

## 第3章 角形 CFT 柱部材の設計用疲労曲線式の検討

### 3.1 既往研究の分析と疲労性能曲線式の検討（H30 年度実施）

#### 3.3.1 背景と目的

一定変位振幅繰返し载荷を受ける CFT 柱材に関して発表されている論文を元に実験データの分析を行い、技術知見の取得を目的とする。本節では、既往の実験資料を用い、実験データの分析および疲労曲線式の検討を行う。

### 3.1.2 既往の研究による実験データの分析

CFT 柱が多数回の繰返し荷重を受ける場合の耐力劣化性状に関する既往の研究の概要を示す。

文献 3.1-1)、3.1-2)は、平成 25 年度基準整備促進事業 S10「長周期地震動に対する CFT 造柱部材等の安全性検証方法に関する検討」の一環として行われた実験についての論文で、多数回繰返し変形に対する保有性能（耐力、変形能力、劣化性状等）を確認することを目的とし、CFT 柱を対象とした定変位振幅繰返し載荷実験が行われている。試験体の材料強度は、490N 級鋼材と Fc60 コンクリート、590N 級鋼材と Fc100 コンクリート、および 400N 級鋼材と Fc100 コンクリートの試験体である。

文献 3.1-3)、3.1-4)は、日本鋼構造協会「長周期地震動に対する柱部材の保有性能に関する調査研究小委員会」の活動の一環として行われた研究で、文献 3.1-4)では、小委員会で行った以外の研究成果もとりまとめて示している。

以下、概要と得られた成果を示す。

#### (1) 基準整備促進事業 S10「長周期地震動に対する CFT 造柱部材等の安全性検証方法に関する検討」

##### 1) 実験概要

多数回繰返し変形に対する保有性能（耐力、変形能力、劣化性状等）を確認することを目的とし、CFT 柱を対象とした定変位振幅繰返し載荷実験が行われている。490N 級鋼材と Fc60 コンクリート、および 590N 級鋼材と Fc100 コンクリートを用いた実験が行われている。表 3.1-1 に試験体一覧を示す。図 3.1-1 に試験体を示す。表 3.1-1 に示すように、試験体数は計 22 体 (No.1～No.6、No.1～No.16) で実験変数は次の通りである。

- 1) 軸力比：0.3、0.6（一定）、0～0.6、0.15～0.45（変動）
- 2) 変位振幅：0.6%、1%、1.5%、2%
- 3) 座屈長さ・断面せい比：8、12、15
- 4) 柱鋼管幅厚比：20、31
- 5) 材料強度：490N 級鋼材+Fc60、590N 級鋼材+Fc100、400N 級鋼材+Fc100
- 6) 載荷プログラム：一定変位、漸増変位
- 7) 載荷方向：0°、45°

軸力について、一定軸力は少なく 6 体である。変動軸力は、軸力比  $0.3 \pm 0.3$ 、 $0.3 \pm 0.15$  としている。変位振幅は、同一軸力比において 1～3 種類変化させている。座屈長さ・断面せい比( $L/D$ )は 8 を基本とし、12 は 2 体、15 は 1 体である。

図 3.1-1 に示すように試験体は上下を固定端として逆対称曲げが作用する荷重条件となっている。また、試験体は溶接箱形断面柱である。

##### 2) 実験結果概要

水平力-部材角関係、ピーク荷重の推移、軸縮みの推移などが示され、繰返し回数と塑性率ならびに累積塑性変形倍率との関係が示されている。なお、繰返し回数は、最大荷重  $Q_{max}$  の 90%、80% に荷重が低下した時の回数を  $N_{90\%}$ 、 $N_{80\%}$  として示している。ここで、塑性率は図 3.1-2 に示すように、CFT 指針に示されている骨格曲線のように弾性剛性  $K_e$  に対して  $\alpha_y=0.7$  を乗じた剛性を表す直線と、終局耐力を表す直線との交点を  $\delta_p$  とし、それに対する変位振幅  $\delta$  として定義している。また、

CFT 指針では  $M-R$  関係として骨格曲線が示されているが、図 3.1-2(a)は水平力—水平変位関係で示されているので、 $PA$ 効果が考慮されているかどうかは不明である。

図 3.1-3、図 3.1-4 に、塑性率 $\mu (= \delta/\delta_p)$ と  $N_{90\%}$ 、 $N_{80\%}$ の関係を示す。塑性率が小さいほど繰返し回数が大きくなる傾向はみられるが、試験体によってばらつきがあり、塑性率のみで繰返し回数を評価することは困難であると考えられる。

表 3.1-1 試験体一覧

No.	試験体名	柱部材断面	柱長さ	加力方向	軸力比	$c\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$s\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	振幅* R	R/R <sub>p</sub>	N <sub>90%</sub>	N <sub>80%</sub>		
1	MM-14M-C1	□-280 ×14	2240 L/D=8	0°	0.3	64.8	376	10	1.74	80	166		
2	MM-14M-C2					66.0		15	2.60	21	33		
3	MM-14M-V1				0-0.6 変動	67.7	10	2.34	6	17			
4	MM-14M-V2					66.7	15	2.59	5	10			
5	MM-14M-VL1	□-280 ×9			0-0.45 変動	68.4	396	10	1.75	8	30		
6	MM-14M-VL2					66.2		15	3.39	4	6		
1	HH-14M-C1	□-280 ×14	2240 L/D=8		0.3	104	495	10	1.35	421	441		
2	HH-14M-C2					109		15	2.02	94	119		
3	HH-14M-C3				109	20		2.70	17	21			
4	HH-14M-CH1				0.6	103		10	1.79	5	8		
5	HH-14M-V0				0-0.6 変動	111		6	1.07	15	107		
6	HH-14M-V1					111		10	1.78	5	20		
7	HH-14M-V2				110	15		2.60	5	10			
8	HH-14M-VL1				0-0.45 変動	105		10	1.46	132	240		
9	HH-14M-VL2					102		15	2.20	42	61		
10	HH-14MU-V1				3360	L/D=12		0-0.6 変動	105		10	1.21	5
11	HH-14MU-V2			105	15				1.81		5	13	
12	HH-14L-V1			4200 L/D=15		105		10	0.95	14	59		
13	HH-9M-V0	□-280 ×9	2240	0-0.6 変動	103	445	6	1.14	3	16			
14	HH-9M-V1				103	445	10	1.84	2	5			
15	HH-14M-V0D	□-280 ×14	L/D=8	45°	103	495	6	1.08	41	131			
16	LH-9M-V1	□-280 ×9		0°	105	311	10	2.26	2	2			

\*1/1000rad

$c\sigma_B$ : コンクリート圧縮強度、 $s\sigma_y$ : 鋼管降伏強度  
R/R<sub>p</sub>: 図 3.1-9 に示す塑性率 $\mu$ の定義により求めた値

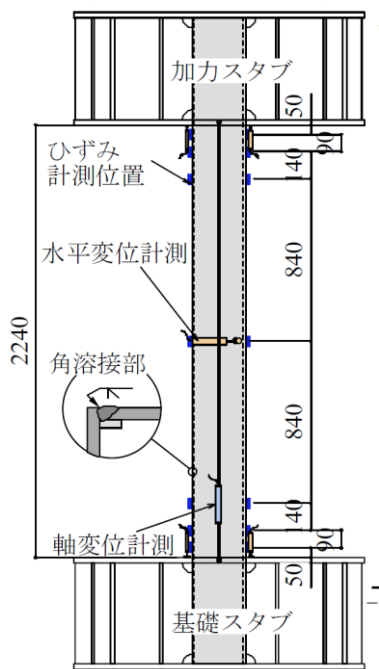


図 3.1-1 試験体 3.1-1)

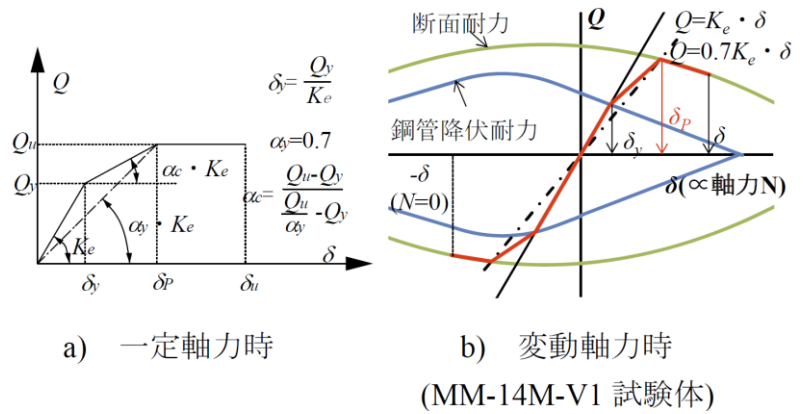
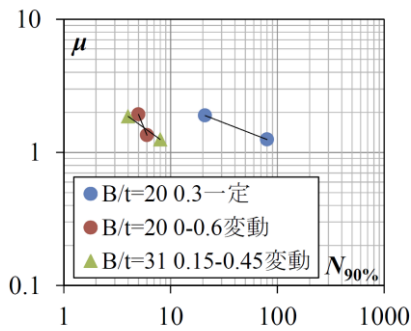
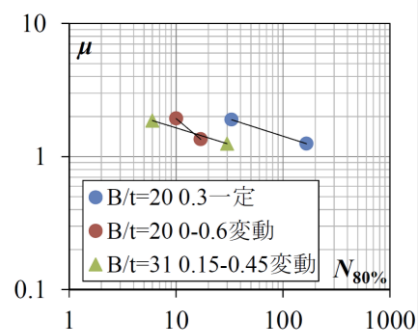


図 3.1-2 塑性率  $\delta/\delta_p$  の定義 3.1-1)

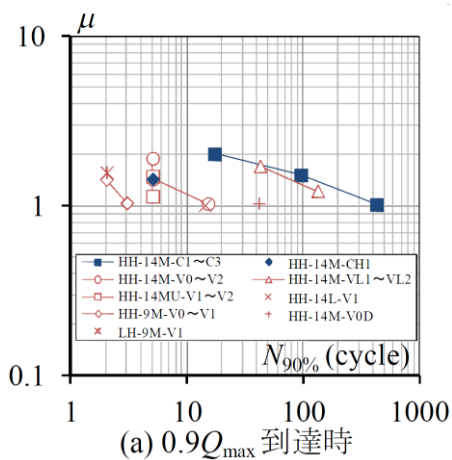


a)  $0.9Q_{max}$  時

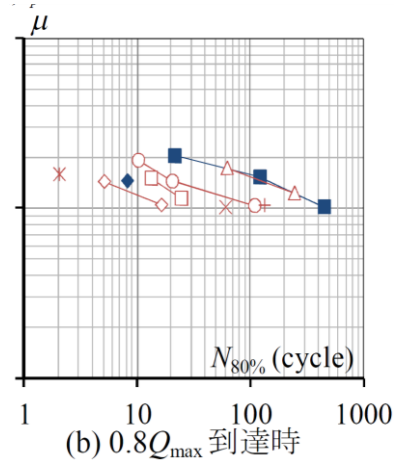


b)  $0.8Q_{max}$  時

図 3.1-3 塑性率と  $N_{90\%}$ 、 $N_{80\%}$  の関係 (490N+Fc60) 3.1-1)



(a)  $0.9Q_{max}$  到達時



(b)  $0.8Q_{max}$  到達時

図 3.1-4 塑性率と  $N_{90\%}$ 、 $N_{80\%}$  の関係(590N+Fc100) 3.1-2)

(2) 日本鋼構造協会「長周期地震動に対する柱部材の保有性能に関する調査研究小委員会」

1) 実験概要

多数回繰返し変形に対する保有性能（耐力、変形能力、劣化性状等）を確認することを目的とし、BCR295 と Fc60 コンクリートを用いた実験が行われている<sup>3.1-3)</sup>。表 3.1-2 に試験体一覧を示す。実験変数は次の通りである。

- 1) 座屈長さ・断面せい比( $l_k/D$ ) : 8、10、14、20
- 2) 振幅（部材角  $R$ ） : 0.5、0.75、1、1.25、1.5、2、3%
- 3) 軸力比( $n$ ) : 0.15、0.3、0.45、0.6

試験体数は 28 体で、試験体 No.4、10、20、23 は、変位振幅を途中で変更している。荷重条件は図 3.1-5 に示すように片持ち柱形式である。本実験は、

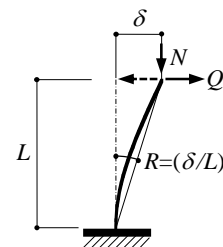


図 3.1-5 荷重条件

表 3.1-2 試験体一覧

試験体名	柱部材断面	$l_k/D$	$R$ (%)	$\mu$	$n$	$\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	$s\sigma_y$	限界繰返し回数（正側）				
								$N_{95\%}$	$N_{90\%}$	$N_{85\%}$	$N_{80\%}$	
1	LD8-n15R1	□-150 ×6	8	1	1.89	0.15	74.6	14	38	122	200+	
2	LD8-n30R1			1	1.84	0.3	75.7	12	28	54	117	
3	LD8-n45R1			1	1.96	0.45	75.5	6	13	22	34	
4	LD8-n60R05		8	0.5	1.17	0.6	74.0	100+	-	-	-	
	LD8-n60R075			0.75	1.76	0.6	74.0	9	15	16	17	
5	LD10-n15R1		□-150 ×6	10	1	1.57	0.15	55.6	14	43	124	200+
6	LD10-n15R15				1.5	2.29	0.15	56.7	3	6	12	24
7	LD10-n30R1				1	1.54	0.3	57.8	11	27	51	120
8	LD10-n30R15				1.5	2.27	0.3	56.7	4	6	11	18
9	LD10-n45R1				1	1.64	0.45	58.7	8	18	32	36
10	LD10-n60R05				0.5	0.979	0.6	59.6	100+	-	-	-
	LD10-n60R075			0.75	1.47	0.6	59.6	7	10	11	12	
11	LD10-n60R1	1		2.03	0.6	57.6	2	*	*	3		
12	LD14-n15R1	□-150 ×6		14	1	1.12	0.15	75.4	54	200+	-	-
13	LD14-n15R15				1.5	1.68	0.15	76.0	9	23	58	185
14	LD14-n30R1				1	1.07	0.3	75.7	65	200+	-	-
15	LD14-n30R15				1.5	1.63	0.3	70.9	8	15	26	44
16	LD14-n45R1		1		1.15	0.45	76.6	38	82	200+	-	
17	LD14-n45R125		1.25		1.45	0.45	77.5	10	19	31	36	
18	LD14-n60R075		0.75	1.02	0.6	75.6	31	100+	-	-		
19	LD14-n60R1		1	1.31	0.6	77.3	4	7	*	8		
20	LD20-n15R1		□-150 ×6	20	1	0.804	0.15	61.8	500+	-	-	-
	LD20-n15R125				1.25							
21	LD20-n15R2				2	1.61	0.15	57.9	4	11	27	65
22	LD20-n15R3				3	2.41	0.15	60.0	2	4	6	9
23	LD20-n30R1	1			0.783	0.3	62.6	400+	-	-	-	
	LD20-n30R125	1.25										
24	LD20-n30R2	2		1.55	0.3	61.4	5	10	13	33		
25	LD20-n30R3	3		2.38	0.3	58.5	*	2	4	5		
26	LD20-n45R1	1		0.831	0.45	61.7	100+	-	-	-		
27	LD20-n60R1	1		0.959	0.6	62.8	12	29	33	35		
28	LD20-n60R125	1.25		1.20	0.6	63.7	*	1	2	4		

100+、200+、400+、500+ : 荷重が低下する前にそれぞれ 100、200、400、500 サイクルで実験を終了した。

\* : 荷重の低下が大きく、その荷重を超えて次の荷重まで低下したことを示す。

凡例 : LD14 - n15R15  
 $\swarrow$   $l_k/D=14$        $\swarrow$  n15:軸力比 0.15、R15:振幅 1.5%

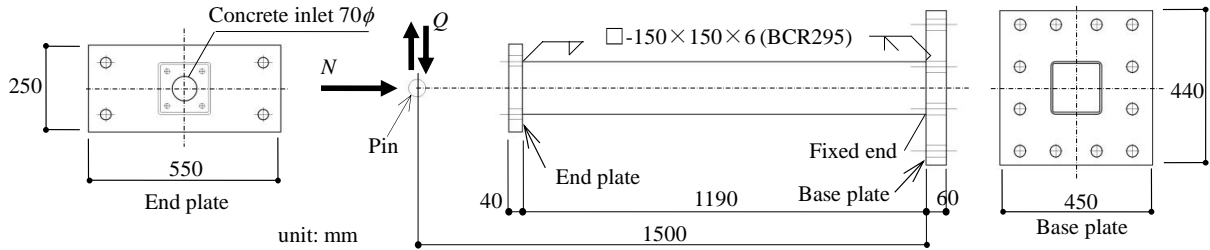


図 3.1-6 試験体<sup>3.1-3)</sup>

基準整備促進事業とは異なり、軸力比は一定である。これは、一定軸力下における保有性能を明らかにすることを目的として行ったためである。試験体 ( $l_k/D=20$ ) を図 3.1-6 に示す。

## 2) 実験結果概要

水平力-部材角関係、ピーク荷重の推移、軸縮みの推移などが示されている。耐力劣化状況に及ぼす実験の影響を明らかにし、重心軸ひずみ挙動と耐力劣化状況の関連性について示している。また、重心軸ひずみが急増するとき、耐力が急激に低下するときの実験変数の組合せを示している。CFT 柱について、次の内容が結論として得られている<sup>3.1-3)</sup>。

- 1) 軸力比  $n$  が大きいほど、座屈長さ・断面せい比が小さいほど、繰返しによる耐力低下が大きい。変位振幅  $R_0$  が大きくなると、繰返しによる耐力の低下が大きい。
- 2) 重心軸ひずみと荷重サイクルの関係は、重心軸ひずみがほぼ一定、あるいはわずかに増加するものと、急激に増大するものに分類できる。軸力比  $n$  が大きく、変位振幅  $R_0$  が大きくなるほど重心軸ひずみが急激に増大・発散する様相が観察される。部材角  $R=1\%$  の場合は、 $l_k/D=20$ 、14 については軸力比  $n=0.6$  で、 $l_k/D=10$ 、8 については  $n=0.45$  以上で重心軸ひずみが急激に増大する。
- 3) 変位反転点での水平力  $Q_{0i}$  は、重心軸ひずみ挙動と同じく、軸力比  $n$  が大きく、変位振幅  $R_0$  が大きくなるほど低下する。部材角  $R=1\%$  の場合は、 $l_k/D=20$ 、14 については軸力比  $n=0.6$  で、 $l_k/D=10$ 、8 については  $n=0.45$  以上で耐力が急激に低下する。
- 4) 本実験の範囲内で  $n=0.45$  までであれば  $R_0/R_{pc}$  (塑性率で図 3.1-9 参照, 図 3.1-2 とは異なる) の値が 1 未満の場合、100 サイクル繰返ししても、耐力は最大耐力の 95%程度を保持できていた。
- 5) 短期許容耐力以下で繰返しを行った  $l_k/D=20$ 、 $n=0.15$ 、 $R_0=1\%$  の試験体は 300 サイクルまでほとんど荷重が低下していなかった。また、柱脚の曲げモーメントが全塑性モーメントに達していない試験体は、本実験の繰返し回数の範囲内では、最大耐力  $Q_{max}$  の 80%は保持できていた。

### 3.1.3 疲労曲線の検討

#### (1) 既往の評価方法

これまでに提案されている既往の疲労曲線について示す。

##### 1) 文献 3.1-5) による提案

文献 3.1-5)では、実験資料にもとづき、重回帰分析を用いて最大荷重の 95%に低下した時のサイクル数を評価する式を提示している。

$$N_l = 1.04 \cdot 0.154^\mu \cdot 3.29^\eta \cdot 1.57^p \cdot 0.993^{c\sigma B} \cdot 1.04^\lambda \quad (3.1-1)$$

ここで、 $\mu$ は部材角比で、次式で定義される。

$$\mu = \frac{R}{R_l} \quad (3.1-2)$$

また、 $R_l$ は限界部材角で次式で定義される。

$$R_l = 0.217 \cdot 0.158^p \cdot 0.559^\eta \cdot 0.985^{c\sigma B} \quad (3.1-3)$$

式(3.1-1)中、 $\eta$ は一般化幅厚比、 $p$ は軸力比、 $\lambda$ は座屈長さ・断面せい比  $l_k/D$  である。

本評価方法の特徴としては、10 サイクルまでのみ評価できる手法である。図 3.1-7 に、実験値と計算値の比較を示す。10 サイクル以内であれば精度よく評価できていることがわかる。

##### 2) 基準整備促進事業による提案

実験結果に基づき、疲労性能評価ひずみ  $\varepsilon_h$  を用いて  $N_{80\%}$  の評価方法を提案している<sup>3.1-2)</sup>。疲労性能評価ひずみは、充填コンクリートに生じるひずみの最大値  $\varepsilon_{cmax}$  か鋼管に生じるひずみ振幅  $\Delta\varepsilon_s$  である。全軸力が鋼管のみに作用した時の軸方向ひずみ  $\varepsilon_0$  がコンクリート圧縮強度時のひずみ  $c\varepsilon_u$  以上であれば、 $\varepsilon_h = \varepsilon_{cmax}$  とし、 $\varepsilon_0$  が  $c\varepsilon_u$  より小さい場合は  $\varepsilon_h = \Delta\varepsilon_s$  とする。変動軸力の場合には、正側、負側の平均値が一定軸力として作用するものとして取り扱っている。

これらから得られた式は下式となる。

$$\log \varepsilon_h = -0.3 \log N_{80\%} - 1.7 \quad (3.1-4)$$

図 3.1-8 に、 $\varepsilon_h$  と  $N_{80\%}$  の関係を示す。2 体 (LH-9M-V1、HH-14M-CH1) 評価できない試験体が含まれているが、おおむね式(3.1-4)と実験値が対応していることがわかる。2 体の試験体については、式(3.1-4)の適用範囲から外れているものとして、今後適用範囲を検討するとされている。

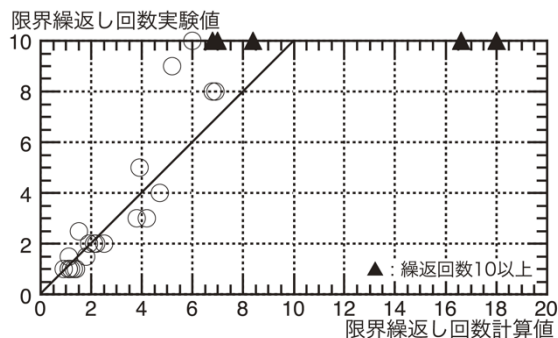


図 3.1-7 限界繰返し回数実験値と計算値との比較<sup>3.1-5)</sup>

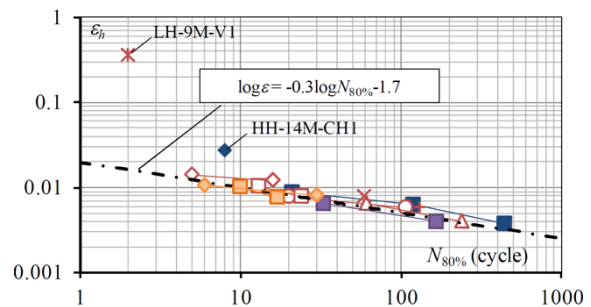


図 3.1-8 限界ひずみと  $N_{80\%}$  の関係<sup>3.1-2)</sup>

## (2) 評価法の検討

### 1) JSSCの実験結果を用いた場合の検討

図 3.1-10 に、実験<sup>3.1-3)</sup>から得られた正側の限界繰返し回数  $N_{95\%}$  と部材角、軸力比、座屈長さ・断面せい比、塑性率、コンクリート圧縮強度の関係をそれぞれ示す。図 3.1-10(a)、(d)、(e) 中の○印、◇印、□印、△印はそれぞれ軸力比  $n=0.15, 0.3, 0.45, 0.6$  の場合を示す。図 3.1-10(b)、(c) 中の○印、◇印、□印、△印、●印、◆印、■印はそれぞれ部材角  $R=0.5\%, 0.75\%, 1\%, 1.25\%, 1.5\%, 2\%, 3\%$  の場合を示す。なお、塑性率は、図 3.1-9 に示すように定義している。図 3.1-2 のように剛性の低下は考慮せず、塑性崩壊機構直線まで同じ値とし、水平剛性は、軸力およびせん断変形を考慮して算定している。

図 3.1-10(a)によれば、部材角  $R$  と  $N_{95\%}$  には負の相関がある。しかし、部材角 1% の試験体が多く、2 サイクルから 500 サイクルまでのばらつきがある。図 3.1-10(b)によると、軸力比と  $N_{95\%}$  には、部材角ほどに明確な関係は見られなかった。ただし部材角ごとに着目してみると、●印、◆印、■印で示される、比較的部材角が大きなもの、 $N_{95\%}$  が小さくなっている。また、最も試験体数の多い  $R=1\%$  (□印) に着目すると、軸力比が大きくなるにつれ  $N_{95\%}$  の値が小さくなる傾向がみられる。

図 3.1-10(c) の座屈長さ・断面せい比についてみると、軸力比と同様に、部材角ほどに  $N_{95\%}$  と明確な関係は見られない。しかし、 $R=1\%$  (□印) で軸力比が同じ場合については、 $l_k/D$  の値が大きくなるにつれ  $N_{95\%}$  の値もやや大きくなる (図 3.1-10(c) 中○印で囲んだ箇所)。図 3.1-10 (d) によれば、塑性率は、 $N_{95\%}$  と明確な負の相関がみられる。これらは  $N_{95\%}$  のときについてのみの結果で、 $N_{90\%}$ 、 $N_{85\%}$ 、 $N_{80\%}$  のときはしだいにばらつきが大きくなってはいたが、おおよその傾向は同じであった。

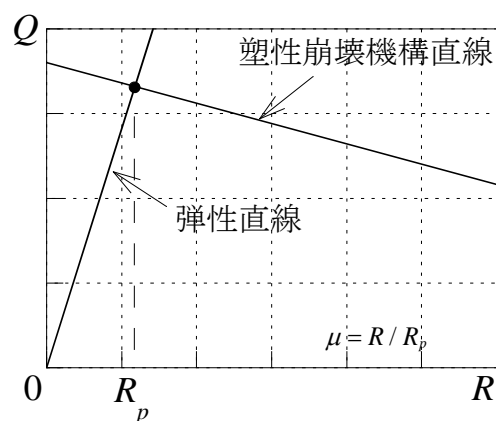


図 3.1-9 弾性限部材角  $R_p$  の定義



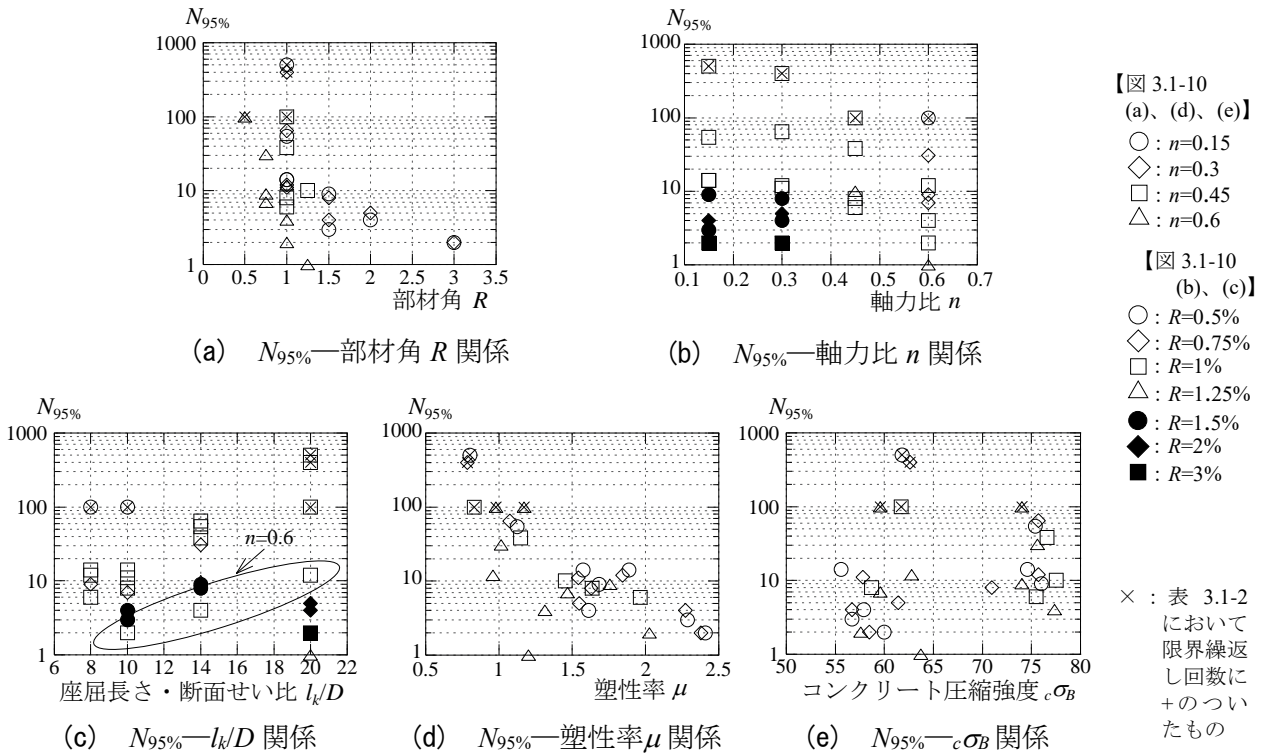


図 3.1-10  $N_{95\%}$ と実験変数の関係<sup>3.1-6)</sup>

したがって、これらの変数を因子として用いて重回帰分析を行い、限界繰返し回数を式で表すこととする。図 3.1-10(e) のコンクリート圧縮強度については、実験では  $55.6 \sim 77.5 \text{ N/mm}^2$  と変数としての範囲は狭いが、因子として含めることとした。

文献 3.1-5) のように、塑性率  $\mu$ 、軸力比  $n$ 、座屈長さ・断面せい比  $l_k/D$ 、コンクリート圧縮強度  $c\sigma_B$  を因子とし、重回帰分析を用いて、 $N_{95\%}$ 、 $N_{90\%}$ 、 $N_{85\%}$ 、 $N_{80\%}$  と各実験変数との関係を求めた<sup>3.1-6)</sup>。文献 3.1-5) と異なるのは、部材角比を用いず塑性率を用いている点にある。また、本実験は、幅厚比を実験変数としていなかったため、幅厚比の影響は考慮できていない。

$$N_{95\%} = 251 \cdot 0.152^\mu \cdot 0.0669^n \cdot 0.908^{l_k/D} \cdot 1.03^{c\sigma_B} \quad (3.1-5)$$

$$N_{90\%} = 1790 \cdot 0.129^\mu \cdot 0.0228^n \cdot 0.886^{l_k/D} \cdot 1.02^{c\sigma_B} \quad (3.1-6)$$

$$N_{85\%} = 9172 \cdot 0.121^\mu \cdot 0.00473^n \cdot 0.876^{l_k/D} \cdot 1.02^{c\sigma_B} \quad (3.1-7)$$

$$N_{80\%} = 54568 \cdot 0.0837^\mu \cdot 0.000754^n \cdot 0.874^{l_k/D} \cdot 1.02^{c\sigma_B} \quad (3.1-8)$$

式(3.1-5)～(3.1-8)を、次のように係数を用いて表現する。

$$N_{\%} = A \cdot B^\mu \cdot C^n \cdot D^{l_k/D} \cdot E^{c\sigma_B} \quad (3.1-9)$$

式(3.1-9)の係数  $A$  を除くそれぞれの項と各変数 (指数) の関係を図 3.1-11 に示す。図によれば、塑性率、軸力比、座屈長さ・断面せい比が大きくなるにつれ係数は小さくなっている。塑性率 (部材角)、軸力比については実験で得られた知見と同様の傾向を示している。座屈長さ・断面せい比については、同じ軸力比、部材角であれば、座屈長さ・断面せい比が大きいほうが弾性限も大きく、繰返し回数は大きくなるが、本式では塑性率を用いているため、座屈長さ・断面せい比が大きくなるにつれ係数が小さくなる結果となっていた。

図 3.1-12 に、実験での限界繰返し回数と、式(3.1-5)～(3.1-8) による限界繰返し回数の比較を示す。図 3.1-12(a)、(b)、(c)、(d)はそれぞれ  $N_{95\%}$ 、 $N_{90\%}$ 、 $N_{85\%}$ 、 $N_{80\%}$ を示す。図 3.1-12 中の△印、◇印、□印、×印はそれぞれ座屈長さ・断面せい比  $l_k/D$  が 8、10、14、20 の場合を示す。

図 3.1-12 によれば、実験値と計算値の対応は比較的良好であるといえる。ただし、重回帰分析の際に含めなかった、荷重が低下する前に载荷を終了した試験体(表 3.1-2 中限界繰返し回数で「+」印のついたもの) に関しては、実験値が計算値を上回る傾向にあった (図 3.1-12 中○印で囲んだ箇所)。また、計算値のほうが大きく、危険側となっているものもある。

## 2) 基準整備促進事業<sup>3.1-1)</sup>、<sup>3.1-2)</sup> との比較

式(3.1-6)、(3.1-8)を用いて、基準整備促進事業の試験体の繰返し回数を評価してみる。ここで、変動軸力の場合はより不利だと考えられる高軸力側の軸力比を用いて算定する。塑性率の算定も同様である。文献 3.1-1)、3.1-2)とは塑性率の定義が異なるので、文献内に記載された内容から塑性率を再計算した。その結果を表 3.1-1 に  $R/R_p$  として示している。図 3.1-13 に  $N_{90\%}$ 、 $N_{80\%}$ と塑性率の関係を示す。負の相関は見られるが、図 3.1-10(d) よりもばらつきが大きいことが観察される。図中●は一定軸力の試験体を示しているが、 $N_{80\%}$ の一体を除き、負の相関がみられる。また、参

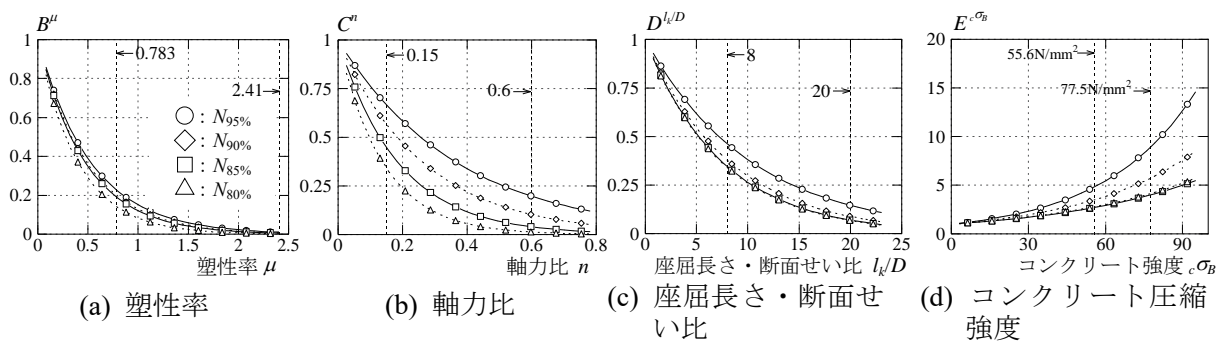


図 3.1-11 繰返し回数評価式の係数-パラメータ関係<sup>3.1-6)</sup>

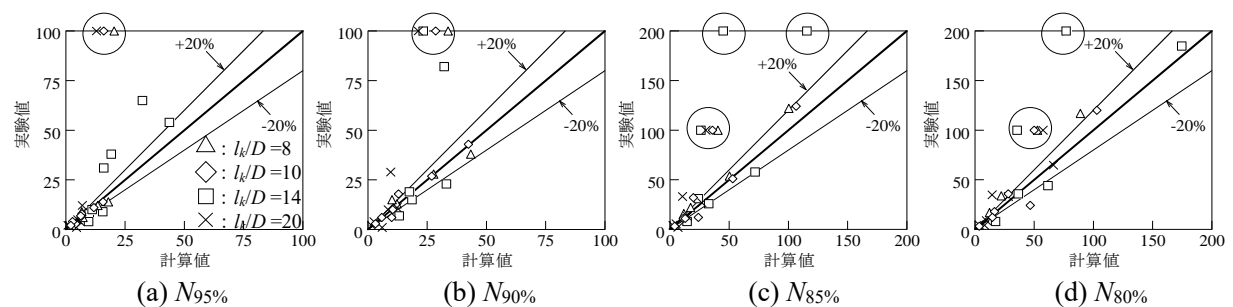


図 3.1-12 実験値と計算値の比較<sup>3.1-6)</sup>

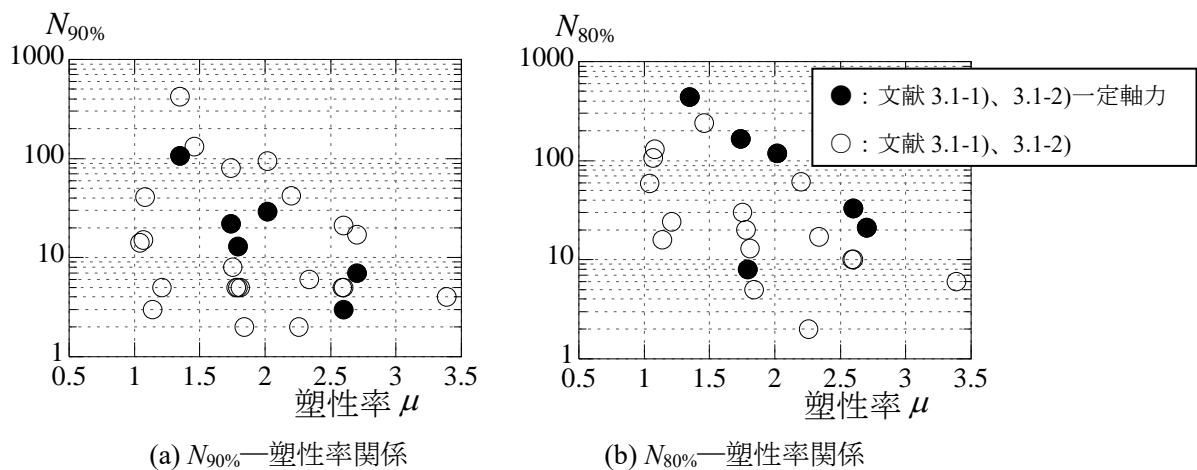


図 3.1-13 限界繰返し回数と塑性率の関係 基準整備促進事業

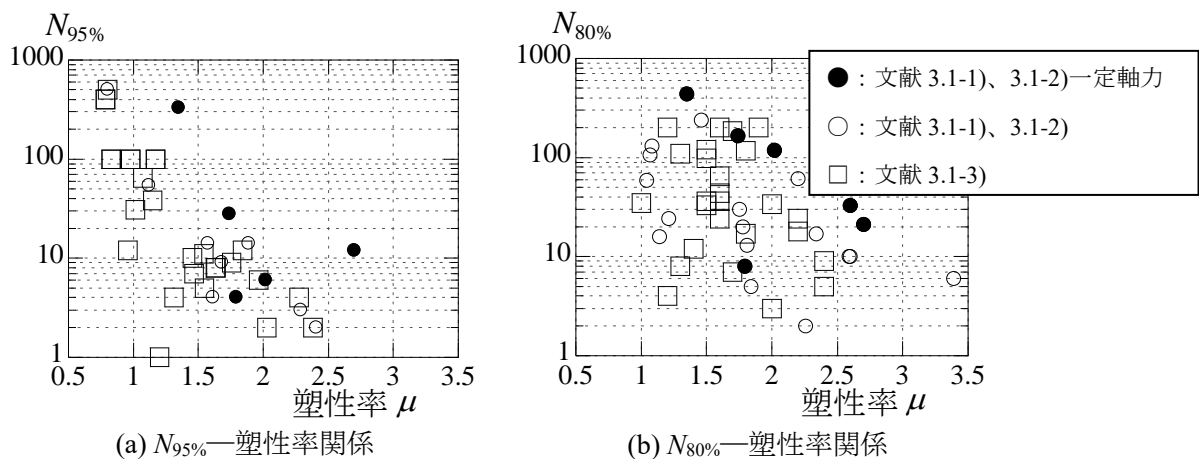


図 3.1-14 限界繰返し回数と塑性率の関係 文献 3.1-1～3.1-3)の比較

考として図 3.1-10(d)に一定軸力の試験体を追加したものを図 3.1-14(a)に示す。図によれば、文献 3.1-3)で得られた結果と同じかやや高い値を示している。

また、 $N_{80\%}$ について、表 3.1-1、表 3.1-2 のすべての試験体をあわせて示したものを図 3.1-14(b)に示している。 $N_{95\%}$ と比較すると  $N_{80\%}$ のほうがばらつきが大きくなっていることがわかる。また、文献 3.1-1)、3.1-2)の結果は、1つの試験体を除き文献 3.1-3)のほぼ上限となっていることがわかる。なお、 $N_{95\%}$ が明らかな一定軸力の試験体は 5 体で、 $N_{80\%}$ は 6 体であった。

図 3.1-15(a)、(b)に、実験値と計算値の比較を示す。限界繰返し回数は 100 サイクルまでとしている。一定軸力の試験体は■印、変動軸力の試験体は□印、幅厚比が 31 の試験体は×印を追加して示している（これ以外はすべて幅厚比 20 である）。図 3.1-15(a)の  $N_{90\%}$ の場合、実験値と計算値の対応は良いとは言えない。また、かなり危険側の評価となってしまう試験体もある。また、 $N_{80\%}$ も同様で、実験値と計算値の対応は良いとは言えない。

図 3.1-15(c)、(d)に、1000 サイクルまで対数軸で示した実験値と計算値の比較を示す。まず、 $N_{90\%}$ に着目してみる。危険側の試験体は、軸力比 0.6 のものである。したがって、一定軸力比 0.3 であれば安全側に評価できている。また、×印を追加した幅厚比が 31 の試験体はほぼ危険側の評価をしている。 $N_{80\%}$ については、一定軸力試験体についてみると、危険側となる試験体が  $N_{90\%}$ よりも増えている。危険側となっている試験体は、 $N_{90\%}$ と同じく軸力比 0.6 の試験体であった。また、幅厚比の大きな試験体は、ほぼすべて危険側の評価となっていた。

前述したように、式(3.1-5)~(3.1-8)は幅厚比が反映されていない。また、試験体数として  $l_k/D=8$  の占める割合が少なく、座屈長さ・断面せい比の影響が十分に反映されていない可能性もある。さらには、コンクリート圧縮強度も、式(3.1-5)~(3.1-8)の範囲は  $55.6\sim 77.5\text{N/mm}^2$  と狭いので、コンクリート強度の影響も十分に反映されていない可能性もある。

また、変動軸力を受ける場合は一定軸力の場合とは異なり、軸力比、塑性率、座屈長さ・断面せい比だけでは評価が難しいことが予想される。

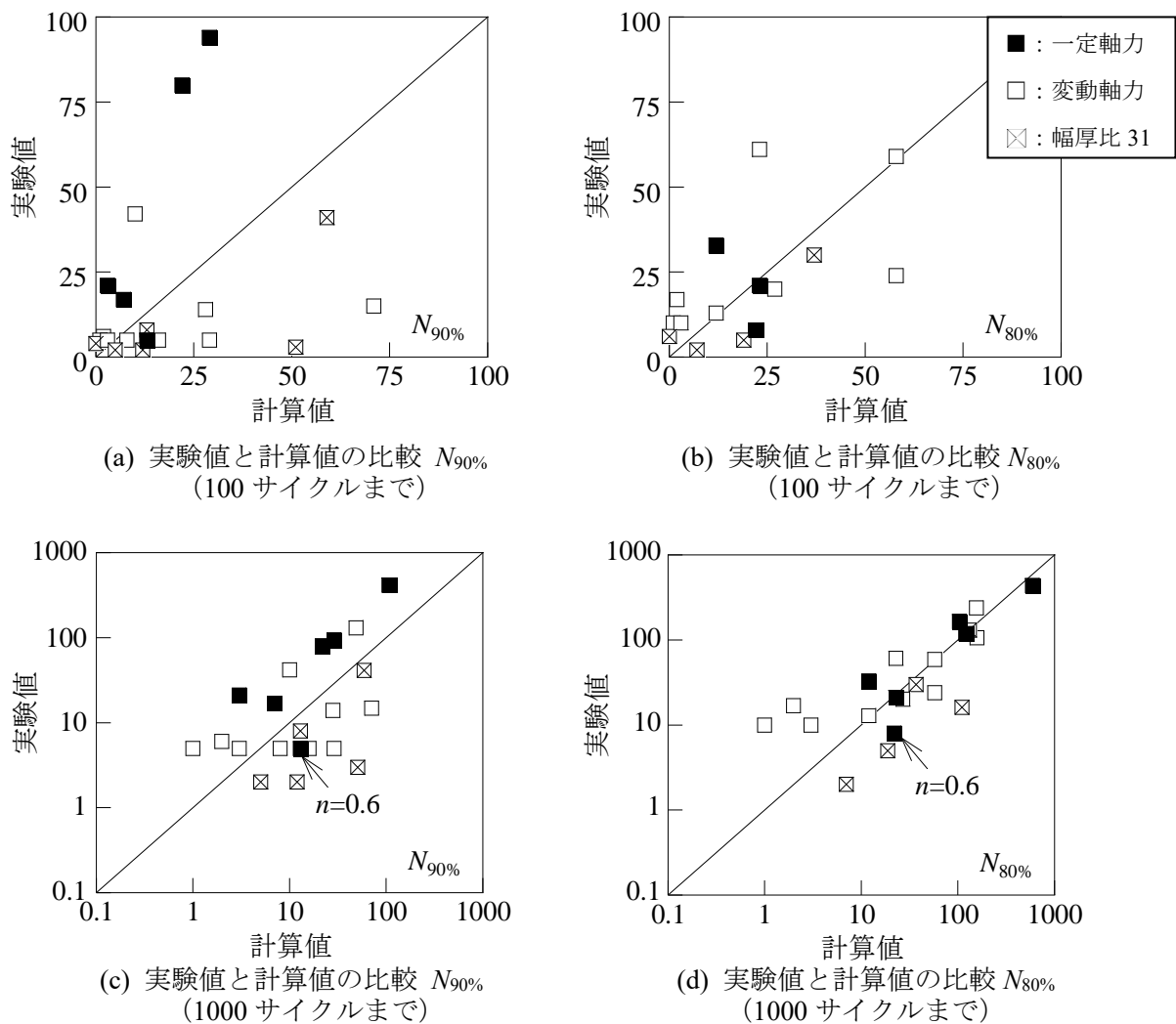


図 3.1-15 実験値と計算値の比較

### 3.1.4 既往研究の分析と疲労性能曲線式の検討のまとめと今後の課題

一定変位振幅繰返し载荷を受ける CFT 柱材に関して発表されている論文を元に実験データの概要を述べ、文献 3.1-3)に示された実験結果を用い、重回帰分析により、軸力比、塑性率、座屈長さ・断面せい比を変数として最大耐力の 95%、90%、85%、80%に低下した時の限界繰返し回数  $N_{95\%}$ 、 $N_{90\%}$ 、 $N_{85\%}$ 、 $N_{80\%}$ の回帰式を導いた。また、文献 3.1-1)、3.1-2)で実施された実験結果と比較を行い、実験値と計算値の比較を行った。

#### (1) まとめ

##### 【既往実験の概要】

- 1) 一定変位振幅繰返し载荷を受ける CFT 柱材について系統的な実験が行われているものとして、平成 25 年度基準整備促進事業 S10「長周期地震動に対する CFT 造柱部材等の安全性検証方法に関する検討」と日本鋼構造協会「長周期地震動に対する柱部材の保有性能に関する調査研究小委員会」によって行われたものがある。
- 2) 基準整備促進事業では、軸力比、変位振幅、座屈長さ・断面せい比、柱鋼管幅厚比、材料強度の組合せ、载荷プログラム、载荷方向を実験変数として一定変位振幅における曲げせん断実験が計 22 体行われている。変動軸力試験体のほうが多く、座屈長さ・断面せい比は 8 を基本としている。ほとんどが一定変位振幅である。幅厚比は、20 と 31 の 2 種類である。
- 3) 日本鋼構造協会では、軸力比、変位振幅、座屈長さ・断面せい比を実験変数として曲げせん断実験が計 28 体行われている。すべて一定軸力下における実験である。ほとんどが一定変位振幅繰返し载荷である。幅厚比は 25 である。

##### 【疲労曲線の検討】

- 4) 日本鋼構造協会で実施された実験資料を用い、限界繰返し回数評価式を重回帰分析を用いて導いた。
- 5) 基準整備促進事業で得られた限界繰返し回数と重回帰式による限界繰返し回数を比較したところ、一定軸力の場合は、軸力比 0.6 を除けばおおむね安全側の評価ができること、幅厚比が 31 の場合は危険側の評価をすること、変動軸力の場合は、対応があまりよくないことがわかった。

#### (2) 今後の課題

今後に残された課題を以下に示す。

- 1) 一定軸力下での実験資料を用いて導いた限界繰返し回数評価式は、変動軸力の影響を十分に反映できていない。また、この評価式は幅厚比の影響が考慮できていない。これらの影響を考慮すべく、幅厚比の異なる実験資料の収集と、変動軸力を考慮した繰返し回数評価法の検討が必要である。変動軸力に関しては、低減係数を設けるなどの対応も考えられる。
- 2) 一定変位振幅下における実験資料を用いているため、建物モデルでの応答解析による部材の多数回繰返し特性を評価する際には、Miner 則等を用いる必要がある。したがって、変動振幅下における実験資料の収集が必要であると考えられる。

### 【参考文献】

- 3.1-1) 成原弘之他：長周期地震動に対する鉄骨造超高層建物の安全性検証方法の検討 その 27～28 CFT 柱部材の多数回繰返し載荷実験、日本建築学会大会学術講演梗概集・構造Ⅲ、pp.1251～1254、2014.9
- 3.1-2) 宇佐美徹、成原弘之他：長周期地震動に対する鉄骨造超高層建物の安全性検証方法の検討 その 29～31 CFT 柱部材の多数回繰返し載荷実験、日本建築学会大会学術講演梗概集・構造Ⅲ、pp.1255～1260、2014.9
- 3.1-3) 城戸將江、津田恵吾、福元敏之、一戸康生、森田耕次：一定変位振幅繰返し載荷を受ける角形 CFT 柱の構造性能、日本建築学会構造系論文集、第 84 巻、第 759 号、pp.725-735、2019.5
- 3.1-4) 城戸將江、福元敏之、津田恵吾、一戸康生、森田耕次：長周期地震動に対する CFT 柱部材の保有性能に関する研究、鋼構造論文集、第 24 巻 第 94 号、pp.49-64、2017.6
- 3.1-5) 福元敏之：コンクリート充填角形鋼管長柱の疲労特性、日本建築学会構造系論文集、第 83 巻、第 694 号、pp.2229-2235、2013.12
- 3.1-6) 宇津宮遥奈、城戸將江、津田恵吾：角形 CFT 柱の限界繰返し回数におよぼす影響因子に関する研究、日本建築学会九州支部研究報告、pp.405-408、2019.3

## 3.2 角形 CFT 柱部材の多数回繰返し载荷実験 (R1 年度実施)

### 3.2.1 背景・目的

角形 CFT 柱部材に対する設計用疲労曲線を提案することを目的として、既往実験結果<sup>3.2-1)</sup>を考慮した実験計画を立案し、角形 CFT 柱部材の多数回繰返し実験を実施する。

令和 1 年度の実験では、一定軸力下における角形 CFT 柱部材が変動変位振幅繰返し载荷を受ける場合の構造特性を把握し、既往の一定変位振幅繰返し载荷実験結果と合わせて部材角一限界繰返し回数の定式化を行う。次に、得られた式を用い、ある部材角時における限界繰返し回数を計算し、変動変位振幅繰返し载荷を受ける場合の限界繰返し回数を予測し、その予測した値と、実験により得られた限界繰返し回数を比較し、Miner 則が成立するかどうかの検討を行う。

### 3.2.2 実験計画

#### (1) 試験体

Miner 則の成立性の検討が行えるよう、既往研究<sup>3.2-1)</sup>で行われている一定変位振幅繰返し载荷実験と同様の試験体形状とし、実験変数もこれまで十分に行われているもの（座屈長さ・断面せい比、軸力比）を選択し実験計画を行った。柱断面は、角形 CFT 柱を対象とする。

令和 1 年度の実験では、角形 CFT 柱部材が変動変位振幅繰返し载荷を受ける場合の構造特性を把握し、Miner 則を耐力劣化評価に適用できるかの検討を行うことを目的として変位振幅を変動させた実験を実施する。

試験体柱は、 $\square$ -150×150×6 (BCR95; 1/5~1/8 縮尺程度) で、試験体数は 11 体とする。図 3.2-1 に試験体形状を示す。鋼管の自由端側（柱頭）には厚さ 40mm のエンドプレート（柱頭）を隅肉溶接で、固定端側（柱脚）には厚さ 60mm のベースプレート（柱脚）を完全溶け込み溶接により取り付けられた。

コンクリートの充填は、図 3.2-1 に示したエンドプレートにあけた孔（Concrete inlet 70φ）より行なった。

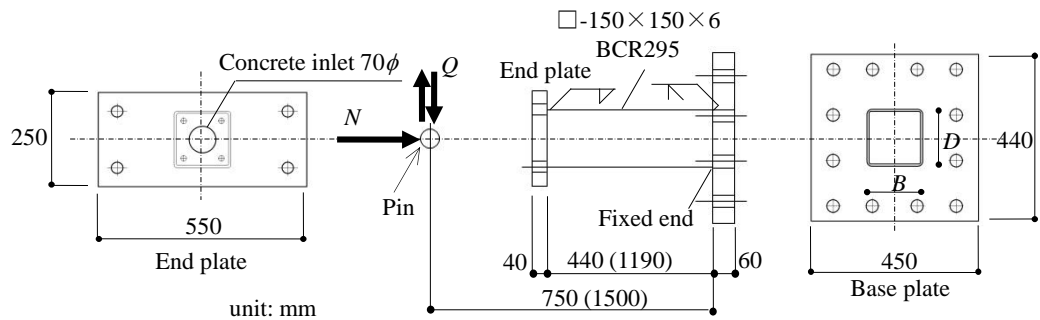


図 3.2-1 試験体

( ) 内は  $l_k/D=20$  試験体



## (2) 実験パラメータ

実験パラメータは、既往実験<sup>3.2-1)</sup>でよく用いられているものとし、かつ、構造性能に大きく影響を及ぼすと考えられる軸力比、変位振幅（部材角）、細長さの影響を把握するために座屈長さ・断面せい比も選択した。軸力比は、既往の研究では0.15、0.3、0.45、0.6の4水準について行われているが、これらのうち、0.3、0.6を選択した。これは、一定軸力として角形CFT柱に作用すると想定される $n=0.15$ 、0.3について、 $n=0.15$ は既往の研究で比較的安定した構造性能を示すことが明らかとなっていたため除外し、耐力劣化が比較的大きくなる $n=0.3$ を選択した。また、変動軸力として作用すると想定される $n=0.45$ 、0.6についてはより大きな値における構造性能を把握しておく必要があるとの認識から $n=0.6$ を選択した。なお、変動振幅繰返し载荷の変位の決定方法は、後述する。

実験パラメータを以下に示す。

- 軸力：2水準（軸力比 $n=0.3$ 、0.6）
- 座屈長さ・断面せい比：2水準（ $l_k/D=10$ 、20）
- 変位振幅：一定変位振幅、変動変位振幅

表 3.2-1 に試験体一覧を示す。表 3.2-2 に試験体鋼管断面の実測寸法を示す。

表 3.2-1 試験体一覧

No.	試験体名	$l_k/D$	軸力比 $n$	部材角 $R$ (%)	振幅	S or CFT	コンクリート 圧縮強度 $c\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )	軸力 $N$ (kN)		
1	S-LD10n30Rv1	10	0.3	0.6、0.8、1、1.2	変動	S	-	377		
2	LD10n30Rv1			0.6、0.8、1、1.2				722		
3	LD10n30Rv2			1、1.1、1.2、1.25				746		
4	LD10n30R12			1.2	一定			746		
5	LD10n60Rv1		0.6	変動	0.5、0.6、0.7、0.8			CFT	65.7	1505
6	LD10n60Rv2				0.6、0.7、0.8、0.85				64.6	1492
7	LD10n60R06			0.6	一定				63.1	1475
8	LD10n60R08			0.75					63.5	1480
9	LD20n30R15	20	0.3	1.5	一定	CFT	69.01		771	
10	LD20n30Rv1			1.25、1.5、 1.75、2	変動		72.27		790	
11	LD20n30Rv2			1.1、1.4、1.7、 2			70.39		779	

表 3.2-2 鋼管の実測寸法<sup>3.2-1)</sup>

断面せい・幅 $D$ (mm)	板厚 $t$ (mm)	幅厚比 $D/t$	断面積 $A$ (mm <sup>2</sup> )	R 部外径 $R_o$ (mm)	R 部内径 $R_i$ (mm)
150.1	5.97	25.1	3330	13.95	7.98

### (3) 使用材料の機械的性質

材料特性を調べるため、鋼材の引張試験、コンクリートシリンダーの圧縮試験を行った。

引張試験は鋼管平板部分より溶接シーム部のない板要素より切り出した JIS 1A 号試験片 3 片を用いて行った。引張試験の結果を表 3.2-3 に、引張試験による応力 $\sigma$ -ひずみ $\varepsilon$  関係を図 3.2-2 に示す。図 3.2-2 に示すように 2 本は降伏棚を有していたが 1 本は降伏棚が明瞭に表れなかったため、表 3.2-3 は降伏棚を有している 2 本の平均値を示している。なお、この鋼管は文献 3.2-1) の試験体と同一ロットのものを用いているため、その値を示している。

コンクリートの調合表を表 3.2-4 に示す。呼び強度は  $54\text{N/mm}^2$  (調合強度は  $64.8\text{N/mm}^2$ ) とした。シリンダー圧縮試験による圧縮強度  $c\sigma_B$  を表 3.2-1 に、代表的な応力 $\sigma$ -ひずみ $\varepsilon$  関係を図 3.2-3 に示す。

表 3.2-3 鋼材の機械的性質 <sup>3.2-1)</sup>

降伏応力度 $\sigma_y(\text{N/mm}^2)$	引張強さ $\sigma_u(\text{N/mm}^2)$	降伏比 $\sigma_y/\sigma_u$	$\varepsilon_{st}$ (%)	破断伸び $EL(\%)$	降伏ひずみ $\varepsilon_y(\%)$	ヤング係数 $E(\text{N/mm}^2)$
378	457	0.84	1.26	20.6	0.18	$2.10 \times 10^5$

\*  $\varepsilon_{st}$  はひずみ硬化開始時ひずみである。

表 3.2-4 コンクリート調合表

呼び強度 ( $\text{N/mm}^2$ )	水セメント比 (%)	セメント ( $\text{kg/m}^3$ )	水 ( $\text{kg/m}^3$ )	細骨材 ( $\text{kg/m}^3$ )	粗骨材 ( $\text{kg/m}^3$ )	混和剤 ( $\text{kg/m}^3$ )	スランプ フロー (cm)
54	35.8	475	170	850	886	4.39	50

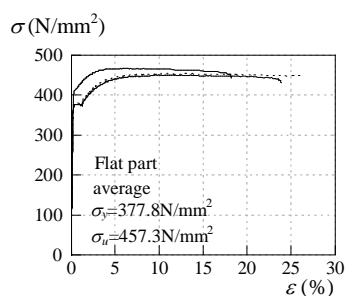


図 3.2-2 鋼管の応力-ひずみ関係 <sup>3.2-1)</sup>

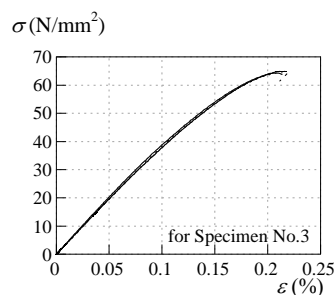
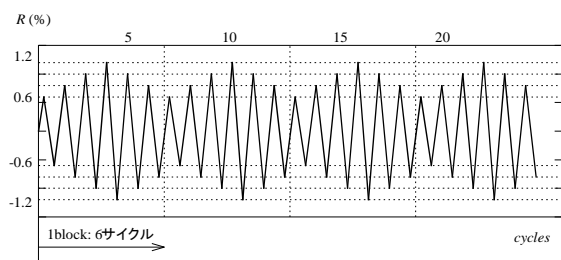


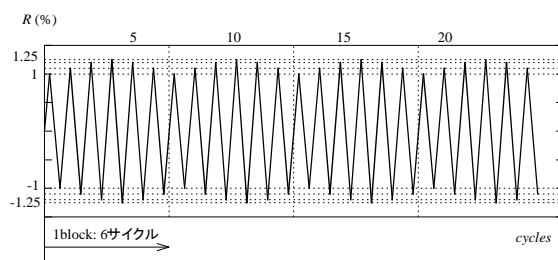
図 3.2-3 コンクリートの  
応力-ひずみ関係

#### (4) 载荷プログラム

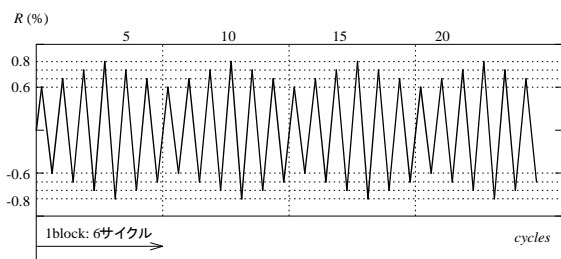
各試験体の载荷プログラムを図 3.2-4 に示す。载荷プログラムは、既往の研究<sup>3.2-2)</sup>を参考としつつ、限界繰返し回数（最大耐力の 95%、90%、85%、80%に耐力が低下した時のサイクル数  $N_{95\%}$ 、 $N_{90\%}$ 、 $N_{85\%}$ 、 $N_{80\%}$ ）が記録できるように設定した。繰返し回数が多くなりすぎると実験が長期にわたるため、振幅の値は 4 レベルとし、同一振幅での繰返しは行わず 1 回とし、図 3.2-4 に示すように、最小振幅から開始し、順に振幅を増加させ、最大振幅後は順に振幅を減少させることとした。したがって、6 サイクルがひとまとまりとなる（これを 1block とよぶ）。



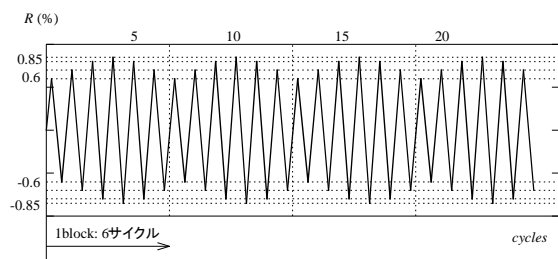
(a) LD10n30Rv1(No.2)



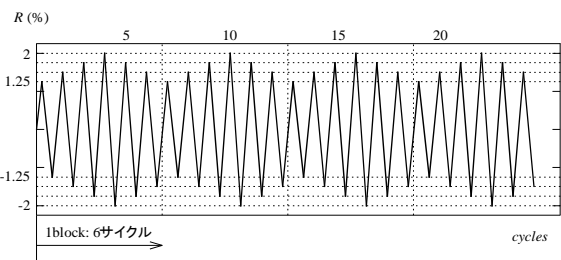
(b) LD10n30Rv2(No.3)



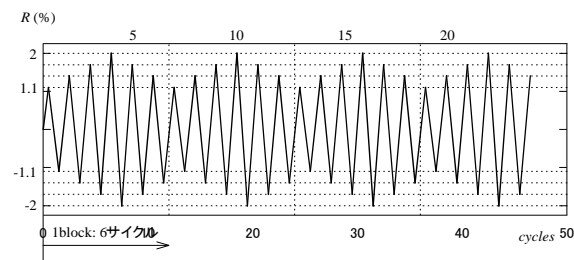
(c) LD10n60Rv1(No.5)



(d) LD10n60Rv2(No.6)



(e) LD20n30Rv1(No.10)



(f) LD20n30Rv2(No.11)

図 3.2-4 载荷プログラム(変動変位振幅)

### (5) 実験方法

加力装置を図 3.2-5 に示す。荷重装置の都合により、柱材軸が水平位置となるように試験体を設置した。図に示すように水平方向に軸力荷重の 1500kN の油圧ジャッキを、鉛直方向に水平力荷重の 500kN の油圧ジャッキを取り付け、どちらもロードセルにて荷重の測定を行った。また、構面外変位の発生を防止するため、構面外変位拘束治具を設けている。

変位の測定は図 3.2-6 に示すように、柱頭ピン位置で水平変位を測定する水平変位計 2 台と試験体の伸びあるいは縮みを測定する軸方向変位計 2 台で行った。変位の制御は、水平変位 1 および 2 の平均値で行った。また、鋼管板要素の幅方向の中央にひずみゲージを貼付し、ひずみを測定した。図 3.2-7 に柱脚部分のひずみゲージの貼り付け位置を示す。

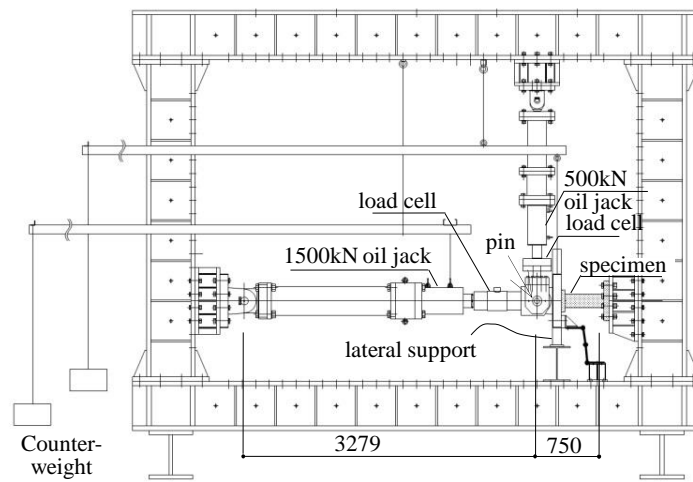


図 3.2-5 荷重装置

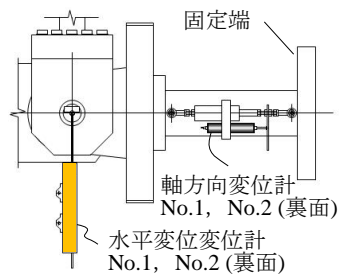


図 3.2-6 変位の測定

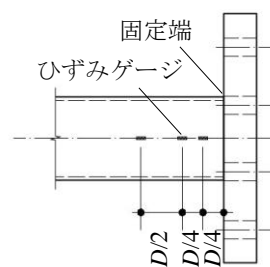


図 3.2-7 ひずみゲージ  
貼り付け位置

### 3.2.3 実験結果

#### (1) 実験経過および破壊性状

試験体の実験結果一覧を表 3.2-5 に、実験終了後の写真を写真 3.2-1～3.2-11 に示す。以下に各試験体の実験経過を示す。

No.1 S-LD10n30Rv1 試験体 ( $l_k/D=10$ 、 $n=0.3$ 、 $R=0.6$ 、 $0.8$ 、 $1$ 、 $1.2\%$ 、中空) では、1 サイクル目で鋼管が降伏し（鋼管に貼り付けたひずみゲージの値が引張試験により得られた降伏ひずみに到達し）、10 サイクル正側、10 サイクル負側（いずれも 2 ブロック目）で最大荷重に到達した。3 サイクル目で、鋼管フランジに局部座屈が発生し、35 サイクル目で、鋼管ウェブに局部座屈が発生した。荷重は徐々に劣化し、局部座屈変形も大きくなり、最大振幅  $R=1.2\%$  では 17 ブロック（100 サイクル）で最大荷重の 80% を下回った。

No.2 LD10n30Rv1 試験体 ( $l_k/D=10$ 、 $n=0.3$ 、 $R=0.6$ 、 $0.8$ 、 $1$ 、 $1.2\%$ 、CFT) では、1 サイクル負側で鋼管が降伏し、10 サイクル正側（2 ブロック目）、4 サイクル負側（1 ブロック目）で最大荷重に到達した。5 サイクル目で、鋼管フランジに局部座屈が発生し、53 サイクル目で、鋼管ウェブに局部座屈が発生した。荷重が徐々に劣化し、局部座屈変形も大きくなり、28 サイクル負側（5 ブロック）で最大荷重の 80% を下回った。

No.3 LD10n30Rv2 試験体 ( $l_k/D=10$ 、 $n=0.3$ 、 $R=1$ 、 $1.1$ 、 $1.2$ 、 $1.25\%$ 、CFT) では、1 サイクル負側で鋼管が降伏し、4 サイクル正側、4 サイクル負側（いずれも 1 ブロック目）で最大荷重に到達した。2 サイクル目で、鋼管フランジに局部座屈が発生し、22 サイクル目で、鋼管ウェブに局部座屈が発生した。荷重が徐々に劣化し、局部座屈変形も大きくなり、76 サイクル負側（13 ブロック）で最大荷重の 80% を下回った。

No.4 LD10n30R12 試験体 ( $l_k/D=10$ 、 $n=0.3$ 、 $R=1.2\%$ 、CFT) では、1 サイクル目で鋼管が降伏し、2 サイクル正側、1 サイクル負側で最大荷重に到達した。2 サイクル目で、鋼管フランジに局部座屈が発生し、37 サイクル目で、鋼管ウェブに局部座屈が発生した。荷重が徐々に劣化し、46 サイクル負側で最大荷重の 80% を下回った。

No.5 LD10n60Rv1 試験体 ( $l_k/D=10$ 、 $n=0.6$ 、 $R=0.5$ 、 $0.6$ 、 $0.7$ 、 $0.8\%$ 、CFT) では、1 サイクル目で鋼管が降伏し、10 サイクル正側（2 ブロック目）、4 サイクル負側（1 ブロック目）で最大荷重に到達した。4 サイクル目で、鋼管フランジに局部座屈が発生し、20 サイクル目で、鋼管ウェブに局部座屈が発生した。荷重が徐々に劣化し、荷重が最大荷重の 90% 程度（21 ブロック程度）に低下すると急激に耐力が劣化し始め、142 サイクル負側で最大荷重の 80% を下回った。

No.6 LD10n60Rv2 試験体 ( $l_k/D=10$ 、 $n=0.6$ 、 $R=0.6$ 、 $0.7$ 、 $0.8$ 、 $0.85\%$ 、CFT) では、1 サイクル目で鋼管が降伏し、4 サイクル正側、4 サイクル負側（いずれも 1 ブロック目）で最大荷重に到達した。2 サイクル目で、鋼管フランジに局部座屈が発生し、6 サイクル目で、鋼管ウェブに局部座屈が発生した。荷重が最大荷重の 90% 程度（4 ブロック程度）に低下すると急激に耐力が劣化し始

め、28 サイクルで最大荷重の 85%を下回った。なお、5 ブロック目は最大耐力の 70%を下回り 6 ブロック目は 40%程度となっていた。

No.7 LD10n60R06 試験体 ( $l_k/D=10$ 、 $n=0.6$ 、 $R=0.6\%$ 、CFT) では、1 サイクル目で鋼管が降伏し、4 サイクル正側、3 サイクル負側で最大荷重に到達した。1 サイクル目で、鋼管フランジに局部座屈が発生し、9 サイクル目で、鋼管ウェブに局部座屈が発生した。荷重が徐々に劣化したが、450 サイクル繰り返しても最大荷重の約 90%までしか荷重は低下しなかった。

No.8 LD10n60R08 試験体 ( $l_k/D=10$ 、 $n=0.6$ 、 $R=0.8\%$ 、CFT) では、1 サイクル目で鋼管が降伏し、3 サイクル正側、2 サイクル負側で最大荷重に到達した。1 サイクル目で、鋼管フランジに局部座屈が発生し、3 サイクル目で、鋼管ウェブに局部座屈が発生した。荷重が徐々に劣化し、最大荷重の 90%まで低下したあたり（正側 52 サイクル、負側 63 サイクル）から、耐力の劣化が著しくなり、正側 65 サイクル、負側 67 サイクルで最大荷重の 80%を下回った。

No.9 LD20n30R15 試験体 ( $l_k/D=20$ 、 $n=0.3$ 、 $R=1.5\%$ 、CFT) では、1 サイクル目で鋼管が降伏し、2 サイクル正側、1 サイクル負側で最大荷重に到達した。1 サイクル目で、鋼管フランジに局部座屈が発生し、151 サイクル目で、鋼管ウェブに局部座屈が発生した。荷重が徐々に劣化し、174 サイクル負側で最大荷重の 80%となった。なお、正側と負側の耐力劣化は負側のほうが大きくなっていた。

No.10 LD20n30Rv1 試験体 ( $l_k/D=20$ 、 $n=0.3$ 、 $R=1.25$ 、 $1.5$ 、 $1.75$ 、 $2\%$ 、CFT) では、1 サイクル目で鋼管が降伏し、10 サイクル正側、4 サイクル負側で最大荷重に到達した。なお、2 サイクル目正側で片方の変位計が引っかかって動かなくなってしまい、それに気が付く 7 サイクル目まで予定よりも大きな変位を与えてしまった。1 サイクル目で、鋼管フランジに局部座屈が発生し、54 サイクル目で、鋼管ウェブに局部座屈が発生した。荷重が徐々に劣化し、52 サイクル（正側、負側とも 9 ブロック目）で最大荷重の 80%を下回った。

No.11 LD20n30Rv2 試験体 ( $l_k/D=20$ 、 $n=0.3$ 、 $R=1.1$ 、 $1.4$ 、 $1.7$ 、 $2\%$ 、CFT) では、1 サイクル目で鋼管が降伏し、4 サイクル正側、4 サイクル負側（いずれも 1 ブロック目）で最大荷重に到達した。3 サイクル目で、鋼管フランジに局部座屈が発生し、37 サイクル目で、鋼管ウェブに局部座屈が発生した。荷重が徐々に劣化し、正側 82 サイクル（14 ブロック目）負側 58 サイクル（10 ブロック目）で最大荷重の 80%を下回った。

表 3.2-5 実験結果

No.	Specimen		$Q_{max}$	$M_{max}$	$M_{pc}$	$M_{max}/M_{pc}$
1	S-LD10n30Rv1	正	84.8	67.0	62.4	1.07
		負	-85.5	-67.6		-1.08
2	LD10n30Rv1	正	116	93.4	89.6	1.04
		負	-118	-94.7		-1.06
3	LD10n30Rv2	正	120	97.0	91.1	1.06
		負	-120	-96.8		-1.06
4	LD10n30R12	正	120	96.9	91.1	1.06
		負	-118	-95.0		-1.04
5	LD10n60Rv1	正	91.8	77.8	70.7	1.10
		負	-94.5	-79.5		-1.12
6	LD10n60Rv2	正	96.1	81.3	70.2	1.16
		負	-102.1	-86.0		-1.22
7	LD10n60R06	正	83.6	69.3	69.6	1.00
		負	-81.2	-67.5		-0.97
8	LD10n60R08	正	98.4	82.7	69.8	1.18
		負	-89.3	-75.8		-1.09
9	LD20n30R15	正	41.6	79.8	92.7	0.86
		負	-41.9	-80.1		-0.86
10	LD20n30Rv1	正	47.4	96.5	93.9	1.03
		負	-46.6	-93.0		-0.99
11	LD20n30Rv2	正	48.2	95.0	93.2	1.02
		負	-45.9	-91.4		-0.98

$M_{pc}$ : 軸力を考慮した柱脚の全塑性モーメント計算値



(a) a面全景



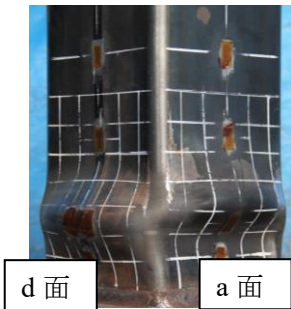
(b) b面全景



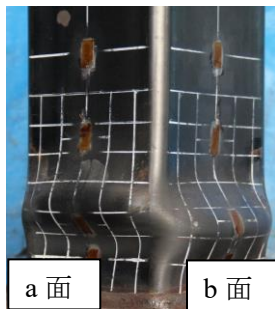
(c) c面全景



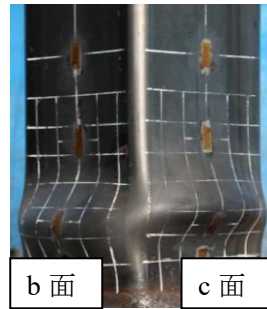
(d) d面全景



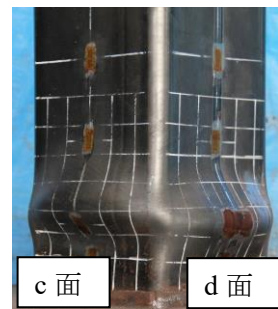
(e) d-a面  
柱脚部詳細



(f) a-b面  
柱脚部詳細



(g) b-c面  
柱脚部詳細



(h) c-d面  
柱脚部詳細

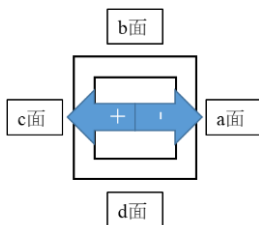


写真 3.2-1 試験体の最終状況 [S-LD10n30Rv1]





(a) a 面全景



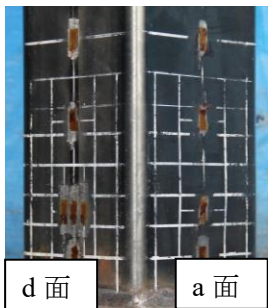
(b) b 面全景



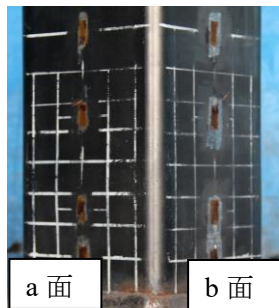
(c) c 面全景



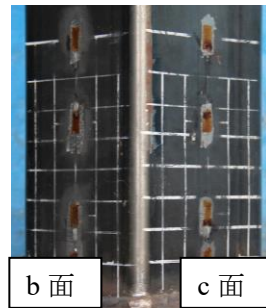
(d) d 面全景



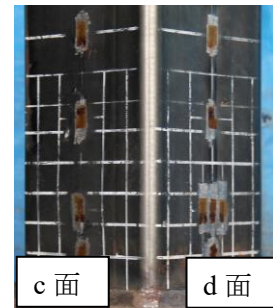
(e) d-a 面  
柱脚部詳細



(f) a-b 面  
柱脚部詳細



(g) b-c 面  
柱脚部詳細



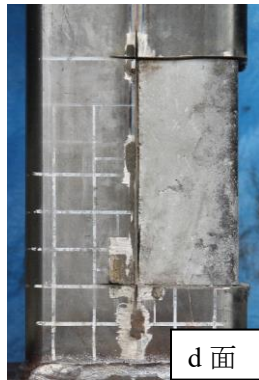
(h) c-d 面  
柱脚部詳細



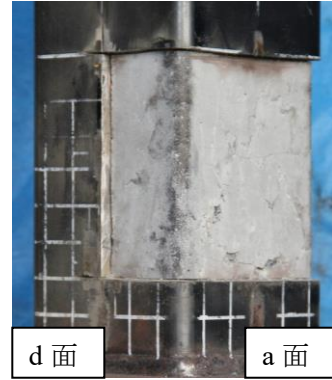
(i) a 面柱脚部  
内部コンクリート



(j) b 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d-a 面柱脚部  
内部コンクリート

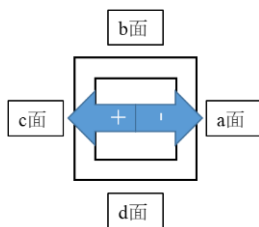


写真 3.2-2 試験体の最終状況 [LD10n30Rv1]



(a) a 面全景



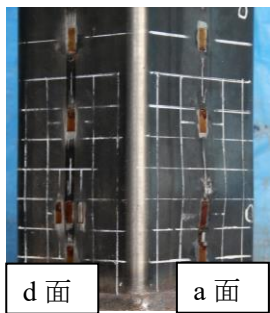
(b) b 面全景



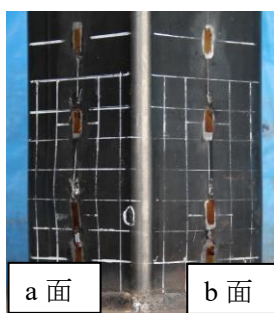
(c) c 面全景



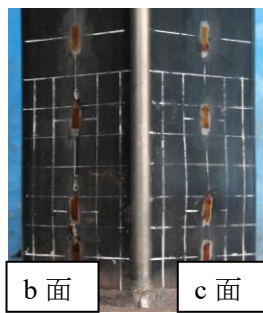
(d) d 面全景



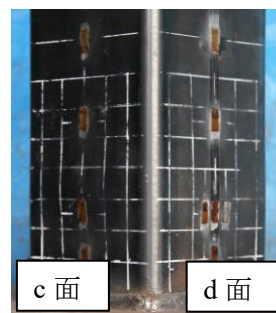
(e) d-a 面  
柱脚部詳細



(f) a-b 面  
柱脚部詳細



(g) b-c 面  
柱脚部詳細



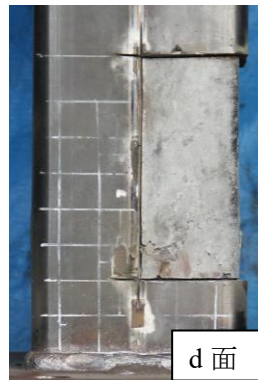
(h) c-d 面  
柱脚部詳細



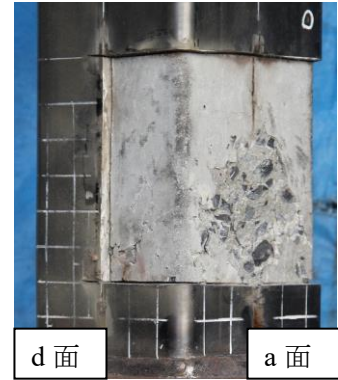
(i) a 面柱脚部  
内部コンクリート



(j) b 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d-a 面柱脚部  
内部コンクリート

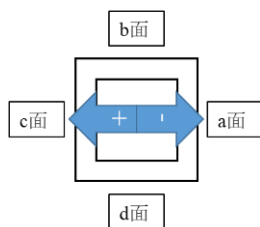


写真 3.2-3 試験体の最終状況 [LD10n30Rv2]



(a) a 面全景



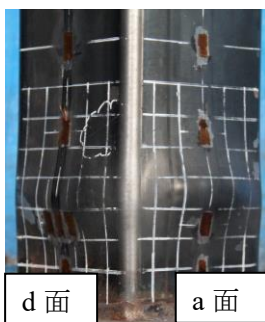
(b) b 面全景



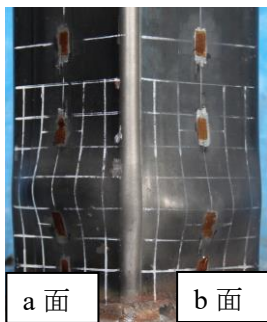
(c) c 面全景



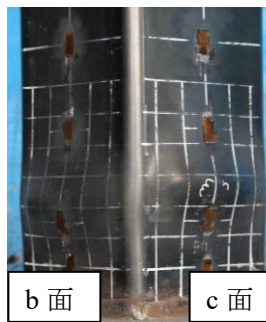
(d) d 面全景



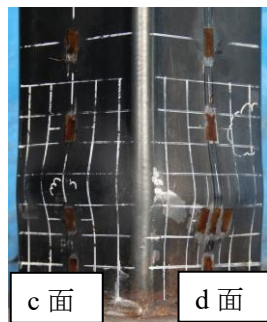
(e) d-a 面  
柱脚部詳細



(f) a-b 面  
柱脚部詳細



(g) b-c 面  
柱脚部詳細



(h) c-d 面  
柱脚部詳細



(i) a 面柱脚部  
内部コンクリート



(j) b 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d-a 面柱脚部  
内部コンクリート

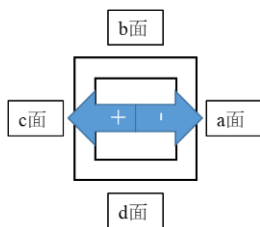


写真 3.2-4 試験体の最終状況 [LD10n30R12]



(a) a 面全景



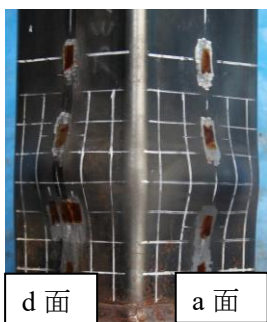
(b) b 面全景



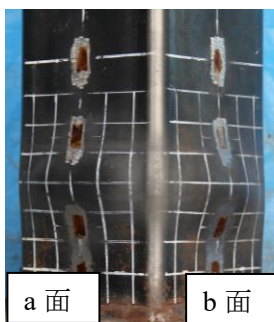
(c) c 面全景



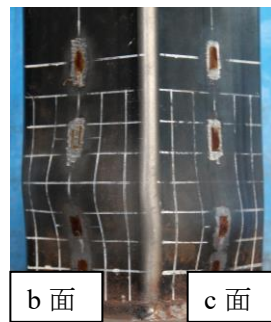
(d) d 面全景



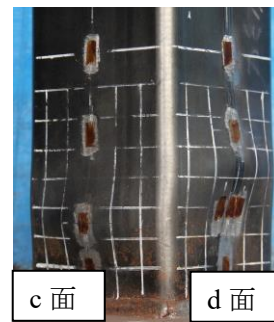
(e) d-a 面  
柱脚部詳細



(f) a-b 面  
柱脚部詳細



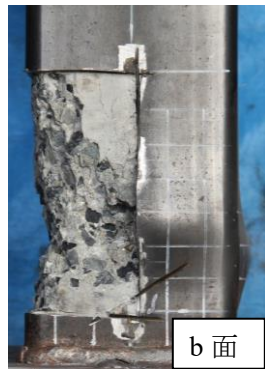
(g) b-c 面  
柱脚部詳細



(h) c-d 面  
柱脚部詳細



(i) a 面柱脚部  
内部コンクリート



(j) b 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d-a 面柱脚部  
内部コンクリート

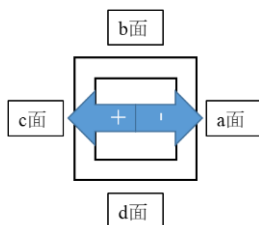


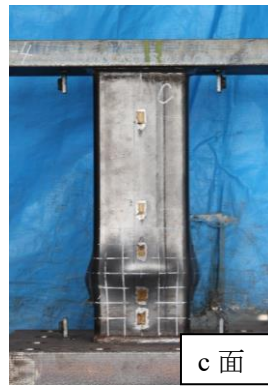
写真 3.2-5 試験体の最終状況 [LD10n60Rv1]



(a) a 面全景



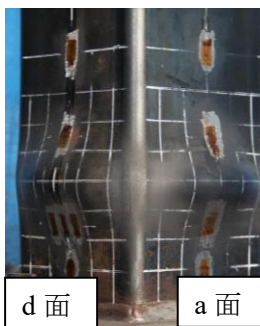
(b) b 面全景



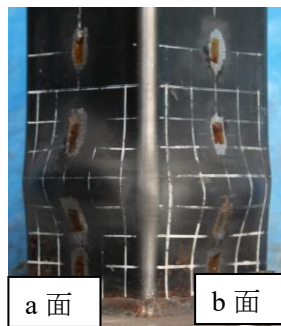
(c) c 面全景



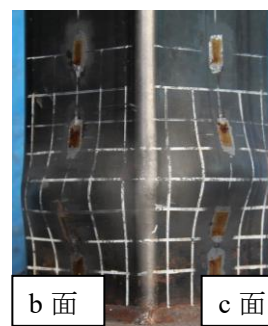
(d) d 面全景



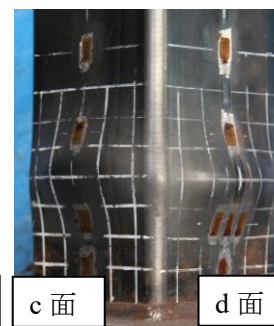
(e) d-a 面  
柱脚部詳細



(f) a-b 面  
柱脚部詳細



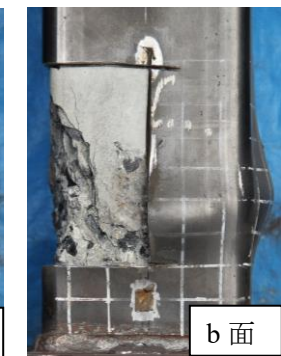
(g) b-c 面  
柱脚部詳細



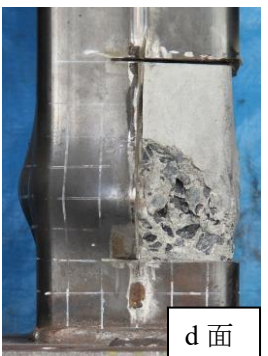
(h) c-d 面  
柱脚部詳細



(i) a 面柱脚部  
内部コンクリート



(j) b 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d-a 面柱脚部  
内部コンクリート

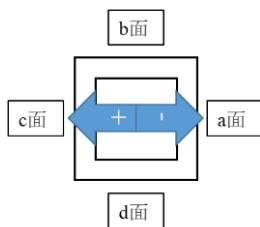


写真 3.2-6 試験体の最終状況 [LD10n60Rv2]



(a) a 面全景



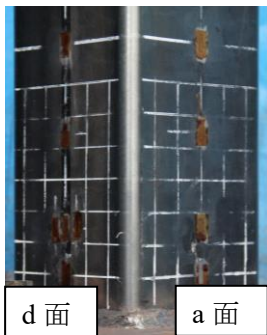
(b) b 面全景



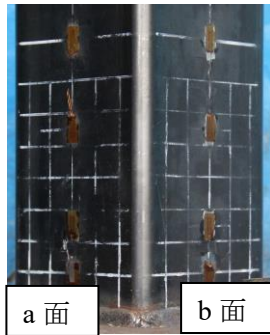
(c) c 面全景



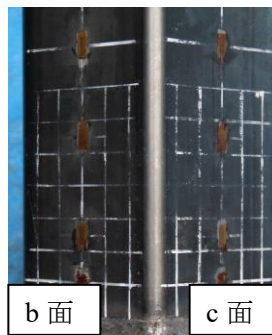
(d) d 面全景



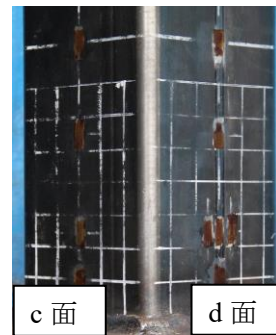
(e) d-a 面  
柱脚部詳細



(f) a-b 面  
柱脚部詳細



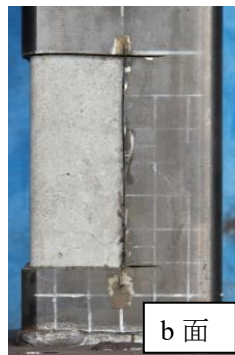
(g) b-c 面  
柱脚部詳細



(h) c-d 面  
柱脚部詳細



(i) a 面柱脚部  
内部コンクリート



(j) b 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d-a 面柱脚部  
内部コンクリート

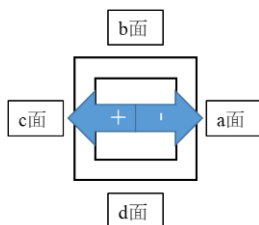


写真 3.2-7 試験体の最終状況 [LD10n60R06]



(a) a 面全景



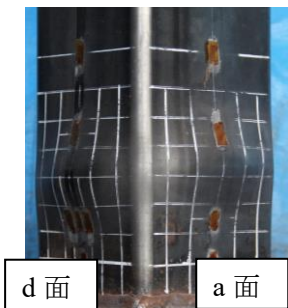
(b) b 面全景



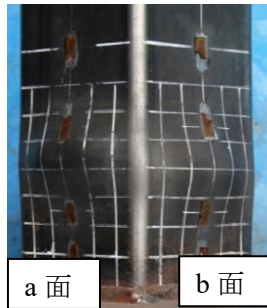
(c) c 面全景



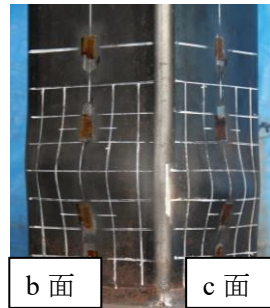
(d) d 面全景



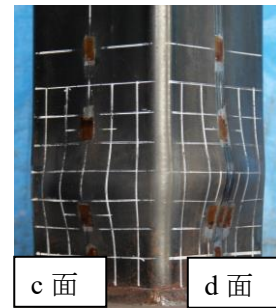
(e) d-a 面  
柱脚部詳細



(f) a-b 面  
柱脚部詳細



(g) b-c 面  
柱脚部詳細



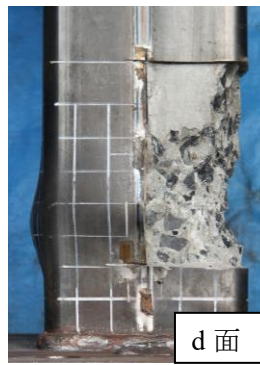
(h) c-d 面  
柱脚部詳細



(i) a 面柱脚部  
内部コンクリート



(j) b 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d-a 面柱脚部  
内部コンクリート

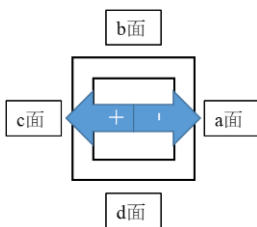


写真 3.2-8 試験体の最終状況 [LD10n60R08]



(a) a面全景



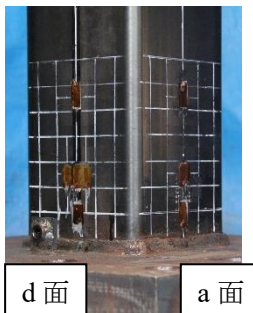
(b) b面全景



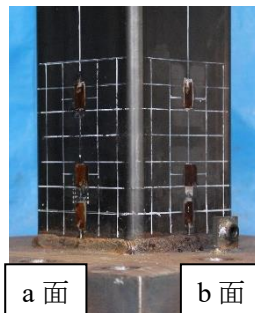
(c) c面全景



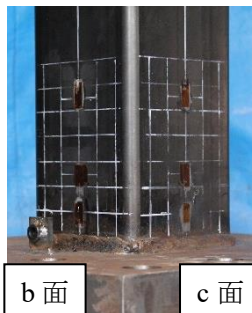
(d) d面全景



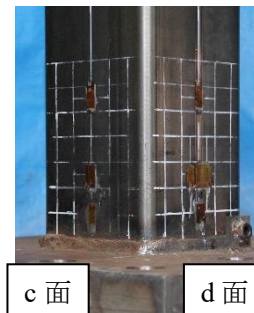
(e) d-a面  
柱脚部詳細



(f) a-b面  
柱脚部詳細



(g) b-c面  
柱脚部詳細



(h) c-d面  
柱脚部詳細



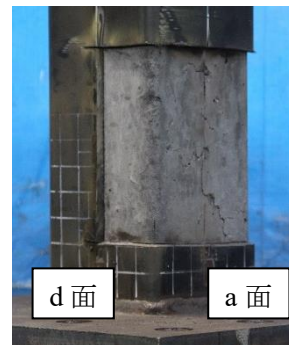
(j) a面柱脚部  
内部コンクリート



(i) b面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d面柱脚部  
内部コンクリート



(l) d-a面柱脚部  
内部コンクリート

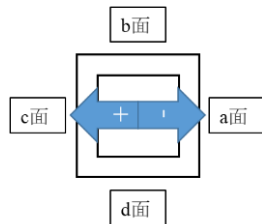
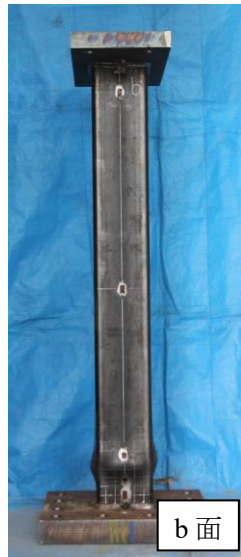


写真 3.2-9 試験体の最終状況 [LD20n30R15]

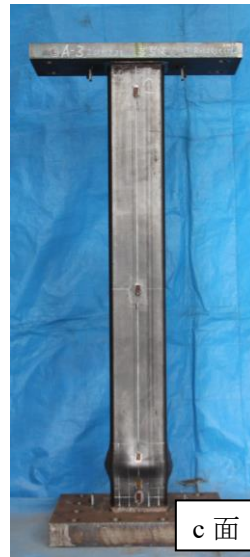




(e) a 面全景



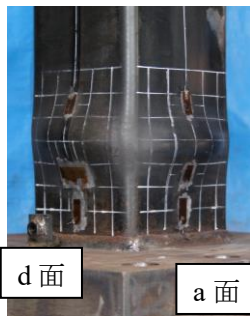
(f) b 面全景



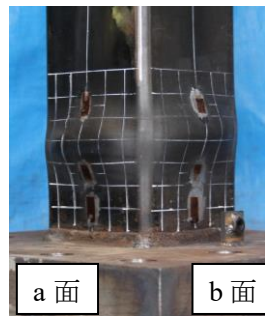
(g) c 面全景



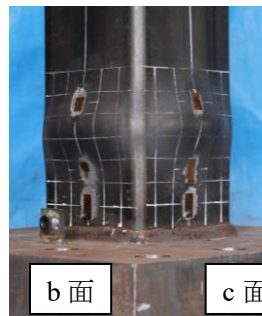
(h) d 面全景



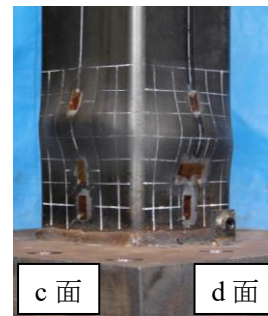
(e) d-a 面  
柱脚部詳細



(f) a-b 面  
柱脚部詳細



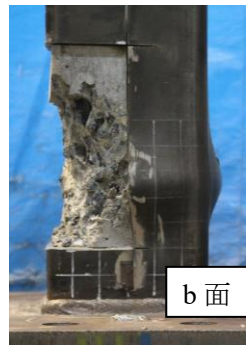
(g) b-c 面  
柱脚部詳細



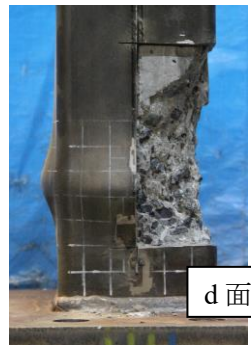
(h) c-d 面  
柱脚部詳細



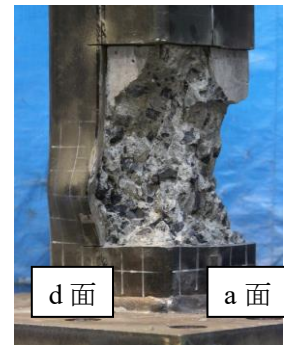
(j) a 面柱脚部  
内部コンクリート



(j) b 面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d 面柱脚部  
内部コンクリート



(l) d-a 面柱脚部  
内部コンクリート

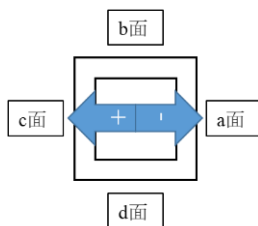


写真 3.2-10 試験体の最終状況 [LD20n30Rv1]



(i) a面全景



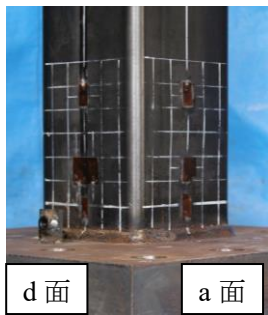
(j) b面全景



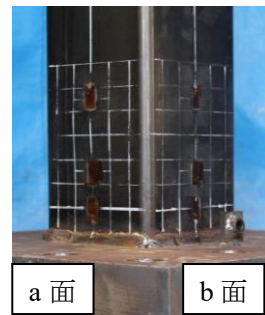
(k) c面全景



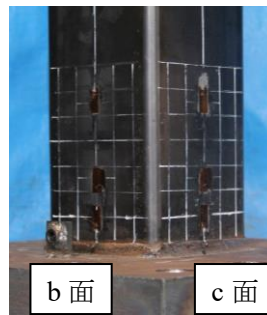
(l) d面全景



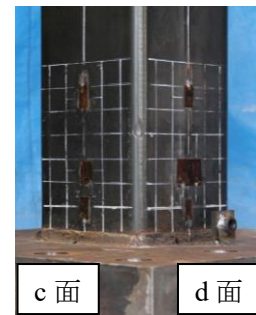
(e) d-a面  
柱脚部詳細



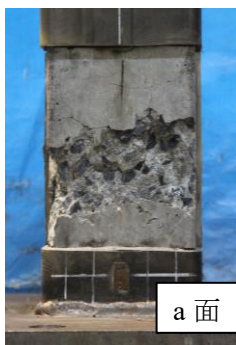
(f) a-b面  
柱脚部詳細



(g) b-c面  
柱脚部詳細



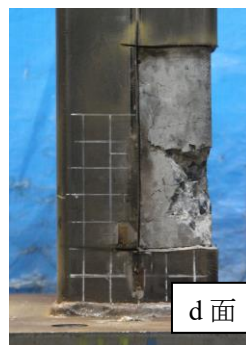
(h) c-d面  
柱脚部詳細



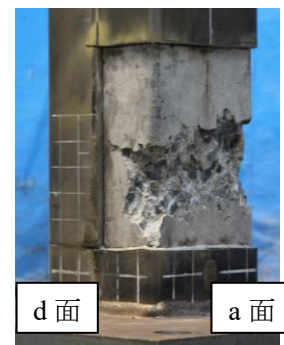
(j) a面柱脚部  
内部コンクリート



(i) b面柱脚部  
内部コンクリート



(k) d面柱脚部  
内部コンクリート



(l) d-a面柱脚部  
内部コンクリート

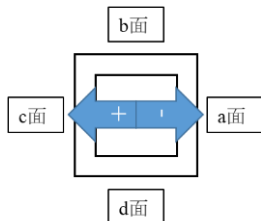


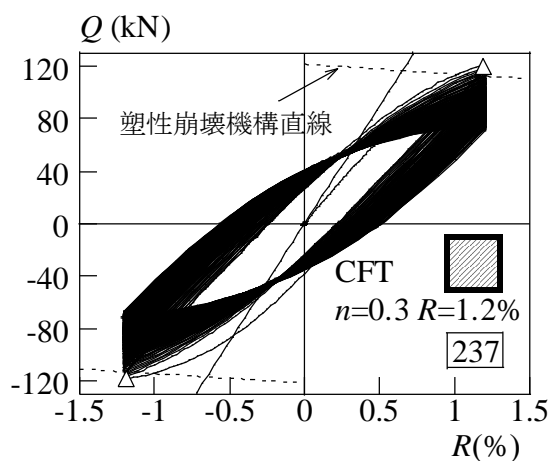
写真 3.2-11 試験体の最終状況 [LD20n30Rv2]

(2) 水平力—部材角関係（一定変位振幅の場合）

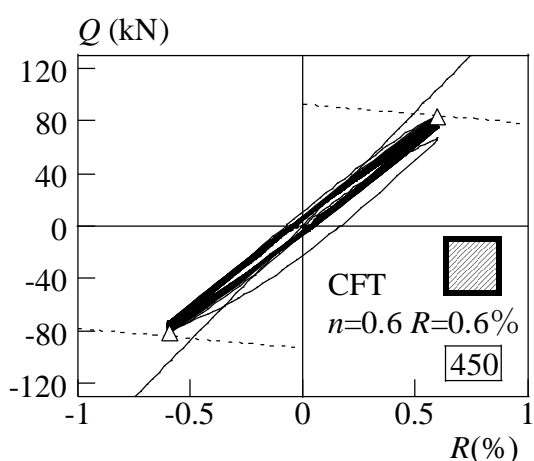
各試験体の水平力—部材角関係を図 3.2-8 に、部材角—軸縮み関係を図 3.2-9 に示す。

1) 水平力—部材角関係(図 3.2-8)

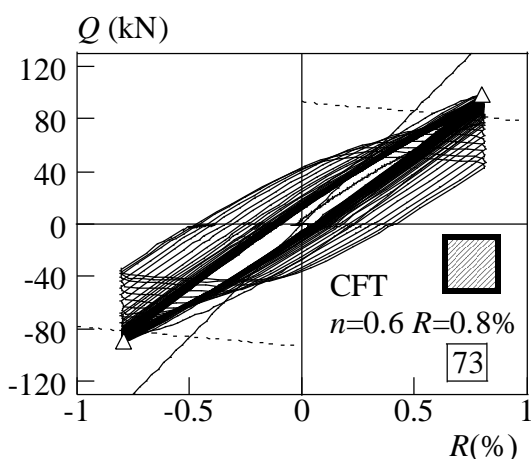
図 3.2-8 に、一定変位振幅の場合の水平力—部材角関係を示す。図中、△印は最大荷重を示している。点線は塑性崩壊機構直線を、直線は初期剛性計算値を表している。また、四角に囲まれた数値は、繰返したサイクル数を表している。図(a)  $n=0.3$ 、 $R=1.2\%$ 、図(c)  $n=0.6$ 、 $R=0.8\%$  の場合は徐々に耐力が低下していることがわかる。一方で、図(b)  $n=0.6$ 、 $R=0.6\%$  試験体は比較的耐力の低下が小さかった。また、図(a)  $n=0.3$ 、 $R=1.2\%$ 、図(c)  $n=0.6$ 、 $R=0.8\%$  試験体は全塑性モーメントに到達しているが、図(b)  $n=0.6$ 、 $R=0.6\%$  試験体、図(d)  $n=0.3$ 、 $R=1.5\%$  試験体は全塑性モーメントに到達していなかった。



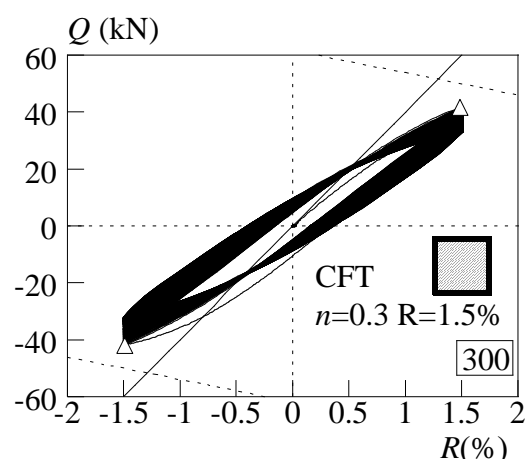
(a) LD10n30R12



(b) LD10n60R06



(c) LD10n60R08



(d) LD20n30R15

図 3.2-8 水平力  $Q$ —部材角  $R$  関係（一定変位振幅の場合）

2) 部材角一軸縮み関係(図 3.2-9)

図 3.2-9 に、一定変位振幅の場合の部材角一軸縮み関係を示す。図中、□で囲まれた記号と数値は、局部座屈の発生サイクルを表しており、F はフランジ、W はウェブ、数値はサイクル数、+ は正側、- は負側である。

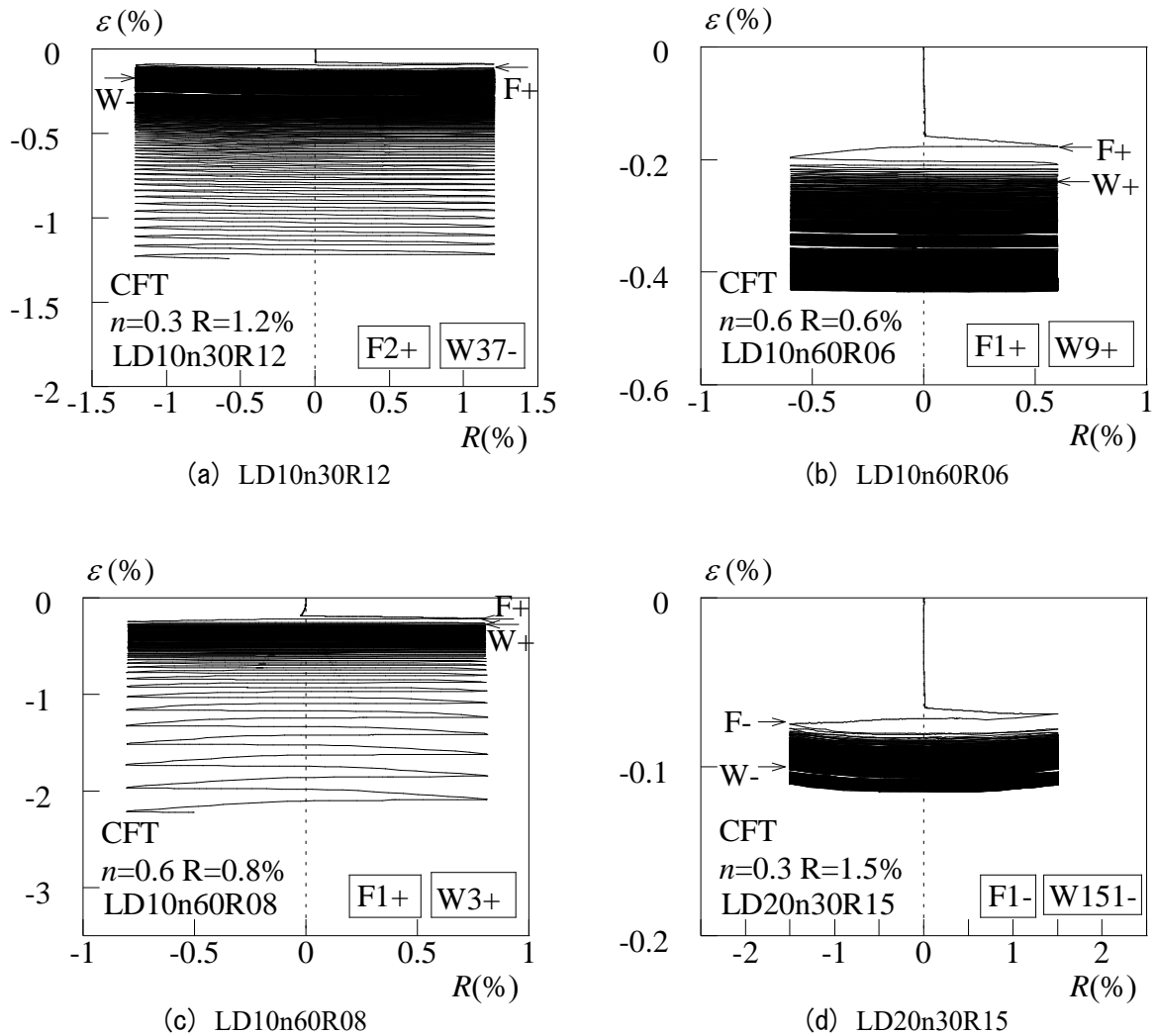


図 3.2-9 部材角  $R$  一軸縮み  $\varepsilon$  関係 (一定変位振幅の場合)

(3) 多数回繰返し特性（一定変位振幅の場合）

1) ピーク荷重の推移(図 3.2-10)

図 3.2-10 にピーク荷重の推移 ( $Q_i/Q_{max}$ ,  $Q_i$ :  $i$  サイクル時の変位反転点の水平力、 $Q_{max}$ : 最大耐力) を示す。 $l_k/D=10$ ,  $n=0.3$  の場合(図(a))、50 サイクル程度までは耐力劣化が著しいが、途中からは比較的緩やかに耐力が低下した。しかし、約 220 サイクルを超えたあたりから再度、耐力低下が著しくなっていることがわかる。また、 $n=0.6$  の場合、図(b) $R=0.6\%$  については緩やかに耐力が低下し、図(c) $R=0.8\%$  の場合は、50 サイクル程度までは比較的緩やかに耐力が低下していたが、その後  $Q_i/Q_{max}$  が 0.9 程度になると急激に耐力が低下した。

$l_k/D=20$ ,  $n=0.3$  の場合 (図(d))、耐力の劣化は比較的緩やかであった。

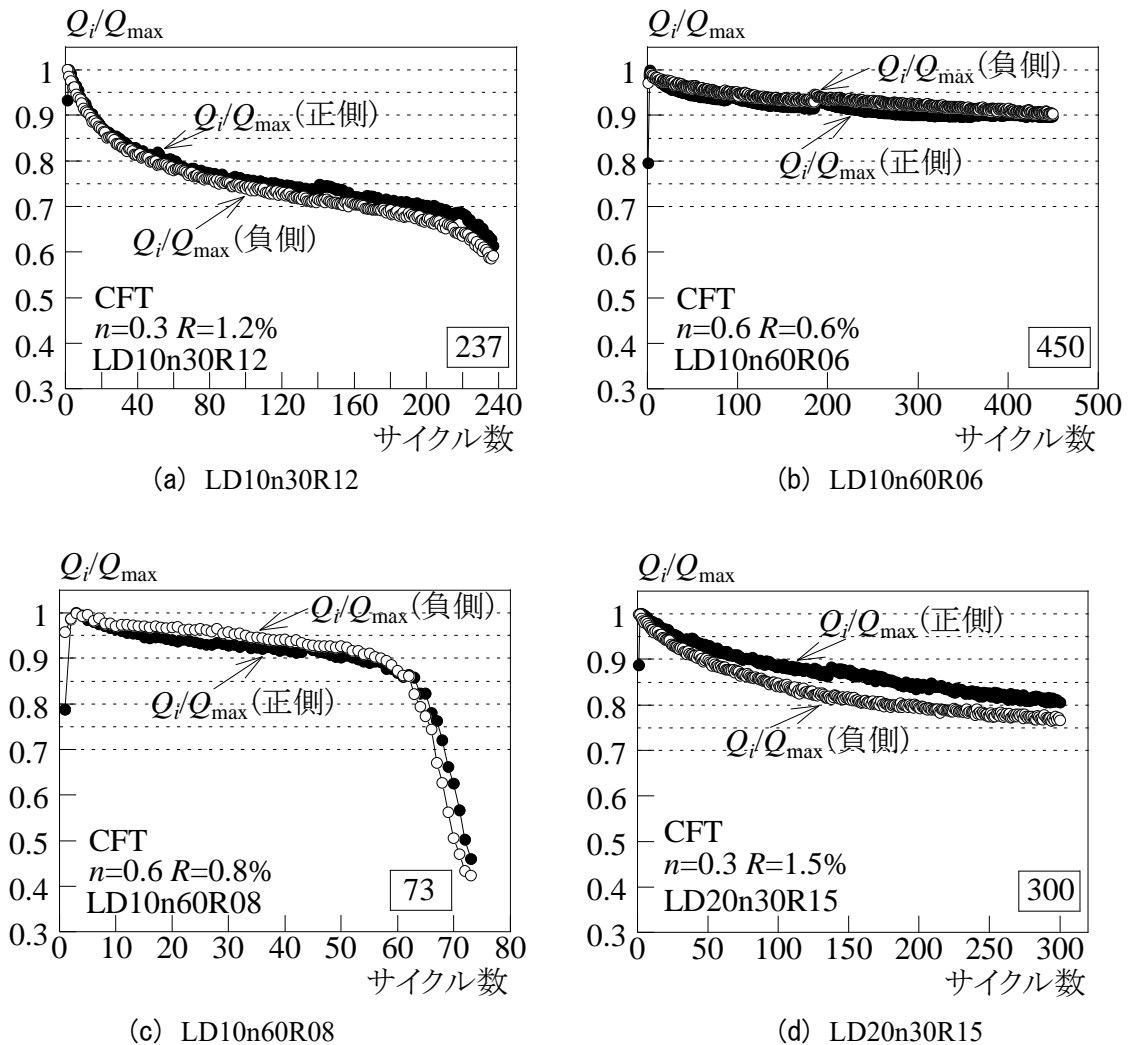


図 3.2-10 ピーク荷重の推移(一定変位振幅の場合)

## 2) 限界繰返し回数と部材角の関係(一定変位振幅)

表 3.2-6 に、限界繰返し回数（最大耐力の 95%、90%、85%、80%に耐力が低下した時のサイクル数  $N_{95\%}$ 、 $N_{90\%}$ 、 $N_{85\%}$ 、 $N_{80\%}$ ）を示す。表 3.2-6(a) が軸力比 0.3 の場合で、No.2 が本研究で行った実験で、No.1、No.3 は、既往の研究<sup>3.2-1)</sup>で行ったものである。表 3.2-6(b)が軸力比 0.6 の場合で、No.2、No.3 が本研究で行った実験で、No.1、No.4 が既往の研究<sup>3.2-1)</sup>で行ったものである。なお、表(b)中 No.1 試験体は、部材角  $R = 0.5\%$  で 100 サイクル繰返しても最大耐力の 95%まで耐力が低下しなかったため、部材角を 0.75%に増加させて同様に実験を行ったものである。

限界繰返し回数と部材角の関係を図 3.2-11 に示す。図 3.2-11(a)は軸力比 0.3 の場合、図 3.2-11(b)は軸力比 0.6 の場合である。●印、◆印、■印、▲印（正側は黒色、負側は白色）がそれぞれ  $N_{95\%}$ 、 $N_{90\%}$ 、 $N_{85\%}$ 、 $N_{80\%}$ を示している。図中の直線は、回帰分析によって求めた正側の式である。ただし、図(b)において  $R = 0.75\%$ については前述したように  $R = 0.5\%$ で 100 サイクル繰返した後に行ったもので、傾向が大きく異なると思われたので、回帰分析では除外した。また、回帰分析による直線は  $N_{95\%}$ 、 $N_{80\%}$ の場合のみ示している。

図(a)によれば、 $n = 0.3$  の場合、対数軸上において、部材角と限界繰返し回数の関係はほぼ直線であることが分かる。図(b)によれば、 $n = 0.6$  の場合は、限界繰返し回数と部材角の関係は  $n = 0.3$  のように直線ではなかった。また、 $N_{95\%}$ 以外は同じような関係となっていた。これは、 $n = 0.6$  の

表 3.2-6(a) 限界繰返し回数 ( $n=0.3$ 、 $l_k/D=10$ )

No.	Specimen		$N_{95\%}$	$N_{90\%}$	$N_{85\%}$	$N_{80\%}$
1	LD10n30R1 <sup>1)</sup>	+	11	27	51	120
		-	9	19	58	134
2	LD10n30R12	+	7	15	28	59
		-	5	13	25	46
3	LD10n30R15 <sup>1)</sup>	+	4	6	11	18
		-	2	5	8	15

表 3.2-6(b) 限界繰返し回数 ( $n=0.6$ 、 $l_k/D=10$ )

No.	Specimen		$N_{95\%}$	$N_{90\%}$	$N_{85\%}$	$N_{80\%}$
1	LD10n60R05 <sup>1)</sup>	+	100+	-	-	-
		-	100+	-	-	-
	LD10n60R075 <sup>1)</sup>	+	7	10	11	12
		-	8	9	10	11
2	LD10n60R06	+	52	426	450+	-
		-	122	450+	-	-
3	LD10n60R08	+	14	52	63	65
		-	32	63	65	67
4	LD10n60R1 <sup>1)</sup>	+	2	*	*	3
		-	1	*	2	3

場合は、荷重が 90%に低下した以降は急激に耐力が低下することを意味している。回帰分析の結果を表 3.2-7(a)および表 3.2-7(b)に示している。

表 3.2-8 および図 3.2-12 に、 $l_k/D=20$  の場合の限界繰返し回数と部材角の関係を示す。 $R=1\%$  のときは 400 サイクル繰返しても耐力が低下していないので、いずれの限界繰返し回数も 400 としている。その部分を除けば、おおむね対数軸上で直線的な関係になっていることがわかる。回帰分析により求めた回帰式を図中に太線で示している。図(a)正側においては  $R=2\%$  のとき  $N_{90\%}$ 、 $N_{85\%}$  は対数軸上では値が近く、 $N_{90\%}$  の近似直線による値は、 $N_{85\%}$  の実験値よりも大きな値となっていることが分かる。図(b)負側については、 $N_{90\%}$  は 2 点しかないために、その他の傾向とは異なっているため、部材角が小さい範囲では限界繰返し回数をすくなくめに、部材角が大きい範囲では多めに評価する。回帰分析の結果を表 3.2-9 に示している。

表 3.2-7(a) 限界繰返し回数 回帰分析結果( $n=0.3$ )

	正側		負側	
	$C$	$\alpha$	$C$	$\alpha$
$N_{95\%}$	2.615	-0.401	1.816	-0.267
$N_{90\%}$	2.436	-0.267	2.421	-0.290
$N_{85\%}$	2.829	-0.264	2.300	-0.204
$N_{80\%}$	2.782	-0.211	2.465	-0.185

表 3.2-7(b) 限界繰返し回数 回帰分析結果( $n=0.6$ )

	正側		負側	
	$C$	$\alpha$	$C$	$\alpha$
$N_{95\%}$	1.18	-0.1744	1.03	-0.0979
$N_{90\%}$	1.09	-0.0930	1.03	-0.0790
$N_{85\%}$	1.09	-0.0910	1.09	-0.0907
$N_{80\%}$	1.14	-0.0993	1.14	-0.0990

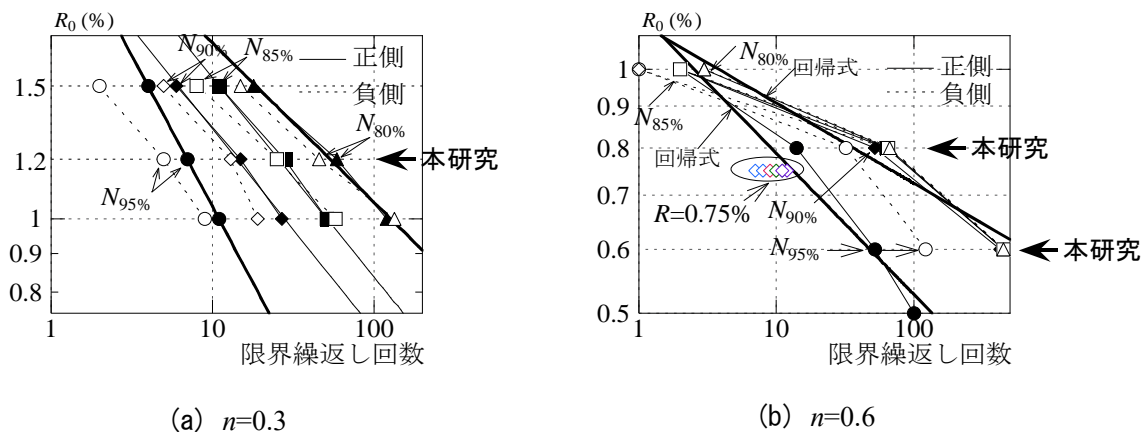


図 3.2-11 限界繰返し回数—部材角  $R$  関係  $l_k/D=10$

表 3.2-8 限界繰返し回数 ( $l_k/D=20$ )

No.	Specimen		$N_{95\%}$	$N_{90\%}$	$N_{85\%}$	$N_{80\%}$
1	LD20n30R1	+	400	-	-	-
		-	400	-	-	-
2	LD20-n30R15-C	+	28	74	182	300
		-	17	45	92	174
3	LD20n30R2	+	5	10	13	33
		-	4	11	16	38
4	LD20n30R3	+	*	2	4	5
		-	*	*	1	2

表 3.2-9 限界繰返し回数 回帰分析結果( $n=0.3$ ,  $l_k/D=20$ )

	正側		負側	
	$C$	$\alpha$	$C$	$\alpha$
$N_{95\%}$	2.378	-0.147	2.5623	-0.158
$N_{90\%}$	3.2636	-0.204	3.3029	-0.190
$N_{85\%}$	3.0149	-0.153	3.4878	-0.169
$N_{80\%}$	3.3732	-0.153	3.8132	-0.168

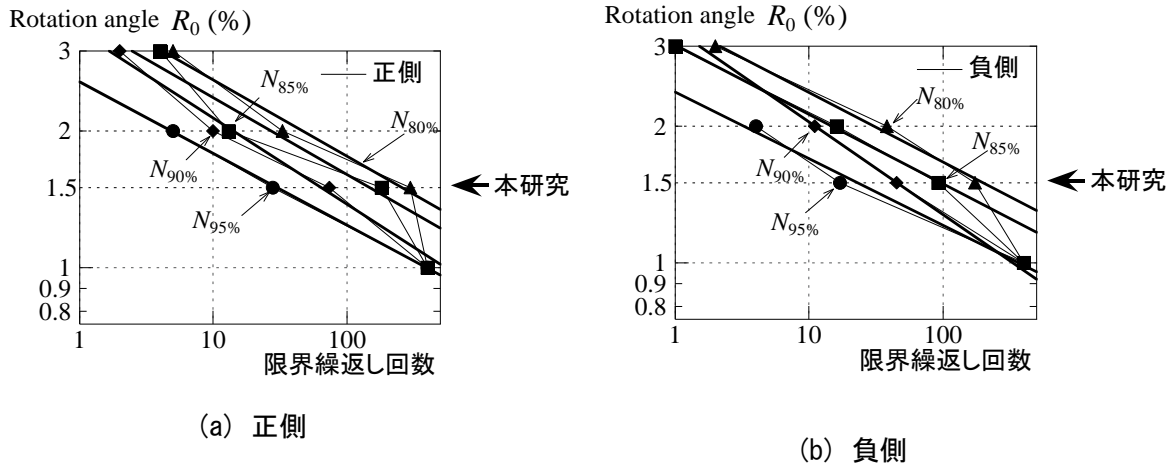


図 3.2-12 限界繰返し回数—部材角  $R$  関係  $l_k/D=20$ ,  $n=0.3$



#### (4) 水平力—部材角関係（変動変位振幅の場合）

##### 1) 水平力—部材角関係(図 3.2-13)

図 3.2-13 に、変動変位振幅の場合の水平力  $Q$ —部材角  $R$  関係を示す。図中の記号は△印は最大荷重を示しており、点線は塑性崩壊機構直線を、直線は初期剛性計算値を表している。また、四角で囲んだサイクル数で繰返している。いずれの場合も全塑性モーメントに到達している。なお、試験体のパラメータは、表 3.2-1 を参照されたい。

まず、図(a)と図(b)を比較する。これらは中空試験体と CFT 試験体であり、軸力比 ( $n$ )、変位振幅（部材角  $R$ ）共に同じである。図によれば、中空試験体のほうが耐力劣化が著しいことがわかる。次に図(b)と図(c)を比較する。実験で与えた変位振幅（部材角  $R$ ）は、図(c)の方が大きい。図によれば振幅が小さいほうが耐力劣化が小さいことが観察され、サイクル数も多い。

図(d)、図(e)は軸力比  $n=0.6$  の場合であり、それぞれ最小振幅は 0.1%、最大振幅は 0.05%異なっている。図によれば、いずれも耐力が著しく劣化していることが観察されるが、繰返し回数は図(e)のほうが少ない。部材角がそれぞれ 0.1%（最大振幅は 0.05%）異なるだけで、耐力劣化挙動が大きくなることが分かる。これは軸力比  $n=0.3$  よりも  $n=0.6$  のほうが振幅の変化の影響が大きいことを示している。

図(f)、図(g)は座屈長さ・断面せい比  $l_k/D=20$  の場合である。比較的、振幅の値が近いためおおむね同じような挙動となっている。いずれも耐力が徐々に劣化している。

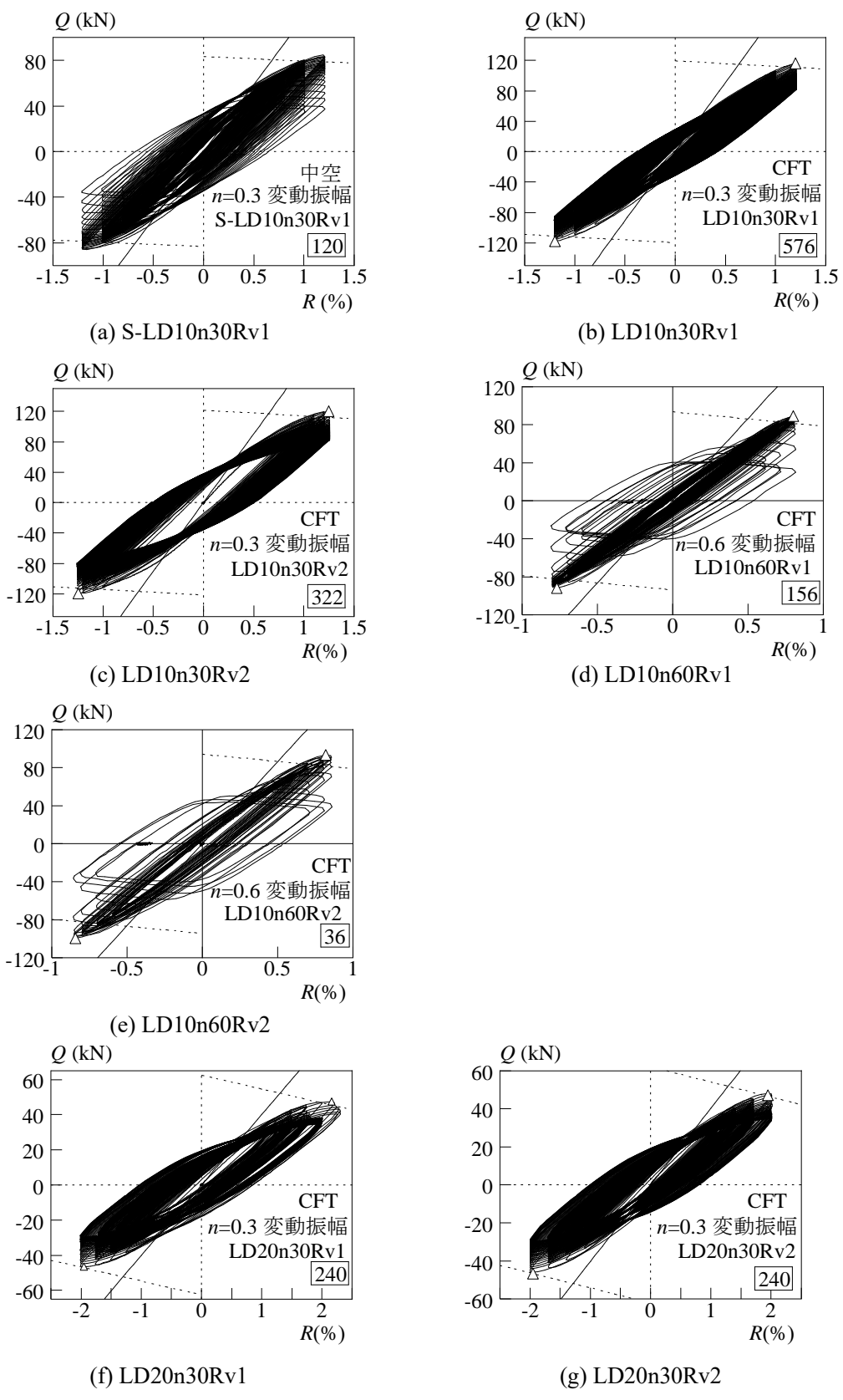


図 3.2-13 水平力-変位角関係 (変動変位振幅)

## 2) 部材角一軸縮み関係(図 3.2-14)

図 3.2-14 に、変動変位振幅の場合の部材角一軸縮み関係を示す。図中、□で囲まれた記号と数値は、局部座屈の発生サイクルを表しており、F はフランジ、W はウェブ、数値はサイクル数、+ は正側、- は負側である。

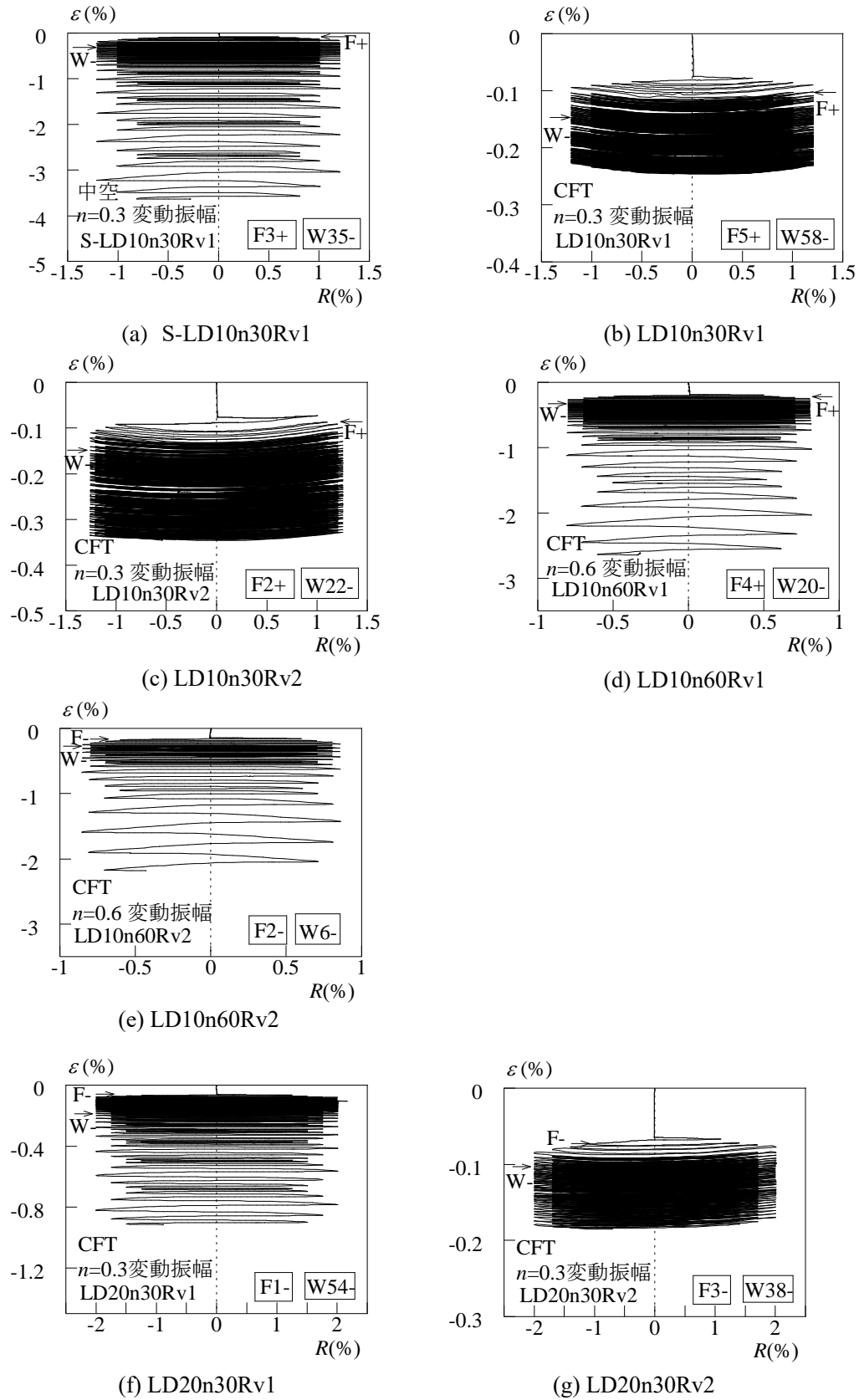
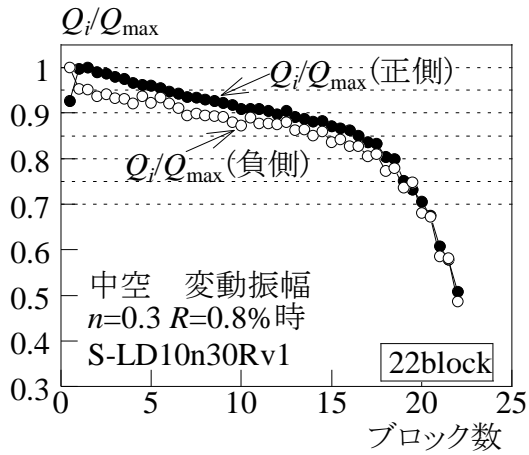


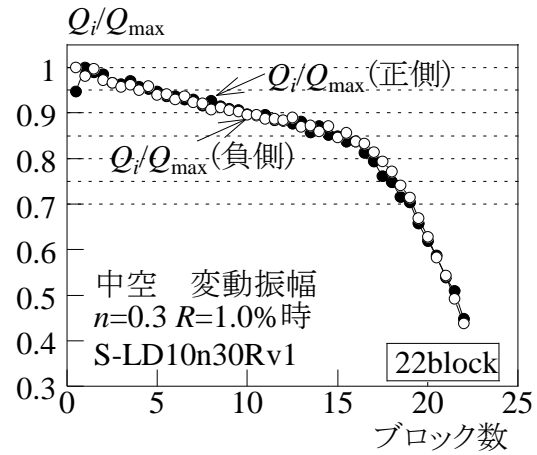
図 3.2-14 部材角-軸縮み関係

(5) 多数回繰返し特性(変動変位振幅の場合)(図 3.2-15、図 3.2-16)

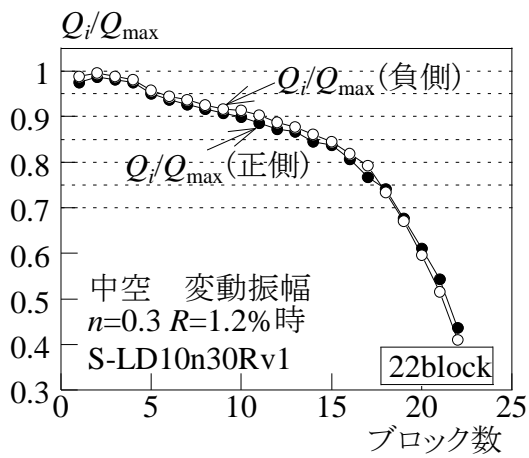
図 3.2-15、図 3.2-16 にそれぞれ  $l_k/D=10$ 、 $20$  の場合のピーク荷重の推移 ( $Q_i/Q_{\max}$ 、 $Q_i$  :  $i$  サイクル時の変位反転点の水平力、 $Q_{\max}$  : 最大耐力) を示す。変位振幅は 4 段階に設定しているが、大きいほうから数えて 3 段階分について示している (表 3.2-1 参照)。なお、横軸はブロック数であり、例えば LD10n30Rv1 試験体の場合、部材角  $R=0.6\%$ 、 $1.2\%$  については 1 ブロックに対し 1 プロット、部材角  $R=0.8\%$ 、 $1\%$  については 0.5 ブロックに対し 1 プロット、すなわち 1 ブロックに対し 2 プロット記載している (ブロックについては、図 3.2-4 参照)。



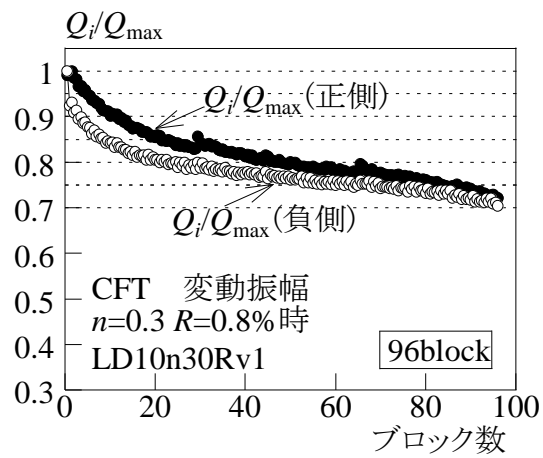
(a) S-LD10n30Rv1  $R=0.8\%$ 時



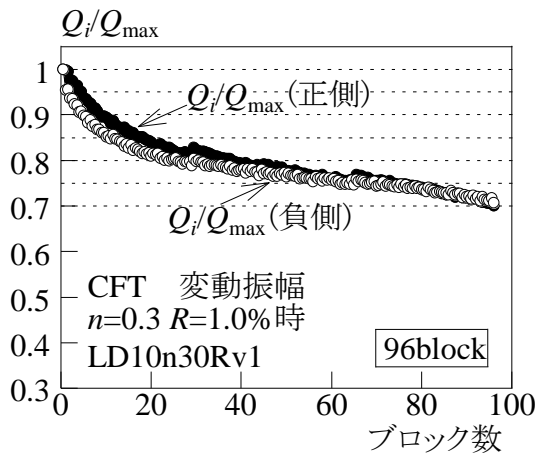
(b) S-LD10n30Rv1  $R=1.0\%$ 時



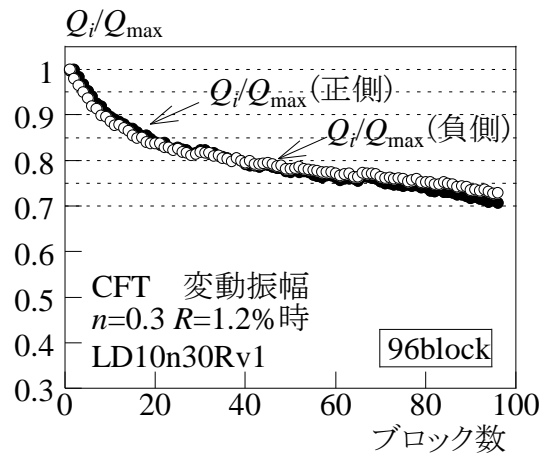
(c) S-LD10n30Rv1  $R=1.2\%$ 時



(d) LD10n30Rv1  $R=0.8\%$ 時

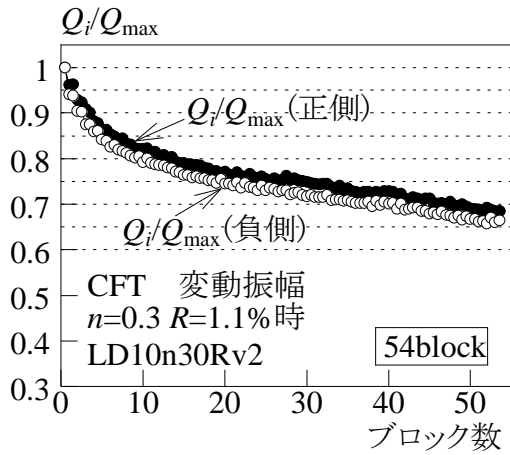


(e) LD10n30Rv1  $R=1.0\%$ 時

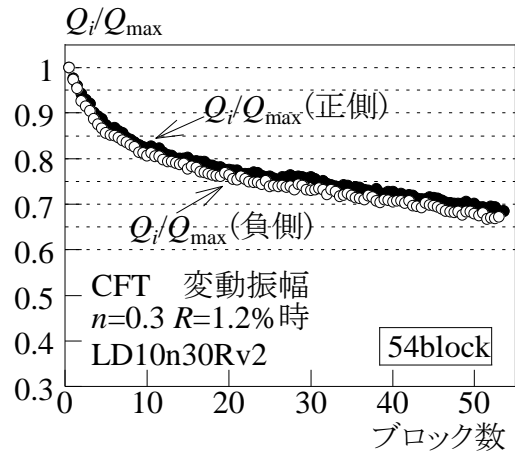


(f) LD10n30Rv1  $R=1.2\%$ 時

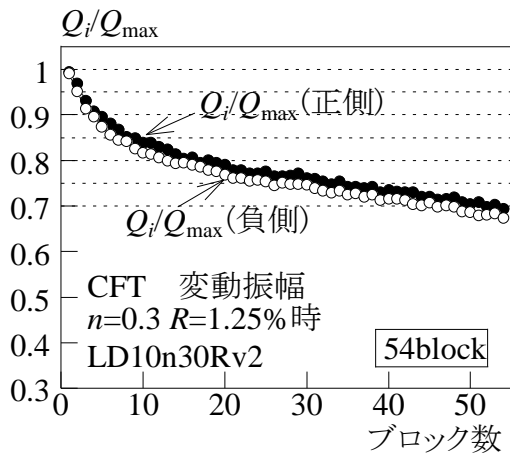
図 3.2-15 ピーク荷重の推移 (変動振幅,  $l_k/D=10$ ) (つづく)



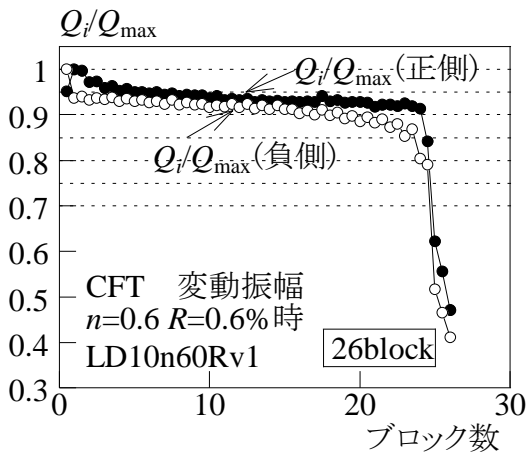
(g) LD10n30Rv2  $R=1.1\%$  時



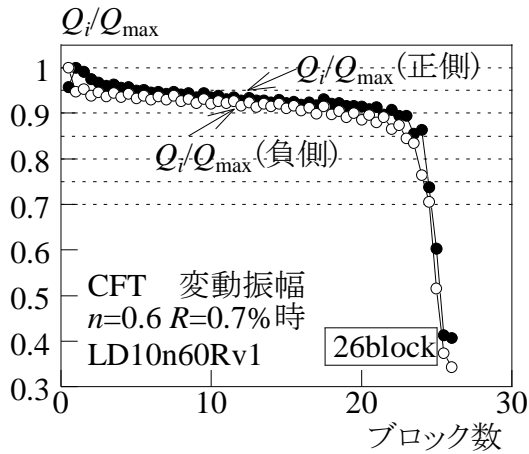
(h) LD10n30Rv2  $R=1.2\%$  時



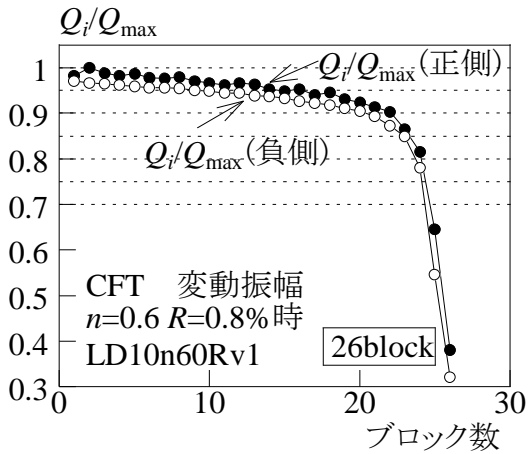
(i) LD10n30Rv2  $R=1.25\%$  時



(j) LD10n60Rv1  $R=0.6\%$  時

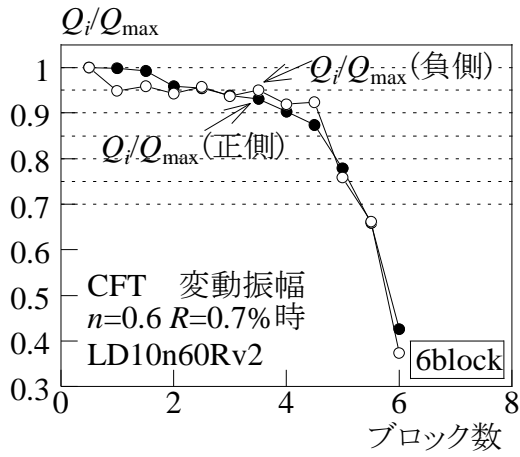


(k) LD10n60Rv1  $R=0.7\%$  時

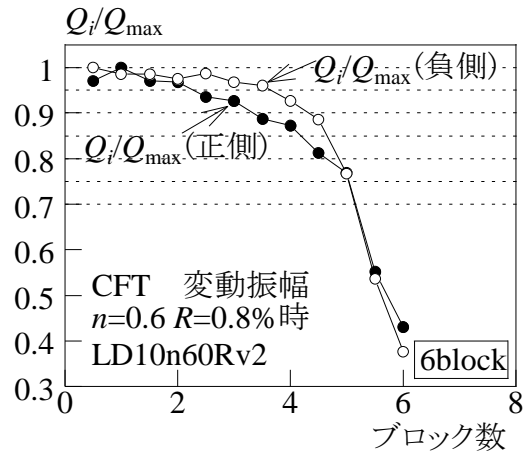


(l) LD10n60Rv1  $R=0.8\%$  時

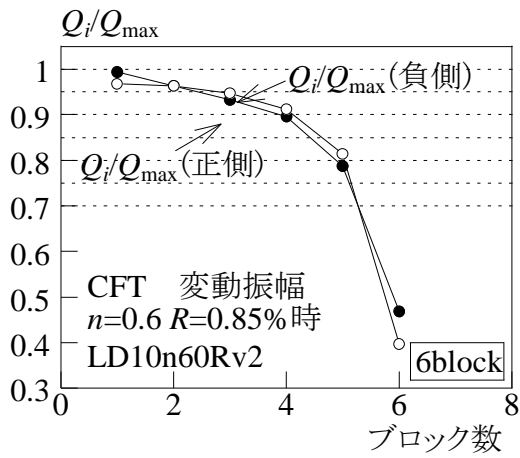
図 3.2-15 ピーク荷重の推移 (変動振幅,  $l_k/D=10$ ) (つづく)



(m) LD10n60Rv2  $R=0.7\%$ 時



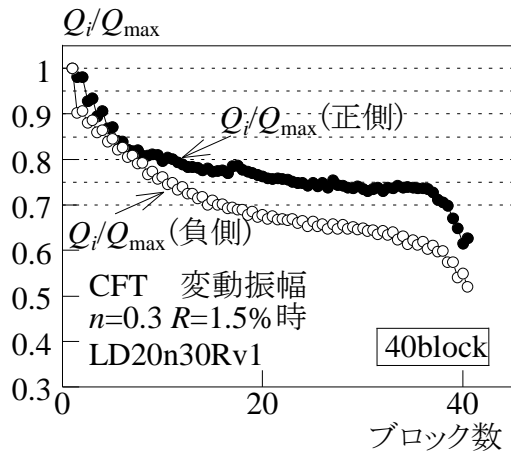
(n) LD10n60Rv2  $R=0.8\%$ 時



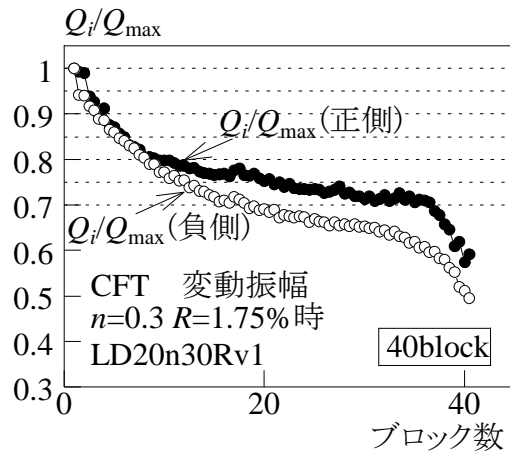
(o) LD10n60Rv2  $R=0.85\%$ 時

図 3.2-15 ピーク荷重の推移 (変動振幅,  $l_k/D=10$ ) (つづき)

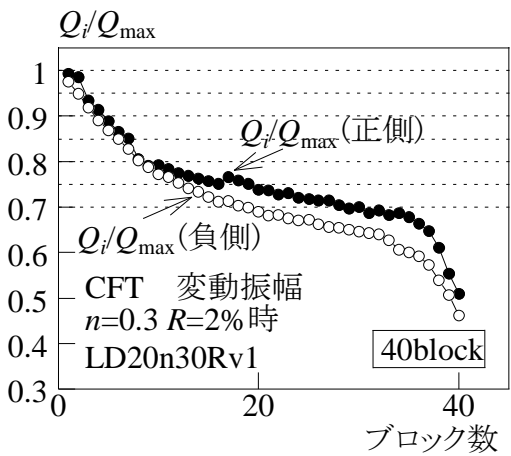




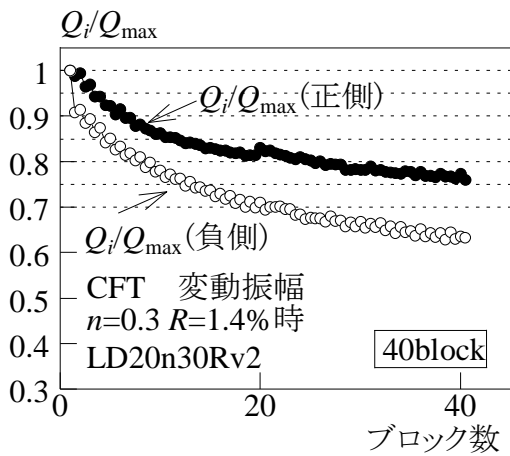
(a) LD20n30Rv1 R=1.5%時



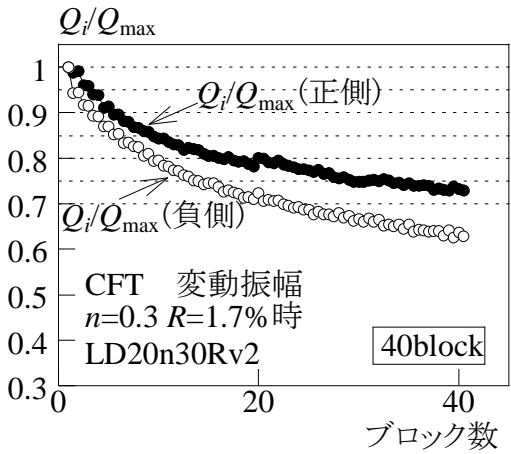
(b) LD20n30Rv1 R=1.75%時



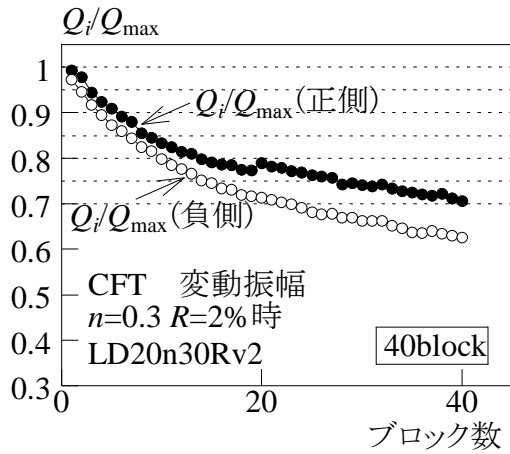
(c) LD20n30Rv1 R=2%時



(d) LD20n30Rv2 R=1.4%時



(e) LD20n30Rv2 R=1.7%時



(f) LD20n30Rv2 R=2%時

図 3.2-16 ピーク荷重の推移 (変動振幅,  $l_i/D=20$ )

(6) Miner 則の成立性の検討

1)  $l_k/D=10$  の場合

表 3.2-9～表 3.2-10 に、座屈長さ・断面せい比  $l_k/D=10$ 、軸力比 0.3 の場合の最大荷重の 95%、90%、85%、80%に耐力が低下した時のブロック数を示す。限界ブロック数は実験によって観察されたブロック数で、限界ブロック数（計算）は、Miner 則によって計算した限界ブロック数である。また、 $D$  値は限界ブロック数（計算）に対する実験による限界ブロック数の比である。表 3.2-9 によれば、限界ブロック数は、 $R=1\%$ の負側荷重のときが最も値が小さい。そのときの  $D$  値は概ね 1 程度である。表 3.2-10 によれば、限界ブロック数は、 $R=1.2\%$ の負側荷重のときが最も値が小さい。

表 3.2-9 実験値と計算値の比較と  $D$  値 (LD10n30Rv1)

			$B_{95\%}$	$B_{90\%}$	$B_{85\%}$	$B_{80\%}$
実験による 限界ブロック数	$R=1\%$	+	4	9	19	38
		-	2	5	11	24
	$R=1.2\%$	+	6	10	19	37
		-	5	8	16	37
$D=1$ となる 限界ブロック数（計算）		+	2.2	5.6	10.6	25.0
		-	1.9	4.2	11.4	24.6
$D$ 値 実験値/計算値	$R=1\%$	+	1.8	1.6	1.8	1.5
		-	1.1	1.2	1.0	1.0
	$R=1.2\%$	+	2.7	1.8	1.8	1.5
		-	2.7	1.9	1.4	1.5

表 3.2-10 実験値と計算値の比較と  $D$  値 (LD10n30Rv2)

			$B_{95\%}$	$B_{90\%}$	$B_{85\%}$	$B_{80\%}$
実験による 限界ブロック数	$R=1.1\%$	+	3	5	9	17
		-	3	4	7	13
	$R=1.2\%$	+	2	4	7	13
		-	1	3	5	10
	$R=1.25\%$	+	2	4	8	15
		-	2	4	7	12
$D=1$ となる 限界ブロック数（計算）		+	1.3	2.8	5.2	11
		-	0.92	2.2	4.9	10
$D$ 値 実験値/計算値	$R=1.1\%$	+	2.3	1.8	1.7	1.6
		-	3.2	1.8	1.4	1.3
	$R=1.2\%$	+	1.5	1.4	1.4	1.2
		-	1.1	1.4	1.0	1.0
	$R=1.25\%$	+	1.5	1.4	1.5	1.4
		-	2.2	1.8	1.4	1.2

そのときの  $D$  値は 1.0~1.4 であった。ただし、 $R=1.2\%$  の負側の最大荷重の 85% 耐力低下までの載荷ブロック数は一桁でありおおむね対応しているものと考えられる。

表 3.2-11 および表 3.2-12 に、軸力 0.6 の場合の最大荷重の 95%、90%、85%、80% に耐力が低下した時のブロック数を示す。限界ブロック数は実験によって観察されたブロック数で、限界ブロック数（計算）は、Miner 則によって計算した限界ブロック数である。また、 $D$  値は限界ブロック数（計算）に対する実験による限界ブロック数である。表 3.2-11 によれば、限界ブロック数は、 $R=0.7\%$  の負側載荷のときが最も値が小さい。そのときの  $D$  値は最大荷重の 95% で 0.1 程度、それ以外は 1.1~1.2 であった。表 3.2-12 によれば、限界ブロック数は小さく、3~5 である。 $D$  値は 0.6~1.5 であり、1 を下回るものが多い。

軸力比が 0.6 のとき、図 3.2-15 からわかるように耐力が最大耐力の 90% 程度になると急激に耐力が劣化していくことがわかる。一定軸力比 0.6 は実際には無いと思われるが、高軸力の場合は、制限を厳しくしておくことが必要である。

表 3.2-11 実験値と計算値の比較と  $D$  値 (LD10n60Rv1)

			$B_{95\%}$	$B_{90\%}$	$B_{85\%}$	$B_{80\%}$
実験による 限界ブロック数	$R=0.7\%$	+	5	22	25*	25*
		-	1	17	23	24
	$R=0.8\%$	+	15	23	24	25*
		-	9	21	23	24
$D=1$ となる 限界ブロック数（計算）		+	3.8	18	20	22
		-	7.8	16	19	21
$D$ 値 実験値/計算値	$R=0.7\%$	+	1.3	1.2	1.3	1.1
		-	0.1	1.1	1.2	1.1
	$R=0.8\%$	+	3.9	1.3	1.2	1.1
		-	1.2	1.3	1.2	1.1

\*印はその耐力値を超えて耐力が低下しているが、参考のために計算を行った。

表 3.2-12 実験値と計算値の比較と  $D$  値 (LD10n60Rv2)

			$B_{95\%}$	$B_{90\%}$	$B_{85\%}$	$B_{80\%}$
実験による 限界ブロック数	$R=0.8\%$	+	3	4	5	5
		-	4	5	-	5
	$R=0.85\%$	+	3	4	5	-
		-	3	-	5	-
$D=1$ となる 限界ブロック数（計算）		+	2.0	6.3	6.8	8
		-	2.86	5.1	6.9	8
$D$ 値 実験値/計算値	$R=0.8\%$	+	1.5	0.6	0.7	0.6
		-	1.4	1.0	-	0.6
	$R=0.85\%$	+	1.5	0.6	0.7	-
		-	1.0	-	0.7	-

## 2) $l_k/D=20$ の場合

表 3.2-13、3.2-14 に、 $l_k/D=20$  の場合の、予想される限界繰返し回数（計算値）と実験により得られた限界繰返し回数の値を示す。計算値は、回帰分析により求めた限界繰返し数から、Miner 則にしたがって求めたものである。

LD20n30Rv1 試験体については、令和 1 年度は正側において予定よりも大きな変位振幅を与えてしまったので、 $R=2.3\%$ として補正した予想サイクル数も示した。前述の 1)  $l_k/D=10$  の場合、実験値は計算値の 1.3 倍程度となっていたが、令和 1 年度は異なる傾向であった。まず、正側については  $N_{95\%}$ では実験値のほうが大きく、そのほかの場合は実験値のほうが限界繰返し回数は小さくなっていた。また、補正した値と比較した場合は、 $N_{80\%}$ 以外は実験値のほうが大きなサイクル数となっていた。負側については、 $N_{95\%}$ では実験値のほうが大きく、それ以外は実験値のほうが小さくなっていた。ただし、正側と負側の予想サイクル数を比較すると、正側のほうが約 1.3~1.7 程度大きく、回帰分析の精度も影響していると考えられる。

表 3.2-13 実験値と計算値の比較と  $D$  値 (LD20n30Rv1)

		$N_{95\%}$	$N_{90\%}$	$N_{85\%}$	$N_{80\%}$
正側	実験による限界サイクル数	16	28	46	52
	$D=1$ となる限界ブロック数 (計算)	2.1	5.6	11.5	20
	$D=1$ となる限界サイクル数 (計算)	13	33	69	120
	$D=1$ となる限界サイクル数 (補正)	7.9	23.4	44.5	77.1
	実験/計算	1.23	0.85	0.67	0.43
	実験/予想 (補正)	2.03	1.20	1.03	0.67
負側	実験による限界サイクル数	10	22	34	52
	$D=1$ となる限界ブロック数 (計算)	1.5	4.2	6.7	13.9
	$D=1$ となる限界サイクル数 (計算)	9.1	25.2	40.1	83.6
	$D=1$ となる限界サイクル数 (補正)	5.2	18.3	23.8	49.7
	実験/計算	1.09	0.87	0.85	0.62

表 3.2-14 実験値と計算値の比較と  $D$  値 (LD20n30Rv2)

		$N_{95\%}$	$N_{90\%}$	$N_{85\%}$	$N_{80\%}$
正側	実験による限界サイクル数	16	34	52	82
	$D=1$ となる限界ブロック数 (計算)	2.5	6.4	13.2	23.0
	$D=1$ となる限界サイクル数 (計算)	15	38	79	138
	実験/計算	1.08	0.89	0.66	0.59
負側	実験による限界サイクル数	10	22	40	58
	$D=1$ となる限界ブロック数 (計算)	1.7	4.8	7.7	16.0
	$D=1$ となる限界サイクル数 (計算)	10.5	29	46	96
	実験/計算	0.95	0.77	0.87	0.60

表 3.2-14 に示す試験体 LD20n30Rv2 についても同様の傾向で、 $N_{95\%}$ についてはおおむね実験値/計算値の値は正側、負側でそれぞれ 1.08、0.95 でおおむね 1 であり、 $N_{90\%}$ 以下の場合には 1 未満の値となっていた。

一部、振幅が変わってしまったことで、影響がわかりにくくなっているが、回帰式を求める際に下限とするなどの配慮が必要であると考えられる。

### 3.2.4 角形 CFT 柱部材の多数回繰返し载荷実験のまとめと今後の課題

#### (1) まとめ

- 1) 一定変位振幅繰返し载荷の部材角一限界繰返し回数（最大荷重の 95%、90%、85%、80%に耐力が低下した時のサイクル数  $N_{95\%}$ 、 $N_{90\%}$ 、 $N_{85\%}$ 、 $N_{80\%}$ ）関係は、既往の研究<sup>3.2-1)</sup>とほぼ同じ傾向を示しており、軸力比  $n=0.3$  の場合、部材角一限界繰返し回数関係はほぼ直線式で表現できることがわかった。このことから、一定変位振幅繰返し载荷の部材角一限界繰返し回数関係を一つの試みとして回帰分析により定式化した。
- 2) 上記 1) で定式化した部材角一限界繰返し回数関係を用い、Miner 則が成り立つかどうかの検討を行った結果、座屈長さ・断面せい比が 10 の場合は、計算値よりも実験値のほうが限界繰返し回数が多く、座屈長さ・断面せい比が 20 の場合は、計算値よりも実験値のほうが限界繰返し回数が少なくなっていたが、おおむね対応していた。

#### (2) 今後の課題

今後に残された課題を以下に記す。

- 1) 変動軸力下における実験を行っていないので、変動軸力を実験変数として多数回繰返し実験を行う必要がある。
- 2) 令和 1 年度行った変動変位振幅繰返し载荷の結果ならびに次年度に実施する変動軸力による実験結果を考慮し、設計用疲労曲線の検討を行う必要がある。

**【参考文献】**

- 3.2-1) 城戸將江、津田恵吾、福元敏之、一戸康生、森田耕次：一定変位振幅繰返し载荷を受ける角形 CFT 柱の構造性能、日本建築学会構造系論文集、第 84 卷、第 759 号、pp.725-735、2019.5
- 3.2-2) 建築研究所：長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の耐震安全性に関する検討、建築研究資料 No.160、2014.7

### 3.3 CFT 柱部材の多数回繰り返し载荷実験と疲労評価の検討 (R2 年度実施)

#### 3.3.1 CFT 柱部材の多数回繰り返し载荷実験

##### (1) 試験体

試験体柱は、3.2 で記した令和 1 年度と同様に□-150×150 (BCR295 ; 1/5~1/8 縮尺程度) で、試験体の径高さ比  $L/D$  および幅厚比  $D/t$  は、令和 1 年度に中心に実施した  $L/D=10.0$ 、 $D/t=25$  ( $t=6\text{mm}$ ) とする。図 3.3-1 に試験体形状を示す。

CFT 柱部材の多数回繰り返し特性を把握する上で、令和 1 年度に実施していない変動軸力を考慮した実験を実施し、試験体数は 5 体とする。

また、令和 1 年度の実験は片持ち柱形式で実施したが、令和 2 年度は柱の上下端をともに固定した逆対称加力形式とした。鋼管の上下端には、厚さ 50mm のエンドプレートで完全溶け込み溶接により取り付ける。

コンクリートの充填は、図 3.3-1 に示す上部エンドプレートにあけたコンクリート注入孔(70Φ)より行う。また、試験体上部には空気抜き孔(15Φ)を 4 つ設けた。

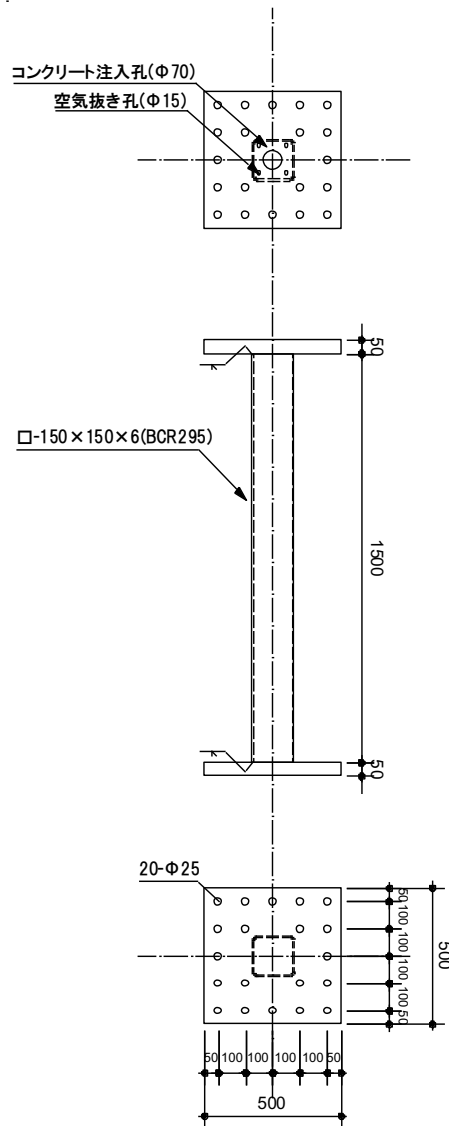


図 3.3-1 試験体形状



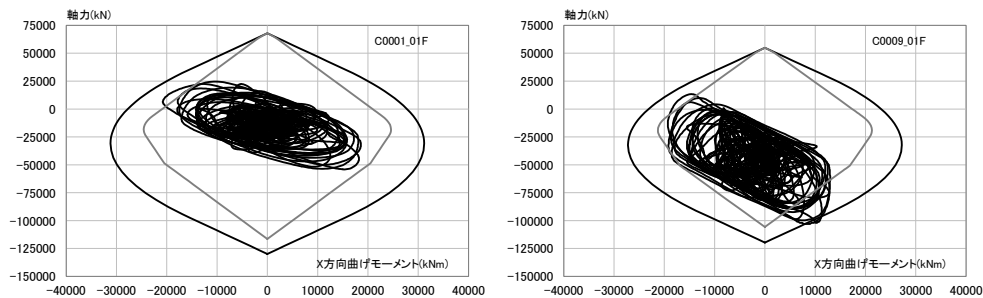
## (2) 実験パラメータ

実験パラメータは、軸力比および変位振幅とした。

軸力比は、平成 30 年度に実施した CFT32 モデルの解析結果<sup>3.3-1)</sup>を参考に決定した。図 3.3-2 に CFT32 モデルの解析結果の一例を示す。図より、外周の柱では軸力比がおよそ-0.2~0.4 の幅で変動しており、内側の柱では軸力比がおよそ-0.1~0.8 の幅で変動していることがわかる。試験装置の定格荷重を考慮し、解析結果から軸力のパラメータを  $n=0.15\pm 0.35$ 、 $0.3\pm 0.3$ 、 $0.3\pm 0.4$  の 3 水準とした。ここで、変動軸力は図 3.3-3 に示すように、変位最大時に最大軸力（圧縮）、変位最小時に最小軸力（引張）となるように与える。なお、圧縮側の軸力は CFT 柱の終局軸力に対して、引張側の軸力は鉄骨部分のみの終局軸力に対して軸力比を乗じたものを与える。

変位振幅は、軸力比  $n=0.15\pm 0.35$  は、令和 1 年度に実施した軸力比  $n=0.15$  の試験体と同じ  $R=0.01$ 、 $0.015[\text{rad}]$  とした。これらの実験の結果、荷重低下が生じる繰り返しが小さかったことから、軸力比  $n=0.3\pm 0.3$  の試験体については振幅を  $R=0.005$ 、 $0.008[\text{rad}]$ 、軸力比  $0.3\pm 0.4$  の試験体については振幅を  $R=0.005[\text{rad}]$  とした。

表 3.3-1 に試験体一覧、表 3.3-2 に諸耐力一覧、図 3.3-4 に  $M-N$  関係、図 3.3-5 に本実験と同じ径高さ比・幅厚比の既往の実験結果<sup>3.3-2、3.3-3)</sup>を示す。ここで、試験体耐力は文献 3.3-4)における中柱式より求めた。



(a)外周の柱

(b)内側の柱

図 3.3-2 CFT32 モデルの解析結果例

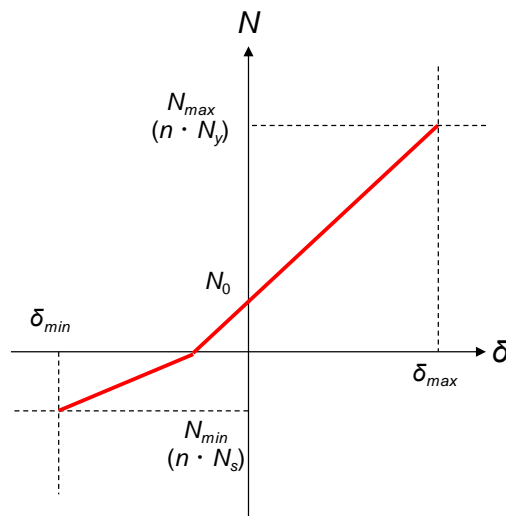


図 3.3-3 変動軸力の作用方法

表 3.3-1 試験体一覧

No.	試験体名	幅厚比 $D/t$	径高さ比 $Lk/D$	軸力比 $n$	振幅 $R[\text{rad}]$		
1	LD10-n15v35R1-C	25	10	変動	一定		
2	LD10-n15v35R15-C					0.15±0.35	0.01
3	LD10-n30v30R05-C					0.3±0.3	0.015
4	LD10-n30v30R08-C						0.005
5	LD10-n30v40R05-C						0.008
				0.3±0.4	0.005		

※試験体名称

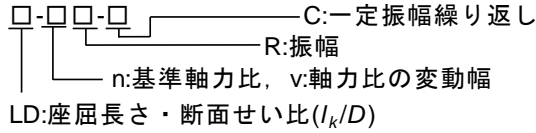


表 3.3-2 諸耐力一覧

軸力		最大耐力	
軸力比 $n$	作用軸力 $N_a[\text{kN}]$	曲げモーメント $M_u[\text{kNm}]$	せん断力 $Q_u[\text{kN}]$
-0.2	-283.2	60.5	80.7
-0.1	-141.6	68.1	90.8
0	0.0	75.6	100.9
0.15	398.9	85.4	113.8
0.3	797.9	80.5	107.4
0.5	1329.8	56.4	75.2
0.6	1595.7	43.7	58.2
0.7	1861.7	30.9	41.3

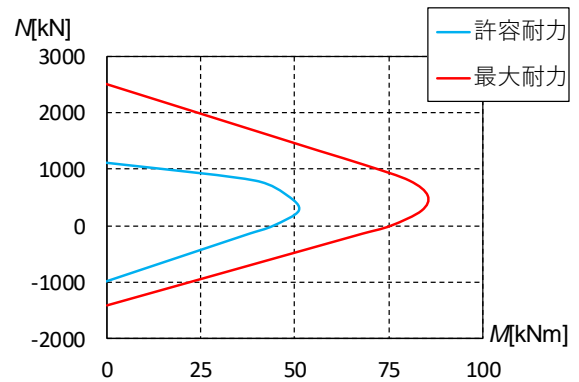
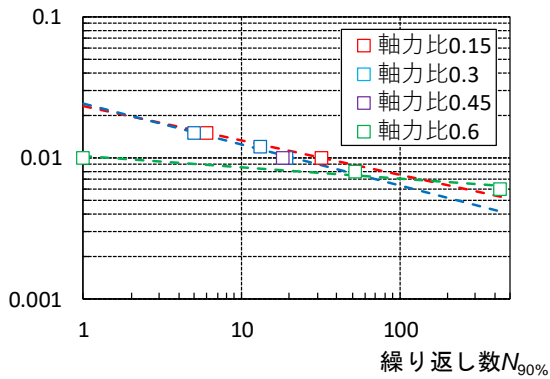


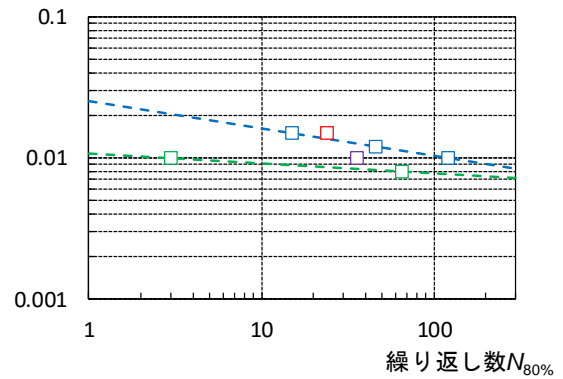
図 3.3-4  $M-N$ 関係

部材角振幅 $R[\text{rad}]$



(a) $N_{90\%}$

部材角振幅 $R[\text{rad}]$



(b) $N_{80\%}$

図 3.3-5 既往の実験結果 <sup>3.3-2, 3.3-3</sup>

### (3) 使用材料

#### 1) 鋼素材の材料試験

試験体を用いる鋼材について JIS Z 2241 に従い引張試験を実施した。

表 3.3-3 に使用材料の機械的性質、図 3.3-6 に応力-ひずみ関係を示す。

表 3.3-3 鋼材の機械的性質

	実測板厚	降伏点	引張強さ	降伏比	伸び
	mm	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%	%
PL6	5.99	425	474	90	19

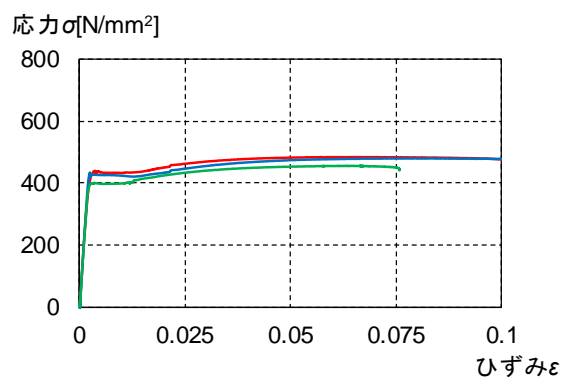


図 3.3-6 鋼材の応力ひずみ関係

## 2) コンクリートの材料試験

鋼管に充填するコンクリートについて JIS A 1132 に従いテストピースを製作し、JIS A 1108 により圧縮試験、JIS A 1113 により割裂試験を行う。テストピースは現場封緘養生とする。

表 3.3-4 にコンクリート調合表、表 3.3-5 にコンクリートの性質、図 3.3-7 に応力-ひずみ関係を示す。コンクリート材料試験は、1 週強度、4 週強度、1 体目載荷時(材齢 33 日)、5 体目載荷時(材齢 62 日)の 4 回実施したが、ここでは制御軸力の計算に用いた 1 体目載荷時の結果を示す。

表 3.3-4 コンクリート調合表

呼び強度	水セメント比	セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤	スランブフロー
N/mm <sup>2</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	cm
54	35.5	479	170	783	886	6.95	59

表 3.3-5 コンクリートの機械的性質

圧縮強度	引張強度	静弾性係数	ポアソン比	最大荷重時ひずみ
$\sigma_c$	$\sigma_t$	$E_c$	$\nu_c$	$\epsilon_c$
N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>		$\mu$
65.3	4.8	36390	0.21	2677

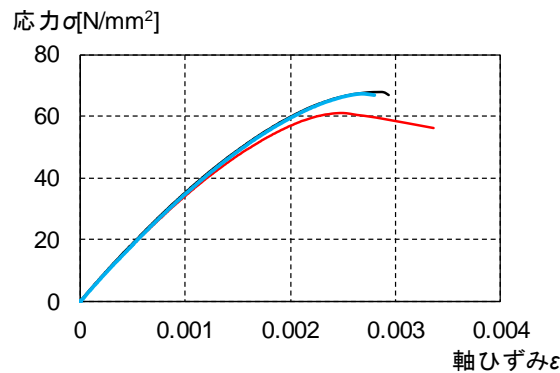


図 3.3-7 コンクリートの応力ひずみ関係

### 3) 角形 CFT 柱の短柱圧縮試験

柱試験部分の圧縮特性把握のため、アムスラーによる短柱圧縮試験を実施する。試験体の高さは柱せいの3倍とした。図 3.3-8 に圧縮試験の概要、写真 3.3-1 に圧縮試験状況を示す。

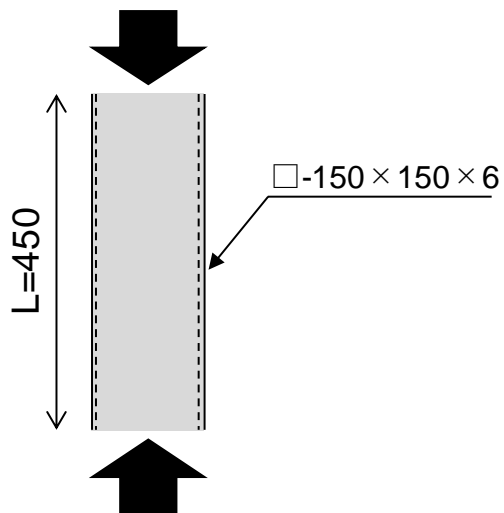


図 3.3-8 短柱圧縮試験概要



写真 3.3-1 短柱圧縮試験の状況

図 3.3-9 に短柱圧縮試験での圧縮軸力と軸ひずみの関係、写真 3.3-2 に最終破壊状況を示す。図 3.3-9 には参考として素材試験で得られた終局軸力の値  $N_y=2660$ [kN]を示している。なお、軸ひずみは試験体の軸縮みを柱高さ(450mm)で除した値である。

図 3.3-9 より、素材試験より得られた終局軸力近くまで荷重は上昇しているが、終局軸力には届かずに荷重の低下が始まっている。素材試験の結果を見ると、荷重の低下が始まった際のひずみは鋼材の荷重低下ひずみよりも小さく、充填コンクリートの損傷が大きく進展したことにより、荷重が低下したと考えられる。

写真 3.3-2 より内部コンクリートの状況を確認すると、鉄骨の局部座屈性状と同様の形状で内部コンクリートが圧壊している。

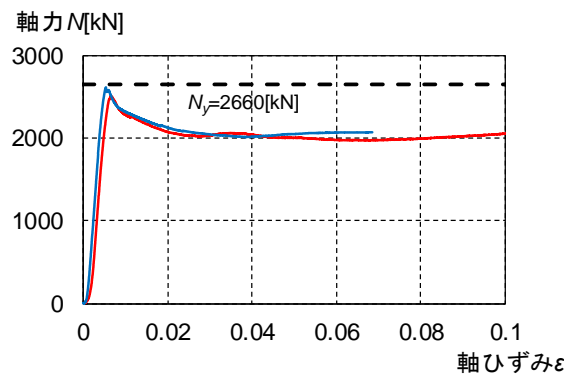
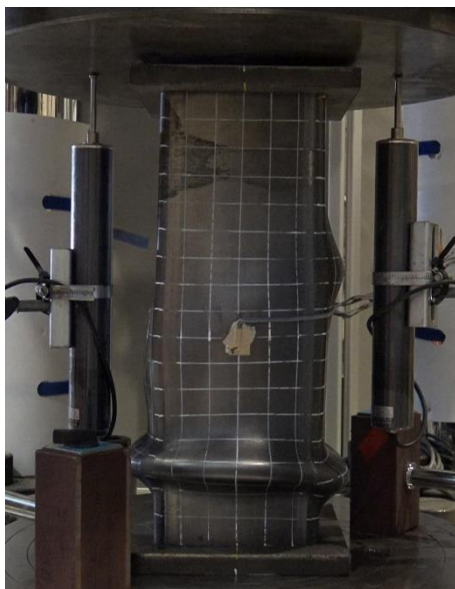


図 3.3-9 軸力軸ひずみ関係



(a)外観



(b)内部コンクリート

写真 3.3-2 最終破壊状況

#### (4) 実験方法

##### 1) 加力方法

加力装置を図 3.3-10 に、加力状況を写真 3.3-3 に示す。加力は、建研式加力方法を採用し、反力床上に敷設した加力フレームの上に試験体を設置し、上下の加力フレームとベースプレートとを緊結することで試験体を固定し、上部に取り付いた加力装置を介して、鉛直方向の 2000kN ジャッキにより軸力を導入した状態で、下部に取り付いた 500kN アクチュエーターにより水平方向の一定振幅載荷を行う。また、実験終了は原則として、正載荷時の荷重が最大荷重に対して 70%に低下し、負載荷時の荷重が 90%に低下した時点までとするが、載荷時間の都合から負載荷時の荷重が 90%まで低下せずに終了した試験体もある。

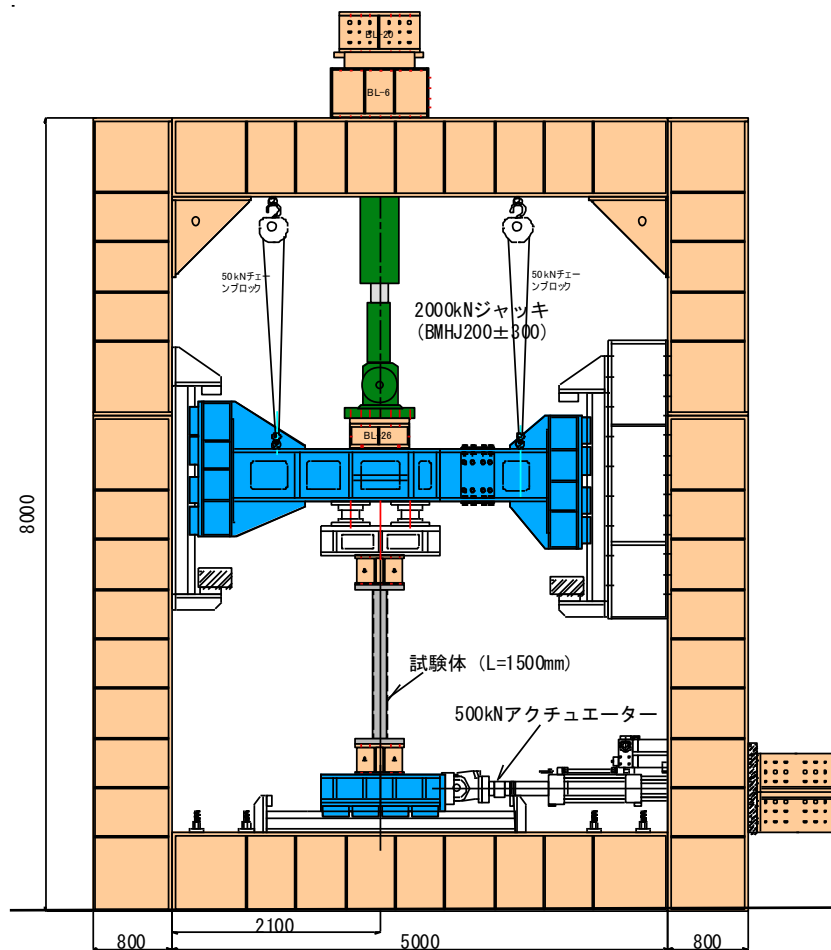
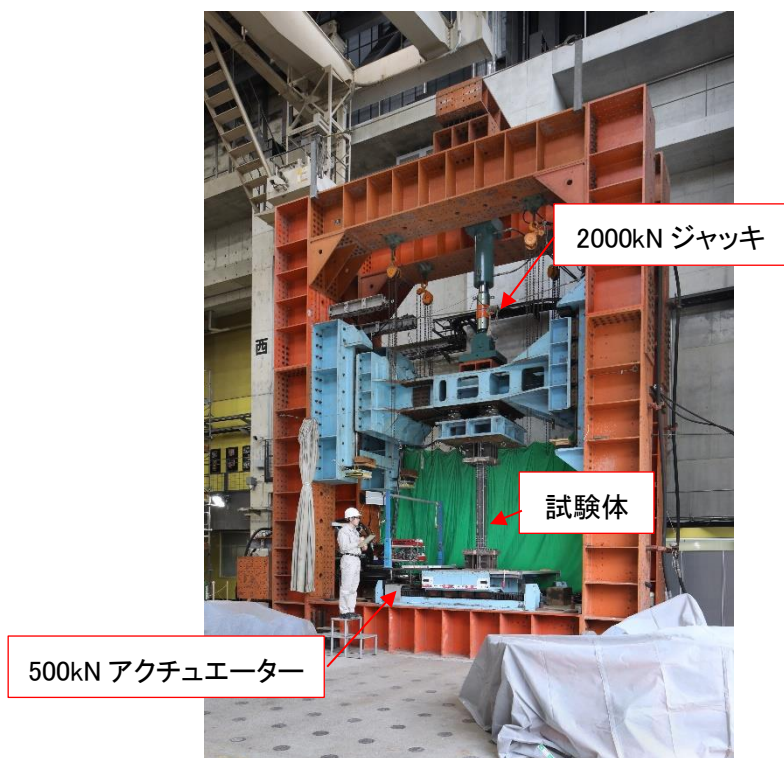
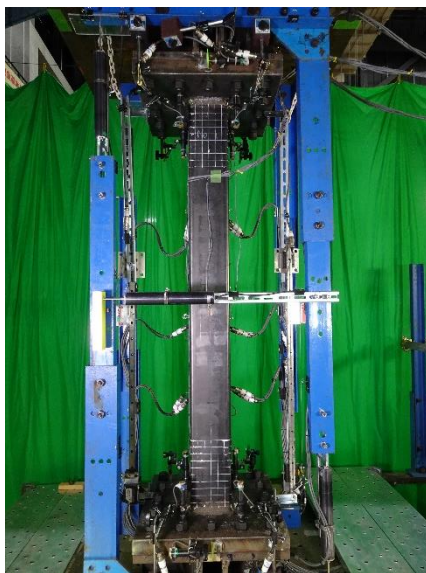


図 3.3-10 加力装置



(a)実験状況全景



(b)実験状況拡大

写真 3.3-3 実験状況



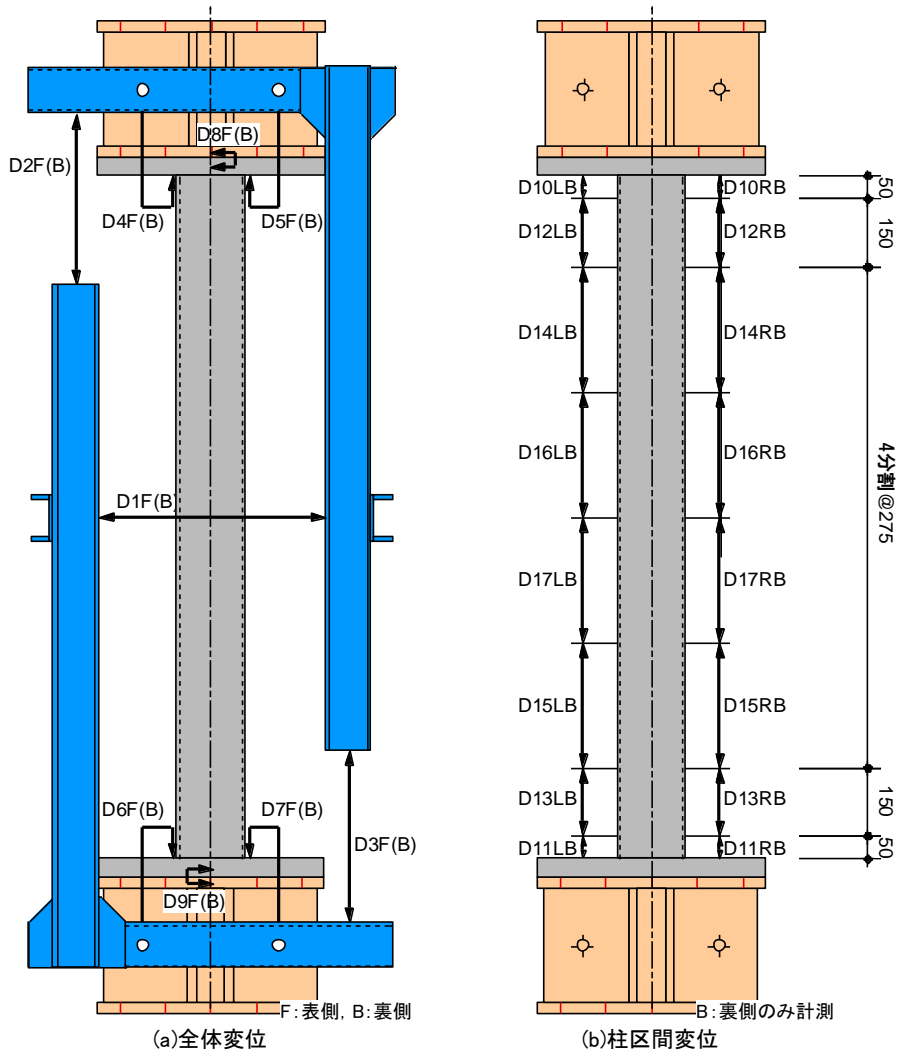
## 2) 計測方法

表 3.3-6 に計測項目一覧、図 3.3-11 に変位計測位置、図 3.3-12 に局部座屈変形計測概要、図 3.3-13 にひずみ計測位置を示す。

計測は、試験体の作用荷重、柱部材の水平、鉛直、局部変形、区間伸び変形、鋼管フランジおよびウェブのひずみ等について行う。また、柱材端部の局部座屈高さについても計測を行う。実験時の変位振幅は、図 3.3-11 の図に従い、全体変形から回転変形を除くことにより求める。局部座屈高さについては、試験体の下半分についてのみ計測を行った。

表 3.3-6 計測項目一覧

	計測項目	計測点数	計測点名称	備考
荷重	柱せん断力	1	P	
	柱軸力	2	NL, NR	
	分力計	8	L1-X, L2-X, L3-X, L4-X L1-Z, L2-Z, L3-Z, L4-Z	分力計は計4台 (水平・鉛直方向)
	小計	11		
変形	柱水平方向変形	2	D1F, D1B	
	柱軸方向変形	4	D2F, D3F D2B, D3B	
	局部浮き上がり 変形	8	D4F, D5F, D6F, D7F D4B, D5B, D6B, D7B	
	試験体と加力治具 のずれ変形	4	D8F, D9F D8B, D9B	
	柱区間変形	16	D10LB, D11LB, D12LB, D13LB D14LB, D15LB, D16LB, D17LB D10RB, D11RB, D12RB, D13RB D14RB, D15RB, D16RB, D17RB	
	局部座屈変形	2	LB-L, LB-R	
	小計	36		
ひずみ	柱フランジ	6	SF1L, SF2L, SF3L SF1R, SF2R, SF3R	
	柱ウェブ	2	SW1F, SW1B	
	小計	8		
計測点数合計		55		



$\delta = \delta_t - \delta_r$   
 $\delta_t = D1(F, R) - (D8(F, R) + D9(F, R))$   
 $\delta_r = \theta \times h$   
 $\theta = (\theta_1 + \theta_2) / 2$   
 $\theta_1 = (D4(F, B) - D5(F, B)) / d$   
 $\theta_2 = (D6(F, B) - D7(F, B)) / d$   
 \*: DO(F,B) は表裏の平均値を示す。

変位振幅      全体変形      回転変形

図 3.3-11 変位計測位置

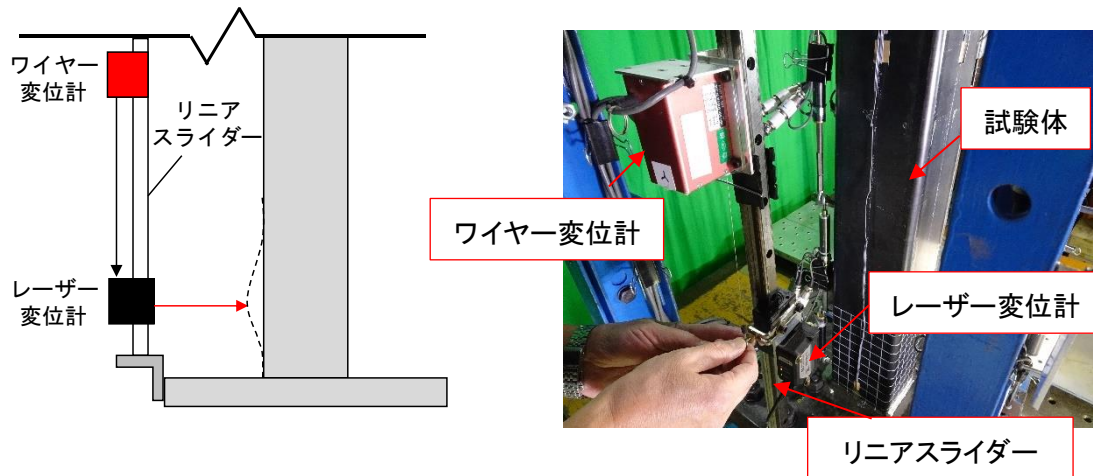


図 3.3-12 局部座屈変形計測概要

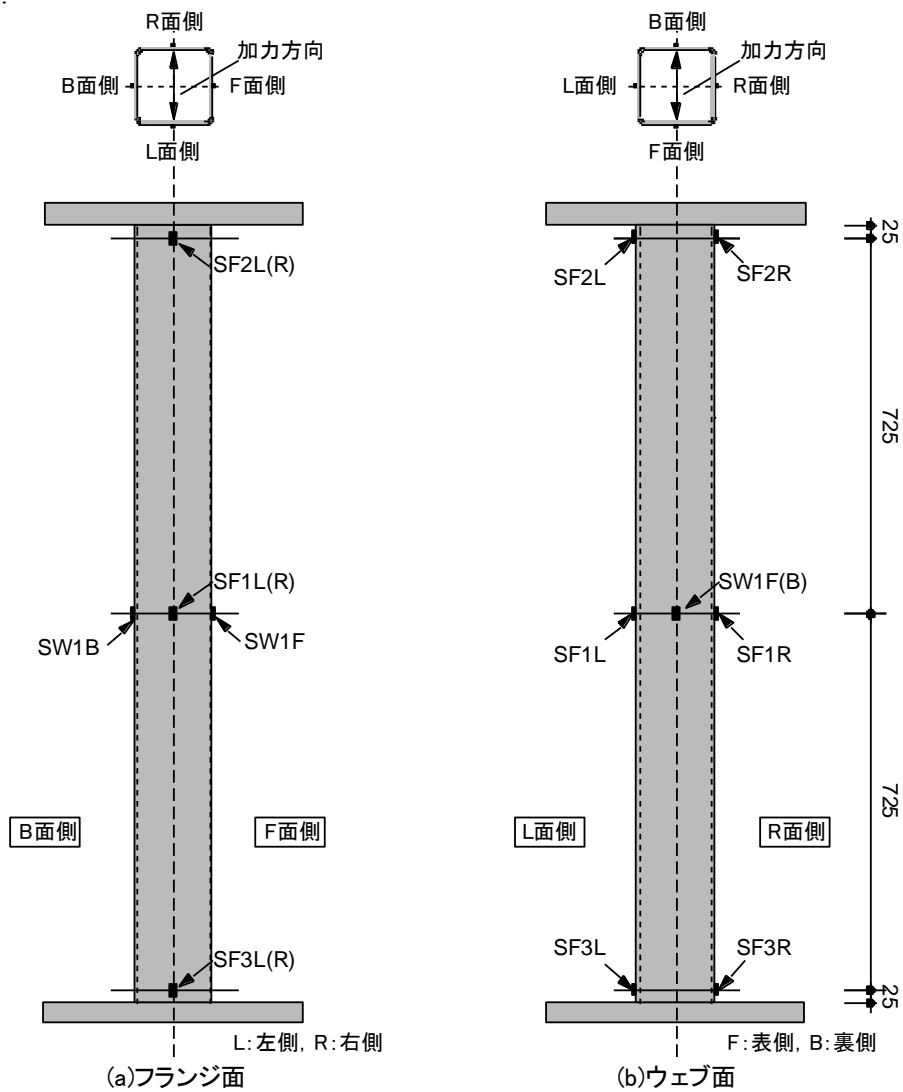


図 3.3-13 ひずみ計測位置

## (5) 実験結果

### 1) 実験経過および破壊性状

以下に、各試験体の実験経過を示す。

LD10-n15v35R1-C 試験体 ( $D/t=25$ 、 $L/D=10$ 、 $n=0.15\pm 0.35$ 、 $R=1/100$ ) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、最大荷重に到達した。最大荷重時に、鋼管に目に見える損傷は見られなかった。その後も、鋼管の損傷は見られず、+4 サイクルで荷重が最大荷重の 90% を下回った。荷重が最大荷重の 70% を下回った +17 サイクルにも、鋼管には局部座屈は生じていなかった。

LD10-n15v35R15-C 試験体 ( $D/t=25$ 、 $L/D=10$ 、 $n=0.15\pm 0.35$ 、 $R=1/67$ ) では、1 サイクル目で柱頭・柱脚が曲げ降伏した後、最大荷重に到達した。最大荷重時に、鋼管に目に見える損傷は見られなかった。その後、+2 サイクルで鋼管に局部座屈が見られ始め、+3 サイクルで荷重が最大荷重の 90% を下回った。最終的な鋼管の座屈波高さは 2.5mm 程度であった。

LD10-n30v30R05-C 試験体 ( $D/t=25$ 、 $L/D=10$ 、 $n=0.3\pm 0.3$ 、 $R=1/200$ ) では、2 サイクル目で最大荷重に到達した。最大荷重時に、鋼管に目に見える損傷は見られなかった。その後も、鋼管の損傷は見られず、+8 サイクルで荷重が最大荷重の 90% を下回った。荷重が最大荷重の 70% を下回った +60 サイクルにも、鋼管には局部座屈は生じていなかった。また、載荷を終了した 120 サイクル終了時にも柱端部に貼付したひずみゲージの値は降伏ひずみに達していなかった。

LD10-n30v30R08-C 試験体 ( $D/t=25$ 、 $L/D=10$ 、 $n=0.3\pm 0.3$ 、 $R=1/125$ ) では、2 サイクル目で最大荷重に到達した。最大荷重時に、鋼管に目に見える損傷は見られなかった。その後も、鋼管の損傷は見られず、+4 サイクルで荷重が最大荷重の 90% を下回った。荷重が最大荷重の 70% を下回った +17 サイクルにも、鋼管には局部座屈は生じていなかった。また、載荷を終了した 60 サイクル終了時にも柱端部に貼付したひずみゲージの値は降伏ひずみに達していなかった。

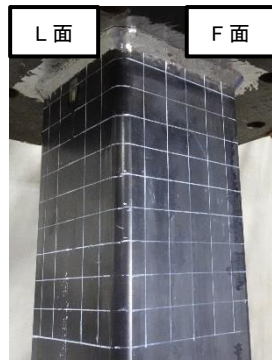
LD10-n30v40R05-C 試験体 ( $D/t=25$ 、 $L/D=10$ 、 $n=0.3\pm 0.4$ 、 $R=1/200$ ) では、1 サイクル目で最大荷重に到達した。最大荷重時に、鋼管に目に見える損傷は見られなかった。その後も、鋼管の損傷は見られず、+4 サイクルで荷重が最大荷重の 90% を下回った。荷重が最大荷重の 70% を下回った +10 サイクルにも、鋼管には局部座屈は生じていなかった。また、載荷を終了した 50 サイクル終了時にも柱端部に貼付したひずみゲージの値は降伏ひずみに達していなかった。

以上より、LD10-n15v35R15-C 試験体には鋼管の局部座屈が見られたが、その他の試験体には鋼管の損傷は見られなかった。写真 3.3-4~3.3-8 に実験終了後の各試験体の写真を示す。

また、鋼管に損傷が見られなかったことから、全試験体とも柱頭と柱脚の鋼管をはがして、内部コンクリートの状況を確認した。写真 3.3-9~3.3-13 に内部コンクリートの状況を示す。振幅が 1/125 を上回る試験体については、内部コンクリートが大きく損傷していることがわかる。しかし、振幅が 1/200 の試験体のうち LD10-n30v30R05-C 試験体は、柱脚部付近で大きな損傷が見られるが、LD10-n30v40R05-C 試験体は内部コンクリートの損傷もほとんど見られないことがわかる。



(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱頭部詳細



(d) R-B 面柱頭部詳細



(e) L 面全景



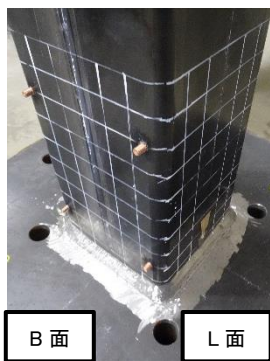
(f) F 面全景



(g) R 面全景



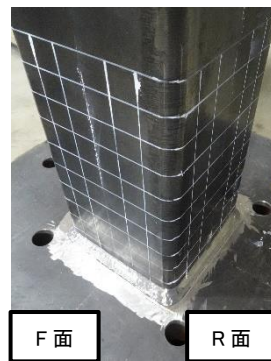
(h) B 面全景



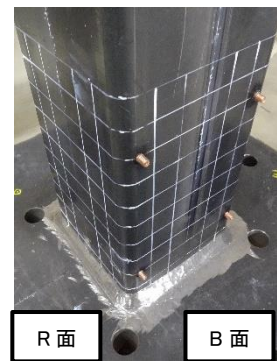
(i) B-L 面柱脚部詳細



(j) L-F 面柱脚部詳細



(k) F-R 面柱脚部詳細



(l) R-B 面柱脚部詳細

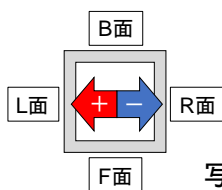
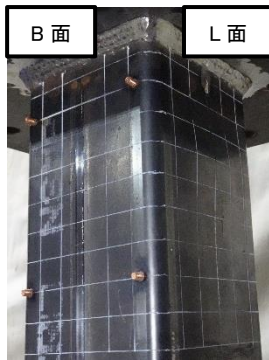
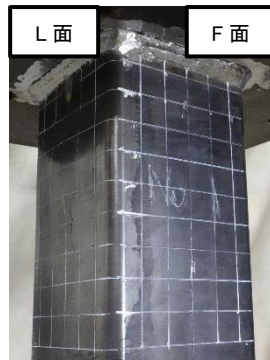


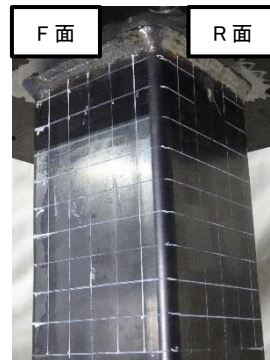
写真 3.3-4 LD10-n15v35R1-C の最終状況(軸力比  $0.15 \pm 0.35$ 、振幅  $1/100$ )



(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱頭部詳細



(d) R-B 面柱頭部詳細



(e) L 面全景



(f) F 面全景



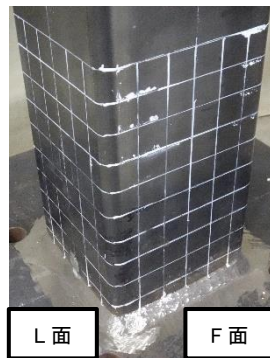
(g) R 面全景



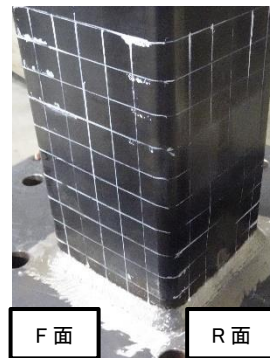
(h) B 面全景



(i) B-L 面柱脚部詳細



(j) L-F 面柱脚部詳細



(k) F-R 面柱脚部詳細



(l) R-B 面柱脚部詳細

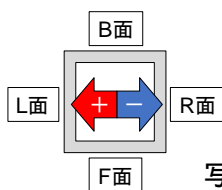


写真 3.3-5 LD10-n15v35R15-C の最終状況(軸力比  $0.15 \pm 0.35$ 、振幅  $1/67$ )



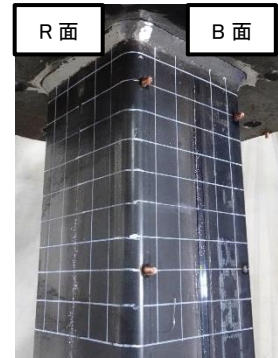
(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱頭部詳細



(d) R-B 面柱頭部詳細



(e) L 面全景



(f) F 面全景



(g) R 面全景



(h) B 面全景



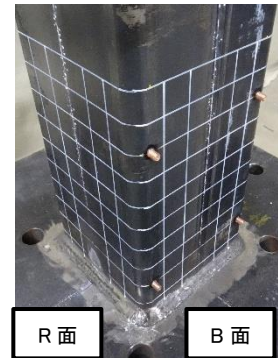
(i) B-L 面柱脚部詳細



(j) L-F 面柱脚部詳細



(k) F-R 面柱脚部詳細



(l) R-B 面柱脚部詳細

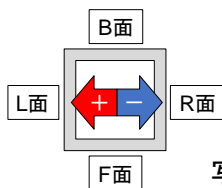


写真 3.3-6 LD10-n30v30R05-C の最終状況 (軸力比  $0.3 \pm 0.3$ 、振幅  $1/200$ )



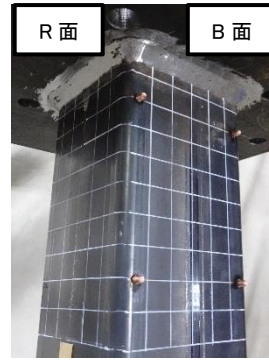
(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱頭部詳細



(d) R-B 面柱頭部詳細



(e) L面全景



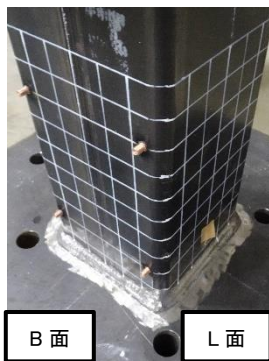
(f) F面全景



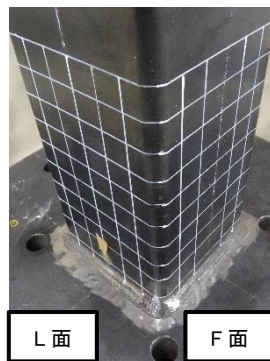
(g) R面全景



(h) B面全景



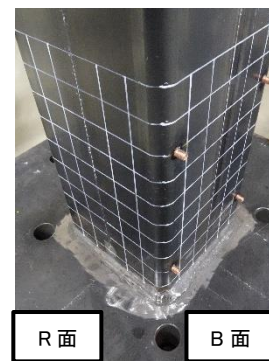
(i) B-L 面柱脚部詳細



(j) L-F 面柱脚部詳細



(k) F-R 面柱脚部詳細



(l) R-B 面柱脚部詳細

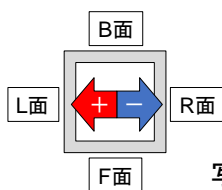
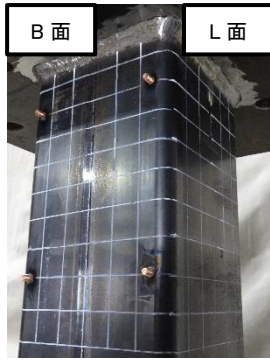


写真 3.3-7 LD10-n30v30R08-C の最終状況(軸力比  $0.3 \pm 0.3$ 、振幅  $1/125$ )

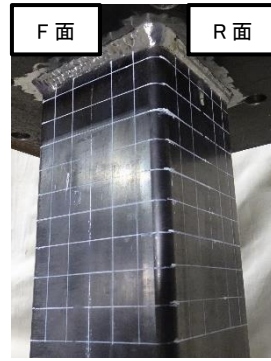




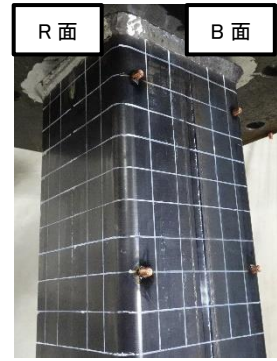
(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱頭部詳細



(d) R-B 面柱頭部詳細



(e) L面全景



(f) F面全景



(g) R面全景



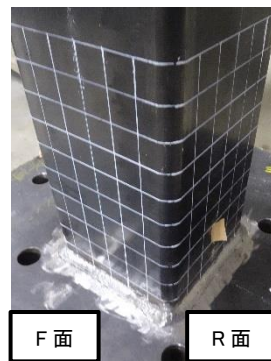
(h) B面全景



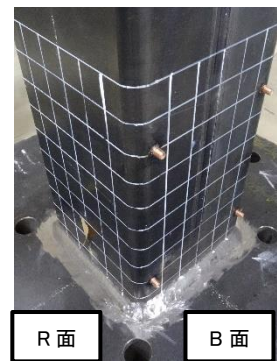
(i) B-L 面柱脚部詳細



(j) L-F 面柱脚部詳細



(k) F-R 面柱脚部詳細



(l) R-B 面柱脚部詳細

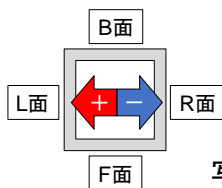


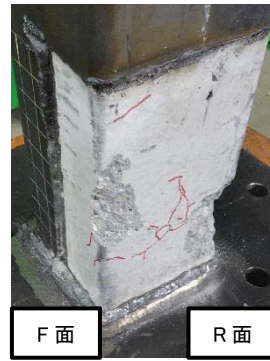
写真 3.3-8 LD10-n30v40R05-C の最終状況 (軸力比  $0.3 \pm 0.4$ 、振幅  $1/200$ )



(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱脚部詳細



(d) R-B 面柱脚部詳細

写真 3.3-9 LD10-n15v35R1-C の内部コンクリートの状況(軸力比  $0.15 \pm 0.35$ 、振幅 1/100)



(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱脚部詳細

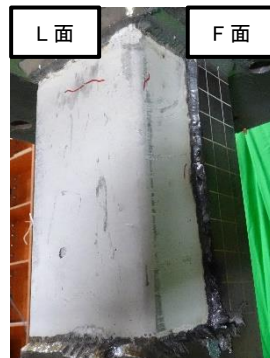


(d) R-B 面柱脚部詳細

写真 3.3-10 LD10-n15v35R15-C の内部コンクリートの状況(軸力比  $0.15 \pm 0.35$ 、振幅 1/67)



(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細

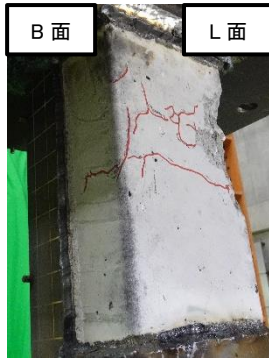


(c) F-R 面柱脚部詳細



(d) R-B 面柱脚部詳細

写真 3.3-11 LD10-n30v30R05-C の内部コンクリートの状況(軸力比  $0.3 \pm 0.3$ 、振幅 1/200)



(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱脚部詳細



(d) R-B 面柱脚部詳細

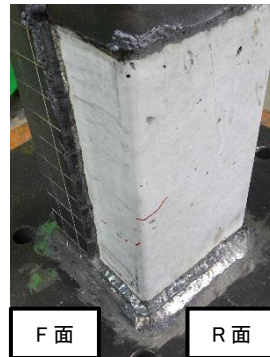
写真 3.3-12 LD10-n30v30R08-C の内部コンクリートの状況 (軸力比  $0.3 \pm 0.3$ 、振幅 1/125)



(a) B-L 面柱頭部詳細



(b) L-F 面柱頭部詳細



(c) F-R 面柱脚部詳細



(d) R-B 面柱脚部詳細

写真 3.3-13 LD10-n30v40R05-C の内部コンクリートの状況 (軸力比  $0.3 \pm 0.4$ 、振幅 1/200)

## 2) 実験結果一覧

表 3.3-7~3.3-8 に一定振幅繰り返し载荷の実験結果一覧を示す。表 3.3-8 の計測値は観察を行ったサイクルでの値であり、表 3.3-7 の各荷重レベルのサイクルと近いサイクルでの値を示している。

表 3.3-7 実験結果一覧(荷重低下サイクル)

		最大荷重 Q <sub>max</sub>	0.95Q <sub>max</sub>	0.9Q <sub>max</sub>	0.85Q <sub>max</sub>	0.8Q <sub>max</sub>	0.7Q <sub>max</sub>	
LD10-n15v35R1-C D/t=25 D/Lk=10 n=0.15±0.35 R=1/100	正	cycle	+1	+2	+3	+5	+7	+16
		せん断力 Q[kN]	82.6	79.8	76.0	70.4	66.5	58.4
		軸ひずみ ε <sub>v</sub> [%]	0.26	0.28	0.28	0.30	0.30	0.31
	負	cycle	-1	-6	-14	-	-	-
		せん断力 Q[kN]	-102.1	-97.5	-92.1	-	-	-
		軸ひずみ ε <sub>v</sub> [%]	-0.08	-0.07	-0.08	-	-	-
LD10-n15v35R15-C D/t=25 D/Lk=10 n=0.15±0.35 R=1/67	正	cycle	+1	+2	+2	+3	+3	+6
		せん断力 Q[kN]	90.7	86.8	86.8	78.5	78.5	63.6
		軸ひずみ ε <sub>v</sub> [%]	0.31	0.35	0.35	0.37	0.37	0.40
	負	cycle	-1	-3	-7	-	-	-
		せん断力 Q[kN]	-118.2	-113.3	-106.4	-	-	-
		軸ひずみ ε <sub>v</sub> [%]	-0.09	-0.08	-0.08	-	-	-
LD10-n30v30R05-C D/t=25 D/Lk=10 n=0.3±0.3 R=1/200	正	cycle	+2	+3	+7	+14	+25	+58
		せん断力 Q[kN]	44.4	42.8	40.0	37.9	35.7	31.2
		軸ひずみ ε <sub>v</sub> [%]	0.33	0.34	0.35	0.35	0.36	0.37
	負	cycle	-19	-	-	-	-	-
		せん断力 Q[kN]	-76.1	-	-	-	-	-
		軸ひずみ ε <sub>v</sub> [%]	0.08	-	-	-	-	-
LD10-n30v30R08-C D/t=25 D/Lk=10 n=0.3±0.3 R=1/125	正	cycle	+2	+2	+3	+6	+8	+16
		せん断力 Q[kN]	65.4	65.4	61.7	55.8	52.8	46.3
		軸ひずみ ε <sub>v</sub> [%]	0.32	0.32	0.32	0.34	0.35	0.36
	負	cycle	-4	-27	-	-	-	-
		せん断力 Q[kN]	-104.4	-99.2	-	-	-	-
		軸ひずみ ε <sub>v</sub> [%]	0.04	0.06	-	-	-	-
LD10-n30v40R05-C D/t=25 D/Lk=10 n=0.3±0.4 R=1/200	正	cycle	+1	+1	+2	+3	+4	+9
		せん断力 Q[kN]	35.0	35.0	32.1	29.8	28.3	24.7
		軸ひずみ ε <sub>v</sub> [%]	0.34	0.34	0.37	0.38	0.39	0.40
	負	cycle	-19	-	-	-	-	-
		せん断力 Q[kN]	-73.4	-	-	-	-	-
		軸ひずみ ε <sub>v</sub> [%]	0.05	-	-	-	-	-

表 3.3-8 実験結果一覧(座屈波高さ:最大値)

		軸力導入時	1 cycle	最大荷重 $Q_{max}$	0.95 $Q_{max}$	0.9 $Q_{max}$	0.85 $Q_{max}$	0.8 $Q_{max}$	0.7 $Q_{max}$	
LD10-n15v35R1-C	正	cycle	0	+1	+2	+3	+4	+6	+8	+17
		R [mm]	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0
	負	cycle	-	-1	-2	-7	-15	-	-	-
		L [mm]	-	-0.3	-0.1	-0.1	-0.1	-	-	-
LD10-n15v35R15-C	正	cycle	0	+1	+2	-	+3	-	+4	+7
		R [mm]	0.1	-0.2	-0.3	-	-0.1	-	0.2	1.5
	負	cycle	-	-1	-2	-4	-8	-	-	-
		L [mm]	-	-0.2	-0.2	-0.2	-0.1	-	-	-
LD10-n30v30R05-C	正	cycle	0	+1	+3	+4	+8	+15	+26	+60
		R [mm]	0.3	-0.1	0.0	-0.1	0.0	0.0	-0.1	0.0
	負	cycle	-	-1	-23	-	-	-	-	-
		L [mm]	-	0.1	0.1	-	-	-	-	-
LD10-n30v30R08-C	正	cycle	0	+1	+2	+3	+4	+7	+9	+18
		R [mm]	0.4	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
	負	cycle	-	-1	-6	-28	-	-	-	-
		L [mm]	-	-0.1	-0.2	-0.1	-	-	-	-
LD10-n30v40R05-C	正	cycle	0	+1	+2	-	+3	+4	+5	+10
		R [mm]	0.0	0.0	0.0	-	0.0	0.0	0.0	0.1
	負	cycle	-	-1	-17	-	-	-	-	-
		L [mm]	-	0.1	0.2	-	-	-	-	-

### 3) 荷重変形特性

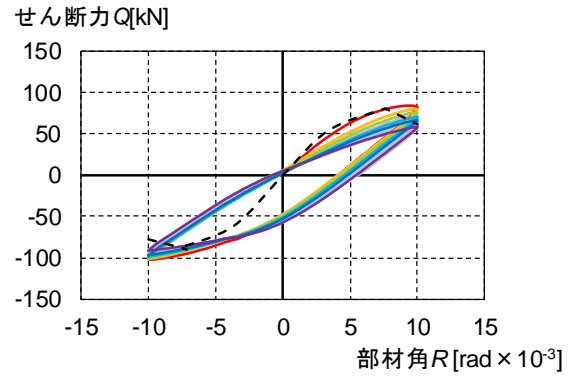
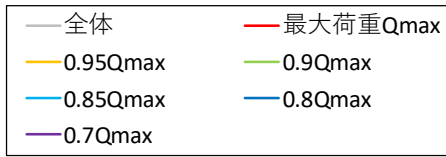
図 3.3-14 に各試験体の荷重・変形関係、図 3.3-15 に部材角・軸ひずみ関係を示す。荷重・変形関係の縦軸は柱せん断力  $Q$ 、横軸は柱部材角  $R$  である。なお、図 3.3-14 中の黒線は、文献 3.3-5) を参考にし、 $P-\Delta$  効果を考慮したスケルトンカーブである。また、 $M-N$  関係は文献 3.3-4) に示されている中柱式より求めた。荷重・軸縮み関係の縦軸は柱の軸縮み変形を柱高さで除した軸縮み  $\varepsilon_v$ 、横軸は柱部材角  $R$  であり、圧縮ひずみを正としている。

#### (a) 荷重・変形関係(図 3.3-14)

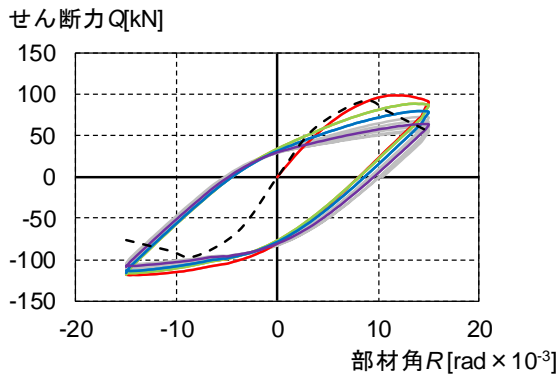
荷重変形関係では、すべての試験体が 1~2 サイクルで正載荷時（最大軸力作用時）に最大荷重に到達し、その後は荷重が低下している。また、振幅の小さな試験体は、負載荷の除荷時において変形が 0 となる際の荷重が負の値となっており、コンクリートの挙動の影響を大きく受けられていると考えられる。

#### (b) 部材角・軸ひずみ関係(図 3.3-15)

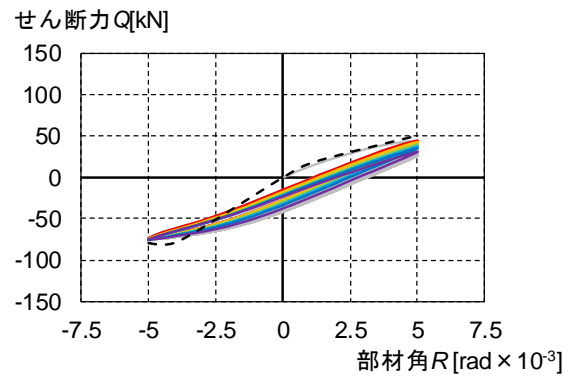
部材角・軸ひずみ関係では、全試験体ともに荷重低下に伴う急激な軸ひずみの進展はなく、水平耐力が低下しても柱としての軸力は保持することができているといえる。また、引張軸力を-0.2 まで作用させた LD10-n15v35R1-C、LD10-n15v35R15-C 試験体は、負載荷時の軸ひずみが 0 を下回っており、CFT 柱が伸びていることがわかる。



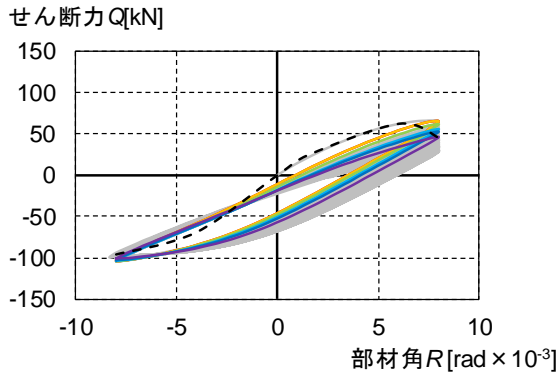
(a)LD10-n15v35R1-C



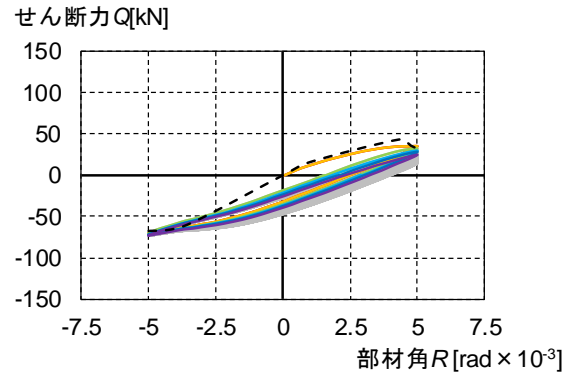
(b)LD10-n15v35R15-C



(c)LD10-n30v30R05-C

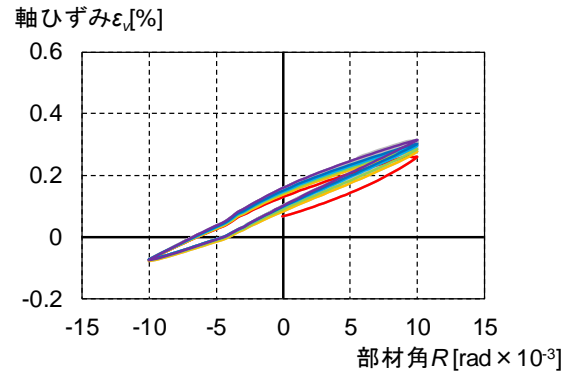
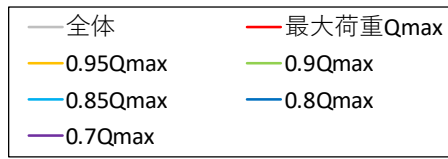


(d)LD10-n30v30R08-C

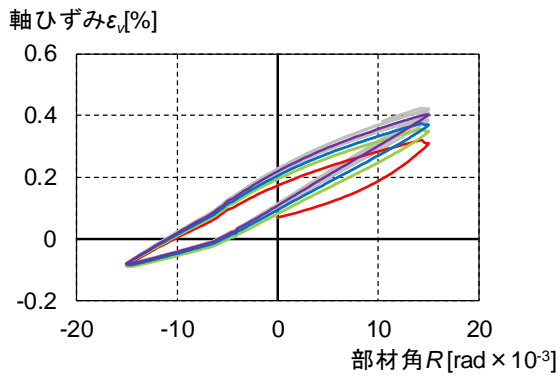


(e)LD10-n30v40R05-C

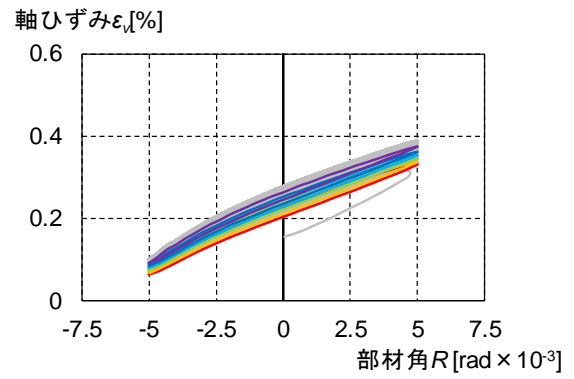
图 3.3-14 荷重变形关系



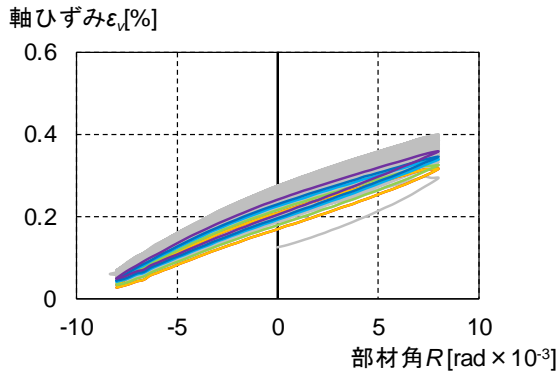
(a)LD10-n15v35R1-C



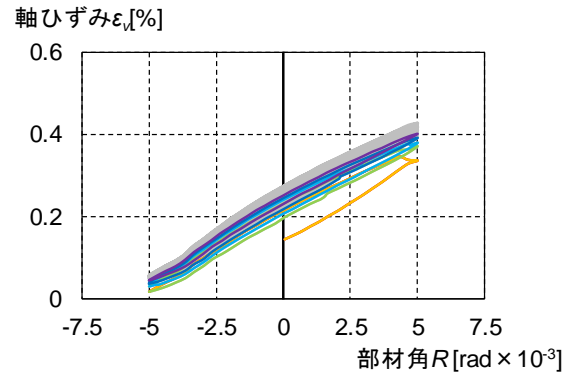
(b)LD10-n15v35R15-C



(c)LD10-n30v30R05-C



(d)LD10-n30v30R08-C



(e)LD10-n30v40R05-C

図 3.3-15 部材角・軸ひずみ関係



#### 4) 多数回繰り返し特性

各サイクルピークでの荷重（以下、ピーク荷重）の推移を図 3.3-16 に、ピーク荷重での軸縮みおよび座屈波高さの推移を図 3.3-17、3.3-18 に示す。図 3.3-16 中の赤、青の点線はそれぞれ正載荷、負載荷時の全塑性耐力を示している。なお、座屈波高さは正載荷・負載荷それぞれにおいて圧縮曲げが作用する面の最大値を示している。

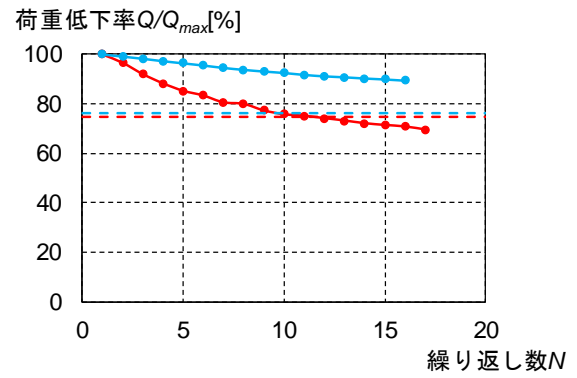
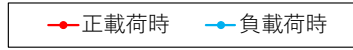
##### (a) ピーク荷重の推移(図 3.3-16)

すべての試験体において、正載荷時（圧縮軸力作用時）の荷重低下が顕著であり、負載荷時（引張軸力作用時）は荷重低下が小さいことがわかる。特に、振幅の小さい LD10-n30v30R05-C、LD10-n30v40R05-C 試験体については、正載荷時には 40~60%の荷重低下が見られるが、負載荷時の荷重低下はほとんど見られていない。

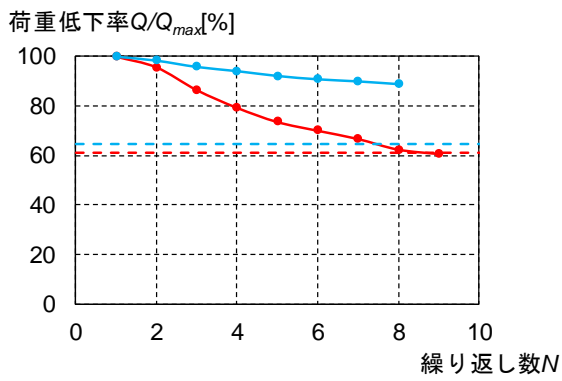
##### (b) 各サイクルピークでの軸ひずみおよび座屈波高さの推移(図 3.3-17、図 3.3-18)

軸縮みに関しては、すべての試験体において、最初の数サイクルで多少進展するが、荷重が最大荷重の 90%を下回ったあたりで、進展がほとんどなくなっていることがわかる。

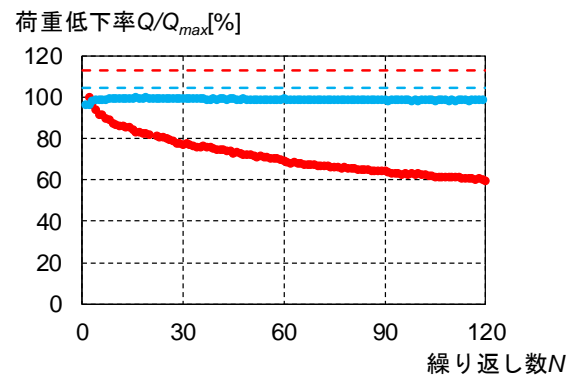
座屈波高さに関しては、LD10-n15v35R15-C 試験体を除いたすべての試験体において 0.5mm を下回っており、ほとんど局部座屈が生じていないことがわかる。また、局部座屈が生じた LD10-n15v35R15-C 試験体についても、軸ひずみは他の試験体とほとんど変わっておらず、CFT 試験体は、水平耐力が低下しても軸力保持性能については維持し続けるといえる。



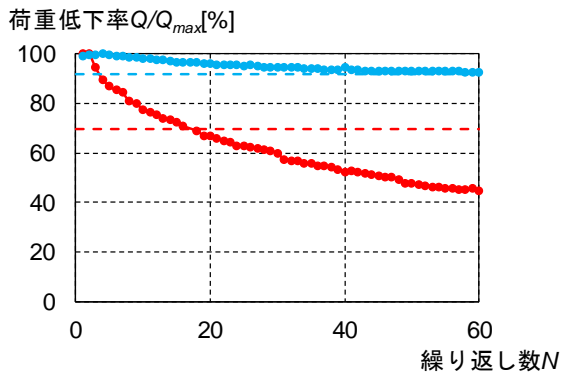
(a)LD10-n15v35R1-C



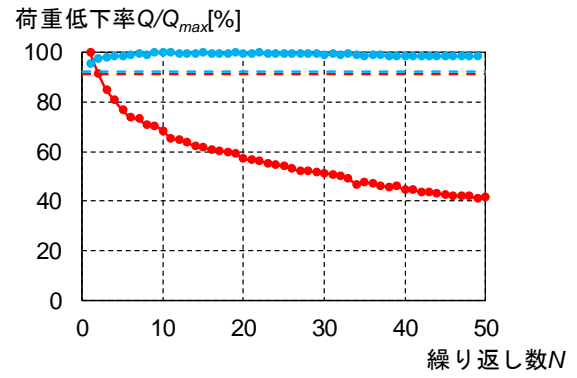
(b)LD10-n15v35R15-C



(c)LD10-n30v30R05-C

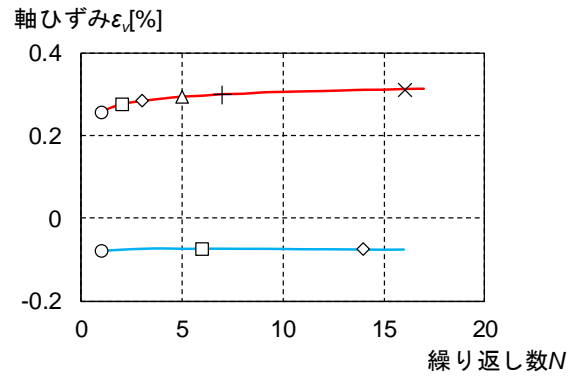
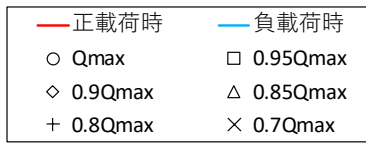


(d)LD10-n30v30R08-C

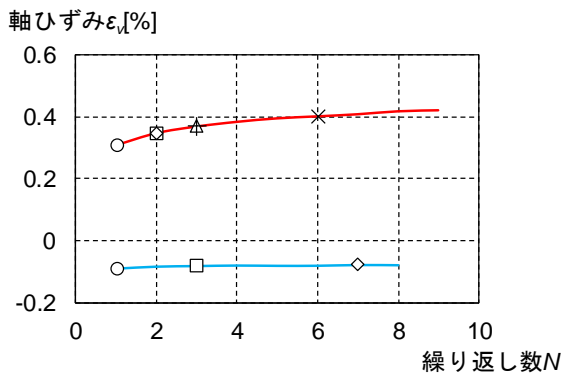


(e)LD10-n30v40R05-C

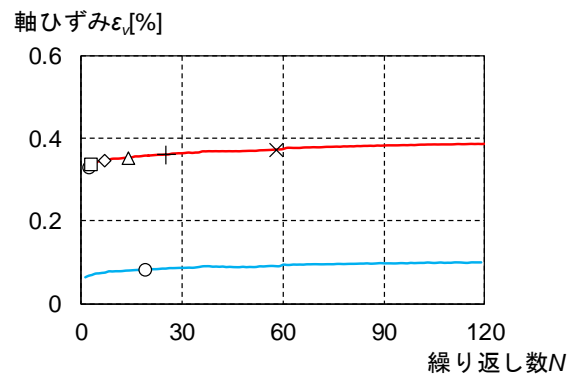
図 3.3-16 ピーク時荷重の推移



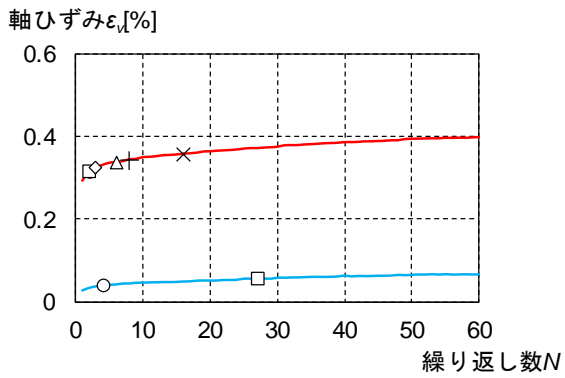
(a)LD10-n15v35R1-C



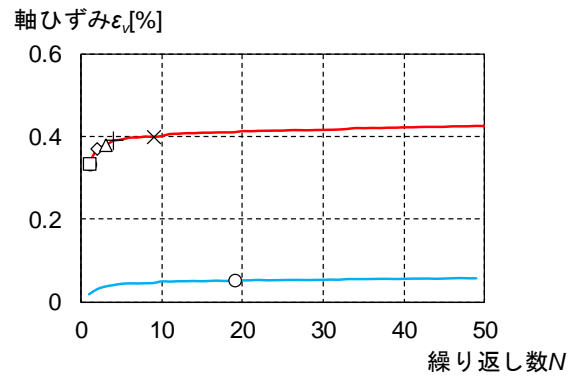
(b)LD10-n15v35R15-C



(c)LD10-n30v30R05-C

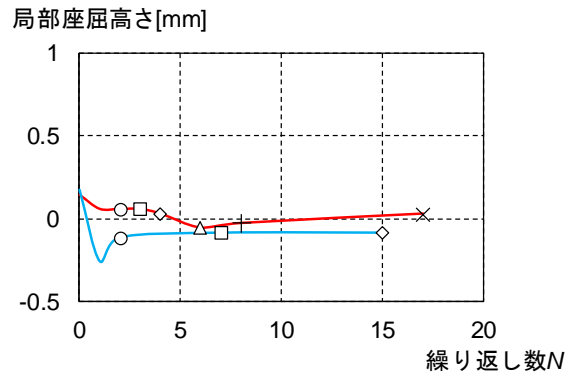
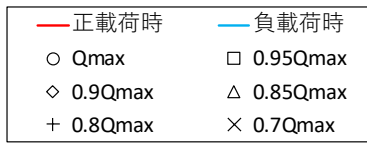


(d)LD10-n30v30R08-C

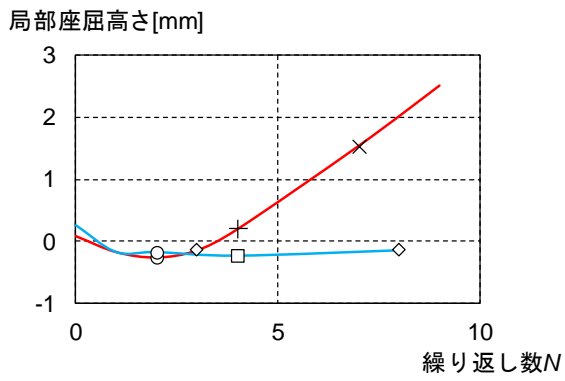


(e)LD10-n30v40R05-C

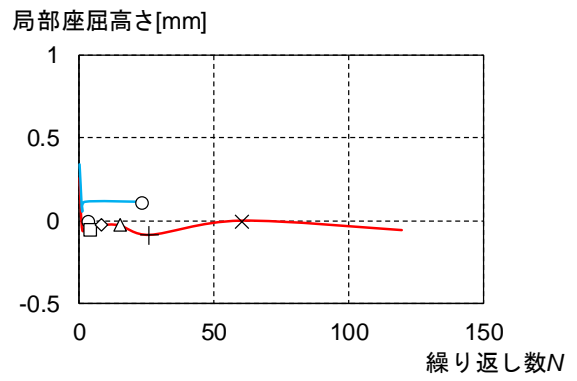
図 3.3-17 軸ひずみの推移



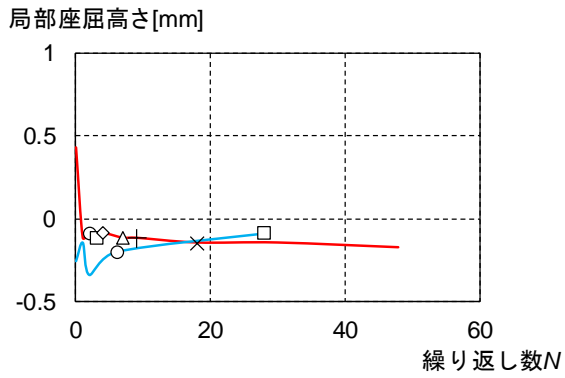
(a)LD10-n15v35R1-C



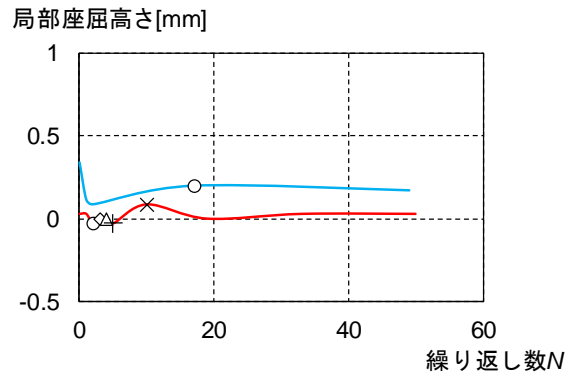
(b)LD10-n15v35R15-C



(c)LD10-n30v30R05-C



(d)LD10-n30v30R08-C



(e)LD10-n30v40R05-C

図 3.3-18 局部座屈高さの推移

(c) 曲率の分布

材軸方向の曲率分布を図 3.3-19 に示す。図は正載荷時の曲率分布で、曲げ降伏時、+1 サイクルピーク時および荷重が最大荷重から 70%まで低下した際 ( $0.7Q_{max}$  時) を示す。なお、曲げ降伏は柱端部に貼付したひずみゲージの計測値が降伏ひずみに達した際とし、LD10-n30v30R05-C、LD10-n30v30R08-C、LD10-n30v40R05-C 試験体については、ひずみの計測値が降伏ひずみに達していないため、曲げ降伏時については示していない。

曲率分布の反曲点位置は、おおよそ試験体高さの中央に位置していることがわかる。また、+1 サイクルピーク時と  $0.7Q_{max}$  時の曲率分布を比較すると、すべての試験体においてほぼ同様の挙動を示しており、鋼管部分の劣化はほとんど進展していないことがわかる。

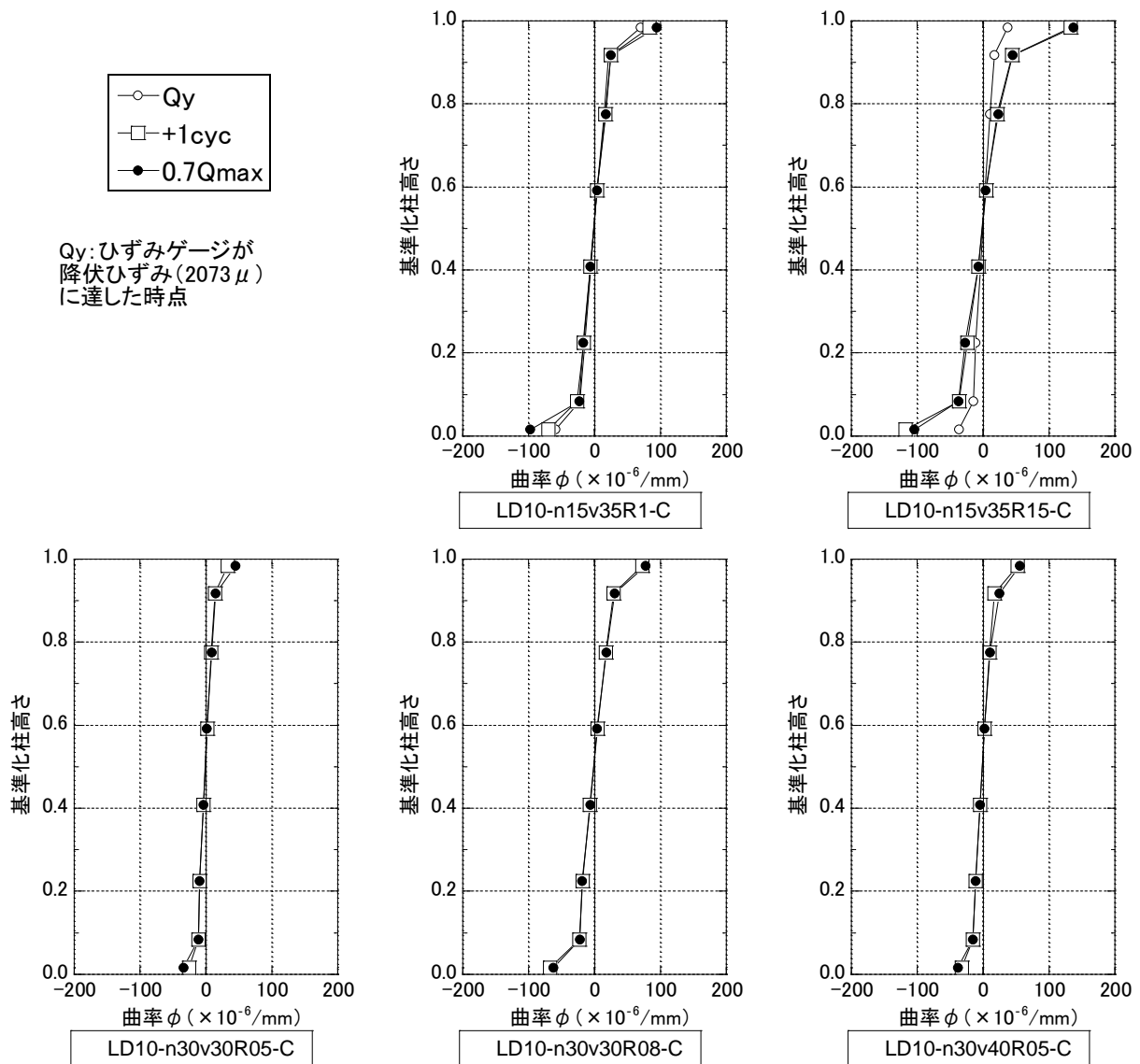


図 3.3-19 材軸方向の曲率分布

(6) 変位振幅と繰り返し数の関係

表 3.3-9 に令和 2 年度の実験結果より得られた繰り返し回数および既往研究<sup>3.3-2, 3.3-3)</sup>の中で、本実験と同じ径高さ比・幅厚比の試験体の繰り返し回数、図 3.3-20 に部材角振幅  $R$  と荷重が最大荷重の 90%を維持した繰り返し数( $N_{90\%}$ )の関係を示す。

実験結果より、鋼材・コンクリート強度があまり高くない CFT 柱の繰り返し数は、変動軸力を受ける場合、基準軸力と同じ一定軸力を受ける場合と比較して非常に小さくなることわかる(図中：◆と□、◆と□)。さらに、変動軸力の最大軸力と一定軸力が 0.6 である試験体を比較すると、変動軸力下での変形性能が悪くなっている試験体があり、引張軸力がコンクリートの損傷に悪影響を及ぼしていることが考えられる(図中：◆と□)。

また、最大軸力が 0.5 の場合(図中：◆)と 0.6 の場合(図中：◆)の繰り返し数は同程度の繰り返し数となると想定されるが、最大軸力が 0.7 (図中：●)となると非常に性能が悪くなることわかる。

表 3.3-9 繰り返し回数

試験体	軸力比 $n$	部材角 振幅 $R$		実験結果(繰り返し数)				
				$N_{95\%}$	$N_{90\%}$	$N_{85\%}$	$N_{80\%}$	$N_{70\%}$
LD10-n15R15-C <sup>(2.3-2)</sup>	0.15	1/67	0.015	2	6	12	24	-
LD10-n15R10-C <sup>(2.3-2)</sup>		1/100	0.010	11	32	82	-	-
LD10-n15v35R15-C	0.15±0.35	1/67	0.015	2	2	3	3	6
LD10-n15v35R1-C		1/100	0.010	2	3	5	7	16
LD10-n30R15-C <sup>(2.3-2)</sup>	0.3	1/67	0.015	2	5	8	15	-
LD10-n30R12-C <sup>(2.3-3)</sup>		1/83	0.012	5	13	25	46	-
LD10-n30R1-C <sup>(2.3-2)</sup>		1/100	0.010	9	19	51	120	-
LD10-n30v30R08-C	0.3±0.3	1/125	0.008	2	3	6	8	16
LD10-n30v30R05-C		1/200	0.005	3	7	14	25	58
LD10-n30v40R05-C	0.3±0.4	1/200	0.005	1	2	3	4	9
LD10-n45R1-C <sup>(2.3-2)</sup>	0.45	1/100	0.010	8	18	31	36	-
LD10-n60R1-C <sup>(2.3-2)</sup>	0.6	1/100	0.010	1	1	2	3	-
LD10-n60R08-C <sup>(2.3-3)</sup>		1/125	0.008	14	52	63	65	-
LD10-n60R06-C <sup>(2.3-3)</sup>		1/150	0.006	52	426	-	-	-

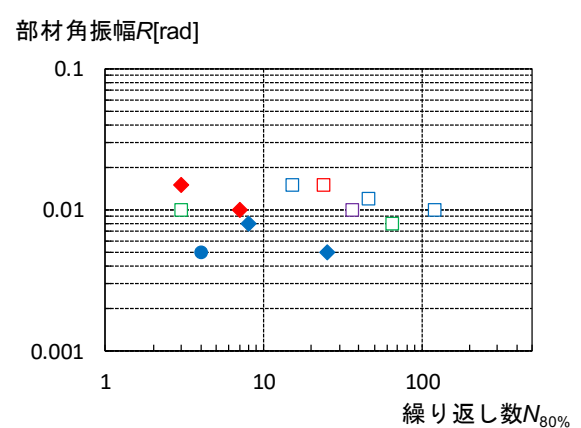
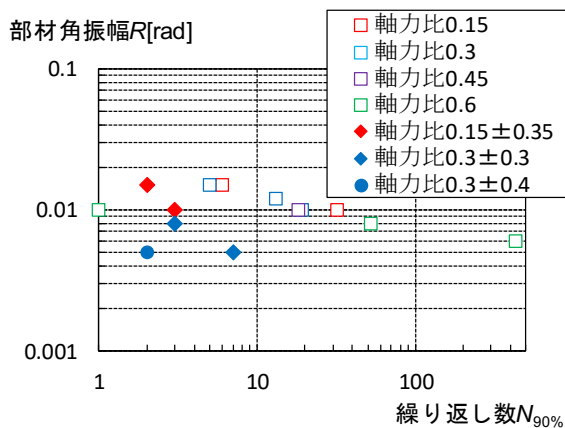


図 3.3-20 部材角振幅と繰り返し数の関係

令和2年度実施した5体の実験では、正載荷時の耐力低下が顕著に見られ、負載荷時の耐力低下は正載荷時と比較すると小さかった。実際の建物では、片方の側柱が大きな圧縮軸力を受ける場合、反対側の側柱の軸力が小さくなる（または引張軸力となる）ため、変動軸力を受ける場合は図3.3-21のように片振幅ではなく両振幅で評価できると考えられる。

表3.3-10に両振幅で評価した場合の繰返し数、図3.3-22に両振幅で評価した場合の部材角振幅と繰返し数の関係を示す。図3.3-21の方法を用いる場合、用いない場合と比べて繰返し数が1.5~8倍となっている。

なお、図3.3-21の赤文字にて示すように、軸力が小さい場合の耐力低下が小さいとすると、軸力が大きい場合の耐力が80%まで低下した時点を両振幅での90%耐力低下とすることができる。

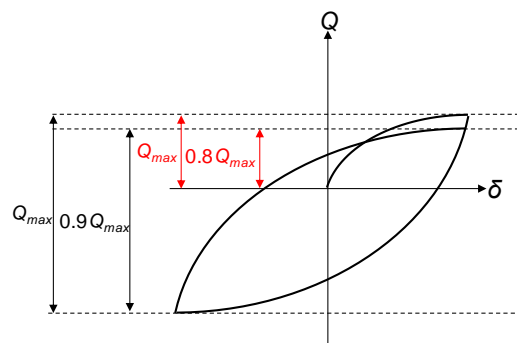


図 3.3-21 荷重低下率の両振幅での評価

表 3.3-10 両振幅で評価した場合の繰返し数

試験体	軸力比n	部材角振幅R		実験結果(繰返し数)				
				N <sub>95%</sub>	N <sub>90%</sub>	N <sub>85%</sub>	N <sub>80%</sub>	N <sub>70%</sub>
LD10-n15R15-C <sup>(2.3-2)</sup>	0.15	1/67	0.015	2	6	12	24	-
LD10-n15R10-C <sup>(2.3-2)</sup>		1/100	0.010	11	32	82	-	-
LD10-n15v35R15-C	0.15±0.35	1/67	0.015	2	3	4	6	-
LD10-n15v35R1-C		1/100	0.010	3	7	9	-	-
LD10-n30R15-C <sup>(2.3-2)</sup>	0.3	1/67	0.015	2	5	8	15	-
LD10-n30R12-C <sup>(2.3-3)</sup>		1/83	0.012	5	13	25	46	-
LD10-n30R1-C <sup>(2.3-2)</sup>		1/100	0.010	9	19	51	120	-
LD10-n30v30R08-C	0.3±0.3	1/125	0.008	4	10	19	32	-
LD10-n30v30R05-C		1/200	0.005	20	60	-	-	-
LD10-n30v40R05-C	0.3±0.4	1/200	0.005	4	15	34	-	-
LD10-n45R1-C <sup>(2.3-2)</sup>	0.45	1/100	0.010	8	18	31	36	-
LD10-n60R1-C <sup>(2.3-2)</sup>	0.6	1/100	0.010	1	1	2	3	-
LD10-n60R08-C <sup>(2.3-3)</sup>		1/125	0.008	14	52	63	65	-
LD10-n60R06-C <sup>(2.3-3)</sup>		1/150	0.006	52	426	-	-	-

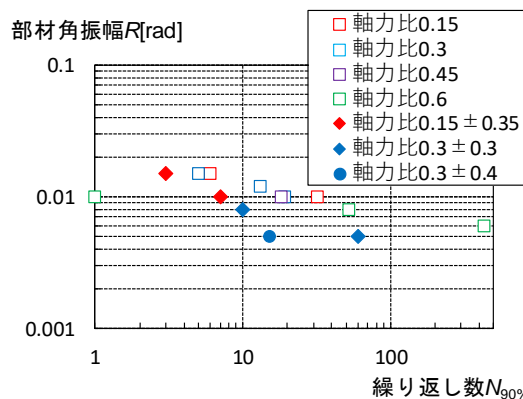


図 3.3-22 両振幅で評価した場合の部材角振幅と繰返し数の関係(N<sub>90%</sub>)

### 3.3.2 CFT 柱部材の疲労評価法

角形断面CFT柱の繰返し荷重作用下に於いて、変動軸力比の変化が小さい中柱及び変動軸力比の変動が大きい側柱の限界繰返し回数は、各々(3.3-1)式及び(3.3-2)式に依る。又、変動振幅繰返しの損傷評価は線形累積損傷則の(3.3-5)式に依って検討し、 $D < 1.0$ とする。なお、関係式は塑性範囲式であり、弾性範囲では別途検討が必要である。

[変動軸力変化が小さい場合(中柱)]

$$N = \alpha \cdot 710.6R^{-3.152} \cdot \lambda^{1.075} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.580} \quad (p_{max} \leq 0.3)$$

$$N = \alpha \cdot 3.396R^{-3.152} \cdot p_{max}^{-4.564} \cdot \lambda^{1.075} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.580} \quad (0.3 < p_{max}) \quad (3.3-1)$$

[変動軸力変化が大きい場合(側柱)]

$$N = \alpha \cdot 1.666(R \cdot r_p)^{1.696} \cdot \left\{ 710.6R^{-3.152} \cdot \lambda^{1.075} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.580} \right\}$$

$$= \alpha \cdot 1184R^{-1.456} \cdot r_p^{1.696} \cdot \lambda^{1.075} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.580} \quad (p_{max} \leq 0.3)$$

$$N = \alpha \cdot 1.666(R \cdot r_p)^{1.696} \cdot \left\{ 3.396R^{-3.152} \cdot p_{max}^{-4.564} \cdot \lambda^{1.075} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.580} \right\}$$

$$= \alpha \cdot 5.658R^{-1.456} \cdot p_{max}^{-4.564} \cdot r_p^{1.696} \cdot \lambda^{1.075} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.580} \quad (0.3 < p_{max}) \quad (3.3-2)$$

$$\lambda = \frac{l_k}{D}, \quad p = \frac{P}{P_0}, \quad \eta = \frac{D}{t} \sqrt{\frac{s\sigma_y}{sE}}, \quad \beta = \frac{sA \cdot s\sigma_y}{P_0} \quad (3.3-3)$$

$$P_0 = sA \cdot s\sigma_y + cA \cdot c\sigma_B$$

$$r_p = \frac{p_{max}}{|p_{max} - p_{min}|} \quad (3.3-4)$$

$cA, sA$ : 各々コンクリート及び鋼管の断面積、 $D$ : 鋼管の成(幅)、 $l_k$ : 柱の座屈長さ、 $P$ : 柱の作用軸力、 $P_0$ : 柱の軸耐力、 $p_{max}, p_{min}$ : 圧縮側を正とし場合の変動軸力に於ける各々最大軸力比、最少軸力比、 $R$ : 部材角( $\times 10^{-2}$ rad.)、 $r_p$ : 軸力比変化率、 $t$ : 鋼管の板厚、 $\alpha$ : 安全係数(=0.5)、 $c\sigma_B$ : コンクリートの圧縮強度、 $s\sigma_y$ : 鋼管の降伏応力度、 $\beta$ : 鋼管耐力比、 $\eta$ : 一般化幅厚比

[線形累積損傷則]

$$D = \sum_{i=1}^m \frac{n_i}{N_i} \quad (3.3-5)$$

$N_i$ : 任意の部材角の限界繰返し数((3.3-1),(3.3-2)式に依る)、 $n_i$ : 任意の部材角に於ける繰返し数

(3.3-1)式及び(3.3-2)式の限界繰返し回数(式)は、一般社団法人日本鋼構造協会「長周期地震動に対するCFT柱の安全性検証法に関する研究小委員会(委員長: 森田耕次)」に於いて検討した一定振幅繰返し載荷実験資料に基づき、作成した(3.3-6)式<sup>3.3-6)</sup>に基づくもので、変動振幅繰返し及び変動軸力繰返しの影響を考慮し、下限値を与える式となっている。限界繰返し回数に関しては、変動軸力変化が小さい場合、一定軸力状態と考え、正負載荷何れの側が、最大耐力の90%低下した時点の繰返し回



数とする。他方、変動軸力変化が大きい場合、定軸力とは異なり、瞬時的に最大軸力が作用する。前述の実験結果に依れば、最少軸力比に於いて耐力低下が見られず、最大軸力比のみで耐力低下が見られることから、平均的な耐力低下が90%耐力低下とする観点に立ち、最少軸力比で耐力低下無しであり、最大軸力比で80%耐力低下時点を繰返し回数とする。

[一定振幅繰返し限界回数]

$$N=959.6R^{-3.152} \cdot \lambda^{1.075} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.580} \quad (p \leq 0.3)$$

$$N=19.98R^{-3.152} \cdot p^{-3.643} \cdot \lambda^{1.075} \cdot \left(\frac{D}{t}\right)^{-1.580} \quad (0.3 < p) \quad (3.3-6)$$

変動振幅繰返し载荷に於ける累積損傷則の検討に用いた実験資料は、本事業で実施した変動振幅のブロックを単位とした変動振幅繰返し载荷実験結果<sup>3.3-3)</sup>、又、斯かる実験資料では実験資料数が僅少であることを鑑みて、既往研究に於いて、漸増振幅繰返し载荷実験の中、各振幅レベルで多数回繰返した実験結果<sup>3.3-7)</sup>を用い、その試験体の範囲は、表 3.3-11 の変動振幅繰返し欄に示すもので、26体の試験体である。(3.3-6)式及び(3.3-5)式に依って損傷値を求めると図3.3-23となり、 $D = 0.07 \sim 4.55$ (平均値1.09、変動係数1.044)と平均値はほぼ1.0の値となっているが、 $D=1.0$ を下廻るのが多く危険側の評価となっている。又、軸力比が大きくなると、 $D$ 値が小さくなる傾向が見られる。そこで、(3.3-6)式の軸力比の項に於いて、下限値を与える式を検討すると、図3.3-24に示す如く、軸力比に於いて下限の式にすると(3.3-1)式( $\alpha=1.0$ )が求まる。文献3.3-6)で検討した表3.3-11の一定振幅繰返し欄に示す一定振幅繰返し実験資料を用いて、(3.3-6)式及び(3.3-1)式( $\alpha=1.0$ )の計算結果と実験結果を比較すると各々図3.3-25 (a)及び図3.3-25 (b)となる。(3.3-6)式及び(3.3-1)式( $\alpha=1.0$ )の限界繰返し回数計算値に対する実験値の比は、各々実験値/計算値=0.24~5.70(平均値1.24、変動係数0.73)及び実験値/計算値=0.32~11.09(平均値2.45、変動係数0.875)であり、(3.3-6)式は平均値的に対応は良いが、実験値 / 計算値=0.5を下廻る試験体が数体見られ、(3.3-1)式( $\alpha=1.0$ )では、実験値 / 計算値=0.5を下廻るものが1体であり、下限値を与える式になっている。又、表3.3-11 の変動振幅繰返し欄の試験体に対して、(3.3-1)式( $\alpha=1.0$ )の限界繰返し回数計算値に対する実験値の比は、各々実験値/計算値=0.31~12.87(平均値2.32、変動係数1.080)であり、一定振幅繰返し実験資料と同様に、 $D=0.5$ を下廻るものが1体と、下限値を与える式になっている。

他方、変動軸力に関しては、表3.3-11 の変動軸力繰返し欄に示す令和2年度実施した本事業の実験結果及び以前の基準整備事業で実施した実験結果3.3-5)、3.3-8)の26体の試験体に基づき、(3.3-1)式( $\alpha=1.0$ )の限界繰返し回数計算値と実験値を比較すると、図3.3-27 (a)となり、部材角と(3.3-4)式の軸力比変化率との積の因子によって変化が見られるので、この下限式を求め、(3.3-1)式に乗ずると(3.3-2)式となる。斯かる限界繰返し回数計算値( $\alpha=1.0$ )と実験値の対応は、図3.3-27 (b)に示す如くであり、実験値/計算値=0.61~11.17(平均値3.52、変動係数0.808)と下限値を与える式となる。

これらの算定式に於いて、実験値との対応が 0.5 程度になるものが見られることを勘案して、安全係数を $\alpha=0.5$ とした。

表3.3-11 検討に用いた実験資料

因 子		変動振幅繰返し	変動軸力繰返し	定振幅繰返し
座屈長さ・断面成比 $\lambda^{1)}$		10.0~20.0	8.0~15.0	8.0~21.1
軸力比 $p^{1)}$		0.20~0.79	-0.19~0.68	0.15~0.60
軸力比変化率 $r_p^{2)}$		-	0.72~1.59	-
鋼	幅厚比 $D/t$	22.7~44.6	20.0~32.2	16.8~47.2
	一般化幅厚比 $\eta^{1)}$	1.01~2.01	0.86~1.50	0.75~2.05
	種 別 <sup>3)</sup>	FA~FD	FA~FC	FA~FD
管	降伏応力度 $s\sigma_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	378~449	311~495	313~495
	引張強さ $s\sigma_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	457~505	440~679	403~679
コンクリート圧縮強度 $c\sigma_B$ (N/mm <sup>2</sup> )		34.1~72.3	65.5~111.5	17.6~109.0
鋼管耐力比 $\beta^{1)}$		0.49~0.71	0.30~0.57	0.46~0.80
試験体数		26	21	78

注：1) (2.3-3)式に依る

2) (2.3-4)式に依る

3) FAクラス： $Cr < 33$ , FBクラス： $33 \leq Cr < 37$ ,  
FCクラス： $37 \leq Cr < 48$ , FDクラス： $48 \leq Cr$

$$Cr = (D/t) / \sqrt{(235 / s\sigma_y)}$$

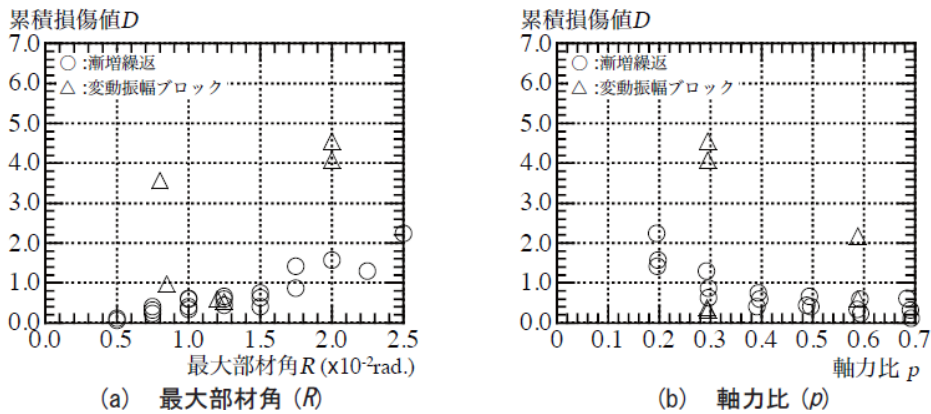


図3.3-23 (3.3-6)式に依る変動振幅繰返し実験資料の累計損傷計算結果

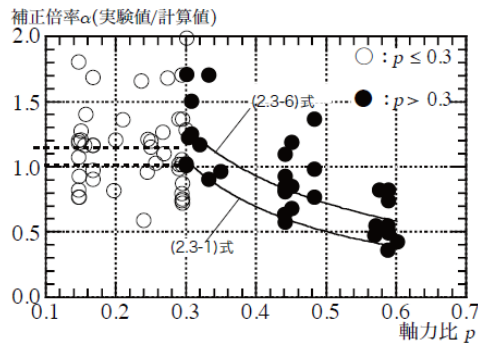
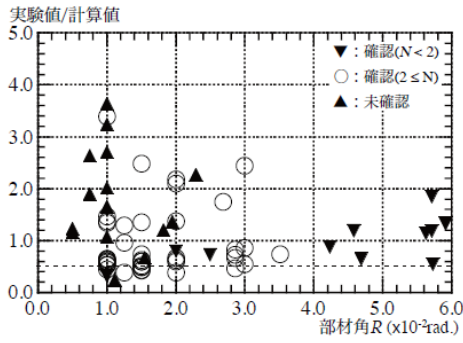
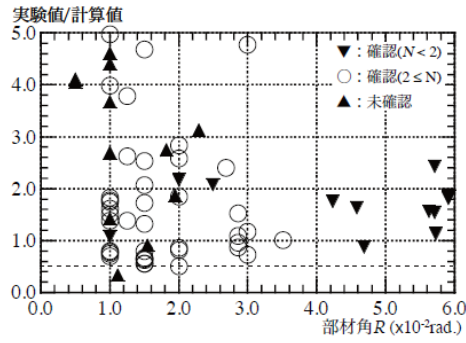


図3.3-24 補正倍率(実験値と計算値の対応)と軸力比( $p$ )の関係

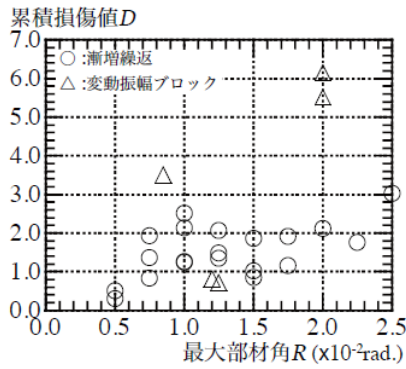


(a) (2.3-6)式

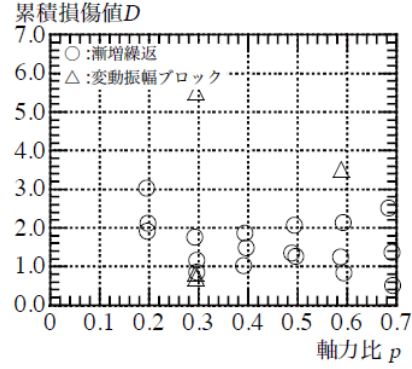


(b) (2.3-1)式 ( $\alpha=1.0$ )

図3.3-25 一定振幅繰り返しの実験資料に基づく限界繰り返し回数計算値と実験値の比較

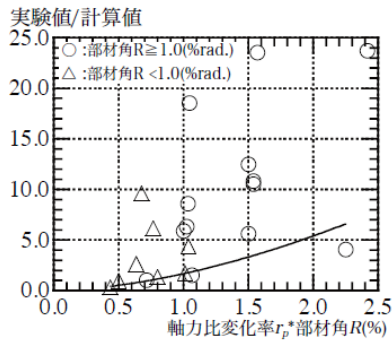


(a) 最大部材角 ( $R$ )

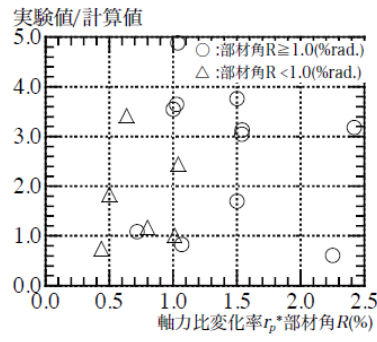


(b) 軸力比 ( $p$ )

図3.3-26 (3.3-1)式 ( $\alpha=1.0$ )に依る変動振幅繰り返し実験資料の累積損傷計算結果



(a) (2.3-1)式 ( $\alpha=1.0$ )



(b) (2.3-2)式 ( $\alpha=1.0$ )

図3.3-27 変動軸力の実験資料に基づく限界繰り返し回数計算値と実験値の比較

### 3.3.3 CFT柱部材の多数回繰返し載荷実験と疲労評価の検討のまとめ

長周期地震動に依る繰返し荷重が作用する角形断面CFT柱を対象に、令和2年は、変動軸力下の特性に着目し、可成り広範囲の軸力比-0.1(引張側)~0.7(圧縮側)を対象に、変動軸力下の一定振幅の繰返し載荷実験を実施した。又、斯かる実験結果及び既往の実験結果に基づき、変動振幅、変動軸力に対応した繰返し荷重下の疲労損傷評価法を検討した。以下に、令和2年度得られた成果及び今後の課題について概括する。

#### (1) 変動軸力下の一定振幅の繰返し載荷実験

変動軸力を受ける角形 CFT 柱の変形性能を把握するため、軸力比・振幅をパラメータとした一定振幅繰返し載荷実験を実施した。変動軸力下の一定振幅の繰返し載荷実験は、2.1 節における解析結果を勘案して、軸力比を  $0.15\pm 0.35$ 、 $0.3\pm 0.3$ 、 $0.3\pm 0.4$  の 3 水準、振幅を  $1/200\sim 1/67$  の範囲の 4 水準とし、5 体の実験を行った。試験体は、令和 1 年度に中心に実施した  $\square 150\times 150$ 、 $L/D=10.0$ 、 $D/t=25.0$ ( $t=6\text{mm}$ )を用いた。

振幅が大きい程、最大軸力比が大きい程、限界繰返し回数は小さくなる傾向にある。また、変動軸力を受ける試験体と変動軸力の最大軸力を一定軸力として受ける試験体を比較すると、変動軸力の試験体の変形性能が悪いケースが見られ、引張軸力が内部のコンクリートに悪影響を及ぼしている可能性がある。ただし、軸ひずみはほとんど進展しておらず、水平耐力低下後も軸力を保持していることが確認された。

変動軸力を受けるCFT柱は軸力が大きい場合の耐力低下が顕著に見られ、軸力が小さい場合の耐力低下は小さかった。実際の建物では、片方の側柱が大きな圧縮軸力を受ける場合、反対側の側柱の軸力が小さくなる（または引張軸力となる）ため、変動軸力を受ける場合、両振幅ではなく片振幅で評価できると考えられる。

これら、引張軸力を受けるCFT柱の劣化特性の解明等、広範囲な軸力変化に対しては、本実験である程度定性的な性状は把握されたものの、今後も実験資料の蓄積により、的確な疲労特性評価が可能であると考えられる。

#### (2) 疲労損傷評価法

検討した限界繰返し回数の式は、日本鋼構造協会・長周期地震動に対するCFT柱の安全性検証法に関する研究小委員会に於いて検討した一定振幅繰返し載荷の実験資料に依って作成した評価式に基づくもので、斯かる式は、実験値と計算値の平均値が1.0となる式なので、変動振幅繰返し試験体について、令和1年度の実験結果及び既往実験結果に基づき、軸力比の影響を下限として与える式を検討し、平均値が1.0となる式ではなく、実験の下限を与える式を提示した。他方、変動軸力に対しては、軸力比変化率と部材角の積を因子とした補正項を考え、斯かる式に依って、実験結果の下限値を与える式を提示した。これらの式は、実験資料に依る回帰式であり、現状、上述の如く実験資料が僅少であることを鑑みると、今後更なる実験資料の蓄積による的確な疲労評価式の検討が必要であると考えられる。

### 【参考文献】

- 3.3-1) 安本宏ほか：長周期地震動に対する超高層鉄骨造建築物の地震応答解析（その 1, 2），日本建築学会大会梗概集，pp.1197-1200，2019.7
- 3.3-2) 城戸將江，津田恵吾，福元敏之，一戸康生，森田耕次：一定変位振幅繰返し载荷を受ける角形 CFT 柱の構造性能，日本建築学会構造系論文集，2019.5
- 3.3-3) 鹿島建設，小堀鐸二研究所，北九州市立大学：S29「長周期地震動に対する超高層鉄骨造の安全性検証法に関する検討」，令和元年度建築基準整備促進事業報告書，2020.3
- 3.3-4) 日本建築学会：コンクリート充填鋼管構造設計施工指針 第2版，2008
- 3.3-5) 長谷川隆ほか：長周期地震動に対する鉄骨造超高層建物の安全性検証方法の検討（その27~31），日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1251-1260，2014.9
- 3.3-6) 福元敏之，森田耕次，津田恵吾，城戸將江，一戸康生：定変位振幅繰返し载荷に於けるコンクリート充填角形鋼管柱の繰返し特性，鋼構造論文集，第28巻第110号，2021.6（掲載決定）
- 3.3-7) 松井千秋，津田恵吾，山地雄二郎，藤永隆：コンクリート充填鋼管柱の構造性能と軸力制限値，日本建築学会構造系論文集，第504号，pp.103-110，1998.2
- 3.3-8) 長谷川隆ほか：長周期地震動に対する鉄骨造超高層建物の安全性検証方法の検討(その13, その14)，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.1057-1060，2012.9

### 3.4 まとめ

第3章の各節の検討の概要と得られた成果及び課題を以下にまとめて示す。

#### 3.4.1 既往研究の分析と疲労性能曲線式の検討（H30年度実施）

一定変位振幅繰返し载荷を受けるCFT柱材に関して発表されている論文を元に実験データの概要を述べ、文献3.1-3)に示された実験結果を用い、重回帰分析により、軸力比、塑性率、座屈長さ・断面せい比を変数として最大耐力の95%、90%、85%、80%に低下した時の限界繰返し回数 $N_{95\%}$ 、 $N_{90\%}$ 、 $N_{85\%}$ 、 $N_{80\%}$ の回帰式を導いた。また、文献3.1-1)、3.1-2)で実施された実験結果と比較を行い、実験値と計算値の比較を行った。

##### (1) まとめ

###### 【既往実験の概要】

- 1) 一定変位振幅繰返し载荷を受けるCFT柱材について系統的な実験が行われているものとして、平成25年度基準整備促進事業S10「長周期地震動に対するCFT造柱部材等の安全性検証方法に関する検討」と日本鋼構造協会「長周期地震動に対する柱部材の保有性能に関する調査研究小委員会」によって行われたものがある。
- 2) 基準整備促進事業では、軸力比、変位振幅、座屈長さ・断面せい比、柱鋼管幅厚比、材料強度の組合せ、载荷プログラム、载荷方向を実験変数として一定変位振幅における曲げせん断実験が計22体行われている。変動軸力試験体のほうが多く、座屈長さ・断面せい比は8を基本としている。ほとんどが一定変位振幅である。幅厚比は、20と31の2種類である。
- 3) 日本鋼構造協会では、軸力比、変位振幅、座屈長さ・断面せい比を実験変数として曲げせん断実験が計28体行われている。すべて一定軸力下における実験である。ほとんどが一定変位振幅繰返し载荷である。幅厚比は25である。

###### 【疲労曲線の検討】

- 4) 日本鋼構造協会で行われた実験資料を用い、限界繰返し回数評価式を重回帰分析を用いて導いた。
- 5) 基準整備促進事業で得られた限界繰返し回数と重回帰式による限界繰返し回数を比較したところ、一定軸力の場合は、軸力比0.6を除けばおおむね安全側の評価ができること、幅厚比が31の場合は危険側の評価をすること、変動軸力の場合は、対応があまりよくないことがわかった。

##### (2) 今後の課題

今後に残された課題を以下に示す。

- 1) 一定軸力下での実験資料を用いて導いた限界繰返し回数評価式は、変動軸力の影響を十分に反映できていない。また、この評価式は幅厚比の影響が考慮できていない。これらの影響を考慮すべく、幅厚比の異なる実験資料の収集と、変動軸力を考慮した繰返し回数評価法の検討が必要である。変動軸力に関しては、低減係数を設けるなどの対応も考えられる。
- 2) 一定変位振幅下における実験資料を用いているため、建物モデルでの応答解析による部材の多数回繰返し特性を評価する際には、Miner則等を用いる必要がある。したがって、変動振幅下に

おける実験資料の収集が必要であると考えられる。

### 3.4.2 角形 CFT 柱部材の多数回繰返し載荷実験 (R1 年度実施)

角形 CFT 柱部材に対する設計用疲労曲線を提案することを目的として、既往実験結果を考慮した実験計画を立案し、角形 CFT 柱部材の多数回繰返し実験を実施した。

令和 1 年度の実験では、一定軸力下における角形 CFT 柱部材が変動変位振幅繰返し載荷を受ける場合の構造特性を把握し、既往の一定変位振幅繰返し載荷実験結果と合わせて部材角一限界繰返し回数の定式化を行う。次に、得られた式を用い、ある部材角時における限界繰返し回数を計算し、変動変位振幅繰返し載荷を受ける場合の限界繰返し回数を予測し、その予測した値と、実験により得られた限界繰返し回数を比較し、Miner 則が成立するかどうかの検討を行った。

#### (1) まとめ

- 1) 一定変位振幅繰返し載荷の部材角一限界繰返し回数（最大荷重の 95%、90%、85%、80%に耐力が低下した時のサイクル数 N95%、N90%、N 85%、N80%）関係は、既往の研究 3.2-1) とほぼ同じ傾向を示しており、軸力比  $n=0.3$  の場合、部材角一限界繰返し回数関係はほぼ直線式で表現できることがわかった。このことから、一定変位振幅繰返し載荷の部材角一限界繰返し回数関係を一つの試みとして回帰分析により定式化した。
- 2) 上記 1) で定式化した部材角一限界繰返し回数関係を用い、Miner 則が成り立つかどうかの検討を行った結果、座屈長さ・断面せい比が 10 の場合は、計算値よりも実験値のほうが限界繰返し回数が多く、座屈長さ・断面せい比が 20 の場合は、計算値よりも実験値のほうが限界繰返し回数が少なくなっていたが、おおむね対応していた。

#### (2) 今後の課題

今後に残された課題を以下に記す。

- 1) 変動軸力下における実験を行っていないので、変動軸力を実験変数として多数回繰返し実験を行う必要がある。
- 2) 令和 1 年度行った変動変位振幅繰返し載荷の結果ならびに次年度に実施する変動軸力による実験結果を考慮し、設計用疲労曲線の検討を行う必要がある。

### 3.4.3 CFT 柱部材の多数回繰返し載荷実験と疲労評価の検討 (R2 年度実施)

長周期地震動に依る繰返し荷重が作用する角形断面CFT柱を対象に、令和2年は、変動軸力下の特性に着目し、可成り広範囲の軸力比-0.1(引張側)~0.7(圧縮側)を対象に、変動軸力下の一定振幅の繰返し載荷実験を実施した。又、斯かる実験結果及び既往の実験結果に基づき、変動振幅、変動軸力に対応した繰返し荷重下の疲労損傷評価法を検討した。以下に、令和2年度得られた成果及び今後の課題について概括する。

#### (1) 変動軸力下の一定振幅の繰返し載荷実験

変動軸力を受ける角形 CFT 柱の変形性能を把握するため、軸力比・振幅をパラメータとした一定振幅繰返し載荷実験を実施した。変動軸力下の一定振幅の繰返し載荷実験は、2.1 節における解析結果を勘案して、軸力比を  $0.15\pm 0.35$ 、 $0.3\pm 0.3$ 、 $0.3\pm 0.4$  の 3 水準、振幅を  $1/200\sim 1/67$  の範囲の 4 水準とし、5 体の実験を行った。試験体は、令和 1 年度に中心に実施した  $\square 150\times 150$ 、 $L/D=10.0$ 、

$D/t=25.0(t=6\text{mm})$ を用いた。

振幅が大きい程、最大軸力比が大きい程、限界繰返し回数は小さくなる傾向にある。また、変動軸力を受ける試験体と変動軸力の最大軸力を一定軸力として受ける試験体を比較すると、変動軸力の試験体の変形性能が悪いケースが見られ、引張軸力が内部のコンクリートに悪影響を及ぼしている可能性がある。ただし、軸ひずみはほとんど進展しておらず、水平耐力低下後も軸力を保持していることが確認された。

変動軸力を受けるCFT柱は軸力が大きい場合の耐力低下が顕著に見られ、軸力が小さい場合の耐力低下は小さかった。実際の建物では、片方の側柱が大きな圧縮軸力を受ける場合、反対側の側柱の軸力が小さくなる（または引張軸力となる）ため、変動軸力を受ける場合、両振幅ではなく片振幅で評価できると考えられる。

これら、引張軸力を受けるCFT柱の劣化特性の解明等、広範囲な軸力変化に対しては、本実験である程度定性的な性状は把握されたものの、今後も実験資料の蓄積により、的確な疲労特性評価が可能であると考えられる。

## (2) 疲労損傷評価法

検討した限界繰返し回数の式は、日本鋼構造協会・長周期地震動に対するCFT柱の安全性検証法に関する研究小委員会に於いて検討した一定振幅繰返し載荷の実験資料に依って作成した評価式に基づくもので、斯かる式は、実験値と計算値の平均値が1.0となる式なので、変動振幅繰返し試験体について、令和1年度の実験結果及び既往実験結果に基づき、軸力比の影響を下限として与える式を検討し、平均値が1.0となる式ではなく、実験の下限を与える式を提示した。他方、変動軸力に対しては、軸力比変化率と部材角の積を因子とした補正項を考え、斯かる式に依って、実験結果の下限値を与える式を提示した。これらの式は、実験資料に依る回帰式であり、現状、上述の如く実験資料が僅少であることを鑑みると、今後更なる実験資料の蓄積による的確な疲労評価式の検討が必要であると考えられる。