

第Ⅲ部

免震部材の特性評価と応答評価

第1章 免震部材実験によるエネルギー吸収性能の評価

1.1 目的

長時間にわたる長周期の外力下での免震部材の繰り返し特性や限界性能については、いまだ不明な点が多い。そこで、長周期地震動に対する免震建築物の安全性を検討するために必要となる各種免震材料の性能を、部材の要素実験（縮小または実大実験）により明らかとする。

1.2 全体方針

(1) 対象部材

実験の対象とする部材は、免震支承、免震ダンパーとして一般的に用いられている以下の種類のもをを対象とする。

○ 支承：天然ゴム系積層ゴム、高減衰ゴム系積層ゴム、鉛プラグ入り積層ゴム、弾性すべり支承（高摩擦）、弾性すべり支承（低摩擦）

○ ダンパー：鉛ダンパー、鋼材ダンパー、オイルダンパー、粘性ダンパー

各部材の試験条件の選定に当たっては、第Ⅱ部第1章の検討内容や既往の研究成果を参考に共通方針を定め、詳細な試験体仕様や試験パラメーターなどの条件は部材としての一般性に配慮し、また、試験機の性能に合わせて部材毎に決定するものとする。各部材についての多数回繰り返し性能に関する既往の主な研究成果を表 1.1-1 に示す。

以下に、それぞれの部材について考慮すべき点を挙げる。

1) 支承

a) 既往の知見

第Ⅱ部第1章に記載した免震部材実験による、多数回繰り返し試験に関する主な指摘事項は以下のとおりである。

○ 鉛プラグ入り積層ゴム：鉛プラグの温度の上昇にともない降伏荷重が低下する。

○ 高減衰ゴム系積層ゴム：ゴムの温度の上昇にともない降伏荷重、降伏剛性が低下する。

○ 弾性すべり支承：すべり材・すべり板の温度上昇にともない摩擦係数が低下する。

これらの知見から、繰り返しに伴う温度上昇などの要因による履歴特性の変化および限界性能の把握が主な課題であることが判った。部材実験では累積変形量（または累積ひずみ）の目標を定めて繰り返し動的载荷を行い、併せて試験体の温度計測を行うこととする。

b) 試験体の仕様

試験体の仕様に関する基本方針は以下の通りとする。

○ 試験体は試験装置の性能範囲内で縮小試験体を設定する。

例：((1/2)Φ500, (1/4)Φ250 等)

○ 積層ゴム部の体積あたり熱容量を整合させるため、実大試験体（φ1000）の標準モデルを基準として、可能な限り積層のゴム層厚や鉄板厚を同スケールで縮小する。弾性すべり支承については径方向のみ縮小とし、厚さ方向は実スケールとする。

○ 試験体は、ゴム内部温度、鉛プラグ温度の計測を考慮して製作する。

c) 実験方法

実験方法に関する基本方針は以下の通りとする。

○ 静的に圧縮力を载荷した状態下の水平1方向動的せん断試験を基本とする。

○ 積層ゴム支承は限界性能が明確でないため、累積変形量に余裕度（ex. $\alpha=2.0$ 以上）を考慮した限界性能試験を実施する。

○ 载荷面圧については基準面圧を定めるが、面圧に関する依存性が大きいと考えられる支承については基準面圧に加えて別水準の試験も実施する。

2) ダンパー

a) 既往の知見

第Ⅱ部第1章に記載した免震部材実験による、多数回繰り返し試験に関する主な指摘事項は以下のとおりである。

○ オイルダンパー：

単位時間当たりの入力熱量がオイルダンパーの熱容量を超え、外壁温度が上昇すると作動油の滲み出しが発生する。

○ 鋼材ダンパー：

破断直前までの履歴特性は安定している。限界性能は低サイクル疲労の回数によって決定される。

○ 鉛ダンパー：

累積変形量の増加に伴い、降伏荷重とエネルギー吸収性能が低下する。限界性能は主に温度上昇による鉛鑄造体の軟化・溶解・破断によって決定される。

これらの知見から、支承と同様に繰り返しに伴う温度上昇などの要因による履歴特性の変化および限界性能の把握が主な課題であることが判った。部材実験では累積変形量（または累積ひずみ）の目標を定めて繰り返し動的载荷を行い、併せて試験体の温度計測を行うこととする。

b) 試験体の仕様

試験体の仕様に関する基本方針は以下の通りとする。

○ 試験体は原則として実大とする。

○ 試験体は温度計測を考慮して製作する（動的試験の場合）。

c) 実験方法

実験方法に関する基本方針は以下の通りとする。

○ 水平1方向動的せん断試験を基本とする。速度依存性の少ない部材は静的条件による実施も可とする。

○ 鋼材ダンパー、鉛ダンパーの限界性能試験では、破断までの回数の繰り返し試験を行う。

○ オイルダンパーの限界性能試験では、限界状態となる温度上昇による油漏れを想定し、シールの温度許容値（80℃）までの回数の繰り返し試験を行う。

表 1.2-1 多数回繰り返し性能に関する既往の主な研究成果

番号	論文名	著者	掲載誌	種別	サイズ	試験条件※
①	免震構造用鉛ダンパーの実験的研究 -別置型鉛ダンパーの復元力モデルと繰返し特性の 評価について-	森田慶子 高山峯夫	AIJ構造系論文集, 2003. 8.	鉛ダンパー	実大	T=3s d=5cm, 10cm, 15cm n=150回
②	実大弾性すべり支承の載荷実験に基づく摩擦特性の モデル化	日比野浩他	AIJ構造系論文集, 2003. 12.	SB(高摩擦)	φ 800, 600	T=3s d=10cm n=50回
③	減衰特性および各種依存性を考慮した建築用オイル ダンパーの開発と解析モデルに関する研究	高橋治他	AIJ構造系論文集, 2005. 8.	制震OIL	実大	T=0. 2s d=0. 02cm n=250万回
④	免震構造用U字形鋼材ダンパーの繰返し変形性能 に関する研究	吉敷祥一他	AIJ構造系論文集, 2008. 2.	鋼材 ダンパー	実大	T=3s, 4s, 5s d=10cm, 25cm n=破断まで
⑤	積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究	竹中康雄他	AIJ構造系論文集, 2009. 12.	LRB, HDB	LRB : φ 1000, 510, 255 HDB : φ 500, 300	T=3s, 5s γ =50, 100, 200% n=100回
⑥	風外力を受ける超高層免震構造における滑り支承の 耐久性に関する研究	東野雅彦他	AIJ構造系論文集, 2010. 2.	SBの NRゴム	φ 800, 400	T=3s, 2. 5s, 2s, 1s γ =100, 200, 300% n=1000~60000回
⑦	高減衰積層ゴムの熱・力学的連成挙動の免震建物 応答への影響評価	北村春幸 早川修平他	AIJ構造系論文集, 2010. 9. (掲載予定)	HDB	φ 500, 300, 225	T=3s, 5s γ =50, 100, 200% n=100回

※ T : 加振周期、d:加振振幅、γ : 最大せん断ひずみ、n : 繰返し回数

(2) 試験共通条件の設定

第Ⅱ部第2章では、文献調査結果および解析検討の結果から、地震動条件および免震の応答量を
 長周期地震動の入力エネルギーの等価速度：3.0m/s～4.0m/s
 累積変形量：20～30m 程度
 最大変形量は 500～600mm 程度

としており、長周期地震動を想定したエネルギー吸収性能評価のための試験方法として 3 水準
 (400、200、100mm) の変位振幅における正弦波加振を設定し、累積変形量 (50m) が同一とな
 るようなサイクル数を加振振幅ごとに設定する繰り返し試験を提案している。本試験では、この
 検討結果をもとに表 1.2-2 に示す 6 ケースの基本条件を定め、部材毎に試験装置の性能と優先条件
 を勘案して、以下のとおり実施試験条件を決定するものとする。

- ① 試験装置の性能の範囲内で実施可能なケースはそのまま実施する。
- ② ①が不可能なケースでは、累積変形量の目標値および単位時間あたりの累積変形量 (または
 累積ひずみ量) を最大限に確保しながら、変位・加振周期・速度を変更して実施する。
- ③ 全ケースとも、破壊等の終局状態に達した場合は試験を中止する。また、予備試験体数等の
 状況に応じて、限界性能試験の範囲を超えた累積変形量の試験を実施しても良いこととする。

なお、試験計画においては以下を考慮するものとする。

- 変位制御による加振試験とする。
- 加振波形は周期 4 秒のサイン波を標準とする。
- 断熱条件での試験とする。
- それぞれの試験終了後、常温下での性能試験を実施し、基本特性を確認する。

表 1.2-2 多数回繰り返し試験の基本ケース

ケース	試験条件	加振周期	変位		換算速度	サイクル数	時間	累積変形
			s	±mm				
1A	長周期	4	100	50%	15.7	125	500	50
1B	限界	4	100	50%	15.7	250 *2	1000	100
2A	長周期	4	200	100%	31.4	60	240	48
2B	限界	4	200	100%	31.4	120 *2	480	96
3A	長周期	4	400	200%	62.8	30	120	48
3B	限界	4	400	200%	62.8	60 *2	240	96
備考		*1	*1 (ダンパー)	(実大支承)		*1		*1

注 *1 第Ⅱ部第2章の検討結果に準拠

*2 ダンパーの限界試験では破断または油温 80℃とする。

1.3 実験内容

1.3.1 天然ゴム系積層ゴム

1.3.1.1 実験計画

(1) 実験目的と背景

(a) 目的

天然ゴム系積層ゴム支承の大振幅高速繰り返し試験を縮小試験体により実施し、多数回繰り返しに対する性能を把握する事を目的とする。

試験で確認する項目は以下の通りである。

① 多数回繰り返しに対する水平荷重—変位特性の変化

② 多数回繰り返しに対する試験体の温度変化

③ 動的軸力変動の影響による上記性状の変化

(b) 背景

天然ゴムは、その弾性的な性質がゴム材料の中で最も優れており、免震建築用積層ゴムの主要な材料として用いられている^{1.3.1-1)}。

天然ゴムは加硫によってゴム状弾性という長所を与えることができ、天然ゴム系積層ゴムはカーボンブラック等の補強材や石油系オイル等の軟化材、加硫材を添加して調整されたものである。天然ゴム系積層ゴムでは弾性と相反する減衰性能を付与する必要がないので、優れた弾性的性質を存分に発揮する免震部材といえる。

天然ゴム系積層ゴムに繰り返し変形を与えた際の変化は、最初の数回の変形で数%程度の水平ばね定数の低下が見られる。こうした現象は、カーボンブラック等の補強材を添加したゴム材料で予備伸長にみられる軟化現象（Mullins 効果）と説明されている。ただし、繰り返し3サイクル程度以降で荷重変形関係は安定し、せん断ひずみが200%程度までは繰り返しによる水平ばね定数の低下は小さいものとされている^{1.3.1-2)}。

以上の背景から、天然ゴム系積層ゴム支承の繰り返し特性について着目した既往の研究成果は少ないが、同支承は免震支承として多用されていること、その特性は減衰付与タイプの支承に対するリファレンスとなることを考慮し、天然ゴム系積層ゴム支承の多数回繰り返し試験を実施することとした。

(2) 実験日時および場所

日 時： 平成23年1月13日～17日

場 所： (株)ブリヂストン 横浜工場（下郷地区）

(3) 試験体

支承は実大サイズの1/4縮小試験体として、外径Φ250（ゴム種G4、ブリヂストン製）を4体製作した。ゴム層厚は1.7mm、ゴム層数は30層、内部鋼板厚は1.2mm、S1=35.3、S2=4.9、基準面圧は15N/mm²である。

試験体の外観図を図1.3.1-1に示す。

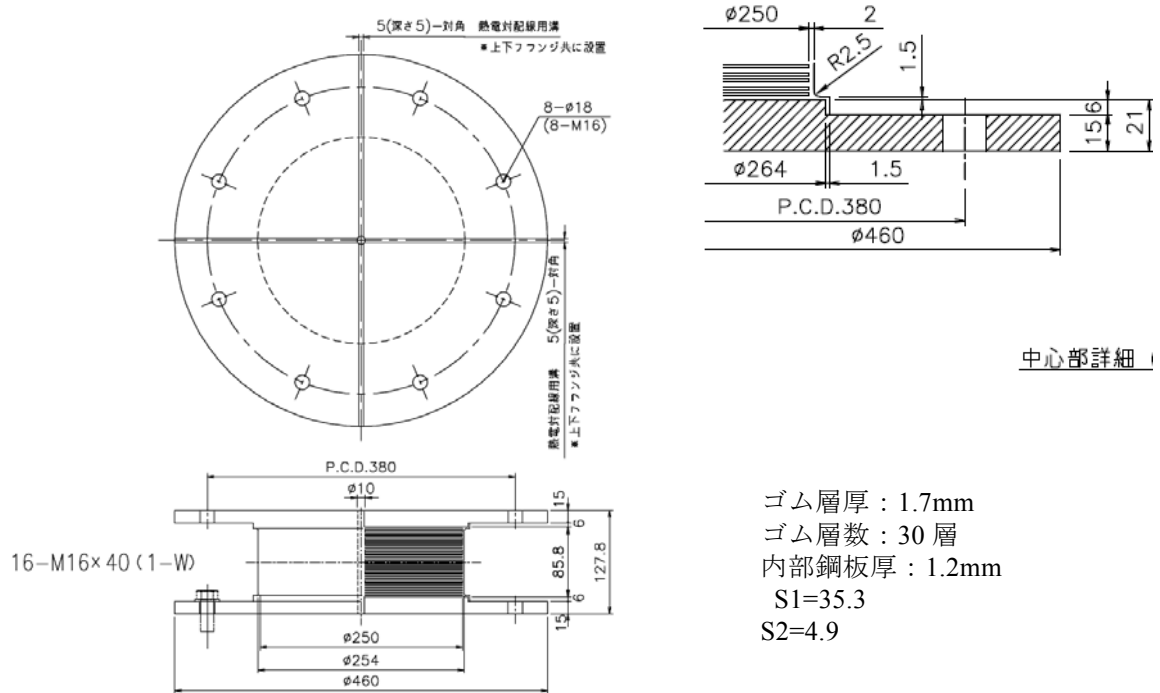


図 1.3.1-1 試験体外観（天然ゴム系積層ゴム支承）

(4) 試験装置

試験装置として、ブリヂストン横浜工場（下郷地区）の 1000kN 動的試験機を用いる。試験機仕様を表 1.3.1-1 に、試験機外観を図 1.3.1-2 に示す。

表 1.3.1-1 試験機仕様（1000kN 動的試験機）

鉛直 方向	最大荷重	圧縮：1000kN 引張：300kN
	最大ストローク	±100mm
	最大速度	0.0314m/s
水平 方向	最大荷重	±300kN
	最大ストローク	±300mm
	最大速度	0.628m/s
入力波形	正弦波、三角波	

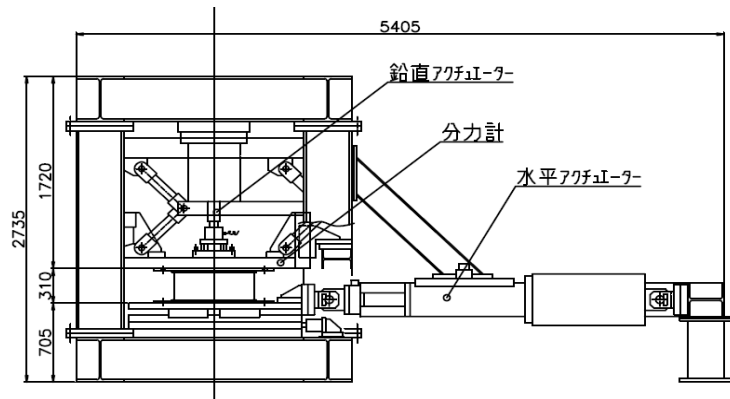


図 1.3.1-2 試験機外観（1000kN 動的試験機）

断熱材として標準高温用断熱板（D-M-E 双葉、10mm 厚）を用い、試験機側面盤と試験体フレンジの間に挿入し固定した。

断熱板の仕様を表 1.3.1-2 に、試験体設置要領を図 1.3.1-3 に示す。

表 1.3.1-2 断熱板の仕様

圧縮強度	338 (N/mm ²) (24℃の場合) 103 (N/mm ²) (285℃の場合)
吸水性	0.06%
熱伝導率	0.274W/(m・k) (24℃の場合) 0.303W/(m・k) (220℃の場合)
難燃性	94V-0(自己消化性)
最高使用温度	285℃
材質	アルミニウムカーボネート+グラスファイバー+不飽和ポリエステル

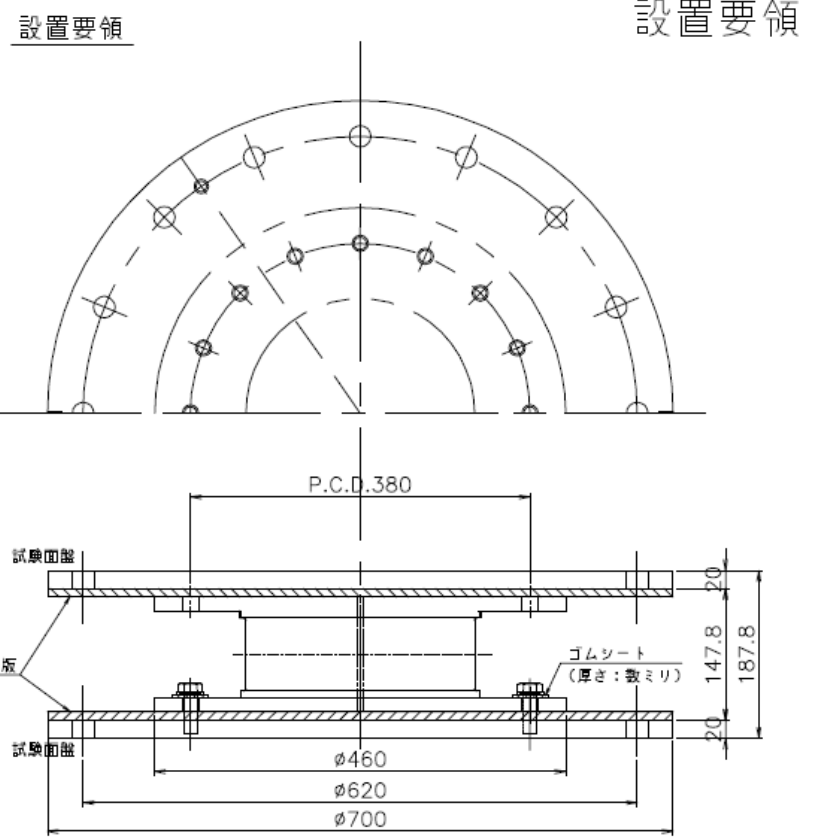
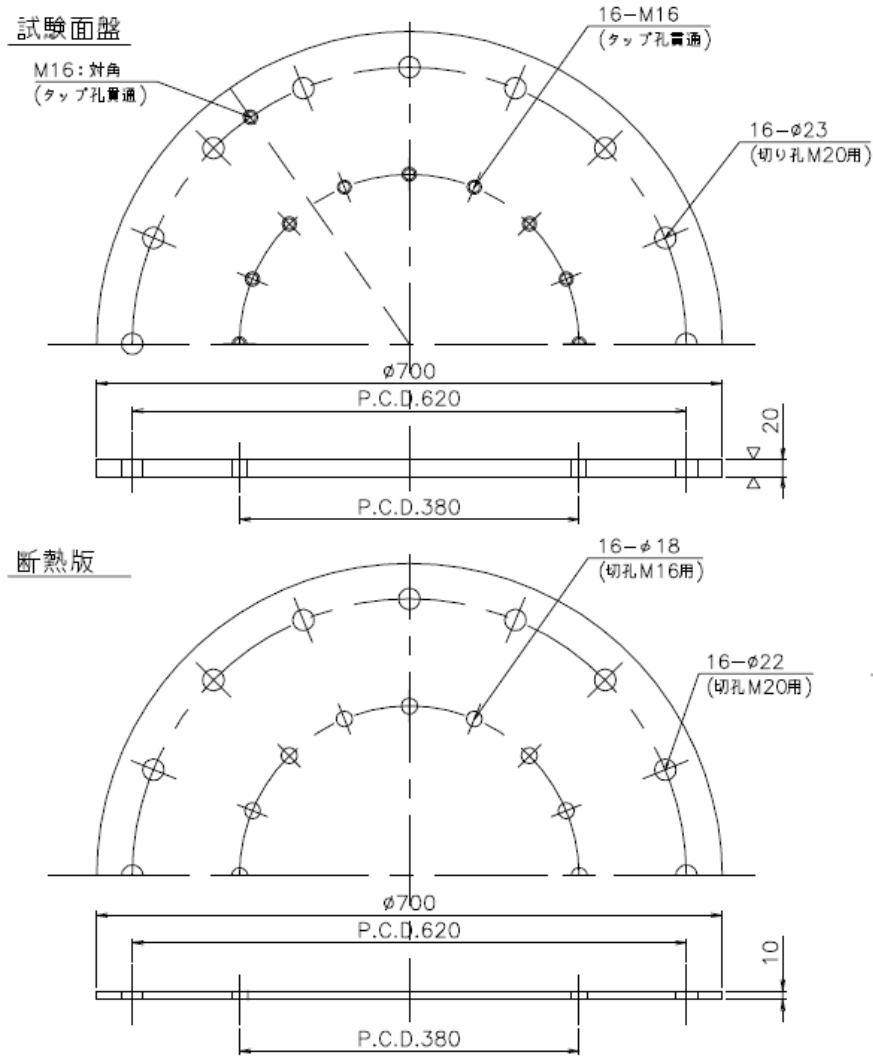


図 1.3.1-3 試験体設置要領

(5) 計測項目と計測方法

計測項目は、水平変位、水平荷重、鉛直荷重、鉛直変位に加え、温度（試験体内部および室温）の計測を行った。

水平変位は試験機内蔵の変位計により、鉛直変位は2箇所の対角に配置した外部変位計により計測した。また水平荷重および鉛直荷重は、試験機の分力計により測定した。温度計測は、ゴム内部およびフランジ上面の溝部に計17点の熱電対と、ゴム表面部で非接触型の放射温度計2点の計19点を設置した。

温度計測点を図 1.3.1-4 に示す。

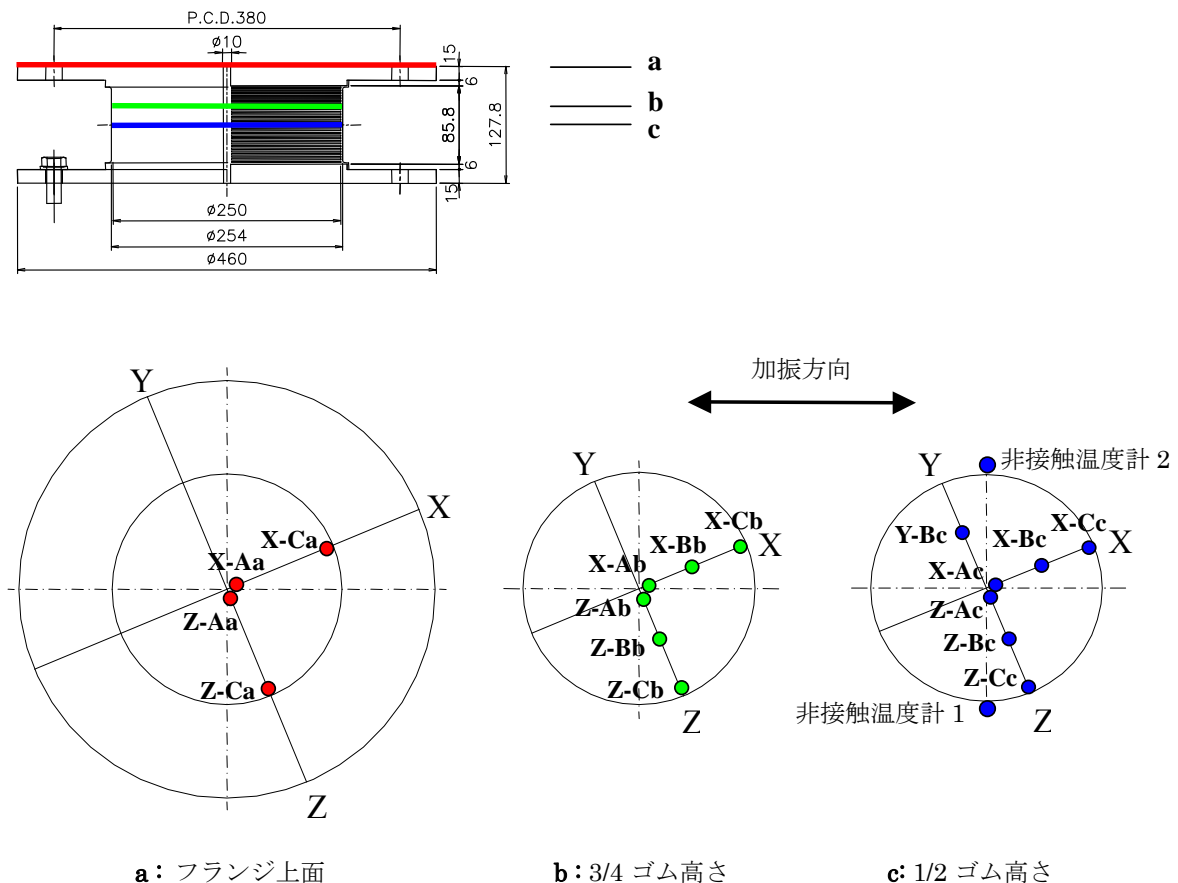


図 1.3.1-4 温度計測点

(6) 実験方法および実験ケース

動的荷重は正弦波による加振を基本とし、地震応答波荷重（最大振幅を 200mm 程度に調整）も併せて実施した。鉛直一定、水平動的の2軸荷重を基本とし、上下動的-水平動的の2軸荷重のケースも併せて実施した。各試験の初期温度は、常温（ $20 \pm 5^\circ\text{C}$ ）を基本とした。

目標とする実験ケース（参考）を表 1.3.1-3 に、実施実験ケースを表 1.3.1-4 に示す。事前加振の結果、本試験条件ではインターバル無しの連続加振が可能であることが確認されたので、長周期試験、限界試験ともに連続加振を行った。

試験では、基本となる長周期、限界の試験ケースに加えて、試験体を恒温層で 24 時間以上保存して初期温度を 0°C または 30°C として荷重を開始するケース（#3-1、#3-2）、標準軸力 $15\text{N}/\text{mm}^2$

に水平方向载荷と同位相で±5N/mm²の軸力変動または倍調波で5N/mm²の軸力低減を与えるケース(#4-1~#4-4)、目標载荷振幅を0.5mm、1mm、3mm、5mmとする微小振幅のケース(#2-1)、免震建築物の地震応答波を载荷波とするランダム波加振ケース(#2-4)を実施した。このうち地震応答波载荷では、免震周期4秒、降伏せん断力係数を0.03、上部構造を剛体とした1質点モデルに、T-TN-AIC003-AVおよびT-TN-AIC003-SDを入力して得られた応答変位波形を用いた。試験では応答変位波形のうち主要動部付近の300秒分を用いた。図1.3.1-5に载荷に用いた応答変位波形を示す。

表 1.3.1-3 実験目標ケース (参考)

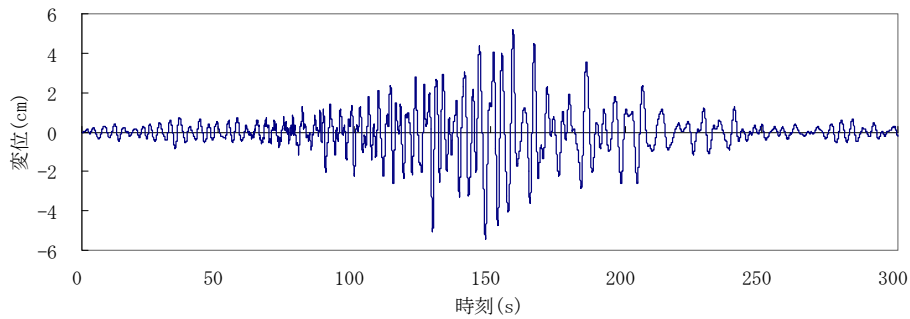
ケース	試験条件	加振周期 s	変位 ±mm	換算速度 cm/s	サイクル数	時間 s	累積変形 m
1A*	長周期	4	100	15.7	125	500	50
1B*	限界	4	100	15.7	250	1000	100
2A*	長周期	4	200	31.4	60	240	48
2B*	限界	4	200	31.4	120	480	96
3A*	長周期	4	400	62.8	30	120	48
3B*	限界	4	400	62.8	60	240	96

表 1.3.1-4(1) 実験ケース一覧

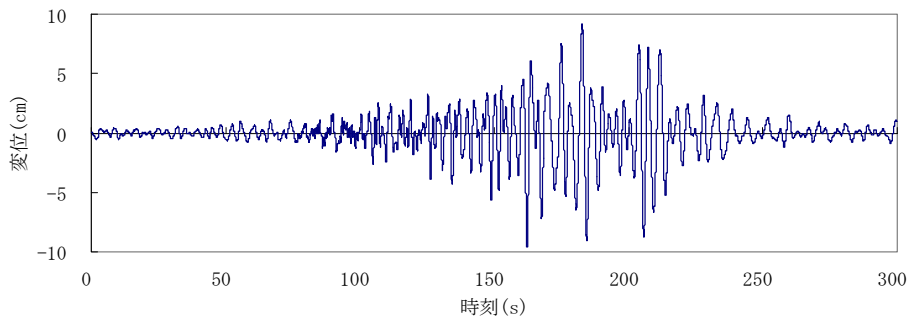
ser. No.	試験 No.	ケース	試験条件	加振周期 s	面圧 N/mm ²	ひずみ (変位) %(±mm)	換算速度 cm/s	サイクル数	時間 s	累積変形 m	初期温度 ℃	備考
1	#1-1		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
2		1A相当	長周期	4	15	50 (25.5)	3.9	125	500	12.5	20	
3			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
4	#1-2		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
5		1B相当	限界	4	15	50 (25.5)	3.9	1000	4000	100	20	
6			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
7	#1-3		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
8		2A相当	長周期	4	15	100 (51)	7.9	60	240	12.5	20	
9			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
10	#1-4		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
11		2B相当	限界	4	15	100 (51)	7.9	500	2000	96	20	
12			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
13			(後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
14			(出荷)基本特性	20	15	100 (51)	0.26	3	60	0.6	20	三角波
15-18	#2-1		微小振幅	3	15	10 (5.1)	1.1	3	9	0.8	20	
19	#2-2		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
20		3A相当	長周期	4	15	200 (102)	15.7	30	120	12	20	
21			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
22	#2-3		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
41		3B相当	限界	4	15	200 (102)	15.7	250	1000	96	20	
42			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
43			(後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
44	#2-4		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
45			地震応答波(1)	-	15	54.3	11.1		300		20	AIC003_av
46			地震応答波(2)	-	15	95.9	19.2		300		20	AIC003_sd
47			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
48			(出荷)基本特性	20	15	100 (51)	0.26	3	60	0.6	20	三角波

表 1.3.1-4(2) 実験ケース一覧

ser. No.	試験 No.	ケース	試験条件	加振周期 s	面圧 N/mm ²	ひずみ (変位) % (±mm)	換算速度 cm/s	サイクル数	時間 s	累積変形 m	初期温度 °C	備考
23	#3-1		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	0	
24		3B相当	限界	4	15	200 (102)	15.7	250	1000	96	0	
25			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
26			(後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
49	#3-2		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	30	
50		3B相当	限界	4	15	200 (102)	15.7	250	1000	96	30	
51			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
52			(後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
53			(出荷)基本特性	20	15	100 (51)	0.26	3	60	0.6	20	三角波
27	#4-1		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	水平-上下同位相
28		3A相当	長周期	4	15±5	200 (102)	15.7	30	120	12	20	
29			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
30	#4-2		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	水平-上下倍調波
31		3A相当	長周期	4	15-5	200 (102)	15.7	30	120	12	20	
32			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
33	#4-3		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	水平-上下同位相
34		3B相当	限界	4	15±5	200 (102)	15.7	250	1000	96	20	
35			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
36	#4-4		基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	水平-上下倍調波
37		3B相当	限界	4	15-5	200 (102)	15.7	250	1000	96	20	
38			(直後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	終了時	
39			(後)基本特性	4	15	100 (51)	7.9	4	16	0.8	20	
40			(出荷)基本特性	20	15	100 (51)	0.26	3	60	0.6	20	三角波



(a) T-TN-AIC003-AV 入力



(b) T-TN-AIC003-SD 入力

図 1.3.1-5 地震応答波入力用波形

1.3.1.2 実験結果

(1) 特性値の評価方法

免震部材の水平剛性、等価粘性減衰定数は以下の方法により求める。評価方法は、文献^{1.3.1-2)}をもとに定義する。

特性値の評価対象は原則として載荷3サイクルめの荷重-変形関係とする。長周期、限界試験では繰り返し特性を評価するため、各載荷ケースでサイクル毎の荷重-変形関係特性値を読み取ることとする。

a) 水平剛性

荷重-変形関係において、原点と最大荷重点を結ぶ直線の勾配の正負平均値を水平剛性 K_h とする (図 1.3.1-6a, 式(1.3.1-1))。

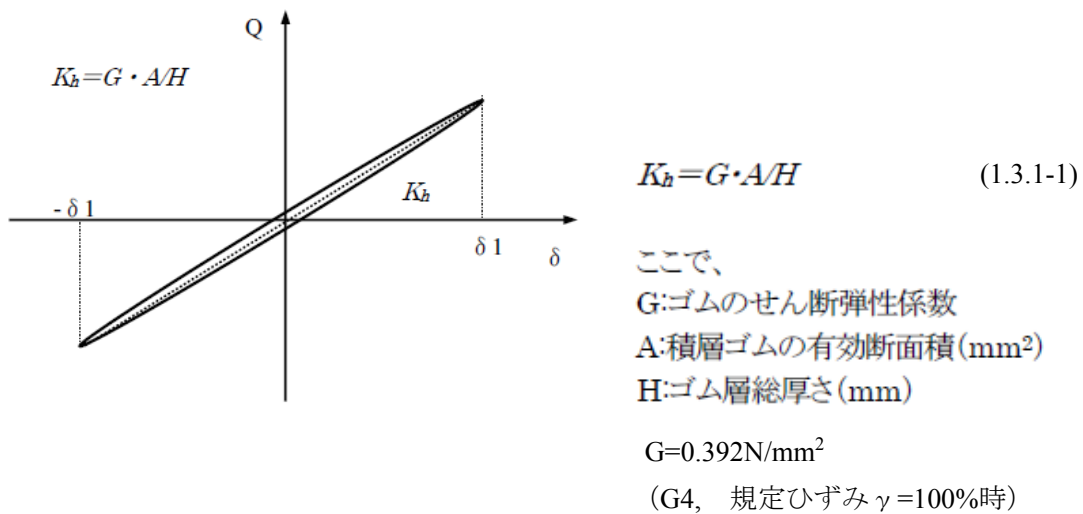


図 1.3.1-6a 水平剛性 K_h の算出方法

b) 減衰特性値

荷重変形関係の面積と前述の水平剛性 K_h から等価粘性減衰定数 h_{eq} を求める (図 1.3.1-6b)。

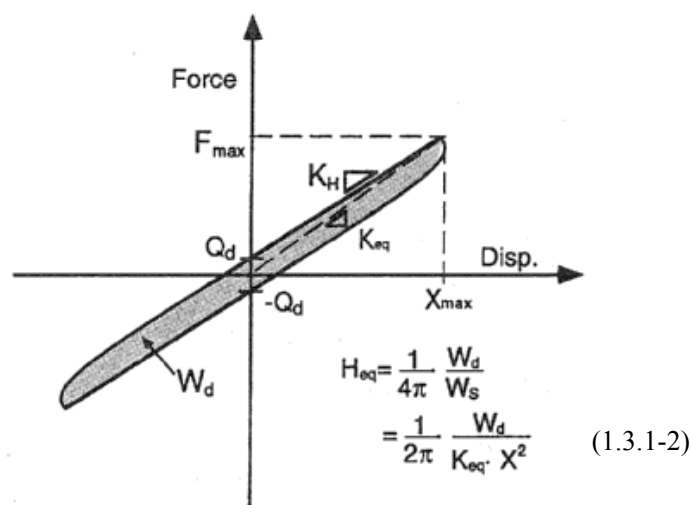


図 1.3.1-6b 等価粘性減衰 h_{eq} の算出方法

(2) 荷重-変位関係

各実験の荷重-変位関係を図 1.3.1-7~20 (図番号に記号 a を付す) に示す。

荷重-変位関係では、 $\gamma=50\%$ および $\gamma=100\%$ では長周期・限界の両試験とも繰り返しの伴う荷重変形関係の変化はきわめて小さく、各サイクルのループはほぼ重なっている(図 1.3.1-7a~10a)。 $\gamma=200\%$ では若干のハードニング傾向が見られ、また初期サイクルで剛性がやや高めとなっているが、2 サイクルめ以降の荷重変形関係はほぼ安定している(図 1.3.1-11a、12a)。初期温度 30°C のケース(図 1.3.1-16a)、基準面圧 15N/mm² に対して 5N/mm² の軸力変動を与えたケース(図 1.3.1-17a~20a)もほぼ同じ傾向を示すが、積層ゴムの初期温度を 0°C とした限界試験(図 1.3.1-15a)では荷重変形関係の変化はやや大きい。その理由は、後述のように、繰り返しの影響ならびに試験体温度が常温に戻る際の温度変化の影響が複合して現れているものと見られる。

(3) 温度変化

長周期・限界試験の温度変化を図 1.3.1-7~20 (図番号に記号 b を付す) に示す。

限界試験の温度変化(図 1.3.1-8b、10b、12b)を比較すると、加振振幅が大きいケースほど同じ累積変形を短時間に載荷するためにゴム内部の温度上昇量が大きくなっており、3B 相当ケース(図 1.3.1-12b)では加振終了後には 35°C 程度となり、初期に比べて最大で 15°C 程度上昇している。初期温度を 0°C (図 1.3.1-15b)、30°C (図 1.3.1-16b)とした場合のゴム内部の温度上昇はそれぞれ 23°C、12°C 程度であり、載荷条件が同じでも初期温度と雰囲気温度との関係で温度上昇量が異なることが分かる。いずれのケースも室温を 20°C 程度に管理して行っているため、特に初期温度を 0°C としたケースでは載荷による温度上昇と試験体温度が室温に戻る両方の影響を示している。なお、図-1.3.1-#b (#=8~20)の各図で計測データが短時間で変動する暴れがみられる成分がみられる。この現象は載荷に伴う熱電対の断線等によるものとみられるが、図中には収録されたデータをそのまま掲載している。

(4) 試験前後の荷重-変位関係の変化

長周期または限界試験の前後に行った基本特性試験で得られた荷重-変位関係の比較を図 1.3.1-21 に示す。 $\gamma=200\%$ の限界試験を経験した試験体#2、#3、#4 では $\gamma=100\%$ までの加振とした試験体#1 に比べて試験後の剛性が低くなっているが、試験前後の荷重変形関係の変化はごく僅かである。

(5) K_h 、 Heq の変化

長周期・限界試験の K_h および Heq の変化を図 1.3.1-22~24 に示す。初期のサイクルで K_h 、 Heq の値が急に減少し、その後は緩やかに減少する傾向にある。初期温度 0°C (図 1.3.1-23 の#3-1) は初期温度 30°C (同図の#3-2) に比べて K_h および Heq の減少傾向が顕著であり、常温の限界試験(図 1.3.1-22 の#2-3)はこれらのケースの中で中間の傾向を示す。

各ケースの 3 サイクルめで評価された K_h 、 Heq の一覧を表 1.3.1-5 に示す。比率欄は各試験体において、最初に実施する基本特性試験の値に対する比率を表している。長周期・限界試験の前後に行った基本特性試験と(直後)基本特性試験の比較によれば、繰り返しのより K_h が減少する傾向が確認できる。その程度は $\gamma=100\%$ (#1) に比べて $\gamma=200\%$ (#2) のほうが顕著である。 K_h の変化量は $\gamma=200\%$ (#2) で-10%~-8%であった。 Heq は増減の傾向が安定していないが変化量は $\gamma=200\%$ (#2) で-2%~+8%であった。これらの変化傾向は初期温度を 0°C としたケース (#3-1) では常温のケース (#2) に比べて顕著に現れているが、軸力変動を与えたケース (#4) は (#2) と同程度の変化となっている。

(直後)基本特性試験と試験体温度を常温に戻した後の(後)基本特性試験の K_h 、 Heq の比較によれば、時間経過後にやや回復する傾向は見られるが、若干の残留変化量が見られる。 K_h 、 Heq の残留変化量は $\gamma=200\%$ の長周期試験(#2-2)で -6% 、 $+5\%$ であった。

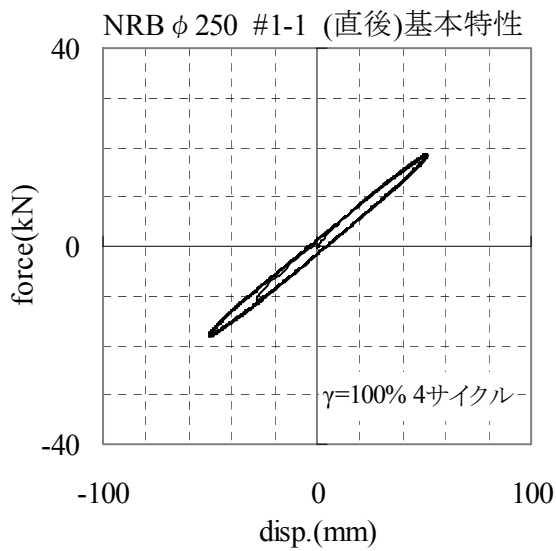
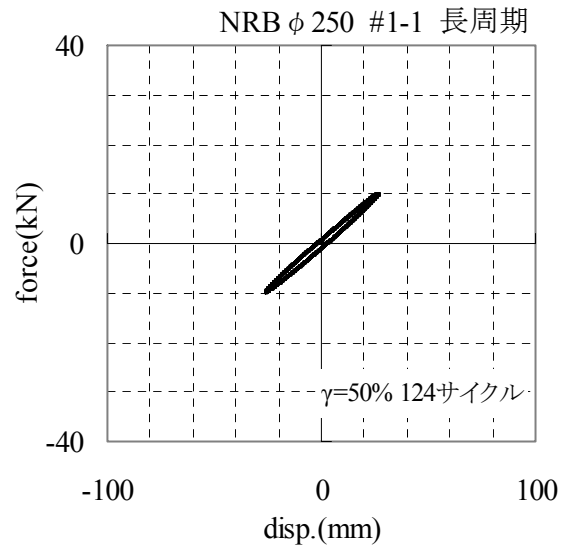
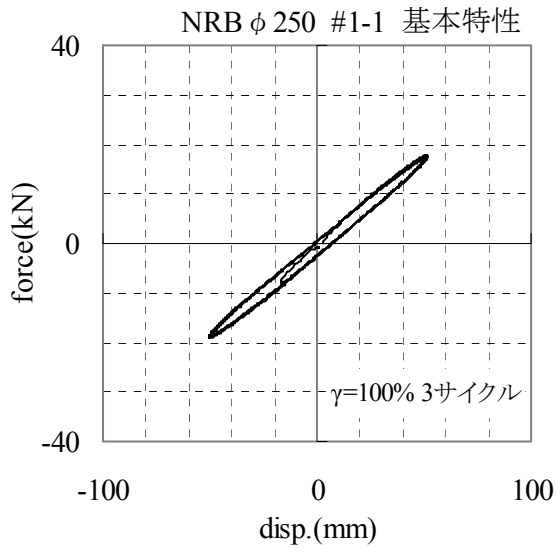


図 1.3.1-7a 荷重-変位関係 (1A 相当 : 長周期) $\gamma=50\%$ ($\pm 25.5\text{mm}$)

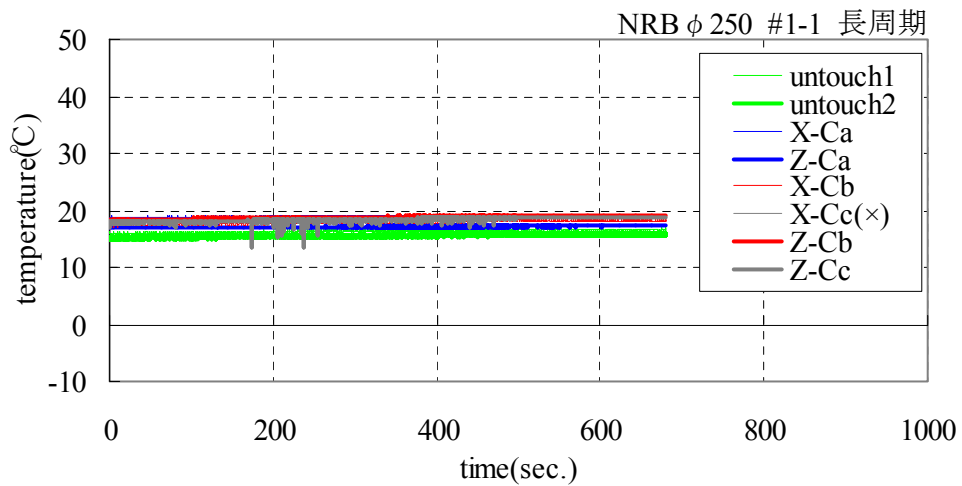
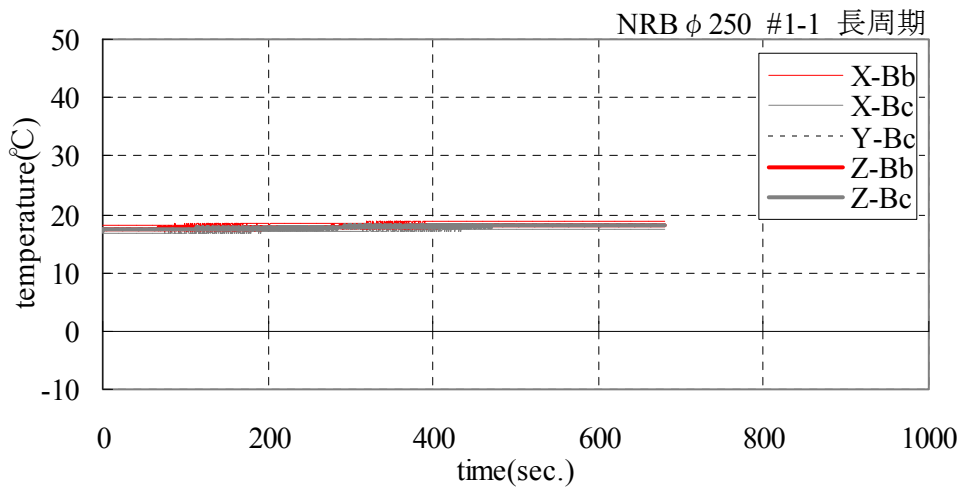
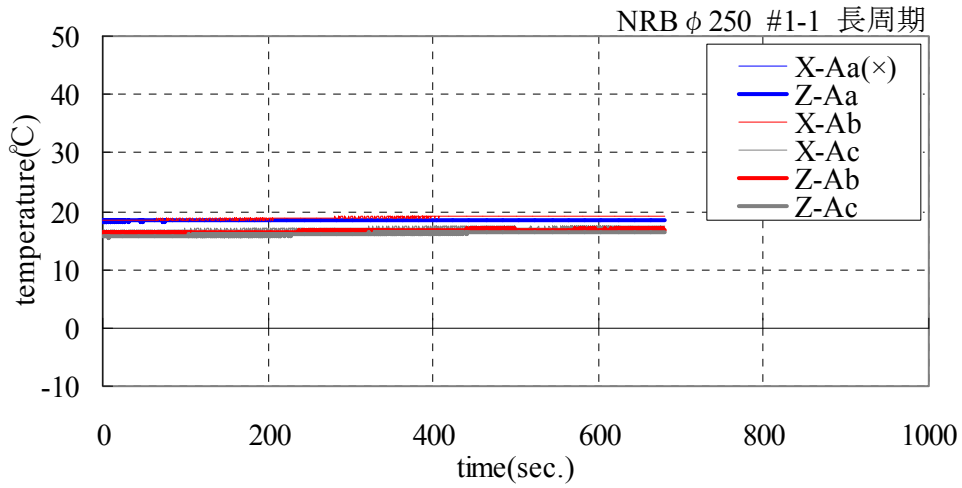


図 1.3.1-7b 温度変化 (1A 相当 : 長周期) $\gamma = 50\%$ ($\pm 25.5\text{mm}$)

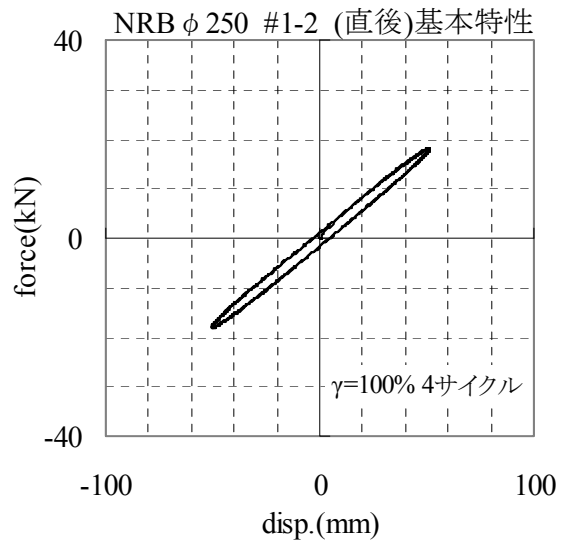
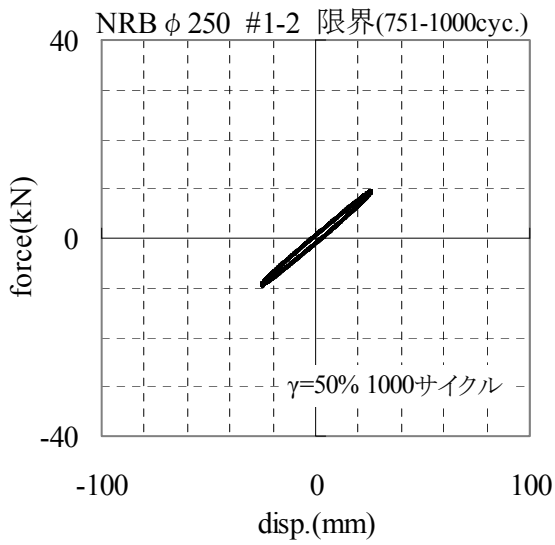
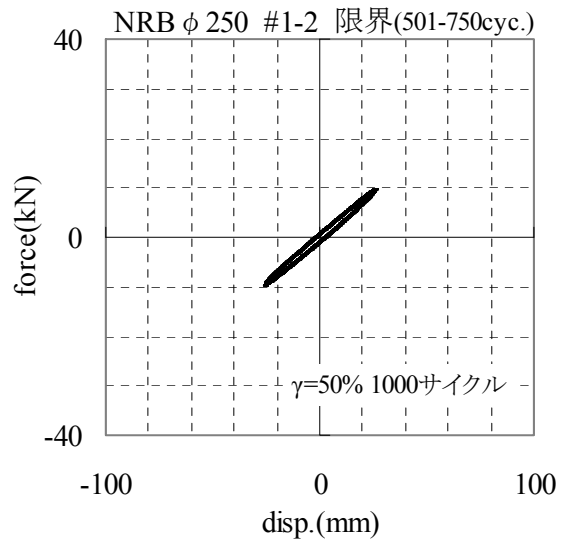
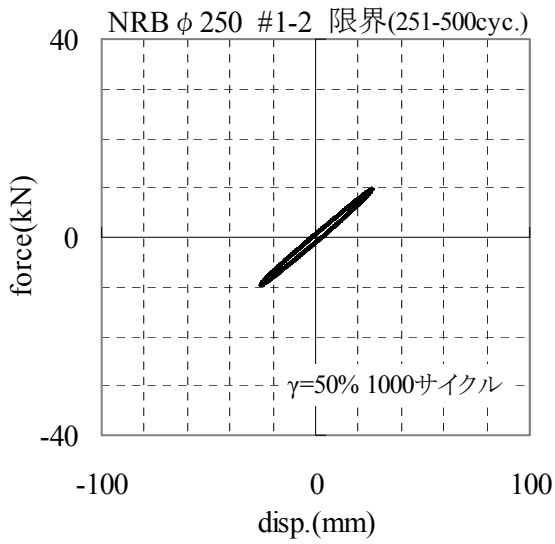
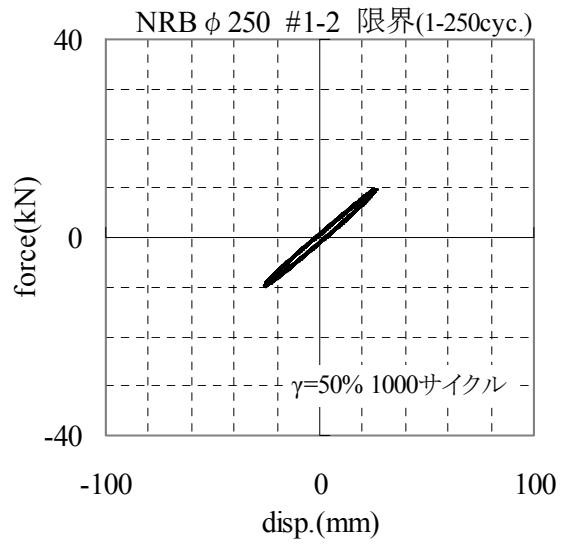
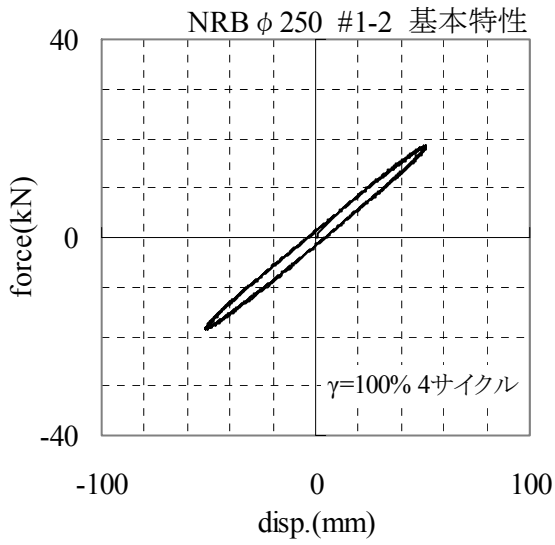


図 1.3.1-8a 荷重-変位関係 (1B 相当 : 限界) $\gamma=50\%$ ($\pm 25.5\text{mm}$)

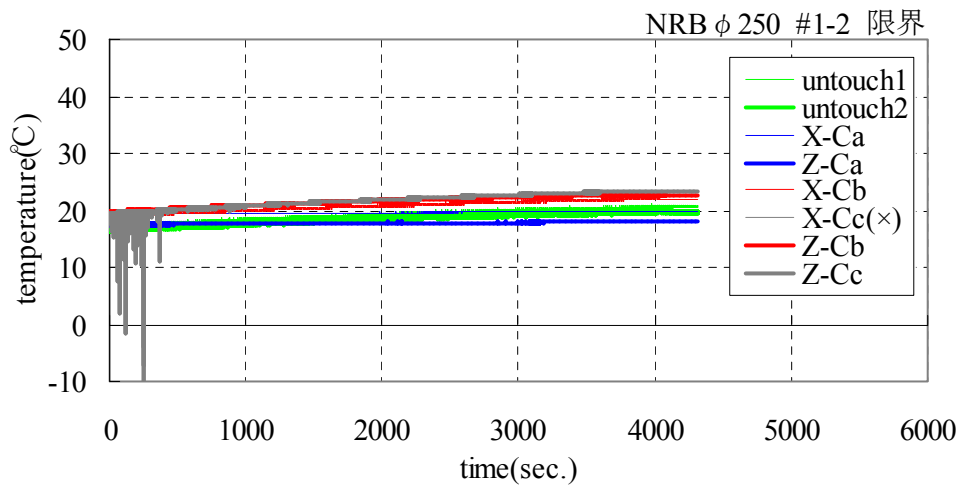
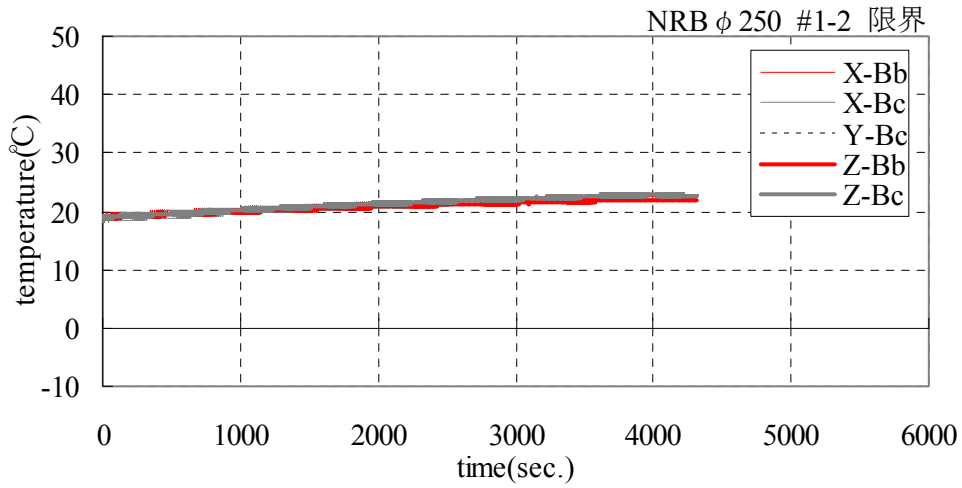
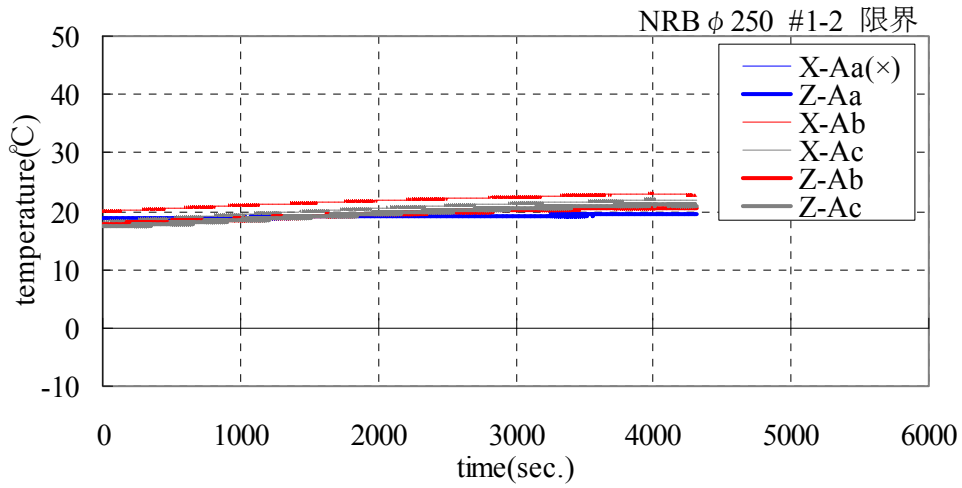


図 1.3.1-8b 温度変化 (1B 相当 : 限界) $\gamma = 50\%$ ($\pm 25.5\text{mm}$)

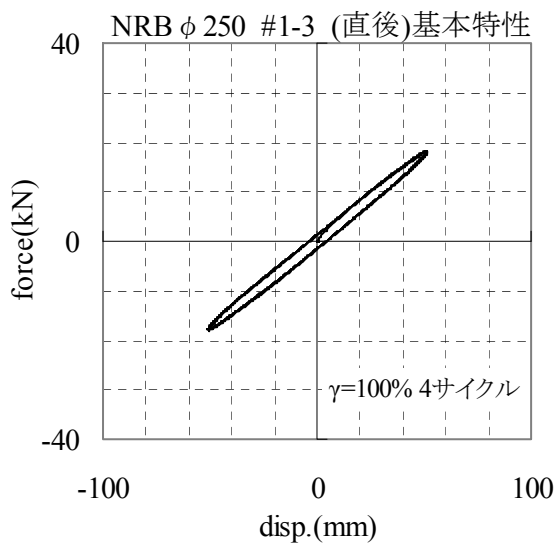
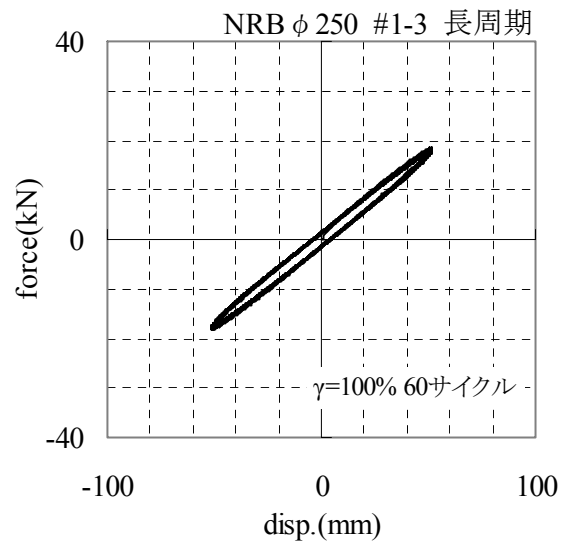
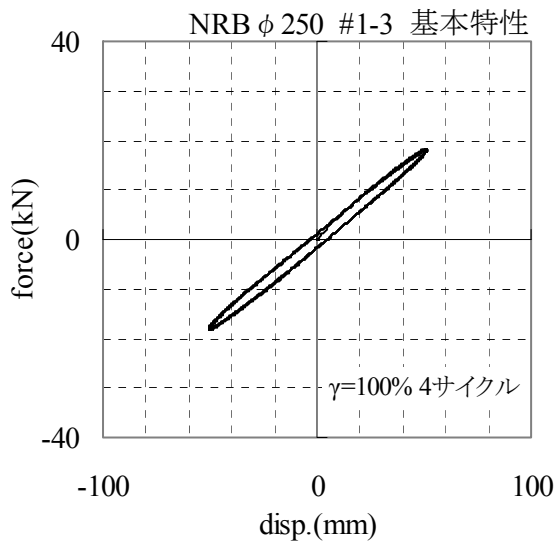


図 1.3.1-9a 荷重-変位関係 (2A 相当：長周期) $\gamma=100\%$ ($\pm 51\text{mm}$)

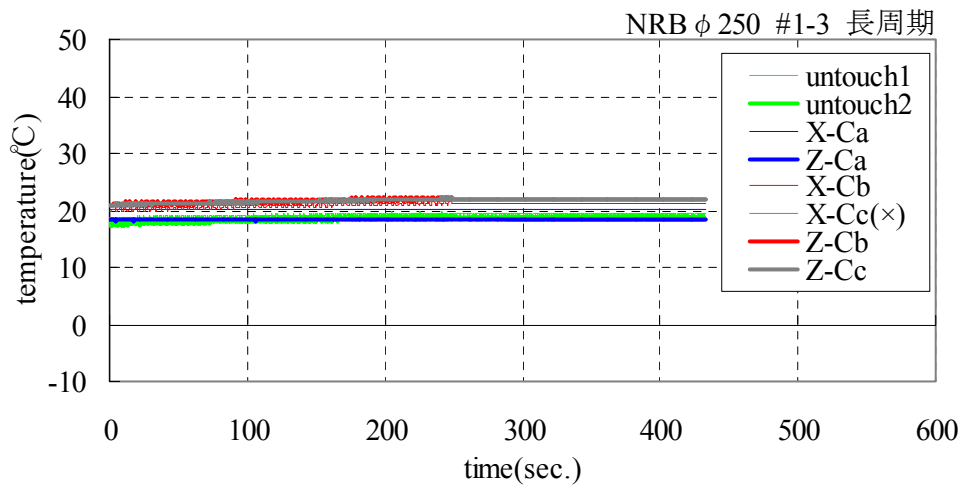
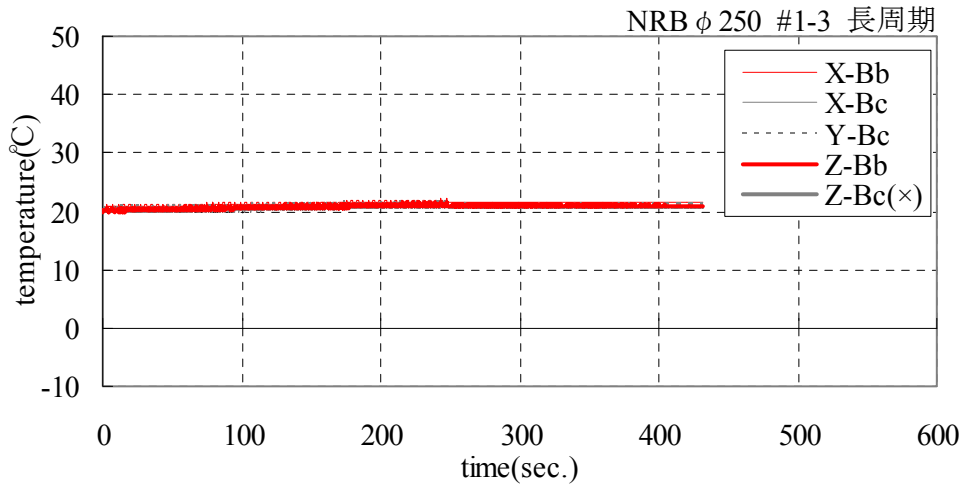
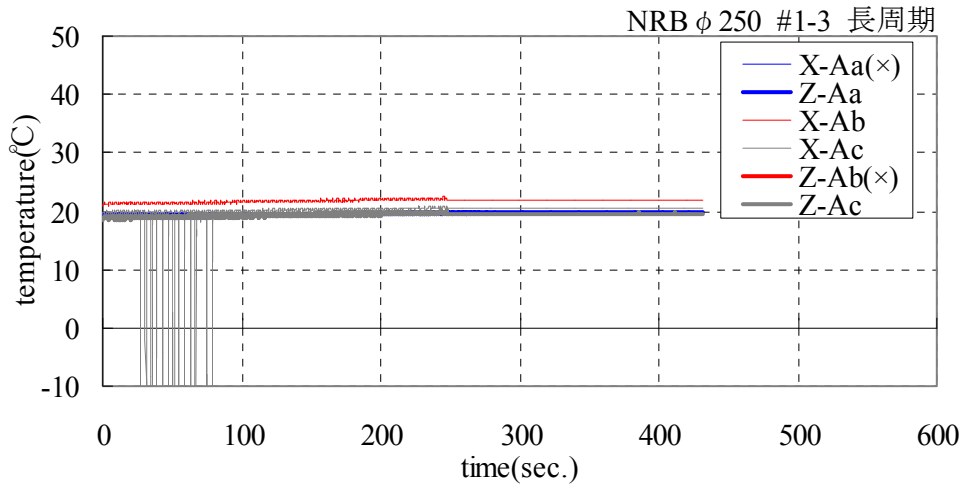


図 1.3.1-9b 温度変化 (2A 相当 : 長周期) $\gamma = 100\%$ ($\pm 51\text{mm}$)

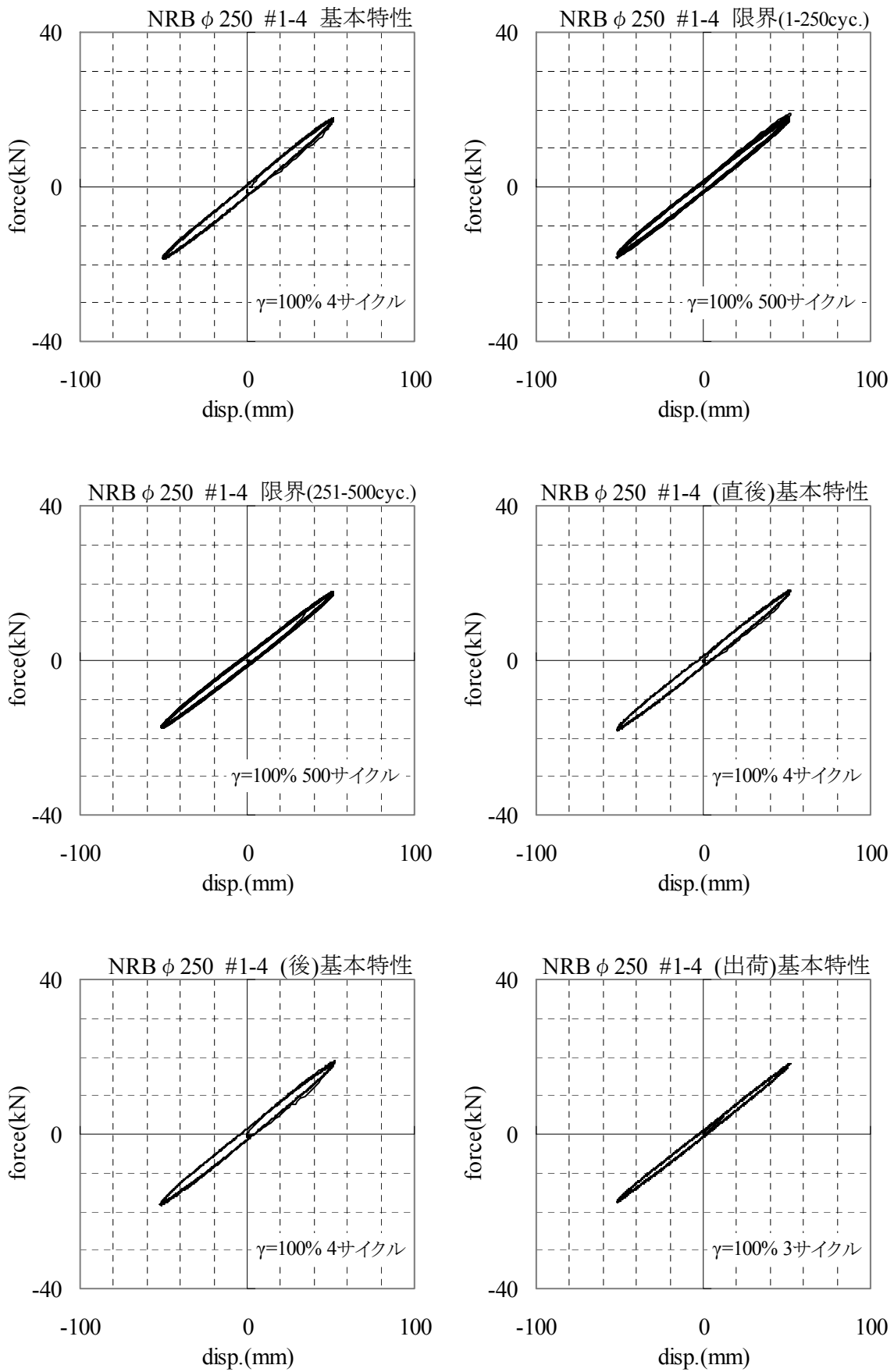


図 1.3.1-10a 荷重-変位関係 (2B 相当：限界) $\gamma=100\%$ ($\pm 51\text{mm}$)

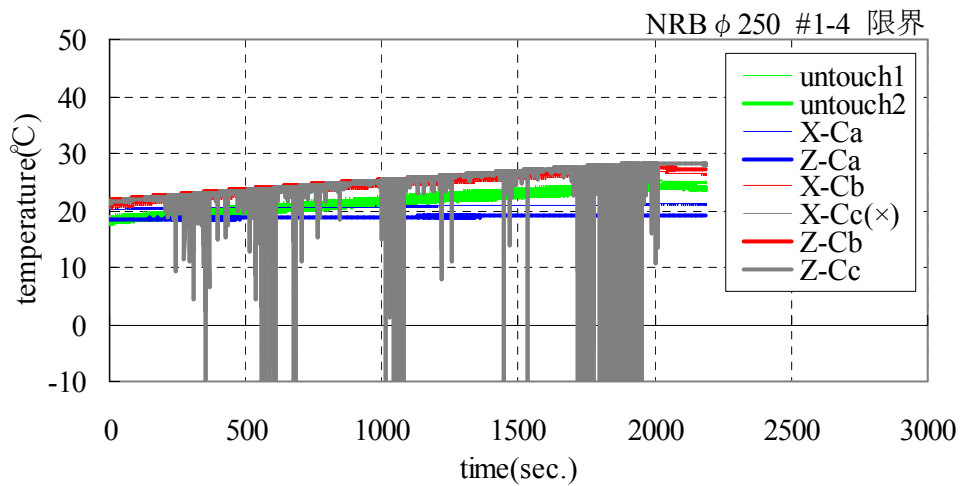
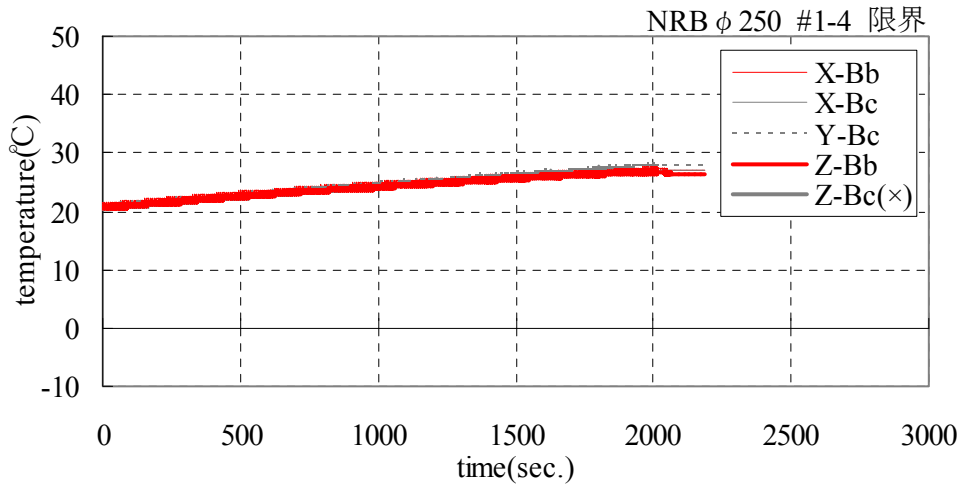
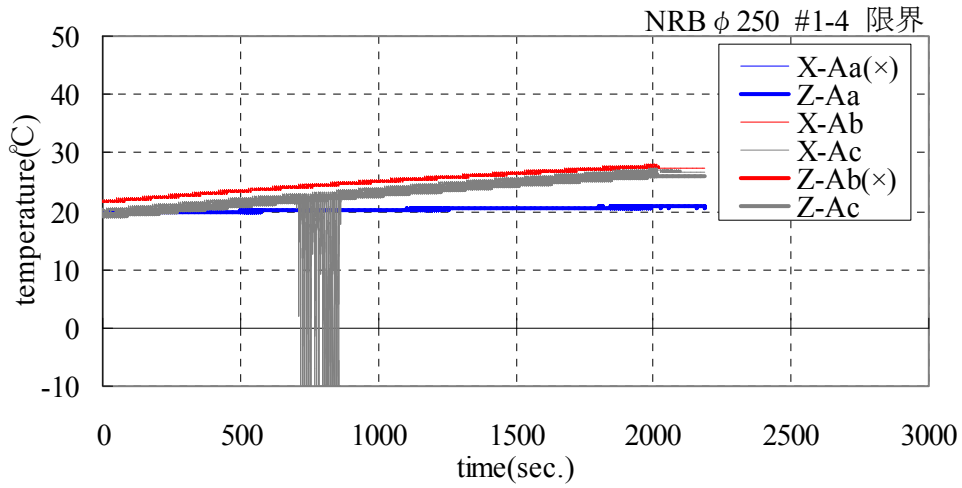


図 1.3.1-10b 温度変化 (2B 相当 : 限界) $\gamma=100\%$ ($\pm 51\text{mm}$)

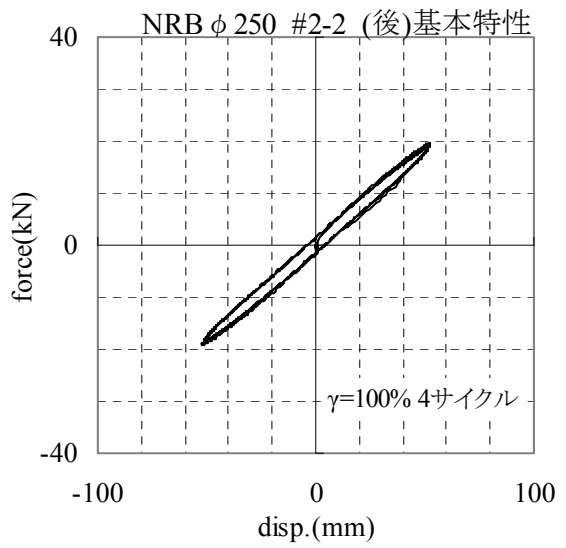
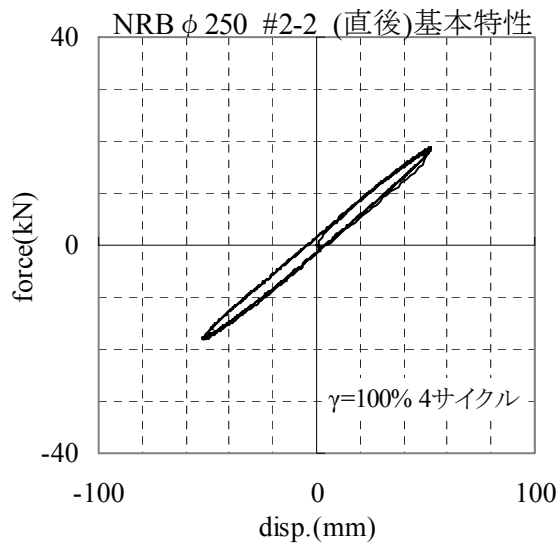
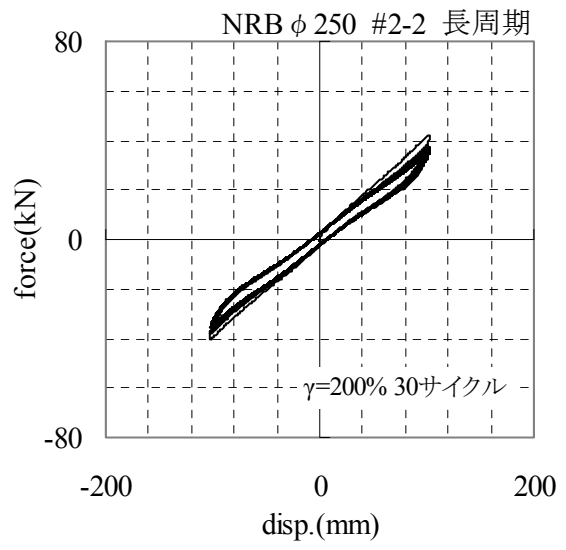
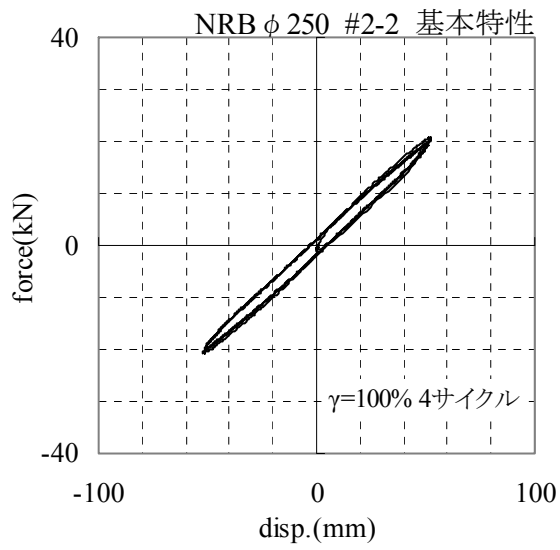


図 1.3.1-11a 荷重-変位関係 (3A 相当：長周期) $\gamma=200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

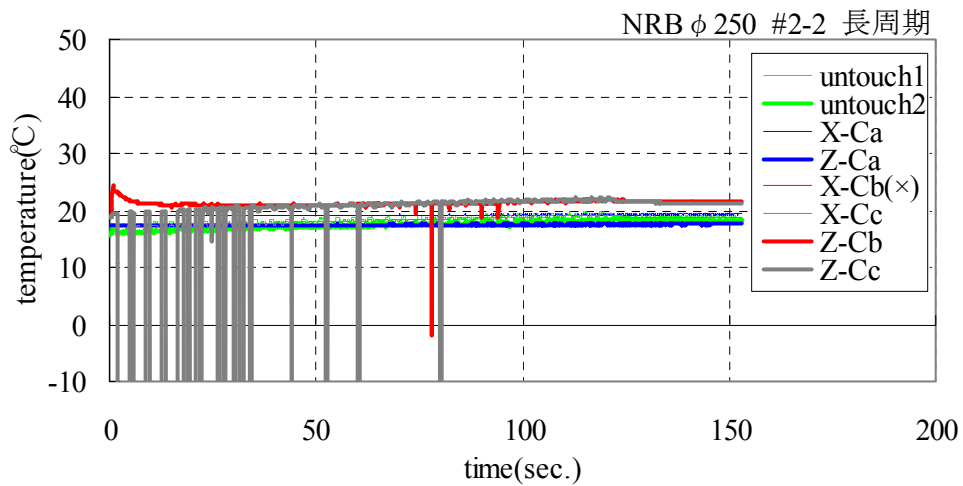
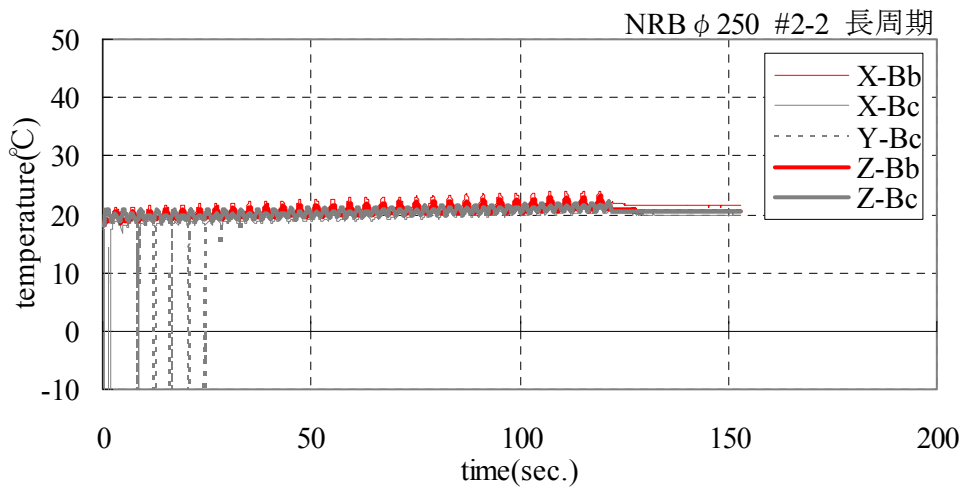
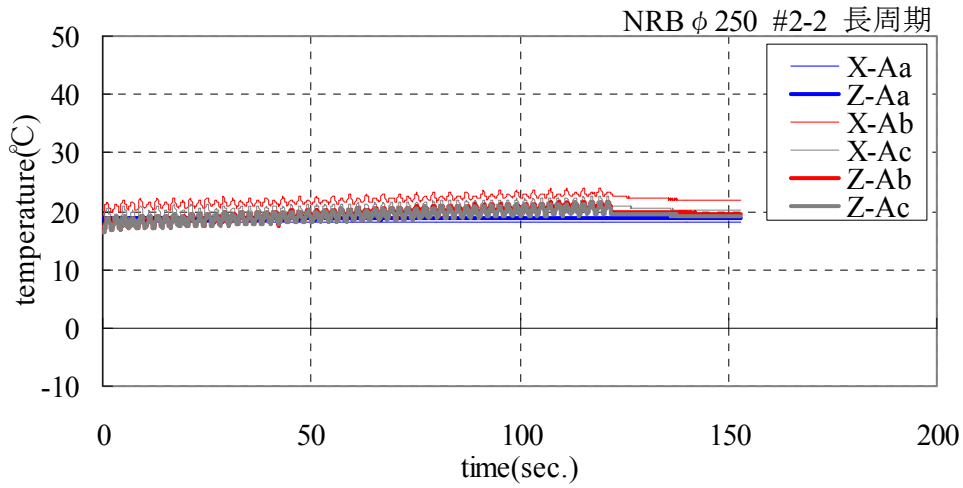


図 1.3.1-11b 温度変化 (3A 相当 : 長周期) $\gamma = 200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

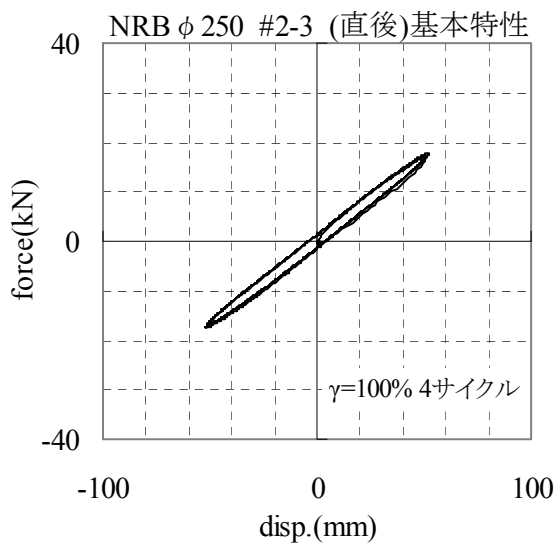
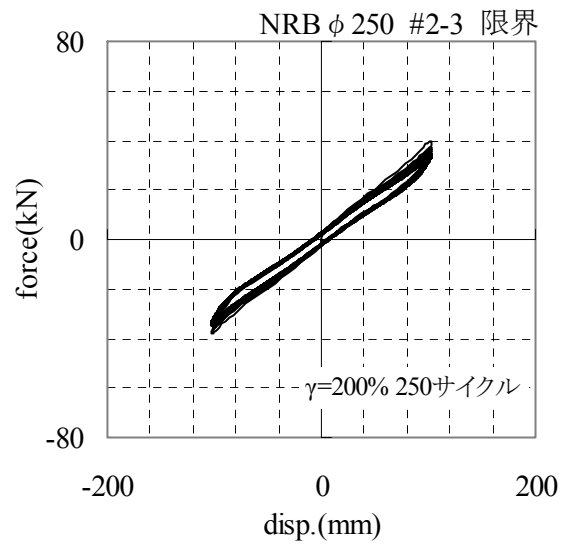
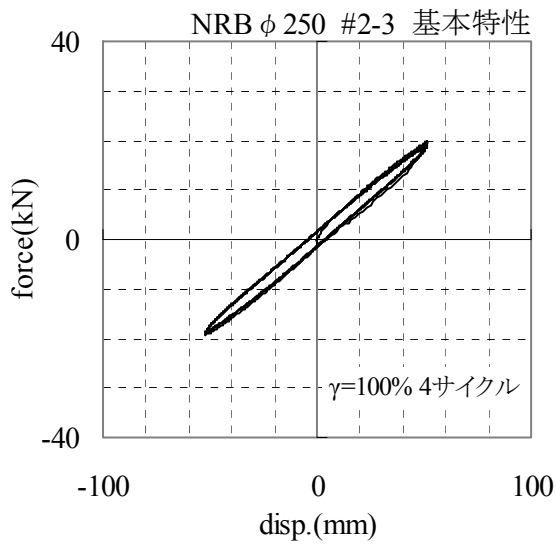


図 1.3.1-12a 荷重-変位関係 (3B 相当 : 限界) $\gamma = 200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

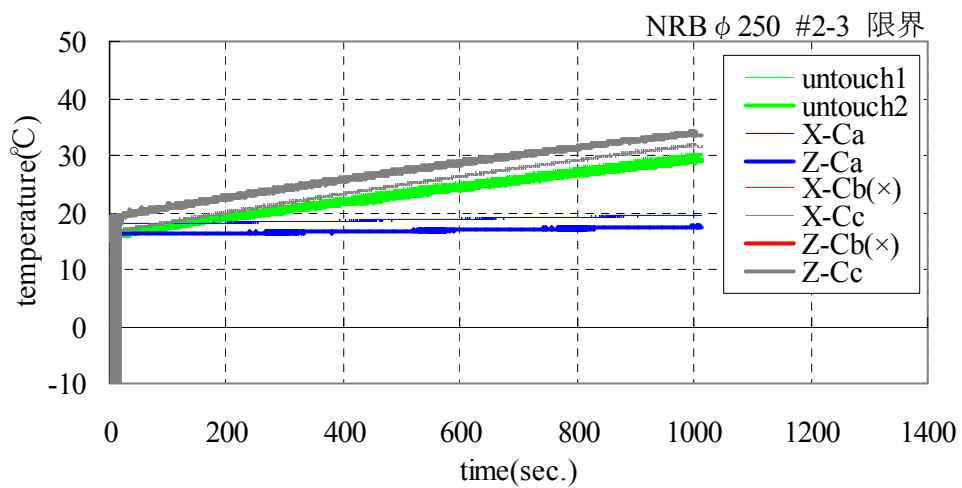
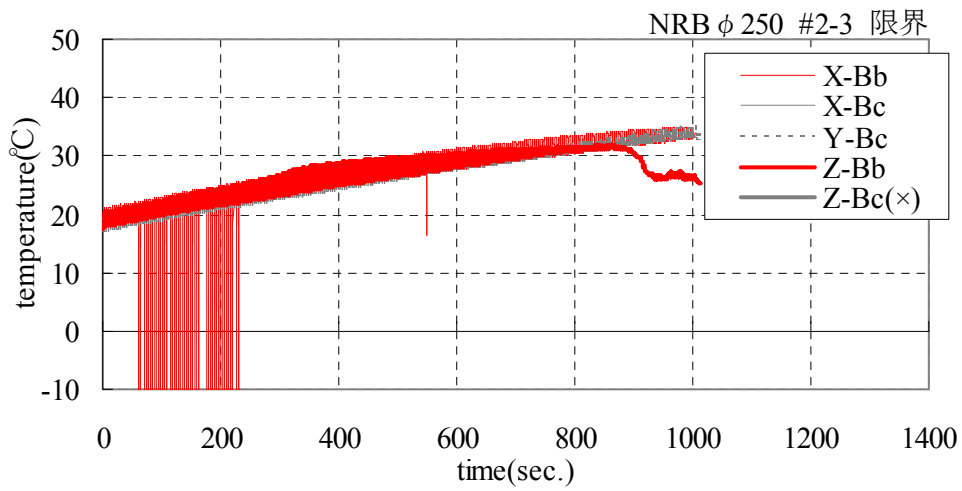
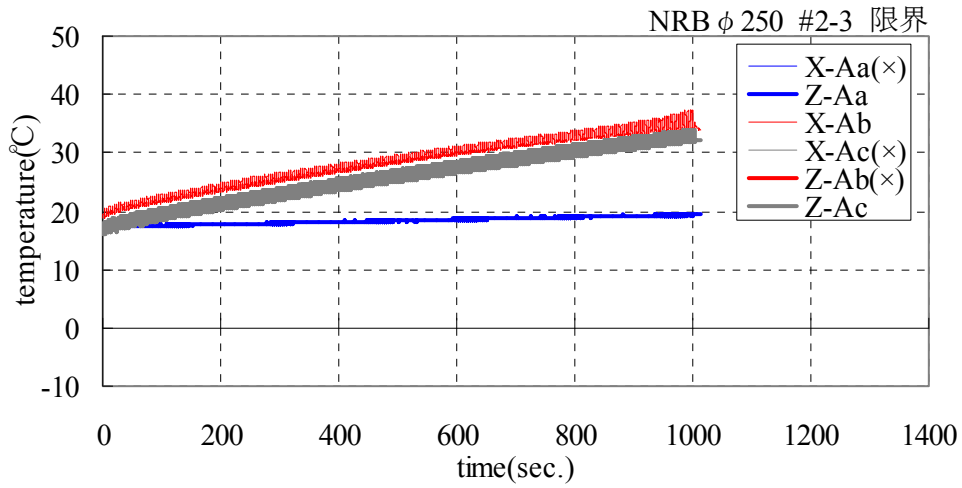


図 1.3.1-12b 温度変化 (3B 相当 : 限界) $\gamma = 200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

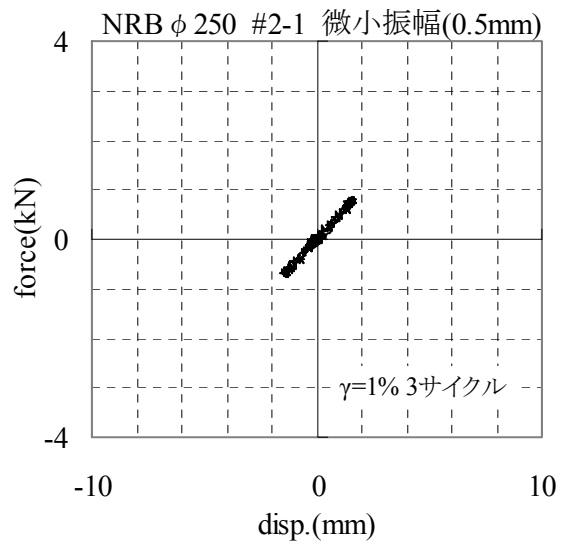
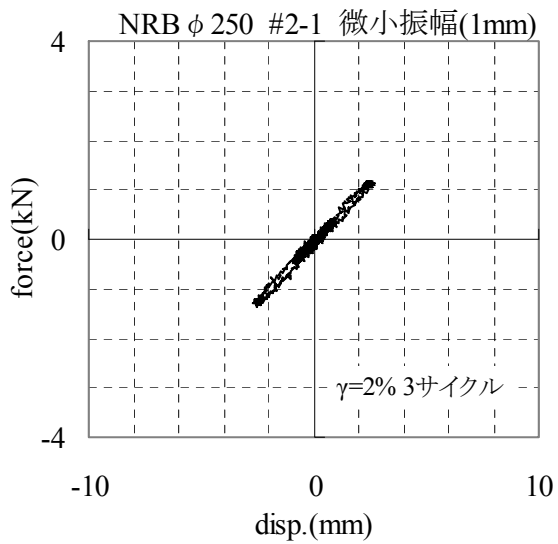
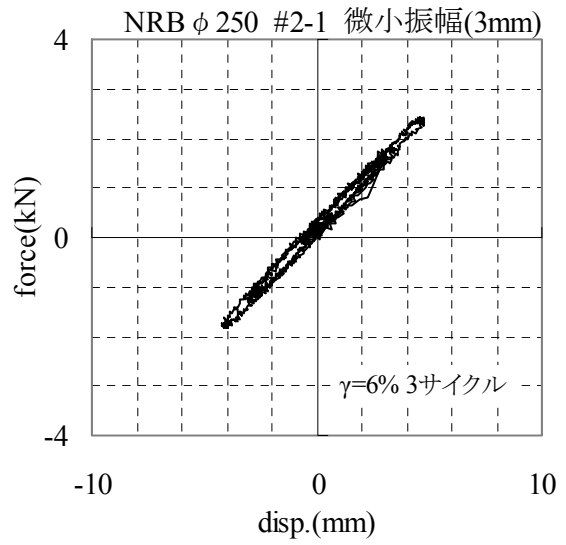
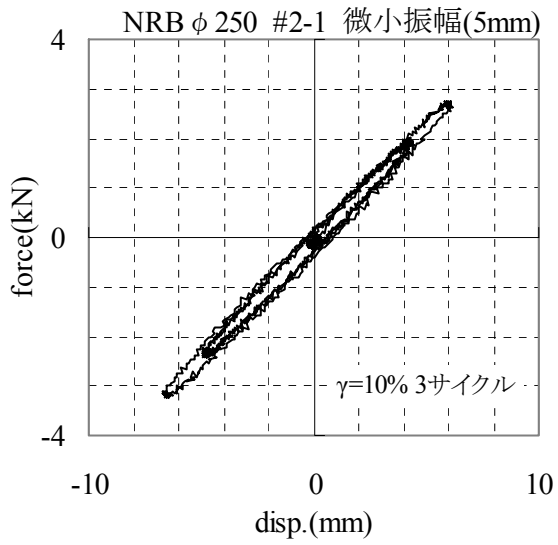


図 1.3.1-13a 荷重-変位関係 (微小振幅)

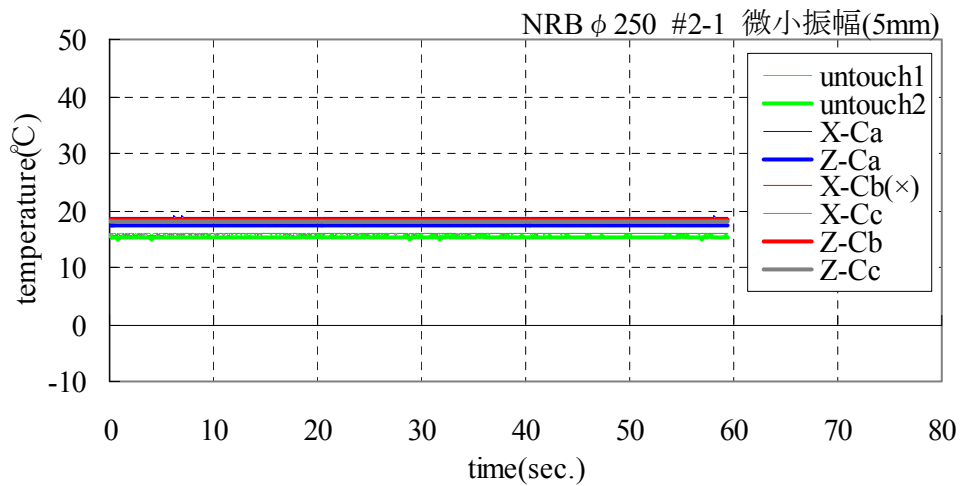
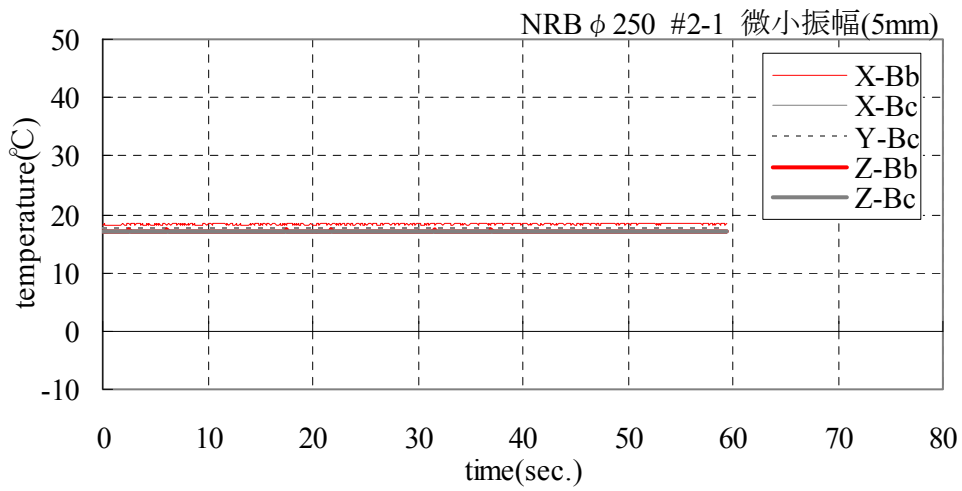
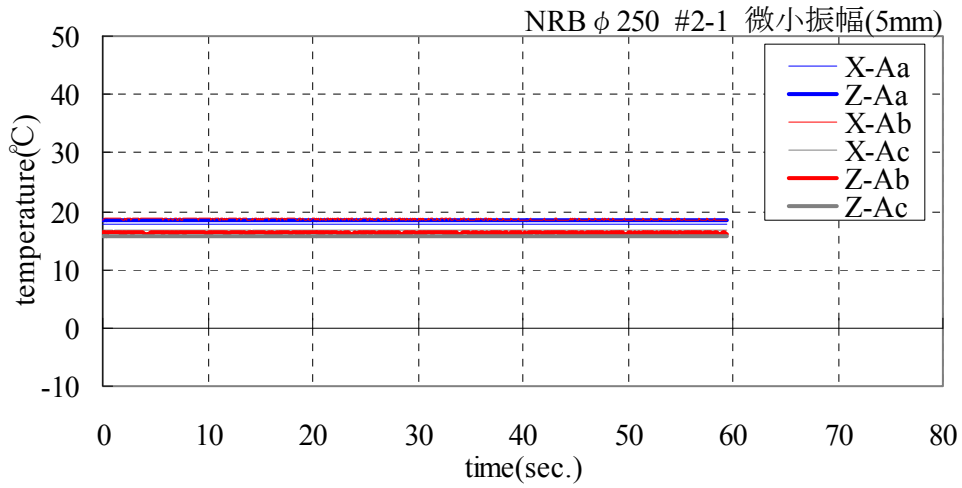


图 1.3.1-13b 温度变化 (微小振幅 5mm)

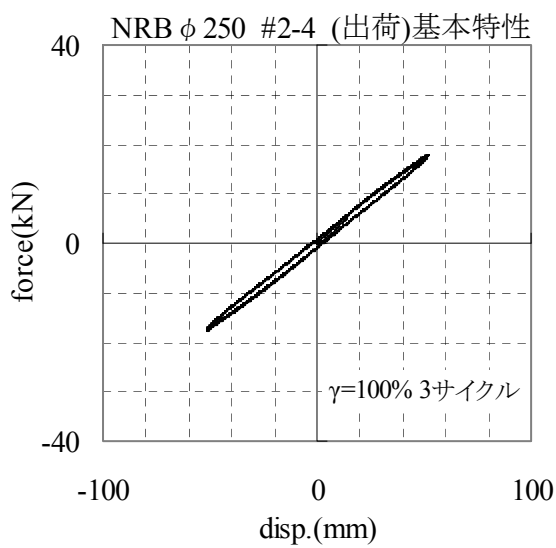
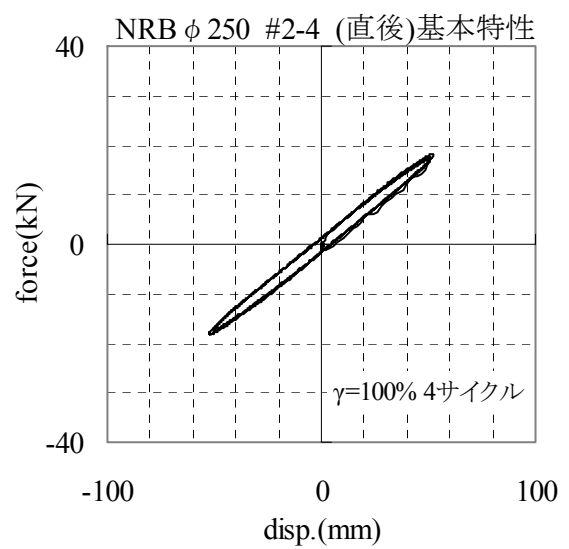
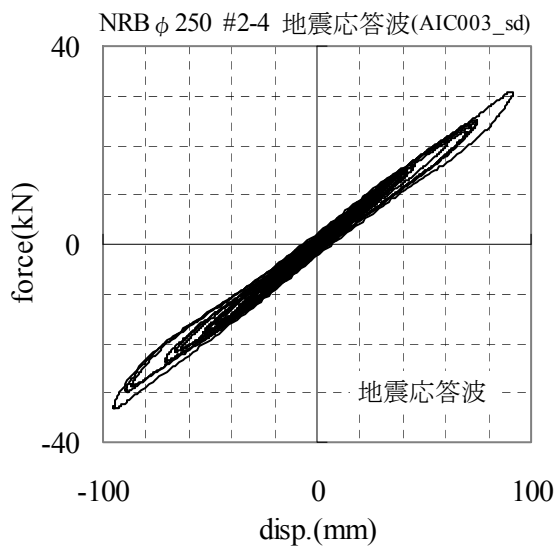
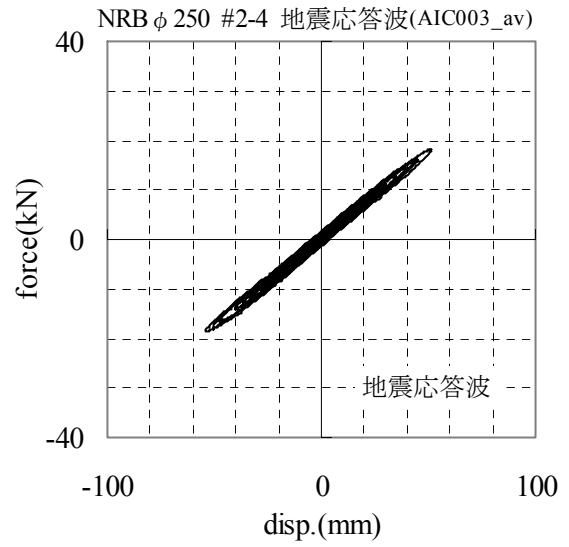
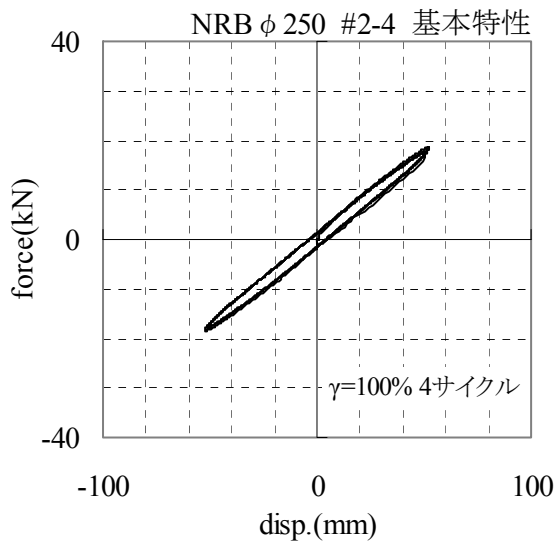


図 1.3.1-14a 荷重-変位関係 (地震応答波)

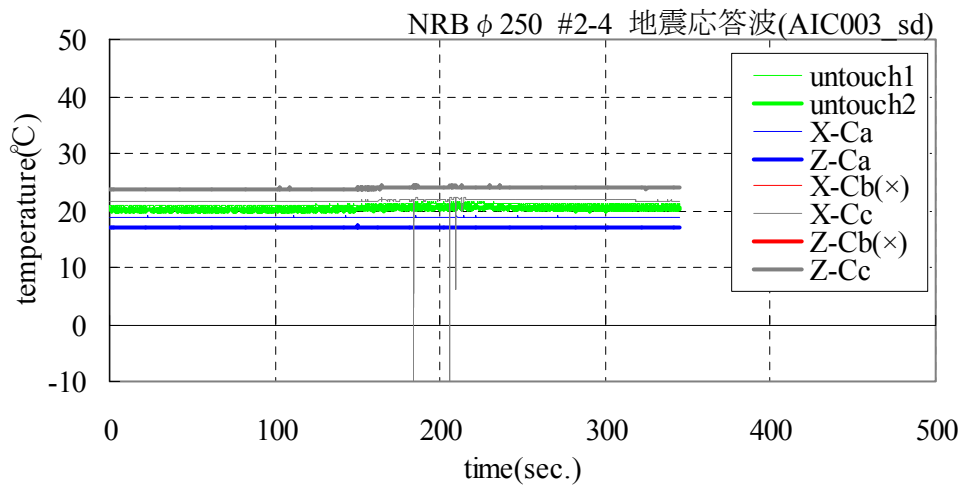
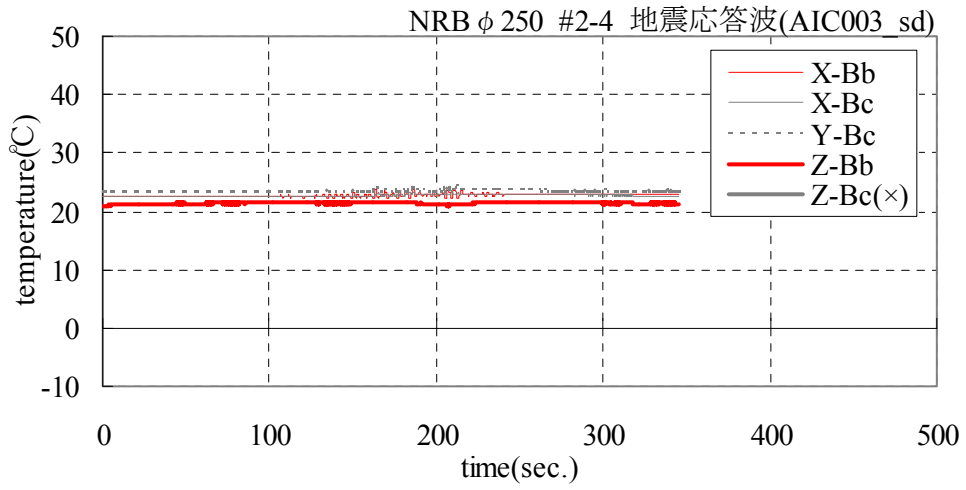
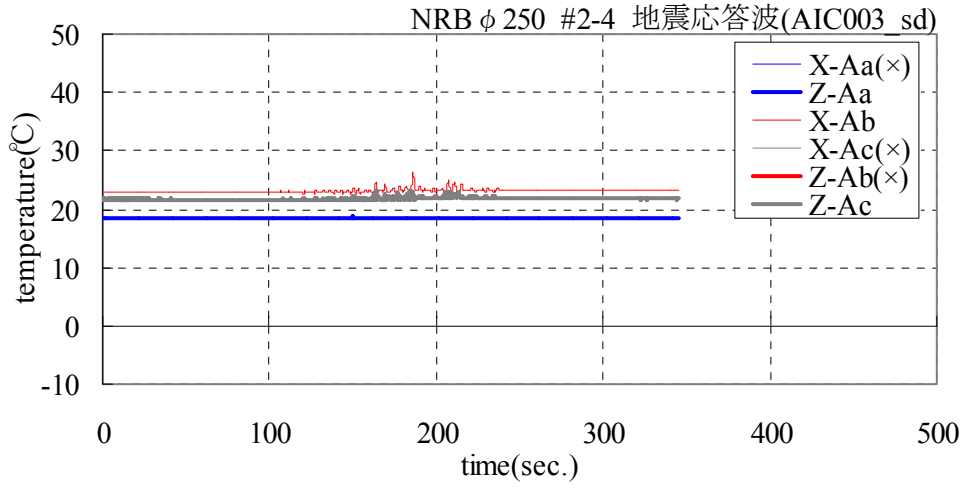


図 1.3.1-14b 温度変化 (地震応答波)

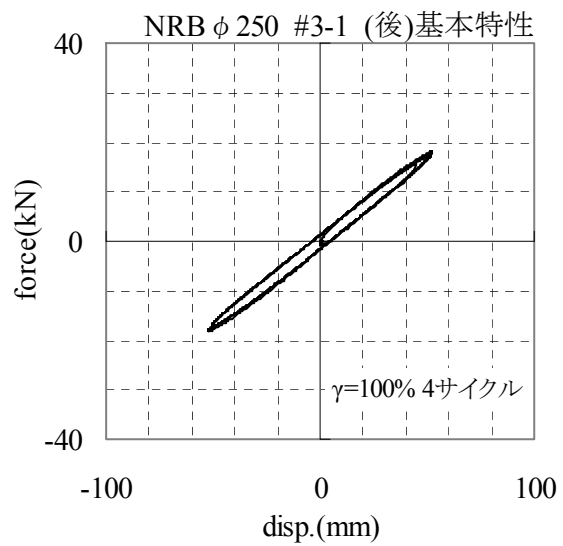
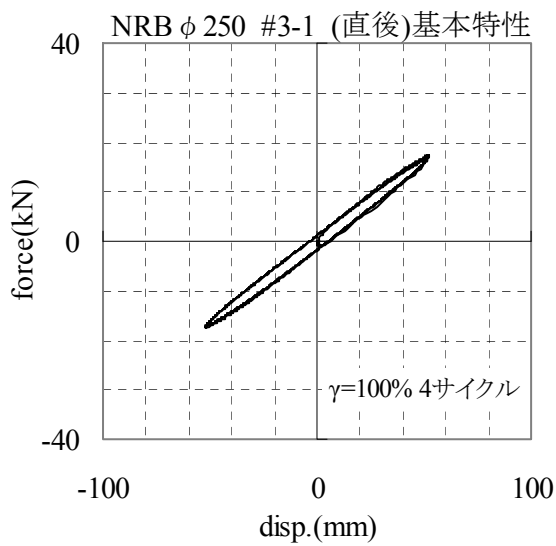
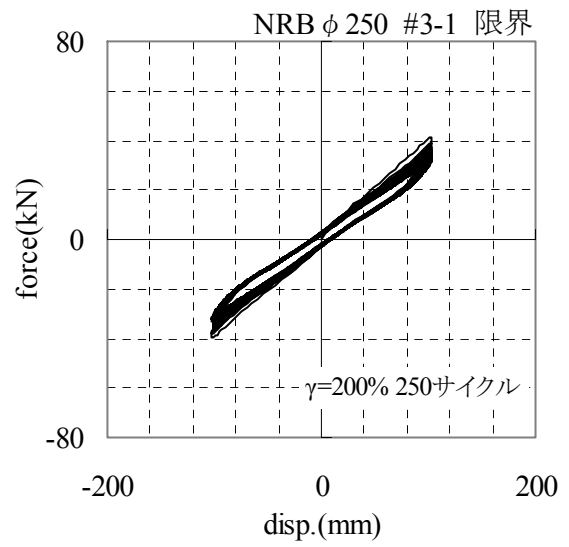
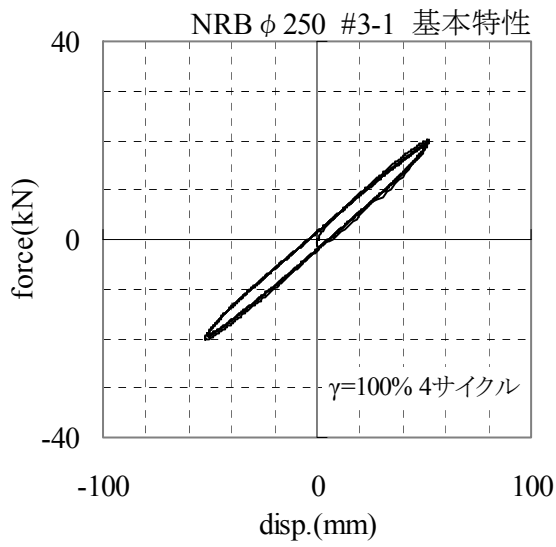


図 1.3.1-15a 荷重-変位関係 (3B 相当：限界【初期温度 0°C】) $\gamma = 200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

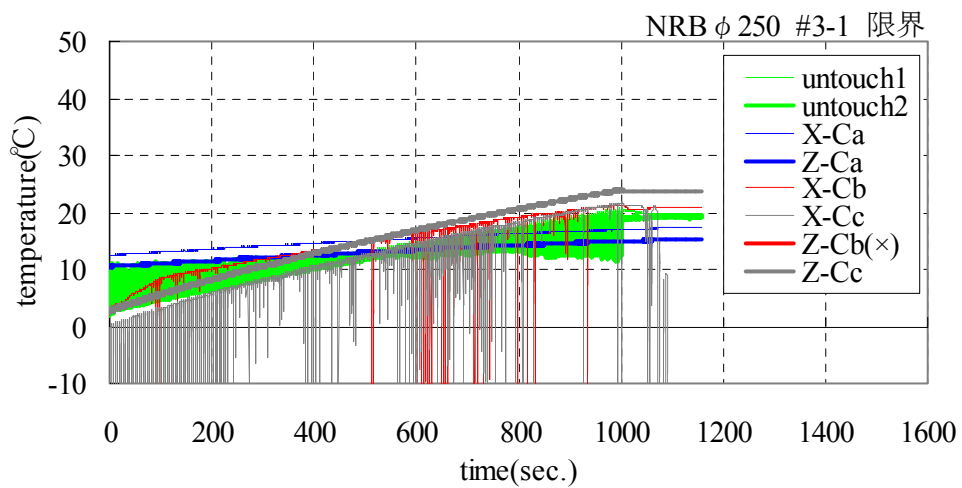
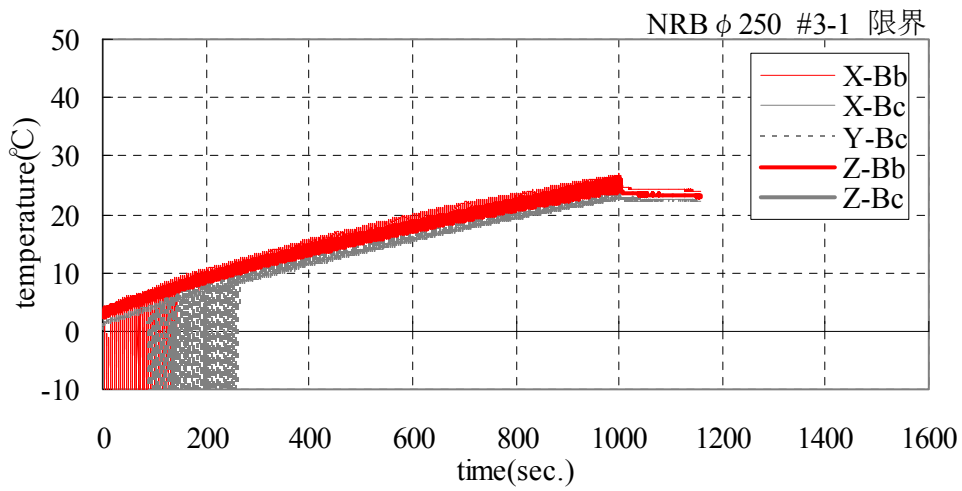
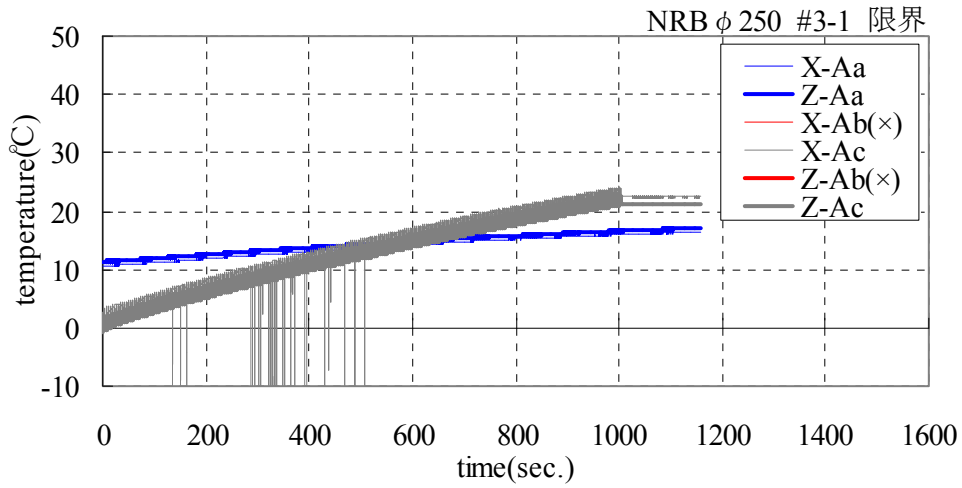


図 1.3.1-15b 温度変化 (3B 相当 : 限界【初期温度 0°C】) $\gamma = 200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

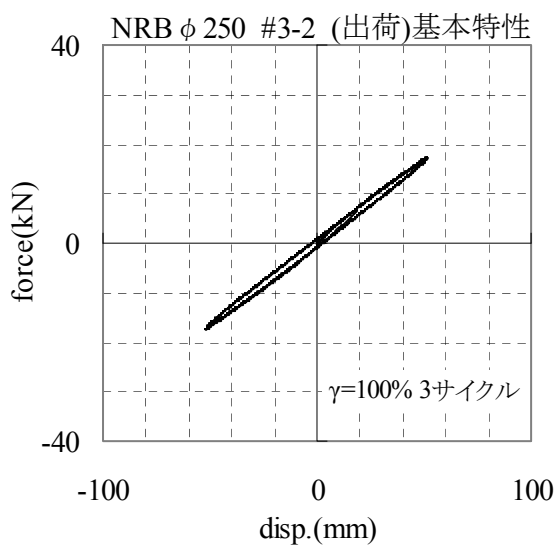
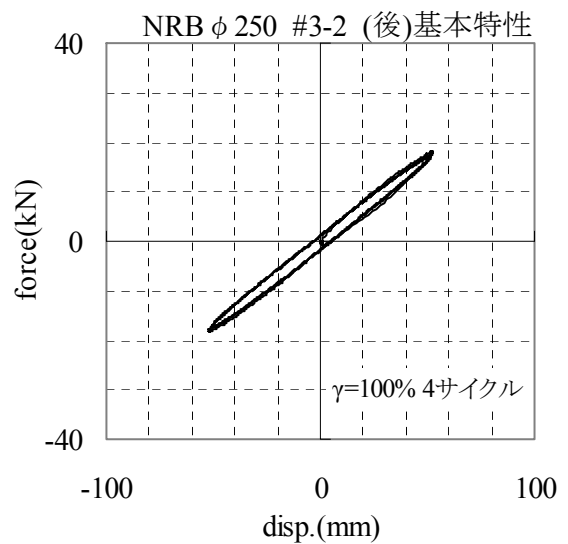
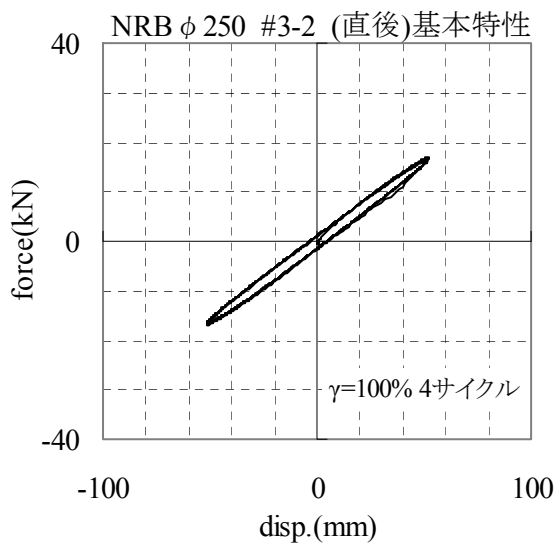
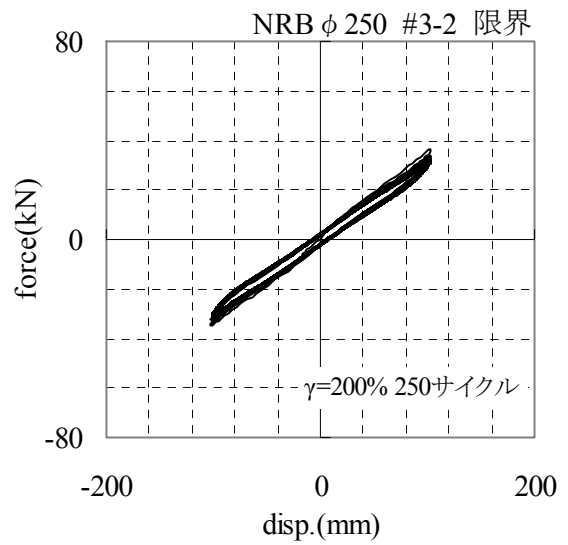
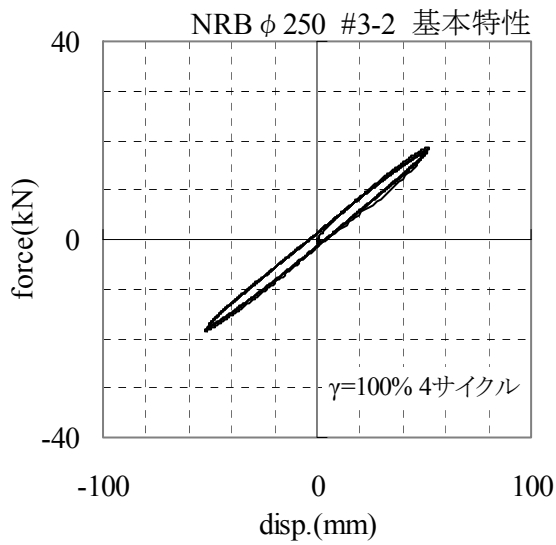


図 1.3.1-16a 荷重-変位関係 (3B 相当：限界【初期温度 30°C】) γ=200% (±102mm)

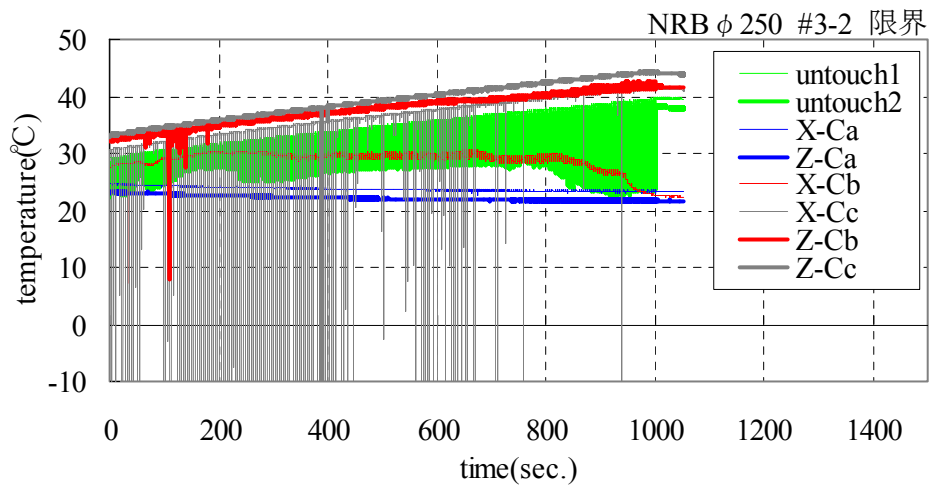
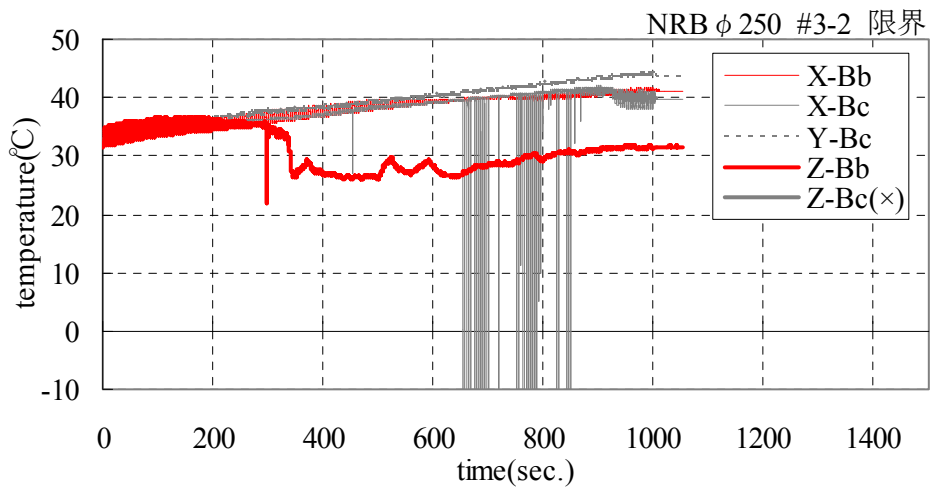
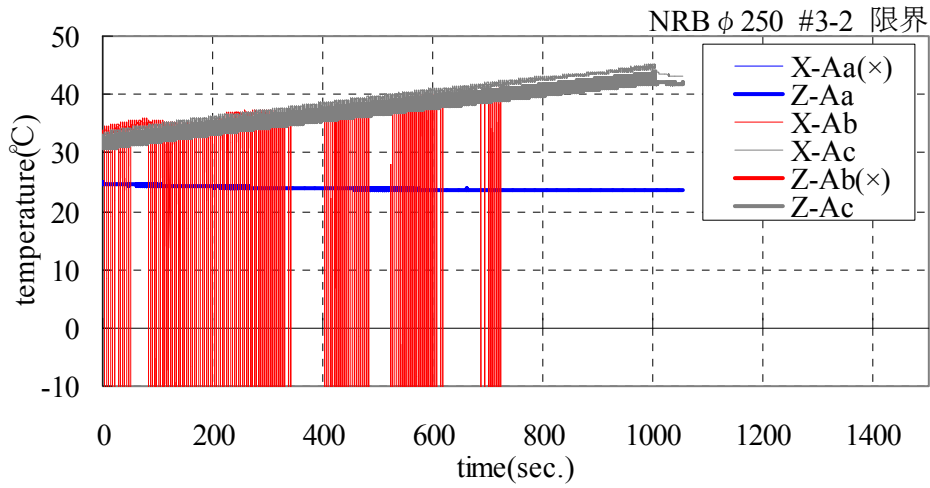


图 1.3.1-16b 温度变化 (3B 相当 : 限界【初期温度 30°C】) $\gamma = 200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

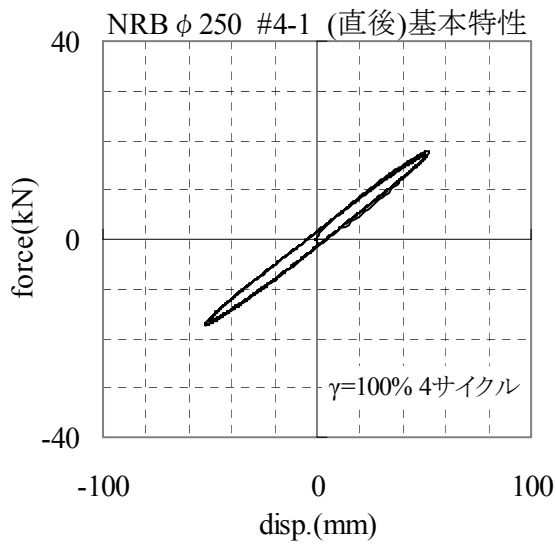
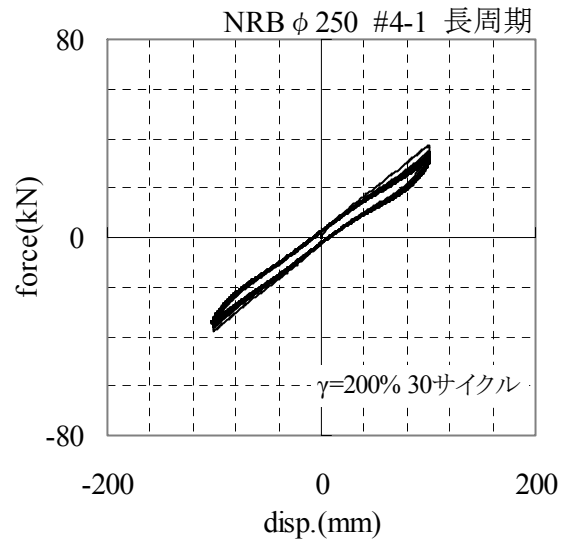
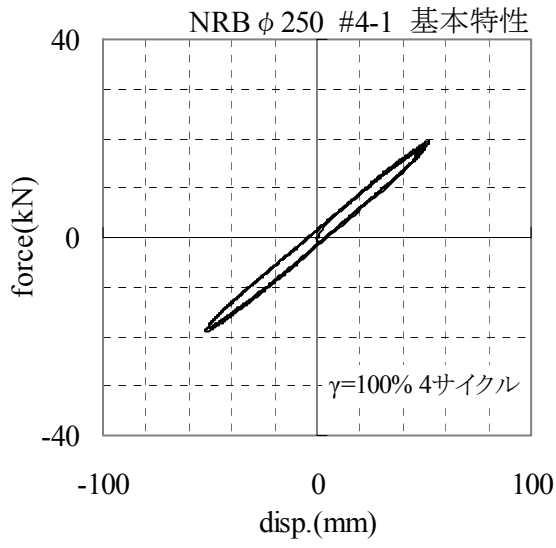


図 1.3.1-17a 荷重-変位関係 (3A 相当：長周期) $\gamma=200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

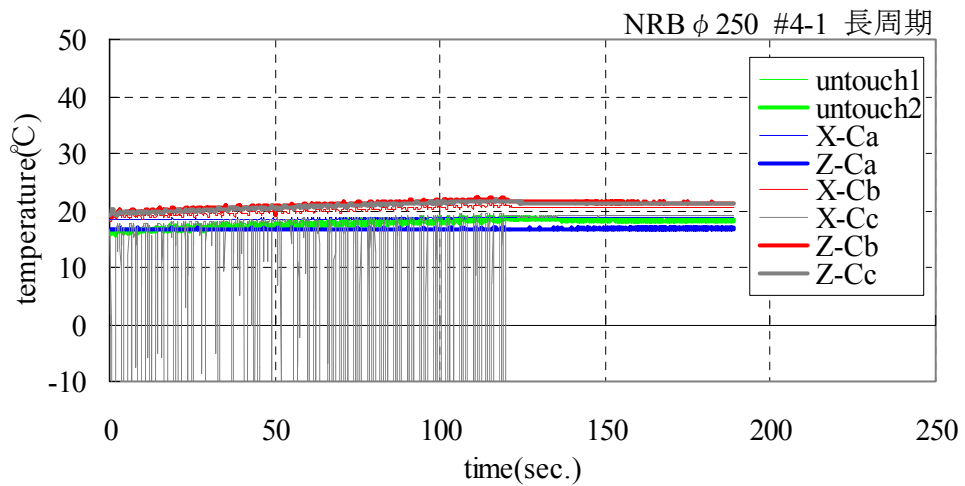
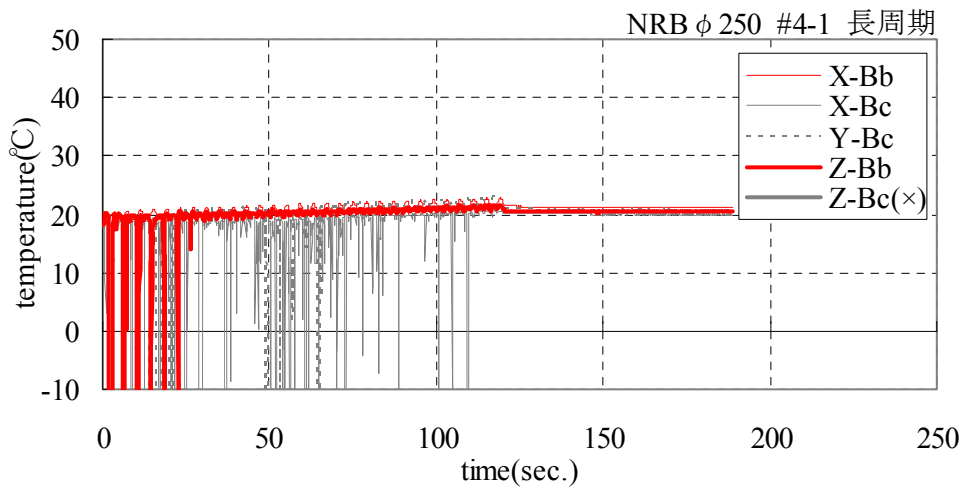
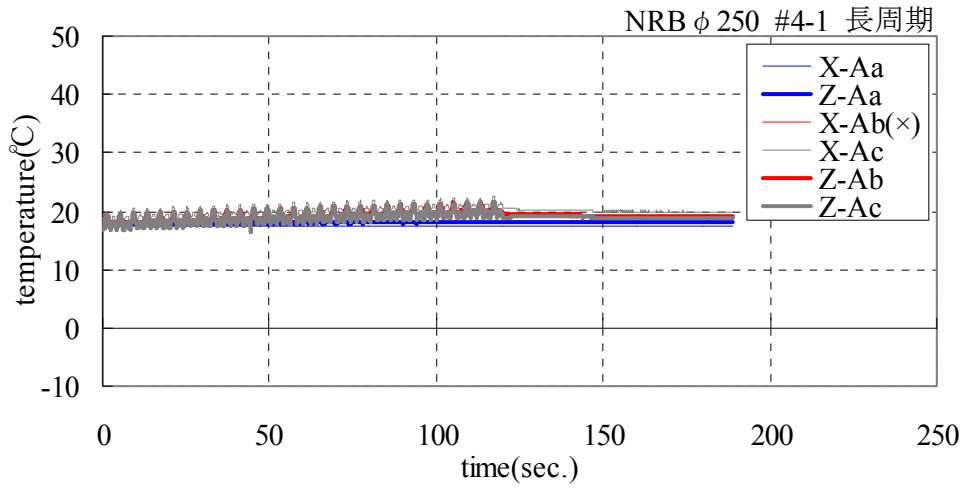


図 1.3.1-17b 温度変化 (3A 相当 : 長周期) $\gamma = 200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

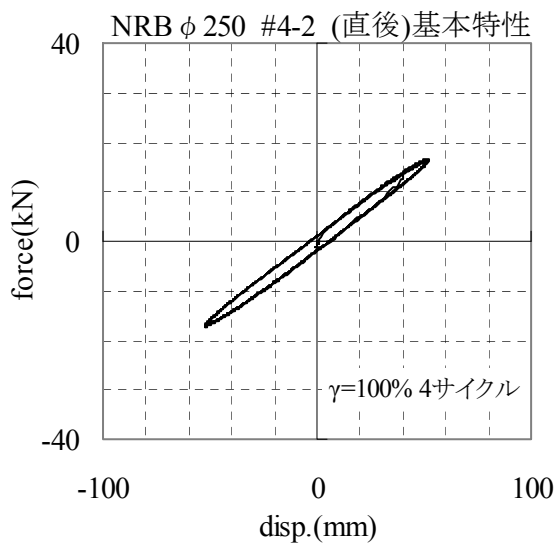
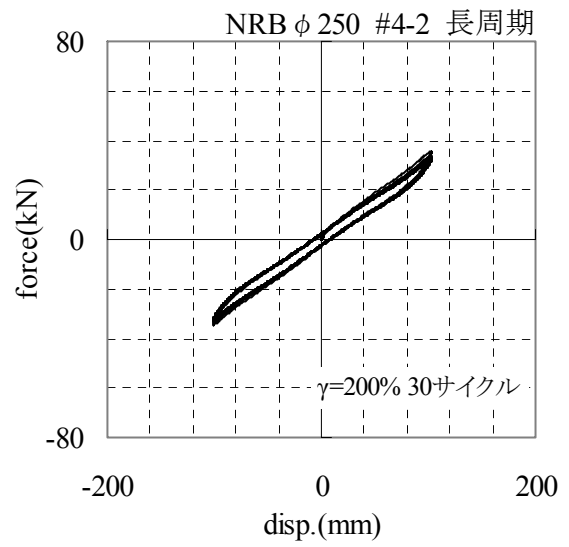
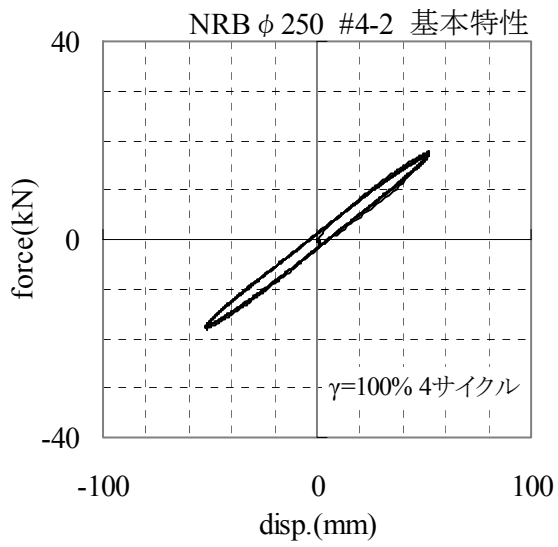


図 1.3.1-18a 荷重-変位関係 (3A 相当：長周期) $\gamma = 200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

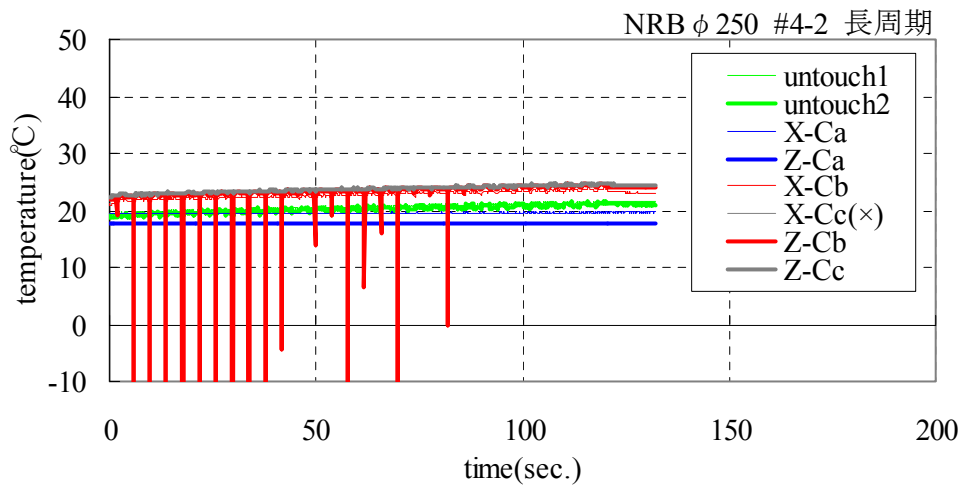
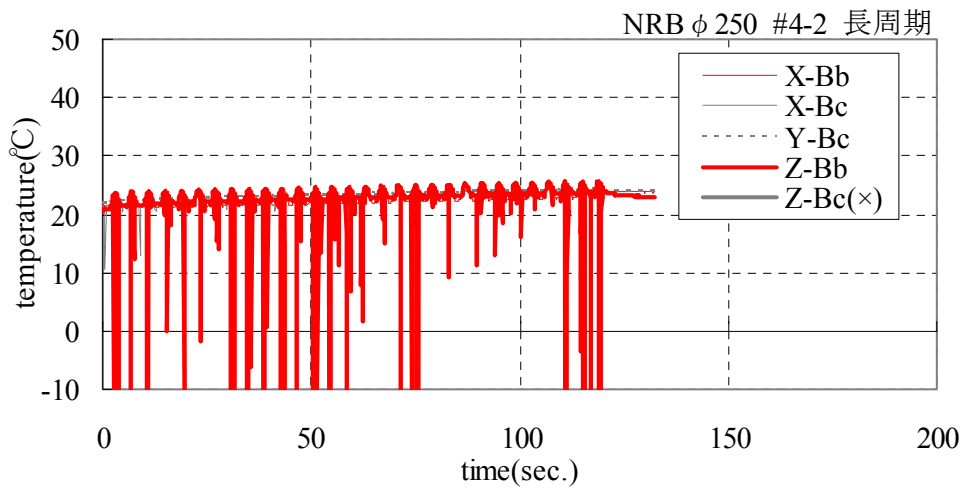
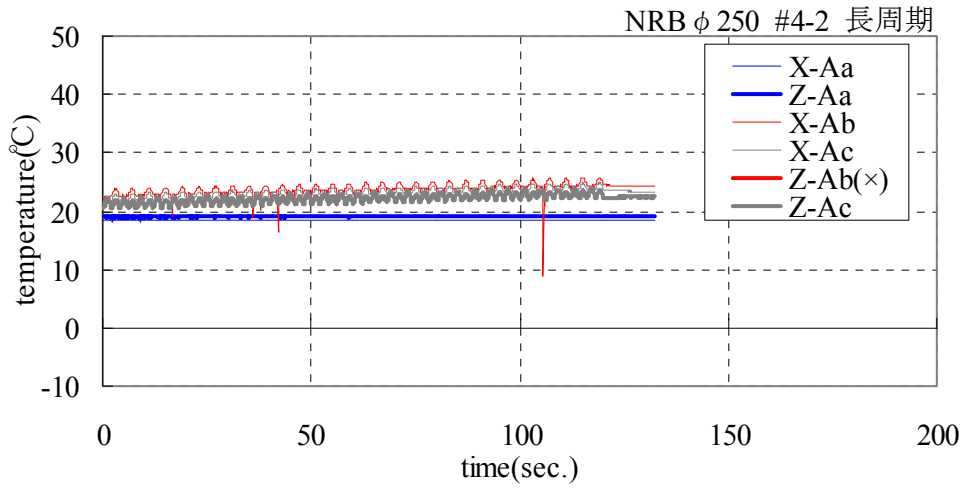


図 1.3.1-18b 温度変化 (3A 相当 : 長周期) $\gamma = 200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

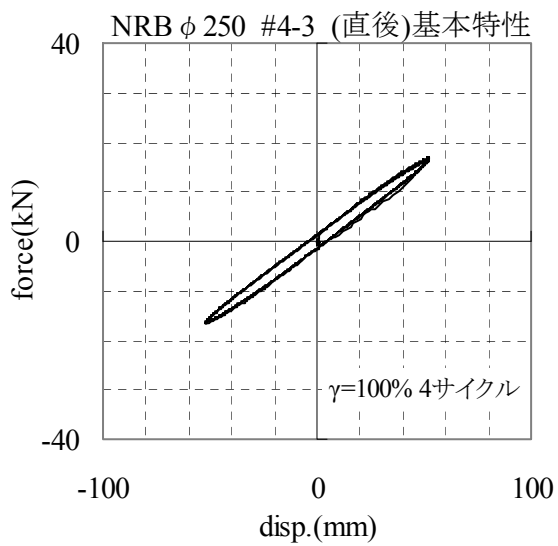
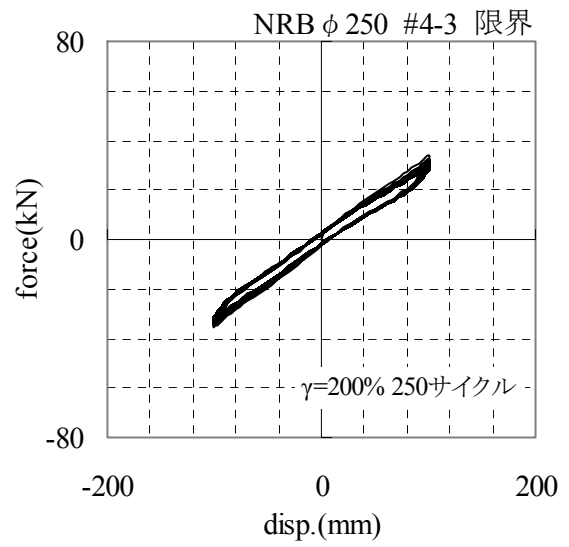
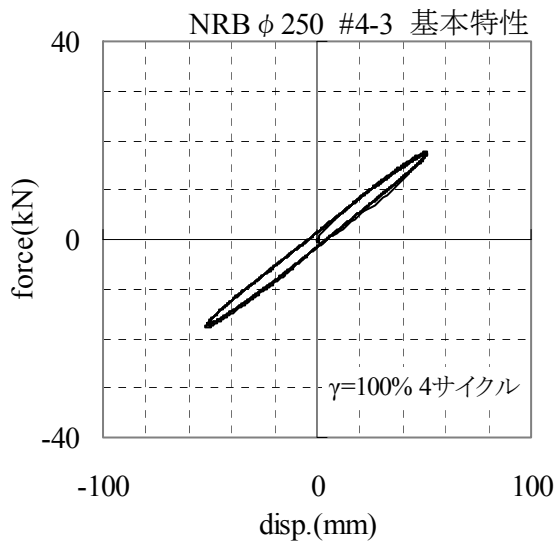


図 1.3.1-19a 荷重-変位関係 (3B 相当 : 限界) $\gamma = 200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

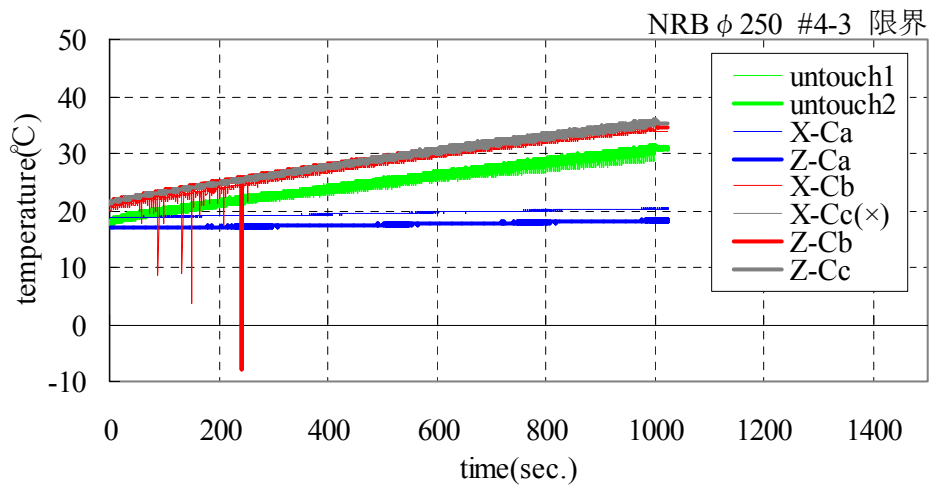
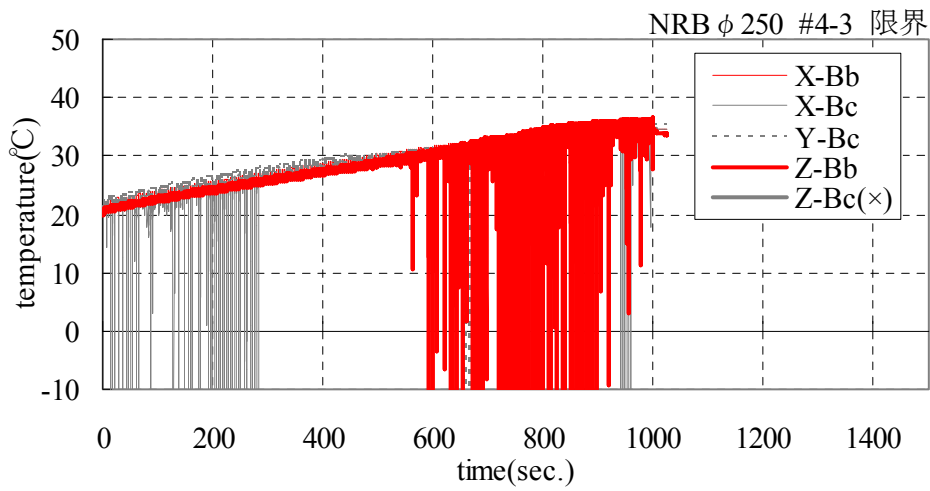
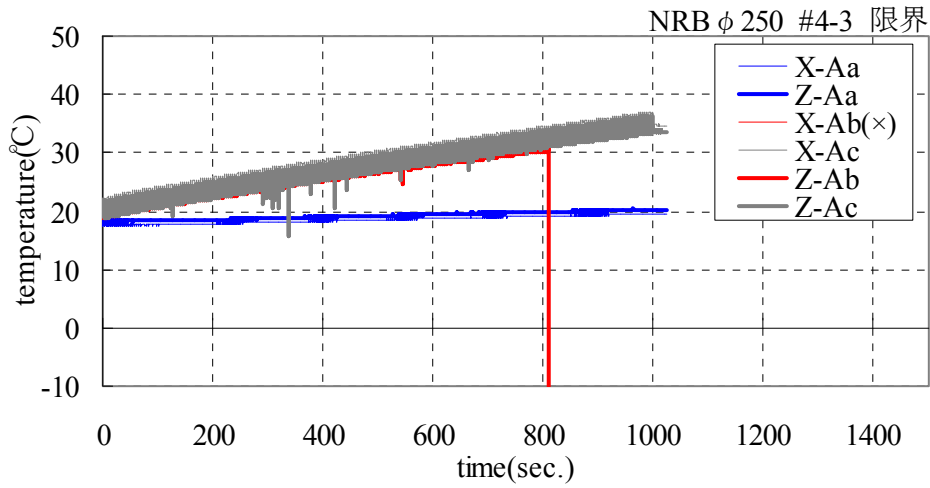


図 1.3.1-19b 温度変化 (3B 相当 : 限界) $\gamma = 200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

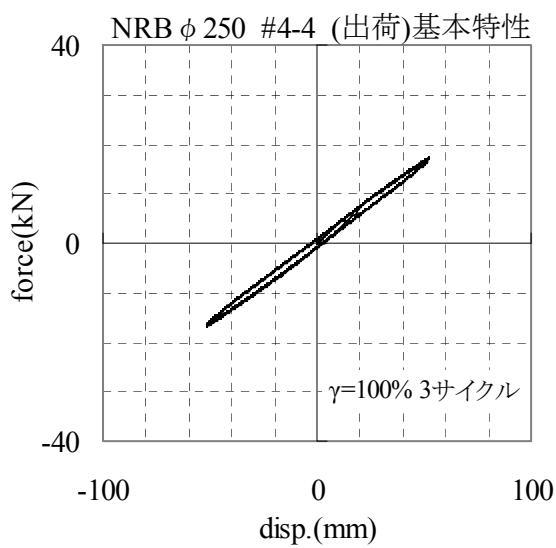
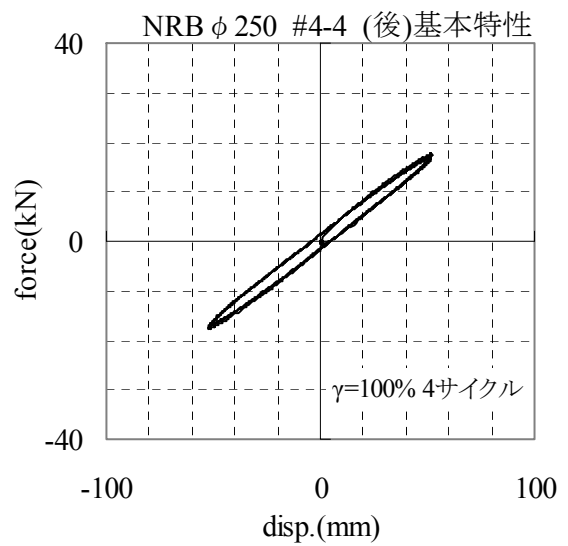
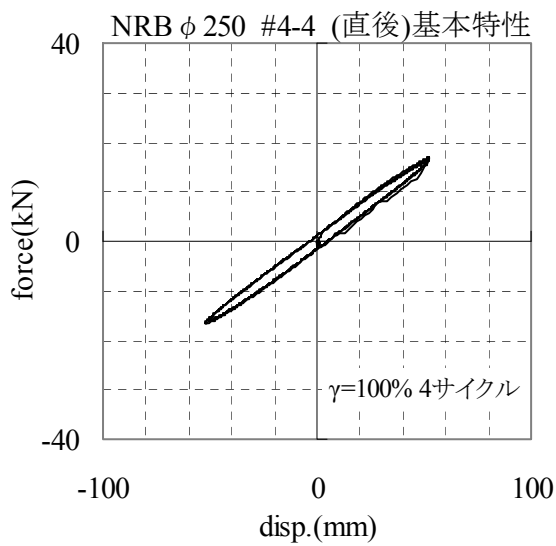
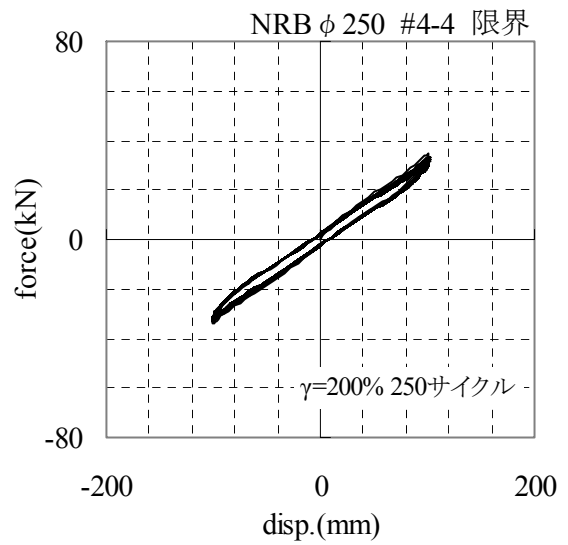
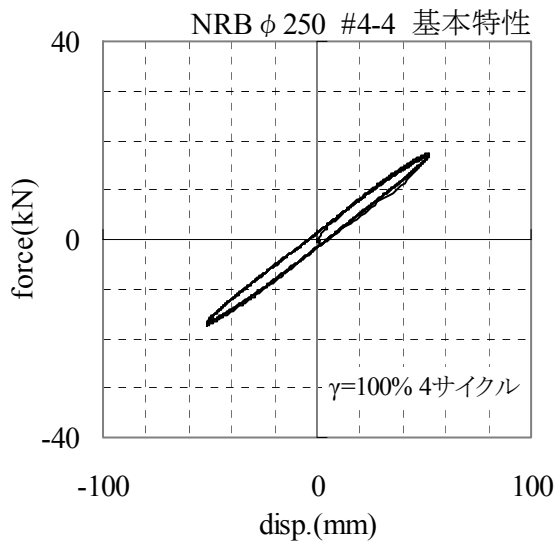


図 1.3.1-20a 荷重-変位関係 (3B 相当 : 限界) $\gamma=200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

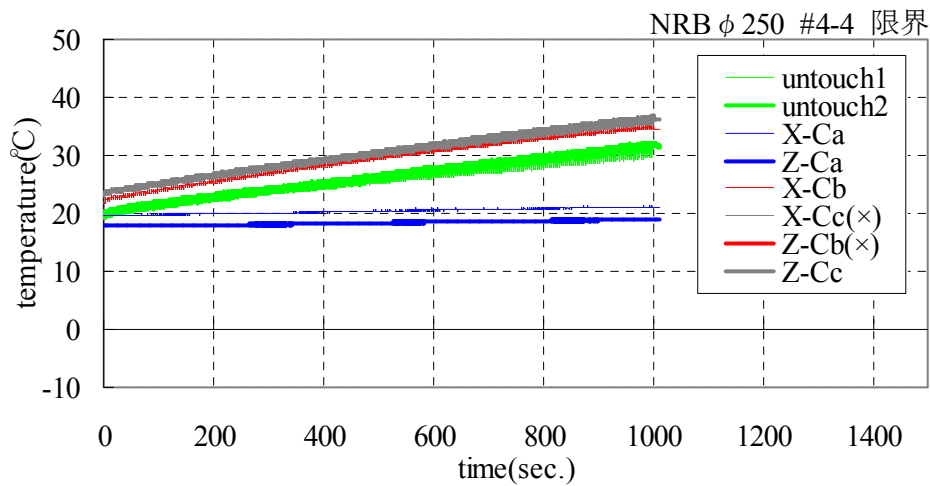
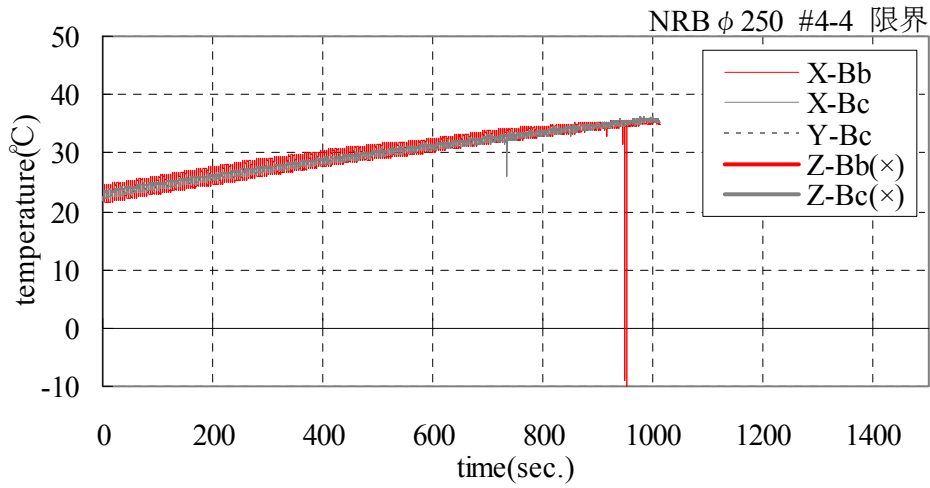
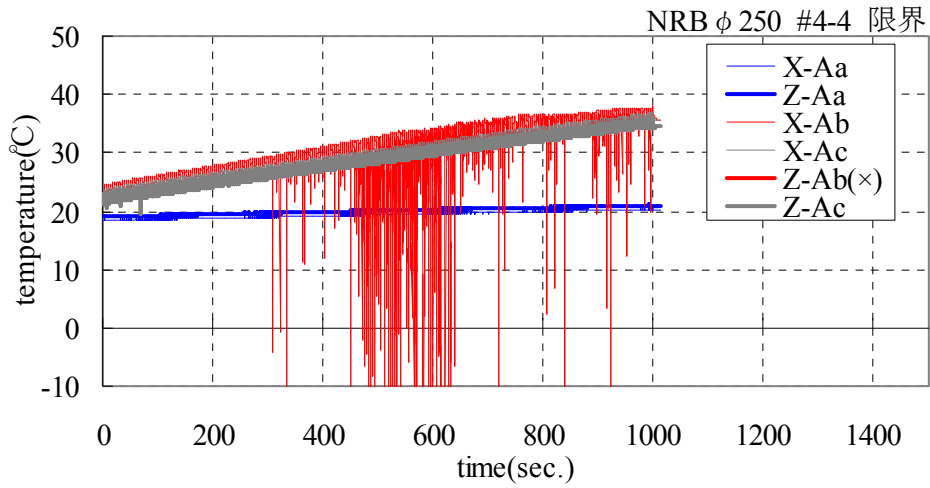


図 1.3.1-20b 温度変化 (3B 相当 : 限界) $\gamma = 200\%$ ($\pm 102\text{mm}$)

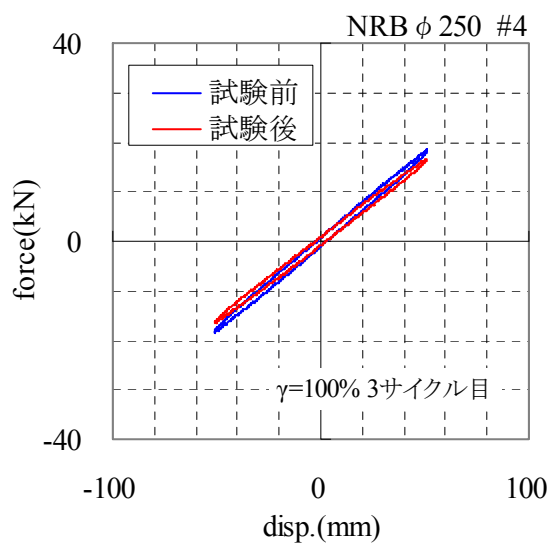
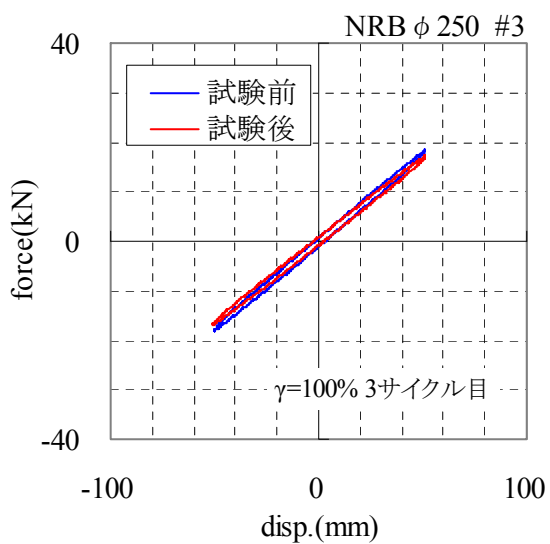
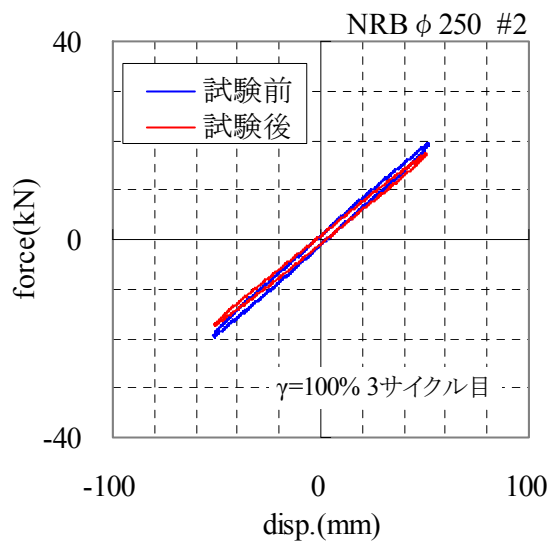
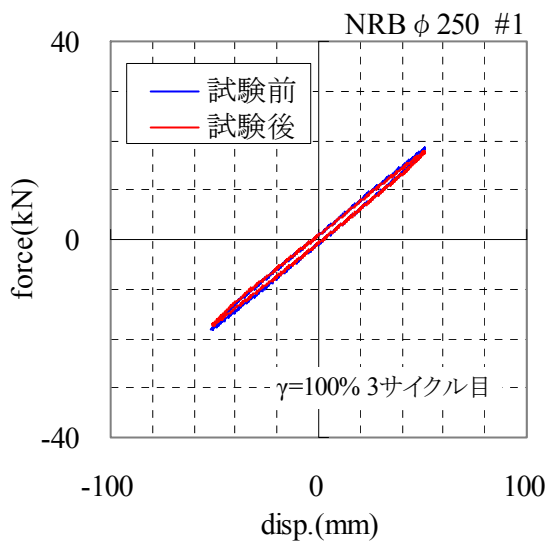


図 1.3.1-21 試験体毎の荷重-変位関係（基本特性） $\gamma = 100\%$

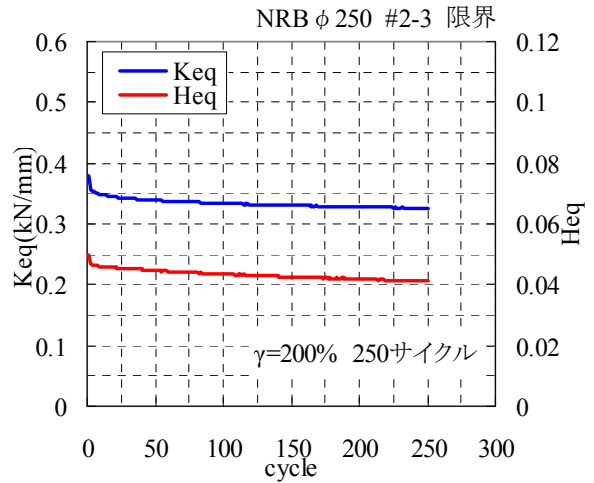
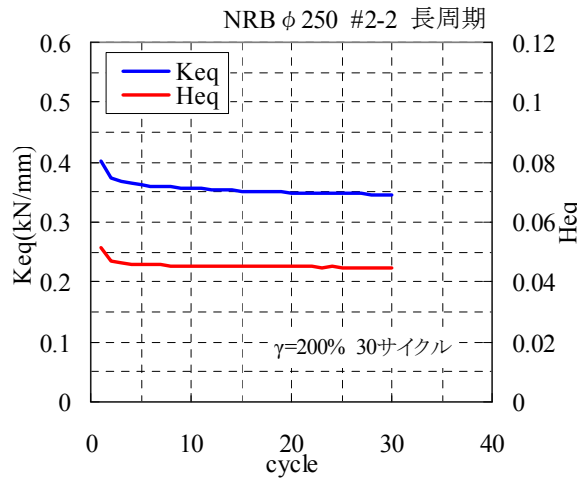
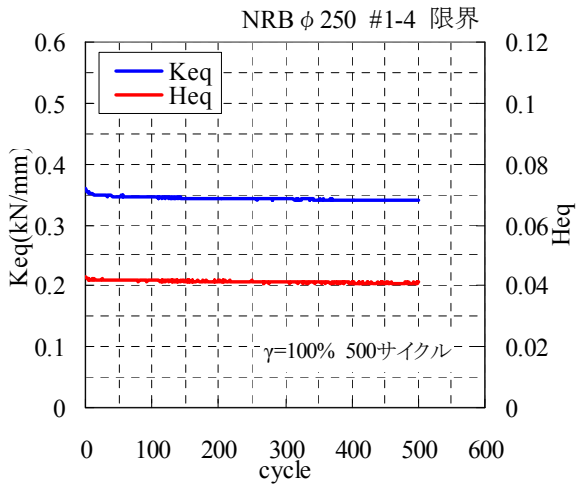
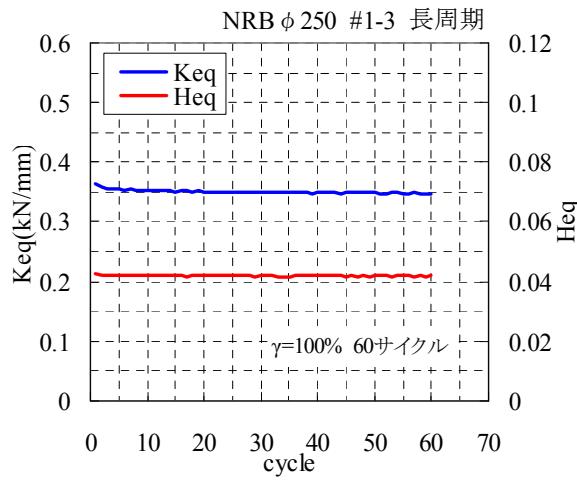
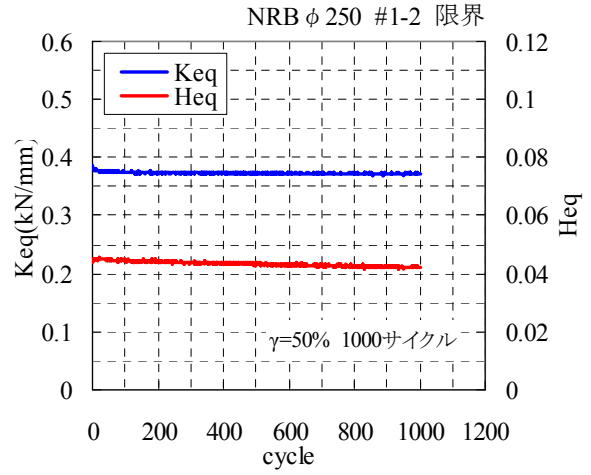
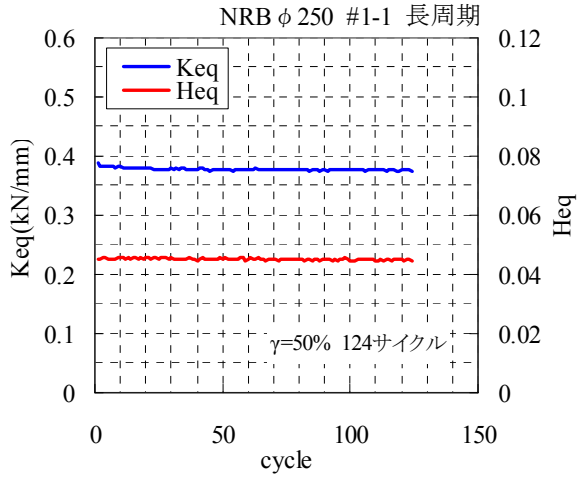


図 1.3.1-22 Kh 、 Heq の変化 $\gamma=50\%,100\%,200\%$

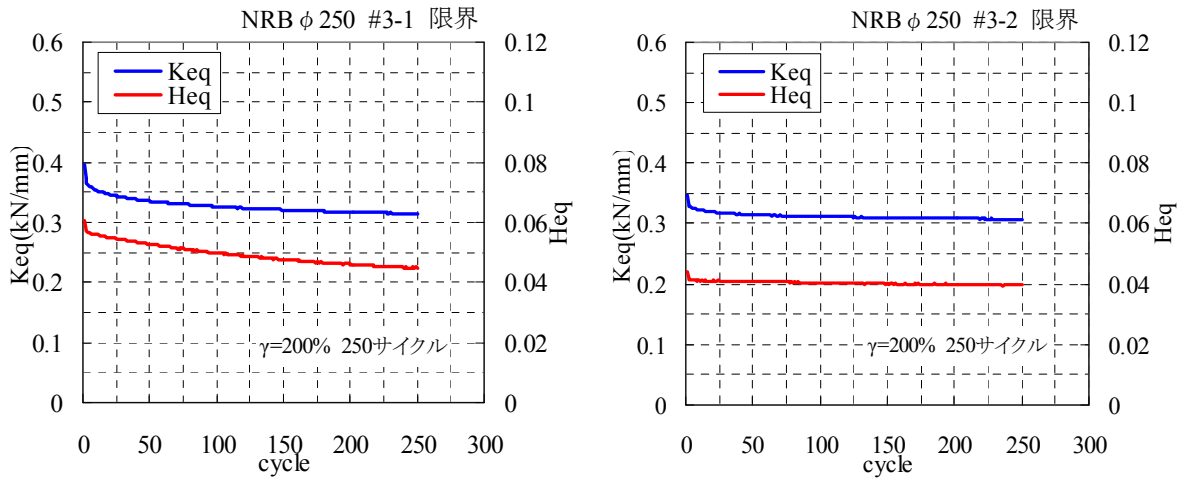


図 1.3.1-23 K_h 、 H_{eq} の変化【初期温度 0°C、30°C】 $\gamma = 200\%$

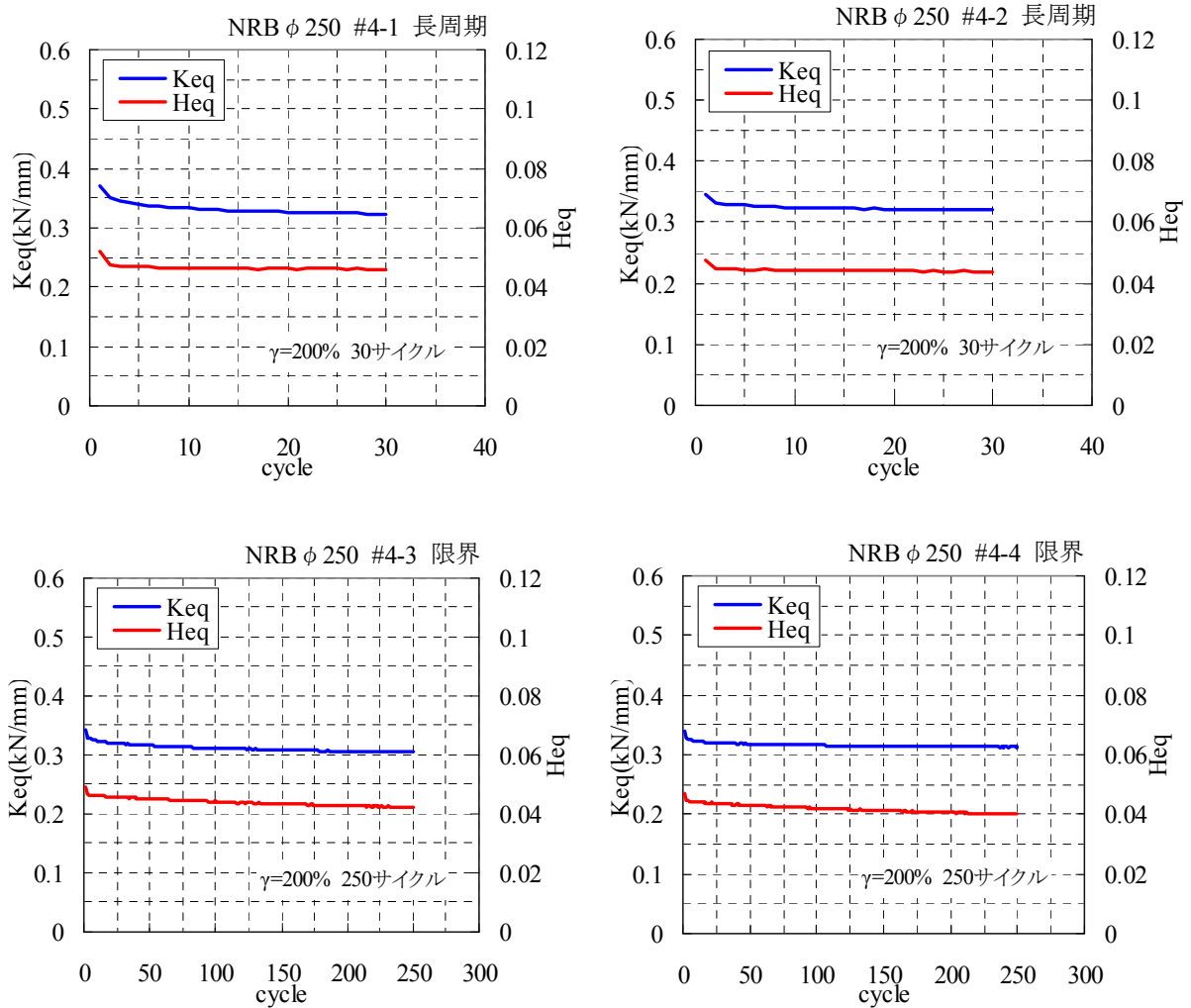


図 1.3.1-24 K_h 、 H_{eq} の変化【軸力変動】 $\gamma = 200\%$

表 1.3.1-5 Kh 、 Heq 一覧

試験体	試験No.	試験条件	Kh (kN/mm)		Heq	
			3サイクルめ	比率	3サイクルめ	比率
#1		(前)出荷基本特性	0.361		0.0262	
	#1-1	基本特性	0.360	1.000	0.0437	1.000
		長周期	0.383	1.065	0.0456	1.044
		(直後)基本特性	0.359	0.997	0.0424	0.970
	#1-2	基本特性	0.357	0.993	0.0431	0.987
		限界	0.382	1.061	0.0450	1.030
		(直後)基本特性	0.356	0.991	0.0411	0.941
	#1-3	基本特性	0.357	0.992	0.0421	0.964
		長周期	0.357	0.991	0.0422	0.965
		(直後)基本特性	0.351	0.976	0.0421	0.964
	#1-4	基本特性	0.354	0.984	0.0424	0.970
		限界	0.355	0.986	0.0423	0.967
		(直後)基本特性	0.345	0.959	0.0411	0.941
		(後)基本特性	0.350	0.972	0.0424	0.969
		(後)出荷基本特性	0.345		0.0247	
#2		(前)出荷基本特性	0.379		0.0273	
	#2-1	微小振幅5mm	0.470		0.0456	
		微小振幅3mm	0.473		0.0473	
		微小振幅1mm	0.453		0.0581	
		微小振幅0.5mm	-		-	
	#2-2	基本特性	0.387	1.000	0.0409	1.000
		長周期	0.369	0.953	0.0463	1.132
		(直後)基本特性	0.349	0.903	0.0440	1.076
		(後)基本特性	0.365	0.943	0.0428	1.049
	#2-3	基本特性	0.365	0.945	0.0430	1.053
		限界	0.356	0.922	0.0467	1.144
		(直後)基本特性	0.335	0.867	0.0420	1.028
	#2-4	基本特性	0.349	0.901	0.0431	1.055
		地震応答波(AIC003_av)	-		-	
地震応答波(AIC003_sd)		-		-		
(直後)基本特性		0.343	0.888	0.0433	1.060	
		(後)出荷基本特性	0.342		0.0260	
#3		(前)出荷基本特性	0.361		0.0255	
	#3-1	基本特性	0.378	1.000	0.0502	1.000
		限界	0.366	0.970	0.0570	1.134
		(直後)基本特性	0.328	0.869	0.0457	0.910
		(後)基本特性	0.341	0.904	0.0449	0.894
	#3-2	基本特性	0.349	0.925	0.0403	0.803
		限界	0.329	0.872	0.0415	0.825
		(直後)基本特性	0.322	0.854	0.0416	0.828
		(後)基本特性	0.340	0.901	0.0441	0.877
			(後)出荷特性	0.333		0.0261
#4		(前)出荷基本特性	0.361		0.0262	
	#4-1	基本特性	0.363	1.000	0.0441	1.000
		長周期	0.345	0.949	0.0470	1.066
		(直後)基本特性	0.332	0.915	0.0467	1.059
	#4-2	基本特性	0.334	0.920	0.0466	1.056
		長周期	0.330	0.909	0.0446	1.012
		(直後)基本特性	0.320	0.882	0.0482	1.092
	#4-3	基本特性	0.338	0.931	0.0464	1.053
		限界	0.329	0.907	0.0467	1.060
		(直後)基本特性	0.316	0.871	0.0447	1.014
	#4-4	基本特性	0.329	0.904	0.0472	1.071
		限界	0.327	0.900	0.0445	1.009
		(直後)基本特性	0.315	0.868	0.0446	1.011
		(後)基本特性	0.331	0.911	0.0463	1.050
		(後)出荷基本特性	0.325		0.0275	

1.3.1.3 まとめと課題

天然ゴム系積層ゴム支承の多数回繰り返しに対する性能を把握する事を目的として、実大の 1/4 縮小試験体 (Φ250) により大振幅高速繰り返し試験を実施した。以下に、本実験から得られた知見をまとめて示す。

(1) 多数回繰り返しに対する水平荷重—変位特性の変化

荷重—変位関係では、 $\gamma=50\%$ および $\gamma=100\%$ では長周期・限界の両試験とも繰り返しに伴う荷重変形関係の変化はきわめて小さかった。 $\gamma=200\%$ では若干のハードニング傾向が見られ、また初期サイクルで剛性がやや高めとなっているが、2 サイクルめ以降の荷重変形関係はほぼ安定していた。初期温度 30℃、基準面圧 15N/mm²に対して 5N/mm²の軸力変動を与えたケースもほぼ同じ傾向を示すが、積層ゴムの初期温度を 0℃とした限界試験では繰り返しの影響ならびに試験体温度が常温に戻る際の温度変化の影響が複合し、荷重変形関係の変化はやや大きい。

長周期・限界試験を経験する前後で常温の同一条件で行った基本特性試験の比較により、 Kh が減少する傾向が確認された。 Kh の変化は $\gamma=100\%$ (#1) に比べて $\gamma=200\%$ (#2) のほうが顕著であり、変化量は $\gamma=200\%$ (#2) で $-10\% \sim -8\%$ であった。 Kh 、 Heq の残留変化量は $\gamma=200\%$ の長周期試験(#2-2)で -6% 、 $+5\%$ であった。

(2) 多数回繰り返しに対する試験体の温度変化

限界試験の温度変化では、加振振幅が大きいケースほど同じ累積変形を短時間に载荷するためにゴム内部の温度上昇量が大きくなっており、3B 相当ケースでは加振終了後には 35℃程度となり、初期に比べて 15℃程度上昇している。

初期温度を 0℃、30℃とした場合のゴム内部の温度上昇はそれぞれ 23℃、12℃程度であり、载荷条件が同じでも初期温度と雰囲気温度との関係で温度上昇量が異なる。いずれのケースも室温を 20℃程度に管理して行っているため、特に初期温度を 0℃としたケースでは载荷による温度上昇と試験体温度が室温に戻る両方の影響を示している。

(3) 動的軸力変動の影響による上記性状の変化

基準面圧 15N/mm²に対して 5N/mm²の軸力変動を与えたケースにおいて、多数回繰り返しによる水平荷重—変位特性および Kh 、 Heq の変化性状は、軸力一定のケースと同様の傾向となった。

以上、天然ゴム系積層ゴムの 1/4 縮小試験体による多数回繰り返し試験を通じて、長周期・限界の試験条件に対して安定した特性を示すことが確認された。今後の課題として、多数回繰り返しによる特性値評価式の検討および地震応答解析への反映、実大試験体による温度上昇や特性値変動に対するスケール効果の確認などが挙げられる。

参考文献

- 1.3.1-1) 社団法人日本ゴム協会：免震用積層ゴム委員会技術報告、2006
- 1.3.1-2) 電力中央研究所：電力中央研究所報告、U34、1998
- 1.3.1-3) 株式会社ブリヂストン：天然ゴム系積層ゴム支承技術資料

1.3.2 鉛プラグ入り積層ゴム

1.3.2.1 実験計画

(1) 実験目的と背景

表 1.3.2-1 に鉛プラグ入り積層ゴム (LRB) の繰り返し加振時の温度上昇に伴う特性変化に関する主要文献を示す。以下、主要文献について内容をまとめる。文中の文献番号は表 1.3.2-1 による。

LRB の繰り返し加振時における特性変化については文献 1 により、LRB ϕ 500 に対してせん断ひずみ $\gamma=150\%$ で 30 回繰り返し加振時に降伏荷重特性値 Q_d は初期値の約 55% に低下していることが示されている。文献 2 においても LRB ϕ 300 に対して $\gamma=300\%$ で 30 回繰り返し加振時に 3 サイクル目と比較して 27 サイクル目には 85%、90% に低下したことが示されている。本文献中では鉛吸収エネルギーと比較して鉛温度上昇が小さく熱伝導解析による検討が必要と指摘されている。文献 3 では LRB ϕ 250 に対して $\gamma=250\%$ で 50 回繰り返し加振時に降伏後剛性 K_d はほとんど変化せず、降伏荷重特性値 Q_d は 65% に低下していることが示されている。以上についてはそれぞれが正弦波加振下での特性変化について示されているが、文献 4 では地震応答波加振を実施しており、正弦波加振下での実験結果と同様の結果が得られている。文献 5 では LRB と高減衰ゴム系積層ゴムを対象とした正弦波加振試験、地震応答波加振試験の結果及び実験結果のシミュレーション解析手法が示されており、LRB については鉛プラグの温度上昇を考慮した地震応答解析手法が提案されている。また実験結果については文献 7 にまとめられている。文献 6 では LRB ϕ 410 に対して $\gamma=200\%$ で 200 回繰り返し加振時に Q_d は 3 サイクル目に対し約 42% に低下したことが示されており、実験結果よりエネルギー吸収量と Q_d 低下率の関係を用い、 Q_d の低下を考慮した地震応答解析を実施している。

以上のように、LRB では、長時間繰り返し加力に伴い鉛プラグの温度上昇が上昇し、降伏荷重が低下することが明らかになっている。ここでは、第 II 部の報告書で提案された長周期地震動を想定したエネルギー吸収性能評価のための試験方法に基づき、縮小試験体を用いた長時間繰り返し加振実験を実施し、LRB の特性変化や限界性能を明らかにする。

(2) 実験日時および場所

日時： 2010 年 11 月 18 日～12 月 3 日

場所： オイレス工業株式会社 足利事業所

(3) 試験体

本試験は、鉛プラグ入り積層ゴムの縮小体を用いて行う。想定実機を、LRB1000 (鉛プラグ入り外径： ϕ 1000、鉛プラグ径： ϕ 200)、基準面圧を 15 N/mm^2 とし、その 1/2 スケール縮小サイズの試験体を用いる。また、1 本プラグタイプに関しては、過去の実験によりある程度の知見を得ている。今回は、鉛プラグ 1 本と複数本とでの違いを検証するため、3 本プラグタイプを設定した。これらの概略図を図 1.3.2-1 に、またその試験体一覧を表 1.3.2-2 に示す。

表 1.3.2-1 鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇に伴う特性変化に関する主要文献

番号	論文名	著者名	掲載誌
1	鉛プラグ入り積層ゴムの速度依存性と繰り返し依存性 ^{1.3.2-3)}	人見泰義他	AIJ 大会、1998.9
2	鉛プラグ型積層ゴムの圧縮面圧下における限界変形能力 ^{1.3.2-4)}	高山峯夫他	AIJ 技術報告集 No.16,2002.12
3	鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し加振実験報告 ^{1.3.2-5)}	西澤崇雄他	AIJ 大会、2004.8
4	長周期地震動を想定した LRB1000 の内部温度特性確認実験 ～地震応答波の 1/1 加振実験～ ^{1.3.2-6)}	河内山修他	AIJ 大会、2006.9
5	大振幅繰り返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究(その 1～14) ^{1.3.2-7)}	竹中康雄他	AIJ 大会、2007～2010
6	Durability of Rubber Isolators by Long-Duration Ground Motion due to Large Earthquakes ^{1.3.2-8)}	Mineo Takayama et.al	14WCEE,2008.10
7	積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究 ^{1.3.2-9)}	竹中康雄他	AIJ 構造系論文集, No.646,2009.12

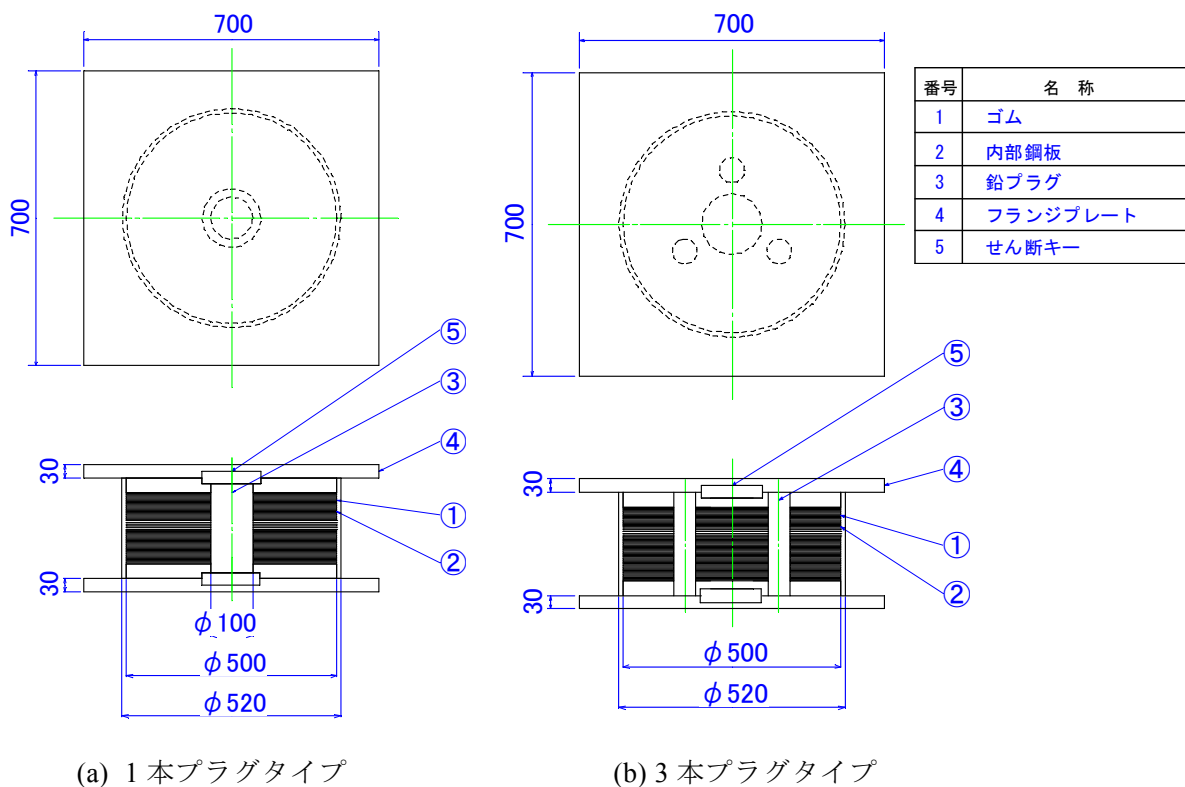


図 1.3.2-1 試験体形状

表 1.3.2-2 試験体一覧

項目	想定実機 1/1	縮小体 1/2	
		1本プラグ	3本プラグ
ゴム材料	NR G4		
外径 (mm)	1000	500	500
鉛プラグ本数	1	1	3
鉛プラグ径(mm)	200	100	57.7
ゴム層厚(mm)×層数	6.0×33	3.0×33	3.0×33
内部鋼板厚(mm)	4.4	2.2	2.2
受圧面積(mm ²)	753982	188459	188459
1次形状係数：S1	41.7	41.7	41.7
2次形状係数：S2	5.1	5.1	5.1

(4) 試験装置

本試験に用いる試験機の概要を図 1.3.2-2 および表 1.3.2-3 に示す。

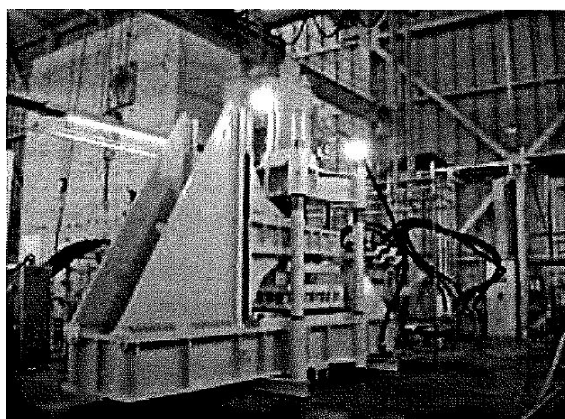


図 1.3.2-2 試験機

表 1.3.2-3 試験機加振能力

最大鉛直荷重	3 MN
最大水平荷重(動的)	±700 kN
水平ストローク	±500 mm
最大水平速度	2000 mm/s

連続加振可能な最大速度は約 300mm/s

※ただし、加振条件により最大速度が変動する。

(5) 計測項目と計測方法

1) 計測項目

計測項目は鉛直荷重、水平力、水平変位および温度とする。水平力は、試験体上部に設置したロードセルにより計測し、水平変位は試験機の上盤と加振テーブル間を計測する。温度計測は、LRB 内部（鉛プラグ、積層ゴム、フランジ）の温度を加振中および加振後について計測する。表 1.3.2-4 に 1 本プラグタイプの計測項目一覧を示し、表 1.3.2-5 に 3 本プラグタイプの計測項目一覧を示す。

表 1.3.2-4 計測項目一覧（1 本プラグ）

センサー名	計測項目
Fv	鉛直荷重
Fh	水平力
Dh	水平変位
P-1	鉛プラグ頂部
P-2	鉛プラグ1/4高さ
P-3	鉛プラグ1/2高さ
RQ-1	ゴム層1/4高さ
RQ-2	ゴム層1/4高さ被覆部
RC-1	ゴム層1/2高さ
RC-2	ゴム層1/2高さ被覆部
MT-1	フランジ（中央）
MT-2	フランジ（R60）
MT-3	フランジ（R250）
Air	雰囲気

表 1.3.2-5 計測項目一覧（3 本プラグ）

センサー名	計測項目
Fv	鉛直荷重
Fh	水平力
Dh	水平変位
P-1	鉛プラグ頂部
P-2	鉛プラグ1/4高さ
P-3	鉛プラグ1/2高さ
RQ-1	ゴム層1/4高さ①
RQ-2	ゴム層1/4高さ被覆部
RQ-3	ゴム層1/4高さ②
RC-1	ゴム層1/2高さ①
RC-2	ゴム層1/2高さ被覆部
RC-3	ゴム層1/2高さ②
MT-1	フランジ（中央）
MT-2	フランジ（R125）
MT-3	フランジ（R250）
Air	雰囲気

2) 温度計測位置

積層ゴム体内部の温度計測位置を図 1.3.2-3 (1本プラグタイプ)、図 1.3.2-4 (3本プラグタイプ) に示す。なお、試験体の上下フランジプレートと試験機取付け盤との間に断熱板を設置する。断熱板は、アルミニウムカーボネート系断熱板 (熱伝導率 0.3W/m/K 程度)、厚さは 10mm 程度のもを使用し、上下フランジと試験機との間に設置した (図 1.3.2-5)。

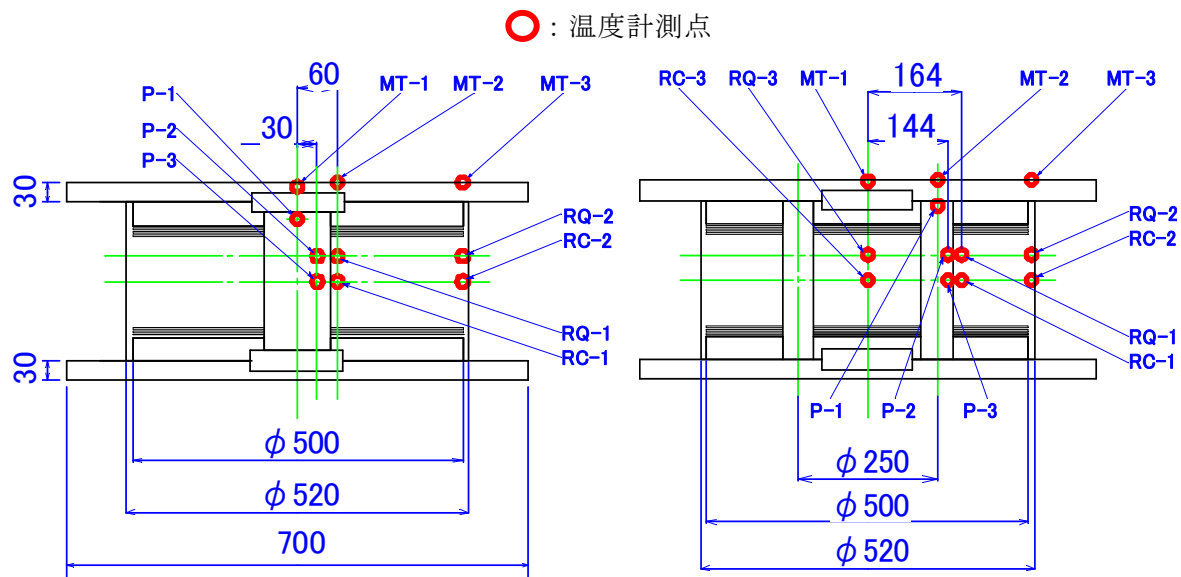


図 1.3.2-3 温度計測位置
(1本プラグタイプ)

図 1.3.2-4 温度計測位置
(3本プラグタイプ)

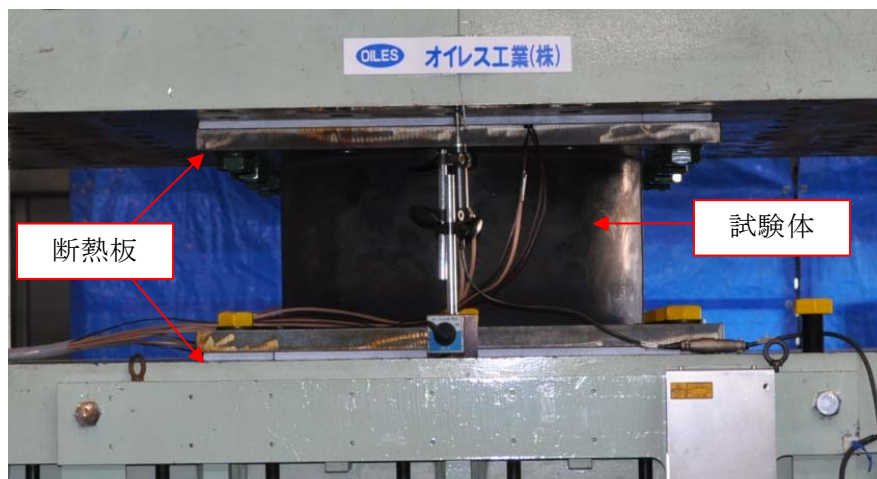


図 1.3.2-5 試験体設置状況

(6) 実験方法と実験ケース

表 1.3.2-6 に試験体番号を、表 1.3.2-7 に加振ケースの一覧を、表 1.3.2-8 に加振条件の一覧を示す。試験体は 1 本プラグタイプが 3 体、3 本プラグタイプが 1 体である。試験は正弦波加振試験（長周期加振ケース：1A、2A、3A、限界加振ケース：1B、2B、3B）と地震応答波加振（Eq.1、Eq.2）からなり、各試験の前後に基本特性試験（せん断ひずみ 100%、4 サイクル）を実施した。面圧はいずれも 15N/mm^2 とした。地震応答波は、参照する表 1.3.2-9、図 1.3.2-6、図 1.3.2-7 に示す東海-東南海地震に対する愛知県津島市の地震動（平均）およびこれを 1.5 倍に拡幅した地震動を用いて免震建築物を想定した 1 質点系地震応答解析を行い、解析結果として得られた変位応答波形とした。免震建築物条件は、想定実機（ゴム種 G4、外径 $\phi 1000\text{mm}$ 、鉛径 $\phi 200\text{mm}$ 、ゴム総厚 200mm ）が面圧 15N/mm^2 で用いられているものとし、免震周期を 5.6sec 、免震層降伏せん断力係数を 0.023 とした。図 1.3.2-8 に解析結果の荷重変形関係を、図 1.3.2-9 に変位応答波形を示す。試験体の温度計測のため、加振終了後も引き続き計測を実施した。各試験のインターバルは表 1.3.2-8 に示した値を基本とするが、試験体の温度が 25°C よりも高い場合には、試験体の温度が 25°C 以下になるのを待って加振を開始した。

表 1.3.2-6 試験体番号

試験体番号	内部構成
#1	1本プラグタイプ
#2	
#3	
#4	3本プラグタイプ

表 1.3.2-7 加振ケース

試験種類		加振周期 [s]	せん断 ひずみ [%]	最大速度 [cm/s]	サイクル数 [cycle]	時間 [s]	累積 変形 [m]
基本特性	—	40	100	1.5	4	41.5	1.58
長周期	1A	4	50	8.0	125	500	24.75
	2A	4	100	15.9	60	240	23.76
	3A	4	200	31.9	30	120	23.76
限界	1B	4	50	8.0	250	1000	49.5
	2B	4	100	15.9	120	480	47.52
	3B	4	200	31.9	60	240	47.52
地震応答波	Eq.1	—	136	—	—	300	—
	Eq.2	—	287	—	—	300	—

表 1.3.2-8 加振条件

試験体 番号	加振 順	試験種類	せん断 ひずみ [%]	サイクル数 [cycle]	加振後 インターバル [min.] 以上	
#1	1	—	基本特性	100	4	10
	2	1A	長周期	50	125	30
	3	—	基本特性	100	4	10
	4	Eq.1	地震応答波	136	—	30
	5	—	基本特性	100	4	10
	6	1B	限界	50	250	30
	7'	—	基本特性	100	4	2 days
	7	—	基本特性	100	4	—
#2	1	—	基本特性	100	4	10
	2	2A	長周期	100	60	30
	3	—	基本特性	100	4	10
	4	Eq.2	地震応答波	287	—	30
	5	—	基本特性	100	4	10
	6	2B	限界	100	120	30
	7'	—	基本特性	100	4	2 days
	7	—	基本特性	100	4	—
#3	1	—	基本特性	100	4	10
	2	3A	長周期	200	30	30
	3	—	基本特性	100	4	10
	4	3B	限界	200	60	30
	5'	—	基本特性	100	4	2 days
	5	—	基本特性	100	4	—
#4	1	—	基本特性	100	4	10
	2	1B	限界	50	250	30
	3	—	基本特性	100	4	10
	4	Eq.2	地震応答波	287	—	30
	5	—	基本特性	100	4	10
	6	3B	限界	200	60	30
	7'	—	基本特性	100	4	2 days
	7	—	基本特性	100	4	—

表 1.3.2-9 加振応答波作成における入力地震動

呼称	対象地震・ 評価地点	加速度 (cm/s^2)	速度 (cm/s)
Eq1:T-TN-AIC003_AV	東海・東南海地震 津島 平均	221.1	31.0
Eq2 : T-TN-AIC003_AVx1.5	同上 x 1.5	331.7	46.5

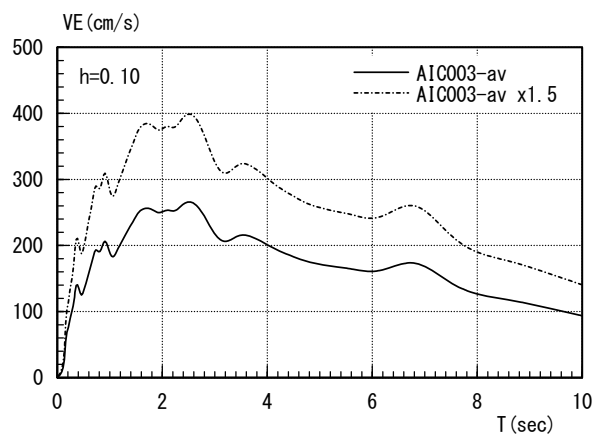


図 1.3.2-6 入力地震動 VE スペクトル

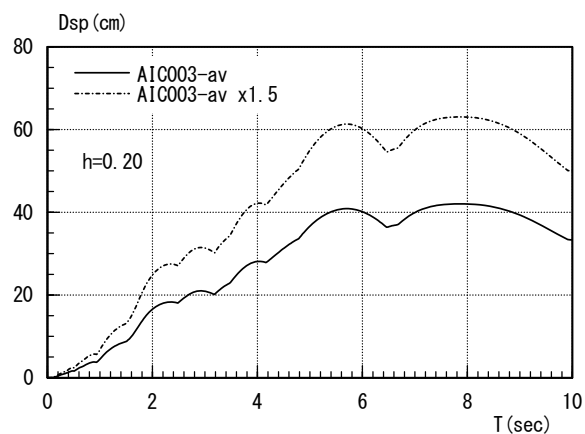


図 1.3.2-7 入力地震動変位応答スペクトル
($h=0.20$)

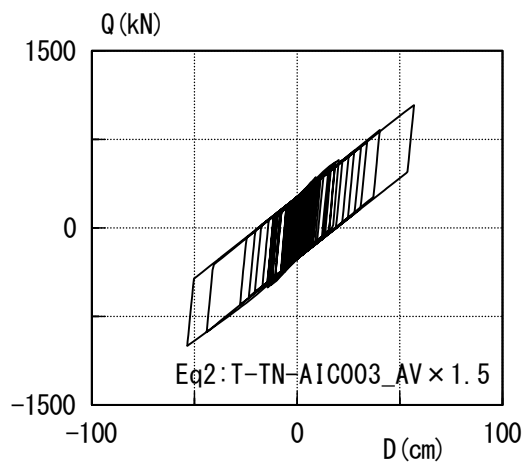
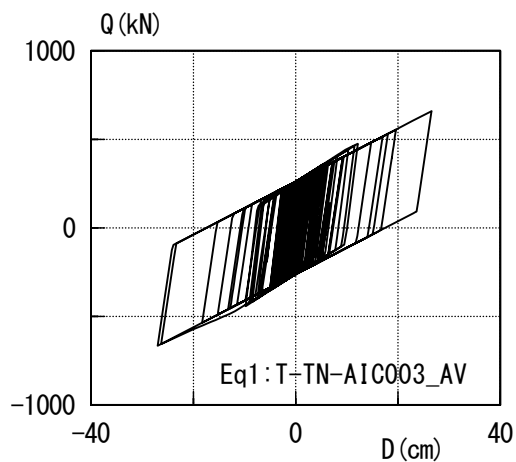


図 1.3.2-8 応答解析結果荷重変形関係

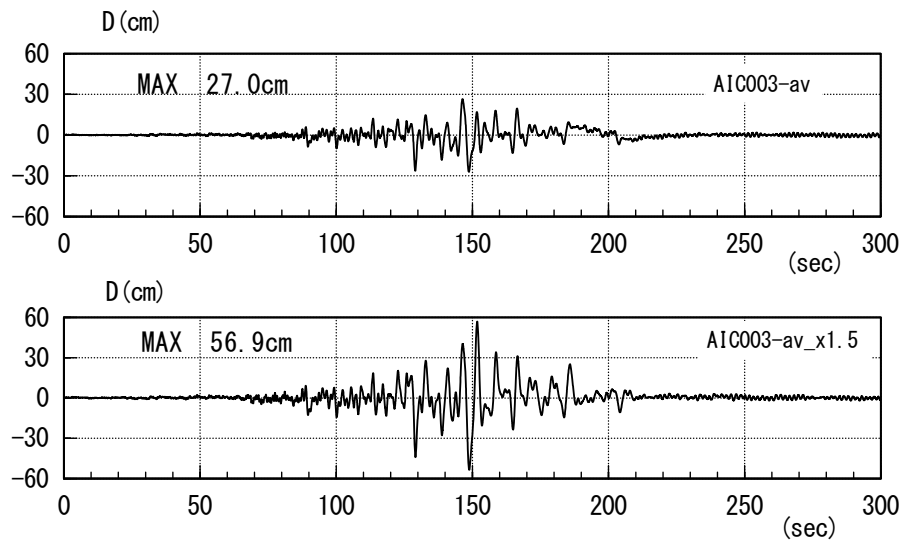


図 1.3.2-9 地震応答変位波形(これを縮小率 1/2 を乗じて実験用変位加振波形とする)

1.3.2.2 実験結果

(1) 特性値 (Qd、Kd) の評価法

荷重変形関係において、正負の切片荷重の絶対値平均を、その荷重変形関係における切片荷重 Qd とする。

$$Qd = \frac{|Qd_u| + |Qd_d|}{2} \quad (1.3.2-1)$$

また、荷重変形関係において、各加力試験における変位が、せん断ひずみ振幅 $\pm \gamma_{max}$ の 1/2 ひずみ時の点を結ぶ直線の傾きをその荷重変形関係における降伏後剛性とし、荷重変形関係の上側と下側の降伏後剛性 Kd_u 、 Kd_d の平均を、その荷重変形関係における降伏後剛性 Kd とする (図 1.3.2-10)。また、Qd、Kd の繰り返しに伴う変化は、3 サイクル目の値で除した変化率で評価する。

$$Kd = \frac{Kd_u + Kd_d}{2} \quad (1.3.2-2)$$

また、各サイクルの荷重変形関係の描く面積を履歴吸収エネルギー ΔW とし、各加振ケースの履歴面積の累積値を累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ とする。

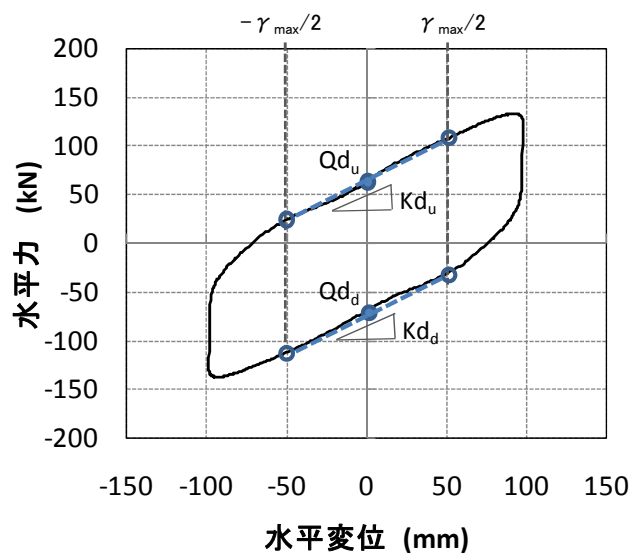


図 1.3.2-10 Qd、Kd の定義

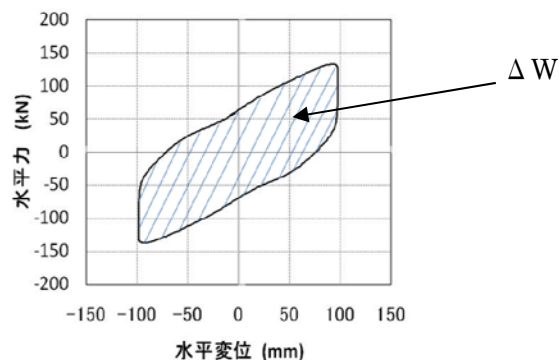


図 1.3.2-11 履歴吸収エネルギー

(2) 基本特性試験

図 1.3.2-12 に、試験体#1～#4 について、初めに行なった基本特性試験の荷重変形関係を重ねて示す。すべての荷重変形関係は重なっており、ほとんど同一であることが分かる。また、3 サイクル目の Qd は 66.8～67.4 kN で設計値に対して+2～+3%、Kd は 0.78～0.89 N/mm で設計値に対して-1.6～+12%であり、試験体#1～#4 すべてについて検収条件を満たしている。

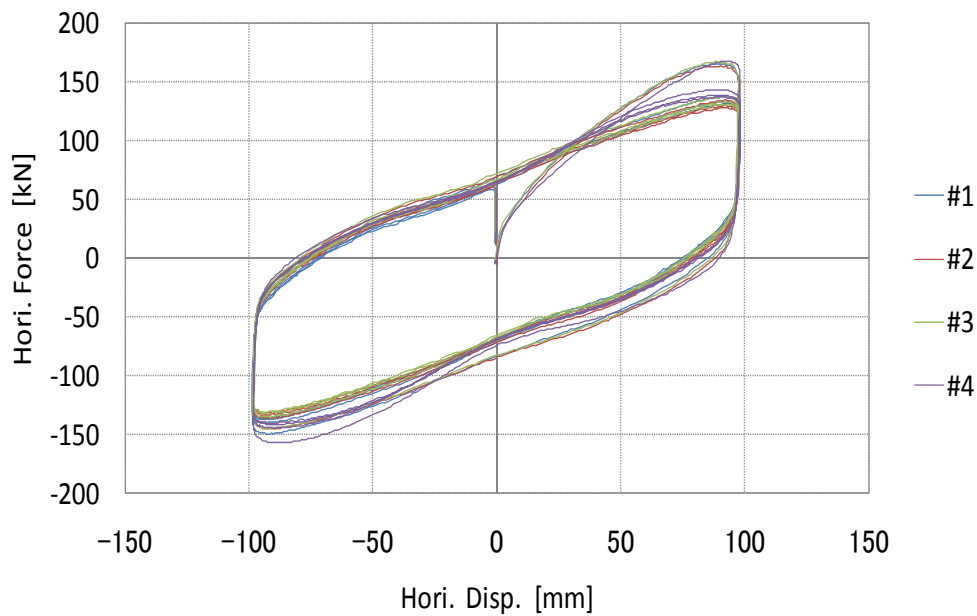


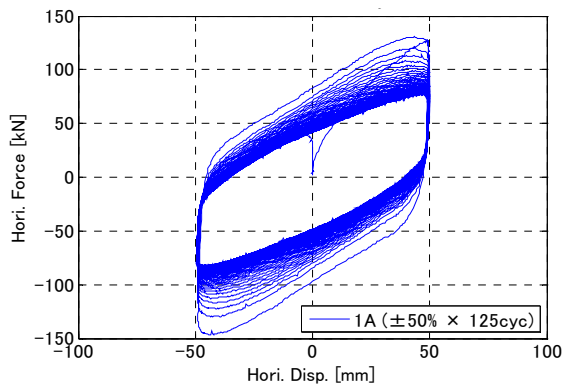
図 1.3.2-12 基本特性試験（#1、#2、#3、#4）

(3) 正弦波加振試験

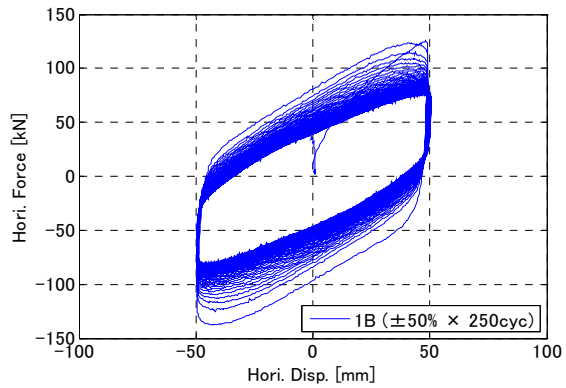
1) 荷重変形関係

1 本プラグタイプ試験体の正弦波加振試験の結果について、図 1.3.2-13 (a-1)~(c-1)に長周期加振ケースの荷重変形関係を、図 1.3.2-13 (a-2)~(c-2)に限界加振ケースの荷重変形関係を示す。

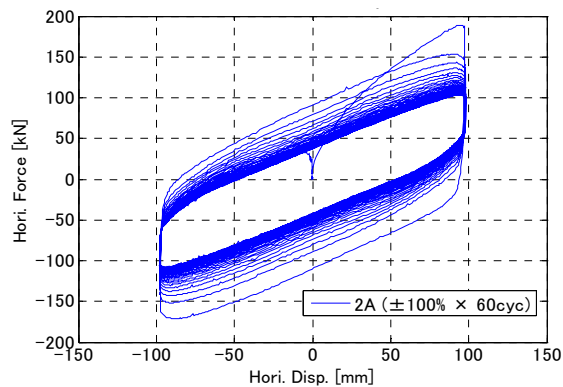
いずれの振幅条件についても荷重変形関係は安定しており、荷重変形関係の面積は徐々に小さくなっている。限界加振ケースの加振回数は、長周期加振ケースの2倍であるが、両者の荷重変形関係は概ね同様であり、加振終了直前の荷重変形関係もほぼ同程度になっている。つまり、長周期の加振回数で履歴ループは安定し、それ以上の繰返し加振に対して荷重変形関係の変化は小さいことが分かる。



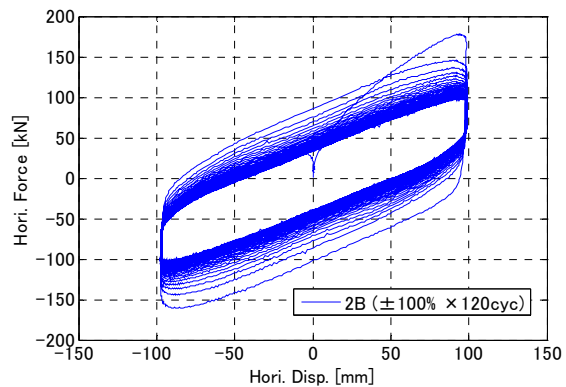
(a-1) 1A (±50%×125cyc)



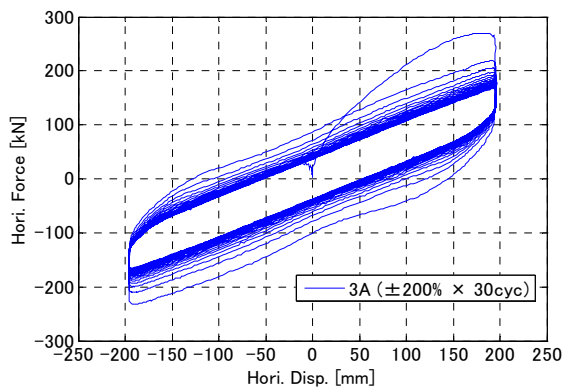
(a-2) 1B (±50%×250cyc)



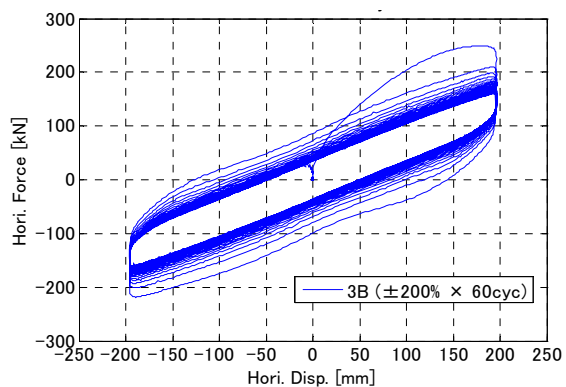
(b-1) 2A (±100%×60cyc)



(b-2) 2B (±100%×120cyc)



(c-1) 3A (±200%×30cyc)

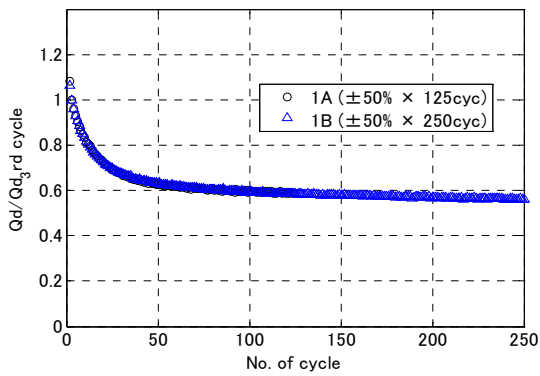


(c-2) 3B (±200%×60cyc)

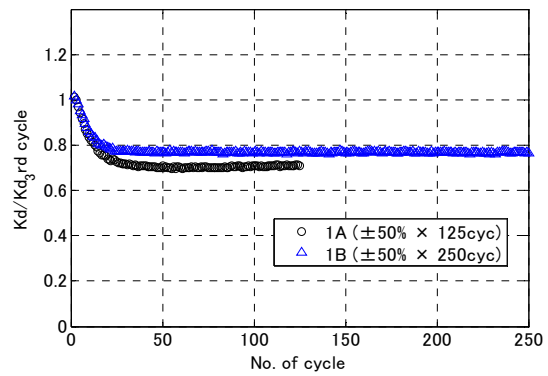
図 1.3.2-13 正弦波加振試験の荷重変形関係

2) Qd、Kd の変化率

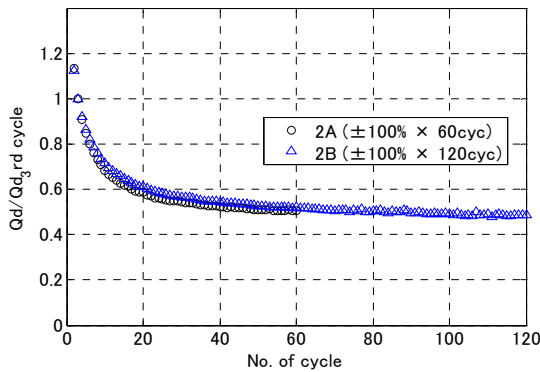
1本プラグタイプ試験体の正弦波加振試験の結果について、図 1.3.2-14 に降伏荷重 Qd および降伏後剛性 Kd の3サイクル目の値を基準にした変化率を示す。これより、Qd は、加振開始後 20 サイクル目程度まで急激に低下するが、それ以降の低下は緩やかになっている。この傾向はいずれのせん断ひずみについても同様である。また、Qd の変化率は、せん断ひずみが大きいほど大きくなる傾向にあり、せん断ひずみ 100% と 200% では、3 サイクル目の値に対して 50% 程度まで低下している。一方、Kd は、せん断ひずみ 50% については、加振開始後 20 サイクル目程度まで急激に低下し、その後一定値となっているが、せん断ひずみ 100% 以上については、加振初期から低下は見られずほとんど変化はない。



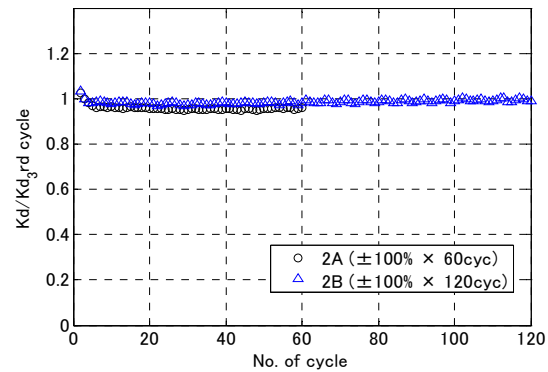
(a-1) Qd 変化率 (#1 試験体)



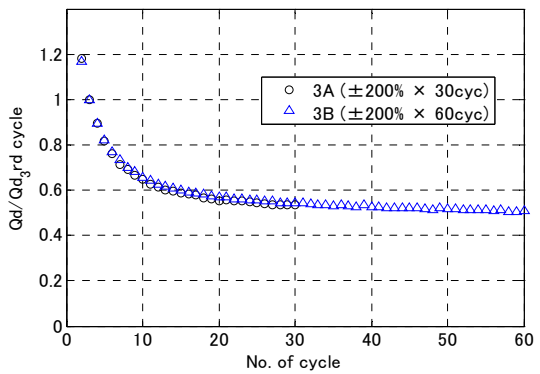
(a-2) Kd 変化率 (#1 試験体)



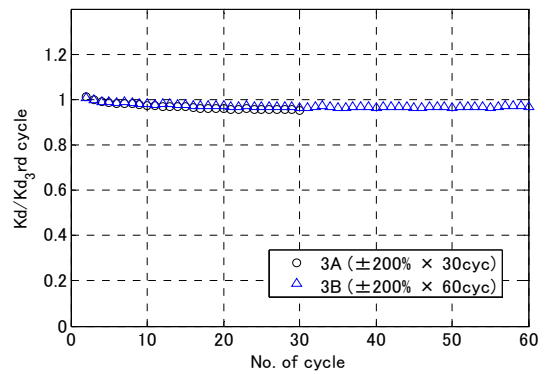
(b-1) Qd 変化率 (#2 試験体)



(b-2) Kd 変化率 (#2 試験体)



(c-1) Qd 変化率 (#3 試験体)



(c-2) Kd 変化率 (#3 試験体)

図 1.3.2-14 Qd、Kd の変化率

3) 試験体の温度履歴

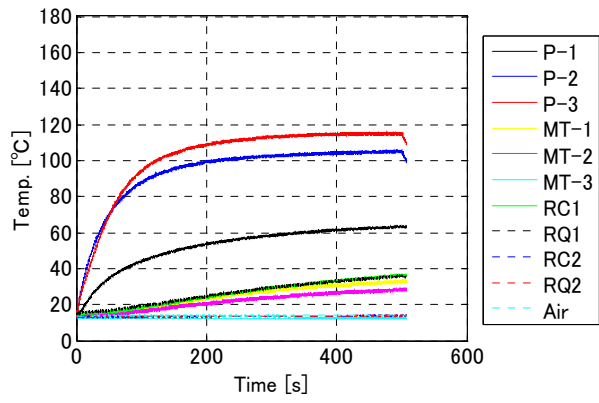
図 1.3.2-15 に、1 本プラグタイプ試験体の正弦波加振中の温度計測結果を示す。加振中に熱電対センサーの断線、およびセンサーの位置ズレ・抜けが生じたものについては、グラフ中に注記した。

鉛プラグ温度 P-3、P-2 は加振直後に急上昇し、その後上昇が緩やかになり一定温度に収束している。表 1.3.2-10 に鉛プラグの最大温度を示す。鉛プラグの温度は、 $P-3 > P-2 > P-1$ の順であり、P-3 の温度が最も高い。鉛プラグの発熱はプラグ中央が最も高く、鉛プラグの上下に熱が伝達していることが分かる。2A (長周期ケース) と 2B (限界ケース) の鉛プラグ温度 P-3 を比較すると、共に約 160°C に収束している。これより、鉛プラグの温度は、加振回数が多くなっても収束傾向にあると考えられる。

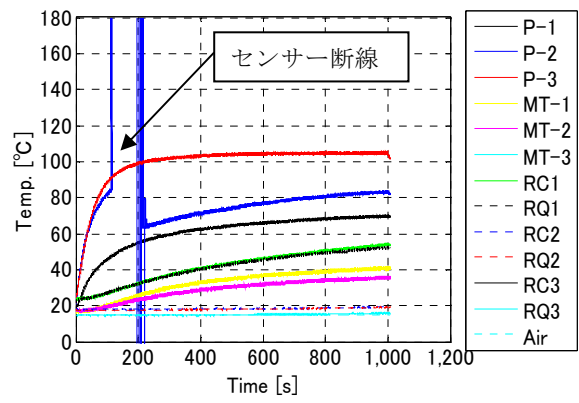
ゴム層の温度については、鉛プラグに近い RC-1 と RQ-1 の温度は緩やかに上昇するが、試験体外周部に位置する RC-2 と RQ-2 では温度上昇は見られず、鉛プラグの熱は、外周部へはほとんど伝達していない。

図 1.3.2-16 に加振後に試験体の温度が 25°C 以下になるまでの温度計測結果を示す。加振中に熱電対センサーの断線、およびセンサーの位置ズレ・抜けが生じたものについては、グラフ中に注記した。加振後の鉛プラグの温度は、すべての加力ケースにおいて、加振停止直後より急激に低下し、10 分程度で約 40°C まで低下する。そして、加振停止後 2 時間前後で加振初期温度にまで低下する。ゴム内部 RC、RQ、およびフランジ部 MT の温度は、鉛プラグより遅れて上昇し始めており、鉛プラグで発生した熱がゴム部やフランジに伝導していると考えられる。

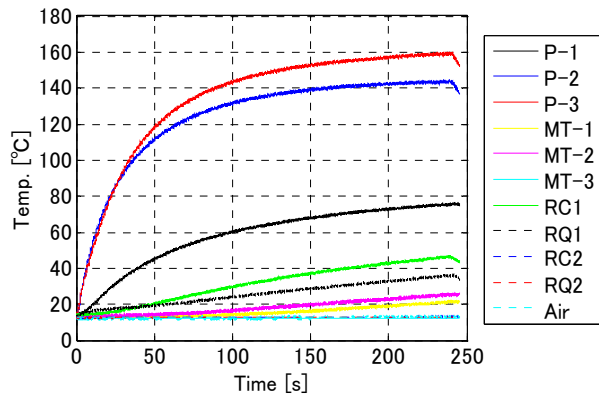
表 1.3.2-10 に、各試験ケースの累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ 、試験体の最大温度 (P-3) と加振停止から 25°C 到達までの所要時間を示す。これより、長周期加振ケースでは 30 分～43 分、限界ケースでは 144 分～167 分の時間を要している。2A (長周期加振ケース) と 2B (限界加振ケース) の最大温度は同程度であるが、試験体温度の 25°C 到達所要時間は 2B の方は 2A よりも約 5.5 倍長くなっている。これは 2B の方が 2A よりも $\Sigma \Delta W$ が約 1.8 倍と大きいため、鉛プラグの発熱時間が長く、ゴム層や上下フランジ部に熱伝導が進み、ゴム体が全体的に温度上昇しており、その分温度低下に時間を要したと考えられる。



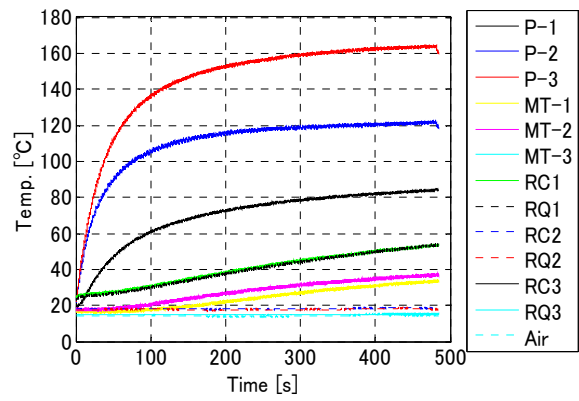
(a-1) 1A ($\pm 50\% \times 125\text{cyc}$)



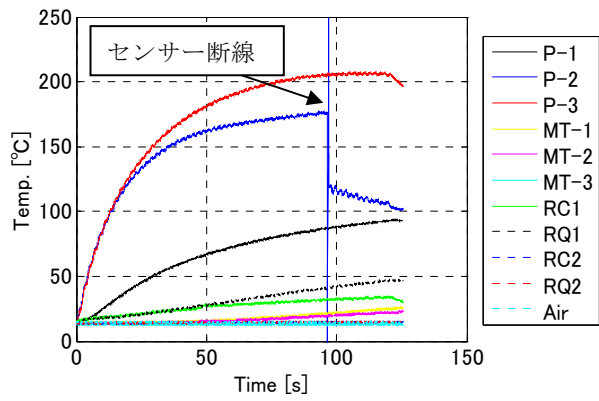
(a-2) 1B ($\pm 50\% \times 250\text{cyc}$)



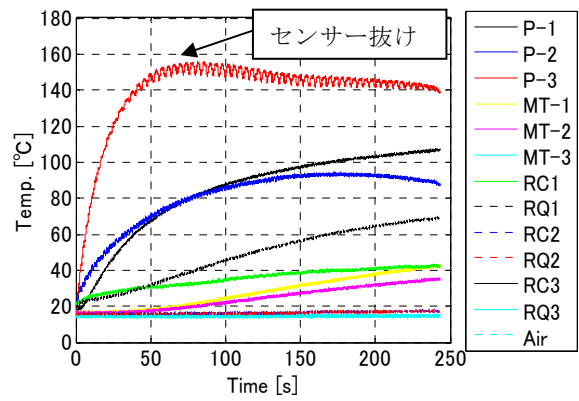
(b-1) 2A ($\pm 100\% \times 60\text{cyc}$)



(b-2) 2B ($\pm 100\% \times 120\text{cyc}$)



(c-1) 3A ($\pm 200\% \times 30\text{cyc}$)



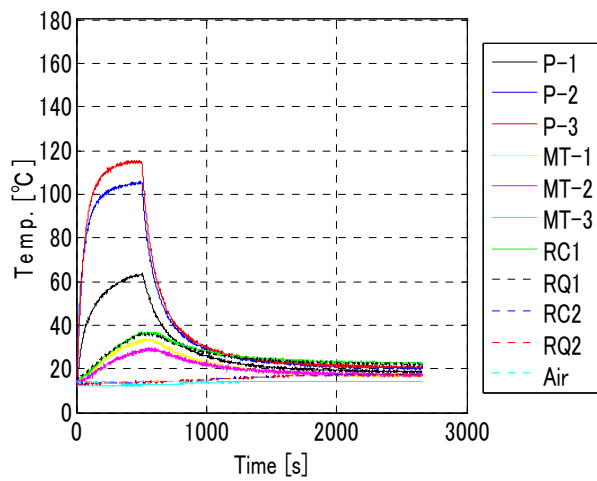
(c-2) 3B ($\pm 200\% \times 60\text{cyc}$)

図 1.3.2-15 加振中の温度履歴

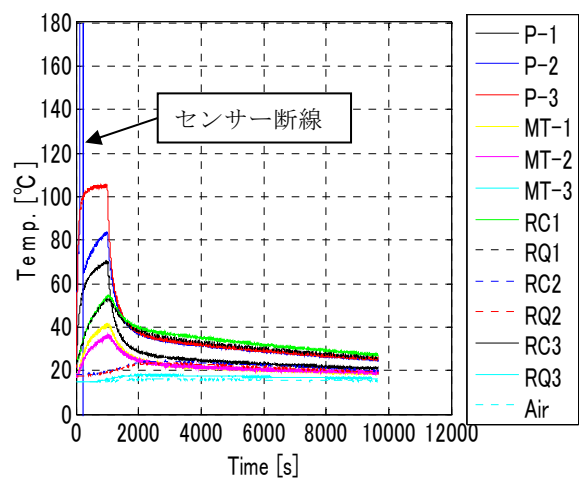
表 1.3.2-10 最大温度と温度低下所要時間

加振ケース	累積履歴吸収エネルギー : $\Sigma \Delta W$ (kN・mm)	最大温度 (P-3) (°C)	加振停止から 25°C到達 までの所要時間 (s)
1A	1.1216×10^6	115	2610 (43 min.)
1B	2.1162×10^6	105	8661 (144 min.)
2A	1.0642×10^6	160	1807 (30 min.)
2B	1.9033×10^6	164	9997 (167 min.)
3A	1.0841×10^6	206	1871 (31 min.)
3B	1.9097×10^6	(155) *	9208 (153 min.)

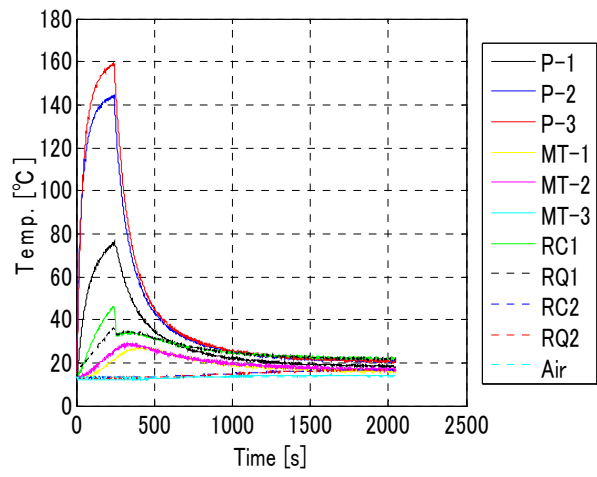
* : センサー抜けのため、参考値とする。



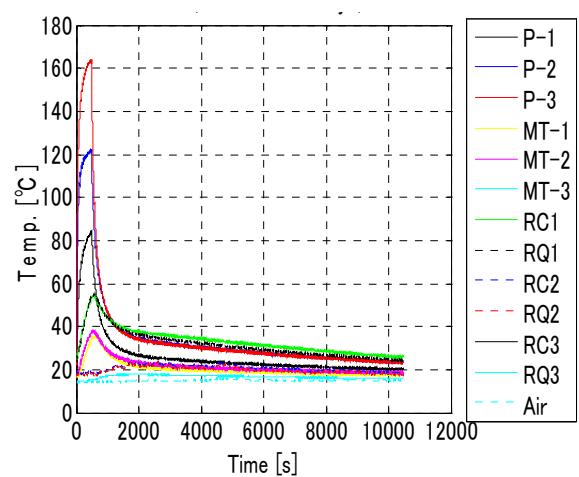
(a-1) 1A ($\pm 50\% \times 125\text{cyc}$)



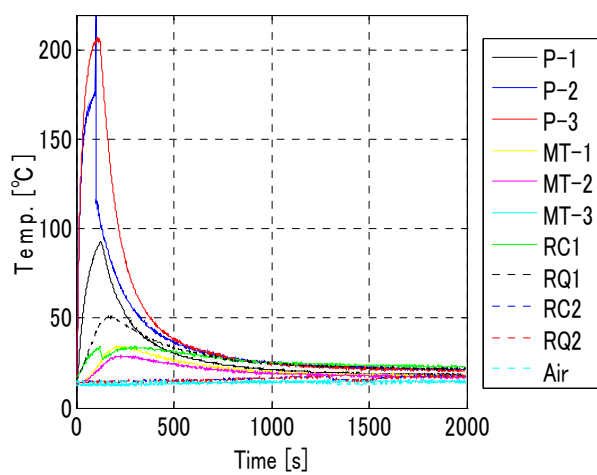
(a-2) 1B ($\pm 50\% \times 250\text{cyc}$)



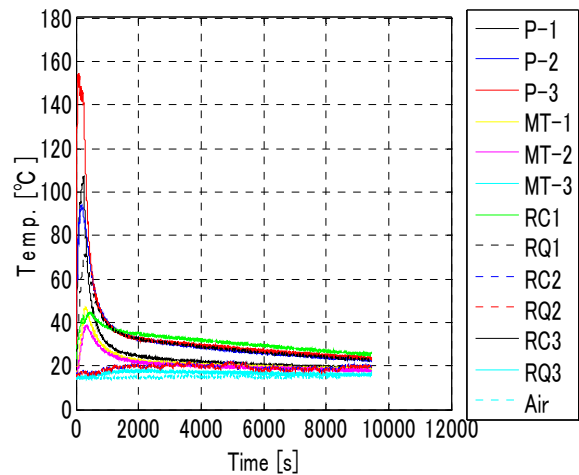
(b-1) 2A ($\pm 100\% \times 60\text{cyc}$)



(b-2) 2B ($\pm 100\% \times 120\text{cyc}$)



(c-1) 3A ($\pm 200\% \times 30\text{cyc}$)



(c-2) 3B ($\pm 200\% \times 60\text{cyc}$)

図 1.3.2-16 加振中と加振後の温度履歴

(4) 地震応答波加振試験

1) 荷重変形関係

図 1.3.2-17 に 1 本プラグタイプ試験体の荷重変形関係を示す。いずれも安定した荷重変形関係を描いている。

2) 累積吸収エネルギー

図 1.3.2-18 に 1 本プラグタイプ試験体の累積履歴吸収エネルギーを示す。最大の累積履歴吸収エネルギーは、Eq.1 が 3.6703×10^5 kN・mm、Eq.2 が 5.6962×10^5 kN・mm であった。

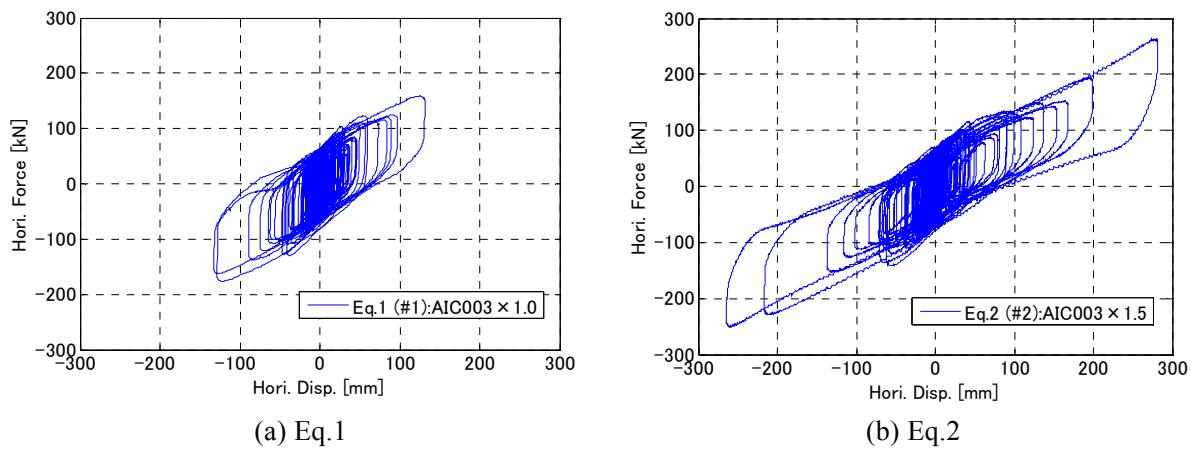


図 1.3.2-17 荷重変形関係（地震応答波加振）

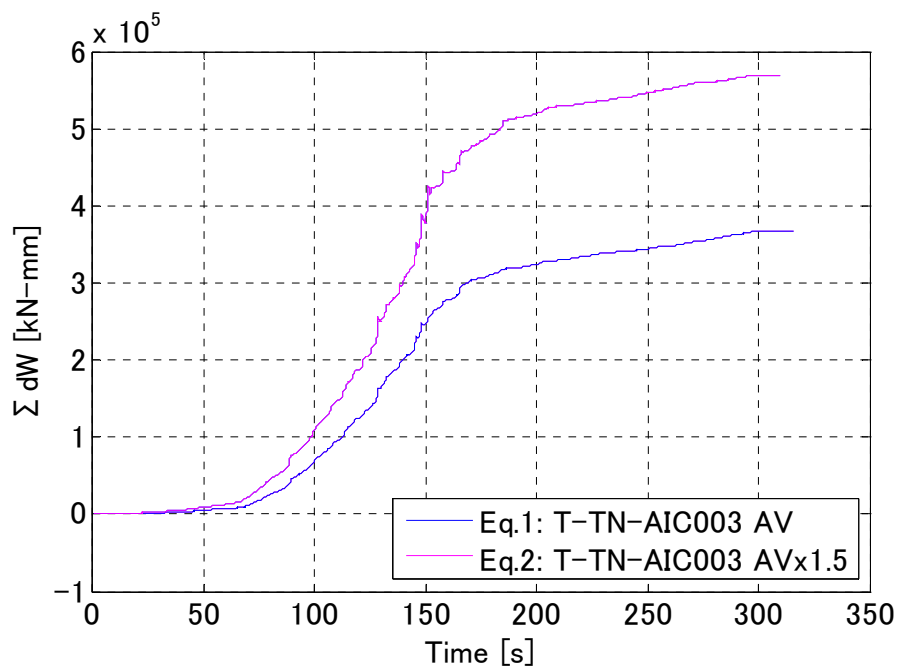


図 1.3.2-18 累積履歴吸収エネルギー

3) 試験体の温度履歴

図 1.3.2-19 に 1 本プラグタイプ試験体の試験体温度履歴を示す。加振開始から 80 秒付近から加振変位の増加に伴い鉛プラグの温度が上昇し、150 秒付近の最大加振変位時に鉛プラグの温度が最大となる。その後も加振は続くが、鉛プラグの温度は減少し、加振終了時には約 55°C (Eq.1 加振時) まで低下する。この温度の増加と減少の傾向は Eq.1 と Eq.2 と同じである。

図 1.3.2-20 に 1 本プラグタイプ試験体の加振中と加振後の試験体温度履歴を示す。Eq.2 の方が加振による鉛プラグとゴム部の温度が高いため、加振停止後の試験体温度 25°C 到達までの所要時間が長くなっている。

表 1.3.2-11 に、各ケースの累積履歴吸収エネルギー、最大温度 (P-3) 及び加振停止から 25°C 到達までの所要時間を示す。Eq.2 の $\Sigma \Delta W$ は Eq.1 の約 1.55 倍であり、Eq.2 の上昇温度は Eq.1 の約 1.47 倍であった。また、25°C 到達までの所要時間の差は 10 分程度である。

表 1.3.2-11 最大温度と加振停止から 25°C 到達までの所要時間

加振ケース	累積履歴吸収エネルギー : $\Sigma \Delta W$ (kN・mm)	最大温度 (P-3) (°C)	上昇温度* ΔT (°C)	加振停止から 25°C 到達までの 所要時間 (s)
Eq.1	3.6703×10^5	99	約 79	1949 (32 min.)
Eq.2	5.6962×10^5	136	約 116	2446 (41 min.)

* : 上昇温度 : $\Delta T = (\text{最大温度}) - (\text{加振開始時の温度})$

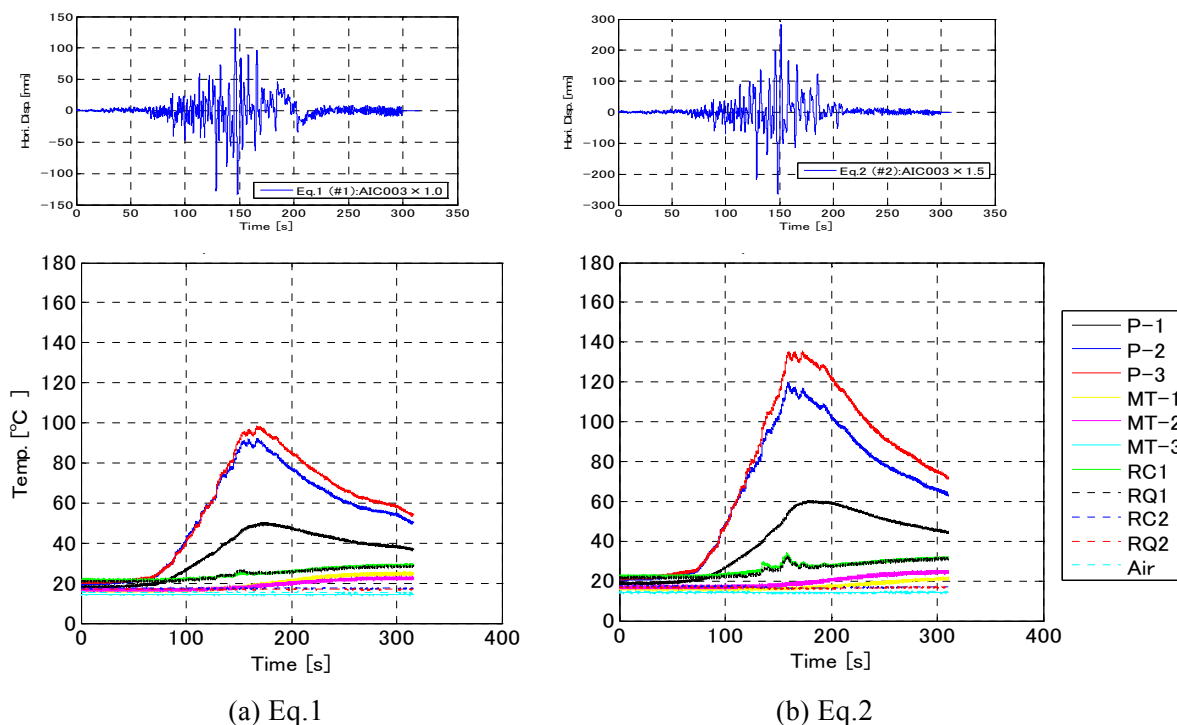
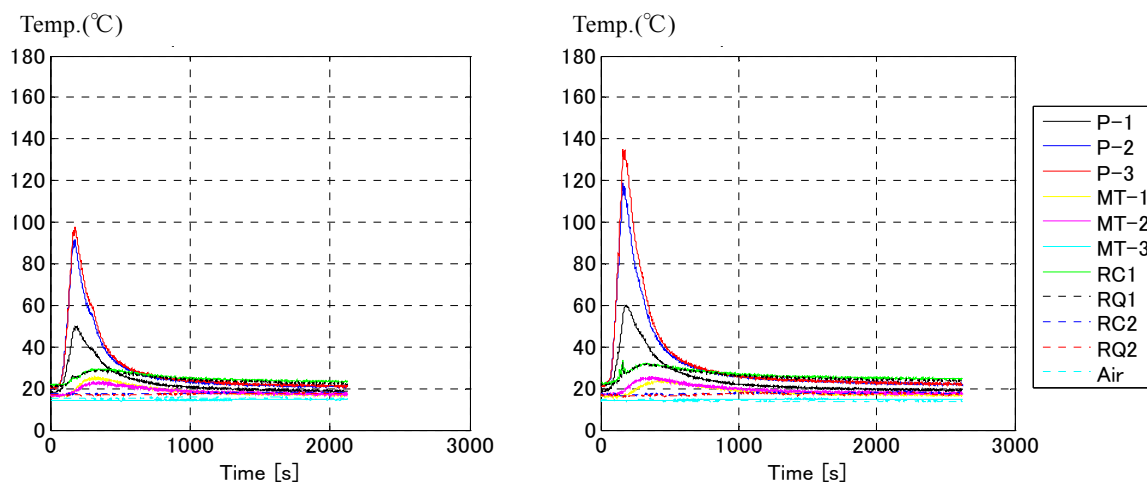


図 1.3.2-19 加振中の温度履歴



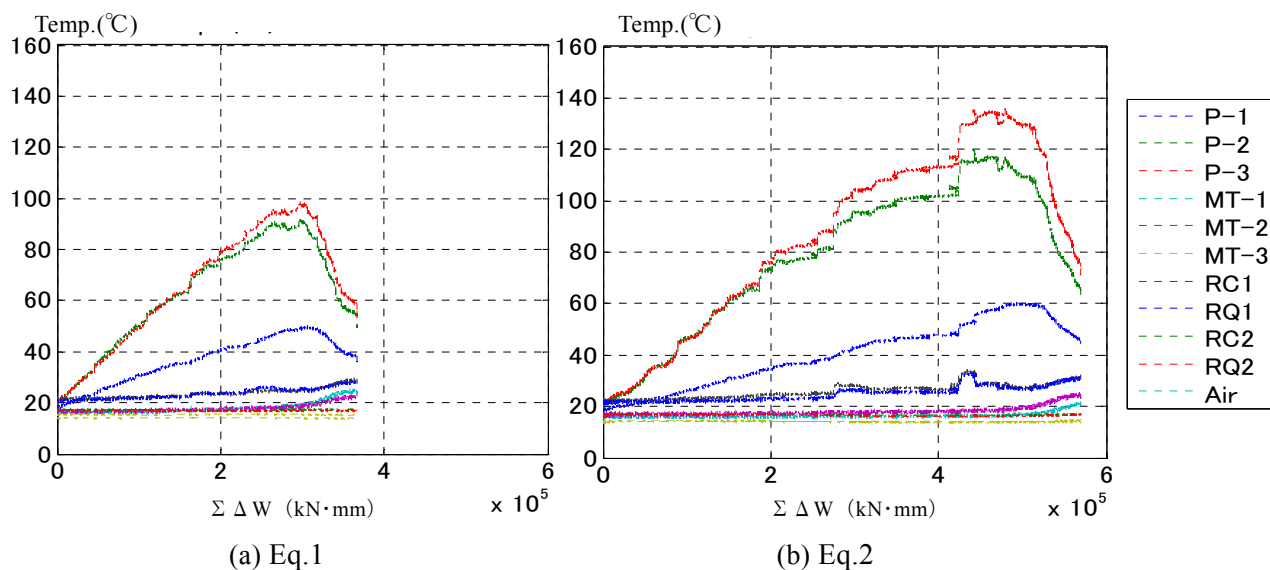
(a) Eq.1

(b) Eq.2

図 1.3.2-20 加振中と加振後の温度履歴

4) 累積履歴吸収エネルギーと温度

図 1.3.2-21 に累積履歴吸収エネルギーと温度の関係を示す。Eq.1 と Eq.2 の温度増加と減少の傾向は概ね同一である。また、Eq.1 と Eq.2 の $\Sigma \Delta W$ に対する鉛プラグ温度 (P-3、P-2) の傾きは、 $\Sigma \Delta W$ が 200000 kN・mm 以下の範囲において、ほぼ同じである。



(a) Eq.1

(b) Eq.2

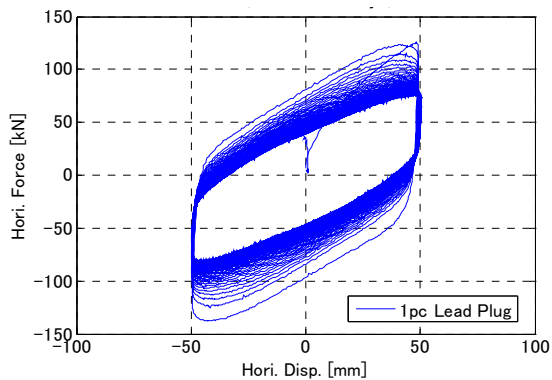
図 1.3.2-21 累積履歴エネルギーと温度 : Eq.1 (#1) と Eq.2 (#2)

(5) 1本プラグと3本プラグの比較

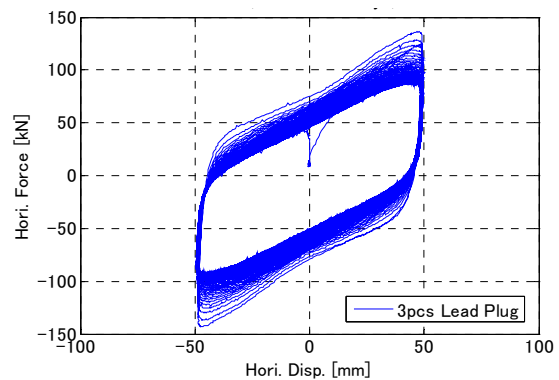
1) 正弦波加振試験

a) 荷重変形関係

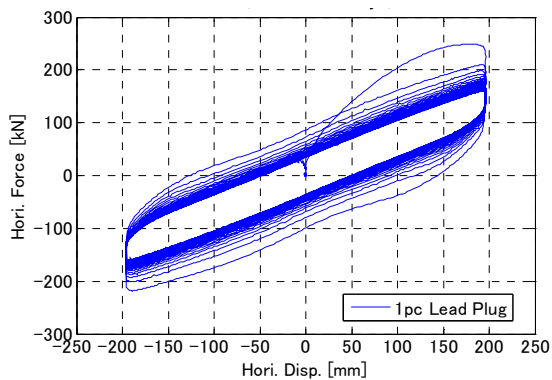
図 1.3.2-22 に正弦波加振（1B： $\pm 50\% \times 250\text{cycle}$ 、3B： $200\% \times 60\text{cycle}$ ）における1本プラグタイプ試験体(#1、#3)と3本プラグタイプ試験体(#4)の荷重変形関係を示す。いずれの加振ケースについても安定した荷重変形関係を描いている。せん断ひずみ200%については、1本プラグタイプおよび3本プラグタイプ共に同様な荷重変形関係となっている。一方、せん断ひずみ50%加振の荷重変形関係については、1本プラグタイプはやや丸みのある矩形であるが、3本プラグタイプは1本タイプに比べ角張った矩形である。



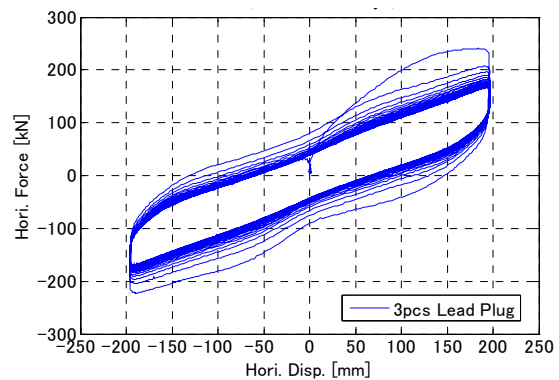
(a-1) 1本プラグ($\pm 50\% \times 250\text{cyc}$), #1



(a-2) 3本プラグ($\pm 50\% \times 250\text{cyc}$), #4



(b-1) 1本プラグ($\pm 200\% \times 60\text{cyc}$), #3



(b-2) 3本プラグ ($\pm 200\% \times 60\text{cyc}$), #4

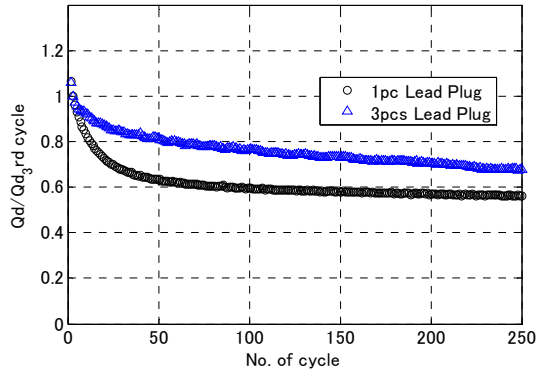
図 1.3.2-22 荷重変形関係

b) Qd、Kd の変化率

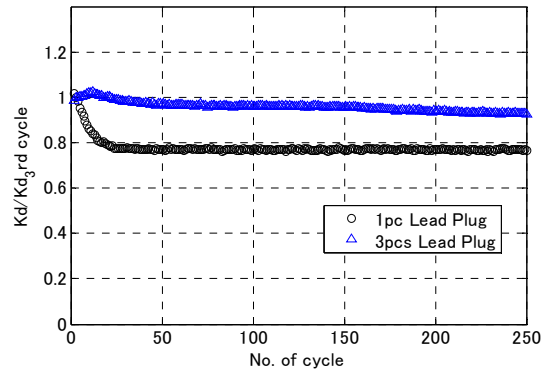
図 1.3.2-23 に、1 本プラグタイプ試験体 (#1、#3) と 3 本プラグタイプ試験体 (#4) の正弦波加振 (1B : $\pm 50\% \times 250\text{cyc}$ 、3B : $200\% \times 60\text{cycle}$) について、3 サイクル目の値を基準にした降伏荷重 Qd および降伏後剛性 Kd の変化率を示す。

せん断ひずみ 50% の Qd 変化率については (a-1)、1 本プラグタイプでは 50 サイクル目まで急激に低下し、それ以降は 0.6 に収束しているのに対し、3 本プラグタイプでは加振開始から緩やかに低下し、加振終了時には 0.7 となった。せん断ひずみ 200% の Qd 変化率については (b-1)、10 サイクル目までは両者は一致しているが、1 本プラグタイプはそれ以降も緩やかに減少し、3 本プラグはそれ以降、繰り返し加振してもほとんど低下しない。すなわち、3 本プラグの方が 1 本プラグよりも Qd の低下が小さいことが分かる。

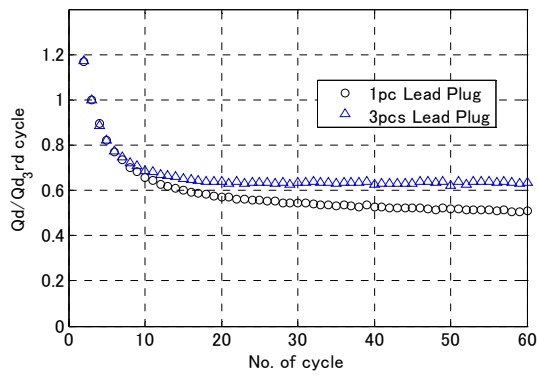
せん断ひずみ 50% の Kd 変化率について (a-2)、1 本プラグタイプでは 25 サイクル目まで急激に減少し、それ以降は約 0.75 で一定となるが、3 本プラグタイプでは急激な低下は見られず、繰り返しの伴う低下は緩やかであり、加振終了時には約 0.95 となった。これについては、鉛プラグの配置位置に因るところが大きいと考えられる。3 本プラグタイプ積層ゴムの場合、積層ゴム中心部に鉛プラグが配置されていないため、比較的小さいせん断変形時にも安定した復元力を得られるのではないかと思われる。また、前章で見られた荷重変形関係の相違は、この現象のためであると考えられる。一方、せん断ひずみ 200% の Kd 変化率 (b-2) の傾向は、プラグタイプによらずほぼ同一であり、加振開始より非常に緩やかに減少しているが、その変化率は小さく、ほとんど変化しない。



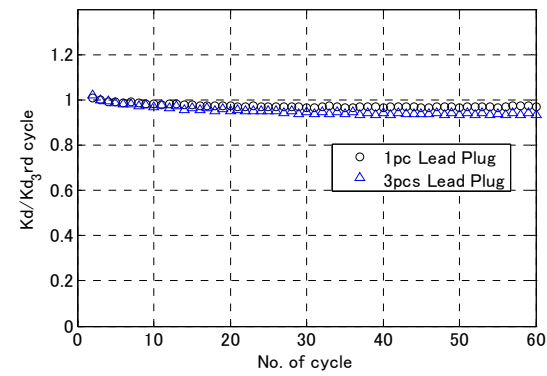
(a-1) Qd 変化率 ($\pm 50\% \times 250\text{cyc}$)



(a-2) Kd 変化率 ($\pm 50\% \times 250\text{cyc}$)



(b-1) Qd 変化率 ($\pm 200\% \times 60\text{cyc}$)



(b-2) Kd 変化率 ($\pm 200\% \times 60\text{cyc}$)

図 1.3.2-23 Qd、Kd の変化率と加振回数の関係

c) 累積履歴吸収エネルギー

図 1.3.2-24、図 1.3.2-25 に正弦波加振における累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ と Qd 変化率および Kd 変化率の関係を示す。Qd 変化率は、3 本プラグタイプ試験体（試験体#4）の 1B（せん断ひずみ 50%）を除き、累積エネルギーが 500000 kN・mm 以降で減少傾向に差があるものの、概ね一つの曲線で代表することができる。また、Kd の変化率については、1 本プラグタイプ試験体（試験体#1）の 1B（せん断ひずみ 50%）を除けば、いずれの加振ケースもほぼ一つの直線となっている。

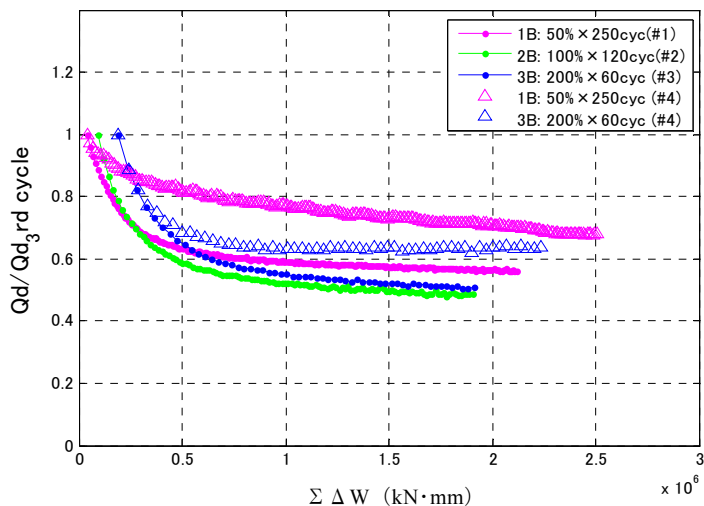


図 1.3.2-24 累積履歴吸収エネルギーと Qd 変化率

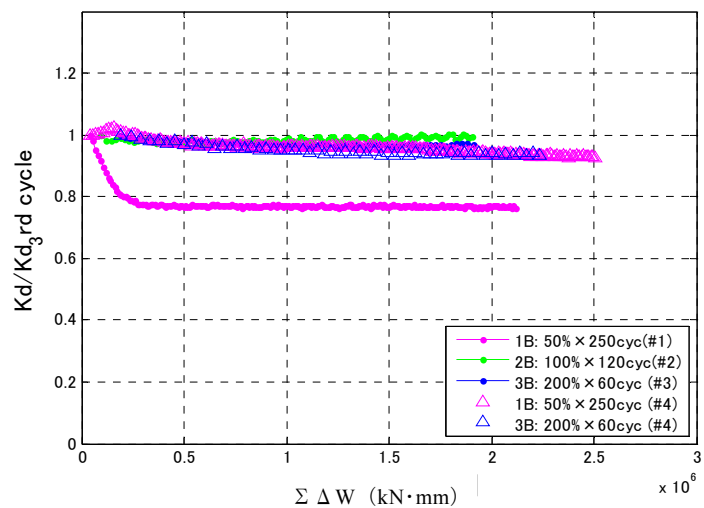
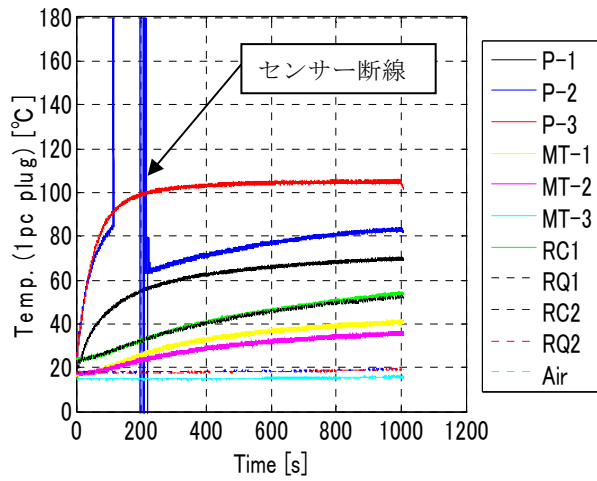


図 1.3.2-25 累積履歴吸収エネルギーと Kd 変化率

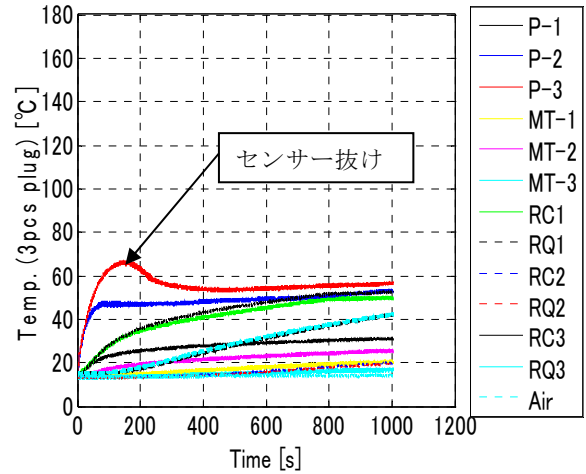
d) 試験体の温度履歴

図 1.3.2-26 に、1 本プラグタイプ試験体(#3)と 3 本プラグタイプ試験体(#4)の正弦波加振中の温度計測結果を示す。加振中に熱電対センサーの断線、およびセンサーの位置ズレ・抜けが生じたものについては、グラフ中に注記した。鉛プラグ部のセンサーの抜けが多いため定性的、定量的な評価が難しいが、位置ズレが小さく安定した計測点の P-1 についてみると、3 本プラグの方が 1 本プラグよりも温度が低く、その温度上昇傾向も緩やかである。また、3 本プラグの方が、積層ゴム部全体の温度が同時に上昇する傾向がある。

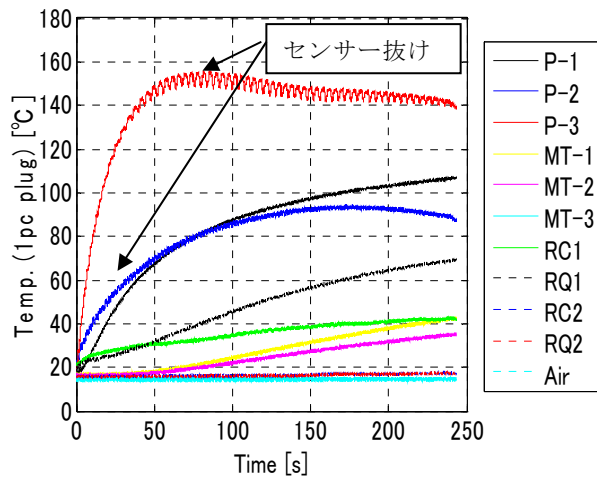
図 1.3.2-27 に、1 本プラグタイプ試験体(#1、#3)と 3 本プラグタイプ試験体(#4)の正弦波加振中と加振後の温度計測結果を示す。表 1.3.2-12 に、累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ 、鉛プラグの温度 (P-3) 及び加振停止から 25°C 到達までの所要時間を示す。1B (せん断ひずみ 50%) については、3 本プラグタイプの $\Sigma \Delta W$ は 1 本プラグタイプの約 1.2 倍であるが、25°C 到達までの所要時間は 3 本プラグタイプの方が 1 本プラグタイプよりも約 20 分早い。また、3B (せん断ひずみ 200%) についても同様に、3 本プラグタイプの $\Sigma \Delta W$ は 1 本プラグタイプの約 1.2 倍であるが、25°C 到達までの所要時間は 3 本プラグタイプの方が 1 本プラグタイプよりも約 40 分早い。3 本プラグタイプの方が 1 本プラグタイプよりも温度上昇が小さく、降伏荷重の低下も小さいと推察される。



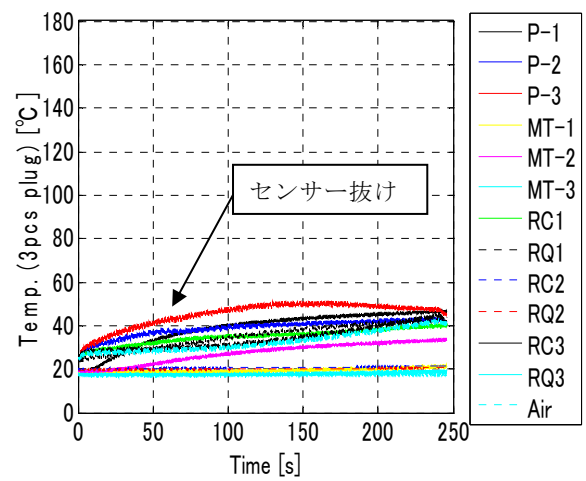
(a-1) 1本プラグ (1B:±50%×250cyc)



(a-2) 3本プラグ (1B:±50%×250cyc)

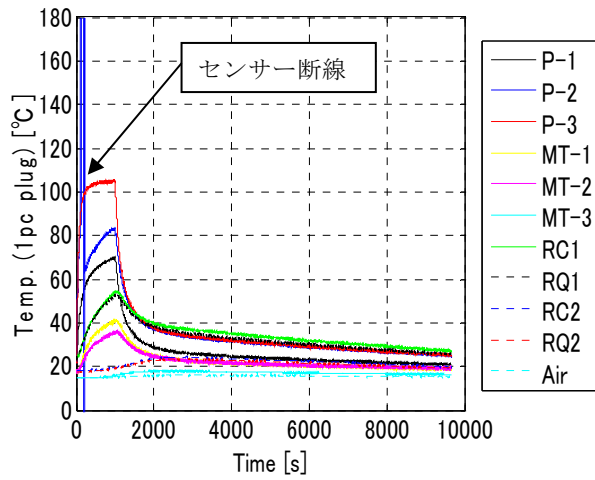


(b-1) 1本プラグ (3B:±200%×60cyc)

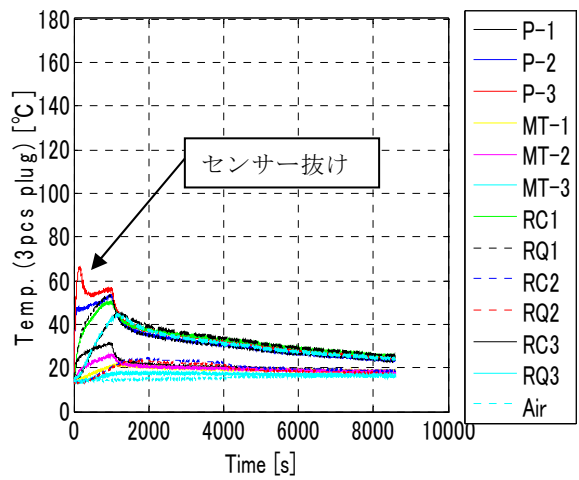


(b-2) 3本プラグ (3B:±200%×60cyc)

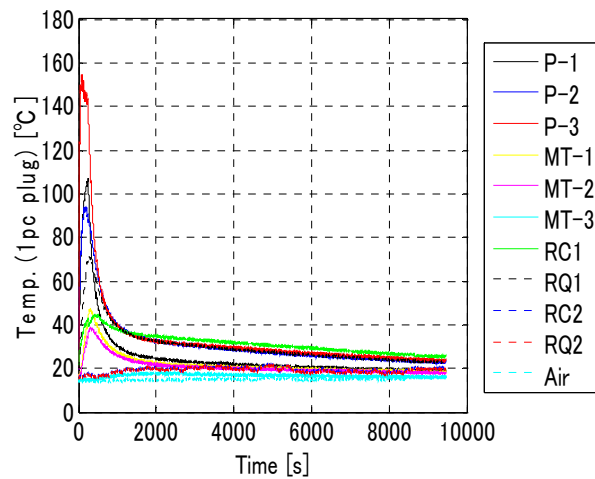
図 1.3.2-26 正弦波加振中の温度履歴



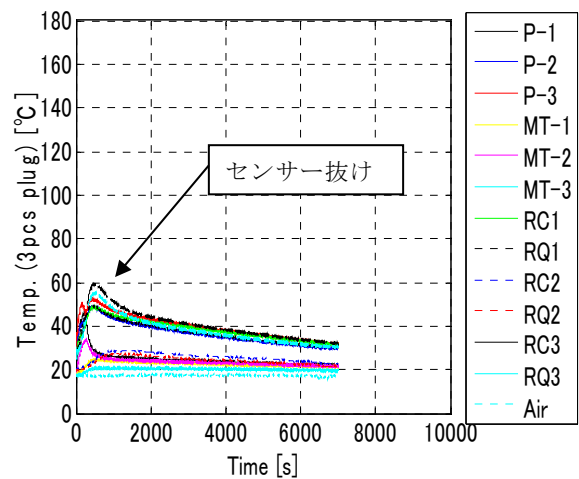
(a-1) 1本プラグ(1B:±50%×250cyc)



(a-2) 3本プラグ(1B:±50%×250cyc)



(b-1) 1本プラグ (3B:±200%×60cyc)



(b-2) 3本プラグ (3B:±200%×60cyc)

図 1.3.2-27 正弦波加振中+加振後の温度履歴

表 1.3.2-12 最大温度と加振停止から25℃到達までの所要時間

試験体	加振ケース	累積履歴吸収エネルギー : $\Sigma \Delta W$ (kN・mm)	最大温度 (P-3) (°C)	加振停止から25℃到達 までの所要時間 (s)
#1	1B	2.1162×10^6	106	8661 (144 min.)
#4		2.5040×10^6	(66)*	7582 (126 min.)
#3	3B	1.9097×10^6	(155)*	9208 (153 min.)
#4		2.2385×10^6	(53)*	6749 (112 min.)

*: センサー抜けのため、参考値とする。

2) 地震応答波加振試験

a) 荷重変形関係

図 1.3.2-28 に 1 本プラグタイプ試験体 (#3) と 3 本プラグタイプ試験体 (#4) の地震応答波加振 (Eq.2) の荷重変形関係を示す。どちらも安定した荷重変形関係を示している。変位が 200mm 以上の荷重変形関係については、3 本プラグタイプでは、1 本プラグタイプよりもハードニング傾向がみられる。この相違は、前述の正弦波加振試験結果と同様に、鉛プラグの配置位置に因るところが大きいと推察される。

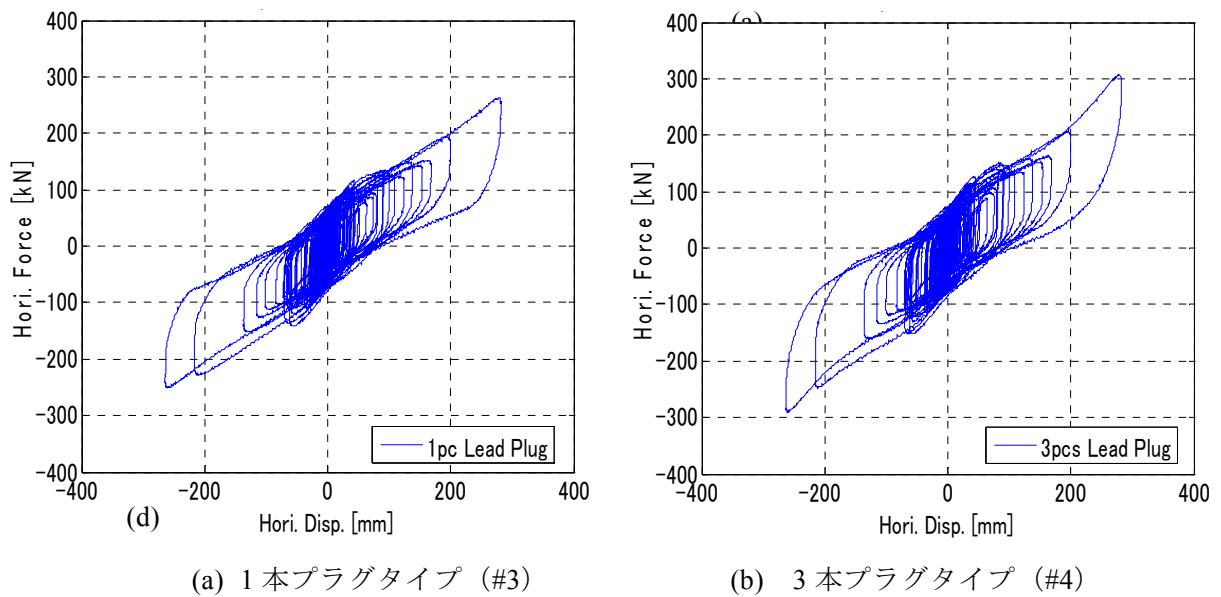
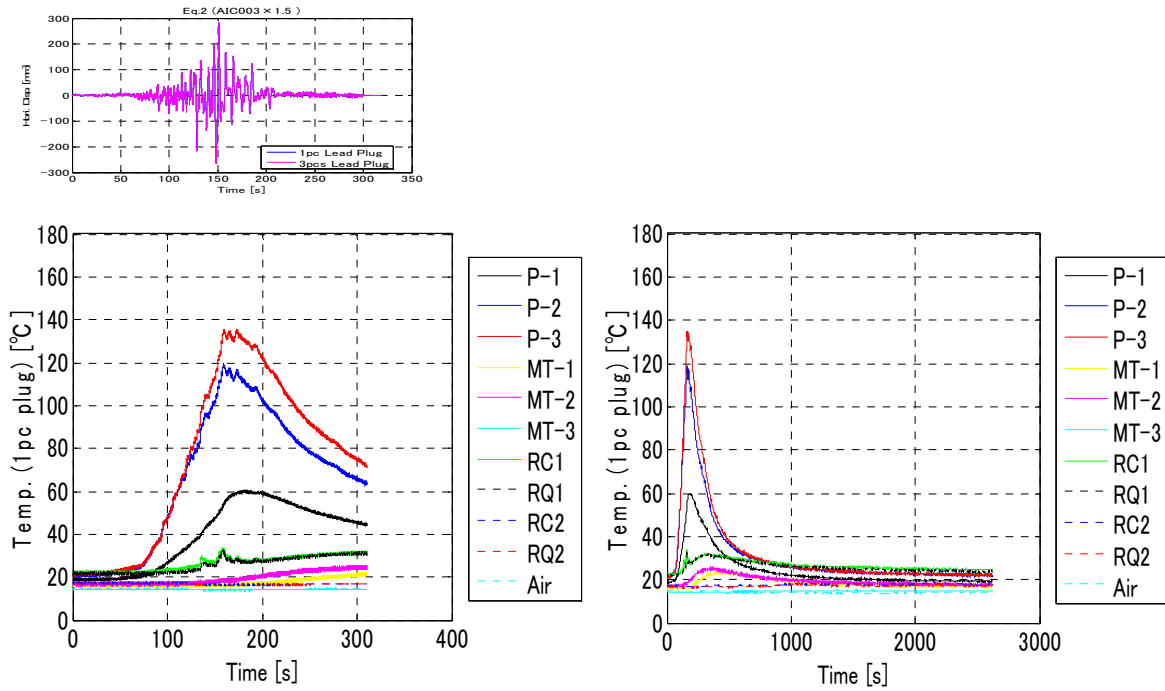


図 1.3.2-28 荷重変形関係 (Eq.2)

b) 試験体の温度履歴

図 1.3.2-29 に 1 本プラグタイプ試験体 (#3) と 3 本プラグタイプ試験体 (#4) の地震応答波加振 (Eq.2) における試験体温度履歴を示す。また、図 1.3.2-30 に同じく加振中と加振後の試験体温度履歴を示す。

1 本プラグタイプの鉛プラグ温度 (P-3) は 136°C まで上昇し、最大加振振幅を過ぎると温度が減少している。なお、3 本プラグタイプについては、加振中に熱電対センサーの計測位置ズレが顕著に見られたため、内部温度特性についての評価は難しい。



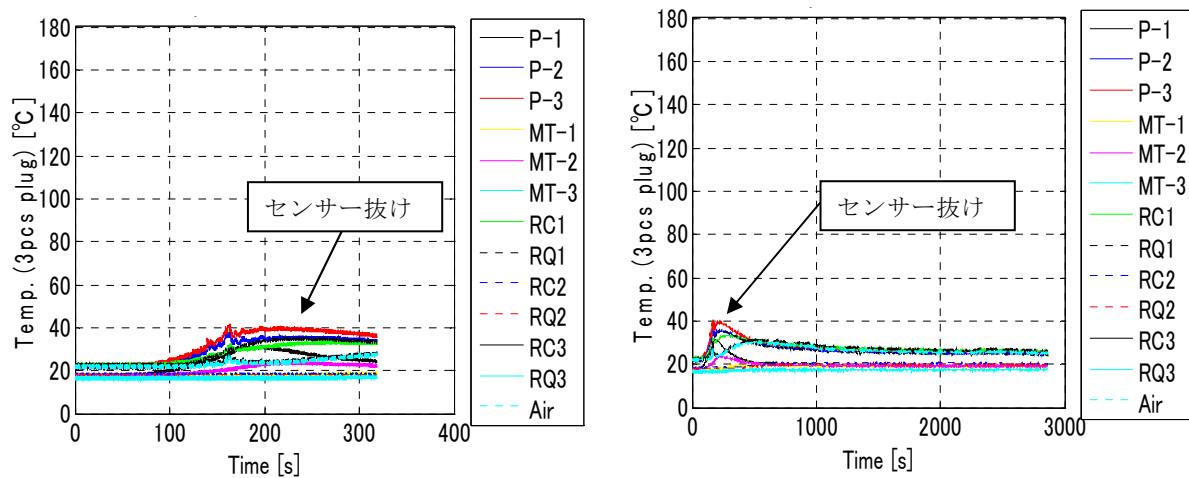
Eq.2 : T-TN-AIC003_AVx1.5

(a) 加振中の温度

Eq.2 : T-TN-AIC003_AVx1.5

(b) 加振中と加振後の温度

図 1.3.2-29 1 本プラグタイプ (#3)



Eq.2 : T-TN-AIC003_AVx1.5

(a) 加振中の温度

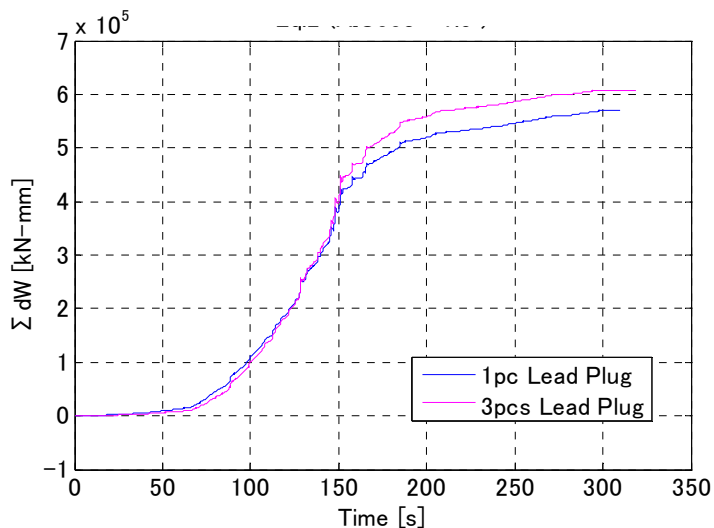
Eq.2 : T-TN-AIC003_AVx1.5

(b) 加振中と加振後の温度

図 1.3.2-30 3 本プラグタイプ (#4)

c) 入力エネルギー

図 1.3.2-31 に、1 本プラグタイプ試験体 (#3) と 3 本プラグタイプ試験体 (#4) の地震応答波加振 (Eq.2) における累積履歴吸収エネルギー $\Sigma \Delta W$ を重ねて示す。また、表 1.3.2-13 に、 $\Sigma \Delta W$ 、鉛プラグ温度 (P-3) 及び加振停止から 25°C 到達までの所要時間を示す。 $\Sigma \Delta W$ の最大値は 1 本プラグタイプが 5.6962×10^5 kN・mm、3 本プラグタイプが 6.0776×10^5 kN・mm であった。3 本プラグタイプの $\Sigma \Delta W$ は 1 本プラグの約 1.07 倍であり、25°C 到達までの所要時間は両ケースともほぼ同じ約 45 分であった。



Eq.2 : T-TN-AIC003_AVx1.5

図 1.3.2-31 累積履歴吸収エネルギー

表 1.3.2-13 最大温度と加振停止から 25°C 到達までの所要時間

試験体	累積履歴エネルギー： $\Sigma \Delta W$ [kN・mm]	最大温度 (P-3) [°C]	加振停止から 25°C 到達までの所要時間 [s]
#1 : 1 本プラグ	5.6962×10^5	136	2446 (41 min.)
#4 : 3 本プラグ	6.0776×10^5	(42)*	2696 (45 min.)

* : センサー抜けのため、参考値とする。

(6) 実験前後の特性変化

各加力ケースの初期に実施した基本特性試験、加振の間に実施した基本特性試験および一連の加力試験後に実施した基本特性試験の荷重変形関係の比較結果を図 1.3.2-32～図 1.3.2-35 に示す。どの加力条件においても荷重変形関係の変化はほとんどなく、健全な状態を保っている。

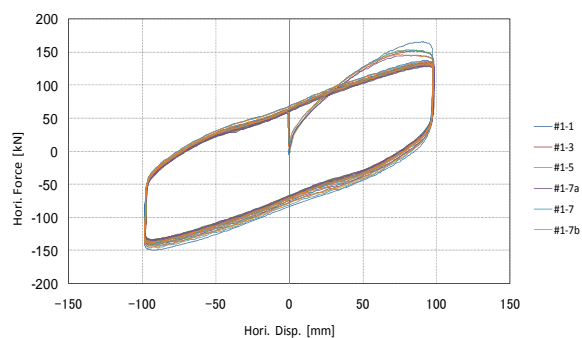


図 1.3.2-32 試験体#1

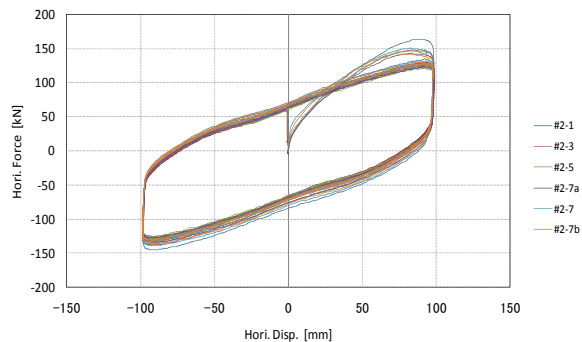


図 1.3.2-33 試験体#2

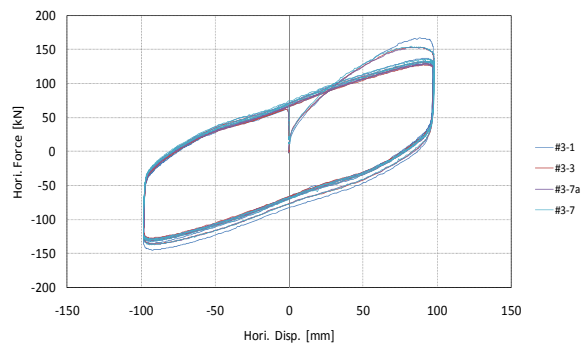


図 1.3.2-34 試験体#3

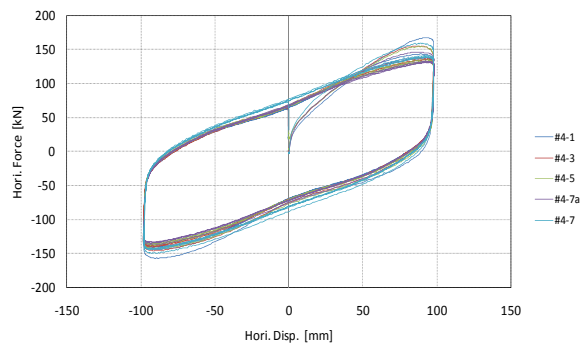


図 1.3.2-35 試験体#4

3.3.2.3 まとめ

いずれの加振ケースについても、荷重変形関係における履歴面積は加振に伴い徐々に小さくなったが、長周期加振と限界加振の荷重変形関係はほとんど同じであることから、長周期加振で荷重変形関係が安定し、それ以上の加振を与えても荷重変形関係はほとんど変化しないことが確認された。また、加振に伴い降伏荷重 Q_d が低下し、鉛プラグの温度が上昇した。一方、せん断ひずみ 100%以上の加振ケースにおいては、降伏後剛性 K_d はほとんど変化せず一定であった。

この Q_d の低下傾向には鉛プラグの温度上昇と負の相関が見られる。鉛プラグの温度が上昇すると、 Q_d が低下し、鉛プラグの温度上昇が緩やかになると Q_d の低下も小さくなっている。また、累積履歴吸収エネルギーの大きい限界加振時においても、 Q_d は際限なく低下せず、ある一定のところに収束する。これらの一連の試験を経験した試験体の荷重変形関係は試験初期とほぼ同一であり、長周期地震動を想定した正弦波限界加振による入力エネルギーを経験しても LRB の性能は健全に保たれることが確認された。

地震応答波加振における累積履歴吸収エネルギーは、Eq.1 が 0.367×10^6 kN・mm、Eq.2 が 0.570×10^6 kN・mm であり、正弦波加振の累積履歴吸収エネルギー ($2.0 \sim 2.5 \times 10^6$ kN・mm) よりも小さく、繰り返しの伴う Q_d の低下が収束する前の状態であった。すなわち、長周期地震動に対しても LRB は安定した荷重変形関係を示すことが確認されたことになる。

3本プラグタイプと1本プラグタイプの荷重変形関係を比較した。これより、3本プラグの方が1本プラグよりも Q_d の低下が小さいことが確認された。3本プラグでは温度計測が正確に行なわれなかったため定量的な評価は難しいが、鉛プラグを分散配置させたことにより温度上昇が小さくなり、それに伴う Q_d の低下も小さくなったと考えられる。また、荷重変形関係の形状については、せん断ひずみ 50%加振時に差が見られ、1本プラグのやや丸みのある矩形に対して3本プラグは角張った矩形を示した。 K_d の変化率については1本プラグでは減少したのに対して3本プラグではほとんど減少しなかった。この相違は、鉛プラグの配置に因るところが大きいと考えられる。3本プラグの場合、積層ゴム中心部に鉛プラグが配置されていないため、比較的小さいせん断変形においても復元力を安定して得られるのではないかと推察される。この3本タイプの LRB についても、一連の試験を経験した後の荷重変形関係は試験初期とほとんど同じであり、健全であることが確認された。

以上の長周期地震動を想定した実験により、LRB の健全性が確認されたことから、鉛プラグの温度上昇に伴う力学特性の変化を設計に反映するための評価法が今後の課題となる。また、3本プラグタイプでは1本プラグタイプと比較して繰り返しの伴う降伏荷重の低下が小さいことが確認され、解析的検討などさらなる検討が期待される。

参考文献

- 1.3.2-1) 平成 21 年度 建築基準整備促進補助金事業「1 超高層建築物等の安全対策に関する検討」長周期地震動に関する検討-免震建築物の応答性状, 2009 【地震波の参考文献】
- 1.3.2-2) 鹿島建設(株), 東京理科大学, オイレス工業(株), (株)ブリヂストン, 免震装置の熱・力学連成挙動解明と免震建物応答評価法の開発, 2008.4
- 1.3.2-3) 人見、加治木、荒井：鉛プラグ入り積層ゴムの速度依存性と繰り返し依存性, 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.543-544、1998 年 9 月
- 1.3.2-4) 高山、森田：鉛プラグ型積層ゴムの圧縮面圧下における限界変形能力, 日本建築学会技術報告集、No.16、pp.57-62、2002 年 12 月
- 1.3.2-5) 西澤、山本、川口、金子：鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し加振実験報告, 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.445-446、2004 年 8 月
- 1.3.2-6) 河内山、竹中、仲村、山本、宮崎：長周期地震動を想定した LRB1000 の内部温度特性確認実験～地震応答波の 1/1 スケール加振実験, 日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.603-604、2006 年 9 月
- 1.3.2-7) 竹中他：大振幅繰り返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究(その 1～14)、日本建築学会大会学術講演梗概集、2007 年～2010 年
- 1.3.2-8) Mineo Takayama et.al : Durability of Rubber Isolators by Long-Duration Ground Motion due to Large Earthquakes、The 14th World Conference on Earthquake Engineering、Oct. 2008
- 1.3.2-9) 竹中、近藤、高岡、引田、北村、仲村：積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第 74 巻、第 646 号、pp.2245-2253、2009 年 12 月

1.3.3 高減衰ゴム系積層ゴム

1.3.3.1 実験計画

(1) 実験目的と背景

本実験は、高減衰ゴム系積層ゴム支承の長振幅高速繰返し試験を縮小試験体により実施し、多数回繰返しに対する性能の把握を目的とする。

表 1.3.3-1 に、既往の研究における高減衰ゴム系積層ゴムの多数回繰返し実験の内容をまとめて示す。縮小試験体による実験がほとんどであるが、文献^{1.3.3-2)}においては実大サイズの試験体による実験も実施されている。加力プログラムとしては、正弦波による一定振幅加振、正弦波の組み合わせによるランダム波加振、および地震応答波加振が実施されている。加振周期は 3～5 秒の動的加振であり、累積変形量は大きなもので 70～80m となっている。図 1.3.3-1 に、文献^{1.3.3-4)}で実施された直径 500mm の試験体の正弦波加力の実験結果を例示する。全ての加振振幅の結果とも、繰返し加力に伴い履歴ループ面積が徐々に小さくなっている様子が確認できる。特性値の変化および温度上昇については、変形量が大きいくほど、加力周期が短いほど増大する傾向が見られる。また文献^{1.3.3-4)}中には、直径 300mm の試験体についても、特性変化、温度上昇について直径 500mm の試験体と同様の傾向であったと示されている。

メーカーの技術資料^{1.3.3-5)}においては、高減衰ゴム系積層ゴムは動的な水平変形を連続して与えると、積層ゴムの等価水平剛性 K_{eq} 、等価減衰定数 H_{eq} 、および吸収エネルギー ΔW は低下するとされ、表 1.3.3-2 および図 1.3.3-2 のような実験結果が示されている。

以上のように、既往の実験においては、主に正弦波による一定振幅多数回繰返し加振が実施され、繰返しの影響による試験体温度の上昇と水平復元力特性値の低下が確認されている。高減衰ゴム系積層ゴムは、繰返し依存性だけではなくその他にも様々な依存性を有しており、温度依存性、振動数依存性、荷重履歴依存性については、繰返し加力時の特性変化に影響を与えると考えられる。長周期地震動を想定したランダムな入力に対する履歴特性変化を評価しようとする場合、これらの各種依存性が多数回繰返し加力時にどのように影響してくるのかを検討する必要がある。また、より大きな累積変形量、累積エネルギー量を受けた場合の性能を確認し、繰返し加振による限界状態の把握も必要と考えられる。

表 1.3.3-1 既往の研究における高減衰ゴム系積層ゴムの多数回繰返し実験一覧

参考文献	試験体	面圧	加力プログラム	周期	累積変形量	
文献 1.3.3-1)	φ 225mm(E0.6), S1=28.1, S2=5.11	8N/mm ²	正弦波, γ=200%で 200 サイクル	3.0 秒	70.4m	
文献 1.3.3-2)	φ 700mm(X0.6), S1=36.4, S2=4.96	14N/mm ²	正弦波の組合わせによる変位パターン		35.0m	
	φ 1300mm(X0.6), S1=36.5, S2=4.98	14N/mm ²			35.0m	
文献 1.3.3-3)	φ 225mm(X0.6), S1=35, S2=5.0	?	正弦波, γ=200%で 200 サイクル	3.0 秒	72.0m	
文献 1.3.3-4)	φ 500mm(X0.6), S1=35.7, S2=4.9	3~5 N/mm ²	正弦波, γ=50%で 100 サイクル	3.0 秒	20.4m(12.0m)	
			正弦波, γ=100%で 50 サイクル	3.0 秒	20.4m(12.0m)	
			正弦波, γ=100%で 50 サイクル	5.0 秒	20.4m(12.0m)	
			正弦波, γ=200%で 100 サイクル	3.0 秒	81.6m(48.0m)	
			正弦波, γ=200%で 100 サイクル	5.0 秒	81.6m(48.0m)	
	φ 300mm(X0.6), S1=37.5mm, S2=5.0		地震波, JMA KOBE NS			—
			地震波, K-NET TOMAKOMAI NS×1.5			—
			地震波, MEXICO SCT1 EW			—
			地震波, BCJ-L2			—
			地震波, JSCA 告示波			—
地震波, 三の丸波 EW			—			

※文献 1.3.3-4)の累積変形量の表記は、φ 500mm (φ 300mm)

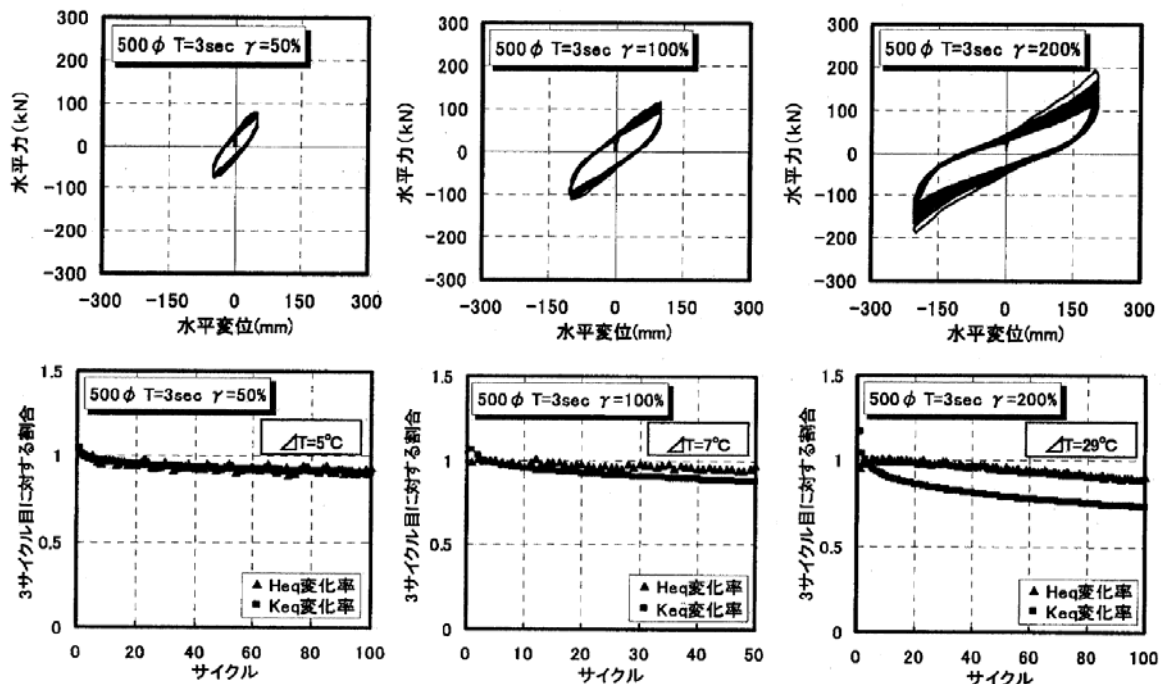


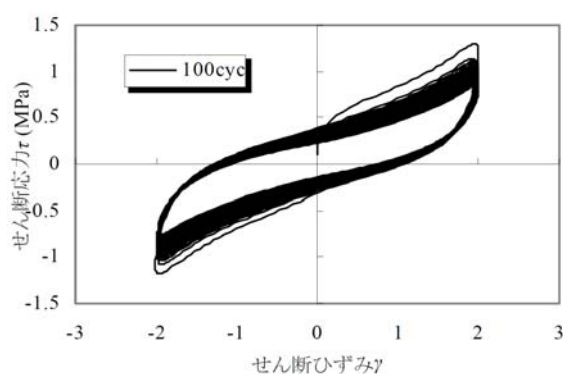
図 1.3.3-1 文献 1.3.3-4)における実験結果(φ 500 正弦波加力時の履歴ループと特性変化)

表 1.3.3-2 $\phi 225(S1=35.1, S2=5.0, G=0.62)$ 試験体

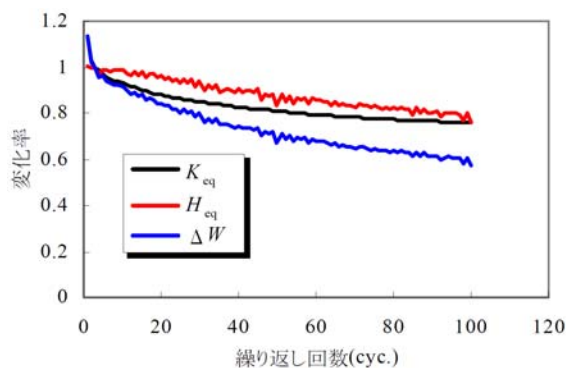
繰返しによる水平特性値の変化 (せん断ひずみ 200% \times 100 サイクル(加振周期 3.0 秒))

サイクル数	K_{eq} 変化率	H_{eq} 変化率	ΔW 変化率
1	1.136	1.001	1.138
3	1.000	1.000	1.000
10	0.928	0.986	0.915
20	0.879	0.961	0.844
50	0.809	0.832	0.673
100	0.757	0.757	0.573

※変化率は 3 サイクル目の特性値に対する各サイクルの特性値の割合



(a) せん断ひずみ-応力度関係



(b) 水平特性の繰返し依存性

(変化率は 3 サイクル目に対する割合)

図 1.3.3-2 $\phi 225(S1=35.1, S2=5.0, G=0.62)$ 試験体

せん断ひずみ 200% \times 100 サイクル(加振周期 3.0 秒)繰返し加力試験結果

(2) 実験日時および場所

実施日時：2010年12月13日～12月16日

実施場所：ブリヂストン横浜工場(下郷地区)

(3) 試験体

試験体は、実大サイズ(直径 1000mm)の 1/4 サイズの直径 250mm の高減衰ゴム系積層ゴム (X0.6R)×4 体。表 1.3.3-3 に、実大サイズの積層ゴムと試験体の諸元を合わせて示す。図 1.3.3-3 に、試験体の形状を示す。試験体の上下フランジには、試験体温度計測のための熱電対の配線用に幅・深さとも 5mm の溝が設けられている。

表 1.3.3-3 高減衰ゴム系積層ゴム試験体諸元

	外径 (mm)	内径 (mm)	ゴム層厚	内部鋼板厚(mm)	S1	S2
実大サイズ	1000	25	6.7mm×30層=201mm	4.4	36.4	4.98
試験体	250	10.0	1.7mm×30層=51mm	1.2	35.3	4.9

$$G_{eq} (\gamma=100\% \text{時}) = 0.620 \text{N/mm}^2$$

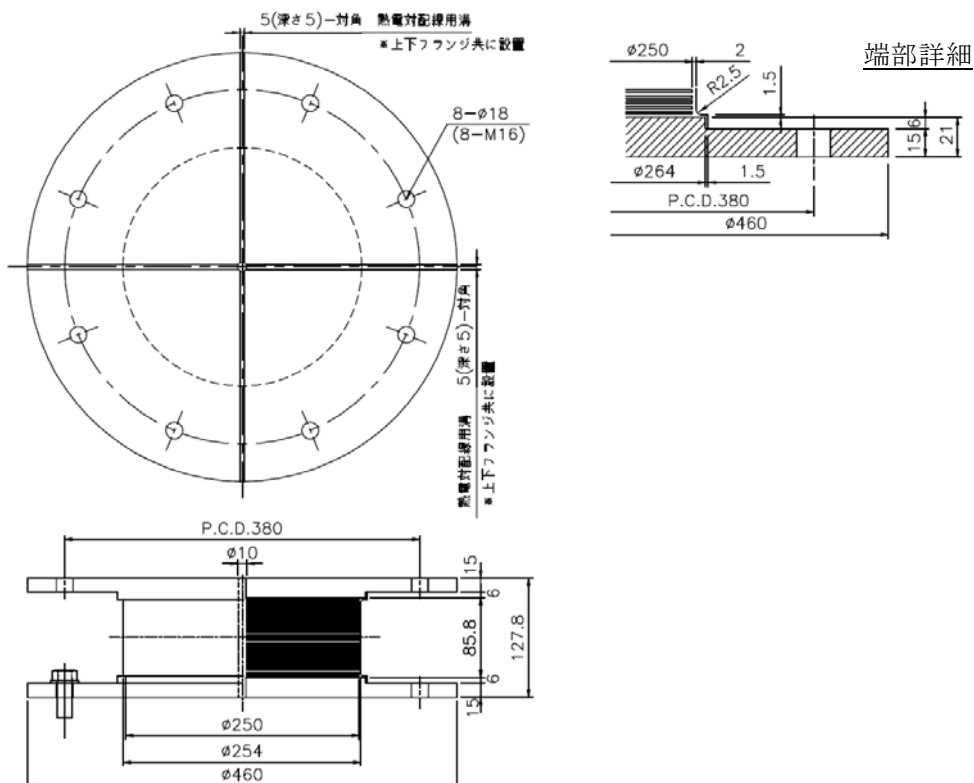


図 1.3.3-3 高減衰ゴム系積層ゴム試験体形状

(4) 試験装置

試験機はブリヂストンの 1000kN 動的試験機(電気油圧サーボ方式動的 2 軸試験機)を使用した。図 1.3.3-4 に試験機外観と試験機性能を示す。加力により試験体に発生する熱が試験機に伝達しないよう、試験体の上下に断熱板を設置する。断熱板は、D-M-E 高温用断熱板(厚さ 10mm)を使用した。図 1.3.3-5 に断熱板の設置要領を示す。写真 1.3.3-1 に試験体の設置状況を示す。

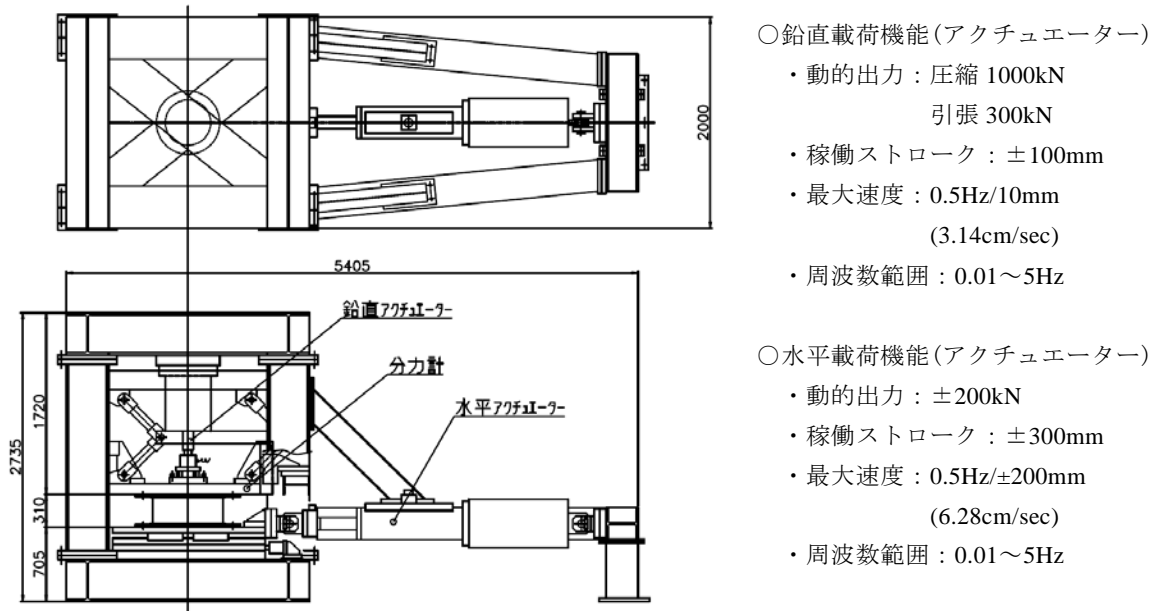


図 1.3.3-4 試験機外観および試験機性能

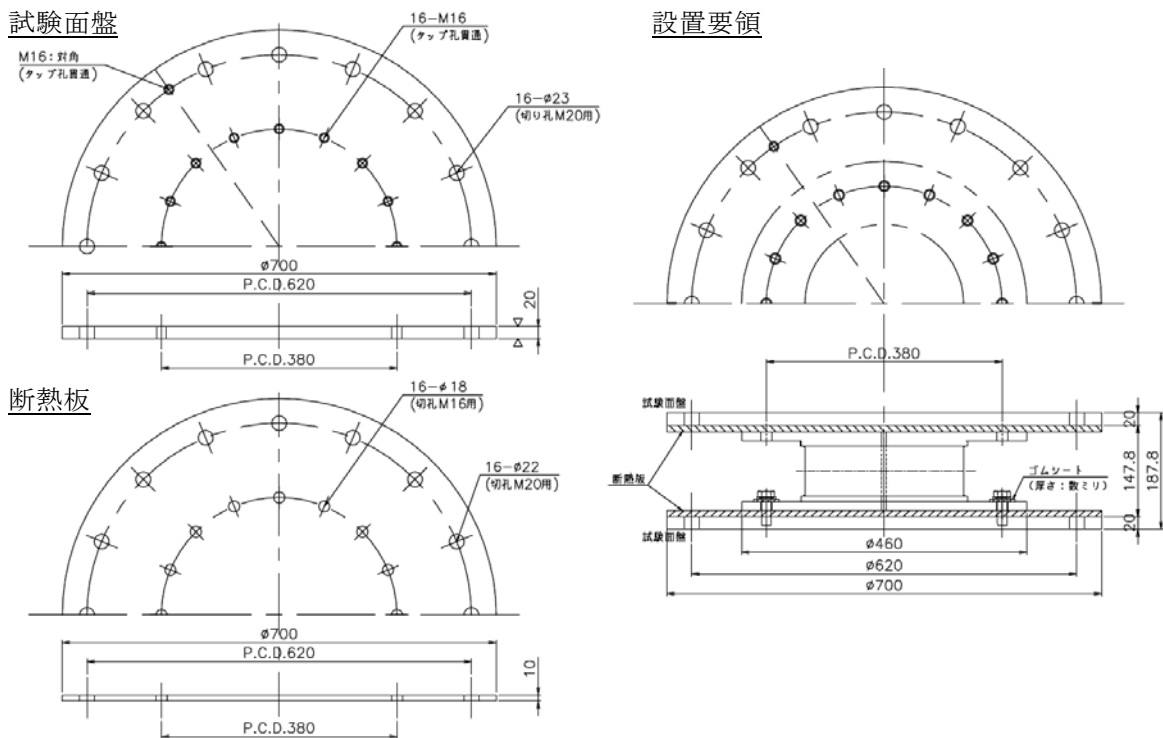
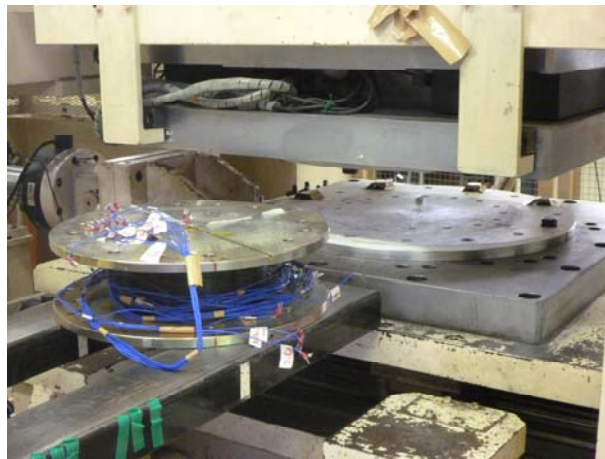


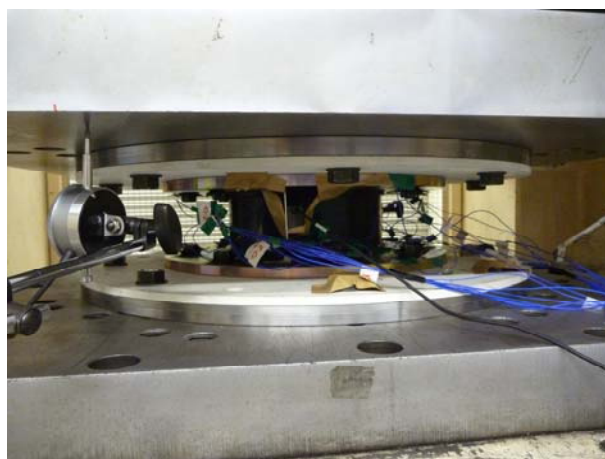
図 1.3.3-5 断熱板設置要領



(a) 熱電対配線用のフランジ溝



(b) 試験体の設置



(c) 試験体の設置状況

写真 1.3.3-1 試験体の設置状況

(5) 計測項目と計測方法

高減衰ゴム系積層ゴムの多数回繰返し加振時の、水平復元力特性値の変化、試験体の温度変化の確認を目的として、計測項目は以下の通りとする。

- ・ 水平荷重、水平変位
- ・ 鉛直荷重、鉛直変位
- ・ 試験体各部の温度
- ・ 雰囲気温度

試験体各部の温度は、熱電対および非接触型温度計にて計測する。図 1.3.3-6 に試験体の温度計測点を示す。サンプリング周波数は、温度は 10Hz、荷重および変位は 100Hz とする。温度計測については加振終了後も一定時間継続し、加振による発熱後の試験体温度の低下傾向を確認する。

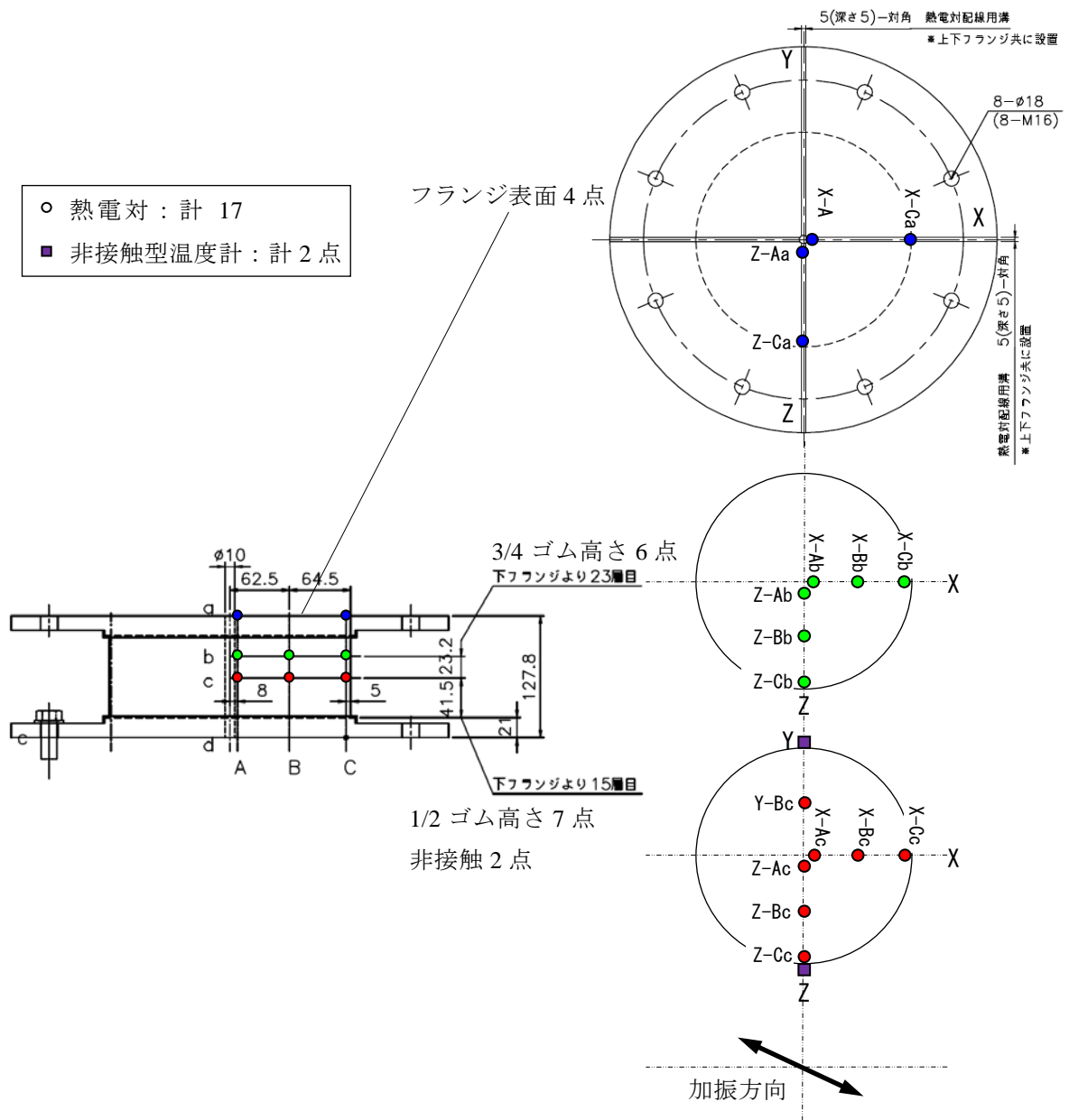


図 1.3.3-6 試験体温度計測点

(6) 試験方法および試験ケース

表 1.3.3-4 に、実大積層ゴムに対するエネルギー吸収性能評価のための目標試験ケースを示す。3 水準の加振振幅において、累積変形量が 50m となるよう繰返しサイクル数を設定した長周期地震動を対象とする試験ケース、およびそれに 2.0 倍の余裕度を考慮した限界性能を対象とする試験ケースである。この目標試験ケースを基準に、縮小試験体の試験ケースを設定した。

表 1.3.3-5 に、4 体の縮小試験体の試験ケースを示す。試験は、15.0N/mm² の一定面圧下における加振周期 4.0 秒の正弦波による多数回繰返し加振である。試験体 1 においては、表 1.3.3-4 に示す目標試験ケースの限界性能試験ケース(1B、2B、3B)に相当する試験を実施した。ただし、累積変形量は縮小試験体に対して 100m としており、目標試験ケースよりも厳しい条件となっている。また、高減衰ゴム系積層ゴムは様々な依存性を持つことから、試験体 2 においては初期温度、試験体 3、4 においては荷重履歴を変化させた試験ケースを実施した。初期温度 0℃および 30℃の試験ケースについては、設定温度の恒温槽に 24 時間以上入れることによって試験体の初期温度を調整した。この時、試験体を恒温槽から取出した後の試験準備中における試験体の温度変化を考慮して、恒温槽の温度設定を初期温度 0℃の試験ケースにおいては-4℃、初期温度 30℃の試験ケースにおいては 33℃とした。実際の加振時温度は、試験準備および「基本特性」の加振により図 1.3.3-6 の温度計測点の X-Bc 点において、初期温度 0℃の試験ケース開始時には約 4℃、初期温度 30℃の試験ケース開始時には約 33℃であった。加えて、ランダム波に対する応答を確認するため、試験体 4 において地震応答波による加力を実施した。地震応答波としては、高減衰ゴム系積層ゴムのみで構成される免震層を有する等価周期 4.0 秒($\gamma=200\%$ 時)の 1 質点剛体モデルに、T-TN-AIC003-AV を入力した応答変位波形を用いた。図 1.3.3-7 に、T-TN-AIC003-AV の加速度時刻歴波形を示す。試験には、継続時間 600 秒以上の入力による応答変位波形のうち、主要動部分を含む 60~120 秒の 150 秒間の応答変位波形を用いた。図 1.3.3-8 に、試験に用いた応答変位波形を示す。地震波による累積変形量が、実大サイズに換算して約 50m となるよう、図 1.3.3-8 に示す 150 秒間の応答変位波形の 4 回連続入力を実施した。また、各試験ケースにおける試験体の水平復元力特性の変化を確認するため、各試験ケースの前後において 4 種類の基本特性試験を実施した。表 1.3.3-6 に、4 種類の基本特性試験の概要を示す。写真 1.3.3-2 に、試験体の加振状況を示す。

表 1.3.3-4 実大積層ゴム($\phi 1000$)に対する目標試験ケース

ケース	試験条件	加振周期 (sec)	ひずみ (%)	変位 (mm)	換算速度 (cm/s)	サイクル 数	時間 (sec)	累積変形 (m)
1A	長周期	4.0	50	100	15.7	125	500	50
1B	限界	4.0	50	100	15.7	250	1000	100
2A	長周期	4.0	100	200	31.4	60	240	48
2B	限界	4.0	100	200	31.4	120	480	96
3A	長周期	4.0	200	400	62.8	30	120	48
3B	限界	4.0	200	400	62.8	60	240	96

※加振波は正弦波とする。

表 1.3.3-5 HDR ϕ 250 縮小試験体試験ケース一覧(その 1)

試験体	加振順	ケース	試験条件	加振周期 (sec)	ひずみ (%)	変位 (mm)	換算速度 (cm/s)	サイクル数	累積変形 (m)	試験体初期温度 (°C)
1	5		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	6	1B 相当	限界	4.0	50	26	4.0	1000	104	20.0
	7		(直後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時温度
	8		(後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	9		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	10	2B 相当	限界	4.0	100	51	8.0	500	102	20.0
	11		(直後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時温度
	12		(後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	13		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	14	3B 相当	限界	4.0	200	102	16.0	250	102	20.0
	15		(直後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時温度
	16		(後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	17		(出荷) 基本特性	20.0	100	51	1.02	3	0.6	20.0
2	1		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	0.0
	2	初期 0°C	初期 0°C	4.0	200	102	16.0	250	102	0.0
	3		(直後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時温度
	4		(後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	28		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	30.0
	29	初期 30°C	初期 30°C	4.0	200	102	16.0	250	102	30.0
	30		(直後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時温度
	31		(後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	32		(出荷) 基本特性	20.0	100	51	1.02	3	0.6	20.0

- ・面圧 15.0N/mm²
- ・地震応答波、(出荷)基本特性以外は正弦波加振
- ・(出荷)基本特性は三角波加振
- ・試験体初期温度 20°Cの試験については、試験体温度 20°C \pm 5°Cを許容値とする

表 1.3.3-5 HDRφ250 縮小試験体試験ケース一覧(その 2)

試験体	加振 順	ケース	試験 条件	加振 周期 (sec)	ひずみ (%)	変位 (mm)	換算 速度 (cm/s)	サイクル 数	累積 変形 (m)	試験体 初期温度 (°C)
3	18	風応答	微小振幅 1	3.0	6	3	0.6	3	—	—
	19		微小振幅 2	3.0	10	5	1.0	3	—	—
	20		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	21	荷重 履歴	漸増	4.0	50	26	4.0	245	25.0	20.0
	22			4.0	100	51	8.0	122	24.9	
	23			4.0	200	102	16.0	61	24.9	
	24			4.0	250	128	20.0	49	25.1	
								計 477	計 100	
	25		(直後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時 温度
	26		(後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
27		(出荷) 基本特性	20.0	100	51	1.02	3	0.6	20.0	
4	33	風応答	微小振幅 1	3.0	6	3	0.6	3	—	—
	34		微小振幅 2	3.0	10	5	1.0	3	—	—
	39		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	40	荷重 履歴	漸減	4.0	250	128	20.0	49	25.1	20.0
	41			4.0	200	102	16.0	61	24.9	
	42			4.0	100	51	8.0	122	24.9	
	43			4.0	50	26	4.0	245	25.0	
								計 477	計 100	
	44		(直後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時 温度
	45		(後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	35		基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
	36	地震 応答	地震 応答波		max 約 130	max 約 70			約 3.4 ×4 回	20.0
	37		(直後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	終了時 温度
	38		(後) 基本特性	4.0	100	51	8.0	4	0.8	20.0
46		(出荷) 基本特性	20.0	100	51	1.02	3	0.6	20.0	

- ・面圧 15.0N/mm²
- ・地震応答波、(出荷)基本特性以外は正弦波加振
- ・(出荷)基本特性は三角波加振
- ・試験体初期温度 20°Cの試験については、試験体温度 20°C±5°Cを許容値とする

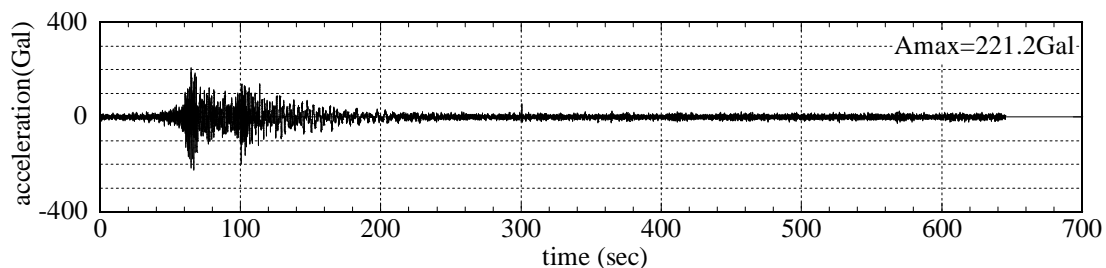


図 1.3.3-7 T-TN-AIC003-AV の加速度時刻歴波形

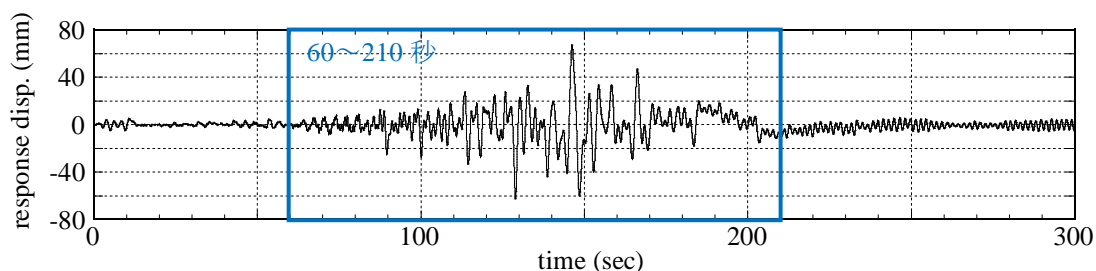


図 1.3.3-8 T-TN-AIC003-AV 入力時の応答変位波形(HDRφ250 試験体相当)

表 1.3.3-6 基本特性試験概要

基本特性試験	各試験ケース実施前に、試験体温度 20℃にて実施。初期温度 0℃、30℃のケースについては、各初期温度にて実施。
(直後)基本特性試験	各試験ケース実施直後にインターバルをとらずに、試験終了時温度にて実施。
(後)基本特性試験	各試験ケース実施後にインターバルをとって、試験体温度が 20(±5)℃に復帰した状態で実施。
(出荷)基本特性試験	各試験体の最初と最後に、製品検査と同様の試験を実施。尚、最初の試験については製品検査に振替える(実施試験機は同じ)。

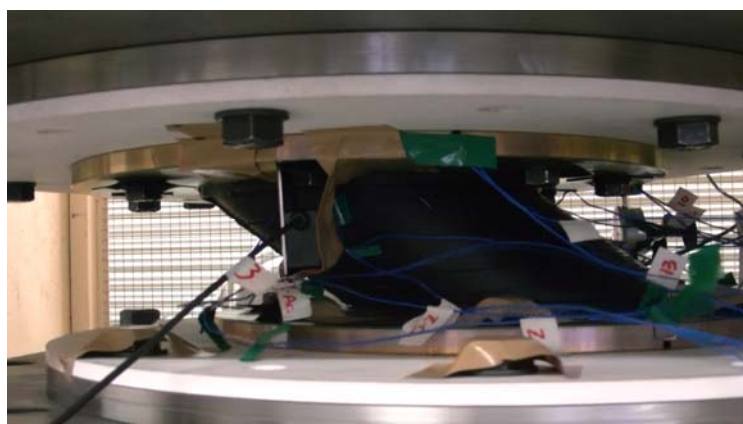


写真 1.3.3-2 加振状況

1.3.3.2 実験結果

(1) 水平荷重変位関係および試験体温度の推移

実験結果の水平荷重変位関係からの水平復元力特性値の算出は、以下の通りとする(図 1.3.3-9)^{1.3.3-5)}。

【等価剛性 K_{eq} 】

水平荷重変位関係の正側最大変位 $+\delta_0$ 、負側最大変位 $-\delta_0$ 、正側最大荷重 $+Q$ 、負側最大荷重 $-Q$ としたとき、 K_{eq} は以下の式で算出する。

$$K_{eq} = \frac{+Q - (-Q)}{+\delta_0 - (-\delta_0)} \quad (1.3.3-1)$$

実験結果の履歴ループにおいては、最大荷重点と最大変位点が一致しないため、 K_{eq} は履歴ループ上には乗らない仮想点としての正側と負側の最大点を結ぶ割線剛性とする。

【等価減衰定数 H_{eq} 】

履歴ループの1サイクル分の履歴吸収エネルギー(1サイクルが囲む面積) ΔW 、正側と負側の最大変位の平均値 δ_0 として、以下の式により算出する。

$$H_{eq} = \frac{\Delta W}{2\pi \cdot K_{eq} \cdot \delta_0^2} \quad (1.3.3-2)$$

【降伏荷重特性係数 u 】

正側の降伏荷重 $+Q_d$ と負側の降伏荷重 $-Q_d$ の平均値を Q_d として、以下の式により算出する。なお、1サイクル目は荷重の立ち上がり部分があるため Q_d の値が不安定となるので、1サイクル目の値は使用しない。

$$u = \frac{Q_d}{K_{eq} \cdot \delta_0} \quad (1.3.3-3)$$

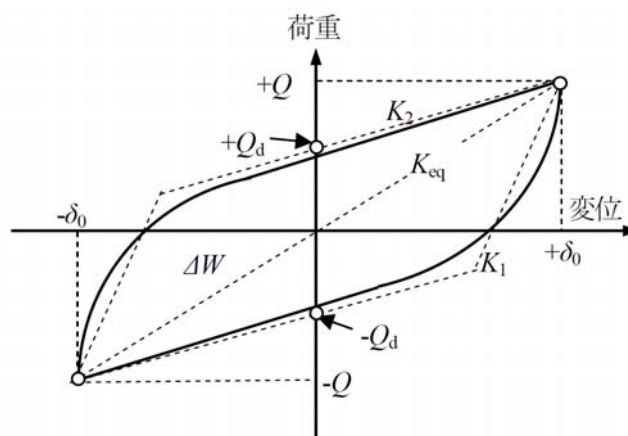


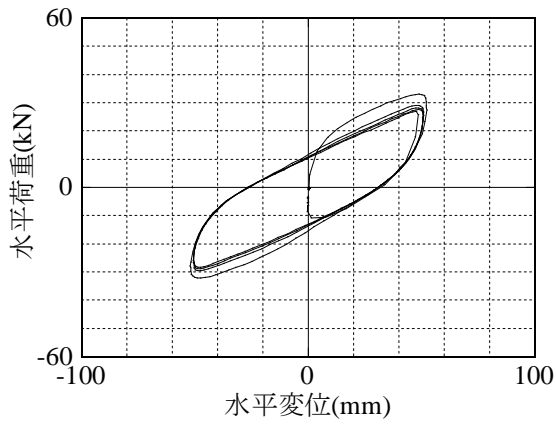
図 1.3.3-9 高減衰ゴム系積層ゴムの水平復元力特性 ^{1.3.3-5)}

図 1.3.3-10～32 に、各試験ケースの実験結果の水平荷重変位関係、水平復元力特性値 K_{eq} 、 H_{eq} 、 u の加振サイクル数による推移、および試験体各部温度の推移を示す。水平荷重変位関係については、各試験ケースの履歴ループと、各試験ケースの前後で実施した「基本特性」、「(直後)基本特性」、「(後)基本特性」の履歴ループを並べて示す。荷重履歴漸増、漸減のケースについては、各加振振幅による履歴ループ全てを合わせて描いた履歴ループに加え、各加振振幅ごとに分けて描いた履歴ループを示す。水平復元力特性値の加振サイクルによる推移においては、各試験ケースの任意のサイクルの履歴ループを取り出した図を並べて示す。水平復元力特性値の 3 サイクル目の値に対する比とは、各試験ケースの 3 サイクル目の履歴ループから抽出した値で各サイクルの値を除した値とする。荷重履歴漸増、漸減のケースについては、各振幅による加振の 3 サイクル目の値で除した値とする。また、試験体各部の温度については平面方向の位置が同一である計測点ごと(A:中心孔、B:ゴム部中心、C:ゴム表面)にまとめて示す。凡例において灰色で示されている計測点は、熱電対の断線等により計測不能となった計測点である。

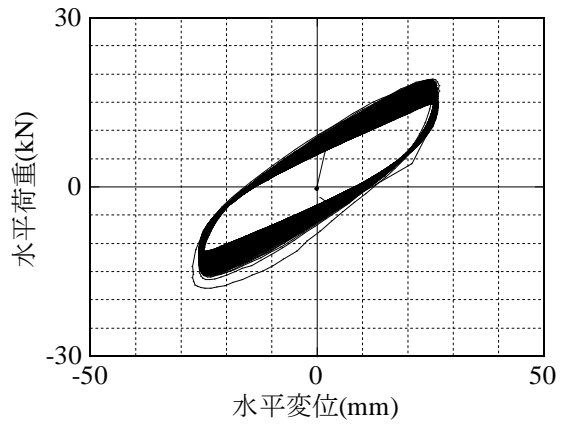
各試験ケースの履歴ループにおいては、多数回の繰返し加振に伴い最大荷重と履歴ループ面積が徐々に低下している様子が確認できる。また、「基本特性」、「(直後)基本特性」、「(後)基本特性」の履歴ループを比較すると、加振終了直後で試験体温度が高い状態の「(直後)基本特性」の履歴ループは最大荷重と履歴ループ面積が「基本特性」のループよりも小さくなっている。インターバルにおいて試験体温度が 25℃程度に復帰した後の「(後)基本特性」のループは、「基本特性」のループに近い形状に回復している。

図 1.3.3-11(b)、14(b)、17(b)に示す 1B 相当、2B 相当、3B 相当の試験ケースの水平復元力特性値の推移において、 K_{eq} は最初急激な低下を示すが、その後低下が緩やかになり、ある一定の値に収束する傾向が見られる。 H_{eq} と u は、全加振サイクルにわたって緩やかに低下する傾向を示している。図 1.3.3-20(b)および 23(b)に示す、初期温度 0℃、30℃の水平復元力特性値の推移を比較すると、初期温度 0℃のケースが 30℃のケースに比べて大きな低下を示しているが、これは初期温度 0℃の 3 サイクル目の特性値が大きいためである。図 1.3.3-20(a)、23(a)に示す、両ケースの 250 サイクル目の履歴ループを比較すると、おおよそ一致した形状を示している。図 1.3.3-21、24 に示す試験体温度についても、初期温度 0℃、30℃の両ケースとも加振終了時の温度は、試験体高さ 1/2 において約 90℃となっており、図 1.3.3-18 に示す 3B 相当の加振終了時温度ともほぼ一致する。以上より、3B 相当、初期温度 0℃、初期温度 30℃のケースは、初期温度が異なっても同じ繰返し加振を受けることによりほぼ同様の履歴特性に至ったと考えられる。図 1.3.3-26、29 に示す、荷重履歴漸増、漸減のケースの水平復元力特性値の推移を比較すると、漸増のケースにおいては各加振振幅で K_{eq} 、 H_{eq} 、 u とも値の低下を示しているが、漸減のケースにおいては、せん断ひずみ 250%での加振において特性値が大きく低下し、その後の 200%、100%、50%での加振においては、 H_{eq} と u は緩やかに低下し続けているが、 K_{eq} は緩やかに上昇している。このことから、経験した荷重履歴が繰返し加振時の復元力特性の変化に影響を与えることが確認できる。

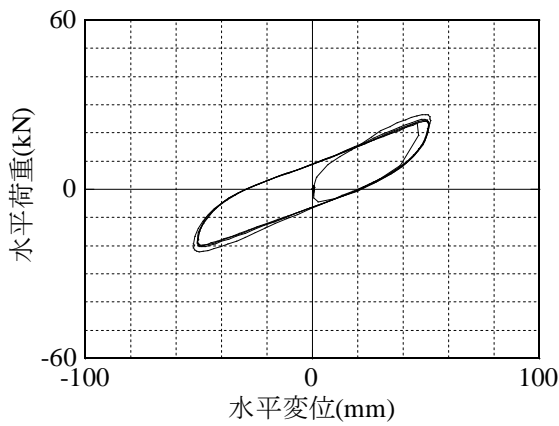
試験体各部の温度については、フランジ部の温度上昇は小さく、大きい場合でも 10℃強であり、加振後の温度低下は非常に緩やかである。ゴム部については、中心孔の 1/2 高さが最も高い温度を示している。加振後の温度の低下は 3/4 高さの方が 1/2 高さよりも下がり始めがやや早い。一方、中心孔とゴム表面の温度低下の傾向はほぼ一致している。また、地震応答波による試験体の温度上昇は、4 回連続加振によって、1/2 高さで 8℃程度であった。



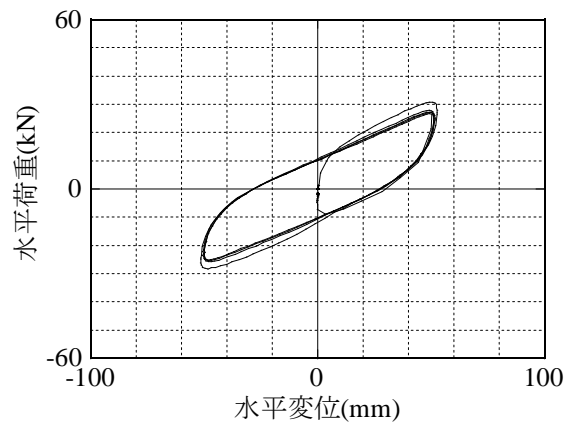
(a) 基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]



(b) 1B相当 限界 [$\gamma=50\%$, 1000 サイクル]

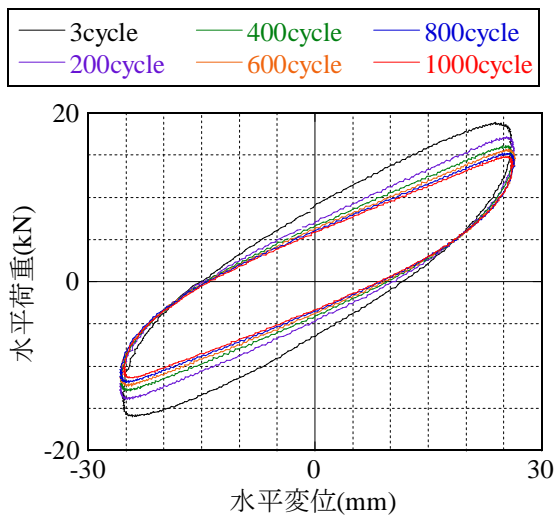


(c) (直後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

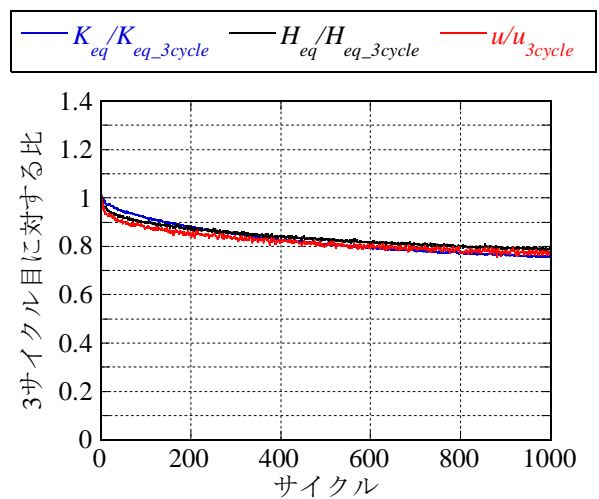


(d) (後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

図 1.3.3-10 試験体 1、1B 相当($\gamma=50\%$, 1000 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係



(a) 各サイクルの水平荷重変位関係



(b) K_{eq} , H_{eq} , u の 3 サイクル目に対する比

図 1.3.3-11 試験体 1、1B 相当($\gamma=50\%$, 1000 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平復元力特性値の加振サイクル数による推移

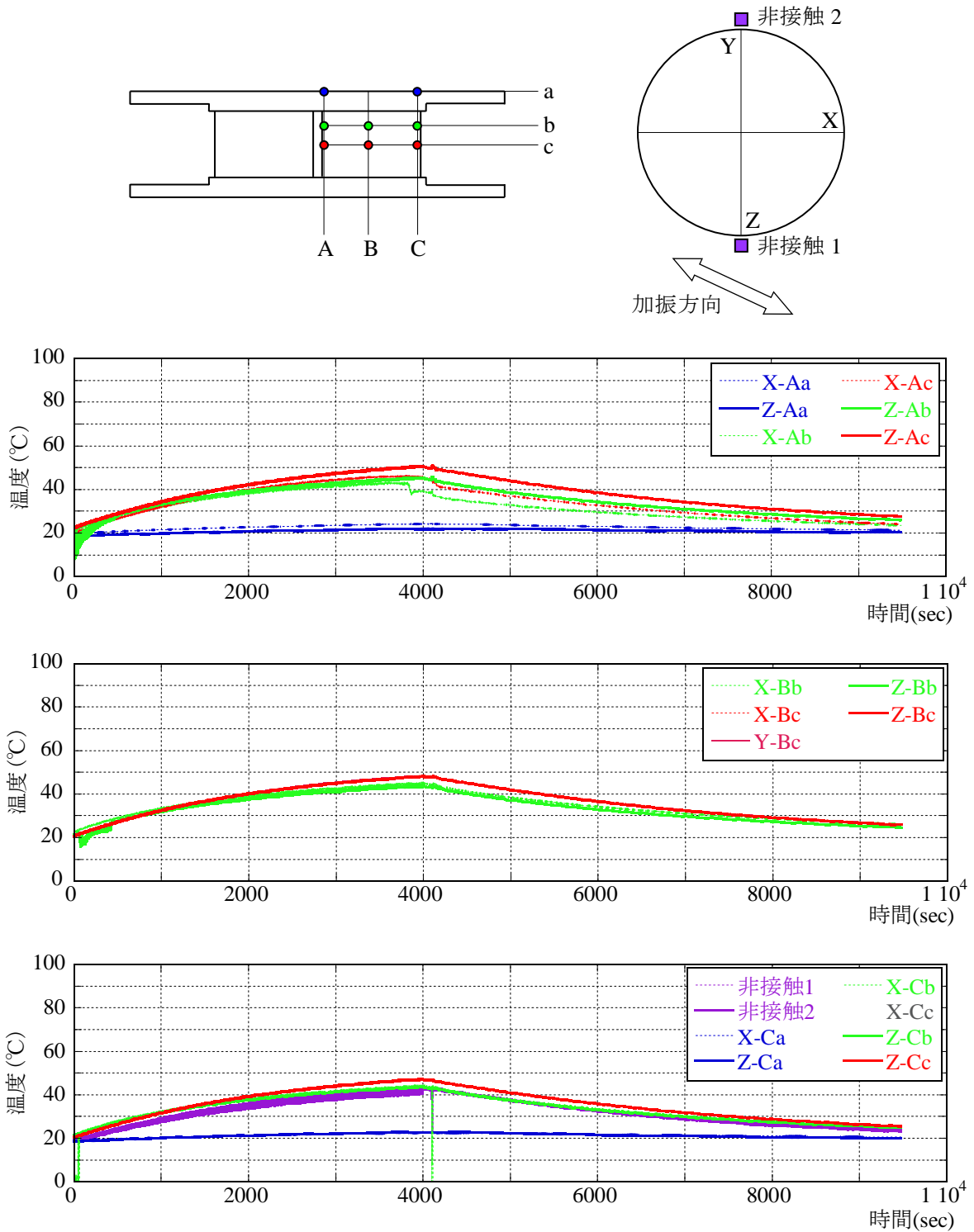
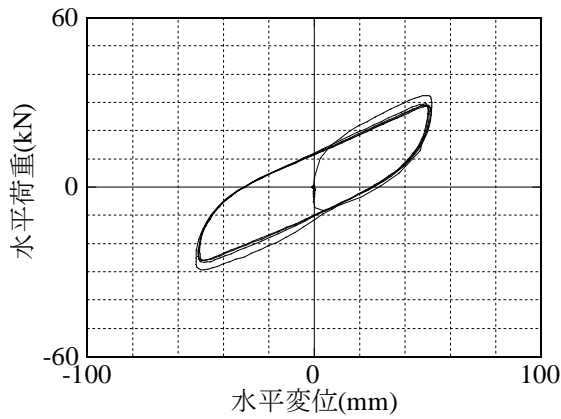
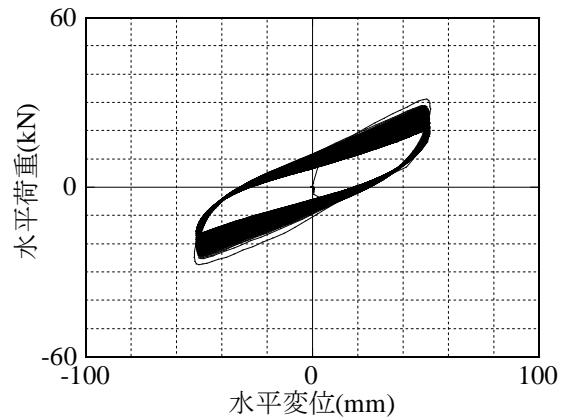


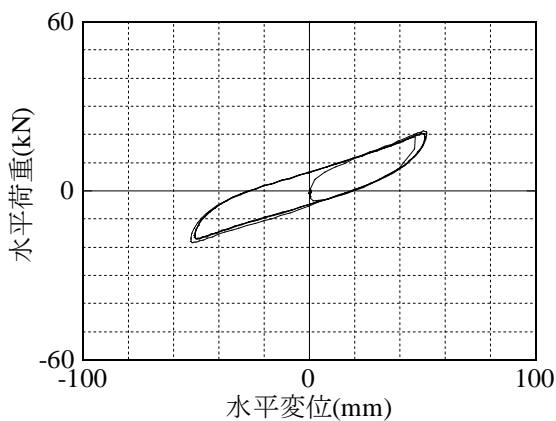
図 1.3.3-12 試験体 1、1B 相当($\gamma=50\%$, 1000 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
試験体各部温度の推移(加振時間 4000 秒)



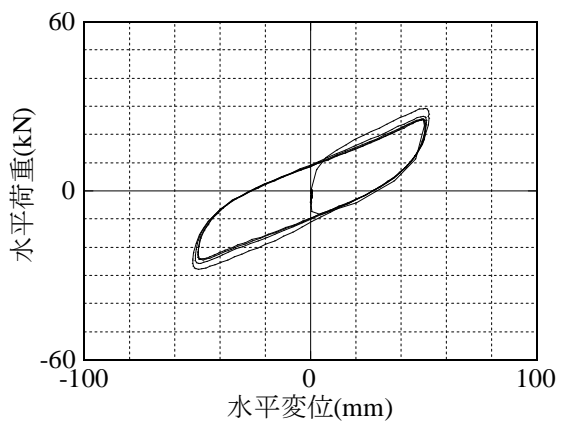
(a) 基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]



(b) 2B 相当 限界 [$\gamma=100\%$, 500 サイクル]

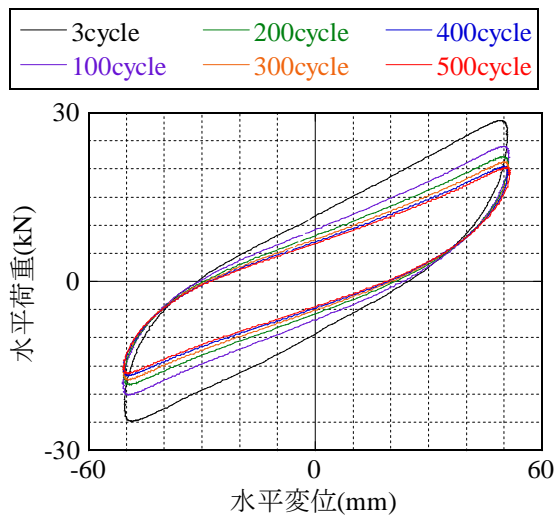


(c) (直後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

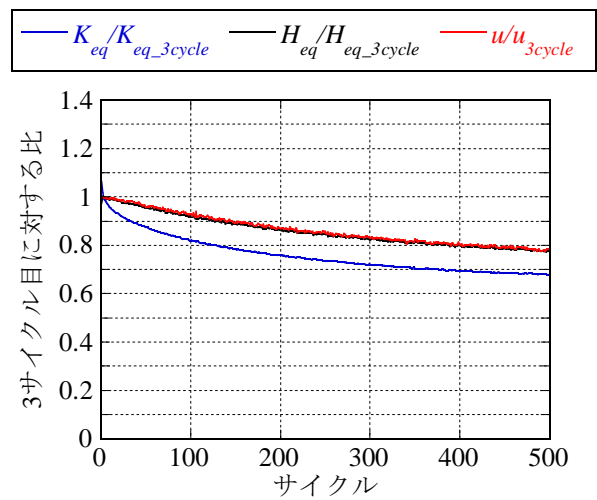


(d) (後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

図 1.3.3-13 試験体 1、2B 相当($\gamma=100\%$, 500 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係



(a) 各サイクルの水平荷重変位関係



(b) K_{eq} , H_{eq} , u の 3 サイクル目に対する比

図 1.3.3-14 試験体 1、2B 相当($\gamma=100\%$, 500 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平復元力特性値の加振サイクル数による推移

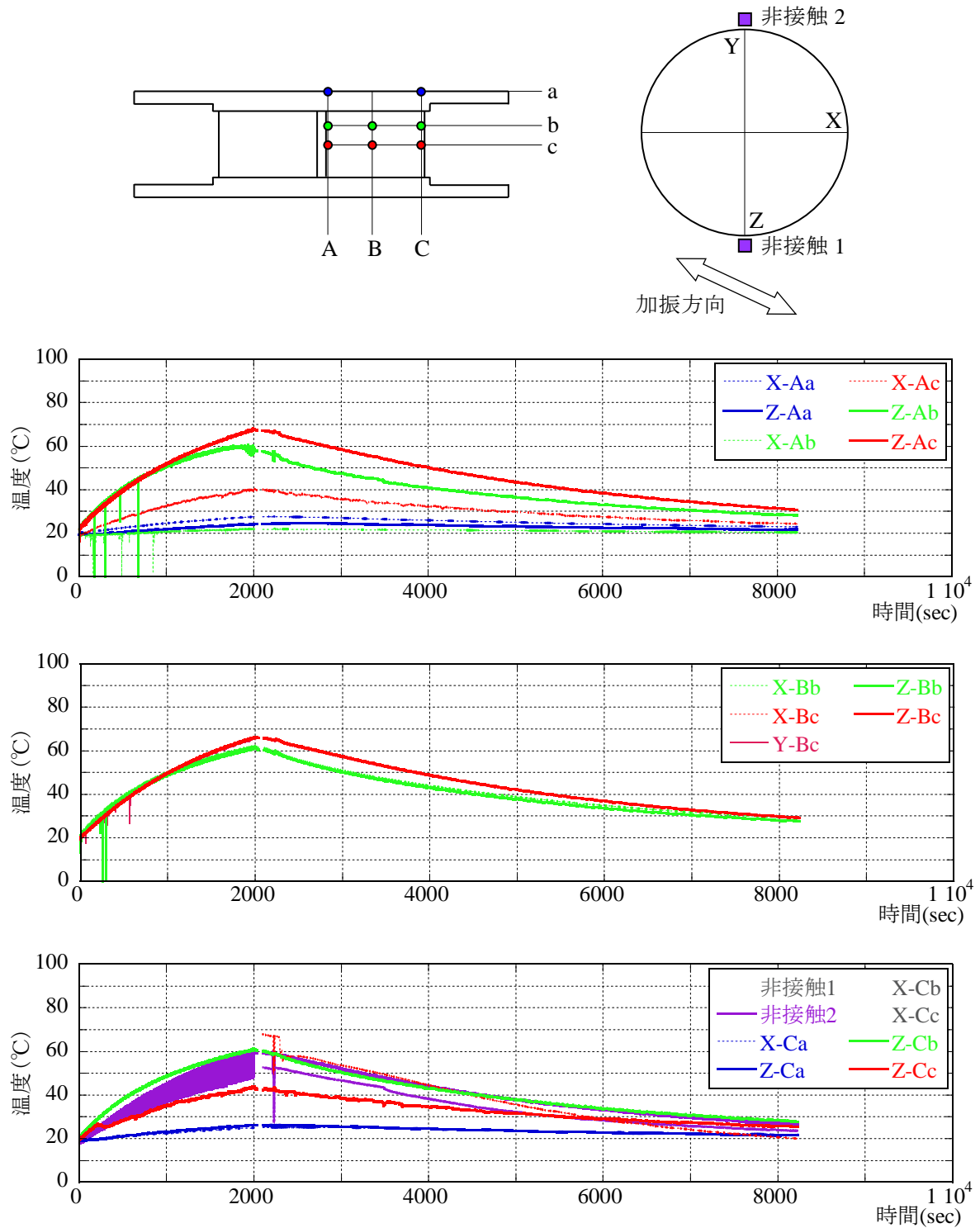
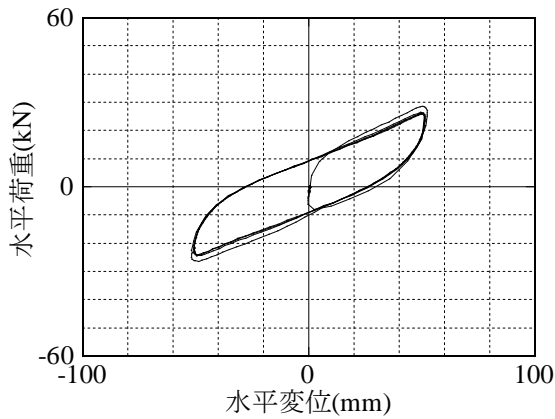
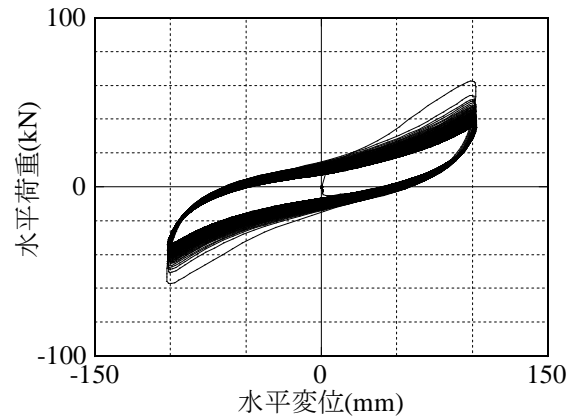


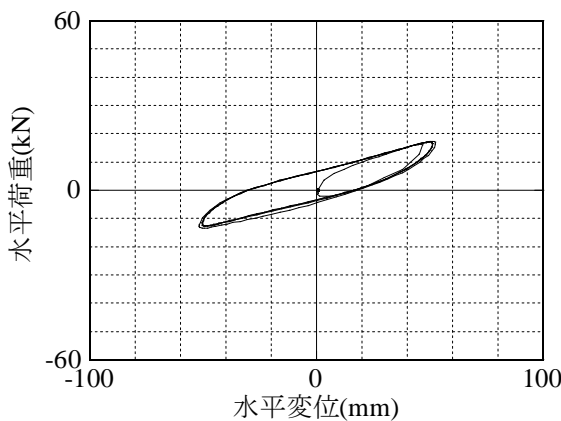
図 1.3.3-15 試験体 1、2B 相当 ($\gamma=100\%$, 500 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
試験体各部温度の推移(加振時間 2000 秒)



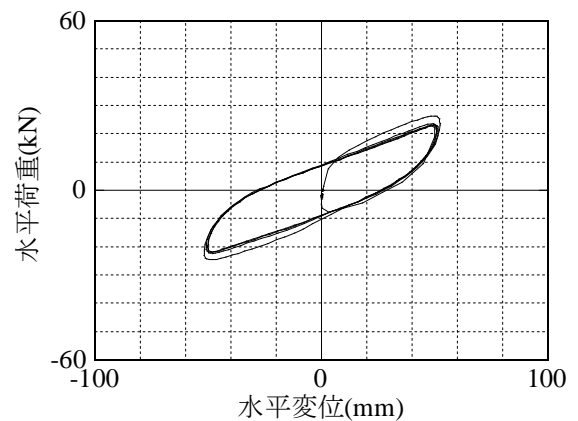
(a) 基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]



(b) 3B 相当 限界 [$\gamma=200\%$, 250 サイクル]

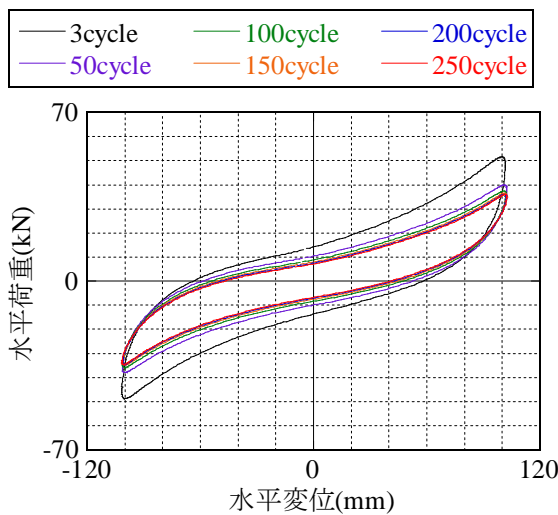


(c) (直後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

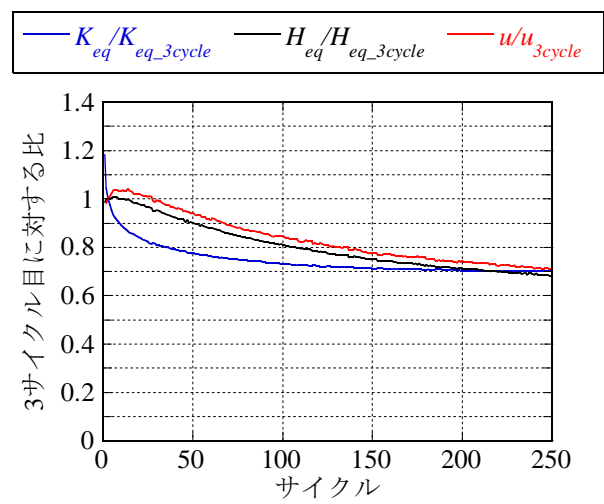


(d) (後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

図 1.3.3-16 試験体 1、3B 相当($\gamma=200\%$, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係



(a) 各サイクルの水平荷重変位関係



(b) K_{eq} , H_{eq} , u の 3 サイクル目に対する比

図 1.3.3-17 試験体 1、3B 相当($\gamma=200\%$, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平復元力特性値の加振サイクル数による推移

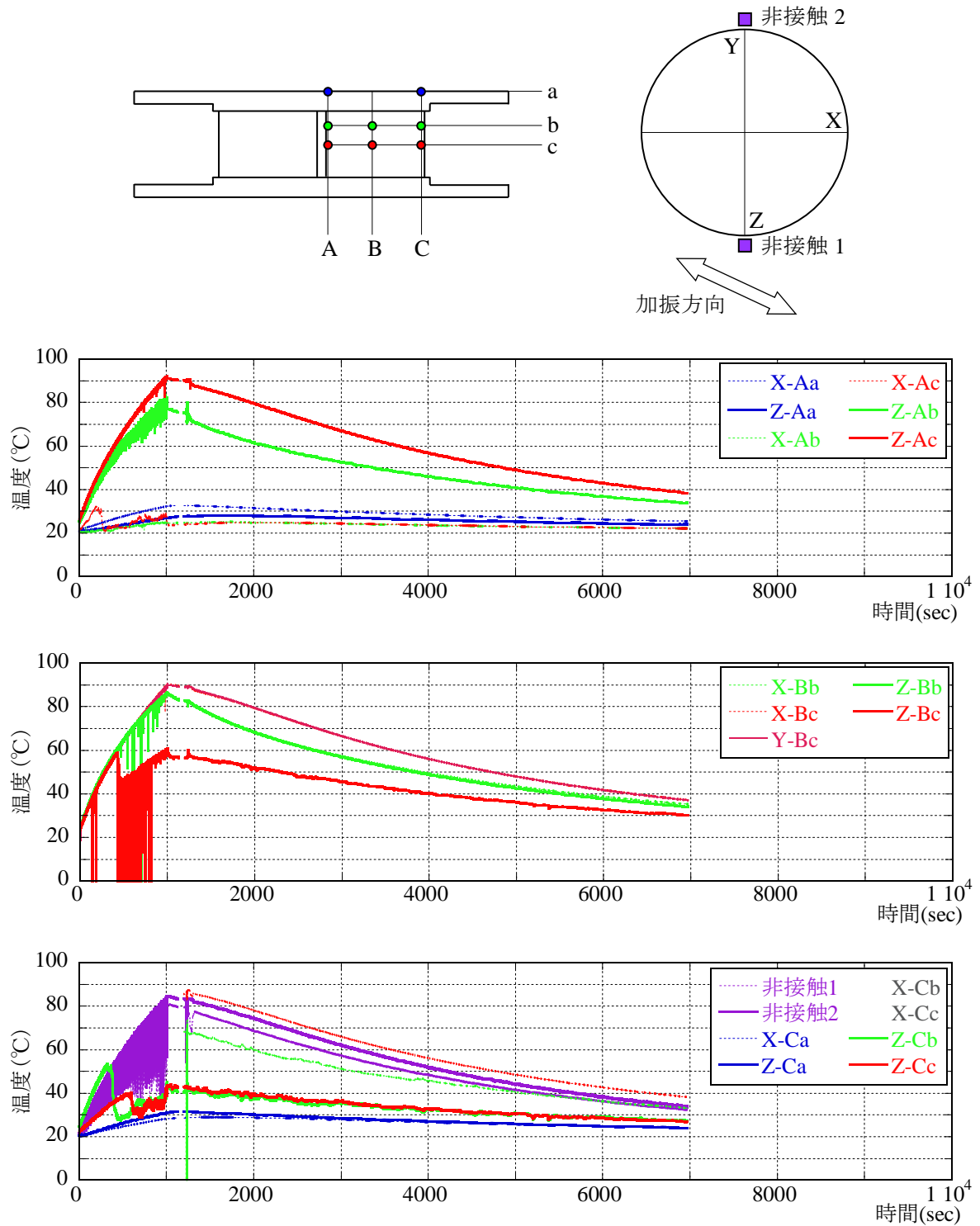
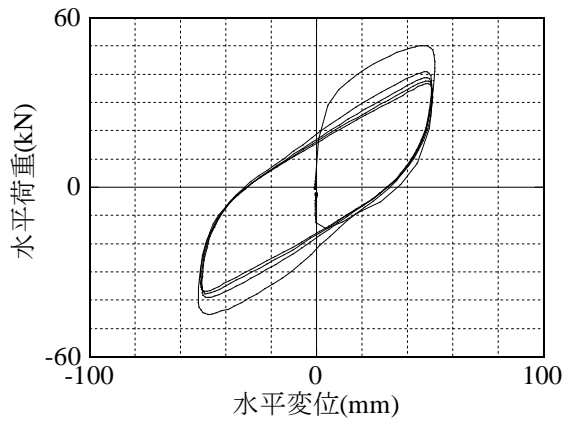
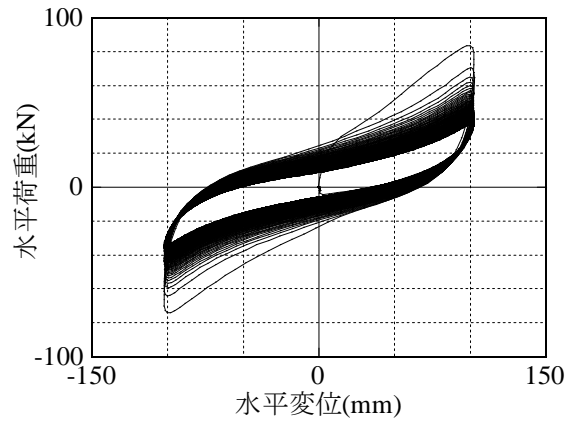


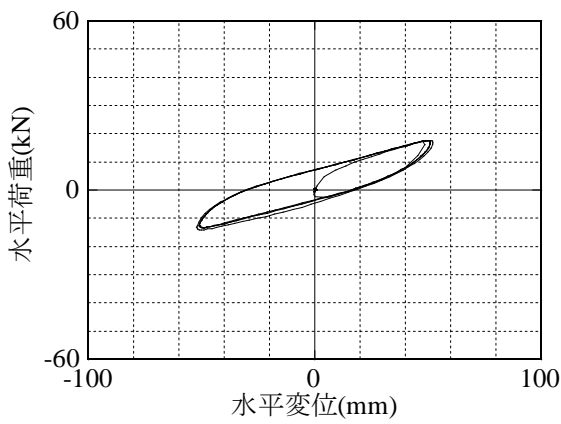
図 1.3.3-18 試験体 1、3B 相当($\gamma=200\%$, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
試験体各部温度の推移(加振時間 1000 秒)



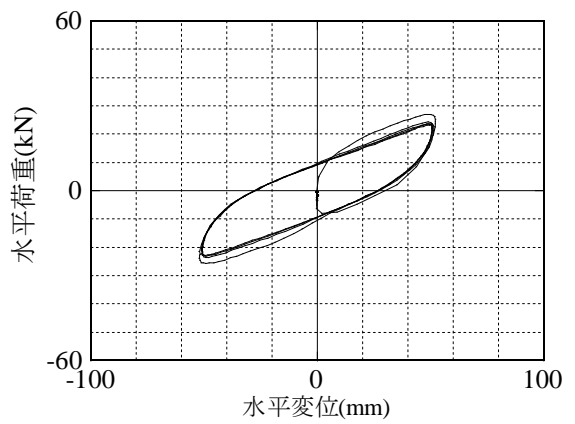
(a) 基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]



(b) 初期温度 0°C [$\gamma=200\%$, 250 サイクル]

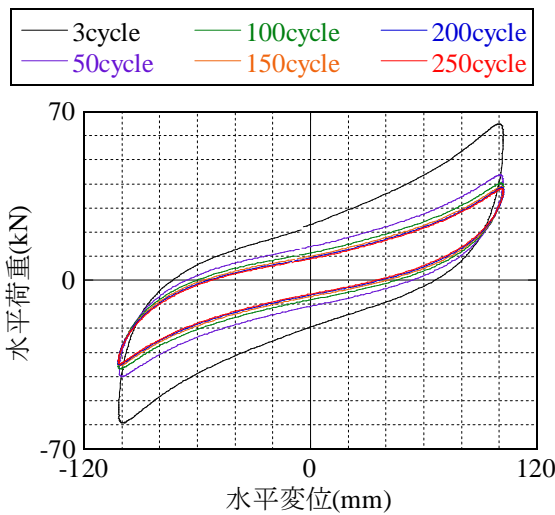


(c) (直後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

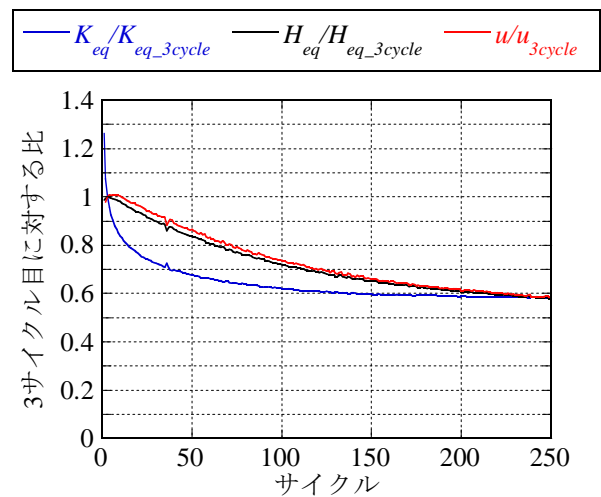


(d) (後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

図 1.3.3-19 試験体 2、初期 0°C ($\gamma=200\%$, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係



(a) 各サイクルの水平荷重変位関係



(b) K_{eq} , H_{eq} , u の 3 サイクル目に対する比

図 1.3.3-20 試験体 2、初期 0°C ($\gamma=200\%$, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平復元力特性値の加振サイクル数による推移

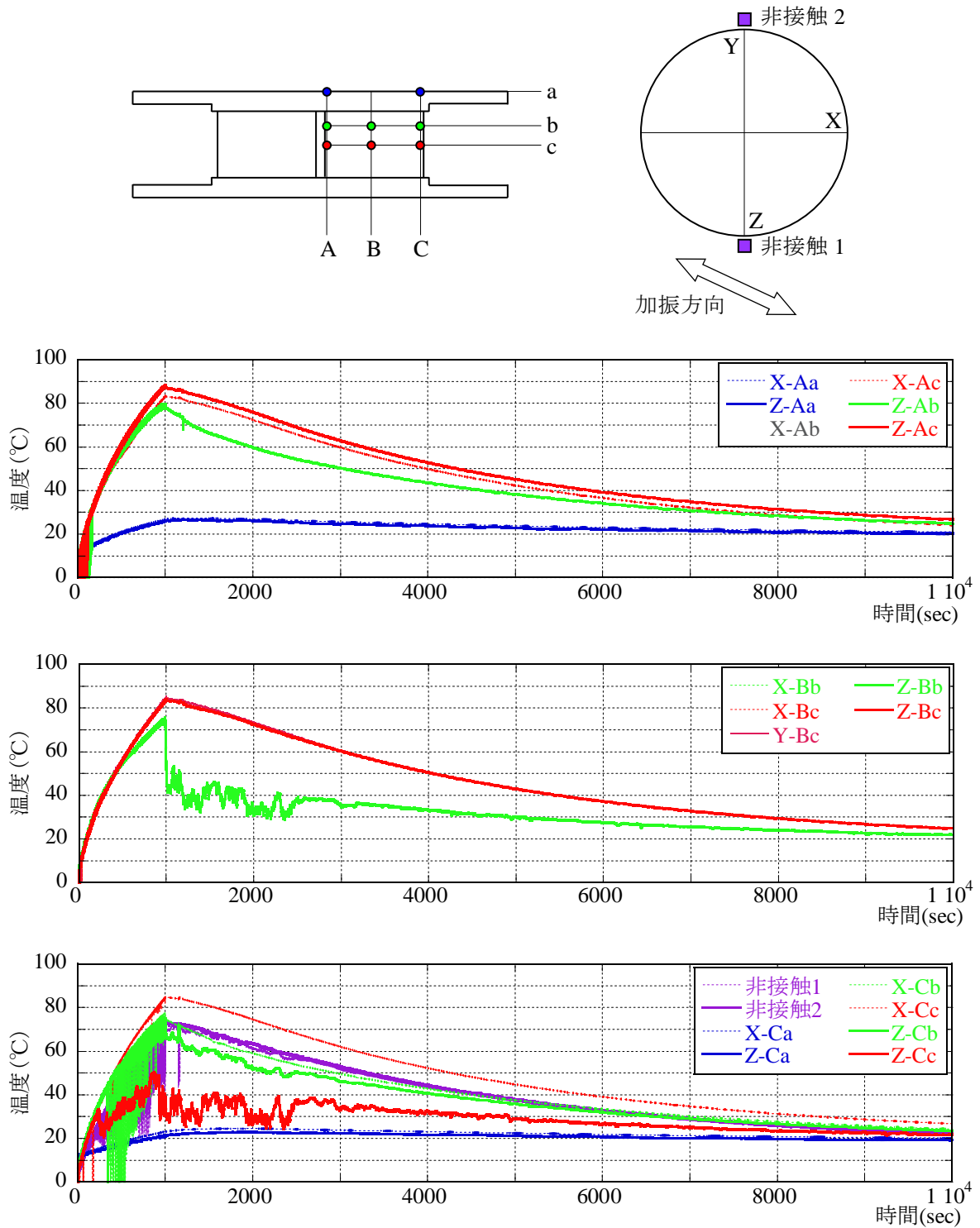
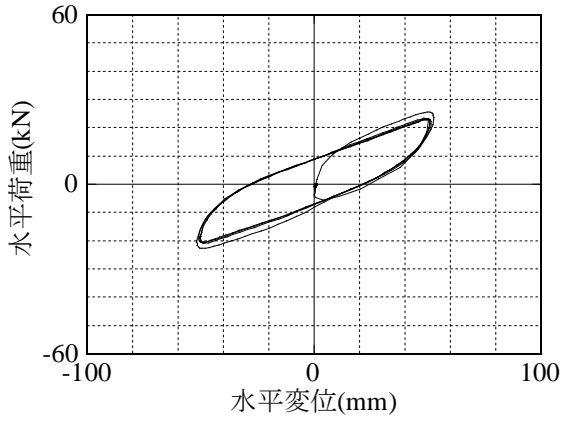
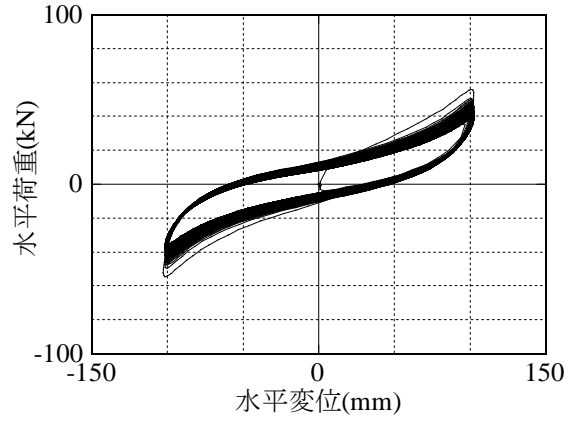


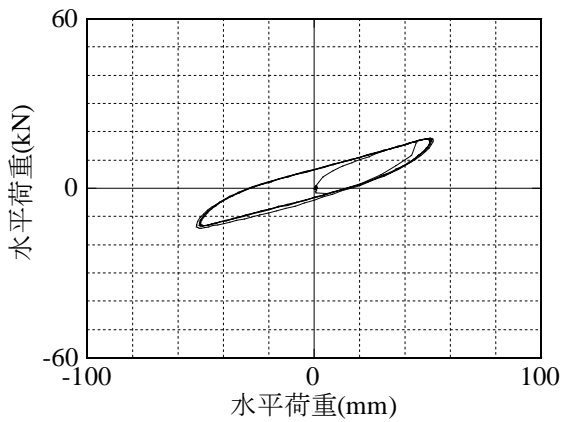
図 1.3.3-21 試験体 2、初期 0°C ($\gamma=200\%$, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
試験体各部温度の推移(加振時間 1000 秒)



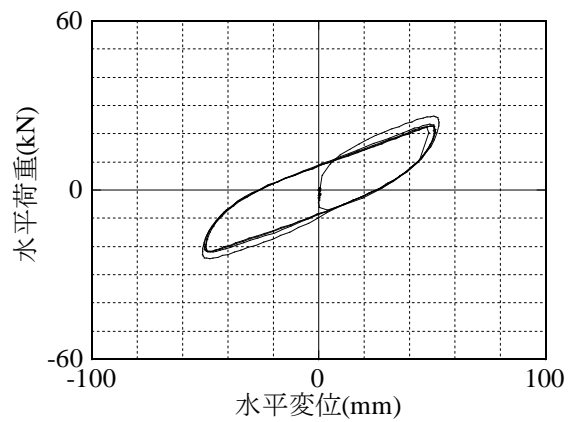
(a) 基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]



(b) 初期温度 30°C [$\gamma=200\%$, 250 サイクル]

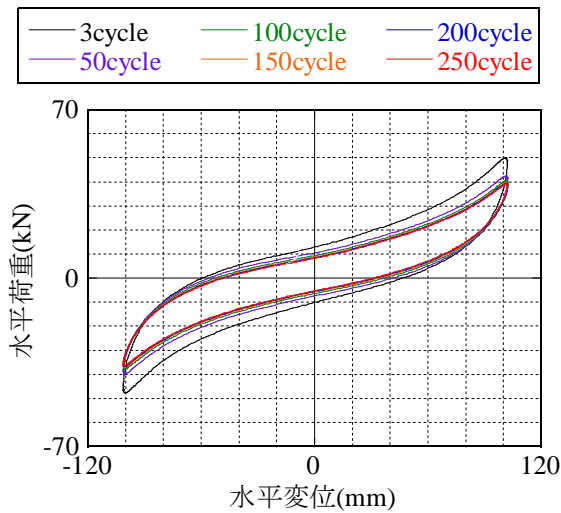


(c) (直後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

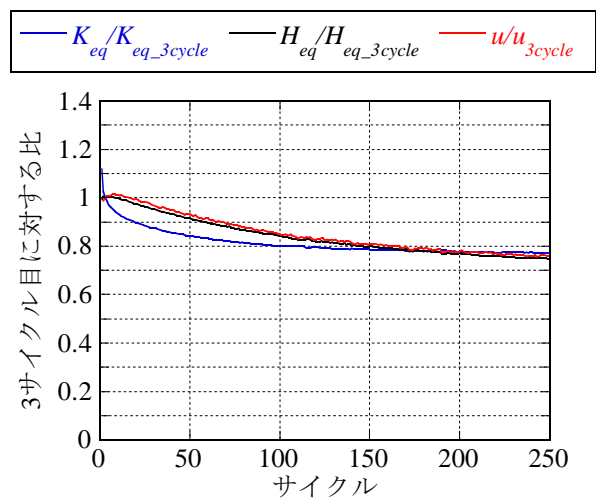


(d) (後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

図 1.3.3-22 試験体 2、初期 30°C ($\gamma=200\%$, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係



(a) 各サイクルの水平荷重変位関係



(b) K_{eq}, H_{eq}, u の 3 サイクル目に対する比

図 1.3.3-23 試験体 2、初期 30°C ($\gamma=200\%$, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平復元力特性値の加振サイクル数による推移

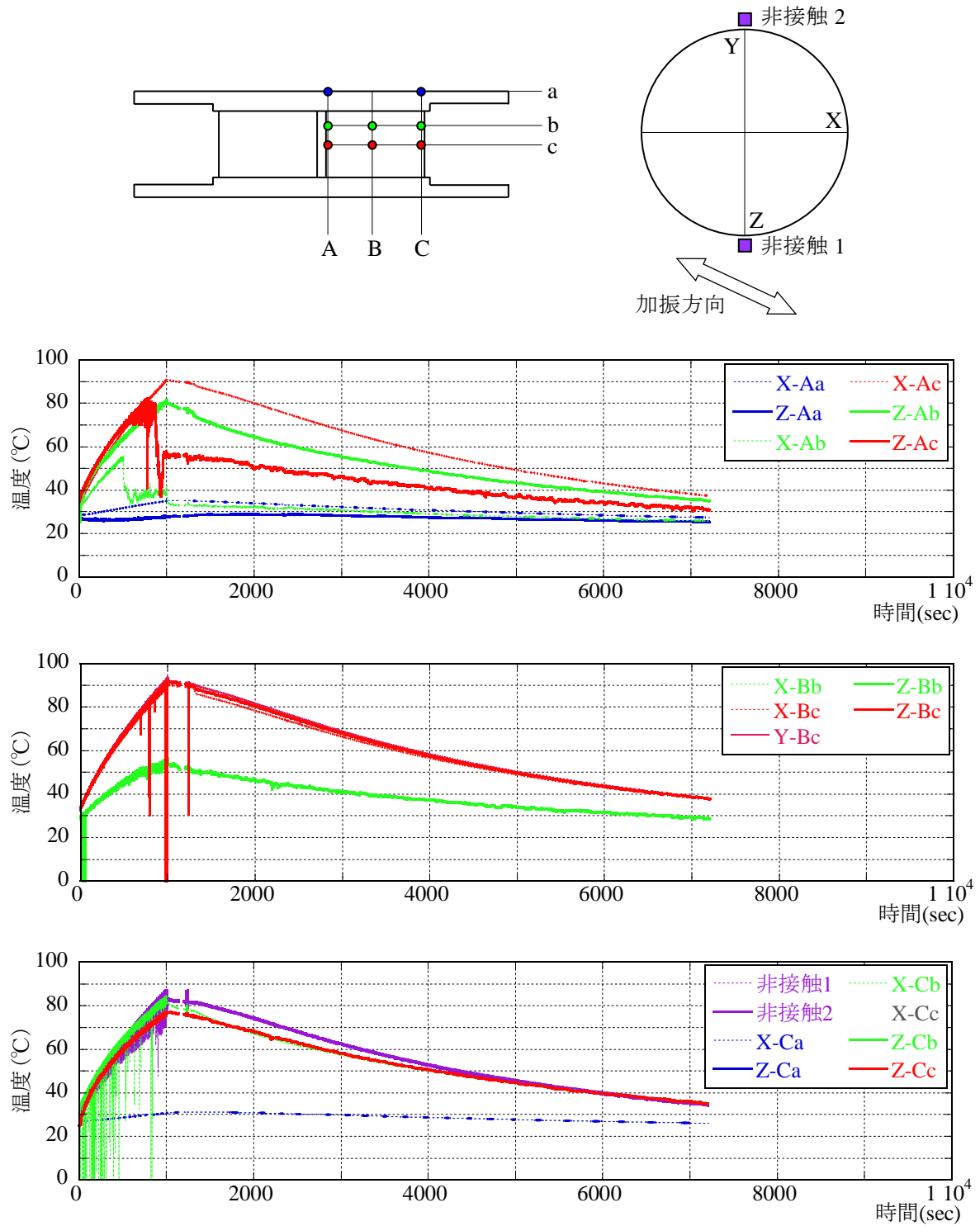
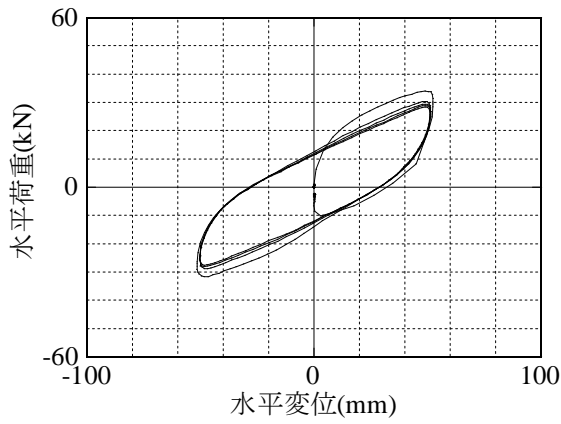
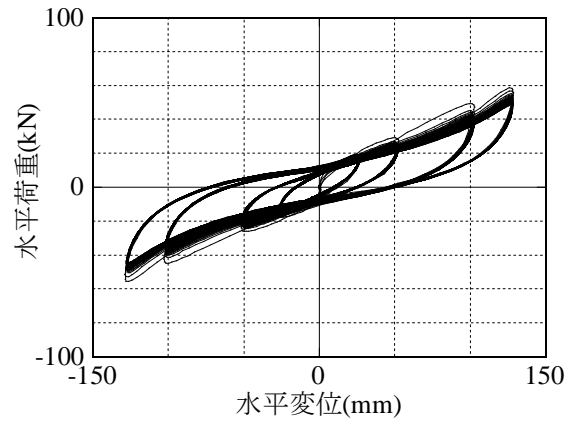


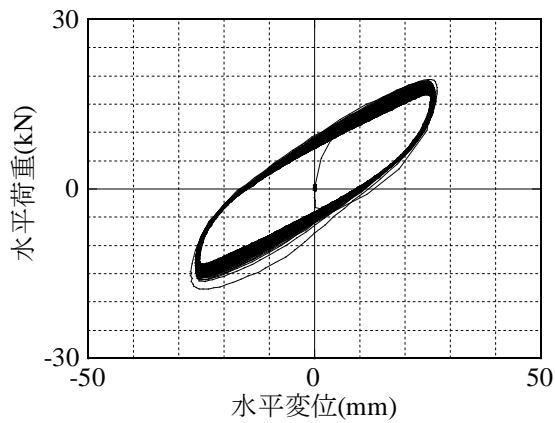
図 1.3.3-24 試験体 2、初期 30°C($\gamma=200\%$, 250 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
試験体各部温度の推移(加振時間 1000 秒)



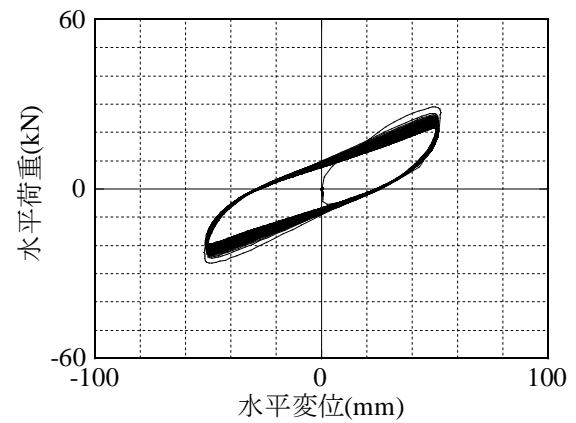
(a) 基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]



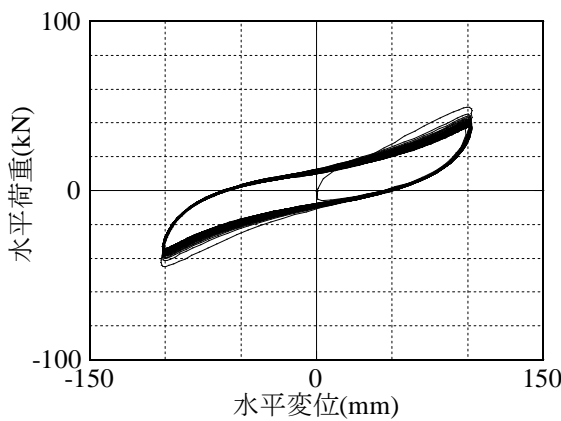
(b) 荷重履歴漸増
[$\gamma=50,100,200,250\%$, 計 477 サイクル]



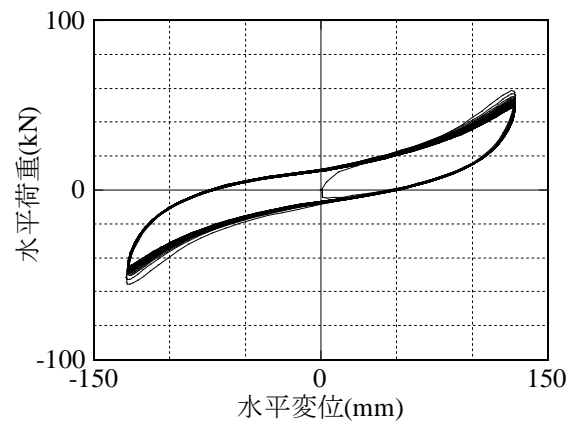
(c) 荷重履歴漸増 $\gamma=50\%$
[$\gamma=50\%$, 245 サイクル]



(d) 荷重履歴漸増 $\gamma=100\%$
[$\gamma=100\%$, 122 サイクル]

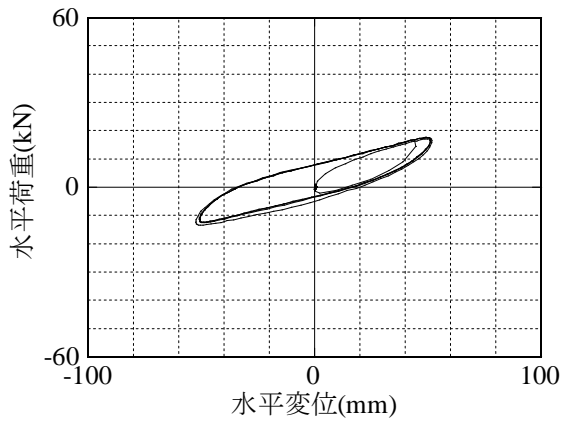


(e) 荷重履歴漸増 $\gamma=200\%$
[$\gamma=200\%$, 61 サイクル]

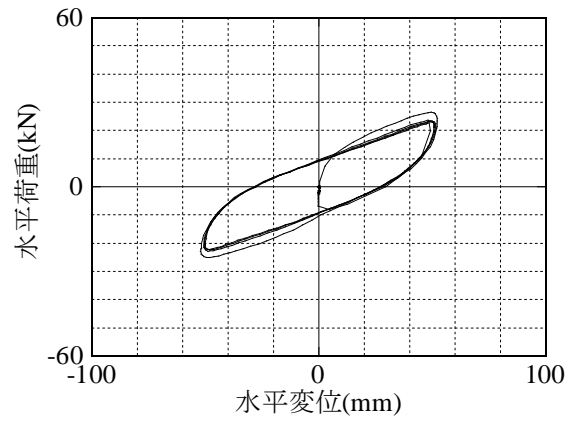


(f) 荷重履歴漸増 $\gamma=250\%$
[$\gamma=250\%$, 49 サイクル]

図 1.3.3-25 試験体 3、荷重履歴漸増($\gamma=50,100,200,250\%$, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係

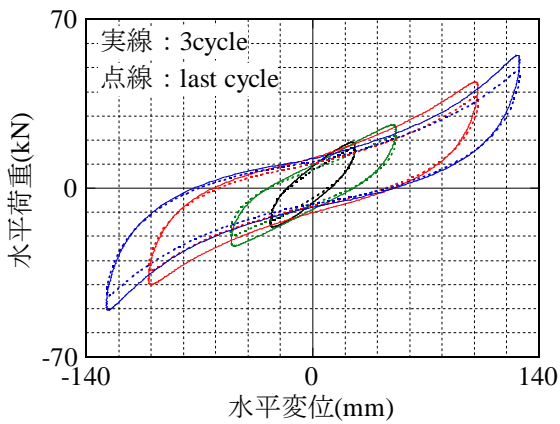
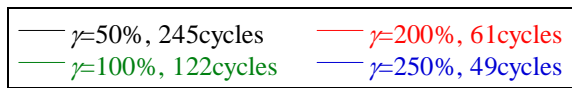


(g) (直後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

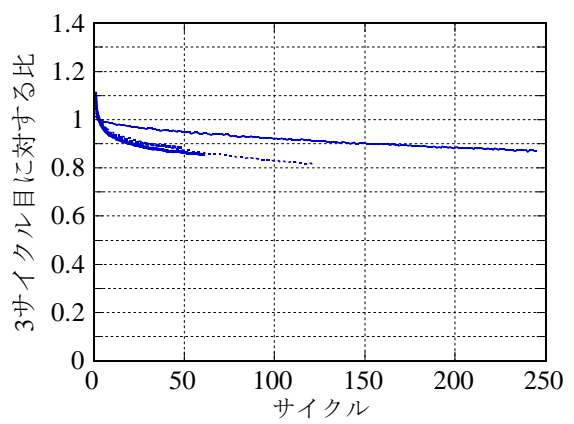
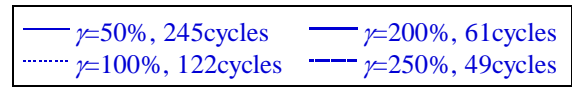


(h) (後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

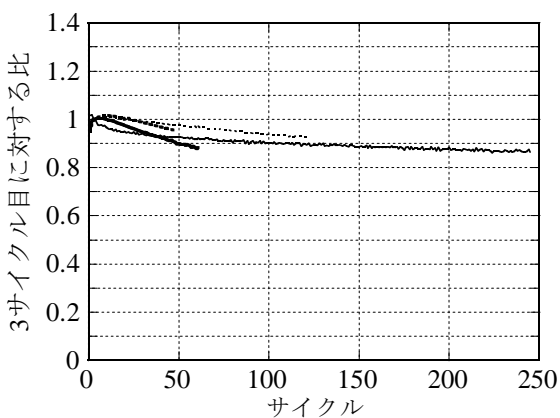
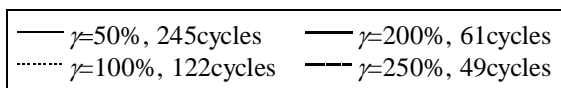
図 1.3.3-25 試験体 3、荷重履歴漸増($\gamma=50,100,200,250\%$, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波) 水平荷重変位関係



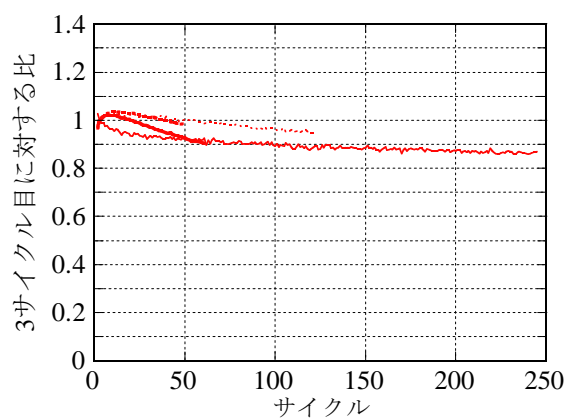
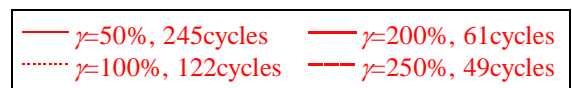
(a) 3 サイクルと最終サイクルの水平荷重変位関係



(b) K_{eq} の各振幅 3 サイクル目に対する比



(c) H_{eq} の各振幅 3 サイクル目に対する比



(d) u の各振幅 3 サイクル目に対する比

図 1.3.3-26 試験体 3、荷重履歴漸増($\gamma=50,100,200,250\%$, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波) K_{eq} 、 H_{eq} 、 u の加振サイクル数による推移

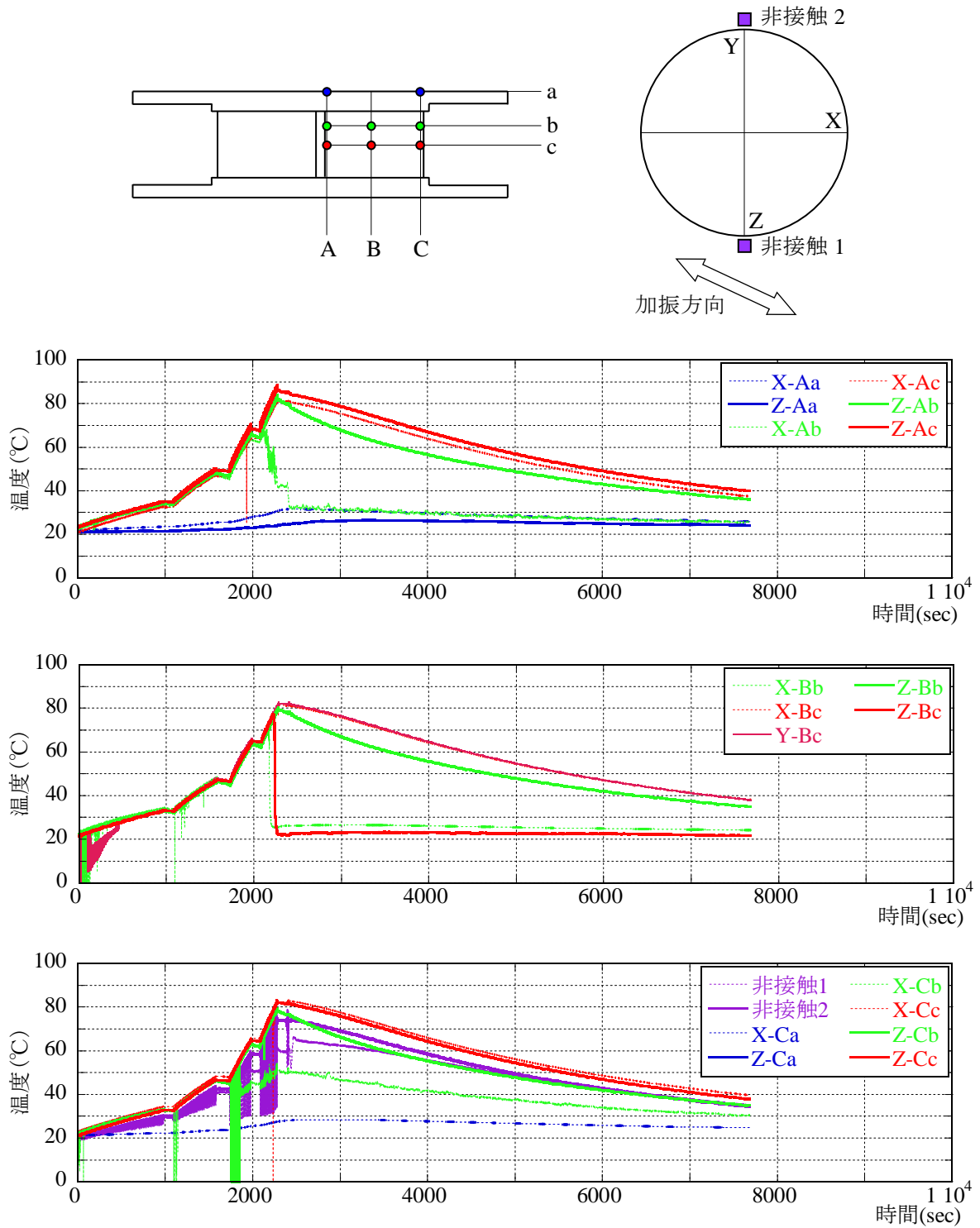
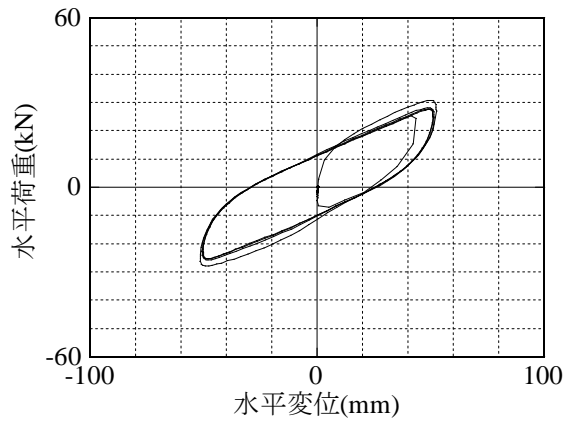
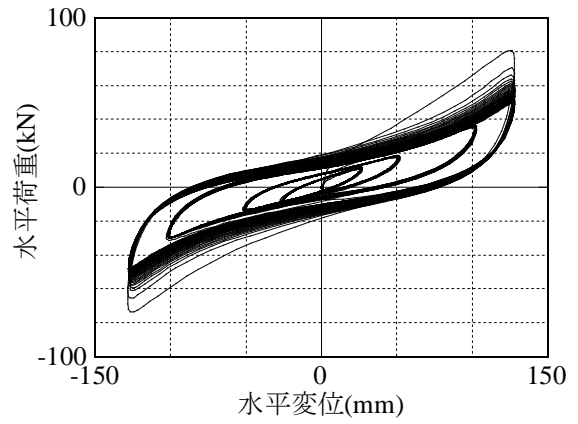


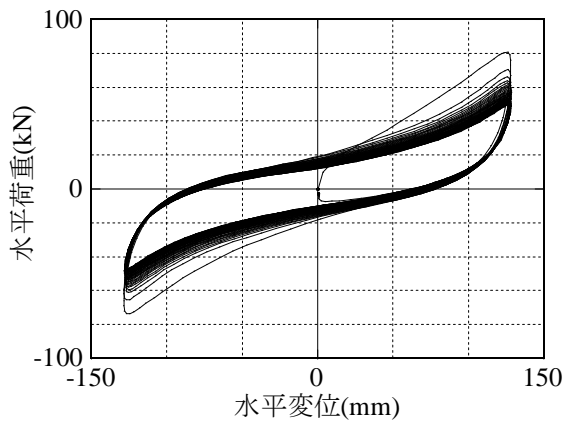
図 1.3.3-27 試験体 3、荷重履歴漸増($\gamma=50,100,200,250\%$, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
試験体各部温度の推移(加振時間計 1908 秒)



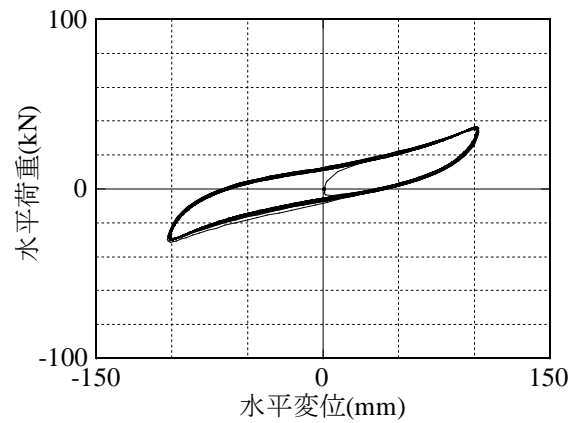
(a) 基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]



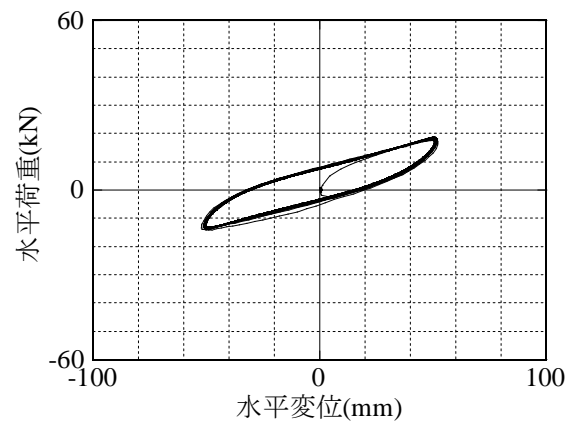
(b) 荷重履歴漸減
[$\gamma=250, 200, 100, 50\%$, 計 477 サイクル]



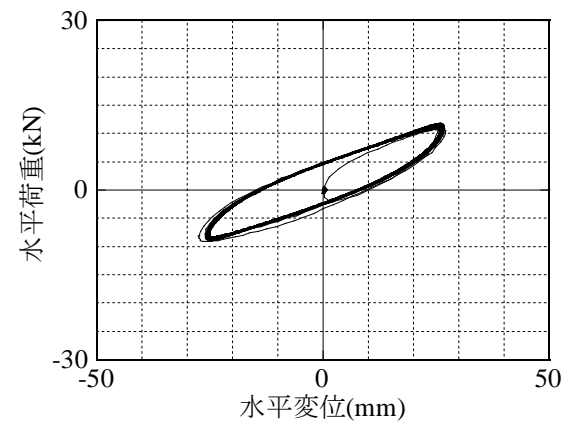
(c) 荷重履歴漸減 $\gamma=250\%$
[$\gamma=250\%$, 49 サイクル]



(d) 荷重履歴漸減 $\gamma=200\%$
[$\gamma=200\%$, 61 サイクル]

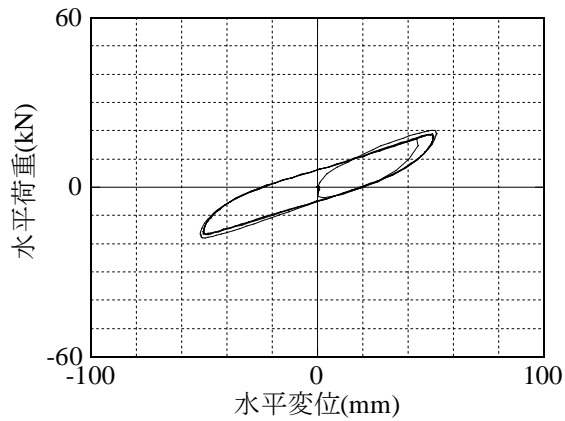


(e) 荷重履歴漸減 $\gamma=100\%$
[$\gamma=100\%$, 122 サイクル]

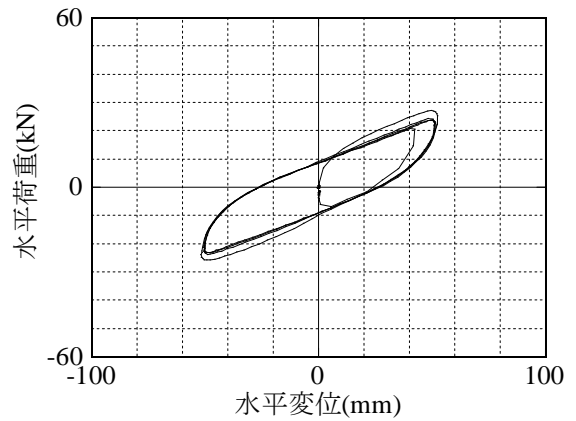


(f) 荷重履歴漸減 $\gamma=50\%$
[$\gamma=50\%$, 245 サイクル]

図 1.3.3-28 試験体 4、荷重履歴漸減($\gamma=250, 200, 100, 50\%$, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係

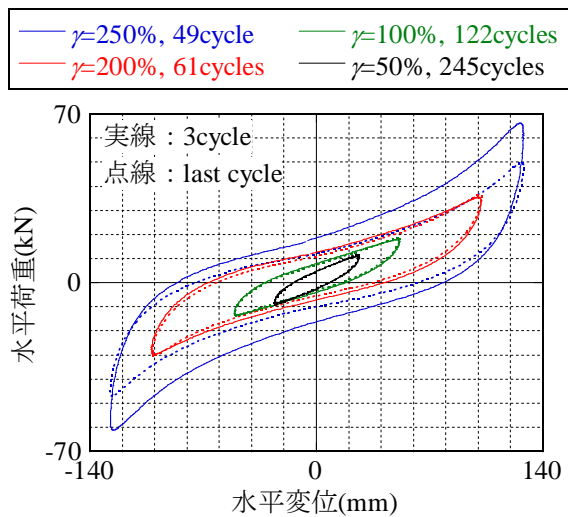


(g) (直後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

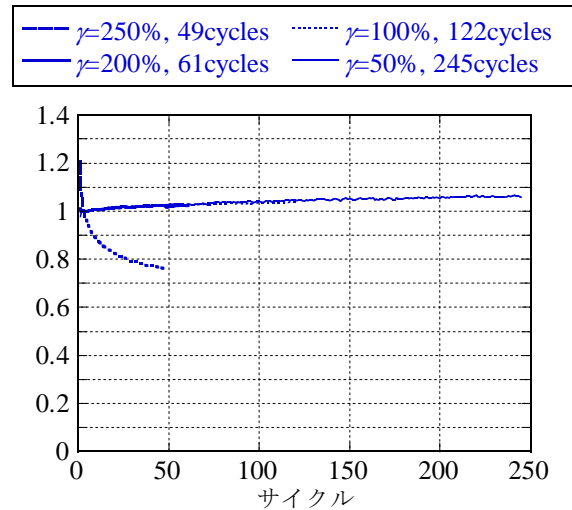


(h) (後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

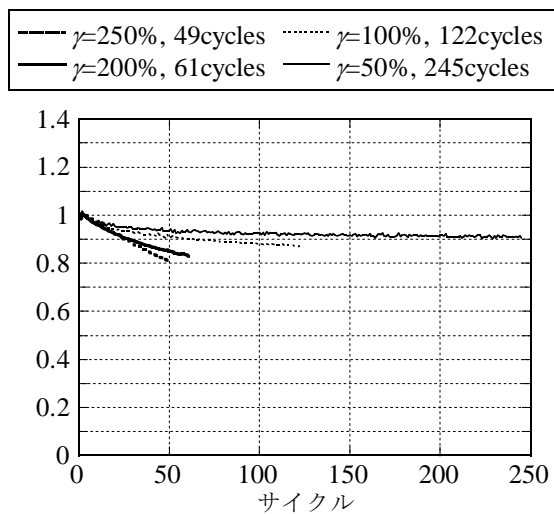
図 1.3.3-28 試験体 4、荷重履歴漸減($\gamma=250,200,100,50\%$, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係



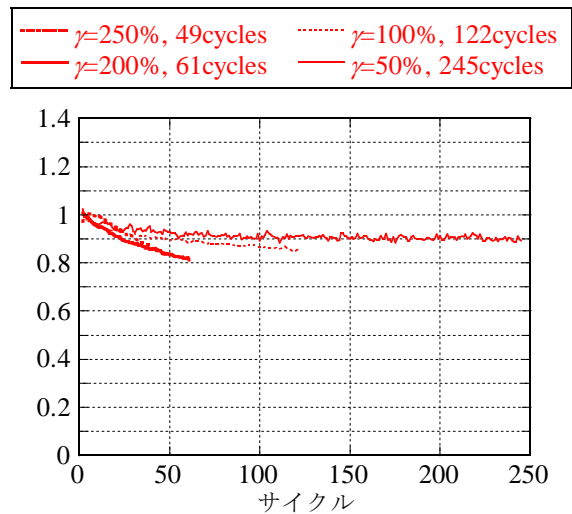
(a) 3 サイクルと最終サイクルの水平荷重変位関係



(b) K_{eq} の各振幅 3 サイクル目に対する比



(c) H_{eq} の各振幅 3 サイクル目に対する比



(d) u の各振幅 3 サイクル目に対する比

図 1.3.3-29 試験体 4、荷重履歴漸減($\gamma=250,200,100,50\%$, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
水平復元力特性値の加振サイクル数による推移

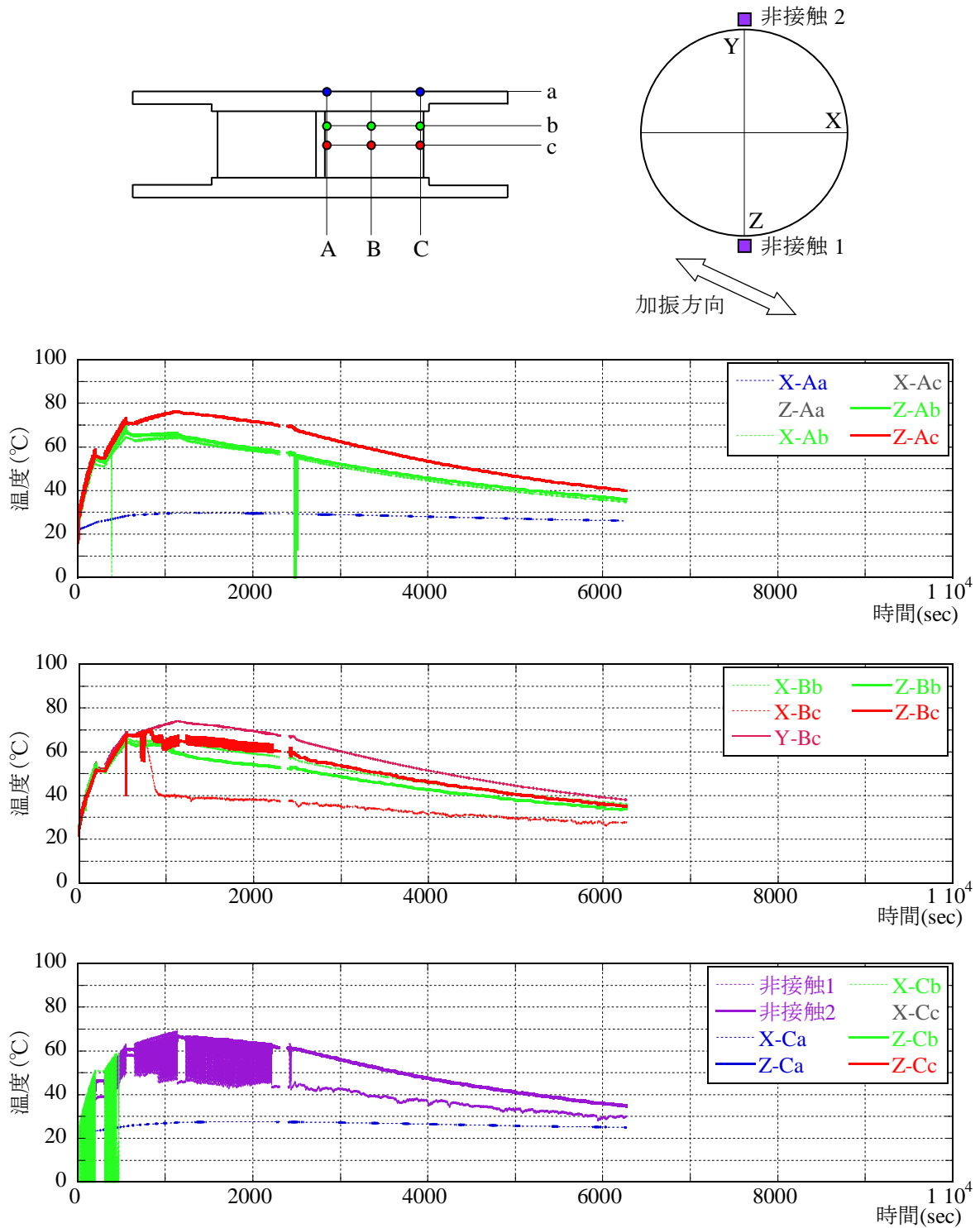
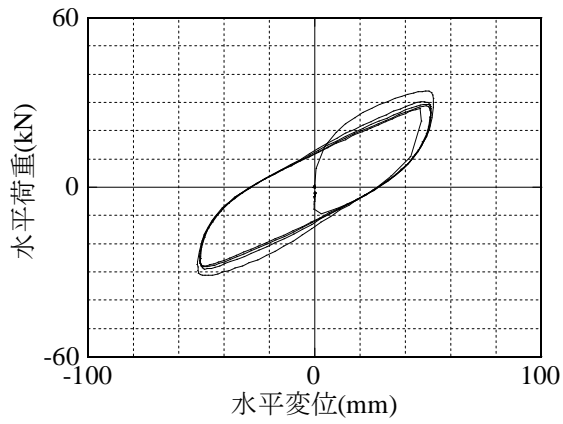
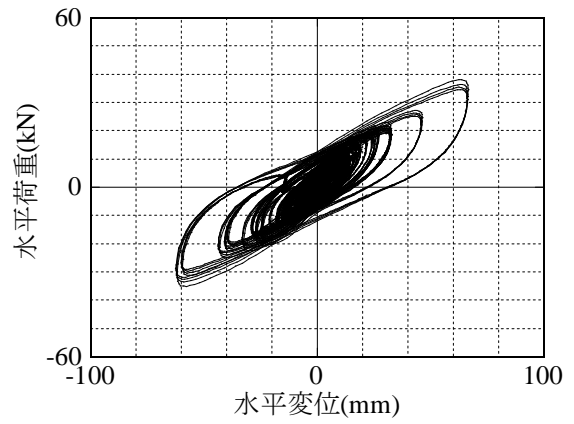


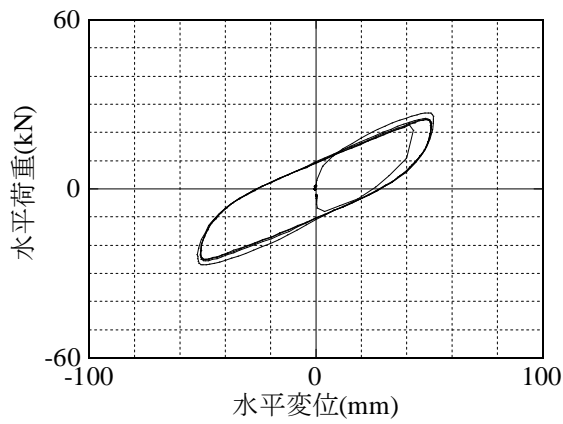
図 1.3.3-30 試験体 4、荷重履歴漸減($\gamma=250,200,100,50\%$, 計 477 サイクル, 加振周期 4.0 秒, 正弦波)
試験体各部温度の推移(加振時間計 1908 秒)



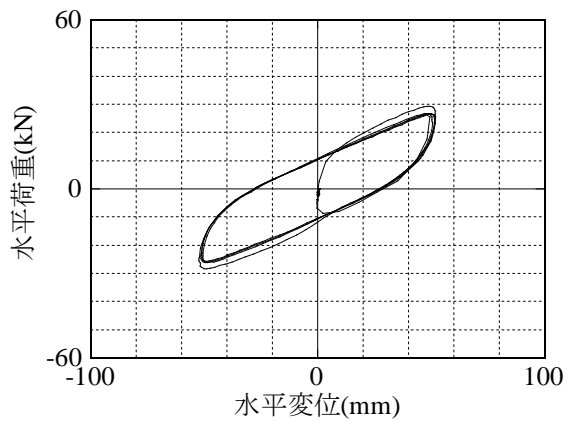
(a) 基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]



(b) 地震応答波 [150sec \times 4 回連続]



(c) (直後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]



(d) (後)基本特性 [$\gamma=100\%$, 4 サイクル]

図 1.3.3-31 試験体 4、地震応答波(愛知・津島(南海・東南海地震)・平均 150sec \times 4 回連続)
水平荷重変位関係

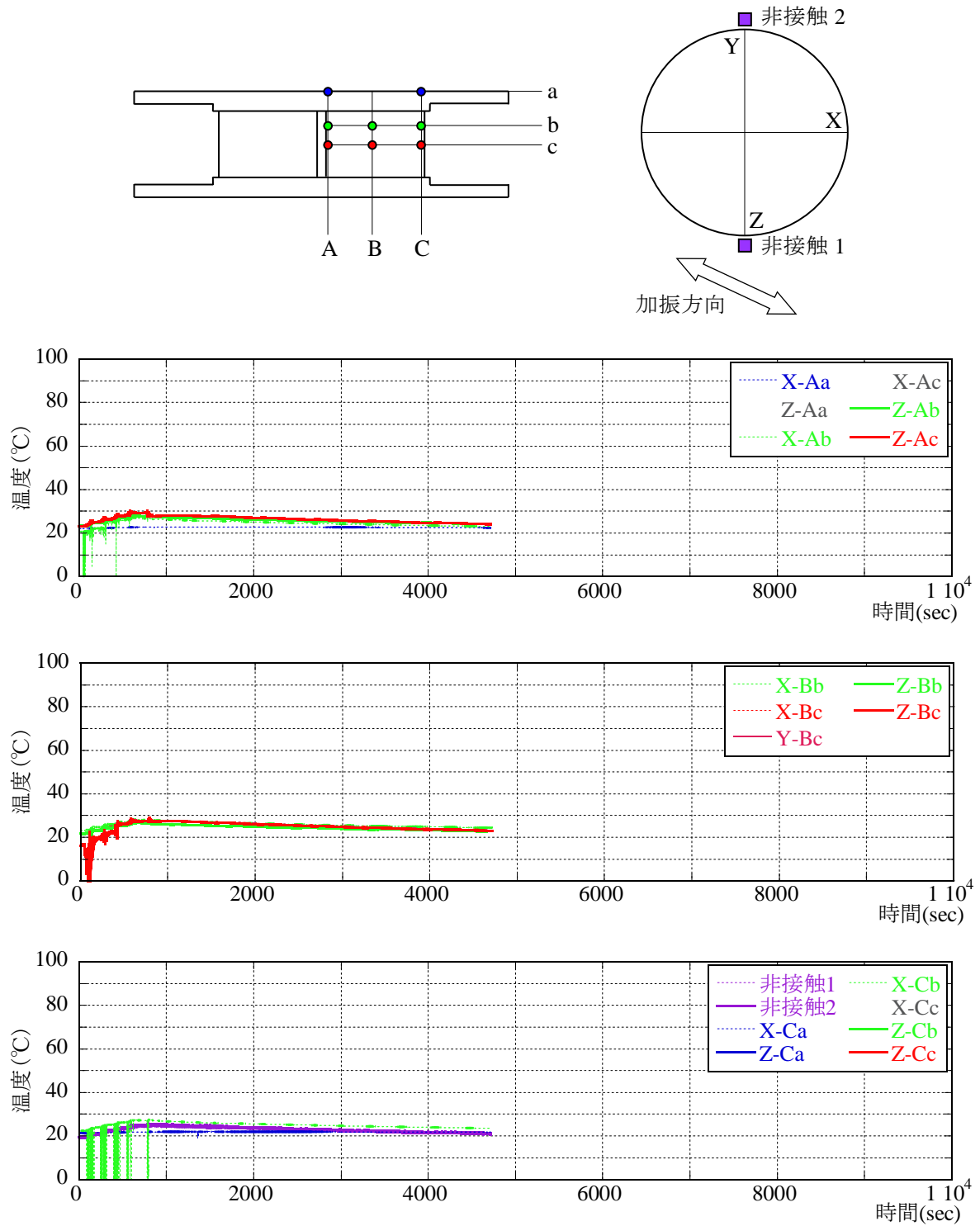


図 1.3.3-32 試験体 4、地震応答波(愛知・津島(南海・東南海地震)・平均 150sec×4 回連続)
試験体各部温度の推移

(2) 基本特性試験による特性値

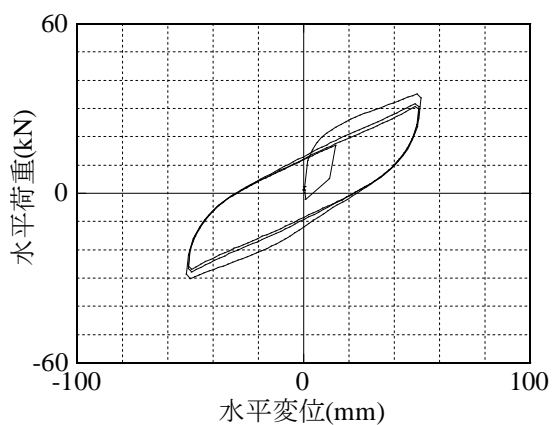
図 1.3.3-33～36 に、各試験体の製品検査および「(出荷)基本特性」の水平荷重変位関係を示す。製品検査および「(出荷)基本特性」は、加振周期 20 秒の三角波による静的水平加振試験である。各試験体の、加振周期 4.0 秒の正弦波による「基本特性」試験結果の履歴ループに比較すると、最大荷重点がとがった紡錘形のループ形状となっており、ループ面積が若干小さくなっている。

表 1.3.3-7 に、各試験ケースの前後で実施した 4 種類の基本特性試験(表 1.3.3-6)の水平荷重変位関係の 3 サイクル目の履歴ループから抽出した水平復元力特性値の一覧を示す。せん断弾性率 G_{eq} については、実験結果の履歴ループから抽出した K_{eq} から以下の式を用いて算出した。

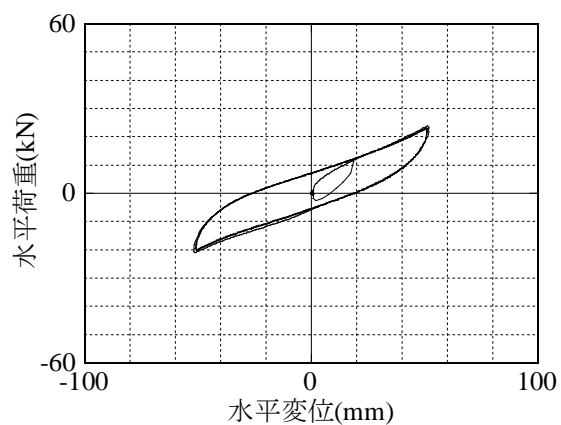
$$G_{eq} = \frac{K_{eq} \cdot h_r}{A} \quad (1.3.3-4)$$

ここで、 h_r はゴム層総厚、 A はゴムの断面積である。技術資料^{1.3.3-5)}による各復元力特性値の設計値は $\gamma=100\%$ 、試験体温度 20℃、加振振動数 0.33Hz の基準状態において、 $G_{eq}=0.620\text{N/mm}^2$ 、 $H_{eq}=0.240$ 、 $u=0.408$ である。4 体の試験体の製品検査による水平荷重変位関係の 3 ループ目から抽出した特性値の平均値は、 $G_e=0.602\text{N/mm}^2$ 、 $H_{eq}=0.198$ 、 $u=0.355$ となっている。また、各試験体における最初の「基本特性」試験による水平荷重変位関係の 3 ループ目の水平復元力特性の平均値は、 $G_{eq}=0.587\text{N/mm}^2$ 、 $H_{eq}=0.237$ 、 $u=0.421$ となっている。ただし、試験体 2 については最初の「基本特性」試験時の初期温度が約 0℃であるため、試験体 2 を除く 3 体の平均値である。一般に、高減衰ゴム系積層ゴムは振動数が高くなるに従い G_{eq} および H_{eq} が増加する傾向を示すが、 G_{eq} については、加振振動数 0.05Hz の製品検査の試験結果と加振振動数 0.25Hz の「基本特性」試験結果の値は、製品検査の値がわずかに大きな値を示しているがほぼ同じ値となっている。 H_{eq} および u については、製品検査の値がやや小さな値を示しており、振動数依存性によるものと考えられる。

図 1.3.3-37～40 に、各試験体における 4 種類の基本特性試験(表 1.3.3-6)結果の 3 サイクル目の履歴ループから抽出した水平復元力特性値の推移を示す。水平復元力特性値は、各試験体の製品検査の値に対する比として示している。製品検査と各試験体の最初の「基本特性」試験の特性値を比較すると、 K_{eq} はほぼ同じ値を示しており、 H_{eq} および u は「基本特性」の値が製品検査の 1.2 倍程度の値を示している。ただし、試験体 2 については最初の「基本特性」試験時の試験体温度が約 0℃であることから、 K_{eq} 、 H_{eq} 、 u とも製品検査の値の 1.2 倍以上となっている。各試験ケースの「基本特性」、「(直後)基本特性」、「(後)基本特性」の K_{eq} の推移を見ると、各試験ケースの加振により「(直後)基本特性」の値は「基本特性」の値から大きく低下するが、「(後)基本特性」の値は「基本特性」の値の 90%程度まで回復している。「(後)基本特性」は、試験体温度が 20(±5)℃に復帰した時点で加振を実施しており、「(直後)基本特性」と「(後)基本特性」の間のインターバルは、どの試験ケースにおいても 3 時間程度である。また、図 1.3.3-37 に示す試験体 1 の結果において、1B 相当の「(後)基本特性」試験と 2B 相当の「基本特性」試験の間はほぼ丸 1 日のインターバルがあり、2B 相当の「基本特性」の特性値は、1B 相当の「基本特性」の特性値の 94～97%の値となっており、水平復元力特性がほぼ回復していることが確認できる。各試験体の「(出荷)基本特性」の特性値は、製品検査の特性値の 80%程度の値となっており、各試験ケースの加振を受けたことによる復元力特性の低下が生じている。

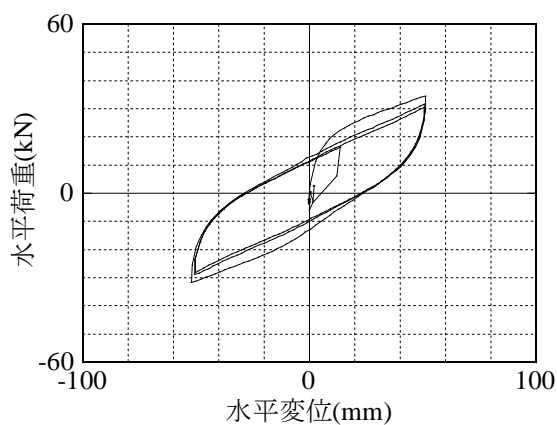


(a) 製品検査

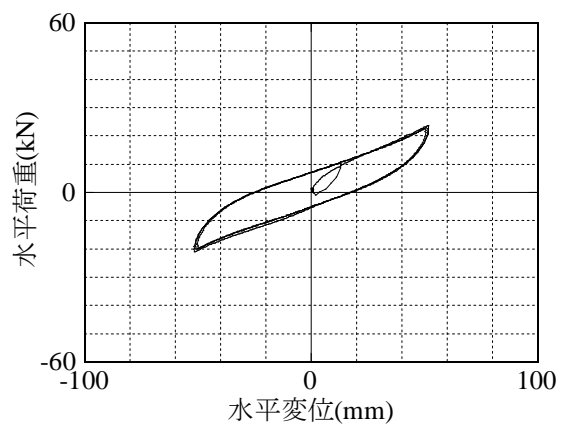


(b) (出荷)基本特性

図 1.3.3-33 試験体 1 製品検査および(出荷)基本特性試験の水平荷重変位関係
($\gamma=100\%$, 3 サイクル, 加振周期 20.0 秒, 三角波)

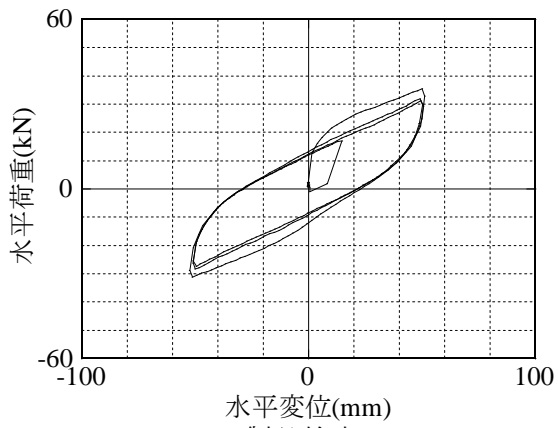


(a) 製品検査

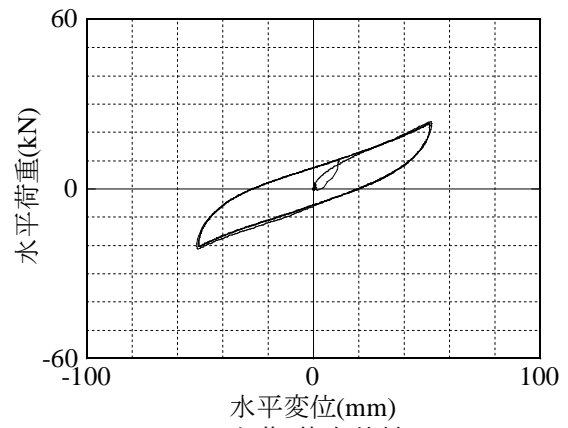


(b) (出荷)基本特性

図 1.3.3-34 試験体 2 製品検査および(出荷)基本特性試験の水平荷重変位関係
($\gamma=100\%$, 3 サイクル, 加振周期 20.0 秒, 三角波)

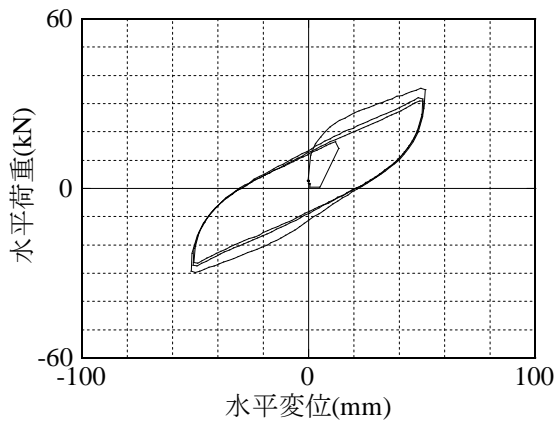


(a) 製品検査

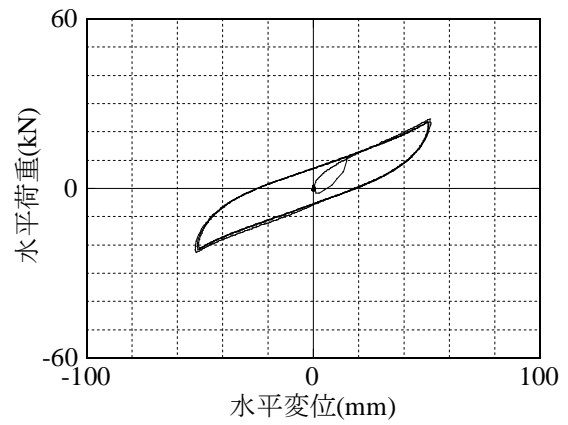


(b) (出荷)基本特性

図 1.3.3-35 試験体 3 製品検査および(出荷)基本特性試験の水平荷重変位関係
($\gamma=100\%$, 3 サイクル, 加振周期 20.0 秒, 三角波)



(a) 製品検査



(b) (出荷)基本特性

図 1.3.3-36 試験体 4 製品検査および(出荷)基本特性試験の水平荷重変位関係
($\gamma=100\%$, 3 サイクル, 加振周期 20.0 秒, 三角波)

表 1.3.3-7 基本特性試験 3 サイクル目の特性値一覧

試験体	加振 順	加振 日	ケース	試験条件	K_{eq} (kN/mm)	G_{eq} (N/mm ²)	H_{eq}	u
1		12/6		製品検査	0.574	0.597	0.199	0.354
	5	12/13		基本特性	0.562	0.585	0.238	0.423
	7	12/13	1B 相当	(直後)基本特性	0.437	0.455	0.200	0.343
	8	12/13		(後)基本特性	0.520	0.542	0.225	0.392
	9	12/14		基本特性	0.543	0.565	0.227	0.399
	11	12/14	2B 相当	(直後)基本特性	0.367	0.382	0.174	0.304
	12	12/14		(後)基本特性	0.498	0.519	0.212	0.373
	13	12/14		基本特性	0.493	0.514	0.207	0.365
	15	12/14	3B 相当	(直後)基本特性	0.294	0.306	0.184	0.337
	16	12/14		(後)基本特性	0.445	0.463	0.219	0.397
	17	12/14		(出荷)基本特性	0.422	0.440	0.164	0.289
2		12/6		製品検査	0.578	0.601	0.198	0.354
	1	12/13		基本特性	0.752	0.783	0.250	0.437
	3	12/13	初期 0℃	(直後)基本特性	0.304	0.316	0.187	0.348
	4	12/13		(後)基本特性	0.459	0.477	0.222	0.400
	28	12/15		基本特性	0.432	0.449	0.202	0.364
	30	12/15	初期 30℃	(直後)基本特性	0.304	0.316	0.174	0.323
	31	12/15		(後)基本特性	0.444	0.462	0.212	0.380
	32	12/15		(出荷)基本特性	0.420	0.438	0.158	0.280
3		12/6		製品検査	0.584	0.608	0.197	0.355
	20	12/15		基本特性	0.565	0.588	0.235	0.419
	25	12/15	漸増	(直後)基本特性	0.296	0.308	0.204	0.373
	26	12/15		(後)基本特性	0.449	0.468	0.226	0.406
	27	12/15		(出荷)基本特性	0.426	0.443	0.171	0.304
4		12/6		製品検査	0.578	0.602	0.198	0.358
	39	12/16		基本特性	0.524	0.545	0.226	0.399
	44	12/16	漸減	(直後)基本特性	0.348	0.363	0.176	0.310
	45	12/16		(後)基本特性	0.464	0.483	0.212	0.376
	35	12/16		基本特性	0.566	0.589	0.237	0.422
	37	12/16	地震応答	(直後)基本特性	0.491	0.511	0.225	0.392
	38	12/16		(後)基本特性	0.515	0.535	0.226	0.396
	46	12/16		(出荷)基本特性	0.441	0.459	0.160	0.282

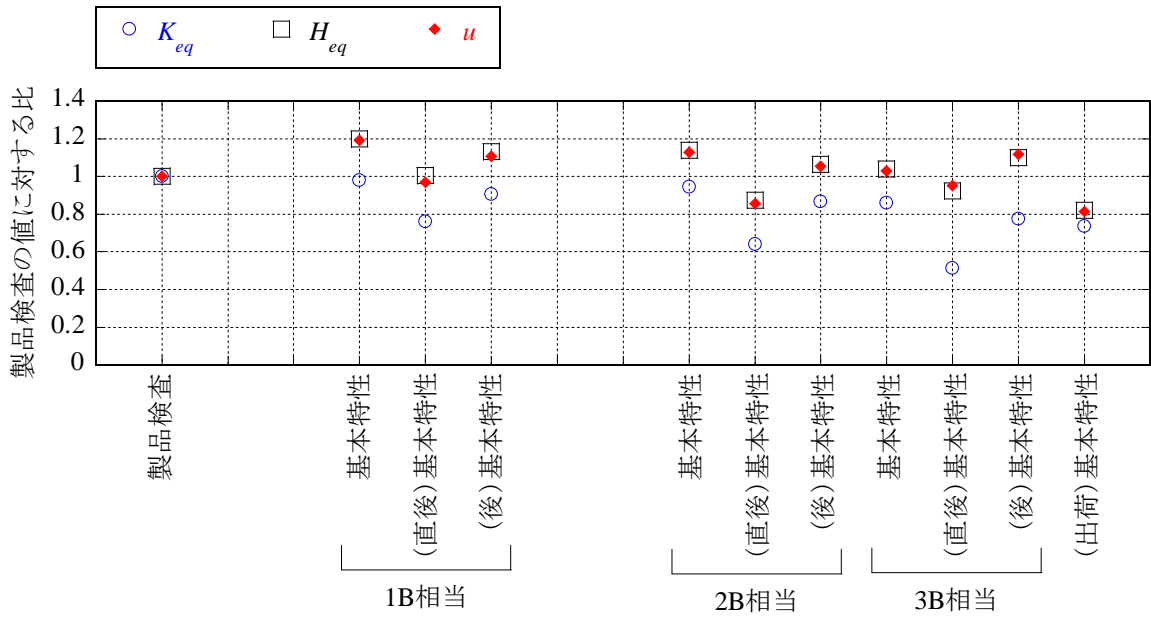


図 1.3.3-37 試験体 1 基本特性試験による特性値の推移

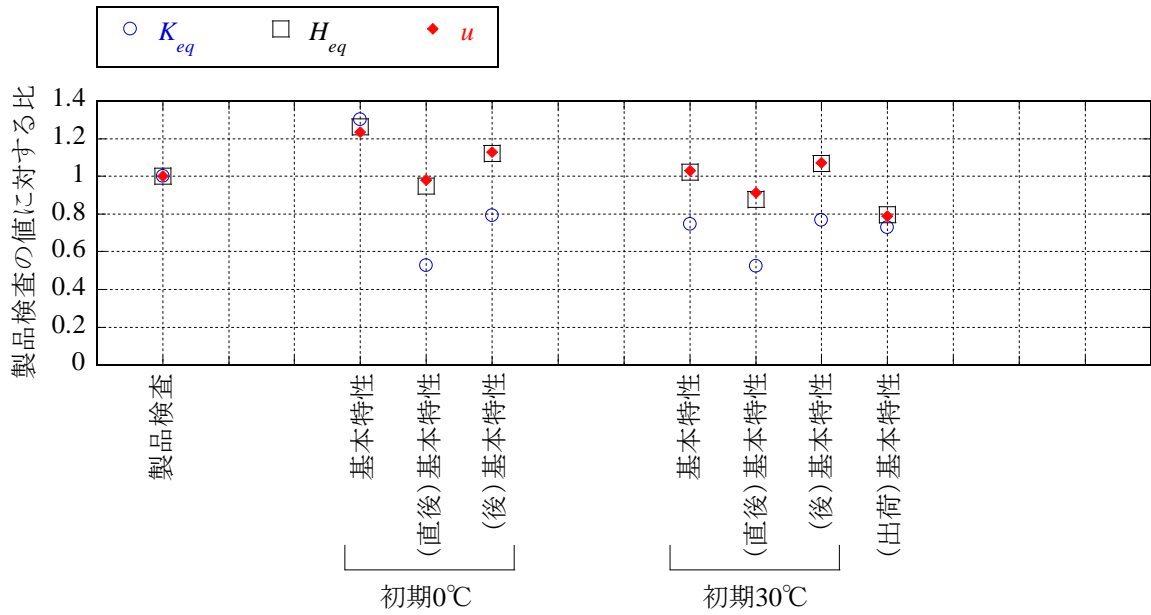


図 1.3.3-38 試験体 2 基本特性試験による特性値の推移

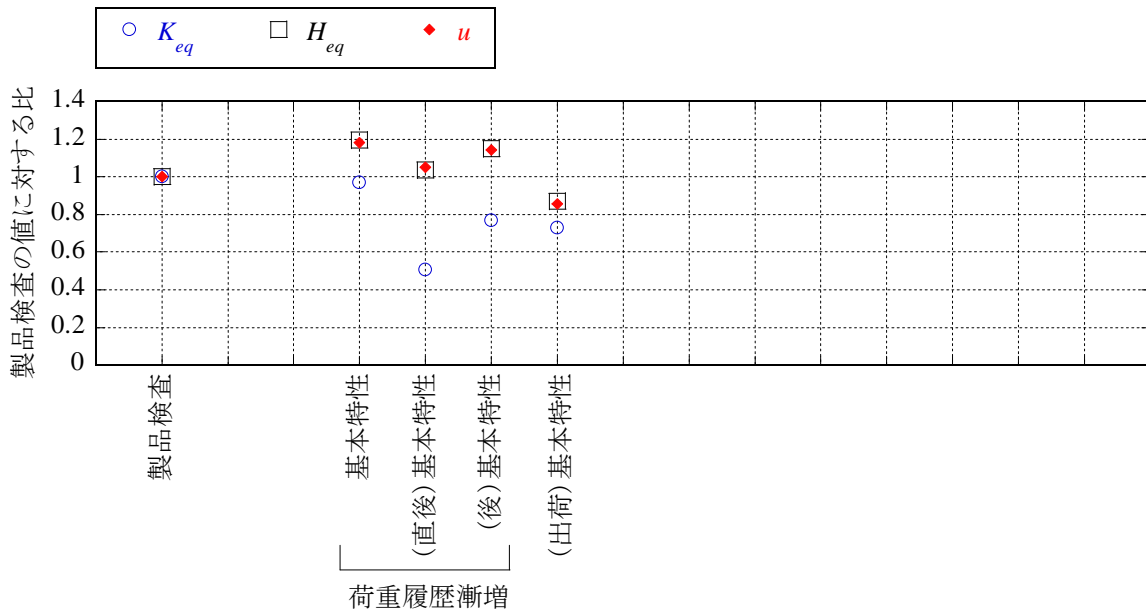


図 1.3.3-39 試験体 3 基本特性試験による特性値の推移

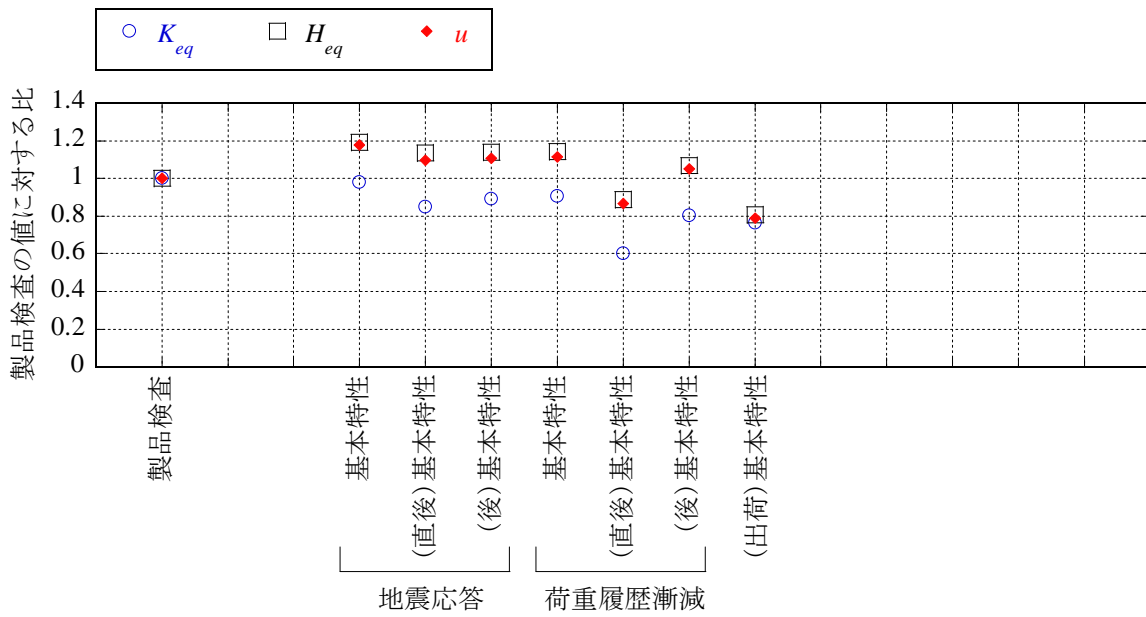


図 1.3.3-40 試験体 4 基本特性試験による特性値の推移

(3) 各指標による特性値推移の比較

各試験ケースにおける水平復元力特性値の変化を累積変形量、累積履歴吸収エネルギー量、および 1/2 高さの試験体温度の 3 つの指標によってまとめ、水平復元力特性値の変化率と 3 つの指標との相関性を検討する。1/2 高さの試験体温度については、図 1.3.3-6 に示す試験体温度計測点のうち、1/2 高さのゴム部中心である X-Bc 点の温度を用いる。ただし、試験体 4 の荷重履歴漸減の試験ケースにおいては、X-Bc 点の熱電対が計測不能となったので、Y-Bc 点の温度を用いる。また、累積履歴吸収エネルギー量については、履歴吸収エネルギー E を、ゴム体積 V で除した単位ゴム体積当たりの履歴吸収エネルギー量 E/V の累積値で表す。水平復元力特性値は、1B 相当、2B 相当、3B 相当の試験ケースの 3 サイクル目の値を、各々せん断ひずみ 50%、100%、200%の基準値として、加振振幅が一致する基準値で除した値で表している。漸増および漸減の試験ケースのせん断ひずみ 250%については、3B 相当(せん断ひずみ 200%)の値を基準値として用いる。

図 1.3.3-41 に、各試験ケースにおける累積変形量、累積 E/V 、1/2 高さの試験体温度の加振時間中の推移を示す。図 1.3.3-41(a)に示す累積変形量は、加振時間に比例して増加し加振終了時の累積変形量が 100m となる(地震応答波を除く)。図 1.3.3-41(b)に示す累積 E/V の推移において、1B 相当、2B 相当、3B 相当の試験ケースを比較すると、最終的な累積変形量が同一であっても加振振幅が大きいほどエネルギー吸収量が大きくなっている。加振プログラムが同一である 1B 相当、初期温度 0°C、初期温度 30°Cは、類似した増加傾向を示しているが、初期温度 0°Cのケースが最もエネルギー吸収量が大きく、初期温度 30°Cのケースが最も小さい。これは、試験体温度が低い方が、履歴ループ面積が大きいことによる。荷重履歴の漸増と漸減のケースは、上昇経路が異なるが加振終了時には、漸増のケースの方がやや大きいがおおよそ同じ値となっている。図 1.3.3-41(c)に示す試験体温度の推移は、累積 E/V の推移と類似した傾向を示しているが、荷重履歴漸減のケースにおいて、せん断ひずみ 50%での加振時において E/V が増加しているのに対し、試験体温度は緩やかに低下している。また、地震応答波の各指標の推移は、せん断ひずみ 50%での繰返し加振である 1B 相当の推移にほぼ重なっている。

図 1.3.3-42 に、各試験ケースの K_{eq} の変化率を 3 つの指標によりまとめたグラフを示す。図 1.3.3-42(a-1)、(b-1)、(c-1)に示す各試験ケースの K_{eq} の低下傾向を見ると、荷重履歴漸減のケースによる加振時を除けば、 K_{eq} はおおよそ基準値の 0.7 倍程度まで低下した後はほぼ一定の値となっている。図 1.3.3-42(a-2)、(b-2)、(c-2)は、各々(a-1)、(b-1)、(c-1)のグラフの一部を拡大したグラフである。図 1.3.3-42(b-2)に示す累積 E/V による推移は、最初の数サイクルを除いて 1B 相当、2B 相当、3B 相当ともおおよそ一致した低下傾向を示しているが、初期温度 0°Cはその上方を推移している。図 1.3.3-42(c-2)に示す試験体温度による推移は、初期温度の異なるケースも含め最初の数サイクルによる急激な低下部分を除く緩やかな低下部分はおおよそ一致した傾向を示している。

図 1.3.3-43 に、各試験ケースの H_{eq} の変化率を 3 つの指標によりまとめたグラフを示す。図 1.3.3-43(a-1)、(b-1)、(c-1)に示す各試験ケースの H_{eq} は、緩やかに低下し続け K_{eq} のような比較的是っきりとした収束傾向を持たないが、基準値に対して 0.6~0.7 程度が下限値と推察できる。図 1.3.3-43(c-2)に示すグラフにおいて、 H_{eq} は試験体温度に対して最初の数サイクルを除いて直線的な低下傾向を示していることから、 H_{eq} は温度の依存性が強いと考えられる。また、図 1.3.3-44 に示す各試験ケースの u の推移については、 H_{eq} とほぼ同様の傾向が見られる。

図 1.3.3-42(c-1)、(c-2)および図 1.3.3-43(c-1)、(c-2)中に橙色の実線で表される温度補正式は、技術資料^{1.3.3-5)}に示される以下の式である。

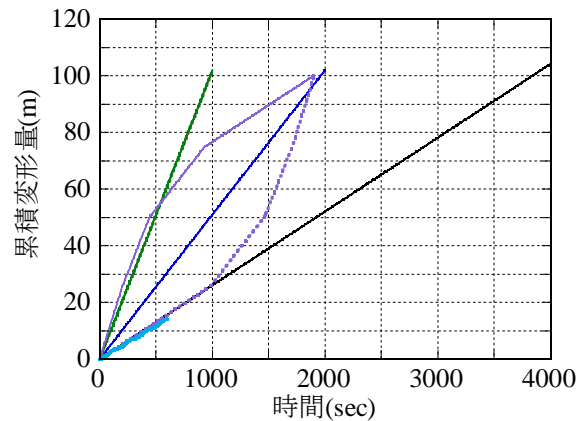
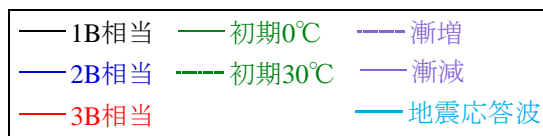
$$\beta_k = \frac{1}{a + bT + cT^2 + dT^3} \quad (1.3.3-5)$$

$$\beta_h = \frac{1}{e + fT + gT^2 + hT^3} \quad (1.3.3-6)$$

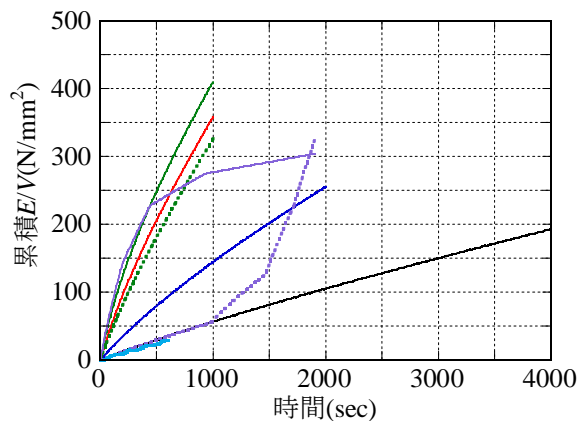
T: 試験時温度

ゴム材料	a	b	c	d	e	f	g	h
X0.6R	1.21	-1.86 × 10 ⁻²	5.99 × 10 ⁻⁴	-8.99 × 10 ⁻⁶	1.06	-4.13 × 10 ⁻³	1.10 × 10 ⁻⁴	-3.10 × 10 ⁻⁶

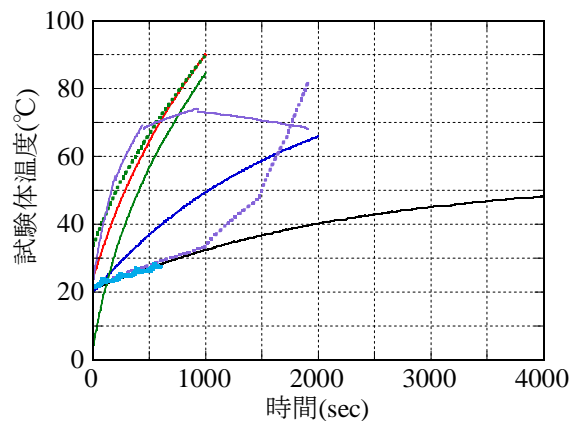
図 1.3.3-42(c-1)、(c-2)中の温度補正式は、式(1.3.3-5)で算出される等価剛性の補正係数 β_k の逆数であり、図 1.3.3-43(c-1)、(c-2)中の温度補正式は式(1.3.3-6)で算出される等価減衰定数の補正係数 β_h の逆数である。この温度補正式の適用範囲は-10℃～40℃であり、グラフ中には0℃～40℃のグラフが示されており、加振による試験体温度変化と K_{eq} 、 H_{eq} の推移の関係と温度補正式はおおよそ一致した推移を示している。



(a) 累積変形量の推移

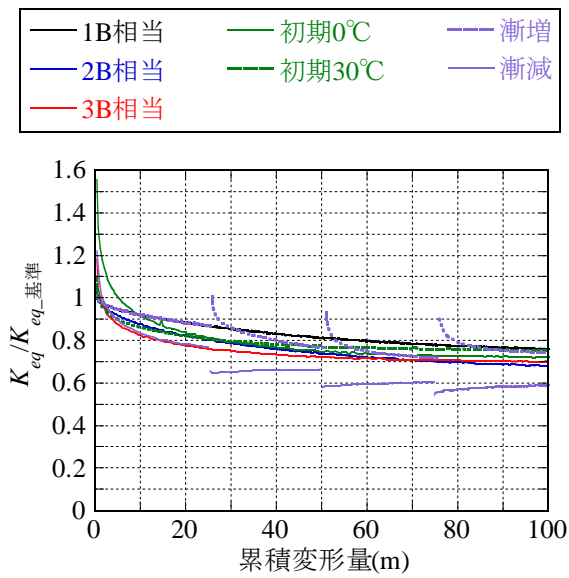


(b) 累積履歴吸収エネルギーの推移

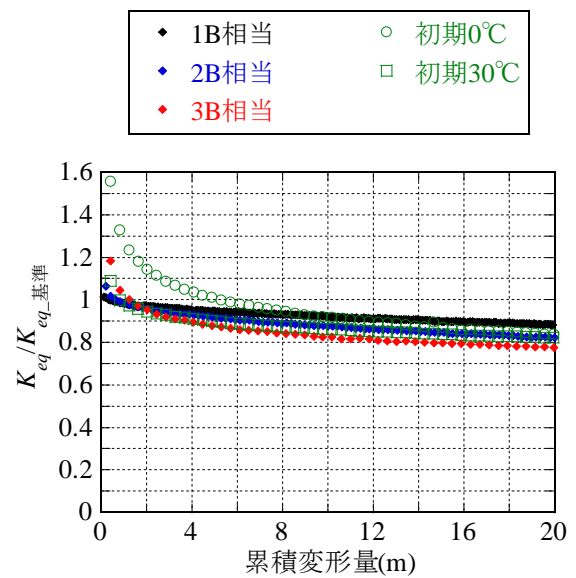


(c) 1/2 高さ試験体温度の推移

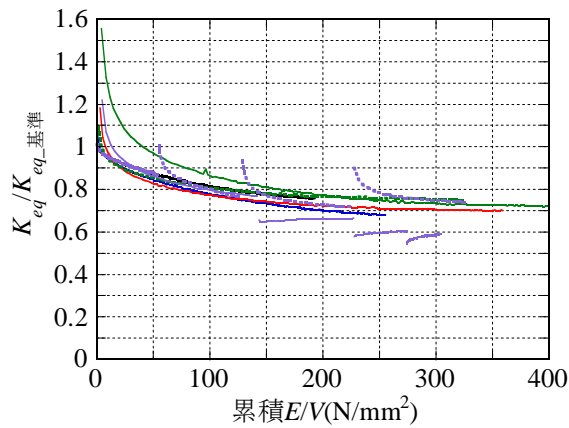
図 1.3.3-41 累積値および試験体温度の推移



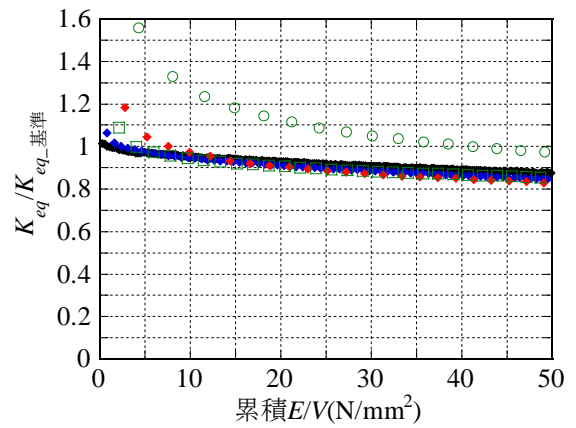
(a-1) 累積変形量による推移



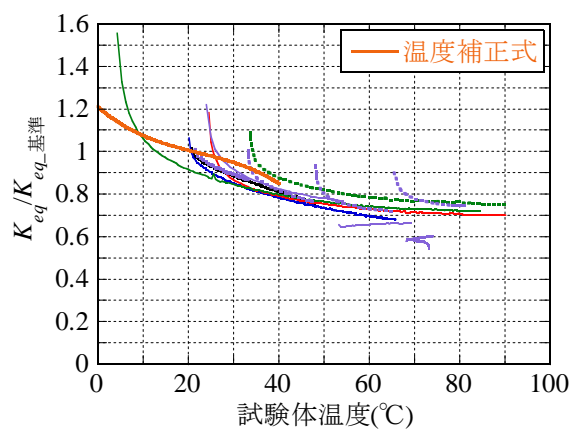
(a-2) 累積変形量による推移(0~20m)



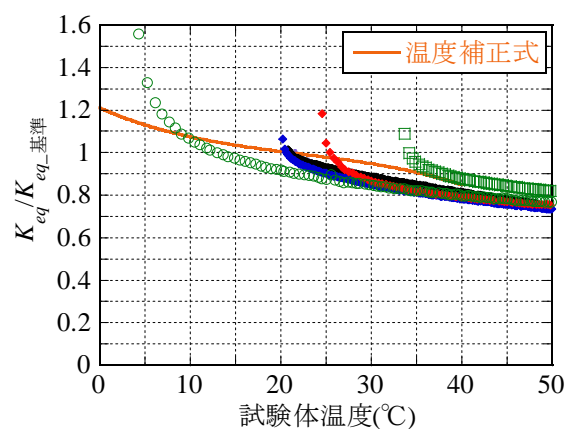
(b-1) 累積 E/V による推移



(b-2) 累積 E/V による推移(0~50N/mm²)

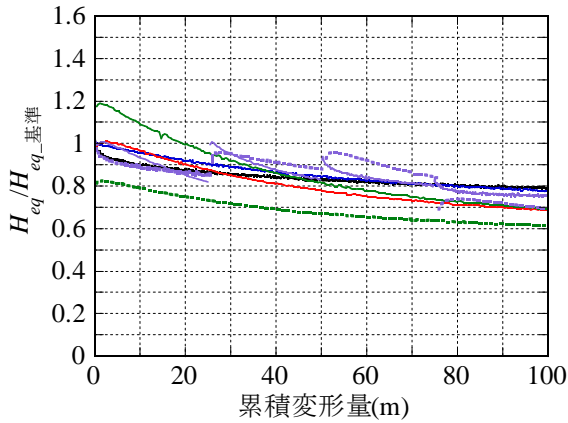
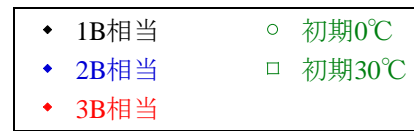
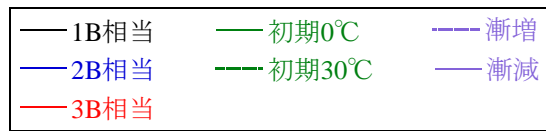


(c-1) 試験体温度による推移

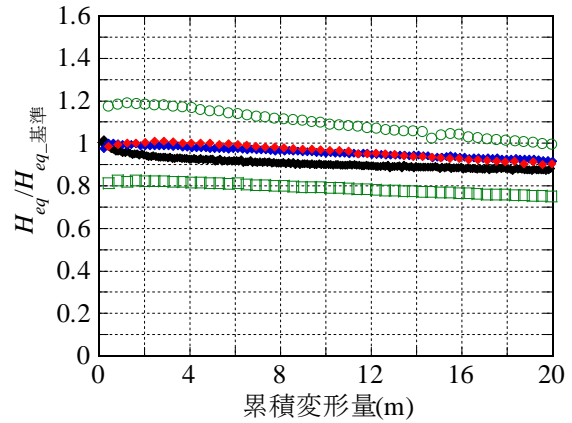


(c-2) 試験体温度による推移(0~50°C)

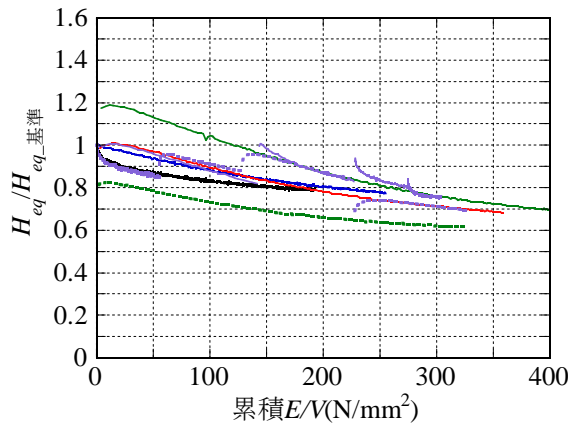
図 1.3.3-42 各試験ケースの K_{eq} の推移



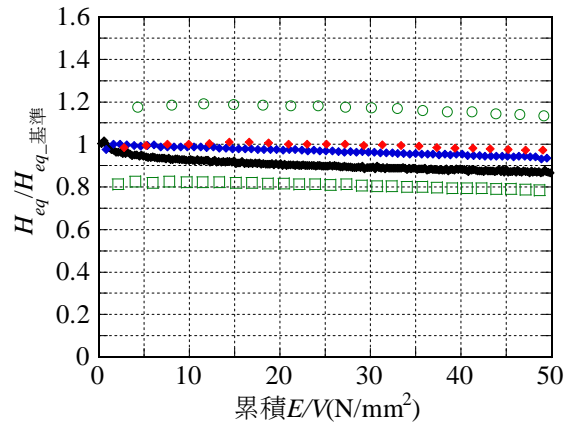
(a-1) 累積変形量による推移



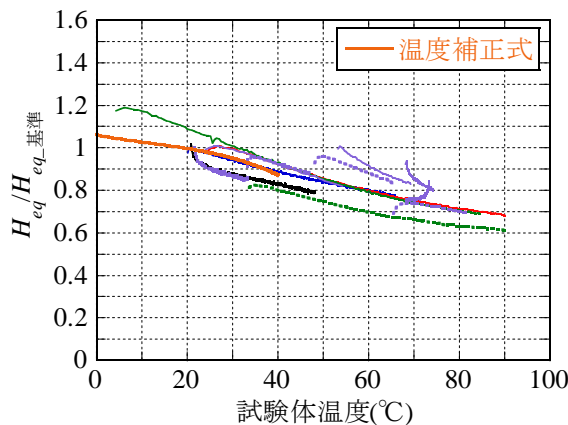
(a-2) 累積変形量による推移(0~20m)



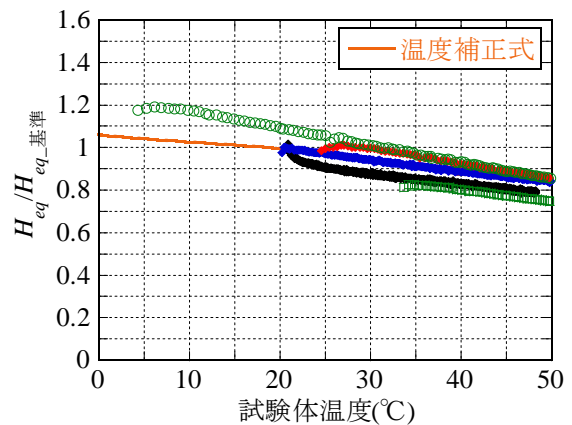
(b-1) 累積 E/V による推移



(b-2) 累積 E/V による推移(0~50N/mm²)

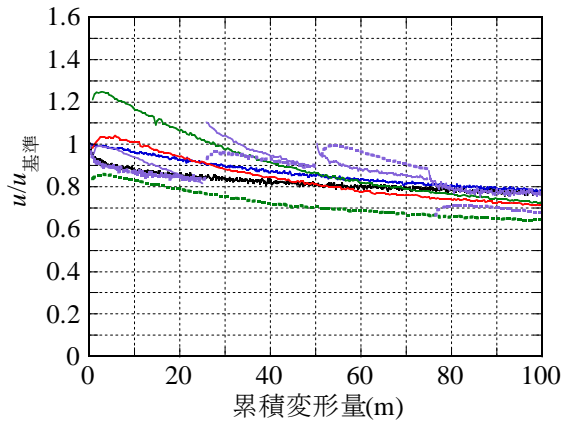
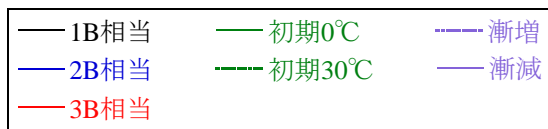


(c-1) 試験体温度による推移

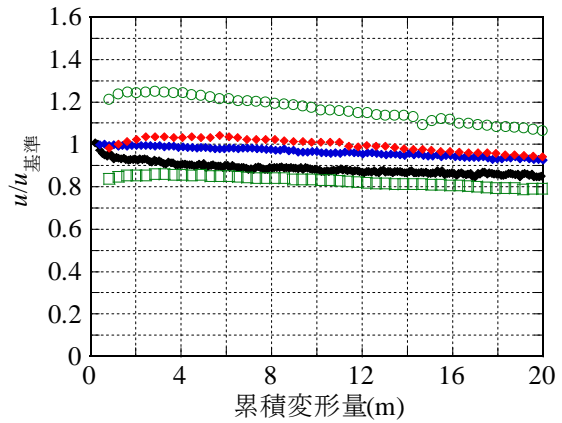


(c-2) 試験体温度による推移(0~50°C)

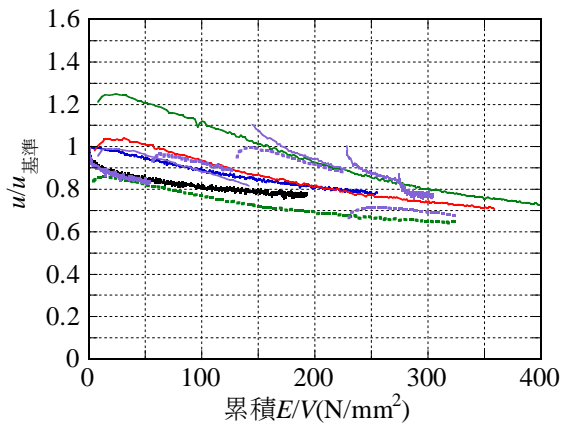
図 1.3.3-43 各試験ケースの H_{eq} の推移



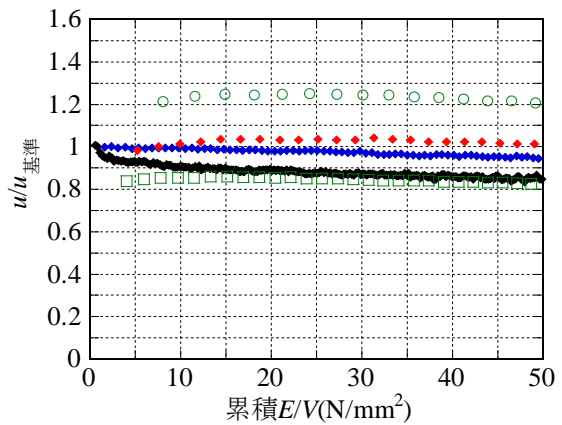
(a-1) 累積変形量による推移



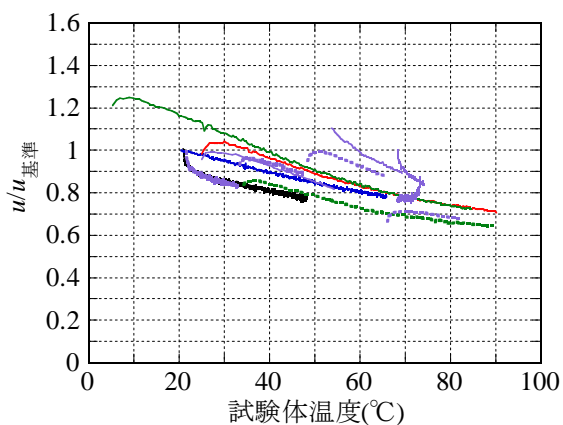
(a-2) 累積変形量による推移(0~20m)



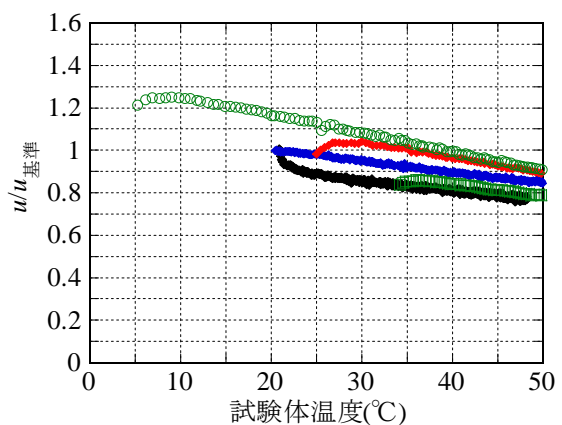
(b-1) 累積 E/V による推移



(b-2) 累積 E/V による推移(0~50N/mm²)



(c-1) 試験体温度による推移



(c-2) 試験体温度による推移(0~50°C)

図 1.3.3-44 各試験ケースの u の推移

(4) 微小振幅試験結果

図 1.3.3-45 に風応答を対象とした微小振幅試験結果の水平荷重変位関係を示す。微小振幅試験は、せん断変位 3mm($\gamma=6\%$)、5mm($\gamma=10\%$)で、加振周期 3.0 秒の正弦波加振である。加振は 3 サイクル実施しているが、試験機の制御上の都合により 1 サイクル目の振幅が目標変位よりも大きくなっている。図 1.3.3-45 の水平荷重変位関係においては、せん断ひずみ 10%以下の微小振幅時にも履歴がループを描いていることが確認できる。

表 1.3.3-8 に、図 1.3.3-45 に示す微小振幅試験の水平荷重変位関係から抽出した K_{eq} , G_{eq} , H_{eq} の値の一覧を示す。 G_{eq} の値は、実験結果の K_{eq} から式(1.3.3-4)を用いて算出する。試験体 3 および 4 の微小振幅試験の 3 サイクル目の値の平均値は、 $\gamma=6\%$ 時で $G_{eq}=1.900\text{N/mm}^2$, $H_{eq}=0.239$ であり、 $\gamma=10\%$ 時で $G_{eq}=1.639\text{N/mm}^2$, $H_{eq}=0.228$ である。表 1.3.3-9 に、技術資料^{1.3.3-5)}に示される水平復元力特性値の設計式を示す。この設計式の適用範囲は $\gamma=10\sim 270\%$ であるが、これを外挿して用いると $\gamma=6\%$ で $G_{eq}=1.632\text{N/mm}^2$, $H_{eq}=0.223$, $\gamma=10\%$ で $G_{eq}=1.547\text{N/mm}^2$, $H_{eq}=0.225$ となる。微小試験結果の特性値の平均値は、設計式を外挿した値よりやや大きい、その差は 16% 程度以下である。

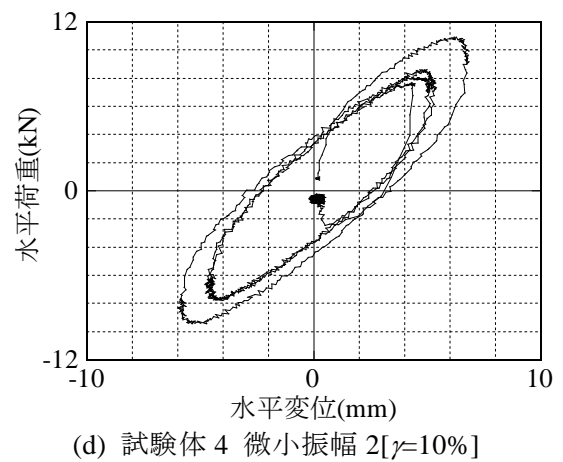
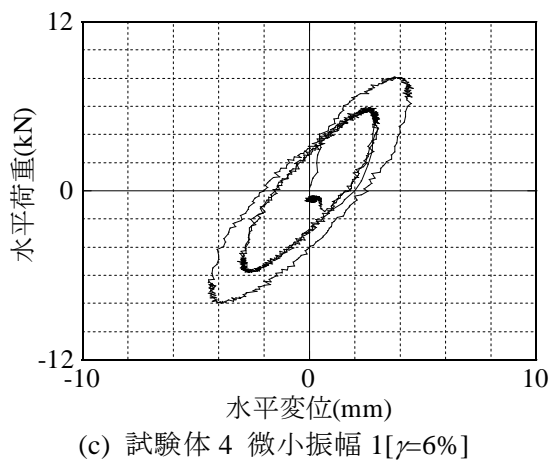
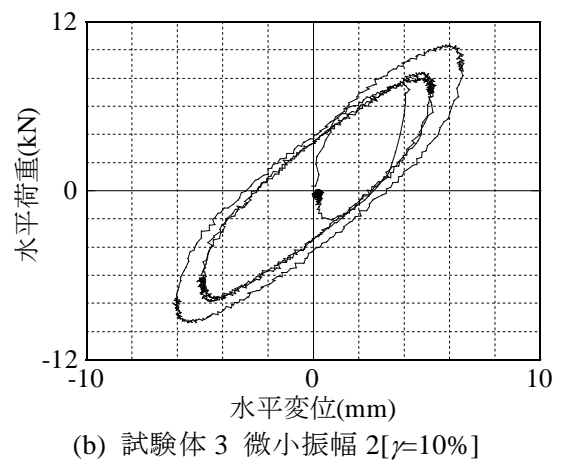
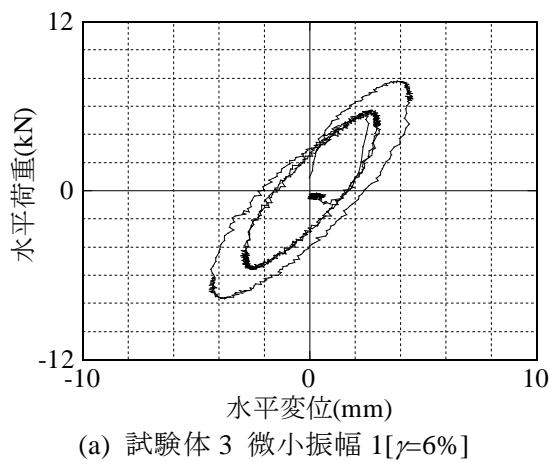


図 1.3.3-45 微小振幅試験($\gamma=6\%$, 10% , 3 サイクル, 加振周期 3.0 秒, 正弦波)
水平荷重変位関係

表 1.3.3-8 微小振幅試験結果の水平復元力特性値

試験体	サイクル	微小振幅1 ($\gamma=6\%$)			微小振幅2 ($\gamma=10\%$)		
		K_{eq} (kN/mm)	G_{eq} (N/mm ²)	H_{eq}	K_{eq} (kN/mm)	G_{eq} (N/mm ²)	H_{eq}
3	1	1.723	1.793	0.242	1.542	1.605	0.226
	2	1.856	1.931	0.245	1.555	1.618	0.233
	3	1.830	1.904	0.242	1.539	1.602	0.227
4	1	1.782	1.782	0.237	1.590	1.655	0.223
	2	1.885	1.885	0.236	1.611	1.677	0.228
	3	1.895	1.895	0.235	1.609	1.675	0.228

表 1.3.3-9 高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R)設計式

ゴム材料呼称	代表特性値 ($\gamma=100\%$)	各関数 ($10\% \leq \gamma \leq 270\%$)
X0.6R	$G_{eq}=0.620\text{N/mm}^2$ $H_{eq}=0.240$	$G(\gamma)=G_0 \times (2.855 - 3.878\gamma + 2.903\gamma^2 - 1.016\gamma^3 + 0.1364\gamma^4)$ $G_0=0.620$ 、 $\gamma=1.0$ におけるせん断弾性係数
		$H_{eq}(\gamma)=H_{eq0} \times (0.9150 + 0.2364\gamma - 0.1804\gamma^2 + 0.02902\gamma^3)$ $H_{eq0}=0.240$ 、 $\gamma=1.0$ における等価減衰定数
		$u(\gamma)=u_0 \times (0.9028 + 0.2711\gamma - 0.2083\gamma^2 + 0.03421\gamma^3)$ $u_0=0.408$ 、 $\gamma=1.0$ における降伏荷重特性比

1.3.3.3 まとめと課題

高減衰ゴム系積層ゴム支承の多数回繰返しに対する性能を確認するため、4体の縮小試験体により長振幅高速繰返し試験を実施した。試験は、一定面圧下(15N/mm²)における周期4.0秒の正弦波による繰返し加振で、累積変形量が約100 μ mとなる加力プログラムを実施した。高減衰ゴム系積層ゴムの各種依存性の影響を確認するため、3水準の加振振幅(50%、100%、200%)、2水準の初期温度(0 $^{\circ}$ C、30 $^{\circ}$ C)、2種類の荷重履歴(漸増、漸減)を設定した。また、ランダム波加振による応答性能を確認するため地震応答波による加振も実施した。実験結果より、以下の事項が確かめられた。

(1) 加振振幅の影響

累積変形量が同じでも、加振振幅が大きい方が水平復元力特性値は大きく低下した。せん断ひずみ50%による加振では K_{eq} 、 H_{eq} 、 u とも類似した緩やかな低下傾向を示すが、せん断ひずみ100%、200%の加振においては、 K_{eq} は急激な低下を示した後、ある一定の値に収束する傾向が見られた。 H_{eq} および u は、全加振サイクルに渡って緩やかに低下し続けた。加振終了時の試験体温度(加振開始時約20 $^{\circ}$ C)は、ゴムの1/2高さにおいて、 $\gamma=50\%$ の1000サイクルで約50 $^{\circ}$ C、 $\gamma=100\%$ の500サイクルで約70 $^{\circ}$ C、 $\gamma=200\%$ の250サイクルで約90 $^{\circ}$ Cと、加振振幅が大きくなるほど高い温度を示した。

(2) 初期温度の影響

初期温度の違いにより加振開始時の復元力特性が異なり、初期温度が低いほど履歴ループの面積が大きく、累積履歴吸収エネルギーも大きかった。また、初期温度が低いほど繰返し加振による水平復元力特性値の低下率が大きかった。ただし、せん断ひずみ200%の250サイクルという同一の加力プログラム加振後の履歴ループ形状および試験体温度は、初期温度0 $^{\circ}$ C、20 $^{\circ}$ C、30 $^{\circ}$ Cのケースともほぼ同様であった。初期温度が異なっても、同様の加振を受けることで履歴特性はおおよそ同じ状態に至った。

(3) 荷重履歴の影響

加振振幅が50%、100%、200%、250%と大きくなっていく漸増の荷重履歴においては、各加振振幅で水平復元力特性値の低下が生じた。一方、加振振幅が250%、200%、100%、50%と小さくなっていく漸減の荷重履歴においては、せん断ひずみ250%の49サイクルという大変形による繰返し加振により水平復元力特性値が大きく低下した後は、続くせん断ひずみ200%、100%、50%の繰返し加振では等価剛性がやや回復する傾向が見られた。また、試験体温度も漸減の荷重履歴においては、せん断ひずみ50%での加振時には加振中に緩やかな低下を生じた。以上のように、累積変形量および累積履歴吸収エネルギー量がほぼ同じであっても、経験した荷重履歴によって水平復元力特性値の推移が異なることが確認された。

(4) 復元力特性値の回復特性

多数回繰返し加振により試験体温度が上昇し、水平復元力特性値が低下するが、加振終了後試験体温度が標準温度である20 $^{\circ}$ C程度まで低下すると、水平復元力特性値は加振前の値の90%程度まで回復した。また、加振後丸1日程度経過すると水平復元力特性値はおおよそ加振前の

値に回復した。

(5) 水平復元力特性の評価指標

多数回繰返し加振による水平復元力特性値の低下の下限値は、3 サイクル目の値に対して K_{eq} は 0.7 倍程度、 H_{eq} および u は 0.6~0.7 倍程度とみられる。累積変形量、累積エネルギー量、試験体温度と水平復元力特性値の関係を見ると、 K_{eq} は累積エネルギー量に対して加振振幅に関わらずほぼ一致した傾向を示している。ただし、初期温度による初期状態の違いは別途考慮する必要がある。また、試験体温度に対しては初期温度の違うケースも含めて、各ケース類似した傾向を示している。ただし、最初の数サイクルにおける急激な低下を考慮する必要がある。また、加振中の振幅変化の影響も適切に考慮しなければならない。 H_{eq} および u は、おおよそ一致した傾向を示しており、試験体温度に対する依存性が強いと考えられる。

今後の課題としては、実験結果をさらに詳細に分析することで繰返しの影響による特性変化を地震応答解析に反映させる際の評価指標を整理することが挙げられる。また、今回の試験体が縮小試験体であるため、実大サイズの高減衰ゴム系積層ゴムに対する実験結果との比較により、サイズの違いによる影響を確認する必要がある。

参考文献

- 1.3.3-1) 技術委員会 免震部材部会：積層ゴムと弾性すべり支承のエネルギー吸収性能、(社)日本免震構造協会、MENSIN、NO.67、P1.3.38、2010.2
- 1.3.3-2) 嶺脇重雄他：超高層免震建物の地震応答を想定した実大免震支承部材の性能確認試験、構造工学論文集、Vol.55B、P469-477、2009.3
- 1.3.3-3) 室田伸夫他：荷重履歴依存性を改良した新高減衰積層ゴムの開発(その 1)~(その 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、P879-882、2007.8
- 1.3.3-4) 竹中康雄他：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学挙動に関する研究 (その 1)~(その 6)、日本建築学会学術講演梗概集、P867-878、2007.8
- 1.3.3-5) 株式会社ブリヂストン：高減衰ゴム系積層ゴム支承(X0.6R)技術資料

1.3.4 弾性すべり支承（高摩擦）

1.3.4.1 実験計画

(1) 実験目的と背景

(a) 目的

弾性すべり支承（高摩擦）の大振幅高速繰り返し試験を縮小試験体により実施し、多数回繰り返しに対する性能を把握する事を目的とする。

試験で確認する項目は以下の通りである。

- ① 多数回繰り返しに対する摩擦特性の変化
- ② 多数回繰り返しに対する試験体の温度変化
- ③ 多数回繰り返しに対する耐久性能
- ④ 静的軸力の違いによる上記性状の変化

(b) 背景

免震建築物に適用される弾性すべり支承の繰り返し特性については、小口径試験体を対象とした数々の実験的研究で、PTFE系のすべり支承について摩擦係数の面圧、速度、繰り返しなどに対する各依存性について検討が行われている^{1.3.4-1)~1.3.4-10)}。これらの研究では、摩擦係数は面圧増加に伴い低減すること、速度増加に対して漸減または漸増傾向にあることが共通に指摘されている^{1.3.4-1)、1.3.4-4)、1.3.4-6)、1.3.4-8)~1.3.4-10)}。また、摩擦係数は繰り返し载荷（またはすべり面の温度上昇）に対しては漸減するとの報告もある^{1.3.4-4)、1.3.4-6)、1.3.4-9)、1.3.4-10)}。これらの結果からすべり面の面圧や速度の変動を考慮した依存型摩擦モデルを設定し地震応答解析に利用した検討例^{1.3.4-2)、1.3.4-11)~1.3.4-13)}が報告されている。

以下では、大口径の弾性すべり支承試験体による動的载荷実験により、摩擦係数の繰り返し依存性について評価した事例^{1.3.4-9)}を示す。

標準条件（ $v=20\text{ cm/s}$ 、 $\sigma=20\text{ N/mm}^2$ ）における繰り返し依存性確認試験で得られた繰り返し回数 n および累積すべり変位 $S=\sum d$ に対する動摩擦係数 $\bar{\mu}$ およびすべり板温度 T の変化を図 1.3.4-1 に示す。载荷開始直後は T が载荷前の管理温度（ 30°C ）から急激に上昇、 $\bar{\mu}$ は初期の値から急激に下降する。その後、 T の上昇および $\bar{\mu}$ の下降傾向は次第に直線的になる。これを T - $\bar{\mu}$ 関係（図 1.3.4-2）で表すと、 $\bar{\mu}$ は T の上昇に伴いほぼ直線的に低下する傾向が確認できる。

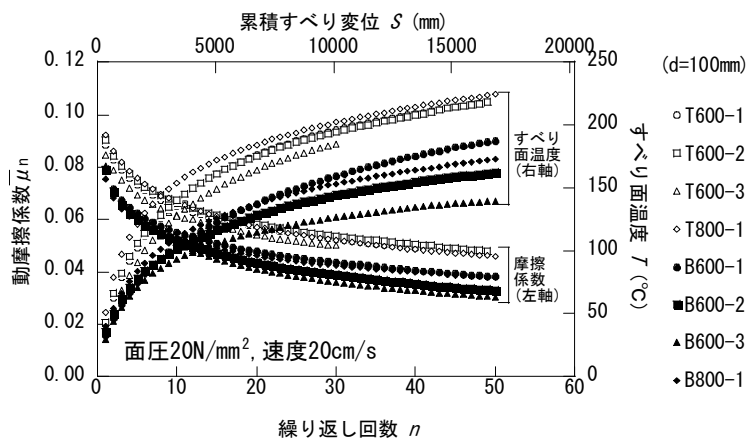


図 1.3.4-1 摩擦係数の繰り返し依存性（Type T&B, $\sigma=20\text{ N/mm}^2$, $v=20\text{ cm/s}$ ）^{1.3.4-9)}

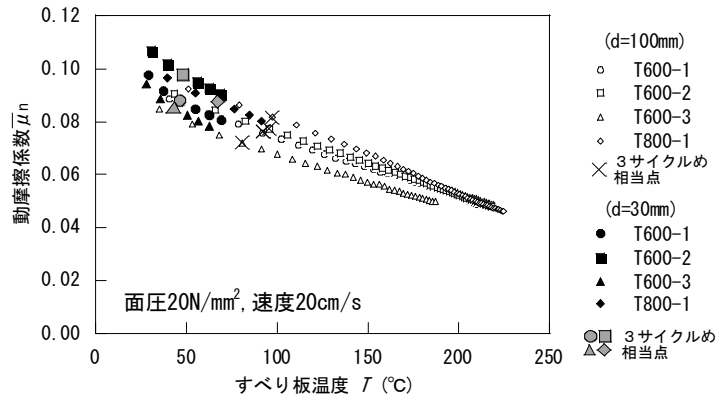
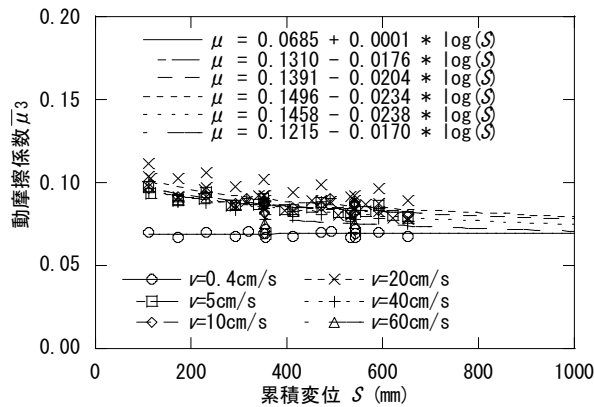


図 1.3.4-2 摩擦係数のすべり板温度依存性 (Type T, $\sigma=20\text{N/mm}^2$, $v=20\text{cm/s}$) 1.3.4-9)

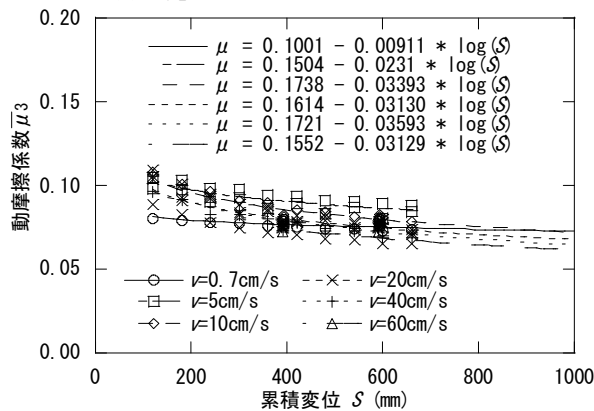
図 1.3.4-3 には正弦波载荷試験 ($d=100\text{mm}$, 30mm) による動摩擦係数の累積すべり変位依存性を示す。 $\bar{\mu}$ は S が小さいうちは最大速度が大きいほど大きな値を示すが、 S が大きくなると次第に減少し、 $v < 1\text{cm/s}$ の準静的なケースの $\bar{\mu}$ にほぼ漸近する。

$$\mu = a + b \cdot \log S \quad (40 \leq S \leq 2196 [\text{mm}]) \quad (1.3.4-1)$$

ここに a 、 b は回帰係数である。



(a) Type T ($d=100\text{mm}, 30\text{mm}$)



(b) Type B ($d=100\text{mm}, 30\text{mm}$)

図 1.3.4-3 正弦波载荷による動摩擦係数の累積すべり変位依存性 ($\sigma=20\text{N/mm}^2$) 1.3.4-9)

(2) 実験日時および場所

日時：平成22年11月15日～18日
 場所：(株)コベルコ科研 尼崎事業所

(3) 試験体

支承は実大サイズの約1/3縮小試験体として、外径 $\Phi 300$ (CR ゴム、東京ファブリック製) の支承を5体 (予備1体を含む)、すべり板を2枚製作した。ゴム層厚は2.5mm、ゴム層数は3層、基準面圧は20N/mm²である。

試験体の外観図を図1.3.4-4に、試験体諸元を表1.3.4-1に示す。

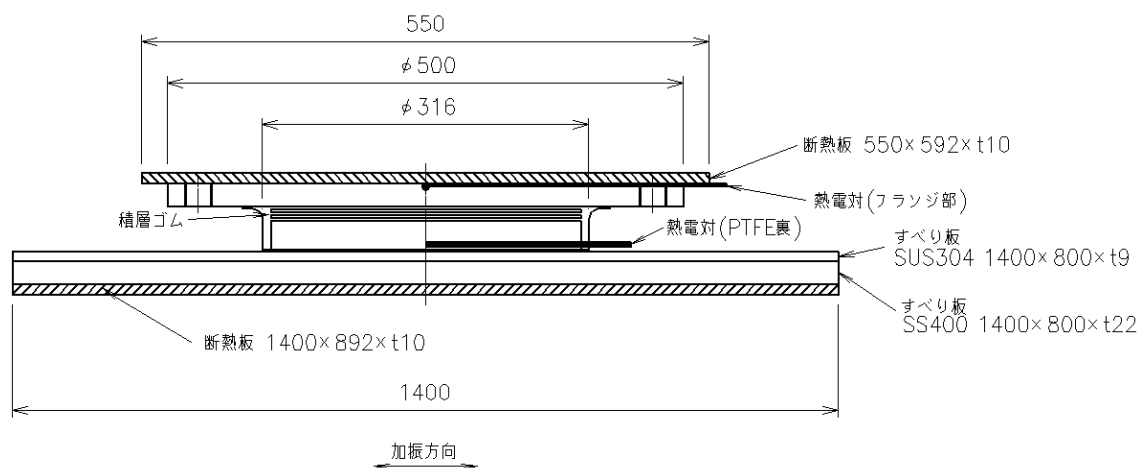


図 1.3.4-4 試験体外観 (弾性すべり支承 (高摩擦))

表 1.3.4-1 試験体緒元

項目	単位	試験体寸法
支承径	mm	$\phi 300$
ゴム一層厚	mm	2.5
積層数	層	3
PTFE	mm	2
試験体数	—	CR 4体
一次形状係数	—	30
二次形状係数	—	40
摩擦係数	—	0.100

(4) 試験装置

試験装置として、コベルコ科研尼崎事業所の高速二軸試験機を用いた。
試験機仕様を表 1.3.4-2 に、試験機外観を図 1.3.4-5 に示す。

表 1.3.4-2 試験機仕様 (高速二軸試験機)

鉛直最大荷重	10MN (5MN×2基: 静的油圧ジャッキ)
水平最大荷重	400kN (±400kN 動的油圧サーボアクチュエータ)
水平最大変位	±250mm
水平最大速度	水平最大速度 100cm/s

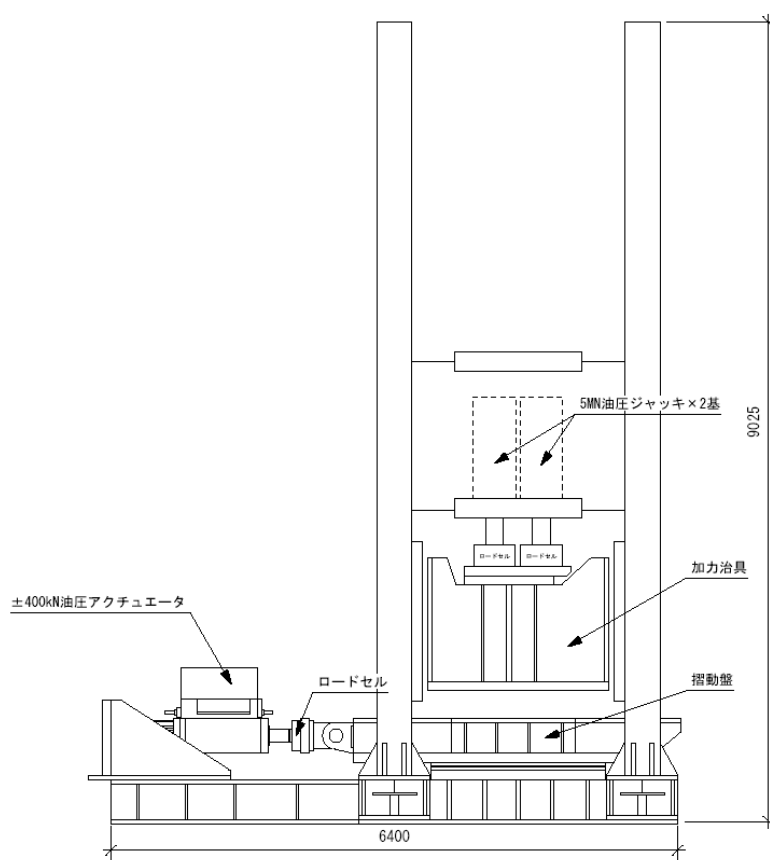


図 1.3.4-5 試験機外観 (3000kN 高速二軸試験機)

断熱材として標準高温用断熱板 (D-M-E 双葉、10mm 厚) を使い、試験機側面盤と支承フランジの間、すべり板と摺動盤の間に断熱板を設置した。

断熱板の仕様を表 1.3.4-3 に示す。

表 1.3.4-3 断熱板の仕様

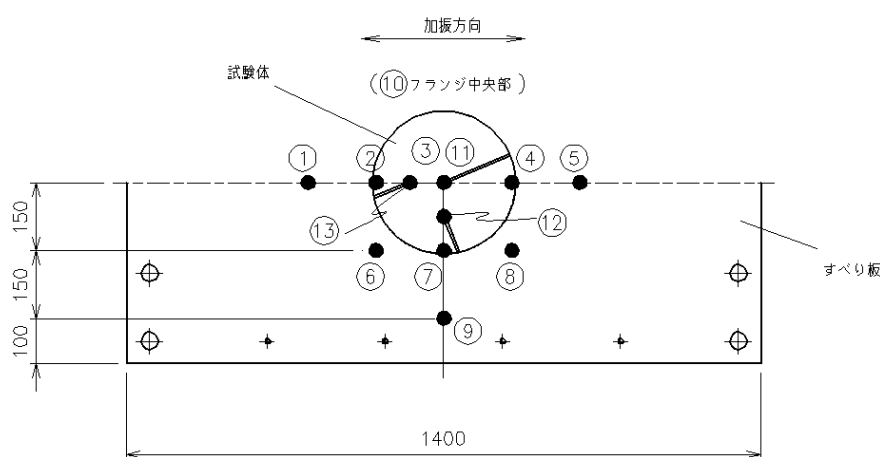
圧縮強度	338 (N/mm ²) (24℃の場合) 103 (N/mm ²) (285℃の場合)
吸水性	0.06%
熱伝導率	0.274W/(m・k) (24℃の場合) 0.303W/(m・k) (220℃の場合)
難燃性	94V-0(自己消化性)
最高使用温度	285℃
材質	アルミニウムカーボネート+グラスファイバー+ 不飽和ポリエステル

(5) 計測項目と計測方法

計測項目は、水平変位（すべり板、積層ゴム部）、水平荷重、鉛直変位（摺動盤）、鉛直荷重、温度（試験体内部・表面、室温）、PTFE 摩耗量とした。

すべり板水平変位は試験機内蔵の変位計により、積層ゴム部変位は外部リール型変位計により、摺動盤の鉛直変位はひずみゲージ式摺動型変位計により計測した。また、水平荷重および鉛直荷重はアクチュエータおよびジャッキ先端のロードセルにより測定し、水平荷重は慣性力補正により求めた。温度計測は、すべり板（SUS 裏面）9 点、ゴム表面 4 点、PTFE 裏 3 点、フランジ上面 1 点の計 17 点を設置した。温度計測は、ゴム表面部の 2 点では非接触型の放射温度計を用い、他の計測点は熱電対を使用した。

すべり板の温度計測位置を図 1.3.4-6 に、弾性すべり支承の温度計測位置を図 1.3.4-7、図 1.3.4-8 に示す。また、摺動盤の鉛直変位計測位置を図 1.3.4-9 に、加力治具・摺動盤の温度計測位置を図 1.3.4-10 に、膜厚計による PTFE 摩耗量の計測位置を図 1.3.4-11 に示す。



①～⑨：すべり板温度、⑩：フランジ中央温度、
⑪～⑬：PTFE 裏温度（図 1.3.4-7）

図 1.3.4-6 温度計測位置（すべり板）

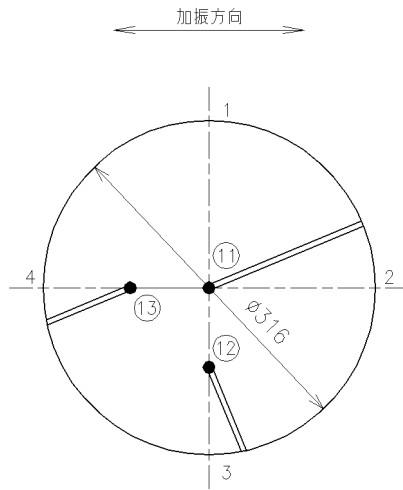


図 1.3.4-7 弾性すべり支承の温度計測位置 (PTFE 裏) ⑪～⑬

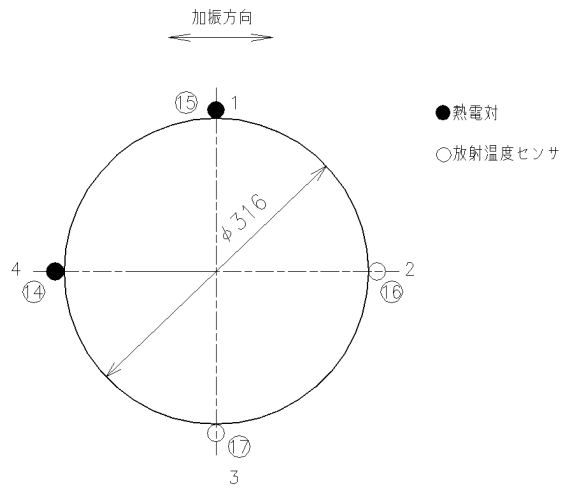


図 1.3.4-8 弾性すべり支承の温度計測位置 (ゴム表面) ⑭～⑰

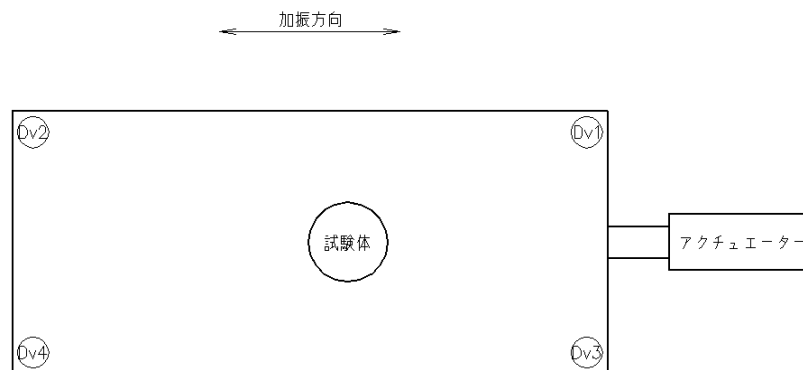


図 1.3.4-9 摺動盤の鉛直変位(Dv1～Dv4)

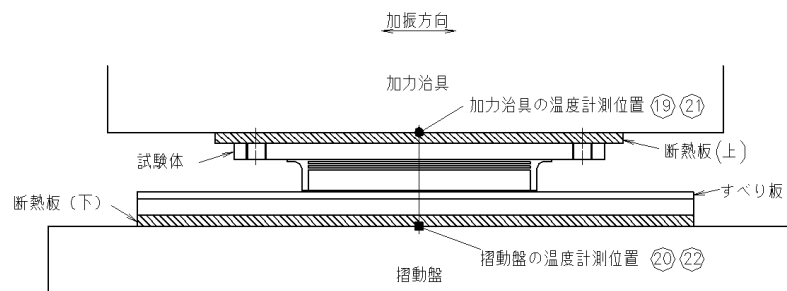
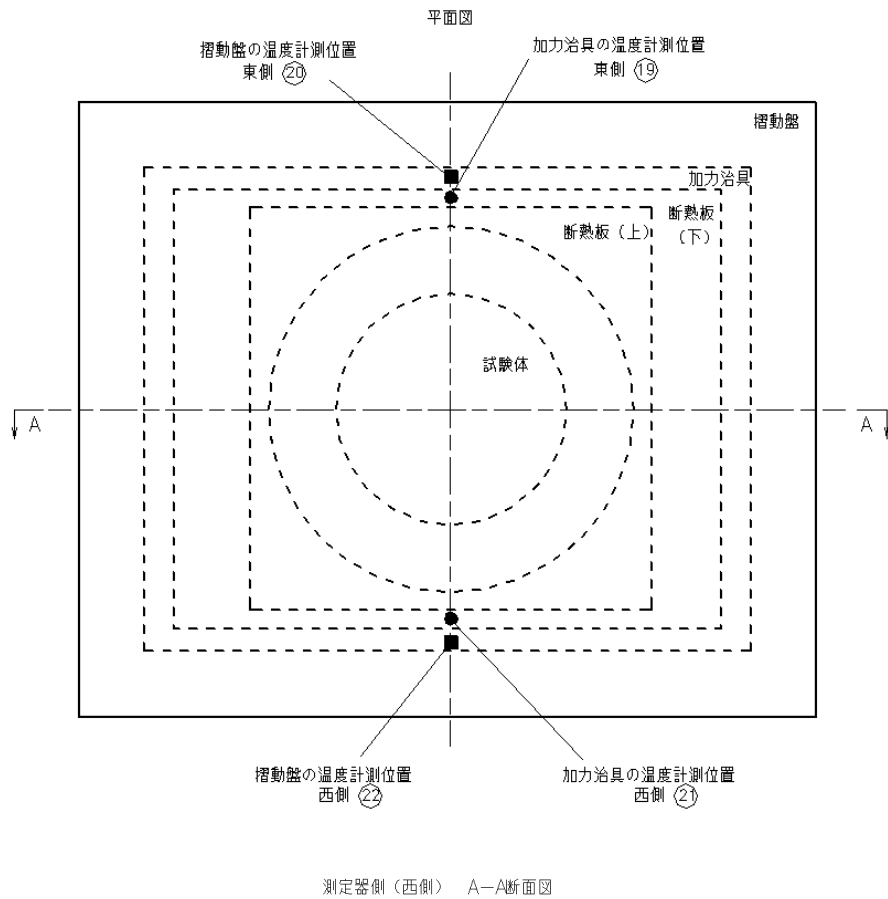


図 1.3.4-10 加力治具・摺動盤温度計測位置

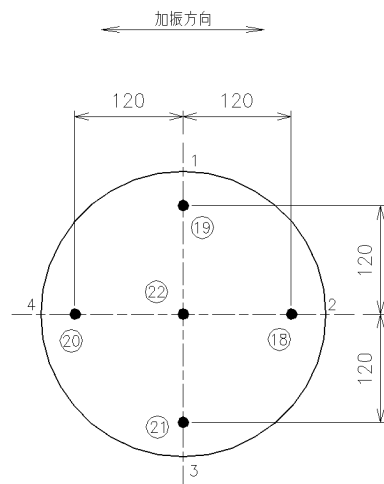


図 1.3.4-11 PTFE 摩耗量の計測位置 (18)~(22)

(6) 実験方法および実験ケース

基準面圧(20N/mm²)を載荷した状態で正弦波により水平加振するすべり試験を行なった。各試験は初期温度を常温(20℃程度)として実施した。試験は正弦波による多数繰り返し試験(長周期:1A-1、1A-2、限界1B、2B、3B)からなり、各試験の前後に基本特性試験(4サイクル)を実施した。基本特性試験は常温で行うため、長周期、限界試験後は試験体の冷却を行った。表1.3.4-4に共通実験条件を、表1.3.4-5に実験ケース一覧を示す。

長周期および限界試験では、試験機のアキュムレータ蓄圧のため、15~40サイクル毎に1~3分のインターバル時間をとったが、#1、#5試験体による一部のケースでは連続加振を実施した。

試験では、基本となる基準面圧の長周期、限界の試験ケースに加えて、基準面圧の2倍(40N/mm²)相当の軸力を載荷するケース(#4-1、#5-3)、目標載荷振幅を1mm、2mm、3mm、5mmとする微小振幅のケース(#4-1)、免震建築物の地震応答波を載荷波とするランダム波加振ケース(#2-1、#5-1)を実施した。このうち地震応答波載荷では、免震周期4秒、降伏せん断力係数を0.03、上部構造を剛体とした1質点モデルに、T-TN-OSKH02-AVおよびT-TN-AIC003-AVを入力して得られた応答変位波形を用いた。試験では応答変位波形のうち主要動部付近を抜き出して用いた。図1.3.4-12に載荷に用いた応答変位波形を示す。

表 1.3.4-4 共通実験条件

面圧	20 N/mm ² (基準面圧)
鉛直荷重	1414kN
入力波形	正弦波
加振周期	4sec

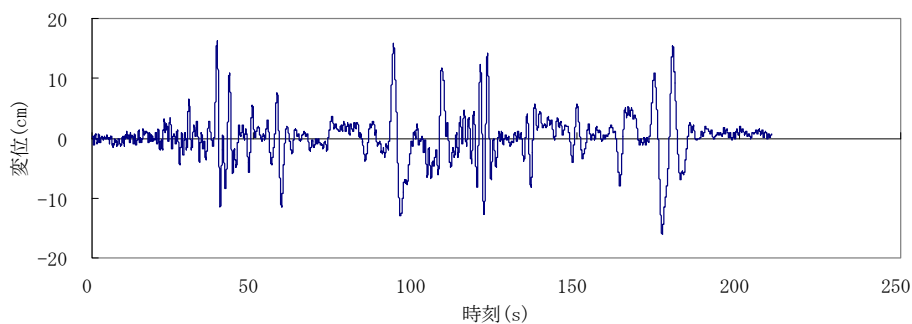
表 1.3.4-5 (1) 実験ケース一覧

試験体 No.	試験 No.	ケース	試験条件	面圧 (N/mm ²)	変位 ± mm	サイクル数	時間 sec	累積変形 m
#1	#1-1		基本特性	20	100	4	16	1.6
		1A-1	長周期		100	125(40×3+5)	500	50
			(後)基本特性		100	4	16	1.6
	#1-2		基本特性		100	4	16	1.6
		1A-2	長周期		100	125(40×3+5)	500	50
			(後)基本特性		100	4	16	1.6
	#1-3		基本特性		100	4	16	1.6
#1-4	1B	限界	100	250【連続】	1000	100		
#2	#2-1		地震波(osk)	20	101		210	
			基本特性		100	4	16	1.6
		1B	限界		100	250(40×6+5+5)	1000	100
			(後)基本特性		100	4	16	1.6
#3 (大変位)	#3-1		基本特性	20	100	4	16	1.6
		2B	限界		200	125(30×4+5)	480	100
			(後)基本特性		200*	4	16	1.6
	#3-3		基本特性		100	4	16	1.6

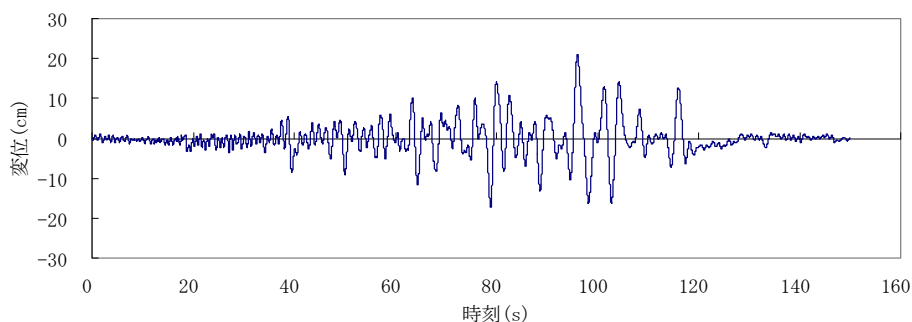
表 1.3.4-5 (2) 実験ケース一覧

試験体 No.	試験 No.	ケース	試験条件	面圧 (N/mm ²)	変位 ± mm	サイクル数	時間 sec	累積変形 m
#4 (大面圧)	#4-1		微小振幅	20	振幅：1、2、3、5mm、4 サイクル、周期：3 秒			
			基本特性	40	100	4	16	1.6
		1A-1	長周期		100	125 (40×3+5)	500	50
			(後)基本特性		100	4	16	1.6
	#4-2		基本特性		100	4	16	1.6
		1A-2	長周期		100	125 (40×3+5)	500	50
			(後)基本特性		100	4	16	1.6
#5 (大変位)	#5-1		地震波(aic)	20	210		210	
			基本特性		100	4	16	1.6
		3B	限界		230	100 (15×6+5+5)	480	92
			(後)基本特性		230*	4	16	1.6
#5(大面圧)	#5-2		基本特性	20	100	4	16	1.6
	#5-3	1B	限界	40	100	250 【連続】	1000	100

「(後) 基本特性」は温度上昇状態で基本特性試験と同条件の試験を実施。(*長周期・限界の最終5サイクルで代用)



(a) T-TN-OSKH02-AV 入力 ($\delta \max=10.1\text{cm}$ 、 $\Sigma \delta s=234\text{cm}$)



(b) T-TN-AIC003-AV 入力 ($\delta \max=21.0\text{cm}$ 、 $\Sigma \delta s=824\text{cm}$)

図 1.3.4-12 地震応答波入力用波形

1.3.4.2 実験結果

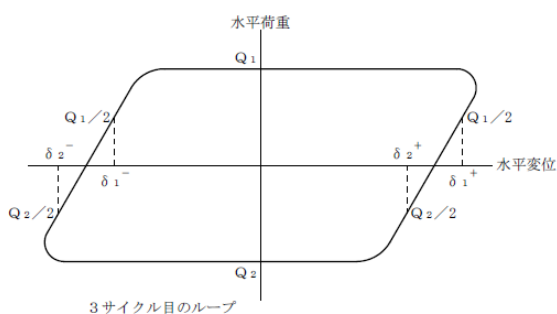
(1) 特性値の評価方法

免震部材の水平剛性、摩擦係数は以下の方法により求める。評価方法は、文献^{1.3.4-15)}をもとに定義する。

特性値の評価対象は原則として载荷3サイクルめの荷重-変形関係とする。長周期、限界試験では繰り返し特性を評価するため、各载荷ケースでサイクル毎の荷重-変形関係特性値を読み取ることとする。

a) 水平剛性

荷重-変形関係において、正負の切片荷重の1/2の点を結ぶ直線の勾配を読み取り、水平変位の正側と負側で剛性 $Kh1$, $Kh2$ を求め、その平均値を水平剛性 Kh とする(図1.3.4-13a, 式(1.3.4-2)~(1.3.4-4))。



$$Kh_1 = \left(\frac{Q_1}{2} - \frac{Q_2}{2} \right) / (\delta_{1^+} - \delta_{2^+}) \quad (1.3.4-2)$$

$$Kh_2 = \left(\frac{Q_1}{2} - \frac{Q_2}{2} \right) / (\delta_{1^-} - \delta_{2^-}) \quad (1.3.4-3)$$

$$Kh = \frac{Kh_1 + Kh_2}{2} \quad (1.3.4-4)$$

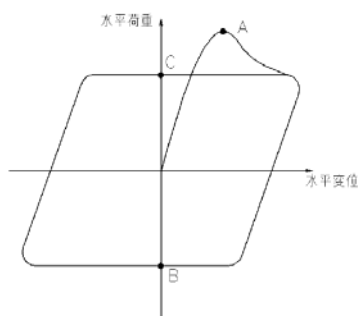
Q_1 : +側の切片荷重の絶対値

Q_2 : -側の切片荷重の絶対値

図 1.3.4-13a 水平剛性 Kh の算出方法

b) 摩擦係数

荷重-変形関係において、1波目については最大値A点(+側)とB点(-側)の水平荷重を、2波目以降は水平変位が0のときの水平荷重(B点、C点)を読み取り、正側と負側で摩擦係数 $\mu 1$, $\mu 2$ を求め、その平均値を摩擦係数 μ とする(図1.3.4-13b, 式(1.3.4-5)~(1.3.4-7))。



$$\mu 1 = Q1/N1 \quad Q1: +側の切片荷重の絶対値 \quad (1.3.4-5)$$

$$\mu 2 = Q2/N2 \quad N1: Q1 時の鉛直荷重 \quad (1.3.4-6)$$

$Q2$: -側の切片荷重の絶対値

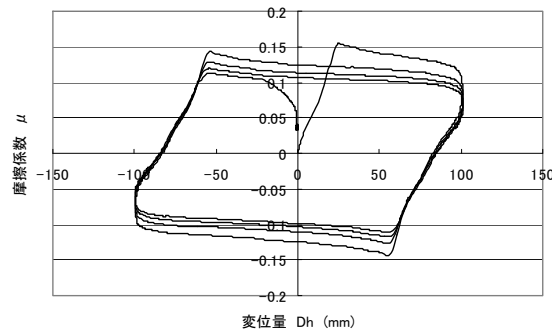
$$\mu = \frac{\mu 1 + \mu 2}{2} \quad N2: Q2 時の鉛直荷重 \quad (1.3.4-7)$$

図 1.3.4-13b 摩擦係数 μ の算出方法

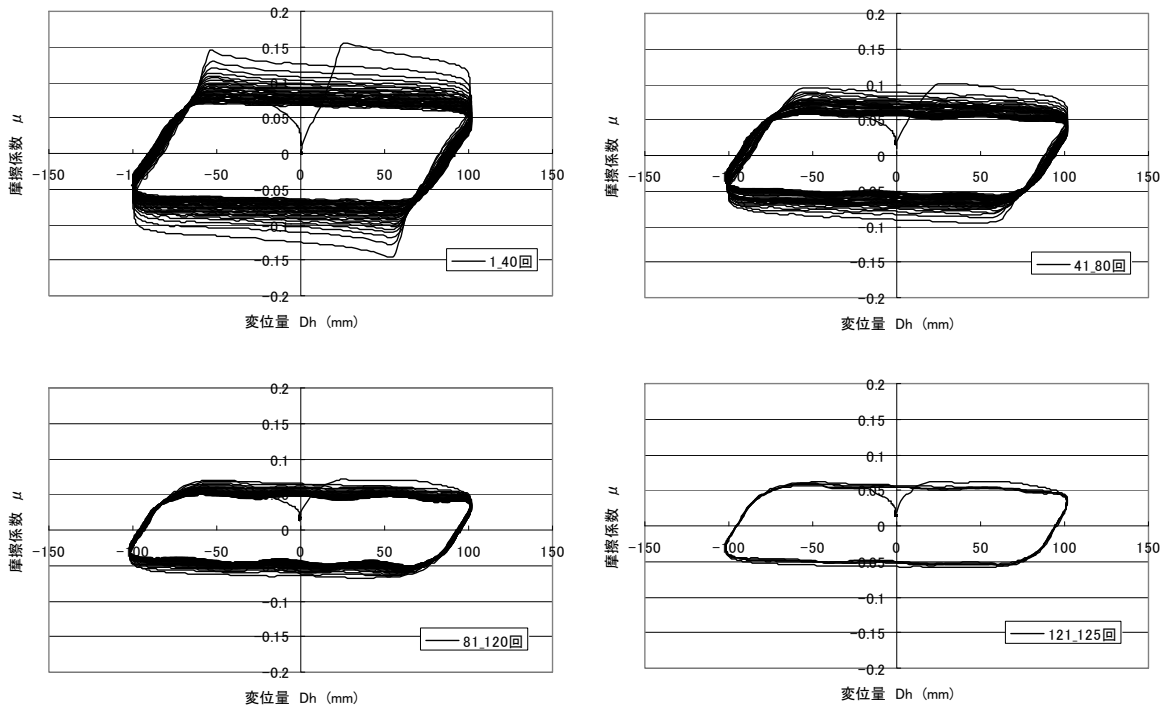
(2) 荷重-変位関係

各ケースの荷重-変位関係を、長周期限界試験について図 1.3.4-14～図 1.3.4-23 に、地震波加振について図 1.3.4-24～図 1.3.4-25 に、微小振幅試験について図 1.3.4-26 にそれぞれ示す。これらのうち長周期限界試験については荷重軸を軸力目標値で除した水平荷重（摩擦係数相当）で表示している。

摩擦係数-変位関係において、基本特性試験および繰り返しの初期段階では摩擦係数の低下傾向が大きいためにすべり部分で右下がりの勾配を示すが、繰り返しに伴い次第に弾塑性型の荷重変位関係を示すようになる。例えば 20N/mm^2 、 $\pm 100\text{mm}$ の限界試験（#2-1、図 1.3.4-17）で見ると、繰り返し 40 回で摩擦係数の変化は緩やかになり弾塑性型の荷重変位関係を示すようになる。変位振幅が大きいケース（#2-1、図 1.3.4-22）では 15～30 回程度で荷重変位関係が安定するようになり、一定の累積すべり量に達すると摩擦係数が安定する傾向が確認できる。

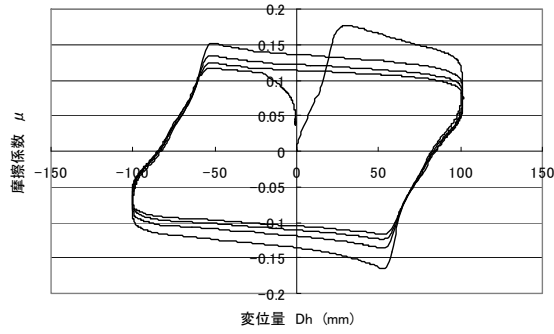


(a)基本特性

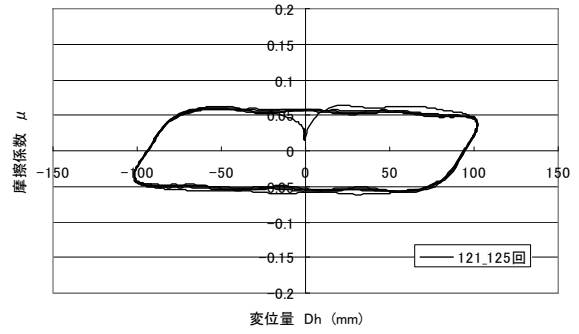
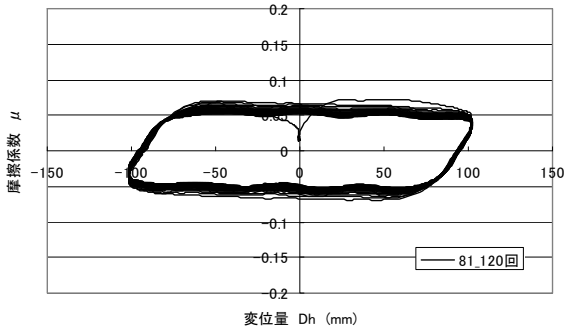
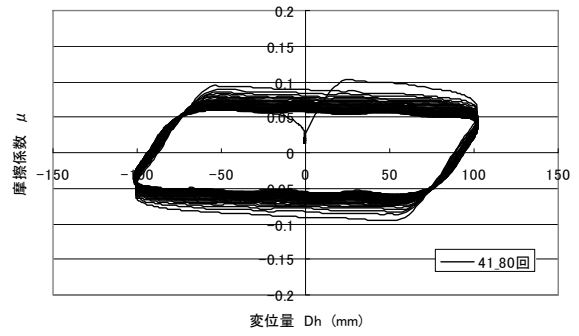
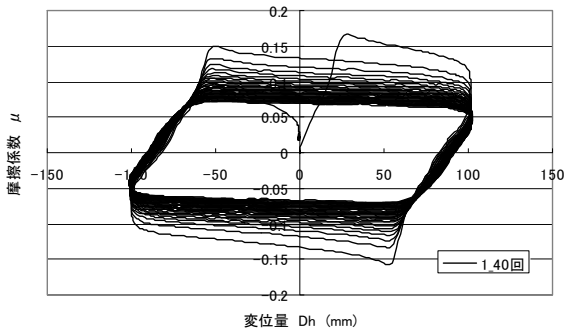


(b)長周期および(後)基本特性

図 1.3.4-14 荷重-変位関係 ((#1-1) 1A-1 長周期、 20N/mm^2 、 $\pm 100\text{mm}$ 、40 回×3 セット)

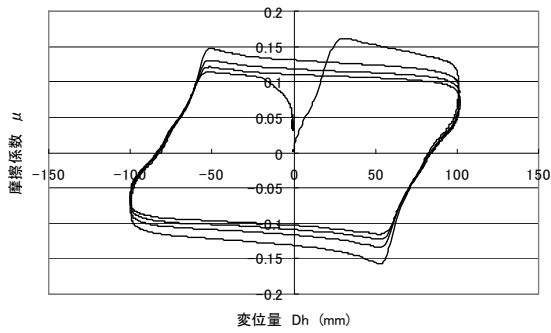


(a) 基本特性

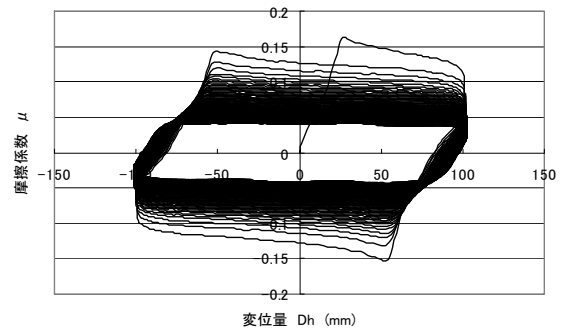


(b) 長周期および(後)基本特性

図 1.3.4-15 荷重-変位関係 ((#1-2) 1A-2 長周期、20N/mm²、±100mm、40回×3セット)

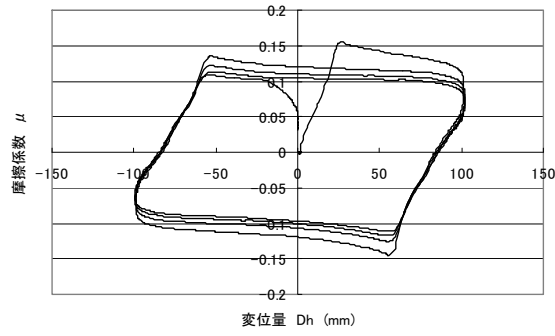


(a) 基本特性

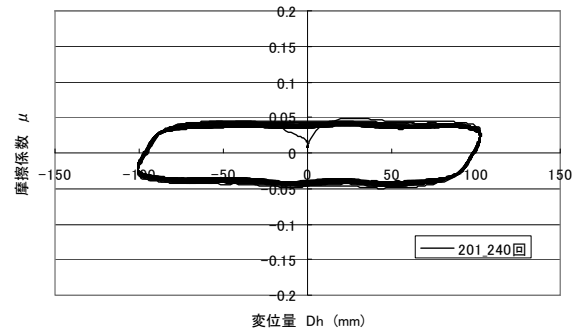
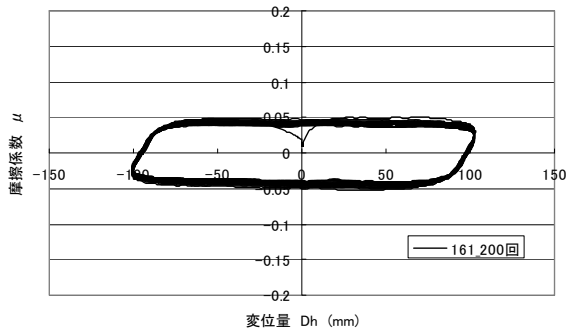
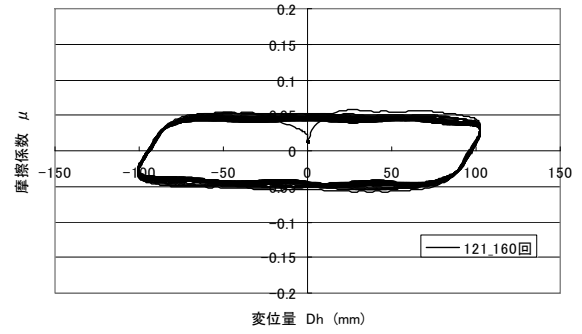
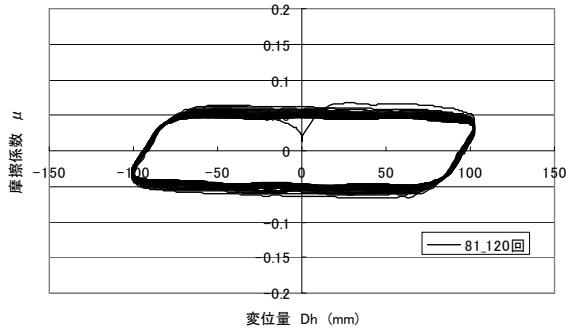
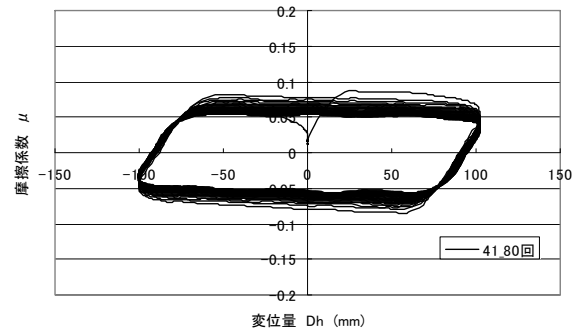
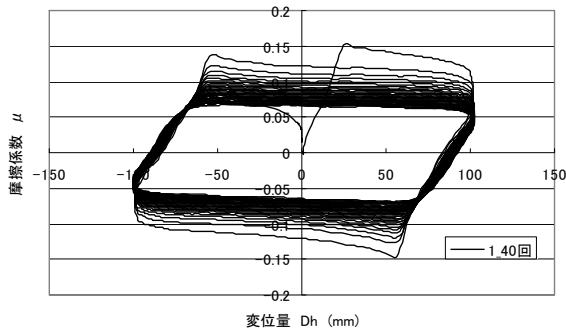


(b) 限界および(後)基本特性

図 1.3.4-16 荷重-変位関係 ((#1-3, #1-4) 1B 限界、20N/mm²、±100mm、250回【連続】)

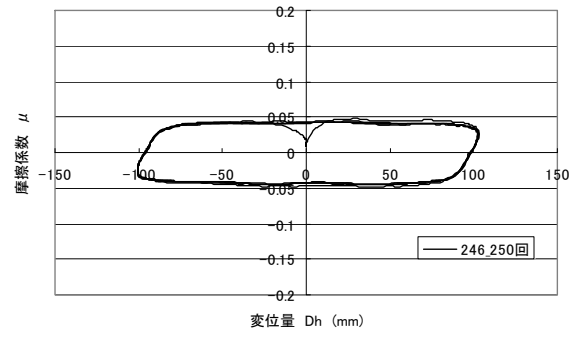
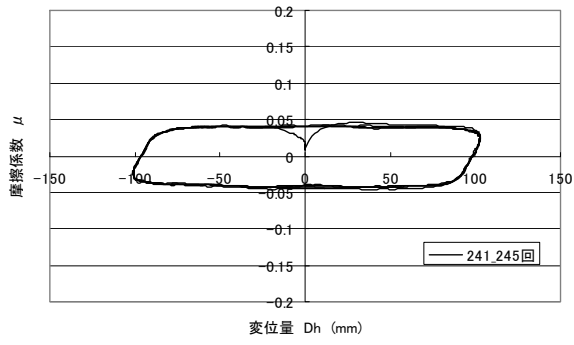


(a) 基本特性



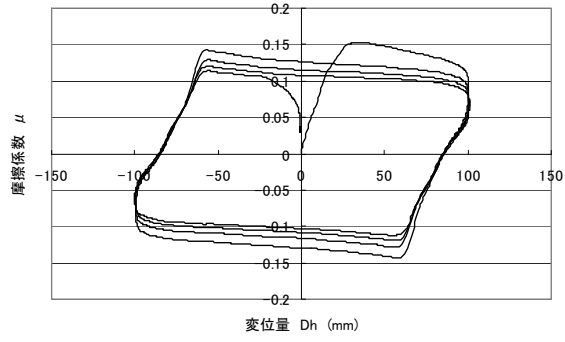
(b) 限界および(後)基本特性

図 1.3.4-17 (1) 荷重-変位関係 ((#2-1) 1B 限界、 20N/mm^2 、 $\pm 100\text{mm}$ 、40 回 \times 6 セット)

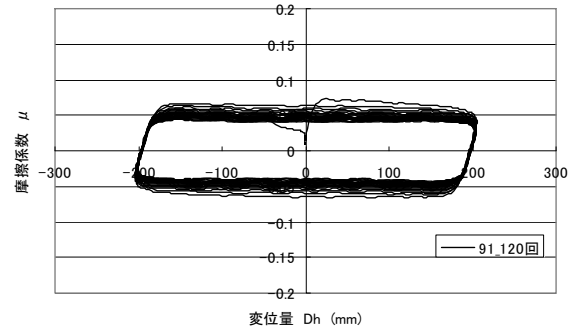
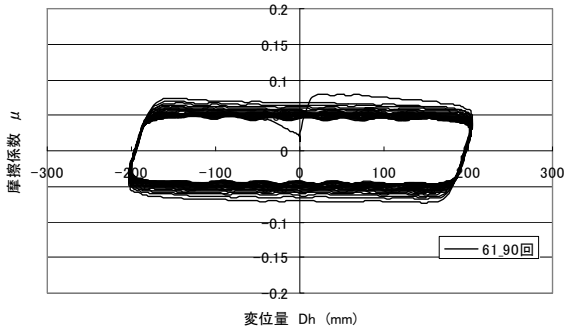
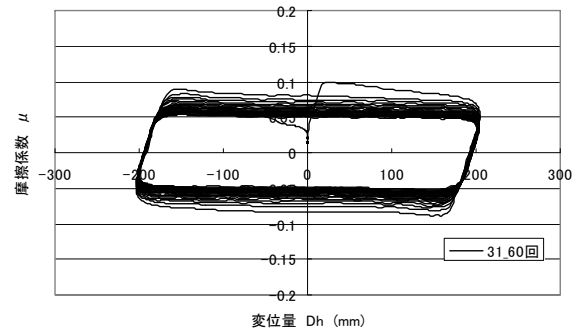
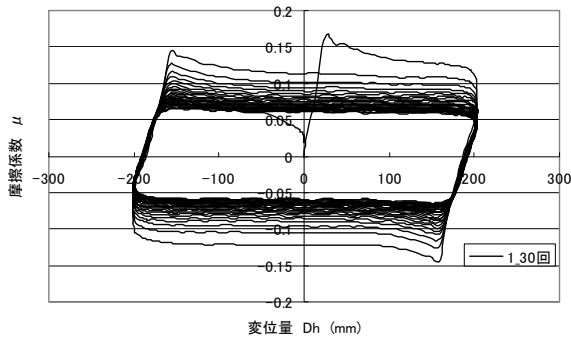


(c) (後)基本特性

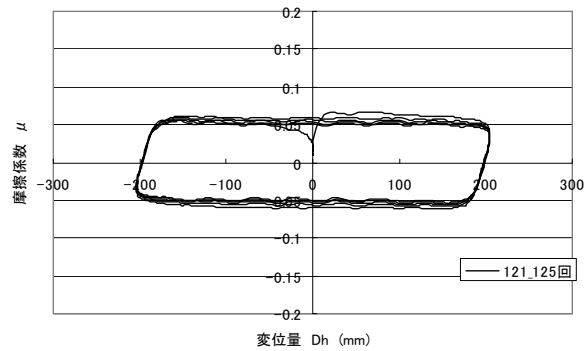
図 1.3.4-17 (2) 荷重-変位関係 ((#2-1) 1B 限界、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $\pm 100\text{mm}$ 、40回 \times 6セット)



(a)基本特性

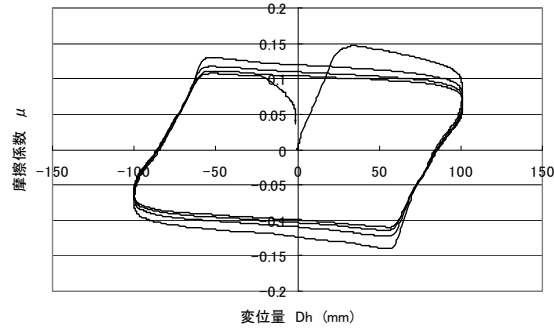


(b) 限界特性



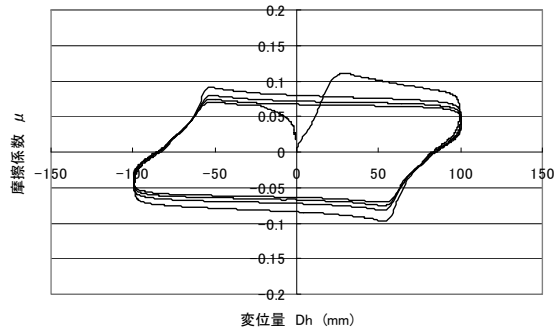
(c) (後)基本特性

図 1.3.4-18 荷重-変位関係 ((#3-1) 2B 限界、 20N/mm^2 、 $\pm 200\text{mm}$ 、 $30\text{回} \times 4\text{セット}$)

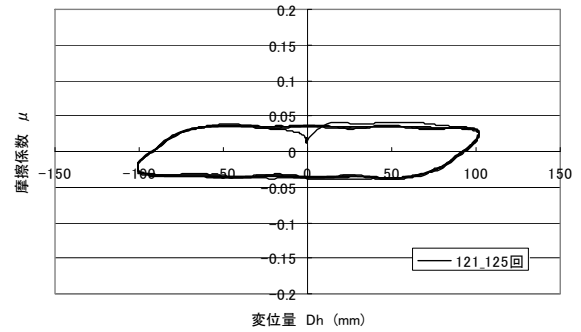
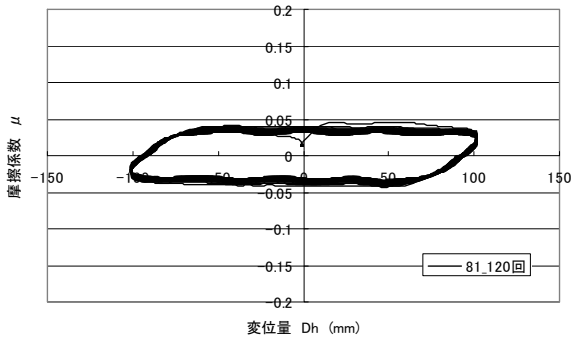
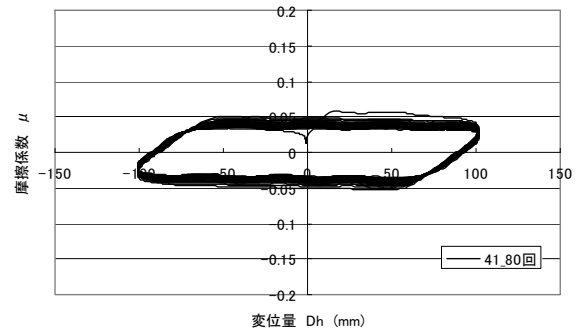
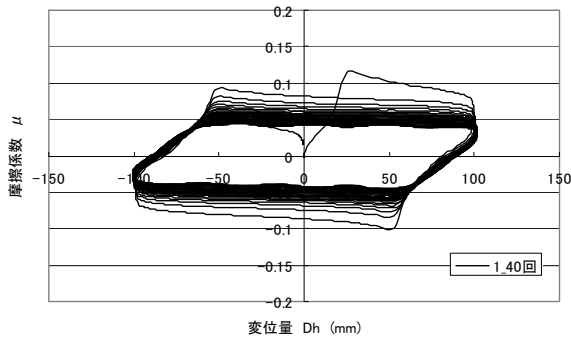


(a) 基本特性

図 1.3.4-19 荷重-変位関係 ((#3-3)、20N/mm²、±100mm)

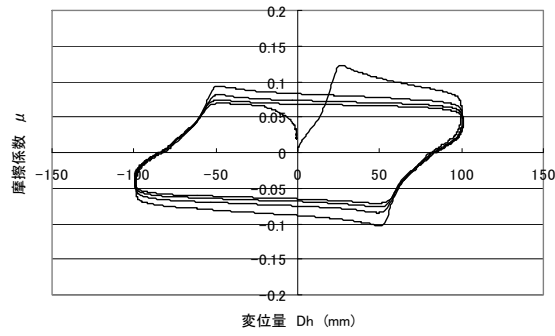


(a) 基本特性

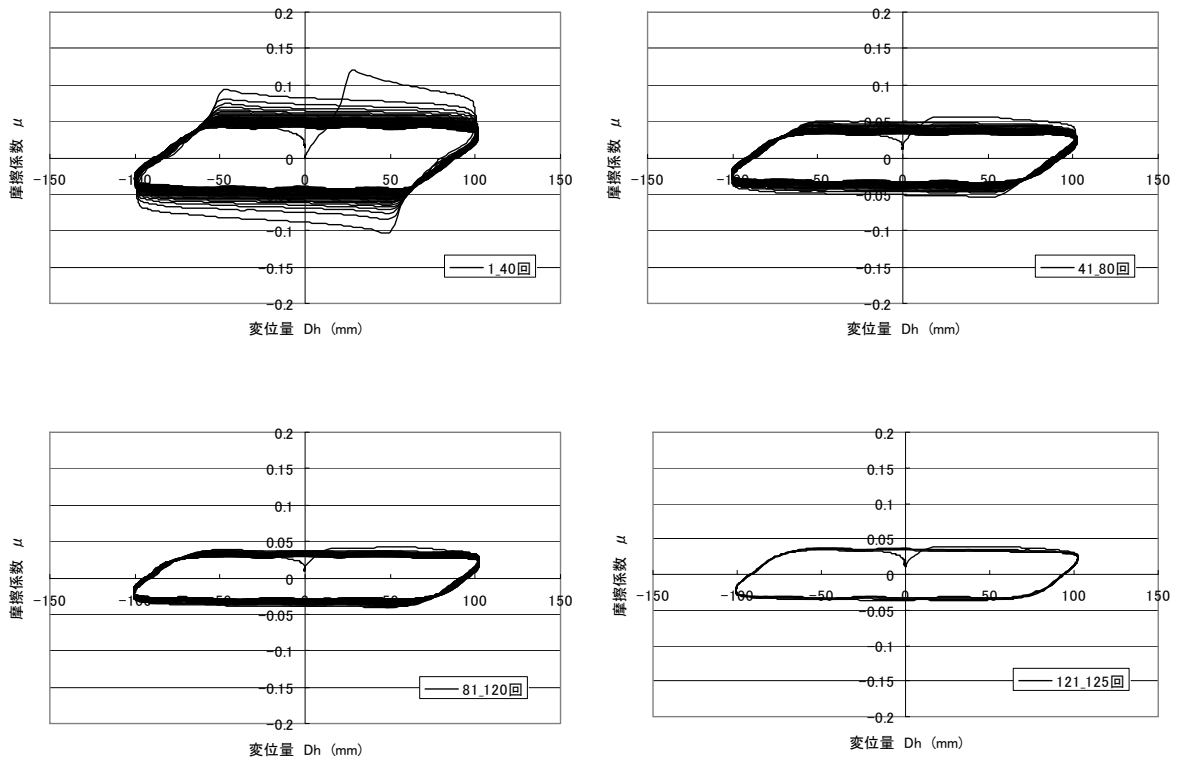


(b) 長周期および(後)基本特性

図 1.3.4-20 荷重-変位関係 ((#4-1) 1A-1 長周期、40N/mm²、±100mm、40回×3セット)

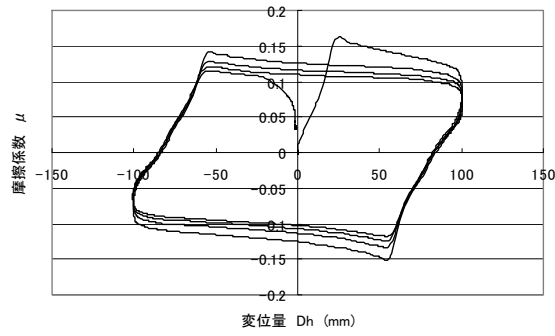


(a) 基本特性

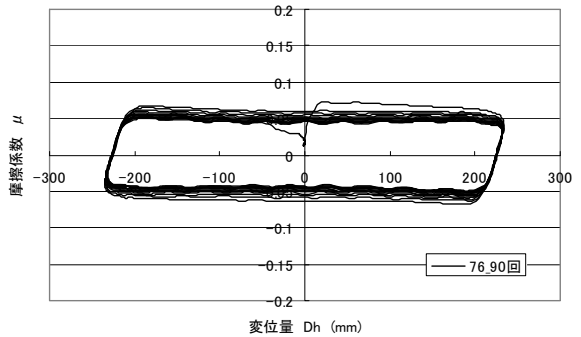
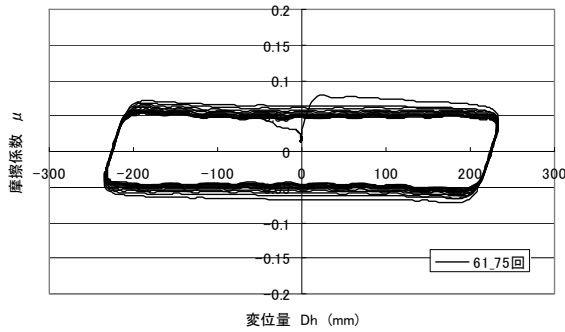
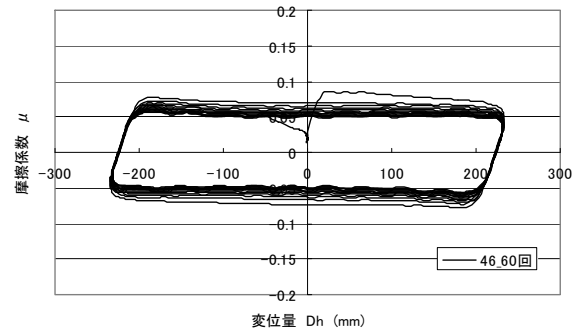
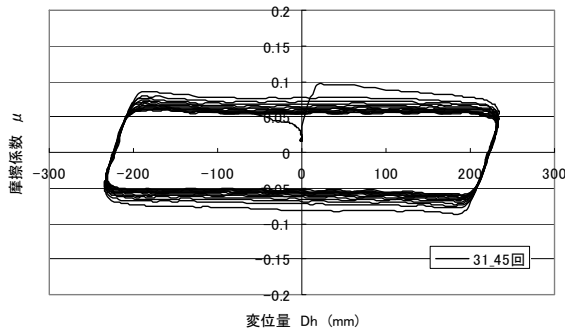
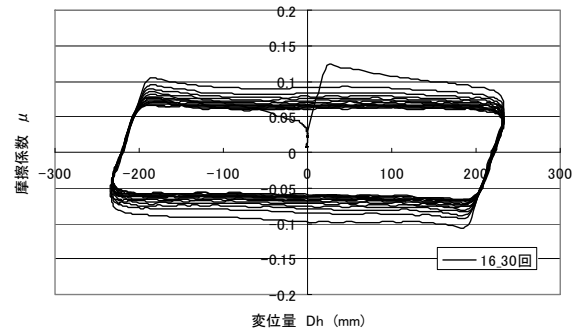
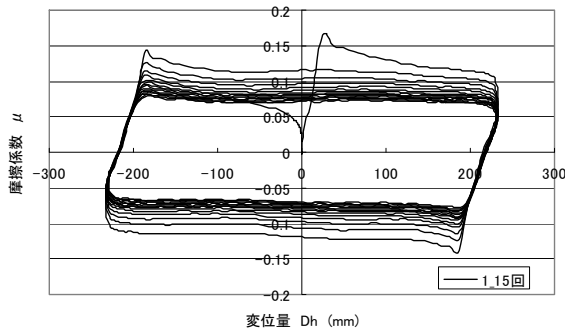


(b) 長周期および(後)基本特性

図 1.3.4-21 荷重-変位関係 ((#4-2) 1A-2 長周期、40N/mm²、±100mm、40回×3セット)

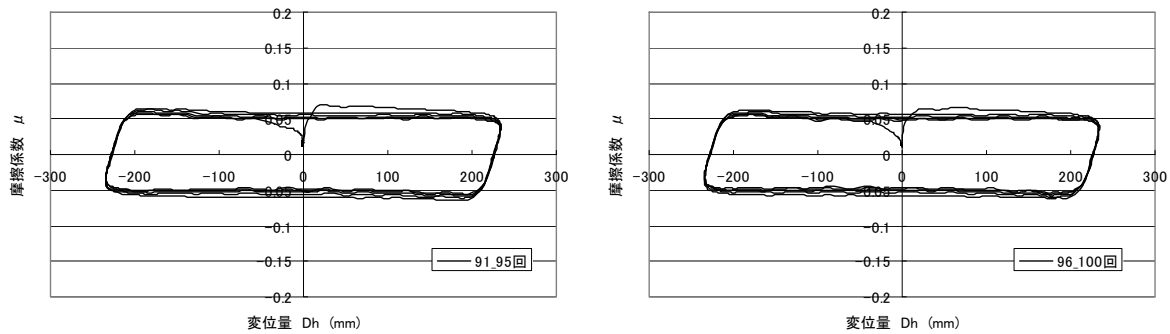


(a) 基本特性

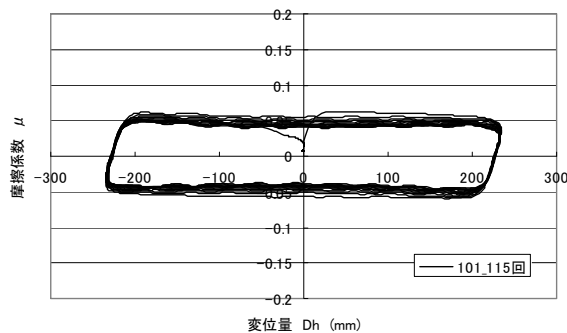


(b) 限界特性

図 1.3.4-22 (1) 荷重-変位関係 ((#5-1) 3B 限界、 20N/mm^2 、 $\pm 230\text{mm}$ 、15回 \times 6セット)

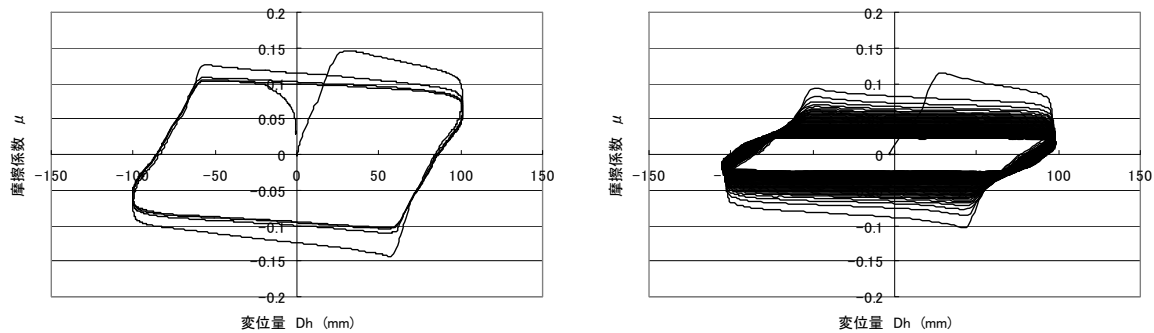


(c) 限界特性



(d) (後)基本特性

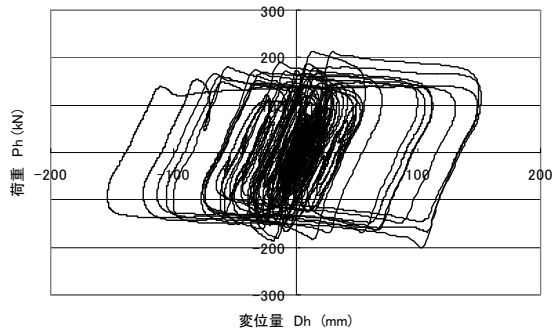
図 1.3.4-22 (2) 荷重-変位関係 ((#5-1) 3B 限界、 $20\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $\pm 230\text{mm}$ 、15回 \times 6セット)



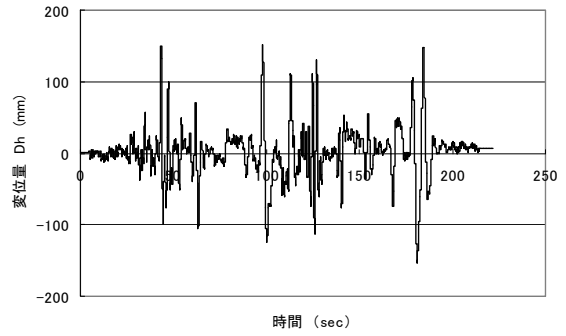
(a) 基本特性 ($20\text{N}/\text{mm}^2$)

(b) 限界および(後)基本特性

図 1.3.4-23 荷重-変位関係 ((#5-2, #5-3) 1B 限界、 $40\text{N}/\text{mm}^2$ 、 $\pm 100\text{mm}$ 、250回【連続】)

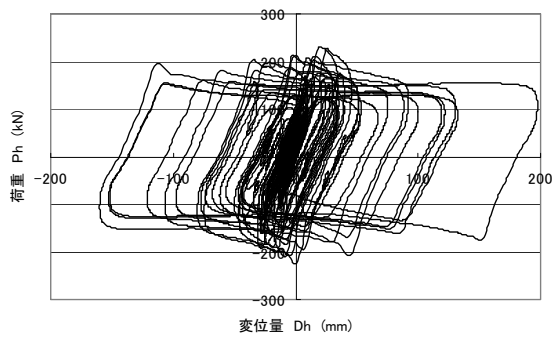


(a) 荷重-変位関係

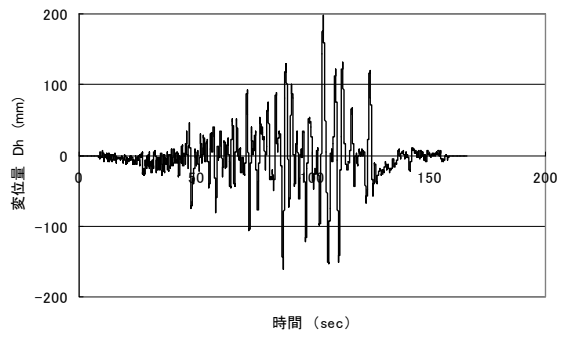


(b) 変位波形

図 1.3.4-24 荷重-変位関係 ((#2-1) 地震応答波 oskh02_sd、20N/mm²)

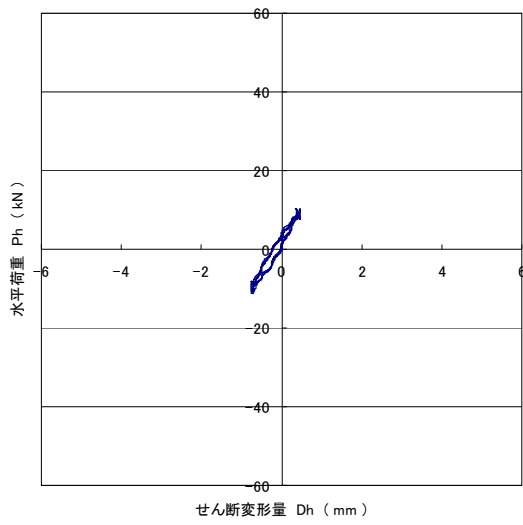


(a) 荷重-変位関係

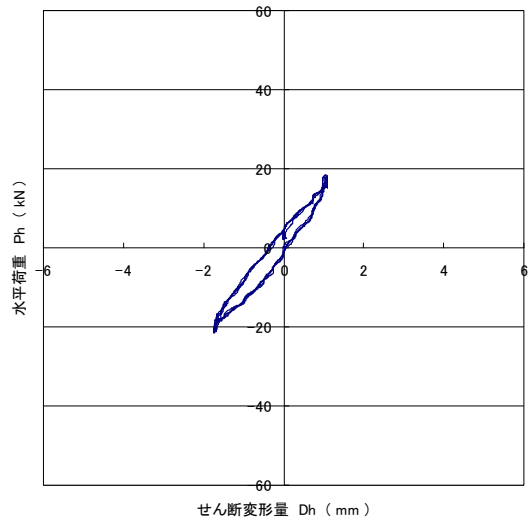


(b) 変位波形

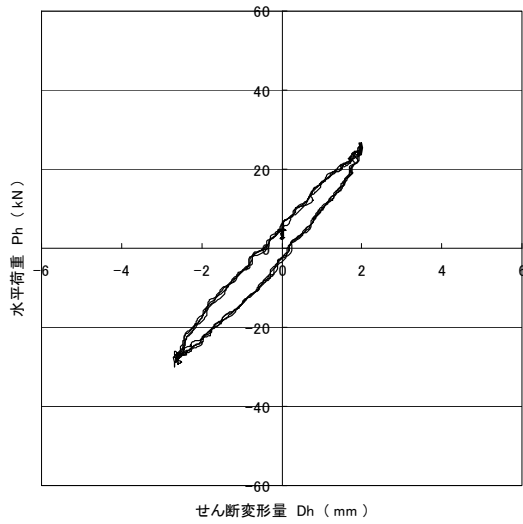
図 1.3.4-25 荷重-変位関係 ((#5-1) 地震応答波 aic003_av、20N/mm²)



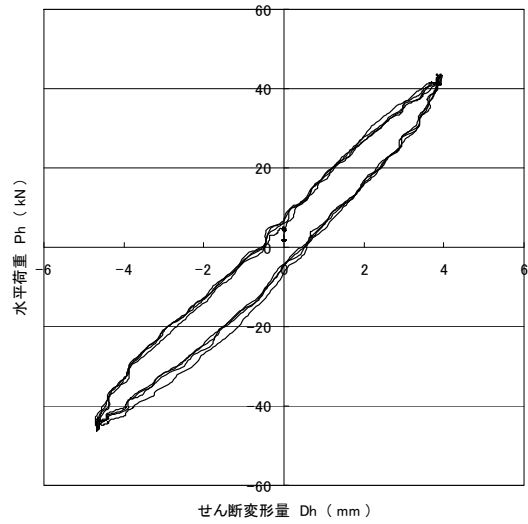
(a) 1mm



(b) 2mm



(c) 3mm



(d) 5mm

図 1.3.4-26 荷重-変位関係 ((#4-1) 微小振幅、20N/mm²)

(3) 摩擦係数

1) 基本特性試験

基本特性試験の摩擦係数の結果を表 1.3.4-6 に示す。基本特性試験の摩擦係数 μ_0 は 3 サイクル目を評価した。摩擦係数の最大ばらつきは設計値 0.100 に比べて 13% 程度となっている。

表 1.3.4-6 より、基準面圧 20N/mm^2 (#1-1、#1-2) での摩擦係数 μ_3 は 0.106、0.113、大面圧 40N/mm^2 (#4-1、#4-2) での摩擦係数 μ_3 は 0.068、0.069 であり、大面圧による摩擦係数の低下率は 0.64、0.61 であった。

表 1.3.4-6 摩擦係数結果 (基本特性試験)

試験体 No.	試験 No.	基本特性試験の摩擦係数 μ_0
#1	#1-1	0.106
	#1-2	0.113
	#1-3	0.110
#2	#2-1	0.103
#3	#3-1	0.109
	#3-3	0.103
#4	#4-1	0.068
	#4-2	0.069
#5	#5-1	0.109
	#5-2	0.096

2) 長周期試験および限界試験

長周期、限界試験の摩擦係数の結果を表 1.3.4-7 に、摩擦係数の繰り返しの伴う変化を図 1.3.4-27 に示す。3 サイクル目の摩擦係数 μ_3 、最終サイクルの摩擦係数を μ_e とした。摩擦係数の変化率は μ_3 を基準とした。

これらの結果より、以下の傾向を確認した。

a) 繰り返しの影響

回数を繰り返すことで摩擦係数は減少する。摩擦係数の変化率は#1-1(120 サイクル)で-59%、#1-4(250 サイクル連続)で-67%であった。繰り返しの伴う摩擦係数の減少はインターバル時間中には一旦留まり、摩擦係数が復帰する(大きくなる)傾向にある。

b) 面圧の影響

表 1.3.4-7 より、面圧 20N/mm^2 (#1-1、#1-2) での摩擦係数 μ_3 は 0.106、0.111 であり、面圧 40N/mm^2 (#4-1、#4-2) での摩擦係数 μ_3 は両ケースとも 0.069 となり、基本特性試験と同等であった。両方の面圧で摩擦係数の変化を比較すると、面圧が増えると面圧依存性により初期の摩擦係数は小さくなるが、初期状態からの摩擦係数の変化率は、いずれの面圧とも繰り返し 120 回の場合で-59%~-57%であり、両面圧で減少の程度はほぼ同様と言える。

c) PTFE 軟化の影響

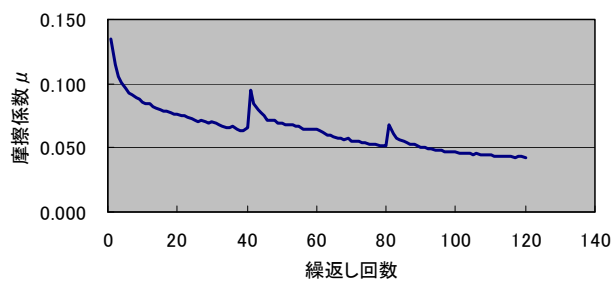
面圧 40N/mm^2 で連続加振を行った限界試験のケース (#5-3) については、125 サイクルめ頃か

ら温度上昇により PTFE が軟化し始め、載荷の継続により支承周辺部に PTFE の流動化(はみ出し)が確認されたので、目標の 250 サイクルに至る前の 179 サイクルめで載荷を中止した。

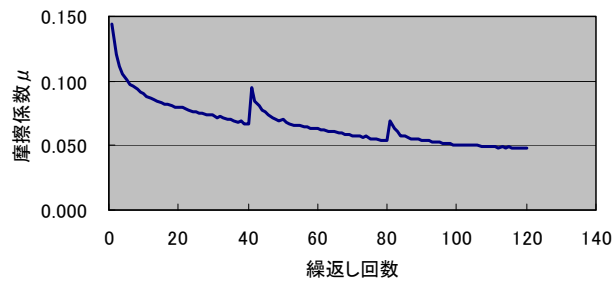
こうした軟化傾向は、限界(基準面圧)の#2-1、長周期(大面圧)の#4-2 でも見られたが、載荷の停止を判断するほどの流動は見られなかった。#5-3 では限界試験と大面圧の両条件により流動化が進行したものと見られる。(4)で後述するように、#5-3 実施後の支承高さは 0.2mm 程度小さくなっているが、鉛直支持性能に大きな変化は見られなかった。

表 1.3.4-7 摩擦係数結果(長周期試験および限界試験)

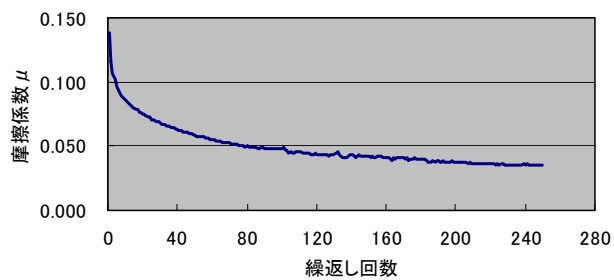
試験体 No.	試験 No.	試験条件	3 サイクル目の摩擦係数 μ_3	最終サイクルの摩擦係数 μ_e	変化率 (%)	最終サイクル	備考
#1	#1-1	長周期	0.106	0.043	-59	120	-
	#1-2		0.111	0.048	-57	120	
	#1-4	限界【連続】	0.107	0.035	-67	250	
#2	#2-1	限界	0.103	0.037	-64	240	-
#3	#3-1	限界	0.095	0.041	-57	120	大変位(200mm)
#4	#4-1	長周期	0.069	0.029	-58	120	大面圧(40N/mm ²)
	#4-2		0.069	0.028	-59	120	
#5	#5-1	限界	0.100	0.044	-56	90	大変位(230mm)
	#5-3	限界【連続】	0.068	0.026	-62	179	大面圧(40N/mm ²)



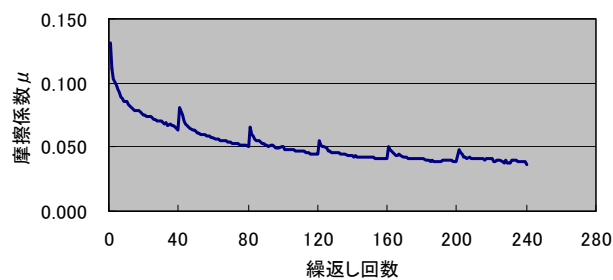
(a) #1-1 (40回×3セット)



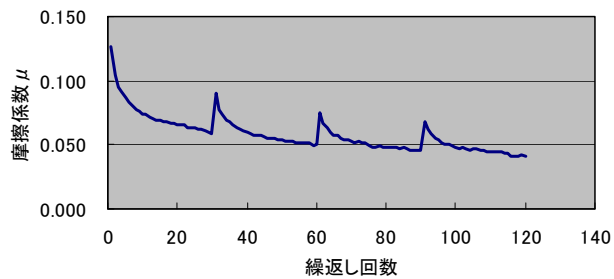
(b) #1-2 (40回×3セット)



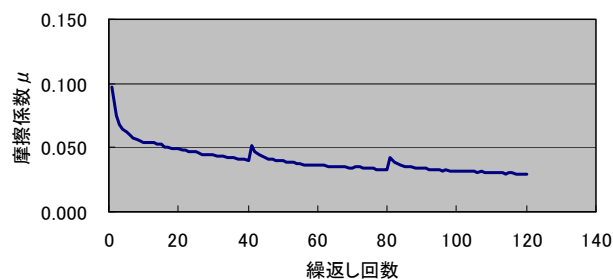
(c) #1-4 (250回【連続】)



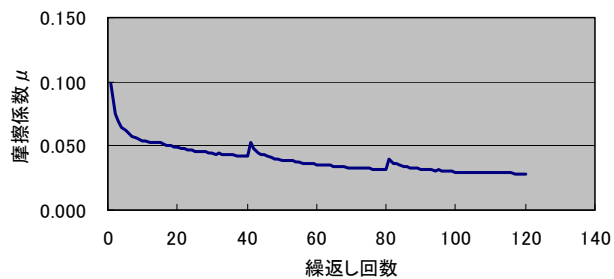
(d) #2-1 (40回×6セット)



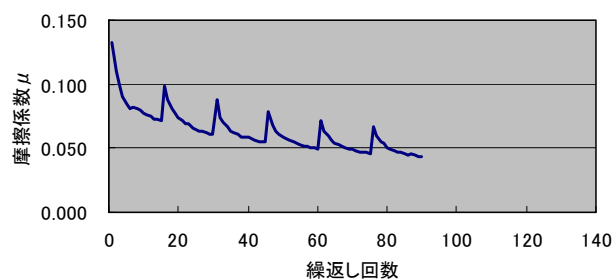
(e) #3-1 (30回×4セット)



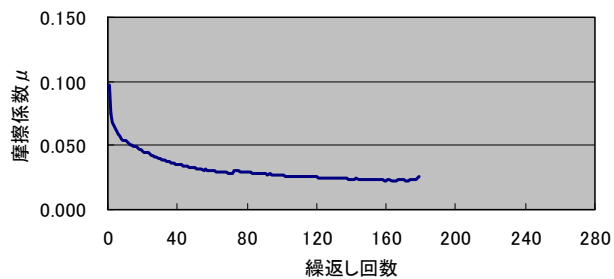
(f) #4-1 (40回×3セット)



(g) #4-2 (40回×3セット)



(h) #5-1 (15回×6セット)



(i) #5-3 (目標 250回【連続】 → 179回で停止)

図 1.3.4-27 摩擦係数の変化

(4) 温度特性

1) 最大温度

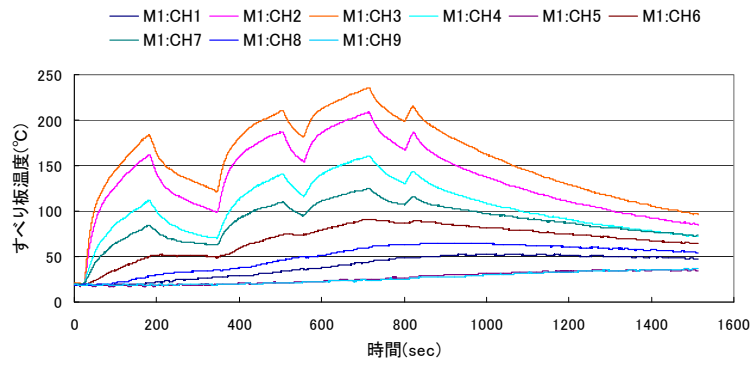
各測定点における最大温度を表 1.3.4-8 に、試験体温度の時間変化を図 1.3.4-28～図 1.3.4-38 に示す。

表 1.3.4-8 より、インターバルあり、基準面圧(20N/mm²)、振幅±100mm のすべり板温度は、長周期 (#1-1、#1-2) で 236～238℃、限界 (#2-1) で 258℃まで上昇した。限界 (#3-1)、限界 (#5-1) のすべり板はそれぞれ 286℃、265℃まで上昇したが、両ケースが他に比べて温度が高いのはすべり速度が大きく、時間当たりの発熱量が異なるためと考えられる。また、インターバルなし、振幅±100mm の連続条件では、基準面圧、大面圧(40N/mm²)の限界 (#1-4、#5-3) が 255～270℃まで上昇した。本実験の試験体に用いている PTFE 材料の材料特性表によれば、使用温度範囲は-240℃～260℃とされている。同材料の融点は 320℃以上とさらに高いものの、材料の分解が始まる 260℃を高温側の使用限界と定めている。本実験では PTFE 材料の温度を直接測定していないが、PTFE と常時接触しているすべり板中央部の温度は限界 (#1-4、#3-1、#5-2) および大面圧 (#4-1、#4-2) のケースで 260℃に達しており、実験で確認された軟化現象を説明するものとなっている。一方、地震応答波入力では、すべり板温度 100℃前後まで上昇するがゴム表面は常温に近い状態であった。

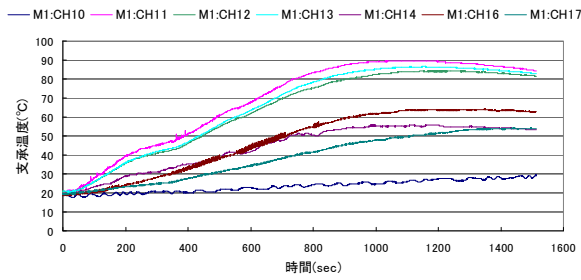
加力治具の温度はすべてのケースにおいて 17～22℃で推移しており、断熱板により熱の伝達が遮断されていたことが確認できる。

表 1.3.4-8 温度計測結果 (最大温度、単位℃)

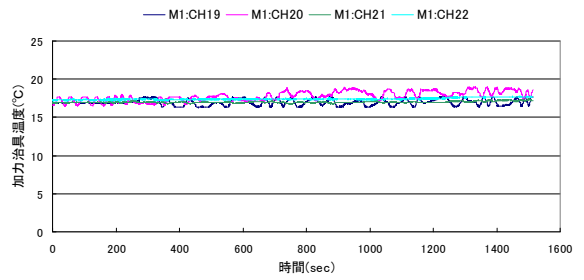
試験体 No.	試験 No.	すべり板 (中央部)	PTFE 裏	ゴム表面	加力治具
#1	#1-1	236	90	64	19
	#1-2	238	89	63	17
	#1-4	270	118	74	18
#2	地震波 (oskh02_sd)	97	33	24	20
	#2-1	258	135	77	20
#3	#3-1	286	126	84	20
#4	#4-1	260	105	65	19
	#4-2	262	102	62	19
#5	地震波 (aic003_av)	114	29	21	17
	#5-1	265	127	80	19
	#5-3	255	114	72	22



(a) すべり板

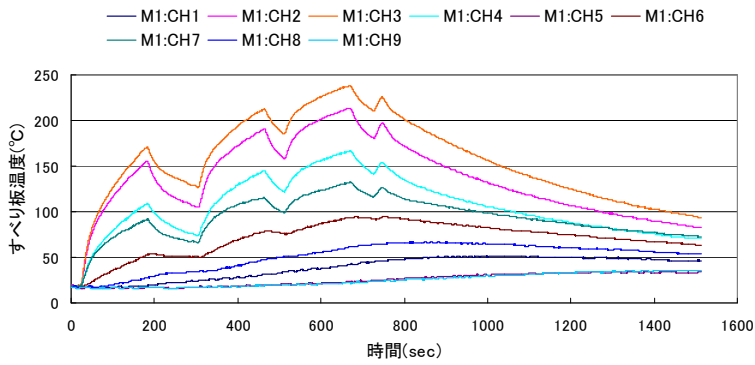


(b) 支承

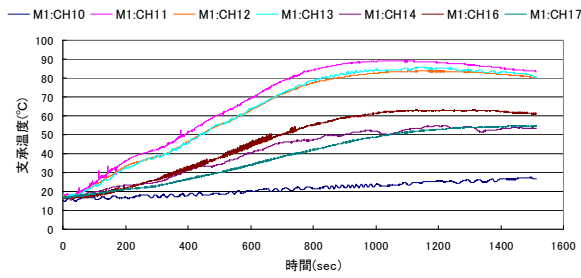


(c) ゴム表面

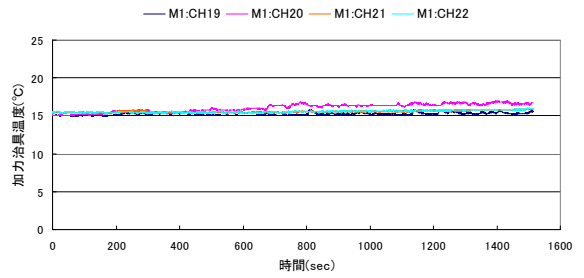
図 1.3.4-28 試験体の温度変化 ((#1-1) 1A-1 長周期、20N/mm²、±100mm、40回×3セット)



(a) すべり板

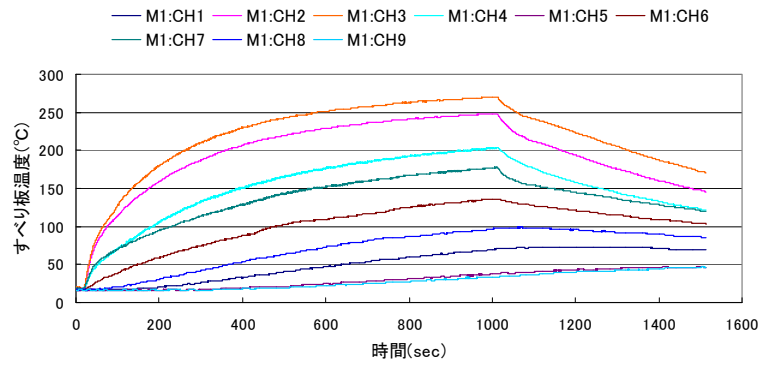


(b) 支承

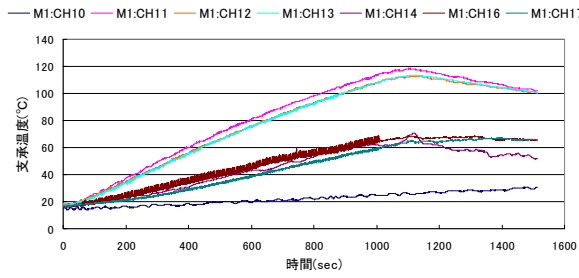


(c) ゴム表面

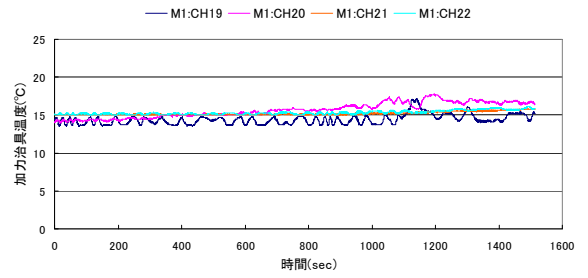
図 1.3.4-29 試験体の温度変化 ((#1-2) 1A-2 長周期、20N/mm²、±100mm、40回×3セット)



(a) すべり板

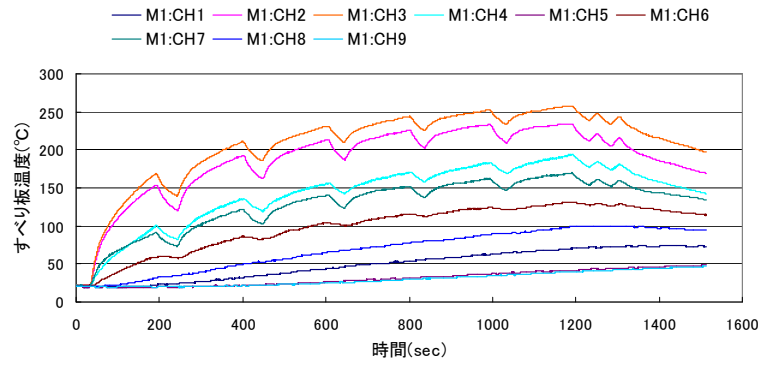


(b) 支承

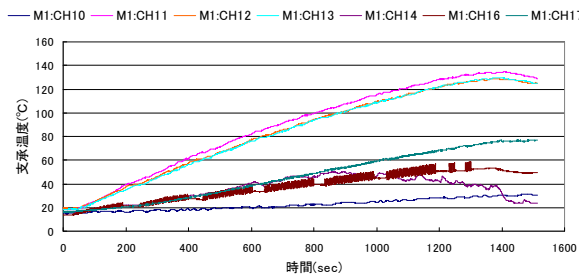


(c) ゴム表面

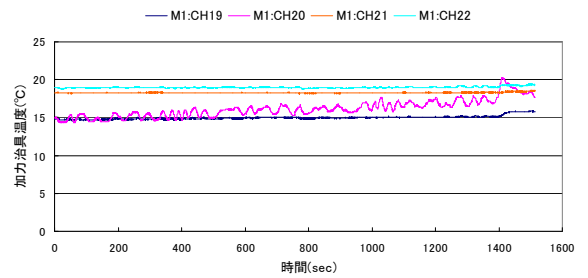
図 1.3.4-30 試験体の温度変化 ((#1-4) 1B 限界、20N/mm²、±100mm、250回【連続】)



(a) すべり板

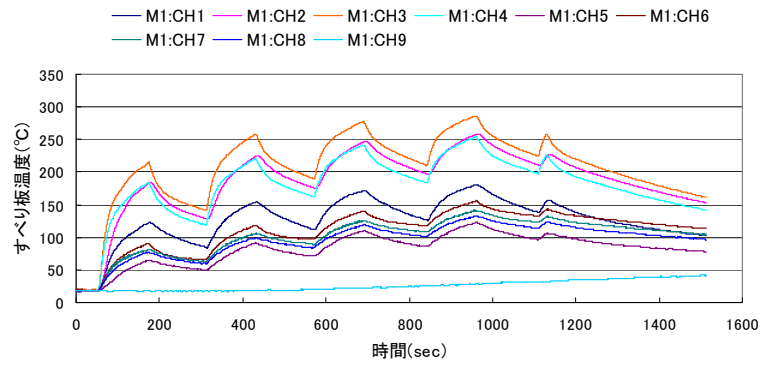


(b) 支承

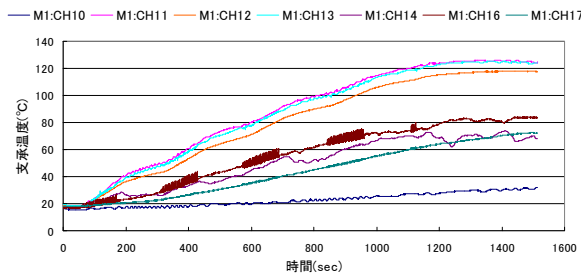


(c) ゴム表面

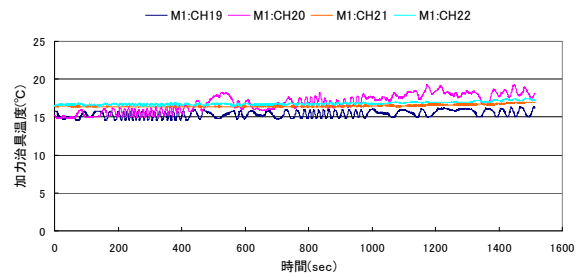
図 1.3.4-31 試験体の温度変化 ((#2-1) 1B 限界、20N/mm²、±100mm、40回×6セット)



(a) すべり板

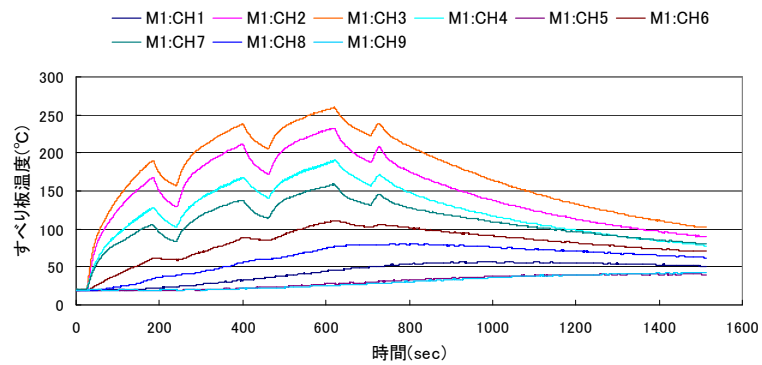


(b) 支承

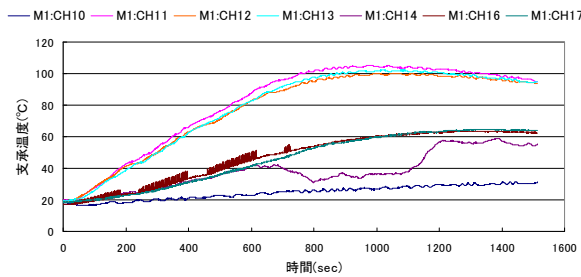


(c) ゴム表面

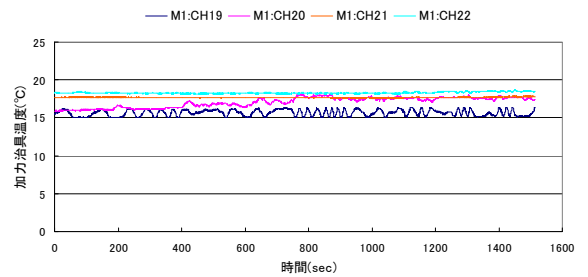
図 1.3.4-32 試験体の温度変化 ((#3-1) 2B 限界、20N/mm²、±200mm、30回×4セット)



(a) すべり板

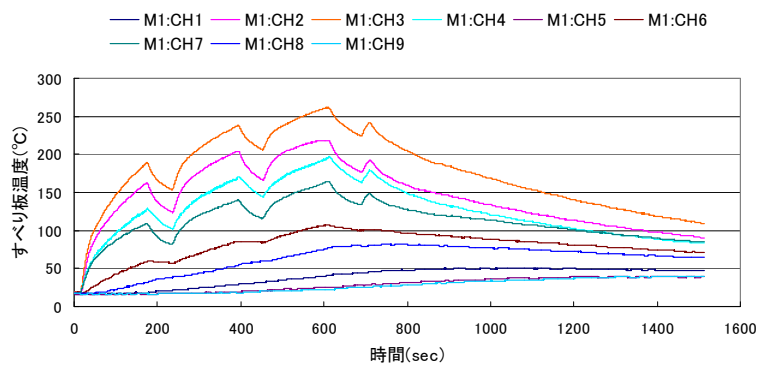


(b) 支承

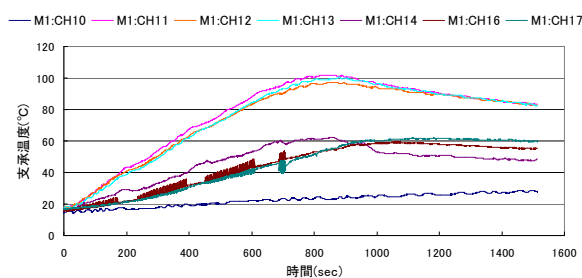


(c) ゴム表面

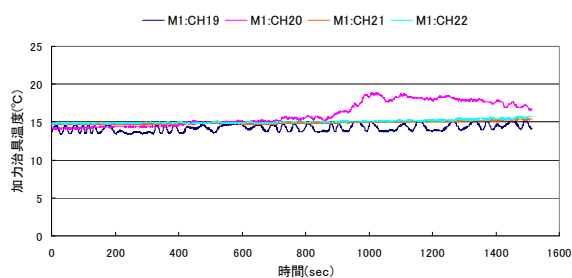
図 1.3.4-33 試験体の温度変化 ((#4-1) 1A-1 長周期、40N/mm²、±100mm、40回×3セット)



(a) すべり板

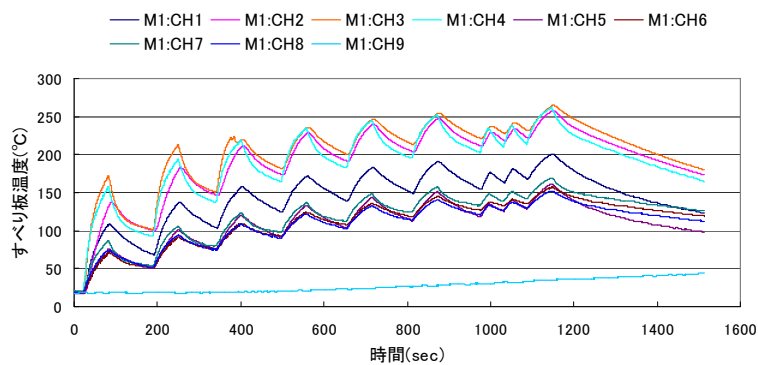


(b) 支承

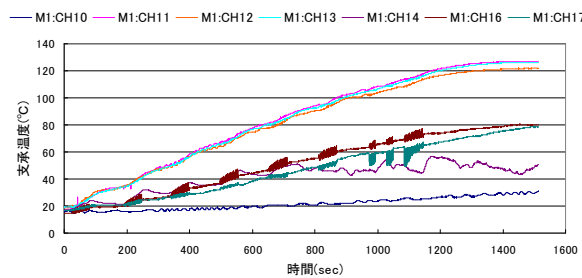


(c) ゴム表面

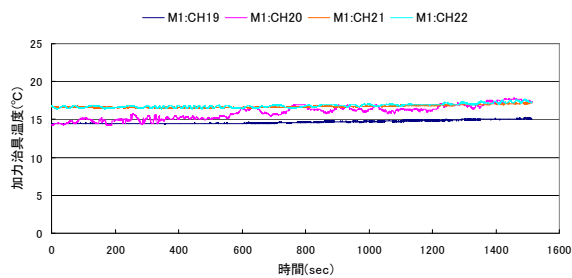
図 1.3.4-34 試験体の温度変化 ((#4-2) 1A-2 長周期、40N/mm²、±100mm、40回×3セット)



(a) すべり板

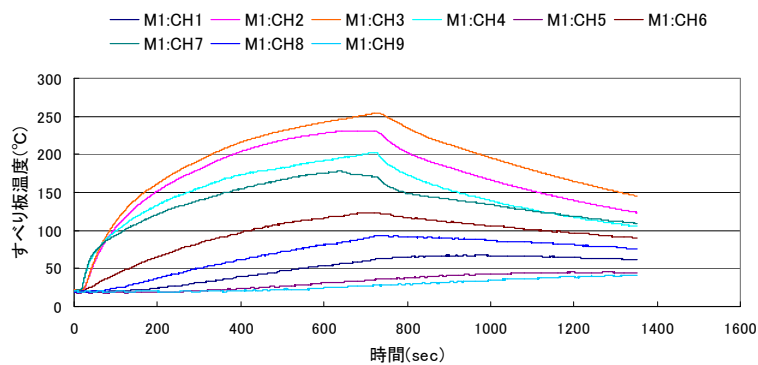


(b) 支承

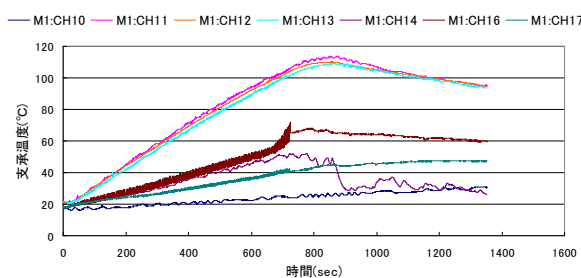


(c) ゴム表面

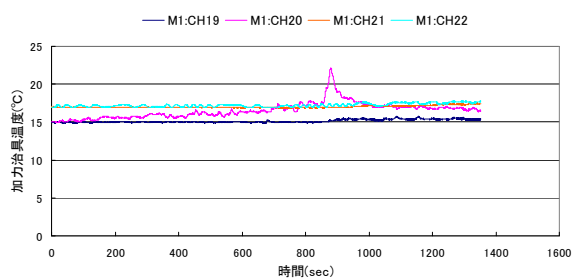
図 1.3.4-35 試験体の温度変化 ((#5-1) 3B 限界、20N/mm²、±230mm、15回×6セット)



(a) すべり板



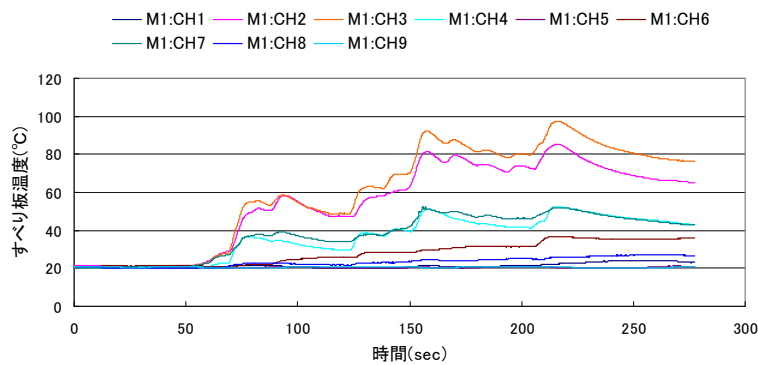
(b) 支承



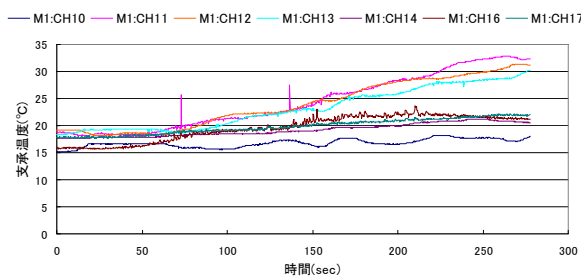
(c) ゴム表面

図 1.3.4-36 試験体の温度変化

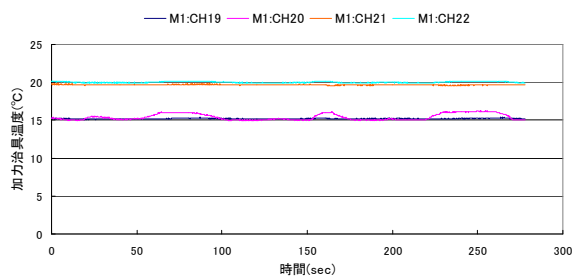
((#5-3) 1B 限界、40N/mm²、±100mm、目標 250回→179で停止【連続】)



(a) すべり板

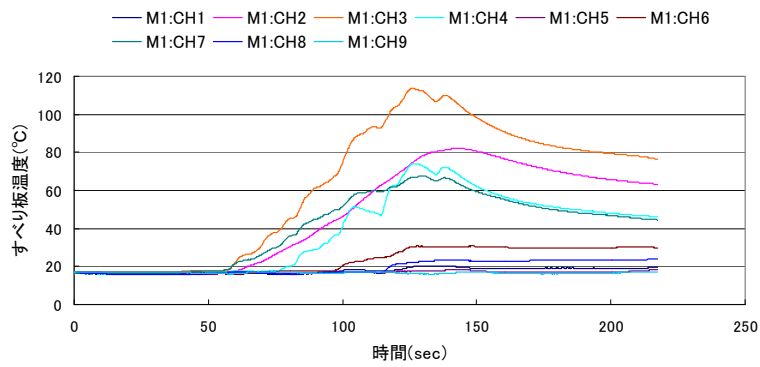


(b) 支承

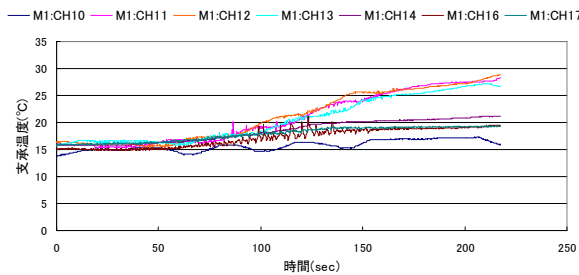


(c) ゴム表面

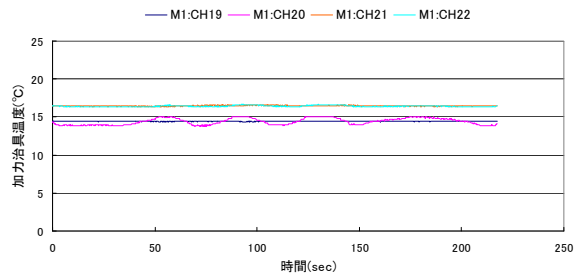
図 1.3.4-37 試験体の温度変化 ((#2-1) 地震応答波 oskh02_sd、20N/mm²)



(a) すべり板



(b) 支承



(c) ゴム表面

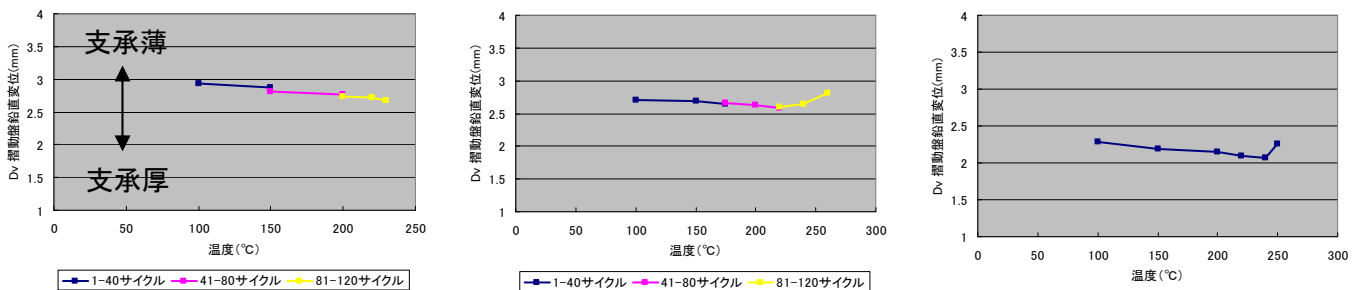
図 1.3.4-38 試験体の温度変化 ((#5-1) 地震応答波 aic003_av、20N/mm²)

2) 摺動盤の鉛直変位とすべり板温度の関係

すべり板温度と摺動盤の鉛直変位の関係を図 1.3.4-39 に示す。摺動盤の鉛直変位は支承高さを表す。方向はプラスを圧縮（支承が薄くなる）、マイナスを引張（支承が厚くなる）とした。

#1-1 では、すべり板温度が上昇するとともに摺動盤の鉛直変位が 0.3mm 減少、即ち支承厚が 0.3mm 増加していることが分かった。すべり板の熱が試験体に伝達して、バック鋼板の温度が上昇し、鋼板が熱膨張した影響であると考えられる。

#4-2 では 240°C 付近から摺動盤の鉛直変位が 0.2mm 上昇、即ち支承厚が 0.2mm 減少している。これは PTFE が溶け始め、試験体高さが薄くなったためと考えられる。#5-3 についても同様のことが考えられる。



#1-1 (面圧 : 20N/mm²)

#4-2 (面圧 : 40N/mm²)

#5-3 (面圧 : 40N/mm²)

図 1.3.4-39 すべり板温度と摺動盤の鉛直変位の関係 (その 2)

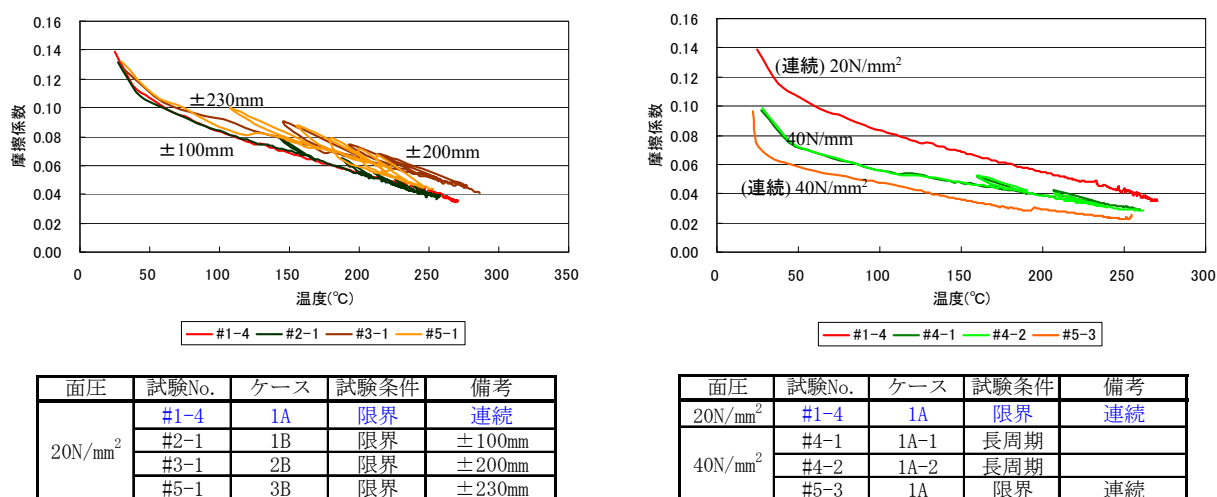
(5) 摩擦係数と諸量との関係

1) 摩擦係数－すべり板温度関係

すべり板中心温度と摩擦係数の関係を図 1.3.4-40 に示す。

同図(a)によれば、繰り返しによる温度上昇に伴い摩擦係数が低下する傾向が確認できる。初期温度から 50℃程度まで上昇する過程では、摩擦係数は急激に低下するが、その後は繰り返しに伴って摩擦係数は直線的に低下するようになる。特に連続加振のケースでは摩擦係数はすべり板温度の上昇に伴って単調に減少する。インターバルがあるケースは、载荷の休止時間中に温度が低下し摩擦係数も上昇する傾向にあり連続加振の曲線よりも上方で軌跡を描きながら推移するが、次のセットの加振を再開すると次第に連続加振の曲線上に載るようになる。インターバルの影響を無視すれば、载荷振幅による摩擦係数への影響は少ないものと考えられる。

同図(b)に示す大面圧のケースにおいても、摩擦係数が繰り返しに伴い直線的に低下する傾向が同様に確認できる。



(a) 载荷振幅比較

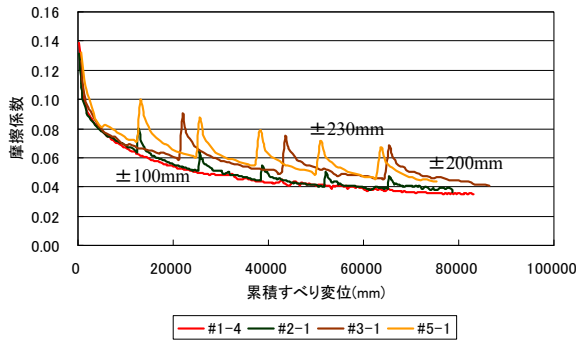
(b) 面圧、インターバルの影響

図 1.3.4-40 摩擦係数－すべり板温度関係

2) 摩擦係数－累積すべり変位関係

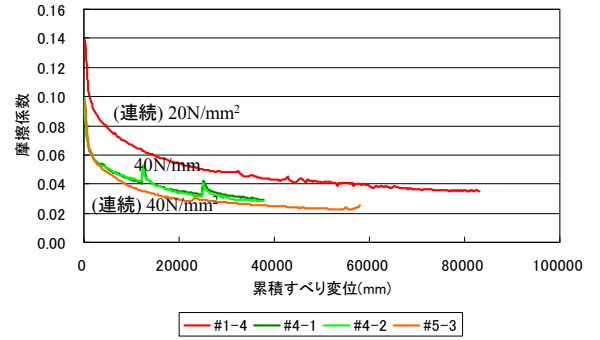
累積すべり変位（支承の累積変形から弾性変形分を除いた分）と摩擦係数の関係を図 1.3.4-41 に示す。

同図(a)より、累積すべり変位の増加に伴って摩擦係数が低下する傾向が確認できる。その変化傾向は累積すべりが大きくなるほど緩やかになる。また、同じ累積すべり量で比較すると、振幅が小さいほど摩擦係数の低下が強く出る傾向が見られる。その理由として、振幅が小さい場合に考えられることとして、すべり板上で摺動部面積が小さくなるため支承部に熱が溜まり易いこと、载荷時間に対してインターバル時間が相対的に短かったために放熱しにくい状況にあったことなどが考えられる。



面圧	試験No.	ケース	試験条件	備考
20N/mm ²	#1-4	1A	限界	連続
	#2-1	1B	限界	±100mm
	#3-1	2B	限界	±200mm
	#5-1	3B	限界	±230mm

(a) 荷重振幅比較



面圧	試験No.	ケース	試験条件	備考
20N/mm ²	#1-4	1A	限界	連続
40N/mm ²	#4-1	1A-1	長周期	
	#4-2	1A-2	長周期	
	#5-3	1A	限界	連続

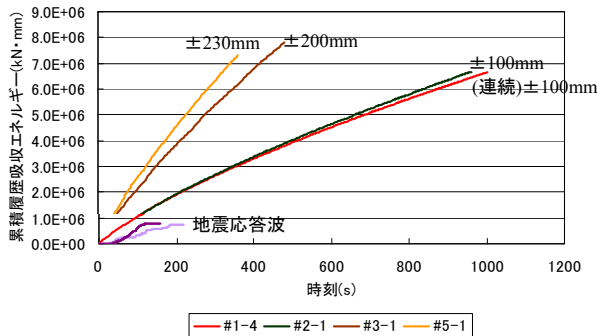
(b) 面圧、インターバルの影響

図 1.3.4-41 摩擦係数－累積すべり変位関係

3) 累積吸収エネルギー

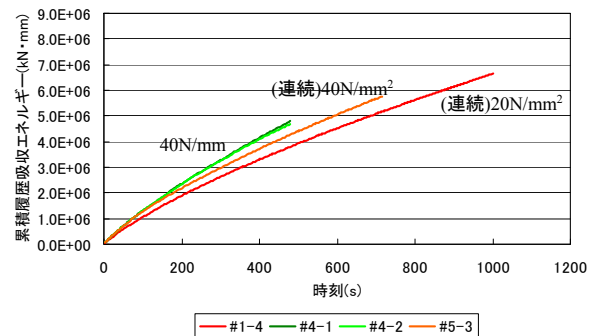
累積吸収エネルギーの時間変化を図 1.3.4-42 に示す（時刻データはインターバル時間を除いた荷重時間で表している）。図中には、参考に地震応答波加振のデータも記載している。

摩擦係数と累積吸収エネルギーの関係を図 1.3.4-43 に示す。累積吸収エネルギーは累積すべり変位の増加に伴いほぼ直線的に変化する（図 1.3.4-44）ので、摩擦係数－累積すべり変位関係（図 1.3.4-41）と同様の傾向を示している。



面圧	試験No.	ケース	試験条件	備考
20N/mm ²	#1-4	1A	限界	連続
	#2-1	1B	限界	±100mm
	#3-1	2B	限界	±200mm
	#5-1	3B	限界	±230mm

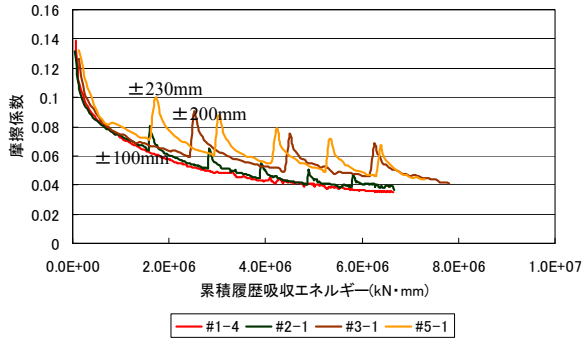
(a) 荷重振幅比較



面圧	試験No.	ケース	試験条件	備考
20N/mm ²	#1-4	1A	限界	連続
40N/mm ²	#4-1	1A-1	長周期	
	#4-2	1A-2	長周期	
	#5-3	1A	限界	連続

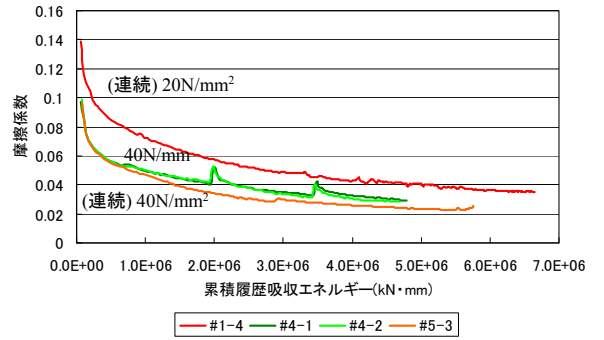
(b) 面圧、インターバルの影響

図 1.3.4-42 累積吸収エネルギーと荷重時間の関係



面圧	試験No.	ケース	試験条件	備考
20N/mm ²	#1-4	1A	限界	連続
	#2-1	1B	限界	±100mm
	#3-1	2B	限界	±200mm
	#5-1	3B	限界	±230mm

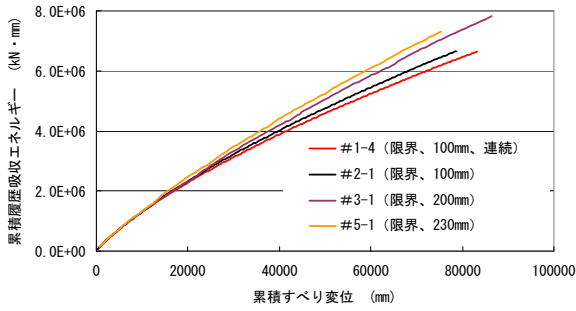
(a) 荷重振幅比較



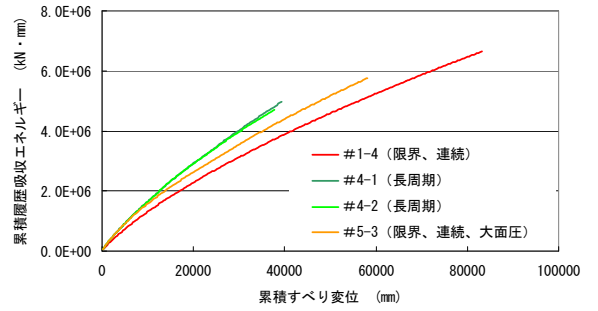
面圧	試験No.	ケース	試験条件	備考
20N/mm ²	#1-4	1A	限界	連続
40N/mm ²	#4-1	1A-1	長周期	
	#4-2	1A-2	長周期	
	#5-3	1A	限界	連続

(b) 面圧、インターバルの影響

図 1.3.4-43 摩擦係数－累積吸収エネルギー関係



(a) 荷重振幅比較



(b) 面圧、インターバルの影響

図 1.3.4-44 累積吸収エネルギー－累積すべり変位関係

(6) その他の特性

1) 試験体の外観変化

試験後の供試体及び試験状況を写真 1.3.4-1 に示す。

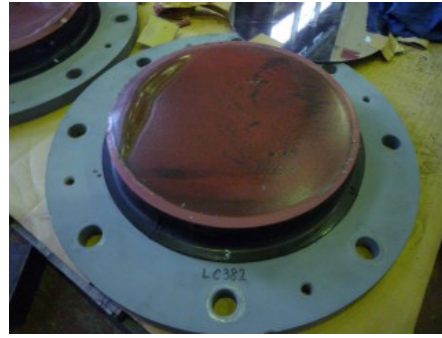
基準面圧 (20N/mm^2) の長周期試験を実施した試験体#1 では、PTFE が加振前後方向部にずれて支承端部でやや盛り上がっていたが大きな損傷は見られなかった。同じ面圧条件で大変位の限界試験を実施した試験体#3 においては外観に異常は見られず、試験後に試験体を切断して確認した結果においても PTFE の接着部に異常は見られなかった。以上から、基準面圧 (20N/mm^2)、累積変形が 50m 以内の条件下で、すべり支承の健全性を確保できることを確認した。限界試験を実施した試験体#2 では、一部に PTFE の膨れが見られ、接着層での剥離が考えられる。

大面圧 (40N/mm^2) の長周期試験を実施した試験体#4、試験体#5 では、すべり板の温度が 250°C に達する付近から PTFE が軟化し始め、支承外周部にはみ出した (写真 1.3.4-1 (f))。試験後に加力治具を上げた際には PTFE 面に皺を生じ、温度低下とともにそのまま固化した (同 (d), (e))。試験後に試験体を切断して確認した結果、PTFE と接着層の間に空隙が確認された (同 (h))。皺の原因は、支承の軸力を開放した際に PTFE 裏面の接着部に加熱により分解したガスなどが部分的に溜まり、軟化した PTFE を膨張させたことが理由と考えられる。載荷後も支承の軸力を開放せずに放置し温度が低下するのを待てば、PTFE の皺は生じなかったものと考えられる。

前掲の表 1.3.4-8 に示したとおり、基準面圧、大面圧の試験ともすべり板や PTFE 裏の最大温度はさほど変わらない。表 1.3.4-7 に示したように大面圧の場合は摩擦係数が減少し、摩擦係数と軸力の積で表される摩擦力および摩擦熱は基準面圧の場合とさほど変わらないと考えられる。こうした状況下で大面圧の試験体#4、試験体#5 で PTFE のはみ出しが確認された理由としては、温度上昇により軟化した PTFE に大面圧が作用することで流動が促進されたためと考えられる。



(a) #1



(b) #2



(c) #3



(d) #4



(e) #5



(f) #5-3 試験状況



(g) #3 試験後切断状況



(h) #5 試験後切断状況

写真 1.3.4-1 試験実施後の試験体の状況

2) 試験体の弾性変形量

試験体の弾性変形量と繰り返しによる変化傾向を表 1.3.4-9 及び図 1.3.4-45 に示す。

図 1.3.4-13 より繰り返し回数が増加すると、摩擦係数の低下に伴って試験体の弾性変形量は減少する傾向を確認できる。弾性変形量の最大値は 20.6mm(#4-2)であった。

表 1.3.4-9 試験体の弾性変形量

試験体 No.	試験 No.	サイクル数	弾性変形量 (mm)
#1	#1-1	1~40	18.7
		81~120	14.8
	#1-2	1~40	19.1
		81~120	15.4
#2	#2-1	1~40	18.8
		201~240	11.1
#3	#3-1	1~30	18.4
		91~120	14.6
#4	#4-1	1~40	19.8
		81~120	16.2
	#4-2	1~40	20.6
		81~120	15.4
#5	#5-1	1~15	17.7
		76~90	13.4

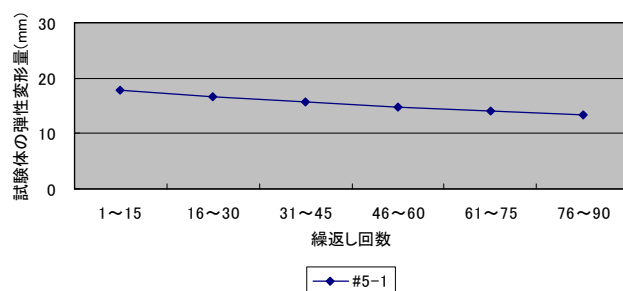
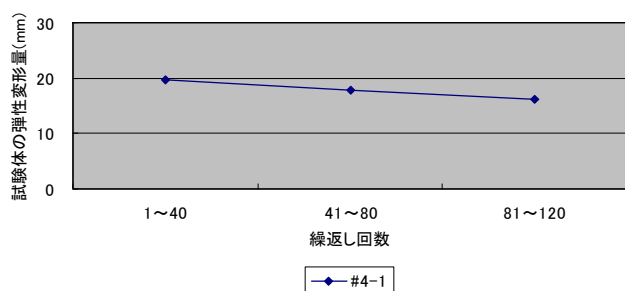
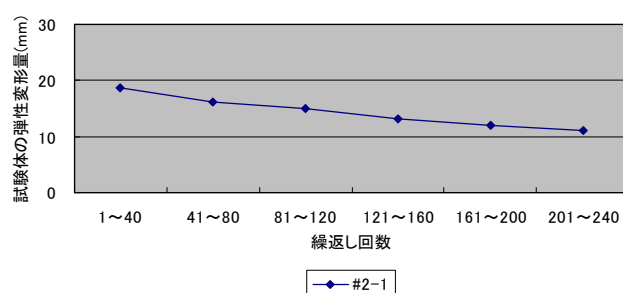
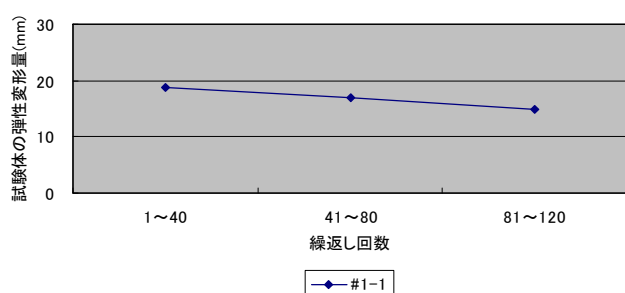


図 1.3.4-45 弾性変形と繰り返し回数の関係

3) PTFE の膜厚変化

表 1.3.4-10 に膜厚測定結果、図 1.3.4-46 に PTFE の摩耗量と累積変形量の関係を示す。

図 1.3.4-46 より PTFE の摩耗量は累積変形量に比例する傾向が見られる。また、#4-1(面圧 40N/mm²、累積変形量 50m)のケースでは PTFE の摩耗量が 0.2mm であり、摩耗量は面圧に依存する傾向が見られる。

表 1.3.4-10 PTFE の膜厚測定結果

試験 No.	膜厚(mm)						
		A	B	C	D	E	平均
#1-1	試験前	3.41	3.34	3.34	3.45	3.38	3.39
	試験後	3.27	3.25	3.31	3.32	3.32	3.29
	差	0.14	0.09	0.03	0.13	0.06	0.10
#1-2	試験前	3.27	3.25	3.31	3.32	3.32	3.29
	試験後	3.21	3.22	3.25	3.22	3.28	3.23
	差	0.06	0.03	0.06	0.10	0.04	0.06
#1-3	試験前	3.21	3.22	3.25	3.22	3.28	3.23
	試験後	3.17	3.24	3.28	3.22	3.19	3.23
	差	0.04	-0.02	-0.03	0.00	0.09	0.00
#2-1	試験前	3.15	3.25	3.25	3.11	3.25	3.19
	試験後	-	3.20	3.21	3.02	3.19	-
	差	-	0.05	0.04	0.09	0.06	-
#3-1	試験前	3.35	3.50	3.25	3.45	3.40	3.39
	試験後	3.21	3.38	3.15	3.25	3.28	3.25
	差	0.14	0.12	0.10	0.20	0.12	0.14
#4-1	試験前	3.22	3.30	3.22	3.13	3.23	3.22
	試験後	2.99	3.12	3.05	2.90	3.18	3.02
	差	0.23	0.18	0.17	0.23	0.05	0.20
#4-2	試験前	2.99	3.12	3.05	2.90	3.18	3.02
	試験後	-	2.88	3.00	-	2.74	-
	差	-	0.24	0.05	-	0.44	-
#5-1	試験前	3.20	3.09	3.20	3.25	3.19	3.19
	試験後	3.06	2.92	3.09	3.12	3.06	3.05
	差	0.14	0.17	0.11	0.13	0.13	0.14
#5-2	試験前	3.06	2.92	3.09	3.12	3.06	3.05
	試験後	3.07	2.89	3.08	3.10	3.06	3.04
	差	-0.01	0.03	0.01	0.02	0.00	0.01

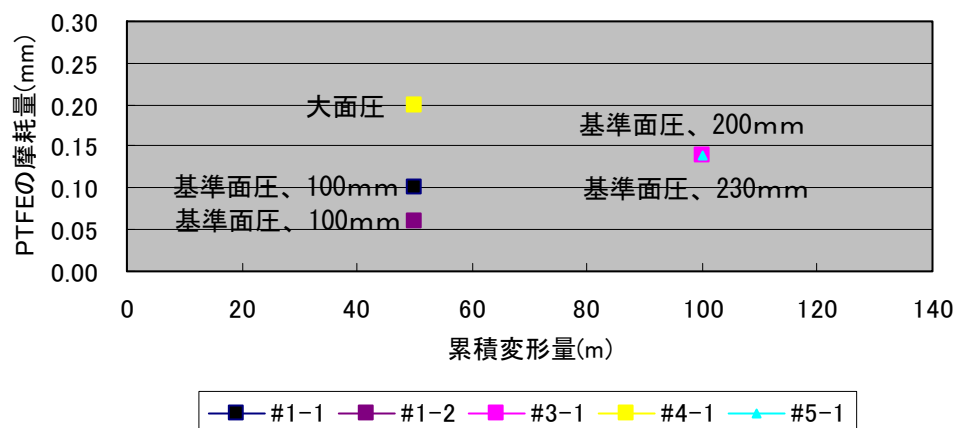


図 1.3.4-46 PTFE の摩耗量

1.3.4.3 まとめと課題

弾性すべり支承（高摩擦）の多数回繰り返しに対する性能を把握する事を目的として、実大の1/3 縮小試験体（Φ300）により大振幅高速繰り返し試験を実施した。以下に、本実験から得られた知見をまとめて示す。

(1) 多数回繰り返しに対する摩擦特性の変化

基準面圧（20N/mm²）の長周期、限界試験における摩擦係数は回数を繰返すことで減少し、摩擦係数の変化率は#1-1（120 サイクル）で-59%、#1-4（250 サイクル連続）で-67%であった。繰り返しに伴う摩擦係数の減少傾向はインターバル時間中には一旦止まり、摩擦係数が復帰する（大きくなる）傾向にあった。

(2) 多数回繰り返しに対する試験体の温度変化

基準面圧（20N/mm²）、振幅±100mm、インターバルありのすべり板温度は、長周期で236～238℃、限界で258℃まで上昇した。すべり速度が大きい限界（#3-1、#5-1）のすべり板温度はそれぞれ286℃、265℃まで上昇した。また、インターバルなし、振幅±100mmの連続条件では、基準面圧の限界（#1-4）のすべり板温度が270℃まで上昇した。地震波試験でのすべり板温度は100℃前後まで上昇するが、ゴム表面は常温に近い状態であった。

加力治具の温度は17～22℃で推移しており、断熱板により熱の伝達が遮断されていたと考えられる。

(3) 多数回繰り返しに対する耐久性

基準面圧（20N/mm²）の長周期試験を実施した試験体#1 では、PTFE が片側によっていたが大きな損傷は見られなかった。限界試験を実施した試験体#2 では、一部にPTFE の膨れが見られ、接着層での剥離が考えられる。同じ面圧条件で大変位の限界試験を実施した試験体#3 においては外観に異常は見られなかった。以上から、基準面圧（20N/mm²）、累積変形が50mm 以内の条件下で、すべり支承の健全性を確保できることを確認した。

(4) 静的軸力の違いによる上記性状の変化

インターバルなし、振幅±100mmの連続条件では、大面圧（40N/mm²）の限界（#5-3）が255℃まで上昇したが、最大温度は基準面圧の場合と比べて同程度かやや低い程度であった。大面圧では摩擦係数が低くなるためと考えられる。

大面圧（40N/mm²）の長周期試験を実施した試験体#4、試験体#5 では、すべり板の温度が240℃付近からPTFE が溶け始め横にはみ出した。この理由としては、温度上昇により軟化したPTFE に大面圧が作用することで流動が促進されたためと考えられる。この場合も試験体高さの変化はごくわずかであり、荷重支持性能は確保されることを確認した。

以上、弾性すべり支承（高摩擦）の縮小試験体による多数回繰り返し試験を通じて、摩擦特性の変化、温度変化ならびに限界性能を確認した。今後の課題として、多数回繰り返しによる特性値評価式の検討および地震応答解析への反映、実大試験体による温度上昇や特性値変動に対するスケール効果の確認などが挙げられる。

参考文献

- 1.3.4-1) Mokha, A., Constantinou, M. and Reinhorn, A., Teflon Bearings in Base Isolation, I: Testing, *Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.116, No.2, pp.438-454, 1990.2*
- 1.3.4-2) 富島誠司, 大橋智樹, 佐藤啓治: すべり支承方式の免震に用いるすべり材の動摩擦係数に関する研究, *日本建築学会技術報告集, 第1号, pp.140-145, 1995.12*
- 1.3.4-3) 岡本晋, 藤井俊二, 尾崎大輔, Constantinou, M.C., Tsopelas, P.C.: すべり方式免震システムを有する橋梁の動特性に関する実験的研究, *土木学会論文集, No. 507/I-30号, pp.167-177, 1995.1*
- 1.3.4-4) 江森純一, 山中久幸, 谷垣政治, 平田裕一, 山岸邦彰: 弾性すべり支承の基本性能に関する実験的研究, *日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.487-488, 1998.9*
- 1.3.4-5) 林章二, 北村佳久, 猿田正明: 積層ゴムとすべり支承による複合免震システムに関する研究, *日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.10-3, pp.2807-2812, 1998*
- 1.3.4-6) 松崎浩, 森利弘, 渡辺則雄, 滝沢賢一: すべり支承とせん断型コイルばねによる免震構法(その2) すべり支承加力試験, *日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.495-496, 1998.9*
- 1.3.4-7) 浜口弘樹, 東野雅彦, 遠山幸太郎, 安部裕, 沖芳郎: 低摩擦特性のすべり支承に関する研究(その3) 実大装置の性能確認試験, *日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.701-702, 1999.9*
- 1.3.4-8) 増田圭司, 三山剛史: 低摩擦滑り支承を用いた免震構法の開発 その1. 低摩擦支承の開発, *日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.737-738, 2000.9*
- 1.3.4-9) 日比野浩, 高木政美, 勝田庄二: 実大弾性すべり支承の載荷実験に基づく摩擦特性のモデル化, *日本建築学会構造系論文集, 第574号, pp.45-52, 2003.12*
- 1.3.4-10) 松本喜代隆, 高澤恒男, 加藤直樹, 岡本守, 市村敦史: 弾性すべり支承の開発(その4: 摩擦係数の動特性), *日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.505-506, 2002.8*
- 1.3.4-11) 南輝弥, 加藤朝郎, 大場政章, 村角保行: FBR 免震設計に関する研究 その30 複合免震装置の原子炉施設への適用(弾性すべり支承を用いた複合免震構法の検討 その2), *日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.1219-1220, 1999.9*
- 1.3.4-12) 高坂隆一, 木本幸一郎, 竹内貞光, 伊藤嘉朗, 降旗大助, 芳沢利和, 和田章: 弾性すべり支承免震の実験的研究, その3: 振動実験と弾性すべり支承の面圧, 速度依存性を考慮したシミュレーションの比較, *日本建築学会大会学術講演梗概集, B-2, pp.727-728, 2000.9*
- 1.3.4-13) 田中寛人, 高橋良和, 家村浩和: 滑り支承の速度・荷重依存性のモデル化と免震効果に関する研究, *土木学会年次学術講演会講演概要集, 第1部, Vol.57, pp.905-906, 2002.9*
- 1.3.4-14) 社団法人日本建築学会: 免震構造設計指針, pp.210~211、2001
- 1.3.4-15) 社団法人日本免震構造協会: 免震部材 JSSI 規格、2000

1.3.5 弾性すべり支承（低摩擦）

本節では、弾性すべり支承（低摩擦）の多数回繰返し変形に対する特性の変動について、免震建築物の安全性検証方法に関する国土交通省基準整備に資する知見を取得するための調査について述べる。本調査においては弾性すべり支承（低摩擦）に関する調査を代表できる免震材料として、オイレス工業 SSR ($\mu=0.01$) を調査対象とした。

1.3.5.1 実験計画

(1) 実験目的と背景

1) 実験目的

弾性すべり支承（低摩擦）を代表できる免震材料として、オイレス工業 SSR ($\mu=0.01$) の多数回繰返し変形に対する特性の変動について調査を行い、免震建築物の安全性検証方法に関する国土交通省基準整備に資する知見を取得する。

2) 調査対象部材の構成

図 1.3.5-1 に調査対象部材の製品概念図を示す。すべり材と積層ゴムが連結鋼板を介して直列に積層されすべり子が構成される。すべり子はフランジプレートを介して建物構造体に接合される。すべり板はステンレス板にフッ素樹脂系コーティングを施したものである。取付鋼板を介して建物構造体に取り付けられる。

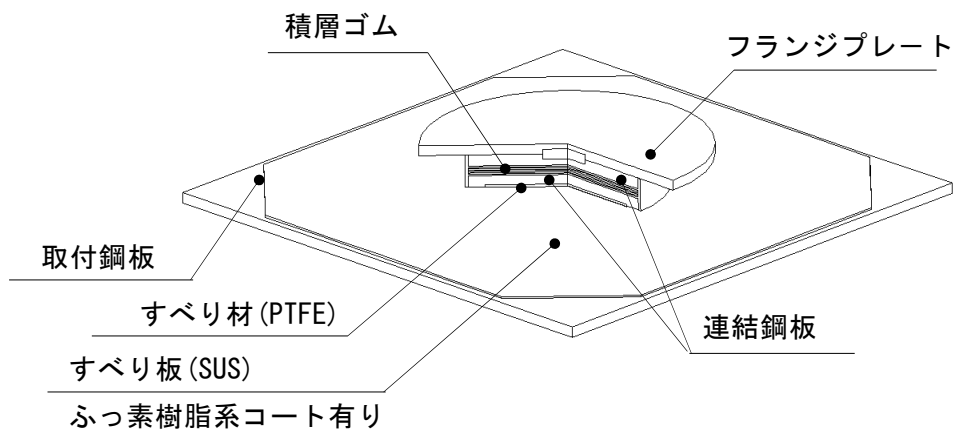


図 1.3.5-1 調査対象部材の製品概念図

図 1.3.5-2 にすべり材下面（すべり面）の構成を示す。ガラスエポキシ樹脂に PTFE（四ふっ化エチレン樹脂）シートが貼付されているほか、表面に穿たれた孔部に固体潤滑剤が充填されている。すべり面における PTFE シートと固体潤滑剤の面積比率はおよそ 0.75 : 0.25 である。当初取付時には、PTFE シート表面も固体潤滑剤で被われている。

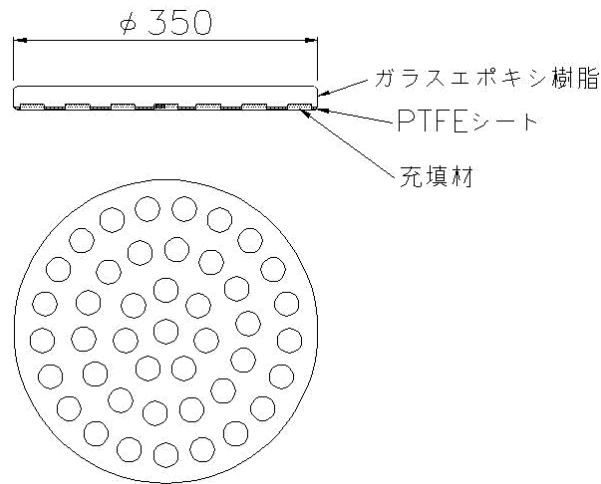


図 1.3.5-2 すべり材下面の構成

3) 既往の知見

a) 繰り返し依存性

小径のすべり材供試体（外形φ100、μ0.01仕様）を用いた調査結果を基に、免震材料認定における繰り返し回数（波数）に対する摩擦係数変動の基準値が定められている^{1.3.5-1}。同調査の試験条件は、面圧 20MPa、相対速度 10mm/s の正弦波（変位振幅±100mm）による加振であり、本調査において、長周期地震動による応答 1 回分に相当する累積変形量として考えている 50m を超える領域までのデータが得られている。これによると、摩擦係数変動の範囲は 0.0085～0.0120 とされている。

b) 温度依存性

温度に対する摩擦係数変動については、基準値が定められていない。また、繰り返しによる影響についても示されていない。

c) 面圧依存性

動摩擦係数 μ は面圧依存性を持ち、相対速度 100mm/s の時、式(1.3.5-1)のように定められている。速度が異なる場合は式(1.3.5-2)による。

$$\mu(\sigma_s)=0.0355 \cdot \sigma_s^{-0.44} \quad (1.3.5-1)$$

$$\mu(\sigma_s, v)=(0.0355-0.0093 \cdot e^{-0.1 \cdot v}) \cdot \sigma_s^{-0.44} \quad (1.3.5-2)$$

ここで、 σ_s : すべり材面圧(MPa)、 v : 相対速度(mm/s)

φ 250 (3 体)、□250×250 (3 体) のすべり材を用いた試験結果により、得られた摩擦係数の各面圧における値が上記の面圧依存式で得られる基準値に対してばらつきの範囲内（±30%以内）であることが確認されている。試験条件は試験面圧 10～40N/mm²、加振速度 15～600mm/s、正弦波 4 波による加振であり、3 波目の降伏荷重 Q から摩擦係数 μ が計算されている。ただし、加振波数は 4 波であり、繰り返し回数との関係は示されていない。

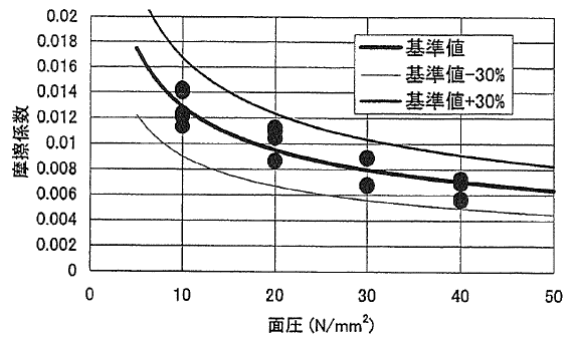


図 1.3.5-3 摩擦係数の面圧依存性（相対速度 200mm/s）

d) まとめ

調査対象部材の繰り返しに対する摩擦係数変動は、繰り返し回数（波数）に対する依存性として示されており、調査範囲は 400 波までである。累積変形量に換算すると 160m となる。変動の幅は 0.008~0.012 程度である。

温度に対する摩擦係数変動については、基準値が定められていない。繰り返しによるすべり面の温度上昇が摩擦係数の変動をもたらすかどうかについても論じられていない。

面圧依存性については 10~40MPa の範囲で摩擦係数変動の基準値が定められている。繰り返し特性と面圧の関係については論じられていない。

(2) 実験日時および場所

実験は、平成 22 年 12 月 14 日～12 月 24 日に、オイレス工業株式会社足利工場（栃木県足利市羽刈町 1000 番地）において実施した。実験実施スケジュールは表 1.3.5-1 に示すとおり（試験体名は後述のとおり）である。

表 1.3.5-1 実験実施スケジュール

試験体 No.	実験実施日	備考
#1	平成 22 年 12 月 14 日	
#2	平成 22 年 12 月 17 日	平成 22 年 12 月 20 日公開実験
#3	平成 22 年 12 月 21 日	
#4	平成 22 年 12 月 24 日	

(3) 試験体

試験体概略図を図 1.3.5-4 に、試験体仕様一覧を表 1.3.5-2 に示す。本調査では、使用可能な加力装置能力の制約から、想定実機（SSR ϕ 800、積層ゴム外径： ϕ 800、すべり材径： ϕ 700）の 1/2 程度の試験体を対象とした。材料の厚さ方向は縮小の対象とはせず、実験対象の免震材料として免震材料認定品の小径製品（SSR ϕ 400、積層ゴム外径： ϕ 400、すべり材径： ϕ 350）を用いた。すべり材基準面圧は 20MPa である。試験体数は 4 体とした。但し、免震材料を構成する要素のうち、積層ゴム部およびすべり板取付プレートは治具として扱い、それぞれ 1 体および 2 枚製作した。これらに、試験体としてのすべり材およびすべり板を順次取付け、交換することで実験対象材料を構成した。すべり材の交換を実施するために、積層ゴム下フランジプレートとすべり材ホルダが構造上分離されている。

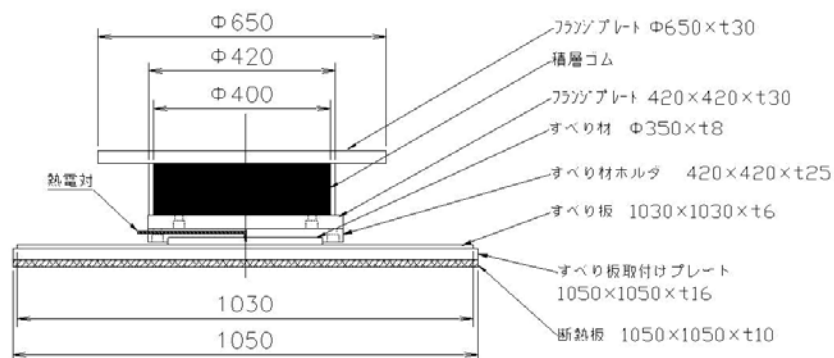


図 1.3.5-4 試験体の全体形状

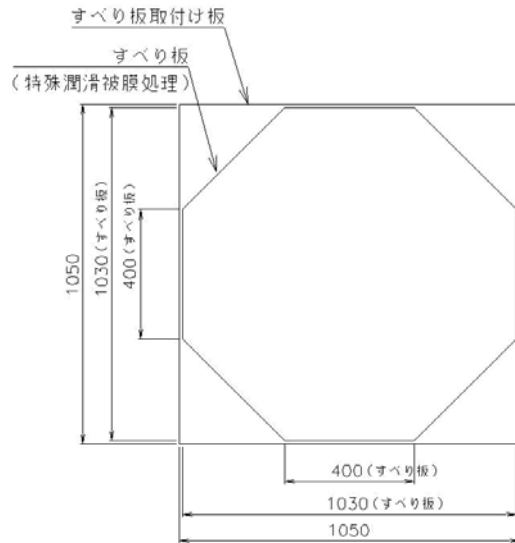


図 1.3.5-5 すべり板の形状

表 1.3.5-2 試験体諸元

項目	想定実機 1 / 1	縮小体 1 / 2
ゴム材料	天然ゴム G6	
積層ゴム外形 (mm)	Φ800	Φ400
ゴム層厚 (mm) × 層数	7.5×6	4×9
内部鋼板厚 (mm) × 層数	3.1×5	2.5×8
1次形状係数	25.8	24.1
2次形状係数	17.8	11.1
すべり材 (mm) (μ=0.01 タイプ)	Φ700×t8	Φ350×t8
すべり板 (mm) (すべりコート有り)	□2000×t8	□1030×t6
すべり板取付け板 (mm)	□2020×t22	□1050×t16

(4) 試験装置

本実験に用いた試験装置の概要を写真 1.3.5-1 および表 1.3.5-3 に示す。最大鉛直荷重 3MN の二軸せん断試験装置である。

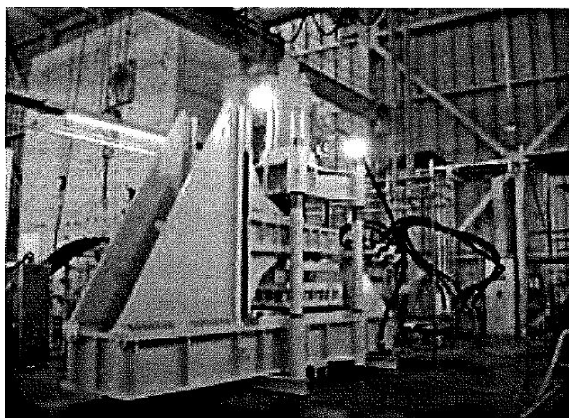


写真 1.3.5-1 試験装置

表 1.3.5-3 試験装置能力

最大鉛直荷重	3 MN
最大水平荷重(動的)	±700 kN
水平ストローク	±500 mm
最大水平速度	2000 mm/s

連続加振可能な最大速度は約 300mm/s

(5) 計測項目と計測方法

試験機による加力情報として鉛直荷重、水平荷重、水平変位を計測した。荷重は試験機に付属するロードセルを、変位は外部変位計（ストローク計およびレーザー変位計）を用いた。水平変位は全体変形および積層ゴム部変形を計測した。

すべり板、すべり子の温度を温度センサー（熱電対）をあらかじめ試験体内部に埋め込むことで計測した。すべり板取付板と試験機盤との間には断熱板を設置した。材料はアルミニウムカーボネート系断熱板（熱伝導率 0.3W/m/K 程度）とし、厚さは 10mm とした。

すべり板コーティング膜厚を計測した。後述する多数回繰り返し実験のセット間のインターバル時間において膜厚計を用いて手動にて計測した。計測項目一覧を表 1.3.5-4 に示す。

表1.3.5-4 計測項目一覧

センサー名	計測項目
Fv	鉛直荷重
Fh	水平荷重
Dh1	水平変位（全体変位）
Dh2	水平変位（積層ゴム変位）
Temp.1	すべり材中央部温度①
Temp.2	すべり板温度位置②
Temp.3	すべり板温度位置③
Temp.4	すべり板温度位置④
Temp.5	すべり板温度位置⑤
Temp.6	すべり板温度位置⑥
Temp.7	すべり板温度位置⑦
Temp.8	すべり板温度位置⑧
Temp.9	すべり板温度位置⑨
Temp.10	すべり板温度位置⑩
Temp.11	雰囲気温度
膜厚計	すべりコーティング面①～⑮

計測システムを図 1.3.5-6 に示す。多数回繰り返し実験時におけるサンプリングは 100Hz とした。温度に関しては、加振終了後 10 分間継続して計測した。

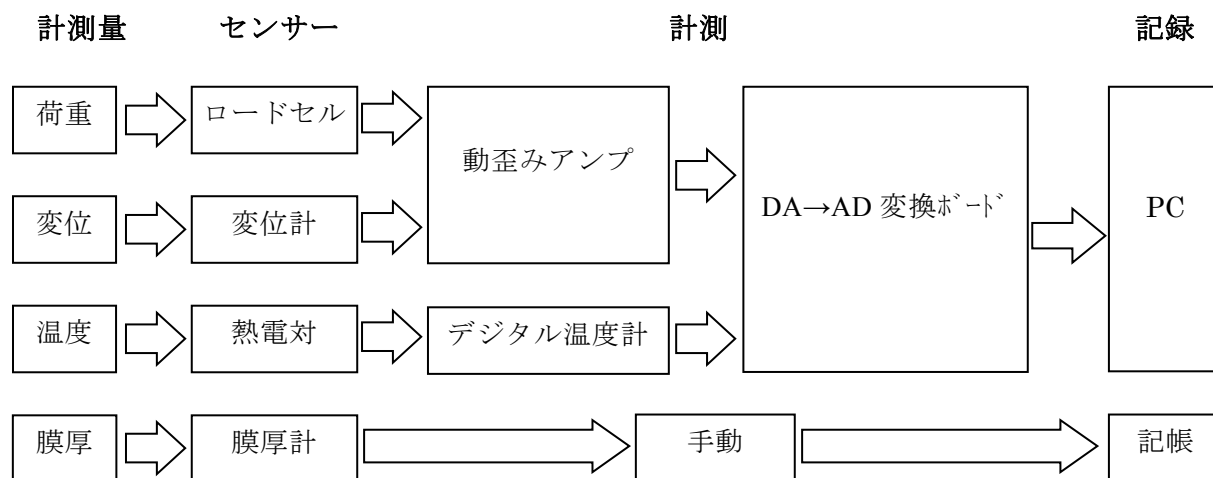


図 1.3.5-6 計測システム図

すべり子およびすべり板の温度計測要領を図 1.3.5-7~8 に、計測点配置を図 1.3.5-9 に示す。計測点はすべり子 1 点、すべり板 9 点である。このほか、雰囲気温度 1 点を計測した。

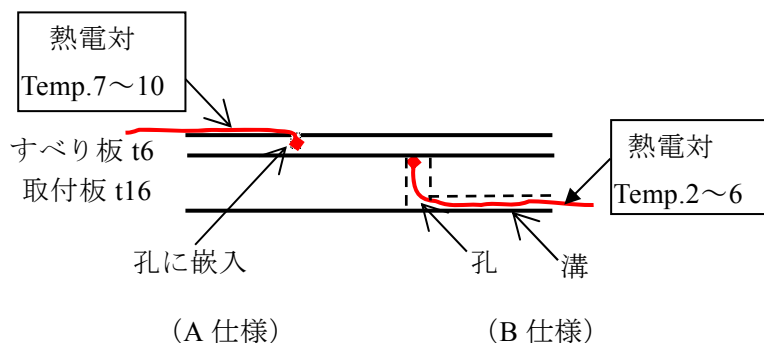


図 1.3.5-7 すべり板の熱電対取付け要領

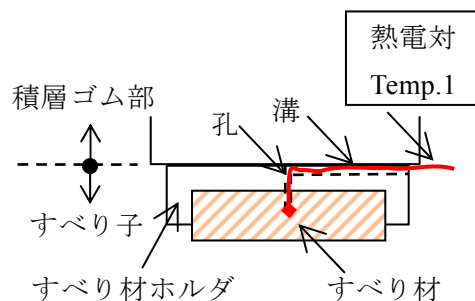


図 1.3.5-8 すべり子の熱電対取付け要領

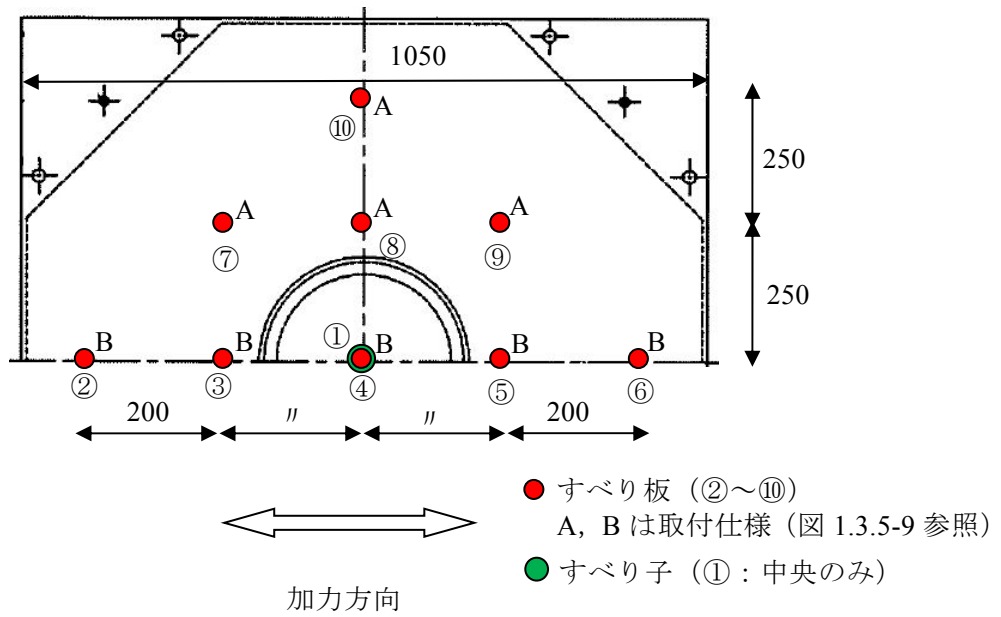


図 1.3.5-9 すべり板の温度計測位置

すべりコーティング膜厚計測位置を図 1.3.5-10 に示す。

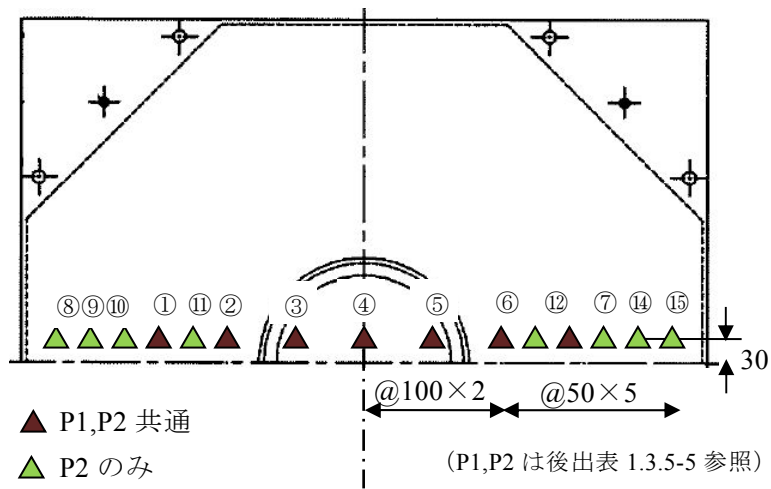


図 1.3.5-10 すべりコーティング膜厚計測位置

(6) 実験方法および実験ケース

長周期地震動による応答 1 回分に相当する実験条件として累積変形量 50m 以上となる繰り返し条件を想定し、これを 1 セットと称した。各試験体についてインターバル時間を挟んで 10 セット実施した。

実験パラメータは、加振波形（定振幅正弦波：150mm、変動振幅正弦波：50~300mm）、すべり材面圧（基準：20MPa、高面圧：30MPa）、インターバル時間（標準：30 分（原則）、短：3~11 分）とし、4 体の試験体に割りつけた。

加振波形は振幅および各部の通過回数の影響を把握することを目的としたパラメータである。定振幅±150mm 正弦波は試験装置能力の制約上、連続加振可能な最大振幅である。変動振幅波形においても連続加振可能であることを確認の上実施した。

すべり材面圧は従来知見のない繰り返し特性と面圧の関係について調査することを目的としたパラメータである。高面圧 30MPa は試験装置能力の限界を考慮して設定した。

標準インターバル時間を採った場合には、10 分間の温度低下を計測した後、膜厚計測およびすべり面の状況観察を実施した。水準値 30 分は計測および観察に掛かる必要時間により定めた。この際、すべり材とすべり板を離間させた。短インターバル時間は、すべり面温度が異常に上昇する状況を生起させるために設けたパラメータである。この場合には、状況に応じ上記計測および観察を省略した。

実験実施においては、前出二軸試験装置の鉛直アクチュエータによって所定面圧から計算される鉛直荷重を与えた後、水平アクチュエータによって所定変位振幅を強制的に与えた。

加力条件を表 1.3.5-5 に示す。

表 1.3.5-5 加力条件

試験体 No.	加振順 (セット)	ケース	実験タイプ	すべり材面圧 [N/mm ²]	加振周期 [s]	水平変位 (全体変位) [mm]	最大加振速度 [cm/s]	波形	サイクル数 [cycle]	時間 [s]	累積変位 [m]	加振後のインターバル [min.]
#1	1	P1	定常	20	4	±150	23.6	正弦波	84	336	50.4	10+20*
	2~10	同上										
#2	1	P2	変動	20	4	±50	7.9	正弦波	11	44	2.2	連続
						±100	15.7	正弦波	11	44	4.4	
						±150	23.6	正弦波	11	44	6.6	
						±200	31.4	正弦波	11	44	8.8	
						±250	39.3	正弦波	3	12	3	
						±300	47.1	正弦波	3	12	3.6	
						±200	31.4	正弦波	11	44	8.8	
						±150	23.6	正弦波	11	44	6.6	
						±100	15.7	正弦波	11	44	4.4	
						±50	7.9	正弦波	11	44	2.2	
	累積小計								94	376	50.6	10+20*
2~10	同上											
#3	1	P1	定常	30	4	±150	23.6	正弦波	84	336	50.4	10+20*
	2~10	同上										
#4	1	P1	定常	20	4	±150	23.6	正弦波	84	336	50.4	10+1*
	2~6	同上										
	7~10	同上										

※ 加振後のインターバルとして、温度変化の計測時間 10 分と、すべり面観察及び膜厚測定のための時間（原則として 20 分）を取った。臨時の計測系チェック等のため、インターバルを拡大したセット間もある（詳細は付録：実験実施記録表参照）。#4 では、すべり面観察及び膜厚測定を省略し、7~9 セット目では加振後の温度変化の計測時間を 2 分とした。

1.3.5.2 実験結果

(1) 製品試験

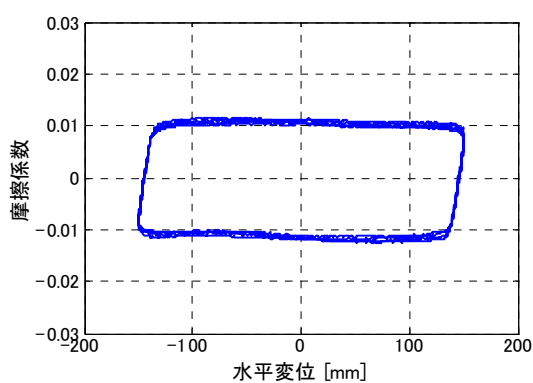
調査対象の試験体が、免震材料認定に適合するものであることを確認するために製品試験を実施した。製品試験における水平特性試験の条件は、すべり材面圧：20MPa、水平変位振幅：±150mm（定常）、加振周期：62.8秒、加振波形：正弦波、最大速度：15mm/s、サイクル数：4であり、試験前に同一条件で4サイクルのなじみ加振を行った後実施した。3サイクル目の特性を試験値として抽出した。

なお、#1試験体については、多数回繰り返し実験における1セット目の最初の4サイクルをなじみ加振とみなし、5～8サイクルを製品試験における水平特性試験と見なした。試験条件は、すべり材面圧：20MPa、水平変位振幅：±150mm（定常）、加振周期：4秒、加振波形：正弦波、最大速度：236mm/sであり、3サイクル目の特性を試験値として抽出し、速度換算式により速度15mm/sに換算した。

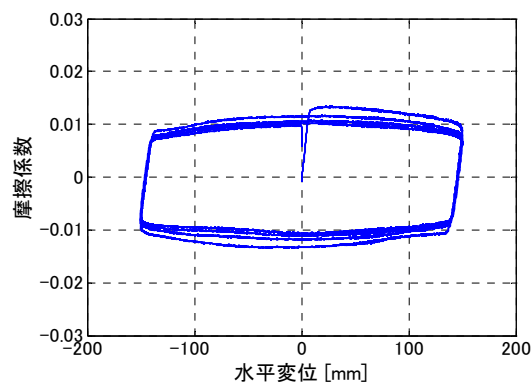
寸法試験結果を表1.3.5-6に、水平特性試験結果を図1.3.5-11および表1.3.5-7に示す。対象とする試験体4体は免震材料認定に適合するものであることが確認できた。

表 1.3.5-6 弾性すべり支承（低摩擦）試験体寸法試験結果

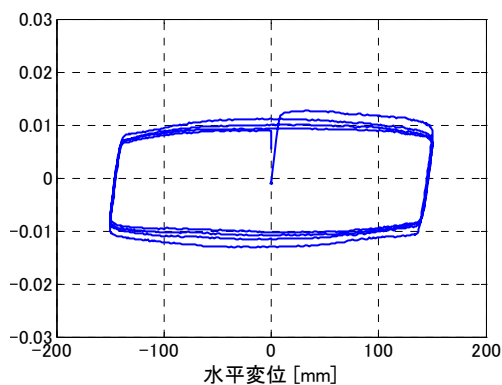
図面 寸法	単体高さ(H2) 208.4mm						平行度			外観	判定
	単体高さの±2mm(206.4 ~ 210.4mm)						≤1.9mm	≤1/500			
試験 体 No.	測定位置				平均 値	対計 算値 比率	①-③ の 絶対 値 [mm]	②-④ の 絶対 値 [mm]	フランジ 辺長 650mm	異常 なき こと	
	①	②	③	④							
#1	208.1	208.2	208.2	207.6	208.2	0.999	0.1	0.6	0.46/500	良	合格
#2	207.4	207.5	208.1	207.5	207.7	0.996	0.7	0.0	0.54/500	良	合格
#3	208.6	208.2	207.6	208.6	208.1	0.999	1.0	0.4	0.77/500	良	合格
#4	208.5	208.0	208.0	208.2	208.2	0.999	0.5	0.2	0.38/500	良	合格



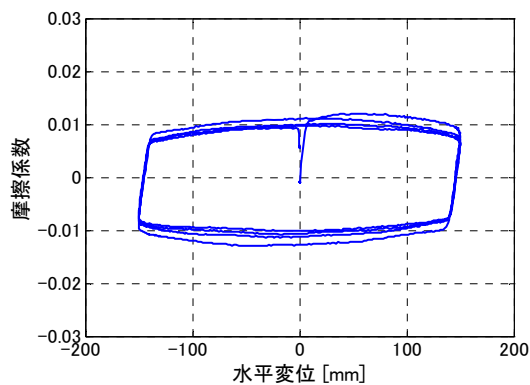
(a) #1 試験体



(b) #2 試験体



(c) #3 試験体



(d) #4 試験体

図 1.3.5-11 弾性すべり支承（低摩擦）水平特性試験結果

表 1.3.5-7 弾性すべり支承（低摩擦）水平特性試験結果

試験体 No	試験条件				計測値			摩擦係数 基準値 μ_0	μ/μ_0	μ/μ_0 許容値	判定
	すべり材 面圧 σ (MPa)	鉛直荷重 F_v (kN)	振動数 f (Hz)	振幅 δ (mm)	最大速度 V (mm/s)	水平荷重 F_h (kN)	摩擦係数 μ				
#1	20	1923	0.25	±150	236	21.0*	0.011*	0.009	1.22	0.7~1.3	合格
#2	20	1923	0.0159	±150	15	20.9	0.011		1.21		合格
#3	20	1923	0.0159	±150	15	20.1	0.010		1.17		合格
#4	20	1923	0.0159	±150	15	19.9	0.010		1.16		合格

* : 速度 15mm/s に換算

(2) 多数回繰り返し実験

試験体取り付け状況を写真 1.3.5-2 に示す。

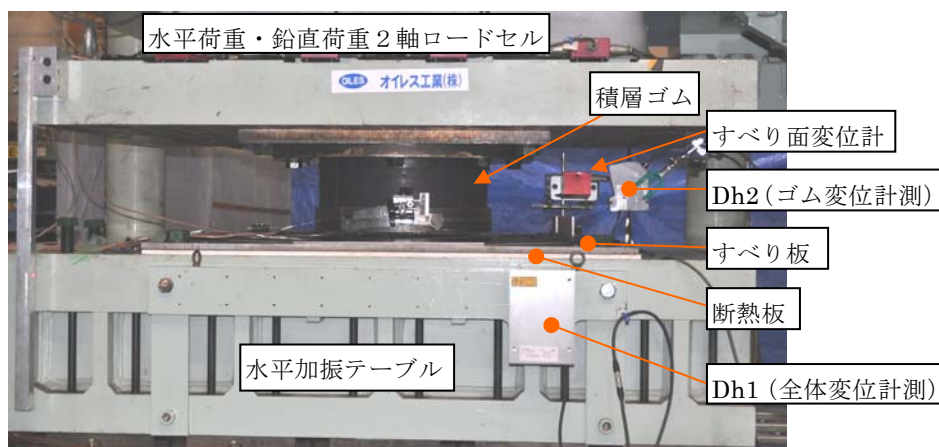


写真 1.3.5-2 試験体取り付け状況

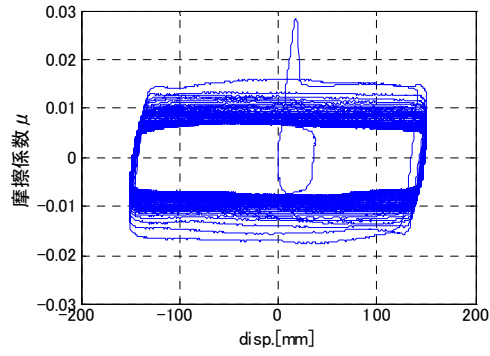
1) #1 試験体

#1 試験体の実験条件はすべり材面圧：20MPa、水平変位振幅：±150mm（定常）、加振周期：4 秒、加振波形：正弦波、最大速度：236mm/s、1 セットのサイクル数：84、1 セットの累積変位：50.4m、加振後のインターバル：原則 30 分、繰り返しセット数：10 である。

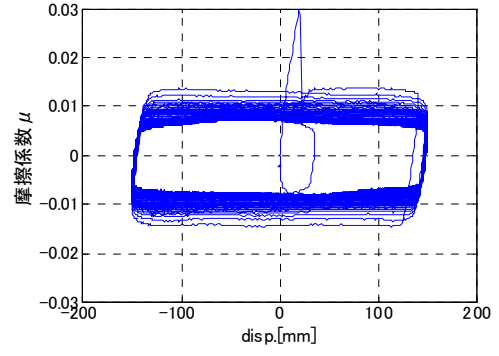
a) 摩擦係数特性

図 1.3.5-12 に 1、3、6、10 セット目の水平方向の摩擦係数—変形関係を示す。また、図 1.3.5-13 には 1、3、6、10 セット目の 0 変位切片における動摩擦係数の変化を示す。図 1.3.5-13 においては同一サイクルの正負平均値を示した。各セット開始時における摩擦係数は 1 セット目、3 セット目で大きいと 10 サイクルを超えると摩擦係数の変動はほぼ同等となる。6 セット目と 10 セット目の間にほとんど相違は見られない。また、各セットとも加振開始時に静摩擦力の立ち上がりが見られ、セット間に相違は見られない。

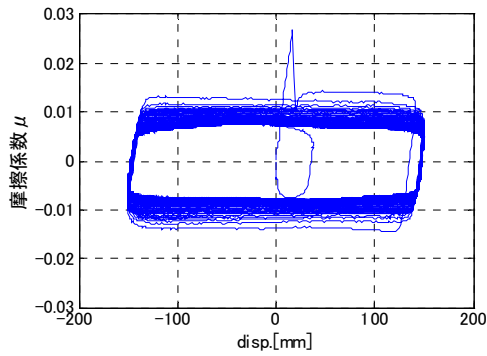
図 1.3.5-14 に各セットにおける最大、最小動摩擦係数の変動を示す。図中には各セットにおける吸収エネルギーが等価となる平均的な摩擦係数（以下、平均摩擦係数）を併せて示した。図中▼で示したのは定常振幅±150mm に対する基準値である。また、各セットにおける吸収エネルギーを図 1.3.5-15 に示す。上述のように、各セットの最大摩擦係数は 1 セット目で特に大きく、4 セット目以降はほぼ一定の値となる。最小摩擦係数はセット間の変動がほとんどない。平均摩擦係数のセット間の変動も小さく、実験条件（20MPa、236mm/s）による基準値よりも押し並べて 15%ほど小さい。各セットにおける吸収エネルギーも平均摩擦係数と同様、セット間の変動は小さい。



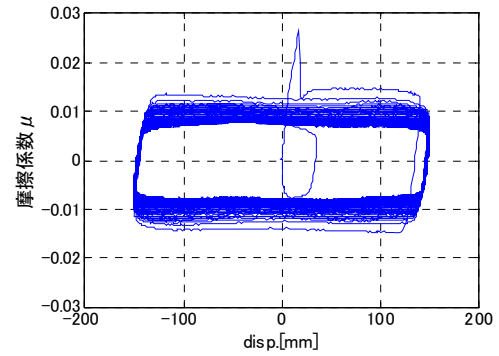
(a) 1セット目



(b) 3セット目

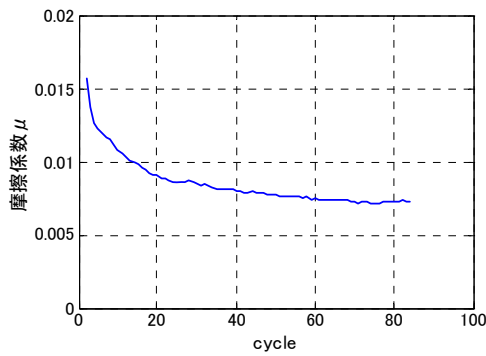


(c) 6セット目

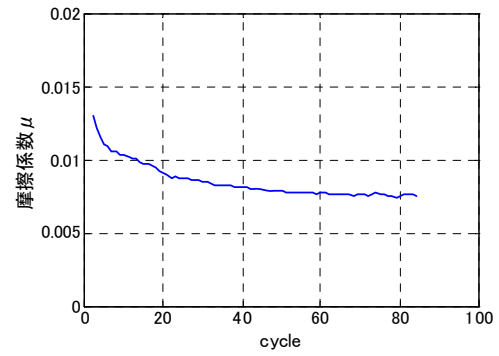


(d) 10セット目

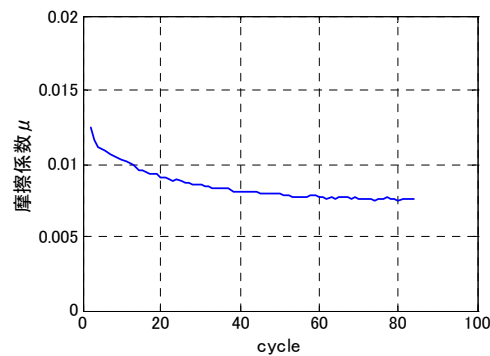
図 1.3.5-12 #1 試験体 水平方向摩擦係数—変形関係



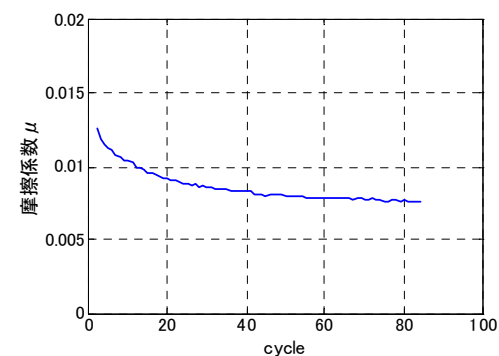
(a) 1セット目



(b) 3セット目



(c) 6セット目



(d) 10セット目

図 1.3.5-13 #1 試験体 0 変位切片における動摩擦係数の変化

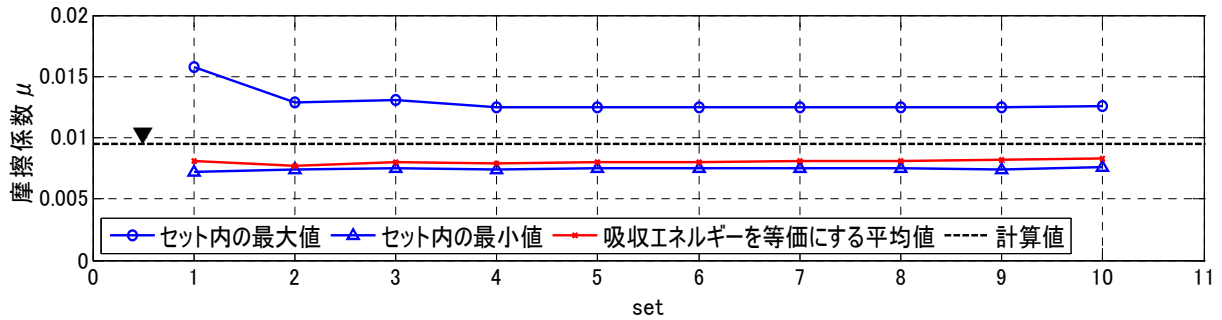


図 1.3.5-14 #1 試験体 各セットにおける最大、最小動摩擦係数

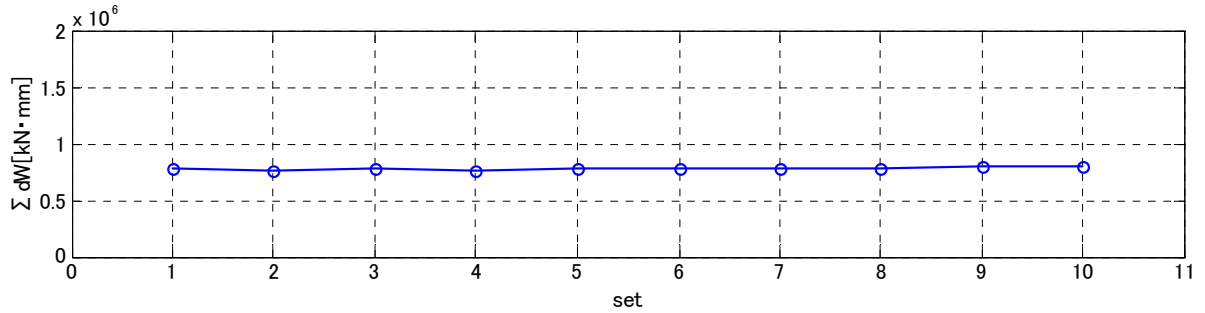
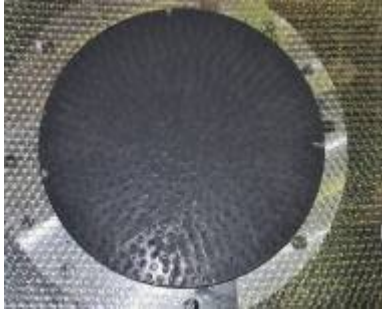


図 1.3.5-15 #1 試験体 各セットの吸収エネルギー

写真 1.3.5-3 に加振前および 1、3、6、10 セット目加振後のすべり材下面およびすべり板の状況を示す。初期の実験によりすべり材下面全体の固体潤滑剤がはがれ、セット繰り返しを追うごとに孔部に充填された固体潤滑剤の落下が進む。すべり板には滑動跡が見られ、すべり材より脱落した固体潤滑剤の付着、剥離が繰り返されているものと考えられる。6 セット目後からすべり面に線状の傷が発生し、セットを追うごとに本数は増加するが面的に広がることはなかった。なお、本調査ではセット終了ごとにすべり子を持ち上げてすべり材下部およびすべり板の観察と記録を行ったため、固体潤滑剤の落下が助長された可能性がある。



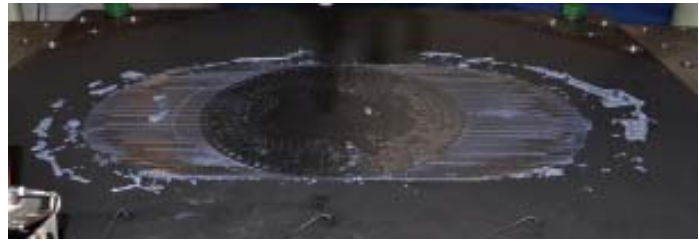
(a) すべり材下面 実験前



(b) すべり板表面 実験前



(c) すべり材下面 1セット目後



(d) すべり板表面 1セット目後



(e) すべり材下面 3セット目後



(f) すべり板表面 3セット目後



(g) すべり材下面 6セット目後



(h) すべり板表面 6セット目後



(j) すべり材下面 10セット目後



(k) すべり板表面 10セット目後

写真 1.3.5-3 #1 試験体 すべり材下面、すべり板表面状況写真

b) 温度特性

温度計測点の状況を写真 1.3.5-4 に示す。

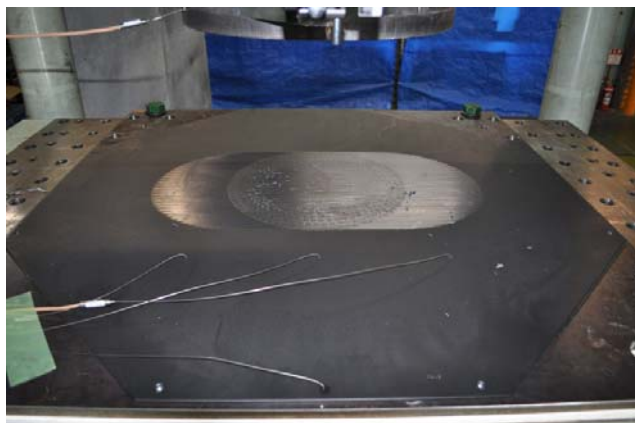
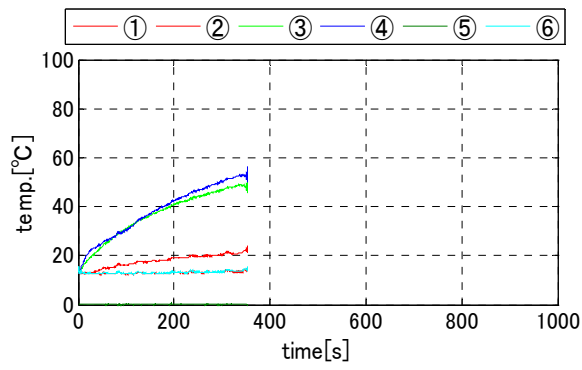


写真 1.3.5-4 温度計測点

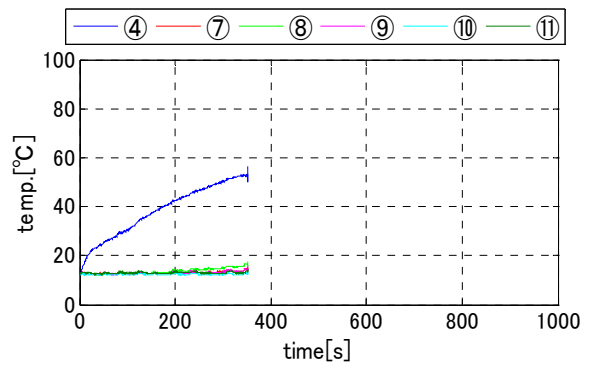
図 1.3.5-16 に 1、3、6、10 セット目の温度時刻歴を示す。3、6、10 セット目については加力終了後 600 秒間の温度低下についても示した。左図に計測点①~⑥、右図に計測点④、⑦~⑩を示した。なお、計測点⑤は 1 セット目開始前より、計測点⑥は 2 セット目途中より、いずれも断線のため 0°C と記録されている。左図からは、すべり材中央直下の計測点④に対し計測点③はやや低く計測点②はほとんど温度上昇が見られないなど、すべり板内に温度分布が生じていることや、すべり子の停止位置である計測点④の加振終了後の温度低下は計測点③に比べ鈍いこと、すべり材 (PTFE : 厚さ 8mm) 中心に埋め込まれた計測点①の温度上昇は鈍く、加振終了後の温度低下も鈍いことなどがわかる。右図からは、加力中の計測点⑦~⑩の温度上昇は小さく、すべり材走行部分を外れたすべり板内への熱伝導は期待しにくいこと、加力終了後には若干ながら熱伝導による温度上昇が生じていることなどがわかる。

図 1.3.5-17 に計測点①および④について、各セットにおける最低温度、最高温度のセット間の変動を示す。セット間の最低温度、最高温度の変動はわずかであるが、繰り返しを追うごとにいずれも上昇する。セット内の温度上昇量 (最低温度と最高温度の差) は計測点④がより大きい。各セットの最低温度は計測点①および④でほぼ等しくなる。30 分程度のインターバルはすべり材とその接触位置のすべり板の温度差を解消するには充分大きかったことを示していると考えられる。

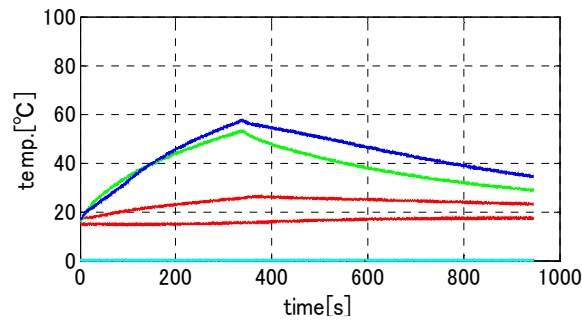
摩擦係数の変動がセット内で大きくセット間で小さいことと、温度変動がセット内で大きくセット間で小さいことには対応関係があると考えられることができる。



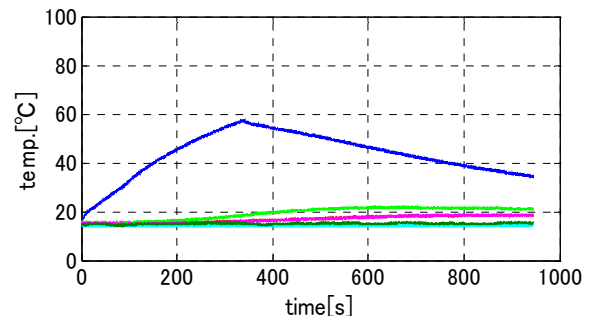
(a) 1セット目①～⑥計測点



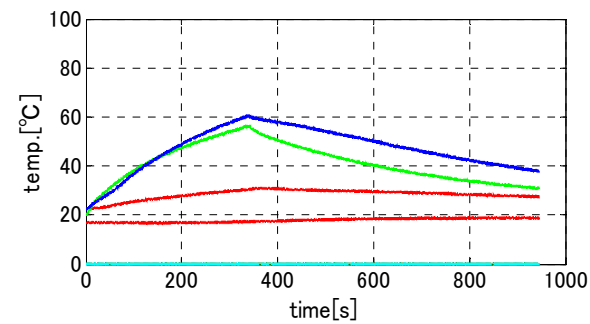
(b) 1セット目④、⑦～⑪計測点



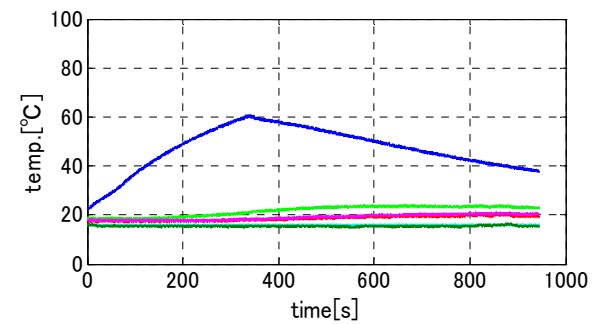
(c) 3セット目①～⑥計測点



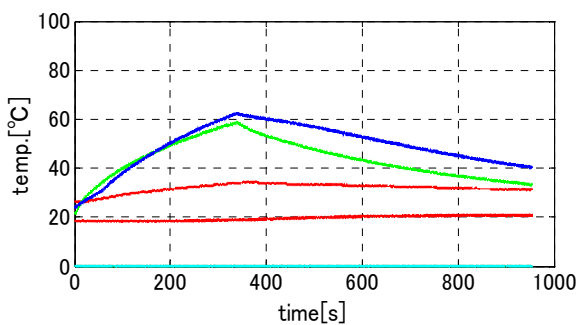
(d) 3セット目④、⑦～⑪計測点



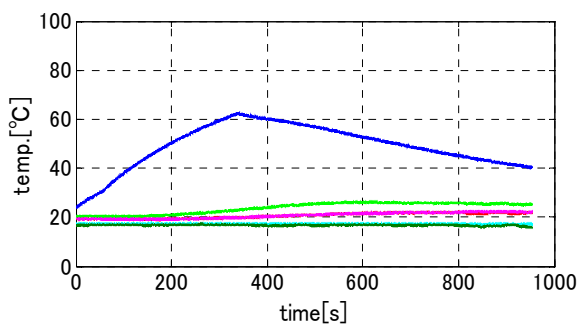
(e) 6セット目①～⑥計測点



(f) 6セット目④、⑦～⑪計測点



(g) 10セット目①～⑥計測点



(h) 10セット目④、⑦～⑪計測点

図 1.3.5-16 #1 試験体 各計測点の温度時刻歴

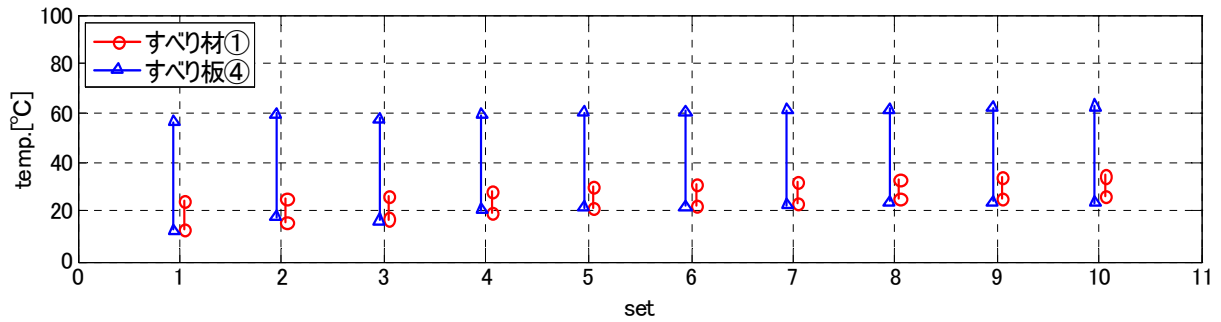


図 1.3.5-17 #1 試験体 ①、④計測点における各セットの最低、最高温度

c) 膜厚

膜厚測定状況を写真 1.3.5-5 に示す。

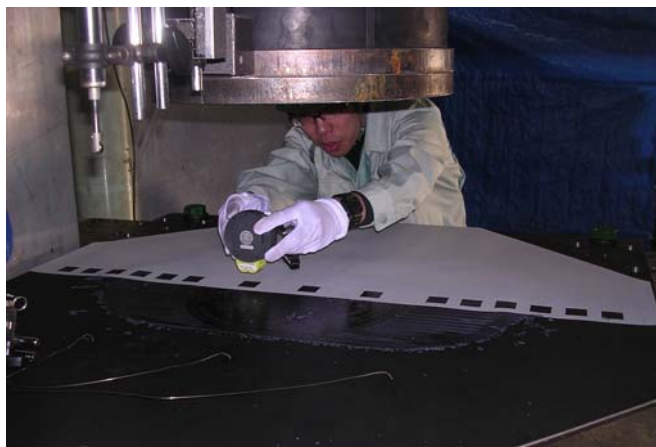


写真 1.3.5-5 膜厚測定状況

図 1.3.5-18 に各測定点の膜厚測定結果を示す。測定点間の値にはばらつきが見られるが、各点で繰り返し試験による膜厚変化がほとんど生じておらず、管理値 $20\mu\text{m}$ を下回ることもなかった。本試験体の加力条件では、すべり板コーティング面に異常を生じさせることはなかったと判断できる。

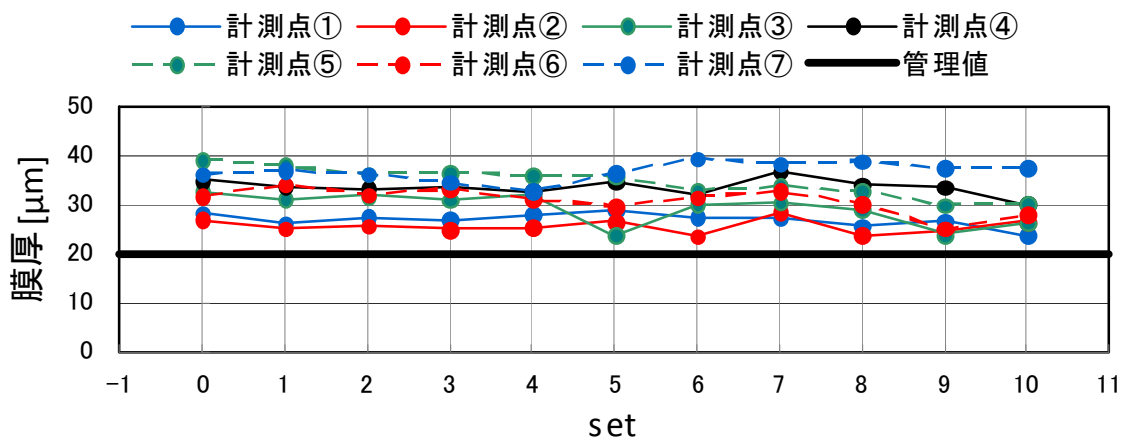


図 1.3.5-18 #1 試験体 膜厚測定結果

2) #2 試験体

#2 試験体の実験条件はすべり材面圧：20MPa、水平変位振幅：±50~±300mm（変動＝漸増漸減）、加振周期：4秒、加振波形：正弦波、最大速度：471mm/s、1セットのサイクル数：94、1セットの累積変位：50.6m、加振後のインターバル：原則30分、繰り返しセット数：10である。

a) 摩擦係数特性

図 1.3.5-19 に 1, 3, 6, 10 セット目の水平方向の摩擦係数－変形関係を示す。また、図 1.3.5-20 には 1, 3, 6, 10 セット目の 0 変位切片における動摩擦係数の変化（補正前）を示す。本実験条件においては振幅によって 0 変位通過時の速度が異なるため、速度補正式を用いて速度 $v = 236\text{mm/s}$ の条件に補正したものを図 1.3.5-21 に示す。図 1.3.5-20, 21 における値は同一サイクルの正負平均値である。各セット開始時を含め、セット間の摩擦係数にほとんど相違は見られない。セット内では摩擦係数は漸減する傾向にあるが、より大きな振幅に更新された際に直前よりも大きな摩擦係数が生じることがある。速度による補正の影響はほとんどない。

また、加振開始時の静摩擦力の立ち上がりが、1セット目を除いて観察された。

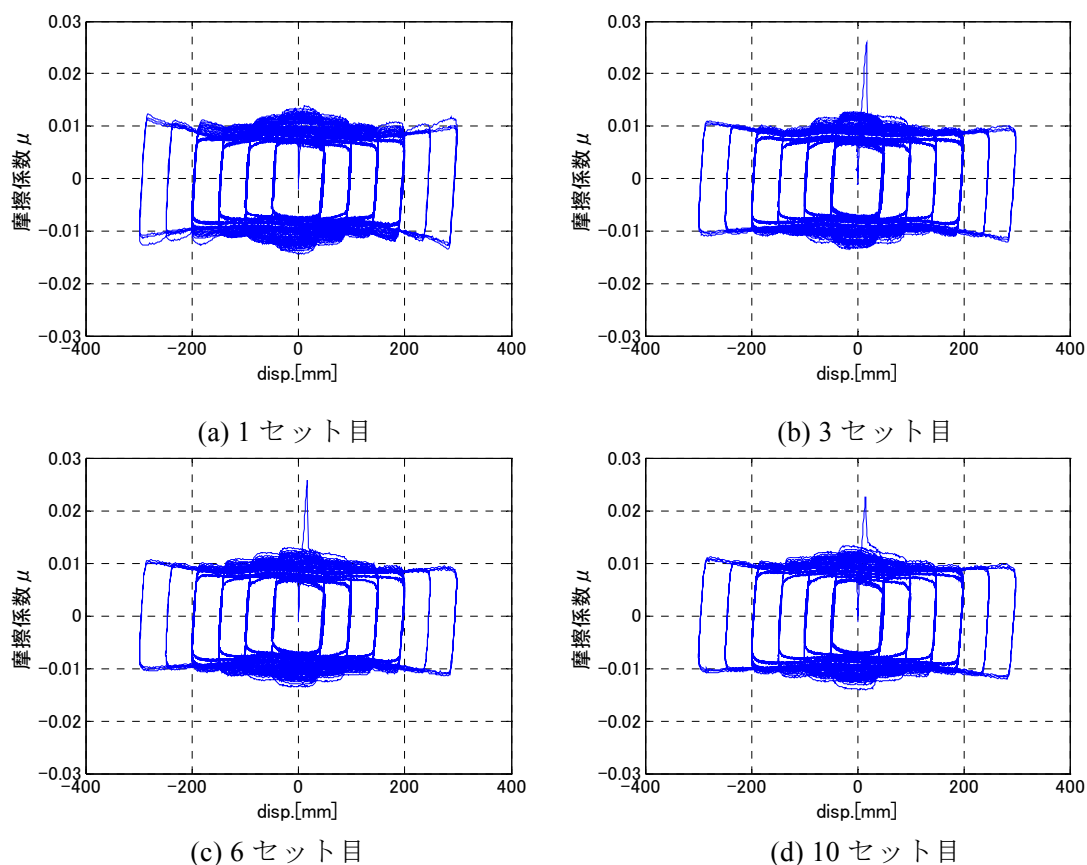
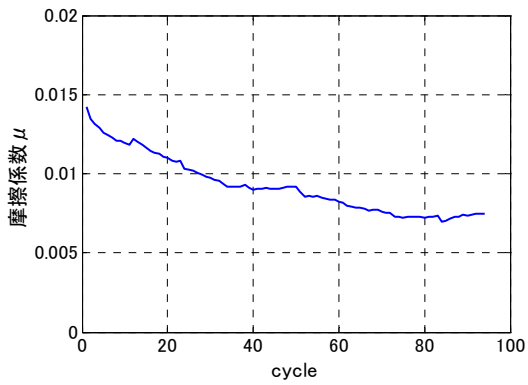
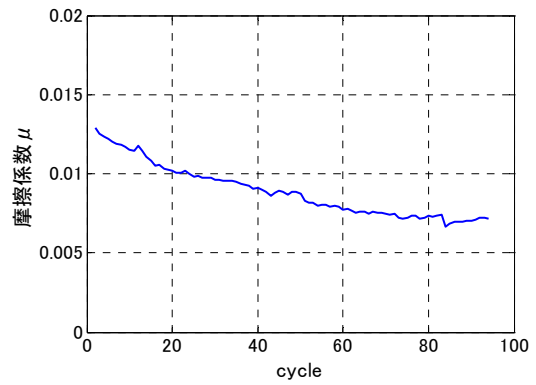


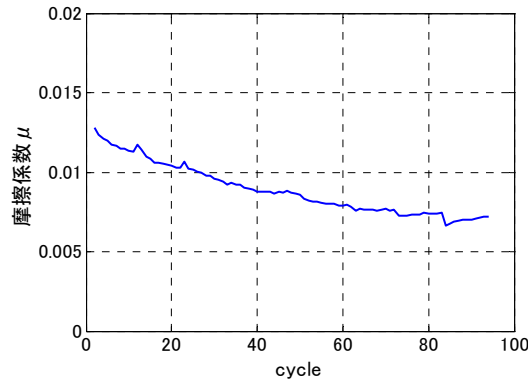
図 1.3.5-19 #2 試験体 水平方向摩擦係数－変形関係



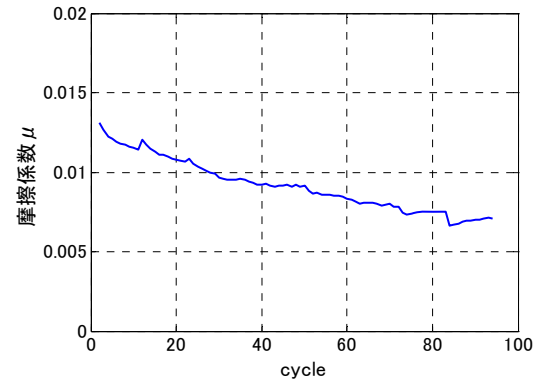
(a) 1セット目



(b) 3セット目

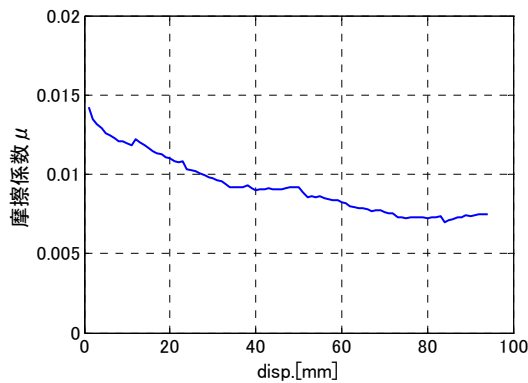


(c) 6セット目

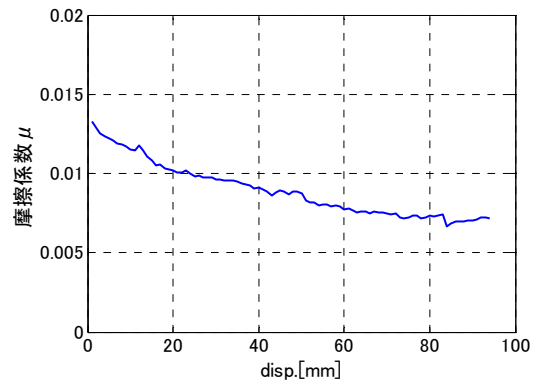


(d) 10セット目

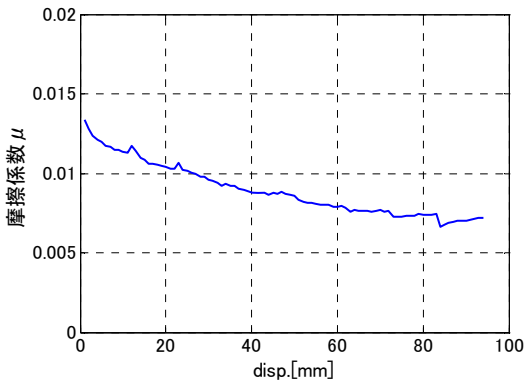
図 1.3.5-20 #2 試験体 0 変位切片における動摩擦係数の変化 (補正前)



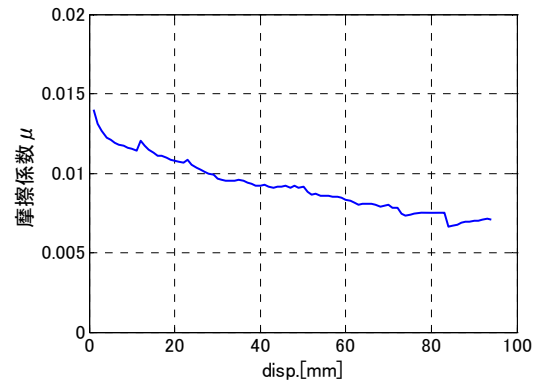
(a) 1セット目



(b) 3セット目



(c) 6セット目



(d) 10セット目

図 1.3.5-21 #2 試験体 0 変位切片における動摩擦係数の変化 (速度 236mm/s に補正)

図 1.3.5-22 に各セットにおける最大、最小動摩擦係数の変動を示す。図は速度補正後の値で描いた。図中には各セットにおける吸収エネルギーが±150mm の定常ループで等価となる平均摩擦係数を併せて示した。図中▼で示したのは定常振幅±150mm に対する基準値である。また、各セットにおける吸収エネルギーを図 1.3.5-23 に示す。1～2 セット目の最大摩擦係数とその後のセットに比べやや大きいほかは、最大、最小摩擦係数にセット間の変動はほとんど見られない。平均摩擦係数のセット間の変動も小さい。平均摩擦係数は定常振幅±150mm に対する基準値よりも 8%ほど小さい。

図 1.3.5-24 に各サイクルにおける振幅が最大振幅の 0.9 倍に至ったときの摩擦係数（正負往路の平均値）を各測定振幅毎に当該位置の通過回数に対して描いたものを 1、3、6、10 セット目について示す。値は速度 $v=236\text{mm/s}$ の条件に補正した。振幅漸増時には、±50mm～±150mm のそれぞれの振幅において摩擦係数の低下が明瞭に見られる。図 1.3.5-20,21 に見られたとおり、より大きな振幅の当初には前振幅の最終値よりも大きな摩擦係数を示すが、前振幅の当初値に比べれば低下する。振幅漸減時の摩擦係数は各振幅による値をつなぐように滑らかに低下する。±100mm、±50mm では若干増加する傾向を示す。1 セット目の開始当初の摩擦係数は他のセットに比べやや大きい、そのほかにはセット間の傾向の違いはほとんどない。

以上から、変動振幅加力における摩擦係数の傾向は、単純なサイクル数によっても、ローカルな摺動回数によっても、十分には説明できないことがわかる。

写真 1.3.5-6 に加振前および 1、3、6、10 セット目加振後のすべり材下面およびすべり板の状況を示す。概ね#1 試験体と同様の状況である。すべり板には振幅毎に滑動跡が見られる。すべり面の線状の傷は 7 セット目後（非表示）から発生しセットを追うごとに本数の増加が見られたが、面的に広がることはなかった。

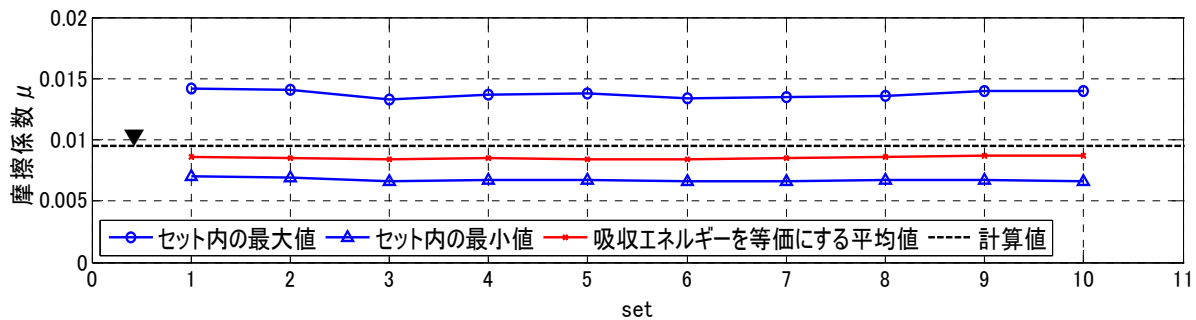


図 1.3.5-22 #2 試験体 各セットにおける最大、最小動摩擦係数

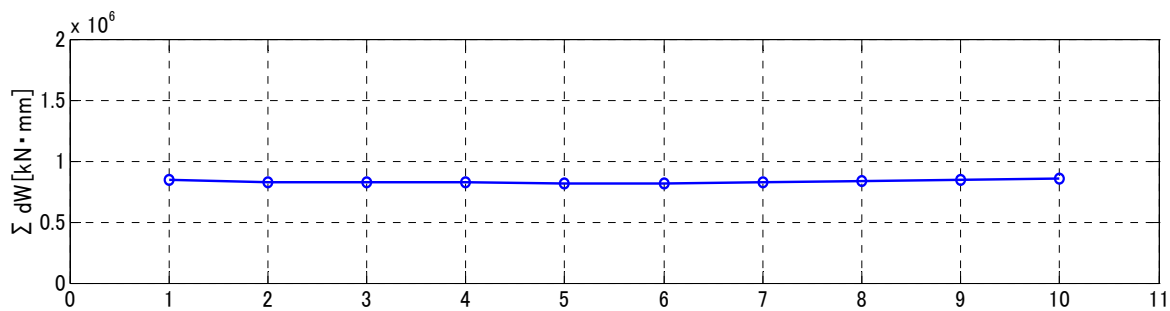


図 1.3.5-23 #2 試験体 各セットの吸収エネルギー

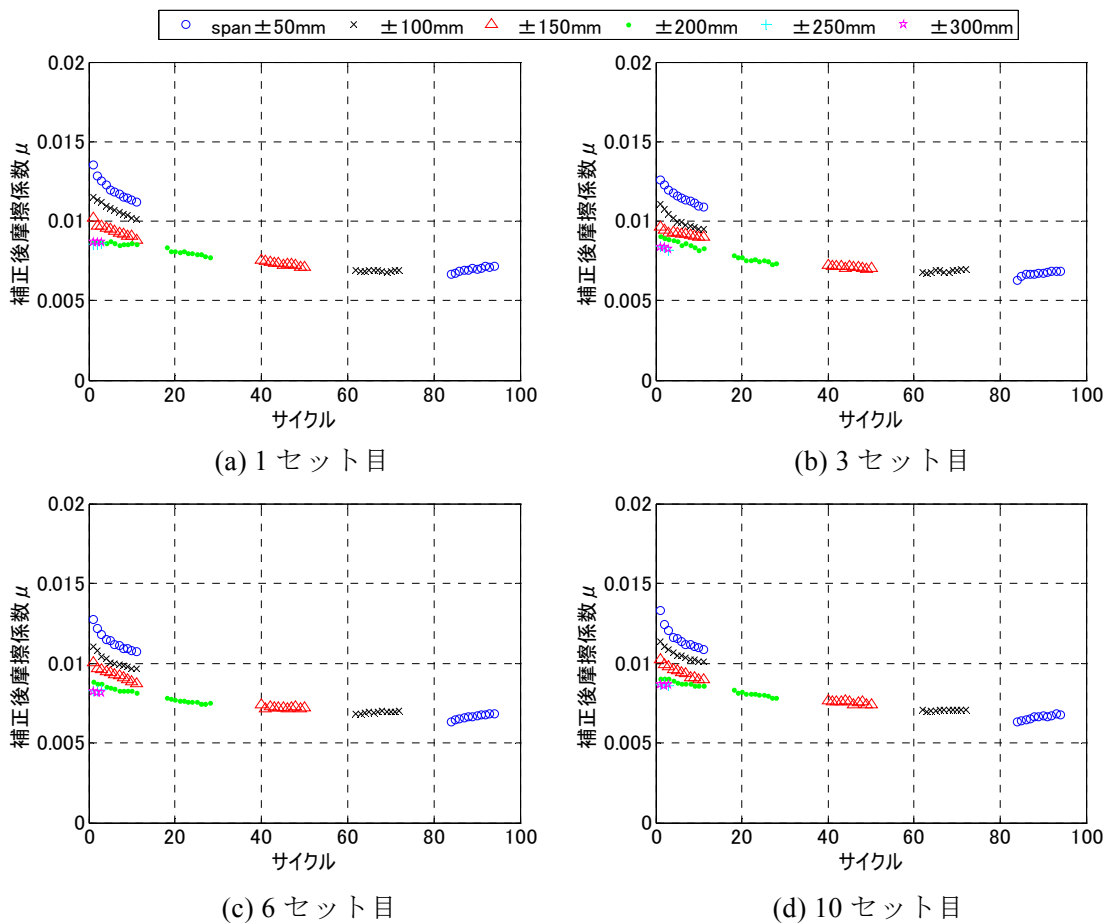
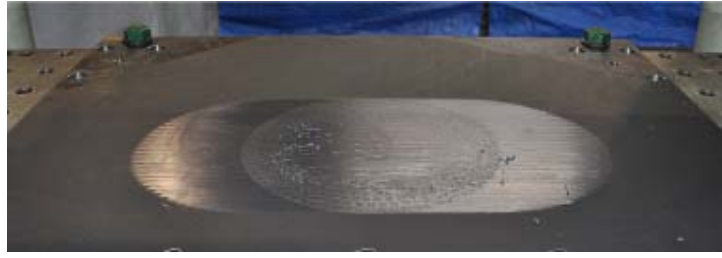


図 1.3.5-24 #2 試験体 変位振幅×0.9 における動摩擦係数の変化 (速度 236mm/s に補正)



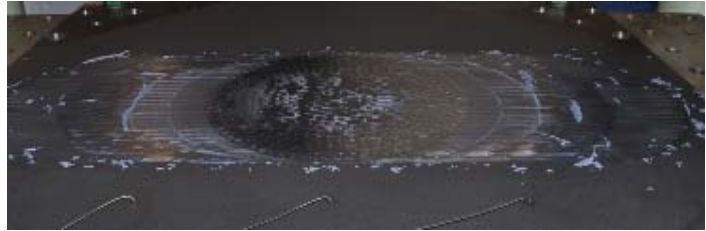
(a) すべり材下面 実験前



(b) すべり板表面 実験前



(c) すべり材下面 1セット目後



(d) すべり板表面 1セット目後



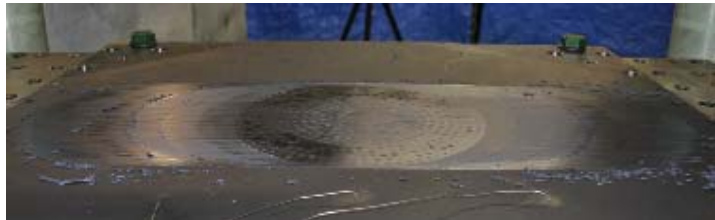
(e) すべり材下面 3セット目後



(f) すべり板表面 3セット目後



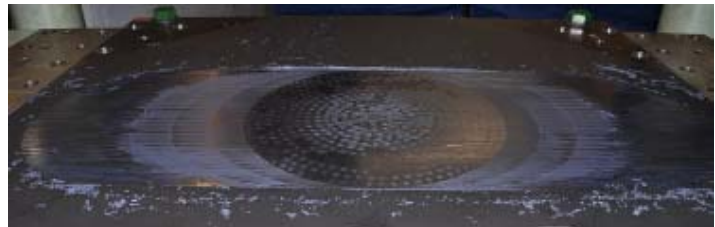
(g) すべり材下面 6セット目後



(h) すべり板表面 6セット目後



(j) すべり材下面 10セット目後



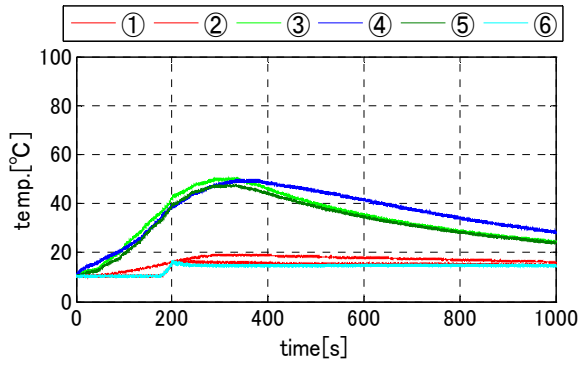
(k) すべり板表面 10セット目後

写真 1.3.5-6 #2 試験体 すべり材下面、すべり板表面状況写真

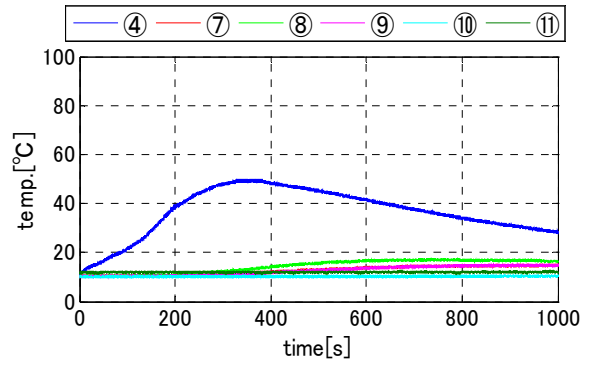
b) 温度特性

図 1.3.5-25 に 1、3、6、10 セット目の温度時刻歴を示す。左図に計測点①~⑥、右図に計測点④、⑦~⑪を示した。#1 試験体に比べ加振立ち上がり時の温度上昇勾配が小さく、加振時の温度上昇は 1 セット目を除き計測点③、⑤が計測点④に先行し最高温度は計測点③、④、⑤がほぼ同等となる。また、計測点②、⑥に時刻 180 秒~200 秒程度で温度の急激な上昇が見られる。この時刻は振幅±250mm、±300mm の加振時刻に相当する。計測点位置と加振振幅によるすべり子の移動とを考えると、高温となったすべり材との接触によりすべり板に熱が拡散するメカニズムが想定できる。加振終了後の温度低下の様子は#1 試験体と同様である。

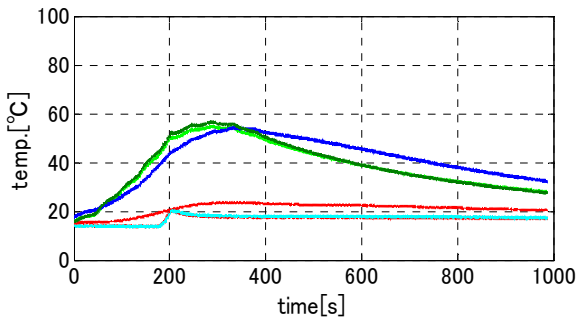
図 1.3.5-26 に計測点①および④について、各セットにおける最低温度、最高温度のセット間の変動を示す。両計測点とも最低温度、最高温度ともセットを追うごとに若干上昇する。#1 試験体と比較すると、計測点④における 1~3 セット目の温度上昇（最低温度と最高温度の差）がやや小さいが、その後のセットではほぼ同様の性状を示している。



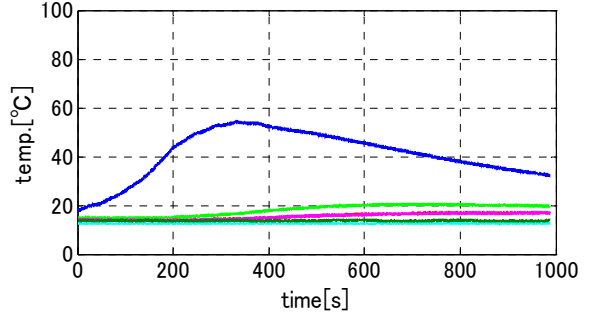
(a) 1セット目①～⑥計測点



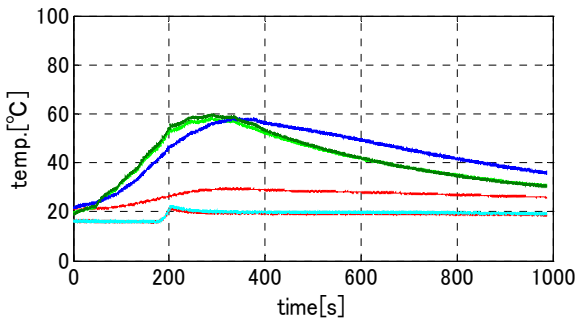
(b) 1セット目④、⑦～⑪計測点



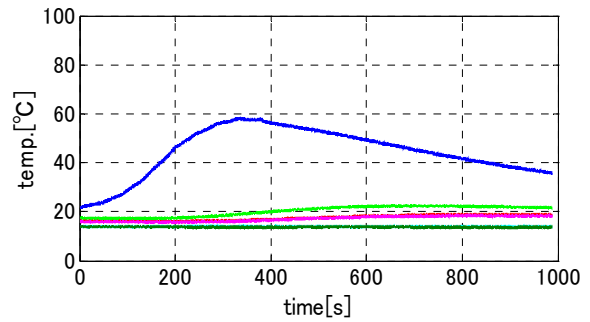
(c) 3セット目①～⑥計測点



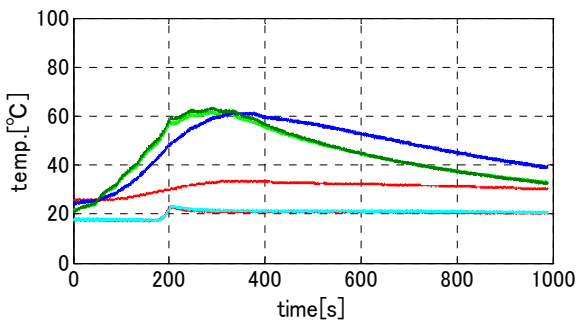
(d) 3セット目④、⑦～⑪計測点



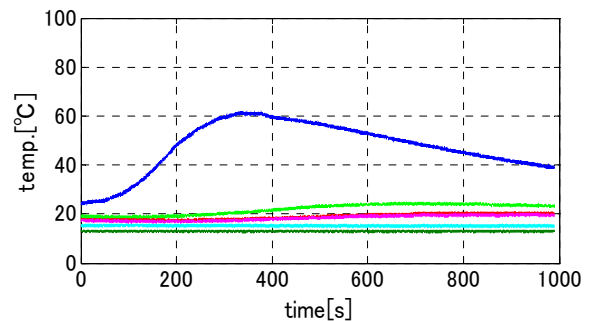
(e) 6セット目①～⑥計測点



(f) 6セット目④、⑦～⑪計測点



(g) 10セット目①～⑥計測点



(h) 10セット目④、⑦～⑪計測点

図 1.3.5-25 #2 試験体 各計測点の温度時刻歴

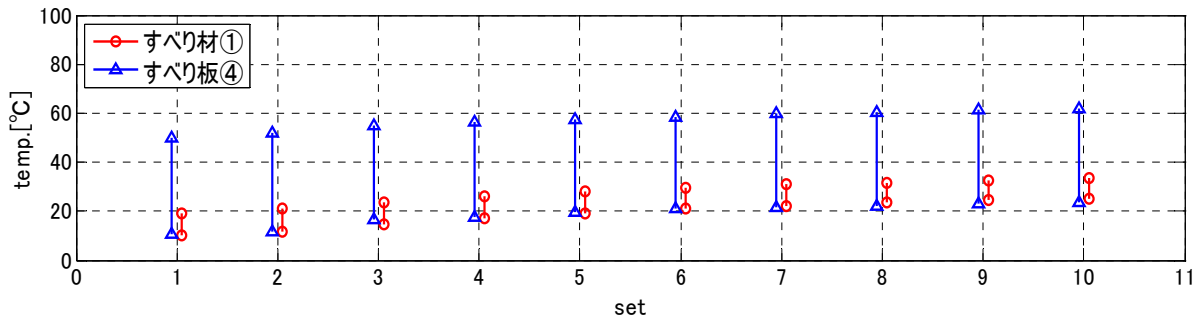


図 1.3.5-26 #2 試験体 ①、④計測点における各セットの最低、最高温度

c) 膜厚

図 1.3.5-27 に各測定点の膜厚測定結果を示す。#1 試験体と同様、膜厚に有意な変化が生じているとは判断できず、管理値 $20 \mu\text{m}$ を下回ることもなかった。

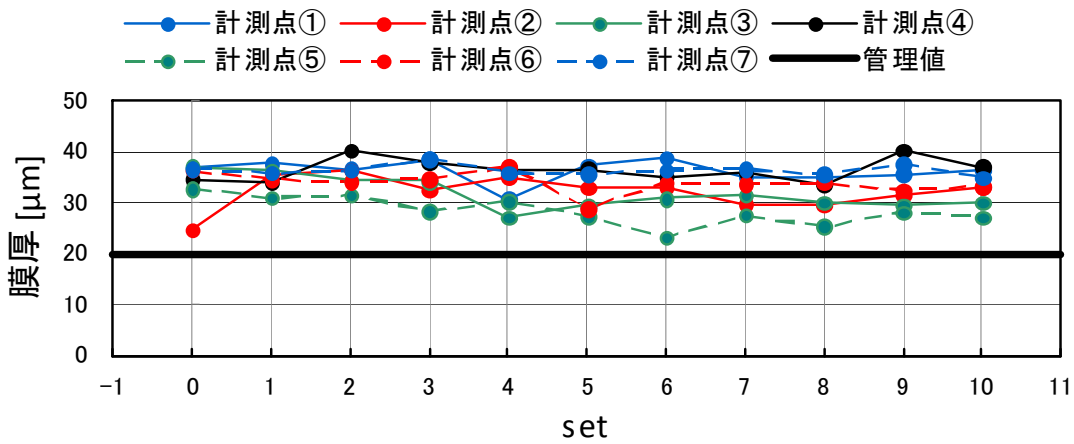


図 1.3.5-27 #2 試験体 膜厚測定結果

3) #3 試験体

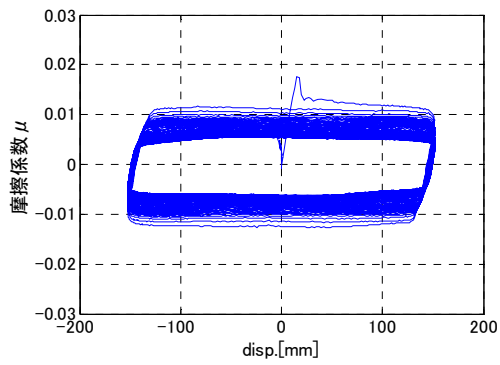
#3 試験体の実験条件はすべり材面圧：30MPa、水平変位振幅：±150mm（定常）、加振周期：4秒、加振波形：正弦波、最大速度：236mm/s、1セットのサイクル数：84、1セットの累積変位：50.4m、加振後のインターバル：原則30分、繰り返しセット数：10である。

a) 摩擦係数特性

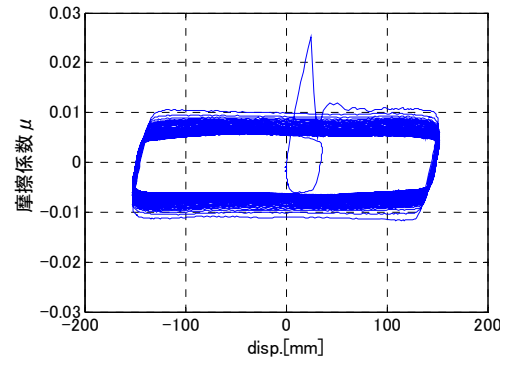
図 1.3.5-28 に 1、3、6、10 セット目の水平方向の摩擦係数—変形関係を示す。また、図 1.3.5-29 には 1、3、6、10 セット目の 0 変位切片における動摩擦係数の変化を示す。図 1.3.5-29 においては同一サイクルの正負平均値を示した。1 セット目と 3 セット目の比較では、セット中盤までの摩擦係数が 1 セット目で大きい。この時点では、面圧依存特性の影響で、#1 試験体に比べ摩擦係数はやや低い。6 セット目、10 セット目ではセット数が増すにつれ摩擦係数の増加が見られる。10 セット目では 1 セット目の 1.6 倍程度である。後述するように、この試験体では 6 セット目からすべり材コーティングの剥離が顕著となっており、摩擦係数の増加の増加はこれに対応するものであると考えられる。加振開始時における静摩擦力の立ち上がりは各セットで見られ、特に 3 セット目、6 セット目で顕著である。

図 1.3.5-30 各セットにおける最大、最小動摩擦係数の変動を示す。図中には平均摩擦係数を併せて示した。図中▼で示したのは定常振幅±150mm に対する基準値である。また、各セットにおける吸収エネルギーを図 1.3.5-31 に示す。上述のように、各セットの最大摩擦係数は最初の 1 セット目でやや大きく、2～4 セット目で一旦低下した後、5 セット目以降上昇に転じる。最小動摩擦係数も 5 セット目以降上昇する。平均摩擦係数は最小動摩擦係数をやや上回り、セット間の変動は最小動摩擦係数と同様である。実験条件（30MPa、236mm/s）による基準値に対し、4 セット目までは 12～15%ほど小さく、7 セット目以降は大きくなる。10 セット目の吸収エネルギーは初期のセットの 1.5 倍程度に増大した。

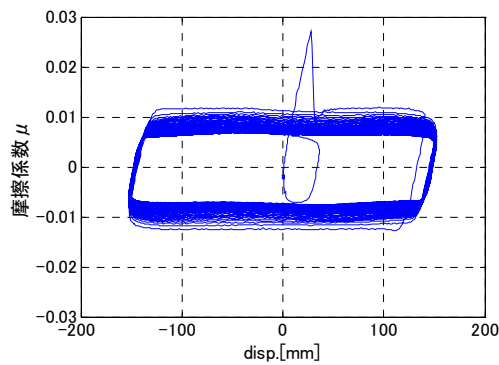
写真 1.3.5-7 に加振前および 1、3、6、10 セット目加振後のすべり材下面およびすべり板の状況を示す。6 セット目加振後のすべり板面にはコーティング剥離による光沢面が確認でき、10 セット目加振後にはその面積が拡大した。すべり材下面では、#1、#2 試験体に比べ固体潤滑剤の脱落が甚だしく、基盤となる PTFE 面が全面にわたり露出した。



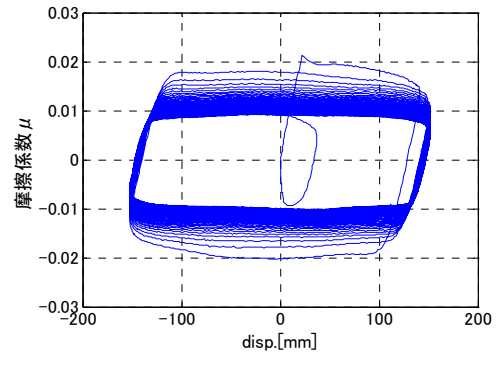
(a) 1セット目



(b) 3セット目

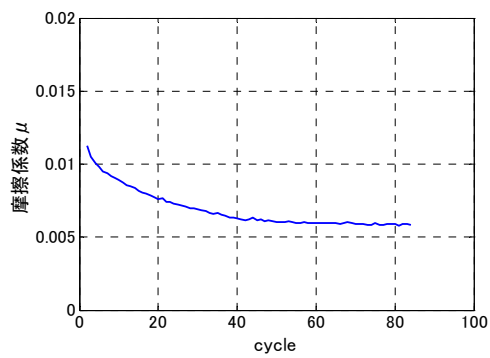


(c) 6セット目

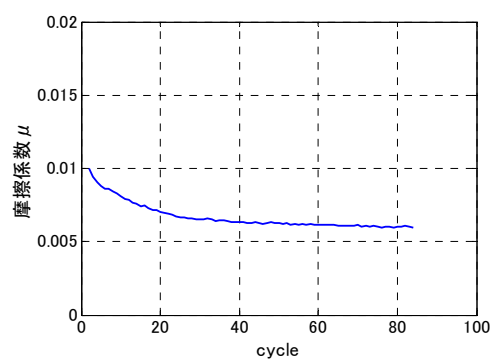


(d) 10セット目

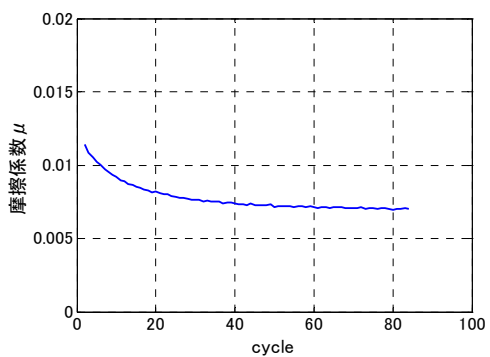
図 1.3.5-28 #3 試験体 水平方向摩擦係数—変形関係



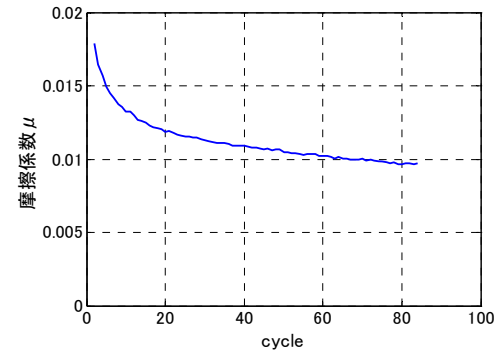
(a) 1セット目



(b) 3セット目



(c) 6セット目



(d) 10セット目

図 1.3.5-29 #3 試験体 0 変位切片における動摩擦係数の変化

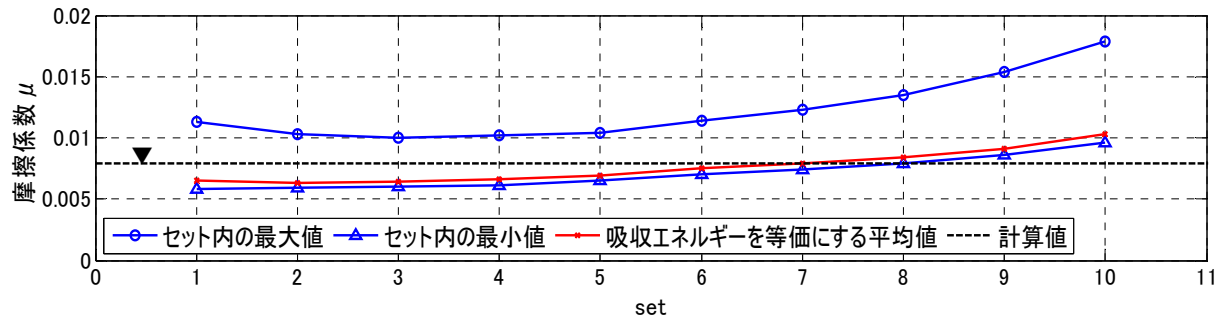


図 1.3.5-30 #3 試験体 各セットにおける最大、最小動摩擦係数

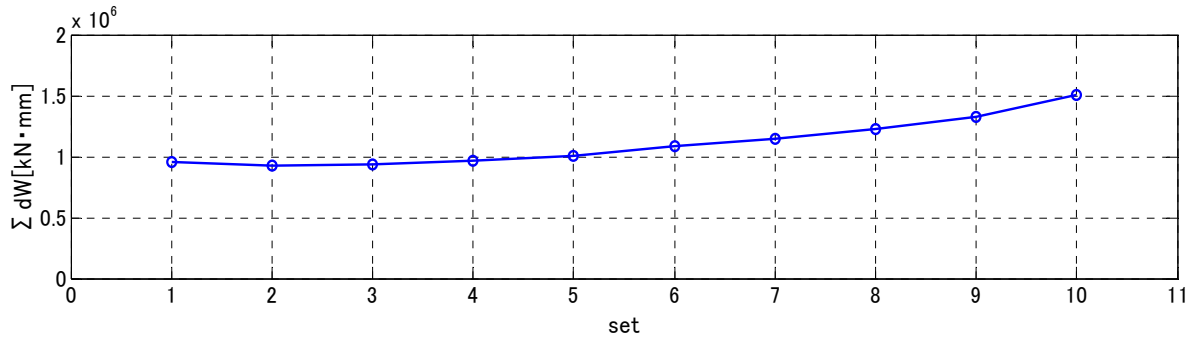


図 1.3.5-31 #3 試験体 各セットの吸収エネルギー



(a) すべり材下面 実験前



(b) すべり板表面 実験前



(c) すべり材下面 1セット目後



(d) すべり板表面 1セット目後



(e) すべり材下面 3セット目後



(f) すべり板表面 3セット目後



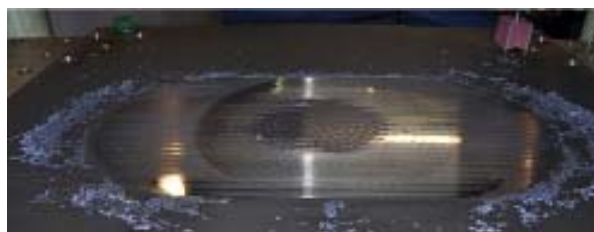
(g) すべり材下面 6セット目後



(h) すべり板表面 6セット目後



(j) すべり材下面 10セット目後



(k) すべり板表面 10セット目後

写真 1.3.5-7 #3 試験体 すべり材下面、すべり板表面状況写真

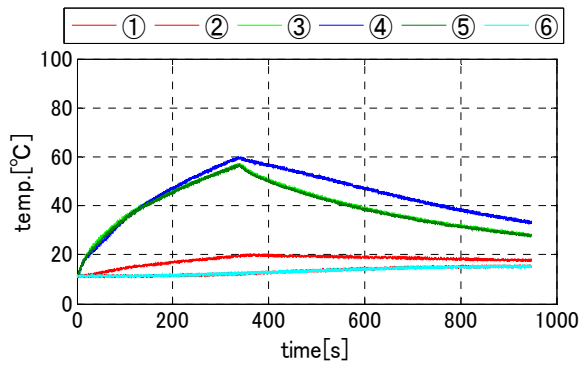
b) 温度特性

図 1.3.5-32 に 1、3、6、10 セット目の温度時刻歴を示す。左図に計測点①~⑥、右図に計測点④、⑦~⑩を示した。すべり板各点の相対的な温度上昇傾向は#1 試験体に相似し、計測点③~⑤に比べその他の点は温度上昇量が小さい。計測点⑦~⑨では加力の後半から若干の温度上昇が見られる。10 セット目では、計測点④で 100℃、計測点①で 40℃に至った。

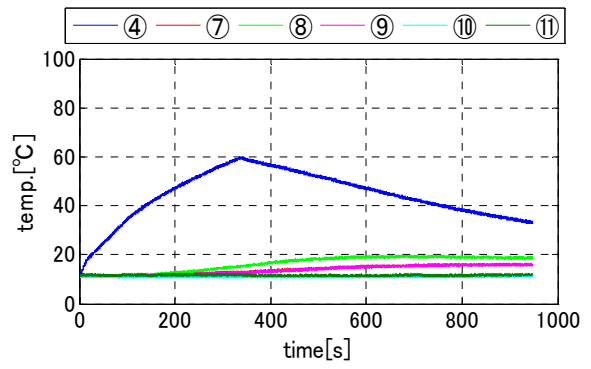
図 1.3.5-33 に計測点①および④について、各セットにおける最低温度、最高温度のセット間の変動を示す。摩擦係数の増加が確認される 5 セット目以降で、最低温度と最高温度の差が拡大する。

c) 膜厚

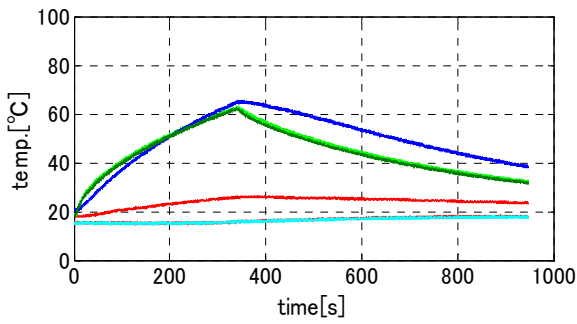
図 1.3.5-34 に各測定点の膜厚測定結果を示す。光沢面が確認できるようになった 6 セット目以降で、計測点③および⑤が管理値 $20 \mu\text{m}$ を下回る。コーティング剥離による膜厚減少およびその位置が数値的に確認できたことになる。図示していないが、各セット後に新たに生じた光沢面位置を測定すると $10 \mu\text{m}$ を下回る数値となり、後続のセット後に再度同位置を測定すると $10 \mu\text{m}$ 以上の値をしめすという傾向が見られた。



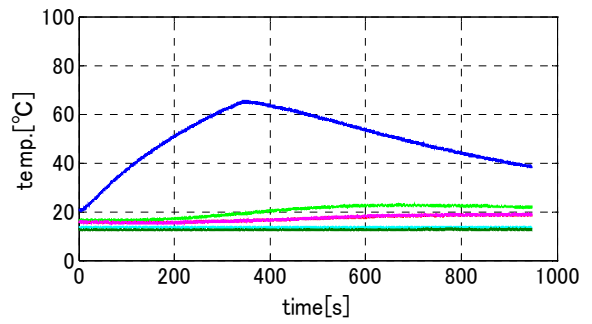
(a) 1 セット目①～⑥計測点



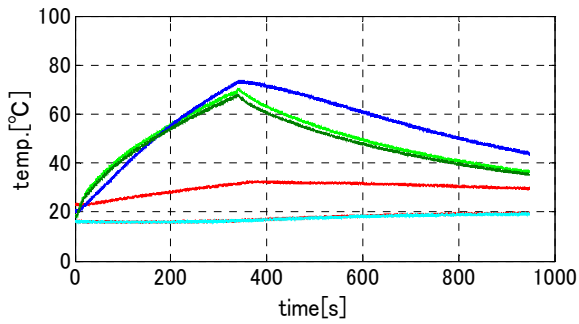
(b) 1 セット目④、⑦～⑪計測点



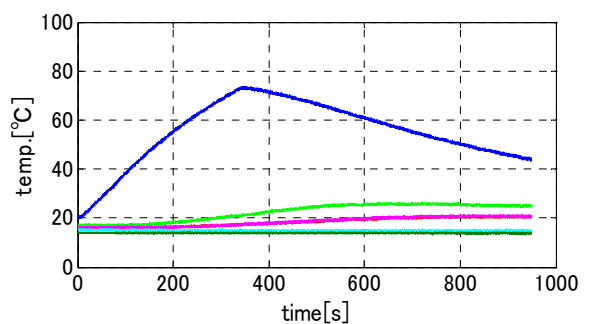
(c) 3 セット目①～⑥計測点



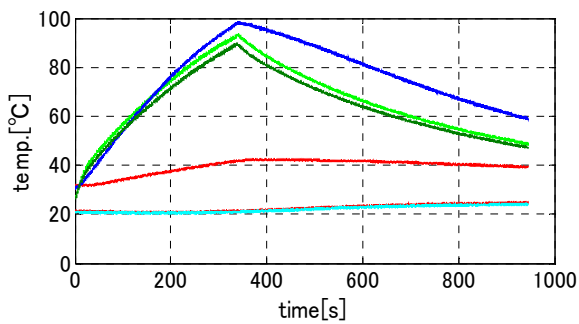
(d) 3 セット目④、⑦～⑪計測点



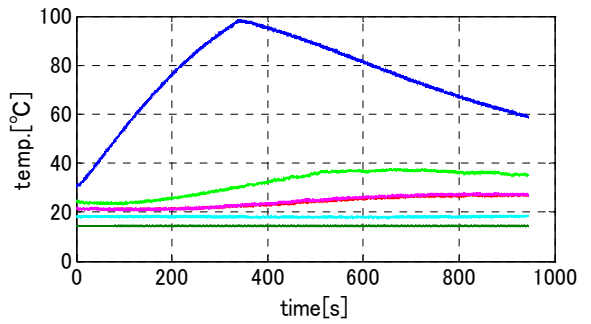
(e) 6 セット目①～⑥計測点



(f) 6 セット目④、⑦～⑪計測点



(g) 10 セット目①～⑥計測点



(h) 10 セット目④、⑦～⑪計測点

図 1.3.5-32 #3 試験体 各計測点の温度時刻歴

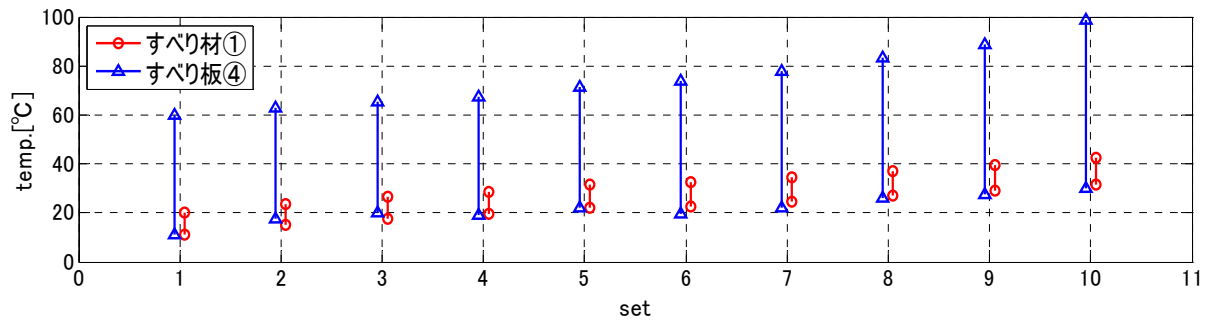


図 1.3.5-33 #3 試験体 ①、④計測点における各セットの最低、最高温度

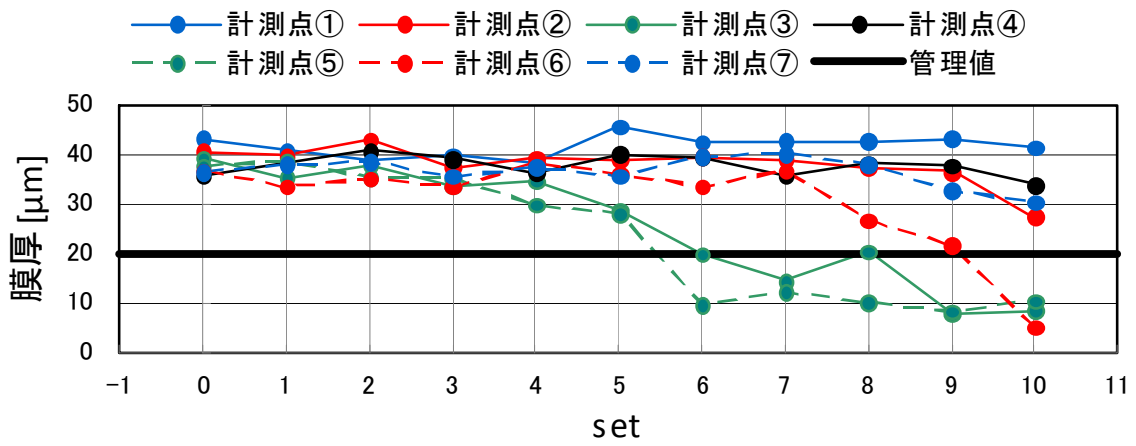


図 1.3.5-34 #3 試験体 膜厚測定結果

4) #4 試験体

#4 試験体の実験条件はすべり材面圧：20MPa、水平変位振幅：±150mm（定常）、加振周期：4秒、加振波形：正弦波、最大速度：236mm/s、1セットのサイクル数：84、1セットの累積変位：50.4m、加振後のインターバル：（～7セット目）11分、（8セット目～）3分、繰り返しセット数：10である。

a) 摩擦係数特性

図 1.3.5-35 に 1, 3, 6, 10 セット目の水平方向の摩擦係数－変形関係を示す。また、図 1.3.5-36 には 1, 3, 6, 10 セット目の 0 変位切片における動摩擦係数の変化を示す。1, 3 セット目では、#1 試験体とほとんど相違は見られない。6, 10 セット目では、加振開始後の数サイクルにおける摩擦係数の低下が緩和される。静摩擦力の立ち上がりはインターバルを 11 分とした 2～7 セット目で見られたが、1 セット目およびインターバルを 3 分とした 8 セット目～10 セット目では見られなかった。

図 1.3.5-37 に各セットにおける最大、最小動摩擦係数の変動を示す。図中には平均摩擦係数を併せて示した。図中▼で示したのは定常振幅±150mm に対する基準値である。また、各セットにおける吸収エネルギーを図 1.3.5-40 に示す。1～7 セット目では、#1 試験体とほとんど相違は見られず、8～10 セット目では、最大動摩擦係数、吸収エネルギーが低下する。

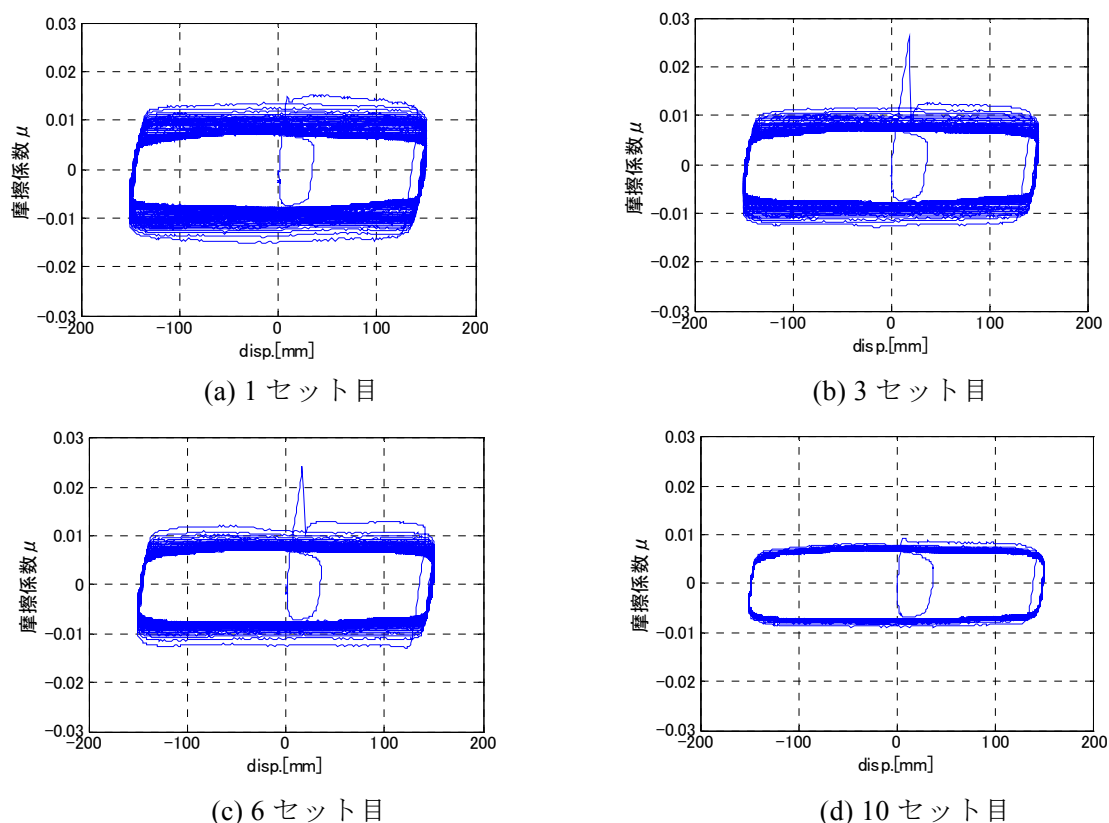
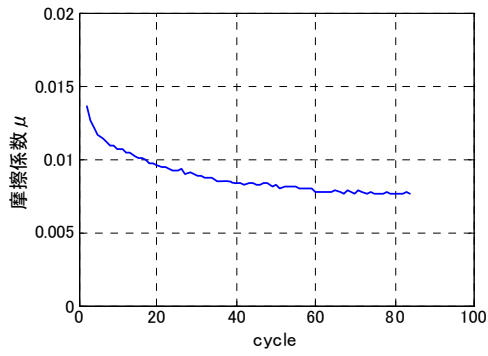
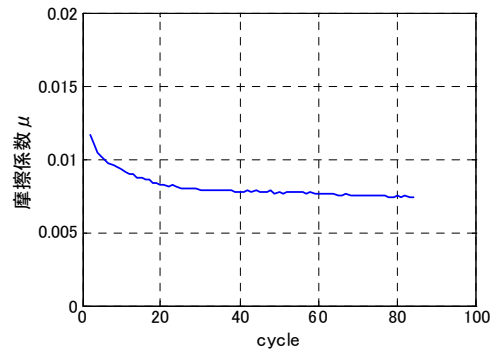


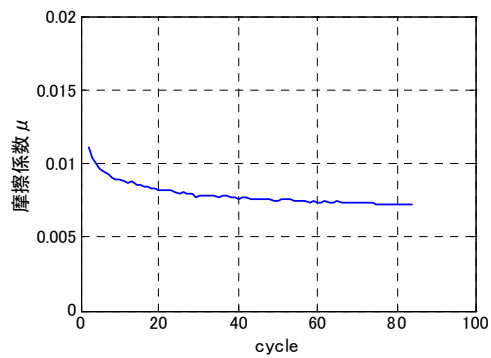
図 1.3.5-35 #4 試験体 水平方向摩擦係数－変形関係



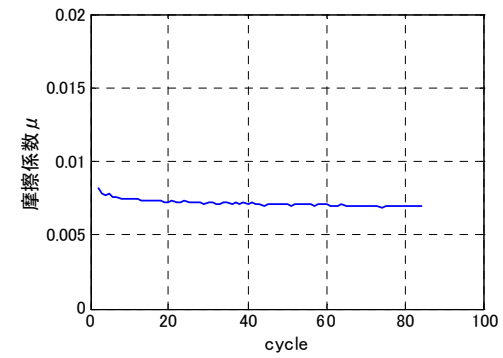
(a) 1セット目



(b) 3セット目



(c) 6セット目



(d) 10セット目

図 1.3.5-36 #4 試験体 0変位切片における動摩擦係数の変化

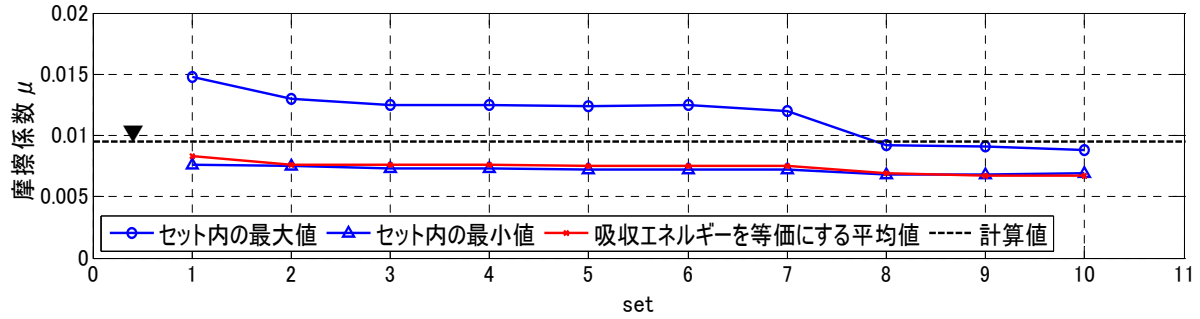


図 1.3.5-37 #4 試験体 各セットにおける最大、最小動摩擦係数

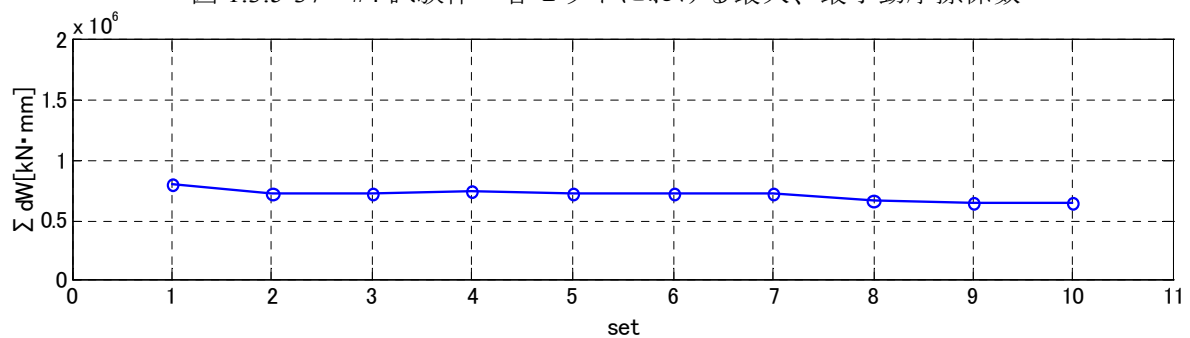


図 1.3.5-38 #4 試験体 各セットの吸収エネルギー

写真 1.3.5-8 に加振前および10セット目加振後のすべり材下面およびすべり板の状況を示す。10セット目加振後においてもすべり板に異常は見られない。すべり材固体潤滑剤の脱落は、#1試験体と明確な違いは観察されなかった。



(a) すべり材下面 実験前



(b) すべり板表面 実験前



(c) すべり材下面 10セット目後



(d) すべり板表面 10セット目後

写真 1.3.5-8 #4 試験体 すべり材下面、すべり板表面状況写真

b) 温度特性

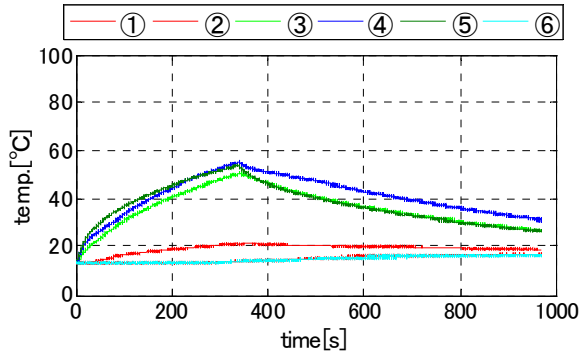
図 1.3.5-39 に 1、3、6、10 セット目の温度時刻歴を示す。左図に計測点①~⑥、右図に計測点④、⑦~⑩を示した。すべり材とすべり面を離間させず、かつインターバル時間が短いため、各点とも#1 試験体の同一セットに比べ、開始時点の温度が上昇する。1、3 セット目では#1 試験体と同程度の温度上昇量を示すが、6、10 セット目では温度上昇量が小さく、特に、加振開始後の数サイクルにおける温度上昇に差が見られる。また、この試験体では、計測点⑤の温度が計測点③より相対的にやや高く、温度分布に偏りが生じていたと思われる。6 セット目までは、計測点⑦~⑩に温度上昇が見られるが、10 セット目では見られなくなった。

6、10 セット目におけるセット開始時の摩擦係数低下が緩和される傾向と、6、10 セット目において加振開始後の数サイクルにおける温度上昇が小さくなる傾向に対応関係が求められる可能性がある。

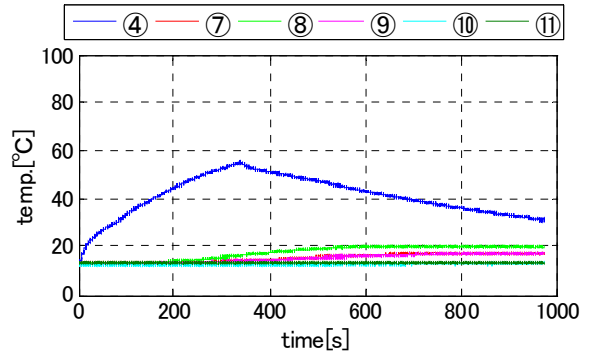
図 1.3.5-40 に計測点①および④について各セットにおける最低温度、最高温度のセット間の変動を示す。両計測点におけるセット間の温度上昇が、#1 試験体に比べ明瞭である。すべり板温度④については、4 セット目から 7 セット目間で温度上昇が頭打ちとなる傾向が見られる。8~10 セット目では、最低、最高温度の上昇とともに、セット内の温度上昇量（最低温度と最高温度の差）が小さくなる傾向が見られる。

c) 膜厚

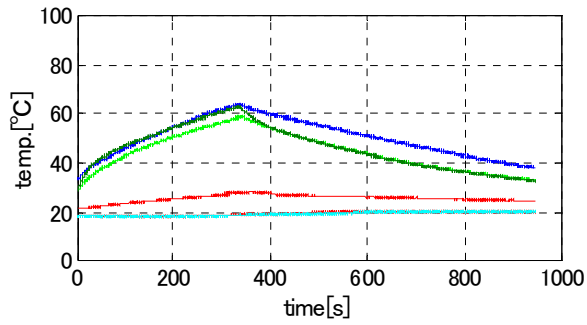
1 セット目開始前および 10 セット目終了時点の膜厚測定結果を図 1.3.5-41 に示す。各計測点の値にほとんど変動は見られない。また、いずれも管理値 $20 \mu\text{m}$ を下回ることはない。



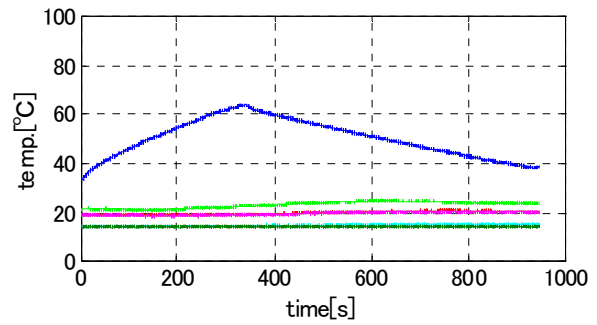
(a) 1 セット目①～⑥計測点



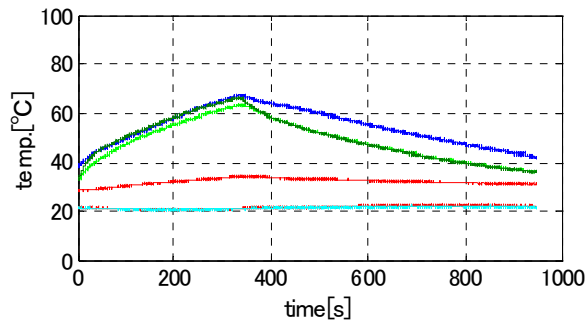
(b) 1 セット目④、⑦～⑪計測点



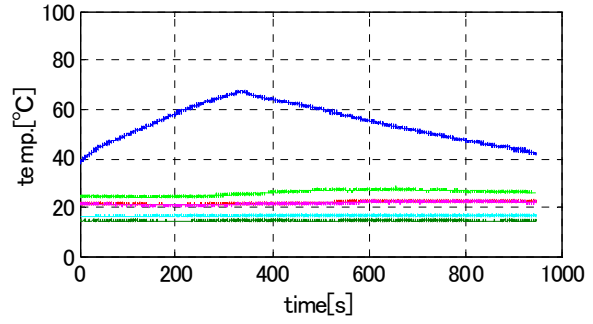
(c) 3 セット目①～⑥計測点



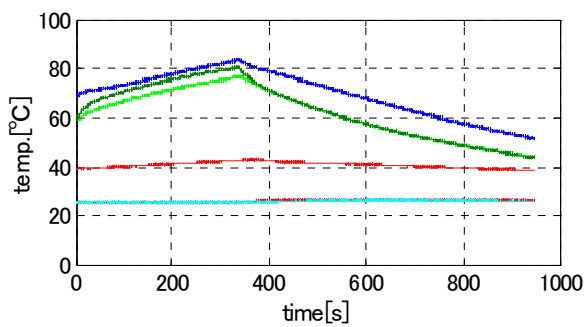
(d) 3 セット目④、⑦～⑪計測点



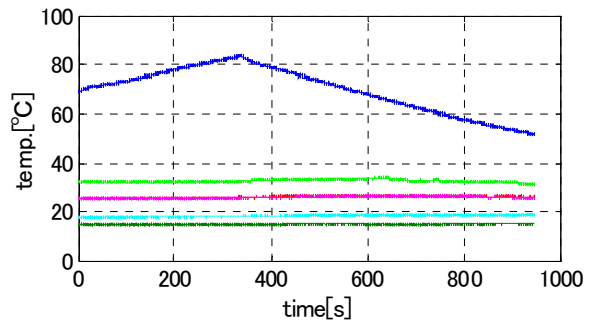
(e) 6 セット目①～⑥計測点



(f) 6 セット目④、⑦～⑪計測点



(g) 10 セット目①～⑥計測点



(h) 10 セット目④、⑦～⑪計測点

図 1.3.5-39 #4 試験体 各計測点の温度時刻歴

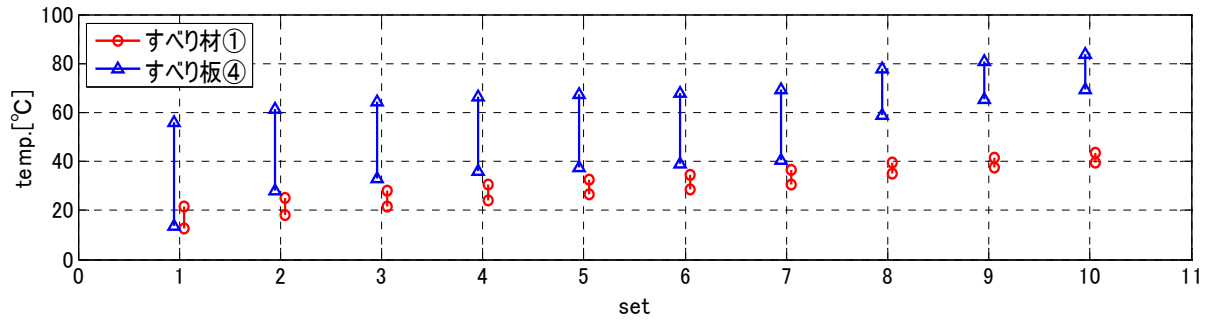


図 1.3.5-40 #4 試験体 ①、④計測点における各セットの最低、最高温度

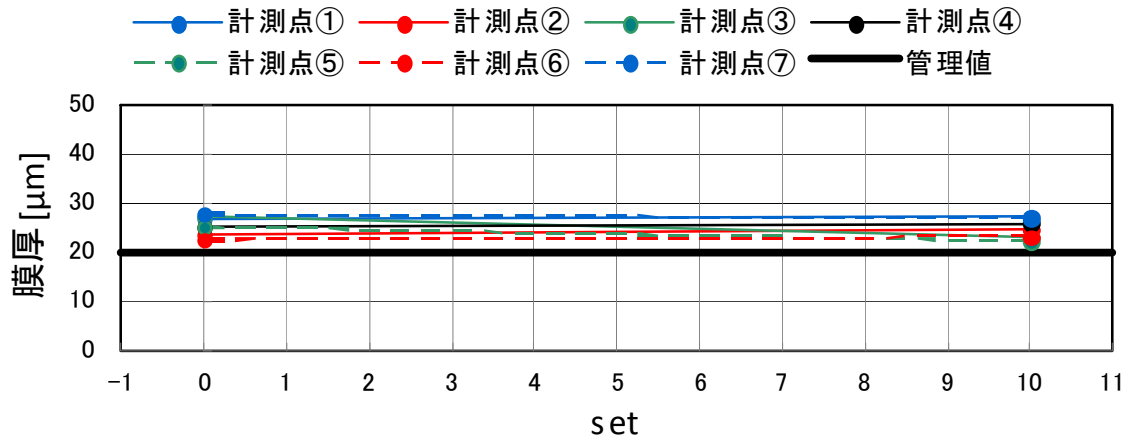


図 1.3.5-41 #3 試験体 膜厚測定結果

(3) 繰り返し実験後の基本特性試験

繰り返し実験後の試験体における特性変化の有無を製品試験における水平特性試験と同一条件で確認するために、基本特性試験を実施した。試験条件は4体とも、すべり材面圧：20MPa、水平変位振幅：±150mm（定常）、加振周期：62.8秒、加振波形：正弦波、最大速度：15mm/s、サイクル数：4である。3サイクル目の特性を試験値として抽出した。

試験結果を図 1.3.5-42 および表 1.3.5-8 に示す。#3 試験体ではループ形状にやや歪みが生じているが、検査値にほとんど変化はない。#2、#4 試験体では検査値にもループ形状にもほとんど変化は見られない。#1 試験体では、#2、#4 試験体で見られる変位 0 付近の摩擦係数上昇が見られず、検査値の数値は相対的に小さいが、許容値として与えられている±30%を逸脱していない。

以上から、繰り返し実験においてすべり板摩擦面のコーティング剥離が見られた#3 試験体を含め、製品試験と同一条件の基本特性試験における検査値上は特性変化が生じたとは認められない結果となった。

なお、#1、#2、#4 試験体で静摩擦係数の立ち上がりが見られるのは、製品試験における水平特性試験で通常実施する試験前のなじみ運転を行わなかったためである。

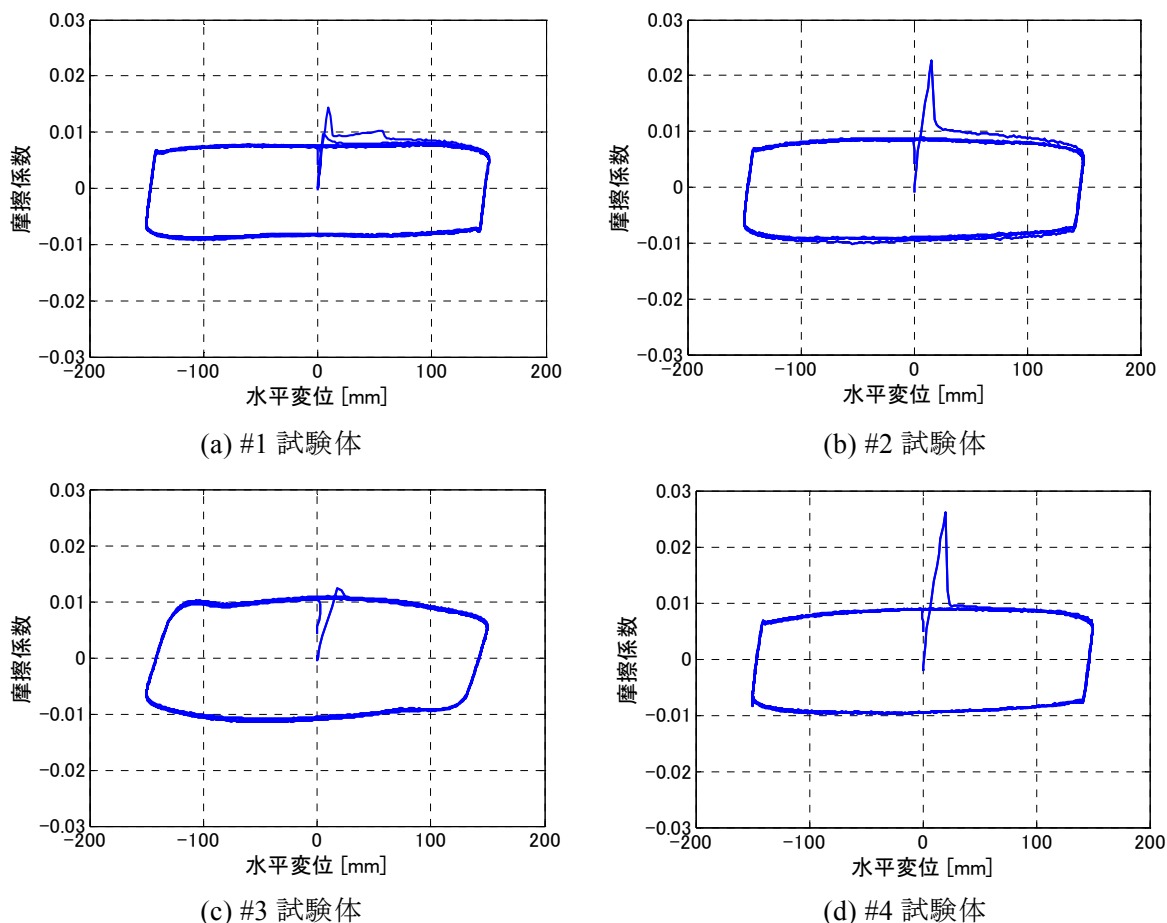


図 1.3.5-42 繰り返し実験後の基本特性試験結果

表 1.3.5-8 繰り返し実験後の基本特性試験結果

試験体 No	試験条件					計測値		摩擦係数 基準値 μ_0	μ/μ_0	μ/μ_0 許容値	判定
	すべり材 面圧 σ (MPa)	鉛直荷重 F_v (kN)	振動数 f (Hz)	振幅 δ (mm)	最大速度 V (mm/s)	水平荷重 F_h (kN)	摩擦係数 μ				
#1	20	1923	0.0159	±150	15	15.0	0.008	0.009	1.13	0.7~1.3	異常なし
#2	20	1923	0.0159	±150	15	16.9	0.009		1.00		異常なし
#3	20	1923	0.0159	±150	15	20.6	0.011		0.82		異常なし
#4	20	1923	0.0159	±150	15	17.7	0.009		1.00		異常なし

(4) 考察

繰り返し特性に影響を与える要因について考察する。

1) 累積変形量

図 1.3.5-43 に#1～#4 各試験体の累積変形量に対する摩擦係数の変動を示す。摩擦係数は面圧 20MPa、速度 15mm/s に補正して表示した。累積変形量は全体変形を積算して求めた。図中には比較のため、メーカー提供の既往評価データを示した。

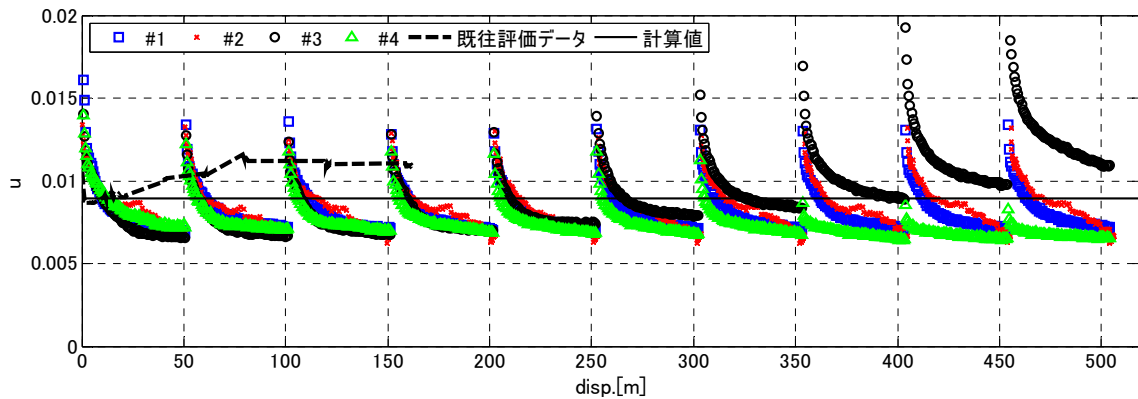


図 1.3.5-43 累積変形量と摩擦係数

繰り返し実験による累積変形量は、既往評価データの評価範囲(~160m)を大きく超えている。本調査においては、長周期地震動 1 波分の応答を想定したセット毎に摩擦係数の有意な低下が見られ、インターバル時間を挟んだ次セットの開始時には摩擦係数の復帰が見られるのが特徴であり、既往評価データを用いた評価では、その傾向を表現することはできない。また、本調査におけるセット間の相対的な変化は乏しく、累積変形量に対する既往評価データの変動トレンドは現れていない。

現状、繰り返しに対する摩擦係数の変動が、変動幅の上下限の値を用いたバラツキとして扱われていることを考慮し、既往評価データと実験データの上下限値を、実験条件が面圧 20MPa の試験体 (#1, 2, 4) を対象に比較すると、各セットの開始時における摩擦係数の上限値は既往評価データの上限値をやや上回り、終盤における摩擦係数の下限値は既往評価データの下限値を下回る。

面圧 30MPa の#3 試験体では、累積変形量 200m (5 セット目) 程度から摩擦係数の上昇傾向が観察される。350m (8 セット目) 以降、上昇傾向は顕著となる。面圧が 20MPa を超える場合には、この累積変形量領域における摩擦係数変動を考慮する必要がある。

2) 摺動サイクル数

図 1.3.5-44 に摺動サイクル数に対する摩擦係数の変動を示す。前掲の累積変形量に対する図と同様に、既往評価データを用いた評価で、今般実験の傾向を表現することはできない。

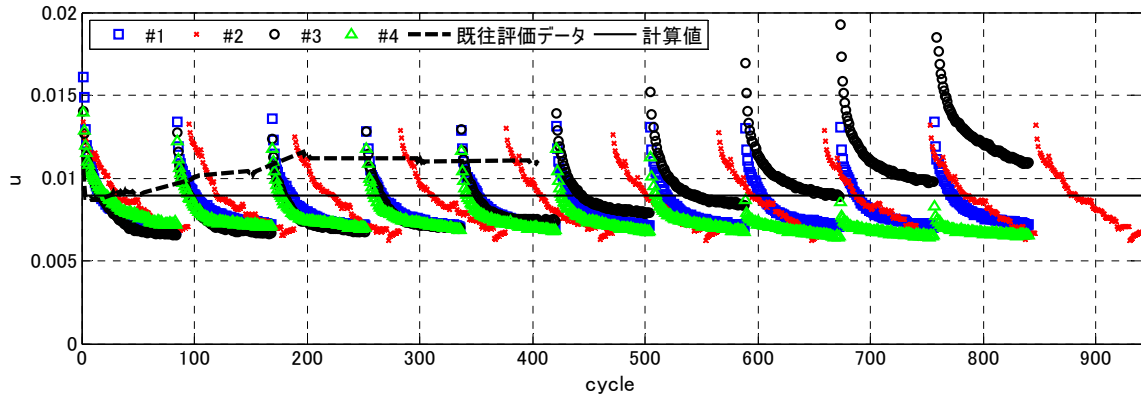


図 1.3.5-44 摺動サイクル数と摩擦係数

3) 温度

図 1.3.5-45～46 に温度に対する摩擦係数の変動を示す。図 1.3.5-45 は縦軸に摩擦係数を採り、横軸にはそれぞれ、すべり板中央（測点④）温度、すべり材中心（測点①）温度、すべり板のすべり子滑動領域（測点③～⑤）平均温度を採った。図 1.3.5-46 は縦軸に各セット開始時の摩擦係数に対する各サイクルの摩擦係数の低下分（以下、摩擦係数低下量）を採り、横軸にはそれぞれ、すべり板中央（測点④）温度の各セット開始時点からの上昇分（以下単に、温度上昇）、すべり材中心（測点①）の温度上昇、すべり板のすべり子滑動領域（測点③～⑤）の温度上昇を採った。図は、摩擦係数の顕著な上昇が見られた#3 試験体の 7 セット目以降と、インターバルが短く各セット開始時点の温度が高温状態となった#4 試験体の 8 セット目以降を除く、4 試験体の全セットについて重ね書きした。

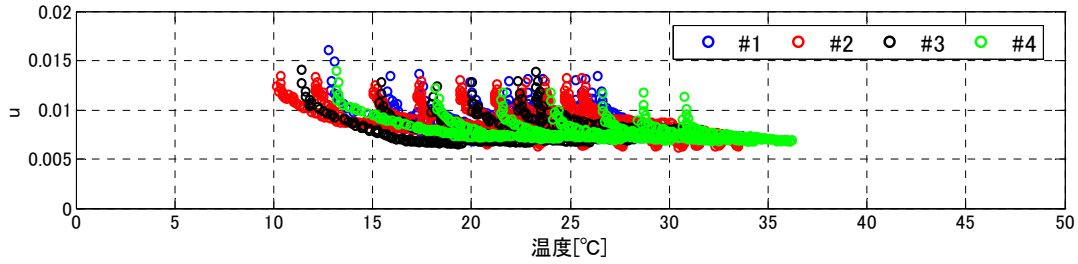
図 1.3.5-45 からは、本実験においては、セット開始直後の急激な低下を除けば、摩擦係数の変動とすべり板中央（計測点④）温度が比較的ばらつきの少ない関係を有していることがわかる。図 1.3.5-45 (b) から摩擦係数 μ と計測点④温度 T_4 の近似式を求めると、式(1.3.5-3)となる。一方、式(1.3.5-3)で無視したセット開始時（1 サイクル目）の摩擦係数 μ_0 （各セットの最大動摩擦係数）と計測点④温度 T_4 の関係は式(1.3.5-4)で表現できる。

図 1.3.5-46 からは、#1 試験体の 1 セット目を除くと、本実験においては、摩擦係数低下量とすべり板温度上昇の間に一定の関係を見出すことができる。ここでは図 1.3.5-46 (a) より、摩擦係数低下量 $\Delta\mu$ と計測点④の温度上昇 ΔT_4 の関係を式(1.3.5-5)で近似できる。

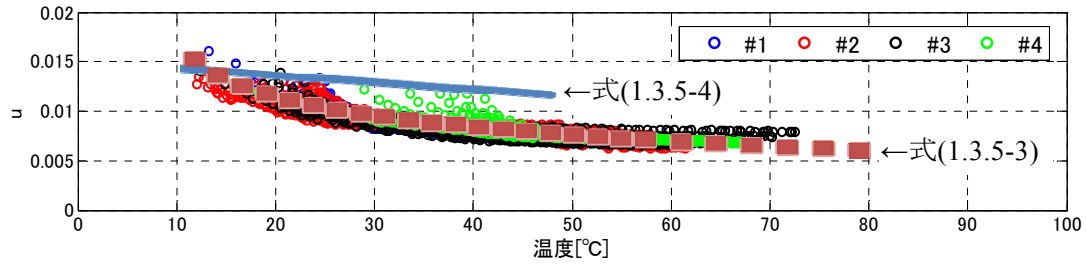
$$\mu = 0.07 \cdot (T_4 - 9)^{-0.045} - 0.0516 \quad (1.3.5-3)$$

$$\mu_0 = -7.5 \times 10^{-5} \cdot T_4 + 0.0145 \quad (1.3.5-4)$$

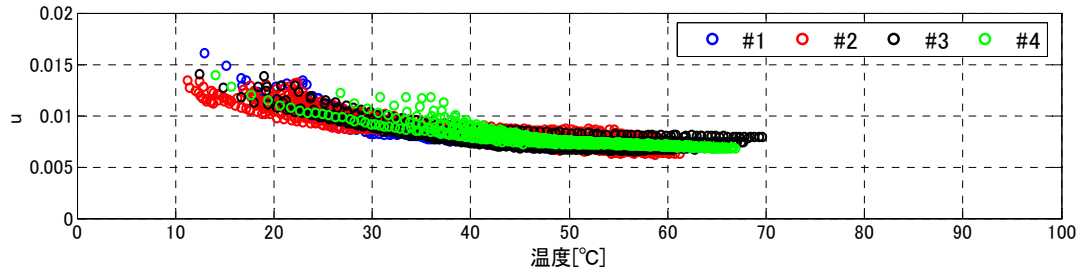
$$\Delta\mu = 0.03 \cdot (\Delta T_4 + 1)^{-0.06} - 0.03 \quad (1.3.5-5)$$



(a) すべり材温度（測定点①）と摩擦係数

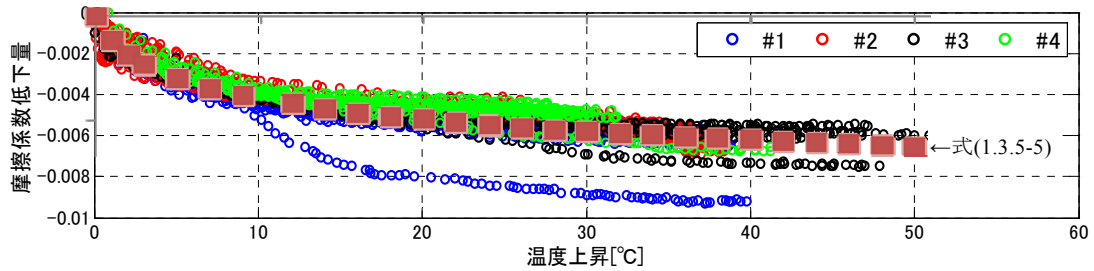


(b) すべり板温度（測定点④）と摩擦係数

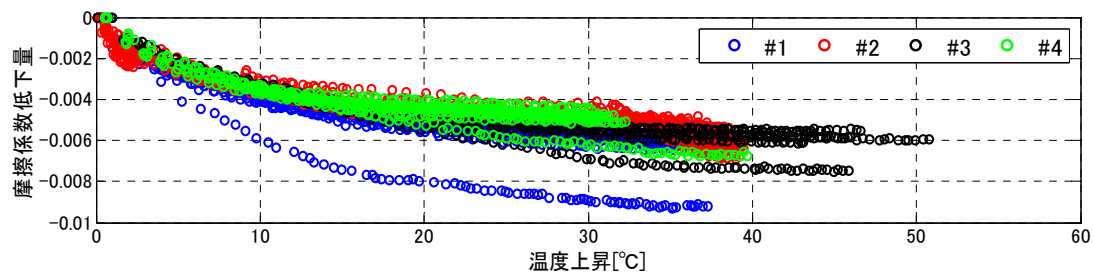


(c) すべり板温度（測定点③～⑤の平均）と摩擦係数

図 1.3.5-45 温度に対する摩擦係数の変動



(a) すべり板温度上昇（測定点④）と摩擦係数低下量

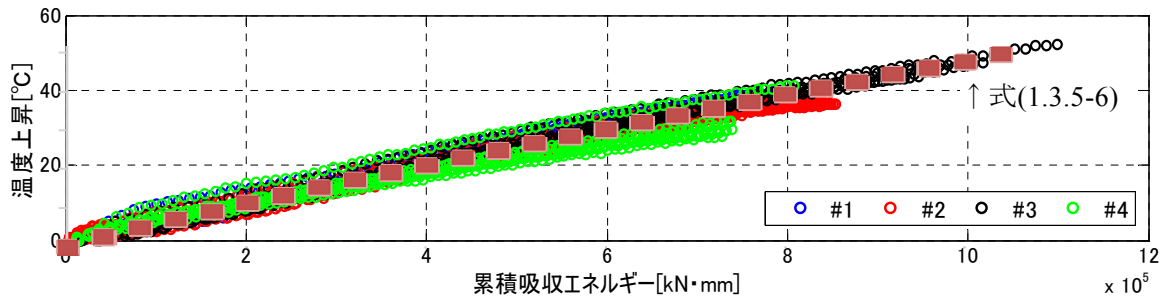


(b) すべり板温度上昇（測定点③～⑤の平均）と摩擦係数低下量

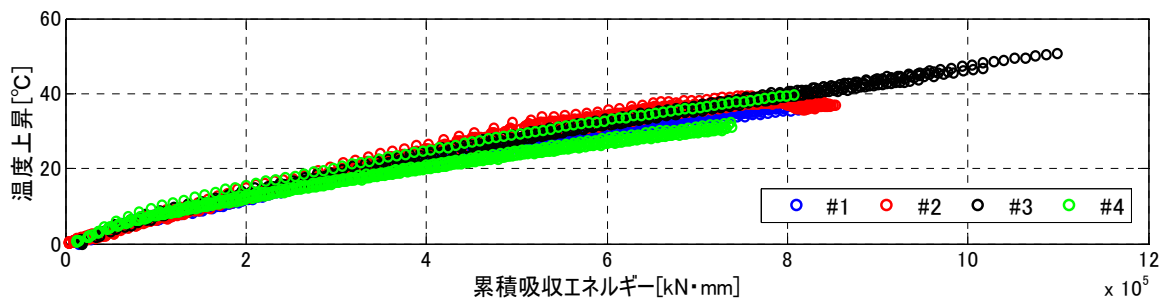
図 1.3.5-46 すべり板温度変動に対する摩擦係数の変動

4) 吸収エネルギーと温度上昇の相関

図 1.3.5-47 に各セットにおける吸収エネルギーと温度上昇の相関を示す。(a)図より各セットにおける吸収エネルギー E_d と計測点④の温度上昇 ΔT_4 の関係は式(1.3.5-6)で表すことができる。



(a) 累積吸収エネルギーとすべり板温度上昇 (測定点④)



(b) 累積吸収エネルギーとすべり板温度上昇 (測定点③～⑤の平均)

図 1.3.5-47 累積吸収エネルギーとすべり板温度上昇

$$\Delta T_4 = 0.00019 \cdot E_d^{0.9} \quad (1.3.5-6)$$

摩擦係数と温度の関係を表(1.3.5-4)、(1.3.5-5)の組合せで表現することにし、式(1.3.5-6)で加振中の温度上昇を累積吸収エネルギーに置き換えると、高面圧の繰り返しの伴う摩擦係数の顕著な上昇が生じたケース(#3 試験体の7セット目以降)と、すべり板温度が高温状態から加振が開始されたケース(#4 試験体の8セット目以降)を除く、本調査の実験結果を対象とした動摩擦係数 μ の繰り返し特性依存式が式(1.3.5-7)のように提示できる。式中 T は初期のすべり板温度であり、環境温度に代表される。

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \mu_0 + \Delta\mu \\ \mu_0 &= -7.5 \times 10^{-5} \cdot T + 0.0145 \\ \Delta\mu &= 0.03 \cdot (0.00019 \cdot E_d^{0.9} + 1)^{-0.06} - 0.03 \end{aligned} \right\} \quad (1.3.5-7)$$

式(1.3.5-6)における関係は、変位振幅、吸収エネルギーの時間勾配、すべり材サイズ等により変動することが考えられるが、式(1.3.5-4)、(1.3.5-5)の説明変数として選択した代表点温度が、実現象として動摩擦係数の変動を代表できるかどうかには考慮の余地が残ること、本調査に伴って予備的に実施した熱伝導解析ではすべり板各部の定量的な温度上昇について必ずしも十分な精度が得られない結果に終わったこと、設計ツールとして用いる地震応答解析には、温度評価を介在させるよりも吸収エネルギーを用いた方がなじみが良いこと、などを考慮して式(1.3.5-7)の形式を採った。評価式の一般化は今後の課題となる。

5) #3 試験体における摺動距離と摩擦係数の相関

図 1.3.5-48 に#3 試験体の各セット開始時の動摩擦係数と式(1.3.5-7)第 2 式との偏差（以下、初期値偏差）を累積摺動距離 D_s との関係で、図 1.3.5-49 に#3 試験体のセット毎の動摩擦係数の低下量を式(1.3.5-7)第 3 式に対する比（以下、低下量比）として累積摺動距離 D_s との関係で示す。初期値偏差、低下量比とも D_s が 200m を超えると式(1.3.5-7)に対し増加する傾向にある。ここでは、すべり材面圧 σ_p が 20MPa を超え、かつ累積摺動距離 D_s が 200m を上回る場合の初期動摩擦係数 μ_0 と繰り返しによる摩擦係数低下量 $\Delta\mu$ の補正項 $\mu_{0,col}$ 、 $\Delta\mu_{col}$ として両図より式(1.3.5-8)、式(1.3.5-9)を導く。式中 r_p は σ_p による補正係数で、本調査の範囲では $\sigma_p=20\text{MPa}$ のとき 0、 $\sigma_p=30\text{MPa}$ のとき 1 となる。

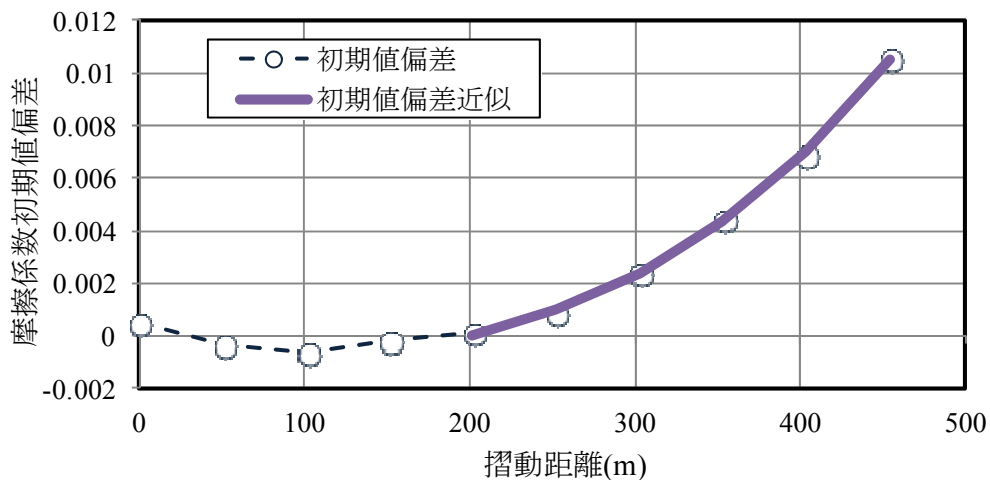


図 1.3.5-48 #3 試験体 動摩擦係数初期値偏差と摺動距離の関係

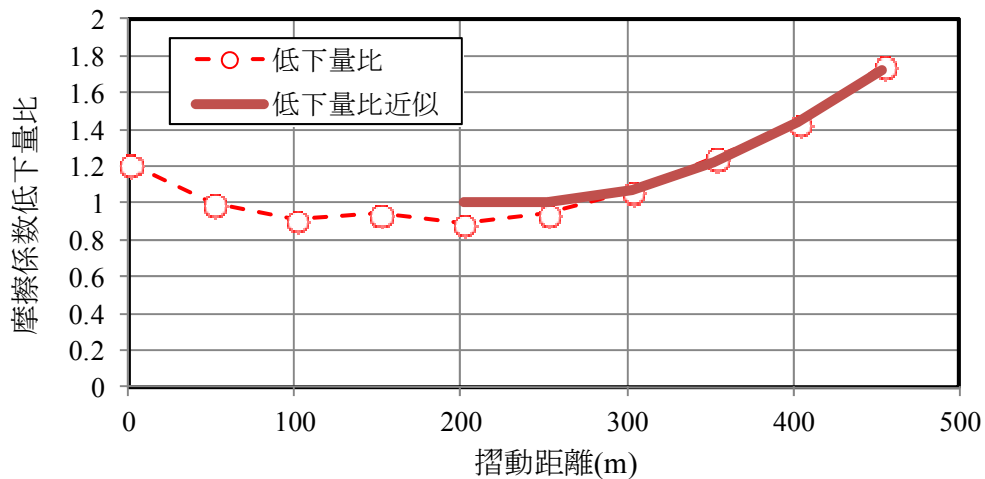


図 1.3.5-49 #3 試験体 動摩擦係数低下量比と摺動距離の関係

$$\left. \begin{aligned} \mu_{0_col} &= r_p \cdot (1.8 \times 10^{-10} \cdot D_{s2}^3 + 5.5 \times 10^{-8} \cdot D_{s2}^2 + 1.6 \times 10^{-5} \cdot D_{s2}) \\ D_{s2} &= Ds - 200 \geq 0 \\ r_p &= \begin{cases} 0 (\sigma_p = 20\text{MPa}) \\ 1 (\sigma_p = 30\text{MPa}) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\Delta\mu_{_col} = r_p \cdot (-2.8 \times 10^{-9} \cdot D_{s2}^3 + 1.5 \times 10^{-5} \cdot D_{s2}^2 - 7.9 \times 10^{-4} \cdot D_{s2} + 1) \quad (9)$$

6) 繰り返し依存特性評価式の提示

上述の式(1.3.5-7)～(1.3.5-9)を組み合わせるにより、本調査の実験結果を対象とした動摩擦係数 μ の繰り返し特性依存式が式(1.3.5-10)のように提示できる。

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \mu_0 + \mu_{0_col} + \Delta\mu \cdot \Delta\mu_{_col} \\ \mu_0 &= -7.5 \times 10^{-5} \cdot T + 0.0145 \\ \Delta\mu &= 0.03 \cdot (0.00019 \cdot E_d^{0.9} + 1)^{-0.06} - 0.03 \\ \mu_{0_col} &= r_p \cdot (1.8 \times 10^{-10} \cdot D_{s2}^3 + 5.5 \times 10^{-8} \cdot D_{s2}^2 + 1.6 \times 10^{-5} \cdot D_{s2}) \\ \Delta\mu_{_col} &= r_p \cdot (-2.8 \times 10^{-9} \cdot D_{s2}^3 + 1.5 \times 10^{-5} \cdot D_{s2}^2 - 7.9 \times 10^{-4} \cdot D_{s2} + 1) \\ D_{s2} &= Ds - 200 \geq 0 \\ r_p &= \begin{cases} 0 (\sigma_p = 20\text{MPa}) \\ 1 (\sigma_p = 30\text{MPa}) \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

実験値と式(1.3.5-10)による評価値の相関を図 1.3.5-50 に示す。#4 試験体の 8 セット目以降を除く、4 試験体全セットの全サイクルについて評価した。サンプル数 n は 3208、寄与率 R^2 は 0.926 である。

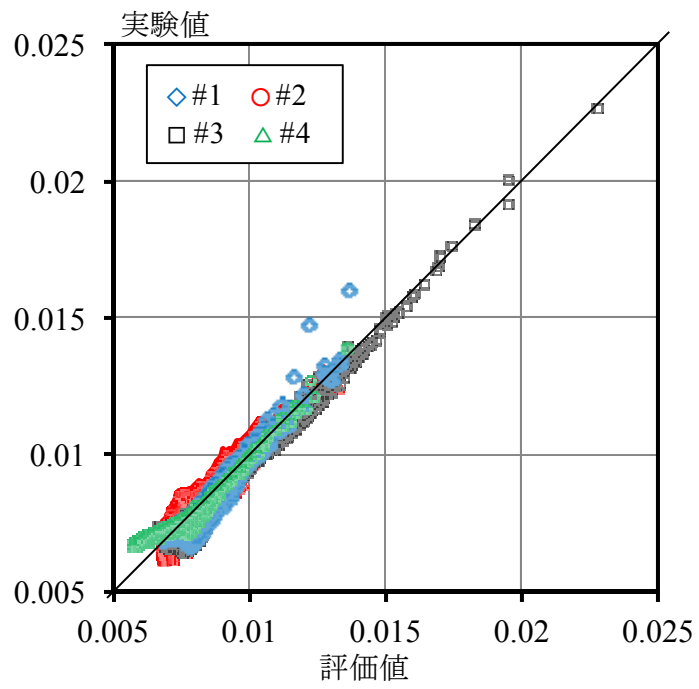


図 1.3.5-50 提示した摩擦係数評価式と実験値の相関

1.3.5.3 まとめと課題

(1) まとめ

低摩擦弾性すべり支承に関する調査を代表できる免震材料として、オイレス工業 SSR ($\mu=0.01$) を調査対象とし、長周期地震動による免震建築物の応答を想定した多数回繰り返し実験を実施することにより特性の変動を調査した。

長周期地震動による応答 1 回分に相当する実験条件として累積変形量 50mm 以上となる繰り返し条件を設定した。長周期地震動による応答 1 回分の実験を 1 セットと称し、インターバル時間を挟んで、各試験体について 10 セット実施した。実験パラメータは、加振波形（定振幅正弦波：150mm、変動振幅正弦波：50~300mm）、すべり材面圧（基準：20MPa、高面圧：30MPa）、インターバル時間（標準：30 分（原則）、短：3~11 分）である。

いずれの試験体についても、各セット開始時に相当程度の摩擦係数の低下が見られ、その後安定した。セット間にインターバル時間を設けることにより、前セットで低下した摩擦係数が相当程度復帰した。セット開始時の摩擦係数低下量は、1 セット目が最も大きく、その後のセットでは低下量は漸減した。面圧 20MPa 試験体では全 10 セットにわたり、面圧 30MPa 試験体では当初の 4~5 セットにわたり、各セットの摩擦係数下限値にほとんど変化は見られない。また、各セットのエネルギー吸収量の変動もほとんどない。インターバル時間を 3 分としたセットでは、摩擦係数の復帰が小さかったが、下限値に大きな変化はない。

以上の実験結果より、調査対象とした免震部材は、繰り返し特性に優れた部材であると評価できる。

調査対象とした免震部材の繰り返し特性は、免震材料認定資料別表に累積摺動回数に対する依存性として示されているが、本調査の多数回繰り返し実験で見られたセット毎に摩擦係数が復帰する変動傾向を説明できない。また、本調査の実験で得られた摩擦係数の変動幅は、上記既往知見で示される変動幅を上回る。

変動振幅加振を行った試験体について、局所的な摺動回数と摩擦係数の変動について整理すると、定振幅加振を行った試験体における摺動回数と摩擦係数の変動の傾向に類似するという知見が得られた。摩擦係数の変動評価に局所的な摺動回数が有意な要素となり得ることを示唆するが、インターバル時間を挟んだ摩擦係数の変動を説明する要素とはなり得ない。

摩擦係数の変動をすべり板温度で整理すると、高面圧試験体で摩擦係数の上昇が見られたセットと短インターバルでセット開始時のすべり板温度が 60℃以上となっていたセットを除けば、相当のばらつきを伴うものの、一定の依存性が認められる。

各セットにおける温度上昇は、吸収エネルギーの関数として表現できることから、各セットの初期温度を与条件とすれば、摩擦係数の変動を吸収エネルギーの関数として表現できる。

また、面圧 30MPa 試験体では 6 セット目（長周期地震動による応答 6 回分）以降ですべり板コーティング剥離による摩擦係数の上昇が見られた。各セットの上/下限摩擦係数の上昇傾向とセット数の関係は明瞭に見られることから、標準面圧を上回る条件に対する摩擦係数の変動を摺動距離の関数として与えることができる。

以上を組み合わせ、本調査の実験結果に基づく繰り返し特性評価式を提示した。寄与率 R^2 は 0.926 となった。

参考文献

1.3.5-1) 国土交通省：オイレス式弾性すべり支承 建築材料認定書 (MVBR-0377) 別表、2008.6

1.3.5.4 実験実施記録表

各試験体の実験実施記録表を表 1.3.5-9～12 に示す。表には各セットの実施時刻、各セット間のインターバル時間を記載した。

表 1.3.5-9 #1 試験体実験実施記録表

実験日時	実験内容	セット数	すべり 材面圧	加振 周期	振幅	サイ クル 数	摺動 距離	次加振 までの インタ ーバル
			MPa	秒	mm		m	
2010.12.14	11:08	1	20	4	定常±150	84	50.4	0:36
	11:48	2						0:49
	12:43	3						0:32
	13:21	4						0:28
	13:55	5						0:31
	14:32	6						0:32
	15:10	7						0:30
	15:46	8						0:31
	16:23	9						0:36
	17:05	10						0:26
	17:37	静摩擦力確認	20	4	定常±150	10	6.0	0:10
	17:48	基本性能試験(繰返し後)	20	62.5	定常±150	4	2.4	0:02
	17:54	同上	20	62.5	定常±150	4	2.4	—

表 1.3.5-10 #2 試験体実験実施記録表

実験日時	実験内容	セット数	すべり 材面圧	加振 周期	振幅	サイ クル 数	摺動 距離	次加振 までの インタ ーバル	
			MPa	秒	mm		m		
2010.12.17	10:03	基本性能試験(製品試験)	20	62.5	定常±150	4	2.4	1:04	
	11:13	多数回繰り 返し実験	1	20	4	変動±50 ～±300	94	50.6	3:29
	14:48		2						0:34
	15:28		3						0:37
	16:11		4						0:33
	16:50		5						0:31
	17:27		6						0:31
	18:04		7						0:31
	18:41		8						0:31
	19:18		9						0:31
	19:55		10						0:29
	20:30	基本性能試験(繰返し後)	20	62.5	定常±150	4	2.4	18:46	
	2010.12.20	13:40	基本性能試験(公開実験)	20	62.5	定常±150	4	2.4	0:28
14:12		多数回繰り 返し実験	11	20	4	変動±50 ～±300	84	50.6	0:33
14:51			12						—

表 1.3.5-11 #3 試験体実験実施記録表

実験日時		実験内容	セット数	すべり 材面圧	加振 周期	振幅	サイ クル 数	摺動 距離	次加振 までの インタ ーバル
				MPa	秒	mm		m	
2010.12.20	19:26	基本性能試験(製品試験)		20	62.5	定常±150	4	2.4	—
2010.12.21	10:47	多数回繰り 返し実験	1	30	4	定常±150	84	50.4	0:32
	11:25		2						0:33
	12:04		3						0:40
	12:50		4						0:33
	13:29		5						0:51
	14:26		6						0:39
	15:11		7						0:32
	15:49		8						0:31
	16:26		9						0:30
	17:02		10						0:39
	17:47	基本性能試験(繰返し後)		20	62.5	定常±150	4	2.4	—

表 1.3.5-12 #4 試験体実験実施記録表

実験日時		実験内容	セット数	すべり 材面圧	加振 周期	振幅	サイ クル 数	摺動 距離	次加振 までの インタ ーバル
				MPa	秒	mm		m	
2010.12.23	16:21	基本性能試験(製品試験)		20	62.5	定常±150	4	2.4	—
2010.12.24	10:33	多数回繰り 返し実験	1	20	4	定常±150	84	50.4	0:13
	10:52		2						0:11
	11:09		3						0:11
	11:26		4						0:11
	11:43		5						0:11
	12:00		6						0:11
	12:17		7						0:03
	12:26		8						0:03
	12:35		9						0:03
	12:44		10						0:13
	13:03	基本性能試験(繰返し後)		20	62.5	定常±150	4	2.4	—

1.3.5.5 各試験体各セットの結果概要

図 1.3.5-51～90 に各試験体各セットの結果概要を示す。それぞれ(a)図は水平荷重－水平変位関係、(b)図は水平変位時刻歴、(c)図は各サイクルごとの変位 0 切片における摩擦係数（正負平均）、(d)図は水平荷重時刻歴、(e)図は①～⑥測定点の温度時刻歴、(f) 図は⑦～⑪測定点の温度時刻歴である。

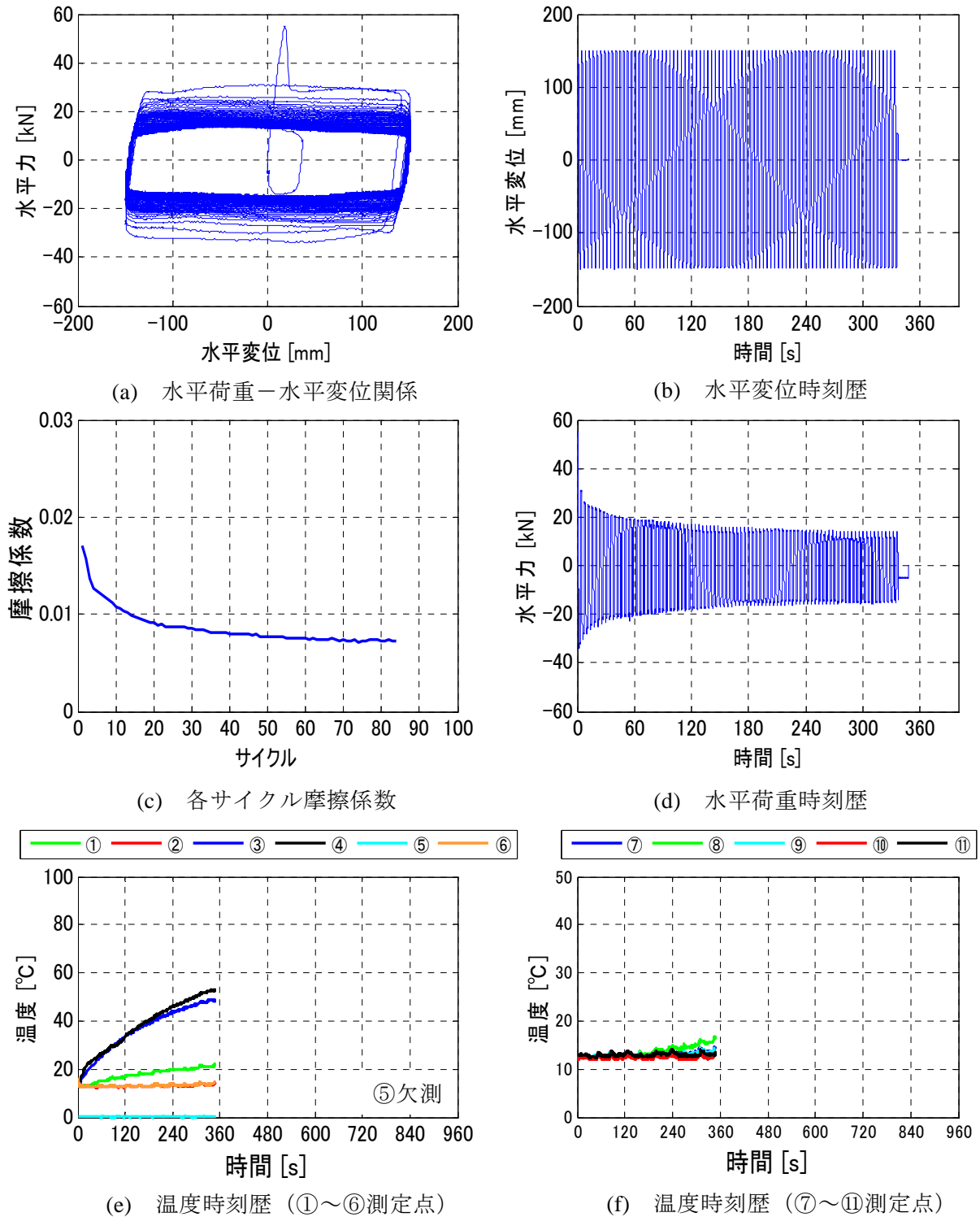
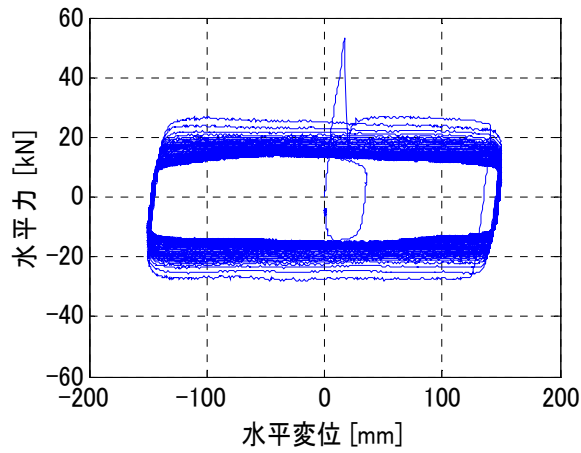
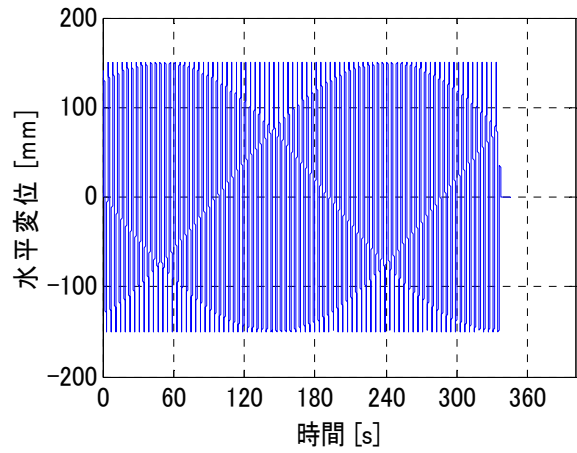


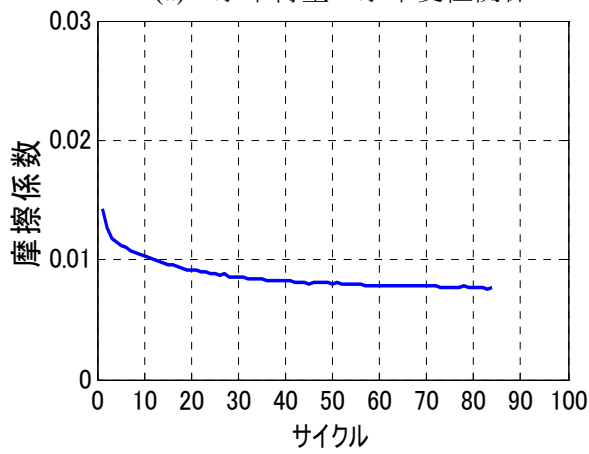
図 1.3.5-51 #1 試験体 1 セット目実験結果概要



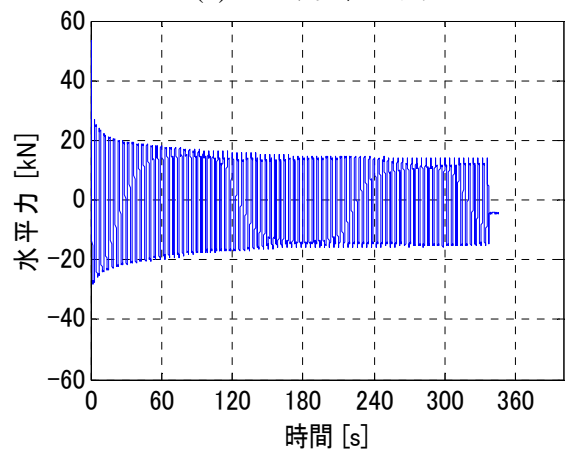
(a) 水平荷重－水平変位関係



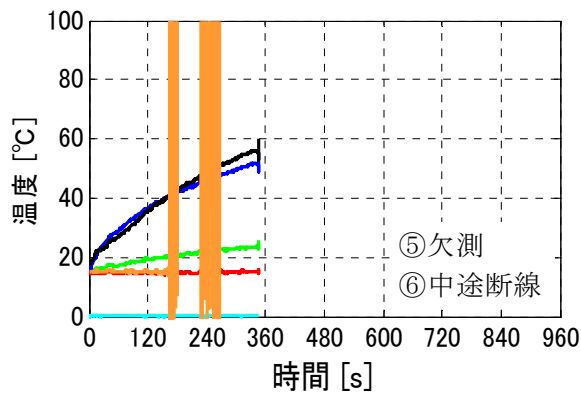
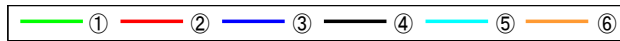
(b) 水平変位時刻歴



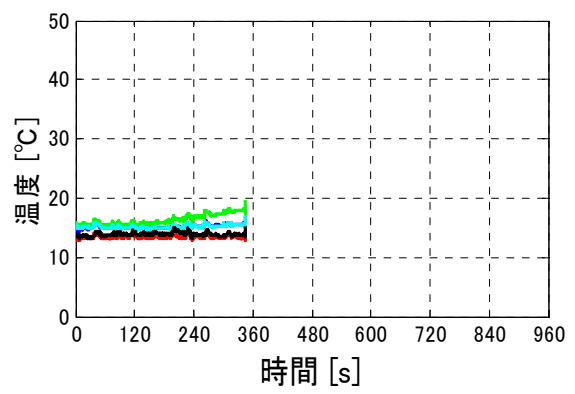
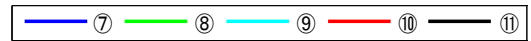
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

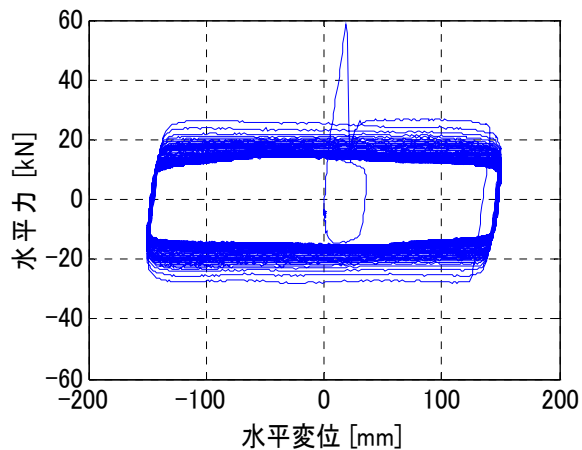


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

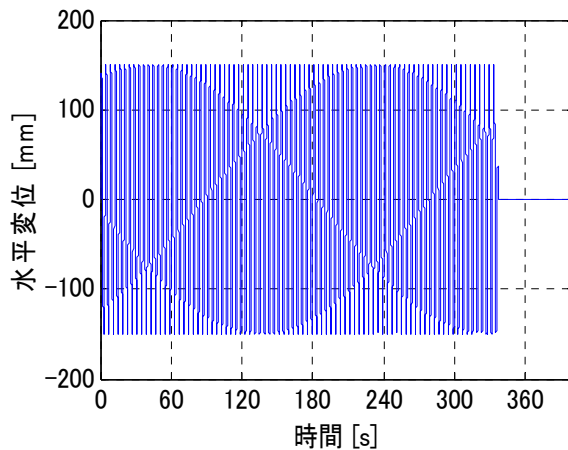


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

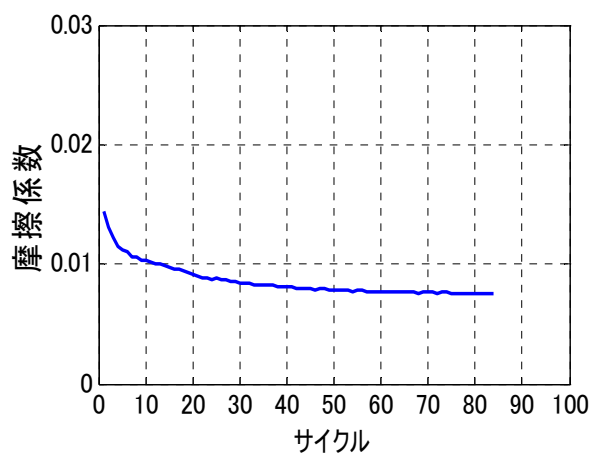
図 1.3.5-52 #1 試験体 2 セット目実験結果概要



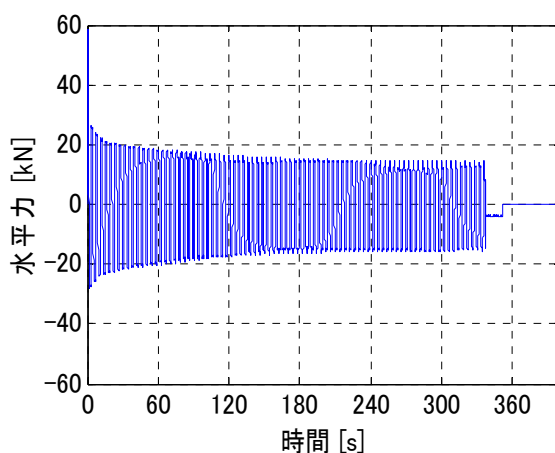
(a) 水平荷重-水平変位関係



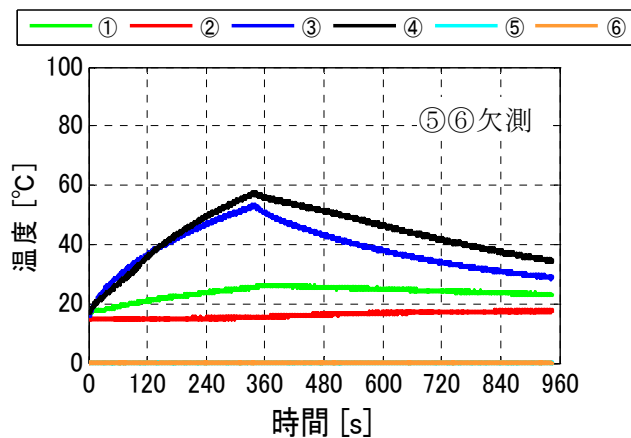
(b) 水平変位時刻歴



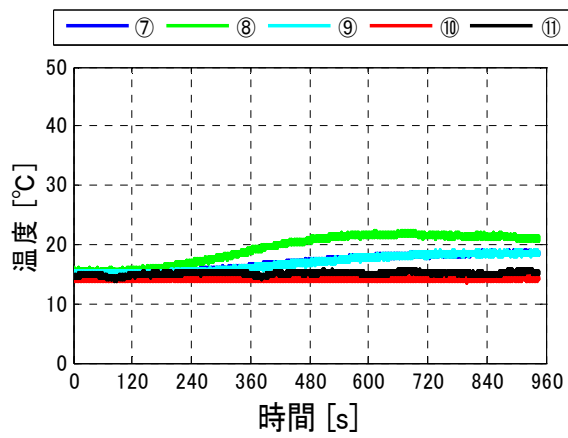
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

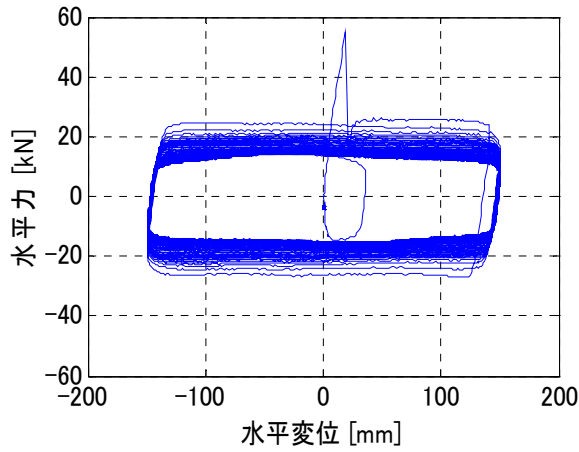


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

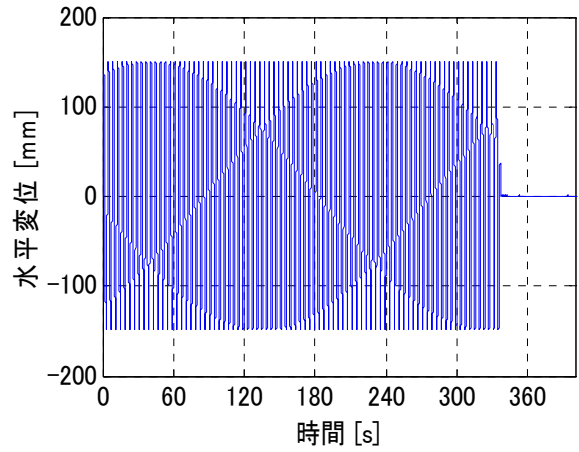


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

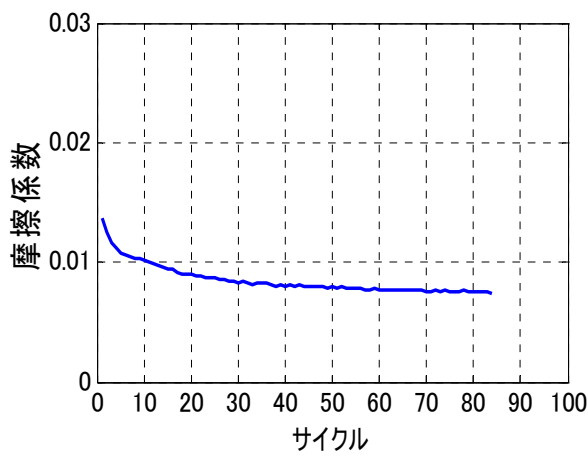
図 1.3.5-53 #1 試験体 3 セット目実験結果概要



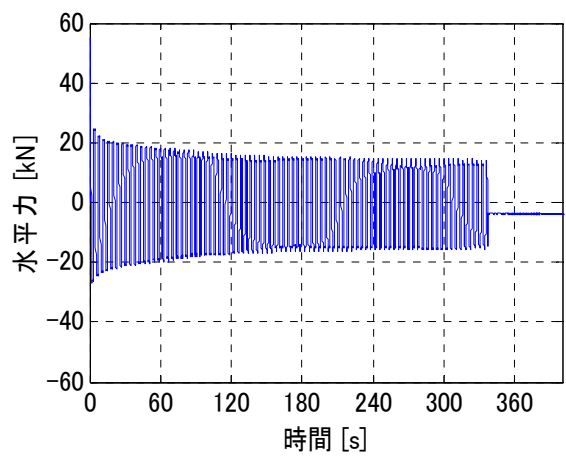
(a) 水平荷重－水平変位関係



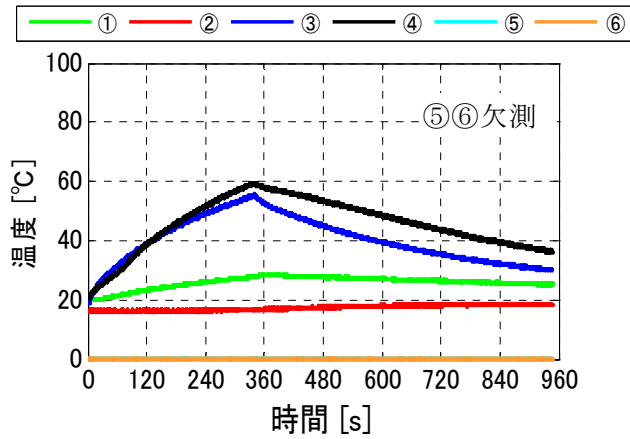
(b) 水平変位時刻歴



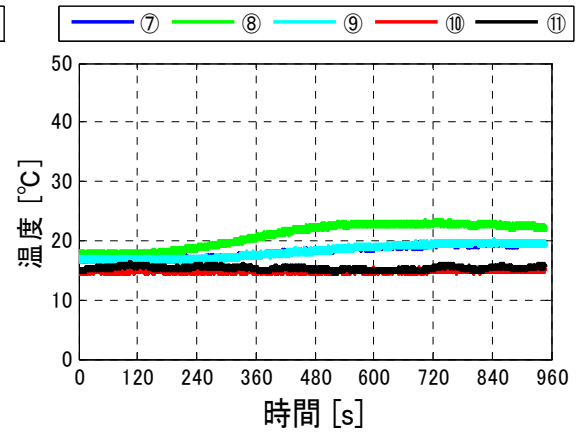
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

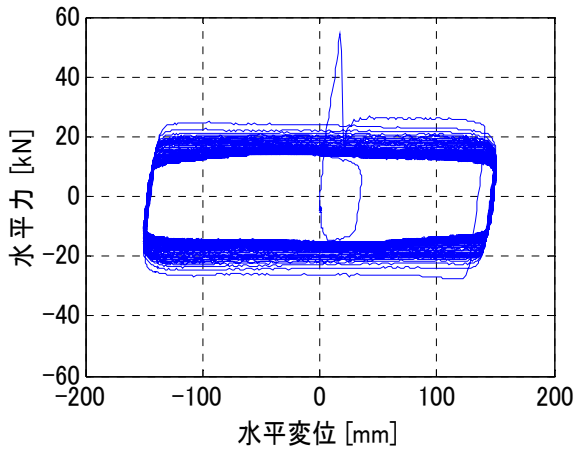


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

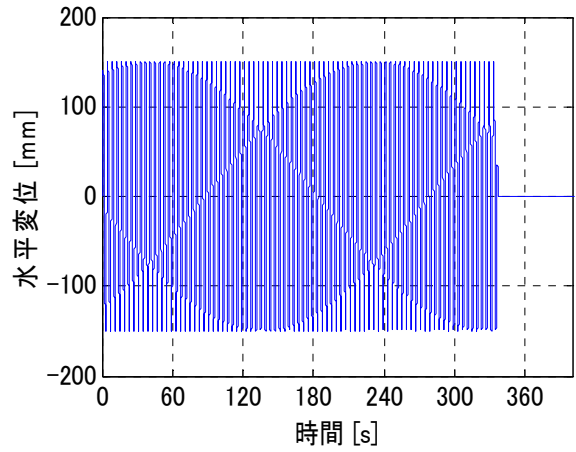


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

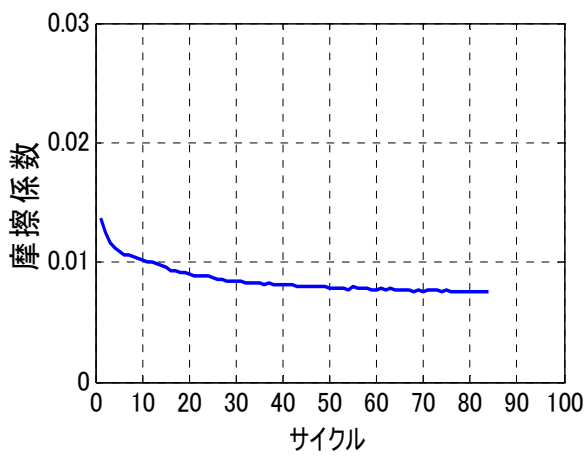
図 1.3.5-54 #1 試験体 4 セット目実験結果概要



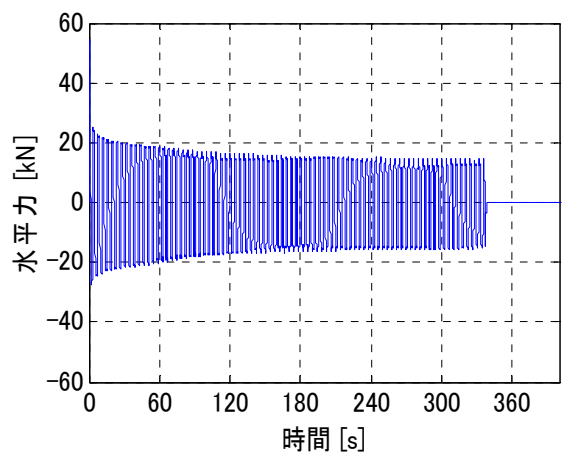
(a) 水平荷重－水平変位関係



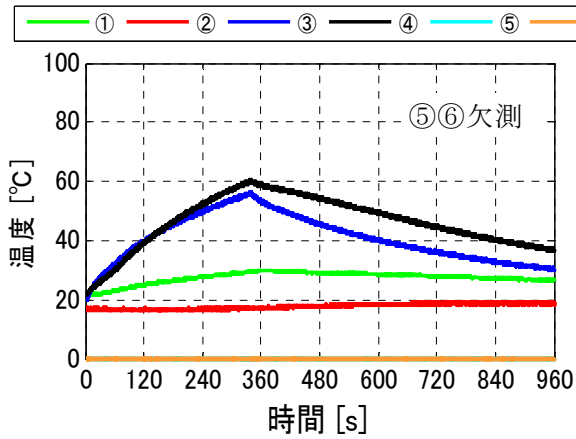
(b) 水平変位時刻歴



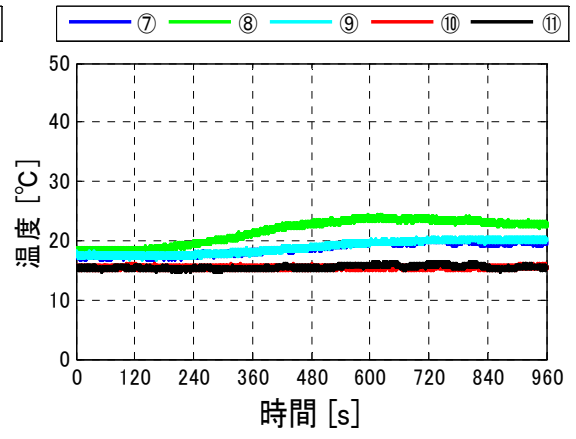
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

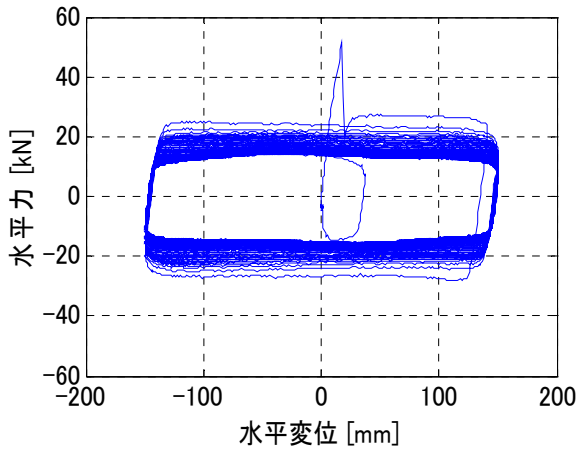


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

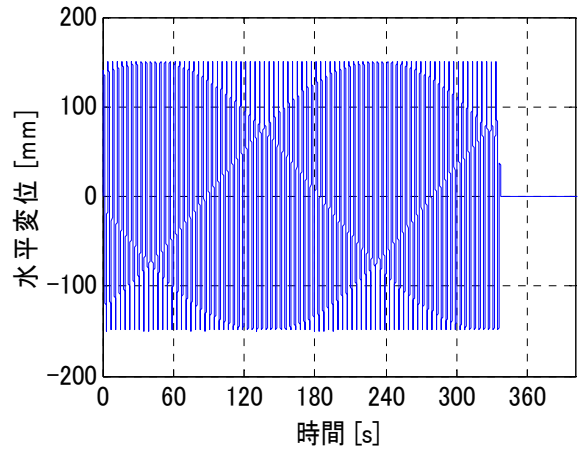


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

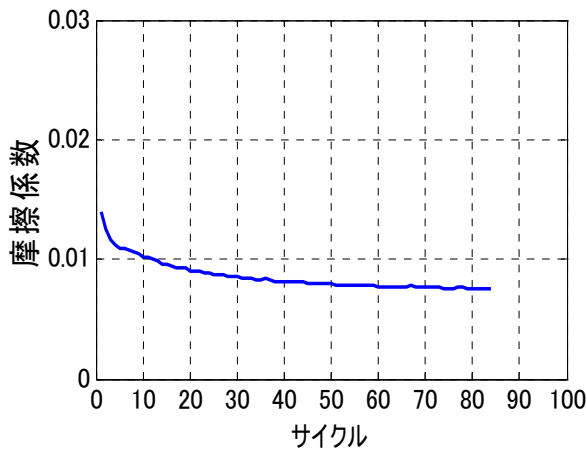
図 1.3.5-55 #1 試験体 5 セット目実験結果概要



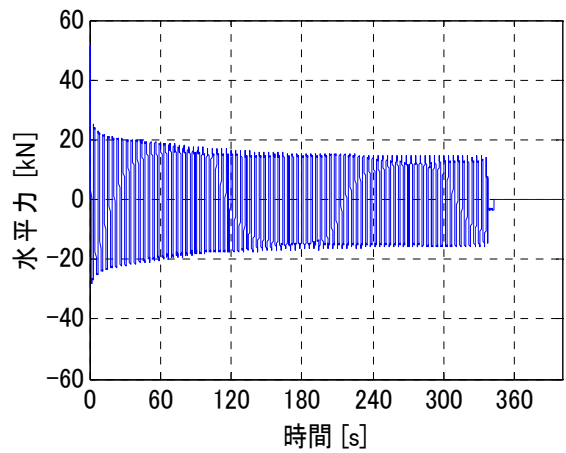
(a) 水平荷重－水平変位関係



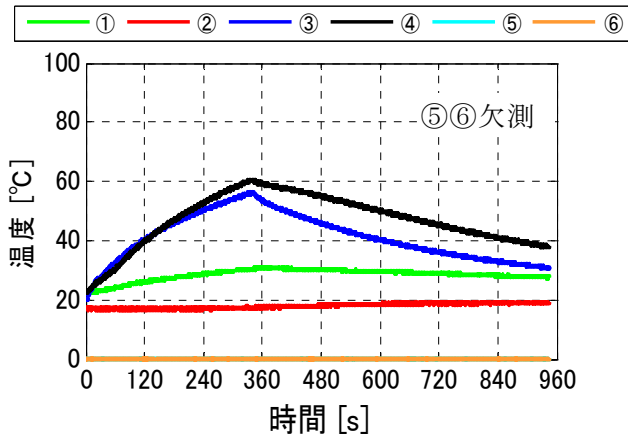
(b) 水平変位時刻歴



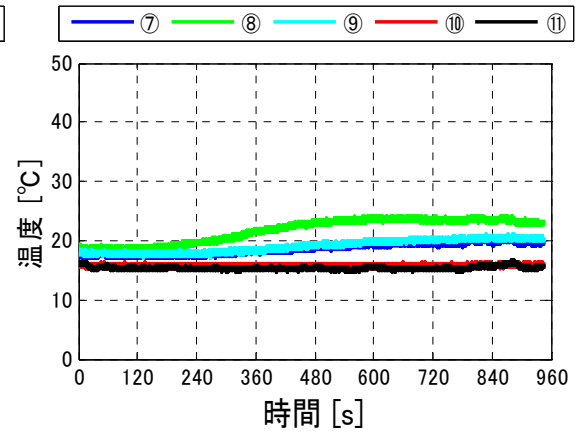
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

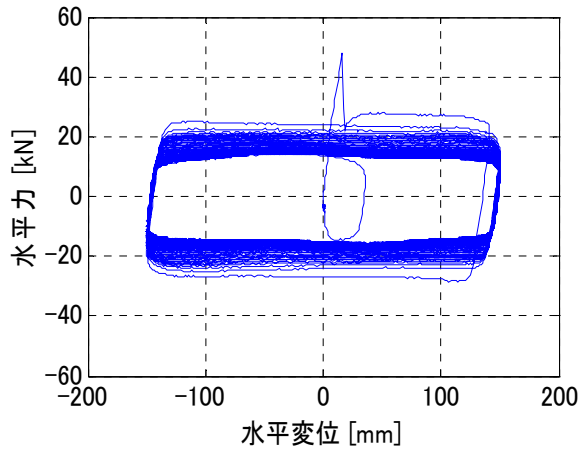


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

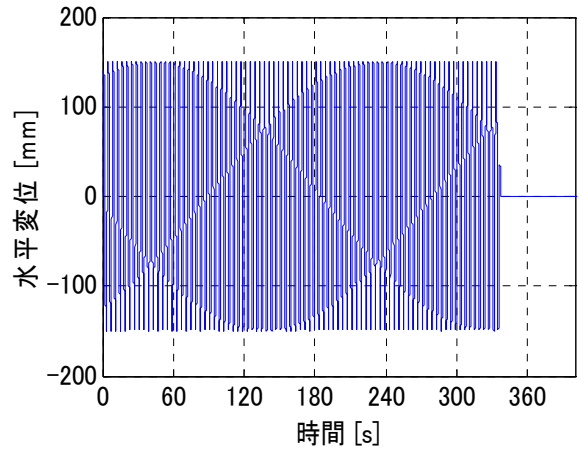


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

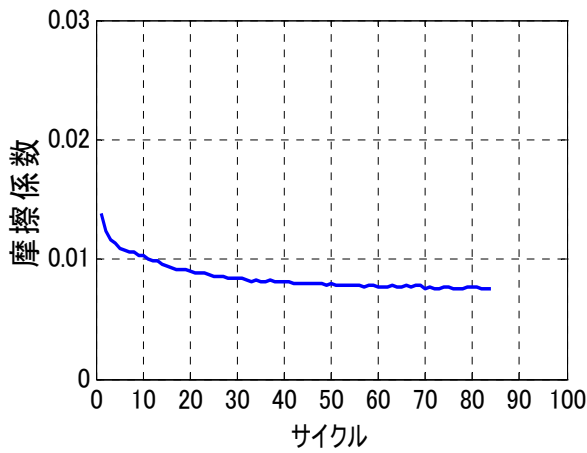
図 1.3.5-56 #1 試験体 6 セット目実験結果概要



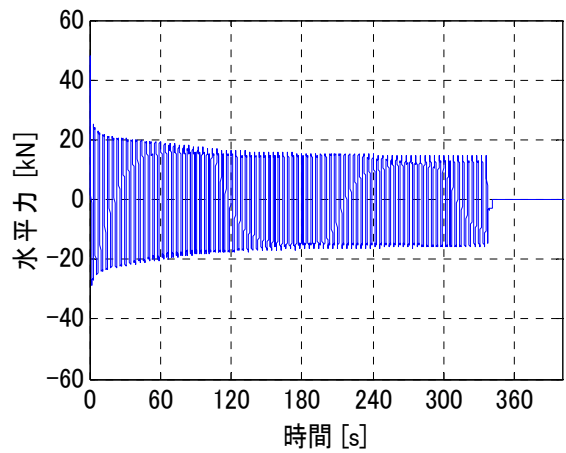
(a) 水平荷重-水平変位関係



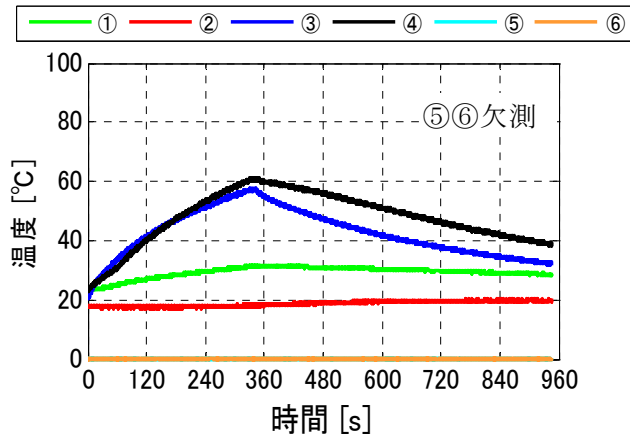
(b) 水平変位時刻歴



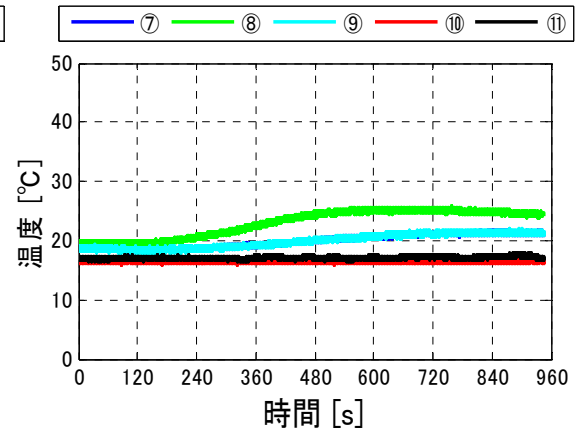
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

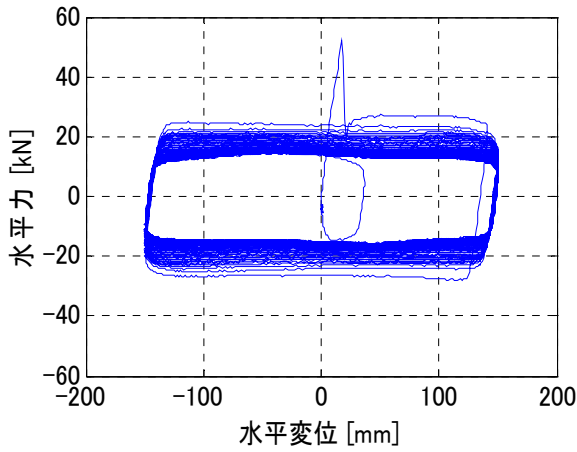


(e) 温度時刻歴 (①~⑥測定点)

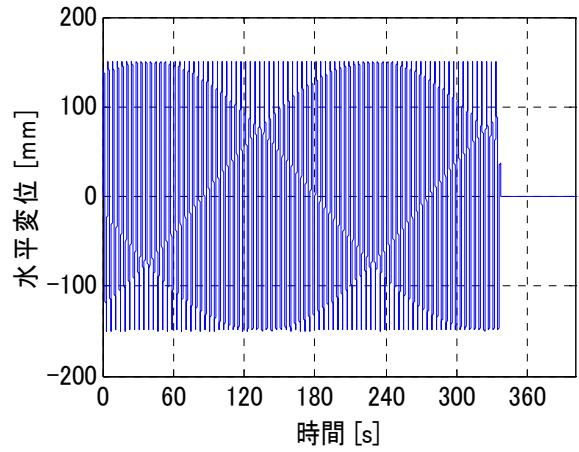


(f) 温度時刻歴 (⑦~⑪測定点)

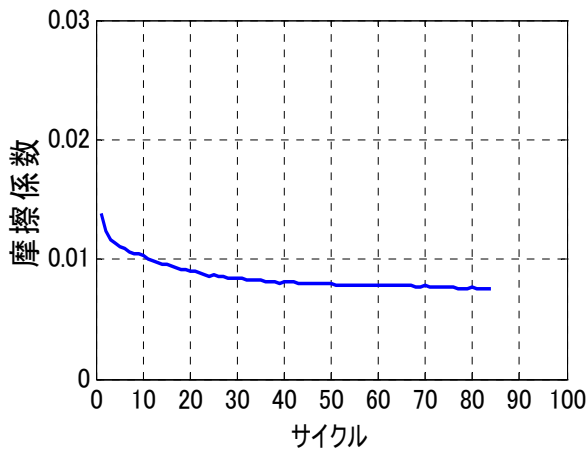
図 1.3.5-57 #1 試験体 7 セット目実験結果概要



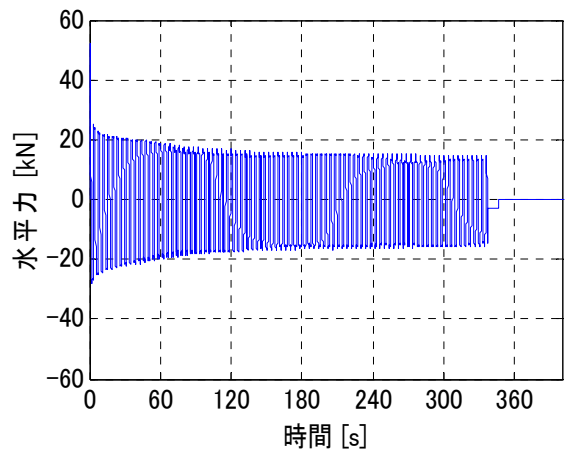
(a) 水平荷重－水平変位関係



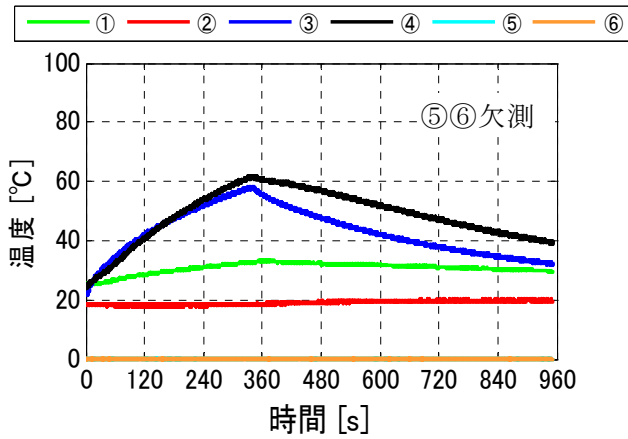
(b) 水平変位時刻歴



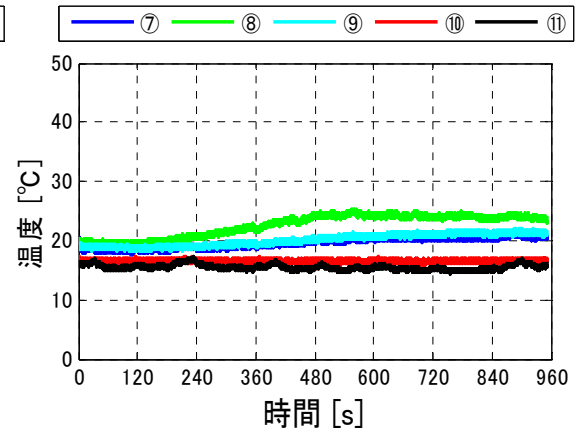
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

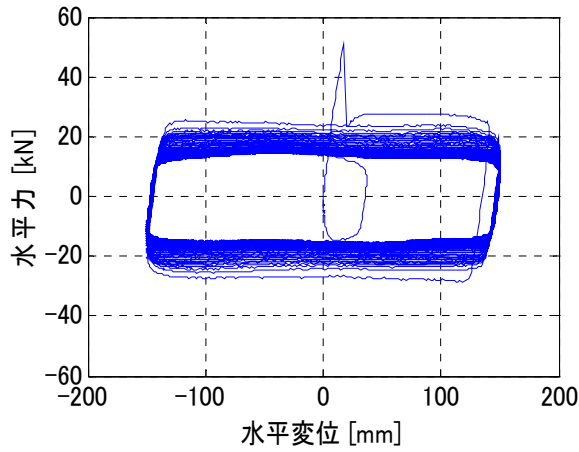


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

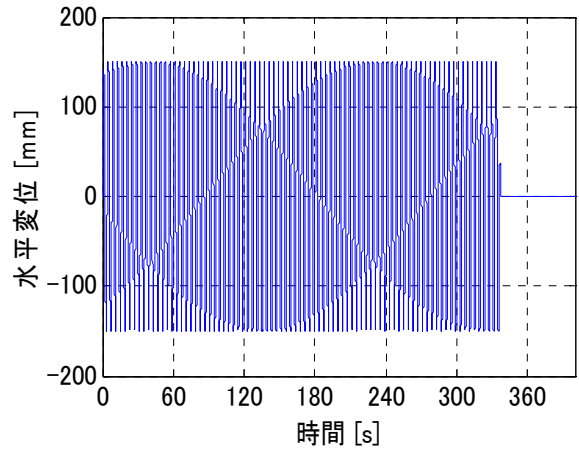


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

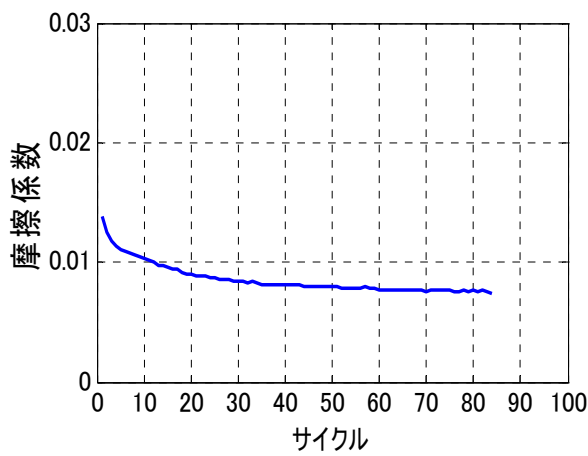
図 1.3.5-58 #1 試験体 8 セット目実験結果概要



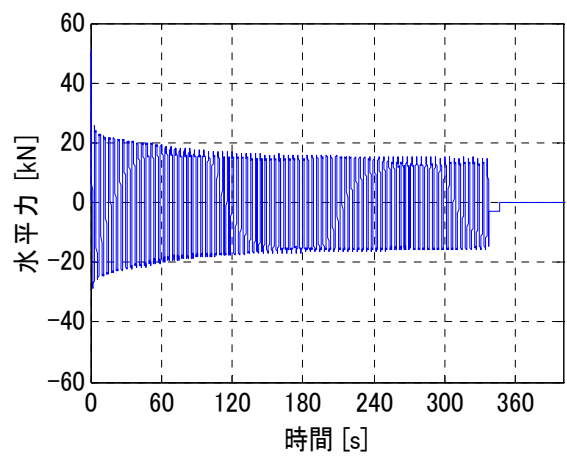
(a) 水平荷重－水平変位関係



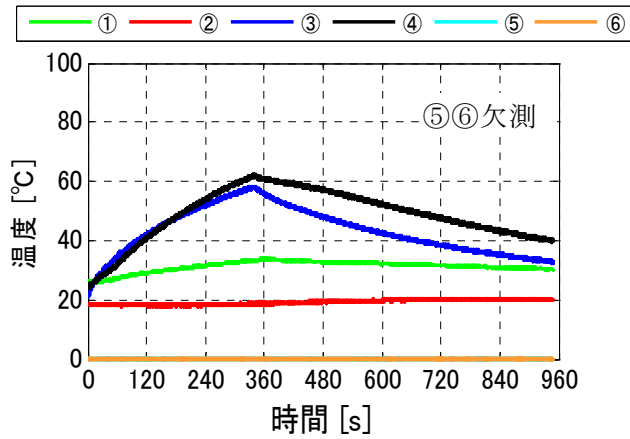
(b) 水平変位時刻歴



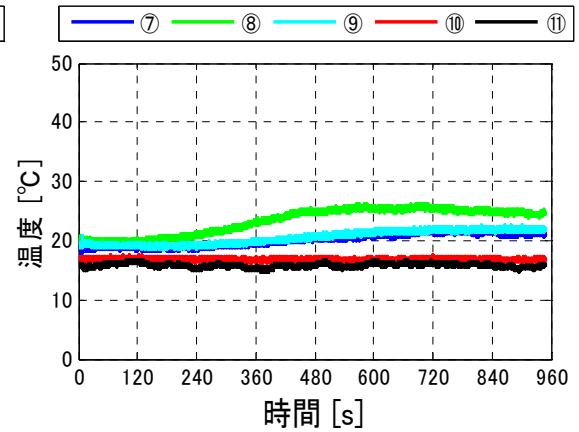
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

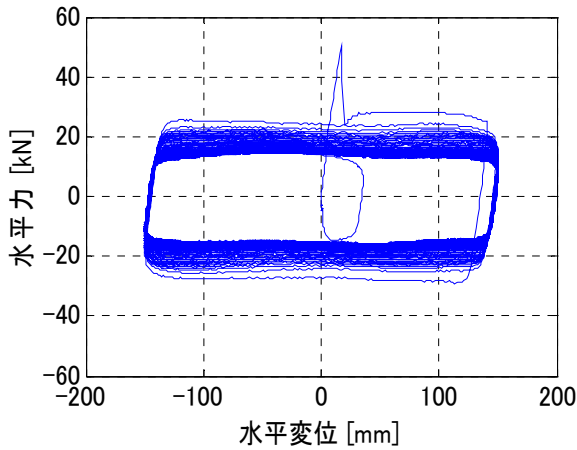


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

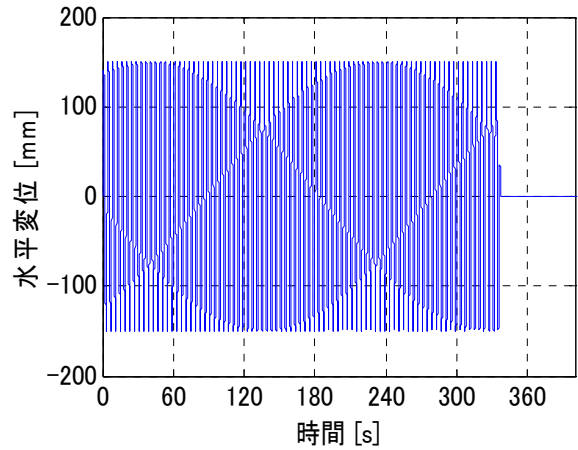


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

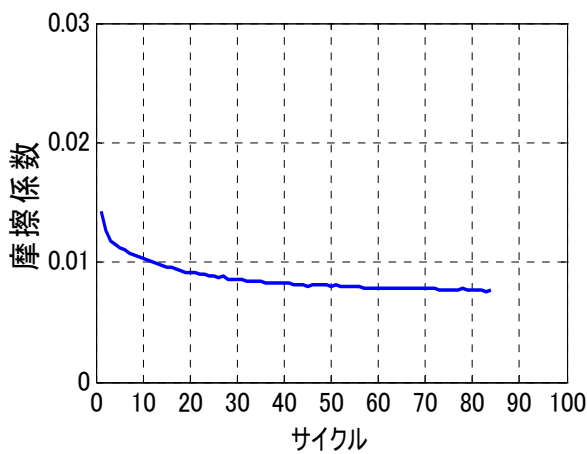
図 1.3.5-59 #1 試験体 9 セット目実験結果概要



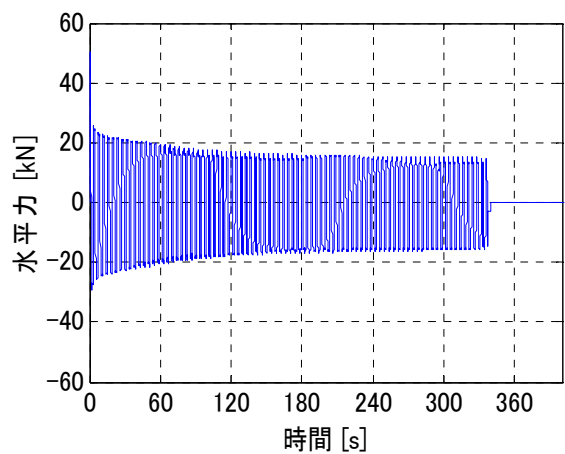
(a) 水平荷重－水平変位関係



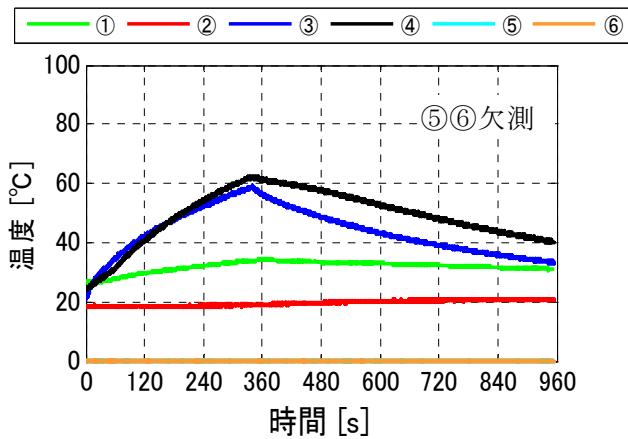
(b) 水平変位時刻歴



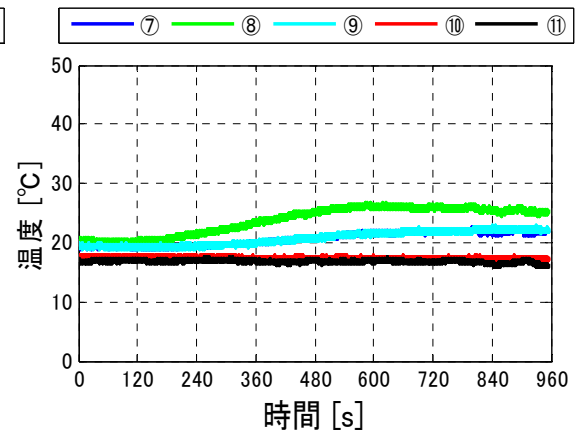
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

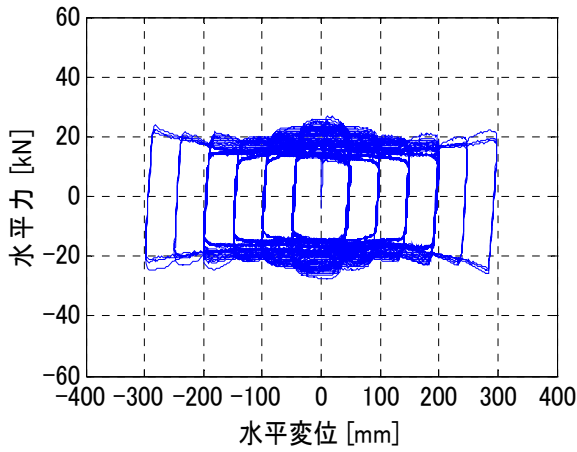


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

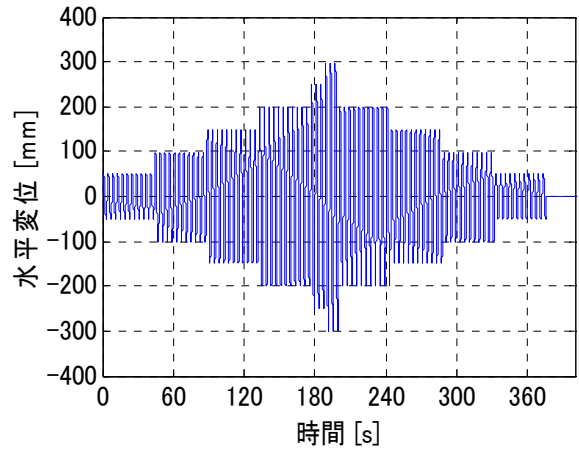


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

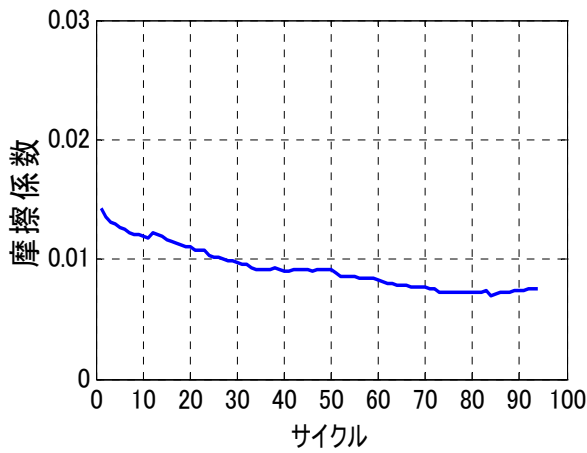
図 1.3.5-60 #1 試験体 10 セット目実験結果概要



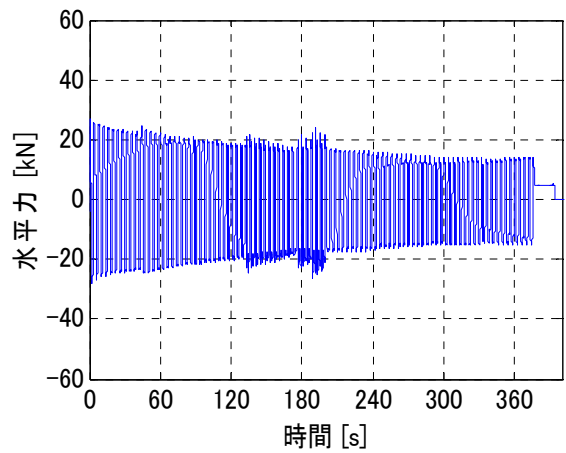
(a) 水平荷重－水平変位関係



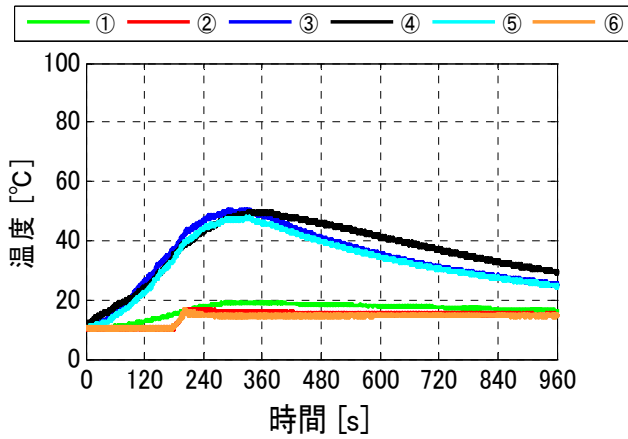
(b) 水平変位時刻歴



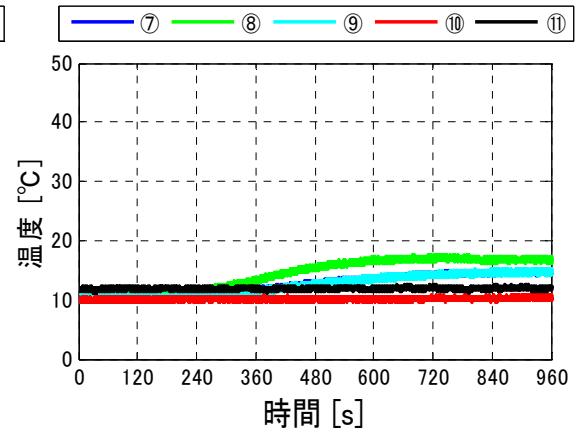
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

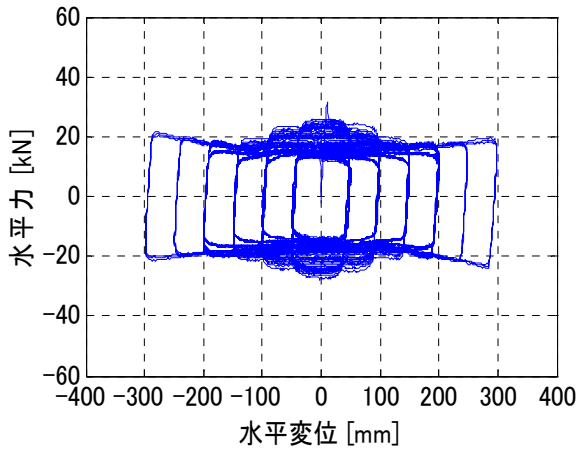


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

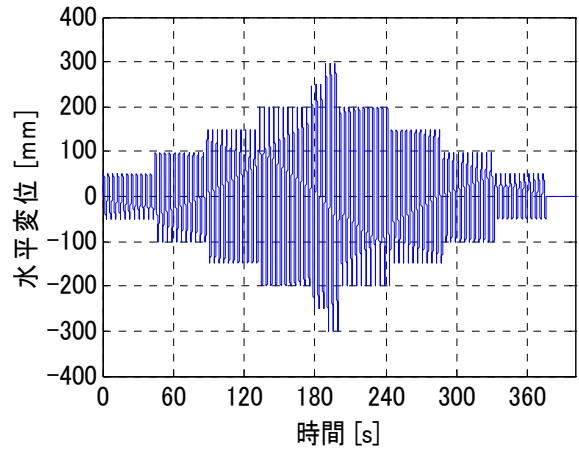


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

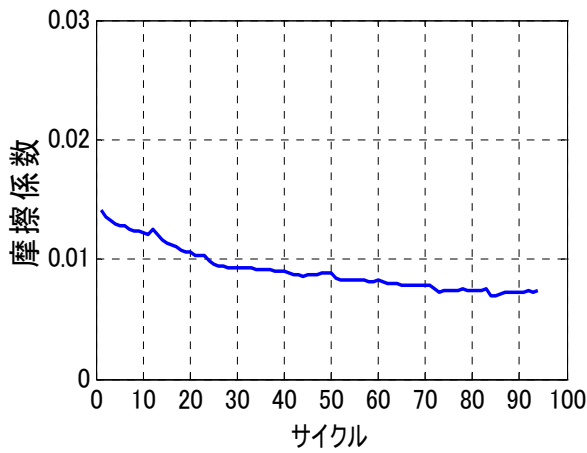
図 1.3.5-61 #2 試験体 1 セット目実験結果概要



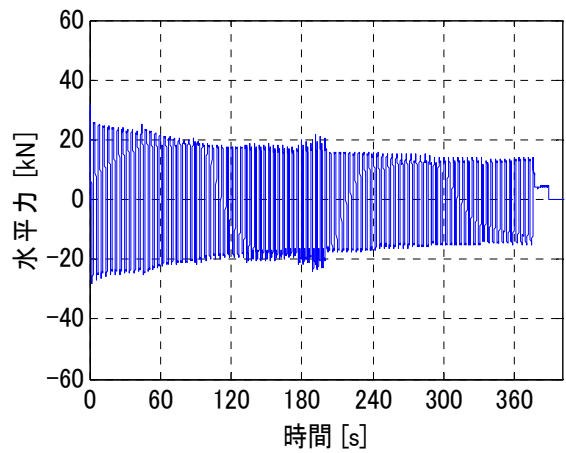
(a) 水平荷重-水平変位関係



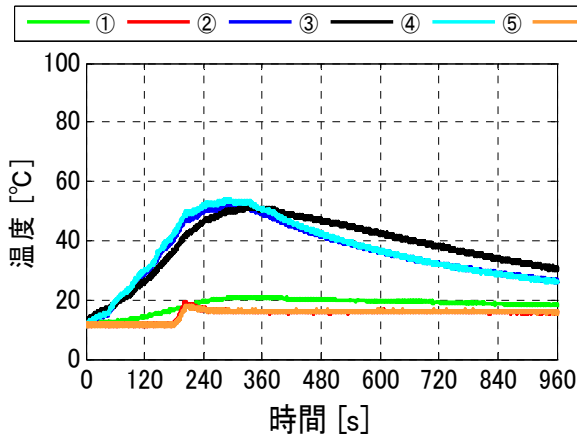
(b) 水平変位時刻歴



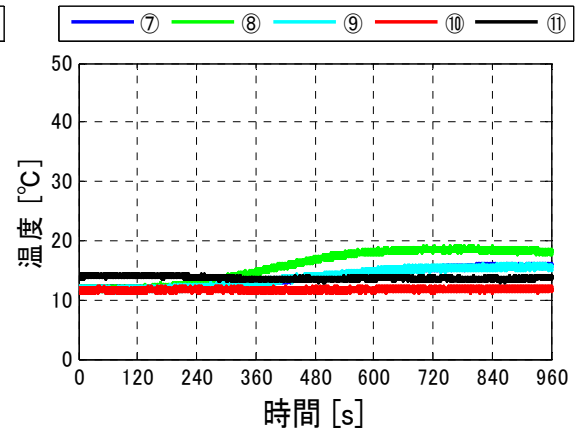
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

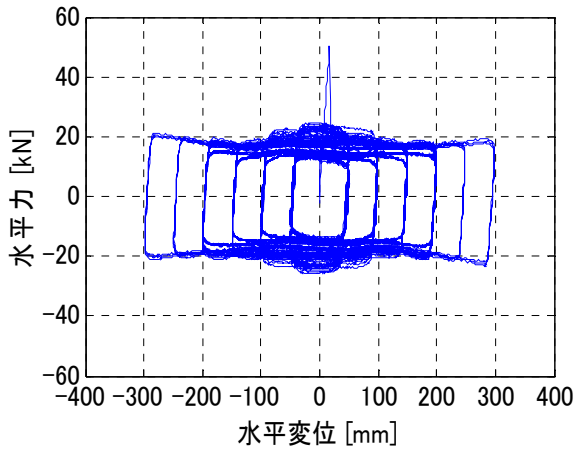


(e) 温度時刻歴 (①~⑥測定点)

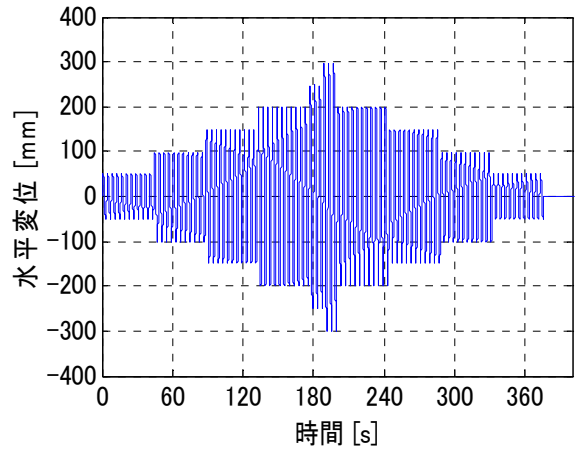


(f) 温度時刻歴 (⑦~⑪測定点)

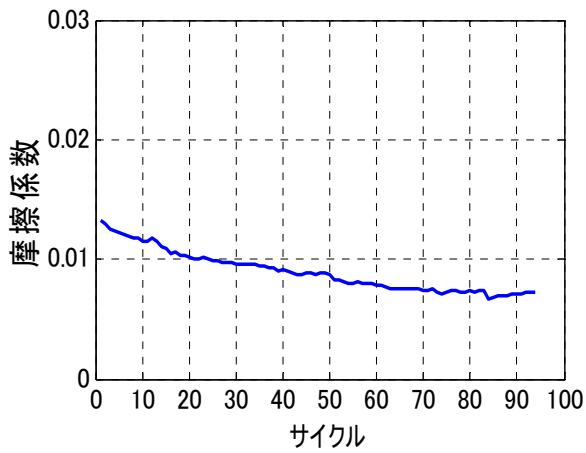
図 1.3.5-62 #2 試験体 2 セット目実験結果概要



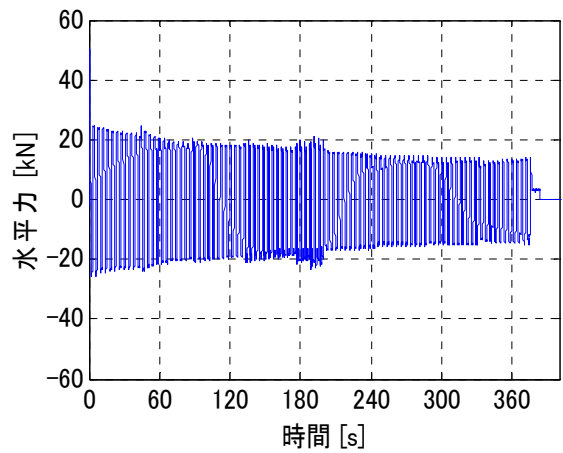
(a) 水平荷重-水平変位関係



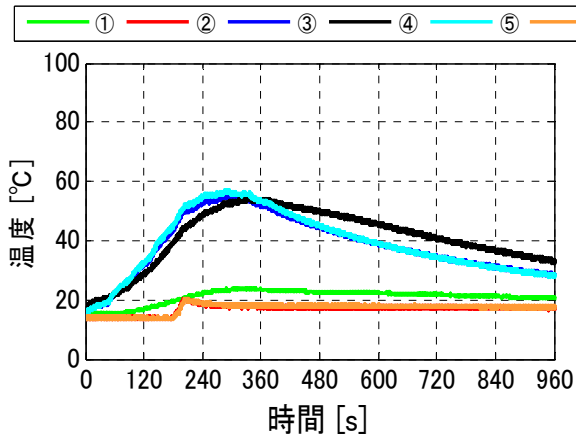
(b) 水平変位時刻歴



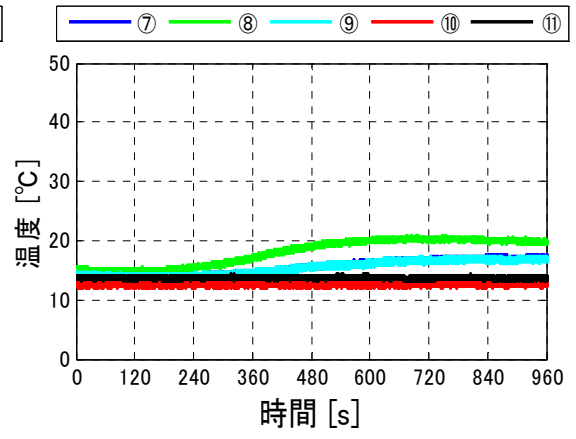
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

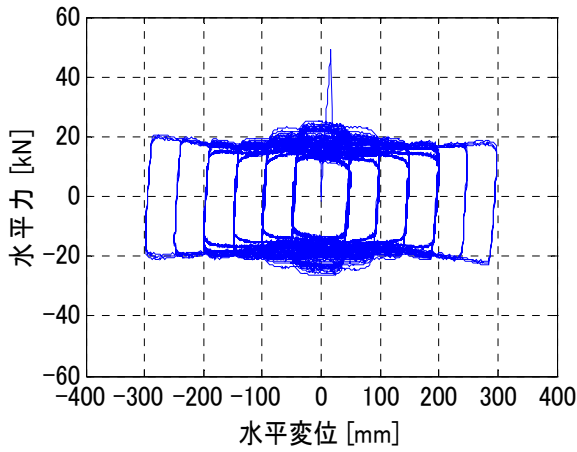


(e) 温度時刻歴 (①~⑥測定点)

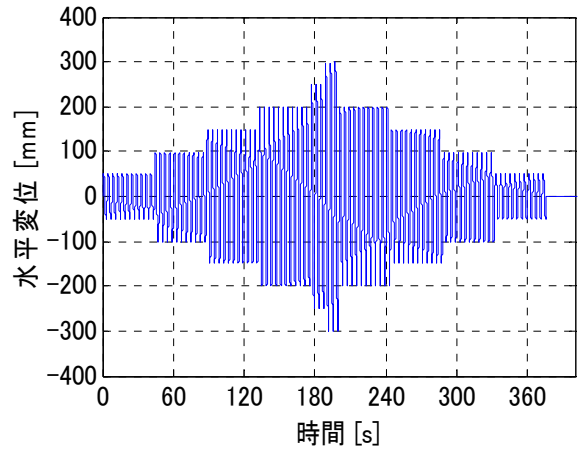


(f) 温度時刻歴 (⑦~⑪測定点)

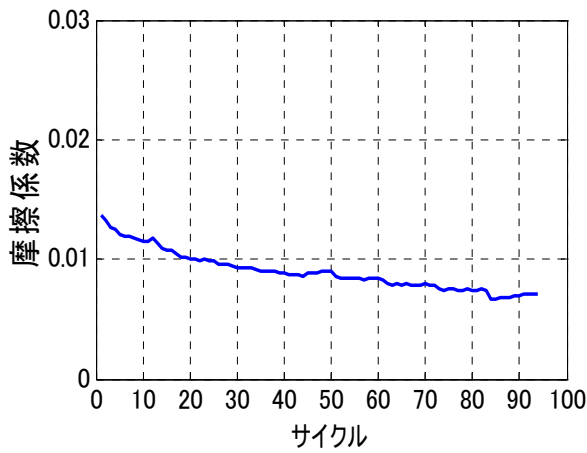
図 1.3.5-63 #2 試験体 3 セット目実験結果概要



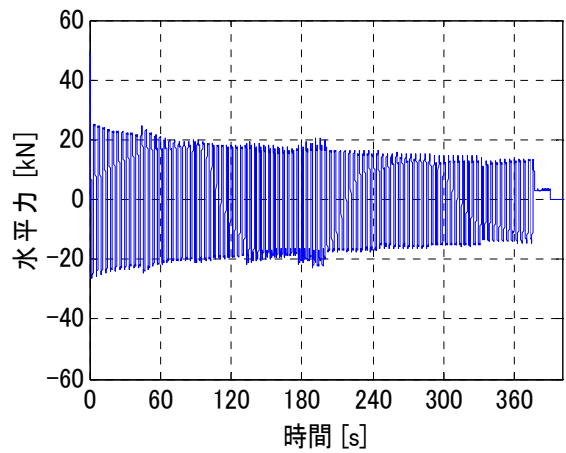
(a) 水平荷重-水平変位関係



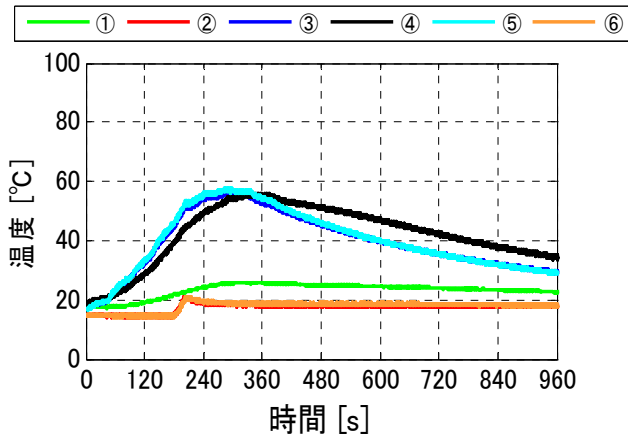
(b) 水平変位時刻歴



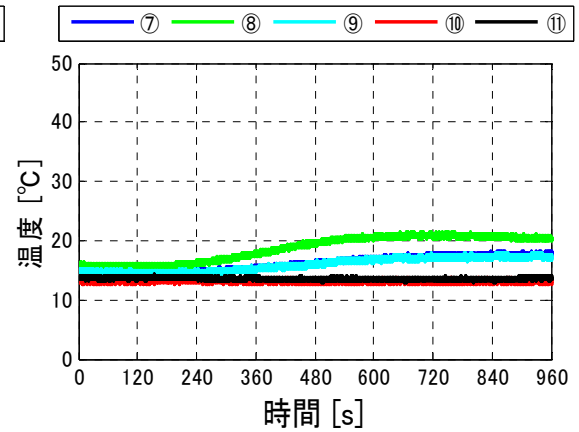
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

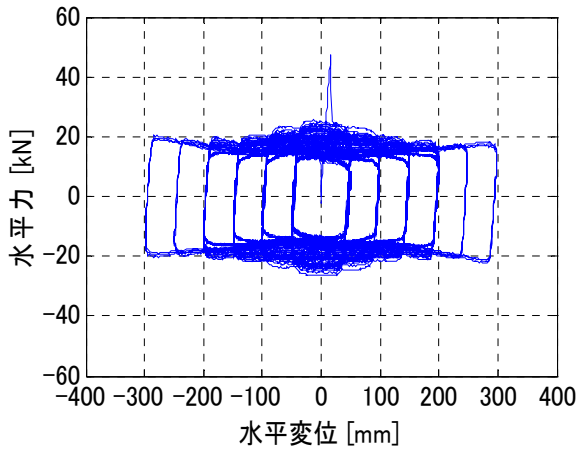


(e) 温度時刻歴 (①~⑥測定点)

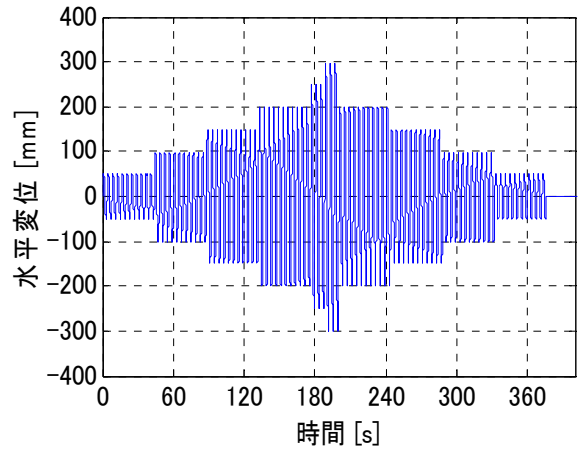


(f) 温度時刻歴 (⑦~⑪測定点)

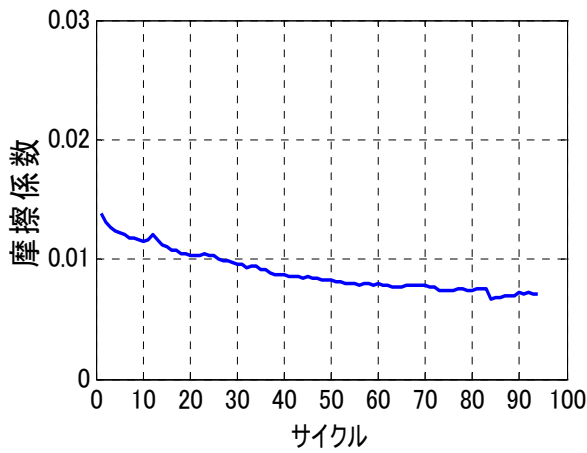
図 1.3.5-64 #2 試験体 4 セット目実験結果概要



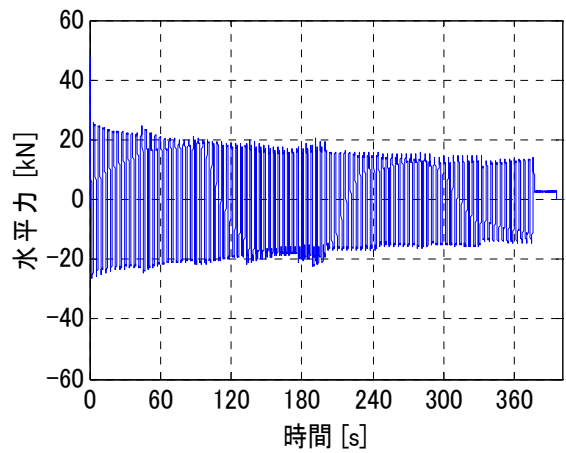
(a) 水平荷重－水平変位関係



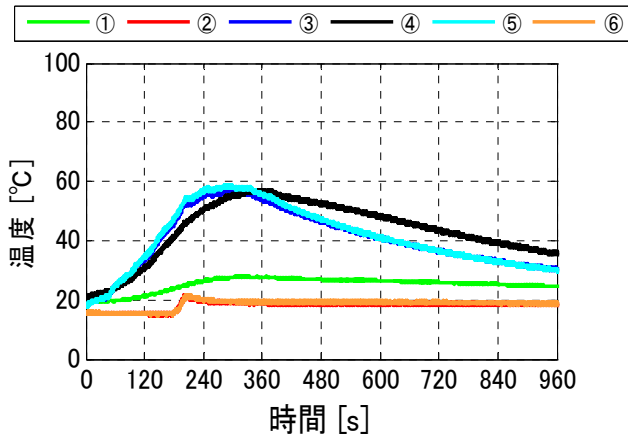
(b) 水平変位時刻歴



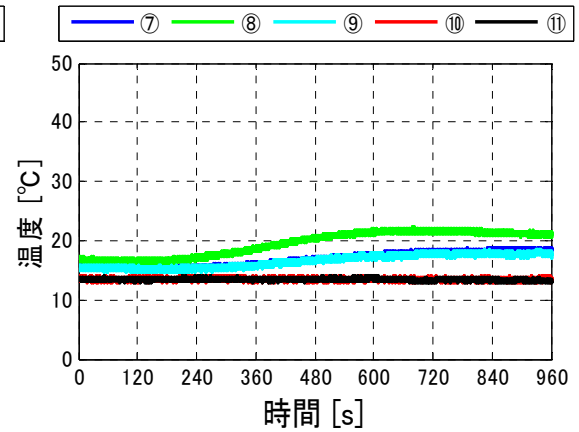
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

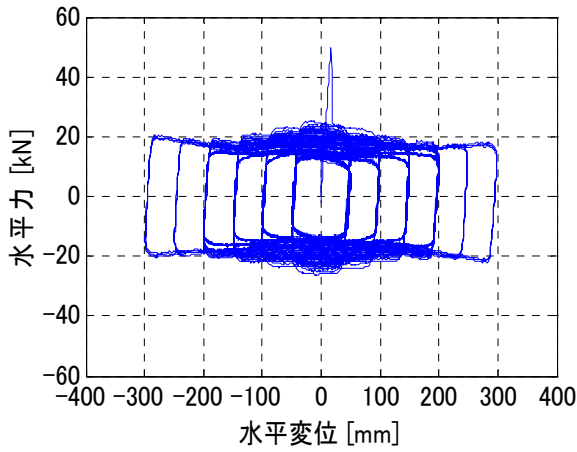


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

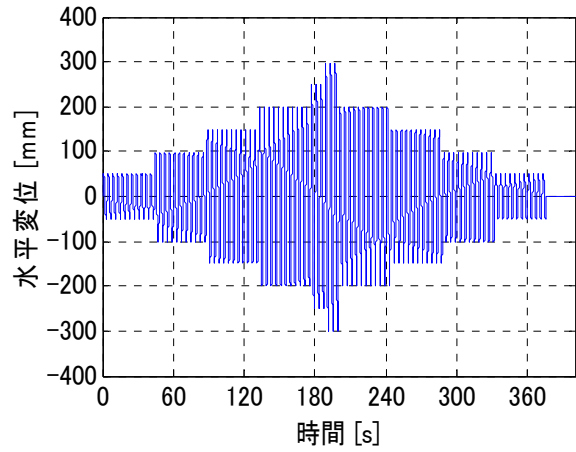


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

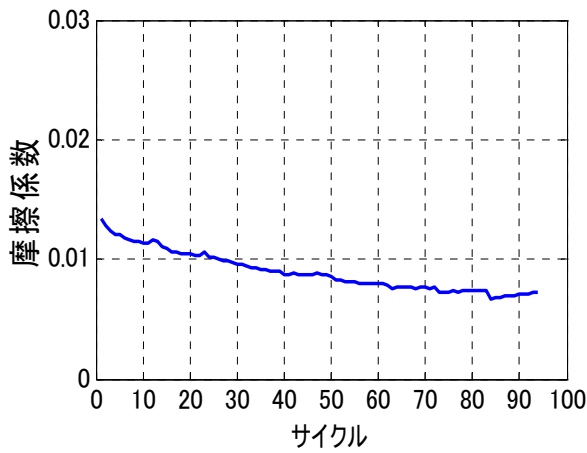
図 1.3.5-65 #2 試験体 5 セット目実験結果概要



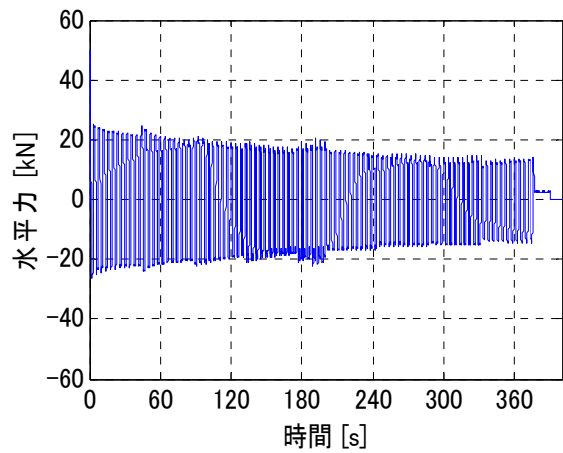
(a) 水平荷重-水平変位関係



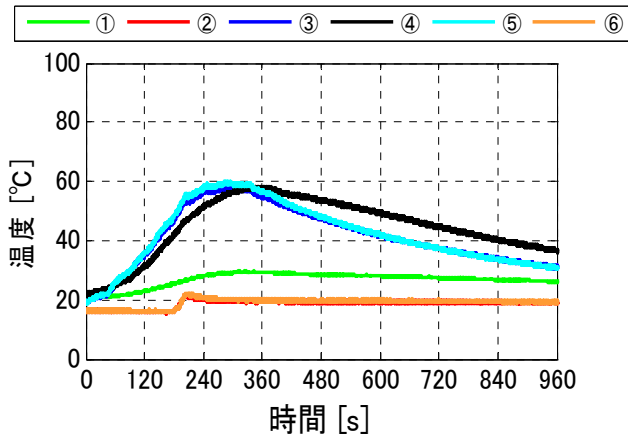
(b) 水平変位時刻歴



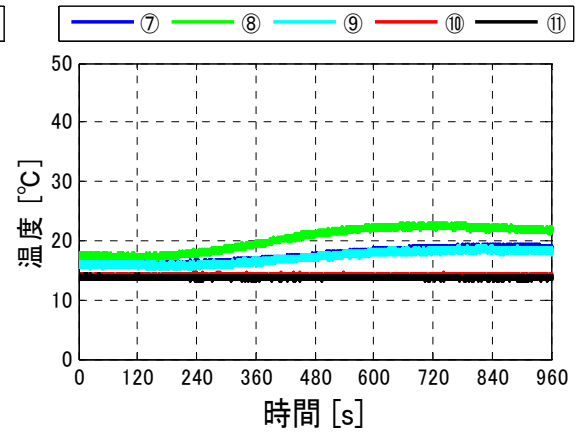
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

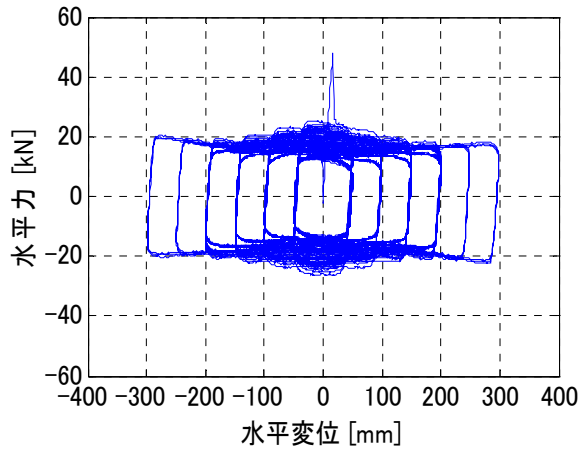


(e) 温度時刻歴 (①~⑥測定点)

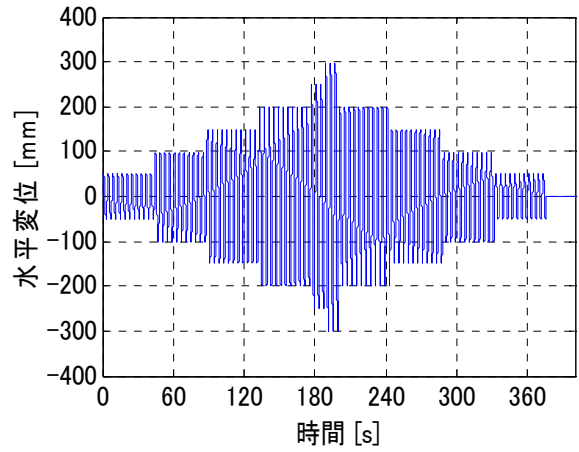


(f) 温度時刻歴 (⑦~⑪測定点)

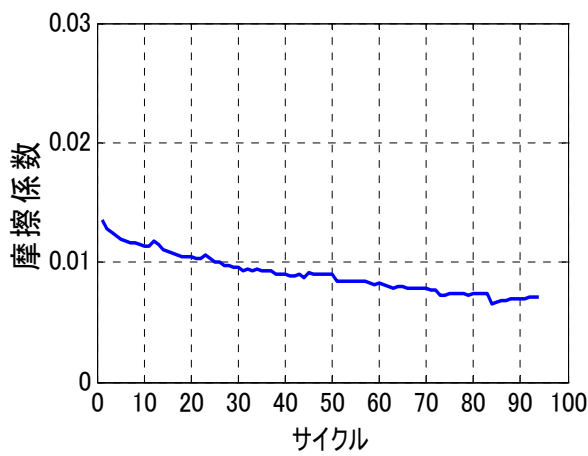
図 1.3.5-66 #2 試験体 6 セット目実験結果概要



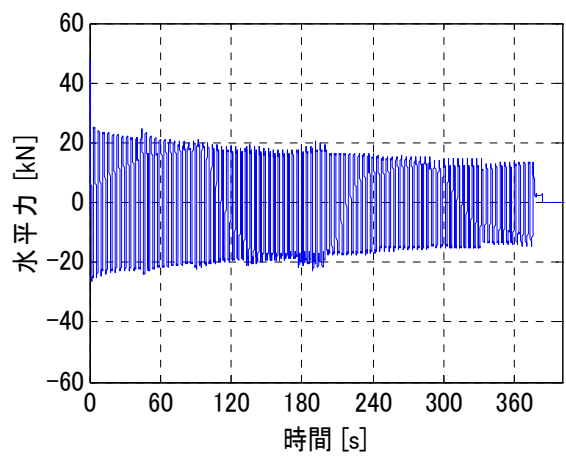
(a) 水平荷重-水平変位関係



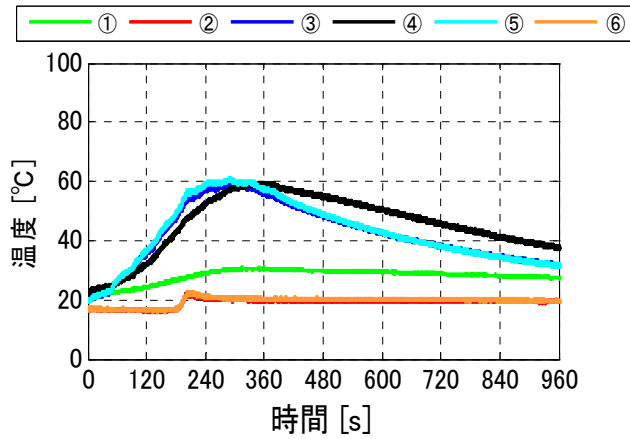
(b) 水平変位時刻歴



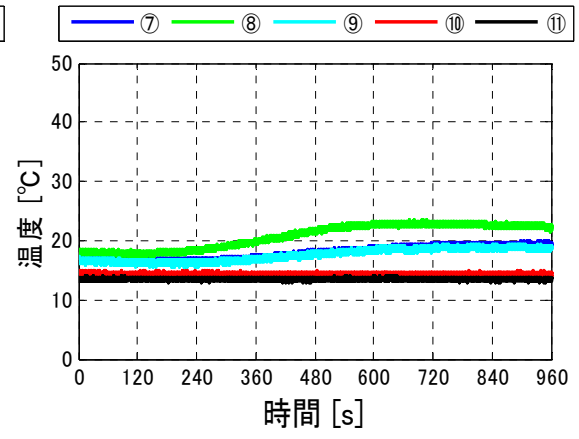
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

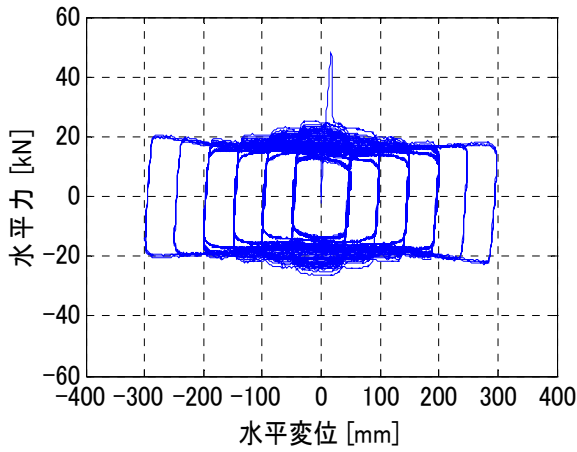


(e) 温度時刻歴 (①~⑥測定点)

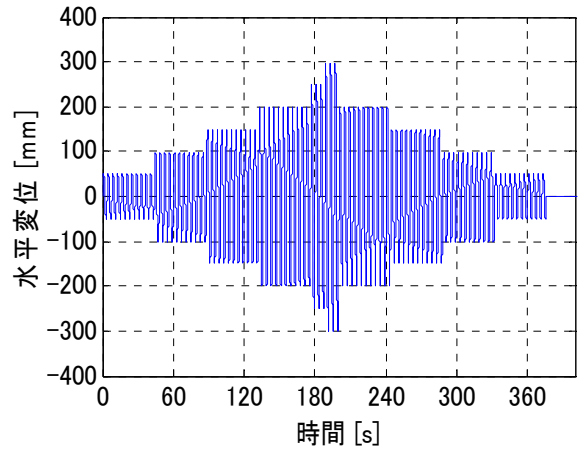


(f) 温度時刻歴 (⑦~⑪測定点)

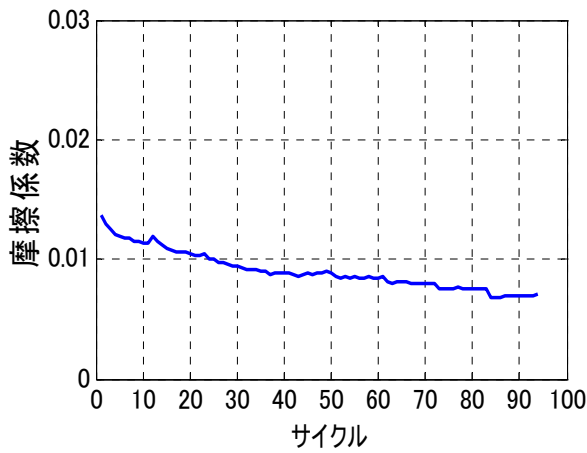
図 1.3.5-67 #2 試験体 7セット目実験結果概要



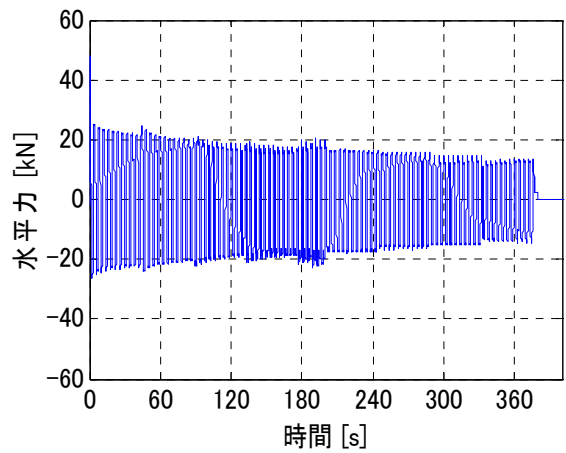
(a) 水平荷重-水平変位関係



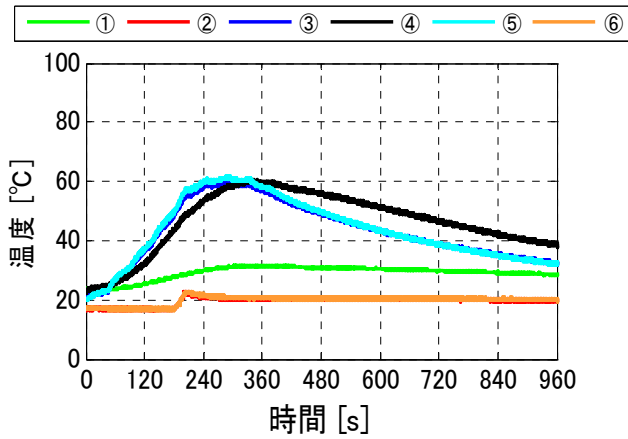
(b) 水平変位時刻歴



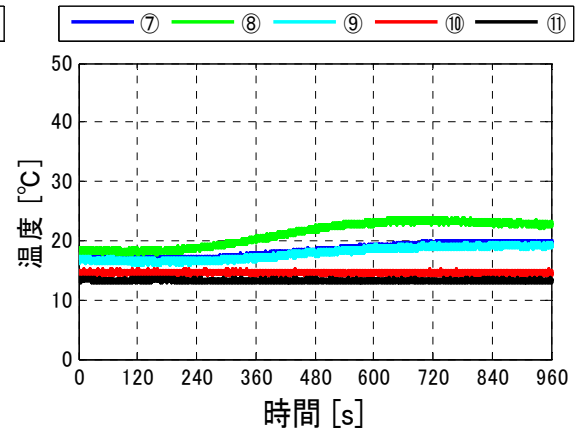
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

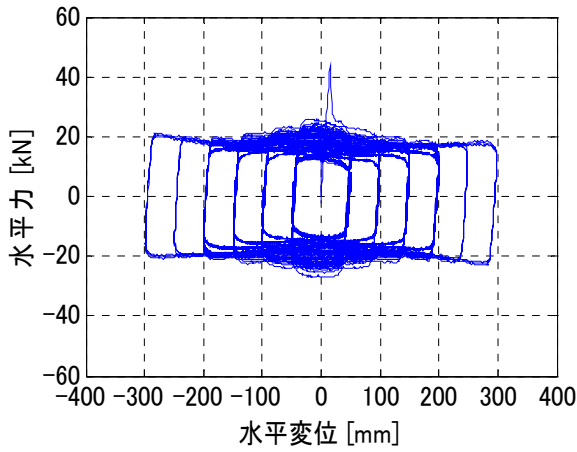


(e) 温度時刻歴 (①~⑥測定点)

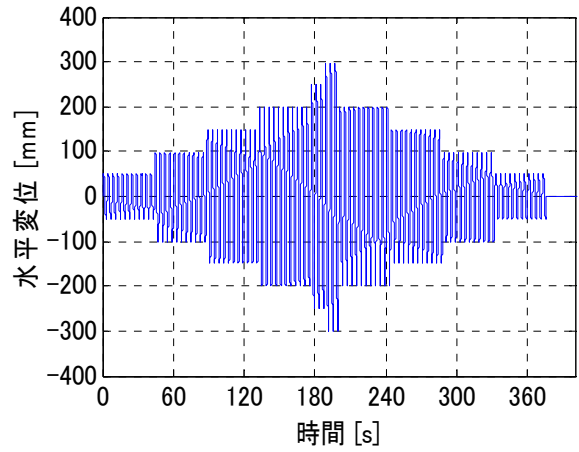


(f) 温度時刻歴 (⑦~⑪測定点)

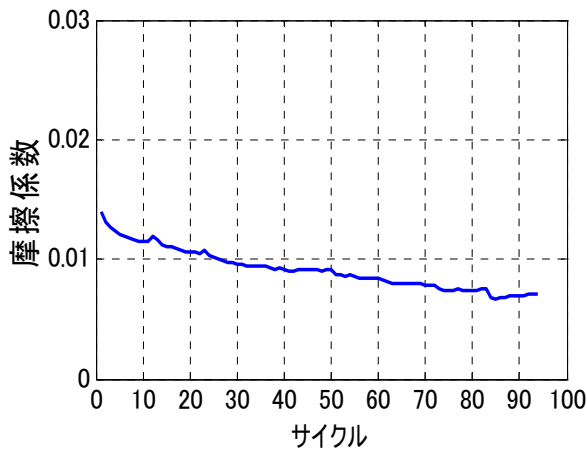
図 1.3.5-68 #2 試験体 8 セット目実験結果概要



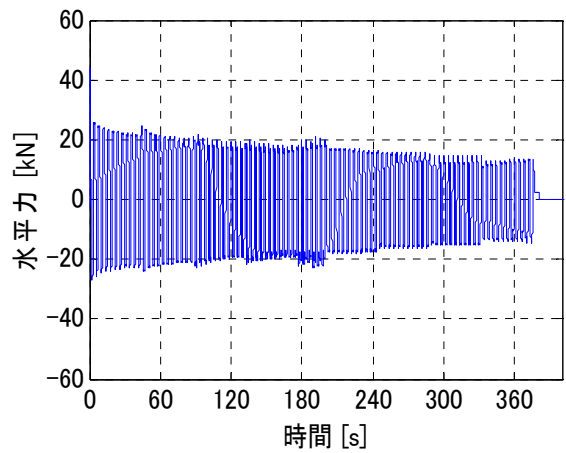
(a) 水平荷重-水平変位関係



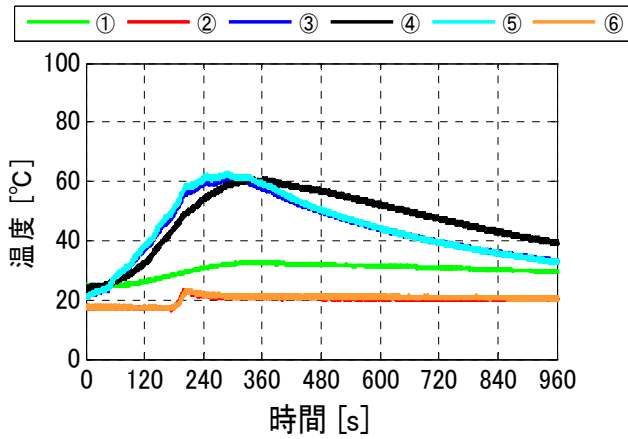
(b) 水平変位時刻歴



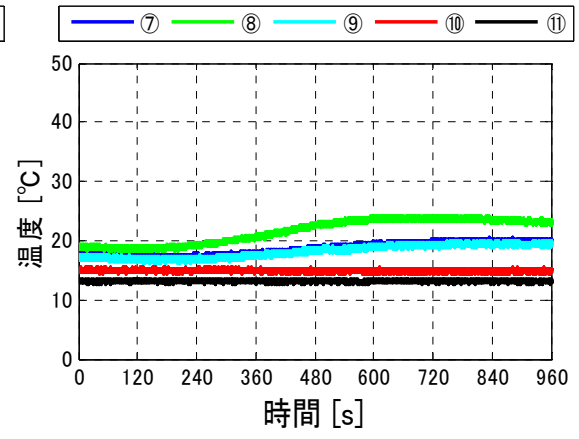
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

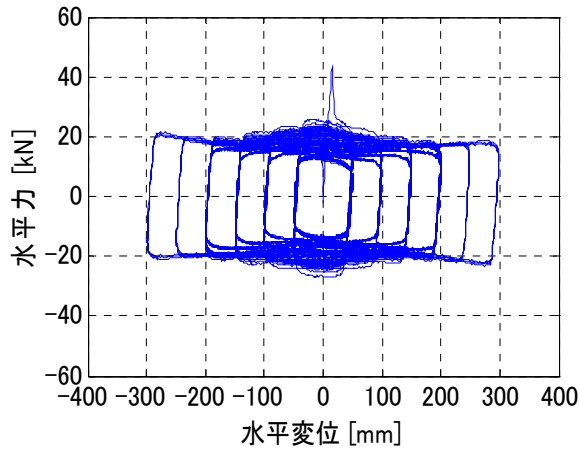


(e) 温度時刻歴 (①~⑥測定点)

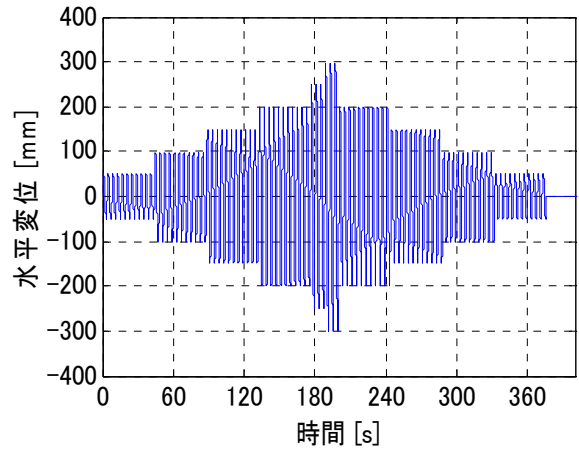


(f) 温度時刻歴 (⑦~⑪測定点)

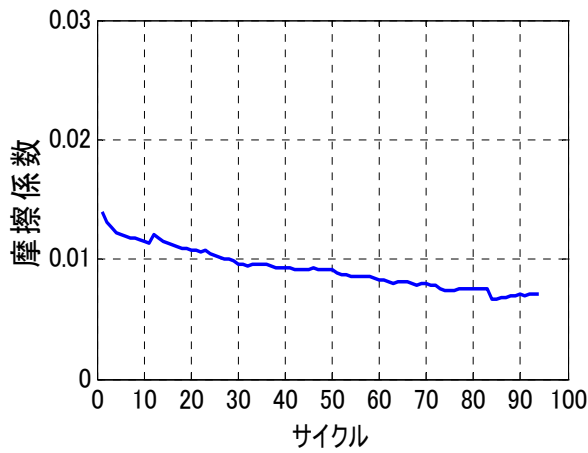
図 1.3.5-69 #2 試験体 9 セット目実験結果概要



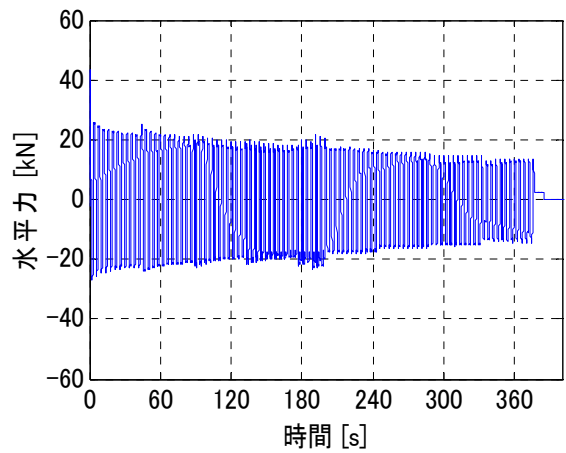
(a) 水平荷重-水平変位関係



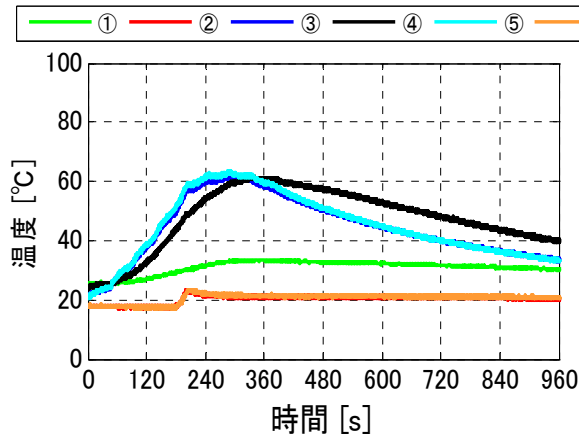
(b) 水平変位時刻歴



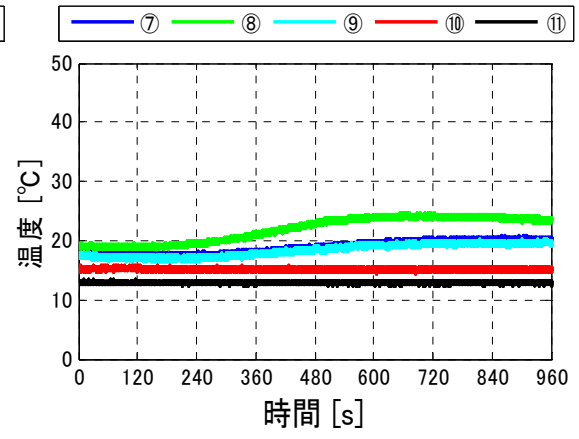
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

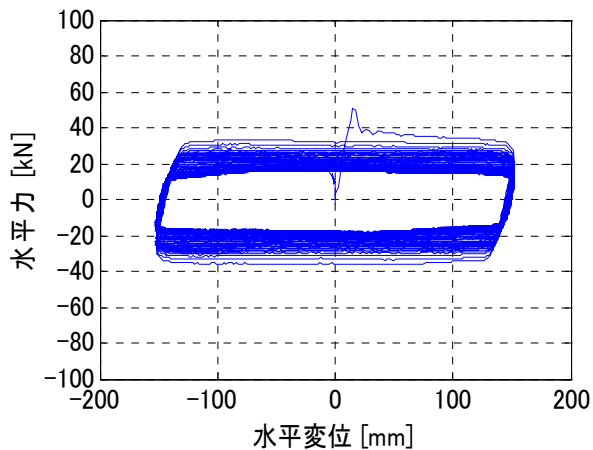


(e) 温度時刻歴 (①~⑥測定点)

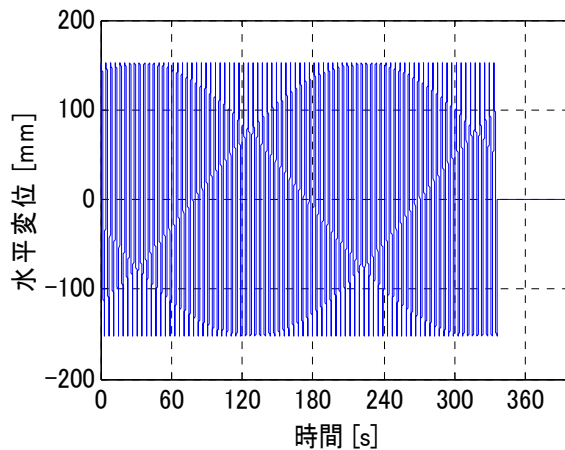


(f) 温度時刻歴 (⑦~⑪測定点)

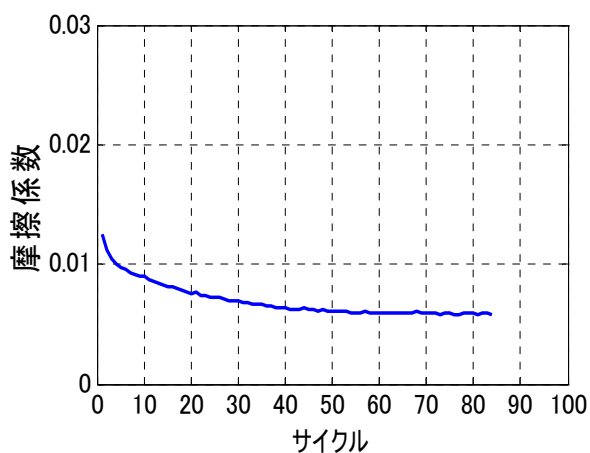
図 1.3.5-70 #2 試験体 10 セット目実験結果概要



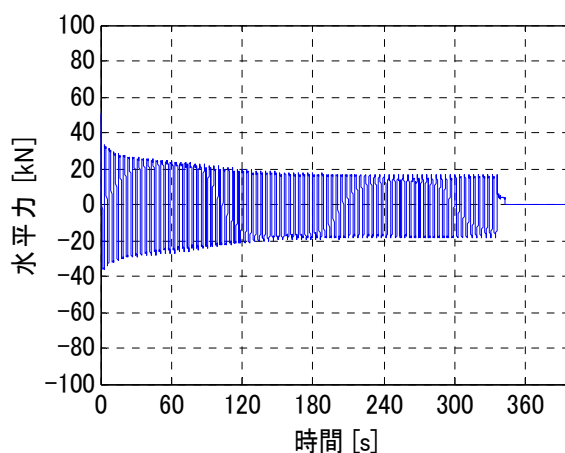
(a) 水平荷重-水平変位関係



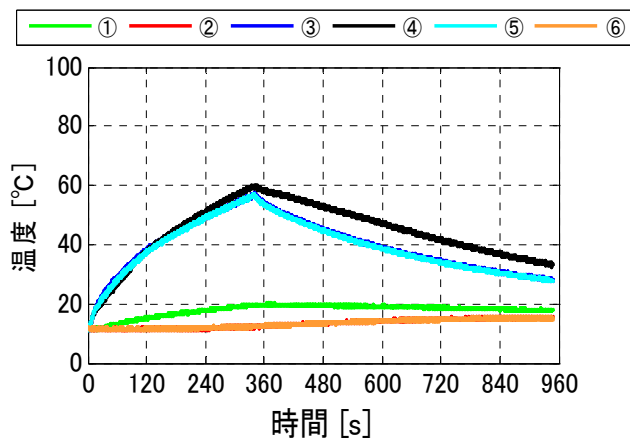
(b) 水平変位時刻歴



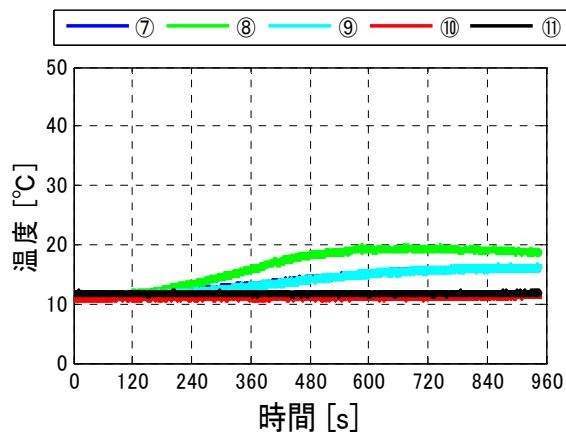
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

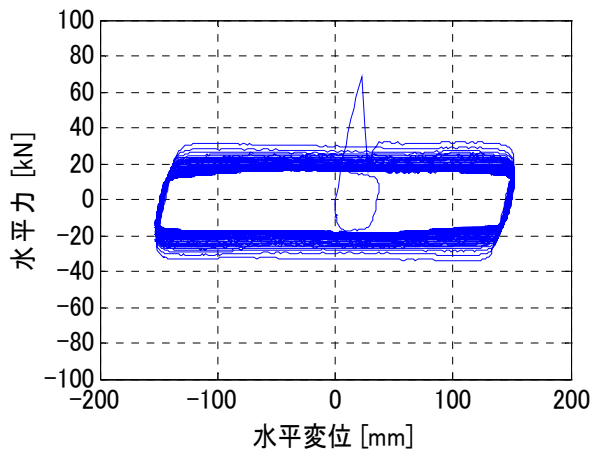


(e) 温度時刻歴 (①~⑥測定点)

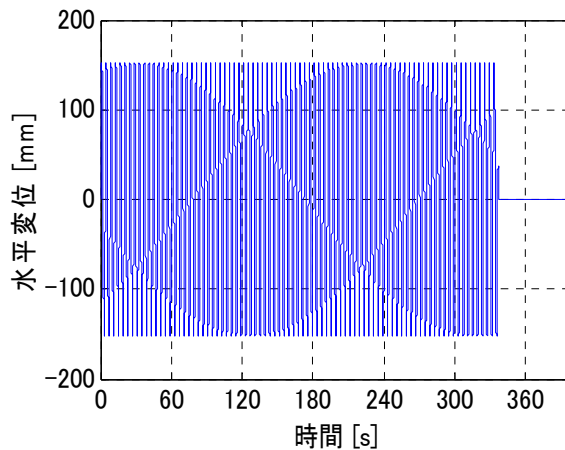


(f) 温度時刻歴 (⑦~⑪測定点)

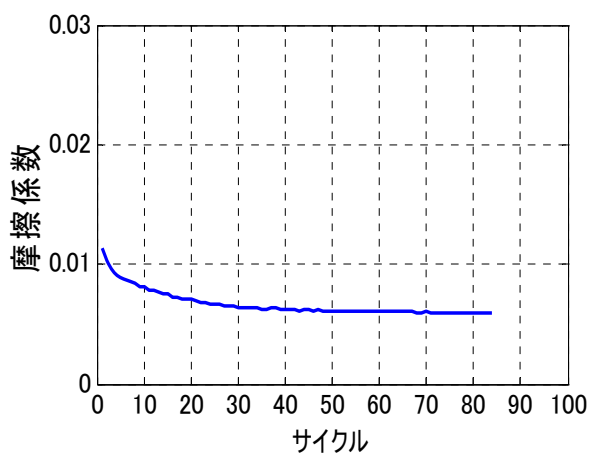
図 1.3.5-71 #3 試験体 1 セット目実験結果概要



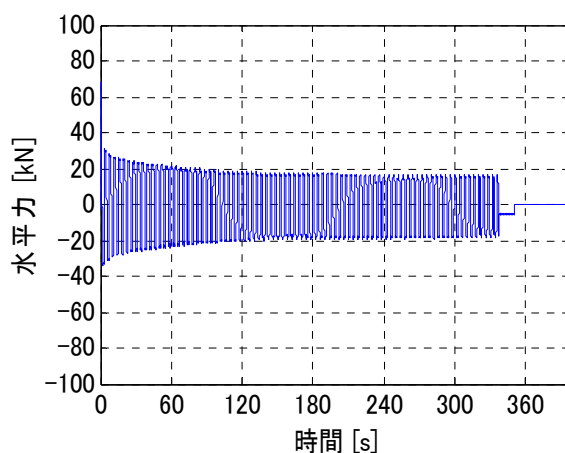
(a) 水平荷重－水平変位関係



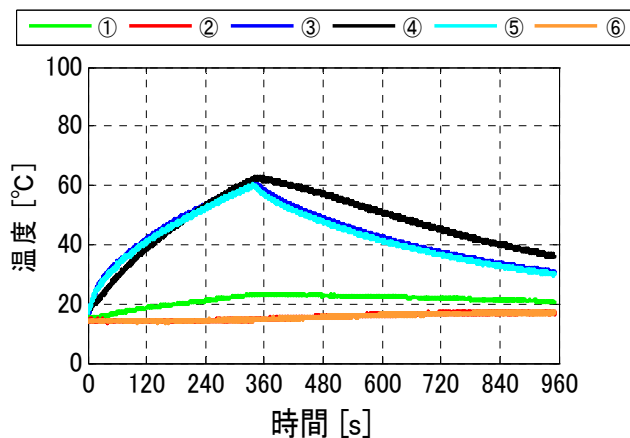
(b) 水平変位時刻歴



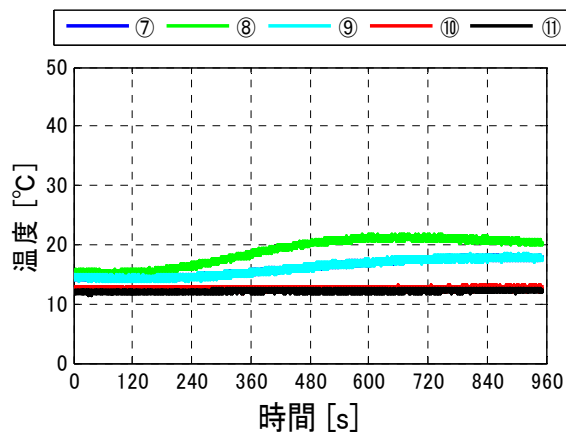
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

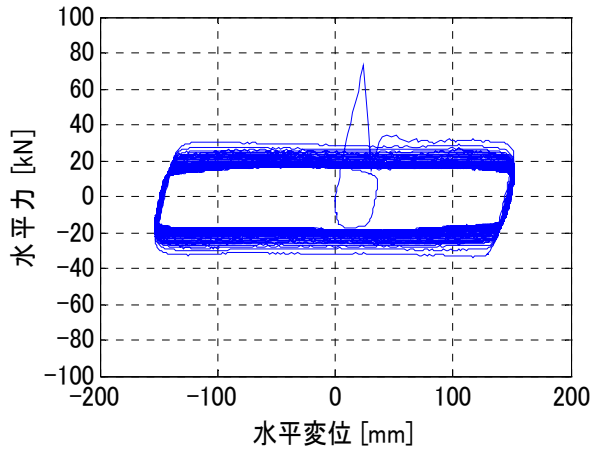


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

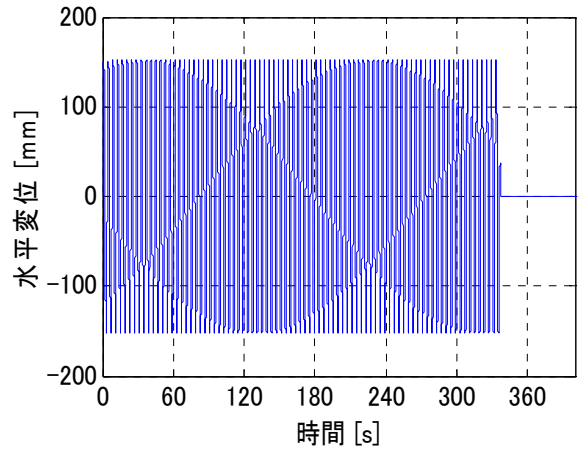


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

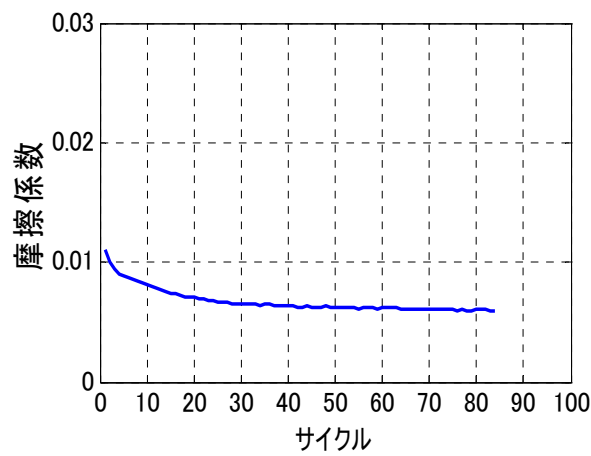
図 1.3.5-72 #3 試験体 2 セット目実験結果概要



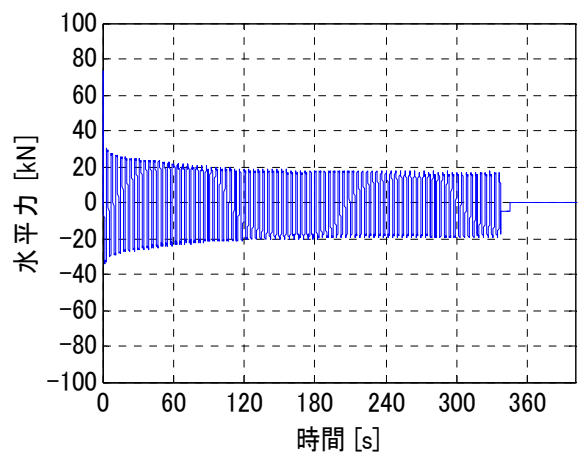
(a) 水平荷重－水平変位関係



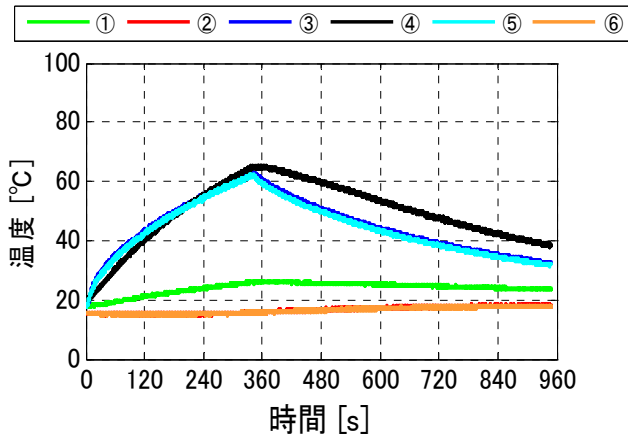
(b) 水平変位時刻歴



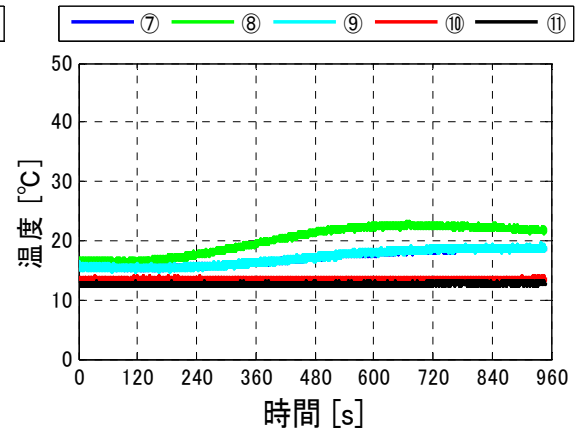
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

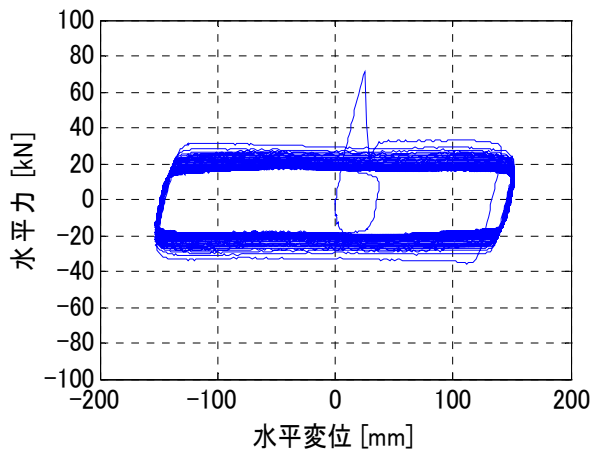


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

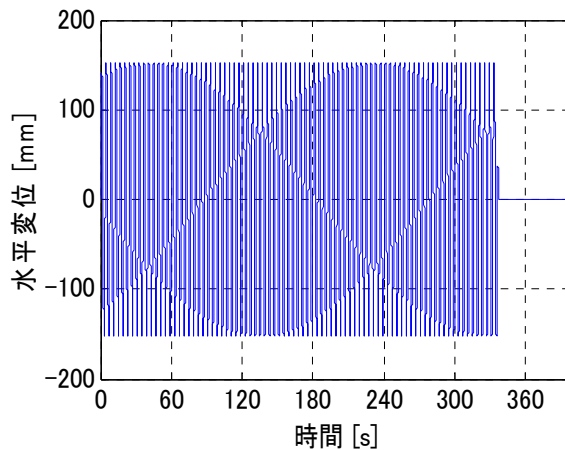


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

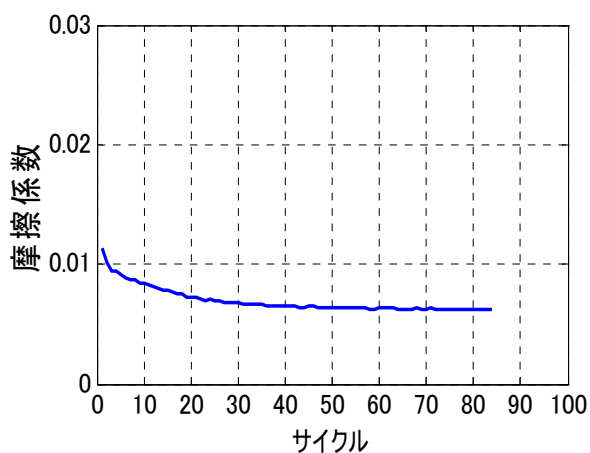
図 1.3.5-73 #3 試験体 3 セット目実験結果概要



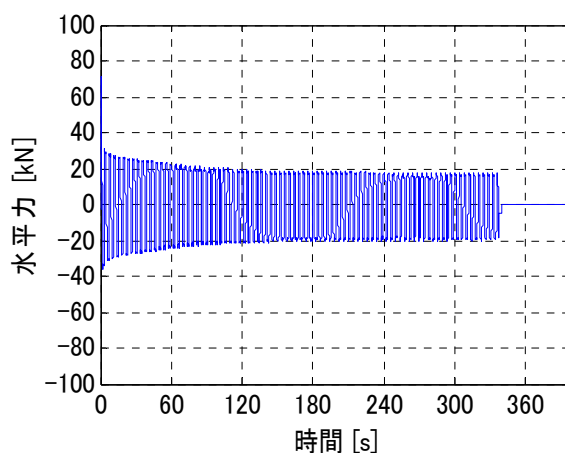
(a) 水平荷重-水平変位関係



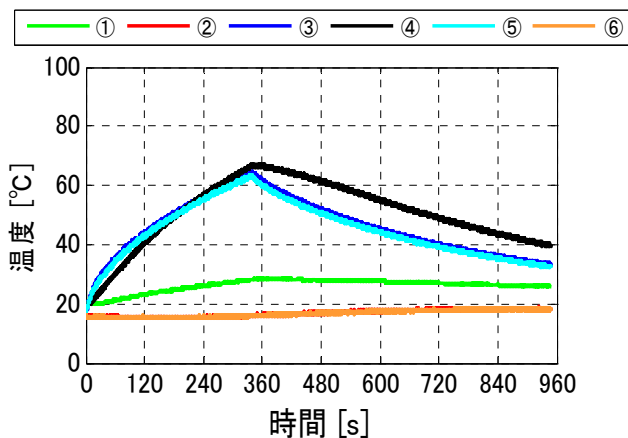
(b) 水平変位時刻歴



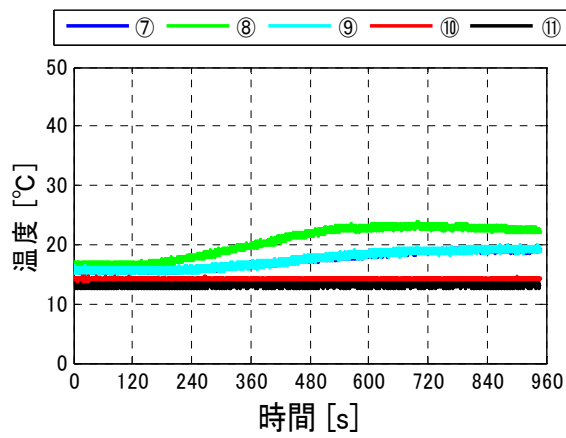
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

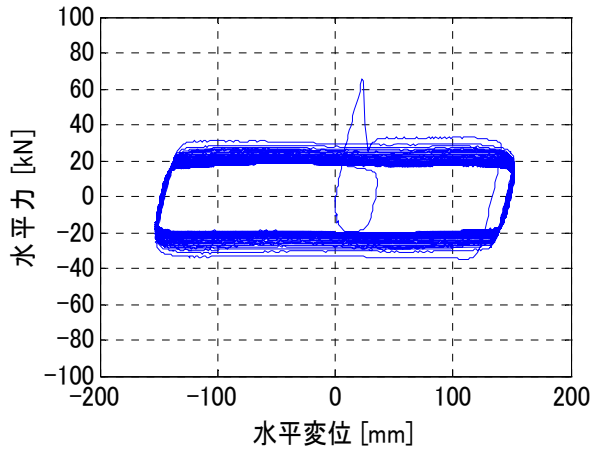


(e) 温度時刻歴 (①~⑥測定点)

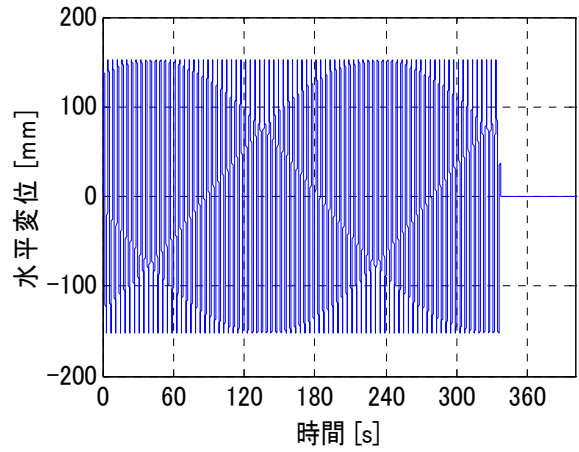


(f) 温度時刻歴 (⑦~⑪測定点)

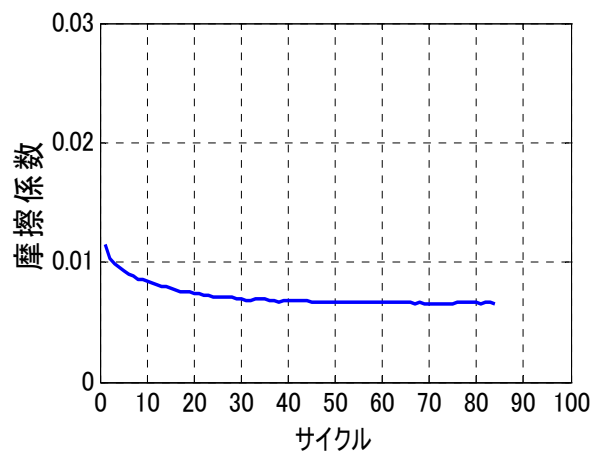
図 1.3.5-74 #3 試験体 4 セット目実験結果概要



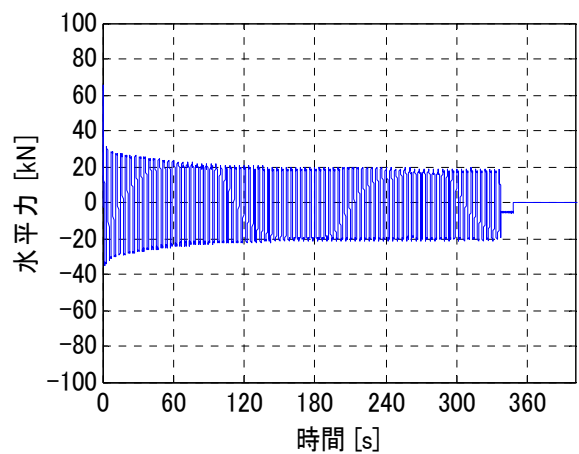
(a) 水平荷重－水平変位関係



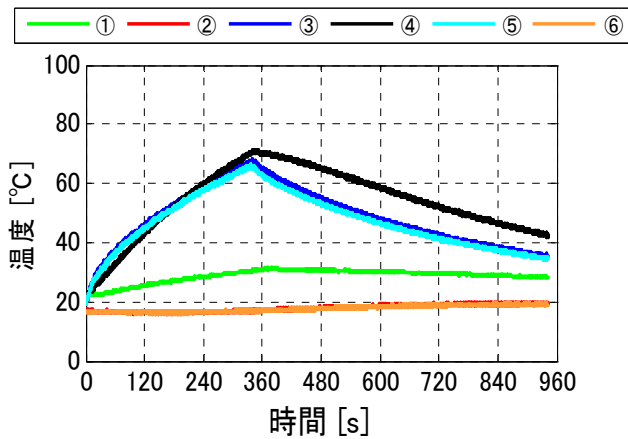
(b) 水平変位時刻歴



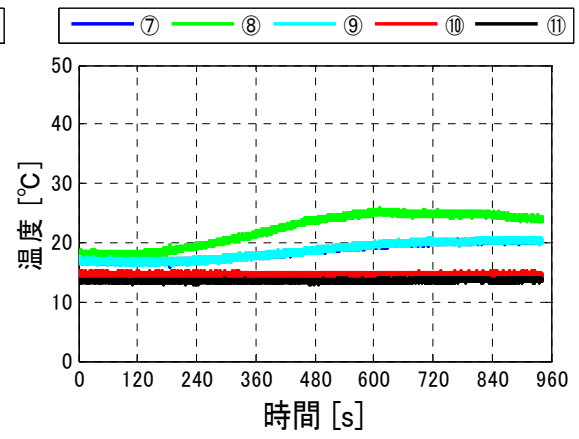
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

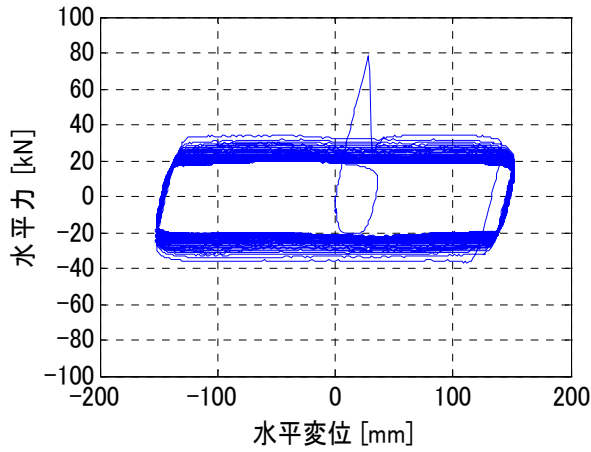


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

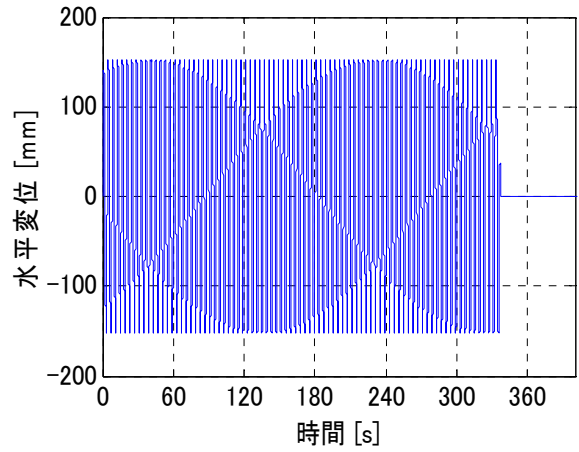


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

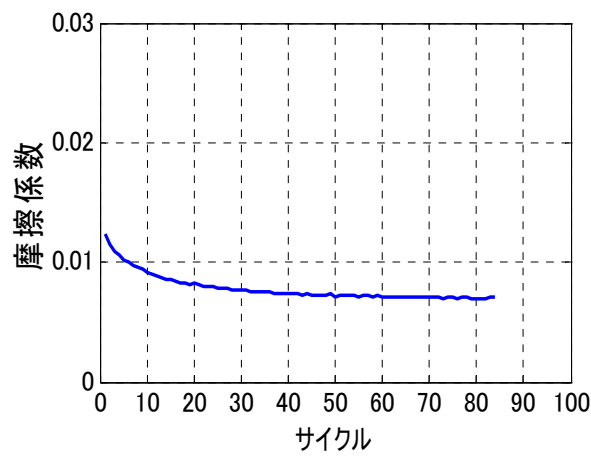
図 1.3.5-75 #3 試験体 5 セット目実験結果概要



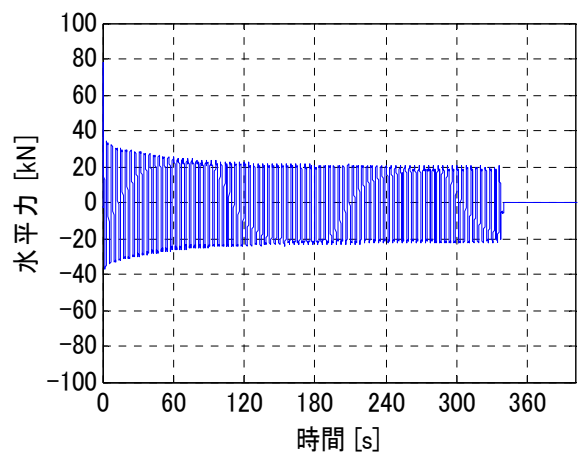
(a) 水平荷重－水平変位関係



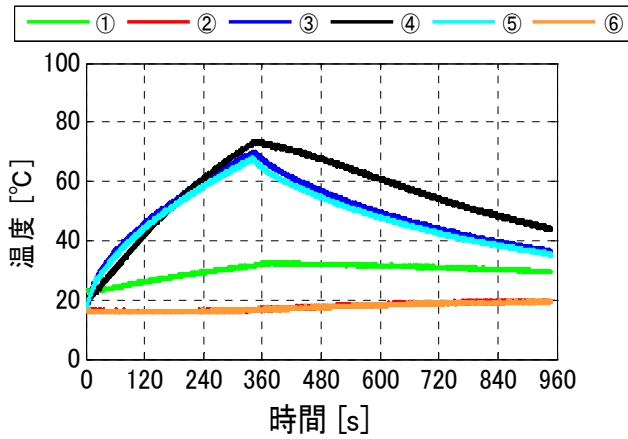
(b) 水平変位時刻歴



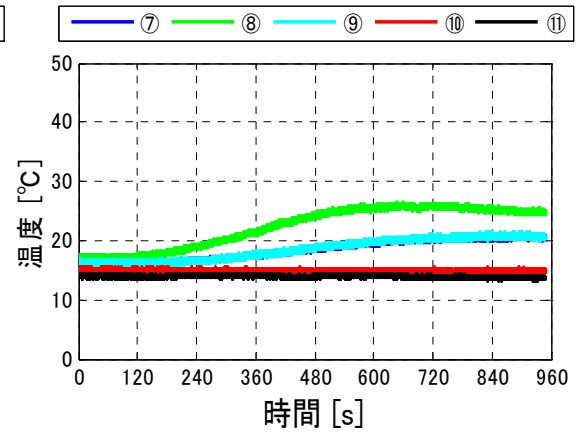
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

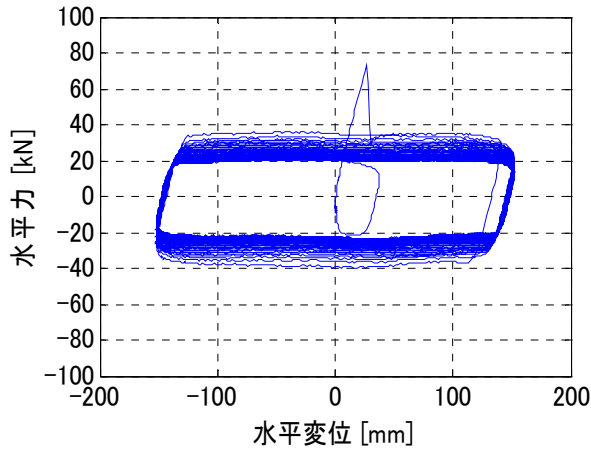


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

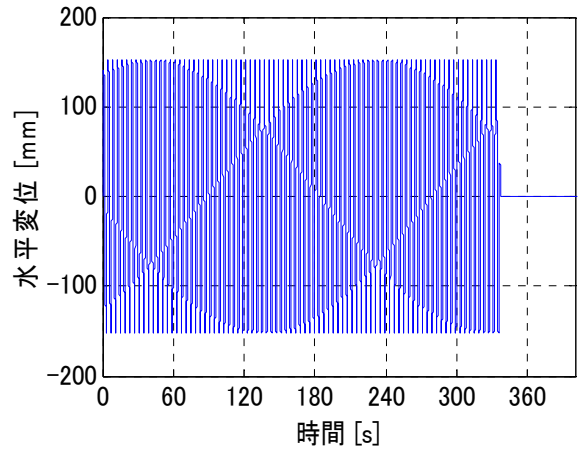


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

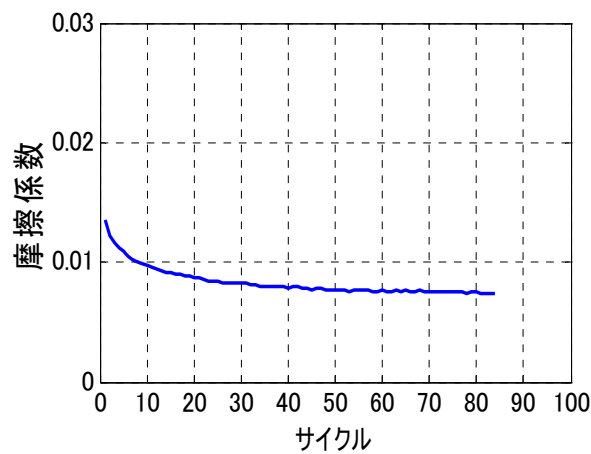
図 1.3.5-76 #3 試験体 6 セット目実験結果概要



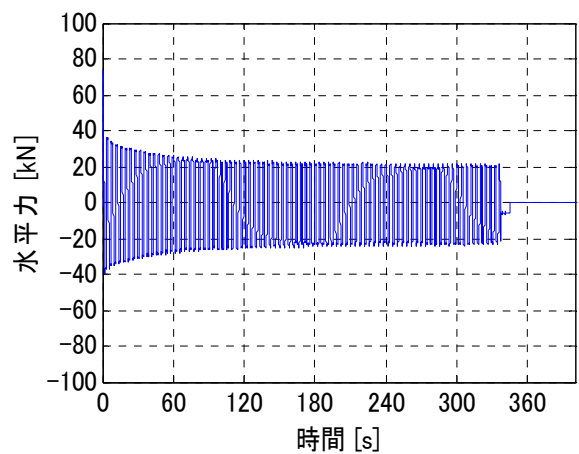
(a) 水平荷重－水平変位関係



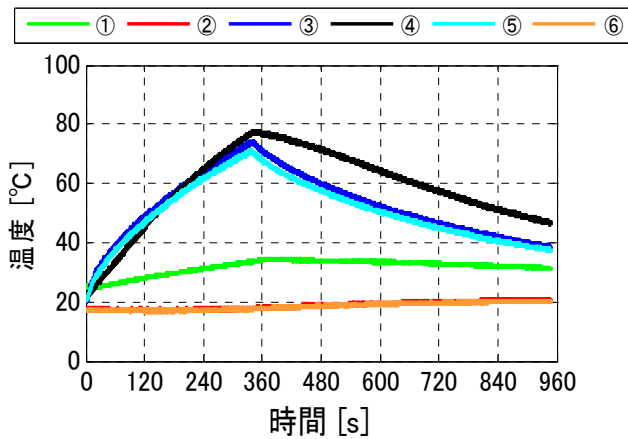
(b) 水平変位時刻歴



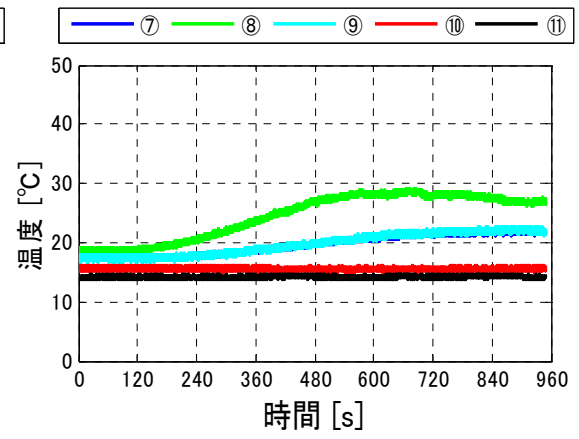
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

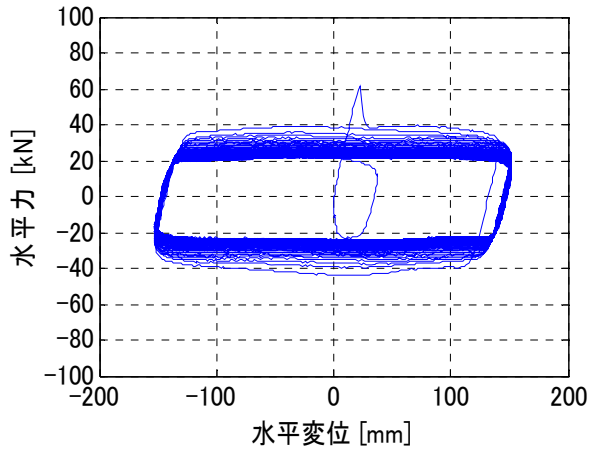


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

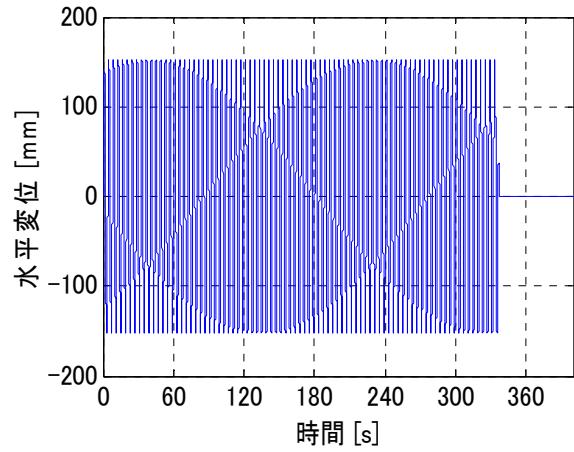


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

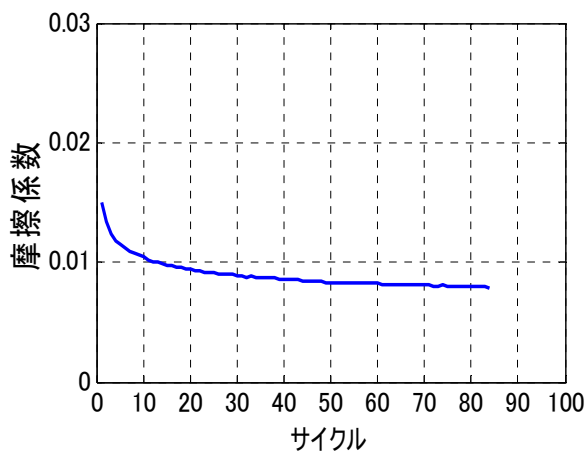
図 1.3.5-77 #3 試験体 7 セット目実験結果概要



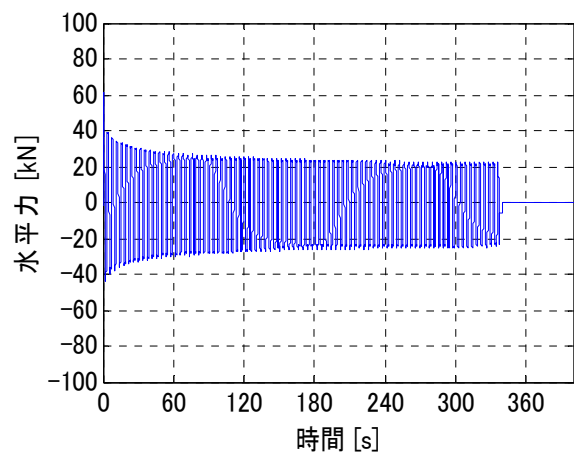
(a) 水平荷重－水平変位関係



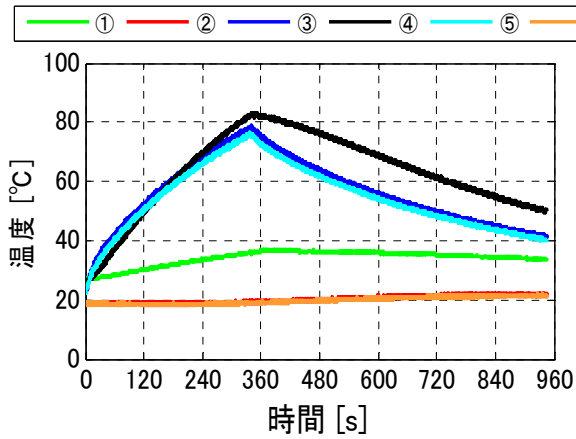
(b) 水平変位時刻歴



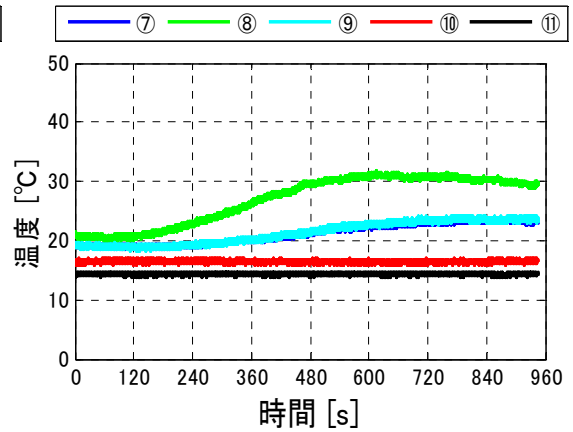
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

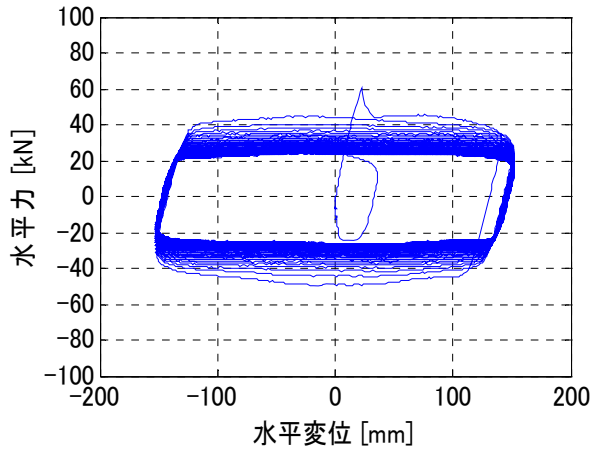


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

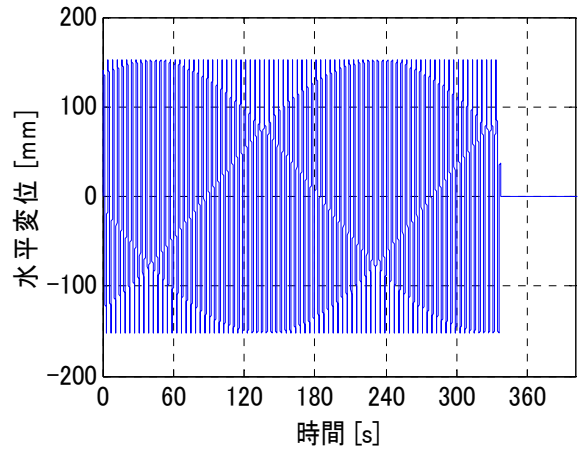


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

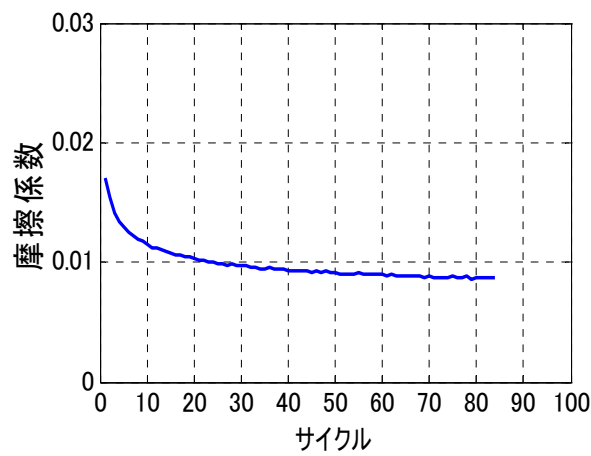
図 1.3.5-78 #3 試験体 8 セット目実験結果概要



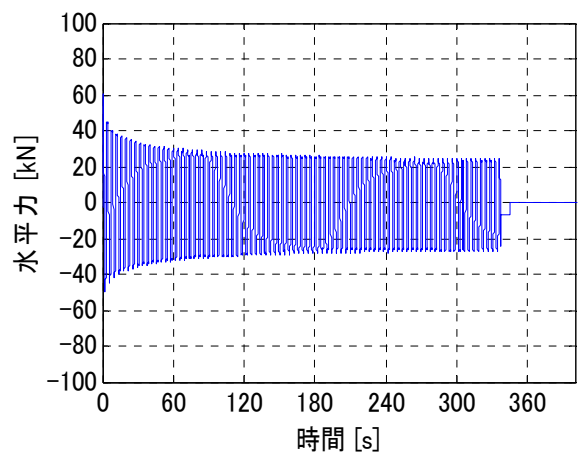
(a) 水平荷重－水平変位関係



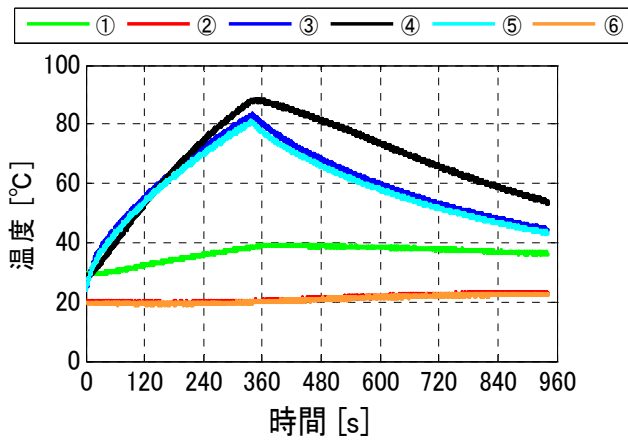
(b) 水平変位時刻歴



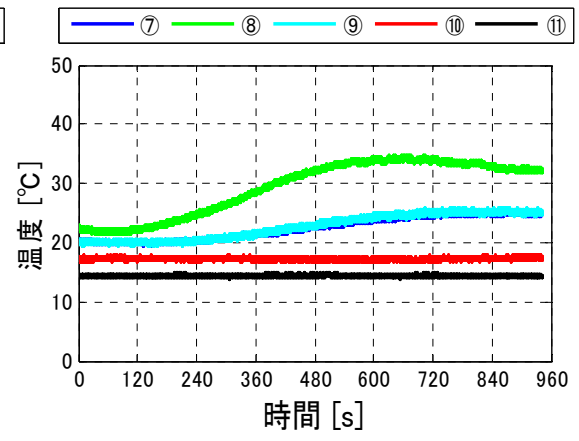
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

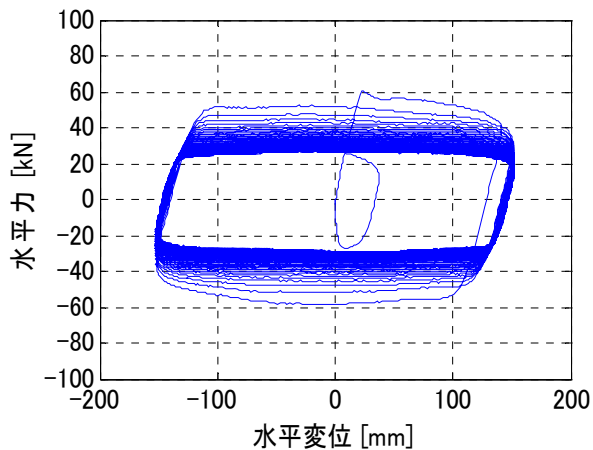


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

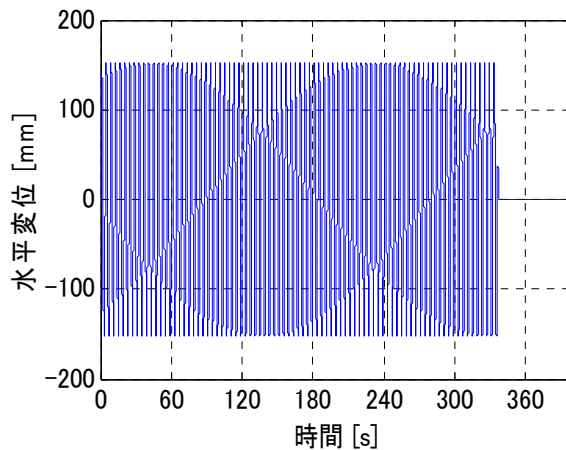


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

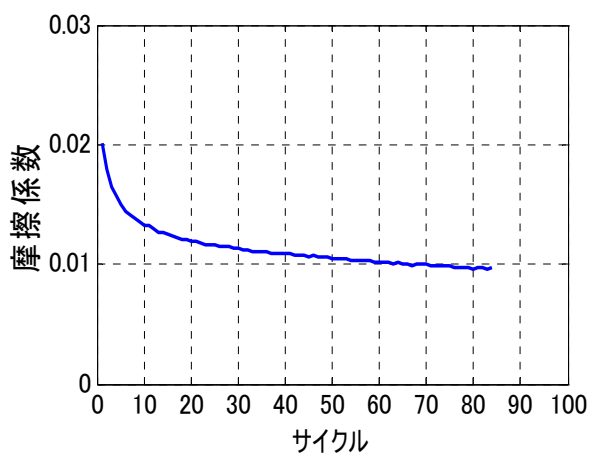
図 1.3.5-79 #3 試験体 9 セット目実験結果概要



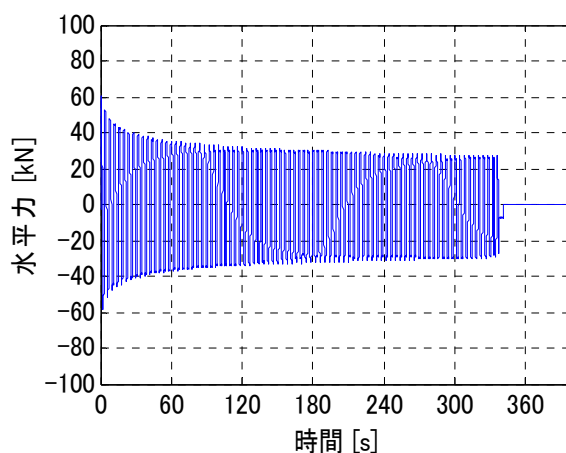
(a) 水平荷重－水平変位関係



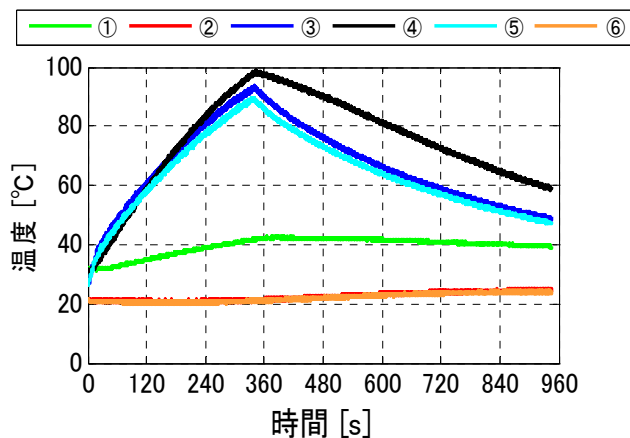
(b) 水平変位時刻歴



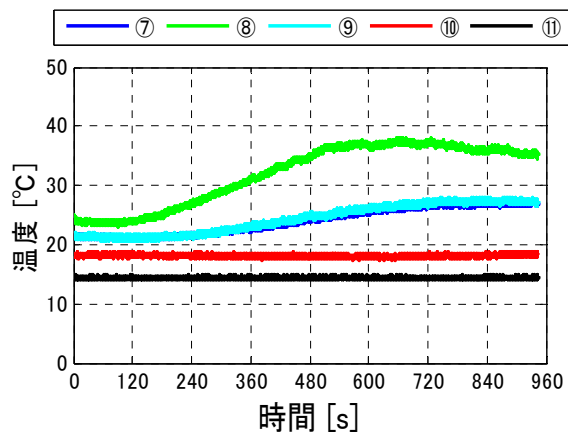
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

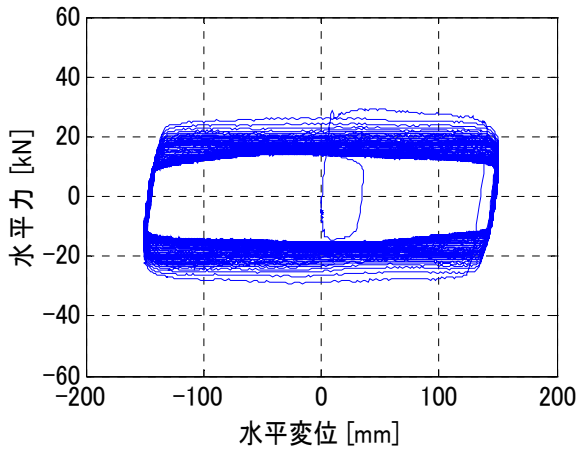


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

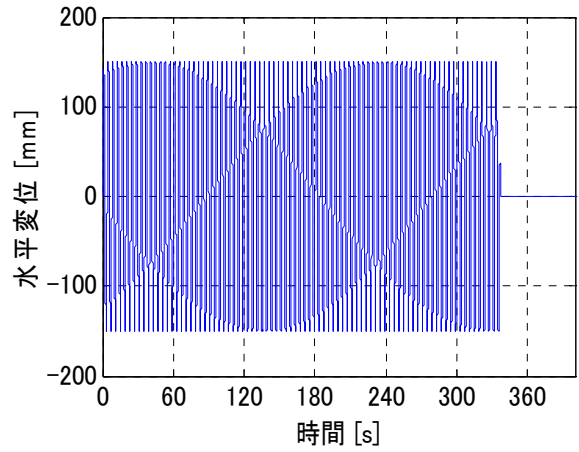


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

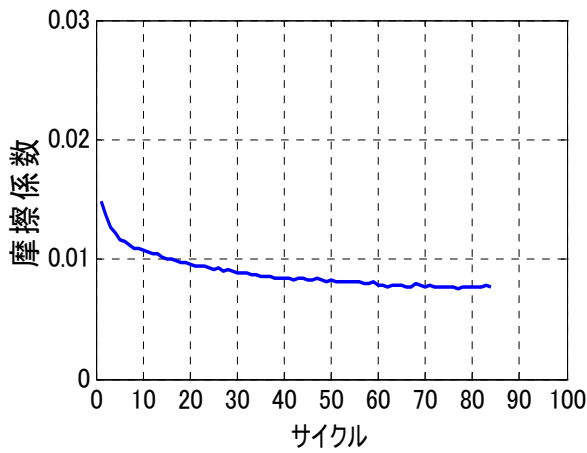
図 1.3.5-80 #3 試験体 10 セット目実験結果概要



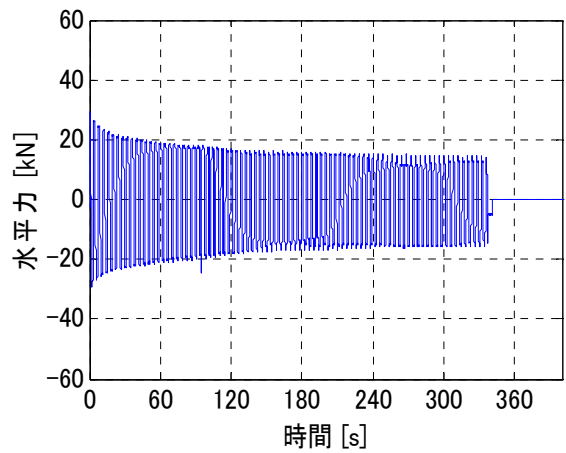
(a) 水平荷重－水平変位関係



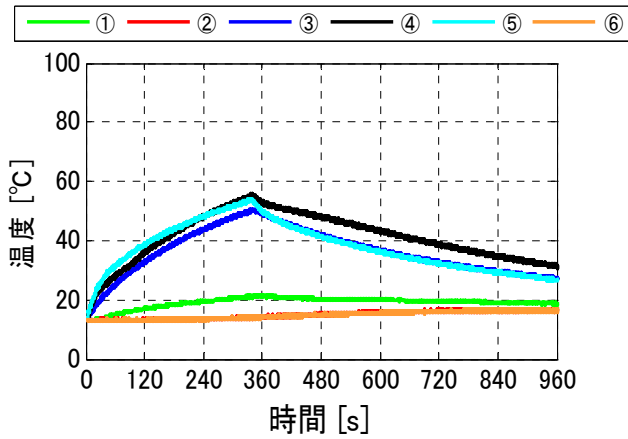
(b) 水平変位時刻歴



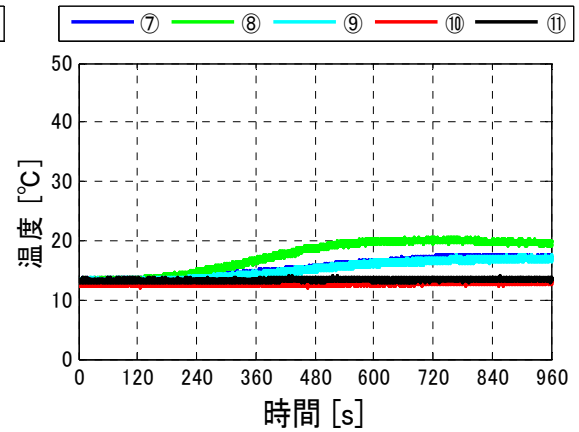
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

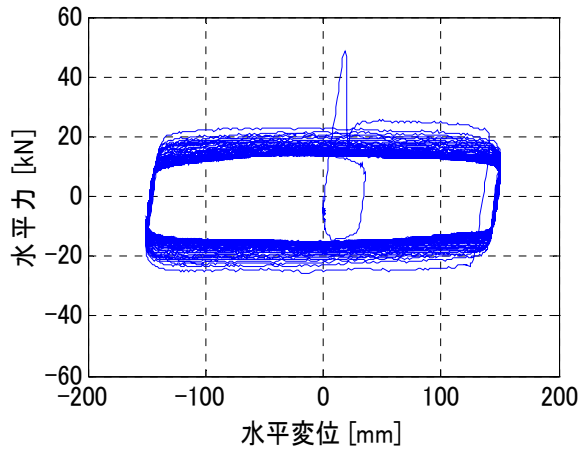


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

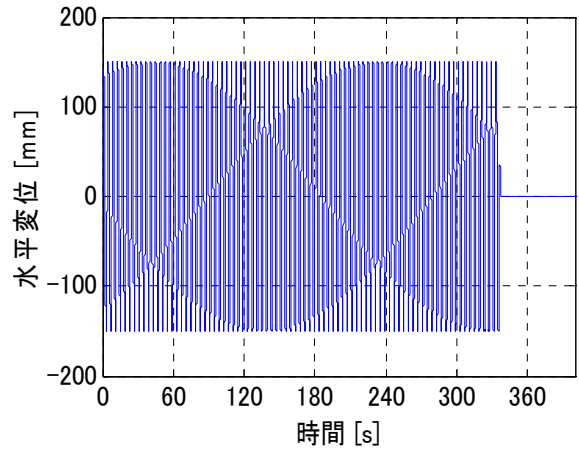


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

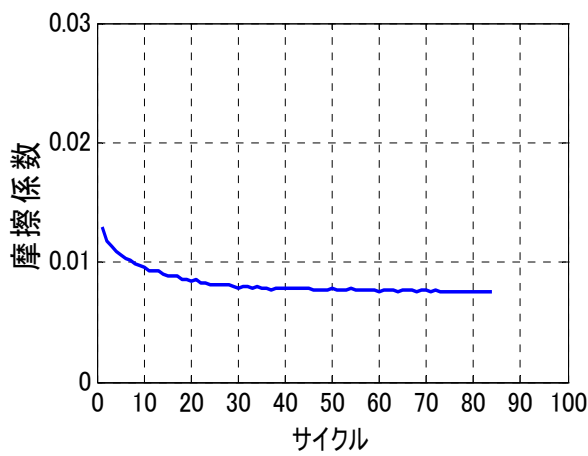
図 1.3.5-81 #4 試験体 1 セット目実験結果概要



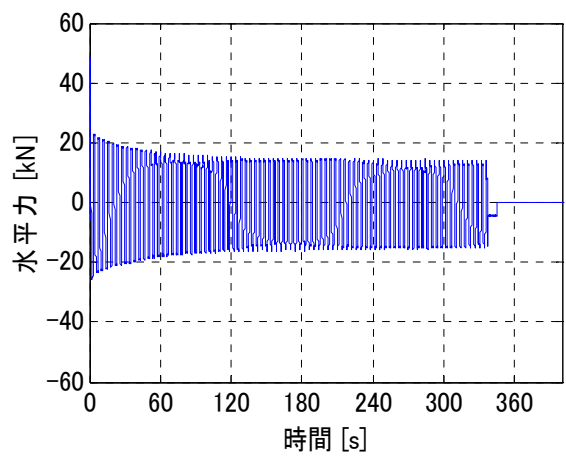
(a) 水平荷重－水平変位関係



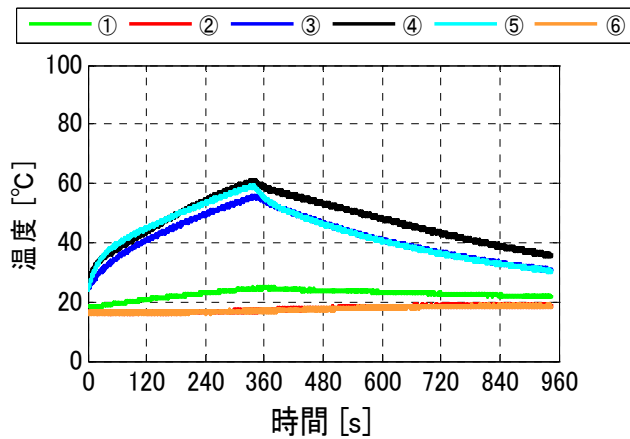
(b) 水平変位時刻歴



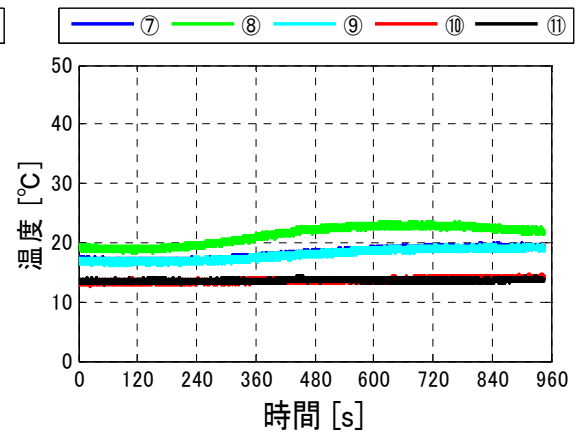
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

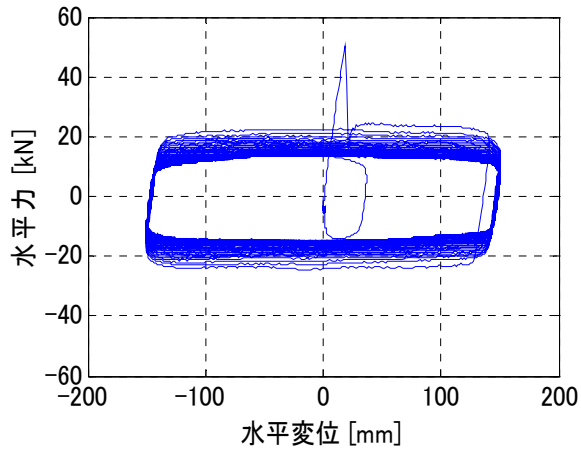


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

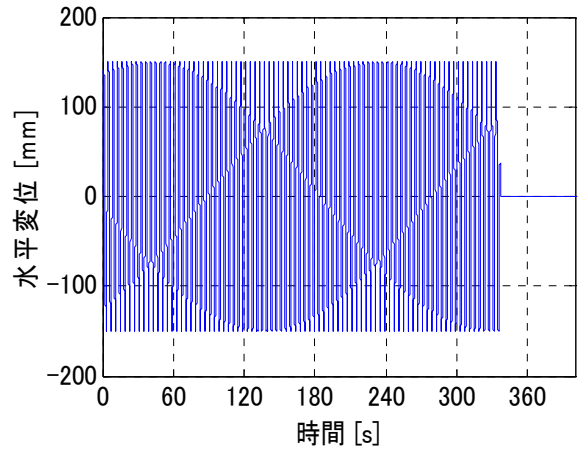


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

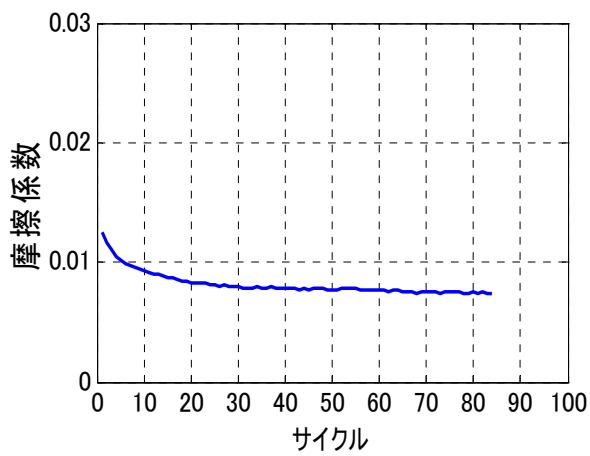
図 1.3.5-82 #4 試験体 2 セット目実験結果概要



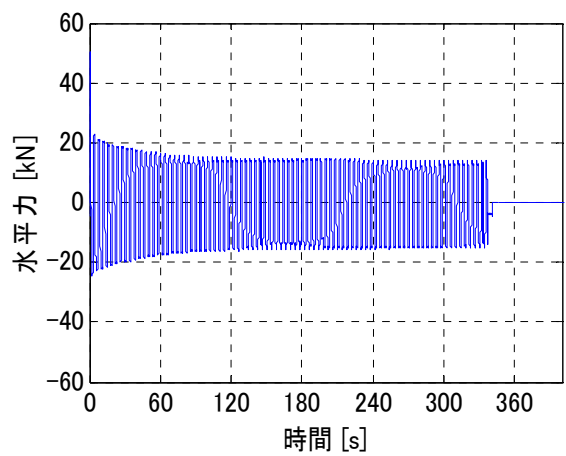
(a) 水平荷重－水平変位関係



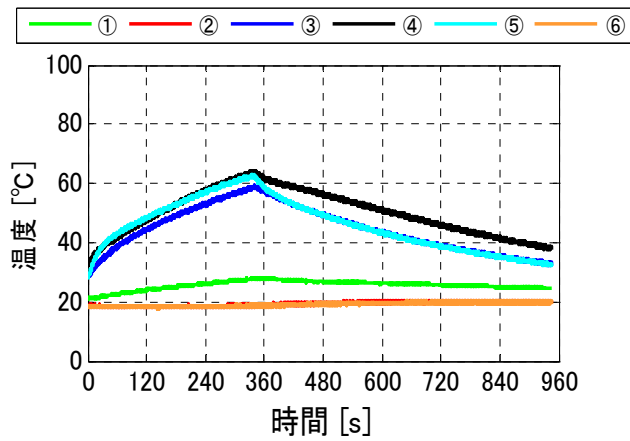
(b) 水平変位時刻歴



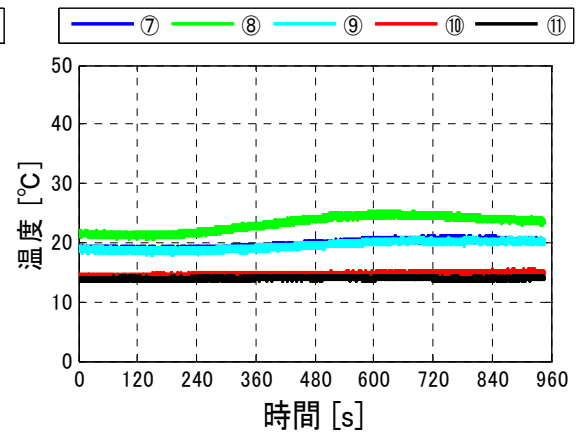
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

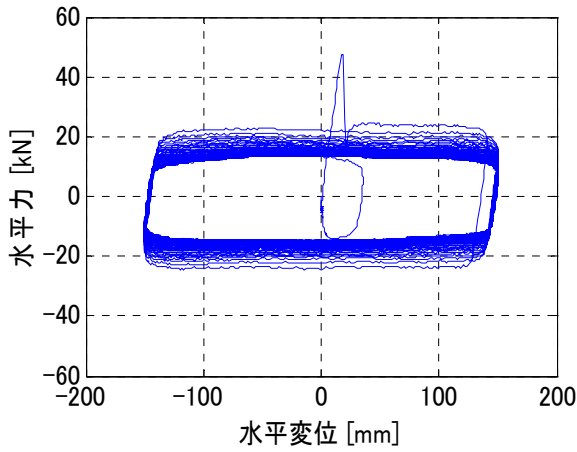


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

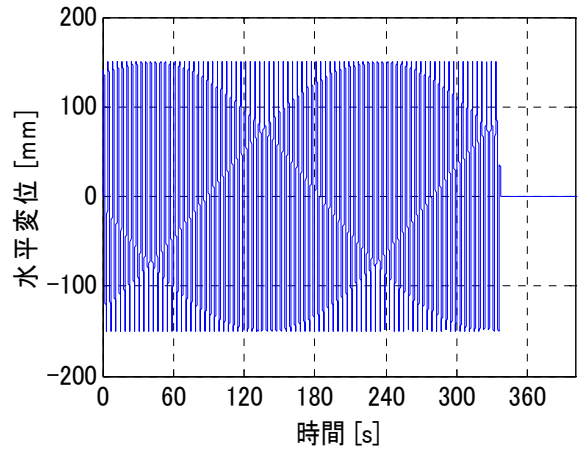


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

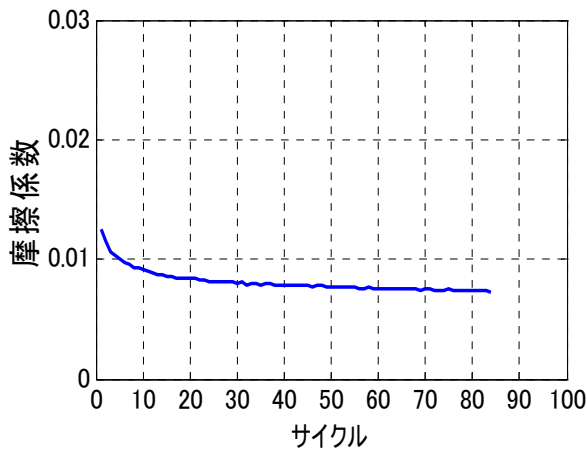
図 1.3.5-83 #4 試験体 3 セット目実験結果概要



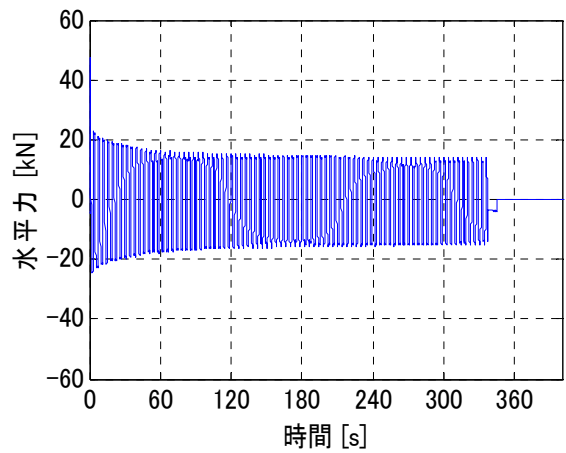
(a) 水平荷重－水平変位関係



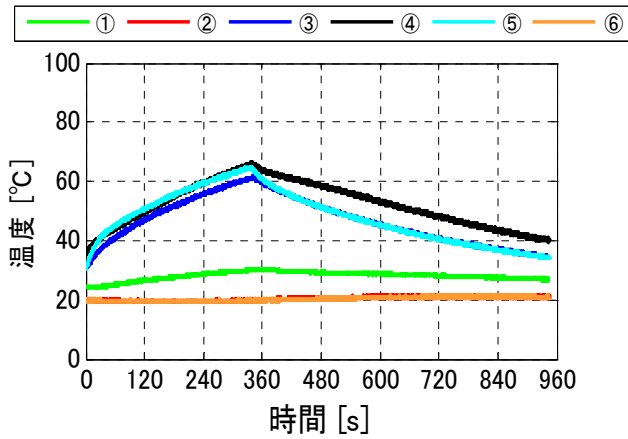
(b) 水平変位時刻歴



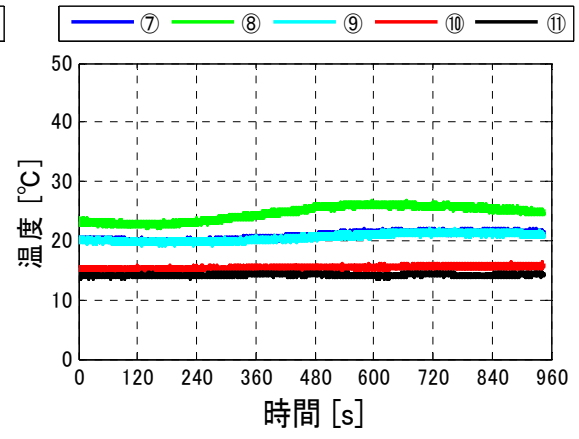
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

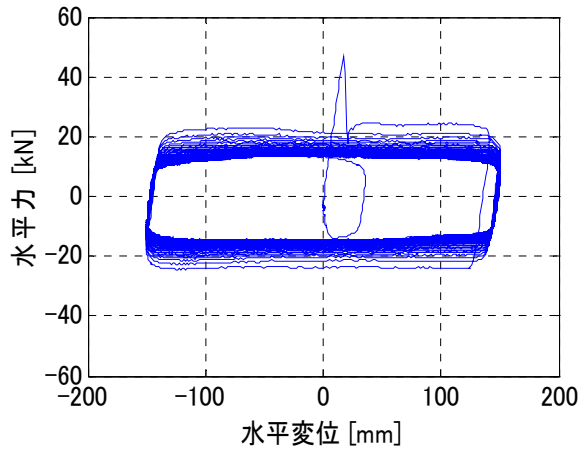


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

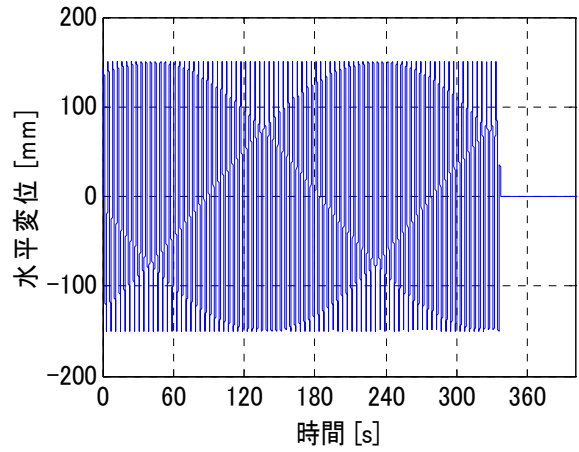


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

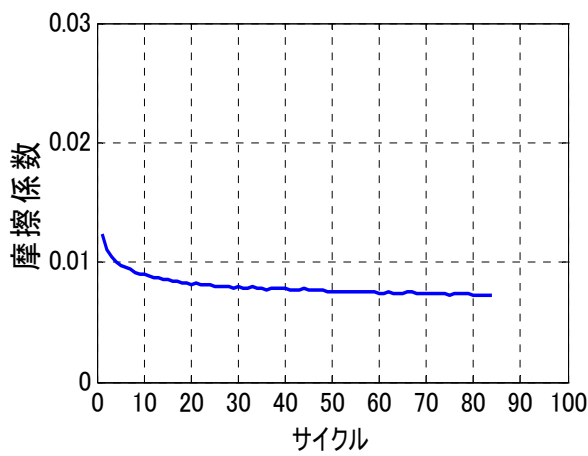
図 1.3.5-84 #4 試験体 4 セット目実験結果概要



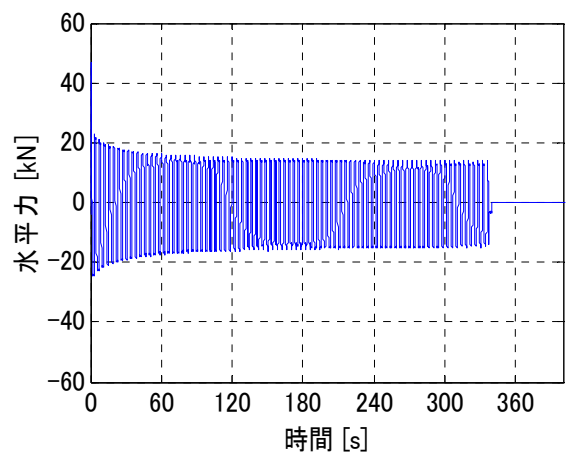
(a) 水平荷重－水平変位関係



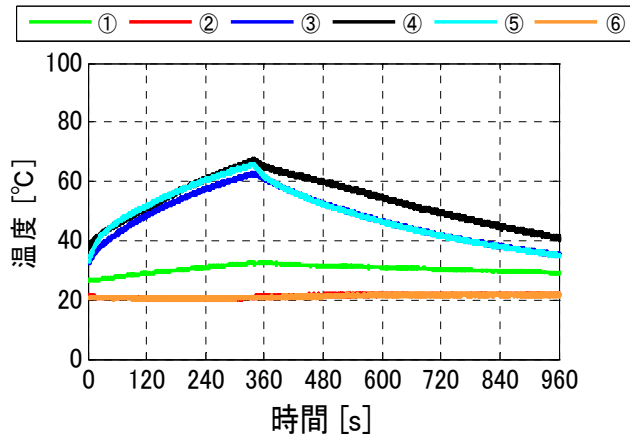
(b) 水平変位時刻歴



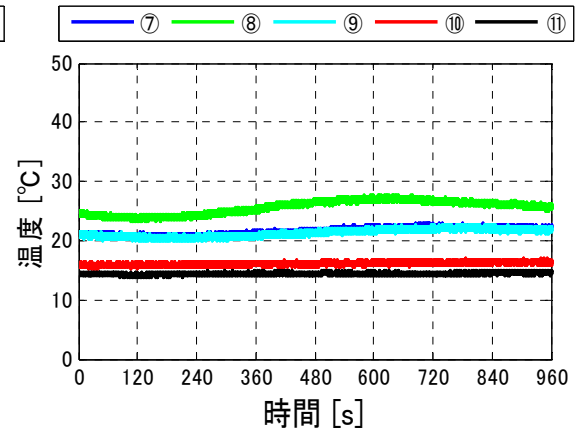
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

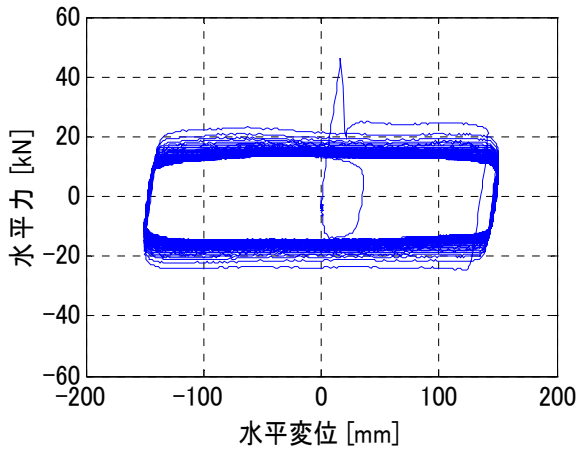


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

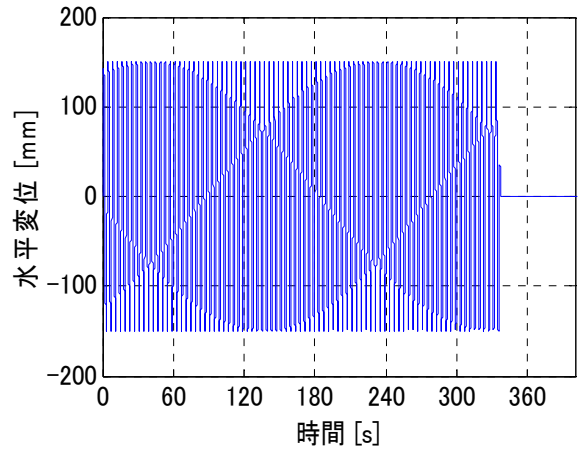


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

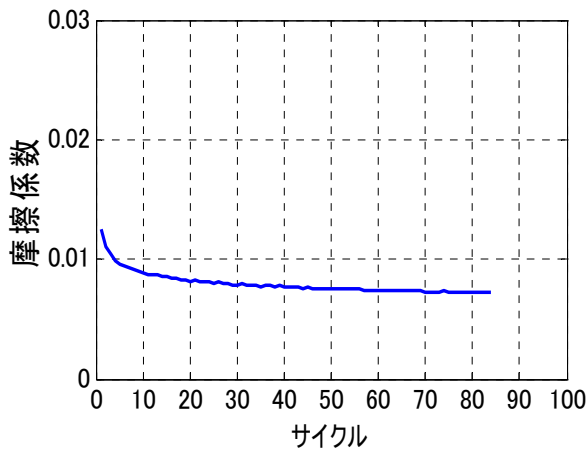
図 1.3.5-85 #4 試験体 5 セット目実験結果概要



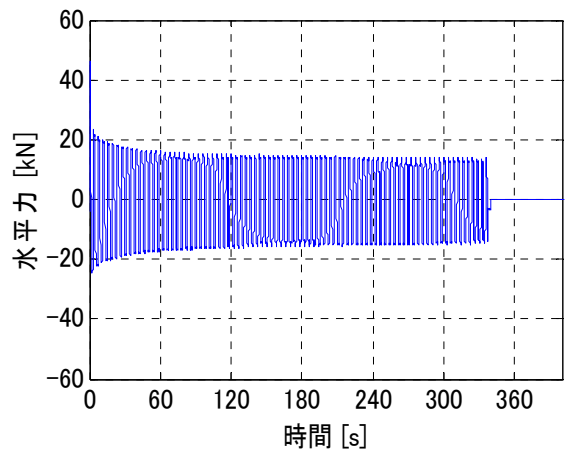
(a) 水平荷重－水平変位関係



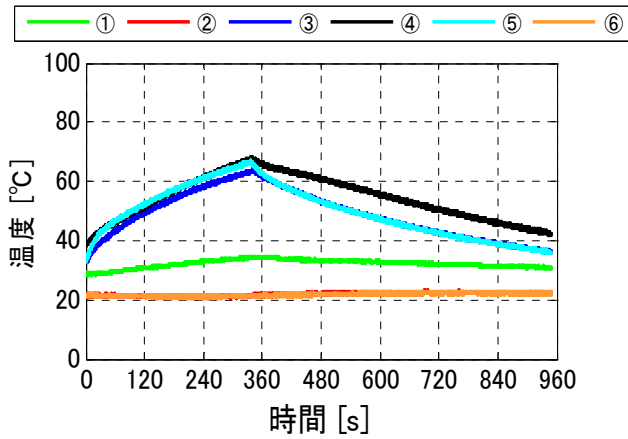
(b) 水平変位時刻歴



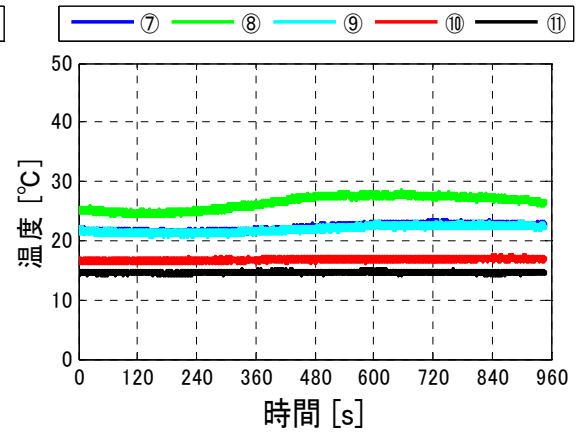
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

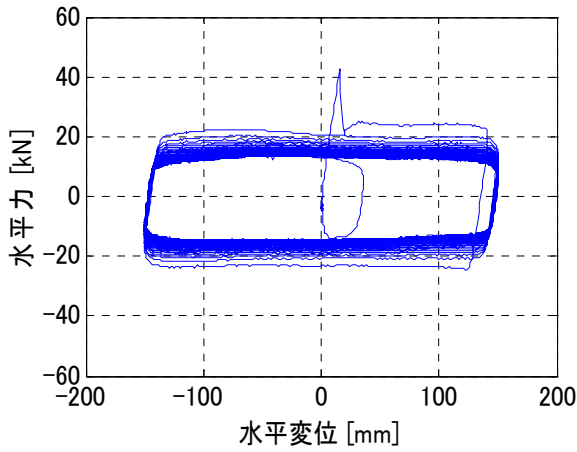


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

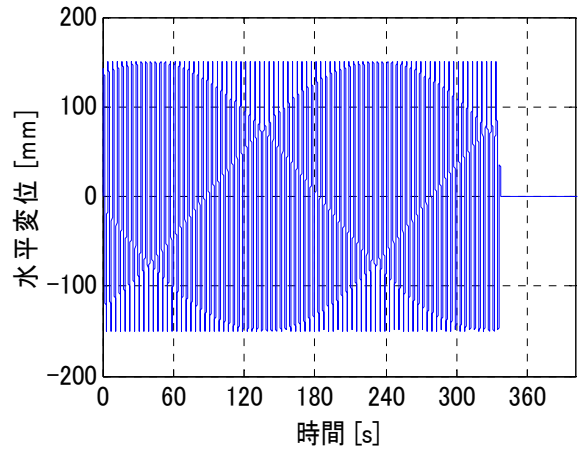


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

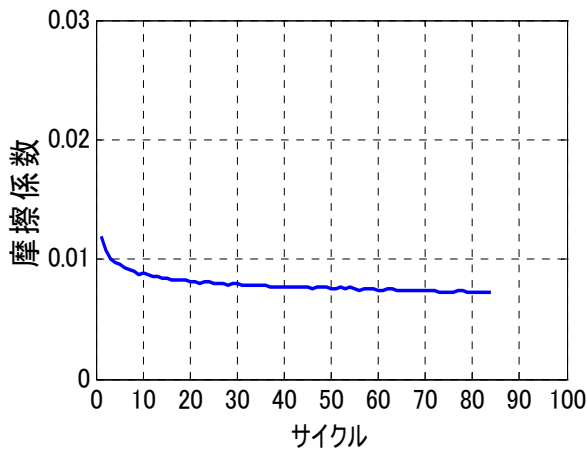
図 1.3.5-86 #4 試験体 6 セット目実験結果概要



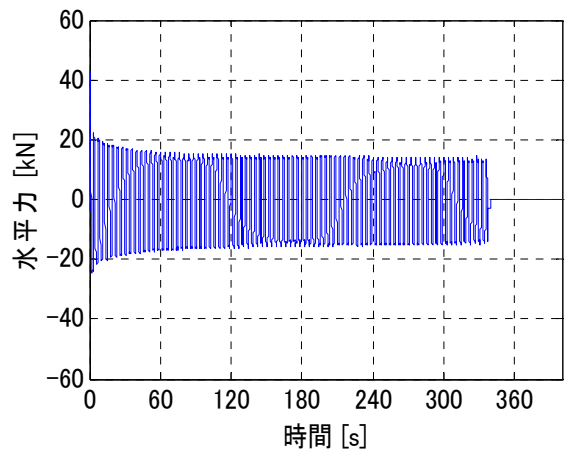
(a) 水平荷重－水平変位関係



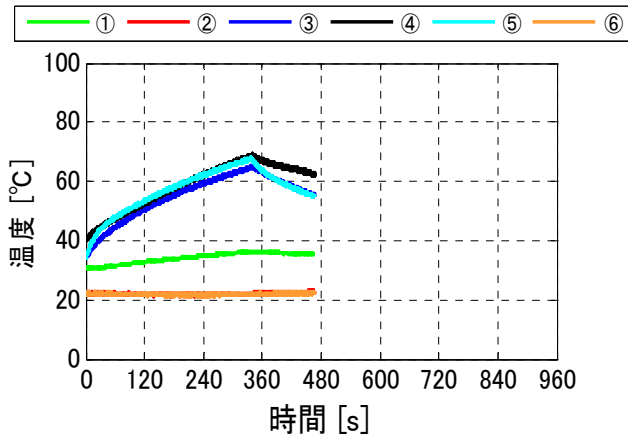
(b) 水平変位時刻歴



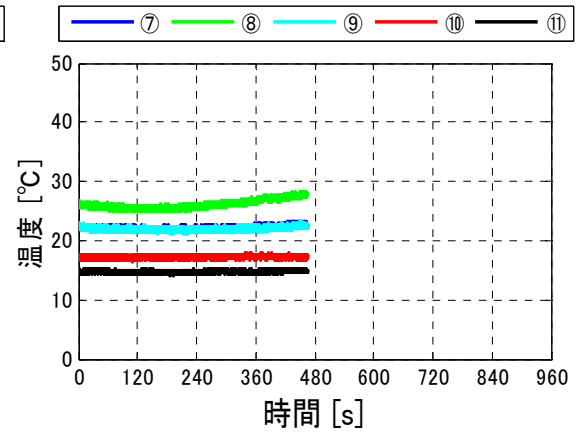
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

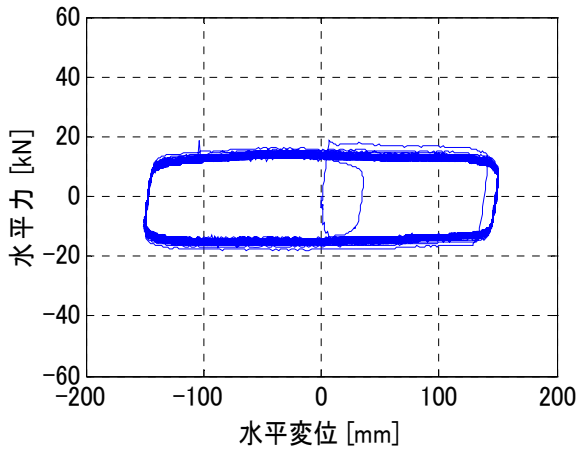


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

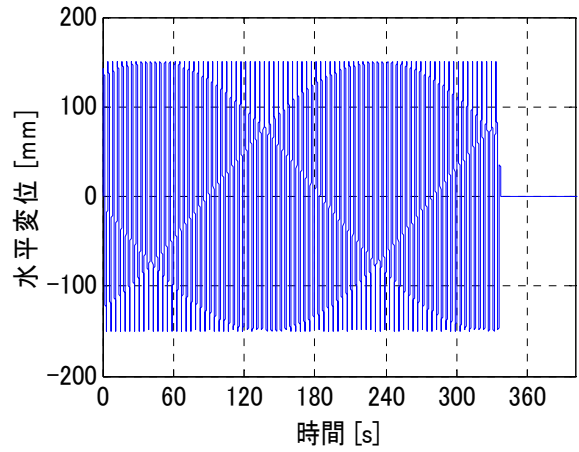


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

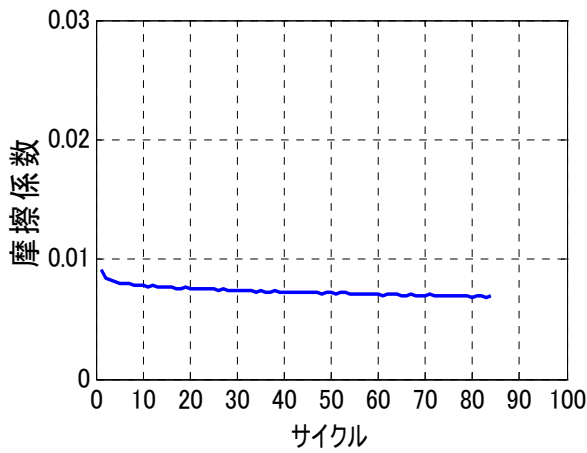
図 1.3.5-87 #4 試験体 7 セット目実験結果概要



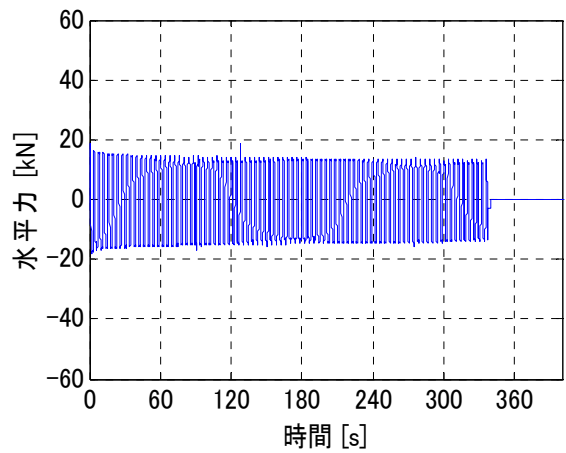
(a) 水平荷重-水平変位関係



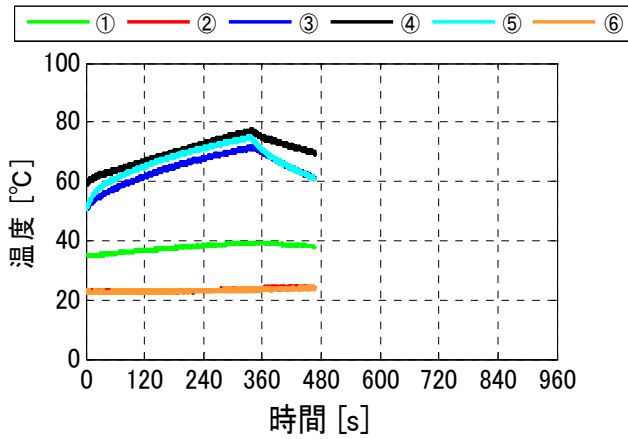
(b) 水平変位時刻歴



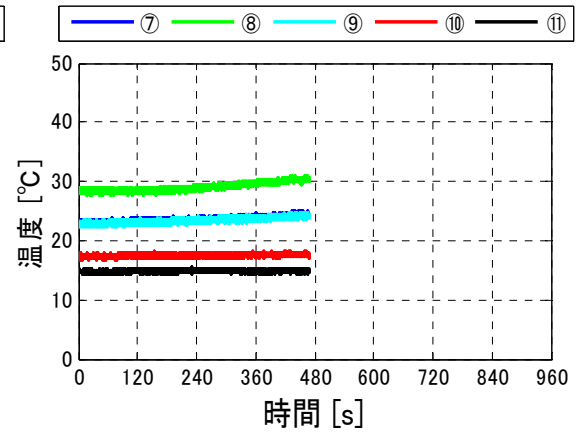
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

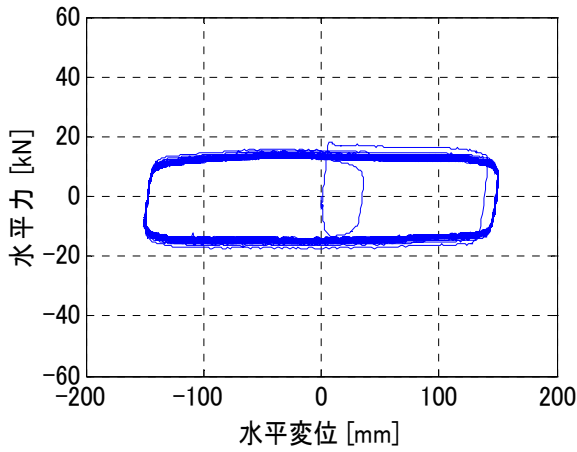


(e) 温度時刻歴 (①~⑥測定点)

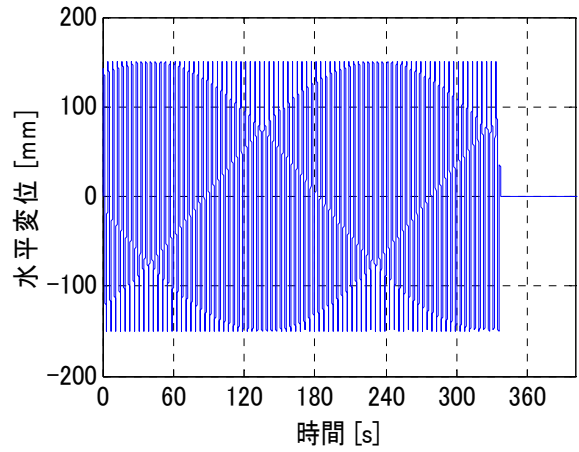


(f) 温度時刻歴 (⑦~⑪測定点)

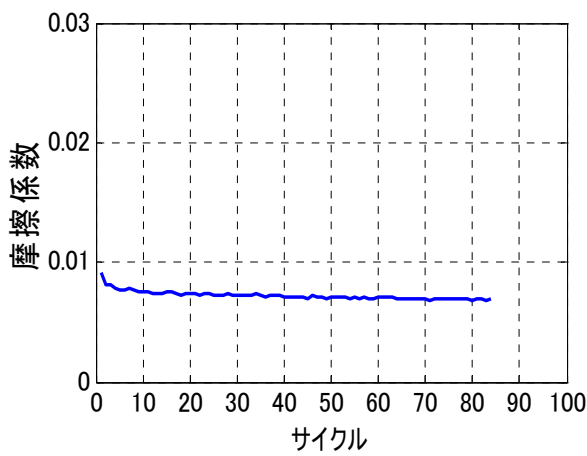
図 1.3.5-88 #4 試験体 8 セット目実験結果概要



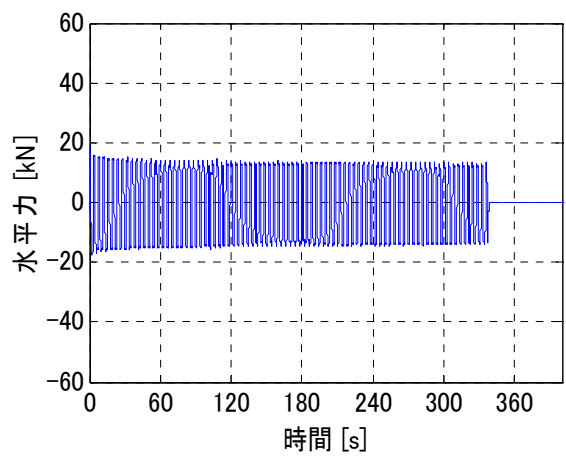
(a) 水平荷重－水平変位関係



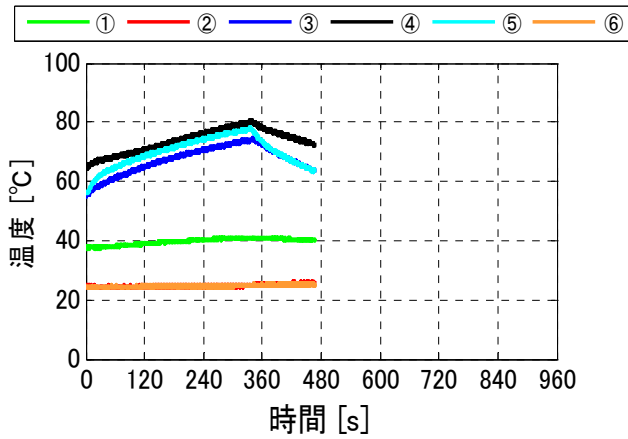
(b) 水平変位時刻歴



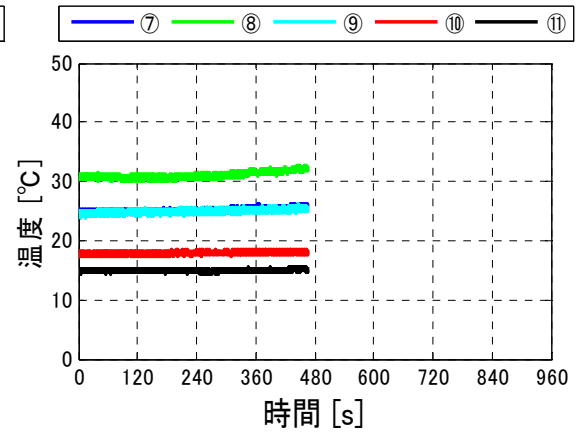
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴

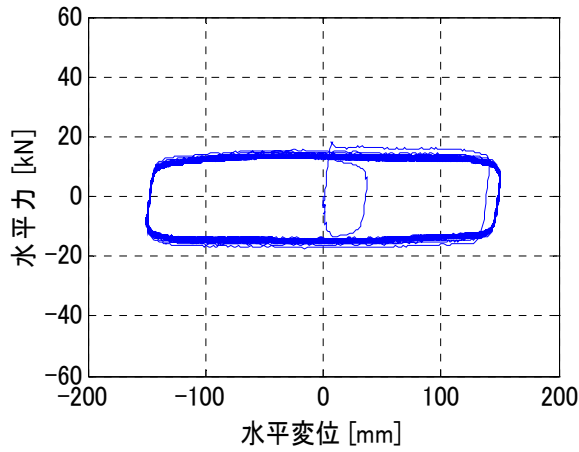


(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)

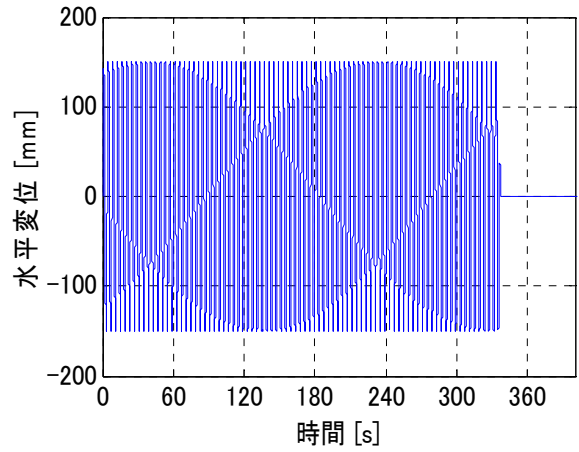


(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

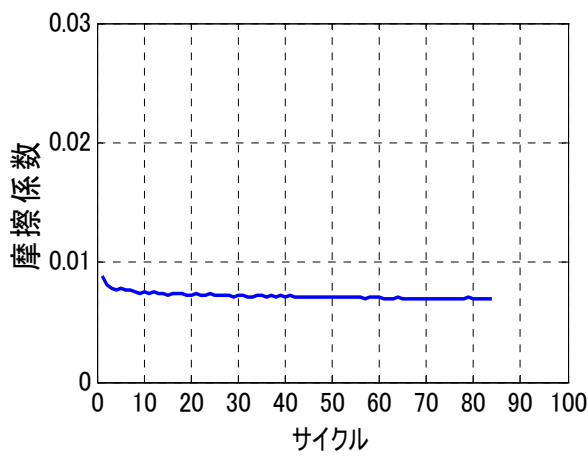
図 1.3.5-89 #4 試験体 9 セット目実験結果概要



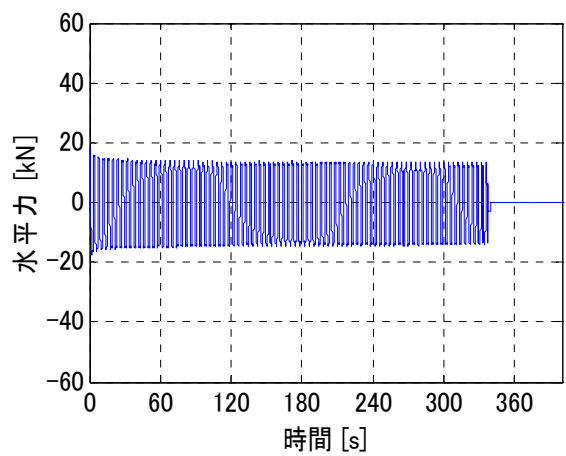
(a) 水平荷重－水平変位関係



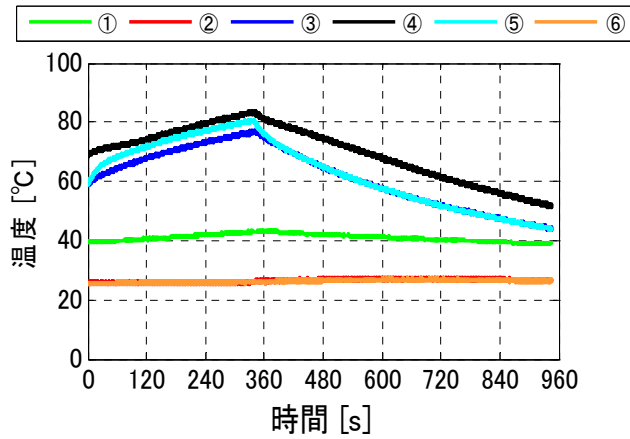
(b) 水平変位時刻歴



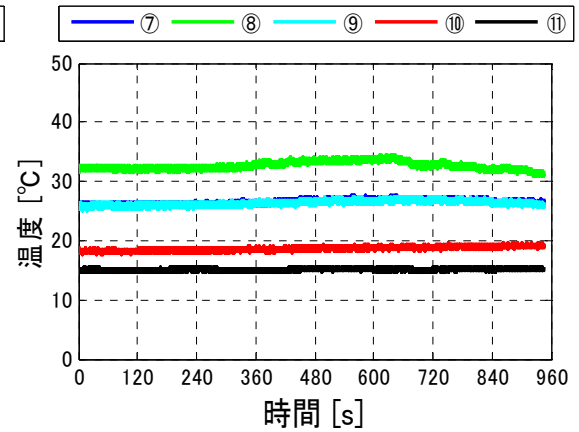
(c) 各サイクル摩擦係数



(d) 水平荷重時刻歴



(e) 温度時刻歴 (①～⑥測定点)



(f) 温度時刻歴 (⑦～⑪測定点)

図 1.3.5-90 #4 試験体 10セット目実験結果概要

1.3.5.6 各試験体各セット後のすべり面状況写真

写真 1.3.5-8～13 に各試験体各セット後のすべり材下面およびすべり板状況写真を示す。



(a) すべり材下面 実験前



(b) すべり板表面 実験前



(c) すべり材下面 1セット目後



(d) すべり板表面 1セット目後



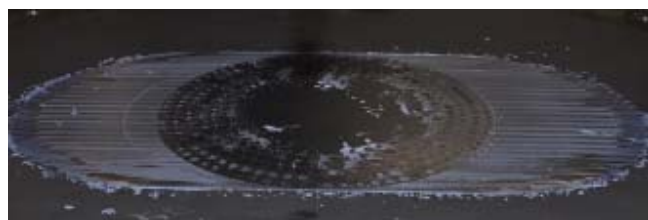
(e) すべり材下面 2セット目後



(f) すべり板表面 2セット目後



(g) すべり材下面 3セット目後



(h) すべり板表面 3セット目後



(j) すべり材下面 4セット目後

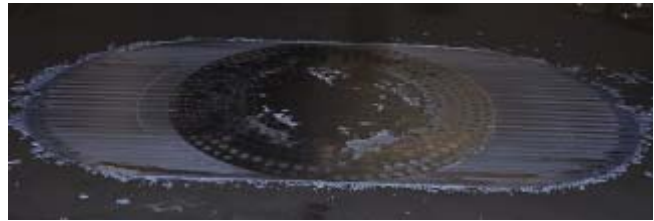


(k) すべり板表面 4セット目後

写真 1.3.5-8 #1 試験体 すべり材下面、すべり板表面状況写真(1)



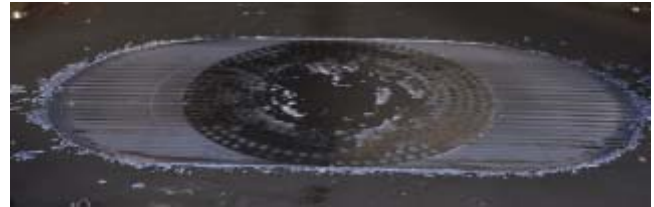
(l) すべり材下面 5セット目後



(m) すべり板表面 5セット目後



(n) すべり材下面 6セット目後



(o) すべり板表面 6セット目後



(p) すべり材下面 7セット目後



(q) すべり板表面 7セット目後



(r) すべり材下面 8セット目後



(s) すべり板表面 8セット目後



(t) すべり材下面 9セット目後



(u) すべり板表面 9セット目後



(v) すべり材下面 10セット目後



(w) すべり板表面 10セット目後

写真 1.3.5-9 #1 試験体 すべり材下面、すべり板表面状況写真(2)



(a) すべり材下面 実験前



(b) すべり板表面 実験前



(c) すべり材下面 1セット目後



(d) すべり板表面 1セット目後



(e) すべり材下面 2セット目後



(f) すべり板表面 2セット目後



(g) すべり材下面 3セット目後



(h) すべり板表面 3セット目後



(j) すべり材下面 4セット目後



(k) すべり板表面 4セット目後



(l) すべり材下面 5セット目後



(m) すべり板表面 5セット目後

写真 1.3.5-10 #2 試験体 すべり材下面、すべり板表面状況写真(1)



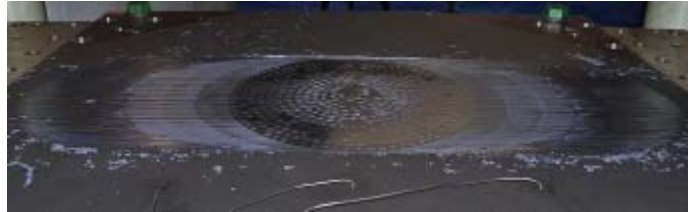
(n) すべり材下面 6セット目後



(o) すべり板表面 6セット目後



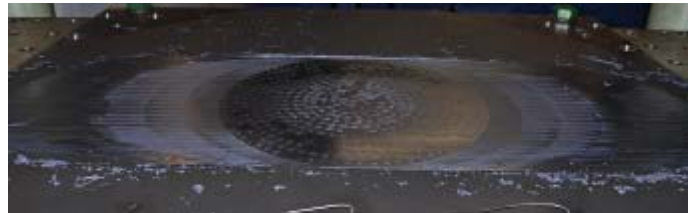
(p) すべり材下面 7セット目後



(q) すべり板表面 7セット目後



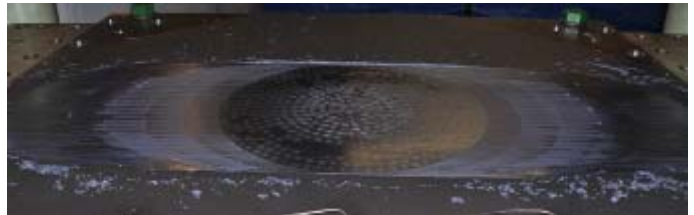
(r) すべり材下面 8セット目後



(s) すべり板表面 8セット目後



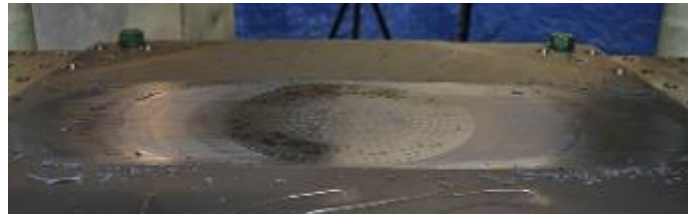
(t) すべり材下面 9セット目後



(u) すべり板表面 9セット目後



(v) すべり材下面 10セット目後



(w) すべり板表面 10セット目後

写真 1.3.5-11 #2 試験体 すべり材下面、すべり板表面状況写真(2)



(a) すべり材下面 実験前



(b) すべり板表面 実験前



(c) すべり材下面 1セット目後



(d) すべり板表面 1セット目後



(e) すべり材下面 2セット目後



(f) すべり板表面 2セット目後



(g) すべり材下面 3セット目後



(h) すべり板表面 3セット目後



(j) すべり材下面 4セット目後



(k) すべり板表面 4セット目後



(l) すべり材下面 5セット目後



(m) すべり板表面 5セット目後

写真 1.3.5-12 #3 試験体 すべり材下面、すべり板表面状況写真(1)



(n) すべり材下面 6セット目後



(o) すべり板表面 6セット目後



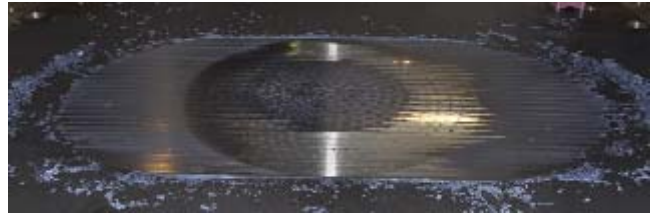
(p) すべり材下面 7セット目後



(q) すべり板表面 7セット目後



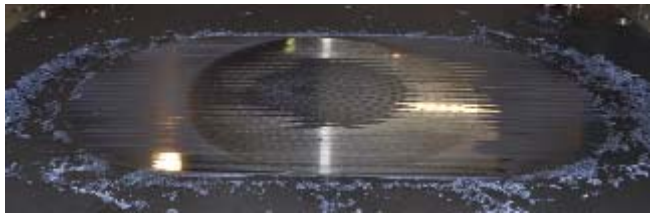
(r) すべり材下面 8セット目後



(s) すべり板表面 8セット目後



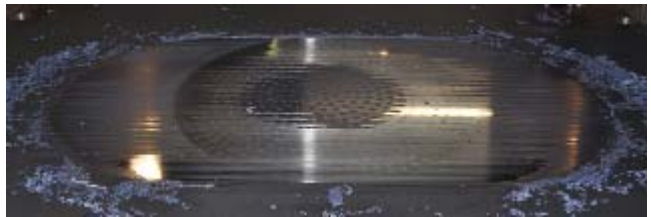
(t) すべり材下面 9セット目後



(u) すべり板表面 9セット目後



(v) すべり材下面 10セット目後



(w) すべり板表面 10セット目後

写真 1.3.5-13 #3 試験体 すべり材下面、すべり板表面状況写真(2)

1.3.6 鋼材ダンパー

1.3.6.1 実験計画

(1) 実験目的と背景

表 1.3.6-1 に鋼材ダンパーの繰り返し加振実験に関する主要文献を示す。以下、主要文献について内容をまとめる。文中の文献番号は表 1.3.6-1 による。

鋼材ダンパーの繰り返し加振時における特性については表 1.3.6-1 中の文献 1 により、積層ゴムφ600 に対応する鋼材ダンパーで 0 度、45 度、90 度の静的漸増加振結果により疲労特性が、縮小試験体により速度依存性、温度依存性が求められている。また、実大 4 本組試験体により縮小試験体と同様の特性が得られ相似則が成立することが示されている。表 1.3.6-1 中の文献 2 では縮小試験体の定振幅載荷実験により疲労曲線を求め、ランダム振幅に対する破断回数の予測方法としてマイナー則による方法を提示している。表 1.3.6-1 中の文献 3、4 では実大試験体の動的載荷試験を行い鋼材ダンパーの履歴挙動と 0 度、45 度、90 度方向載荷時の疲労性能を評価している。また 2 方向の地震応答波加振も実施している。

表 1.3.6-1 の文献に示された鋼材ダンパーは全て免震 U 型ダンパーであり、近年このタイプが鋼材ダンパーの主流となっている。ここでは免震 U 型ダンパーを対象として、多数回繰り返し載荷に対する性能確認のための実験を行う。本実験における確認項目は以下の通りとする。

- ①定振幅繰り返し載荷により低サイクル疲労による限界性能を把握し、既往の疲労曲線との対応を確認する。
- ②これまで実施例の少ない複数の振幅による繰り返し載荷により変動振幅に対する低サイクル疲労性能を確認する。その際、マイナー則による疲労評価で疲労曲線との対応を確認する。
- ③破断直前までの履歴特性が安定していることを確認する。

表 1.3.6-1 鋼材ダンパーの繰り返し加振実験に関する主要文献

番号	論文名	著者名	掲載誌
1	免震 U 型ダンパーに関する実験的研究 (その 1~6)	鈴木一弁他	建築学会学術講演集、1999~ 2000
2	免震 U 型ダンパーの実大動的載荷試験 (その 1、2)	植草雅浩他	建築学会学術講演集、2007
3	免震構造用 U 字型ダンパーの繰り返し変形性能に関する研究	吉敷祥一他	構造系論文集、 No.646、 2009.12
4	免震 U 型ダンパーの実大試験体による動的載荷試験 (その 1、2)	西本晃治他	建築学会学術講演集、2008

(2) 実験日時および場所

場所 : 新日鐵総合技術センター内 新日鐵エンジニアリング技術開発研究所開発 A 棟
 日時 : 平成 22 年 11 月 1 日～11 日

(3) 試験体

試験体は免震 U 型ダンパー NSUD55×4 (ダンパーロッド 4 本) の実大試験体 4 体とする。試験体の保有性能を表 1.3.6-2 に、疲労性能曲線を図 1.3.6-1 に、試験体形状図を図 1.3.6-2 に示す。

表 1.3.6-2 NSUD55×4 保有性能

初期剛性	9,600 kN/m	板厚	45mm
2 次剛性	160 kN/m	弾性限度範囲	31.7mm
降伏せん断力	304 kN	限界変形	850mm

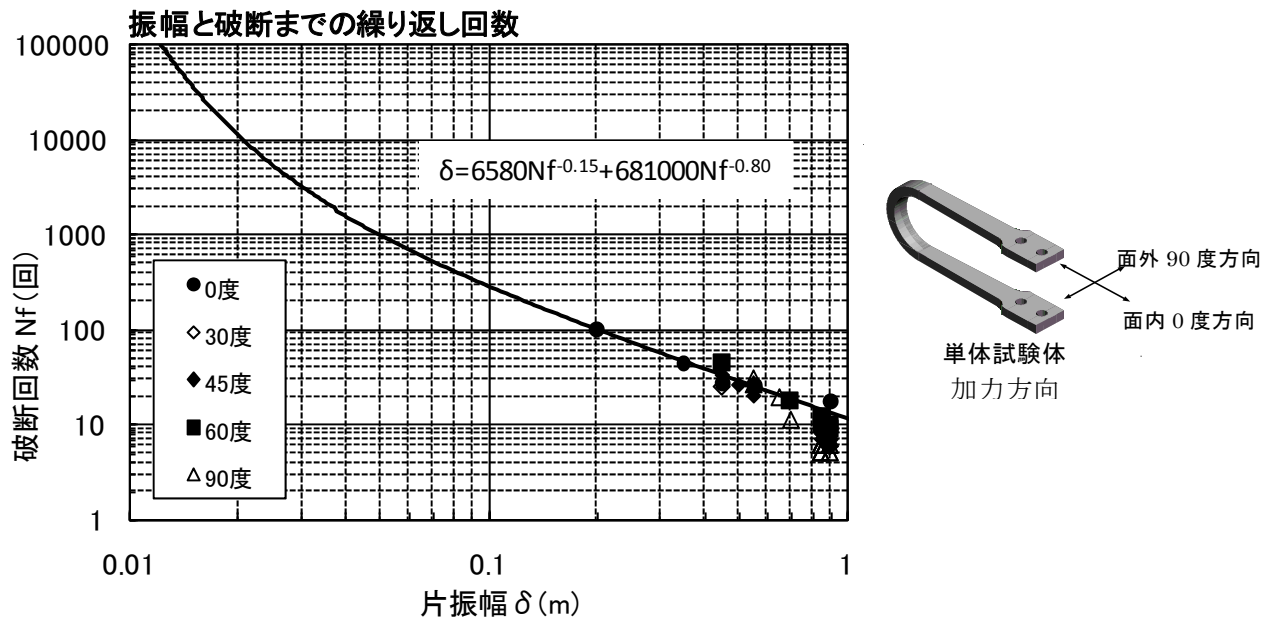


図 1.3.6-1 NSUD55 疲労性能曲線

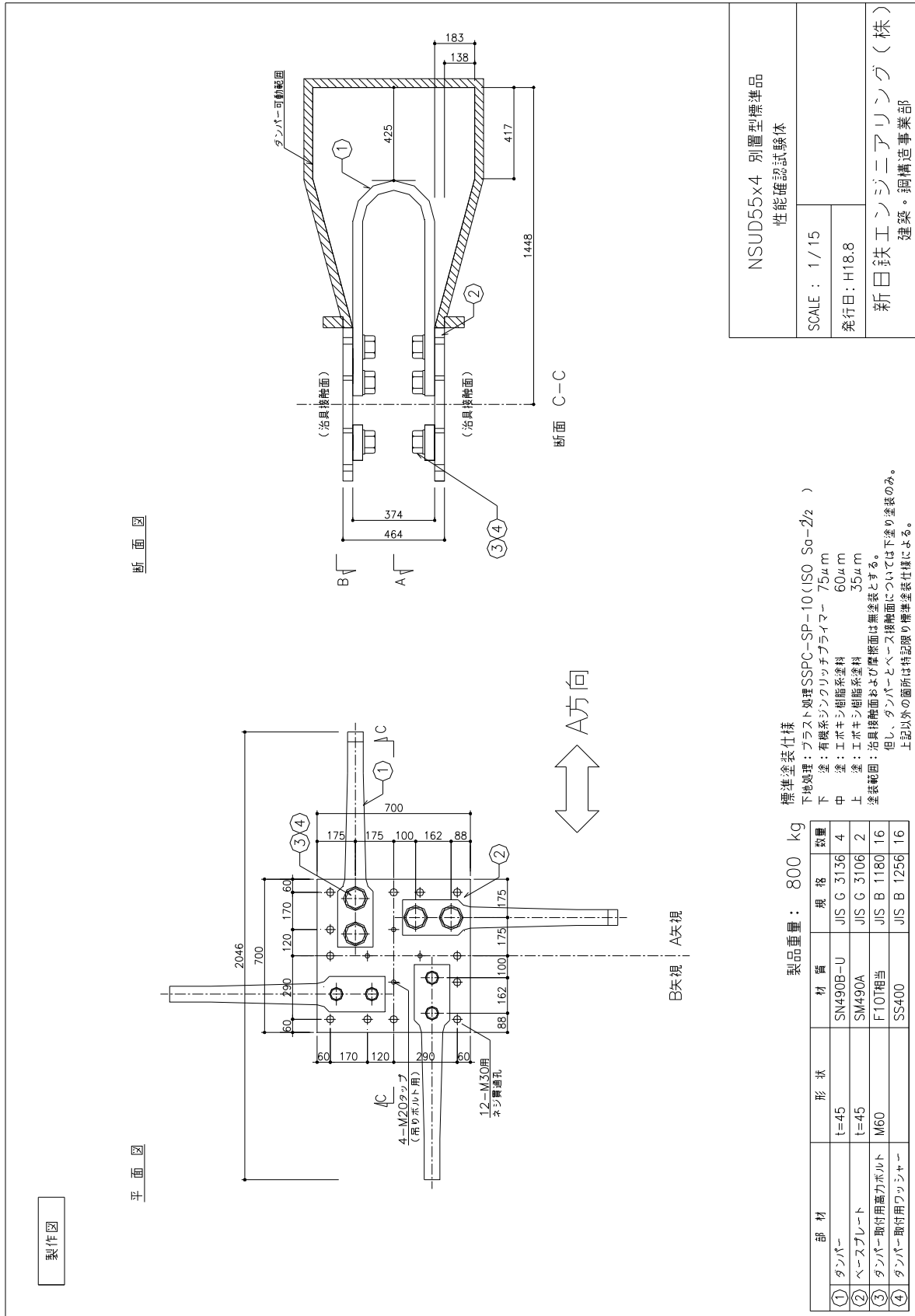


図 1.3.6-2 試験体形状図

(4) 試験装置

载荷には、図 1.3.6-3 に示す新日鉄エンジニアリング(株)技術開発研究所の圧縮せん断試験機（最大荷重：±1,000kN（鉛直・水平とも）、最大ストローク：±1,200mm、最大速度：10mm/sec.）を用いる。

試験体上下のフランジプレートと取付治具の間に日本ディー・エム・イー株式会社製「高温用断熱板」THIS-3636-2（914×914×6.35mm）をセットする。

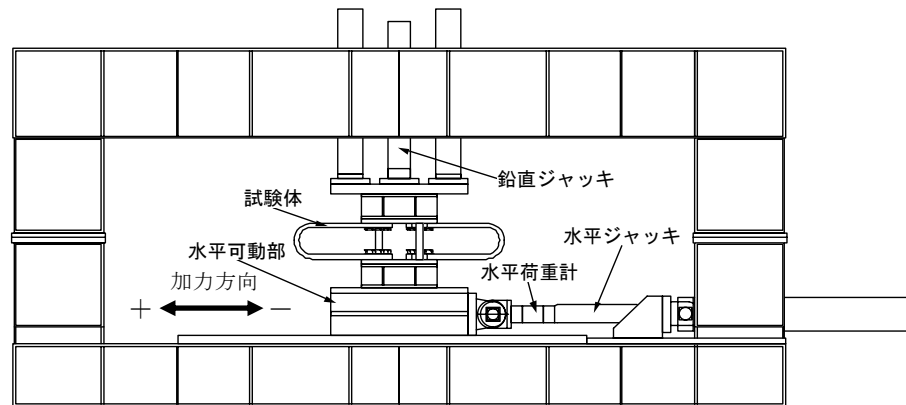


図 1.3.6-3 試験装置

(5) 計測項目と計測方法

計測項目は以下の通りとする。（ ）内は計測方法である。

- ①水平力、水平変位（荷重計と水平ジャッキ内蔵変位計）
- ②破断までの繰返し回数
- ③ダンパー3 か所及びベースプレート1 か所の温度（温度ゲージ、試験体2のみ）
- ④定点連続撮影（デジタルビデオカメラ）

(6) 実験方法と実験ケース

载荷方法を表 1.3.6-3 に示す。载荷方向は図 1.3.6-2 に示す A 方向とし、载荷速度は 10mm/sec の三角波とする。载荷終了はダンパーロッド 4 本のうち 3 本目が破断に至ったとき、あるいは、1 本目が破断した回数の 2 倍を超えたときとする。試験体 1 及び 2 は、それぞれ定振幅 100mm 及び 400mm での繰返し载荷、試験体 3 及び 4 は 100、200、300、400mm を組み合わせた変動振幅での繰返し载荷である。変動振幅については、図 1.3.6-1 の疲労性能曲線より、各振幅での破断回数は、100mm が 294 回、200mm が 100 回、300mm が 58 回、400mm が 38 回となるので、マイナー則に従い破断までの回数が 5:2:2:1 と 1:2:2:5 となるようにそれぞれの振幅を組み合わせた（次式参照）。

$$\text{変動振幅 A} \quad 294 \times \frac{5}{10} : 100 \times \frac{2}{10} : 58 \times \frac{2}{10} : 38 \times \frac{1}{10} = 147 : 20 : 11.6 : 3.8 \cong 38 : 5 : 3 : 1$$

$$\text{変動振幅 B} \quad 294 \times \frac{1}{10} : 100 \times \frac{2}{10} : 58 \times \frac{2}{10} : 38 \times \frac{5}{10} = 29.4 : 20 : 11.6 : 19 \cong 3 : 2 : 1 : 2$$

表 1.3.6-4 に、図 1.3.6-1 の疲労曲線を用いた各試験体における破断回数の予測を示す。

なお、本ダンパーの動的実験から得られた履歴挙動やエネルギー吸収性能は、静的実験とほぼ同等であることが確認されており^{1.3.6-1)}、本ダンパーの速度依存性は小さいと考えられる。よって、今回の繰り返し加力実験を載荷速度 10mm/s の準静的な加力で実施することについては、問題ないと考えられる。

表 1.3.6-3 載荷方法

試験体 番号	載荷方向 (図 1.3.6-2 参照)	載荷方法
1	A	定振幅(±100mm)で繰り返し
2	A	定振幅(±400mm)で繰り返し
3	A	変動振幅 A (±100mm×38 回+±200mm×5 回+±300mm×3 回+±400mm×1 回) で繰り返し
4	A	変動振幅 B (±100mm×3 回+±200mm×2 回+±300mm×1 回+±400mm×2 回) で繰り返し

表 1.3.6-4 破断回数の予測

試験体 番号	振幅毎の回数組合せ割合(%)				破断までの予測回数 (回) *1				累積 変形量 (m)	載荷 時間 (分)
	振幅 (mm)				振幅 (mm)					
	±100	±200	±300	±400	±100	±200	±300	±400		
1	100				294	0	0	0	117.6	196
2				100	0	0	0	38	60.8	101
3	81	11	6	2	149	19	12	4	95.6	159
4	38	25	13	25	30	20	10	20	72	120

*1 ダンパーロッド 4 本のうち 1 本目の破断

1.3.6.2 実験結果

(1) 履歴特性

図 1.3.6-4～1.3.6-7 に各試験体の荷重-変位履歴図を示す。いずれのケースについても、0 度方向に設置された 2 本のダンパーロッドが相次いで破断し、その後、90 度方向のダンパーロッド 1 本が破断し、実験を終了した。図に示したように、ダンパーの荷重は繰り返し载荷に伴い次第に小さくなるが、ダンパーロッドが破断するたびに大きく低下していることが分かる。なお、試験体 4 では、0 度方向の 2 本のダンパーロッドが同時期に破断したため、ロッド 3 本分の荷重を明記していない。

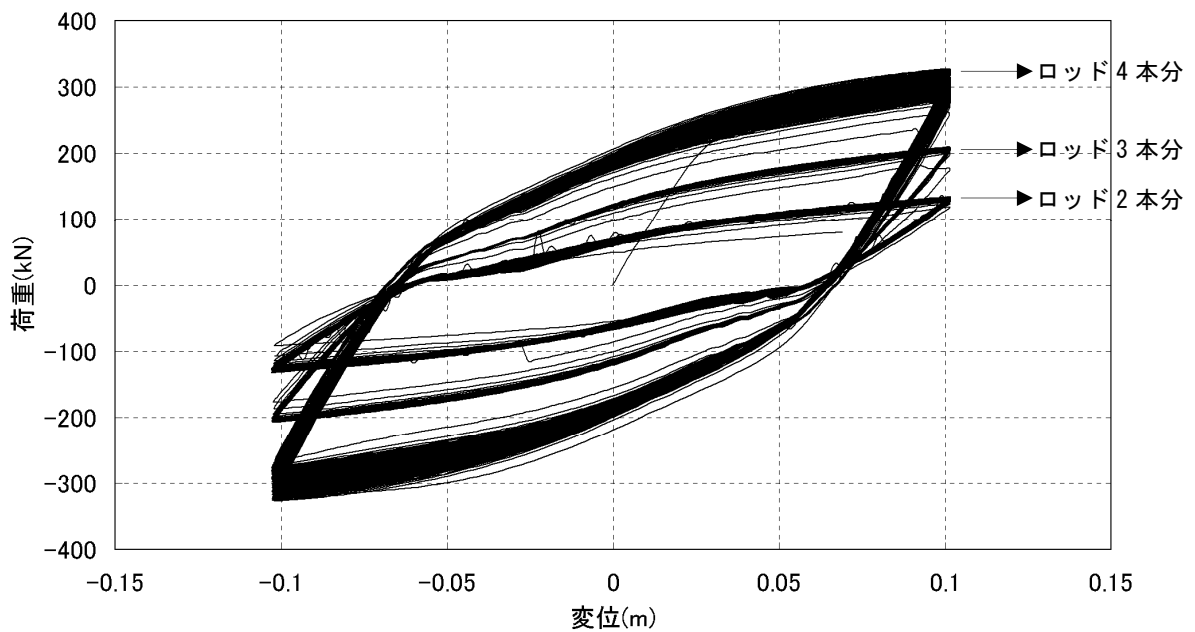


図 1.3.6-4 荷重変形関係 (試験体 1: 定振幅±100mm)

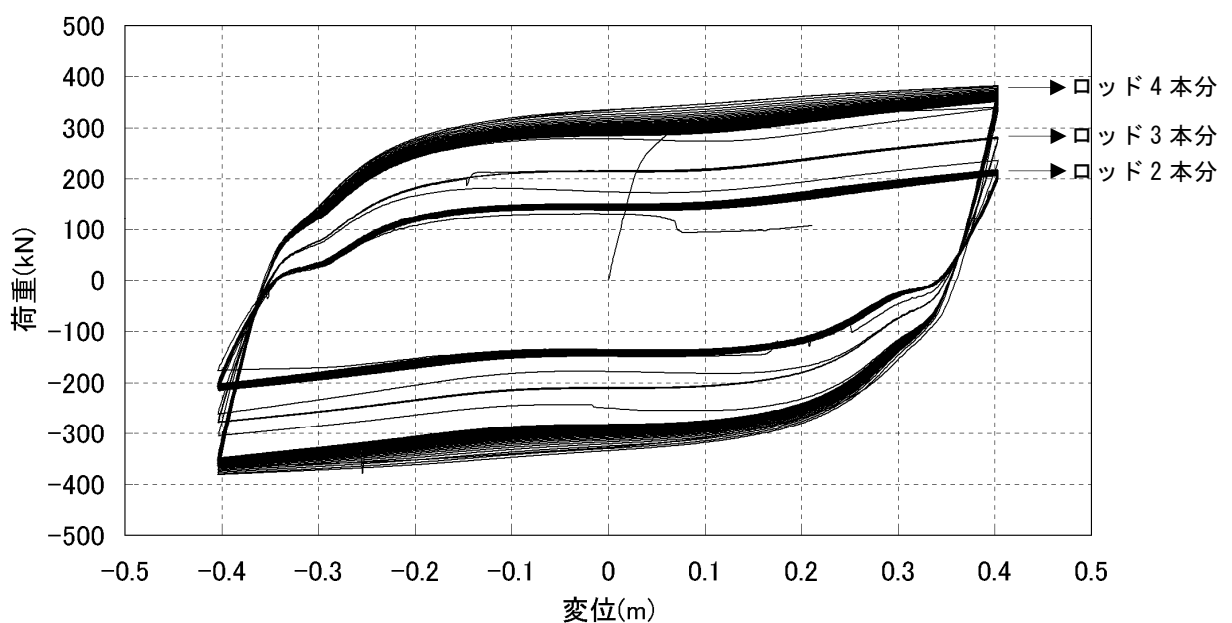


図 1.3.6-5 荷重変形関係 (試験体 2: 定振幅±400mm)

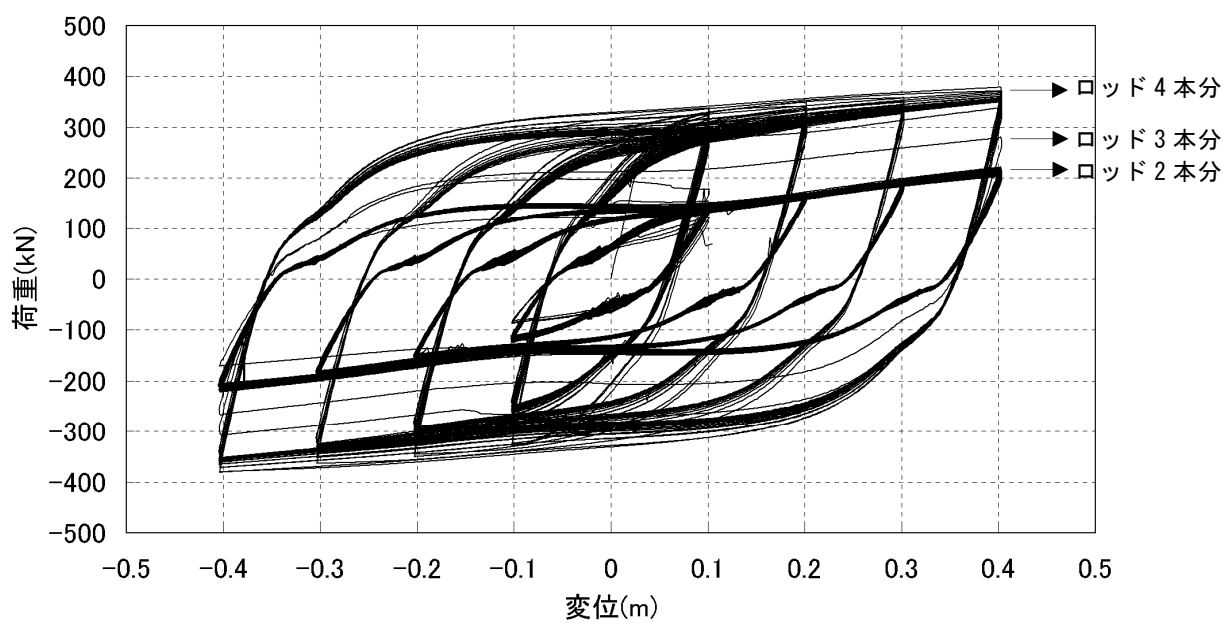


図 1.3.6-6 荷重変形関係 (試験体 3 : 変動振幅 A)

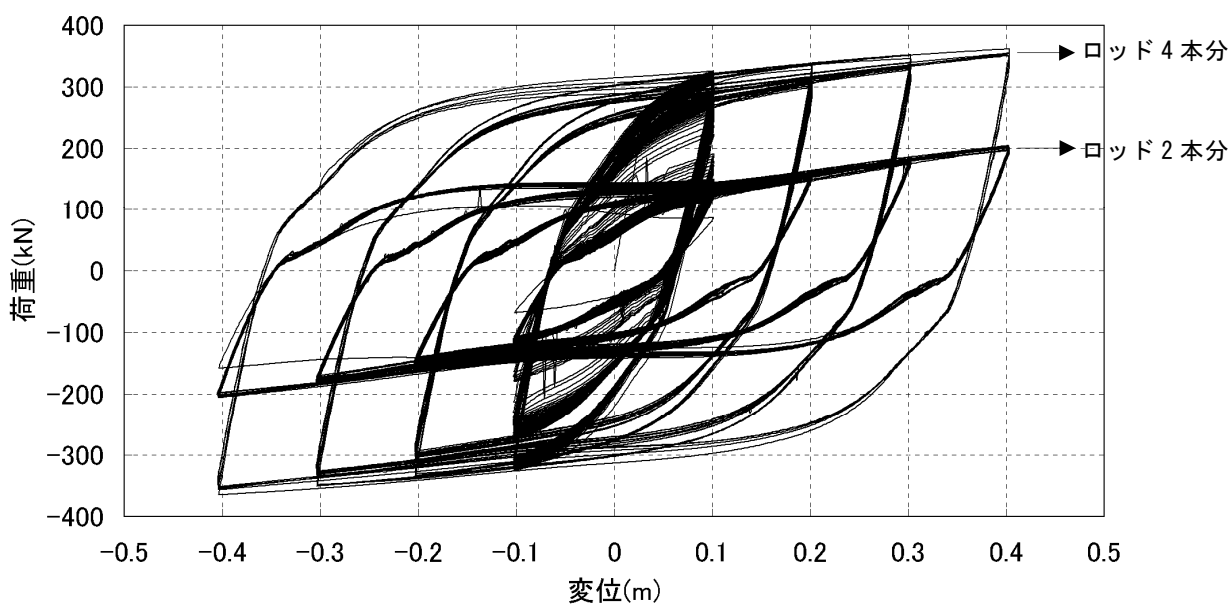


図 1.3.6-7 荷重変形関係 (試験体 4 : 変動振幅 B)

(2) エネルギー吸収特性

図 1.3.6-8～1.3.6-15、表 1.3.6-5～1.3.6-8 に各試験体の 1 サイクル当りのエネルギー吸収と累積吸収エネルギーの変化を示す。定振幅の結果（試験体 1、2）より、1 サイクル当たりの吸収エネルギーは繰り返しの伴い小さくなり、1 本目と 2 本目のダンパーロッド（いずれも 0 度方向）の破断によって大きく低下していることが分かる。その後、ダンパーロッド 3 本目（90 度方向）の破断までは、吸収エネルギーの低下は小さい。また、1 サイクル当たりの吸収エネルギーは、ダンパーロッド 1 本目破断の数回前のサイクルで 2 サイクル目に対して 85%程度になる。いずれのケースについても、累積吸収エネルギーは繰り返しの伴い増加するが、ダンパーロッドが破断するたびにその増加率が低下している。

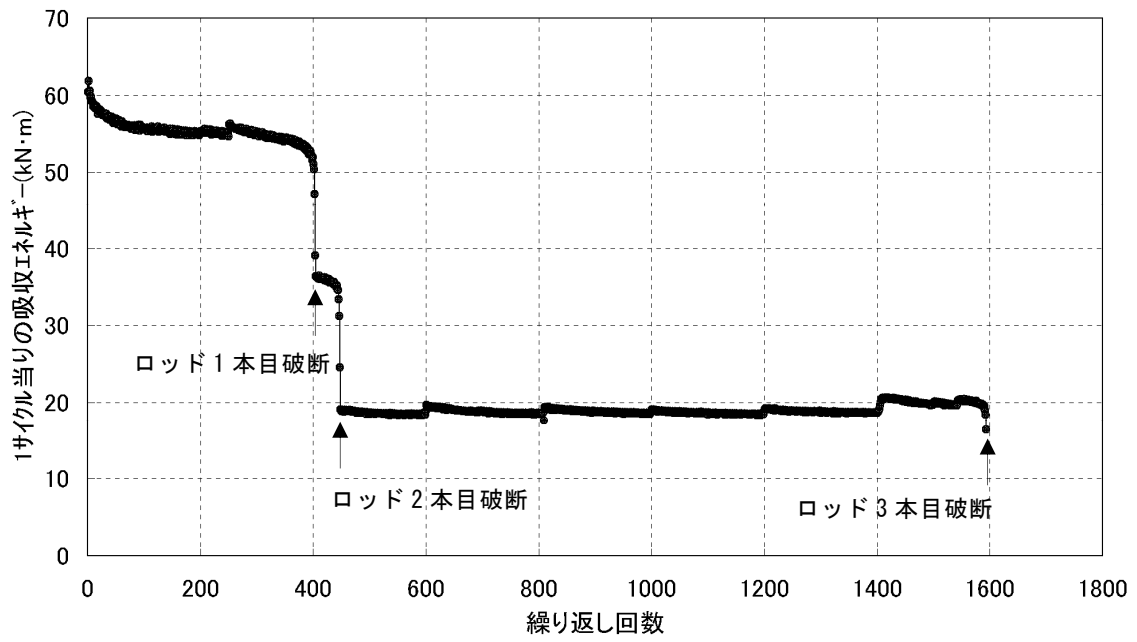


図 1.3.6-8 1 サイクル当りのエネルギー吸収量 (試験体 1 : 定振幅±100mm)

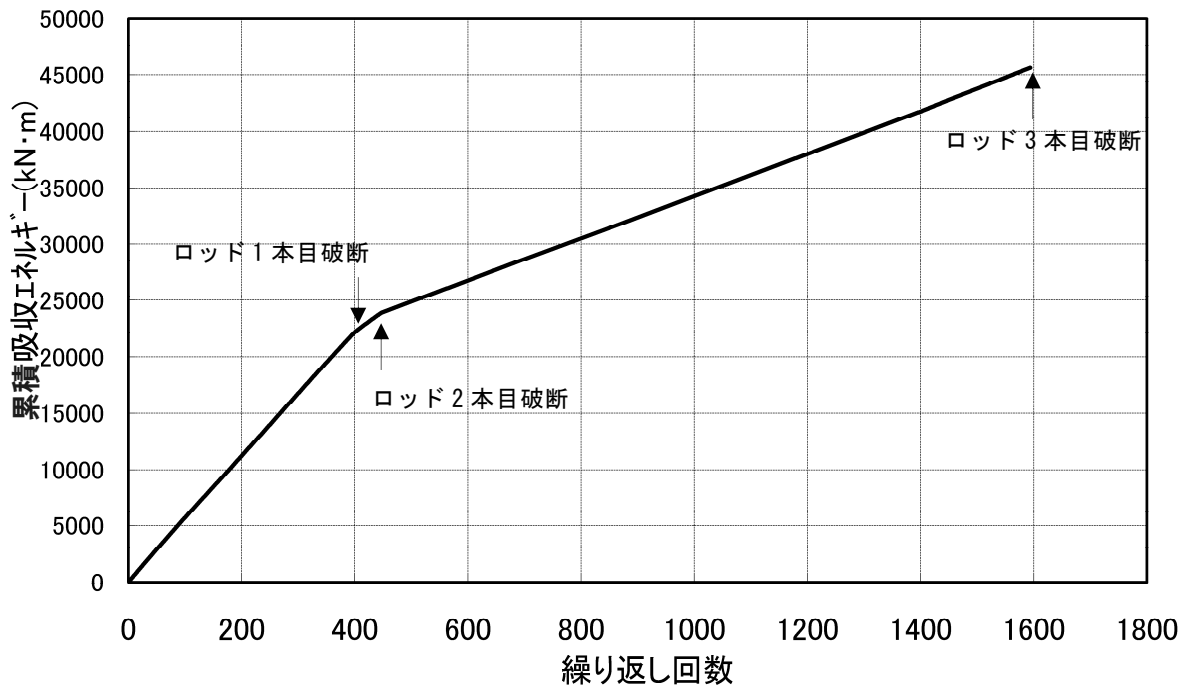


図 1.3.6-9 累積吸収エネルギーの変化 (試験体 1 : 定振幅±100mm)

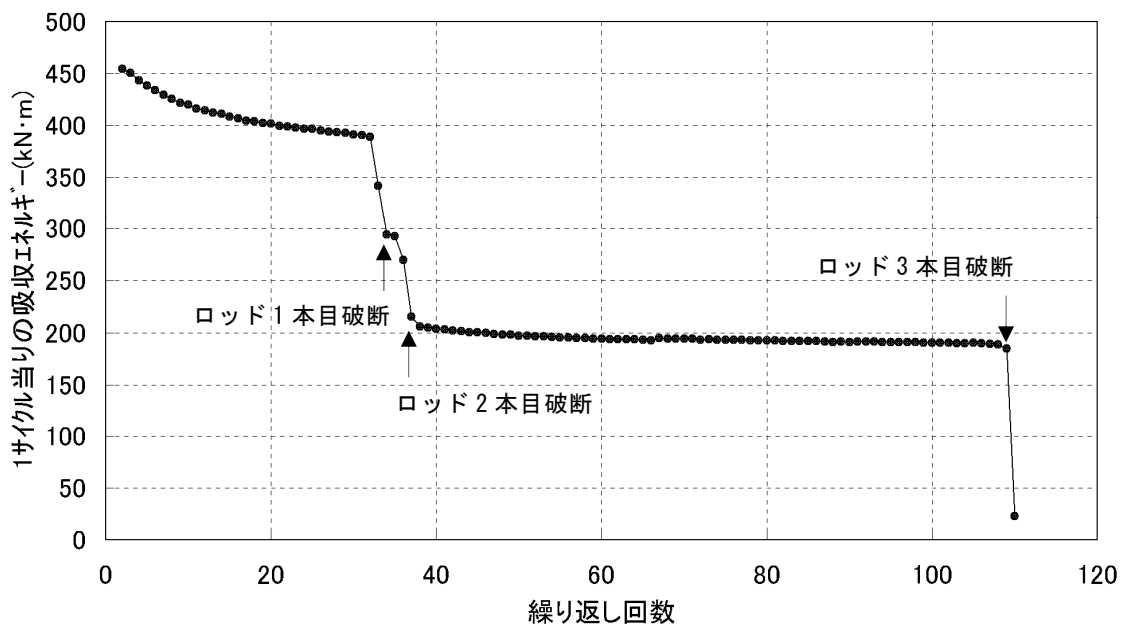


図 1.3.6-10 1 サイクル当りのエネルギー吸収量 (試験体 2 : 定振幅±400mm)

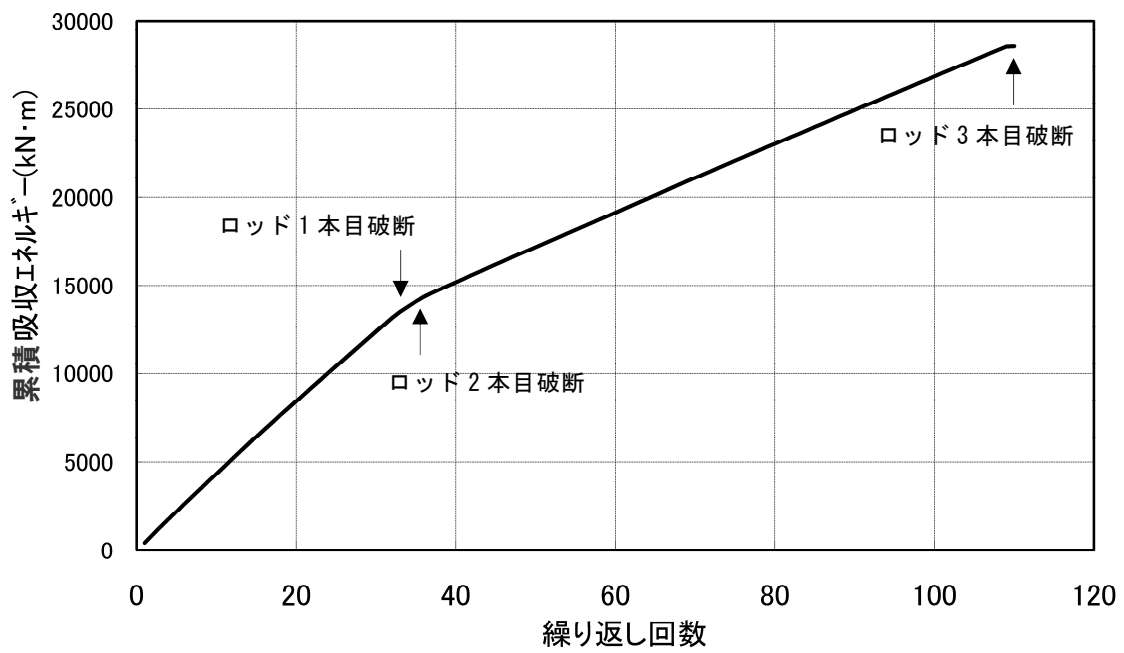


図 1.3.6-11 累積吸収エネルギーの変化 (試験体 2 : 定振幅±400mm)

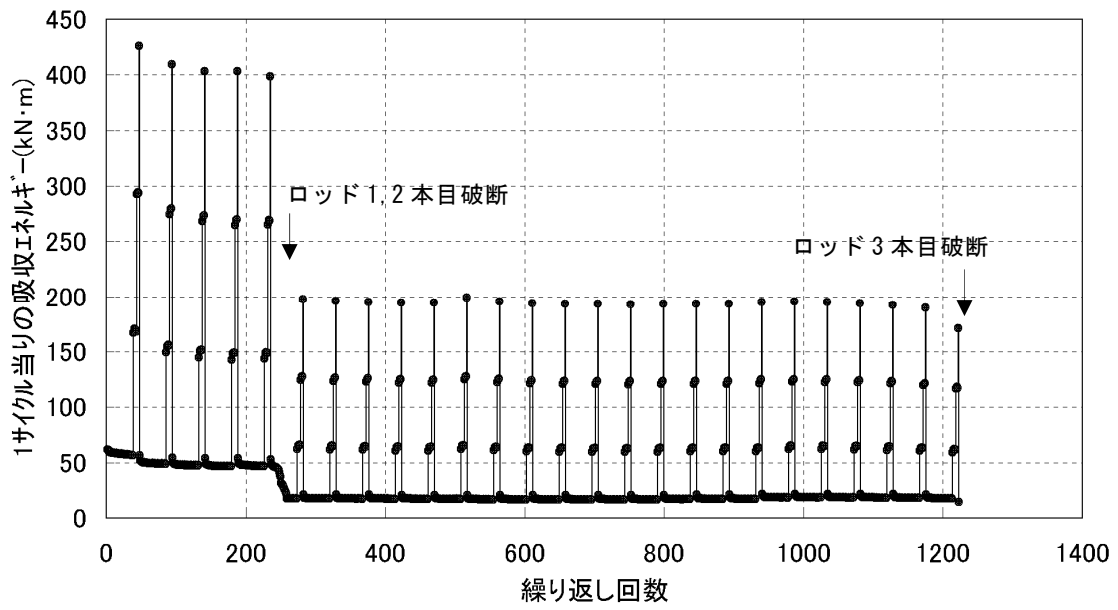


図 1.3.6-12 1 サイクル当りのエネルギー吸収量 (試験体 3 : 変動振幅 A)

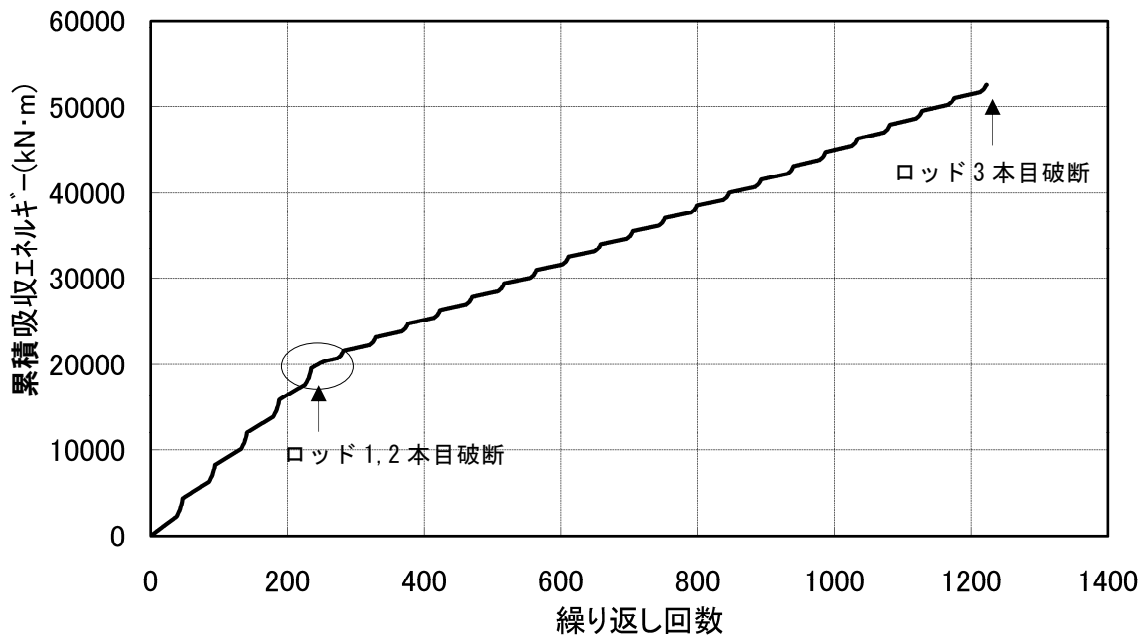


図 1.3.6-13 累積吸収エネルギーの変化 (試験体 3 : 変動振幅 A)

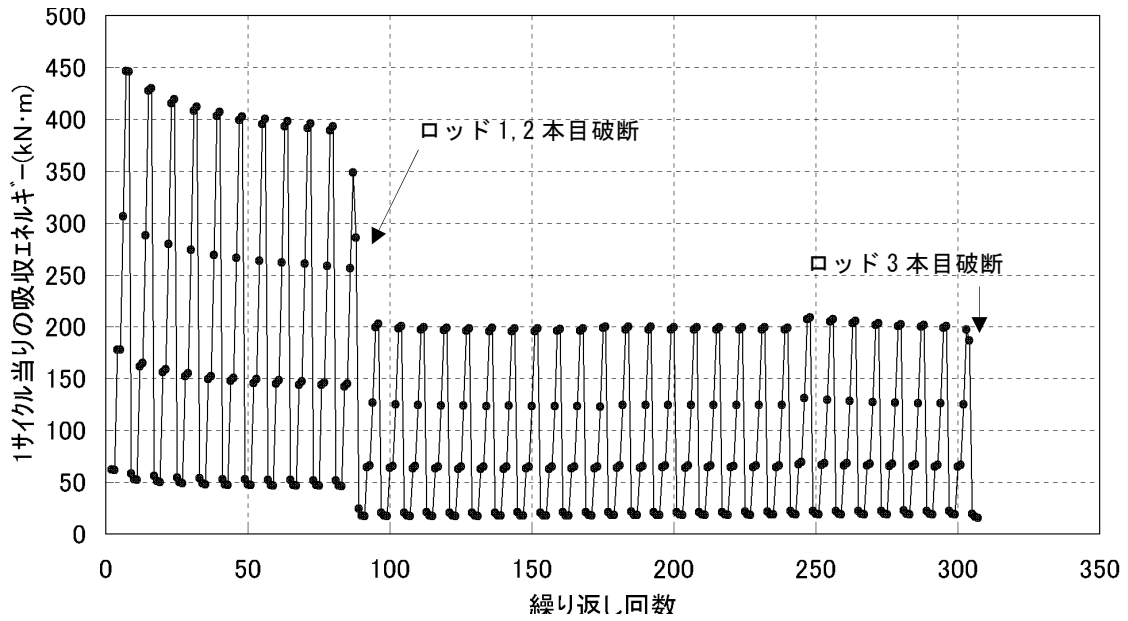


図 1.3.6-14 1 サイクル当りのエネルギー吸収量 (試験体 4 : 変動振幅 B)

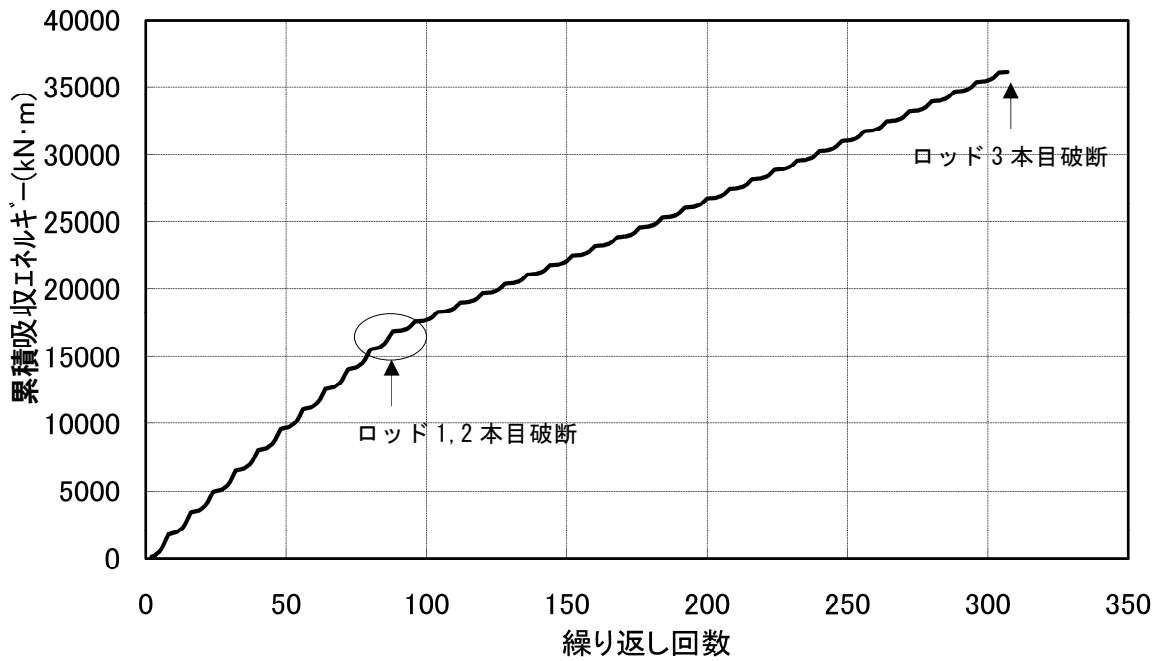


図 1.3.6-15 累積吸収エネルギーの変化 (試験体 4 : 変動振幅 B)

表 1.3.6-5 1 サイクルエネルギー吸収量、最大荷重の変化（試験体 1：定振幅±100mm）

繰返し回数	振幅 (m)	累積エネルギー (kN・m)	吸収エネルギー (kN・m)	最大荷重			備 考
				正側 (kN)	負側 (kN)	平均 (kN)	
1	0.10	60	60	314.4	-319.1	316.7	
2		122	62	324.8	-326.0	325.4	
3		183	60	327.9	-327.1	327.5	
4		243	61	327.9	-326.8	327.3	
5		303	60	327.1	-325.6	326.3	
6		363	60	326.7	-324.4	325.5	
7		422	59	325.0	-323.5	324.3	
8		481	59	324.6	-322.4	323.5	
9		540	59	324.0	-321.6	322.8	
10		599	59	322.4	-320.4	321.4	
20		1183	58	315.4	-313.1	314.3	
30		1759	57	310.9	-308.2	309.6	
40		2331	57	307.4	-304.6	306.0	
50		2899	57	303.9	-302.1	303.0	
60		3463	56	301.3	-299.5	300.4	
70		4025	56	299.8	-297.7	298.7	
80		4584	56	298.5	-296.4	297.5	
90		5143	56	297.1	-295.2	296.2	
100		5700	56	296.2	-294.1	295.1	
150		8475	55	293.3	-290.6	291.9	
200		11231	55	291.5	-289.2	290.3	
250		13987	55	290.8	-289.1	290.0	
300		16759	55	293.7	-291.3	292.5	
350		19487	54	290.6	-287.3	289.0	
400		22163	52	280.6	-277.3	279.0	
401		22214	51	279.0	-275.7	277.3	
402		22264	50	273.3	-273.5	273.4	
403		22311	47	261.6	-266.6	264.1	
404		22350	39	206.6	-206.7	206.6	1本目破断
405		22387	36	209.1	-206.8	207.9	
406		22423	36	208.9	-206.7	207.8	
407		22459	36	208.9	-206.9	207.9	
408		22495	36	209.6	-206.7	208.1	
409		22532	36	209.3	-206.4	207.8	
410		22568	36	209.0	-206.1	207.6	
420		22928	36	208.1	-205.2	206.6	
430		23287	36	207.2	-204.0	205.6	
440		23642	35	204.9	-201.2	203.1	
441		23677	35	205.0	-200.9	202.9	
442		23712	35	204.2	-199.6	201.9	
443		23747	35	204.2	-198.2	201.2	
444		23782	35	203.2	-194.8	199.0	
445		23815	33	201.7	-187.5	194.6	
446		23846	31	200.0	-176.6	188.3	
447		23871	25	177.6	-126.4	152.0	2本目破断
448		23890	19	128.1	-126.2	127.2	
449		23909	19	128.4	-126.4	127.4	
450		23928	19	128.5	-126.2	127.4	
500		24869	19	127.5	-125.6	126.6	
600		26720	19	127.2	-125.1	126.2	
700		28628	19	129.7	-127.5	128.6	
800		30490	19	128.4	-126.1	127.3	
801		30509	19	128.4	-126.4	127.4	
802		30528	19	128.3	-126.2	127.2	
803		30546	18	128.4	-126.1	127.3	
804		30565	19	128.4	-126.3	127.4	
805		30583	19	128.3	-126.1	127.2	
806		30602	19	128.4	-126.4	127.4	
807		30620	19	128.3	-126.1	127.2	
808		30639	19	128.4	-126.3	127.4	1本目破断の2倍
809		30657	18	129.1	-126.5	127.8	
810		30676	19	129.2	-126.8	128.0	
900		32387	19	128.3	-126.2	127.2	
1000		34256	19	127.9	-125.9	126.9	
1100		36133	18	128.2	-126.1	127.1	
1200		37985	19	127.9	-125.7	126.8	
1300		39879	19	128.2	-126.2	127.2	
1400		41750	19	128.2	-126.0	127.1	
1500		43764	20	129.0	-126.7	127.9	
1550		44758	20	132.2	-129.4	130.8	
1590		45559	20	128.8	-121.4	125.1	
1591		45578	19	127.9	-119.0	123.4	
1592		45597	19	127.2	-114.5	120.8	
1593		45615	18	124.6	-107.2	115.9	
1594		45632	16	118.3	-91.6	105.0	3本目破断

表 1.3.6-6 1 サイクルエネルギー吸収量、最大荷重の変化（試験体 2：定振幅±400mm）

繰返し回数	振幅 (m)	累積エネルギー (kN・m)	吸収エネルギー (kN・m)	最大荷重			備 考
				正側 (kN)	負側 (kN)	平均 (kN)	
1	0.40	428	428	340.1	-367.8	353.9	
2	0.40	883	455	381.4	-381.0	381.2	
3	0.40	1333	450	382.6	-379.8	381.2	
4	0.40	1777	444	380.0	-376.9	378.5	
5	0.40	2215	438	377.3	-374.1	375.7	
6	0.40	2649	434	374.5	-371.6	373.0	
7	0.40	3078	429	372.1	-369.2	370.7	
8	0.40	3504	426	370.0	-367.1	368.6	
9	0.40	3926	422	368.1	-365.1	366.6	
10	0.40	4346	420	366.2	-363.4	364.8	
11	0.40	4762	416	365.0	-361.9	363.4	
12	0.40	5177	415	363.2	-360.7	361.9	
13	0.40	5589	412	362.0	-359.2	360.6	
14	0.40	6000	411	361.0	-358.2	359.6	
15	0.40	6409	409	359.9	-357.2	358.5	
16	0.40	6816	407	358.9	-356.3	357.6	
17	0.40	7220	405	358.0	-355.5	356.8	
18	0.40	7624	404	357.3	-354.7	356.0	
19	0.40	8027	402	356.9	-354.0	355.4	
20	0.40	8428	402	356.2	-353.4	354.8	
21	0.40	8828	400	355.6	-352.9	354.3	
22	0.40	9227	399	355.0	-352.3	353.6	
23	0.40	9625	398	354.5	-351.9	353.2	
24	0.40	10022	397	354.2	-351.6	352.9	
25	0.40	10418	397	353.8	-351.2	352.5	
26	0.40	10813	395	353.6	-350.7	352.2	
27	0.40	11207	394	353.2	-350.6	351.9	
28	0.40	11600	393	352.9	-350.1	351.5	
29	0.40	11993	393	352.4	-349.9	351.2	
30	0.40	12385	391	352.7	-349.6	351.1	
31	0.40	12775	390	351.9	-349.2	350.6	
32	0.40	13164	389	351.8	-348.7	350.3	
33	0.40	13506	342	338.1	-305.2	321.6	1本目破断
34	0.40	13801	294	281.7	-277.8	279.8	
35	0.40	14093	293	281.0	-276.6	278.8	
36	0.40	14363	270	279.3	-260.9	270.1	
37	0.40	14579	216	236.3	-214.7	225.5	2本目破断
38	0.40	14784	206	217.6	-214.8	216.2	
39	0.40	14989	205	217.2	-214.1	215.7	
40	0.40	15193	204	216.6	-213.6	215.1	
50	0.40	17192	197	211.6	-208.9	210.2	
60	0.40	19145	194	209.6	-207.1	208.3	
61	0.40	19339	194	209.7	-207.0	208.3	
62	0.40	19533	194	209.5	-207.0	208.2	
63	0.40	19726	193	209.5	-206.9	208.2	
64	0.40	19920	194	209.3	-206.8	208.0	
65	0.40	20113	193	209.2	-206.8	208.0	
66	0.40	20306	193	209.4	-206.4	207.9	1本目破断の2倍
67	0.40	20501	195	211.0	-208.4	209.7	
68	0.40	20695	194	210.8	-208.1	209.5	
69	0.40	20889	194	210.6	-208.1	209.4	
70	0.40	21083	194	210.4	-208.0	209.2	
80	0.40	23014	192	209.9	-207.2	208.5	
90	0.40	24932	191	209.7	-206.6	208.1	
100	0.40	26842	190	209.1	-205.8	207.4	
101	0.40	27032	190	209.0	-205.7	207.3	
102	0.40	27223	190	208.8	-205.5	207.2	
103	0.40	27413	190	208.7	-205.3	207.0	
104	0.40	27602	190	208.5	-205.1	206.8	
105	0.40	27792	190	208.3	-204.9	206.6	
106	0.40	27982	190	208.1	-204.5	206.3	
107	0.40	28171	189	207.7	-203.9	205.8	
108	0.40	28360	189	207.5	-202.6	205.1	
109	0.40	28545	185	206.7	-176.2	191.5	
110	0.40	28567	23	106.0	0.0	106.0	3本目破断

表 1.3.6-7 1 サイクルエネルギー吸収量、最大荷重の変化（試験体 3：変動振幅 A）

サイクル数	振幅 (m)	累積エネルギー (kN・m)	吸収エネルギー (kN・m)	最大荷重			備考
				正側	負側	平均	
				(kN)	(kN)	(kN)	
1	0.10	60	60	311.9	-317.3	314.6	
2	0.10	122	62	322.3	-324.0	323.1	
3	0.10	183	61	325.3	-324.8	325.1	
4	0.10	243	60	325.8	-324.4	325.1	
5	0.10	303	60	324.9	-323.4	324.2	
6	0.10	362	59	323.7	-322.6	323.2	
7	0.10	422	59	323.3	-321.4	322.4	
8	0.10	480	59	321.9	-320.7	321.3	
9	0.10	540	59	321.2	-319.8	320.5	
10	0.10	599	59	320.6	-318.3	319.5	
11	0.10	657	59	319.3	-317.8	318.6	
12	0.10	716	59	318.6	-317.1	317.8	
13	0.10	775	59	318.1	-316.0	317.1	
14	0.10	833	58	317.5	-315.1	316.3	
15	0.10	892	58	316.0	-314.8	315.4	
16	0.10	950	58	315.4	-314.1	314.7	
17	0.10	1008	58	315.1	-313.2	314.2	
18	0.10	1067	58	314.1	-312.2	313.2	
19	0.10	1124	58	313.4	-311.8	312.6	
20	0.10	1182	58	312.8	-311.6	312.2	
21	0.10	1240	58	312.6	-311.0	311.8	
22	0.10	1298	58	312.2	-310.4	311.3	
23	0.10	1356	58	311.6	-310.0	310.8	
24	0.10	1414	58	311.2	-309.4	310.3	
25	0.10	1472	58	310.7	-308.9	309.8	
26	0.10	1529	58	310.3	-308.5	309.4	
27	0.10	1587	57	309.7	-308.0	308.9	
28	0.10	1644	57	308.9	-307.5	308.2	
29	0.10	1701	58	308.4	-306.8	307.6	
30	0.10	1759	57	307.7	-306.2	306.9	
31	0.10	1816	57	307.8	-306.2	307.0	
32	0.10	1873	57	307.4	-306.0	306.7	
33	0.10	1930	57	306.7	-305.4	306.0	
34	0.10	1987	57	306.3	-304.6	305.5	
35	0.10	2044	57	305.8	-304.3	305.0	
36	0.10	2101	57	305.4	-303.7	304.5	
37	0.10	2158	57	305.1	-303.5	304.3	
38	0.10	2214	57	305.3	-303.4	304.3	
39	0.20	2381	167	331.6	-330.5	331.1	
40	0.20	2552	171	335.4	-334.0	334.7	
41	0.20	2722	170	337.0	-334.7	335.8	
42	0.20	2891	170	336.9	-334.1	335.5	
43	0.20	3060	168	336.3	-333.2	334.7	
44	0.30	3353	293	346.1	-348.2	347.2	
45	0.30	3647	294	352.2	-350.1	351.1	
46	0.30	3940	294	352.4	-349.5	351.0	
47	0.40	4367	426	362.1	-364.8	363.5	
236	0.10	19607	53	297.7	-250.2	274.0	
237	0.10	19655	48	285.6	-251.6	268.6	
238	0.10	19703	47	278.7	-250.9	264.8	
239	0.10	19750	47	274.6	-249.9	262.2	
240	0.10	19796	47	271.3	-248.8	260.1	
241	0.10	19843	46	268.4	-247.9	258.2	
242	0.10	19889	46	265.8	-247.1	256.4	
243	0.10	19935	46	263.5	-245.6	254.6	
244	0.10	19981	46	260.7	-244.6	252.7	
245	0.10	20026	45	257.2	-243.3	250.3	
246	0.10	20070	45	254.1	-241.7	247.9	
247	0.10	20114	44	247.7	-239.5	243.6	
248	0.10	20156	42	237.9	-236.2	237.0	
249	0.10	20194	39	229.7	-230.2	230.0	
250	0.10	20232	37	222.7	-213.4	218.1	
251	0.10	20264	32	190.9	-179.8	185.3	1本目破断
252	0.10	20294	30	186.8	-178.3	182.6	
253	0.10	20324	30	183.9	-176.5	180.2	
254	0.10	20352	29	178.4	-174.2	176.3	
255	0.10	20380	27	173.0	-171.3	172.1	
256	0.10	20406	26	167.4	-163.5	165.4	
257	0.10	20430	24	162.3	-149.7	156.0	
258	0.10	20452	22	159.0	-140.9	150.0	2本目破断

表 1.3.6-7 1 サイクルエネルギー吸収量、最大荷重の変化（試験体 3：変動振幅 A）

（続き）

No.2

サイクル数	振幅 (m)	累積エネルギー (kN・m)	吸収エネルギー (kN・m)	最大荷重			備考
				正側 (kN)	負側 (kN)	平均 (kN)	
259	0.10	20470	18	130.6	-118.6	124.6	
260	0.10	20488	18	130.3	-118.5	124.4	
261	0.10	20505	18	130.2	-118.7	124.4	
262	0.10	20523	18	130.1	-118.3	124.2	
263	0.10	20541	18	129.9	-118.4	124.2	
264	0.10	20558	18	129.8	-118.4	124.1	
265	0.10	20576	18	129.5	-118.3	123.9	
266	0.10	20594	18	129.5	-118.3	123.9	
267	0.10	20611	18	129.3	-118.2	123.8	
268	0.10	20629	18	129.3	-118.4	123.8	
269	0.10	20647	18	129.1	-118.2	123.7	
270	0.10	20664	18	129.1	-118.0	123.5	
271	0.10	20682	18	128.8	-118.2	123.5	
272	0.10	20700	18	128.8	-118.1	123.4	
273	0.10	20717	18	128.7	-118.2	123.4	
274	0.20	20780	62	154.9	-148.1	151.5	
275	0.20	20845	66	156.9	-150.5	153.7	
276	0.20	20911	66	157.5	-151.6	154.5	
277	0.20	20977	66	157.3	-152.0	154.7	
278	0.20	21043	66	157.1	-152.2	154.6	
279	0.30	21168	125	176.3	-175.8	176.0	
280	0.30	21295	128	179.4	-177.3	178.4	
281	0.30	21423	128	180.2	-177.6	178.9	
282	0.40	21621	198	197.1	-198.8	197.9	
500	0.10	28371	17	124.9	-114.6	119.7	
501	0.10	28388	17	124.7	-114.5	119.6	
502	0.10	28405	17	124.7	-114.5	119.6	1本目破断回数2倍
503	0.10	28423	17	131.5	-119.6	125.6	
504	0.10	28440	17	130.4	-119.7	125.1	
505	0.10	28457	17	130.5	-119.6	125.0	
506	0.10	28474	17	130.5	-119.6	125.0	
507	0.10	28491	17	130.4	-120.0	125.2	
508	0.10	28508	17	130.3	-119.4	124.8	
509	0.20	28570	62	159.7	-151.8	155.7	
510	0.20	28635	65	161.3	-153.6	157.5	
511	0.20	28700	65	161.2	-154.8	158.0	
512	0.20	28766	66	161.3	-155.0	158.1	
513	0.20	28831	65	160.8	-155.5	158.1	
514	0.30	28956	125	183.0	-181.6	182.3	
515	0.30	29084	127	185.0	-182.9	184.0	
516	0.30	29212	128	185.8	-183.1	184.4	
517	0.40	29411	199	204.3	-205.6	205.0	
1213	0.10	51762	17	118.2	-109.5	113.8	
1214	0.20	51822	59	149.3	-140.6	145.0	
1215	0.20	51883	62	150.3	-142.1	146.2	
1216	0.20	51945	62	150.2	-142.7	146.5	
1217	0.20	52007	62	150.1	-143.1	146.6	
1218	0.20	52069	62	149.9	-143.1	146.5	
1219	0.30	52186	117	176.0	-173.6	174.8	
1220	0.30	52304	118	176.7	-173.2	174.9	
1221	0.30	52422	117	176.1	-171.0	173.5	
1222	0.40	52593	171	198.3	-158.2	178.2	
1223	0.10	52607	14	85.7	-68.2	77.0	3本目破断

表 1.3.6-8 1 サイクルエネルギー吸収量、最大荷重の変化（試験体 4：変動振幅 B）

繰返し回数	振幅 (m)	累積エネルギー (kN・m)	吸収エネルギー (kN・m)	最大荷重			備考
				正側 (kN)	負側 (kN)	平均 (kN)	
1	0.10	61	61	317.9	-323.7	320.8	
2	0.10	123	123	327.2	-329.5	328.4	
3	0.10	185	61	330.0	-330.5	330.2	
4	0.20	363	178	341.0	-345.5	343.3	
5	0.20	540	178	349.1	-350.2	349.6	
6	0.30	848	307	358.2	-363.5	360.9	
7	0.40	1294	447	371.4	-380.0	375.7	
8	0.40	1740	446	378.9	-380.8	379.8	
25	0.10	5017	55	315.7	-265.4	290.5	
26	0.10	5067	50	301.8	-267.2	284.5	
27	0.10	5116	49	294.9	-266.6	280.8	
28	0.20	5267	152	321.0	-311.1	316.0	
29	0.20	5422	155	319.7	-311.6	315.7	
30	0.30	5697	274	338.4	-337.9	338.1	
31	0.40	6105	408	357.4	-360.4	358.9	
32	0.40	6517	412	360.8	-360.9	360.9	
49	0.10	9618	53	301.0	-254.0	277.5	
50	0.10	9665	48	287.6	-255.6	271.6	
51	0.10	9713	47	282.0	-255.5	268.7	
52	0.20	9858	146	310.3	-299.7	305.0	
53	0.20	10007	149	309.4	-300.8	305.1	
54	0.30	10272	264	331.0	-329.9	330.5	
55	0.40	10668	396	351.6	-354.1	352.8	
56	0.40	11068	401	354.7	-355.0	354.8	
73	0.10	14098	52	293.8	-249.1	271.4	
74	0.10	14145	47	281.5	-250.7	266.1	
75	0.10	14192	46	275.7	-250.5	263.1	
76	0.20	14335	143	305.1	-293.7	299.4	
77	0.20	14481	146	304.3	-295.2	299.7	
78	0.30	14741	259	328.1	-326.6	327.3	
79	0.40	15130	390	349.8	-352.2	351.0	
80	0.40	15524	394	352.9	-353.1	353.0	
81	0.10	15575	52	291.4	-246.6	269.0	
82	0.10	15622	47	279.2	-248.6	263.9	
83	0.10	15668	46	272.5	-248.5	260.5	
84	0.20	15810	142	302.9	-291.4	297.2	
85	0.20	15955	145	302.3	-292.6	297.5	
86	0.30	16212	257	326.6	-324.7	325.6	
87	0.40	16561	349	337.8	-308.0	322.9	1本目破断
88	0.40	16848	286	279.2	-265.4	272.3	
89	0.10	16872	25	178.1	-117.6	147.9	2本目破断
90	0.10	16890	18	144.8	-120.2	132.5	
91	0.10	16907	17	141.9	-120.5	131.2	
92	0.20	16971	64	166.3	-155.8	161.1	
93	0.20	17038	66	164.7	-156.9	160.8	
94	0.30	17164	127	186.1	-184.6	185.4	
95	0.40	17364	199	206.0	-208.3	207.2	
96	0.40	17566	202	208.6	-208.8	208.7	
121	0.10	19702	21	144.2	-113.1	128.7	
122	0.10	19719	18	139.0	-115.8	127.4	
123	0.10	19737	17	135.7	-116.6	126.1	
124	0.20	19800	63	161.0	-150.4	155.7	
125	0.20	19865	65	160.0	-151.9	156.0	
126	0.30	19989	124	183.6	-181.4	182.5	
127	0.40	20184	196	203.6	-205.8	204.7	
128	0.40	20383	198	206.2	-206.5	206.3	
145	0.10	21805	21	142.4	-112.1	127.3	
146	0.10	21823	18	137.3	-115.1	126.2	
147	0.10	21841	18	134.1	-115.5	124.8	
148	0.20	21904	63	159.7	-149.2	154.5	
149	0.20	21969	65	158.9	-150.4	154.7	
150	0.30	22092	123	183.7	-181.2	182.4	
151	0.40	22288	195	204.1	-206.2	205.2	
152	0.40	22486	198	206.7	-206.9	206.8	
169	0.10	23911	21	141.8	-112.2	127.0	
170	0.10	23929	18	136.7	-114.9	125.8	
171	0.10	23947	18	133.5	-115.6	124.5	
172	0.20	24010	63	159.3	-149.0	154.2	
173	0.20	24075	65	158.8	-150.4	154.6	
174	0.30	24198	123	184.2	-181.8	183.0	1本目破断の2倍
175	0.40	24397	199	206.9	-208.9	207.9	
176	0.40	24596	200	209.2	-209.3	209.3	
201	0.10	26743	21	141.9	-112.7	127.3	
202	0.10	26762	19	136.8	-115.7	126.3	
203	0.10	26780	18	133.5	-116.3	124.9	
204	0.20	26844	64	159.8	-149.3	154.6	
205	0.20	26910	66	159.2	-150.7	154.9	
206	0.30	27035	124	185.7	-183.0	184.3	
207	0.40	27231	197	207.3	-209.2	208.3	
208	0.40	27431	199	209.6	-209.7	209.6	
249	0.10	31034	22	150.7	-118.4	134.6	
250	0.10	31053	19	145.1	-121.7	133.4	
251	0.10	31072	19	141.7	-122.3	132.0	
252	0.20	31139	67	168.4	-158.3	163.3	
253	0.20	31207	69	167.4	-159.6	163.5	
254	0.30	31337	129	194.6	-192.0	193.3	
255	0.40	31542	205	217.6	-219.2	218.4	
256	0.40	31749	207	218.9	-219.2	219.1	
297	0.10	35388	22	142.6	-113.4	128.0	
298	0.10	35408	19	137.0	-116.1	126.5	
299	0.10	35427	19	133.8	-116.8	125.3	
300	0.20	35492	65	160.0	-150.4	155.2	
301	0.20	35558	66	159.2	-151.9	155.6	
302	0.30	35683	125	186.4	-183.7	185.0	
303	0.40	35880	197	210.4	-205.3	207.8	
304	0.40	36066	186	210.6	-170.7	190.7	
305	0.10	36086	19	129.4	-87.2	108.3	
306	0.10	36102	17	121.8	-85.1	103.5	
307	0.10	36118	15	113.0	-81.8	97.4	3本目破断

(3) 最大荷重の変化

図 1.3.6-16～1.3.6-19 に各試験体の最大荷重の変化を示す。基本的に 1 サイクル当りのエネルギー吸収の変化と同様の傾向を示す。定振幅の結果（試験体 1、2）より、最大荷重は、ダンパーロッド 1 本目破断の数回前のサイクルで 2 サイクル目に対して 85%程度になる。

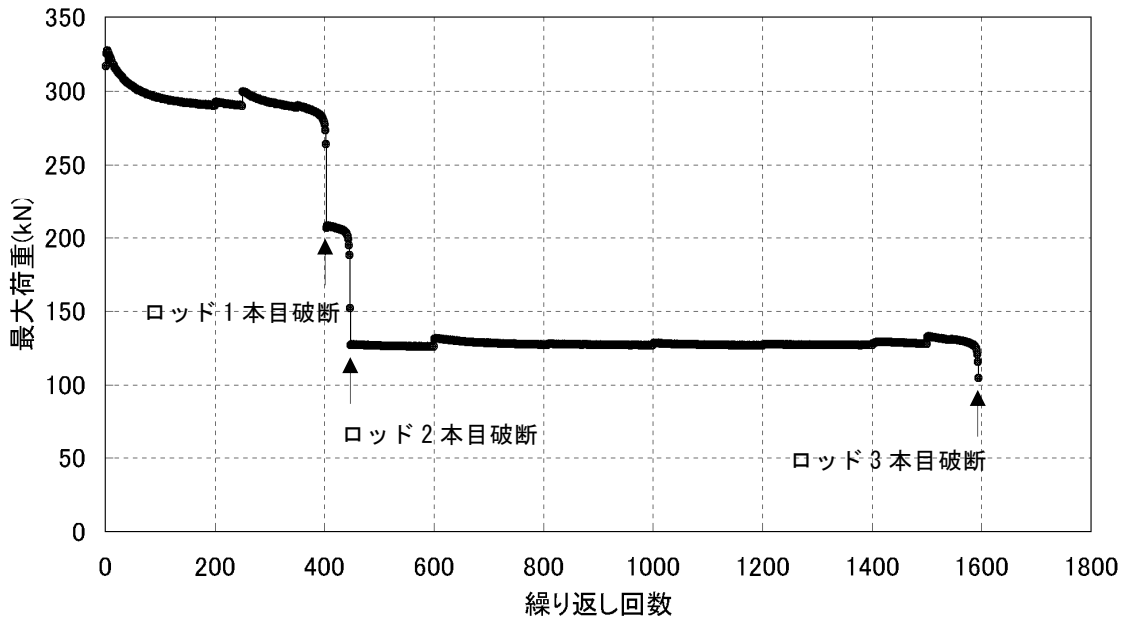


図 1.3.6-16 最大荷重の変化（試験体 1：定振幅±100mm）

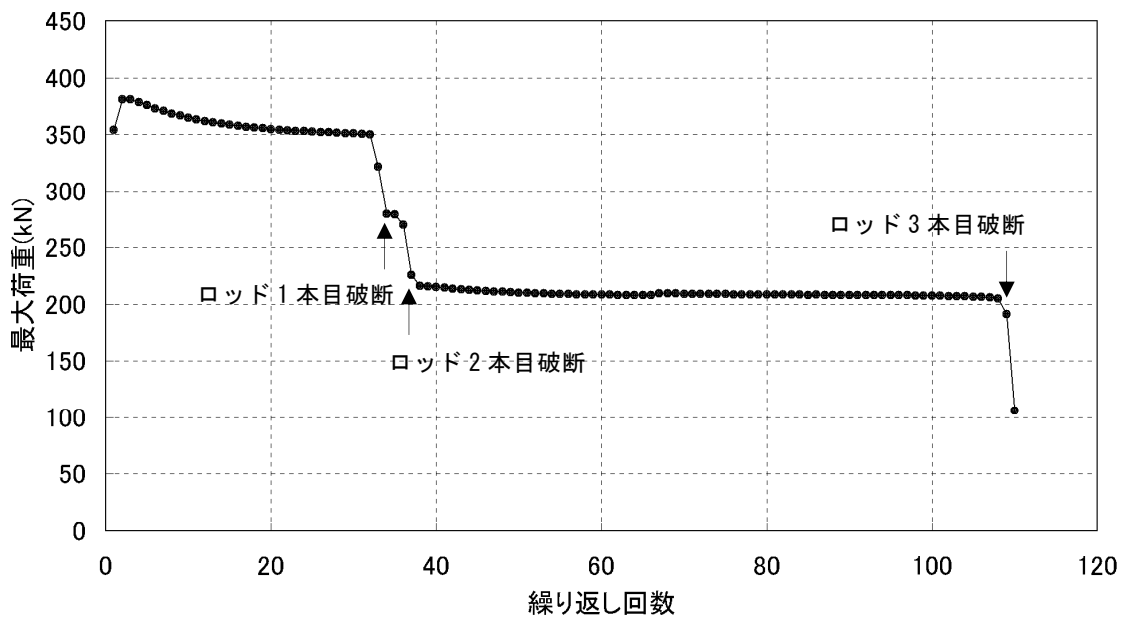


図 1.3.6-17 最大荷重の変化（試験体 2：定振幅±400mm）

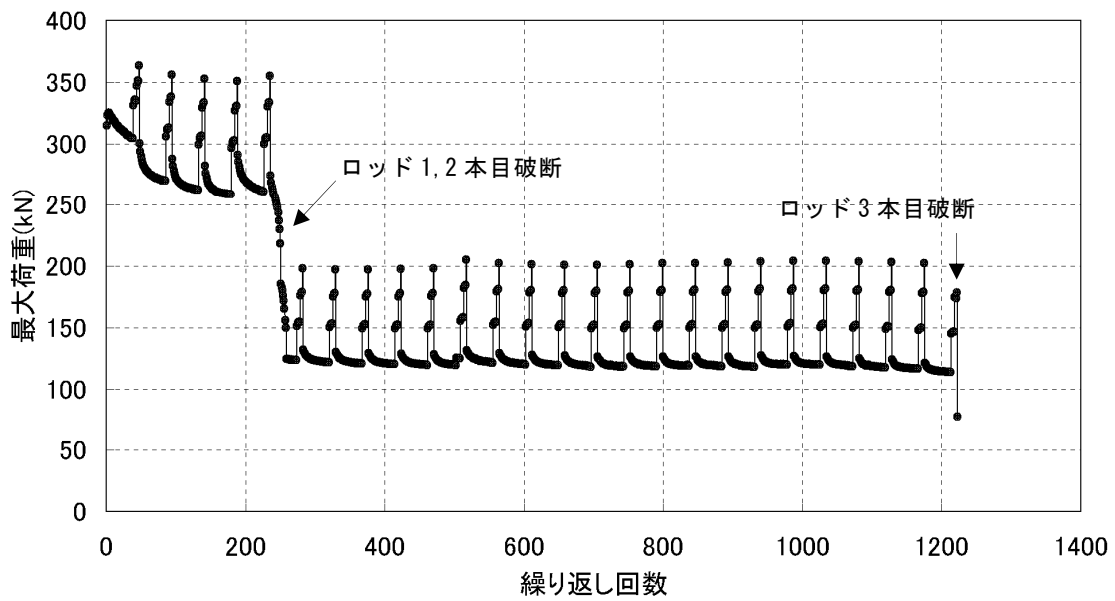


図 1.3.6-18 最大荷重の変化 (試験体 3 : 変動振幅 A)

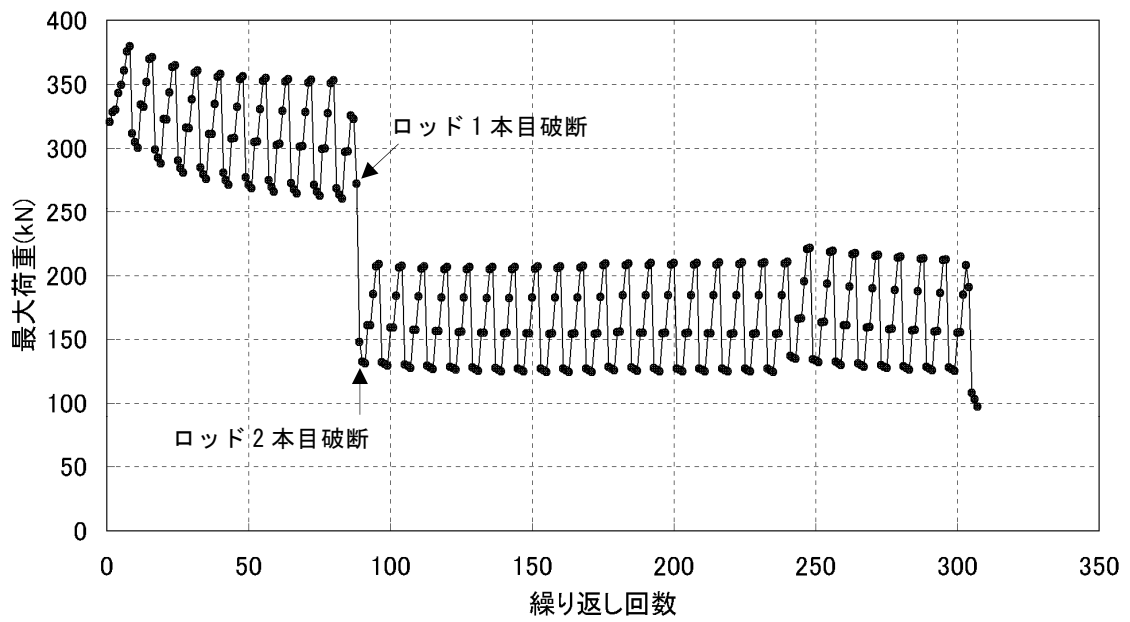


図 1.3.6-19 最大荷重の変化 (試験体 4 : 変動振幅 B)

(4) 温度測定

試験体 2 については、温度測定用ゲージを図 1.3.6-20 の位置に設置し、加力時の温度を測定した。図 1.3.6-21 に測定結果を示す。これより、繰り返しの载荷に伴い温度が上昇している。ダンパーロッド 1 本目が破断するまでの繰り返しにおいて、0 度方向先端②と 90 度方向先端③は 80~90℃まで、0 度方向根元①は 50℃程度まで上昇した。また、3 本目破断時の温度は 105℃となった。

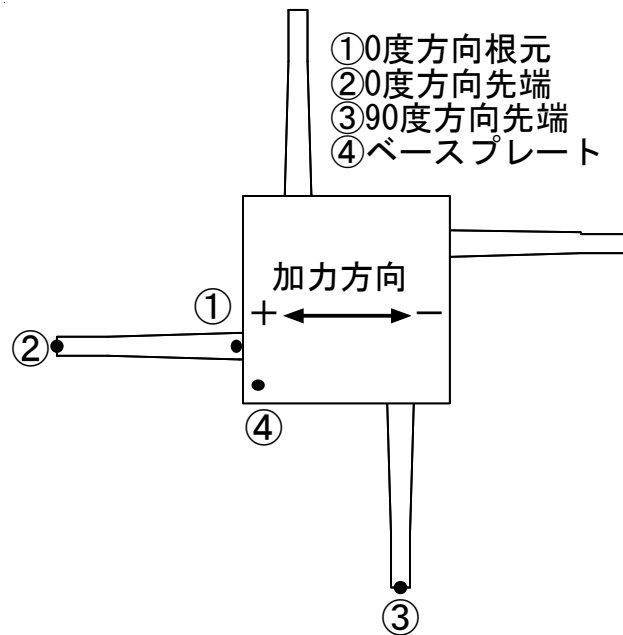


図 1.3.6-20 温度測定箇所（試験体 2）

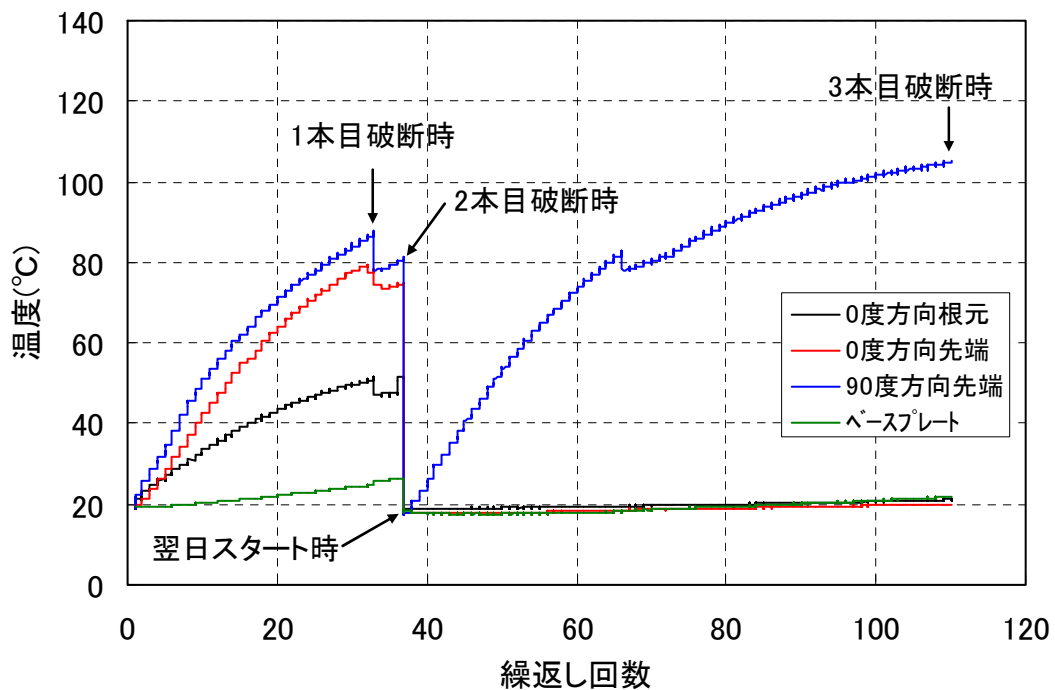


図 1.3.6-21 加力時の温度変化（試験体 2）

(5) 破断回数及び破断箇所

表 1.3.6-9、図 1.3.6-22 に破断回数と破断箇所を示す。また、図 1.3.6-23～図 1.3.6-26 に各試験体の 1 本目破断時の状況を示す。これより、いずれのケースについても、0 度方向に設置された 2 本のダンパーロッドが同程度の回数で破断した。また、破断状況の図から分かるように、根元 D 以外の変形が集中する箇所に破断が生じた。その後、90 度方向のダンパーロッド 1 本がいずれのケースもダンパーロッドの根元部分で破断した。破断回数は 0 度方向の回数の 3～5 倍程度であった。

表 1.3.6-9 破断回数と破断箇所

試験体番号		1	2	3	4
1 本目	破断回数	404	33	251	87
	破断ロッド	④	④	②	④
	破断箇所	B	B	A	C
2 本目	破断回数	447	37	258	89
	破断ロッド	②	②	④	②
	破断箇所	B	B	B	C
3 本目	破断回数	1594	110	1223	307
	破断ロッド	③	①	③	③
	破断箇所	D	D	D	D

破断ロッドと破断箇所は図 1.3.6-22 参照

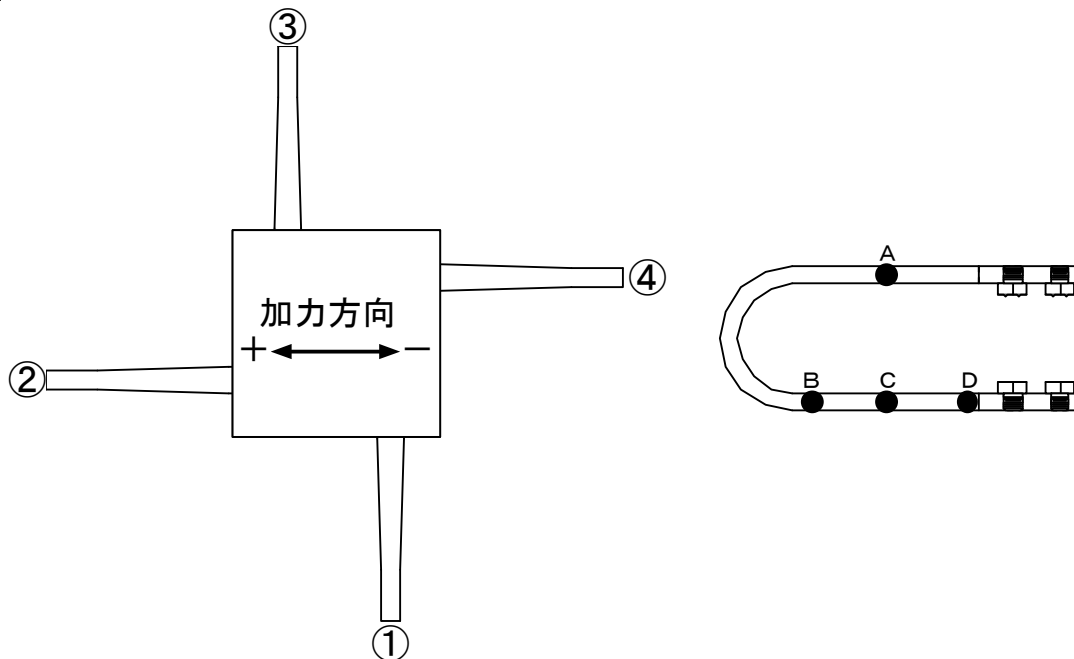


図 1.3.6-22 破断箇所

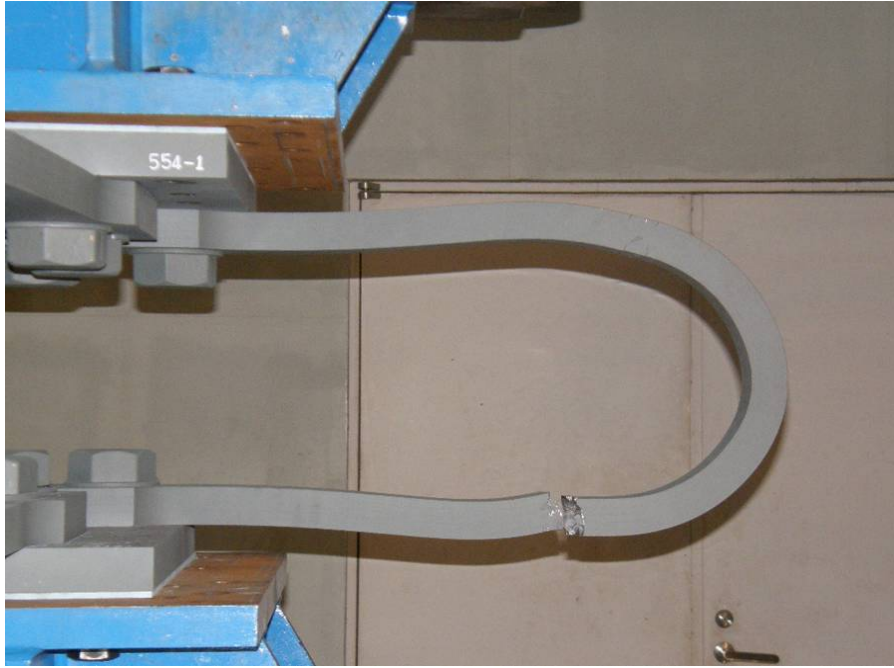


図 1.3.6-23 試験体 1 の 1 本目破断時の状況



図 1.3.6-24 試験体 2 の 1 本目破断時の状況



図 1.3.6-25 試験体 3 の 1 本目破断時の状況

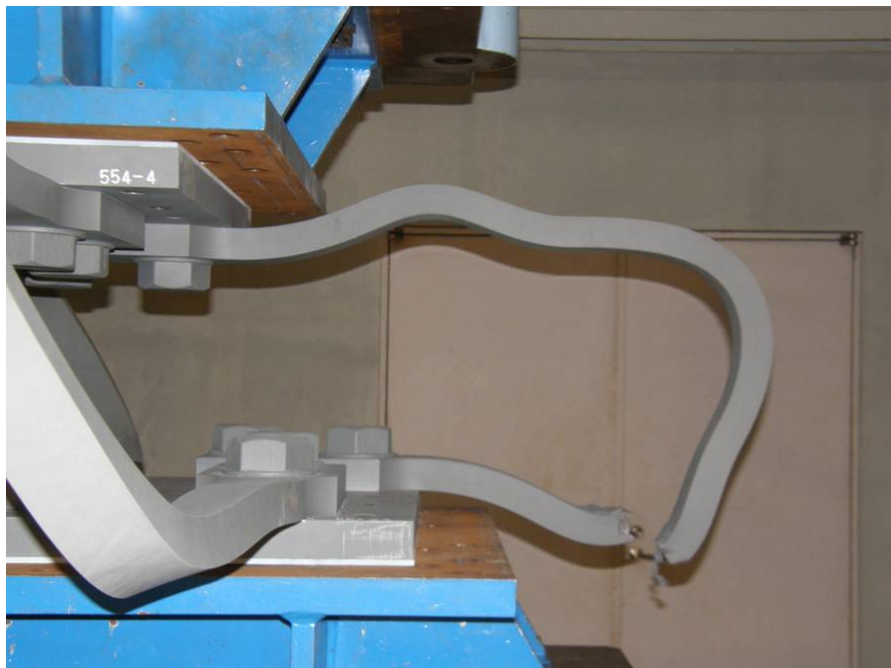


図 1.3.6-26 試験体 4 の 1 本目破断時の状況

(6) 疲労性能

表 1.3.6-10 に、振幅毎の破断までの繰返し回数を、図 1.3.6-27 にこれらの値を疲労性能曲線上にプロットして示す。変動振幅については、参考データとして、各振幅それぞれにおける繰返し回数でプロットした。破断時におけるトータルの疲労蓄積度はマイナー則を用いて、後述する表 1.3.6-11 にまとめている。

0 度方向のダンパーロードについて累積疲労損傷度 (D 値) の評価を行なった。表 1.3.6-11 に評価結果を示す。D 値は、破断までの繰返し回数 n_i を、図 1.3.6-1 の疲労性能曲線より求めた破断回数 N_{fi} で除して求めた。変動振幅については各振幅の D 値の和によって表した。これより、試験体 1 (定振幅 100mm) では D 値が 1.37 と 1.52 であったが、試験体 2 (定振幅 400mm) では 0.87 と 0.97 で 1 を下回った。これについては、振幅が大きく繰返し回数の少ない領域では、疲労曲線に対して実験結果のばらつきが大きくなる傾向にあり、試験体 2 の結果は疲労曲線に対して 90%程度で、安定した結果が得られたと考えられる。一方、試験体 3、4 (変動振幅 A、B) の D 値は 1.07~1.36 で、1 を上回る結果となった。

表 1.3.6-10 振幅と破断までの繰返し回数

試験体 番号	振幅 (mm)		破断までの繰返し回数		
			1 本目	2 本目	3 本目
			0 度		90 度
1	定振幅	100	404	447	1594
2	定振幅	400	33	37	110
3	変動振幅 A	100	206	213	989
		200	25	25	130
		300	15	15	78
		400	5	5	26
			251	258	1223
4	変動振幅 B	100	33	34	117
		200	22	22	76
		300	11	11	38
		400	21	22	76
			87	89	307

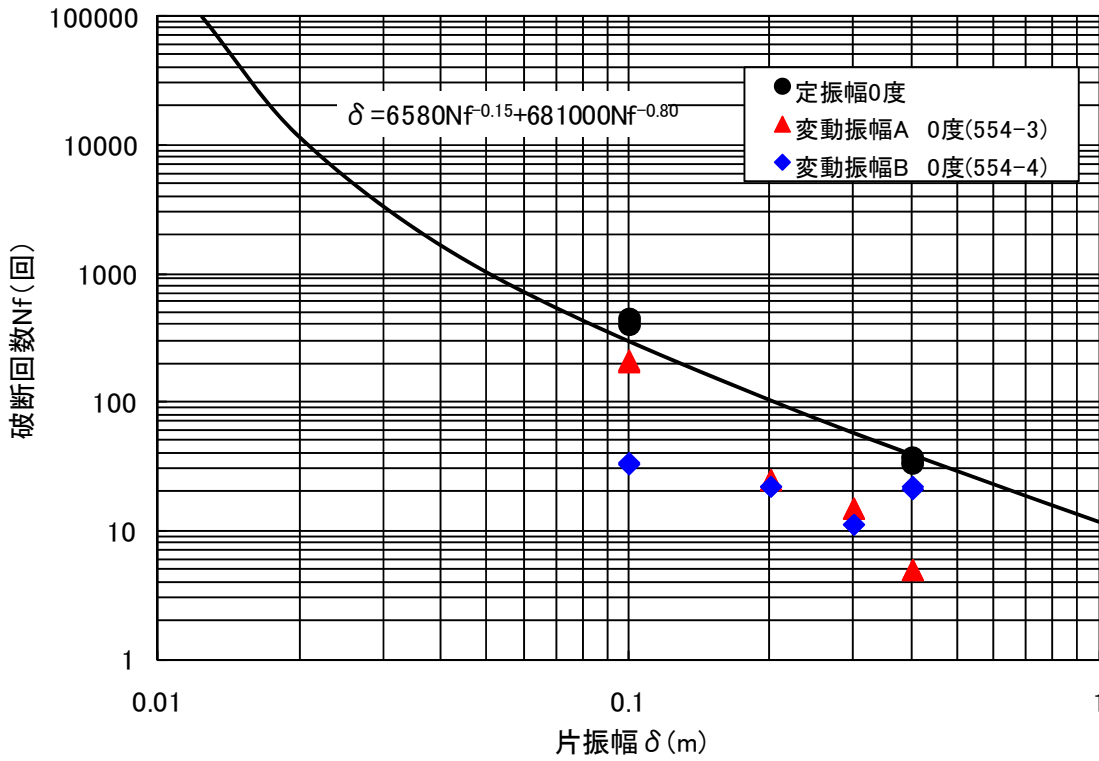


図 1.3.6-27 振幅と破断までの繰返し回数 (0 度方向加力)

表 1.3.6-11 既往の疲労曲線との比較

試験体 番号	振幅 (mm)		疲労曲線 による 破断回数 N_{fi}	破断までの繰り返し回数			
				1 本目		2 本目	
				回数 n_i	D 値 n_i / N_{fi}	回数 n_i	D 値 n_i / N_{fi}
1	定振幅	100	294	404	1.37	447	1.52
2	定振幅	400	38	33	0.87	37	0.97
3	変動振幅 A	100	294	206	0.70	213	0.72
		200	100	25	0.25	25	0.25
		300	59	15	0.25	15	0.25
		400	38	5	0.13	5	0.13
					251	1.34	258
4	変動振幅 B	100	294	33	0.11	34	0.12
		200	100	22	0.22	22	0.22
		300	59	11	0.19	11	0.19
		400	38	21	0.55	22	0.58
					87	1.07	89

(7) 小振幅繰り返し特性

1) はじめに

継続時間の長い風荷重に対する免震U型ダンパーの小振幅での疲労性能について以下の2点の検討を行う。

- ・小振幅領域での疲労曲線
- ・風荷重の平均成分に対するオフセット変位が疲労性能に与える影響

2) 小振幅領域での疲労特性

免震U型ダンパー (NSUD50) のU型ロッド単体を対象とした定振幅繰り返し試験において方向別の疲労特性を図 1.3.6-28 に示す。これより、振幅 400mm 以下の領域では 0 度方向の方が繰り返し性能が低いことがわかる。そこで、U型ダンパーの弾性限付近の小振幅領域を対象とした試験では、0 度方向のみに着目した実験が行われている。表 1.3.6-12 に小振幅領域での定変位繰り返し試験結果を示す。また、表 1.3.6-13 にダンパー種類毎の各部寸法を示す。

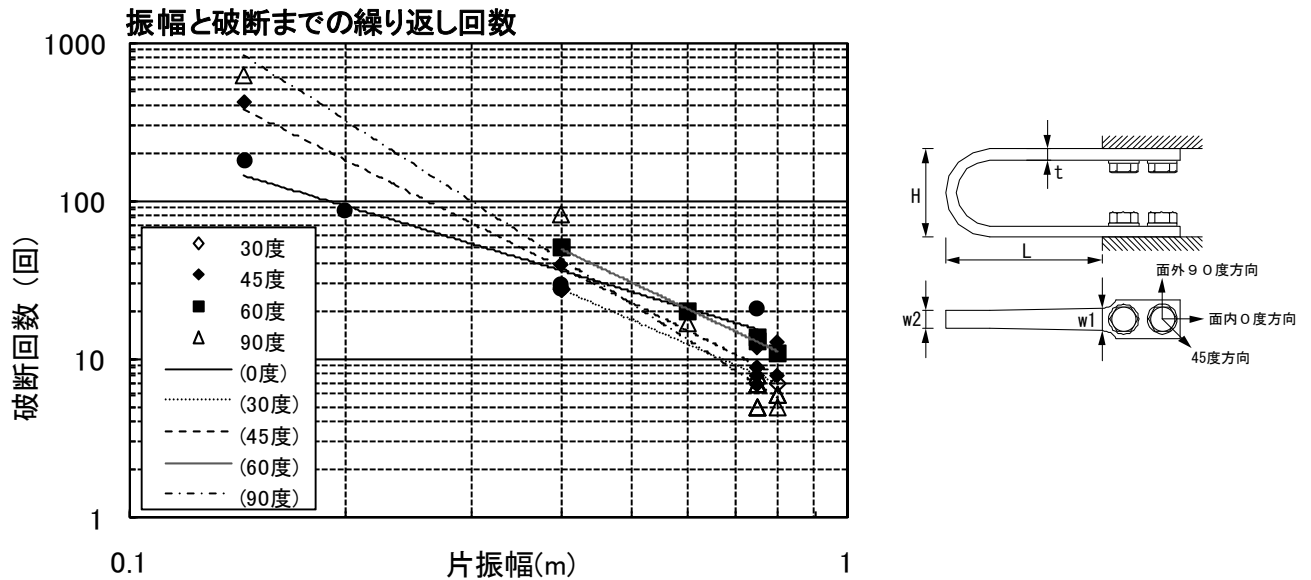


図 1.3.6-28 NSUD50 の疲労特性

表 1.3.6-12 定変位繰り返し試験結果

試験 No.	ダンパー種類	振幅 (mm)	UD55相当振幅 (mm)	破断回数 (回)
1	UD40	±10	±16	19,114
2	UD40	±15	±24	4,763
3	UD50	±28	±31	2,568
4	UD50	±28	±31	2,704
5	UD40	±30	±48	1,254
6	UD50	±43	±48	1,007

表 1.3.6-13 ダンパー各部寸法

ダンパー種類	各部寸法 (mm)		
	t	L	H
UD40	28	416	231
UD50	40	602	335
UD55	45	673	374

NSUD55 の地震を対象とした振幅での定変位繰り返し試験結果に、表 1.3.6-12 に示す小振幅領域での結果を NSUD55 相当に相似則で振幅を変換した結果を図 1.3.6-29 に示す。地震を対象とした振幅での結果から回帰した疲労曲線(1)に対して、風を対象とした小振幅領域では破断回数は大きくなり、振幅がより小さくなる程顕著になることがわかる。疲労曲線(2)は小振幅も含めた結果から回帰したもの^{1.3.6-2)}である。

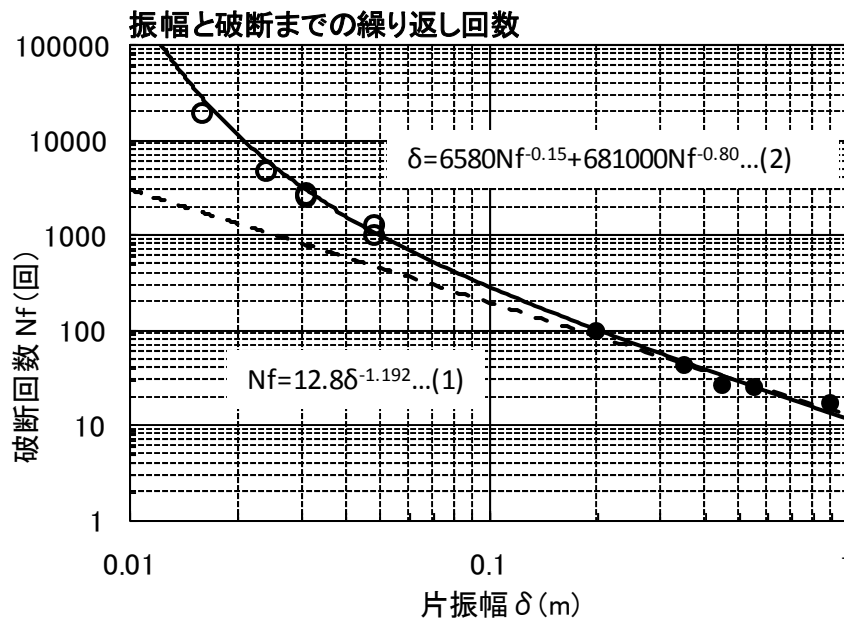


図 1.3.6-29 NSUD55 の疲労特性

3) 小振幅領域でのオフセット変位が疲労性能に与える影響

暴風時に風荷重の平均成分に対するオフセット変位を受けた状態で変動成分に対する振幅を繰り返した時を想定し、小振幅領域でのオフセット変位が疲労性能に与える影響について検討する。試験体は NSUD50 を用いて、0 度方向の 2 本組 (図 1.3.6-30) による試験を行った。振幅およびオフセット変位および破断回数を表 1.3.6-14 に、履歴ループを図 1.3.6-31 に示す。これより、各ロッドの破断に至るサイクル数は 2568 回から 2847 回の範囲で、オフセット変位が破断回数に与える影響は見られなかった

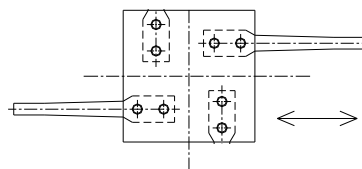


図 1.3.6-30 試験体平面図 (UD50、0 度方向、2 本組)

表 1.3.6-14 加振振幅と破断回数

試験 No.	ダンパー 種類	振幅 (mm)	UD55相当 振幅 (mm)	オフセット変位 (mm)	UD55相当 オフセット変位 (mm)	破断回数	
						1本目 (回)	2本目 (回)
1	UD50	±28	±31	0	0	2,568	2,704
2				±28	±31	2,566	2,683
3				±112	±124	2,733	2,847

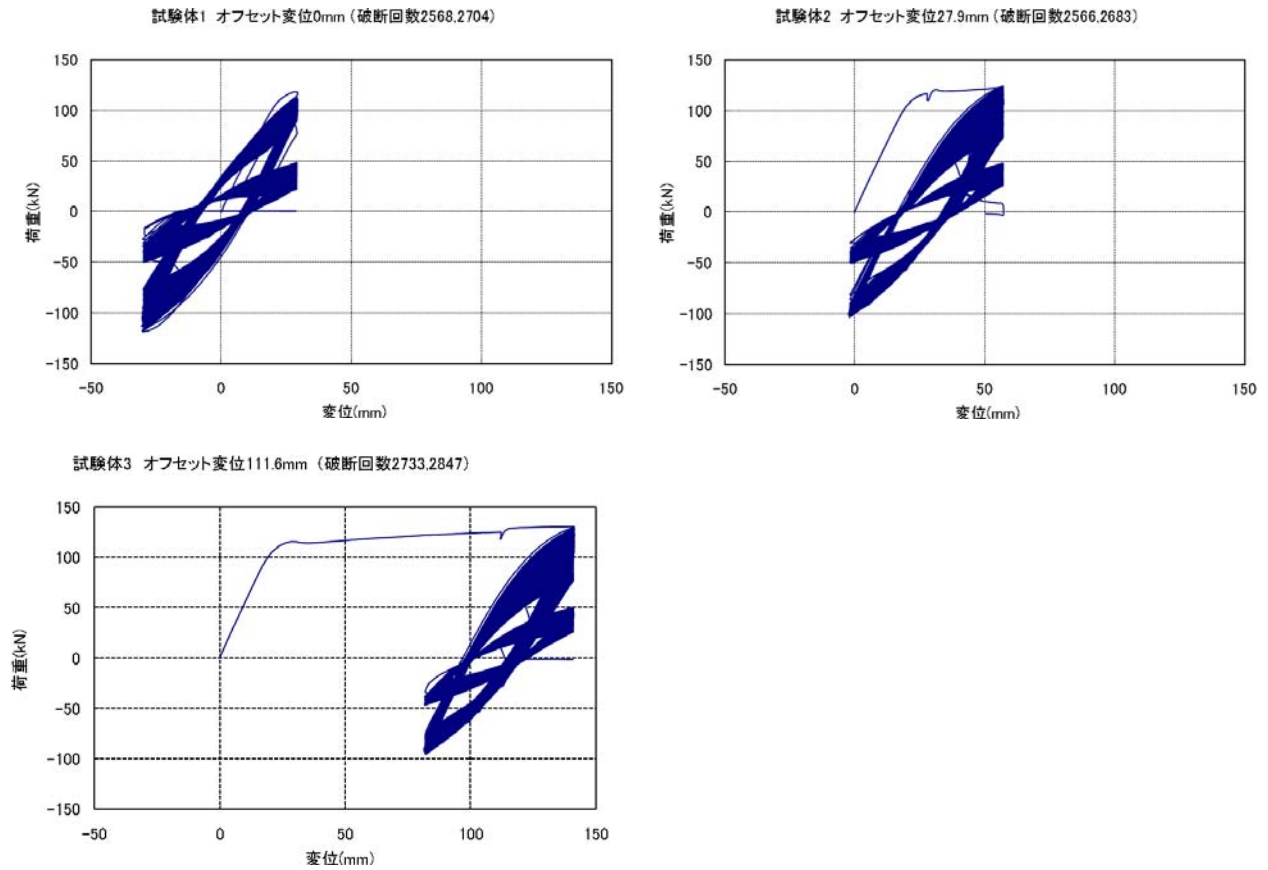


図 1.3.6-31 荷重変形関係

1.3.6.3 まとめと課題

鋼材ダンパーとして主に用いられている免震 U 型ダンパー (NSUD55×4、ダンパーロッド 4 本) について、多数回繰り返し载荷に対する性能確認のための実験を実施した。試験体は 4 体で、定振幅での繰り返し载荷 (100mm 及び 400mm、2 ケース)、100、200、300、400mm を組み合わせた変動振幅での繰り返し载荷 (2 ケース) を実施した。本実験から得られた主な知見は以下の通りである。

- いずれのケースについても、0 度方向に設置された 2 本のダンパーロッドが相次いで破断し、その後、90 度方向のダンパーロッド 1 本が破断し、実験を終了した。ダンパーの荷重は繰り返しに伴い次第に小さくなり、ダンパーロッドが破断するたびに大きく低下した。
- 1 サイクルの吸収エネルギー量は、定振幅繰り返し载荷において破断に至る数回前のサイクルで 2 サイクル目に対して 85% 程度になった。
- 各サイクルの最大荷重は、定振幅繰り返し载荷において破断に至る数回前のサイクルで 2 サイクル目の最大荷重に対し 85% 程度になった。
- 定振幅 400mm では载荷時の温度を測定した。破断時の温度は、0 度方向ロッドの先端部分で 80℃ に、90 度方向ロッド先端部分で 105℃ となった。
- 0 度方向のダンパーロッドについて、累積疲労損傷度 (D 値) の評価を行なった。定振幅 100mm では D 値が 1.37 と 1.52 であったが、定振幅 400mm では 0.87 と 0.97 で 1 を下回った。一方、変動振幅の D 値は 1.07~1.36 で 1 を上回る結果となった。
- 90 度方向のダンパーロッドは、0 度方向加力のロッドに対して 3~5 倍の繰り返し回数で破断に至った。

今後の課題としては下記の項目が挙げられる。

- 地震応答変位波形に対する疲労特性
今回の実験では、4 種類の振幅を組み合わせた変動振幅での繰り返し载荷を実施したが、地震応答のようなランダムな振幅の組み合わせに対しても、マイナー則での疲労予測が可能かどうかを確認する。
- 水平 2 方向加振に対する疲労特性
水平 2 方向の変形に対しては、U 型ダンパーが変形に追従し機能を発揮することが確認されているが、破断までの加振は行なわれていない。直交方向の変形が作用した場合に 1 方向の疲労特性がどのように変化するか明らかにする。

参考文献

- 1.3.6-1) 植草、大河原、吉敷、山田、和田：免震 U 型ダンパーの実大動的载荷実験—その 1 速度依存性と寸法効果に関する検討—、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.1051-1052、2007 年 8 月
- 1.3.6-2) 吉敷、大河原、山田、和田：免震構造用 U 字形鋼材ダンパーの繰り返し変形性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 73 巻、第 624 号、pp.333-340、2008 年 2 月

1.3.7 鉛ダンパー

1.3.7.1 実験計画

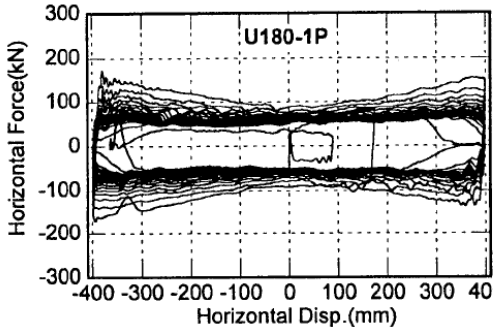
(1) 実験目的と背景

免震構造用鉛ダンパーの長振幅繰り返し試験を実大試験体により実施し、多数回繰り返しに対する性能の把握を目的とする。

鉛ダンパーにおける多数回繰り返し性能の既往の研究を以下に列記する。

1) 大変形時の繰り返し試験例^{1.3.7-1)}

試験体	加力方向	加力プログラム	
U180(実大)	P,O	正弦波周期 3 秒 (P 方向両振幅加振: ±100mm,3 サイクル →±200mm,3 サイクル →±400mm, 破断まで)	正弦波周期 3 秒 (O 方向両振幅加振: ±100mm,3 サイクル →±200mm,3 サイクル →±400mm, 2 サイクル(周期 100s) →±400mm, 破断まで)
U2426(実大)	P, O		



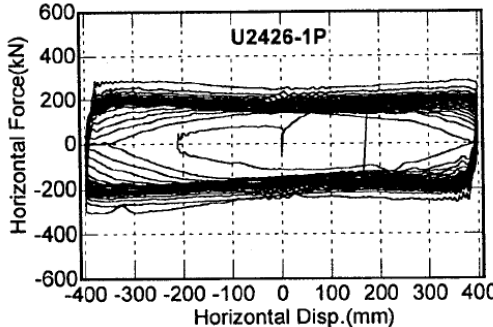


図 1.3.7-1.1 U180 実大 周期 3s P 方向

図 1.3.7-1.2 U2426 実大 周期 3s P 方向

上記試験の本来の目的はダンパー反力の計測であった。片振幅 3 サイクルの 0→600mm(U180), 0→800mm(U2426)の試験も実施されている。水平力の履歴形状は剛塑性型で、変形が増えるにつれてハードニングする傾向にある。U180 と U2426 で荷重は違うが、傾向はほぼ同様であった。O 方向についての言及はされていない。

2) 繰り返し試験時の特性変化について

繰り返し回数とエネルギー吸収量の関係を図 1.3.7-1.3～4 に示す。これより 1 サイクルエネルギー吸収量は繰り返し回数の増加に伴い低下する傾向にあることがわかる。振幅±400mm では 20 回目で約 70%まで低下し、25 回を超えてから破断した。

降伏荷重は、累積変形量の増加に伴い低下する傾向にある。図 1.3.7-1.5 に累積変位量と降伏荷重の変化率の関係を示す。振幅±5mm では累積変形量 170m までにおいて、降伏荷重にほとんど変化は見られない。振幅±20mm では累積変形量が増加するのに伴い降伏荷重は低下し、5500m では初期の約 20%まで低下した。振幅±400mm では累積変形量 25m で約 80%まで低下し、40m で約 50%まで低下後に破断した。

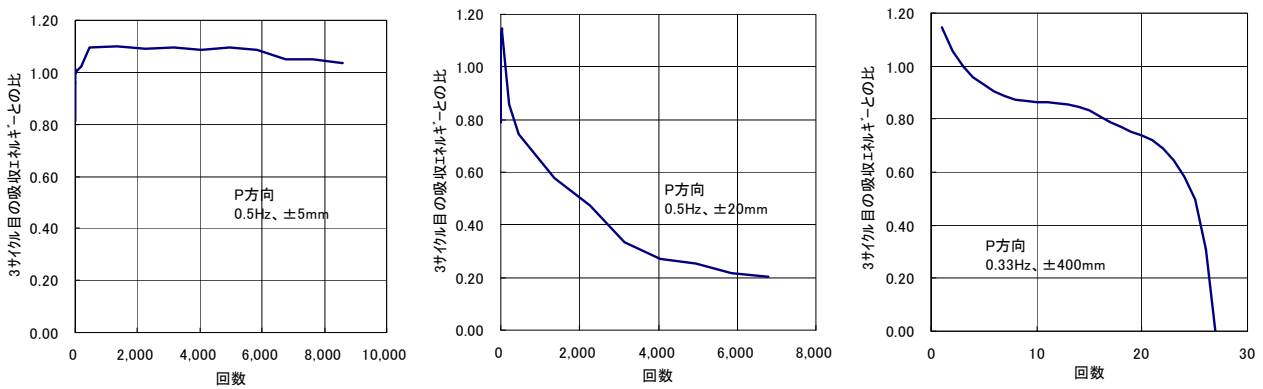


図 1.3.7-1.3 繰り返し回数とエネルギー吸収量の関係 (U2426 型) ^{1.3.7-2)}

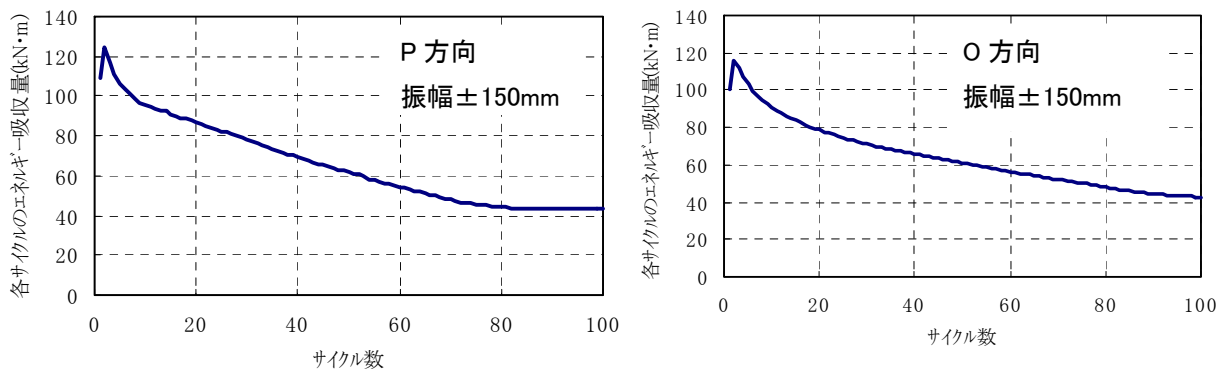


図 1.3.7-1.4 エネルギー吸収量の繰り返し回数依存性(U2426 型、振幅±150mm)³⁾

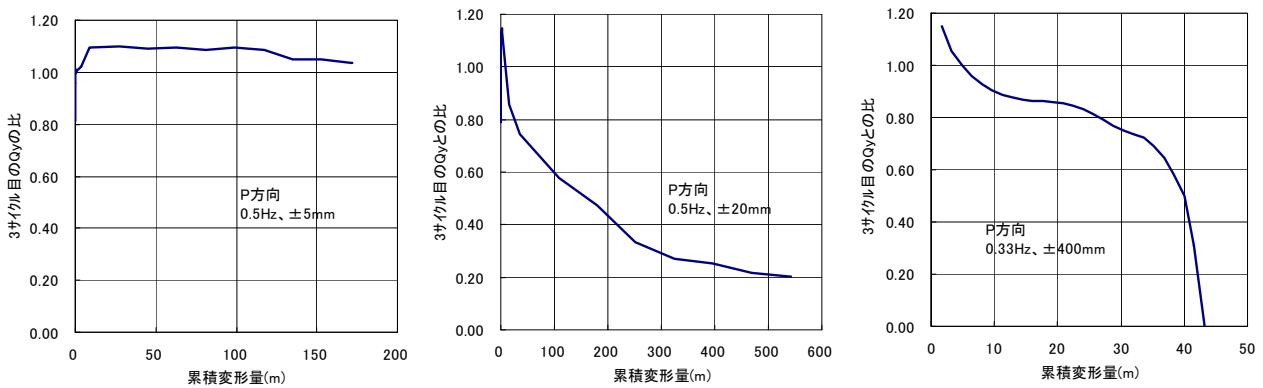


図 1.3.7-1.5 累積変位量と降伏荷重の変化率の関係 (U2426 型) ^{1.3.7-2)}

3) 破断までの繰り返し回数

振幅と破断までの繰り返し回数の関係が図 1.3.7-1.6 に示され、式(1.3.7-1)にて表現されている。なお、式(1.3.7-1)は±20～800mm での実験結果より求めたものであるもので、±20mm 未満（全振幅 40mm 未満）での破断に到る回数は本疲労曲線を外挿することにより求めることとする。

$$Nd = 8.84 \times 10^5 \delta^{-1.74} = 8.84 \times 10^5 (\Delta/2)^{-1.74} \quad (1.3.7-1)$$

ここに、

Nd : 破断時繰り返し回数、 δ : 片振幅(mm)、 Δ : 全振幅(mm)

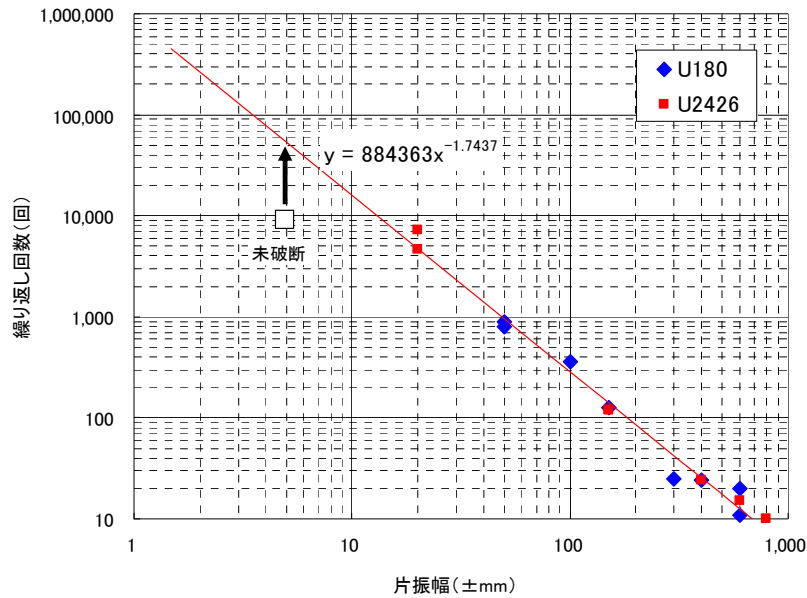


図 1.3.7-1.6 鉛ダンパーの振幅と破断時繰り返し回数の関係^{1.3.7-3)}

式(1.3.7-1)より、主な振幅における破断時繰り返し回数は表 1.3.7-1.1 のようになる。

表 1.3.7-1.1 主な振幅における破断時繰り返し回数 Nd

振幅(mm)	100	200	400
Nd (サイクル)	292	87	26

想定免震建物に対する長周期地震動の時刻歴応答解析における免震層の応答から、レインフロー法により振幅の繰り返し頻度を求めた。検討ケースにおける累積疲労損傷度 $\sum Di$ は0.046～0.183であった^{1.3.7-3)}。

4) 既往検討のまとめ

鉛ダンパーの破断に到る繰り返し実験は、既に行われている。また、破断に到るまでの繰り返し回数は振幅を用いて定式化されている。ただし、これは定振幅加振結果に基づくものである。繰り返しにより、1サイクルあたりのエネルギー吸収量および降伏耐力は低下する。

長周期地震動の時刻歴解析結果および振幅と破断までに到る繰り返し回数の関係を用い、累積疲労損傷度に関する検討が計算上実施されている。

(2) 実験日および場所

実験は愛知県豊田市の愛知工業大学耐震実験センターにて実施した。

同センターでは、MTS 製 1000kN(ストローク±400mm)のアクチュエータを保有しており、これを用いて試験体を加力した。

試験期間は平成 22 年 12 月 8 日～12 月 24 日であった。

(3) 試験体

試験体は、図 1.3.7-1.7 に示す実大の住友金属鉱山シボレックス製鉛ダンパー(U2426 型)の 3 体であった。1 体の重量は 1,070kgf であり、うち鉛部の重量は 740kgf である。試験体諸元を表 1.3.7-1.2 に示す。

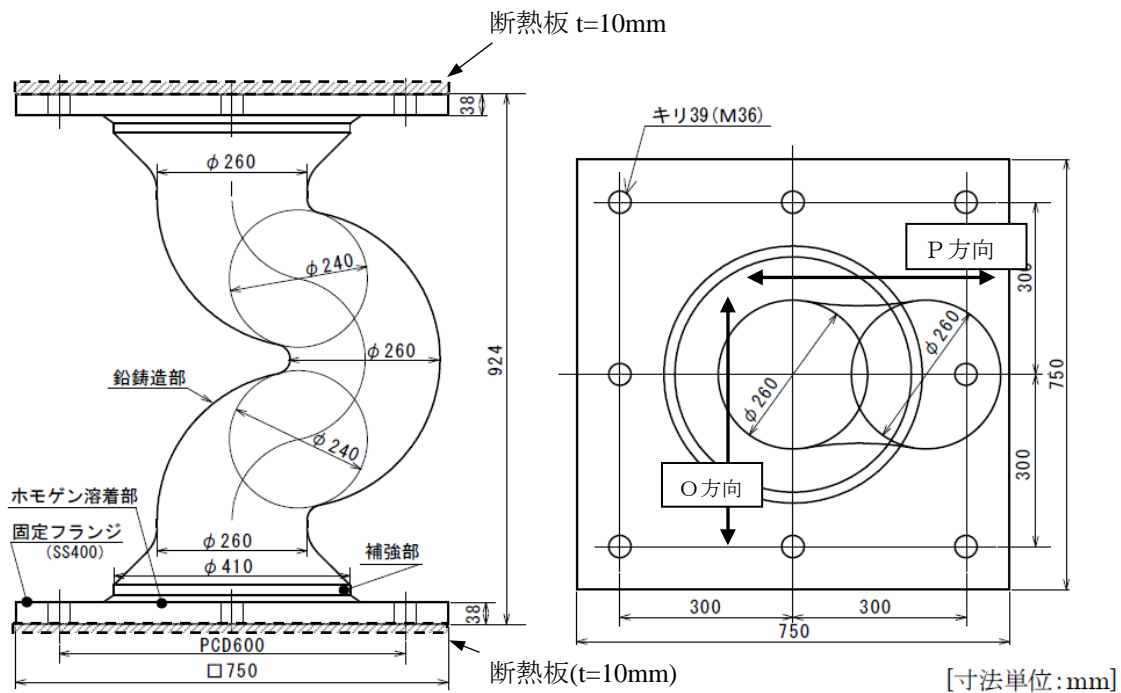


図 1.3.7-1.7 試験体 (U2426 型)

表 1.3.7-1.2 鉛ダンパー試験体諸元

名称	高さ (mm)	降伏荷重 (kN)	1 次剛性 (kN/m)	2 次剛性 (kN/m)	降伏変位 (mm)
U2426	924	220	30,000	0	7.33

(4) 試験装置

試験装置を図 1.3.7-1.8 および写真 1.3.7-1.1 に示す。試験体の下端フランジは反力床に固定され、上端フランジは試験機の加力梁に固定されている。アクチュエータにより加力梁を水平移動させ、試験体に所要の水平変形を与える。加力梁はピンを用いた機構にて支持されている。図 1.3.7-1.9 に加力梁支持機構の作動原理を示す。図 1.3.7-1.9 中の A 点が A' 点へ水平移動しても、その際の幾何学的な関係から定まる本装置の鉛直変形は非常に小さなものとする事ができる。

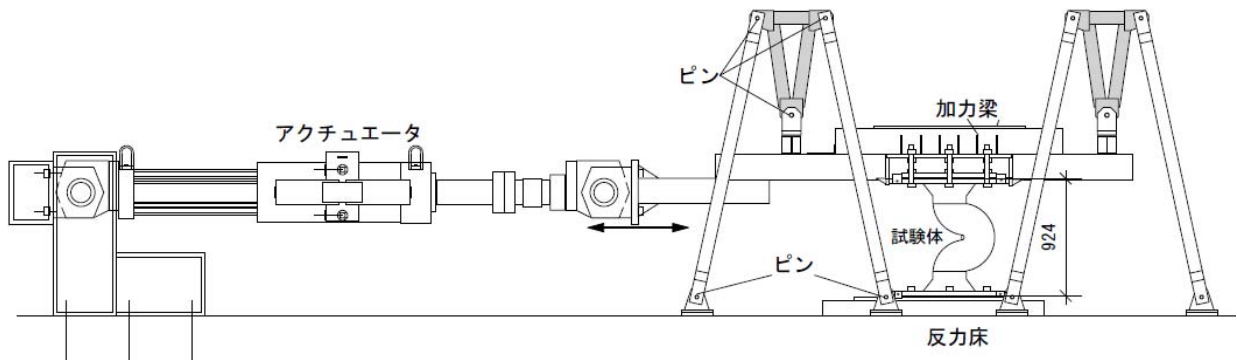


図 1.3.7-1.8 試験装置

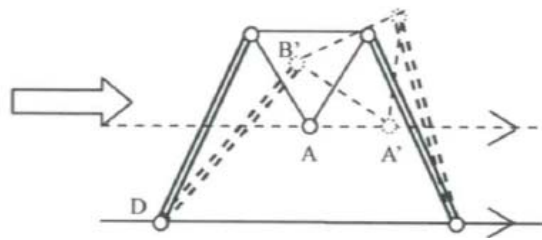


図 1.3.7-1.9 加力梁支持機構の作動原理



写真 1.3.7-1.1 試験装置

(5) 計測項目と計測方法

計測項目は、水平荷重、水平変位、鉛直変位、歪み、鉛およびフランジ表面温度とする。歪みゲージの貼付位置および熱電対による表面温度の計測位置を図 1.3.7-1.10 に示す。P 方向加力時試験において、上部フランジの変位の正負は、図 1.3.7-1.10 に示すように鉛のくびれが膨らんでいる方向を正側とし、ダンパーの変形および荷重もこの符号と同一とする。

サンプリング周波数は、加力時において 25Hz とする。ただし、表面温度の計測は加力時において 1Hz 計測として、動的計測システムとは別のシステムとした。温度計測には動的サンプリングとの同期目的で水平変位もあわせてデータ収録を行った。計測チャンネルを表 1.3.7-1.3 に示す。

一部の試験条件では加振試験終了後、1 分刻みで温度計測を実施した。また、試験条件 2 (方向を変えて断続的に加振) および試験条件 3 (地震応答波加振) では、鉛の表面温度分布を調べるために熱画像センサーによる温度計測も実施した。

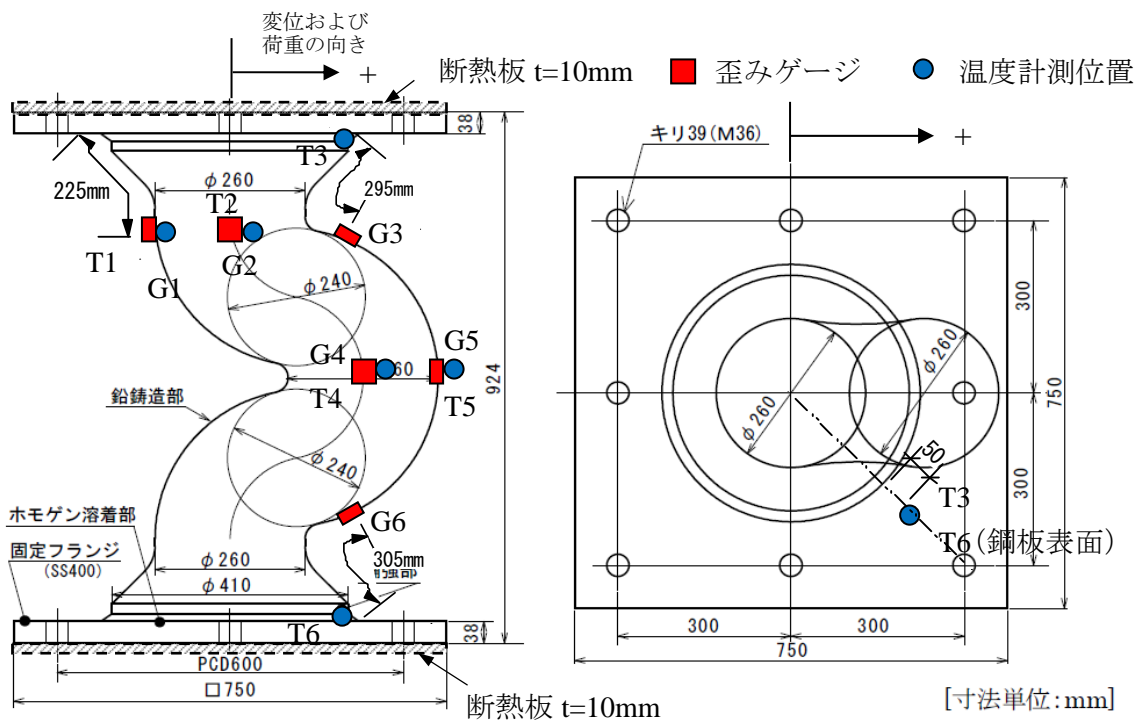


図 1.3.7-1.10 計測位置図

表 1.3.7-1.3 計測チャンネル表

計測項目	計測器(記号)	チャンネル数
水平荷重	ロードセル(L)	1
水平変位 (外部変位) *	変位計(DH)	2
上梁の加速度	加速度計(ACC)	1
フランジ間鉛直変位	変位計(DV)	2
歪み分布	歪みゲージ(G)	6×3 方向
鉛表面温度*	T 型熱電対 (T)	4
フランジ表面温度	T 型熱電対 (T)	2

計 30ch

*水平変位 (外部変位) は動的計測(25Hz)と静的計測 (1Hz) で収録を行う。

(6) 試験方法および試験ケース

試験条件と試験実施日を表 1.3.7-1.4 に示す。

表 1.3.7-1.4 試験体および試験条件一覧

試験体 No.	条件	周期 (秒)	加力方向	水平変位 (サイクル数)	累積変形 (m)	Di	実施日
1**	微小振幅加振	3	P	±0.2mm (3 サイクル)	0.0024	2.06E-07	12/18
				±1mm (3 サイクル)	0.012	3.39E-06	12/18
				±2mm (3 サイクル)	0.024	1.13E-05	12/18
				±4mm (3 サイクル)	0.048	3.79E-05	12/18
				±10mm (3 サイクル)	0.12	1.86E-04	12/18
				±16mm (3 サイクル)	0.192	4.23E-04	12/18
				±20mm (3 サイクル)	0.24	6.23E-04	12/18
小計					0.638	0.0013	
1	漸増連続基本加振	4 →4 →5	P	±100mm (30 サイクル) →±200mm (30 サイクル) →±400mm (破断まで)	12 →36 →破断	0.102 0.344 -	12/18
2-A**	方向を変えて	4	P	±150mm (30 サイクル)	24	0.344	12/20
2-B**	断続的に	4	O	±150mm (30 サイクル)	48	0.344	12/20
2-C	加振	4	P	±150mm (破断まで)	→破断	-	12/21
3-A	地震応答波加振	4	P	T-TN-AIC003.av 時の 免震層応答変位加振×3 回	14m×3	—	12/24
インターバル 3分							
3-B	地震応答波加振	4	P	T-TN-AIC003.av 時の 免震層応答変位加振×9 回	14m×9	—	12/24

注) P : Parallel, O : Orthogonal, Di : 各振幅における疲労損傷度 (1 が破断限界)

* 可能な範囲で試験実施。 ** 加振試験終了後、温度計測 (1 分おき程度)

試験条件は以下のとおりである。

○試験条件 1'. 微小変形加振 (試験体 1)

微小変形の周期 3s 動的正弦波加振を実施した。

変形は、±0.2mm、±1mm、±2mm、±4mm、±10mm、±16mm、±20mm とし、それぞれ 3 サイクルとする。変形量ごとにインターバルを置いて、計測・加振を実施した。

○試験条件 1. 漸増連続基本加振 (試験体 1)

振幅を段階的に挙げて連続加振を実施した。

100mm (周期 4 秒、30 サイクル) →200mm (周期 4 秒、30 サイクル) →400mm (周期 5 秒、破断まで)

加力方向は P 方向とする。

本試験は、振幅が異なる累積損傷の影響を把握するためのデータ取得を目的とする。

一定振幅試験における破断までの繰り返し数（±400mm 時、25 回程度）は既往研究^{1.3.7-3)}を参照する。

○試験条件 2. 方向を変えて断続的に加振（試験体 2）

P 方向（30 サイクル）→O 方向（30 サイクル）→P 方向（破断まで）と加振する。本試験では繰り返し性状、破断性状について、異なる加振方向の累積変形による影響が見られるのかを把握する。変形は 150mm とする。

単一方向の場合（P 方向）における振動数 0.33Hz の±150mm 一定振幅時の既往試験結果^{1.3.7-4)}を図 1.3.7-1.11 に示す。この図は 100 サイクル（累積変形量：60m）までの結果である。120 サイクル目（累積変形量：72m）にて終局限界となった。

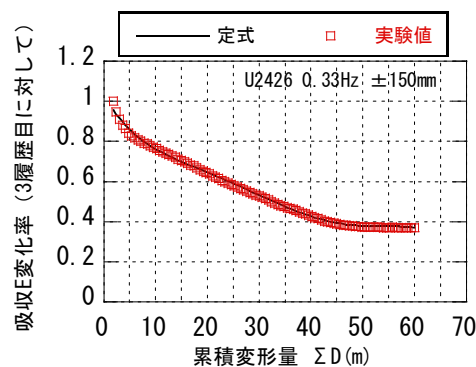


図 1.3.7-1.11 U2426 P 方向 ±150mm 振動数 0.33Hz 加振時の
1 ループ分吸収エネルギー変化率

○試験条件 3. 地震応答波加振（試験体 3）

地震応答 WG (WG3) において、鉛ダンパー U2426 に対して、エネルギー吸収量の時々刻々の変化を模擬する応答評価用モデルを提案している。試験体 3 では、応答評価用復元力モデル検証用としてランダム応答時のダンパーの力と変位の関係を取得する。累積変形量と 1 ループ当たりの吸収エネルギーの変化率の実験結果を模擬する復元力特性による 1 質点系の地震応答解析結果を実施し、その応答変位波形を試験体に強制変位として载荷させた。

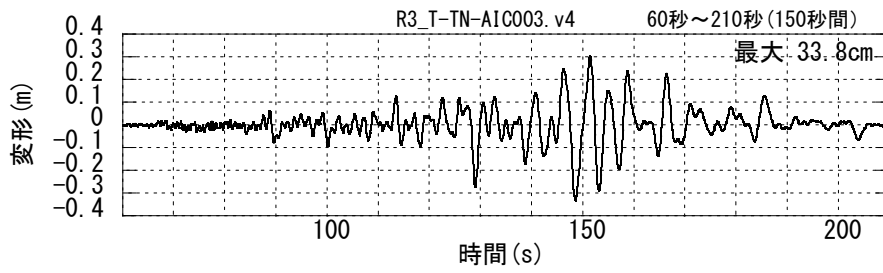
1 質点系の解析モデルとしては、天然ゴム系積層ゴムを想定した線形弾性要素と鉛ダンパーの完全弾塑性ノーマルバイリニアモデルの並列和からなる。降伏せん断力係数は 0.02、免震層 δ = 35cm 時の等価周期 $T_{eq}(\delta = 35\text{cm})$ は 4.25 秒と設定した。地震動 T-TN-AIC003.av 入力時の解析結果を図 1.3.7-1.12 に示す。図 1.3.7-1.12 (a),(b) に変形および累積変形量を示す。最大値は 33.8cm で累積変形量は 60 秒から 210 秒の 150 秒間においては 14.0m となる。強制変位波形としては、この 60 秒から 210 秒の 150 秒間の波形を用いる。最初の加振(3-A)では、150 秒の波形を繰り返し連続で 3 回加力した。その後インターバル時間 3 分ののちに 150 秒の波形を繰り返し連続で 9 回加力(3-B)した。この試験で用いた試験体は、合計 12 回の 150 秒波形の強制変位をうけた。

※参考：±150mm、連続 30 サイクル時における温度上昇 ΔT（放熱非考慮）

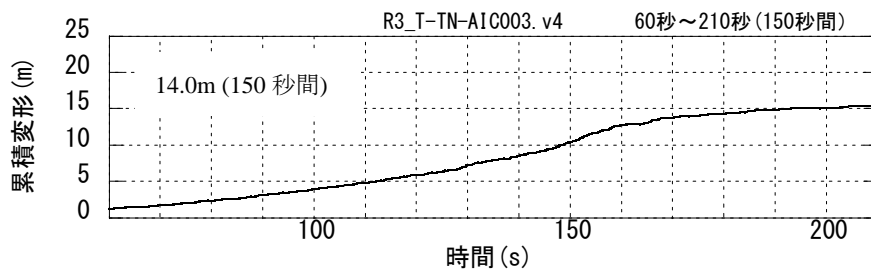
$$\begin{aligned} \Delta T &= q / mc = Qd \times \delta t / mc \\ &= 1000 * 220 * 0.15 * 4 * 30 / (740 * 129) = 41.5 \text{ (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

ここに、δt：累積塑性変形量、ΔT：上昇温度、q：吸収エネルギー量、

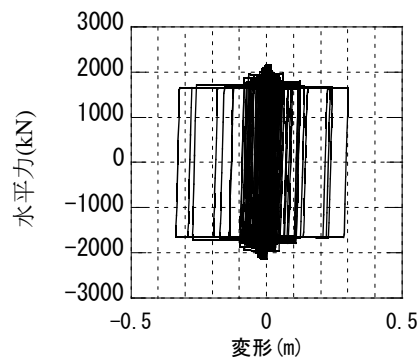
Qd : 鉛ダンパーの降伏荷重、m : 鉛鑄造体重量 (U2426:740kg)、c : 鉛の比熱 (129J/(kg · K))



(a) 変形



(b) 累積変形量



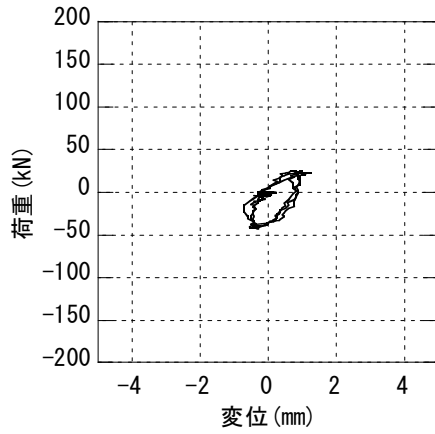
(c) 鉛ダンパーの水平荷重変形関係

図 1.3.7-1.12 地震動 T-TN-AIC003.av 入力時の解析結果

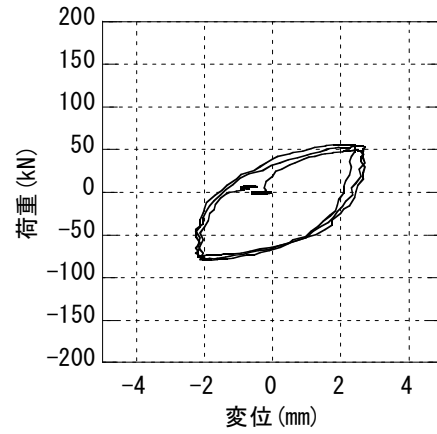
1.3.7.2 試験結果

(1) 微小振幅加振

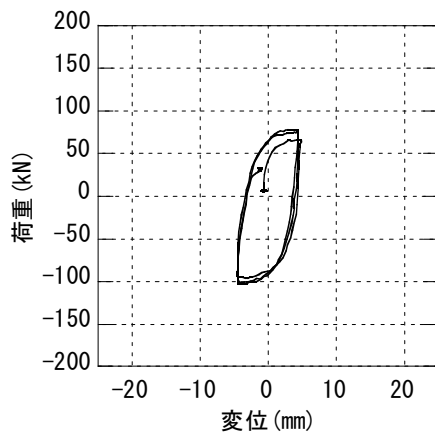
荷重変形関係を図 1.3.7-2.1 に示す。変形±1mm 時から履歴はループを描いている。変形が大きくなるほど荷重値は大きくなっていることがわかる。



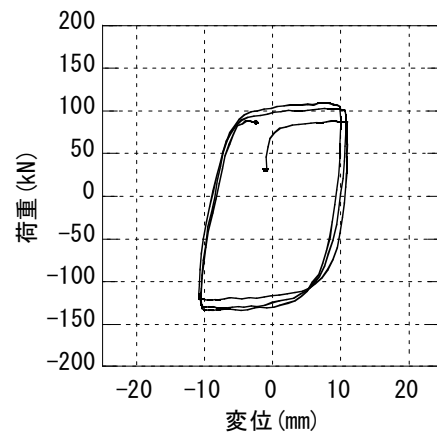
(a) ±1mm 荷重変形



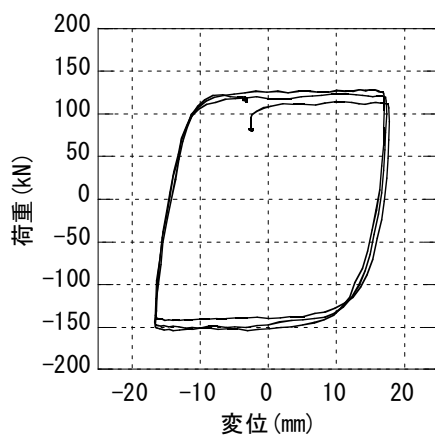
(b) ±2mm 荷重変形



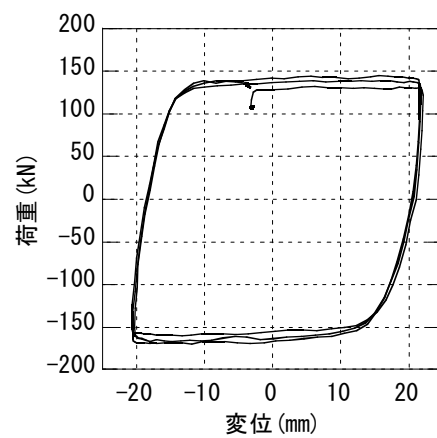
(c) ±4mm 荷重変形



(d) ±10mm 荷重変形



(e) ±16mm 荷重変形



(f) ±20mm 荷重変形

図 1.3.7-2.1 微小振幅加振 荷重変形関係

(2) 漸増連続基本加振

水平変位および累積変位の時刻歴を図 1.3.7-2.2 に示す。±400mm の 9 サイクル目の負側の最大変位に到達する前に試験体の上部にて破断を確認した。破断までの累積変形量は 50.88m であった。

荷重変形関係図を図 1.3.7-2.3 に示す。(b) 図で示す ±100mm 加力時では、荷重変形関係は正負対称な形である。±200mm 加振 (図(c)) および ±400mm 加振では、水平変位の正側と負側で荷重の大きさが異なっている。これは繰り返し加力を受けたことによる試験体の形状変化の影響によるものと考えられる。±200mm の繰り返し载荷において、試験体のくびれ部の下側に亀裂が生じており、試験体は初期と異なる形状となっている。同一変形内における繰り返しにより降伏荷重の値は、繰り返し回数とともに低下している。

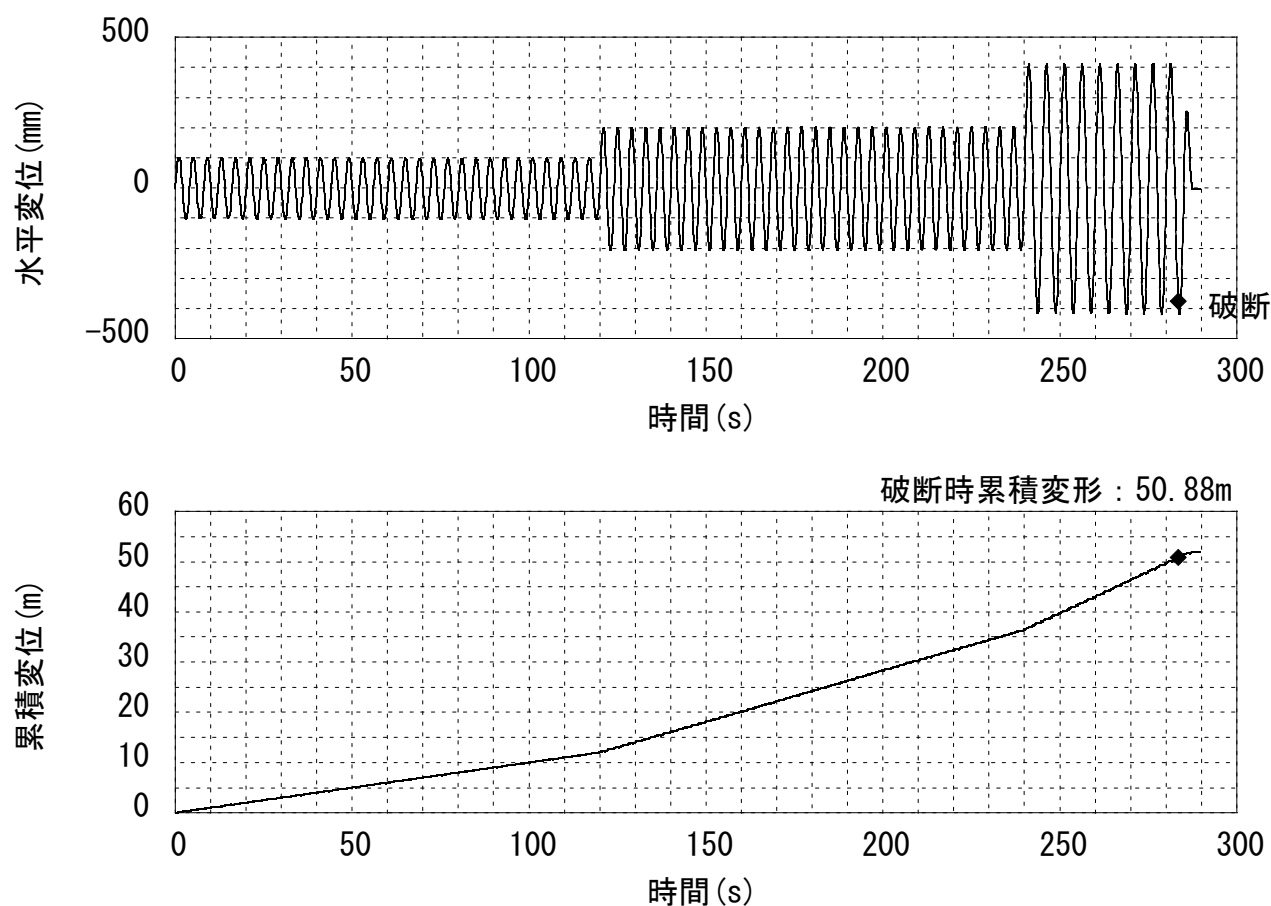
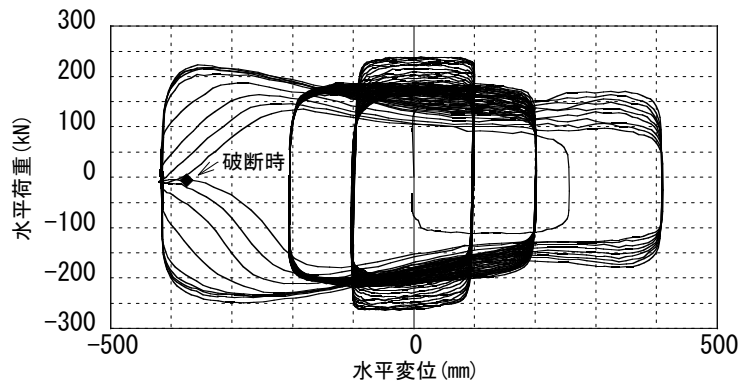
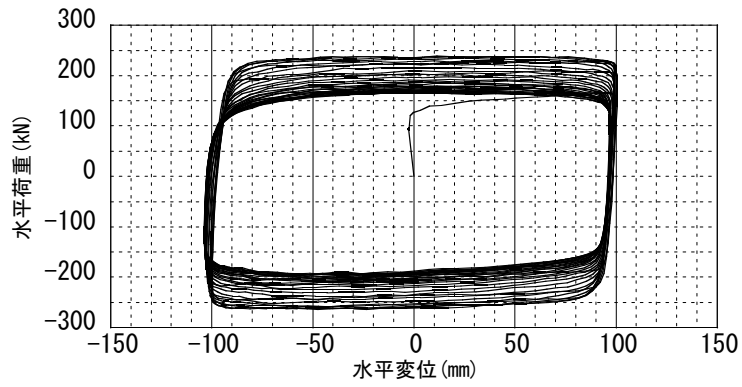


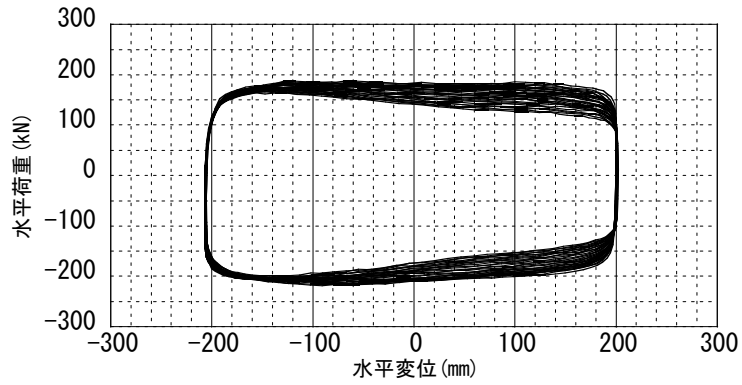
図 1.3.7-2.2 漸増連続基本加振 変位時刻歴



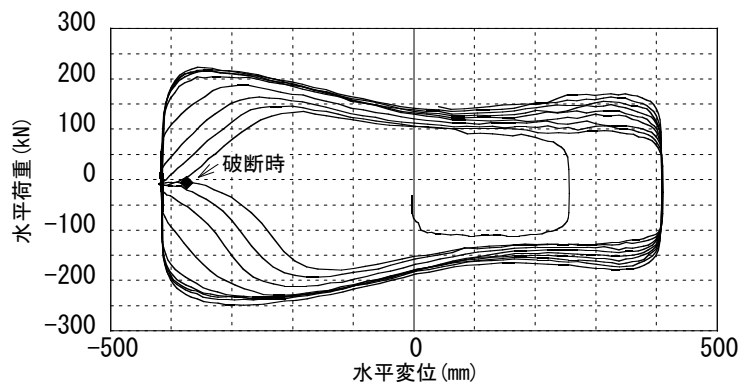
(a) 水平荷重変形関係 (全データ)



(b) 水平荷重変形関係 (±100mmのみ)



(c) 水平荷重変形関係 (±200mmのみ)



(d) 水平荷重変形関係 (±400mmのみ)

図 1.3.7-2.3 漸増連続基本加振 水平荷重変形関係

降伏荷重と累積変形量の関係を図 1.3.7-2.4 に示す。降伏荷重の算出は、荷重変形関係 1 ループ当りのエネルギー吸収量 W より式(1.3.7-2)を用いて求めた。

$$Q_y = \frac{W}{2(d_{\max} - d_{\min} - d_y)} \quad (1.3.7-2)$$

Q_y : 降伏荷重

W : 1 ループ当りのエネルギー吸収量

d_{\max} 、 d_{\min} : 1 ループ内の最大変形および最小変形

d_y : 降伏変位 (表 1.3.7-1.2 より 7.33mm)

図 1.3.7-2.4 では降伏荷重を 3 サイクル目の降伏荷重により基準化している。±100mm の 30 サイクル繰り返しによる降伏荷重は 3 サイクル目に対して 70%に低減している。変形が±200mm に大きくなると、降伏荷重は 80%にまで回復する。その後±200mm の繰り返しにより荷重が低下し、30 サイクル終了時では、±100mm 加力の 3 サイクル目における降伏荷重値の 65%となる。変形が±400mm の加力では再び荷重は回復するが、繰り返し履歴により荷重は低下し、破断時では 45%となった。P 方向±150mm および±400 の単一振幅正弦波加振結果^{1.3.7-4, 1.3.7-5}より求めた累積変形量と降伏荷重の低下率の関係を図中にあわせて示す。既往実験による関係式は以下のとおりである。

$$\pm 150\text{mm} : R_W = -1.411 \times 10^{-8} Y^5 + 2.391 \times 10^{-6} Y^4 - 1.470 \times 10^{-4} Y^3 + 4.101 \times 10^{-3} Y^2 - 6.261 \times 10^{-2} Y + 1.093 \quad (1.3.7-3)$$

$$\pm 400\text{mm} : R_W = -1.84 \times 10^{-7} Y^5 + 1.91 \times 10^{-5} Y^4 - 7.50 \times 10^{-4} Y^3 + 1.37 \times 10^{-2} Y^2 - 0.121 Y + 1.32 \quad (1.3.7-4)$$

R_W : 1 ループ分の吸収エネルギーの 3 サイクル目に対する変化率

Y : 累積変形量(m)

±100mm の本試験による低下傾向は、既往の±150mm 試験に基づいた低下式とほぼ同様の低下度合いとなっている。ただし、本実験結果では変形が変わる際に荷重の回復現象が見られるため、既往結果と異なる変化を示している。累積エネルギー吸収量と累積変形量の関係を図 1.3.7-2.5 に示す。破断直前まで試験体はエネルギーを吸収している。最終的なエネルギー吸収量は 8850kJ であった。

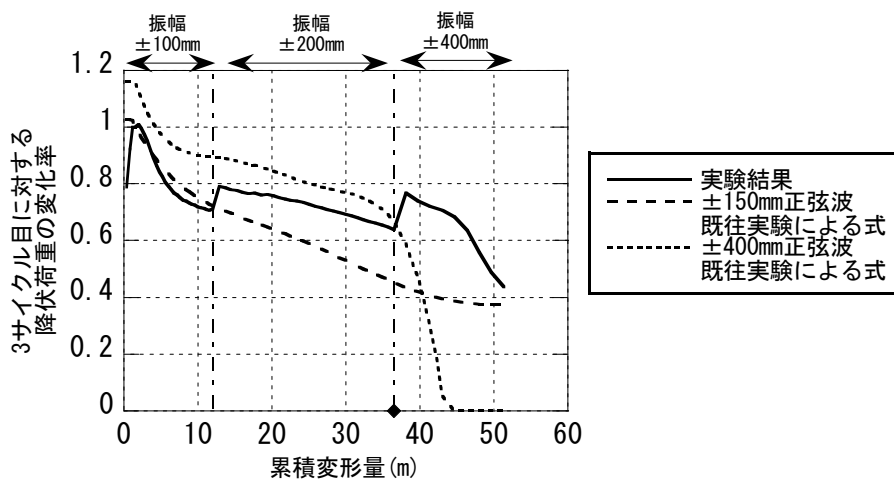


図 1.3.7-2.4 降伏荷重と累積変形量の関係

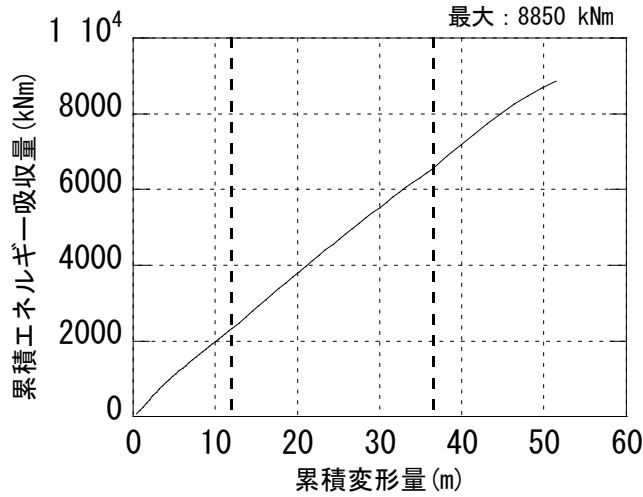


図 1.3.7-2.5 累積エネルギー吸収量と累積変形量の関係

次に累積損傷度の検討を実施した。振幅と破断までの繰り返し回数^{1.3.7-3)}の関係が図 1.3.7-2.6 に示され、式(1.3.7-5)にて表現されている。なお、式(1.3.7-5)は±20～800mm での実験結果より求めたものであるため、±20mm 未満(全振幅 40mm 未満)での破断に到る回数は本疲労曲線を外挿することにより求めることとしている。

$$Nd = 8.84 \times 10^5 \delta^{-1.74} = 8.84 \times 10^5 (\Delta/2)^{-1.74} \quad (1.3.7-5)$$

ここに、

Nd : 破断時繰り返し回数、 δ : 片振幅(mm)、 Δ : 全振幅(mm)

本実験における累積損傷度の評価結果を表 1.3.7-2.1 に示す。各振幅における損傷度の和は、0.788 となり、1 未満の値となった。

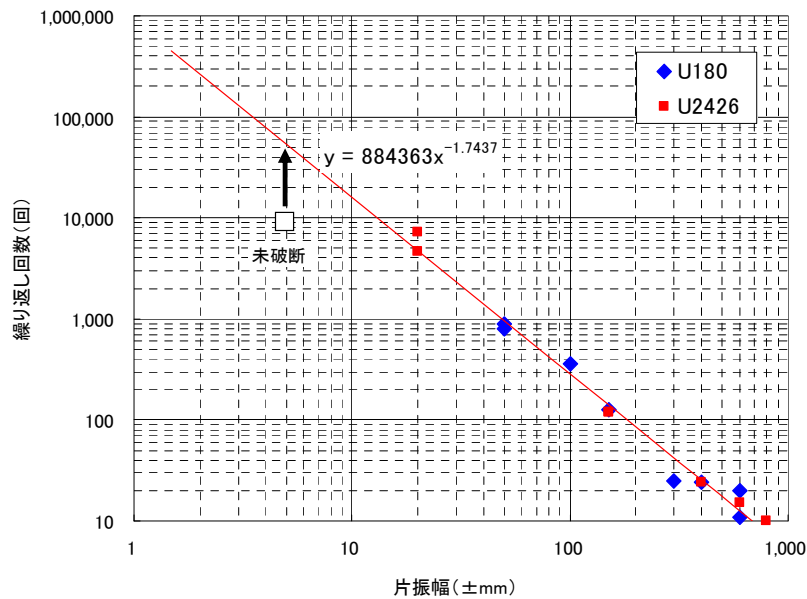
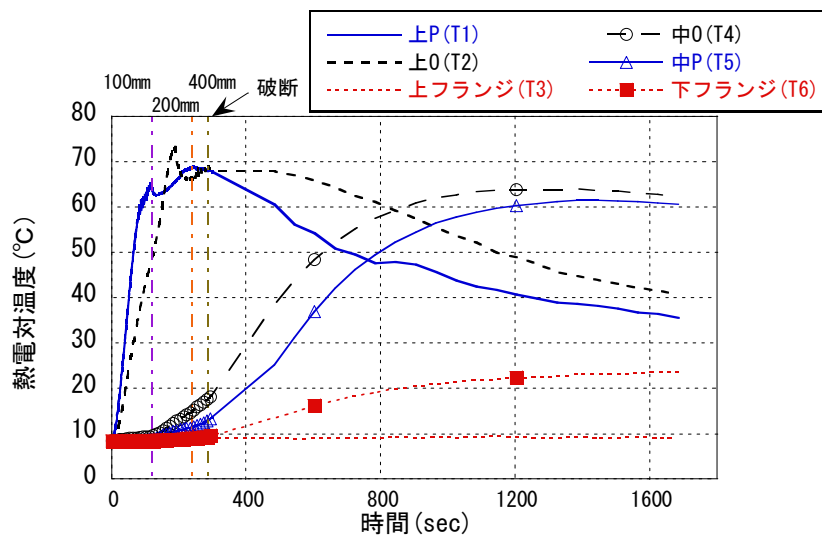


図 1.3.7-2.6 破断までの繰り返し回数と振幅の関係^{1.3.7-3)}

表 1.3.7-2.1 漸増連続基本加振 累積損傷度評価

振幅 δ (mm)	破断時 繰り返し回数 Ndi	実験 繰り返し回数 ni	損傷度 ni/Ndi
100	292.7	30	0.102
200	87.6	30	0.342
400	26.2	9	0.343
累積損傷度			0.788



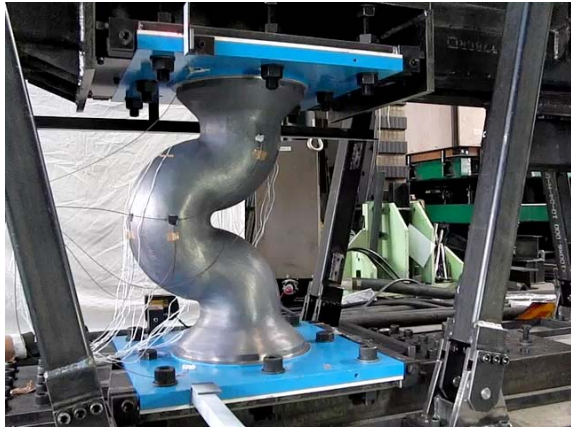
※上フランジの熱電対は鋼板から剥離

図 1.3.7-2.7 漸増連続基本加振 熱電対計測結果

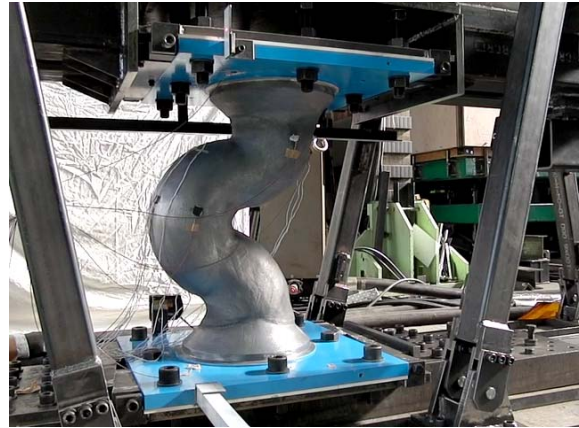
熱電対による試験体表面の温度計測結果を図 1.3.7-2.7 に示す。鉛部上部の温度 (T1, T2) は試験開始時から急激に上昇する。ただし、温度が 70°C 程度にて頭打ちとなっている。一方、中央のくびれ部およびフランジの加力中における発熱はわずかである。加力が終了すると、鉛上部の温度は漸減する。一方、中央部およびフランジの温度は上昇する。特に、中央部の温度は 60°C から 65°C にまで上昇し、ピークを迎えその後漸減した。なお、本試験の上フランジを計測する熱電対 (T3) は試験中に剥離し、計測することができなかった。

次頁以降に、試験体の状況写真を示す。±200mm の加振時にはすでに形状変化が顕著に表れ、くびれ部下部の鉛断面は大きくなり、くびれ上部は細くなっている。試験体の破断はくびれ上部の断面が細くなる部分で発生した。なお、破断確認後に変位 0 の位置へアクチュエータを戻して試験体を放置したところ、破断面が結合し、上フランジは自立可能であった。

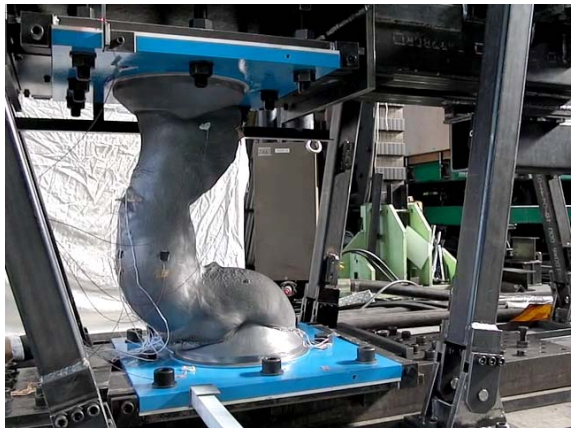
漸増連続基本加振 (試験 No. 1) 試験体状況



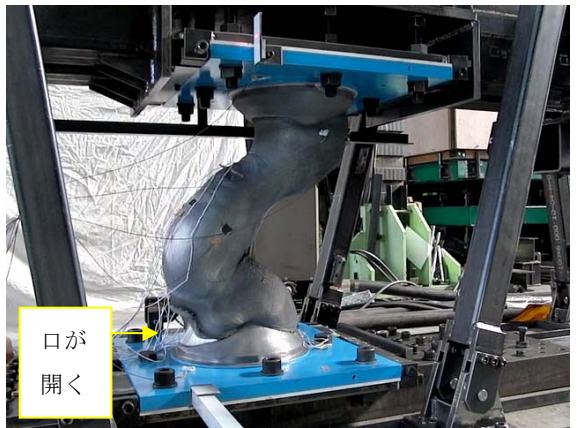
No. 1 試験開始前



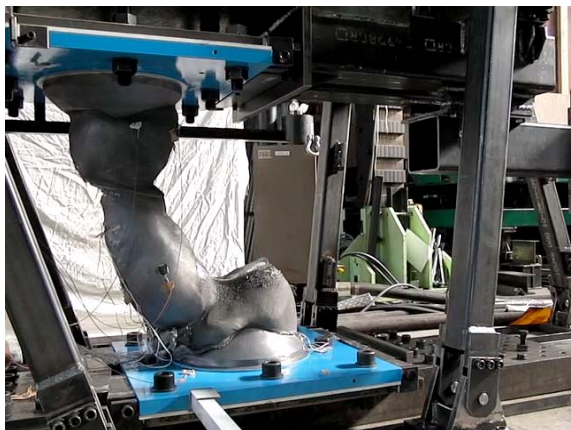
±100mm 30 サイクル目



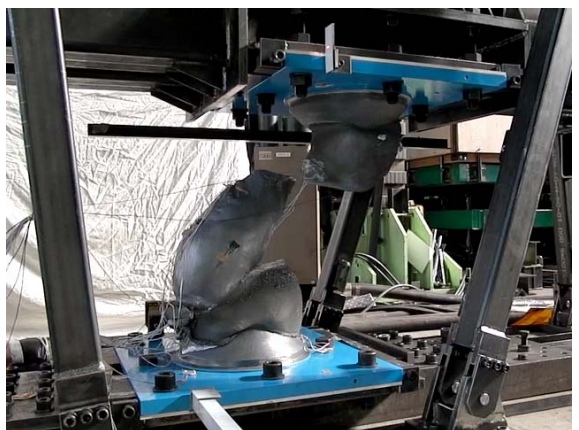
±200mm 30 サイクル目 変位正側



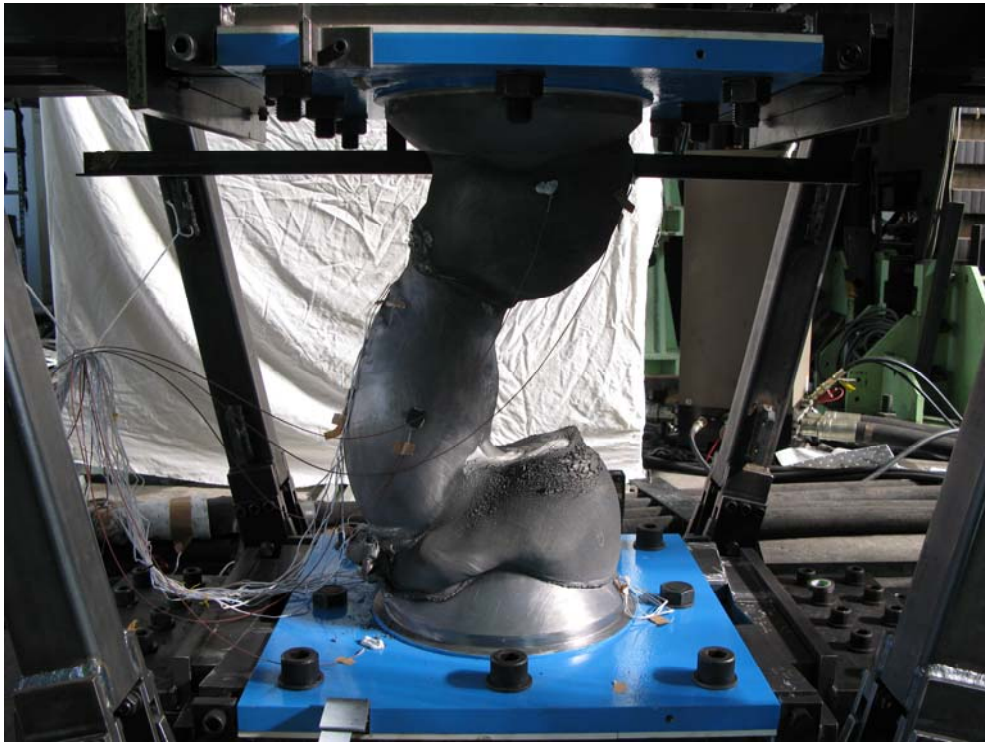
±200mm 30 サイクル目 変位負側



±400mm 9 サイクル目 変位正側



±400mm 9 サイクル目 変位負側(破断確認)



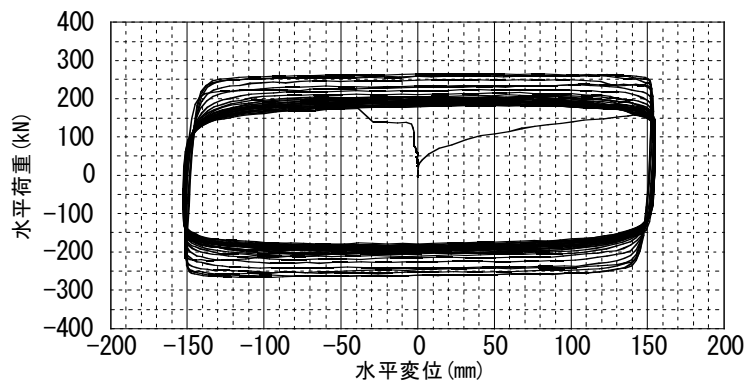
試験体 No. 1 試験後の鉛ダンパー(1)



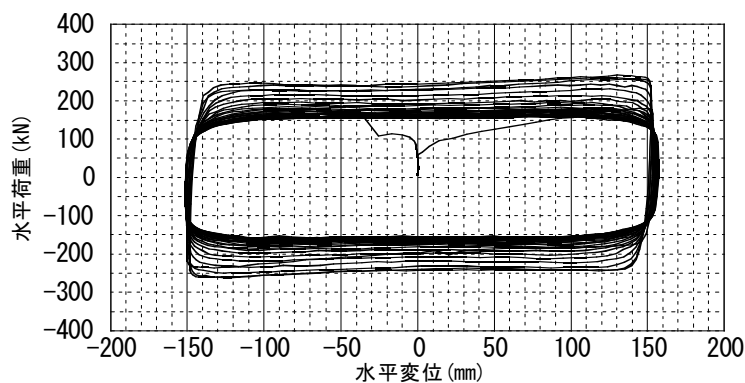
試験体 No. 1 試験後の鉛ダンパー(2)

(3) 方向を変えて断続的に加振 (試験体 2 P 方向→O 方向→P 方向)

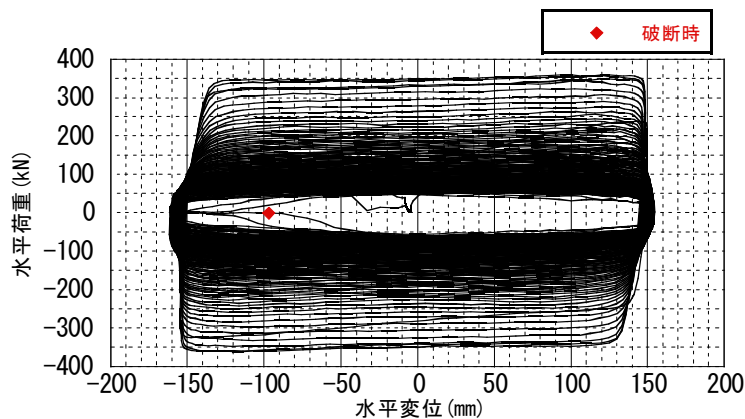
本実験では、P 方向への 2 回目加力時 250 サイクル目 (P 方向 1 回目加力とあわせると 280 サイクル) において、試験体上部にて破断を確認した。各加力方向別の水平方向荷重変形関係を図 1.3.7-2.8 に示す。±200mm または ±400mm 加振時において確認された変形の正負に対する荷重値の非対称性は各図とも見られなかった。図(a)の P 方向 1 回目の履歴形状と図(b)の O 方向 1 回目の履歴形状をくらべると、図(a)は図(b)に対してやや丸みを帯びた形状となっているものの、大きな違いは確認されず、繰り返しとともに荷重が低減している。P 方向 2 回目の荷重は加力初期に 350kN 程になっており、図(a)、図(b)に対して大きな値となっている。これは、O 方向加力によって、試験体の形状が変化したためであると考えられる。P 方向 2 回目の加力においても、繰り返しにより荷重が低減していく。



(a) ±150mm 30 サイクル P 方向 1 回目 荷重変形関係



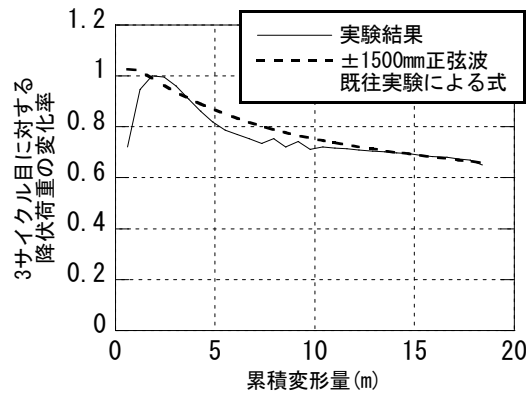
(b) ±150mm 30 サイクル O 方向 荷重変形関係



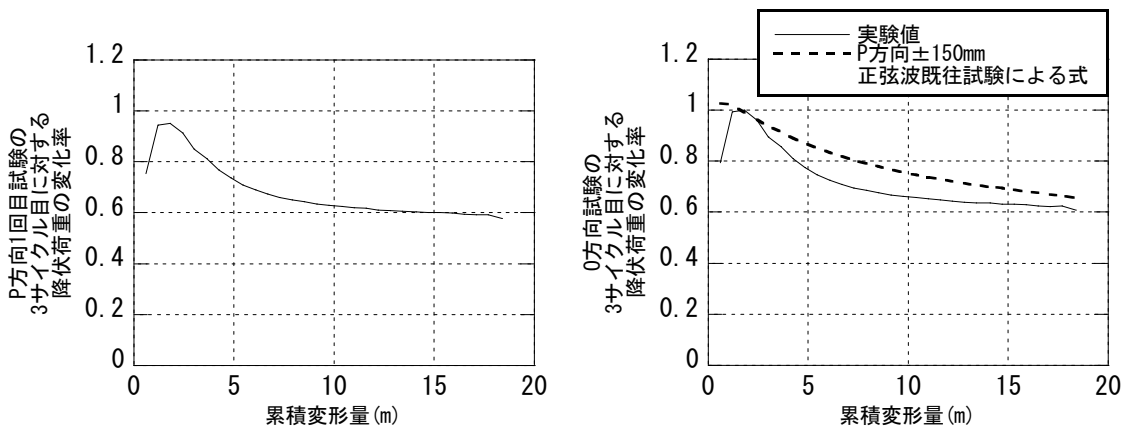
(c) ±150mm P 方向 2 回目 荷重変形関係

図 1.3.7-2.8 方向を変えて断続的に加振 水平方向荷重変形関係

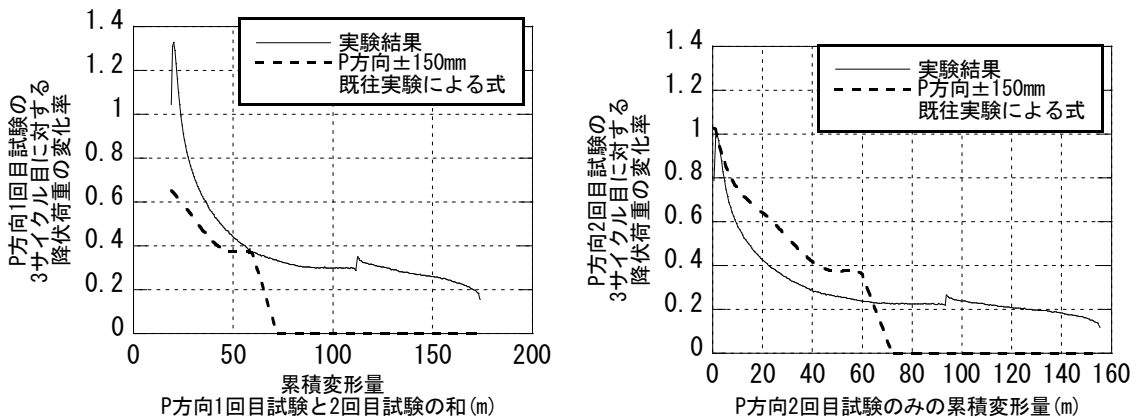
降伏荷重の変化率と累積変形量の関係を図 1.3.7-2.9 に示す。降伏荷重は 1 ループ当りのエネルギー吸収量から式(1.3.7-2)により求めた。図(a)は P 方向 1 回目の 30 サイクルの結果である。既往の $\pm 150\text{mm}$ の実験結果から求めた式とよく適合している。O 方向加力時の降伏荷重の低下 (図(b)) は、P 方向加力 1 回目とくらべると、その低下傾向はほぼ同様であるものの、同一の累積変形量においてはやや低下度合いが大きい。P 方向の $\pm 150\text{mm}$ の既往式と比べても、実験結果はやや下回る値となっている。P 方向 2 回目の降伏荷重は初期において P 方向 1 回目加力の 3 サイクル目にて評価した降伏荷重に対して 1.3 倍程度大きくなっている。その後、累積変形量とともに荷重



(a) P 方向加力 (1 回目)



(b) O 方向加力



(c) P 方向加力 (2 回目)

図 1.3.7-2.9 累積変形量と降伏荷重の変化率

は低下し、最終的な荷重値は、P方向加力1回目の3サイクル目に対して0.2倍、P方向加力2回目の3サイクル目に対して0.12倍となった。既往実験による累積変形量と変化率の式とP方向加力2回目における降伏荷重の変化率との対応は、P方向加力1回目ほどの対応は得られなかった。

累積変形量と累積吸収エネルギーの関係を図1.3.7-2.10に示す。試験体は破断時までエネルギーを吸収している。P方向1回目とO方向では同様な曲線を描き、P方向2回目はこれらをやや上回った。表1.3.7-2.2より破断までの累積変形量は、2回のP方向とO方向をあわせて192.39m、P方向のみで174.03mであった。また累積吸収エネルギーは、2方向の和で21887kNm、P方向のみで18706kNmとなった。

累積損傷度の評価結果を表1.3.7-2.3に示す。破断時繰返し数N_{di}は、式(1.3.7-5)より求めた。本実験結果ではP方向のみを考慮した場合の累積損傷度は1.937であり、PおよびQ方向をともに考慮すると2.144となり1よりも大きな値となった。漸増連続基本加振において累積損傷度が1を下回った結果を踏まえると、加振の連続性も破断に寄与するパラメータとして考えられる。

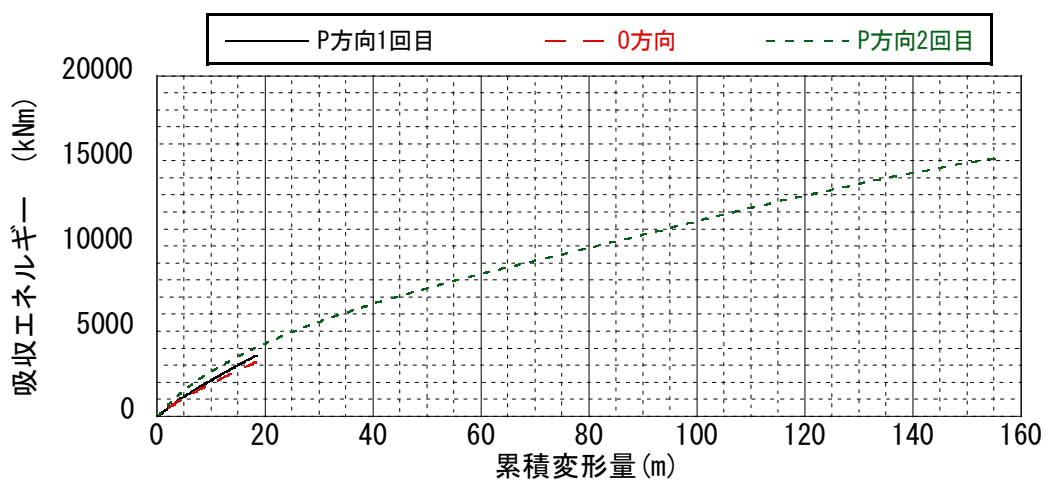


図 1.3.7-2.10 累積変形量と累積吸収エネルギーの関係

表 1.3.7-2.2 方向を変えて断続的に加振 実験結果

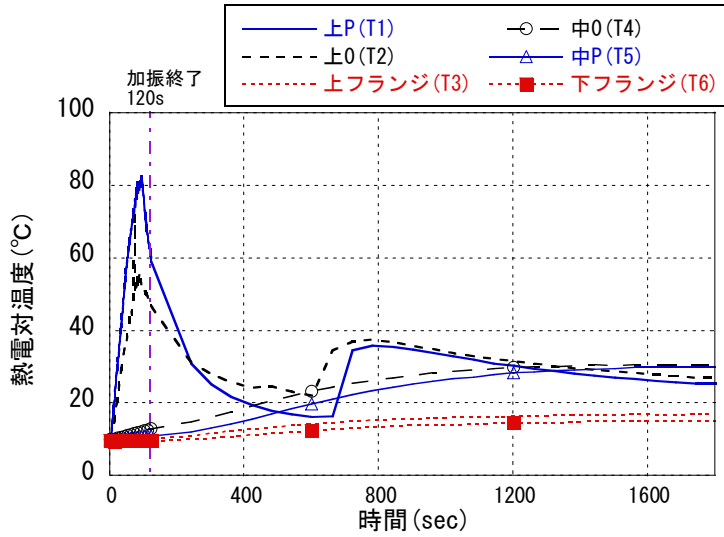
試験条件	振幅/周期	サイクル数	累積変形 (m)	吸収 E (kNm)
P 方向 1 回目	150mm/4s	30	18.39	3568
O 方向		30	18.36	3181
P 方向 2 回目		250	155.64	15138
計 (P-O-P)		310	192.39	21887
計 (P 2 回分)		280	174.03	18706

表 1.3.7-2.3 累積損傷度

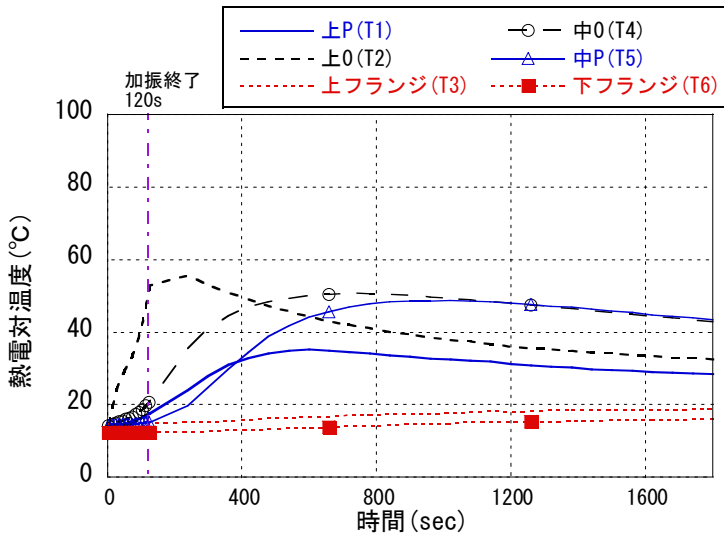
振幅 δ (mm)	破断時 繰返し回数 N _{di}	実験 繰返し回数 n _i	損傷度 n _i /N _{di}
P 方向 150	144.6	280	1.937
Q 方向 150	144.6	30	0.208
累積損傷度			2.144

熱電対による表面温度計測結果を図 1.3.7-2.11 に示す。P 方向の加力では、試験体上部の T1, T2 の温度が急激に高くなり、続いて中央部の温度がゆっくりと温度上昇する。一方、O 方向加力では、上部の O 方向 (T2) のみ急激に温度が上昇し、上部の P 方向の温度は O 方向の上部に比べゆっくり上昇する。いずれの試験結果においてもある程度の時間が経過すると、試験体上部の温度よりも中央部の温度の方が高くなっている。P 方向加力 2 回目では試験体中央部の O 方向 (T4) において 127℃まで温度が上昇している。なお、図(a)の T1, T2 点において 600 秒付近にて温度が上昇しているが、これは 2 点の熱電対受感部と試験体との接触を修正したためである。

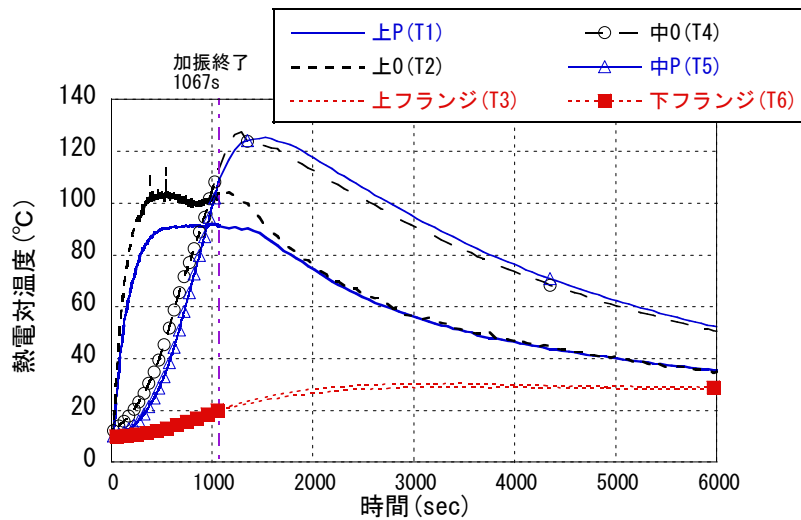
非接触の熱画像センサーによる試験体の温度分布を図 1.3.7-2.12 に示す。温度が高いところは上下に 2 箇所あり、くびれ部と補強部の間で集中的に温度が高くなっていることがわかる。P 方向 2 回目の加振終了時では、温度は 150℃を超える表示となっている。このセンサーは画面内での相対的な温度の高低を捕らえるものである。熱画像センサーは設定する放射率により温度表示が大きく左右される。放射率は、漸増連続基本加振時に接触式熱電対により設定したものの、ここで示す温度の絶対値について精度は高くないことを付け加えておく。



(a) P方向加力1回目

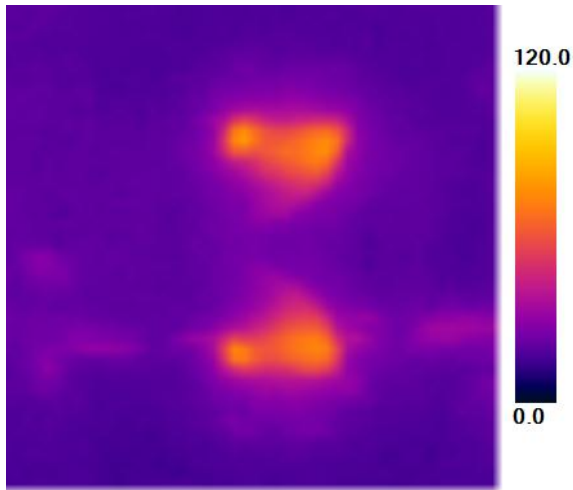


(b) O方向加力

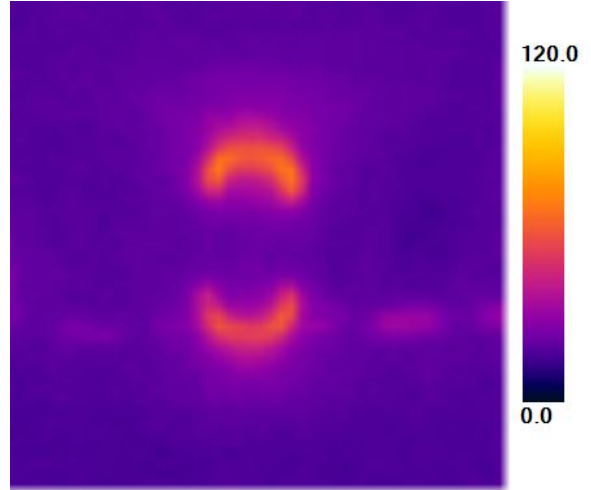


(c) P方向加力2回目

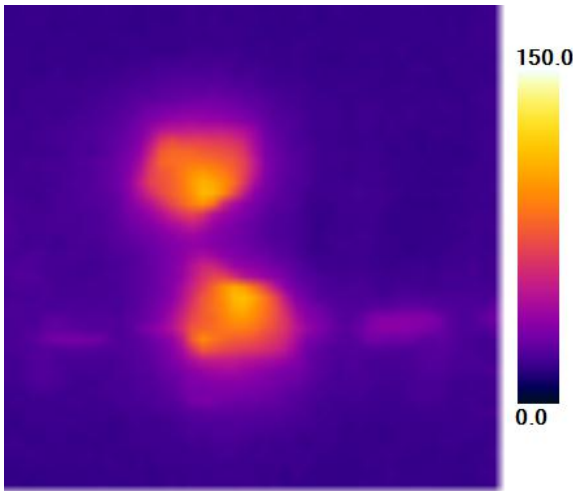
図 1.3.7-2.11 熱電対計測結果



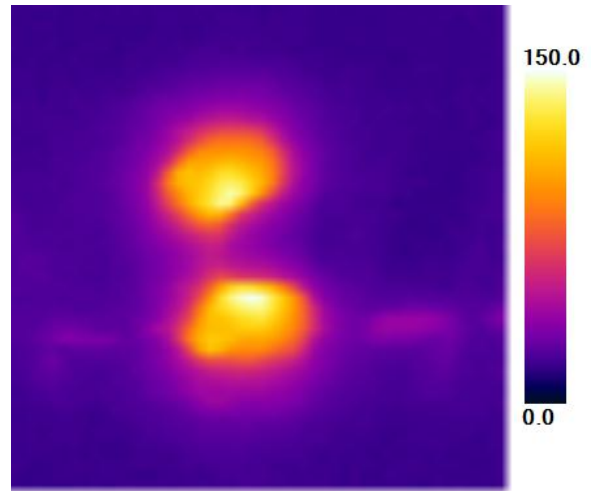
P 方向加力 1 回目 加力終了時



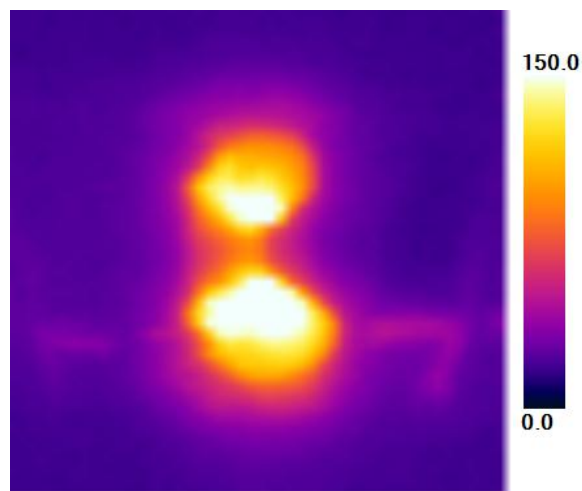
O 方向加力 加力終了時



P 方向加力 2 回目 50 サイクル時



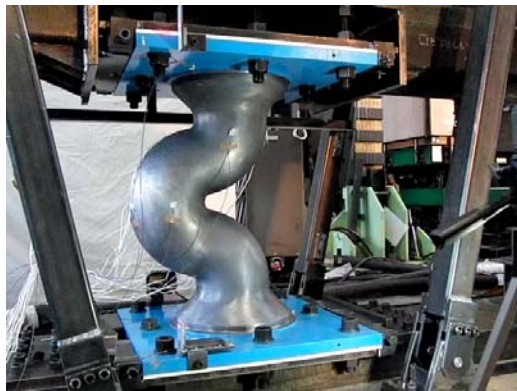
P 方向加力 2 回目 100 サイクル時



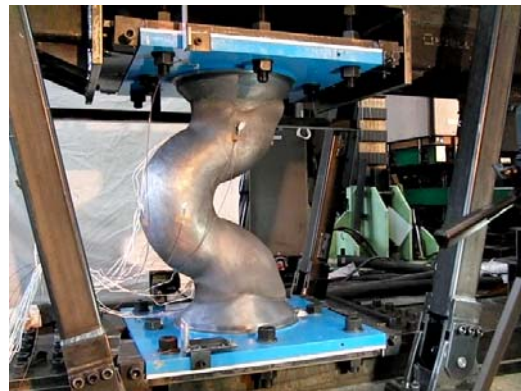
P 方向加力 2 回目 加力終了時

図 1.3.7-2.12 熱画像センサーによる温度分布

試験 No. 2 試験状況 (1)



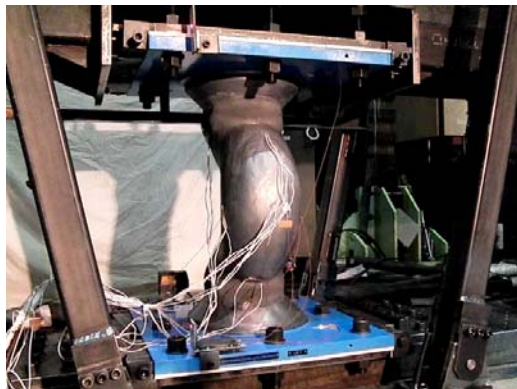
P 方向 1 回目 試験前



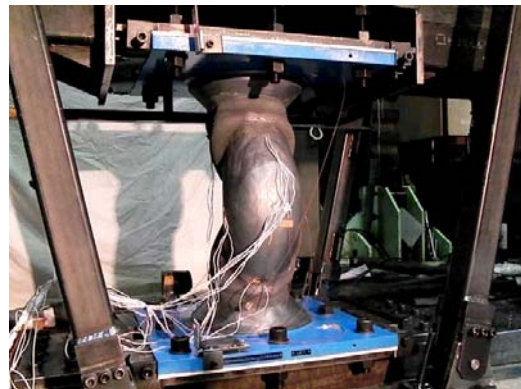
P 方向 1 回目 試験後



P 方向 1 回目 試験後状況



O 方向 試験前

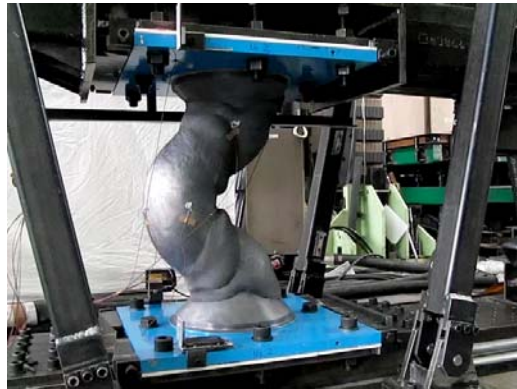


O 方向 試験後

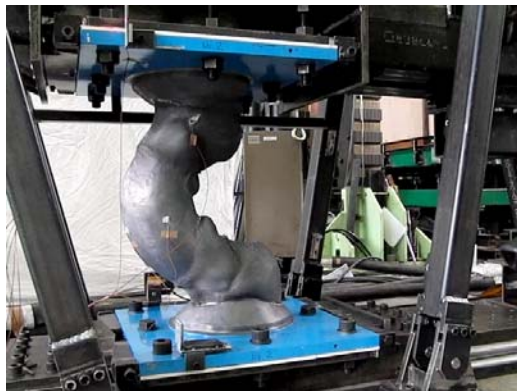


O 方向 試験後 試験体状況

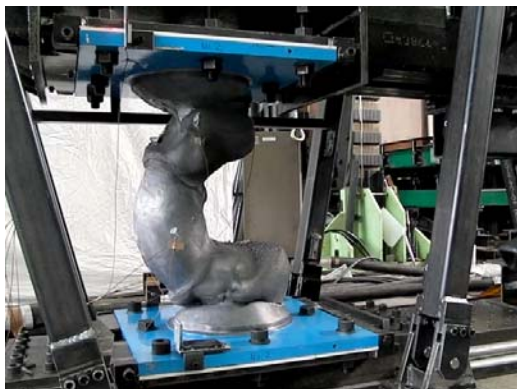
試験 No. 2 試験状況 (2)



P 方向 2 回目 試験前

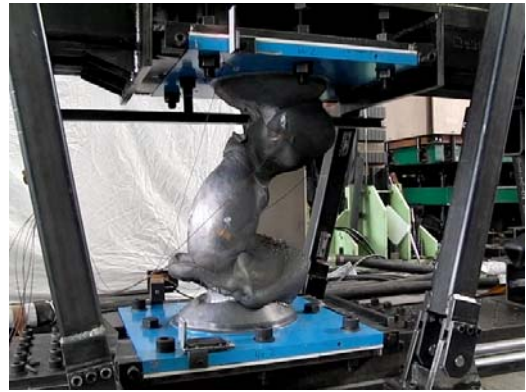
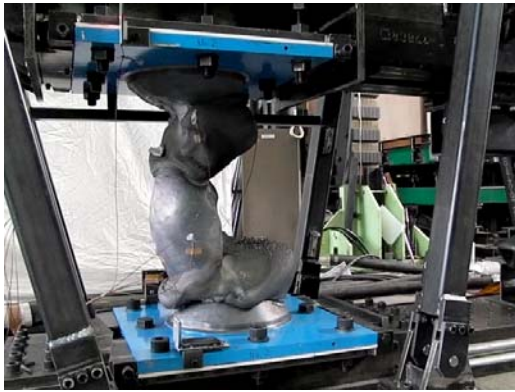


50 サイクル (2 回目試験累積変形 30m)



100 サイクル (2 回目試験累積変形 60m)

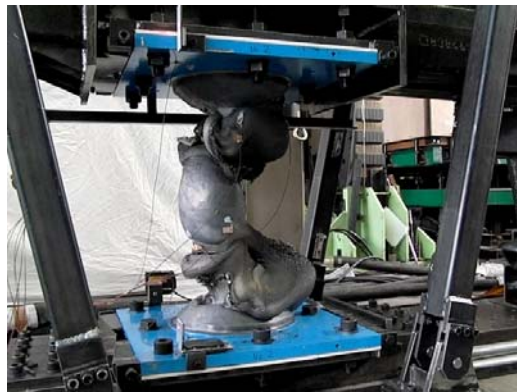
試験 No. 2 試験状況 (3)



150 サイクル (2 回目試験累積変形 90m)



250 サイクル (2 回目試験累積変形 150m)



P 方向 2 回目 試験後

(4) 地震応答波加振

150秒間の地震応答波加振を累計12回加力した。3回目と4回目の間に約3分間のインターバルを除いて、加振は連続して行った。12回の加振においても、試験体の破断は確認されなかった。試験体の下フランジと試験装置を締結するボルトへ形状変化した鉛が覆いかぶさり、ボルトが外せなくなるおそれがあったため、加力は12回で中止された。

水平方向荷重変形関係を図1.3.7-2.13に示す。図(a)の1~3回目の荷重は、図(b)の4~12回目の荷重値よりも大きな値となっている。前述の試験結果の一部で確認された変形の正負により荷重値が非対称となる傾向がこの試験結果でも見られる。変形が大きい場合、変位が正側、つまり上フランジプレートが試験体のくぼみのある方向へ移動したときに、逆方向へのフランジ移動時に生じる水平力よりも小さくなる傾向がみられる

水平変位および荷重の時刻歴波形を図1.3.7-2.14に示す。図(b)より、1回目の加力における荷重の最大値が最も大きく、2回、3回と続くにつれて、荷重の最大値が低減していく。ただし、5回目以降では、荷重最大値はほぼ一定となっている。図(a)と図(b)より荷重は変形に依存し、変形が小さい場合荷重は小さく、変形が大きくなると荷重は大きくなっている。一般的な鉛ダンパーの復元力特性は完全弾塑性モデルとして表されることが多いが、実験結果は完全弾塑性モデルと異なる傾向を示している。

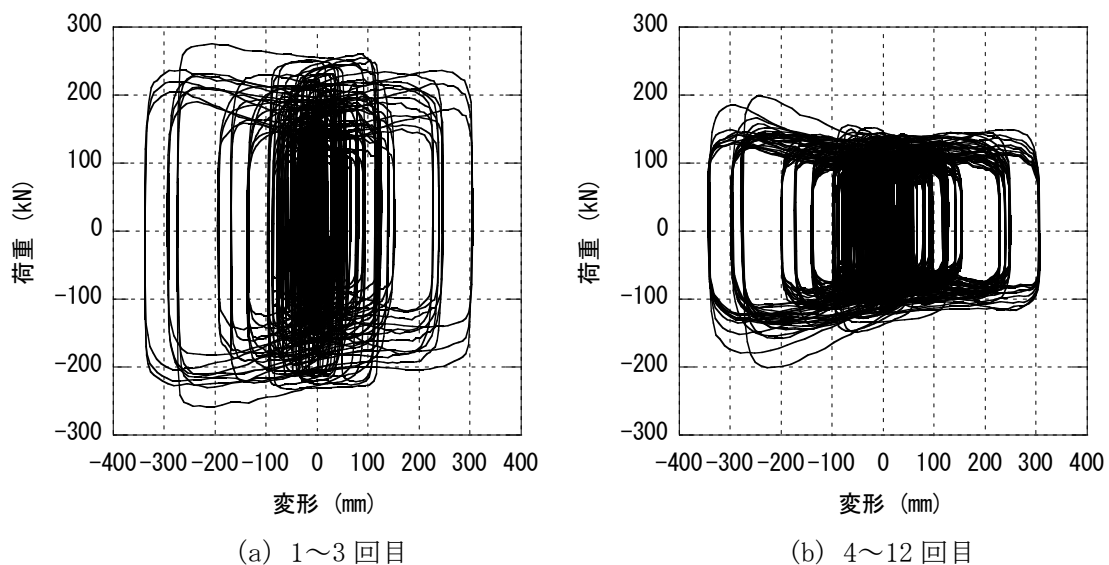
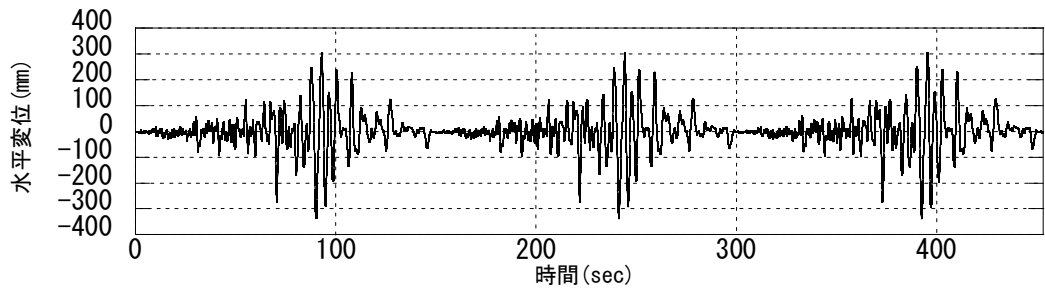
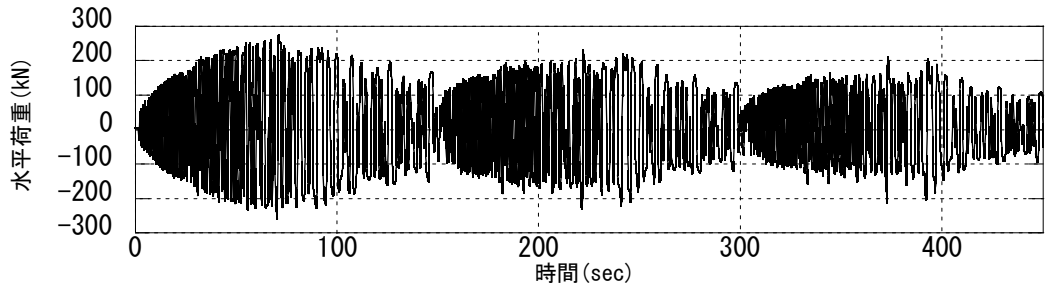


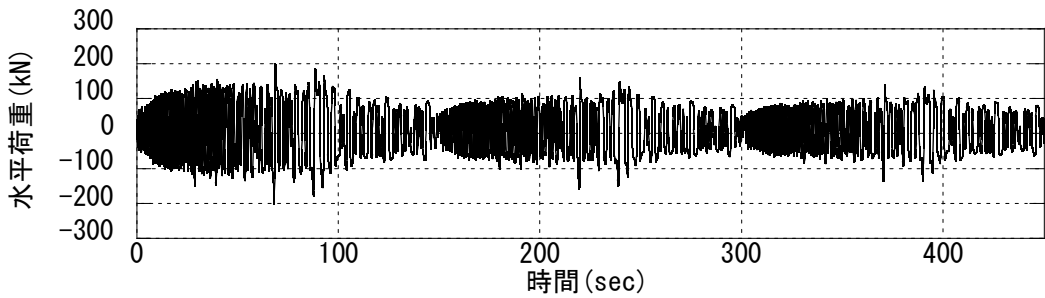
図 1.3.7-2.13 地震応答波加振 荷重変形関係



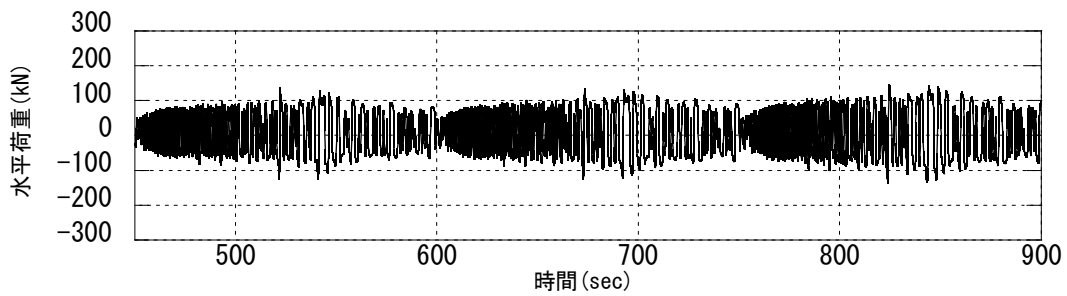
(a) 1~3回目 水平変位時刻歴



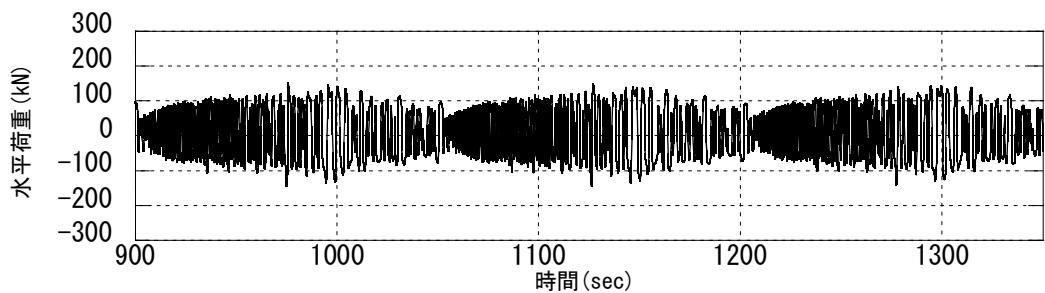
(b) 1~3回目 水平荷重時刻歴



(c) 4~6回目 水平荷重時刻歴



(d) 7~9回目 水平荷重時刻歴



(e) 10~12回目 水平荷重時刻歴

図 1.3.7-2.14 水平変位および荷重の時刻歴

累積変形量およびエネルギー吸収量を表 1.3.7-2.4 に示す。地震波 1 回当たりの累積変形量 ΣD は 13.1m であり、12 回目の加振終了時において 162.9m であった。試験体は計 17755kNm のエネルギーを吸収しており、加振が進むにつれ形状が変化したが、継続的にエネルギーを吸収できていることがわかる。また、地震波 1 回当たりのエネルギー吸収量 W は、6 回目の地震波加振時が最小となり、1 回目のエネルギー吸収量に対して 44% となった。最終回の吸収エネルギーは 1 回目の地震波に対して 54% であり、6 回目のエネルギー吸収量よりも大きい。

熱電対にて計測された表面温度を図 1.3.7-2.15 に示す。初期温度は各点とも 10°C であった。加振初期では、試験体上部の温度が急激に上昇し、P 方向では 2 回目の加振時に 100°C 近くに達した。試験体中央部では徐々に温度が上昇し、全加振終了時には中央部 O 方向の熱電対で 150°C を計測した。上下のフランジも温度が徐々に上昇し、全加振終了時には上フランジ 24°C、下フランジ 25°C となった。

表 1.3.7-2.4 累積変形量、累積吸収エネルギー (ΣW)
および地震波 1 回に吸収するエネルギーと 1 回目に対する変化率

回数	ΣD (m)	ΣW (kNm)	W (kNm)	W/W (1 回目)
1	13.1	2494	2494	1.000
2	26.3	4623	2129	0.853
3	39.8	6366	1743	0.699
4	53.4	7883	1517	0.608
5	67.0	9070	1187	0.476
6	80.7	10158	1088	0.436
7	94.4	11249	1091	0.437
8	108.2	12416	1167	0.468
9	121.9	13698	1281	0.514
10	135.6	15047	1349	0.541
11	149.2	16403	1357	0.544
12	162.9	17755	1352	0.542

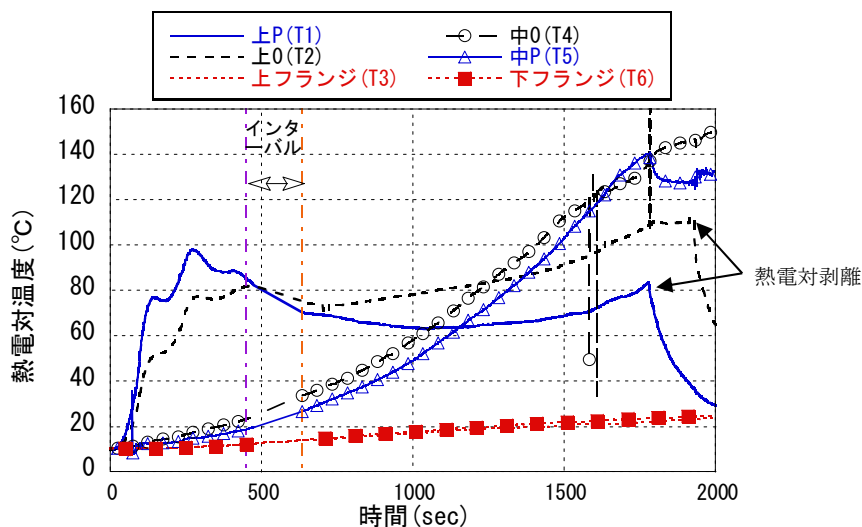


図 1.3.7-2.15 地震応答波加振時 熱電対計測結果

熱温度センサーによる表面温度分布を図 1.3.7-2.16 に示す。3 回目の加振終了時および 4 回目の加振開始時においては、鉛中央のくびれ部と上下の拡幅部の間が高温となっている。加振とともに高温部となる領域が増え、12 回目の加振終了時には高温部が試験体全体に広がっている。

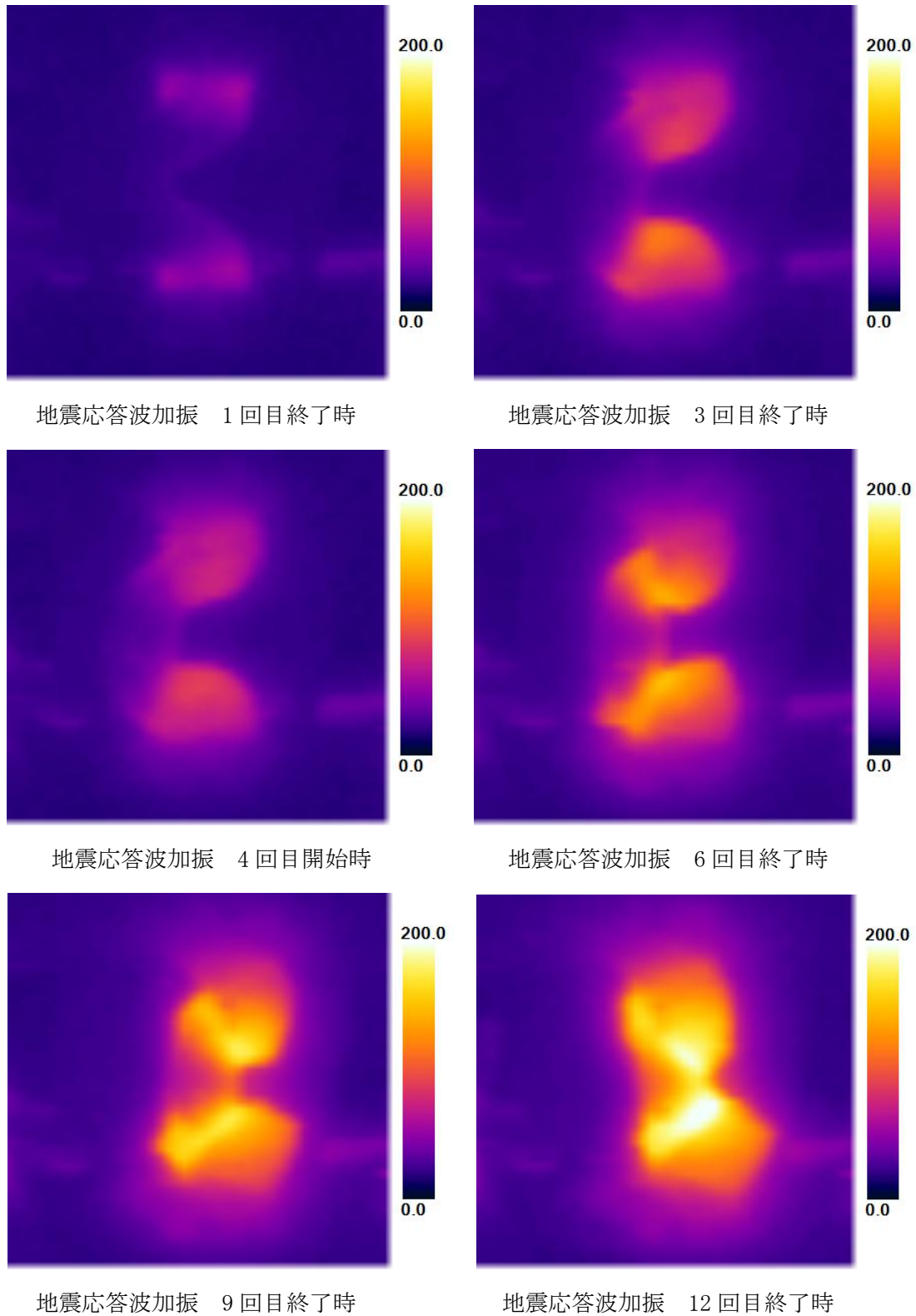


図 1.3.7-2.16 熱画像センサーによる温度分布

累積損傷度の評価に際して、地震応答波加振 12 回の全水平変形波形に対してレインフロー法^{1.3.7-6)}を用い各振幅のサイクル数を算出した。振幅の階級と階級の間隔は 10mm とした。サイクル数の分布を図 1.3.7-2.17 に示す。ここで示す振幅は片振幅 (0-p) である。累積損傷度評価結果を表 1.3.7-2.5 に示す。0mm~10mm における振幅については、非常に微小な振動もカウントされている可能性があるため、累積損傷度評価に際しては、検討から除外している。12 回全体の累積損傷度は 1.59 となり、Miner 則では破断限界とみなす 1 よりも実験結果は上回った。なお、今回採用した地震応答波変位の 1 回当たりの累積損傷度は、 $1.59/12=0.133$ となる。

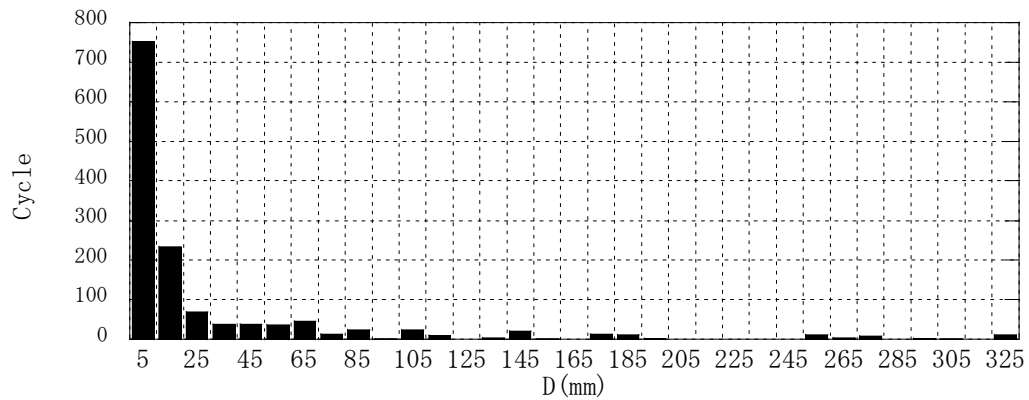


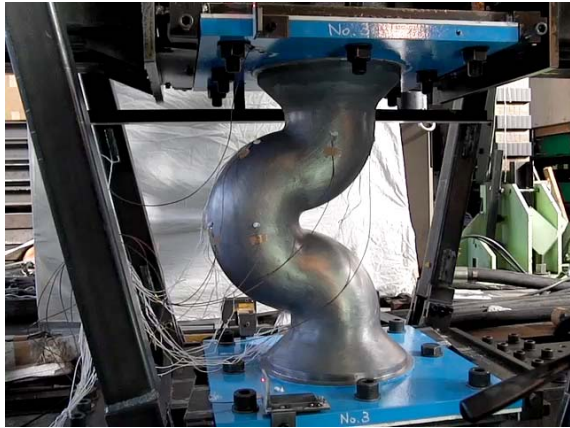
図 1.3.7-2.17 地震応答波加振 レインフロー法による振幅頻度分布

表 1.3.7-2.5 地震応答波加振 累積損傷度評価

変形(mm)	cycle_1	cycle_2	total_cycle	Ndi	ni/Ndi
15	54.5	178.5	233	7944	0.0293
25	12.5	56.5	69	3266	0.0211
35	13.5	23.5	37	1819	0.0203
45	6.5	31.5	38	1175	0.0324
55	9	27	36	828	0.0435
65	11	35	46	619	0.0743
75	2.5	9.5	12	483	0.0249
85	6	18	24	388	0.0618
95	0.5	0.5	1	320	0.0031
105	7	17.5	24.5	269	0.0911
115	1	8.5	9.5	230	0.0414
125	0	0	0	199	0.0000
135	3	0	3	174	0.0173
145	3	18	21	153	0.1369
155	0.5	0.5	1	137	0.0073
165	0	0	0	122	0.0000
175	3	9	12	111	0.1085
185	3	8.5	11.5	100	0.1146
195	0.5	1	1.5	92	0.0164
205	0	0	0	84	0.0000
215	0	0	0	77	0.0000
225	0	0	0	71	0.0000
235	0	0	0	66	0.0000
245	0	0	0	62	0.0000
255	2.5	8	10.5	57	0.1829
265	2.5	1	3.5	54	0.0652
275	0	8	8	50	0.1589
285	0	0	0	47	0.0000
295	1	0.5	1.5	45	0.01.3.7
305	0	0.5	0.5	42	0.0119
315	0	0	0	40	0.0000
325	2.5	8.5	11	38	0.2922

$\Sigma ni/Ndi$	1.59
-----------------	------

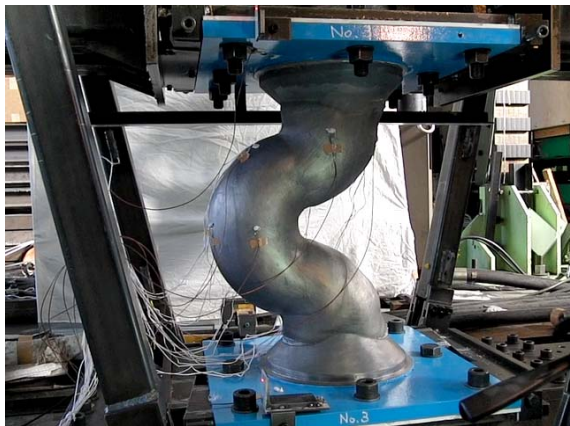
試験 No. 3 試験状況 (1)



試験開始前



地震波 1 回目 最大変形時



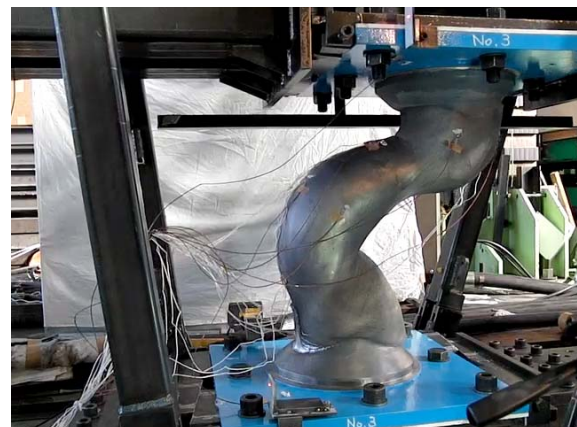
地震波 2 回目 開始前



地震波 2 回目 最大変形時

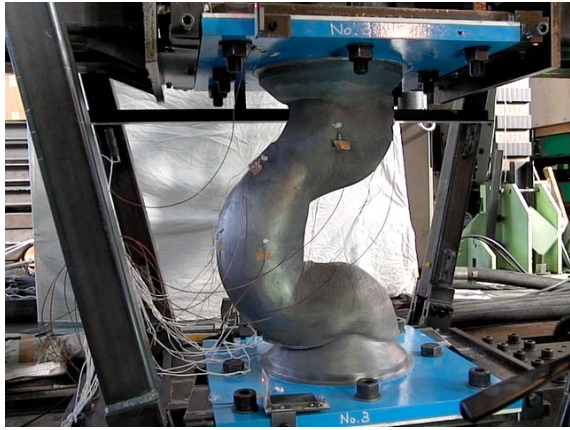


地震波 3 回目 開始前

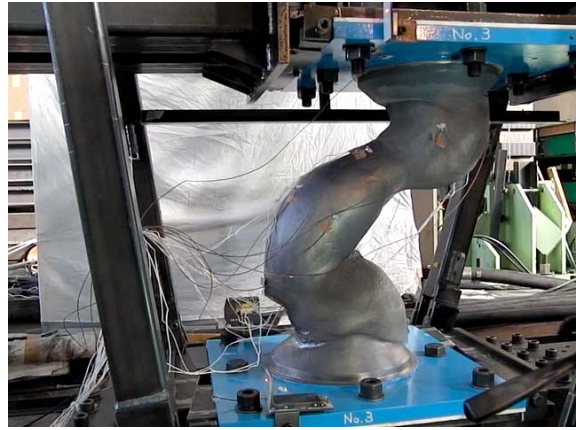


地震波 3 回目 最大変形時

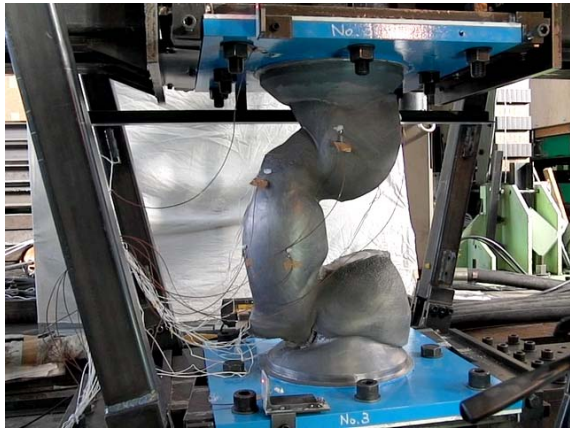
試験 No. 3 試験状況 (2)



地震波 4回目 開始前



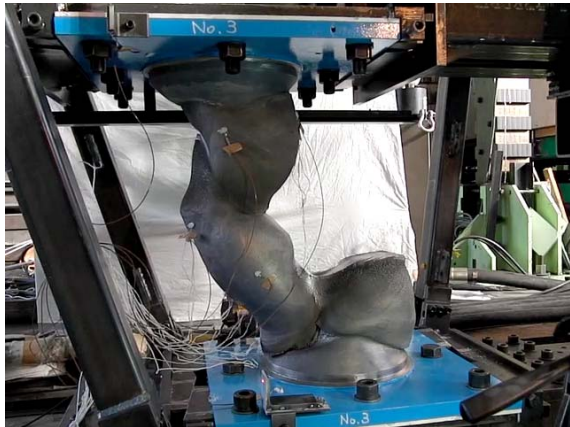
地震波 4回目 最大変形時



地震波 6回目 終了時



地震波 7回目 最大変形時

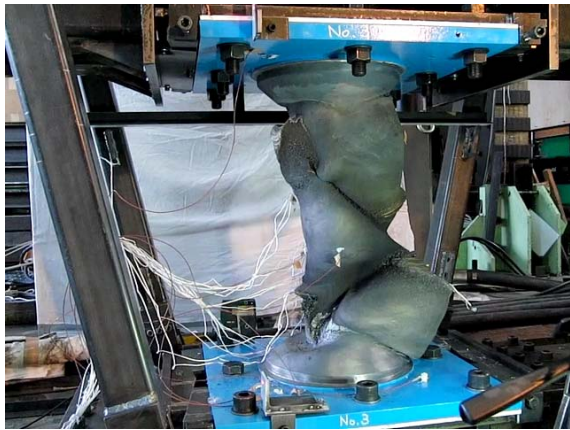


地震波 7回目 変形時

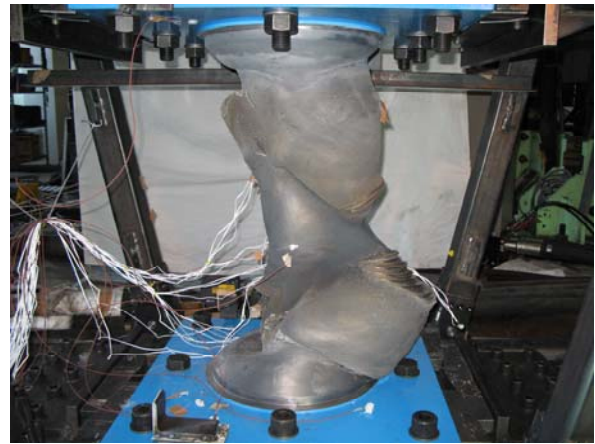


地震波 12回目 最大変形時

試験 No. 3 試験状況 (3)



試験終了後 (1)



試験終了後 (2)



試験終了後 (3)



試験終了後 (4)

1.3.7.3 まとめと課題

免震用鉛ダンパーの繰返しに対する性能を確認するために、実大試験体による多数回繰返し試験を実施した。試験は、ダンパー中央部にあるくびれと平行な向きであるP方向に対して±100mm、±200mm および±400mm の漸増正弦波加振、同一試験体に対して加振方向をP方向、P方向と直交する0方向、P方向と順に変えた±150mmの繰返し正弦波加振、および地震応答波加振を実施した。これより以下の事項が確認された

(1) 降伏荷重

一定振幅時では繰返しにより降伏荷重は低下する傾向を示した。ただし、0方向を加力した後のP方向の加力時のように、荷重が初期の値よりも大きくなる場合もあることが確認された。この場合は、繰返しによる鉛の形状変化に起因するものと考えられる。P方向の変形が±200mm以上となる繰返し加振時では、変形の向きにより荷重値が異なる現象が確認された。この現象も鉛の形状変化に起因するものと考えられる。これらより繰返しによる水平荷重は、発熱のための温度変化および鉛の形状変化により変化する。また、荷重は振幅依存性があり、変位が大きくなるに応じて荷重値も増大する現象が確認された。

(2) 破断特性

漸増正弦波加振および方向を変えた繰返し正弦波加振では、破断まで試験を実施した。破断部位はいずれも試験体のくびれの上部であった。単一振幅における正弦波加振試験に基づいた振幅と破断までの繰返し回数に基づき、各試験について累積損傷度の検討を行った。漸増正弦波加振において破断時の累積損傷度は0.788となり、方向を変えた断続的な加振時の累積損傷度は1.9を超える値となった。これより、破断に影響を及ぼすパラメータとして、加振の連続性ならびに加力方向が考えられる。

(3) 温度分布

繰返し加振とともにダンパー中央のくびれ部と振幅部との間が集中的に温度上昇することがわかった。また中央にあるくびれ部は、繰返し加振当初の温度上昇はわずかであるが、時間の経過とともに温度が上昇し高温となる。フランジプレートも時間の経過とともに温度が上昇するが、その上昇度合いは鉛のくびれ部位ほど高くならなかった。

本試験結果をふまえ、長周期地震動における応答評価に向けた復元力特性の検討が今後の課題である。

参考文献

- 1.3.7-1) 高山峯夫ほか:鉛ダンパーの取り付け部に作用する軸力と曲げモーメントに関する研究、日本建築学会九州支部研究報告、第45号、pp.509-512、2006.3
- 1.3.7-2) 日本建築センターほか:免震部材のエネルギー吸収性能評価に関する現状と課題 報告書、pp.4-26、2007.3
- 1.3.7-3) 清水建設ほか:平成21年度国土交通省建築基準整備促進補助金事業「12.免震建築物の基準の整備に資する検討」報告書、pp.4.1-112、2010.3
- 1.3.7-4) 日本免震構造協会編:第4回技術報告会概要集、pp.39、2006.11
- 1.3.7-5) 日本免震構造協会編:第5回技術報告会概要集、pp.7-10、2009.4
- 1.3.7-6) 遠藤達雄ほか:「Rain Flow Method」の提案とその応用、九州工業大学研究報告(工学)、No.28、pp.33-62

1.3.8 オイルダンパー

1.3.8.1 実験計画

(1) 実験目的と背景

免震構造用オイルダンパーの長振幅繰り返し加振試験を実大試験体により実施し、長周期地震動を想定した多数回繰り返し加振に対するエネルギー吸収性能の把握を目的とする。

オイルダンパーは、温度上昇や繰り返し回数に対して、エネルギー吸収性能の変化が小さいことが知られている。車両用オイルダンパーの繰り返し加振実験においては、オイルダンパーの外壁温度が 100℃以上になるとシール部から作動油のしみだし免震建築物生じた例があるが、タンク室の油量に余裕があるため、しみだしが生じても直ちにエネルギー吸収性能が低下することがないという知見が得られている。そこで、免震用オイルダンパーについて、第Ⅱ部第 1 章で提案された長周期地震動を想定したエネルギー吸収性能評価のための試験方法に基づき、油温温度で 100℃程度までの繰り返し加振実験を実施し、温度上昇に伴うエネルギー吸収性能の変化や作動油のしみだし（限界状態）の発生の有無を確認する。

(2) 試験日時および場所

試験日時：（平成 22 年 12 月 14 日～平成 23 年 1 月 25 日）

試験体 1：12 月 18 日（長周期 2A）、12 月 24 日（限界 2B）、1 月 21 日（公開実験 限界 2B）

試験体 2：1 月 22 日（限界 2B）

試験体 3：12 月 18 日（限界 2B）

場所：日立オートモティブシステムズ（株）相模事業所

(3) 試験体

日立オートモティブシステムズ（株）製の免震構造用オイルダンパー（最大減衰力 1000kN タイプ、オイルシール：フッ素系樹脂）3 体を試験体として用いた。オイルダンパー試験体の諸元を表 1.3.8-1 に、オイルダンパーの形状及び寸法を図 1.3.8-1 に示す。試験体 1 は、近年最も多く採用されている容量および特性を持つオイルダンパー（形式 BM250-4C 型：最大減衰力 1000kN、ストローク±700mm、速度-減衰力：バイリニア型）で、本実験における基準体として位置づけた。また、基準体に対して減衰係数を上下に振った試験体を各 1 体製作した。試験体 2（減衰係数小）は、速度-減衰力：リニア型の認定品（形式 BM250-6C）に相当し、試験体 3（減衰係数大）は、1 次減衰係数を試験体 1（基準体）の 1.5 倍に設定した特注仕様品である。

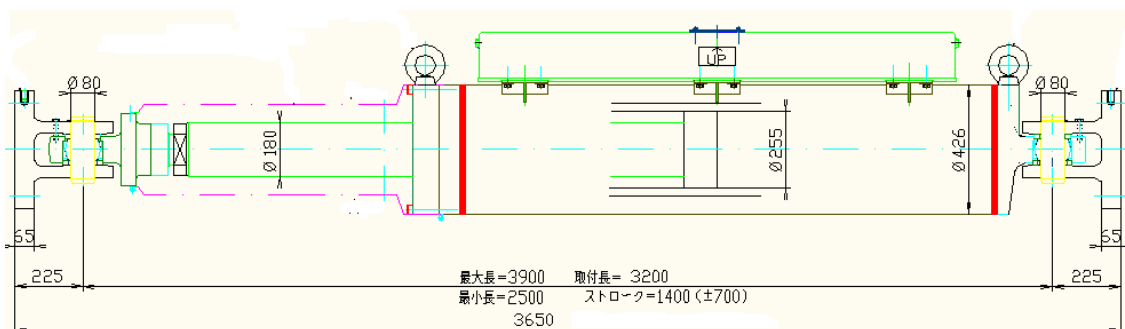


図 1.3.8-1 オイルダンパー形状寸法

表 1.3.8-1 試験体特性

	試験体 1 基準体 (大臣認定品)	試験体 2 減衰係数小 (大臣認定品)	試験体 3 減衰係数大
オイルダンパー形式	BM250-4C	BM250-6C	BM250-特注
減衰力タイプ	バイリニア	リニア	バイリニア
1次減衰係数(C1) MN・s/m	2.50	0.80	3.75
2次減衰係数(C2) MN・s/m	0.1695	—	0.1695
リリース速度 m/s	0.320	—	0.208
リリース減衰力 kN	800	—	780
最大速度 m/s	1.50	1.25	1.51
最大減衰力 kN	1000	1000	1000
ストローク mm	±700	±700	±700

(4) 試験装置

2000kN動的試験機を用いた。試験機諸元を表 1.3.8-2 に、試験機構成を図 1.3.8-2 に示す。

表 1.3.8-2 試験機諸元

No.	項目	仕様
1	最大出力(動的)	±2000kN
2	最大変位	±450mm
3	最大速度	150cm/s(但し 1000kN 時は 100cm/s)
4	*連続加振可能回数 (周期 4 秒の正弦波加振の場合)	加振変位 ±10cm 時 15 回 ±20cm 時 6 回 ±40cm 時 2 回
5	駆動方式	電気油圧サーボ方式
6	加振周波数	0.01~30.0Hz

※ 試験機は、アキュムレータに油圧エネルギーを蓄圧して、その蓄圧エネルギーによって試験を駆動させるものであり、加振力・加振周波数・加振速度と蓄圧エネルギーの関係から連続加振回数に制限がある。よって多数回の加振には、蓄圧によるインターバルが必要である。

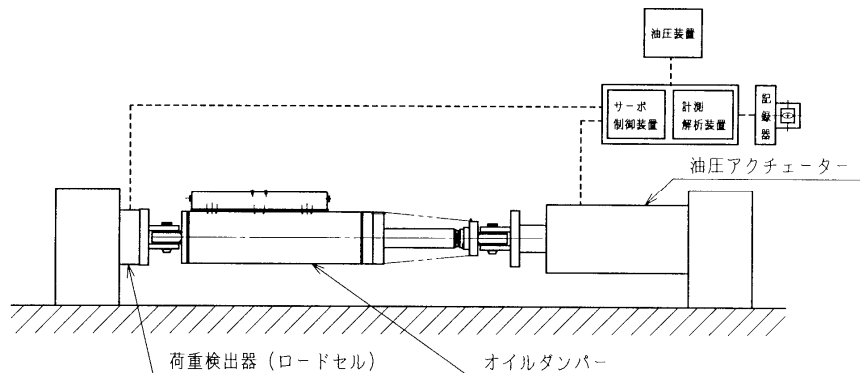


図 1.3.8-2 オイルダンパー形状寸法

(5) 計測項目と計測方法

計測項目を以下に示す。ダンパー減衰力、ダンパー変位、ダンパー各部の温度および室温を計測した。ダンパー減衰力は試験機内に組み込まれたロードセルで計測し、ダンパー変位はアクチュエータのストロークを変位計で計測した。また、ダンパー各部の温度及び室温はK型熱電対を用いて計測した。温度計測点の位置と熱電対の設置状況を図 1.3.8-3、写真 1.3.8-1 および 1.3.8-2 に示す。油温は、試験体上部のリザーバタンク上面孔から熱電対をタンク内部に挿入して計測した。なお、データ収録のサンプリングは、100 回/秒（サンプリング周期 0.01 秒）とした。

計測項目

- (1) ダンパー減衰力
- (2) ダンパー変位
- (3) 温度：タンク内油温、本体（ベースシェル）中央上部表面、本体中央下部表面、ロッド端部表面、ベースシェル端部表面（図 1.3.8-3 参照）
- (4) 室温（雰囲気温度）

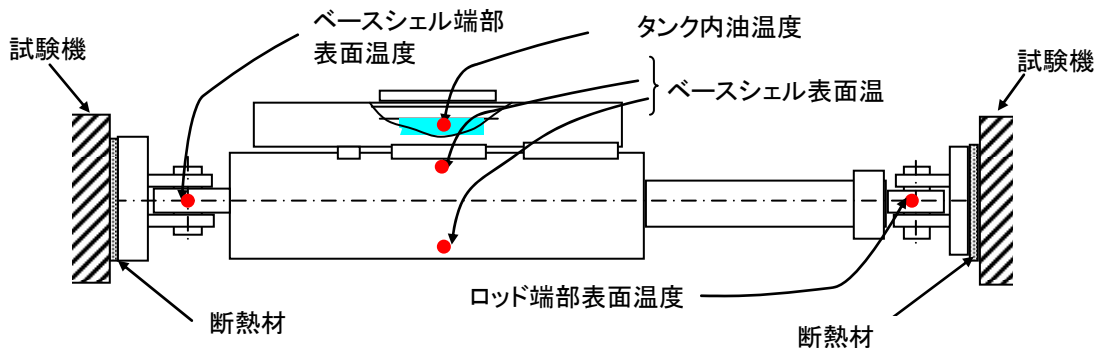


図 1.3.8-3 温度計測点の位置



写真 1.3.8-1 熱電対のセット状況



写真 1.3.8-2 油温計測用熱電対のセット状況

(6) 試験方法および試験ケース

試験項目は、以下に示す出荷検査としての基本特性試験（基本特性 A）、加振周期特性試験（基本特性 B）、微小振幅加振試験、多数回繰り返し加振試験（長周期 2A、限界 2B）及び地震応答波加振試験の 6 項目である。試験条件の詳細は次頁の a)～f)に記す。多数回繰り返し加振試験は、正弦波（周期 4 秒）の連続加振とすることが目標であるが、試験機の連続加振能力の制約（振幅±20cm の場合で 6 サイクル）から、正弦波 6 サイクル毎にアキュムレータ蓄圧のためのインターバル（所用時間約 5 分）を設けた。その結果、長周期 2A（累積変形 50m）条件では、6 サイクル×11 セット（インターバル 10 回）、限界 B 条件（累積変形 100m）では 6 サイクル×21 セット（インターバル 20 回）の加振を実施した。なお、試験機の正弦波は、図 1.3.8-4 に示すように、駆動開始後、逐次変位量を増加させ所定の変位振幅で所定サイクル数駆動し、その後逐次変位量を減少させて停止する波形となるため、所定変位振幅部で加振サイクル数をカウントし、所定変位振幅部の累積変形量が 50m および 100m を超えるよう計画した。漸増・漸減部を含めた累積変形量は長周期 2A 加振で 79.2m、限界 2B 加振で 151.2m である。

また、多数回繰り返し加振試験直後にも出荷検査としての基本特性試験（基本特性 A）を実施し、初期性能に対する最大減衰力およびエネルギー吸収量の変化状況を確認した。更に、試験体 1 については、冷却後においても基本特性試験（基本特性 A）を実施した。なお、ダンパーは、高温用断熱板（ $t = 10\text{mm}$ ，日本 D.M.E 製）を介して試験機に取り付けた。表 1.3.8-8 に試験ケース一覧を示す。

試験項目

- a) 長周期加振条件（±20cm、累積変形 50m）による多数回繰り返し加振試験（長周期 2A）
[試験体 1]
- b) 限界加振条件（±20cm、累積変形 100m）による多数回繰り返し加振試験（限界 2B）
[試験体 1、試験体 2、試験体 3]
- c) 出荷検査としての基本特性試験（基本特性 A） [試験体 1、試験体 2、試験体 3]
- d) 加振周期特性試験（基本特性 B） [試験体 1、試験体 2、試験体 3]
- e) 地震応答波加振試験 [試験体 1]
- f) 微小振幅加振試験 [試験体 1]

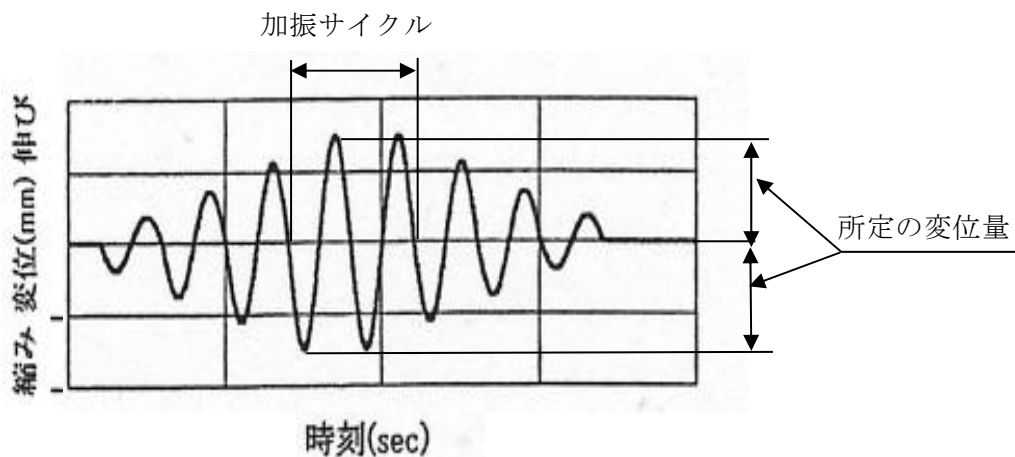


図 1.3.8-4 試験機の正弦波加振波形（サイクル数 2 の加振波形の例）

a) 長周期加振条件（長周期 2A）による多数回繰り返し加振の試験方法

表 1.3.8-3 に示す長周期加振条件でオイルダンパーを加振し、油温温度と最大減衰力、吸収エネルギー量、荷重変位関係の関係を求める。

表 1.3.8-3 長周期加振条件 [2A]

試験体	加振波形	周期 (s)	変位 (cm)	速度 (cm/s)	減衰力 (kN)	加振サイクル (回)	インターバル (回)	累積変形 (m)	吸収エネルギー (kN・m)	温度上昇予想値 (°C)
試験体 1 (バネ定数 C1=25)	正弦波	4.0	20.0	31.4	785	66	10	52.8	32553	39

注) 累積変形、計画エネルギーは加振波形のうち、図 1.3.8-4 に示す所定サイクル部分の合計を表す。漸増・漸減部分を含む累積変形量は 79.2m、吸収エネルギーは 42026 kN・m である。

b) 限界加振条件（限界 2B）による多数回繰り返し加振の試験方法

表 1.3.8-4 に示す限界加振条件でオイルダンパーを加振し、油温温度と最大減衰力、吸収エネルギー、荷重変位関係の関係を求める。

表 1.3.8-4 限界加振条件 [2B]

試験体	加振波形	周期 (s)	変位 (cm)	速度 (cm/s)	減衰力 (kN)	加振サイクル (回)	インターバル (回)	累積変形 (m)	吸収エネルギー (kN・m)	温度上昇予想値 (°C)
試験体 1 (バネ定数 C1=25)	正弦波	4.0	20.0	31.4	785	126	20	100.8	62147	75
試験体 2 (バネ定数 C1=0.8)	正弦波	4.0	20.0	31.4	251	126	20	100.8	19871	24
試験体 3 (バネ定数 C1=3.75)	正弦波	4.0	20.0	31.4	798	126	20	100.8	73364	88

注) 累積変形、計画エネルギーは加振波形のうち、図 1.3.8-4 に示す所定サイクル部分の合計を表す。漸増・漸減部分を含む累積変形量は 151.2m である。

c) 出荷検査としての基本特性試験（基本特性 A）の試験方法

表 1.3.8-5 に示す加振条件でオイルダンパーを加振し、最大減衰力、吸収エネルギー量および荷重変位関係を求める。

表 1.3.8-5 基本性能試験（基本特性 A）の加振条件

試験体	加振 波形	周期 (s)	変位 (cm)	サイクル数 (回)	速度 (cm/s)	減衰力規格±15% (kN)
試験体 1 (バネ C1=2.5)	正弦波	4.0	9.5	2	15.0	375.0±56.3
		4.0	15.9	2	25.0	625.0±93.8
		4.0	31.8	2	50.0	830.5±124.6
		2.22	35.4	2	100.0	915.3±137.3
試験体 2 (リニア C1=0.8)	正弦波	4.0	15.9	2	25.0	200.0±30.0
		4.0	31.8	2	50.0	400.0±60.0
		2.22	35.4	2	100.0	800.0±120.0
試験体 3 (バネ C1=3.75)	正弦波	4.0	6.4	2	10.0	375.0±56.3
		4.0	9.5	2	15.0	562.5±84.4
		4.0	31.8	2	50.0	829.5±124.4
		2.22	35.4	2	100.0	914.2±137.1

d) 加振周期特性試験（基本特性 B）の試験方法

表 1.3.8-6 に示す加振条件でオイルダンパーを加振し、加振周期と最大減衰力、吸収エネルギー量および荷重変位関係の関係を求める。

表 1.3.8-6 加振周期特性試験（基本特性 B）の加振条件

試験体	加振 波形	周期 (s)	変位 (cm)	速度 (cm/s)	減衰力 (kN)
試験体 1 (バネ C1=2.5)	正弦波	2.0	6.4	20.0	500
		3.0	9.5		
		4.0	12.7		
		5.0	15.9		
試験体 2 (リニア C1=0.8)	正弦波	2.0	6.4	20.0	160
		3.0	9.5		
		4.0	12.7		
		5.0	15.9		
試験体 3 (バネ C1=3.75)	正弦波	2.0	6.4	20.0	750
		3.0	9.5		
		4.0	12.7		
		5.0	15.9		

e) 地震応答波加振試験 試験方法

地震応答波で加振した際の減衰力、吸収エネルギーを計測した。地震応答波は、東海-東南海地震に対する愛知県津島市の地震動（平均：AIC003-av）による1質点系地震応答解析から得られた変位応答波を入力する。変位応答波の入力倍率は、0.5倍と1倍の2ケースとする。なお、免震建築物の条件としては、バイリニア型オイルダンパーが設置された、固有周期4秒の天然ゴム系免震建物を想定した。1次減衰係数C1に対する減衰定数は $h=0.31$ である。図1.3.8-5に変位応答波形を示す。なお、試験機の加振能力の制約により、入力倍率1倍の加振は170秒程度までの加振となる。

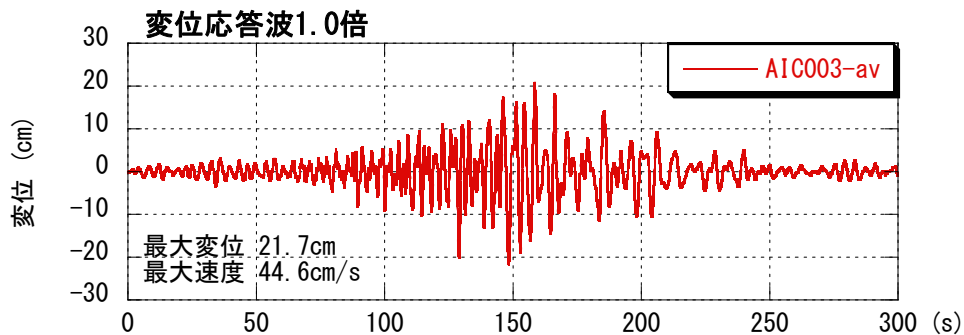


図 1.3.8-5 変位応答波形 (AIC003-av)

f) 微小振幅加振試験の試験方法

表 1.3.8-7 に示す加振条件でオイルダンパーを加振し、微小変形における荷重変位関係を求める。

表 1.3.8-7 微小振幅加振試験の加振条件

試験体	加振波形	周期 (s)	変位 (cm)	速度 (cm/s)	目標サイクル (回)
試験体 1	正弦波	3.0	0.02	0.04	3
		3.0	0.1	0.21	3
		3.0	0.2	0.42	3
		3.0	0.4	0.84	3
		3.0	1.0	2.1	3
		3.0	1.6	3.4	3
		3.0	2.0	4.2	3

表 1.3.8-8 試験ケース一覧

試験体	試験項目	周期 (s)	変位 (cm)	速度 (cm/s)	サイクル (回)	インターバル (回)	備考
試験体1 ハイニア C1=2.5	基本特性A (出荷検査)	4	9.5	15	2	-	
		4	15.9	25	2	-	
		4	31.8	50	2	-	
		2.22	35.4	100	2	-	
	基本特性B (加振周期)	5	15.9	20	2	-	
		4	12.7	20	2	-	
		3	9.5	20	2	-	
		2	6.4	20	2	-	
	微少振幅加振	3	0.02	0.04	3	-	
		3	0.1	0.21	3	-	
		3	0.2	0.42	3	-	
		3	0.4	0.84	3	-	
		3	1	2.1	3	-	
		3	1.6	3.4	3	-	
	長周期(2A)	4	20	31.4	66	10	累積変形50m
	直後基本特性A (出荷検査)	4	9.5	15	2	-	
		4	15.9	25	2	-	
		4	31.8	50	2	-	
		2.22	35.4	100	2	-	
	冷却						
後基本特性A (出荷検査)	4	9.5	15	2	-	冷却後の基本特性 の確認	
	4	15.9	25	2	-		
	4	31.8	50	2	-		
	2.22	35.4	100	2	-		
限界(2B)	4	20	31.4	126	20	累積変形100m	
直後基本特性A (出荷検査)	4	9.5	15	2	-	温度上昇後の基本 特性の確認	
	4	15.9	25	2	-		
	4	31.8	50	2	-		
	2.22	35.4	100	2	-		
冷却							
後基本特性A (出荷検査)	4	9.5	15	2	-	冷却後の基本特性 の確認	
	4	15.9	25	2	-		
	4	31.8	50	2	-		
	2.22	35.4	100	2	-		
応答波加振 (AIC003)	4	10.9	22.3	-	-	0.5倍入力 1.0倍入力	
	4	21.7	44.6	-	-		
試験体2 リア C1=0.8	基本特性A (出荷検査)	4	15.9	25	2	-	
		4	31.8	50	2	-	
		2.22	35.4	100	2	-	
	基本特性B (加振周期)	5	15.9	20	2	-	
		4	12.7	20	2	-	
		3	9.5	20	2	-	
	限界(2B)	4	20	31.4	126	20	累積変形100m
直後基本特性A (出荷検査)	4	15.9	25	2	-	温度上昇後の基本 特性の確認	
	4	31.8	50	2	-		
	2.22	35.4	100	2	-		
試験体3 ハイニア C1=3.75	基本特性A (出荷検査)	4	6.4	10	2	-	
		4	9.5	15	2	-	
		4	31.8	50	2	-	
		2.22	35.4	100	2	-	
	基本特性B (加振周期)	5	15.9	20	2	-	
		4	12.7	20	2	-	
		3	9.5	20	2	-	
	限界(2B)	4	20	31.4	126	20	累積変形100m
直後基本特性A (出荷検査)	4	6.4	10	2	-	温度上昇後の基本 特性の確認	
	4	9.5	15	2	-		
	4	31.8	50	2	-		
	2.22	35.4	100	2	-		

1.3.8.2 実験結果

(1) 試験体 1

試験体 1 (基準体) における試験結果を以下に示す。

a) 長周期加振条件[2A]における荷重変位関係、温度時歴と基本特性の関係

図 1.3.8-6 に表 1.3.8-3 の条件で加振した 6 波×11 セットの減衰力-変位曲線を重ねて示す。図 1.3.8-7 に加振時の各部温度の時刻歴波形を示す。表 1.3.8-9 に各加振セットにおける吸収エネルギーおよび温度上昇量と、吸収エネルギーをオイルダンパーの熱容量 (作動油+接液部鋼材) で除して求めた温度上昇予測値を示す。また、表 1.3.8-10 に各加振セットの 1 サイクル目の吸収エネルギーと最大減衰力の変化を示す。

油温は 60℃まで上昇したが荷重変位関係の変化は小さく、1 サイクル当たりのエネルギー吸収量の低下率は 2%程度、最大減衰力の低下率も 1%程度であった。油漏れは生じなかった。

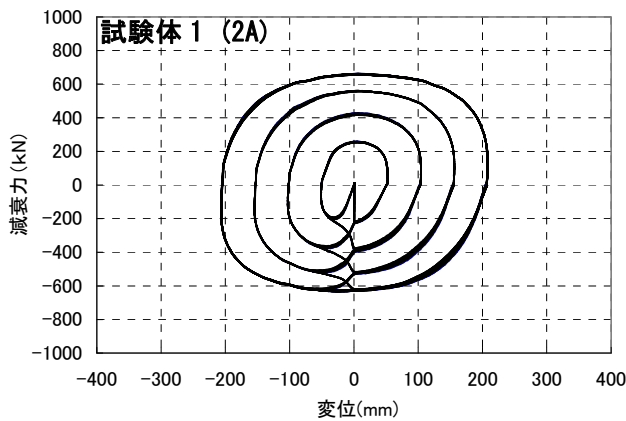


図 1.3.8-6 減衰力-変位曲線 (6 波×11 セット)

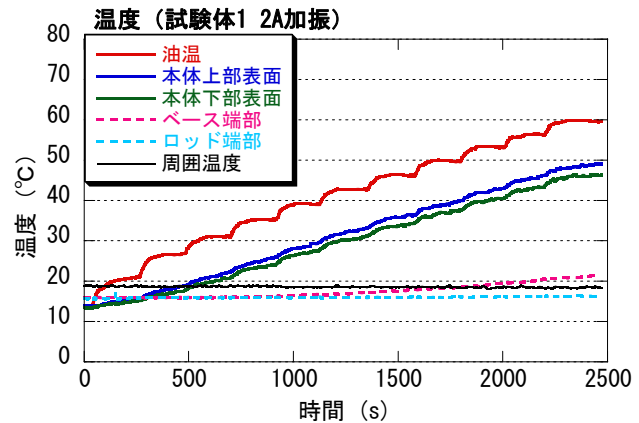


図 1.3.8-7 各部温度の時刻歴波形

表 1.3.8-9 各加振セットにおける吸収エネルギーと温度上昇値

加振波 NO.	吸収エネルギーQ (kN-m = kJ)				温度上昇 (°C)		
	所定振幅 6 波分のみ Qa		前後増減波含み Qt		計算値 (Qt/C)	試験結果	
	個別	累積	個別	累積		タンク内作動油	本体上部表面
1	2,646.2	2,646.2	3,597.7	3,597.7	4.3	6.8	1.8
2	2,640.0	5,286.2	3,586.7	7,184.3	8.6	12.6	4.7
3	2,638.8	7,925.1	3,582.5	10,766.9	12.9	17.1	8.1
4	2,623.2	10,548.3	3,573.3	14,340.2	17.2	21.2	11.7
5	2,629.2	13,177.5	3,567.7	17,907.9	21.5	25.1	15.4
6	2,622.6	15,800.1	3,560.1	21,468.0	25.8	28.6	18.9
7	2,617.0	18,417.1	3,555.3	25,023.3	30.1	32.1	22.4
8	2,616.1	21,033.1	3,549.7	28,573.1	34.3	35.6	25.5
9	2,612.1	23,645.3	3,543.9	32,117.0	38.6	39.1	29
10	2,608.1	26,253.4	3,537.5	35,654.5	42.9	42.2	31.9
11	2,604.1	28,857.4	3,531.1	39,185.6	47.1	46.0	35.4
合計	28,857.4		39,185.6				

注) 温度上昇の計算値は吸収エネルギーを下記の熱容量で除した放熱は考慮しない数値を示す。

オイルダンパー熱容量C : 8.32E+05 J/°C
(作動油+接液部鋼材)

表 1.3.8-10 各セットにおける吸収エネルギーと減衰力の推移 (1 サイクル当たり)

試験体 1 (2A)

セット	加振波数	吸収エネルギー kJ (kN・m) (指数)		最大減衰力 (kN)			
				伸び側 (指数)	縮み側 (指数)		
1	1波目	449.6	(1.00)	662.6	(1.00)	-635.4	(1.00)
2	7波目	448.6	(1.00)	662.8	(1.00)	-635.1	(1.00)
3	13波目	449.0	(1.00)	662.8	(1.00)	-633.2	(1.00)
4	19波目	446.4	(0.99)	661.3	(1.00)	-632.4	(1.00)
5	25波目	446.7	(0.99)	660.8	(1.00)	-632.3	(0.99)
6	31波目	445.2	(0.99)	660.2	(1.00)	-630.9	(0.99)
7	37波目	444.8	(0.99)	659.8	(1.00)	-629.8	(0.99)
8	43波目	444.4	(0.99)	658.5	(0.99)	-629.6	(0.99)
9	49波目	440.8	(0.98)	658.1	(0.99)	-628.5	(0.99)
10	55波目	443.2	(0.99)	657.6	(0.99)	-627.6	(0.99)
11	61波目	442.7	(0.98)	657.4	(0.99)	-627.0	(0.99)

b) 限界加振条件[2B]における荷重変位関係、温度時歴と基本特性の関係

図 1.3.8-8 に表 1.3.8-4 の条件で加振した 6 波×21 セットの減衰力-変位曲線を重ねて示す。図 1.3.8-9 に加振時の各部温度の時刻歴波形を示す。表 1.3.8-11 に各加振セットにおける吸収エネルギーおよび温度上昇量と、吸収エネルギーをオイルダンパーの熱容量（作動油+接液部鋼材）で除して求めた温度上昇予想値を示す。また、表 1.3.8-12 に各加振セットの 1 サイクル目の吸収エネルギーと最大減衰力の変化を示す。また、図 1.3.8-10 に限界加振試験後の温度推移の時刻歴を示す。

油温は 88℃まで上昇したが荷重変位関係の変化は小さく、1 サイクル当たりのエネルギー吸収量の低下率は 3%程度、最大減衰力の低下率も 2%程度であった。また、油漏れは生じなかった。

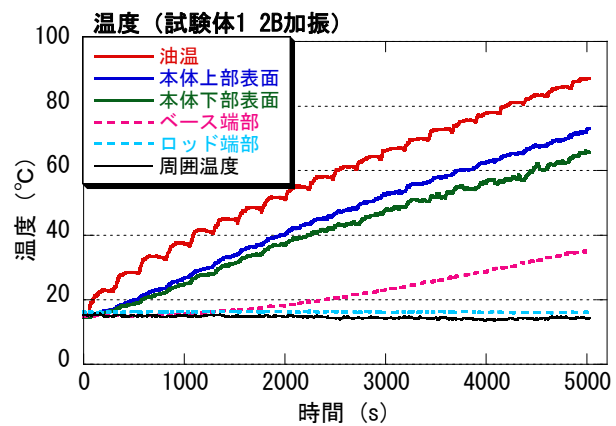
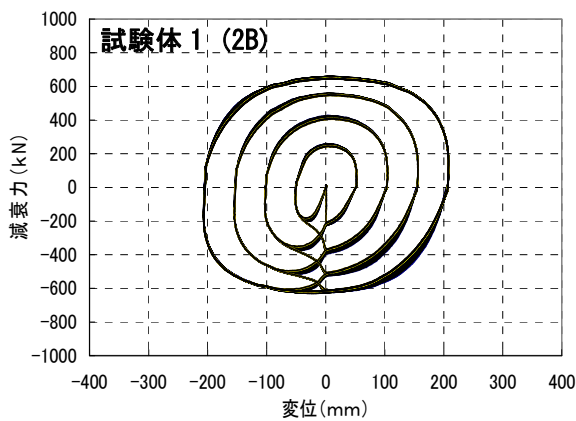


図 1.3.8-8 減衰力-変位曲線（6 波×21 セット）

図 1.3.8-9 各部温度の時刻歴波形

表 1.3.8-11 各加振セットにおける吸収エネルギーと温度上昇値

試験体 1 (2B)					周囲温度 15℃		
加振波NO.	吸収エネルギー (kN-m=kJ)				温度上昇 (°C)		
	所定振幅 6 波分のみ		前後増減波含み		計算値 (Qt/C)	試験結果	
	個別	累積	個別	累積		クク内作動油	本体上部表面
1	2,666	2,666	3,579	3,579	4.3	7.4	2.1
2	2,659	5,324	3,557	7,136	8.6	12.8	5.3
3	2,661	7,985	3,568	10,704	12.9	17.3	8.4
4	2,625	10,611	3,566	14,269	17.2	21.4	12.2
5	2,658	13,268	3,559	17,828	21.4	25.3	15.2
6	2,654	15,923	3,552	21,380	25.7	28.6	18.9
7	2,648	18,571	3,545	24,925	30.0	31.8	22.2
8	2,644	21,215	3,542	28,467	34.2	35.7	25.4
9	2,640	23,855	3,535	32,002	38.5	38.8	28.4
10	2,638	26,493	3,529	35,531	42.7	42.0	31.0
11	2,635	29,128	3,523	39,054	46.9	45.2	33.4
12	2,629	31,757	3,517	42,572	51.2	48.3	36.5
13	2,591	34,348	3,511	46,083	55.4	51.1	38.6
14	2,624	36,971	3,507	49,590	59.6	54.2	41.4
15	2,615	39,586	3,498	53,088	63.8	56.8	43.7
16	2,612	42,198	3,490	56,578	68.0	59.8	45.8
17	2,606	44,805	3,485	60,063	72.2	62.5	48.1
18	2,602	47,407	3,479	63,542	76.4	65.4	50.5
19	2,581	49,988	3,474	67,016	80.6	67.6	53.0
20	2,597	52,585	3,468	70,483	84.7	70.4	55.4
21	2,602	55,187	3,477	73,960	88.9	73.4	58.5

注) 温度上昇の計算値は吸収エネルギーを下記の熱容量で除した放熱は考慮しない数値を示す。

オイルダンパー熱容量C: 8.32E+05 J/°C
(作動油+接液部鋼材)

表 1.3.8-12 各セットにおける吸収エネルギーと減衰力の推移 (1 サイクル当たり)

試験体 1 (2B)

セット	加振波数	吸収エネルギー kJ (kN・m) (指数)		最大減衰力 (kN)			
				伸び側 (指数)	縮み側 (指数)		
1	1波目	447.2	(1.00)	657.4	(1.00)	-628.9	(1.00)
2	7波目	446.5	(1.00)	658.7	(1.00)	-629.6	(1.00)
3	13波目	443.2	(0.99)	658.9	(1.00)	-630.2	(1.00)
4	19波目	445.0	(1.00)	658.9	(1.00)	-629.6	(1.00)
5	25波目	443.7	(0.99)	657.9	(1.00)	-629.3	(1.00)
6	31波目	443.7	(0.99)	657.6	(1.00)	-628.3	(1.00)
7	37波目	443.3	(0.99)	656.8	(1.00)	-627.8	(1.00)
8	43波目	442.9	(0.99)	657.2	(1.00)	-627.0	(1.00)
9	49波目	443.0	(0.99)	656.1	(1.00)	-627.2	(1.00)
10	55波目	441.5	(0.99)	655.5	(1.00)	-627.0	(1.00)
11	61波目	440.1	(0.98)	654.9	(1.00)	-625.9	(1.00)
12	67波目	440.4	(0.98)	654.6	(1.00)	-625.7	(0.99)
13	73波目	439.9	(0.98)	653.4	(0.99)	-624.9	(0.99)
14	79波目	439.2	(0.98)	652.7	(0.99)	-623.8	(0.99)
15	85波目	438.3	(0.98)	651.4	(0.99)	-623.8	(0.99)
16	91波目	436.7	(0.98)	650.8	(0.99)	-622.5	(0.99)
17	97波目	436.7	(0.98)	649.5	(0.99)	-621.2	(0.99)
18	103波目	435.7	(0.97)	649.5	(0.99)	-621.2	(0.99)
19	109波目	435.7	(0.97)	648.2	(0.99)	-620.6	(0.99)
20	115波目	434.4	(0.97)	648.2	(0.99)	-620.4	(0.99)
21	121波目	434.8	(0.97)	646.9	(0.98)	-619.3	(0.98)

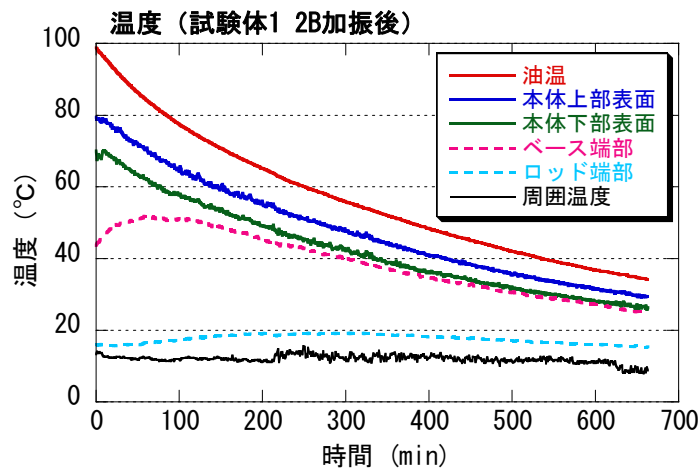


図 1.3.8-10 加振後の温度の降下推移 (限界試験 2B 後)

c) 限界加振試験[2B]前後の基本特性の比較

限界加振試験前の常温状態で実施した基本特性 A 試験（出荷検査）と、限界試験直後に高温状態で実施した基本特性 A 試験の結果を比較して以下に示す。図 1.3.8-11、表 1.3.8-13 に F - V 特性を比較して示す。また、図 1.3.8-12 に所定振幅での減衰力-変位曲線を比較して示す。

限界試験直後の高温状態（約 90℃）における最大減衰力の変化は小さく、常温下（約 20℃）の初期状態に比べて 1～4%程度の低下率であった。

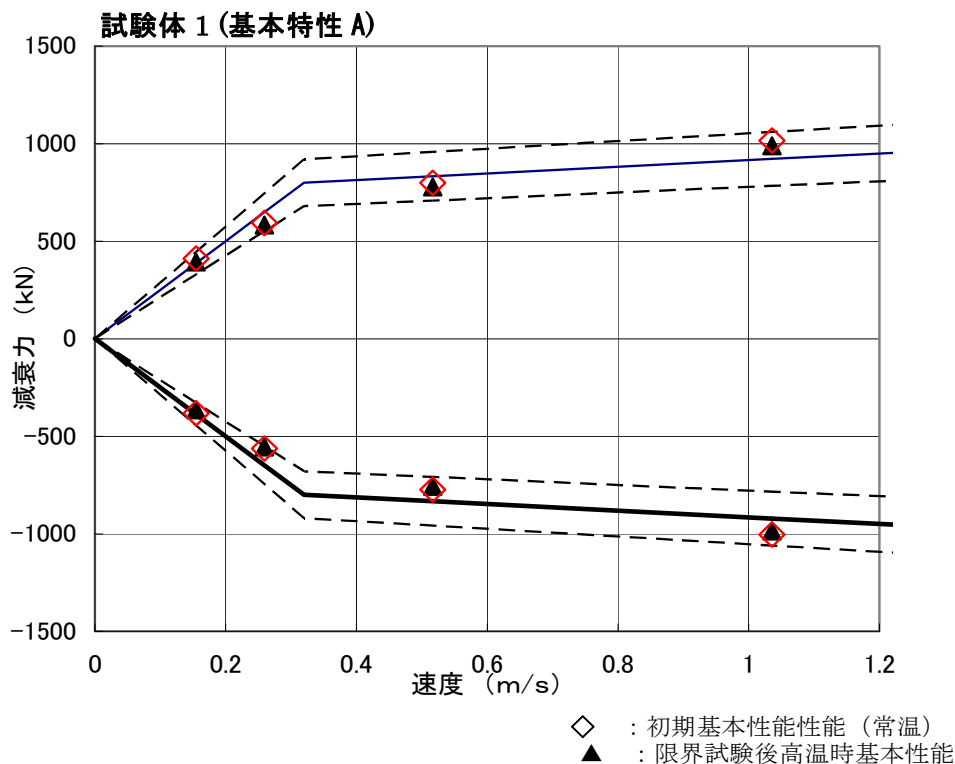
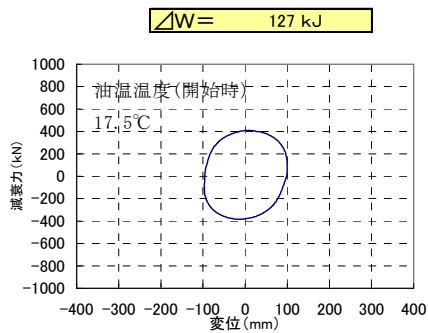


図 1.3.8-11 F - V 特性（常温および限界試験直後）

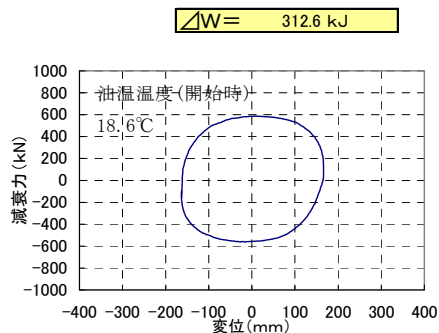
表 1.3.8-13 限界加振試験前後の最大減衰力の比較

試験体 1 (基本特性 A)

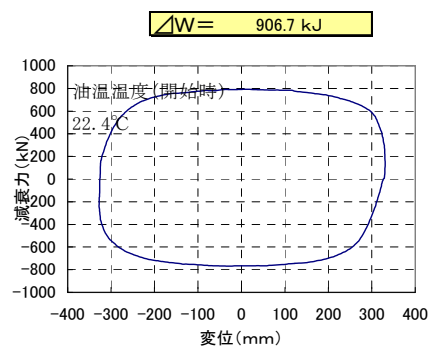
速度 V (m/s)	減衰力 F _d				減衰力 F (初期常温)	
	伸び (kN)		縮み (kN)		伸び (kN)	縮み (kN)
		(F _d /F)		(F _d /F)		
0.15	393.0	(0.96)	-365.1	(0.96)	411.1	-382.2
0.25	582.6	(0.98)	-554.8	(0.99)	593.1	-562.9
0.5	778.3	(0.97)	-756.6	(0.98)	799.1	-774
1	989.1	(0.97)	-986.1	(0.98)	1014.9	-1004.1



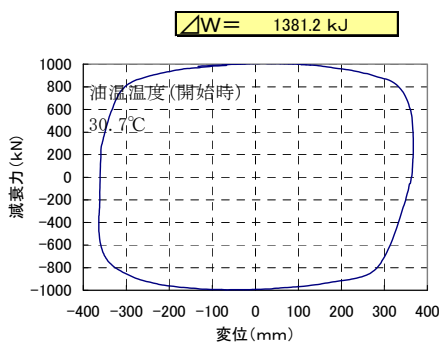
$V = 0.15 \text{ m/s}$



$V = 0.25 \text{ m/s}$

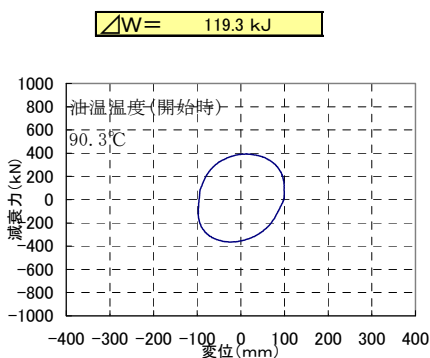


$V = 0.5 \text{ m/s}$

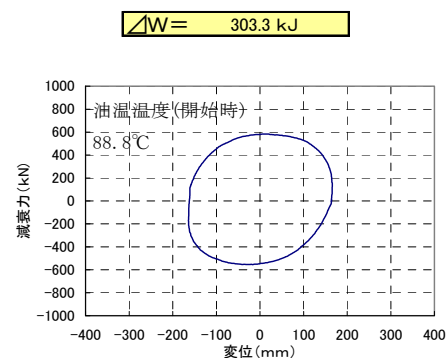


$V = 1.0 \text{ m/s}$

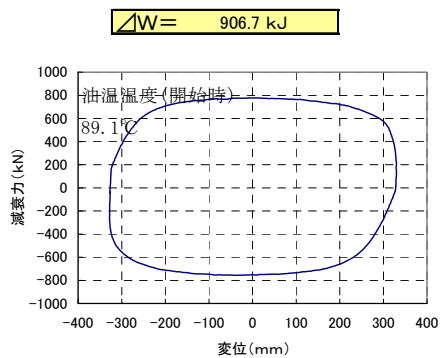
(限界試験前：常温時) 【試験体 1】



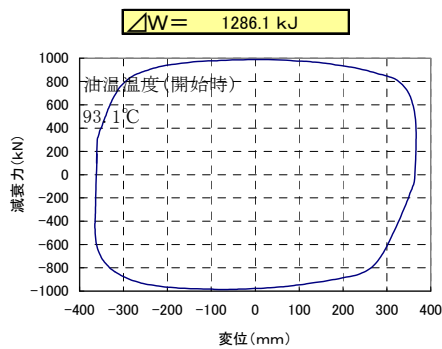
$V = 0.15 \text{ m/s}$



$V = 0.25 \text{ m/s}$



$V = 0.5 \text{ m/s}$



$V = 1.0 \text{ m/s}$

(限界試験後：高温時) 【試験体 1】

図 1.3.8-12 基本特性 A 試験の減衰力-変位曲線の比較 (限界試験前後)

d) 加振周期特性試験（基本特性 B）の試験結果

常温下で実施した基本特性 B 試験の結果を以下に示す。図 1.3.8-13 に $V=20\text{cm/s}$ において周期 2、3、4、5 秒で加振した際の、所定振幅での減衰力－変位曲線を比較して示す。また、表 1.3.8-14 に各周期における最大減衰力と等価減衰係数を示す。油の内部剛性による影響で、加振周期が短くなるにつれて等価減衰係数が小さくなる傾向が見られ、周期 2 秒では周期 5 秒に対して約 3% 低下する。

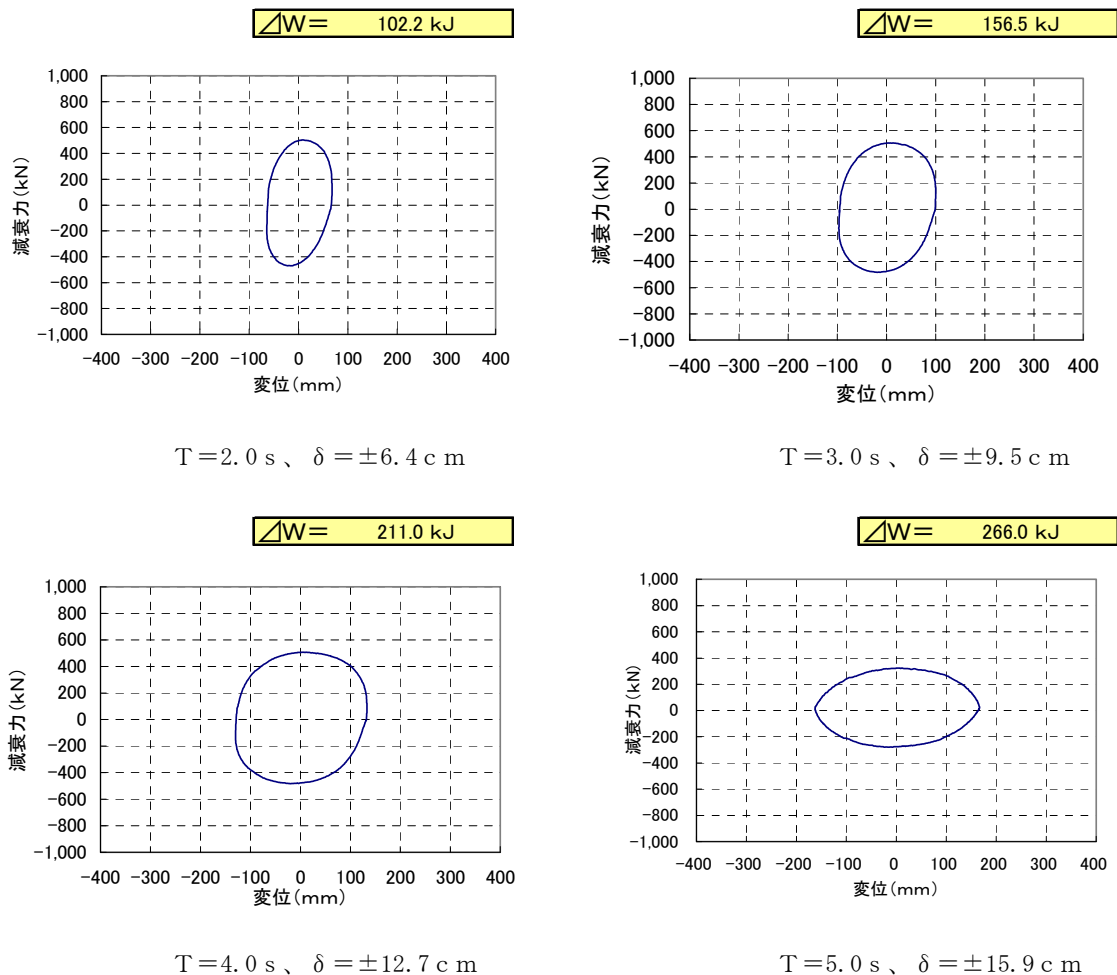


図 1.3.8-13 基本特性 B 試験の減衰力－変位曲線 【試験体 1】

表 1.3.8-14 各加振での最大減衰力と等価減衰係数

試験体 1（基本特性 B）

周期	最大減衰力 (kN)				等価減衰係数 (kN・s/cm)	
	伸側	(指数)	縮側	(指数)	(指数)	
5	508.5	1.00	-482.6	1.00	26.65	1.00
4	507.6	1.00	-483.2	1.00	26.51	0.99
3	506.4	1.00	-482.6	1.00	26.35	0.99
2	503.3	0.99	-469.7	0.97	25.81	0.97

e) 地震応答波加振結果

図 1.3.8-14 および図 1.3.8-15 に地震応答波 (AIC003-av) ×0.5 倍加振時の減衰力-変位曲線と、時刻歴波形を示す。

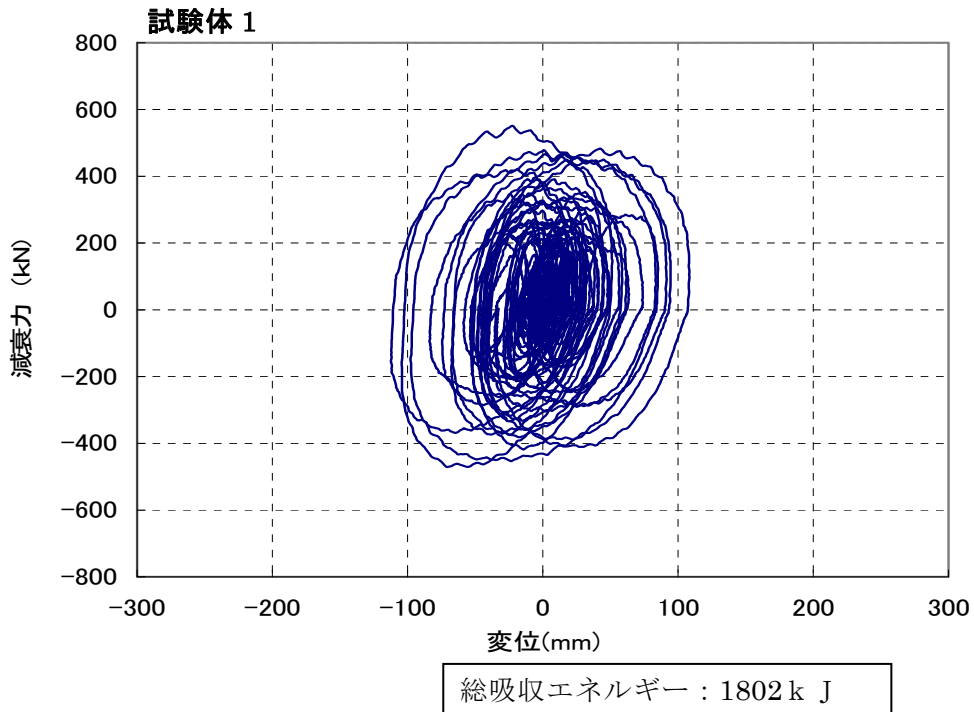


図 1.3.8-14 減衰力-変位曲線 (応答波×0.5 倍)

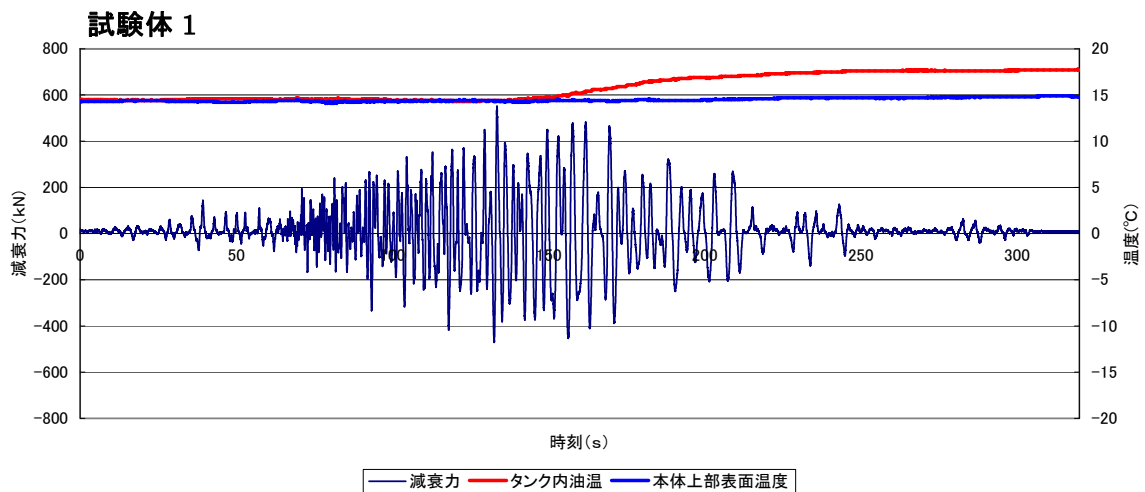


図 1.3.8-15 減衰力と温度上昇の時刻歴波形 (応答波×0.5 倍)

図 1.3.8-16 および図 1.3.8-17 に地震応答波 (AIC003-av) ×1.0 倍加振時の減衰力－変位曲線と、時刻歴波形を示す。加振中にアクチュエータの油圧が低下し、アクチュエータが停止した。

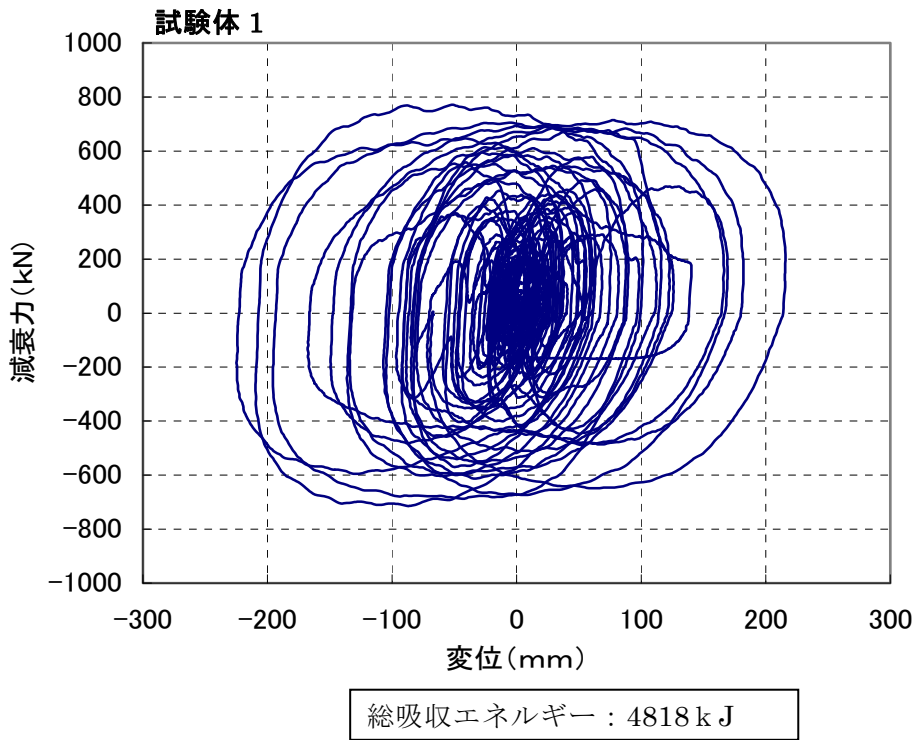


図 1.3.8-16 減衰力－変位曲線 (応答波×1.0 倍)

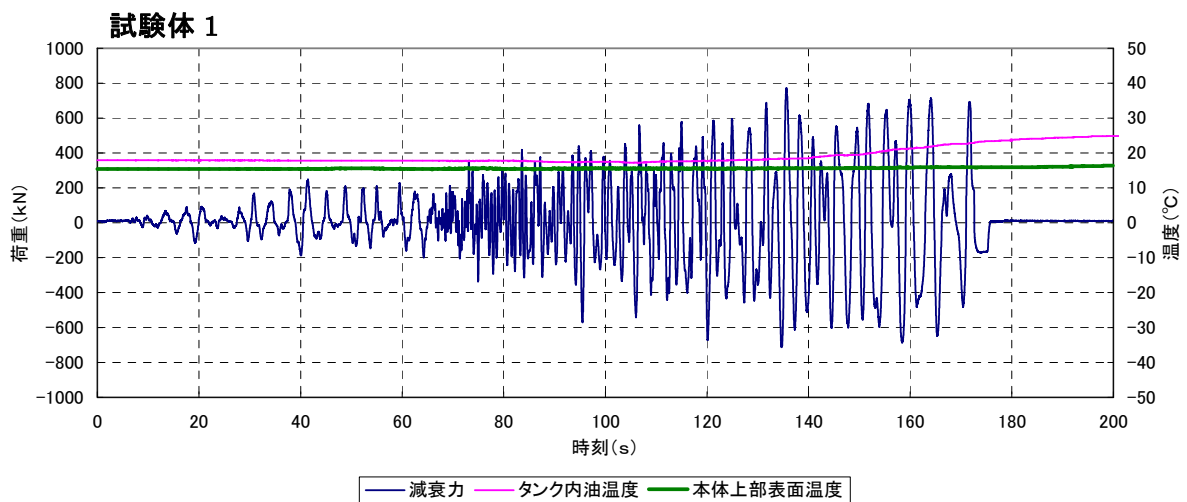


図 1.3.8-17 減衰力と温度上昇の時刻歴波形 (応答波×1.0 倍)

f) 微小振幅加振結果

図 1.3.8-18 および図 1.3.8-19 に、表 1.3.8-7 の加振条件で加振した微小振幅加振時の減衰力-変位曲線を示す。

- ・ $\pm 0.02\text{cm}$ 、 $\pm 0.1\text{cm}$ 加振時は、試験機の漸増・漸減変位において減衰力の変化がなく、フリクションが大勢を占めていると思われる。
- ・ $\pm 0.2\text{cm}$ の加振からは、試験機の漸増・漸減変位において減衰力が漸増・漸減しておりオイルダンパーとしての減衰力を発揮している。

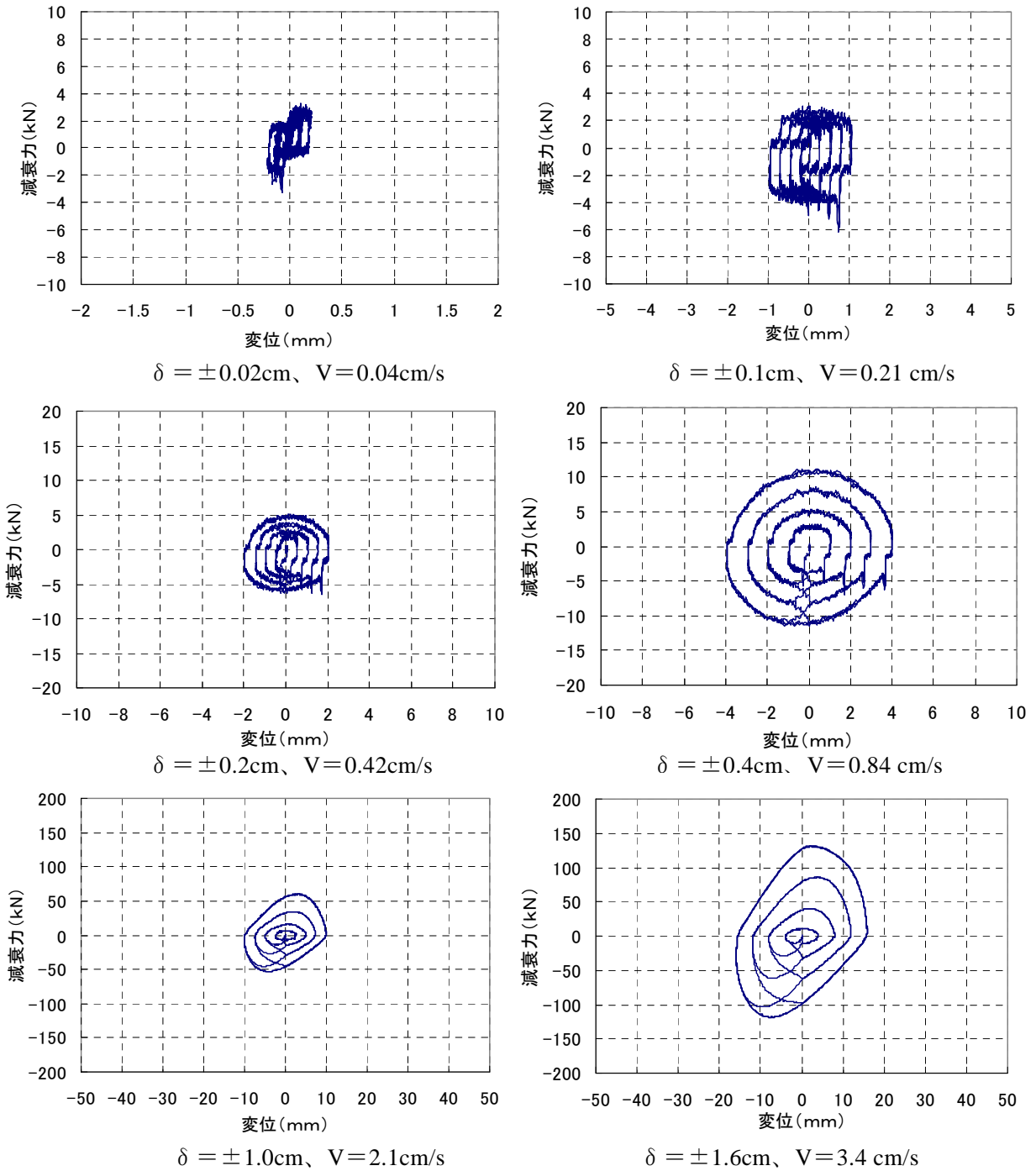
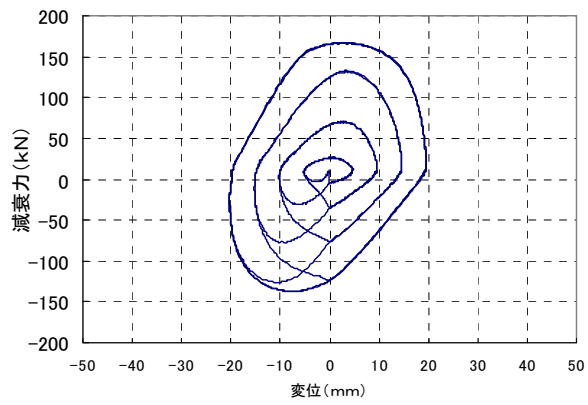


図 1.3.8-18 減衰力-変位曲線 (微小振幅加振試験) 【試験体 1】



$$\delta = \pm 2.0\text{cm}、V = 4.2\text{cm/s}$$

図 1.3.8-19 減衰力-変位曲線（微小振幅加振試験）【試験体 1】

(2) 試験体 2

試験体 2 (減衰係数小) における試験結果を以下に示す。

a) 限界加振条件[2B]における荷重変位関係、温度時歴と基本特性の関係

図 1.3.8-20 に表 1.3.8-4 の条件で加振した 6 波×21 セットの減衰力-変位曲線を重ねて示す。図 1.3.8-21 に加振時の各部温度の時刻歴波形を示す。表 1.3.8-15 に各加振セットにおける吸収エネルギーおよび温度上昇量と、吸収エネルギーをオイルダンパーの熱容量 (作動油+接液部鋼材) で除して求めた温度上昇予測値を示す。表 1.3.8-16 に各加振セットの 1 サイクル目の吸収エネルギーと最大減衰力の変化を示す。油温は 41℃まで上昇したが荷重変位関係の変化は小さく、1 サイクル当たりのエネルギー吸収量の低下率は 2%程度、最大減衰力の低下率も 2%程度であった。油漏れは生じなかった。

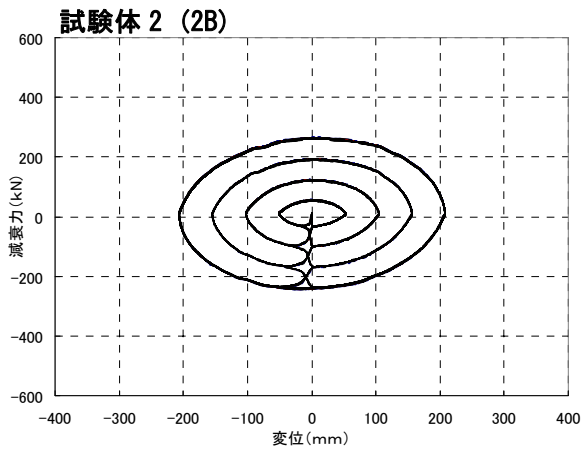


図 1.3.8-20 減衰力-変位曲線 (6 波×21 セット)

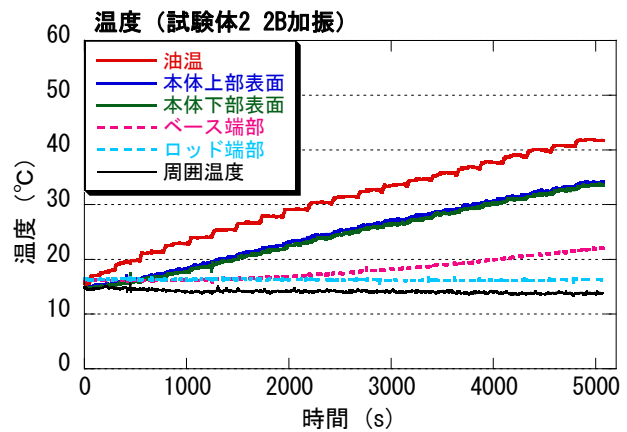


図 1.3.8-21 各部温度の時刻歴波形

表 1.3.8-15 各加振セットにおける吸収エネルギーと温度上昇値

試験体 2 (2B)

周囲温度 14℃

加振波NO.	吸収エネルギー (kN-m=kJ)				温度上昇 (°C)		
	所定振幅 6 波分の引前後増減波含み				計算値 (Qt/C)	試験結果	
加振前	個別	累積	個別	累積		タンク内作動油	本体上部表面
1	964	964	1,218	1,218	1.5	2.3	0.5
2	961	1,925	1,217	2,435	2.9	4.1	1.2
3	956	2,882	1,213	3,648	4.4	5.8	2.1
4	957	3,839	1,214	4,861	5.8	7.2	3.2
5	955	4,794	1,212	6,073	7.3	8.5	4.1
6	955	5,749	1,210	7,283	8.8	9.9	5.5
7	956	6,705	1,210	8,493	10.2	11.1	6.6
8	942	7,647	1,209	9,702	11.7	12.2	7.5
9	949	8,596	1,207	10,909	13.1	13.5	8.6
10	948	9,544	1,206	12,115	14.6	14.7	9.6
11	948	10,492	1,204	13,319	16.0	15.9	10.6
12	944	11,436	1,204	14,523	17.5	17.2	11.6
13	951	12,387	1,203	15,726	18.9	18.1	12.2
14	941	13,328	1,202	16,928	20.3	19.2	13.2
15	947	14,275	1,202	18,129	21.8	20.2	14.0
16	936	15,211	1,201	19,330	23.2	21.2	15.1
17	938	16,149	1,202	20,532	24.7	22.1	15.8
18	946	17,095	1,200	21,732	26.1	23.4	16.8
19	937	18,032	1,201	22,933	27.6	24.3	17.5
20	946	18,978	1,200	24,133	29.0	25.2	18.4
21	942	19,920	1,199	25,332	30.4	26.2	19.2

注) 温度上昇の計算値は吸収エネルギーを下記の熱容量で除した放熱は考慮しない数値を示す。

オイルダンパー熱容量C: 8.32E+05 J/°C
(作動油+接液部鋼材)

表 1.3.8-16 各セットにおける吸収エネルギーと減衰力の推移 (1 サイクル当たり)

試験体 2 (2B)

セット	加振波数	吸収エネルギー kJ (kN・m) (指数)	最大減衰力 (kN)	
			伸び側 (指数)	縮み側 (指数)
1	1波目	161.8 (1.00)	267.4 (1.00)	-244.9 (1.00)
2	7波目	160.5 (0.99)	266.4 (1.00)	-243.8 (1.00)
3	13波目	160.0 (0.99)	265.1 (0.99)	-243.2 (0.99)
4	19波目	160.4 (0.99)	265.1 (0.99)	-243.9 (1.00)
5	25波目	160.4 (0.99)	264.9 (0.99)	-243.2 (0.99)
6	31波目	160.3 (0.99)	264.4 (0.99)	-243.6 (0.99)
7	37波目	160.0 (0.99)	264.2 (0.99)	-243.0 (0.99)
8	43波目	159.7 (0.99)	264.2 (0.99)	-242.3 (0.99)
9	49波目	159.8 (0.99)	263.6 (0.99)	-241.9 (0.99)
10	55波目	159.7 (0.99)	263.6 (0.99)	-241.7 (0.99)
11	61波目	159.2 (0.98)	263.6 (0.99)	-240.9 (0.98)
12	67波目	159.1 (0.98)	262.9 (0.98)	-241.3 (0.99)
13	73波目	158.8 (0.98)	262.9 (0.98)	-241.1 (0.98)
14	79波目	159.0 (0.98)	262.5 (0.98)	-240.6 (0.98)
15	85波目	158.9 (0.98)	262.3 (0.98)	-241.7 (0.99)
16	91波目	158.6 (0.98)	262.1 (0.98)	-241.1 (0.98)
17	97波目	158.8 (0.98)	262.9 (0.98)	-241.3 (0.99)
18	103波目	159.0 (0.98)	262.5 (0.98)	-241.7 (0.99)
19	109波目	158.6 (0.98)	262.3 (0.98)	-240.9 (0.98)
20	115波目	158.7 (0.98)	261.8 (0.98)	-242.3 (0.99)
21	121波目	158.6 (0.98)	262.9 (0.98)	-241.1 (0.98)

b) 限界加振試験[2B]前後の基本特性の比較

限界加振試験前の常温状態で実施した基本特性 A 試験（出荷検査）と、限界試験直後に高温状態で実施した基本特性 A 試験の結果を比較して以下に示す。図 1.3.8-22、表 1.3.8-17 に F - V 特性を比較して示す。また、図 1.3.8-23 に所定振幅での減衰力 - 変位曲線を比較して示す。限界試験直後の温度状態（約 40℃）における最大減衰力の変化は小さく、常温下（約 20℃）の初期状態に比べて 1~2% 程度の低下率であった。

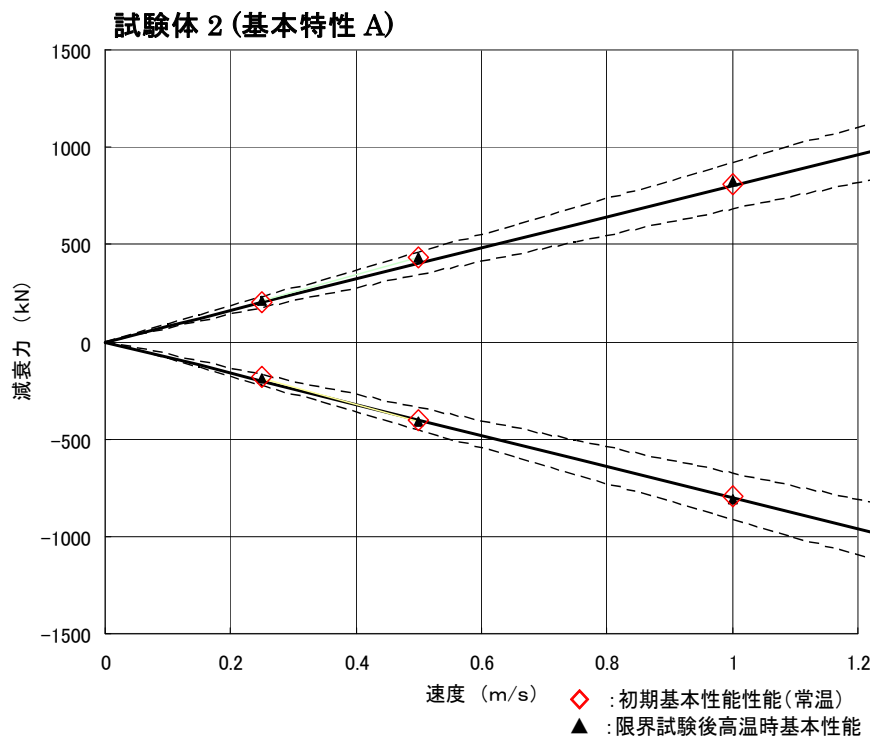
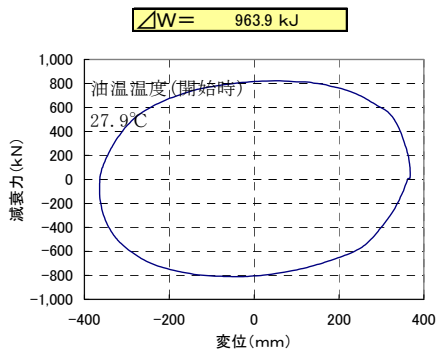
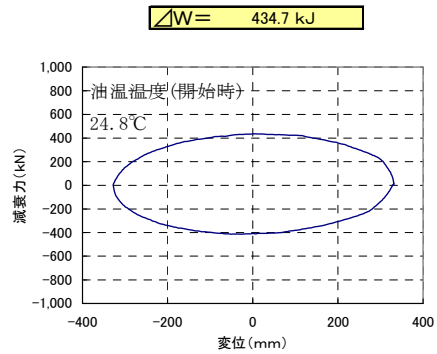
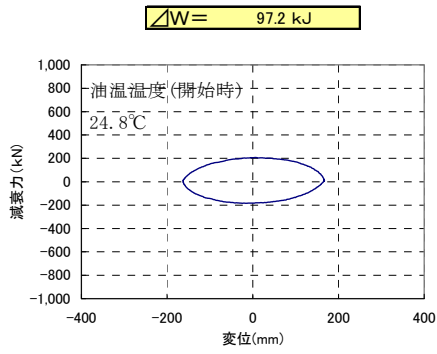


図 1.3.8-22 F - V 特性（常温—限界試験直後）

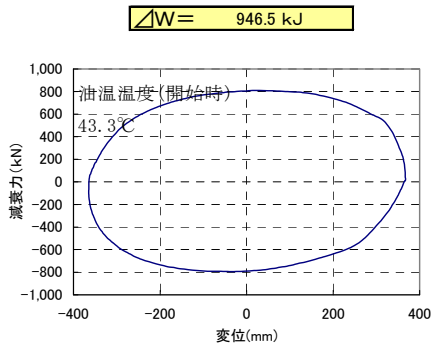
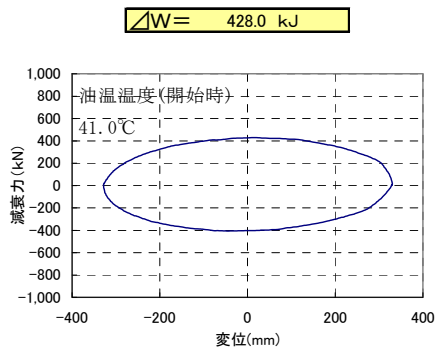
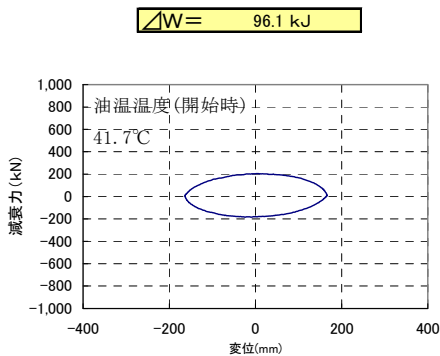
表 1.3.8-17 限界加振試験前後の最大減衰力の比較

試験体 2 (基本特性 A)

速度 V (m/s)	減衰力 Fd				減衰力 F (初期常温)	
	伸び (kN)	(Fd/F)	縮み (kN)	(Fd/F)	伸び (kN)	縮み (kN)
0.25	204.6	(0.99)	-183.2	(0.99)	207.4	-184.5
0.5	430.1	(0.98)	-406.5	(0.98)	436.7	-413.3
1	808.5	(0.98)	-794.4	(0.98)	826.1	-810.9



(限界試験前：常温時) 【試験体 2】



(限界試験後：高温時) 【試験体 2】

図 1.3.8-23 基本特性 A 試験の減衰力－変位曲線の比較 (限界試験前後)

c) 加振周期特性試験（基本特性 B）の試験結果

常温下で実施した基本特性 B 試験の結果を以下に示す。図 1.3.8-24 に $V=20\text{cm/s}$ において周期 2、3、4、5 秒で加振した際の、所定振幅での減衰力-変位曲線を比較して示す。また、表 1.3.8-18 に各周期における最大減衰力と等価減衰係数を示す。加振周期による最大減衰力、等価減衰係数の変化は小さい。

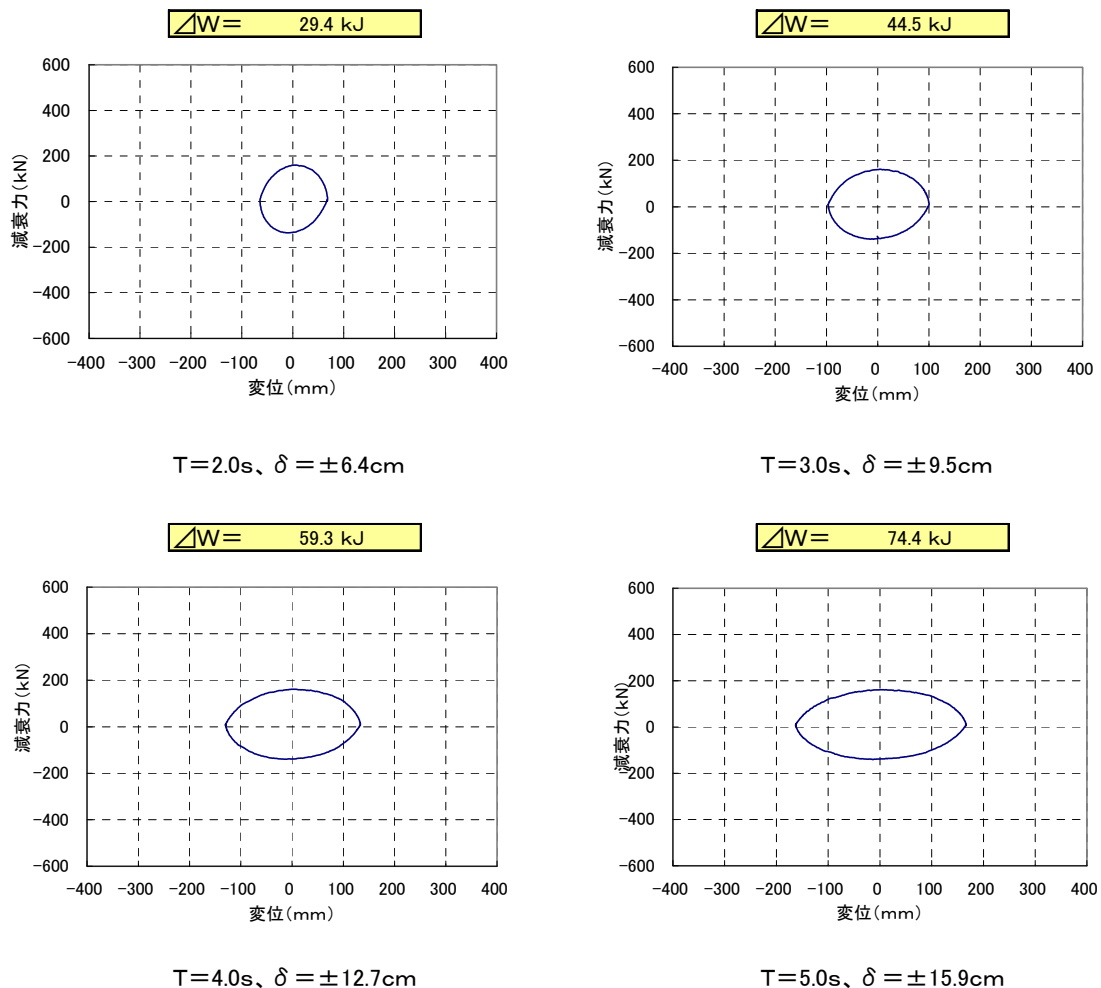


図 1.3.8-24 基本特性 B 試験の減衰力-変位曲線 【試験体 2】

表 1.3.8-18 各加振での最大減衰力と等価減衰係数

試験体 2 (基本特性 B)

周期	最大減衰力 (kN)				等価減衰係数 (kN · s/cm)	
	伸側	(指数)	縮側	(指数)	(指数)	
5	161.6	1.00	-137.5	1.00	7.45	1.00
4	161.4	1.00	-140.3	1.02	7.45	1.00
3	160.7	0.99	-139.0	1.01	7.49	1.01
2	160.6	0.99	-137.5	1.00	7.27	0.98

(3) 試験体 3

試験体 3 (減衰係数大) における試験結果を以下に示す。

a) 限界加振条件[2B]における荷重変位関係、温度時歴と基本特性の関係

図 1.3.8-25 に表 1.3.8-4 の条件で加振した 6 波×22 セットの減衰力-変位曲線を重ねて示す。図 1.3.8-26 に加振時の各部温度の時刻歴波形を示す。表 1.3.8-19 に各加振セットにおける吸収エネルギーおよび温度上昇量と、吸収エネルギーをオイルダンパーの熱容量 (作動油+接液部鋼材) で除して求めた温度上昇予測値を示す。また、表 1.3.8-20 に各加振セットの 1 サイクル目の吸収エネルギーと最大減衰力の変化を示す。

油温は 102℃まで上昇したが荷重変位関係の変化は小さく、1 サイクル当たりのエネルギー吸収量の低下率は 4%程度、最大減衰力の低下率も 4%程度であった。油漏れは生じなかった。

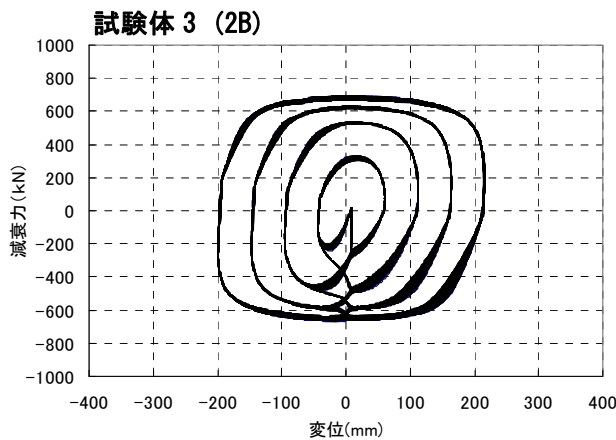


図 1.3.8-25 減衰力-変位曲線 (6 波×22 セット)

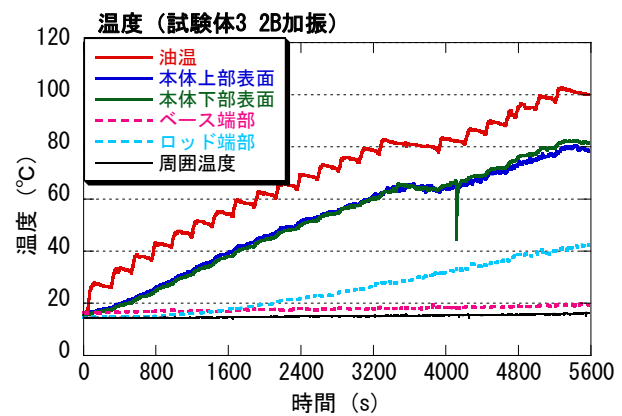


図 1.3.8-26 各部温度の時刻歴波形

表 1.3.8-19 各加振セットにおける吸収エネルギーと温度上昇値

加振波NO.	吸収エネルギー (kN-m=k J)				温度上昇 (°C)		
	所定振幅 6 波分のみ前後増減波含み				計算値 (Qt/C)	試験結果	
	個別	累積	個別	累積		タンク内作動油	本体上部表面
加振前							
1	2,946	2,946	4,061	4,061	4.9	9.9	1.9
2	2,949	5,896	4,048	8,109	9.7	16.1	4.7
3	2,944	8,840	4,046	12,155	14.6	21.0	8.2
4	2,943	11,783	4,033	16,189	19.5	25.7	11.9
5	2,931	14,714	4,036	20,225	24.3	30.3	15.6
6	2,926	17,640	4,028	24,253	29.2	34.0	19.5
7	2,893	20,533	4,019	28,272	34.0	37.7	23.2
8	2,906	23,439	4,012	32,284	38.8	41.7	27.0
9	2,900	26,339	4,003	36,287	43.6	45.1	30.4
10	2,889	29,228	3,992	40,279	48.4	48.4	33.0
11	2,895	32,123	3,977	44,256	53.2	51.7	36.5
12	2,868	34,991	3,974	48,230	58.0	55.3	38.7
13	2,877	37,868	3,966	52,196	62.7	58.7	41.8
14	2,870	40,738	3,957	56,154	67.5	61.9	45.8
15	2,876	43,614	3,942	60,096	72.2	63.3	47.5
16	2,837	46,451	3,942	64,038	77.0	65.5	49.2
17	2,833	49,284	3,932	67,970	81.7	69.1	51.2
18	2,828	52,112	3,920	71,890	86.4	72.2	54.2
19	2,848	54,960	3,906	75,796	91.1	77.0	55.8
20	2,840	57,800	3,900	79,696	95.8	78.5	58.3
21	2,828	60,628	3,888	83,583	100.5	82.0	61.4
22	2,829	63,457	3,876	87,459	105.1	83.4	62.5

注) 温度上昇の計算値は吸収エネルギーを下記の熱容量で除した放熱は考慮しない数値を示す。

オイルダンパー熱容量C: 8.32E+05 J/°C
(作動油+接液部鋼材)

表 1.3.8-20 各セットにおける吸収エネルギーと減衰力の推移 (1 サイクル当たり)

試験体 3 (2B)

セット	加振波数	吸収エネルギー kJ (kN・m) (指数)		最大減衰力 (kN)			
				伸び側 (指数)	縮み側 (指数)		
1	1波目	495.8	(1.00)	692.8	(1.00)	-667.3	(1.00)
2	7波目	495.1	(1.00)	691.5	(1.00)	-665.8	(1.00)
3	13波目	493.6	(1.00)	690.9	(1.00)	-665.6	(1.00)
4	19波目	493.6	(1.00)	690.8	(1.00)	-664.5	(1.00)
5	25波目	492.8	(0.99)	689.8	(1.00)	-665.6	(1.00)
6	31波目	492.0	(0.99)	689.6	(1.00)	-663.8	(0.99)
7	37波目	491.2	(0.99)	688.3	(0.99)	-662.1	(0.99)
8	43波目	489.6	(0.99)	687.8	(0.99)	-660.8	(0.99)
9	49波目	488.7	(0.99)	686.8	(0.99)	-659.1	(0.99)
10	55波目	487.3	(0.98)	685.9	(0.99)	-658.1	(0.99)
11	61波目	486.5	(0.98)	684.4	(0.99)	-656.6	(0.98)
12	67波目	485.5	(0.98)	683.3	(0.99)	-655.9	(0.98)
13	73波目	484.9	(0.98)	681.8	(0.98)	-653.8	(0.98)
14	79波目	483.7	(0.98)	681.0	(0.98)	-652.5	(0.98)
15	85波目	482.4	(0.97)	679.7	(0.98)	-651.4	(0.98)
16	91波目	481.8	(0.97)	678.9	(0.98)	-649.9	(0.97)
17	97波目	479.5	(0.97)	677.3	(0.98)	-648.0	(0.97)
18	103波目	479.0	(0.97)	675.4	(0.97)	-646.7	(0.97)
19	109波目	478.5	(0.97)	674.4	(0.97)	-645.4	(0.97)
20	115波目	474.3	(0.96)	674.1	(0.97)	-643.7	(0.96)
21	121波目	475.4	(0.96)	672.4	(0.97)	-642.0	(0.96)
22	127波目	474.7	(0.96)	671.8	(0.97)	-640.7	(0.96)

b) 限界加振試験[2B]前後の基本特性の比較

限界加振試験前の常温状態で実施した基本特性 A 試験（出荷検査）と、限界試験直後に高温状態で実施した基本特性 A 試験の結果を比較して以下に示す。図 1.3.8-27、表 1.3.8-21 に F - V 特性を比較して示す。また、図 1.3.8-28 に所定振幅での減衰力 - 変位曲線を比較して示す。

限界試験直後の高温状態（約 100℃）における最大減衰力の変化は、常温下（約 20℃）の初期状態に比べて 3～9%程度の低下率であった。

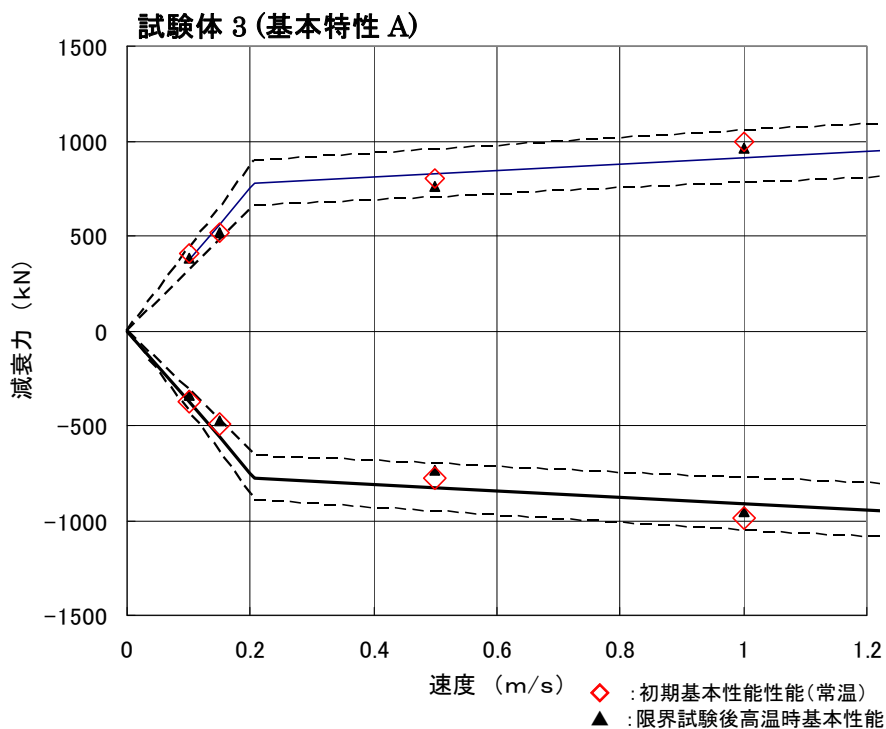
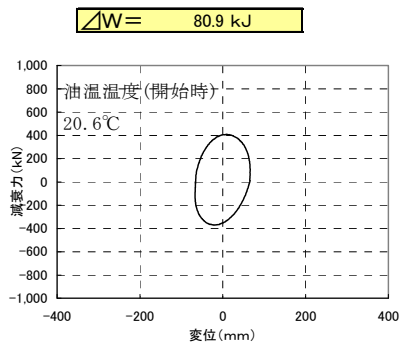


図 1.3.8-27 F - V 特性（常温—限界試験直後）

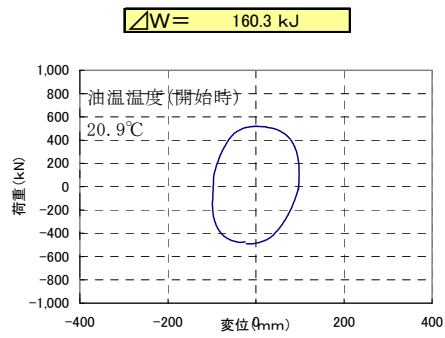
表 1.3.8-21 限界加振試験前後の最大減衰力の比較

試験体 3 (基本特性 A)

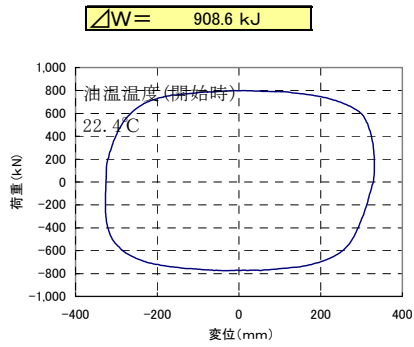
速度 V (m/s)	減衰力Fd				減衰力F(初期常温)	
	伸び (kN)	(Fd/F)	縮み (kN)	(Fd/F)	伸び (kN)	縮み (kN)
0.1	384.2	(0.94)	-337.7	(0.91)	408.8	-371.3
0.15	518.1	(1.00)	-476.8	(0.97)	520.3	-491.1
0.5	757.9	(0.95)	-732.8	(0.95)	799.1	-774
1	963.2	(0.97)	-950.3	(0.96)	996	-987.4



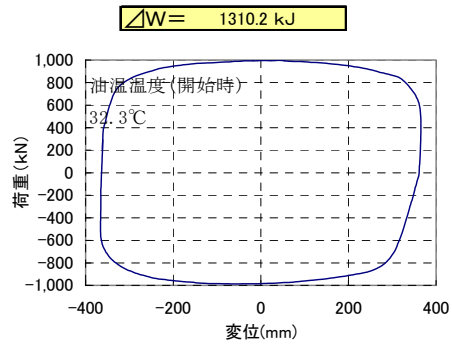
$V = 0.1 \text{ m/s}$



$V = 0.15 \text{ m/s}$

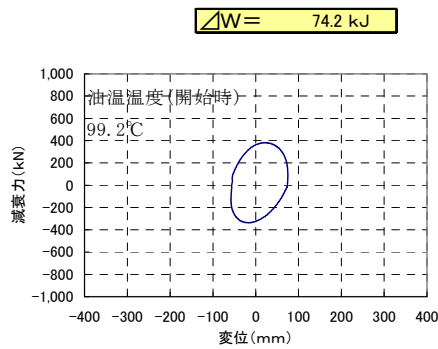


$V = 0.5 \text{ m/s}$

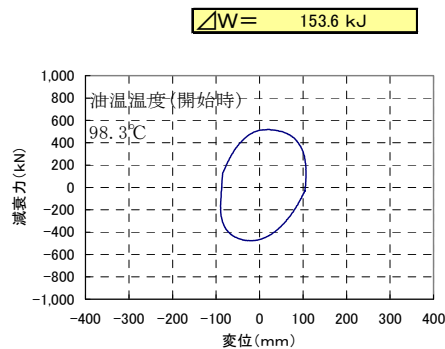


$V = 1.0 \text{ m/s}$

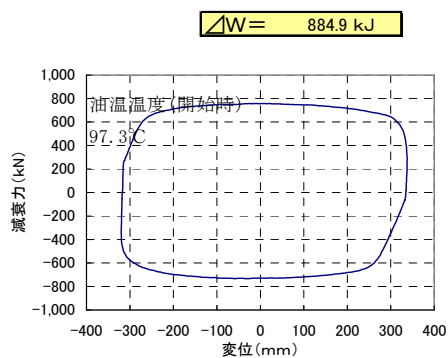
(限界試験前：常温時) 【試験体 3】



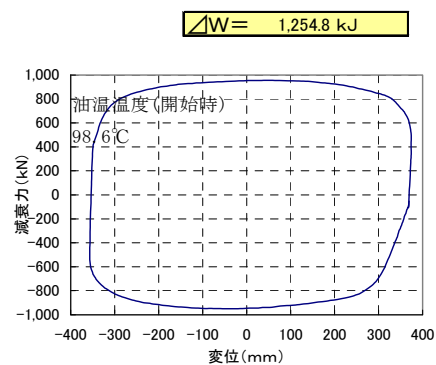
$V = 0.1 \text{ m/s}$



$V = 0.15 \text{ m/s}$



$V = 0.5 \text{ m/s}$



$V = 1.0 \text{ m/s}$

(限界試験後：高温時) 【試験体 3】

図 1.3.8-28 基本特性 A 試験の減衰力-変位曲線の比較 (限界試験前後)

c) 加振周期特性試験（基本特性 B）の試験結果

常温下で実施した基本特性 B 試験の結果を以下に示す。図 1.3.8-29 に $V=20\text{cm/s}$ において周期 2、3、4、5 秒で加振した際の、所定振幅での減衰力-変位曲線を比較して示す。また、表 1.3.8-22 に各周期における最大減衰力と等価減衰係数を示す。油の内部剛性による影響で、加振周期が短くなるにつれて等価減衰係数が小さくなる傾向が見られ、周期 2 秒では周期 5 秒に対して約 5% 低下する。

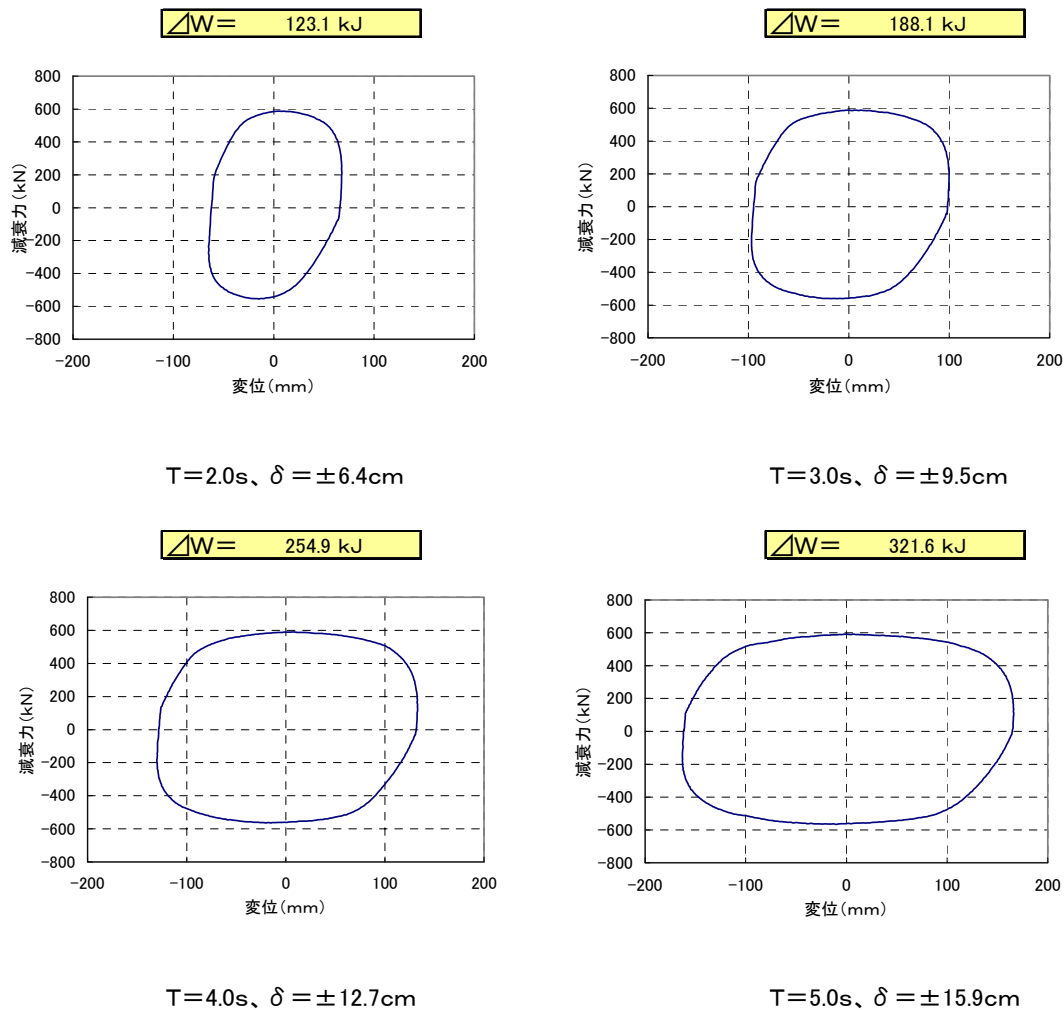


図 1.3.8-29 基本特性 B 試験の減衰力-変位曲線【試験体 3】

表 1.3.8-22 各加振での最大減衰力と等価減衰係数

試験体 3 (基本特性 B)

周期	最大減衰力 (kN)				等価減衰係数 (kN・s/cm)	
	伸側	(指数)	縮側	(指数)	(指数)	
5	591	1.00	-564.9	1.00	32.22	1.00
4	589.7	1.00	-563.3	1.00	32.03	0.99
3	589.3	1.00	-561.4	0.99	31.68	0.98
2	587.6	0.99	-554.1	0.98	30.45	0.95

1.3.8.3 まとめ

(1) 多数回繰り返し特性

図 1.3.8-30 に多数回繰り返し試験結果について、各試験体の累積変形量（漸増・漸減加振部分を含む）と、累積吸収エネルギーおよび油温上昇量の関係をまとめて示す。また、図 1.3.8-31 に各試験体の累積吸収エネルギーと油温上昇量の関係をまとめて示す。また、図 1.3.8-32 に吸収エネルギーをオイルダンパーの熱容量（作動油+接液部鋼材）で除して求めた油温上昇予測値（放熱無し）と、オイルダンパーの鋼材表面から空气中への熱伝導を考慮して求めた油温上昇予測値（放熱考慮）を実験値と比較して示す。また、図 1.3.8-33 および図 1.3.8-34 に各試験体の油温と最大減衰力・吸収エネルギーの低下率の関係をまとめて示す。これらの結果より、得られた知見は以下である。

- ・ 限界加振条件 2B（所定振幅加振部分の累積変形量が約 100m、漸増・漸減加振部分を含む累積変形量が約 150m）の加振による油温上昇量は、試験体 1（2.5MN・s/m）が 73℃（油温 15℃→88℃）、試験体 2（0.8MN・s/m）が 26℃（油温 15℃→41℃）、試験体 3（3.75MN・s/m）が 83℃（油温 19℃→102℃）であった。油温が 100℃を超える試験体もあったが、荷重変位関係の変化は小さく、また、シール部から作動油のしみだしは見られなかった。
- ・ 試験体表面からの空气中への放熱量は少なく、入力エネルギーの大半が油温の温度上昇に反映されているため、累積吸収エネルギー量と油温上昇量の相関は高い。インターバルによる放熱の影響を評価するため、放熱を考慮した油温上昇量の予測値と放熱無しの予測値を比較したところ、加振 90 分間の本実験の放熱量は、試験体 1 が約 11℃、試験体 2 が約 4℃、試験体 3 が約 14℃であり、油温上昇量に比べて放熱量が小さいことがわかる。
- ・ 放熱の影響は少なく、累積吸収エネルギーを作動油+接液部鋼材の熱容量で除した油温上昇量の予測（放熱無し）でも実験結果と良い対応をするが、インターバルを設けた本実験においては、放熱を考慮するほうがより精度良く油温上昇量を予測できる。
- ・ 多数繰り返し加振による油温の上昇に伴い、最大減衰力と吸収エネルギー量は僅かに低下する傾向が見られる。常温（20℃）に対する最大減衰力の低下率は、油温（100℃）においても伸び側で約 3%、縮み側で約 5%であった。また、1 サイクル当たりのエネルギー吸収量の低下率は、油温（100℃）においても約 5%の低下であった。

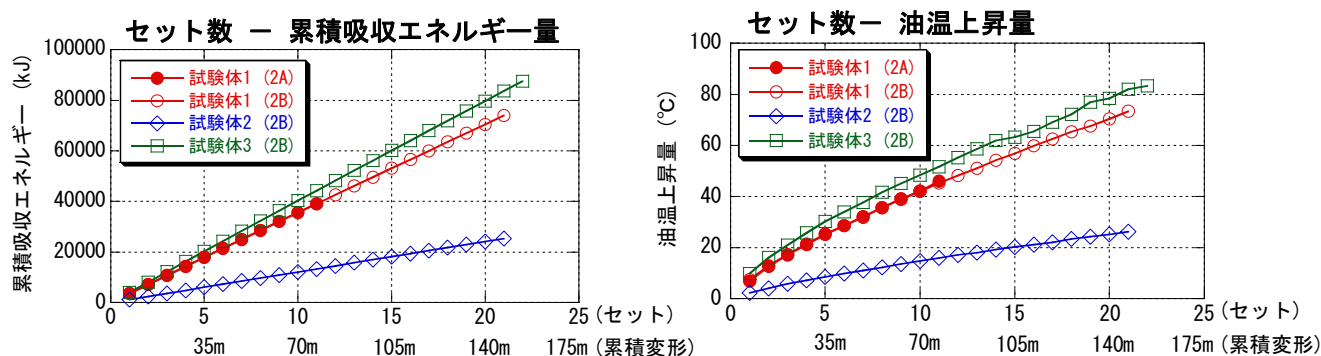


図 1.3.8-30 多数回繰り返し試験結果(累積変形量と累積吸収エネルギー及び油温上昇量の関係)

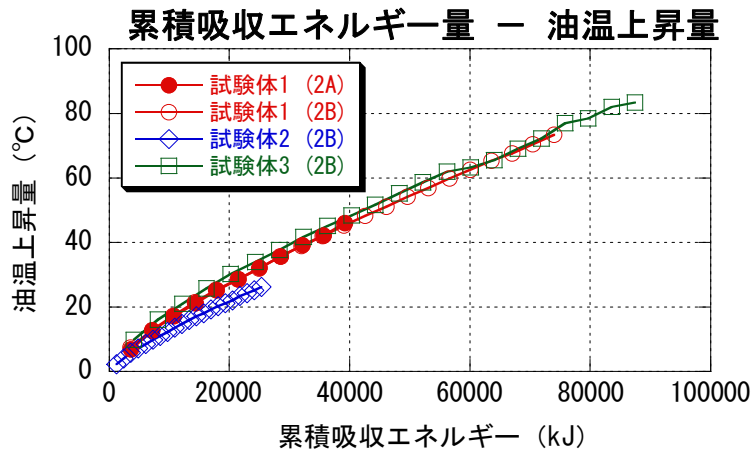


図 1.3.8-31 多数回繰り返し試験結果（累積吸収エネルギーと油温上昇量の関係）

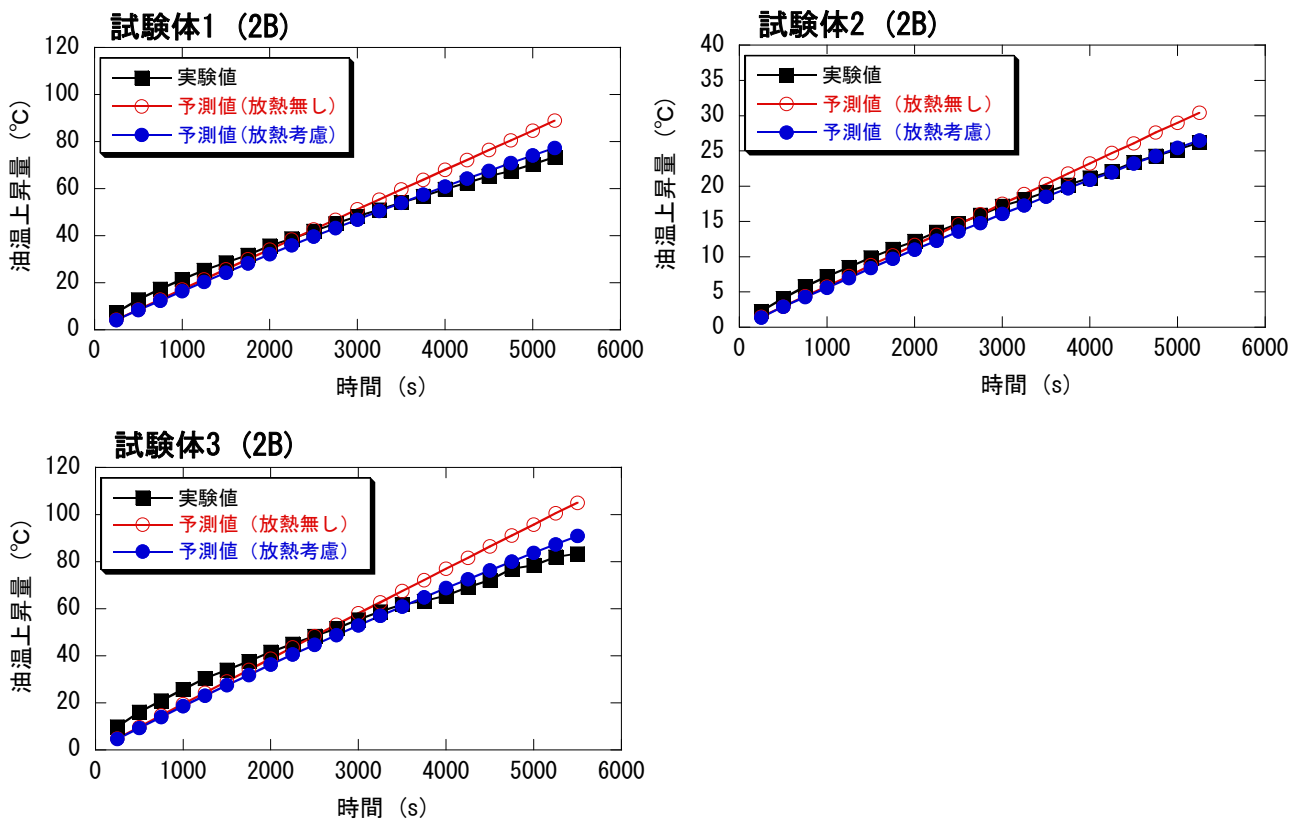


図 1.3.8-32 多数回繰り返し試験結果（油温上昇量の予測値と実験値の比較）

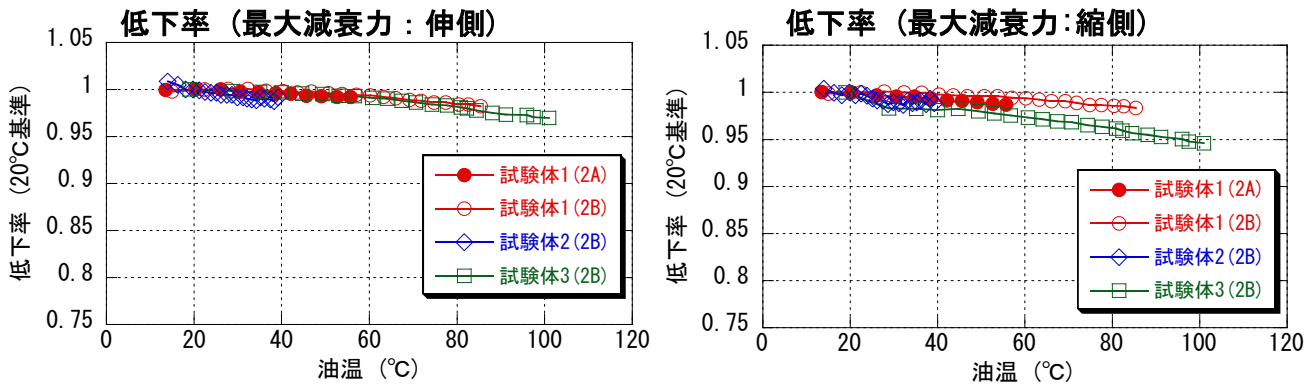


図 1.3.8-33 多数回繰り返し試験結果 (油温と最大減衰力の低下率の関係)

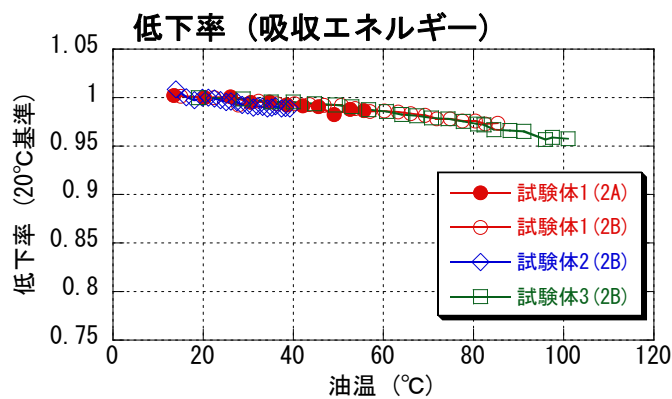


図 1.3.8-34 多数回繰り返し試験結果 (油温と吸収エネルギーの低下率の関係)

(2)その他

図 1.3.8-35 に多数回繰り返し試験結果前後および冷却後に実施した基本特性 A 試験 (出荷試験) について、初期特性に対する最大減衰力の変化率をまとめて示す。また、基本特性 B 試験 (加振周期を変化) について、図 1.3.8-36 に周期 5 秒加振に対する最大減衰力の変化率を、図 1.3.8-37 に周期 5 秒加振に対する吸収エネルギーの変化率をまとめて示す。これらの結果より、得られた知見は以下である。

- 多数繰り返し加振直後の高温状態における基本特性 (出荷試験の各速度における最大減衰力) の変化は小さく、常温化の初期状態に比べて最大でも 6% 程度の低下であった。
- 油温が常温状態に戻ると、基本特性 (出荷試験の各速度における最大減衰力) は、ほぼ初期状態に復元する。
- 加振周期による最大減衰力と等価減衰係数の変化は小さい。加振周期が 2 秒まで短くなっても、最大減衰力 (伸び側) はほとんど変化しないが、最大減衰力 (縮み側) と等価減衰係数では 3~5% 程度の低下が見られる。作動油の内部剛性の影響により、加振周期が短く、減衰係数が大きなダンパーで低下率が大きくなる。作動油の内部剛性の影響を考慮するためには、オイルダンパーの解析モデルは Maxwell モデルとするのが望ましい。

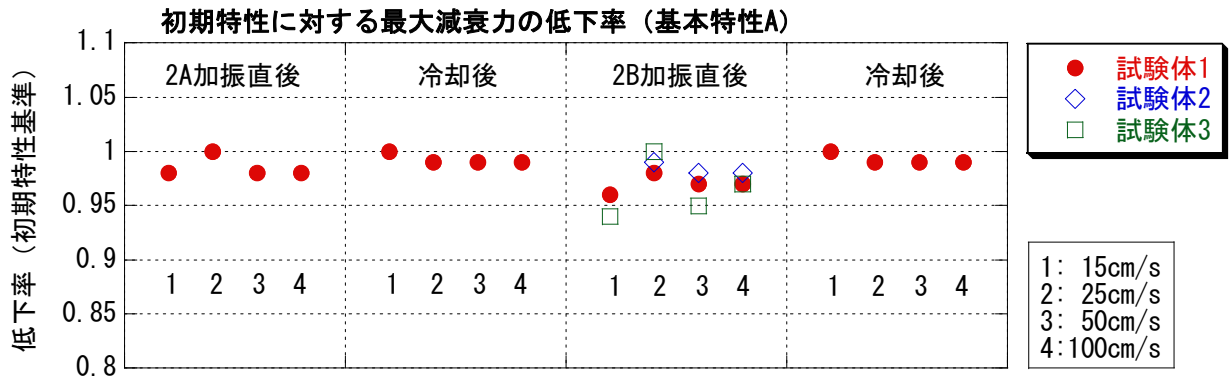


図 1.3.8-35 多数回加振後および冷却後の初期特性に対する最大減衰力の変動 (基本特性 A 試験)

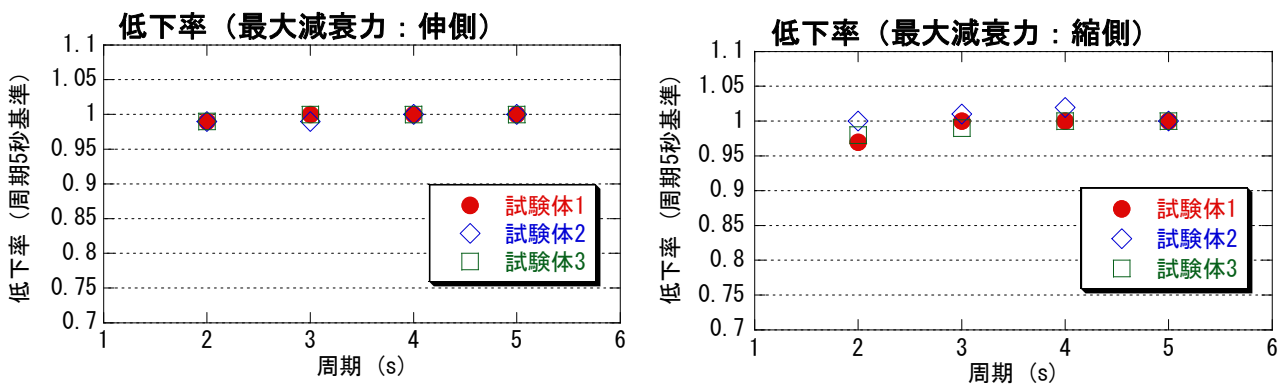


図 1.3.8-36 加振周期による最大減衰力の変化率 (基本特性 B 試験)

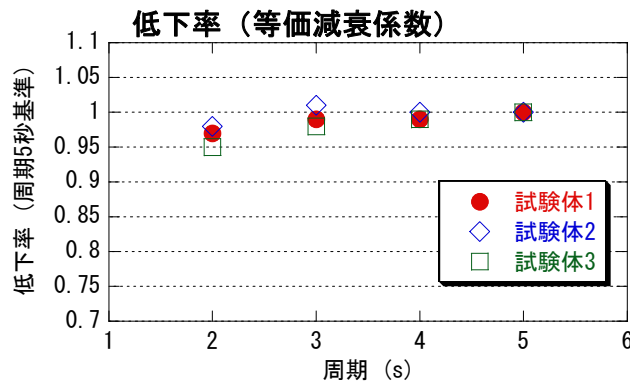


図 1.3.8-37 加振周期による等価減衰係数の変化率 (基本特性 B 試験)

(3)今後の課題

加振中における放熱量は小さいため、インターバルを設けた加振の影響は少ないと思われるが、今後の課題としてインターバル無しでの連続加振と地震応答波加振の実施が挙げられる。また、オイルシールとして、フッ素系樹脂よりも限界温度が低いニトリルゴムを用いたダンパーについても、限界加振を実施するのが望ましい。また、伸び側と縮み側で油剛性が異なるユニフロー型の免震ダンパーのエネルギー吸収量を更に精度良く評価するために、伸び側と縮み側の特性を解析モデルに反映することが考えられる。

1.3.9 粘性ダンパー

本節では、粘性ダンパーの多数回繰り返し変形に対する特性の変動について、免震建築物の安全性検証方法に関する国土交通省基準整備に資する知見を取得するための調査について述べる。粘性ダンパーは国土交通省の免震材料に関わる基準において流体系減衰材（作動油を用いないもの）として位置づけられるものである。本調査においては粘性ダンパーを代表する減衰部材として、免制震デバイス社/THK社・AT式増幅機構付き減衰装置－減衰こま（以下、RDTと略称することがある）を調査対象として選択した。

1.3.9.1 実験計画

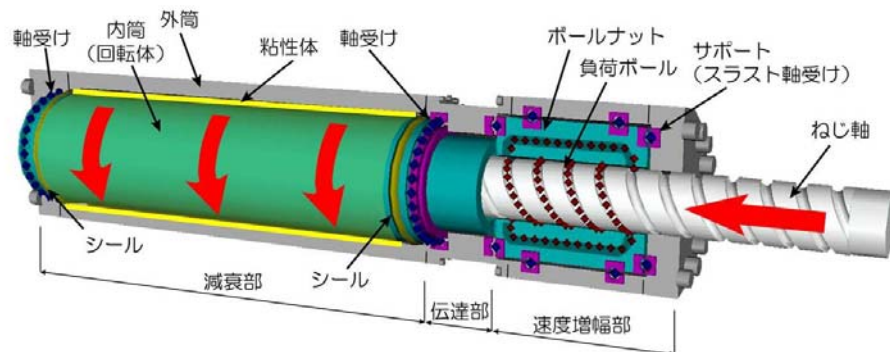
(1) 実験目的と背景

1) 実験目的

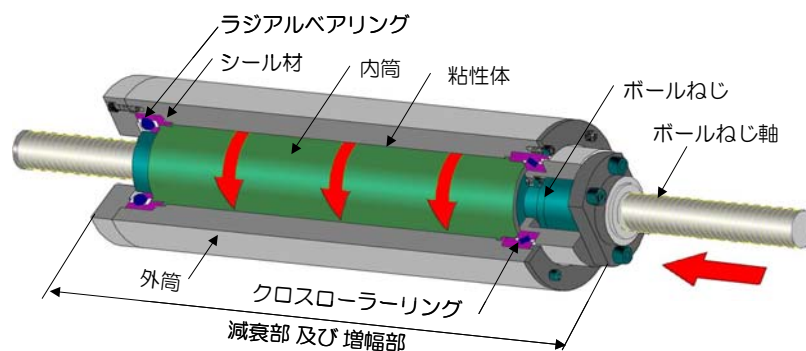
粘性ダンパーの多数回繰り返し変形に対する特性の変動について調査を行い、免震建築物の安全性検証方法に関する国土交通省基準のうち流体系減衰材（作動油を用いないもの）に関わる部分の整備に資する知見を取得する。

2) 調査対象部材の構成

調査対象部材の概要図を図 1.3.9-1 に示す。



a) RDT-AT-10 万 cst ・ RDT-AT-30 万 cst



b) RDT-AT-Short

図 1.3.9-1 調査対象部材構成概要図

調査対象部材は、免震層の相対変形による直線運動を、ボールねじを介して回転運動に変換し、直線運動の速度を円周方向に増幅させる機構を有している。減衰部の内筒と外筒の隙間には粘性体が充填されており、増幅された円周方向運動により粘性体に大きなせん断歪速度が発生することで、減衰部材として大きな減衰力が得られるものである^{1.3.9-1)}。増幅率 S は、ボールねじのピッチ（リード L_d と称される）と、内筒外径 D_n から式 (1.3.9-1) で与えられる。軸方向減衰力は軸速度に対して S の二乗で増幅される関係をもつ。

$$S = \pi \cdot D_n / L_d \quad (1.3.9-1)$$

3) 既往の研究

a) 粘性体の温度特性

調査対象部材には、粘性材料の中でも粘度の温度依存性が比較的小さいとされているジメチルシリコンオイルが用いられている。粘性体の温度と粘度の関係を図 1.3.9-2 に示す^{1.3.9-1)}。-10℃から 50℃の範囲で調べられている。温度が高くなると粘度は減少する。例えば 50℃の粘性体の動粘度は 25℃の粘性体の対し 0.61 倍である。

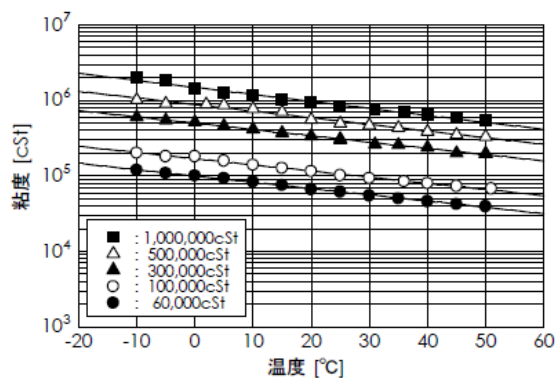


図 1.3.9-2 温度依存性^{1.3.9-1)}

粘性体の温度上昇については、調査対象部材の限界性能を検証するための動的加振試験において検討されている^{1.3.9-2)}。免震用の試験体（ストローク±750mm、30万 cSt 型、速度増幅倍率 12.0）に対し、周期 3～4 秒、最大速度：40～150cm/s、サイクル数 4 の漸増漸減正弦波（1 サイクルで漸増、定常 2 サイクル、1 サイクルで漸減）における加振前後の粘性体温度が計測されている。図 1.3.9-3 に累積吸収エネルギーのピーク値と粘性体の温度上昇を、図 1.3.9-4 に示す検討モデルと表 1.3.9-1 に示す材料諸元により熱容量を算出した結果と併せて示す。理論値／試験値は 0.94～1.68 の範囲にある。大部分の発熱量が速やかに周辺鉄部へ伝わるために温度上昇は小さくなることが解析的に導かれている。

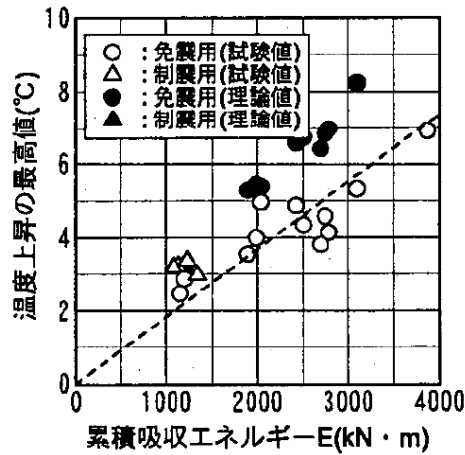


図 1.3.9-3 累積吸収エネルギーと温度上昇値 1.3.9-2)

表 1.3.9-1 材料諸元

諸元	外筒	内筒	粘性体	単位
材料	鉄	鉄	シリコン	
比熱 s	488	488	1488	J/(kg·K)
比重	7.85	7.85	0.978	
熱伝導率	83.5	83.5	0.159	W/(m·K)
容積	免震用	49153	31358	2943
	制震用	44285	28880	
質量 m	免震用	386	246	2.9
	制震用	348	225	
質量×比熱 [$m \times s$]	免震用	188951	119635	4277
	制震用	168951	109341	

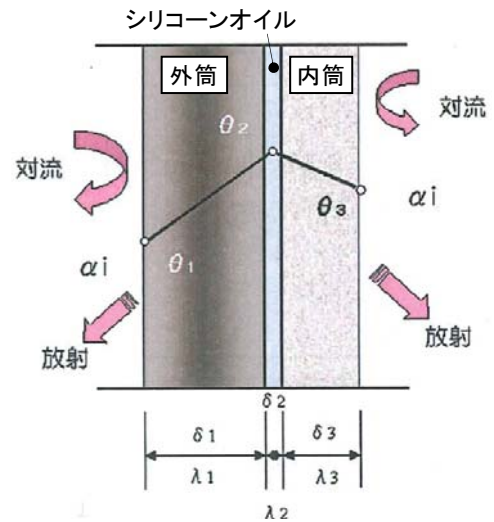


図 1.3.9-4 検討モデル

b) 繰り返し特性

繰り返し回数と抵抗力の関係については、小規模試験体（型番：RDT4-500S 相当）を用いた調査結果が報告されている（1.3.9-3）～（1.3.9-5）。粘性体粘度 10 万 cSt 型に関する試験によって得られた荷重変形関係を図 1.3.9-5 に示す。試験条件は最大速度が同等の 3 条件 ((a)加振振動数 0.5Hz、振幅 150mm、(b)0.25Hz、300mm、(c)0.16Hz、450mm) である。図のとおり、連続加振により抵抗力は低下する。この抵抗力の低下は、せん断歪速度の増大とともに、粒子間の相互作用が急速に弱まるため粘度が低下するためであり、粘性体の分子構造自体の破壊により生じるものではないとされており、分子間の応力緩和がもとの状態にもどると減衰性能は回復する。

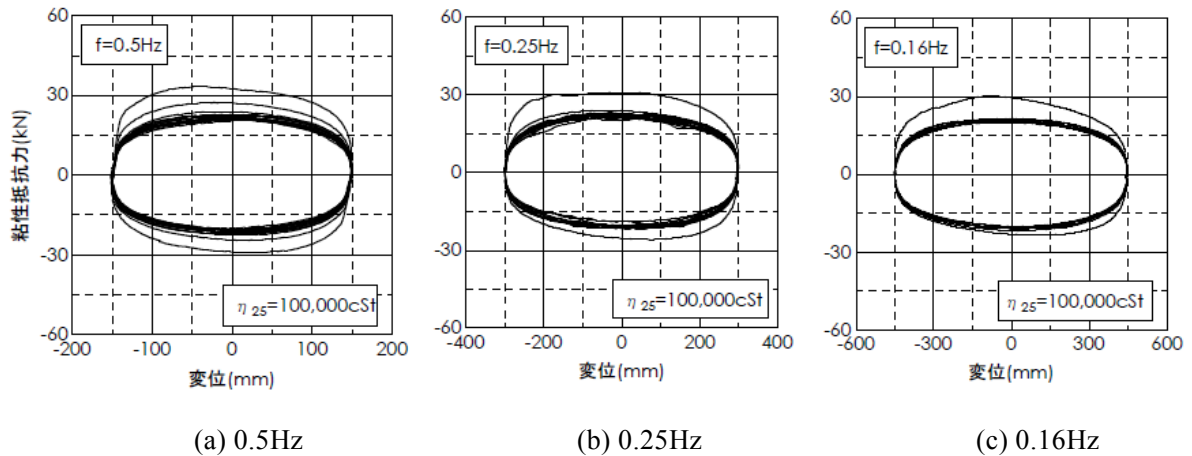


図 1.3.9-5 荷重変形関係（粘性体粘度 10 万 cSt 型）

図 1.3.9-6 は上記試験における粘性抵抗力の繰り返し依存特性を、調査対象部材の抵抗力基準式における繰り返し依存係数 α の変動としてプロットしたものである。 $\alpha=0.85$ が基準値を定める係数となる。図は粘性体が充填されている容積あたりの粘性累積吸収エネルギー（以下この項では、単位容積粘性エネルギー）の関数として示されている。繰り返しの初期で粘性抵抗力が急激に低減し、 $\alpha=0.7225(=0.85 \times 0.85)$ に至った後は一定値を保つ特性が提示されている。評価範囲は単位容積粘性エネルギー1200J/cc程度までである。粘性体粘度 30 万 cSt 型についても同様の検討（試験条件は (a)加振振動数 0.5Hz、振幅 80mm、(b)0.25Hz、160mm、(c)0.16Hz、240mm）が行われ、10 万 cSt 型、30 万 cSt 型それぞれについて評価式が求められている。

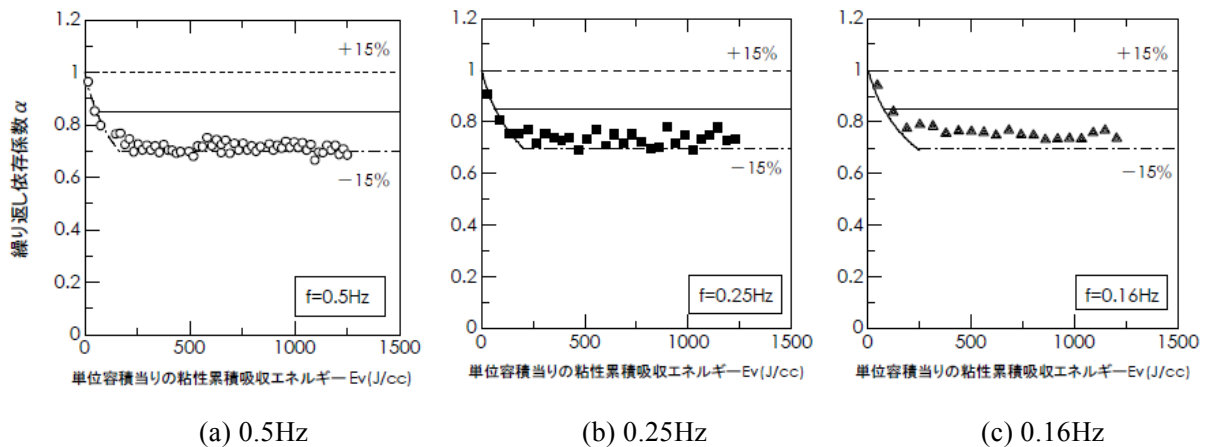


図 1.3.9-6 繰り返し依存係数（粘性体粘度 10 万 cSt 型）

c) まとめ

調査対象部材の多数回繰り返し変形に対する特性の変動に関する既往の知見は以下のようにまとめられる。粘性ダンパーの繰り返しによる性能変動に影響を与える因子として、粘性体の温度特性および粘性体粒子間の相互作用の変化に伴うとされる繰り返し依存性が考えられる。

- ・粘性体の温度特性は-10℃～50℃の範囲について調べられており、粘性体粘度は温度の上昇により低下する。
- ・内部に充填された粘性体の温度上昇は、周辺鉄部への熱伝導によって抑制される。4 サイクル程度の繰り返し試験について解析的に説明が行われている。

- ・繰り返しの伴う粘性抵抗力の低下は、単位容積粘性エネルギーの関数として定式化されており、評価範囲は単位容積粘性エネルギー1200J/cc 程度までである。

(2) 実験日時および場所

実験は、平成 22 年 12 月 13 日～12 月 17 日に、株式会社免制震デバイス技術センター（栃木県下野市仁良川 1 7 2 6 番地）において実施した。実験実施スケジュールは表 1.3.9-2 に示すとおり（試験体名、試験条件名は後述のとおり）である。

表 1.3.9-2 実験実施スケジュール

2010年 12月	10:00	11:00	12:00	13:00	14:00	15:00	16:00	17:00	18:00	19:00
13日 (月)	繰り返し(水準0) RDT30			入れ替え作業	繰り返し(水準0) RDT8S		入れ替え作業			
14日 (火)	繰り返し(水準0) RDT16			入れ替え作業						
15日 (水)				公開試験 繰り返し(水準1) RDT16			入れ替え作業			
16日 (木)	繰り返し(水準2) RDT30			入れ替え作業	繰り返し(水準2) RDT8S		入れ替え作業	繰り返し(水準2) RDT16		
17日 (金)	繰り返し(水準1) RDT30				繰り返し(水準1) RDT8S					

(3) 試験体

調査対象部材の免震材料認定は、MVBR-0387、0221、0222 の 3 編に分かれているため、各認定に該当する製品から 1 基ずつ、計 3 基の試験体を抽出した。試験体は部材認定リストの実機製品とするが、使用可能な加力装置能力の制約から、抵抗力の基準値が 300kN 以下の製品を選択した。すなわち、実験を実施する装置は、RDT8-500S、RDT16-500、および RDT30-750 各 1 基である。以下、それぞれ、RDT8 試験体、RDT16 試験体、RDT30 試験体と呼称する。

各試験体の諸元を表 1.3.9-3 に示す。

表 1.3.9-3 試験体諸元

試験体名		RDT8 試験体	RDT16 試験体	RDT30 試験体
型番		RDT8-500S	RDT16-500	RDT30-750
認定番号		MVBR-0387	MVBR-0221	MVBR-0222
認定名称		RDT-AT-Short	RDT-AT-10 万 cst	RDT-AT-30 万 cst
装置全長	mm	1317	1756	1990
有効ストローク	mm	500	500	750
ねじ軸径	mm	40	50	80
リード	mm	40	50	40
内筒外径	mm	108	148	195
抵抗部有効長さ	mm	525	815	490
せん断隙間	mm	2.5	3	3
粘性体動粘度	cSt	100,000 (25℃)	100,000 (25℃)	300,000 (25℃)
粘性体充填容積	cc	456	1160	914
バッファ容量	cc	67	172	136
抵抗力基準値	kN	80.2 (1.5m/s)	159.6 (1.5m/s)	299 (1.5m/s)
質量	Kg	96	246	475

(4) 試験装置

実験には、前記技術センターに設置されている 30t 試験機を用いた。

実験に当たっては、クレビスを介して試験体両端を試験フレーム内に設置し、試験体には軸方向力のみが加わるようにした。試験体と試験機の接触部分に断熱板（アルミニウムカーボネート系断熱板、熱伝導率 0.3W/m/K 程度、厚さ 10mm）を挿入した。

加力はダイナミックアクチュエータの変位制御により実施した。各種計測機器により変位、抵抗力および試験体の温度を計測し、速度-荷重関係のデータを取得した。

30t 試験機の繰り返し試験時最大能力を表 1.3.9-4 に示し、外観を図 1.3.9-7 に示す。

表 1.3.9-4 試験機の能力（繰り返し実験時）

試験機名称	項目	最大値
30t 試験機	最大荷重	±300kN
	ストローク	±400mm
	最大速度 (繰り返し実験時)	50cm/s

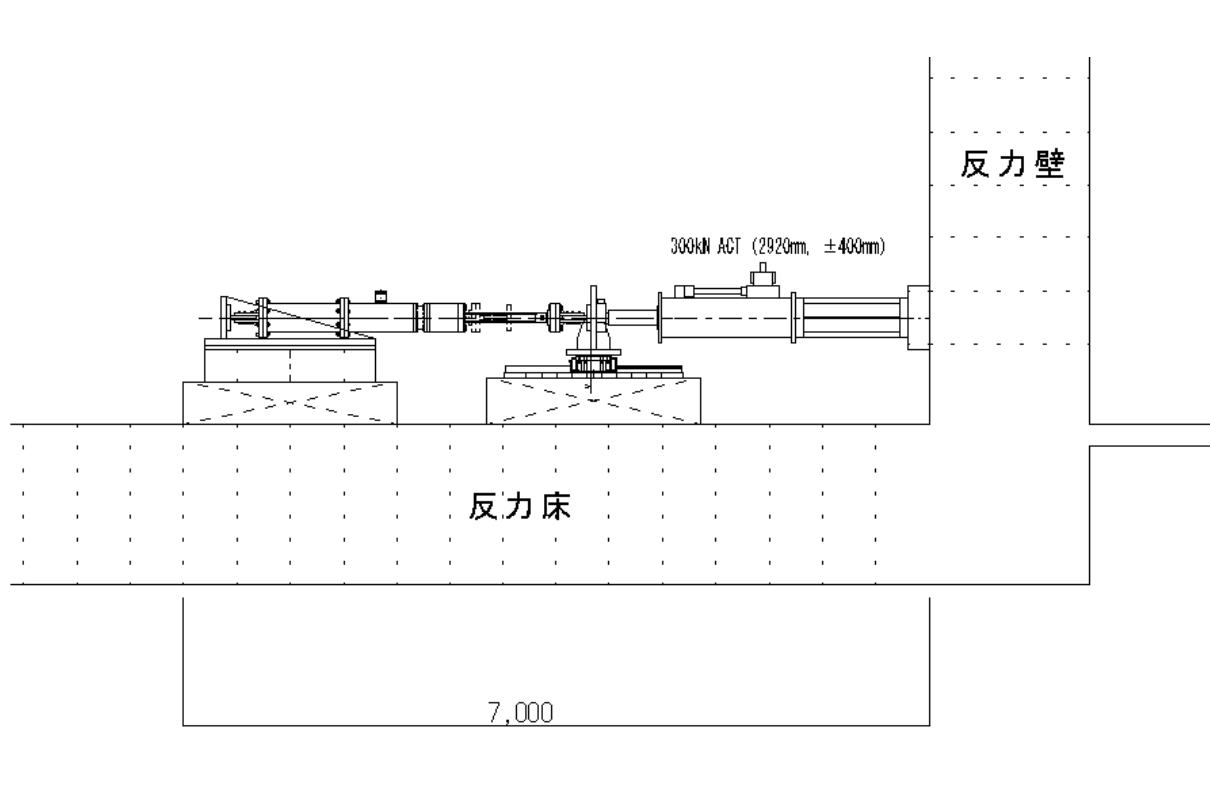


図 1.3.9-7 試験機の外観

(5) 計測項目と計測方法

1) 計測システム

計測項目は水平荷重、水平変位および粘性体温度とした。計測システムの概要を図 1.3.9-8 に示す。インターバル時および試験体冷却時には温度計測のみ実施した。計測サンプリングは加力時およびインターバル時には 100Hz、試験体冷却時は (1 回/5 分) とした。

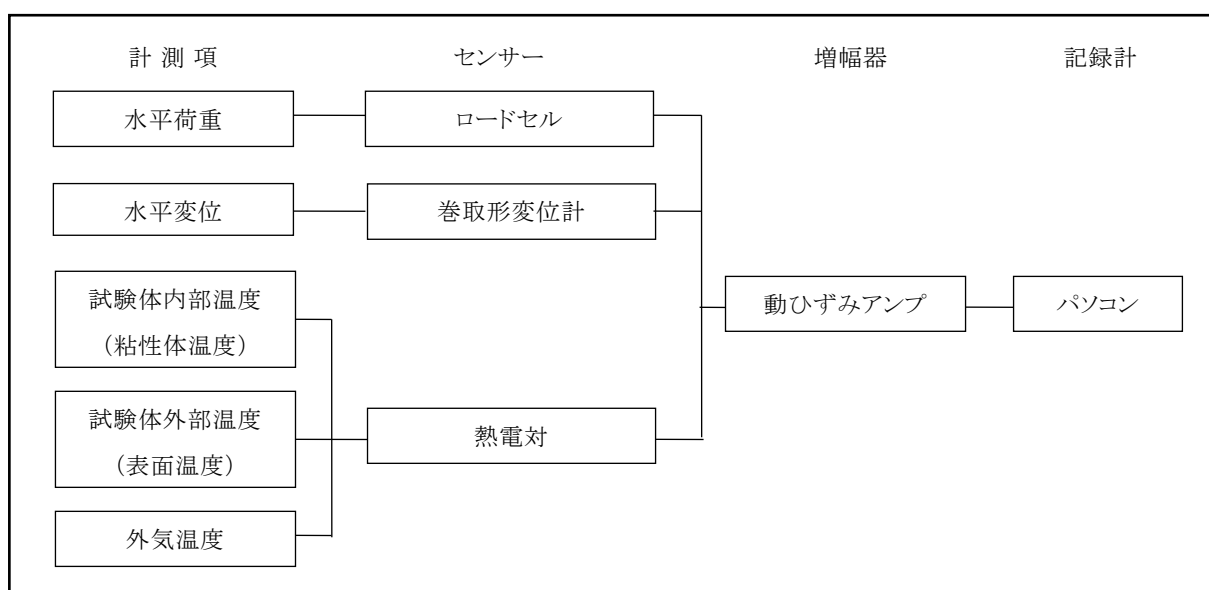


図 1.3.9-8 計測システム

2) 計測機器の詳細および取付位置

計測機器の詳細を表 1.3.9-5 に示し、各機器の取付位置を図 1.3.9-9 に、熱電対取付位置詳細を試験体毎に図 1.3.9-10~12 に示す。

表1.3.9-5 計測機器一覧

計測項目	検出器(センサー)	容量	機器番号	数量	記号	備考
水平荷重	引張・圧縮型荷重計	3,000kN	—	1	LH1	
試験体ストローク量	巻取り形変位計			1	DH1	
全体変位	巻取り形変位計 アクチュエータ FB			1	DH6	
クレビス変位 ※1	ひずみゲージ式	25mm	CDP-25	4	DH2,3,4,5	モニター用
内部温度 (粘性体温度)	熱電対	—	T型	3	TM1・2・3	
外部温度 (表面温度)				6	TM4・5・6 7・8・9	
外気温度				1	TM10	

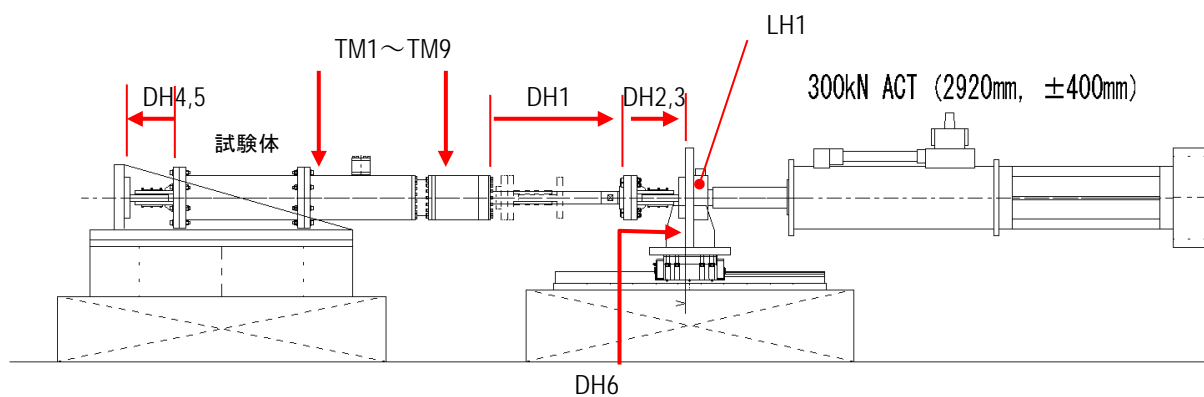


図 1.3.9-9 計測点位置図

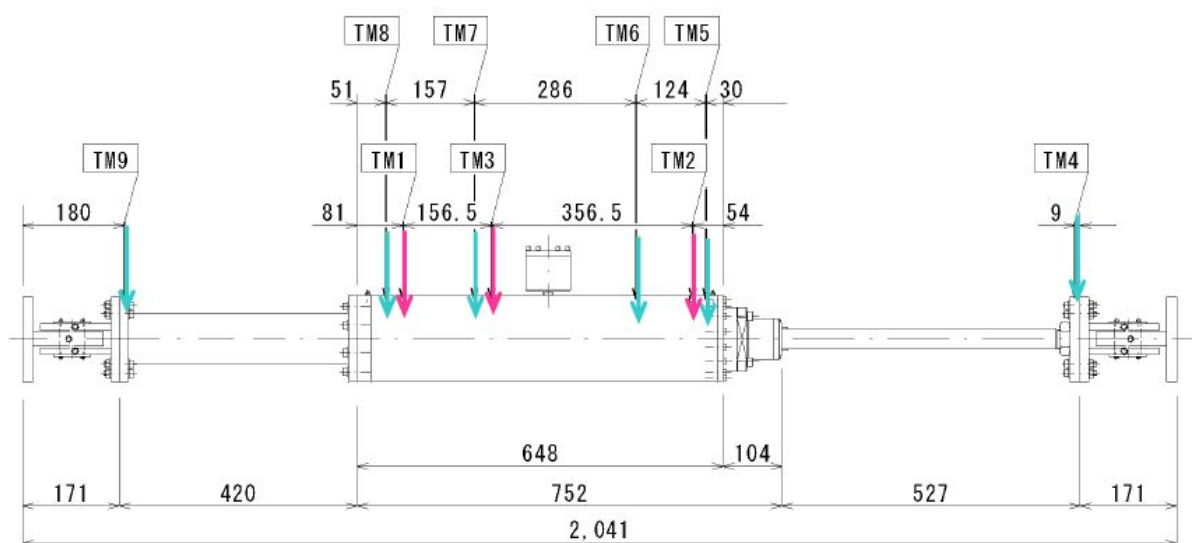


图 1.3.9-10 RDT8 試驗体熱電対位置図

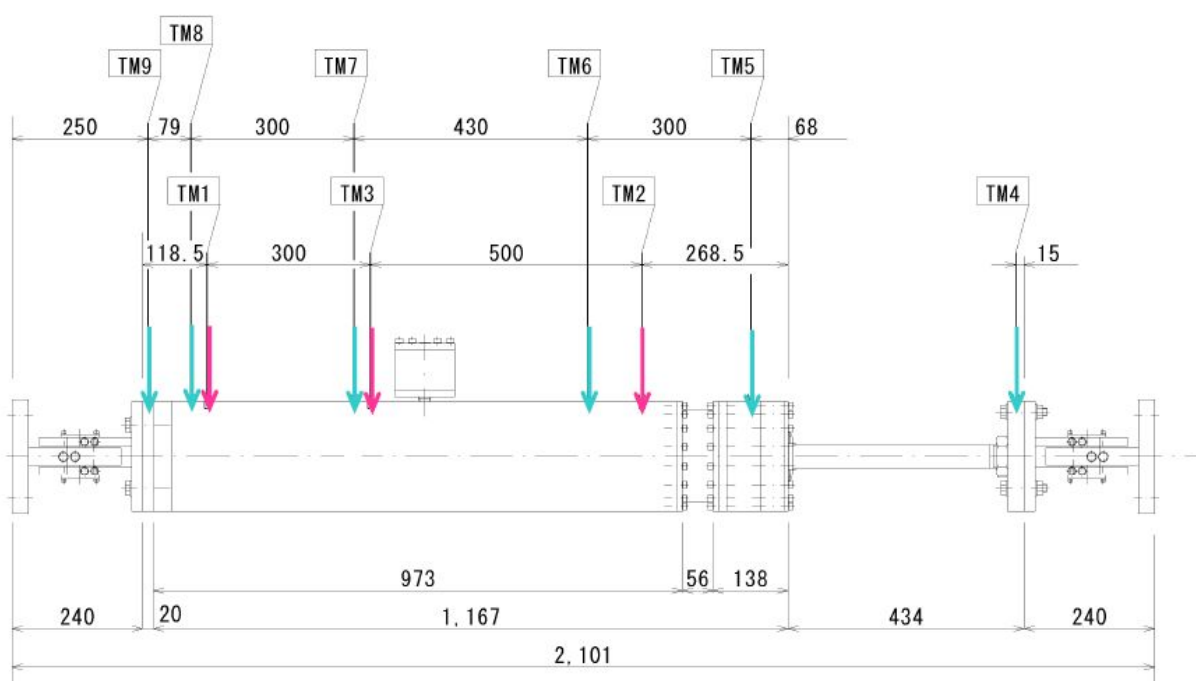


图 1.3.9-11 RDT16 試驗体熱電対位置図

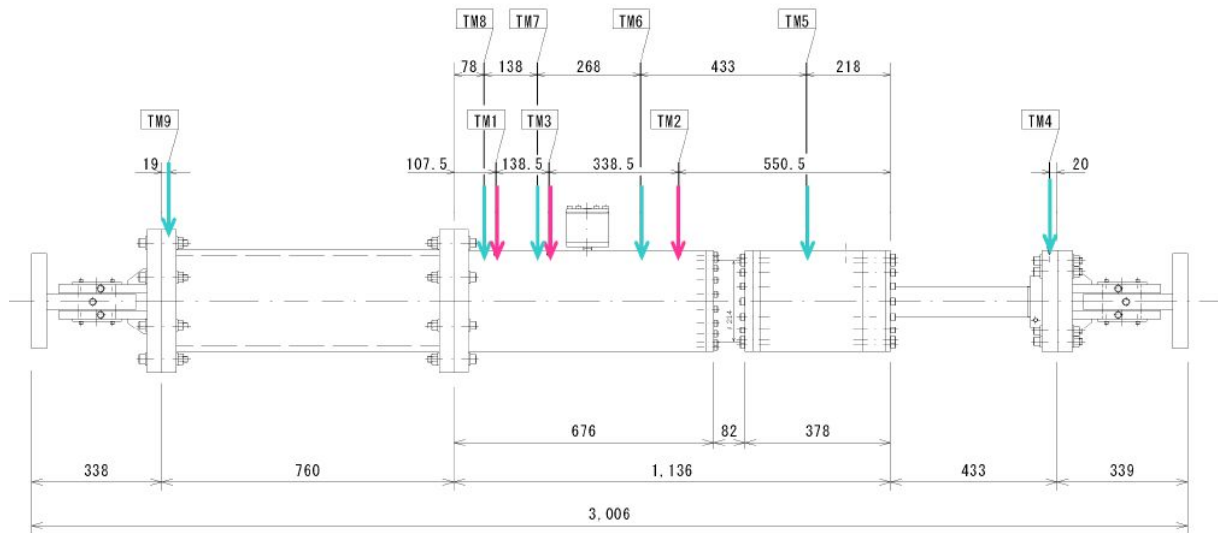


図 1.3.9-12 RDT30 試験体熱電対位置図

(6) 実験方法および実験ケース

1) 基本性能試験

多数回高速繰り返し実験の各水準の直前および直後に実施した。試験条件を表 1.3.9-6 に示す。入力波形は図 1.3.9-13 に示すように前後のテーパ波を含めて 5 サイクルの正弦波とした。試験は環境温度下で実施した。変位振幅は、試験体ストローク量 (=DH1) とした。試験結果とし得られた抵抗力は温度補正により 20℃に換算して評価した。温度補正係数を試験体毎に図 1.3.9-14~図 1.3.9-16 に示す。

表1.3.9-6 基本性能試験の条件

試験名称	加振波形	振動数 f (Hz)	周期 (sec)	振幅 r (mm)	最大速度 V (mm/s)
基本性能試験	正弦波	0.5	2.0	63.7	200

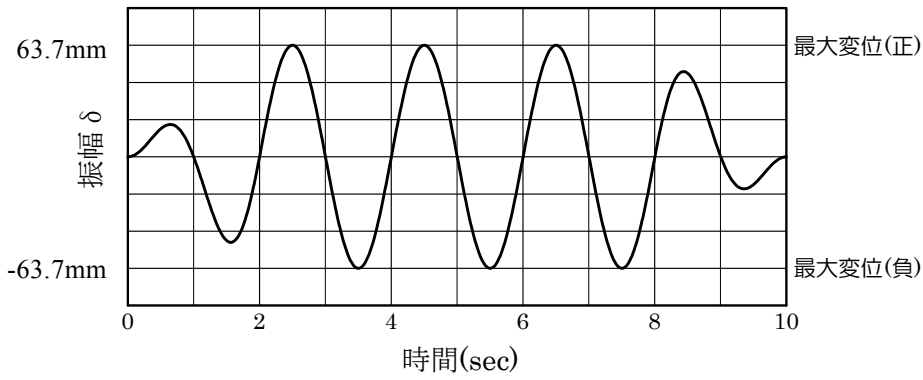


図1.3.9-13 基本性能試験入力波形

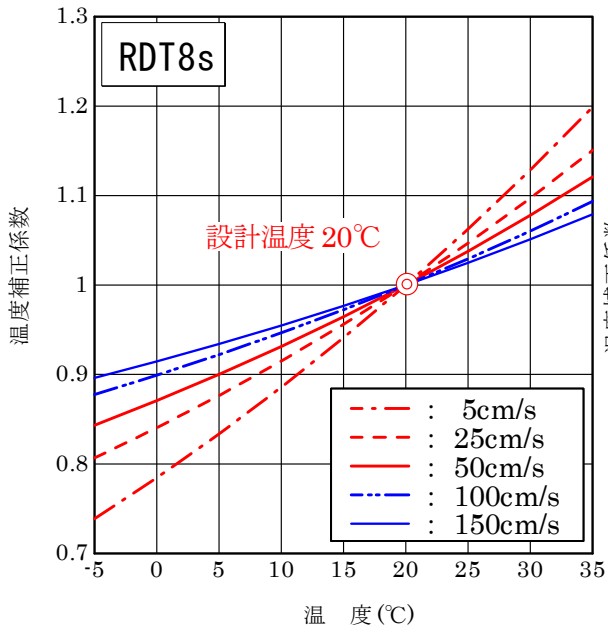


図 1.3.9-14 温度補正係数 (RDT8 試験体)

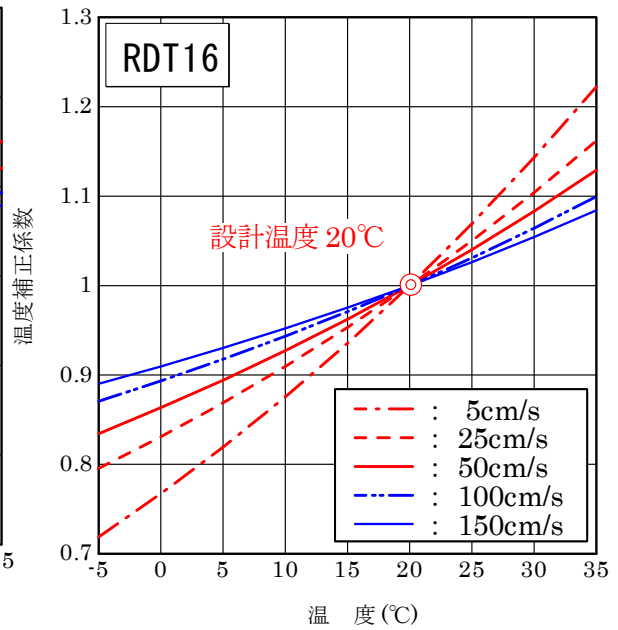


図 1.3.9-15 温度補正係数 (RDT16 試験体)

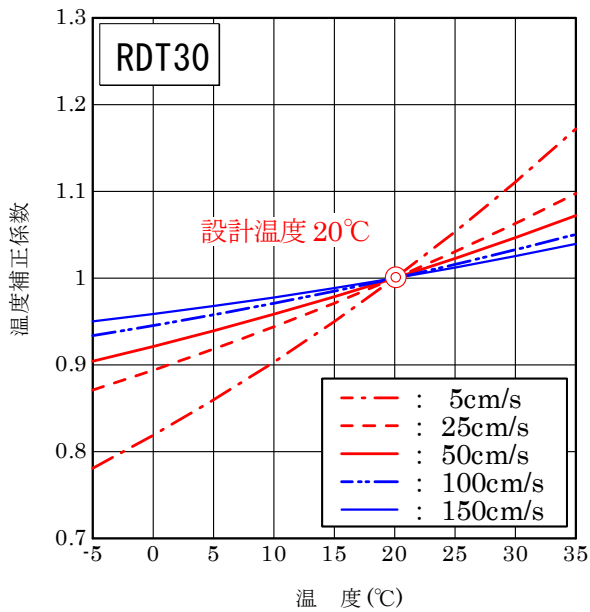


図 1.3.9-16 温度補正係数 (RDT30 試験体)

2) 多数回高速繰り返し実験

3 試験体とも同一条件の高速繰り返し実験を行った。1 加振（以下、1 セット）を想定される長周期地震動による応答 1 回分を上回る変位履歴と位置づけ、第Ⅱ部における試験方法の提案に関する記述を参考にして、1 セットの累積変形量が 50m となるまで加振を継続した。加振変位振幅を実験パラメータとし、3 水準設定した。加振変位波形は正弦波、加振周期は 4 秒とし、制御信号をアクチュエータのストローク量（すなわち全体変形（=DH6））として与えた。同一条件の加振を 3 セットずつ行った。セット間には 10 分のインターバルを設けた。実験は環境温度下で実施した。実験条件を表 1.3.9-7 に示す。

波形は図 1.3.9-17 に示すように連続の正弦波とし、一連の加振の前後にそれぞれ 1 サイクルテーパ波を入力した。

次の水準の実験に移行する場合には、20 時間程度以上実験棟内に放置し、試験体内部の粘性体温度が室温程度に低下したことを確認した後に実施した。

表1.3.9-7 多数回高速繰り返し実験条件

水準	変位振幅 (±mm)	周期 (sec)	振動数 (Hz)	最大速度 (cm/s)	繰り返し数 (回)	継続時間 (sec)	セット数 (回)	累積変位 (m)
0 標準	200	4	0.25	31.4	63	252	3	50.4
1 大変位	300	4	0.25	47.1	42	168	3	50.4
2 小変位	100	4	0.25	15.7	125	500	3	50.0

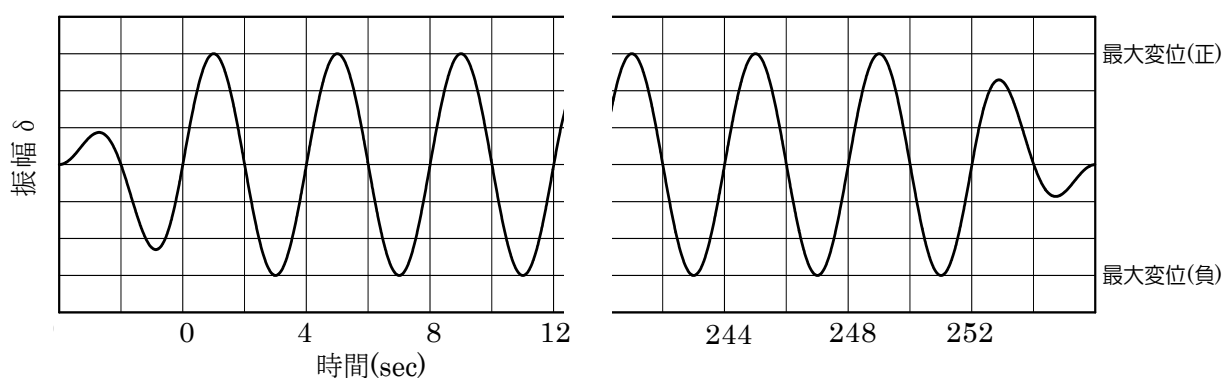


図1.3.9-17 多数回高速繰り返し実験入力波形（時間軸は水準0の場合を表示）

1.3.9.2 実験結果

(1) 製品試験

調査対象の試験体が、免震材料認定に適合するものであることを確認するために製品試験を実施した。

1) RDT8 試験体

寸法試験結果を表 1.3.9-8 に、水平特性試験結果を図 1.3.9-18 および表 1.3.9-9 に示す。RDT8 試験体は免震材料認定に適合するものであることが確認できた。

表 1.3.9-8 RDT8 試験体寸法試験結果

検査項目	基準値 (mm)	実測値 (mm)	許容値(mm)	合否
装置全長	1579.0	1580.0	±5	合格
本体長さ	752.0	752.1	±2.0	合格
限界ストローク(引張)	535.0	536.0	±5	合格
限界ストローク(圧縮)	535.0	537.0	±5	合格
フランジ厚 ねじ軸側	18.0	18.0	±0.8	合格
フランジ厚 減衰部側	25.0	25.0	±0.8	合格
外筒外直径	156.0	155.8	±1.2	合格
外筒内直径	113.00	113.02	±0.1	合格
内筒外直径	108.00	107.99	±0.1	合格
有効長さ	525.0	525.0	±0.5	合格
せん断隙間	2.50	2.52	±0.3	合格

表 1.3.9-9 RDT8 試験体水平特性試験結果

加振 パラメータ	振動数	速度	振幅	基準値 ^{※1}	実験結果						判定値 (Pn'/Pn)	合否
					減衰力	温度	温度 補正係数	繰り返し 依存係数	温度 補正後	繰り返し 補正後 ^{※2}		
					Pn	F	T	β	α'	減衰力		
Hz	cm/s	mm	KN	kN	°C	-	-	kN	kN			
NO.1	0.5	25.0	79.5	43.9	47.4	23.1	1.03	0.92	48.8	45.1	1.03	合格
NO.2	0.5	50.0	159.2	57.2	54.7	22.9	1.02	0.84	55.7	56.4	0.99	合格
NO.3	0.5	100.0	318.3	71.5	56.5	23.7	1.02	0.72	57.8	68.2	0.95	合格

※1 $P_n = 1.16 (0.85 \cdot Q_v + 2.2)$ ここに、 Q_v :粘性抵抗力

※2 $P_n' = P_n(\text{温度補正後}) \times (0.85 / \alpha')$

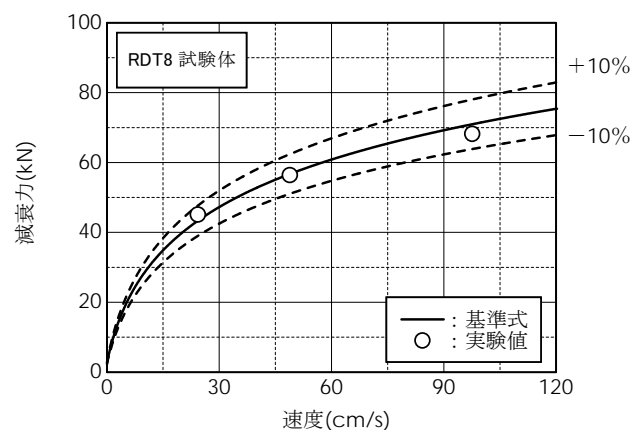


図 1.3.9-18 RDT8 試験体水平特性試験結果

2) RDT16 試験体

寸法試験結果を表 1.3.9-10 に、水平特性試験結果を図 1.3.9-19 および表 1.3.9-11 に示す。RDT16 試験体は免震材料認定に適合するものであることが確認できた。

表 1.3.9-10 RDT16 試験体寸法試験結果

検査項目	基準値 (mm)	実測値 (mm)	許容値(mm)	合否
装置全長	1756.0	1759.0	±5	合格
増幅部長さ	138.0	138.1	±1.2	合格
伝達部長さ	56.0	56.0	±0.8	合格
減衰部長さ	973.0	973.1	±2.0	合格
限界ストローク(引張)	535.0	536.0	±5	合格
限界ストローク(圧縮)	530.0	525.0	±5	合格
フランジ厚 ねじ軸側	30.0	30.0	±0.8	合格
フランジ厚 減衰部側	34.0	34.0	±0.8	合格
外筒外直径	202.0	202.2	±1.2	合格
外筒内直径	154.00	154.02	±0.1	合格
内筒外直径	148.00	148.02	±0.1	合格
有効長さ	815.0	815.0	±0.5	合格
せん断隙間	3.00	3.00	±0.3	合格

表 1.3.9-11 RDT16 試験体水平特性試験結果

加振 パラメータ	振動数	速度	振幅	基準値 ^{※1}	実験結果						判定値 (Pn'/Pn)	合否
					減衰力	温度	温度 補正係数	繰り返し 依存係数	温度 補正後	繰り返し 補正後 ^{※2}		
					Pn	F	T	β	α'	減衰力		
Hz	cm/s	mm	KN	kN	°C	-	-	kN	kN			
NO.1	0.5	5.0	15.9	35.7	47.5	11.5	0.860	0.99	41.2	35.4	1.00	合格
NO.2	0.5	10.0	31.8	53.7	71.9	11.6	0.878	0.98	63.5	55.1	1.03	合格
NO.3	0.5	20.0	63.7	76.7	99.0	12.0	0.901	0.95	89.5	80.1	1.04	合格

※1 $P_n = 1.03 (0.85 \cdot Q_v + 2.7)$ ここに、 Q_v :粘性抵抗力

※2 $P_n' = P_n(\text{温度補正後}) \times (0.85 / \alpha')$

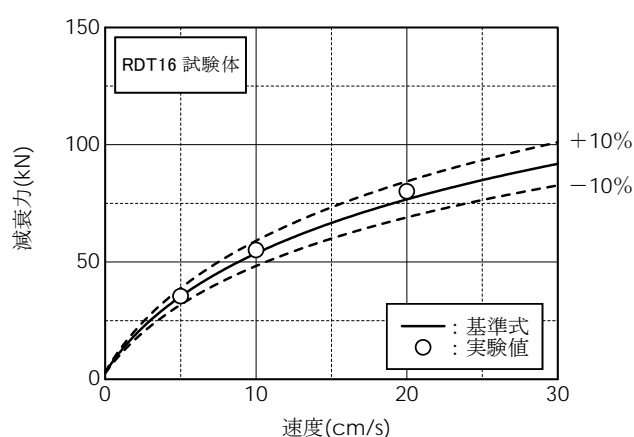


図 1.3.9-19 RDT16 試験体水平特性試験結果

3) RDT30 試験体

寸法試験結果を表 1.3.9-12 に、水平特性試験結果を図 1.3.9-20 および表 1.3.9-13 に示す。RDT30 試験体は免震材料認定に適合するものであることが確認できた。

表 1.3.9-12 RDT30 試験体寸法試験結果

検査項目	基準値 (mm)	実測値 (mm)	許容値(mm)	可否
装置全長	2666.0	2668.0	±5	合格
増幅部長さ	378.0	378.0	±1.2	合格
伝達部長さ	82.0	82.0	±0.8	合格
減衰部長さ	676.0	676.1	±2.0	合格
限界ストローク(引張)	780.0	783.0	±5	合格
限界ストローク(圧縮)	780.0	776.0	±5	合格
フランジ厚 ねじ軸側	41.0	41.0	±0.8	合格
フランジ厚 減衰部側	38.0	38.0	±0.8	合格
外筒外直径	267.0	267.2	±1.2	合格
外筒内直径	201.00	201.01	±0.1	合格
内筒外直径	195.00	194.99	±0.1	合格
有効長さ	490.0	490.1	±0.5	合格
せん断隙間	3.00	3.01	±0.3	合格

表 1.3.9-13 RDT30 試験体水平特性試験結果

加振 パラメータ	振動数	速度	振幅	基準値 ^{※1}	実験結果						判定値 (Pn'/Pn)	可否
					減衰力	温度	温度 補正係数	繰り返し 依存係数	温度 補正後	繰り返し 補正後 ^{※2}		
					Pn	F	T	β	α'	減衰力		
Hz	cm/s	mm	KN	kN	°C	-	-	kN	kN			
NO.1	0.5	5.0	15.9	130	152.7	10.9	0.906	0.98	139.2	120.7	0.93	合格
NO.2	0.5	10.0	31.8	167	193.1	11.2	0.925	0.94	179.3	162.1	0.97	合格
NO.3	0.5	20.0	63.7	203	222.4	11.8	0.948	0.88	211.3	204.1	1.01	合格

※1 $P_n = 1.06 (0.85 \cdot Q_v + 8.1)$ ここに、 Q_v :粘性抵抗力

※2 $P_n' = P_n(\text{温度補正後}) \times (0.85 / \alpha')$

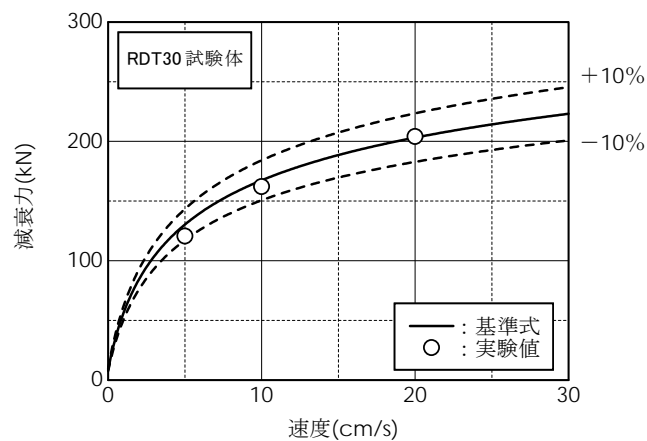


図 1.3.9-20 RDT30 試験体水平特性試験結果

(2) 多数回高速繰り返し実験

1) RDT8 試験体

試験体取り付け状況を写真 1.3.9-1~2 に、当該試験体の実験履歴を表 1.3.9-14 に示す。

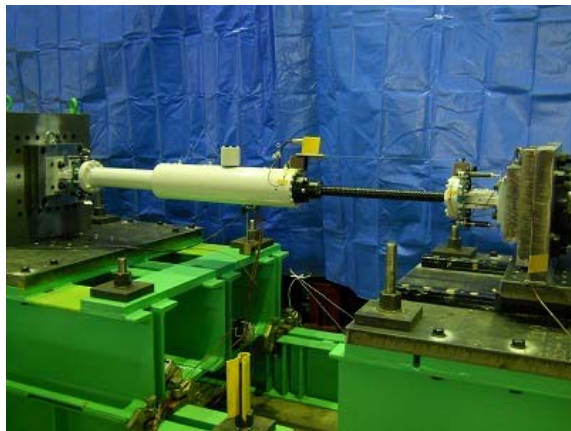


写真 1.3.9-1 RDT8 試験体取り付け状況

写真 1.3.9-2 RDT8 試験体取り付け状況 (部分)

表 1.3.9-14 RDT8 試験体実験履歴

実験内容	水準	実験内容	セット数	振動数	振幅	最大速度	繰返し回数
				Hz	mm	cm/s	回
2010/12/13 (月)	0	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
		多数回高速繰返し実験	1	0.25	200	31.4	63
			2				
			3				
		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5
2010/12/16 (木)	2	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
		多数回高速繰返し実験	1	0.25	100	15.7	125
			2				
			3				
		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5
2010/12/17 (金)	1	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
		多数回高速繰返し実験	1	0.25	300	47.1	42
			2				
			3				
		実施せず	繰返し後	0.5	63.7	20	5

以下、実験履歴順に実験結果を示す。

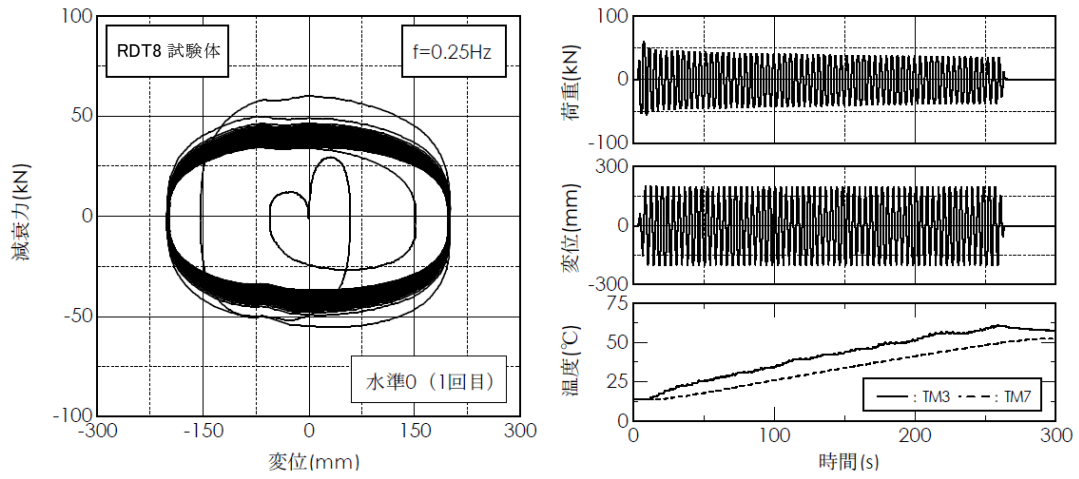
a) 水準 0

図 1.3.9-21 に水準 0 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。荷重の温度補正は実施していない。温度代表点は減衰部中央付近の計測点(TM3)と、その点と位置的に対応する外筒表面計測点(TM7)である。(a)図は 1 セット目、(b)図は 2 セット目、(c)図は 3 セット目の結果である。1 セット目では、変位 0 切片における荷重（以下、減衰力）の変動は、当初（所定変位振幅に至った直後の負側荷重、以下同じ）の 54kN から 35kN（正負平均、以下同じ）まで低下した。セットを重ねるごとに、セット内での減衰力低下量は小さくなるものの、減衰力の低下は継続し、3 セット目では 30kN（正負平均、以下同じ）となった。但し、3 セット目では若干ながら減衰力が上昇する傾向が見られた。粘性体温度(TM3)は当初の 13.6℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 103℃に至った。端的には、減衰力と粘性体温度に相関があると考えられる結果が得られたと言える。

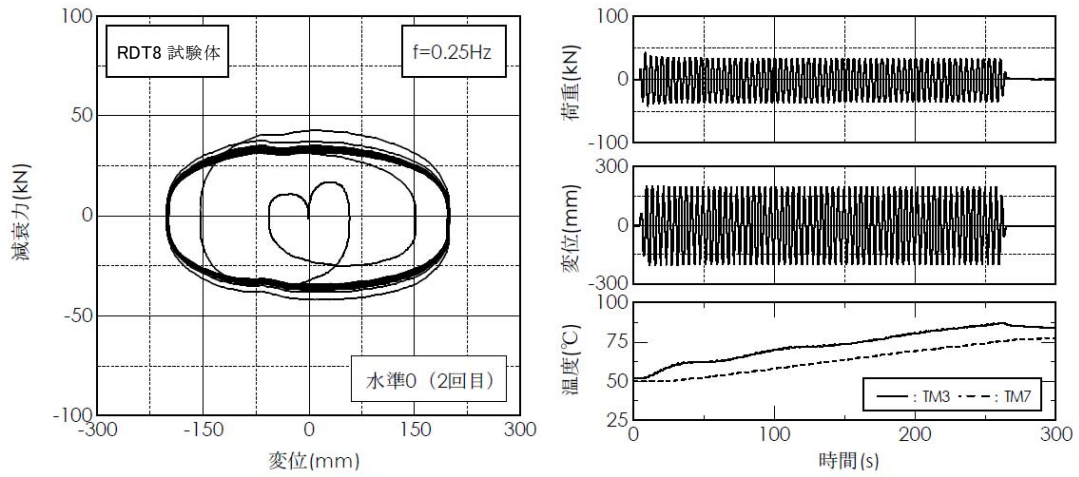
図 1.3.9-22~24 に、減衰力、各点温度、累積吸収エネルギーの変動を 1 セット目から 3 セット目まで連続して表記したものを示す。各セット間の 20 分間のインターバルによって、粘性体温度の低下と減衰力の再上昇が見られるが、数サイクルの繰り返りで前セットの変動曲線の延長線上に復帰している。インターバル間では、外筒端部の TM8 の温度上昇が顕著であり、粘性体から外筒、試験体端部に向けた熱伝導が生じていることが認められる。TM4、TM9 には温度上昇が見られずこの両計測点には熱伝導が及んでいない。粘性体温度相互間では、TM1 計測点温度が他の 2 点に比べやや低く、粘性体内に 5℃程度の温度分布が生じていることがわかる。

3 セット目における減衰力上昇は、後述する RDT30 試験体の結果から類推すれば、粘性体部分の圧力上昇が原因になっていると考えられる。

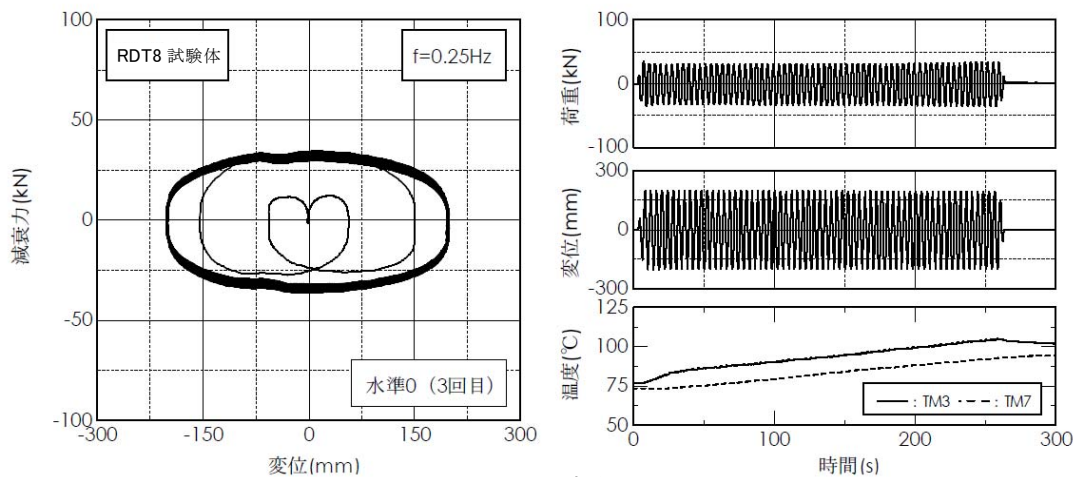
累積吸収エネルギーの履歴は、試験体各点の温度上昇と対応しており、周辺への熱伝導、熱伝達を含めた粘性体の温度上昇やそれに伴う減衰力の低下を累積吸収エネルギーにより簡便に表現できる可能性が認められる。



(a) 1セット目



(b) 2セット目



(c) 3セット目

図 1.3.9-21 RDT8 試験体水準 0 実験結果
(荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴)

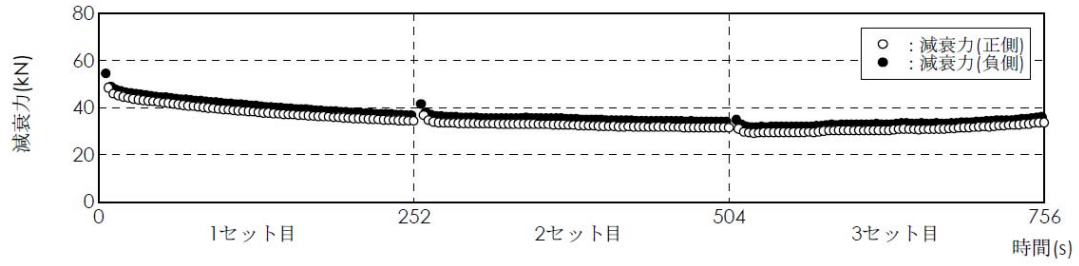


図 1.3.9-22 RDT8 試験体水準 0 実験 減衰力時刻歴

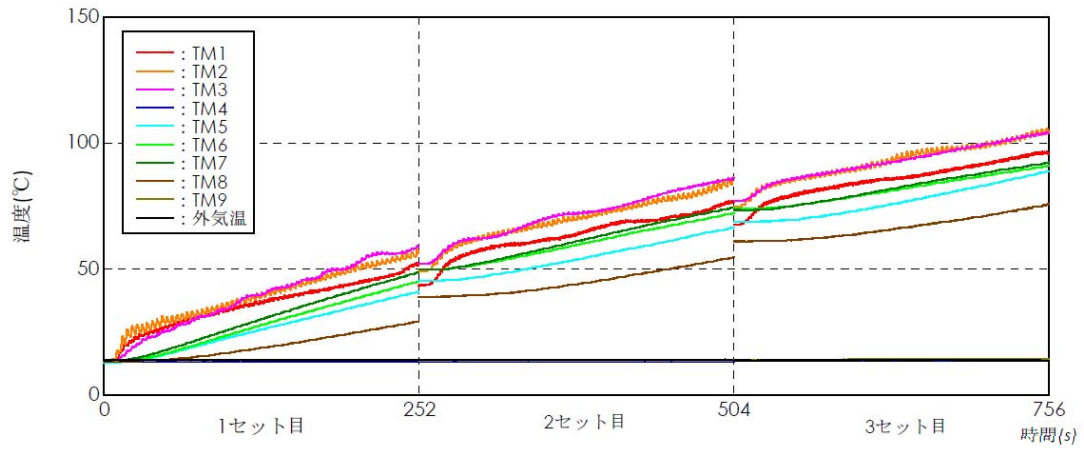


図 1.3.9-23 RDT8 試験体水準 0 実験 温度時刻歴

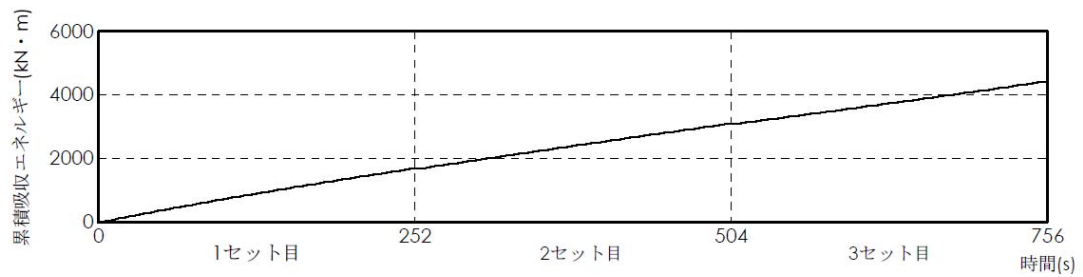


図 1.3.9-24 RDT8 試験体水準 0 実験 累積吸収エネルギー時刻歴

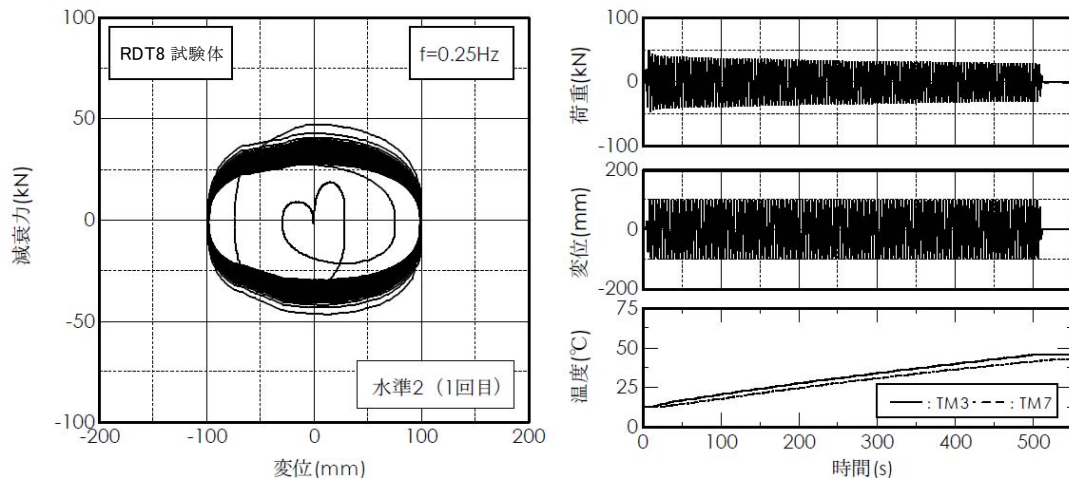
b) 水準 2

図 1.3.9-25 に水準 2 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。水準 0 と同様、荷重の温度補正は実施していない。温度代表点も水準 0 と同様 TM3 と TM7 を選んだ。減衰力は、1 セット目では当初の 40kN から 32kN まで低下し、セットを重ねるごとに減衰力の低下が継続し、3 セット目の終わりでは 21kN となった。水準 0 でみられた 3 セット目で減衰力が上昇する傾向は見られなかった。粘性体温度(TM3)は当初の 12.8℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 79℃に至った。

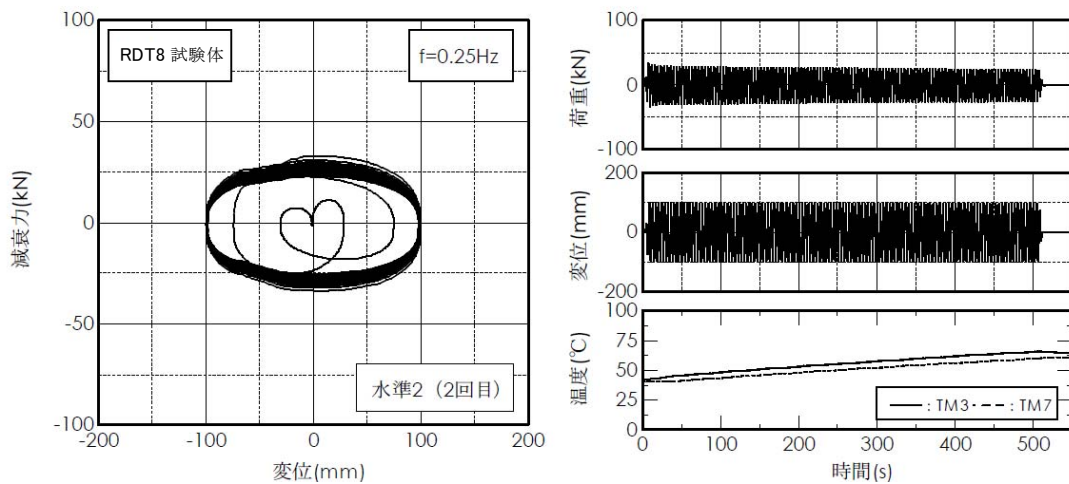
図 1.3.9-26~28 に、減衰力、各点温度、累積吸収エネルギーの変動を 1 セット目から 3 セット目まで連続して表記したものを示す。減衰力や温度変化に見られる、セット間のインターバル後数サイクルの繰り返して前セットの変動曲線の延長線上に復帰する傾向や、インターバル時に粘性体温度の低下するのに対し、TM8 計測点の温度が上昇する傾向も水準 0 で見られたものと同様である。

総じて、水準 0 に比べ変化の程度が緩やかな実験結果となっており、水準 0 の 3 セット目で見られた一種の使用限界発現の閾値を下回る加力条件であったと解釈できる。

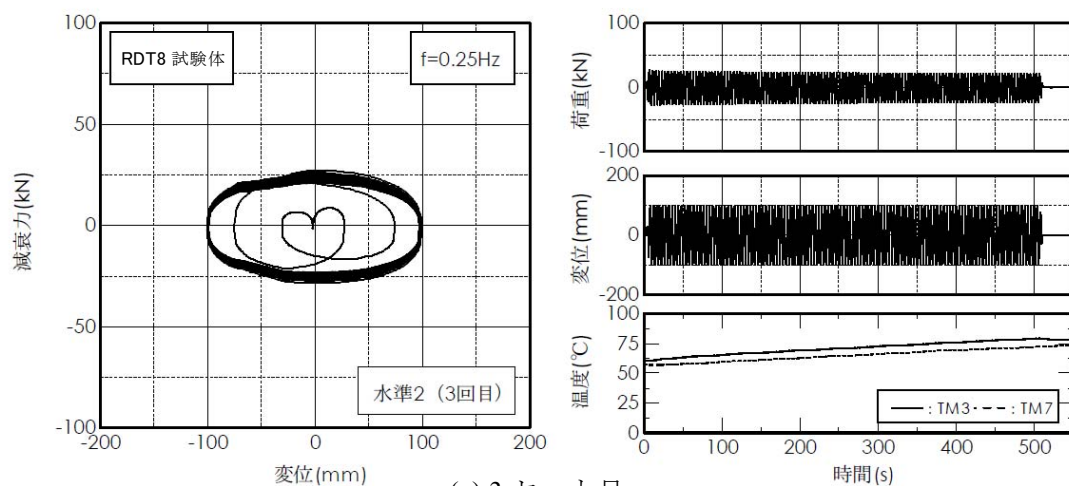
累積吸収エネルギーは、加力に伴い滑らかに上昇し、試験体各点の温度上昇や減衰力低下の傾向とよく対応する。



(a) 1セット目



(b) 2セット目



(c) 3セット目

図 1.3.9-25 RDT8 試験体水準 2 実験結果
(荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴)

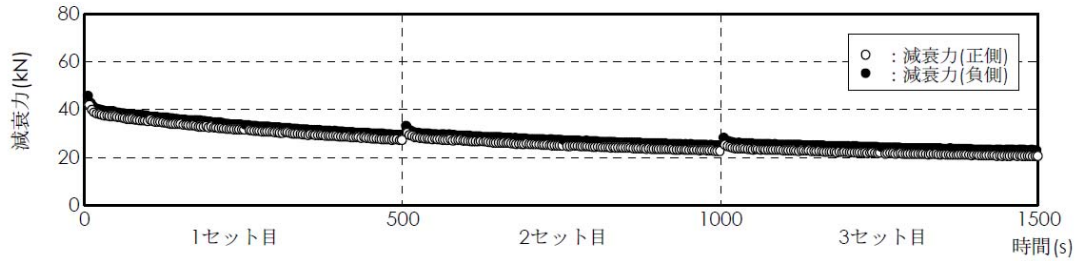


図 1.3.9-26 RDT8 試験体水準 2 実験 減衰力時刻歴

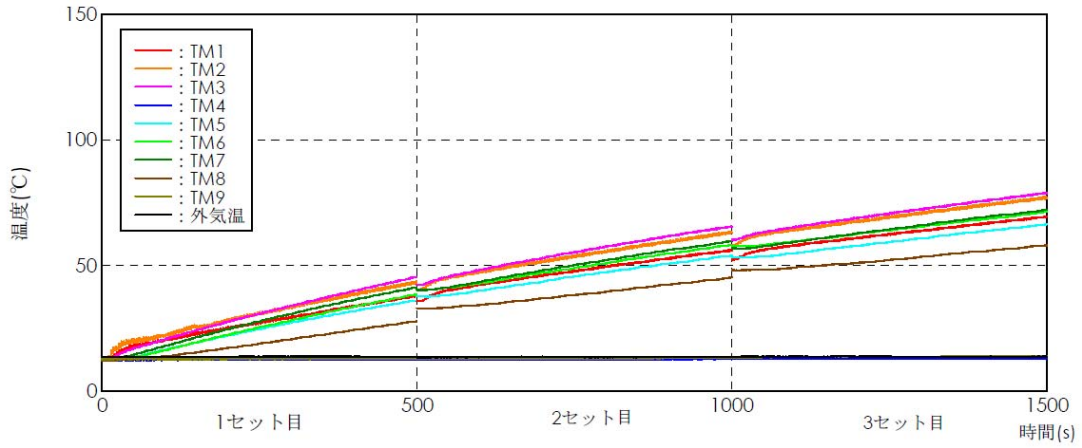


図 1.3.9-27 RDT8 試験体水準 2 実験 温度時刻歴

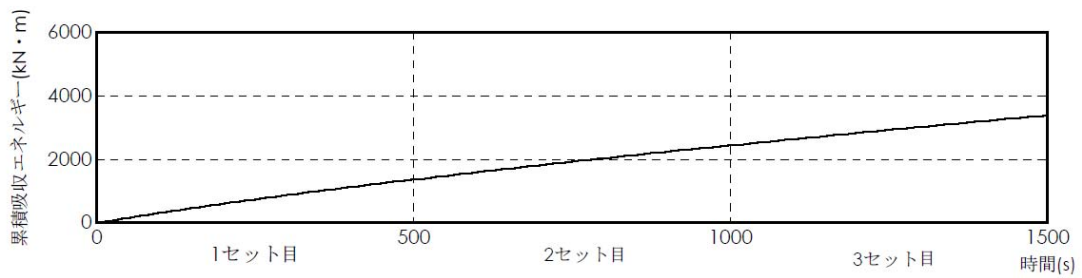


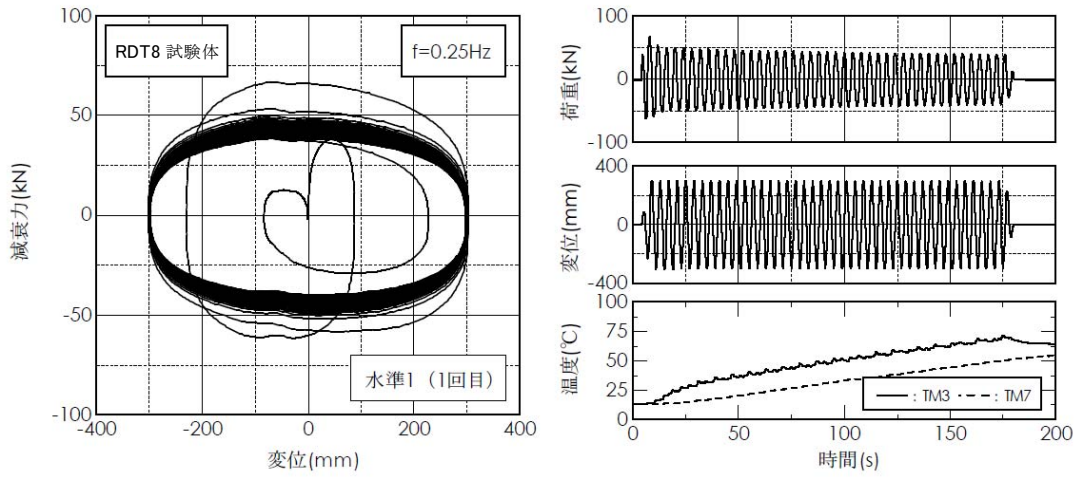
図 1.3.9-28 RDT8 試験体水準 2 実験 累積吸収エネルギー時刻歴

c) 水準 1

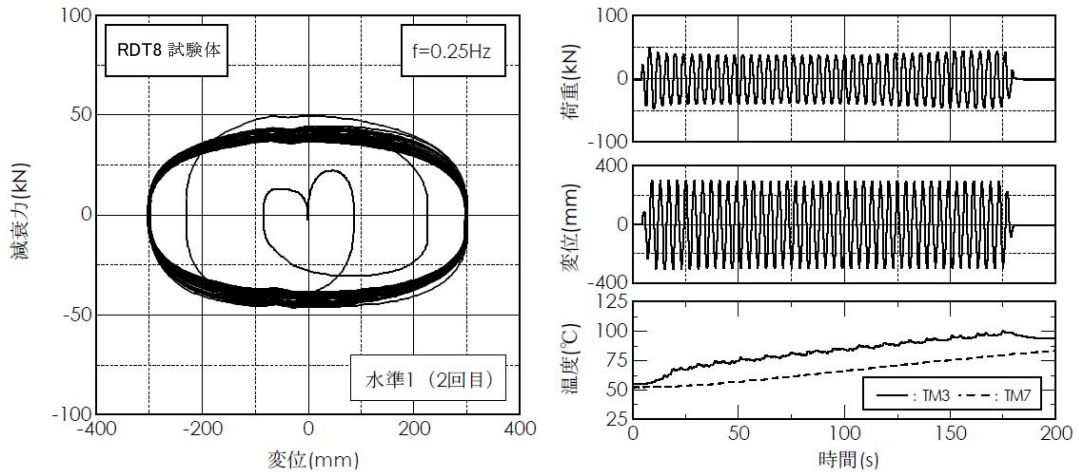
図 1.3.9-29 に水準 1 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。水準 0、2 と同様、荷重の温度補正は実施していない。温度代表点も水準 0、2 と同様 TM3 と TM7 である。この水準においては、3 セット目の序盤に粘性体温度センサー取付部のエポキシ樹脂によるシールが破損し内部粘性体が漏出したため実験を打ち切った。

減衰力は、1 セット目では、当初の 57kN から 39kN まで低下したが、2 セット目の序盤から殆ど低下が見られず、同セットの中盤から明らかな減衰力上昇が観察された。3 セット目では当初の数サイクルで低下した後、上昇に転じ 14 サイクル目に温度センサーシール部の破損に至った。図 1.3.9-29 の荷重変形関係には、破損後の 5 ループ程度の履歴も描かれており、粘性体の漏出により減衰力は急激に低下するが全く喪失するわけではないことがわかる。粘性体温度 (TM3) は当初の 13.3°C から 1 セット目で 72°C まで、2 セット目で 100°C まで上昇した。

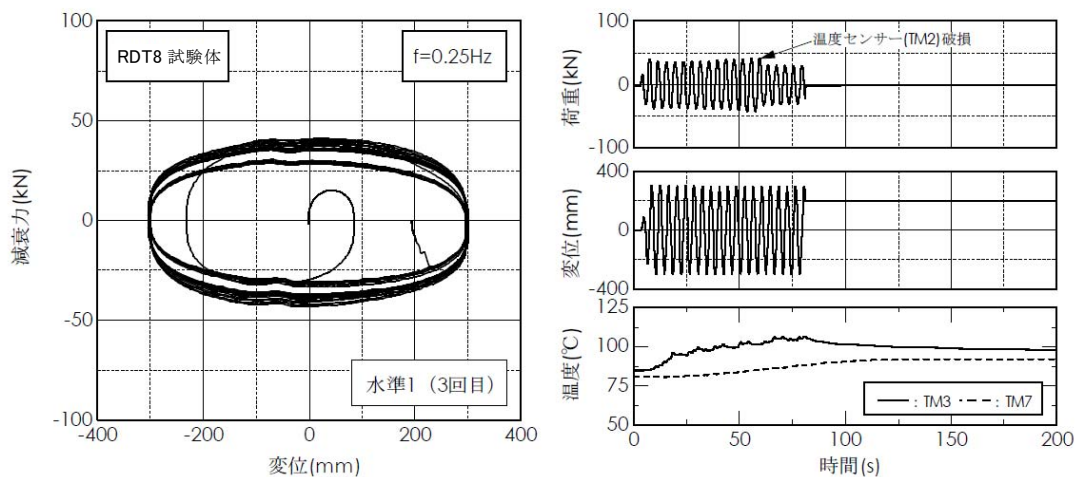
図 1.3.9-30~32 に、減衰力、各点温度、累積吸収エネルギーの変動を 1 セット目から 3 セット目まで連続して表記したものを示す。2 セット目、3 セット目の減衰力上昇が明瞭である。水準 0、2 に比べ、粘性体温度 (TM1~3) と外筒温度 (TM5~7) の温度差が大きい。これは、入力エネルギーの時間勾配が大きく、各セットの立ち上がり部において外筒表面まで熱伝導が及びにくい為と考えられる。インターバル時における TM8 の温度上昇も水準 0、2 に比べ大きい。



(a) 1セット目



(b) 2セット目



(c) 3セット目

図 1.3.9-29 RDT8 試験体水準 1 実験結果
(荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴)

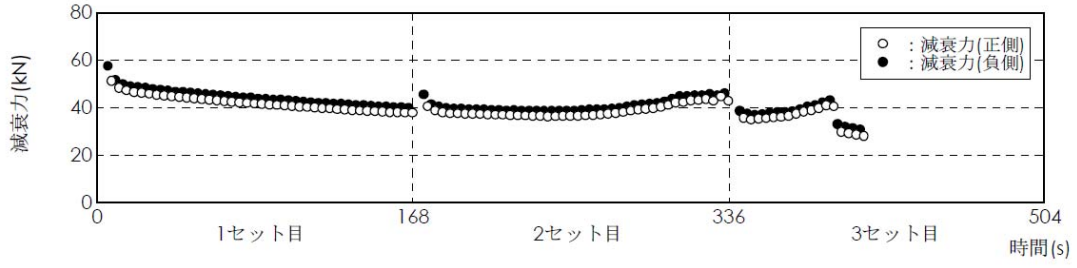


図 1.3.9-30 RDT8 試験体水準 1 実験 減衰力時刻歴

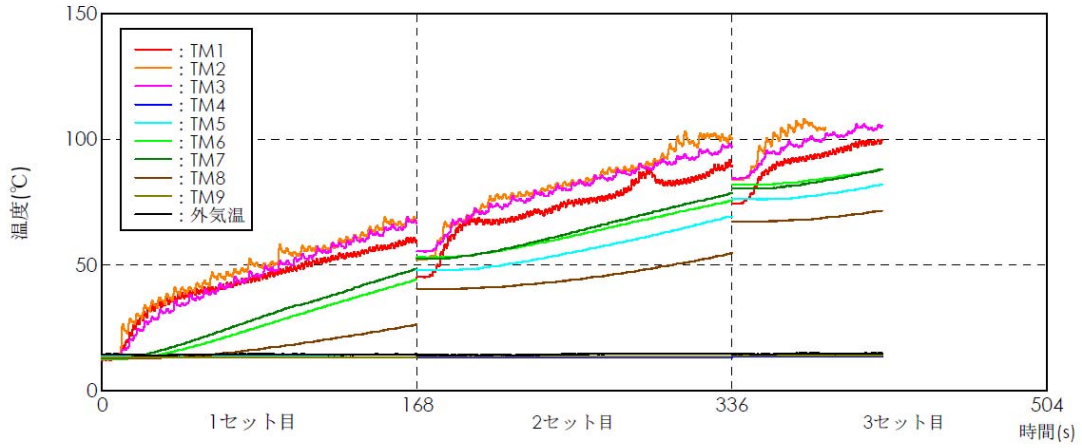


図 1.3.9-31 RDT8 試験体水準 1 実験 温度時刻歴

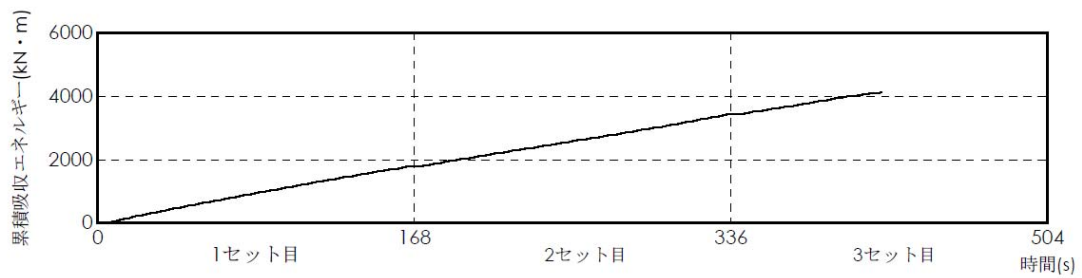


図 1.3.9-32 RDT8 試験体水準 1 実験 累積吸収エネルギー時刻歴

2) RDT16 試験体

試験体取り付け状況を写真 1.3.9-3~4 に、当該試験体の実験履歴を表 1.3.9-15 に示す。

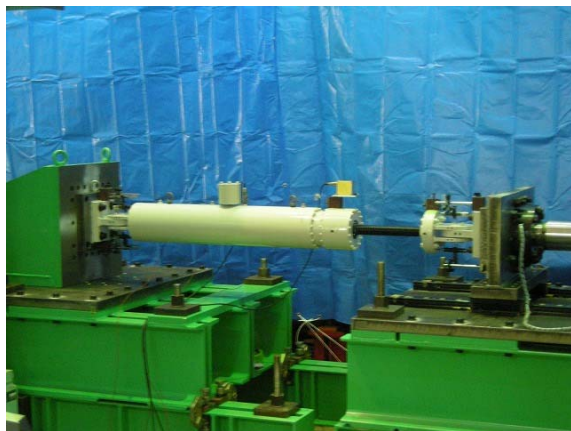


写真 1.3.9-3 RDT16 試験体取り付け状況

写真 1.3.9-4 RDT16 試験体取り付け状況(部分)

表 1.3.9-15 RDT16 試験体実験履歴

実験内容	水準	実験内容	セット数	振動数	振幅	最大速度	繰返し回数	
				Hz	mm	cm/s	回	
2010/12/14 (火)	10:09	0	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	10:16		多数回高速繰返し実験	1	0.25	200	31.4	63
	10:31			2				
	10:48			3				
	11:03		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5
2010/12/15 (水)	14:09	1	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	14:21		多数回高速繰返し実験	1	0.25	300	47.1	42
	14:39			2				
	14:56			3				
	15:10		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5
2010/12/16 (木)	17:05	2	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	17:15		多数回高速繰返し実験	1	0.25	100	15.7	125
	17:34			2				
	17:55			3				
	18:15		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5

以下、実験履歴順に実験結果を示す。

a) 水準 0

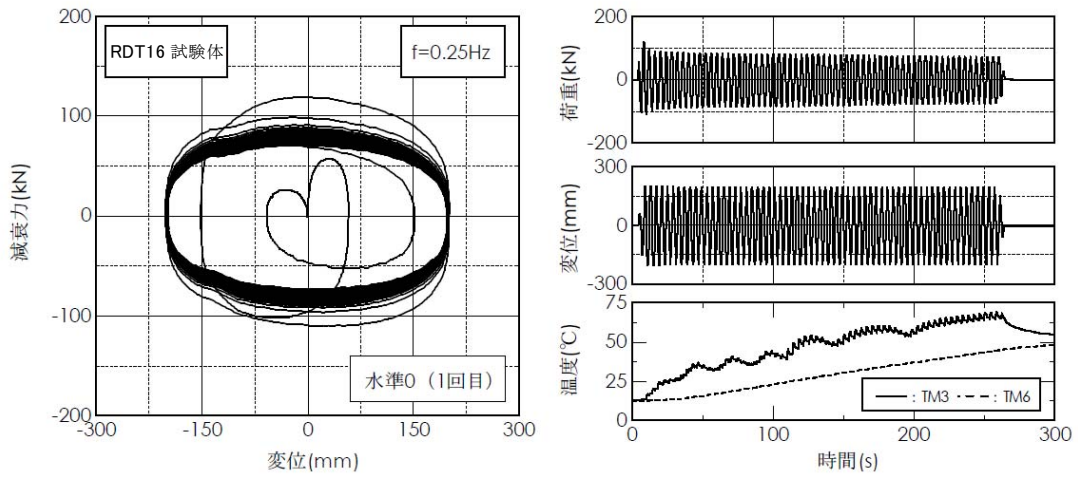
図 1.3.9-33 に水準 0 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。荷重の温度補正は実施していない。温度代表点として、粘性体、外筒表面それぞれについて最高温度を記録した TM3 と TM6 を選択した。

減衰力は、1 セット目では、当初の 109kN から 72kN まで低下し、セットを重ねるごとに減衰力の低下が継続し、3 セット目の終わりでは 54kN となった。セットを重ねるごとに、セット内での減衰力低下量は小さくなったが、RDT8 試験体でみられた 3 セット目で減衰力が上昇する傾向は見られなかった。粘性体温度(TM3)は当初の 12.9℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 101℃に至った。

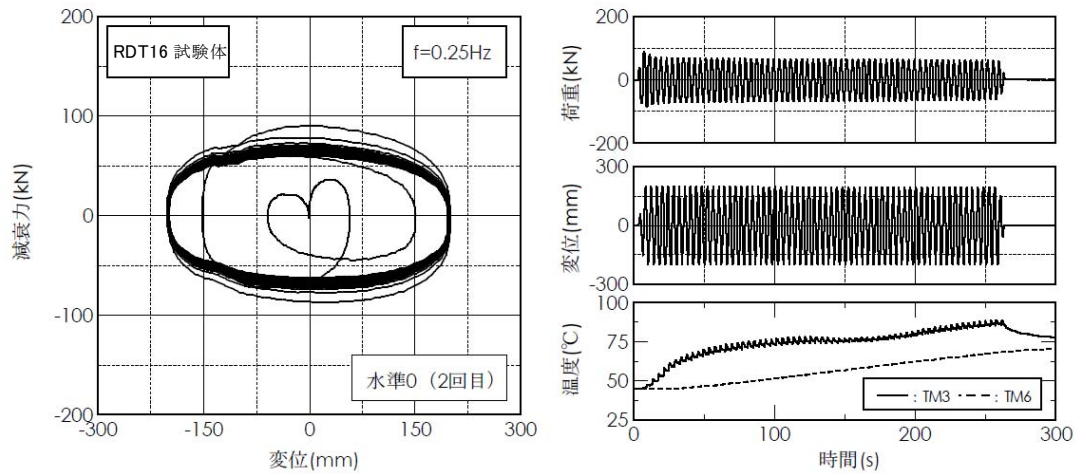
図 1.3.9-34~37 に、減衰力、各点温度、粘性体圧力、累積吸収エネルギーの変動を 1 セット目から 3 セット目まで連続して表記したものを示す。セット間のインターバル後の数サイクルを除いて、減衰力が連続的に低下し粘性体および外筒温度が連続的に上昇する傾向が明瞭である。粘性体内の温度分布については、この試験体においても TM1 が相対的に低い。インターバル後には速度増幅部外殻の TM5 計測点にも温度上昇が見られる。TM9 計測点は試験体の構成上 RDT8 試験体、RDT30 試験体に比べ相対的に粘性体充填部に近いが、加振中には TM5 計測点とともに温度上昇が見られない。粘性体最大圧力は振動的な増減を伴いながらセットを重ねるごとに上昇を続け 0.53MPa (5.2 気圧) に至った。この程度の圧力は減衰力上昇として観察される一種の使用限界発現の閾値を下回ると解釈できる。

大きな温度上昇が見られたものの、力学性状は RDT8 試験体に比べ安定しており、粘性体の熱容量、バッファ部分を含めた体積、周辺鉄部（外筒、内筒）の熱容量などの試験体の構造上、優れた繰り返し特性を発揮できる構成となっていたものと考えられる。

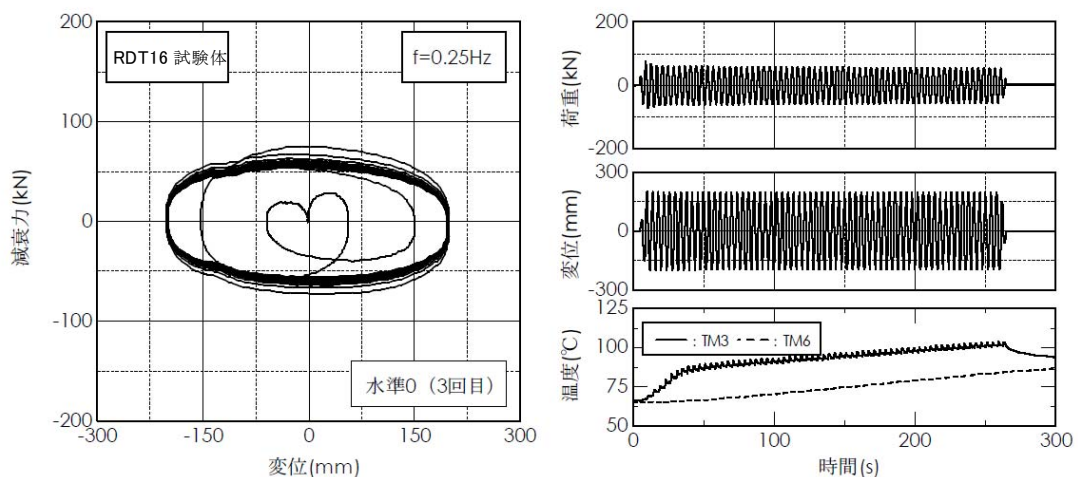
累積吸収エネルギーは、加力に伴い滑らかに上昇し、各セットの立ち上がり部を除き、試験体各点の温度上昇や減衰力低下の傾向とよく対応する。



(a) 1セット目



(b) 2セット目



(c) 3セット目

図 1.3.9-33 RDT16 試験体水準 0 実験結果
(荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴)

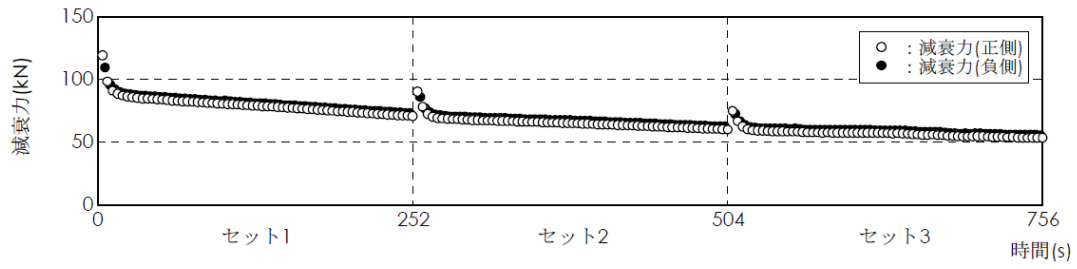


図 1.3.9-34 RDT16 試験体水準 0 試験 減衰力時刻歴

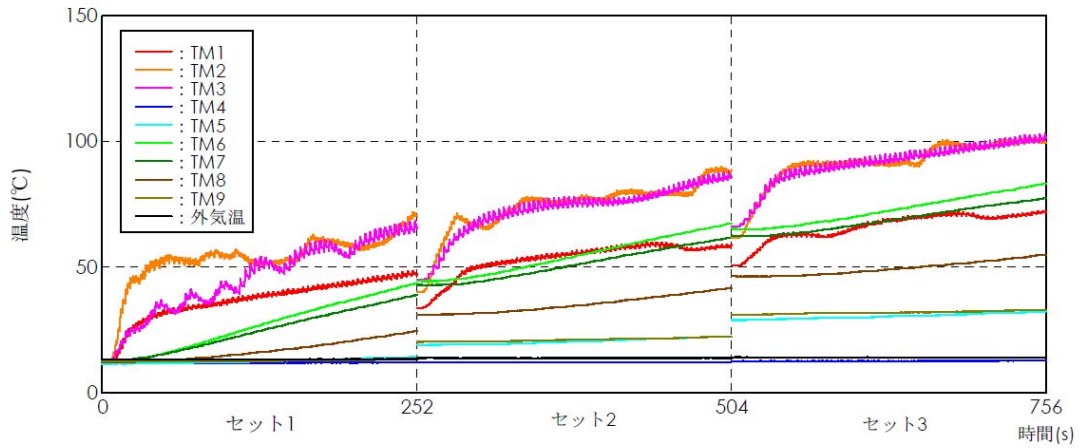


図 1.3.9-35 RDT16 試験体水準 0 試験 温度時刻歴

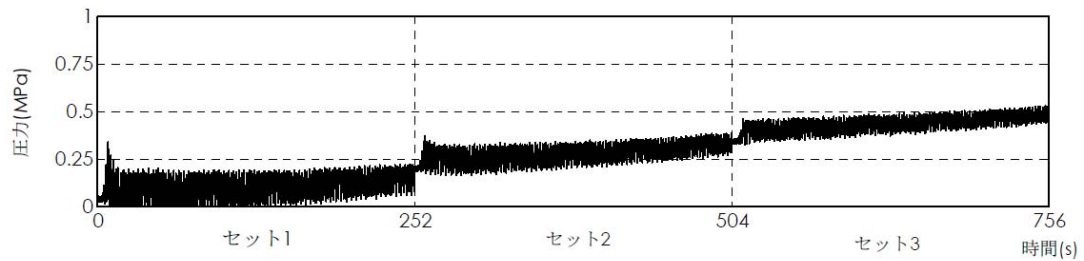


図 1.3.9-36 RDT16 試験体水準 0 試験 粘性体圧力時刻歴

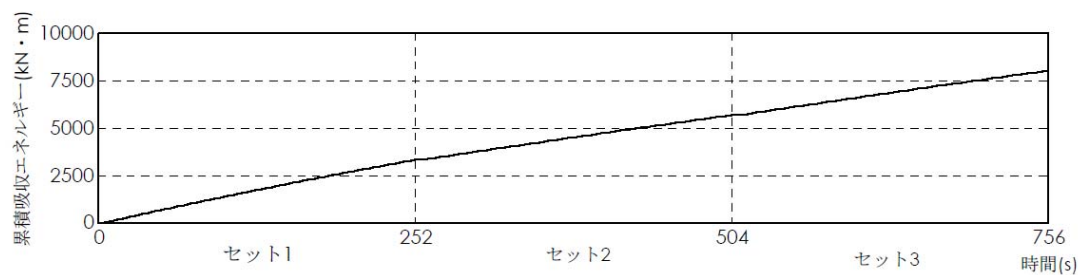


図 1.3.9-37 RDT16 試験体水準 0 試験 累積吸収エネルギー時刻歴

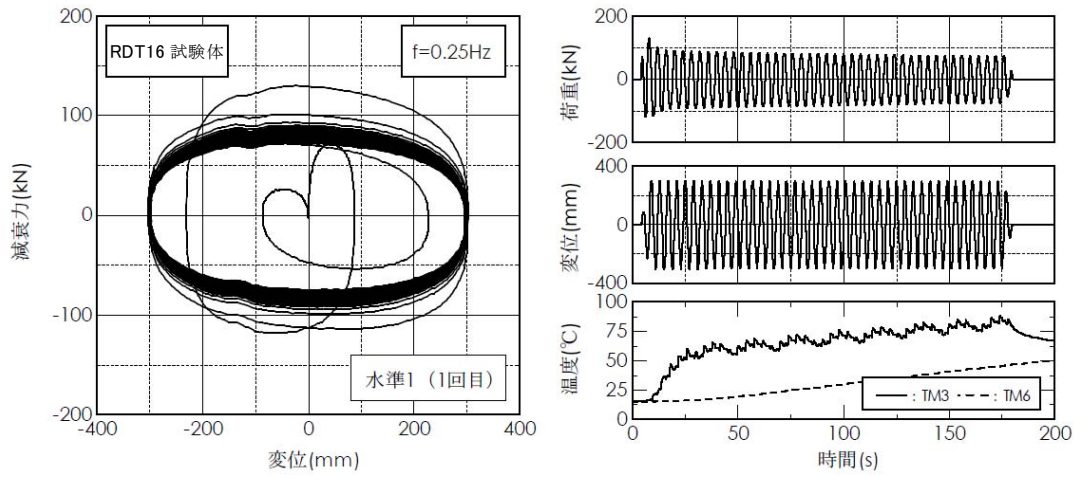
b) 水準 1

図 1.3.9-38 に水準 1 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。荷重の温度補正は実施していない。温度代表点として、水準 0 と同様、TM3 と TM6 を選択した。

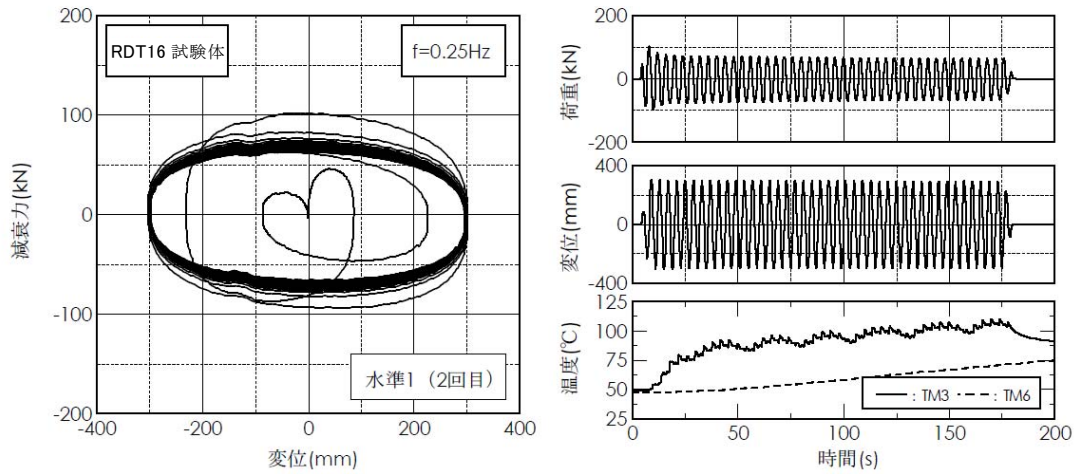
減衰力は、1 セット目では、当初の 113kN から 74kN 程度低下し、セットを重ねるごとに減衰力の低下が継続し、3 セット目の終わりでは 59kN となった。この水準でも減衰力が上昇する傾向は見られなかった。粘性体温度(TM3)は当初の 15.3℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 125℃に達した。

図 1.3.9-39~42 に、減衰力、各点温度、粘性体圧力、累積吸収エネルギーの変動を連続して表記したものを示す。水準 0 と同様、セット間のインターバル後の数サイクルを除いて、減衰力が連続的に低下し粘性体および外筒温度が連続的に上昇する傾向が明瞭に確認できる。粘性体温度は、TM3 が数サイクルないし 10 サイクル程度周期で増減する傾向をもつほか、TM1、TM2 においてもセット内で細かな増減が見られる。この原因は不明であるが、粘性体の温度分布が均一でなくかつ流動していることが可能性として考えられる。3 点の相対的な傾向では、水準 0 と同様 TM1 が相対的に低い。TM2、TM3 については RDT8 試験体と同様、水準 0 に比べ外筒表面温度(TM6、7)との開きが大きくなった。粘性体最大圧力は 0.72MPa (7.1 気圧)に至ったが、力学性状が安定していることから、減衰力上昇として観察される一種の使用限界発現の閾値としての圧力にはまだ余裕があるものと解釈できる。

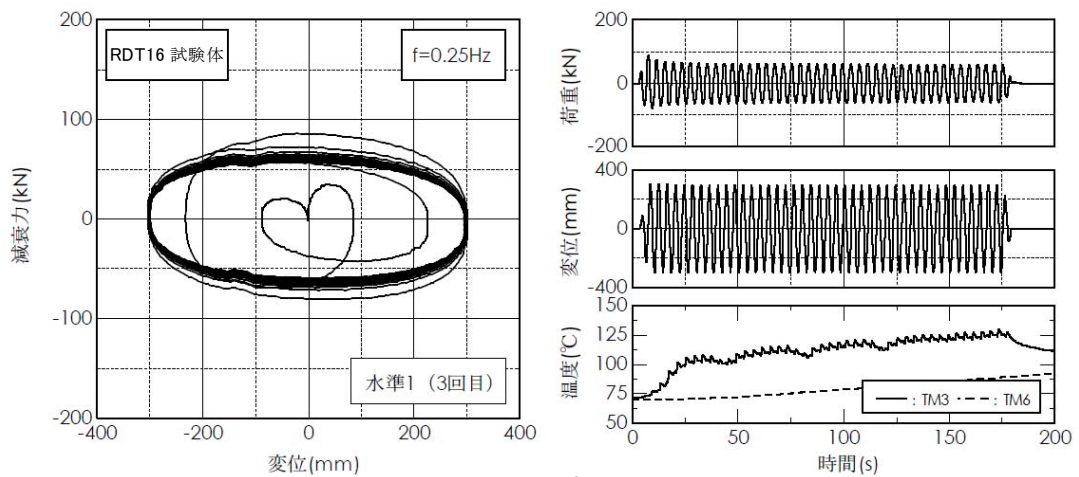
吸収エネルギーの時間勾配は、水準 0 に比べ 1.5 倍以上大きい。



(a) 1セット目



(b) 2セット目



(c) 3セット目

図 1.3.9-38 RDT16 試験体水準 1 実験結果
(荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴)

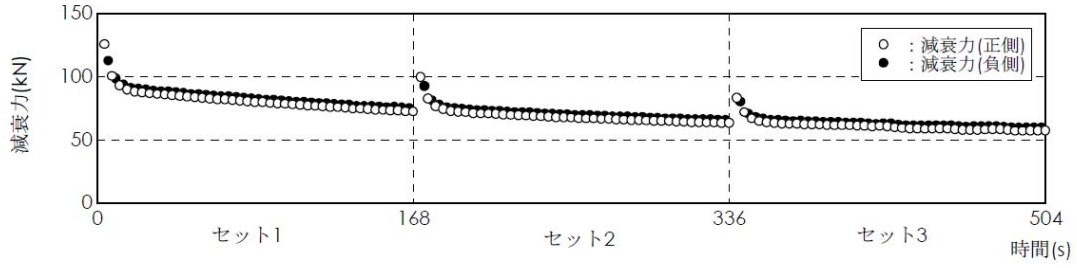


図 1.3.9-39 RDT16 試験体水準 1 試験 減衰力時刻歴

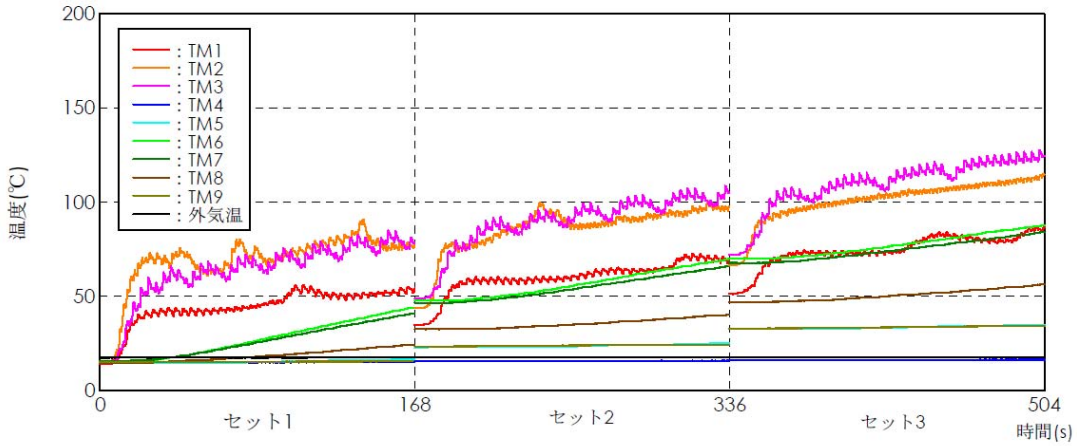


図 1.3.9-40 RDT16 試験体水準 1 試験 温度時刻歴

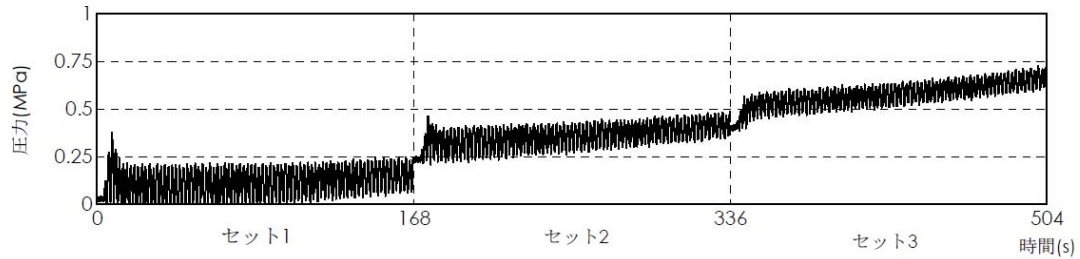


図 1.3.9-41 RDT16 試験体水準 1 試験 粘性体圧力時刻歴

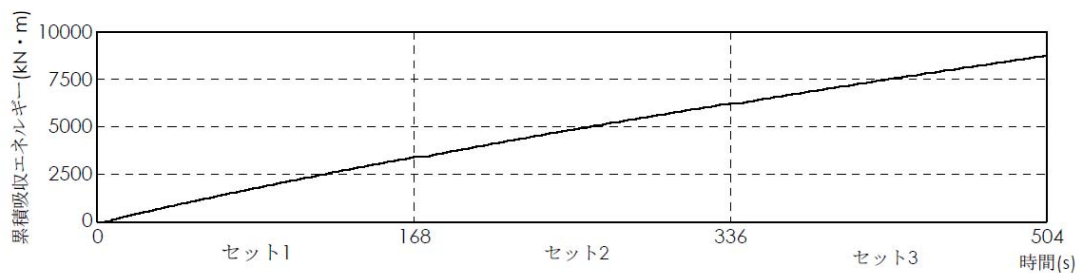


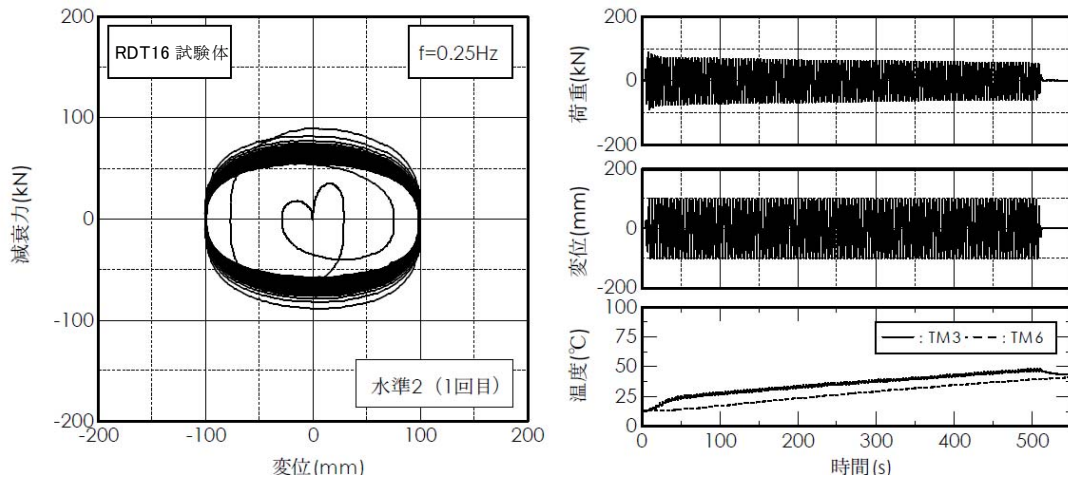
図 1.3.9-42 RDT16 試験体水準 1 試験 累積吸収エネルギー時刻歴

c) 水準 2

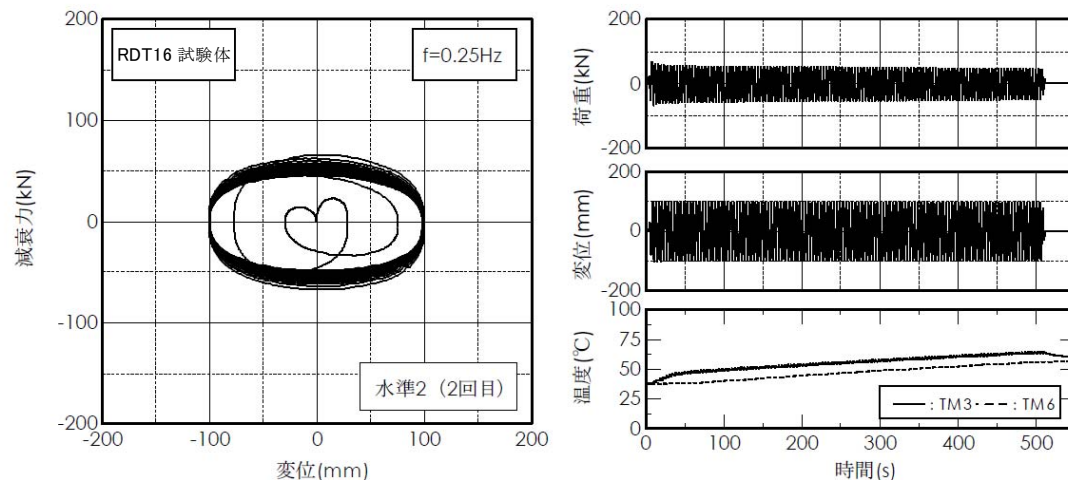
図 1.3.9-43 に水準 2 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。荷重の温度補正は実施していない。温度代表点として TM3 と TM6 を選択した。

減衰力は、1 セット目では、当初の 88kN から 56kN まで低下した。セットを重ねるごとに減衰力の低下が継続し、3 セット目の終わりでは 42kN となった。減衰力が上昇する傾向は見られなかった。粘性体温度(TM3)は当初の 13.5℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 76℃に達した。

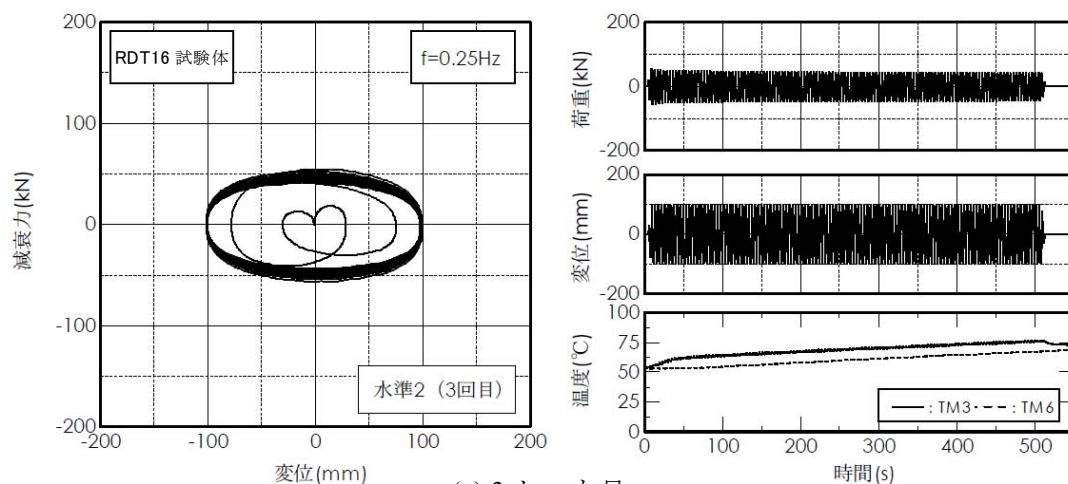
図 1.3.9-44~47 に、減衰力、各点温度、粘性体圧力、累積吸収エネルギーの変動を連続して表記したものを示す。水準 0、1 と同様、セット間のインターバル後の数サイクルを除いて、減衰力が連続的に低下し粘性体および外筒温度が連続的に上昇する傾向が確認できる。水準 0、1 に比べ粘性体温度(TM2、3)と外筒表面温度(TM6、7)の開きは小さかった。水準 1 で見られた粘性体温度がセット内で細かく増減する傾向は現れなかった。粘性体最大圧力は 0.36MPa (3.6 気圧) であった。吸収エネルギーの時間勾配は、水準 0 の 1/2 以下であった。



(a) 1セット目



(b) 2セット目



(c) 3セット目

図 1.3.9-43 RDT16 試験体水準 2 実験結果
(荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴)

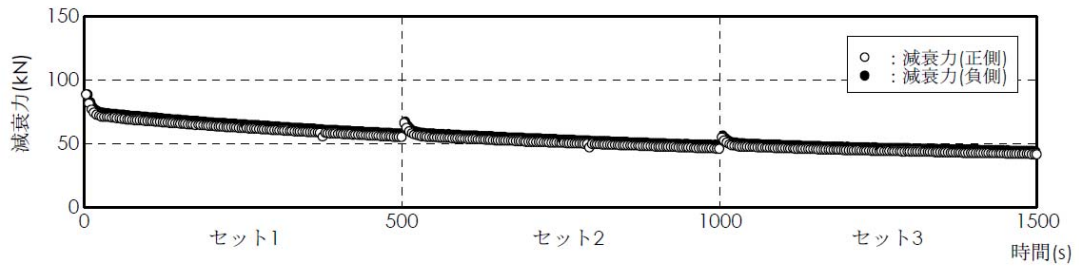


図 1.3.9-44 RDT16 試験体水準 2 試験 減衰力時刻歴

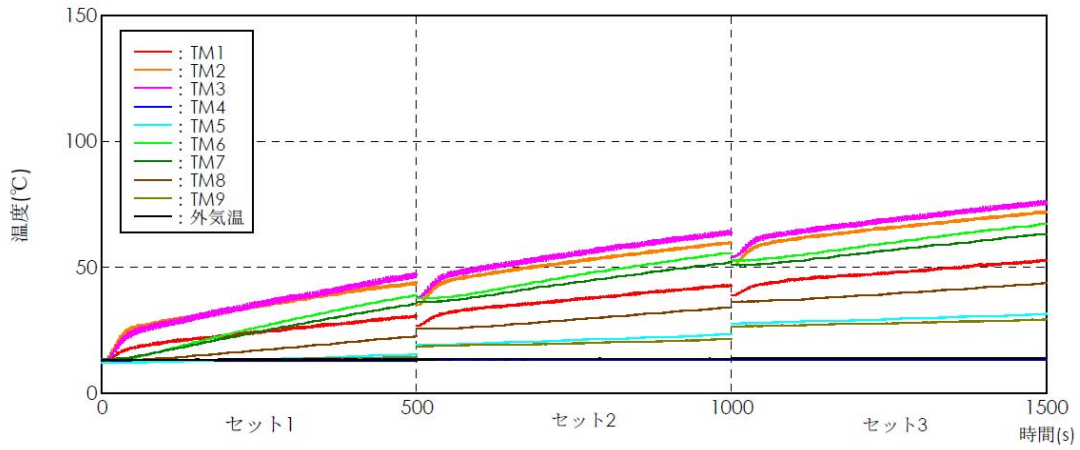


図 1.3.9-45 RDT16 試験体水準 2 試験 温度時刻歴

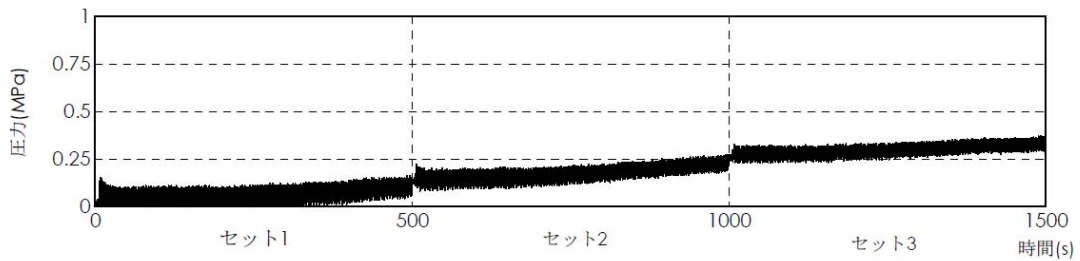


図 1.3.9-46 RDT16 試験体水準 2 試験 粘性体圧力時刻歴

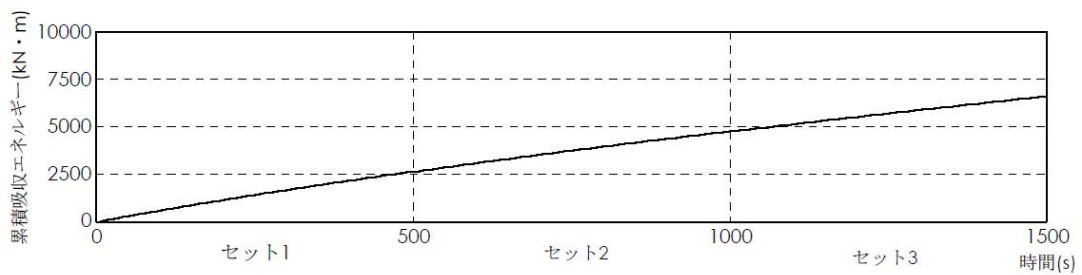


図 1.3.9-47 RDT16 試験体水準 2 試験 累積吸収エネルギー時刻歴

3) RDT30 試験体

試験体取り付け状況を写真 1.3.9-5~6 に、当該試験体の実験履歴を表 1.3.9-16 に示す。

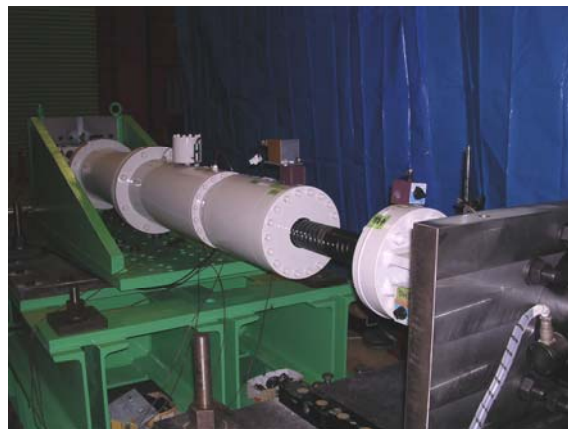


写真 1.3.9-5 RDT30 試験体取り付け状況

写真 1.3.9-6 RDT30 試験体取り付け状況(部分)

表 1.3.9-16 RDT30 試験体実験履歴

実験内容	水準	実験内容	セット数	振動数	振幅	最大速度	繰返し回数	
				Hz	mm	cm/s	回	
2010/12/13 (月)	10:19	0	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	10:27		多数回高速繰返し実験	1	0.25	200	31.4	63
	10:42			2				
	10:57			3				
	11:13		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5
2010/12/16 (木)	9:35	2	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	9:45		多数回高速繰返し実験	1	0.25	100	15.7	125
	10:05			2				
	10:25			3				
	10:45		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5
2010/12/17 (金)	9:59	1	基本性能試験	繰返し前	0.5	63.7	20	5
	10:11		多数回高速繰返し実験	1	0.25	300	47.1	42
	10:26			2				
	10:42			3				
	10:55		基本性能試験	繰返し後	0.5	63.7	20	5

以下、実験履歴順に実験結果を示す。

a) 水準 0

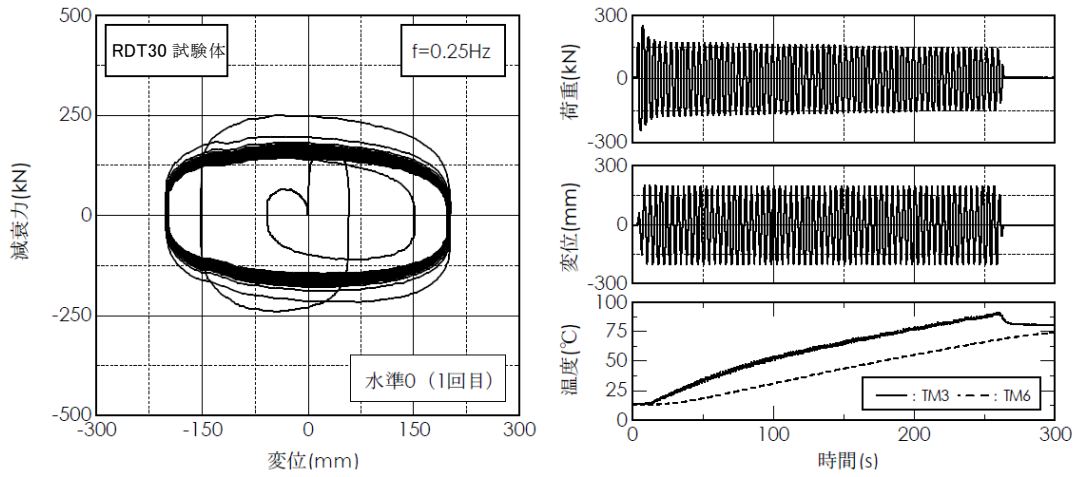
図 1.3.9-48 に水準 0 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。荷重の温度補正は実施していない。温度代表点として TM3 と TM6 を選択した。

減衰力は、1 セット目では、当初の 214kN 程度から 144kN まで低下し、セットを重ねるごとに減衰力の低下が継続し、3 セット目の中盤以降では 122kN となった。セットを重ねるごとに、セット内での減衰力低下量は小さくなり、3 セット目の後半ではほとんど低下が見られなくなった。荷重変形関係から判断する限り力学性状は安定していた。なお、荷重変形関係の形状を RDT8、RDT16 試験体と比較すると、最大、最小変位における減衰力のギャップ量が相対的に大きい（矩形に近い）形状を示した。これは、減衰力の基準値を求める設計式に定数項として表現されている値に相当し、粘性体粘度の違いによる減衰部材の性状が反映された結果と考えられる。粘性体温度(TM3)は当初の 13.6℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 153℃に至った。

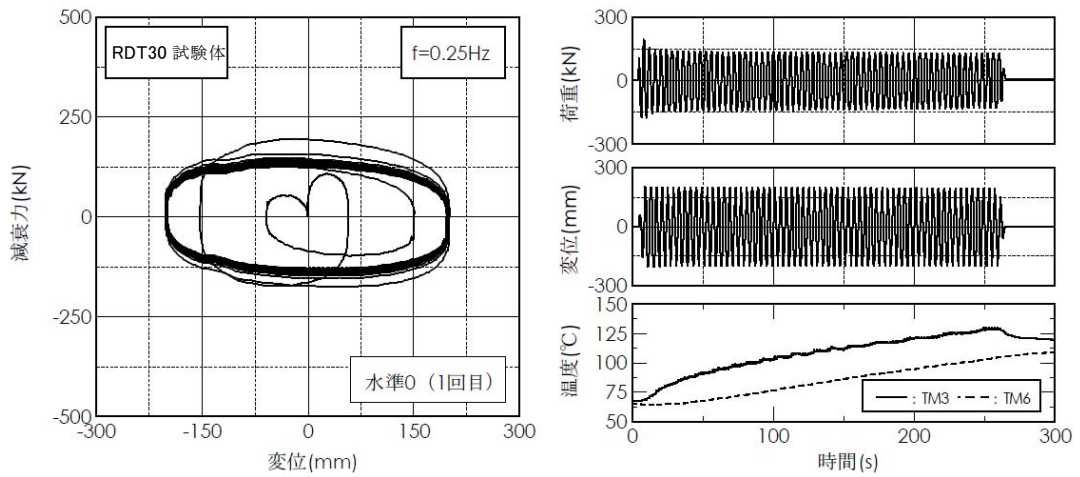
図 1.3.9-49~52 に、減衰力、各点温度、粘性体圧力、累積吸収エネルギーの変動を 1 セット目から 3 セット目まで連続して表記したものを示す。1 セット目の中盤に減衰力変動が必ずしも滑らかでない区間が見られるが、大局的には RDT8、RDT16 試験体と同様に、セット間のインターバル後の数サイクルを除いて、減衰力が連続的に低下し粘性体および外筒温度が連続的に上昇する傾向は確認できる。1 セット目の序盤を除いて、TM3 の温度が TM1、TM2 に比べ相対的に高い。TM4、TM9 のみでなく TM5 計測点にも加振中にはほとんど温度上昇が見られない。

粘性体最大圧力は 2.0MPa (19.7 気圧) に至った。特に 3 セット目に入り圧力が 1MPa を超えた後に圧力上昇の時間勾配が大きくなった。

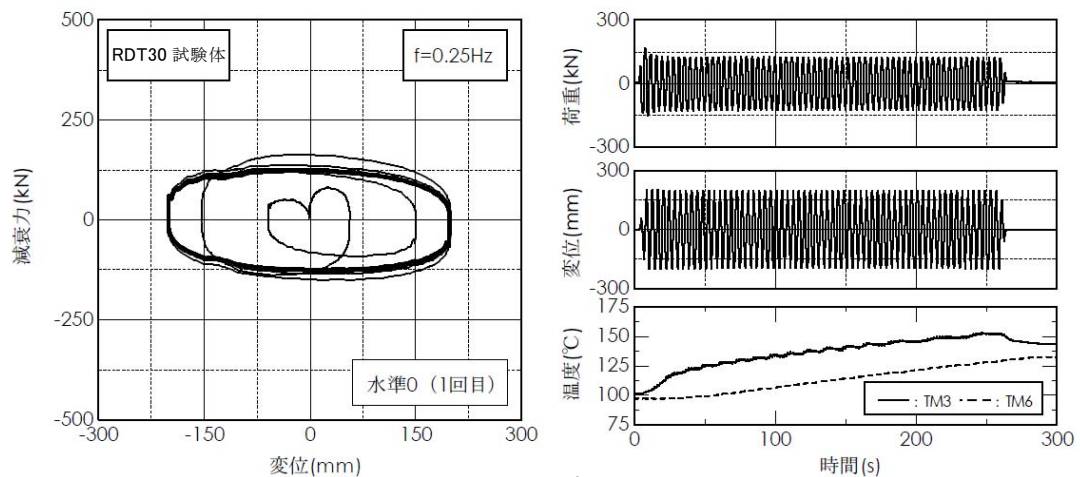
累積吸収エネルギーの時間勾配は、RDT16 試験体水準 0 の 2 倍以上となった。本試験体は、RDT16 試験体に比べ大きな減衰力を発揮する部材である一方で粘性体体積が小さいため、大きな温度上昇と圧力上昇が生じやすい構成となっていると考えられる。総吸収エネルギーは 17.9MJ であった。



(a) 1セット目



(b) 2セット目



(c) 3セット目

図 1.3.9-48 RDT30 試験体水準 0 実験結果
(荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴)

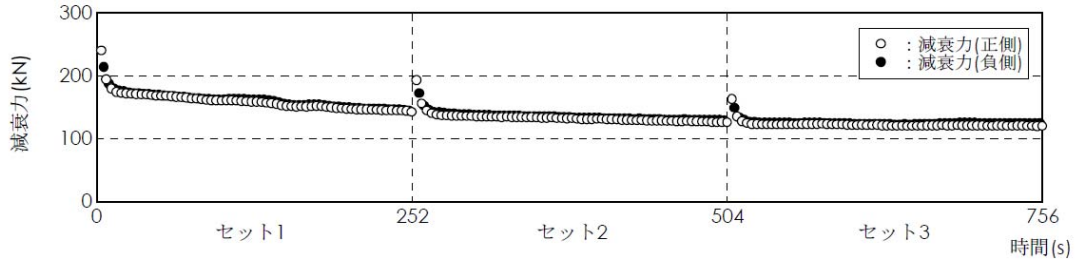


図 1.3.9-49 RDT30 試験体水準 0 試験 減衰力時刻歴

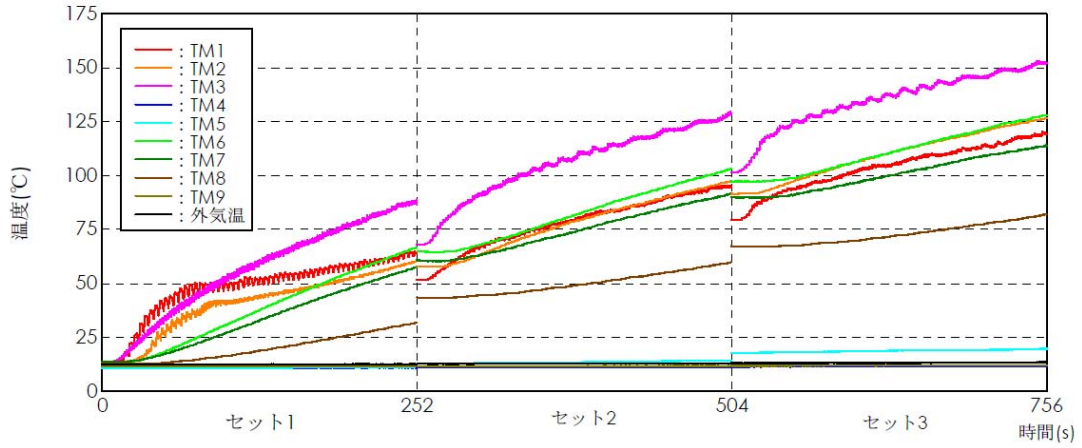


図 1.3.9-50 RDT30 試験体水準 0 試験 温度時刻歴

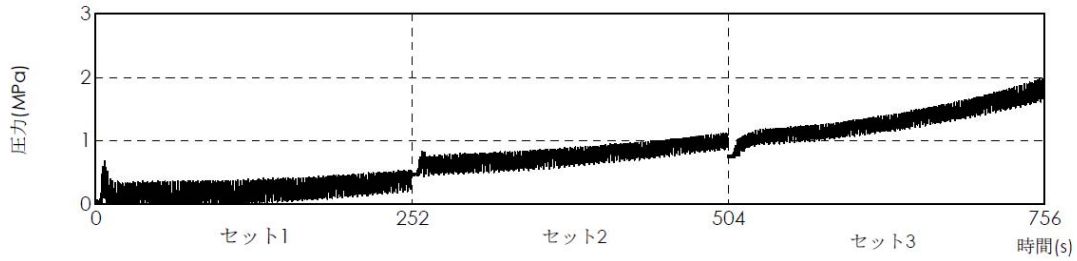


図 1.3.9-51 RDT30 試験体水準 0 試験 粘性体圧力時刻歴

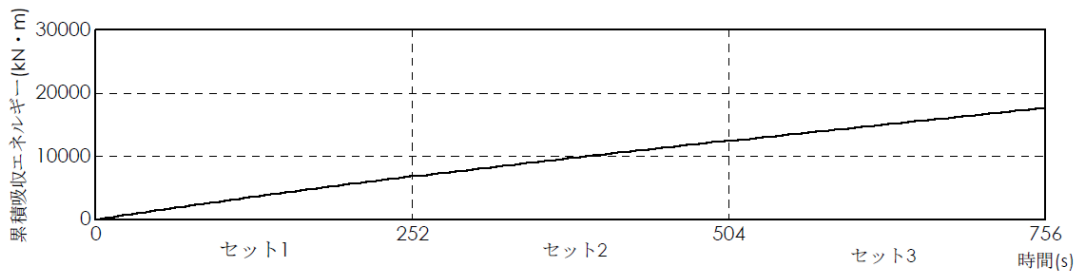


図 1.3.9-52 RDT30 試験体水準 0 試験 累積吸収エネルギー時刻歴

b) 水準 2

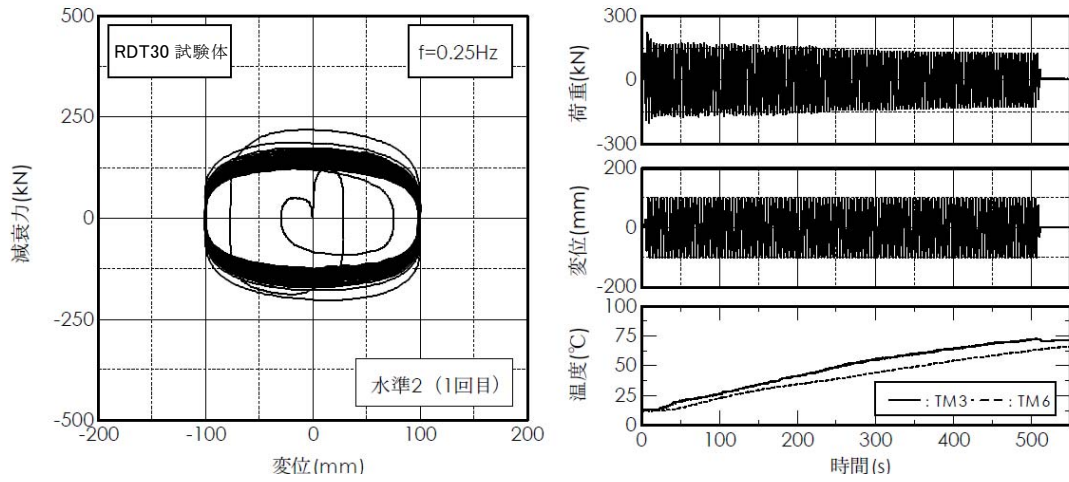
図 1.3.9-53 に水準 2 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。荷重の温度補正は実施していない。温度代表点として TM3 と TM6 を選択した。

減衰力は、1 セット目では、199kN から 122kN まで低下し、3 セット目の終わりでは 94kN となった。1 セット目の前半では、荷重時刻歴の包絡線が必ずしも滑らかではない。セットを重ねるごとにセット内での減衰力低下量は小さくなったが、減衰力が上昇する傾向は見られなかった。3 セット目まで安定した力学性状を示した。

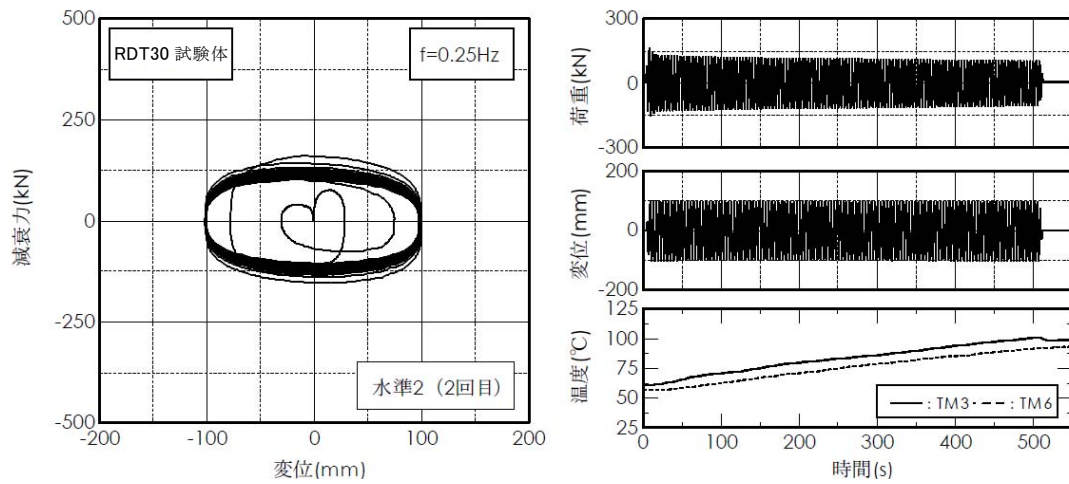
粘性体温度(TM3)は当初の 12.6℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 119℃に至った。

図 1.3.9-54~57 に、減衰力、各点温度、粘性体圧力、累積吸収エネルギーの変動を連続して表記したものを示す。1 セット目の前半でサイクルごとの減衰力がばらつきを有している区間が見られるが、大局的には減衰力が漸減する傾向を有していると判断できる。この区間では、粘性体圧力の変動も大きい。減衰力ばらつきの原因として、水準 0 実施後の冷却期間でバッファ部分から空気が粘性体に入り込み、せん断隙間内に広がったことが可能性として考えられる。セット間のインターバル後の数サイクルを除いて、減衰力が連続的に低下し粘性体および外筒温度が連続的に上昇する傾向は、RDT8、RDT16 試験体と同様である。粘性体内部の温度分布は、TM3 が最も高く、TM2、TM1 の順に低くなる。

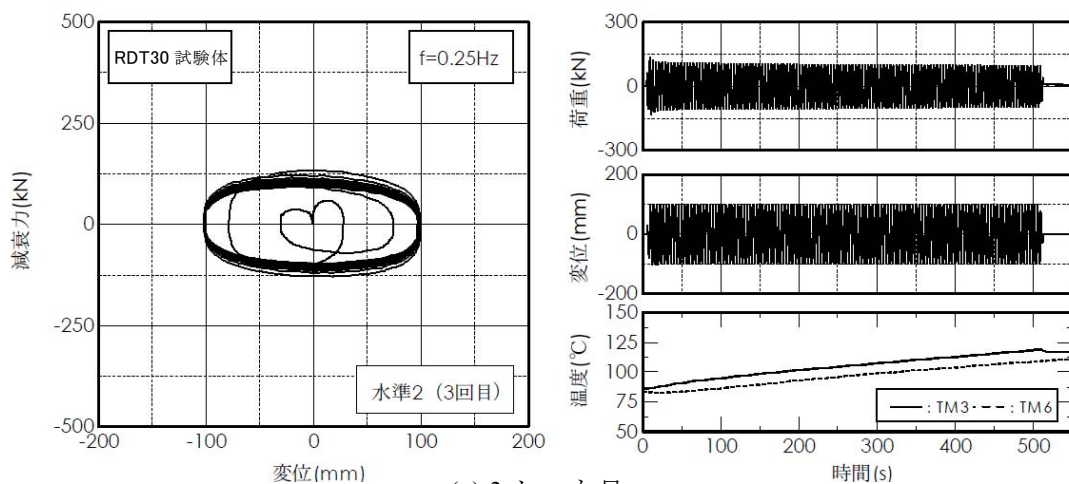
粘性体最大圧力は 0.88MPa (8.7 気圧) であった。総吸収エネルギーは 15.1MJ となり、水準 0 の 0.84 倍であった。



(a) 1セット目



(b) 2セット目



(c) 3セット目

図 1.3.9-53 RDT30 試験体水準 2 実験結果
(荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴)

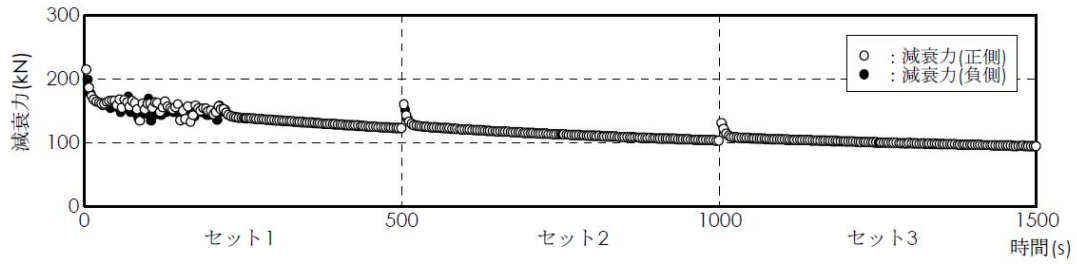


図 1.3.9-54 RDT30 試験体水準 2 試験 減衰力時刻歴

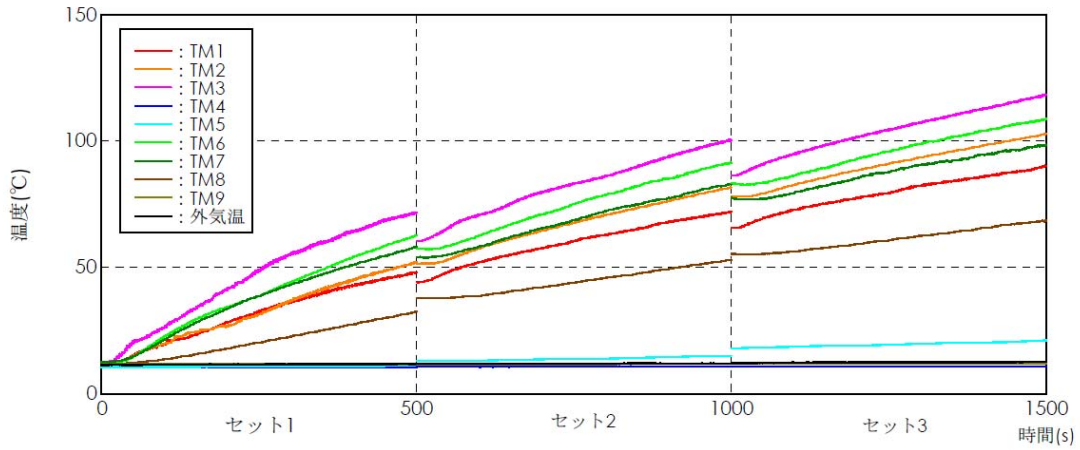


図 1.3.9-55 RDT30 試験体水準 2 試験 温度時刻歴

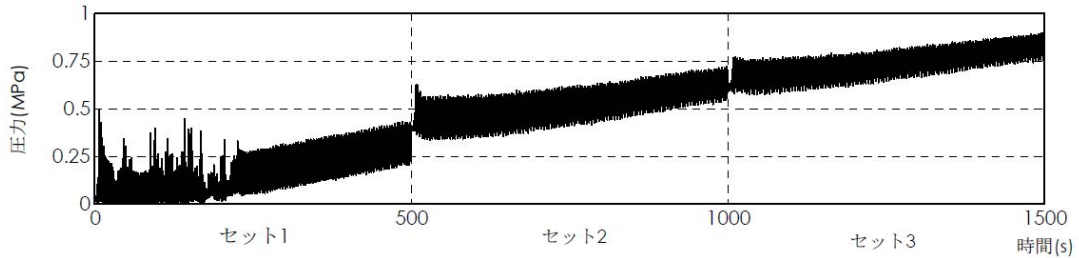


図 1.3.9-56 RDT30 試験体水準 2 試験 粘性体圧力時刻歴

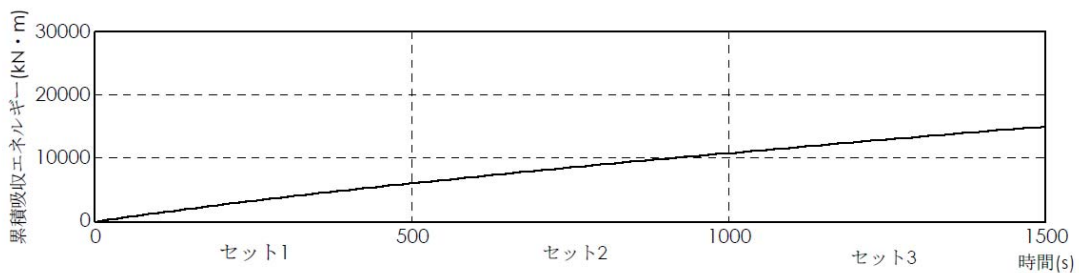


図 1.3.9-57 RDT30 試験体水準 2 試験 累積吸収エネルギー時刻歴

c) 水準 1

図 1.3.9-58 に水準 1 実験の荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴を示す。荷重の温度補正は実施していない。温度代表点は TM3 と TM6 である。

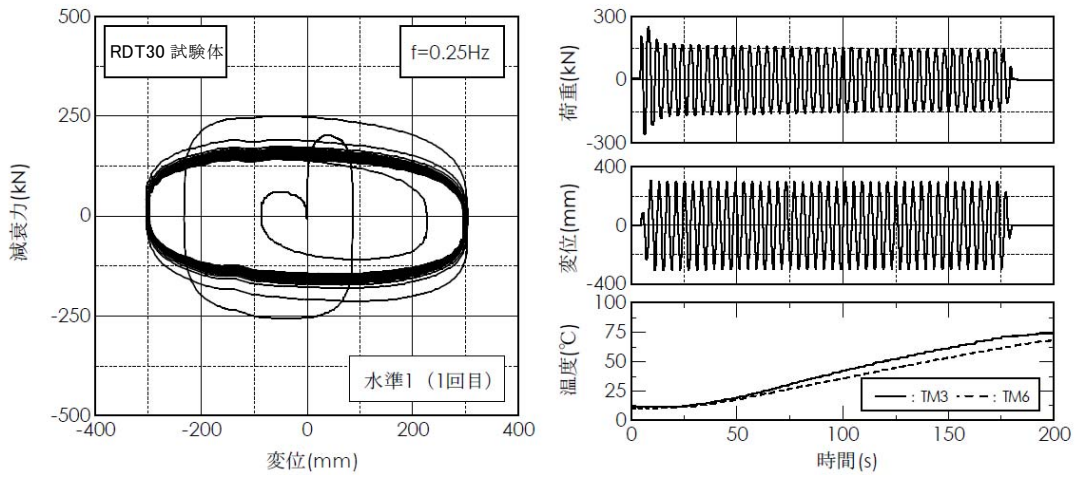
変位 0 切片における減衰力は、1 セット目では、当初の 207kN から 142kN まで低下した。2 セット目では中盤まで減衰力がわずかに低下し、その後わずかに上昇した。3 セット目では、最初の数サイクルでインターバルでの復帰分が低下した後、前半部では減衰力上昇が見られ、後半では再び低下した。

粘性体温度(TM3)は当初の 11.2℃から徐々に上昇し、3 セット目終了時点では 143℃となった。

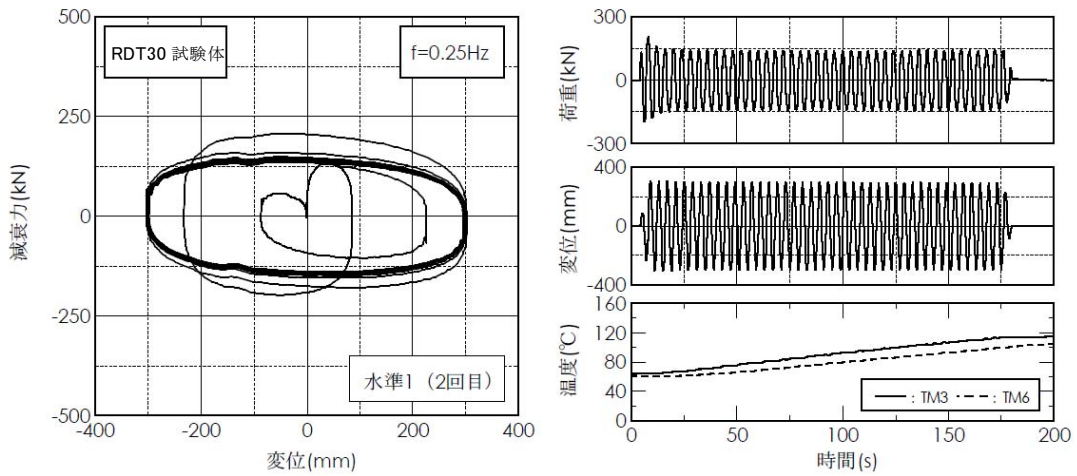
図 1.3.9-59~62 に、減衰力、各点温度、粘性体圧力、累積吸収エネルギーの変動を連続して表記したものを示す。前述のように 2 セット目以降減衰力が増減したのに対し、温度は連続的に上昇した。粘性体内部の温度分布は、TM2 が相対的にやや低く、インターバル時の低下は TM1 が相対的に大きい。

粘性体最大圧力は 2 セット目で 2.5MPa (24.4 気圧)、3 セット目で 6.5MPa (64.0 気圧) に至った。2 セット目の後半で圧力が 1MPa を超えた付近から圧力上昇の時間勾配が大きくなる現象が観察された。総吸収エネルギーは 18.2MJ であり、吸収エネルギーの時間勾配は水準 0 の 1.5 倍程度であった。

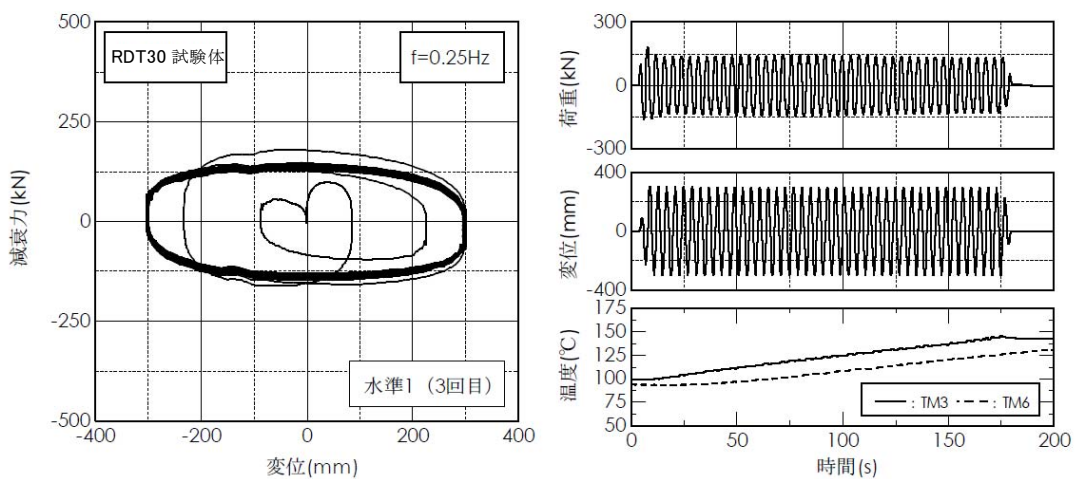
本試験体は、前述したように、大きな温度上昇と圧力上昇が生じやすい構成となっていると考えられるが、長周期地震動によるエネルギー入力として相当厳しいと考えられるこの加力水準においても、粘性体圧力上昇が顕著となる 2 セット目の途中までは安定した力学性状を示した。



(a) 1セット目



(b) 2セット目



(c) 3セット目

図 1.3.9-58 RDT30 試験体水準 1 実験結果
(荷重変形関係、荷重時刻歴、変位時刻歴、代表点温度時刻歴)

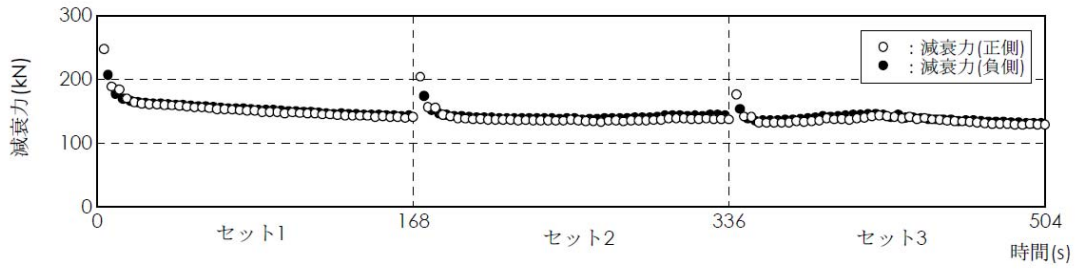


図 1.3.9-59 RDT30 試験体水準 1 試験 減衰力時刻歴

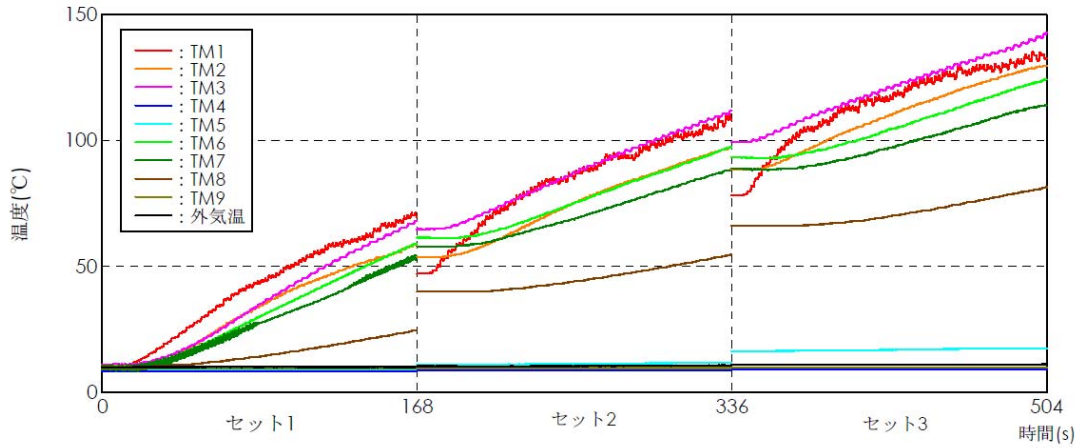


図 1.3.9-60 RDT30 試験体水準 1 試験 温度時刻歴

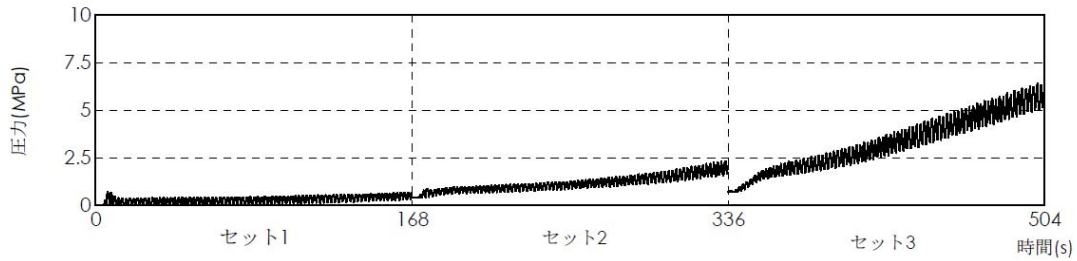


図 1.3.9-61 RDT30 試験体水準 1 試験 粘性体圧力時刻歴

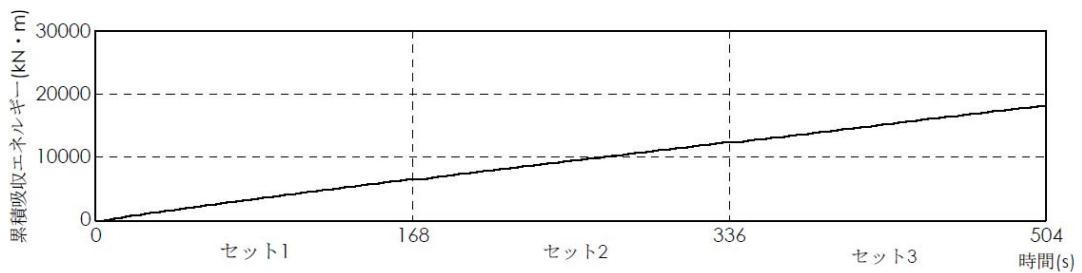


図 1.3.9-62 RDT30 試験体水準 1 試験 累積吸収エネルギー時刻歴

(3) 基本性能試験

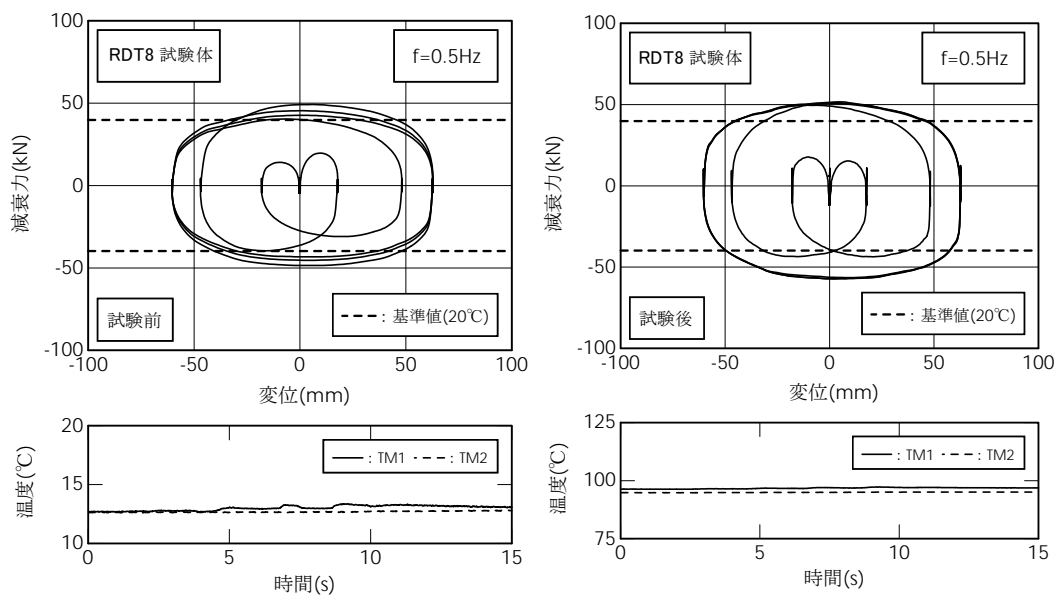
多数回高速繰り返し実験の直前直後に実施した基本性能試験結果を比較する。

1) RDT8 試験体

a) 水準 0 の前後

図 1.3.9-63 に、RDT8 試験体水準 0 前後の基本性能試験結果を示す。減衰力はいずれも 20°C に補正した。温度補正に用いる粘性体温度は製品試験における方法に従い TM1 および TM2 の平均値を採った（以下同じ）。水準 0 直後の温度は温度補正式の適用外であるが、式を外挿し適用した。

水準 0 直後の基本性能試験における温度補正後減衰力は、水準 0 直前の温度補正後減衰力を上回る。内部圧力上昇による減衰力の上昇と、温度補正式外挿による誤差が原因と考えられ、粘性体自体に特性の変化が生じていたかどうかは明らかでない。



(a) 水準 0 直前

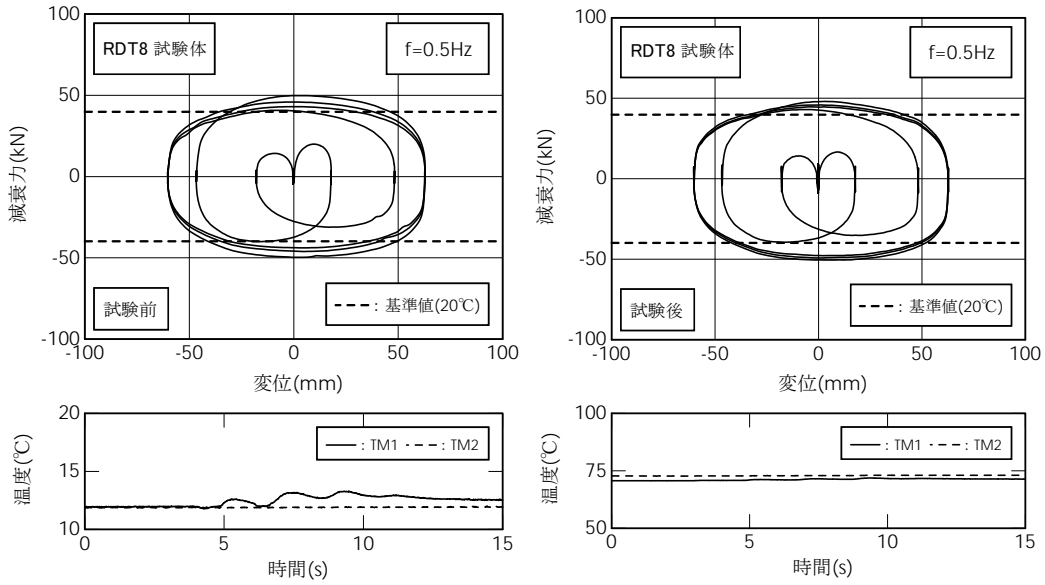
(b) 水準 0 直後

図 1.3.9-63 RDT8 試験体水準 0 前後の基本性能試験結果

b) 水準 2 の前後

図 1.3.9-64 に、RDT8 試験体水準 2 前後の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは水準 0 と同様である。

水準 2 直前の基本性能試験による荷重変形関係は、水準 0 直前のそれと同様であり、冷却後の特性に変化は見られない。水準 2 直後の温度補正後減衰力は、水準 2 直前の温度補正後の減衰力と同程度であり、この温度領域においては、粘性体自体の特性の変化はほとんどなく、温度補正式も適用可能であると考えられる。



(a) 水準 2 直前 (b) 水準 2 直後
 図 1.3.9-64 RDT8 試験体水準 2 前後の基本性能試験結果

c) 水準 1 の直前

図 1.3.9-65 に、RDT8 試験体水準 1 直前の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは水準 0、2 と同様である。水準 1 は限界状態発現により試験を中断したため、直後の基本性能試験は実施していない。

水準 1 直前の基本性能試験による荷重変形関係は、水準 0 直前および水準 2 直前のそれと同様であり、冷却後の特性に変化は見られない。

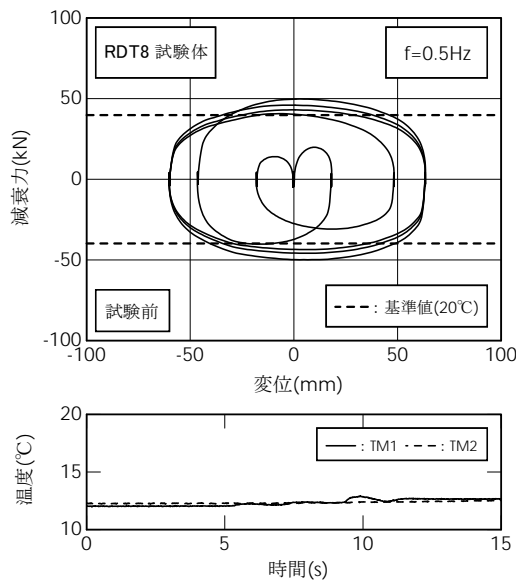


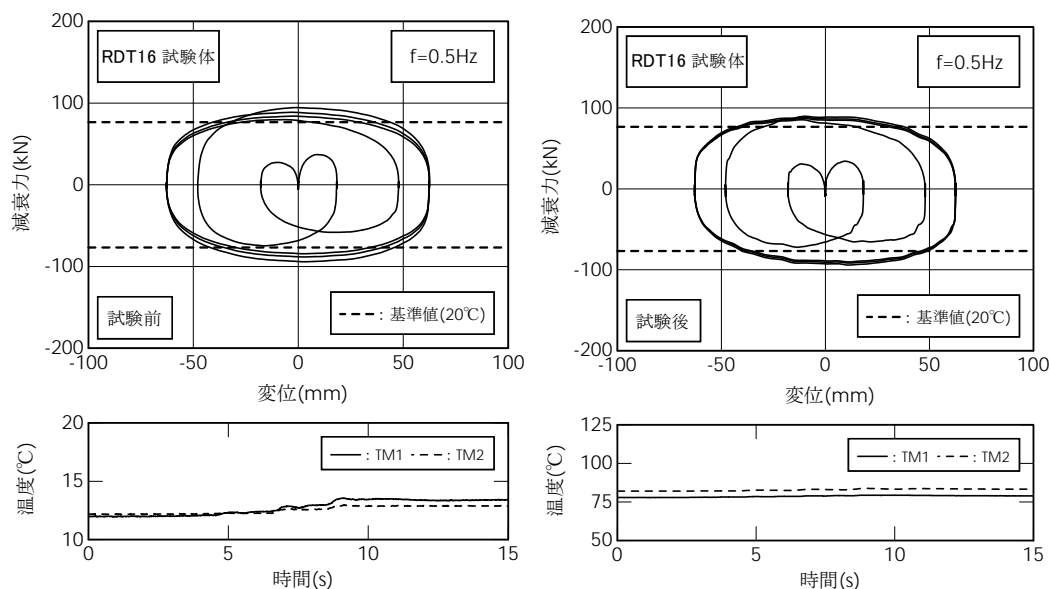
図 1.3.9-65 RDT8 試験体水準 1 直前の基本性能試験結果

2) RDT16 試験体

a) 水準 0 の前後

図 1.3.9-66 に、RDT16 試験体水準 0 前後の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは RDT8 試験体と同様、TM1 および TM2 の平均値を用いて減衰力を 20°C 相当の値に補正した。

水準 0 直後の温度補正後減衰力は、水準 0 直前の温度補正後の減衰力と同程度であり、粘性体自体の特性の変化はほとんどなく、温度補正式も適用可能であると考えられる。



(a) 水準 0 直前

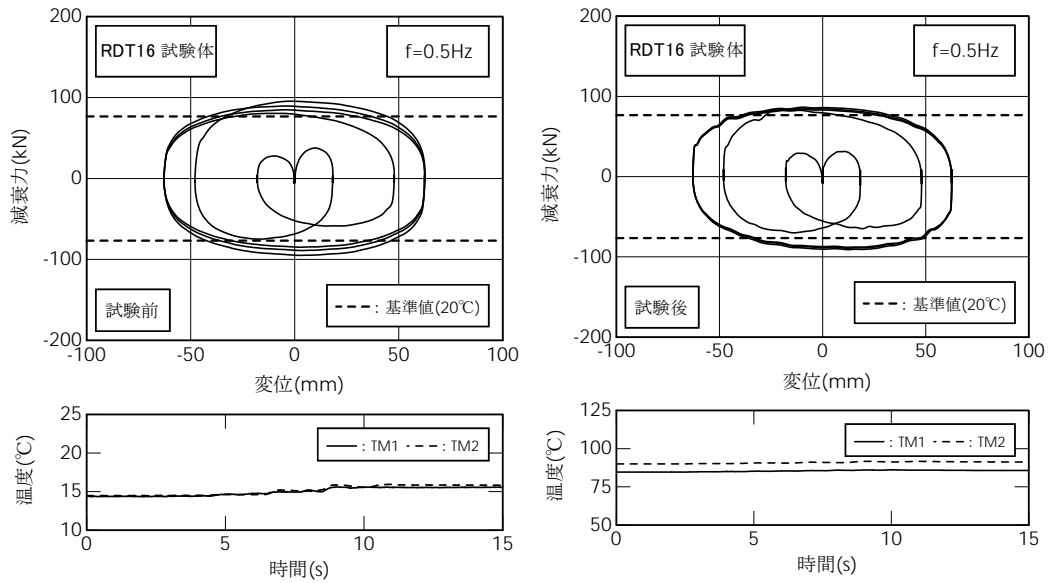
(b) 水準 0 直後

図 1.3.9-66 RDT16 試験体水準 0 前後の基本性能試験結果

b) 水準 1 の前後

図 1.3.9-67 に、RDT16 試験体水準 1 前後の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは水準 0 と同様である。

水準 1 直前の基本性能試験による荷重変形関係は、水準 0 直前のそれと同様であり、冷却後の特性に変化は見られない。水準 1 直後の温度補正後減衰力は、水準 1 直前の温度補正後の減衰力と同程度であり、粘性体自体の特性の変化はほとんどなく、温度補正式も適用可能であると考えられる。



(a) 水準 1 直前

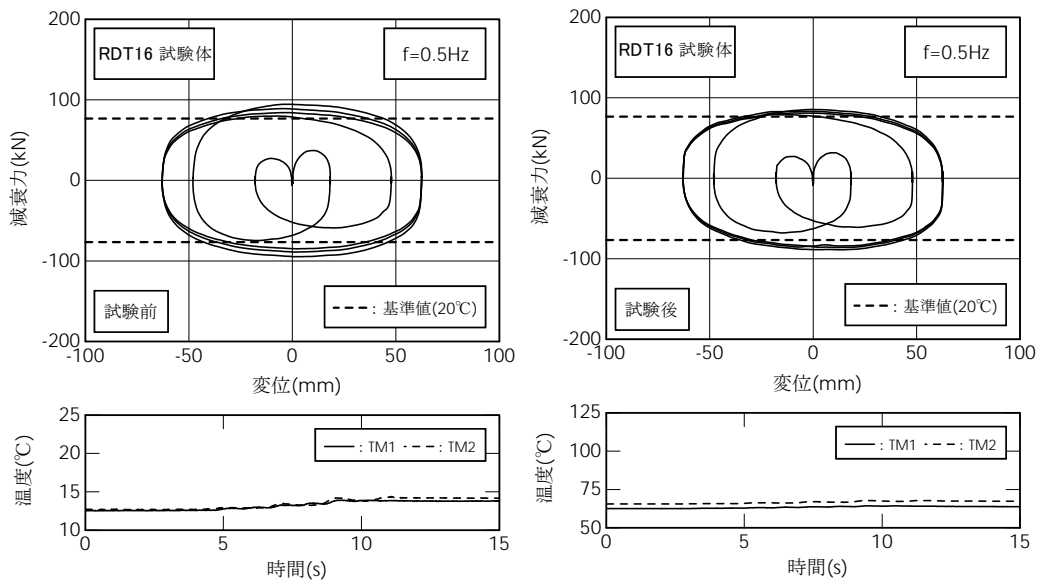
(b) 水準 1 直後

図 1.3.9-67 RDT16 試験体水準 1 前後の基本性能試験結果

c) 水準 2 の前後

図 1.3.9-68 に、RDT16 試験体水準 2 前後の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは水準 0、1 と同様である。

水準 2 直後の温度補正後減衰力は、水準 2 直前の温度補正後の減衰力と同程度であり、粘性体自体の特性の変化はほとんどなく、温度補正式も適用可能であると考えられる。



(a) 水準 2 直前

(b) 水準 2 直後

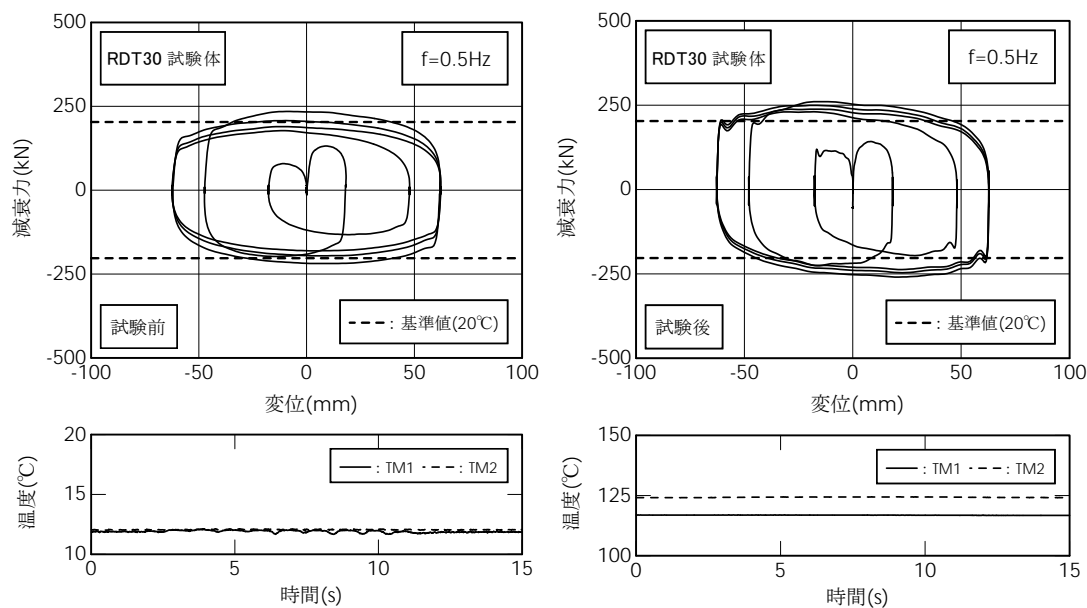
図 1.3.9-68 RDT16 試験体水準 2 前後の基本性能試験結果

3) RDT30 試験体

a) 水準 0 の前後

図 1.3.9-69 に、RDT30 試験体水準 0 前後の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは RDT8 試験体、RDT16 試験体と同様、TM1 および TM2 の平均値を用いて減衰力を 20°C 相当の値に補正した。

水準 0 直後の基本性能試験における温度補正後減衰力は、水準 0 直前の温度補正後減衰力をわずかながら上回る。内部圧力上昇による減衰力の上昇と、温度補正式外挿による誤差が原因と考えられ、粘性体自体に特性の変化が生じていたかどうかは明らかでない。



(a) 水準 0 直前

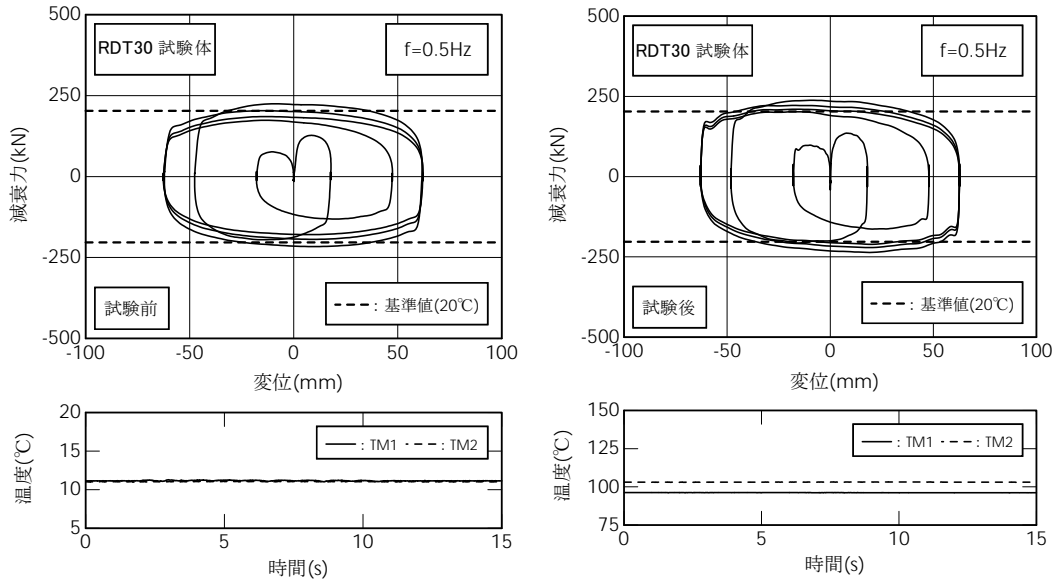
(b) 水準 0 直後

図 1.3.9-69 RDT30 試験体水準 0 前後の基本性能試験結果

b) 水準 2 の前後

図 1.3.9-70 に、RDT30 試験体水準 2 前後の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは水準 0 と同様である。

水準 2 直前の基本性能試験による荷重変形関係は、水準 0 直前のそれと同様であり、冷却後の特性に変化は見られない。水準 2 直後の温度補正後減衰力は、水準 2 直前の温度補正後の減衰力と同程度であり、この温度領域においては、粘性体自体の特性の変化はほとんどなく、温度補正式も適用可能であると考えられる。



(a) 水準 2 直前

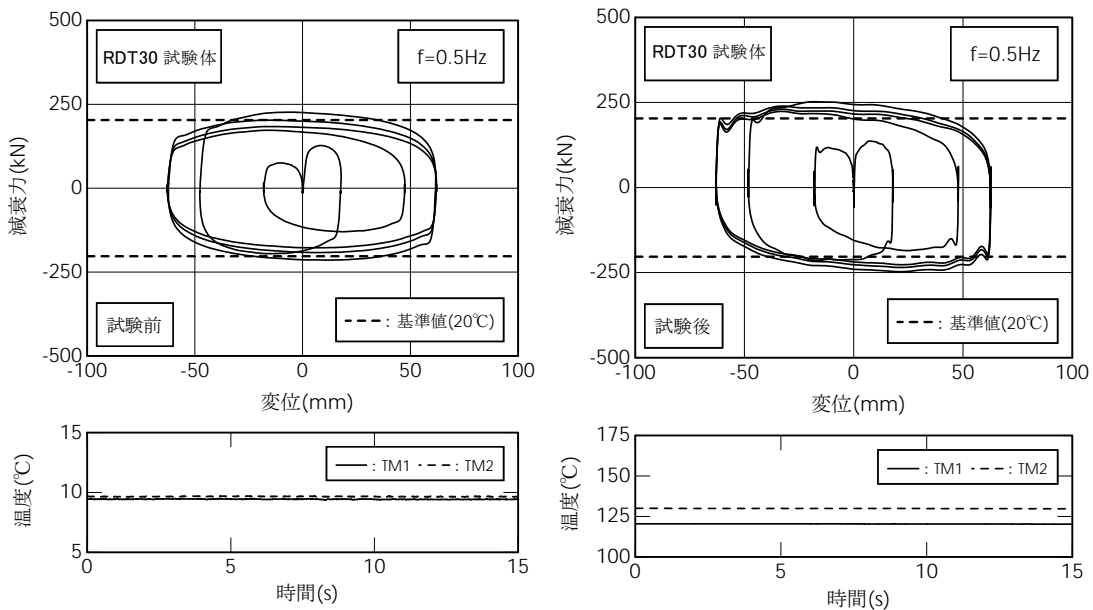
(b) 水準 2 直後

図 1.3.9-70 RDT30 試験体水準 2 前後の基本性能試験結果

c) 水準 1 の前後

図 1.3.9-71 に、RDT30 試験体水準 1 前後の基本性能試験結果を示す。温度補正に関する扱いは水準 0、2 と同様である。

水準 1 直前の基本性能試験による荷重変形関係は、水準 0 直前および水準 2 直前のそれと同様であり、冷却後の特性に変化は見られない。水準 1 直後の基本性能試験における温度補正後減衰力は、水準 1 直前の温度補正後減衰力をわずかながら上回る。内部圧力上昇による減衰力の上昇と、温度補正式外挿による誤差が原因と考えられ、粘性体自体に特性の変化が生じていたかどうかは明らかでない。



(a) 水準 1 直前

(b) 水準 1 直後

図 1.3.9-71 RDT30 試験体水準 1 前後の基本性能試験結果

(4) 温度低下性状

多数回高速繰り返し実験における各セット間のインターバル時(インターバル前半の5分間)、および各水準終了後に温度計測を実施した。

1) RDT8 試験体

a) インターバル時

図 1.3.9-72 (次ページ) に、各インターバル時の温度変化時刻歴を示す。(a)~(c)図が水準 0 実験における 1 セット目後~3 セット目後、(d)~(f)図が水準 2 実験における 1 セット目後~3 セット目後、(g)~(j)図が水準 1 実験における 1 セット目後~3 セット目後の計測結果である。

インターバル直後の数十秒~100 秒程度の間には粘性体温度の低下と周辺鉄部の温度上昇が見られるが、その後は大幅な温度の変化は見られない。粘性体温度の低下は、水準 0 で 10°C 程度、水準 2 で 5°C 程度、水準 1 で 20°C 程度であった。

b) 各水準終了後

各水準終了後に加力装置から試験体を取り外し、実験場内に放置した状態で温度計測を実施した。図 1.3.9-73 に、各水準後の温度変化時刻歴を示す。(a)図が水準 0 実験後、(b)図が水準 2 実験後、(c)図が水準 1 実験後の計測結果である。

高温となった TM1~TM3、TM5~TM8 の各点温度は最初の 10 時間程度で大幅に低下する。当初の 2~3 時間は TM4、TM9 に温度上昇が見られ試験体内の熱伝導による熱の拡散が生じていることがわかるが、その後は全計測点の温度が低下し、熱伝達(対流)による冷却が支配的となる。粘性体および鉄部の各点温度がほぼ一様となり、かつ室温程度に冷却されるまでには、15~17 時間要する。

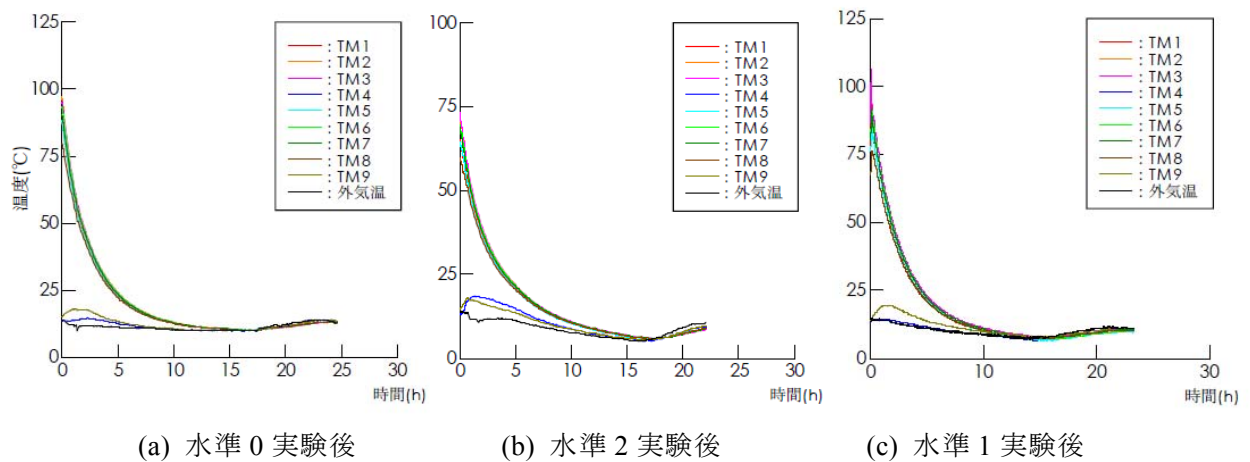
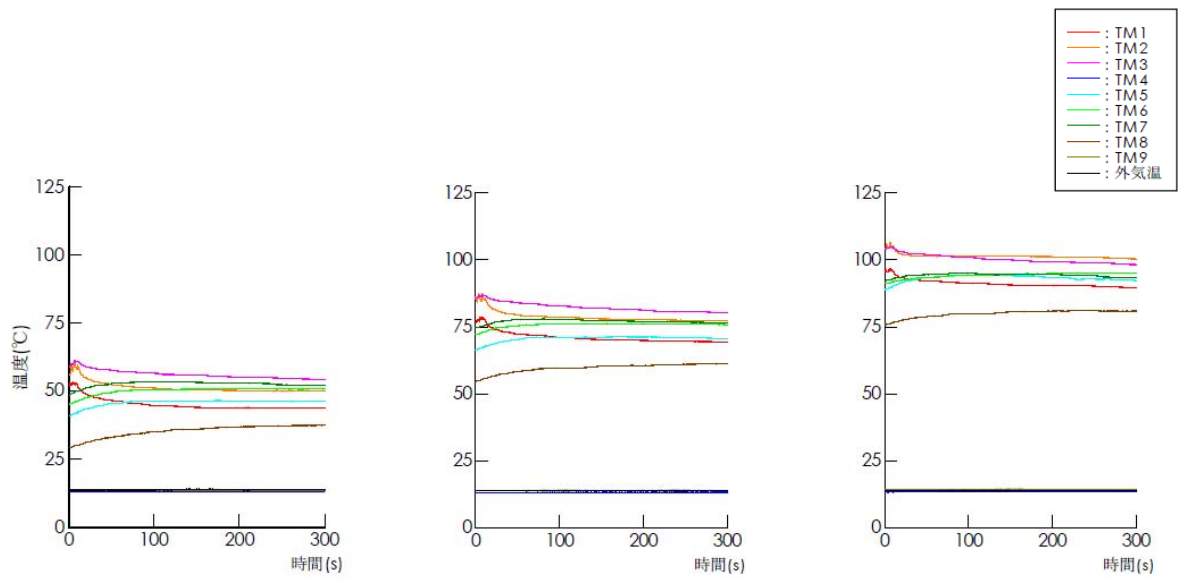
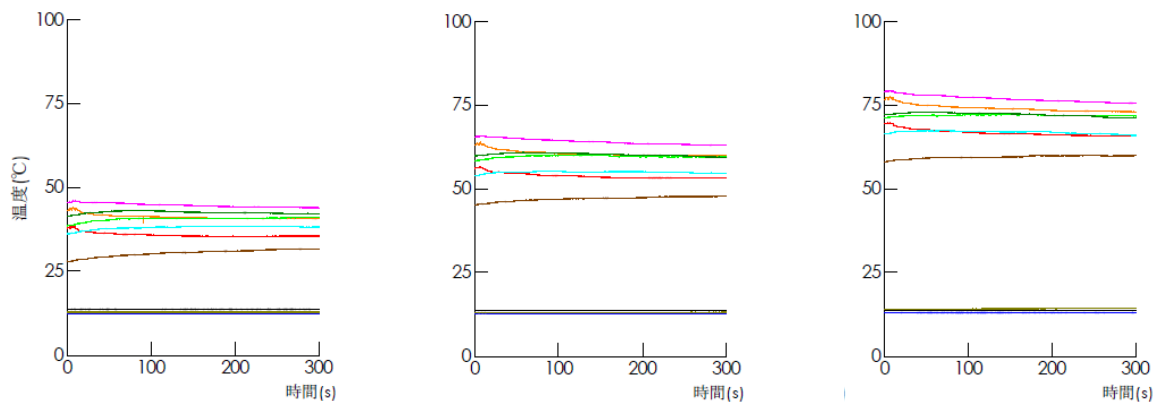


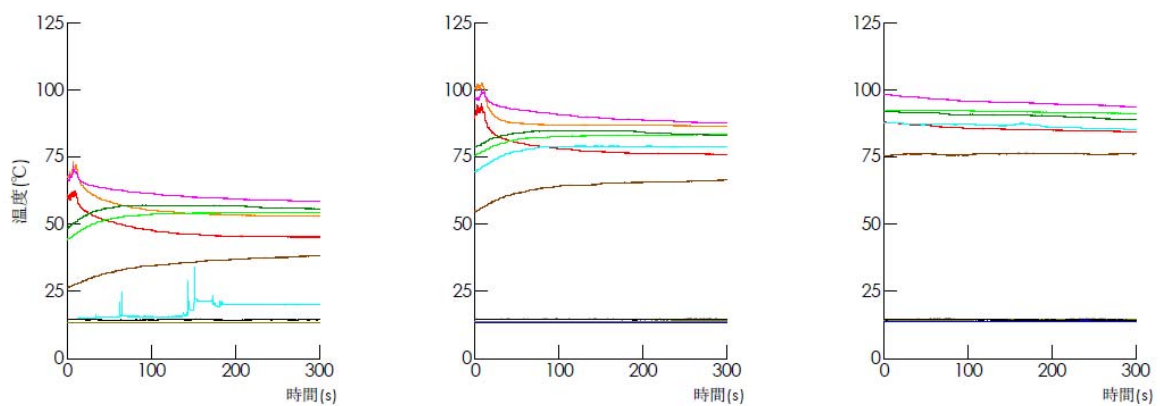
図 1.3.9-73 RDT8 試験体各水準後の温度変化時刻歴



(a) 水準0 1セット目実験後 (b) 水準0 2セット目実験後 (c) 水準0 3セット目実験後



(d) 水準2 1セット目実験後 (e) 水準2 2セット目実験後 (f) 水準2 3セット目実験後



(g) 水準1 1セット目実験後 (h) 水準1 2セット目実験後 (j) 水準1 3セット目実験後

図 1.3.9-72 RDT8 試験体各水準後の温度変化時刻歴

2) RDT16 試験体

a) インターバル時

図 1.3.9-74 (次ページ) に、各インターバル時の温度変化時刻歴を示す。((a)~(c)図が水準 0 実験における 1 セット目後~3 セット目後、(d)~(f)図が水準 1 実験における 1 セット目後~3 セット目後、(g)~(j)図が水準 2 実験における 1 セット目後~3 セット目後の計測結果である。

RDT8 試験体と同様の性状を示す。粘性体温度の低下は、水準 0 で 20°C 程度、水準 1 で 30°C 程度、水準 2 で 10°C 程度であった。

b) 各水準終了後

各水準終了後に加力装置から試験体を取り外し、実験場内に放置した状態で温度計測を実施した。図 1.3.9-75 に、各水準後の温度変化時刻歴を示す。(a)図が水準 0 実験後、(b)図が水準 1 実験後、(c)図が水準 2 実験後の計測結果である。

RDT8 試験体と同様の性状であるが、高温部の温度低下はやや緩慢であり、熱伝導による熱の拡散は水準 0、水準 2 であまり明確ではない。粘性体および鉄部の各点温度がほぼ一様となり、かつ室温程度に冷却されるまでには、15~20 時間要する。

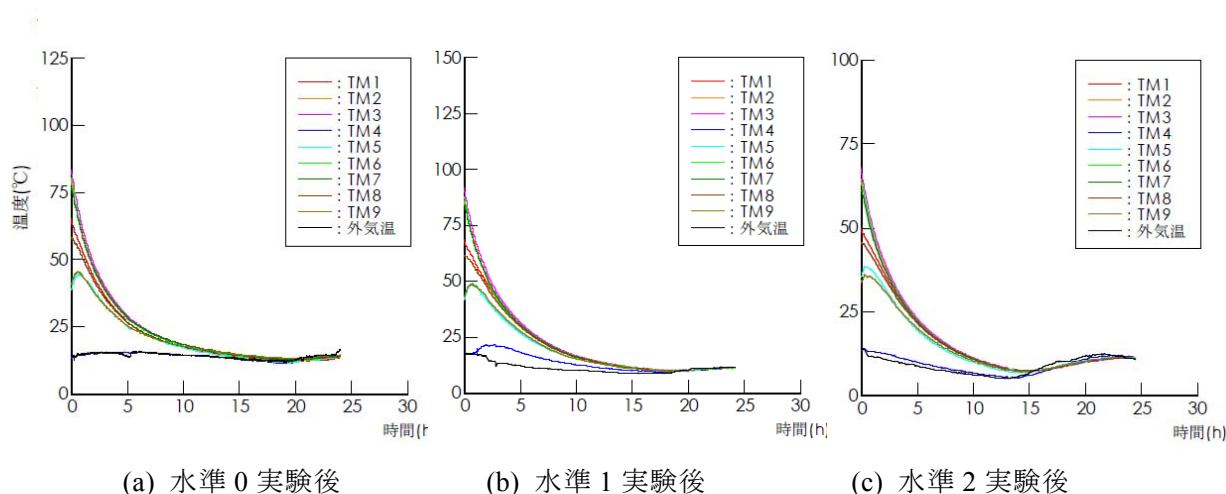
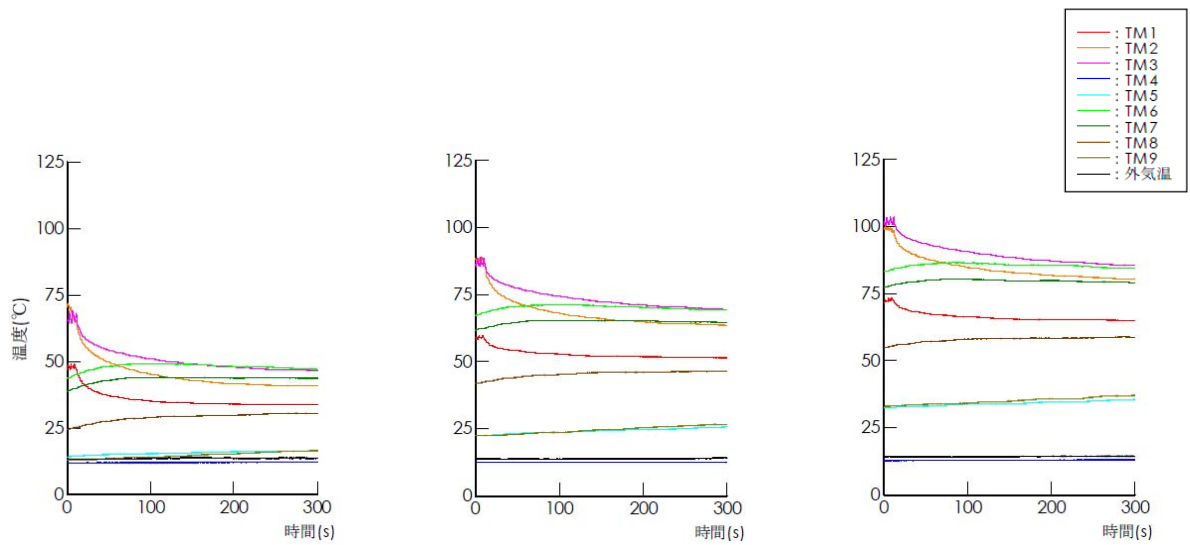
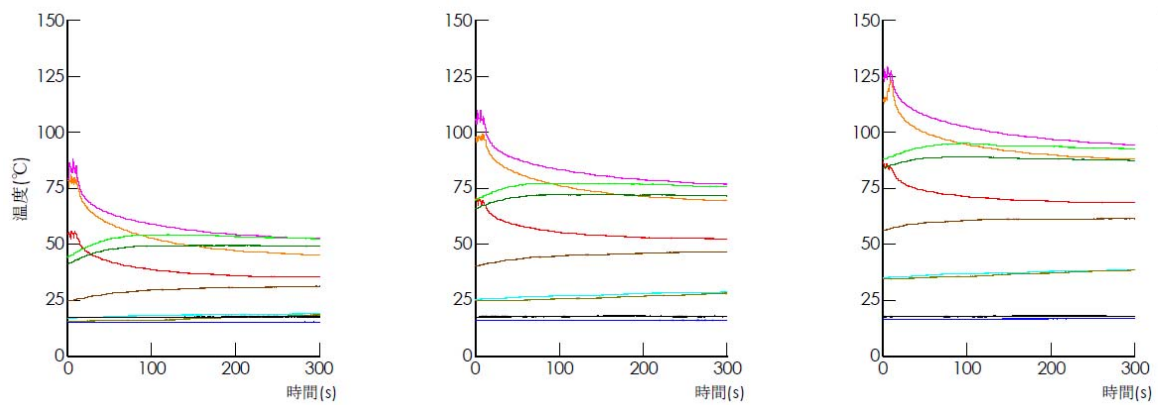


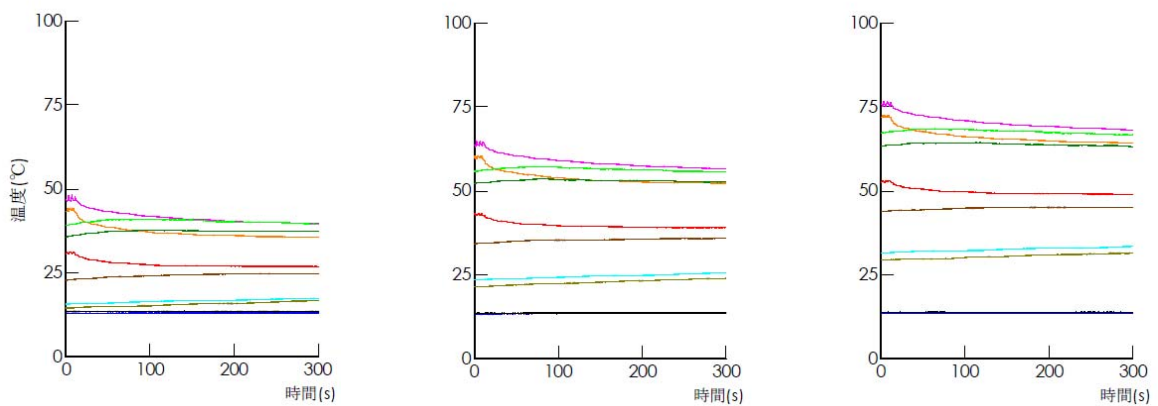
図 1.3.9-75 RDT16 試験体各水準後の温度変化時刻歴



(a) 水準0 1セット目実験後 (b) 水準0 2セット目実験後 (c) 水準0 3セット目実験後



(d) 水準1 1セット目実験後 (e) 水準1 2セット目実験後 (f) 水準1 3セット目実験後



(g) 水準2 1セット目実験後 (h) 水準2 2セット目実験後 (i) 水準2 3セット目実験後

図 1.3.9-74 RDT16 試験体各水準後の温度変化時刻歴

3) RDT30 試験体

a) インターバル時

図 1.3.9-76 (次ページ) に、各インターバル時の温度変化時刻歴を示す。(a)~(c)図が水準 0 実験における 1 セット目後~3 セット目後、(d)~(f)図が水準 2 実験における 1 セット目後~3 セット目後、(g)~(j)図が水準 1 実験における 1 セット目後~3 セット目後の計測結果である。

RDT8、RDT16 試験体と同様の性状を示す。5 分間の粘性体温度の低下は、水準 0 の TM1、TM3 で 20°C 程度、水準 1 の TM1 で 30°C 程度、水準 2 の TM1~TM3 で 10°C 程度であった。

b) 各水準終了後

各水準終了後に加力装置から試験体を取り外し、実験場内に放置した状態で温度計測を実施した。図 1.3.9-77 に、各水準後の温度変化時刻歴を示す。(a)図が水準 0 実験後、(b)図が水準 2 実験後、(c)図が水準 1 実験後の計測結果である。

RDT8、RDT16 試験体と同様の性状である。熱伝導による TM4、TM9 への熱の拡散は水準 0、水準 1 で放置後 6 時間程度まで確認できる。粘性体および鉄部の各点温度がほぼ一様となり、かつ室温程度に冷却されるまでには、22~25 時間要する。

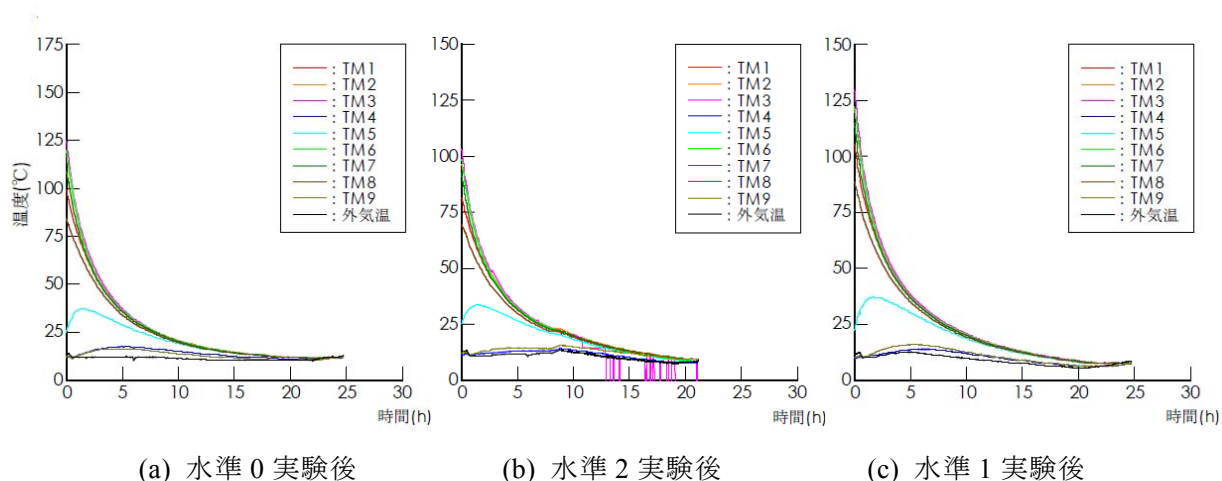
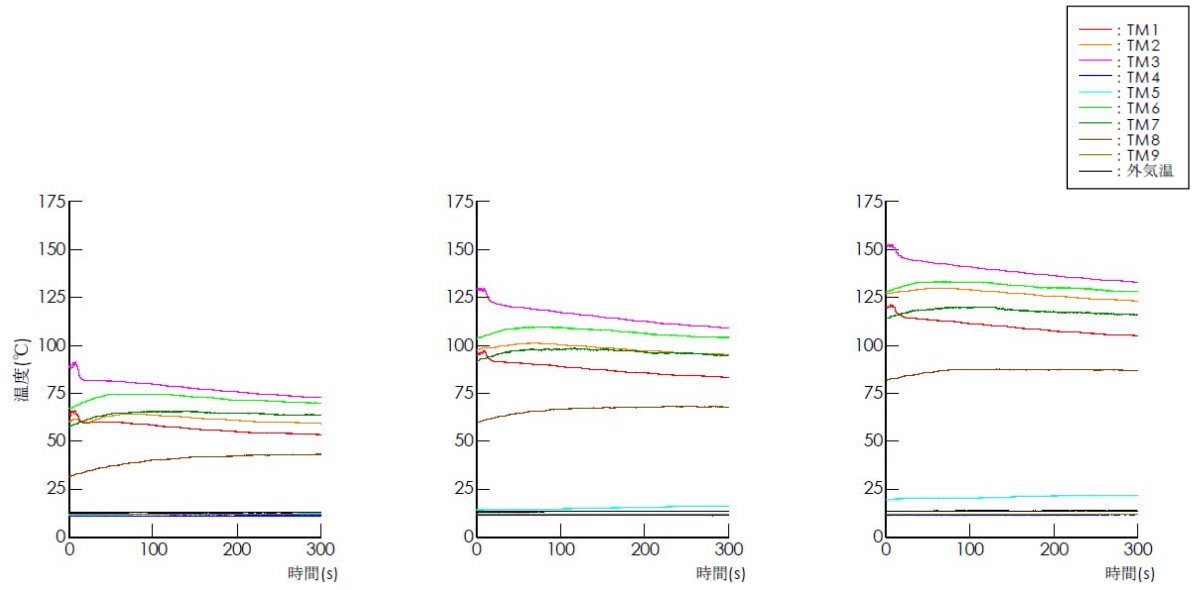
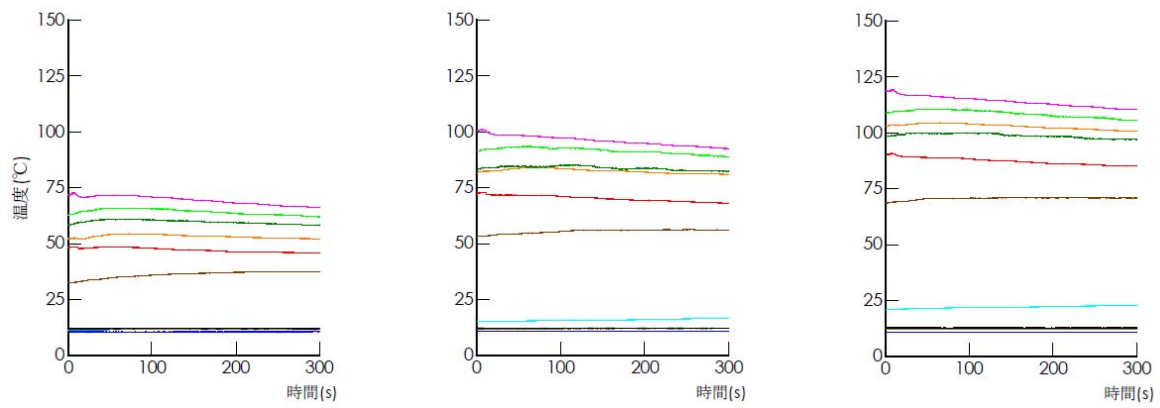


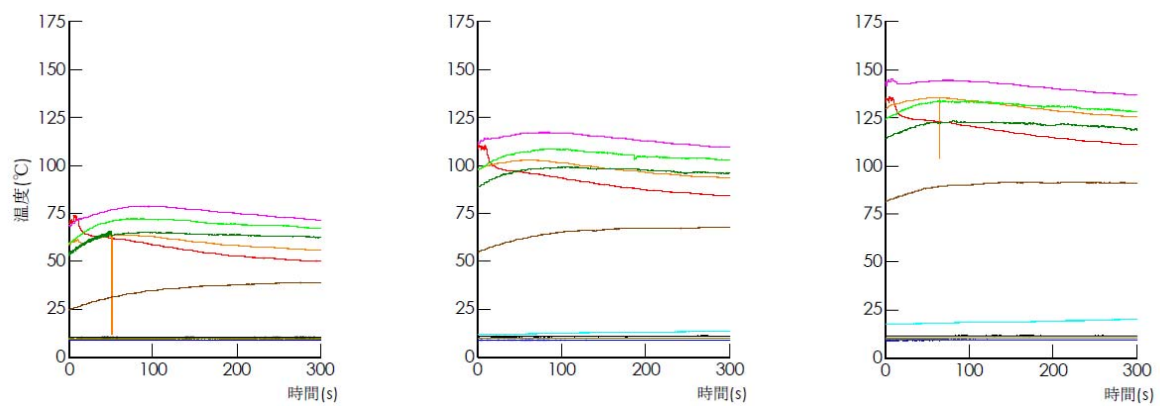
図 1.3.9-77 RDT30 試験体各水準後の温度変化時刻歴



(a) 水準0 1セット目実験後 (b) 水準0 2セット目実験後 (c) 水準0 3セット目実験後



(d) 水準2 1セット目実験後 (e) 水準2 2セット目実験後 (f) 水準2 3セット目実験後



(g) 水準1 1セット目実験後 (h) 水準1 2セット目実験後 (j) 水準1 3セット目実験後

図 1.3.9-76 RDT30 試験体各水準後の温度変化時刻歴

(5) 考察

1) 繰り返し特性評価

a) 既往の評価法による適用限界

図 1.3.9-78～80 に、RDT8、RDT16、RDT30 各試験体の各水準実験毎に、減衰力の変動を既往式による評価と重ね書きして示す。既往の評価式は、式(1.3.9-2)による繰り返し依存性と、式(1.3.9-3)による温度依存性を乗じたものである。式(1.3.9-2)には粘性抵抗力による累積吸収エネルギー量と粘性体の充填されている容積の比（以下、単位体積エネルギー） E_v / V_v に、式(1.3.9-3)には粘性体温度 t に適用範囲があり、今般調査の範囲はその適用範囲を超えるが、式(1.3.9-2)、式(1.3.9-3)が外挿可能であるものとして適用した。評価にあたって、粘性体温度は TM1、TM2 計測点の平均値を採った。

$$\alpha = 1 / (1 + a (E_v / V_v))^b \quad (1.3.9-2)$$

ここで、 α : 繰り返し依存係数（下限値： $\alpha = 0.7$ 、基準値 $\alpha = 0.85$ ）

E_v : 粘性抵抗力による累積吸収エネルギー量(J)

V_v : 粘性体の充填されている容積(cc)

適用範囲 $E_v / V_v \leq 1200 \text{J/cc}$

$a = 0.0016 \text{Ln}(f) + 0.011$ (short 型、10 万 cst 型)

$a = 0.0014 \text{Ln}(f) + 0.009$ (30 万 cst 型)

$b = 0.394 \cdot f^{0.087}$

f : 振動数(Hz) 適用範囲 $2 \text{s} \leq 1/f \leq 6 \text{s}$

$$\left. \begin{aligned} \xi_2 &= \eta(V_s, t) / \eta(V_s, 20) \\ \eta(V_s, t) &= \eta_t / (1 + b \cdot V_s)^\beta \times 10^{-6} \\ b &= 0.000472 \cdot \eta_t^{0.276} \\ \beta &= 0.308 \cdot \eta_t^{0.081} \\ \eta_t &= 1.02^{(25-t)} \cdot \eta_{25} \end{aligned} \right\} (1.3.9-3)$$

ここで、 t : 粘性体温度 (°C) 適用範囲 $0^\circ\text{C} \leq t \leq 40^\circ\text{C}$

V_s : せん断ひずみ速度 (s^{-1})

$\eta(V_s, t)$: せん断ひずみ速度 V_s 、温度 t における見かけの粘度($\text{Pa}\cdot\text{s}$)

η_t : 低速度定常領域、温度 t における動粘度(cSt)

η_{25} : 温度 25°C における動粘度(cSt)

$\eta_{25} = 100000$ (short 型、10 万 cst 型)

$\eta_{25} = 300000$ (30 万 cst 型)

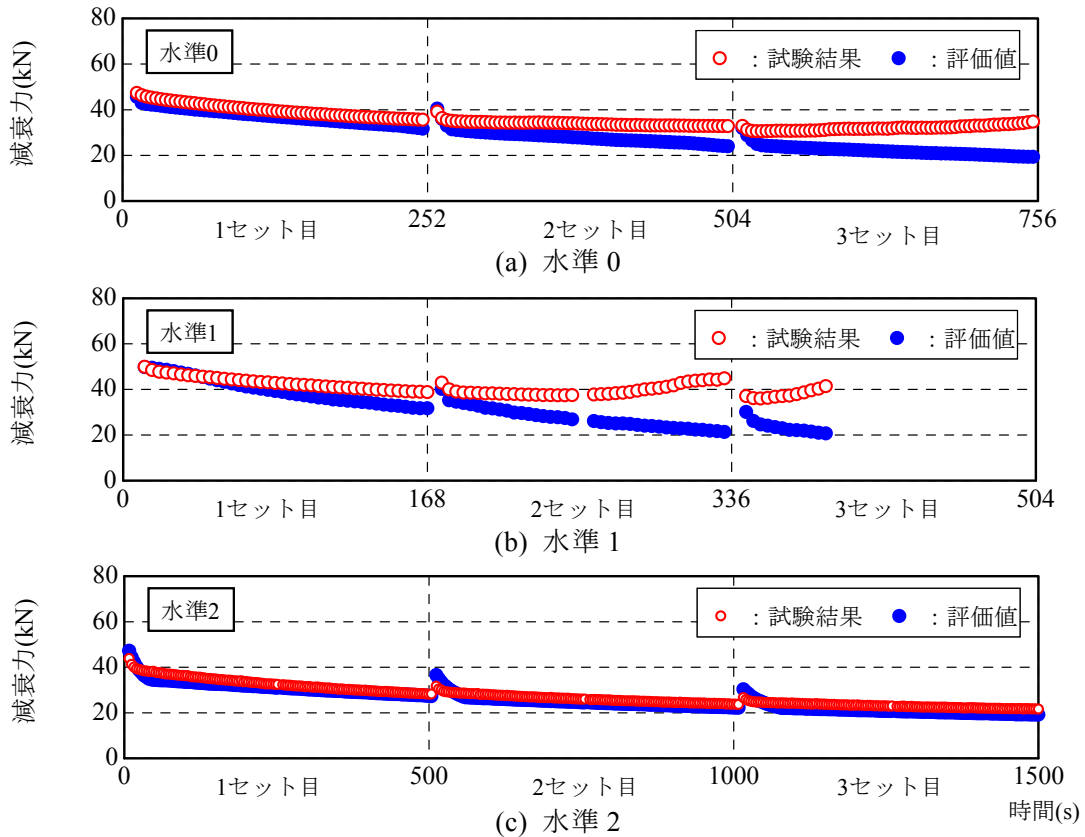


図 1.3.9-78 RDT8 試験体 繰り返し特性評価 実験値と既往評価式の比較

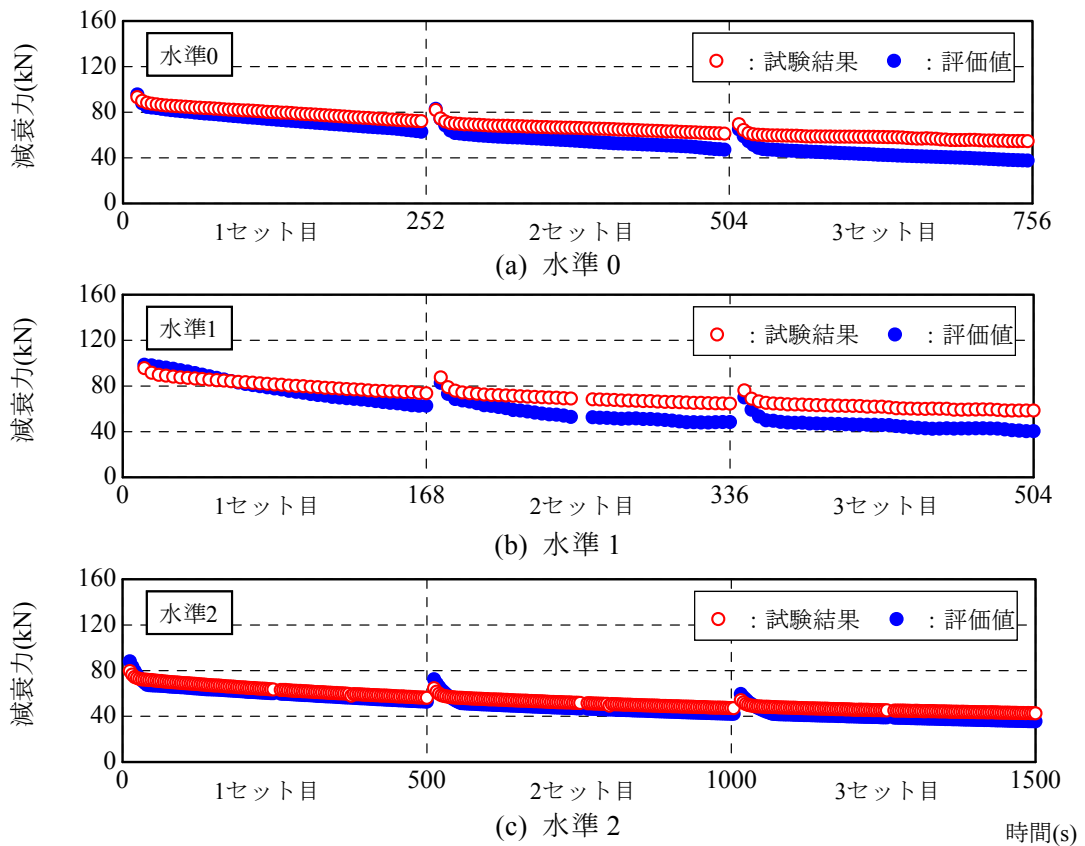


図 1.3.9-79 RDT16 試験体 繰り返し特性評価 実験値と既往評価式の比較

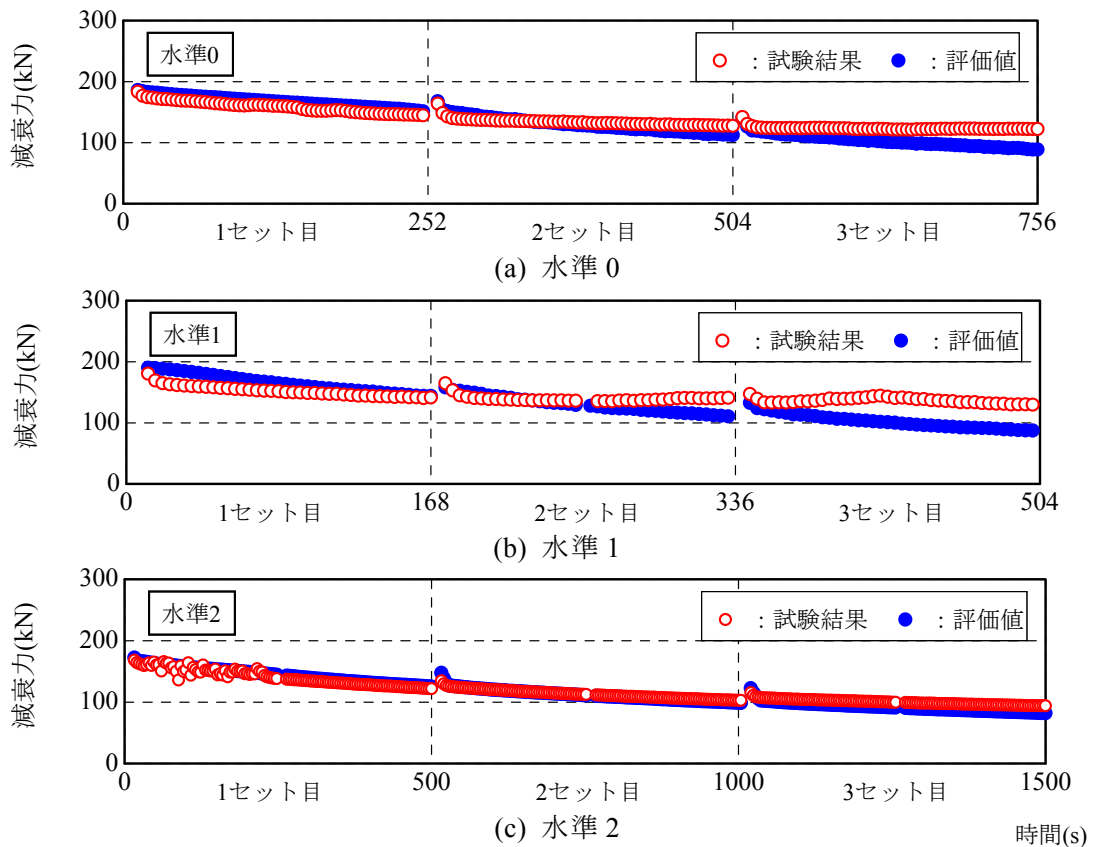
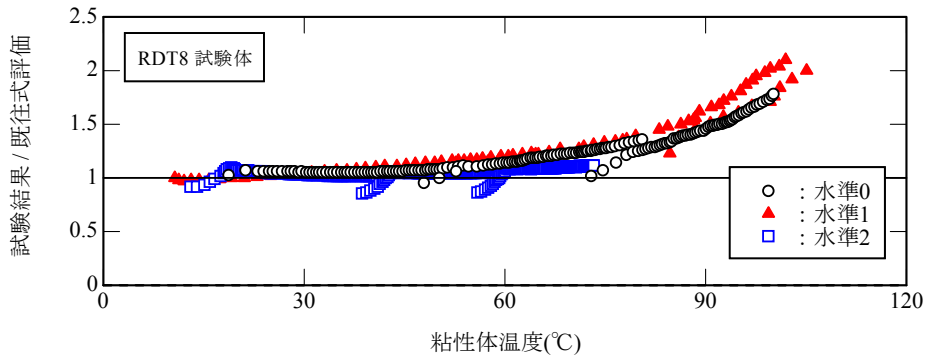


図 1.3.9-80 RDT30 試験体 繰り返し特性評価 実験値と既往評価式の比較

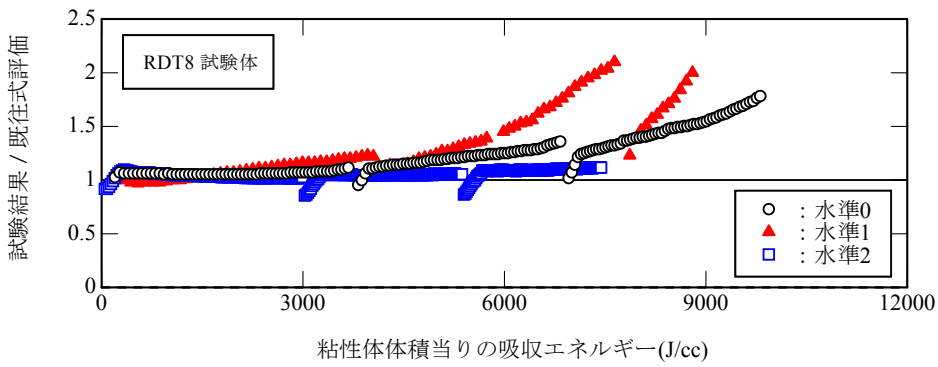
3 試験体とも水準 0 については 1 セット目に関する既往評価式による評価は実験結果とほぼ一致する。水準 2 については 1～3 セット目の全実験区間に関して、良い適合を示す。水準 1 については、RDT8、RDT16 試験体では 1 セット目の中盤で、RDT30 試験体では 2 セット目の中盤で既往評価式による評価は実験結果と乖離する。それ以後の乖離の方向は安全側（既往式による評価が実験結果よりも小さめの減衰力を与える）である。

詳細にみると、RDT8、RDT16 試験体における水準 1 の 1 セット目前半、RDT30 試験体における水準 0 および水準 1 の 2 セット目前半までは、既往評価式による評価が実験結果よりも大きく危険側の評価となっている。両者の差は RDT30 試験体における水準 0 の 1 セット目前半で大きい。

図 1.3.9-81～83 に、RDT8、RDT16、RDT30 各試験体について、実験結果による減衰力と既往評価式による値との比を、(a)粘性体温度（TM1、TM2 計測点の平均値）、(b)単位体積エネルギーで整理して示す。

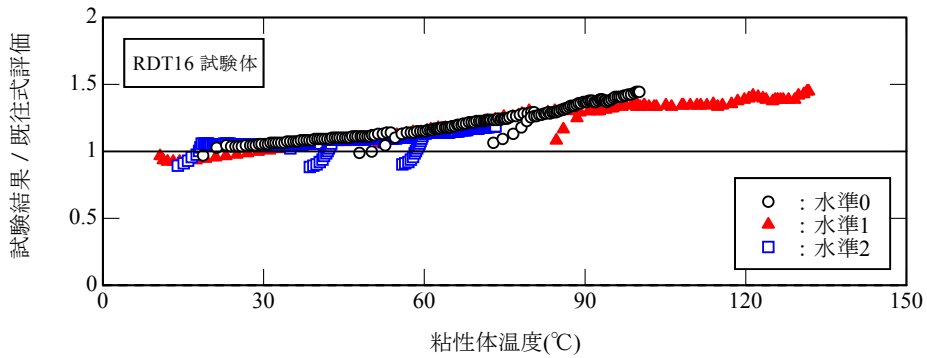


(a) 粘性体温度

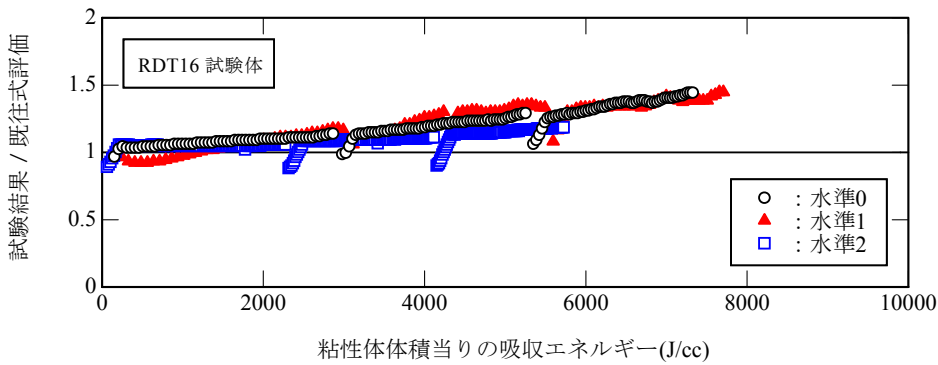


(b) 単位体積エネルギー

図 1.3.9-81 RDT8 試験体 既往評価式の適用限界



(a) 粘性体温度



(b) 単位体積エネルギー

図 1.3.9-82 RDT16 試験体 既往評価式の適用限界

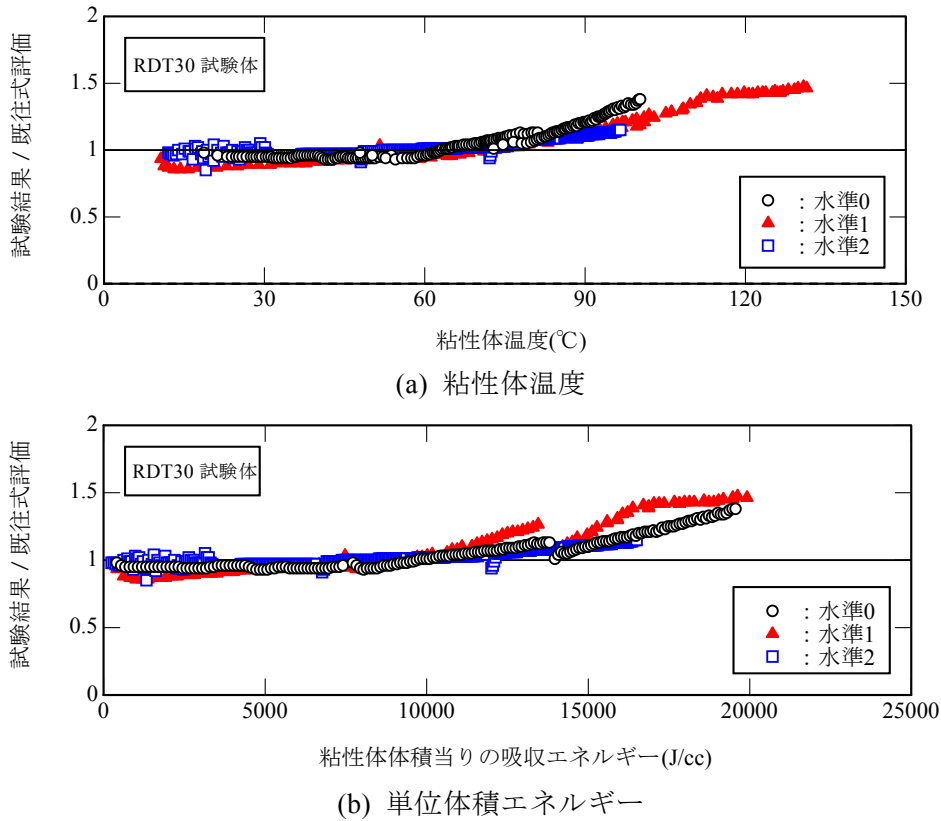


図 1.3.9-83 RDT30 試験体 既往評価式の適用限界

実験結果による減衰力と既往評価式による値が乖離を始める点として、RDT8 試験体では、粘性体温度については 50°C、単位体積エネルギーについては 3000 J/cc、RDT16 試験体ではそれぞれ 30°C、1200 J/cc、RDT30 試験体では 60°C、10000 J/cc 程度と評価でき、試験体によって相当の差がある。

既往評価式の適用限界は、試験体によっては、今般調査で想定した長周期地震動による応答で生じる温度上昇や単位体積エネルギーをカバーできない。限界を超えた領域では既往減衰力評価式は多くの場合実験結果を安全側に評価するが、長周期地震動に対する部材性能をより精度よく設計に反映させるためには、評価式の改善が必要となる。

b) 評価式の改善

前項の検討で、既往評価式が長周期地震動による応答を想定した多数回高速繰り返し領域に必ずしも適用できないことがわかったため、本項で評価式の改善を検討する。

また、既往の評価式は、繰り返し依存性と温度依存性が、それぞれ単位体積エネルギーと粘性体温度の関数として与えられており、評価の際にはそれらを組み合わせる必要がある。ところが、通常の構造設計における地震応答解析で、減衰材料に関する熱伝導解析をリアルタイムに行い時々刻々粘性体温度を評価することは設計ツールの問題でほとんど行われておらず、既往の評価式の運用には不便がある。また、本調査の実験結果として得られた温度分布を熱伝導解析によって予測する試みを実施したところ、温度上昇が認められる領域が粘性体充填部に限定される定性的な傾向については説明できるものの、3 試験体それぞれの定量的な温度上昇評価については必ずしも十分な精度が得られないという結果となり、設計ツールとして用いる地震応答解析と熱伝導解析を組み合わせるには相当の困難が予想される。

そこで、本調査においては、実験結果として得られた減衰力変動を、グロスで単位体積エネルギーの関数として表現することを原則とする。また、既往評価式では単位体積エネルギーには粘性吸収エネルギー E_v のみが評価されているが、ここでは簡便さを考慮して全吸収エネルギー E_d を用いて、 E_d/V_v を単位体積エネルギーと呼ぶ。また、必要に応じ、単位体積エネルギーの時間勾配 $\Delta E_d/V_v$ を評価関数として導入する。

評価式は実験式として、試験体毎に別個に表すものとする。

i) RDT8 試験体

図 1.3.9-84 に実験結果で得られた減衰力 (0 変位切片荷重) Q と初期条件の減衰力基準値 Q_0 の差分を、各水準毎に単位体積エネルギー E_d/V_v との相関で示す。減衰力基準値 Q_0 は表 1.3.9-17 に示すとおりである。ここで、実験中に減衰力の上昇が見られた水準 0 の 3 セット目、水準 1 の 2 セット目後半と 3 セット目は評価対象から省いた。

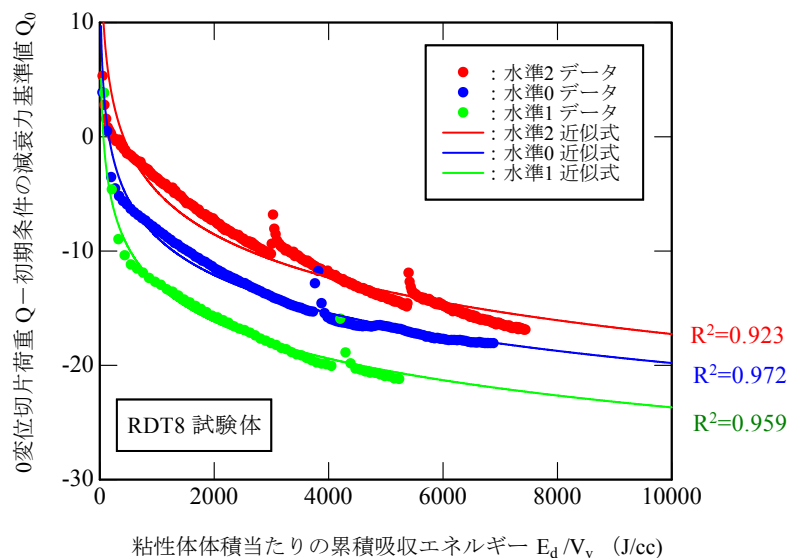


図 1.3.9-84 RDT8 試験体 減衰力低下量と単位体積エネルギーとの相関

表 1.3.9-17 RDT8 試験体 減衰力基準値 Q_0

水準	初期温度	速度	初期温度時の減衰力基準値
	℃	cm/s	kN
0	13.5	31.4	50.9
1	13.3	47.1	58.9
2	12.6	15.7	38.5

セット間のインターバル直後の数サイクルを除いて、各水準についてほぼ連続的な変化が生じていると解釈できる。実験条件のように 10 分程度のインターバルで長周期地震動が連続することを評価対象とすることは原則としてあり得ず、また、仮にあり得たとしても減衰力評価においては安全側の評価となることから、この部分的な不連続は評価式策定の対象から省き、一連の連続関数として評価する。

各水準について、 $Q-Q_0$ を E_d/V_v の関数で近似すると式(1.3.9-4)を得る。

$$\begin{aligned}
 \text{水準 0: } & g_0(E_d/V_v) = Q - Q_0 = -4.78 \cdot \log_e(E_d/V_v) + 24.5 \\
 \text{水準 1: } & g_1(E_d/V_v) = Q - Q_0 = -4.67 \cdot \log_e(E_d/V_v) + 19.3 \\
 \text{水準 2: } & g_2(E_d/V_v) = Q - Q_0 = -5.42 \cdot \log_e(E_d/V_v) + 32.7
 \end{aligned}
 \quad \left. \vphantom{\begin{aligned} \text{水準 0: } \\ \text{水準 1: } \\ \text{水準 2: } \end{aligned}} \right\} \quad (1.3.9-4)$$

3 水準の減衰力変動の差が、温度上昇の程度など吸収エネルギーの時間勾配に支配される要因に基づくと考えると、式(1.3.9-4)における各水準の差を粘性体体積当たりの吸収エネルギーの時間勾配 $\Delta E_d/V_v$ で表現する必要がある。ここでは、水準 0 を基準として、各水準の実験結果と水準 0 に関する式(1.3.9-4)との残差を $\Delta E_d/V_v$ で整理する。結果を図 1.3.9-85 に示す。水準毎の平均値を意識して近似式を求めると式(1.3.9-5)を得る。式(1.3.9-4)と組合せて RDT8 試験体に関する減衰力の多数回繰り返し特性評価式として式(1.3.9-6)を得る。

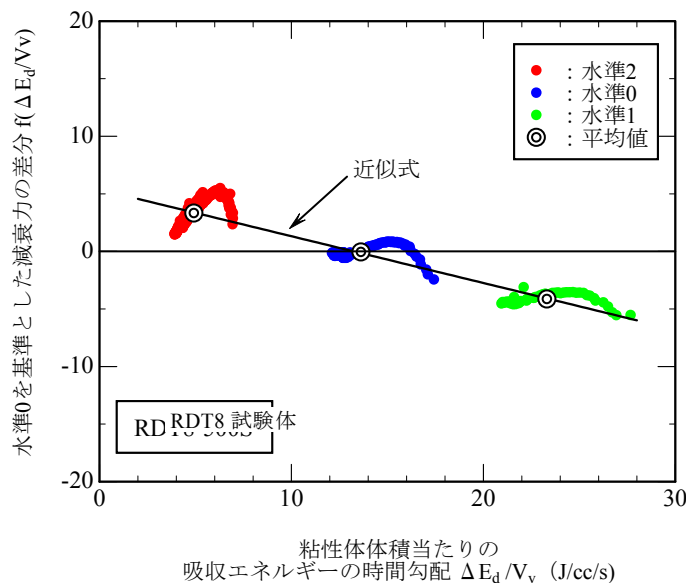


図 1.3.9-85 RDT8 試験体 各水準における減衰力低下量の水準 0 に関する式(1.3.9-4)との残差と単位体積エネルギーの時間勾配との相関

$$f(\Delta E_d / V_v) = -0.37 \times (\Delta E_d / V_v) + 5.07 \quad (1.3.9-5)$$

$$Q = Q_0 + (g_0(E_d / V_v) + f(\Delta E_d / V_v)) \quad (1.3.9-6)$$

式(1.3.9-6)の寄与率 R^2 は 0.907 である。

ii) RDT16 試験体

図 1.3.9-86 に実験結果で得られた減衰力 (0 変位切片荷重) Q と初期条件の減衰力基準値 Q_0 の差分を、水準毎に単位体積エネルギー E_d / V_v との相関で示す。減衰力基準値 Q_0 は表 1.3.9-18 に示すとおりである。各水準とも全セットを評価対象とした。

各水準について、 $Q - Q_0$ を E_d / V_v の関数で近似すると式(1.3.9-7)を得る。

表 1.3.9-18 RDT16 試験体 減衰力基準値 Q_0

水準	初期温度	速度	初期温度時の減衰力基準値
	℃	cm/s	kN
0	12.7	31.4	100.0
1	15.7	47.1	113.6
2	13.1	15.7	73.6

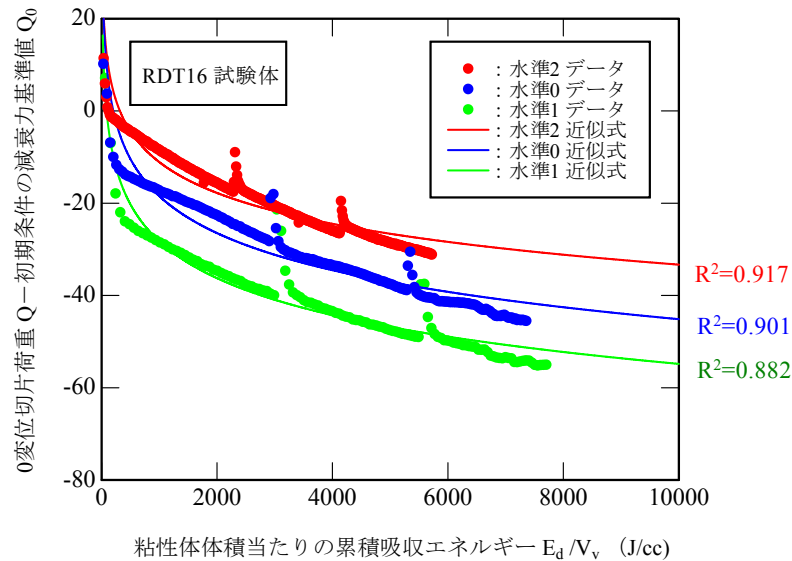


図 1.3.9-86 RDT16 試験体 減衰力低下量と単位体積エネルギーとの相関

$$\left. \begin{aligned} \text{水準 0 : } & g_0(E_d / V_v) = Q - Q_0 = -11.6 \cdot \log_e(E_d / V_v) + 61.6 \\ \text{水準 1 : } & g_1(E_d / V_v) = Q - Q_0 = -11.5 \cdot \log_e(E_d / V_v) + 51.5 \\ \text{水準 2 : } & g_2(E_d / V_v) = Q - Q_0 = -9.66 \cdot \log_e(E_d / V_v) + 55.6 \end{aligned} \right\} \quad (1.3.9-7)$$

水準0を基準として、各水準の実験結果と水準0に関する式(1.3.9-7)との残差を $\Delta E_d / V_v$ で整理したものを図 1.3.9-87 に示す。これを水準毎の平均値を意識して近似式を求めると式(1.3.9-8)を得る。式(1.3.9-7)と組合せて RDT16 試験体に関する減衰力の多数回繰り返し特性評価式として式(1.3.9-9)を得る。

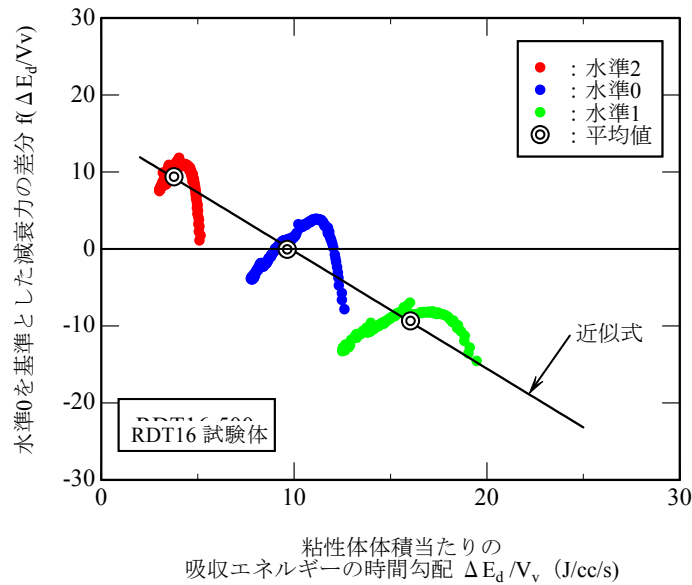


図 1.3.9-87 RDT16 試験体 各水準における減衰力低下量の水準0に関する式(1.3.9-7)との残差と単位体積エネルギーの時間勾配との相関

$$f(\Delta E_d / V_v) = -1.55 \times (\Delta E_d / V_v) + 14.8 \quad (1.3.9-8)$$

$$Q = Q_0 + (g_0(E_d / V_v) + f(\Delta E_d / V_v)) \quad (1.3.9-9)$$

式(1.3.9-9)の寄与率 R^2 は 0.861 である。

iii) RDT30 試験体

図 1.3.9-88 に実験結果で得られた減衰力 (0 変位切片荷重) Q と初期条件の減衰力基準値 Q_0 の差分を、水準毎に単位体積エネルギー E_d / V_v との相関で示す。減衰力基準値 Q_0 は表 1.3.9-19 に示すとおりである。水準0の3セット目後半、水準1の2セット目後半と3セット目は評価対象から省いた。

表 1.3.9-19 RDT30 試験体 減衰力基準値 Q_0

水準	初期温度	速度	初期温度時の減衰力基準値
	°C	cm/s	kN
0	13.1	31.4	233.8
1	10.6	47.1	255.0
2	12.2	15.7	201.7

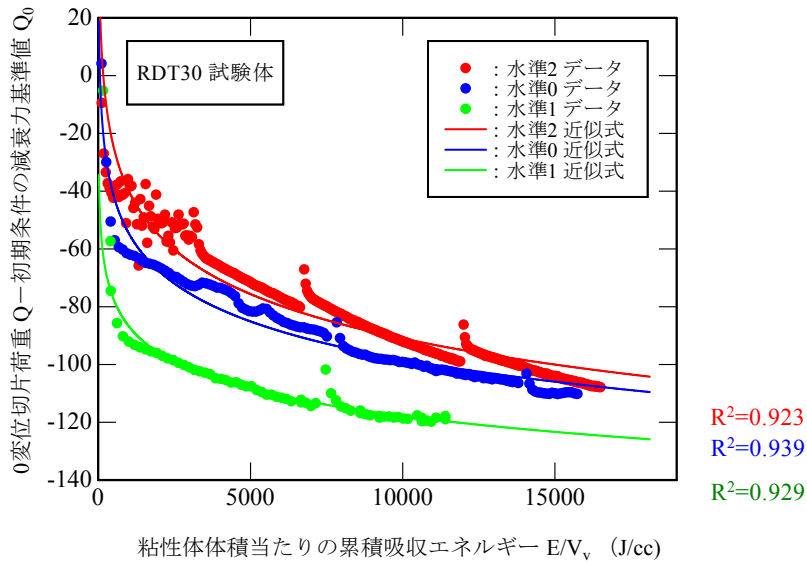


図 1.3.9-88 RDT30 試験体 減衰力低下量と単位体積エネルギーとの相関

各水準について、 $Q - Q_0$ を E_d / V_v の関数で近似すると式(1.3.9-10)を得る。

$$\begin{aligned}
 \text{水準 0 : } g_0(E_d / V_v) &= Q - Q_0 = -18.9 \cdot \log_e(E_d / V_v) + 76.6 \\
 \text{水準 1 : } g_1(E_d / V_v) &= Q - Q_0 = -13.5 \cdot \log_e(E_d / V_v) + 6.78 \\
 \text{水準 2 : } g_2(E_d / V_v) &= Q - Q_0 = -22.2 \cdot \log_e(E_d / V_v) + 113.6
 \end{aligned}
 \quad (1.3.9-10)$$

水準 0 を基準として、各水準の実験結果と水準 0 に関する式(1.3.9-10)との差分を $\Delta E_d / V_v$ で整理したものを図 1.3.9-89 に示す。これを水準毎の平均値を意識して近似式を求めると式(1.3.9-11)を得る。式(1.3.9-10)と組合せて RDT30 試験体に関する減衰力の多数回繰り返し特性評価式として式(1.3.9-12)を得る。

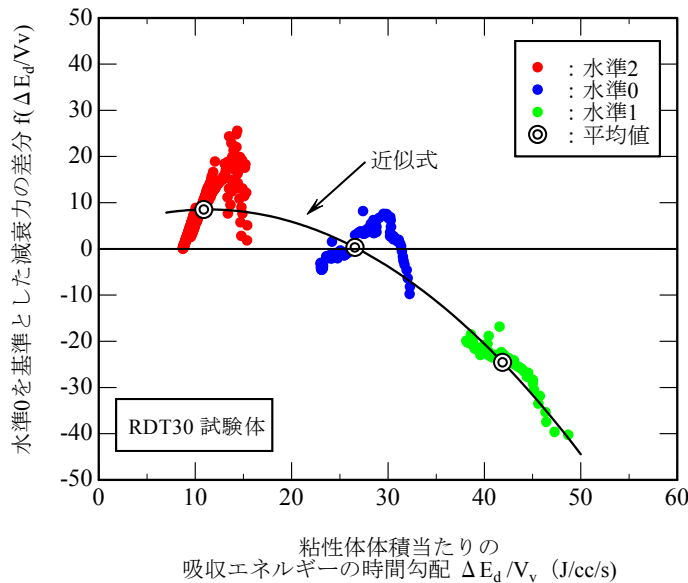


図 1.3.9-89 RDT30 試験体 各水準における減衰力低下量の水準 0 に関する式(1.3.9-10)との残差と単位体積エネルギーの時間勾配との相関

$$f(\Delta E_d / V_v) = -0.046(\Delta E_d / V_v)^2 + 1.403(\Delta E_d / V_v) + 1.97 \quad (1.3.9-11)$$

$$Q = Q_0 + (g_0(E_d / V_v) + f(\Delta E_d / V_v)) \quad (1.3.9-12)$$

式(1.3.9-12)の寄与率 R^2 は 0.907 である。

式(1.3.9-6) (1.3.9-9) (1.3.9-12)は、当該試験体に関する実験式である。調査対象とならなかった製品についても同形式の実験式を求めることができると考えられるが、その係数は当該製品における粘性体の熱容量、粘性体に接する鉄部の有効体積などの構成に依存するものと考えられる。

2) 限界状態

a) 使用限界

前述のように、RDT8 試験体水準 0 の 3 セット目、水準 1 の 2 セット目後半および 3 セット目、RDT30 試験体の水準 1 の 2 セット目後半および 3 セット目において、従前の実験でいったん低下した減衰力が上昇に転じるという現象が把握された。RDT30 試験体では粘性体圧力が計測されており、この減衰力の再上昇と圧力の上昇傾向とが対応する事象であると解釈できる。

すなわち、「多数回繰り返し変形による過大なエネルギー吸収」→「粘性体の温度上昇」→「粘性体圧力の過大な上昇」→「減衰力の再上昇」という連関が想定でき、減衰力の再上昇として現れた現象を当該免震材料の使用限界発現であると解釈することができる。

RDT30 試験体の実験結果から、使用限界発現の閾値としての粘性体圧力を評価する。水準 0 の 3 セット目では減衰力上昇は観察されなかったものの減衰力低下がごくわずかであった。このセットにおける粘性体最大圧力は 2.0MPa (19.7 気圧) であった。一方、水準 1 の 2 セット目ではその後半でわずかな減衰力上昇が観察された。このセットにおける粘性体最大圧力は 2.5MPa (24.4 気圧) であった。

これらの実験結果から、粘性体最大圧力 2.0~2.5MPa が、減衰力上昇として観察される使用限界発現の閾値に相当すると評価できる。

b) 終局限界

RDT8 試験体水準 1 の 3 セット目では、粘性体温度センサー取付用キャップのセンサー挿入孔をふさぐエポキシ樹脂シールが破損し内部粘性体が漏出した (写真 1.3.9-7~8)。センサー取付用キャップは出荷実験時に温度センサーを挿入するために設けられているものであり、出荷時には孔のないキャップに交換されるので、今般実験で生じた破損が実製品で生じるとは考えにくく、今般実験に用いた試験体に限定された終局限界として位置づけられる。

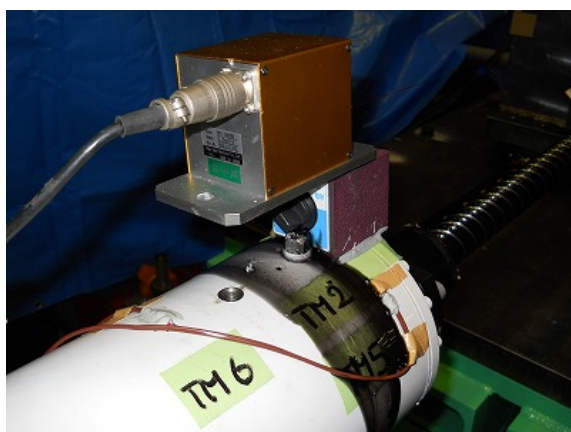


写真 1.3.9-7 RDT8 試験体の内部粘性体漏出の状況



写真 1.3.9-8 RDT8 試験体のセンサー取付用キャップの状況

但し、破損直前には減衰力再上昇が相当程度生じており、RDT30 試験体では減衰力再上昇と粘性体圧力上昇が対応する事象として観察されていることから、この破損は上述の使用限界発現に連続する事象であると考えることができ、実製品においては、オイルバッファ部またはシール部などで起こり得る終局限界の一つの可能性を示唆していると解釈することができる。

RDT30 試験体で計測された粘性体最大圧力は水準 1 の 3 セット目における 6.5MPa (64.0 気圧) であり、この時点で減衰力再上昇の程度は、RDT8 試験体の破損直前ほどには著しくない。したがって、上記のような終局限界の発現を想定したとしても、その閾値に相当する粘性体最大圧力は 6.5MPa を大きく上回ると考えることができる。

1.3.9.3 まとめと課題

(1) まとめ

粘性ダンパー（国土交通省の免震材料に関わる基準において流体系減衰材（作動油を用いないもの）として位置づけられるもの）を代表する減衰部材として、免制震デバイス社/THK社・AT式増幅機構付き減衰装置－減衰こまを対象として、多数回高速繰り返し実験を実施することにより特性の変動を調査した。

長周期地震動による応答1回分に相当する実験条件として累積変形量50m以上となる高速繰り返し条件を設定した。具体的には、加振波形を正弦波とし、振幅の異なる3水準（水準0：振幅200mm、水準1：振幅300mm、水準2：振幅100mm）を実験パラメータとして設定した。長周期地震動による応答1回分の実験を1セットと称し、10分程度のインターバルを挟んで、原則として3セットまで行った。同一の試験体に対し異なる水準の実験を行う場合には、20時間程度以上実験棟内に放置し、試験体内部の各点温度がほぼ同様となり、かつ粘性体温度が室温程度に低下したことを確認した後に実施した。

後述するRDT8試験体水準1の3セット目を除き、いずれの試験体、何れの水準についても、安定した形状の荷重変形関係が確認され、減衰部材としての機能が失なわれることはなかった。大局的には、減衰力（0変位切片荷重）は各セット内およびセット間を通じて連続的に低下し、粘性体温度、外筒表面温度は連続的に上昇する傾向を示した。既往評価式は長周期地震動を想定していないため、適用範囲を超過した領域で実験結果から安全側に乖離する傾向を示した。

調査対象部材に関わる3種類の材料認定のうち、10万cst型を代表するRDT16試験体については全ての水準で、30万cst型を代表するRDT30試験体では水準0および水準2で、short型を代表するRDT8試験体では水準2で、上述した減衰力、温度の変動傾向が確認された。但し、RDT30試験体の水準0の3セット目では、減衰力低下はごくわずかであった。RDT30試験体水準0で粘性体最高温度は150℃程度に至った。

RDT30試験体の水準1、RDT8試験体の水準0および水準1では2セット目の後半ないし3セット目の序盤から、いったん低下した減衰力が再上昇する傾向が見られた。RDT8試験体の水準1では3セット目の前半で減衰力の上昇に続いて温度センサー取付用キャップのセンサー挿入孔をふさぐエポキシ樹脂シールが破損し内部粘性体が漏出した。RDT30試験体の粘性体圧力計測結果から、減衰力の再上昇と圧力の上昇傾向とは対応する事象であると解釈でき、粘性体シール部破損による漏出はそれに連続する事象であると考えられる。調査対象とした試験体については、前者を使用限界、後者を終局限界と位置付けることができる。粘性体圧力との対応から、前者の閾値に相当する粘性体最大圧力を2.0～2.5MPaと、後者の閾値に相当する粘性体最大圧力は6.5MPaを相当上回ると考えることができる。なお、実建物に用いられる製品では、温度センサー取付用キャップは孔のないキャップに交換されて出荷されるので、今般実験で発現した終局限界は実製品で起こり得る終局限界の一つの可能性を示唆しているとの解釈に留まる。

繰り返し特性に関する既往評価式の限界を超える領域までの適用を考慮して、粘性体体積当たりの吸収エネルギーとその時間勾配を説明変数とする近似式を各試験体について求めた。寄与率 R^2 はRDT8試験体、RDT16試験体、RDT30試験体のそれぞれについて0.907、0.861、0.907となった。

(2) 今後の課題

既往の繰り返し特性評価式は、長周期地震動による応答を想定していないため、検討条件によっては適用範囲を超える可能性がある。また、設計条件を超える想定外の繰り返しに対しては乖離が大きくなる惧れがある。本調査では、対象とした試験体それぞれについて実験結果を近似する評価式を求めたが、多くの製品に適用できる統一的评价式とはなっていない。各式における係数は、各試験体における粘性体と周辺部材の熱容量のバランスを反映していると考えられるので、今後、必要に応じて、実験的、解析的検討を行い、統一的评价を策定してゆくことが望まれる。

試験体や実験水準によっては、設計条件を超える領域で、一旦低下した減衰力の再上昇や温度センサー取付部のシール破損による粘性体流出として把握される限界状態の発現が見られた。

これらの現象は、温度上昇に伴う粘性体圧力の上昇に起因するものと推測され、粘性体圧力はバッファ部分を含めた粘性体充填部分の容積に、温度上昇は粘性体と周辺部材の熱容量のバランスに影響を受けると考えられる。今後、免震材料に要求される設計余裕度の考え方によっては、より温度上昇、圧力上昇を抑制可能な免震材料の構成方法を検討する必要性が生じることも考えられる。

また、限界状態を確認しておくことは、設計者が余裕度を明確に設定するための有益なデータとなるので、免震材料自体の設計や性能把握の過程で、設計条件を超える領域における特性と限界状態の発現に関わる情報を明確にしておくことが望ましい。

参考文献

- 1.3.9-1) 日本免震構造協会編：免震構造 部材の基本から設計・施工まで；オーム社、2010.12
- 1.3.9-2) 光阪勇治ほか：増幅機構付き減衰装置の高速度領域における性能評価（その2）高速試験結果；日本建築学会大会学術講演梗概集、B2、P761、2003.9
- 1.3.9-3) 国土交通省：AT 式増幅機構付き減衰装置－減衰こま（RDT-AT-short）建築材料認定書（MVBR-0387）；別表、2008.8
- 1.3.9-4) 国土交通省：AT 式増幅機構付き減衰装置－減衰こま（Rotary Damping Tube）RDT-AT-10万 cst 建築材料認定書（MVBR-0221）；別表、2004.4
- 1.3.9-5) 国土交通省：AT 式増幅機構付き減衰装置－減衰こま（Rotary Damping Tube）RDT-AT-30万 cst 建築材料認定書（MVBR-0222）；別表、2004.4

1.4 まとめ

長周期地震動に対する免震建築物の安全性を検討するために必要となる各種免震部材の性能を明らかとすることを目的として、部材の多数回繰り返し実験（縮小または実大実験）を行った。

実験の対象とする部材は、免震支承、免震ダンパーとして一般的に用いられているものを対象とした。各部材の試験条件として、第Ⅱ部第2章の検討結果および既往の研究成果を参考に、振幅400mm以下の3水準（400、200、100mm）の変位振幅および累積変形量2水準（50m, 100m）を目標とする正弦波加振を設定し、各部材の試験を実施した。

各部材の実験により得られた主な知見と今後の課題を以下に示す。

・天然ゴム系積層ゴム

荷重-変位関係では、 $\gamma=50\%$ および $\gamma=100\%$ では長周期・限界の両試験とも繰り返しの伴う履歴形状の変化は極めて小さく、全ケースにおいても長周期・限界の試験条件に対して安定した特性を示すことが確認された。

今後の課題として、多数回繰り返しによる特性値評価式の検討および地震応答解析への反映、実大試験体による特性値変動に対するスケール効果の確認などが挙げられる。

・鉛プラグ入り積層ゴム

いずれの加振ケースについても、履歴曲線の面積は加振に伴い徐々に小さくなったが、長周期加振で履歴形状が安定し、それ以上の加振を与えても履歴特性はほとんど変化しないことが確認された。

鉛プラグの温度上昇に伴う力学特性の変化を設計に反映するための評価法が今後の課題となる。また、3本プラグタイプでは1本プラグタイプと比較して繰り返しによる降伏荷重の低下が小さいことが確認され、解析的検討などさらなる検討が期待される。

・高減衰ゴム系積層ゴム

多数回繰り返し加振による水平復元力特性値の低下の下限値は、3サイクル目の値に対して K_{eq} は0.7倍程度、 H_{eq} および u は0.6~0.7倍程度とみられる。累積変形量、累積エネルギー量、試験体温度と水平復元力特性値の関係を見ると、 K_{eq} は累積エネルギー量に対して加振振幅に関わらずほぼ一致した傾向を示している。

今後の課題としては、繰り返しによる特性変化を地震応答解析に反映させる際の評価指標の整理、サイズの違いによる影響の確認などが挙げられる。

・弾性すべり支承（高摩擦）

基準面圧（20N/mm²）の長周期、限界試験における摩擦係数は回数を繰り返すことで減少した。繰り返しの伴う摩擦係数の減少傾向はインターバル時間中には一旦止まり、摩擦係数が復帰する傾向にあった。基準面圧（20N/mm²）、振幅±100mm、インターバルありのすべり板温度は、長周期で236~238℃、限界で258℃まで上昇した。すべり板の温度と摩擦係数には比較的良い負の相関が見られた。

今後の課題として、多数回繰り返しによる特性値評価式の検討および地震応答解析への反映、

実大試験体による温度上昇や特性値変動に対するスケール効果の確認などが挙げられる。

- ・弾性すべり支承（低摩擦）

面圧 20MPa 試験体では全 10 セットにわたり、面圧 30MPa 試験体では当初の 4~5 セットにわたり、各セットの摩擦係数下限値にほとんど変化は見られない。また、各セットのエネルギー吸収量の変動もほとんどない。インターバル時間を 3 分としたセットでは、摩擦係数の復帰が小さかったが、下限値に大きな変化はない。以上の実験結果より、調査対象とした免震部材は、繰り返し特性に優れた部材であると評価できる。

今後の課題として、高速繰り返し試験条件におけるすべり板温度とその変動に対する変化率の考慮、吸収エネルギーなどを指標とした評価式、実用性に向けた評価式の検証などが挙げられる。

- ・鋼材ダンパー

いずれのケースについても、0 度方向に設置された 2 本のダンパーロッドが相次いで破断し、その後、90 度方向のダンパーロッド 1 本が破断し、実験を終了した。ダンパーの荷重は繰り返しの伴い次第に小さくなり、ダンパーロッドが破断するたびに大きく低下した。1 サイクルの吸収エネルギー量は、定振幅繰り返し载荷において破断に至る数回前のサイクルで 2 サイクル目に対して 85%程度になった。

今後の課題としては、地震応答変位波形に対する疲労特性および水平 2 方向加振に対する疲労特性の把握が挙げられる。

- ・鉛ダンパー

一定振幅時では繰り返しにより降伏荷重は低下する傾向を示した。繰り返しによる水平荷重は、発熱のための温度変化および鉛の形状変化により変化する。また、荷重は振幅依存性があり、変位が大きくなるに応じて荷重値も増大する現象が確認された。また、破断に影響を及ぼすパラメータとして、加振の連続性ならびに加力方向が考えられた。

本試験結果をふまえ、長周期地震動における応答評価に向けた復元力特性の検討が今後の課題である。

- ・オイルダンパー

多数繰り返し加振直後の高温状態における基本特性（出荷試験の各速度における最大減衰力）の変化は小さく、常温化の初期状態に比べて最大でも 6%程度の低下であった。油温が常温状態に戻ると、基本特性（出荷試験の各速度における最大減衰力）は、ほぼ初期状態に復元する。

今後の課題としてインターバル無しでの連続加振と地震応答波加振の実施が挙げられる。

- ・粘性ダンパー

基本的に安定した形状の履歴ループが確認され、減衰材料としての機能が失われることはなかった。大局的には、減衰力（0 変位切片荷重）は各セット内およびセット間を通じて連続的に低下し、粘性体温度、外筒表面温度は連続的に上昇する傾向を示した。

今後の課題としては、実験的、解析的検討による統一的評価式の策定などが挙げられる。

以上より、免震部材実験によって、多数回繰り返しのもとでのエネルギー吸収性能の変化を確

認した。今後の課題として、影響要因の整理と繰り返し特性を反映した履歴特性および特性値評価式の検討、地震応答や連続加振（インターバルなし）のもとでの特性把握、実大試験体の実験によるスケール効果の把握、などが挙げられる。

第2章 免震部材の繰り返し特性と長周期地震動に対する免震建築物の応答評価（1）

2.1 目的

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定に向けて、多数回繰り返し時の免震部材の特性評価とモデル化、免震部材の特性を考慮した応答解析に基づく応答評価を実施する。

2.2 全体方針

(1) 方針

既往の研究と免震部材メーカー提供による多数回繰り返し特性を解析に反映させ、長周期地震動に対する免震建築物の応答解析を実施し、応答評価を行う。

検討ケースは以下の通りとする。

- ① 鉛プラグ入り積層ゴム
- ② 高減衰ゴム系積層ゴム
- ③ 天然ゴム系積層ゴム+鋼材ダンパー
- ④ 天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパー
- ⑤ 天然ゴム系積層ゴム+オイルダンパー
- ⑥ 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（高摩擦）
- ⑦ 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（低摩擦）+粘性ダンパー

各免震部材について、応答解析に反映させるべきもの（累積変形、温度上昇などの関数として評価できるもの）、通常の応答解析を行って結果から評価できるものなど、評価手法を整理する。応答解析に反映させるものについては、各社が独自にプログラムを改良し、繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを整備する。

検討用長周期地震動に対する応答解析結果を整理し、多数回繰り返しによって何が問題となるかを抽出する。また、入力倍率が1.0倍、1.25倍、1.5倍と大きくなることによって、繰り返し依存性がどのように応答に影響するかを考察し、繰り返し依存性を考慮した場合としない場合の比較から、今後の課題等を抽出する。

(2) 解析モデル

解析モデルは上部構造を剛体モデルとした1質点モデルとし、免震層の設定は積層ゴムによる免震周期4.0秒程度、ダンパーの負担せん断力係数3.0~3.5%を標準とし、免震支承毎に設定を行なう。

また、①鉛プラグ入り積層ゴム、⑥天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（高摩擦）については、2方向入力に対する検討を行い、2方向入力に応答に与える影響について検討する。

(3) 入力地震動

入力地震動は以下の4波とする。

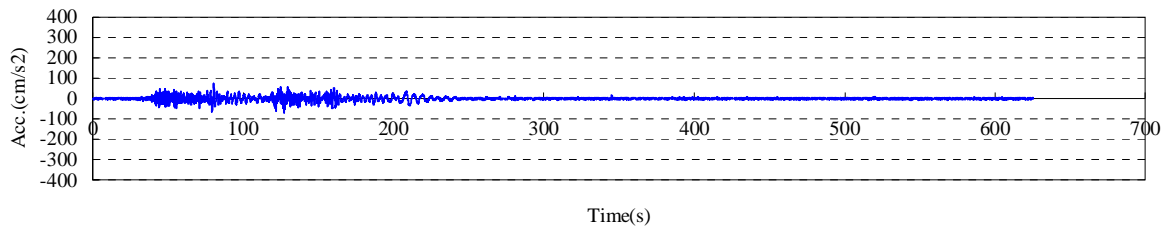
- | | |
|----------------|---------------------------|
| N-OSKH02-AV | （大阪・此花（南海地震）平均） |
| T-TN-AIC003-AV | （愛知・津島 K-NET（東海・東南海連動）平均） |
| T-TN-AIC004-AV | （名古屋K-NET（東海・東南海連動）平均） |
| T-TN-KGIN1F-AV | （東京・工学院大（東海・東南海連動）平均） |

入力地震動の諸元を表 2.2-1 に、加速度時刻歴波形を図 2.2-1、擬似速度応答スペクトルを図 2.2-2、エネルギースペクトルを図 2.2-3 に示す。

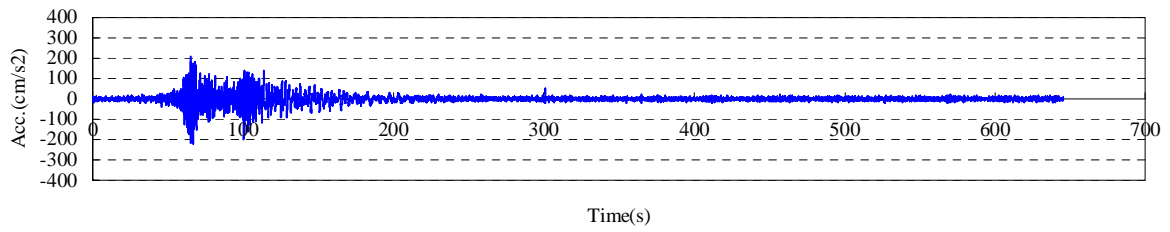
表 2.2-1 入力地震動諸元

地震波	加速度 (cm/s^2)	速度 (cm/s)	変位 (cm)	継続時間 (s)
N-OSKH02-AV	70.9	34.2	30.4	625.36
T-TN-AIC003-AV	221	31.0	24.1	645.36
T-TN-AIC004-AV	323	22.3	13.7	645.36
T-TN-KGIN1F-AV	89.6	21.5	23.1	620.0

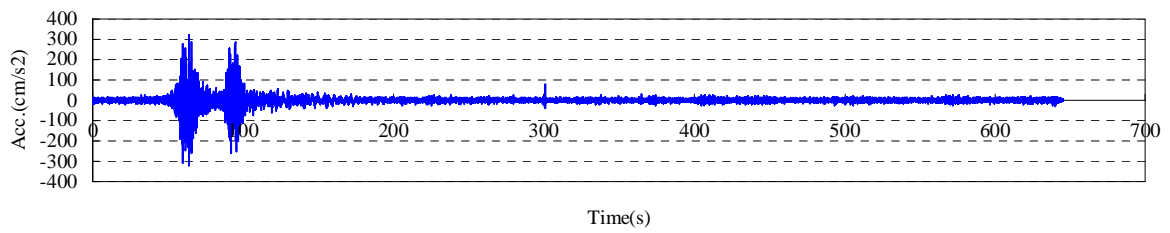
検討には上記入力地震動のレベルを 1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍として応答解析を実施する。



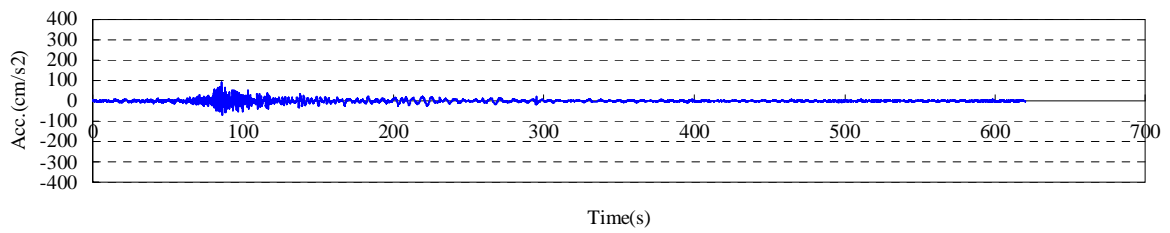
(a) N-OSKH02-AV



(b) T-TN-AIC003-AV



(c) T-TN-AIC004-AV



(d) T-TN-KGIN1F-AV

図 2.2-1 入力地震動加速度時刻歴波形

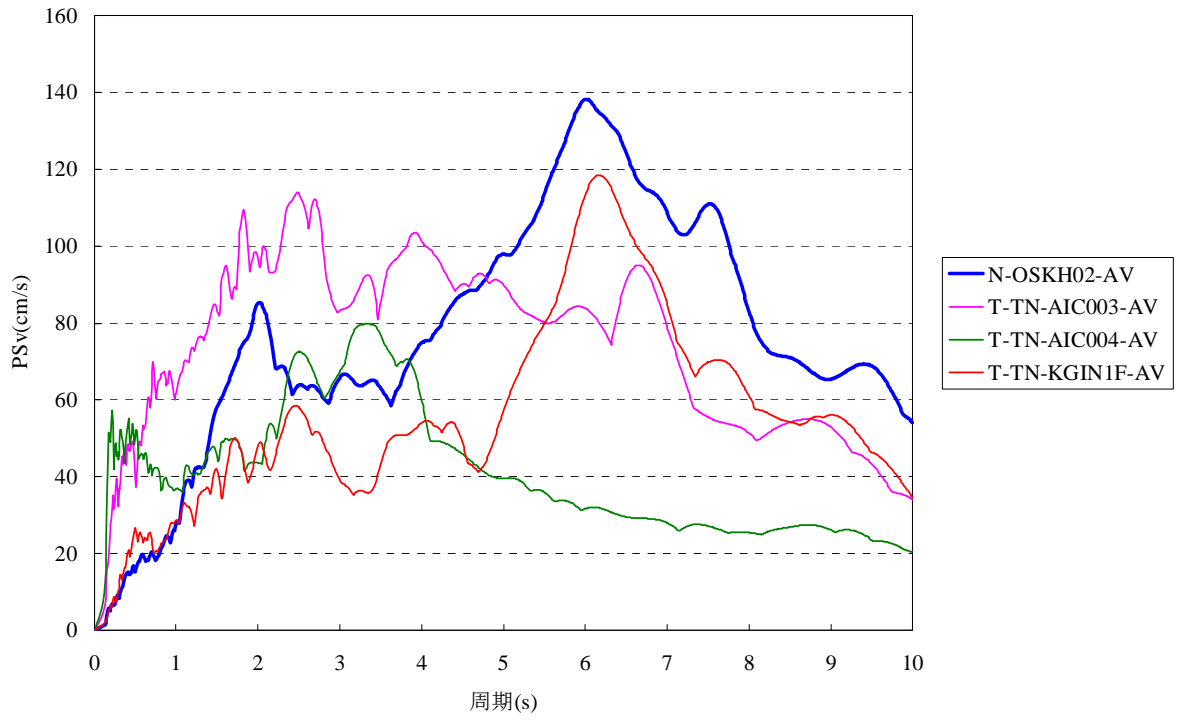


図 2.2-2 入力地震波擬似速度応答スペクトル(h=0.05)

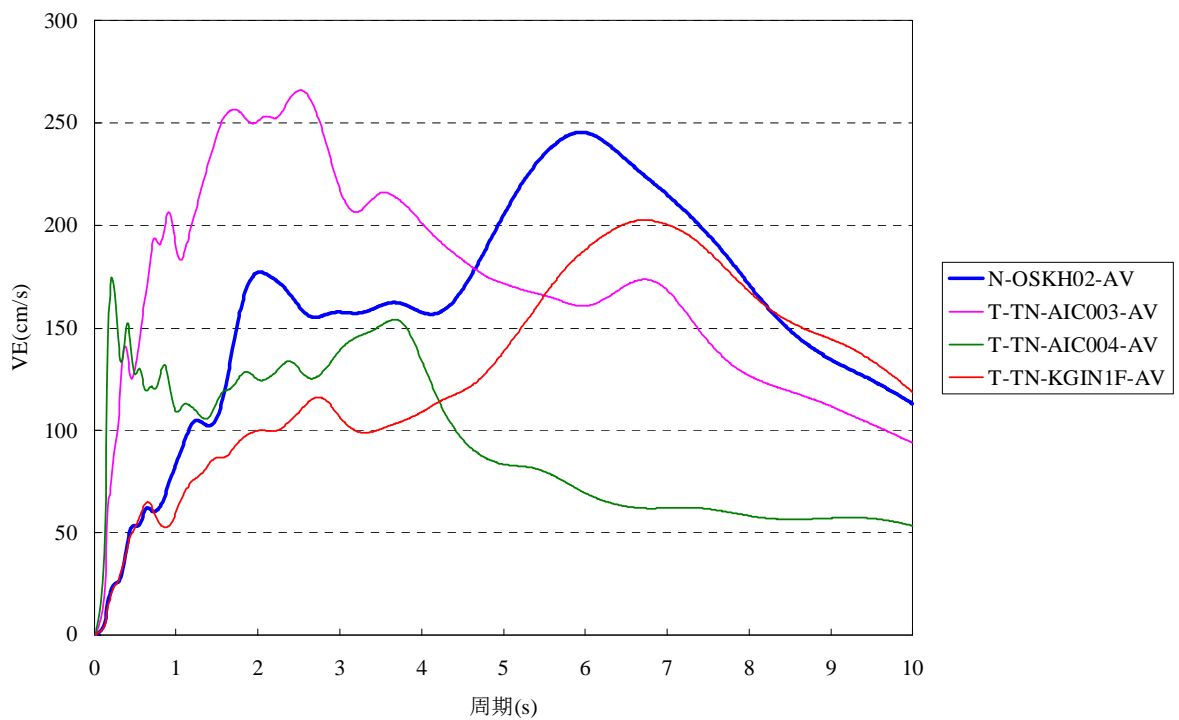
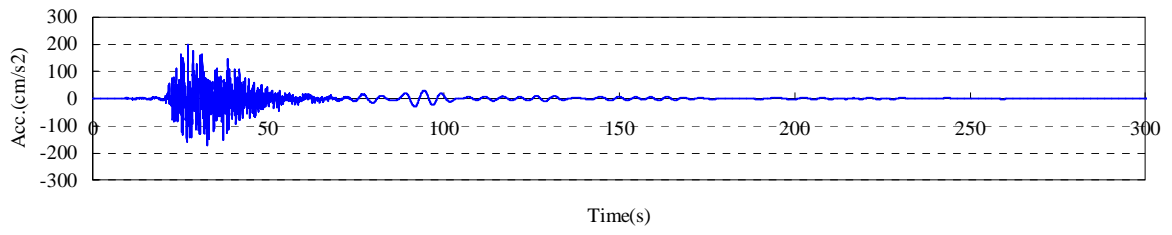


図 2.2-3 入力地震波エネルギースペクトル(h=0.10)

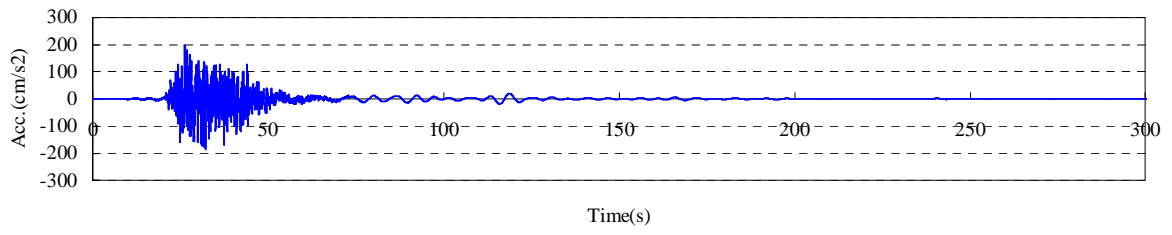
また、一部の免震支承の検討には2方向入力を考慮した解析を行う。2方向入力地震動の諸元を表2.2-2に、加速度時刻歴波形を図2.2-4、擬似速度応答スペクトルを図2.2-5、エネルギースペクトルを図2.2-6に示す。

表 2.2-2 2方向入力地震動諸元（各最大値と継続時間）

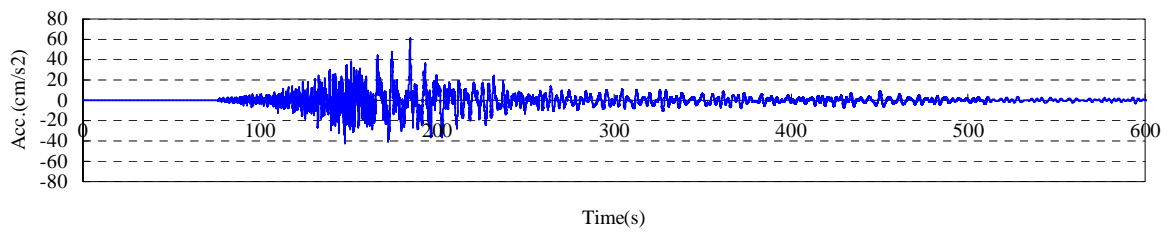
地震波	成分	加速度 (cm/s ²)	速度 (cm/s)	変位 (cm)	継続時間 (s)
WAVE-Ts1	NS	197	40.5	31.4	327.69
	EW	197	37.1	48.8	327.69
WAVE-Ts2	NS	59.5	30.6	38.9	600.0
	EW	60.8	35.7	52.2	600.0
WAVE-Tk	NS	190	30.6	22.3	1000.0
	EW	192	38.3	39.1	1000.0
WAVE-S	NS	84.9	25.5	19.1	297.92
	EW	69.3	24.8	19.9	297.92
WAVE-K	NS	106	19.2	19.2	668.86
	EW	87.2	15.1	13.6	668.86



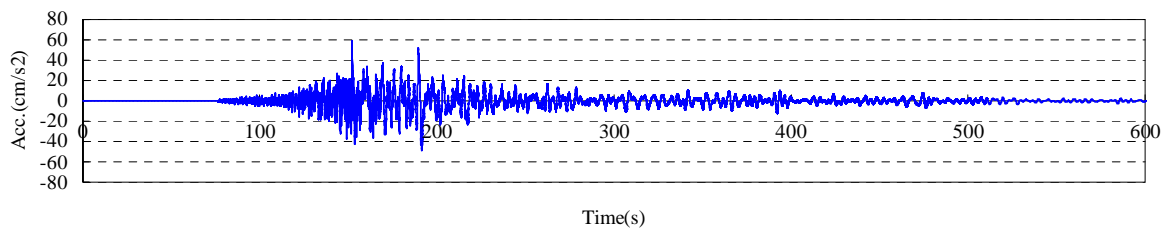
(a-1) WAVE-Ts1-NS



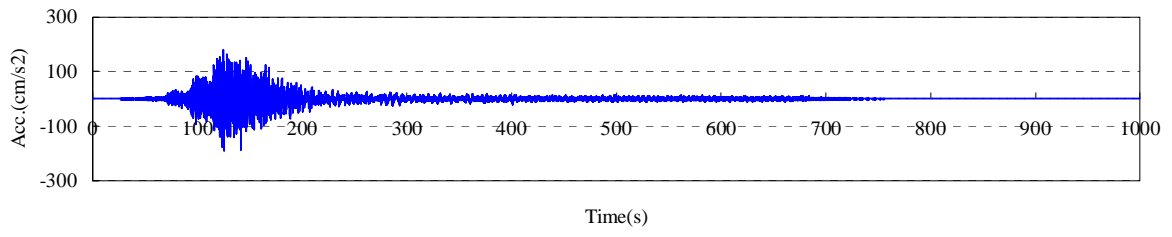
(a-2) WAVE-Ts1-EW



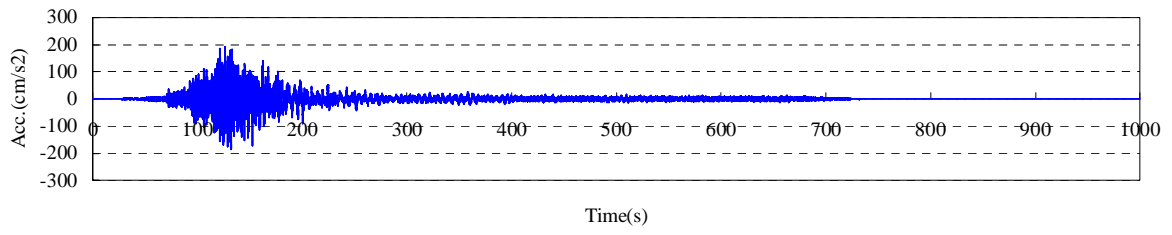
(b-1) WAVE-Ts2-NS



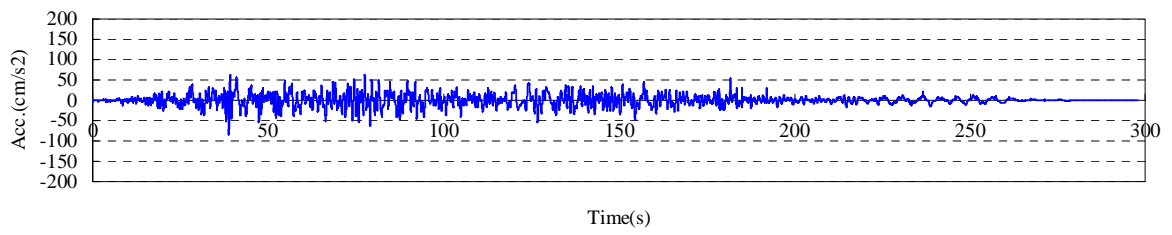
(b-2) WAVE-Ts2-EW



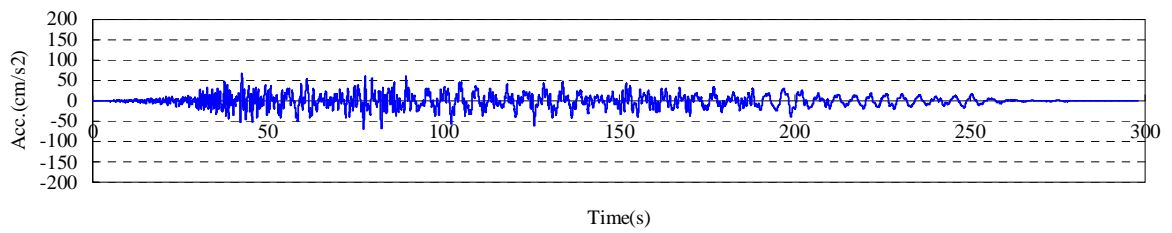
(c-1) WAVE-Tk-NS



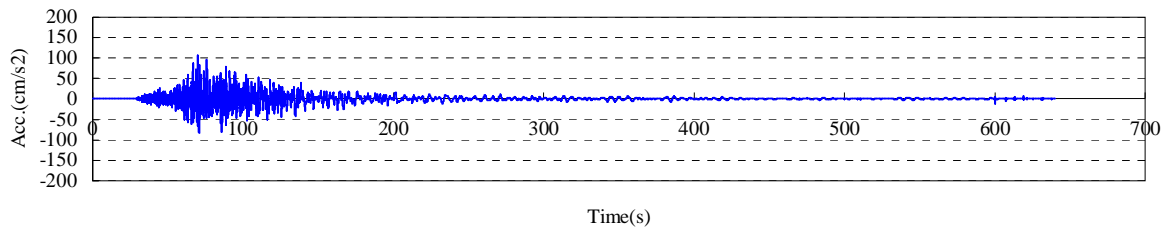
(c-2) WAVE-Tk-EW



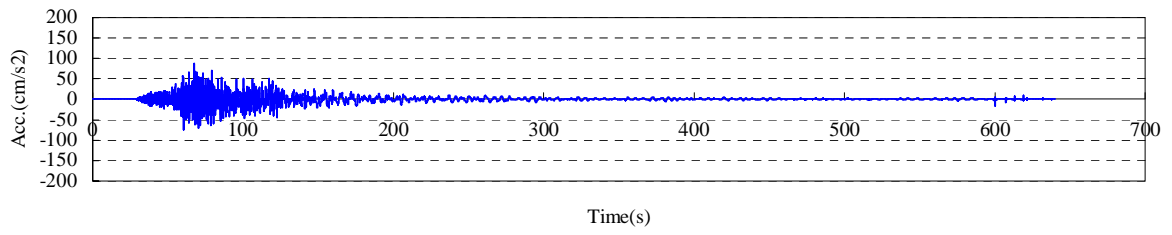
(d-1) WAVE-S-NS



(d-2) WAVE-S-EW

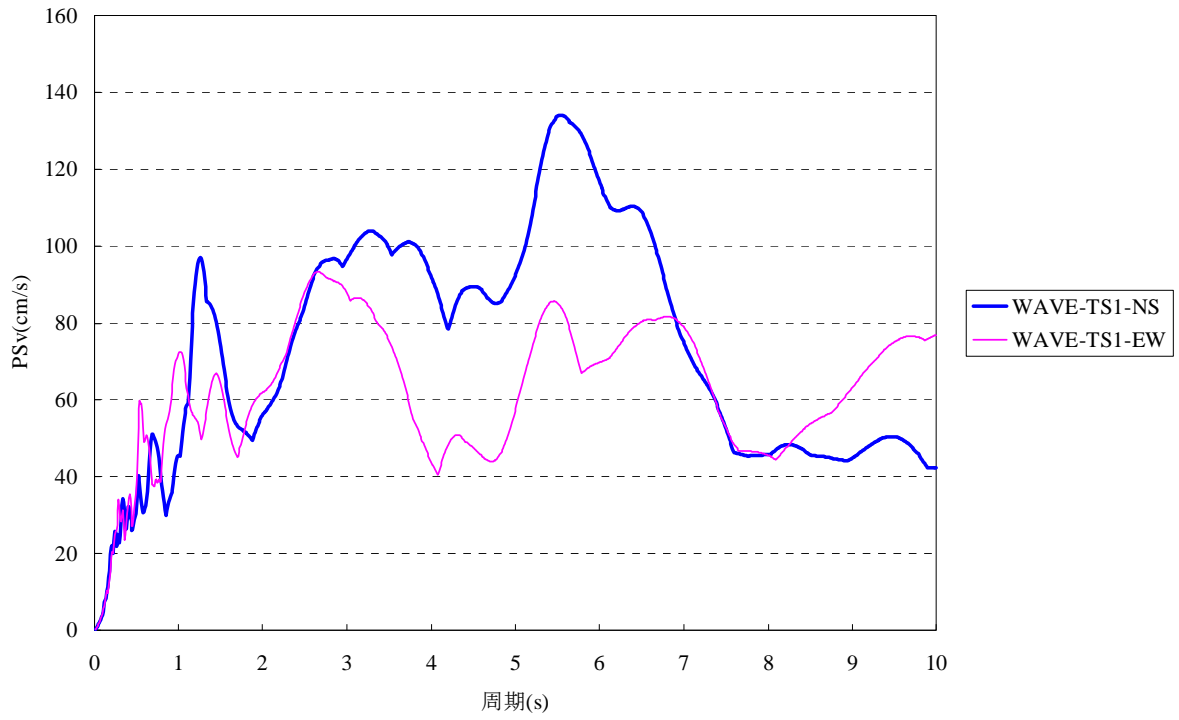


(e-1) WAVE-K-NS



(e-1) WAVE-K-NS

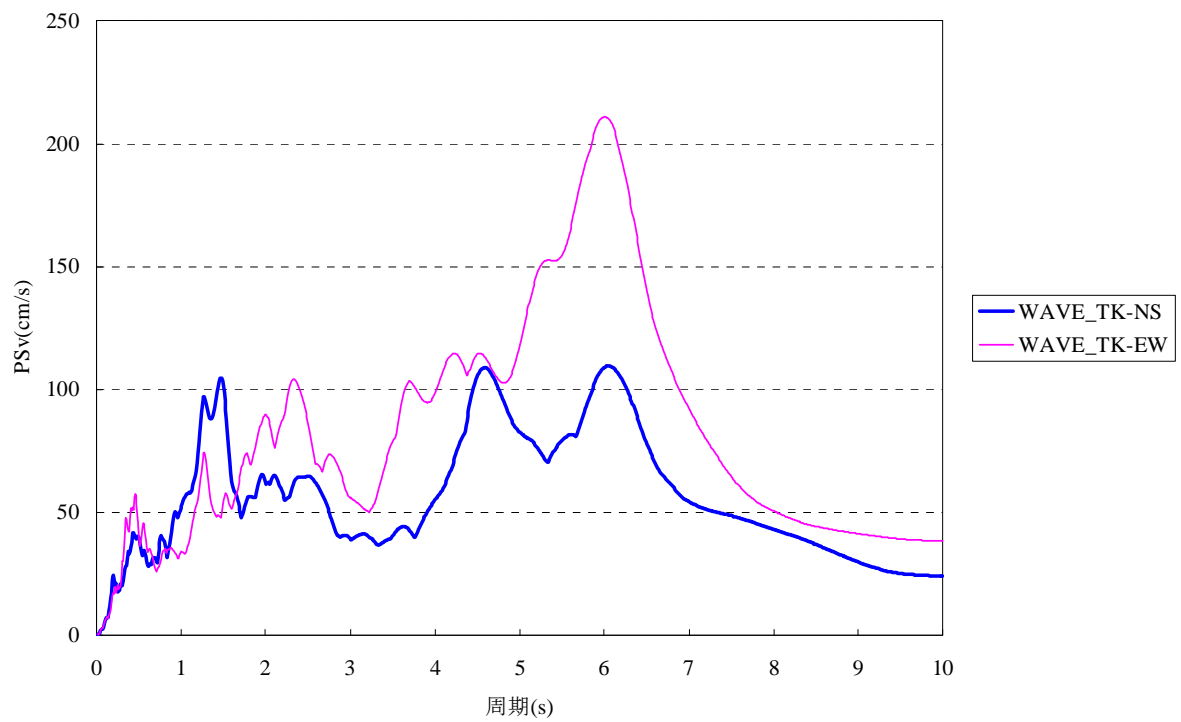
图 2.2-4 2 方向入力地震動加速度時刻歴波形



(a) WAVE-Ts1



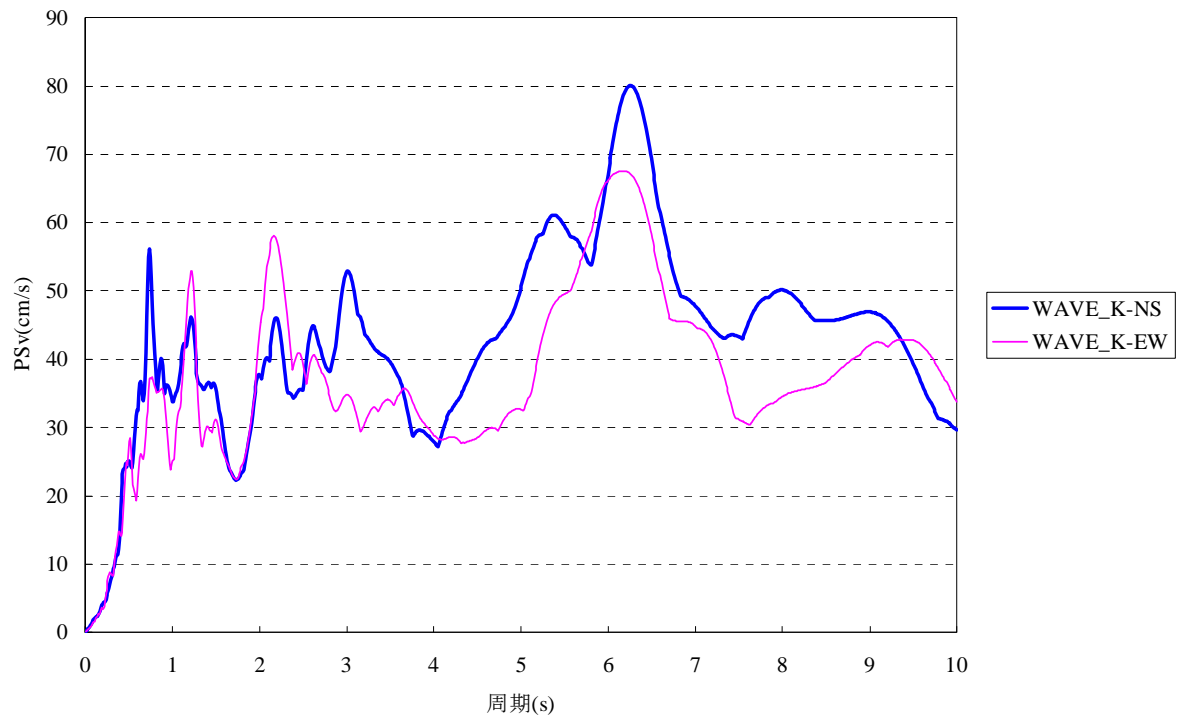
(b) WAVE-Ts2



(c) WAVE-Tk

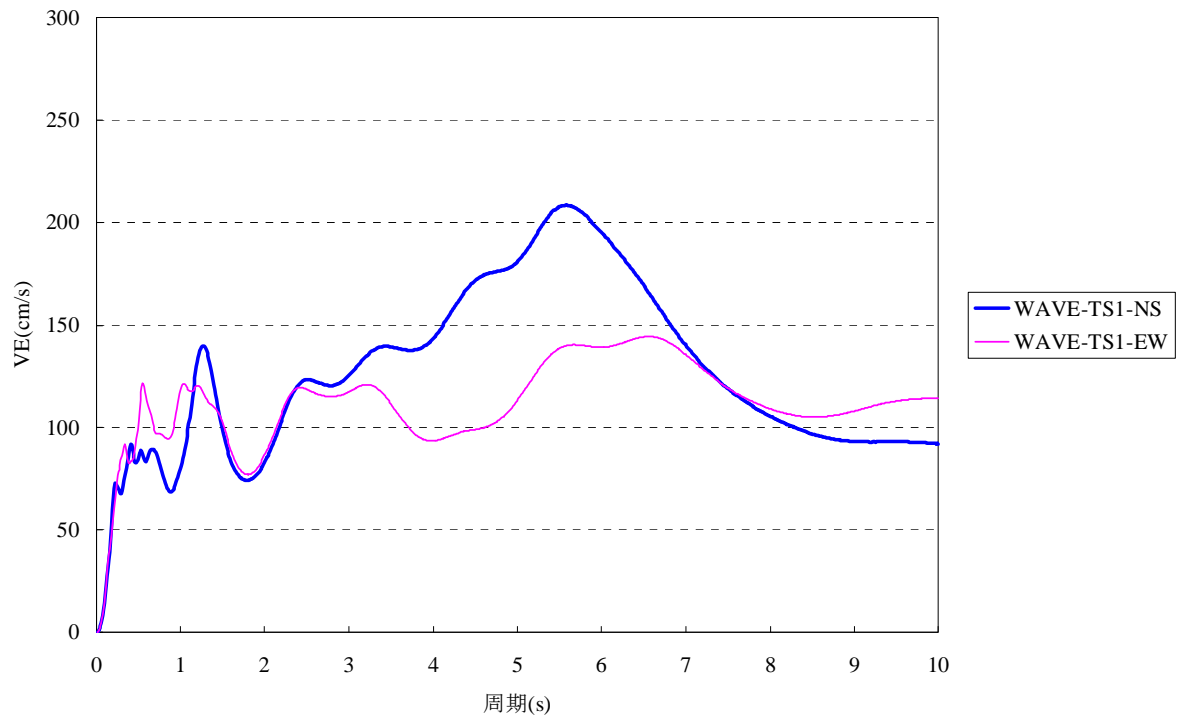


(d) WAVE-S

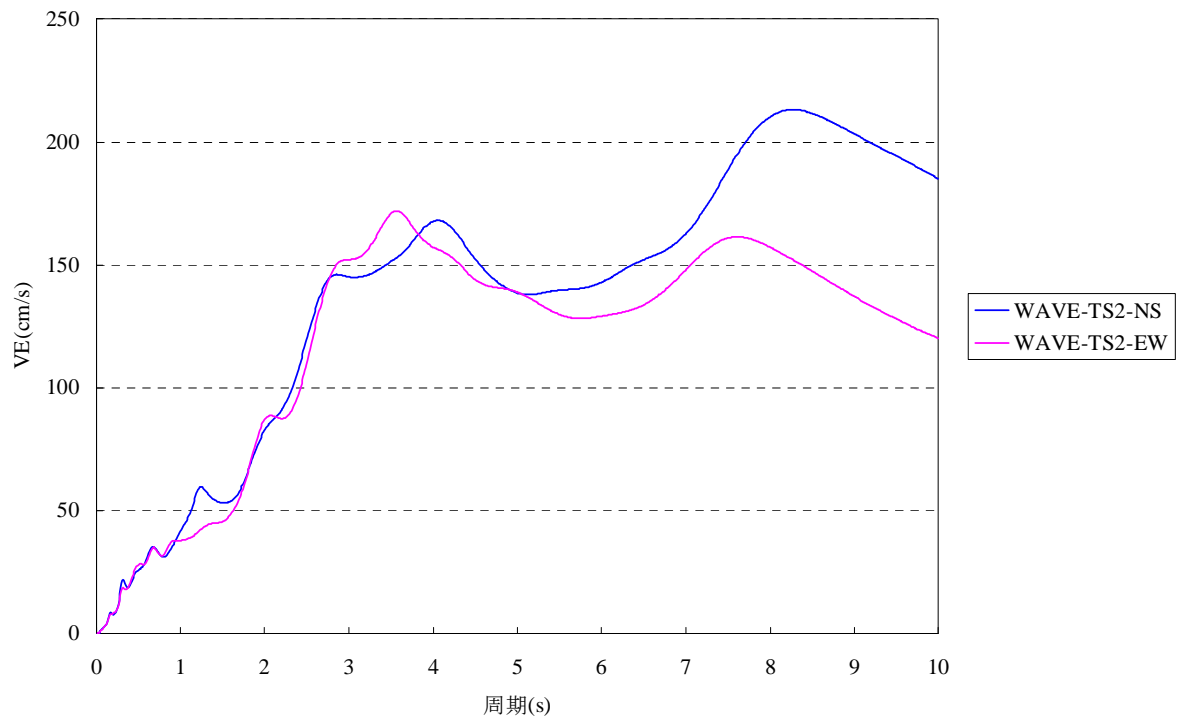


(e) WAVE-K

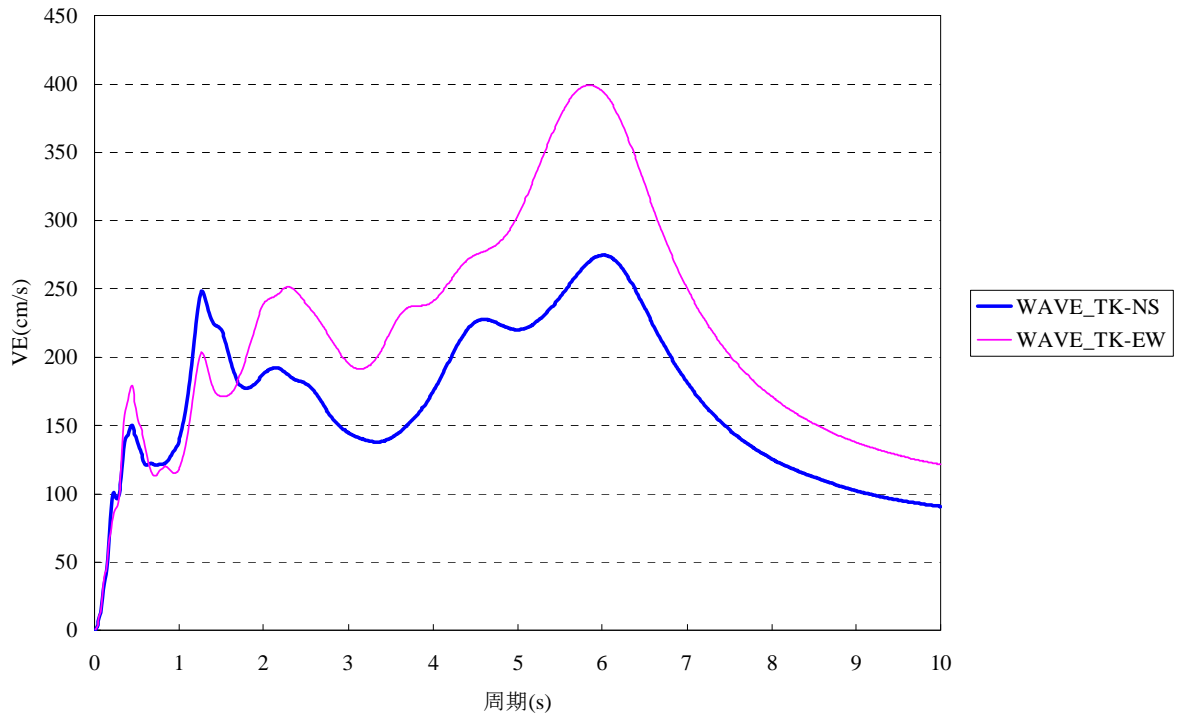
図 2.2-5 2 方向入力地震動擬似速度応答スペクトル(h=0.05)



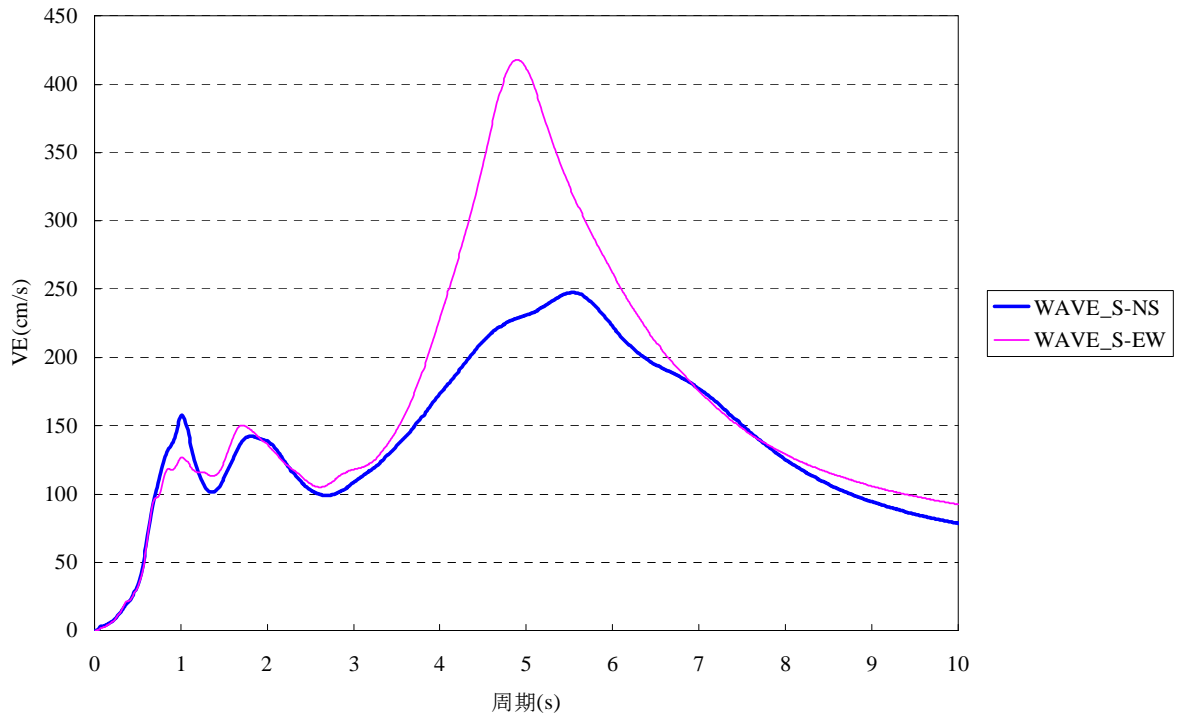
(a) WAVE-Ts1



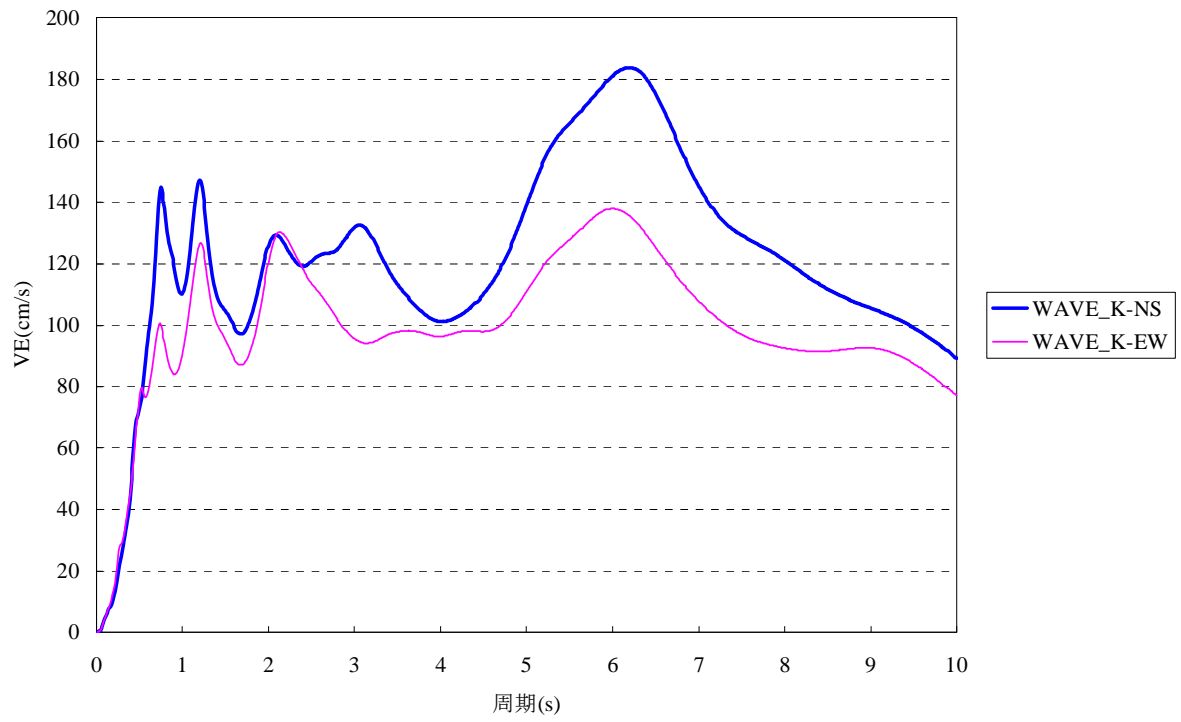
(b) WAVE-Ts2



(c) WAVE-Tk



(d) WAVE-S



(e) WAVE-K

図 2.2-6 2 方向入力地震動エネルギースペクトル

2.3 免震部材の繰り返し特性モデルと地震応答解析（その1）

2.3.1 鉛プラグ入り積層ゴム

免震材料として鉛プラグ入り積層ゴム(LRB)を適用した免震建築物を対象として、長周期地震動による繰り返し加振による温度上昇に伴い、降伏荷重が低下する特性を考慮した地震応答解析を実施し、その影響評価を行った。

(1) 各種依存性に関する既往の研究

表 2.3.1-1 に鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し加振時の温度上昇に伴う特性変化に関する主要文献を示す。

表 2.3.1-1 鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇に伴う特性変化に関する主要文献

番号	論文名	著者名	掲載誌
1	鉛プラグ入り積層ゴムの速度依存性と繰り返し依存性	人見泰義他	建築学会学術講演集、1998.9
2	鉛プラグ型積層ゴムの圧縮面圧下における限界変形能力	高山峯夫他	技術報告集 No.16,2002.12
3	鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し加振実験報告	西澤崇雄他	建築学会学術講演集、2004.8
4	長周期地震動を想定した LRB1000 の内部温度特性確認実験 ～地震応答波の 1/1 加振実験～	河内山修他	建築学会学術講演集、2006.9
5	大振幅繰り返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究 (その 1～14)	竹中康雄他	建築学会学術講演集、2007～2010
6	Durability of Rubber Isolators by Long-Duration Ground Motion due to Large Earthquakes	Mineo Takayama et.al	14WCEE,2008.10
7	積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究	竹中康雄他	構造系論文集、No.646、2009.12

以下、主要文献について内容をまとめる。文中の文献番号は表 2.3.1-1 による。

鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し加振時における特性変化については文献 1 により、LRB ϕ 500 に対して $\gamma=150\%$ で 30 回繰り返し加振時に降伏荷重特性値 Q_d は初期値の約 55% に低下していることが示されている。文献 2 においても LRB ϕ 300 に対して $\gamma=300\%$ で 30 回繰り返し加振時に 3 サイクル目と比較して 27 サイクル目には 85%、90% に低下したことが示されている。本文献中では鉛吸収エネルギーと比較して鉛温度上昇が小さく熱伝導解析による検討が必要と指摘されている。文献 3 では LRB ϕ 250 に対して $\gamma=250\%$ で 50 回繰り返し加振時に降伏後剛性 K_d はほとんど変化せず、降伏荷重特性値 Q_d は 65% に低下していることが示されている。以上についてはそれぞれが正弦波加振下での特性変化について示されているが、文献 4 では地震応答波加振を実施しており、正弦波加振下での実験結果と同様の結果が得られている。文献 5 では鉛プラグ入り積層ゴムと高減衰積層ゴムを対象とした正弦波加振試験、地震応答波加振試験の結果及び実験結果のシミュレーション解析手法が示されており、鉛プラグ入り積層ゴムについては鉛プラグの温度上昇を考慮した地震応答解析手法が提案されている。また実験結果については文献 7 にまとめられている。文献 6 では LRB ϕ 410 に対して $\gamma=200\%$ で 200 回繰り返し加振時に降伏荷重特性値 Q_d は 3 サイクル目に対し約 42% に低下したことが示されており、実験結果よりエネルギー吸収量と Q_d 低下率の関係をを用い、 Q_d の低下を考慮した地震応答解析を実施している。

(2) 解析条件

応答評価を行った建物モデル諸元を表 2.3.1-2 に示す。応答解析は上部建物を 1 質点としてモデル化し実施した。免震層は鉛プラグ入り積層ゴムのみで構成されるものとし、鉛プラグ入り積層ゴムはゴム種 G4、外径 φ1000、鉛径 200mm、ゴム総厚 200mm とし、積層ゴムのゴム剛性による周期 $T_f=4.5s$ 、鉛降伏せん断力係数 ($\alpha_s=0.035$) となるよう設定した。

表 2.3.1-2 対象建物諸元

上部構造 重量 (積層ゴム 1 基当り) (kN)	LRB 平均面圧 (N/mm ²)	T_f (sec)	α_s
7477	9.9	4.5	0.035

T_f : ゴム剛性による免震周期
 α_s : 鉛プラグ降伏せん断力係数

地震応答解析には LRB の温度について熱伝導解析を行いながら、鉛プラグ部の温度によって LRB の降伏荷重 Q_d を変化させながら行う手法を用いている (参考文献 2.3.1-1) 参照。

地震応答解析には、鉛プラグ入り積層ゴムの熱伝導方程式と免震建物運動方程式を並行して解く、時刻歴応答解析法 (参考文献 2.3.1-1) 参照) を行う手法である。鉛プラグ入り積層ゴム熱伝導解析差分法モデル、鉛プラグの温度-降伏荷重関係、時刻歴応答解析法はそれぞれ以下のように設定する。

鉛プラグ入り積層ゴムにおける熱伝導解析差分法モデルは、前進差分法による鉛プラグ入り積層ゴムの要素分割した差分法モデルとする (図 2.3.1-1(a)参照)。地震エネルギーの吸収量はすべて鉛プラグ部での発熱となると仮定し、モデル化範囲には取り付け部も含めることによって、鉛プラグから積層ゴム部、フランジ、上下基礎への熱エネルギーの拡散を考慮する。また、鉛プラグの温度-降伏荷重関係は、下式 (2.3.1-1) の提案式に基づくものとする。(図 2.3.1-1(b)参照)。本式は、鉛プラグが約 200°C まで温度上昇した実験ケースを含む鉛プラグ入り積層ゴム加振実験結果の分析により得られた実験式である。

$$\tau = \tau_0 \left\{ 1 - (T/T_L)^{\alpha_T} \right\}, \quad \alpha_T = 0.4 + 0.25 \cdot (T/T_L) \quad \dots (2.3.1-1)$$

$$\tau_0 = 15.0 (N/mm^2), \quad T_L = 327.5 (^\circ C)$$

ここに、 τ : 鉛降伏応力、 τ_0 : 鉛降伏応力設計値

T : 鉛プラグ平均温度、 T_L : 鉛融点

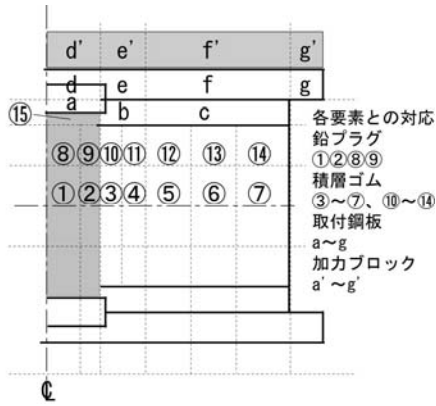


図2.3.1-1(a) 鉛プラグ入り積層ゴムの熱伝導差分法モデルの例

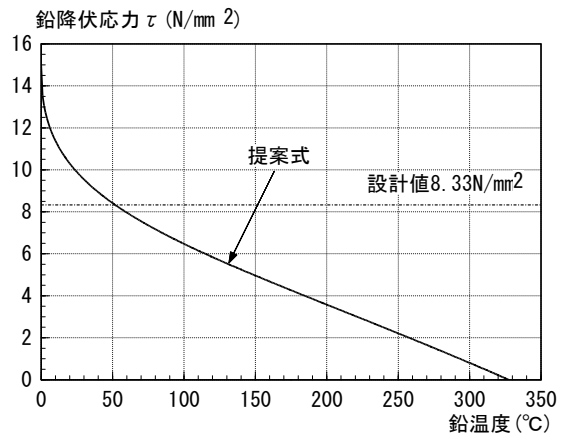


図2.3.1-1(b) 鉛プラグ温度-降伏応力関係

解析において鉛入り積層ゴムは修正バイリニアモデルによる履歴を考慮し、免震層の履歴減衰のみ考慮した。また、温度上昇を考慮する場合の初期温度は 15°C とした。

(3) 解析結果

表 2.3.1-3 に各入力地震動における解析結果を、図 2.3.1-2 に各入力地震動における積層ゴムの応答せん断ひずみ-免震層せん断力係数図を示す。

図 2.3.1-3 に各入力地震動における鉛プラグの降伏応力の時刻歴を、図 2.3.1-4 に鉛部の平均温度時刻歴を、図 2.3.1-5 に累積変位量時刻歴を、図 2.3.1-6 に免震層における履歴吸収エネルギー量の速度換算値の時刻歴を示す。

解析結果より、入力地震動のうち T-TN-AIC003_AV の場合には免震層応答最大水平変位は温度上昇非考慮時に比較して、考慮時にはその増大がみられ、入力地震動の倍率が 1.0 倍の場合に変位増大率が 1.18 倍、地震動倍率が 1.5 倍の場合に変位増大率が 1.38 倍となっている。また、積層ゴムのせん断ひずみは入力地震動の倍率が 1.2 倍で温度上昇を考慮した場合に $\gamma=200\%$ 程度、1.5 倍で $\gamma=300\%$ 程度である。

その他の地震動においては入力倍率が 1.5 倍の場合に変位増大率が 1.35 倍となるケースがあるものの、積層ゴムのせん断ひずみは $\gamma=100\%$ 以内である。

表 2.3.1-3(a) 応答解析結果

入力地震動	入力倍率	免震層水平変位 (cm)			応答最大加速度 (cm/s ²)		
		温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 /非考慮	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 /非考慮
N-OSKH02_AV	1.00	9.9	9.6	0.97	59	63	1.07
	1.25	13.2	13.3	1.01	64	68	1.05
	1.50	16.1	21.8	1.35	69	73	1.06
T-TN-AIC003_AV	1.00	20.4	24.2	1.18	76	74	0.98
	1.25	30.2	39.4	1.30	94	95	1.02
	1.50	41.8	57.5	1.38	113	119	1.05
T-TN-AIC004_AV	1.00	8.6	8.1	0.94	55	58	1.04
	1.25	12.2	11.8	0.97	63	63	1.00
	1.50	18.9	19.4	1.02	74	72	0.97
T-TN-KGIN_AV	1.00	3.6	4.0	1.11	42	51	1.22
	1.25	6.7	5.5	0.83	50	52	1.03
	1.50	10.0	8.6	0.86	59	58	0.99

表 2.3.1-3(b) 応答解析結果

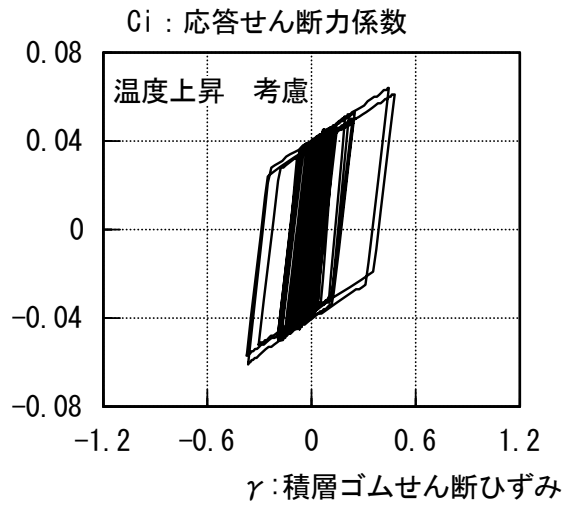
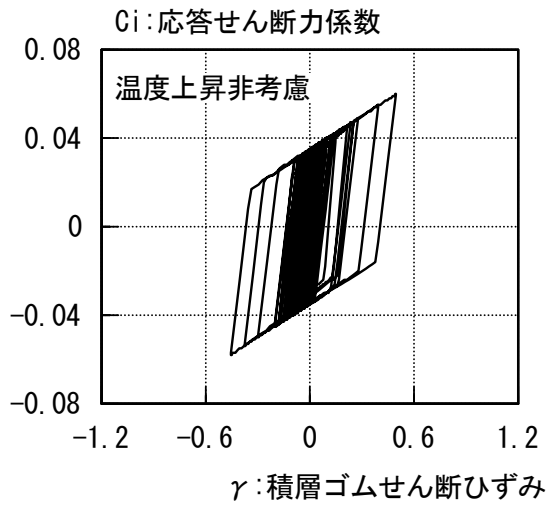
入力地震動	入力倍率	免震層せん断ひずみ (%)			免震層応答最大せん断力係数		
		温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 /非考慮	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 /非考慮
N-OSKH02_AV	1.00	50	48	0.97	0.060	0.064	1.07
	1.25	66	67	1.01	0.066	0.069	1.05
	1.50	81	109	1.35	0.071	0.075	1.06
T-TN-AIC003_AV	1.00	102	121	1.18	0.078	0.076	0.98
	1.25	151	197	1.30	0.095	0.097	1.02
	1.50	209	288	1.38	0.115	0.122	1.06
T-TN-AIC004_AV	1.00	43	40	0.94	0.057	0.059	1.04
	1.25	61	59	0.97	0.064	0.064	1.00
	1.50	95	97	1.02	0.075	0.073	0.97
T-TN-KGIN_AV	1.00	18	20	1.11	0.042	0.052	1.22
	1.25	33	28	0.83	0.051	0.053	1.03
	1.50	50	43	0.86	0.060	0.060	0.99

表 2.3.1-3(c) 応答解析結果

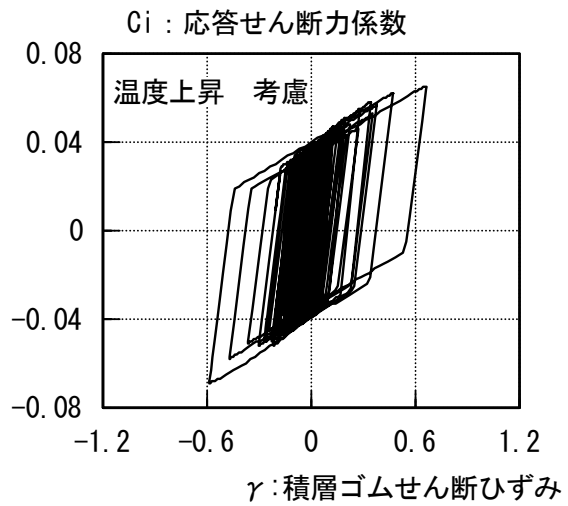
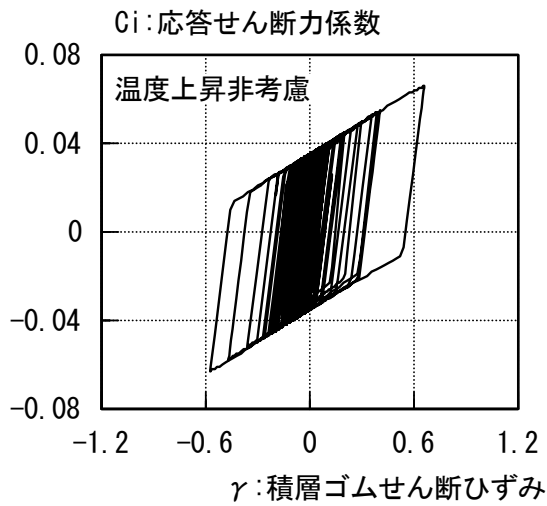
入力地震動	入力倍率	免震層累積変位量 *1 (m)			免震層吸収エネルギー 速度換算値 (cm/s)			最大鉛 平均温度 (°C)
		温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 /非考慮	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 /非考慮	
N-OSKH02_AV	1.00	5.3	5.9	1.11	121.7	120.8	0.99	45.9
	1.25	6.8	7.6	1.12	147.7	151.1	1.02	61.2
	1.50	9.3	10.6	1.14	182.9	196.9	1.08	88.6
T-TN-AIC003_AV	1.00	11.4	13.2	1.16	224.4	231.6	1.03	127.3
	1.25	14.9	20.0	1.34	273.6	283.7	1.04	175.3
	1.50	19.1	27.0	1.41	321.4	318.3	0.99	212.9
T-TN-AIC004_AV	1.00	5.0	5.5	1.10	106.5	101.8	0.96	38.2
	1.25	6.4	7.0	1.09	137.9	139.5	1.01	56.9
	1.50	8.4	9.5	1.13	173.8	182.7	1.05	85.7
T-TN-KGIN_AV	1.00	3.2	4.9	1.53	68.7	69.0	1.00	25.7
	1.25	4.0	4.9	1.23	91.0	91.6	1.01	33.9
	1.50	4.7	5.6	1.19	111.8	111.7	1.00	42.6

初期温度 15°C

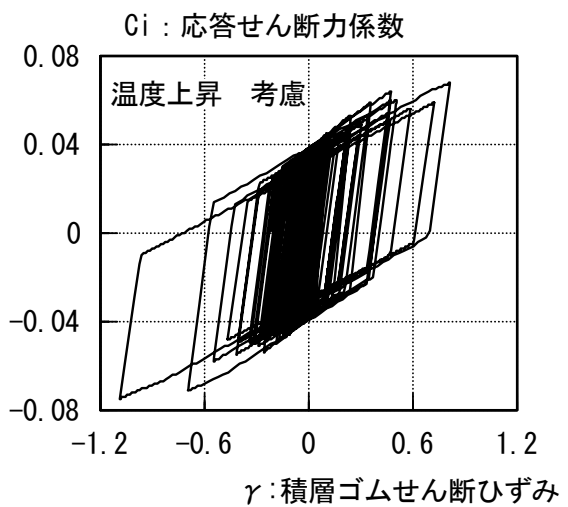
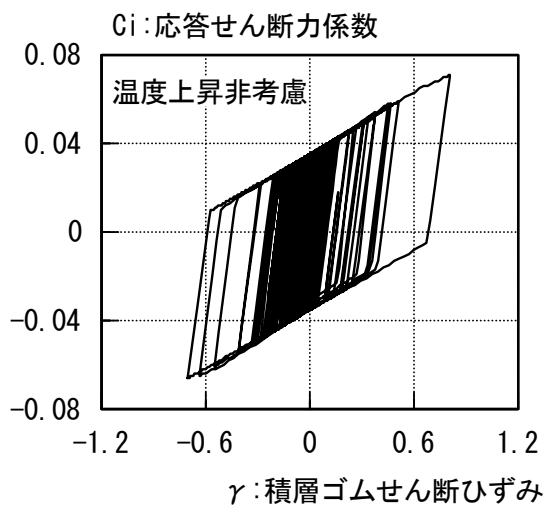
*1 免震層累積変位量については総入力エネルギーの 95%の時刻における値とした。



(i) 1.0 倍入力時

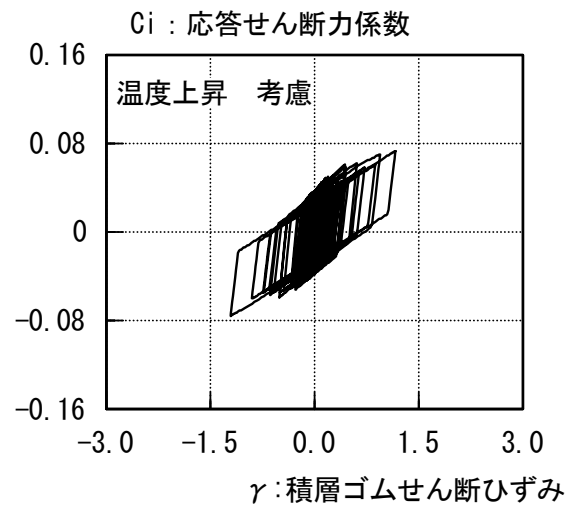
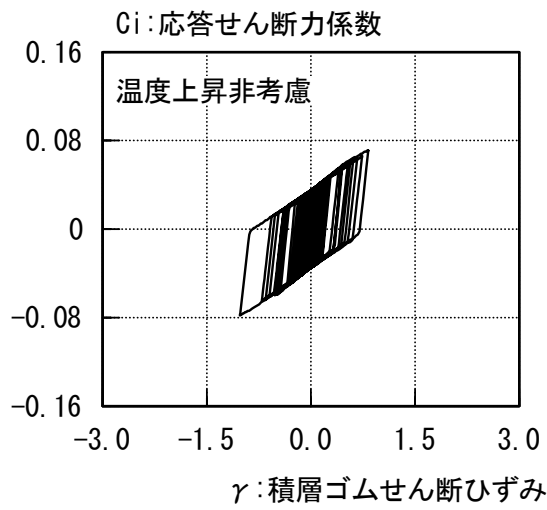


(ii) 1.25 倍入力時

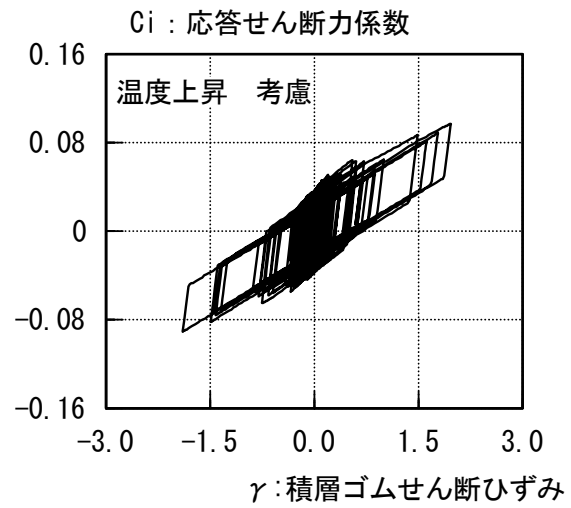
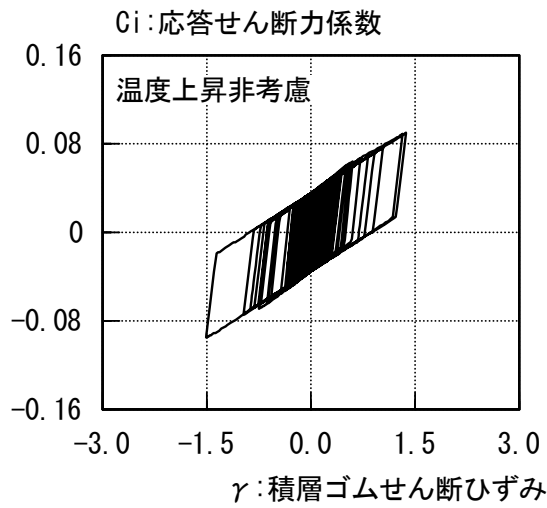


(iii) 1.5 倍入力時

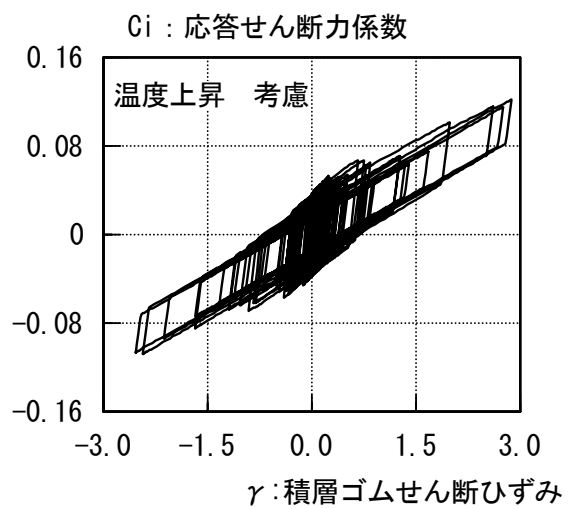
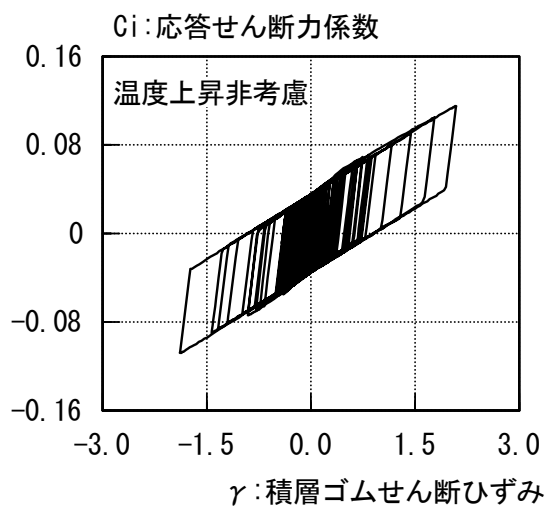
図 2.3.1-2(a) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (N-OSKH02_AV)



(i) 1.0 倍入力時

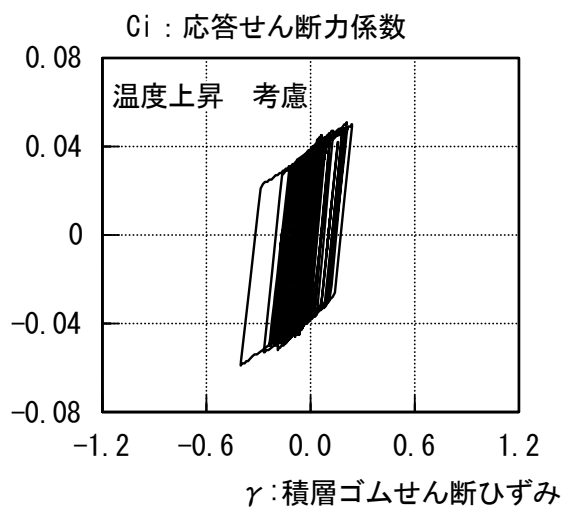
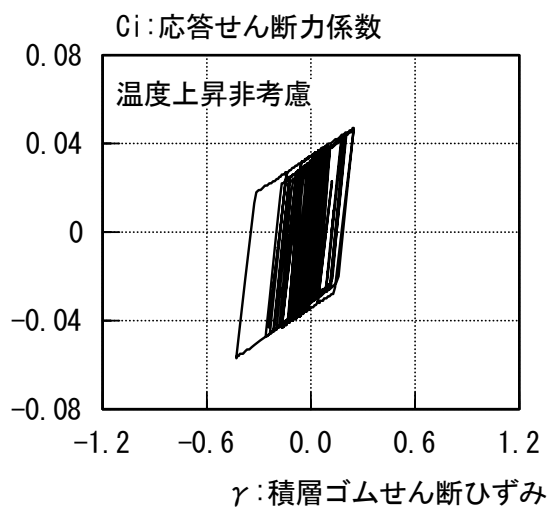


(ii) 1.25 倍入力時

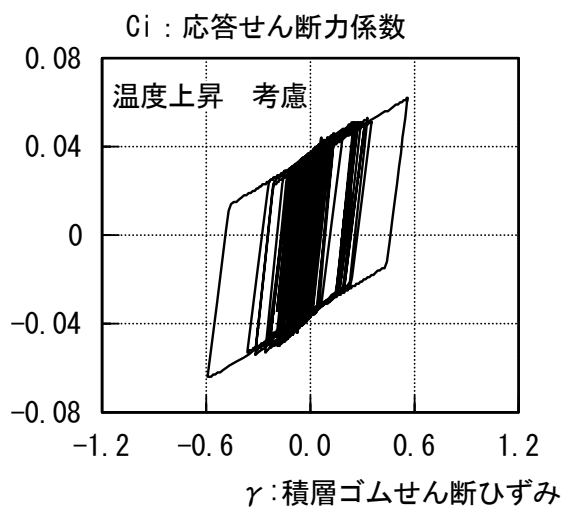
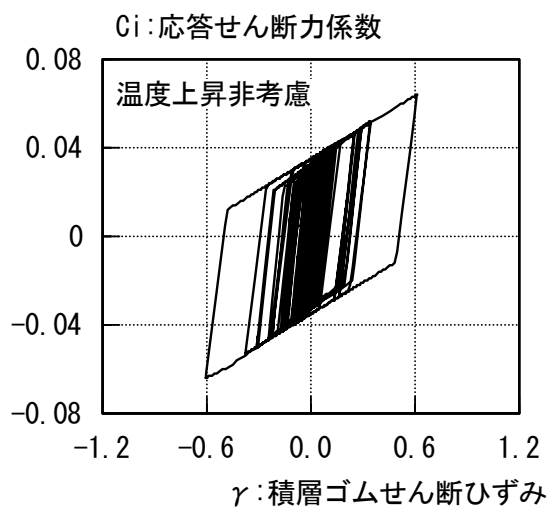


(iii) 1.5 倍入力時

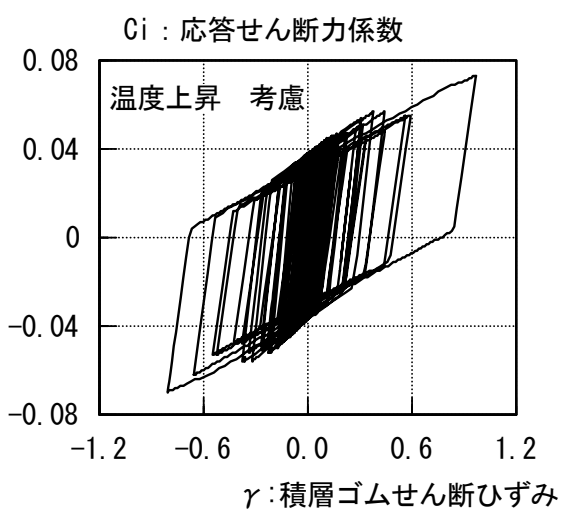
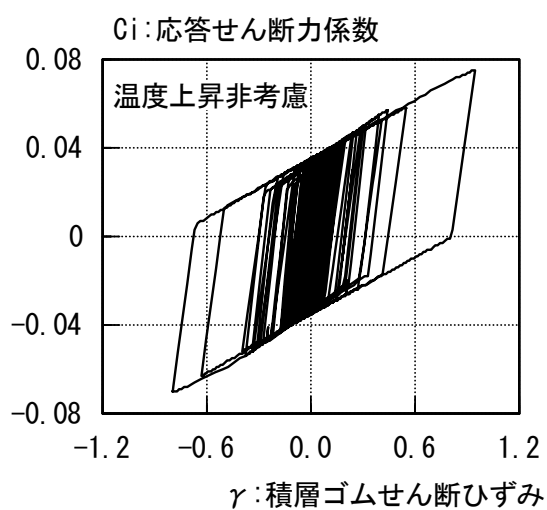
図 2.3.1-2(b) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (T-TN-AIC003_AV)



(i) 1.0 倍入力時

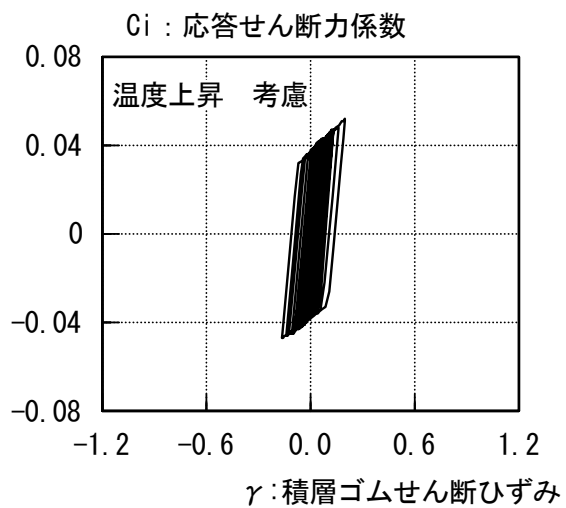
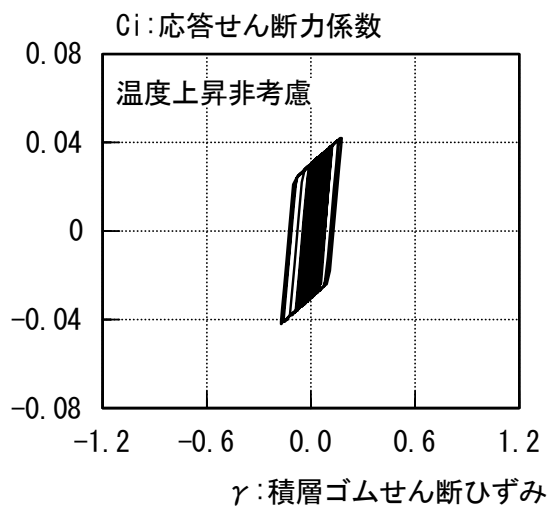


(ii) 1.25 倍入力時

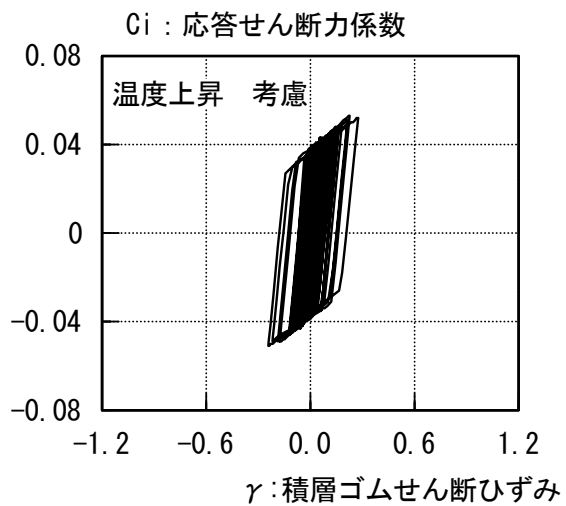
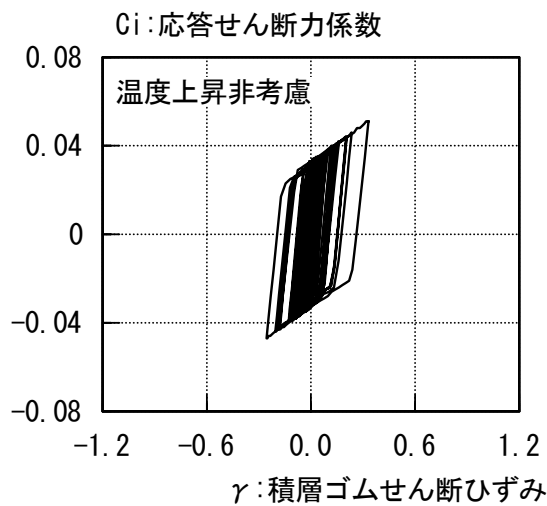


(iii) 1.5 倍入力時

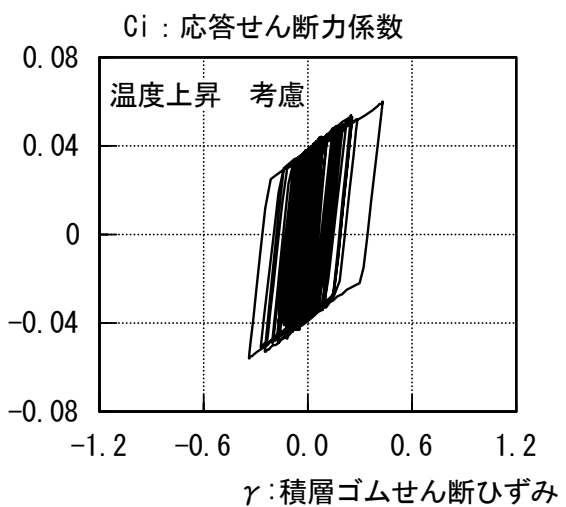
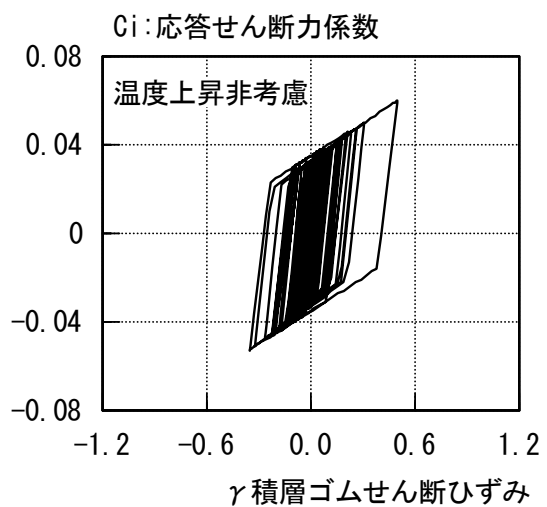
図 2.3.1-2(c) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (T-TN-AIC004_AV)



(i) 1.0 倍入力時



(ii) 1.25 倍入力時



(iii) 1.5 倍入力時

図 2.3.1-2(d) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (T-TN-KGIN_AV)

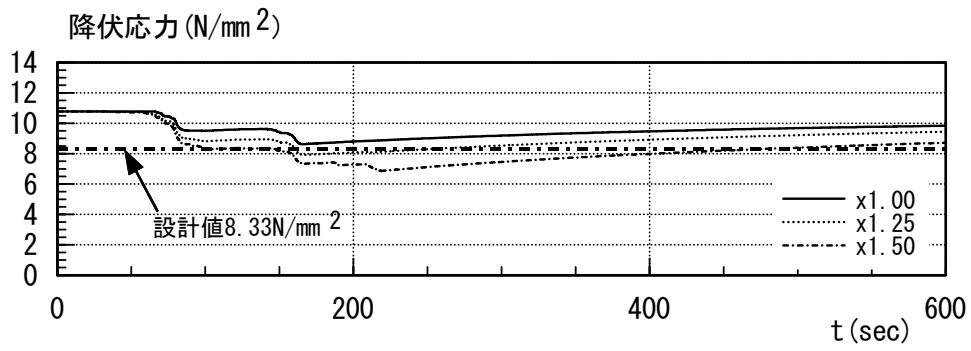


図 5.3.1-3(a) 降伏応力時刻歴 (N-OSKH02_AV)

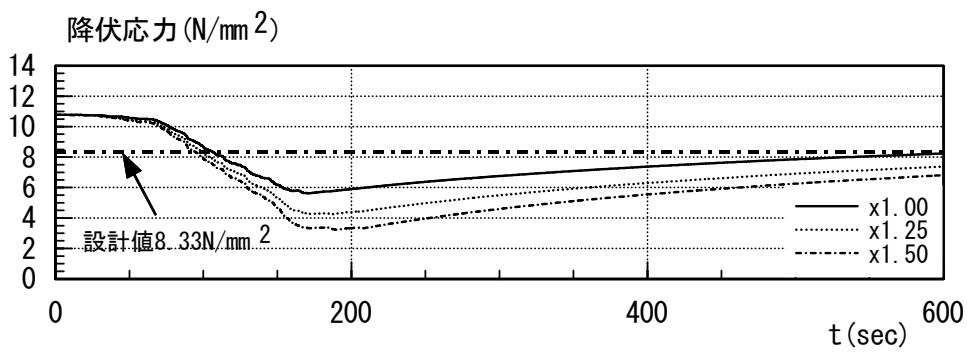


図 2.3.1-3(b) 降伏応力時刻歴 (T-TN-AIC003_AV)

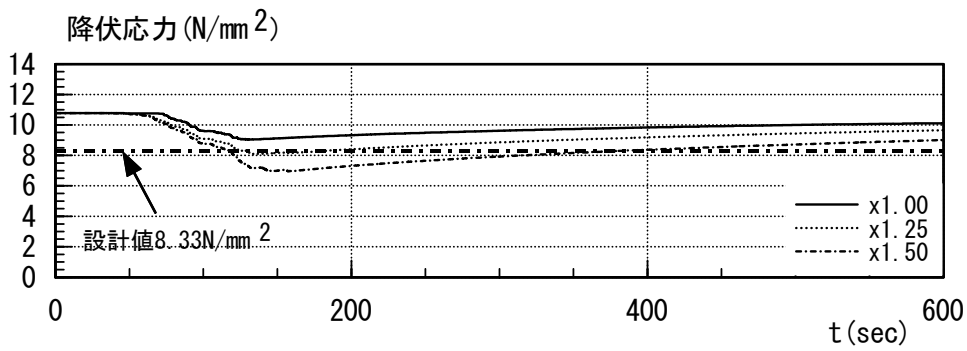


図 2.3.1-3(c) 降伏応力時刻歴 (T-TN-AIC004_AV)

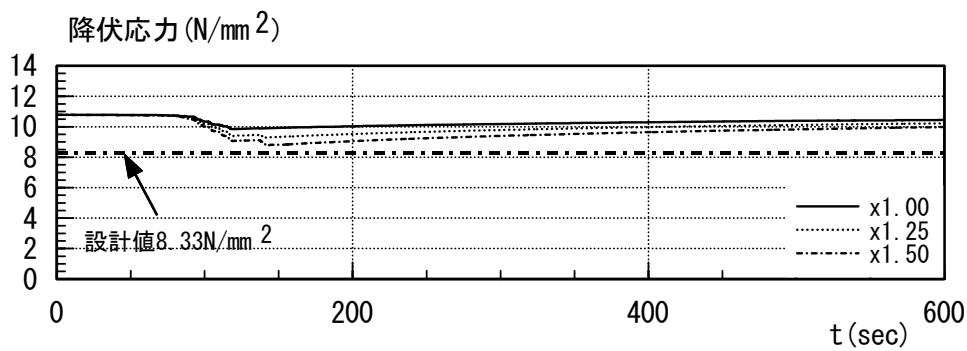


図 2.3.1-3(d) 降伏応力時刻歴 (T-TN-KGIN_AV)

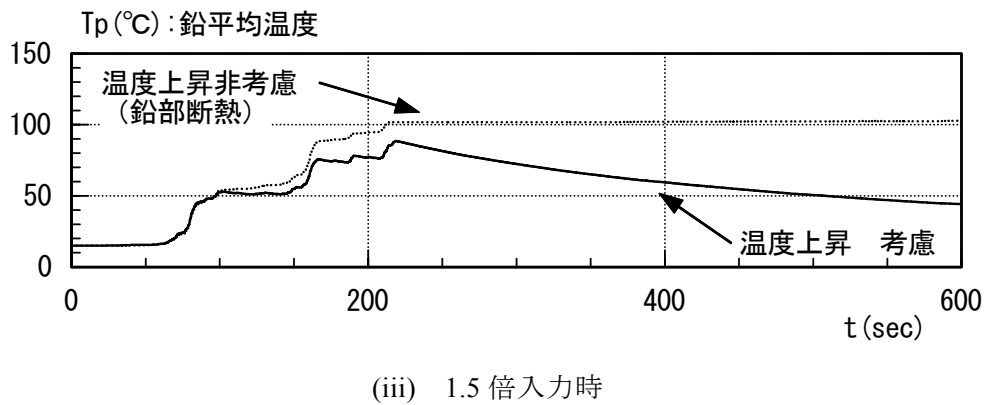
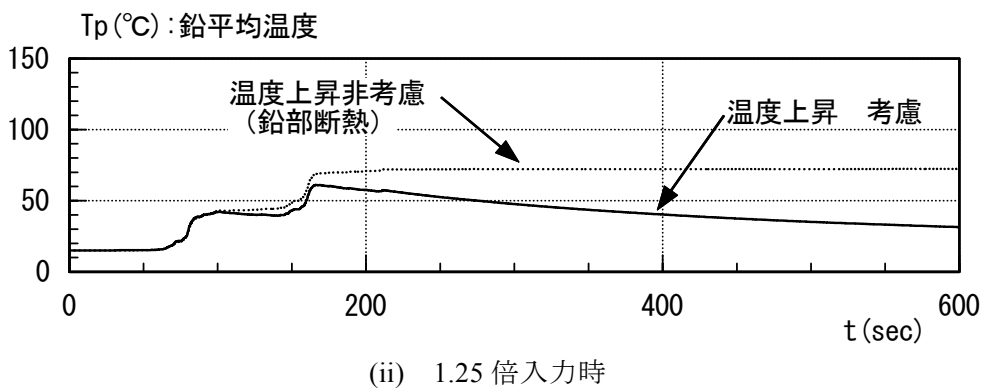
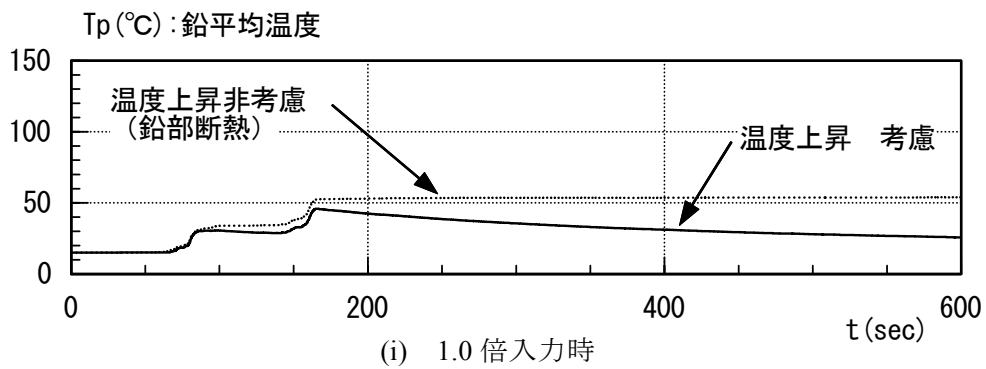


図 2.3.1-4(a) 鉛部平均温度時刻歴 (N-OSKH02_AV)

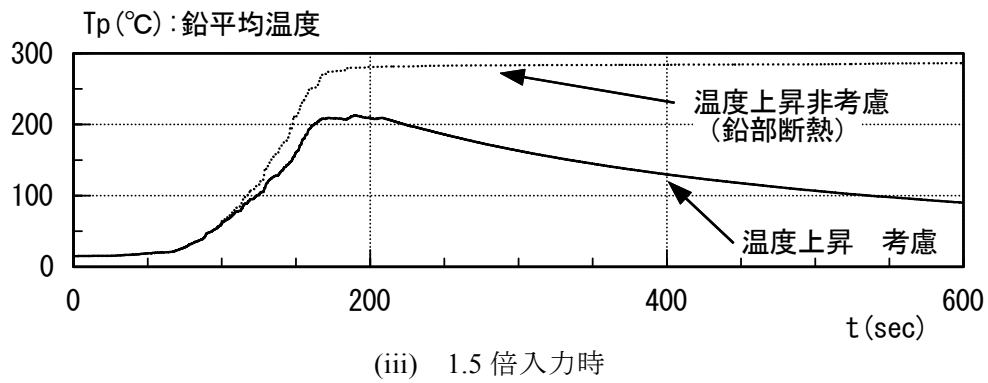
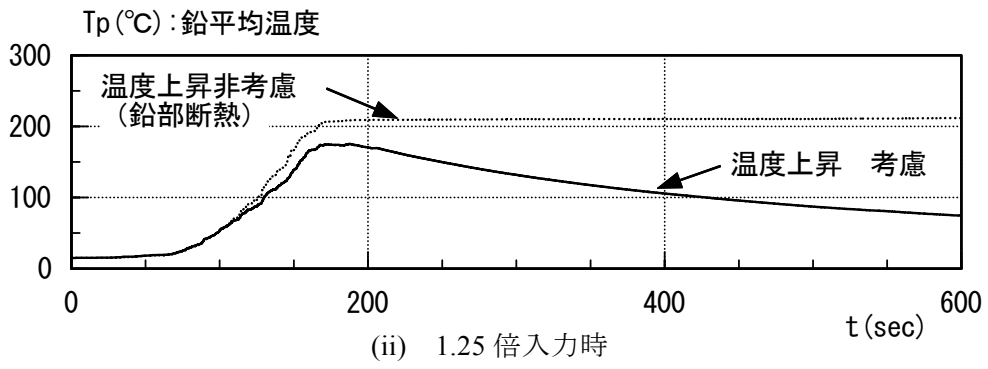
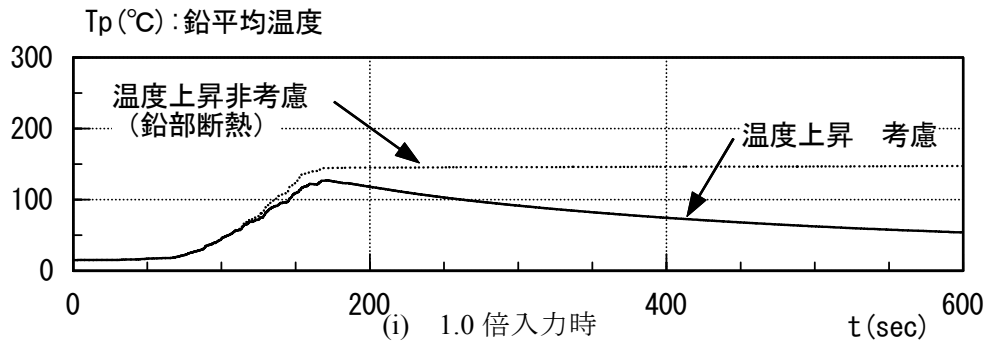
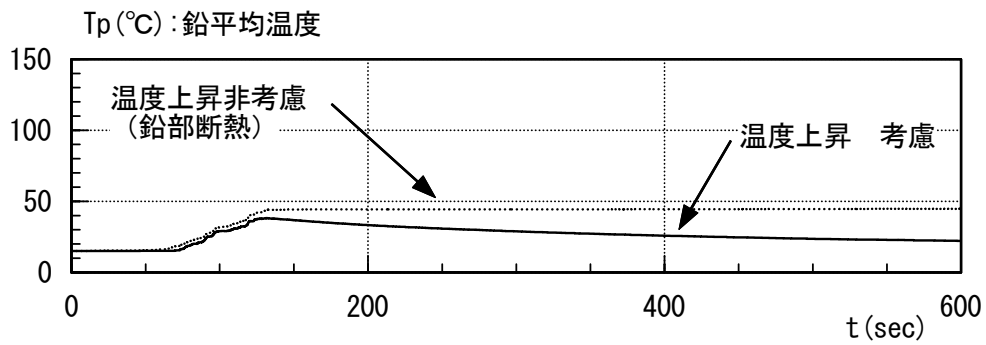
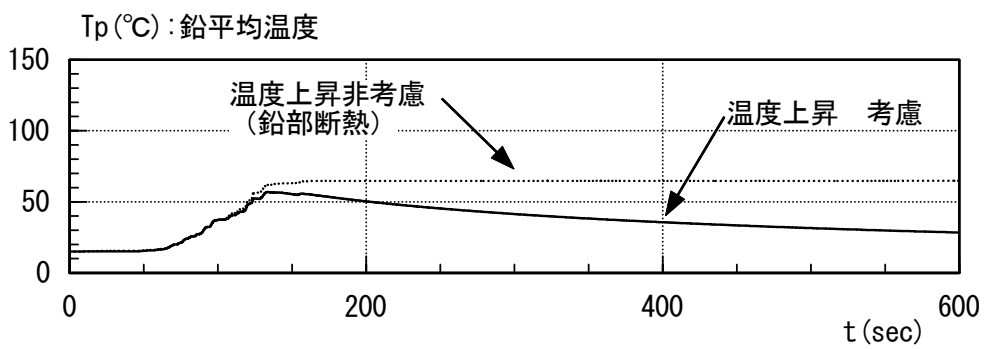


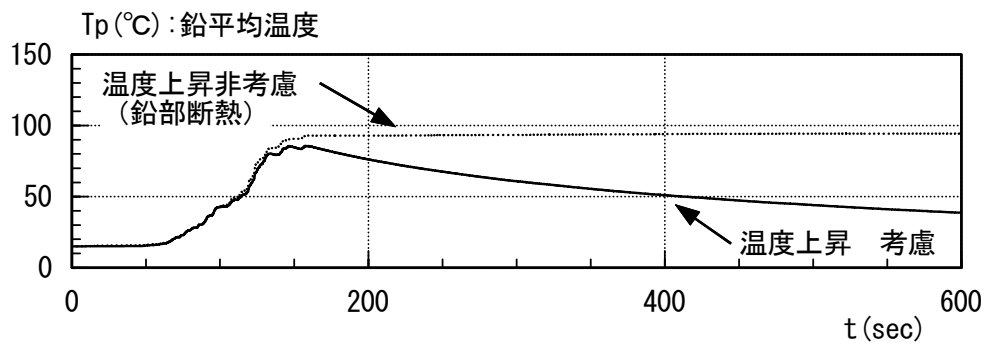
图 2.3.1-4(b) 鉛部平均温度時刻歴 (T-TN-AIC003_AV)



(i) 1.0 倍入力時

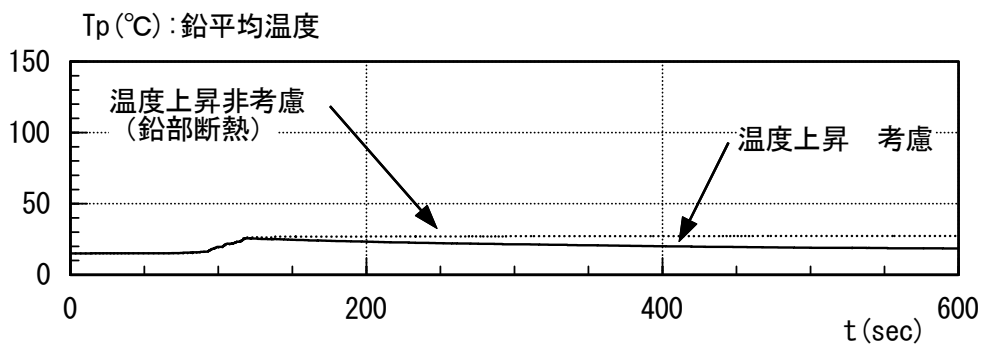


(ii) 1.25 倍入力時

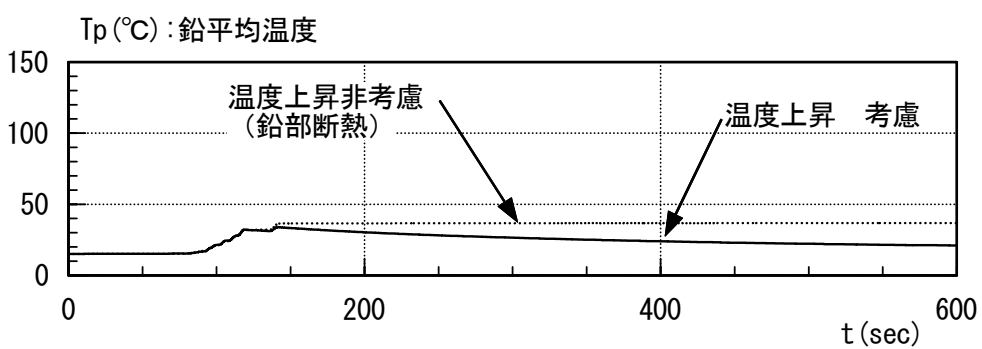


(iii) 1.5 倍入力時

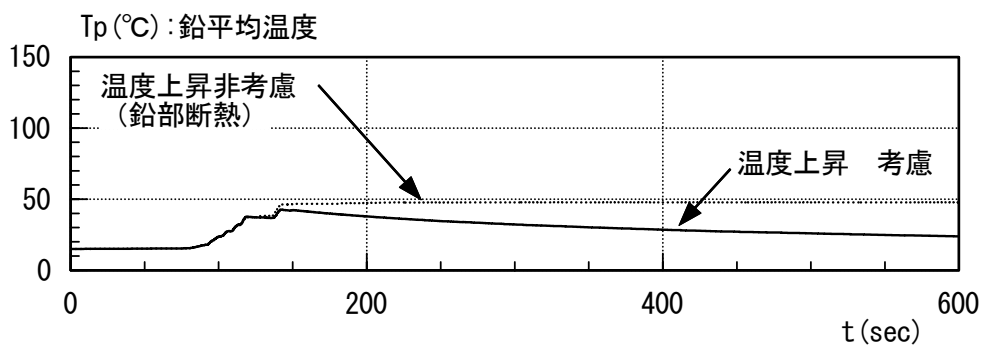
图 2.3.1-4(c) 鉛部平均温度時刻歴 (T-TN-AIC004_AV)



(i) 1.0 倍入力時



(ii) 1.25 倍入力時



(iii) 1.5 倍入力時

図 2.3.1-4(d) 鉛部平均温度時刻歴 (T-TN-KGIN_AV)

●, ○ 総入力エネルギーの 95%時

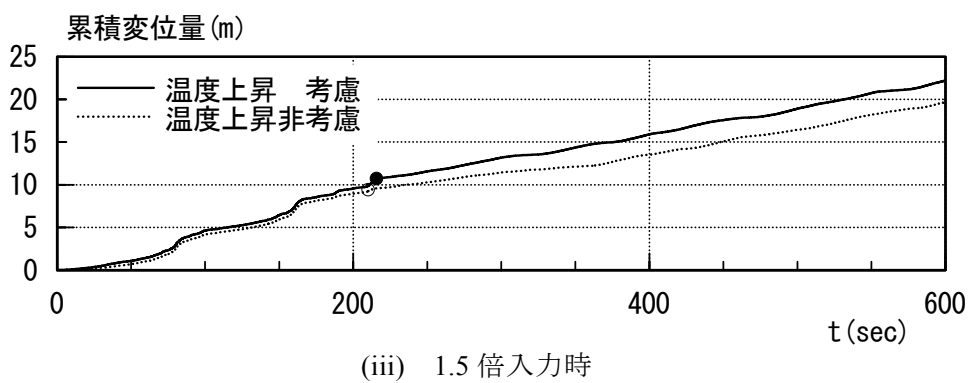
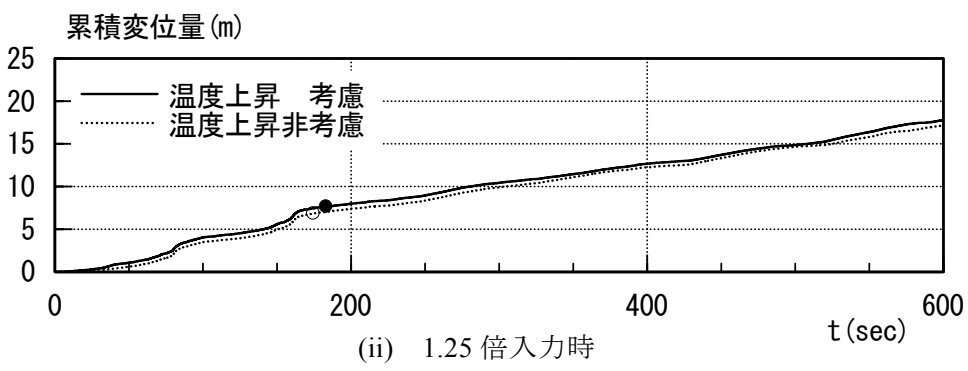
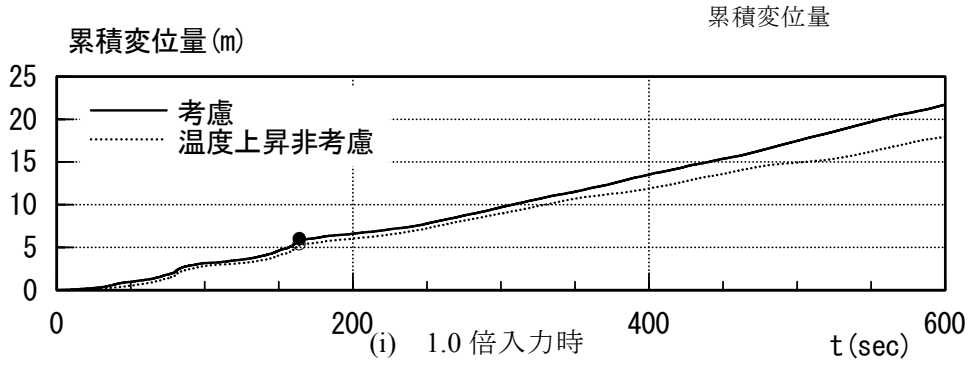


図 2.3.1-5(a) 免震層累積変位量時刻歴 (N-OSKH02_AV)

●, ○ 総入力エネルギーの 95%時

累積変位量

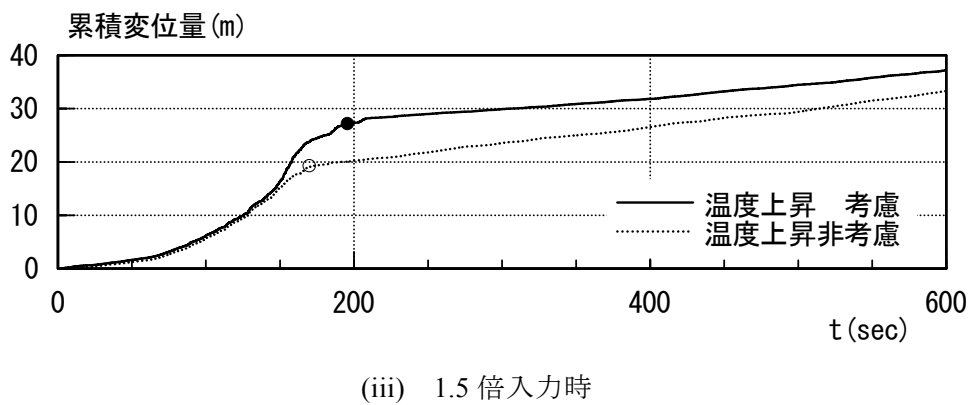
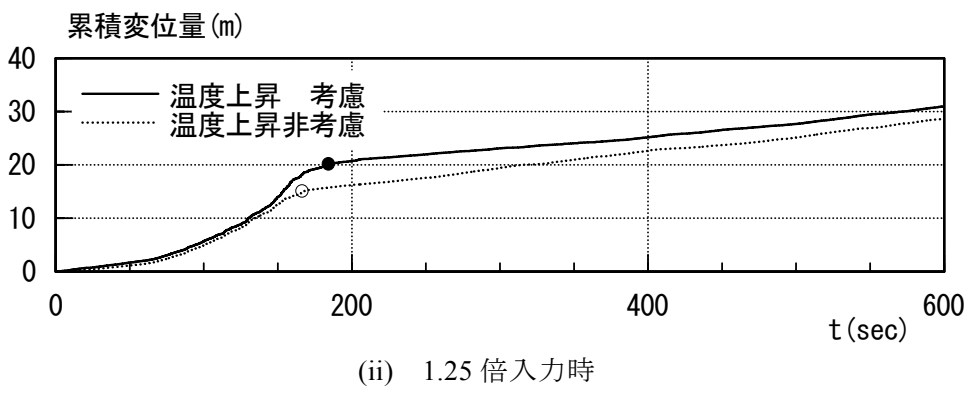
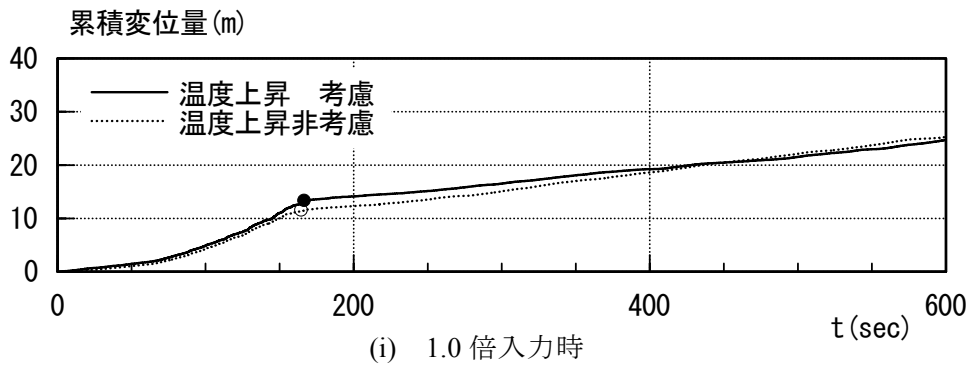


図 2.3.1-5(b) 免震層累積変位量時刻歴 (T-TN-AIC003_AV)

●, ○ 総入力エネルギーの 95%時

累積変位量

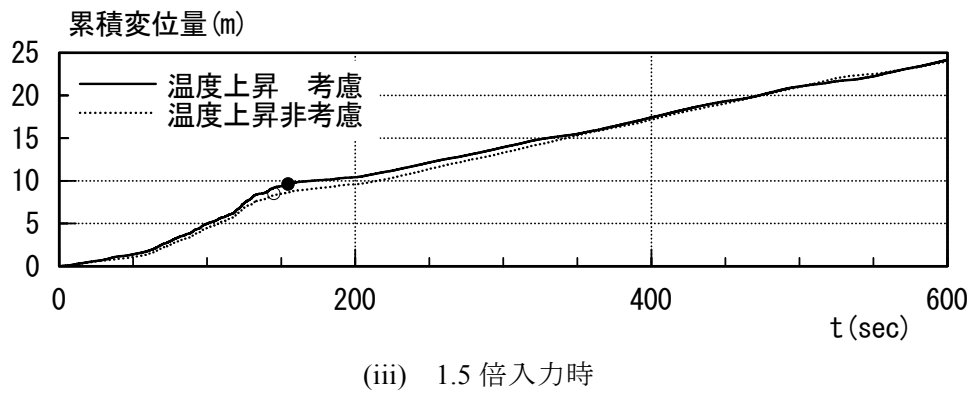
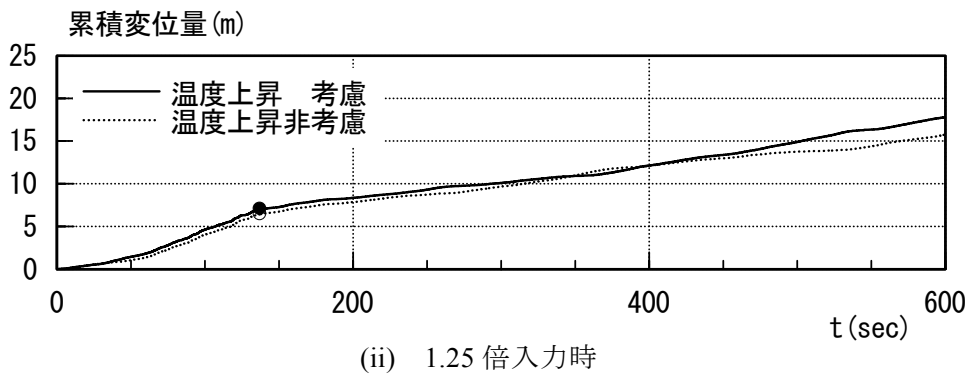
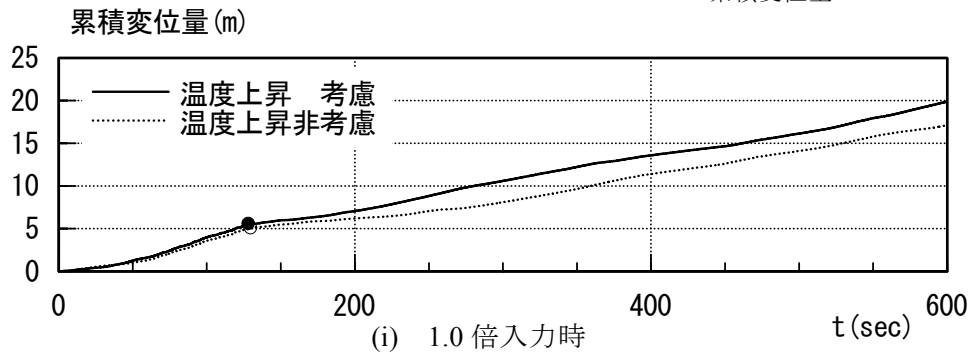


図 2.3.1-5(c) 免震層累積変位量時刻歴 (T-TN-AIC004_AV)

●, ○ 総入力エネルギーの95%時

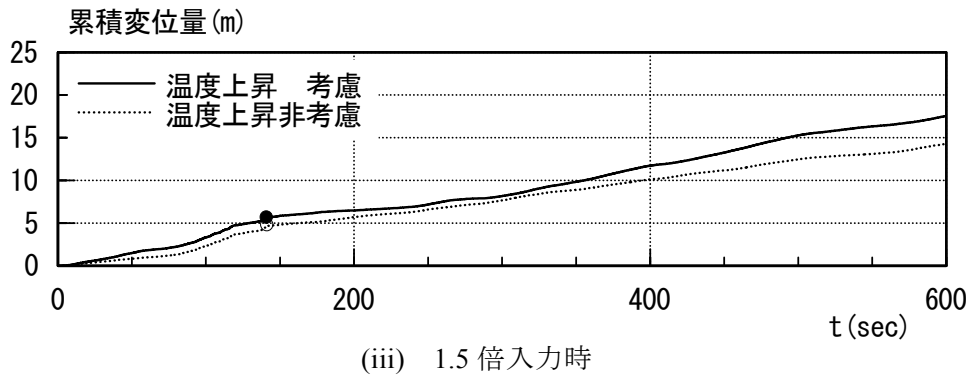
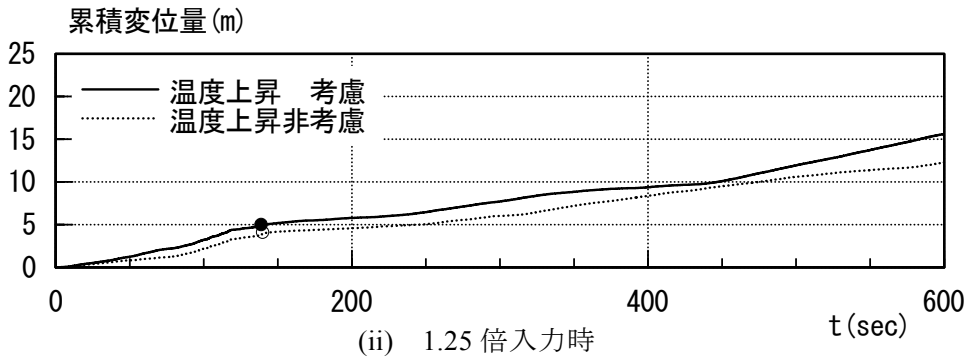
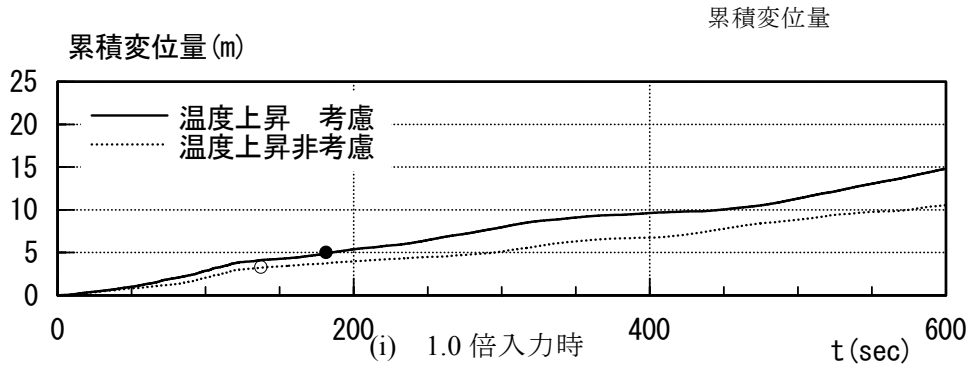
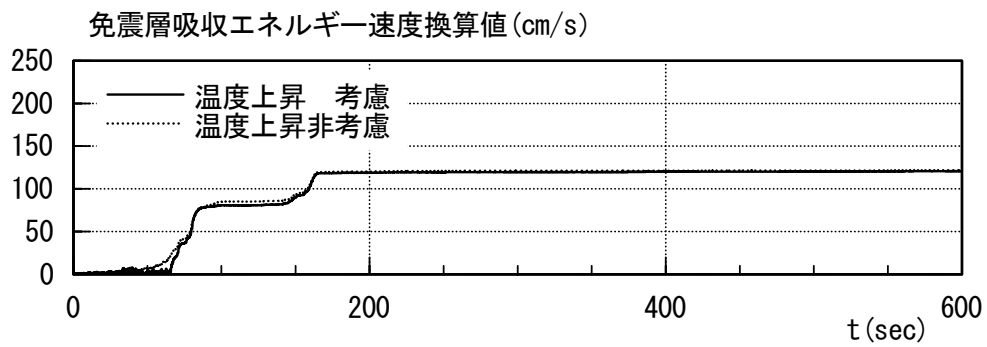
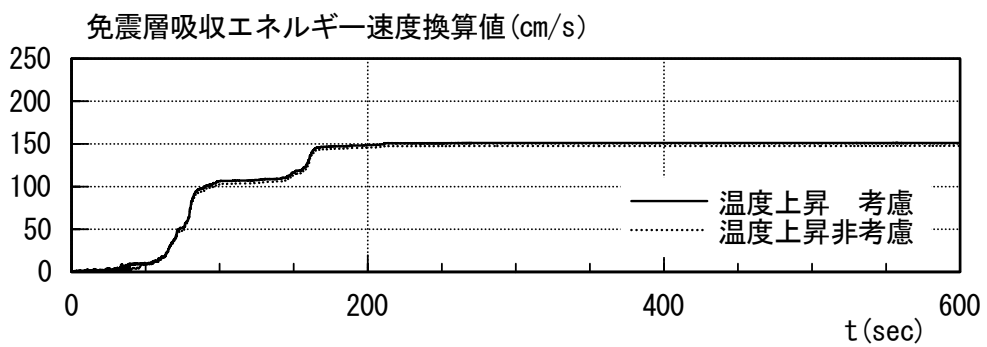


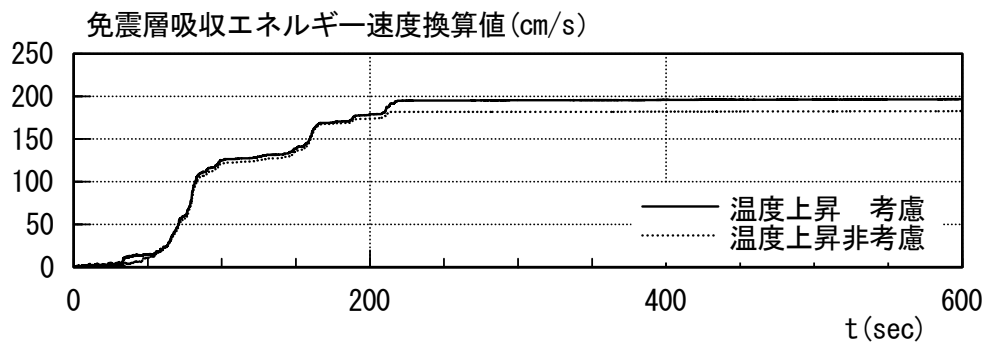
図 2.3.1-5(d) 免震層累積変位量時刻歴 (T-TN-KGIN_AV)



(i) 1.0 倍入力時

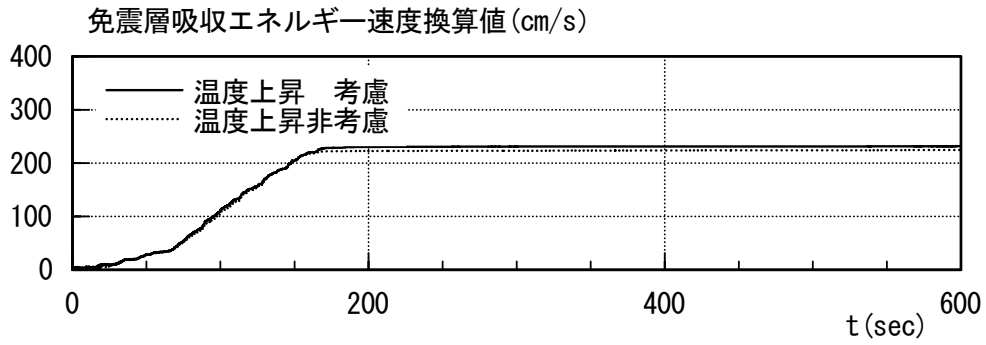


(ii) 1.25 倍入力時

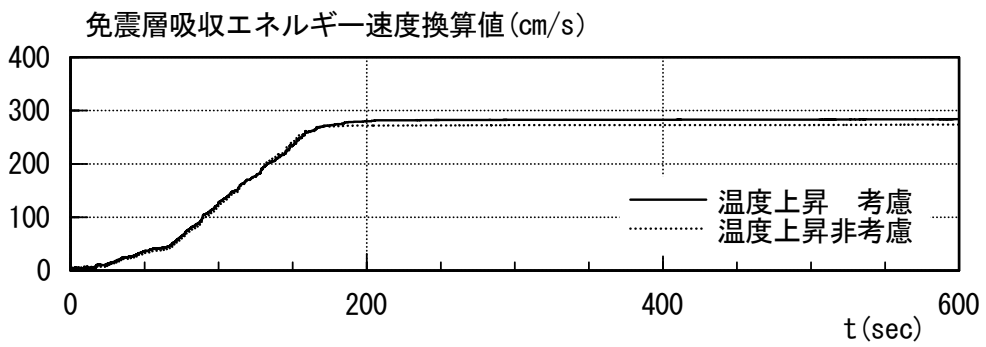


(iii) 1.5 倍入力時

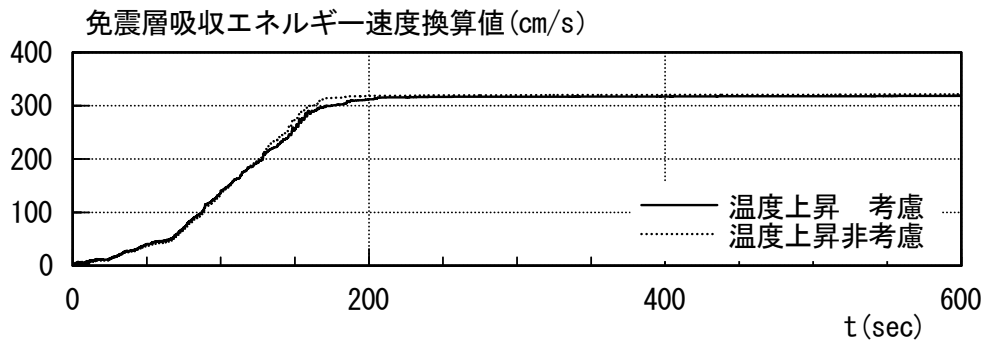
図 2.3.1-6(a) 免震層履歴吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (N-OSKH02_AV)



(i) 1.0 倍入力時



(ii) 1.25 倍入力時



(iii) 1.5 倍入力時

図 2.3.1-6(b) 免震層履歴吸収エネルギー—速度換算値時刻歴 (T-TN-AIC003_AV)

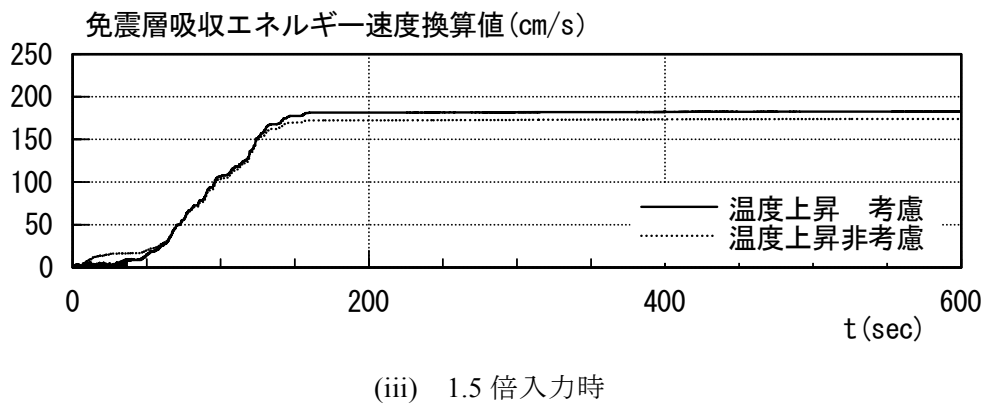
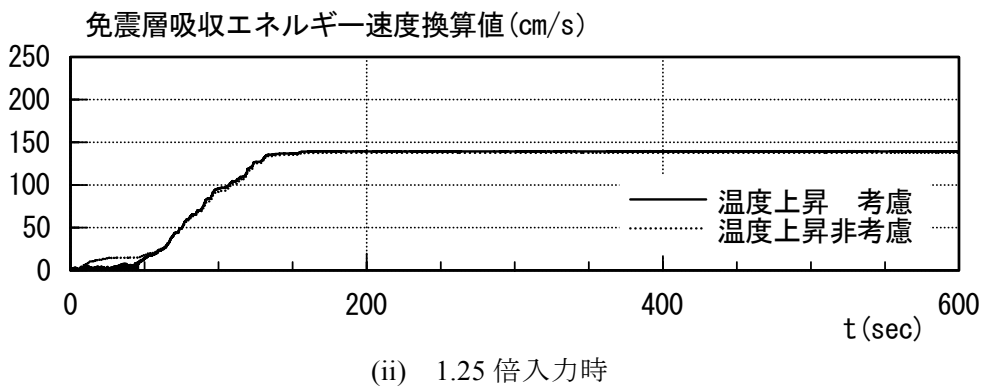
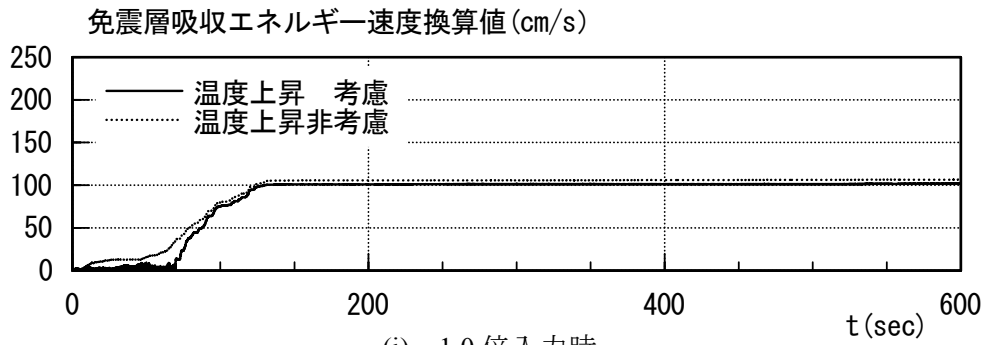


図 2.3.1-6(c) 免震層履歴吸収エネルギー—速度換算値時刻歴 (T-TN-AIC004_AV)

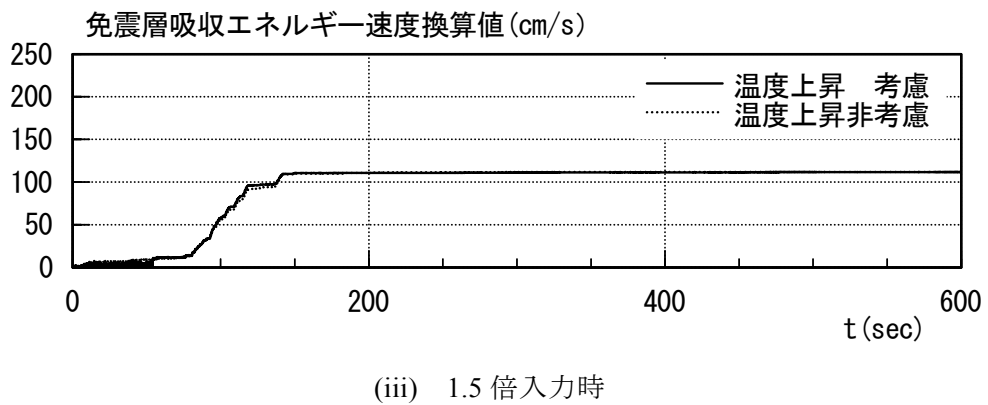
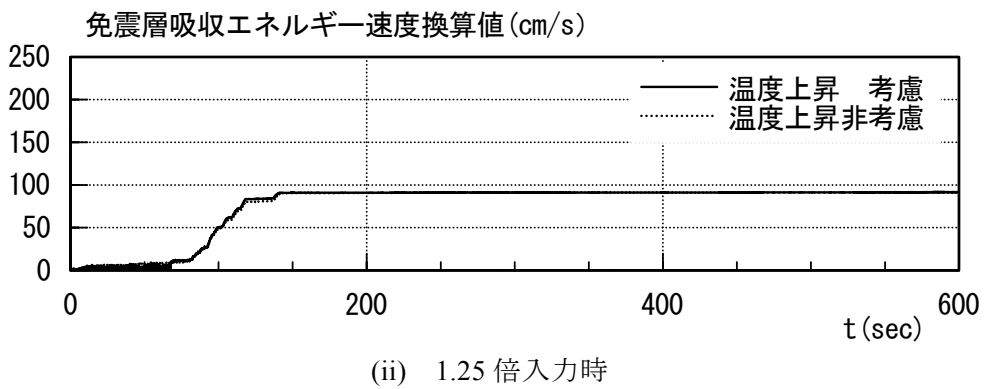
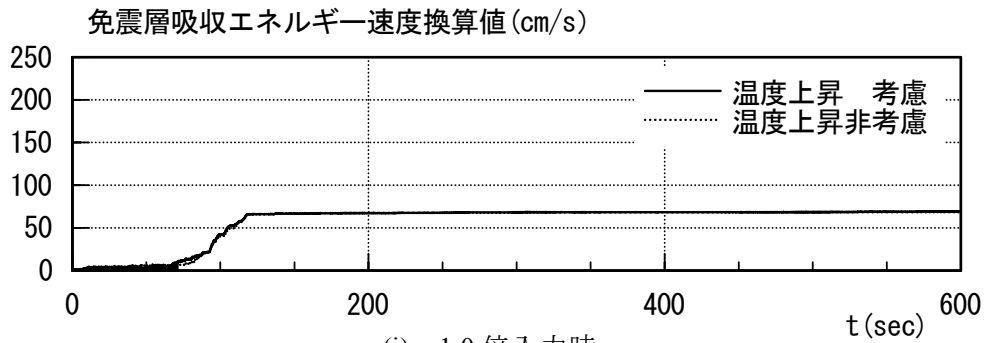


図 2.3.1-6(d) 免震層履歴吸収エネルギー—速度換算値時刻歴 (T-TN-KGIN_AV)

(4) 2方向入力の検討

2方向入力地震動については2.2に示す地震動において検討を実施した。解析においては地震動のNS、EWの2方向成分について、X方向にNS成分を、Y方向にEW成分を入力した。解析において鉛プラグ入り積層ゴムはMSSモデルとした。

表2.3.1-4に各地震動における応答解析結果を、図2.3.1-7に積層ゴムせん断ひずみ-せん断力係数図を示す。

表 2.3.1-4(a) 2方向地震動入力時の免震層水平変位

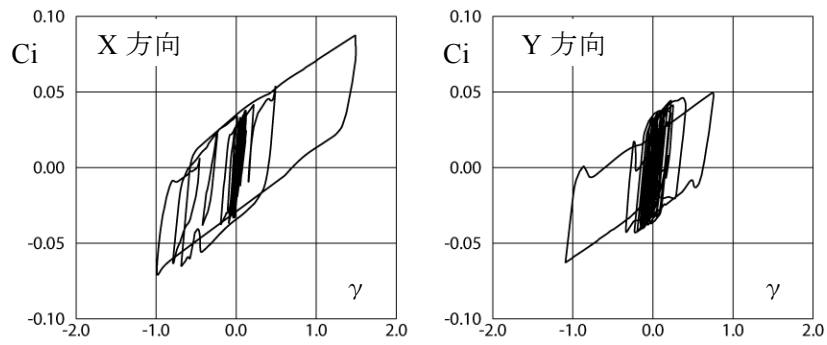
	免震層水平変位(cm)							
	温度上昇非考慮時				温度上昇 考慮時			
	2方向同時入力		1方向入力		2方向同時入力		1方向入力	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
WAVE-Ts1	29.9	21.9	27.9	17.3	27.6	20.6	27.1	15.8
WAVE-Ts2	8.2	13.6	6.5	8.9	6.9	10.5	6.1	8.6
WAVE-Tk	13.8	21.5	12.1	19.5	22.8	41.8	12.4	21.5
WAVE-S	7.9	8.4	6.8	9.3	7.8	8.3	5.9	9.0
WAVE-K	6.2	6.6	6.0	6.7	6.3	6.7	5.6	5.9

表 2.3.1-4(b) 2方向地震動入力時の免震層応答最大せん断力係数

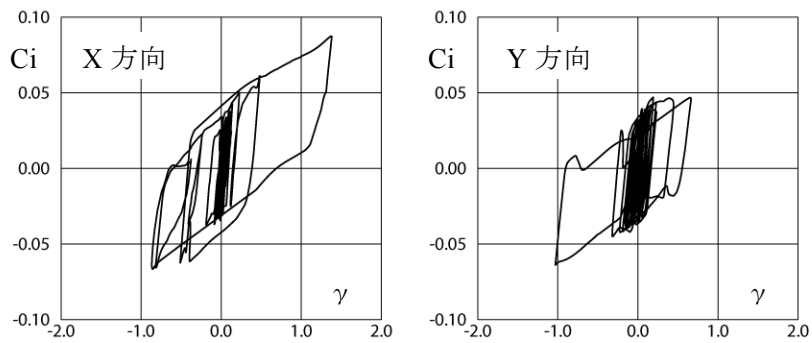
	免震層せん断力係数							
	温度上昇非考慮時				温度上昇 考慮時			
	2方向同時入力		1方向入力		2方向同時入力		1方向入力	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
WAVE-Ts1	0.088	0.063	0.091	0.073	0.087	0.064	0.096	0.078
WAVE-Ts2	0.053	0.066	0.051	0.057	0.056	0.067	0.058	0.065
WAVE-Tk	0.063	0.078	0.064	0.076	0.063	0.093	0.064	0.077
WAVE-S	0.053	0.055	0.052	0.058	0.053	0.055	0.057	0.060
WAVE-K	0.047	0.049	0.050	0.052	0.050	0.050	0.054	0.054

表 2.3.1-4(c) 2方向地震動入力時の入力エネルギーの速度換算値 V_E

	$V_E(\text{cm/s})$							
	温度上昇非考慮時				温度上昇 考慮時			
	2方向同時入力		1方向入力		2方向同時入力		1方向入力	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
WAVE-Ts1	133.6		96.6	101.9	134.8		97.8	102.9
			140.4				142.0	
WAVE-TSs2	105.9		65.2	64.5	88.8		63.2	53.8
			91.7				83.0	
WAVE-Tk	269.1		174.5	205.4	291.9		176.1	211.8
			269.5				275.4	
WAVE-S	195.6		128.4	139.4	189.7		124.6	137.4
			189.5				185.5	
WAVE-K	153.8		120.0	105.2	155.7		120.9	107.6
			159.6				161.8	

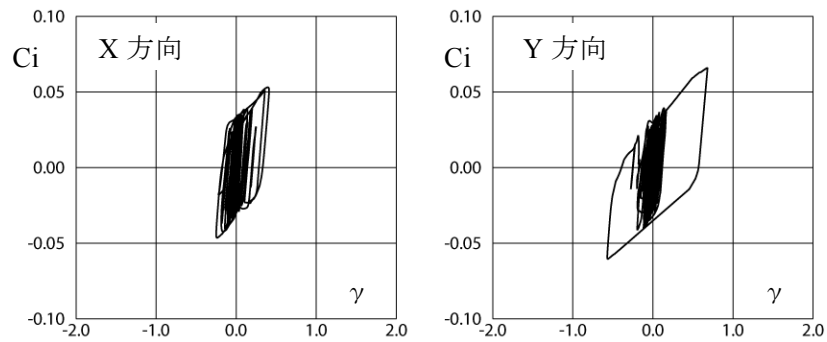


(i)温度上昇非考慮時

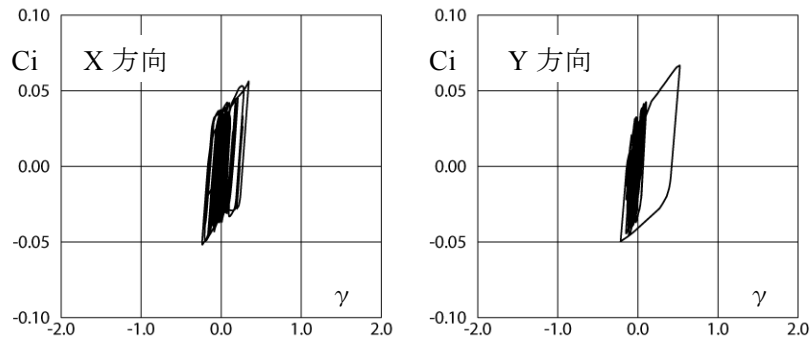


(ii)温度上昇 考慮時

図 2.3.1-7(a) 2 方向入力時積層ゴムせん断ひずみーせん断力係数図 (WAVE-Ts1)

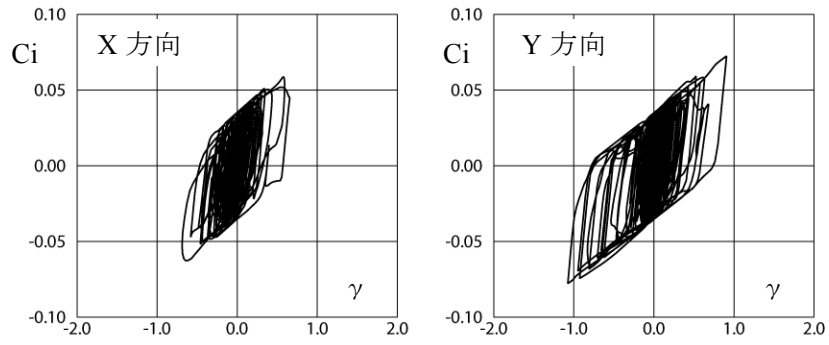


(i)温度上昇非考慮時

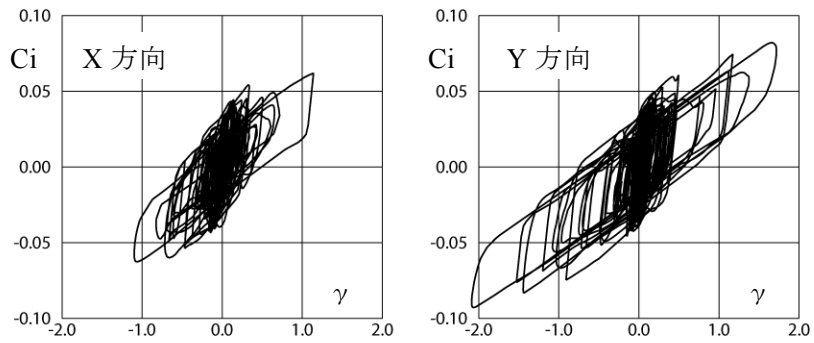


(ii)温度上昇 考慮時

図 2.3.1-7(b) 2 方向入力時積層ゴムせん断ひずみーせん断力係数図 (WAVE-Ts2)

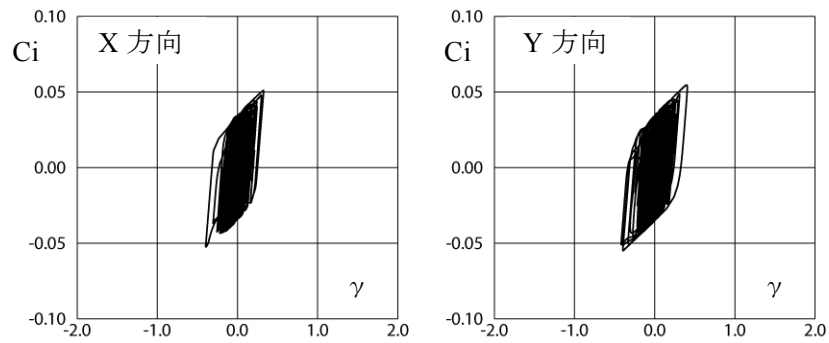


(i)温度上昇非考慮時

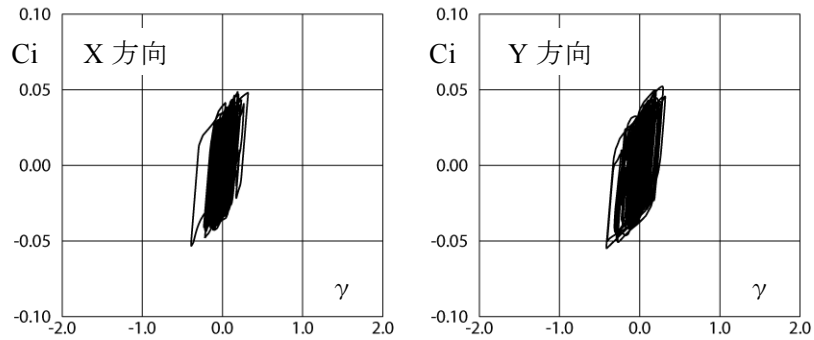


(ii)温度上昇 考慮時

図 2.3.1-7(c) 2方向入力時積層ゴムせん断ひずみーせん断力係数図 (WAVE-Tk)

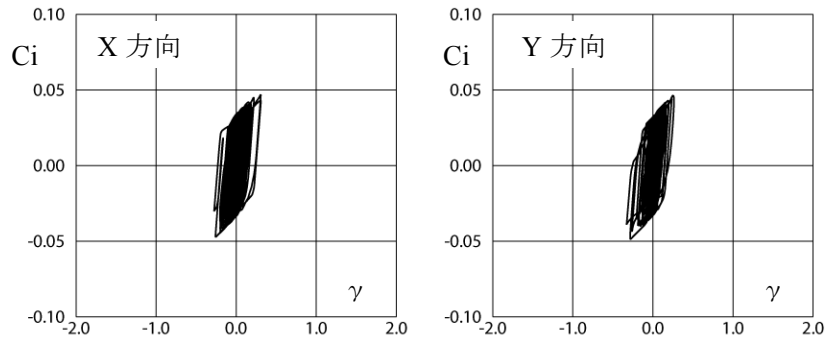


(i)温度上昇非考慮時

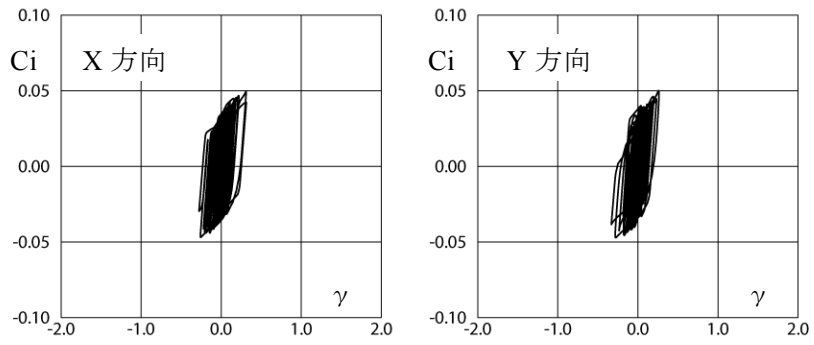


(ii)温度上昇 考慮時

図 2.3.1-7(d) 2方向入力時積層ゴムせん断ひずみーせん断力係数図 (WAVE-S)



(i)温度上昇非考慮時



(ii)温度上昇 考慮時

図 2.3.1-7(e) 2 方向入力時積層ゴムせん断ひずみーせん断力係数図 (WAVE-K)

図 2.3.1-8 に WAVE-Ts1 及び WAVE-Tk 入力時の免震層水平変位 (X,Y 方向)、鉛降伏応力の時刻歴波形を示す。

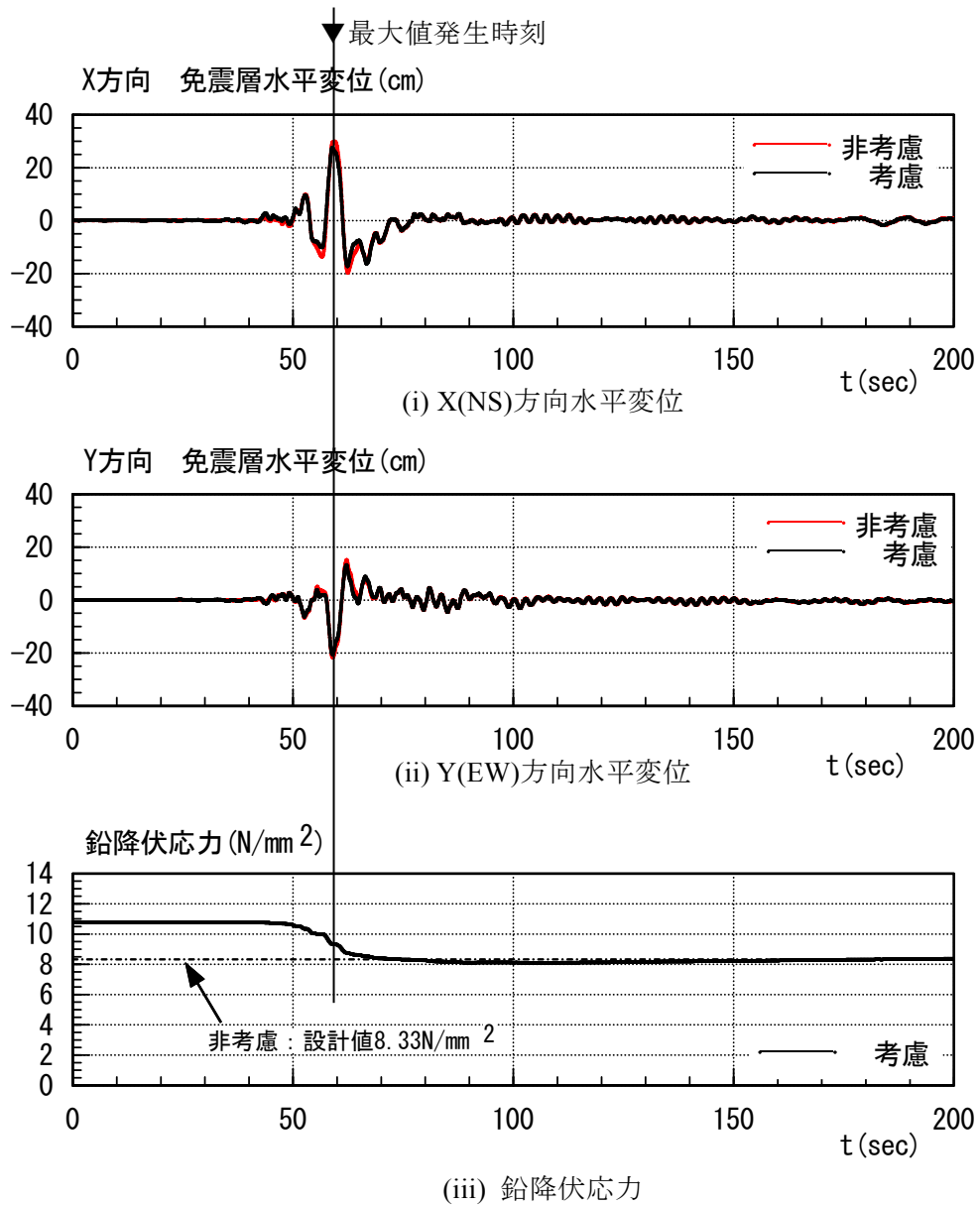


図 2.3.1-8(a) 2 方向入力時免震層水平変位、鉛降伏応力時刻歴 (WAVE-Ts1)

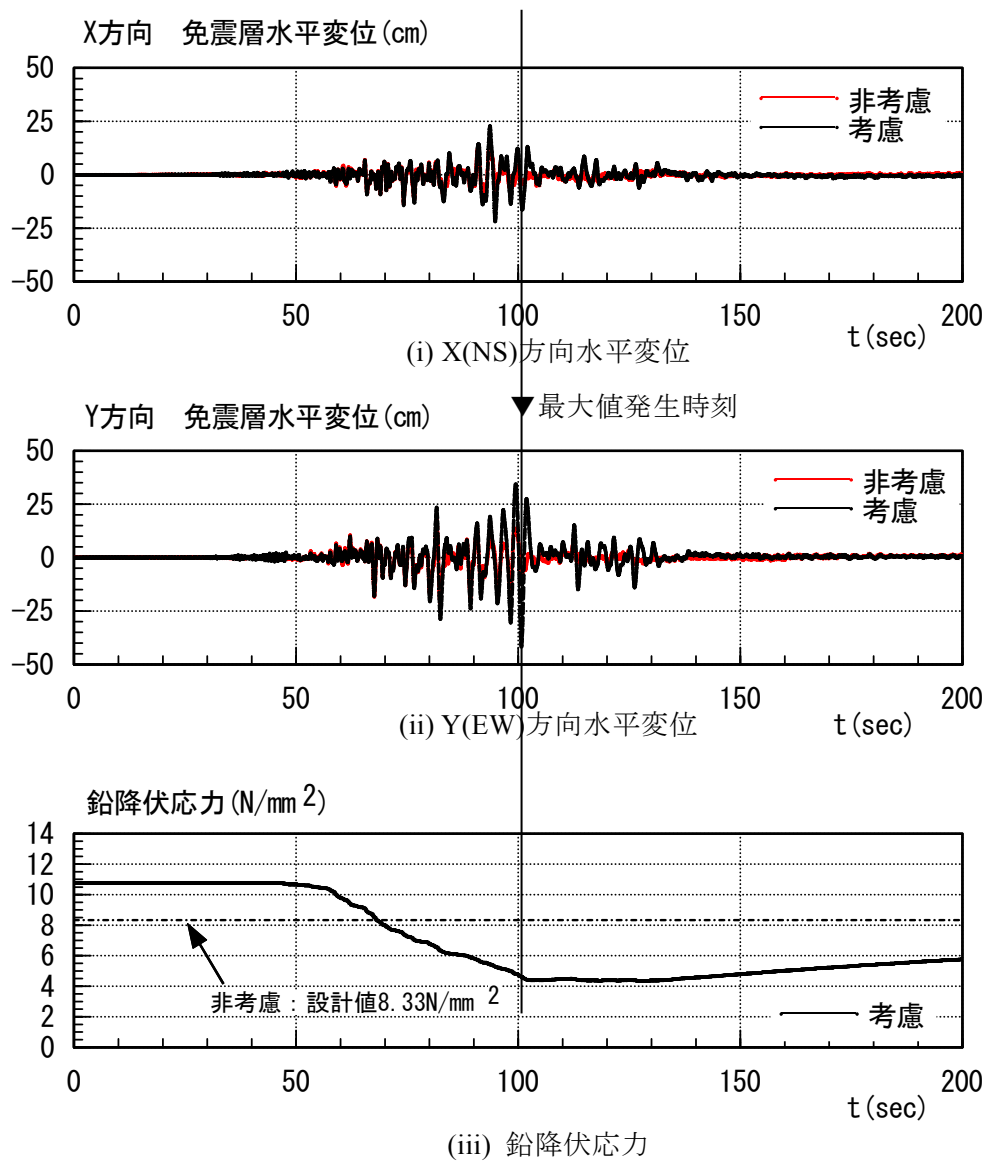


図 2.3.1-8(b) 2 方向入力時免震層水平變位、鉛降伏応力時刻歴 (WAVE-Tk)

地震動の2方向入力を考慮した場合には、入力エネルギーを大きく評価することになるため、免震材料におけるエネルギー吸収による温度上昇が大きくなり、特性変動が大きくなることが考えられる。このため、免震層における最大水平変位は温度上昇を考慮した場合には大きくなると考えられる。

今回の地震応答解析における評価では設定された入力地震動において、免震層の応答最大水平変位は温度上昇考慮時には非考慮時に比較して同等程度若しくは小さくなっている。場合が見られる。WAVE-Ts1の場合を例にとると、図2.3.1-7(a)に示すように免震層の最大水平変位が地震動の初期の部分で発生しており、その時には鉛の降伏応力が設計値より大きな値となっている。このため、温度上昇を考慮した場合に免震層の水平変位が非考慮の場合と比較して小さくなっていると考えられる。

一方、WAVE-Tkについては地震動の入力エネルギーが大きいため鉛プラグ入り積層ゴムの温度上昇による影響が大きく、免震層の水平変位の最大値発生時刻においては鉛降伏応力が設計値を下回っている。このことから温度上昇考慮時に非考慮時と比較して免震層応答最大水平変位が大きくなっていると考えられる。免震層の応答最大水平変位は非考慮時に比較して考慮時にはNS方向(X方向)で1.66倍、EW方向(Y方向)で1.94倍である。ただし、積層ゴムのせん断ひずみとしては最大で $\gamma=210\%$ 程度である。免震層の応答最大層せん断力係数についても温度上昇考慮時には非考慮時に比較して同等程度であるが、WAVE-Tkの場合にEW方向(Y方向)で1.19倍となっている。

(5) まとめ

免震材料として鉛プラグ入り積層ゴムを適用した免震建築物では、地震動の1方向入力時に地震動の入力倍率が1.0倍の場合に変位増大率は0.94～1.18倍である。T-TN-AIC003_AV地震動の入力倍率1.5倍の場合に変位増大率が1.38倍となるケースがあるものの、積層ゴムのせん断ひずみは $\gamma=100\%$ （水平変位20cm）以内である。

地震動の2方向入力時には免震層の応答最大水平変位は入力エネルギーが大きいWAVE-Tkの場合に温度上昇考慮時には非考慮時に比較してX(NS)方向で1.65倍、Y(EW)方向で1.94倍と大きくなっている。ただし、積層ゴムのせん断ひずみとしては最大で $\gamma=210\%$ （水平変位42cm）程度である。

その他の入力地震動においては免震層の応答最大水平変位は温度上昇考慮時に非考慮時と比較して同等程度若しくは小さくなっている。

今後、鉛プラグ入り積層ゴムについて実施された実験結果についての評価を実施し、鉛プラグの温度上昇に伴う降伏荷重の低下に代表される繰り返し加振時の特性変化について現状の評価方法の検証が必要と考えられる。また、免震材料及び免震建築物応答に及ぼす温度上昇の影響を簡易的に評価できる手法についての検討が望まれている。

参考文献

2.3.1-1) 竹中康雄ほか：大振幅繰り返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その9 熱伝導解析による実験結果のシミュレーション、その10 鉛入り積層ゴムにおける鉛温度～降伏応力関係の提案、その11 LRBの温度上昇を考慮した地震応答解析）、日本建築学会大会学術講演梗概集、2008.9.

2.3.2 高減衰ゴム系積層ゴム

(1) 各種依存性に関する既往の研究

(1.1) 技術資料による高減衰ゴム系積層ゴムの復元力特性

高減衰ゴム系積層ゴムの復元力特性は、以下の3つの特性値により決定する(図 2.3.2-1)^{2.3.2-1)}。

- 等価せん断弾性率 G_{eq} (等価せん断剛性 $K_{eq} = G_{eq}A / h_r$)
- 等価減衰定数 $H_{eq} = \Delta W / (2\pi \cdot K_{eq} \cdot \delta_0^2)$
- 降伏荷重特性係数 $u = Q_d / (K_{eq} \cdot \delta_0)$

(A: 積層ゴム断面積、 h_r : ゴム層総厚)

上記3つの特性値により決まるバイリニア型の復元力特性に、せん断ひずみ依存性の修正係数を適用した修正バイリニアモデルが高減衰ゴム系積層ゴムの復元力特性の設計式として用いられている。表 2.3.2-1 に、メーカーの技術資料^{2.3.2-1)}によるせん断ひずみ依存性の修正係数を示す。

高減衰ゴム系積層ゴムの等価剛性 K_{eq} 、および等価減衰定数 H_{eq} は、温度によって値が変化するため、多数回繰返し加振時の積層ゴムの発熱による温度上昇は、これらの特性値を変化させる。高減衰ゴム系積層ゴムの温度依存性の特性値の変化については、任意の温度状態における試験で得られた特性値を、基準温度 20°Cにおける値へ補正するための補正係数の算出式が技術資料に示されている。式(2.3.2-1)に等価剛性の補正係数 β_k 、式(2.3.2-2)に等価減衰定数の補正係数 β_h の算出式を示す(式中の係数は下表)。また、図 2.3.2-2 に温度補正式と実験結果の比較を示す。

$$\beta_k = \frac{1}{a + bT + cT^2 + dT^3} \quad (2.3.2-1)$$

$$\beta_h = \frac{1}{e + fT + gT^2 + hT^3} \quad (2.3.2-2)$$

T: 試験時温度

ゴム材料	a	b	c	d	e	f	g	h
X0.6R	1.21	-1.86×10^{-2}	5.99×10^{-4}	-8.99×10^{-6}	1.06	-4.13×10^{-3}	1.10×10^{-4}	-3.10×10^{-6}

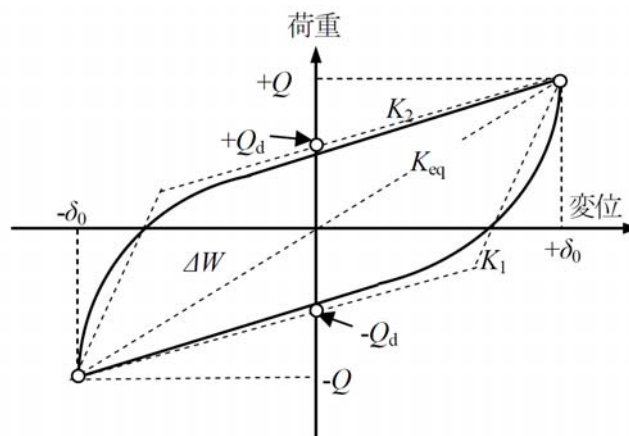


図 2.3.2-1 高減衰ゴム系積層ゴムの水平復元力特性

表 2.3.2-1 高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R)設計式^{2.3.2-1}

ゴム材料呼称	代表特性値 ($\gamma=100\%$)	各関数 ($10\% \leq \gamma \leq 270\%$)
X0.6R	$G_{eq}=0.620\text{N/mm}^2$ $H_{eq}=0.240$	$G(\gamma)=G_0 \times (2.855 - 3.878\gamma + 2.903\gamma^2 - 1.016\gamma^3 + 0.1364\gamma^4)$ $G_0=0.620$ 、 $\gamma=1.0$ におけるせん断弾性係数
		$H_{eq}(\gamma)=H_{eq0} \times (0.9150 + 0.2364\gamma - 0.1804\gamma^2 + 0.02902\gamma^3)$ $H_{eq0}=0.240$ 、 $\gamma=1.0$ における等価減衰定数
		$u(\gamma)=u_0 \times (0.9028 + 0.2711\gamma - 0.2083\gamma^2 + 0.03421\gamma^3)$ $u_0=0.408$ 、 $\gamma=1.0$ における降伏荷重特性比

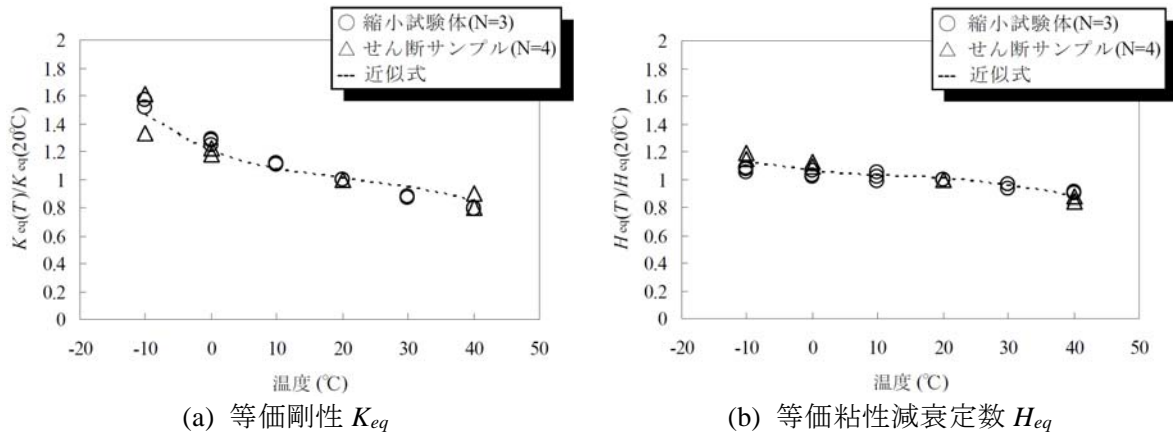


図 2.3.2-2 高減衰ゴム系積層ゴムの水平復元力特性値の温度依存性

(1.2) 高減衰ゴム系積層ゴムの多数回繰返し加振時の特性変化に関する既往の研究

高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し加振時特性変化について、既往の研究^{2.3.2-2), 2.3.2-3)}では等価剛性 K_{eq} を累積履歴エネルギー吸収量 E/V の関数として評価する実験式(式(2.3.2-3)、式(2.3.2-4))が示されている。この時、等価減衰定数 H_{eq} および降伏荷重特性係数 u については、 E/V による変化率は小さいとして一定としている。図 2.3.2-3 に、式(2.3.2-3)および式(2.3.2-4)のグラフを示す。

$$\frac{K_{eq}}{K_{eq0}} = -2.5 + 0.2e^{-(E/V)} + 3.4e^{-(E/1000V)} \quad (2.3.2-3)$$

$$\frac{K_{eq}}{K_{eq0}} = -2.56 + 0.18e^{-(E/2V)} + 3.36e^{-(E/3000V)} \quad (2.3.2-4)$$

(K_{eq0} : 等価剛性の初期値、 E : 累積履歴エネルギー吸収量、 V : ゴム体積)

平成 21 年度の基準整備事業「12 免震建築物の基準の整備に資する検討」^{2.3.2-4)}においては、免震建物の地震応答解析結果より高減衰ゴム系積層ゴムによる履歴吸収エネルギー E を算出し、式(2.3.2-4)を用いて等価剛性の低下率を求めている。表 2.3.2-2 に、「12 免震建築物の基準の整備に資する検討」報告書より抜粋した地震応答解析結果による等価剛性の低下率を示す。表中の地震入力によって高減衰ゴム系積層ゴムの等価剛性が初期状態の 8 割程度に低下することが推察される。

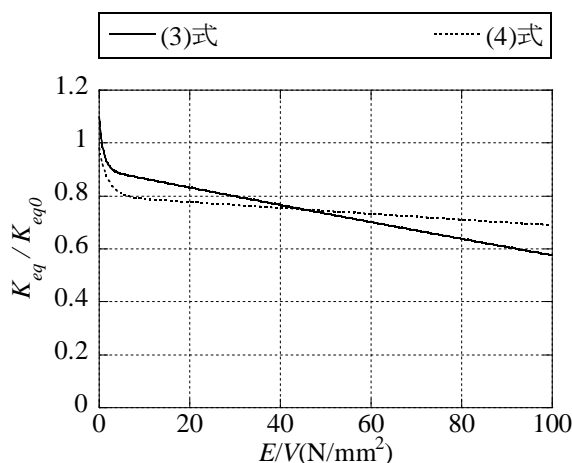


図 2.3.2-3 E/V と K_{eq}/K_{eq0} の関係

表 2.3.2-2 地震応答解析結果による等価剛性 K_{eq} の低下率^{2.3.2-4)}

入力地震動	E (kNm)	δ_{max} (m)	E/V_r (N/mm ²)	K_{eq}/K_{eq0}
N-OSKH02-AV	5.12×10^4	0.12	4.8	0.811
N-OSKH02-SD	1.46×10^5	0.22	13.8	0.784
T-TN-AIC003-AV	1.19×10^5	0.26	11.2	0.788
T-TN-AIC003-SD	2.66×10^5	0.41	25.2	0.772

(2) 解析条件

(2.1) 高減衰ゴム系積層ゴムの復元力モデル

繰返し加振時の特性変化を考慮した解析モデルとして、単位ゴム体積当たりの累積履歴吸収エネルギーを指標とした等価剛性の評価式である式(2.3.2-3)を、修正バイリニアモデルによる高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R)の設計式(表 2.3.2-1)に取り入れた解析モデルを適用する。時時刻々の特性値変化を取り入れた解析方法は、以下①～④のようになる。

- ① 時刻歴応答解析の1ステップごとに履歴吸収エネルギー E を求める。
- ② 式(2.3.2-3)を用いて、等価剛性の低下率 $C_e (=K_{eq} / K_{eq0})$ を求める。
- ③ $K_{eq} = C_e \cdot K_{eq0}$ を用いて次ステップの応答計算を実施する。
- ④ ①～③を繰返し計算する。

図 2.3.2-4 に、表 2.3.2-1 に示す設計式による復元力モデル(設計式モデル)と、設計式に式(2.3.2-3)による等価剛性の低下を考慮した復元力モデル(剛性低下モデル)を比較して示す。設計式モデルは繰返し加振に関わらず一定の履歴ループを描くのに対し、剛性低下モデルは繰返し加振に伴い等価剛性が低下し、最大荷重が徐々に小さくなっている。

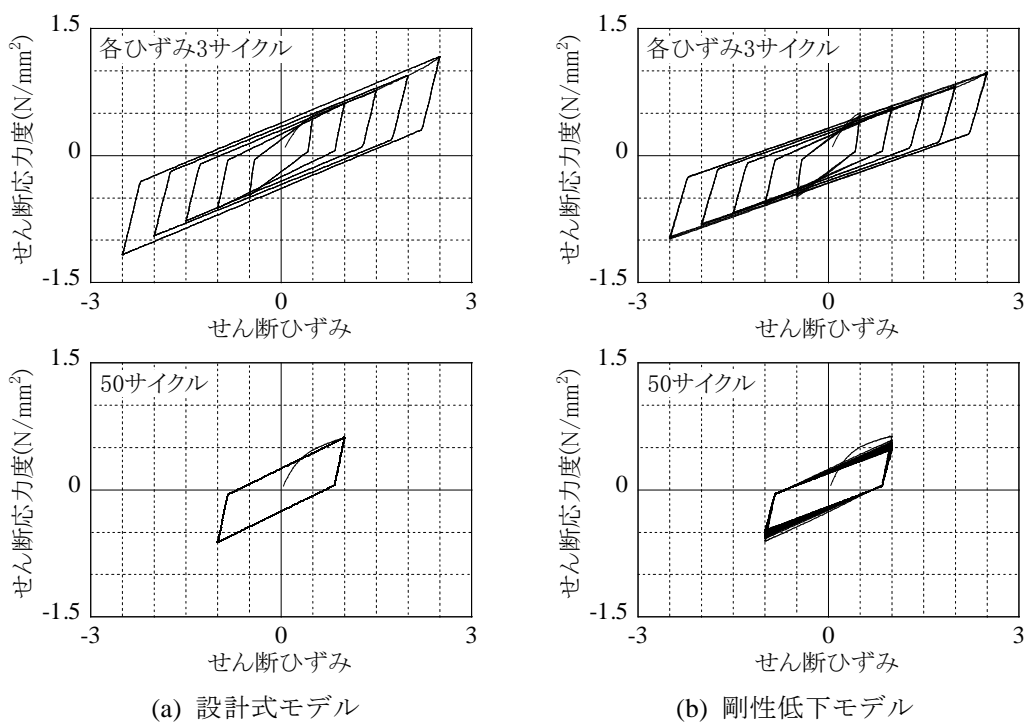


図 2.3.2-4 設計式モデルと剛性低下モデルの比較

(2.2) 解析モデル

解析モデルは、高減衰ゴム系積層ゴムのみで構成される免震層を有する 1 質点剛体モデルとする。図 2.3.2-5 に、解析モデル概念図を示す。せん断ひずみ 200%時の等価周期が 3.5 秒、4.0 秒(共通設定)、4.5 秒の 3 種類のモデルで検討を行う。表 2.3.2-3 に解析モデルの諸元を示す。免震層は 2 種地盤相当の JSSI 波により免震層変位が、せん断ひずみ 200%以下となるよう設定する。高減衰ゴム系積層ゴムの復元力特性として、図 2.3.2-4 に示す設計式モデル、剛性低下モデルの両方を用い、応答の違いを検討する。入力地震動は、表 2.3.2-4 に示す 4 波を 1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍と係数倍して入力する。

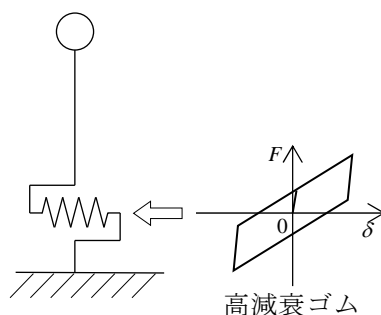


図 2.3.2-5 解析モデルイメージ

表 2.3.2-3 高減衰ゴム系積層ゴム解析モデル

	免震周期 3.5 秒	免震周期 4.0 秒	免震周期 4.5 秒
想定建物	RC 造、10 階建て 基礎免震	RC 造、10 階建て 基礎免震	RC 造、12 階建て 基礎免震
上部構造重量	46,000kN	46,000kN	55,000kN
積層ゴム台数	12 台	12 台	12 台
積層ゴム直径(内径)	800mm (20mm)	700mm (15mm)	700mm (15mm)
ゴム層総厚	199.8mm	202.1mm	202.1mm
積層ゴム面圧	7.6 N/mm ²	10.0 N/mm ²	11.9 N/mm ²
γ=100%時等価周期	3.1 秒	3.6 秒	4.0 秒
γ=200%時等価周期	3.6 秒	4.1 秒	4.5 秒
JSSI 波による 免震層応答変位	400mm (γ=200%)以下	400mm (γ=200%)以下	400mm (γ=200%)以下

表 2.3.2-4 応答解析用入力地震動

入力地震動	最大加速度
N-OSKH02-AV	70.9Gal
T-TN-AIC003-AV	221.2Gal
T-TN-AIC004-AV	323.0Gal
T-TN-KGIN1F-AV	89.6Gal

(3) 解析結果

(3.1) 最大応答値

表 2.3.2-5～7 に、地震応答解析結果の最大応答値一覧を示す。応答値は質点加速度、免震層変位、せん断力係数であり、設計式モデルの結果と剛性低下モデルの結果を比較して示す。また、図 2.3.2-6 に、入力加速度と免震層変位、せん断力係数の最大応答値の関係を示す。

各入力地震動の 1.0 倍入力による設計式モデルの結果は、免震周期 3.5 秒、4.0 秒、4.5 秒の 3 種類のモデルとも免震層変位はせん断ひずみ 200%(約 400mm)以下となっている。1.0 倍入力でも最も免震層変位が大きいのは、免震周期 4.5 秒モデルに T-TN-AIC003-AV を入力したケースで、281.0mm($\gamma=139\%$)である。免震周期 3.5 秒モデル、4.0 秒モデルについても T-TN-AIC003-AV を入力したケースが最も大きな応答値を示している。入力地震動を 1.25 倍、1.5 倍と係数倍して入力すると応答値も大きくなっていくが、免震層変位が設計式モデルで $\gamma=200\%$ を超えるケースは、免震周期 4.0 秒モデルに T-TN-AIC003-AV の 1.5 倍を入力したケース、免震周期 4.5 秒モデルに N-OSKH02-AV の 1.5 倍を入力したケース、および免震周期 4.5 秒モデルに T-TN-AIC003-AV の 1.5 倍を入力したケースの 3 ケースである。また、せん断力係数については地震動を係数倍入力したケースも含め、ほとんどのケースで 0.1 よりも小さい値となっている。設計式モデルにおいてせん断力係数が 0.1 以上となっているのは、免震周期 3.5 秒モデルに T-TN-AIC003-AV の 1.25 倍、1.5 倍を入力したケース、および免震周期 4.0 秒モデルに T-TN-AIC003-AV の 1.5 倍を入力したケースの 3 ケースである。

設計式モデルと剛性低下モデルの応答値を比較すると、ほとんどのケースで剛性低下モデルの方が大きな免震層変位を示しており、設計式モデルよりも 10～20%程度免震層変位が大きい。N-OSKH02-AV を入力したケースにおいて、設計式モデルと剛性低下モデルによる免震層変位の差が明確に現れており、剛性低下モデルの方が設計式モデルよりも 70%程度大きな値となるケースもある。せん断力係数については、ほとんどのケースにおいて剛性低下モデルは設計式モデルに対して 5～10%程度小さな値を示している。ただし、剛性低下モデルの免震層変位が設計式モデルに対して 70%程度と非常に大きくなるケースでは、剛性低下モデルの方が設計式モデルよりも 10%程度大きなせん断力係数を示している。

図 2.3.2-6 に示す入力加速度と最大応答値の関係をみると、設計式モデルは入力地震動の加速度の倍率を上げると、それに対応してほぼ一定の割合で応答値も増加しているが、剛性低下モデルは免震周期 3.5 秒モデルに N-OSKH02-AV を入力したケースや、免震周期 4.5 秒モデルに T-TN-KGIN1F-AV を入力したケースのように、入力倍率の増加に対し応答値が急激に跳ね上がるケースが見られ、この場合設計式モデルの応答値との差が大きくなっている。

表 2.3.2-5 免震周期 3.5 秒モデルの最大応答値一覧

入力			応答					
地震波	倍率	加速度 (Gal)	質点加速度(Gal)		免震層変位(mm)		せん断力係数	
			設計式	剛性低下	設計式	剛性低下	設計式	剛性低下
N- OSKH02-AV	1.00	70.90	66.61	60.38 (0.91)	125.1	122.5 (0.98)	0.068	0.062 (0.91)
	1.25	88.63	72.06	63.47 (0.88)	154.2	149.5 (0.97)	0.074	0.065 (0.88)
	1.50	106.35	75.42	85.82 (1.14)	174.4	297.2 (1.70)	0.077	0.088 (1.14)
T-TN- AIC003-AV	1.00	221.20	82.86	77.13 (0.93)	218.2	244.8 (1.12)	0.085	0.079 (0.93)
	1.25	276.50	98.80	93.05 (0.94)	297.5	334.6 (1.12)	0.101	0.095 (0.94)
	1.50	331.80	119.37	106.03 (0.89)	388.6	402.0 (1.03)	0.122	0.108 (0.89)
T-TN- AIC004-AV	1.00	323.00	62.93	60.83 (0.97)	108.7	120.7 (1.11)	0.064	0.062 (0.97)
	1.25	403.75	72.98	66.47 (0.91)	159.6	163.1 (1.02)	0.074	0.068 (0.91)
	1.50	484.50	78.69	70.24 (0.89)	194.1	188.9 (0.97)	0.080	0.072 (0.89)
T-TN- KGIN1F-AV	1.00	89.60	49.57	48.74 (0.98)	67.9	67.7 (1.00)	0.051	0.050 (0.98)
	1.25	112.00	60.76	60.05 (0.99)	100.3	109.1 (1.09)	0.062	0.061 (0.99)
	1.50	134.40	68.42	65.83 (0.96)	134.0	149.7 (1.12)	0.070	0.067 (0.96)

※()内の数字は、剛性低下モデルの値を設計式モデルの値で除した値。

表 2.3.2-6 免震周期 4.0 秒モデルの最大応答値一覧

入力			応答					
地震波	倍率	加速度 (Gal)	質点加速度(Gal)		免震層変位(mm)		せん断力係数	
			設計式	剛性低下	設計式	剛性低下	設計式	剛性低下
N- OSKH02-AV	1.00	70.90	48.83	53.78 (1.10)	113.4	201.0 (1.77)	0.050	0.055 (1.10)
	1.25	88.63	68.40	70.41 (1.03)	255.4	333.4 (1.31)	0.070	0.072 (1.03)
	1.50	106.35	85.98	85.33 (0.99)	361.6	442.0 (1.22)	0.088	0.087 (0.99)
T-TN- AIC003-AV	1.00	221.20	70.10	62.68 (0.89)	266.5	269.2 (1.01)	0.072	0.064 (0.89)
	1.25	276.50	82.27	76.22 (0.93)	340.0	364.9 (1.07)	0.084	0.078 (0.93)
	1.50	331.80	98.21	89.19 (0.91)	431.5	451.2 (1.05)	0.100	0.091 (0.91)
T-TN- AIC004-AV	1.00	323.00	51.23	47.76 (0.93)	127.9	125.6 (0.98)	0.052	0.049 (0.93)
	1.25	403.75	56.77	55.66 (0.98)	168.5	213.0 (1.26)	0.058	0.057 (0.98)
	1.50	484.50	68.49	66.24 (0.97)	256.0	296.6 (1.16)	0.070	0.068 (0.97)
T-TN- KGIN1F-AV	1.00	89.60	46.74	45.63 (0.98)	102.8	104.8 (1.02)	0.048	0.047 (0.98)
	1.25	112.00	53.39	49.97 (0.94)	142.6	144.7 (1.01)	0.054	0.051 (0.94)
	1.50	134.40	57.39	52.34 (0.91)	173.4	173.4 (1.00)	0.059	0.053 (0.91)

※()内の数字は、剛性低下モデルの値を設計式モデルの値で除した値。

表 2.3.2-7 免震周期 4.5 秒モデルの最大応答値一覧

入力			応答					
地震波	倍率	加速度 (Gal)	質点加速度(Gal)		免震層変位(mm)		せん断力係数	
			設計式	剛性低下	設計式	剛性低下	設計式	剛性低下
N- OSKH02-AV	1.00	70.90	53.78	53.65 (1.00)	227.0	286.6 (1.26)	0.055	0.055 (1.00)
	1.25	88.63	68.86	68.66 (1.00)	340.3	417.9 (1.23)	0.070	0.070 (1.00)
	1.50	106.35	83.34	84.15 (1.01)	439.1	509.9 (1.16)	0.085	0.086 (1.01)
T-TN- AIC003-AV	1.00	221.20	60.54	55.79 (0.92)	281.0	297.8 (1.06)	0.062	0.057 (0.92)
	1.25	276.50	73.53	65.48 (0.89)	372.9	378.8 (1.02)	0.075	0.067 (0.89)
	1.50	331.80	85.33	80.81 (0.95)	451.2	498.3 (1.10)	0.087	0.082 (0.95)
T-TN- AIC004-AV	1.00	323.00	45.28	43.68 (0.96)	148.2	177.1 (1.19)	0.046	0.045 (0.96)
	1.25	403.75	54.51	51.18 (0.94)	233.2	257.6 (1.10)	0.056	0.052 (0.94)
	1.50	484.50	64.29	57.83 (0.90)	308.2	316.7 (1.03)	0.066	0.059 (0.90)
T-TN- KGIN1F-AV	1.00	89.60	40.72	39.03 (0.96)	112.9	113.8 (1.01)	0.042	0.040 (0.96)
	1.25	112.00	44.62	41.50 (0.93)	142.4	143.5 (1.01)	0.046	0.042 (0.93)
	1.50	134.40	47.90	54.87 (1.15)	172.5	295.8 (1.71)	0.049	0.056 (1.15)

※()内の数字は、剛性低下モデルの値を設計式モデルの値で除した値。

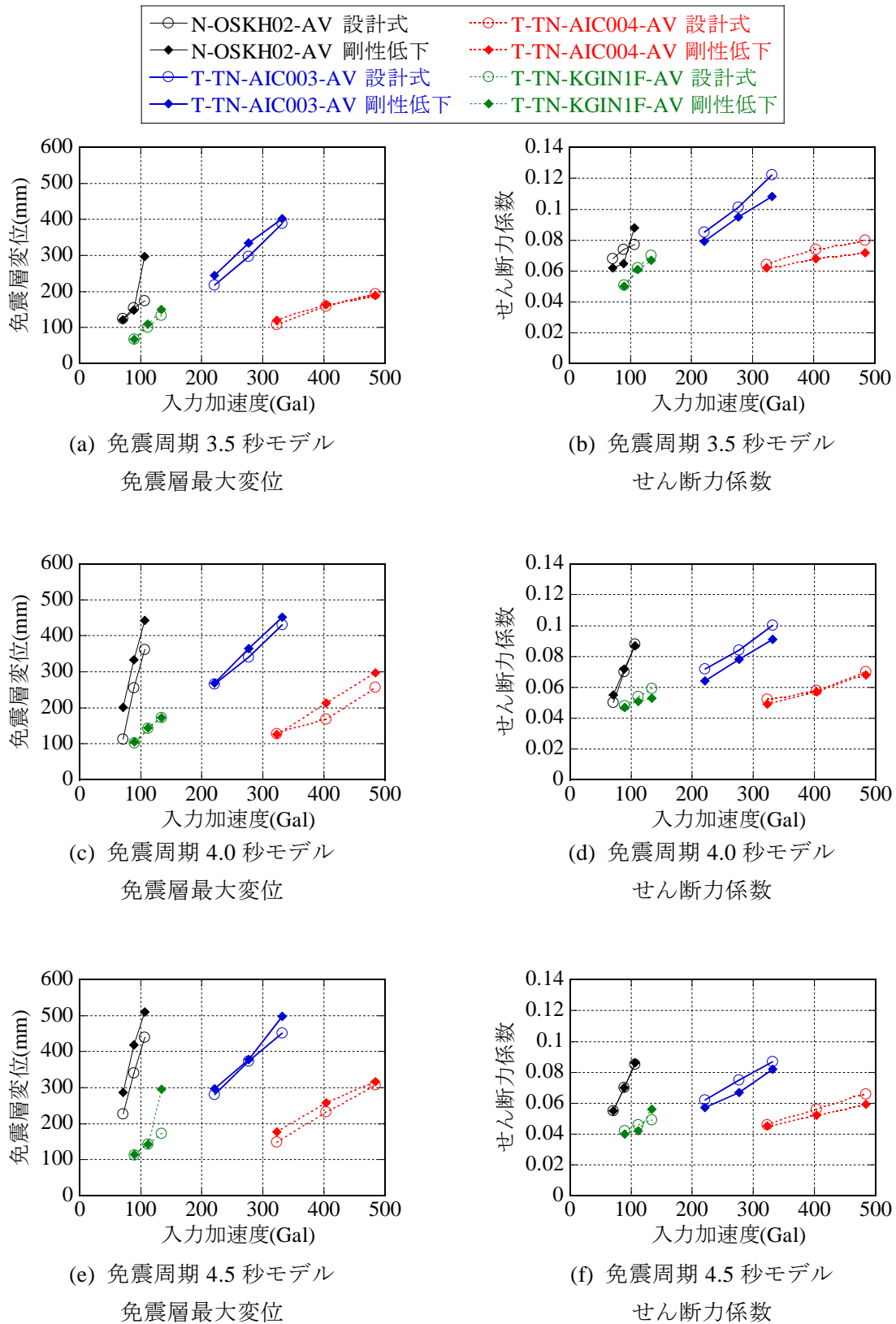


図 2.3.2-6 入力加速度と最大応答値の関係

(3.2) せん断ひずみ応力度関係

図 2.3.2-7～12 に、各入力地震動の 1.0 倍および 1.5 倍入力時の高減衰ゴム系積層ゴムのせん断ひずみ応力度関係を示す。設計式モデルによる解析結果と剛性低下モデルによる解析結果を重ねて示す。最大せん断ひずみが 50% 程度のケースでは、設計式モデルと剛性低下モデルの履歴ループはほぼ重なっているが、50% よりも大きなせん断ひずみを生じるケースでは、剛性低下モデルの履歴ループに等価剛性の低下と変位の増大が明確に現れている。N-OSKH02-AV を入力したケースは、等価剛性が低下することで大きく変位が増大している。これに対し、T-TN-AIC003-AV を入力したケースは、履歴ループに剛性低下が明確に現れているが、変位の増大はそれほど大きくない。

図 2.3.2-13～15 に、剛性低下モデルの解析結果における免震層の累積履歴吸収エネルギーを積層ゴムのゴム体積で除した E/V と、剛性低下モデルにおける等価剛性の初期値に対する低下率 (K_{eq}/K_{eq0}) の関係を示す。剛性低下モデルは、等価剛性の低下率を E/V の関数で評価する式 (2.3.2-3) を適用しているため、グラフ中に実線で示す式 (2.3.2-3) の曲線に沿って等価剛性が低下していく。免震周期 3.5 秒、4.0 秒のモデルは T-TN-AIC003-AV 入力時に E/V が最も大きく、1.5 倍入力において免震周期 3.5 秒モデルでは約 20N/mm^2 、免震周期 4.0 秒モデルでは約 22N/mm^2 となっている。免震周期 4.5 秒モデルでは、N-OSKH02-AV 入力時が最も E/V が大きく、1.5 倍入力時に約 24N/mm^2 となっている。各ケースにおいて等価剛性は E/V に応じて低下し、初期値に対して 90～80% 程度まで低下している。今回検討したケースでは、等価剛性が初期値の 80% より小さくなるケースはなかった。

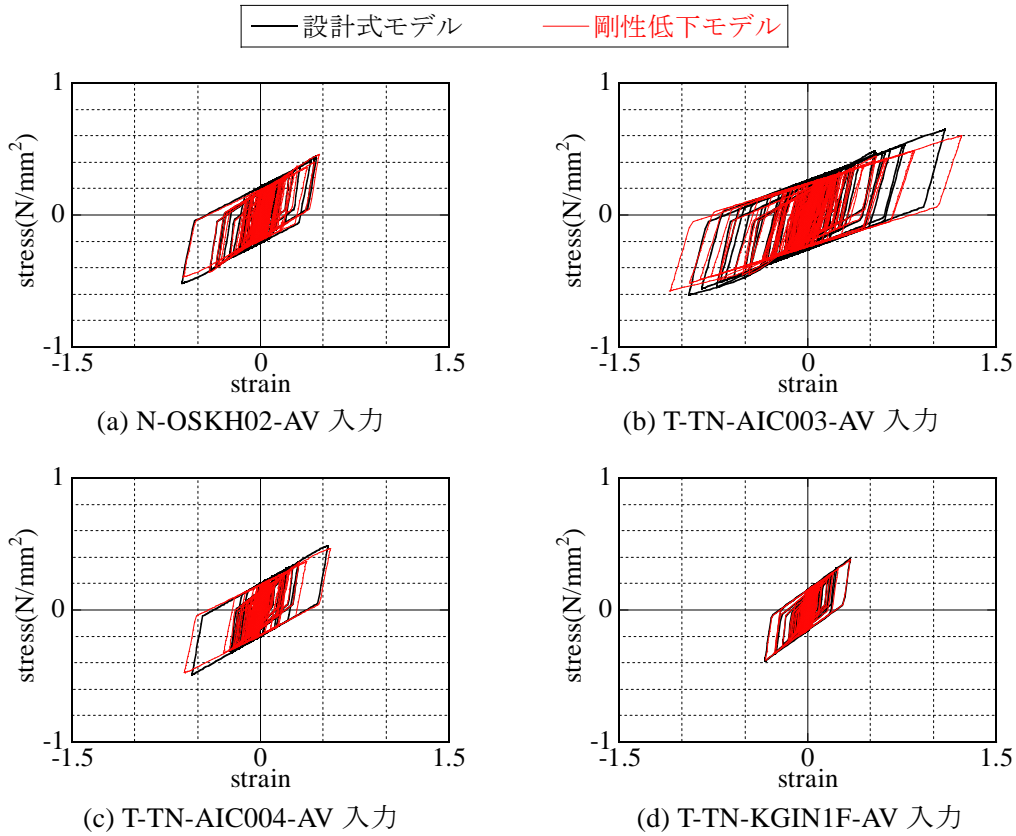


図 2.3.2-7 免震周期 3.5 秒モデル、入力地震動 1.0 倍入力

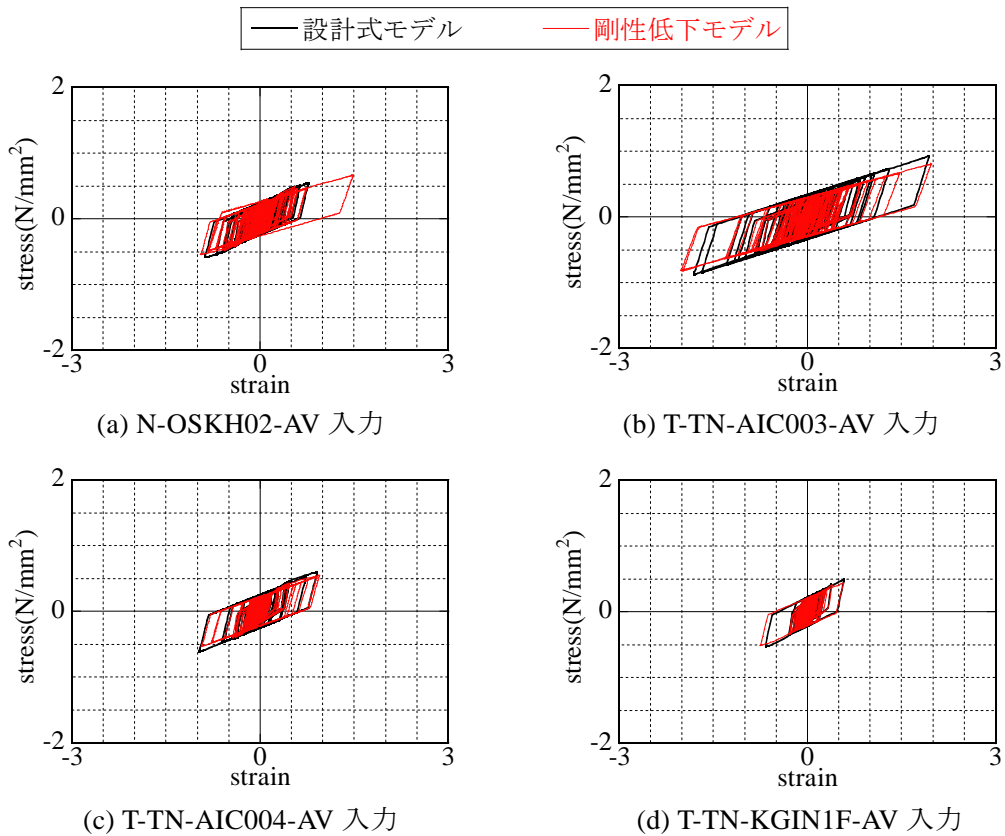
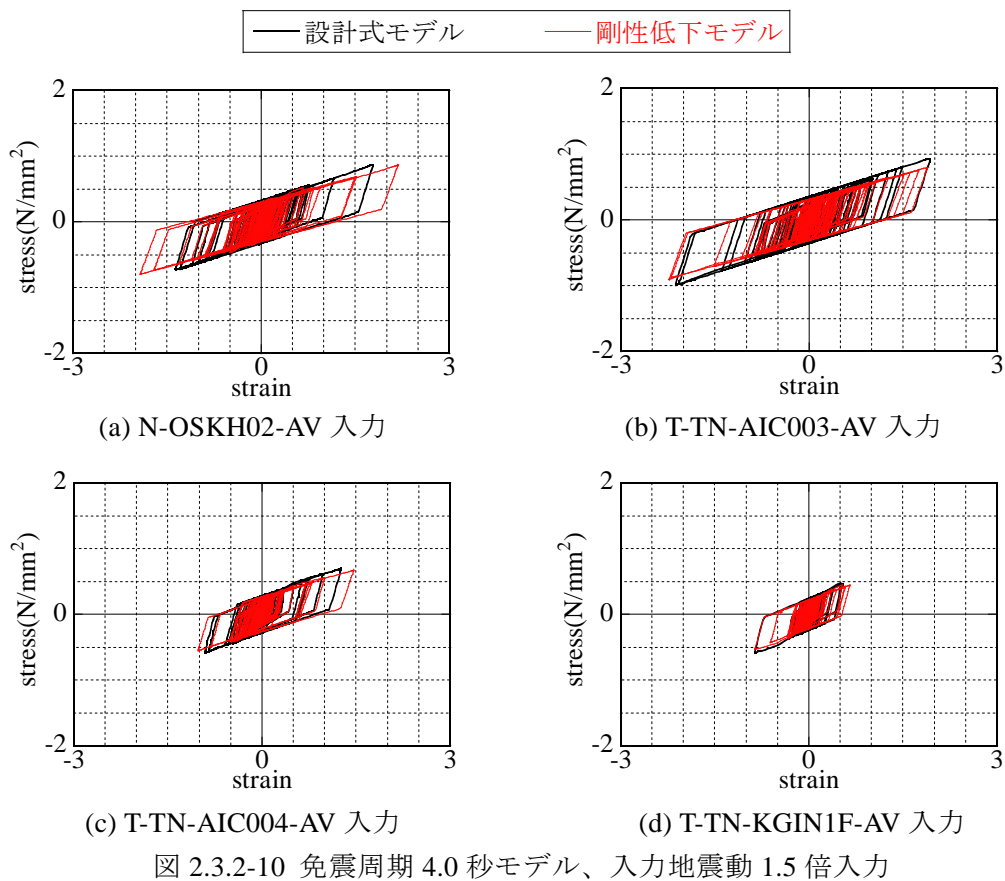
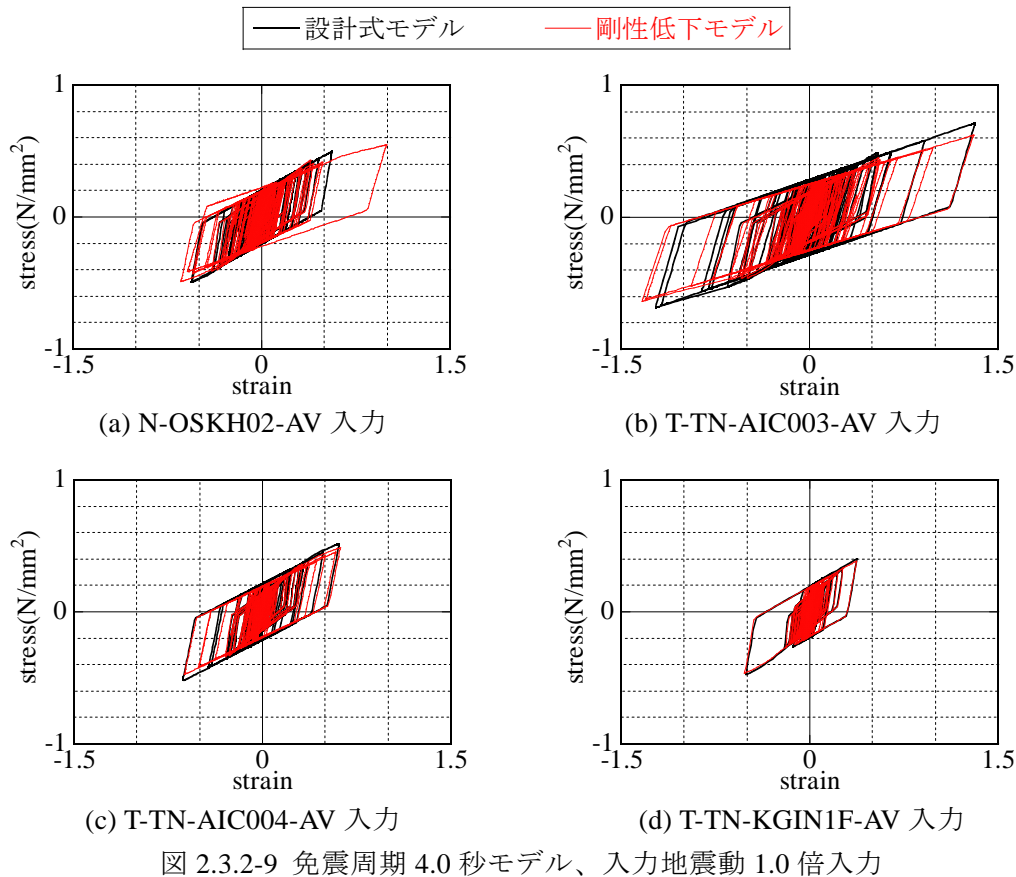
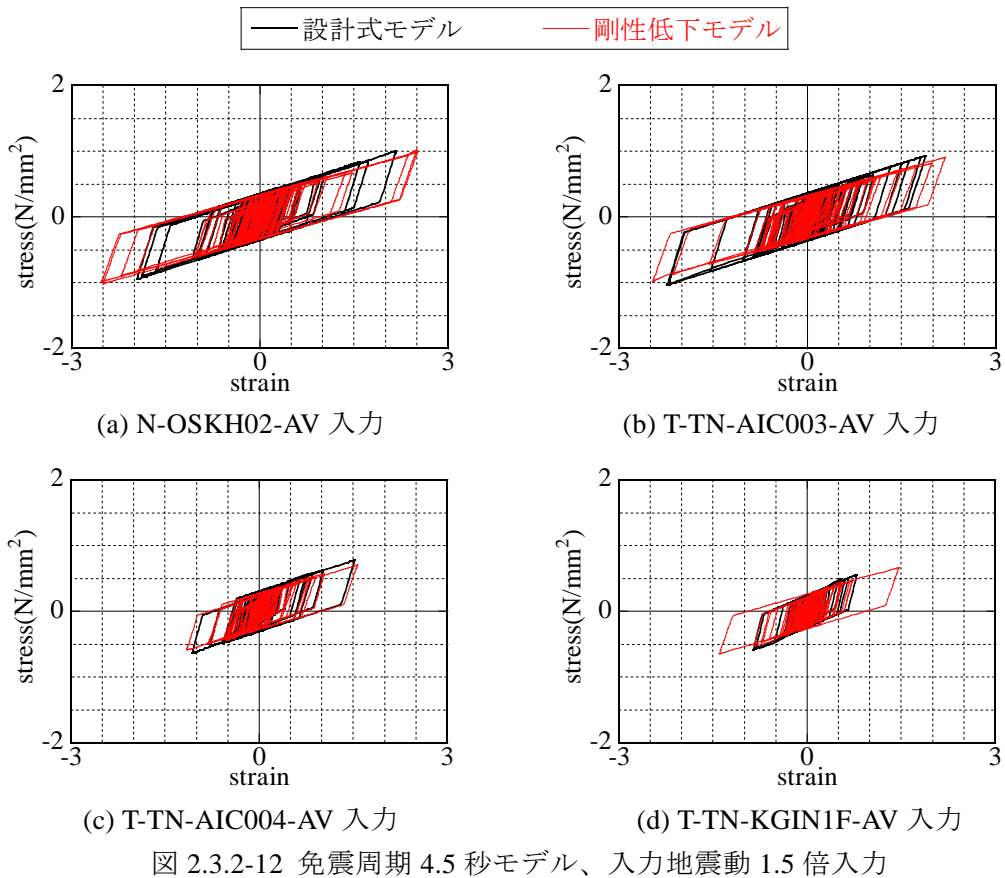
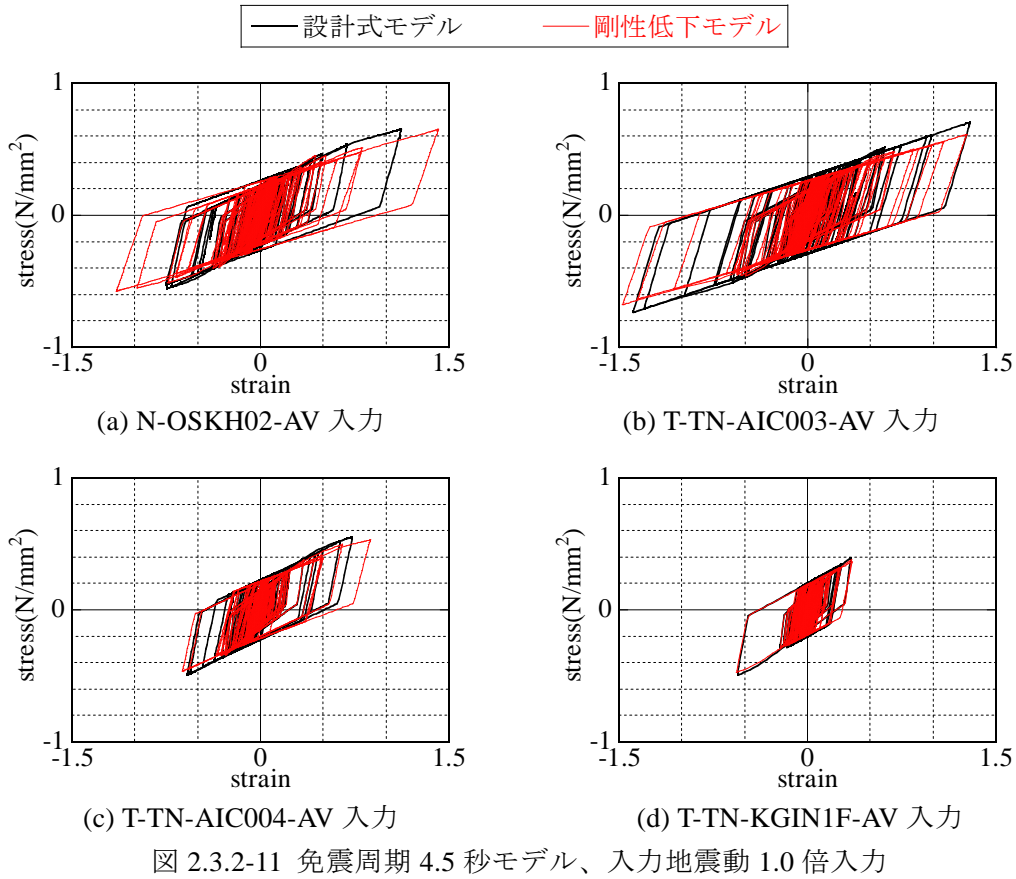


図 2.3.2-8 免震周期 3.5 秒モデル、入力地震動 1.5 倍入力





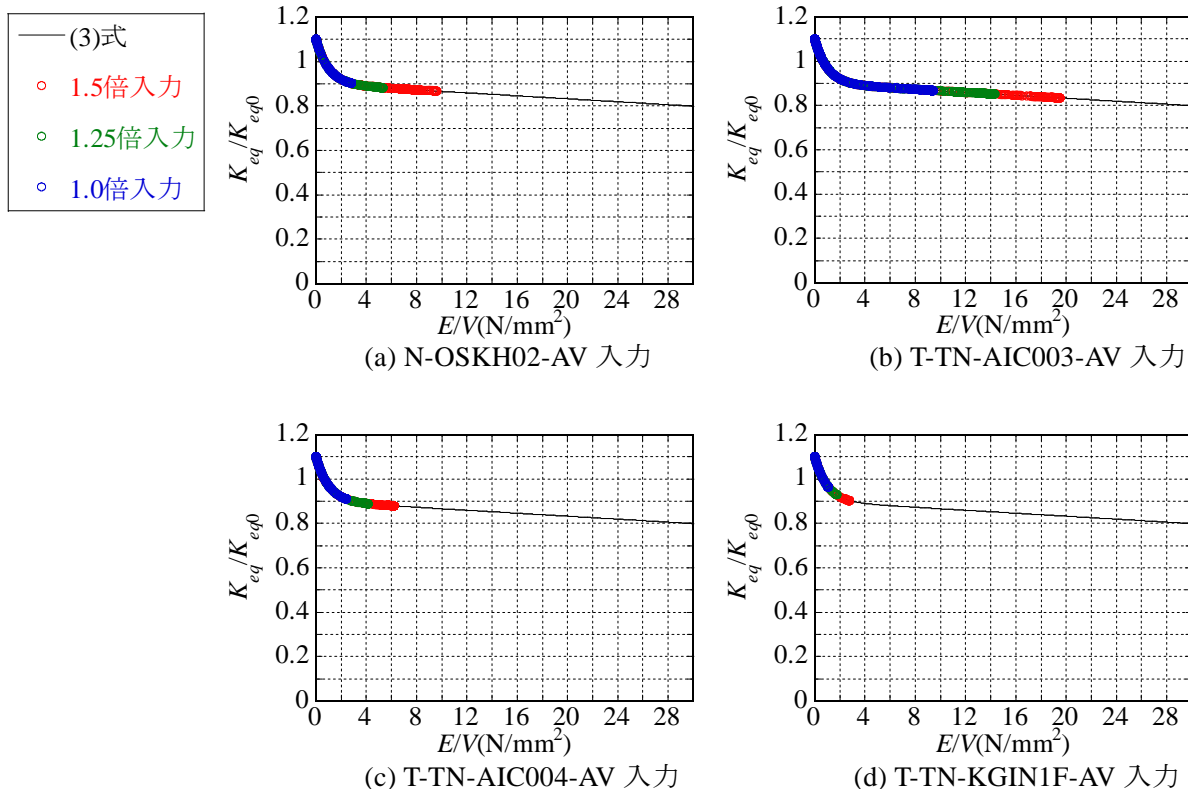


図 2.3.2-13 免震周期 3.5 秒モデル累積履歴吸収エネルギーと等価剛性の低下率

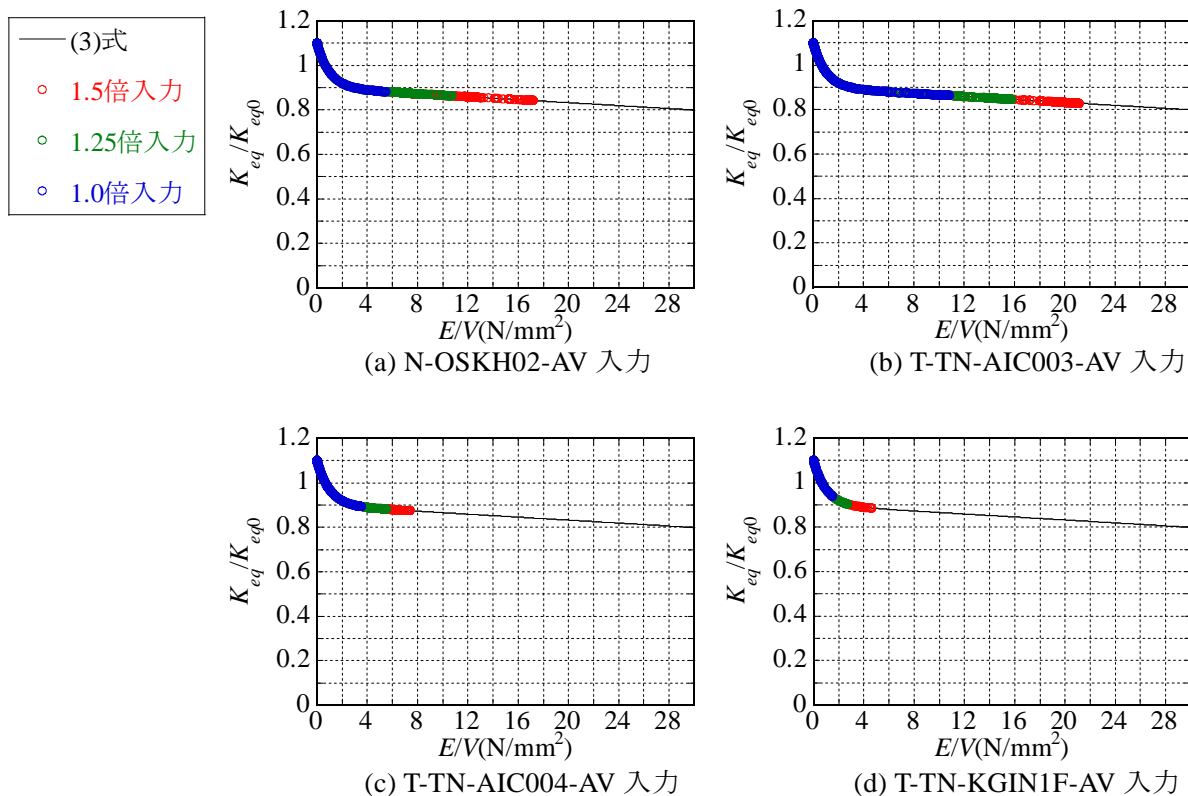
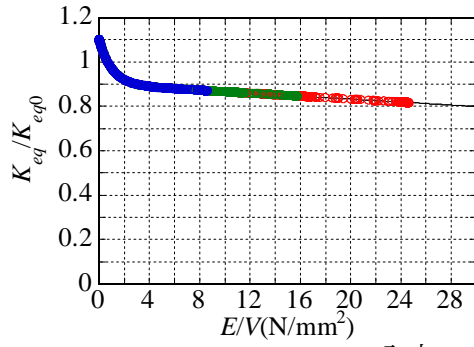
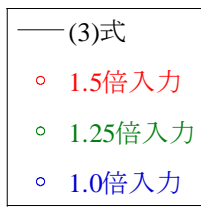
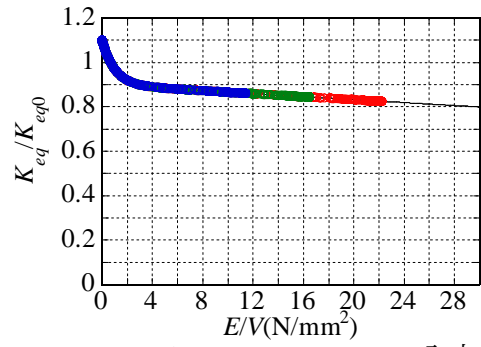


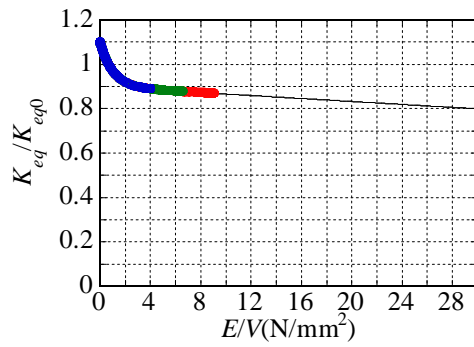
図 2.3.2-14 免震周期 4.0 秒モデル累積履歴吸収エネルギーと等価剛性の低下率



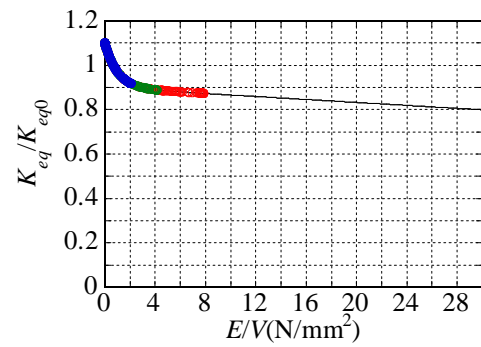
(a) N-OSKH02-AV 入力



(b) T-TN-AIC003-AV 入力



(c) T-TN-AIC004-AV 入力



(d) T-TN-KGIN1F-AV 入力

図 2.3.2-15 免震周期 4.5 秒モデル累積履歴吸収エネルギーと等価剛性の低下率

(3.3) 累積変形量、累積履歴吸収エネルギー

表 2.3.2-8～10 に、解析結果の累積変形量および累積履歴吸収エネルギー量の値の一覧を示す。履歴吸収エネルギーは、エネルギーを積層ゴムのゴム体積で除した E/V 、および等価速度 V_E で示している。また、累積変形量は、履歴吸収エネルギーが全入力エネルギーの 95% に達した時点の値としている。

各解析モデルにおいて、累積変形量、累積履歴吸収エネルギーとも T-TN-AIC003-AV を入力したケースが最も大きく、1.0 倍入力において累積変形量はおおよそ 11～13m、累積履歴吸収エネルギー量は、等価速度でおおよそ 2.0～2.2m/sec である。他の地震動を入力したケースでは、1.0 倍入力では累積変形量は 10m 以下、累積履歴吸収エネルギーは 2.0m/sec 以下となっている。地震動の入力倍率を上げると累積値もそれに伴い増加し、免震周期 4.5 秒モデルに T-TN-AIC003-AV の 1.5 倍を入力したケースが最も累積変形量が大きく 20.9m。また、免震周期 3.5 秒モデルに T-TN-AIC003-AV の 1.5 倍を入力したケースが最も累積 V_E が大きく、3.19m/sec である。

設計式モデルと剛性低下モデルの結果を比較すると、累積変形量においては剛性低下モデルの結果が設計式モデルよりも 10～20% 大きな値を示している。累積履歴吸収エネルギー量においては、T-TN-AIC003-AV を入力したケースのみ、剛性低下モデルの方が設計式モデルよりも小さな値を示しているが、他の地震動を入力したケースでは剛性低下モデルの方が設計式モデルより 10～20% 程度大きな値を示している。

図 2.3.2-16～27 に、解析結果の免震層の累積変形量と累積履歴吸収エネルギーの時刻歴推移を示す。累積変形量は、履歴吸収エネルギー量が全入力エネルギーの 95% に達した時点の値で頭打ちとして描いている。また、履歴吸収エネルギーは等価速度 V_E で表す。累積履歴吸収エネルギーは主要動部で値が増加した後はほぼ一定となっており、N-OSKH02-AV、T-TN-KGIN1F-AV 入力のケースは 250 秒以降、T-TN-AIC003-AV、T-TN-AIC004-AV 入力のケースは 200 秒以降ほとんどエネルギーを吸収していない。また、履歴吸収エネルギーの増加傾向としては、N-OSKH02-AV、T-TN-KGIN1F-AV 入力のケースでは、階段状に値が増加していき、T-TN-AIC003-AV、T-TN-AIC004-AV 入力のケースでは比較的滑らかに値が上昇している。設計式モデルと剛性低下モデルの累積履歴吸収エネルギーの時刻歴推移は、ほぼ同じ傾向で一致している。

表 2.3.2-8 免震周期 3.5 秒モデルの累積値一覧

入力			応答					
地震波	倍率	加速度 (Gal)	累積変形量(m)		累積 $E/V(N/mm^2)$		累積 $V_E(m/sec)$	
			設計式	剛性低下	設計式	剛性低下	設計式	剛性低下
N- OSKH02-AV	1.00	70.90	5.46	6.02 (1.10)	2.73	2.83 (1.04)	1.18	1.21 (1.02)
	1.25	88.63	7.79	8.61 (1.11)	4.54	2.3.2 (1.17)	1.53	1.65 (1.08)
	1.50	106.35	10.59	12.77 (1.21)	7.65	9.57 (1.25)	1.98	2.22 (1.12)
T-TN- AIC003-AV	1.00	221.20	11.67	12.40 (1.06)	9.41	9.42 (1.00)	2.20	2.20 (1.00)
	1.25	276.50	15.17	16.52 (1.09)	14.26	14.32 (1.00)	2.71	2.71 (1.00)
	1.50	331.80	18.13	19.87 (1.10)	19.88	19.48 (0.98)	3.19	3.16 (0.99)
T-TN- AIC004-AV	1.00	323.00	4.90	5.53 (1.13)	2.11	2.38 (1.13)	1.04	1.10 (1.06)
	1.25	403.75	7.13	7.50 (1.05)	3.79	4.14 (1.09)	1.39	1.46 (1.05)
	1.50	484.50	8.83	9.31 (1.05)	5.89	6.21 (1.06)	1.74	1.79 (1.03)
T-TN- KGIN1F-AV	1.00	89.60	3.55	3.99 (1.12)	1.06	1.09 (1.03)	0.74	0.75 (1.01)
	1.25	112.00	3.75	4.13 (1.10)	1.64	1.75 (1.06)	0.92	0.95 (1.03)
	1.50	134.40	5.19	6.01 (1.16)	2.55	2.74 (1.07)	1.14	1.18 (1.03)

※()内の数字は、剛性低下モデルの値を設計式モデルの値で除した値。

表 2.3.2-9 免震周期 4.0 秒モデルの累積値一覧

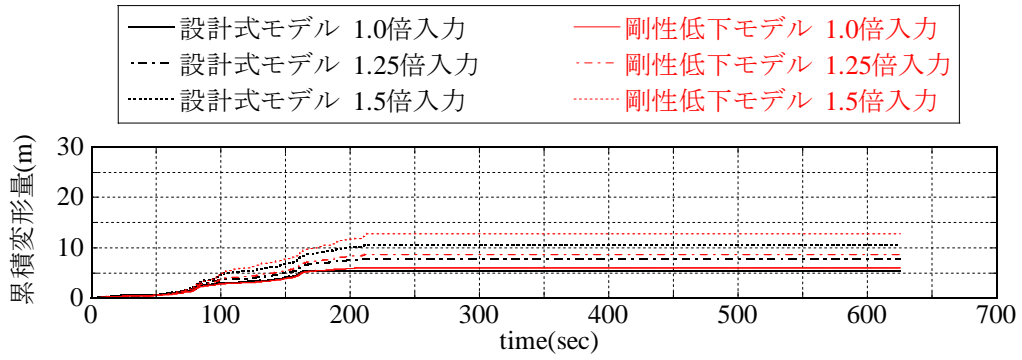
入力			応答					
地震波	倍率	加速度 (Gal)	累積変形量(m)		累積 $E/V(N/mm^2)$		累積 $V_E(m/sec)$	
			設計式	剛性低下	設計式	剛性低下	設計式	剛性低下
N- OSKH02-AV	1.00	70.90	7.63	8.88 (1.16)	4.53	5.47 (1.21)	1.34	1.47 (1.10)
	1.25	88.63	11.30	13.45 (1.19)	8.83	10.70 (1.21)	1.87	2.06 (1.10)
	1.50	106.35	15.17	18.26 (1.20)	14.21	17.14 (1.21)	2.38	2.61 (1.10)
T-TN- AIC003-AV	1.00	221.20	13.08	13.46 (1.03)	11.36	10.80 (0.95)	2.13	2.07 (0.97)
	1.25	276.50	16.61	16.81 (1.01)	16.93	15.73 (0.93)	2.59	2.50 (0.96)
	1.50	331.80	20.74	20.62 (0.99)	23.35	21.17 (0.91)	3.05	2.90 (0.95)
T-TN- AIC004-AV	1.00	323.00	6.12	6.41 (1.05)	3.24	3.48 (1.07)	1.14	1.18 (1.04)
	1.25	403.75	8.19	8.55 (1.04)	5.25	5.50 (1.05)	1.44	1.48 (1.02)
	1.50	484.50	9.94	10.33 (1.04)	7.76	7.40 (0.95)	1.76	1.71 (0.98)
T-TN- KGIN1F-AV	1.00	89.60	3.56	4.50 (1.26)	1.42	1.50 (1.06)	0.75	0.77 (1.03)
	1.25	112.00	5.61	5.87 (1.05)	2.52	2.72 (1.08)	1.00	1.04 (1.04)
	1.50	134.40	7.19	8.03 (1.12)	3.90	4.64 (1.19)	1.25	1.36 (1.09)

※()内の数字は、剛性低下モデルの値を設計式モデルの値で除した値。

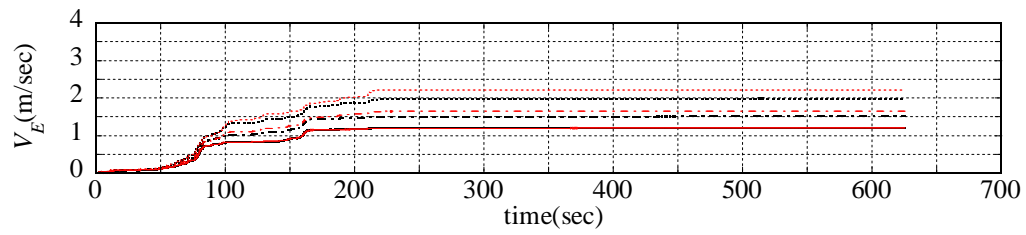
表 2.3.2-10 免震周期 4.5 秒モデルの累積値一覧

入力			応答					
地震波	倍率	加速度 (Gal)	累積変形量(m)		累積 $E/V(N/mm^2)$		累積 $V_E(m/sec)$	
			設計式	剛性低下	設計式	剛性低下	設計式	剛性低下
N- OSKH02-AV	1.00	70.90	9.94	11.74 (1.18)	7.10	8.62 (1.21)	1.54	1.69 (1.10)
	1.25	88.63	14.06	16.73 (1.19)	12.94	15.74 (1.22)	2.07	2.29 (1.10)
	1.50	106.35	18.73	21.82 (1.17)	20.86	24.61 (1.18)	2.63	2.86 (1.09)
T-TN- AIC003-AV	1.00	221.20	13.33	13.51 (1.01)	12.24	11.37 (0.93)	2.02	1.94 (0.96)
	1.25	276.50	17.28	17.13 (0.99)	18.08	16.45 (0.91)	2.45	2.34 (0.95)
	1.50	331.80	20.90	21.02 (1.01)	24.40	22.21 (0.91)	2.85	2.72 (0.95)
T-TN- AIC004-AV	1.00	323.00	6.60	6.87 (1.04)	4.02	3.96 (0.98)	1.16	1.15 (0.99)
	1.25	403.75	8.40	16.54 (1.97)	5.98	6.55 (1.10)	1.41	1.48 (1.05)
	1.50	484.50	10.42	11.52 (1.11)	8.57	9.05 (1.06)	1.69	1.73 (1.03)
T-TN- KGIN1F-AV	1.00	89.60	4.61	4.86 (1.05)	1.91	2.07 (1.08)	0.80	0.83 (1.04)
	1.25	112.00	6.47	7.24 (1.12)	3.47	4.12 (1.19)	1.07	1.17 (1.09)
	1.50	134.40	8.90	10.69 (1.20)	5.93	7.83 (1.32)	1.40	1.61 (1.15)

※()内の数字は、剛性低下モデルの値を設計式モデルの値で除した値。

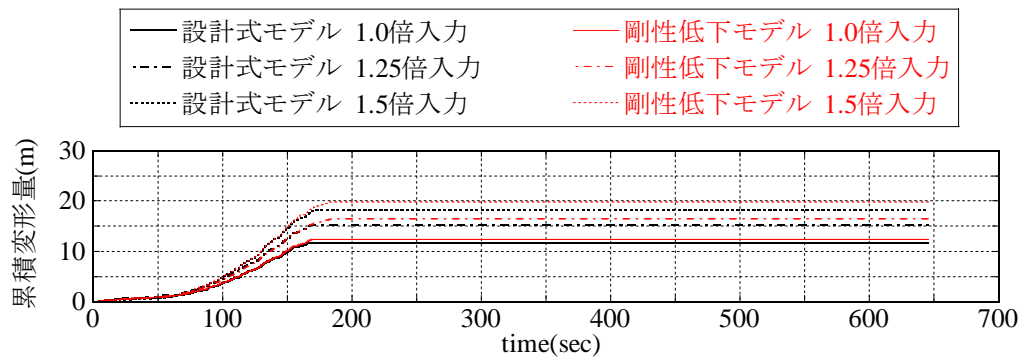


(a) 累積変形量

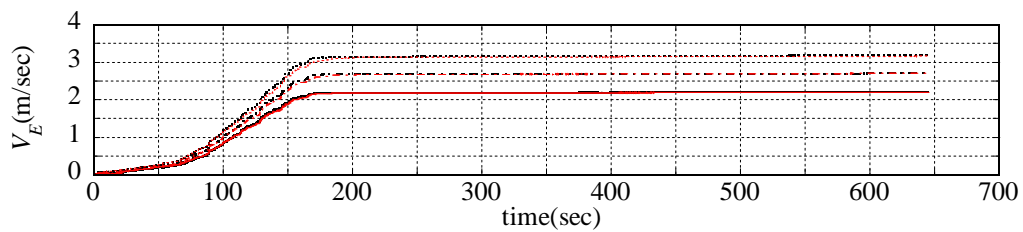


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-16 免震周期 3.5 秒モデル、N-OSKH02-AV 入力時の累積値

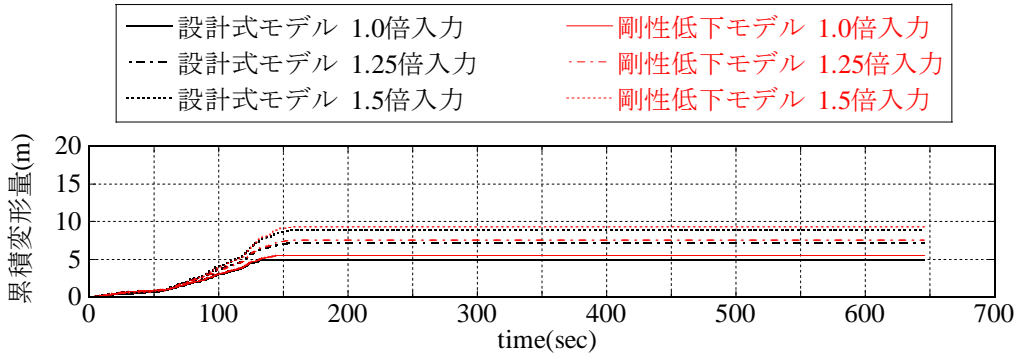


(a) 累積変形量

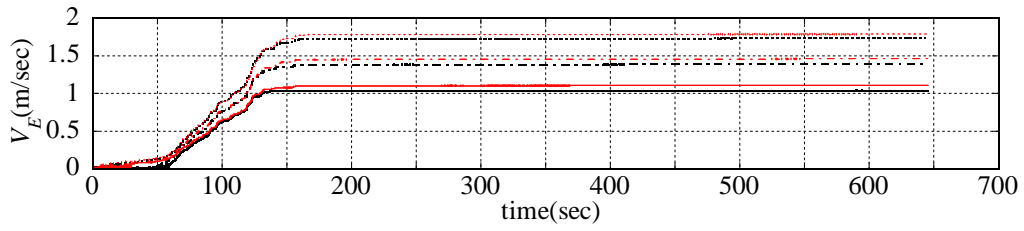


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-17 免震周期 3.5 秒モデル、T-TN-AIC003-AV 入力時の累積値

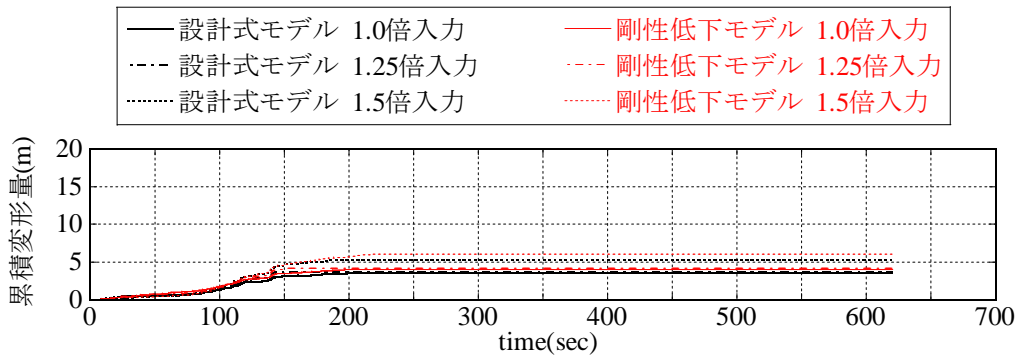


(a) 累積変形量

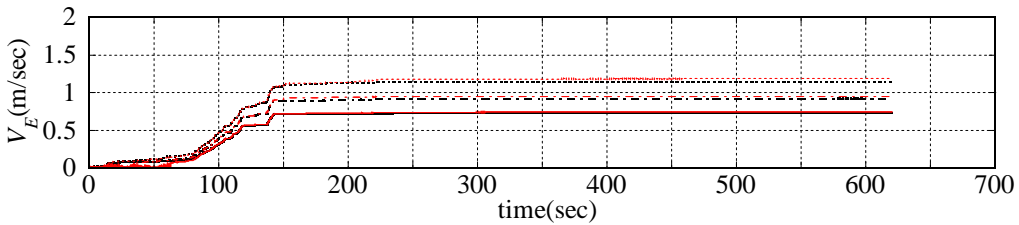


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-18 免震周期 3.5 秒モデル、T-TN-AIC004-AV 入力時の累積値

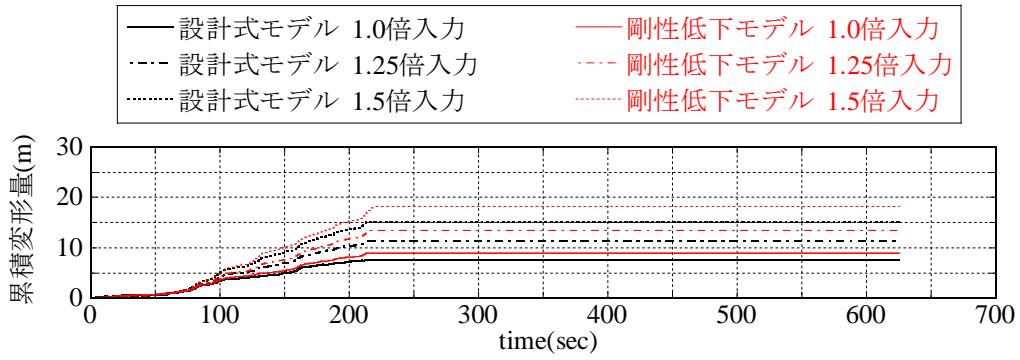


(a) 累積変形量

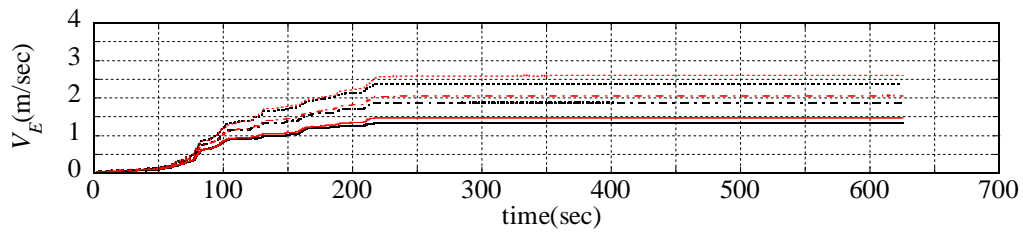


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-19 免震周期 3.5 秒モデル、T-TN-KGIN1F-AV 入力時の累積値

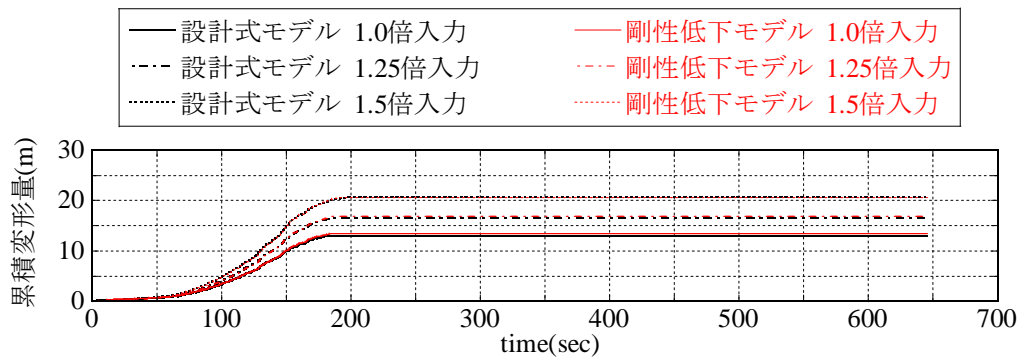


(a) 累積変形量

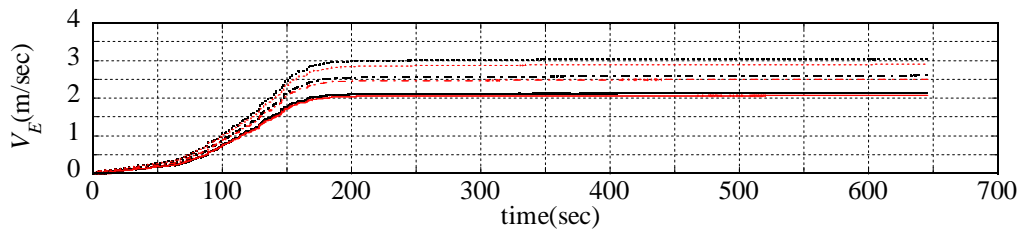


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-20 免震周期 4.0 秒モデル、N-OSKH02-AV 入力時の累積値

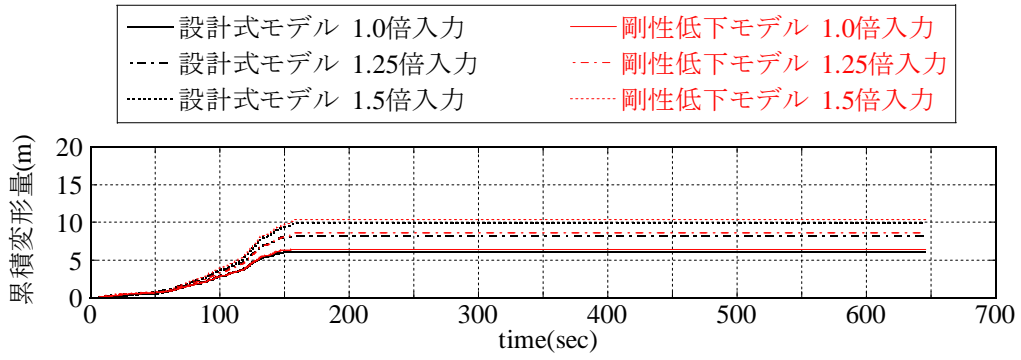


(a) 累積変形量

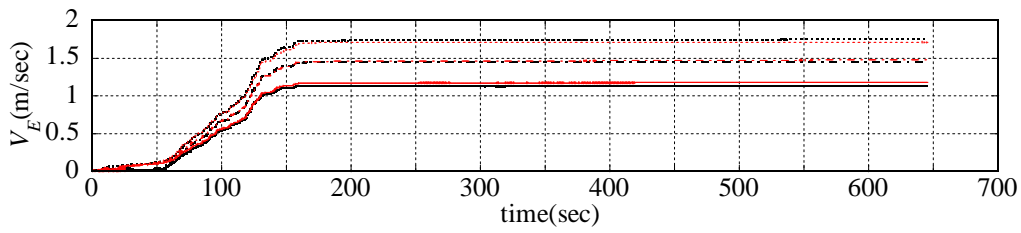


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-21 免震周期 4.0 秒モデル、T-TN-AIC003-AV 入力時の累積値

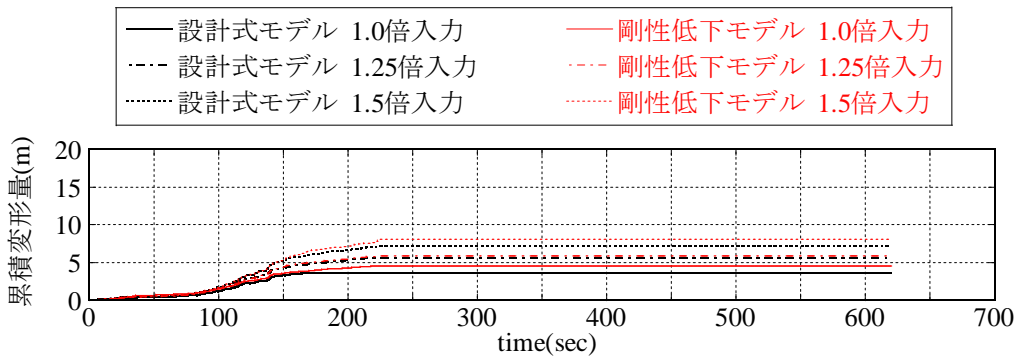


(a) 累積変形量

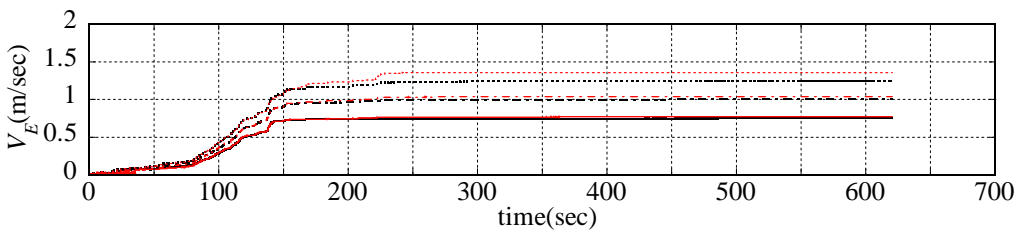


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-22 免震周期 4.0 秒モデル、T-TN-AIC004-AV 入力時の累積値

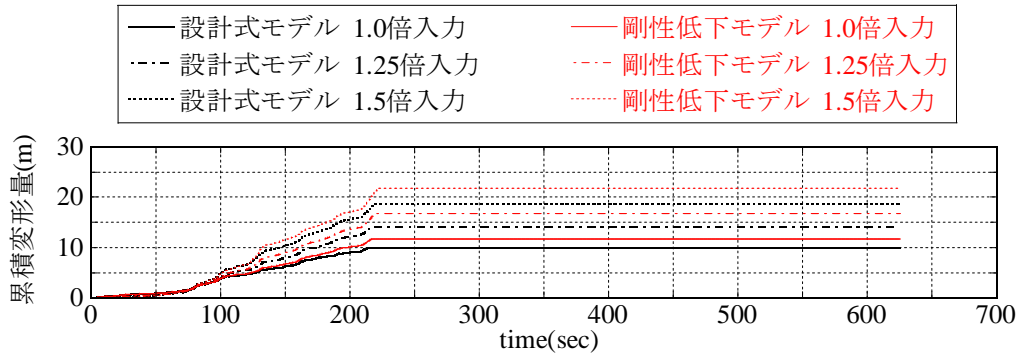


(a) 累積変形量

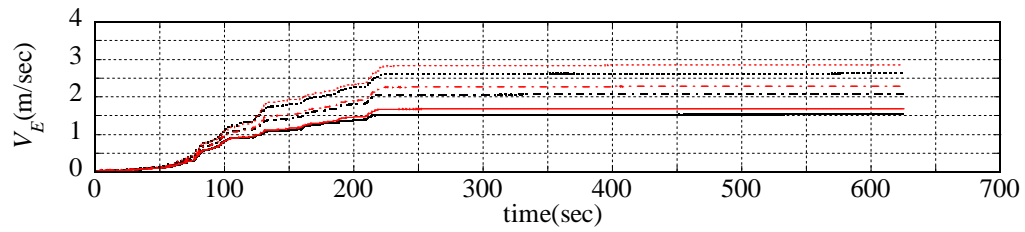


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-23 免震周期 4.0 秒モデル、T-TN-KGIN1F-AV 入力時の累積値

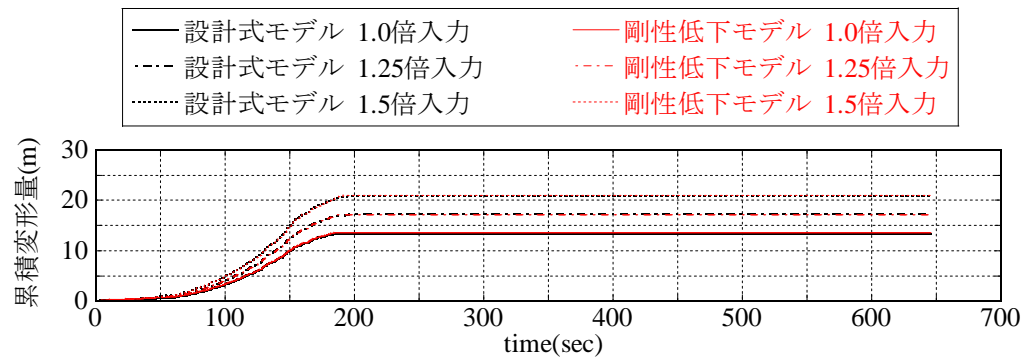


(a) 累積変形量

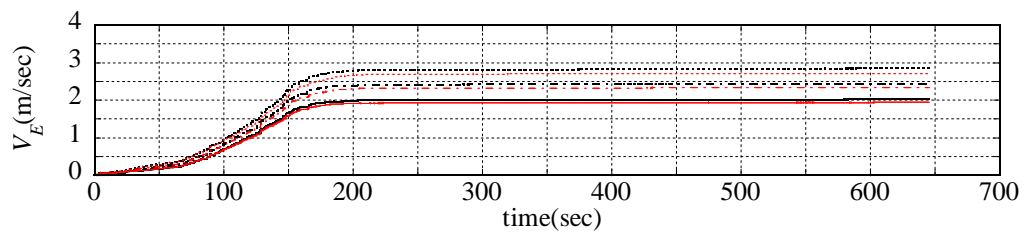


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-24 免震周期 4.5 秒モデル、N-OSKH02-AV 入力時の累積値

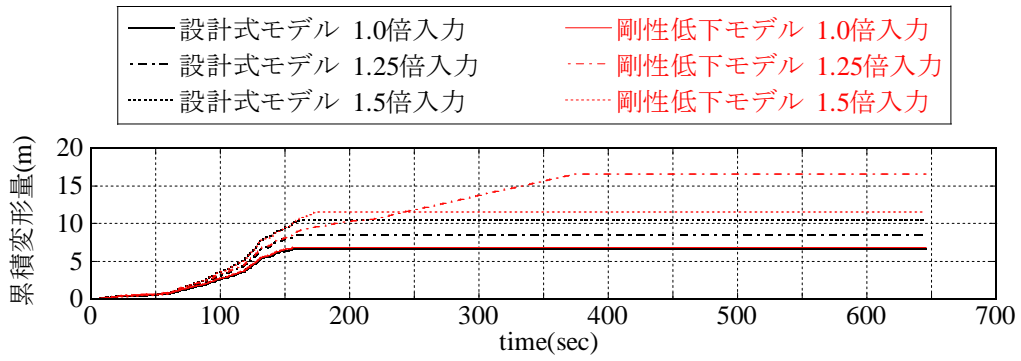


(a) 累積変形量

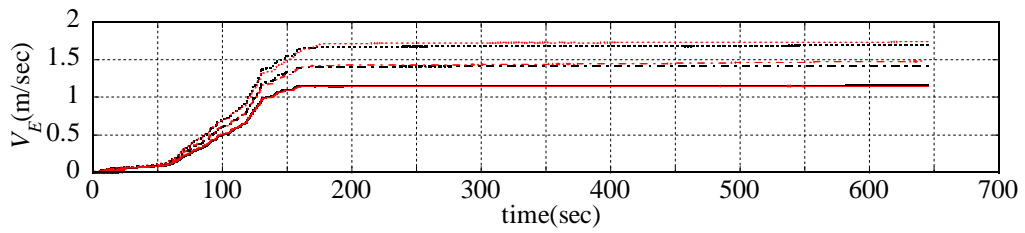


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-25 免震周期 4.5 秒モデル、T-TN-AIC003-AV 入力時の累積値

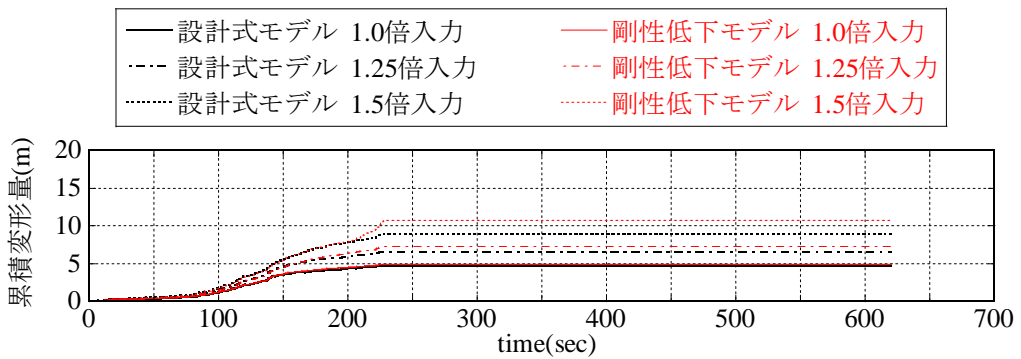


(a) 累積変形量

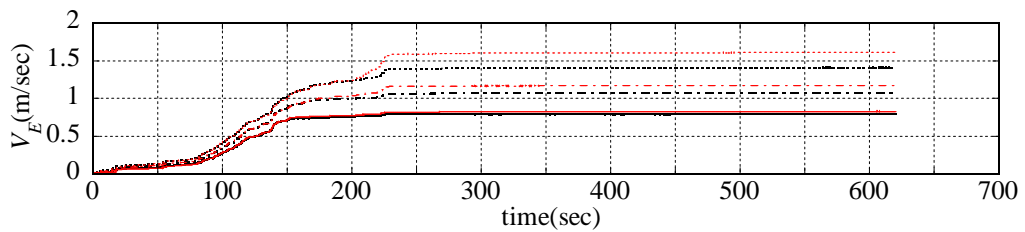


(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-26 免震周期 4.5 秒モデル、T-TN-AIC004-AV 入力時の累積値



(a) 累積変形量



(b) 累積履歴吸収エネルギー等価速度

図 2.3.2-27 免震周期 4.5 秒モデル、T-TN-KGIN1F-AV 入力時の累積値

(4) まとめ

高減衰ゴム系積層ゴムにより構成される免震層を有する 1 質点系に長周期地震動を入力した応答解析を実施した。高減衰ゴム系積層ゴムの復元力特性に、既往の研究により提案されている累積履歴エネルギー吸収量による等価剛性の評価式を用いることで、多数回繰返し加振を受けることによる復元力特性の変化を考慮し、免震層の特性変化が建物応答に与える影響を検討した。

(4.1) 最大応答値

検討に用いた長周期地震動 4 波の原波の入力では現行の設計式を用いた解析モデルの免震層変位はせん断ひずみで 200% 以下であり、せん断力係数も 0.1 以下であった。入力地震動を係数倍にして入力したところ、T-TN-AIC003-AV、N-OSKH02-AV の 1.5 倍入力により免震層変位がせん断ひずみ 200% を超えるケースが生じた。

現行の設計式によるモデルと、繰返し加振による等価剛性の低下を考慮したモデルの最大応答値を比較すると、ほとんどのケースで剛性低下を考慮したモデルの方が、設計式のモデルに対し 10~20% 程度免震層変位が大きくなった。せん断力係数については、剛性低下を考慮したモデルの方が 5~10% 程度小さな値を示した。

(4.2) 水平荷重変位関係

最大せん断ひずみが 50% 以下のケースでは、設計式によるモデルと剛性低下を考慮したモデルの履歴ループにほとんど差は見られなかったが、せん断ひずみが 50% を超えるケースでは剛性低下を考慮したモデルの履歴ループに等価剛性の低下と変位の増加が明確に現れた。今回検討したケースでは、剛性低下を考慮することにより、等価剛性が初期値に対して 90~80% 程度まで低下した。

(4.3) 累積値

検討に用いた長周期地震動 4 波の原波入力では、T-TN-AIC003-AV を入力したケースが最も大きな累積値を示し、累積変形量が 11~13m、累積履歴吸収エネルギー量は等価速度で 2.0~2.2m/sec であった。他の 3 波の原波を入力したケースでは、累積変位量は 10m 以下、エネルギー等価速度は 2.0m/sec 以下であった。

設計式によるモデルと繰返しによる剛性低下を考慮したモデルの解析結果を比較すると、累積変形量は剛性低下を考慮したモデルの方が設計式モデルよりも 10~20% 大きな値を示した。累積履歴吸収エネルギー量は、T-TN-AIC003-AV を入力したケースは、剛性低下を考慮したモデルの結果が設計式モデルの結果よりもやや小さな値を示したが、他の地震動を入力したケースでは剛性低下を考慮したモデルの方が設計式モデルよりも 10~20% 程度大きな値を示した。

今後は、平成 22 年度に実施した部材実験の結果を基に既往の研究における検証よりも広範囲に渡って既往の評価式を検証することで適用範囲の拡大を図り、必要であれば修正を加える。また、他の評価方法についても検討し、繰返しによる特性変化の影響を地震応答解析に適切に反映できる評価手法を検証する。

参考文献

- 2.3.2-1) 株式会社ブリヂストン:高減衰ゴム系積層ゴム支承(X0.6R)技術資料
- 2.3.2-2)北村春幸他: 高減衰積層ゴムの熱・力学的連成挙動の免震建物応答への影響評価、日本建築学会構造系論文集、第 655 号、1635-1644、2010.9.
- 2.3.2-3)竹中康雄他: 積層ゴムの熱・力学的連成挙動に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、第 646 号、2245-222.3.2009.12.
- 2.3.2-4)平成 21 年度建築基準整備促進補助金事業:「12 免震建築物の基準の整備に資する検討」報告書、2010.3.

2.3.3 天然ゴム系積層ゴム+鋼材ダンパー

免震材料として天然ゴム系積層ゴムと鋼材ダンパーを適用した免震建築物を対象として、長周期地震動による地震応答解析を実施した。天然ゴム系積層ゴム及び鋼材ダンパーは繰り返し加振に対して特性変化が生じないと考えられるので地震応答解析により応答値を確認し、鋼材ダンパーについて疲労損傷評価を行った。

(1) 各種依存性に関する既往の研究

表 2.3.3-1 に鋼材ダンパーの繰り返し加振実験に関する主要文献を示す。

表 5.3.3-1 鋼材ダンパの繰り返し加振実験に関する主要文献

番号	論文名	著者名	掲載誌
1	免震 U 型ダンパーに関する実験的研究 (その 1~6)	鈴木一弁他	建築学会学術講演集、1999~2000
2	免震 U 型ダンパーの実大動的載荷試験 (その 1、2)	植草雅浩他	建築学会学術講演集、2007
3	免震構造用 U 字型ダンパーの繰り返し変形性能に関する研究	吉敷祥一他	構造系論文集、No.646、2009.12
4	免震 U 型ダンパーの実大試験体による動的載荷試験 (その 1、2)	西本晃治他	建築学会学術講演集、2008

以下、主要文献について内容をまとめる。文中の文献番号は表 2.3.3-1 による。

鋼材ダンパーの繰り返し加振時における特性については文献 2.3.3-1 により、積層ゴム $\phi 600$ に対応する鋼材ダンパーで 0 度、45 度、90 度の静的漸増加振結果により疲労特性が、縮小試験体により速度依存性、温度依存性が求められている。また、実大 4 本組試験体により縮小試験体と同様の特性が得られ相似則が成立することが示されている。文献 2.3.3-2 では縮小試験体の定振幅載荷実験により疲労曲線を求め、ランダム振幅に対する破断回数の予測方法として Miner 則による方法を提示している。文献 2.3.3-3、2.3.3-4 では実大試験体の動的載荷試験を行い鋼材ダンパーの履歴挙動と 0 度、45 度、90 度方向載荷時の疲労性能を評価している。また 2 方向の地震応答波加振も実施している。

(2) 解析条件

応答評価を行った建物モデル諸元を表 2.3.3-2 に示す。応答解析は上部建物を 1 質点としてモデル化し実施した。免震層は天然ゴム系積層ゴムと鋼材ダンパーで構成されるものとし、天然ゴム系積層ゴムはゴム種 G4、外径φ1000、ゴム総厚 200mm とし、積層ゴムのゴム剛性による周期 $T_f=4.0s$ 、鋼材ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s=0.035$ となるよう設定した。鋼材ダンパーは U 型ダンパーとし、NSUD50x4 を想定している。解析においては免震層の履歴減衰のみ考慮した。

表 2.3.3-2 対象建物諸元

上部構造 重量 (積層ゴム 1 基当り) (kN)	積層ゴム 平均面圧 (N/mm ²)	T_f (sec)	α_s
7477	7.8	4.0	0.035

T_f : ゴム剛性による免震周期
 α_s : 鋼材ダンパー降伏せん断力係数

(3) 解析結果

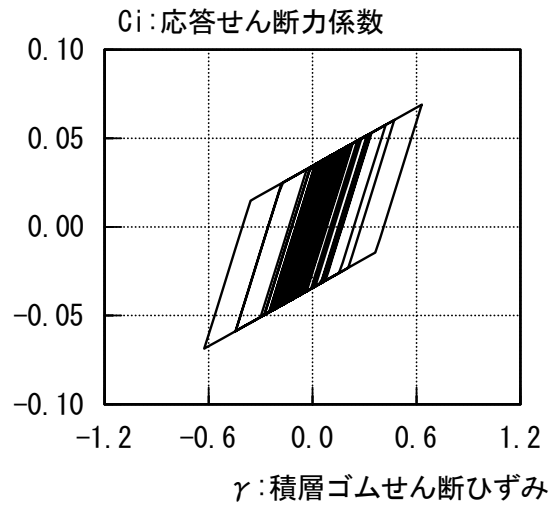
表 2.3.3-3 に各入力地震動における応答解析結果を示す。

表 2.3.3-3 地震応答解析結果

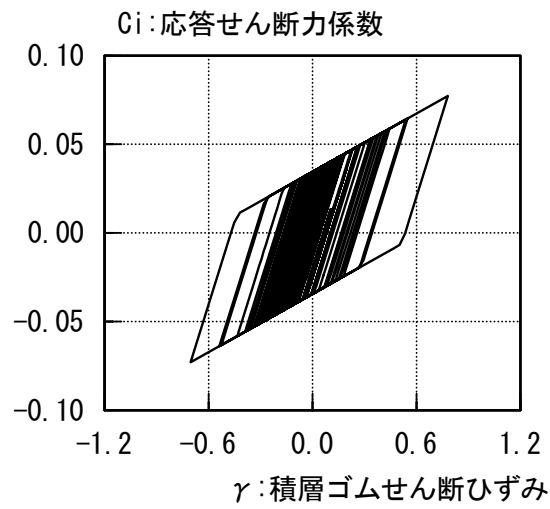
入力地震動	入力倍率	免震層 水平変位 (cm)	免震層応答最大 せん断力係数	応答 最大加速度 (cm/s ²)	免震層 *1 累積変位 (m)	免震層吸収エネルギー 速度換算値 (cm/s)
N-OSKH02_AV	1.00	12.6	0.069	68	8.7	123.3
	1.25	15.6	0.077	76	10.7	161.6
	1.50	18.6	0.085	84	14.0	205.8
T-TN-AIC003_AV	1.00	22.7	0.097	95	17.1	233.3
	1.25	33.7	0.127	124	21.1	285.0
	1.50	40.1	0.144	142	25.4	333.9
T-TN-AIC004_AV	1.00	11.3	0.065	64	9.4	118.0
	1.25	18.3	0.085	83	11.8	155.6
	1.50	22.8	0.097	95	13.6	188.6
T-TN-KGIN_AV	1.00	6.7	0.053	52	6.7	85.8
	1.25	12.2	0.068	67	8.3	115.6
	1.50	16.1	0.079	77	9.7	136.7

*1 免震層累積変位量については総入力エネルギーの 95%の時刻における値とした。

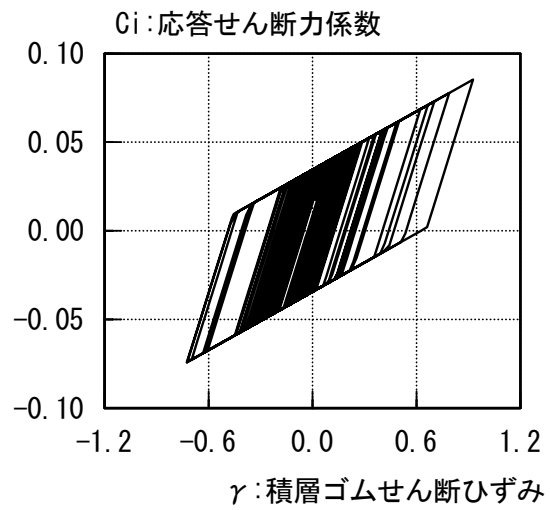
図 2.3.3-1 に各入力地震動時の積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図を、図 2.5.3-2 に免震層における累積変位量時刻歴を、図 2.5.3-3 に免震装置における吸収エネルギーの速度換算値の時刻歴を示す。



(i) 1.0 倍入力時



(ii) 1.25 倍入力時



(iii) 1.5 倍入力時

図 2.3.3-1(a) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (N-OSKH02_AV)

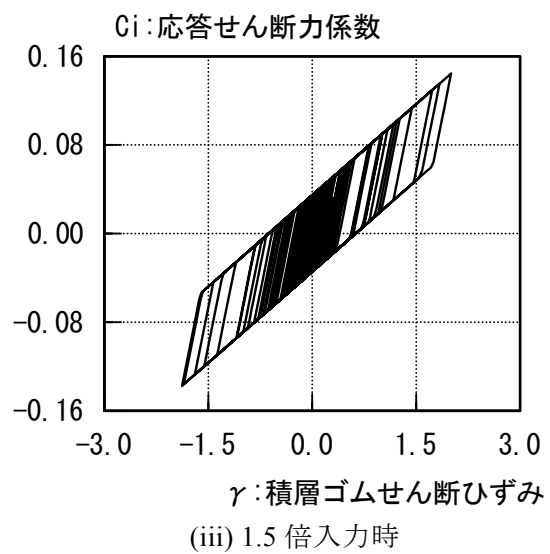
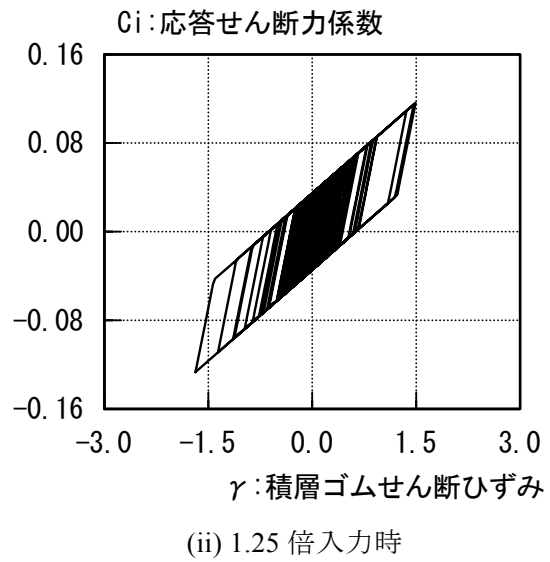
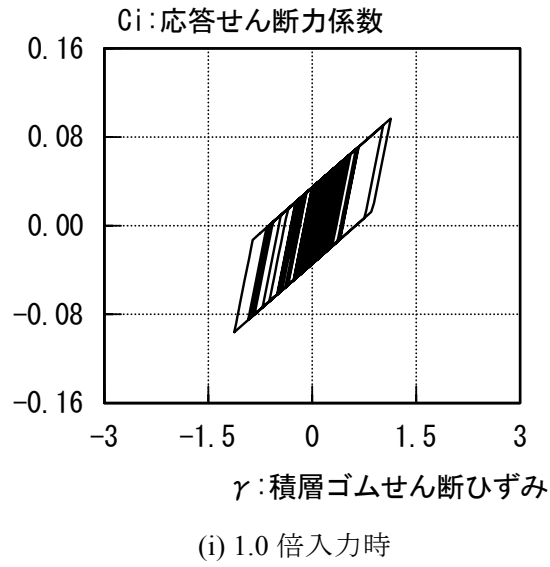
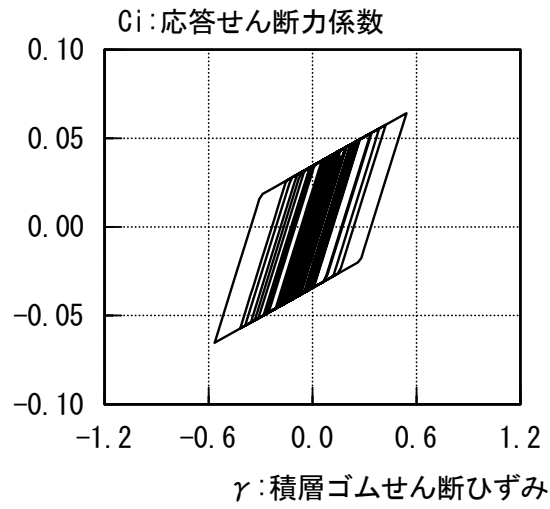
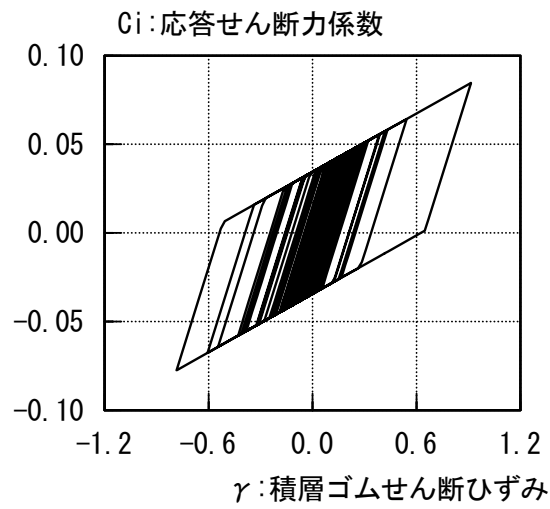


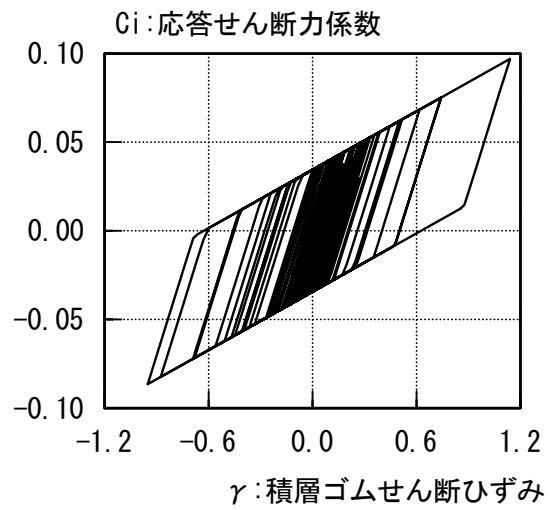
図 2.3.3-1(b) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (T-TN-AIC003_AV)



(i) 1.0 倍入力時



(ii) 1.25 倍入力時



(iii) 1.5 倍入力時

図 2.3.3-1(c) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (T-TN-AIC004_AV)

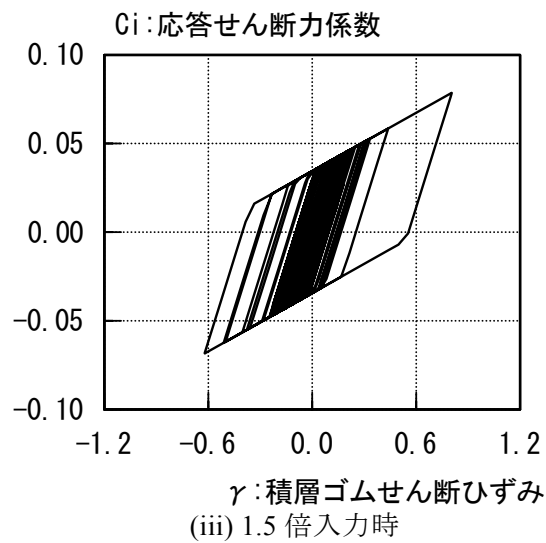
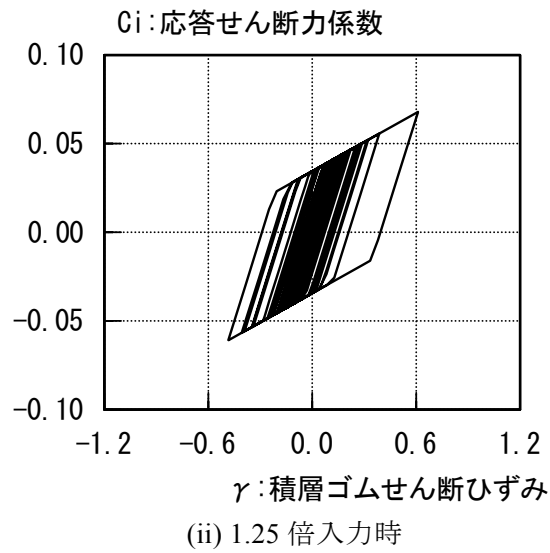
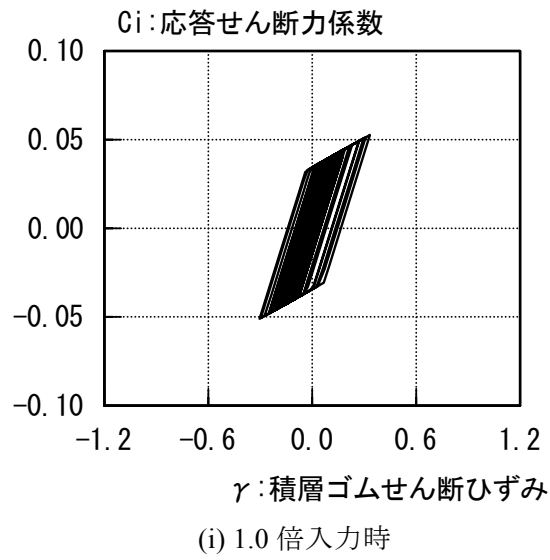


図 2.3.3-1(d) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (T-TN-KGIN_AV)

● 総入力エネルギーの95%時

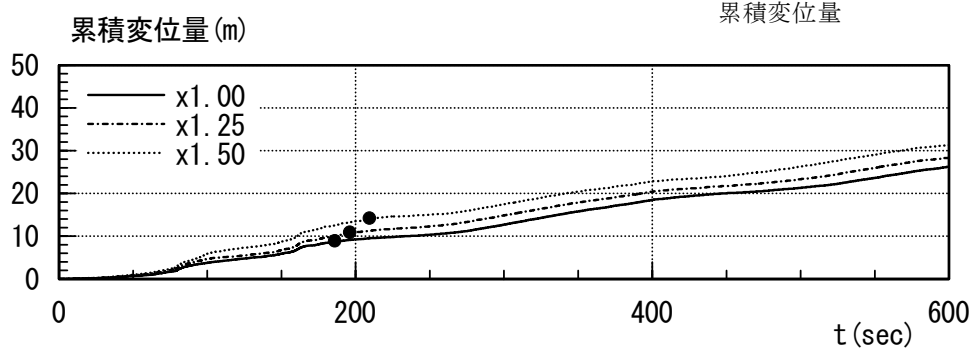


図 2.3.3-2(a) 免震層累積変位量時刻歴 (N-OSKH02_AV)

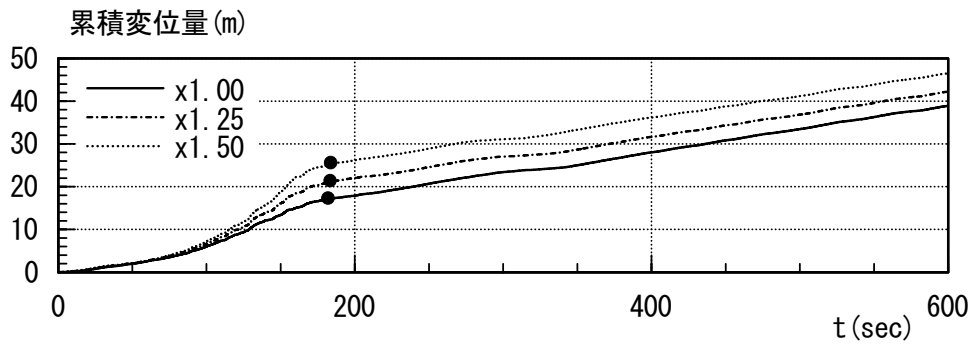


図 2.3.3-2(b) 免震層累積変位量時刻歴 (T-TN-AIC003_AV)

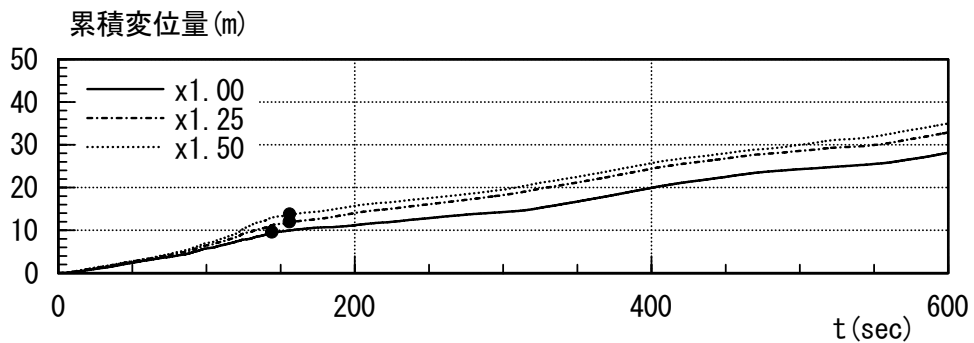


図 2.3.3-2(c) 免震層累積変位量時刻歴 (T-TN-AIC004_AV)

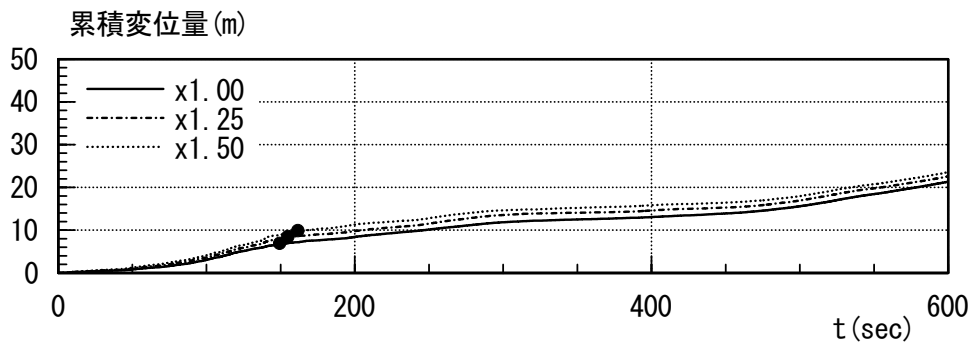


図 2.3.3-2(d) 免震層累積変位量時刻歴 (T-TN-KGIN_AV)

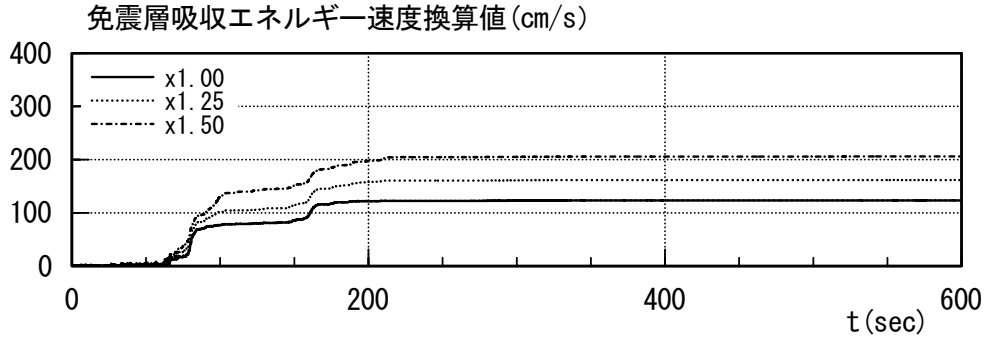


図 2.3.3-3(a) 免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (N-OSKH02_AV)

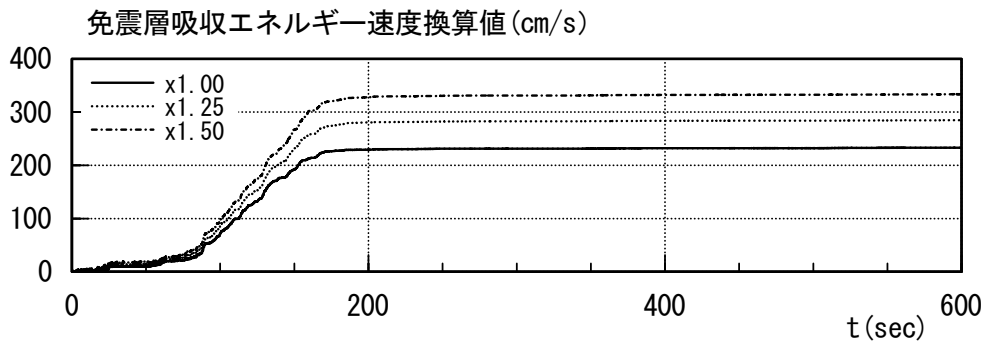


図 2.3.3-3(b) 免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (T-TN-AIC003_AV)

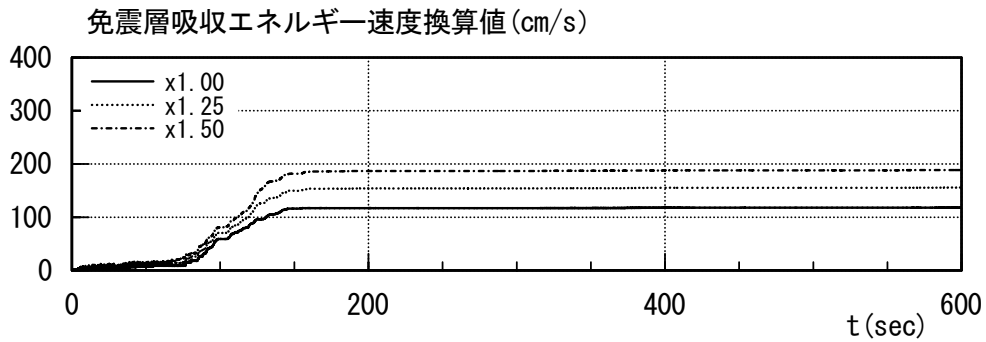


図 2.3.3-3(c) 免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (T-TN-AIC004_AV)

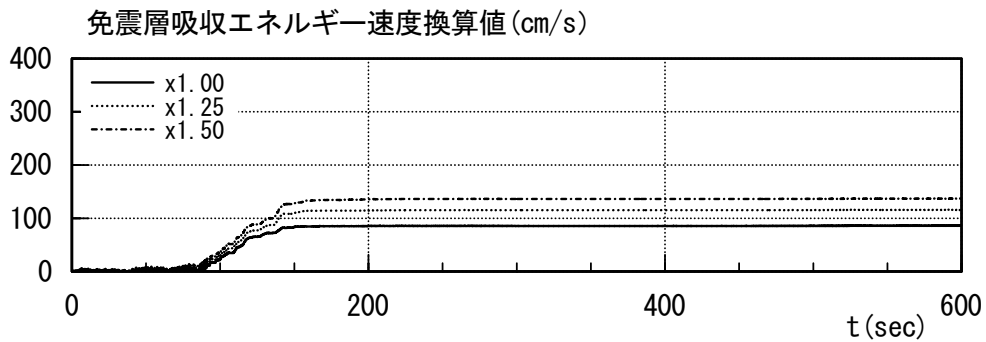


図 2.3.3-3(d) 免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (T-TN-KGIN_AV)

鋼材ダンパーについては、Miner 則に基づく疲労損傷評価を行う。評価に当たっては地震応答解析によって得られた免震材料の変位波形よりレインフロー法により波形分解を行い、各歪範囲レベルでの繰返し頻度 N_i を累積する。

鋼材ダンパーについて表 2.3.3-1 の文献番号 3 により得られている変位振幅 Δ_i と破断回数 N_i の関係 (図 2.3.3-4 : 参考文献 2.3.3-1) に基づいて、下式により損傷度 D を評価する。損傷度 $D=1$ の場合、疲労損傷 (破断) が起きるとする。

$$D = \sum_i \frac{N_i}{N_f}$$

N_i : 変位振幅 Δ_i での頻度

N_f : 変位振幅 Δ_i での破断回数

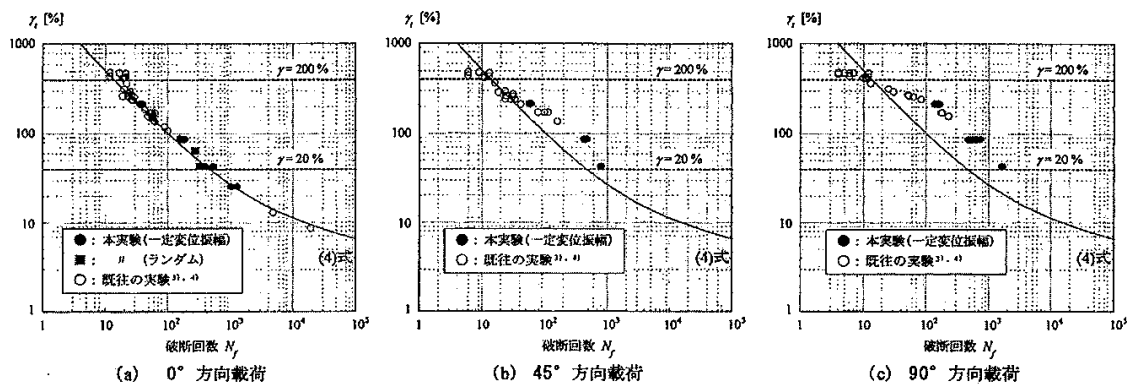


図 10 U ダンパーの疲労性能 (全変位振幅 δ_i の平均せん断変形角 γ_t と破断回数 N_f の関係)

上図中 (4) 式は、 $\gamma_t = 35N_f^{-0.15} + 3620N_f^{-0.80}$

ただし、 γ_t は全変位振幅 δ_i を U 型ダンパーの高さ h で除した平均せん断変形角である。

図 2.3.3-4 鋼材ダンパーの疲労性能 (2.3.3-1)

鋼材ダンパーについては応答解析より得られた応答変位時刻歴を使って、疲労損傷評価を行った。鋼材ダンパーは U 型ダンパーの NSUD50x4 を想定している。表 2.3.3-4 に疲労損傷度を示す。疲労損傷は図 2.3.3-4 に示されるように免震材料における吸収エネルギーが頭打ちとなる継続時間 300 秒間について評価した、また疲労損傷度は破断時を 100% として評価した値である。

表 2.3.3-4 鋼材ダンパーの疲労損傷度

入力地震動	入力倍率	免震層 水平変形 (cm)	疲労損傷度 (%)
N-OSKH02_AV	1.00	12.6	8.1
	1.25	15.6	12.2
	1.50	18.6	18.8
T-TN-AIC003_AV	1.00	22.7	26.4
	1.25	33.7	39.2
	1.50	40.1	55.3
T-TN-AIC004_AV	1.00	11.3	7.7
	1.25	18.3	13.2
	1.50	22.8	17.8
T-TN-KGIN_AV	1.00	6.7	4.9
	1.25	12.2	7.5
	1.50	16.1	9.9

(4) まとめ

天然ゴム系積層ゴムと鋼材ダンパーを適用した免震建築物では T-TN-AIC003_AV の入力倍率が 1.0 倍の場合に積層ゴムのせん断ひずみは $\gamma=114\%$ (水平変位 22.7cm) で最大となる。その他の地震動では積層ゴムのせん断ひずみは $\gamma=50\%$ 程度 (水平変位 10cm 程度) である。また、T-TN-AIC003_AV の入力倍率が 1.5 倍の場合に積層ゴムのせん断ひずみは $\gamma=200\%$ (水平変位 40.1cm) となるものの、その他の入力の場合には積層ゴムのせん断ひずみは $\gamma=100\%$ 程度 (水平変位 20cm 程度) である。また、鋼材ダンパーの疲労損傷度は T-TN-AIC003_AV の入力倍率が 1.0 倍の場合に 26.4% であるが、その他の地震動では 10% 以下である。T-TN-AIC003_AV の入力倍率が 1.5 倍の場合に破断に対する疲労損傷度が 55.3% となる。この場合には風外乱や中小地震による疲労損傷度の累積を考慮すると鋼材ダンパーの破断に対して厳しい値となっていると考えられる。

今後、鋼材ダンパーについて実施された実験結果についての評価を実施し、繰返し加振時の特性評価と疲労損傷度の評価について現状の評価方法の検証が必要と考えられる。疲労損傷度については大地震時の評価だけでなく、風外乱や中小地震時にも疲労損傷が蓄積することから大地震時の疲労損傷度のクライテリアをどの程度にするかが今後の課題である。また、2 方向地震動入力時の応答及びそれが疲労損傷度に及ぼす影響評価についても今後の課題と考えられる。

参考文献

2.3.3-1) 吉敷祥一ほか：免震構造用 U 字鋼材ダンパーの繰返し変形性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 624 号、pp333-344、2008.2.

2.3.4 天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパー

1) 各種依存性に関する既往の研究

1) 温度依存性および繰返しによるエネルギー吸収量の依存性

繰返し試験におけるダンパー製造者の技術資料としては、3 ループ目のエネルギー吸収量における温度依存性が示されている。グラフを図 2.3.4-1 に示す。また、振幅±150mm および±400mm、周期 3s 正弦波繰返し加振時の累積変形量と 1 ループ分エネルギー吸収量の 3 ループ目に対する変化率を図 2.3.4-2 および図 2.3.4-3 に示す。図 2.3.4-2 および図 2.3.4-3 は、免震部材メーカーから提供された実験データに、回帰により求めた関数を追加したものである。いずれの結果も低下率は最小二乗法により定式化されている。これらは住友金属鉱山シポレックス製 U2426 の結果である。本検討では、上記に示したデータに基づき、鉛ダンパーのエネルギー吸収による劣化モデルを考慮した地震応答解析を実施した。なお、鉛ダンパーの復元力特性は完全弾塑性のノーマルバイリニア型として表現する。

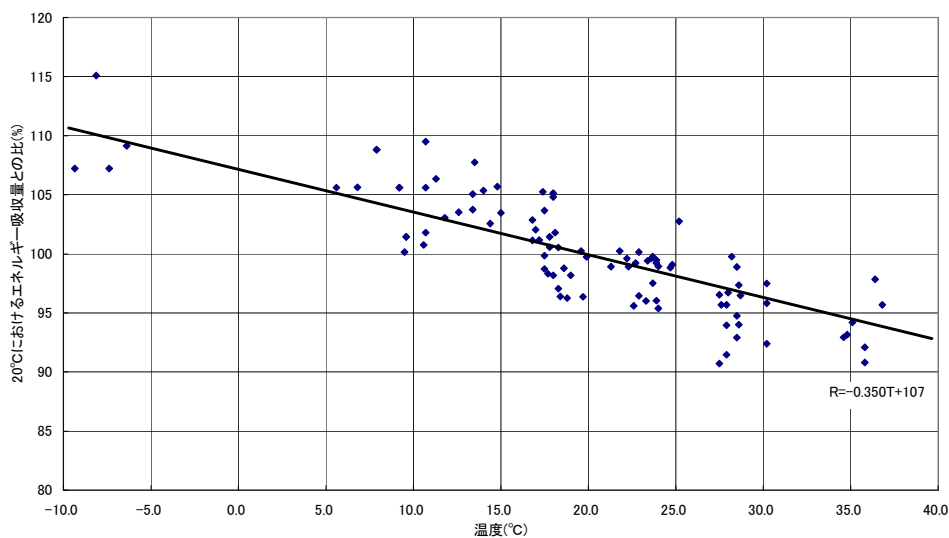


図 2.3.4-1 20°Cに対するエネルギー吸収量の温度依存性 (U2426) ^{2.3.4-1}

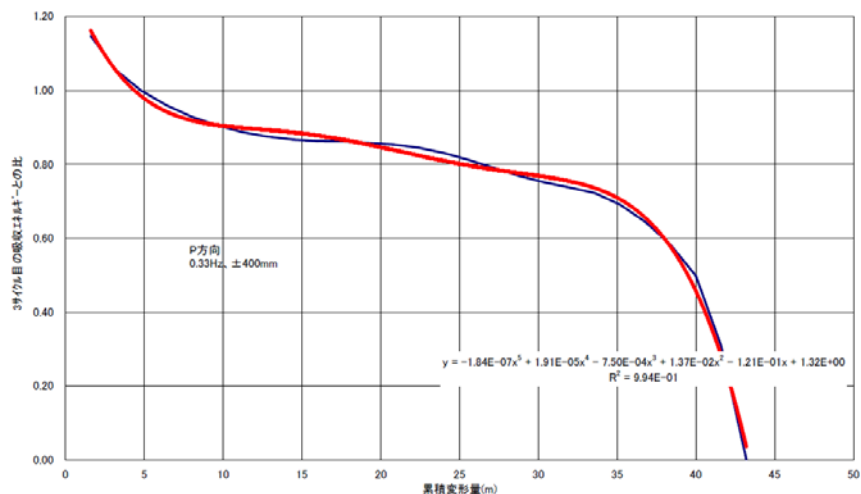


図 2.3.4-2 正弦波繰返し加振時の累積変形量と
1 ループ分エネルギー吸収量の変化率
(P 方向振幅±400mm、周期 3s)

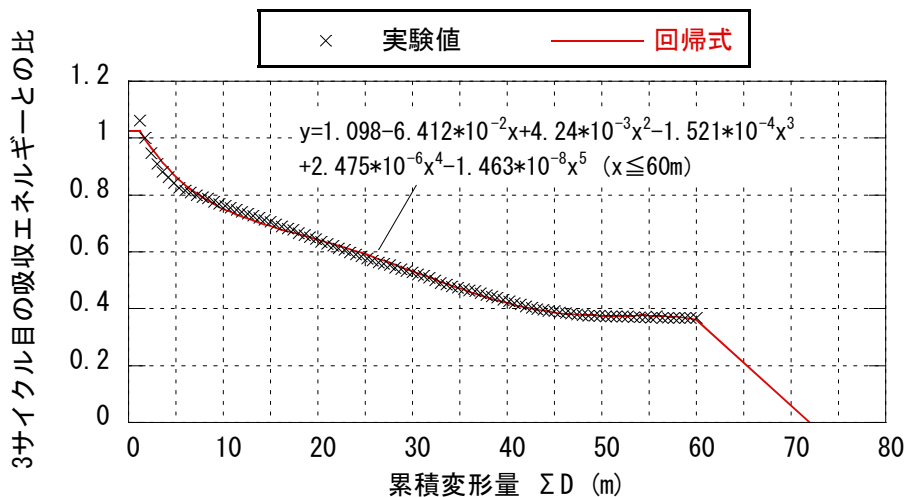


図 2.3.4-3 正弦波繰り返し加振時の累積変形量と
1 ループ分エネルギー吸収量の変化率
(P 方向振幅±150mm、周期 3s)

2) 鉛ダンパーの耐力劣化モデル

エネルギー吸収による時々刻々の耐力劣化のモデルは、以下の Type A～D とする。

a) Type A 完全弾塑性のノーマルバイリニア型で時々刻々の耐力劣化非考慮

b) Type B エネルギー吸収量の温度依存性を考慮

エネルギー吸収量 W の温度依存性 $W/W(T_e=20^\circ\text{C})$ は、図 2.3.4-1 より

$$W/W(T_e=20^\circ\text{C}) = -0.0035T_e + 1.07$$

(2.3.4-1)

T_e : 温度 ($^\circ\text{C}$)

復元力の変化を考える上において、降伏時変位は変化しないとすると、(エネルギー吸収量の変化率) = (降伏耐力の変化) と考える。

ダンパーのエネルギー吸収量が、すべて鉛自身の内部エネルギー上昇に消費されるとする。また、断熱状態と仮定し、鉛各部は均等に温度上昇がなされるものとする、ダンパーのエネルギー吸収量 ΔW による鉛の温度上昇の平均値 ΔT_e は以下のようなになる。

$$\Delta T_e = \Delta W / (\rho m)$$

(2.3.4-2)

ρ : 比熱 (=129 J/kg)、 m : 鉛の質量

時々刻々のエネルギー吸収量の増分値から式(2.3.4-2)により鉛の温度を求め、式 (2.3.4-1)により温度に応じて降伏耐力を変化させる。

c) Type C 正弦波繰り返し加振時の累積変形量と 1 ループ分エネルギー吸収量の変化率を考慮

【P 方向±400mm の加振実験に基づいた場合】

P 方向振幅±400mm、周期 3s 正弦波繰り返し加振時の累積変形量と 1 ループ分エネルギー吸収量の 3 ループ目に対する変化率 (図 2.3.4-2) より、累積変形量 $Y = \sum \delta$ (m) と 1 ループ分のエネルギー吸収量の変化率 R_W は、

$$R_W = -1.84 \times 10^{-7} Y^5 + 1.91 \times 10^{-5} Y^4 - 7.50 \times 10^{-4} Y^3 + 1.37 \times 10^{-2} Y^2 - 0.121 Y + 1.32$$

(2.3.4-3)

式(2.4.3-3)は、3ループ目に対する比率となっている。1ループ目の累積変位である $0 \leq Y \leq 1.6(\text{m})$ では1ループ目の値である $R_W = 1.163$ とする。また、 $R_W \geq 0$ とする。ここでは、復元力の変化を考える上において、降伏時変位は変化しないとし、(エネルギー吸収量の変化率) = (降伏耐力の変化) と考える。鉛ダンパーの累積変形量から、式(2.4.3-3)により時々刻々の R_W を求め、降伏耐力を変化させる。

d) Type D 正弦波繰り返し加振時の累積変形量と1ループ分エネルギー吸収量の変化率を考慮

【P方向±150mmの加振実験に基づいた場合】

P方向振幅±150mm、周期3s正弦波繰り返し加振時の累積変形量と1ループ分エネルギー吸収量の3ループ目に対する変化率(図2.3.4-3)より、累積変形量 $Y = \sum \delta (\text{m})$ と1ループ分のエネルギー吸収量の変化率 R_W は、

$$R_W = -1.411 \times 10^{-8} Y^5 + 2.391 \times 10^{-6} Y^4 - 1.470 \times 10^{-4} Y^3 + 4.101 \times 10^{-3} Y^2 - 6.261 \times 10^{-2} Y + 1.093 \quad (2.3.4-4)$$

ただし、累積変形量が0から2ループ目となる $Y=1.2\text{m}$ まで R_W は、2ループ目の値である1.027一定とする。また、累積変形量 $Y=60\text{m}$ となる100サイクル目まで R_W は式(2.3.4-4)とし、 $Y \geq 60\text{m}$ から、破断限界である $Y=72\text{m}$ (120サイクル) までは、 $R_W(Y=60\text{m})$ の値と $Y=72\text{m}$ 時に $R_W=0$ を直線で結ぶモデルとした。上記のモデル化による値(凡例にて回帰式と表記)を図2.3.4-3に示す。

±150mmおよび±400mmのエネルギー吸収量の累積変形量による変化の実験値を図2.3.4-4に併せて示す。振幅が異なるとエネルギー吸収量が0となる累積変形量が異なる。また累積変形量が40m以下までは、±150mmの低下率が±400mmの低下率を下回っている。

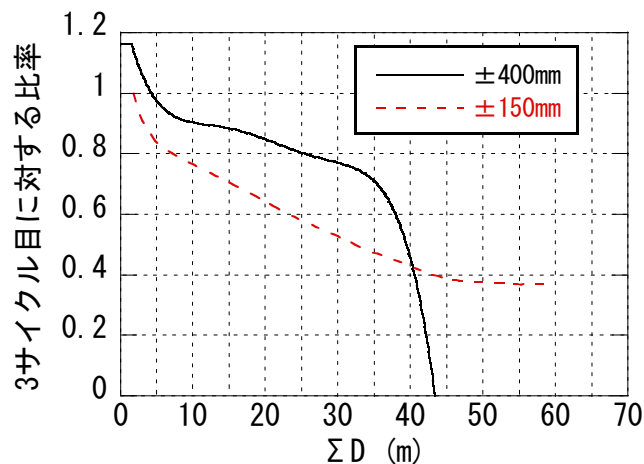
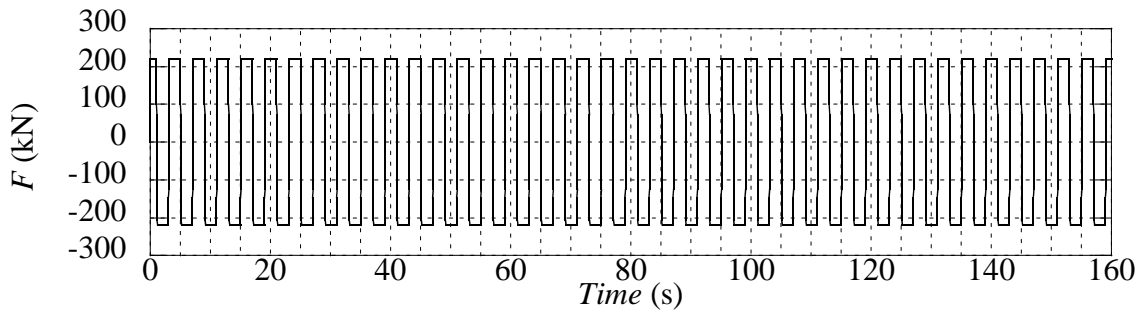
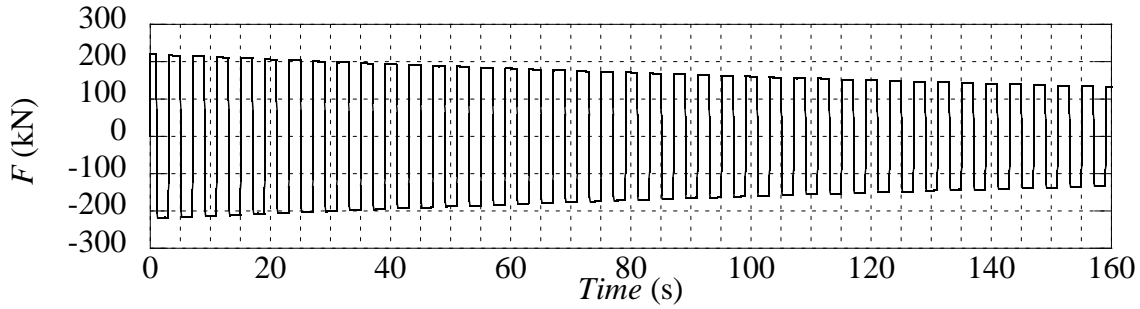


図 2.3.4-4 P方向、0.33Hz 正弦波繰り返し加振時の累積変形量と1ループ分エネルギー吸収量の変化率

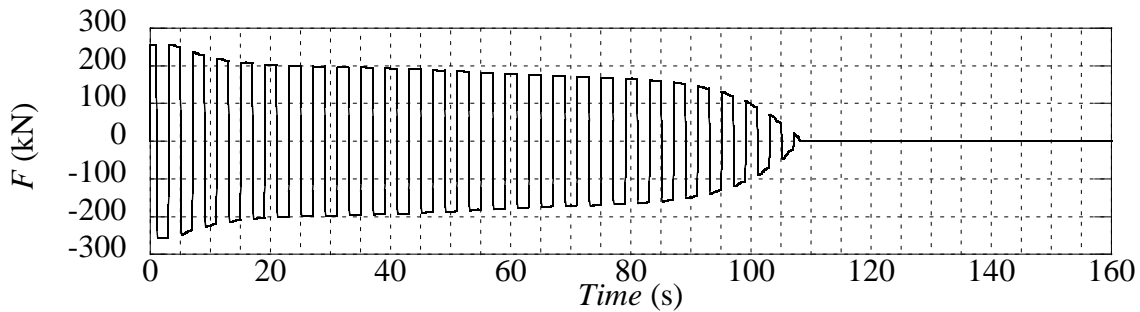
鉛ダンパーの復元力案 Type A~D に対して周期4秒、±400mm、40サイクルの変位を与え、水平荷重履歴を求めた。鉛ダンパーは住友金属鉱山シポレックス製 U2426 とする。降伏荷重は220kN、初期剛性は30,000kN/m とし、初期温度は20°C とする。



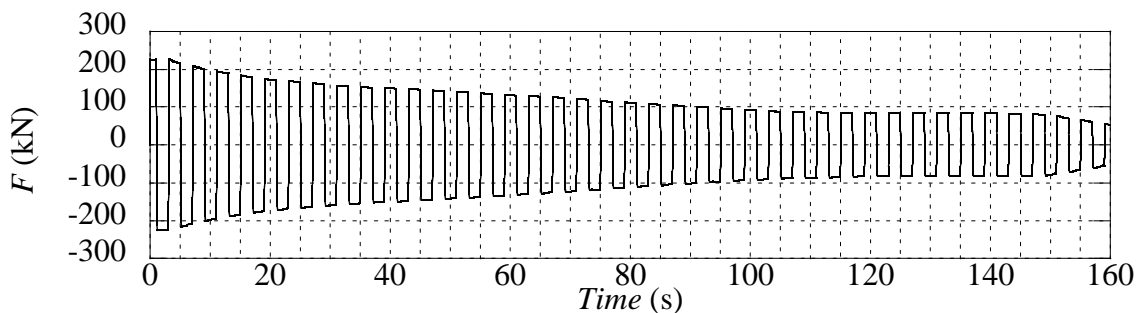
(a) Type A 耐力劣化非考慮



(b) Type B 温度依存性考慮



(c) Type C 累積変形量による耐力劣化考慮



(d) Type D 累積変形量による耐力劣化考慮

図 2.3.4-5 正弦波加振水平荷重の時刻歴

水平荷重の時刻歴を図 2.3.4-5 に示す。Type B（温度依存性考慮）と Type-C（±400mm の累積変形量による耐力劣化考慮）の耐力低下の違いは、加振最初および累積変形量 35m 以上で顕著である。ただし累積変形量 35m 以下では両者のモデルの違いはわずかである。水平荷重変形関係を図 2.3.4-6 に示す。

図(b),(c),(d)より Type B、C、D の履歴ループが描く面積は小さくなっていくことがわかる。Type B および Type D では降伏耐力が最後まで残っているが、Type C では降伏耐力が 0 にまで低減した。Type B、

Type C および Type D モデルの計算結果と温度依存式・累積変形量による吸収率低下式との関係を図 2.3.4-7 に示す。それぞれのモデルによる計算結果は、式(2.3.4-1)、式(2.3.4-3)および式(2.3.4-4)と整合している。

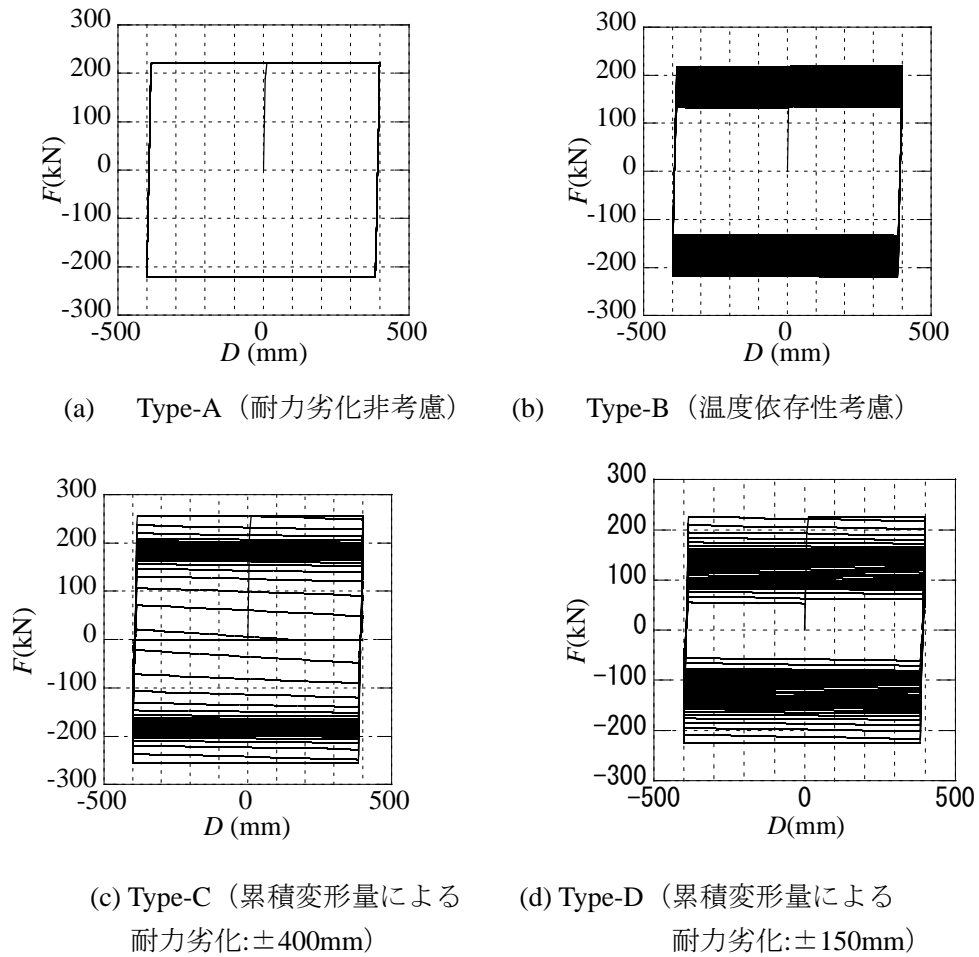
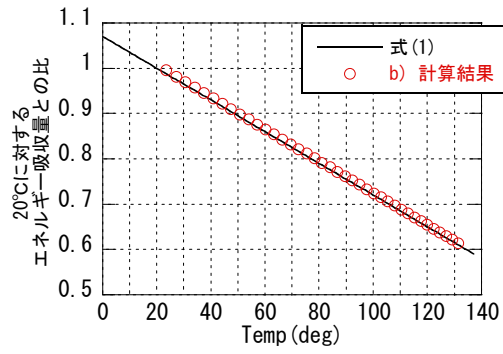
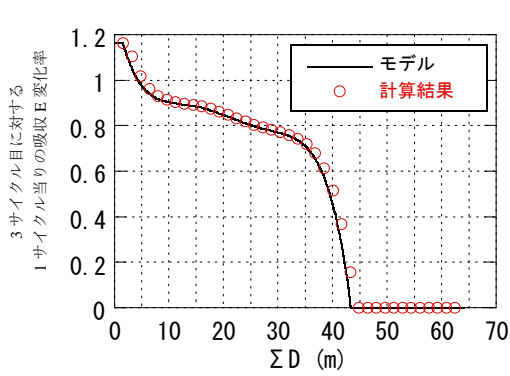


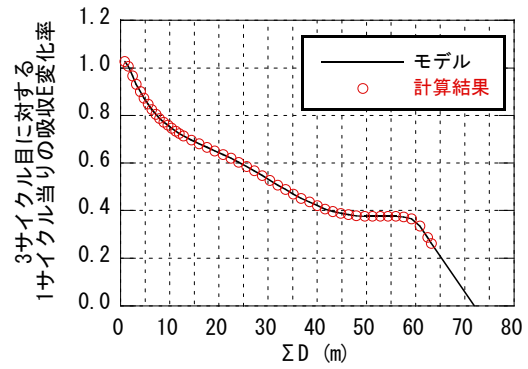
図 2.3.4-6 正弦波加振 水平荷重変形関係



(a) Type-B



(b) Type-C



(c) Type-D

図 2.3.4-7 正弦波加振 計算結果と温度依存式・累積変形量による吸収率低下式との関係

(2) 解析条件

天然ゴム系積層ゴムと鉛ダンパーからなる免震層を有する1質点系の地震応答解析を実施した。

1) 解析モデル

解析で想定する建物モデルを表 2.3.4-1 に示す。上部構造の重量は 46,000kN である。天然ゴム系積層ゴムによる免震周期は 3.5 秒、4.0 秒および 4.5 秒とし、それぞれを Model I,II,III とする。鉛ダンパーの負担せん断力係数は、Model I,II,III とともに 0.038 (U2426 型鉛ダンパー8 台) とした。天然ゴム系積層ゴムの復元力特性は線形弾性とする。鉛ダンパーは完全弾塑性とし、前項 2) で示した Type A~Type D の4 種類のモデルを適用する。Type B における鉛ダンパーの初期温度は 20°C とした。免震層の減衰は鉛ダンパーの履歴減衰のみを考慮した。解析モデルを図 2.3.4-8 に示す。なお本検討は水平方向 1 自由度とする。解析手法は Newmark β 法 ($\beta=1/4$) を用いた。

入力地震動は表 2.3.4-2 に示す長周期地震動 4 波とする。長周期地震動は加速度を 1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍に係数倍した波を入力した。表 2.3.4-2 に示した最大加速度は係数 1.0 時の値である。

表 2.3.4-1 天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパー解析モデル

	免震周期 3.5 秒 (Model I)	免震周期 4.0 秒 (Model II)	免震周期 4.5 秒 (Model III)
想定建物	RC 造、10 階建て 基礎免震	RC 造、10 階建て 基礎免震	RC 造、10 階建て 基礎免震
上部構造重量	46,000kN	46,000kN	46,000kN
鉛ダンパー台数	8 台	8 台	8 台
積層ゴム台数	12 台	10 台	8 台
積層ゴム直径(内径)	800mm(20mm)	750mm(15mm)	750mm(15mm)
積層ゴム面圧	7.6 N/mm ²	10.1 N/mm ²	12.5 N/mm ²
ゴムによる周期	3.6 秒	4.0 秒	4.4 秒
鉛ダンパー負担 せん断力係数	0.038	0.038	0.038

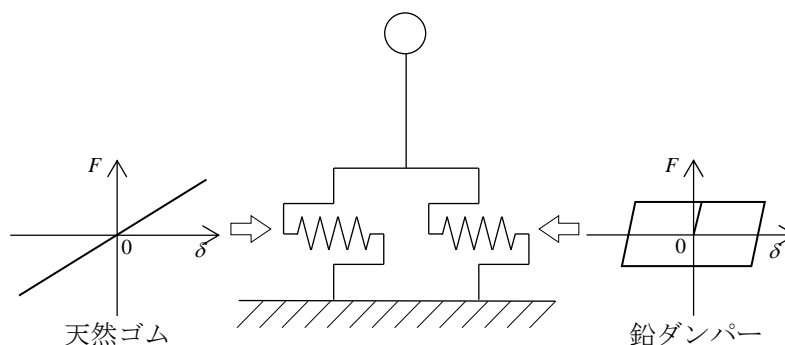


図 2.3.4-8 解析モデル模式図

表 2.3.4-2 応答解析用入力地震動

入力地震動	最大加速度
N-OSKH02-AV	70.9Gal
T-TN-AIC003-AV	221.2Gal
T-TN-AIC004-AV	323.0Gal
T-TN-KGIN1F-AV	89.6Gal

(3) 解析結果

1) 最大変形

入力地震動の入力倍率が 1.0 の場合における最大変形を表 2.3.4-3～5 に、入力倍率 1.25 の場合を表 2.3.4-6～8 に、入力倍率 1.5 倍時を 2.3.4-9～11 に示す。表中の最大値は、入力地震動 4 波のうち最も大きくなった地震動時の値を示している。また、B/A、C/A、D/A は Type B、Type C、Type D の値の Type A 時の値に対する比であり、耐力劣化考慮時の耐力劣化未考慮時に対する比率である。ほとんどの建物モデルにおいて、入力地震動 4 波のうち最も大きな変形となる入力波は、T-TN-AIC003-AV の場合である。鉛ダンパーの耐力劣化を考慮しない Type A の場合、T-TN-AIC003-AV の最大変形は入力倍率 1.0 時に 16.1cm、1.25 倍時に 24.6cm、1.5 倍時に 33.5cm であった。

Type B～Type D による復元力特性の繰返し劣化による最大変形の増大は、Type A の劣化非考慮の場合に対して Type B（温度依存性考慮）で 1.0～1.18 倍、Type C（±400mm の正弦波繰返し劣化特性考慮）では 0.80～1.24 倍、Type D（±150mm の正弦波繰返し劣化特性考慮）は 0.98～1.71 倍となっており、Type B < Type C < Type D の順で最大変位に与える影響が大きくなっている。また入力倍率が高いほど、耐力劣化非考慮時に対する耐力劣化時の比が大きくなる傾向にある。入力倍率が 1.0 の場合、Type A、B、C、D で最も大きな変形はそれぞれ 16.1cm、17.0cm、18.0cm、21.3cm であり、入力倍率が 1.25 では 24.6cm、25.9cm、26.9cm、35.5cm、入力倍率が 1.5 の場合で 33.5cm、39.6cm、41.6cm、56.4cm であった。ゴム総厚を 200mm とすると入力倍率 1.5 倍時の最大変形量 56.4cm 時のせん断ひずみは 282% であり、400%には達していない。

表 2.3.4-3 免震周期 3.5 秒 最大変位 (長周期地震動入力倍率 1.0)

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	8.20	8.22	1.00	7.83	0.95	9.34	1.14
T-TN- AIC003-AV	15.40	16.48	1.07	17.59	1.14	21.28	1.38
T-TN- AIC004-AV	6.26	6.37	1.02	6.28	1.00	7.68	1.23
T-TN- KGIN1F-AV	4.20	4.20	1.00	3.37	0.80	4.20	1.00
最大値	15.4	16.5	1.07	17.6	1.14	21.3	1.38
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-4 免震周期 4.0 秒 最大変位 (長周期地震動入力倍率 1.0)

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	7.67	7.68	1.00	7.65	1.00	9.04	1.18
T-TN- AIC003-AV	15.87	16.84	1.06	17.89	1.13	21.11	1.33
T-TN- AIC004-AV	6.23	6.35	1.02	6.28	1.01	7.57	1.21
T-TN- KGIN1F-AV	4.41	4.41	1.00	3.62	0.82	4.39	1.00
最大値	15.9	16.8	1.06	17.9	1.13	21.1	1.33
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-5 免震周期 4.5 秒 最大変位 (長周期地震動入力倍率 1.0)

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	7.21	7.20	1.00	7.45	1.03	8.74	1.21
T-TN- AIC003-AV	16.12	16.99	1.05	17.98	1.12	20.73	1.29
T-TN- AIC004-AV	6.19	6.30	1.02	6.26	1.01	7.50	1.21
T-TN- KGIN1F-AV	4.54	4.54	1.00	3.78	0.83	4.59	1.01
最大値	16.1	17.0	1.05	18.0	1.12	20.7	1.29
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-6 免震周期 3.5 秒 最大変位 (長周期地震動入力倍率 1.25)

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	12.36	12.56	1.02	12.82	1.04	13.68	1.11
T-TN- AIC003-AV	24.32	25.90	1.06	26.89	1.11	29.01	1.19
T-TN- AIC004-AV	9.84	10.02	1.02	10.18	1.03	11.97	1.22
T-TN- KGIN1F-AV	4.96	4.95	1.00	5.04	1.02	4.85	0.98
最大値	24.3	25.9	1.06	26.9	1.11	29.0	1.22
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC004-AV

表 2.3.4-7 免震周期 4.0 秒 最大変位 (長周期地震動入力倍率 1.25)

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	11.81	11.97	1.01	12.18	1.03	12.88	1.09
T-TN- AIC003-AV	24.59	25.83	1.05	26.62	1.08	33.06	1.34
T-TN- AIC004-AV	9.69	9.86	1.02	10.05	1.04	11.83	1.22
T-TN- KGIN1F-AV	5.18	5.18	1.00	5.23	1.01	5.07	0.98
最大値	24.6	25.8	1.05	26.6	1.08	33.1	1.34
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-8 免震周期 4.5 秒 最大変位 (長周期地震動入力倍率 1.25)

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	11.30	11.44	1.01	11.62	1.03	12.35	1.09
T-TN- AIC003-AV	24.45	25.40	1.04	26.12	1.07	35.52	1.45
T-TN- AIC004-AV	9.52	9.67	1.02	9.89	1.04	11.11	1.17
T-TN- KGIN1F-AV	5.35	5.35	1.00	5.41	1.01	5.26	0.98
最大値	24.5	25.4	1.04	26.1	1.07	35.5	1.45
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-9 免震周期 3.5 秒 最大変位 (長周期地震動入力倍率 1.5)

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	16.26	16.44	1.01	16.66	1.02	17.18	1.06
T-TN- AIC003-AV	33.17	34.06	1.03	33.94	1.02	44.37	1.34
T-TN- AIC004-AV	13.76	14.59	1.06	15.75	1.14	18.85	1.37
T-TN- KGIN1F-AV	5.88	5.96	1.01	5.88	1.00	7.77	1.32
最大値	33.2	34.1	1.06	33.9	1.14	44.4	1.37
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC004-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC004-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC004-AV

表 2.3.4-10 免震周期 4.0 秒 最大変位 (長周期地震動入力倍率 1.5)

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	15.28	15.42	1.01	15.60	1.02	20.34	1.33
T-TN- AIC003-AV	32.94	37.57	1.14	38.67	1.17	56.40	1.71
T-TN- AIC004-AV	13.78	14.70	1.07	15.88	1.15	17.98	1.31
T-TN- KGIN1F-AV	6.37	6.47	1.01	6.25	0.98	8.50	1.33
最大値	32.9	37.6	1.14	38.7	1.17	56.4	1.71
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

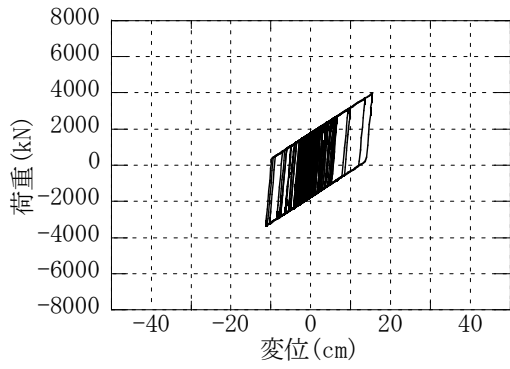
表 2.3.4-11 免震周期 4.5 秒 最大変位 (長周期地震動入力倍率 1.5)

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	14.58	14.71	1.01	14.89	1.02	24.58	1.69
T-TN- AIC003-AV	33.54	39.62	1.18	41.65	1.24	48.82	1.46
T-TN- AIC004-AV	12.99	14.28	1.10	15.86	1.22	18.06	1.39
T-TN- KGIN1F-AV	6.80	6.92	1.02	6.68	0.98	9.03	1.33
最大値	33.5	39.6	1.18	41.6	1.24	48.8	1.69
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02-AV

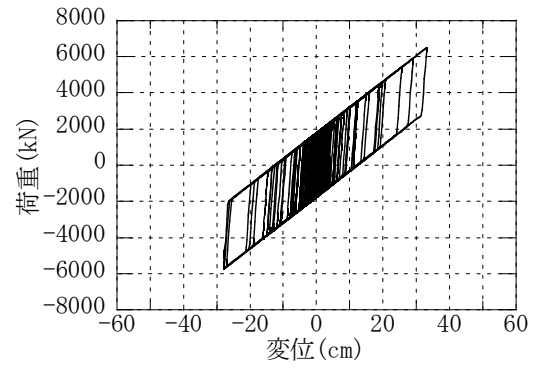
2) 荷重変形関係

免震層の荷重変形関係を図 2.3.4-9～11 に示す。免震層変位が大きい T-TN-AIC003-AV の場合を示す。各図の左側は入力倍率 1.0 の場合、右側は入力倍率 1.5 のものであり、上から順に Type A、B、C、D と並んでいる。Type C、D では、小さな変形域と大きな変形とで描いたループの高さが変わっていることから、地震動による繰り返しによりダンパーの耐力が変化していることがわかる。Type B の荷重変形関係は Type C、D ほどの耐力変化が見られない。

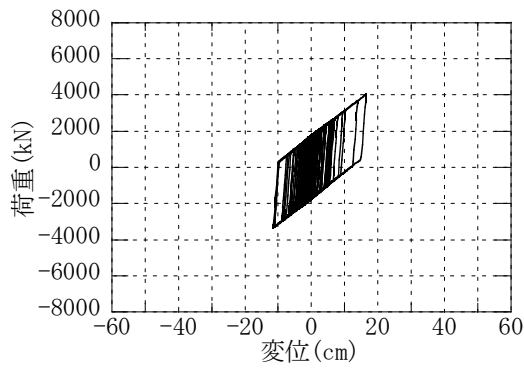
最大応答せん断力係数を表 2.3.4-12～20 に示す。入力倍率が 1.0 の場合、Type A、B、C、D で最も大きな応答せん断力係数はそれぞれ 0.086、0.088、0.089、0.095 であり、入力倍率が 1.25 では 0.114、0.116、0.118、0.117、入力倍率が 1.5 の場合で 0.141、0.141、0.139、0.167 であった。入力が 1.0 倍および 1.25 倍の場合は、Type A、B、C、D のいずれの場合においても免震周期 3.5 秒が最も大きなせん断力を示した。入力が 1.5 倍と大きくなると、Type D では免震周期 4.0 秒の場合にせん断力が最も大きくなった。



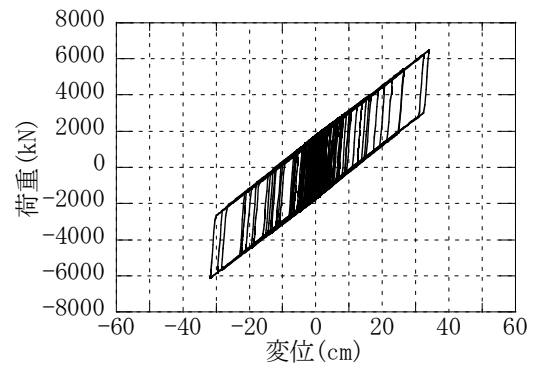
(a) Type A 入力倍率 1.0



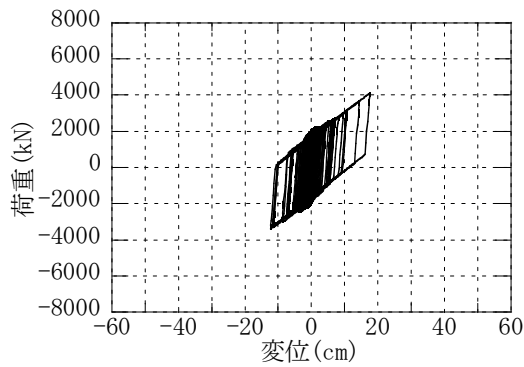
(b) Type A 入力倍率 1.5



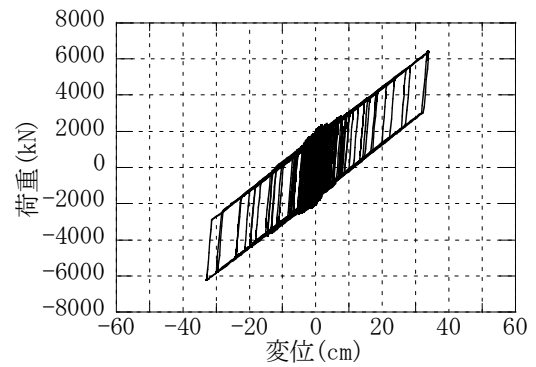
(c) Type B 入力倍率 1.0



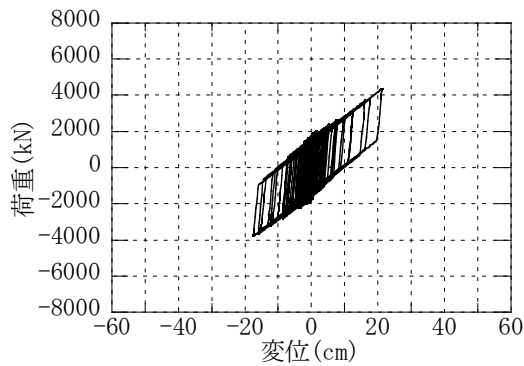
(d) Type B 入力倍率 1.5



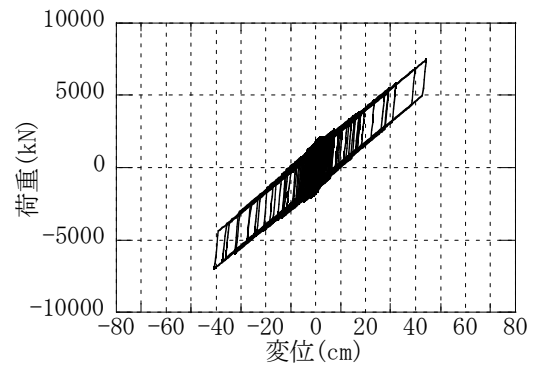
(e) Type C 入力倍率 1.0



(f) Type C 入力倍率 1.5

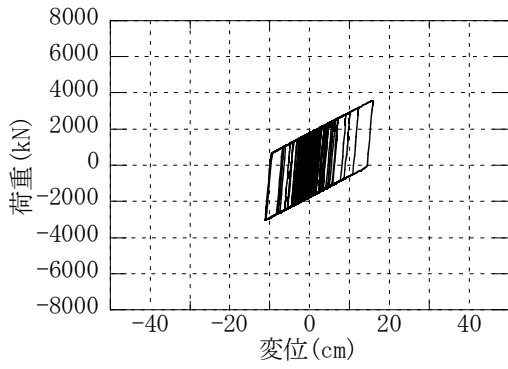


(g) Type D 入力倍率 1.0

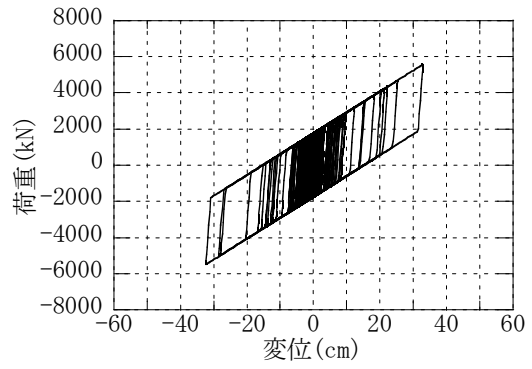


(h) Type D 入力倍率 1.5

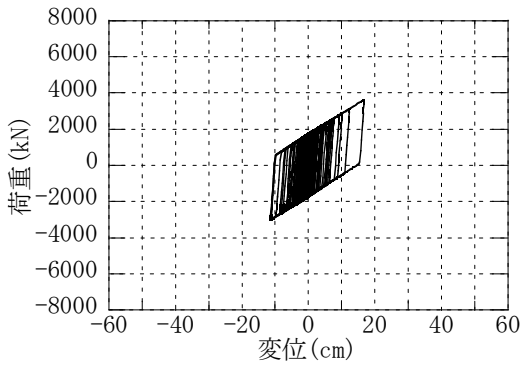
図 2.3.4-9 免震周期 3.5 秒 免震層荷重変形関係 (T-TN-AIC003-AV)



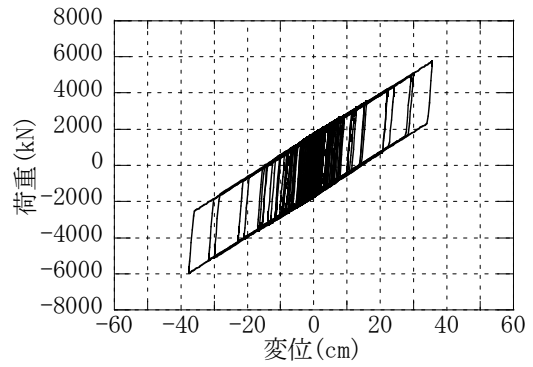
(a) Type A 入力倍率 1.0



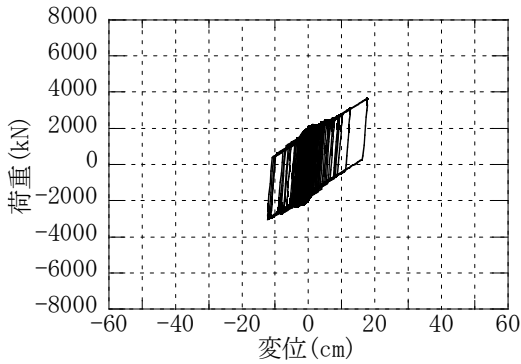
(b) Type A 入力倍率 1.5



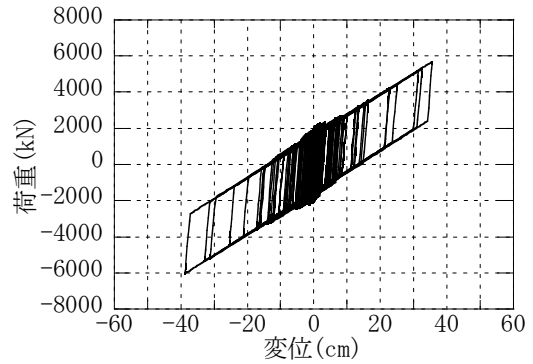
(c) Type B 入力倍率 1.0



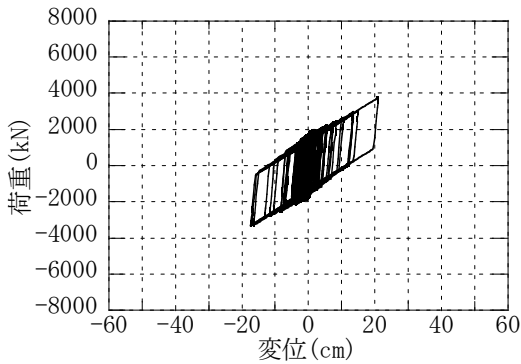
(d) Type B 入力倍率 1.5



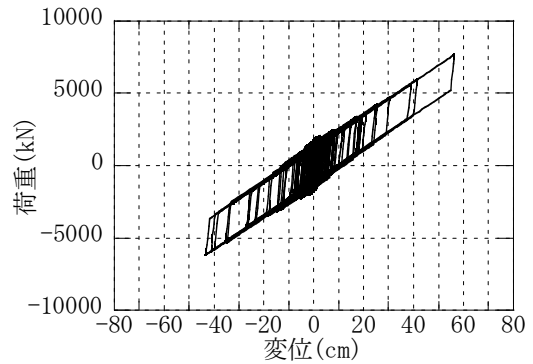
(e) Type C 入力倍率 1.0



(f) Type C 入力倍率 1.5

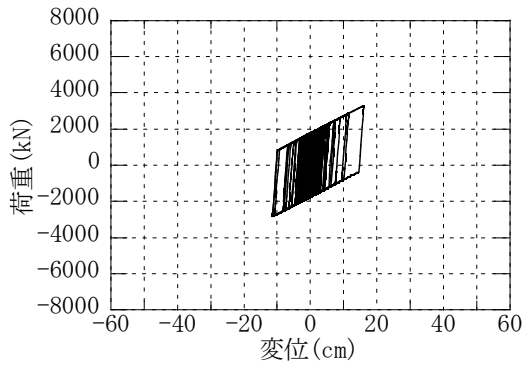


(g) Type D 入力倍率 1.0

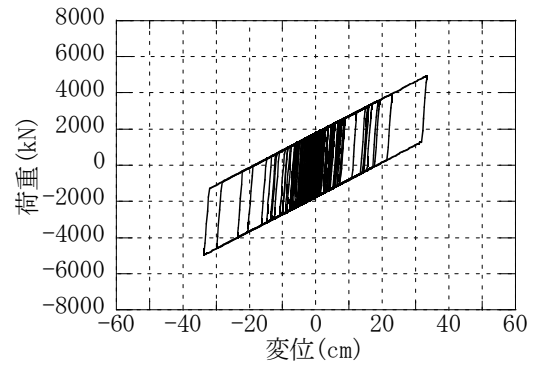


(h) Type D 入力倍率 1.5

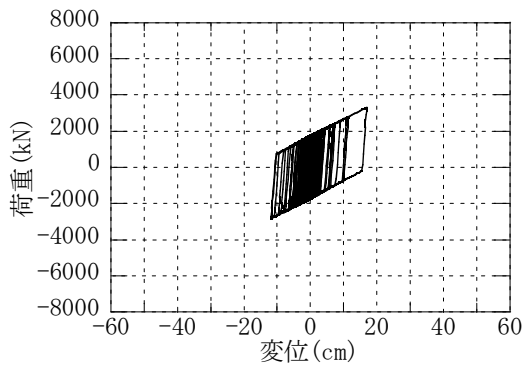
図 2.3.4-10 免震周期 4.0 秒 免震層荷重変形関係 (T-TN-AIC003-AV)



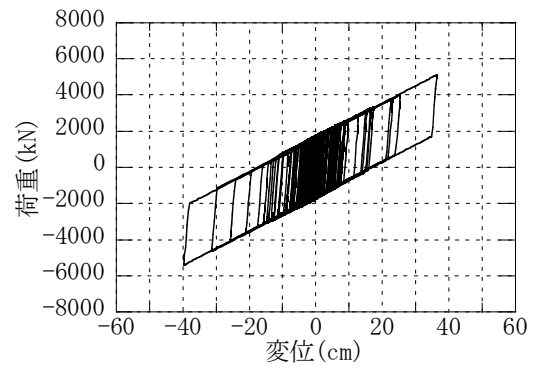
(a) Type A 入力倍率 1.0



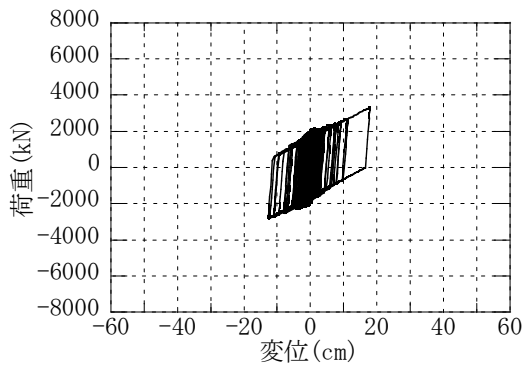
(b) Type A 入力倍率 1.5



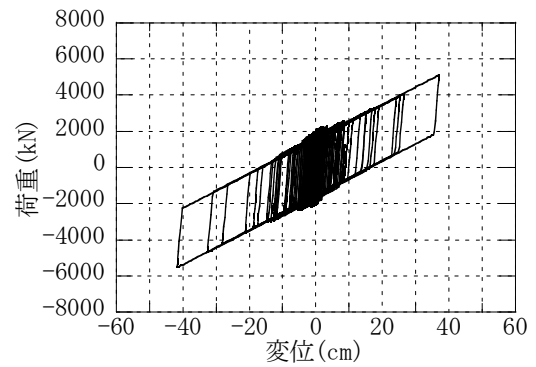
(c) Type B 入力倍率 1.0



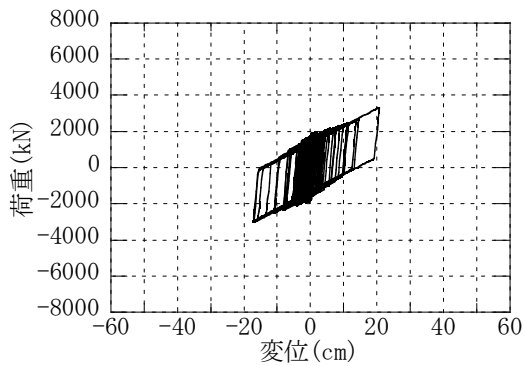
(d) Type B 入力倍率 1.5



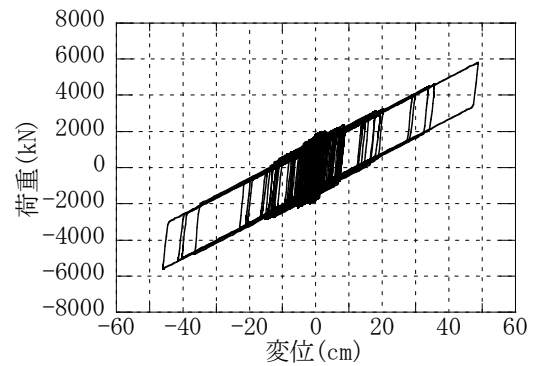
(e) Type C 入力倍率 1.0



(f) Type C 入力倍率 1.5



(g) Type D 入力倍率 1.0



(h) Type D 入力倍率 1.5

図 2.3.4-11 免震周期 4.5 秒 免震層荷重変形関係 (T-TN-AIC003-AV)

表 2.3.4-12 免震周期 3.5 秒 最大応答せん断力係数 (長周期地震動入力倍率 1.0)

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.064	0.064	1.00	0.067	1.05	0.063	1.00
T-TN- AIC003-AV	0.086	0.088	1.02	0.089	1.04	0.095	1.10
T-TN- AIC004-AV	0.058	0.058	1.00	0.058	1.00	0.057	0.99
T-TN- KGIN1F-AV	0.051	0.051	1.00	0.054	1.06	0.050	0.97
最大値	0.086	0.088	1.02	0.089	1.06	0.095	1.10
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-13 免震周期 4.0 秒 最大応答せん断力係数 (長周期地震動入力倍率 1.0)

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.058	0.057	1.00	0.062	1.08	0.057	0.99
T-TN- AIC003-AV	0.078	0.079	1.01	0.080	1.02	0.082	1.05
T-TN- AIC004-AV	0.054	0.054	1.00	0.054	1.00	0.052	0.97
T-TN- KGIN1F-AV	0.049	0.049	1.00	0.052	1.06	0.048	0.97
最大値	0.078	0.079	1.01	0.080	1.08	0.082	1.05
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-14 免震周期 4.5 秒 最大応答せん断力係数 (長周期地震動入力倍率 1.0)

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.053	0.053	1.00	0.058	1.10	0.052	0.98
T-TN- AIC003-AV	0.072	0.072	1.00	0.072	1.01	0.072	1.01
T-TN- AIC004-AV	0.051	0.051	1.00	0.051	1.00	0.049	0.96
T-TN- KGIN1F-AV	0.048	0.048	1.00	0.051	1.07	0.046	0.97
最大値	0.072	0.072	1.00	0.072	1.10	0.072	1.01
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-15 免震周期 3.5 秒 最大応答せん断力係数 (長周期地震動入力倍率 1.25)

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.077	0.077	1.00	0.076	1.00	0.075	0.98
T-TN- AIC003-AV	0.114	0.116	1.02	0.118	1.04	0.117	1.03
T-TN- AIC004-AV	0.069	0.069	1.00	0.069	1.00	0.069	1.00
T-TN- KGIN1F-AV	0.054	0.053	1.00	0.059	1.10	0.052	0.97
最大値	0.114	0.116	1.02	0.118	1.10	0.117	1.03
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-16 免震周期 4.0 秒 最大応答せん断力係数 (長周期地震動入力倍率 1.25)

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.068	0.068	1.00	0.067	0.99	0.065	0.96
T-TN- AIC003-AV	0.100	0.101	1.01	0.101	1.01	0.111	1.10
T-TN- AIC004-AV	0.063	0.062	1.00	0.062	0.99	0.062	0.99
T-TN- KGIN1F-AV	0.051	0.051	1.00	0.056	1.09	0.049	0.96
最大値	0.100	0.101	1.01	0.101	1.09	0.111	1.10
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-17 免震周期 4.5 秒 最大応答せん断力係数 (長周期地震動入力倍率 1.25)

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.062	0.061	0.99	0.061	0.99	0.059	0.95
T-TN- AIC003-AV	0.089	0.089	1.00	0.089	1.00	0.101	1.14
T-TN- AIC004-AV	0.058	0.058	1.00	0.057	0.99	0.056	0.96
T-TN- KGIN1F-AV	0.049	0.049	1.00	0.054	1.09	0.048	0.97
最大値	0.089	0.089	1.00	0.089	1.09	0.101	1.14
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-18 免震周期 3.5 秒 最大応答せん断力係数 (長周期地震動入力倍率 1.5)

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.089	0.088	1.00	0.088	0.99	0.085	0.95
T-TN- AIC003-AV	0.141	0.141	1.00	0.139	0.99	0.162	1.15
T-TN- AIC004-AV	0.081	0.083	1.02	0.085	1.05	0.090	1.10
T-TN- KGIN1F-AV	0.057	0.056	1.00	0.061	1.07	0.058	1.02
最大値	0.141	0.141	1.02	0.139	1.07	0.162	1.15
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC004-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-19 免震周期 4.0 秒 最大応答せん断力係数 (長周期地震動入力倍率 1.5)

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.077	0.076	0.99	0.075	0.98	0.081	1.05
T-TN- AIC003-AV	0.121	0.130	1.07	0.131	1.08	0.167	1.38
T-TN- AIC004-AV	0.073	0.074	1.02	0.076	1.04	0.076	1.05
T-TN- KGIN1F-AV	0.054	0.054	1.00	0.058	1.07	0.055	1.01
最大値	0.121	0.130	1.07	0.131	1.08	0.167	1.38
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-20 免震周期 4.5 秒 最大応答せん断力係数 (長周期地震動入力倍率 1.5)

入力地震動	Type A	Type B	B/A	Type C	C/A	Type D	D/A
N-OSKH02 -AV	0.069	0.068	0.99	0.067	0.98	0.081	1.18
T-TN- AIC003-AV	0.108	0.118	1.09	0.121	1.12	0.127	1.17
T-TN- AIC004-AV	0.065	0.067	1.03	0.069	1.05	0.069	1.05
T-TN- KGIN1F-AV	0.052	0.052	1.00	0.056	1.06	0.053	1.01
最大値	0.108	0.118	1.09	0.121	1.12	0.127	1.18
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02-AV

3) 最大応答加速度

入力倍率が 1.0 の最大応答加速度を表 2.3.4-21～23 に、1.25 倍の場合を表 2.3.4-24～26 に、1.5 倍の場合を表 2.3.4-27～29 にそれぞれ示す。表中に示す最大値は、同一解析条件および鉛ダンパーの復元力特性が同じ場合における 4 波の応答解析結果のうち、最大値を示す。T-TN-AIC003-AV がどの解析モデルにおいても最も大きくなった。入力倍率が 1.0 の場合においては、耐力劣化を考慮しない場合 (Type A) では、47～85Gal であった。この場合、免震周期が長いほど最大応答加速度が小さくなっている。復元力の違いによる影響に関して表中の最大値で比較すると、Type A < Type B < Type C < Type D の傾向がみられた。

表 2.3.4-21 免震周期 3.5 秒 最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	62.5	62.4	1.00	65.7	1.05	62.2	1.00
T-TN- AIC003-AV	84.4	86.1	1.02	87.7	1.04	93.1	1.10
T-TN- AIC004-AV	56.6	56.5	1.00	56.5	1.00	55.9	0.99
T-TN- KGIN1F-AV	50.3	50.3	1.00	53.3	1.06	48.9	0.97
最大値	84.4	86.1	1.02	87.7	1.06	93.1	1.10
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-22 免震周期 4.0 秒 最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	56.4	56.3	1.00	60.9	1.08	56.0	0.99
T-TN- AIC003-AV	76.7	77.5	1.01	78.3	1.02	80.6	1.05
T-TN- AIC004-AV	52.9	52.8	1.00	52.8	1.00	51.4	0.97
T-TN- KGIN1F-AV	48.4	48.4	1.00	51.5	1.06	46.8	0.97
最大値	76.7	77.5	1.01	78.3	1.08	80.6	1.05
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-23 免震周期 4.5 秒 最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	52.2	52.0	1.00	57.4	1.10	51.4	0.98
T-TN- AIC003-AV	70.4	70.7	1.00	70.9	1.01	70.9	1.01
T-TN- AIC004-AV	50.1	50.0	1.00	50.0	1.00	47.9	0.96
T-TN- KGIN1F-AV	46.8	46.7	1.00	50.1	1.07	45.6	0.97
最大値	70.4	70.7	1.00	70.9	1.10	70.9	1.01
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-24 免震周期 3.5 秒 最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	75.1	75.1	1.00	74.9	1.00	73.6	0.98
T-TN- AIC003-AV	111.6	114.1	1.02	115.5	1.04	114.5	1.03
T-TN- AIC004-AV	67.5	67.4	1.00	67.3	1.00	67.8	1.00
T-TN- KGIN1F-AV	52.5	52.4	1.00	57.7	1.10	50.7	0.97
最大値	111.6	114.1	1.02	115.5	1.10	114.5	1.03
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-25 免震周期 4.0 秒 最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	66.7	66.4	1.00	66.0	0.99	63.7	0.96
T-TN- AIC003-AV	98.2	99.0	1.01	99.4	1.01	108.4	1.10
T-TN- AIC004-AV	61.4	61.2	1.00	61.0	0.99	60.7	0.99
T-TN- KGIN1F-AV	50.3	50.2	1.00	54.9	1.09	48.4	0.96
最大値	98.2	99.0	1.01	99.4	1.09	108.4	1.10
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-26 免震周期 4.5 秒 最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.25）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	60.5	60.2	0.99	59.8	0.99	57.4	0.95
T-TN- AIC003-AV	87.4	87.1	1.00	87.0	1.00	99.4	1.14
T-TN- AIC004-AV	56.9	56.6	1.00	56.2	0.99	54.4	0.96
T-TN- KGIN1F-AV	48.4	48.4	1.00	52.9	1.09	46.9	0.97
最大値	87.4	87.1	1.00	87.0	1.09	99.4	1.14
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-27 免震周期 3.5 秒 最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.5）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	87.0	86.6	1.00	85.9	0.99	83.0	0.95
T-TN- AIC003-AV	138.6	138.2	1.00	136.7	0.99	159.3	1.15
T-TN- AIC004-AV	79.4	81.0	1.02	83.2	1.05	87.8	1.10
T-TN- KGIN1F-AV	55.4	55.3	1.00	59.6	1.07	56.6	1.02
最大値	138.6	138.2	1.02	136.7	1.07	159.3	1.15
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC004-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-28 免震周期 4.0 秒 最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.5）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	75.2	74.6	0.99	73.7	0.98	79.3	1.05
T-TN- AIC003-AV	118.8	127.1	1.07	128.7	1.08	163.5	1.38
T-TN- AIC004-AV	71.5	72.9	1.02	74.3	1.04	74.9	1.05
T-TN- KGIN1F-AV	53.2	53.1	1.00	56.8	1.07	54.0	1.01
最大値	118.8	127.1	1.07	128.7	1.08	163.5	1.38
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV

表 2.3.4-29 免震周期 4.5 秒 最大応答加速度（長周期地震動入力倍率 1.5）

入力地震動	Type A (Gal)	Type B (Gal)	B/A	Type C (Gal)	C/A	Type D (Gal)	D/A
N-OSKH02 -AV	67.2	66.6	0.99	66.0	0.98	79.1	1.18
T-TN- AIC003-AV	105.9	115.3	1.09	118.3	1.12	124.2	1.17
T-TN- AIC004-AV	64.0	65.8	1.03	67.5	1.05	67.4	1.05
T-TN- KGIN1F-AV	51.3	51.2	1.00	54.4	1.06	51.6	1.01
最大値	105.9	115.3	1.09	118.3	1.12	124.2	1.18
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02-AV

4) 累積変形およびエネルギー吸収量

免震層の累積変形を表 2.3.4-30～38 に示す。ここで示す累積変形は、免震層の加振終了時における累積エネルギー吸収の 95%時点の値としている。4 波のうち最も大きな累積変形となる地震動は、入力倍率 1.0 の免震周期 4.0 秒にて T-TN-AIC004-AV であったが、ほかのすべての解析モデルにおいて T-TN-AIC003-AV であった。入力倍率が 1.0 の場合、Type A, B, C, D で最も大きな累積変形はそれぞれ 1634cm、1837cm、1547cm、1222cm であり、入力倍率が 1.25 では 1949cm、2058cm、1759cm、1716cm、入力倍率が 1.5 の場合で 2313cm、2329cm、2088cm、2392cm であった。

累積吸収エネルギーから求めた等価速度 V_E を図 2.3.4-12～13 に示す。T-TN-AIC003 が最も大きく、入力倍率 1.0 で 230cm/s、入力倍率 1.5 で 300～350cm/s となっている。モデルの違いによる V_E の差はほとんどのケースでわずかであるが、図 2.3.4-12 で示す N-OSKH02-AV において入力倍率が大きくなるとともに Type D のみ他のモデルの解析結果とやや異なる値となった。

表 2.3.4-30 免震周期 3.5 秒 累積変形（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	500	502	1.00	516	1.03	551	1.10
T-TN- AIC003-AV	1501	1792	1.19	1547	1.03	1222	0.81
T-TN- AIC004-AV	1477	1614	1.09	930	0.63	519	0.35
T-TN- KGIN1F-AV	357	483	1.35	403	1.13	428	1.20
最大値	1501	1792	1.35	1547	1.13	1222	1.20
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV

表 2.3.4-31 免震周期 4.0 秒 累積変形（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	503	506	1.01	505	1.00	563	1.12
T-TN- AIC003-AV	1577	1820	1.15	1525	0.97	1173	0.74
T-TN- AIC004-AV	1584	1640	1.04	872	0.55	511	0.32
T-TN- KGIN1F-AV	347	550	1.59	317	0.91	493	1.42
最大値	1584	1820	1.59	1525	1.00	1173	1.42
最大時の地震動	T-TN- AIC004-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV

表 2.3.4-32 免震周期 4.5 秒 累積変形（長周期地震動入力倍率 1.0）

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	499	506	1.01	485	0.97	554	1.11
T-TN- AIC003-AV	1603	1837	1.15	1520	0.95	1141	0.71
T-TN- AIC004-AV	1634	1649	1.01	829	0.51	523	0.32
T-TN- KGIN1F-AV	755	585	0.77	311	0.41	476	0.63
最大値	1634	1837	1.15	1520	0.97	1141	1.11
最大時の地震動	T-TN- AIC004-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV

表 2.3.4-33 免震周期 3.5 秒 累積変形 (長周期地震動入力倍率 1.25)

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	643	624	0.97	710	1.10	685	1.07
T-TN- AIC003-AV	1878	2058	1.10	1759	0.94	1716	0.91
T-TN- AIC004-AV	1603	1698	1.06	1059	0.66	649	0.40
T-TN- KGIN1F-AV	404	524	1.30	349	0.86	428	1.06
最大値	1878	2058	1.30	1759	1.10	1716	1.07
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02-AV

表 2.3.4-34 免震周期 4.0 秒 累積変形 (長周期地震動入力倍率 1.25)

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	616	671	1.09	697	1.13	683	1.11
T-TN- AIC003-AV	1916	2026	1.06	1707	0.89	1704	0.89
T-TN- AIC004-AV	1667	1732	1.04	968	0.58	631	0.38
T-TN- KGIN1F-AV	440	618	1.40	360	0.82	457	1.04
最大値	1916	2026	1.40	1707	1.13	1704	1.11
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02-AV

表 2.3.4-35 免震周期 4.5 秒 累積変形 (長周期地震動入力倍率 1.25)

入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	611	688	1.13	689	1.13	695	1.14
T-TN- AIC003-AV	1949	1984	1.02	1681	0.86	1608	0.83
T-TN- AIC004-AV	1701	1776	1.04	860	0.51	629	0.37
T-TN- KGIN1F-AV	607	421	0.69	366	0.60	415	0.68
最大値	1949	1984	1.13	1681	1.13	1608	1.14
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02-AV

表 2.3.4-36 免震周期 3.5 秒 累積変形 (長周期地震動入力倍率 1.5)

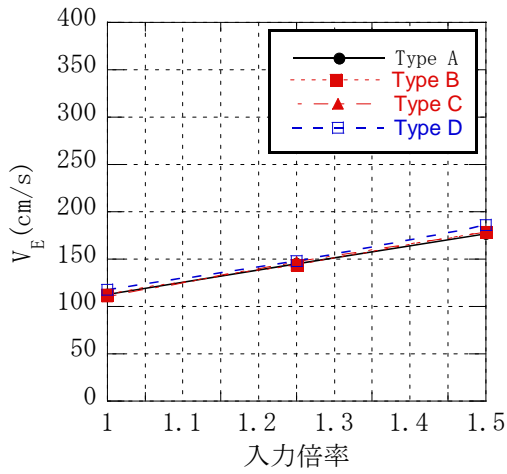
入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	827	836	1.01	837	1.01	887	1.07
T-TN- AIC003-AV	2291	2329	1.02	2088	0.91	2392	1.04
T-TN- AIC004-AV	1734	1812	1.04	1109	0.64	865	0.50
T-TN- KGIN1F-AV	454	510	1.12	415	0.91	503	1.11
最大値	2291	2329	1.12	2088	1.01	2392	1.11
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- KGIN1F-AV

表 2.3.4-37 免震周期 4.0 秒 累積変形 (長周期地震動入力倍率 1.5)

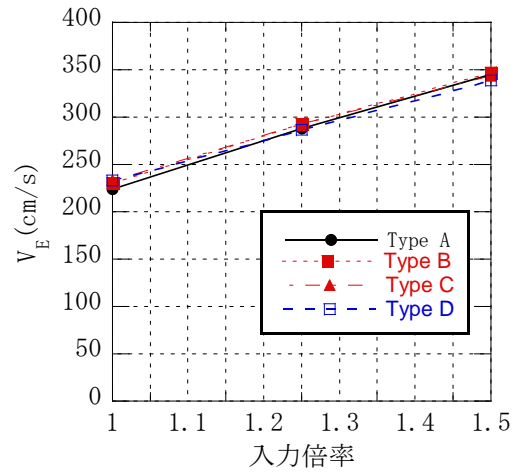
入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	820	825	1.01	830	1.01	911	1.11
T-TN- AIC003-AV	2313	2275	0.98	2026	0.88	2392	1.03
T-TN- AIC004-AV	1763	1810	1.03	950	0.54	833	0.47
T-TN- KGIN1F-AV	495	498	1.01	420	0.85	482	0.97
最大値	2313	2275	1.03	2026	1.01	2392	1.11
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC004-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02-AV

表 2.3.4-38 免震周期 4.5 秒 累積変形 (長周期地震動入力倍率 1.5)

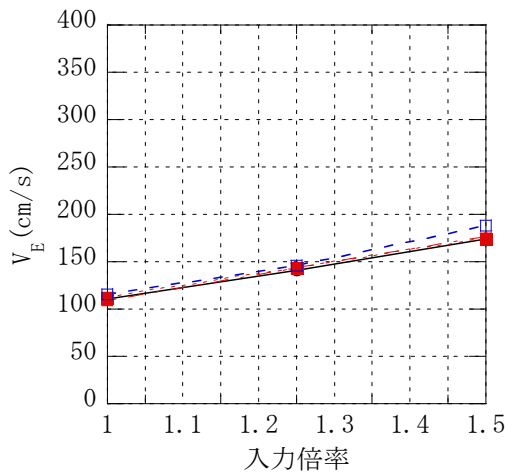
入力地震動	Type A (cm)	Type B (cm)	B/A	Type C (cm)	C/A	Type D (cm)	D/A
N-OSKH02 -AV	808	818	1.01	827	1.02	942	1.17
T-TN- AIC003-AV	2298	2236	0.97	1948	0.85	2224	0.97
T-TN- AIC004-AV	1772	1786	1.01	902	0.51	824	0.47
T-TN- KGIN1F-AV	527	432	0.82	424	0.80	483	0.92
最大値	2298	2236	1.01	1948	1.02	2224	1.17
最大時の地震動	T-TN- AIC003-AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02 -AV	T-TN- AIC003-AV	N-OSKH02-AV



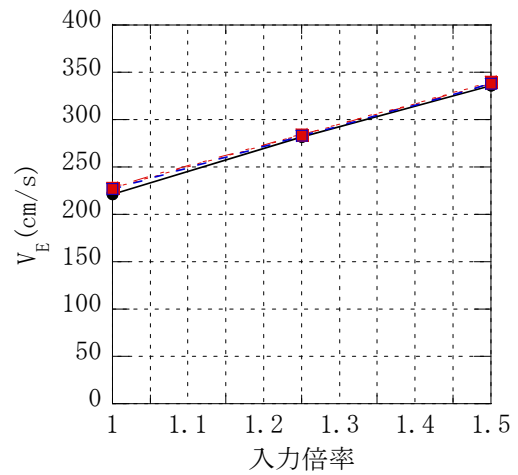
(a) 免震周期 3.5s



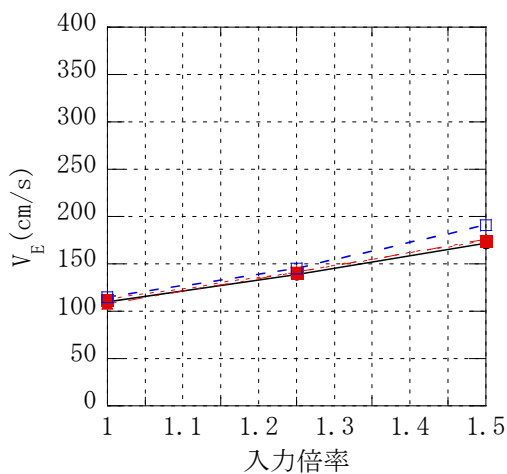
(b) 免震周期 3.5s



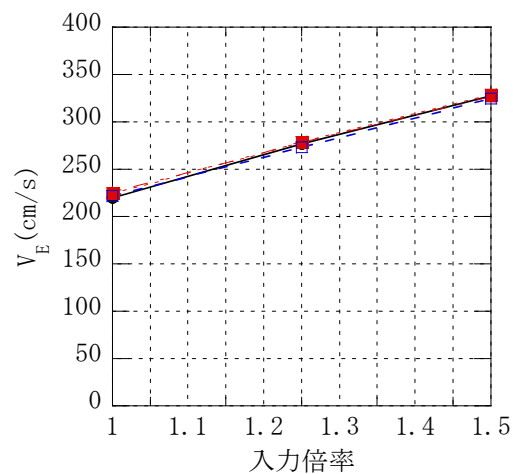
(c) 免震周期 4.0s



(d) 免震周期 4.0s

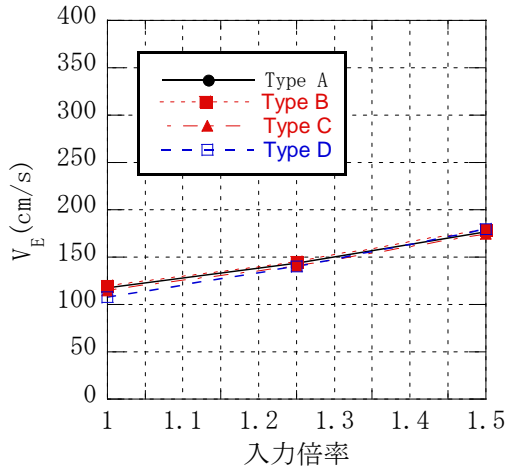


(e) 免震周期 4.5s

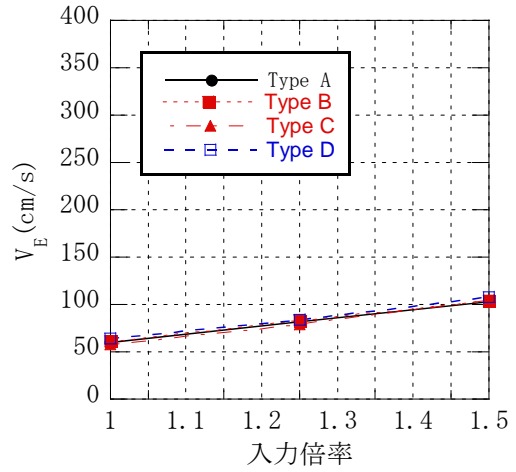


(f) 免震周期 4.5s

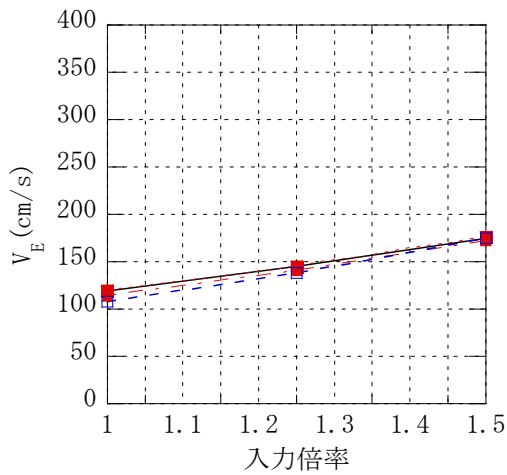
図 2.3.4-12 累積吸収エネルギーによる等価速度
(入力地震波 左 : N-OSKH02-AV、右 : T-TN-AIC003-AV)



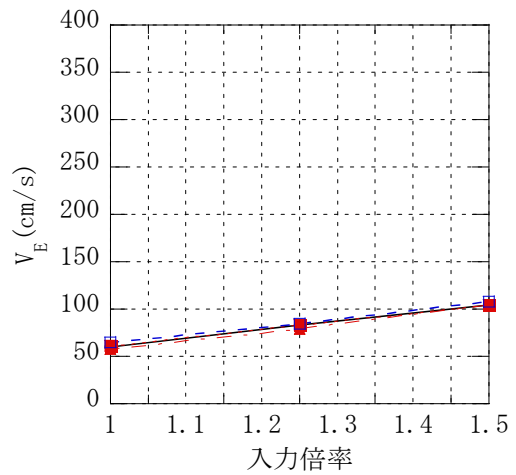
(a) 免震周期 3.5s



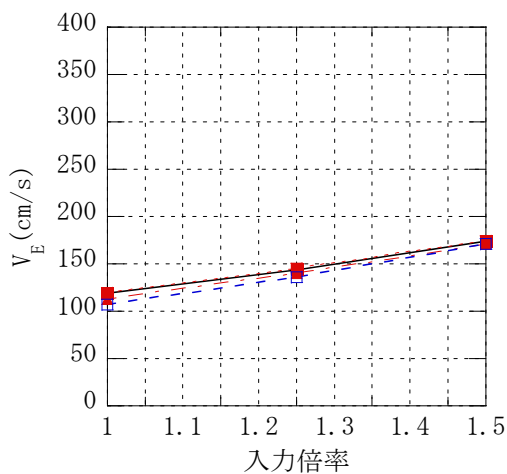
(b) 免震周期 3.5s



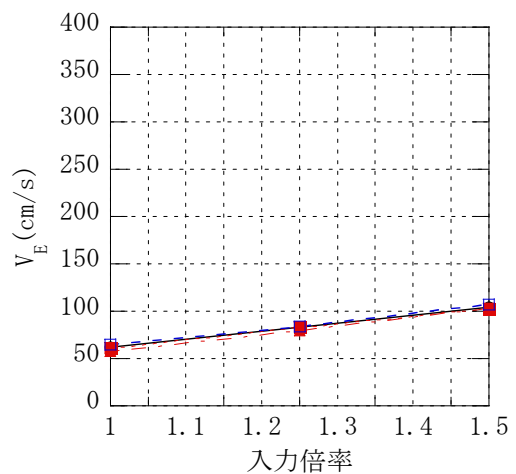
(c) 免震周期 4.0s



(d) 免震周期 4.0s



(e) 免震周期 4.5s



(f) 免震周期 4.5s

図 2.3.4-13 累積吸収エネルギーによる等価速度
(入力地震波 左：T-TN-AIC004-AV、右：T-TN-KGIN1F-AV)

5) 加振による温度上昇

鉛ダンパーの復元力特性 Type B では、エネルギー吸収量に応じ鉛の温度を求めている。復元力特性 Type B を用いた解析ケースにおける地震応答前後の鉛の温度上昇値を図 2.3.4-14 に示す。計算仮定として、ダンパーのエネルギー吸収量がすべて鉛地震の内部エネルギー上昇に消費されるものとする。また、断熱状態と仮定し、鉛各部は均等に温度上昇がなされるものとする。

4 波の入力地震動のなかで、T-TN-AIC003-AV が最も温度上昇量が高く、前項 4) で示した等価速度 V_E の解析結果と対応する。この場合、入力倍率 1.0 で 16°C 程度、入力倍率 1.25 で 25°C 程度、入力倍率 1.5 で 35°C 程度の温度上昇であった。

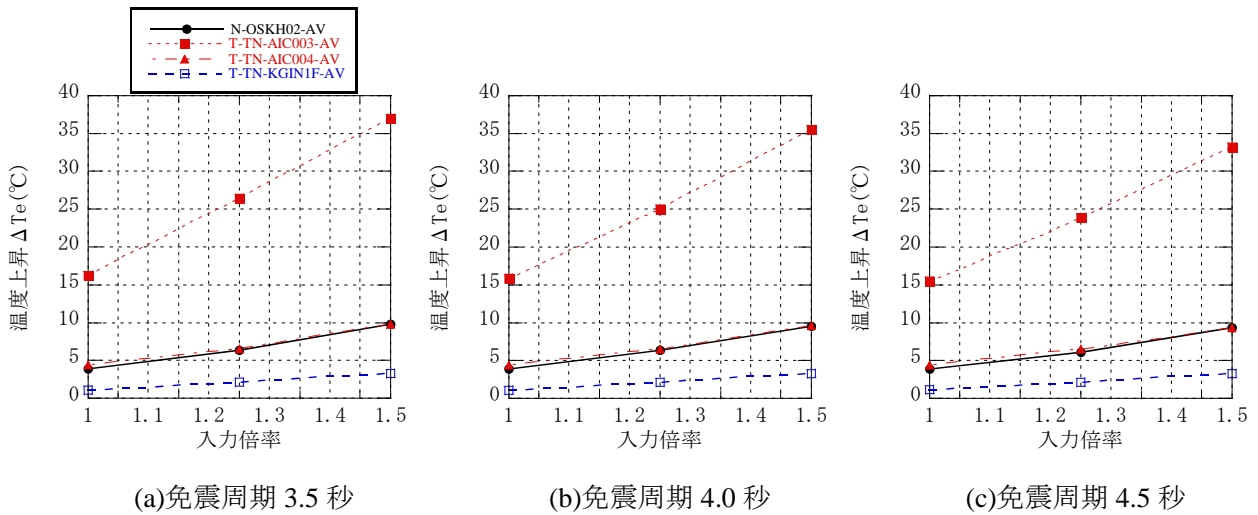


図 2.3.4-14 地震応答終了時の温度上昇 (Type B の復元力特性を用いた場合)

2.3.4.3 まとめ

温度依存性および過去に実施された一定振幅正弦波加振試験結果に基づき、鉛ダンパーの繰返しによる耐力劣化を考慮した解析モデルを用い、鉛ダンパーと天然ゴム系積層ゴムからなる免震層をもつ1質点系に長周期地震動を入力波とした応答解析を実施した。本解析結果より以下のことが確認された。

(1)最大変形

ほとんどの建物モデルにおいて、入力地震動4波のうち最も大きな変形となる入力波は、T-TN-AIC003-AV の場合である。耐力結果を考慮しない Type A の復元力特性の場合、T-TN-AIC003-AV の最大変形は入力倍率 1.0 時に 16.1cm、1.25 倍時に 24.6cm、1.5 倍時に 33.5cm であった。復元力特性の繰返し劣化による最大変形の増大は、劣化非考慮の場合に対して Type B（温度依存性考慮）で 1.0～1.18 倍、Type C（±400mm の正弦波繰返し劣化特性考慮）では 0.80～1.24 倍、Type D（±150mm の正弦波繰返し劣化特性考慮）は 0.98～1.71 倍となっており、Type B < Type C < Type D の順で最大変位に与える影響が大きくなった。入力の増大とともに劣化非考慮時に対する変形の増大比率は大きくなる傾向を示した。

(2)最大層せん断力

入力倍率が 1.0 の場合、Type A、B、C、D の応答せん断力係数はそれぞれ 0.086、0.088、0.089、0.095 であり、入力倍率が 1.5 の場合で 0.141、0.141、0.139、0.167 であった。入力が 1.0 倍および 1.25 倍の場合は、Type A、B、C、D のいずれの場合においても免震周期 3.5 秒が最も大きなせん断力を示した。入力が 1.5 倍に大きくなると、Type D では免震周期 4.0 秒の場合にせん断力が最も大きくなった。

(3)累積変形

最も大きな累積変形となる地震動は、4波のうち最も大きな累積変形となる地震動は、ほとんどの解析モデルにおいて T-TN-AIC003-AV であった。入力倍率が 1.0 の場合、Type A、B、C、D で最も大きな累積変形はそれぞれ 1634cm、1837cm、1547cm、1222cm であり、入力倍率が 1.25 では 1949cm、2058cm、1759cm、1716cm、入力倍率が 1.5 の場合で 2313cm、2329cm、2088cm、2392cm であった。

(4)エネルギー吸収量

累積吸収エネルギーから求めた等価速度は T-TN-AIC003 が最も大きく、入力倍率 1.0 で 230cm/s、入力倍率 1.5 で 300～350cm/s であった。モデルの違いによる等価速度の差はほとんどのケースでわずかであった。

今後は、平成 22 年度に実施した部材実験の結果と上記モデルの整合性を検証し、必要であれば解析モデルの見直しを検討する。また、地震応答解析では、免震部材特性のばらつきを考慮した場合における応答特性を把握する必要があると考えられる。

参考文献

2.3.4-1) 日本免震構造協会，第4回技術報告会概要集，p.40，2006年11月

2.3.5 天然ゴム系積層ゴム+オイルダンパー

(1) 各種依存性に関する既往の研究

オイルダンパーは、繰り返し回数や温度上昇によって、性能がほとんど変化しないことが知られている。しかし、吸収エネルギーが大きいと、オイルダンパーの表面温度が上昇し、シールから作動油が漏れるという知見がある。設計限界温度は、シールの材質特性に余裕を見て、表面温度 80°C（メーカーの一例）としているが、100°C程度まで油漏れ等の問題が生じないことが実験により確認されている。^{2.3.5-1)}

継続時間の長い長周期地震動は入力エネルギーが大きいため、時刻歴応答で入力エネルギーを算出し、温度上昇予測式を用いて、表面温度が許容値以下に入ることを確認する必要がある。温度上昇の予測において、対象とするオイルダンパーの温度は表面温度とし、その温度分布は常に一様とする。温度上昇の一般式^{2.3.5-2)}に用いる代表的な記号を次のように定める。

t	： 温度	[°C]
t_a	： 周囲温度	[°C]
V	： 体積	[m ³]
F	： 表面積	[m ²]
ρ	： 密度	[kg/m ³]
C_p	： 比熱	[kJ / (kg · °C)]
C	： 熱容量 = $V\rho C_p$	[kJ / °C]
U	： 熱伝達係数	[kJ / (m ² · h · °C)]
Q	： 発熱量	[kJ / h]
τ	： 経過時間	[h]

微小時間 $d\tau$ に対象物の温度が dt だけ上がったとすると、この時間内の発熱量 $Q \cdot d\tau$ から放熱量 $U(t - t_a) \cdot F \cdot d\tau$ を差引いた残りが、 dt なる温度上昇に預かった発熱量と考えられることから、次式が成り立つ。

$$Cdt = Qd\tau - U(t - t_a)Fd\tau \quad (2.3.5-1)$$

オイルダンパーの減衰力を F_d [kN]、入力速度を \dot{x} [m/s] とすると、微小時間 $d\tau$ に生じる減衰エネルギー E_d [kN · m] (= [kJ]) は

$$E_d = F_d \dot{x} \cdot d\tau \quad (2.3.5-2)$$

となる。減衰エネルギー E_d がすべて熱エネルギーに変換されるものとする、発熱量 Q との関係は次式となる。

$$E_d = Q \cdot d\tau \quad (2.3.5-3)$$

すなわちオイルダンパーの温度 t は、式(2.3.5-2),(2.3.5-3)を用いて式(2.3.5-1)の微分方程式を逐次数値積分することで温度上昇の時刻歴が得られる。

ここで熱容量 C は $C = V\rho C_P$ として与えられ、体積 V を鉄鋼部品と作動油に分類し、鉄鋼部品の体積を V_s 、オイル体積を V_o とする。密度 ρ 、比熱比 C_P も上述と同様にして鉄鋼部品の密度を ρ_s 、比熱比を C_s とし、またオイル密度を ρ_o 、比熱比を C_o とする。したがって、熱容量 C は式(2.3.5-4)となる。

$$C = V_s \rho_s C_s + V_o \rho_o C_o \quad (2.3.5-4)$$

熱伝達係数は、オイルダンパーの温度上昇程度であればほとんど変化しないため、一定の値として計算できる。また、地震動による単位時間当たりの入力エネルギーに比べて、放熱エネルギーは小さいので、安全側に考え、放熱を無視した簡略式は、式(2.3.5-5)となる。

$$T_m = \frac{Q_m}{V_s \rho_s C_s + V_o \rho_o C_o} + t_a \quad (2.3.5-5)$$

(2) 解析条件

1 質点モデルを用いた応答解析を行い、長周期地震動によるオイルダンパーの温度上昇を検討する。免震層は天然ゴム系積層ゴムとオイルダンパーで構成される。天然ゴム系積層ゴムは弾性バネで、オイルダンパーはリリーフ特性を考慮した粘性要素でモデル化した。解析モデルを図 2.3.5-1 に、天然ゴム系積層ゴムの諸元を表 2.3.5-1 に、オイルダンパーの諸元を表 2.3.5-2 示す。

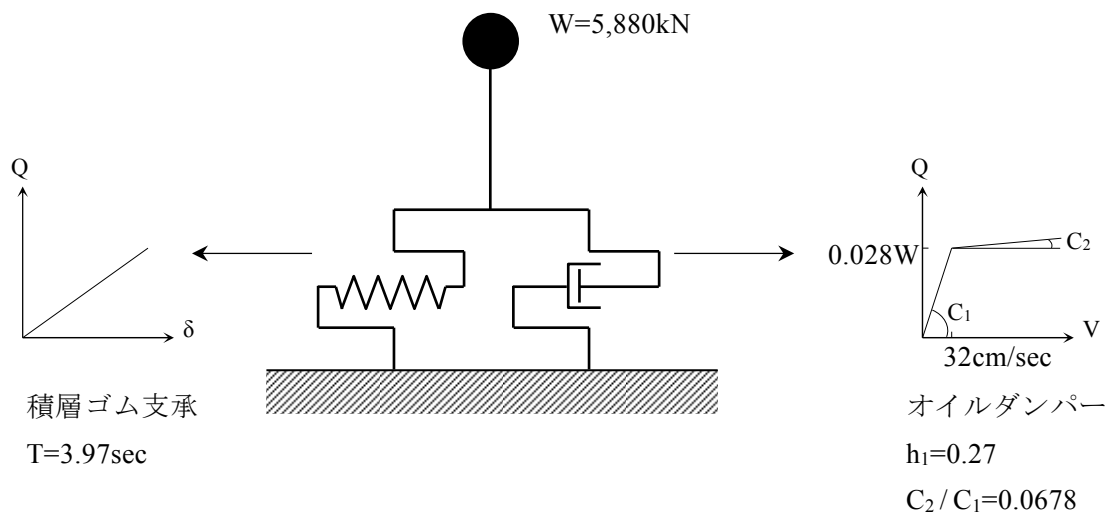


図 2.3.5-1 解析モデル

表 2.3.5-1 天然ゴム系積層ゴムの諸元

径	台数	せん断弾性率 G(N/mm ²)	ゴム総厚(mm) (層×層数)	断面積 (cm ²)	形状係数		水平剛性 (kN/cm)
					一次 S ₁	二次 S ₂	
Φ700	12	0.44	137.8 (5.3×26)	3,839	31.4	5.1	12.3

表 2.3.5-2 オイルダンパーの諸元

型式	台数	最大減衰 力(kN)	減衰係数(kN/kine)		リリース 荷重(kN)	リリース 速度(kine)
			C1	C2		
BDS1201600-B-1	2	1,000	25	1.695	800	32

オイルダンパーは繰り返しによる依存性がないものとしてモデル化し、応答解析結果から温度上昇を推定する。温度上昇の計算に用いた入力パラメータを表 2.3-5-3 に示す。

表 2.3.5-3 オイルダンパーの温度上昇計算入力パラメータ

オイルダンパー型式		BDS1201600-B-1		
鉄鋼部品	体積	V_s	0.0932	[m ³]
	密度	ρ_s	7,850	[kg/m ³]
	比熱	C_s	0.465	[kJ/kg・°C]
	表面積	F	2,890	[m ²]
作動油	体積	V_o	0.173	[m ³]
	密度	ρ_o	892	[kg/m ³]
	比熱	C_o	1.821	[kJ/kg・°C]
温度	初期温度	t_i	20	[°C]
	周囲温度	t_a	20	[°C]
熱伝達係数		U	17.0	[kJ/(h・m ² ・°C)]

- ・鉄鋼部品質量は接油部分の質量とした。
- ・作動油量はカタログ値を用いた。
- ・熱伝達係数は、17.0kJ/(h・m²・°C)とした。(=無風)
- ・実用油圧ポケットブック^{2.3.5-3)}によると、風速 0m/s で熱伝達係数は 17~30kJ/(h・m²・°C)

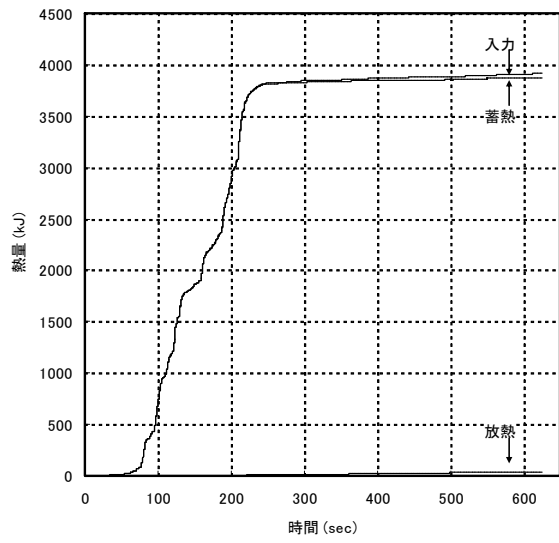
(3) 解析結果

各入力地震動における応答値を表 2.3.5-4 に示す。また、オイルダンパーの放熱を考慮した場合の 1 台当たりの入出力エネルギーの時刻歴を図 2.3.5-2～図 2.3.5-5 に、オイルダンパーの温度上昇の時刻歴を図 2.3.5-6～図 2.3.5-9 に示す。

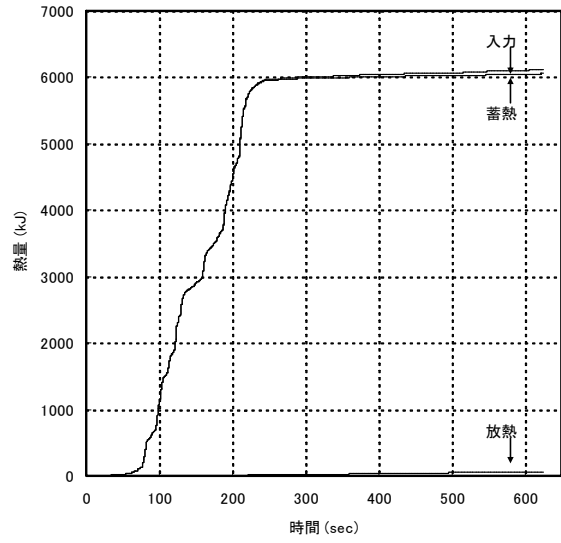
表 2.3.5-4 解析結果

入力地震動	入力倍率	最大応答加速度 (gal)	免震層応答値				オイルダンパー最大温度 (初期温度 20℃)	
			最大応答変形 (cm)	最大応答せん断力係数	累積変形 (m)	吸収エネルギー V_E (cm/sec)	放熱考慮 (℃)	放熱無視 (℃)
N-OSKH02-AV	1.00	61.1	22.4	0.062	16.9	163.1	26.2	26.3
	1.25	76.4	28.1	0.078	21.2	203.9	29.7	29.8
	1.50	95.3	34.9	0.097	25.5	244.6	34.0	34.2
T-TN-AIC003-AV	1.00	70.0	23.3	0.071	20.9	206.4	30.0	30.1
	1.25	98.2	32.7	0.100	26.6	257.9	35.6	35.8
	1.50	138.3	47.4	0.141	33.1	310.4	42.6	42.8
T-TN-AIC004-AV	1.00	50.2	17.2	0.051	11.8	126.7	23.8	23.8
	1.25	62.8	21.5	0.064	14.7	158.3	25.9	25.9
	1.50	78.5	26.9	0.080	17.8	190.0	28.5	28.6
T-TN-KGIN1F-AV	1.00	35.6	13.3	0.036	13.6	112.3	23.0	23.0
	1.25	44.5	16.6	0.045	17.0	140.4	24.6	24.7
	1.50	53.4	20.0	0.054	20.3	168.4	26.7	26.7

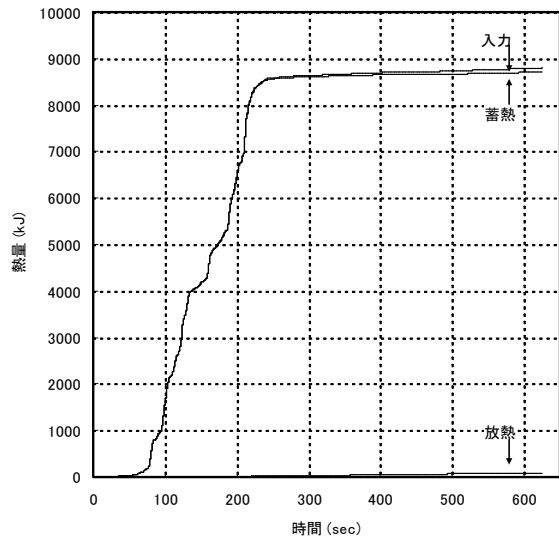
- ・最大応答せん断力係数は、天然ゴム系積層ゴムが負担するせん断力と、オイルダンパーが負担するせん断力の和から求めた。



入力倍率 1.00 倍

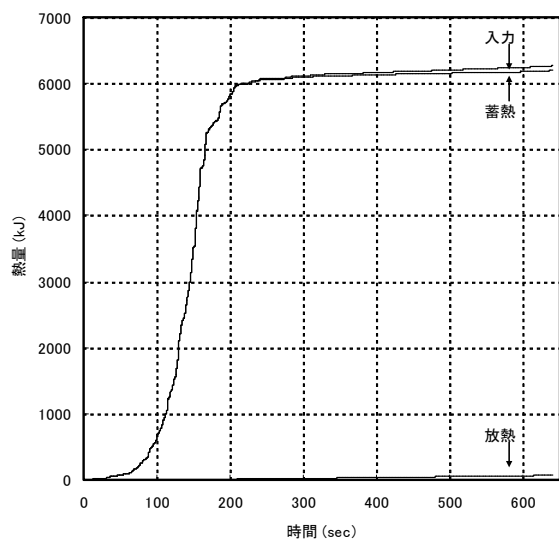


入力倍率 1.25 倍

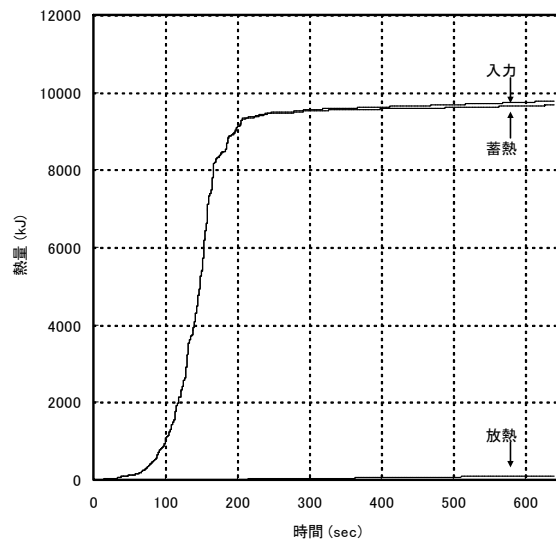


入力倍率 1.50 倍

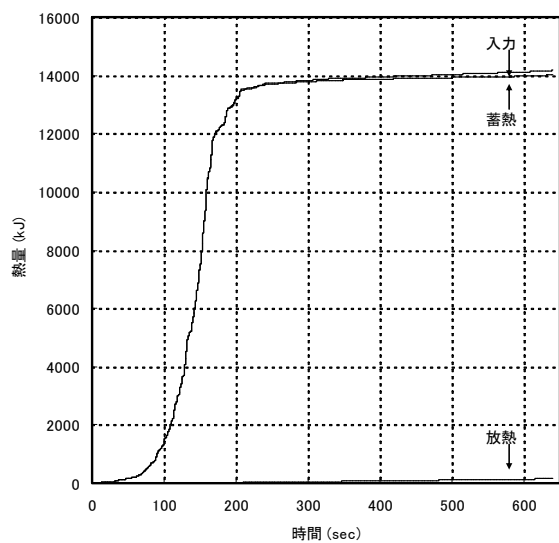
図 2.3.5-2 オイルダンパー 1 台当たりの入出力エネルギーの時刻歴
(N-OSKH02-AV 放熱考慮)



入力倍率 1.00 倍

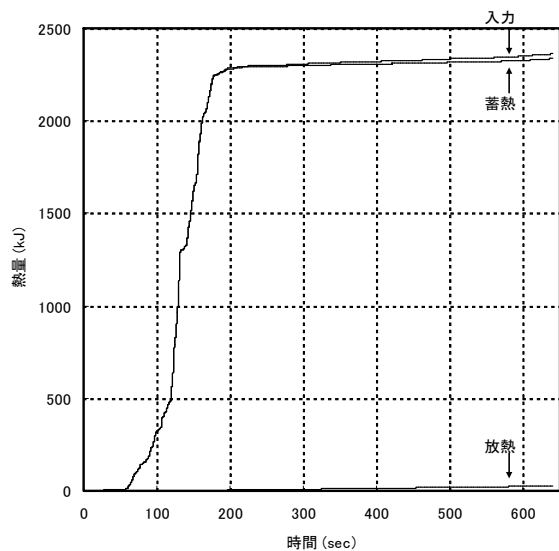


入力倍率 1.25 倍

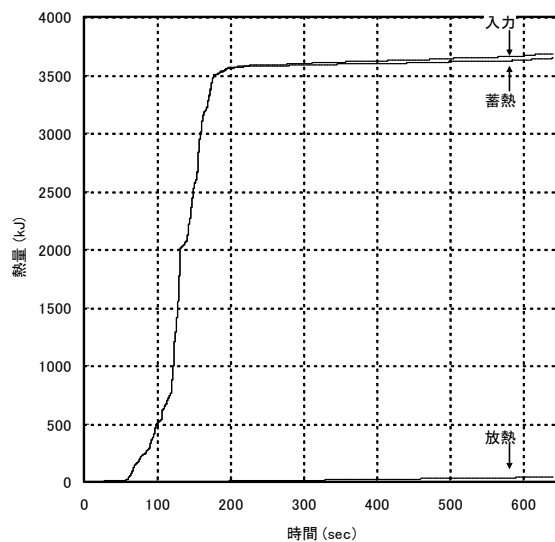


入力倍率 1.50 倍

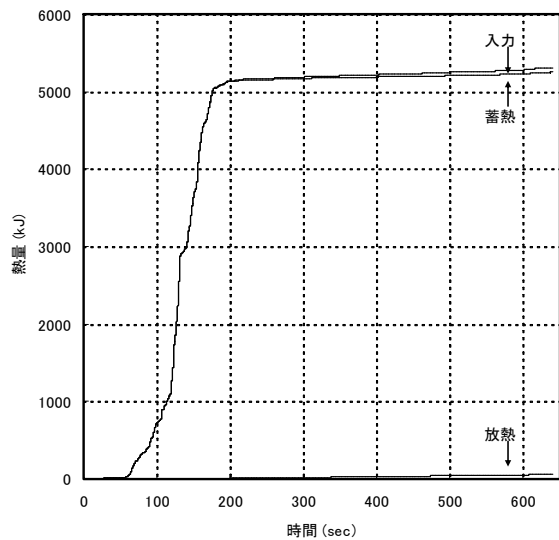
図 2.3.5-3 オイルダンパー 1 台当たりの入出力エネルギーの時刻歴
(T-TN-AIC003-AV 放熱考慮)



入力倍率 1.00 倍

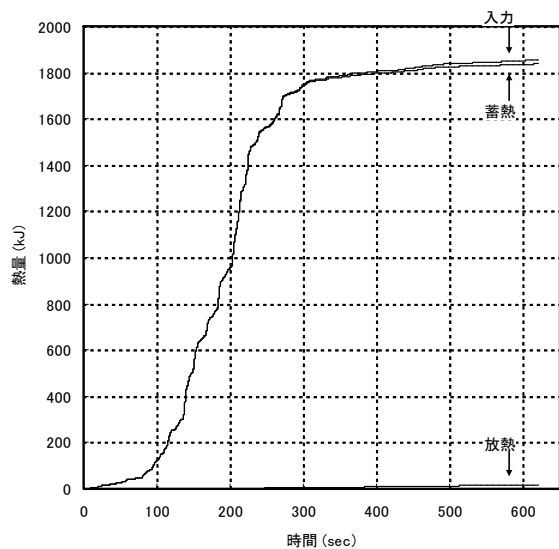


入力倍率 1.25 倍

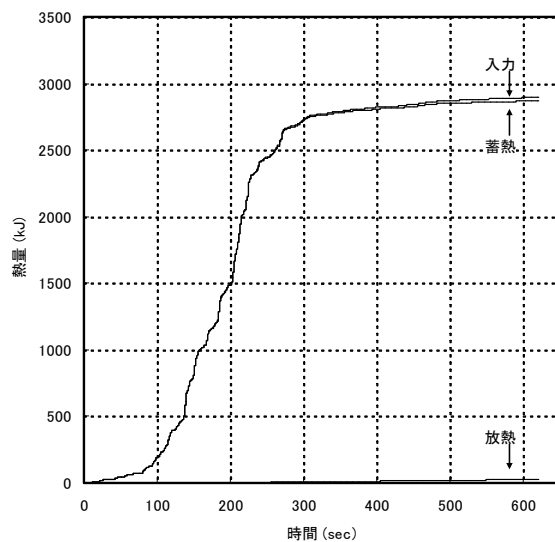


入力倍率 1.50 倍

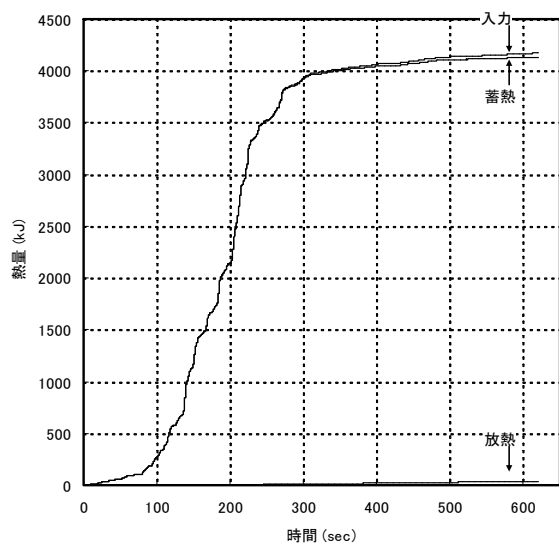
図 2.3.5-4 オイルダンパー 1 台当たりの入出力エネルギーの時刻歴
(T-TN-AIC004-AV 放熱考慮)



入力倍率 1.00 倍

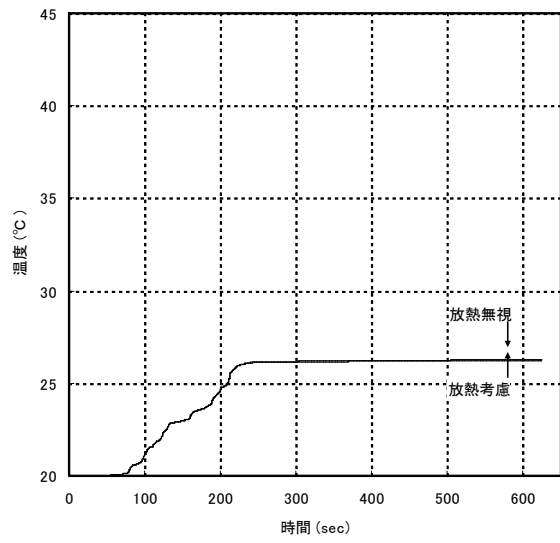


入力倍率 1.25 倍

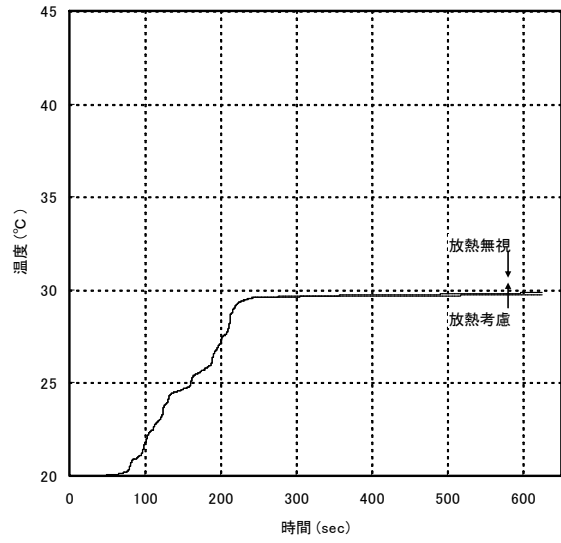


入力倍率 1.50 倍

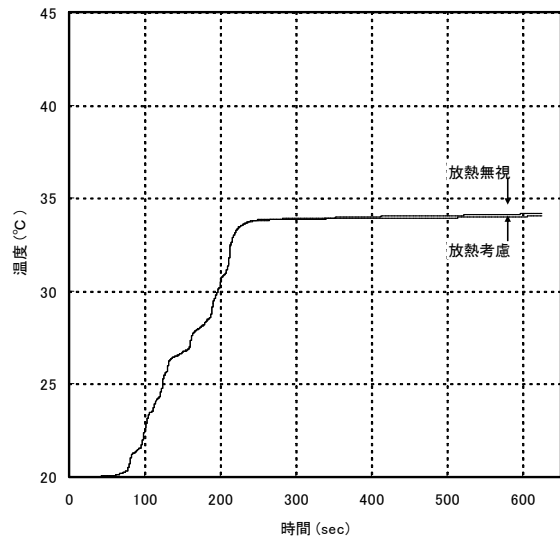
図 2.3.5-5 オイルダンパー 1 台当たりの入出力エネルギーの時刻歴
(T-TN-KGIN1F-AV 放熱考慮)



入力倍率 1.00 倍

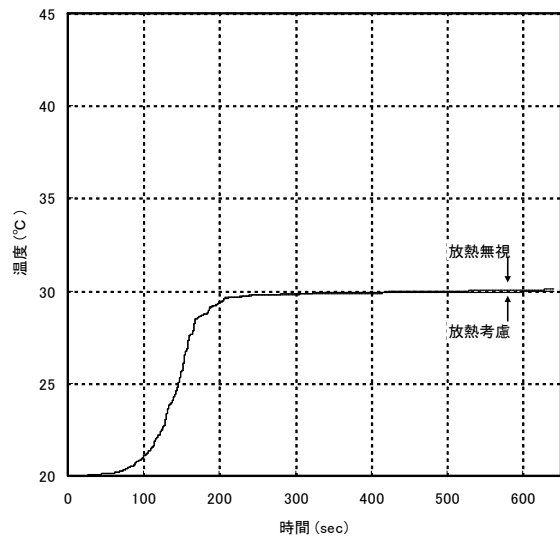


入力倍率 1.25 倍

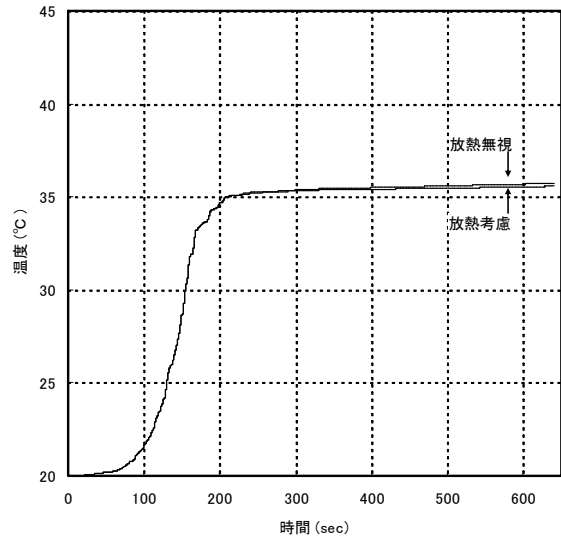


入力倍率 1.50 倍

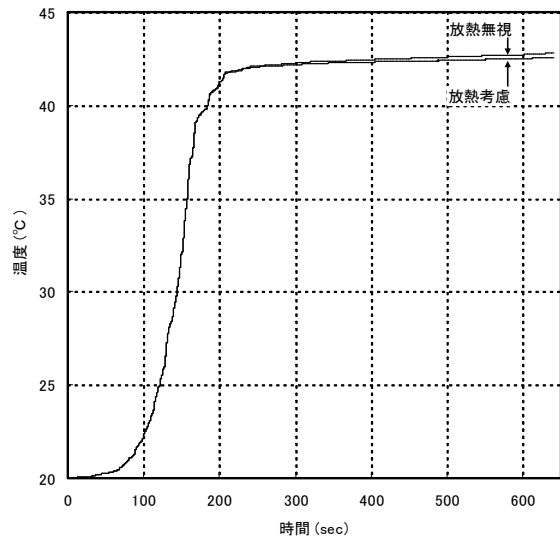
図 2.3.5-6 オイルダンパーの温度上昇の時刻歴 (N-OSKH02-AV)



入力倍率 1.00 倍

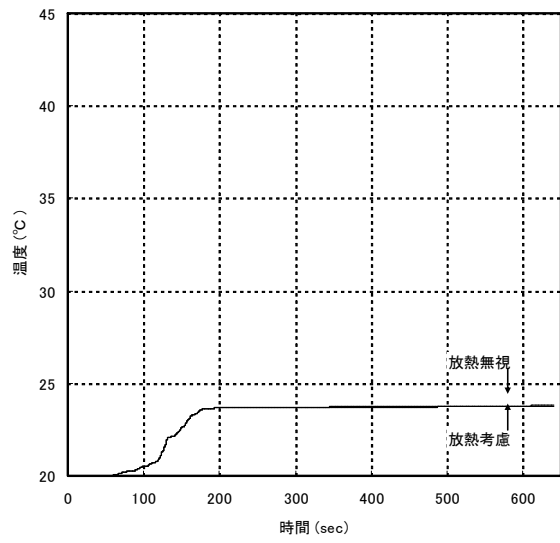


入力倍率 1.25 倍

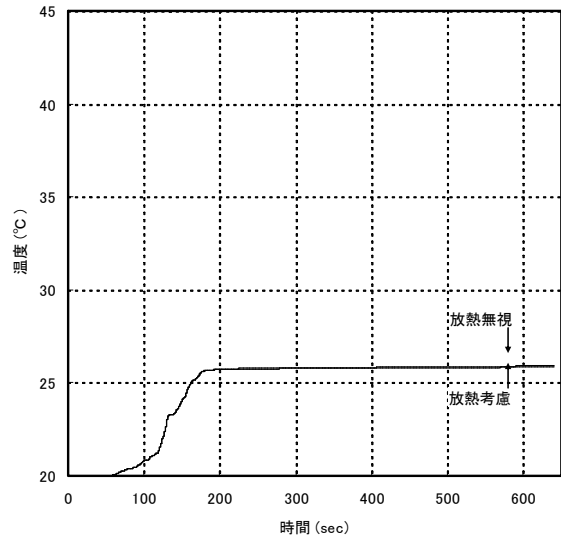


入力倍率 1.50 倍

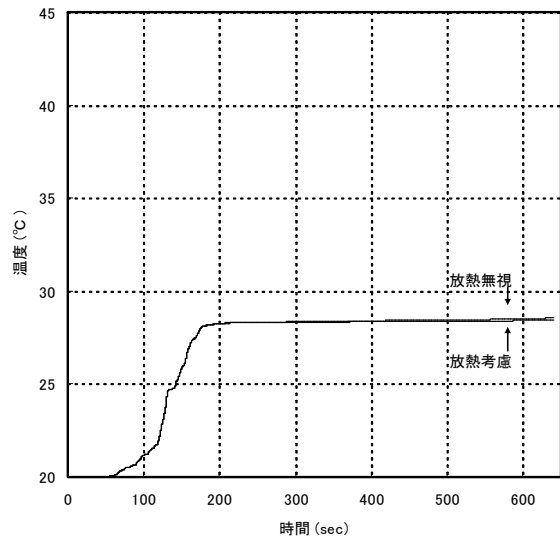
図 2.3.5-7 オイルダンパーの温度上昇の時刻歴 (T-TN-AIC003-AV)



入力倍率 1.00 倍

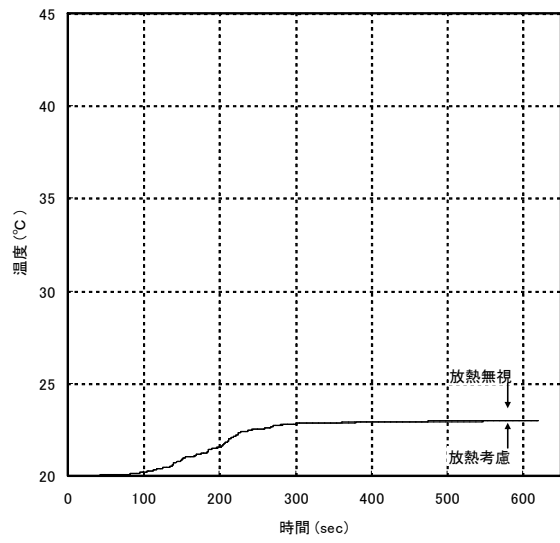


入力倍率 1.25 倍

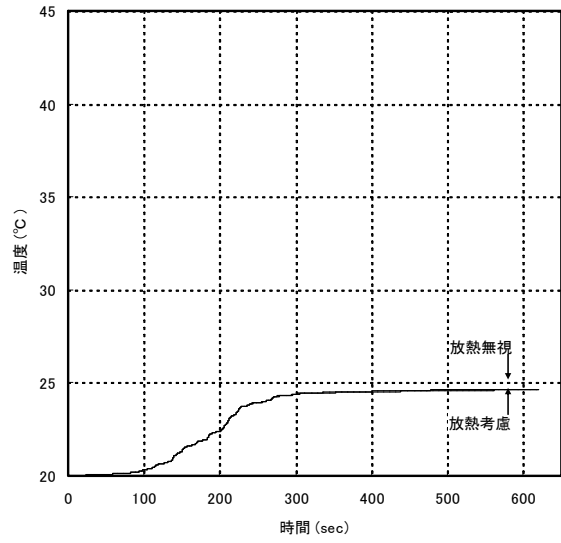


入力倍率 1.50 倍

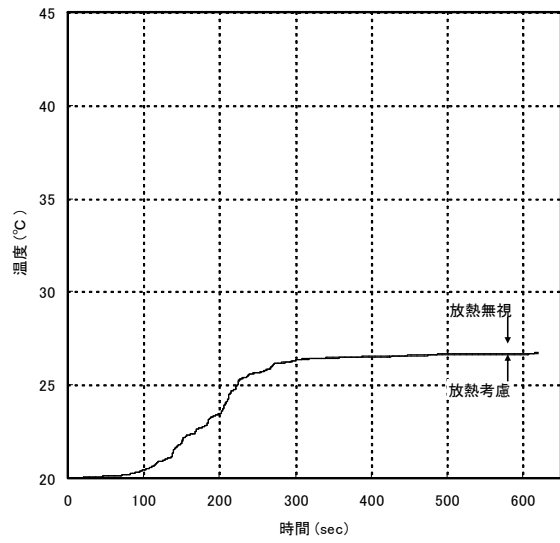
図 2.3.5-8 オイルダンパーの温度上昇の時刻歴 (T-TN-AIC004-AV)



入力倍率 1.00 倍



入力倍率 1.25 倍



入力倍率 1.50 倍

図 2.3.5-9 オイルダンパーの温度上昇の時刻歴 (T-TN-KGIN1F-AV)

(4) まとめ

免震層が天然ゴム系積層ゴムとオイルダンパーで構成された建物を1質点系でモデル化し、地震動応答解析を行った。オイルダンパーの表面温度が最も高くなったのは、入力地震動がT-TN-AIC003-AVで入力倍率が1.50倍のケースで、外気温度が20℃の場合、放熱を考慮した検討では42.6℃、放熱を無視した検討では42.8℃となった。設計限界温度は80℃であるので、検討した条件では温度上昇が問題になることは無いと思われる。

また、温度上昇の計算では、放熱を無視した値は、放熱を考慮した値と大きく違わなかった。入力地震動がT-TN-AIC003-AVで入力倍率が1.50倍のケースでは、放熱エネルギーは入力エネルギーの約1%であった。長周期地震動によるオイルダンパーの温度上昇の検討に関しては、放熱を考慮しない簡易式で評価した値は、放熱を考慮した値と大きく変わらず、値も安全側であるため、使用して問題ないと考えられる。

参考文献

- 2.3.5-1) 社団法人日本免震構造協会編：免震構造－「部材の基本から設計・施工まで」、オーム社、pp.164-165
- 2.3.5-2) 千輝淳二：伝熱計算法、工学図書、pp.214-215
- 2.3.5-3) 社団法人日本フルードパワー工業会編：実用油圧ポケットブック（2008年版）、p.354

2.3.6 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（高摩擦）

(1) 各種依存性に関する既往の研究

弾性すべり支承（高摩擦）に関する各種依存性に関する既往の研究としては、日比野らによる研究^{2.3.6-1)}^{2.3.6-2)}が知られている。以下にその概要を示す。

日比野らは大口径の弾性すべり支承試験体についてその力学的特性の把握および地震時安全性を確認するための地震応答解析に用いる力学モデルの構築を目的として、高面圧下における動的載荷実験を実施した^{2.3.6-14)}~^{2.3.6-16)}。

試験体は弾性すべり支承およびすべり板（図 2.3.6-1）とで構成される。表 2.3.6-1 に試験体の仕様一覧を示す。

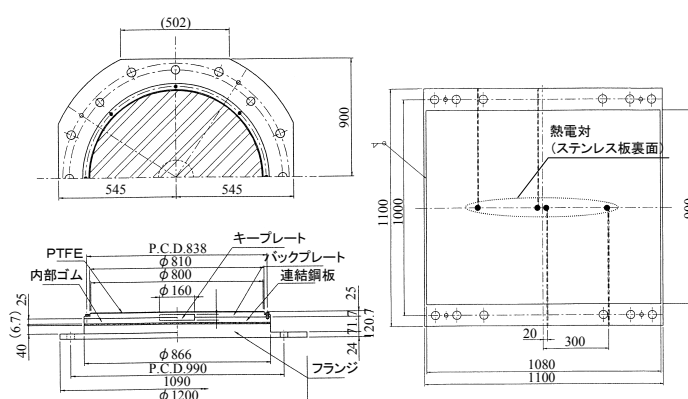


図 2.3.6-1 支承試験体の外観例（B-800）

表 2.3.6-1 試験体の仕様

支承タイプ		T-600	T-800	B-600	B-800
積層 ゴム	ゴム部材質	クロロプレンゴム		天然ゴム	
	直径 (mm)	600	800	600	800
	せん断弾性係数 (N/cm ²)	78.5		117.6	
	ゴム厚 (mm)	5.0	6.7	5.0	6.7
	1次形状係数	30.0	29.9	30.0	29.9
	2次形状係数	120.0	119.4	120.0	119.4
	支承せん断剛性 (kN/mm)	44.4	58.9	66.5	88.2
連結 鋼板	材質	SS400		SS400	
	厚さ (mm)	40.0		20+20	25+25
すべ り材	材質	充填材入り PTFE		充填材入り PTFE	
	直径 (mm)	600	800	600	800
	厚さ (mm)	2		2	
試験体数		3	1	3	1

載荷は変位制御とし、基本摩擦特性および地震時の応答履歴特性を把握するため、定常波およびランダム波による載荷を行った。正弦波繰り返し載荷では標準面圧 $\sigma=20\text{N/mm}^2$ 、標準速度 $v=20\text{cm/s}$ 、標準すべり変位振幅 $d(0-p)$ を 100mm とし、載荷装置の性能範囲内で面圧 $5\sim 40\text{N/mm}^2$ 、載荷速度 $0.1\sim 60\text{cm/s}$ 、すべり変位振幅 $30\sim 100\text{mm}$ の間で複数の試験条件を設定した。

ランダム波載荷では、弾性すべり支承と積層ゴムを併用した免震建築物のモデルに対し、観測地震動波形（Kobe(1995) NS、El Centro(1940) NS、Hachinohe (1968) EW）を入力波とする地震応答解析により求められた免震層の変位応答波を用いた。

動摩擦係数の評価では、正弦波載荷における変位原点付近の荷重を読み取ることにより、三角波等の速度一定載荷と同等の結果を得ることができるものと考えた。具体的には国土交通省告示（第 2010 号）に準拠し、次式により定義し、 n サイクル目の動摩擦係数 $\bar{\mu}_n$ を載荷サイクル毎に往復の平均値で表示した。

$$\bar{\mu}_n = (Q_n^+ / P_n^+ - Q_n^- / P_n^-) / 2 \quad (2.3.6-1)$$

ここに、 Q_n^+ 、 Q_n^- は n サイクルめの水平力-水平変位関係における正負の切片荷重、 P_n^+ 、 P_n^- は同履歴点の鉛直力である。

○正弦波載荷による摩擦係数の各種依存性

・水平力-水平変位関係

図 2.3.6-2 の A、B 点などに見られるように、一連の試験ではすべり始め部分で摩擦が極大となる点を確認された。弾性すべり支承ではすべり始めで速度を持つため、厳密にはこの摩擦は静摩擦と異なるが、載荷開始直後の初期サイクルほど、また載荷速度が増すほど大きな値を示すなど、繰り返しおよび速度などの動的パラメータに対する依存性が確認された。そこで、以下ではすべり始め部分の摩擦係数を立ち上がり摩擦係数 $\hat{\mu}_m$ (添字は載荷開始から m 番目を表し、図においては A, B, C... で表示する) と呼び、その各依存性を $\bar{\mu}_n$ と併せて考察することにする。 $\hat{\mu}_m$ はすべり初期ほど特徴的な性質を示すこと、 $\bar{\mu}_n$ については前述の国土交通省告示では摩擦係数の基準値を繰り返し 3 サイクルめで規定していることから、以下の検討では $\hat{\mu}_m$ および $\bar{\mu}_n$ の代表値として $\hat{\mu}_{1.5}$ ($\hat{\mu}_1$ 、 $\hat{\mu}_2$ の平均値で定義する) および $\bar{\mu}_3$ を用いる。また、 $\hat{\mu}_m$ と $\bar{\mu}_n$ を総称して摩擦係数 μ と表現する。

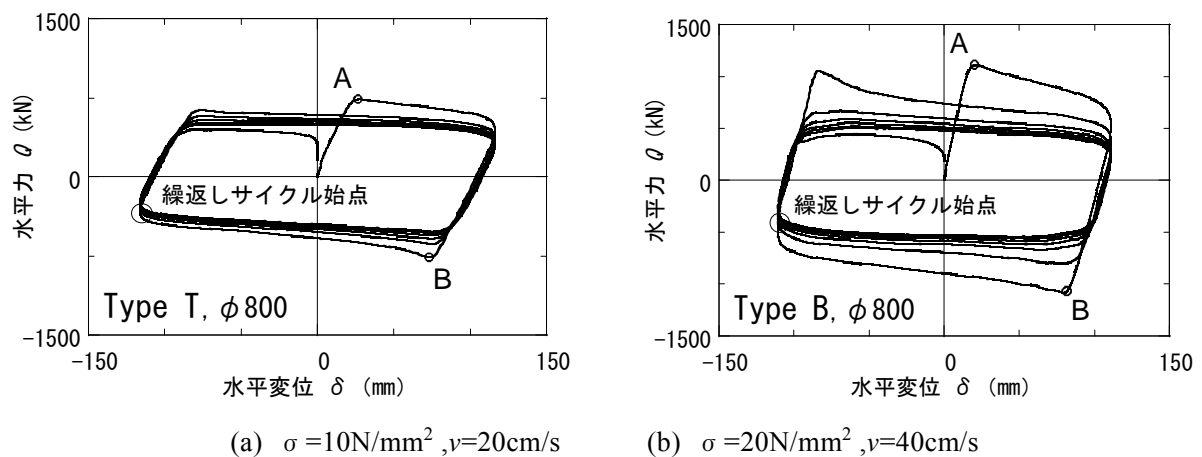


図 2.3.6-2 正弦波載荷による水平力-水平変位関係の一例

1) 摩擦係数の面圧依存性

図 2.3.6-3 に標準速度 ($v = 20 \text{ cm/s}$) における面圧 σ による $\hat{\mu}_{1.5}$ および $\bar{\mu}_3$ の変化を示す。全タイプとも同一面圧では $\hat{\mu}_{1.5} > \bar{\mu}_3$ となっており、 $\hat{\mu}_{1.5}$ 、 $\bar{\mu}_3$ ともに面圧の上昇に伴い値が減少する共通の傾向がみられる。

図 2.3.6-3 には $\hat{\mu}_{1.5}$ および $\bar{\mu}_3$ 各々の回帰結果を併せて示す。最初の回帰関数としては、トライボロジー理論に基づく荷重依存型モデル^{2.3.6-13)}に準じて次式を用いた。

$$\mu = a\sigma^{(-1/3)} \quad (5 \leq \sigma \leq 42 \text{ [N/mm}^2\text{)}) \quad (2.3.6-2)$$

ここに a は回帰係数である。 $\hat{\mu}_{1.5}$ については特に 20N/mm^2 以上の高面圧下における回帰結果に改善の余地があるため、種々の関数形を検討した結果、最も適合度の高い対数関数型の次式を選定した。

$$\mu = a + b \cdot \log(\sigma) \quad (5 \leq \sigma \leq 42 [\text{N/mm}^2]) \quad (2.3.6-3)$$

ここに a 、 b は回帰係数である。式(2.3.6-3)による $\hat{\mu}_{1.5}$ の回帰結果では、全ての面圧領域で式(2.3.6-2)による結果に比べて改善が図られている。

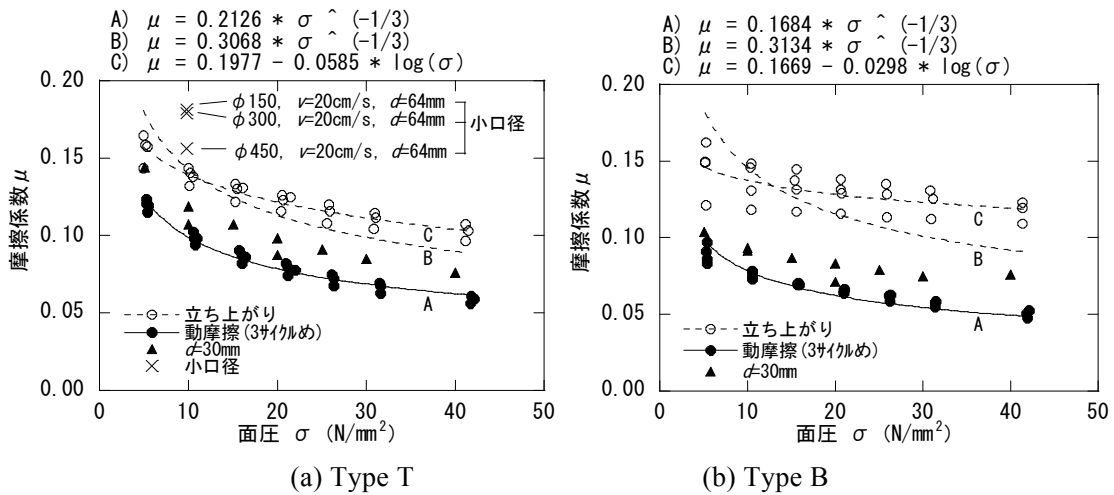


図 2.3.6-3 摩擦係数の面圧依存性 ($v=20\text{cm/s}$)

2) 摩擦係数の速度依存性

図 2.3.6-4 に標準面圧 ($\sigma = 20\text{N/mm}^2$) における速度 v による $\hat{\mu}_{1.5}$ および $\bar{\mu}_3$ の変化を示す。同図では $\hat{\mu}_{1.5}$ は瞬間速度、 $\bar{\mu}_3$ は一定速度に対する関係で示している。図 2.3.6-4 には、次式の対数関数型による回帰結果を併せて示す。

$$\mu = a + b \cdot \log(v) \quad (0.1 \leq v \leq 60 [\text{cm/s}]) \quad (2.3.6-4)$$

ここに a 、 b は回帰係数である。

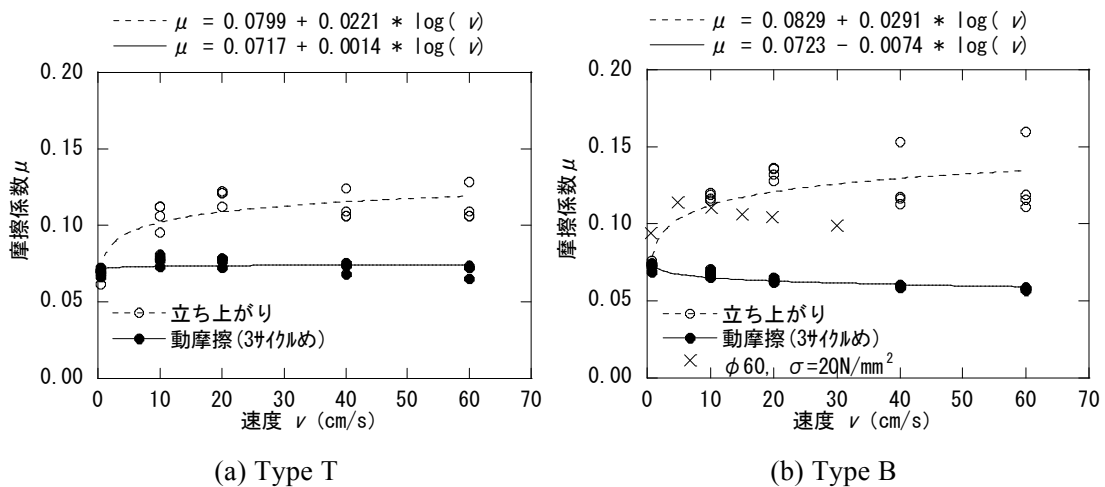


図 2.3.6-4 摩擦係数の速度依存性 ($\sigma=20\text{N/mm}^2$)

3) 荷重振幅依存性

図 2.3.6-3 には、標準条件の $d=100\text{mm}$ に加え荷重振幅による影響を把握するために行った $d=30\text{mm}$ の結果も示した。試験では振幅の影響のみを調べるため、荷重振動数を変更し荷重振幅によらず同一の荷重速度・面圧となるようにした。 $d=30\text{mm}$ の $\bar{\mu}_3$ は $d=100\text{mm}$ に比べて総じて大きく、その比はタイプ毎の平均値で 1.05~1.54 となっている。

4) 摩擦係数の繰り返し依存性

標準条件 ($v=20\text{ cm/s}$ 、 $\sigma=20\text{N/mm}^2$) における繰り返し依存性確認試験での繰り返し回数 n および累積すべり変位 $S=\Sigma d$ に対する $\bar{\mu}$ およびすべり板温度 T の変化を図 2.3.6-5 に示す。荷重開始直後は T が荷重前の管理温度 (30°C) から急激に上昇、 $\bar{\mu}$ は初期の値から急激に下降する。その後、 T の上昇および $\bar{\mu}$ の下降傾向は次第に直線的になる。これを T - $\bar{\mu}$ 関係 (図 2.3.6-6) で表すと、 $\bar{\mu}$ は T の上昇に伴いほぼ直線的に低下する傾向が確認できる。

図 2.3.6-7 には正弦波荷重試験 ($d=100\text{mm}$ 、 30mm) による摩擦係数の累積すべり変位依存性の一例を示す。 $\hat{\mu}$ は S が小さいうちは最大速度が大きいほど大きな値を示すが、 S が大きくなると次第に減少し、 $v<1\text{cm/s}$ の準静的なケースの $\hat{\mu}$ にほぼ漸近する。

$$\mu = a + b \cdot \log S \quad (40 \leq S \leq 2196 [\text{mm}]) \quad (2.3.6-5)$$

ここに a 、 b は回帰係数である。

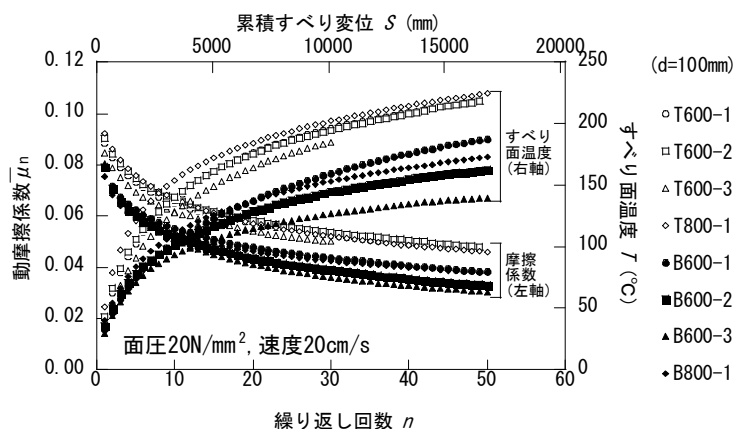


図 2.3.6-5 摩擦係数の繰り返し依存性 (Type T&B, $\sigma=20\text{N/mm}^2$, $v=20\text{cm/s}$)

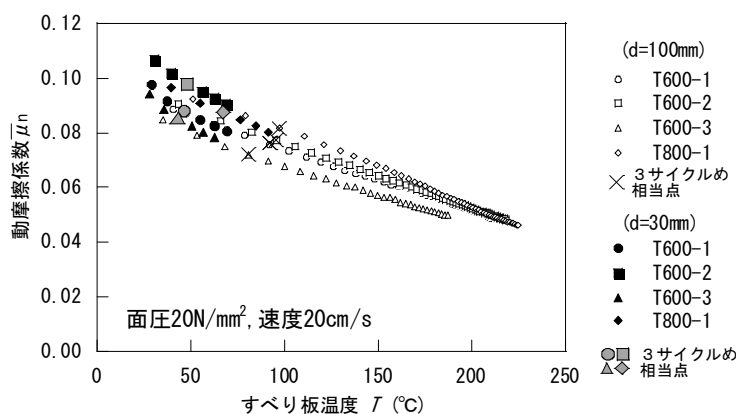


図 2.3.6-6 摩擦係数のすべり板温度依存性 (Type T, $\sigma=20\text{N/mm}^2$, $v=20\text{cm/s}$)

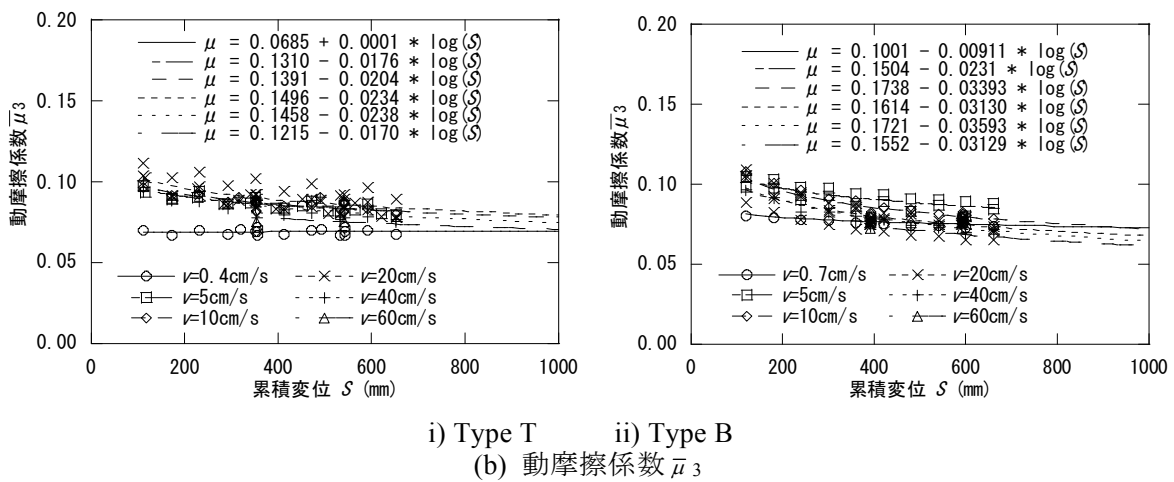
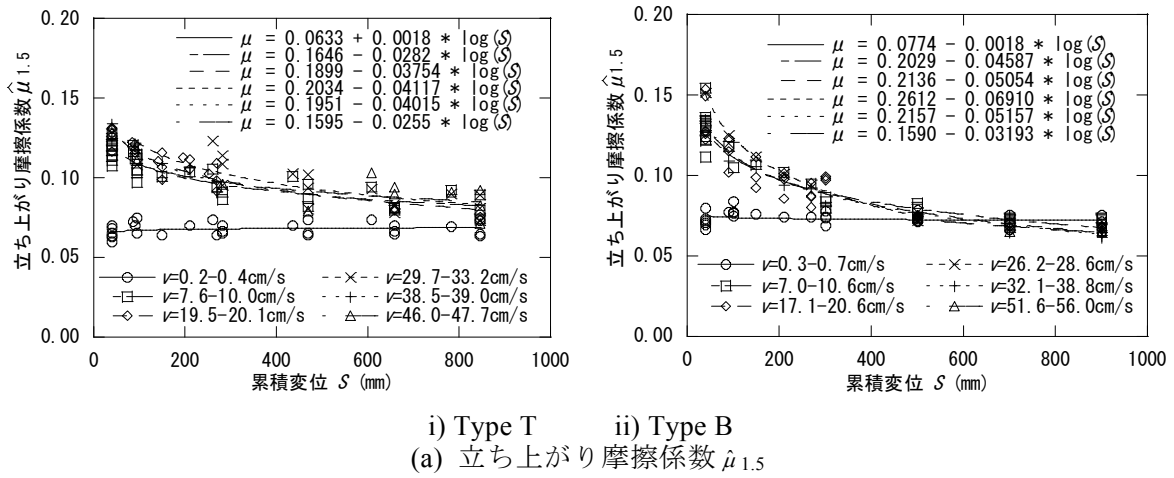


図 2.3.6-7 正弦波載荷 (d=100mm,30mm) による累積すべり変位依存性 ($\sigma=20\text{N/mm}^2$)

○地震応答波載荷による摩擦特性

1) 荷重-水平変位関係にみられる傾向

図 2.3.6-8 に標準面圧 ($\sigma=20\text{N/mm}^2$) 下のランダム波載荷における水平力-水平変位関係の一例を示す。

図 2.3.6-8 (a i) と ii) には、同じ Kobe 応答波を用い最大速度 v_{\max} を変えて載荷した結果を示す。 v_{\max} が大きいほどすべり始め部分の履歴が尖鋭になる傾向があり、速度条件が立ち上がり摩擦の大小に影響を与えていることが分かる。以下では、ランダム波載荷における立ち上がり摩擦係数を $\hat{\mu}_m^{(eq)}$ とし、正弦波載荷による $\hat{\mu}_m$ と区別して扱う。

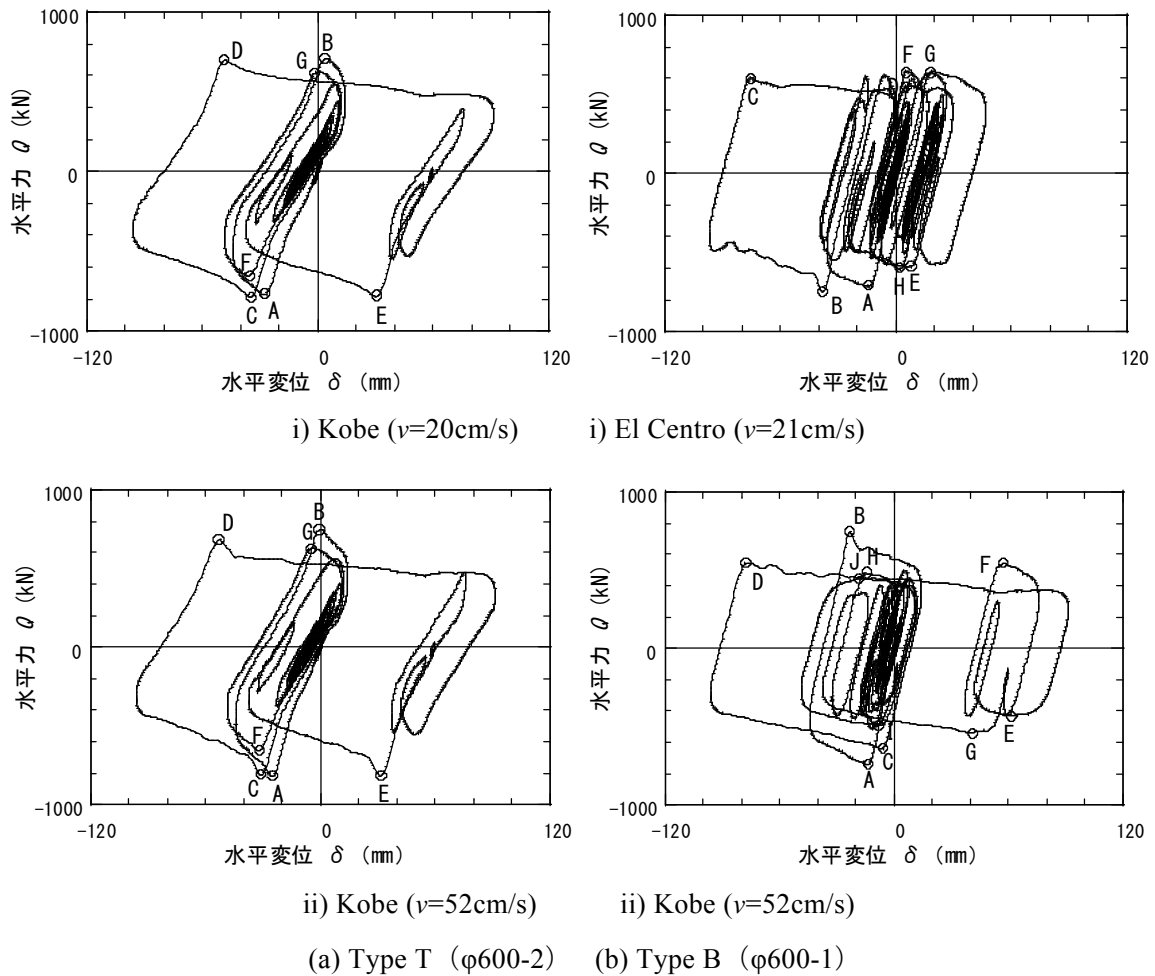
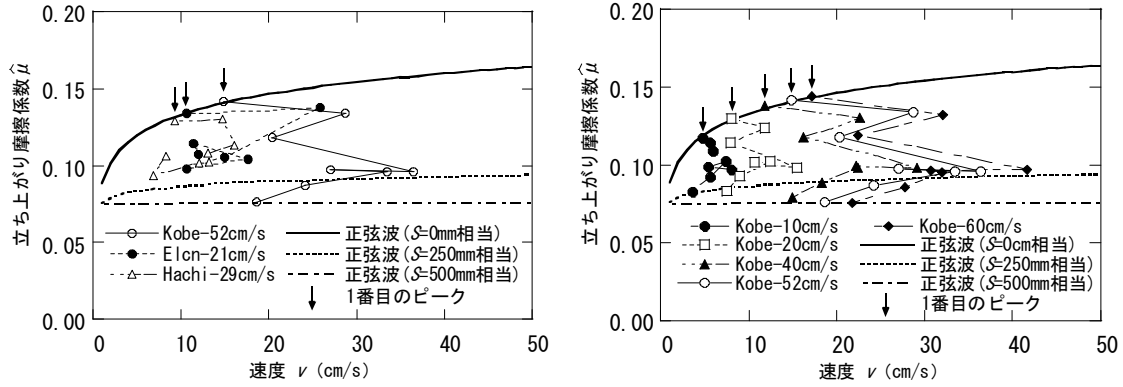


図 2.3.6-8 ランダム波載荷による水平力-水平変位関係 ($\phi 600, \sigma=20\text{N/mm}^2$)

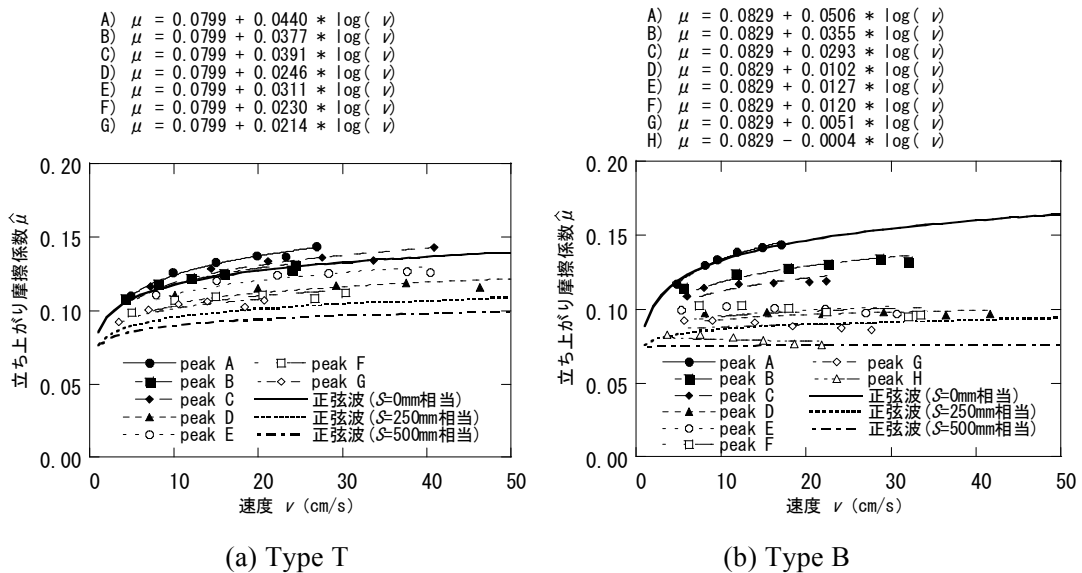
2) 載荷中の摩擦係数の変化

図 2.3.6-9 は、図 2.3.6-8 の履歴上に丸印を付したすべり始め部分の点で水平力と鉛直力の比から立ち上がり摩擦係数 $\hat{\mu}_m^{(eq)}$ を読み取り、正弦波載荷と同様に求めた瞬間速度 v (計算時間刻みを 0.002 秒とした) との関係として示したものである。同図中のプロットは 3 体($\phi 600$) の平均値を表し、折れ線は各点を発生時刻順に結んだものである。各入力地震波とも、図中に矢印で示す 1 番目のピークで決まる $\hat{\mu}_1^{(eq)}$ が最大となっている。図 2.3.6-9 (a) に示すように、いずれの入力地震波においてもすべりを繰返すにつれて $\hat{\mu}_m^{(eq)}$ が次第に小さくなる傾向があるが、単調に減少するだけでなく何らかの原因により $\hat{\mu}_m^{(eq)}$ が再び大きくなる現象も見られる。

図 2.3.6-9 (b) に示す各ケースでは、最大速度の調整に時間スケールを変更する方法をとっているため、各ケースの m 番目のピークにおける累積すべり変位量 $S_m^{(eq)}$ はケース間で互いにほぼ等しいものと考えられる。そこで、図 2.3.6-10 には各ケースの m 番目のピークを改めて系列化して示した。各系列のデータは明瞭な速度依存性を示しており、 $\hat{\mu}_m$ と同様に対数関数的な傾向を示す。



(a) 入力地震波による比較 (応答原波) (b) 最大速度による比較 (Kobe)
 図 2.3.6-9 ランダム波載荷による立ち上がり摩擦係数の変化 (Type B, 600Φ, σ=20N/mm²)



(a) Type T (b) Type B
 図 2.3.6-10 ランダム波載荷による立ち上がり摩擦係数の速度依存性 (Kobe, φ600, σ=20N/mm²)

○弾性すべり支承の摩擦特性モデルの提案

1) 摩擦係数の各依存性のモデル化

支承の摩擦係数を規定する変数を時刻 t における面圧 $\sigma(t)$ 、速度 $v(t)$ 、累積すべり変位 $S(t)$ とする場合、摩擦係数は、

$$\mu(t) = f(\sigma(t), v(t), S(t)) \quad (2.3.6-6)$$

と表すことができる。ここでは簡便化のため、標準面圧 σ_{std} [N/mm²] について得られた回帰式に対して、面圧条件が σ [N/mm²] に変化する場合の補正係数 α を導入して、摩擦係数を

$$\mu(t) = \alpha[\sigma/\sigma_{std}] \cdot \mu'(t)[\sigma_{std}] \quad (2.3.6-7)$$

のように表現できるものと仮定し、まず

$$\mu'(t)[\sigma_{std}] = f(v(t), S(t)) \quad (2.3.6-8)$$

を v 、 S の 2 変数回帰分析により求める。摩擦係数の速度、累積すべり変位依存性は対数関数により概ね良好に回帰できること、図 2.3.6-7 や図 2.3.6-10 に示したように v - μ 依存関係の回帰係数は S の変化に、 S - μ 依存関係の回帰係数は v の変化に伴って変動することを考慮し、以下の

関数型を用いる。

$$\mu'(t) = a \cdot (\log v(t) - \log v_0) \cdot (\log S(t) - \log S_0) + b \quad (2.3.6-9)$$

ここに a 、 b は回帰係数である。 v 、 S 軸を対数軸として、式(2.3.6-9)で表される曲面を 3次元座標空間に表現したものを図 2.3.6-11 に示す。式(2.3.6-9)の定数 v_0 、 S_0 は、 μ が一定値 b となる速度、累積すべり変位を表す。

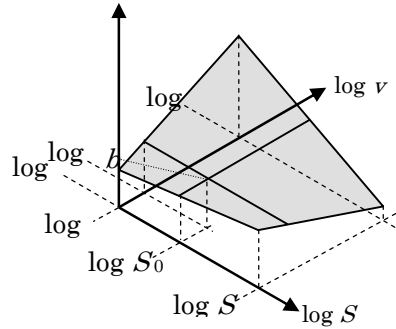


図 2.3.6-11 速度・すべり変位依存性の面回帰モデル

表 2.3.6-2 回帰係数一覧

タイプ	摩擦係数	面圧 σ (N/mm ²)	回帰パラメータ					使用データ範囲			
			a	b	v_0 (cm/s)	S_0 (mm)	重回帰係数 R	v_{min} (cm/s)	v_{max} (cm/s)	S_{min} (mm)	S_{max} (mm)
T	立ち上がり	10	-0.0240	0.0904	0.545	1684	0.850	0.1	60.6	40	846
		20	-0.0179	0.0684	0.293	2562	0.854	0.2	47.7	40	846
	動摩擦	10	-0.0207	0.0901	1.412	1470	0.521	0.4	60.0	110	2050
		20	-0.0131	0.0712	0.255	1638	0.742	0.4	60.0	112	2048
B	立ち上がり	10	-0.0364	0.0894	0.544	539	0.916	0.3	56.0	40	900
		20	-0.0314	0.0720	0.345	626	0.916	0.3	56.0	40	900
	動摩擦	10	-0.0195	0.0892	0.296	511	0.732	0.7	60.0	120	2196
		20	-0.0148	0.0811	0.100	398	0.848	0.7	60.0	120	2195

2) 水平力—水平変位関係のシミュレーション

式(2.3.6-9)および表 2.3.6-2 による $\hat{\mu}$ と $\bar{\mu}$ の推定値は同一の v 、 S に対しても差を持つため、履歴上では $\hat{\mu}$ から $\bar{\mu}$ に滑らかに移行する様に図 2.3.6-12 に示す cosine テーパを使用した。同図の静摩擦保持距離 l は、正弦波載荷時の履歴ループにおいて、すべり始め部分の摩擦力が動摩擦にほぼ収斂するまでのすべり距離である。

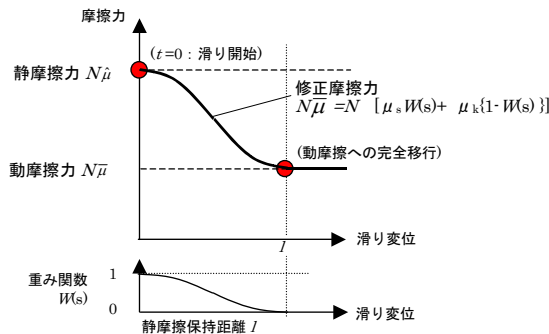
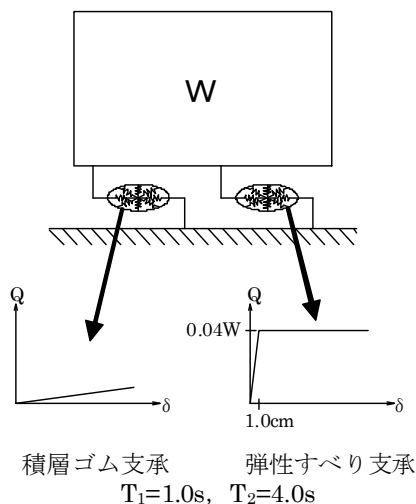


図 2.3.6-12 立ち上がり摩擦から動摩擦への移行モデル

(2) 解析条件

本検討では、長周期地震動に対する摩擦係数の累積すべり変位依存性を確認することを目的とする。解析モデルを図 2.3.1-13 に示す上部構造を剛体とした 1 質点系モデルとする。また、2 方向入力を考慮して免震支承は塑性論モデルとする。



建物重量	$W=51,453.9\text{kN}$
弾性すべり支承負担軸力	$N_s=20,920.1\text{kN}$
基準摩擦係数	$\mu=0.098$
弾性すべり支承水平耐力	$Q_y=2,058.0\text{kN}$
	$(C_i=0.04)$
弾性すべり支承平均面圧	$\sigma=8.04\text{N/mm}^2$
考慮する依存性	累積すべり距離

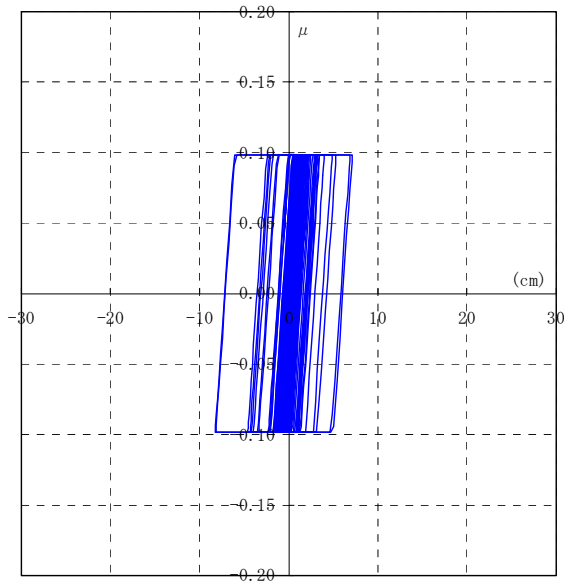
図 2.3.6-13 解析モデル

(3) 1 方向入力解析結果

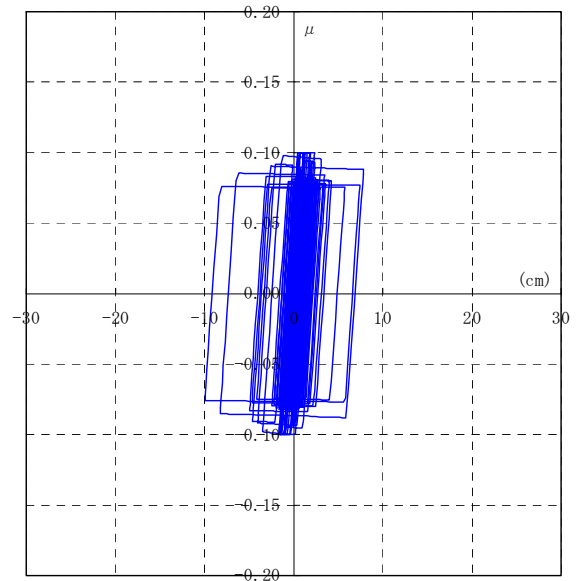
N-OSKH02-AV, T-TN-AIC003-AV, T-TN-AIC004, T-TN-KGIN1F-AV 入力における応答最大値を表 2.3.6-3 に示す。また、入力 1.0 倍, 1.25 倍, 1.50 倍とした場合の弾性すべり支承の摩擦係数-変形履歴, 免震層の荷重-変形履歴図 2.3.6-14~16 に依存性を無視したケースと依存性を考慮したケースを比較して示す。同様に、各入力レベルにおける、弾性すべり支承の累積すべり変位時刻歴波形を図 2.3.6-17~19 に示す。

表 2.3.6-3 応答最大値一覧

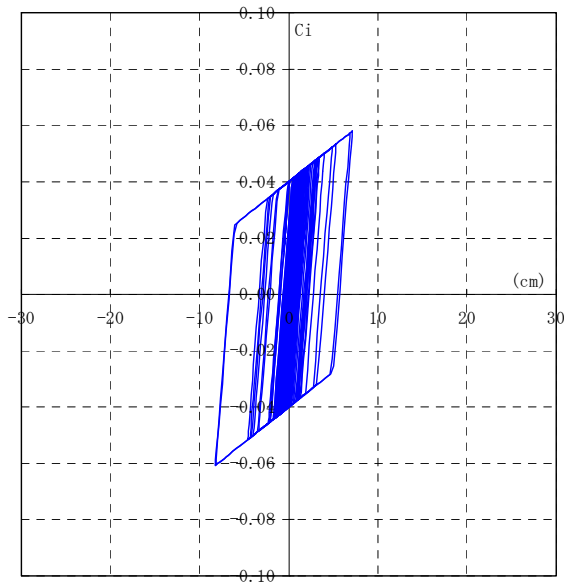
入力		応答最大値											
地震波	倍率	加速度(Gal)		免震層変位(cm)		せん断力係数		累積変位(m)		累積すべり変位(m)		$V_E(\text{cm/s})$	
		依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮
N-OSKH02	1.00	59.5	54.9	8.2	10.0	0.061	0.056	19.1	15.6	1.74	2.14	116.8	118.3
	1.25	69.4	62.1	12.2	13.2	0.071	0.063	20.1	16.9	2.70	3.51	145.7	148.7
	1.50	77.6	81.7	15.6	21.2	0.079	0.083	21.1	19.6	3.93	6.28	175.6	196.1
T-TN-AIC003	1.00	80.2	81.0	16.6	20.9	0.082	0.083	23.4	22.9	5.93	8.09	215.7	221.6
	1.25	101.3	106.9	25.2	31.4	0.103	0.109	27.7	27.9	9.70	12.44	275.8	273.5
	1.50	121.9	135.5	33.5	43.0	0.124	0.138	32.4	33.7	13.66	17.76	327.3	325.9
T-TN-AIC004	1.00	56.8	51.8	7.1	8.3	0.058	0.053	13.8	12.0	1.34	1.56	102.7	102.8
	1.25	64.9	64.5	10.4	14.2	0.066	0.066	14.8	14.4	2.02	2.88	126.0	135.5
	1.50	74.3	74.6	14.2	18.3	0.076	0.076	16.5	17.2	3.09	4.80	155.7	172.3
T-TN-KGIN1F	1.00	48.9	49.5	3.9	3.9	0.050	0.050	15.0	12.6	0.56	0.66	66.8	69.4
	1.25	50.9	50.1	4.8	6.6	0.052	0.051	14.8	13.1	0.95	1.18	86.6	90.6
	1.50	58.2	56.8	7.7	10.5	0.059	0.058	15.8	13.2	1.46	1.87	107.3	111.4



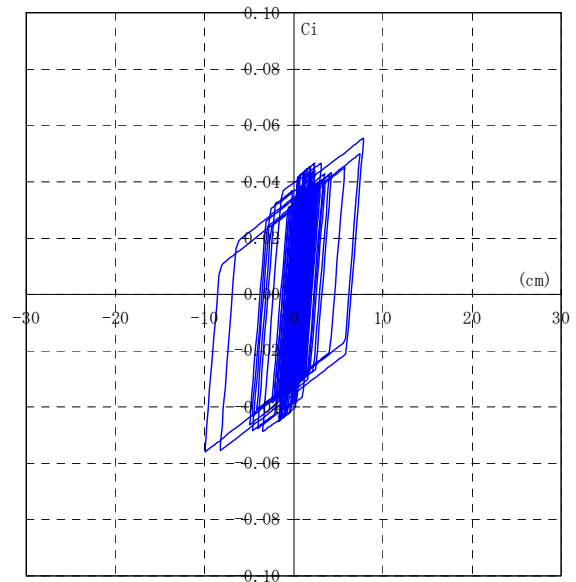
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

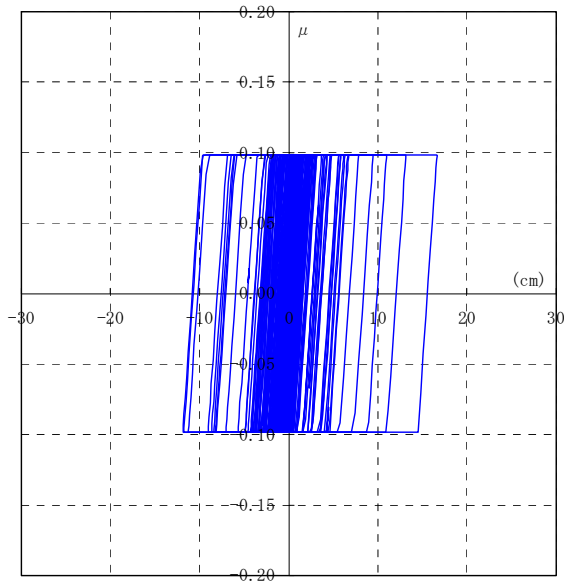


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

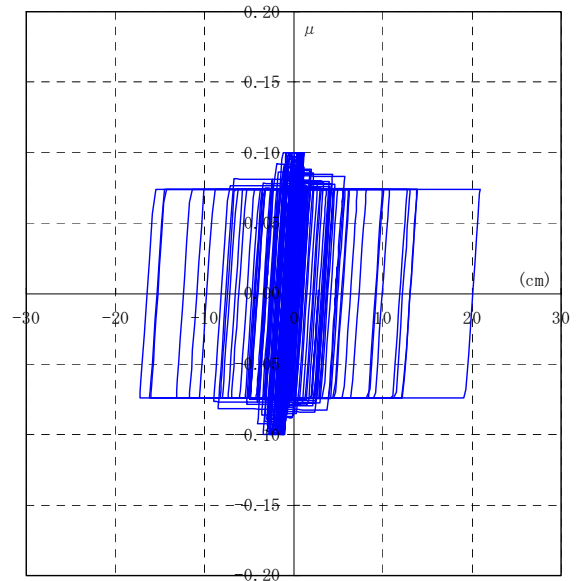


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

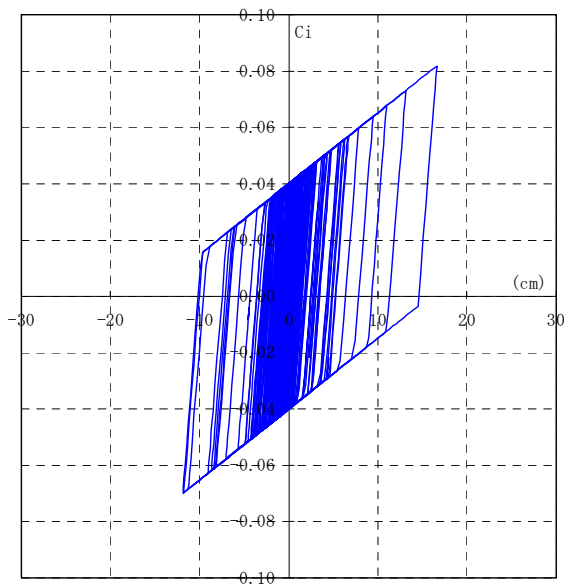
(a) N-OSKH02-AV



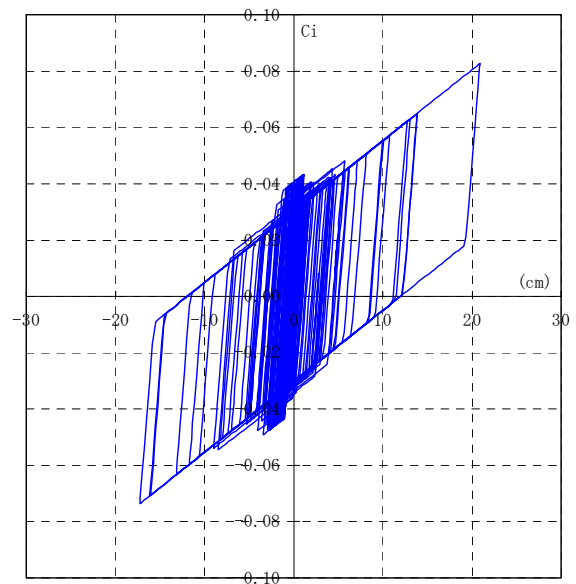
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

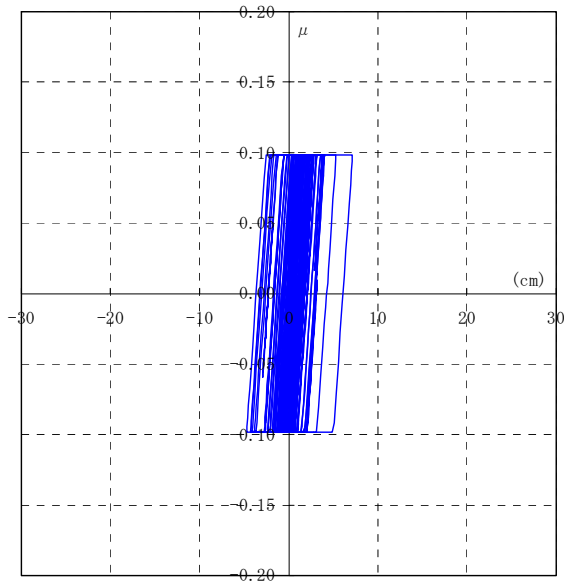


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

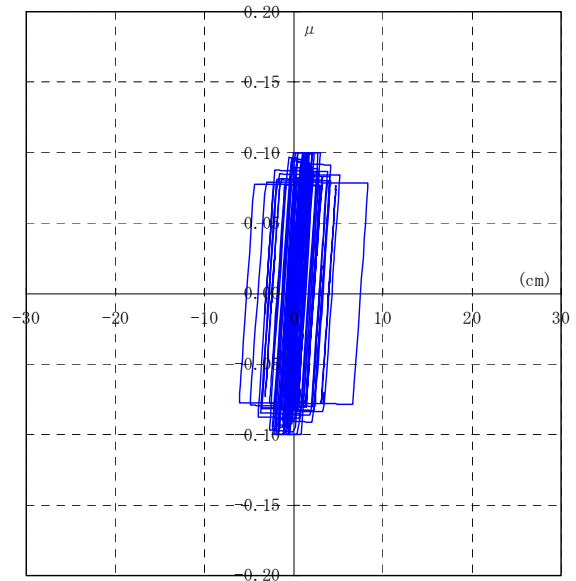


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

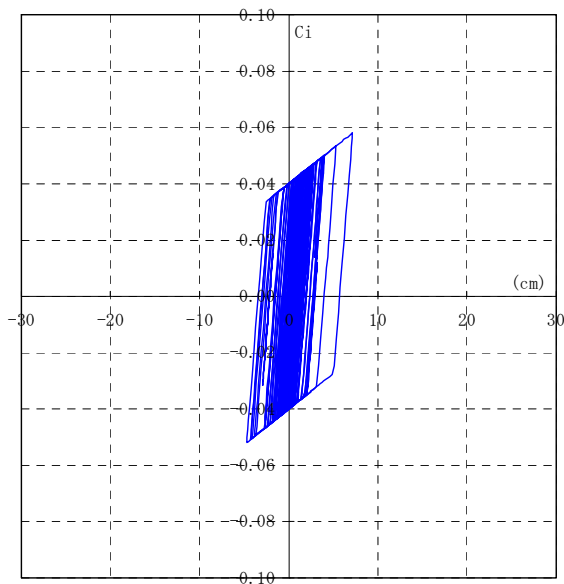
(b) T-TN-AIC003-AV



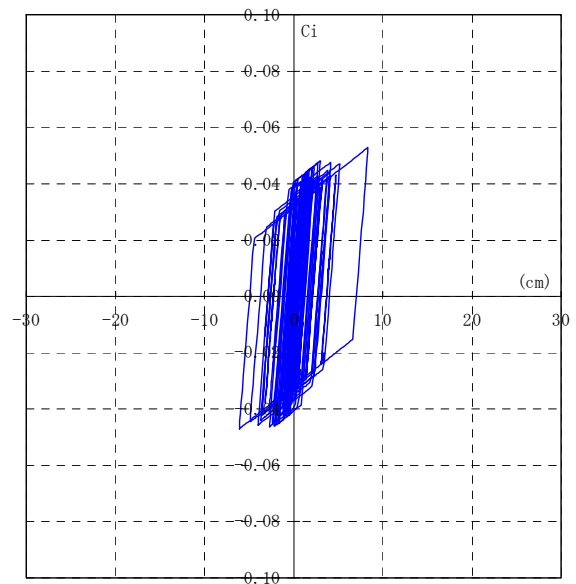
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

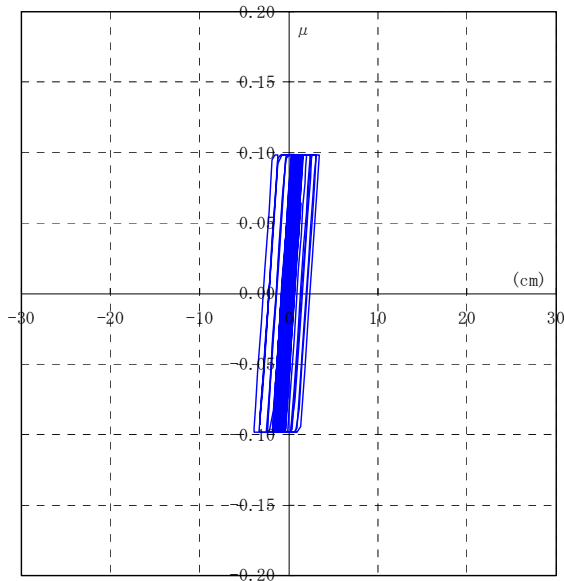


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

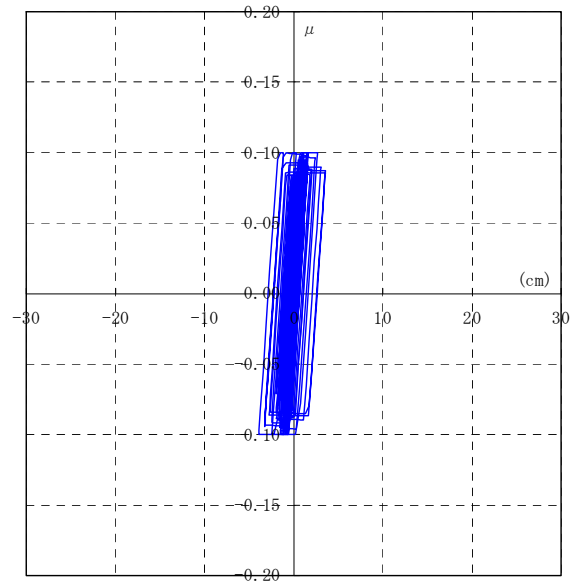


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

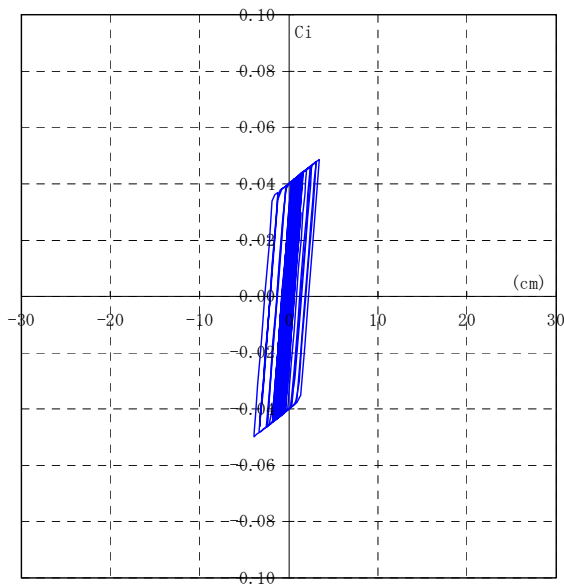
(c) T-TN-AIC004-AV



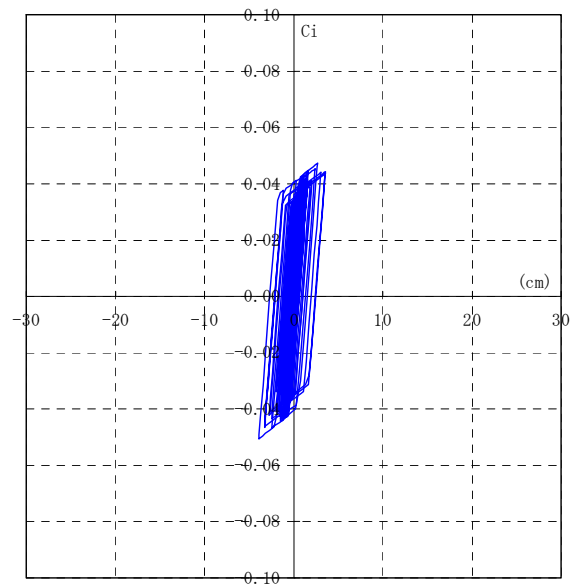
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)



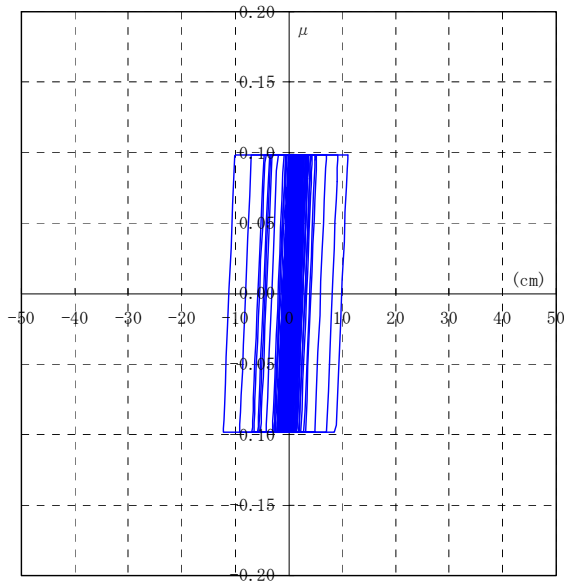
免震層C- δ 履歴 (依存性無視)



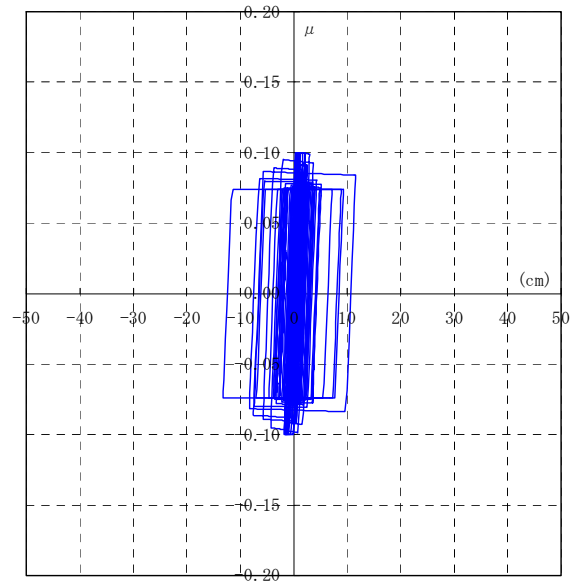
免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

(d) T-TN-KGIN1F-AV

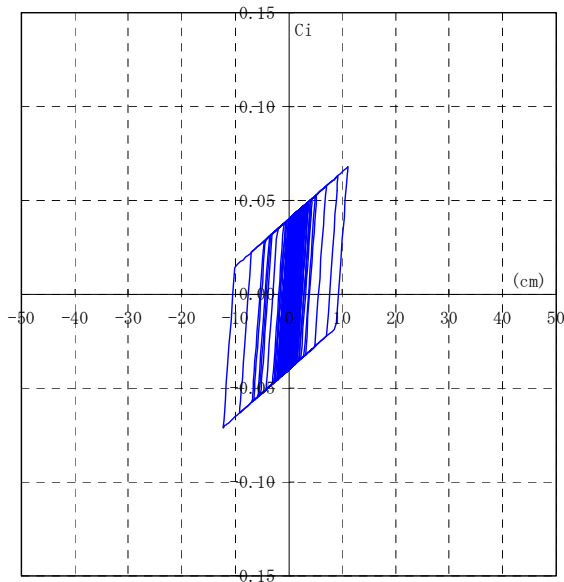
図 2.3.6-14 応答履歴(入力 $\times 1.0$)



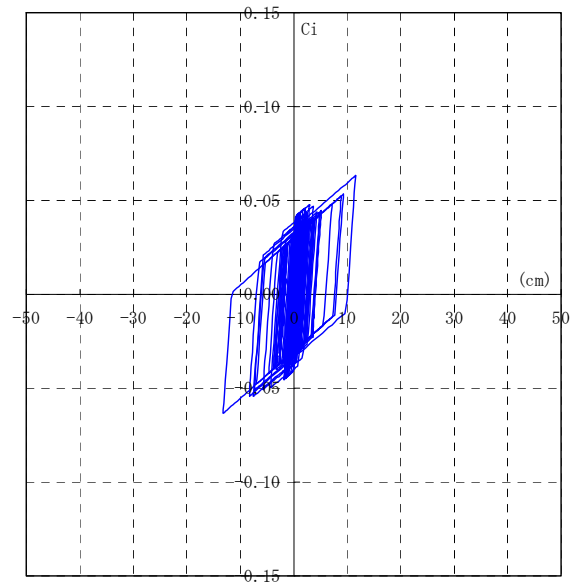
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

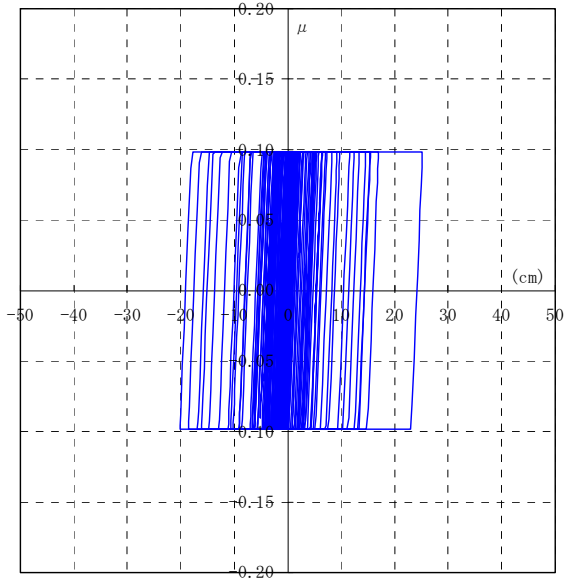


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

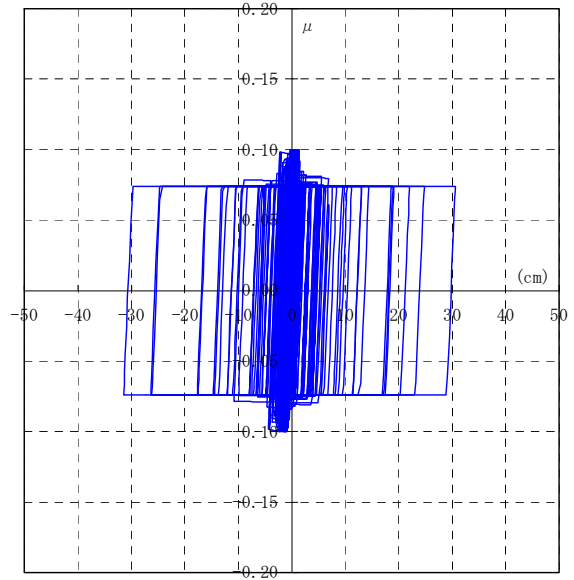


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

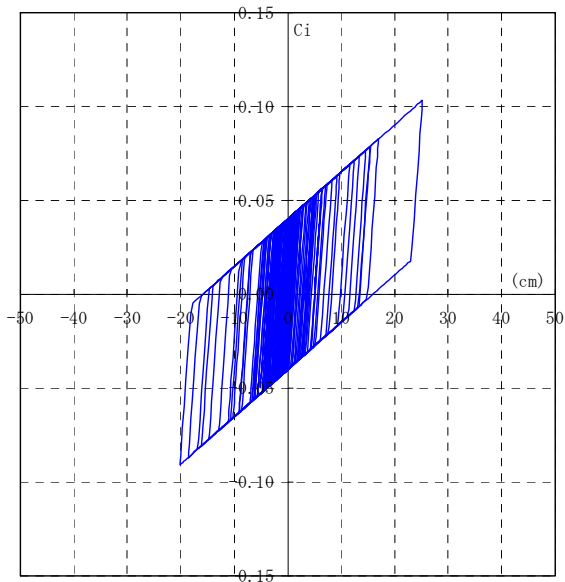
(a) N-OSKH02-AV



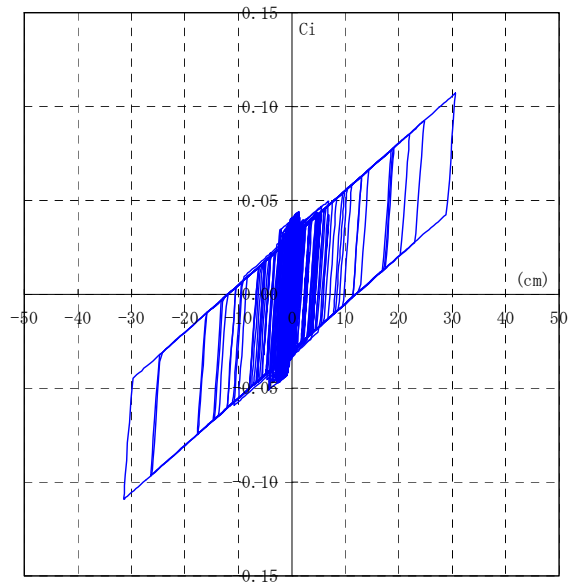
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

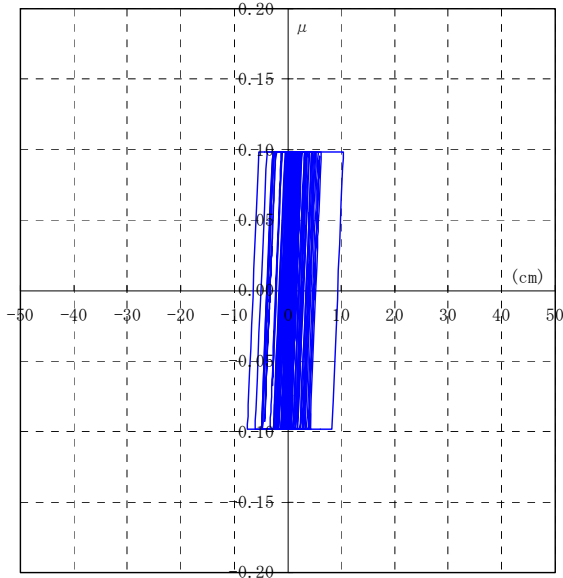


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

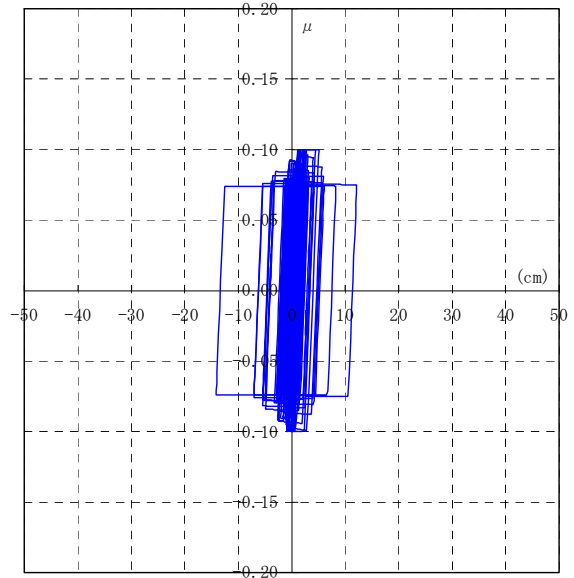


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

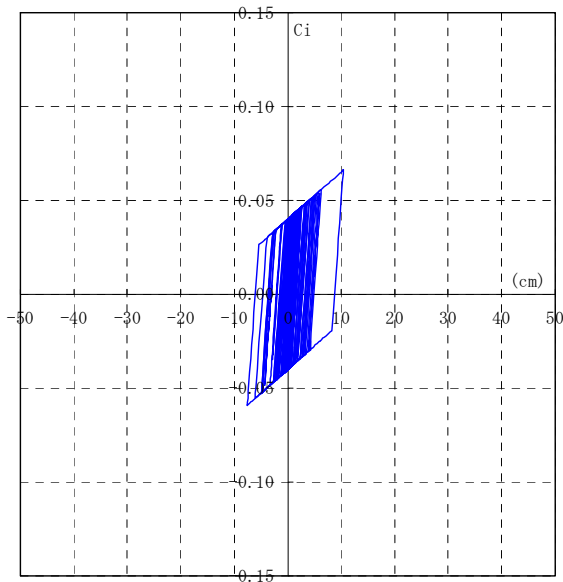
(b) T-TN-AIC003-AV



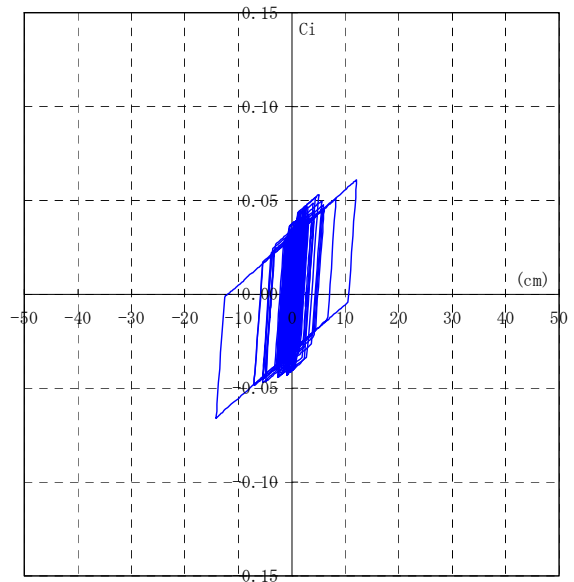
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

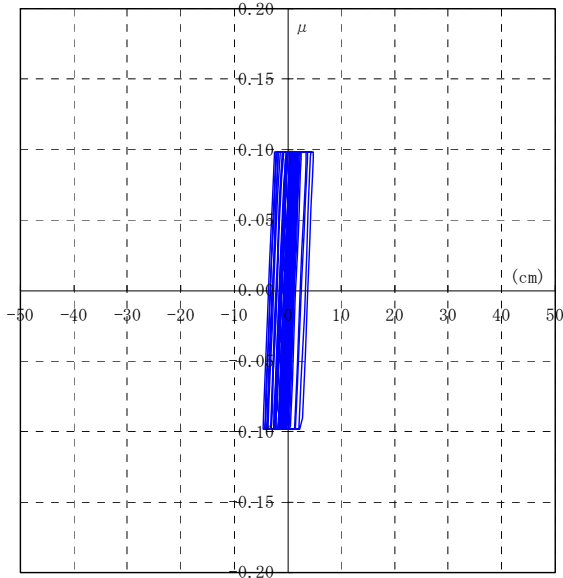


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

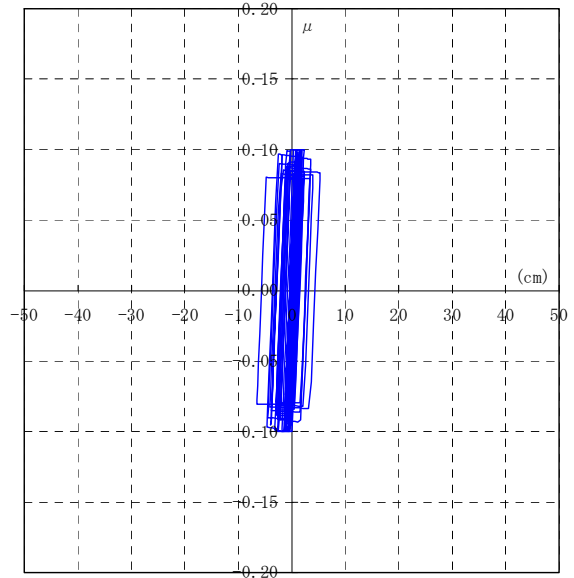


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

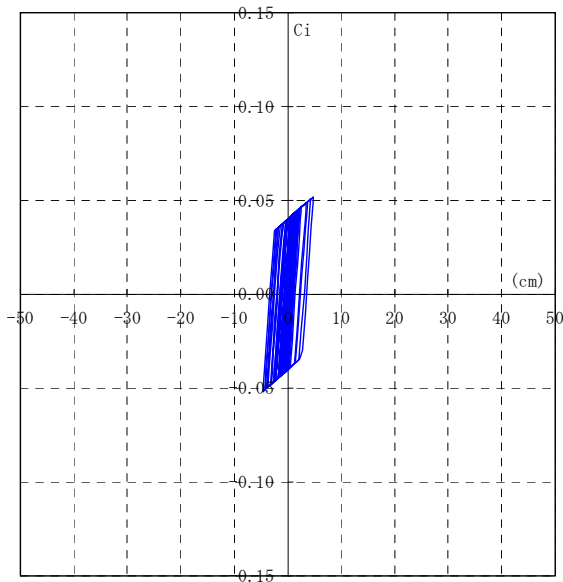
(c) T-TN-AIC004-AV



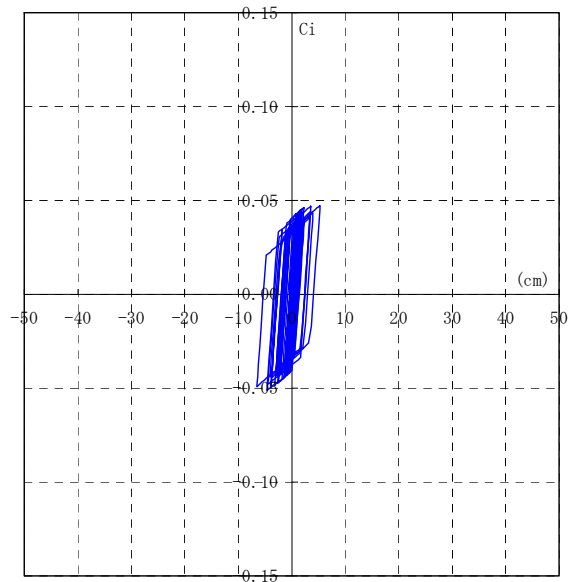
弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)



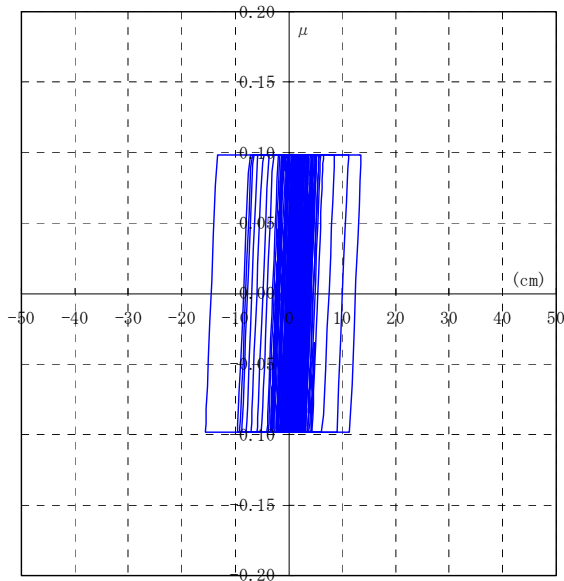
免震層C- δ 履歴 (依存性無視)



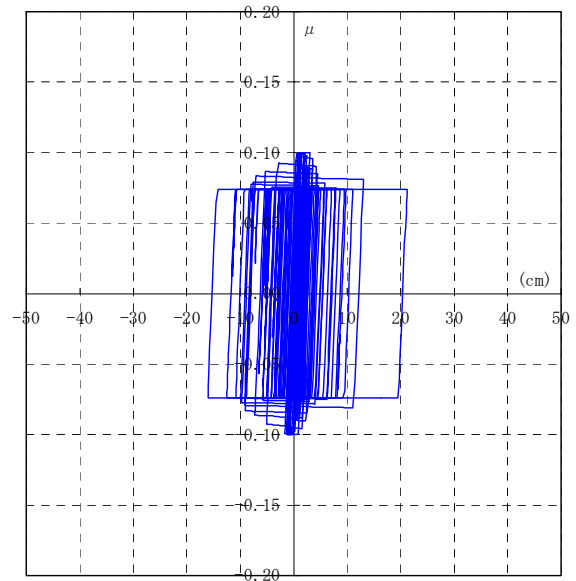
免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

(d) T-TN-KGIN1F-AV

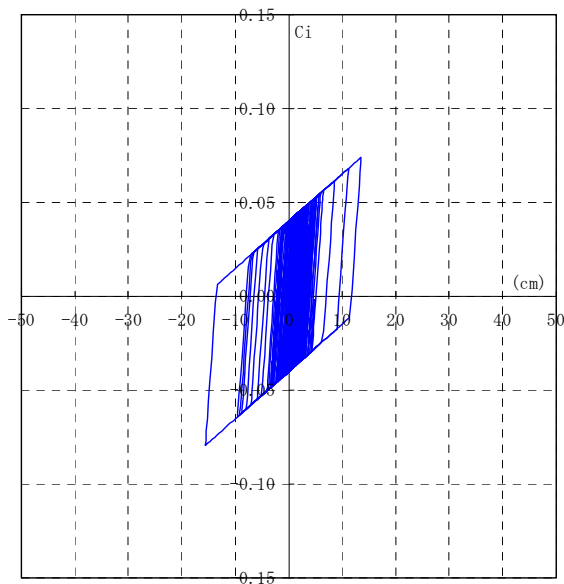
図 2.3.6-15 応答履歴(入力 \times 1.25)



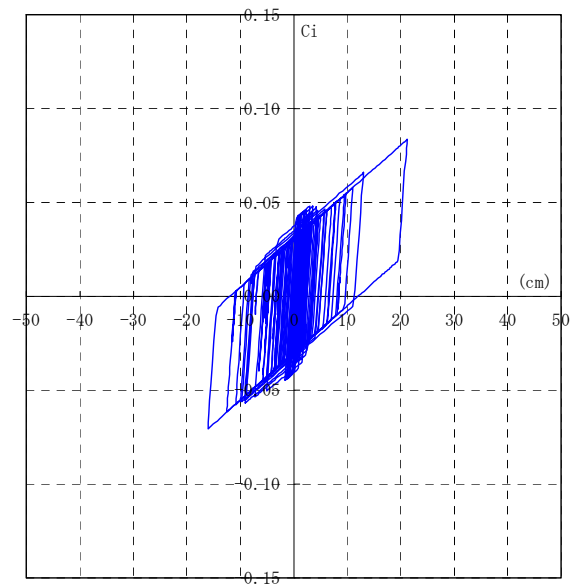
弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

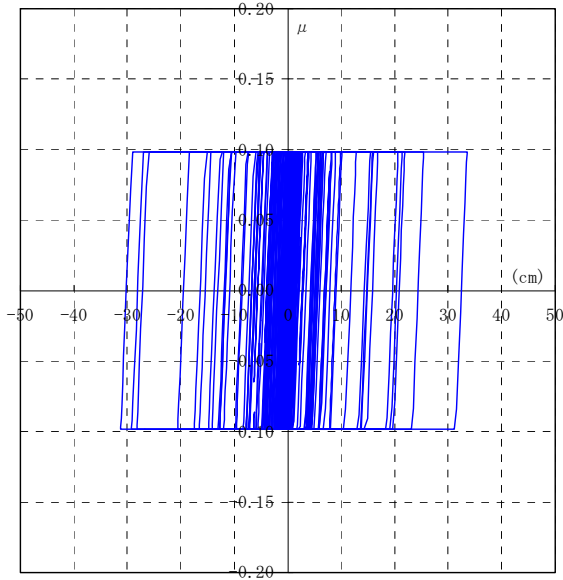


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

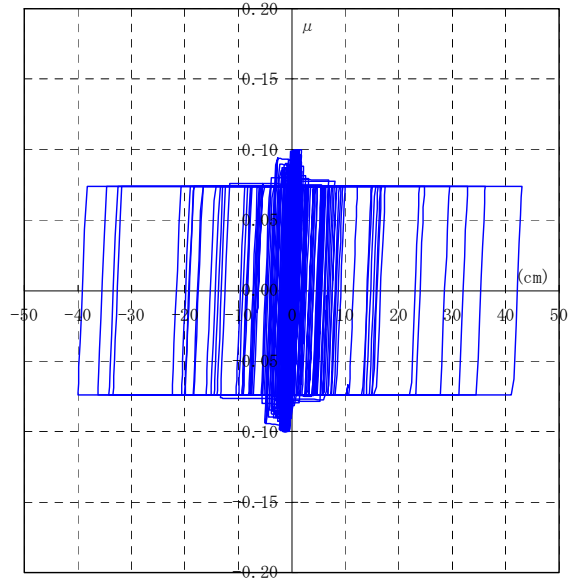


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

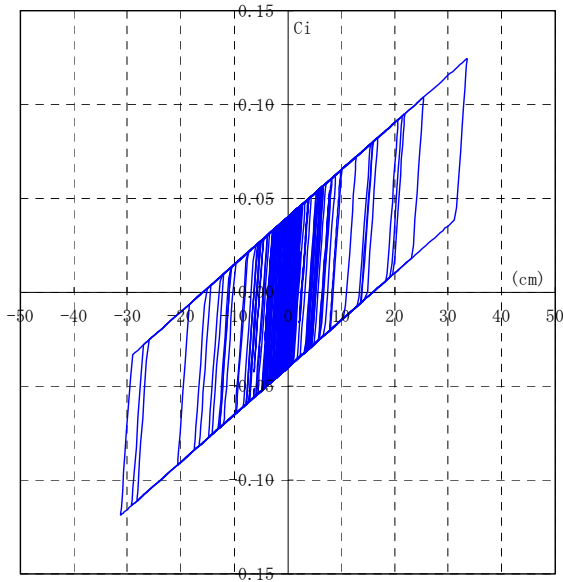
(a) N-OSKH02-AV



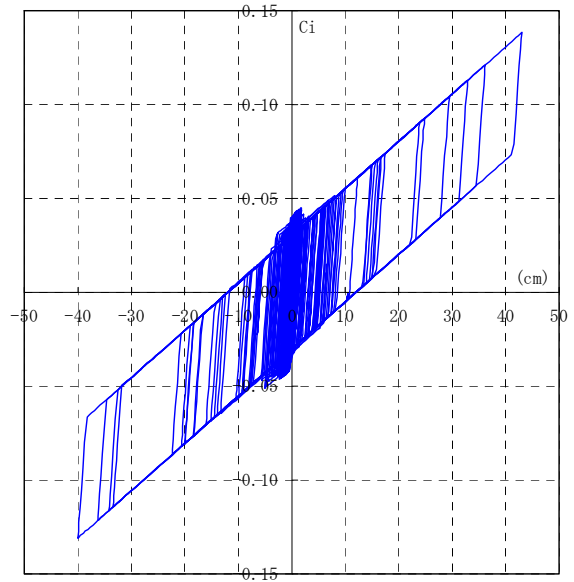
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

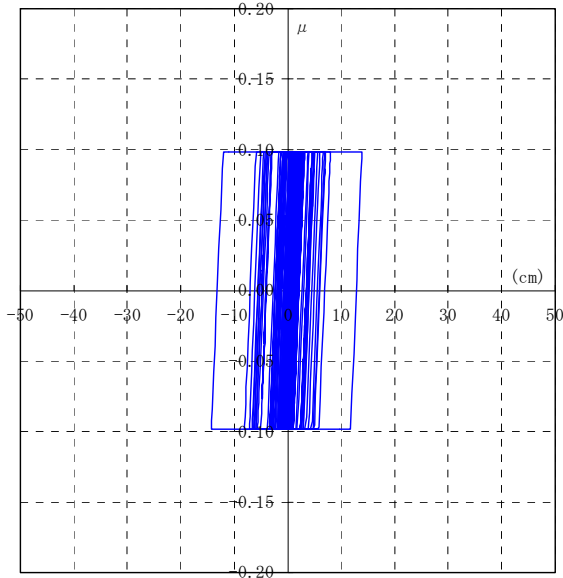


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

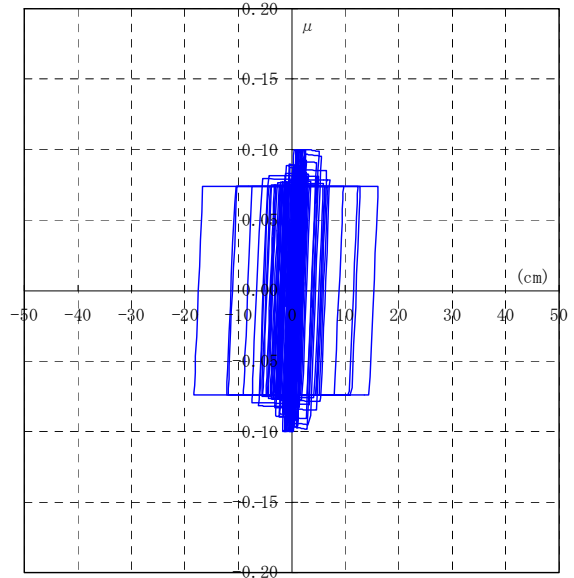


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

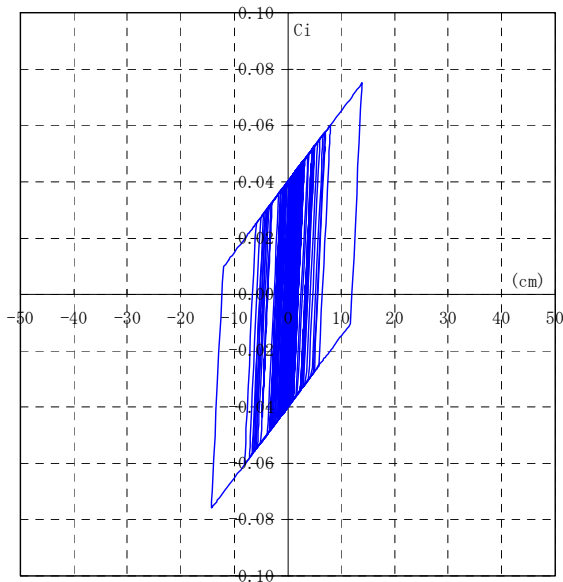
(b) T-TN-AIC003-AV



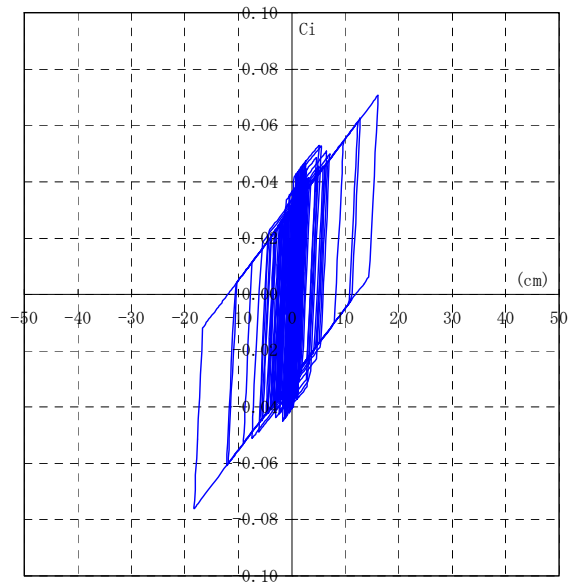
弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

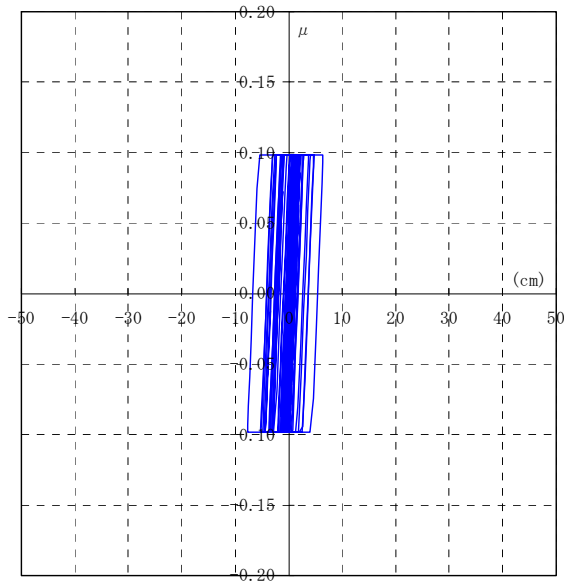


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

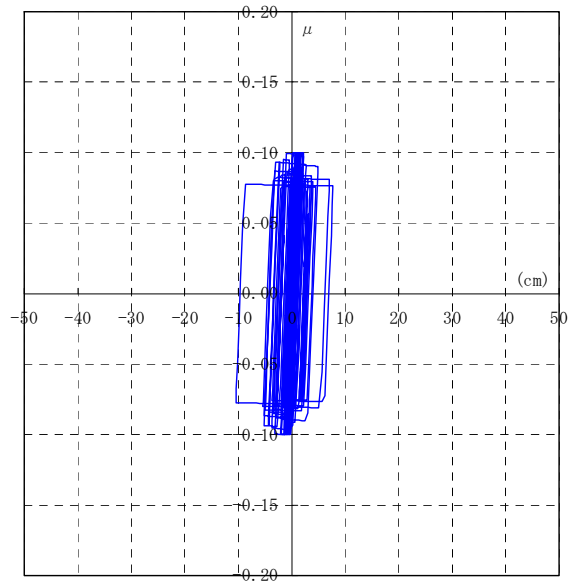


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

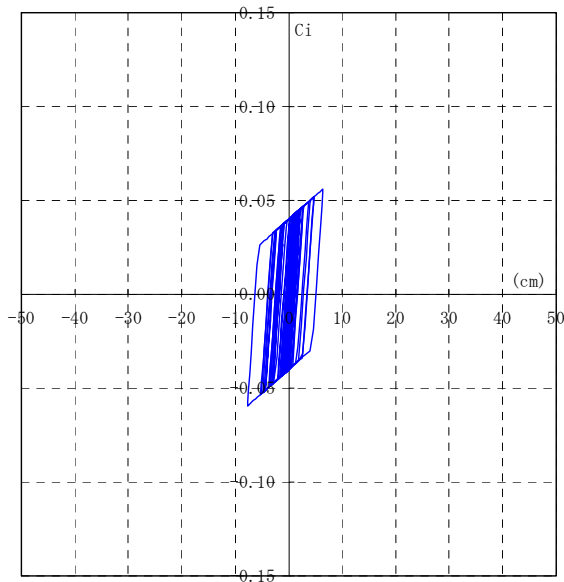
(c) T-TN-AIC004-AV



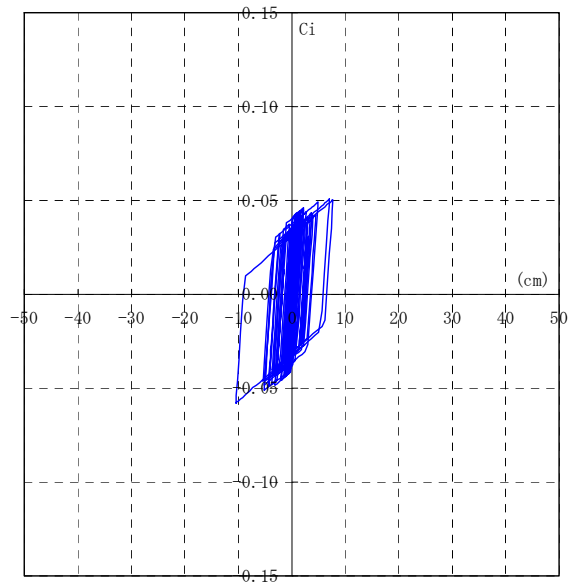
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)



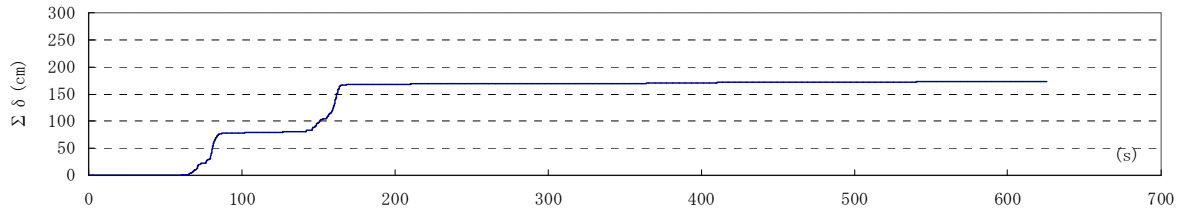
免震層C- δ 履歴 (依存性無視)



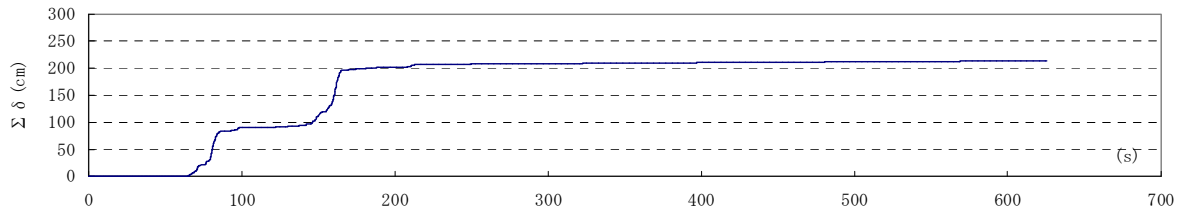
免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

(d) T-TN-KGIN1F-AV

図 2.3.6-16 応答履歴(入力 $\times 1.50$)

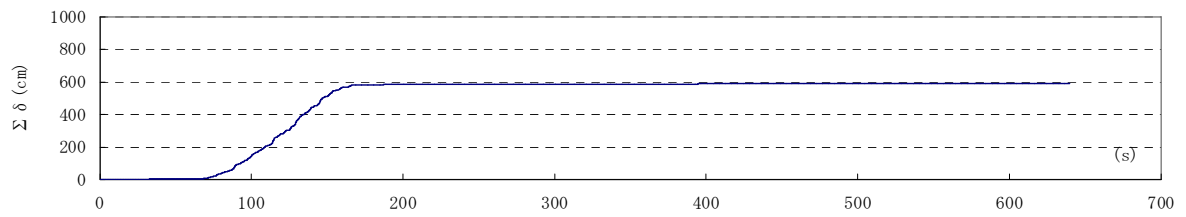


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

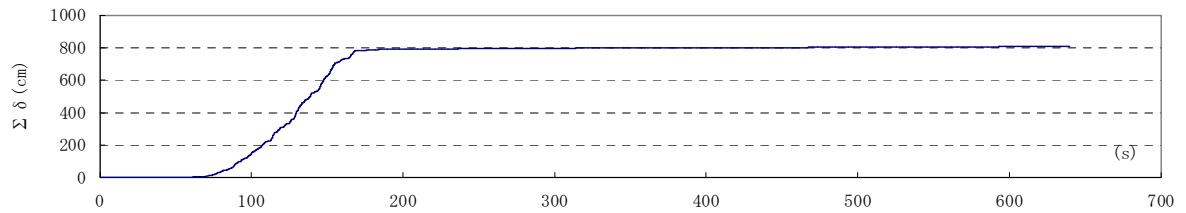


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(a) N-OSKH02-AV

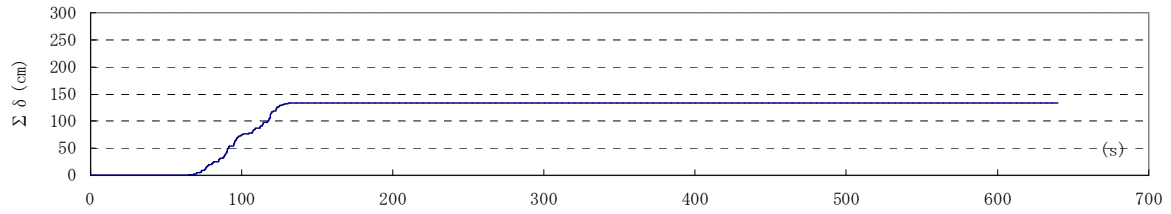


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

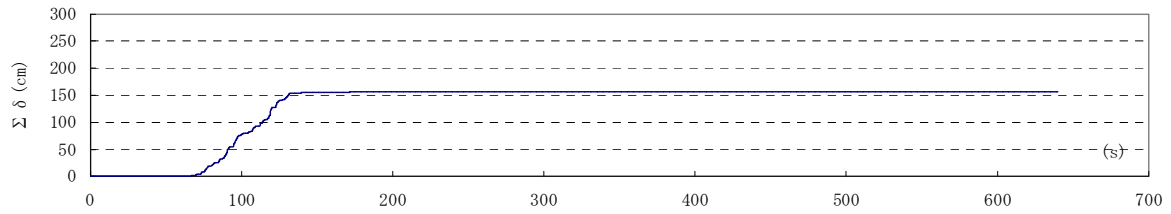


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(b) T-TN-AIC003-AV

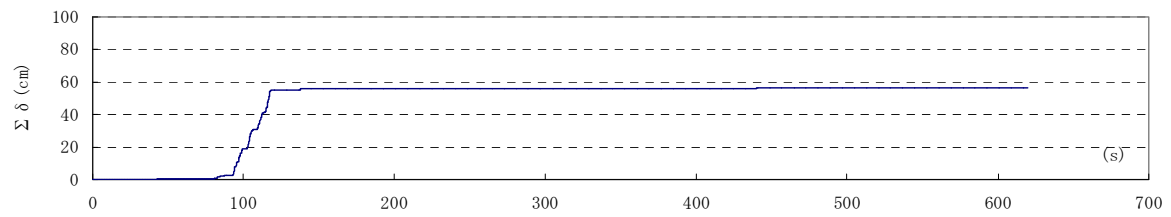


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

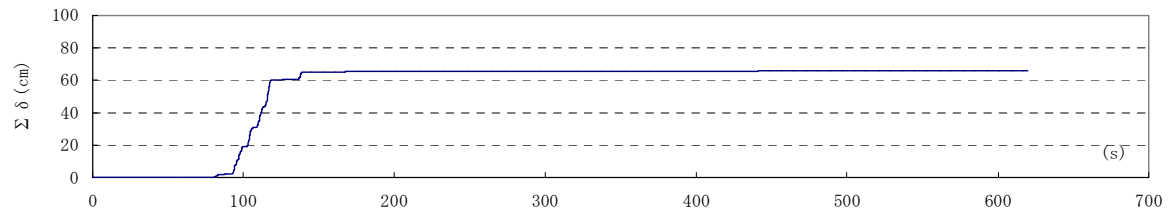


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) T-TN-AIC004-AV



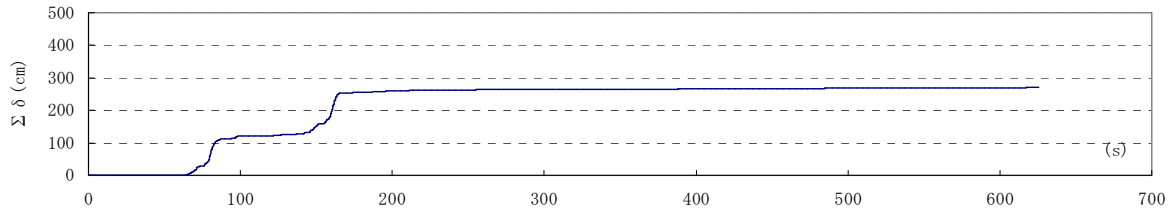
累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



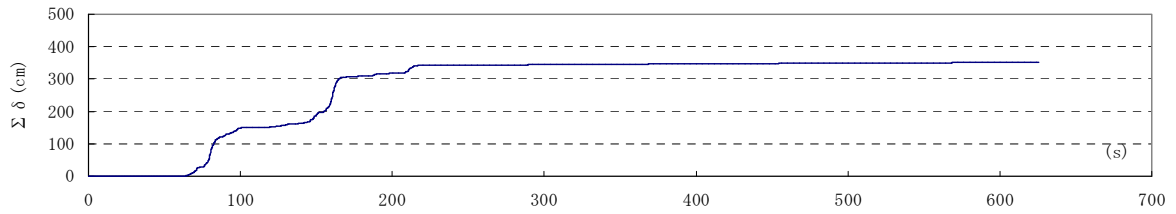
累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(d) T-TN-KGIN1F-AV

図 2.3.6-17 弾性すべり支承累積すべり変位(入力×1.0)

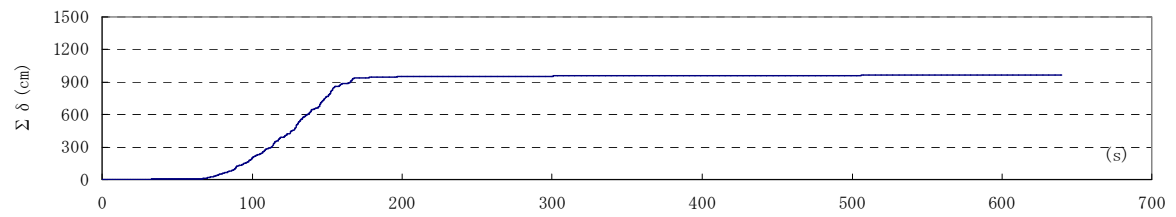


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

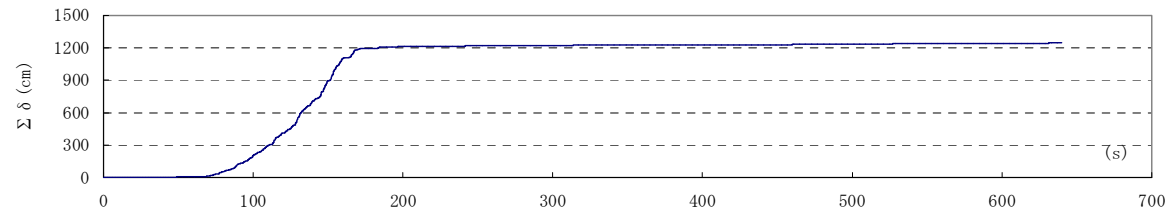


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(a) N-OSKH02-AV

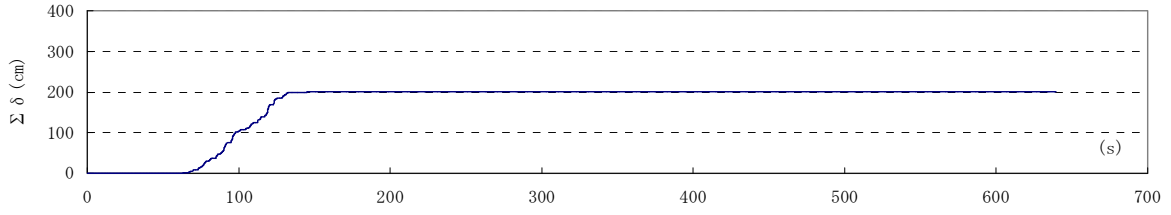


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

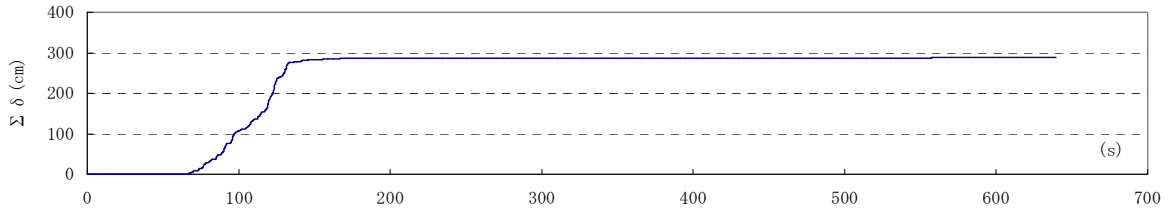


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(b) T-TN-AIC003-AV

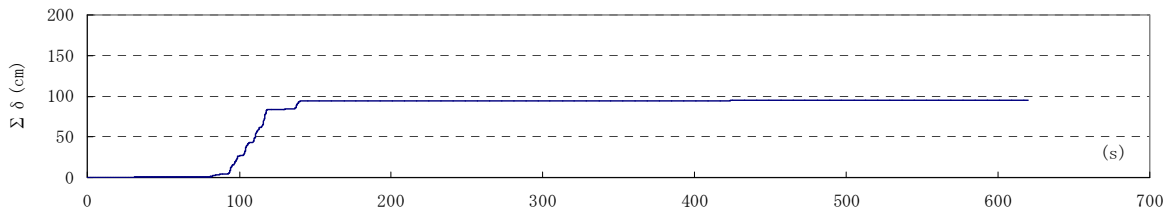


累積すべり変位時刻歴波形 (依存性無視)

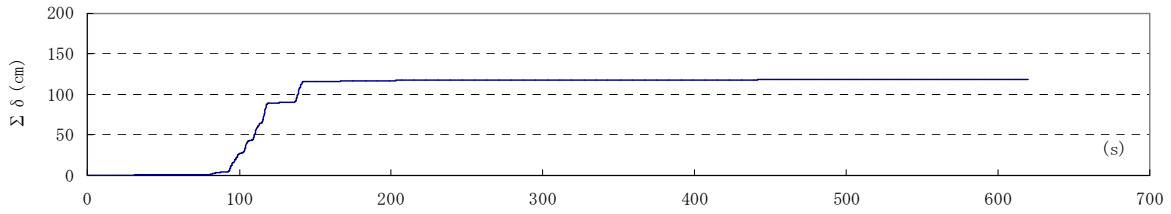


累積すべり変位時刻歴波形 (累積すべり変位依存性考慮)

(c) T-TN-AIC004-AV



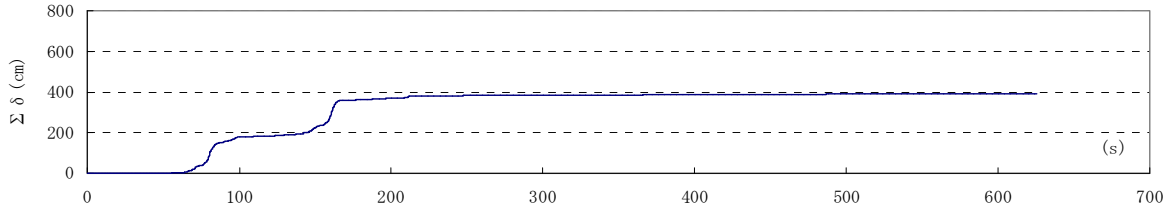
累積すべり変位時刻歴波形 (依存性無視)



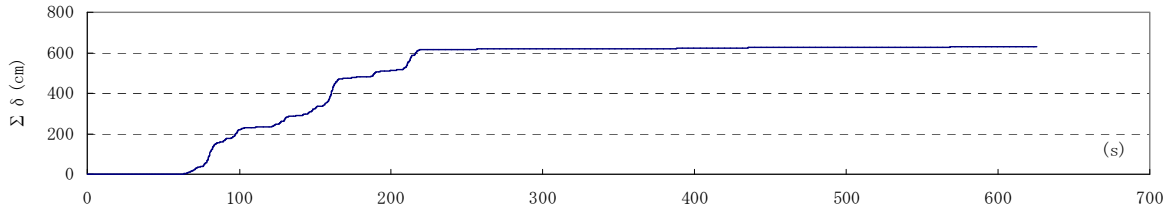
累積すべり変位時刻歴波形 (累積すべり変位依存性考慮)

(d) T-TN-KGIN1F-AV

図 2.3.6-18 弾性すべり支承累積すべり変位(入力×1.25)

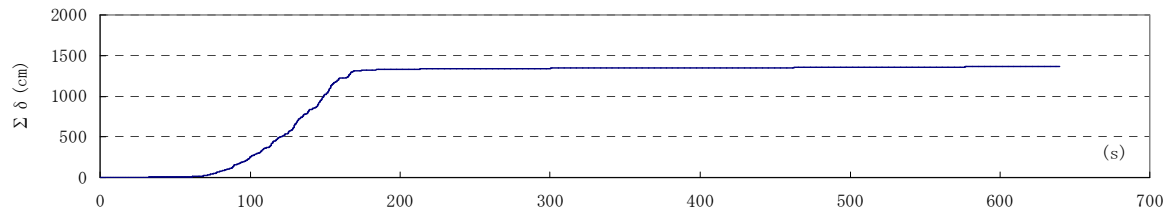


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

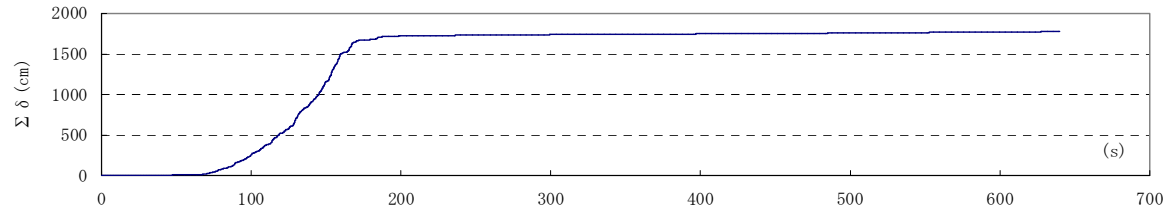


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(a) N-OSKH02-AV

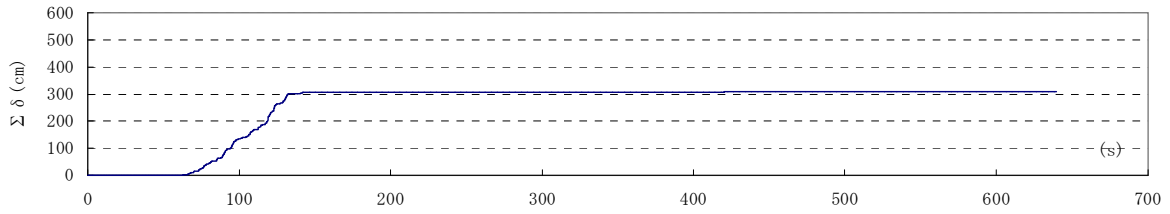


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

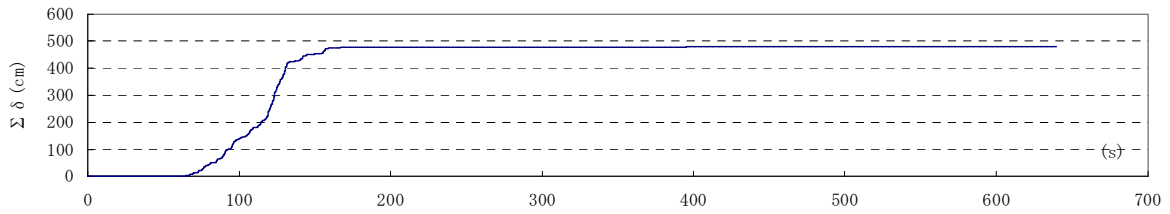


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(b) T-TN-AIC003-AV

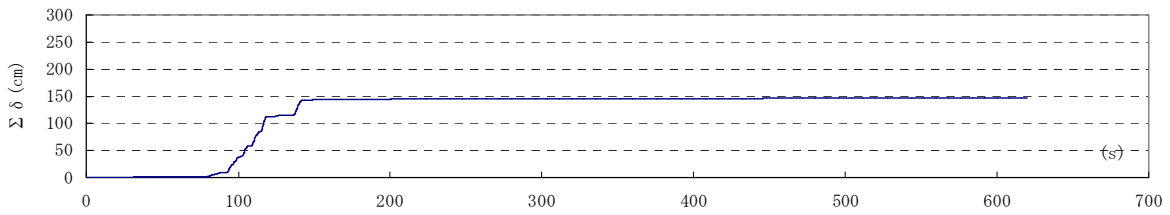


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

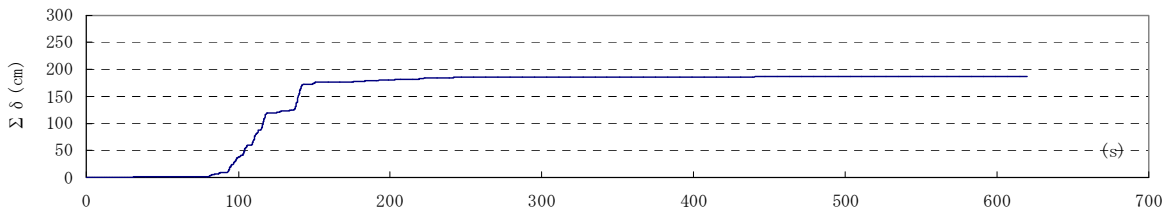


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) T-TN-AIC004-AV



累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(d) T-TN-KGIN1F-AV

図 2.3.6-19 弾性すべり支承累積すべり変位(入力×1.5)

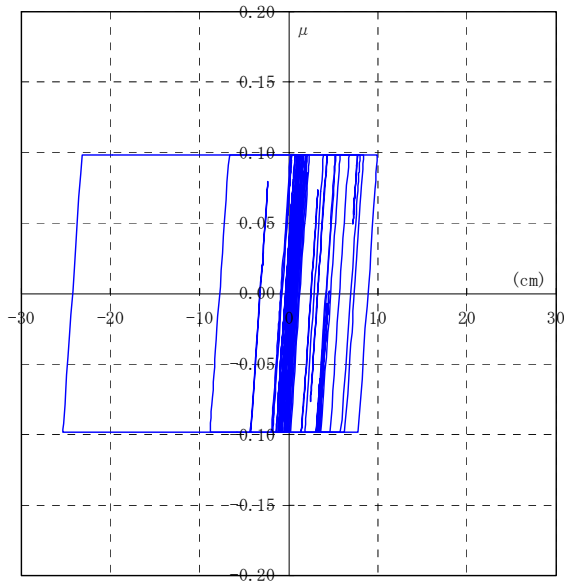
(4) 2方向入力 of 検討

2方向入力用地震動を各方向に単独に入力した場合(1方向入力)と、2方向同時入力した場合の応答性状について、依存性無視したケースと累積すべり変位依存性を考慮したケースを比較する。

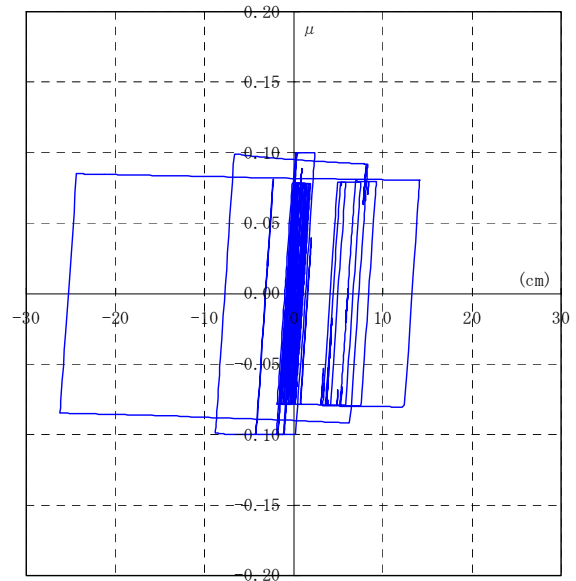
応答最大値一覧を表 2.3.6-3 に示す。また、1方向単独入力の場合と2方向同時入力の場合の応答履歴を各方向成分毎に図 2.3.6-20～2.3.6-24 に、累積すべり変位時刻歴波形を図 2.3.6-25～2.3.6-29 に示す。

表 2.3.6-3 応答最大値一覧

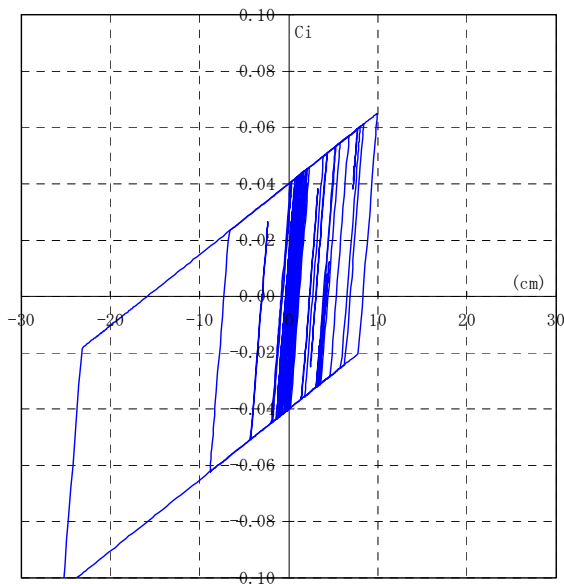
入力			応答最大値									
地震波	入力方法	成分	加速度(Gal)		免震層変位(cm)		せん断力係数		累積すべり変位(m)		V _E (cm/s)	
			依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮	依存性無視	依存性考慮
WAVE-Ts1	1方向	NS	101.7	98.5	25.3	26.2	0.104	0.101	1.21	1.32	97.5	95.1
		EW	78.1	75.8	15.8	16.1	0.080	0.077	1.38	1.59	104.3	103.7
	2方向	NS	102.3	101.1	27.8	29.4	0.104	0.103	2.59	2.97	142.7	137.5
		EW	70.4	69.4	20.3	21.5	0.072	0.071				
WAVE-Ts2	1方向	NS	49.9	50.7	4.4	6.1	0.051	0.052	0.40	0.53	56.4	63.2
		EW	56.8	56.4	7.1	8.4	0.058	0.058	0.42	0.50	58.0	61.2
	2方向	NS	54.5	51.3	6.2	7.5	0.056	0.052	0.98	1.51	87.6	101.1
		EW	54.7	59.1	8.0	12.3	0.056	0.060				
WAVE-Tk	1方向	NS	67.2	60.4	11.4	12.3	0.069	0.062	3.91	4.64	175.2	169.6
		EW	79.8	83.7	16.5	22.0	0.081	0.085	4.93	6.97	196.6	206.2
	2方向	NS	66.3	61.5	12.8	13.3	0.068	0.063	8.33	11.27	255.6	260.5
		EW	85.0	93.2	18.8	26.5	0.087	0.095				
WAVE-S	1方向	NS	54.1	50.6	6.0	66.6	0.055	0.052	2.19	2.51	131.1	127.4
		EW	61.5	55.1	9.1	10.1	0.063	0.056	2.34	2.97	135.7	137.5
	2方向	NS	55.1	48.1	6.5	7.6	0.056	0.049	4.51	6.12	188.0	193.7
		EW	59.4	54.3	8.4	10.3	0.061	0.055				
WAVE-K	1方向	NS	53.6	49.1	5.8	6.2	0.055	0.050	1.77	2.15	117.9	118.6
		EW	54.1	51.4	6.0	7.0	0.055	0.052	1.50	1.68	108.6	106.3
	2方向	NS	55.0	46.9	6.5	6.8	0.056	0.048	3.04	3.65	154.4	151.4
		EW	53.4	46.3	6.0	6.2	0.055	0.047				



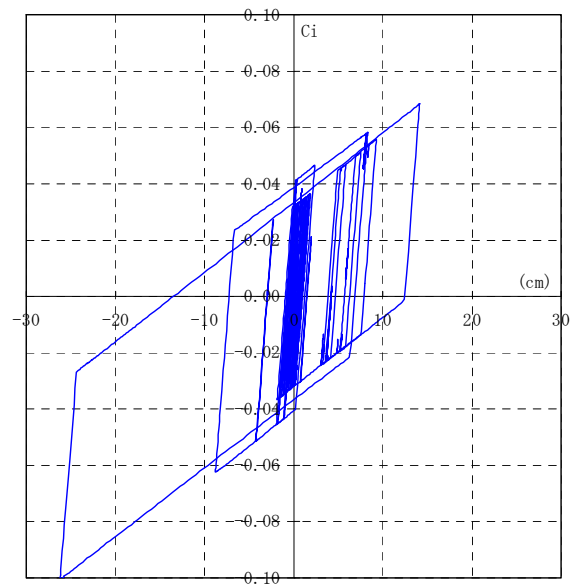
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

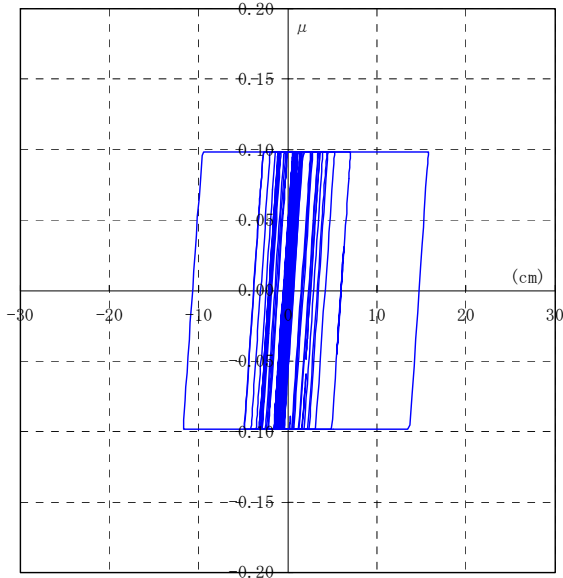


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

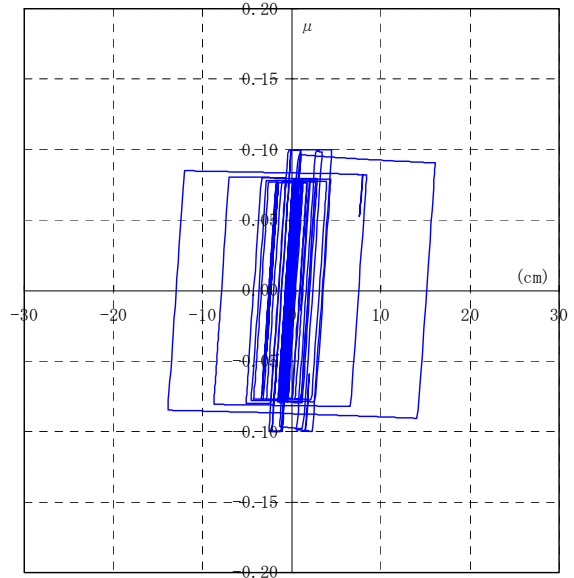


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

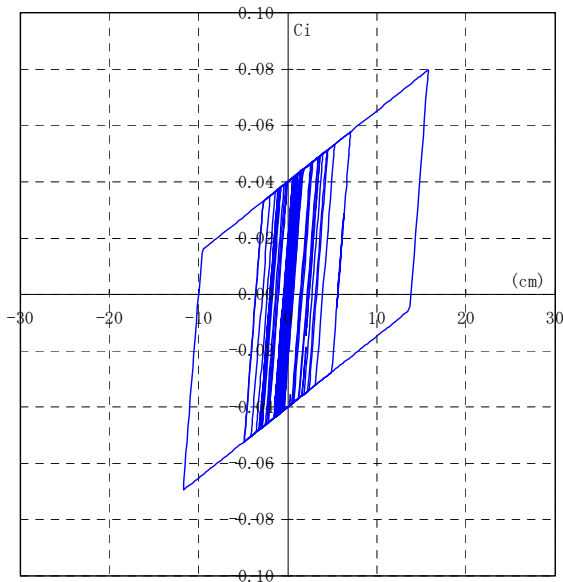
(a) WAVE-Ts1 1 方向入力(NS 成分)



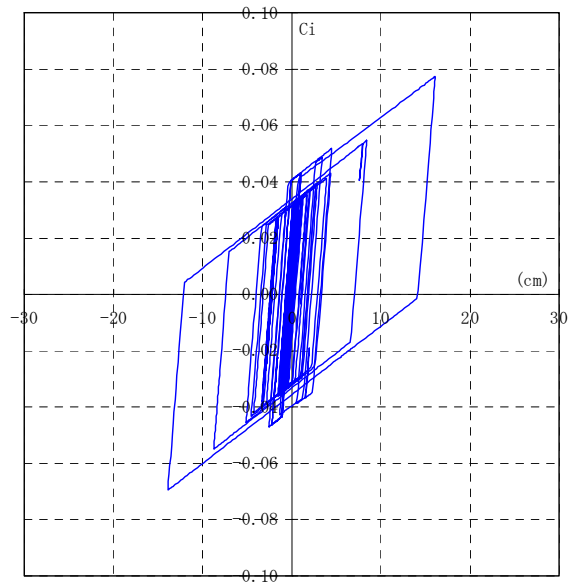
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

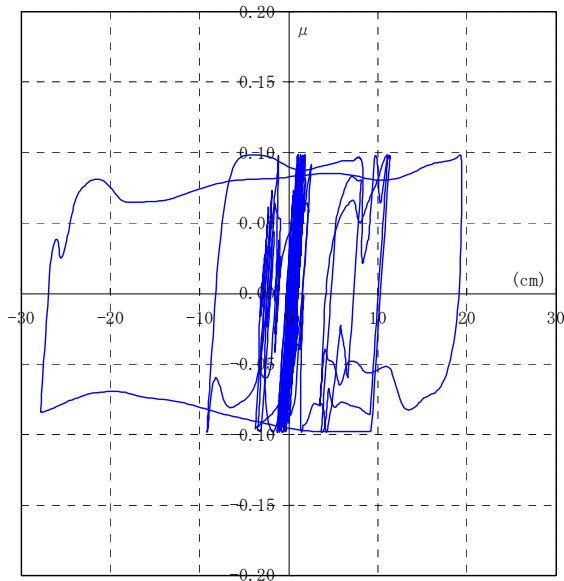


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

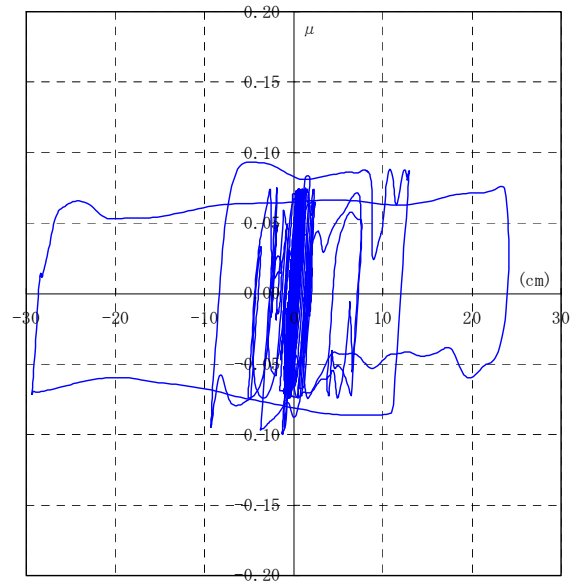


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

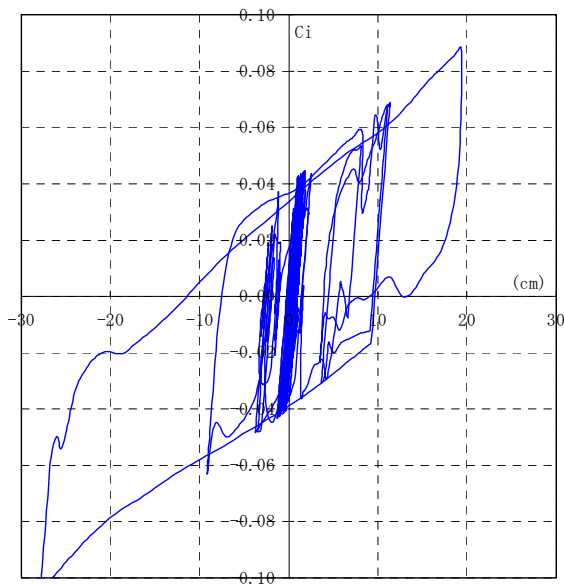
(b) WAVE-Ts1 1 方向入力(EW 成分)



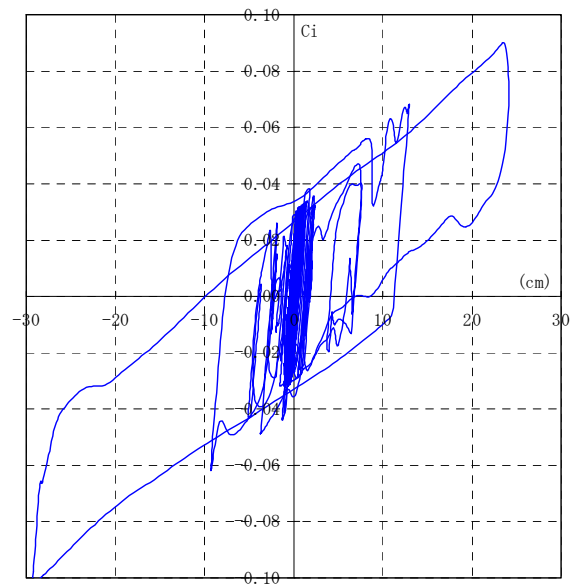
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

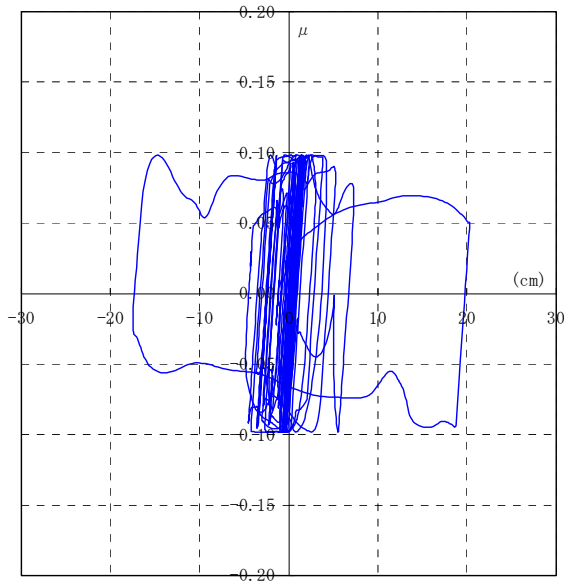


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

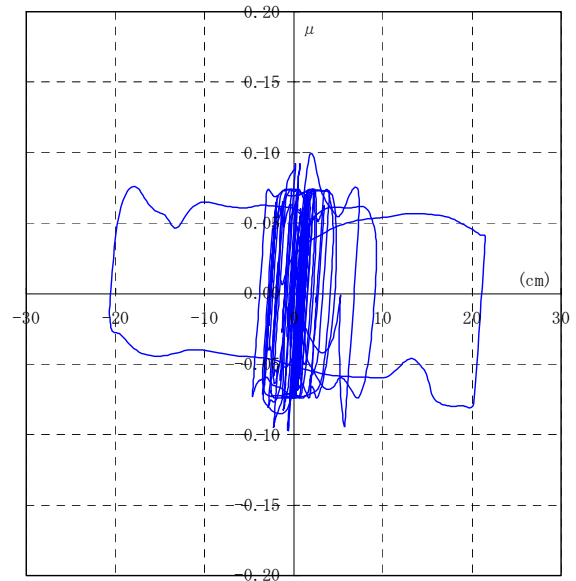


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

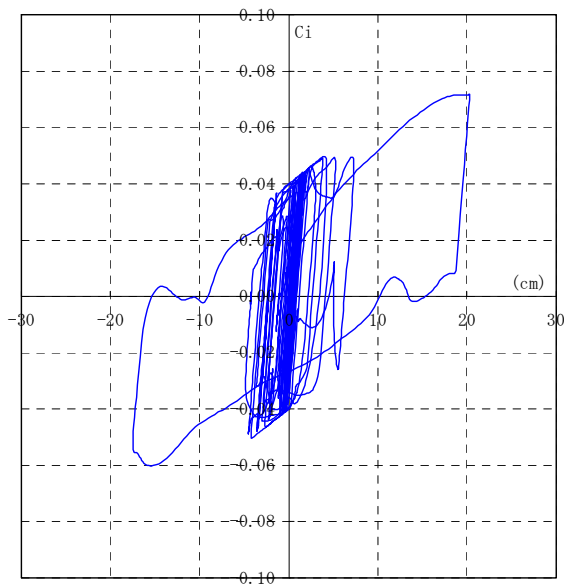
(c) WAVE-Ts1 2方向入力(NS成分)



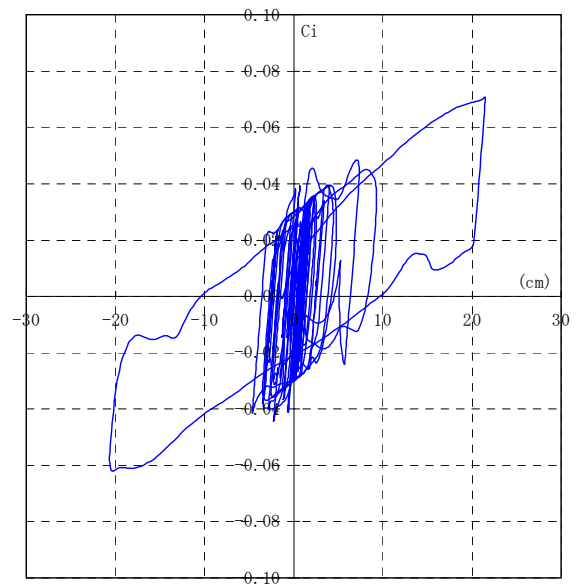
弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)



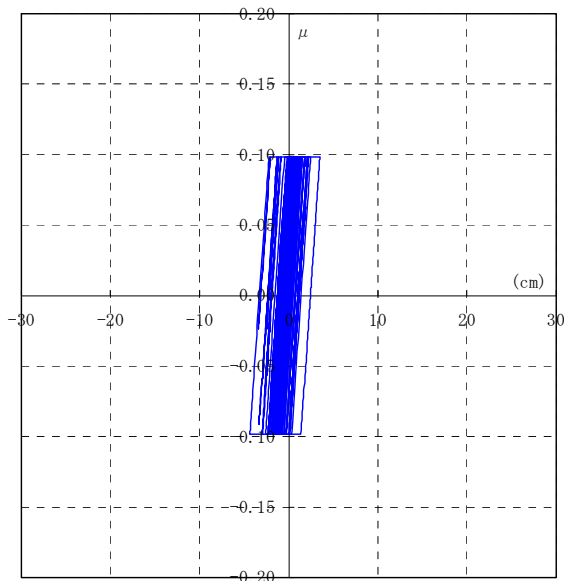
免震層C- δ 履歴 (依存性無視)



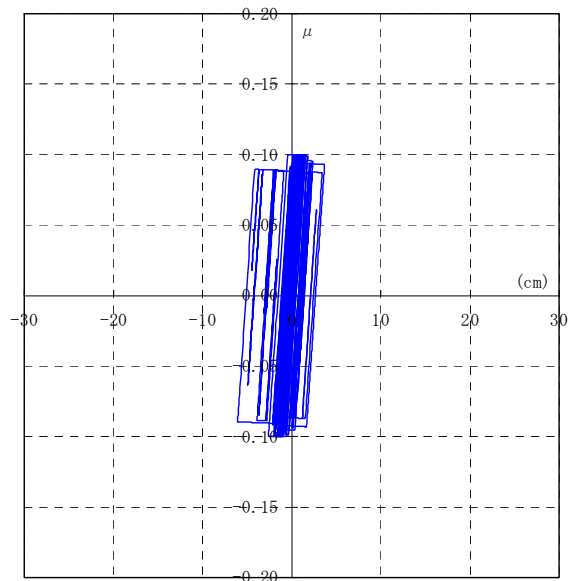
免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

(d) WAVE-Ts1 2方向入力(EW成分)

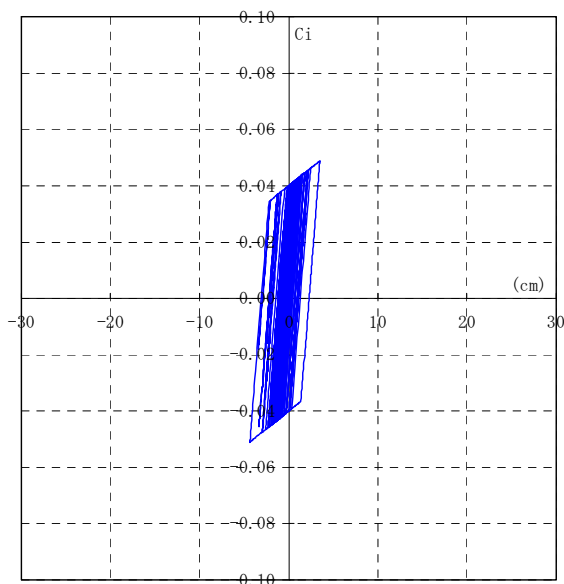
図 2.3.6-20 応答履歴の比較(WAVE-Ts1)



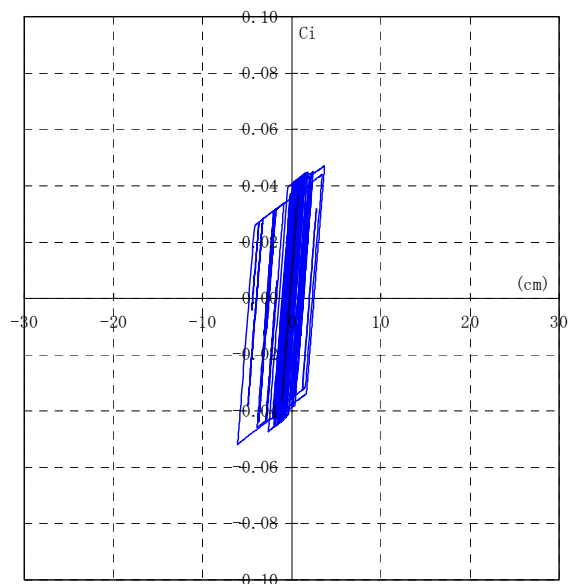
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

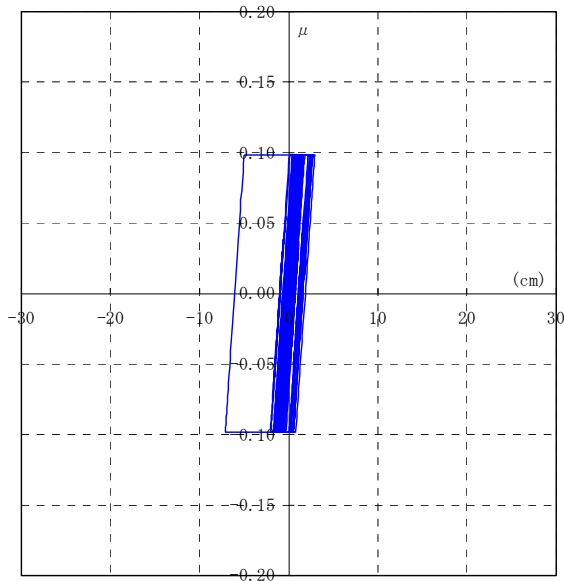


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

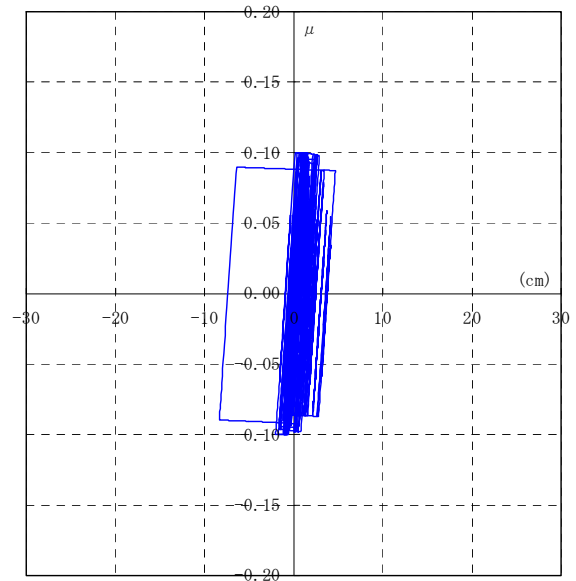


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

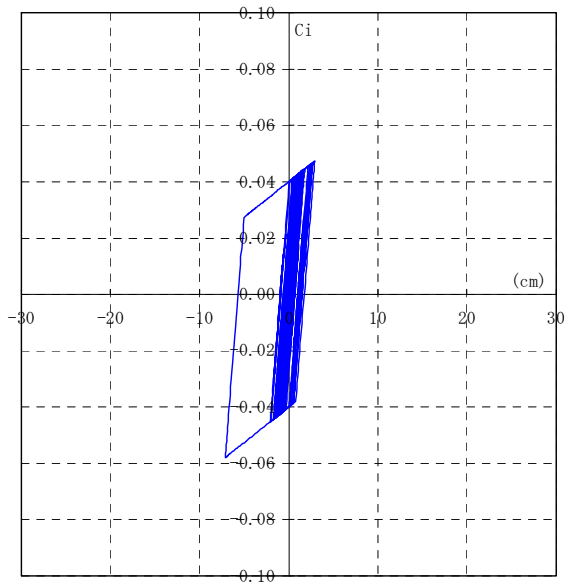
(a) WAVE-Ts2 1方向入力(NS成分)



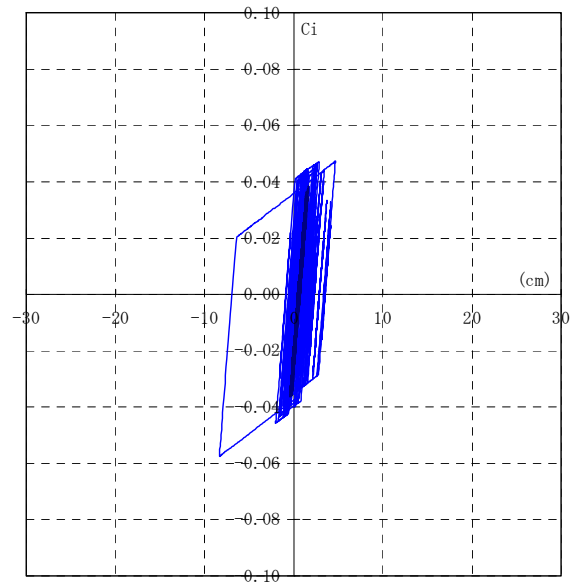
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

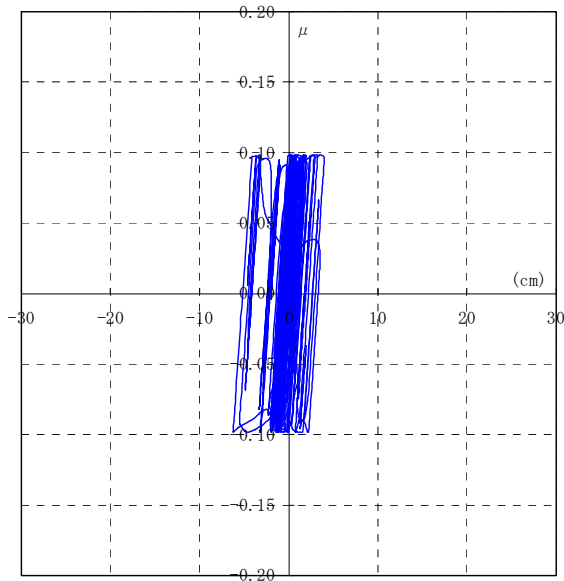


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

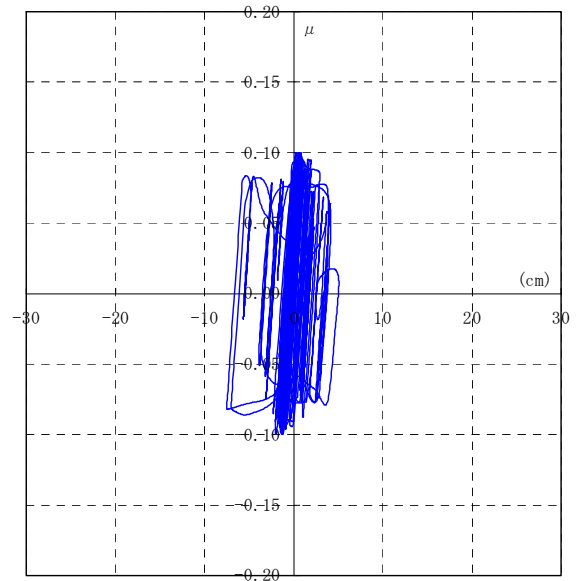


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

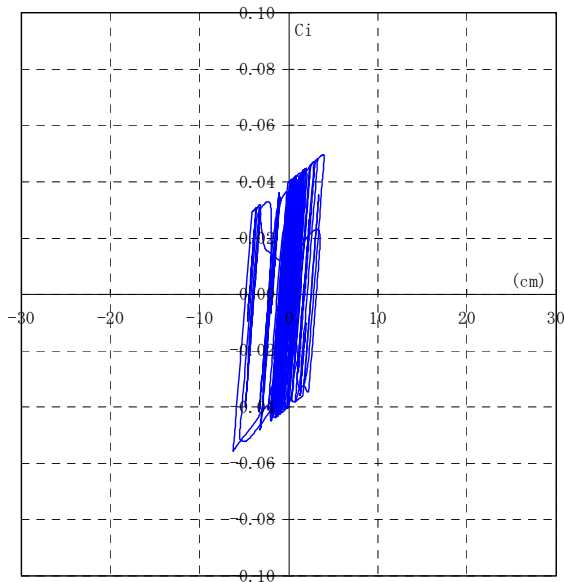
(b) WAVE-Ts2 1 方向入力(EW 成分)



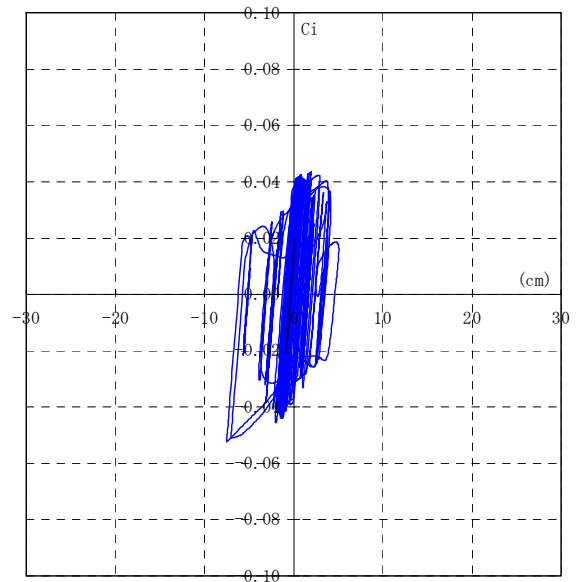
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

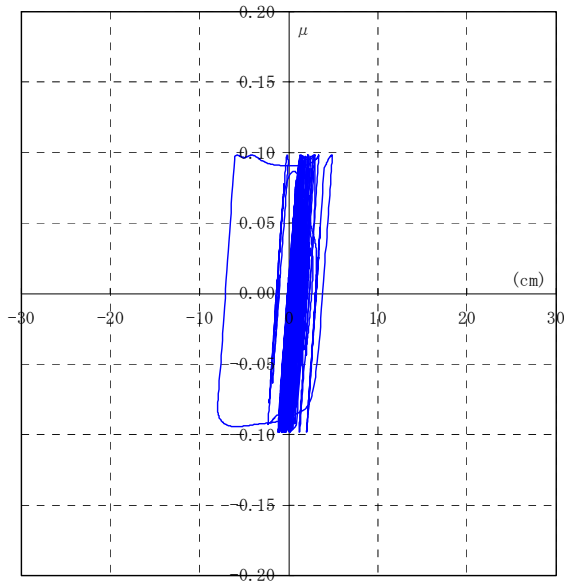


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

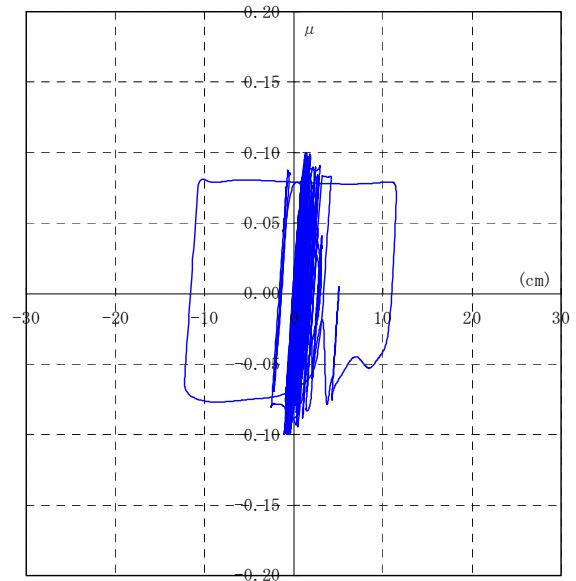


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

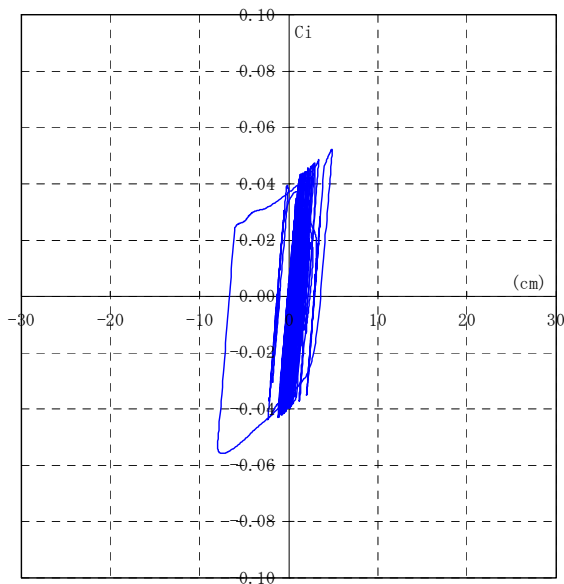
(c) WAVE-Ts2 2方向入力(NS成分)



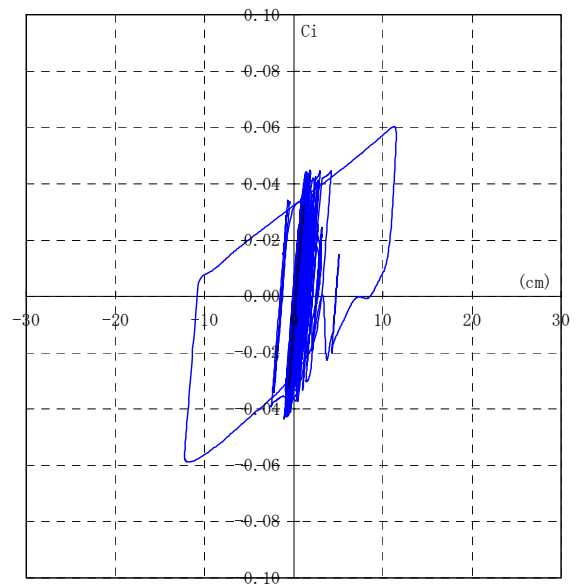
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)



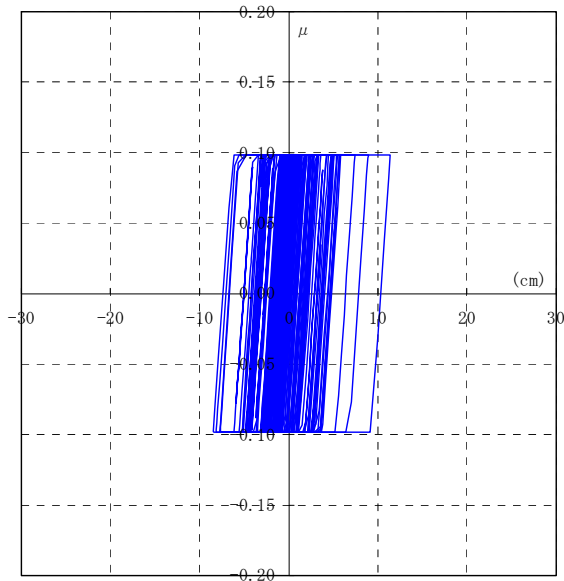
免震層C- δ 履歴 (依存性無視)



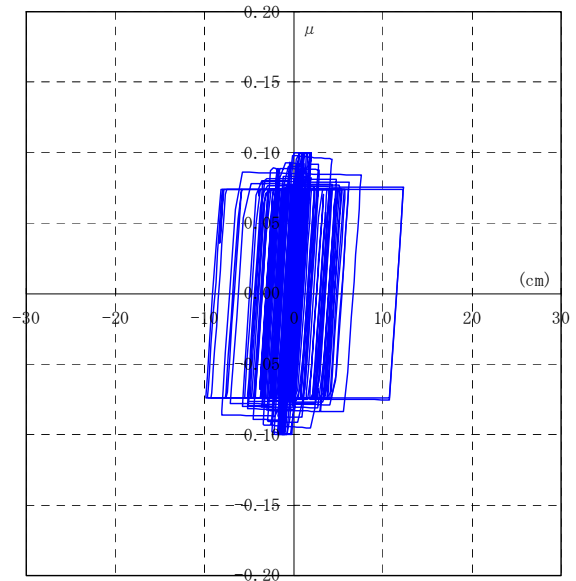
免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

(d) WAVE-Ts2 2 方向入力(EW 成分)

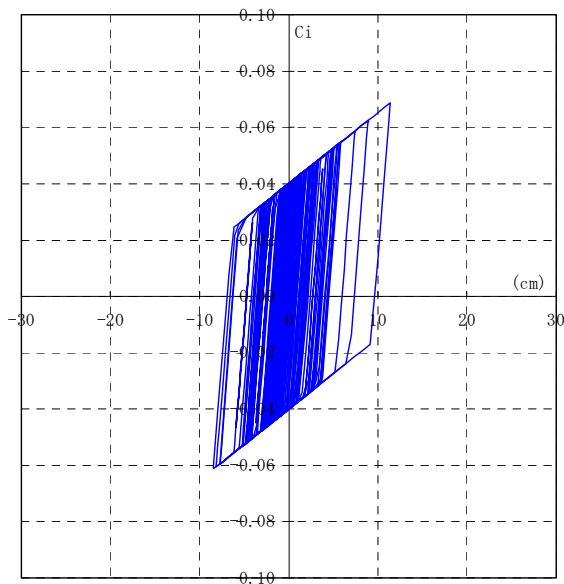
図 2.3.6-21 応答履歴の比較(WAVE-Ts2)



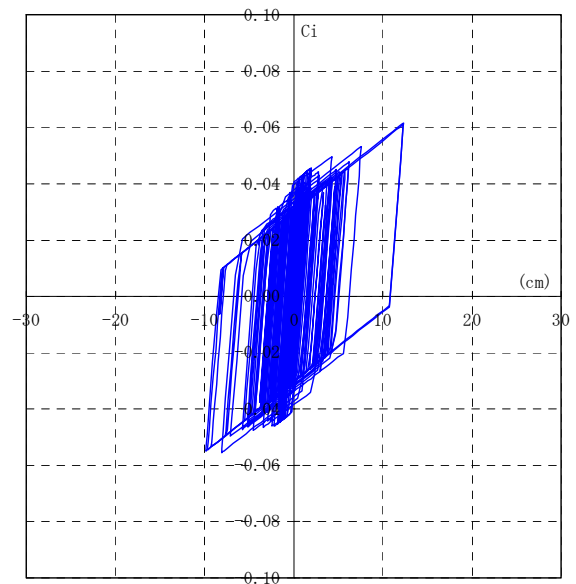
弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

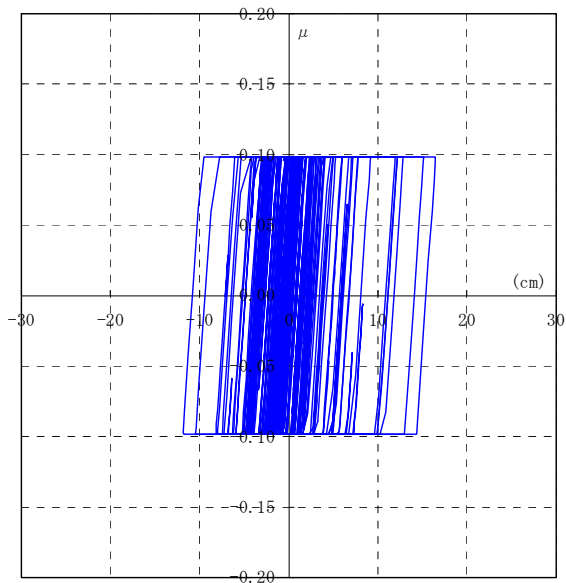


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

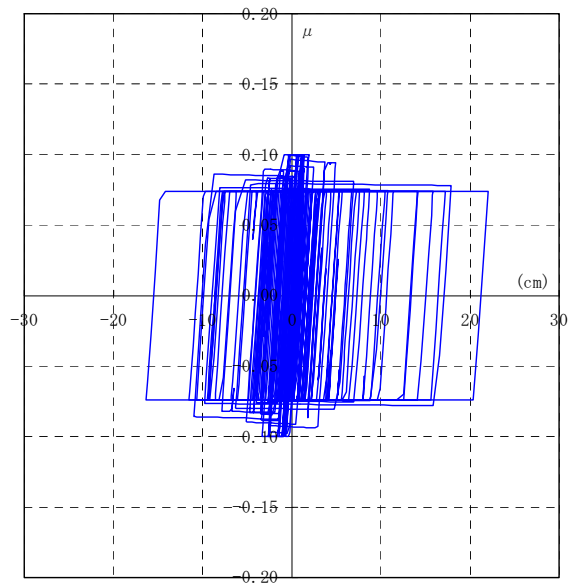


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

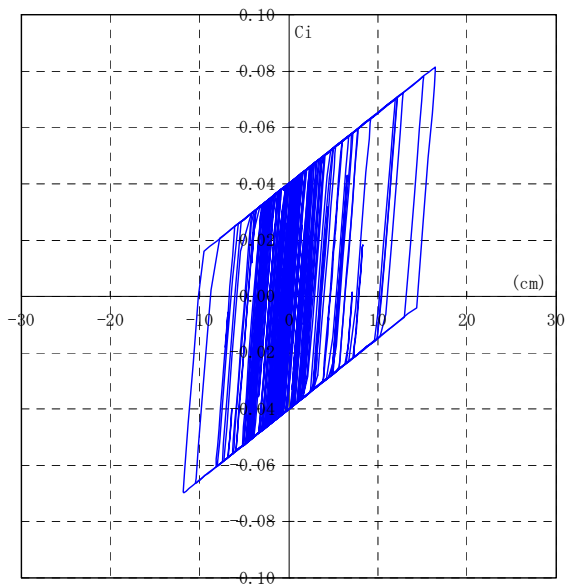
(a) WAVE-Tk 1 方向入力(NS 成分)



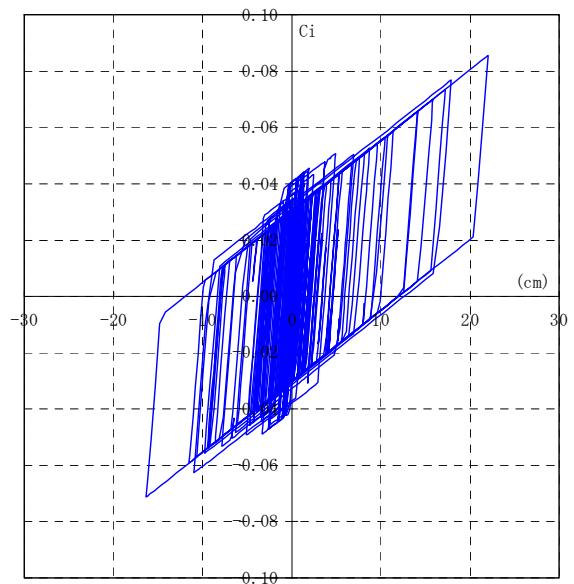
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

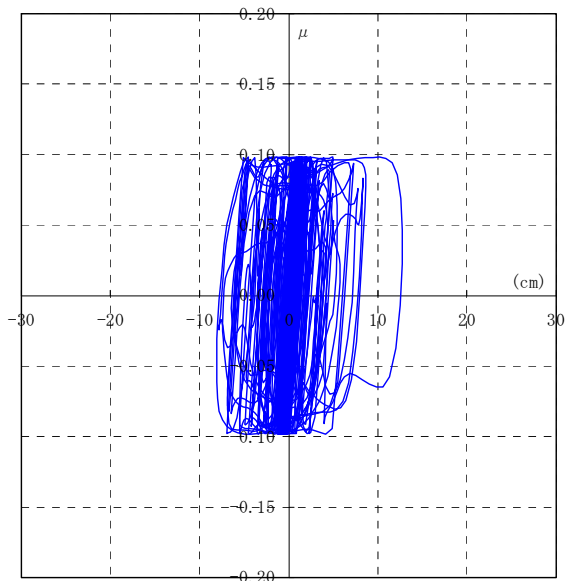


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

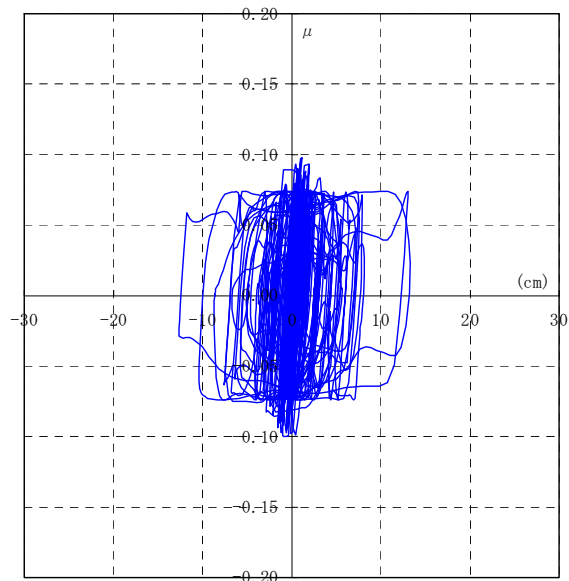


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

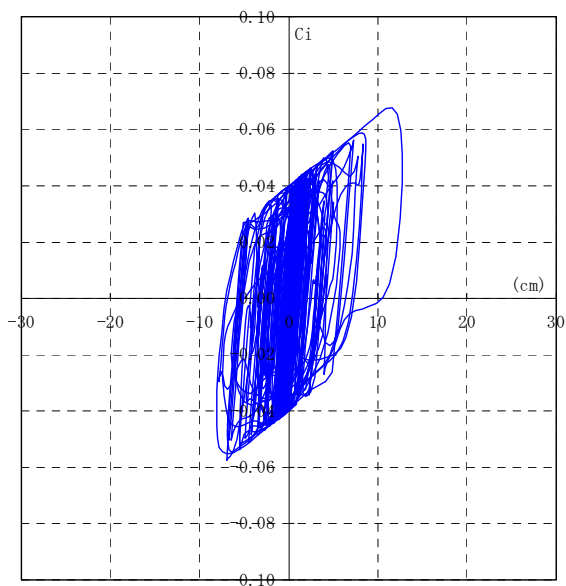
(b) WAVE-Tk 1 方向入力(EW 成分)



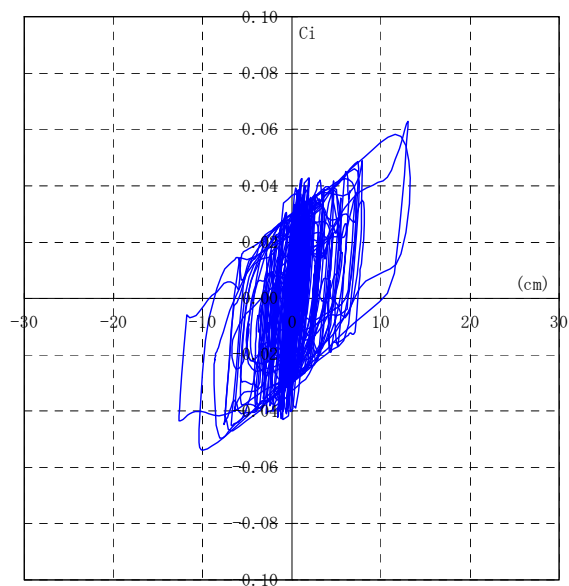
弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

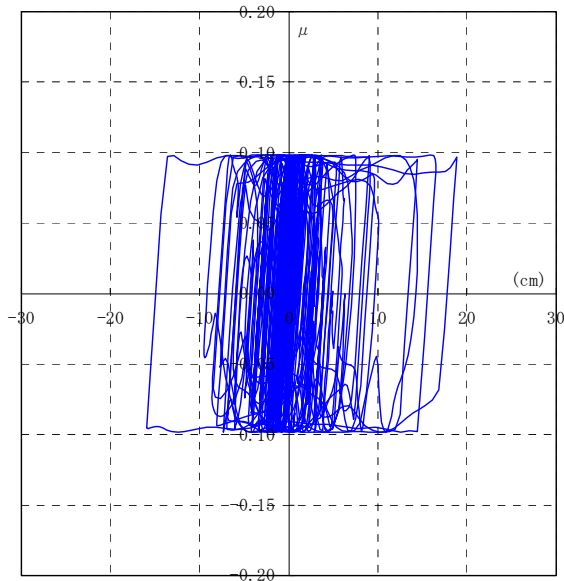


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

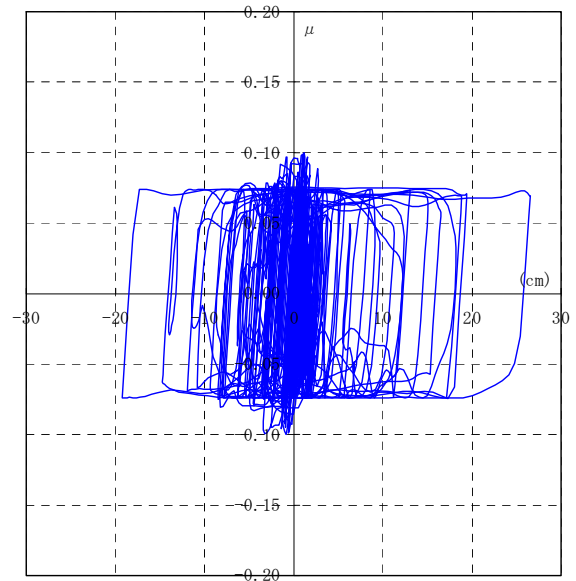


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

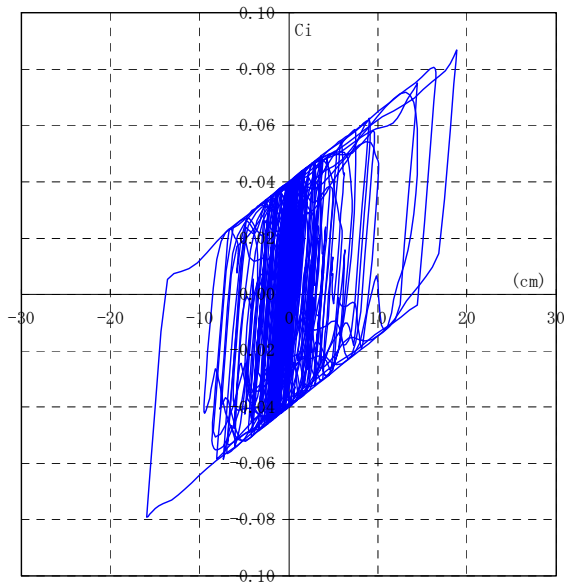
(c) WAVE-Tk 2 方向入力(NS 成分)



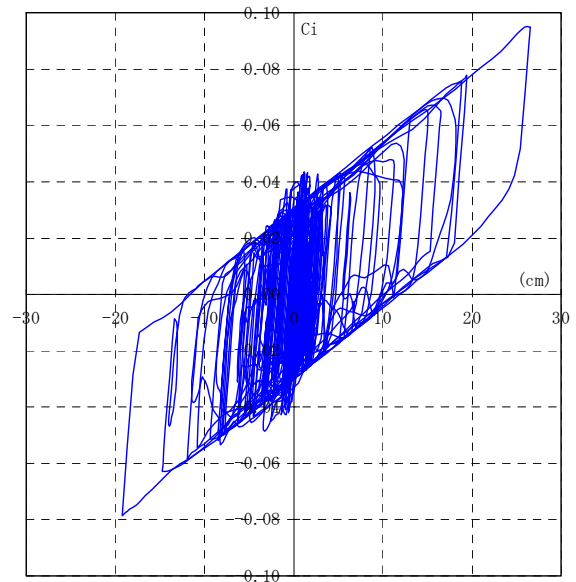
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)



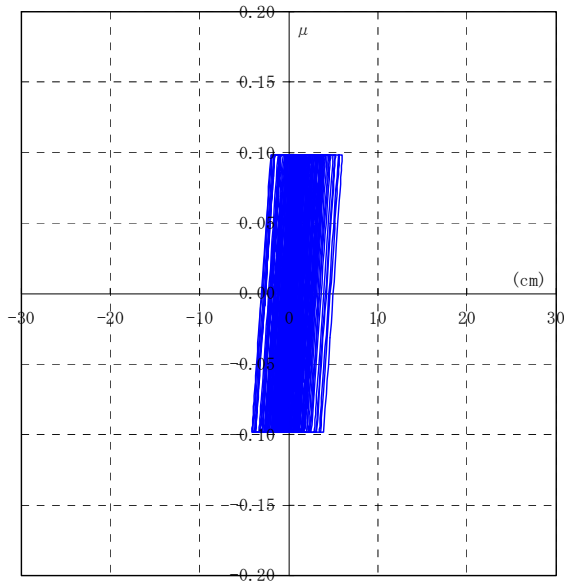
免震層C- δ 履歴 (依存性無視)



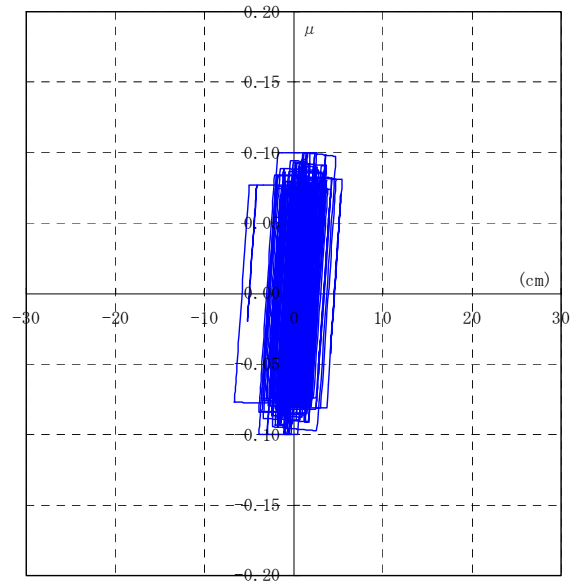
免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

(d) WAVE-Tk 2 方向入力(EW 成分)

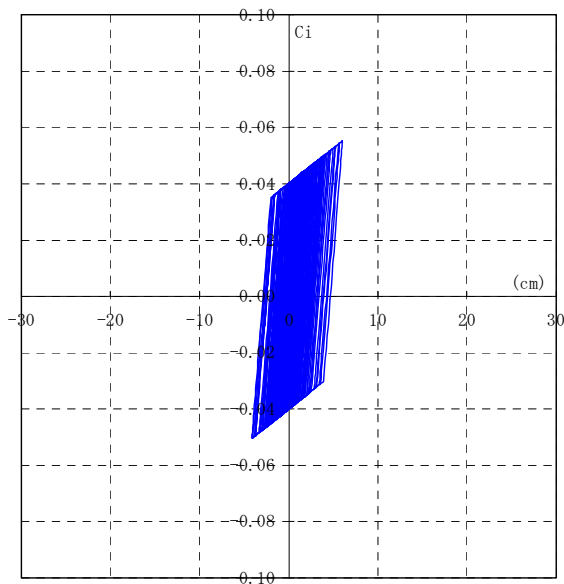
図 2.3.6-22 応答履歴の比較(WAVE-Tk)



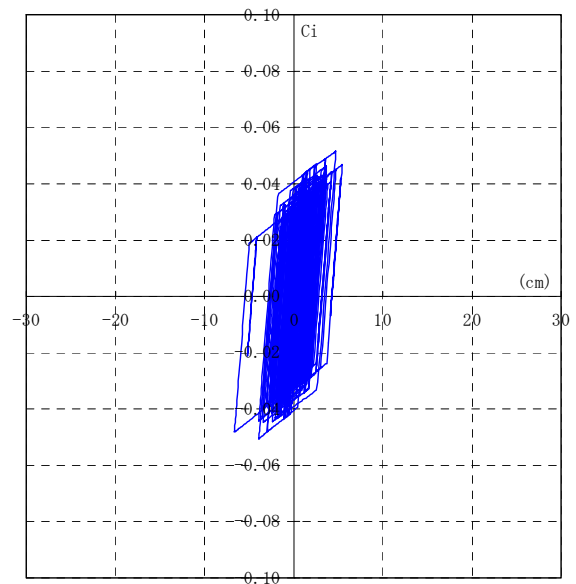
弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

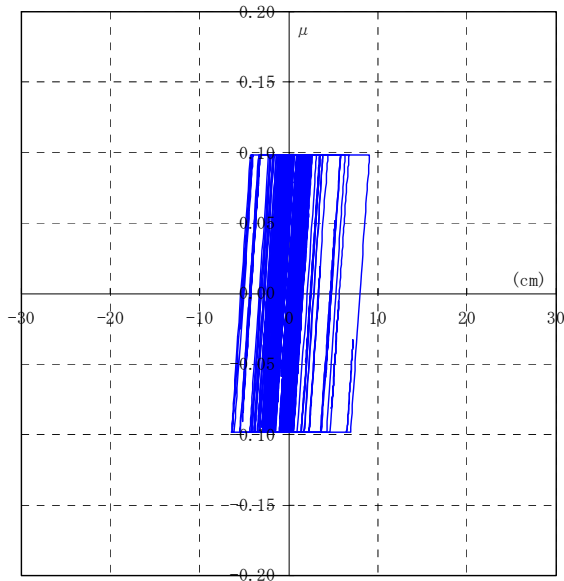


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

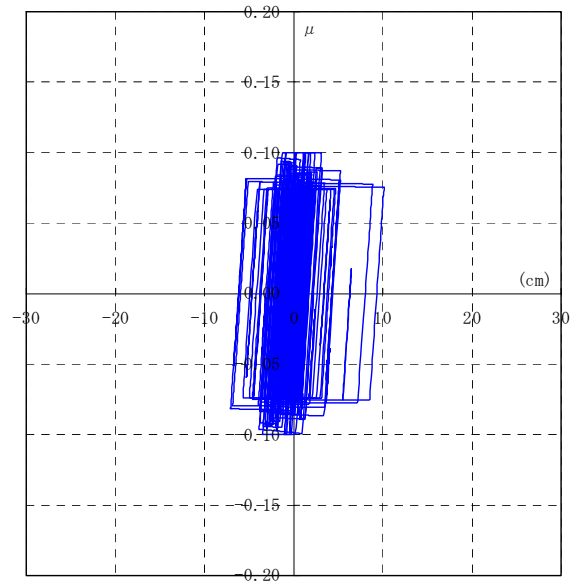


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

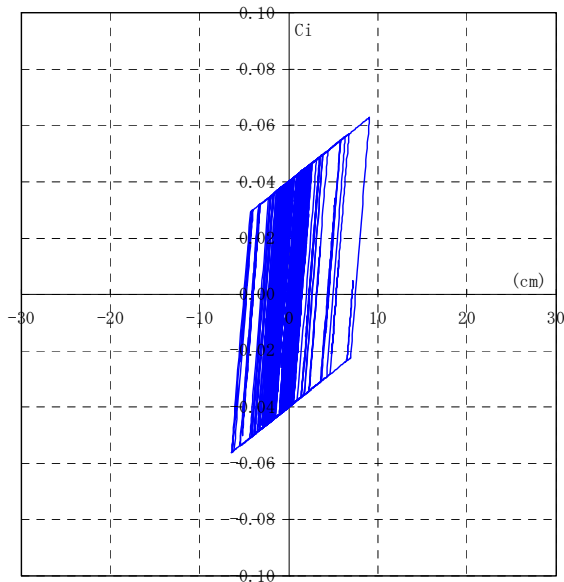
(a) WAVE-S 1 方向入力(NS 成分)



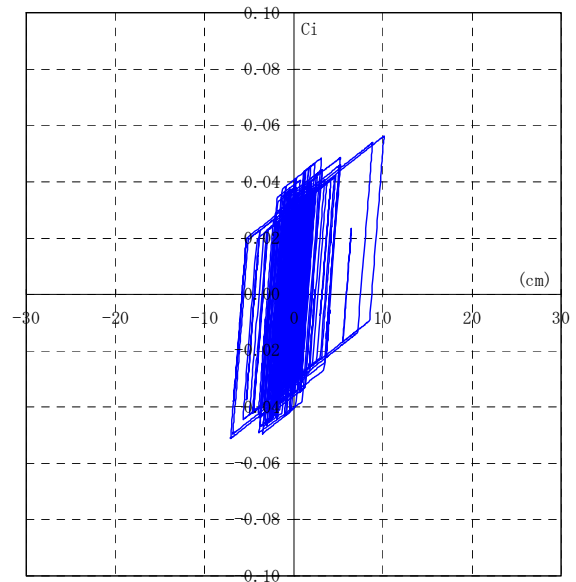
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

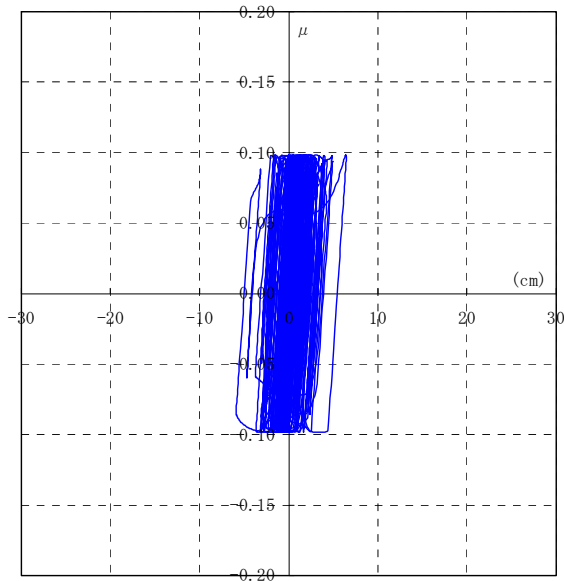


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

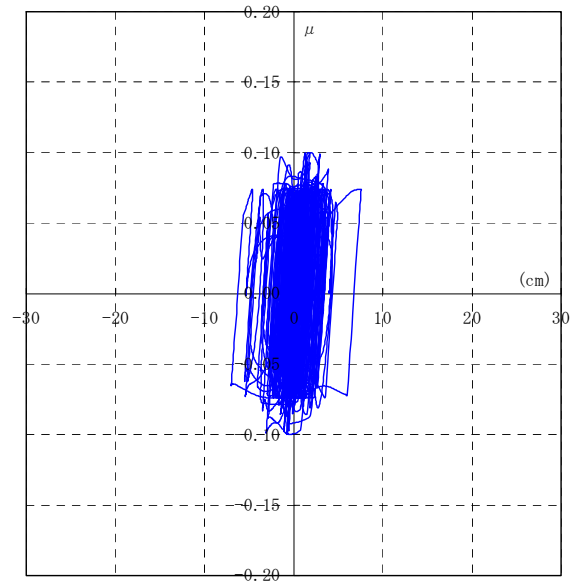


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

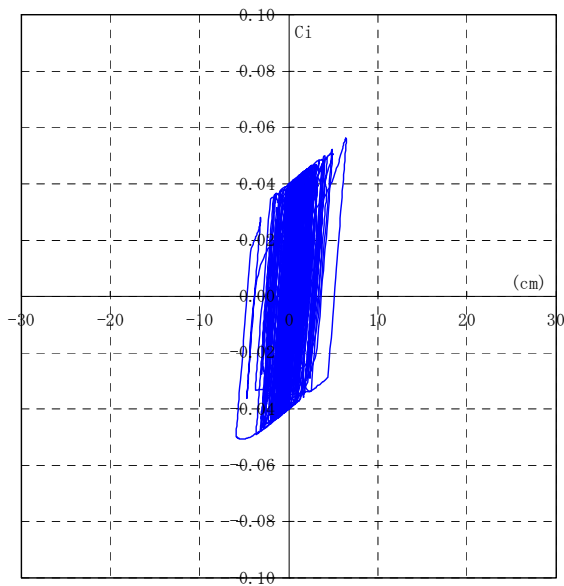
(b) WAVE-S 1 方向入力(EW 成分)



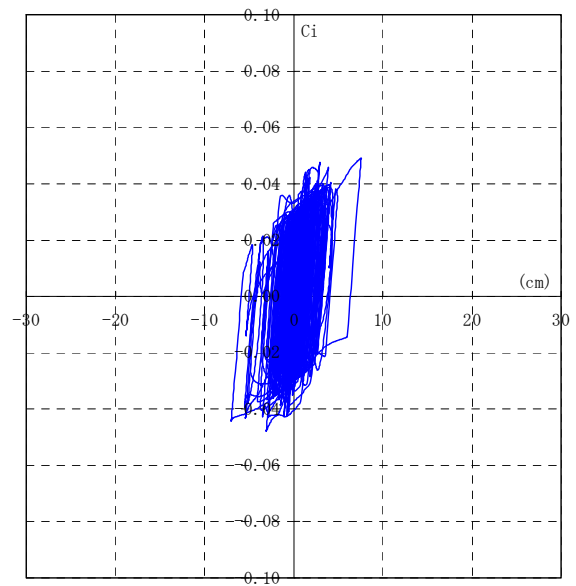
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

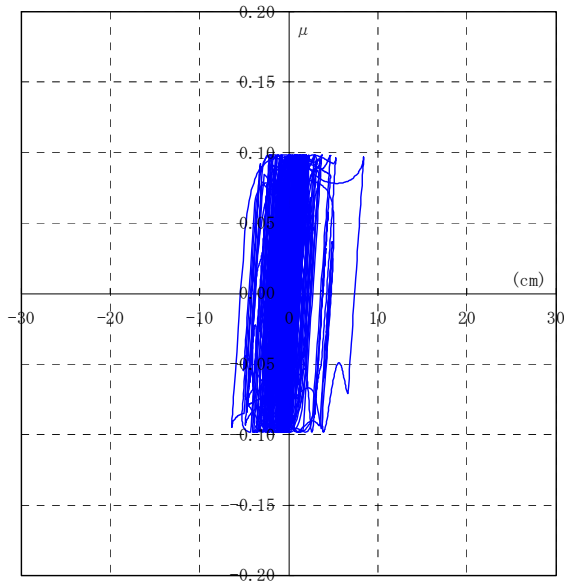


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

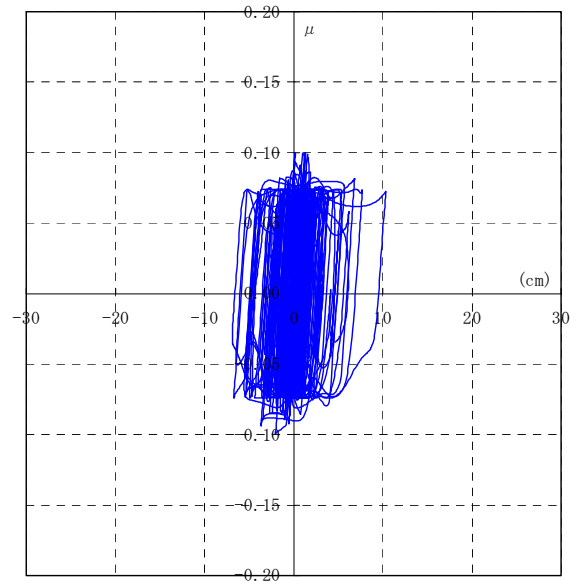


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

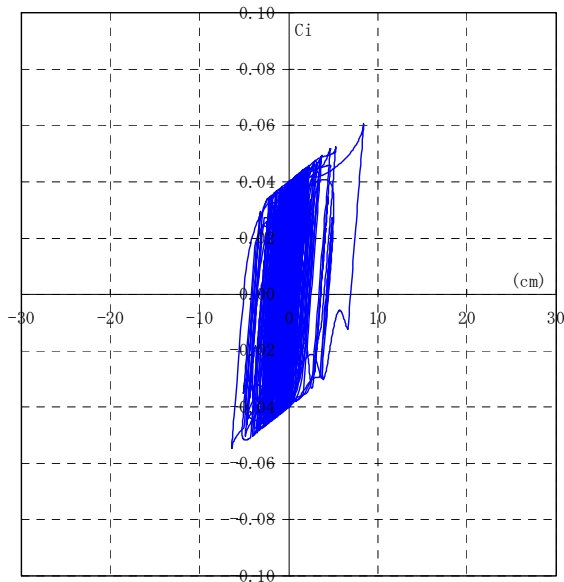
(c) WAVE-S 2方向入力(NS成分)



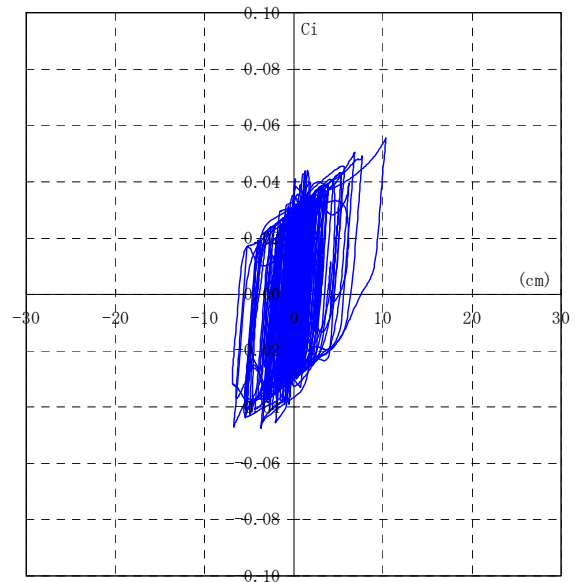
弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)



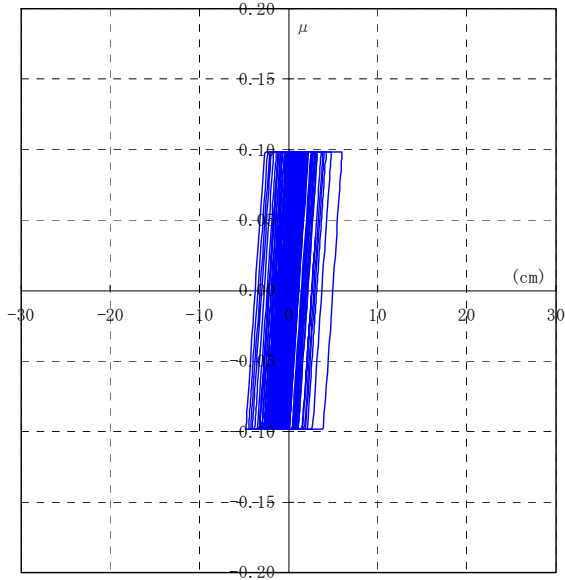
免震層 C - δ 履歴 (依存性無視)



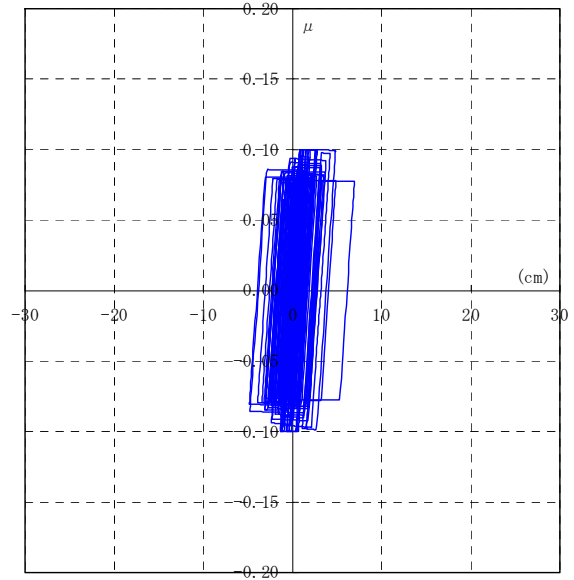
免震層 C - δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

(d) WAVE-S 2 方向入力(EW 成分)

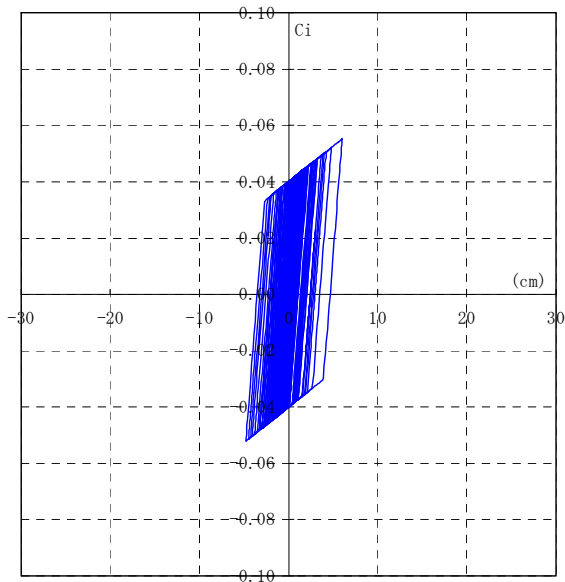
図 2.3.6-23 応答履歴の比較(WAVE-S)



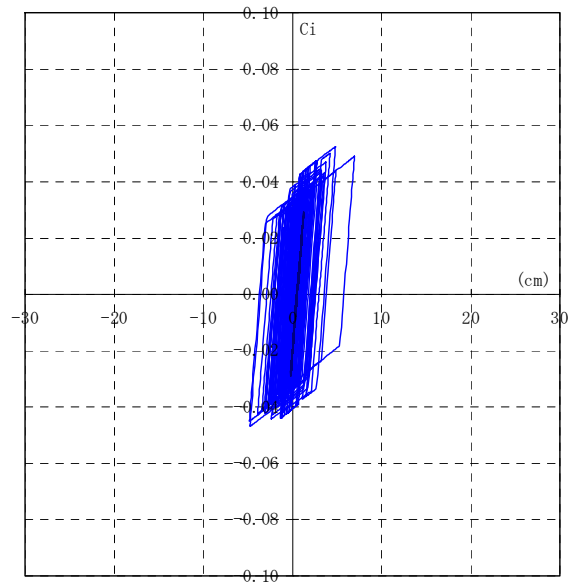
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

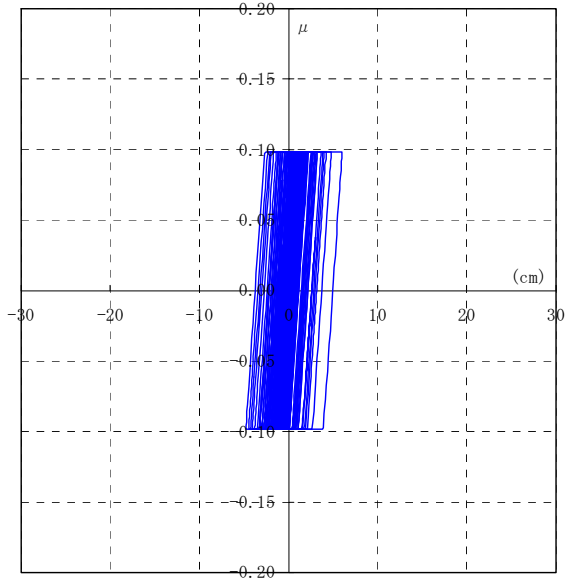


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

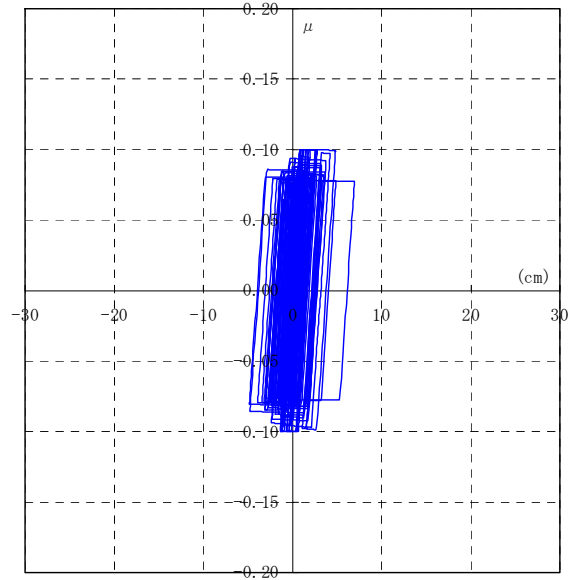


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

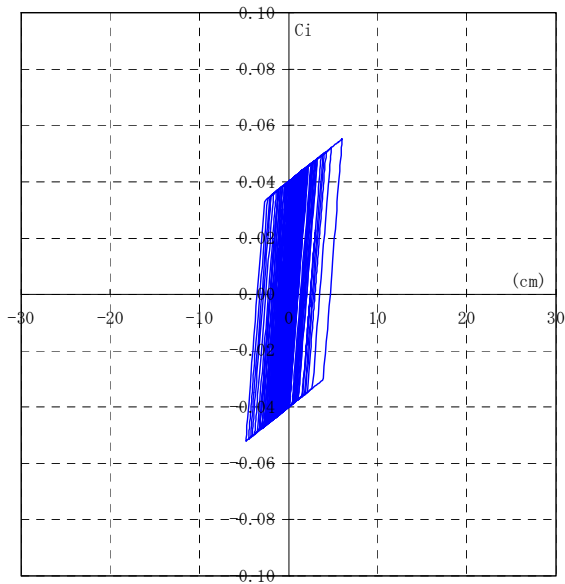
(a) WAVE-K 1方向入力(NS成分)



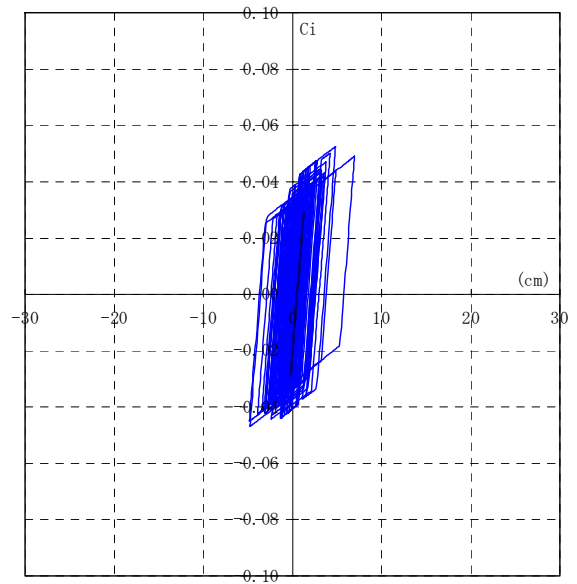
弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

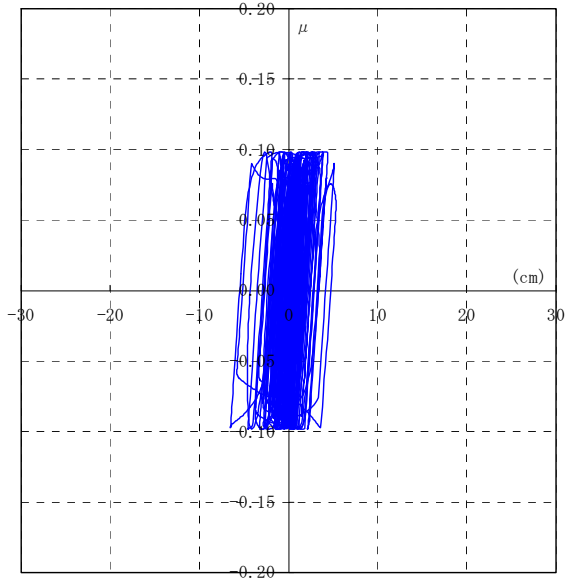


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

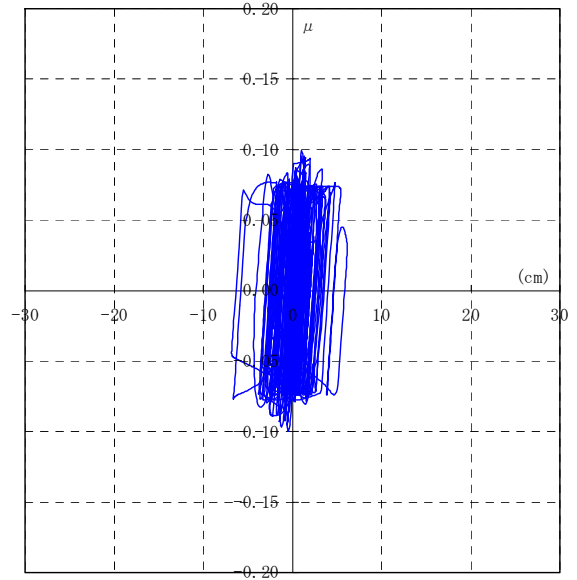


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

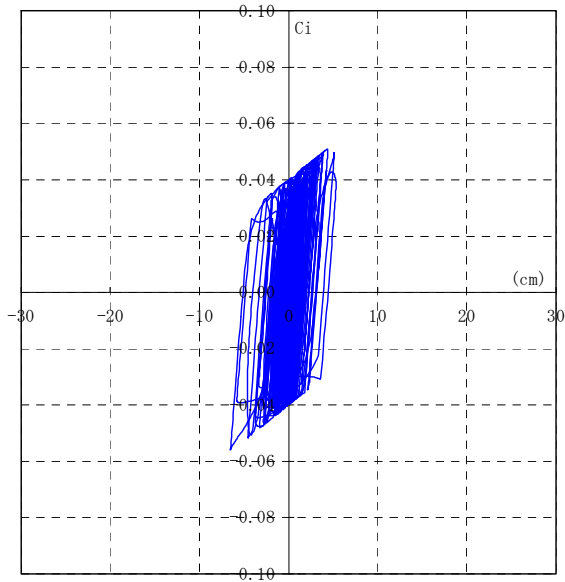
(b) WAVE-K 1 方向入力(EW 成分)



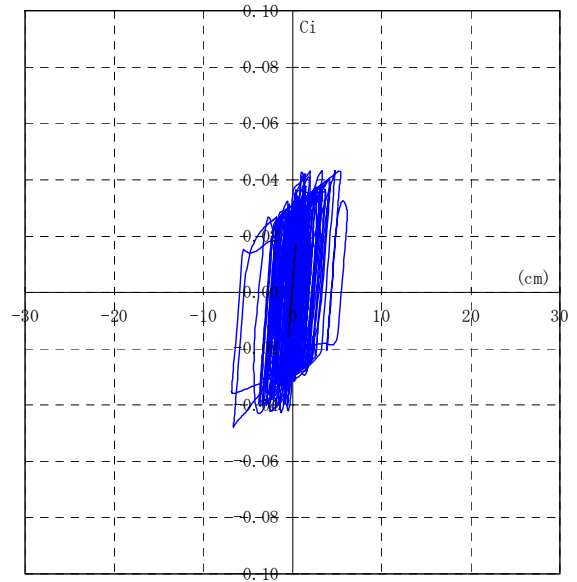
弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

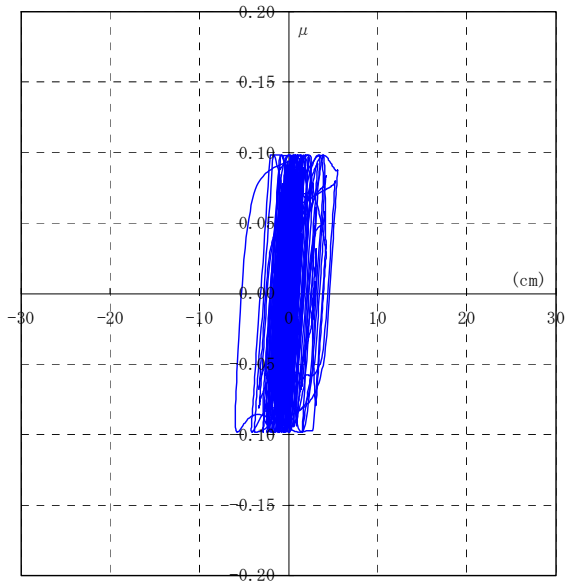


免震層C- δ 履歴 (依存性無視)

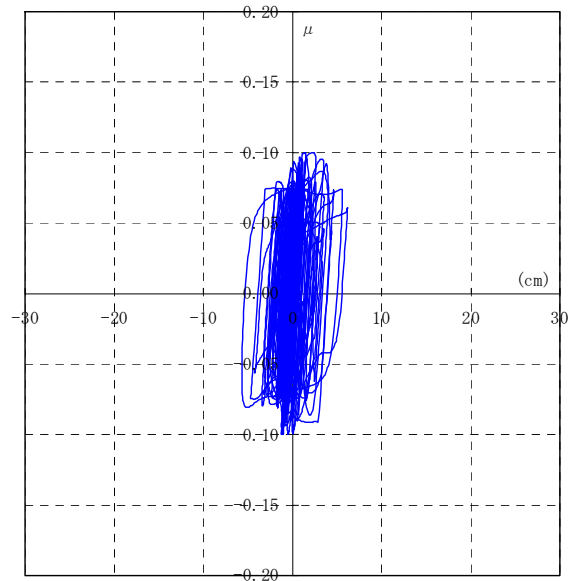


免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

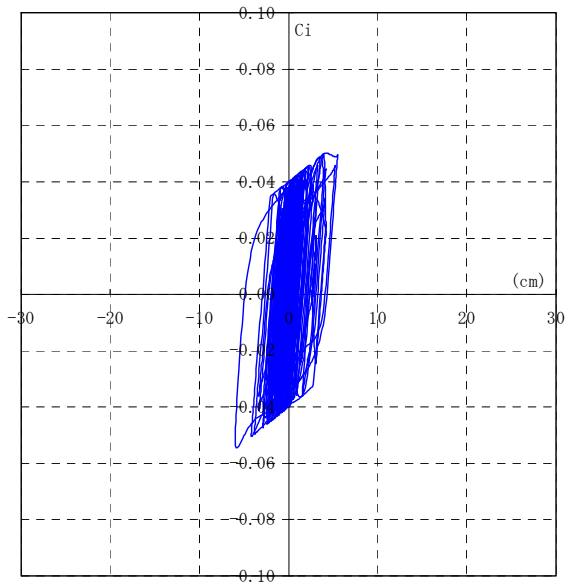
(c) WAVE-K 2方向入力(NS成分)



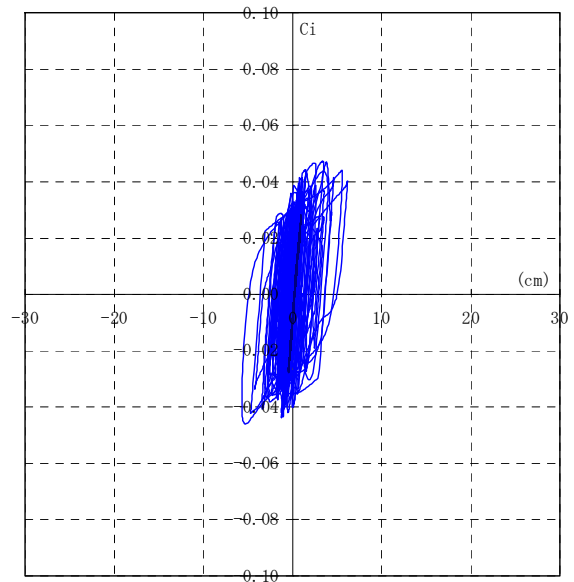
弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)



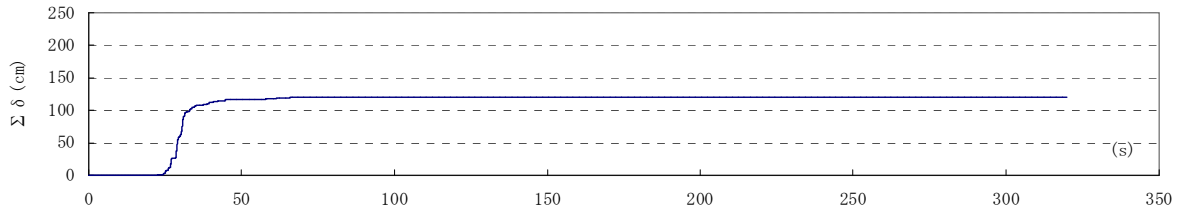
免震層C- δ 履歴 (依存性無視)



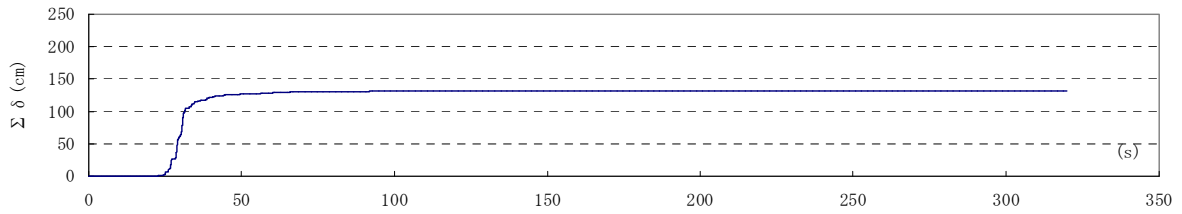
免震層C- δ 履歴 (累積すべり変位依存性考慮)

(d) WAVE-K 2方向入力(EW成分)

図 2.3.6-24 応答履歴の比較(WAVE-K)

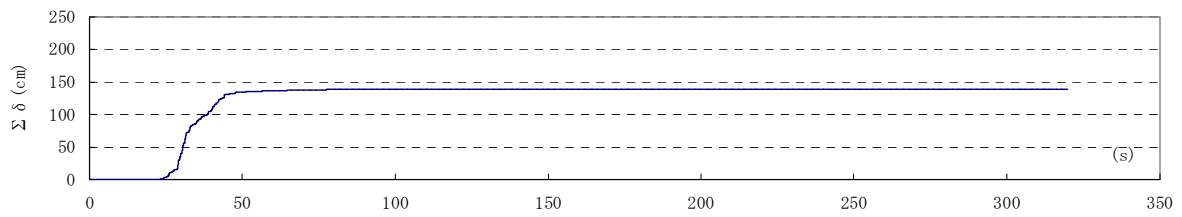


累積すべり変位時刻歴波形 (依存性無視)

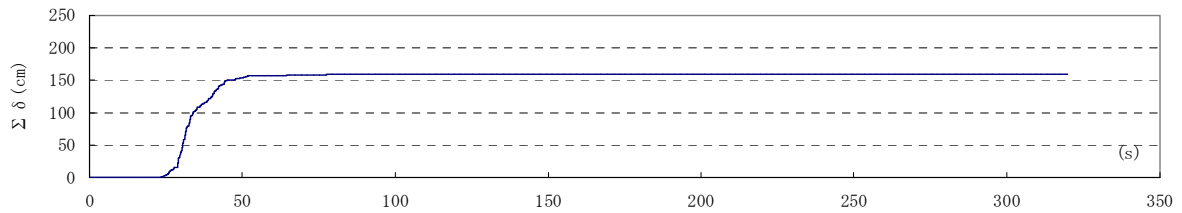


累積すべり変位時刻歴波形 (累積すべり変位依存性考慮)

(a) WAVE-Ts1 1 方向入力(NS 成分)

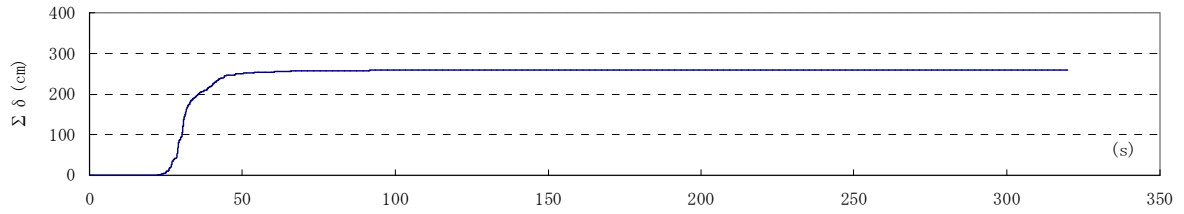


累積すべり変位時刻歴波形 (依存性無視)

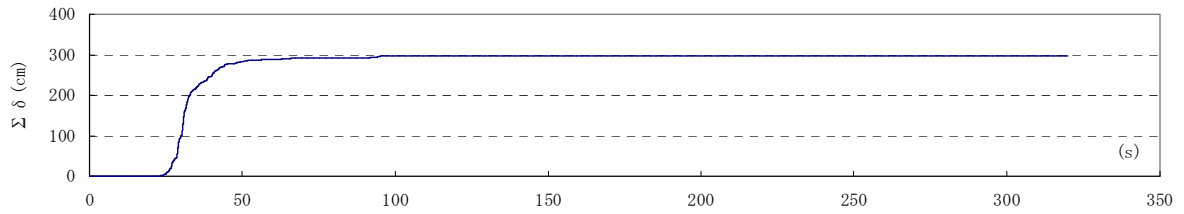


累積すべり変位時刻歴波形 (累積すべり変位依存性考慮)

(b) WAVE-Ts1 1 方向入力(EW 成分)



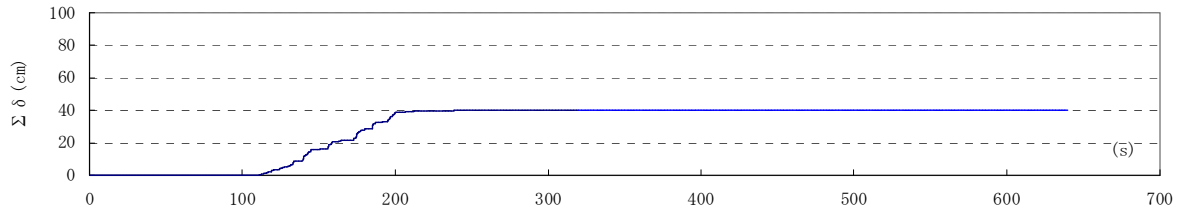
累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



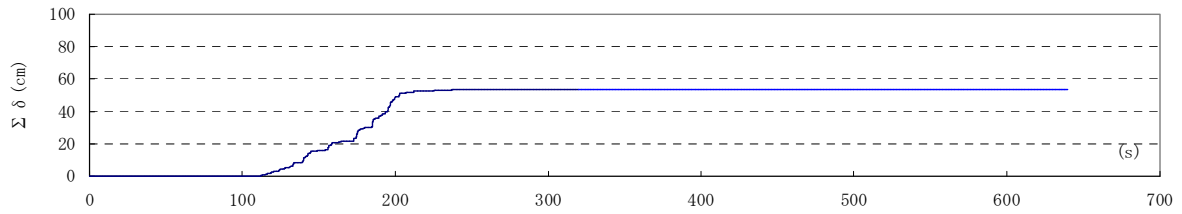
累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) WAVE-Ts1 2方向入力

図 2.3.6.-25 累積すべり変位時刻歴波形(WAVE-Ts1)

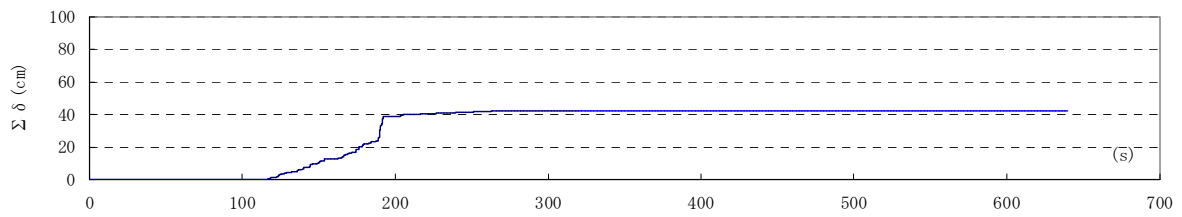


累積すべり変位時刻歴波形 (依存性無視)

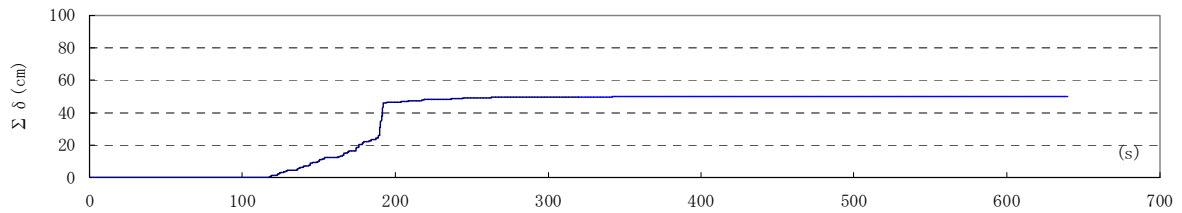


累積すべり変位時刻歴波形 (累積すべり変位依存性考慮)

(a) WAVE-Ts2 1 方向入力(NS 成分)

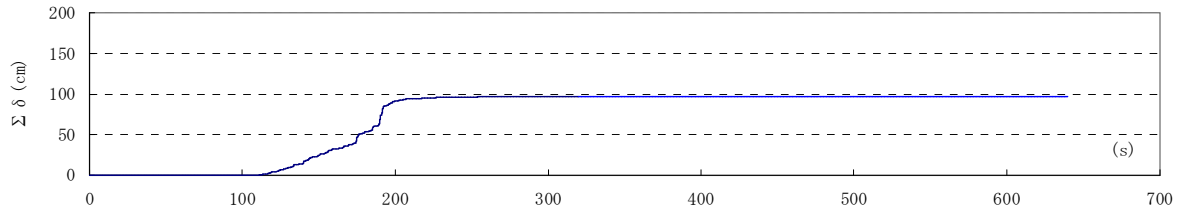


累積すべり変位時刻歴波形 (依存性無視)

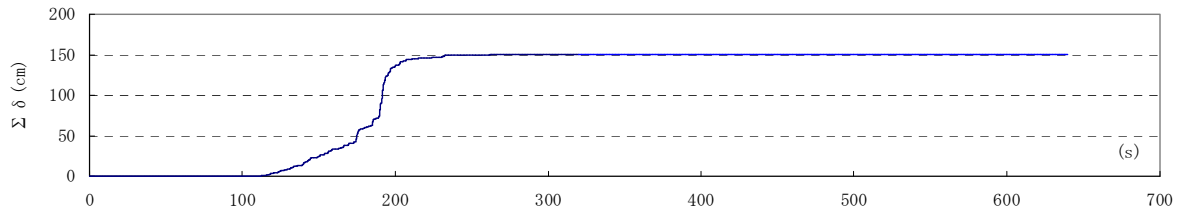


累積すべり変位時刻歴波形 (累積すべり変位依存性考慮)

(b) WAVE-Ts2 1 方向入力(EW 成分)



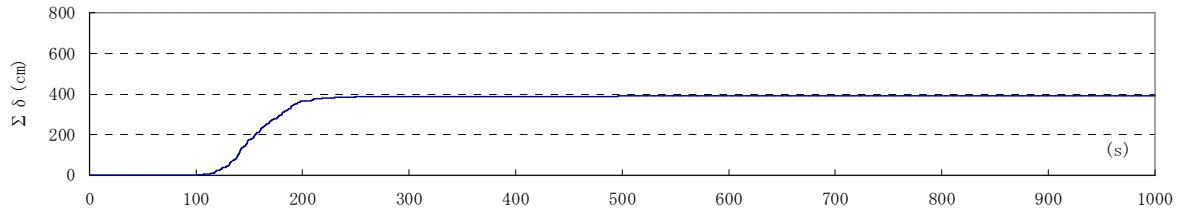
累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



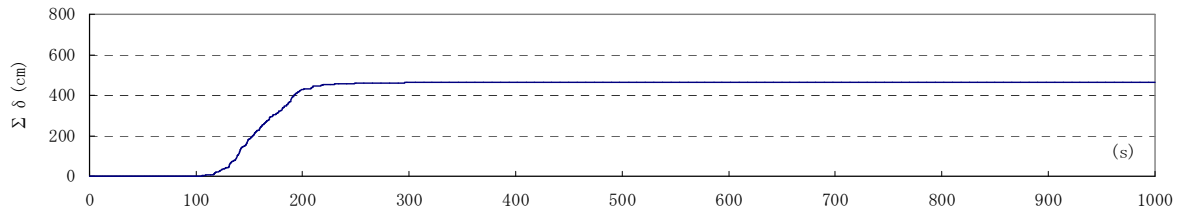
累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) WAVE-Ts2 2方向入力

図 2.3.6.-26 累積すべり変位時刻歴波形(WAVE-Ts2)

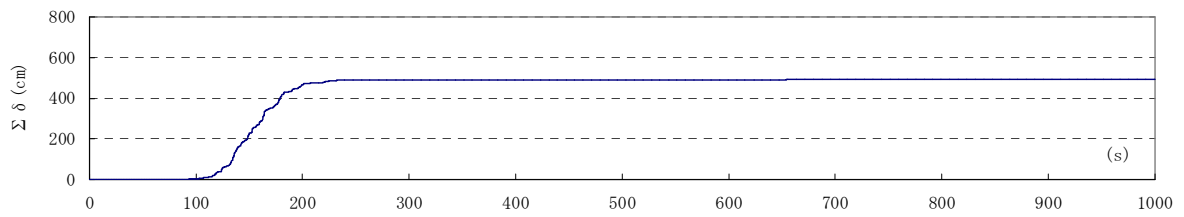


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

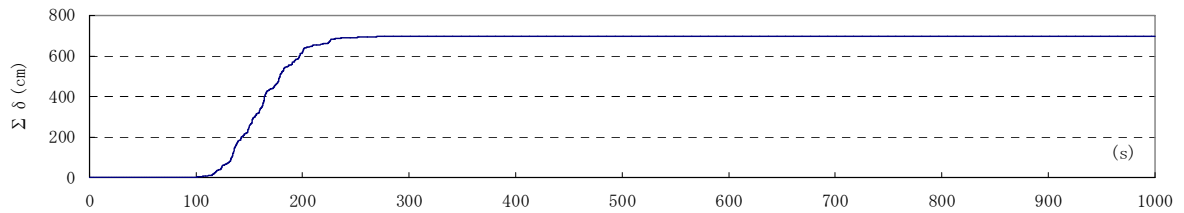


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(a) WAVE-Tk 1 方向入力(NS 成分)

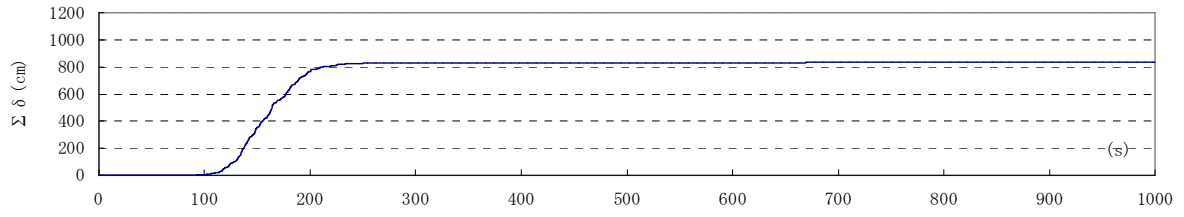


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

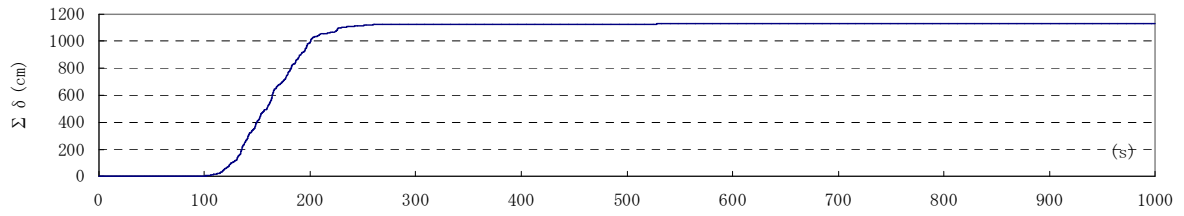


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(b) WAVE-Tk 1 方向入力(EW 成分)



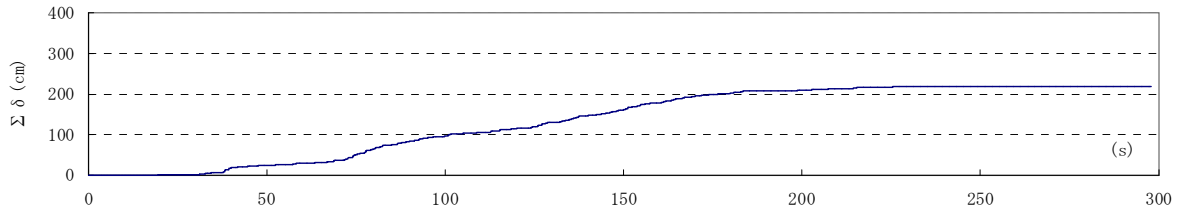
累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



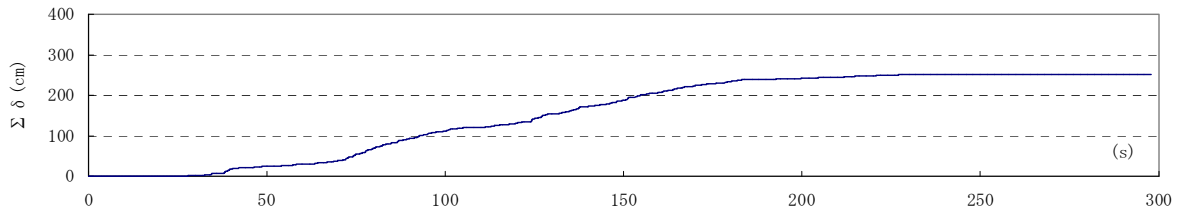
累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) WAVE-Tk 2方向入力

図 2.3.6.-27 累積すべり変位時刻歴波形(WAVE-Tk)

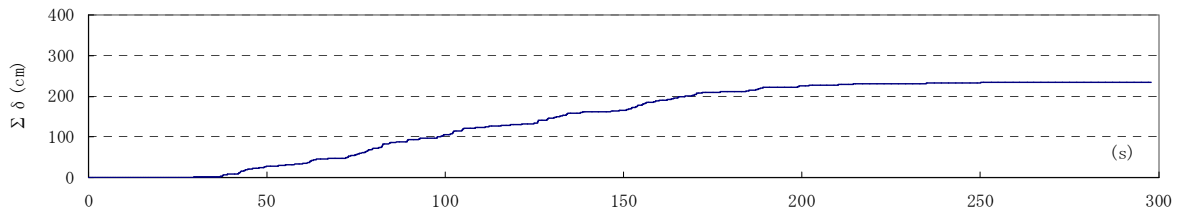


累積すべり変位時刻歴波形 (依存性無視)

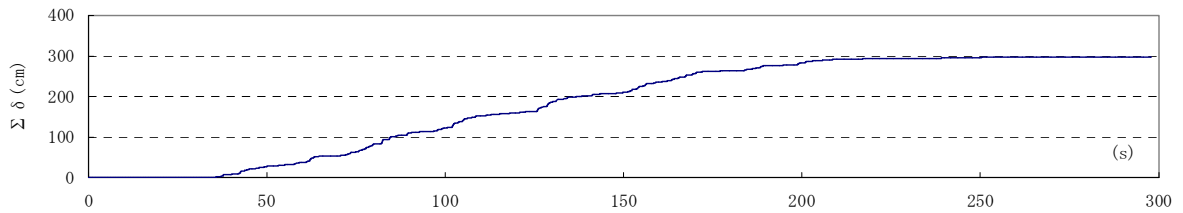


累積すべり変位時刻歴波形 (累積すべり変位依存性考慮)

(a) WAVE-S 1 方向入力(NS 成分)

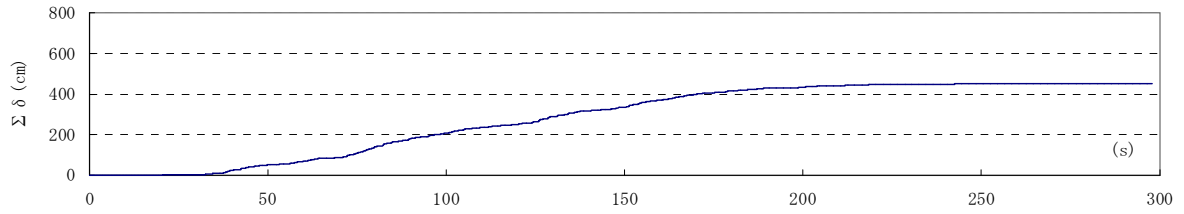


累積すべり変位時刻歴波形 (依存性無視)

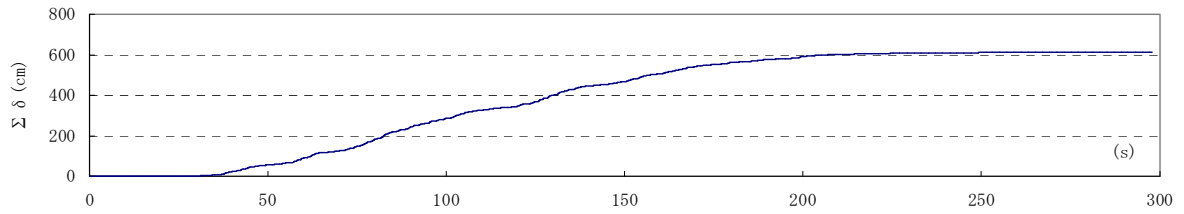


累積すべり変位時刻歴波形 (累積すべり変位依存性考慮)

(b) WAVE-S 1 方向入力(EW 成分)



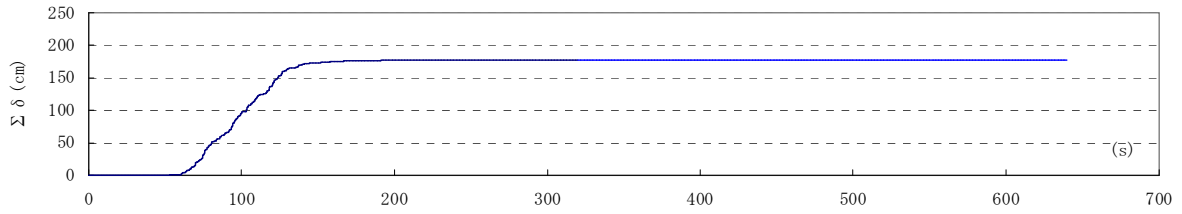
累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



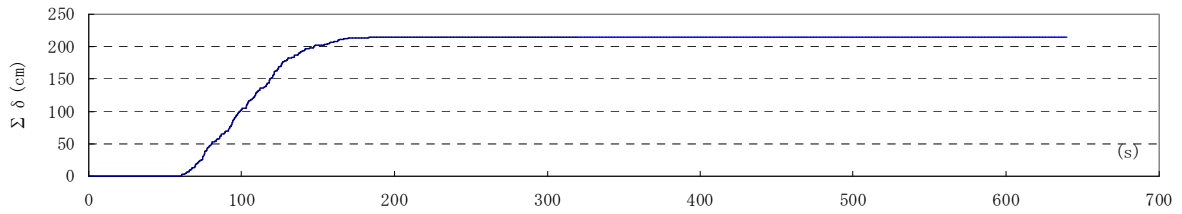
累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) WAVE-S 2方向入力

図 2.3.6.-28 累積すべり変位時刻歴波形(WAVE-S)

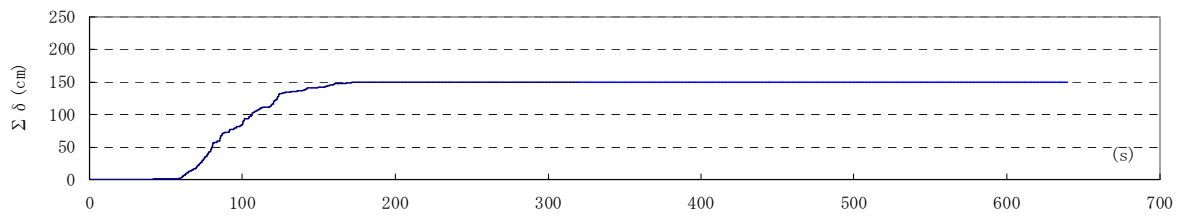


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

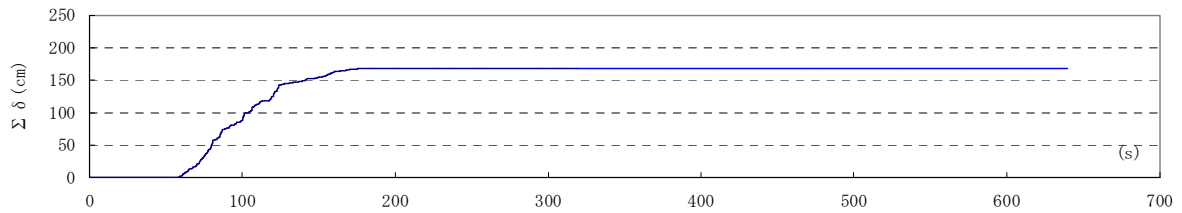


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(a) WAVE-K 1 方向入力(NS 成分)

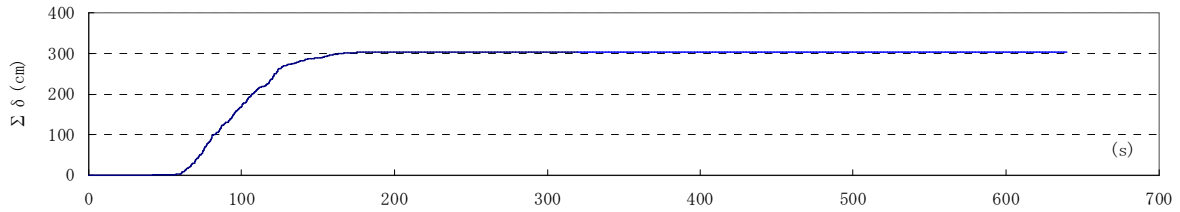


累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）

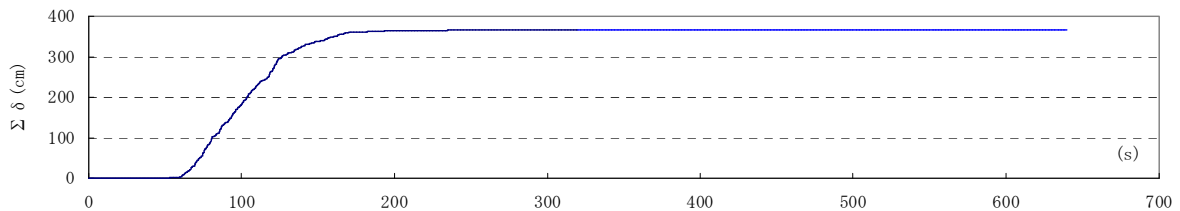


累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(b) WAVE-K 1 方向入力(EW 成分)



累積すべり変位時刻歴波形（依存性無視）



累積すべり変位時刻歴波形（累積すべり変位依存性考慮）

(c) WAVE-K 2方向入力

図 2.3.6.-29 累積すべり変位時刻歴波形(WAVE-K)

(5) まとめ

以上の検討より以下の知見を得た。

- ・ 摩擦係数の累積すべり変位依存性を考慮することにより、繰り返し荷重により摩擦係数が低下し、応答変位が大きくなることが確認された。
- ・ 2方向入力を考慮した場合、累積すべり変位は1方向入力よりも増加するため応答変位が大きくなる。つまり、すべり支承を用いる場合は2方向入力を適切に評価する必要があると考えられる。
- ・ ここで適用した累積すべり変位依存性の評価式にはすべり変位の適用範囲があり、本検討で用いたような継続時間が長く累積すべり変位が増加する応答に対しては十分には適応できていない。今後、弾性すべり支承の繰り返し载荷実験を実施し適用範囲を拡大することが望まれる。

参考文献

- 2.3.6-1) 日比野浩、高木政美、勝田庄二：実大弾性すべり支承の載荷実験に基づく摩擦特性のモデル化、日本建築学会構造系論文集、第 574 号、pp.45-52、2003.12
- 2.3.6-2) 日比野浩、久保哲夫、高木政美、勝田庄二：弾性すべり支承と積層ゴム支承を併用した複合免震建物の地震応答性状－摩擦特性回帰モデルに基づく解析的検討－、日本建築学会構造系論文集、第 574 号、pp.45-52、2003.12
- 2.3.6-3) 富島誠司、大橋智樹、佐藤啓治：すべり支承方式の免震に用いるすべり材の動摩擦係数に関する研究、日本建築学会技術報告集、第 1 号、pp.140-145、1995.12
- 2.3.6-4) 岡本晋、藤井俊二、尾崎大輔、M.C.Constantinou、P.C.Tsopelas：すべり方式免震システムを有する橋梁の動特性に関する実験的研究、土木学会論文集、No. 507/I-30 号、pp.167-177、1995.1
- 2.3.6-5) 江森純一、山中久幸、谷垣政治、平田裕一、山岸邦彰：弾性すべり支承の基本性能に関する実験的研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、487-488、1998.9
- 2.3.6-6) 浜口弘樹、東野雅彦、遠山幸太郎、安部裕、沖芳郎：低摩擦特性のすべり支承に関する研究（その 3）実大装置の性能確認試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.701-702、1999.9
- 2.3.6-7) 増田圭司、三山剛史：低摩擦滑り支承を用いた免震構法の開発 その 1. 低摩擦支承の開発、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.737-738、2000.9
- 2.3.6-8) 松本喜代隆、高澤恒男、加藤直樹、岡本守、市村敦史：弾性すべり支承の開発（その 4：摩擦係数の動特性）、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.505-506、2002.8
- 2.3.6-9) 松崎浩、森利弘、渡辺則雄、滝沢賢一：すべり支承とせん断型コイルばねによる免震構法（その 2）すべり支承加力試験、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.495-496、1998.9
- 2.3.6-10) 林章二、北村佳久、猿田正明：積層ゴムとすべり支承による複合免震システムに関する研究、日本地震工学シンポジウム論文集、Vol.10-3、pp.2807-2812、1998
- 2.3.6-11) 南輝弥、加藤朝郎、大場政章、村角保行：FBR 免震設計に関する研究 その 30 複合免震装置の原子炉施設への適用(弾性すべり支承を用いた複合免震構法の検討 その 2)、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.1219-1220、1999.9
- 2.3.6-12) 高坂隆一、木本幸一郎、竹内貞光、伊藤嘉朗、降旗大助、芳沢利和、和田章：弾性すべり支承免震の実験的研究、その 3：振動実験と弾性すべり支承の面圧、速度依存性を考慮したシミュレーションの比較、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.727-728、2000.9
- 2.3.6-13) 田中寛人、高橋良和、家村浩和：滑り支承の速度・荷重依存性のモデル化と免震効果に関する研究、土木学会年次学術講演会講演概要集、第 1 部 Vol.57、pp.905-906、2002.9
- 2.3.6-14) 勝田庄二、日比野浩、高澤恒男、澤田 毅、柳 勝幸：大口径弾性すべり支承の摩擦特性試験、（その 1）試験の概要、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.641-642、2001.9
- 2.3.6-15) 日比野浩、高木政美、高澤恒男、澤田 毅、柳 勝幸：大口径弾性すべり支承の摩擦特性試験、（その 2）動摩擦特性の基本的傾向、日本建築学会大会学術講演梗概集、B-2、pp.642-643、2001.9
- 2.3.6-16) 日比野浩、高木政美、勝田庄二、室田伸夫、原 暢彦：大口径弾性すべり支承の摩擦

特性試験、(その3) 載荷振幅が摩擦係数に及ぼす影響、日本建築学会大会学術講演梗概集、
B-2、pp.503-504、2002.8

2.3.7 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（低摩擦）+粘性ダンパー

(1) 各種依存性に関する既往の研究

1) 弾性すべり支承（低摩擦）

弾性すべり支承（低摩擦）（以下、低摩擦すべり支承と称する）の繰り返し回数と摩擦係数の関係に関する既往の実験概要を表 2.3.7-1 にまとめる。

一般的に、低摩擦すべり支承は設計領域における摩擦係数の変動はほとんどないとされている。ただし、設計領域以上に繰り返し回数が増えると摩擦係数の上昇が見られる。一方、温度の上昇に対して摩擦係数の変化は小さい。冷却後に摩擦係数が回復しないことから、摩擦係数は温度よりもすべり材の通過回数やコーティング摩耗量との関連が強いと考えられる。

表 2.3.7-1 既往の実験概要

実験名	概要
実験 A ^{2.3.7-1}	すべり支承（φ 300 および φ 400、 μ 0.011、基準面圧 20MPa）を用いて、40 サイクル以上の正弦波繰り返し試験を実施し、摩擦係数の変化率を調査
実験 B ^{2.3.7-1}	実物大のすべり支承試験体（φ 540、φ 720 および φ 900、 μ 0.015、基準面圧 18MPa）を用いて、50 サイクルの繰り返し試験を実施し、摩擦係数の変化率を調査
実験 C ^{2.3.7-2}	すべり支承（すべり材径 φ 100、 μ 0.01、基準面圧 20MPa）を用いて、正弦波による 45 波の繰り返し試験（試験体によっては 400 波）を実施し、摩擦係数の変動を調査
実験 D ^{2.3.7-3}	すべり支承（すべり材径 φ 90、 μ 0.012、基準面圧 20MPa）を用いて、正弦波による連続 25 サイクルを 40 回、計 1000 サイクルの繰り返し試験を実施し、摩擦係数・表面温度の変動を調査
実験 E ^{2.3.7-4}	実物大のすべり支承試験体（φ 916、 μ 0.024、基準面圧 14MPa）を用いて、数種類の変位振幅が繰り返し現れる試験（累積距離 35m）を実施し、摩擦係数の変動、経過時間と温度の関係を調査
実験 F ^{2.3.7-5), 2.3.7-6)}	実物大のすべり支承試験体（すべり材径 φ 202、 μ 0.015、基準面圧 18MPa）を用いて、非常に長い累積変位量（692 サイクル、約 390m）を与える試験を実施し、すべりによる発熱と摩擦係数の関係を調査

本解析では、低摩擦すべり支承の剛性および各種依存性については、表 2.3.7-1 の実験 C で使用されている試験体の建築材料認定書^{2.3.7-2)}を参考にモデル化を行っている。低摩擦すべり支承は水平方向の非線形特性として図 2.3.7-1 に示すバイリニア特性を持つ要素としてモデル化する。

材料認定書より低摩擦すべり支承の水平剛性 K_H および鉛直剛性 K_V は式 (2.3.7-1) および式 (2.3.7-2) によって決まる。

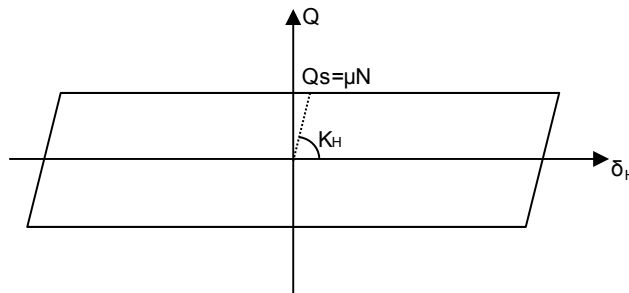


図 2.3.7-1 低摩擦すべり支承のバイリニア特性

$$K_H = G_r \cdot \frac{A_r}{H} \quad (2.3.7-1)$$

ここに、 G_r はゴムのせん断弾性率を示し、次の値を用いる。 $G_r = \begin{cases} 0.588 \text{ N/mm}^2 [\text{G6}] \\ 0.784 \text{ N/mm}^2 [\text{G8}] \end{cases}$

また、 A_r は積層ゴム断面積 (mm^2)、 H は積層ゴム総厚 (mm) を意味する。

$$K_V = \alpha_V \cdot \frac{A_r}{H} \cdot \frac{E_0(1+2 \cdot \kappa \cdot S_l^2) \cdot E_\infty}{E_0(1+2 \cdot \kappa \cdot S_l^2) + E_\infty} \quad (2.3.7-2)$$

ここに、 E_0 はゴムの縦弾性係数を示し、次の値を用いる。 $E_0 = \begin{cases} 1.76 \text{ N/mm}^2 [\text{G6}] \\ 2.35 \text{ N/mm}^2 [\text{G8}] \end{cases}$

また、 E_∞ はゴムの体積弾性係数 ($=1,960 \text{ N/mm}^2$)、 κ はゴム定数 ($=0.85$)、 S_l は 1 次形状係数、 α_V はすべり材による鉛直剛性修正係数 ($=0.70$) を示す。

すべり耐力 Q_S については式 (2.3.7-3) に示すように鉛直支持力 N および摩擦係数 μ によって決まる。

$$Q_S = \mu \cdot N \quad (2.3.7-3)$$

本解析では、低摩擦すべり支承の摩擦係数 μ は面圧・速度依存性および繰り返し依存性を考慮して算定する。ただし、経年変化および制作誤差については本解析では考慮しない。低摩擦すべり支承の面圧・速度依存性および繰り返し依存性を以下の項で説明する。

a) 面圧・速度依存性

材料認定書^{2.3.7-2}より低摩擦すべり支承の摩擦係数は式(2.3.7-4)を用いて計算される。

$$\mu(\sigma_s, V) = (0.0355 - 0.0093 \cdot \exp(-0.1 \cdot V)) \cdot \sigma_s^{-0.44} \quad (2.3.7-4)$$

ここに、 σ_s は面圧(N/mm²)、 V は水平速度(mm/sec)を示す。面圧を一定とした場合の速度依存性は図2.3.7-2のようになる。

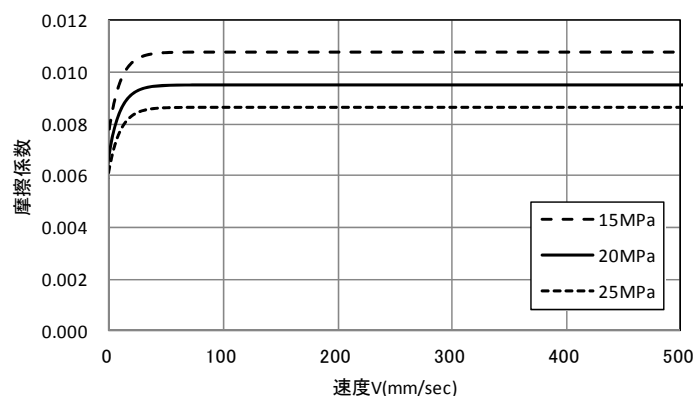


図 2.3.7-2 低摩擦すべり支承の面圧・速度依存性 (面圧 15MPa、20MPa および 25MPa)

b) 繰り返し依存性

摩擦係数の繰り返し依存性は、メーカー提供の試験データを参考にモデル化した。累積すべり量 50m を超える領域までの試験データが得られており、その間の摩擦係数の変動範囲は 0.0085~0.0120 である。

なお、本解析では面圧・速度依存性も同時に考慮するため、繰り返し依存性による摩擦係数の変動状況を累積すべり量 0m 時の摩擦係数からの変化率と考える。従って、(2.3.7-4) 式で算出した面圧・速度依存の摩擦係数に繰り返し依存の変化率を乗じることで時々刻々の摩擦係数を計算する。

2) 粘性ダンパー

本解析でモデル化する粘性ダンパーは増幅機構付き減衰装置(減衰こま)としており、以下では増幅機構付き減衰装置を粘性ダンパーとして扱うものとする。また、当該粘性ダンパーでは粘性体の回転による慣性力がダンパーの減衰力に影響を与えるとされており、本解析では回転による慣性力も含めた検討を実施する。

当該粘性ダンパーで用いられている粘性体の温度特性については、粘性体温度が高くなると粘度が減少する傾向を示すことがわかっている^{2.3.7-7}。また、温度上昇に関する検討として、装置の熱容量から温度上昇の理論値を算定し、実験値との比較が実施されている^{2.3.7-8}。その結果、実験では当該粘性ダンパーの大部分の発熱量は鉄へ奪われるため、理論値に比して温度上昇は小さくなる結果が得られている。

繰り返し回数と抵抗力の関係については、繰り返し依存性を調べる試験が実施されており、連続加振により抵抗力が低下することが分かっている^{2.3.7-1, 2.3.7-7}。この抵抗力の低下はせん断ひずみ速度の増大とともに、粒子間の相互作用が急速に弱まり粘性体の粘度が低下するためである。ただし、粘性体の分子構造自体の破壊により生じるものではないので、分子間の応力緩

和がもとの状態に戻るとともに減衰性能は回復していく。

当該粘性ダンパーの特性および各種依存性については調査対象部材の材料認定書 2.3.7-9)~2.3.7-11)を参考にモデル化を行っている。

粘性ダンパーの軸減衰力 P_n は式 (2.3.7-5) ~式 (2.3.7-15) を使って計算され、図 2.3.7-3 に示すような軸速度依存性を示す。なお、式 (2.3.7-5) で示した設計式では前述の回転体の慣性力による影響は無視している。本解析では、実現象に近いモデルとするため既往の研究 2.3.7-12) を参考として式 (2.3.7-5) に慣性項 Q_i を加えた式 (2.3.7-14) を用いて解析モデルを作成している。

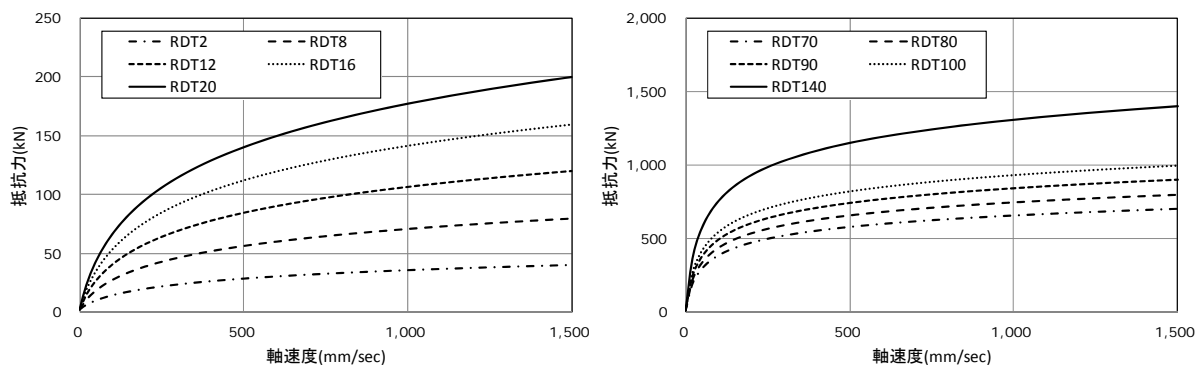


図 2.3.7-3 軸減衰力 P_n の軸速度依存性の一例
(調査対象部材・材料認定書 2.3.7-9)~ 2.3.7-11)より作成)

① 軸減衰力 P_n

$$P_n = a \times (\alpha \cdot Q_v + b) \tag{2.3.7-5}$$

ここに、 α はくり返し依存係数、 Q_v は粘性抵抗 (kN) を示す。式 (2.3.7-5) 内の係数 a および b は粘性ダンパーの種類によって決まり、表 2.3.7-2 にその値を示す。

表 2.3.7-2 軸減衰力基準式の係数 a および b について

デバイスタイプ	係数 a	係数 b
Short タイプ	1.16	2.2
動粘度 10 万 cst タイプ	1.03	2.7
動粘度 30 万 cst タイプ (減衰力 30ton~60ton)	1.06	8.1
動粘度 30 万 cst タイプ (減衰力 70ton~140ton)	1.15	11.5

② 粘性抵抗力 Q_V

$$Q_V = S \cdot \eta(V_S, t) \cdot V_S \cdot A \quad (2.3.7-6)$$

ここに、 S は増幅率、 $\eta(V_S, t)$ は見かけの粘度 ($\text{kPa} \cdot \text{s}$)、 V_S はせん断ひずみ速度 (sec^{-1})、 A は有効面積 (m^2) を示す。

③ 増幅率 S

$$S = \pi \times D_n / L_d \quad (2.3.7-7)$$

ここに D_n は内筒外直径 (m)、 L_d はリード長さ (m) を示す。

④ 見かけの粘度 $\eta(V_S, t)$

$$\eta(V_S, t) = \eta_t / (1 + b \cdot V_S^\beta) \times 10^{-6} \quad (2.3.7-8)$$

係数 b および係数 β は以下の式で表わされる。

$$b = 0.000472 \cdot \eta_t^{0.276} \quad (2.3.7-9)$$

$$\beta = 0.308 \cdot \eta_t^{0.081} \quad (2.3.7-10)$$

ここに、 η_t は粘性体温度が t 度の際の動粘度 (cst) を示し、以下の式で表わされる。

$$\eta_t = 1.02^{(25-t)} \cdot \eta_{25} \quad (2.3.7-11)$$

なお、 η_{25} はせん断歪速度 0、粘性体温度 25 度の際の動粘度 (cst) を示す。

⑤ せん断ひずみ速度 V_S

$$V_S = S \cdot V_N / dy \quad (2.3.7-12)$$

ここに、 V_N は軸方向速度 (m/sec)、 dy はせん断隙間 (m) を示す。

⑥ 有効面積 A

$$A = D_n \cdot \pi \cdot L_e \quad (2.3.7-13)$$

ここに、 L_e は有効長さ (m) を示す。

⑦ 粘性体の回転による慣性項を考慮した軸減衰力

$$P_n = a \times (\alpha \cdot Q_V + b + Q_i) \quad (2.3.7-14)$$

ここに、 Q_i は粘性体の回転による慣性力 (kN) を示し、以下の式で表わされる^{2.3.7-12)}。

$$Q_i = M \cdot \frac{D_n^2 + D_m^2}{8} \cdot \left(\frac{2\pi}{L_d} \right)^2 \cdot A_N \quad (2.3.7-15)$$

ここに、 M は回転体質量 (ton)、 D_m は内筒内直径 (m)、 A_N は軸方向加速度 (m/sec^2) を示す。

当該粘性ダンパーの代表的な依存性としては、繰り返し依存性および温度依存性が挙げられる。本解析では繰り返し依存性は考慮するが、解析中の温度変化は生じないものとしている。

ただし、設計温度は解析開始時の温度として考慮する。また、経年変化および制作誤差についても本解析では考慮しない。繰り返し依存性および温度依存性について以下の項で説明する。

a) 繰り返し依存性

粘性ダンパーの繰り返し試験結果の一例を図 2.3.7-4 に示す。認定書記載の試験結果から、繰り返し依存係数 α は粘性抵抗力 Q_v による累積吸収エネルギー E_v の関数として式 (2.3.7-16) および式 (2.3.7-17) を用いて計算される。なお、 α の下限値は 0.70 としている。

$$\alpha = 1 / (1 + a \cdot (E_v / V_v))^b \quad (2.3.7-16)$$

$$a = \begin{cases} 0.0016 \cdot \ln(f) + 0.011 & (\text{shortタイプ、動粘度}10\text{万cstタイプ}) \\ 0.0014 \cdot \ln(f) + 0.009 & (\text{動粘度}30\text{万cstタイプ}) \end{cases} \quad (2.3.7-17)$$

$$b = 0.394 \cdot f^{0.087}$$

ここに、 E_v は粘性抵抗力 ($= \alpha \cdot Q_v$) による累積吸収エネルギー量 (J)、 V_v は充填されている粘性体の容積 (cc)、 f は定常波の振動数あるいは建屋の 1 次固有振動数 (Hz) を示す。

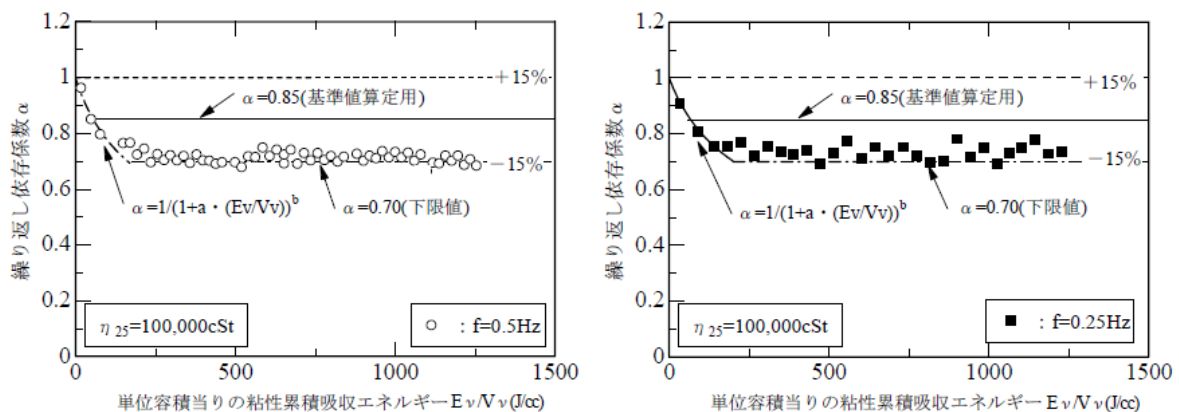


図 2.3.7-4 単位容積当りの粘性累積吸収エネルギー E_v と繰り返し依存係数 α の関係の一例 (調査対象部材・材料認定書 2.3.7-9)~ 2.3.7-11)より抜粋)

b) 温度依存性

粘性ダンパーの温度依存性を図 2.3.7-5 に示す。既往の試験結果から、温度の上昇に伴い得られる減衰力が徐々に小さくなるのが分かっている。ただし、本解析では解析開始時の温度（20度）から変わらないものとしており、温度変化による変化率は考慮していない。

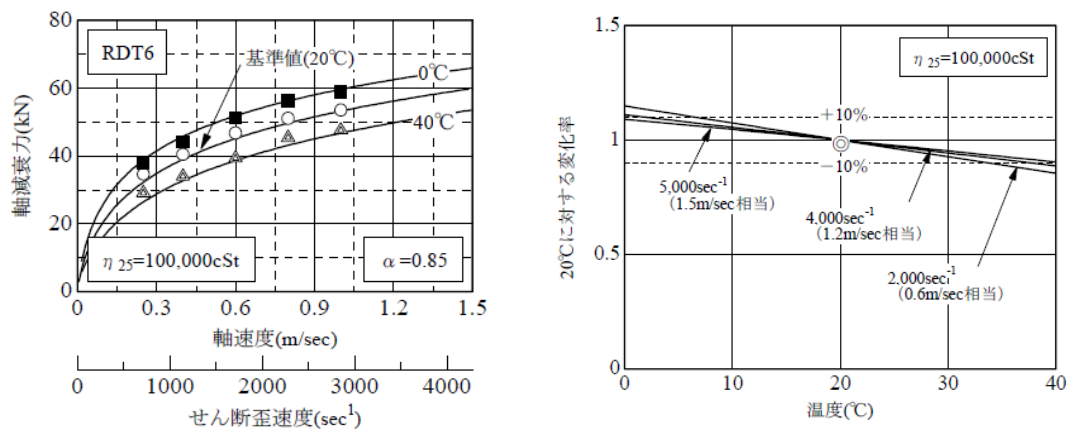


図 2.3.7-5 軸減衰力の温度依存性および温度・せん断ひずみ速度・変化率の関係の一例
(調査対象部材・材料認定書 2.3.7-9)~ 2.3.7-11)より抜粋)

(2) 解析条件

仮定する建物は 30m×30m の平面形状を持つ RC 造の 9 層建物とする。建物の総重量は 100,000kN とする。免震周期、ダンパーの諸条件は以下の通りとした。

- ・建物の免震周期は 4 秒程度
- ・免震層の最大応答変位は 250mm 程度
- ・ダンパーの負担層せん断力係数は 3.0%~3.5%程度

免震部材の配置状況を図 2.3.7-6 に示す。配置する免震部材は天然ゴム系積層ゴム、低摩擦すべり支承および粘性ダンパーとする。解析では建物を 1 質点剛体でモデル化し、水平 1 方向入力とする。そのため粘性ダンパーについては加振方向に平行に配置された 4 基のみをモデル化する (図 2.3.7-7)。以下の項で各免震部材について説明する。

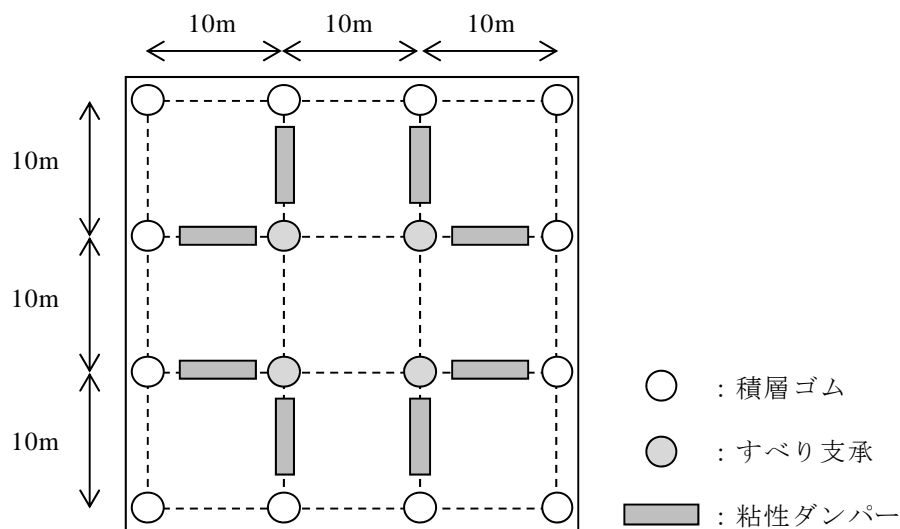


図 2.3.7-6 想定する建物モデルの平面形状

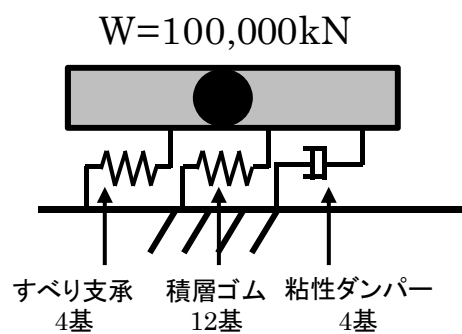


図 2.3.7-7 解析モデル (水平モデル)

1) 天然ゴム系積層ゴム

仮定する積層ゴムはゴム種 G6、φ850、H=160mm とし、12 基配置する。積層ゴム 1 基の水平剛性 k_{Hrb} は、

$$k_{Hrb} = \frac{GA}{H} = \frac{0.6 \times \pi \times 850^2 / 4}{160} = 2,130 N / mm$$

よって、免震層全体では

$$K_{Hrb} = 2,130 \times 12 = 25,600 N / mm$$

なお、解析では積層ゴムのハードニングは考慮せず、線形モデルとして扱う。

2) 低摩擦すべり支承

低摩擦すべり支承は、すべり材径φ700 のものを仮定し、4 基配置する。基準面圧は 19.6MPa とし、すべり荷重は 272kN 程度を想定している。代表的な諸元の値を表 2.3.7-3 に示す。

表 2.3.7-3 仮定する低摩擦すべり支承の諸元一覧

諸元	値
ゴムのせん断弾性率(N/mm ²) : 【G6】	0.588
積層ゴム外形(mm)	800
内径(mm)	25
ゴム 1 層厚(mm)	7.0
ゴム層数(層)	5
ゴム層総厚(mm)	35
1 次形状係数	27.7
すべり材径(mm)	700
鉛直剛性(kN/m)	10,600,000
水平剛性(kN/m)	8440

3) 粘性ダンパー

ダンパーの負担層せん断力係数を 3.0~3.5%とすることから、低摩擦すべり支承の負担分約 0.3% (前述の 272kN) を差し引き、粘性ダンパーの負担分を 2.7~3.2%程度 ($100,000\text{kN} \times 0.027 \sim 0.032 \rightarrow 2,700 \sim 3,200\text{kN}$) と仮定する。周期 4.0 秒で図 2.3.7-8 の荷重変形関係を描く粘性ダンパーとして、軸速度 1.5m/s 時の抵抗力が 100tf の粘性ダンパー (RDT100) を選定し、各方向に 4 基ずつの配置としている。表 2.3.7-4 に RDT100 の代表的な諸元を示す。

一方向に作用する 4 基の粘性ダンパーによる減衰力は約 2,800kN である。すべり支承と合計すると免震層のダンパー負担層せん断力係数は約 3.1%となる。

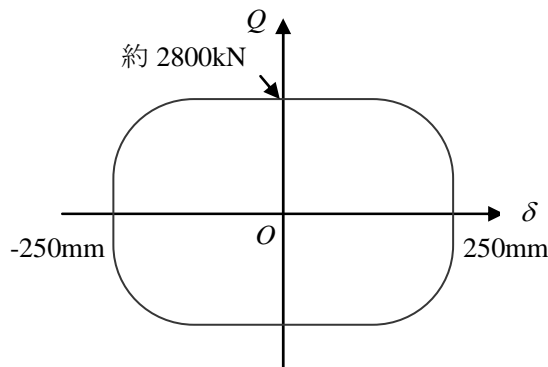


図 2.3.7-8 仮定する粘性ダンパーの荷重変形関係 (4 基の粘性ダンパーを仮定)

表 2.3.7-4 仮定した粘性ダンパー (RDT100) の諸元一覧

諸元	値
ねじ軸直径(m)	0.10
リード長さ(m)	0.05
内筒内直径(m)	0.142
内筒外直径(m)	0.227
有効長さ(m)	1.440
せん断隙間(m)	0.003
25°C時の粘性体粘度(cst)	300000
粘性体充填容量(cc)	3110
回転体の質量(ton)	0.375

4) 建物の免震周期

天然ゴムの水平剛性は 1)から $K_{Hrb}=25,600\text{N/mm}$ である。また 2)からすべり支承のすべり荷重は 4 基で 272,000N となる。

よって、すべり支承を含めた全体の等価剛性 K_H は図 2.3.7-9 より

$$K_H = 6,670,000 / 250 = 26,700\text{N/mm}$$

免震周期 T は $W=100,000\text{kN}\doteq 10,000\text{ton}$ であるから、

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_H}}$$

$$= 2\pi \sqrt{\frac{10,000 \times 1000}{26,700 \times 1000}} = 3.85 \text{ sec}$$

となる。

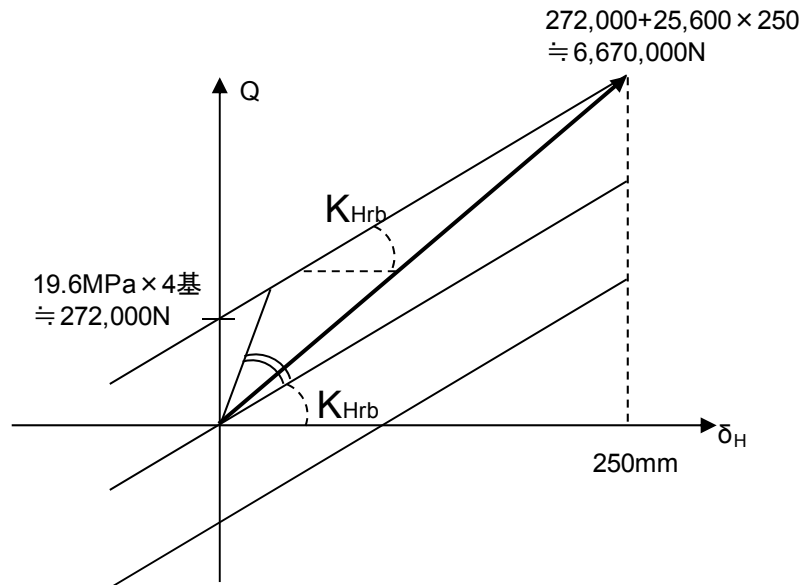


図 2.3.7-9 すべり支承を含めた等価剛性

(3) 解析結果

前述の解析モデルに対して、長周期地震動 4 波による地震応答解析を実施する。1)では当該粘性ダンパーの粘性体の回転による慣性項の影響を確認する。2)では繰り返し依存性による応答への影響比較を実施する。なお、2)では入力地震動を 1.25 倍、1.5 倍に係数倍した場合の解析についても実施している。比較する応答結果は免震層の最大応答変形および加速度、せん断力係数 C_i 、累積変形量、等価エネルギー速度 V_E 、および免震部材の荷重変形関係とする。なお、等価エネルギー速度 V_E (m/s) は以下の式 (2.3.7-18) を用いて算定している。

$$V_E = \sqrt{\frac{2E}{M}} \quad (2.3.7-18)$$

ここに、 E は解析終了時の免震層の累積吸収エネルギー (J)、 M は建屋質量 (kg) を示す。

1) 粘性ダンパーの慣性項の考慮・非考慮による応答比較

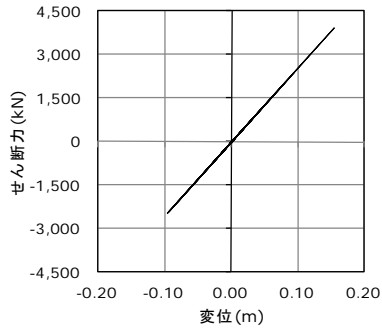
本節では、粘性ダンパーの慣性項の影響を確認する。解析の共通条件として入力地震動は 1 倍入力、解析温度は 20 度とし、繰り返し依存性を考慮している。表 2.3.7-5 に慣性項を考慮したモデルと考慮していないモデルの応答解析結果を示す。図 2.3.7-10～図 2.3.7-17 には各ケースの荷重変形関係を示す。

粘性体の回転による慣性を考慮したモデルと考慮しないモデルでは免震層の応答に最大 4% 程の差異が見られ、慣性項の有無が応答に影響を与えていることがわかる。以降の検討では慣性項を考慮するモデルを基本として検討を実施する。

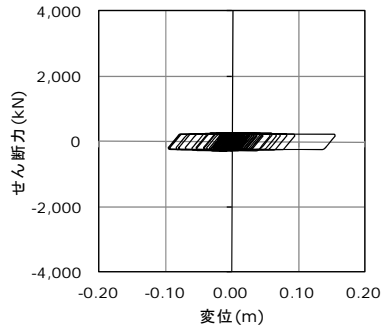
表 2.3.7-5 免震層の応答結果一覧

入力地震	N-OSKH02-AV		T-TN-AIC003-AV		T-TN-AIC004-AV		T-TN-KGIN1F-AV	
	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答 変位(cm)	15.4 (1.00)	15.4	19.5 (0.99)	19.6	8.57 (0.98)	8.78	6.10 (1.00)	6.11
最大応答 加速度 (cm/s ²)	54.1 (0.99)	54.6	66.3 (0.97)	68.2	38.1 (0.96)	39.8	30.4 (0.98)	31.2
せん断力 係数 C_i	0.0551 (0.99)	0.0557	0.0677 (0.97)	0.0695	0.0389 (0.96)	0.0406	0.0310 (0.98)	0.0317
累積変位量 (m)	7.05 (0.99)	7.12	12.4 (0.98)	12.6	5.81 (0.98)	5.92	4.06 (0.99)	4.09
等価エネルギー 速度 V_E (m/s)	1.43 (0.99)	1.44	2.07 (0.99)	2.10	1.20 (0.99)	1.21	0.906 (0.99)	0.913

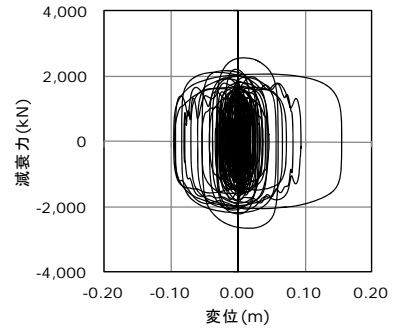
・ () の数値は慣性項考慮モデルと慣性項非考慮モデルの比率を示す



(a)積層ゴム

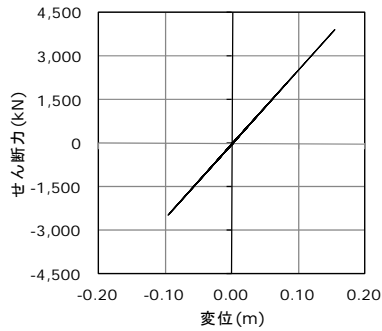


(b)すべり支承

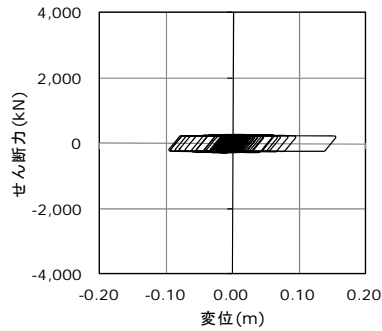


(c)粘性ダンパー

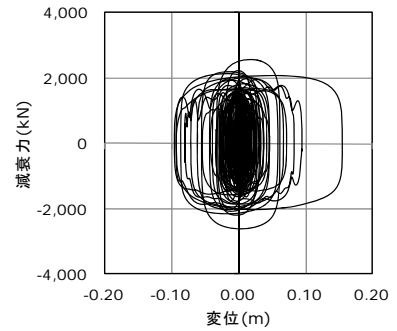
図 2.3.7-10 免震層の荷重変形関係 (N-OSKH02-AV・慣性項考慮)



(a)積層ゴム

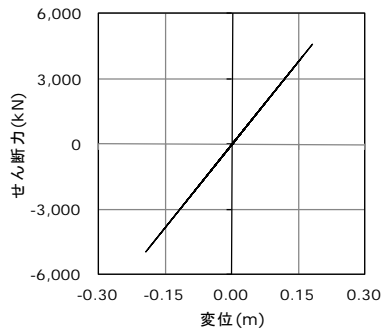


(b)すべり支承

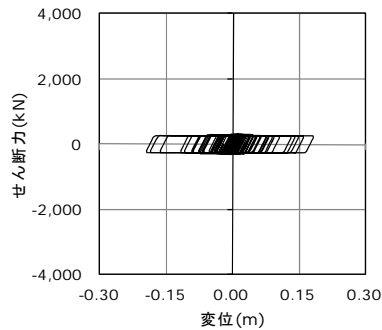


(c)粘性ダンパー

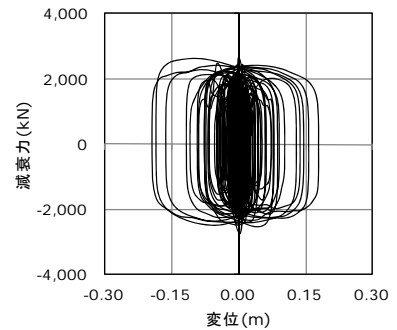
図 2.3.7-11 免震層の荷重変形関係 (N-OSKH02-AV・慣性項非考慮)



(a)積層ゴム

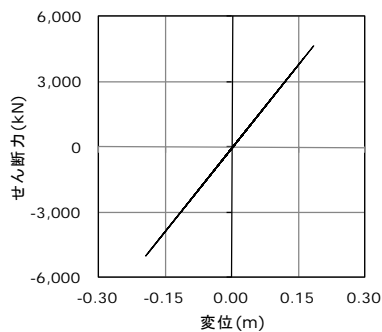


(b)すべり支承

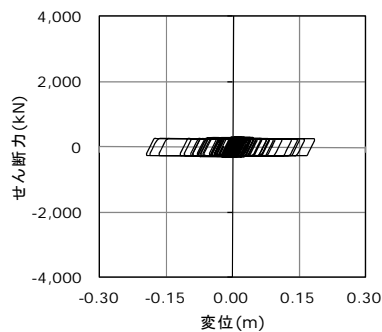


(c)粘性ダンパー

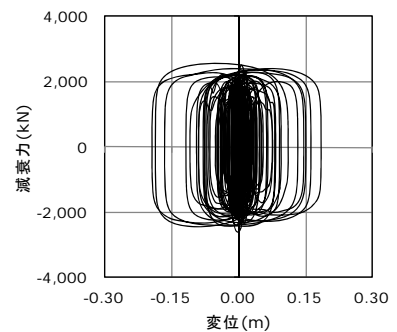
図 2.3.7-12 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC003-AV・慣性項考慮)



(a)積層ゴム

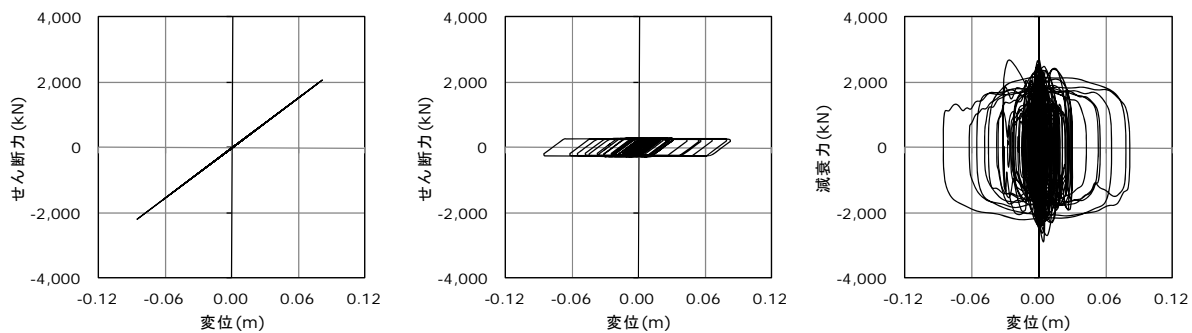


(b)すべり支承



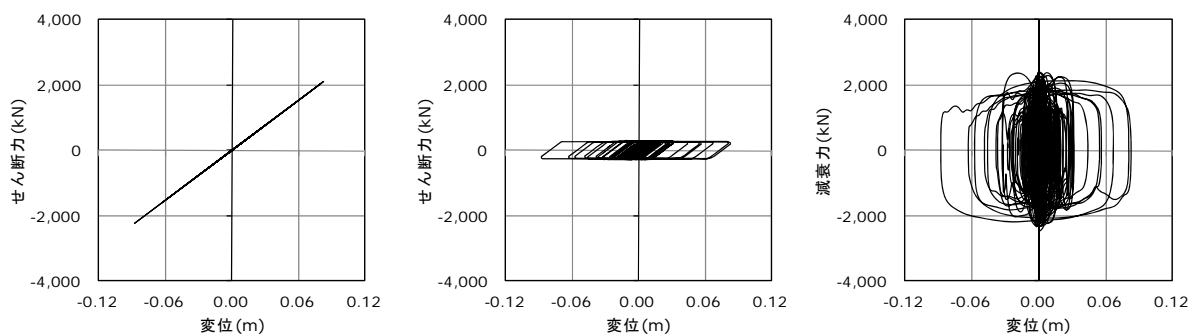
(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-13 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC003-AV・慣性項非考慮)



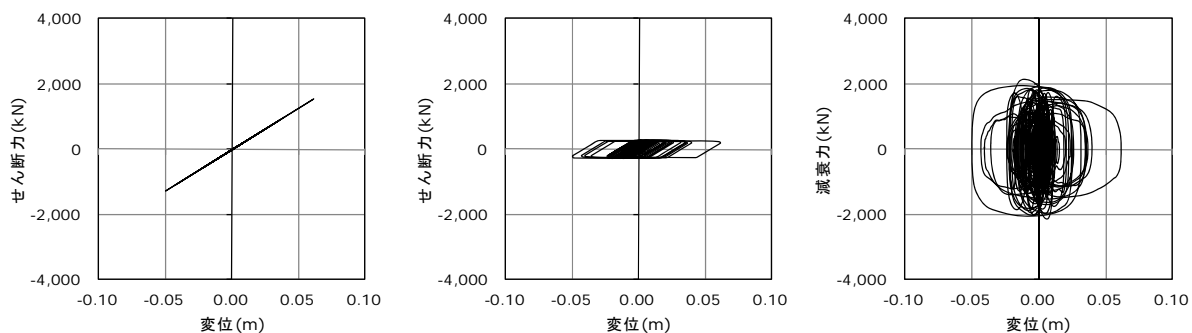
(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

図 2.3.7-14 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC004-AV・慣性項考慮)



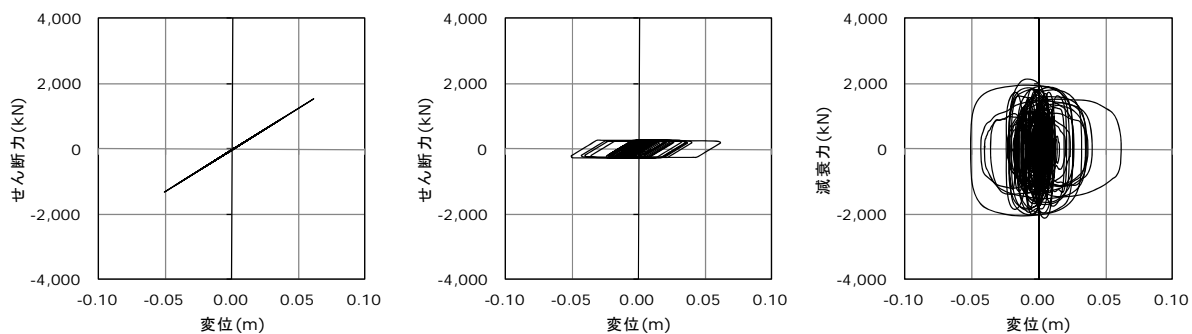
(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

図 2.3.7-15 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC004-AV・慣性項非考慮)



(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

図 2.3.7-16 免震層の荷重変形関係 (T-TN-KGIN1F-AV・慣性項考慮)



(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

図 2.3.7-17 免震層の荷重変形関係 (T-TN-KGIN1F-AV・慣性項非考慮)

2) 繰り返し依存性の考慮・非考慮による応答比較

本節では繰り返し依存性の影響を検討する。低摩擦すべり支承・粘性ダンパーそれぞれの免震部材に繰り返し依存性を定義しているが、解析では二つの免震部材同時に繰り返し依存性を考慮する場合・しない場合でケース分けをしている。

表 2.3.7-6 および表 2.3.7-7 に応答結果の一覧を示す。なお、ここでは免震層の累積変位に加えて、低摩擦すべり支承の累積すべり量についても示しておく。図 2.3.7-18～図 2.3.7-41 には、各ケースにおける免震層の荷重変形関係を示す。また、図 2.3.7-42～図 2.3.7-49 には免震層の累積変位量の時刻歴を示す。

図 2.3.7-50～図 2.3.7-53 には解析終了時の低摩擦すべり支承の摩擦係数変化率および粘性ダンパーの繰り返し依存係数を示す。このとき、低摩擦すべり支承の横軸は累積すべり量とし、弾性変形分は除いている。

全体の傾向として繰り返し依存性を考慮したケースの応答結果は、依存性を考慮しないケースに比して 2 割程度大きくなっている。最大応答変位では最大 1.42 倍、最大応答加速度では最大 1.26 倍(いずれも T-TN-AIC004-AV、1.5 倍入力)、累積変位量では最大 1.21 倍(N-OSKH02-AV、1.25 倍入力) 応答が大きくなっている。

また、入力を係数倍して大きくしていくに従い、依存性考慮モデルと依存性非考慮モデルの比率がわずかであるが大きくなる傾向が見られる。

繰り返し依存性の変化状況を見ると粘性ダンパーの繰り返し依存係数は 1 倍入力で既に下限値 0.7 に達しており、応答への影響としてはすべり支承に比して粘性ダンパーの繰り返し依存性による影響が大きいと思われる。

また、すべり支承の累積変形量は実験で確認されている累積変形量に対して 3 倍入力の応答値でも十分な余裕が見られる。一方、粘性ダンパーについては 1 倍入力においても横軸の E_v/V_v の値が実験で確認されている数値を超えるケースが見られた (T-TN-AIC003-AV 波)。

表 2.3.7-6 免震層の応答結果一覧 その1

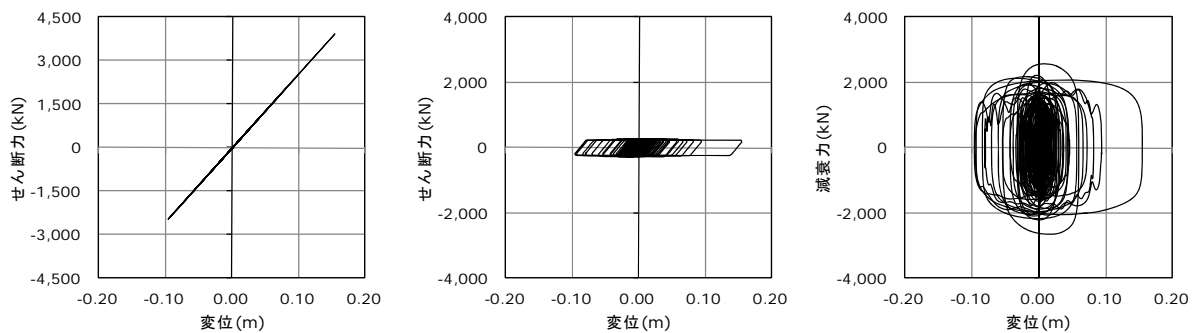
入力地震	N-OSKH02-AV					
	1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変位(cm)	15.4 (1.30)	11.9	23.1 (1.24)	18.6	48.6 (1.13)	43.1
最大応答加速度(cm/s ²)	54.1 (1.13)	48.0	74.7 (1.12)	66.7	141 (1.07)	131
せん断力係数 C_i	0.0551 (1.13)	0.0489	0.0761 (1.12)	0.0681	0.144 (1.07)	0.134
累積変位量(m)	7.05 (1.18)	5.98	10.5 (1.21)	8.66	23.3 (1.20)	19.5
累積すべり量(m) (低摩擦すべり支承)	4.11 (1.38)	2.97	7.16 (1.37)	5.21	18.9 (1.26)	15.0
等価エネルギー速度 V_E (m/s)	1.43 (1.06)	1.35	1.88 (1.06)	1.77	3.17 (1.03)	3.08
入力地震	T-TN-AIC003-AV					
	1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変位(cm)	19.5 (1.17)	16.6	28.2 (1.18)	23.9	42.2 (1.29)	32.8
最大応答加速度(cm/s ²)	66.3 (1.04)	64.1	89.1 (1.08)	82.5	125 (1.18)	106
せん断力係数 C_i	0.0677 (1.04)	0.0653	0.0909 (1.08)	0.0841	0.127 (1.18)	0.108
累積変位量(m)	12.4 (1.14)	10.9	17.2 (1.14)	15.1	22.7 (1.15)	19.8
累積すべり量(m) (低摩擦すべり支承)	7.66 (1.27)	6.05	11.8 (1.24)	9.54	16.6 (1.22)	13.6
等価エネルギー速度 V_E (m/s)	2.07 (1.01)	2.04	2.58 (1.01)	2.56	3.09 (1.01)	3.07

・ ()の数值は依存性考慮モデルと依存性非考慮モデルの比率を示す

表 2.3.7-7 免震層の応答結果一覧 その2

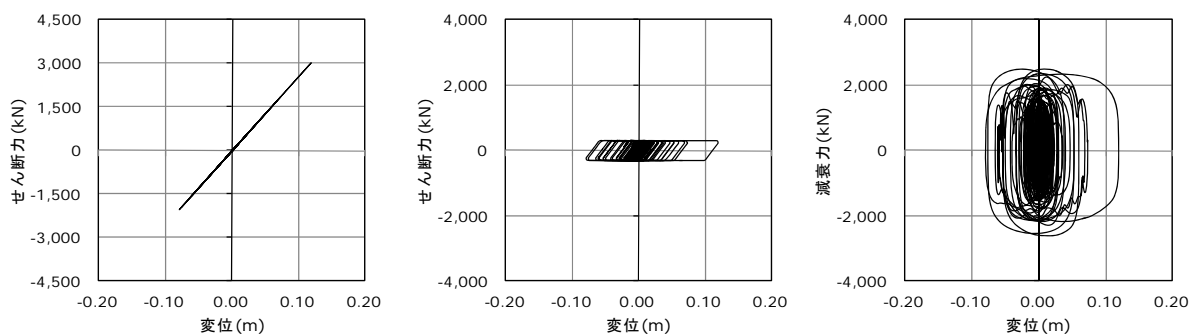
入力地震	T-TN-AIC004-AV					
	1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変形(cm)	8.57 (1.15)	7.44	14.1 (1.34)	10.5	21.5 (1.42)	15.1
最大応答加速度(cm/s ²)	38.1 (0.97)	39.1	52.1 (1.09)	47.6	71.4 (1.26)	59.1
せん断力係数 C_i	0.0389 (0.97)	0.0399	0.0531 (1.09)	0.0485	0.0728 (1.21)	0.0603
累積変位量(m)	5.81 (1.12)	5.18	8.03 (1.14)	7.04	10.5 (1.15)	9.15
累積すべり量(m) (低摩擦すべり支承)	2.03 (1.42)	1.43	3.58 (1.38)	2.59	5.49 (1.35)	4.06
等価エネルギー速度 V_E (m/s)	1.20 (1.04)	1.16	1.52 (1.04)	1.46	1.84 (1.03)	1.78
入力地震	T-TN-KGIN1F-AV					
	1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変形(cm)	6.10 (1.23)	4.95	10.0 (1.30)	7.68	14.0 (1.27)	11.1
最大応答加速度(cm/s ²)	30.4 (0.99)	30.6	38.7 (1.03)	37.5	49.9 (1.11)	45.1
せん断力係数 C_i	0.0310 (0.99)	0.0312	0.0394 (1.03)	0.0382	0.0509 (1.11)	0.0460
累積変位量(m)	4.06 (1.08)	3.75	5.98 (1.16)	5.16	8.06 (1.18)	6.80
累積すべり量(m) (低摩擦すべり支承)	1.25 (1.30)	0.962	2.76 (1.44)	1.92	4.54 (1.43)	3.18
等価エネルギー速度 V_E (m/s)	0.906 (1.04)	0.873	1.20 (1.06)	1.13	1.49 (1.07)	1.40

・ ()の数値は依存性考慮モデルと依存性非考慮モデルの比率を示す



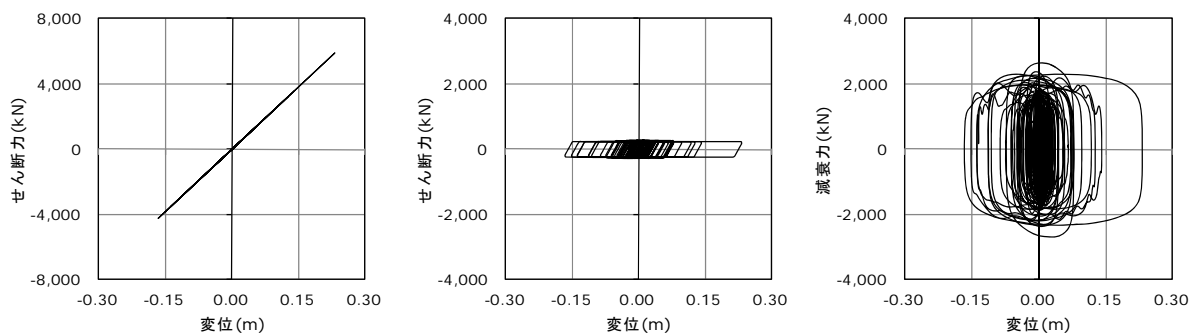
(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

図 2.3.7-18 免震層の荷重変形関係 (N-OSKH02-AV・1倍入力・繰り返し依存性考慮)



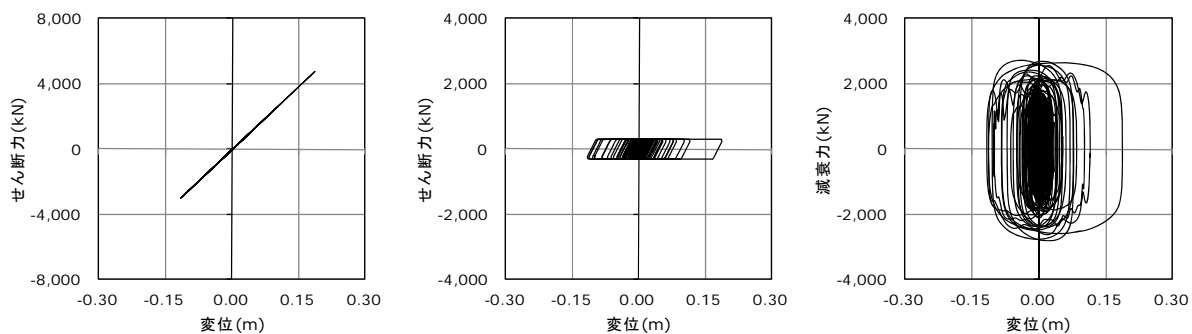
(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

図 2.3.7-19 免震層の荷重変形関係 (N-OSKH02-AV・1倍入力・繰り返し依存性非考慮)



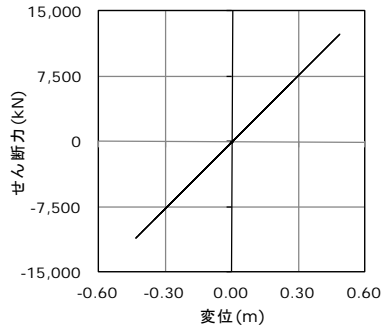
(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

図 2.3.7-20 免震層の荷重変形関係 (N-OSKH02-AV・1.25倍入力・繰り返し依存性考慮)

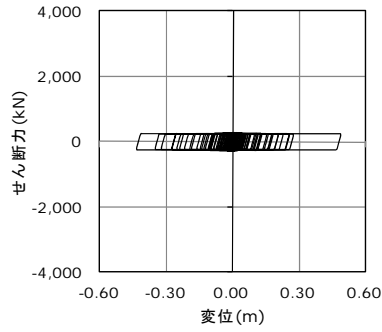


(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

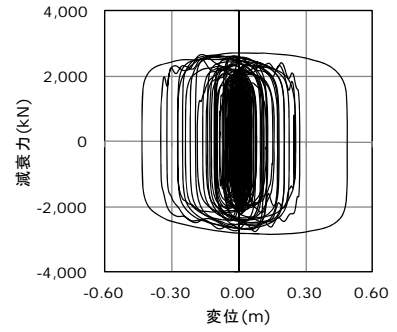
図 2.3.7-21 免震層の荷重変形関係 (N-OSKH02-AV・1.25倍入力・繰り返し依存性非考慮)



(a)積層ゴム

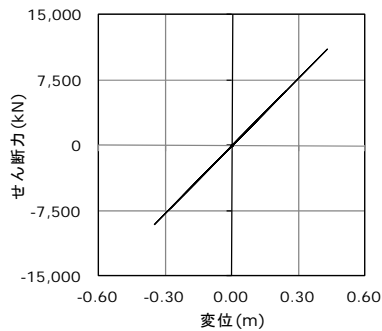


(b)すべり支承

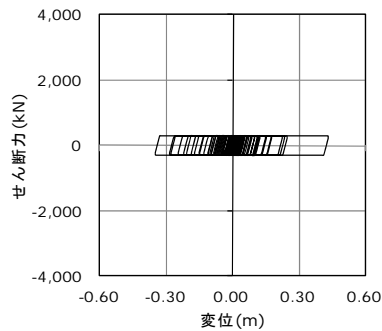


(c)粘性ダンパー

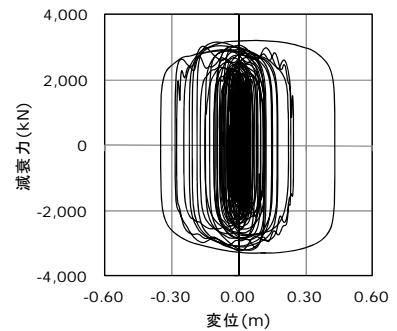
図 2.3.7-22 免震層の荷重変形関係 (N-OSKH02-AV・1.5 倍入力・繰り返し依存性考慮)



(a)積層ゴム

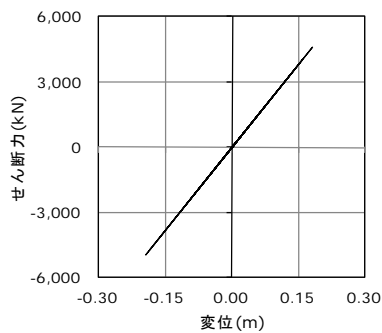


(b)すべり支承

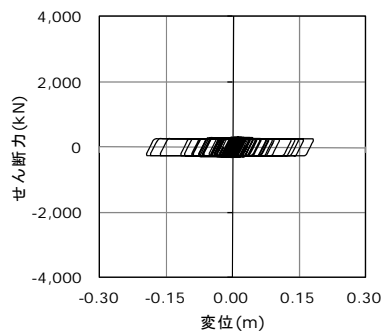


(c)粘性ダンパー

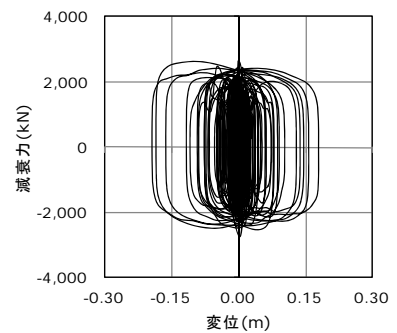
図 2.3.7-23 免震層の荷重変形関係 (N-OSKH02-AV・1.5 倍入力・繰り返し依存性非考慮)



(a)積層ゴム

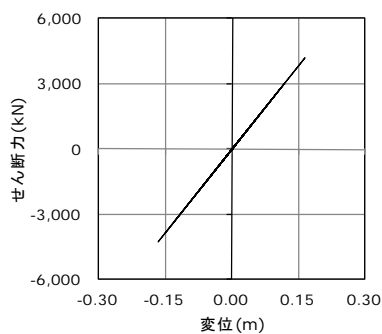


(b)すべり支承

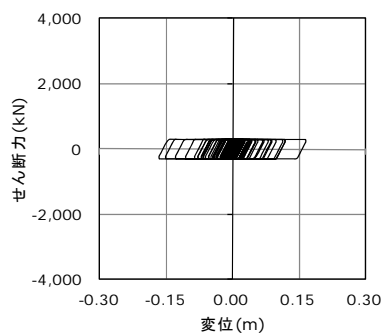


(c)粘性ダンパー

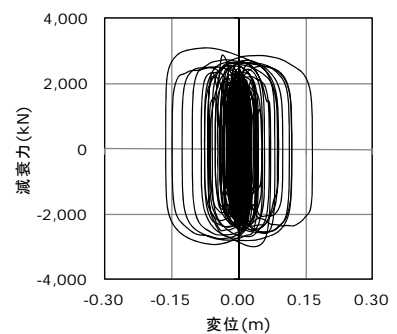
図 2.3.7-24 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC003-AV・1 倍入力・繰り返し依存性考慮)



(a)積層ゴム

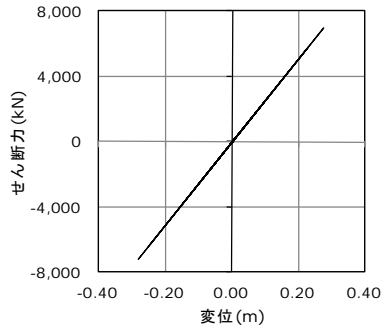


(b)すべり支承

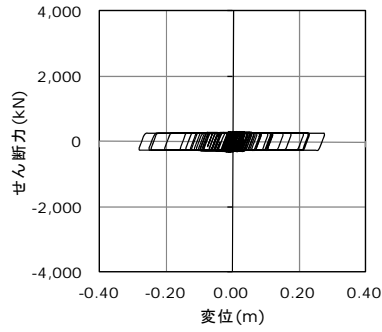


(c)粘性ダンパー

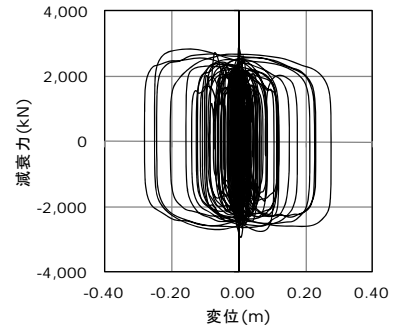
図 2.3.7-25 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC003-AV・1 倍入力・繰り返し依存性非考慮)



(a)積層ゴム

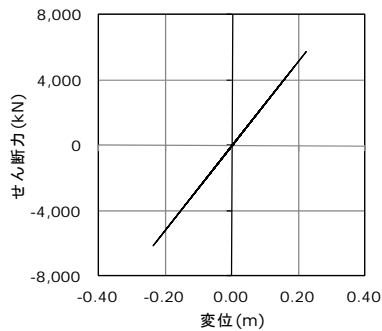


(b)すべり支承

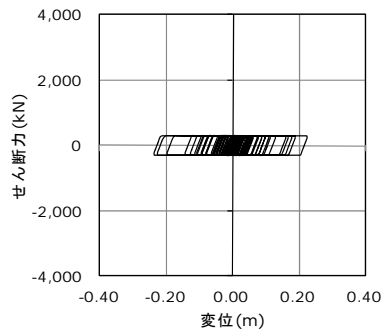


(c)粘性ダンパー

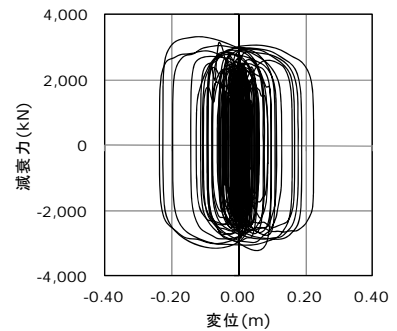
図 2.3.7-26 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC003-AV・1.25 倍入力・繰り返し依存性考慮)



(a)積層ゴム

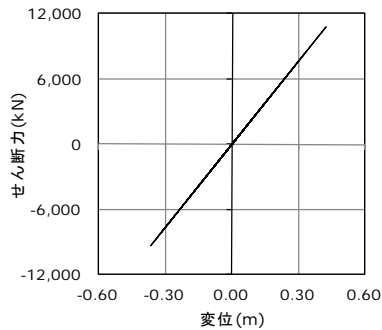


(b)すべり支承

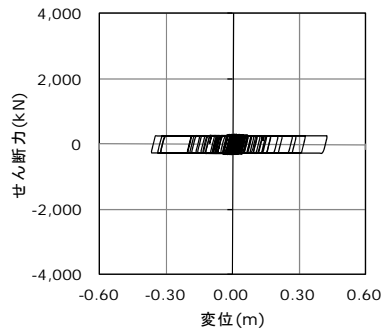


(c)粘性ダンパー

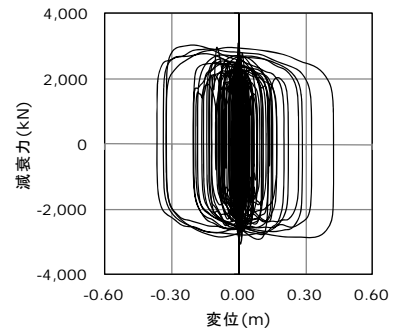
図 2.3.7-27 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC003-AV・1.25 倍入力・繰り返し依存性非考慮)



(a)積層ゴム

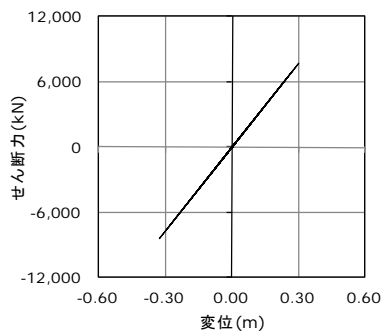


(b)すべり支承

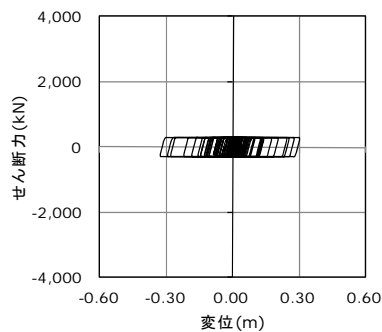


(c)粘性ダンパー

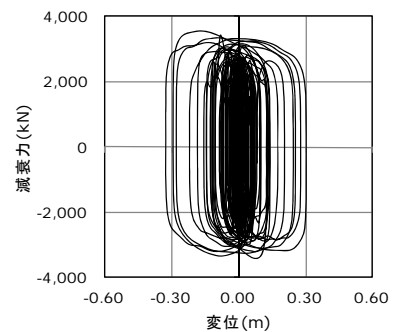
図 2.3.7-28 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC003-AV・1.5 倍入力・繰り返し依存性考慮)



(a)積層ゴム

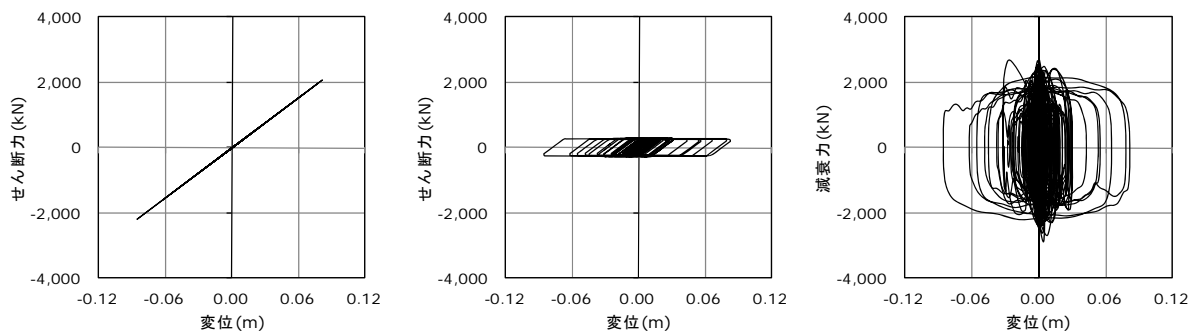


(b)すべり支承



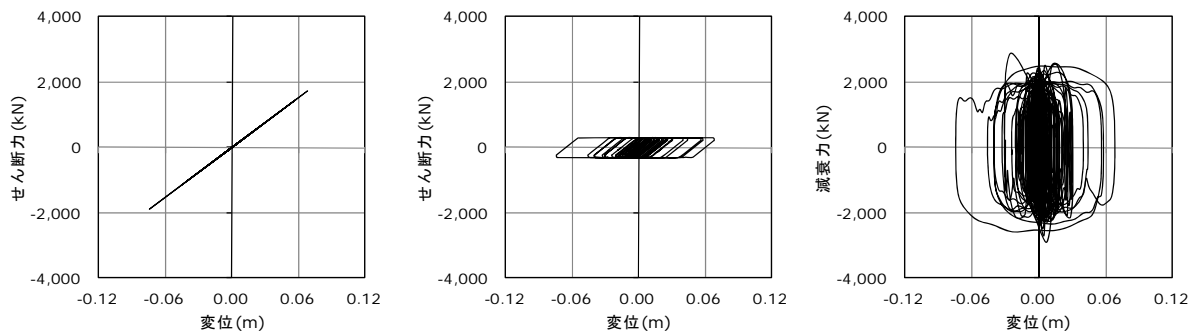
(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-29 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC003-AV・1.5 倍入力・繰り返し依存性非考慮)



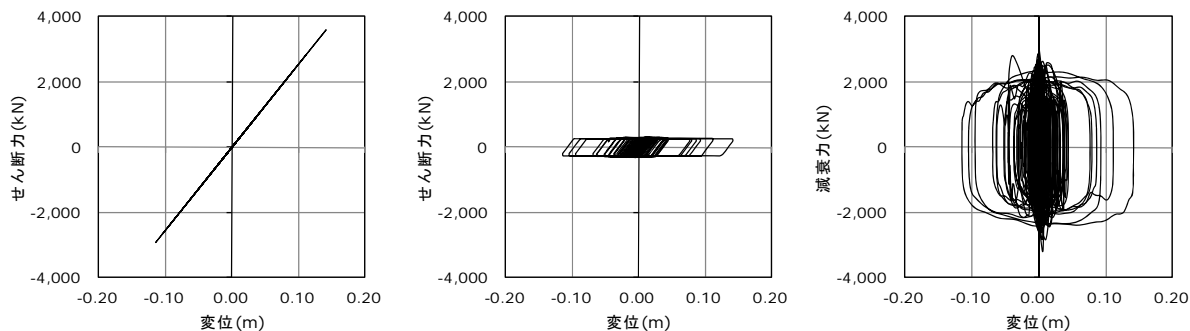
(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

図 2.3.7-30 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC004-AV・1 倍入力・繰り返し依存性考慮)



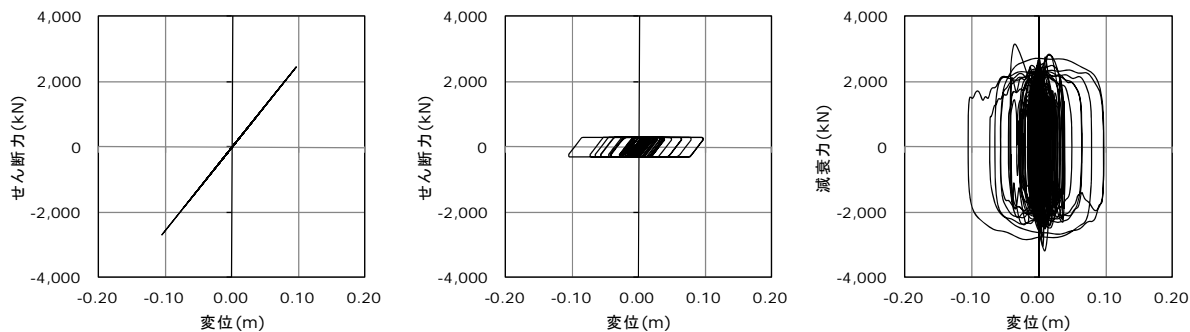
(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

図 2.3.7-31 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC004-AV・1 倍入力・繰り返し依存性非考慮)



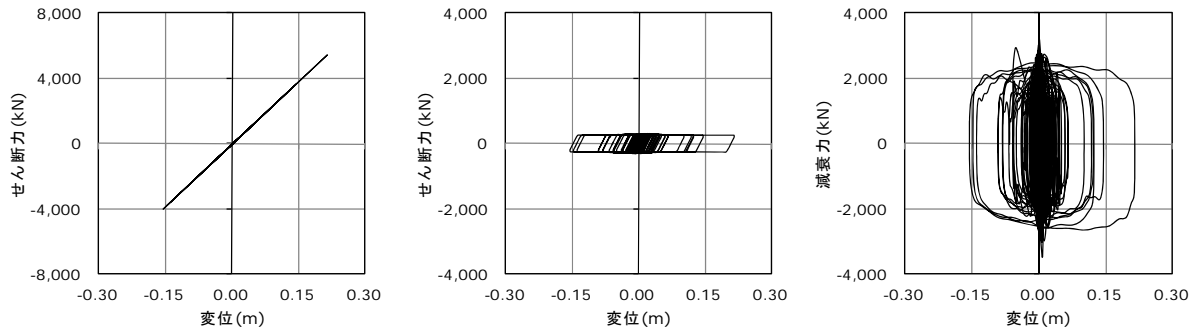
(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

図 2.3.7-32 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC004-AV・1.25 倍入力・繰り返し依存性考慮)



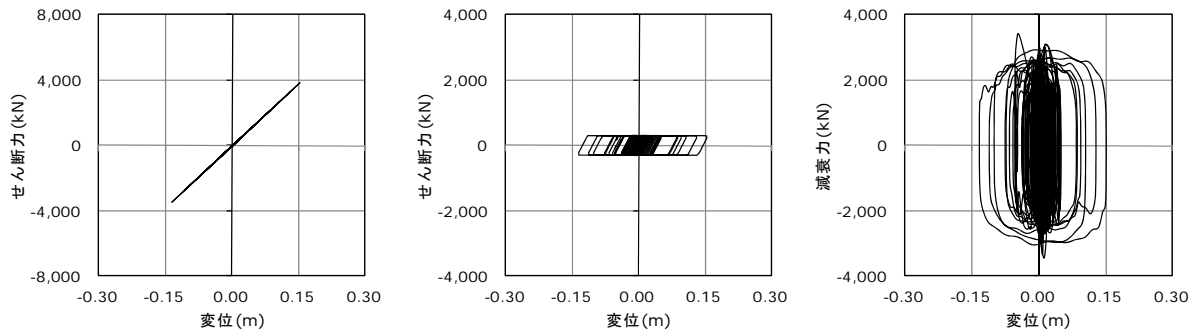
(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

図 2.3.7-33 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC004-AV・1.25 倍入力・繰り返し依存性非考慮)



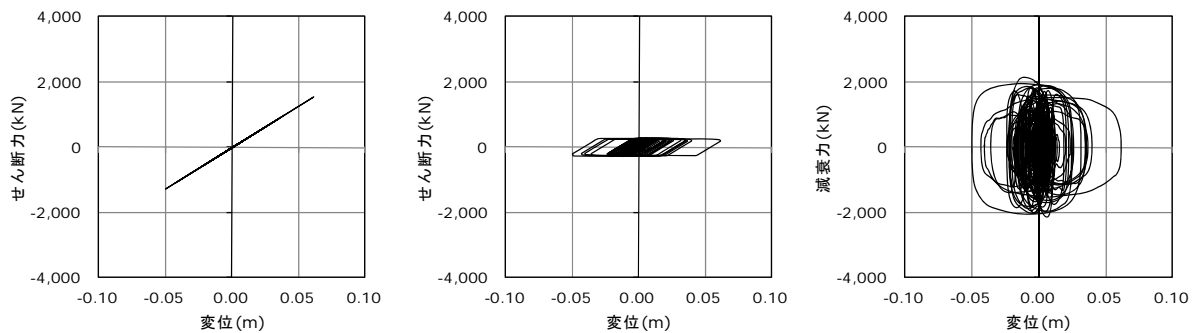
(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

図 2.3.7-34 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC004-AV・1.5倍入力・繰り返し依存性考慮)



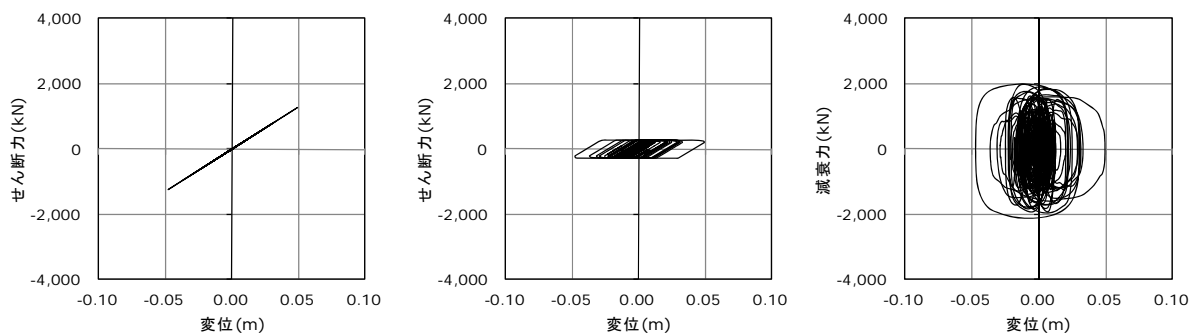
(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

図 2.3.7-35 免震層の荷重変形関係 (T-TN-AIC004-AV・1.5倍入力・繰り返し依存性非考慮)



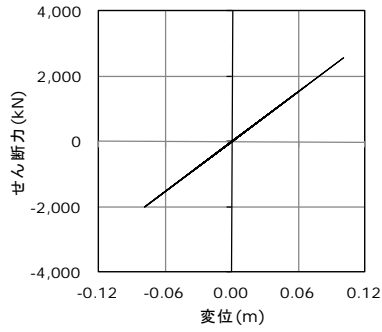
(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

図 2.3.7-36 免震層の荷重変形関係 (T-TN-KGIN1F-AV・1倍入力・繰り返し依存性考慮)

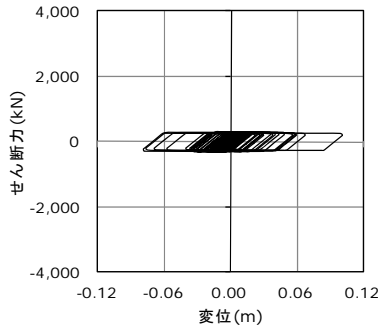


(a)積層ゴム (b)すべり支承 (c)粘性ダンパー

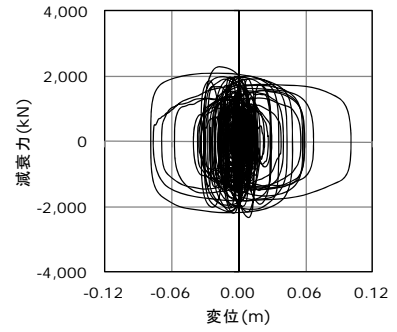
図 2.3.7-37 免震層の荷重変形関係 (T-TN-KGIN1F-AV・1倍入力・繰り返し依存性非考慮)



(a)積層ゴム

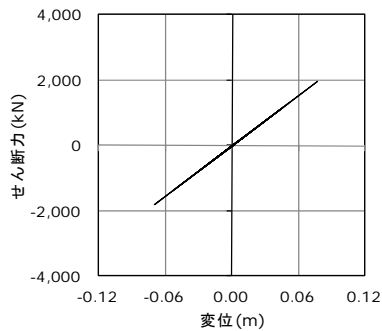


(b)すべり支承

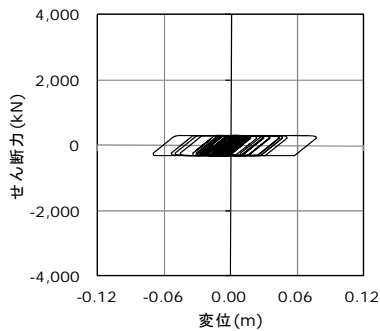


(c)粘性ダンパー

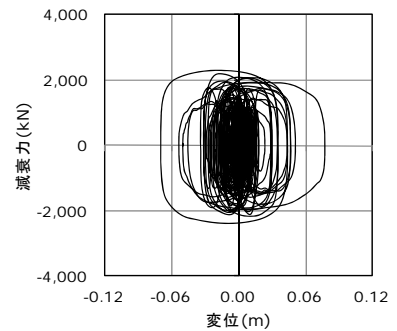
図 2.3.7-38 免震層の荷重変形関係 (T-TN-KGIN1F-AV・1.25倍入力・繰り返し依存性考慮)



(a)積層ゴム

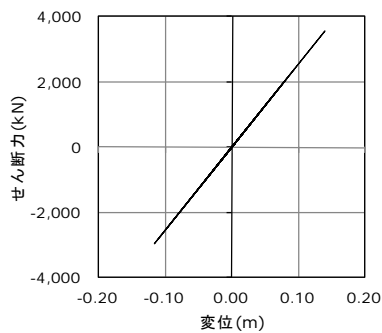


(b)すべり支承

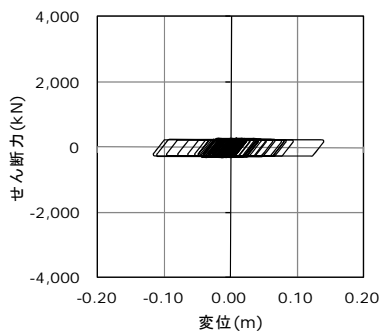


(c)粘性ダンパー

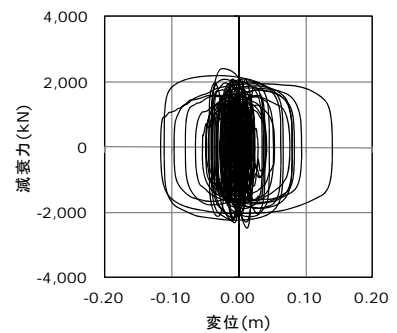
図 2.3.7-39 免震層の荷重変形関係 (T-TN-KGIN1F-AV・1.25倍入力・繰り返し依存性非考慮)



(a)積層ゴム

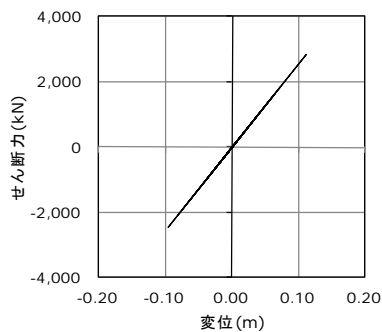


(b)すべり支承

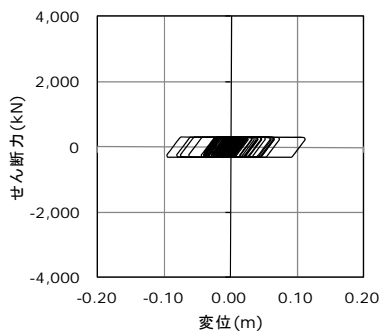


(c)粘性ダンパー

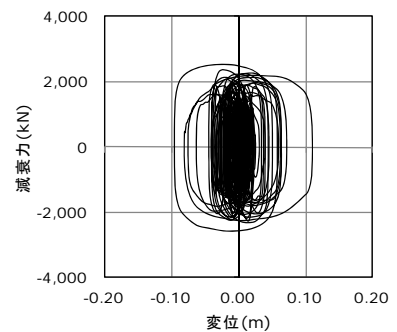
図 2.3.7-40 免震層の荷重変形関係 (T-TN-KGIN1F-AV・1.5倍入力・繰り返し依存性考慮)



(a)積層ゴム



(b)すべり支承



(c)粘性ダンパー

図 2.3.7-41 免震層の荷重変形関係 (T-TN-KGIN1F-AV・1.5倍入力・繰り返し依存性非考慮)

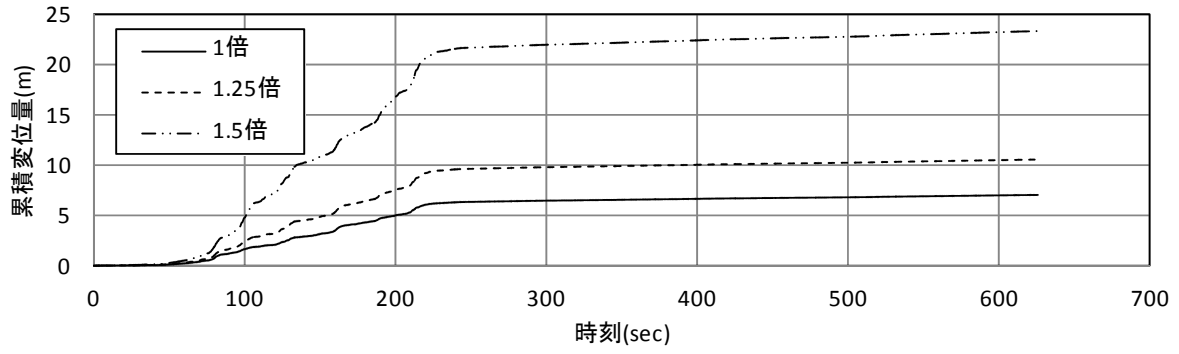


図 2.3.7-42 免震層の累積変位量 (N-OSKH02-AV・繰り返し依存性考慮)

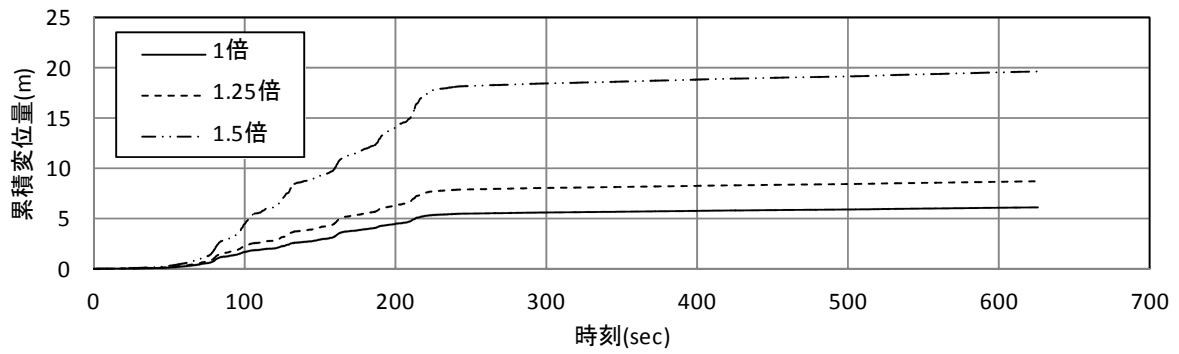


図 2.3.7-43 免震層の累積変位量 (N-OSKH02-AV・繰り返し依存性非考慮)

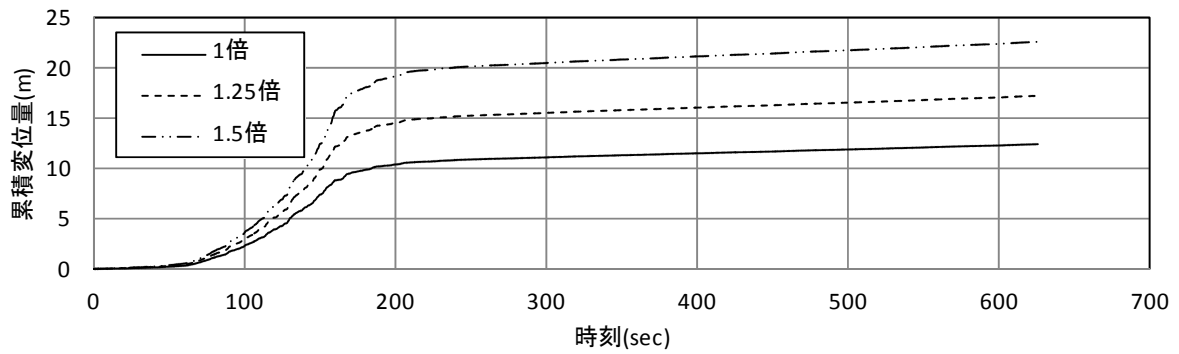


図 2.3.7-44 免震層の累積変位量 (T-TN-AIC003-AV・繰り返し依存性考慮)

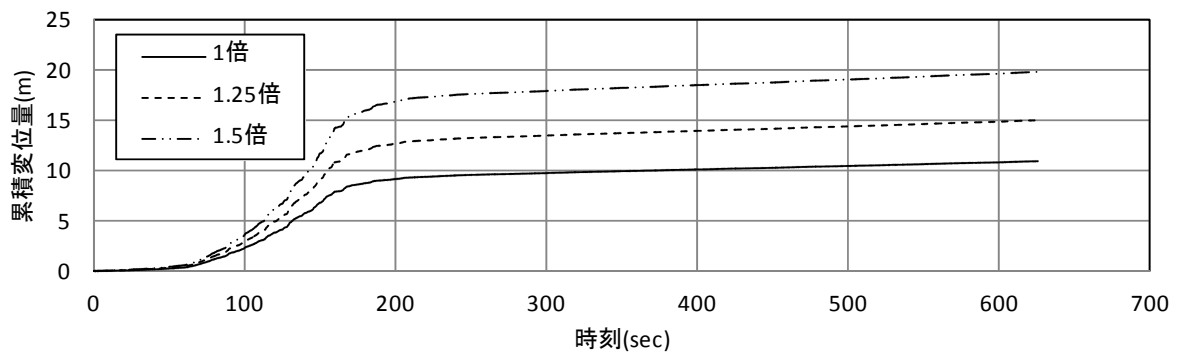


図 2.3.7-45 免震層の累積変位量 (T-TN-AIC003-AV・繰り返し依存性非考慮)

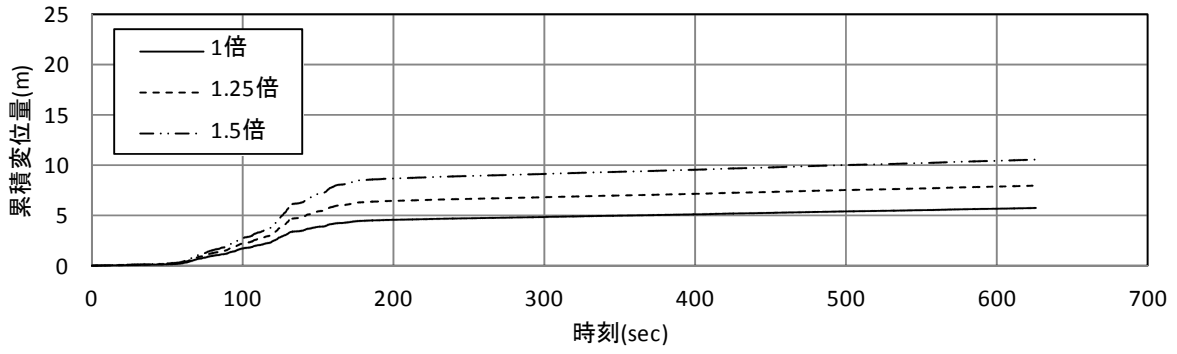


図 2.3.7-46 免震層の累積変位量 (T-TN-AIC004-AV・繰り返し依存性考慮)

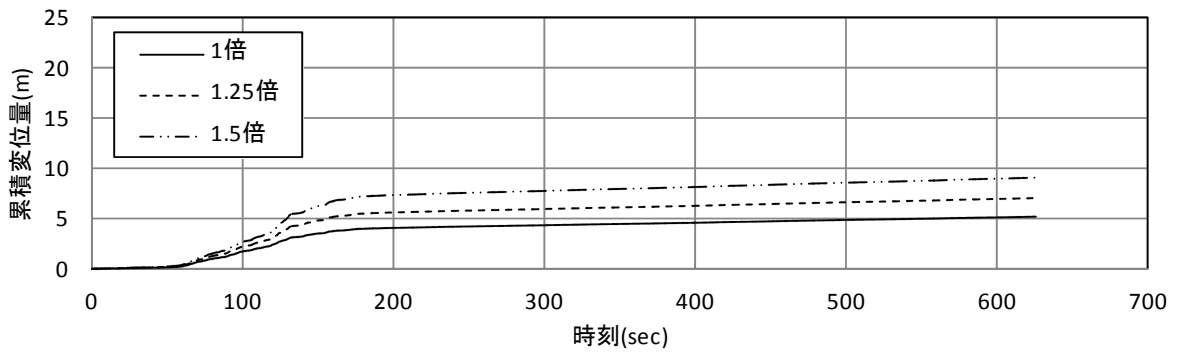


図 2.3.7-47 免震層の累積変位量 (T-TN-AIC004-AV・繰り返し依存性非考慮)

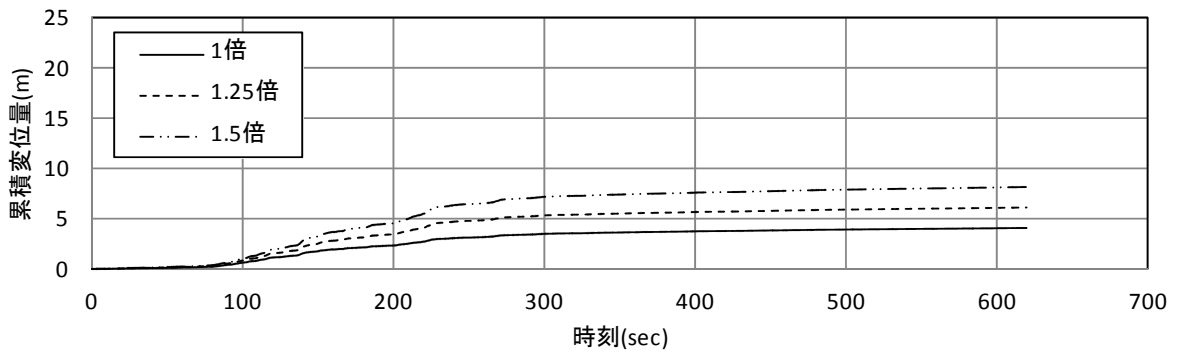


図 2.3.7-48 免震層の累積変位量 (T-TN-KGIN1F-AV・繰り返し依存性考慮)

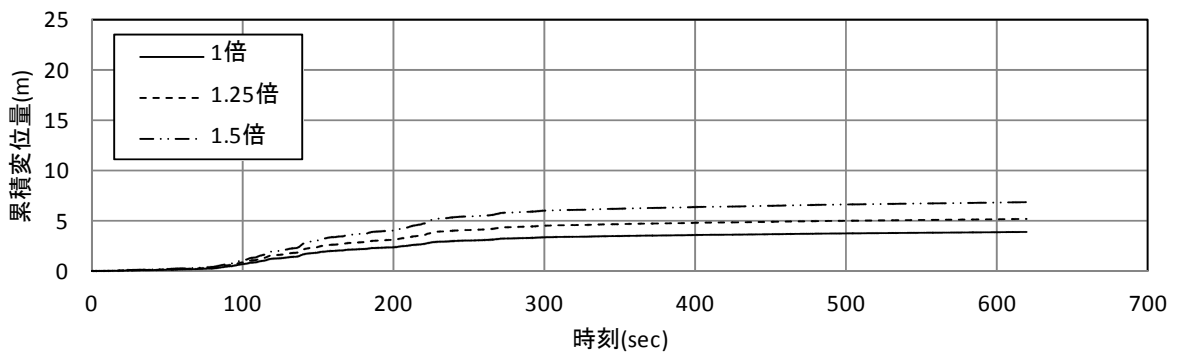
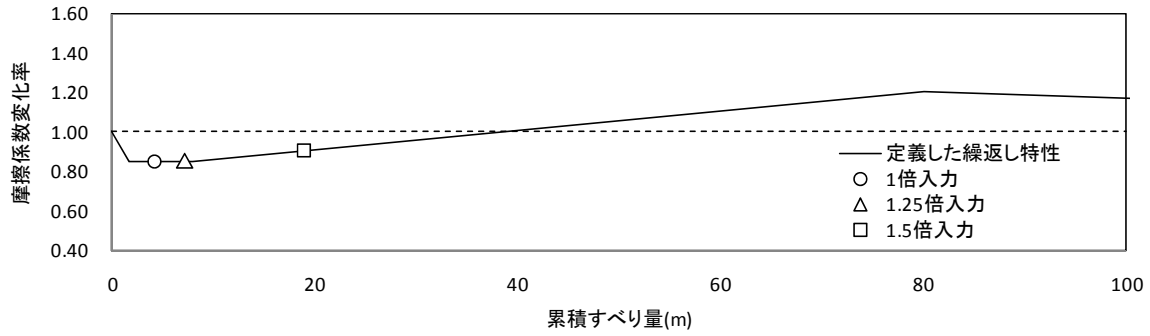
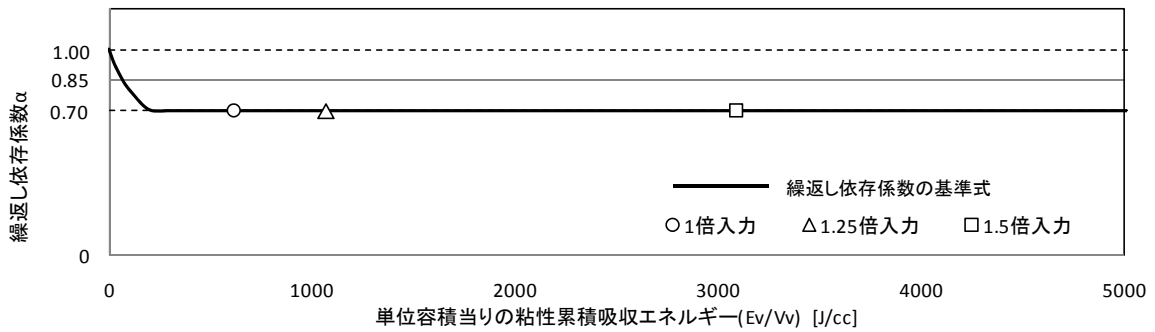


図 2.3.7-49 免震層の累積変位量 (T-TN-KGIN1F-AV・繰り返し依存性非考慮)

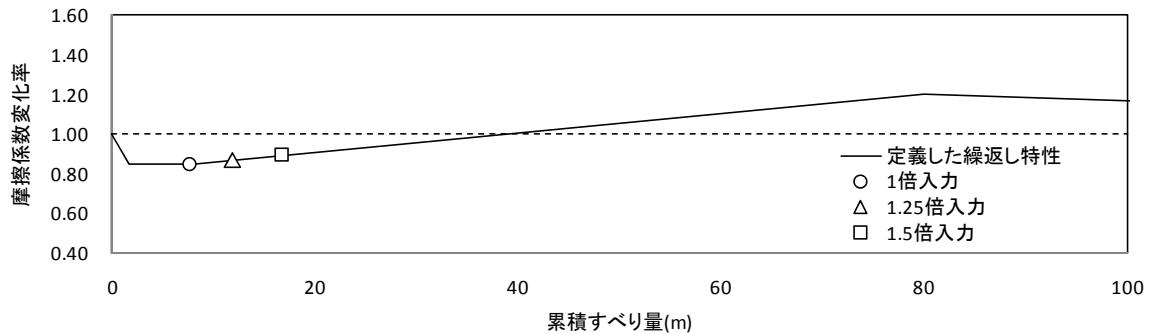


(a) 低摩擦すべり支承

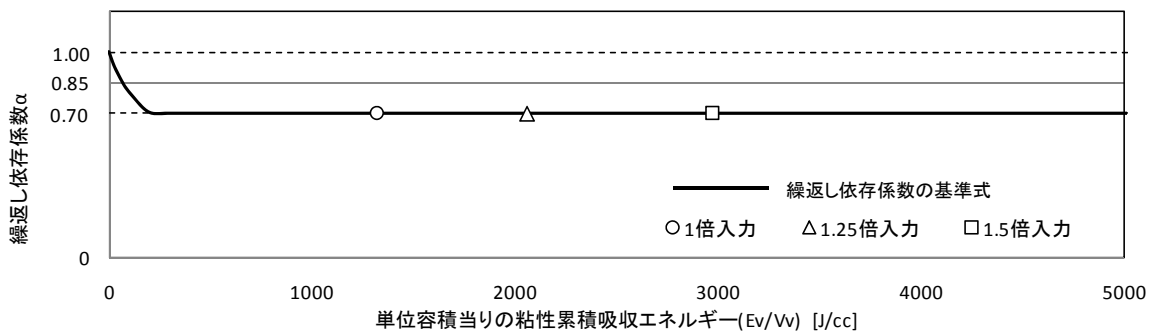


(b) 粘性ダンパー

図 2.3.7-50 N-OSKH02-AV 波による繰返し依存性の変化

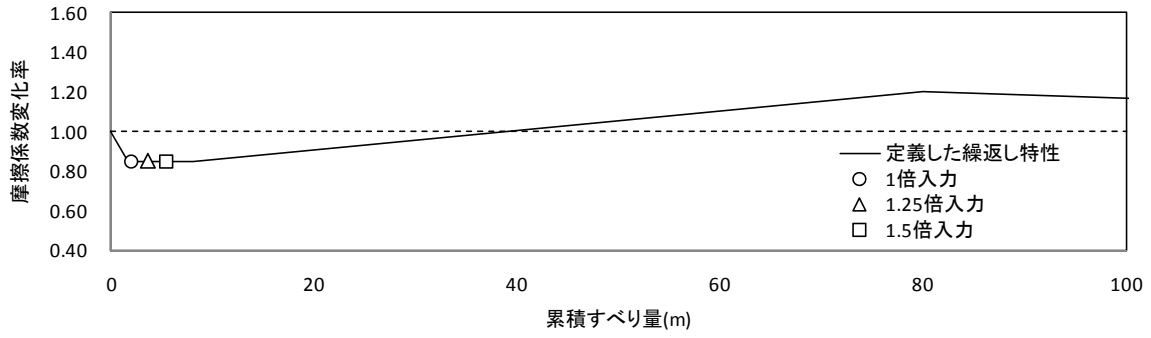


(a) 低摩擦すべり支承

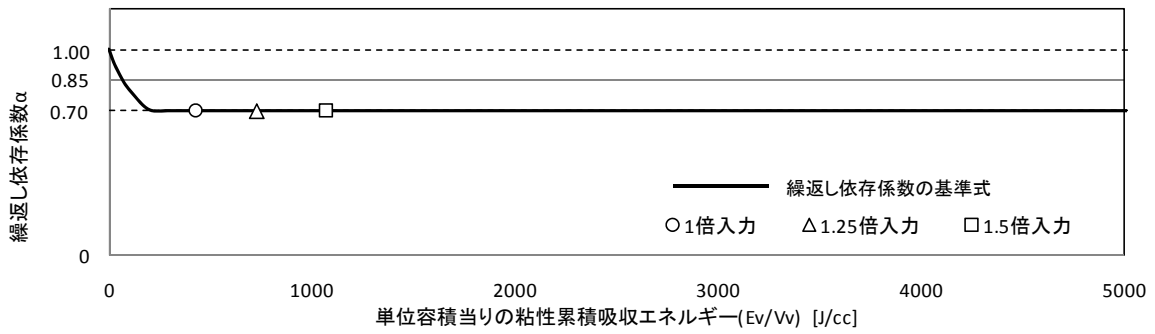


(b) 粘性ダンパー

図 2.3.7-51 T-TN-AIC003-AV 波による繰返し依存性の変化

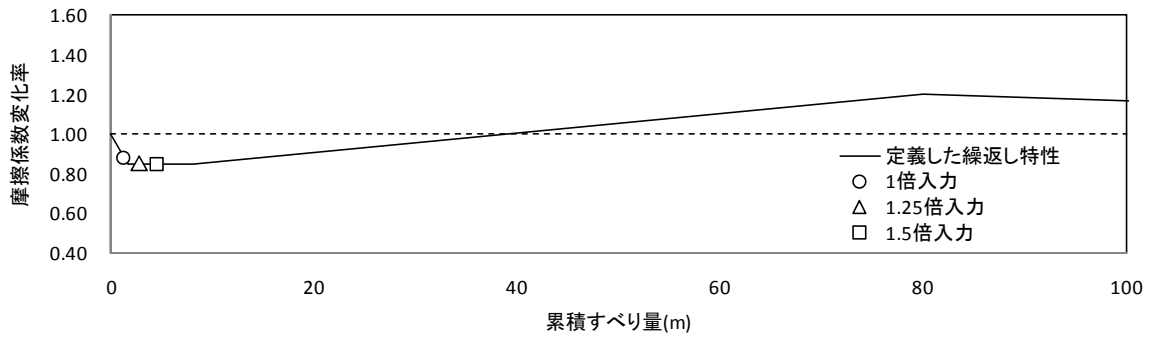


(a) 低摩擦すべり支承

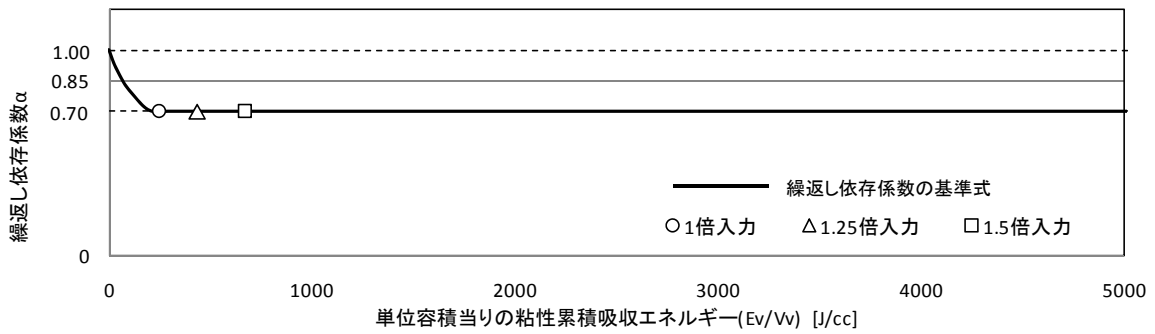


(b) 粘性ダンパー

図 2.3.7-52 T-TN-AIC004-AV 波による繰返し依存性の変化



(a) 低摩擦すべり支承



(b) 粘性ダンパー

図 2.3.7-53 T-TN-KGIN1F-AV 波による繰返し依存性の変化

(4) まとめ

繰り返し依存性を考慮した免震部材として弾性すべり支承（低摩擦）および粘性ダンパーを用いた 1 質点系剛体モデルを作成し、長周期地震による地震応答解析を実施した。

その結果、次の知見が得られた。

- 1) 免震層に低摩擦すべり支承と粘性ダンパーを併用した本解析モデルでは、粘性体の回転による慣性の影響は最大で 4%程度見られた。
- 2) 長周期地震動 4 波による地震応答解析を実施した結果、繰り返し依存性を考慮したモデルでは最大累積変形が 1 倍入力で 12.4m (T-TN-AIC003-AV)、1.5 倍入力で 23.3m (N-OSKH 02-AV) となった。
- 3) 各免震部材の繰り返し依存性を考慮したケースの応答値は、非考慮のケースに比して全体として 2 割程度大きい値を示した。
- 4) 弾性すべり支承（低摩擦）の場合、繰り返し依存性を決める累積すべり量は 1.5 倍入力時においても、実験で確認されている累積変形量に対して十分な余裕が見られた。一方、粘性ダンパーの繰り返し依存係数を決める粘性抵抗力による累積吸収エネルギー量は、1 倍入力時においても実験で確認されているエネルギー量を上回るケースが見られた。

参考文献

- 2.3.7-1) 財団法人日本建築センター免震構造審査委員会ほか：免震部材のエネルギー吸収性能評価に関する現状と課題 報告書；2007.3
- 2.3.7-2) 国土交通省：オイレス式弾性すべり支承 建築材料認定書（認定番号 MVBR-0377）別表、2008.6
- 2.3.7-3) 日本ピラー工業株式会社：免震用すべり材（低摩擦材）の繰り返しすべり試験による摩擦係数の変化；技術連絡書（資料2）、2010.7
- 2.3.7-4) 嶺脇重雄ほか：超高層免震建物の地震応答を想定した実大免震支承部材の性能確認試験；構造工学論文集、Vol.55B、2009.3
- 2.3.7-5) 浜崎宏典ほか：弾性すべり支承の耐久性能に関する実験的研究 その2 低摩擦タイプと高摩擦タイプの弾性すべり支承の実験結果；日本建築学会大会学術講演梗概集、B2、P.1061、2007.8
- 2.3.7-6) 技術委員会ほか：積層ゴムと弾性すべり支承のエネルギー吸収性能；MENSHIN、No.67、P.33、2010.2
- 2.3.7-7) 技術委員会免震部材部会ダンパー小委員会：免震部材部会ダンパー小委員会活動報告；2007.3
- 2.3.7-8) 光阪勇治ほか：増幅機構付き減衰装置の高速度領域における性能評価 その2 高速試験結果；日本建築学会大会学術講演梗概集、B2、P.761、2003.9
- 2.3.7-9) 国土交通省：AT式増幅機構付き減衰装 - 減衰こま (Rotary Damping Tube) RDT-AT-Short 建築材料認定書（認定番号 MVBR-0220）別表、2004.4
- 2.3.7-10) 国土交通省：AT式増幅機構付き減衰装 - 減衰こま (Rotary Damping Tube) RDT-AT-10万 cst 建築材料認定書（認定番号 MVBR-0221）別表、2004.4
- 2.3.7-11) 国土交通省：AT式増幅機構付き減衰装 - 減衰こま (Rotary Damping Tube) RDT-AT-30万 cst 建築材料認定書（認定番号 MVBR-0222）別表、2004.4
- 2.3.7-12) 中南滋樹ほか：慣性質量要素を有する粘性減衰装置の開発；三井住友建設技術研究所報告、No.3、pp.157-164、2005

2.4 まとめ

既往の研究と免震部材メーカー提供による多数回繰り返し特性を解析に反映させ、長周期地震動に対する免震建築物の応答解析を実施し、応答評価を行った。その中で、各免震部材について、応答解析に反映させるべきもの(累積変形、温度上昇などの関数として評価できるもの)、通常の応答解析を行なって結果から評価できるものなど、評価手法を整理した。応答解析に反映させるものについては、各社が独自にプログラムを改良し、繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを整備した。

各免震部材の繰り返し依存性がどのように応答に影響するかを考察し、繰り返し依存性を考慮した場合としない場合の比較から抽出した、まとめと今後の課題は以下の通りである。

・鉛プラグ入り積層ゴム

繰り返し加振による温度上昇に伴い、降伏荷重が低下する特性を考慮した応答解析を実施し、その影響評価を行った。今後は実験結果についての評価を実施し、鉛プラグの温度上昇に伴う降伏荷重の低下に代表される繰り返し加振時の特性変化について現状の評価手法の検証が必要である。

・高減衰ゴム系積層ゴム

既往の研究により提案されている累積履歴エネルギー吸収量による等価剛性の評価式を用いることで、多数回繰り返し加振を受けることによる復元力特性の変化を考慮した。今後は部材実験の結果を基に、広範囲に渡って既往の評価式を検証することで適用範囲の拡大を図る必要がある。

・鋼材ダンパー

繰り返し加振によって特性変化が生じないと考えられるので、応答値に対する疲労損傷評価を行った。今後は実験結果についての評価を実施し、繰り返し加振時の特性評価と疲労損傷度の評価について現状の評価手法の検証が必要である。

・鉛ダンパー

温度依存性および過去に実施された一定振幅正弦波加振試験結果に基づき、鉛ダンパーの繰り返しによる耐力劣化を考慮した解析モデルを用いた。今後は部材実験の結果との整合性を検証し、耐力劣化モデルの見直しを検討する必要がある。

・オイルダンパー

繰り返し回数や温度上昇によって性能がほとんど変化しないことが知られているが、地震の入力エネルギーに対する温度上昇について放熱を考慮した場合と無視した場合について検討し、その違いは小さかった。これより放熱を考慮しない簡略式でも安全側で評価できると考えられる。

・弾性すべり支承（高摩擦）

摩擦係数の累積すべり変位依存性により、摩擦係数の低下を考慮した検討を行い、応答量が適用範囲を超える結果となった。今後は実験結果に基づいて、累積すべり変位依存性を考慮する評価式の適用範囲を拡大する必要がある。また、支承径の違いによる温度変化を評価するために、熱収支解析による摩擦係数変化の修正を行う必要がある。

- ・弾性すべり支承（低摩擦）

摩擦係数の繰り返し依存性を考慮した検討を行った。累積すべり量は実験で確認されている累積変形量に対して十分な余裕があった。

- ・粘性ダンパー

材料認定書記載の繰り返し依存性を考慮し、温度変化は生じないものとして検討した。今後は部材実験の結果を分析し、繰り返しによる温度上昇に伴う抵抗力の低下を適切に評価する必要がある。

また、鉛プラグ入り積層ゴム、天然ゴム系積層ゴム＋弾性すべり支承（高摩擦）については、2方向入力に対する検討を行い、2方向入力に応答に与える影響について検討した。

- ・鉛プラグ入り積層ゴム

2方向入力時には入力エネルギーが大きい地震動の場合に、温度上昇を考慮すると考慮しない場合に比べて免震層の最大応答変形が大きくなった。

- ・弾性すべり支承（高摩擦）

2方向入力を考慮した場合、1方向入力に比べて応答変位が大きくなる傾向になる。また、繰り返し依存性を考慮すると更に応答変位が大きくなる傾向がある。つまり、すべり支承を用いる場合は2方向入力を適切に評価する必要がある。

以上より、長周期地震動に対する免震建築物の応答評価における今後の課題は、免震部材実験結果に対する評価を実施し、現状の評価手法の検証と見直しをすることである。また、免震部材および免震建築物応答に及ぼす繰り返し依存性の影響を簡易的に評価できる手法の検討が望まれる。

第3章 免震部材の繰り返し特性と長周期地震動に対する免震建築物の応答評価（2）

3.1 目的

長周期地震動に対する免震建築物の安全性照査のクライテリア設定に向けて、多数回繰り返し時の免震部材の特性評価とモデル化、免震部材の特性を考慮した応答解析に基づく応答評価を実施する。

3.2 全体方針

(1) 方針

第Ⅲ部第1章に示す免震部材実験結果を基にした詳細なモデル化をプログラムに反映し、多数回繰り返し特性を考慮した長周期地震動に対する1質点モデルの応答解析を実施し、応答評価を行う。

検討ケースは以下の通りとする。

- ① 鉛プラグ入り積層ゴム
- ② 高減衰ゴム系積層ゴム
- ③ 天然ゴム系積層ゴム+鋼材ダンパー
- ④ 天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパー
- ⑤ 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（高摩擦）
- ⑥ 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（低摩擦）+粘性ダンパー（減衰こま）

詳細なモデル化を行えるようプログラムを改良し、繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを整備する。

検討用長周期地震動に対する応答解析結果を整理し、多数回繰り返しによって何が問題となるかを抽出する。また、入力倍率が1.0倍、1.25倍、1.5倍と大きくなることによって、繰り返し依存性がどのように応答に影響するかを考察し、繰り返し依存性を考慮した場合としない場合の比較から、今後の課題等を抽出する。

(2) 解析モデル

解析モデルは上部構造を剛体モデルとした1質点モデルとし、免震層の設定は積層ゴムによる免震周期4.0秒程度、ダンパーの負担せん断力係数3.0~3.5%を標準とし、免震支承毎に設定を行なう。

(3) 入力地震動

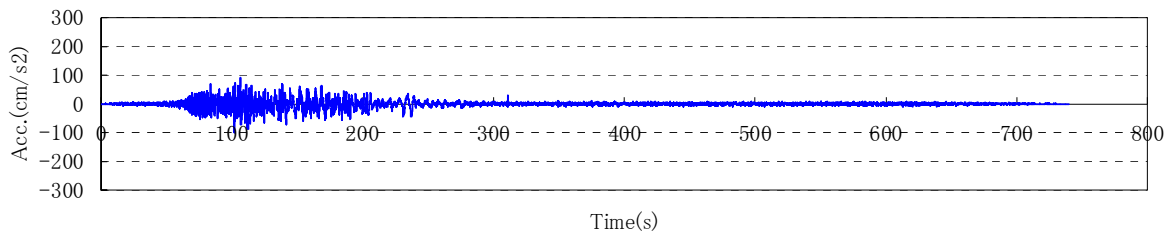
検討用入力地震動は、東海・東南海・南海地震が連続して発生すると想定して作成した以下の4波とする。

OSKH02 (大阪・此花 平均)
AIC003 (愛知・津島 平均)
SZO024 (静岡・浜松 平均)
KGIN (東京・新宿 平均)

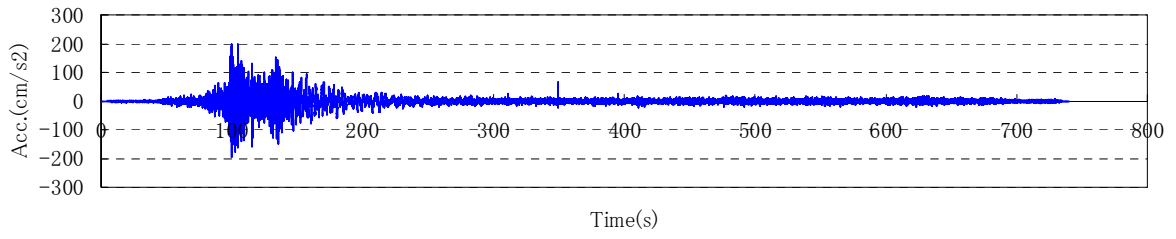
入力地震動の諸元を表 3.2-1 に、加速度時刻歴波形、速度時刻歴波形、変位時刻歴波形を図 3.2-1～3、擬似速度応答スペクトルを図 3.2-4、エネルギースペクトルを図 3.2-5 に示す。

表 3.2-1 入力地震動諸元 (加速度、速度、変位は最大値)

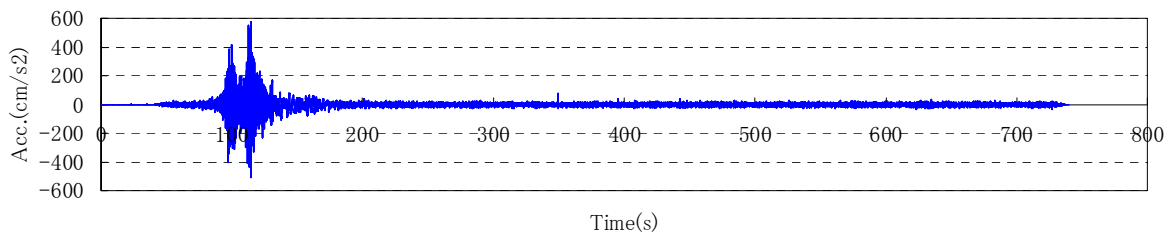
地震波名	3連動地震			
	OSKH02 (此花)	AIC003 (津島)	SZO024 (浜松)	KGIN (新宿)
加速度 (cm/s ²)	98.49	199.4	576.9	42.11
速度 (cm/s)	38.07	26.78	40.08	21.60
変位 (cm)	31.43	21.62	21.13	26.29
継続時間 (s)	739.82	739.82	739.82	739.82



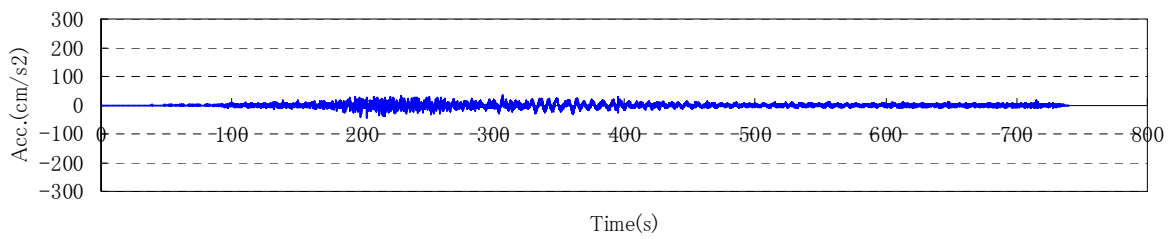
(a) OSKH02



(b) AIC003

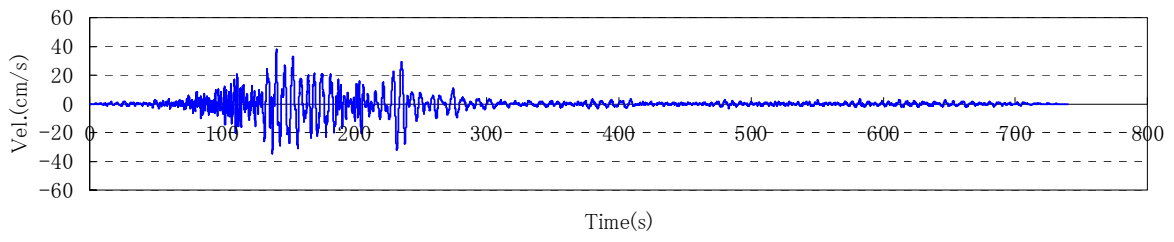


(c) SZO024

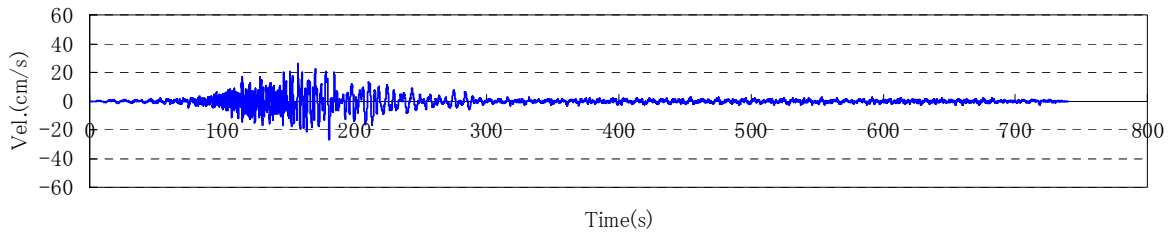


(d) KGIN

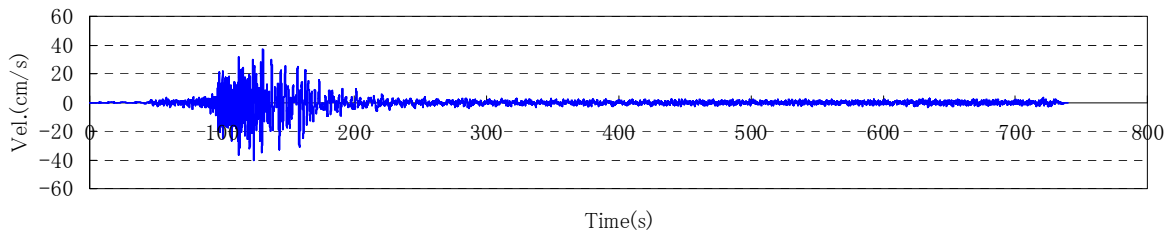
図 3.2-1 入力地震動加速度時刻歴波形



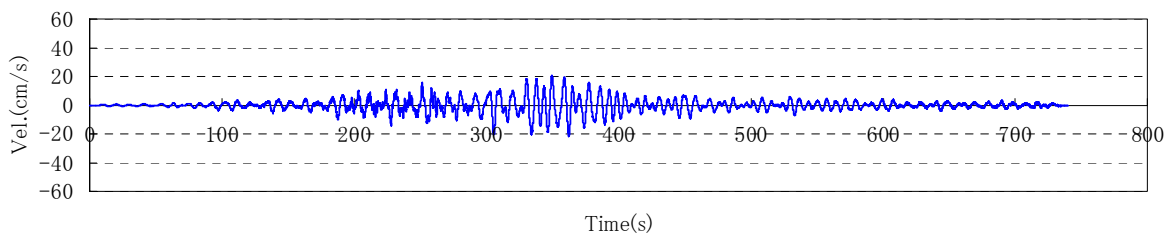
(a) OSKH02



(b) AIC003

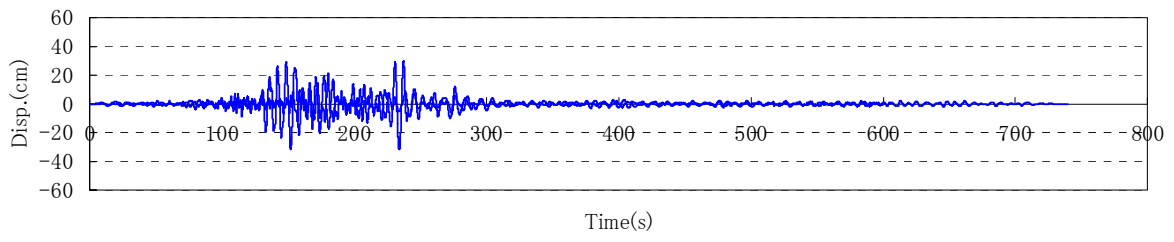


(c) SZO024

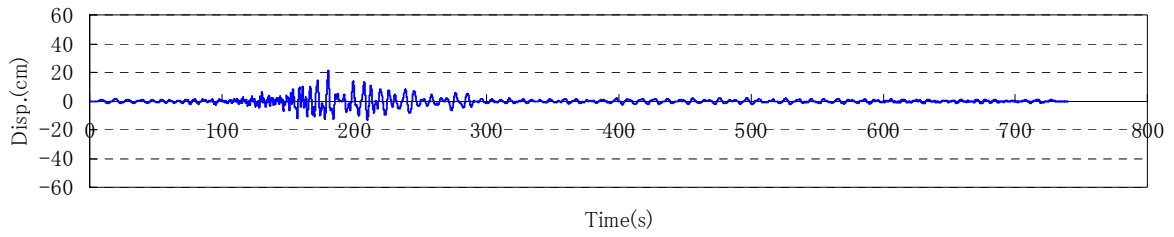


(d) KGIN

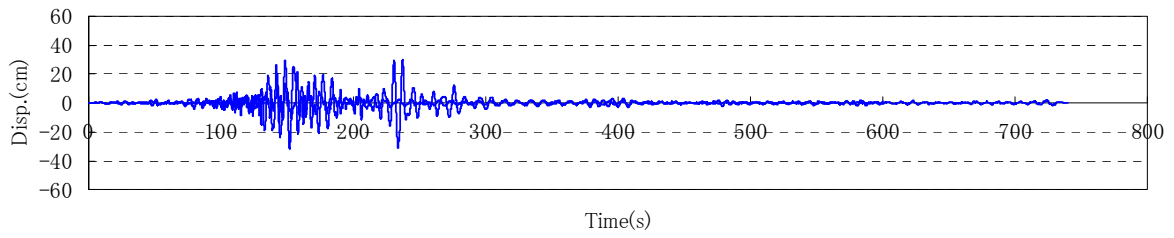
図 3.2-2 入力地震動速度時刻歴波形



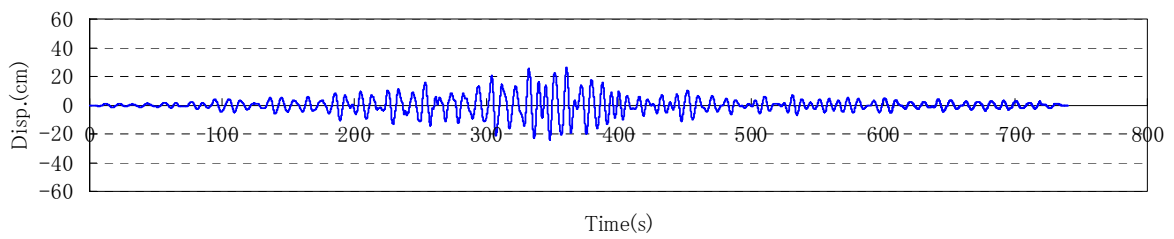
(a) OSKH02



(b) AIC003



(c) SZO024



(d) KGIN

図 3.2-3 入力地震動変位時刻歴波形

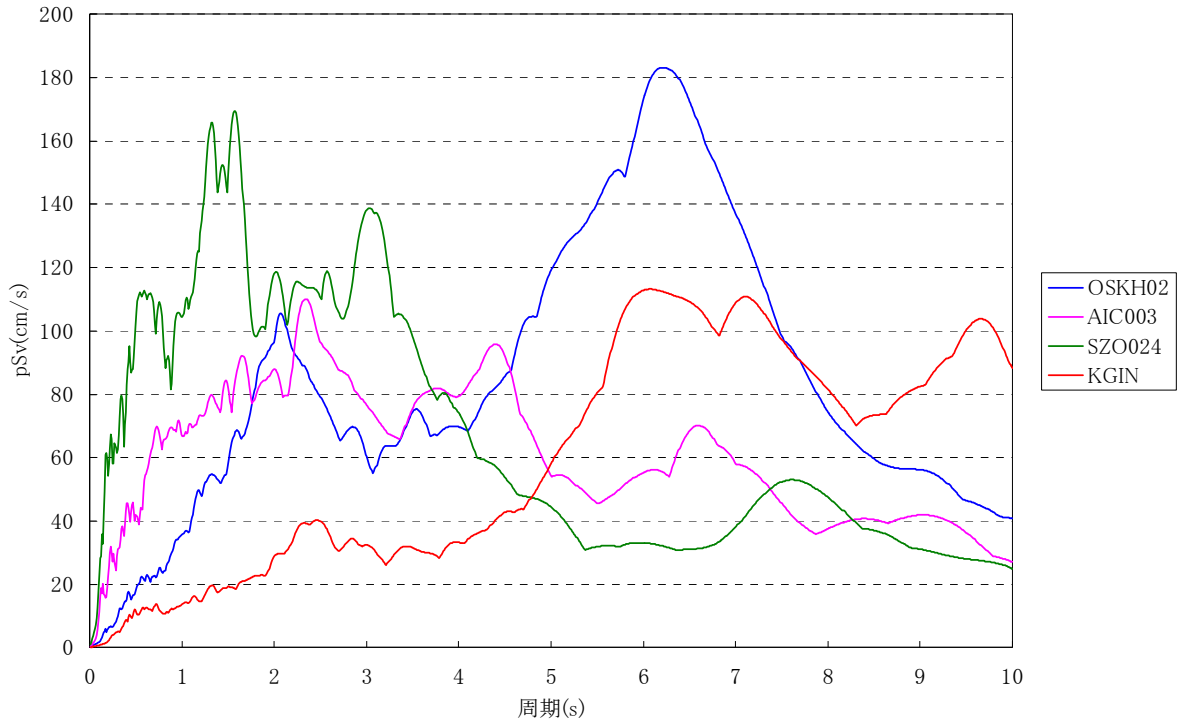


図 3.2-4 入力地震波擬似速度応答スペクトル(h=0.05)

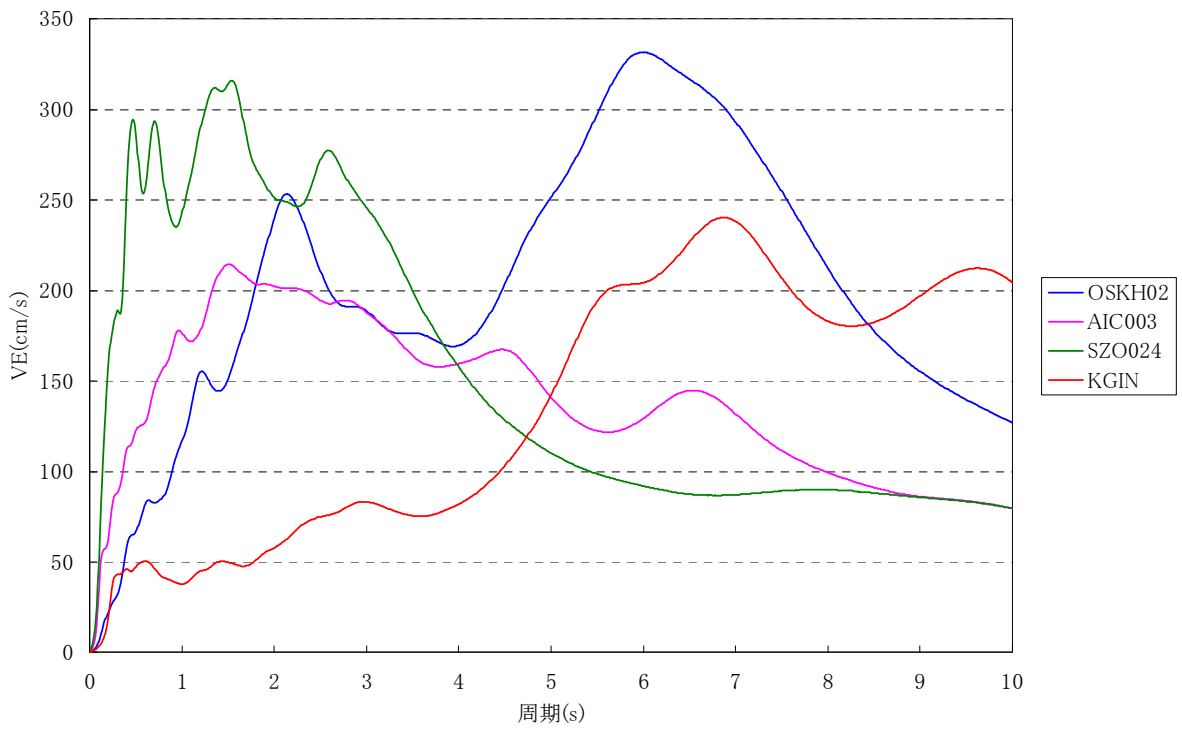


図 3.2-5 入力地震波エネルギースペクトル(h=0.10)

3.3 免震部材の繰り返し特性モデルと地震応答解析（その2）

3.3.1 鉛プラグ入り積層ゴム

(1) 鉛プラグ入り積層ゴム実験結果のモデル化

(a) 1本プラグの実験結果のモデル化

鉛プラグ入り積層ゴムの鉛プラグ1本タイプを対象とし、繰り返しの伴う降伏荷重特性値 Q_d の低下に着目した評価結果を以下に示す。

解析においては実験時の水平変位を与えることにより、曲線型モデルである修正 HD モデルに基づく荷重変形関係を求め、履歴吸収エネルギーが全て鉛部分の熱エネルギーに変換されているとし、熱伝導解析により得られた鉛部温度と、設定した鉛温度～降伏荷重関係に基づき降伏荷重を時々刻々修正していく手法である（参考文献 3.3.1-1～3.3.1-3）。

解析対象は限界試験として実施した表 3.3.1-1 に示す3ケースとした。

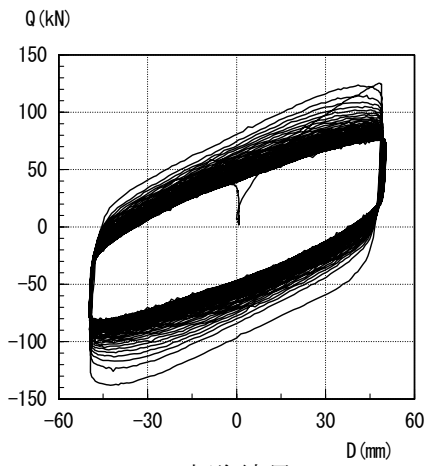
表 3.3.1-1 解析対象実験ケース

試験種類		加振周期 (s)	せん断歪 (%)	サイクル数	累積変形 (m)
正弦波 加振 (限界)	1B	4	50	250	49.5
	2B		100	120	47.52
	3B		200	60	47.52

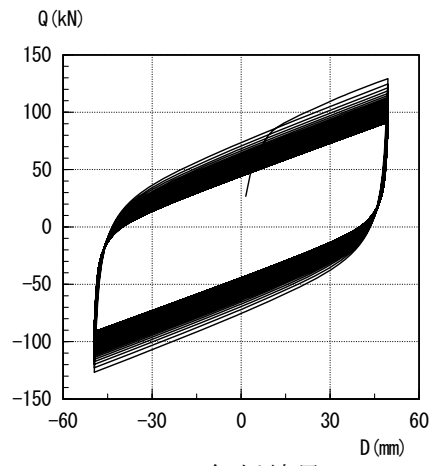
解析においては、初期温度を 15℃とし、鉛プラグ入り積層ゴムの解析開始時の Q_d については各ケースにおいて限界試験の直前に実施した基本特性試験結果から設定した。なお、取付部については実験時に使用した断熱板の熱伝導率を考慮している。

図 3.3.1-1 に荷重変形関係について実験結果とシミュレーション解析とを比較して示す。

図 3.3.1-2、図 3.3.1-3 に Q_d の低下について、実験結果とシミュレーション解析結果とを比較して示す。

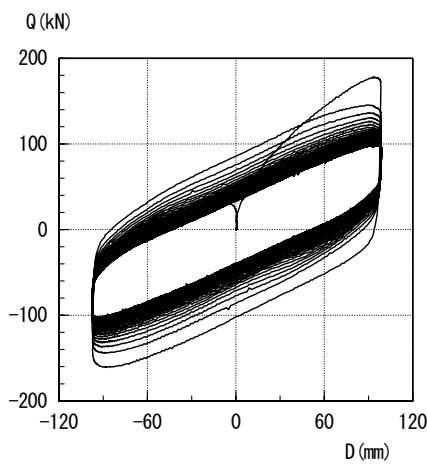


(i) 実験結果

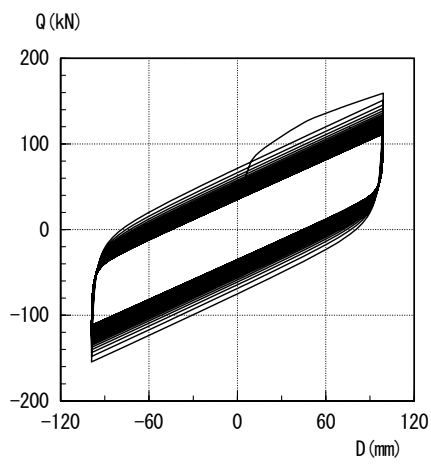


(ii) 解析結果

(a) 実験ケース 1B (T=4s, $\gamma=50\%$, 250cycle)

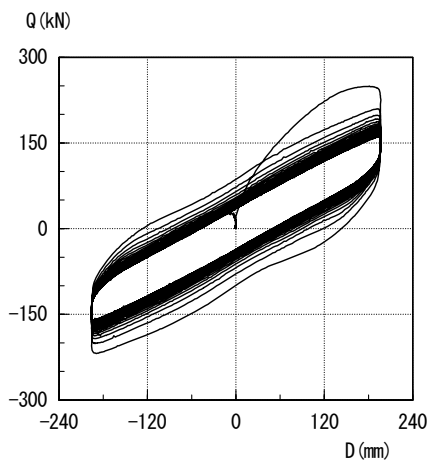


(i) 実験結果

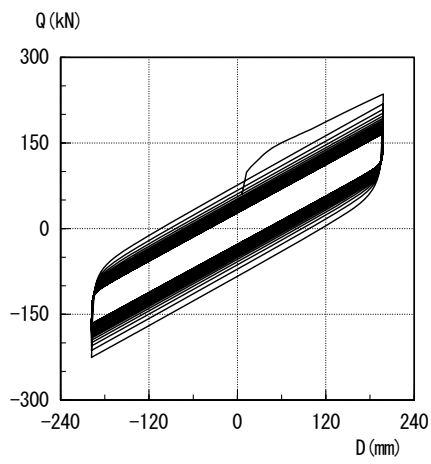


(ii) 解析結果

(b) 実験ケース 2B (T=4s, $\gamma=100\%$, 120cycle)



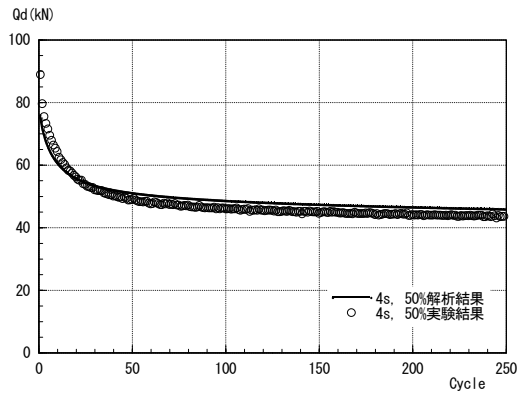
(i) 実験結果



(ii) 解析結果

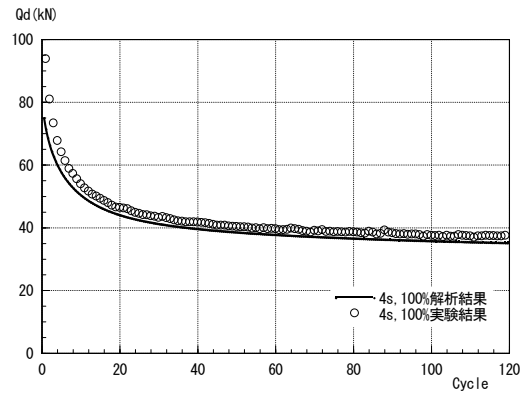
(c) 実験ケース 3B (T=4s, $\gamma=200\%$, 60cycle)

図 3.3.1-1 実験結果と解析結果との比較 (荷重変形関係)



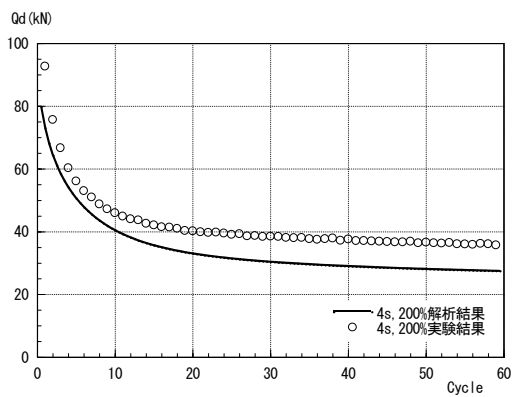
(a) 実験ケース 1B

($T=4s, \gamma=50\%, 250\text{cycle}$)



(b) 実験ケース 2B

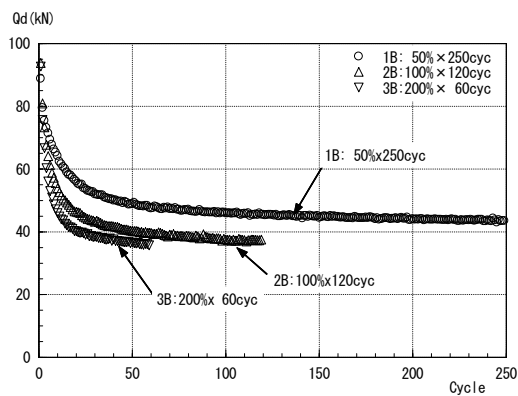
($T=4s, \gamma=100\%, 120\text{cycle}$)



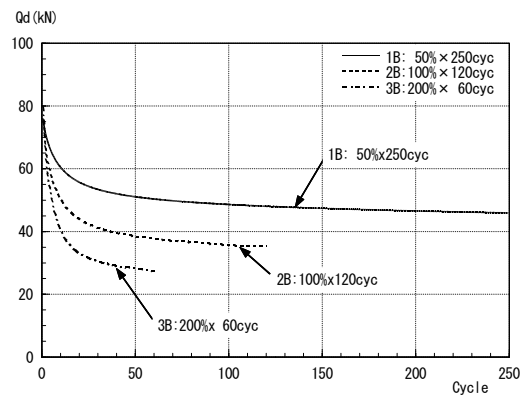
(c) 実験ケース 3B

($T=4s, \gamma=200\%, 60\text{cycle}$)

図 3.3.1-2 実験結果と解析結果との比較 (Q_d での比較)



(a) 実験結果



(b) シミュレーション解析結果

図 3.3.1-3 Q_d の実験ケースでの比較実験結果と解析結果との比較 (Q_d での比較)

(b) 3本プラグの実験結果のモデル化

鉛プラグ入り積層ゴムの鉛プラグ3本タイプを対象とし、繰り返しに伴う降伏荷重特性値 Q_d の低下に着目した評価結果を以下に示す。

(a)で示した解析手法と同様とし、解析対象は限界試験として実施した表 3.3.1-2 に示すケースとした。

表 3.3.1-2 解析対象実験ケース（鉛プラグ3本タイプ）

試験種類	加振周期 (s)	せん断歪 (%)	サイクル数	累積変形 (m)
正弦波加振 (限界)	1B	4	50	49.5
	3B		200	47.52

鉛プラグ3本タイプの熱伝導解析モデルを図 3.3.1-4 に示す。熱伝導解析モデルのモデル化範囲は対称性を考慮して、断面における 1/6 部分、立面における 1/2 部分を各要素に分割した。

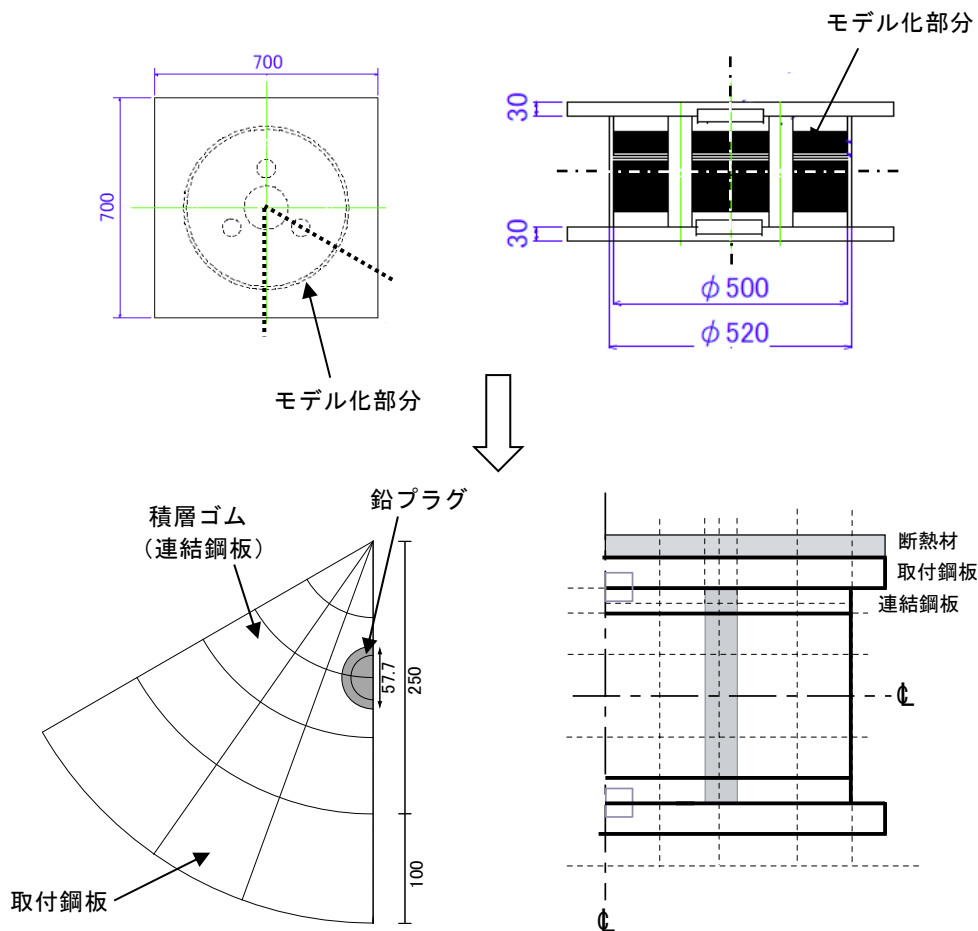


図 3.3.1-4 熱伝導解析モデル（鉛プラグ3本タイプ）

第Ⅲ部第1章に示した実験結果のシミュレーション解析においては、(a)で示した鉛プラグ1本タイプでの解析と同様に初期温度を15℃とし、鉛プラグ入り積層ゴムの解析開始時の Q_d は各ケースにおいて限界試験の直前に実施した基本特性試験結果から設定した。

図 3.3.1-5 に荷重変形関係について鉛プラグ3本タイプの実験結果とシミュレーション解析とを比較して示す。

図 3.3.1-6 に Q_d の低下について、実験結果とシミュレーション解析結果とを比較して示す。

図 3.3.1-7 に Q_d の低下について、3 サイクル目の値で基準化した値の実験結果とシミュレーション解析結果とを比較して示す。

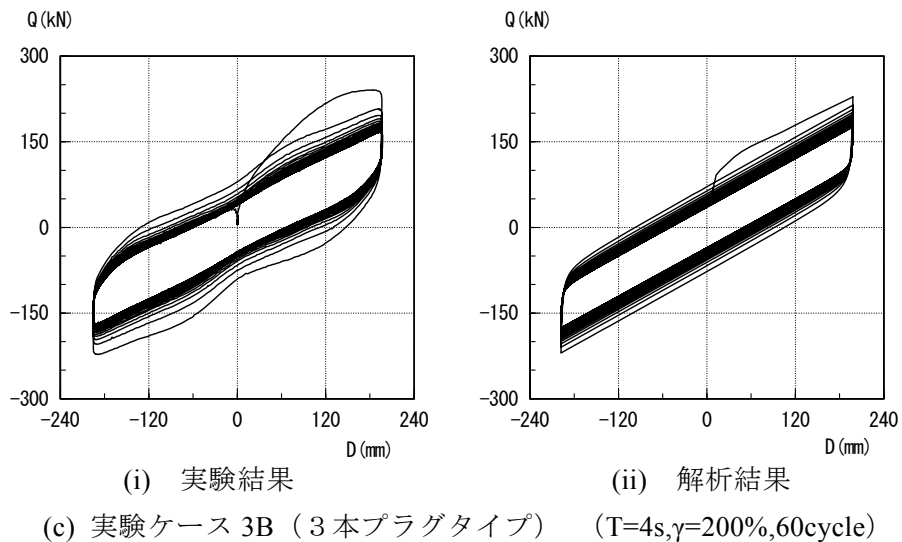
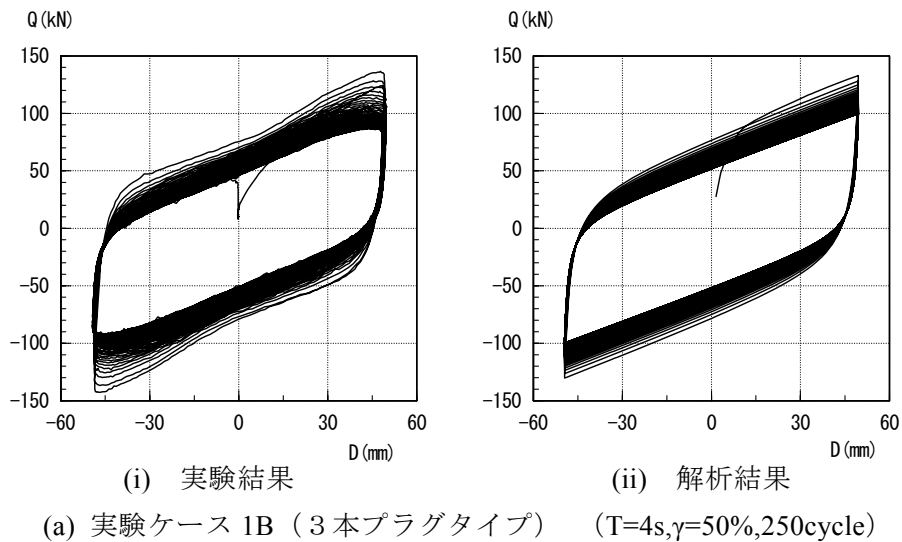
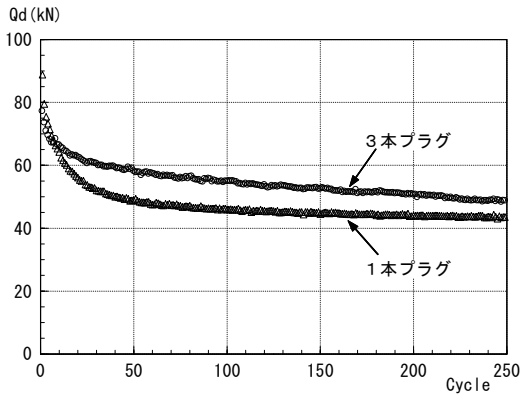
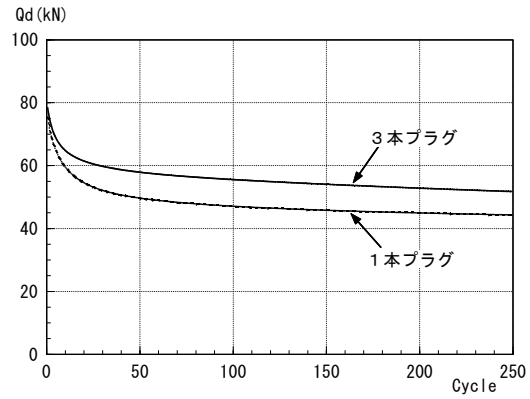


図 3.3.1-5 実験結果と解析結果との比較 (荷重変形関係)



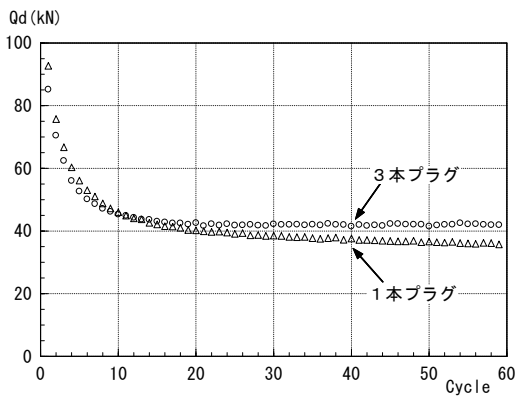
(i) 実験結果

(a) 実験ケース 1B



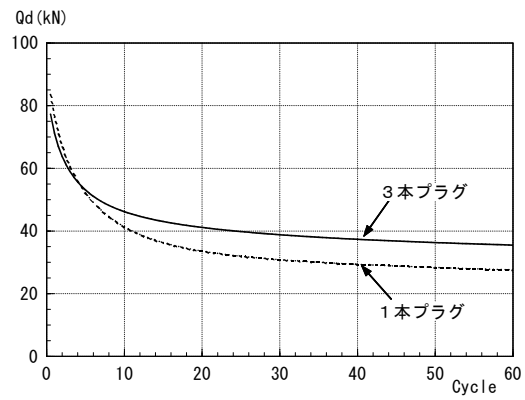
(ii) 解析結果

(T=4s, $\gamma=50\%$, 250cycle)



(i) 実験結果

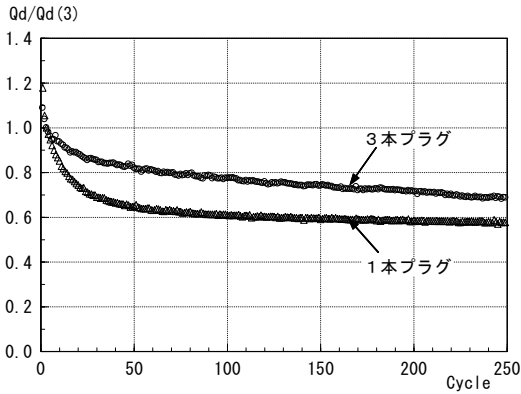
(c) 実験ケース 3B



(ii) 解析結果

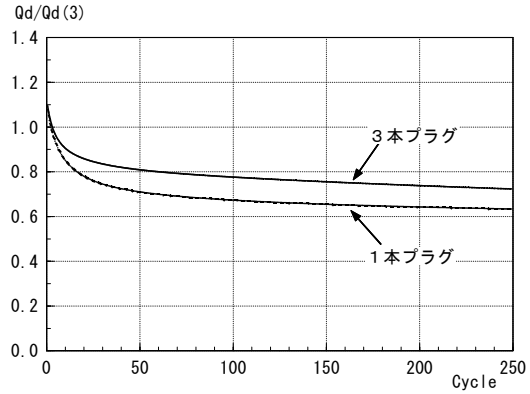
(T=4s, $\gamma=200\%$, 60cycle)

図 3.3.1-6 実験結果と解析結果との比較 (Q_d での比較)



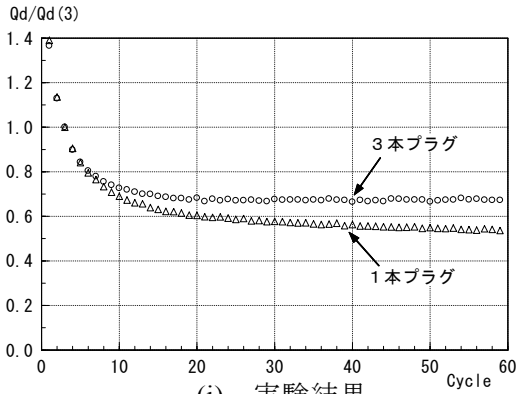
(i) 実験結果

(a) 実験ケース 1B



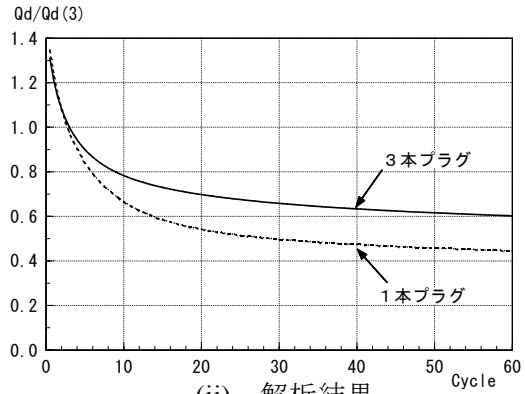
(ii) 解析結果

(T=4s, $\gamma=50\%$, 250cycle)



(i) 実験結果

(c) 実験ケース 3B



(ii) 解析結果

(T=4s, $\gamma=200\%$, 60cycle)

図 3.3.1-7 実験結果と解析結果との比較 (Q_d 3 サイクル目の値で基準化)

第Ⅲ部第1章に示した実験を実施した鉛プラグ入り積層ゴムについて、鉛プラグ1本タイプと3本タイプの正弦波繰返加力実験を対象として、シミュレーション解析を実施した。その結果、降伏荷重特性値 Q_d の低下について実験と解析とで一致した結果が得られた。また、鉛プラグ1本タイプと3本タイプとでの違いを解析にて追跡することができた。

(2) 地震応答解析の条件設定

応答評価を行った建物モデル諸元を表 3.3.1-3 に示す。応答解析は上部建物を 1 質点としてモデル化し実施した。免震層は鉛プラグ入り積層ゴム (LRB) のみで構成されるものとし、鉛プラグ入り積層ゴムはゴム種 G4、外径 ϕ 1000、鉛径 200mm (1 本プラグ)、ゴム総厚 200mm とし、積層ゴムのゴム剛性による周期 $T_f=4.5s$ 、鉛降伏せん断力係数 ($\alpha_s=0.035$) となるよう設定した。

表 3.3.1-3 対象建物諸元

上部構造 重量 (積層ゴム 1 基当り) (kN)	LRB 平均面圧 (N/mm ²)	T_f (sec)	α_s
7477	9.9	4.5	0.035

T_f : ゴム剛性による免震周期
 α_s : 鉛プラグ降伏せん断力係数

地震応答解析には LRB の温度について熱伝導解析により評価し、鉛プラグ部の温度によって LRB の降伏荷重特性値 (以下 Q_d) を変化させながら、運動方程式を並行して解く手法を用いている (参考文献 3.3.1-2) 参照)。鉛プラグ入り積層ゴム熱伝導解析差分法モデル、鉛プラグの温度-降伏荷重関係、時刻歴応答解析法はそれぞれ以下のように設定する。

鉛プラグ入り積層ゴムにおける熱伝導解析差分法モデルは、前進差分法による鉛プラグ入り積層ゴムの要素分割した差分法モデルとする (図 3.3.1-8(a)参照)。地震エネルギーの吸収量はすべて鉛プラグせん断変形部での発熱となると仮定し、モデル化範囲には取付部 (断熱材) も含むことによって、鉛プラグから積層ゴム部、フランジ、上下基礎への熱エネルギーの拡散を考慮する。なお、地震応答解析においては取付部を鉄筋コンクリートとしてモデル化している。また、鉛プラグの温度-降伏荷重関係は、下式 (3.3.1-1) の提案式に基づくものとする。(図 3.3.1-8(b)参照)。本式は、鉛プラグが約 200°C まで温度上昇した実験ケースを含む鉛プラグ入り積層ゴム加振実験結果の分析により得られた実験式である。

$$\tau = \tau_0 \left\{ 1 - (T/T_L)^{\alpha_T} \right\}, \quad \alpha_T = 0.4 + 0.25 \cdot (T/T_L) \quad \dots (3.3.1-1)$$

$$\tau_0 = 15.0 (N/mm^2), \quad T_L = 327.5 (^\circ C)$$

ここに、 τ : 鉛降伏応力、 τ_0 : 鉛降伏応力設計値
 T : 鉛プラグ平均温度、 T_L : 鉛融点

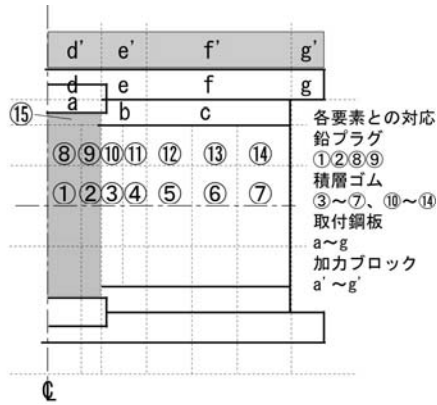


図3.3.1-8(a) 鉛プラグ入り積層ゴムの熱伝導差分法モデルの例

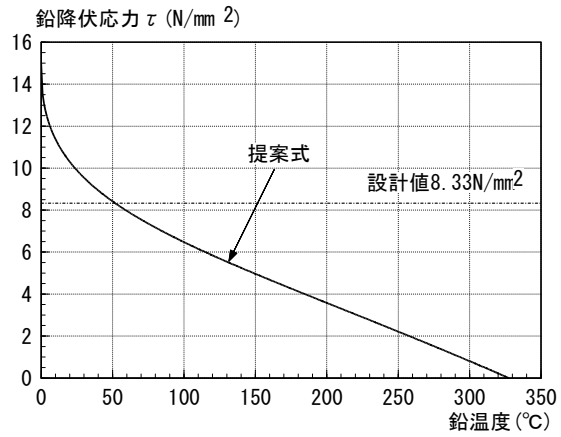


図3.3.1-8(b) 鉛プラグ温度-降伏応力関係

解析において鉛プラグ入り積層ゴムは修正バイリニアモデルによる履歴を考慮し、免震層の履歴減衰のみ考慮した。また、温度上昇を考慮する場合の初期温度は15°Cとした。

(2) 地震応答解析結果

表 3.3.1-4 に各入力地震動における解析結果を、図 3.3.1-9 に各入力地震動における積層ゴム応答せん断ひずみ-免震層せん断力係数図を示す。

図 3.3.1-10 に各入力地震動における鉛プラグの降伏応力の時刻歴を、図 3.3.1-11 に鉛部の平均温度時刻歴を、図 3.3.1-12 に累積変位量時刻歴を、図 3.3.1-13 に免震層における履歴吸収エネルギー量の速度換算値の時刻歴を示す。なお、OSKH02 の入力倍率 1.5 倍、温度上昇を考慮した場合には応答変位及び鉛平均温度が解析の適用範囲を越えたため結果からは除外した。

解析結果より、繰返しによる鉛プラグの温度上昇を考慮した場合の免震層水平変位の増幅率は 1.01~1.83 であり、概ね 1.2 倍程度の増幅率となっている。

入力地震動のうち AIC003 の場合には免震層応答最大水平変位は温度上昇非考慮時に比較して、温度上昇考慮時にはその増大がみられ、入力地震動の倍率が 1.0 倍の場合に変位増大率が 1.05 倍、地震動倍率が 1.5 倍の場合に変位増大率が 1.83 倍となっている。

SZ0024 の場合には温度上昇非考慮時と比較した温度上昇考慮時の水平変位応答増大率は 1.2 倍程度であるものの、水平変形の値は温度上昇考慮時に入力 1.5 倍の場合に 48.1cm と $\gamma=250\%$ 程度の値となっている。

表 3.3.1-4(a) 応答解析結果（応答水平変位、応答加速度）

入力地震動	入力倍率	免震層水平変位 (cm)			応答最大加速度 (cm/s ²)		
		温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 /非考慮	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 /非考慮
OSKH02_AV	1.00	17.9	19.0	1.06	72	72	0.99
	1.25	30.9	34.6	1.12	95	95	1.01
	1.50	43.0	-	-	115	-	-
AIC003_AV	1.00	13.8	14.4	1.05	65	64	0.98
	1.25	18.0	20.7	1.15	72	67	0.93
	1.50	20.4	37.4	1.83	76	93	1.22
SZ0024_AV	1.00	23.3	24.2	1.04	81	76	0.93
	1.25	29.7	36.5	1.23	93	90	0.97
	1.50	37.8	48.1	1.27	107	106	1.00
KGIN_AV	1.00	2.0	2.1	1.04	36	44	1.24
	1.25	2.1	2.3	1.12	36	45	1.24
	1.50	2.5	2.5	1.01	38	46	1.21

表 3.3.1-4(b) 応答解析結果（応答せん断ひずみ、応答せん断力係数）

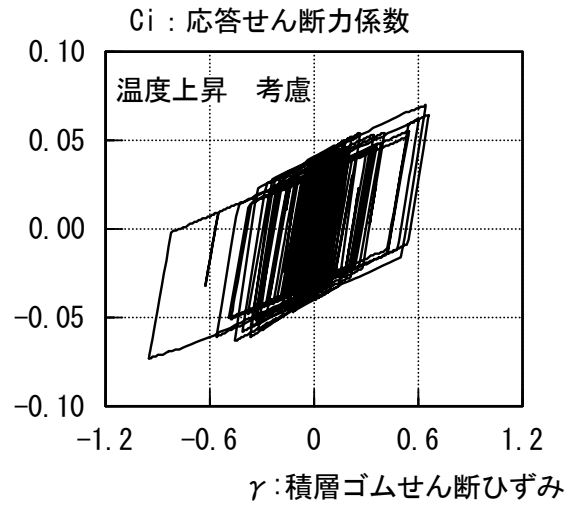
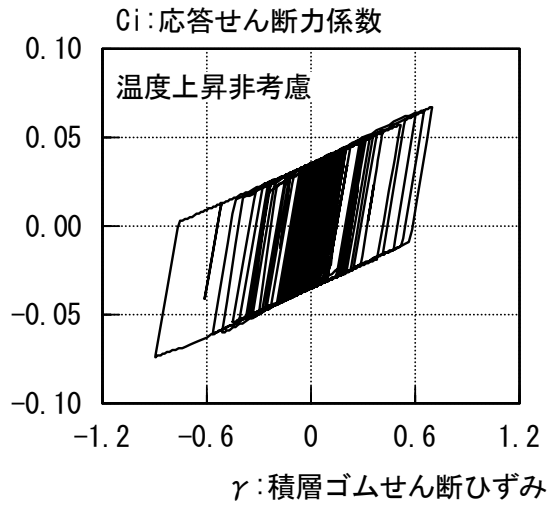
入力地震動	入力倍率	免震層せん断ひずみ (%)			免震層応答最大せん断力係数		
		温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 /非考慮	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 /非考慮
OSKH02_AV	1.00	90	95	1.06	0.074	0.073	0.99
	1.25	154	173	1.12	0.096	0.097	1.01
	1.50	215	-	-	0.117	-	-
AIC003_AV	1.00	69	72	1.05	0.067	0.066	0.98
	1.25	90	103	1.15	0.074	0.069	0.93
	1.50	102	187	1.83	0.078	0.077	0.99
SZ0024_AV	1.00	117	121	1.04	0.083	0.077	0.93
	1.25	149	182	1.23	0.095	0.092	0.97
	1.50	189	240	1.27	0.109	0.108	0.99
KGIN_AV	1.00	10	10	1.04	0.037	0.045	1.24
	1.25	10	12	1.12	0.037	0.046	1.24
	1.50	13	13	1.01	0.039	0.047	1.21

表 3.3.1-4(c) 応答解析結果（累積変位量、吸収エネルギー、鉛平均温度）

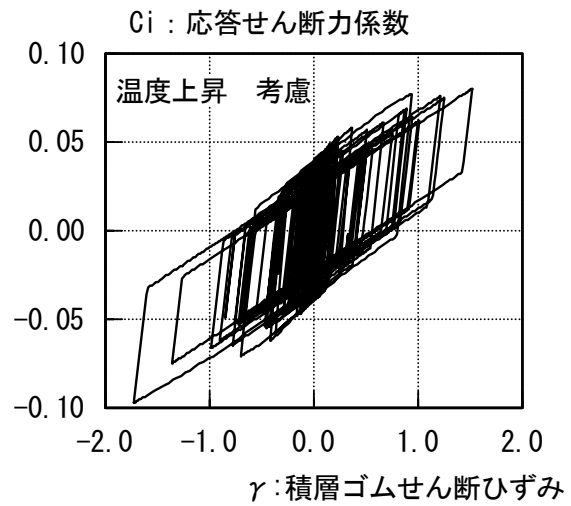
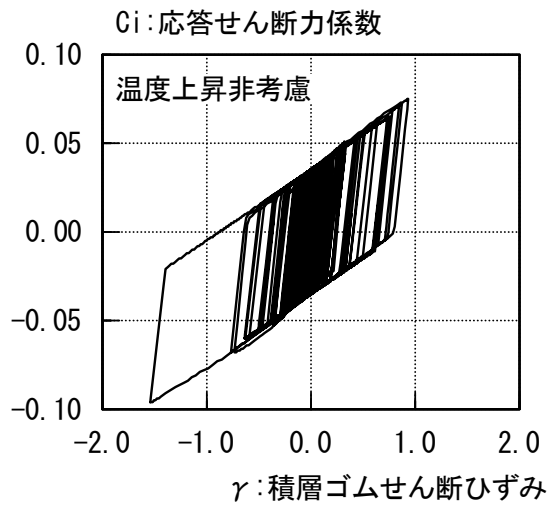
入力地震動	入力倍率	免震層累積変位量 *1 (m)			免震層吸収エネルギー 速度換算値 (cm/s)			最大鉛 平均温度 (°C)
		温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 ／非考慮	温度上昇 非考慮	温度上昇 考慮	考慮 ／非考慮	温度上昇 考慮
OSKH02_AV	1.00	10.9	11.3	1.04	186.7	193.4	1.04	86.5
	1.25	12.7	16.6	1.30	237.0	262.9	1.11	146.5
	1.50	17.1	-	-	295.1	-	-	-
AIC003_AV	1.00	9.2	9.7	1.05	186.2	188.6	1.01	90.7
	1.25	11.8	13.1	1.11	222.6	227.0	1.02	119.6
	1.50	14.7	16.7	1.13	259.9	260.5	1.00	150.2
SZ0024_AV	1.00	11.3	12.4	1.09	232.3	231.6	1.00	128.8
	1.25	14.8	16.0	1.08	275.1	260.8	0.95	155.0
	1.50	18.2	19.6	1.08	311.5	284.7	0.91	177.8
KGIN_AV	1.00	10.8	13.6	1.26	41.0	44.0	1.07	18.1
	1.25	9.0	11.6	1.29	51.2	52.0	1.02	19.5
	1.50	8.4	10.5	1.25	63.6	62.2	0.98	21.5

初期温度 15°C

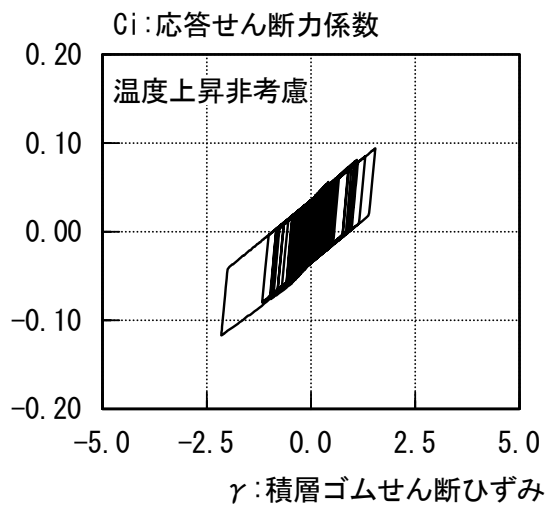
- *1 免震層累積変位量については総入力エネルギーに対して、入力エネルギーが 95%となる時刻における値とした。



(i) 1.0 倍入力時

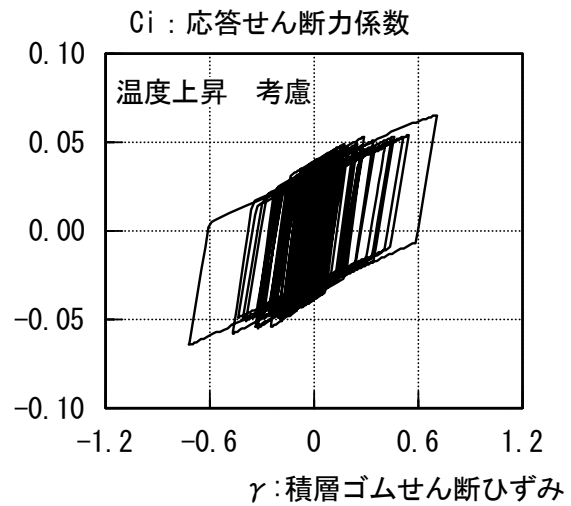
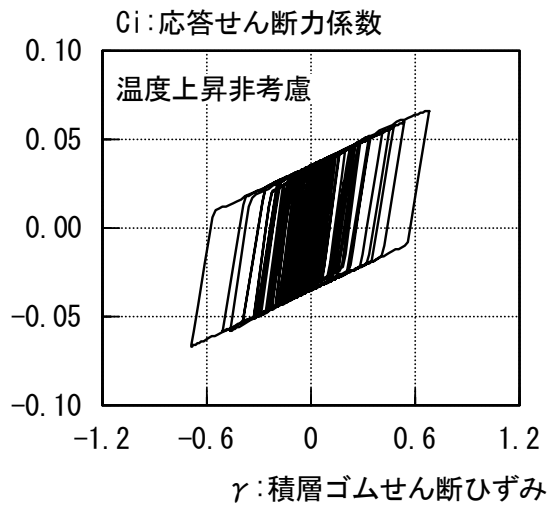


(ii) 1.25 倍入力時

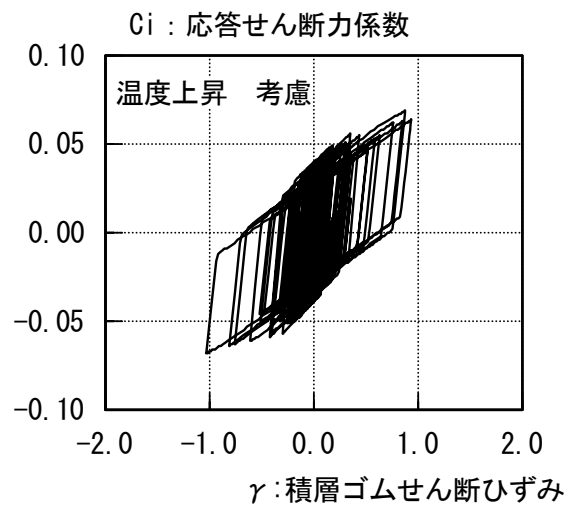
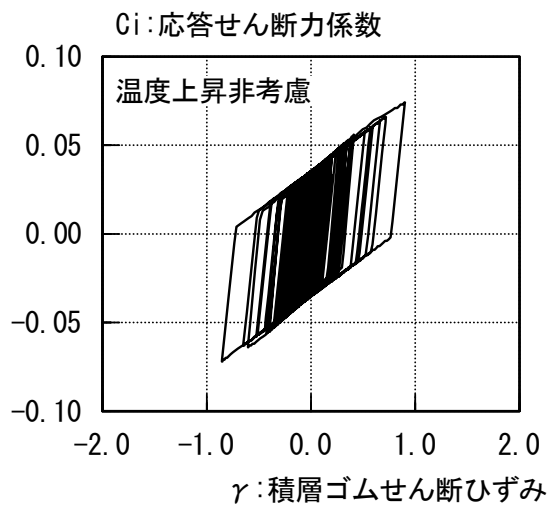


(iii) 1.5 倍入力時

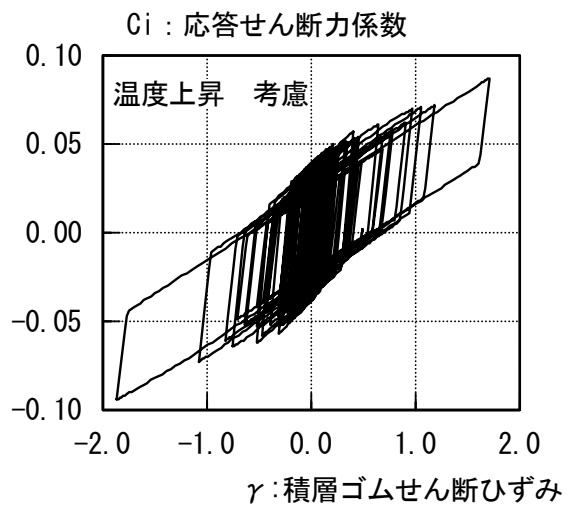
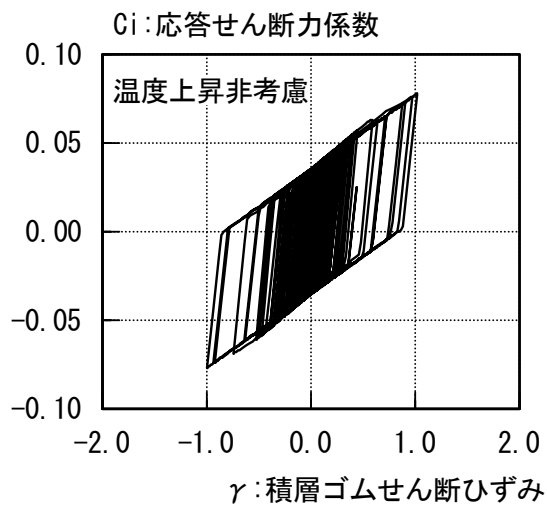
図 3.3.1-9(a) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (OSKH02_AV)



(i) 1.0 倍入力時

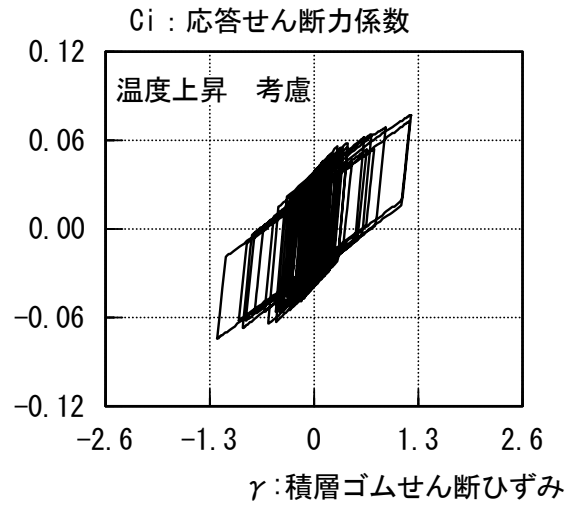
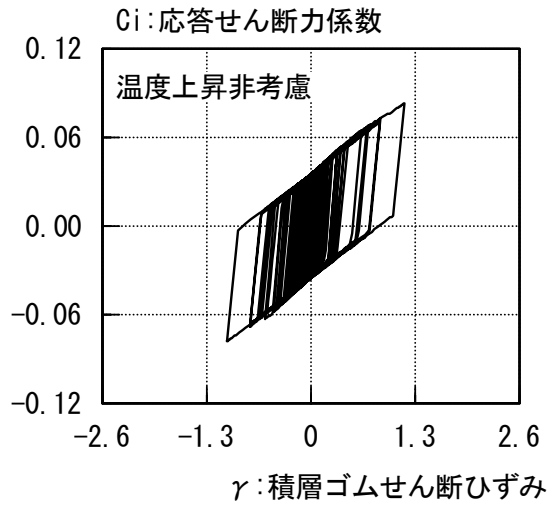


(ii) 1.25 倍入力時

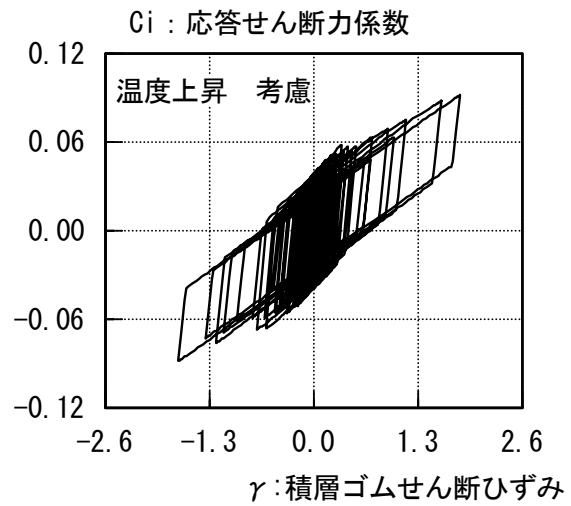
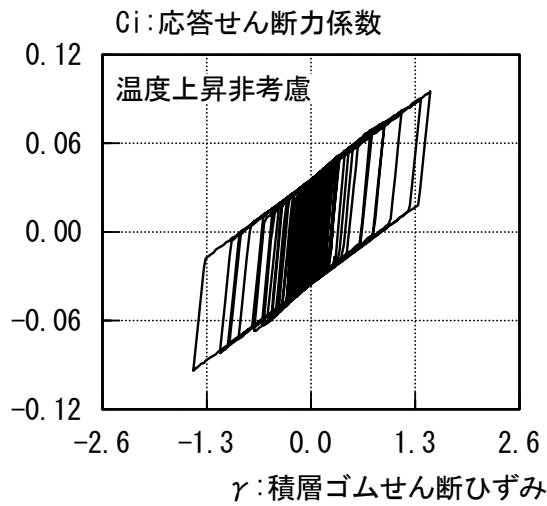


(iii) 1.5 倍入力時

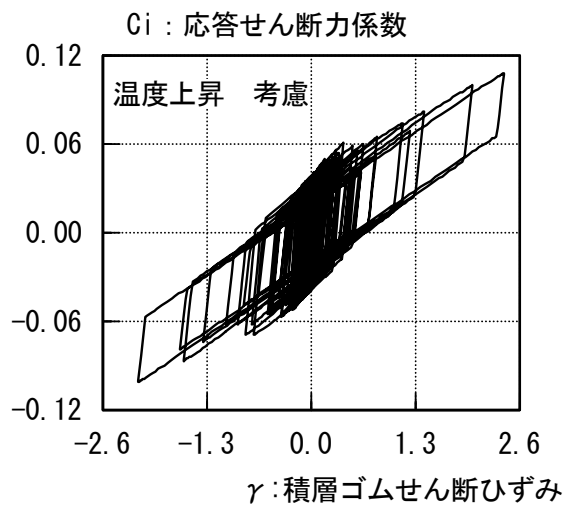
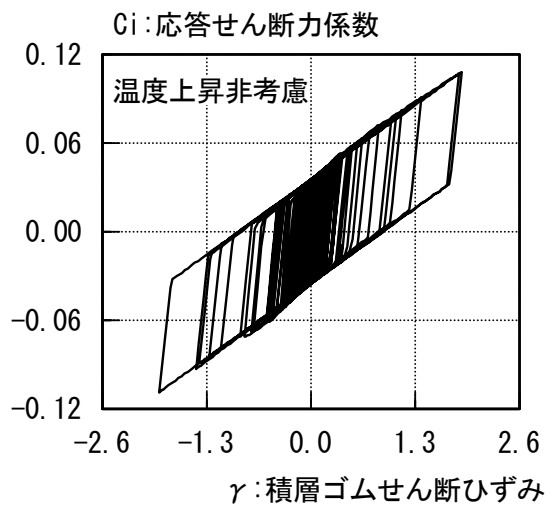
図 3.3.1-9(b) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (AIC003_AV)



(i) 1.0 倍入力時

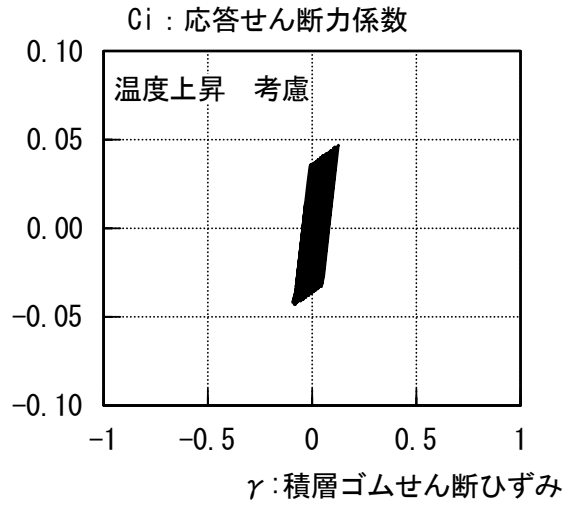
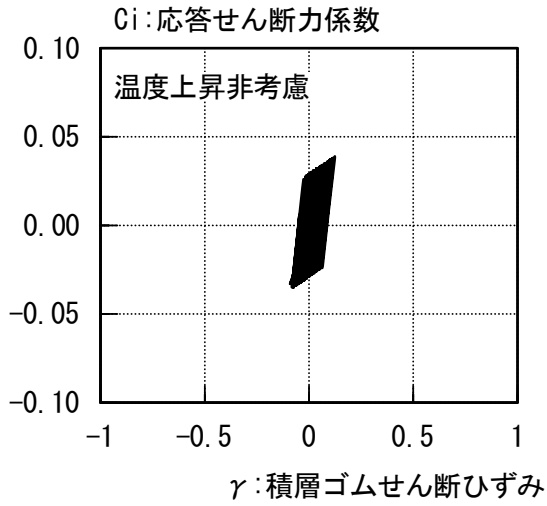


(ii) 1.25 倍入力時

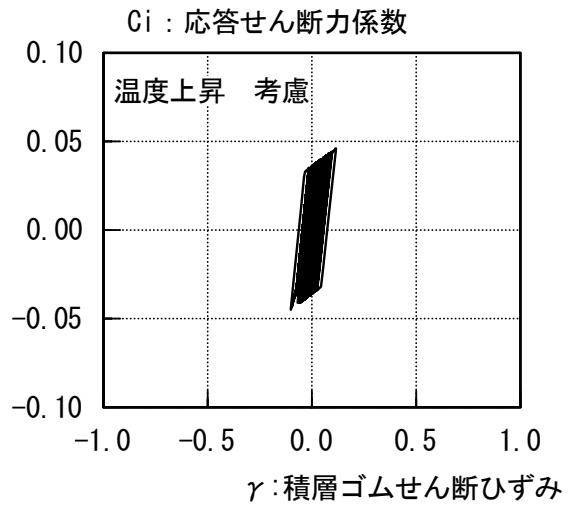
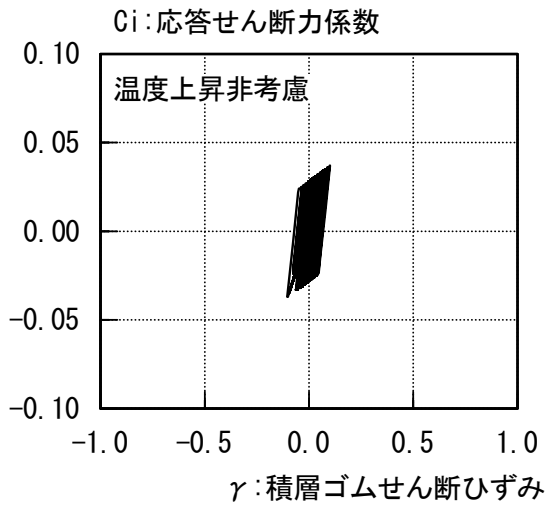


(iii) 1.5 倍入力時

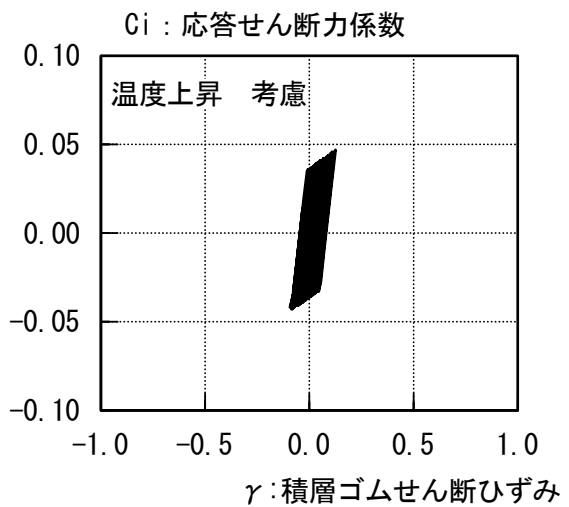
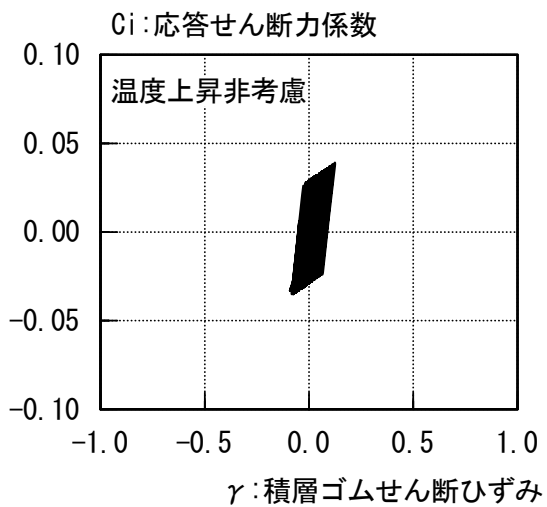
図 3.3.1-9(c) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (SZO024_AV)



(i) 1.0 倍入力時



(ii) 1.25 倍入力時



(iii) 1.5 倍入力時

図 3.3.1-9(d) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (KGIN_AV)

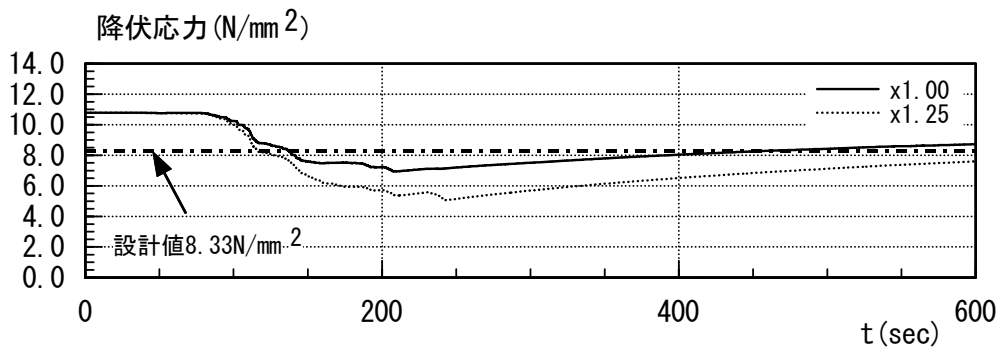


図 3.3.1-10(a) 降伏応力時刻歴 (OSKH02_AV)

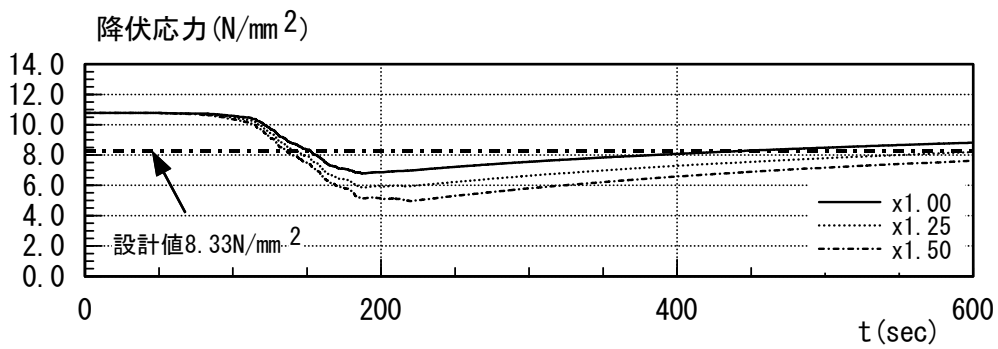


図 3.3.1-10(b) 降伏応力時刻歴 (AIC003_AV)

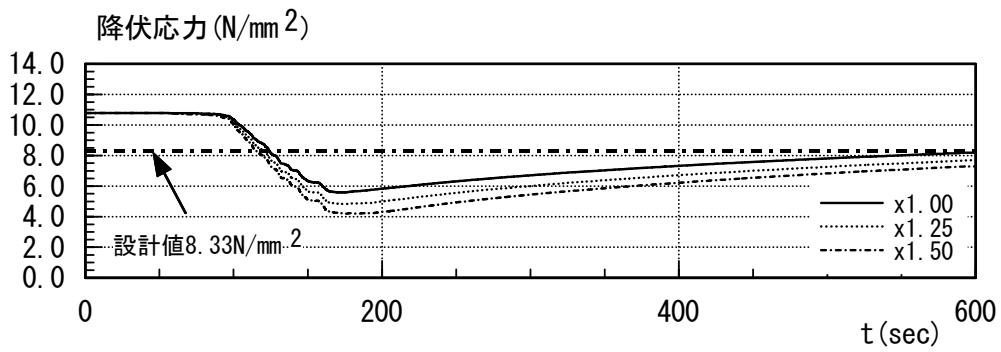


図 3.3.1-10(c) 降伏応力時刻歴 (SZO024_AV)

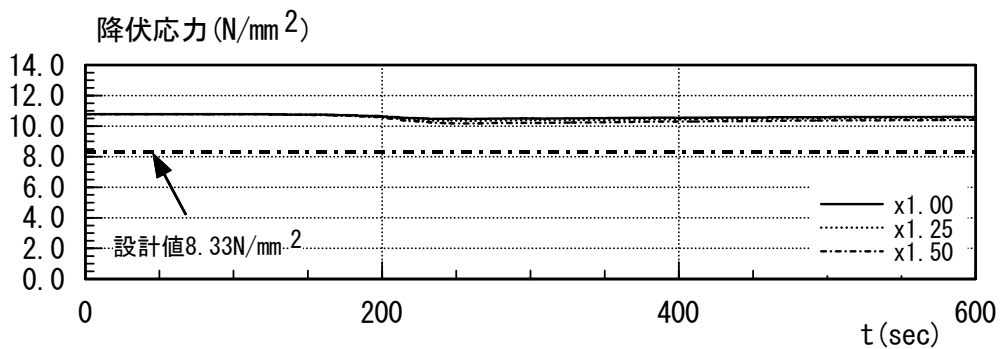


図 3.3.1-10(d) 降伏応力時刻歴 (KGIN_AV)

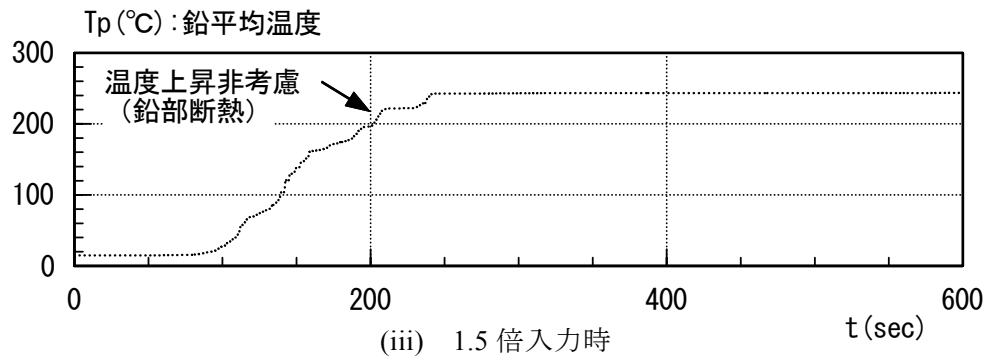
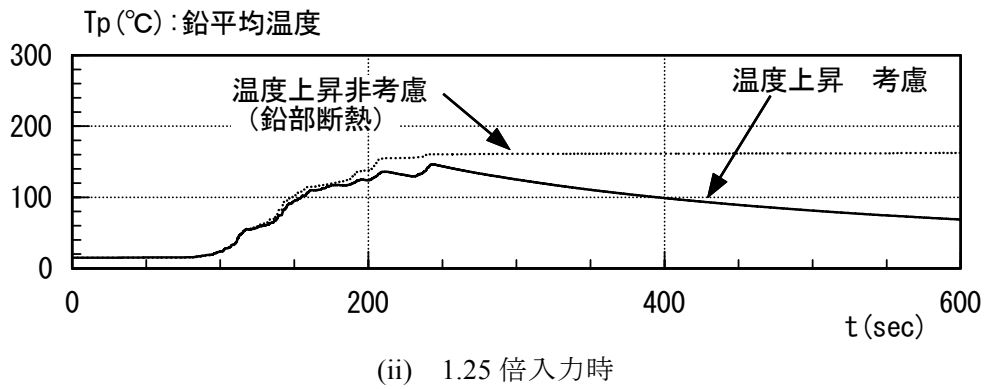
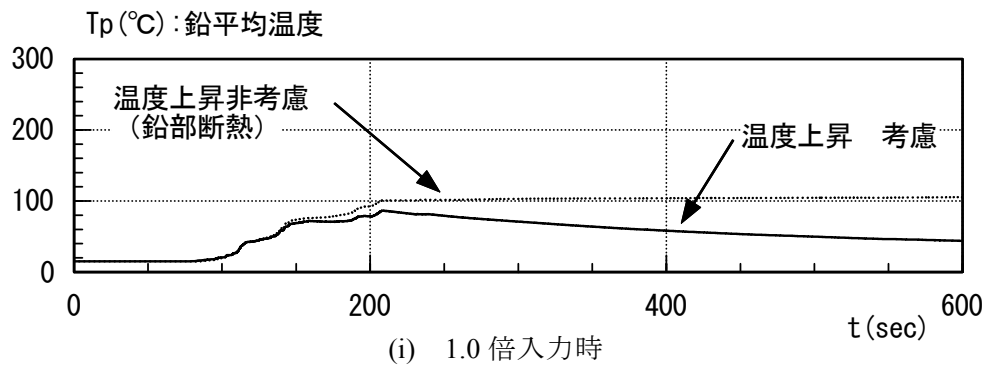


図 3.3.1-11(a) 鉛部平均温度時刻歴 (OSKH02_AV)

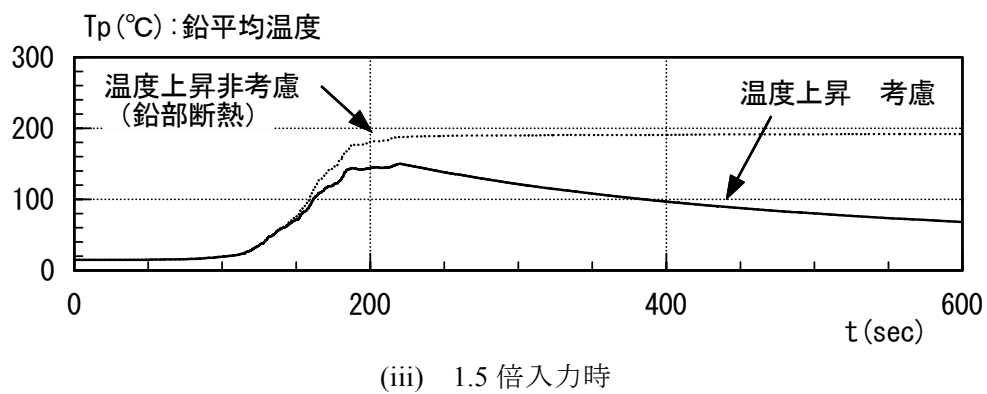
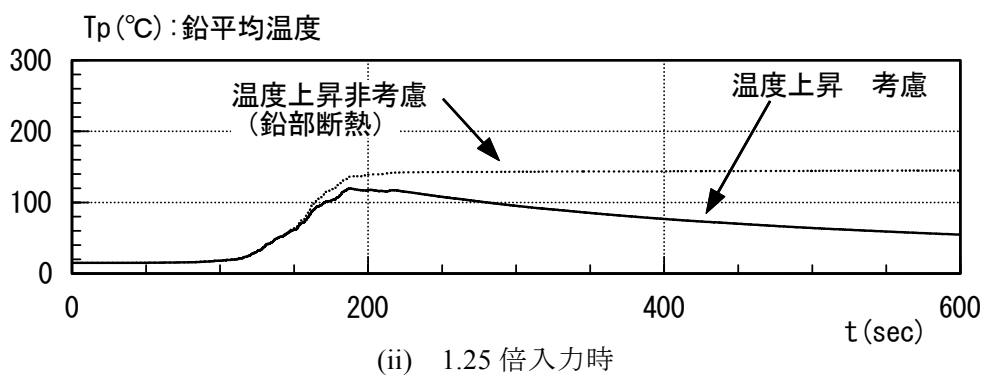
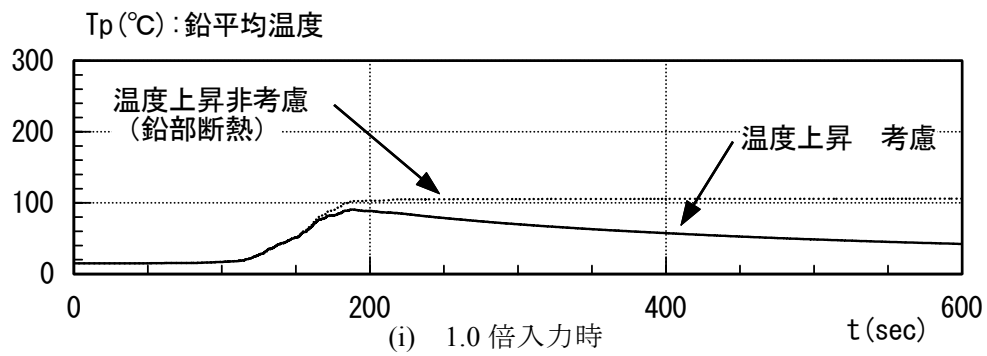
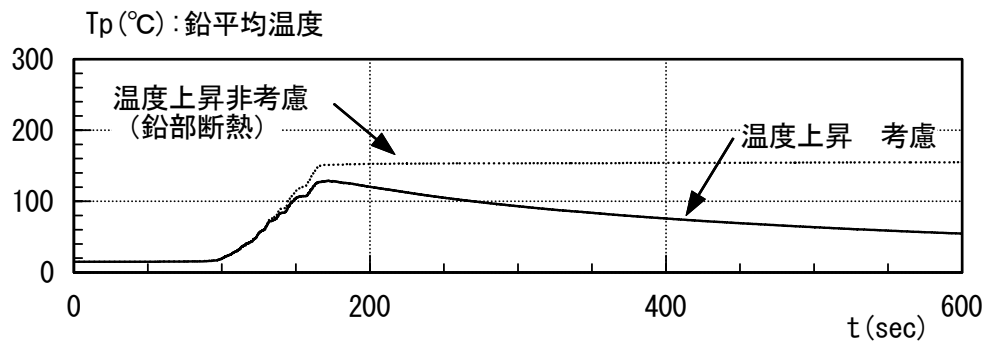
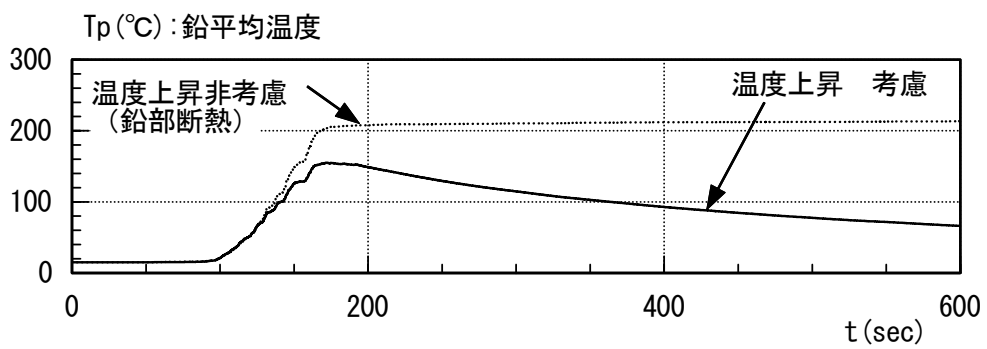


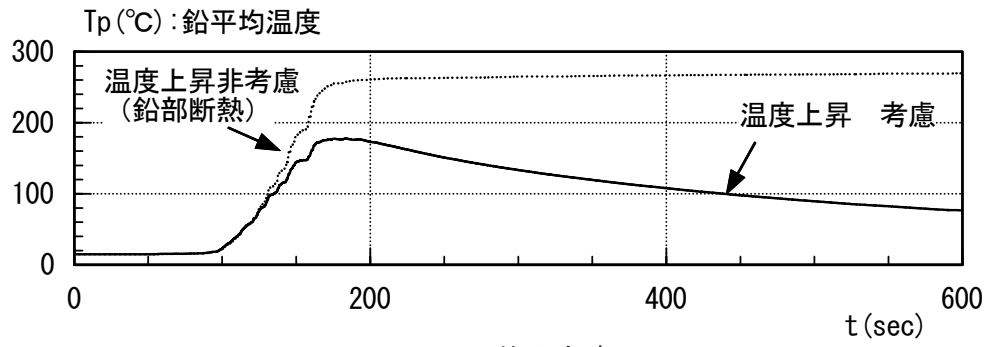
図 3.3.1-11(b) 鉛部平均温度時刻歴 (AIC003_AV)



(i) 1.0 倍入力時



(ii) 1.25 倍入力時



(iii) 1.5 倍入力時

図 3.3.1-11(c) 鉛部平均温度時刻歴 (SZO024_AV)

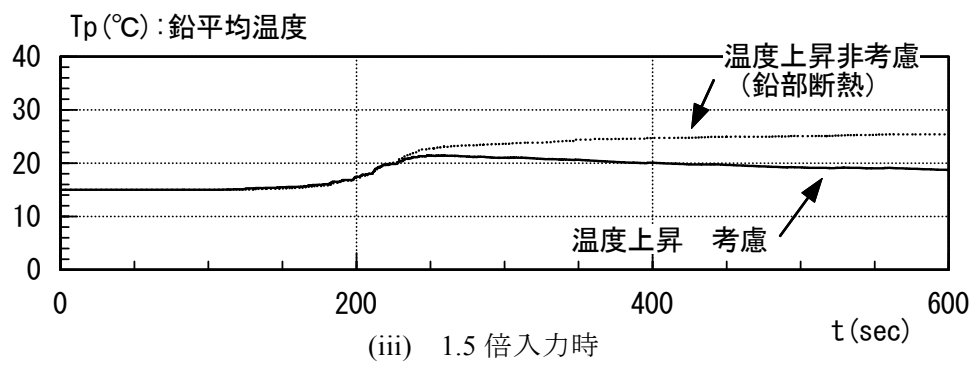
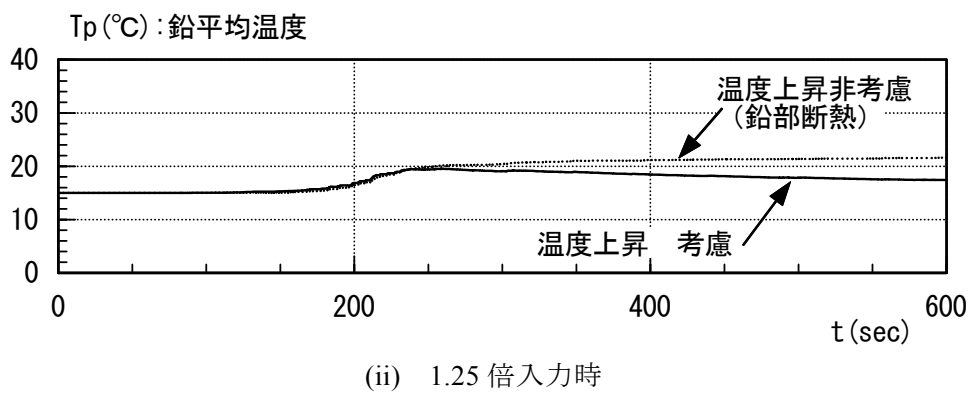
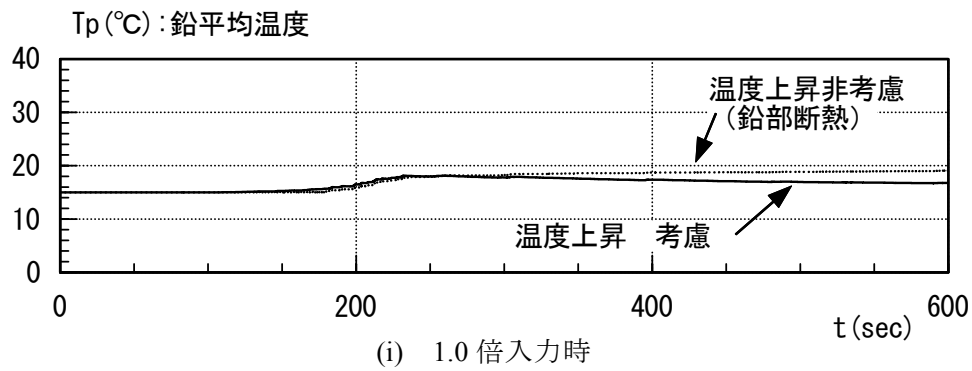
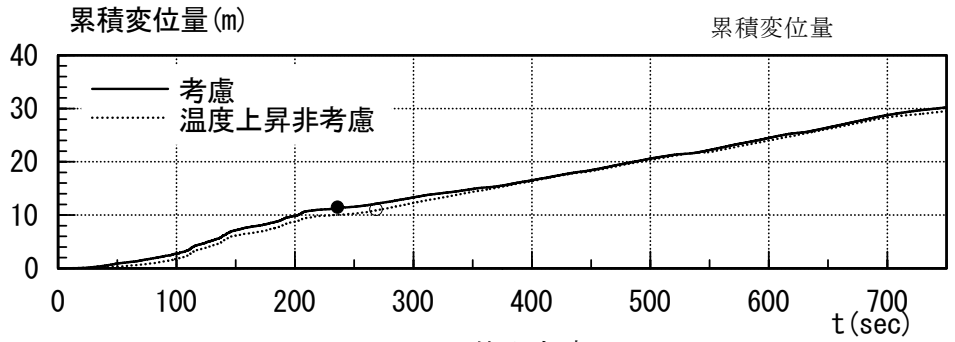
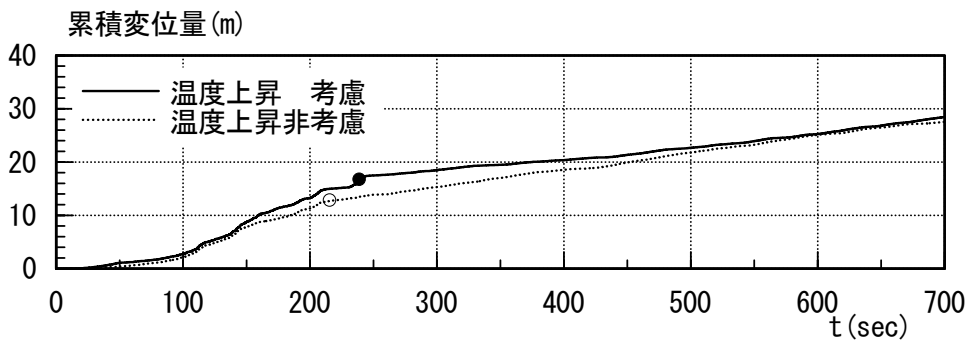


図 3.3.1-11(d) 鉛部平均温度時刻歴 (KGIN_AV)

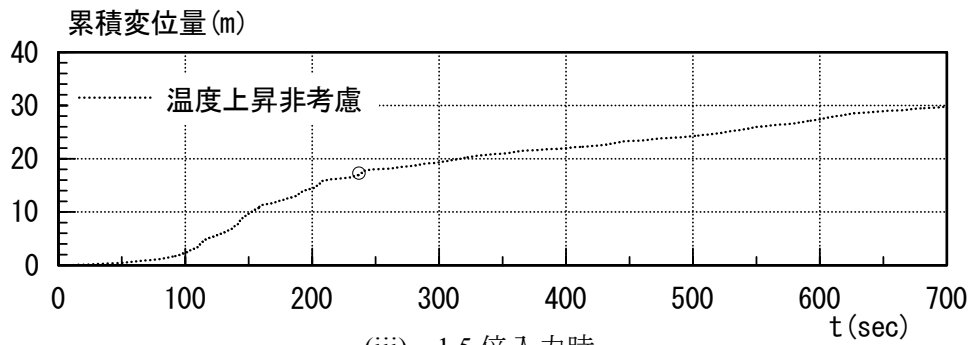
●, ○ 総入力エネルギーの 95%時



(i) 1.0倍入力時



(ii) 1.25倍入力時

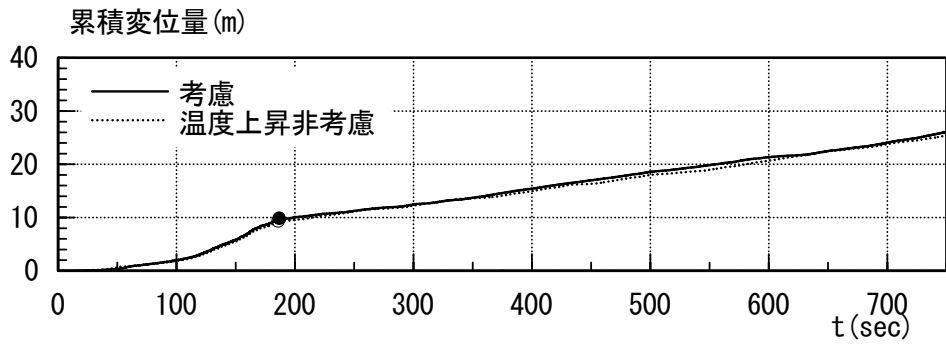


(iii) 1.5倍入力時

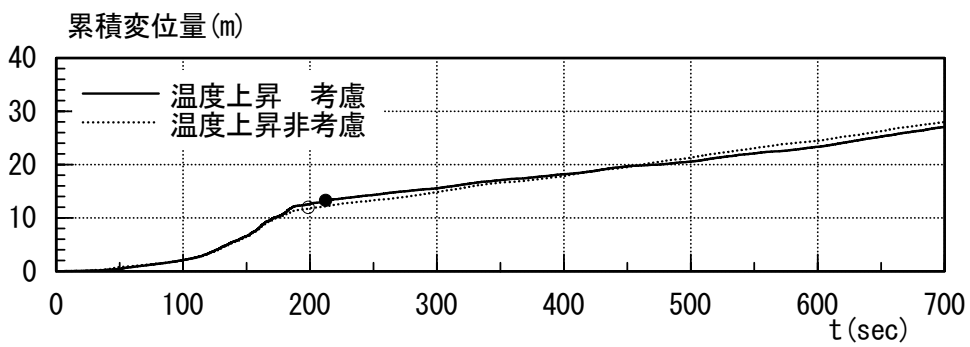
図 3.3.1-12(a) 免震層累積変位量時刻歴 (OSKH02_AV)

●, ○ 総入力エネルギーの 95%時

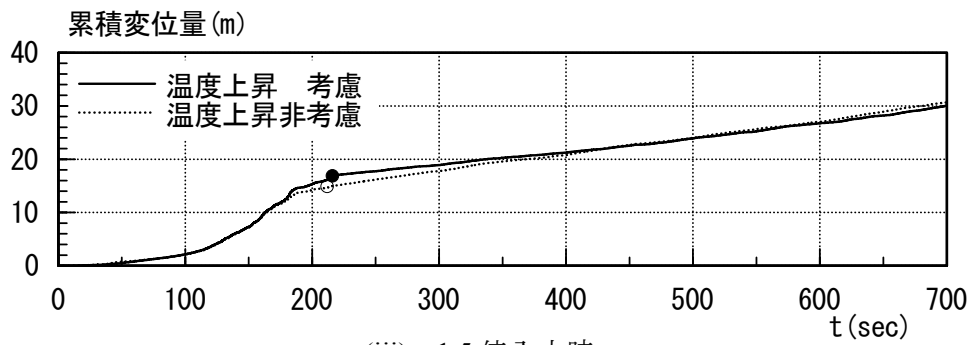
累積変位量



(i) 1.0倍入力時



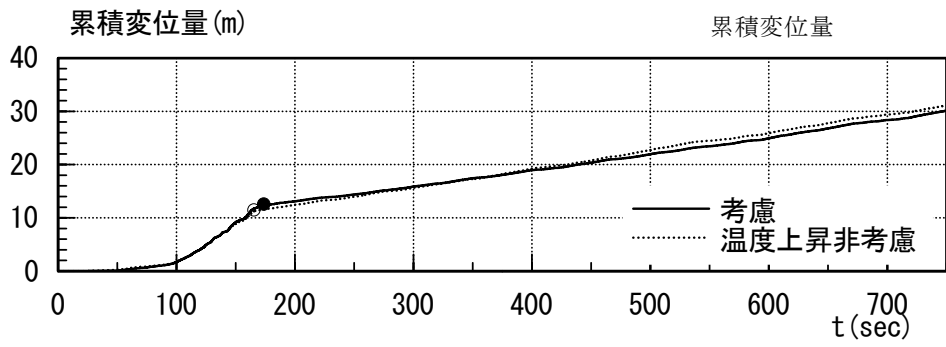
(ii) 1.25倍入力時



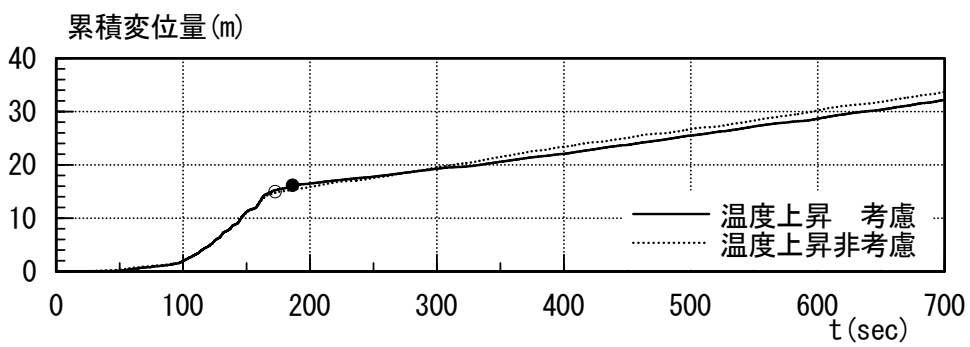
(iii) 1.5倍入力時

図 3.3.1-12(b) 免震層累積変位量時刻歴 (AIC003_AV)

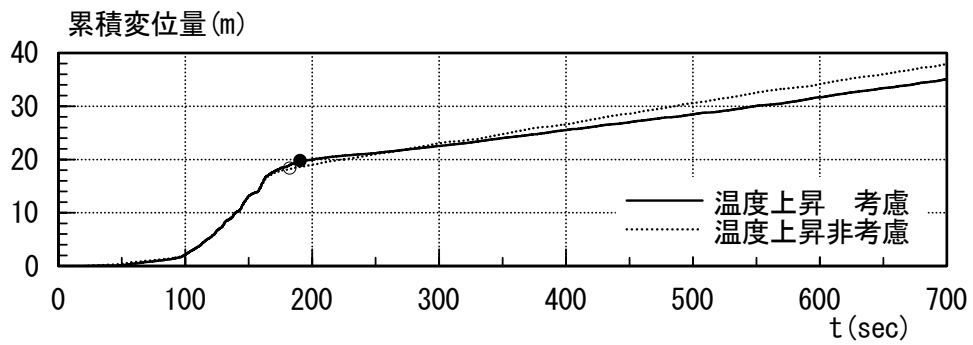
●, ○ 総入力エネルギーの 95%時



(i) 1.0倍入力時



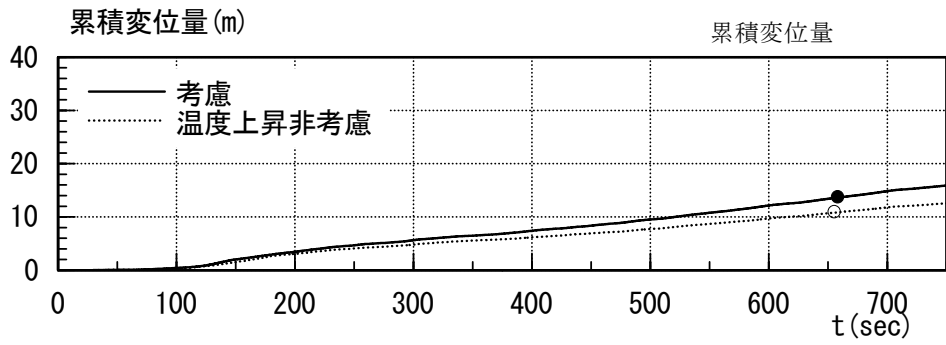
(ii) 1.25倍入力時



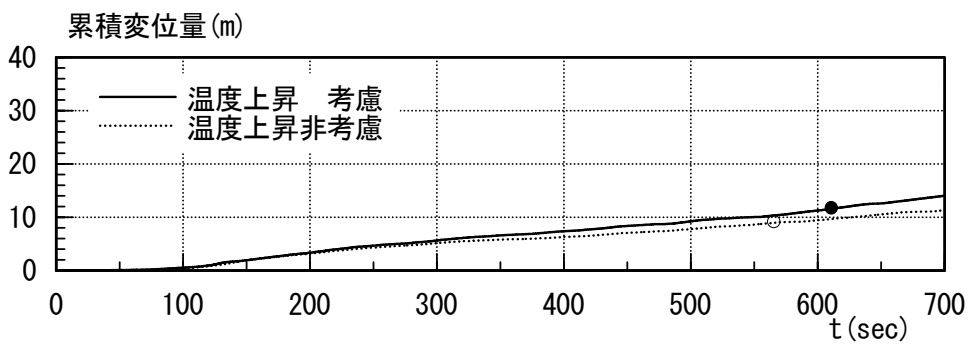
(iii) 1.5倍入力時

図 3.3.1-12(c) 免震層累積変位量時刻歴 (SZO024_AV)

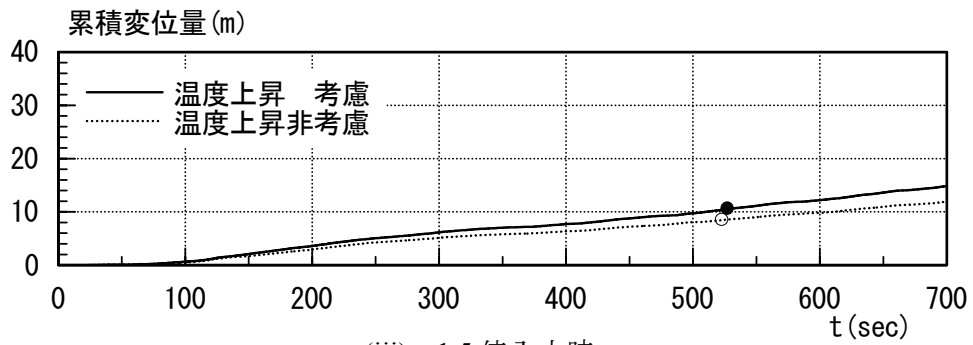
●, ○ 総入力エネルギーの 95%時



(i) 1.0 倍入力時

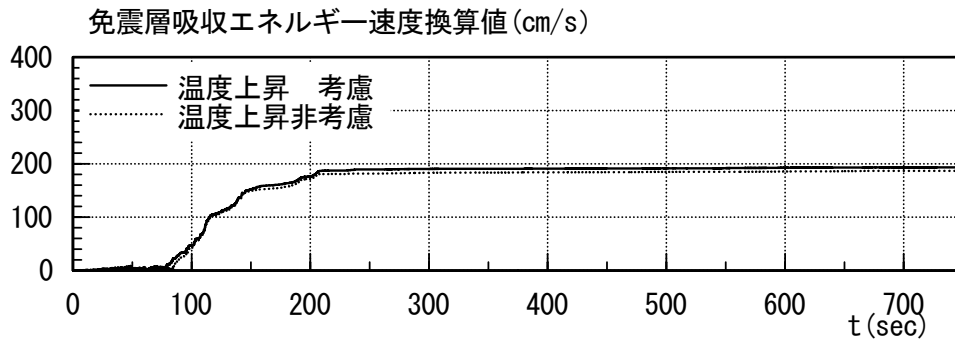


(ii) 1.25 倍入力時

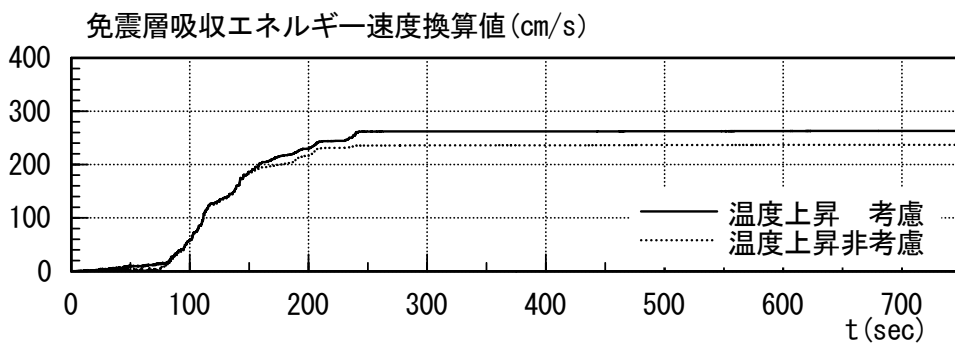


(iii) 1.5 倍入力時

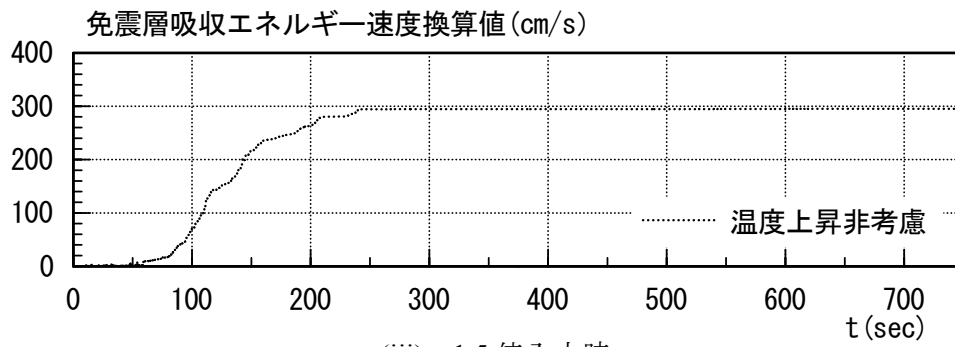
図 3.3.1-12(d) 免震層累積変位量時刻歴 (KGIN_AV)



(i) 1.0 倍入力時

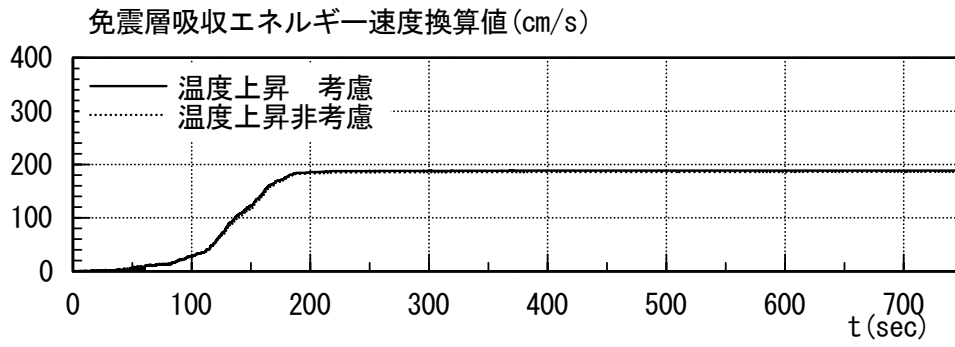


(ii) 1.25 倍入力時

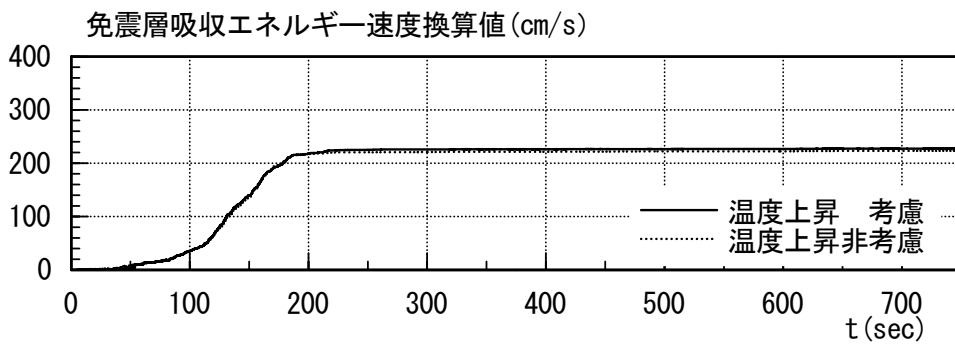


(iii) 1.5 倍入力時

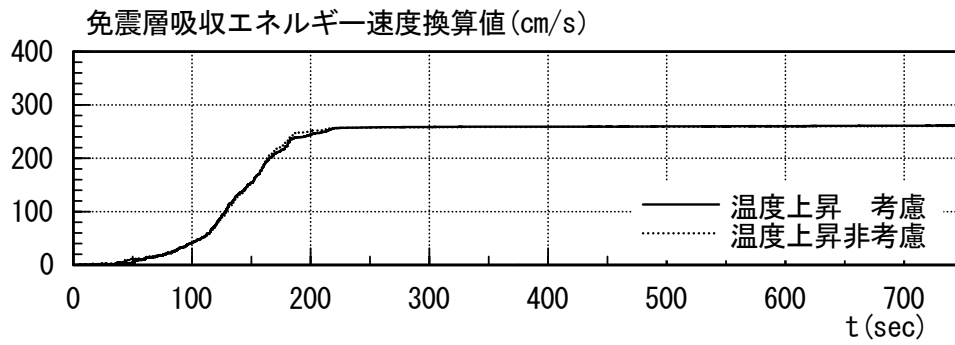
図 3.3.1-13(a) 免震層履歴吸収エネルギー—速度換算値時刻歴 (OSKH02_AV)



(i) 1.0 倍入力時

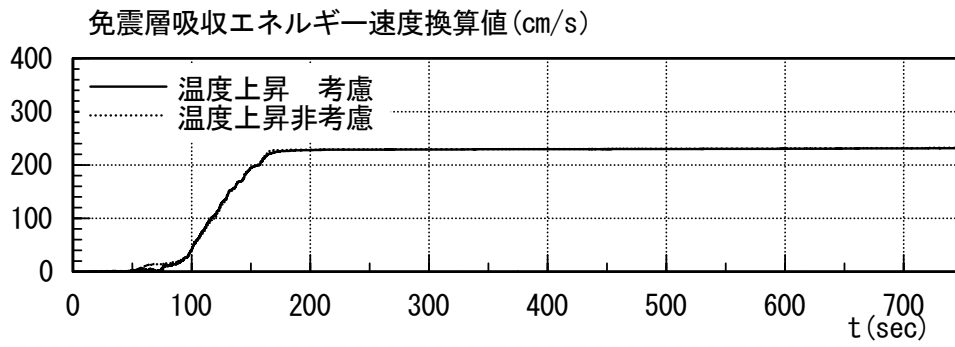


(ii) 1.25 倍入力時

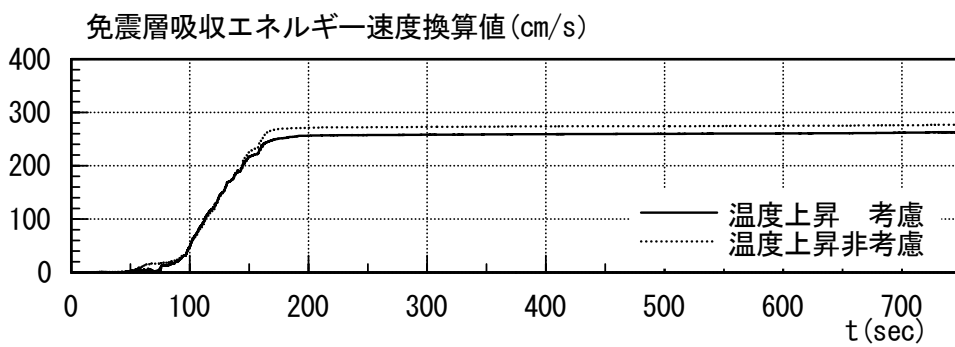


(iii) 1.5 倍入力時

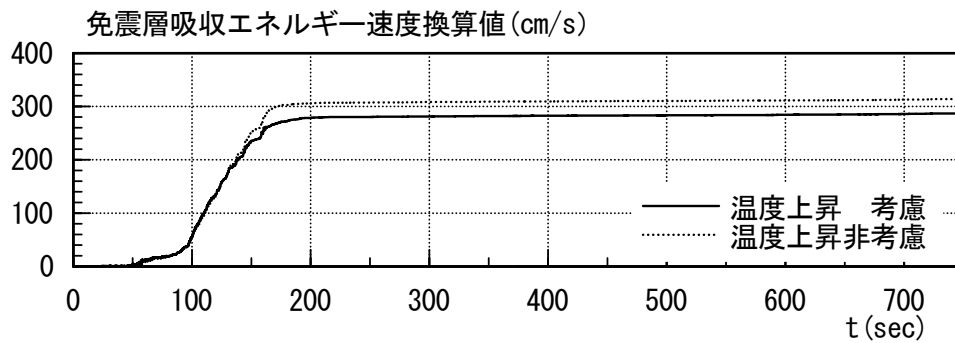
図 3.3.1-13(b) 免震層履歴吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (AIC003_AV)



(i) 1.0 倍入力時



(ii) 1.25 倍入力時



(iii) 1.5 倍入力時

図 3.3.1-13(c) 免震層履歴吸収エネルギー—速度換算値時刻歴 (SZO024_AV)

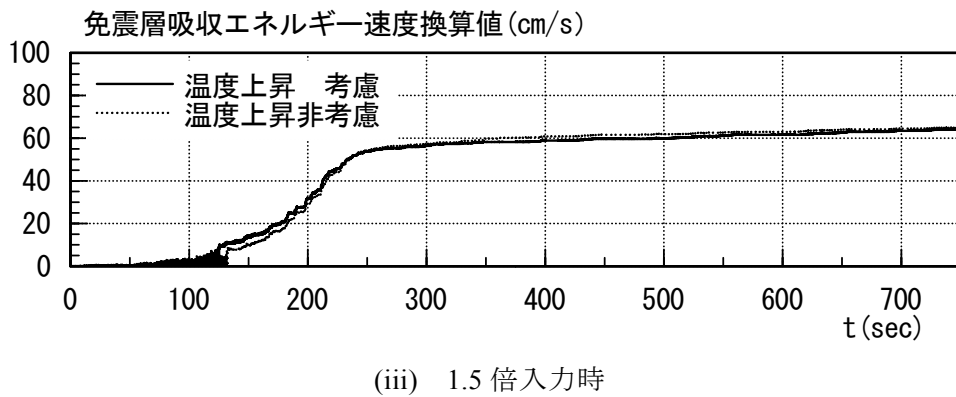
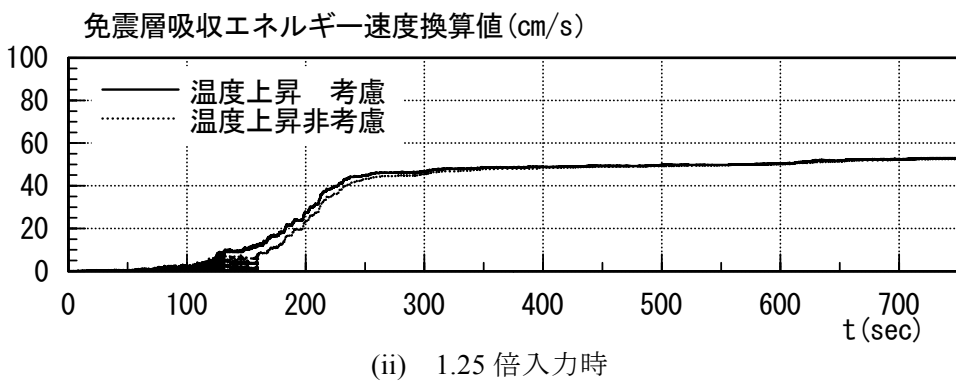
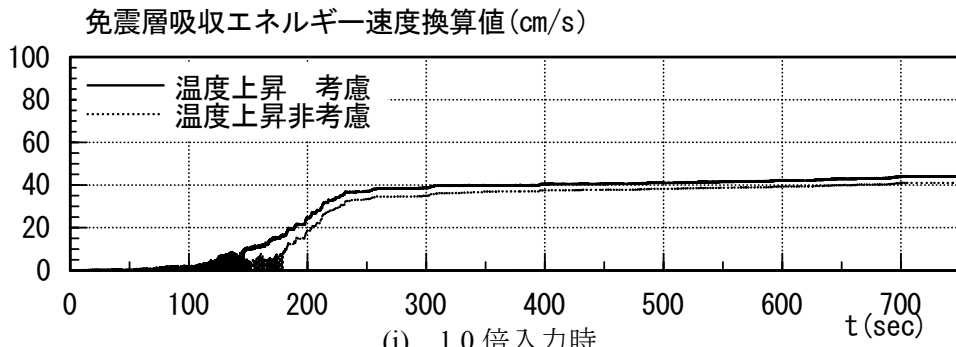
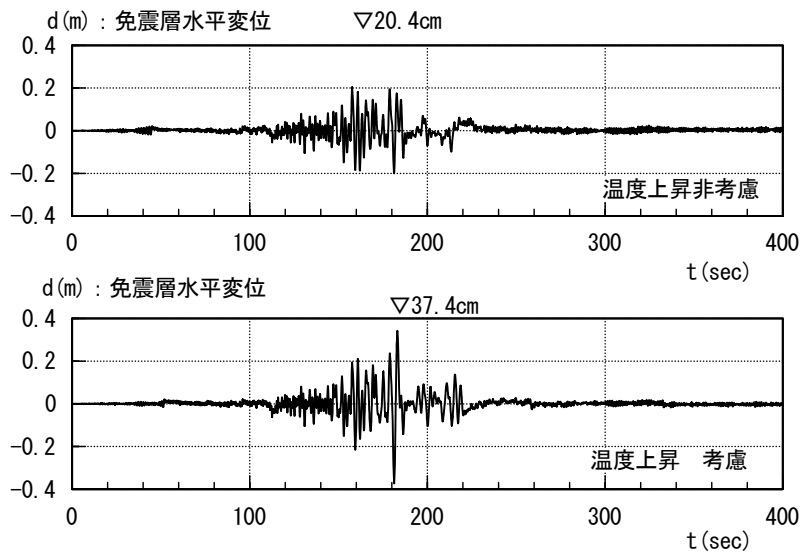


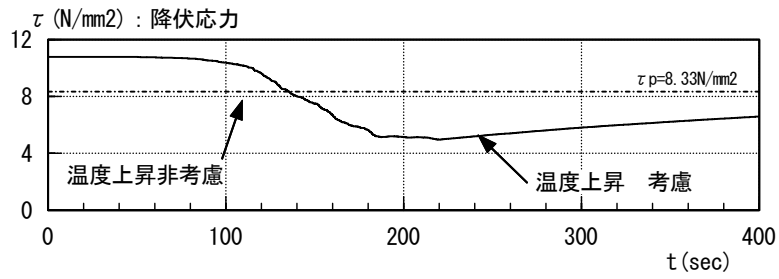
図 3.3.1-13(d) 免震層履歴吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (KGIN_AV)

図 3.3.1-14 に鉛プラグの温度上昇非考慮時と温度上昇考慮時の水平変位応答増大率が 1.83 と大きかった AIC003x1.5 入力時の結果を示す。

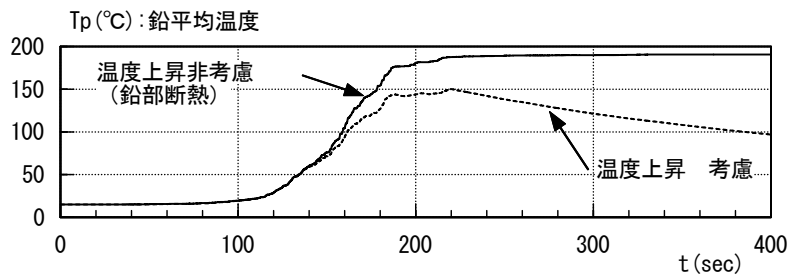
鉛プラグの温度上昇考慮時に最大応答変位が生じている時刻においては、鉛プラグの降伏応力が設計時の値と比較して、60%程度に低下しており、その時の鉛プラグ平均温度も 150℃程度となっている。このため、鉛プラグの耐力が低下した時点での地震入力により温度上昇考慮時の変位が温度上昇非考慮時と比較して大きくなったものと推察される。



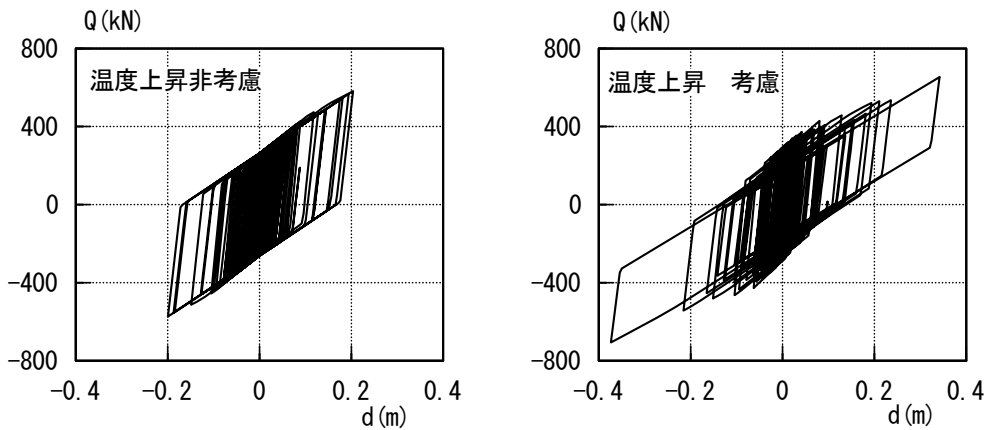
(a) 免震層水平変位



(b) 鉛降伏応力時刻歴



(c) 鉛平均温度



(d) 荷重変形関係

図 3.3.1-14 AIC003x1.5 での解析結果

(4) まとめ

鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し特性を考慮した解析手法として熱伝導解析と温度上昇による力学的特性変化を考慮した手法について、平成 22 年度に実施した正弦波繰返加力実験のシミュレーション解析を実施することによりその妥当性を確認した。

免震材料として鉛プラグ入り積層ゴムを適用した免震建築物では、繰り返しによる鉛プラグの温度上昇の影響を考慮しないケースと考慮したケースとを比較した場合に、地震動の入力倍率が 1.0 倍の場合に変位増大率は 1.04~1.06 倍である。AIC003_AV 地震動の入力倍率 1.5 倍の場合に変位増大率が 1.83 倍となるケースがあるものの、積層ゴムのせん断ひずみは最大でも $\gamma=250\%$ (水平変位 50cm) 以内である。

今後の課題として、鉛プラグ入り積層ゴムについて免震材料及び免震建築物応答に及ぼす温度上昇の影響を時刻歴応答解析によらずに簡易的に評価できる手法についての検討が望まれている。

参考文献

- 3.3.1-1) 本間友規ほか：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その 9 熱伝導解析による実験結果のシミュレーション）、日本建築学会学術講演梗概集、2008.9.
- 3.3.1-2) 近藤明洋ほか：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その 10 鉛入り積層ゴムにおける鉛温度～降伏応力関係の提案）、日本建築学会学術講演梗概集、2008.9.
- 3.3.1-3) 竹中康雄ほか：大振幅繰返し変形を受ける積層ゴム支承の熱・力学的連成挙動に関する研究（その 11 LRB の温度上昇を考慮した地震応答解析）、日本建築学会学術講演梗概集、2008.9.

3.3.2 高減衰ゴム系積層ゴム

(1) 免震部材実験結果に基づくモデル化

(1.1) 縮小試験体実験結果

平成22年度に実施した縮小試験体(HDR ϕ 250)の実験概要と実験結果を示す。写真3.3.2-1に、加振状況を示す。試験体は、実大サイズ(直径1000mm)の1/4サイズの直径250mmの高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R)×4体である。表3.3.2-1に、実大サイズの積層ゴムと試験体の諸元を合わせて示す。計測項目は、水平・鉛直の荷重・変位、および試験体各部の温度である。試験体温度は熱電対および非接触型の温度計により、加力中および加力後の温度を計測した。図3.3.2-1に、試験体の温度計測点を示す。また、加振により試験体に発生する熱が試験機に伝達しないよう、試験体の上下にD-M-E高温用断熱板(厚さ10mm)を設置して、加振を実施した。

表3.3.2-2に、多数回繰返し加振の実験ケース一覧を示す。実験は、 15.0N/mm^2 の一定面圧下における加振周期4.0秒の正弦波による多数回繰返し加振である。高減衰ゴム系積層ゴムが持つ各種依存性の繰返し特性への影響を検討するため、加振振幅、初期温度、荷重履歴を変化させた連続正弦波加振、およびランダム加振として地震応答波による加振を実施した。加振の繰返し回数は、全ての実験ケースについて累積変形量が100mとなるよう設定している(地震応答波を除く)。地震応答波は、高減衰ゴム系積層ゴムのみで構成される免震層を有する等価周期4.0秒($\gamma=200\%$ 時)の1質点剛体モデルに、T-TN-AIC003-AVを入力した応答変位波形を用いた。図3.3.2-2に、T-TN-AIC003-AVの加速度時刻歴波形を示す。実験には、継続時間600秒以上の入力による応答波のうち、主要動部分を含む60~210秒の150秒間の応答変位波形を4回連続入力した。図3.3.2-3に、実験に用いた応答変位波形を示す。

図3.3.2-4に、多数回繰返し実験結果の荷重変形関係を示す。各実験ケースの履歴ループは、繰返し加振に伴い、最大荷重とループ面積が徐々に低下している。初期0°Cの履歴ループは、初期30°Cの履歴ループに比べて、加振開始時のループ面積が大きい。繰返しによる特性変化も大きい。漸増と漸減の履歴ループを比較すると、荷重履歴の違いが繰返し特性に影響を与えることが確認できる。図3.3.2-5に、多数回繰返し実験の加振中および加振終了後の試験体温度の推移を示す。図3.3.2-5の試験体温度は、図3.3.2-1に示す温度計測点のうち、試験体のゴム中心部であるX-Bcの温度を示している。ただし、漸減のケースのみX-Bcが断線したためY-Bcの温度を示している。加振振幅が大きい方が温度上昇が大きく、漸増、漸減のケースでは加振振幅の変化に応じて、温度上昇の度合いが変化していることが確認できる。

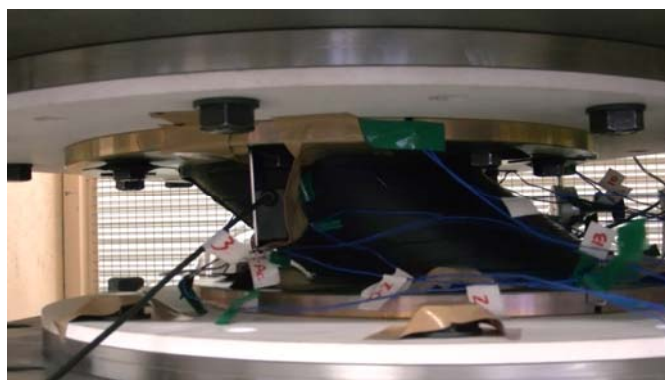


写真3.3.2-1 加振状況

表 3.3.2-1 高減衰ゴム系積層ゴム試験体諸元

	外径 (mm)	内径 (mm)	ゴム層厚	内部鋼板厚 (mm)	S1	S2
実大サイズ	1000	25	6.7mm×30層=201mm	4.4	36.4	4.98
試験体(HDRφ250)	250	10	1.7mm×30層=51mm	1.2	35.3	4.9

$$G_{eq}(\gamma=100\% \text{時}) = 0.620\text{N/mm}^2$$

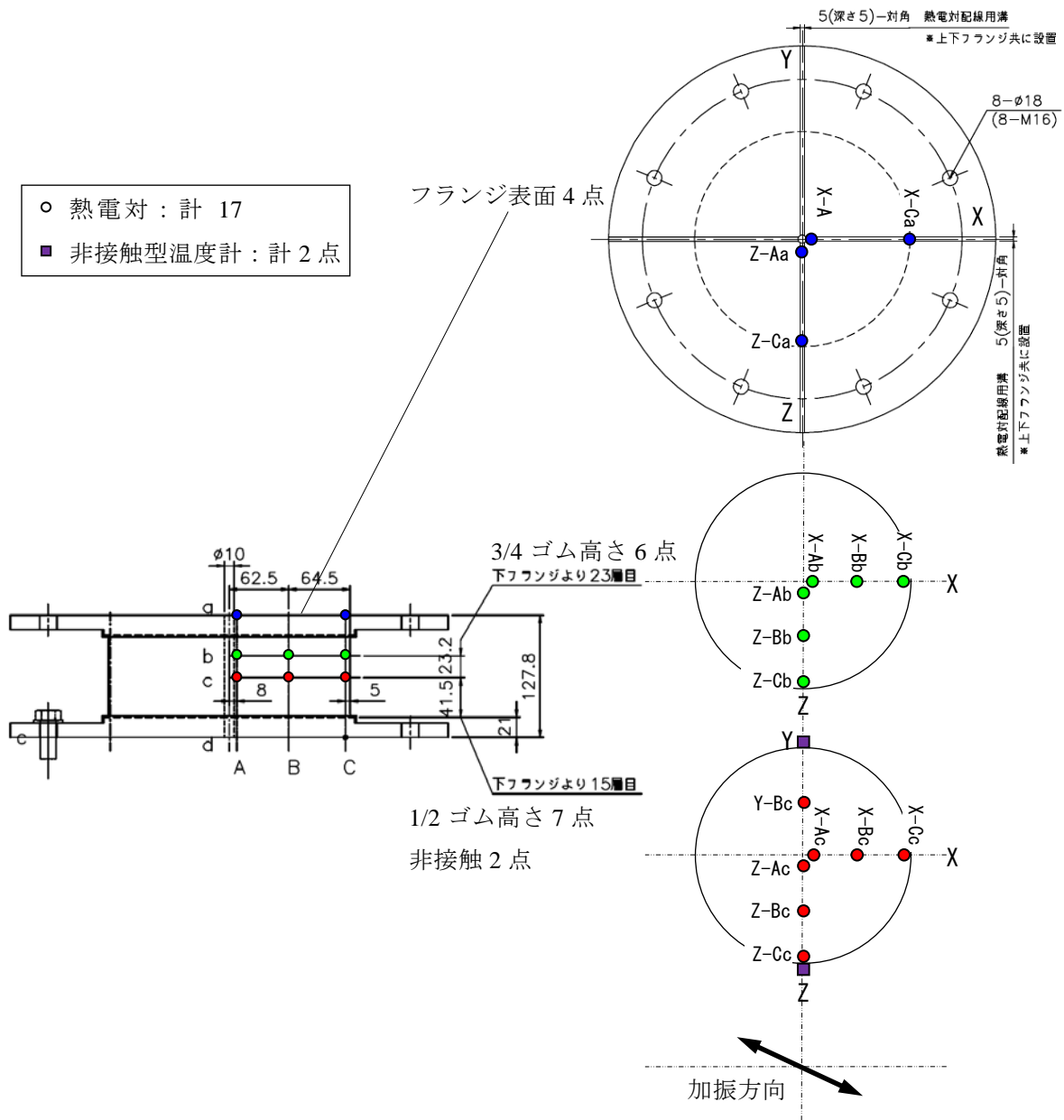


図 3.3.2-1 試験体温度計測点

表 3.3.2-2 HDR ϕ 250 縮小試験体多数回繰返し加振実験ケース一覧

試験体	試験条件	加振周期 (sec)	ひずみ (%)	変位 (mm)	換算速度 (cm/s)	サイクル数	累積変形 (m)	試験体初期温度 (°C)
1	限界 1B	4.0	50	26	4.0	1000	104	20
	限界 2B	4.0	100	51	8.0	500	102	20
	限界 3B	4.0	200	102	16.0	250	102	20
2	初期 0°C	4.0	200	102	16.0	250	102	0
	初期 30°C	4.0	200	102	16.0	250	102	30
3	漸増	4.0	50	26	4.0	245	100	20
			100	51	8.0	122		
			200	102	16.0	61		
			250	128	20.0	49		
4	漸減	4.0	250	128	20.0	49	100	20
			200	102	16.0	61		
			100	51	8.0	122		
			50	26	4.0	245		
	地震応答	—	max.約 130	max 約 70	—	—	約 3.4 ×4 回	20

※試験体初期温度については、設定温度 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ を許容値とする。

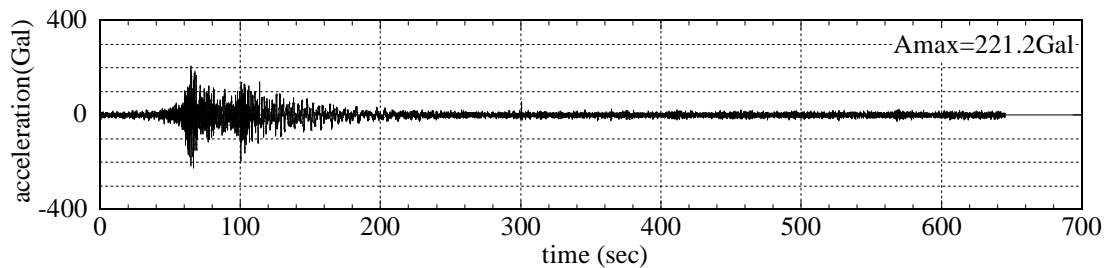


図 3.3.2-2 T-TN-AIC003-AV の加速度時刻歴波形

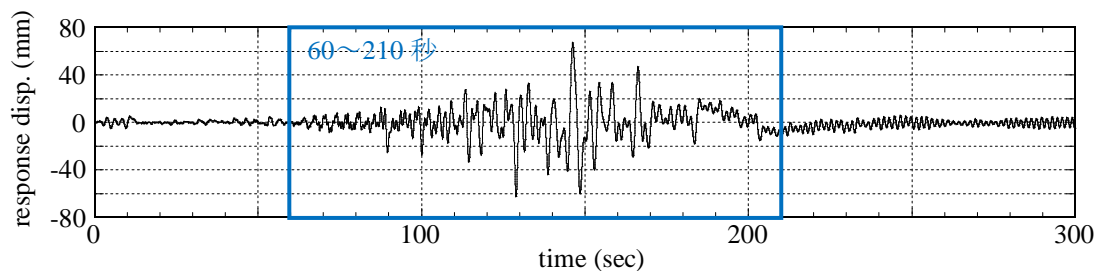


図 3.3.2-3 T-TN-AIC003-AV 入力時の応答変位波形(HDR ϕ 250 試験体相当)

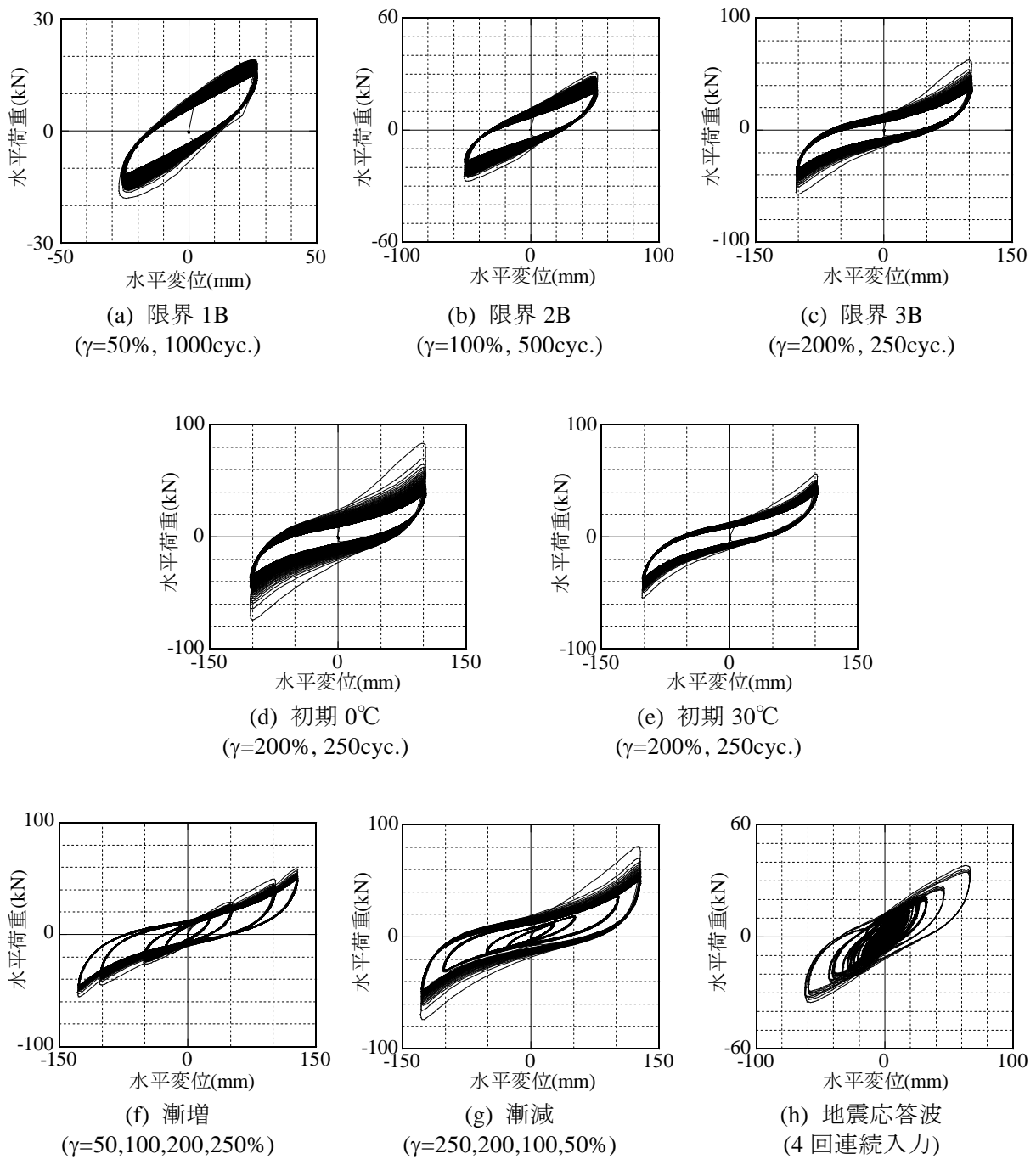
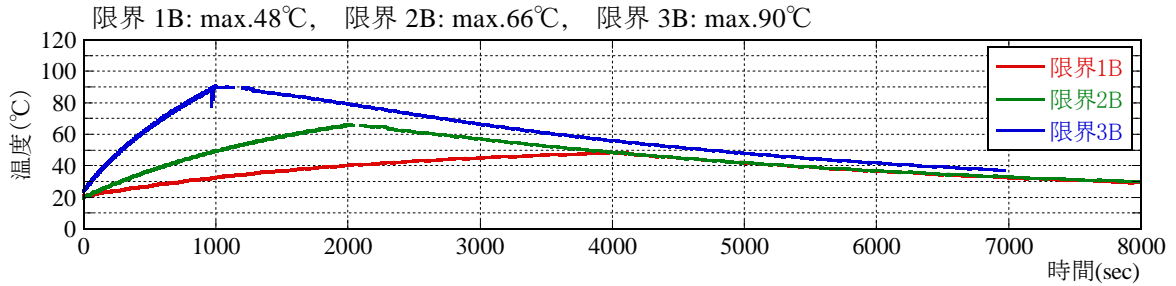
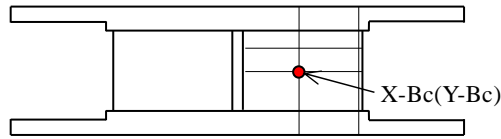
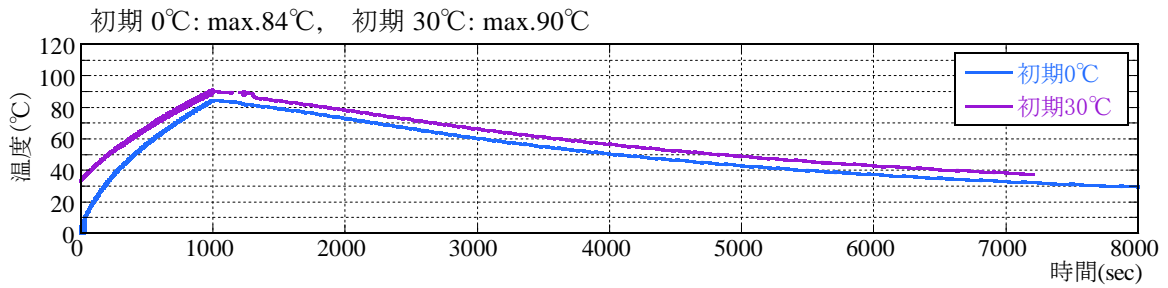


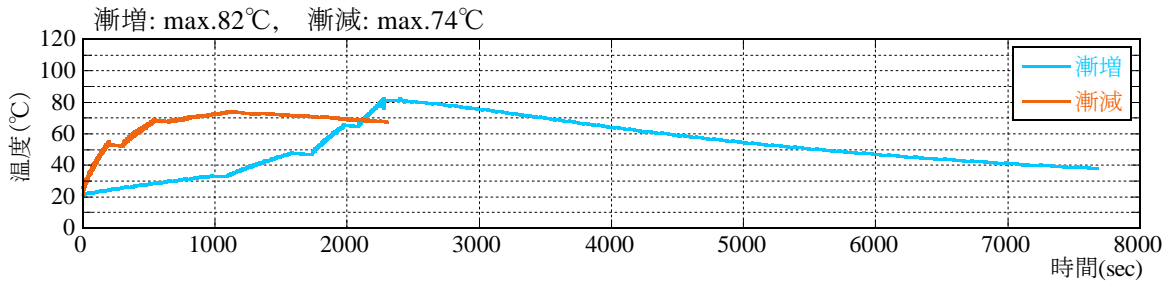
図 3.3.2-4 HDRφ250 多数回繰返し実験結果の荷重変形関係



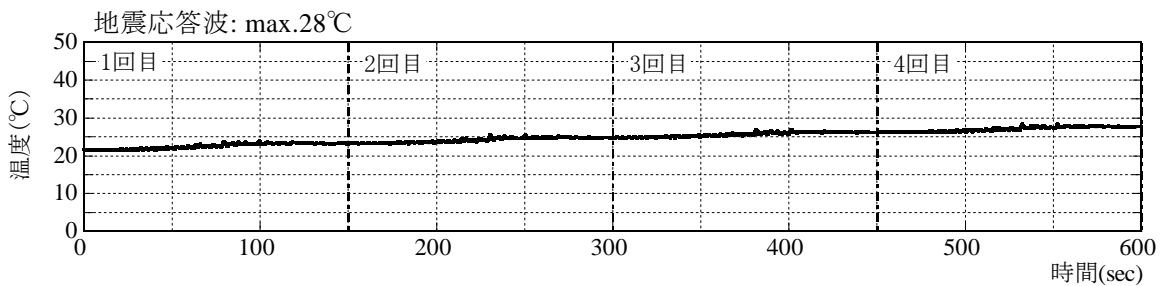
(a) 限界 1B、限界 2B、限界 3B の温度推移



(b) 初期 0°C、初期 30°C の温度推移



(c) 漸増、漸減の温度推移



(d) 地震応答波の温度推移

図 3.3.2-5 加振中および加振終了後の試験体の温度推移 (計測点 X-Bc (漸減のみ Y-Bc))

(1.2) 繰返し特性を考慮した高減衰ゴム系積層ゴムの復元力モデル

(1.2.1) 技術資料による設計式

メーカーの技術資料^{3.3.2-1)}による高減衰ゴム系積層ゴムの復元力モデルは、等価剛性 K_{eq} 、等価減衰定数 H_{eq} 、降伏荷重特性係数 u の3つの復元力特性値により決定され、それぞれ式(3.3.2-1)～(3.3.2-3)によって算出される(図 3.3.2-6)。

$$K_{eq} = G_{eq} \cdot A / h_r \quad (3.3.2-1)$$

$$H_{eq} = \Delta W / (2\pi \cdot K_{eq} \cdot \delta_0^2) \quad (3.3.2-2)$$

$$u = Q_d / (K_{eq} \cdot \delta_0) \quad (3.3.2-3)$$

ここで、 G_{eq} はゴムのせん断弾性係数、 A は積層ゴム断面積、 h_r はゴム層総厚である。 $K_{eq}(G_{eq})$ 、 H_{eq} 、 u の3つの復元力特性値は、表 3.3.2-3 のようにせん断ひずみ γ の関数として与えられる。この時のせん断ひずみ γ は最大経験せん断ひずみが用いられ、せん断ひずみが大きくなるのに伴って、各復元力特性値が更新されていく。このせん断ひずみに依存して変化する復元力特性値を用いた修正バイリニアモデルにより、高減衰ゴム系積層ゴムの復元力特性が表現される。上記の3つの復元力特性値 K_{eq} 、 H_{eq} 、 u を用いて、バイリニアモデルの1次剛性 K_1 、2次剛性 K_2 、降伏荷重特性値 Q_d は、式(3.3.2-4)～(3.3.2-6)によって算出される。

$$K_1 = K_{eq} \frac{u - \pi H_{eq} / 2 + u\pi H_{eq} / 2}{u - \pi H_{eq} / 2} \quad (3.2.2-4)$$

$$K_2 = K_{eq} (1 - u) \quad (3.2.2-5)$$

$$Q_d = u \cdot K_{eq} \cdot h_r \cdot \gamma \quad (3.2.2-6)$$

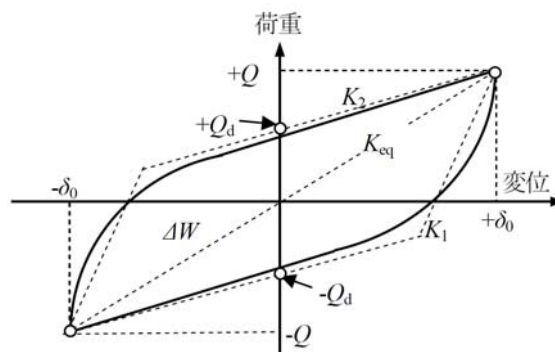


図 3.3.2-6 高減衰ゴム系積層ゴムの水平復元力特性^{3.3.2-1)}

表 3.3.2-3 高減衰ゴム系積層ゴム(X0.6R)の設計式^{3.3.2-1)}

ゴム材料呼称	代表特性値 ($\gamma=100\%$)	各関数 ($10\% \leq \gamma \leq 270\%$)
X0.6R	$G_{eq}=0.620\text{N/mm}^2$ $H_{eq}=0.240$	$G(\gamma)=G_0 \times (2.855 - 3.878\gamma + 2.903\gamma^2 - 1.016\gamma^3 + 0.1364\gamma^4)$ $G_0=0.620$ 、 $\gamma=1.0$ におけるせん断弾性係数
		$H_{eq}(\gamma)=H_{eq0} \times (0.9150 + 0.2364\gamma - 0.1804\gamma^2 + 0.02902\gamma^3)$ $H_{eq0}=0.240$ 、 $\gamma=1.0$ における等価減衰定数
		$u(\gamma)=u_0 \times (0.9028 + 0.2711\gamma - 0.2083\gamma^2 + 0.03421\gamma^3)$ $u_0=0.408$ 、 $\gamma=1.0$ における降伏荷重特性比

(1.2.2) 漸減入力に対応した修正バイリニアモデルの履歴則

図 3.3.2-7 に、(1.2.1)に示す設計式で表される修正バイリニアモデルによる高減衰ゴム系積層ゴムのせん断応力度—ひずみ関係を示す。図 3.3.2-7(a)は、せん断ひずみを 50%から 250%まで漸増した復元力特性、図 3.3.2-7(b)は、せん断ひずみを 250%から 50%まで漸減した復元力特性である。図 3.3.2-7(b)に示す漸減の場合、最初に経験した最大せん断ひずみによってバイリニアの特性値が決定され、その後の漸減加振においては特性値が固定されたバイリニアとなる。このように、設計式で用いられる修正バイリニアモデルは、せん断ひずみによる復元力特性値の更新が、せん断ひずみの最大値更新時にのみ行われるため、一度高ひずみを経験すると、その後の小ひずみ領域においても更新された高ひずみ域に合わせた復元力特性値を使い続ける。よって、主要動終了後の小振幅入力や、大地震後の余震を考慮した地震動の連続入力等、漸減入力を含むランダム波の応答解析において、小ひずみ領域の等価剛性を過小評価する傾向がある。最大応答値の予測を目的とした解析においては問題ないが、長周期地震動を対象とした本検討では累積変形量や累積吸収エネルギーといった累積値の算出も重要な項目であり、上記の傾向は累積値を過大に算出する原因となり得る。よって、本検討では漸減入力にも対応可能な修正バイリニアモデルの履歴則を提案し、解析に使用する。

漸減入力に対応可能な修正バイリニアモデルの履歴則として、除荷点のせん断ひずみを用いた修正バイリニアモデルを提案する。高ひずみ経験後においても、再びせん断ひずみがゼロに戻ると復元力特性値は小ひずみ領域の値に復帰すると仮定して、最大経験せん断ひずみの値をリセットし、せん断ひずみがゼロを通過した後の最大せん断ひずみによって復元力特性値を算出し直す。図 3.3.2-8 に、本検討で提案する修正バイリニアモデルの履歴則の概要図を示す。最大せん断ひずみ γ_{max} 更新時に復元力特性値が更新されるのは、設計式の修正バイリニアモデルと同様である(図 3.3.2-8 青線)。これに加え、載荷後にせん断ひずみがゼロに戻り、逆載荷によってせん断ひずみが 10%(設計式の下限值)を超える場合、次の除荷点において除荷時のせん断ひずみ γ_{rev} を用いて復元力特性値 G_{eq} 、 H_{eq} 、 u を更新してバイリニアを作り直す(図 3.3.2-8 赤線)。ただし、載荷後にせん断ひずみがゼロまで戻らずに再載荷する場合は、復元力特性値は更新しない(図 3.3.2-8 緑線)。

図 3.3.2-9 に、除荷点のせん断ひずみを用いた修正バイリニアモデルによるせん断応力度—ひずみ関係を示す。図 3.3.2-9(a)に示すせん断ひずみ 50%～250%までの漸増加振、および図 3.3.2-9(b)に示すせん断ひずみ 250%～50%までの漸減加振とも、ほぼ同様の復元力特性となっており、高ひずみ経験後の小ひずみ領域において、復元力特性値が小ひずみ時の値に復帰する挙動を表している。図 3.3.2-10 に、表 3.3.2-2 に示す実験ケース一覧のうち、地震応答波入力の実験結果の荷重時刻歴と、一般的な修正バイリニアモデル(設計式)、および除荷点修正バイリニアモデルによる解析結果の荷重時刻歴を比較して示す。実験結果および解析結果は、地震応答波 4 回連続入力のうち、1 回目と 2 回目の結果を続けて示している。どちらの解析結果も、最大荷重は 1 回目、2 回目とも実験結果とよく一致している。しかし、設計式による解析結果(図 3.3.2-10(a))は、1 回目の主要動終了後から 2 回目の主要動までの振幅の小さい領域で、実験結果に比べて荷重を過大に評価している。これに対し、除荷点修正バイリニアモデルによる解析結果(図 3.3.2-10(b))は、主要動終了後の振幅の小さい領域においても、実験結果の荷重を比較的良好に追跡できている。図 3.3.2-11 に、地震応答波入力の実験結果の累積吸収エネルギーと、設計式および除荷点修正バイリニアモデルによる解析結果の累積吸収エネルギーを比較して示

す。設計式の結果に比べて、除荷点修正バイリニアモデルの結果は累積吸収エネルギーの値がやや小さくなり、実験結果の値に近づいている。ただし、繰返し加振による特性変化を考慮していないので、除荷点修正バイリニアモデルの解析結果も実験結果より大きな値を示している。

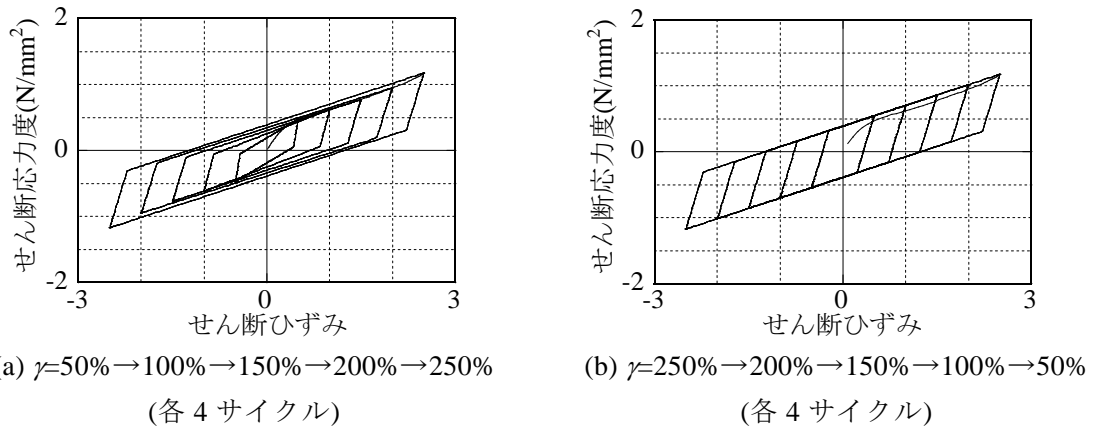


図 3.3.2-7 設計式の修正バイリニアモデルによる復元力特性

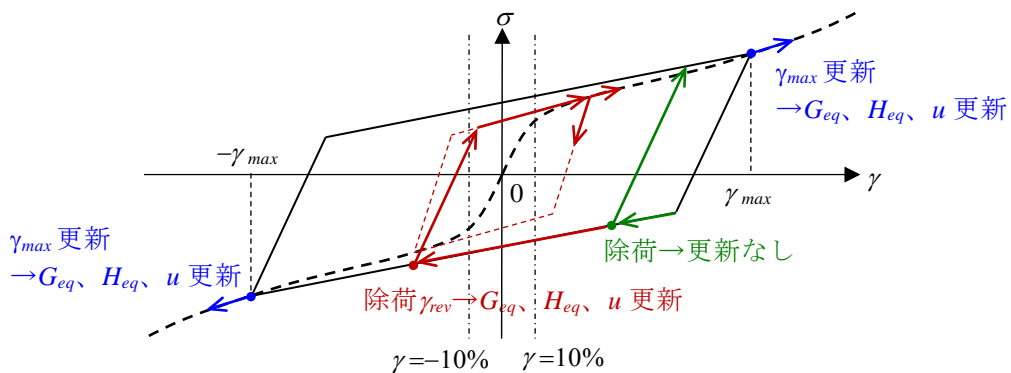


図 3.3.2-8 除荷点のせん断ひずみを用いた修正バイリニアモデルの履歴則概要

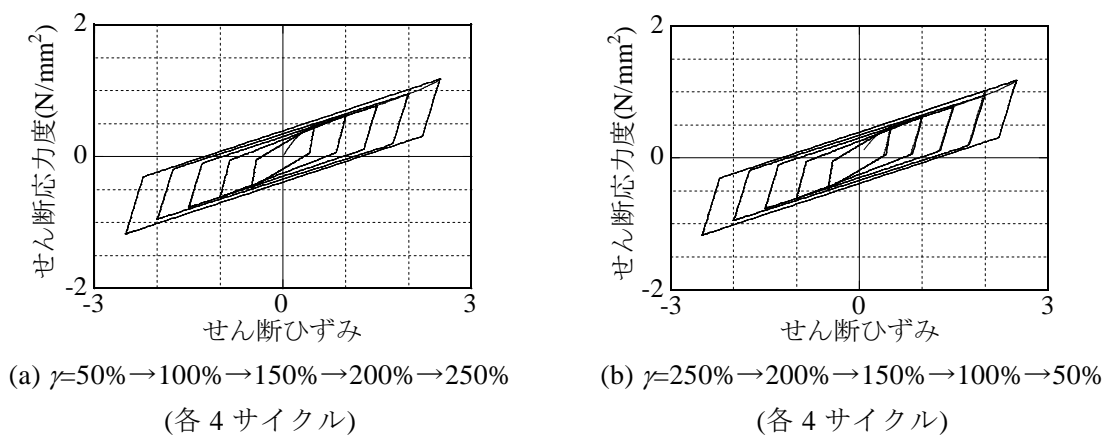
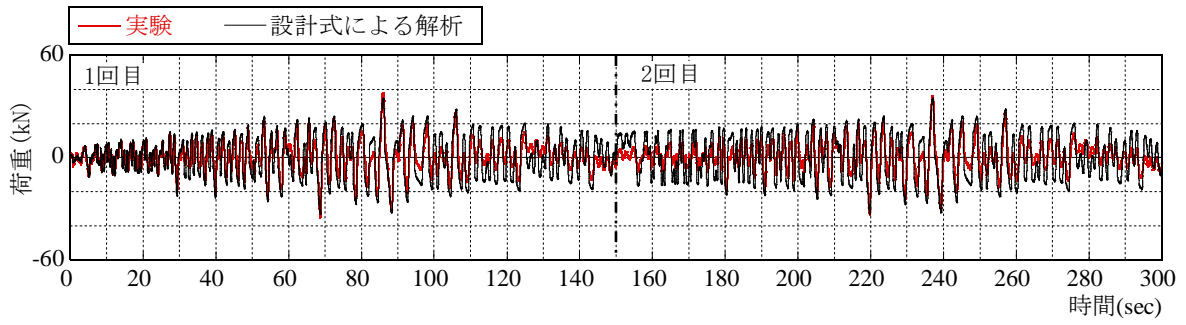
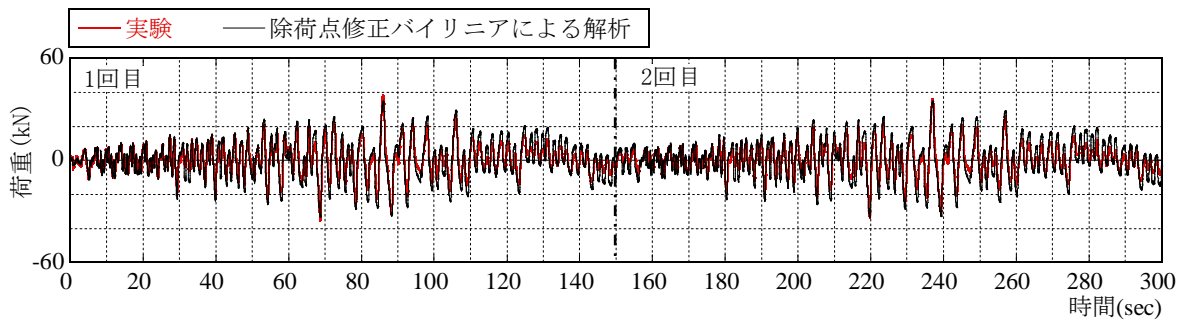


図 3.3.2-9 除荷点せん断ひずみを用いた修正バイリニアモデルによる復元力特性



(a) 設計式(一般的な修正バイリニアモデル)による解析結果と実験結果の比較



(b) 除荷点修正バイリニアモデルによる解析結果と実験結果の比較

図 3.3.2-10 地震応答波加振の実験結果と解析結果の荷重時刻歴の比較

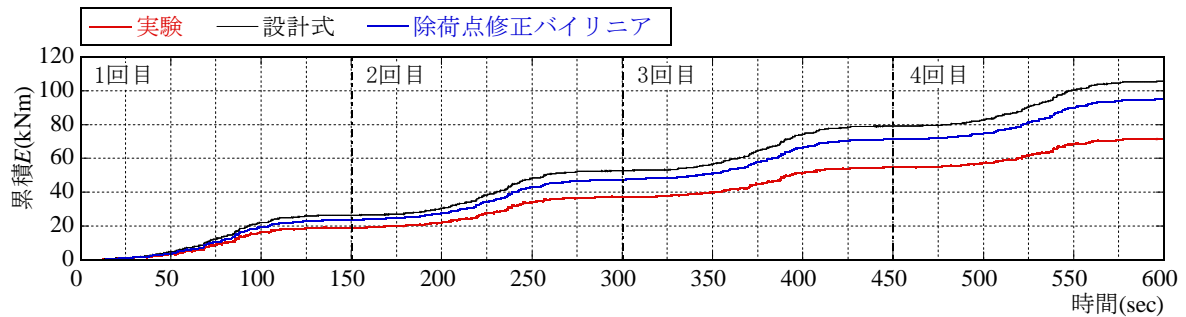


図 3.3.2-11 地震応答波加振の実験結果と解析結果の累積吸収エネルギーの比較

(1.2.3) 積層ゴム温度を用いた復元力特性変化のモデル化

図 3.3.2-4 に示す実験結果より、多数回の繰返し加振により高減衰ゴム系積層ゴムの履歴ループは最大荷重とループ面積が減少していく。高減衰ゴム系積層ゴムは温度依存性を持つ部材であることも考慮し、実験結果に見られる繰返し加振による特性変化を、加振による温度上昇を評価指標としてモデル化を行う。図 3.3.2-12 に、表 3.3.2-2 に示す実験ケースのうち限界 1B($\gamma=50\%$, 1000 サイクル)、限界 2B($\gamma=100\%$, 500 サイクル)、限界 3B($\gamma=200\%$, 250 サイクル)の一定振幅加振の実験ケースについて、実験結果の復元力特性値 K_{eq} 、 H_{eq} 、 u と試験体温度の関係を示す。試験体温度は、図 3.3.2-12 中の試験体図の赤丸で示すゴム部中心点の温度である。本検討では、このゴム部中心点の温度を試験体の代表温度として用いる。各復元力特性値は、 20°C 時の値を基準値として、等価剛性変化率 C_K 、等価減衰定数変化率 C_H 、降伏荷重特性係数変化率 C_u として示している。図 3.3.2-12 より、 K_{eq} 、 H_{eq} 、 u とも試験体の温度上昇にともない値が低下しており、その低下傾向は加振振幅に関わらずおおよそ一定の傾向を示している。この試験体の温度変化による復元力特性値の変化率 C_K 、 C_H 、 C_u を、試験体代表温度 T の関数として評価し、これを用いて繰返しによる復元力特性値の変化を考慮する(式(3.3.2-7)~(3.3.2-9))。

$$\left. \begin{aligned} K_{eq}' &= C_K \cdot K_{eq} \\ C_K &= 1.288 - 0.0144T \quad (T \leq 20^\circ\text{C}) \\ C_K &= 1.668 - 0.548 \log(T - 3.45) \quad (T > 20^\circ\text{C}) \end{aligned} \right\} \quad (3.3.2-7)$$

$$\left. \begin{aligned} H_{eq}' &= C_H \cdot H_{eq} \\ C_H &= (-0.0065T + 1.130) \end{aligned} \right\} \quad (3.3.2-8)$$

$$\left. \begin{aligned} u' &= C_u \cdot u \\ C_u &= (-0.0065T + 1.130) \end{aligned} \right\} \quad (3.3.2-9)$$

図 3.3.2-12 中の赤線が、式(3.3.2-7)~(3.3.2-9)で表される復元力特性値変化率 C_K 、 C_H 、 C_u の評価式である。図 3.3.2-12 中には、等価剛性と等価減衰定数について技術資料^{3.3.2-1}による温度依存式も紫線により合わせて示している。提案する評価式は、この温度依存式と大きくずれないように設定しており、初期温度による復元力特性値の違いについても同時に考慮可能としている。

繰返し加振による試験体温度の上昇は、加振による履歴吸収エネルギーから算出する。図 3.3.2-13 に、実験結果の累積履歴吸収エネルギーと試験体温度増分の関係を示す。図 3.3.2-13 中の黒の点線は、累積吸収エネルギーを高減衰ゴムの熱容量で除して求めた試験体温度増分、赤の点線は累積吸収エネルギーを高減衰ゴムの熱容量と内部鋼板の熱容量の和で除して求めた試験体温度増分である。表 3.3.2-4 に、高減衰ゴム(X0.6R)と鋼板の物性値を示す。図 3.3.2-14 には、高減衰ゴム(X0.6R)の比熱と温度の関係を示す。高減衰ゴムの比熱は、温度が高くなると大きくなる特性があるが、検討には 20°C 時の値である $1.45(\text{kJ}/(\text{kg K}))$ を用いた。実験結果の試験体温度増分は、累積吸収エネルギーをゴムと鋼板の熱容量の和で除して求めた温度増分(図 3.3.2-13 中赤の点線)におおよそ一致し、累積吸収エネルギーに比例した温度上昇を示している。ただし、累積吸収エネルギーが大きくなると実験結果の温度上昇は、試験体の熱容量から求めた温度上昇の傾きよりも上昇傾向がやや緩やかになる。これは、試験体温度が高温になると外気やフランジとの温度差による放熱が大きくなるためと考えられる。この傾向は、加振振幅の小さい限界 1B のケースにおいてより顕著に見られるが、加振振幅が小さいと時間当たりの入

力エネルギーが小さいために、放熱の影響がより顕著に現れるためと考えられる。また、図 3.3.2-5 より、試験体温度は加振が終了すると、ただちに低下し始める。地震波は、大振幅と小振幅が混在し、連続正弦波入力時のように連続的なエネルギー入力ではなく、大振幅時における断続的なエネルギー入力となる。従って、小振幅時においてはエネルギー入力がほとんどなく、上昇した試験体温度が低下する場合も考えられ、ランダム波応答を考える場合、放熱の影響も考慮しなければ試験体温度を過大に評価する可能性がある。以上より、本検討では加振による履歴吸収エネルギーから、放熱による損失エネルギーを差し引いた有効エネルギーが試験体の温度上昇に寄与していると仮定して、試験体温度を算出する。

図 3.3.2-15(a)に、各実験の载荷終了時点からの温度低下の時間経過を示す。各実験ケースの 0～4000 秒程度までの温度低下を比較すると、载荷終了時点の温度が高温のケースほど、急な温度低下を示している。図 3.3.2-15(b)は、(a)のグラフを限界 3B(200%, 250 サイクル)のグラフを基準として、载荷終了時点(温度低下開始時点)の温度が、限界 3B のグラフ上に乗るよう各実験ケースのグラフの時間をシフトさせたものである。図 3.3.2-15(b)より、試験体の温度低下は低下開始時点の温度にのみ依存し、どの実験ケースにおいても一致した傾向で低下していることがわかる。この時、雰囲気温度は約 20℃である。図 3.3.2-15(b)に示す温度低下傾向を低下開始時からの経過時間 t 秒、低下開始から t 秒後の温度 T_e (℃)として、式(3.3.2-11)のように回帰する。図 3.3.2-15(b)中の赤の点線が、式(3.3.2-11)のグラフである。

$$T_e = 88.5 \cdot e^{-0.00015t} \quad (3.3.2-11)$$

式(3.3.2-11)を用いて、任意の温度低下開始温度 T_s (℃)から、任意の Δt 秒間に低下した温度変化 ΔT を求めると、式(3.3.2-12)のように表される。

$$\Delta T = T_s \cdot (1 - e^{-0.00015\Delta t}) \quad (3.3.2-12)$$

試験体の熱容量を、高減衰ゴムと内部鋼板の熱容量の和とすると、式(3.3.2-12)より、放熱による損失エネルギー E_{loss} は、式(3.3.2-13)のように表される。

$$E_{loss} = (C_R + C_S) \cdot T_s \cdot (1 - e^{-0.00015\Delta t}) \quad (3.3.2-13)$$

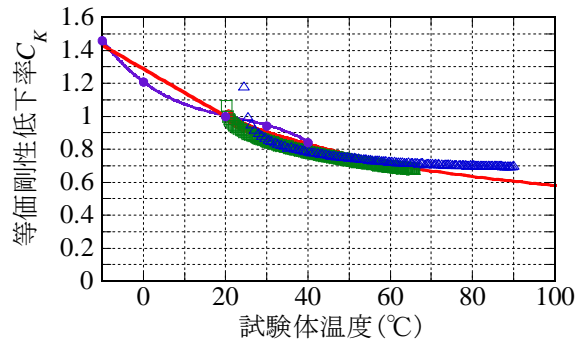
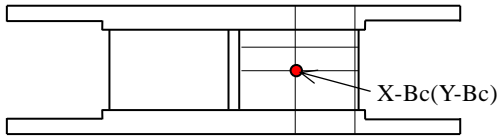
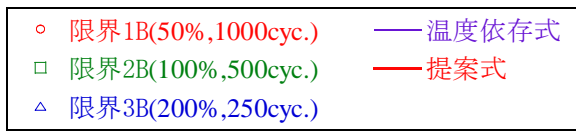
ここで、 C_R はゴムの熱容量、 C_S は鋼板の熱容量である。試験体の荷重変形関係から算出される履歴吸収エネルギーを E_{get} とすると、試験体の温度上昇に寄与する有効エネルギー E_{eff} は、式(3.3.2-14)により算出される。

$$E_{eff} = E_{get} - E_{loss} \quad (3.3.2-14)$$

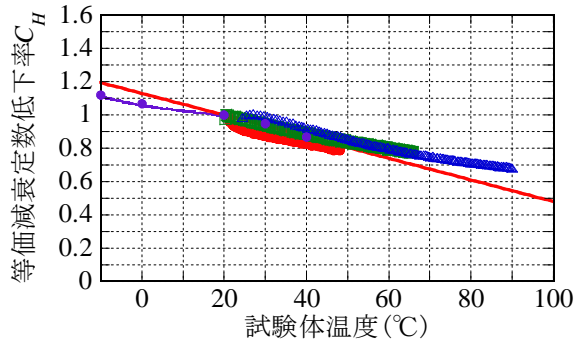
有効エネルギー E_{eff} を用いて、試験体温度 T は、式(3.3.2-15)により算出される。

$$T = \frac{E_{eff}}{(C_R + C_S)} \quad (3.3.2-15)$$

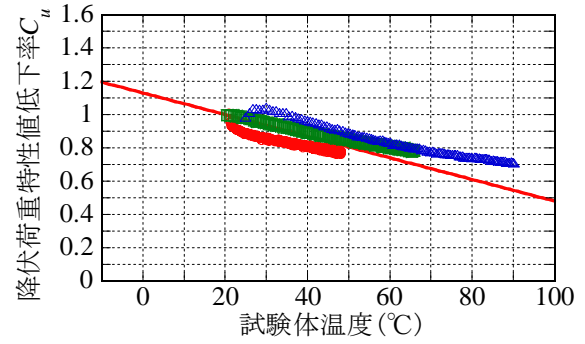
図 3.3.3-16 に、以上の手法により繰返し特性を考慮した高減衰ゴム系積層ゴムの解析フローを示す。



(a) 等価剛性 K_{eq}



(b) 等価減衰定数 H_{eq}



(c) 降伏荷重特性値 u

図 3.3.2-12 実験結果の試験体温度と復元力特性値変化率の関係

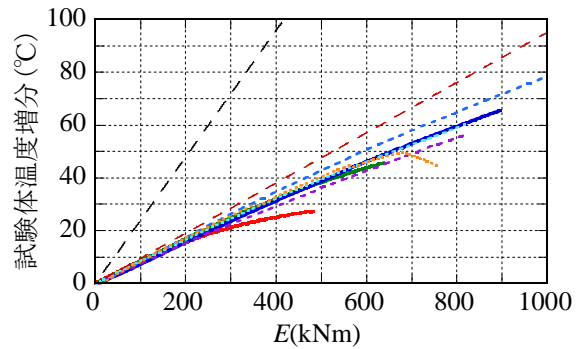


図 3.3.2-13 実験結果の累積吸収エネルギー E と試験体温度増分の関係

表 3.3.2-4 HDRφ250 試験体の材料物性値

材料	体積 (m ³)	密度 (kg/m ³)	比熱 (kJ/kg K)	熱容量 (kJ/K)
高減衰ゴム (X0.6R)	0.002499	1150	1.45	4.167
内部鋼板 (SS400)	0.001706	7860	0.473	6.343

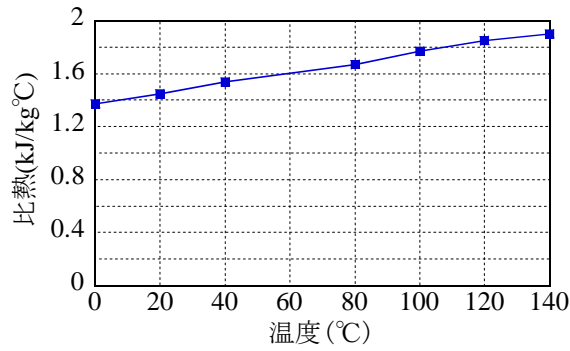
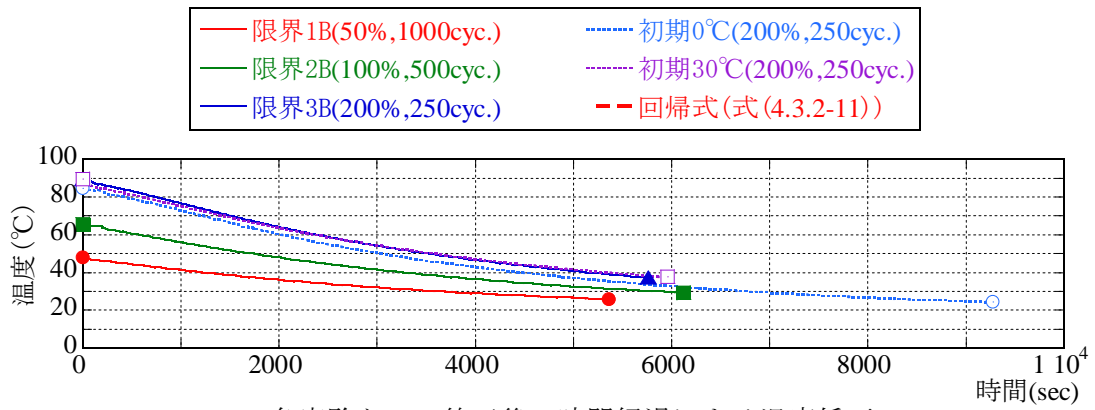
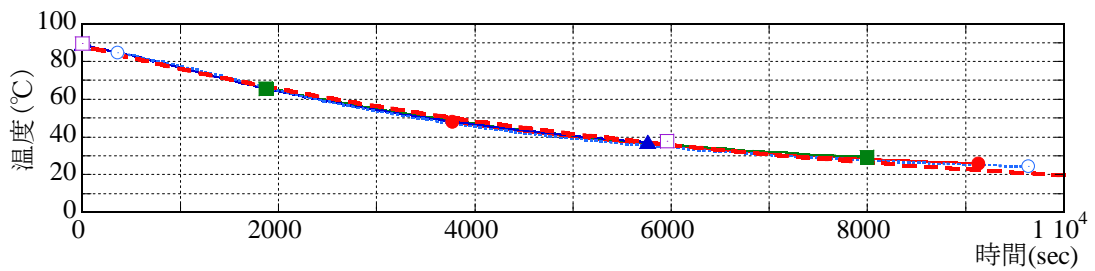


図 3.3.2-14 高減衰ゴム(X0.6R)の比熱と温度の関係



(a) 各実験ケース終了後の時間経過による温度低下



(b) 低下開始時の温度により、(a)の各実験ケースのグラフの時間をシフト

図 3.3.2-15 実験結果の载荷終了後の試験体温度の推移

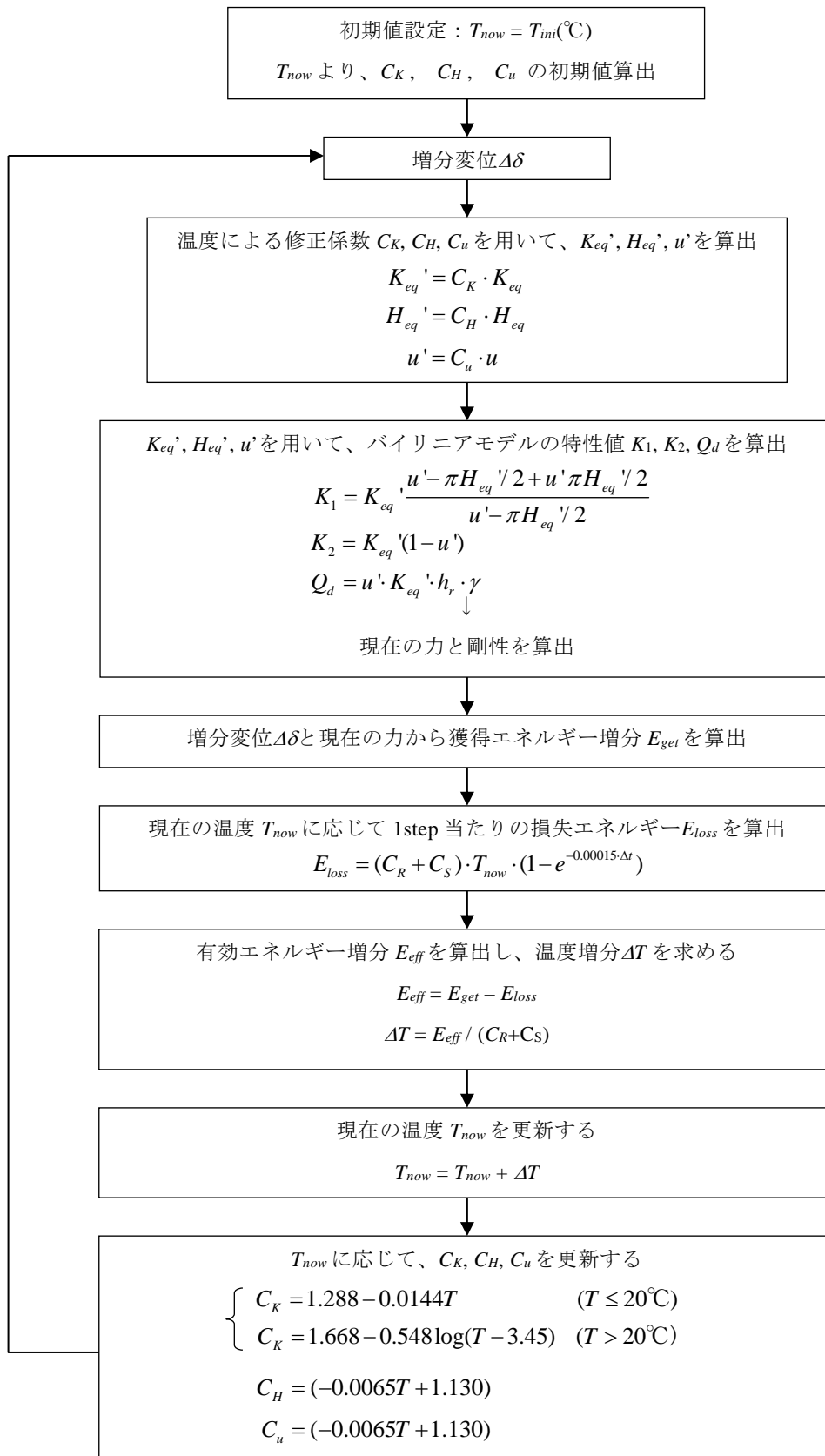


図 3.3.2-16 繰返し特性を考慮した高減衰ゴム系積層ゴムの解析手法フロー

(1.2.4) 実験結果と解析結果の比較

(1.2.1)～(1.2.3)に示す、繰返し特性を考慮した高減衰ゴム系積層ゴムの復元力モデルを用いて、(1.1)に示す縮小試験体 HDR ϕ 250 の多数回繰返し加振実験のシミュレーション解析を実施した。試験体の材料物性値は、表 3.3.2-4 に示す値を用いた。試験体の初期温度は、実験結果における加振開始時点の実測温度を使用した。

図 3.3.2-17 に、実験結果と解析結果の荷重変形関係を比較して示す。図 3.3.2-17(a)、(b)、(c) は、それぞれ限界 1B、限界 2B、限界 3B と加振振幅の異なる実験ケースの実験結果と解析結果を比較して示している。加振振幅の異なる 3 ケースの実験結果について、解析結果は繰返し荷重による履歴特性の変化を良く追跡している。ただし、(a)に示す限界 1B($\gamma=50\%$, 1000 サイクル)については、解析結果は実験結果よりも最大荷重をやや高めに評価している。また、(c)に示す限界 3B($\gamma=200\%$, 250 サイクル)において、実験結果はわずかにハードニングを示しているが、解析モデルはバイリニア型でハードニングを考慮していないため、解析結果は実験結果とややループ形状が異なる。図 3.3.2-17(d)、(e)は、初期 0 $^{\circ}$ C、初期 30 $^{\circ}$ C と加振開始時点の試験体温度が異なるケースの実験結果および解析結果の荷重変形関係を示している。実験結果において、初期 0 $^{\circ}$ C の履歴ループは、初期 30 $^{\circ}$ C の履歴ループに比べて加振開始時点のループ面積が大きく、繰返し荷重によるループ形状の変化も大きい。解析結果は、このような初期温度による加振開始時のループ形状の違い、および繰返しによる履歴特性変化の違いを表現することができている。図 3.3.2-17(f)、(g)は荷重履歴の異なるケースの実験結果と解析結果の荷重変形関係を示している。(1.2.2)に示す、除荷点のせん断ひずみを用いた履歴則を適用することで、(g)に示す、せん断ひずみが $\gamma=250\%$ から漸減していくケースの荷重変形関係についても、解析結果は実験結果を良く追跡することができている。ただし、高ひずみ域でのハードニング挙動については、(c)に示す限界 3B のケースと同様に、バイリニア型では表現できない。図 3.3.2-17(h)は、地震応答波加振の実験結果と解析結果の荷重変形関係であり、主要動部分の 4 回連続入力の結果を全て重ねて描いている。実験結果、解析結果とも繰返しによる特性変化はわずかであり、4 回連続入力の 1 回目～4 回目までの履歴ループ形状に大きな差は生じていない。

図 3.3.2-18 に、実験結果と解析結果の累積履歴吸収エネルギーの時刻歴を比較して示す。(a)に示す限界 1B、限界 2B、限界 3B のケースにおいて、限界 1B の解析結果は実験結果よりも履歴吸収エネルギーを大きく算出している。これは、図 3.3.2-17(a)で示したように、解析結果が最大荷重を高めに評価しているためと考えられる。図 3.3.2-18 (a)に示す限界 2B、3B、(b)に示す初期 0 $^{\circ}$ C、初期 30 $^{\circ}$ C のケースについては、解析結果と実験結果の履歴吸収エネルギーは良く対応していることから、せん断ひずみ 50%以下において、解析結果は最大荷重と履歴吸収エネルギーを大きく評価する傾向がある。(c)に示す漸増、漸減のケースにおいて、実験結果に見られる加振振幅の変化による履歴吸収エネルギー推移の変化を、解析結果は良く追跡している。(d)に示す地震応答波の結果において、実験結果は変形が大きい時のみエネルギーが増加する断続的なエネルギー吸収挙動を示しており、解析結果はやや値が大きい断続的なエネルギー吸収挙動を良く追跡している。

図 3.3.2-19 に、実験結果と解析結果の試験体温度の時刻歴推移を示す。(a)に示す限界 1B、限界 2B のケースにおいては、解析結果は試験体の最高温度を実験結果より 6 $^{\circ}$ C程度高く評価しているが、(a)に示す限界 3B、(b)に示す初期 0 $^{\circ}$ C、初期 30 $^{\circ}$ C の解析結果は加振中の温度上昇から、

加振終了後の温度低下まで実験結果の試験体温度の推移を良好に追跡することができている。(c)に示す漸増、漸減の結果において、実験では振幅の変化時にわずかにインターバルをはさんだため、実験結果と解析結果の時間推移がややずれているが、解析結果は実験結果に見られる加振振幅の変化による温度推移の変化を良好に追跡している。(d)に示す地震応答波加振による試験体温度は、正弦波による多数回連続加振に比べて温度変化が小さく、約 21°C から 27°C へと 6°C 程度の温度上昇であった。解析結果は、このランダム波による温度変化についても良好に再現することができている。

図 3.3.2-20 に、実験結果と解析結果の多数回繰返し加振による等価剛性および等価減衰定数の低下率を示す。実験結果の等価剛性および等価減衰定数の低下率は、限界 1B($\gamma=50\%$)、限界 2B($\gamma=100\%$)、限界 3B($\gamma=200\%$)の実験結果の 3 サイクル目の値を、せん断ひずみ 50%、100%、200%の基準値として、各実験ケースのせん断ひずみに応じた低下率を求めている。漸増および漸減の $\gamma=250\%$ での加振時の値については、限界 3B($\gamma=200\%$)の値を基準値とした。地震応答波の実験結果については、最大変形時の荷重と変形から等価剛性を求めて、表 3.3.2-3 の設計式より、最大変形時のせん断ひずみ $\gamma=130\%$ における等価剛性の設計値を求め、その値を基準値として実験結果の等価剛性の値を除して低下率を求めた。図 3.3.2-20 (a)に示す限界 1B、限界 2B、限界 3B において、限界 1B の解析結果は等価剛性、等価減衰定数とも、実験結果の低下率と良く対応している。限界 2B の解析結果は、等価剛性は実験結果との対応がいいが、等価減衰定数については、実験結果よりも大きな低下を示している。限界 3B の解析結果は、等価剛性、等価減衰定数とも、実験結果よりも大きな低下を示している。(b)に示す初期 0°C、初期 30°C についても、解析結果は実験結果よりもやや低下率が大きい。限界 3B、初期 0°C、初期 30°C において、解析結果の復元力特性値の低下率が実験結果よりも大きいのは、図 3.3.2-12 に示す復元力特性値の試験体温度による評価式において、60°C 以上の高温域における限界 3B の実験結果と回帰式の間はずれが原因と考えられ、試験体温度が 90°C 程度の高温になる実験ケースで、実験結果と解析結果に差が生じていると考えられる。(c)に示す漸増、漸減の結果においては、等価剛性、等価減衰定数とも、最初の加振振幅時は、解析結果と実験結果は良く対応しているが、加振振幅が変化する際に、実験結果と解析結果に差が生じている。これは、漸増加振時において振幅が大きくなった時に、一度等価剛性が復帰する挙動を解析では表現できないことや、実験時に加振振幅が変わる際にわずかにインターバルをとったことによる温度低下等が原因と考えられる。(d)に示す地震応答波加振の結果においては、実験結果は最大変形時のみの値であるが、解析結果の等価剛性低下率を示す線上におおよそ乗っている。ただし、4 回目の加振でも低下率は 0.9 程度と特性変化は小さい。

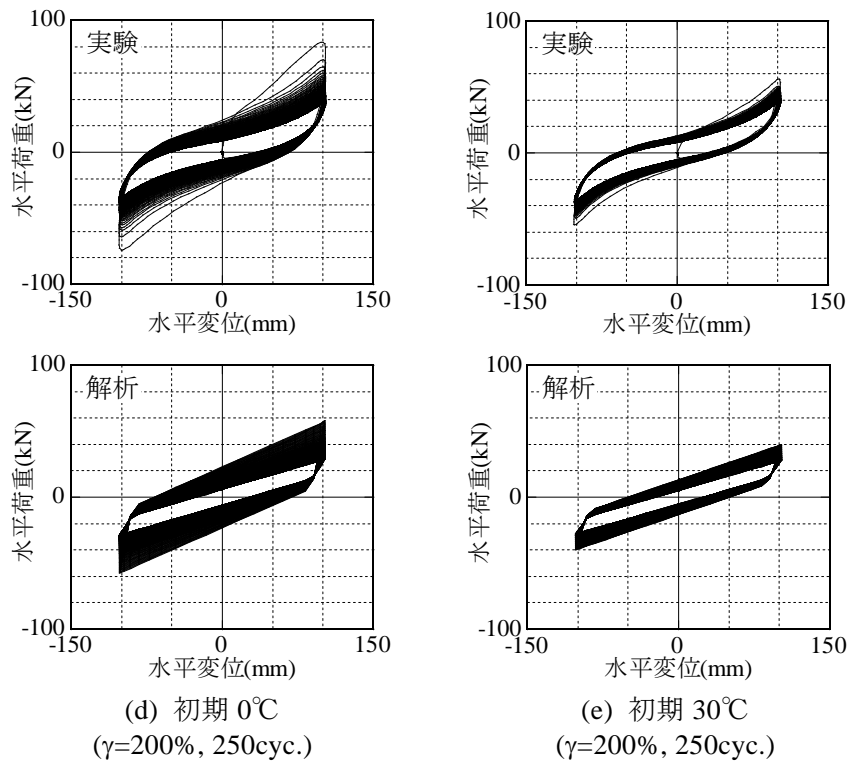
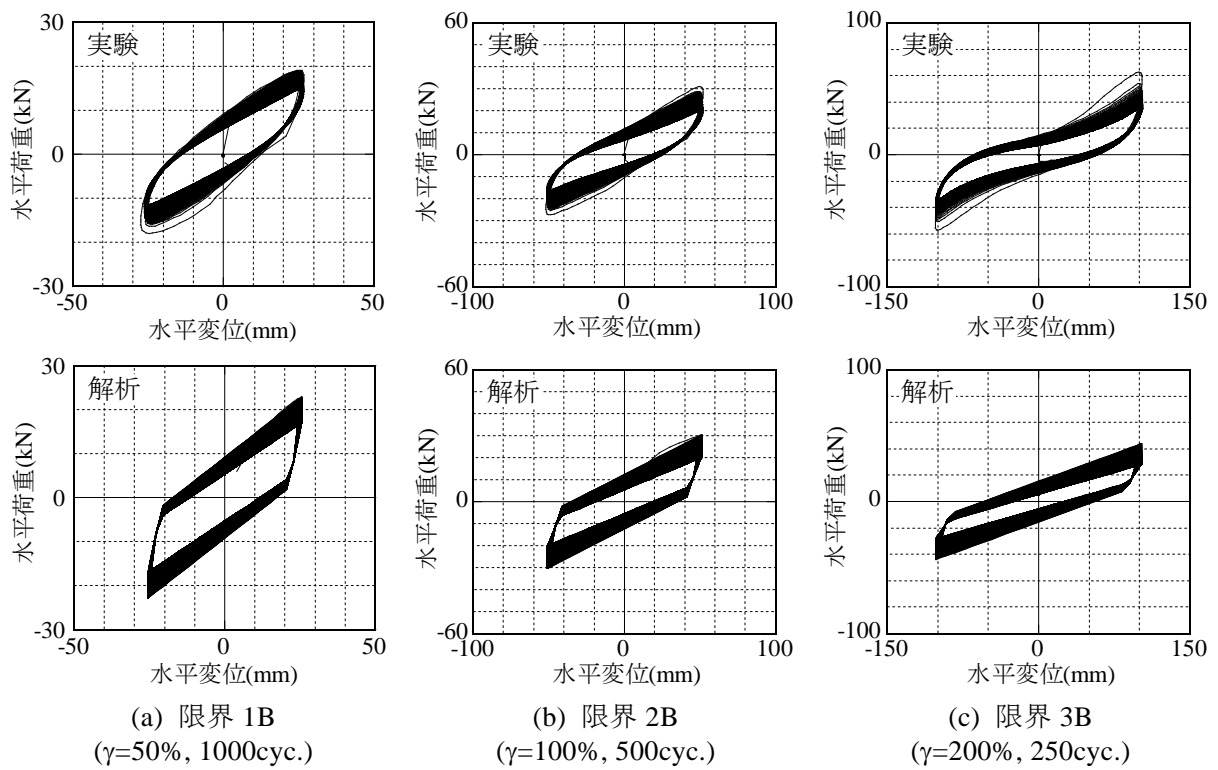


図 3.3.2-17 実験結果と解析結果の荷重変形関係の比較

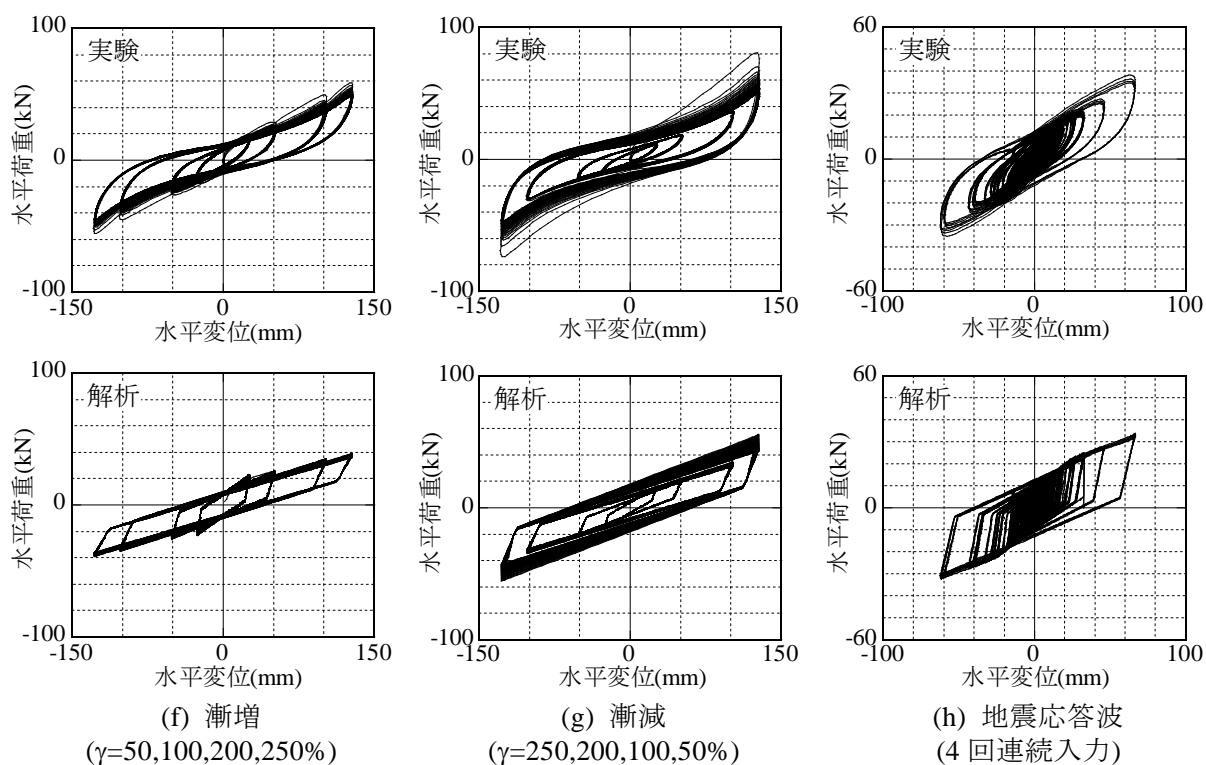


図 3.3.2-17 実験結果と解析結果の荷重変形関係の比較

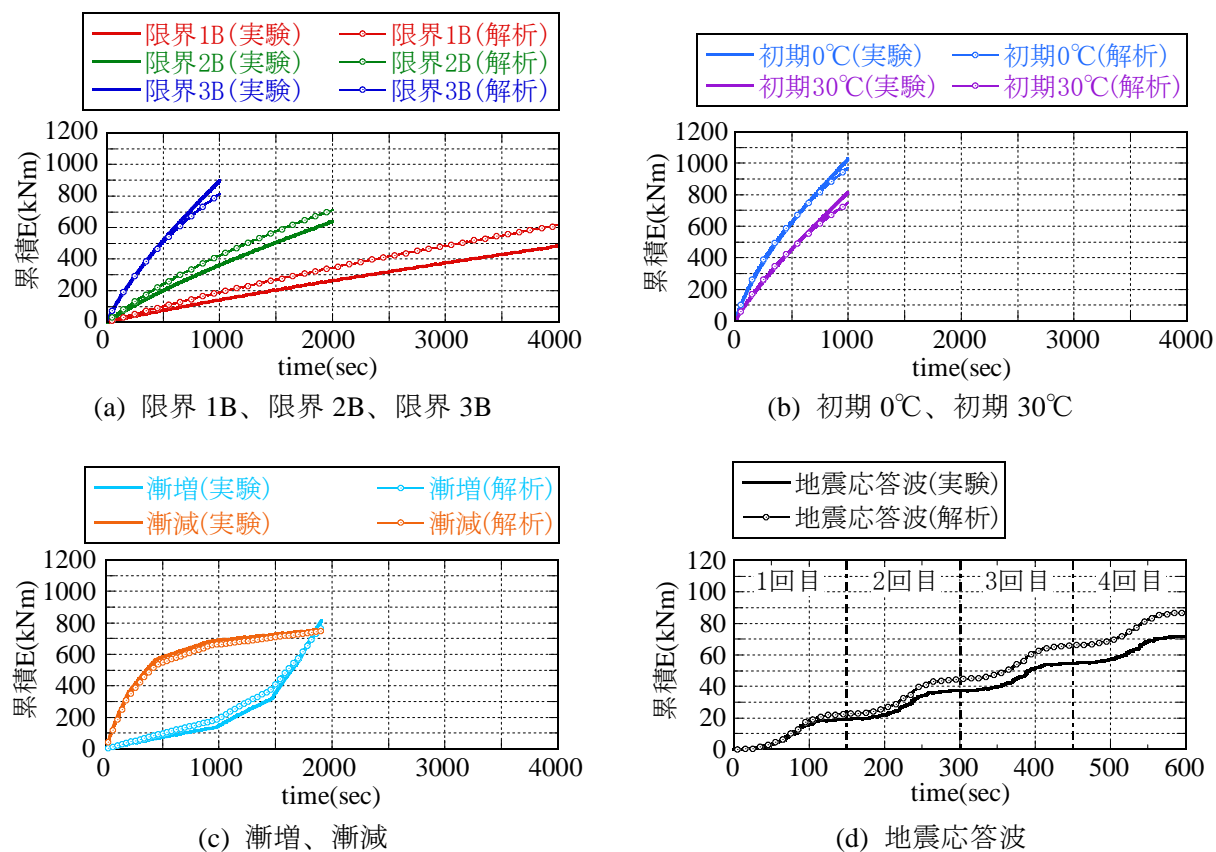
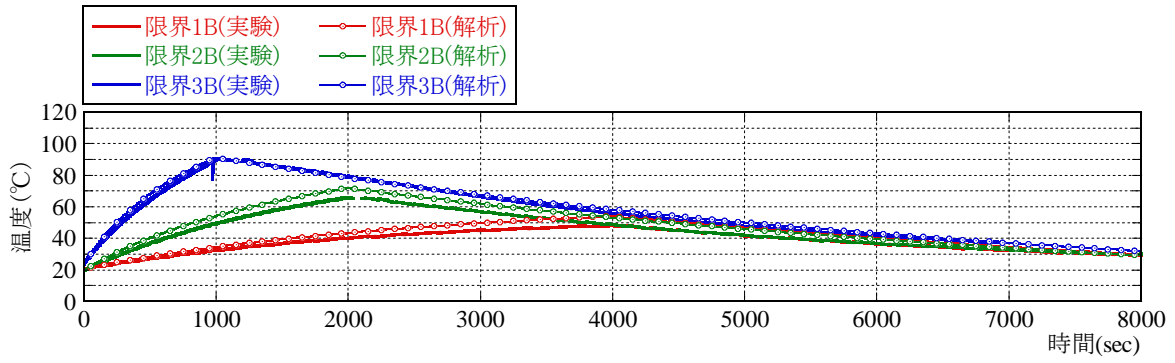
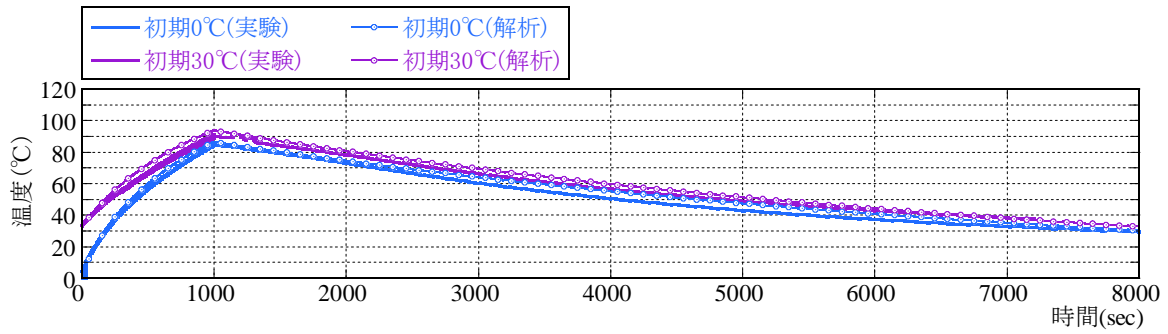


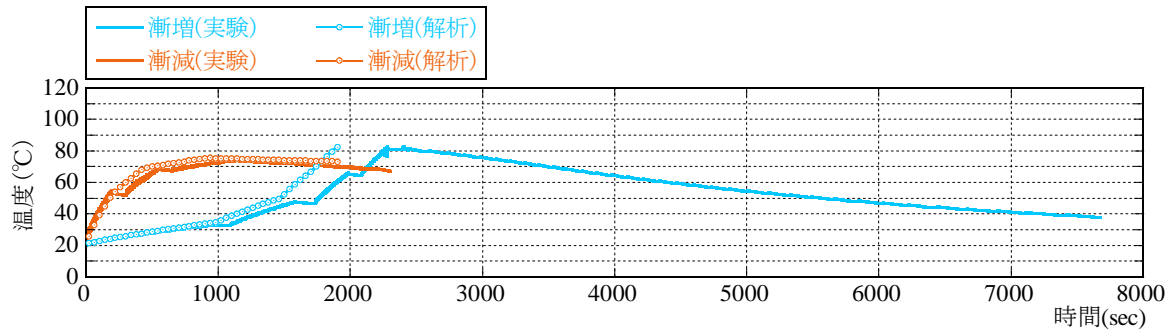
図 3.3.2-18 実験結果と解析結果の累積履歴吸収エネルギーの比較



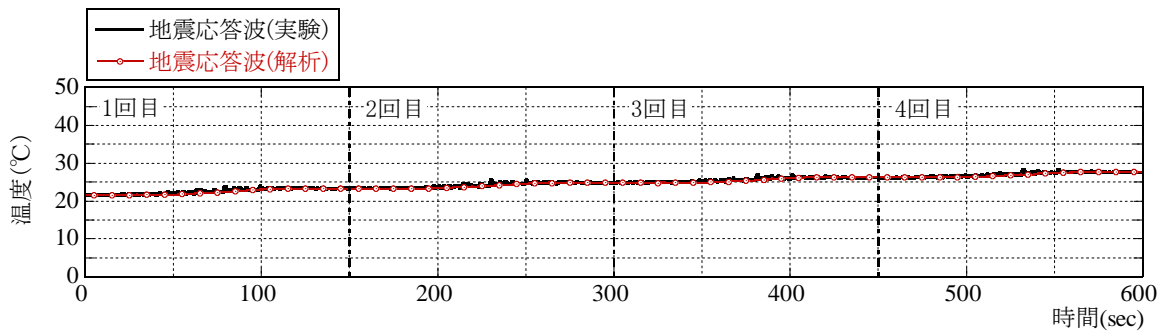
(a) 限界 1B、限界 2B、限界 3B の温度時間推移の実験結果と解析結果の比較



(b) 初期 0°C、初期 30°C の温度時間推移の実験結果と解析結果の比較

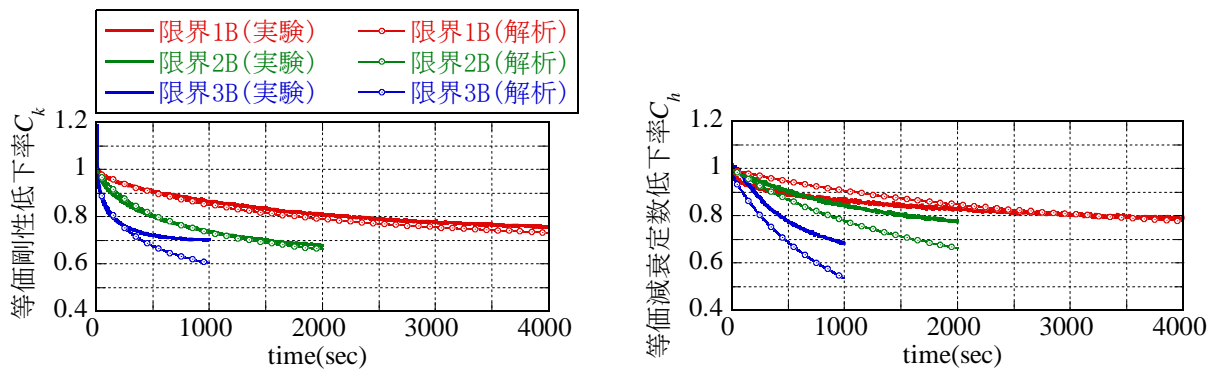


(c) 漸増、漸減の温度時間推移の実験結果と解析結果の比較

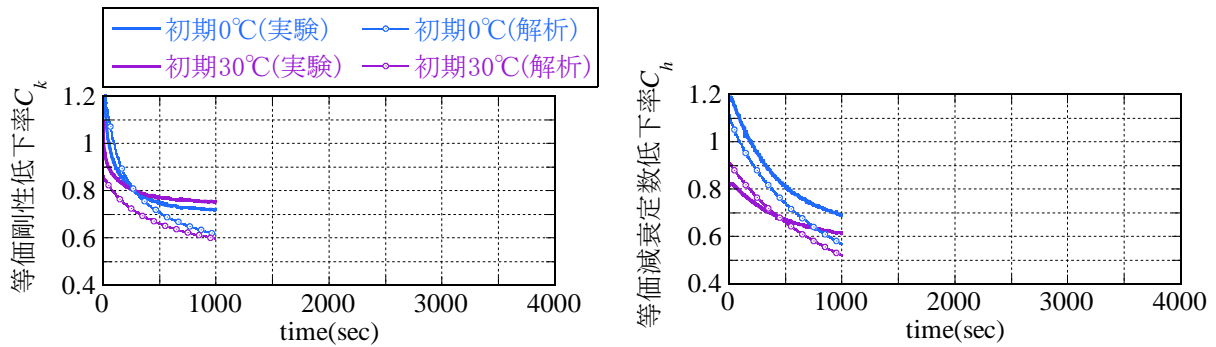


(d) 地震応答波の温度時間推移の実験結果と解析結果の比較

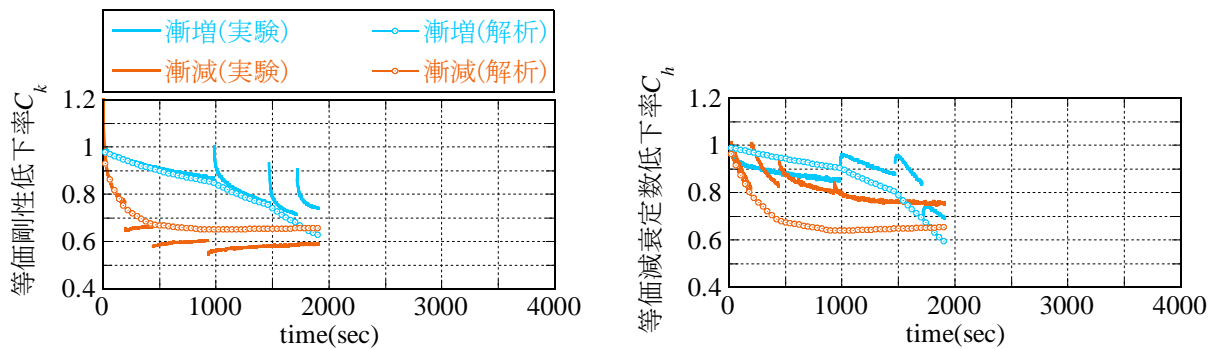
図 3.3.2-19 実験結果と解析結果の温度の時間推移比較



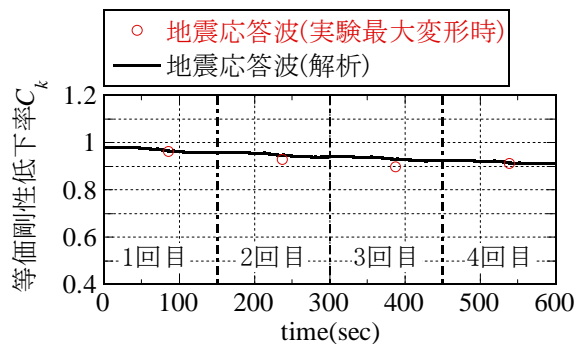
(a) 限界 1B、限界 2B、限界 3B の等価剛性・等価減衰定数の低下率推移



(b) 初期 0°C、初期 30°C の等価剛性・等価減衰定数の低下率推移



(c) 漸増、漸減の等価剛性・等価減衰定数の低下率推移



(d) 地震応答波の等価剛性の低下率推移

図 3.3.2-20 実験結果と解析結果の等価剛性・等価減衰定数の推移比較

(2) 解析条件

建物応答評価に用いる解析モデルは、高減衰ゴム系積層ゴムのみで構成される免震層を有する1質点剛体モデルとする。図 3.3.2-21 に、解析モデルの概念図を示す。免震層は、せん断ひずみ 200%時の等価剛性が約 4.0 秒となるよう設定する。表 3.3.2-5 に、解析モデルの諸元を示す。高減衰ゴム系積層ゴムの特性としては、繰返し特性を考慮しない復元力特性と、繰返し特性を考慮した復元力特性を設定し、繰返し特性の考慮の有無が応答値に影響を与えるか検討する。繰返し特性を考慮する場合、考慮しない場合とも修正バイリニアの履歴則は、(1.2.2)に示す除荷点のせん断ひずみを用いた履歴則とし、繰返し特性を考慮しない復元力モデルは(1.2.3)に示す温度による復元力特性値の変化を適用しないモデル、繰返し特性を考慮する復元力モデルは(1.2.3)に示す温度による復元力特性値の変化を適用したモデルとする。温度による特性変化を考慮するケースにおいて、初期温度は全て 20℃とする。入力地震動は、表 3.3.2-6 に示す 4 波を、1.0 倍、1.25 倍、1.5 倍と係数倍して入力する。

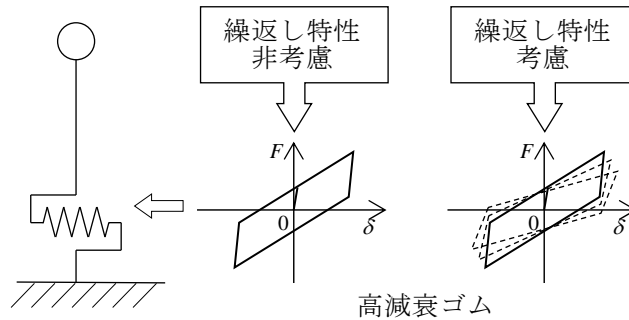


図 3.3.2-21 解析モデルイメージ

表 3.3.2-5 解析モデル諸元

想定建物	RC 造、10 階建て、基礎免震
上部構造重量	46,000kN
積層ゴム台数	12 台
積層ゴム直径(内径)	700mm (15mm)
ゴム層総厚	202.1mm
積層ゴム面圧	10.0N/mm ²
$\gamma=100\%$ 時等価周期	3.6 秒
$\gamma=100\%$ 時等価周期	4.1 秒

表 3.3.2-6 入力地震動（加速度、速度、変位は最大値）

地震波	加速度 (cm/s ²)	速度 (cm/s)	変位 (cm)	継続時間 (s)
OSKH02(此花)	98.49	38.07	31.43	739.82
AIC003(津島)	199.4	26.78	21.62	739.82
SZO024(浜松)	576.9	40.08	21.13	739.82
KGIN(新宿)	42.11	21.60	26.29	739.82

(3) 解析結果

表 3.3.2-7 に、解析結果の最大応答値一覧を示す。応答加速度は、1.0 倍入力で 36~76Gal、1.5 倍入力で 50~129Gal 程度の応答となっている。免震層変位は、OSKH02 入力のケースが最も大きく、1.0 倍入力で 308mm($\gamma=152\%$)、1.5 倍入力で 549mm($\gamma=272\%$)と大きな変形を示している。KGIN 入力のケースでは免震層変位は小さく、1.0 倍入力で 64mm($\gamma=32\%$)、1.5 倍入力で 123mm($\gamma=61\%$)程度である。繰返し特性を考慮しない解析結果(非考慮)と、繰返し特性を考慮した解析結果(考慮)の最大応答加速度に差はなく、ほぼ同じ値示している。免震層変位についても、繰返し特性を考慮した方がわずかに大きな変位を示すが、その差は1~5%と非常に小さい。

表 3.3.2-8 に、解析結果の累積値および積層ゴムの最高温度の一覧を示す。累積エネルギー換算速度 V_E は、総入力エネルギー(加振終了時の累積エネルギー)の 95%の値で算出している。累積変形量は、累積エネルギーが総入力エネルギーの 95%に達した時点の値としている。解析結果の累積変形量は、OSKH02、AIC003、SZO024 の 1.0 倍入力時は 12~13m 程度、1.5 倍入力時は 18~23m 程度である。KGIN 入力時の累積変形量は、1.0 倍入力時で 5m 程度、1.5 倍入力時で 9m 程度と他の 3 波に比較して小さい。累積エネルギー換算速度は、OSKH02、AIC003、SZO024 の 1.0 倍入力時で 2.0m/sec 弱、KGIN1.0 倍入力時で 0.7m/sec 程度である。OSKH02 の 1.5 倍入力時では、累積エネルギー換算速度は 3.0m/sec を超える。繰返し特性を考慮しない解析結果(非考慮)と、繰返し特性を考慮した解析結果(考慮)の累積値に大きな差はなく、ほぼ同じ値となっている。累積変形量は、繰返し特性を考慮した方がわずかに大きな値を示すが、その差は 1~5%程度である。積層ゴムの最高温度は、最も累積吸収エネルギーの大きい OSKH02 の 1.5 倍入力時でも 25.9℃と、初期値の 20℃から 6℃程度の上昇にとどまっている。KGIN 入力のケースでは、1.5 倍入力時でも積層ゴムの温度は初期値の 20℃からほとんど上昇していない。従って、繰返し特性を考慮した場合でも、復元力特性値はほとんど変化せず、繰返し特性考慮の有無による応答の差が現れない結果となっている。

図 3.3.2-22~3.3.2-25 に、繰返し特性を考慮しない解析結果と、繰返し特性を考慮した解析結果の免震層のせん断応力度-ひずみ関係を比較して示す。繰返し特性を考慮した解析においても、積層ゴムの温度上昇がわずかであり、復元力特性値の変化がほとんど生じていないため、繰返し特性考慮・非考慮の履歴ループともほぼ同様であり、明確な差は現れていない。

図 3.3.2-26~3.3.2-29 に、解析結果の応答加速度、免震層変位、累積変形量、累積エネルギー換算速度、積層ゴム温度、等価剛性低下率 C_K 、等価減衰定数低下率 C_H の時刻歴推移を示す。応答加速度、免震層変位、累積変形量、累積エネルギー換算速度については、繰返し特性非考慮と繰返し特性考慮の解析結果を比較して示す。積層ゴム温度、等価剛性低下率 C_K 、等価減衰定数低下率 C_H については、繰返し特性考慮の解析結果のみを示す。入力地震動 4 波の継続時間は 700 秒以上あるが、応答変位波形において変形の大きな時間は、OSKH02、AIC003、SZO024 入力時で 100~150 秒間である。KGIN 入力時の応答変位波形では、主要な揺れが 3 つに分かれているのが明確に見てとれ、変形の大きな時間は 200 秒間程度である。累積エネルギー換算速度、および積層ゴム温度の時刻歴より、エネルギーの吸収は変形の大きな主要動部分のみで行われ、これにより積層ゴム温度が上昇している。主要動終了後はエネルギー吸収がほとんどなく、積層ゴム温度は徐々に低下している。また、等価剛性低下率 C_K 、等価減衰定数低下率 C_H の時刻歴推移より、等価剛性および等価減衰定数は、積層ゴム温度の上昇に伴って低下し、主要動が終了し積層ゴム温度が低下し始めると同時に回復し始めている。ただし、最も温度上昇

が大きかった OSKH02 の 1.5 倍入力時(図 3.3.2-26(b))においても、 C_K および C_H は 0.9 を下回ることはなく、復元力特性の大きな変化は生じなかった。従って、入力地震動 4 波の 1.0~1.5 倍入力のどのケースにおいても、繰返し特性考慮の有無による応答の違いはほとんど生じなかった。図 3.3.2-26(b)に示す、OSKH02 の 1.5 倍入力時に、140 秒付近で最大変形を示した後の免震層変位が、繰返し特性を考慮した解析結果の方がわずかに大きくなっているのが見てとれる程度である。

以上より、本検討で用いた 4 つの入力地震動に対しては、1.5 倍まで係数倍した入力においても、積層ゴムの温度上昇は最大で 6°C 程度、高減衰ゴム系積層ゴムの繰返しによる特性変化は 1 割以下に留まり、建物の応答にはほとんど影響を与えないことが確認された。ただし、今回検討に使用した高減衰ゴム系積層ゴムの解析モデルは、直径 250mm の縮小試験体の実験結果を基に作成したものであり、実大サイズにおいてはゴム体積が大きくなるために放熱しにくい等、放熱特性が変わる可能性がある。その場合、今回検討結果よりも繰返しによる特性変化が大きくなり、建物応答への影響が現れてくることが考えられる。

表 3.3.2-7 応答解析結果の最大応答値一覧（入力加速度、各応答値は最大値）

入力			応答					
地震波	倍率	加速度 (Gal)	質点加速度(Gal)		免震層変位(mm)		せん断力係数	
			非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮
OSKH02	1.00	98.49	76.28	76.03 (1.00)	304.64	308.31 (1.01)	0.0778	0.0776 (1.00)
	1.25	123.11	97.30	96.74 (0.99)	426.45	433.05 (1.02)	0.0993	0.0987 (0.99)
	1.50	147.73	128.83	129.30 (1.00)	540.36	548.66 (1.02)	0.1315	0.1319 (1.00)
AIC003	1.00	199.40	54.82	54.69 (1.00)	153.34	157.92 (1.03)	0.0559	0.0558 (1.00)
	1.25	249.25	68.43	68.73 (1.00)	255.56	266.95 (1.04)	0.0698	0.0701 (1.00)
	1.50	299.10	84.38	84.72 (1.00)	352.24	368.68 (1.05)	0.0861	0.0865 (1.00)
SZO024	1.00	576.78	71.69	70.79 (0.99)	276.65	279.92 (1.01)	0.0732	0.0722 (0.99)
	1.25	720.98	85.96	83.97 (0.98)	361.47	363.91 (1.01)	0.0877	0.0857 (0.98)
	1.50	865.17	100.63	98.07 (0.97)	444.24	449.92 (1.01)	0.1027	0.1001 (0.97)
KGIN	1.00	42.11	36.49	36.49 (1.00)	64.15	64.16 (1.00)	0.0372	0.0372 (1.00)
	1.25	52.64	43.70	43.68 (1.00)	88.87	88.91 (1.00)	0.0446	0.0446 (1.00)
	1.50	63.17	50.34	50.27 (1.00)	122.26	123.18 (1.01)	0.0514	0.0513 (1.00)

※()内の数字は、繰返し特性考慮の結果の非考慮の結果に対する比（考慮／非考慮）。

表 3.3.2-8 応答解析結果の累積値および最高温度一覧

入力			応答				
地震波	倍率	加速度 (Gal)	累積変形量(m)		累積 V_E (m/sec)		温度(°C)
			非考慮	考慮	非考慮	考慮	考慮
OSKH02	1.00	98.49	13.20	13.43 (1.02)	1.95	1.96 (1.01)	21.95
	1.25	123.11	18.15	18.69 (1.03)	2.54	2.56 (1.01)	23.64
	1.50	147.73	23.44	24.57 (1.05)	3.13	3.19 (1.02)	25.91
AIC003	1.00	199.40	12.02	11.89 (0.99)	1.65	1.65 (1.00)	21.30
	1.25	249.25	14.27	14.36 (1.01)	1.99	1.99 (1.00)	22.07
	1.50	299.10	17.85	18.40 (1.03)	2.36	2.38 (1.01)	23.02
SZO024	1.00	576.78	13.15	13.20 (1.00)	1.94	1.92 (0.99)	21.94
	1.25	720.98	16.78	16.79 (1.00)	2.30	2.28 (0.99)	22.83
	1.50	865.17	20.06	21.15 (1.05)	2.64	2.61 (0.99)	23.75
KGIN	1.00	42.11	5.18	5.18 (1.00)	0.74	0.74 (1.00)	20.05
	1.25	52.64	6.95	6.95 (1.00)	0.99	0.99 (1.00)	20.13
	1.50	63.17	8.71	8.74 (1.00)	1.25	1.25 (1.00)	20.35

※累積エネルギーは、加振終了時の95%の値。

※累積変形量は、累積エネルギー95%時の値。

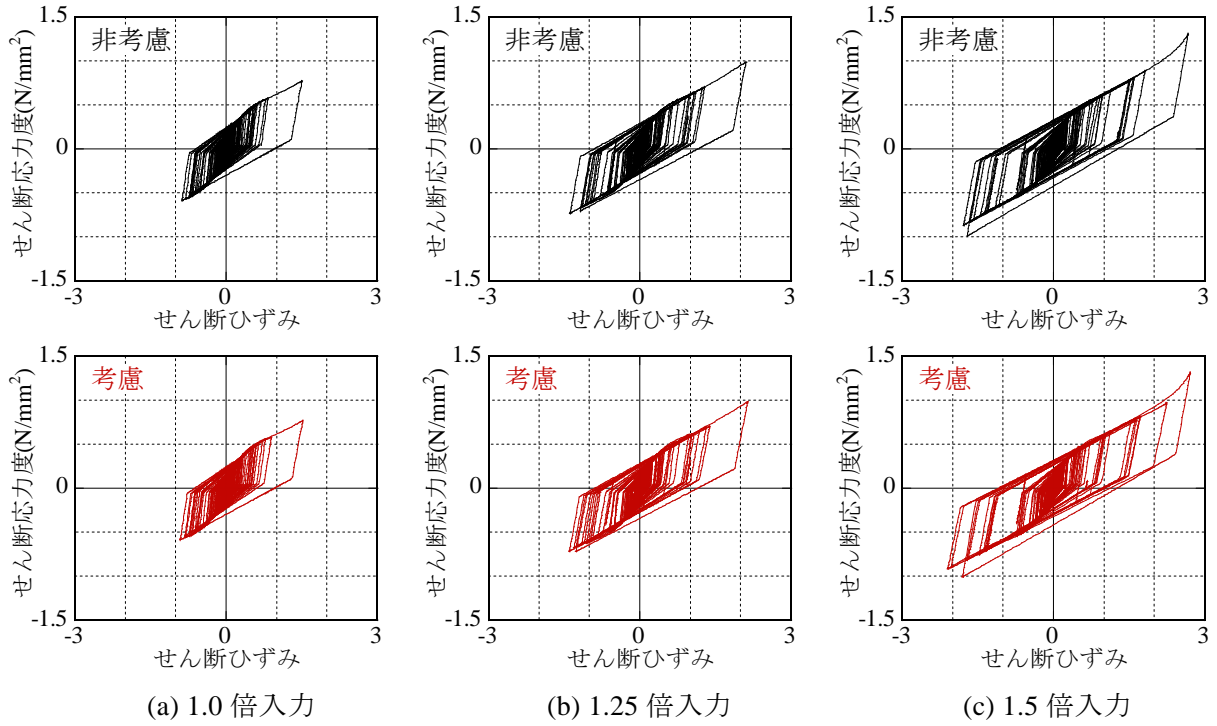


図 3.3.2-22 OSKH02 入力時の免震層せん断応力度－ひずみ関係

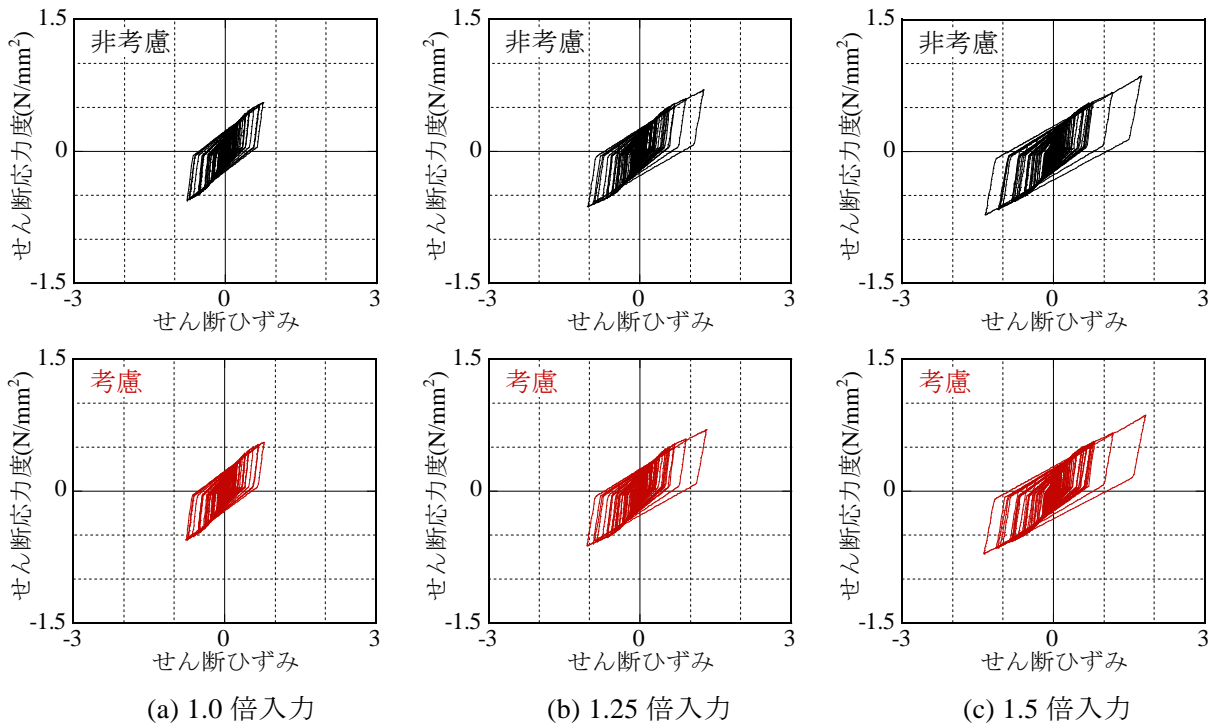


図 3.3.2-23 AIC003 入力時の免震層せん断応力度－ひずみ関係

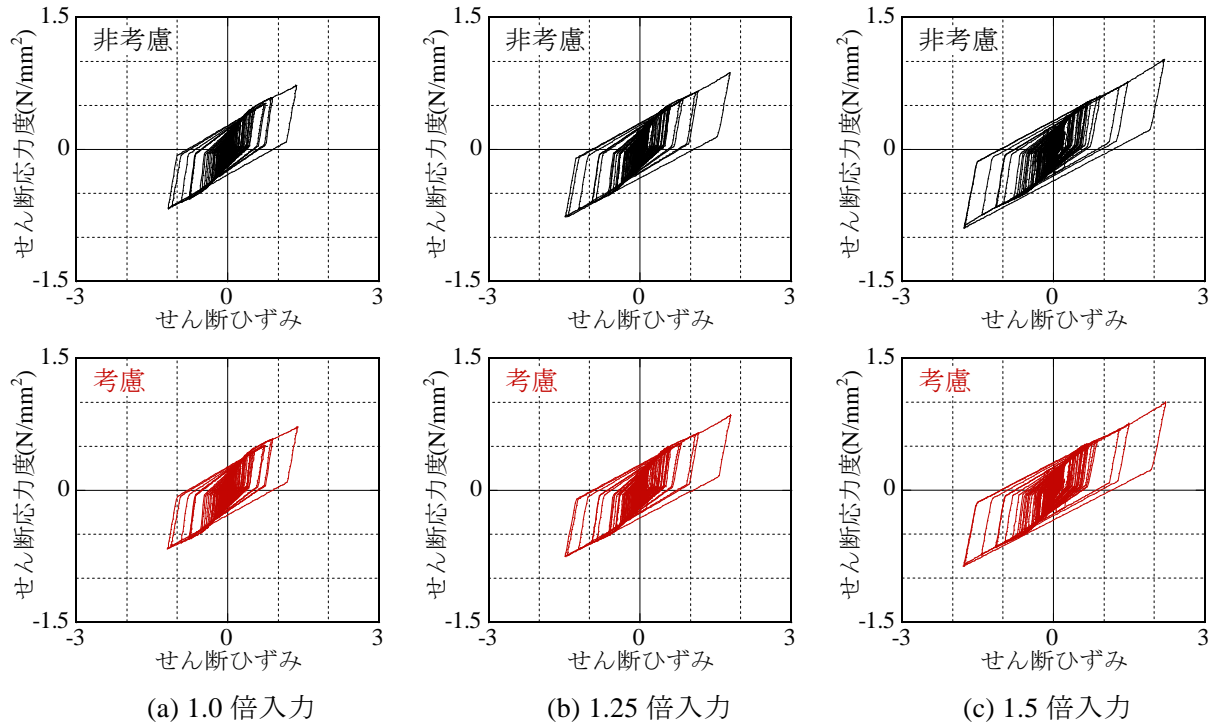


図 3.3.2-24 SZO024 入力時の免震層せん断応力度－ひずみ関係

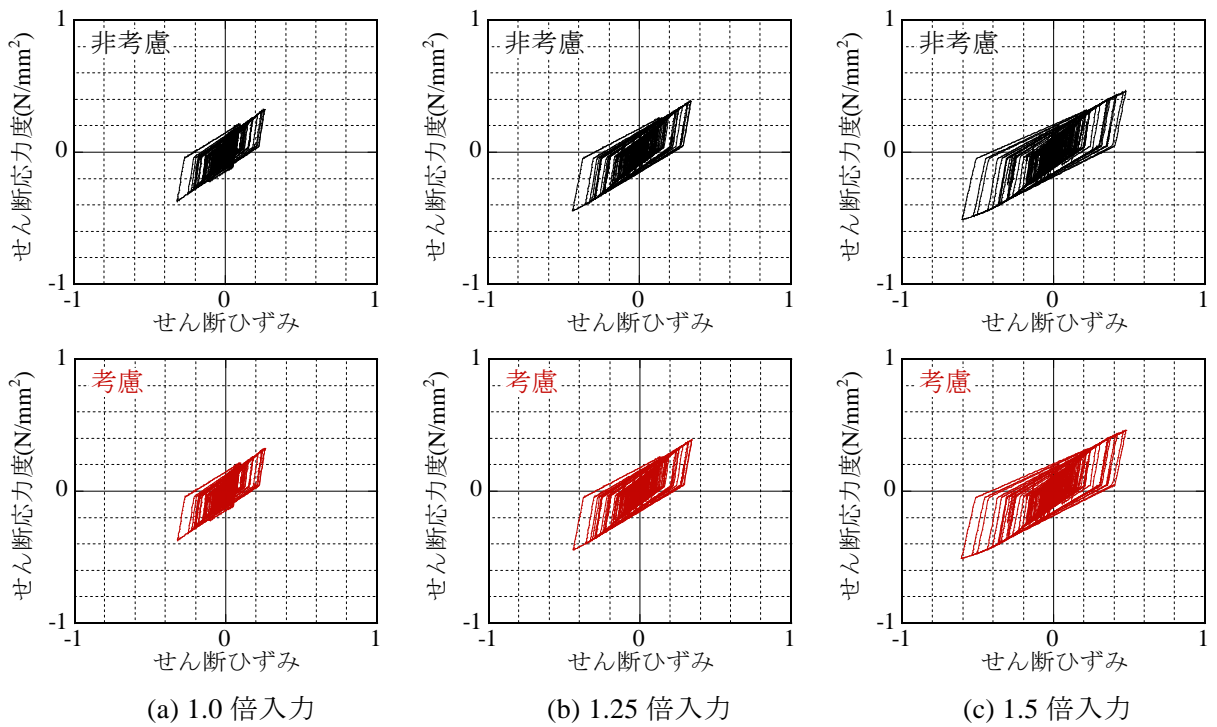
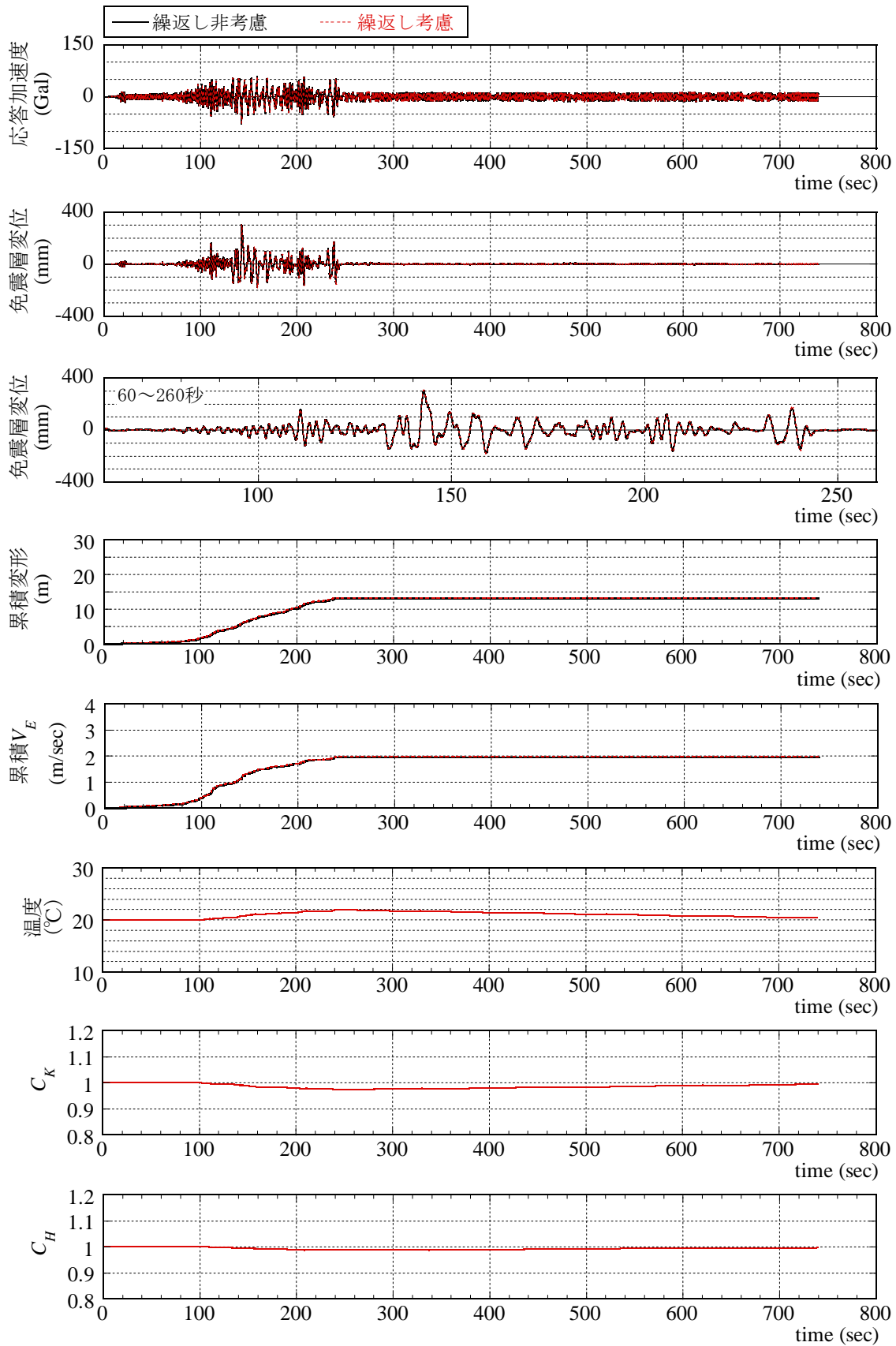
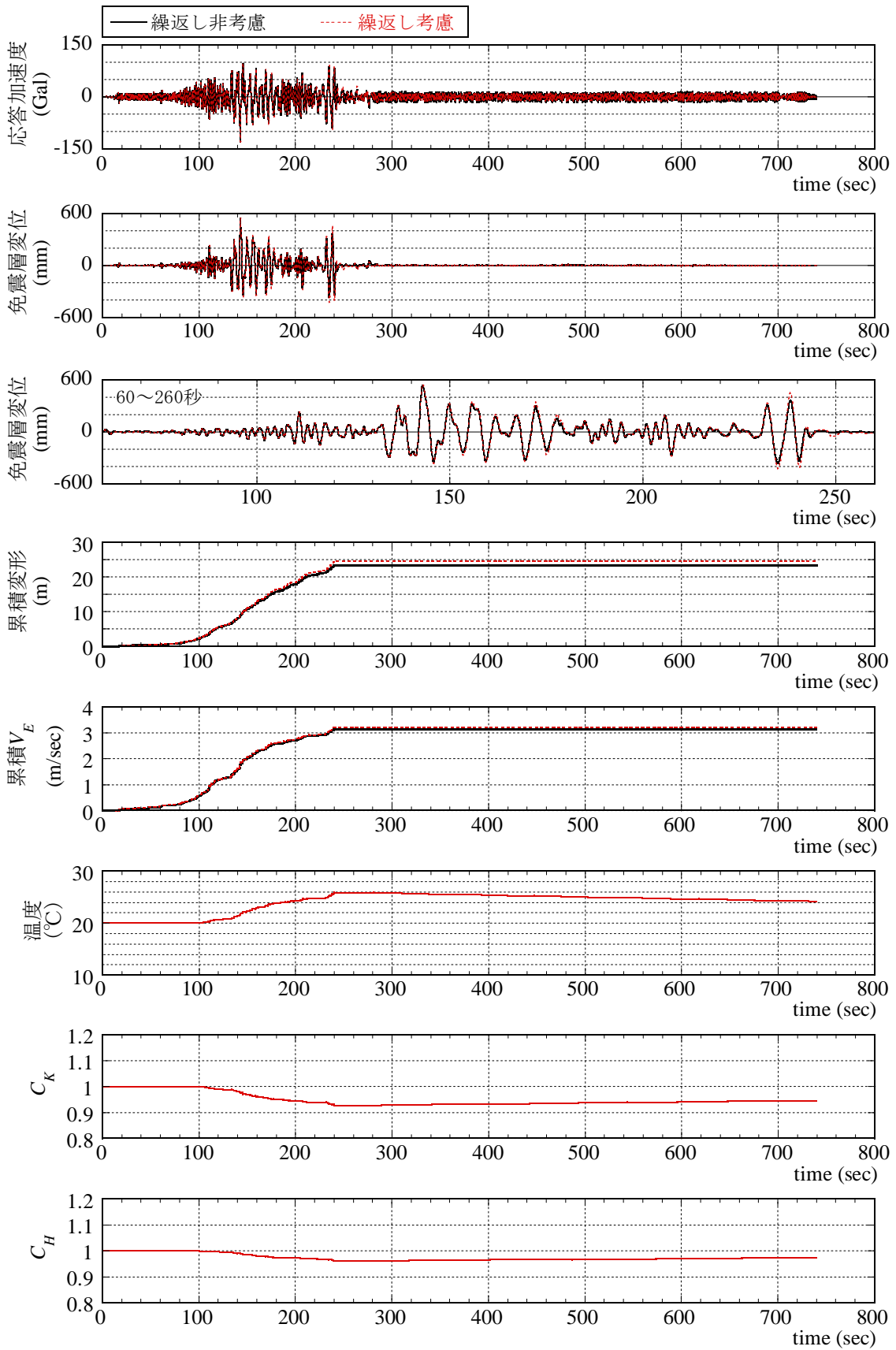


図 3.3.2-25 KGIN 入力時の免震層せん断応力度－ひずみ関係



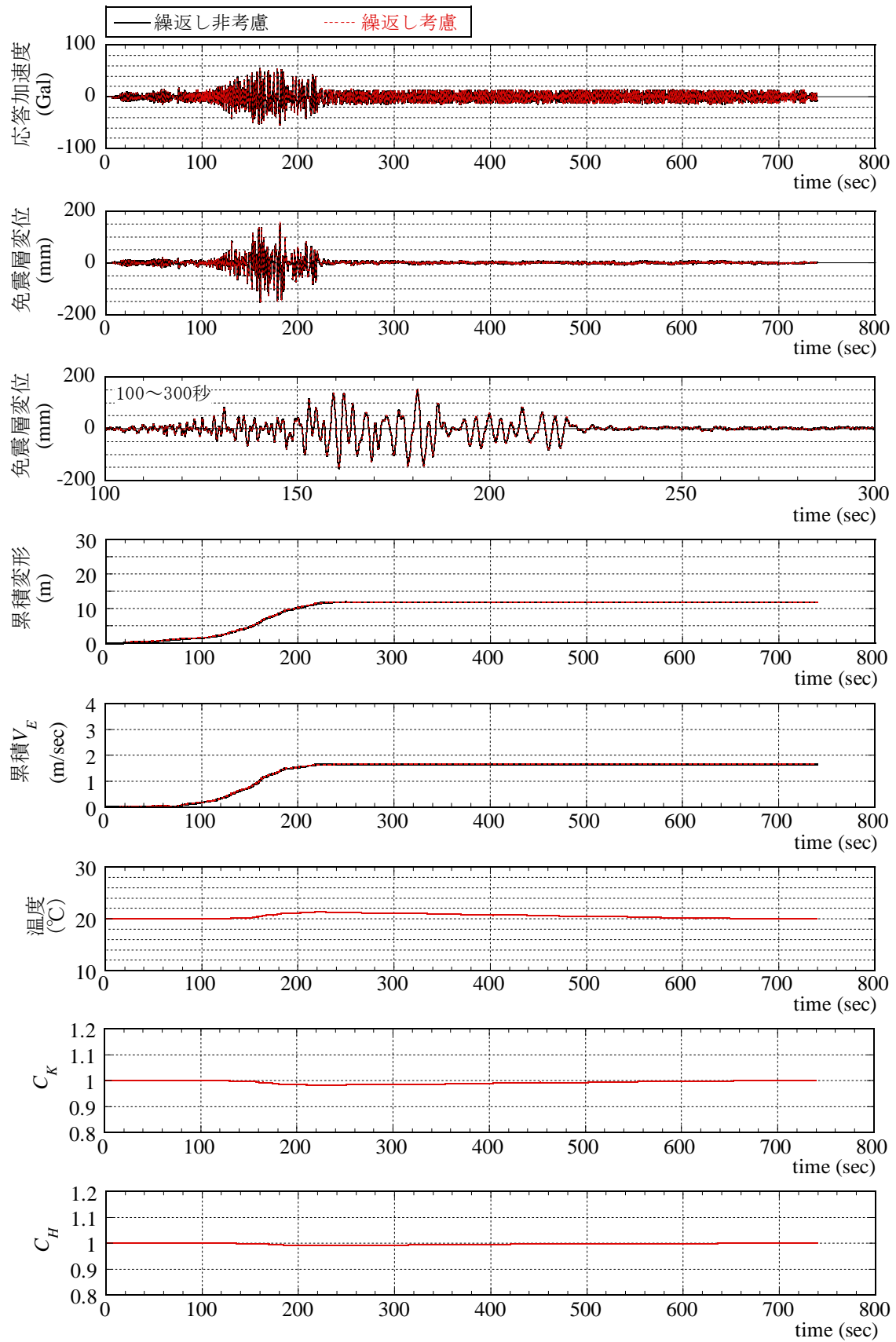
(a) 1.0 倍入力時

図 3.3.2-26 OSKH02 入力時の解析結果の時刻歴推移



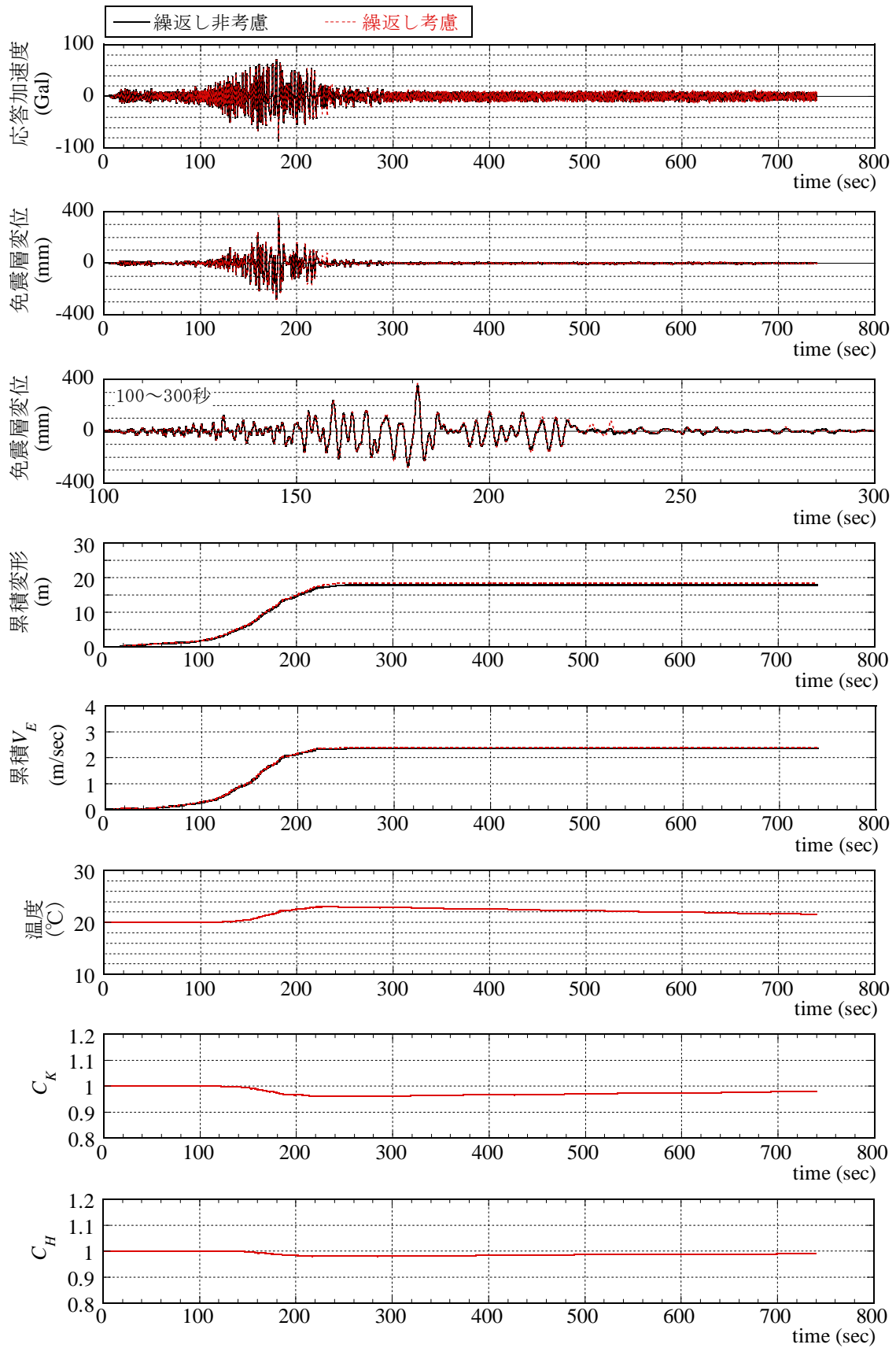
(b) 1.5 倍入力時

図 3.3.2-26 OSKH02 入力時の解析結果の時刻歴推移



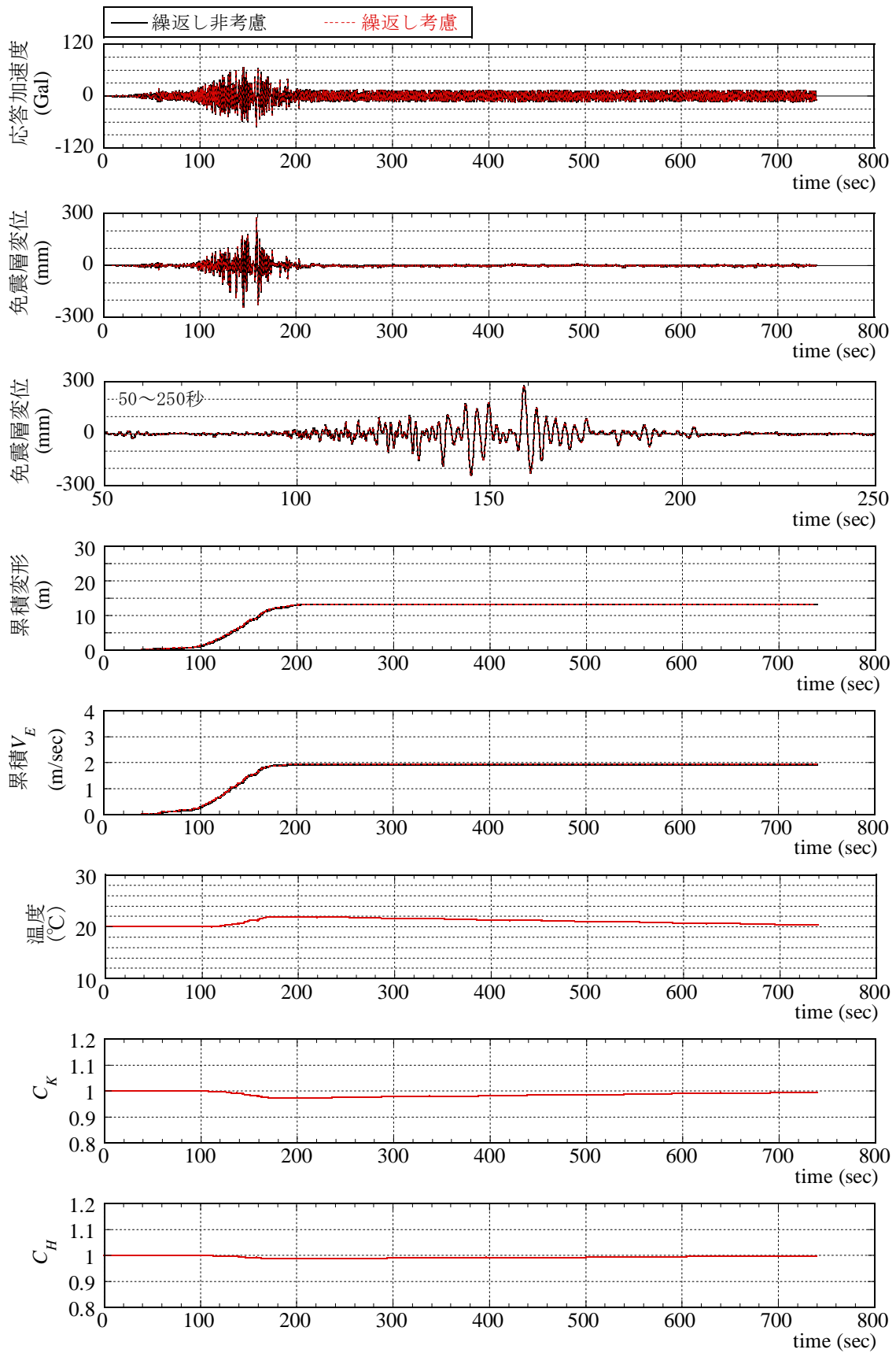
(a) 1.0 倍入力時

図 3.3.2-27 AIC003 入力時の解析結果の時刻歴推移



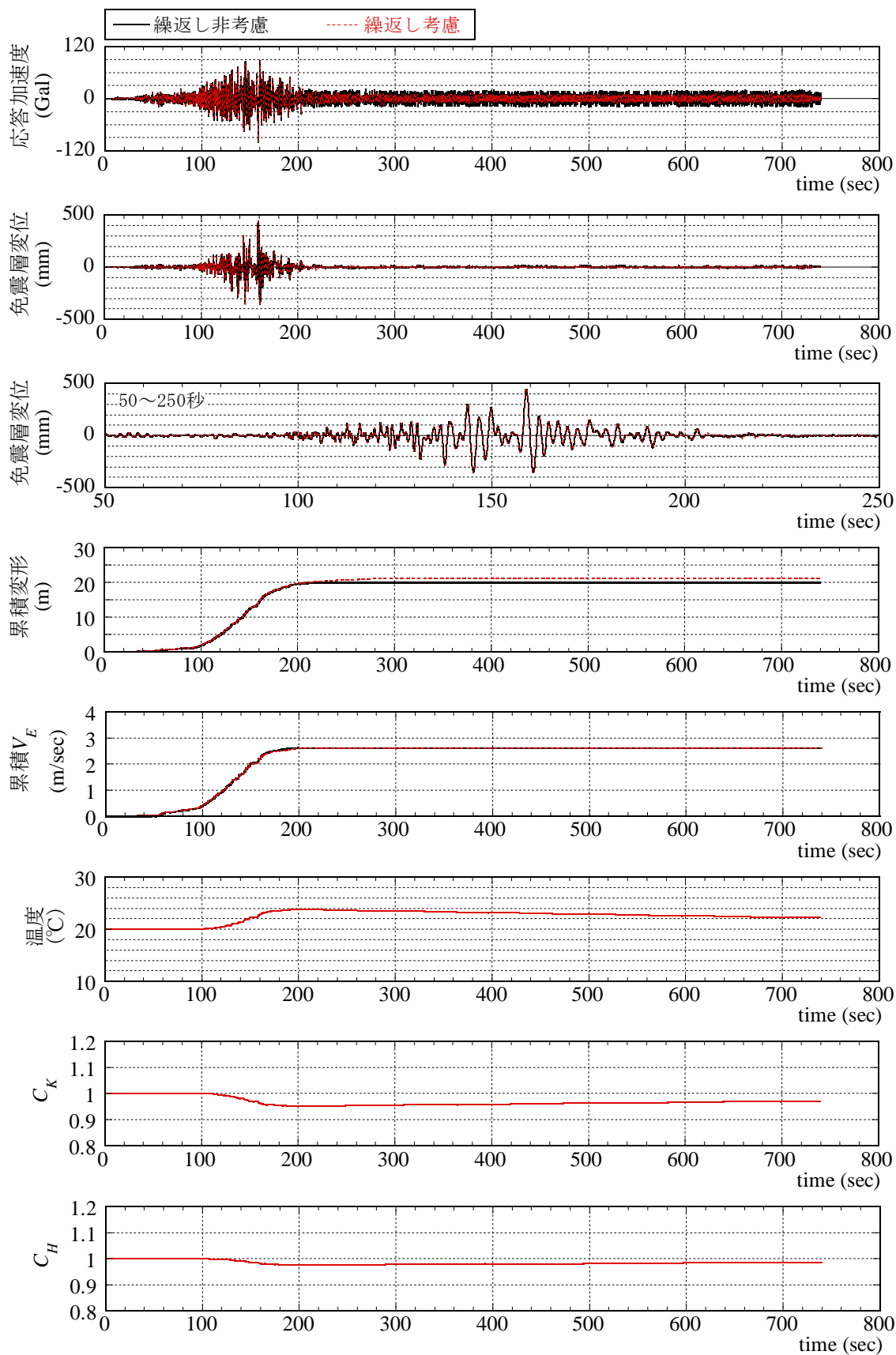
(b) 1.5 倍入力時

図 3.3.2-27 AIC003 入力時の解析結果の時刻歴推移



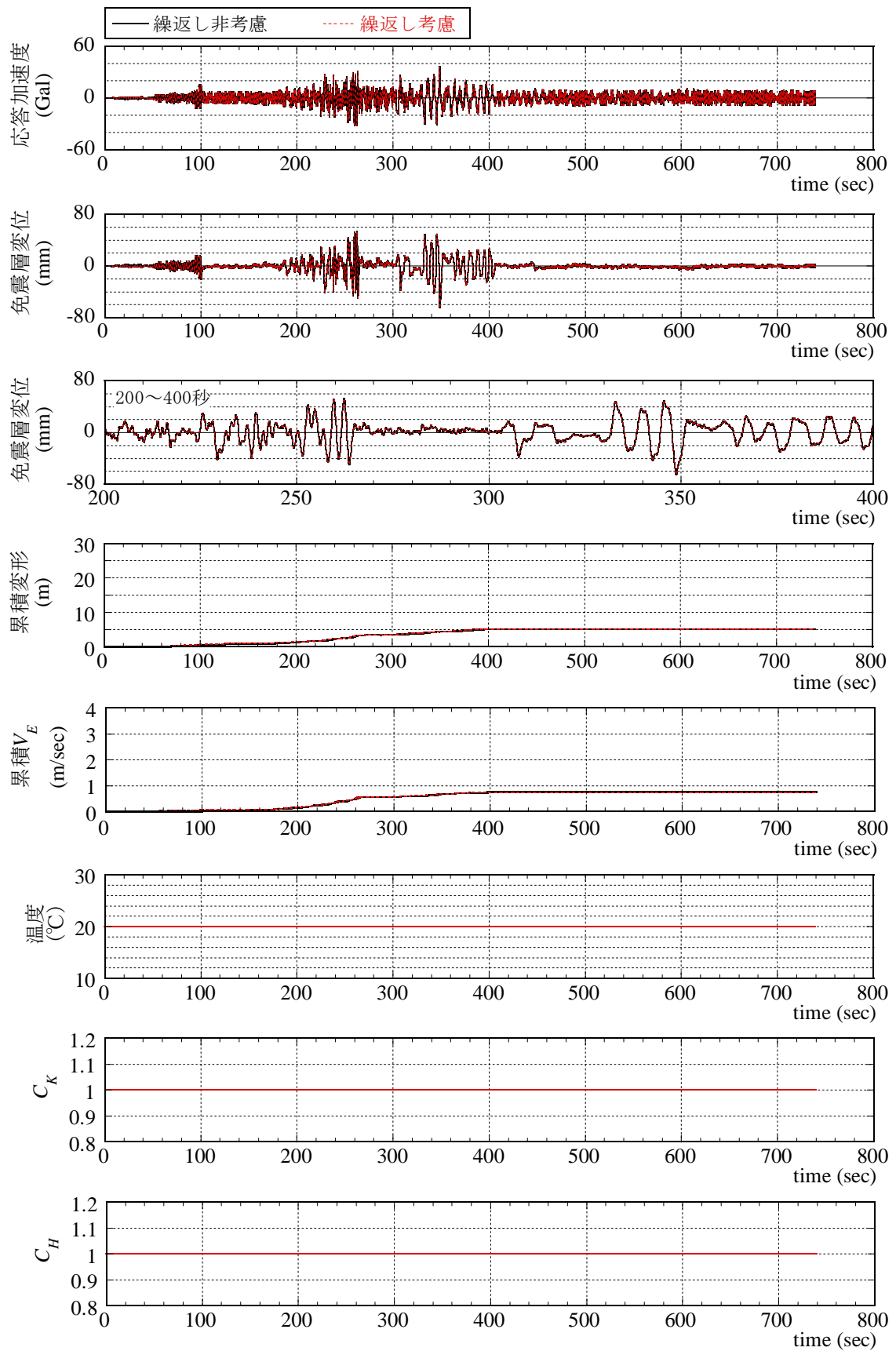
(a) 1.0倍入力時

図 3.3.2-28 SZO024 入力時の解析結果の時刻歴推移



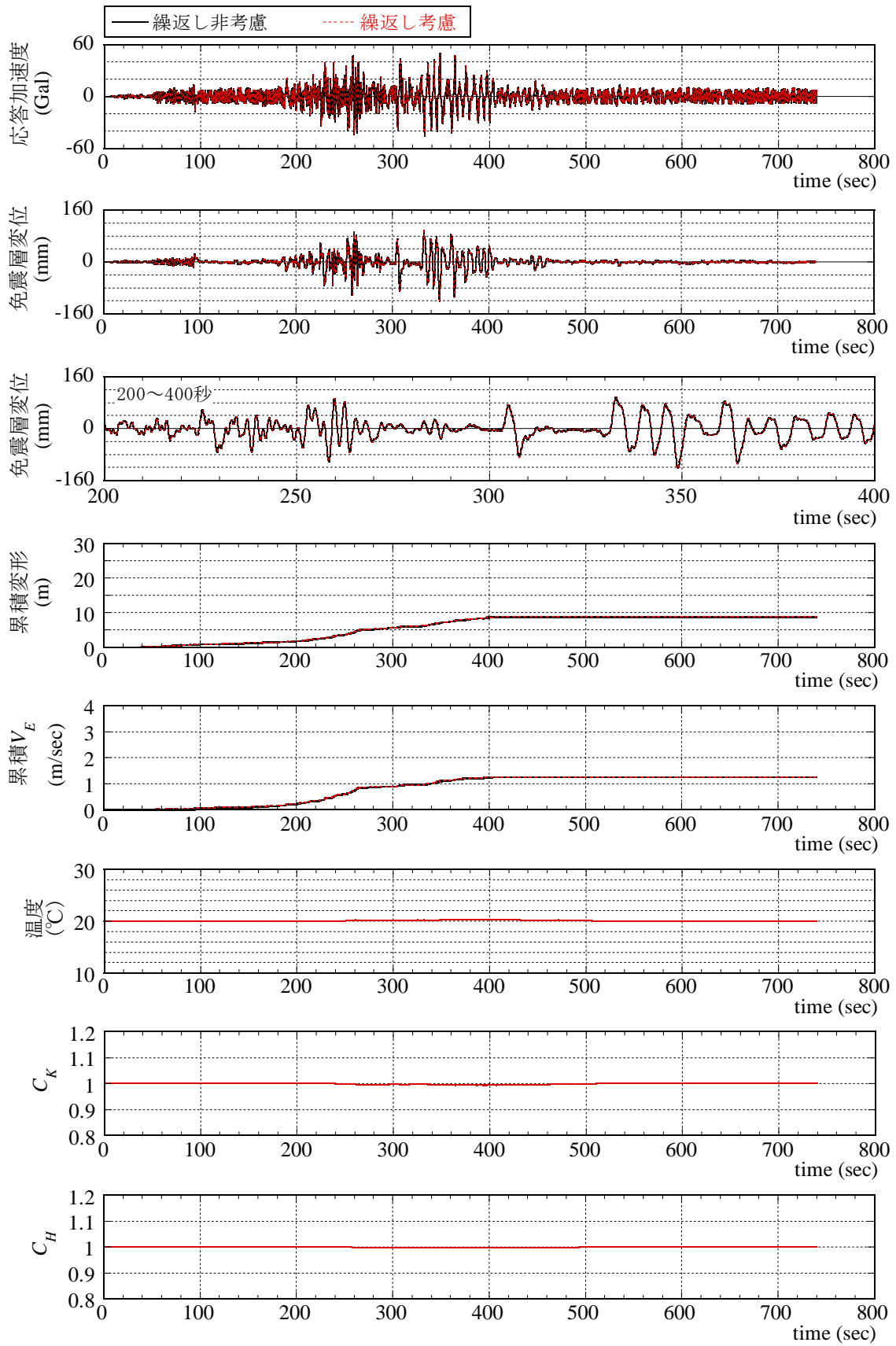
(b) 1.5 倍入力時

図 3.3.2-28 SZO024 入力時の解析結果の時刻歴推移



(a) 1.0 倍入力時

図 3.3.2-29 KGIN 入力時の解析結果の時刻歴推移



(b) 1.5 倍入力時

図 3.3.2-29 KGIN 入力時の解析結果の時刻歴推移

(4) まとめ

高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し特性が、免震建物応答に与える影響を把握するため、平成 22 年度に実施した縮小試験体の多数回繰返し実験の結果を基に、繰返し特性を考慮した復元力モデルを作成し、これを用いて 1 質点モデルによる地震応答解析を行った。

高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し特性を考慮した復元力モデルとして、積層ゴムの代表温度を評価指標として復元力特性値を変化させる解析モデルを作成した。解析における積層ゴム温度は、荷重変形関係から求められる履歴吸収エネルギーから、放熱による損失エネルギーを差し引いた有効エネルギーが温度上昇に寄与すると仮定して、有効エネルギーを積層ゴムの熱容量で除して求めることとした。また、漸減入力を含むランダム波に対応可能なよう、修正バイリニアモデルの履歴則について、除荷点のせん断ひずみを用いた履歴則を提案し、適用した。作成した復元力モデルは、縮小試験体の多数回繰返し実験結果を良好に再現し、その妥当性を確認した。

上記の繰返し特性を考慮した復元力モデルを用いて、1 質点モデルによる地震応答解析を実施した。温度による特性変化を適用しない復元力モデルによる応答解析も実施し、繰返し特性考慮の有無による応答値の違いを検討した。解析結果より、本検討で用いた 4 波の入力地震動に対しては、1.5 倍まで係数倍した入力においても、高減衰ゴム系積層ゴムの温度上昇は最大で 6°C 程度、繰返しによる特性変化は 1 割以下に留まり、温度による特性変化を考慮した解析結果、および考慮しない解析結果ともほぼ同様の応答値を示した。従って、今回検討の地震動については、高減衰ゴム系積層ゴムの繰返し特性は、建物応答にほとんど影響を与えないことを確認した。

ただし、今回検討に使用した高減衰ゴム系積層ゴムの解析モデルは、直径 250mm の縮小試験体の実験結果を基に作成したものであり、実大サイズにおいてはゴム体積が大きくなるために放熱しにくい等、放熱特性が変わる可能性がある。その場合、今回検討結果よりも繰返しによる特性変化が大きくなると考えられる。また、水平 2 方向同時入力時には、履歴吸収エネルギーの評価の仕方や、繰返し特性への影響が異なってくると考えられる。これらについては、平成 24 年度実施予定の実大実験の結果を基に、必要であれば復元力モデルを修正し、再検討を行う必要がある。また、今回検討に使用した復元力モデルはバイリニア型であり、大変形領域のハードニングは考慮していない。本検討では、積層ゴムのせん断ひずみが 250% を超えるケースは OSKH02 の 1.5 倍入力時の 1 ケースのみであり、ハードニングの影響はほとんどないと考えられるが、さらに大変形の応答値を検討する場合は、ハードニングを考慮した復元力モデルによる検討が必要と考えられる。

参考文献

3.3.2-1) 株式会社ブリヂストン：高減衰ゴム系積層ゴム支承(X0.6R)技術資料

3.3.3 天然ゴム系積層ゴム+鋼材ダンパー

免震材料として天然ゴム系積層ゴムと鋼材ダンパーを適用した免震建築物を対象として、長周期地震動による地震応答解析を実施した。鋼材ダンパーについては第Ⅲ部第2章で応答評価に用いた設計モデル（バイリニアモデル）によるケースと、第Ⅲ部第1章に示した実験結果をトリリニアモデルでモデル化したケースで地震応答解析を実施し、両者の結果を比較した。

(1) 鋼材ダンパー実験結果のモデル化

第Ⅲ部第1章で示した鋼材ダンパー（NSUD55x4）の実験結果を基に、特に小振幅時の荷重変形関係の精度を向上させるため、トリリニアモデル及び菊地らの提案モデル（多項式モデル）^{3.3.3-1}を用いたモデル化について検討する。

表 3.3.3-1 に昨年の実験ケース一覧を、図 3.3.3-1～図 3.3.3-3 に実験結果とトリリニアモデルによるモデル化の荷重変形関係及び吸収エネルギーを、図 3.3.3-4～図 3.3.3-5 に実験結果と菊地らの提案モデル（多項式モデル）によるモデル化の荷重変形関係及び吸収エネルギーを示す。

表 3.3.3-1 実験ケース

試験体 番号	載荷方法
1	定振幅(±100mm)で繰り返し
2	定振幅(±400mm)で繰り返し
3	変動振幅 A (±100mm×38 回+±200mm×5 回+±300mm×3 回+±400mm×1 回) で繰り返し
4	変動振幅 B (±100mm×3 回+±200mm×2 回+±300mm×1 回+±400mm×2 回) で繰り返し

第Ⅲ部第1章で示した実験結果を用いた鋼材ダンパーのモデル化についての検討の結果、トリリニアモデル及び多項式モデルともに実験結果の荷重変形関係や吸収エネルギー量についてよく表現できることがわかった。このため、以下に検討を実施する地震応答解析については取り扱いが簡易なトリリニアモデルを用いて検討を実施する。

A) トリリニアモデル

トリリニアモデルの第一・第三勾配は、図 3.3.3-1 に示すようにそれぞれ設計バイリニアモデルの第一・第二勾配を用い、トリリニアモデル第二勾配は、第一勾配に対して 1/6 とした。具体的な値は下記の通りである。

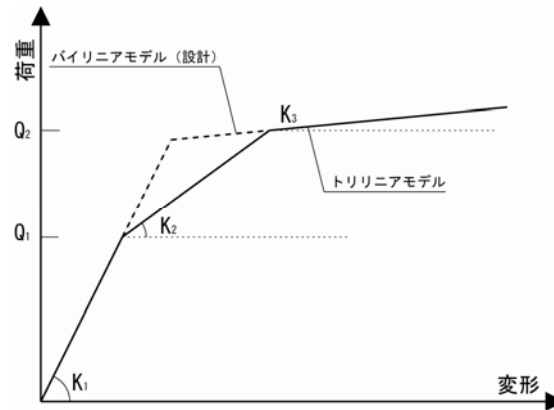


図 3.3.3-1 トリリニアモデル概念図

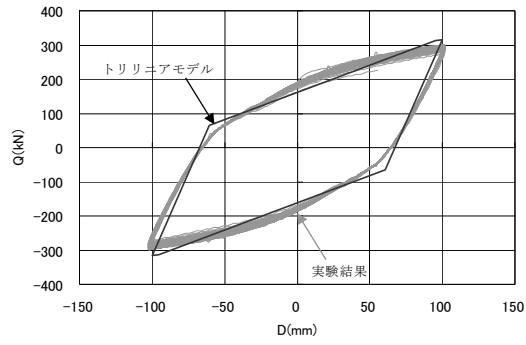
$$K1 = 9600\text{kN/m}$$

$$K2 = 1600\text{kN/m} (=1/6 K1)$$

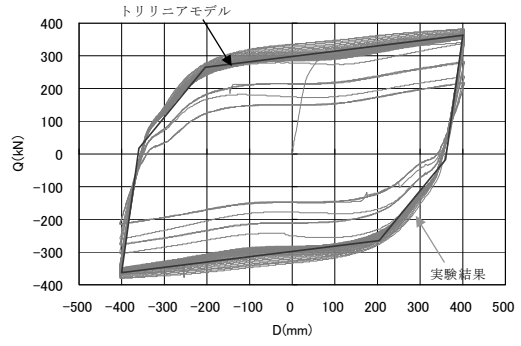
$$K3 = 160\text{kN/m} (=1/60 K1)$$

$$Q1 = 190\text{kN}$$

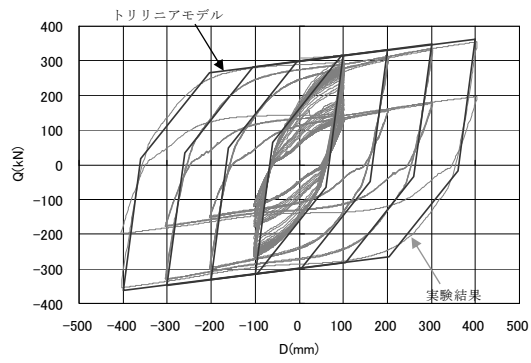
$$Q2 = 315\text{kN}$$



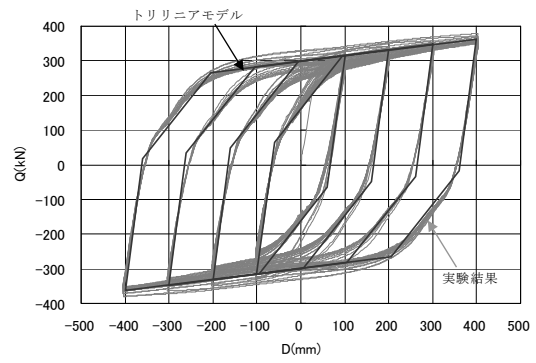
試験体 1



試験体 2

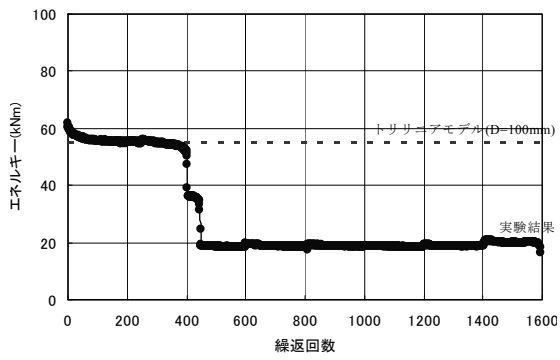


試験体 3

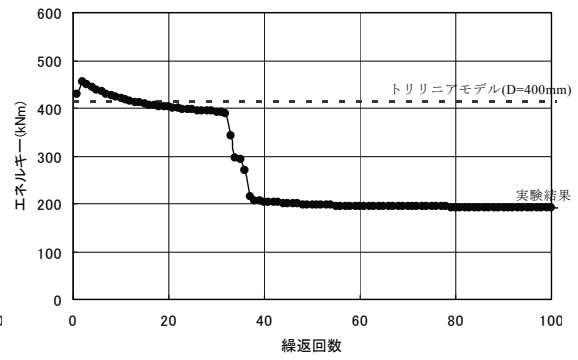


試験体 4

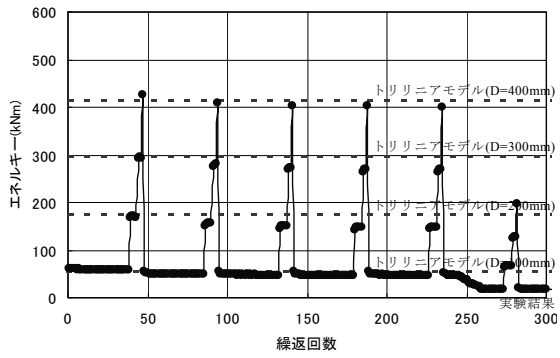
図 3.3.3-2 荷重変形関係の比較 (実験—トリリニアモデル)



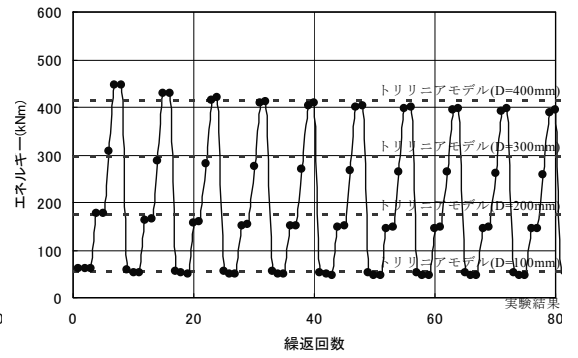
試験体 1



試験体 2



試験体 3



試験体 4

図 3.3.3-3 エネルギーの比較 (実験—トリリニアモデル)

B) 菊地らの提案モデル (多項式モデル)

・ 菊地^{3.3.3-1)}らにより、鋼材ダンパー (U型ダンパーNSUD55x6) に対するモデル化について検討されている。第Ⅲ部第1章で示した実験は NSUD55x4 を用いて行ったため、 K_{eq} の評価式のみダンパー本数を考慮して 4/6 倍することにより補正する。

・ 以下に復元力パラメータの評価式を示す。ここに、 X はダンパーの変形(m)である。

$$\begin{aligned}
 K_{eq} &= 0.633X^{-0.571} (MN/m) && (X \leq 0.5) \\
 &= 2.53 - 3.95X + 2.35X^2 (MN/m) && (0.5 < X \leq 0.9) \\
 h_{eq} &= -0.0582 + 4.22X - 13.7X^2 + 16.6X^3 && (X \leq 0.2) \\
 &= 0.132 + 1.65X - 2.47X^2 + 1.10X^3 && (0.2 < X \leq 0.9) \\
 u &= -0.506 + 20.6X - 111X^2 + 214X^3 && (X \leq 0.1) \\
 &= 0.257 + 5.28X - 14.3X^2 + 15.6X^3 - 6.22X^4 && (0.1 < X \leq 0.9) \\
 n &= 1.0 && (X \leq 0.2) \\
 &= 12.4X - 1.48 && (0.2 < X \leq 0.9)
 \end{aligned}$$

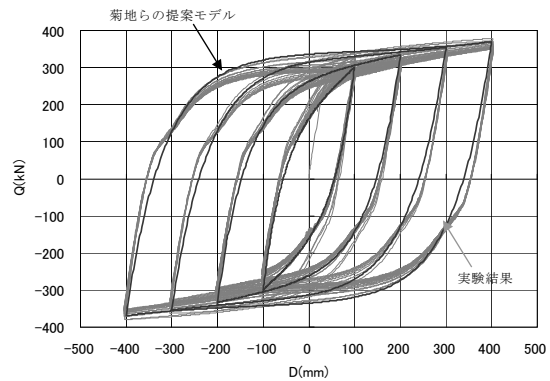
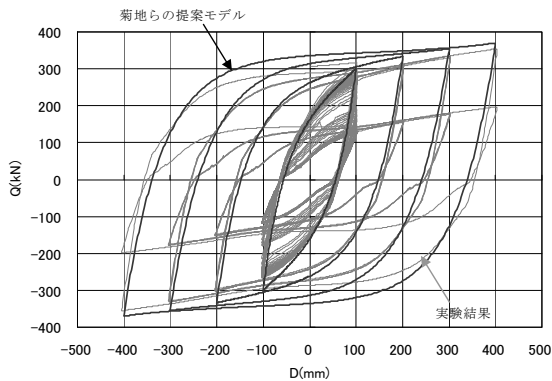
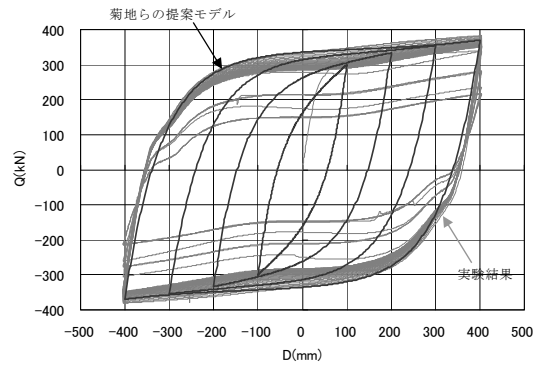
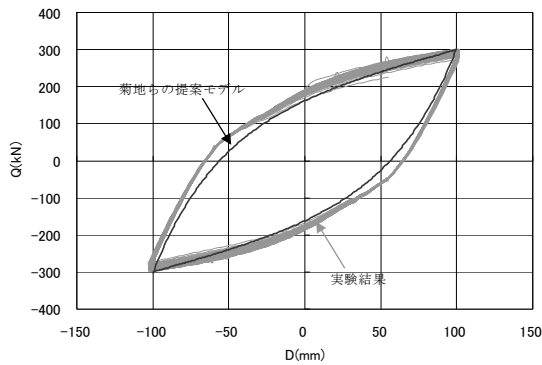
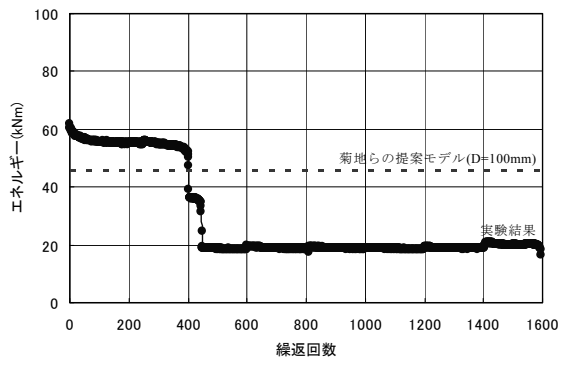
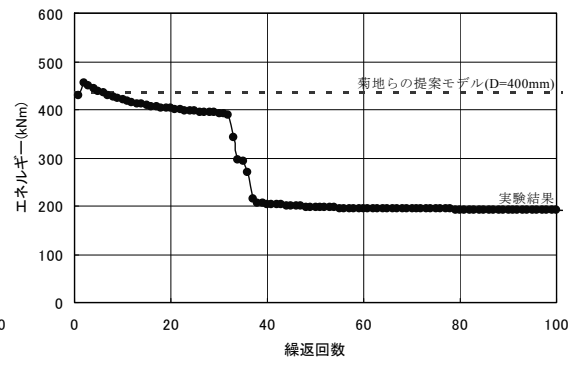


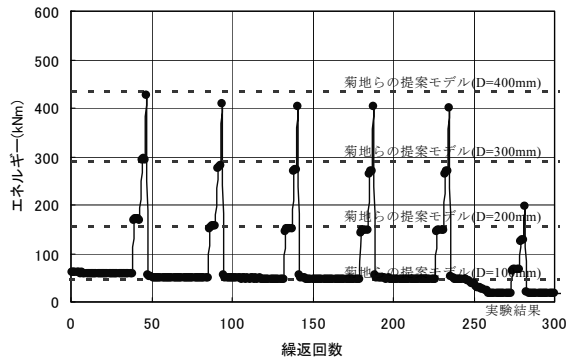
図 3.3.3-4 荷重変形関係の比較 (実験—菊地らの提案モデル)



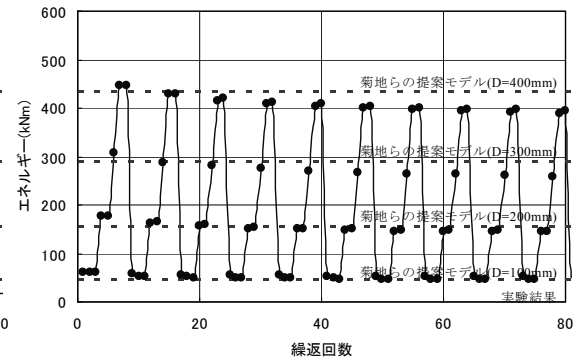
試験体 1



試験体 2



試験体 3



試験体 4

図 3.3.3-5 エネルギーの比較 (実験—菊地らの提案モデル)

(2) 地震応答解析の条件設定

地震応答解析による応答評価を行った建物モデル諸元を表 3.3.3-2 に示す。地震応答解析は上部建物を 1 質点としてモデル化し実施した。免震層は天然ゴム系積層ゴムと鋼材ダンパーで構成されるものとし、天然ゴム系積層ゴムはゴム種 G4、外径 $\phi 1000$ 、ゴム総厚 200mm とし、積層ゴムのゴム剛性による周期 $T_f=4.0s$ 、鋼材ダンパーの降伏せん断力係数 $\alpha_s=0.035$ となるよう設定した。鋼材ダンパーは U 型ダンパーとし、平成 22 年度に実験を実施した鋼材ダンパーと同一のもの (NSUD55x4) を想定している。解析においては免震層の履歴減衰のみ考慮した。

表 3.3.3-2 対象建物諸元

上部構造 重量 (積層ゴム 1 基当り) (kN)	積層ゴム 平均面圧 (N/mm ²)	T_f (sec)	α_s
7477	7.8	4.0	0.035

T_f : ゴム剛性による免震周期

α_s : 鋼材ダンパー降伏せん断力係数

(3) 設計モデルによる地震応答解析結果

表 3.3.3-3 に設計モデルを用いた場合の各入力地震動における応答解析結果を示す。解析においては、鋼材ダンパーの特性について設計時に用いられるバイリニアモデルを用いた。

表 3.3.3-3 地震応答解析結果（設計モデル）

入力地震動		入力倍率	免震層 水平変位 (cm)	免震層応答最大 せん断力係数	応答 最大加速度 (cm/s ²)	免震層 累積変位 (m)	免震層吸収エネルギー 速度換算値 (cm/s)
OSKH02	KONOHANA	1.00	26.0	0.105	103	15.1	203.6
		1.25	34.7	0.128	126	18.2	250.2
		1.50	43.7	0.152	150	22.3	301.1
AIC003	TSUSHIMA	1.00	19.3	0.087	85	14.1	175.7
		1.25	24.1	0.100	98	16.9	211.9
		1.50	28.5	0.111	109	19.4	246.5
SZO024	HAMAMATSU	1.00	26.0	0.105	103	15.0	235.1
		1.25	36.3	0.132	130	18.6	278.9
		1.50	48.7	0.166	163	22.4	321.1
KGIN	SHINJYUKU	1.00	5.6	0.050	49	6.4	40.5
		1.25	6.8	0.053	52	7.8	59.4
		1.50	9.7	0.061	59	9.2	84.6

*1 免震層累積変位量については総入力エネルギーの95%の時刻における値とした。

設計モデルを用いた解析結果として、図 3.3.3-6 に各入力地震動時の積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図を、図 3.3.3-7 に免震層における累積変位量時刻歴を、図 3.3.3-8 に免震材料における吸収エネルギーの速度換算値の時刻歴を示す。

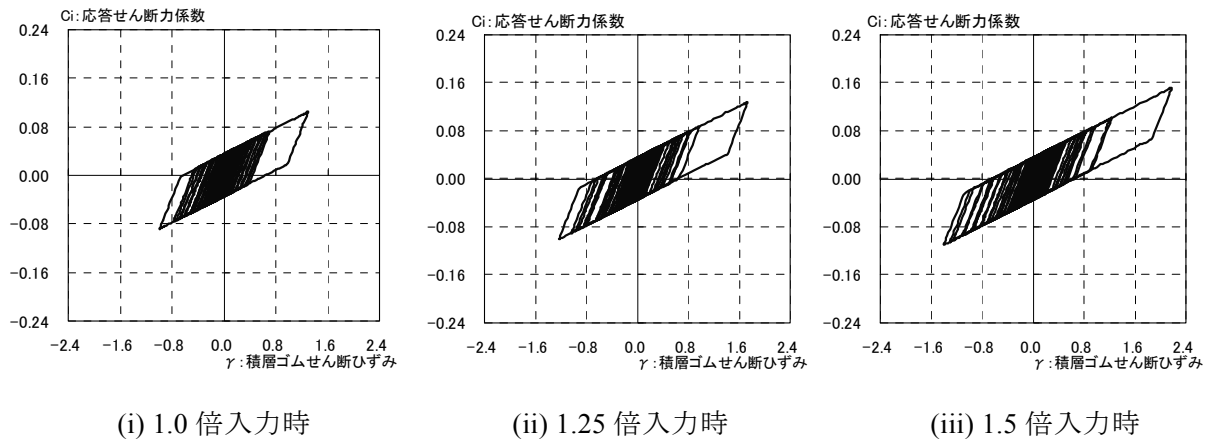
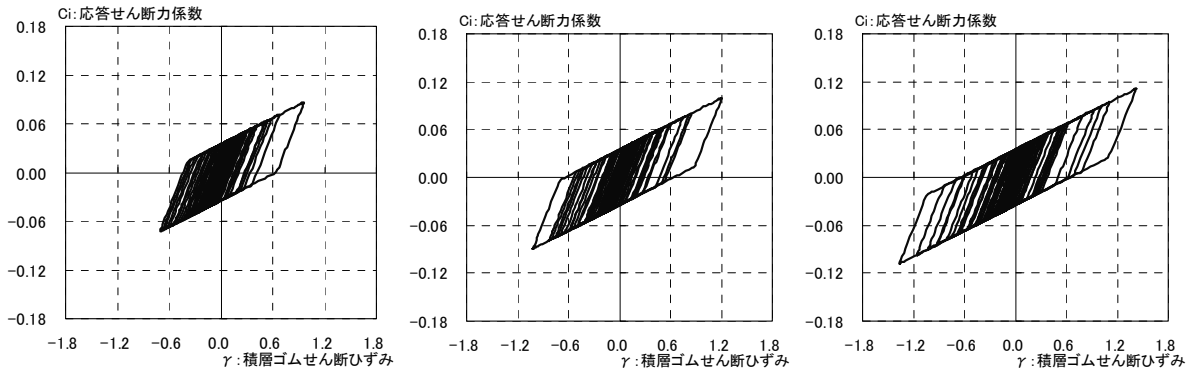
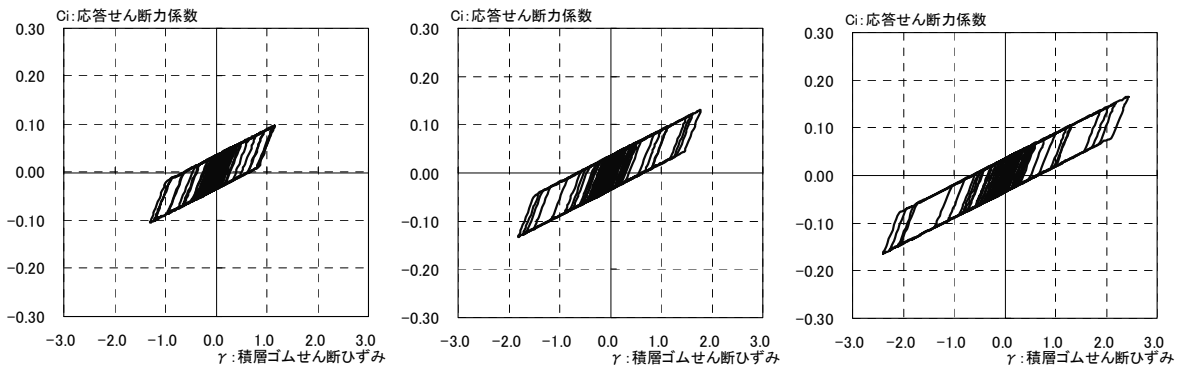


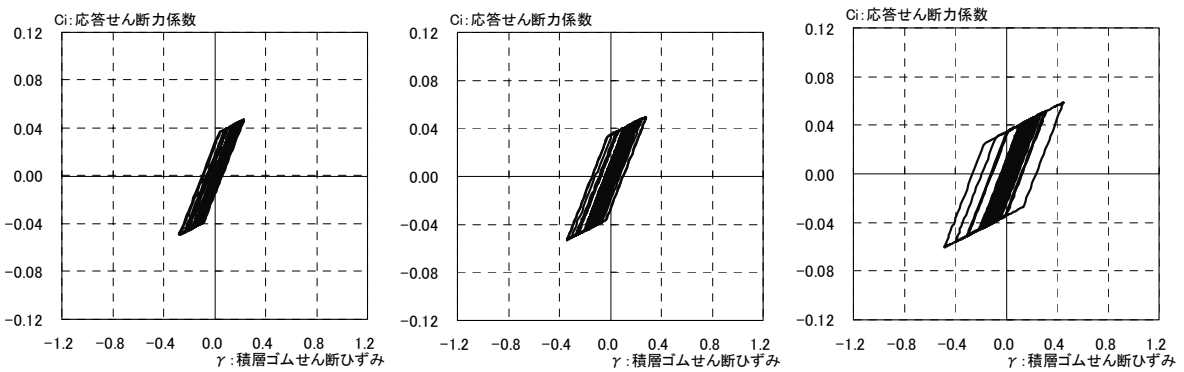
図 3.3.3-6(a) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図（OSKH02）



(i) 1.0 倍入力時 (ii) 1.25 倍入力時 (iii) 1.5 倍入力時
 図 3.3.3-6(b) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (AIC003)



(i) 1.0 倍入力時 (ii) 1.25 倍入力時 (iii) 1.5 倍入力時
 図 3.3.3-6 (c) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (SZO24)



(i) 1.0 倍入力時 (ii) 1.25 倍入力時 (iii) 1.5 倍入力時
 図 3.3.3-6 (d) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (KGIN)

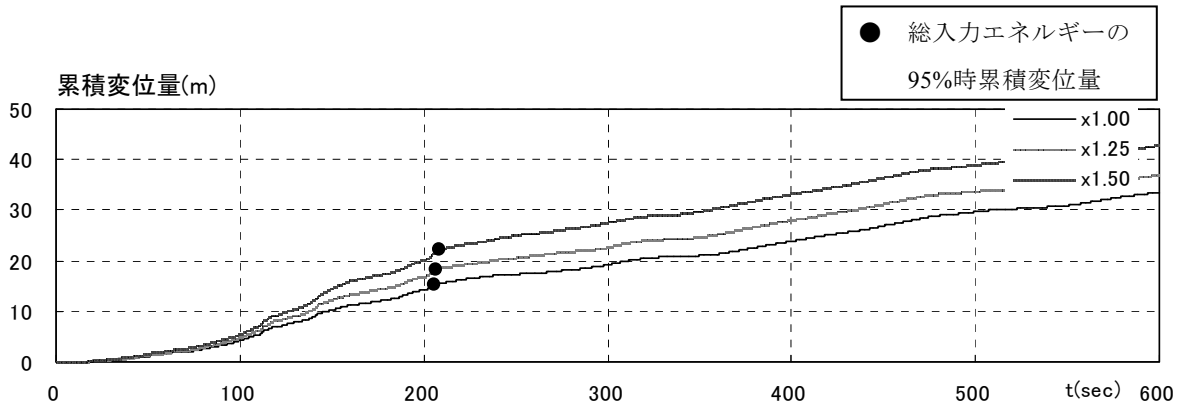


図 3.3.3-7 (a) 免震層累積変位量時刻歴 (OSKH02)

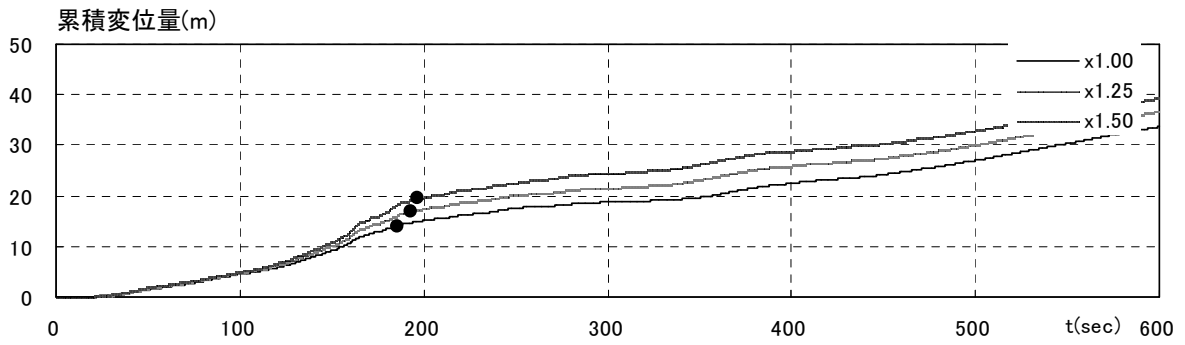


図 3.3.3-7 (b) 免震層累積変位量時刻歴 (AIC003)

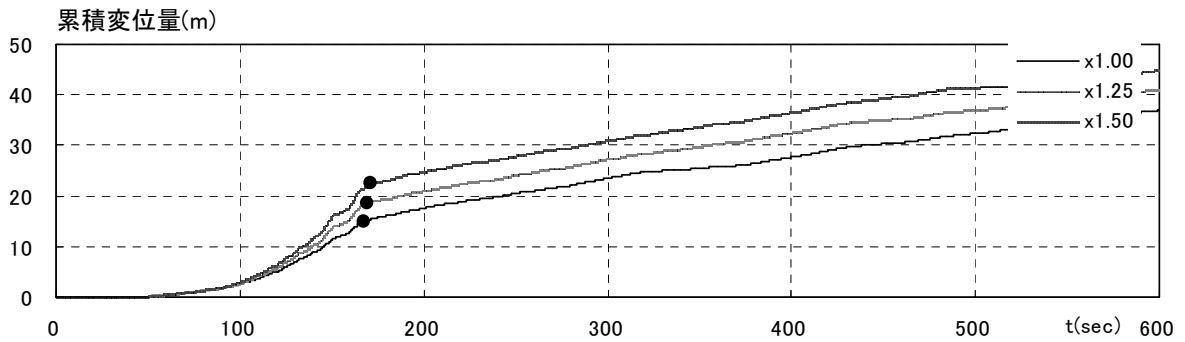


図 3.3.3-7 (c) 免震層累積変位量時刻歴 (SZO024)

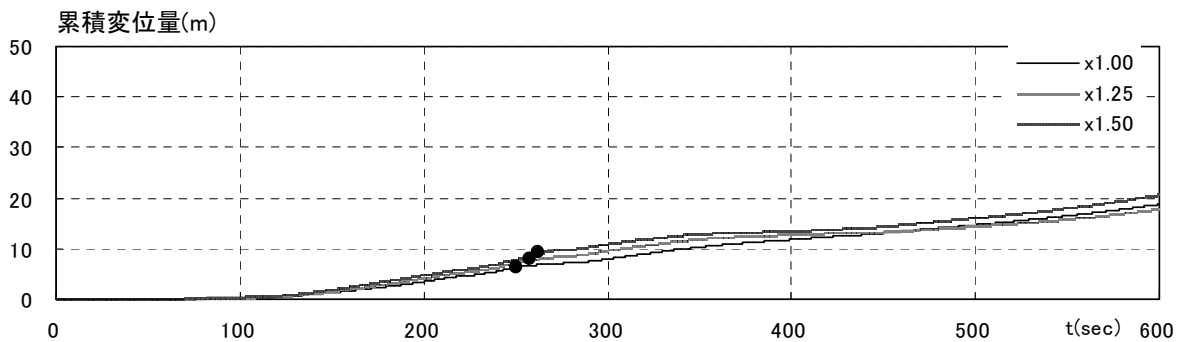


図 3.3.3-7 (d) 免震層累積変位量時刻歴 (KGIN)

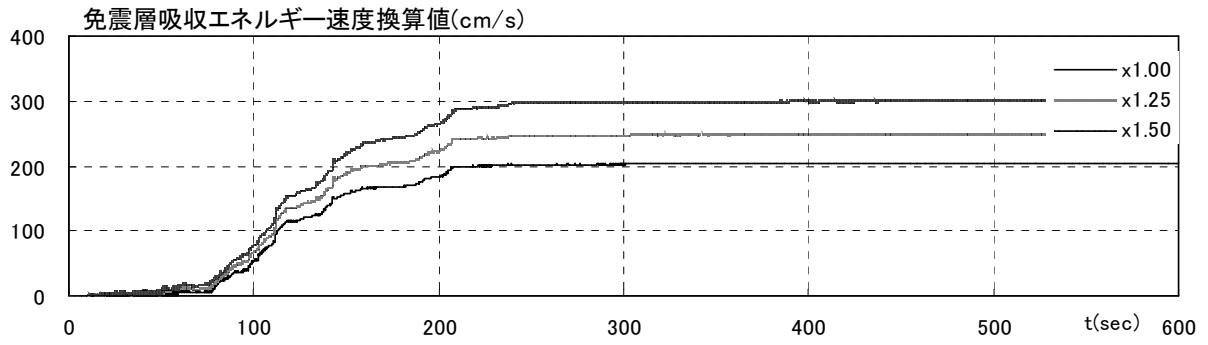


図 3.3.3-8 (a) 免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (OSKH02)

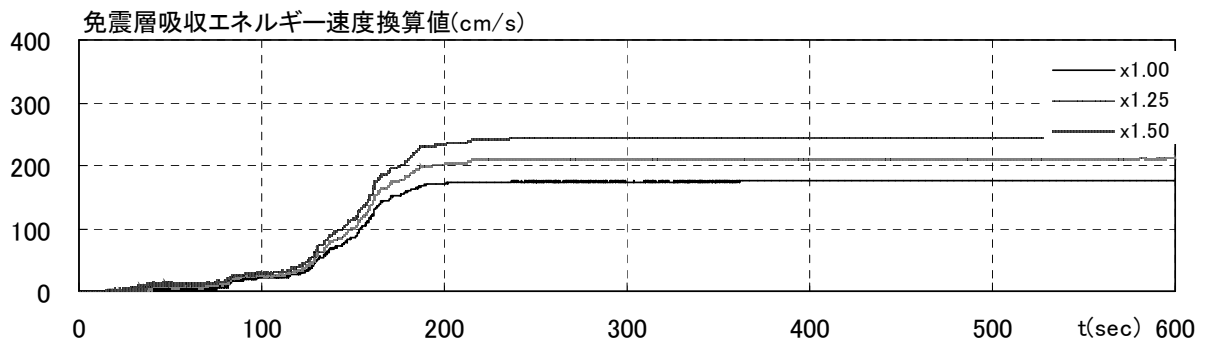


図 3.3.3-8 (b) 免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (AIC003)

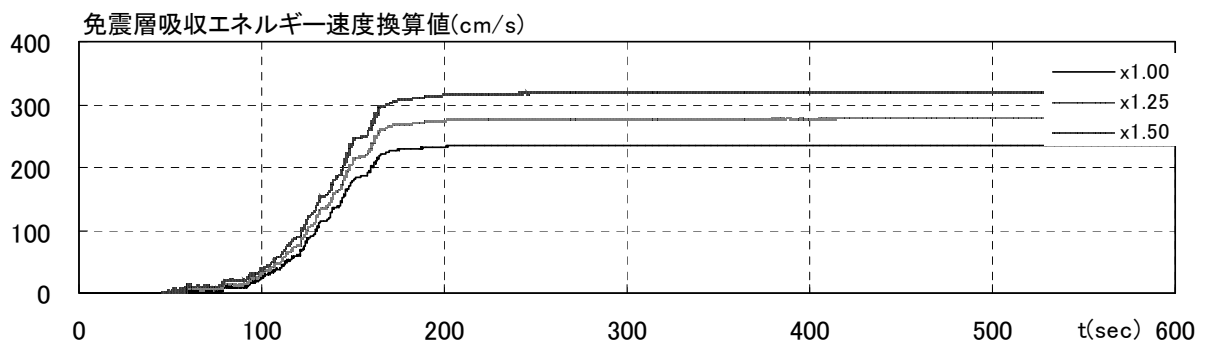


図 3.3.3-8 (c) 免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (SZO024)

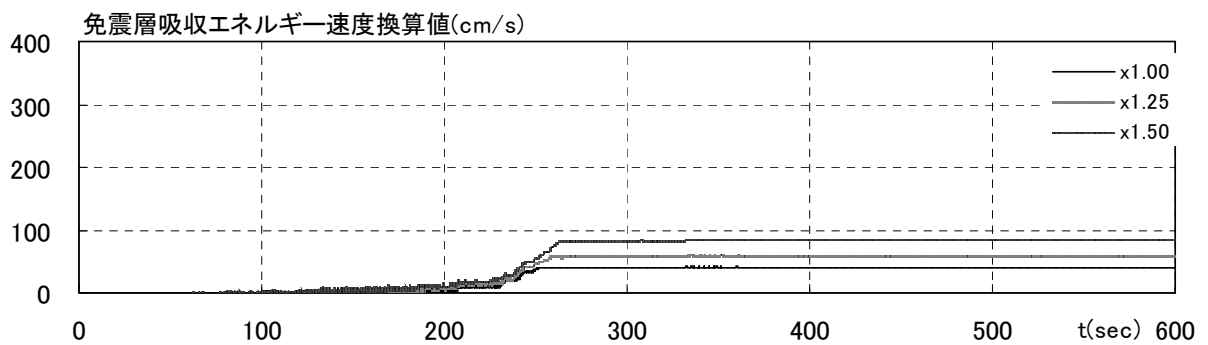


図 3.3.3-8 (d) 免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (KGIN)

(4) トリリニアモデルによる地震応答解析結果

鋼材ダンパーのモデル化として第Ⅲ部第1章に示した実験結果に対する評価を反映させたトリリニアモデルとしてトリリニアモデルを採用した場合の地震応答解析結果を表 3.3.3-4 に示す。鋼材ダンパーのモデル化以外の解析条件は(3)と同様である。

トリリニアモデルを用いた解析結果として、図 3.3.3-9 に各入力地震動時の積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図を、図 3.3.3-10 に免震層における累積変位量時刻歴を、図 3.3.3-11 に免震装置における吸収エネルギーの速度換算値の時刻歴を示す。

表 3.3.3-5 に各入力地震動における応答解析結果を、表 3.3.3-5 にトリリニアモデルの解析結果について、設計モデル(バイリニアモデル)に対する応答値の比を示す。

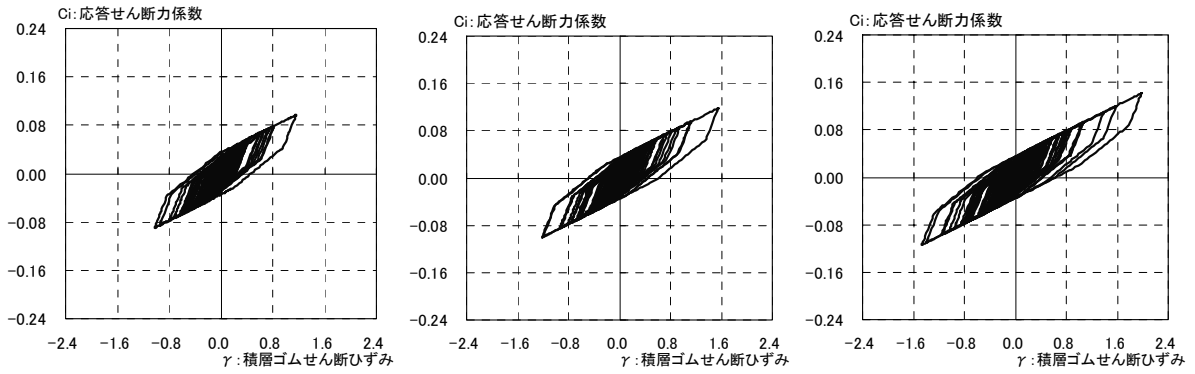
表 3.3.3-4 地震応答解析結果

入力地震動		入力倍率	免震層水平変位 (cm)	免震層応答最大せん断力係数	応答最大加速度 (cm/s ²)	免震層累積変位 (m)	免震層吸収エネルギー速度換算値 (cm/s)
OSKH02	KONOHANA	1.00	23.2	0.097	95	15.7	203.7
		1.25	31.1	0.119	116	19.3	247.0
		1.50	39.7	0.142	139	24.4	297.1
AIC003	TSUSHIMA	1.00	23.4	0.098	96	13.2	169.3
		1.25	28.5	0.111	109	16.1	203.1
		1.50	33.2	0.124	122	19.2	239.7
SZO024	HAMAMATSU	1.00	29.7	0.115	113	15.5	230.3
		1.25	41.0	0.145	143	19.7	276.7
		1.50	53.3	0.179	175	23.8	319.4
KGIN	SHINJYUKU	1.00	6.3	0.046	45	6.2	57.2
		1.25	9.0	0.058	57	7.3	79.4
		1.50	11.7	0.066	65	8.6	96.8

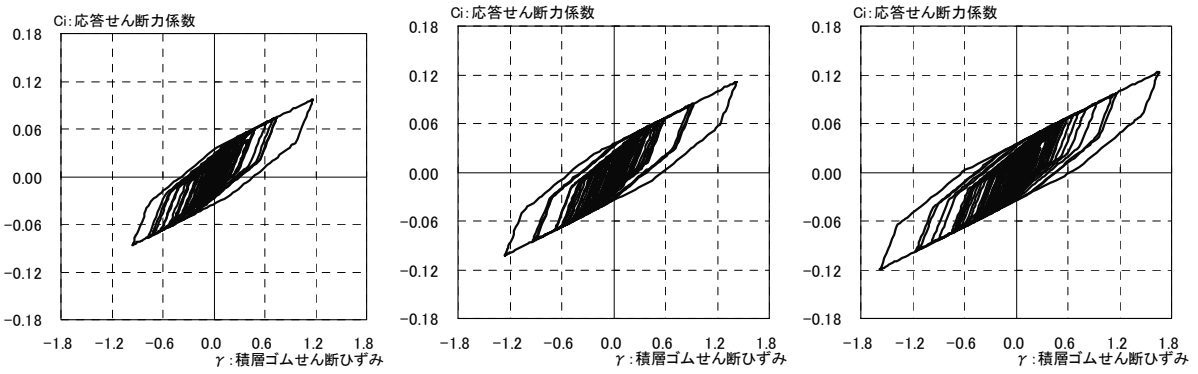
*1 免震層累積変位量については総入力エネルギーの95%の時刻における値とした。

表 3.3.3-5 バイリニアモデルに対するトリリニアモデルの解析結果の比

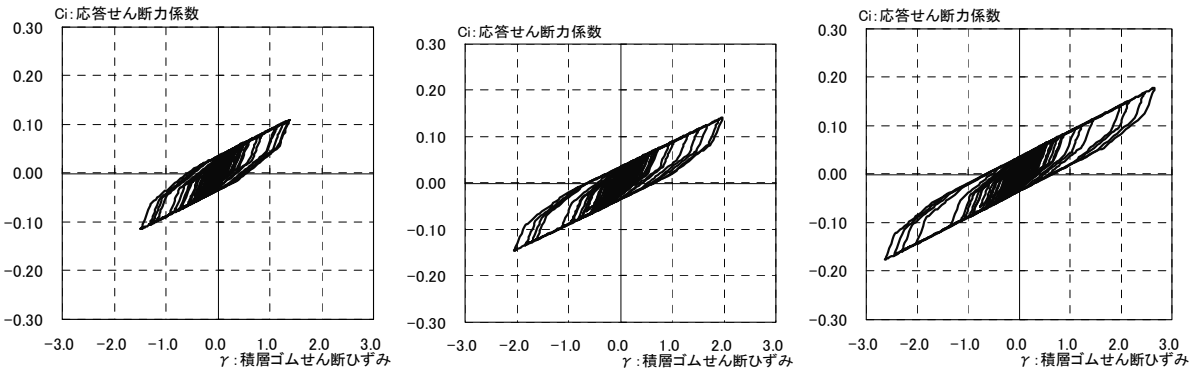
入力地震動		入力倍率	免震層水平変位	免震層応答最大せん断力係数	応答最大加速度	免震層累積変位	免震層吸収エネルギー速度換算値
OSKH02	KONOHANA	1.00	0.89	0.93	0.93	1.04	1.00
		1.25	0.90	0.93	0.93	1.06	0.99
		1.50	0.91	0.93	0.93	1.10	0.99
AIC003	TSUSHIMA	1.00	1.21	1.13	1.13	0.94	0.96
		1.25	1.18	1.12	1.12	0.95	0.96
		1.50	1.17	1.11	1.12	0.99	0.97
SZO024	HAMAMATSU	1.00	1.14	1.09	1.10	1.03	0.98
		1.25	1.13	1.10	1.10	1.06	0.99
		1.50	1.10	1.08	1.08	1.07	0.99
KGIN	SHINJYUKU	1.00	1.12	0.92	0.92	0.97	1.41
		1.25	1.33	1.09	1.09	0.93	1.34
		1.50	1.21	1.09	1.09	0.93	1.14



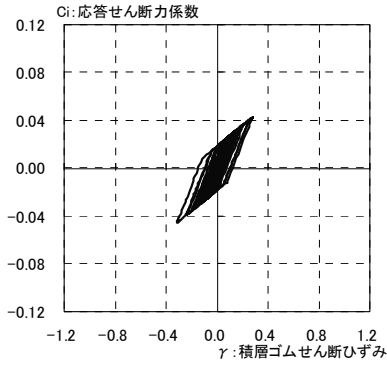
(i) 1.0 倍入力時 (ii) 1.25 倍入力時 (iii) 1.5 倍入力時
 図 3.3.3-9 (a) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (OSKH02)



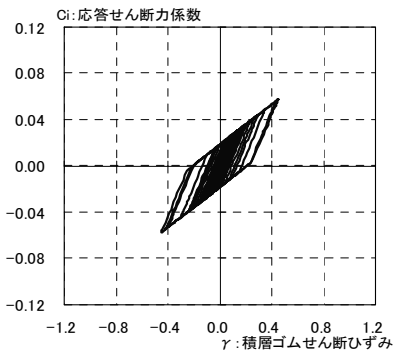
(i) 1.0 倍入力時 (ii) 1.25 倍入力時 (iii) 1.5 倍入力時
 図 3.3.3-9 (b) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (AIC003)



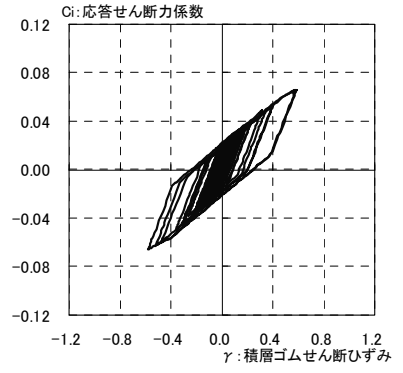
(i) 1.0 倍入力時 (ii) 1.25 倍入力時 (iii) 1.5 倍入力時
 図 3.3.3-9 (c) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (SZO024)



(i) 1.0 倍入力時



(ii) 1.25 倍入力時



(iii) 1.5 倍入力時

図 3.3.3-9 (d) 積層ゴムせん断ひずみ-免震層せん断力係数図 (KGIN)

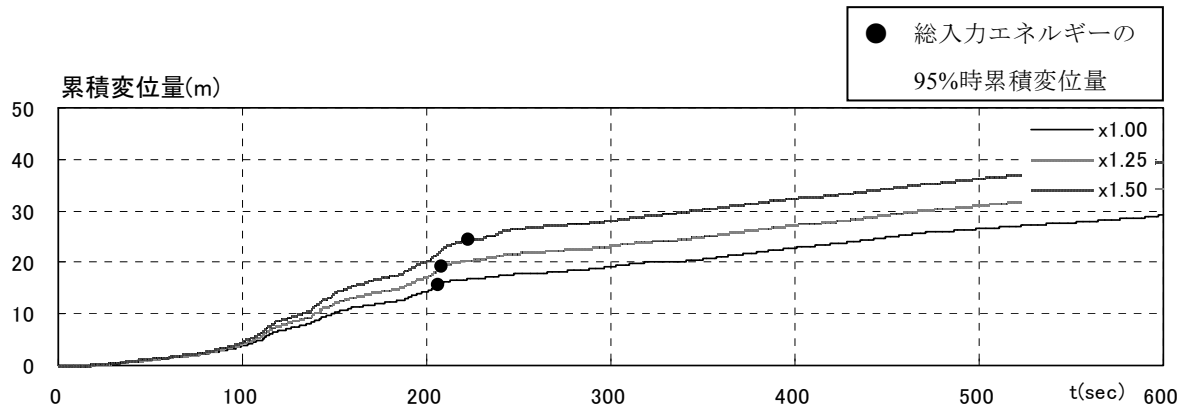


図 3.3.3-10 (a) 免震層累積変位量時刻歴 (OSKH02)

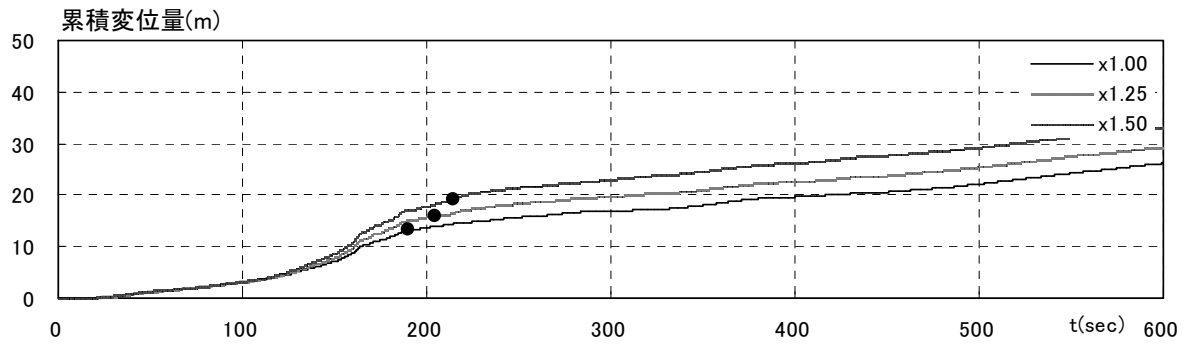


図 3.3.3-10 (b) 免震層累積変位量時刻歴 (AIC003)

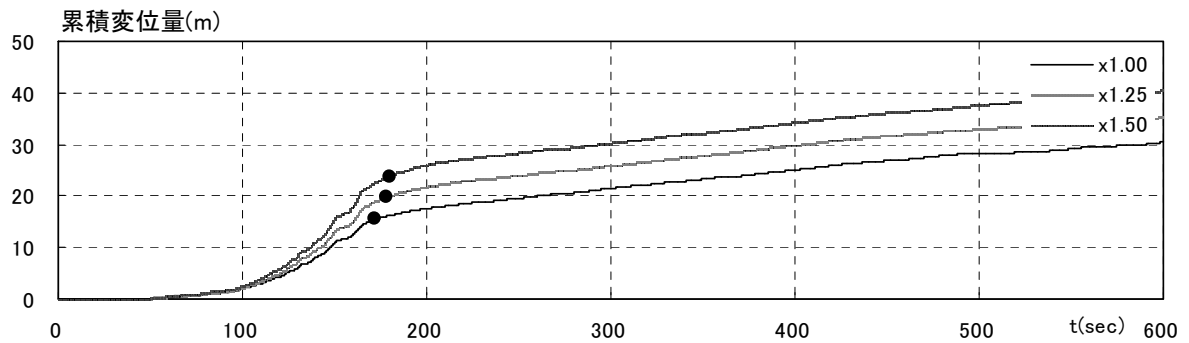


図 3.3.3-10 (c) 免震層累積変位量時刻歴 (SZO024)

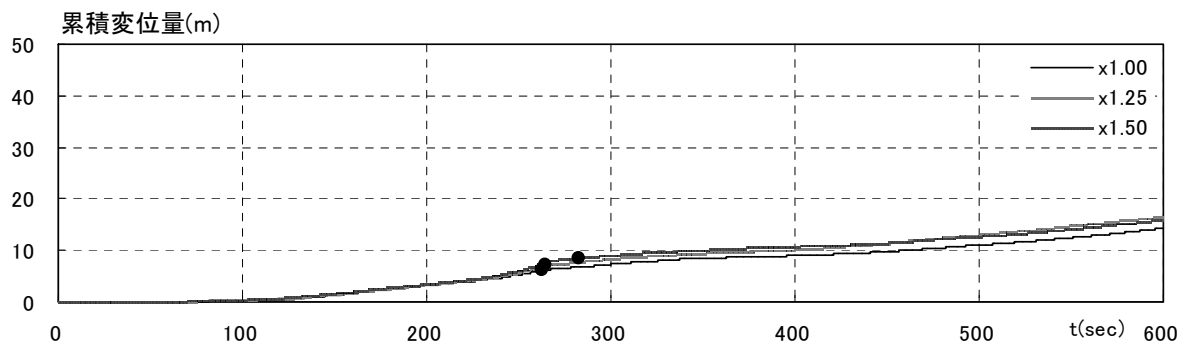


図 3.3.3-10 (d) 免震層累積変位量時刻歴 (KGIN)

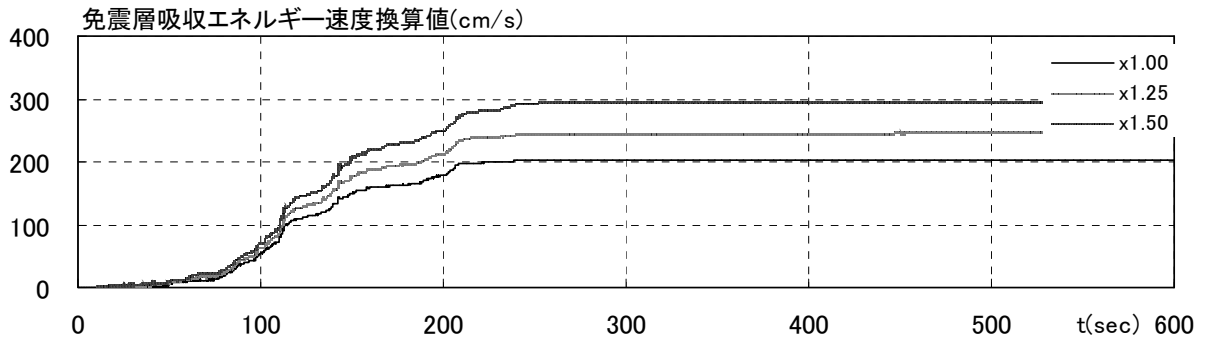


図 3.3.3-11 (a) 免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (OSKH02)

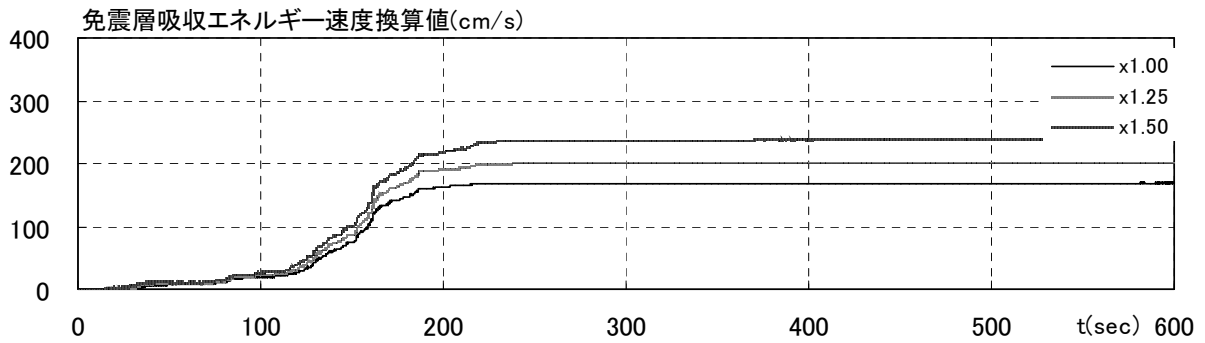


図 3.3.3-11 (b) 免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (AIC003)

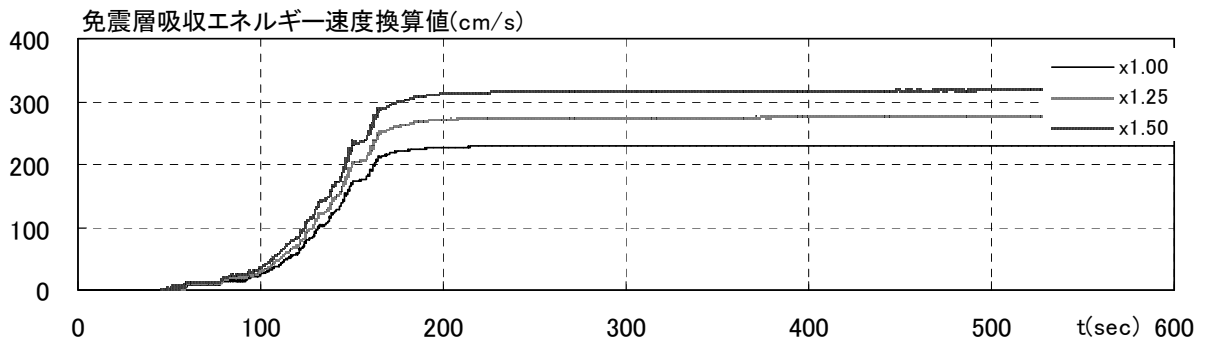


図 3.3.3-11 (c) 免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (SZO024)

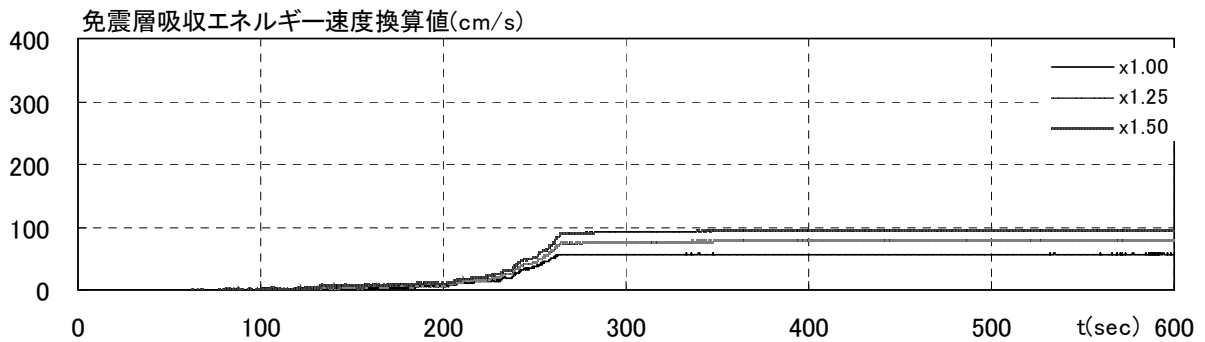


図 3.3.3-11 (d) 免震層吸収エネルギー速度換算値時刻歴 (KGIN)

(5) 鋼材ダンパーの疲労損傷度の評価

鋼材ダンパーについては、Miner 則に基づく疲労損傷評価を行う。評価に当たっては地震応答解析によって得られた免震材料の変位波形よりレインフロー法により波形分解を行い、各歪範囲レベルでの繰返し頻度 N_i を累積する。

変位振幅 Δ_i と破断回数 N_i の関係（第Ⅲ部、図 2.3.3-4 参照）に基づいて、下式により損傷度 D を評価する。損傷値 $D=1$ の場合、疲労損傷（破断）が起きるとする。

$$D = \sum_i \frac{N_i}{N_f}$$

N_i : 変位振幅 Δ_i での頻度

N_f : 変位振幅 Δ_i での破断回数

表 3.3.3-6 に上記により評価した疲労損傷度を示す。鋼材ダンパーは U 型ダンパー NSUD55x4 を想定している。疲労損傷度は図 3.3.3-8、図 3.3.3-11 に示されるように免震材料における吸収エネルギーが頭打ちとなる継続時間 300 秒間について評価した、また疲労損傷度は破断時を 100% として評価した値である。

表 3.3.3-6 鋼材ダンパーの疲労損傷度

入力地震動	入力倍率	設計モデル (バイリニアモデル)		トリリニアモデル	
		免震層 水平変形 (cm)	疲労損傷 度 (%)	免震層 水平変形 (cm)	疲労損傷 度 (%)
OSKH02_AV	1.00	26.0	17.6	23.2	20.4
	1.25	34.7	26.1	31.1	30.3
	1.50	43.7	37.9	39.7	43.7
AIC003_AV	1.00	19.3	14.7	23.4	14.7
	1.25	24.1	20.6	28.5	20.8
	1.50	28.5	27.2	33.2	28.7
SZO024_AV	1.00	26.0	26.2	29.7	27.0
	1.25	36.3	37.0	41.0	39.5
	1.50	48.7	42.8	53.3	42.5
KGIN_AV	1.00	5.6	2.3	6.3	1.8
	1.25	6.8	3.6	9.0	3.3
	1.50	9.7	5.2	11.7	4.6

(6) まとめ

天然ゴム系積層ゴムと鋼材ダンパーを適用した免震建築物では鋼材ダンパーについて設計モデルによる地震応答解析の結果 OSKH02 及び SZO024 の入力倍率が 1.0 倍の場合に積層ゴムのせん断ひずみは $\gamma=130\%$ (水平変位 26.0cm) で最大となる。また、SZO024 の入力倍率が 1.5 倍の場合に積層ゴムのせん断ひずみは $\gamma=244\%$ (水平変位 48.7cm) となっている。

鋼材ダンパーについて第Ⅲ部第 2 章で応答評価に用いた設計モデル(バイリニア)によるケースと、トリリニアモデルとしたケースを用いた場合と比較して、平均的には 1.1~1.2 倍程度の水平変形の増大率となった。KGIN の場合は水平変形の増大率が最大で 1.33 倍程度になるが水平変形の絶対値は最大でも 10cm 程度である。

鋼材ダンパーの疲労損傷度は設計モデルによる評価時には入力倍率が 1.0 倍の場合には SZO024 の場合に 26.2% であるが、その他の地震動では 20% 以下である。入力倍率が 1.5 倍の場合に SZO024 で破断に対する疲労損傷度が 42.8% となる。この場合には風外乱や中小地震による疲労損傷度の累積を考慮すると鋼材ダンパーの破断に対して厳しい値となっていると考えられる。

また、鋼材ダンパーのモデル化について検討を行い、履歴モデルを第Ⅲ部第 2 章で応答評価に用いた設計モデル(バイリニア)によるものと、トリリニアモデルとしたものの比較を行った。その結果、概ね応答値の差は小さいものの、入力波および倍率によっては最大水平変形で 2 割程度差が生じることを確認した。

今後の課題として、鋼材ダンパーについては大地震時だけでなく、風外乱や中小地震時にも疲労損傷が蓄積することから大地震時の疲労損傷度のクライテリアをどの程度にするかが今後の課題である。

参考文献

- 3.3.3-1) 菊地優ほか、履歴減衰型免震部材の復元力モデルに関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 565 号、63-71、2003 年 3 月
- 3.3.3-2) 吉敷祥一ほか：免震構造用 U 字鋼材ダンパーの繰り返し変形性能に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 624 号、pp333-344、2008.2.

3.3.4 天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパー

(1) 繰返しによる特性変化を考慮した鉛ダンパーの解析モデル

1) はじめに

平成 22 年度に実施した鉛ダンパー U2426 の正弦波加振では、繰返しによる耐力劣化が確認された。また、漸増正弦波加振では、振幅の上昇とともに耐力上昇が確認された。これらの現象を表現するために、本検討ではバイリニアモデルの復元力特性に対して骨格曲線を曲線表示し、繰返しによる降伏荷重の低下を考慮した解析モデルを構築する。また、このモデルに対して地震応答波変位を入力し、実験結果との比較を行う。

2) 骨格曲線

鉛ダンパーの降伏荷重は、図 3.3.4-1 のように振幅依存性がある^{3.3.4-1)}。これより、バイリニアモデルの骨格曲線を以下のように与える。

1) 初期は線形とし、剛性は U2426 ダンパーの初期剛性規格値 $K_1 (=30,000\text{kN/m})$ とする。

2) 降伏変形 (d_y) を超えると、水平変形 d の n 乗として規定される。

骨格曲線 Q_d は以下の式(3.3.4-1)および(3.3.4-2)となる。

$$d < d_y(\text{m}) \quad Q_d = K_1 \cdot d \quad (\text{kN}) \quad (3.3.4-1)$$

$$d \geq d_y(\text{m}) \quad Q_d = Q_0 \cdot d^n \quad (\text{kN}) \quad (3.3.4-2)$$

ただし、U2426 鉛ダンパーに対して、パラメータを以下のように設定する。

K_1 : 初期剛性 30,000 (kN/m)

d_y : 降伏変位 5.88×10^{-3} (m)

d : 水平変形(m)

Q_0 : 293.1

n : 0.0958

式(3.3.4-2) 中の Q_0 、 n の算出にあたっては、平成 22 年度に実施の漸増正弦波加振試験結果と整合するように算出した。履歴曲線はバイリニアモデルとし、除荷剛性は常に初期剛性 K_1 、二次剛性は 0 とする。骨格曲線と履歴形状を図 3.3.4-2 に示す。

表 3.3.4-1 骨格曲線上の変形と荷重

変形 $d(\text{m})$	5.88×10^{-3}	0.1	0.2	0.4
荷重 Q_d (kN)	179.2	235.1	251.2	268.5

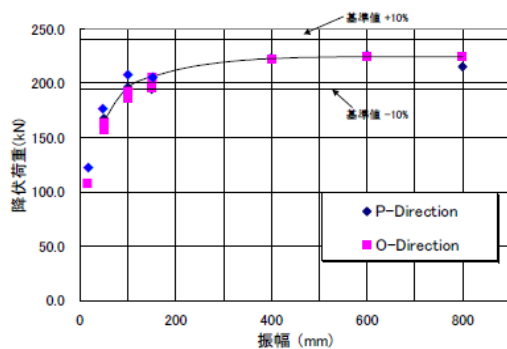


図 3.3.4-1 降伏荷重と振幅の関係^{3.3.4-1)}

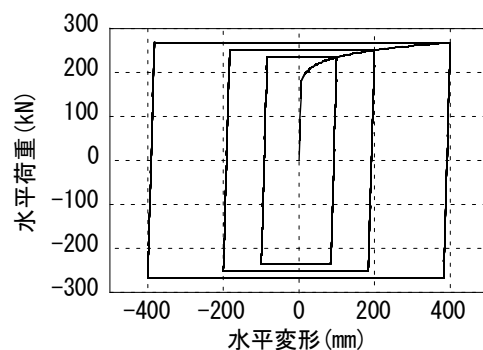


図 3.3.4-2 骨格曲線と履歴形状

3) 繰返しによる耐力劣化

本モデルでは、マクロ的に装置へのダメージ度合いを表しうるダンパーの累積吸収エネルギー E を指標として、繰返しによる耐力劣化を表現する。

正弦波加振時の累積吸収エネルギー E と 3 サイクル目に対する 1 ループ分のエネルギー変化率との関係を図 3.3.4-3 に示す。図 3.3.4-3 は、既往の知見である累積変形量と変化率の関係から求めた。累積吸収エネルギーがある値に達すると、 E と変化率は直線的に変化し、さらに E が大きくなると 1 ループあたりの吸収エネルギーは急激に低下する。さらに、図 3.3.4-3 より変化率が水平変形によって異なることがわかる。これより本モデルでは、降伏荷重の変化率 r_{Q_d} と吸収エネルギー E の関係を図 3.3.4-4 に示す折れ線にて表現する。折れ点の位置は図中の①～④の位置で水平変形により変化する。折れ線の座標 (E, r_{Q_d}) は式(3.3.4-3)～(3.3.4-6)にて表現され、水平変形 $d(m)$ をパラメータとして平成 22 年度に実施した漸増連続正弦波加振結果に整合するように定めた。

①：耐力劣化開始点($E1, r_{Q_d1}=1.0$)

$$E1 = -37 + 2322|d| \quad (0.1 \leq |d| \leq 0.4)$$

$$195 \quad (|d| < 0.1), \quad 892 \quad (|d| > 0.4) \quad (\text{単位:kNm}) \quad (3.3.4-3)$$

②：第 2 折れ点($E2=2205(\text{kNm}), r_{Q_d2}$)

$$r_{Q_d2} = 0.62 + 0.60|d| \quad (0.1 \leq |d| \leq 0.4)$$

$$0.680 \quad (|d| < 0.1), \quad 0.860 \quad (|d| > 0.4) \quad (3.3.4-4)$$

③：第 3 折れ点($E3=8000(\text{kNm}), r_{Q_d3}$)

$$r_{Q_d3} = 0.375 + 0.525|d| \quad (0.1 \leq |d| \leq 0.4)$$

$$0.428 \quad (|d| < 0.1), \quad 0.585 \quad (|d| > 0.4) \quad (3.3.4-5)$$

④：耐力喪失点($E4, r_{Q_d4}=0$)

$$E4 = 9683 - 2060|d| \quad (0.15 \leq |d| \leq 0.4)$$

$$9,854 \quad (|d| < 0.15), \quad 8,859 \quad (|d| > 0.4) \quad (\text{単位:kNm}) \quad (3.3.4-6)$$

耐力劣化は変形が反転する際に生じ、その時点の水平変形 d および累積吸収エネルギー E により降伏荷重の変化率 r_{Q_d} を求める。変形反転後の降伏耐力 Q_d' は以下の式(3.3.4-7)とする。

$$Q_d' = Q_d \cdot r_{Q_d} \quad (3.3.4-7)$$

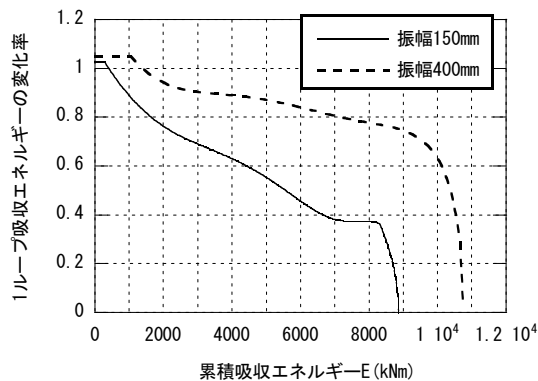


図 3.3.4-3 累積吸収エネルギー E と 1 ループ分のエネルギー変化率

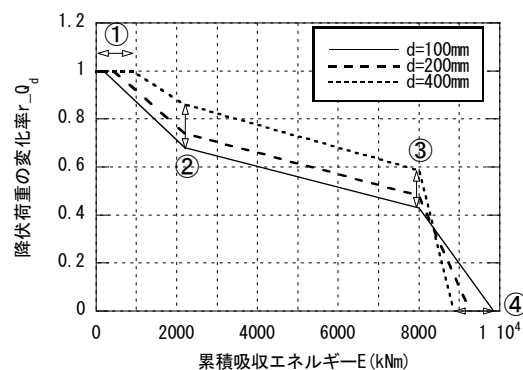


図 3.3.4-4 累積吸収エネルギーと降伏荷重の変化率

4) 解析モデルによる実験結果との比較

解析モデルに平成 22 年度に実施した鉛ダンパーU2426 実大実験で得られた水平変形を与え、出力される荷重値と実験結果を比較した。実験条件を表 3.3.4-2 に示す。今回の検討は試験体 No.1、No.2-A、No. 2-B および No.3 の試験結果に対して実施した。

試験体 No.1 の漸増連続基本加振における吸収エネルギー E と降伏荷重 Q_d の関係を図 3.3.4-5 に示す。降伏荷重は 1 ループ分の吸収エネルギー W より式(3.3.4-8)にて算出した。

$$Q_d = \frac{|d| \cdot K1 - \sqrt{d^2 \cdot K1^2 - W \cdot K1}}{2} \quad (3.3.4-8)$$

図 3.3.4-5 より解析モデルによる Q_d は実験結果とよく整合している。また、吸収エネルギー E の時刻歴と実験結果との対応も良好である。試験体 No.1 の荷重変形関係を図 3.3.4-6 に示す。振幅 $\pm 100\text{mm}$ 、 $\pm 200\text{mm}$ で履歴性状も解析モデルは実験結果とよく整合している。 $\pm 400\text{mm}$ 時の履歴形状では試験結果のループが変形に対して非対称となっているため、本解析モデルによる表現が難しい。

表 3.3.4-2 試験体および試験条件一覧

試験体 No.	条件	周期 (秒)	加力方向	水平変位 (サイクル数)	累積変形 (m)	Di
1	漸増連続 基本加振	4	P	$\pm 100\text{mm}$ (30 サイクル)	12	0.102
		$\rightarrow 4$		$\rightarrow \pm 200\text{mm}$ (30 サイクル)	$\rightarrow 36$	0.344
		$\rightarrow 5$		$\rightarrow \pm 400\text{mm}$ (破断まで)	\rightarrow 破断	-
2-A	方向を変えて 断続的に加振	4	P	$\pm 150\text{mm}$ (30 サイクル)	24	0.344
2-B		O	$\pm 150\text{mm}$ (30 サイクル)	48	0.344	
2-C		P	$\pm 150\text{mm}$ (破断まで)	\rightarrow 破断	-	
3	地震 応答波加振	4	P	T-TN-AIC003.av 時の 免震層応答変位加振 $\times 3$ 回	14m $\times 3$	-
		インターバル 3 分				
		4	P	T-TN-AIC003.av 時の 免震層応答変位加振 $\times 9$ 回	14m $\times 9$	-

注) P : Parallel, O : Orthogonal, Di : 各振幅における疲労損傷度 (1 が破断限界)

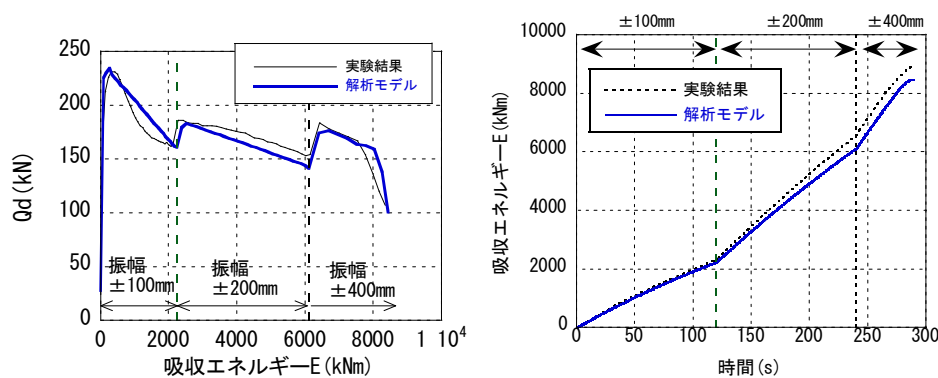
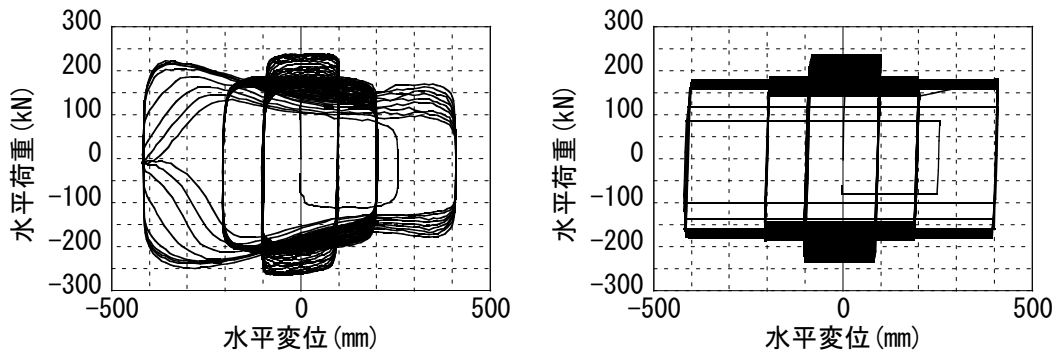
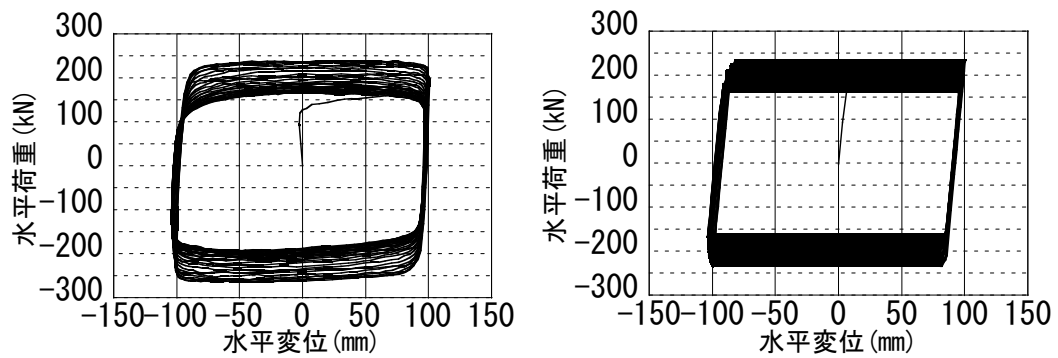


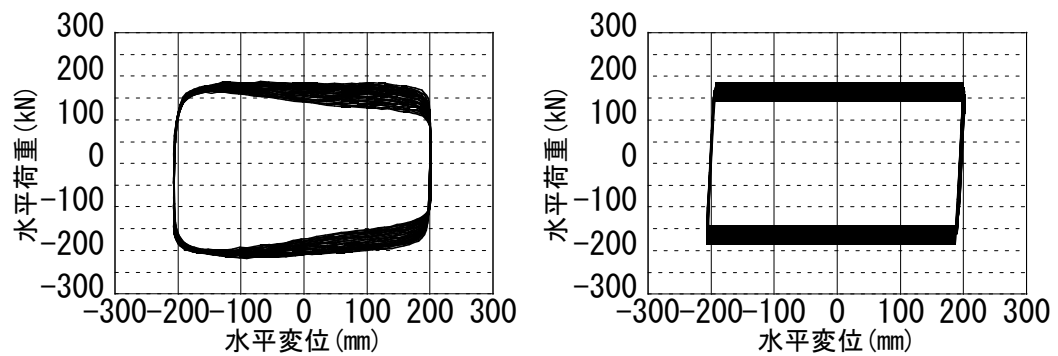
図 3.3.4-5 試験体 No.1 (漸増連続基本加振) 吸収エネルギー E と Q_d の関係



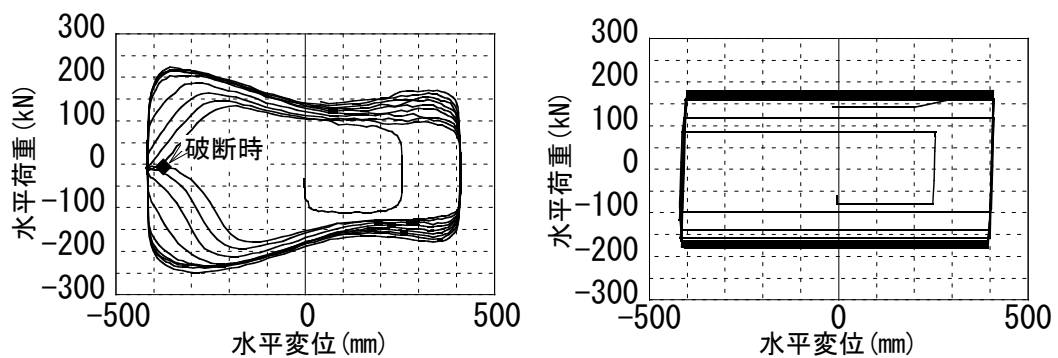
実験全データ



±100mm 周期4秒 30サイクル



±200mm 周期4秒 30サイクル

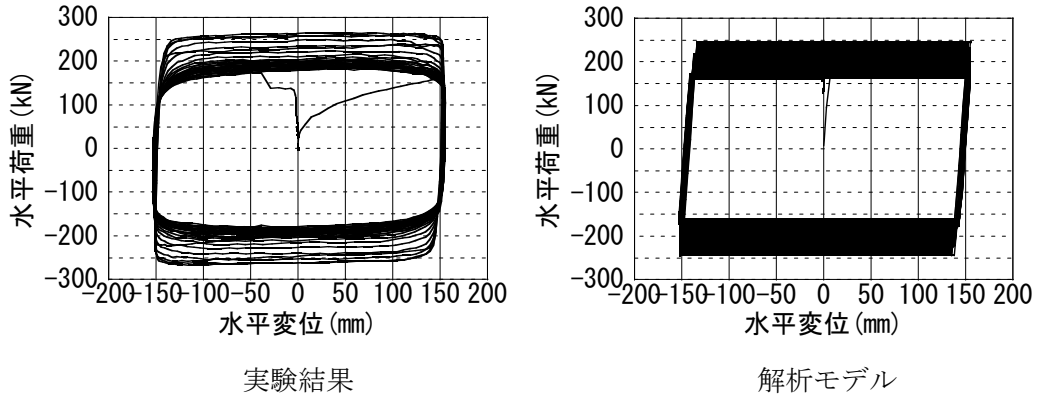


±400mm 周期5秒 9サイクル (破断まで)

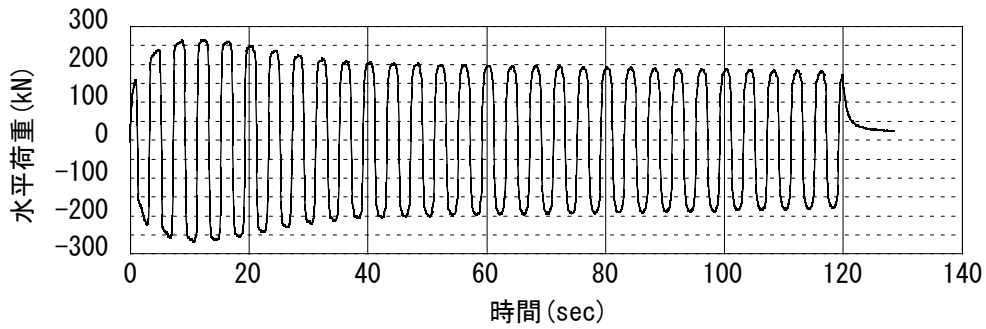
(a)実験結果

(b)解析モデル

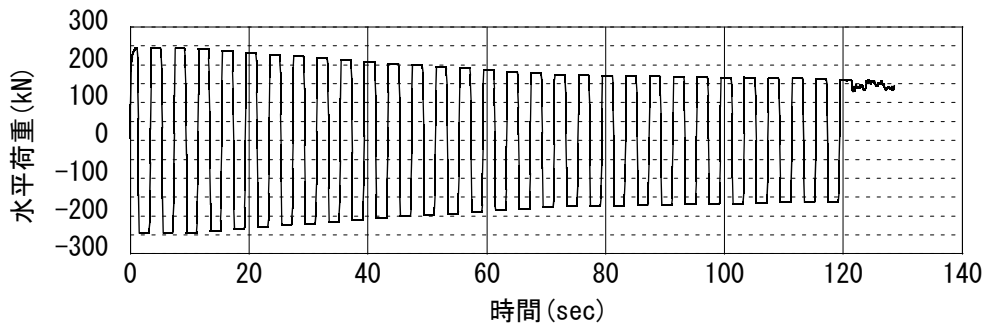
図 3.3.4-6 試験体 No.1 (漸増連続基本加振) 荷重変形関係



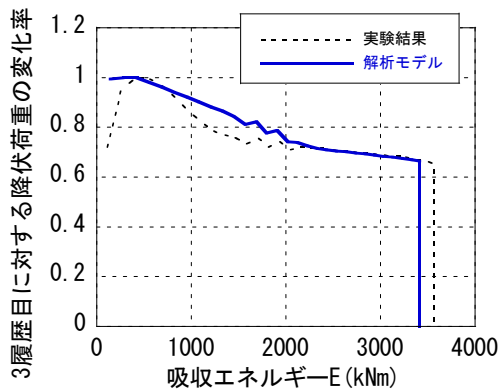
(a) 荷重変形関係



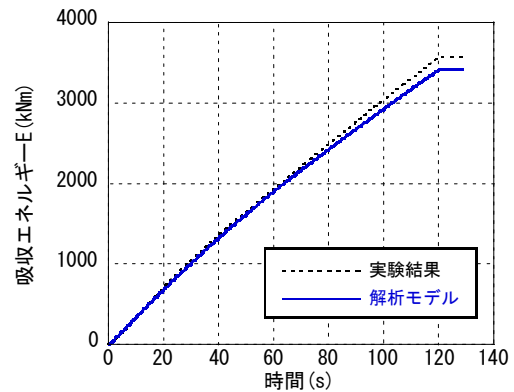
(b) 荷重時刻歴 実験



(c) 荷重時刻歴 解析

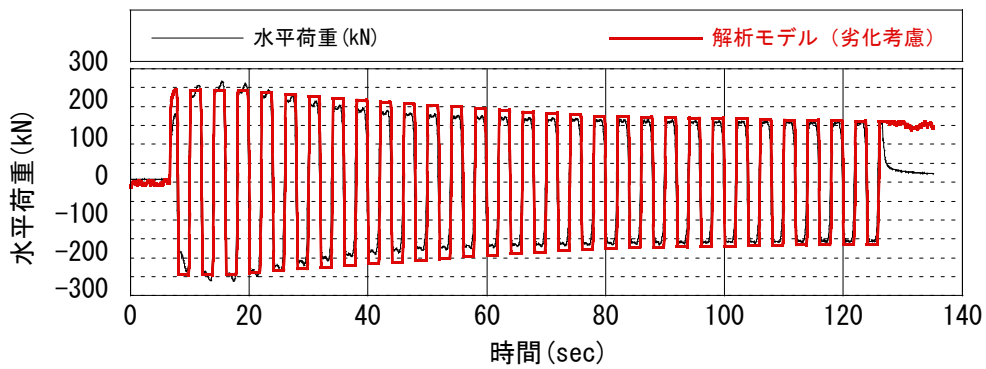
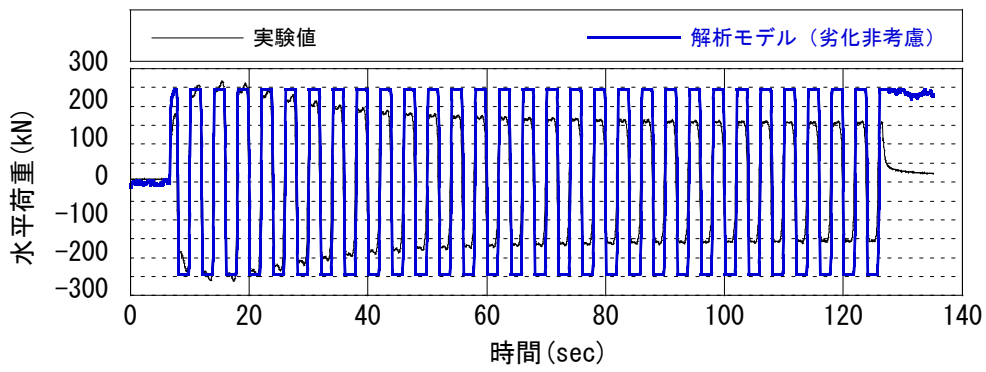
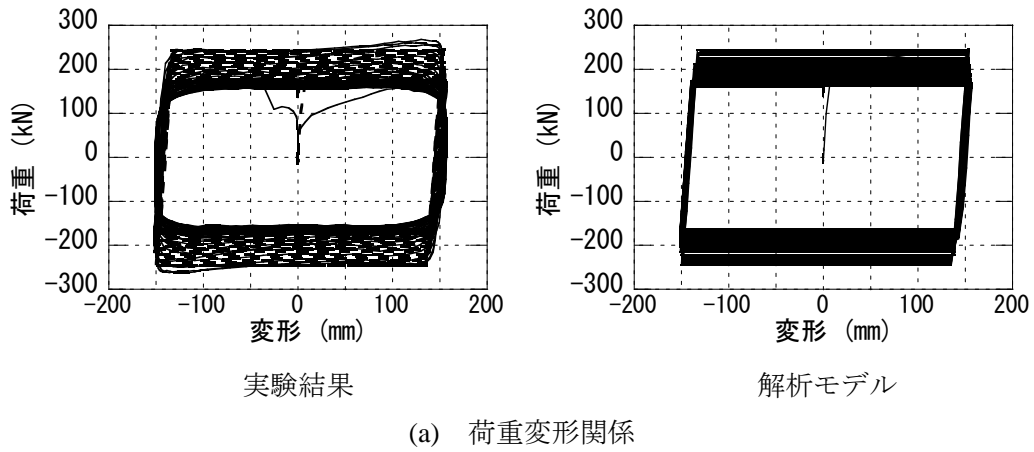


(d) 吸収エネルギーと降伏荷重変化率の関係

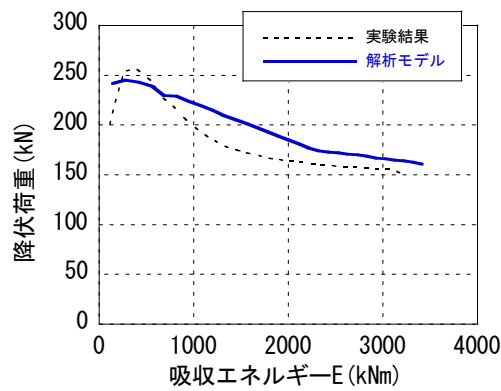


(e) 吸収え

図 3.3.4-7 試験体 No.2-A (P 方向: ±150mm 30 サイクル) との比較



(b) 荷重時刻歴



(c) 吸収エネルギーと降伏荷重変化率の関係

図 3.3.4-8 試験体 No.2-B (O 方向: ±150mm 30 サイクル) との比較

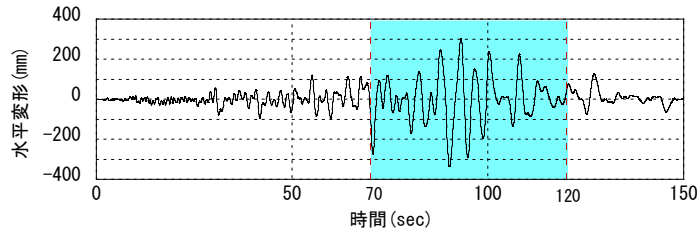
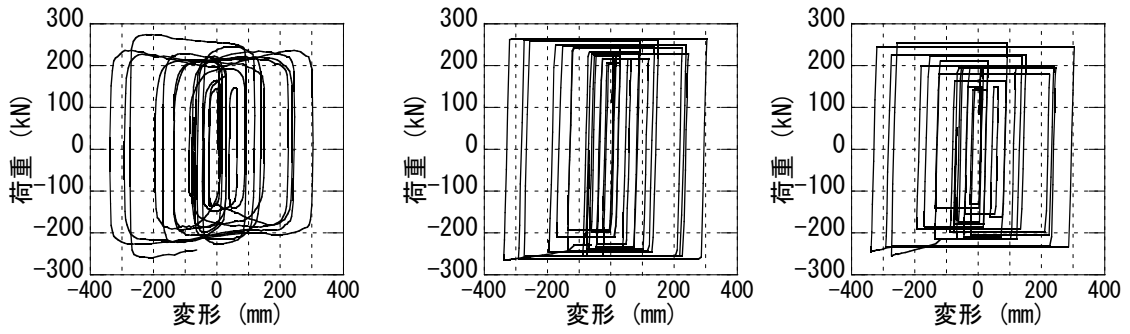


図 3.3.4-9 地震応答波 1 波の水平変形

しかし、ループ全体の大きさとしては、図 3.3.4-5 の結果と考え併せて妥当なものと考えられる。試験体 No.2-A (P 方向±150mm,30 サイクル) の場合を図 3.3.4-7 に示す。解析モデルの荷重値は試験体 No.2-A の場合でも実験結果とよく整合していることがわかる。

提案モデルが O 方向の特性を表現可能であるかを検証した。試験体 No.2-B (O 方向:±150mm 30 サイクル) との比較を図 3.3.4-8 に示す。図 3.3.4-8(a)の荷重変形関係において、提案モデルは試験結果とよく対応していることがわかる。図 3.3.4-8(b)の荷重時刻歴、(c)吸収エネルギーと降伏荷重変化率の関係において、解析モデルは 7~17 サイクル目にて実験結果をやや過大評価する傾向にあるものの、耐力劣化の傾向をよく表現できていることがわかる。

試験体 No.3 (地震応答波加振 12 サイクル) の地震応答波 1 波の水平変位を図 3.3.4-9 に示す。比較的大きな変形が繰返し現れる 70 秒~120 秒の 50 秒間における結果を図 3.3.4-10~図 3.3.4-13 に示す。図 3.3.4-10 は地震波 1 波目、図 3.3.4-11~13 は地震波 3 波目、5 波目および 12 波目の場合である。地震応答波では、繰返しによる劣化を非考慮とした場合も検討した。劣化非考慮の荷重値は実験結果を上回り、地震波の繰返し数が大きくなるにつれ実験結果との乖離は大きくなる傾向がある。一方、図 3.3.4-10~図 3.3.4-12 より、地震波 5 波目までは、繰返しによる劣化を考慮した解析モデルは実験結果をよく表現できていることがわかる。ただし、図 3.3.4-13 に示す地震波 12 波目においては、劣化考慮の解析モデルは荷重値がほとんど 0 となっている。1~3 波目の累積吸収エネルギーの時刻歴を図 3.3.4-14(a)に、4~12 波目を図 3.3.4-14(b)に示す。図 3.3.4-14(a)より 1~3 波目にて解析モデルは試験結果をやや下回るものの、性状をよく表現できている。また図 3.3.4-14(b)より、5 波目 (0~300 秒) まで解析モデルと実験結果の対応はよい。地震応答波加振における地震波 1 波の吸収エネルギー W と累積吸収エネルギー E を表 3.3.4-3 に示す。表 3.3.4-3 の解析は劣化考慮モデルの場合を示している。地震波 1~5 波目における実験と解析モデルとの乖離は W で最大 13%、 E で 11%であった。6 波目で解析モデルによる W は実験値に対して -57% となった。また 7 波目以降では、実験結果に対してより小さな値となっている。これは、解析モデルの耐力喪失時における累積吸収エネルギー E_4 (図 3.3.4-4 中の④点) を漸増正弦波加振結果から式(3.3.4-6)のように $E_4=8,859\sim 9,854$ kNm として設定しているためである。今回の解析モデルの適用範囲としては、地震波 5 波目の累積吸収エネルギー E に相当する 8,000kNm 程度までである。ただし 5 波目の吸収エネルギー W は 1 波目の半分にまで低下し、写真 3.3.4-3 より 5 波目の最大変形時に試験体下部に生じた亀裂が大きく開き、大きな形状変化が生じていることがわかる。一方、表 3.3.4-3 に示すように $E=18,000$ kNm 程度まで U2426 鉛ダンパーはエネルギー吸収をおこなっている。写真 3.3.4-3 および 3.3.4-4 のようなダンパーの状態を許容し、1 台のダンパーに対する累積吸収エネルギー E が 8,000kNm を超える入力を検討する際には、地震応答波実験結果の 6 波目以降もシミュレート可能な解析モデルを構築する必要がある。

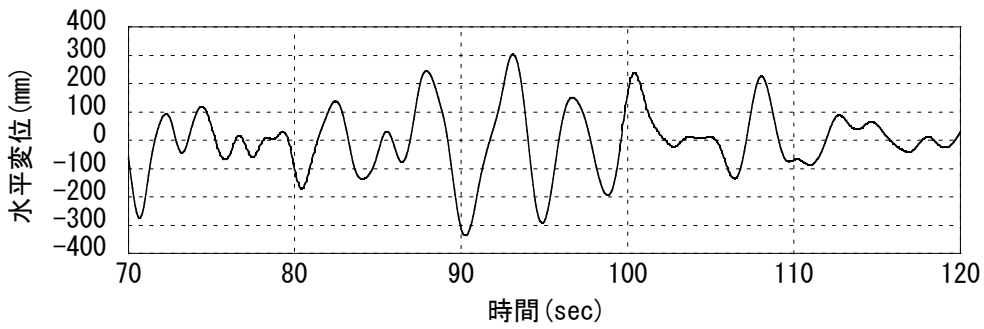


実験結果

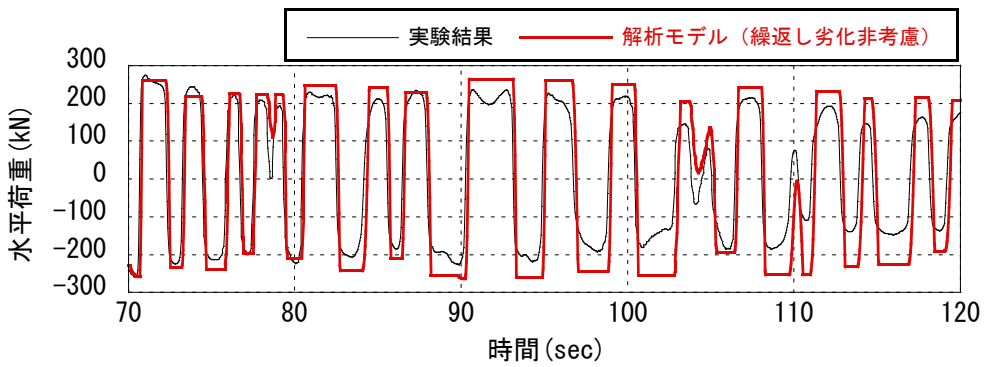
解析モデル (劣化非考慮)

解析モデル (劣化考慮)

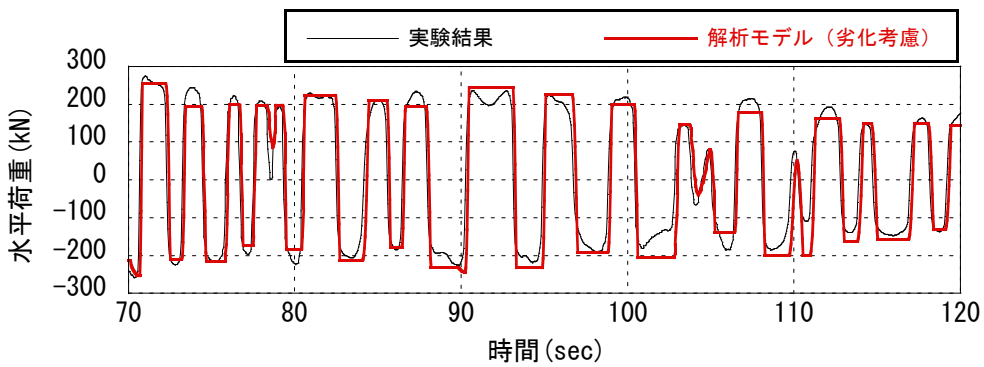
(a) 荷重変形関係



(b) 水平変形

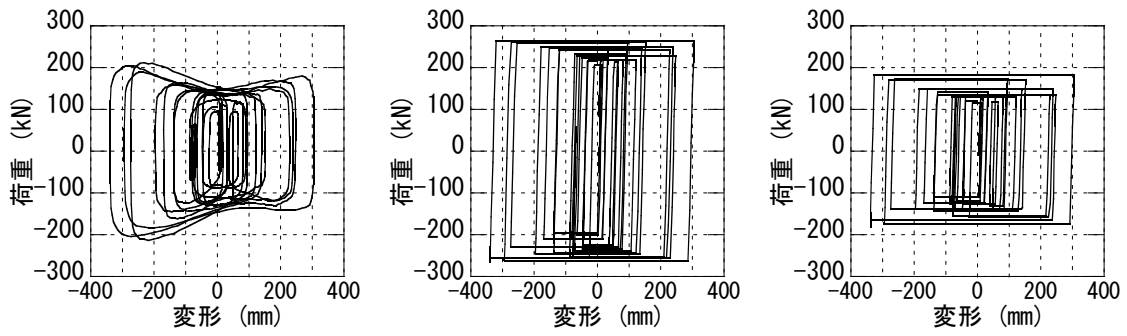


(c) 水平荷重 劣化非考慮



(d) 水平荷重 劣化考慮

図 3.3.4-10 試験体 No.3 (地震応答波加振) 1 波目

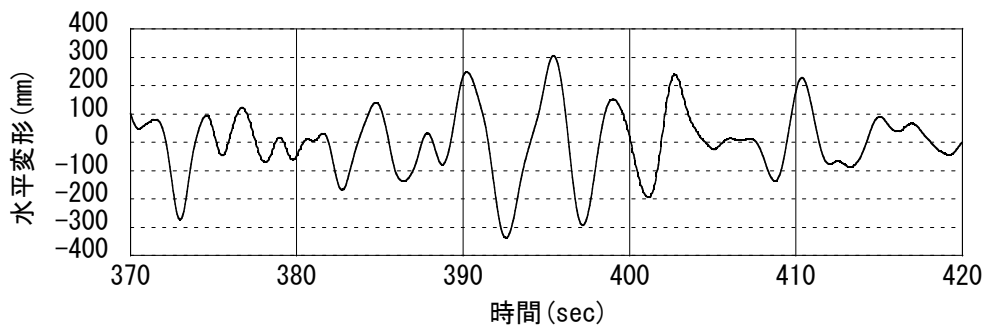


実験結果

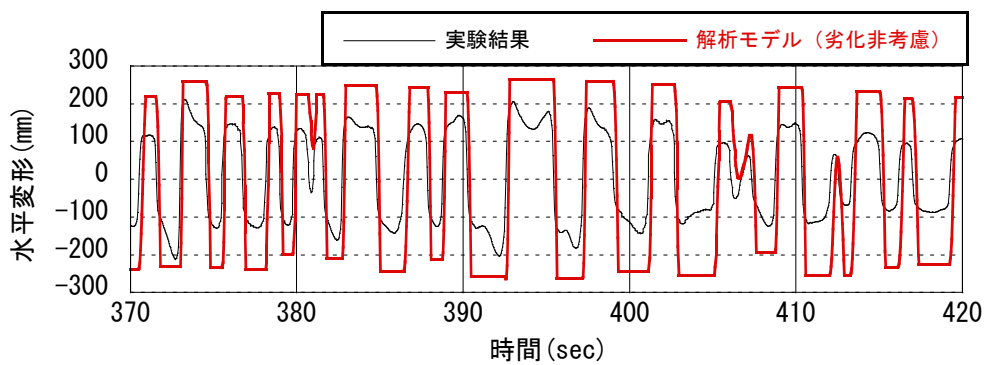
解析モデル (劣化非考慮)

解析モデル (劣化考慮)

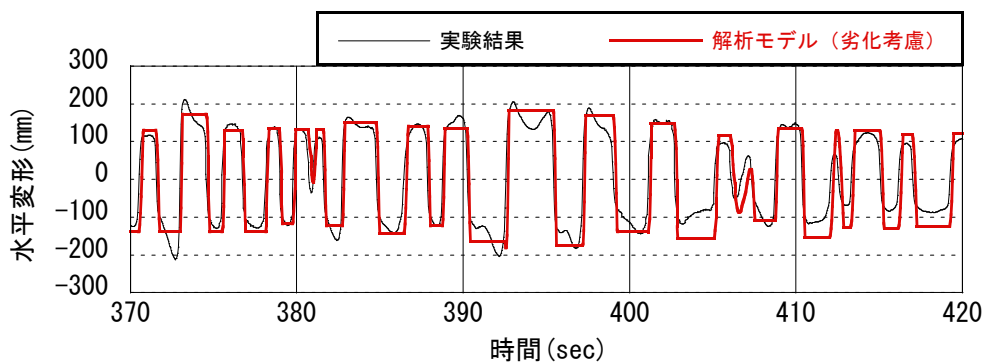
(a) 荷重変形関係



(b) 水平変形

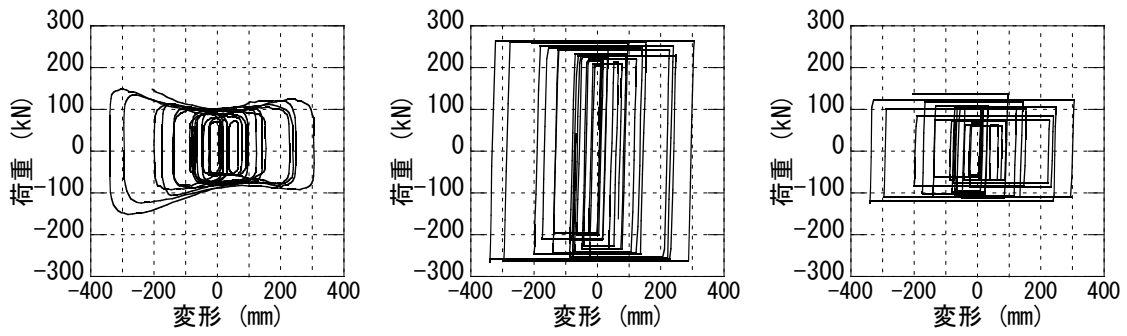


(c) 水平荷重 劣化非考慮



(d) 水平荷重 劣化考慮

図 3.3.4-11 試験体 No.3 (地震応答波加振) 3 波目

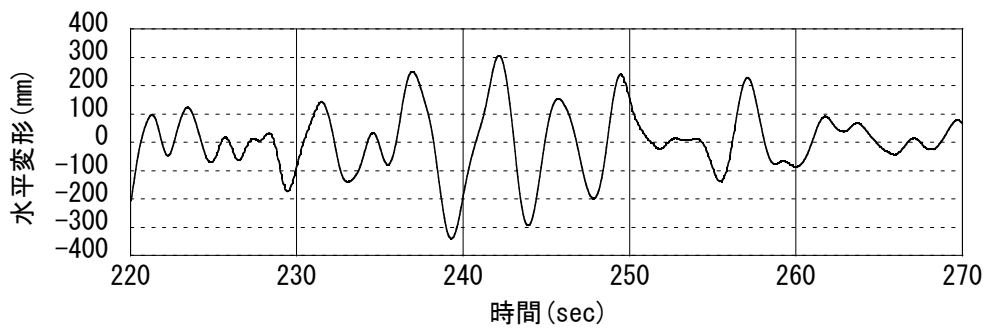


実験結果

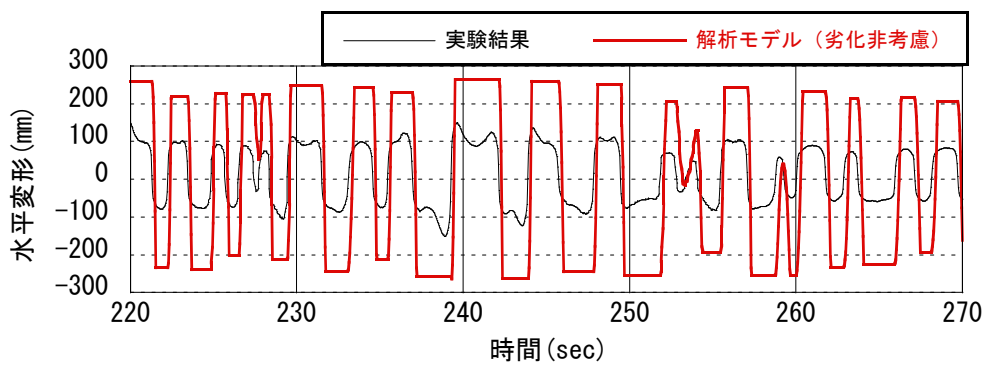
解析モデル (劣化非考慮)

解析モデル (劣化考慮)

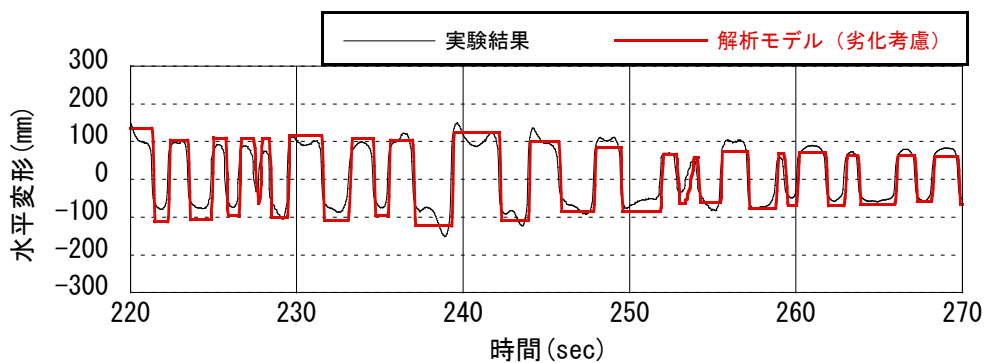
(a) 荷重変形関係



(b) 水平変形

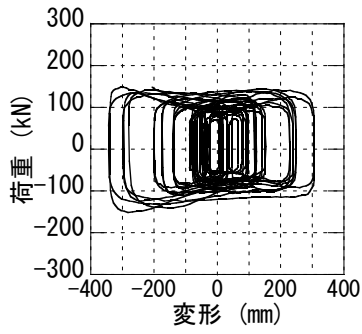


(c) 水平荷重 劣化非考慮

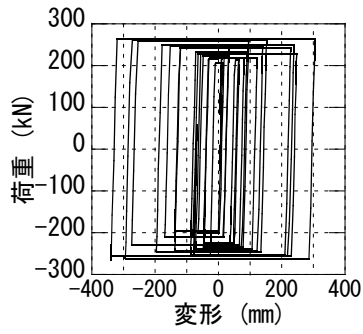


(d) 水平荷重 劣化考慮

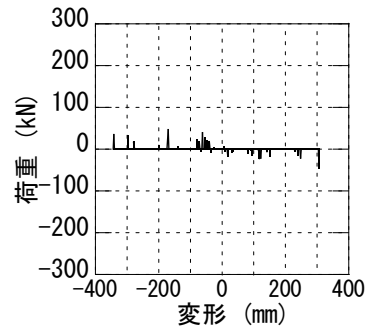
図 3.3.4-12 試験体 No.3 (地震応答波加振) 5 波目



実験結果

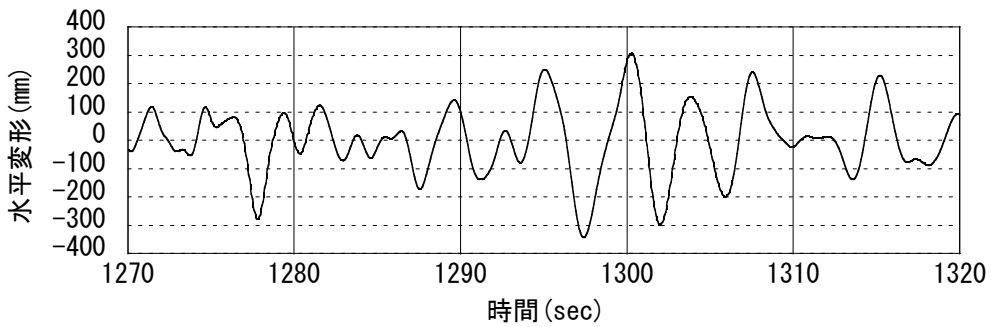


解析モデル (劣化非考慮)

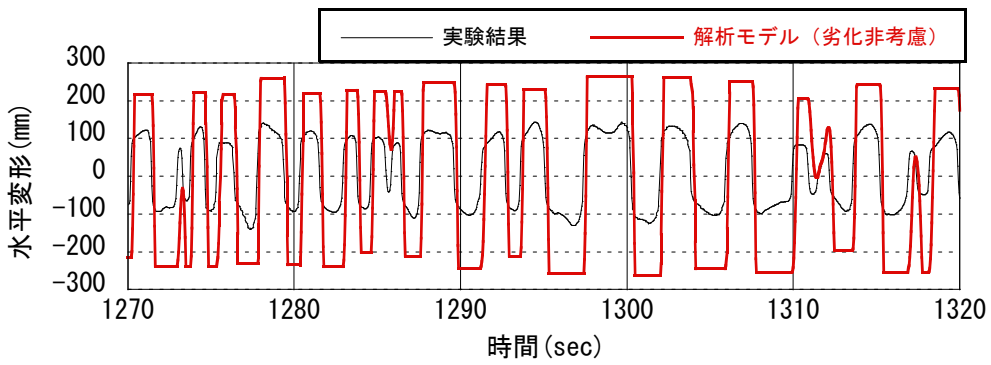


解析モデル (劣化考慮)

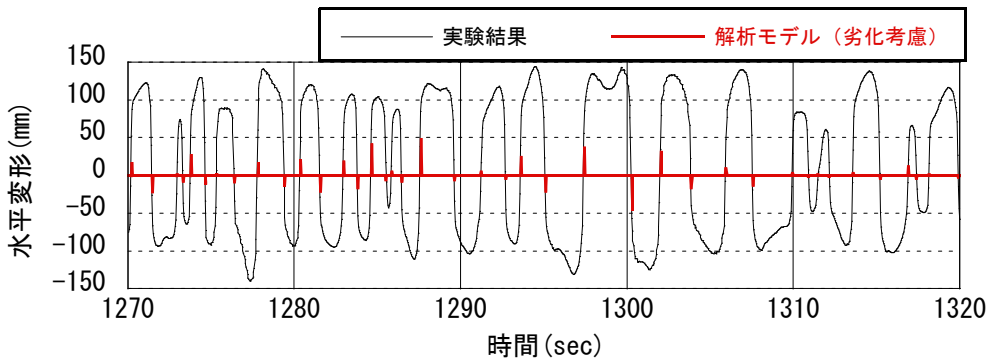
(a) 荷重変形関係



(b) 水平変形

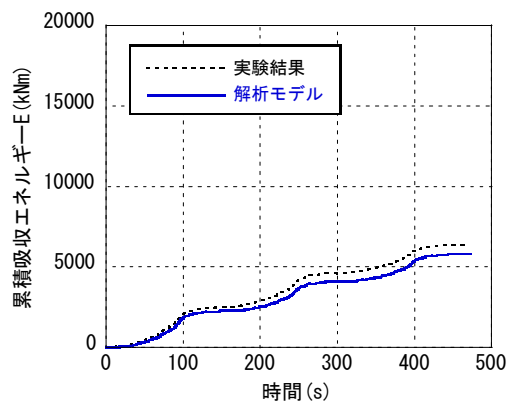


(c) 水平荷重 劣化非考慮

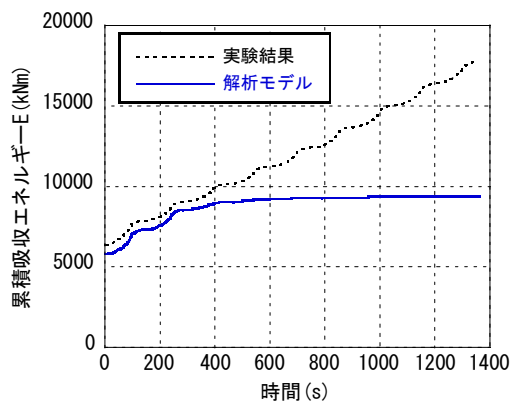


(d) 水平荷重 劣化考慮

図 3.3.4-13 試験体 No.3 (地震応答波加振) 12 波目



(a)地震応答波加振 1～3回目



(b)地震応答波加振 4～12回目

図 3.3.4-14 試験体 No.3 (地震応答波加振) の累積吸収エネルギー

表 3.3.4-3 地震波 1 波の吸収エネルギー W と累積吸収エネルギー E

回数	$\Sigma d(m)$	W (実験)	W (解析)	W 解析/ W 実験	E (実験)	E (解析)	E 解析/ E 実験
1	13.1	2,494	2,270	0.91	2,494	2,270	0.91
2	26.3	2,129	1,844	0.87	4,623	4,114	0.89
3	39.8	1,743	1,691	0.97	6,366	5,805	0.91
4	53.4	1,517	1,538	1.01	7,883	7,343	0.93
5	67.0	1,187	1,237	1.04	9,070	8,580	0.95
6	80.7	1,088	465	0.43	10,158	9,045	0.89
7	94.4	1,091	172	0.16	11,249	9,217	0.82
8	108.2	1,167	81	0.07	12,416	9,298	0.75
9	121.9	1,281	38	0.03	13,698	9,336	0.68
10	135.6	1,349	19	0.01	15,047	9,355	0.62
11	149.2	1,357	10	0.01	16,403	9,365	0.57
12	162.9	1,352	6	0.00	17,755	9,371	0.53

※ W, E の単位は(kNm)、解析モデルは劣化考慮の場合を示す。



写真 3.3.4-1 地震応答波 1 波目 最大変形時



写真 3.3.4-2 地震応答波 3 波目 最大変形時

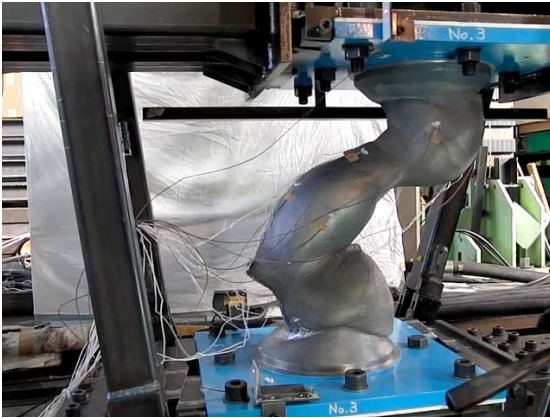


写真 3.3.4-3 地震応答波 5 波目 最大変形時

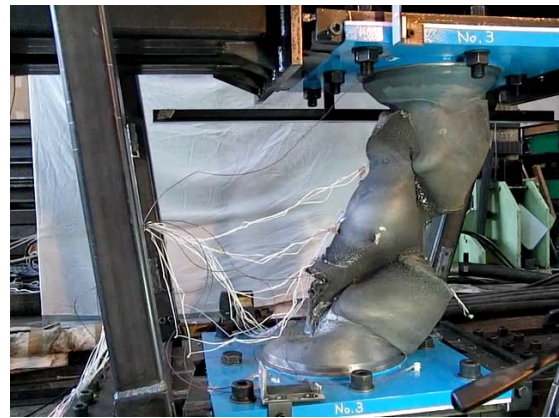


写真 3.3.4-4 地震応答波 12 波目 最大変形時

5) まとめと今後の課題

平成 22 年度に実施した鉛ダンパー U2426 の実験結果から、繰返しによる耐力低下が確認された。実験結果から得られたダンパー耐力の実性状を表現するために、解析モデルの検討を行った。提案した解析モデルは、振幅および繰返しによるエネルギー吸収量に応じてダンパーの耐力を変化させる。長周期地震動時における応答波加振時の実験結果に対して、解析モデルは累積吸収エネルギー 8,000~9,000kNm まで力学特性を精度よく表現できることを確認した。

以下に今後の課題を列挙する。

①ダンパーの累積吸収エネルギー E が 8,000kNm を超える場合への適用範囲の拡大

今回提案した解析モデルは、漸増連続基本加振の破断時累積吸収エネルギー 8,000~9,000kNm 程度までが適用範囲である。地震応答波多数回繰返し加振結果では、上記を超えるエネルギー量においてもダンパーはエネルギー吸収が可能であることを確認している。建物条件や入力地震動によって上記の適用範囲を超える検討を行う場合には、本提案モデルの適用範囲の拡大が必要となる。

②2 方向加力特性の評価および 2 方向特性を表現可能な解析モデルの提案

鉛ダンパーの 2 方向加力時特性を実験的に把握した研究は発表されていない。地震時実挙動と照らして考えると、2 方向加力時特性を実験的に確認し、これらの特性を精度よく評価可能なモデルの構築が必要である。

(2) 地震応答解析

前節にて提案した繰返しによる降伏荷重の変化を考慮できる鉛ダンパーの復元力特性を用いて、天然ゴム系積層ゴムと鉛ダンパーからなる免震層を有する 1 質点系の地震応答解析を実施した。

1) 解析モデル

解析で想定する建物諸元を表 3.3.4-4 に示す。また解析モデルを図 3.3.4-15 に示す。上部構造は 1 質点とした。上部構造の重量は 46,000kN である。天然ゴム系積層ゴムによる免震周期は 4.0 秒とする。鉛ダンパーの負担せん断力係数は 0.033 (U2426 型鉛ダンパー 7 台) とする。

天然ゴム系積層ゴムの復元力特性は線形弾性とする。

鉛ダンパーの復元力特性は、前節で示した振幅ならびに繰返しによる累積吸収エネルギーに応じて降伏耐力が変化するバイリニアモデルとした。本節では、繰返しによる降伏耐力の変化による免震建物応答への影響を評価するため、繰返しによる降伏耐力の変化を考慮するモデルを用いた場合と非考慮の場合で応答解析結果を比較する。なお、両モデルとも降伏耐力の振幅依存性は考慮している。鉛ダンパー解析モデルの地震波入力時の履歴性状を図 3.3.4-16 に示す。

免震層の減衰は鉛ダンパーの履歴減衰のみを考慮した。なお本検討は水平方向 1 自由度とする。解析手法は Newmark β 法 ($\beta=1/4$) を用いた。

表 3.3.4-4 天然ゴム系積層ゴム+鉛ダンパー解析モデル

想定建物	RC 造、10 階建て 基礎免震
上部構造重量	46,000kN
鉛ダンパー台数	7 台
積層ゴム台数	10 台
積層ゴム直径(内径)	750mm(15mm)
積層ゴム面圧	10.1 N/mm ²
ゴムによる周期	4.0 秒
鉛ダンパー負担 せん断力係数	0.033

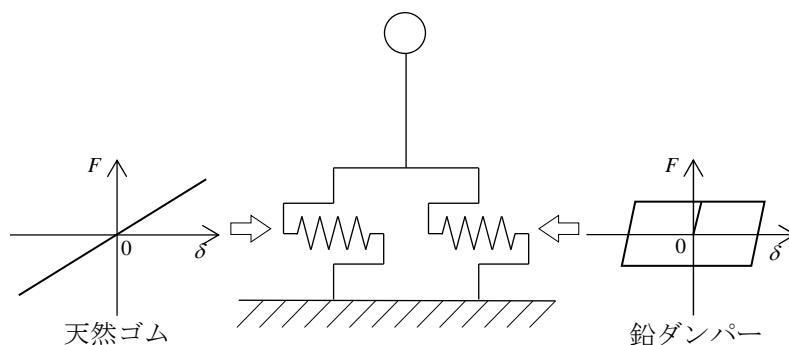
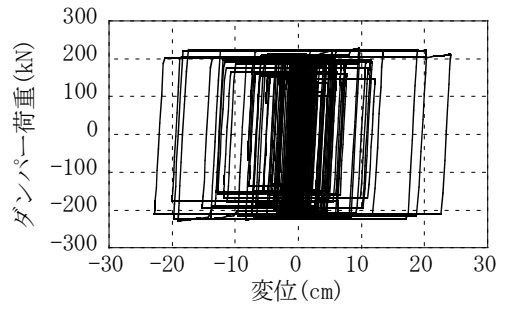
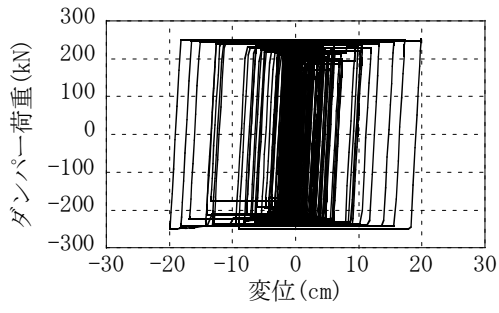


図 3.3.4-15 解析モデル模式図



(a) 繰返しによる耐力変化非考慮

(b) 繰返しによる耐力変化考慮

図 3.3.4-16 鉛ダンパーの解析モデル復元力特性 (地震波入力: AIC003 入力倍率: 1.5)

2) 解析結果

時刻歴応答解析結果を表 3.3.4-5 に示す。各応答値の繰返し非考慮モデルに対する繰返し考慮モデルの比率も併せて表中に示している。表 3.3.4-5(c)に示す免震層の累積変形量は、免震層の累積吸収エネルギー95%時における値としている。鉛ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーの最大値は、表 3.3.4-5(b)より SZO024 入力倍率 1.5 時における 3,542kNm であった。これは鉛ダンパー解析モデルの適用範囲内である。

入力地震動 KGIN の場合では、入力倍率 1.5 倍においても応答値各項目において繰返しによる影響は表れなかった。これは、繰返し考慮モデルは累積吸収エネルギーが少なくとも 195kN を超えないと降伏耐力が変化しないためであり、KGIN の応答結果は最大変位が 4cm 以下、ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーが 150kNm 以下であったことによる。

繰返しによる降伏耐力の変化を考慮すると、免震層最大変位は非考慮時に対して 0.97~1.21 倍となった。SZO024 の入力倍率 1.5 時では繰返し考慮時に 40.9cm となり、今回の検討入力波のうちで最も大きな変位となっている。

応答最大加速度は 38~135cm/s²、免震層の応答最大せん断力係数は 0.04~0.13 であった。繰返し特性考慮時のこれらの値は非考慮時に対して 0.95~1.05 倍であり、最大変位に比べて変化は小さい。

鉛ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーは、最大で約 3,500kNm であった。正弦波±400mm 時加振時の最終エネルギー吸収量は 8,850kNm であり、いずれの入力地震波においてもこの値を下回った。ダンパー1 台あたりの累積吸収エネルギーは、繰返しによる劣化考慮により 0.95~1.12 倍になった。

免震層の累積変形量は、8.5m~19.4m であった。繰返し考慮時で 0.96~1.21 倍であった。増幅率は免震層の最大変位と同程度であった。免震層の吸収エネルギーから求めた速度換算値は繰返し考慮時で 0.97~1.06 倍であった。

表 3.3.4-5(a) 応答解析結果（最大応答水平変位、応答加速度）

入力地震動	入力倍率	免震層最大水平変位 (cm)			応答最大加速度 (cm/s ²)		
		繰返し 非考慮	繰返し 考慮	考慮/ 非考慮	繰返し 非考慮	繰返し 考慮	考慮/ 非考慮
OSKH02_AV	1.00	13.61	14.75	1.084	69.7	71.0	1.018
	1.25	22.43	24.93	1.111	93.3	97.9	1.049
	1.50	32.58	35.76	1.098	119.7	125.9	1.052
AIC003_AV	1.00	13.18	13.47	1.022	68.5	67.6	0.987
	1.25	17.39	16.93	0.973	79.9	76.3	0.955
	1.50	19.90	24.17	1.215	86.6	91.2	1.054
SZO024_AV	1.00	20.26	21.42	1.057	87.5	87.6	1.001
	1.25	27.95	29.92	1.070	107.7	107.9	1.002
	1.50	35.73	40.89	1.145	127.8	134.7	1.054
KGIN_AV	1.00	2.86	2.86	1.000	38.2	38.2	1.000
	1.25	3.29	3.29	1.000	39.7	39.7	1.000
	1.50	3.69	3.69	1.000	41.0	41.0	1.000

表 3.3.4-5(b) 応答解析結果（応答せん断力係数、ダンパーの累積吸収エネルギー）

入力地震動	入力倍率	免震層応答最大せん断力係数			ダンパー1台あたりの 累積吸収エネルギー(kNm)		
		繰返し 非考慮	繰返し 考慮	考慮/ 非考慮	繰返し 非考慮	繰返し 考慮	考慮/ 非考慮
OSKH02_AV	1.00	0.071	0.072	1.018	1086.7	1167.6	1.074
	1.25	0.095	0.100	1.049	1842.8	2033.3	1.103
	1.50	0.122	0.128	1.052	2793.3	3114.1	1.115
AIC003_AV	1.00	0.070	0.069	0.987	1152.9	1158.0	1.004
	1.25	0.081	0.078	0.955	1690.1	1717.7	1.016
	1.50	0.088	0.093	1.054	2312.8	2403.3	1.039
SZ0024_AV	1.00	0.089	0.089	1.001	1698.5	1769.5	1.042
	1.25	0.110	0.110	1.002	2615.9	2575.9	0.985
	1.50	0.130	0.137	1.054	3542.4	3381.8	0.955
KGIN_AV	1.00	0.039	0.039	1.000	53.5	53.5	1.000
	1.25	0.040	0.040	1.000	90.0	90.0	1.000
	1.50	0.042	0.042	1.000	153.2	153.2	1.000

表 3.3.4-5(c) 応答解析結果（免震層累積変形量、累積吸収エネルギー速度換算値）

入力地震動	入力倍率	免震層累積変形量(m)			免震層累積エネルギー速度換算値 (cm/s)		
		繰返し 非考慮	繰返し 考慮	考慮/ 非考慮	繰返し 非考慮	繰返し 考慮	考慮/ 非考慮
OSKH02_AV	1.00	8.5	9.3	1.097	180.1	186.7	1.037
	1.25	11.8	13.3	1.121	234.5	246.3	1.050
	1.50	15.4	18.5	1.205	288.7	304.9	1.056
AIC003_AV	1.00	11.9	11.6	0.974	185.5	185.9	1.002
	1.25	14.9	14.3	0.964	224.6	226.4	1.008
	1.50	17.7	17.0	0.962	262.7	267.8	1.019
SZ0024_AV	1.00	10.5	11.3	1.071	225.2	229.8	1.021
	1.25	14.1	15.4	1.088	279.4	277.3	0.992
	1.50	17.9	19.4	1.086	325.2	317.7	0.977
KGIN_AV	1.00	10.4	10.4	1.000	40.0	40.0	1.000
	1.25	10.2	10.2	1.000	51.8	51.8	1.000
	1.50	10.2	10.2	1.000	67.6	67.6	1.000

図 3.3.4-17 に免震層のせん断力係数と水平変位の関係を示す。KGIN を除いて繰返し考慮時の履歴形状は非考慮に対して変形量が大きくなる傾向がわかる。免震層変位、累積変形量および吸収エネルギーの時刻歴を図 3.3.4-18 に示す。免震層変位の振幅が大ききな区間では、累積変形量、吸収エネルギーの時間あたりの上昇量は大きい。吸収エネルギーは振幅が大きき区間を過ぎると、ほとんど変化が見られなくなるのに対し、累積変形量は解析終了まで漸増する。

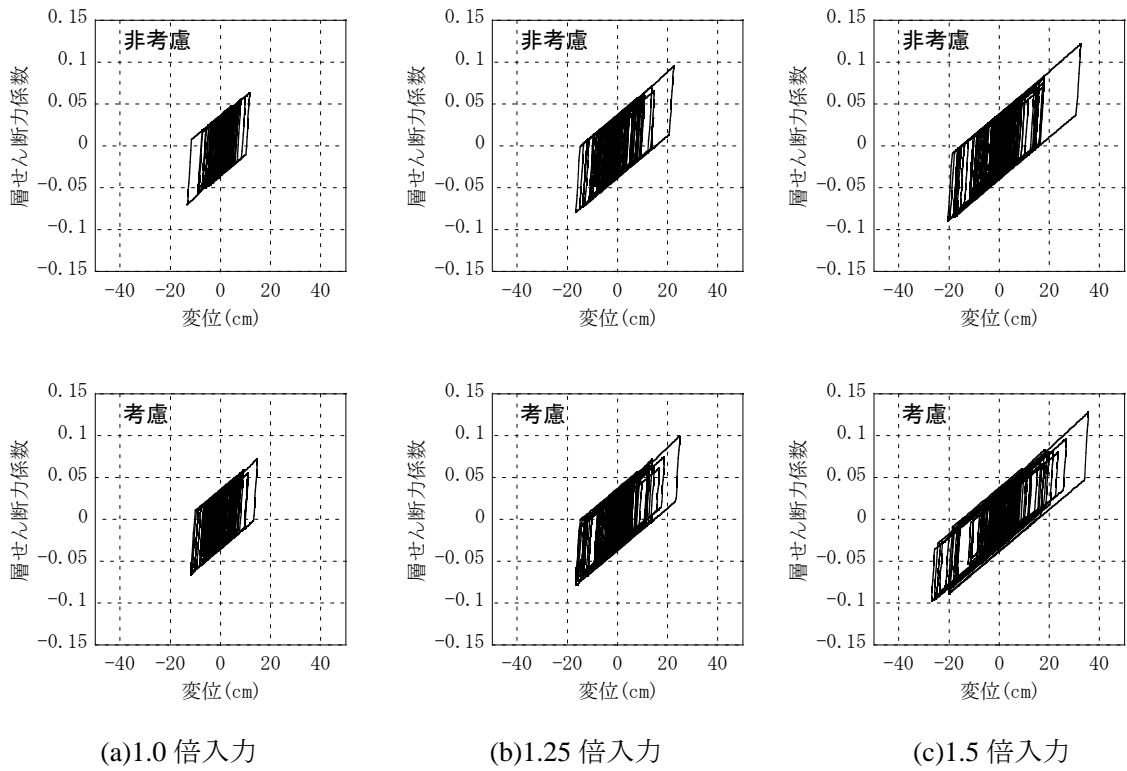


図 3.3.4-17(a) OSKH02 入力時 免震層せん断力係数—免震層変位関係

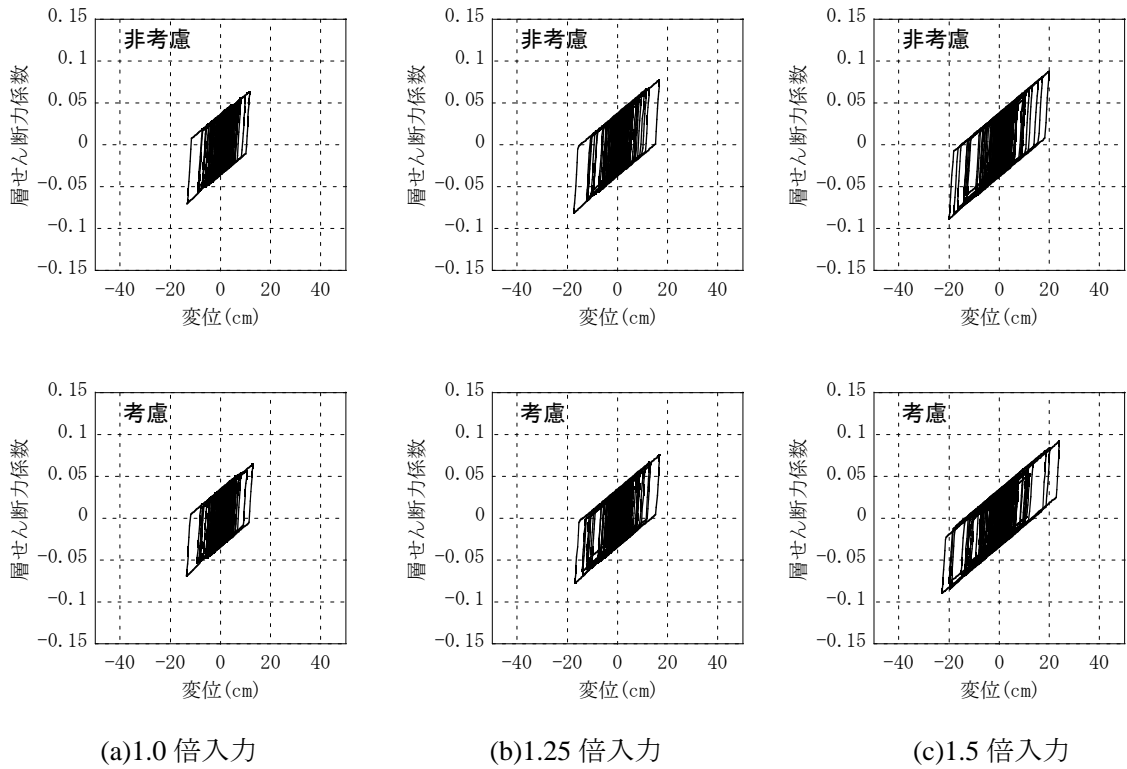


図 3.3.4-17(b) AIC003 入力時 免震層せん断力係数—免震層変位関係

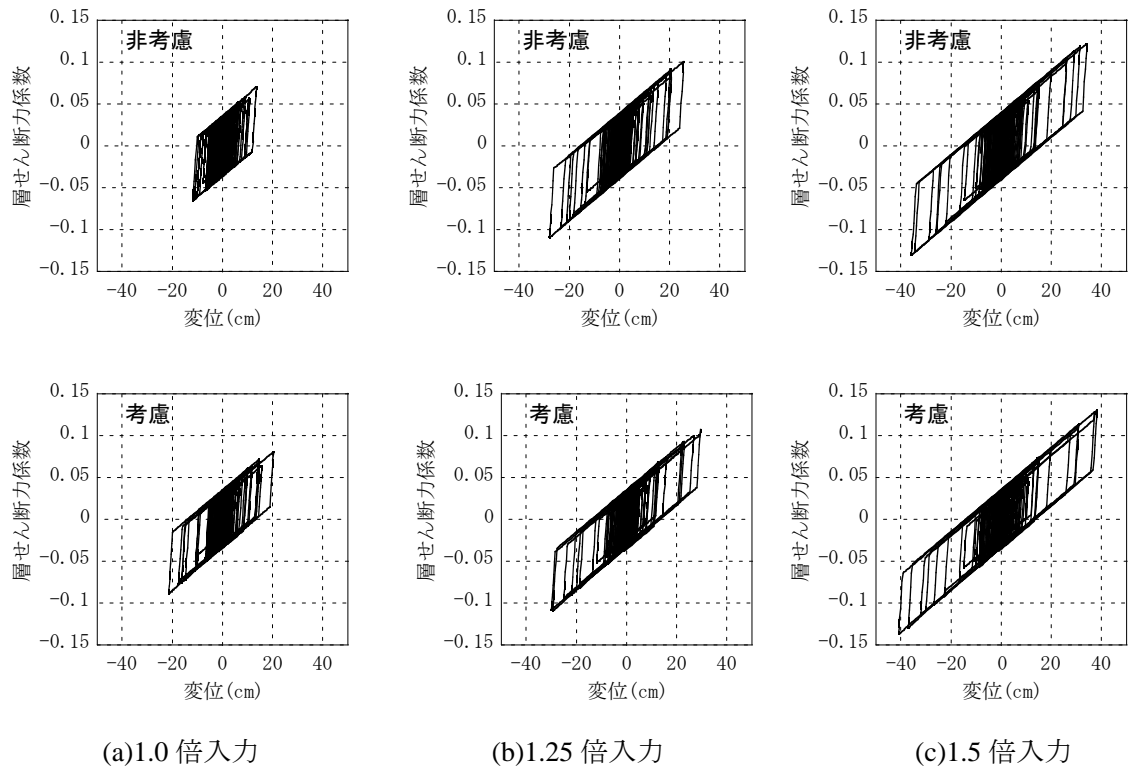


図 3.3.4-17(c) SZO024 入力時 免震層せん断力係数—免震層変位関係

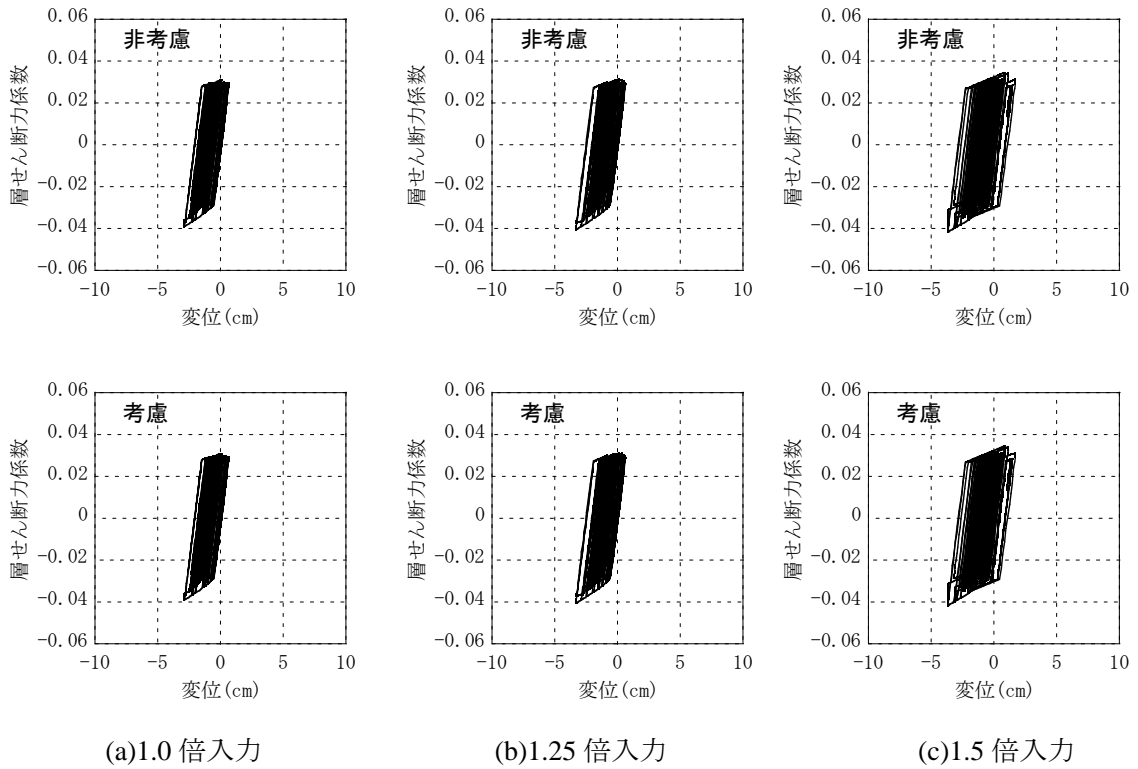


図 3.3.4-17(d) KGIN 入力時 免震層せん断力係数—免震層変位関係

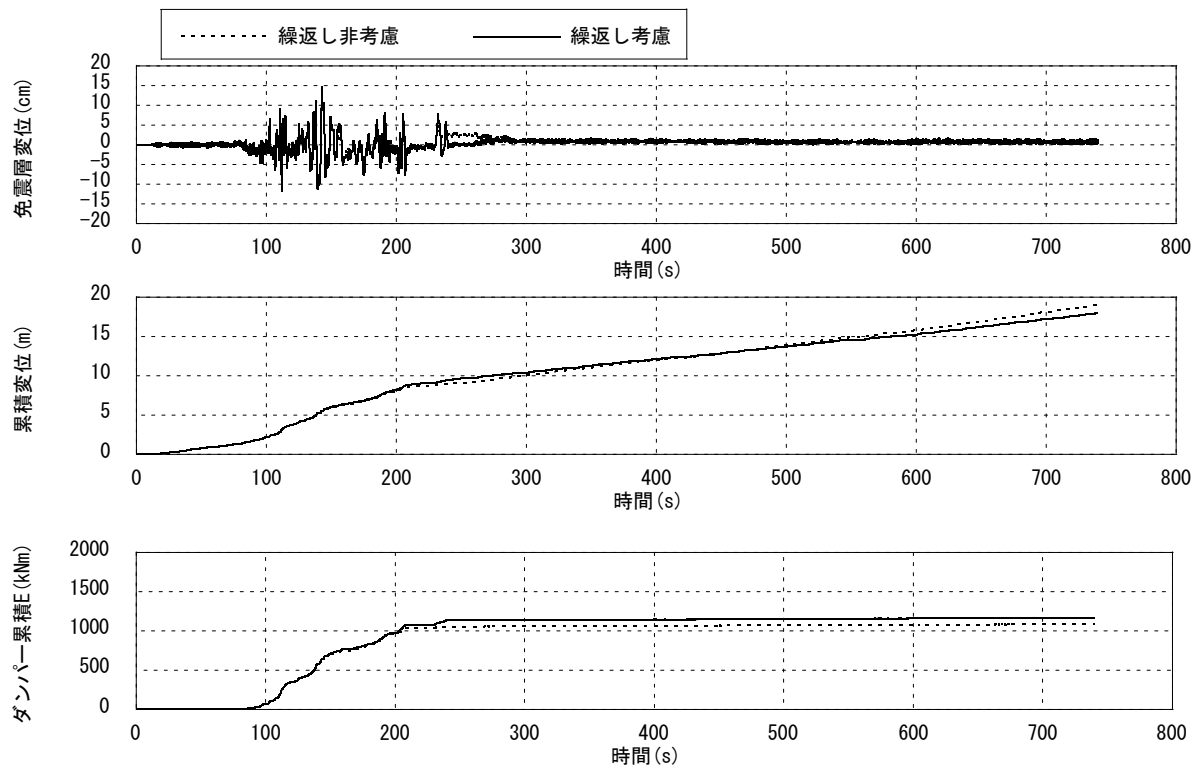


図 3.3.4-18(a) OSKH02 入力倍率 1.0 時刻歴応答

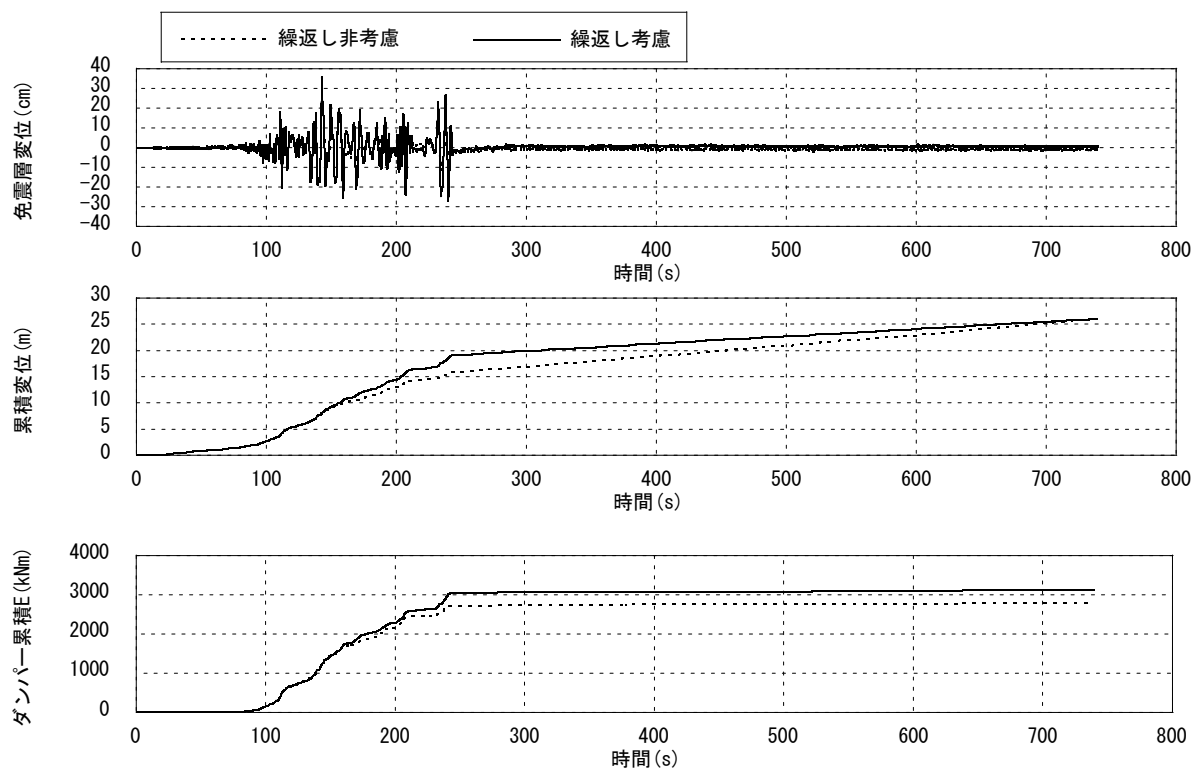


図 3.3.4-18(b) OSKH02 入力倍率 1.5 時刻歴応答

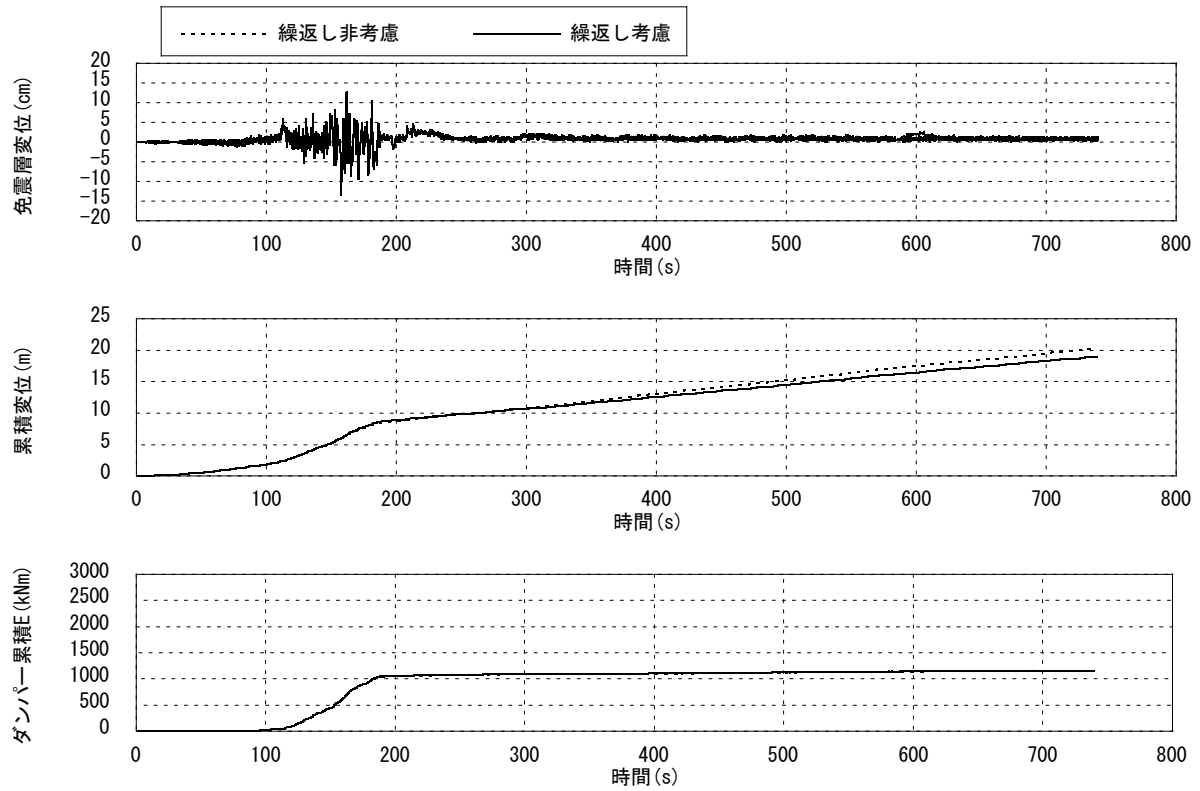


図 3.3.4-18(c) AIC003 入力倍率 1.0 時刻歴応答

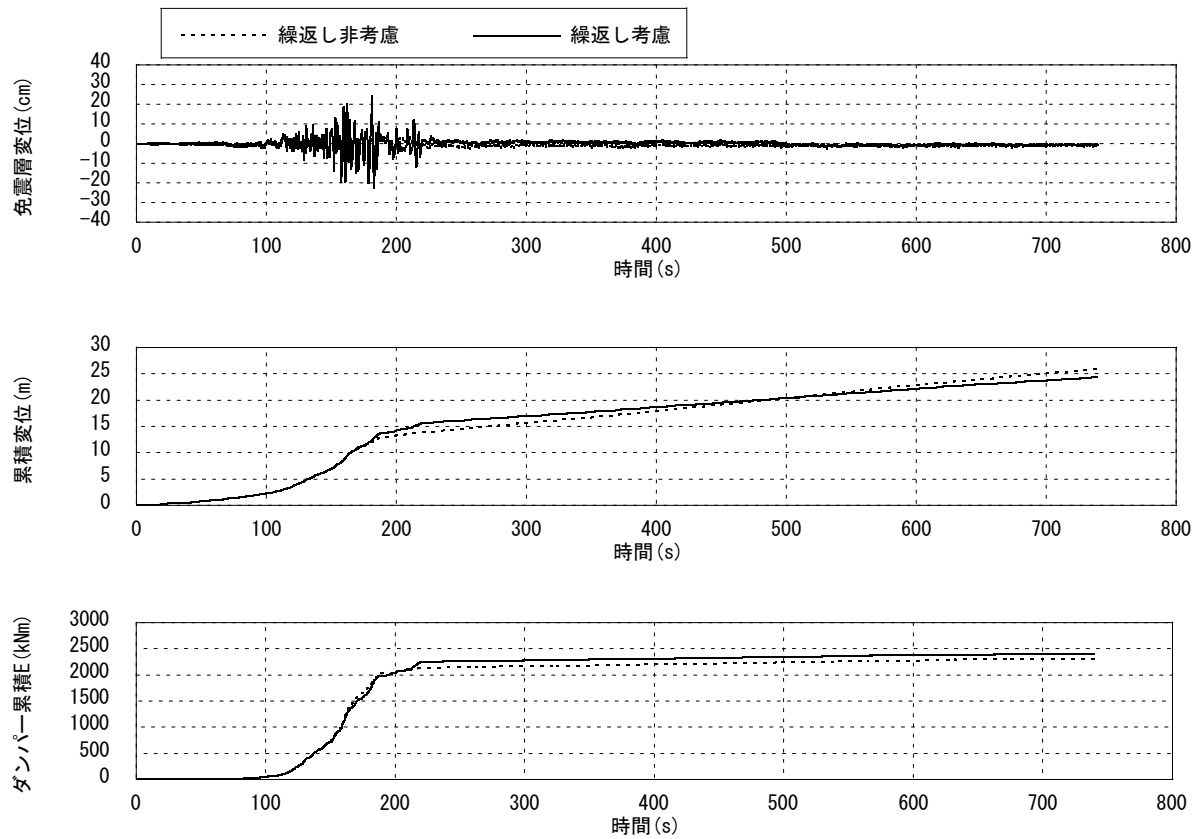


図 3.3.4-18(d) AIC003 入力倍率 1.5 時刻歴応答

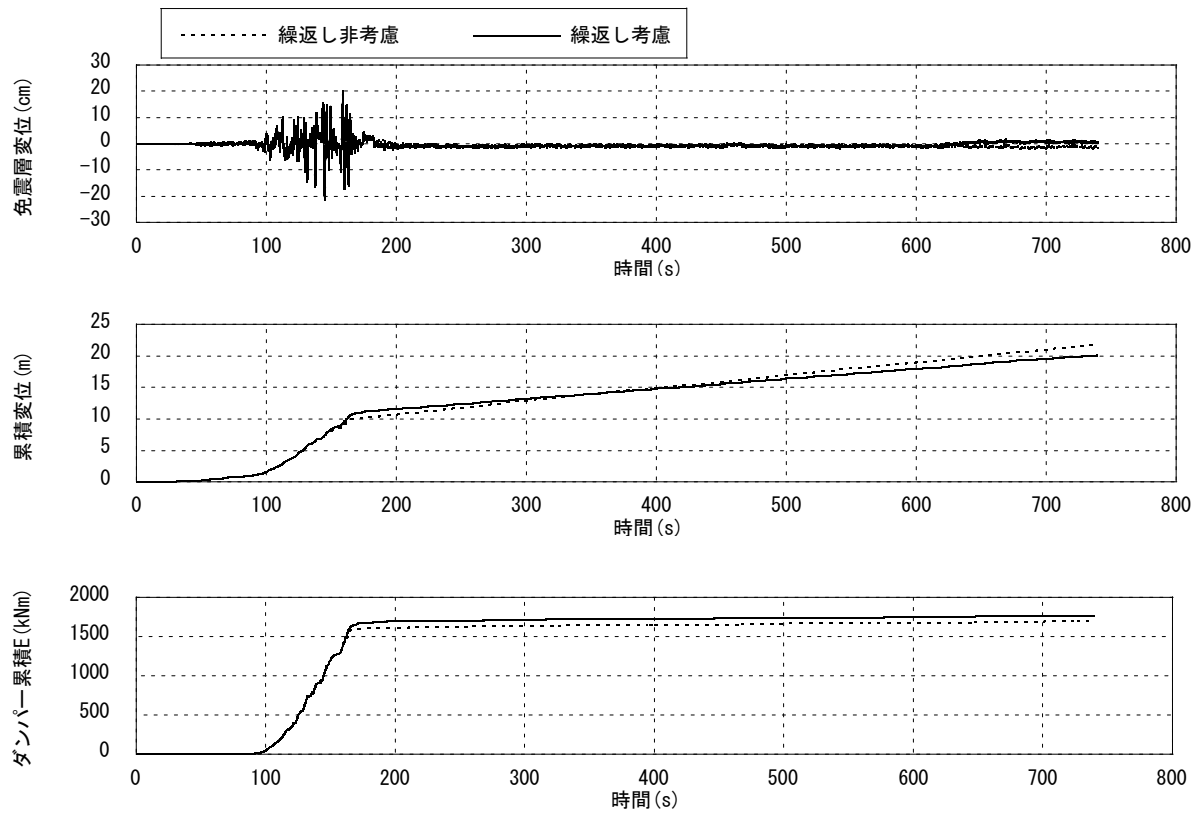


図 3.3.4-18(e) SZO024 入力倍率 1.0 時刻歴応答

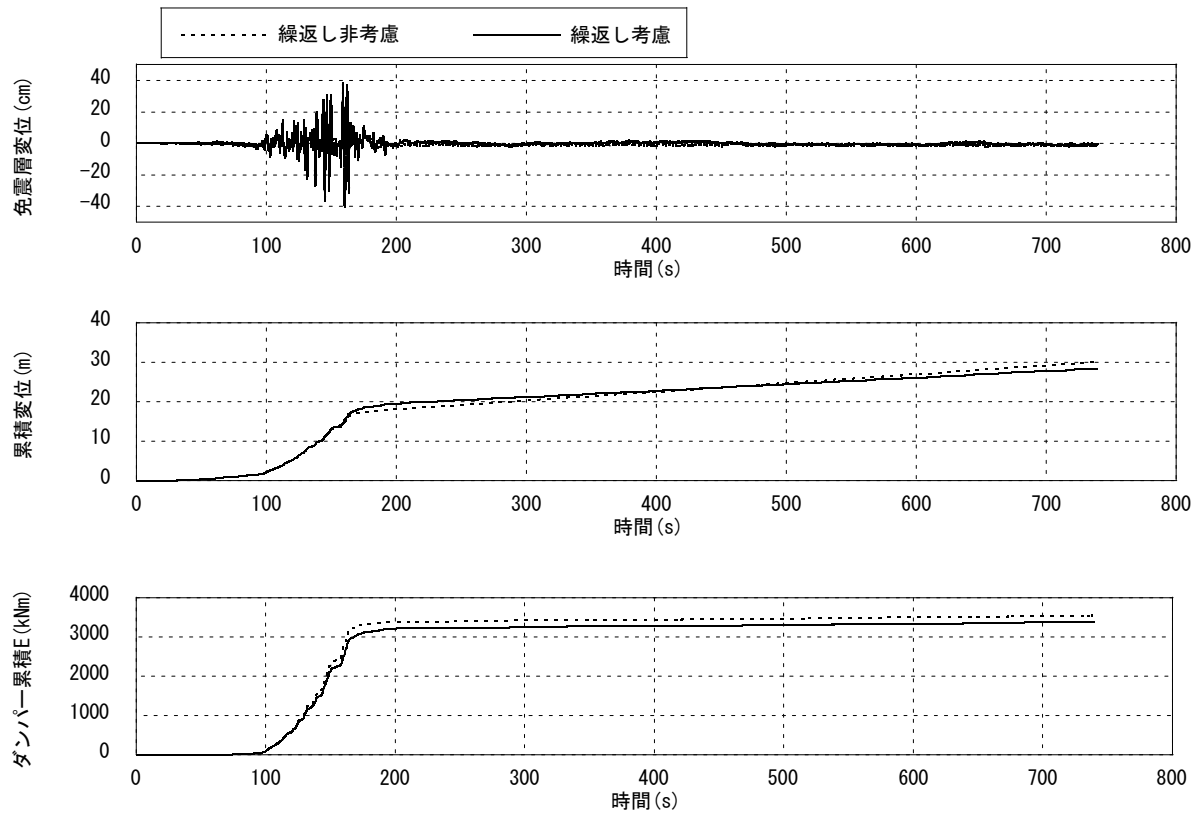


図 3.3.4-18(f) SZO024 入力倍率 1.5 時刻歴応答

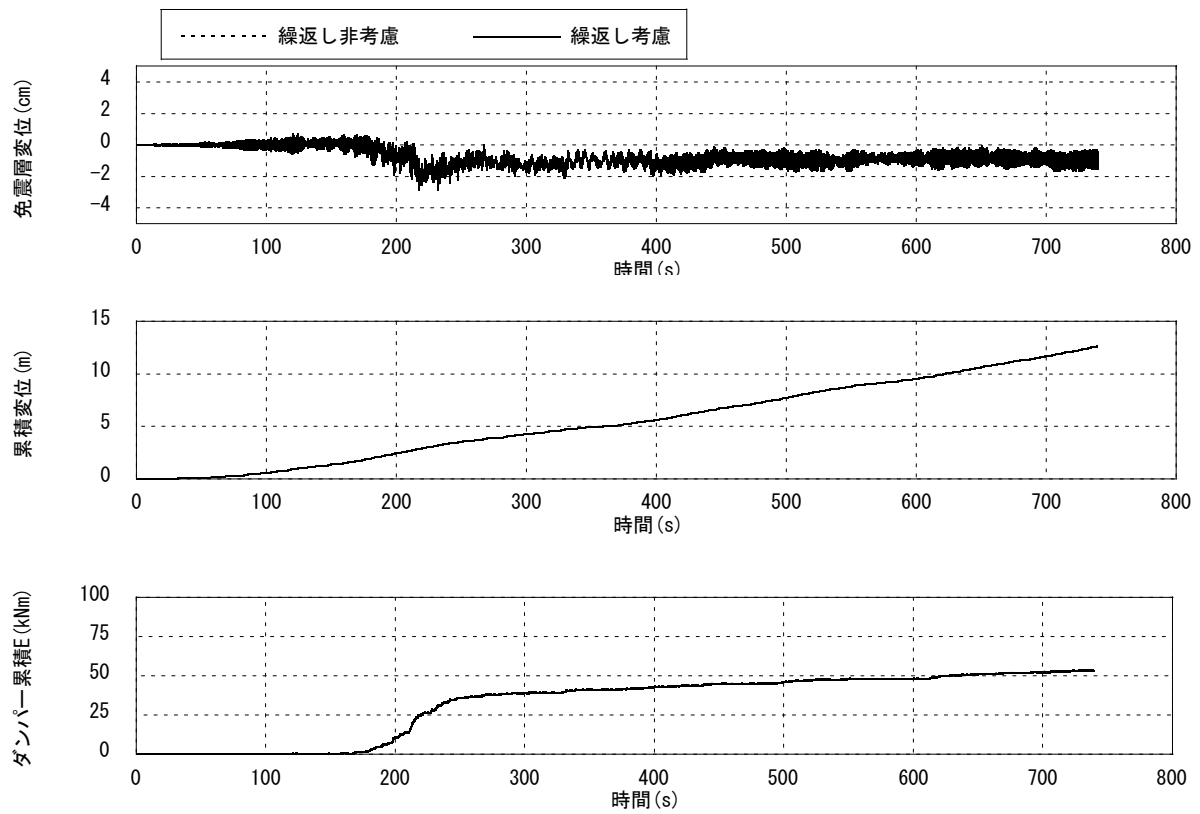


図 3.3.4-18(g) KGIN 入力倍率 1.0 時刻歴応答

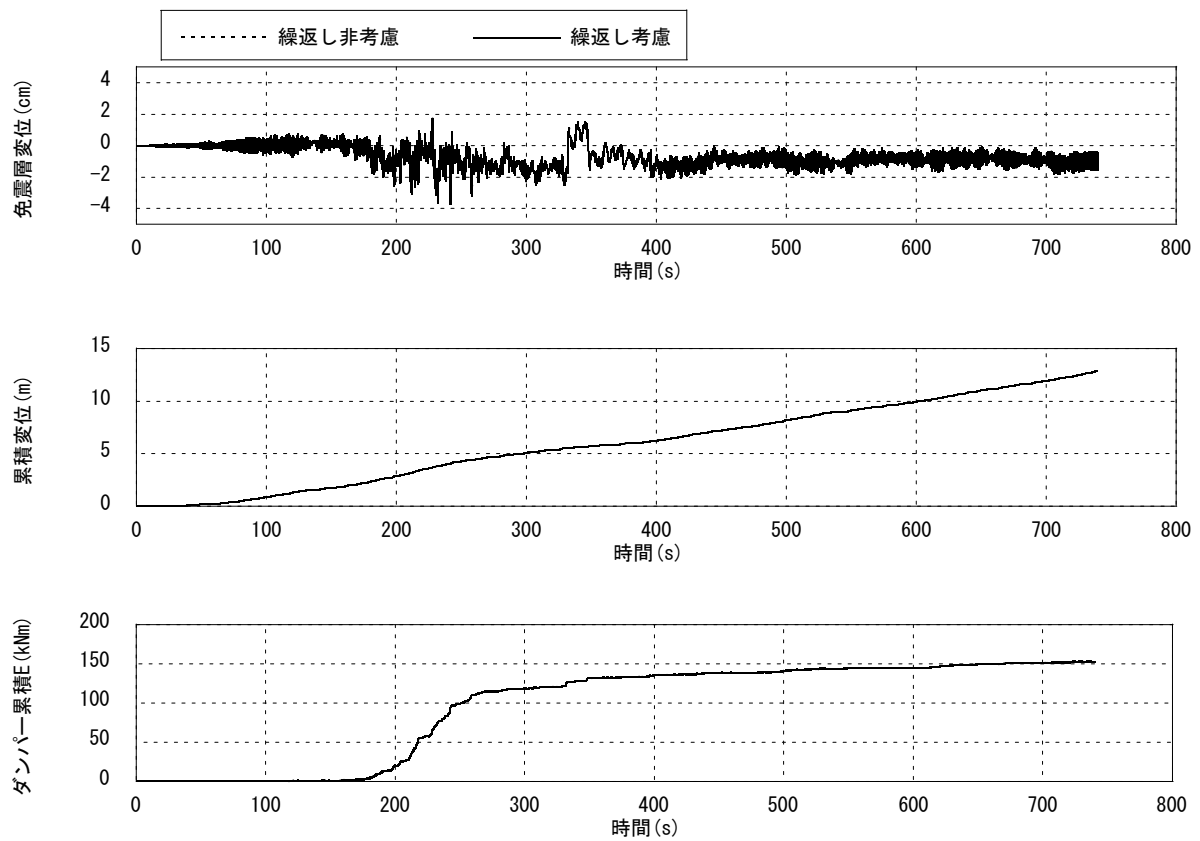


図 3.3.4-18(h) KGIN 入力倍率 1.5 時刻歴応答

鉛ダンパーの繰返し加力時の特性として、破断前に亀裂が発生することが報告されている。様々な振幅にて実験的に確認された鉛ダンパーの亀裂発生および破断時繰返し回数の関係を図 3.3.4-19 に示す^{3.3.4-2)}。亀裂や破断に対する鉛ダンパーの疲労損傷評価法としては、鋼材ダンパーと同様に Miner 則を用いた検討が実施されている。地震応答解析結果に対して Miner 則による累積損傷度評価を実施した。

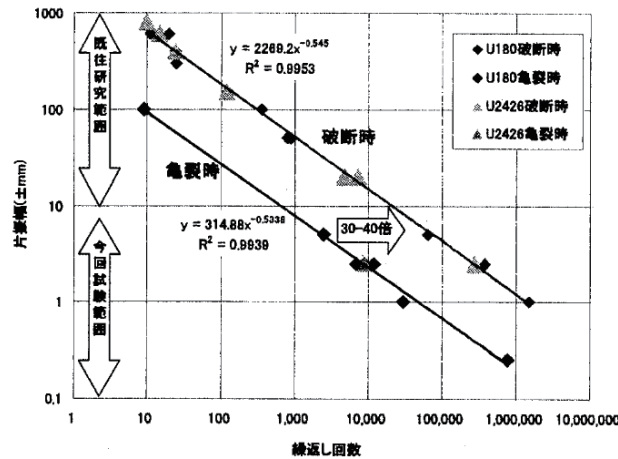


図 3.3.4-19 鉛ダンパーの振幅と亀裂発生および破断時繰返し回数の関係^{3.3.4-2)}

変位振幅 δ と亀裂発生時繰返し数 N_c 、破断時繰返し数 N_d の関係は以下の式で表される。

$$N_c = 4.69 \times 10^4 \delta^{-1.87} \quad (3.3.4-9)$$

$$N_d = 1.38 \times 10^6 \delta^{-1.83} \quad (3.3.4-10)$$

δ : 片振幅(mm)

地震応答解析結果より鉛ダンパーの疲労損傷評価を行うため、レインフロー法により免震層水平変位波形の振幅と繰返し数 n_i との関係を求めた。亀裂および破断に対する累積疲労損傷度 D_c 、 D_d を式(3.3.4-11)にて評価する。Miner 則では損傷度 $D=1$ (100%) で亀裂および破断が生じるものとする。

$$D_c = \sum_i \frac{n_i}{N_{ci}}, \quad D_d = \sum_i \frac{n_i}{N_{di}} \quad (3.3.4-11)$$

D_c : 亀裂に対する累積損傷度

D_d : 破断に対する累積損傷度

n_i : i 番目の振幅の繰返し数

N_{ci} : i 番目の振幅の亀裂発生繰返し数

N_{di} : i 番目の振幅の破断時繰返し数

地震応答解析結果に対する累積損傷度評価を表 3.3.4-6 に示す。OSKH02、AIC003 および SZO024 の入力倍率 1.00 で亀裂に対しての累積損傷度 D_c が 100%を超えており、本評価法では亀裂発生の可能性が高いと判断される。OSKH02、AIC003 および SZO024 の入力倍率 1.50 において破断に対する累積損傷度 D_d は 100%を下回った。SZO024 の 1.5 倍入力時において D_d は最大の 23%となり、

破断に対して4倍程度の余裕がある。KGINでは1.5倍入力時でも亀裂に対しての累積損傷度 D_c が30%となり、本評価法では亀裂は発生しない。

疲労損傷度の繰返し考慮時と非考慮時の比を表中右に示す。KGINを除き、繰返し考慮時では非考慮時に対して疲労損傷度が増加した。増加率は入力波の種類、入力倍率により異なる。OSKH02の入力倍率1.5倍では、考慮時の疲労損傷度は非考慮に対して1.5倍となった。

表 3.3.4-6 鉛ダンパーの累積損傷度

入力地震動	入力倍率	繰返し非考慮			繰返し考慮			疲労損傷度 繰返し考慮/非考慮	
		免震層最大変位 (cm)	疲労損傷度		免震層最大変位 (cm)	疲労損傷度		亀裂	破断
			亀裂 D_c	破断 D_d		亀裂 D_c	破断 D_d		
OSKH02	1.00	13.61	130.9%	3.9%	14.75	143.9%	4.2%	1.10	1.09
	1.25	22.43	253.1%	7.3%	24.93	337.5%	9.6%	1.33	1.31
	1.50	32.58	465.5%	13.1%	35.76	690.2%	19.2%	1.48	1.46
AIC003	1.00	13.18	129.7%	3.8%	13.47	132.4%	3.9%	1.02	1.01
	1.25	17.39	209.8%	6.1%	16.93	226.8%	6.5%	1.08	1.07
	1.50	19.90	315.4%	9.0%	24.17	393.3%	11.1%	1.25	1.23
SZ0024	1.00	20.26	228.7%	6.6%	21.42	274.1%	7.8%	1.20	1.18
	1.25	27.95	441.1%	12.4%	29.92	521.4%	14.5%	1.18	1.17
	1.50	35.73	719.8%	19.9%	40.89	832.8%	22.9%	1.16	1.15
KGIN	1.00	2.86	26.2%	0.8%	2.86	26.2%	0.8%	1.00	1.00
	1.25	3.29	27.2%	0.9%	3.29	27.2%	0.9%	1.00	1.00
	1.50	3.69	30.1%	0.9%	3.69	30.1%	0.9%	1.00	1.00

3) 繰返し考慮モデルと一般的なバイリニアモデルとの応答結果比較

骨格曲線がバイリニアであり、繰返しによる影響を考慮しない通常の地震応答解析で用いられるバイリニアモデル（一般モデル）と実験結果を模擬するために繰返しの影響を考慮した前述の解析モデル（繰返し考慮モデル）との応答結果を比較した。各々の解析モデルの履歴性状を図 3.3.4-21 に示す。繰返し考慮モデル復元力作成時に参照した実験における鉛ダンパーの初期温度は約 10°Cであったため、一般モデルの降伏荷重 Q_d および 1 次剛性 K_1 は、図 3.3.4-2 に示す温度依存性に基づき 20°C 時の 1.035 倍

表 3.3.4-7 鉛ダンパーの復元力モデル

モデル名	骨格曲線	1 次剛性 K_1	繰返しの影響	備考
一般モデル	バイリニア $Q_d=20 \times 1.035 \text{ kN}$ 一定	$30,000 \times 1.035$ kN/m	非考慮	初期温度 10°C (20°C の Q_d, K_1 を 1.035 倍)
繰返し考慮モデル	曲線モデル	30,000 kN/m	考慮	平成 22 年度の実験結果を模擬 実験時雰囲気温度 10°C

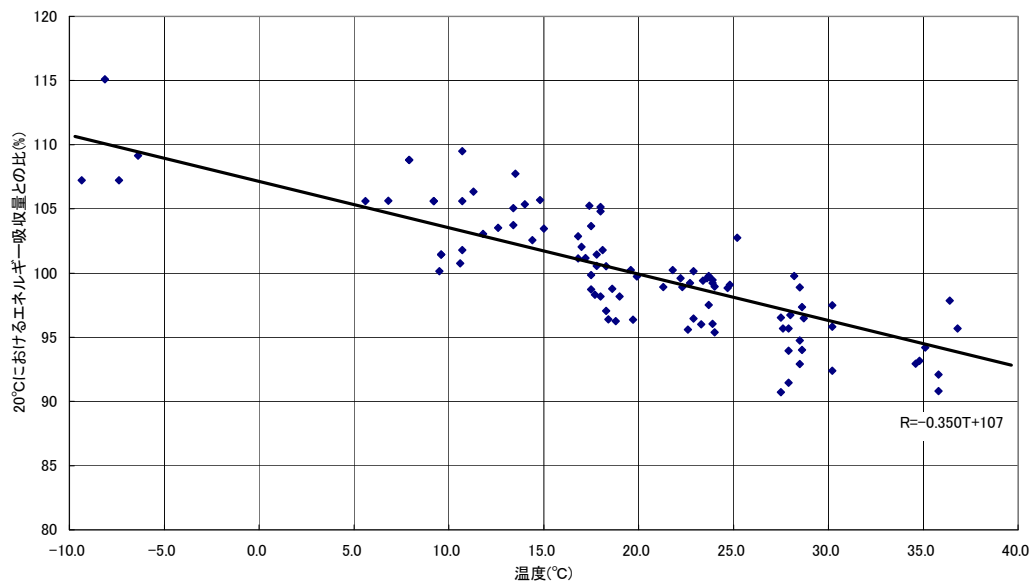


図 3.3.4-20 鉛ダンパーの温度依存性

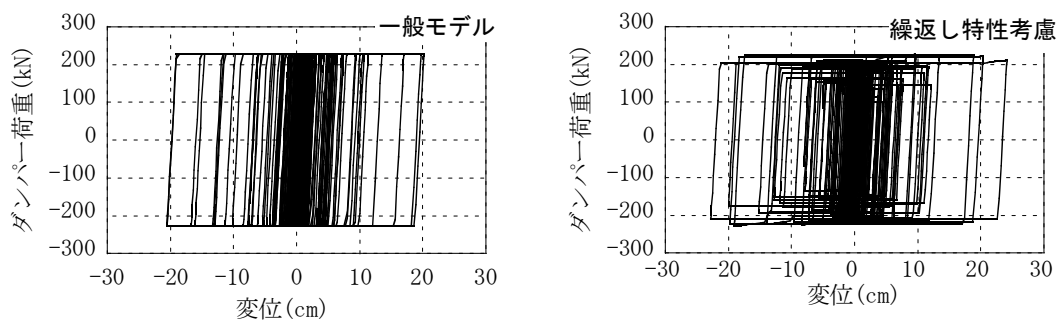


図 3.3.4-21 一般モデルと繰返し考慮モデルの復元力特性 (AIC003、入力倍率 1.50)

とし、両モデルの環境温度条件を同一とした。

応答解析結果を表 3.3.4-8 に示す。一般モデルに対する繰返し考慮モデルの最大変形比を求めると、0.98~1.40 となり、繰返し考慮モデルによる応答が一般モデルよりも総じて大きくなった。ただし、変形が 10cm 以下となる KGIN のケースを除くと、0.98~1.18 となっており、2 割程度の増幅率であった。最大変位の違いは KGIN と AIC003 の場合で比較的大きく表れた。一方、OSKH02 と SZO024 における増幅率は 1.00~1.06 となり、KGIN と AIC003 ほどの変化は見られなかった。

応答最大加速度および免震層最大せん断力係数において、(繰返し考慮モデル) / (一般モデル) の値は 0.97~1.08 であった。OSKH02、AIC003、SZO024 では、繰返し考慮モデルの場合が一般モデルの値より大きくなるが、免震層変位の小さい KGIN の場合では、一般モデルの値の方が繰返し考慮モデルよりも大きくなった。これは、両モデルの骨格曲線の違いによるものと考えられる。ダンパー 1 台あたりの累積吸収エネルギーは、OSKH02、AIC003、SZO024 で (繰返し考慮モデル) / (一般モデル) の値は 0.96~1.15、免震層累積変形量では 0.93~1.18、免震層累積エネルギーの速度変換値で 0.98~1.08 となった。

表 3.3.4-8(a) 応答解析結果 (免震層最大水平変位、応答最大加速度)

入力地震動	入力倍率	免震層最大水平変位 (cm)			応答最大加速度 (cm/s ²)		
		一般モデル	繰返し考慮	考慮/一般	一般モデル	繰返し考慮	考慮/一般
OSKH02_AV	1.00	14.32	14.75	1.030	69.3	71.0	1.024
	1.25	24.45	24.93	1.019	94.3	97.9	1.038
	1.50	35.46	35.76	1.008	121.5	125.9	1.037
AIC003_AV	1.00	12.56	13.47	1.072	64.9	67.6	1.041
	1.25	17.27	16.93	0.981	76.6	76.3	0.997
	1.50	20.53	24.17	1.177	84.6	91.2	1.078
SZO024_AV	1.00	20.36	21.42	1.052	84.2	87.6	1.040
	1.25	29.34	29.92	1.020	106.3	107.9	1.015
	1.50	39.59	40.89	1.033	131.6	134.7	1.023
KGIN_AV	1.00	2.13	2.86	1.344	39.2	38.2	0.973
	1.25	2.69	3.29	1.226	40.6	39.7	0.977
	1.50	2.98	3.69	1.240	41.3	41.0	0.992

表 3.3.4-8(b) 応答解析結果（応答せん断力係数、ダンパーの累積吸収エネルギー）

入力地震動	入力倍率	免震層応答最大せん断力係数			ダンパー1台あたりの 累積吸収エネルギー (kNm)		
		一般 モデル	繰返し 考慮	考慮/ 一般	一般 モデル	繰返し 考慮	考慮/ 一般
OSKH02_AV	1.00	0.071	0.072	1.024	1020.2	1167.6	1.144
	1.25	0.096	0.100	1.038	1819.9	2033.3	1.117
	1.50	0.124	0.128	1.037	2793.1	3114.1	1.115
AIC003_AV	1.00	0.066	0.069	1.041	1174.8	1158.0	0.986
	1.25	0.078	0.078	0.997	1729.0	1717.7	0.993
	1.50	0.086	0.093	1.078	2323.3	2403.3	1.034
SZ0024_AV	1.00	0.086	0.089	1.040	1756.0	1769.5	1.008
	1.25	0.108	0.110	1.015	2636.8	2575.9	0.977
	1.50	0.134	0.137	1.023	3513.3	3381.8	0.963
KGIN_AV	1.00	0.040	0.039	0.973	40.4	53.5	1.323
	1.25	0.041	0.040	0.977	66.7	90.0	1.348
	1.50	0.042	0.042	0.992	107.1	153.2	1.431

表 3.3.4-8 (c) 応答解析結果（免震層累積変形量、累積吸収エネルギー速度換算値）

入力地震動	入力倍率	免震層累積変形量(m)			免震層累積エネルギー 速度換算値 (cm/s)		
		一般 モデル	繰返し 考慮	考慮/ 一般	一般 モデル	繰返し 考慮	考慮/ 一般
OSKH02_AV	1.00	8.1	9.3	1.146	174.5	186.7	1.070
	1.25	11.8	13.3	1.125	233.1	246.3	1.057
	1.50	15.7	18.5	1.176	288.7	304.9	1.056
AIC003_AV	1.00	12.4	11.6	0.937	187.2	185.9	0.993
	1.25	15.1	14.3	0.947	227.2	226.4	0.997
	1.50	18.0	17.0	0.945	263.3	267.8	1.017
SZ0024_AV	1.00	10.6	11.3	1.068	228.9	229.8	1.004
	1.25	14.6	15.4	1.052	280.5	277.3	0.988
	1.50	18.4	19.4	1.053	323.8	317.7	0.981
KGIN_AV	1.00	4.9	10.4	2.125	34.7	40.0	1.150
	1.25	5.7	10.2	1.784	44.6	51.8	1.161
	1.50	8.1	10.2	1.258	56.5	67.6	1.196

4) まとめ

平成 22 年度の実験結果を元に構築した鉛ダンパーの繰返しによる耐力劣化を考慮する解析モデルを含めた種々のモデルを用いて、鉛ダンパーと天然ゴム系積層ゴムからなる免震層をもつ 1 質点系に長周期地震動を入力波とした応答解析を実施した。本解析結果より以下のことが確認された。

a) 最大変形

同一入力倍率時の入力地震波による最大変形は、KGIN<AIC003<OSKH02<SZO024 の順であった。SZO024 の入力倍率 1.5 時では繰返し考慮時に 40.9cm であった。KGIN 波では入力倍率を 1.5 としても 5cm 以下となった。KGIN を除くと、入力倍率が 1.0 の最大変形は、12cm~20cm 程度、入力倍率 1.5 では、20~40cm であった。鉛ダンパーの繰返し特性考慮の場合、非考慮時に対して 0.97~1.21 倍に変化した。また一般的なバイリニアモデルに対して変形が 10cm 以下となる KGIN のケースを除くと、0.98~1.18 となっており、2 割程度の増幅率であった。

b) 最大層せん断力

同一入力倍率時の入力地震波による最大応答せん断力係数は、最大変形と同様に KGIN<AIC003<OSKH02<SZO024 の順に大きくなった。入力倍率が 1.0 の最大層せん断力係数は、0.04~0.09、入力倍率 1.5 では、0.04~0.14 となった。鉛ダンパーの繰返し特性考慮の場合、非考慮時に対して 0.95~1.05 であった。また繰返し劣化考慮モデルと一般的なバイリニアモデルとの最大応答せん断力係数の比は、0.97~1.08 となった。

c) 最大応答加速度

繰返し特性考慮モデルにおいて、入力倍率が 1.0 の最大応答加速度は、38~88 cm/s²、入力倍率 1.5 で 41~135 cm/s² であった。

d) 累積変形

入力倍率 1.0 において各波の累積変形は 9~12m となっている。KGIN 以外の入力波において入力倍率 1.5 の累積変形は 17m~19m であった。鉛ダンパーの繰返し特性考慮の場合、非考慮時に対して 0.96~1.21 であった。また繰返し劣化考慮モデルと一般的なバイリニアモデルとの累積変形の比は、0.93~1.18 となった。

e) エネルギー吸収量

鉛ダンパー 1 台あたりの累積吸収エネルギーは、最大で約 3,500kNm であった。正弦波±400mm 時加振時の最終エネルギー吸収量は 8,850kNm であり、いずれの入力地震波においてもこの値を下回った。ダンパー 1 台あたりの累積吸収エネルギーは、繰返しによる劣化考慮モデルは非考慮時に対して 0.95~1.12 倍になった。

f) 累積損傷度

OSKH02、AIC003 および SZO024 の入力倍率 1.00 で亀裂に対しての累積損傷度 D_c が 100% を超えており、本評価法では亀裂発生の可能性が高いと判断される。OSKH02、AIC003 および SZO024 の入力倍率 1.50 において破断に対する累積損傷度 D_d は 100% を下回った。SZO024 の 1.5 倍入力時において D_d は最大の 23% となり、破断に対して 4 倍程度の余裕がある。KGIN を除き、繰返し考慮モデル時では非考慮モデル時に対して疲労損傷度が増加した。増加率は入力波の種類、入力倍率により異なる。OSKH02 の入力倍率 1.5 倍では、考慮時の疲労損傷度は非考慮に対して 1.5 倍となった。

今後の課題として、低層および中高層といった種々の免震建物モデルに対して、建物応答の観

点を加味した検討を実施するとともに、免震部材特性のばらつきを考慮した場合における応答特性を把握する必要があると考えられる。

参考文献

- 3.3.4-1) 日本免震構造協会：免震部材部会ダンパー小委員会活動報告，2007.3
- 3.3.4-2) 安永亨、高山峯夫、森田慶子、安藤勝利：鉛ダンパーの風応答に関する研究（その2）
微小変位での高サイクル疲労特性、日本建築学会大会学術梗概集、B-II、pp.289-290、2010.8

3.3.5 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（高摩擦）

(1) 免震部材実験結果に基づく弾性すべり支承（高摩擦）摩擦特性のモデル化

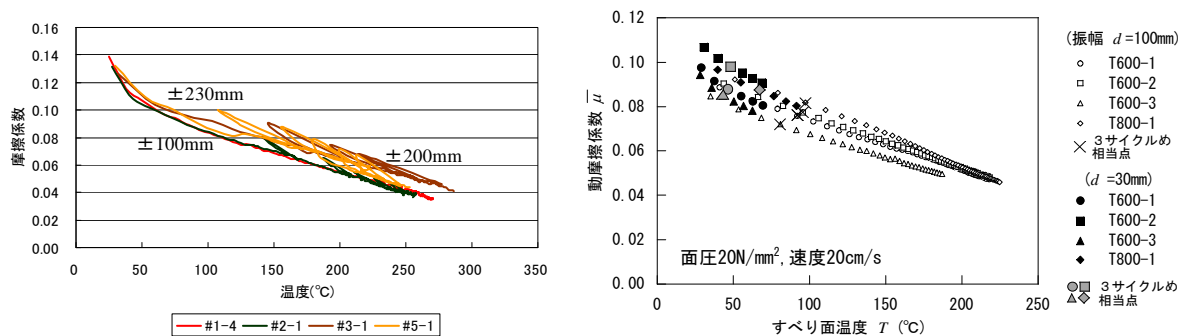
第Ⅲ部 1.3.4 φ 300 試験体の実験により、累積変形 100m 相当までの範囲で、温度上昇に伴う摩擦係数の低下傾向、インターバル加振時の摩擦の復元などが確認された。温度や累積変形量に対する摩擦係数の変化傾向を分析し、摩擦特性モデルに取り込んで同モデルの適用範囲拡大を図る。

○多数回繰り返し実験結果の分析

すべり板温度、累積吸収エネルギー、累積変位量に対する摩擦係数の変化傾向を把握するため、各パラメータに関する単回帰分析を実施し、各パラメータに対する依存性を定式化した。

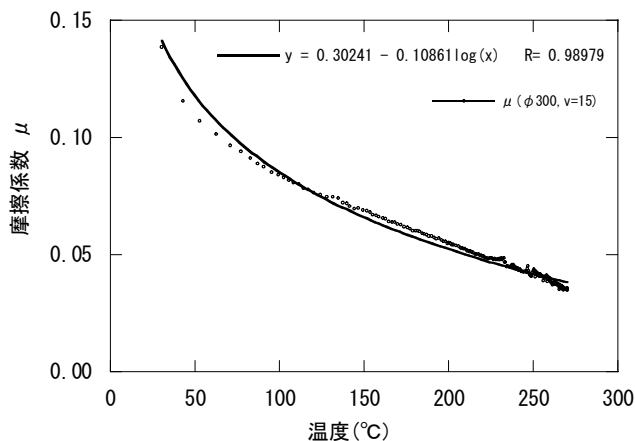
分析対象ケースは、インターバル無しで連続で行った限界試験（試験体#1-4、面圧 20N/mm²、変位振幅±100mm、連続 250 回載荷、累積変形 100m）とした。既往の知見により、摩擦係数の変化にはすべり面の温度影響が大きいと考えられるので、累積変位量としては摩擦発熱量との関連付けが容易な累積すべり変位量を採用した。図 3.3.5-1～3 に実験結果および既往の評価結果と回帰結果を示す。

各パラメータに対する摩擦傾向の減少傾向は、いずれも対数近似により良好に回帰されている。



(a) 実験結果

(b) 既往の評価結果（φ 600, φ 800） 3.3.5-1



(c) 実験結果の回帰（#1-4 限界試験）

図 3.3.5-1 摩擦係数—すべり板温度関係

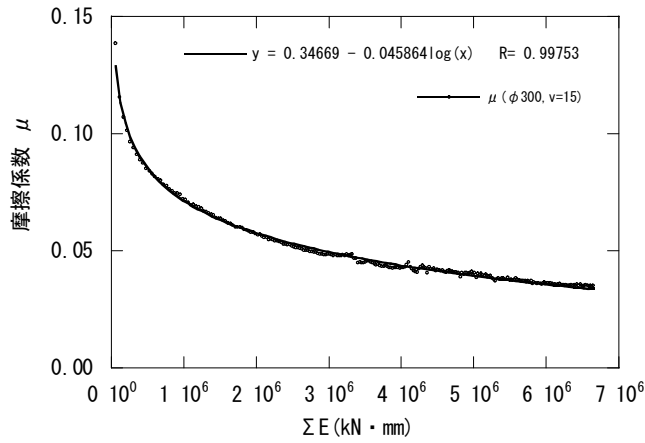
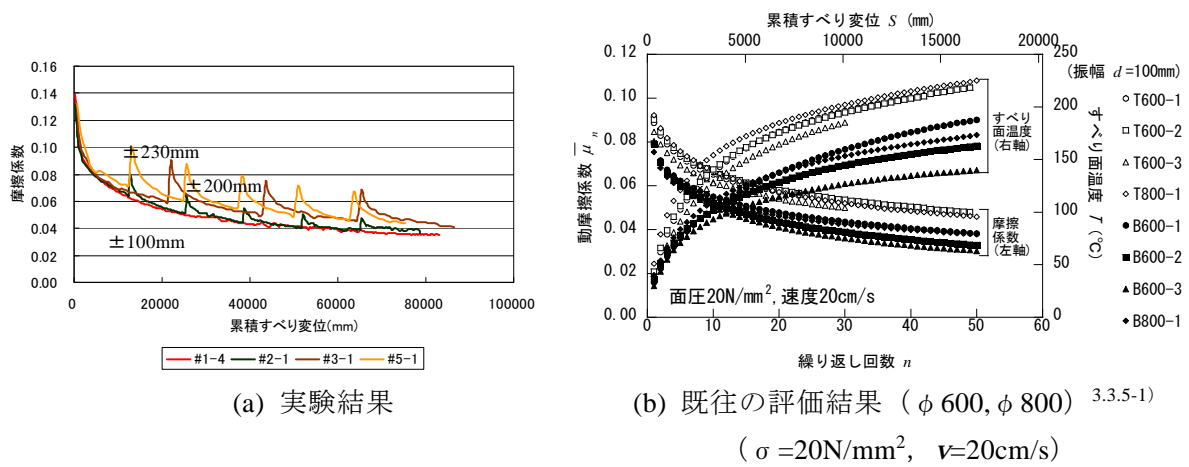
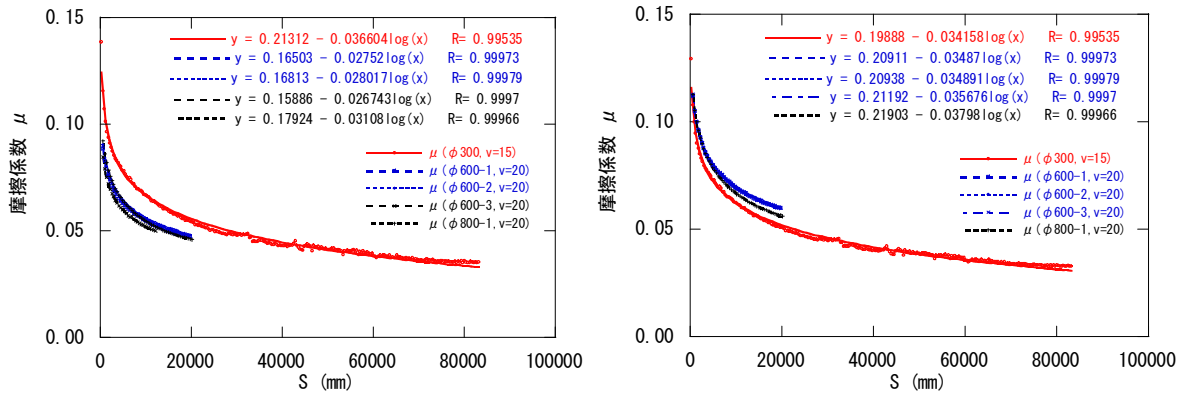


図 3.3.5-2 摩擦係数—累積吸収エネルギー—関係（実験結果）



(a) 実験結果

(b) 既往の評価結果（φ600, φ800）
（ $\sigma = 20\text{N/mm}^2$, $v = 20\text{cm/s}$ ）



(c) 実験結果の回帰（#1-4 限界試験）

(d) 3 サイクルめで基準化

図 3.3.5-3 摩擦係数—累積すべり変位関係

○復元力特性モデルの作成

長周期地震動に対する免震建築物の応答特性把握に供するための、支承の多数回繰り返し特性を表現するパラメータを選定し、修正復元力特性モデルを作成する。

前述のように、多数回繰り返し特性を表す指標として、すべり板温度、累積吸収エネルギー、累積すべり変位量などを用いることが可能であることが示された。特に累積吸収エネルギーまたは累積すべり変位を用いると、摩擦係数の低下傾向が対数近似により良好に回帰できることを確認できた。両パラメータは、地震応答解析による応答値により摩擦係数を決定できるので、熱伝導解析を介することなく応答解析が行える利点がある。

以下では、摩擦係数 μ の速度 v 、累積吸収エネルギー E （または累積すべり変位 S ）の両パラメータに関する依存性を表現する以下の関数型を用いた重回帰分析を行う。

$$\mu(t) = a \cdot (\log v(t) - \log v_0) \cdot (\log E(t) - \log E_0) + b \quad (3.3.5-1)$$

$$\mu(t) = a \cdot (\log v(t) - \log v_0) \cdot (\log S(t) - \log S_0) + b \quad (3.3.5-2)$$

ここに a 、 b は回帰係数である。例として図3.3.5-4に v 、 S 軸を対数軸として、式(3.3.5-2)で表される曲面を3次元座標空間に表現したものを示す。式(3.3.5-1)、(3.3.5-2)の定数 v_0 、 S_0 は、 μ が一定値 b となる速度、累積吸収エネルギー、累積すべり変位を表す。表3.3.5-1に、実験により得られた回帰結果を既往の評価結果と併せて示す。また、実験結果による回帰曲面を図3.3.5-5に示す。

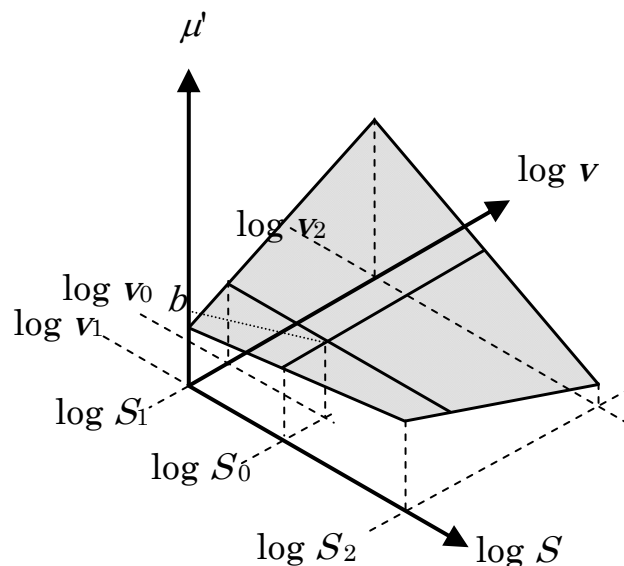


図 3.3.5-4 速度・すべり変位依存性の面回帰モデル

表 3.3.5-1 回帰結果一覧

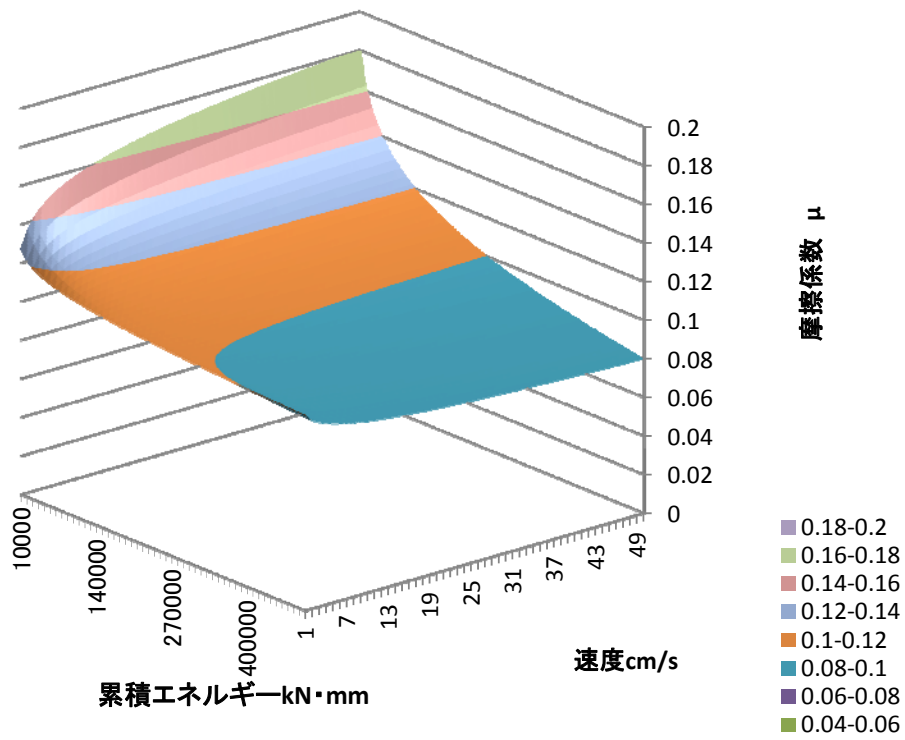
(b)累積吸収エネルギー依存

	面圧 σ (N/mm ²)	使用データ範囲				使用データ範囲			
		a	b	v_0 (cm/s)	$*E_0$ (mm)	v (cm/s)		E (mm)	
						下限 v_1	上限 v_2	下限 $*E_1$	上限 $*E_2$
実験結果 (変位 ±100mm)	20	-2.575E-02	1.086E-01	2.546E-01	1.638E+05	15	37	7.600E+02	6.643E+06

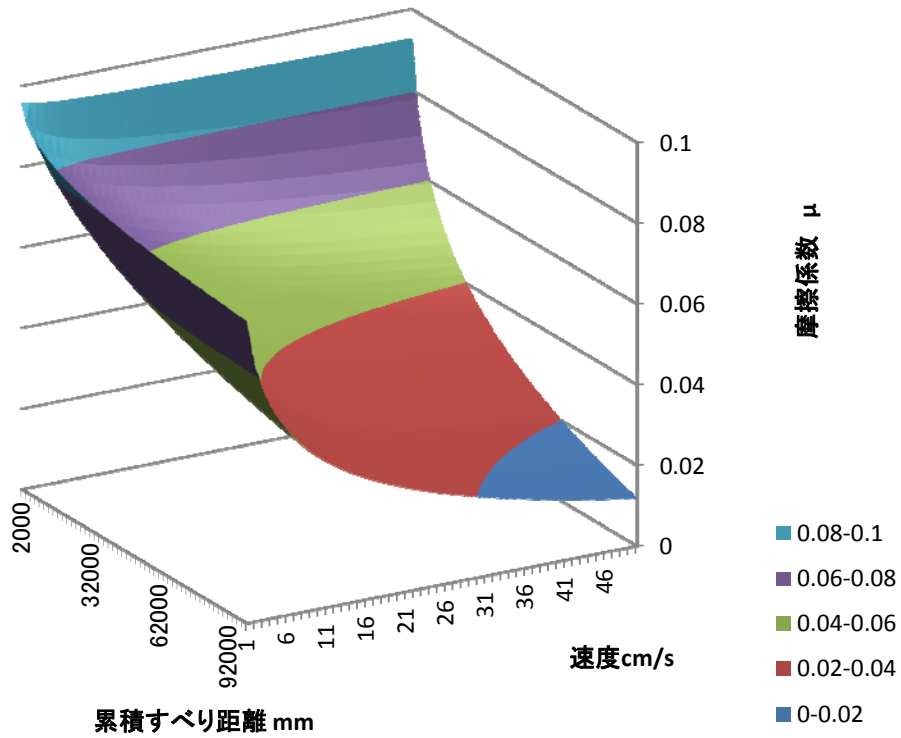
*注：φ300、面圧 20mm²の値であり、免震層ですべりが負担する軸力の比率で係数倍して用いる。

(b)累積すべり変位依存

	面圧 σ (N/mm ²)	使用データ範囲				使用データ範囲			
		a	b	v_0 (cm/s)	S_0 (mm)	v (cm/s)		S (mm)	
						下限 v_1	上限 v_2	下限 S_1	上限 S_2
実験結果 (変位 ±100mm)	20	-2.079E-02	9.684E-02	2.545E-01	1.638E+03	15	37	257	83155
参考) 既往評価結果 (φ600,800)	10	-2.070E-02	9.010E-02	1.412E+00	1.470E+03	0.4	60	110	2050
	20	-1.310E-02	7.120E-02	2.546E-01	1.638E+03	0.4	60	112	2048



(a) 累積吸収エネルギー依存

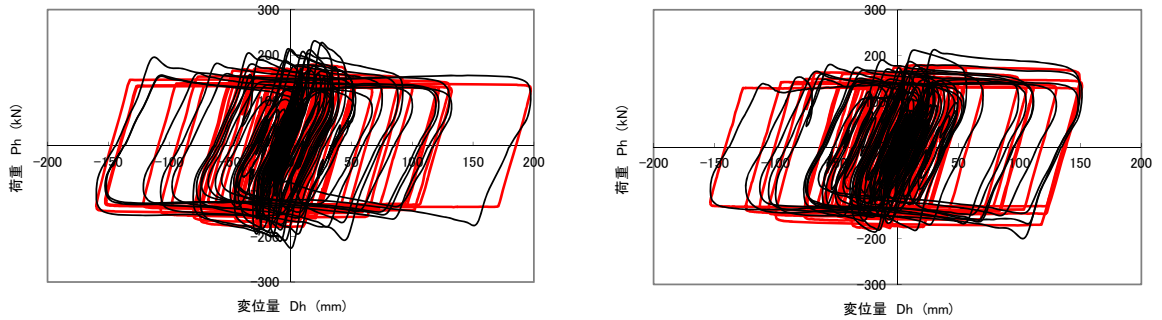


(b) 累積すべり変位依存

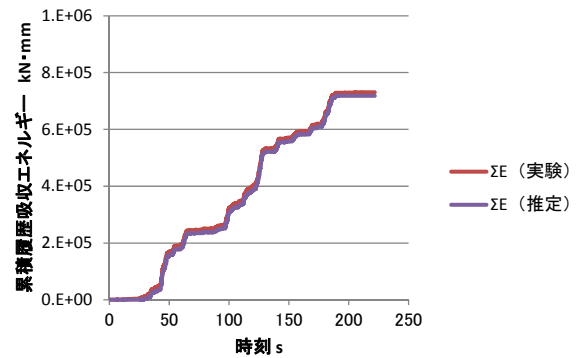
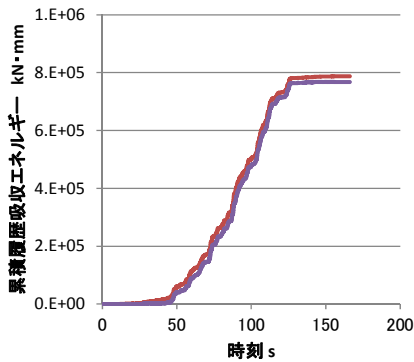
図 3.3.5-5 重回帰分析結果 (変位 $\pm 100\text{mm}$ 、 $\sigma = 20\text{N/mm}^2$)

○復元力モデルの再現性確認

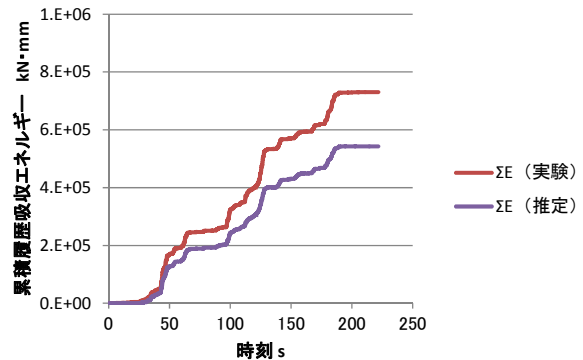
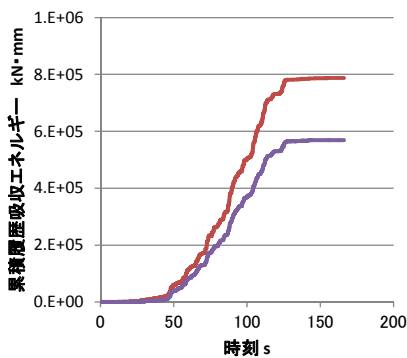
前項に示した摩擦係数の繰り返し依存モデルにより、実験で実施した地震応答波加振による履歴の再現を試みる。地震波加振の2ケース（aic003、oskh02）について、ステップ毎の摩擦係数を式(3.3.5-2)により評価し、荷重-変位関係を実験結果と比較した。図 3.3.5-6 に評価結果を示す。評価では積層ゴム部の1次剛性を9.0kN/mm、累積すべり変位の初期値 $S_{\text{initial}} = 257\text{mm}$ とした。地震波加振は非連続すべり状態となるため S の低減係数を0.08とした。



(黒：実験結果、赤：推定結果)



(参考： S の低減係数 1.0 の場合)



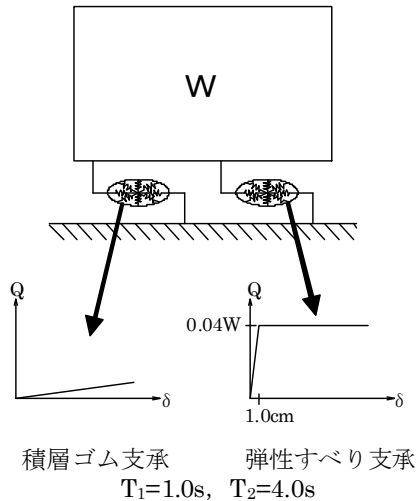
(a) aic003

(a) oskh02

図 3.3.5-6 荷重-変位関係および累積履歴吸収エネルギーの推移の比較

(2) 解析条件

本検討では、長周期地震動に対する摩擦係数の累積吸収エネルギー依存性を確認することを目的とする。解析モデルを図 3.3.5-7 に示す上部構造を剛体とした 1 質点系モデルとする。また、2 方向入力を考慮して免震支承は塑性論モデルとする。(本検討では 1 方向入力のみ)



建物重量	W=51,453.9kN
弾性すべり支承負担軸力	Ns=20,920.1kN
基準摩擦係数	$\mu = 0.098$
弾性すべり支承水平耐力	Qy= 2,058.0kN
	(Ci=0.04)
弾性すべり支承平均面圧	$\sigma = 8.04\text{N/mm}^2$
考慮する依存性	累積吸収エネルギー 累積すべり変位

図 3.3.5-7 解析モデル

(3) 解析結果

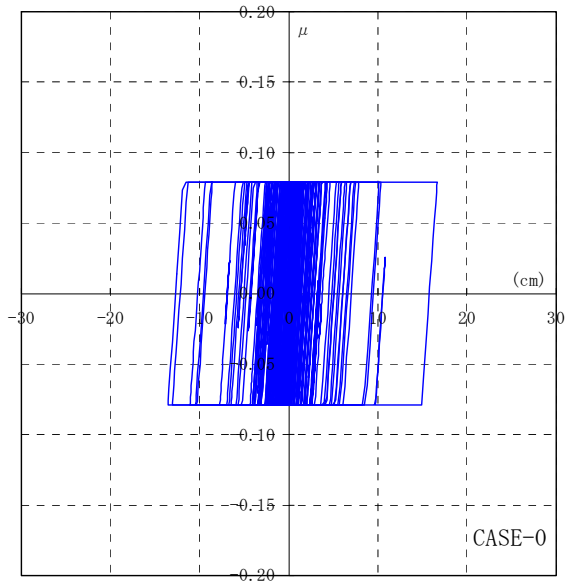
OSKH02(此花),AIC003(津島),SZO024(浜松),KGIN(新宿)入力における、入力倍率を 1.00 倍, 1.25 倍, 1.50 倍としたときの最大応答値一覧を表 3.3.5-2 に、図 3.3.5-8~10 に免震層の荷重-変形履歴図を示す。また、各ケースの最大値比較を図 3.3.5-11、累積吸収エネルギー時刻歴波形, 累積すべり変位時刻歴波形を図 3.3.5-12,13 に、免震層応答変位時刻歴波形を図 3.3.5-14 に、累積すべり変位-累積吸収エネルギー関係を図 3.3.5-15 に示す。

- ここで、 CASE-0：依存性無視モデル
- CASE-1：摩擦係数の累積吸収エネルギー依存性考慮モデル
- CASE-2：摩擦係数の累積すべり変位依存性考慮モデル

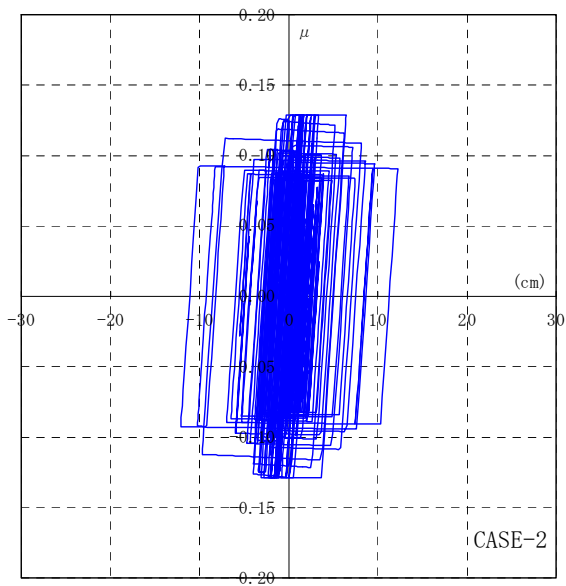
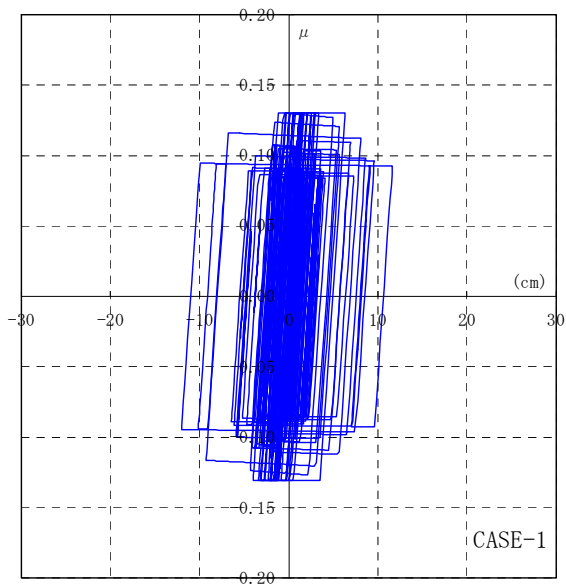
なお、何れのモデルにおいても、静摩擦係数, 面圧依存性, 速度依存性は考慮していない。

表 3.3.5-2 最大応答値一覧

入力地震波	入力倍率	入力波最大加速度 (cm/s ²)	最大応答加速度 (cm/s ²)			最大応答変位 (cm)			ベースシア係数			累積すべり変位 (cm)			累積吸収エネルギーの速度換算値V _E (cm/s)		
			CASE-0	CASE-1	CASE-2	CASE-0	CASE-1	CASE-2	CASE-0	CASE-1	CASE-2	CASE-0	CASE-1	CASE-2	CASE-0	CASE-1	CASE-2
OSKH02 (此花波)	1.00	98.49	72.65	69.17	68.71	16.64	12.01	12.12	0.074	0.071	0.070	503.5	376.8	397.7	178.38	173.58	175.92
	1.25	123.11	100.42	96.65	97.28	27.89	25.54	25.99	0.102	0.099	0.099	868.5	846.4	867.5	234.29	241.67	242.28
	1.50	147.73	126.35	126.32	126.65	38.40	38.49	38.80	0.129	0.129	0.129	1331.5	1541.4	1569.6	290.09	306.30	306.26
AIC003 (津島波)	1.00	199.40	64.85	64.47	63.60	13.47	11.17	11.26	0.066	0.066	0.065	553.5	501.3	508.7	187.04	195.34	194.88
	1.25	249.25	74.80	77.67	77.23	17.52	17.73	17.73	0.076	0.079	0.079	783.0	786.1	794.5	222.45	234.58	233.83
	1.50	299.10	86.46	92.74	93.96	22.23	26.48	27.10	0.088	0.095	0.096	1071.5	1142.9	1155.2	260.23	272.38	271.60
SZO024 (浜松波)	1.00	576.78	86.30	85.85	85.96	22.17	21.84	21.84	0.088	0.088	0.088	818.4	818.2	828.5	227.42	238.39	237.83
	1.25	720.98	108.05	110.80	111.13	30.99	34.04	34.33	0.110	0.113	0.113	1195.2	1262.5	1272.2	274.84	283.29	282.14
	1.50	865.17	134.21	140.40	140.98	41.58	46.93	47.32	0.137	0.143	0.144	1579.7	1697.7	1711.6	315.97	318.00	316.70
KGIN (新宿波)	1.00	42.11	38.74	58.29	57.42	2.89	2.57	2.51	0.040	0.059	0.059	16.2	10.0	10.2	32.04	32.27	32.31
	1.25	52.64	39.76	61.51	60.90	3.31	3.87	3.93	0.041	0.063	0.062	29.9	15.5	15.6	43.48	40.08	40.00
	1.50	63.17	39.85	63.55	62.68	3.34	4.70	4.65	0.041	0.065	0.064	54.7	22.0	22.4	58.81	47.85	47.86

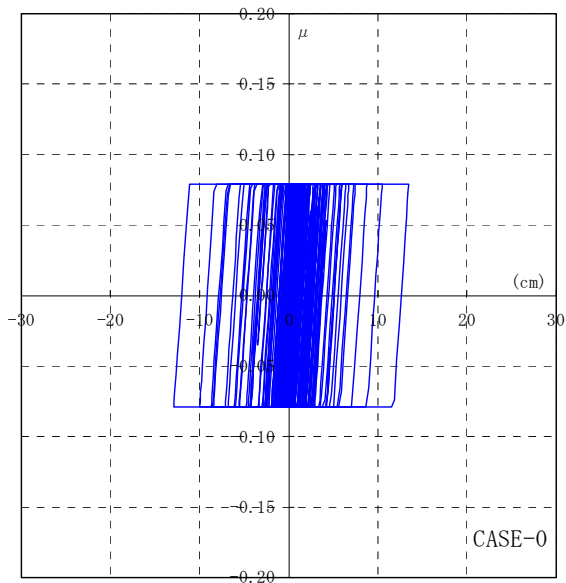


弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (依存性無視)

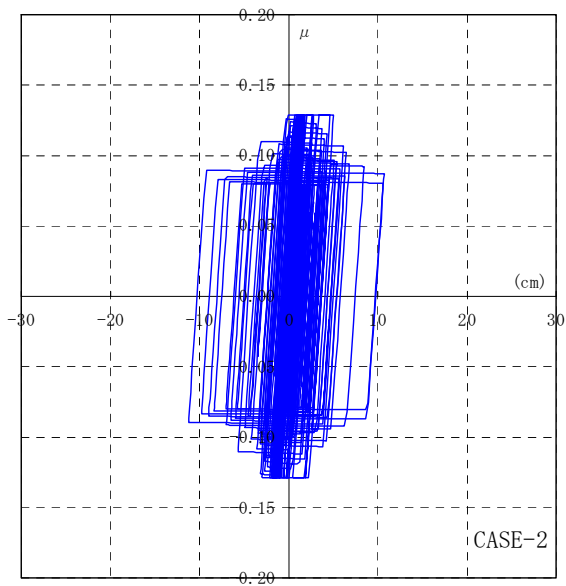
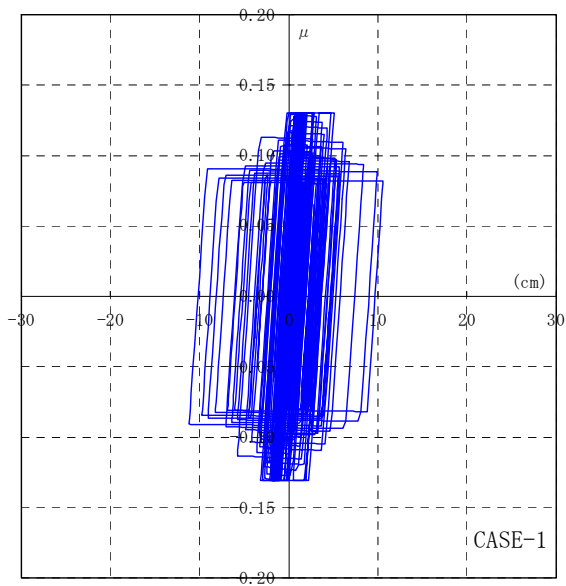


弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (累積吸収エネルギー依存: $\beta=1.00$) 弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (累積すべり変位依存: $\beta=1.00$)

図 3.3.5-8(a) 免震層荷重-変形関係(OSKH02 : 1.00 倍)

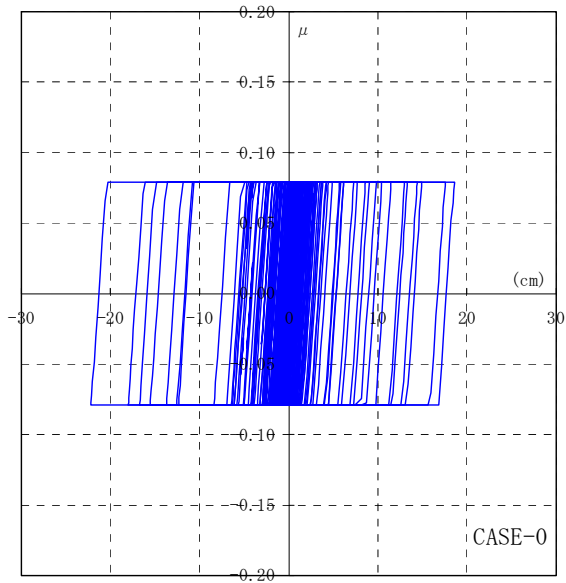


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)

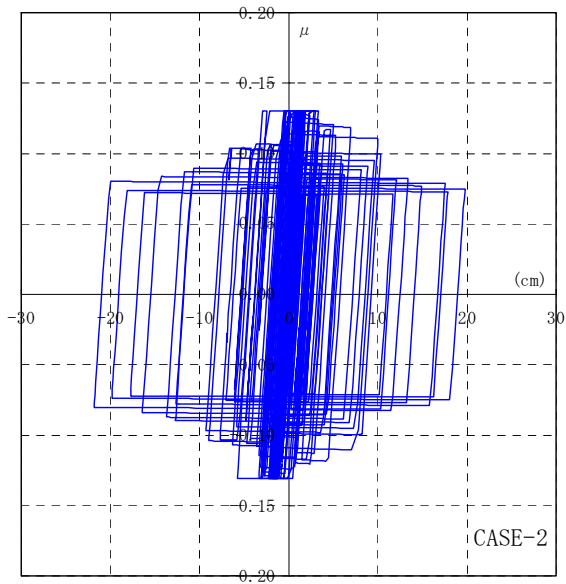
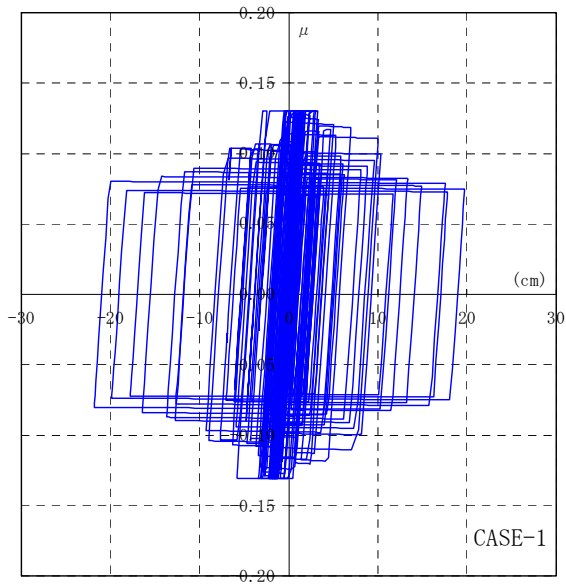


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積吸収エネルギー依存: $\beta=1.00$) 弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存: $\beta=1.00$)

図 3.3.5-8(b) 免震層荷重-変形関係(AIC003 : 1.00 倍)

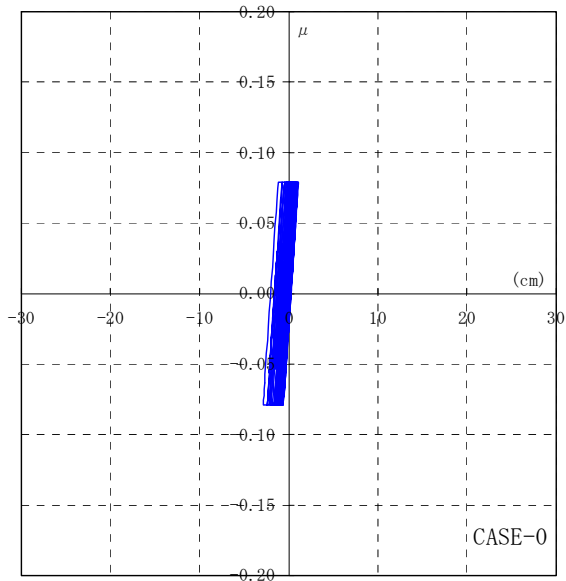


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)

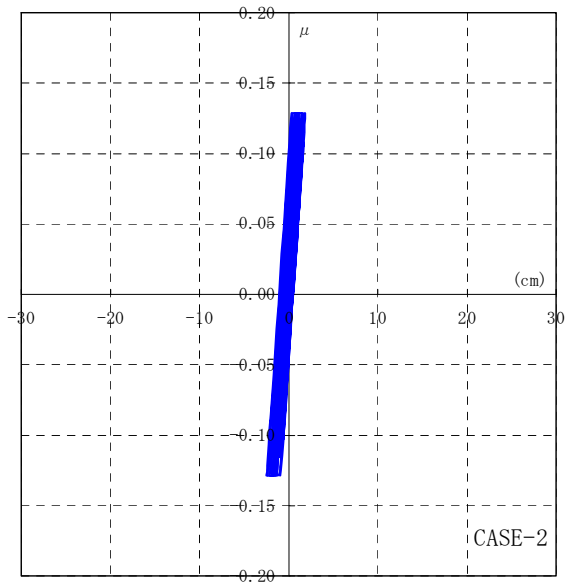
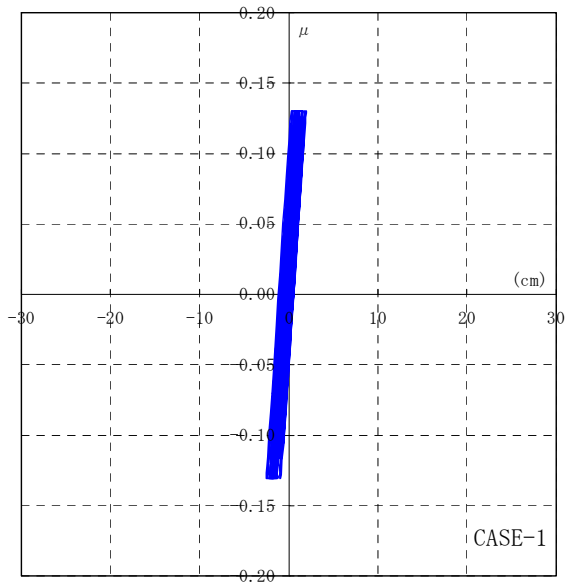


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積吸収エネルギー依存: $\beta=1.00$) 弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存: $\beta=1.00$)

図 3.3.5-8(c) 免震層荷重-変形関係(SZO024 : 1.00 倍)

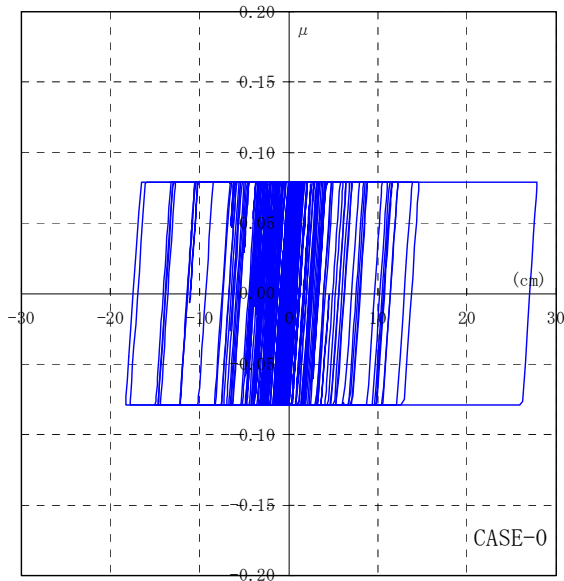


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)

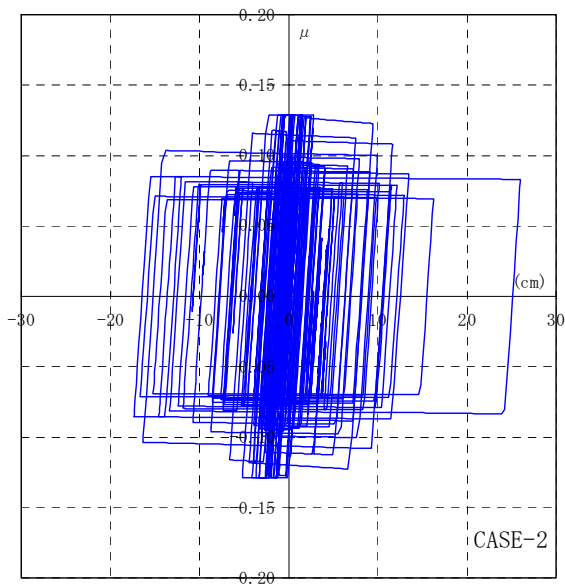
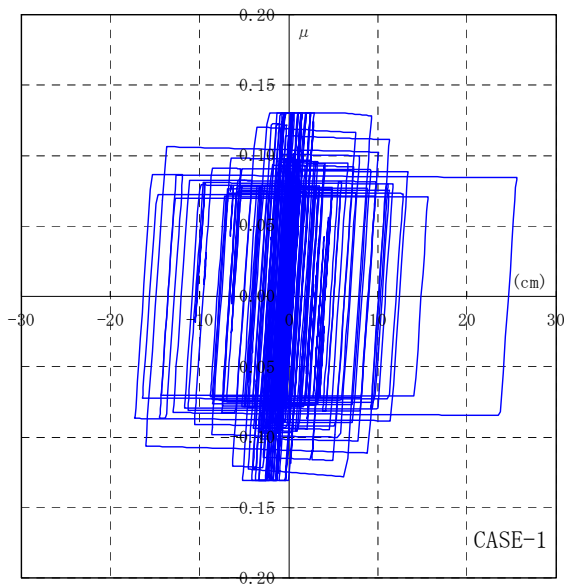


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積吸収エネルギー依存: $\beta=1.00$) 弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存: $\beta=1.00$)

図 3.3.5-8(d) 免震層荷重-変形関係(KGIN : 1.00 倍)

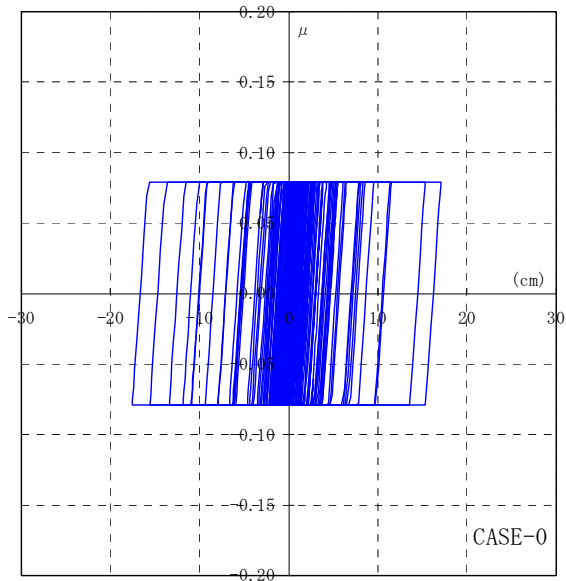


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)

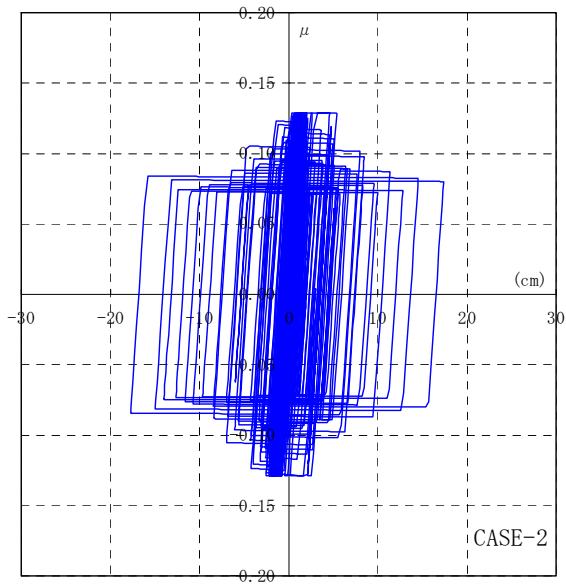
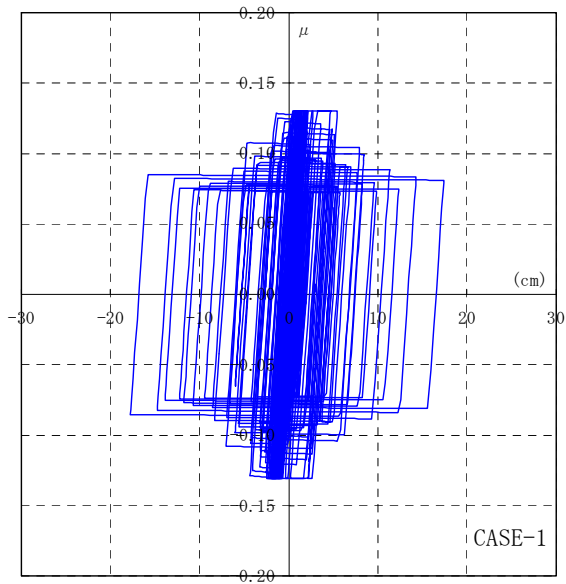


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積吸収エネルギー依存: $\beta=1.00$) 弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存: $\beta=1.00$)

図 3.3.5-9(a) 免震層荷重-変形関係(OSKH02 : 1.25 倍)

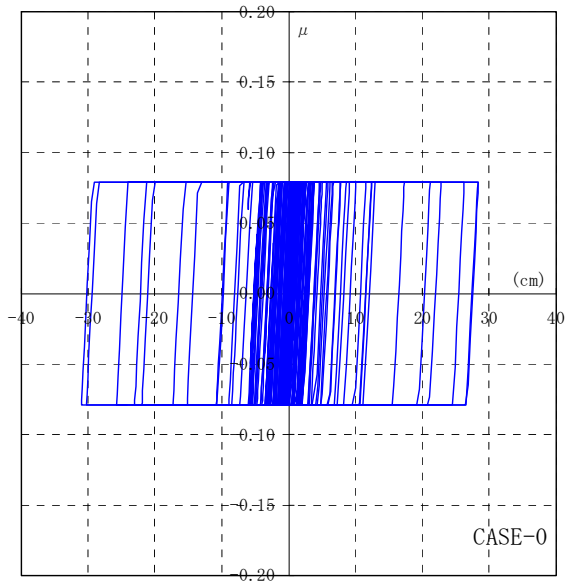


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)

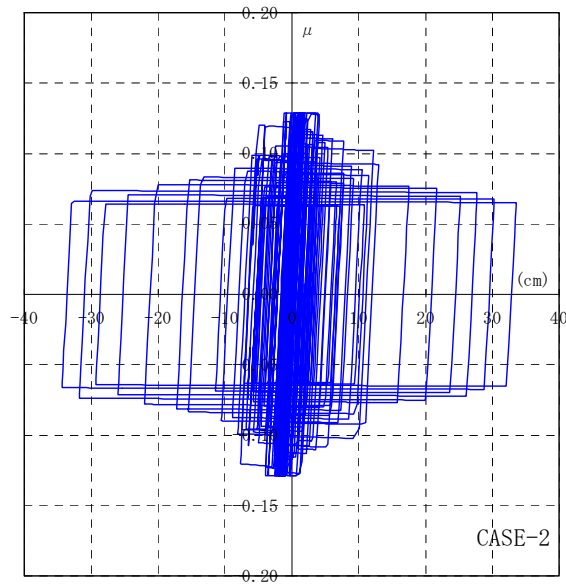
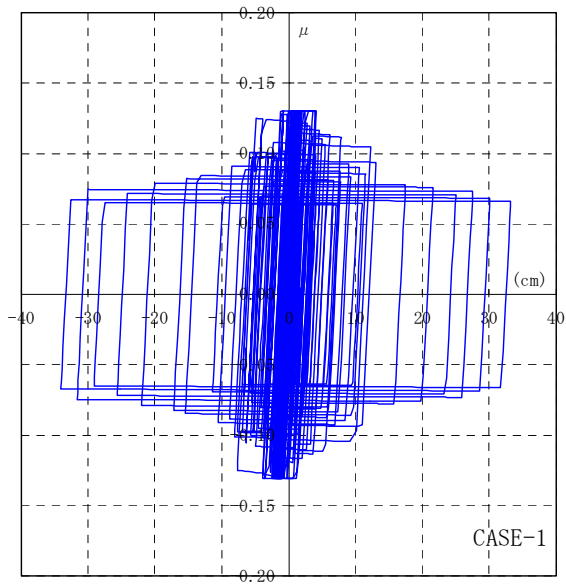


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積吸収エネルギー依存: $\beta=1.00$) 弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存: $\beta=1.00$)

図 3.3.5-9(b) 免震層荷重-変形関係(AIC003 : 1.25 倍)

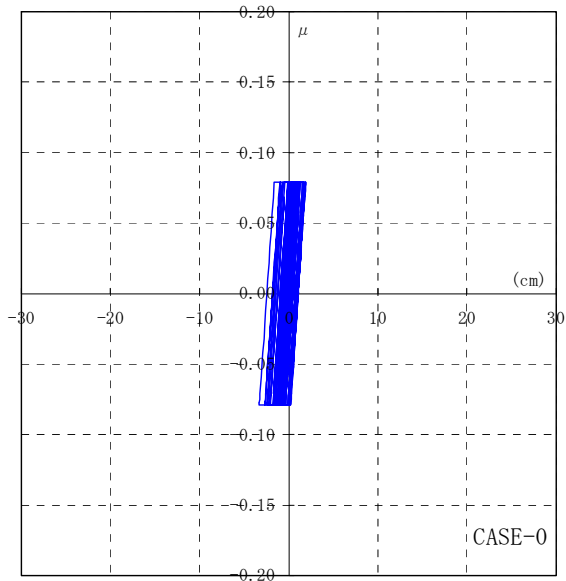


弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (依存性無視)

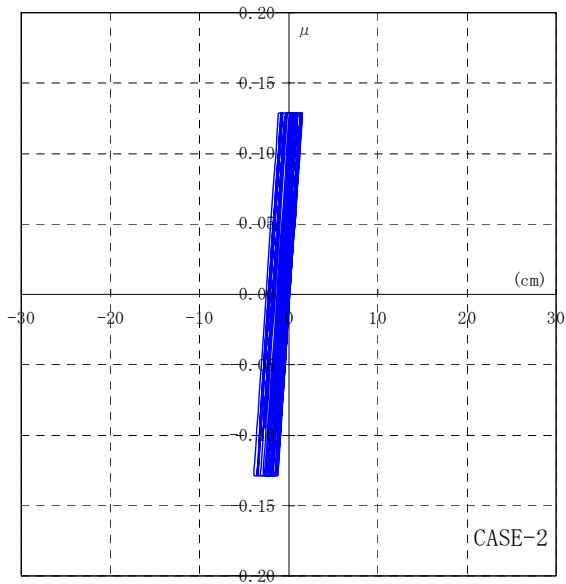
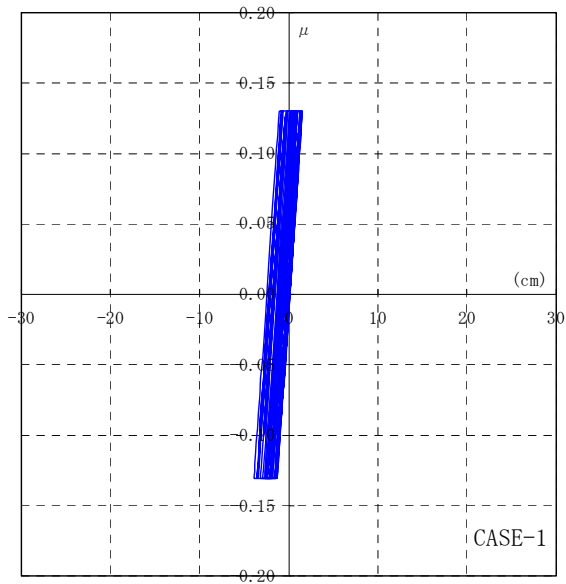


弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (累積吸収エネルギー依存: $\beta=1.00$) 弾性すべり支承 μ - δ 履歴 (累積すべり変位依存: $\beta=1.00$)

図 3.3.5-9(c) 免震層荷重-変形関係(SZO024 : 1.25 倍)

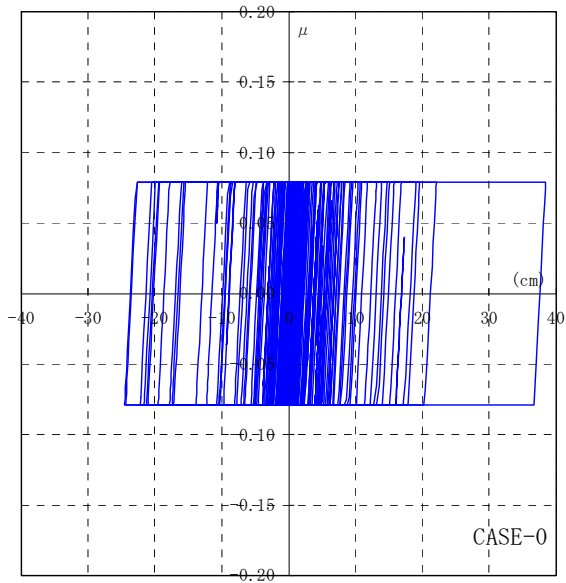


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)

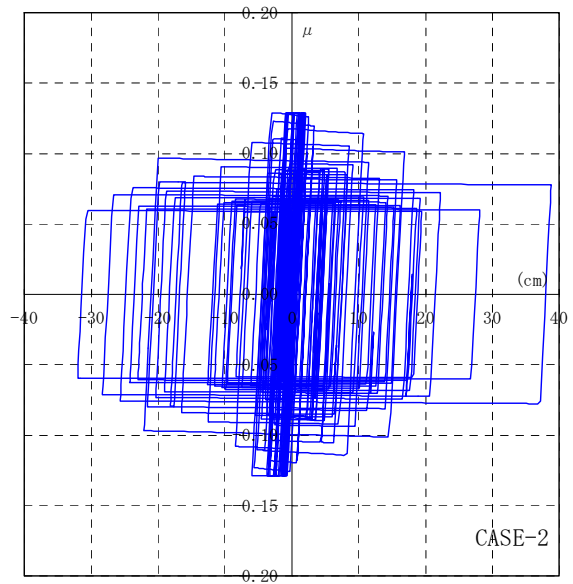
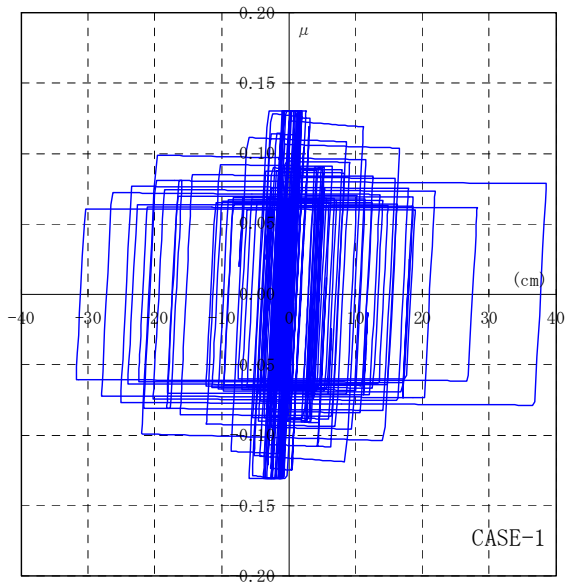


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積吸収エネルギー依存: $\beta=1.00$) 弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存: $\beta=1.00$)

図 3.3.5-9(d) 免震層荷重-変形関係(KGIN : 1.25 倍)

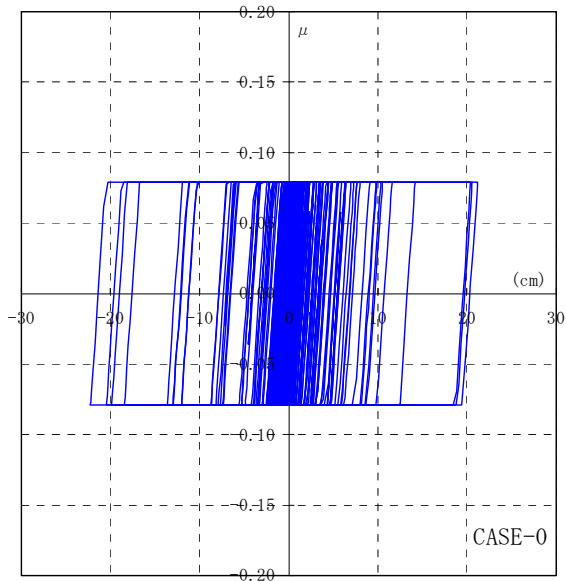


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)

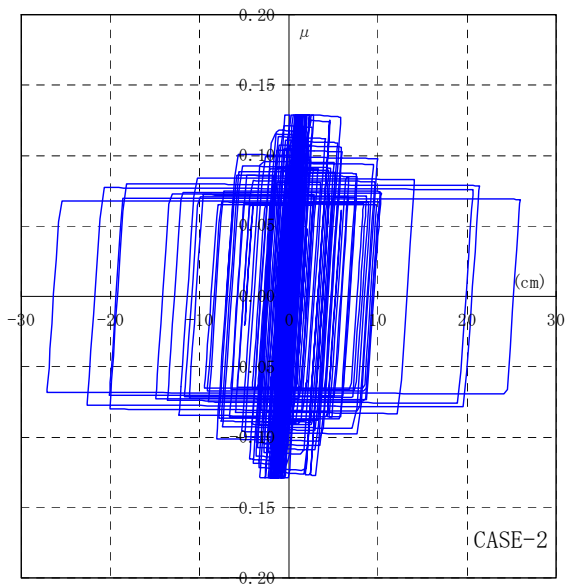
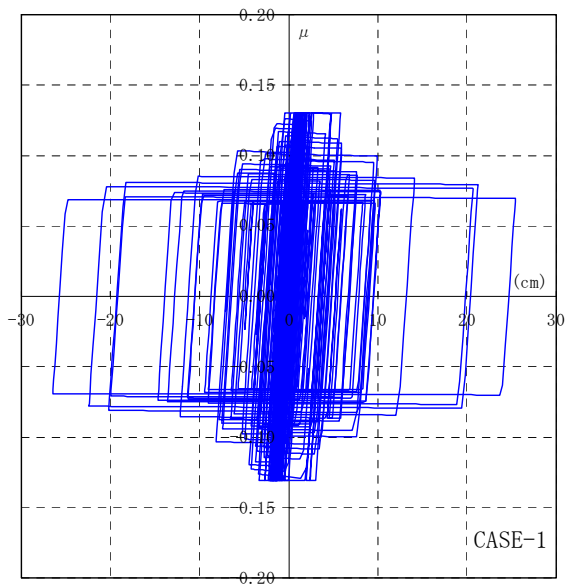


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積吸収エネルギー依存: $\beta=1.00$) 弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存: $\beta=1.00$)

図 3.3.5-10(a) 免震層荷重-変形関係(OSKH02 : 1.50 倍)

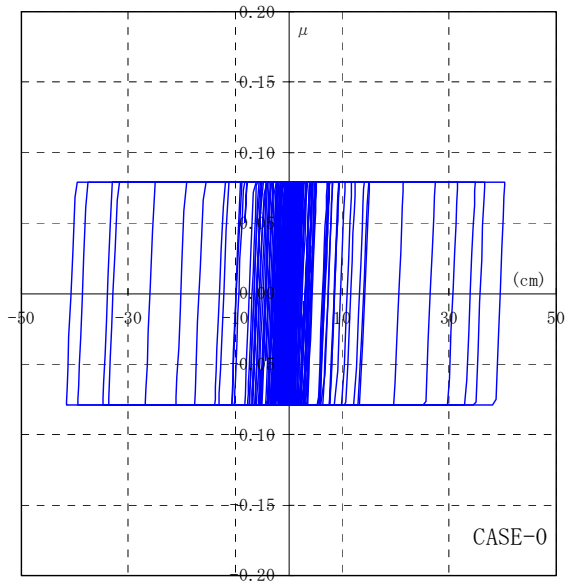


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)

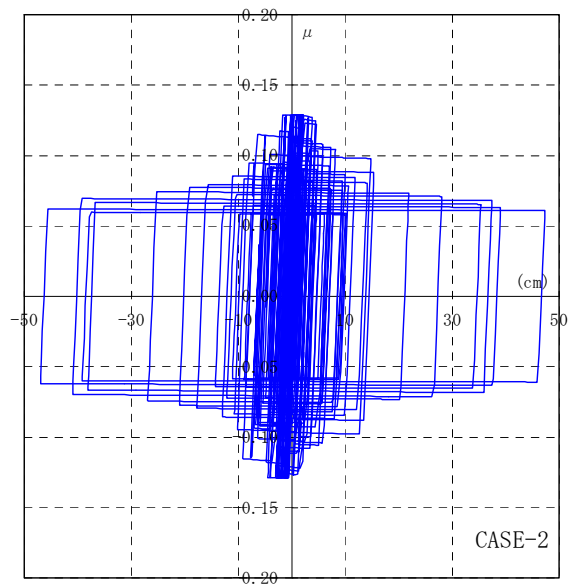
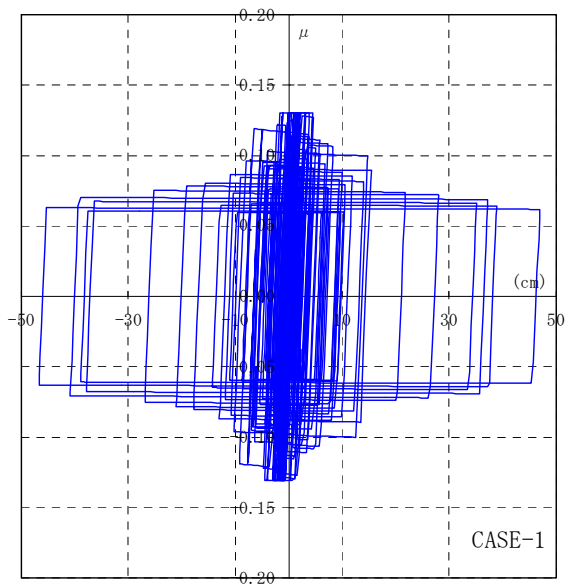


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積吸収エネルギー依存: $\beta=1.00$) 弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存: $\beta=1.00$)

図 3.3.5-10(b) 免震層荷重-変形関係(AIC003 : 1.50 倍)

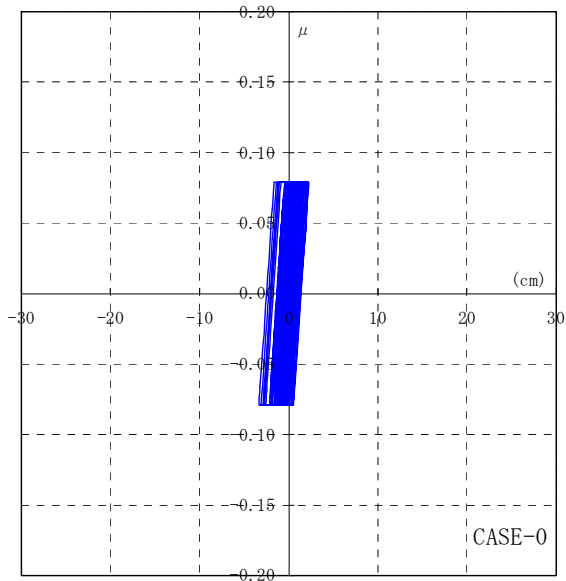


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)

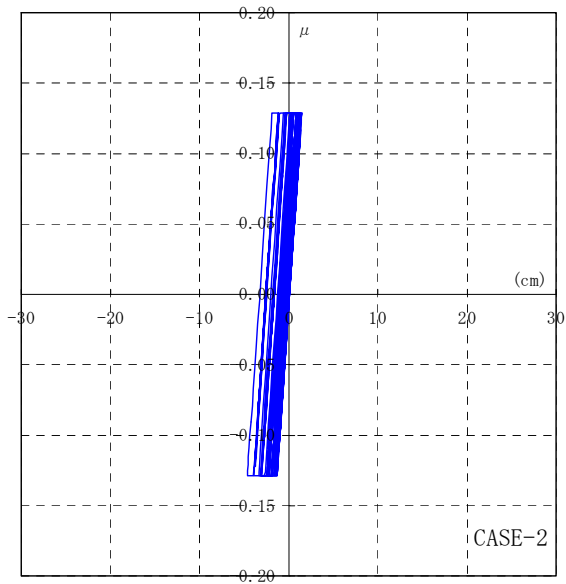
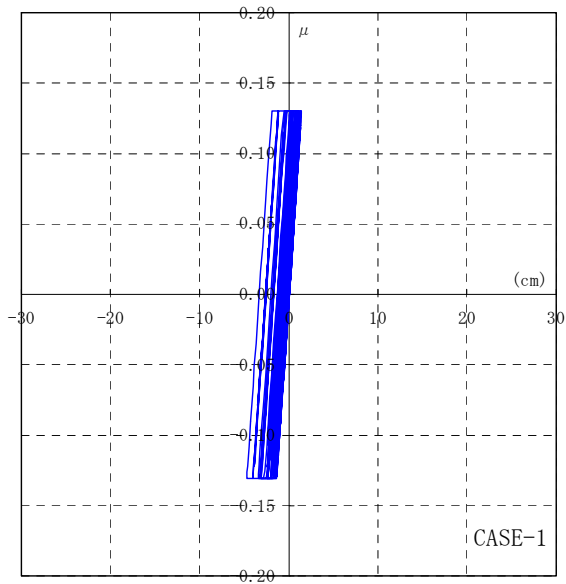


弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積吸収エネルギー依存: $\beta=1.00$) 弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存: $\beta=1.00$)

図 3.3.5-10(c) 免震層荷重-変形関係(SZO024 : 1.50 倍)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (依存性無視)



弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積吸収エネルギー依存: $\beta=1.00$) 弾性すべり支承 $\mu - \delta$ 履歴 (累積すべり変位依存: $\beta=1.00$)

図 3.3.5-10(d) 免震層荷重-変形関係(KGIN : 1.50 倍)

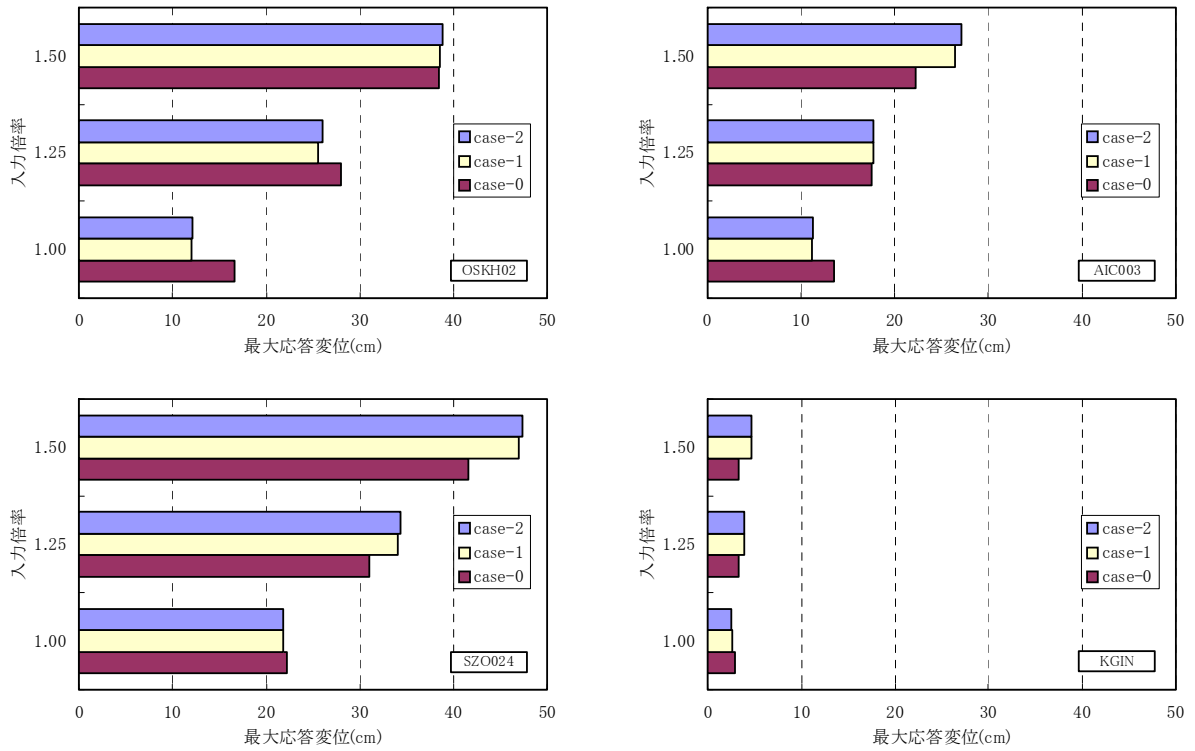


図 3.3.5-11(a) 最大応答値比較(最大応答変位)

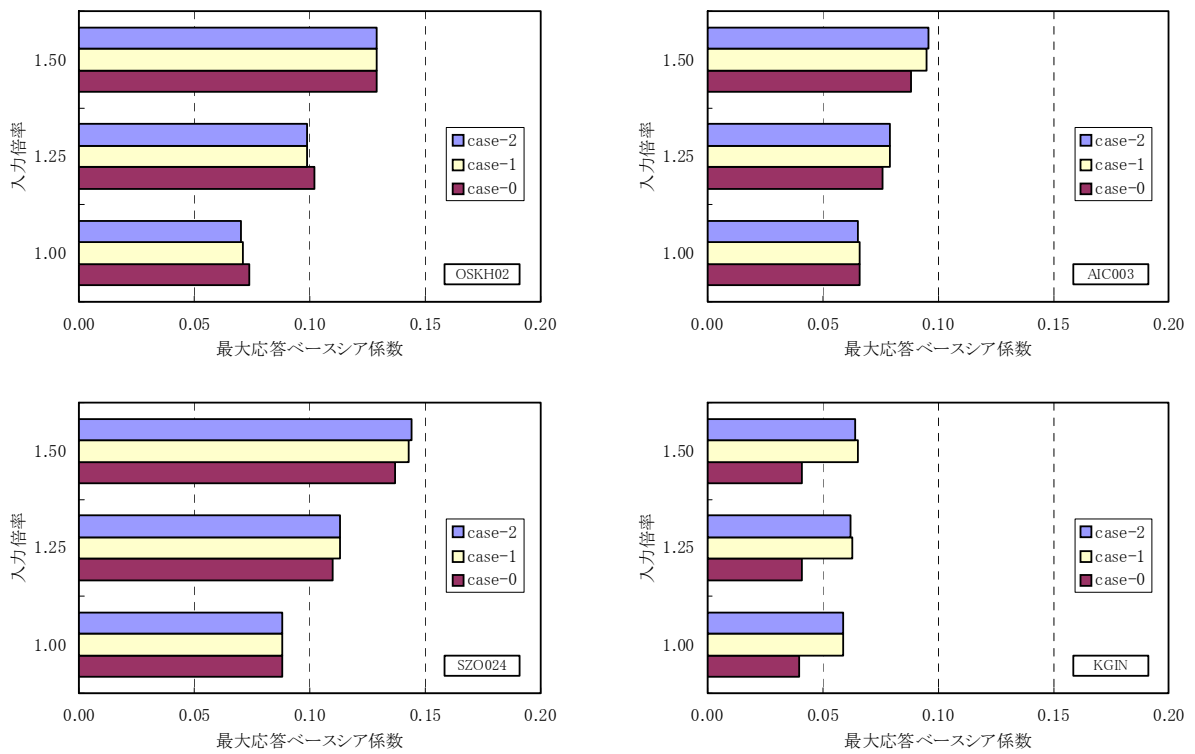


図 3.3.5-11(b) 最大応答値比較(最大応答ベースシア係数)

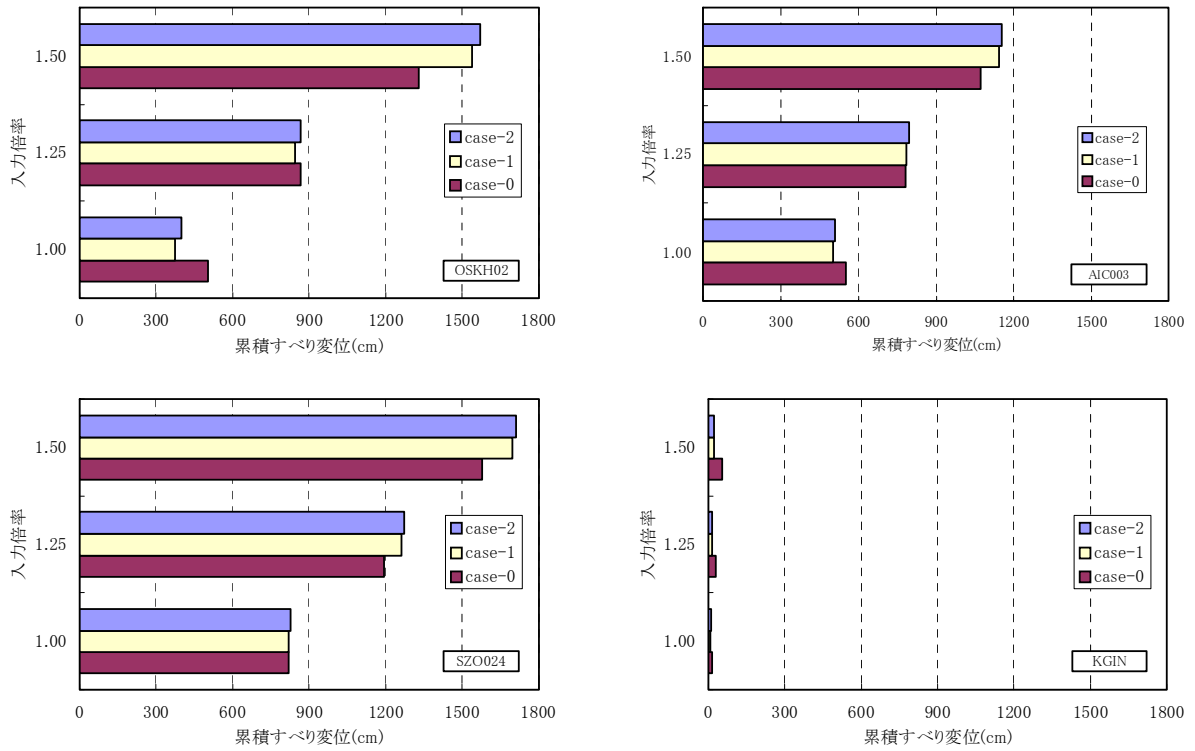


図 3.3.5-11(c) 最大応答値比較(累積すべり変位)

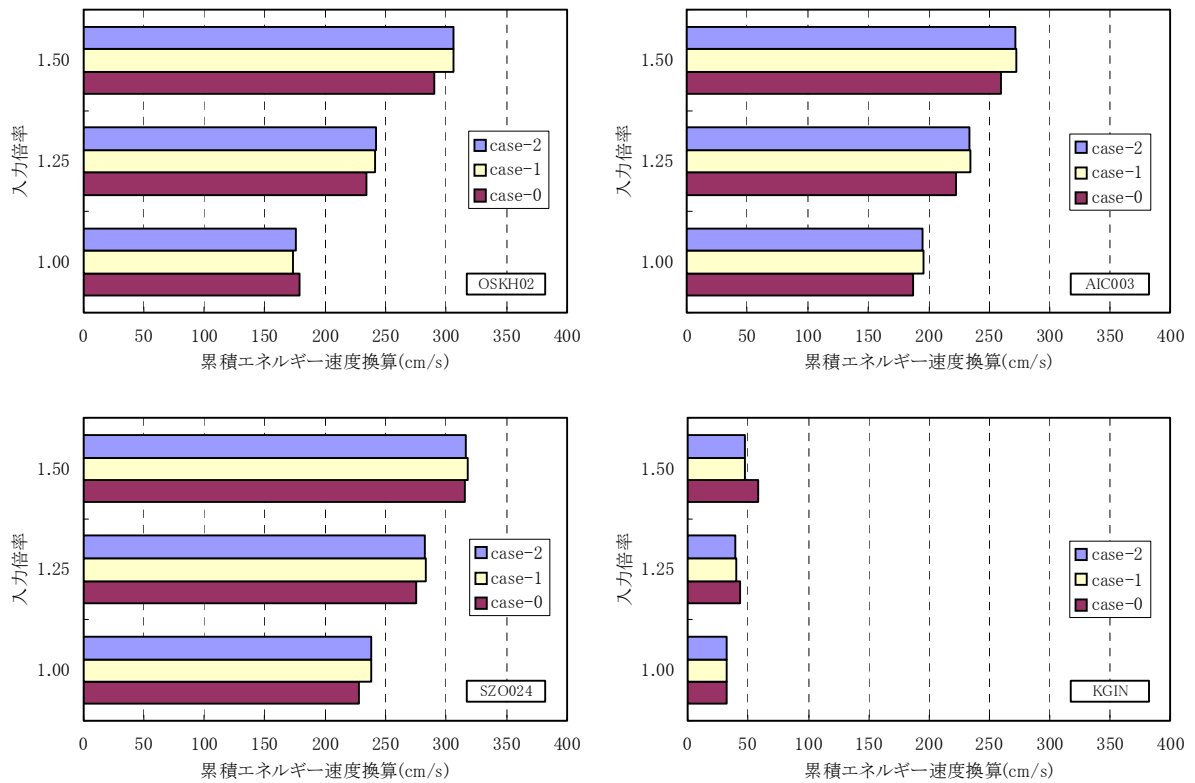


図 3.3.5-11(d) 最大応答値比較(累積吸収エネルギー)

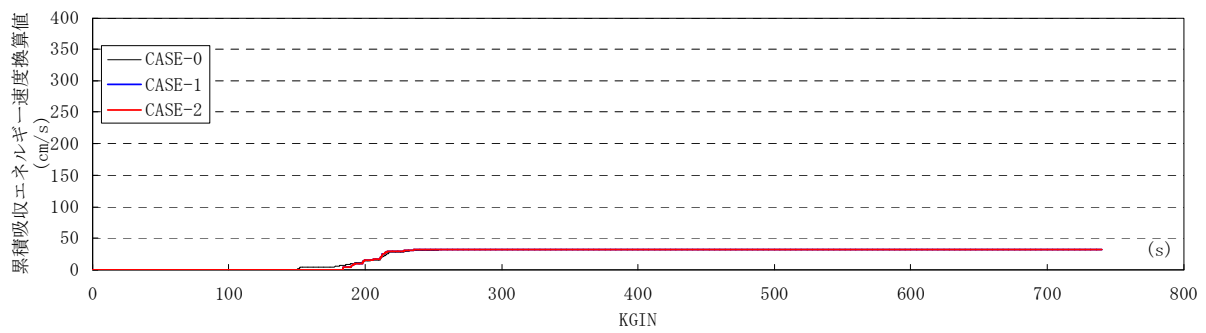
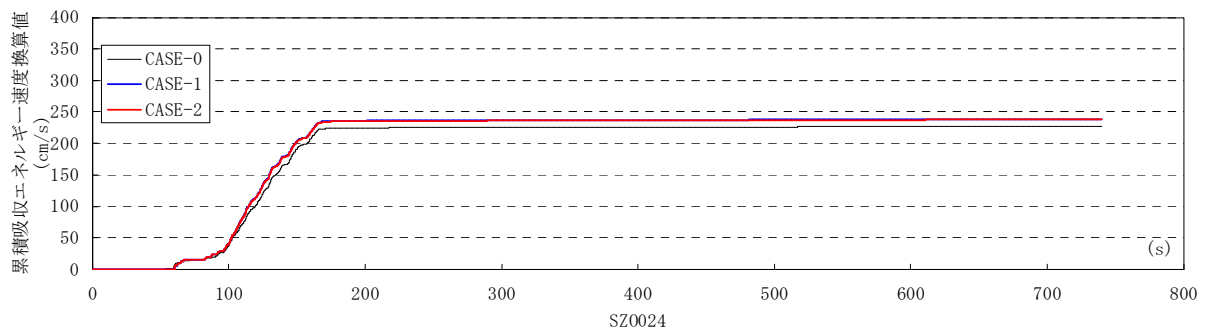
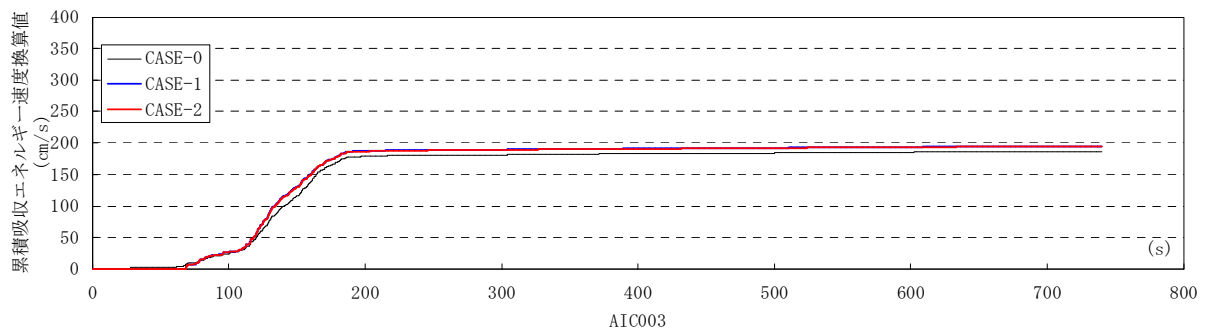
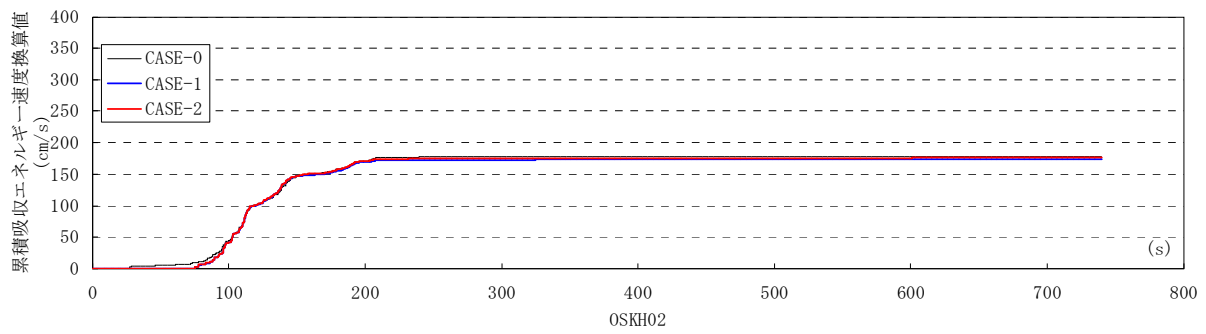


図 3.3.5-12(a) 累積吸収エネルギー速度換算値時刻歴波形(入力×1.00倍)

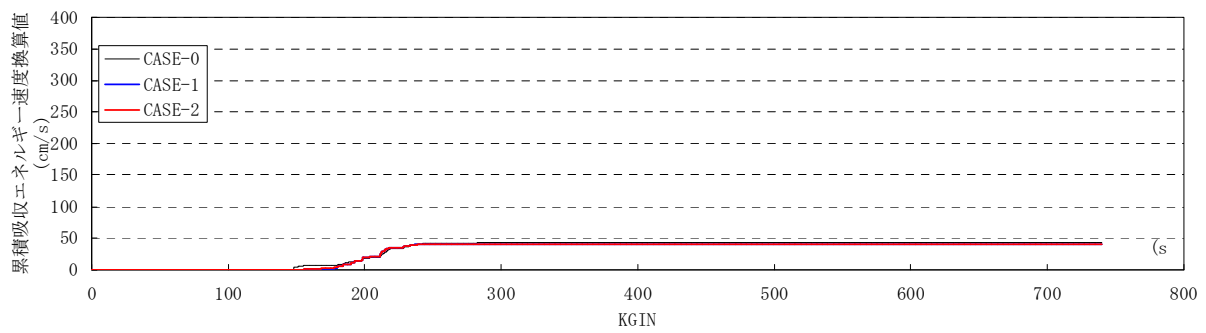
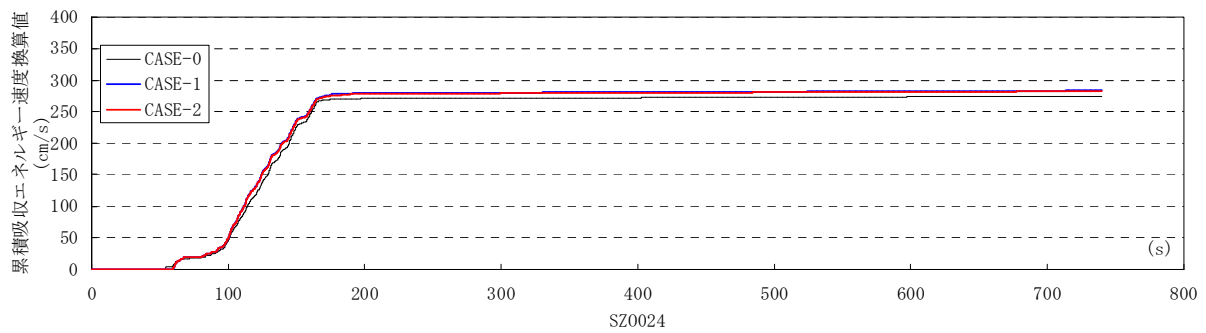
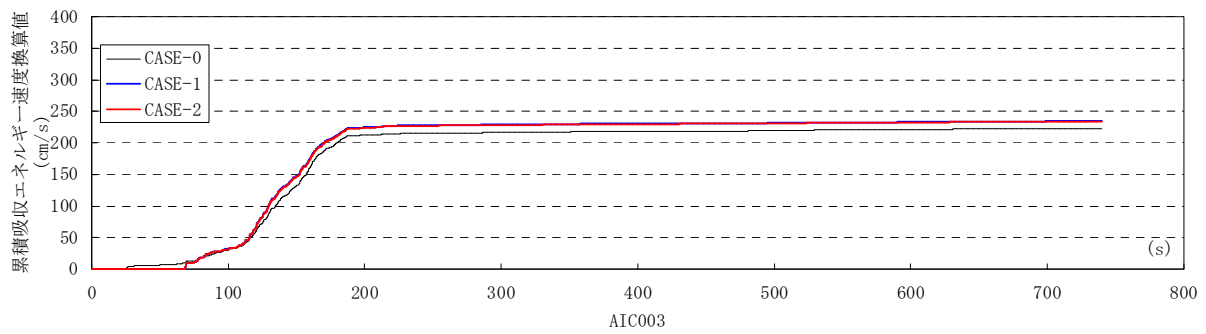
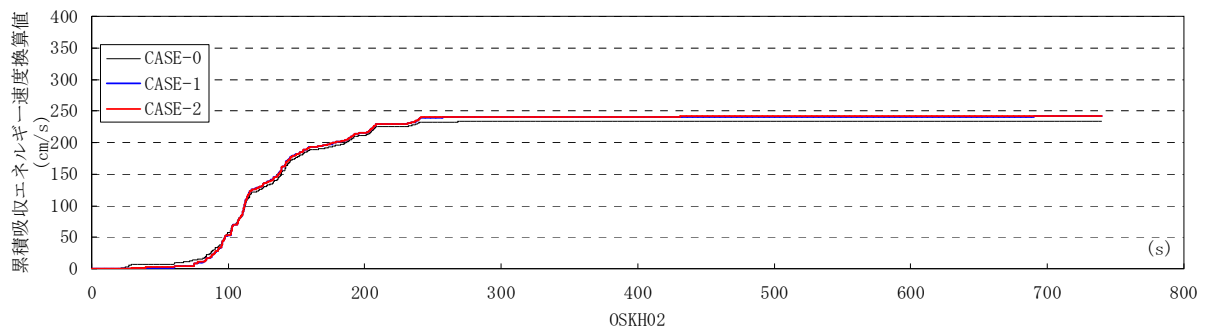


図 3.3.5-12(b) 累積吸収エネルギー速度換算値時刻歴波形(入力×1.25倍)

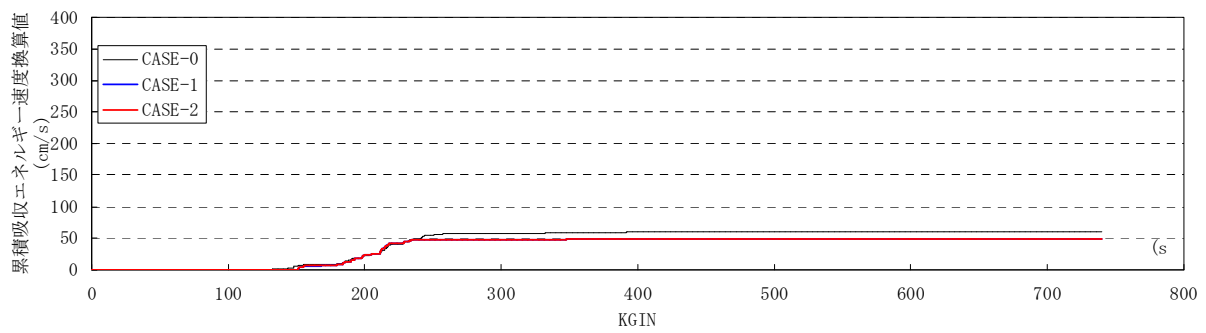
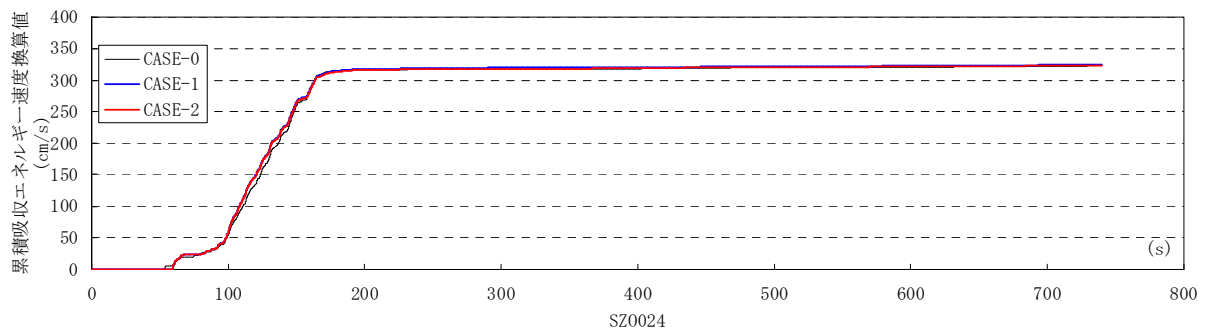
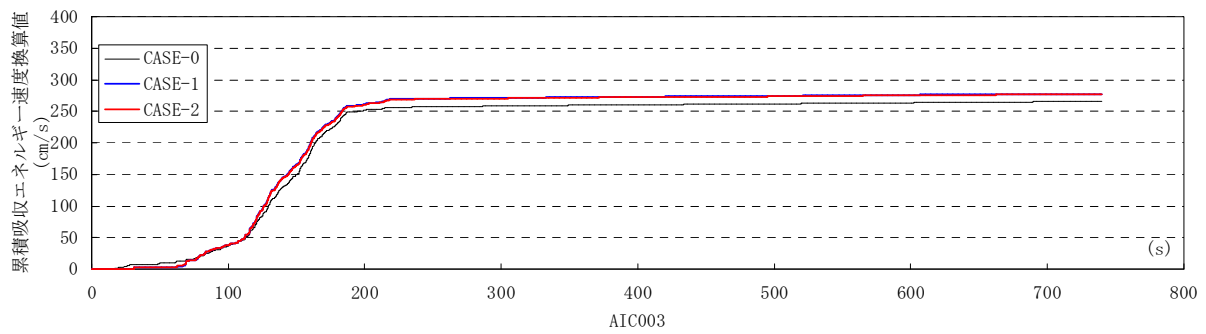
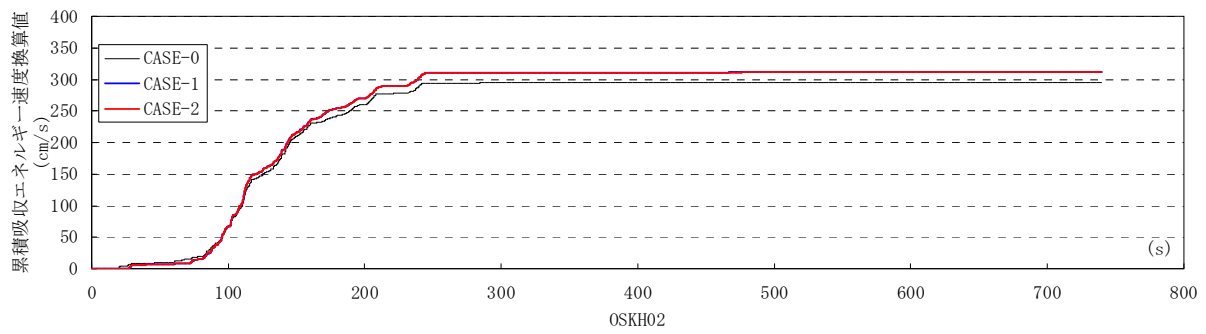


図 3.3.5-12(c) 累積吸収エネルギー速度換算値時刻歴波形(入力×1.50倍)

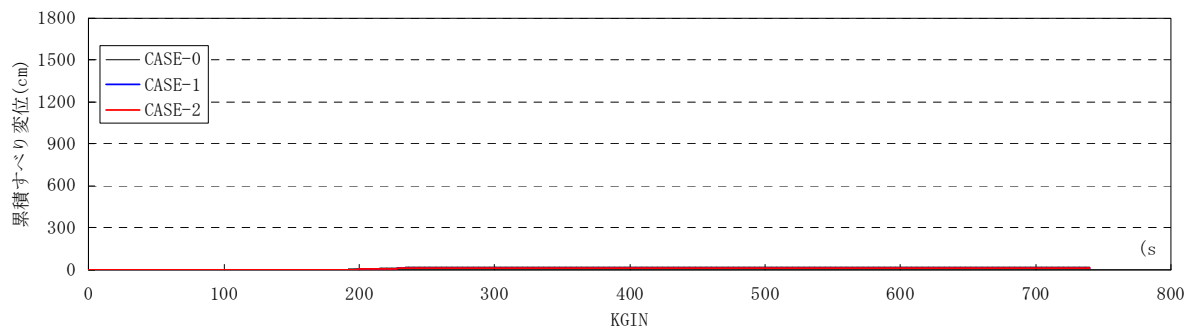
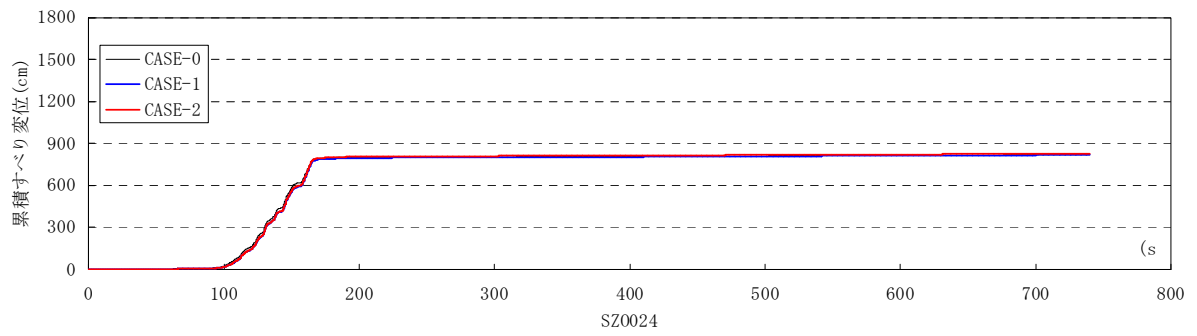
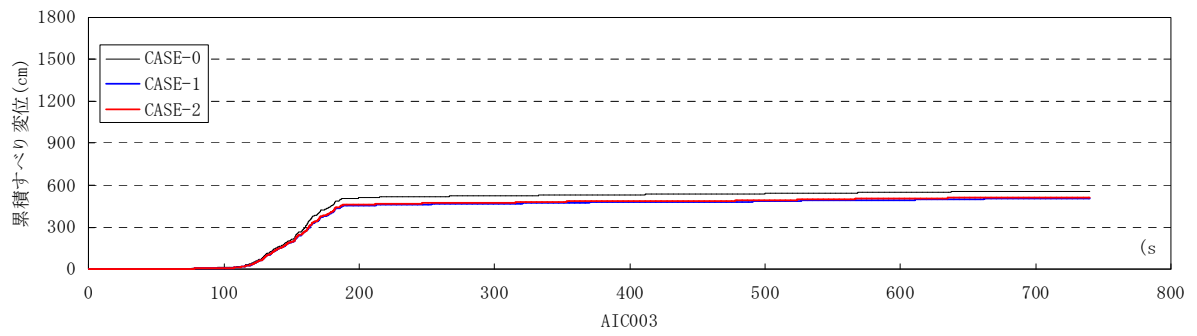
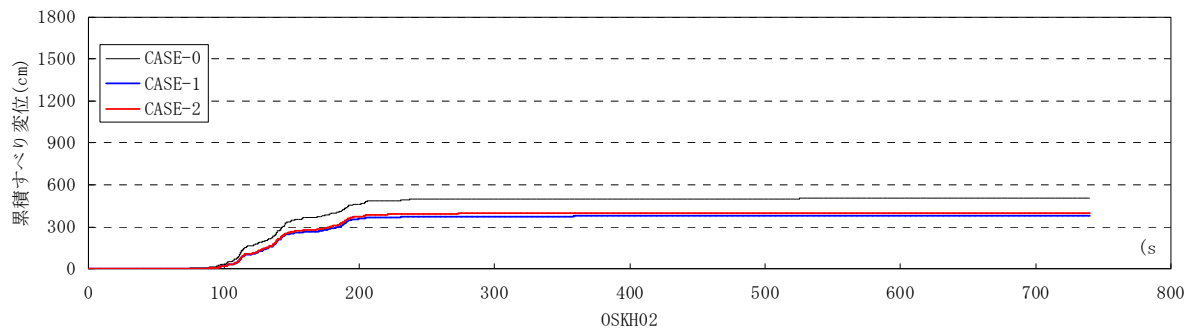


図 3.3.5-13(a) 累積すべり変位時刻歴波形(入力×1.00 倍)

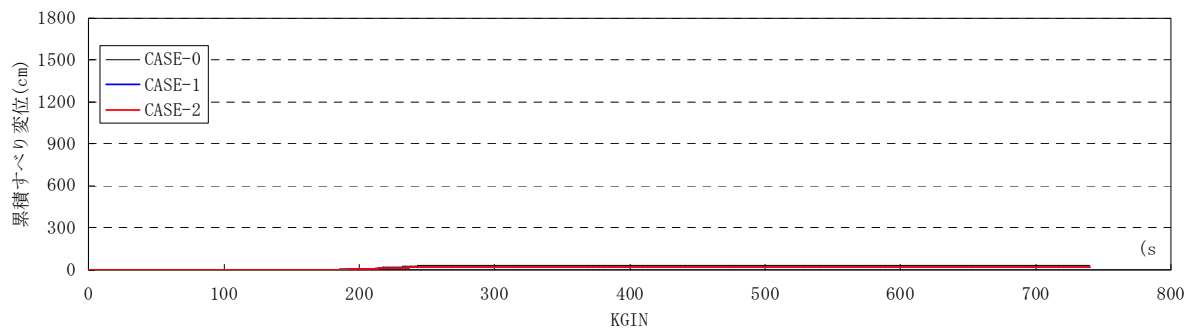
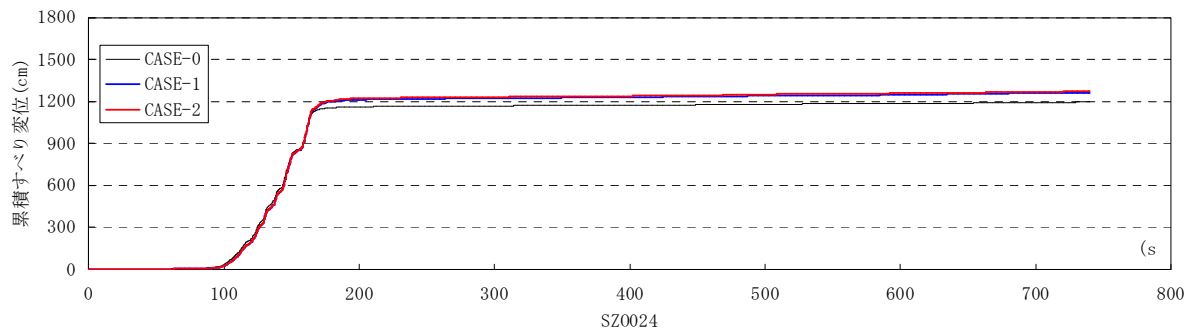
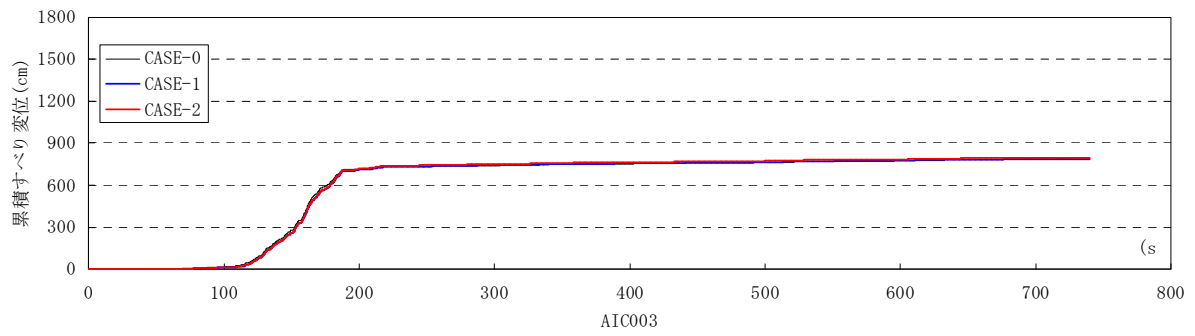
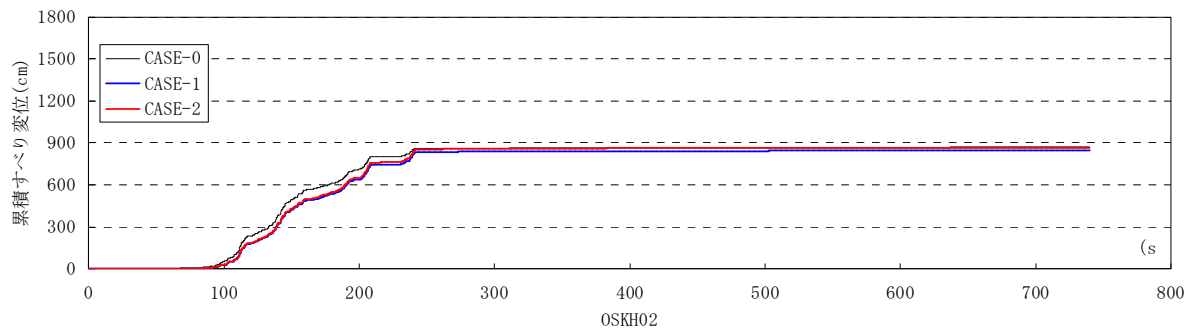


図 3.3.5-13(b) 累積すべり変位時刻歴波形(入力×1.25 倍)

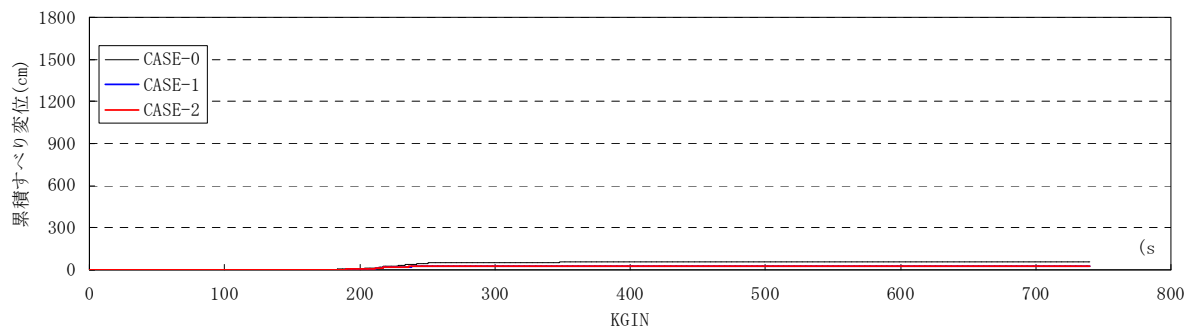
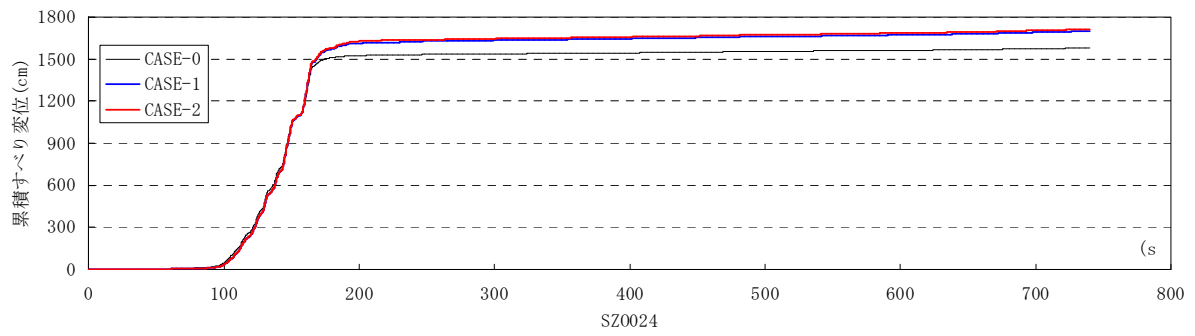
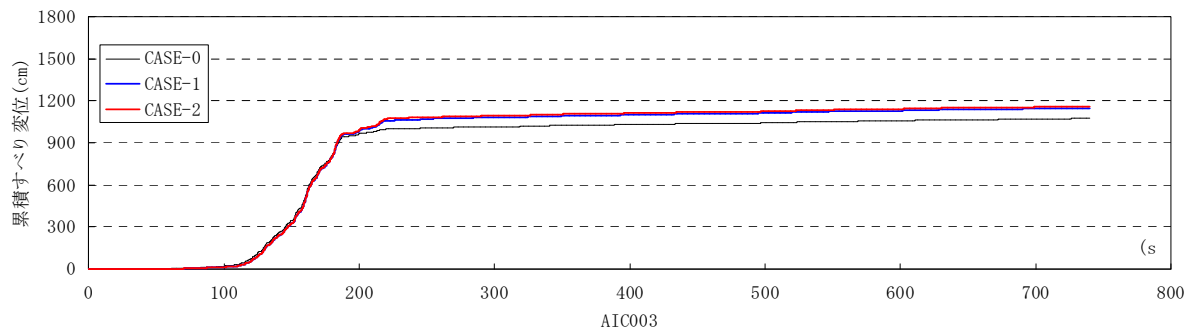
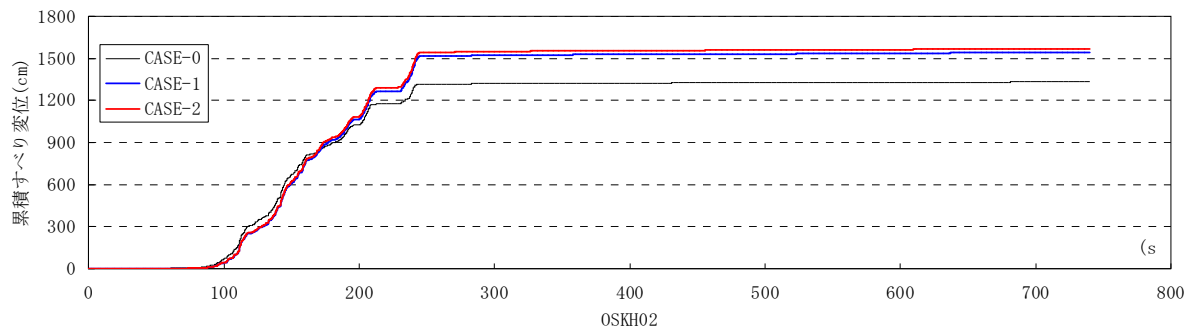


図 3.3.5-13(c) 累積すべり変位時刻歴波形(入力×1.50倍)

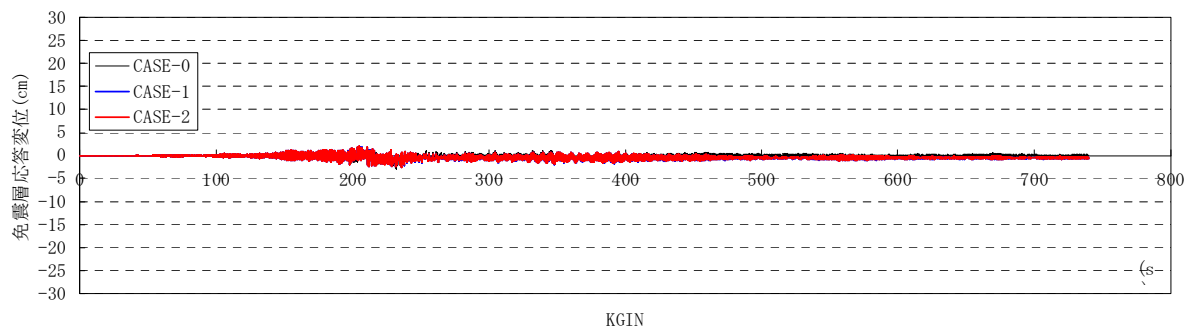
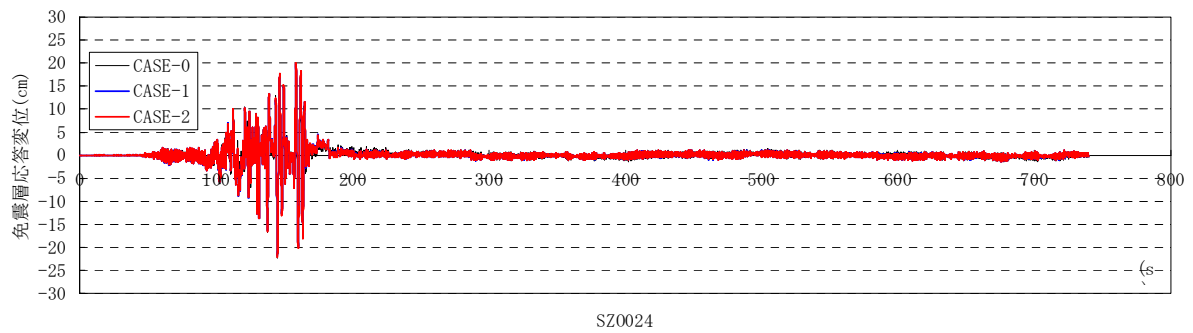
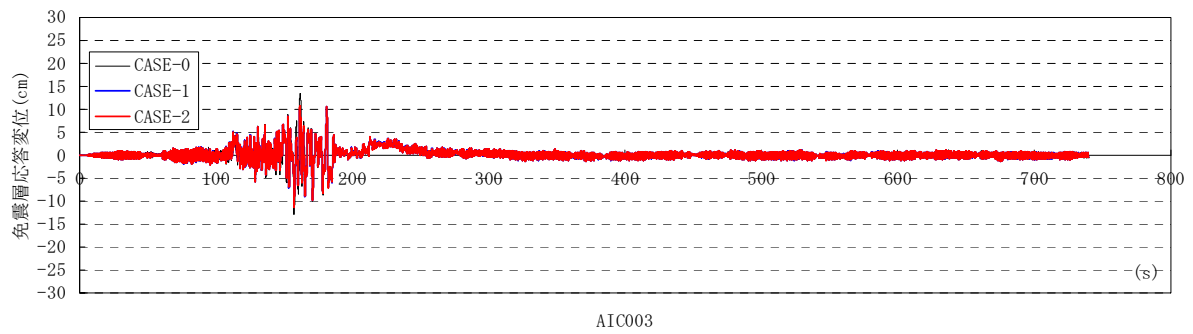
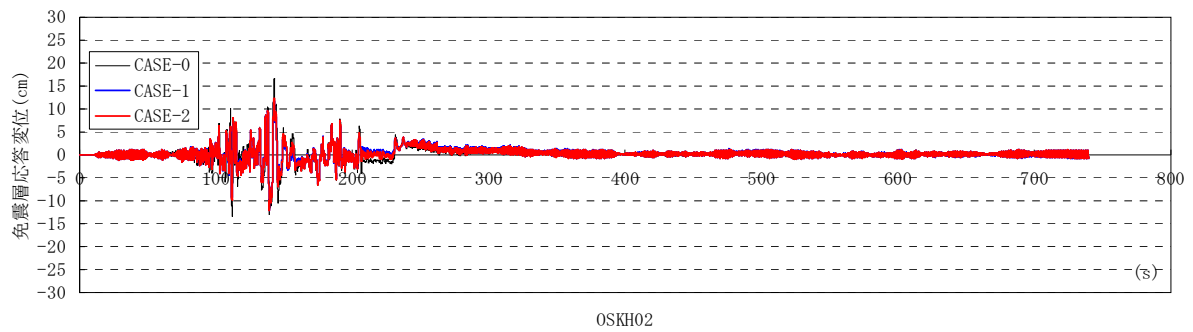


图 3.3.5-14(a) 免震層応答変位時刻歴波形(入力×1.00倍)

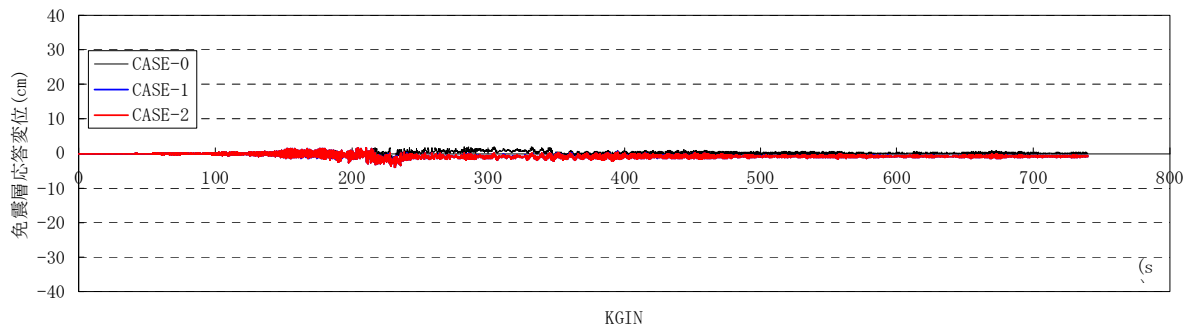
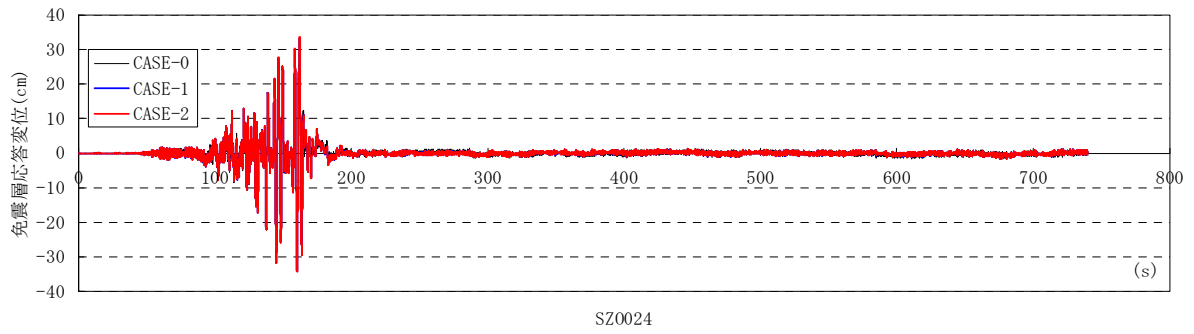
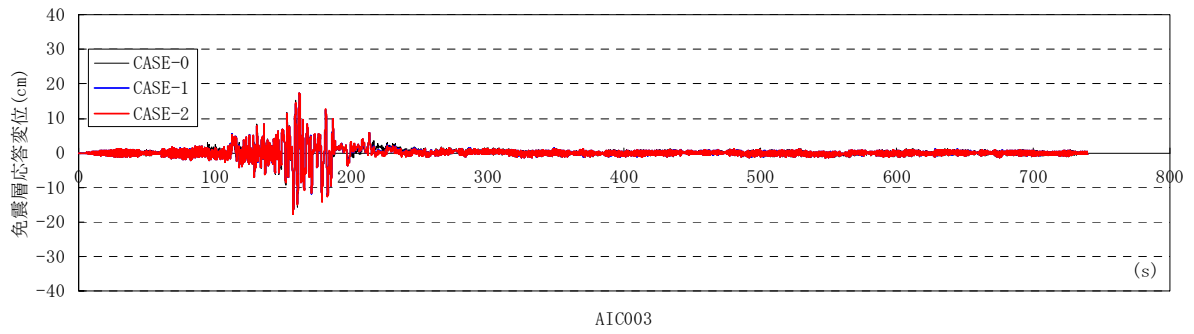
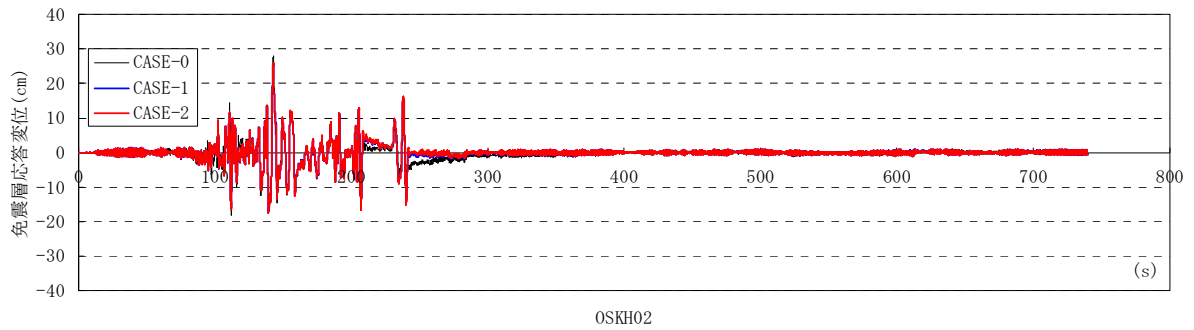


図 3.3.5-14(b) 免震層応答変位時刻歴波形(入力×1.25 倍)

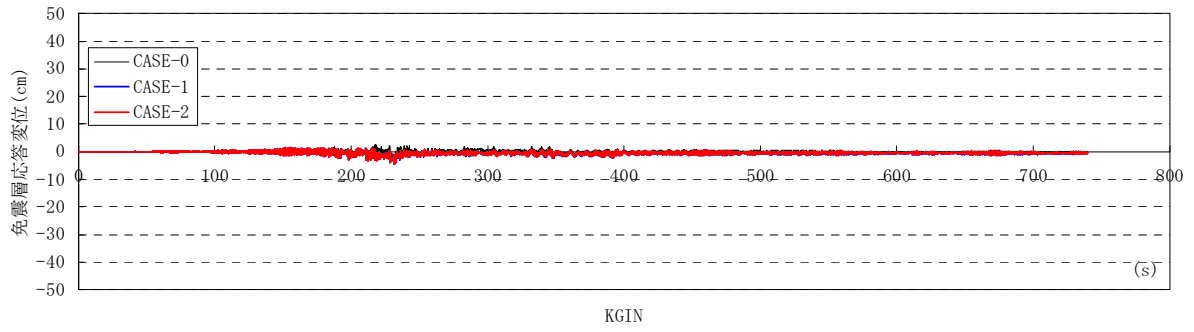
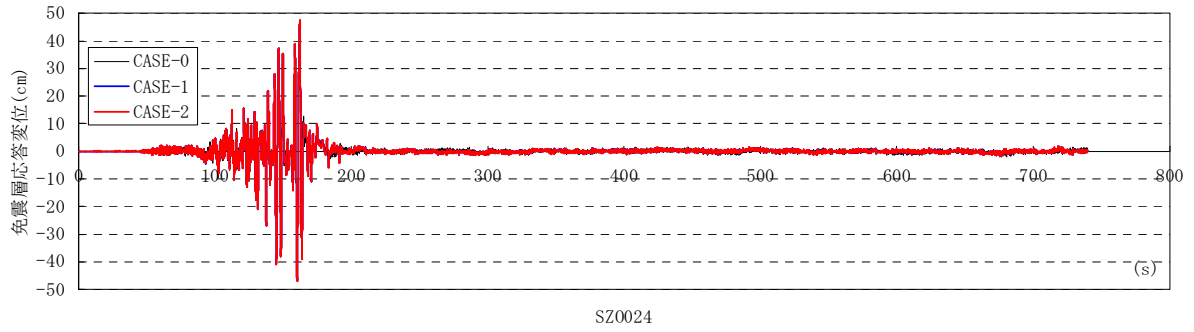
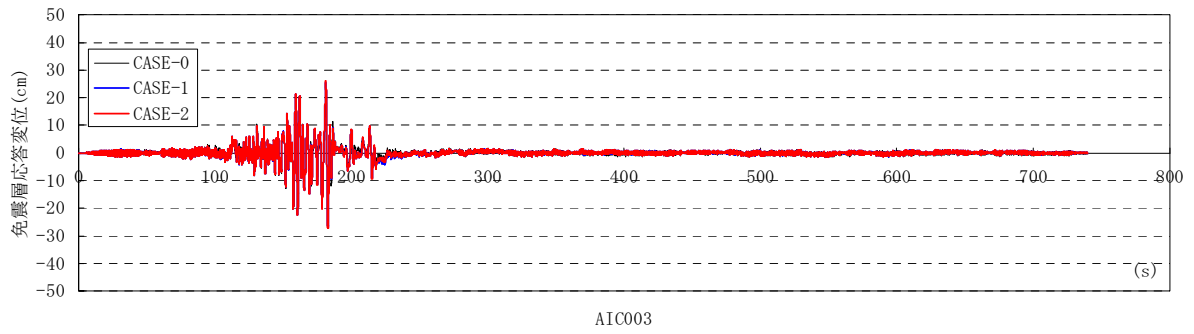
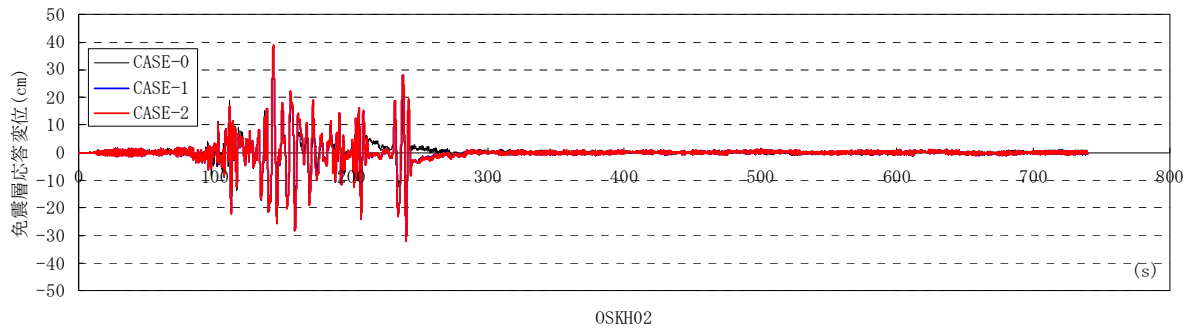


図 3.3.5-14(c) 免震層応答変位時刻歴波形(入力×1.50倍)

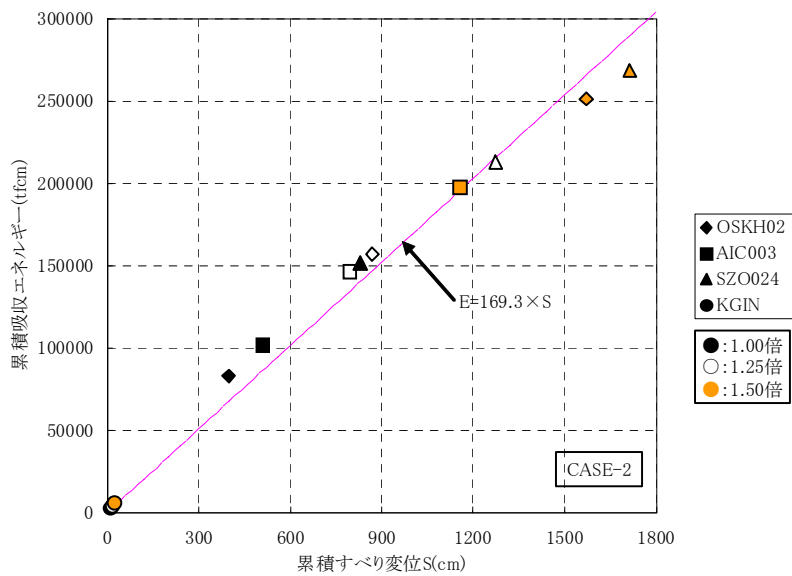
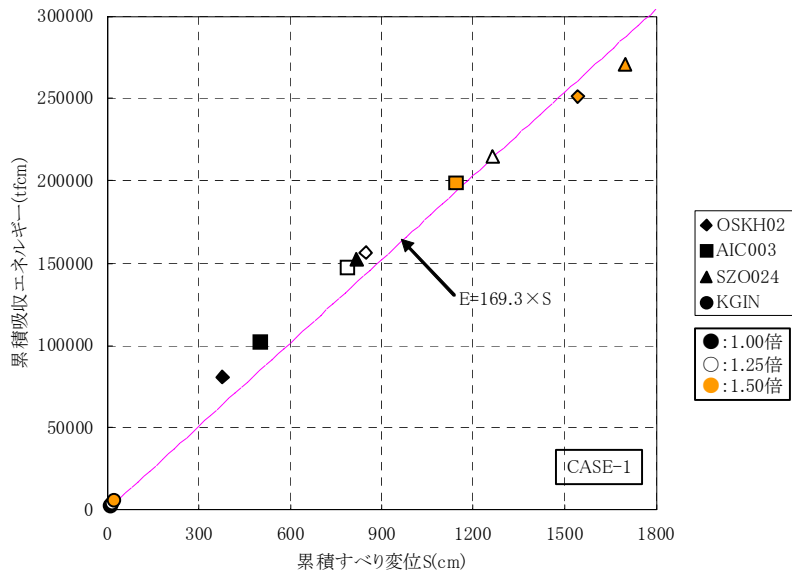
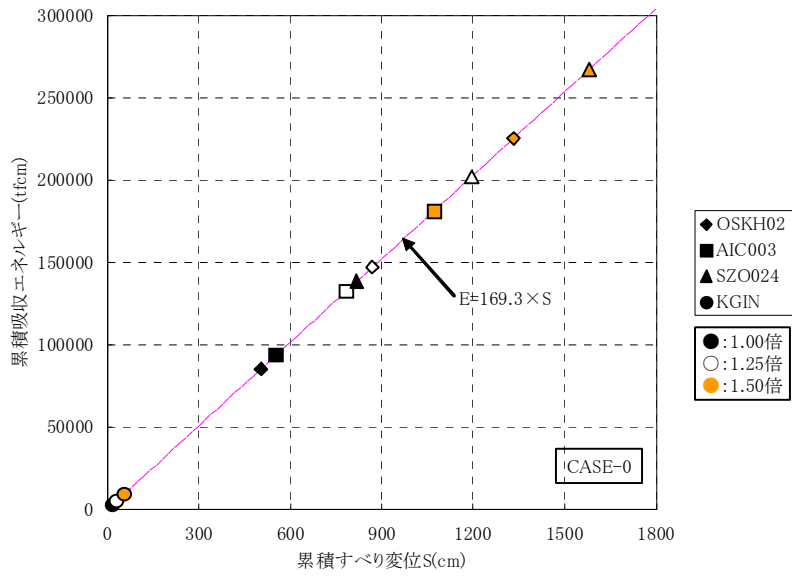


図 3.3.5-15 累積すべり変位-累積吸収エネルギー関係

(4) まとめ

以上の検討より以下の知見を得た。

- ・ 摩擦係数の累積吸収エネルギー依存性を考慮することにより、繰り返し荷重により摩擦係数が低下し、応答変位が大きくなることが確認された。
- ・ 累積吸収エネルギー依存性を考慮した応答結果と、累積すべり変位依存性を考慮した応答結果の比較では、最大応答値はほぼ同値、応答時刻歴波形や免震層の荷重-変形関係図もほぼ同一形状となっていることが確認された。
- ・ 依存性を無視した標準モデルと、依存性を考慮したモデルとでは、初期の摩擦係数が依存性考慮モデルの方が高く出ているため、パラメータの見直しが必要である。
- ・ 入力地震動のレベルにも依るが、累積吸収エネルギーまたは累積すべり変位依存性を考慮すると、標準モデルに比べて最大応答変位が 1 割程度大きくなることが確認できるので、実施設計においては、その分の余裕を見込んでおく必要があるのではないか。

参考文献

- 3.3.5-1) 日比野浩、高木政美、勝田庄二：実大弾性すべり支承の載荷実験に基づく摩擦特性のモデル化、日本建築学会構造系論文集、第 574 号、pp.45-52、2003.12

3.3.6 天然ゴム系積層ゴム+弾性すべり支承（低摩擦）+粘性ダンパー

(1) 免震部材実験結果に基づくモデル化

1) 弾性すべり支承(低摩擦)

承(低摩擦)については、第Ⅲ部 1.3.5 の記述において、累積変形量・温度および吸収エネルギー量に依存性が見られた。

以下では、まず試験の概要を示し、続けて試験結果から得られた依存性を考慮できる評価式の提案を行う。最後に部材試験とシミュレーションの比較を行い、評価式の妥当性を確認する。

a) 試験体及び実験内容の概要

試験体、試験装置、計測項目と計測方法、実験方法および実験ケースについては、第Ⅲ部第1章 1.3.5 項に示した内容と同様であるため、それぞれの記述は割愛する。第Ⅲ部 1.3.5 項を参照してほしい。

b) 試験結果を用いた評価式の改善

①材料認定書の評価式

材料認定書^{3.3.6-1})に記載されている低摩擦すべり支承の既往評価式は、式(3.3.6-1)となる。式(3.3.6-1)では、面圧および速度依存性が考慮されているが、繰り返しによる依存性は考慮されていない。

$$\mu(\sigma_s, V) = (0.0355 - 0.0093 \cdot \exp(-0.1 \cdot V)) \cdot \sigma_s^{-0.44} \quad (3.3.6-1)$$

ここに、 σ_s は面圧(N/mm²)、 V は水平速度(mm/sec)を示す。

②累積変形量と摩擦係数

図 3.3.6-1 に#1～#4 各試験体の累積変形量に対する摩擦係数の変動を示す。摩擦係数は面圧 20MPa、速度 15mm/s に補正して表示した。累積変形量は全体変形を積算して求めた。図中には比較のため、メーカー提供の既往評価データを示した。

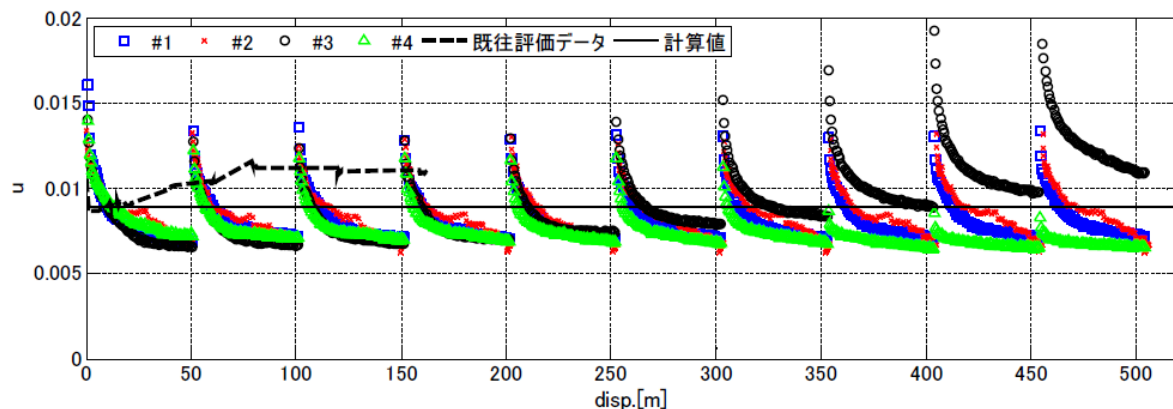


図 3.3.6-1 累積変形量と摩擦係数

本調査においては、長周期地震動 1 波分の応答を想定したセット毎に摩擦係数の有意な低下が見られ、インターバル時間を挟んだ次セットの開始時には摩擦係数の復帰が見られるのが特徴である。また、本調査におけるセット間の相対的な変化はあまり見られない。

特徴的な傾向として、面圧 30MPa の#3 試験体では、累積変形量 200m(5 セット目)程度から摩擦係数の上昇傾向が観察される。350m(8 セット目)以降、上昇傾向は顕著となる。面圧が 20MPa を超える場合には、この累積変形量領域における摩擦係数変動を考慮する必要がある。

③温度と摩擦係数

図 3.3.6-2 および図 3.3.6-3 に温度に対する摩擦係数の変動を示す。図 3.3.6-2 は縦軸に摩擦係数を取り、横軸にはすべり板中央(計測点④)温度を採った。図 3.3.6-3 は縦軸に各セット開始時の摩擦係数に対する各サイクルの摩擦係数の低下分(以下、摩擦係数低下量)を取り、横軸には、すべり板中央(計測点④)温度の各セット開始時点からの上昇分(以下単に、温度上昇)を採った。図は、摩擦係数の顕著な上昇が見られた#3 試験体の 7 セット目以降と、インターバルが短く各セット開始時点の温度が高温状態となった#4 試験体の 8 セット目以降を除く、4 試験体の全セットについて重ね書きした。

図 3.3.6-2 からは、本実験においては、セット開始直後の急激な低下を除けば、摩擦係数の変動とすべり板中央(計測点④)温度 T_4 が比較的ばらつきの少ない関係を有していることがわかる。

セット開始時(1 サイクル目)の摩擦係数 μ_0 (各セットの最大動摩擦係数)と温度 T_4 の関係は式(3.3.6-2)で表現できる。

$$\mu_0 = -7.5 \times 10^{-5} \cdot T_4 + 0.0145 \quad (3.3.6-2)$$

$$\Delta\mu = 0.03 \cdot (\Delta T_4 + 1)^{-0.06} - 0.03 \quad (3.3.6-3)$$

図 3.3.6-3 からは、#1 試験体の 1 セット目を除くと、本実験においては、摩擦係数低下量とすべり板温度上昇の間に一定の関係を見出すことができる。ここでは図 3.3.6-3 より、摩擦係数低下量 $\Delta\mu$ と計測点④の温度上昇 ΔT_4 の関係を式(3.3.6-3)で近似できる。

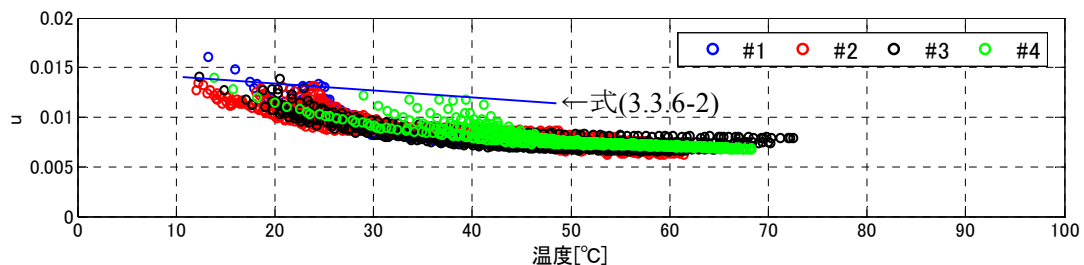


図 3.3.6-2 温度に対する摩擦係数の変動(計測点④)

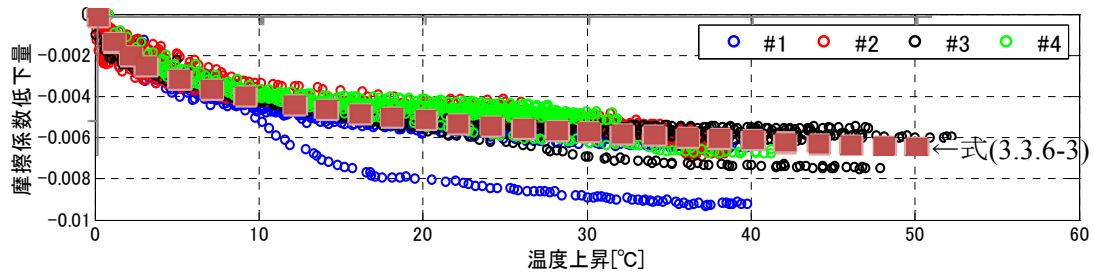


図 3.3.6-3 すべり板温度変動に対する摩擦係数の変動(計測点④)

④吸収エネルギーと温度上昇の相関

図 3.3.6-4 に各セットにおける吸収エネルギーと温度上昇の相関を示す。図 3.3.6-4 より各セットにおける吸収エネルギー E_d と計測点④の温度上昇 ΔT_4 の関係は式(3.3.6-4)で表すことができる。

$$\Delta T_4 = 0.00019 \cdot E_d^{0.9} \quad (3.3.6-4)$$

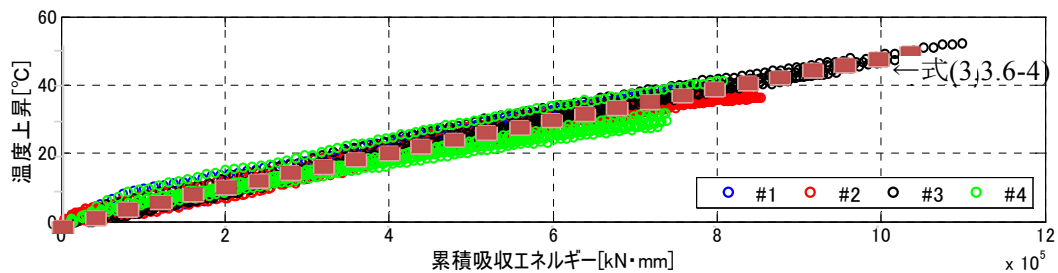


図 3.3.6-4 累積吸収エネルギーとすべり板温度上昇(計測点④)

摩擦係数と温度の関係を示す式(3.3.6-2)および式(3.3.6-3)の組合せで表現することにし、式(3.3.6-4)で加振中の温度上昇を累積吸収エネルギーに置き換えると、高面圧の繰り返しに伴う摩擦係数の顕著な上昇が生じたケース(#3 試験体の 7 セット目以降)と、すべり板温度が高温状態から加振が開始されたケース(#4 試験体の 8 セット目以降)を除く、本調査の実験結果を対象とした動摩擦係数 μ の繰り返し特性依存性が式(3.3.6-5)のように提示できる。式中 T は初期のすべり板温度であり、環境温度に代表される。

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \mu_0 + \Delta\mu \\ \mu_0 &= -7.5 \times 10^{-5} \cdot T + 0.0145 \\ \Delta\mu &= 0.03 \cdot (0.00019 \cdot E_d^{0.9} + 1)^{-0.06} - 0.03 \end{aligned} \right\} (3.3.6-5)$$

設計ツールとして用いる地震応答解析には、温度評価を介在させるよりも吸収エネルギーを用いた方が汎用性が高いことなどを考慮して式(3.3.6-5)の形式を採った。

⑤#3 試験体における摺動距離と摩擦係数の相関

図 3.3.6-5 に#3 試験体の各セット開始時の動摩擦係数と式(3.3.6-5)・第 2 式との偏差(以下、初

期値偏差)を累積摺動距離 D_s との関係で示す。また、図 3.3.6-6 に#3 試験体のセット毎の動摩擦係数の低下量を式(3.3.6-5)・第3式に対する比(以下、低下量比)として累積摺動距離 D_s との関係で示す。

初期値偏差、低下量比とも D_s が 200m を超えると増加する傾向にある。ここでは、すべり材面圧 σ_p が 20MPa を超え、かつ累積摺動距離 D_s が 200m を上回る場合の初期動摩擦係数 μ_0 と繰り返しによる摩擦係数低下量 $\Delta\mu$ の補正項 μ_{0_col} 、 $\Delta\mu_{col}$ として両図より式(3.3.6-6)を導く。

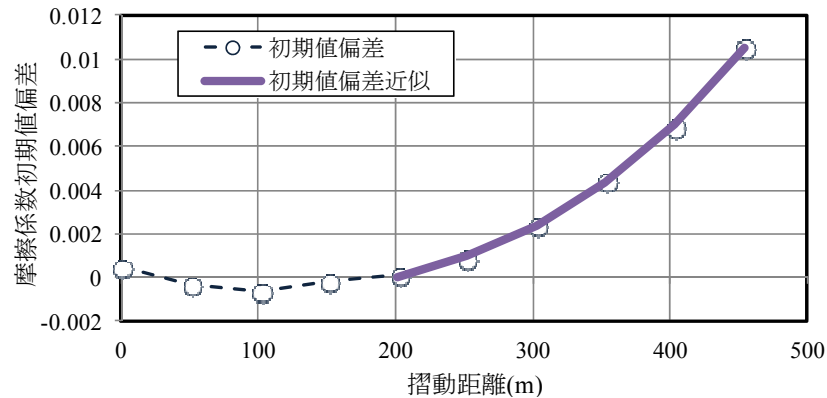


図 3.3.6-5 #3 試験体 動摩擦係数初期値偏差と摺動距離の関係

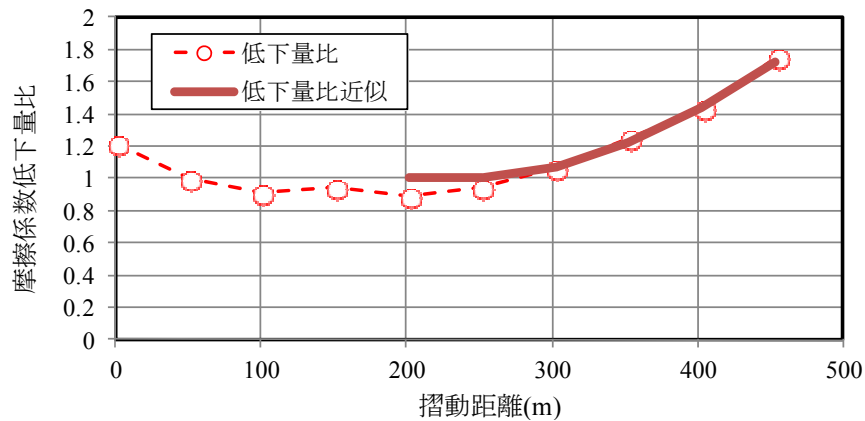


図 3.3.6-6 #3 試験体 動摩擦係数低下量比と摺動距離の関係

$$\mu_{0_col} = \begin{cases} 0 & (\sigma_p = 20MPa) \\ 1.8 \times 10^{-10} \cdot D_{S2}^3 + 5.5 \times 10^{-8} \cdot D_{S2}^2 + 1.6 \times 10^{-5} \cdot D_{S2} & (\sigma_p = 30MPa) \end{cases}$$

$$\Delta\mu_{col} = \begin{cases} 1 & (\sigma_p = 20MPa) \\ -2.8 \times 10^{-9} \cdot D_{S2}^3 + 1.5 \times 10^{-5} \cdot D_{S2}^2 - 7.9 \times 10^{-4} \cdot D_{S2} + 1 & (\sigma_p = 30MPa) \end{cases} \quad (3.3.6-6)$$

ここで、 $D_{S2} = \begin{cases} D_s - 200 & (D_s \geq 200) \\ 0 & (D_s < 200) \end{cases}$

⑥繰り返し依存特性評価式の提示

上述の式(3.3.6-5)および式(3.3.6-6)を組み合わせることにより、本調査の実験結果を対象とし

た動摩擦係数 μ の繰り返し特性依存式を評価する。ただし、式(3.3.6-5)および式(3.3.6-6)では既往評価式である式(3.3.6-1)で考慮されている速度・面圧依存性が考慮されない。

式(3.3.6-1)の摩擦係数は、面圧 20MPa、速度 400mm/sec の際に摩擦係数が 0.00950 となる式となっている。そこで、式(3.3.6-5)および式(3.3.6-6)から得られる摩擦係数に、式(3.3.6-1)を使って求められる摩擦係数を 0.00950 で除した値を乗じて、繰り返し依存性に加えて面圧・速度依存性を考慮した式(3.3.6-7)を提示する。

$$\mu = \mu(E_d, D_s) \cdot \frac{\mu(\sigma_s, V)}{0.0095} \quad (3.3.6-7)$$

ここで

$$\mu(E_d, D_s) = \mu_0 + \mu_{0_col} + \Delta\mu \cdot \Delta\mu_{col}$$

$$\mu_0 = -7.5 \times 10^{-5} \cdot T + 0.0145$$

$$\Delta\mu = 0.03 \cdot (0.00019 \cdot E_d^{0.9} + 1)^{-0.06} - 0.03$$

$$\mu_{0_col} = \begin{cases} 0 & (\sigma_p = 20MPa) \\ 1.8 \times 10^{-10} \cdot D_{S2}^3 + 5.5 \times 10^{-8} \cdot D_{S2}^2 + 1.6 \times 10^{-5} \cdot D_{S2} & (\sigma_p = 30MPa) \end{cases}$$

$$\Delta\mu_{col} = \begin{cases} 1 & (\sigma_p = 20MPa) \\ -2.8 \times 10^{-9} \cdot D_{S2}^3 + 1.5 \times 10^{-5} \cdot D_{S2}^2 - 7.9 \times 10^{-4} \cdot D_{S2} + 1 & (\sigma_p = 30MPa) \end{cases}$$

$$D_{S2} = \begin{cases} D_s - 200 (D_s \geq 200) \\ 0 (D_s < 200) \end{cases}$$

c) 部材試験結果と解析の比較

対象とする部材試験は、面圧 20MPa(#1 試験体)、および面圧 30MPa(#3 試験体)による多数回繰り返し試験とした。各試験体に対して 10 セットの加振が実施されているが、解析では第Ⅲ部 1.3.5 に示している 1, 3, 6, 10 セット目を対象とした。

部材試験結果を反映させた本節提案の評価手法に加え、繰り返し依存性を考慮しない場合の既往評価による解析を実施し比較を行う。

表 3.3.6-1 および表 3.3.6-2 に主要応答値を示し、図 3.3.6-7~図 3.3.6-14 に各解析の応答を実験結果と比較して示す。なお、図中では試験結果を OBS、解析結果を ANA としている。

全体として、本節提案の評価式による解析結果は吸収エネルギーおよび摩擦係数ともに部材試験の結果を良好に再現できていると言える。また、#3 試験体の 6 セット目以降における摩擦係数の増加についても良好にモデル化できている。

一方、繰り返しを考慮しない場合の解析結果は、#3 試験体の 6 セット目以降の摩擦係数の増加は考慮できないため、特に 10 セット目での差異が大きい。また多くのケースにおいて加振後半に吸収エネルギーが実験値を大きく上回る結果となっているが、150 秒(累積距離で 20m 程度)付近までは、実験値を若干下回る程度の結果であると言える。

表 3.3.6-1 #1 試験体(20MPa)の主要応答結果比較

#1 試験体	累積吸収エネルギー (J)			84 サイクル時の摩擦係数		
	実験	繰り返し 考慮	繰り返し 非考慮	実験	繰り返し 考慮	繰り返し 非考慮
1 セット	7.914E5	7.881E5 (1.00)	8.784E5 (1.11)	0.00638	0.00715 (1.12)	0.00914 (1.43)
3 セット	7.810E5	7.881E5 (1.01)	8.784E5 (1.12)	0.00677	0.00715 (1.06)	0.00914 (1.35)
6 セット	7.843E5	7.881E5 (1.00)	8.784E5 (1.12)	0.00681	0.00715 (1.05)	0.00914 (1.34)
10 セット	8.080E5	7.881E5 (0.98)	8.784E5 (1.09)	0.00706	0.00715 (1.01)	0.00914 (1.29)

※3、6、10 セット目の累積吸収エネルギーは、そのセット中に吸収したエネルギーとする

※()内の数値は実験値との比率を示す

※20MPa の解析結果は、摺動距離による影響を受けないため、各セットで同じ結果となる

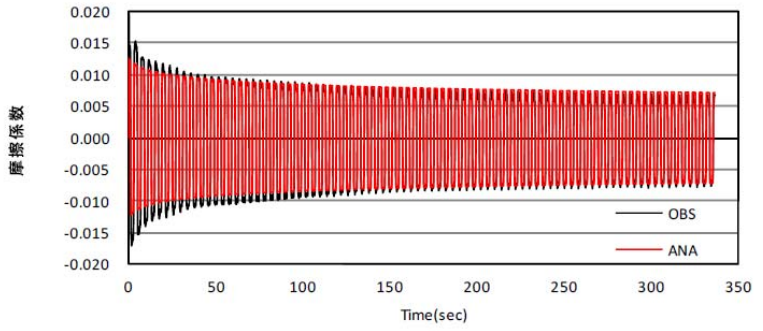
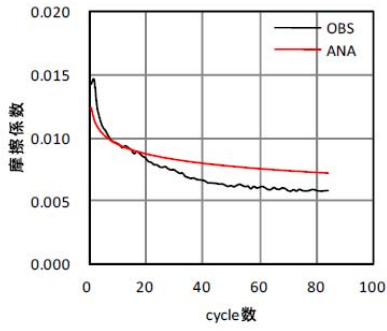
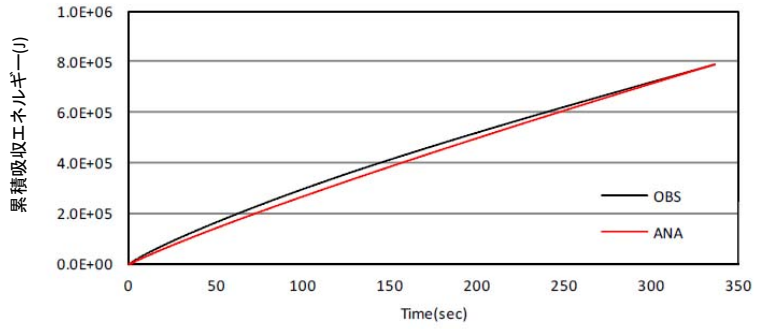
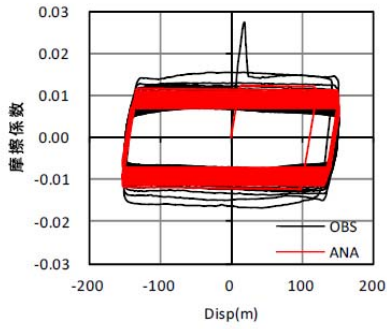
表 3.3.6-2 #3 試験体(30MPa)の主要応答結果比較

#3 試験体	累積吸収エネルギー (J)			84 サイクル時の摩擦係数		
	実験	繰り返し 考慮	繰り返し 非考慮	実験	繰り返し 考慮	繰り返し 非考慮
1 セット	9.580E5	9.531E5 (0.99)	1.089E6 (1.14)	0.00570	0.00580 (1.02)	0.00765 (1.34)
3 セット	9.404E5	9.531E5 (1.01)	1.089E6 (1.16)	0.00552	0.00580 (1.05)	0.00765 (1.39)
6 セット	1.093E6	1.093E6 (1.00)	1.089E6 (1.00)	0.00657	0.00714 (1.09)	0.00765 (1.16)
10 セット	1.513E6	1.492E6 (0.99)	1.089E6 (0.72)	0.00894	0.00979 (1.10)	0.00765 (0.86)

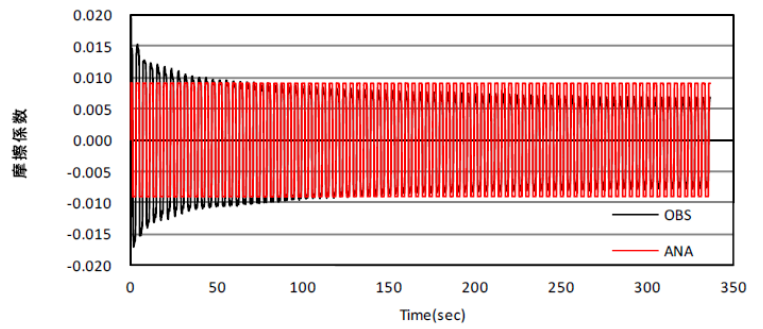
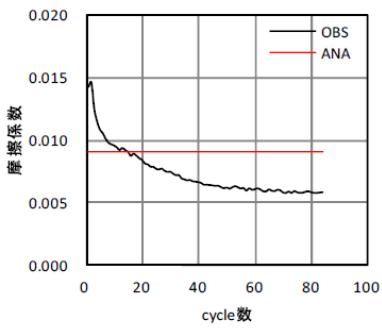
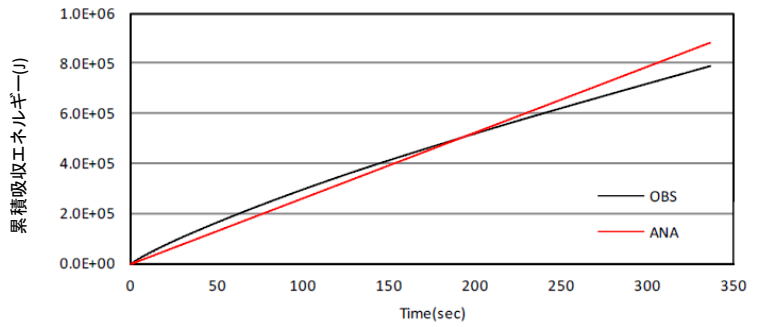
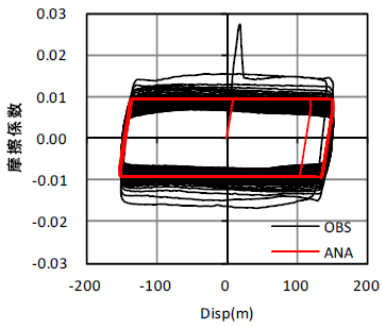
※3、6、10 セット目の累積吸収エネルギーは、そのセット中に吸収したエネルギーとする

※()内の数値は実験値との比率を示す

※繰り返し非考慮については、摺動距離の影響を受けないため、各セットで同じ結果となる

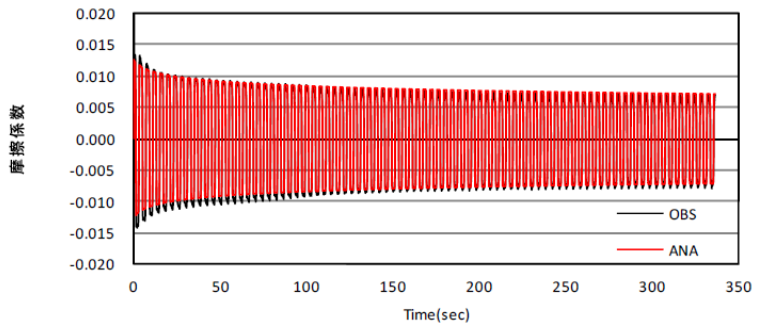
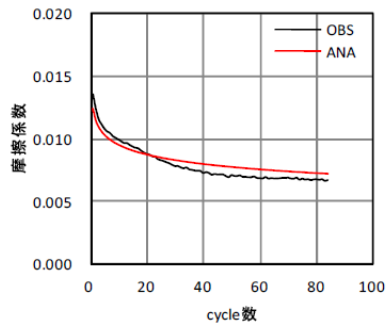
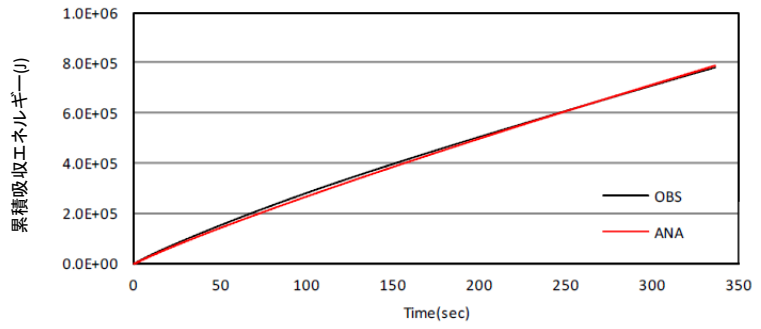
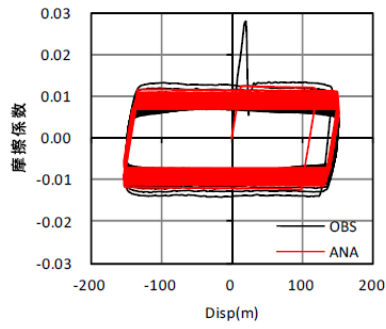


(a) 繰り返し依存性考慮

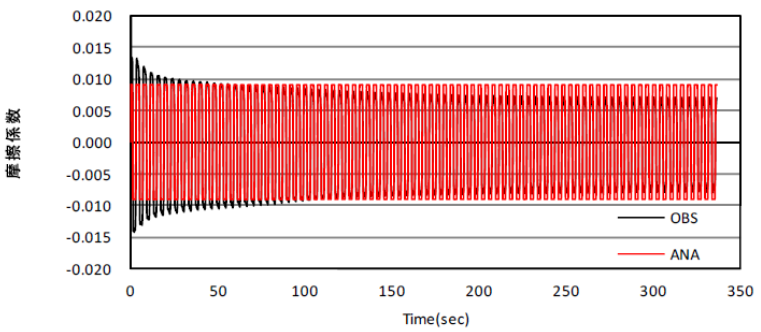
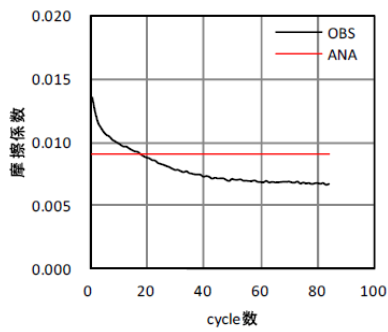
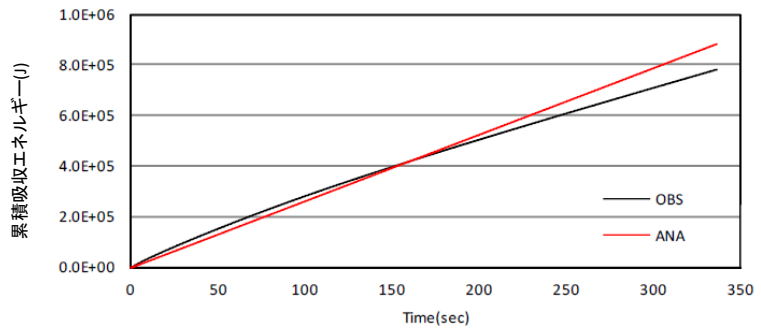
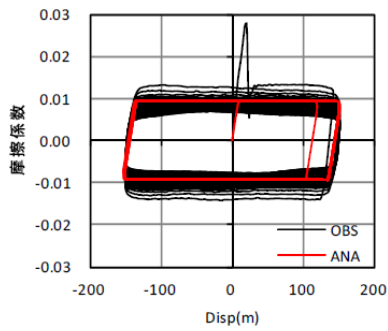


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-7 #1 試験体(面圧 20MPa) 1セット目 実験結果と解析結果の比較

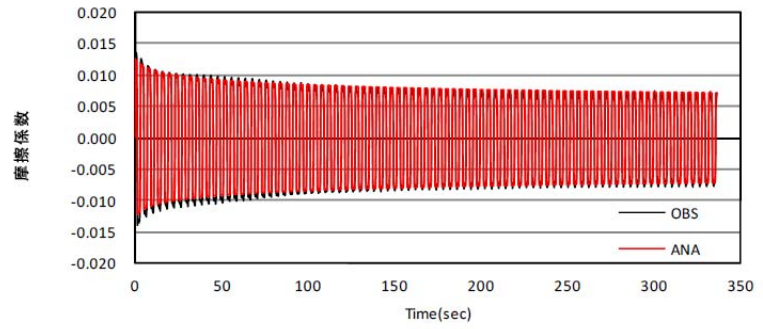
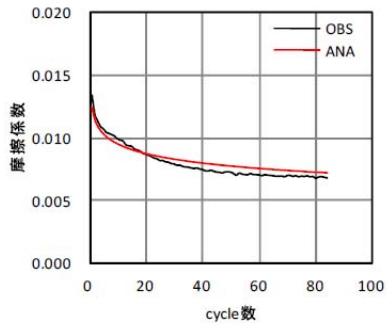
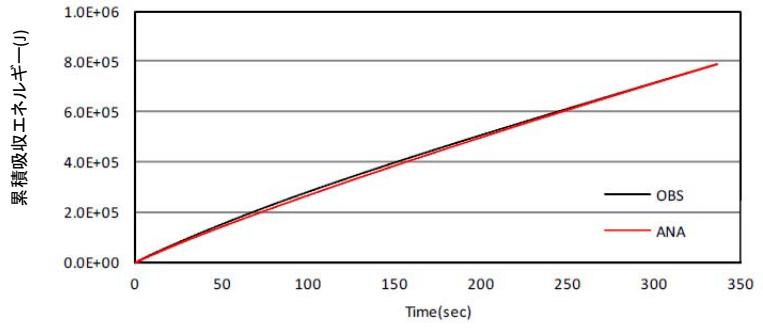
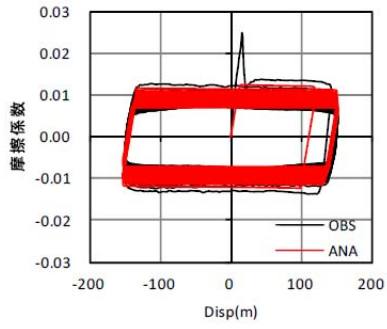


(a) 繰り返し依存性考慮

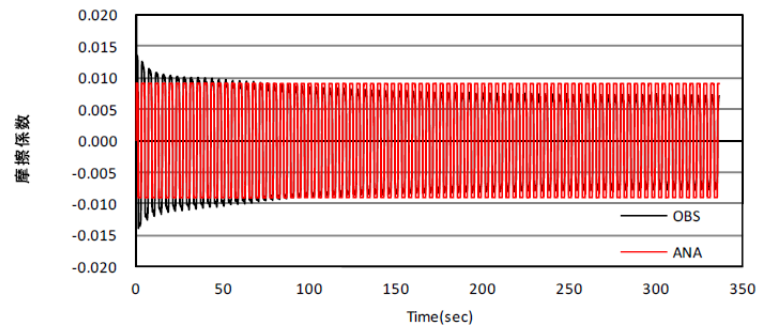
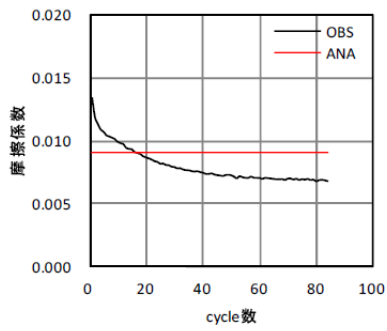
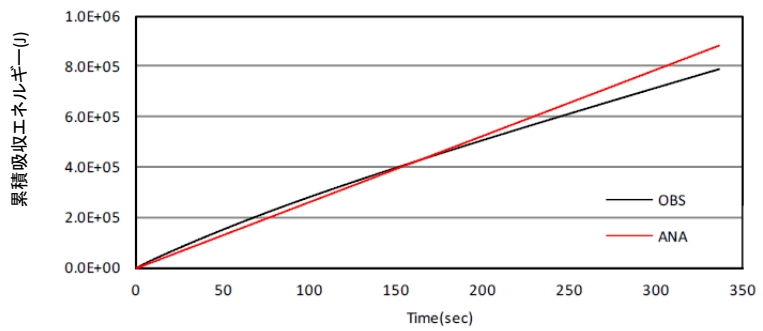
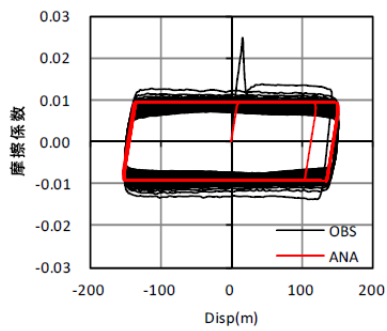


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-8 #1 試験体(面圧 20MPa) 3セット目 実験結果と解析結果の比較

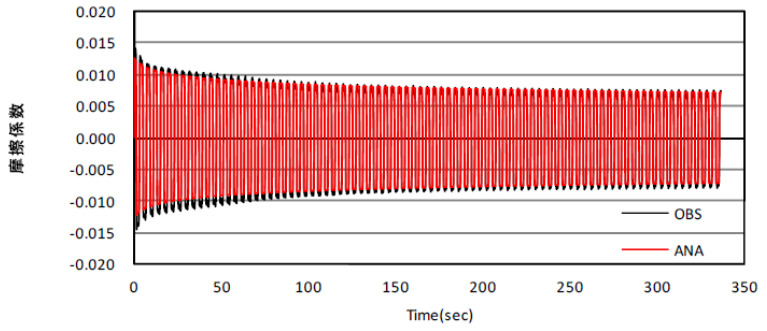
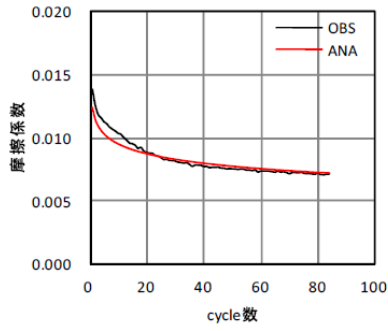
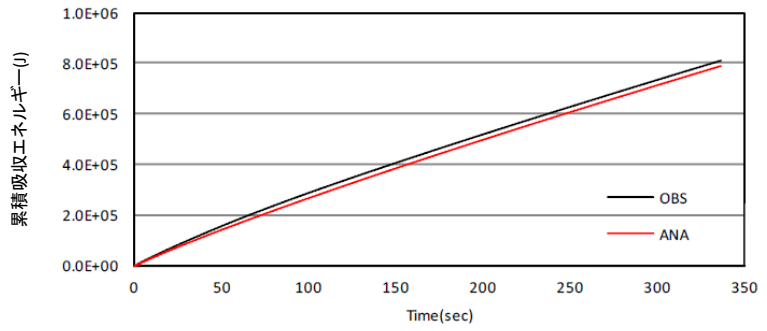
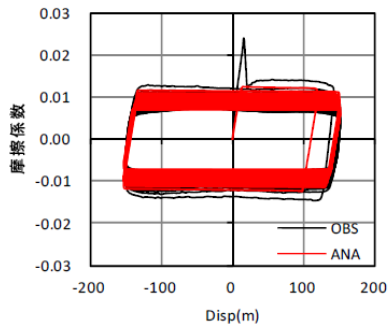


(a) 繰り返し依存性考慮

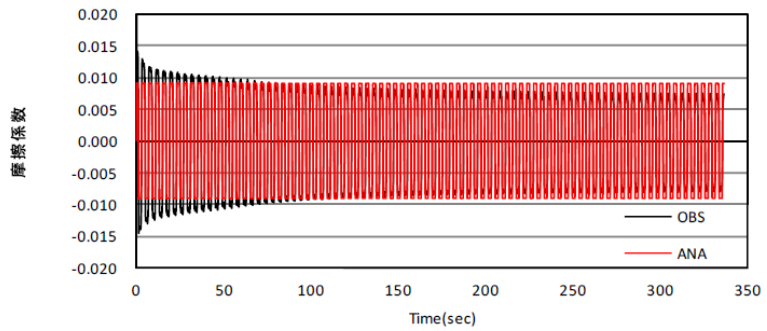
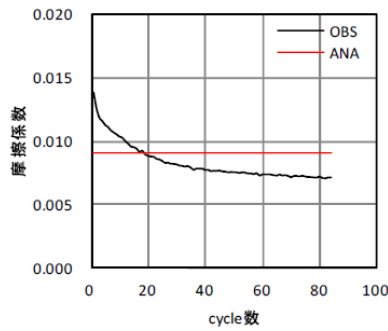
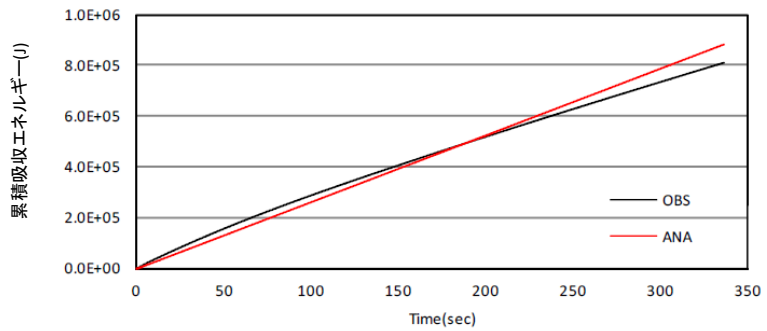
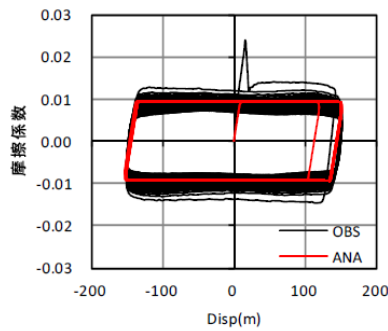


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-9 #1 試験体(面圧 20MPa) 6セット目 実験結果と解析結果の比較

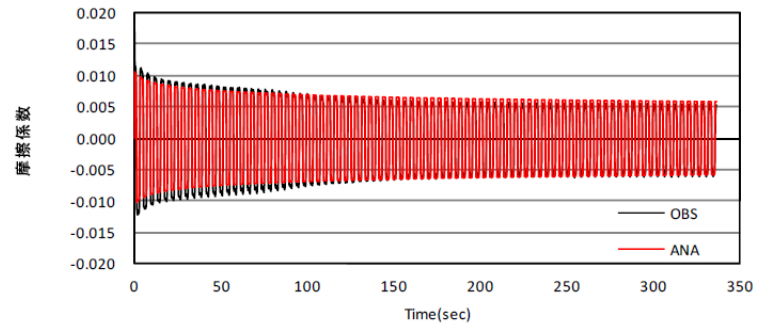
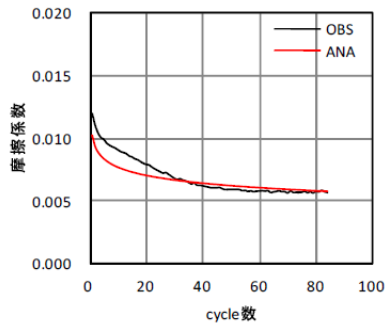
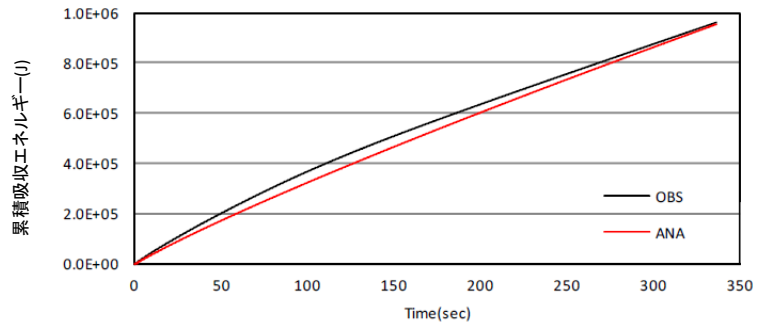
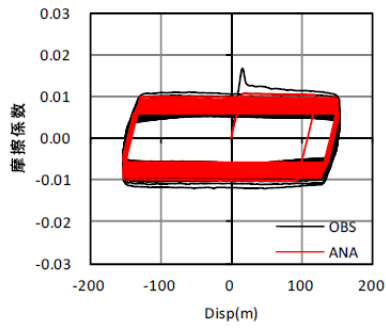


(a) 繰り返し依存性考慮

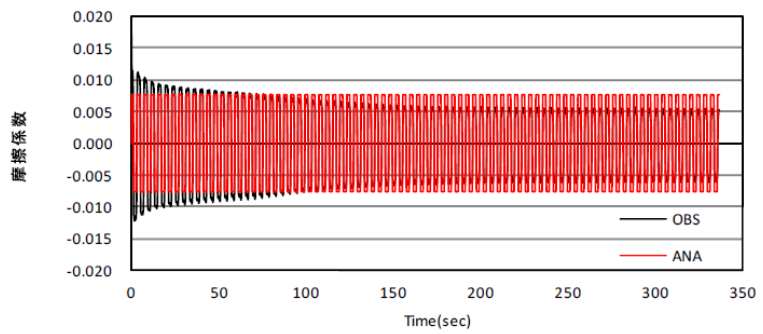
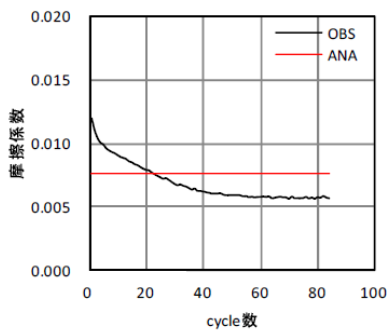
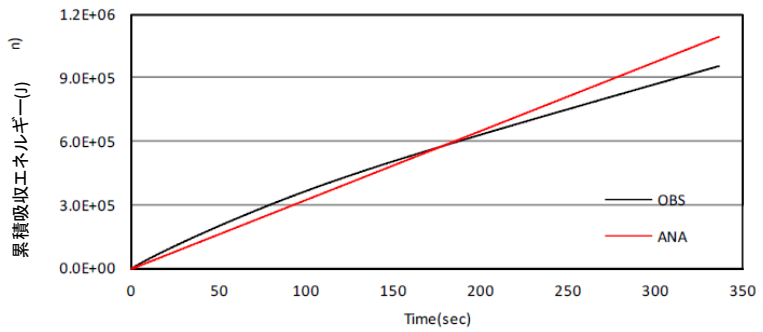
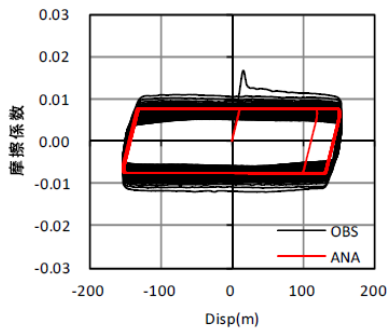


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-10 #1 試験体(面圧 20MPa) 10 セット目 実験結果と解析結果の比較

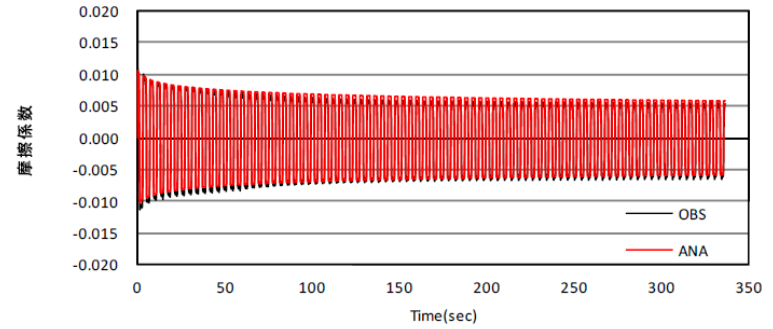
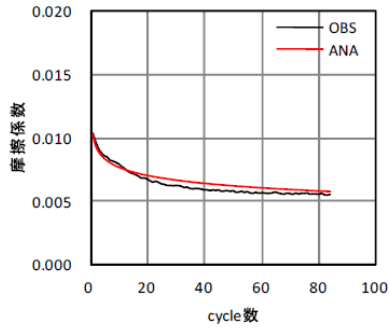
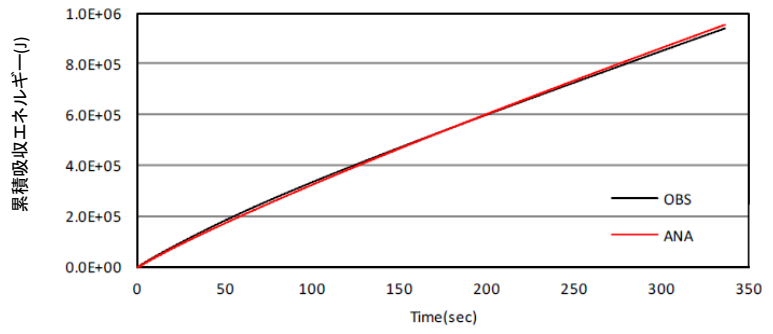
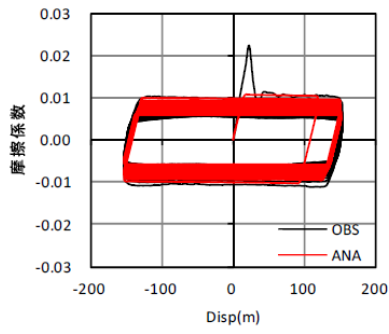


(a) 繰り返し依存性考慮

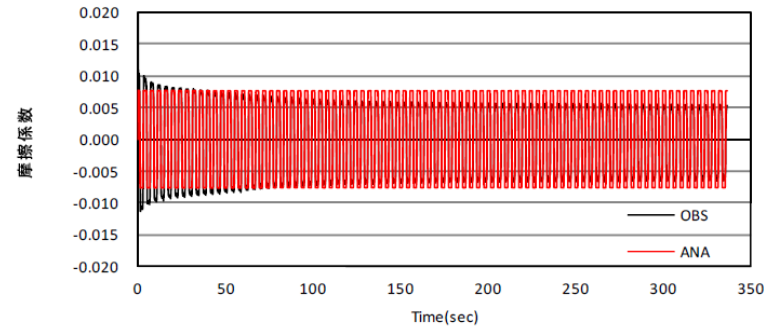
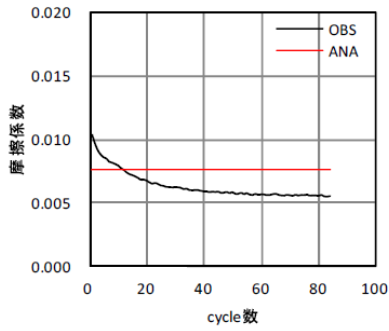
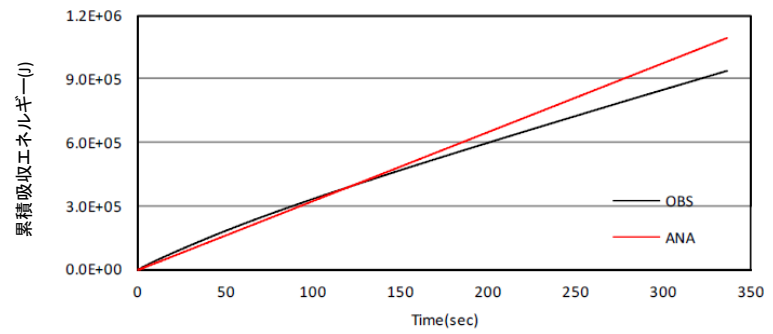
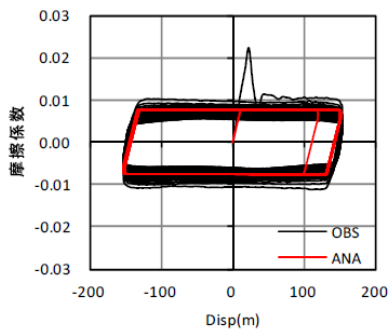


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-11 #3 試験体(面圧 30MPa) 1セット目 実験結果と解析結果の比較

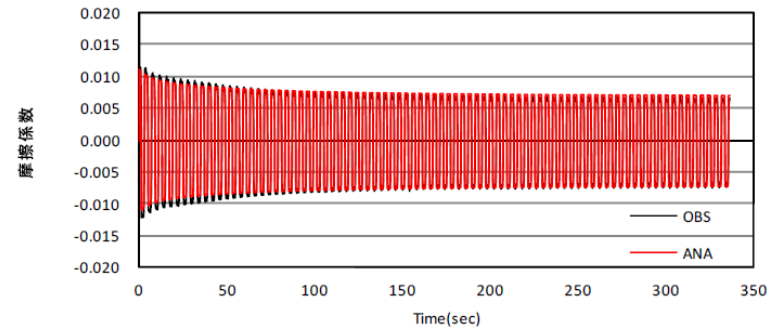
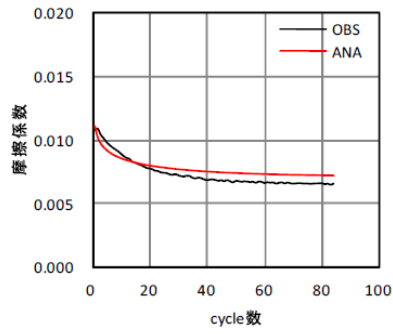
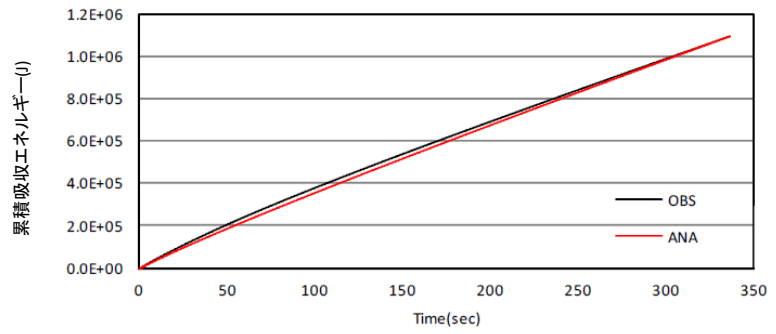
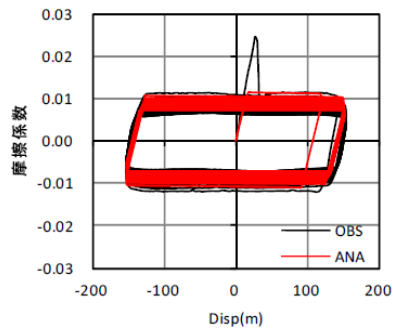


(a) 繰り返し依存性考慮

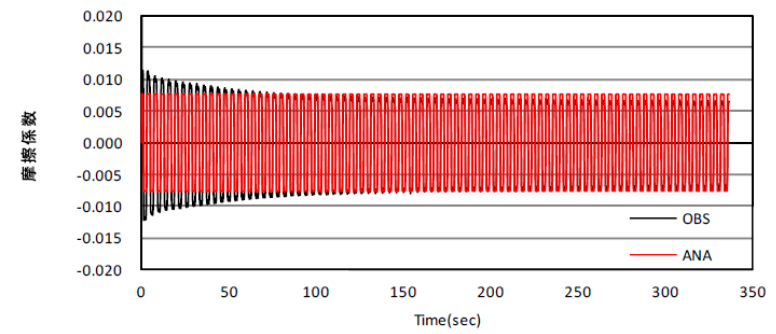
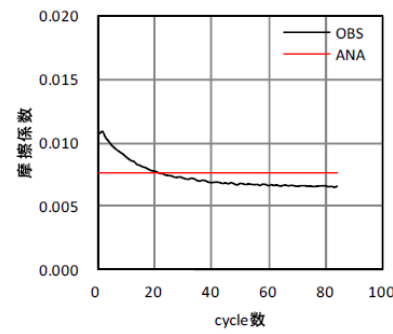
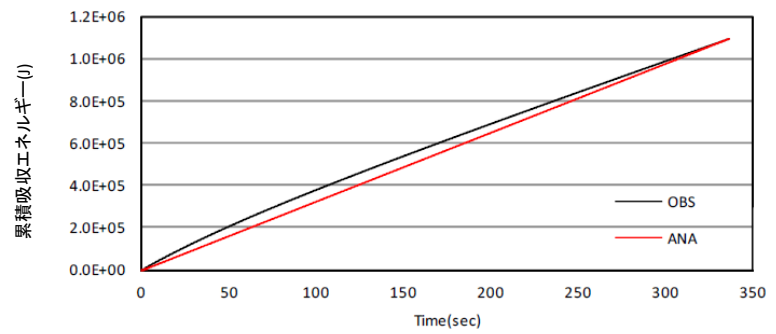
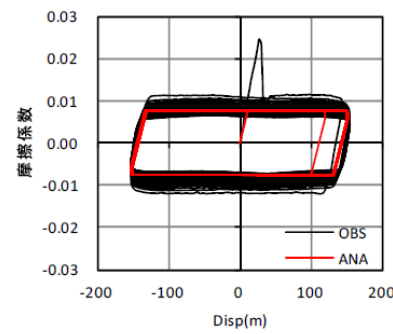


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-12 #3 試験体(面圧 30MPa) 3セット目 実験結果と解析結果の比較

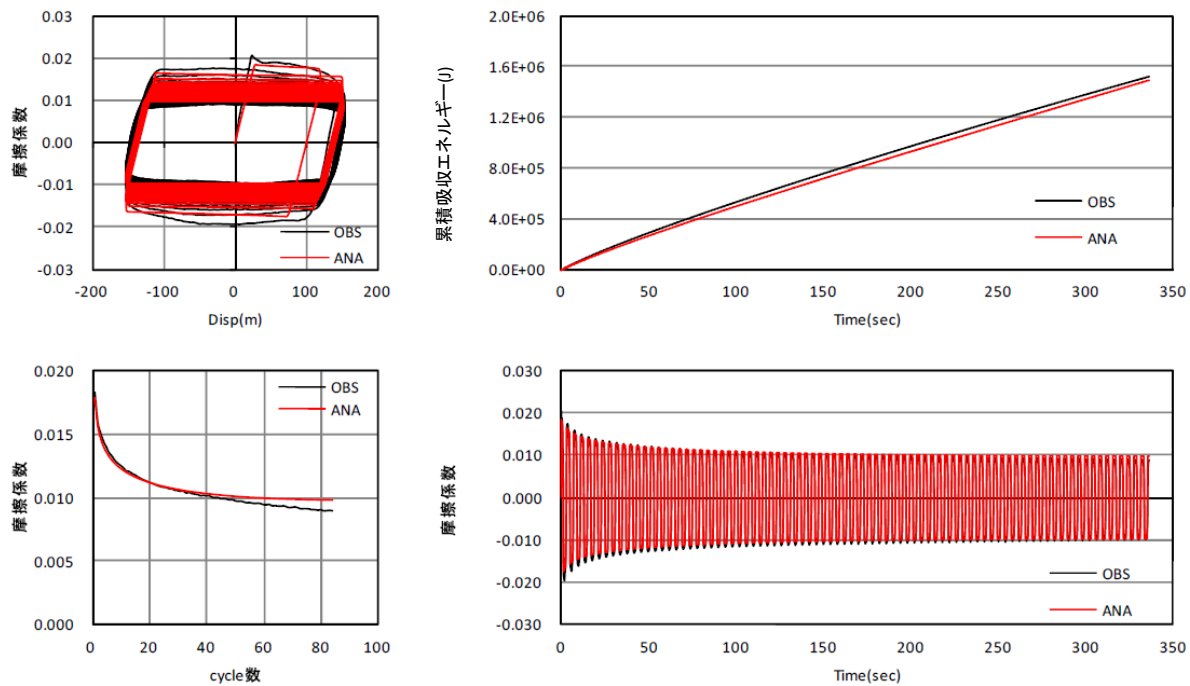


(a) 繰り返し依存性考慮

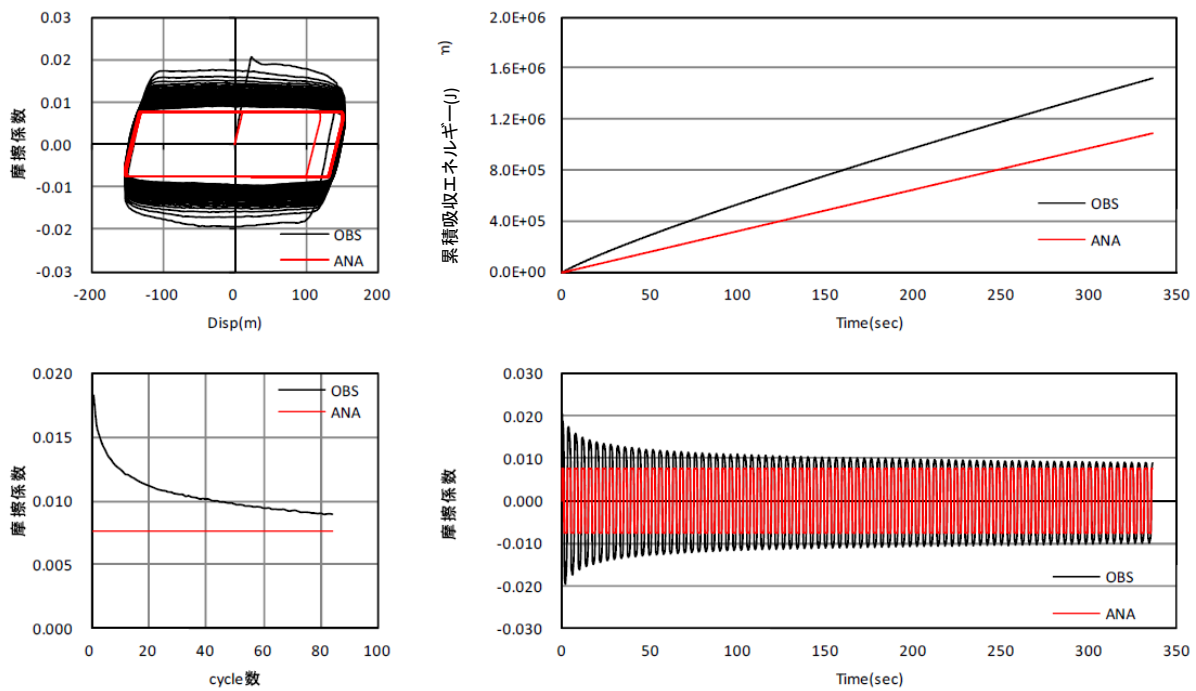


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-13 #3 試験体(面圧 30MPa) 6セット目 実験結果と解析結果の比較



(a) 繰り返し依存性考慮



(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-14 #3 試験体(面圧 30MPa) 10 セット目 実験結果と解析結果の比較

2) 粘性ダンパー

粘性ダンパーについては、第Ⅲ部 1.3.9 記述の部材試験結果において、吸収エネルギー量と繰り返し依存性に相関が見られた。すべり支承同様、まず試験の概要を示し、次に評価式の提案を行う。最後に部材試験とシミュレーションの比較を行い、モデル化の妥当性を確認する。

a) 試験体及び実験内容の概要

試験体、試験装置、計測項目と計測方法および多数回高速繰り返し手法については、第Ⅲ部 第1章 1.3.9 項に示した内容と同様であるため、それぞれの記述は割愛する。第Ⅲ部 1.3.9 項を参照してほしい。

b) 試験結果を用いた評価式の改善

部材試験結果を受けて、本項で評価式の改善を検討する。

①材料認定書の評価式

材料認定書^{3.3.6-2)~3.3.6-4)}に記載されている粘性ダンパーの既往評価式では、軸減衰力 P_n は式(3.3.6-8)で与えられる。

$$P_n = a \times (\alpha \cdot Q_V + b) \quad (3.3.6-8)$$

ここに、 α は繰り返し依存係数、 Q_V は粘性抵抗力(kN)を示す。式(3.3.6-8)内の係数 a および b は粘性ダンパーの種類によって決まり、表 3.3.6-3 にその値を示す。

表 3.3.6-3 軸減衰力基準式の係数 a および b について

デバイスタイプ	係数 a	係数 b
Short タイプ	1.16	2.2
動粘度 10 万 cst タイプ	1.03	2.7
動粘度 30 万 cst タイプ (減衰力 30ton~60ton)	1.06	8.1
動粘度 30 万 cst タイプ (減衰力 70ton~140ton)	1.15	11.5

なお、基準値を算定する際の繰り返し依存係数 α は 0.85 を使用する。また、認定書^{3.3.6-2)~3.3.6-4)}に精算法として与えられている繰り返し依存係数 α の計算式は、式(3.3.6-9)となる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= 1 / (1 + c \cdot (E_V / V_V))^d \\ c &= \begin{cases} 0.0016 \cdot \ln(f) + 0.011 \text{ (short タイプ、動粘度 10 万 cst タイプ)} \\ 0.0014 \cdot \ln(f) + 0.009 \text{ (動粘度 30 万 cst タイプ)} \end{cases} \\ d &= 0.394 \cdot f^{0.087} \end{aligned} \right\} \quad (3.3.6-9)$$

ここに、 E_v は粘性抵抗力($=\alpha \cdot Q_v$)による累積吸収エネルギー量(J)、 V_v は充填されている粘性体の容積(cc)、 f は定常波の振動数あるいは建屋の1次固有振動数(Hz)を示す。

ただし、第Ⅲ部 1.3.9 に記述される通り、認定書に示された繰り返し試験における吸収エネルギーは、長周期地震動による応答解析の結果、既存の試験によって確認されている上限値を大きく超える結果となっている。

また、既往の評価では、繰り返し依存性と温度依存性が、それぞれ単位体積エネルギーと粘性体温度の関数として与えられており、評価の際にはそれらを組み合わせる必要がある。ところが、地震応答解析と熱伝導解析を組み合わせるには相当の困難が予想される。そこで、本調査においては、実験結果として得られた減衰力変動を、グロスで単位体積エネルギーの関数として表現することを原則とする。なお、既往評価式では単位体積エネルギーには粘性吸収エネルギー E_v のみが評価されているが、ここでは簡便さを考慮して全吸収エネルギー E_d を用いて、 E_d/V_v を単位体積エネルギーと呼ぶ。また、必要に応じ、単位体積エネルギーの時間勾配 $\Delta E_d/V_v$ を評価関数として導入する。粘性ダンパーは、そのタイプによって性状が異なるため、②~④では、試験体毎に個別に評価式を示す。

②RDT8 試験体

図 3.3.6-15 に実験結果で得られた減衰力 Q (0 変位切片荷重) と初期条件の減衰力基準値 Q_0 の差分を、水準毎に単位体積エネルギー E_d/V_v との相関で示す。減衰力基準値 Q_0 は表 3.3.6-4 に示すとおりである。ここで、実験中に減衰力の上昇が見られた水準 0 の 3 セット目、水準 1 の 2 セット目後半と 3 セット目は評価対象から省いた。

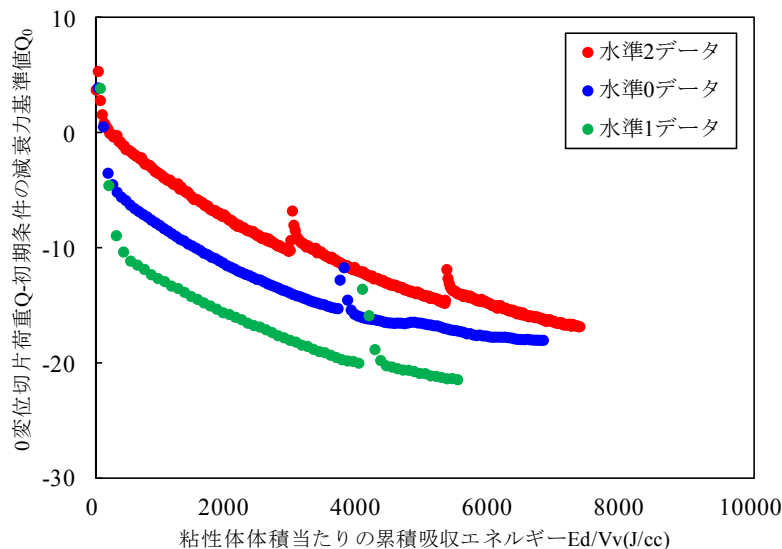


図 3.3.6-15 RDT8 試験体 減衰力低下量と単位体積エネルギーとの相関

表 3.3.6-4 RDT8 試験体 減衰力基準値 Q_0

水準	初期温度	速度	初期温度時の減衰力基準値
	°C	cm/s	kN
0	13.5	31.4	50.9
1	13.3	47.1	58.9
2	12.6	15.7	38.5

セット間のインターバル直後の数サイクルを除いて、各水準についてほぼ連続的な変化が生じていると解釈できる。実験条件のように 10 分程度のインターバルで長周期地震動が連続することを評価対象とすることは原則としてあり得ず、また、仮にあり得たとしても減衰力評価においては安全側の評価となることから、この部分的な不連続は評価式策定の対象から省き、一連の連続関数として評価する。

次に、3 水準の減衰力変動の差が、温度上昇の程度など吸収エネルギーの時間勾配に支配される要因に基づくと考え、各水準の差は粘性体体積当たりの吸収エネルギーの時間勾配 $\Delta E_d / V_v$ の項が評価式に必要となる。

また、 E_d / V_v が 200(J/cc)までと 300(J/cc)以降では、減衰力変動の傾向が大きく異なる。そのため、全区間で分割することは近似の精度が落ちると考え、区間を分割して近似することとする。

$Q - Q_0$ を E_d / V_v 、 $\Delta E_d / V_v$ の関数で近似して評価すると式(3.3.6-10)で表わされる。式(3.3.6-10)の係数については、表 3.3.6-5 に示すとおりである。なお、200(J/cc)と 300(J/cc)の間については、両側の近似式から得られる値の平均値となるように評価している($(Q - Q_0)_2$ の式)。また、図 3.3.6-16 に、評価式と実験値の関係を示す。

なお、動的解析における減衰力基準値は、式(3.3.6-8)で繰り返し依存係数 α を 1.0 とした場合の軸減衰力を時々刻々与える。

$$(Q - Q_0)_i = a + b \cdot (E_d / V_v) + c \cdot (\Delta E_d / V_v) + d \cdot (\Delta E_d / V_v)^2 + e \cdot (E_d / V_v)^{0.5} \cdot (\Delta E_d / V_v)^{0.5}$$

$$(Q - Q_0)_2 = \{ (E_d / V_v - 200) \times (Q - Q_0)_3 + (300 - E_d / V_v) \times (Q - Q_0)_1 \} / 100$$

$$(200 < (E_d / V_v) < 300)$$

(3.3.6-10)

表 3.3.6-5 式(3.3.6-10)の係数について

	a	b	c	d	e	備考
$i=1$	2.30	0.0769	2.23	-0.0350	-0.834	$E_d / V_v \leq 200$
$i=3$	1.22	-0.00262	-0.224	-0.00508	-0.0121	$E_d / V_v \geq 300$

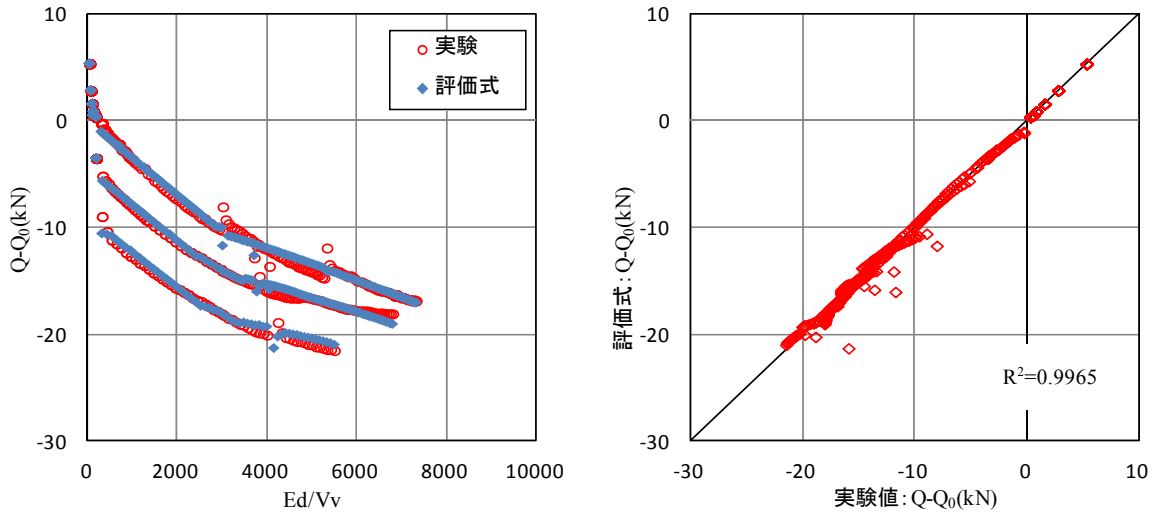


図 3.3.6-16 RDT8 試験体の評価式による $Q-Q_0$ と実験値の関係

③RDT16 試験体

図 3.3.6-17 に実験結果で得られた減衰力 Q (0 変位切片荷重) と初期条件の減衰力の基準値 Q_0 の差分を、水準毎に単位体積エネルギー Ed/Vv との相関で示す。RDT16 試験体の減衰力の基準値 Q_0 は表 3.3.6-6 に示すとおりである。各水準とも全セットを評価対象とした。

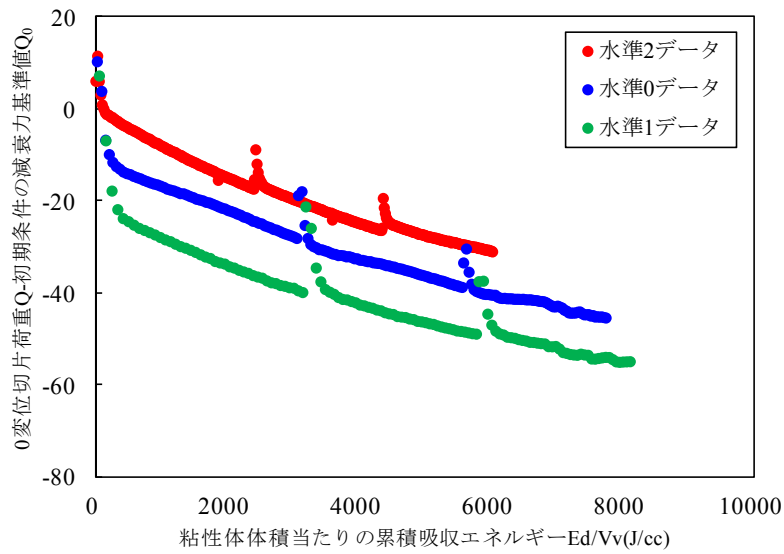


図 3.3.6-17 RDT16 試験体 減衰力低下量と単位体積エネルギーとの相関

表 3.3.6-6 RDT16 試験体 減衰力基準値 Q_0

水準	初期温度	速度	初期温度時の減衰力基準値
	°C	cm/s	kN
0	12.7	31.4	100.0
1	15.7	47.1	113.6
2	13.1	15.7	73.6

RDT8 試験体と同様に、3 水準の試験結果から $Q-Q_0$ を E_d/V_v 、 $\Delta E_d/V_v$ の関数で近似して評価する。RDT16 試験体の場合、区間分割の閾値は 150(J/cc)と 200(J/cc)としている。式(3.3.6-11)に RDT16 試験体の評価式を示す。式(3.3.6-11)の係数は表 3.3.6-7 に示すとおりである。また、図 3.3.6-18 に評価式と実験値の関係を示す。

$$(Q-Q_0)_i = a + b \cdot (E_d/V_v) + c \cdot (\Delta E_d/V_v) + d \cdot (\Delta E_d/V_v)^2 + e \cdot (E_d/V_v)^{0.5} \cdot (\Delta E_d/V_v)^{0.5}$$

$$(Q-Q_0)_2 = \{ (E_d/V_v - 150) \times (Q-Q_0)_3 + (200 - E_d/V_v) \times (Q-Q_0)_1 \} / 50$$

$$(150 < (E_d/V_v) < 200)$$

(3.3.6-11)

表 3.3.6-7 式(3.3.6-11)の係数について

	a	b	c	d	e	備考
$i=1$	6.99	0.178	5.44	-0.0877	-2.16	$E_d/V_v \leq 150$
$i=3$	0.134	-0.00345	0.395	-0.0572	-0.0914	$E_d/V_v \geq 200$

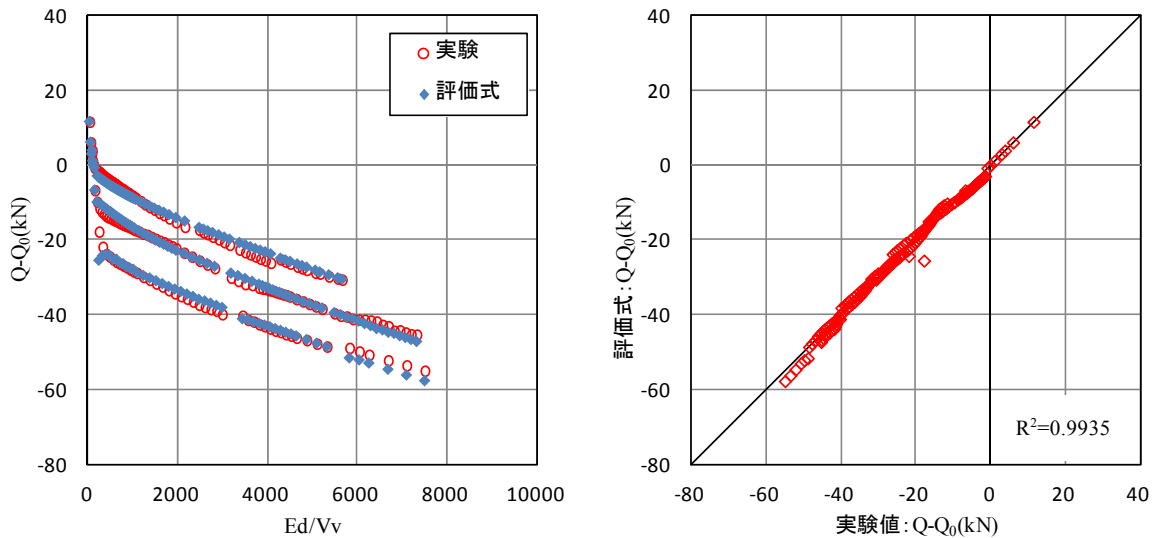


図 3.3.6-18 RDT16 試験体の評価式による $Q-Q_0$ と実験値の関係

④RDT30 試験体

図 3.3.6-19 に実験結果で得られた減衰力 Q (0 変位切片荷重)と初期条件の減衰力基準値 Q_0 の差分を、水準毎に単位体積エネルギー E_d/V_v との相関で示す。減衰力基準値 Q_0 は表 3.3.6-8 に示すとおりである。水準 0 の 3 セット目後半、水準 1 の 2 セット目後半と 3 セット目は評価対象から省いた。

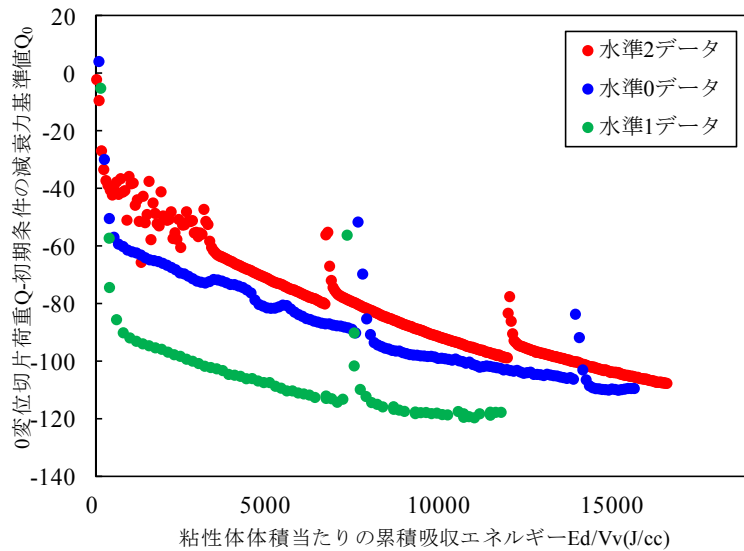


図 3.3.6-19 RDT30 試験体 減衰力低下量と単位体積エネルギーとの相関

表 3.3.6-8 RDT30 試験体 減衰力基準値 Q

水準	初期温度	速度	初期温度時の減衰力基準値
	°C	cm/s	kN
0	13.1	31.4	233.8
1	10.6	47.1	255.0
2	12.2	15.7	201.7

他の試験体と同様に、3 水準の試験結果から $Q - Q_0$ を E_d/V_v 、 $\Delta E_d/V_v$ の関数で近似して評価する。RDT30 試験体の場合、区間分割の閾値は 600(J/cc)と 1000(J/cc)としている。式(3.3.6-12)に RDT30 試験体の評価式を示す。式(3.3.6-12)の係数は表 3.3.6-9 に示すとおりである。また、図 3.3.6-1520 に評価式と実験値の関係を示す。

$$(Q - Q_0)_i = a + b \cdot (E_d / V_v) + c \cdot (\Delta E_d / V_v) + d \cdot (\Delta E_d / V_v)^2 + e \cdot (E_d / V_v)^{0.5} \cdot (\Delta E_d / V_v)^{0.5}$$

$$(Q - Q_0)_2 = \{ (E_d / V_v - 600) \times (Q - Q_0)_3 + (1000 - E_d / V_v) \times (Q - Q_0)_1 \} / 400$$

$$(600 < (E_d / V_v) < 1000)$$

(3.3.6-12)

表 3.3.6-9 式(3.3.6-12)の係数について

	a	b	c	d	e	備考
$i=1$	-25.5	0.0762	3.60	-0.0288	-1.15	$E_d/V_v \leq 600$
$i=3$	-68.2	-0.00186	2.81	-0.0630	-0.0758	$E_d/V_v \geq 1000$

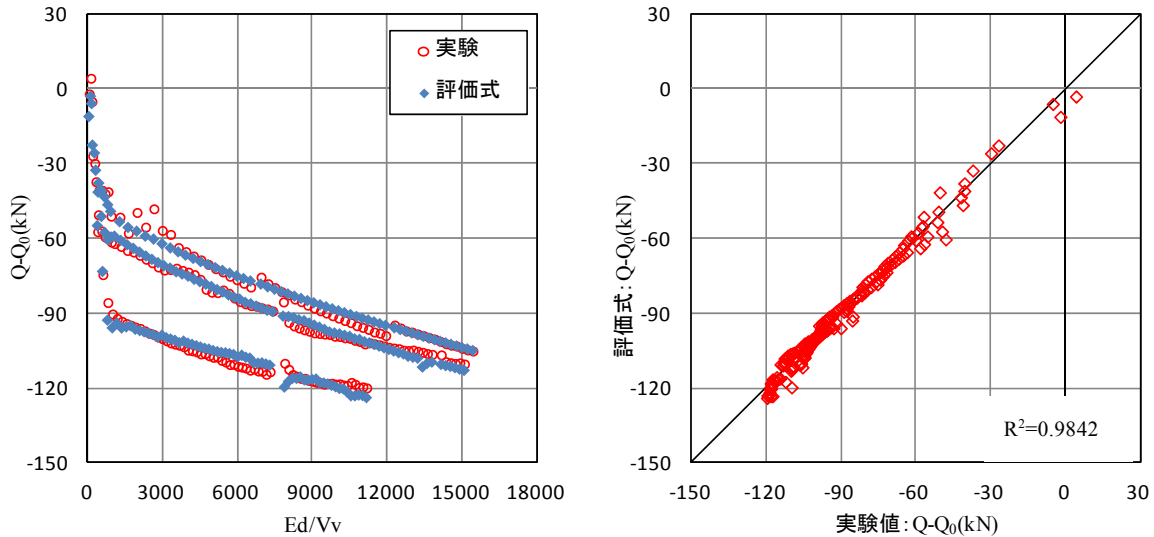


図 3.3.6-150 RDT30 試験体の評価式による $Q-Q_0$ と実験値の関係

式(3.3.6-10)、(3.3.6-11)、(3.3.6-12)は、当該試験体に関する評価式である。調査対象とならなかった製品についても同形式の実験式を求めることができると考えられるが、その係数は当該製品における粘性体の熱容量、粘性体に接する鉄部の有効体積などの構成に依存するものと考えられる。

c) 部材試験結果と解析の比較

解析の対象とする部材試験は、各部材に実施された多数回繰り返し試験とする。各試験体に対して3セットの加振が実施されているが、セットによる差異は小さいことから1セット目を比較対象としている。

解析は部材試験結果を反映させた本節提案の評価手法に加え、繰り返し依存性非考慮による解析を実施し比較を行う。表 3.3.6-30~表 3.3.6-52 に主要応答値を示し、図 3.3.6-161~図 3.3.6-29 に各解析の応答を実験結果と比較して示す。なお、図中では試験結果を OBS、解析結果を ANA としている。

全体として、すべり支承同様、本節提案の評価式による解析結果は吸収エネルギーおよび切片荷重ともに部材試験の結果を良好に再現できていると言える。

一方、繰り返し依存性を考慮しない場合、試験開始時の抵抗力を除き、解析値が実験値を大きく上回る結果となり、その差異は特に RDT30 試験体で大きい。

表 3.3.6-30 RDT8 の主要応答結果比較

RDT8	累積吸収エネルギー (J)			63 サイクル時の切片荷重 (kN)		
	実験	繰り返し 考慮	繰り返し 非考慮	実験	繰り返し 考慮	繰り返し 非考慮
水準 0	1.734E6	1.844E6 (1.06)	2.380E6 (1.37)	35.78	36.56 (1.02)	52.67 (1.47)
水準 1	1.914E6	1.998E6 (1.04)	2.801E6 (1.46)	38.68	38.97 (1.01)	60.46 (1.56)
水準 2	1.378E6	1.436E6 (1.04)	1.715E6 (1.24)	28.63	29.77 (1.04)	39.73 (1.39)

※()内の数値は実験値との比率を示す

表 3.3.6-4 RDT16 の主要応答結果比較

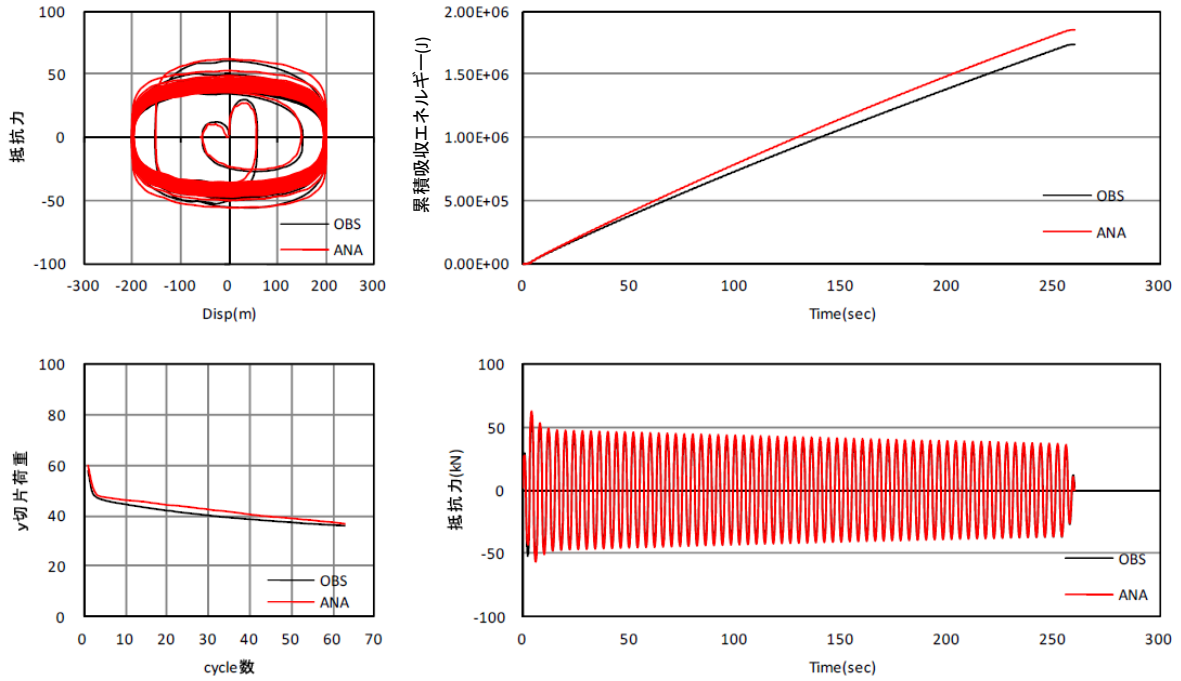
RDT16	累積吸収エネルギー (J)			42 サイクル時の切片荷重 (kN)		
	実験	繰り返し 考慮	繰り返し 非考慮	実験	繰り返し 考慮	繰り返し 非考慮
水準 0	3.440E6	3.331E6 (0.97)	4.549E6 (1.32)	71.67	67.20 (0.94)	101.3 (1.41)
水準 1	3.572E6	3.545E6 (0.99)	5.395E6 (1.51)	73.37	70.76 (0.96)	117.3 (1.60)
水準 2	2.680E6	2.589E6 (0.97)	3.222E6 (1.20)	56.19	55.30 (0.98)	75.25 (1.34)

※()内の数値は実験値との比率を示す

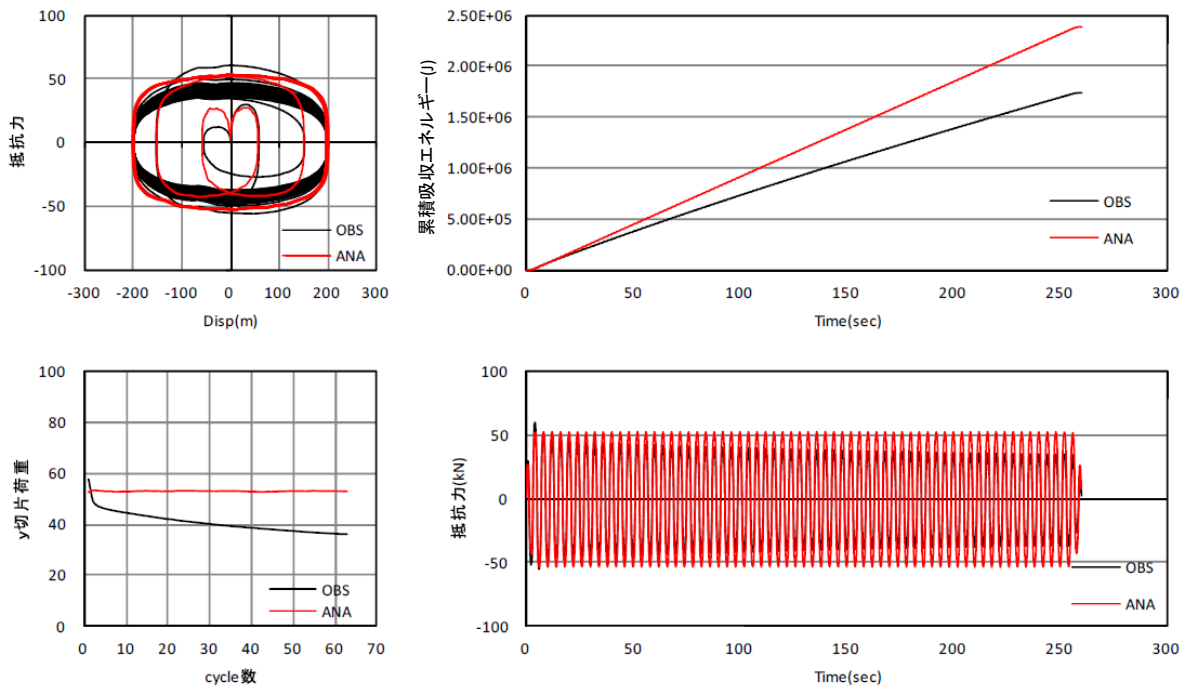
表 3.3.6-52 RDT30 の主要応答結果比較

RDT30	累積吸収エネルギー (J)			125 サイクル時の切片荷重 (kN)		
	実験	繰り返し 考慮	繰り返し 非考慮	実験	繰り返し 考慮	繰り返し 非考慮
水準 0	7.010E6	7.444E6 (1.06)	1.111E7 (1.58)	143.2	144.9 (1.01)	234.5 (1.64)
水準 1	6.878E6	7.137E6 (1.04)	1.220E7 (1.77)	143.2	140.8 (0.98)	255.3 (1.78)
水準 2	6.113E6	6.035E6 (0.99)	9.131E6 (1.49)	122.3	124.0 (1.01)	200.9 (1.64)

※()内の数値は実験値との比率を示す

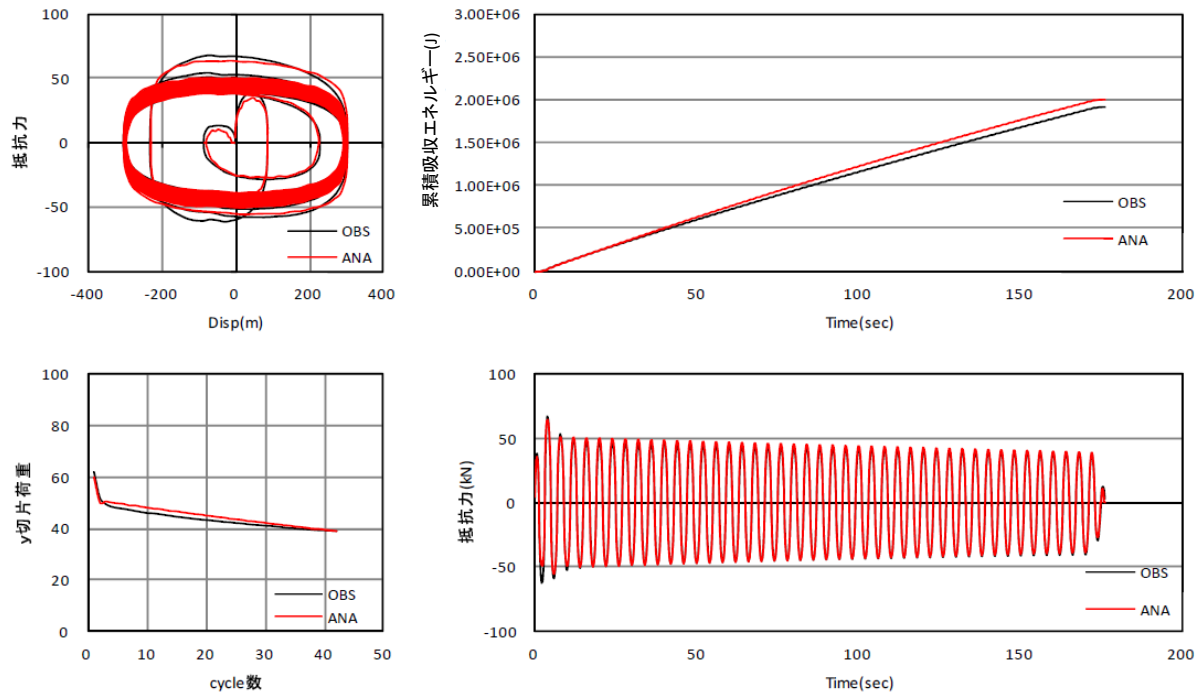


(a) 繰り返し依存性考慮

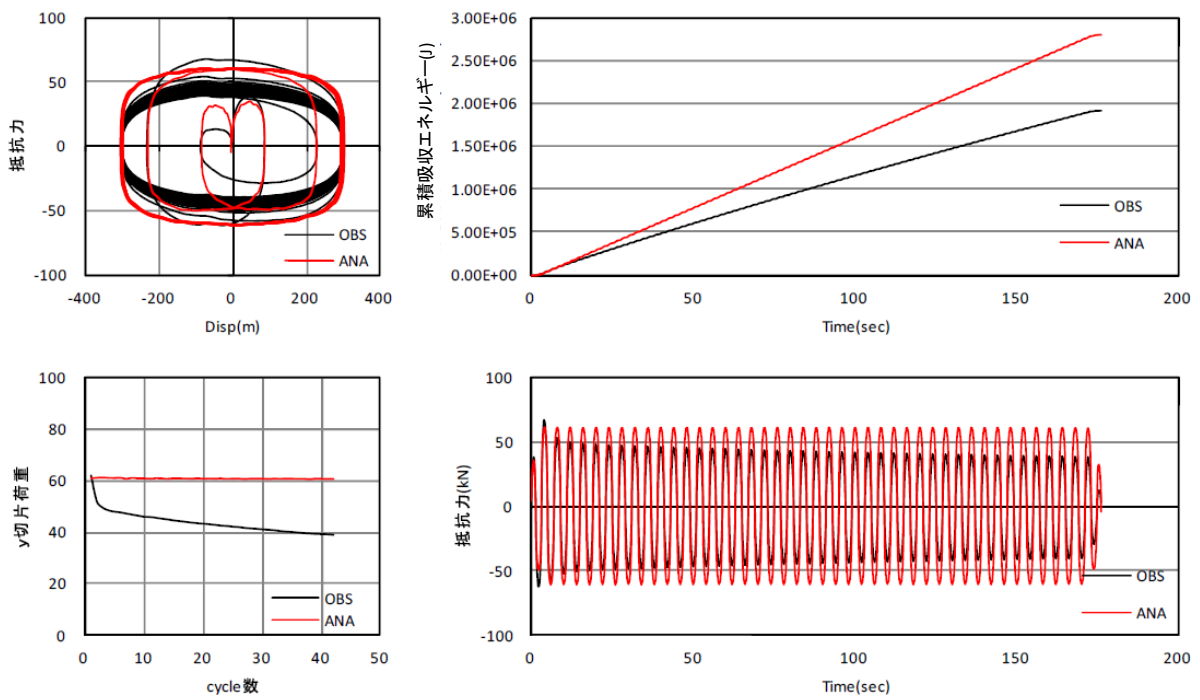


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-161 RDT8 試験体 水準0 実験結果と解析結果の比較

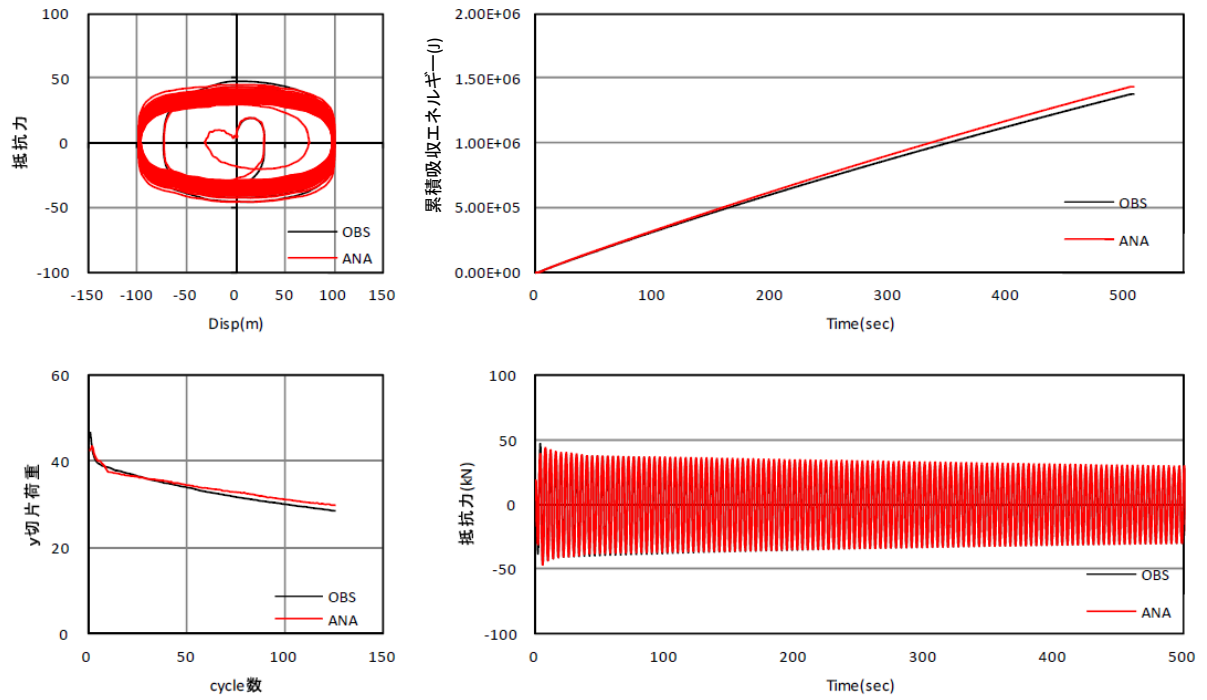


(a) 繰り返し依存性考慮

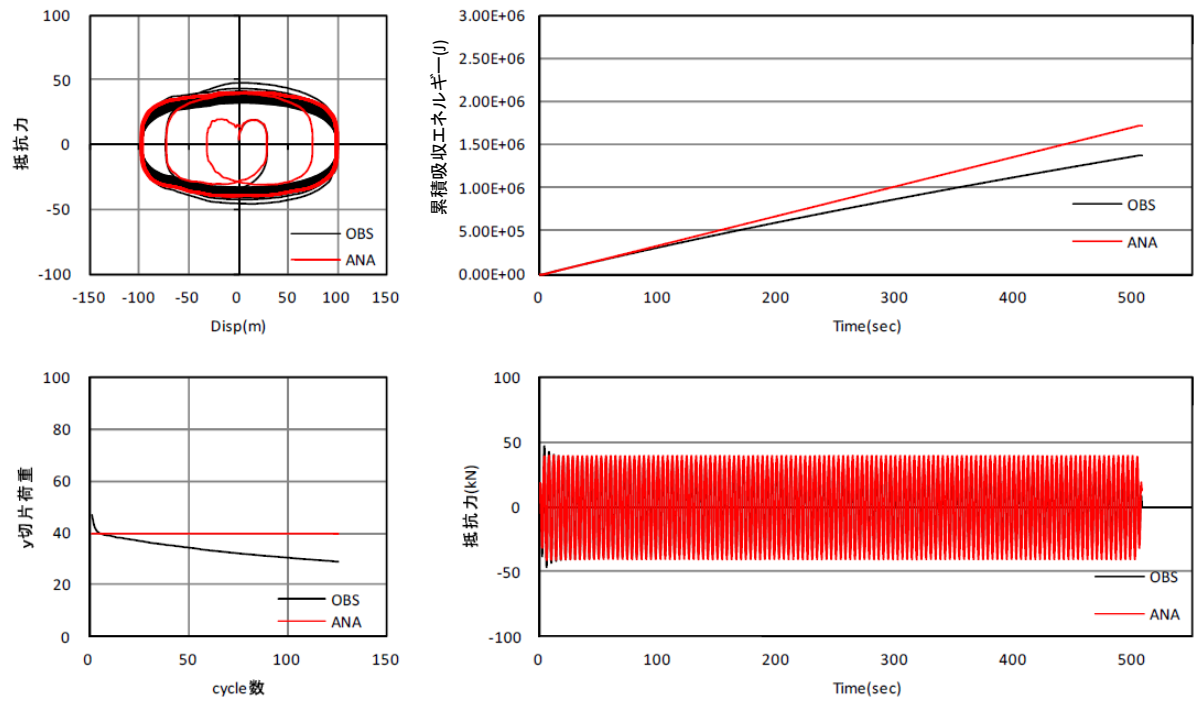


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-22 RDT8 試験体 水準 1 実験結果と解析結果の比較

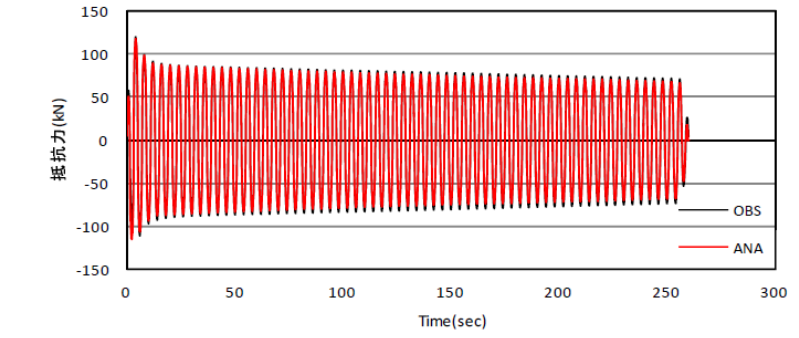
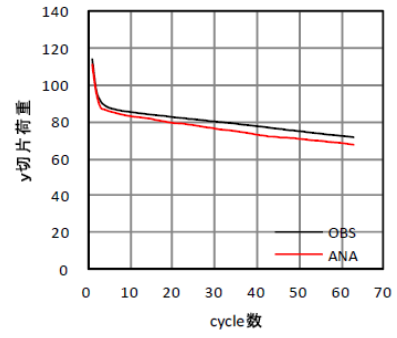
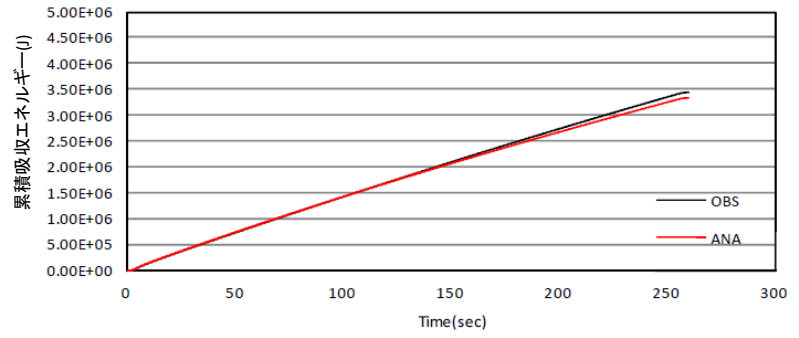
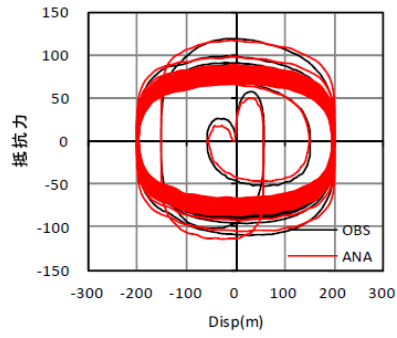


(a) 繰り返し依存性考慮

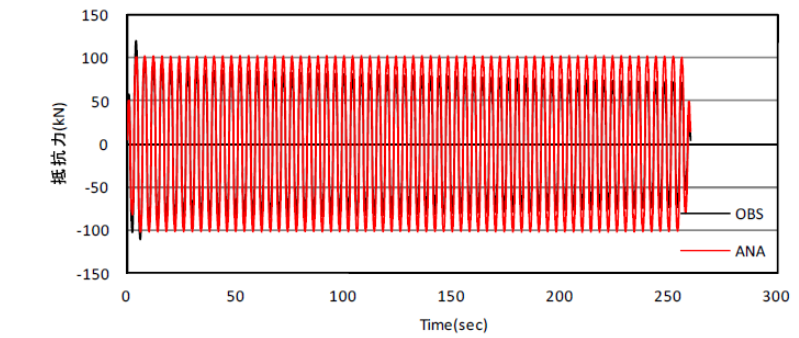
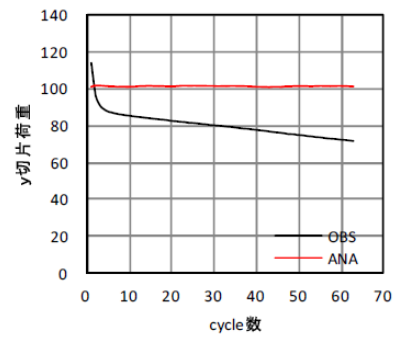
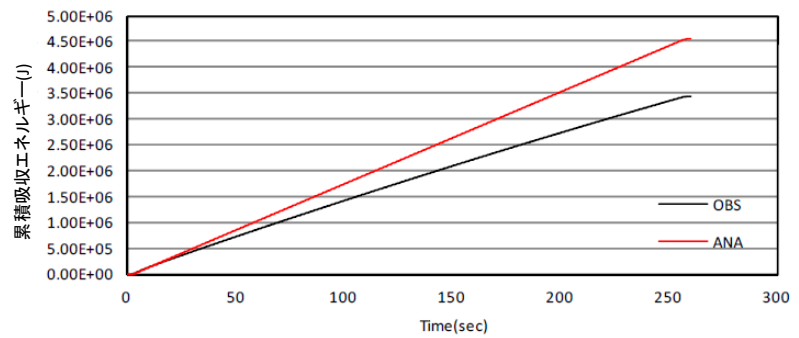
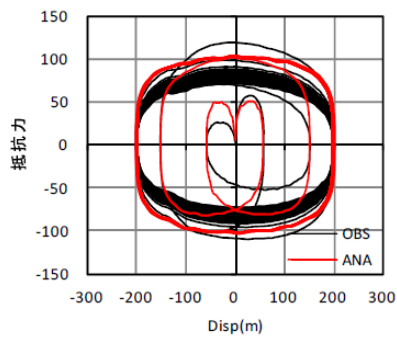


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-23 RDT8 試験体 水準 2 実験結果と解析結果の比較

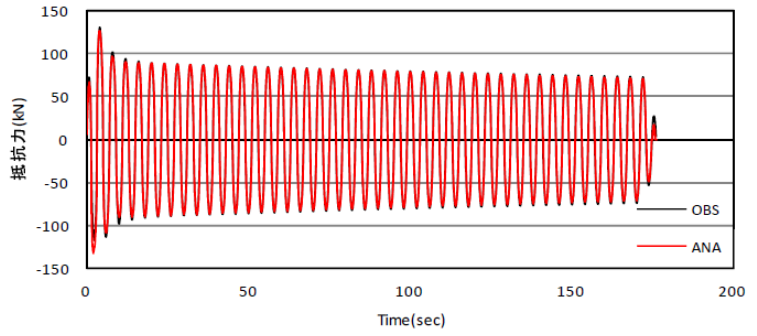
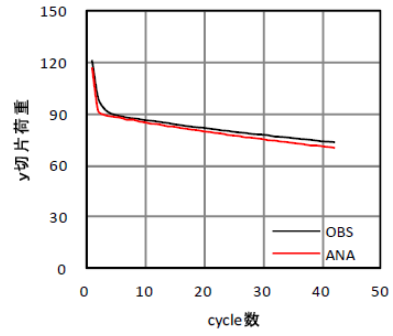
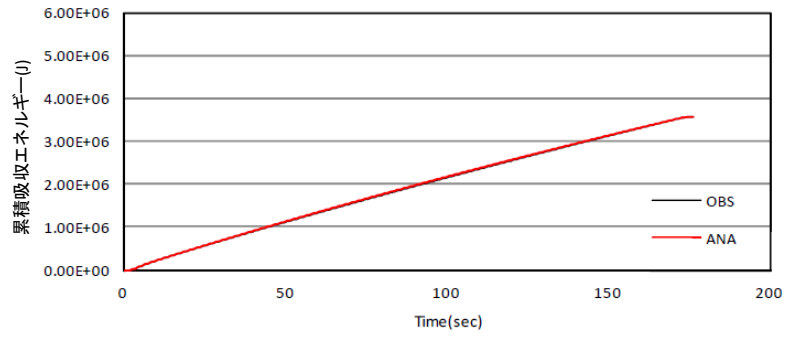
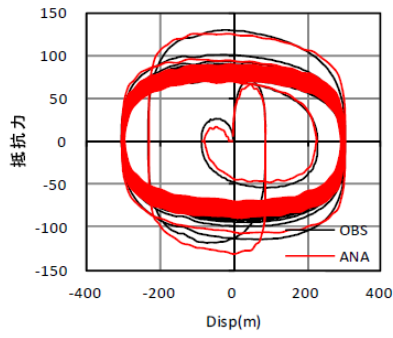


(a) 繰り返し依存性考慮

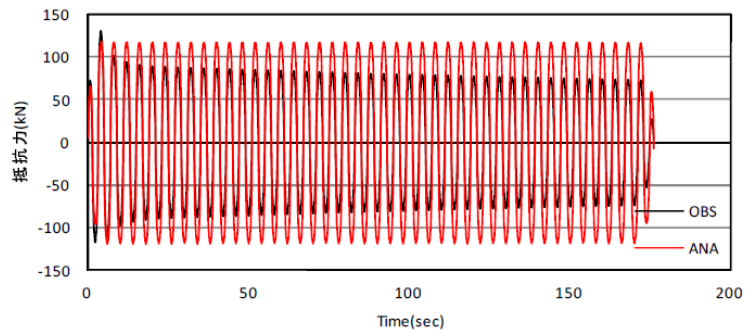
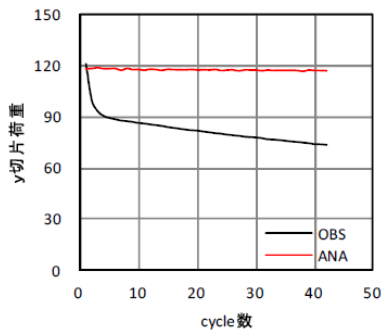
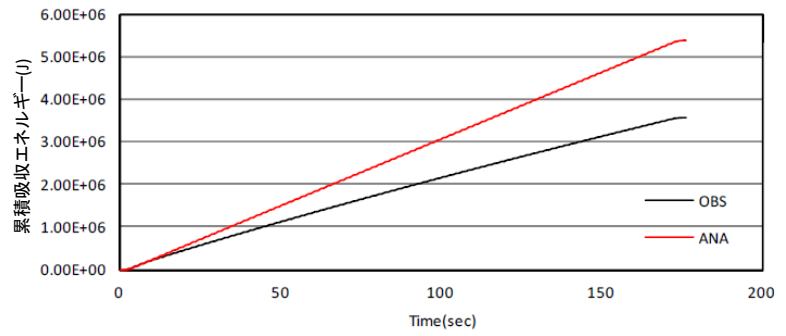
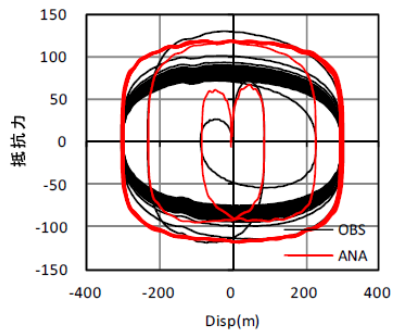


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-24 RDT16 試験体 水準 0 実験結果と解析結果の比較

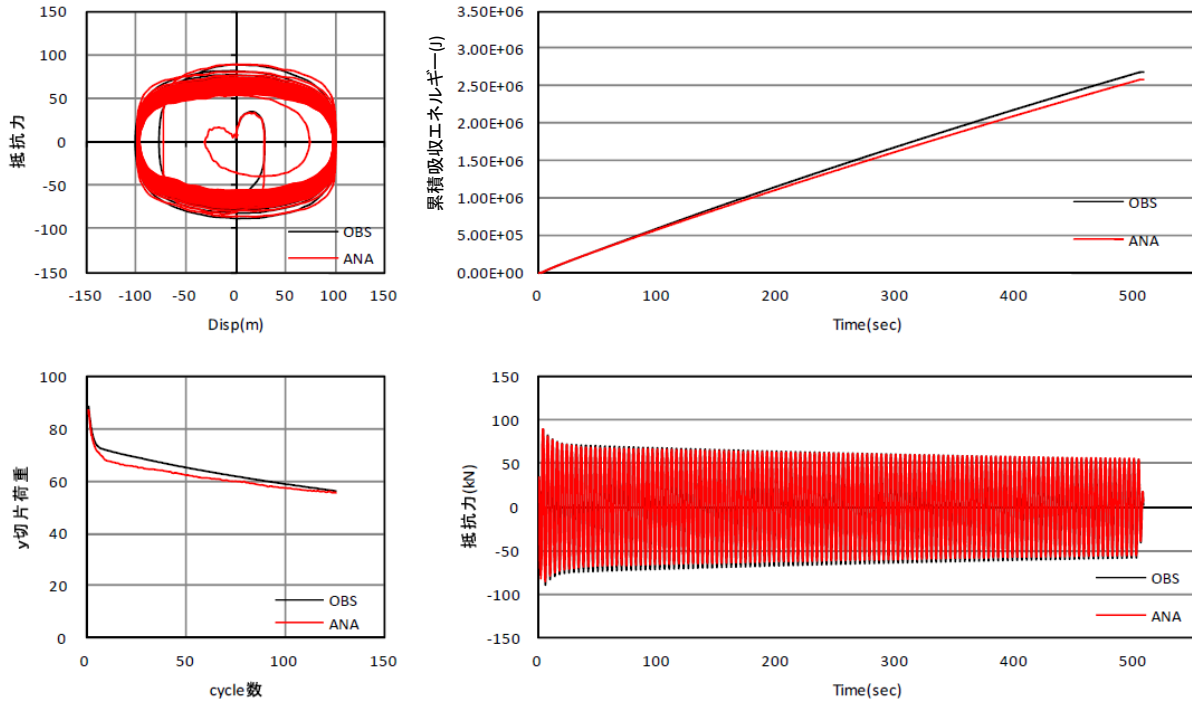


(a) 繰り返し依存性考慮

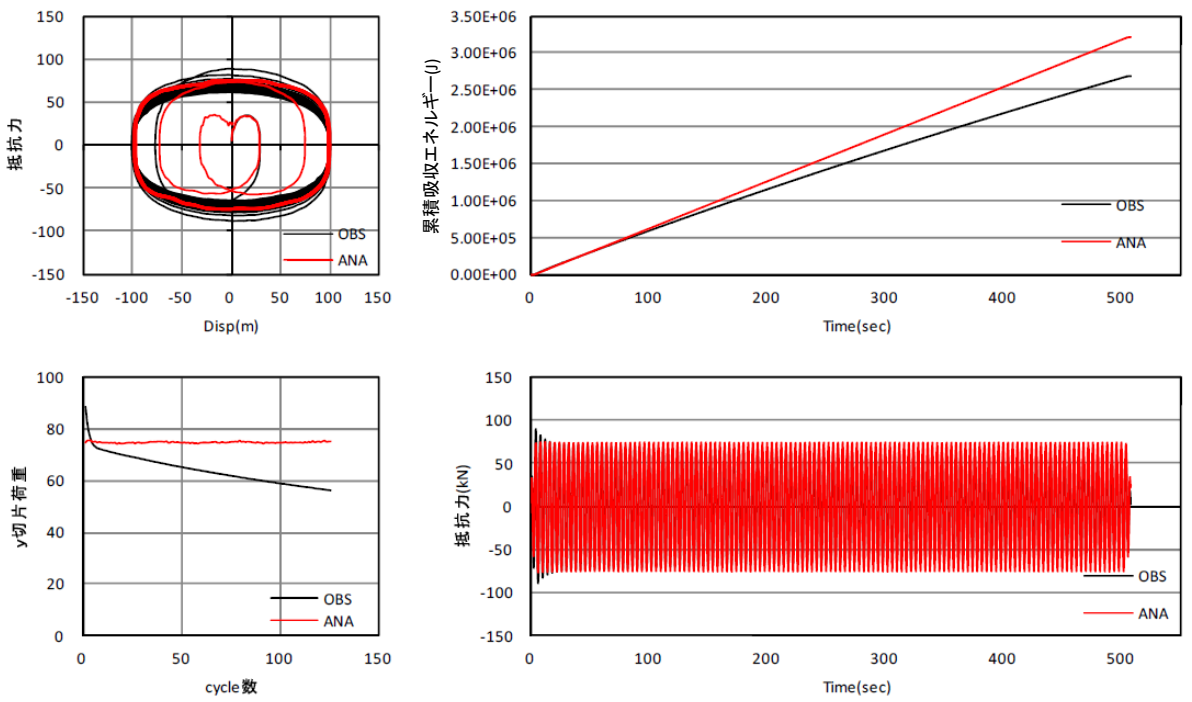


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-25 RDT16 試験体 水準 1 実験結果と解析結果の比較

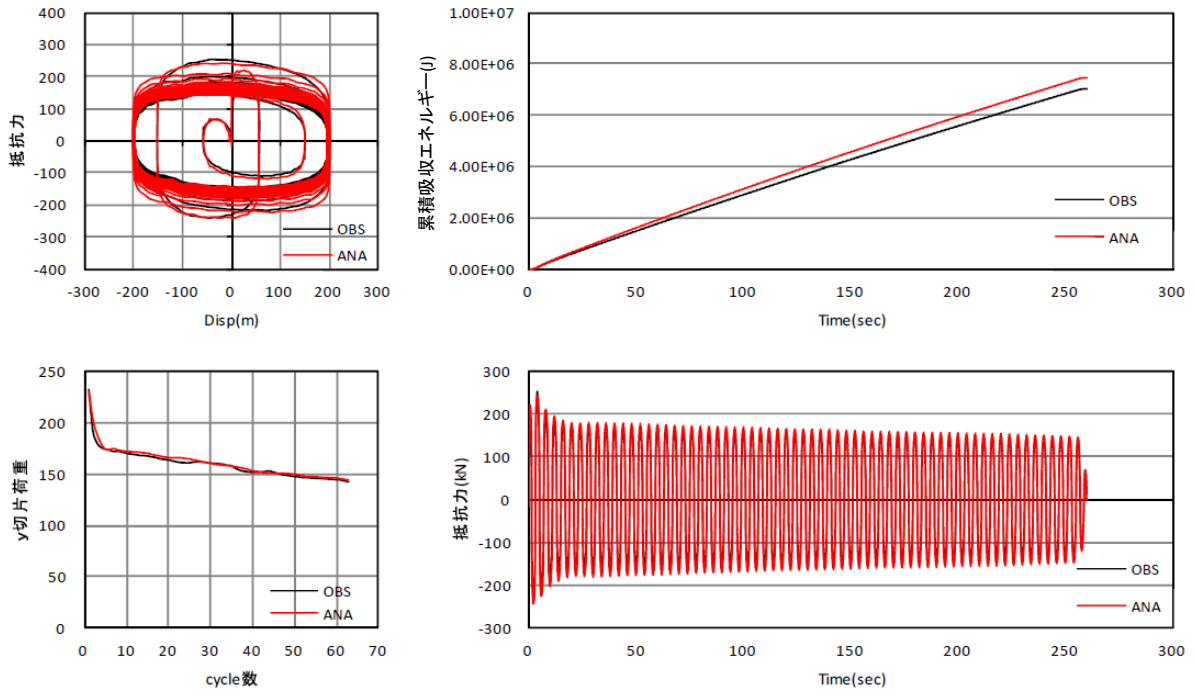


(a) 繰り返し依存性考慮

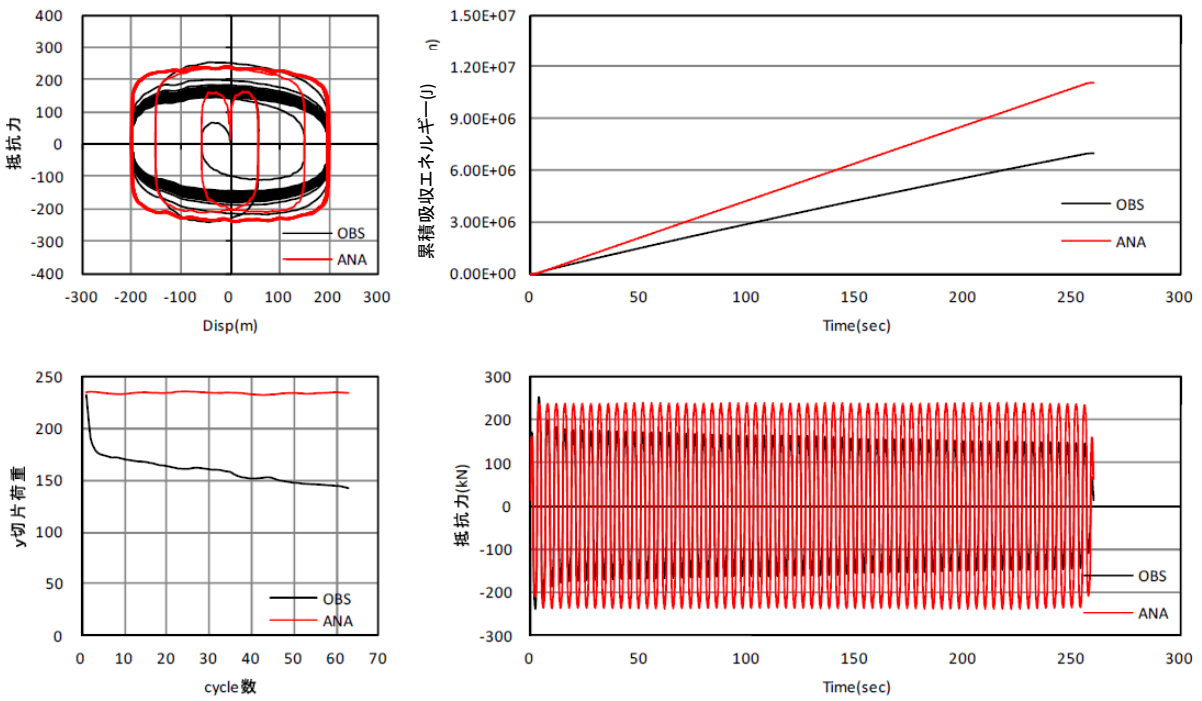


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-26 RDT16 試験体 水準 2 実験結果と解析結果の比較

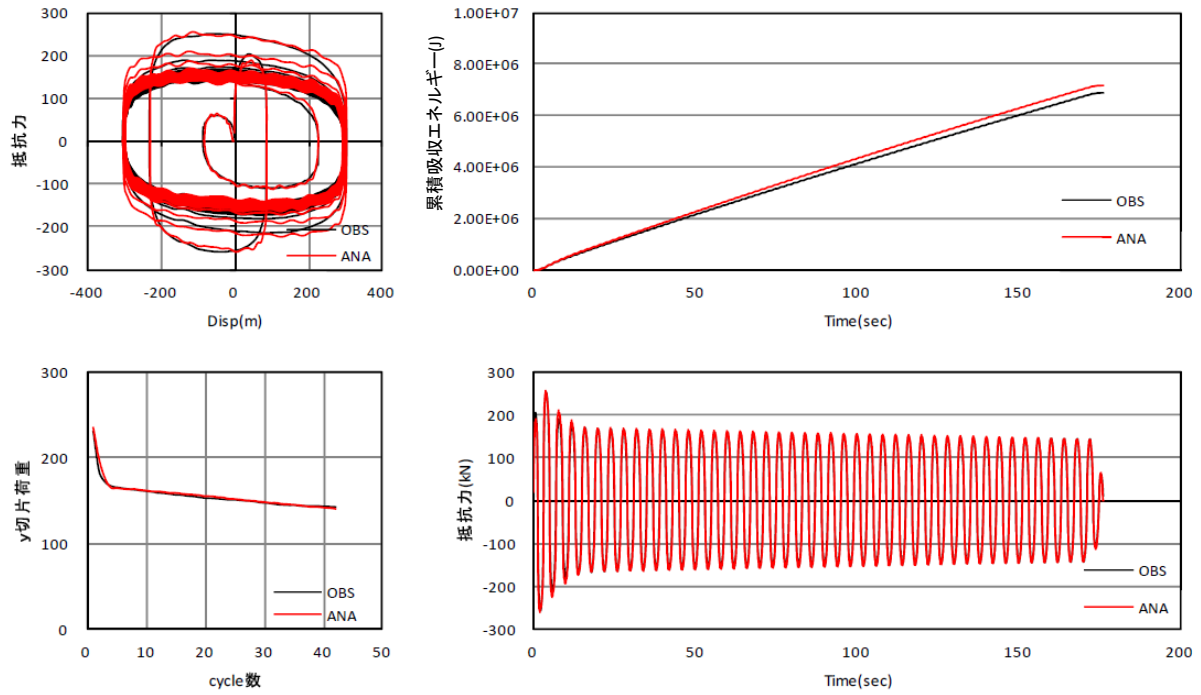


(a) 繰り返し依存性考慮

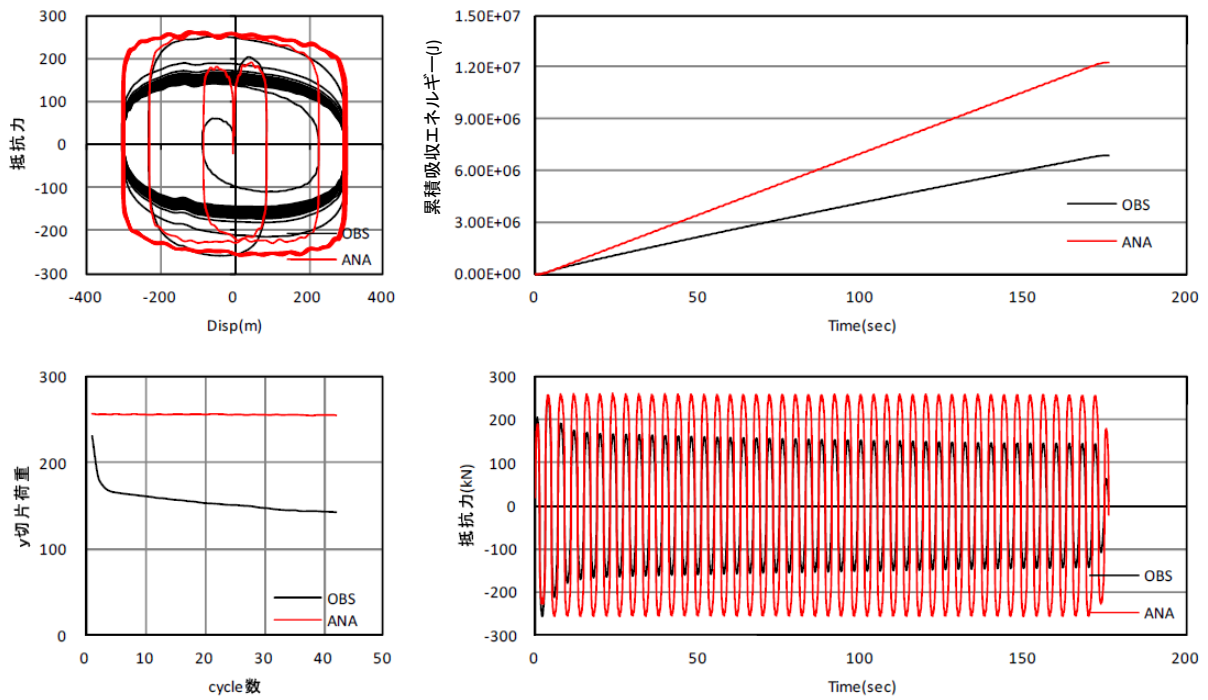


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-27 RDT30 試験体 水準0 実験結果と解析結果の比較

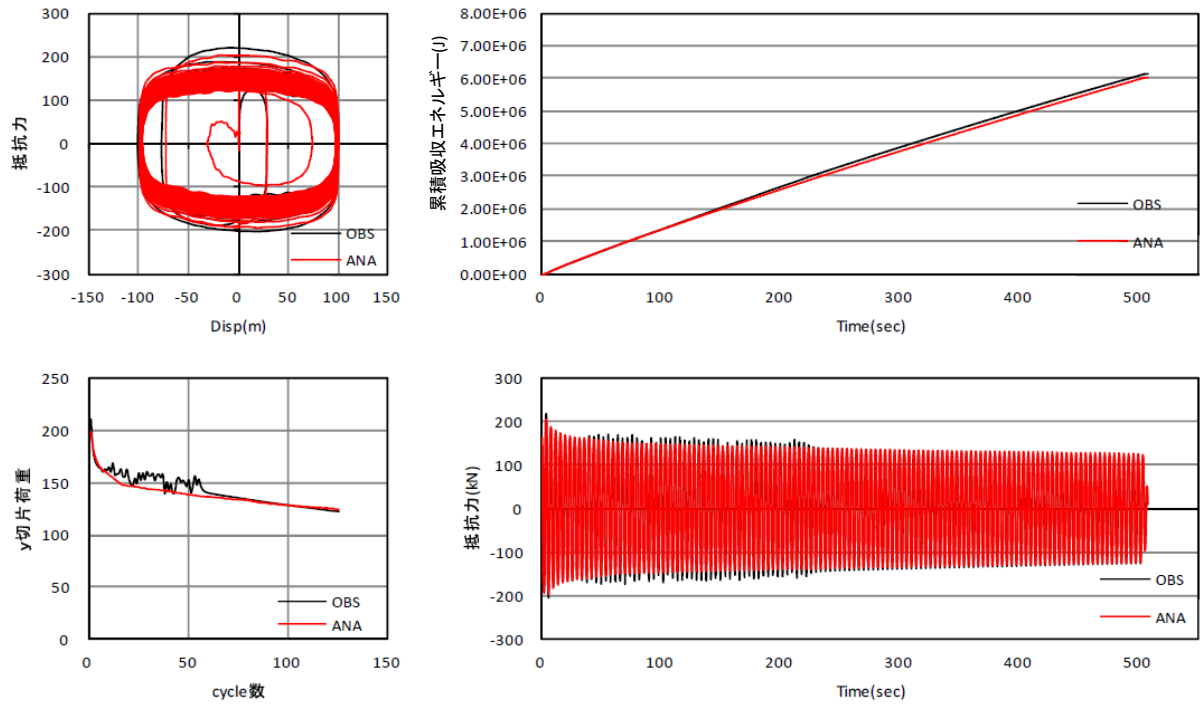


(a) 繰り返し依存性考慮

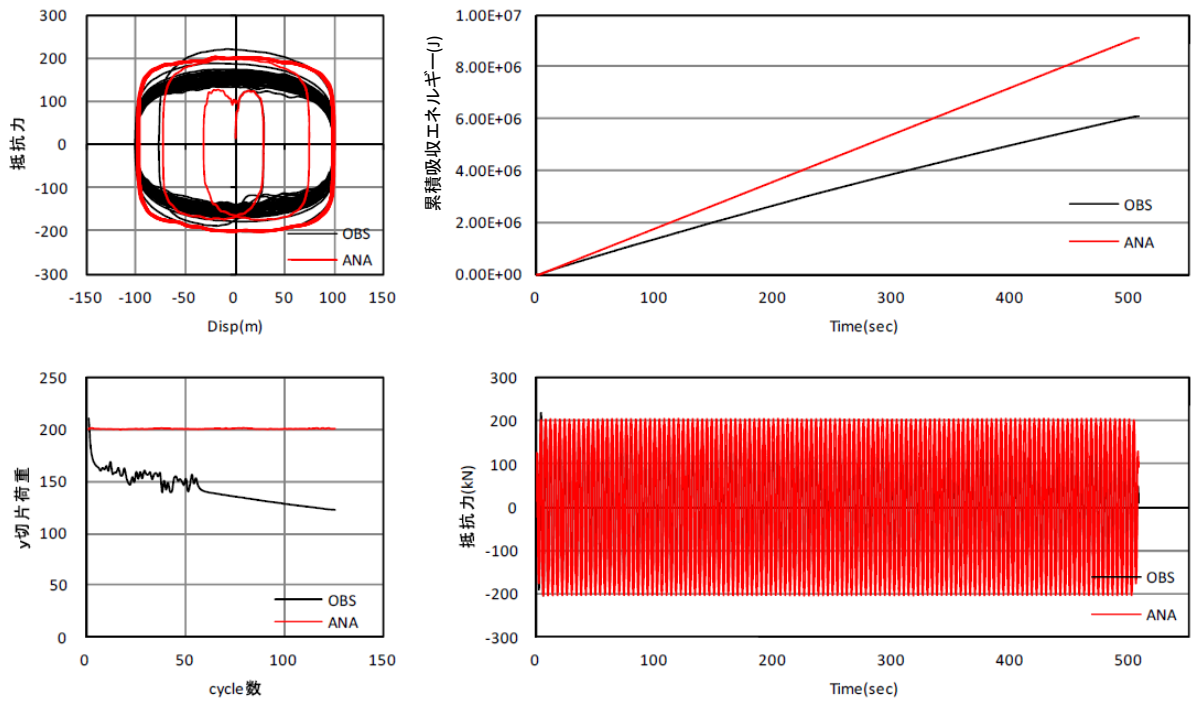


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-28 RDT30 試験体 水準 1 実験結果と解析結果の比較



(a) 繰り返し依存性考慮



(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-29 RDT30 試験体 水準 2 実験結果と解析結果の比較

(2) 解析条件

想定する建物は 30m×30m の平面形状を持つ RC 造の 9 層建物とする。建物の総重量は 100,000kN とする。免震周期、ダンパーの諸条件は以下の通りとした。

- ・ 建物の免震周期は 4 秒程度
- ・ 免震層の最大応答変位は 250mm 程度
- ・ ダンパーの負担層せん断力係数は 3.0%~3.5%程度

免震部材の配置状況を図 3.3.6-45 に示す。配置する免震部材は天然ゴム系積層ゴム、弾性すべり支承(低摩擦)および粘性ダンパーとする。解析では建物を 1 質点剛体でモデル化し、水平 1 方向入力とする。そのため粘性ダンパーについては加振方向に平行に配置された 4 基をモデル化する(図 3.3.6-46)。

なお、地震応答解析でモデル化する粘性ダンパーは、RDT100 を想定しており、装置の能力は RDT100 をモデル化するが、繰り返し依存特性については RDT30 の結果を準用する。その他、建物モデルの詳細については、第Ⅲ部 2.3.7 と同様とする。

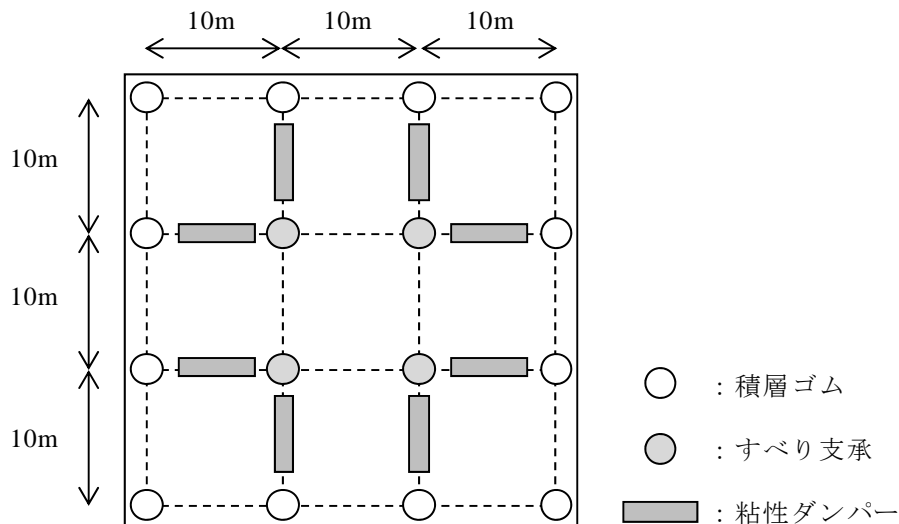


図 3.3.6-45 想定する建物モデルの平面形状

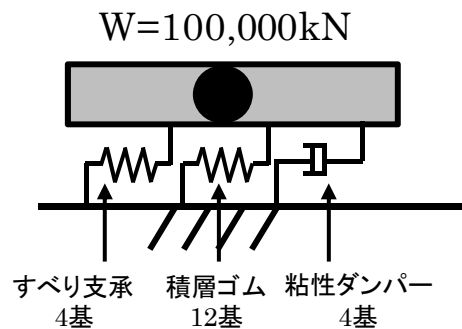


図 3.3.6-46 解析モデル(1 質点系剛体モデル・1 方向入力)

(3) 解析結果

前述の解析モデルに対して、長周期地震動 4 波による地震応答解析を実施する。解析では入力地震動を 1.25 倍、1.5 倍に係数倍した場合の解析についても実施している。

比較する応答結果は免震層の最大応答変形および加速度、せん断力係数 C_i 、累積変形量、等価エネルギー速度 V_E 、免震部材の荷重変形関係および累積値の時刻歴とする。

表 3.3.6-21~ 表 3.3.6-24 に免震層の主要応答の一覧を示す。図 3.3.6-59 ~図 3.3.6-62 に各免震部材の荷重変形関係を、図 3.3.6-47 ~図 3.3.6-58 には、累積変位および免震部材の累積エネルギーの時刻歴を示す。なお、荷重変形関係の縦軸については、部材ごとに合計したものとする。

表 3.3.6-21~ 表 3.3.6-24 より、繰り返し依存性を考慮した本節の評価モデルと繰り返し非考慮の既往評価モデルの差異は概ね 0~30%程度の範囲で、繰り返し依存性を考慮した評価モデルの応答値が大きくなる傾向があった。ただし、AIC003 の応答変位（最大で 53%）のほか、入力が小さい KGIN 波の 1 倍入力の累積変位量 (-33%) など一部で傾向が異なった。なお、KGIN 波では、両モデルによる差異が比較的小さい結果となっている。

両モデルの吸収エネルギー量の差異は、概ね最大変位および加速度を示した時刻(OSKH02 では 142 秒付近、AIC003 では 181 秒付近、SZO024 では 145 秒および 160 秒付近、KGIN では 348 秒付近)以降で生じているが、全体のエネルギー量から見ると変化が小さく、応答にあまり反映されなかったと考えられる。

繰り返しの影響を考慮したモデルによる最大応答変位は、1 倍入力で 21.99cm(OSKH002)、1.25 倍入力で 31.20cm(OSKH002)、1.5 倍入力で 41.06cm(SZO024)であった。また、累積変位では、1 倍入力で 10.32m(SZO024)、1.25 倍入力で 14.53m(OSKH002)、1.5 倍入力で 19.44m(OSKH002)であった。

なお、本応答解析で生じた最大累積変形距離および各免震部材の吸収エネルギーは、すべり支承および粘性ダンパーの部材試験で確認された累積量に対して、適用範囲内であった。

表 3.3.6-21 免震層の応答結果一覧(OSKH02)

入力地震		OSKH02					
		1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性		考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変位 (cm)	値	21.99 (1.23)	17.85	31.20 (1.20)	26.10	39.07 (1.13)	34.69
	発生時刻	142.68	142.64	142.68	142.68	142.72	142.68
最大応答加速 度(cm/s ²)	値	72.76 (1.06)	68.61	94.95 (1.05)	90.13	115.31 (1.03)	112.18
	発生時刻	142.48	142.44	142.52	142.48	142.56	142.52
せん断力係数 C_i		0.07420 (1.06)	0.06996	0.09683 (1.05)	0.09191	0.11759 (1.03)	0.11439
累積変位量 (m)		10.08 (1.42)	7.10	14.53 (1.38)	10.51	19.44 (1.35)	14.45
等価エネルギー速度 V_E (m/s)		1.918 (1.09)	1.756	2.412 (1.06)	2.278	2.880 (1.03)	2.791

- ・()の数値は依存性考慮モデルと依存性非考慮モデルの比率を示す
- ・累積値については、累積吸収エネルギーが総吸収エネルギーの 95%に達した時の累積変位量とする

表 3.3.6-22 免震層の応答結果一覧(AIC003)

入力地震		AIC003					
		1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性		考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変位 (cm)	値	15.67 (1.53)	10.27	22.96 (1.48)	15.56	32.30 (1.47)	21.97
	発生時刻	181.16	181.16	181.16	181.20	181.16	181.20
最大応答加速 度(cm/s ²)	値	54.30 (1.12)	48.63	73.51 (1.17)	62.56	97.32 (1.23)	79.34
	発生時刻	180.92	180.92	181.00	181.00	181.00	181.04
せん断力係数 C_i		0.05537 (1.12)	0.04959	0.07496 (1.17)	0.06380	0.09924 (1.23)	0.08090
累積変位量 (m)		8.05 (1.33)	6.04	11.09 (1.31)	8.44	14.57 (1.31)	11.11
等価エネルギー速度 V_E (m/s)		1.699 (1.06)	1.600	2.081 (1.04)	2.000	2.464 (1.03)	2.392

- ・()の数値は依存性考慮モデルと依存性非考慮モデルの比率を示す
- ・累積値については、累積吸収エネルギーが総吸収エネルギーの 95%に達した時の累積変位量とする

表 3.3.6-23 免震層の応答結果一覧(SZO024)

入力地震		SZO024					
		1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性		考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変位 (cm)	値	21.30 (1.25)	17.04	30.94 (1.27)	24.28	41.06 (1.25)	32.73
	発生時刻	160.40	144.88	160.44	144.92	160.44	160.40
最大応答加速 度(cm/s ²)	値	68.64 (1.04)	66.17	94.07 (1.10)	85.55	120.04 (1.12)	107.00
	発生時刻	160.20	144.72	160.28	144.80	160.32	160.24
せん断力係数 C_i		0.06999 (1.04)	0.06747	0.09593 (1.10)	0.08724	0.12241 (1.12)	0.10911
累積変位量 (m)		10.32 (1.21)	8.56	13.86 (1.17)	11.82	17.59 (1.15)	15.32
等価エネルギー速度 V_E (m/s)		2.084 (0.99)	2.096	2.489 (0.97)	2.572	2.870 (0.95)	3.017

・()の数値は依存性考慮モデルと依存性非考慮モデルの比率を示す

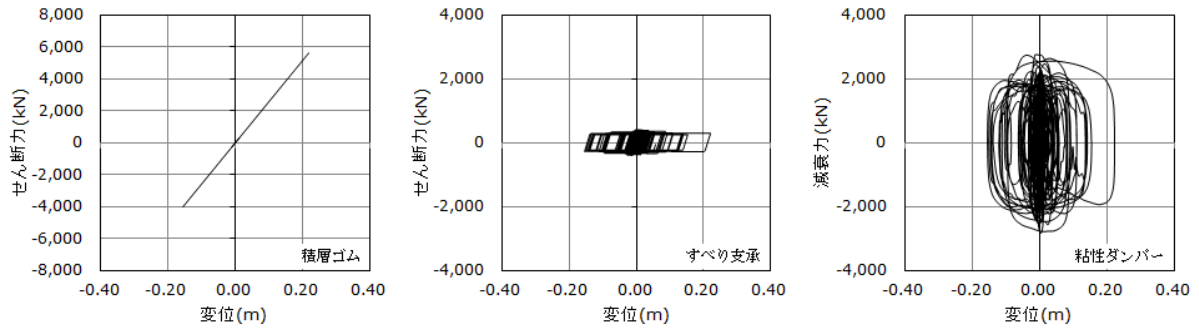
・累積値については、累積吸収エネルギーが総吸収エネルギーの 95%に達した時の累積変位量とする

表 3.3.6-24 免震層の応答結果一覧(KGIN)

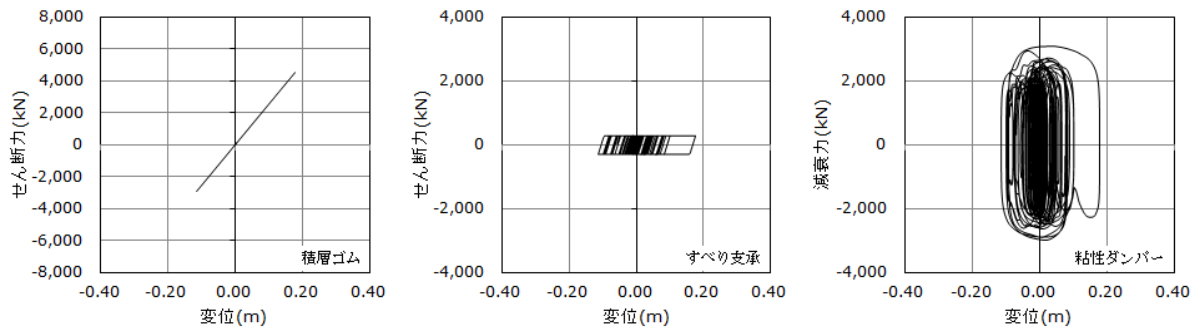
入力地震		KGIN					
		1 倍入力		1.25 倍入力		1.5 倍入力	
繰り返し依存性		考慮	非考慮	考慮	非考慮	考慮	非考慮
最大応答変位 (cm)	値	2.90 (0.82)	3.55	5.98 (1.09)	5.46	10.36 (1.31)	7.91
	発生時刻	349.20	349.20	349.20	349.20	349.04	349.16
最大応答加速 度(cm/s ²)	値	23.31 (0.98)	23.79	30.97 (1.01)	30.72	41.11 (1.07)	38.47
	発生時刻	348.52	348.56	348.56	348.56	348.60	348.60
せん断力係数 C_i		0.02377 (0.98)	0.02426	0.03158 (1.01)	0.03133	0.04192 (1.07)	0.03923
累積変位量 (m)		1.68 (0.67)	2.49	3.28 (0.96)	3.41	5.58 (1.24)	4.50
等価エネルギー速度 V_E (m/s)		0.571 (0.86)	0.662	0.859 (0.98)	0.873	1.197 (1.08)	1.106

・()の数値は依存性考慮モデルと依存性非考慮モデルの比率を示す

・累積値については、累積吸収エネルギーが総吸収エネルギーの 95%に達した時の累積変位量とする

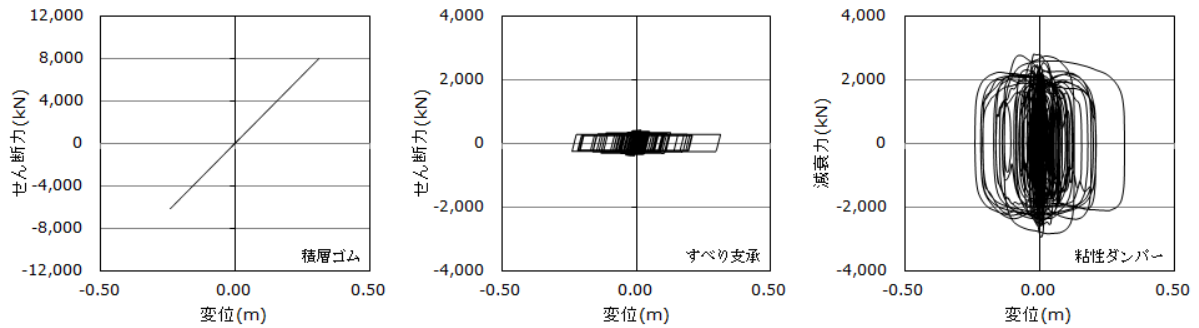


(a) 繰り返し依存性考慮

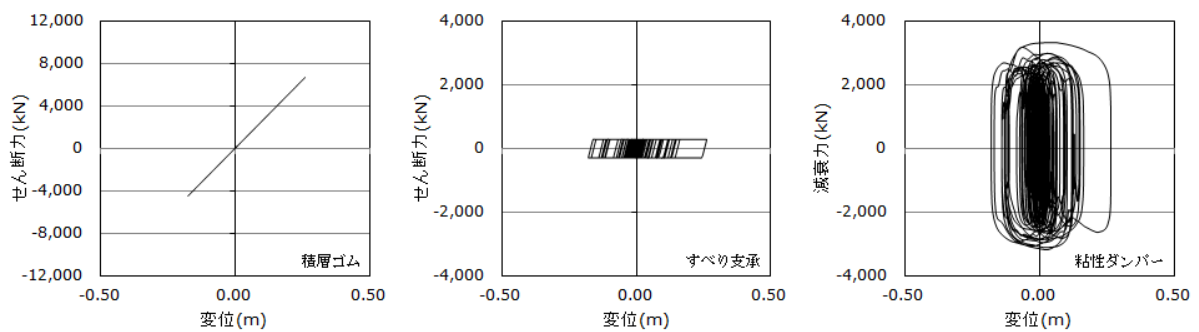


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-47 免震層の荷重変形関係(OSKH02・1.0倍入力)

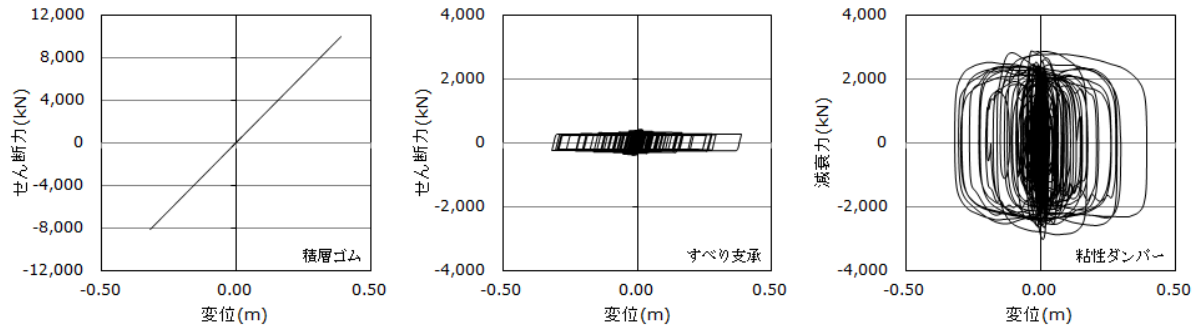


(a) 繰り返し依存性考慮

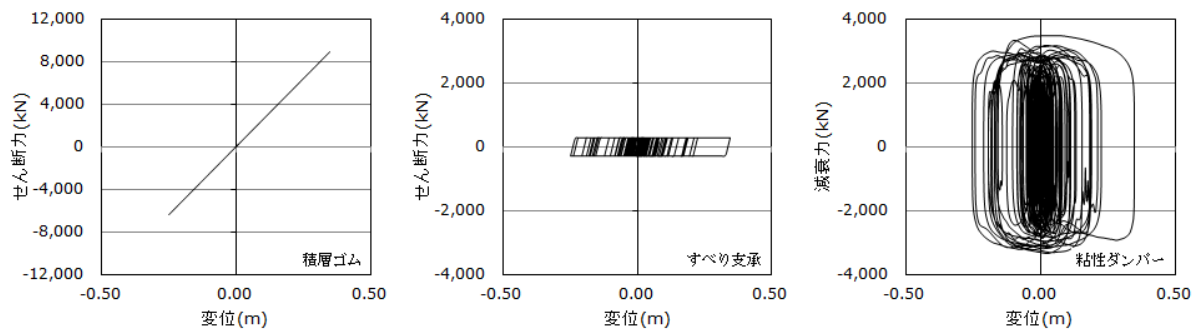


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-48 免震層の荷重変形関係(OSKH02・1.25倍入力)

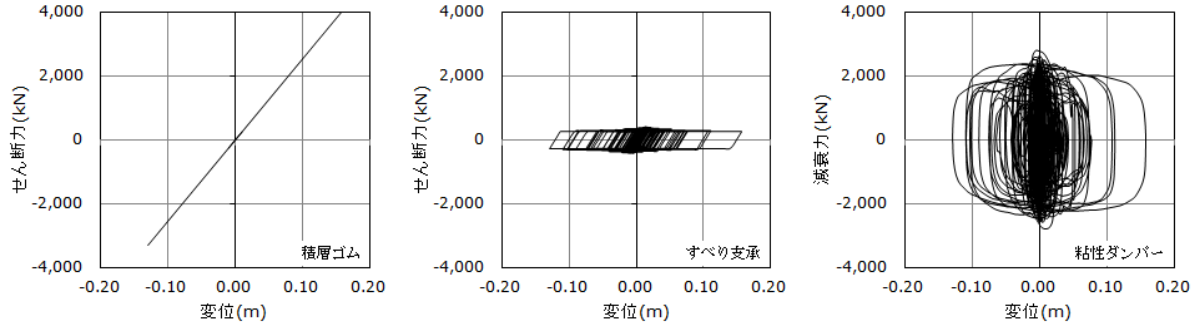


(a) 繰り返し依存性考慮

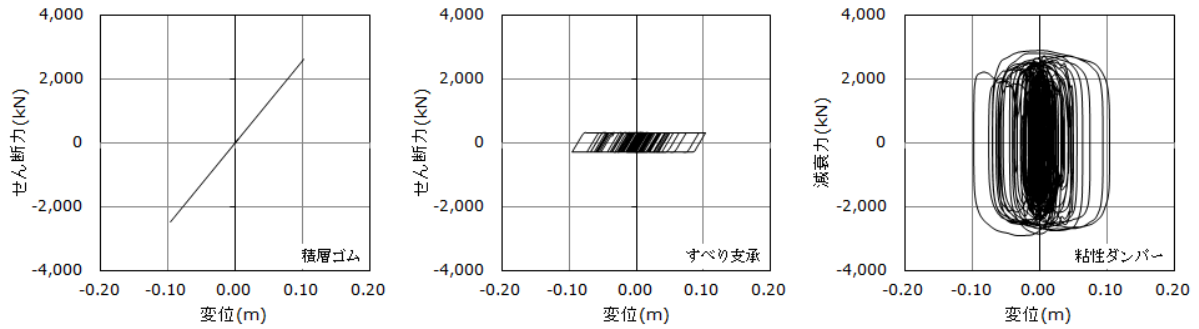


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-49 免震層の荷重変形関係(OSKH02・1.5倍入力)

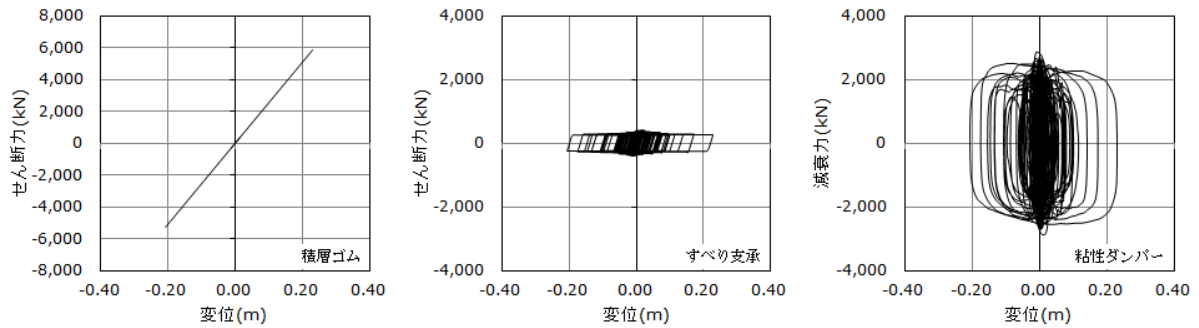


(a) 繰り返し依存性考慮

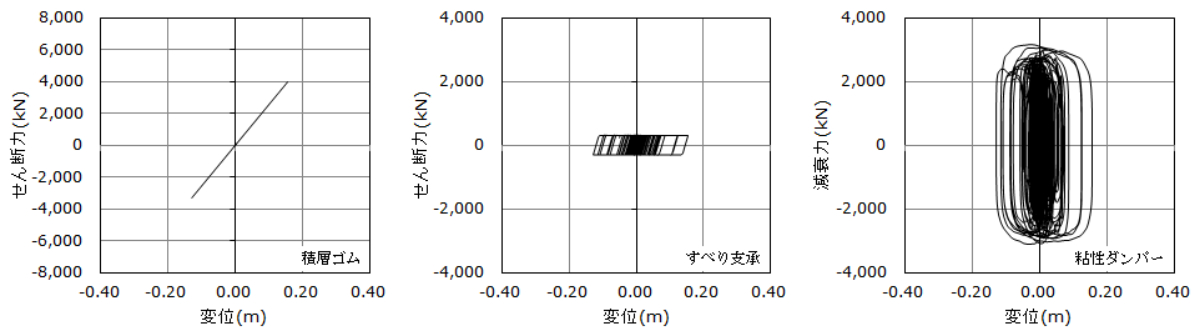


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-50 免震層の荷重変形関係(AIC003・1.0倍入力)

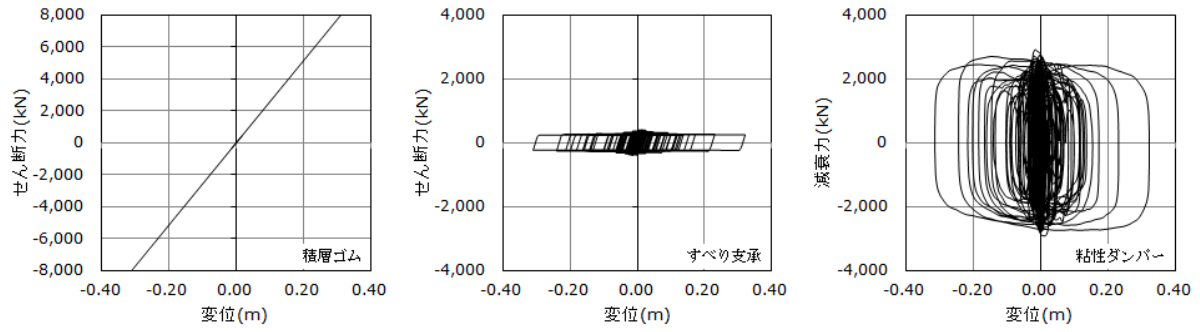


(a) 繰り返し依存性考慮

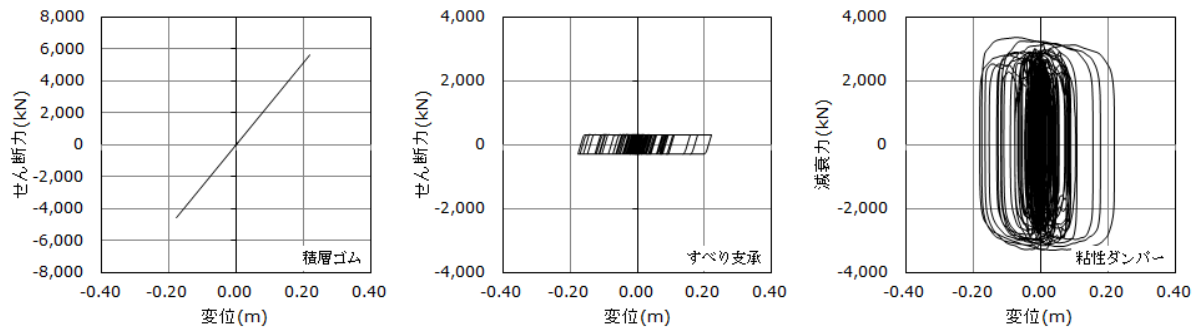


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-51 免震層の荷重変形関係(AIC003・1.25倍入力)

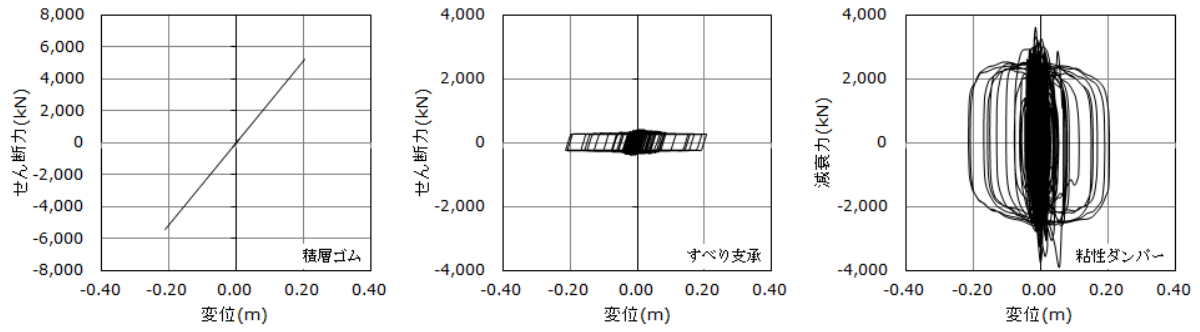


(a) 繰り返し依存性考慮

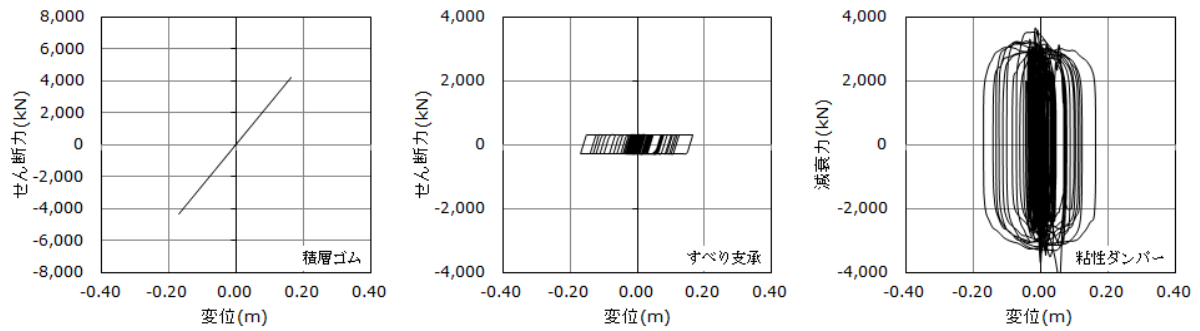


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-52 免震層の荷重変形関係(AIC003・1.5倍入力)

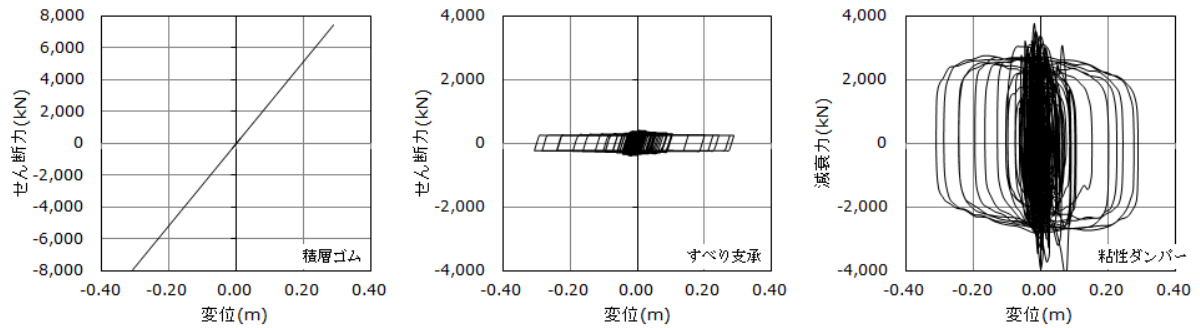


(a) 繰り返し依存性考慮

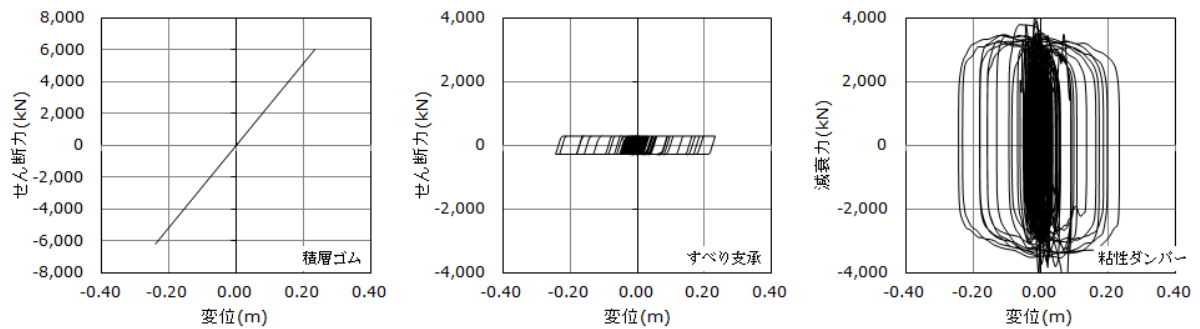


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-53 免震層の荷重変形関係(SZO024・1.0倍入力)

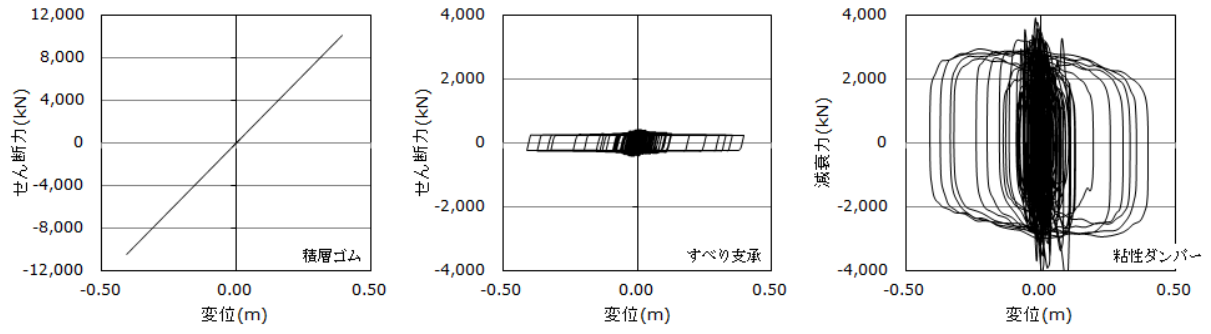


(a) 繰り返し依存性考慮

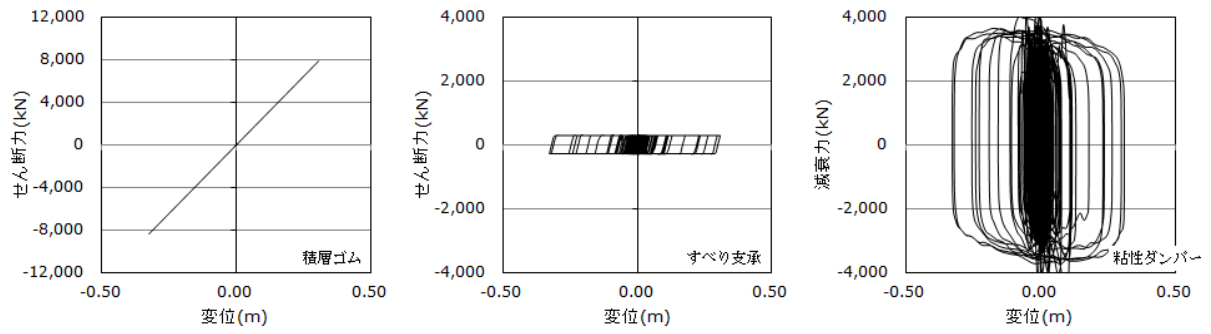


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-54 免震層の荷重変形関係(SZO024・1.25倍入力)

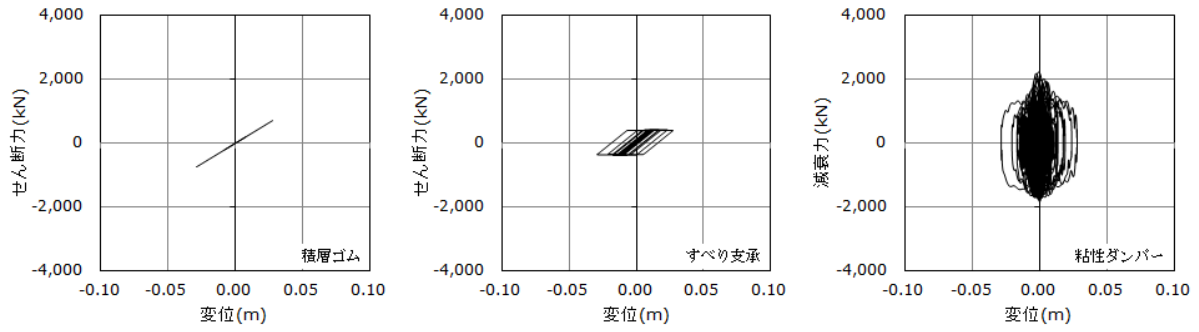


(a) 繰り返し依存性考慮

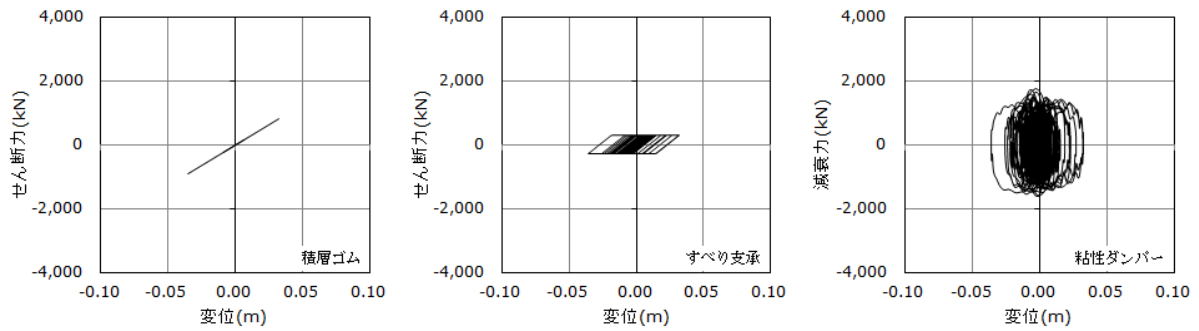


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-55 免震層の荷重変形関係(SZO024・1.5倍入力)

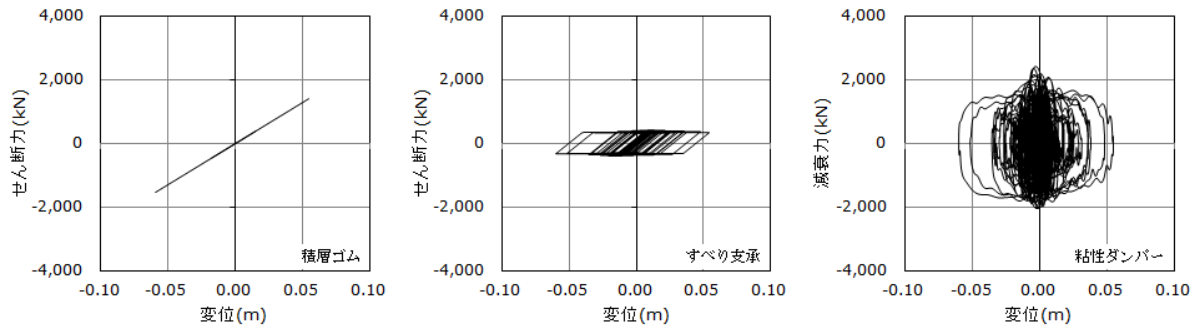


(a) 繰り返し依存性考慮

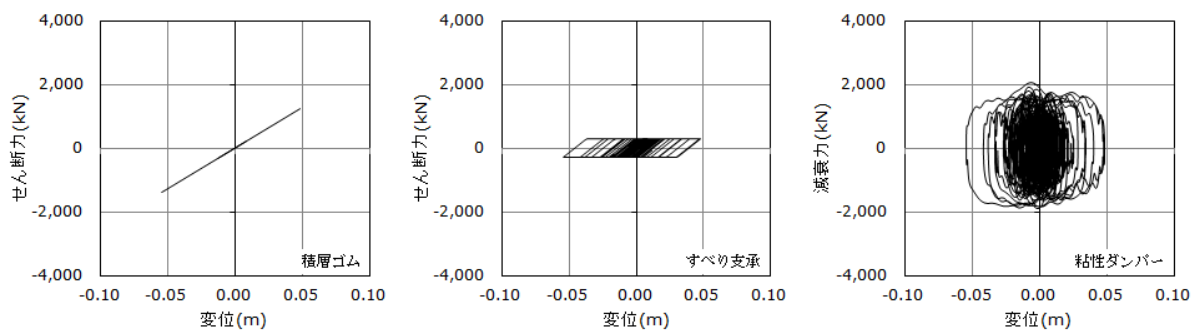


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-56 免震層の荷重変形関係(KGIN・1.0倍入力)

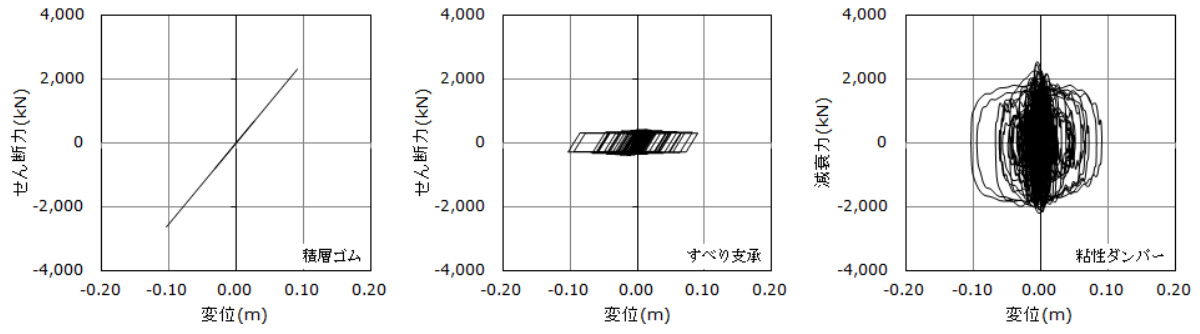


(a) 繰り返し依存性考慮

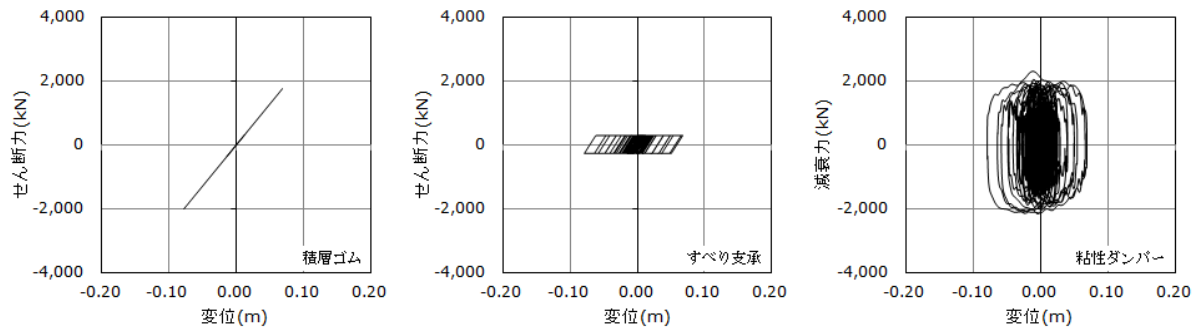


(b) 繰り返し依存性非考慮

図 3.3.6-57 免震層の荷重変形関係(KGIN・1.25倍入力)

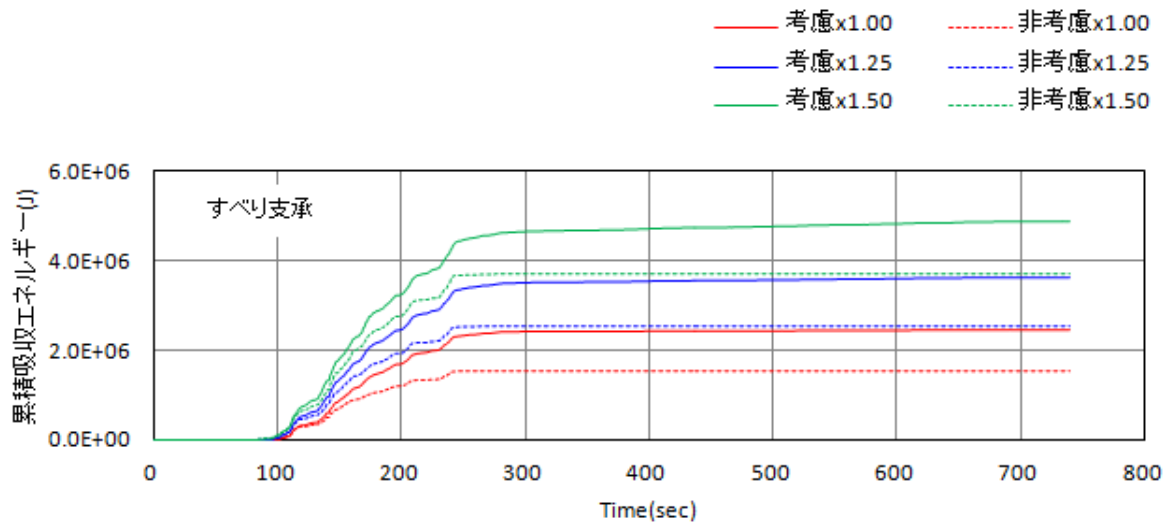


(a) 繰り返し依存性考慮

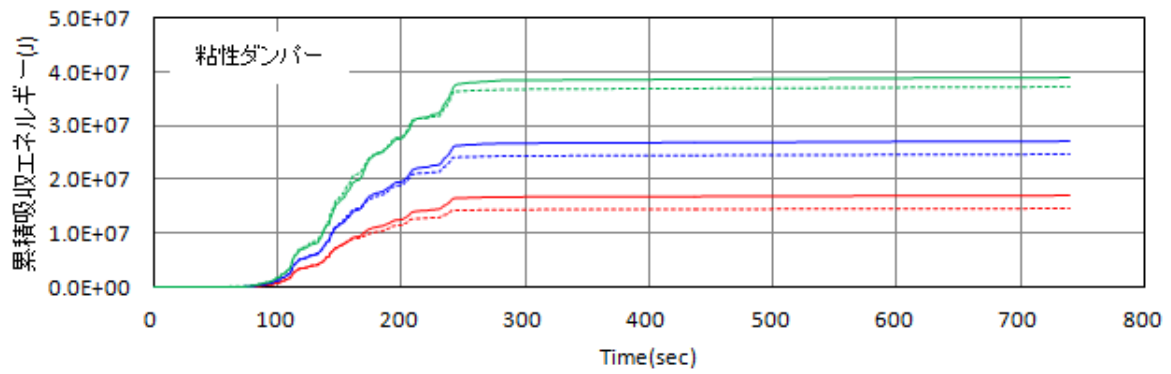


(b) 繰り返し依存性非考慮

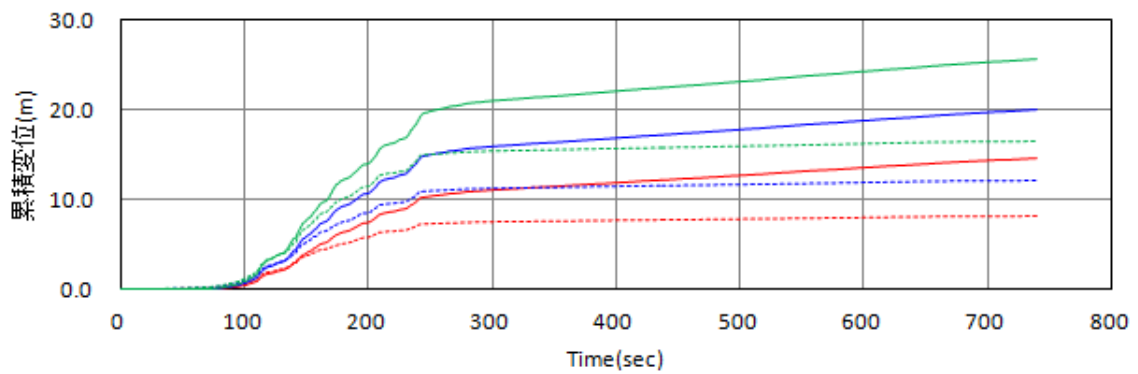
図 3.3.6-58 免震層の荷重変形関係(KGIN・1.5倍入力)



(a) すべり支承の吸収エネルギー時刻歴

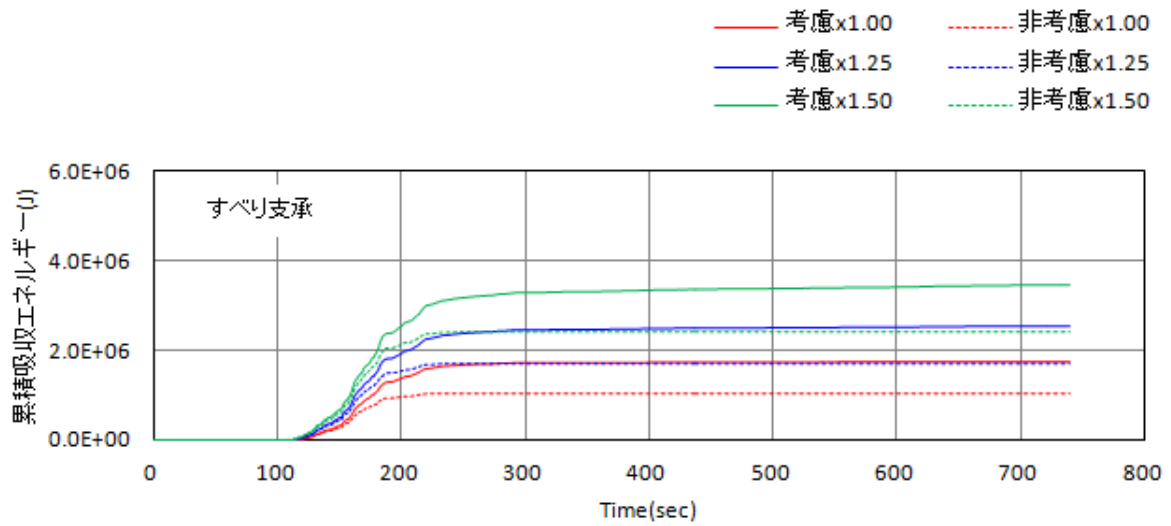


(b) 粘性ダンパーの吸収エネルギー時刻歴

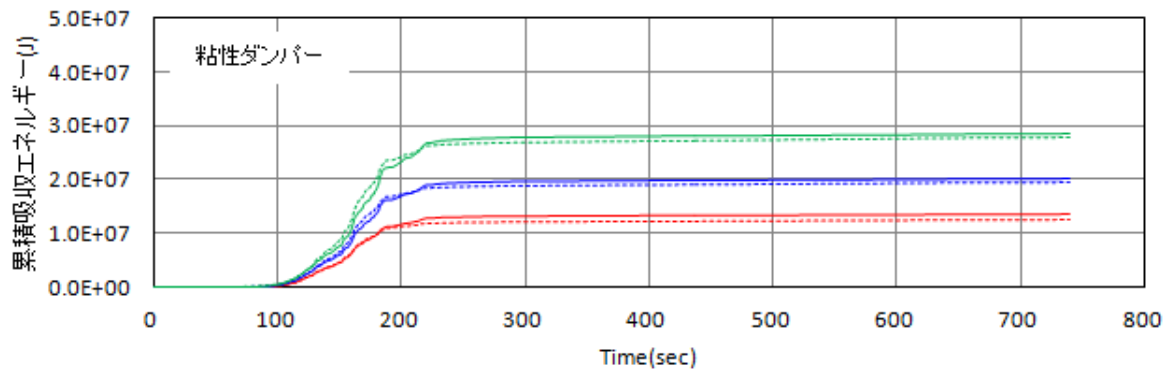


(c) 免震層の累積変位時刻歴

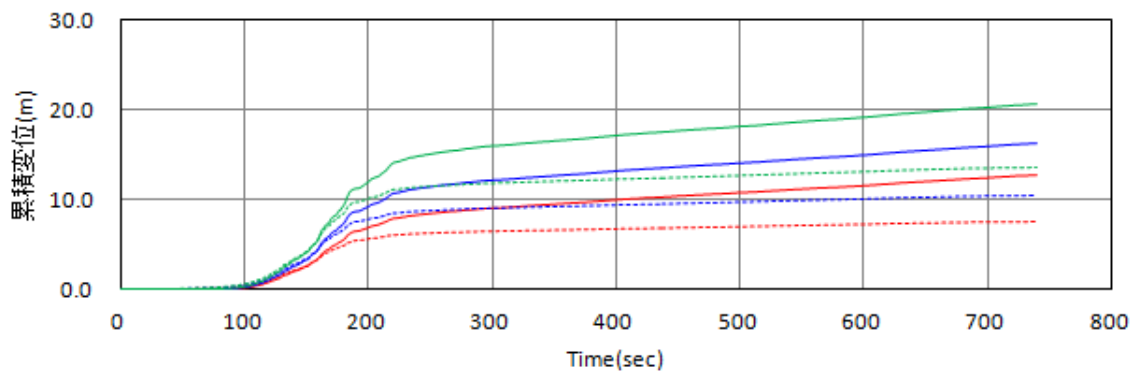
図 3.3.6-59 免震層の累積吸収エネルギーおよび累積変位の時刻歴(OSKH02)



(a) すべり支承の吸収エネルギー時刻歴

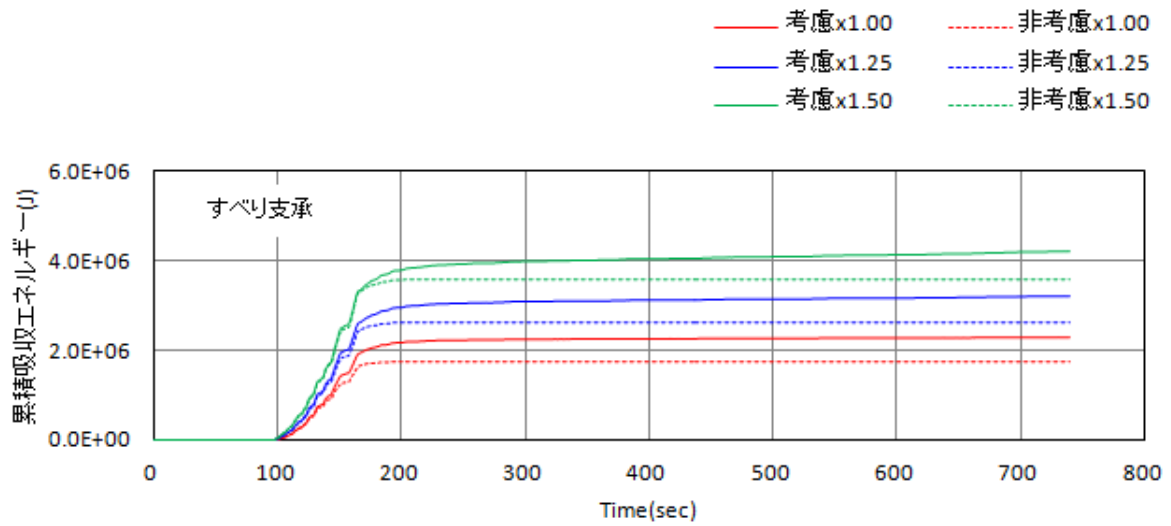


(b) 粘性ダンパーの吸収エネルギー時刻歴

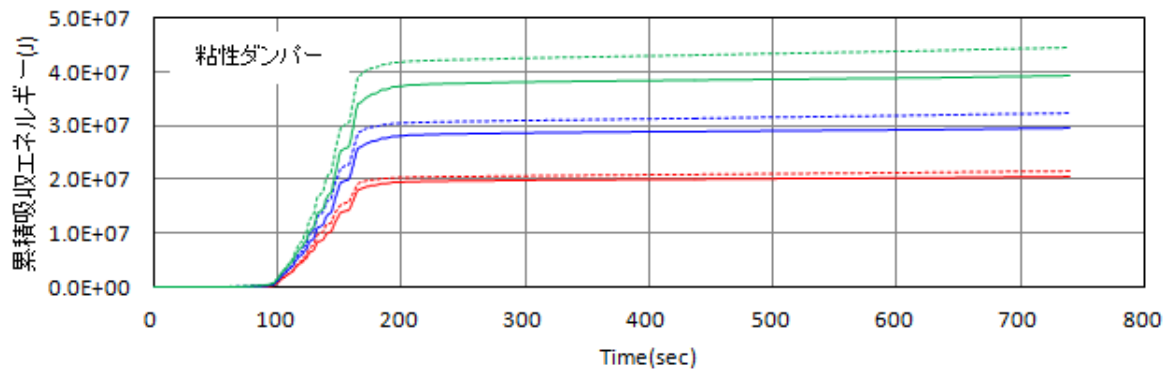


(c) 免震層の累積変位時刻歴

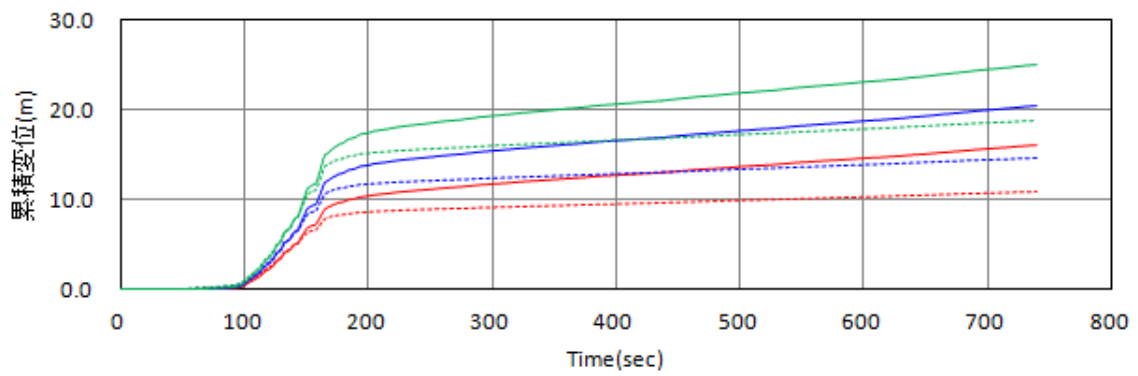
図 3.3.6-60 免震層の累積吸収エネルギーおよび累積変位の時刻歴(AIC003)



(a) すべり支承の吸収エネルギー時刻歴

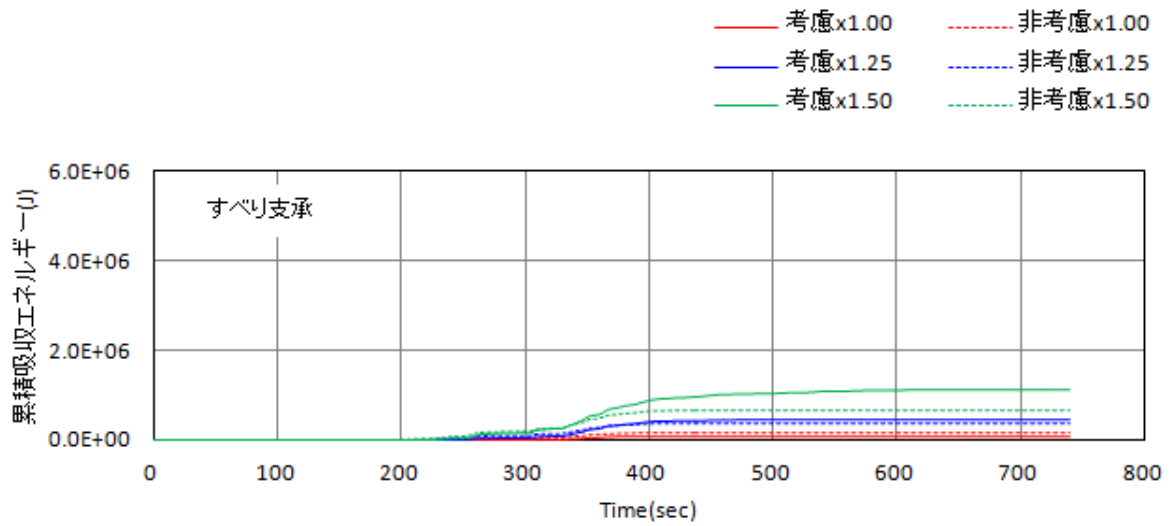


(b) 粘性ダンパーの吸収エネルギー時刻歴

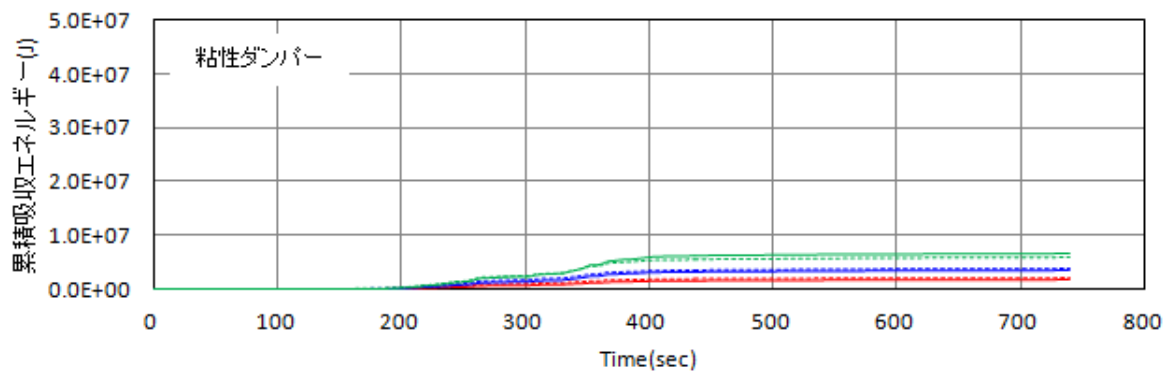


(c) 免震層の累積変位時刻歴

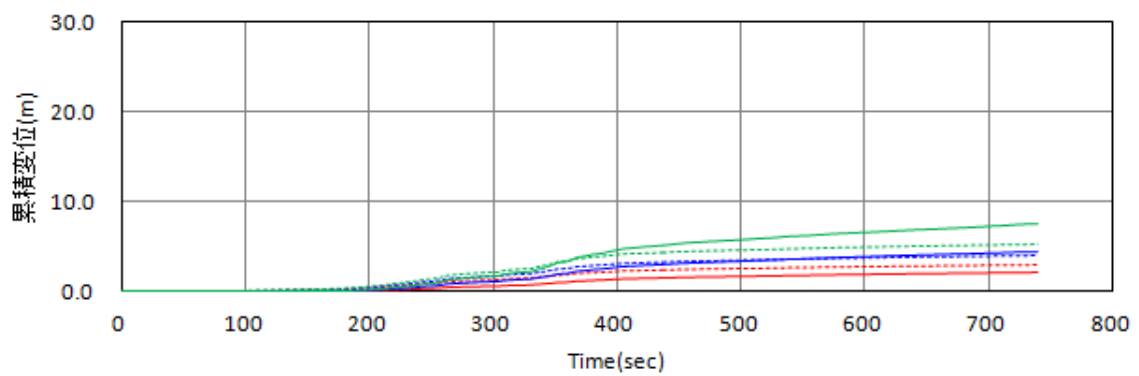
図 3.3.6-61 免震層の累積吸収エネルギーおよび累積変位の時刻歴(SZO024)



(a) すべり支承の吸収エネルギー時刻歴



(b) 粘性ダンパーの吸収エネルギー時刻歴



(c) 免震層の累積変位時刻歴

図 3.3.6-62 免震層の累積吸収エネルギーおよび累積変位の時刻歴(KGIN)

(4) まとめ

すべり支承(低摩擦)および粘性ダンパーの部材試験結果から、繰り返し依存性を評価した免震部材のモデル化を行った。

次にモデル化したすべり支承および粘性ダンパーを用いた 1 質点系剛体モデルを作成し、長周期地震動による地震応答解析を実施した。

以下に、本検討のまとめを部材試験解析および地震応答解析に分けて示す。

1) 部材試験解析

- ① すべり支承は、累積変位・温度および累積吸収エネルギーに依存性が見られた。モデル化では、解析とのなじみの良さから累積変位と吸収エネルギーに依存する式として評価し、試験結果と解析は良好な対応を示した。
- ② 繰り返しを考慮しない場合のすべり支承の部材試験解析の結果は、#3 試験体の 6 セット目以降に見られた摩擦係数の増加を考慮できない。そのため、特に 10 セット目の差異は大きい。また、多くの解析ケースにおいて加振後半に吸収エネルギー量が実験値を大きく上回る結果となったが、150 秒(累積距離で 20m 程度)付近までは、実験値を若干下回る程度の結果であった。
- ③ 粘性ダンパーは、累積吸収エネルギーに依存性が見られた。既往の精算法において、温度依存性についても粘性体温度の関数として評価していたが、本検討のモデル化では、試験結果から得られた減衰力の変動を、グロスで単位体積エネルギーの関数として評価した。すべり支承同様、解析は部材試験結果と良好に対応する結果を示した。
- ④ 粘性ダンパーの場合、繰り返し依存性を考慮しない場合、試験開始時の抵抗力を除き、解析値が実験値を大きく上回る結果となり、その差異は特に RDT30 試験体で大きい。

2) 地震応答解析

- ① 繰り返し依存性を考慮した評価モデルと繰り返し非考慮の既往評価モデルの差異は概ね 0~30% 程度の範囲で、繰り返し依存性を考慮した評価モデルの応答値が大きくなる傾向があった。ただし、AIC002 の応答変位(最大で 53%)のほか、入力小さい KGIN 波の 1 倍入力の累積変位量(-33%)など一部で傾向が異なった。
- ② 最も応答が小さかった KGIN 波では、両モデルの差異が比較的小さい結果となった。
- ③ 両モデルの吸収エネルギー量の差異は、概ね最大変位および加速度を示した時刻以降で生じているが、全体のエネルギー量から見ると変化が小さく、応答にあまり反映されなかったと考えられる。
- ④ 繰り返し依存性を考慮した評価モデルによる最大応答変位は、1 倍入力で 21.99cm(OSKH002)、1.25 倍入力で 31.20cm(OSKH002)、1.5 倍入力で 41.06cm(SZO024)であった。また、累積変位では、1 倍入力で 10.32m(SZO024)、1.25 倍入力で 14.53m(OSKH002)、1.5 倍入力で 19.44m(OSKH002)であった。
- ⑤ 地震応答解析で生じた最大累積変形距離および各免震部材の吸収エネルギーは、すべり支承および粘性ダンパーの部材試験で確認された累積量に対して、適用範囲内であった。

参考文献

- 3.3.6-1) 国土交通省：オイレス式弾性すべり支承、 建築材料認定書（認定番号MVBR-0377）別表、2008.6
- 3.3.6-2) 国土交通省： AT 式増幅機構付き減衰装 - 減衰こま（Rotary Damping Tube）RDT-AT-Short、建築材料認定書（認定番号MVBR-0220）別表、2004.4
- 3.3.6-3) 国土交通省：AT 式増幅機構付き減衰装 - 減衰こま（Rotary Damping Tube）RDT-AT-10cst、建築材料認定書（認定番号MVBR-0221）別表、2004.4
- 3.3.6-4) 国土交通省：AT 式増幅機構付き減衰装 - 減衰こま（Rotary Damping Tube）RDT-AT-30cst、建築材料認定書（認定番号MVBR-0222）別表、2004.4

3.4 まとめ

第Ⅲ部第1章の免震部材実験結果を基にした詳細なモデル化をプログラムに反映し、多数回繰り返し特性を考慮した長周期地震動に対する1質点モデルの応答解析を実施し、応答評価を行った。

詳細なモデル化を行えるよう各社が独自にプログラムを改良し、繰り返し依存性を考慮できる解析プログラムを整備した。

各免震部材の繰り返し依存性がどのように応答に影響するかを考察し、繰り返し依存性を考慮した場合としない場合の比較から抽出した、まとめと今後の課題は以下の通りである。

・鉛プラグ入り積層ゴム

鉛プラグ入り積層ゴムの繰り返し特性を考慮した解析手法として熱伝導解析と温度上昇による力学的特性変化を考慮した手法について、第Ⅱ部 1.3.2 の正弦波繰返加力実験のシミュレーション解析を実施することによりその妥当性を確認した。

繰り返しによる鉛プラグの温度上昇の影響を考慮しないケースと考慮したケースとを比較した場合に、地震動の入力倍率が1.0倍の場合に変位増大率は1.04～1.06倍である。AIC003_AV地震動の入力倍率1.5倍の場合に変位増大率が1.83倍となるケースがあるものの、積層ゴムのせん断ひずみは最大でも $\gamma=250\%$ （水平変位50cm）以内である。なお、OSKH02の入力倍率1.5倍、温度上昇を考慮した場合には応答変位及び鉛平均温度が解析の適用範囲を越えた。

今後の課題として、鉛プラグ入り積層ゴムについて免震部材及び免震建築物の応答に及ぼす温度上昇の影響を時刻歴応答解析によらずに簡易的に評価できる手法についての検討が望まれている。

・高減衰ゴム系積層ゴム

繰り返し特性を考慮した復元力モデルとして、積層ゴムの代表温度を評価指標として復元力特性値を変化させる解析モデルを作成した。

作成した復元力モデルは、縮小試験体の多数回繰り返し実験結果を良好に再現し、その妥当性を確認した。

本検討で用いた4波の入力地震動に対しては、1.5倍まで係数倍した入力においても、高減衰ゴム系積層ゴムの温度上昇は最大で6℃程度、繰り返しによる特性変化は1割以下に留まり、温度による特性変化を考慮した解析結果、および考慮しない解析結果ともほぼ同様の応答値を示した。従って、今回検討の地震動については、高減衰ゴム系積層ゴムの繰り返し特性は、建物応答にほとんど影響を与えないことを確認した。

ただし、今回検討に使用した高減衰ゴム系積層ゴムの解析モデルは、縮小試験体の実験結果を基に作成したものであり、実大サイズにおいてはゴム体積が大きくなるために放熱しにくい等、放熱特性が変わる可能性があり、特性変化が大きくなると考えられる。

・鋼材ダンパー

鋼材ダンパーのモデル化について検討を行い、履歴モデルを第Ⅲ部 2.3.3 の応答評価に用い

た設計モデル（バイリニア）によるものと、トリリニアモデルとしたものの比較を行った。その結果、概ね応答値の差は小さいものの、入力波および倍率によっては最大水平変形で2割程度差が生じることを確認した。

鋼材ダンパーの疲労損傷度は設計モデルによる評価時には入力倍率が1.0倍の場合にはSZO024の場合に0.26であるが、その他の地震動では0.2以下である。入力倍率が1.5倍の場合にSZO024で破断に対する疲労損傷度が0.43となる。

今後の課題として、鋼材ダンパーについては大地震時だけでなく、風外乱や中小地震時にも疲労損傷が蓄積することから大地震時の疲労損傷度のクライテリアをどの程度にするかが今後の課題である。

・鉛ダンパー

振幅および繰り返しによるエネルギー吸収量に応じてダンパーの耐力を変化させる解析モデルを用いると、第Ⅲ部 1.3.7 の免震部材実験結果の力学特性を適用範囲の中では精度よく表現できることを確認した。

長周期地震動に対する1質点モデルの応答解析では、鉛ダンパーの繰り返し特性考慮の場合、非考慮に対して最大変形が2割程度の増幅率であった。

OSKH02、AIC003 および SZO024 の入力倍率1.00で亀裂に対しての累積損傷度が100%を超えており、本評価法では亀裂発生の可能性が高いと判断される。OSKH02、AIC003 および SZO024 の入力倍率1.50において破断に対する累積損傷度は100%を下回った。SZO024 の1.5倍入力時において累積損傷度は最大の23%となり、破断に対して4倍程度の余裕がある。KGINを除き、繰り返し考慮モデル時では非考慮モデル時に対して疲労損傷度が増加した。増加率は入力波の種類、入力倍率により異なる。OSKH02 の入力倍率1.5倍では、考慮時の疲労損傷度は非考慮に対して1.5倍となった。

今後は、提案した解析モデルの適用範囲の拡大と、免震部材特性のばらつきを考慮した場合における応答特性を把握する必要があると考えられる。

・弾性すべり支承（高摩擦）

摩擦係数の累積吸収エネルギー依存性を考慮することにより、繰り返し荷重により摩擦係数が低下し、応答変位が大きくなることが確認された。

累積吸収エネルギー依存性を考慮した応答結果と、累積すべり変位依存性を考慮した応答結果の比較では、最大応答値はほぼ同値、応答時刻歴波形や免震層の荷重-変形関係図もほぼ同一形状となっていることが確認された。

依存性を無視した標準モデルと、依存性を考慮したモデルとでは、初期の摩擦係数が依存性考慮モデルの方が高く出ているため、パラメータの見直しが必要である。

入力地震動のレベルにも依るが、累積吸収エネルギーまたは累積すべり変位依存性を考慮すると、標準モデルに比べて最大応答変位が1割程度大きくなることを確認できるので、実際の設計においては、その分の余裕を見込んでおく必要があるのではないか。

・弾性すべり支承（低摩擦）

第Ⅲ部 1.3.5 の免震部材実験では累積変位・温度および累積吸収エネルギーに依存性が見ら

れた。モデル化では、解析とのなじみの良さから累積変位と吸収エネルギーに依存する式として評価し、試験結果と解析は良好な対応を示した。

応答解析で生じた最大累積変位および累積吸収エネルギーは、すべり支承の部材試験で確認された累積量に対して、適用範囲内であった。

- ・粘性ダンパー（減衰こま）

累積吸収エネルギーに依存性が見られた。既往の精算法において、温度依存性についても粘性体温度の関数として評価していたが、本検討のモデル化では、試験結果から得られた減衰力の変動を、グロスで単位体積エネルギーの関数として評価し、試験結果と解析は良好な対応を示した。

応答解析で生じた累積吸収エネルギーは、部材試験で確認された累積量に対して、適用範囲内であった。

以上より、長周期地震動に対する免震建築物の応答評価における今後の課題は、実大免震部材実験結果に対する評価を実施し、現状の評価手法の検証と見直しをすることである。また、免震装置および免震建築物応答に及ぼす繰り返し依存性の影響を簡易的に評価できる手法の検討が望まれる。