

第Ⅶ部

免震建築物の地震観測と公表観測記録の整理・分析

第1章 免震建築物の地震観測

1.1 目的

長周期地震動の発生が予想される地点（東京・大阪）に建設されている免震建築物をそれぞれ1棟選定し、建物及びその周辺地盤に計測機等を設置して、長周期地震動が免震建築物の応答に及ぼす影響を把握することを目的とする。

1.2 免震建築物の地震観測体制

(1) 共通事項

1) センサー諸元

加速度計、相対変位計の概要を以下に示す。

a) 加速度計(建屋)

製造	(株) 東京測振
品名・形式	サーボ型加速度計 VS-355T
測定周波数	DC ~ 250 Hz (±3dB)
測定範囲(加速度)	±2000 gal、±10V
感度(加速度)	5mV / gal
出力抵抗	100Ω
分解能(加速度)	フルスケールの 0.001%
直線性	フルスケールの 0.003%
ダンピング	$h = 0.6 \sim 0.7$
ケースアライメント	誤差±1度以内
出力ノイズ	5 mV rms
横感度	0.003G / G 以下
最大出力電圧	±11 V
供給電源	±15 V (DC)
消費電流	約 10mA
動作温度	-20 °C ~ +70 °C

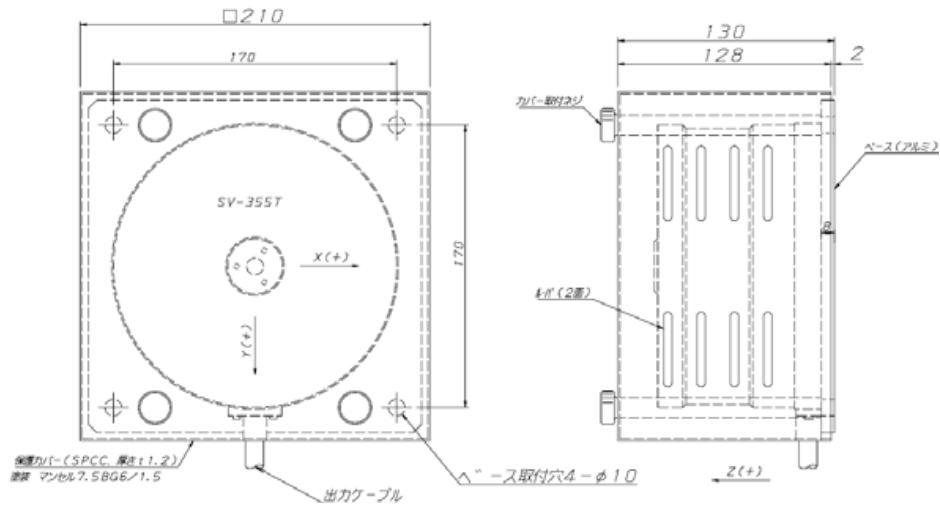


図 1.2-1 サーボ型加速度計(VS-355T)

b) 加速度計(地表用)

製造	(株) 東京測振
品名・形式	サーボ型加速度計 AS-303D3BH
測定周波数	DC ~ 250 Hz (±3dB)
測定範囲(加速度)	±2000 gal ±10V
感度(加速度)	5mV / gal
出力抵抗	100Ω
分解能(加速度)	フルスケールの 0.001%
直線性	フルスケールの 0.003%
ダンピング	$h = 0.6 \sim 0.7$
ケースアライメント	誤差±1 度以内
出力ノイズ	5 mV rms
横感度	0.003G / G 以下
最大出力電圧	±11 V
供給電源	±15 V (DC)
消費電流	約 10mA
動作温度	-20 °C ~ +70 °C

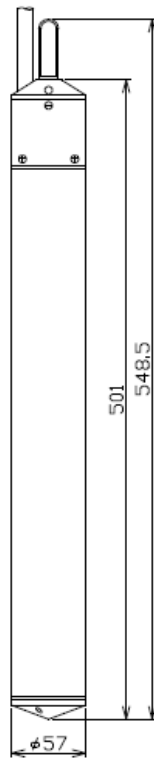


図 1.2-2 サーボ型加速度計(AS-303D3BH)

c) 相対変位計

製造
品名・型式
感度

(株) 東京測振
回転角付変位計 DPR-600A

移動距離 0.016 V/mm
回転角 0.067 V/度

最大測定範囲

変位 ±625mm
回転角
方位±40度、仰角±10度

分解能

変位 0.25mm
回転角 0.05度

最大応答速度

変位 250 mm/sec (max)
回転角 720度/sec (max)

温度範囲

-20℃～+60℃

供給電圧

DC±15V (上記感度はこの供給電圧の場合)

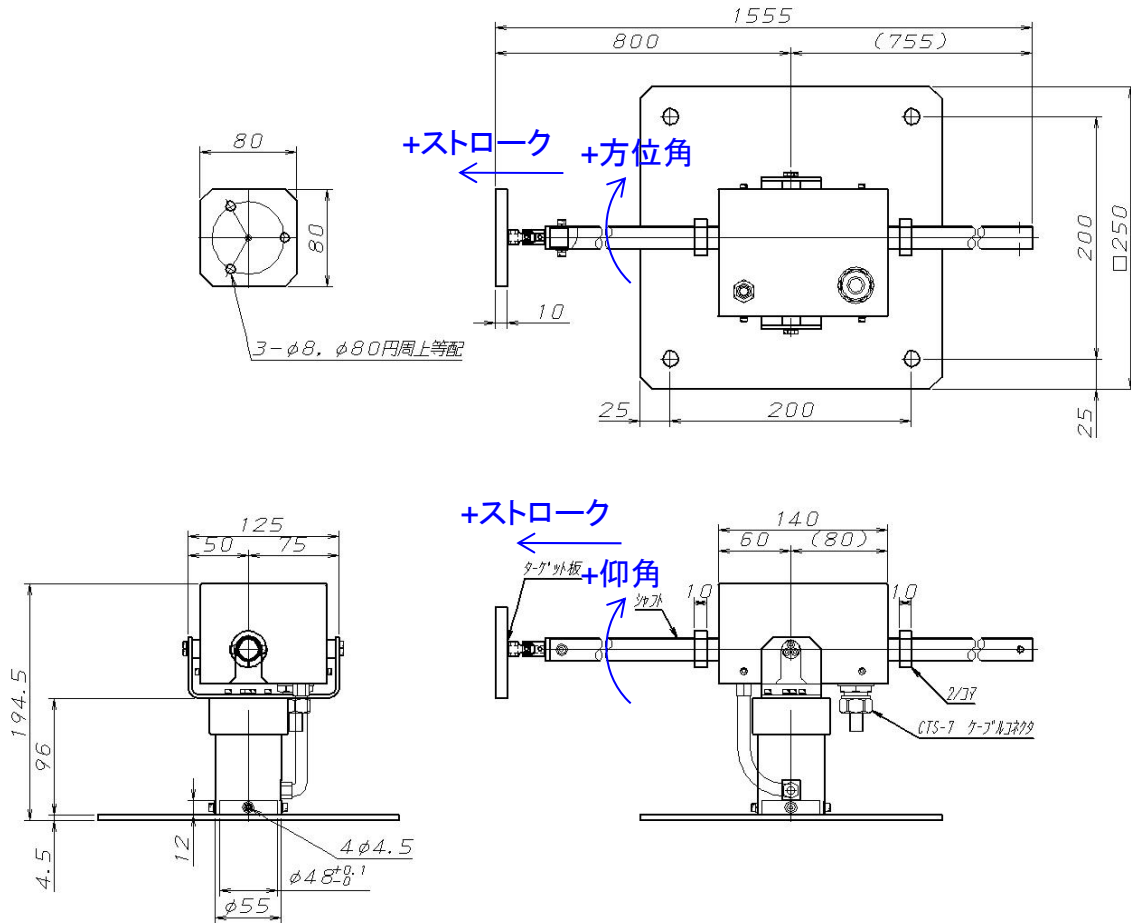


図 1.2-3 相対変位計(AS-303D3BH)

2) 収録装置諸元

収録装置の機器一覧を表1.2-1に示す。

収録を開始するトリガーはいずれかの計測位置で加速度の1秒間のr.m.s.が 2cm/s^2 を越えた場合と設定している。

表1.2-1 収録装置の機器一覧

機器名称	型式	メーカー名
①計測用PC	2UラックマウントPC Core2 2.13 GHz SSD A/D NI PCI-6224 (32ch 16bit)	ミスミ National Instruments
②ディスプレイ	QT-1003B-AVG	クイックサン
③キーボード	MINI KEYBOARD III	Plat' Home
④HUB	LSW-TX-8NP	BUFFALO
⑤プリンタ	POCKET BOOK Si	ペンタックス
⑥無停電電源装置	UPS1010SS	ユカタ電機製作所
⑦LAN制御電源タップ	WATCH BOOT L-zero	明京電機
⑧センサフィルタ・アンプ	SCC-16	東京測振(幸和電子)
⑨センサ端子BOX	SCC-16-BOX	東京測振(幸和電子)

(2) 観測建物概要

1) A建物(大阪地区)

a) 建物概要

本建物の概要を以下に示す。建物の所在地を図1.2-4に示す。

所在地 : 大阪府大阪市中央区

竣工 : 平成20年3月 (耐震改修による免震構造、元建物は昭和34年竣工)

構造 : 鉄骨鉄筋コンクリート造、地下1階、地上8階、塔屋2階
地下1階柱頭免震構造(耐震改修による)

基礎形式 : 直接基礎

免震装置 : R B55台、直動転がり55台

高さ : 28.550m

延床面積 : 24,226m²

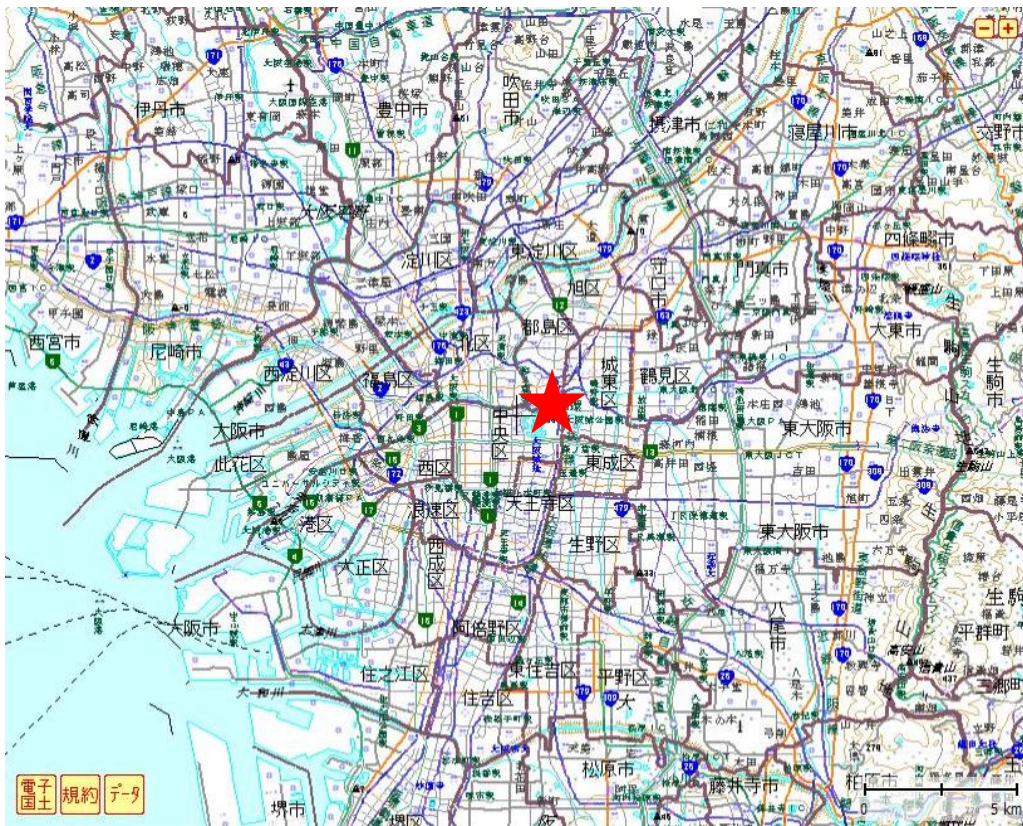


図1.2-4 建物所在地

b) 機器・設置箇所

観測は、加速度計を地表面・地下1階・1階・8階の4箇所に設置し、相対変位計を地下1階免震層に設置した。図1.2-5に観測機器の概要を、図1.2-6～9に設置位置を示す。図1.2-10～15に設置状況の写真を示す。

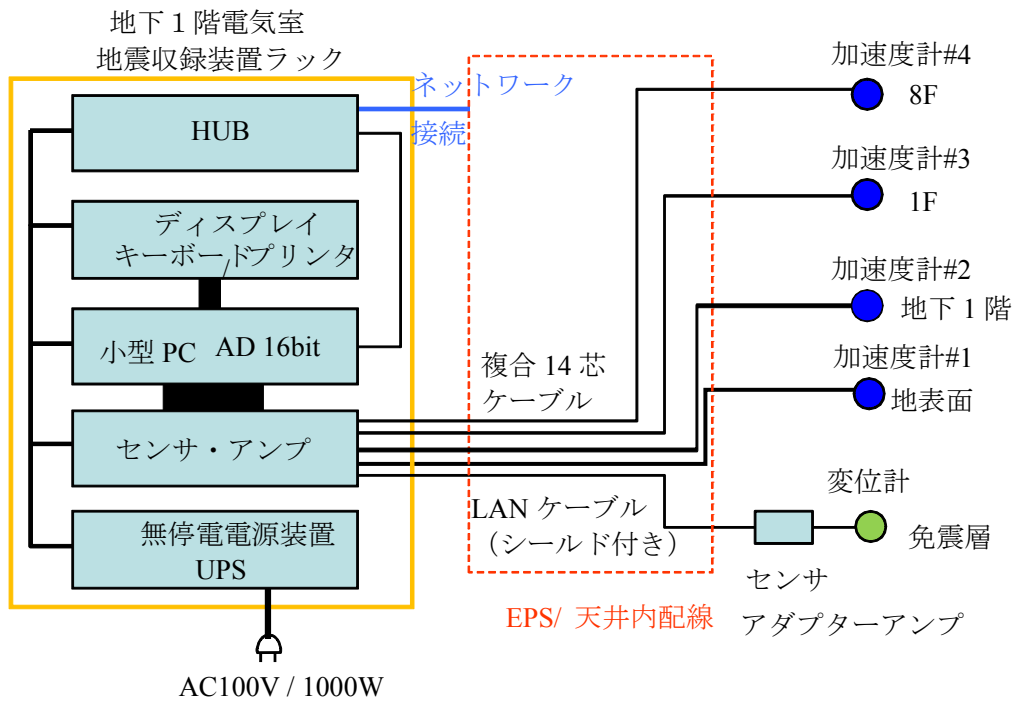


図1.2-5 観測機器概要

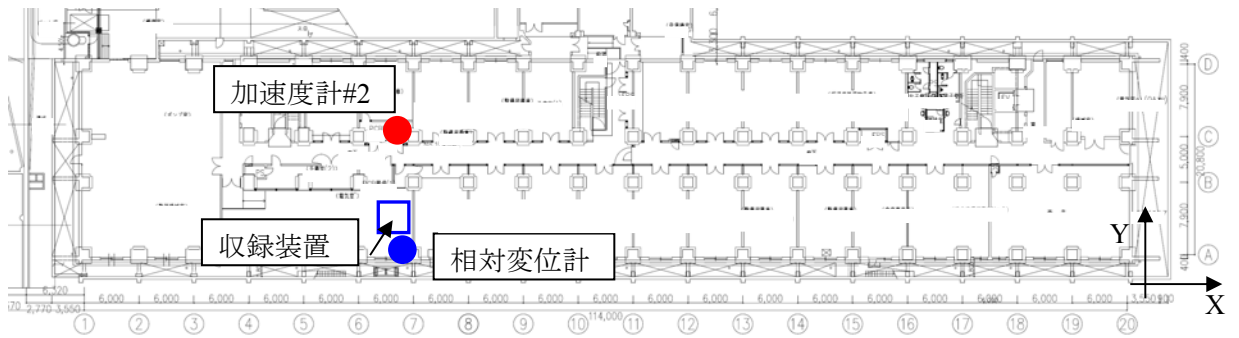


図1.2-6 地震計位置(地下1階)

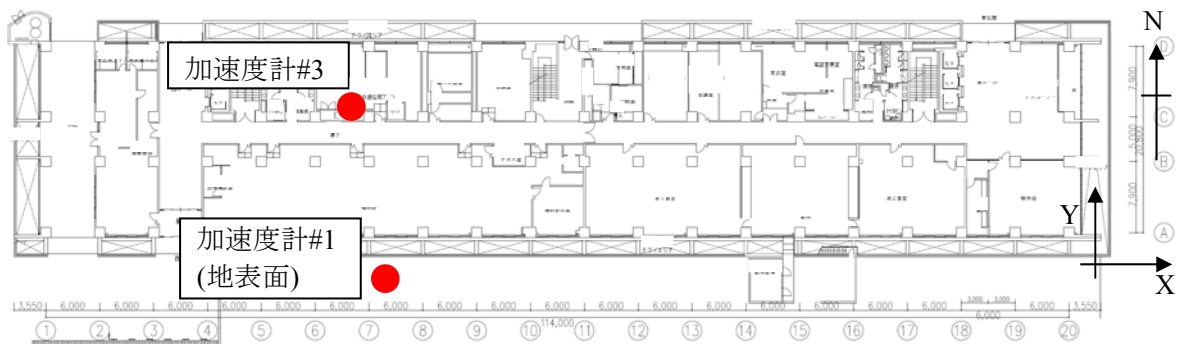


図1.2-7 地震計位置(1階および地表)

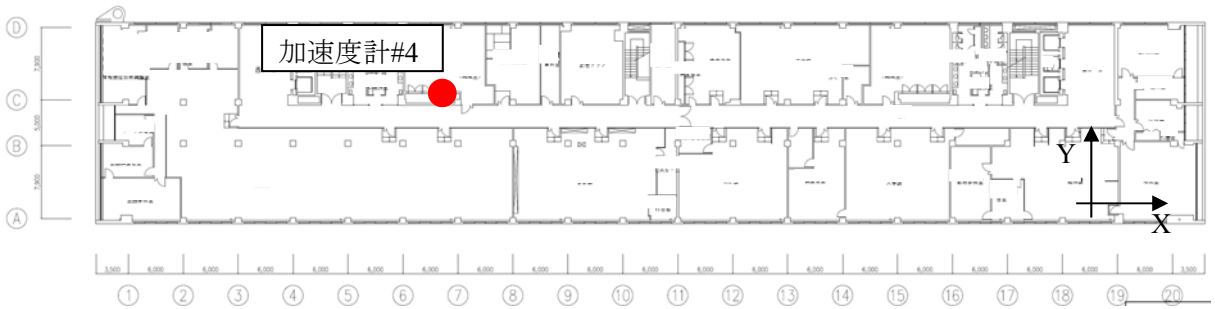


図1.2-8 地震計位置(8階)

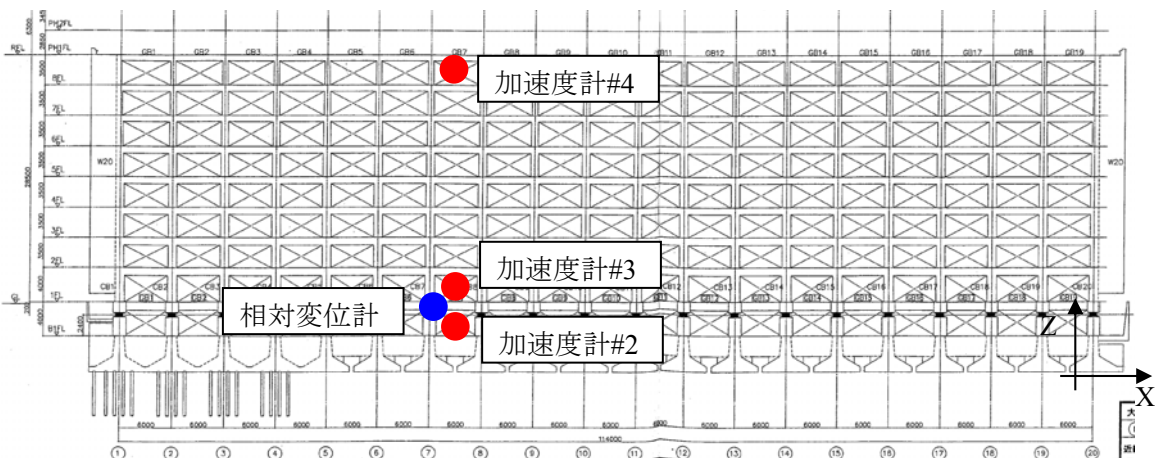


図1.2-9 地震計位置(断面図)



図1.2-10 収録装置(地下1階電気室)



図1.2-11 加速度計#4(8階EPS)



図1.2-12 加速度計#3(1階EPS)



図1.2-13 加速度計#2(地下1階EPS)



図1.2-14 加速度計#1(地盤GL-1.3m)



図 1.2-15 相对変位計(地下 1 階)

2) B建物(東京地区)

a) 建物概要

本建物の概要を以下に示す。建物の所在地を図1.2-16に示す。

所在地 : 東京都江東区

竣工 : 2011年2月

構造 : RC造、免震構造(3-4階間に免震層)、

基礎形式 : 杭基礎(場所打ちコンクリート拡底杭)

免震装置 : 鉛プラグ入り積層ゴム40台、天然ゴム系積層ゴム11台

用途 : 共同住宅・駐車場

敷地面積 : 7,380m²

建築面積 : 3448m²

延床面積 : 51,856m²

軒高 : 114m

最高高さ : 123m

階数 : 地下なし、地上36階、塔屋1階



図 1.2-16 建物外観図

b) 機器・設置箇所

観測は、加速度計を地表面・1階・3階・4階・20階^(*)・36階の6箇所を設置し、相対変位計を免震ピット階(3階~4階間)に設置した。図1.2-17に観測機器の概要、図1.2-18~20に設置位置の概要を示す。^(*): 20階は2012年3月17日から観測開始)

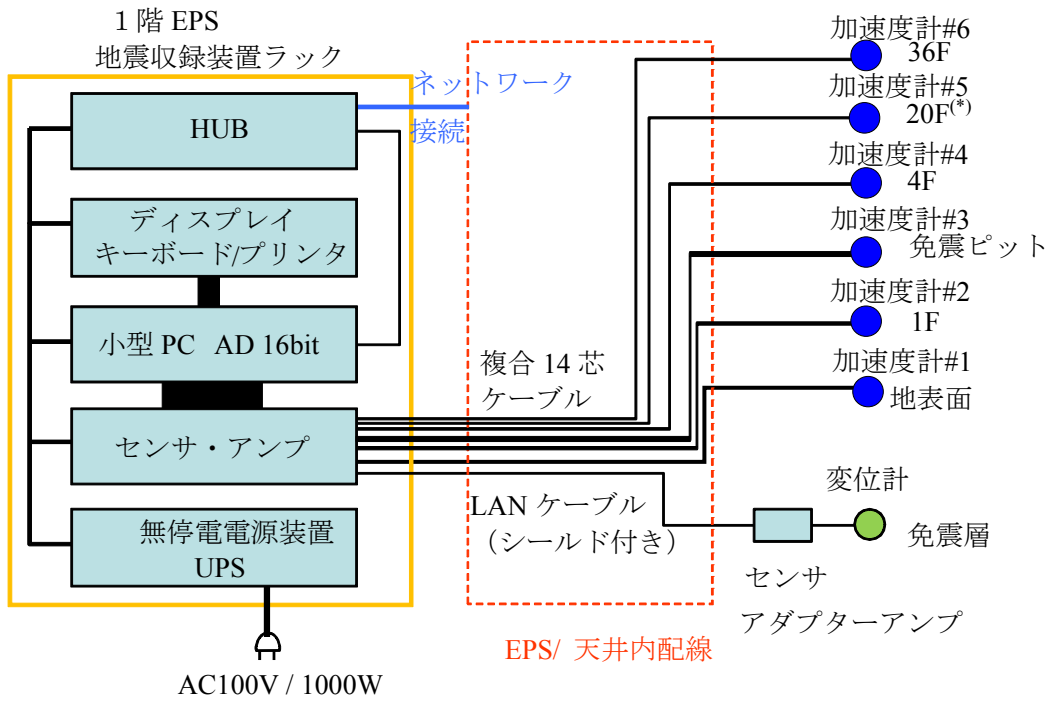


図1.2-17 観測機器概要

地盤面加速度計

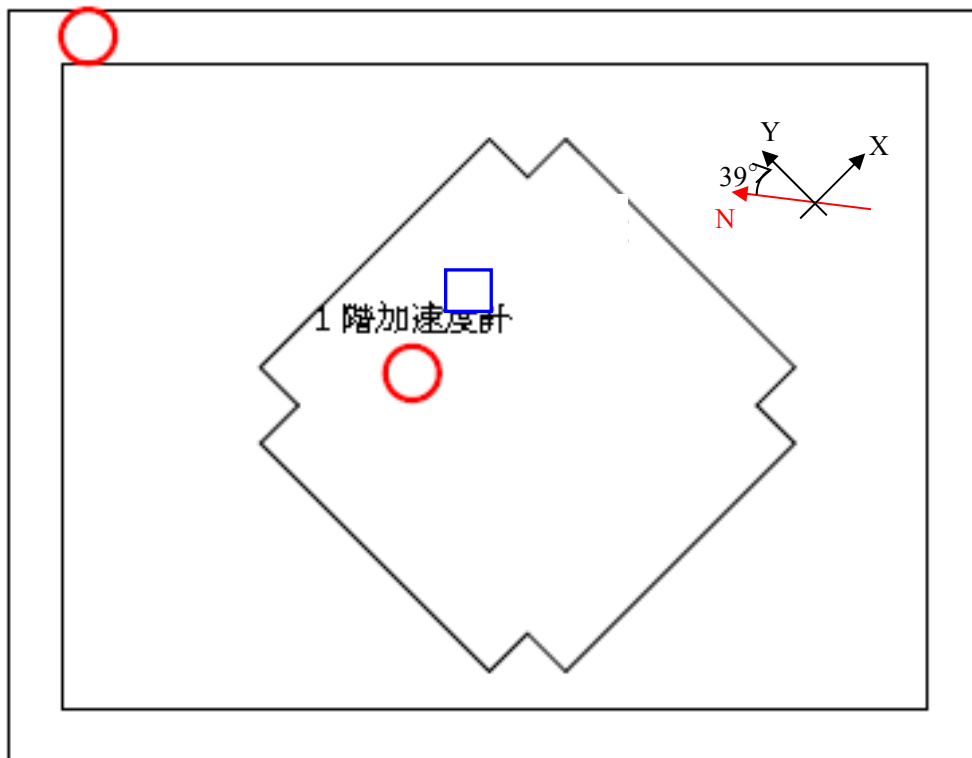


図1.2-18 地震計位置(1階および地盤)

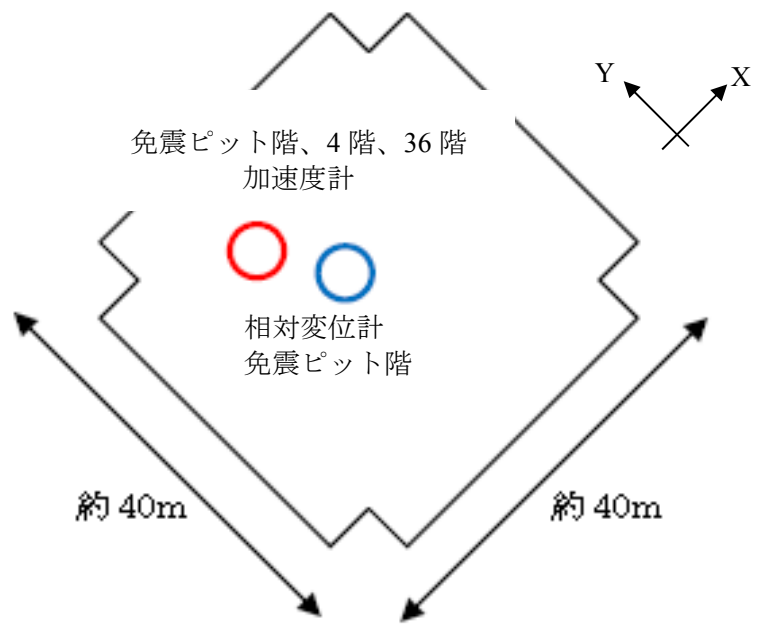


図1.2-19 地震計位置(免震ピット階および4階、36階)

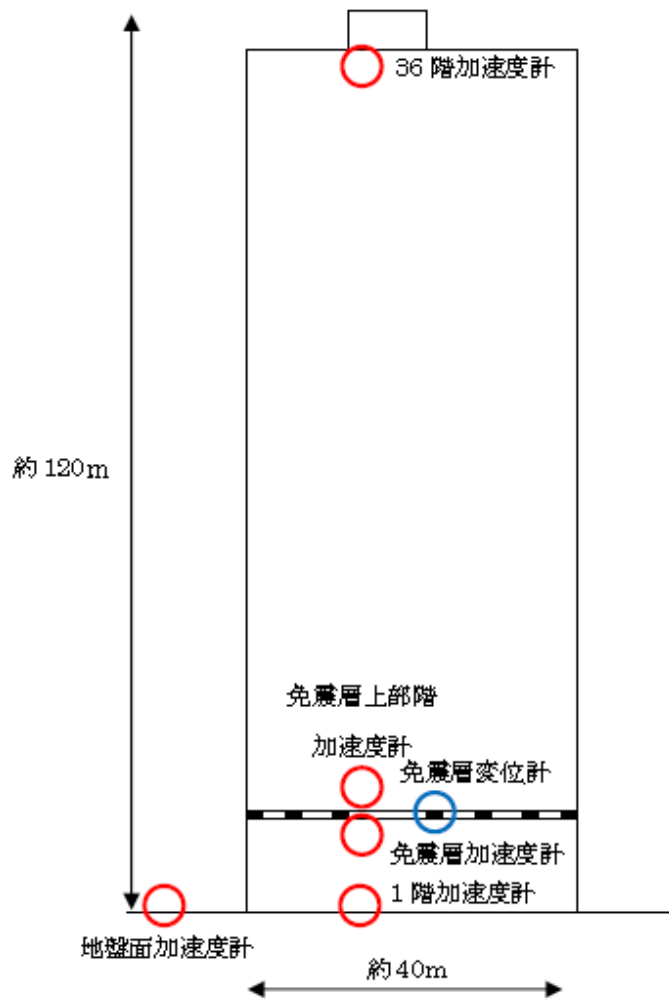


図1.2-20 地震計位置(断面図)



図1.2-21 収録装置(1階EPS)



図1.2-22 加速度計#2(1階EPS)



図1.2-23 加速度計#3(免震ピット階)



図1.2-24 加速度計#4(4階EPS)



図 1.2-25 加速度計#5(36 階 EPS)



図 1.2-26 加速度計#1(地表面 GL-1.5m)



図 1.2-27 相対変位計(免震ピット階)

1.3 観測免震建築物の地震観測記録の分析とシミュレーション解析

1.3.1 観測記録の整理

1) A 建物 (大阪地区)

(1) 観測記録リスト

2011年2月に設置後2013年2月までに、トリガーした観測リストを表1.3.1-1に示す。2012年度に新たに観測された記録はなかった。震源の位置を図1.3.1-1のマップに示す。

表1.3.1-1 観測リスト

観測日時	地表面計測震度	発震時 震源情報							震央地名	最大震度	震央距離 (km)	震源距離 (km)
		日時	緯度 (度 分)	経度 (度 分)	深さ (km)	M						
2011/03/11 14:49:34	3.0	2011/03/11 14:46:00	38 0.0	142 54.0	10	7.9	三陸沖	7	757	757		
2011/03/11 15:18:10	2.3	2011/03/11 15:15:00	36 0.0	141 12.0	80	7.4	茨城県沖	6弱	536	542		
2011/03/15 22:32:59	1.2	2011/03/15 22:31:00	35 18.0	138 42.0	10	6.0	静岡県東部	6強	298	298		
2011/07/05 19:18:42	1.2	2011/07/05 19:34:56	33 59.7	135 14.5	7	4.5	和歌山県北部	4	81	82		
2011/10/09 16:18:02	1.5	2011/10/09 16:18:26	34 30.2	135 29.4	12	3.9	大阪府南部	3	21	24		

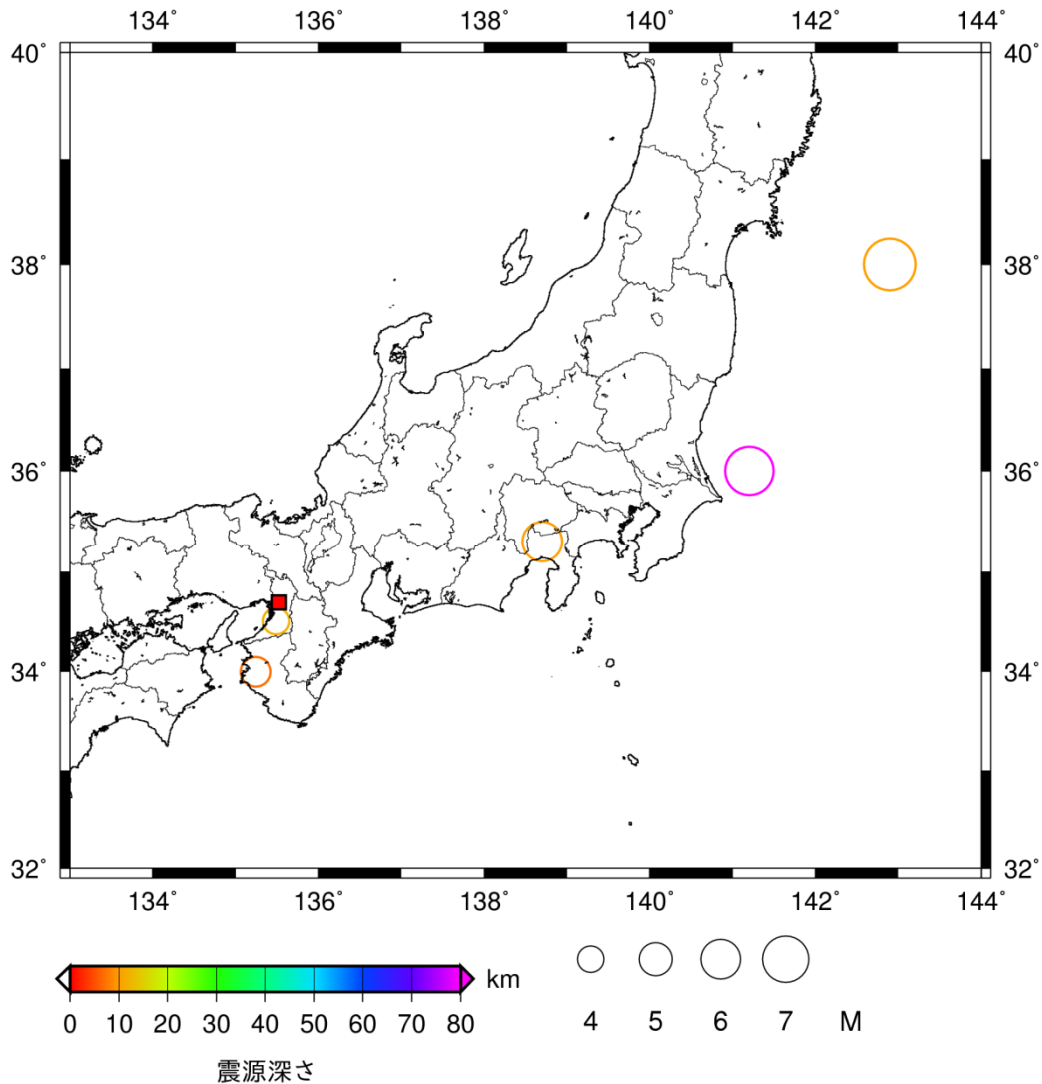


図1.3.1-1 震源マップ

(2) 観測記録の整理・分析

2011年3月11日東北地方太平洋沖地震における観測記録について、加速度時刻歴波形を図1.3.1-2～4に、免震層の相対変位計の時刻歴波形を図1.3.1-5に示す。また、各測定位置の加速度最大値を表1.3.1-2に示す。

相対変位波形を見ると、2mm程度の動きがあるが、免震構造としての機能は発揮されていないものの、上層での増幅もほとんど見られない。

地盤の擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$) を図1.3.1-6に示す。X方向で4.75秒、Y方向で2.5秒付近にピークが見られる。

1階および8階の地下1階に対する伝達関数を、図1.3.1-7に示す。1次の固有振動数は、X・Y方向とも約1.6Hzとなっている。

表 1.3.1-2 加速度最大値 (cm/s^2)

位置	X	Y	Z
8F	10.5	13.3	4.4
1F	10.1	12.8	4.3
B1F	9.2	11.2	4.3
GL	9.5	10.7	4.7

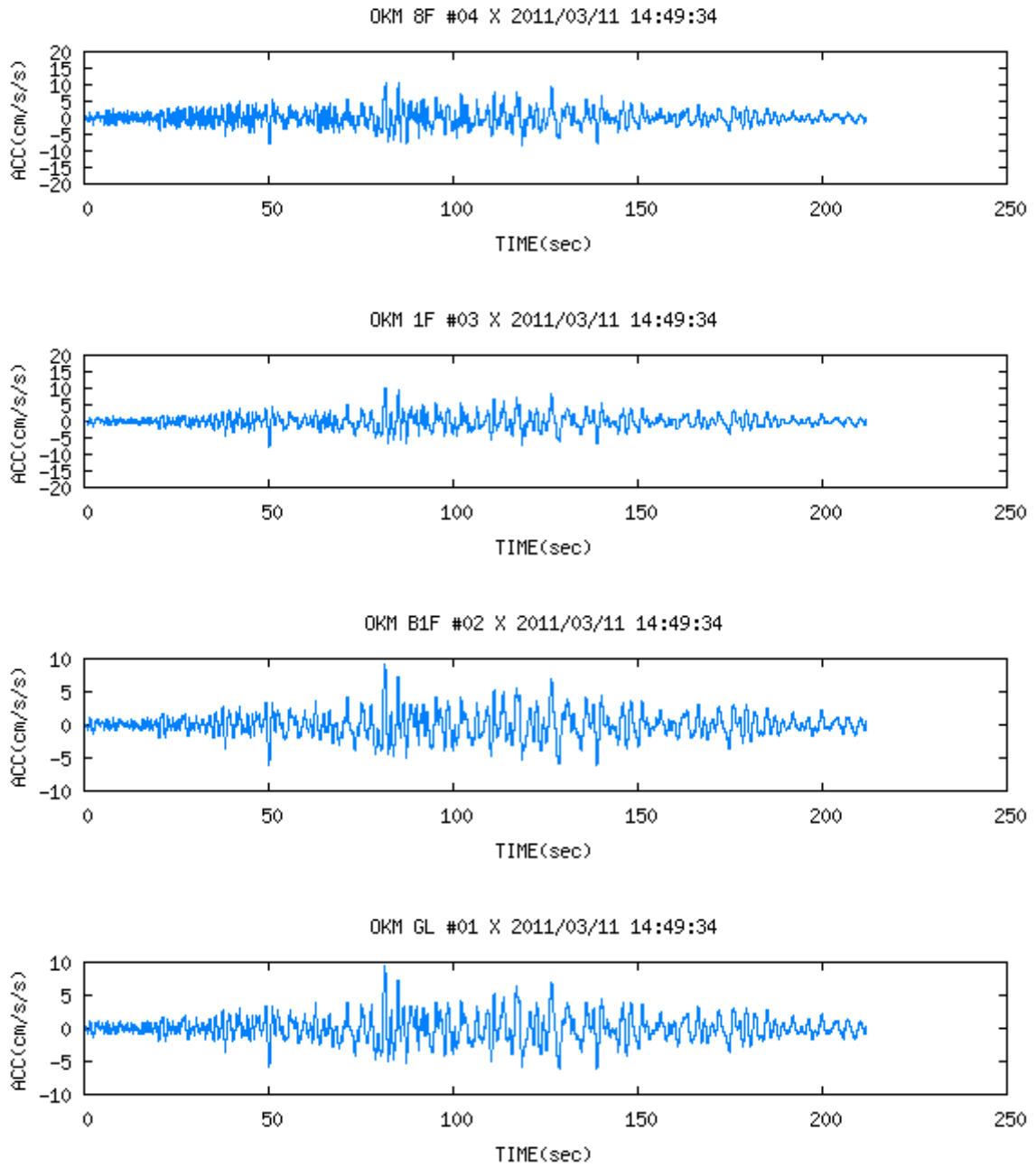


图 1.3.1-2 加速度時刻歴波形 (X 方向)

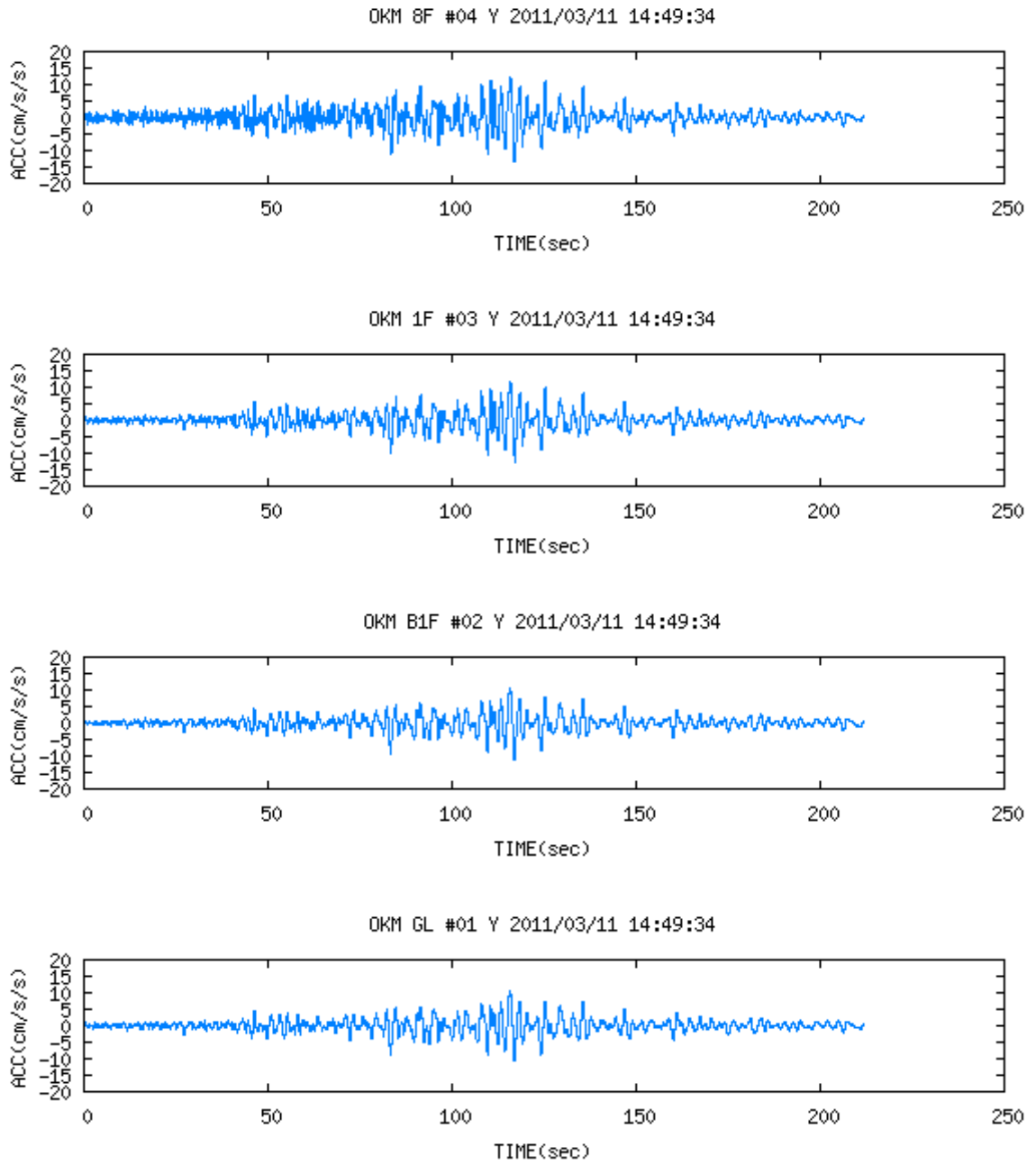


图 1.3.1-3 加速度時刻歴波形 (Y 方向)

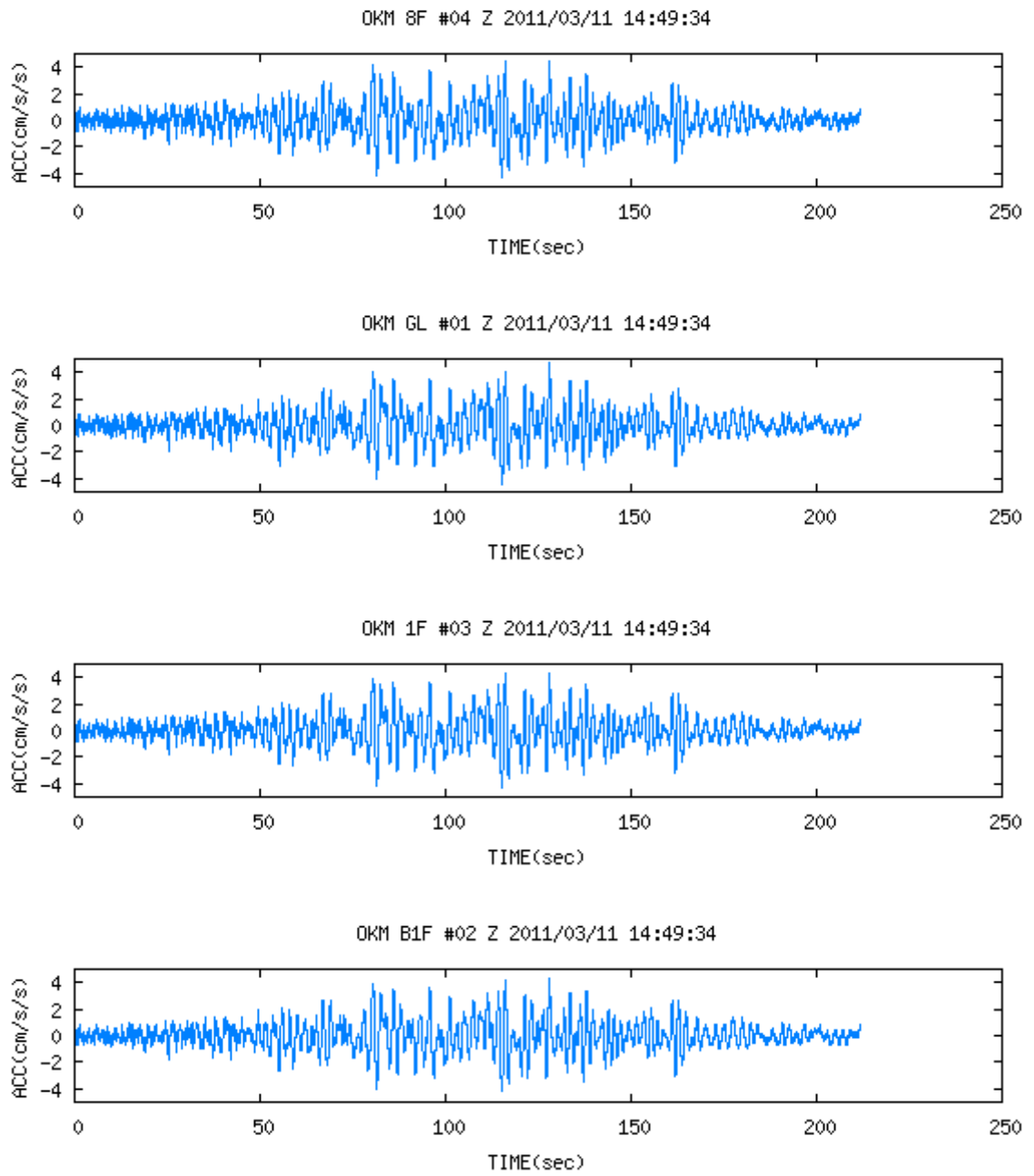


图 1.3.1-4 加速度時刻歴波形（上下方向）

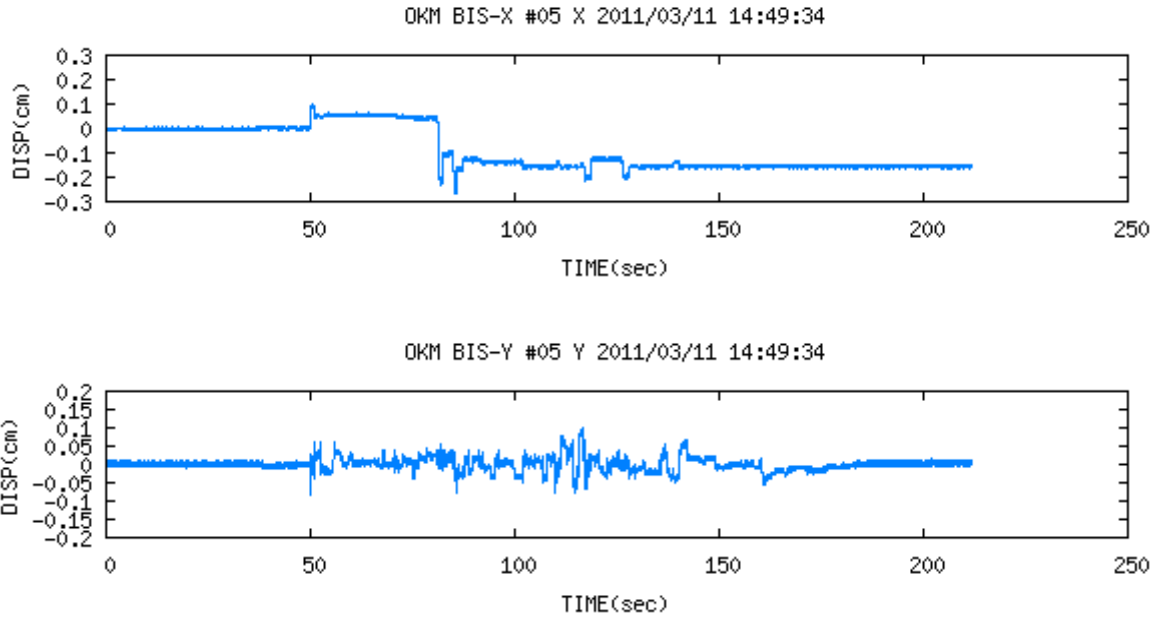


図 1.3.1-5 相対変位時刻歴波形（免震層）

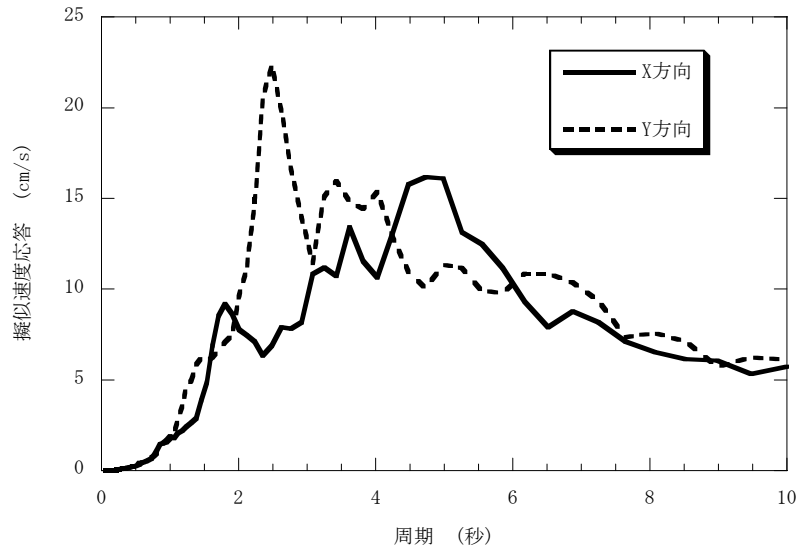


図 1.3.1-6 擬似速度応答スペクトル（地盤）

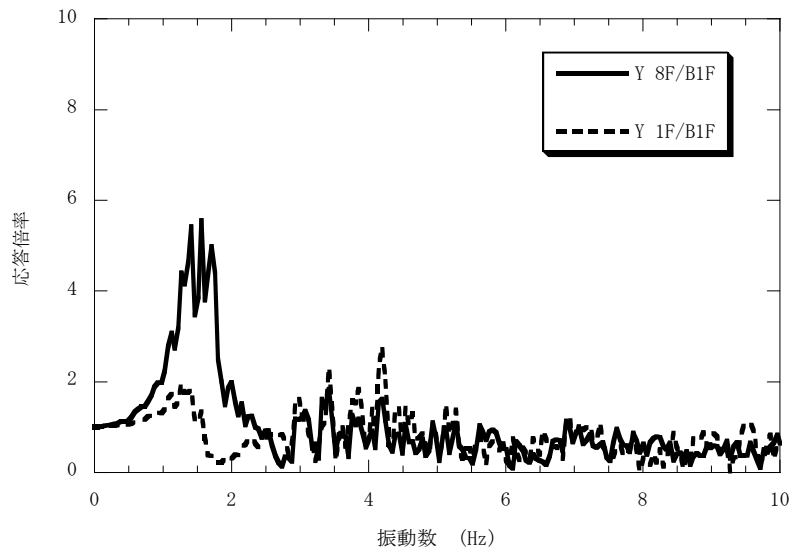
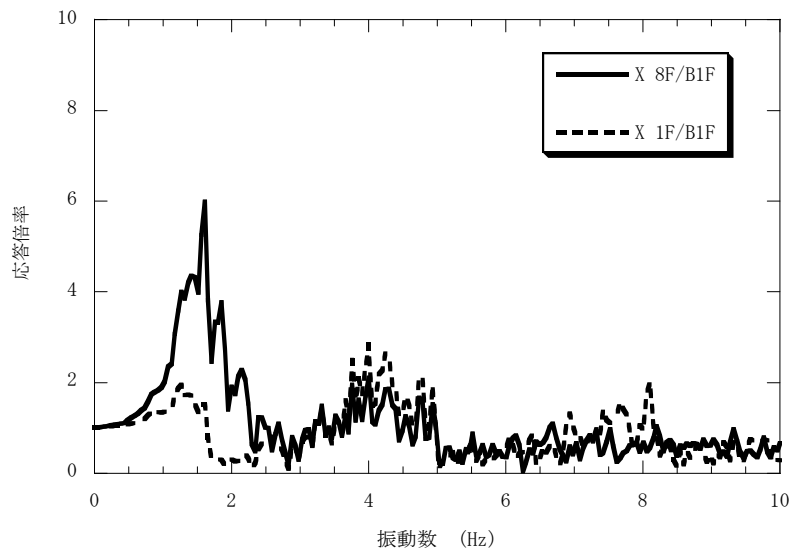


図 1.3.1-7 伝達関数 (8F/B1F, 1F/B1F)

2) B建物(東京地区)

(1) 観測記録リスト

東京の建物では、2010年度85件、2011年度87件、2012年度29件、計201件の観測記録が得られ、免震構造としての効果が確認された。2011年3月から2013年2月末までの観測リストのうち、1階での計測震度が2以上のものを表1.3.1-3に示す。表中赤枠部は、1階での計測震度が3以上のものである。また、震源の位置を図1.3.1-8のマップに示す。

注1) 2011年9月20日までのG Lの記録の内、YおよびZ成分は、アンプの設定が悪かったために、正規の記録が観測されなかった。9月21日以降は、正規の値として記録されている。

注2) 2012年3月17日以降の観測記録は、20階の記録が追加されている。

表1.3.1-3 観測リスト

観測日時	1階		免震層変位		発震時 震源情報										震央距離(km)	震源距離(km)	枝川・東陽町震度
	計測震度	X(cm)	Y(cm)	日時	緯度	経度	深さ	M	震央	最大震度	震央距離(km)	震源距離(km)					
2011/03/09 11:46:54	2.1	-0.255	-0.24	2011/3/9_11:45:12.9	38	19.7	143	16.7	8	7.3	三陸沖	5弱	430	430	江東区枝川 - 震度3, 東陽 - 震度2		
2011/03/11 14:47:14	4.8	-14.56	-13.22	2011/3/11_14:46:18.1	38	6.2	142	51.6	24	9.0	三陸沖	7	386	387	江東区枝川, 東陽 - 震度5強		
2011/03/11 15:14:37	4.4	3.29	-8.99	2011/3/11_15:15:34.4	36	6.5	141	15.9	43	7.6	茨城県沖	6強	142	148	江東区東陽 - 震度4		
2011/03/11 15:26:06	2.3	-0.18	0.28	2011/3/11_15:25:44.4	37	50.2	144	53.6	34	7.5	三陸沖	4	515	516	江東区東陽 - 震度3		
2011/03/14 10:02:49	2.5	0.25	-0.15	2011/3/14_10:02:38.7	36	27.5	141	7.5	32	6.2	茨城県沖	5弱	149	153	江東区枝川, 東陽 - 震度3		
2011/03/15 22:31:48	2.7	0.28	0.31	2011/3/15_22:31:46.3	35	18.5	138	42.8	14	6.4	静岡県東部	6強	106	107	江東区枝川, 東陽 - 震度3		
2011/03/16 12:52:02	2.5	-0.29	-0.18	2011/3/16_12:52:2.7	35	50.2	140	54.3	10	6.1	千葉県東方沖	5弱	102	102	江東区枝川, 東陽 - 震度3		
2011/03/19 18:57:10	2.5	0.24	0.11	2011/3/19_18:56:48.0	36	47	140	34.2	5	6.1	茨城県北部	5強	144	144	江東区枝川, 東陽 - 震度3		
2011/04/11 17:16:26	3.3	-0.55	-0.75	2011/4/11_17:16:12.0	36	56.7	140	40.3	6	7.0	福島県浜通り	6弱	164	164	江東区枝川 - 震度4, 東陽 - 震度3		
2011/04/12 8:08:19	2.9	-0.28	-0.49	2011/4/12_08:08:15.8	35	28.9	140	52.0	26	6.4	千葉県東方沖	5弱	98	102	江東区枝川, 東陽 - 震度3		
2011/04/16 11:19:29	2.7	-0.24	-0.13	2011/4/16_11:19:31.6	36	20.4	139	56.7	79	5.9	茨城県南部	5強	78	111	江東区枝川, 東陽 - 震度3		
2011/04/21 22:37:00	2.4	-0.2	0.13	2011/4/21_22:37:2.1	35	40.5	140	41.1	46	6.0	千葉県東方沖	5弱	80	92	江東区枝川, 東陽 - 震度3		
2011/07/15 21:01:07	2.8	-0.31	-0.17	2011/7/15_21:01:10.8	36	9.8	140	5.0	66	5.4	茨城県南部	5弱	63	91	江東区枝川, 東陽 - 震度3		
2012/01/01 14:29:40	2.7	-0.16	0.025	2012/1/1_14:27:52.0	31	25.6	138	33.9	397	7.0	島島近海	4	484	626	江東区枝川, 東陽 - 震度3		
2012/05/29 1:36:42	2.6	-0.12	-0.13	2012/05/29_01:36:47.1	35	48.3	140	5.2	64	5.2	千葉県北東部	4	31	71	江東区東陽 - 震度3		
2012/11/24 17:59:38	2.5	0.17	-0.04	2012/11/24 17:59:47	35	38.2	140	1	72	4.8	東京湾	4	19	75	江東区東陽 - 震度3		
2012/12/07 17:19:13	3.2	0.39	0.59	2012/12/07 17:18:30	38	1.1	143	52	49	7.3	三陸沖	5弱	448	451	江東区東陽 - 震度3		

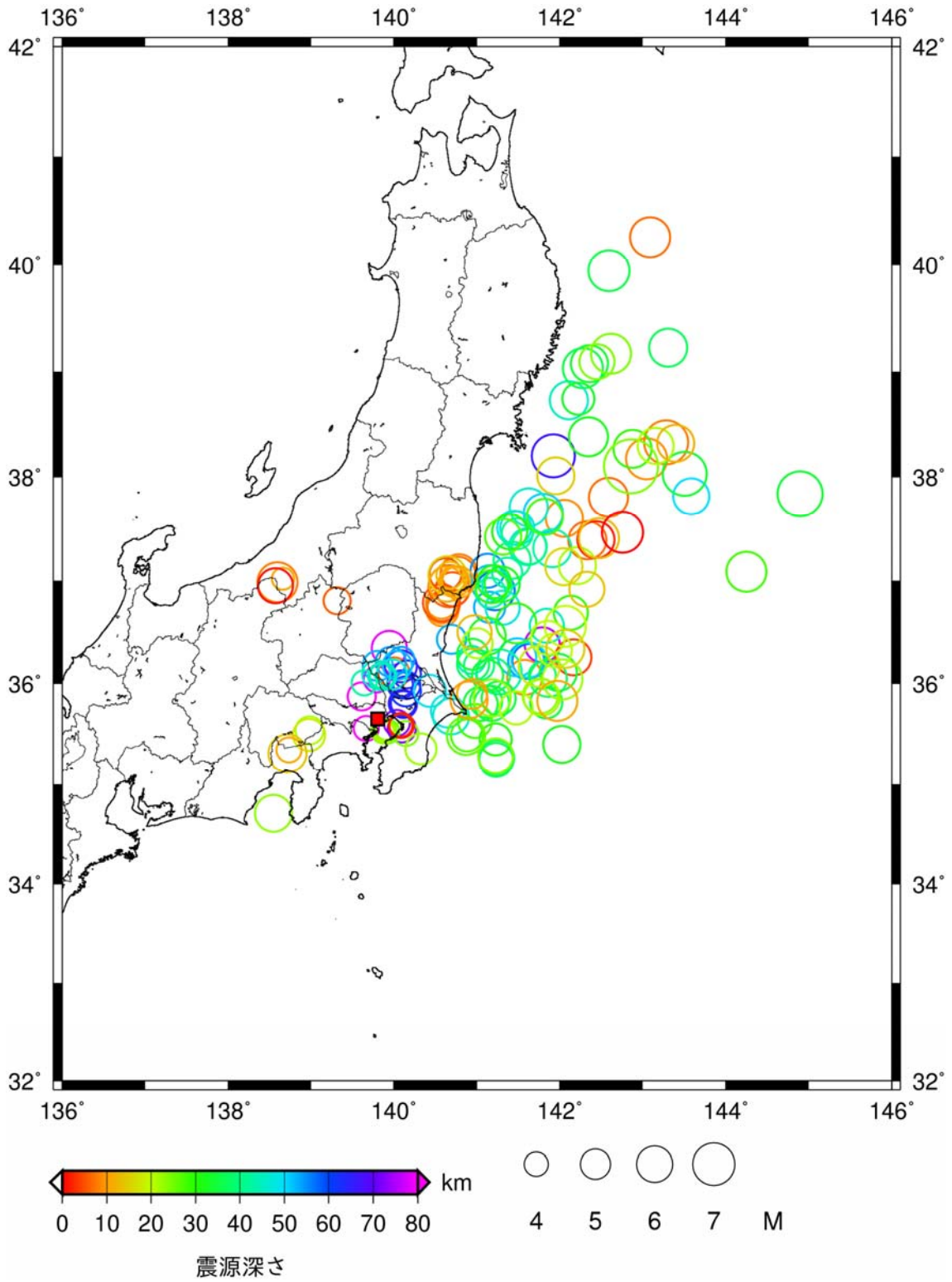


図1.3.1-8 震源マップ 注) 2012/1/1 鳥島近海は除く

(3) 観測記録の整理・分析

観測リストの地震について、加速度の最大値を図 1.3.1-9～11 に示す。

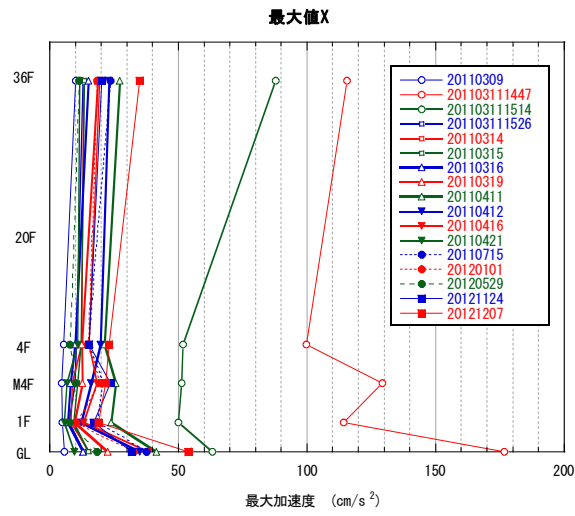


図1.3.1-9 加速度最大値の分布 (X方向)

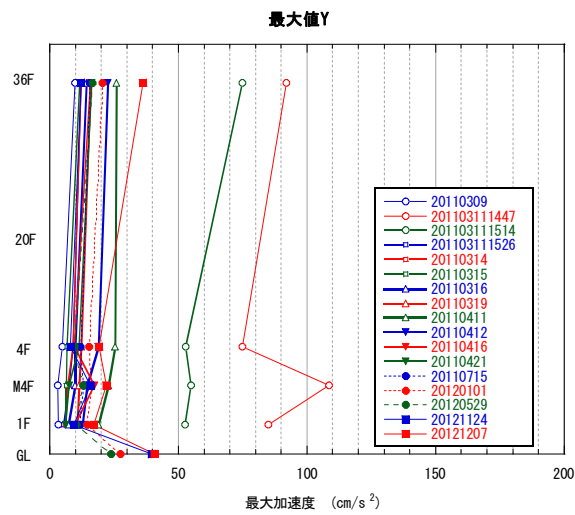


図1.3.1-10 加速度最大値の分布 (Y方向)

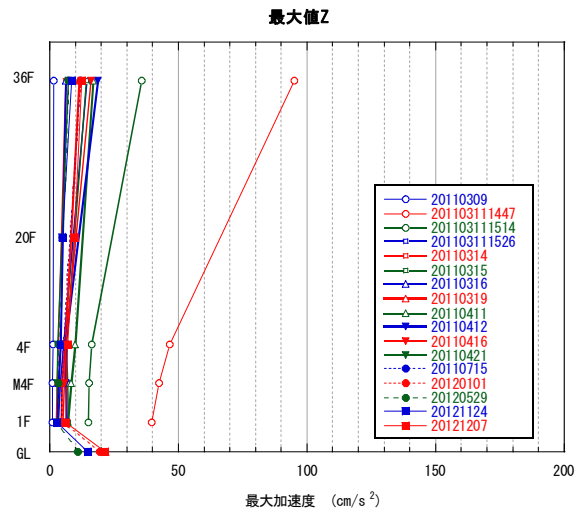


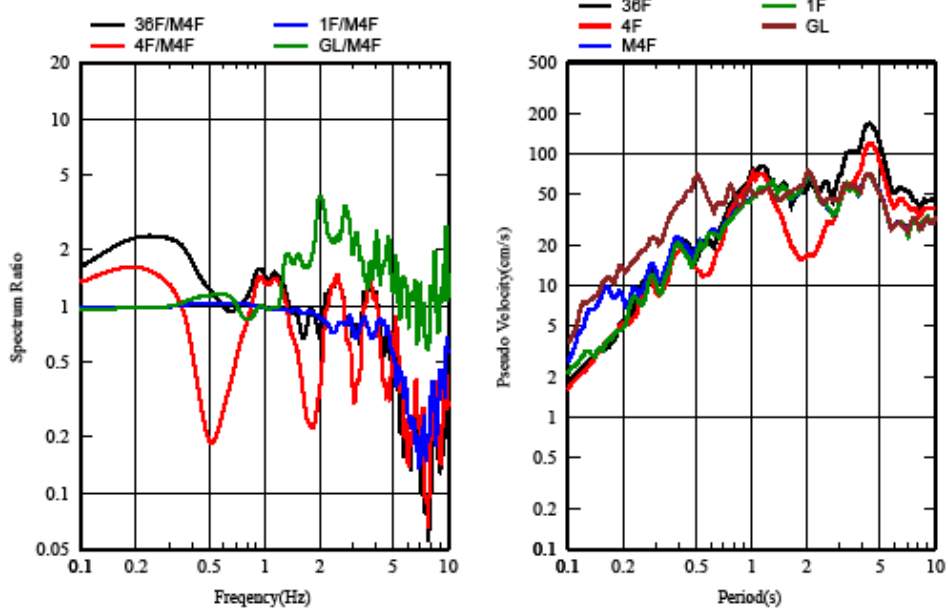
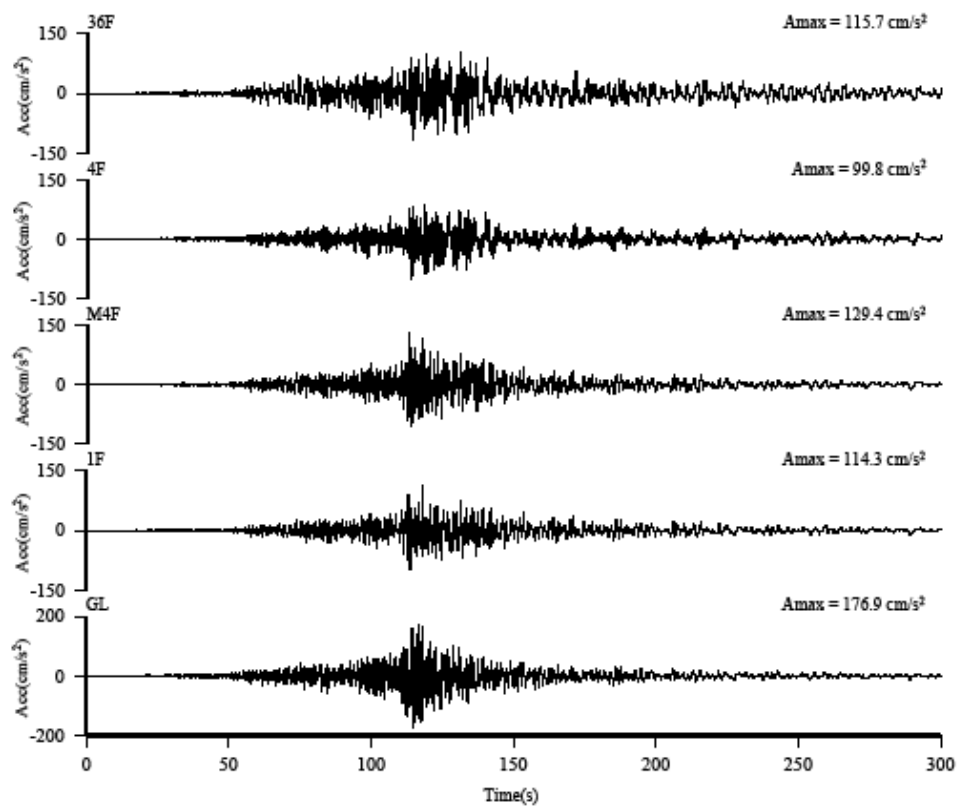
図1.3.1-11 加速度最大値の分布（Z方向）

観測リストから、揺れの大きかった以下の4地震について、加速度の時刻歴波形・スペクトル比・擬似速度スペクトルを図1.3.1-12～23に示す。

水平方向の固有振動数は、201103111447 東北地方太平洋沖地震では、約0.25Hzと免震の固有振動数で応答していることが、201103111514 茨城沖および20110411 茨城沖の地震では約0.5Hzと固有振動数高くなっている。

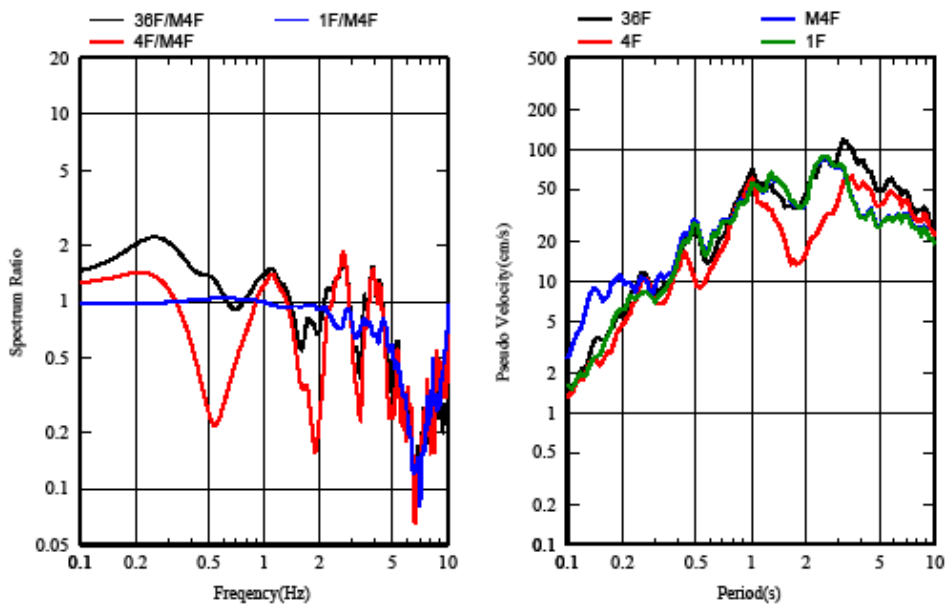
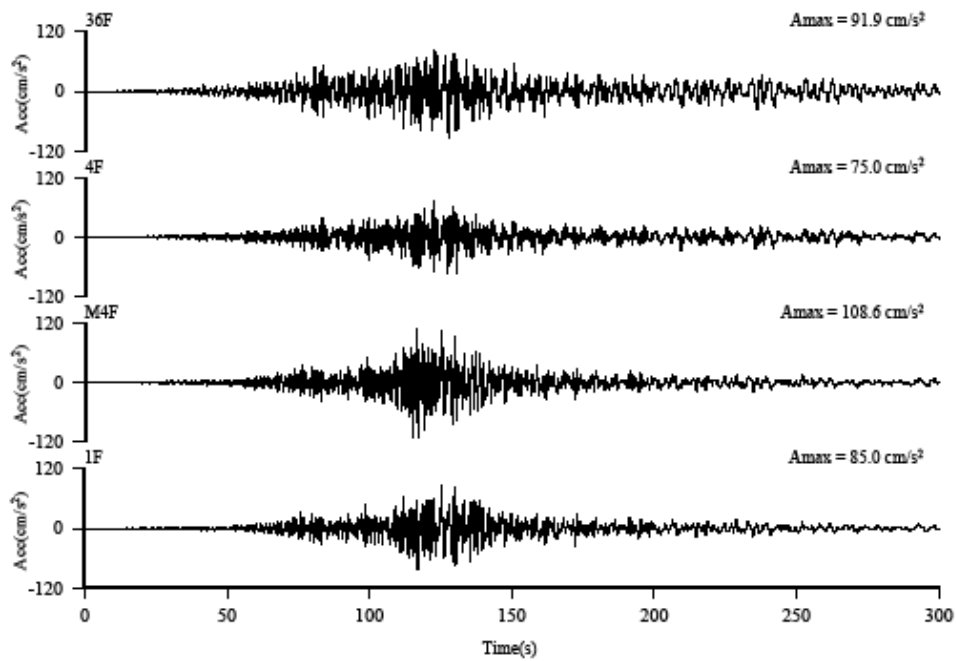
また、免震層での相対変形および累積変形について、図1.3.1-24～25に示す。

201103111447 東北地方太平洋沖地震では、最大変形が15cm、累積変形が10mであった。201103111514 茨城沖の地震では、最大変形が9cm、累積変形が4mであった。



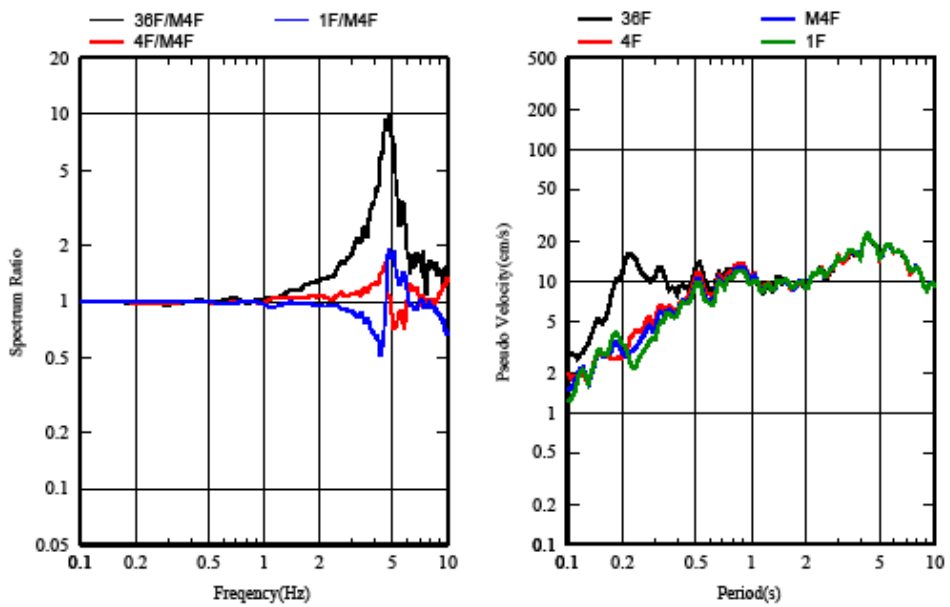
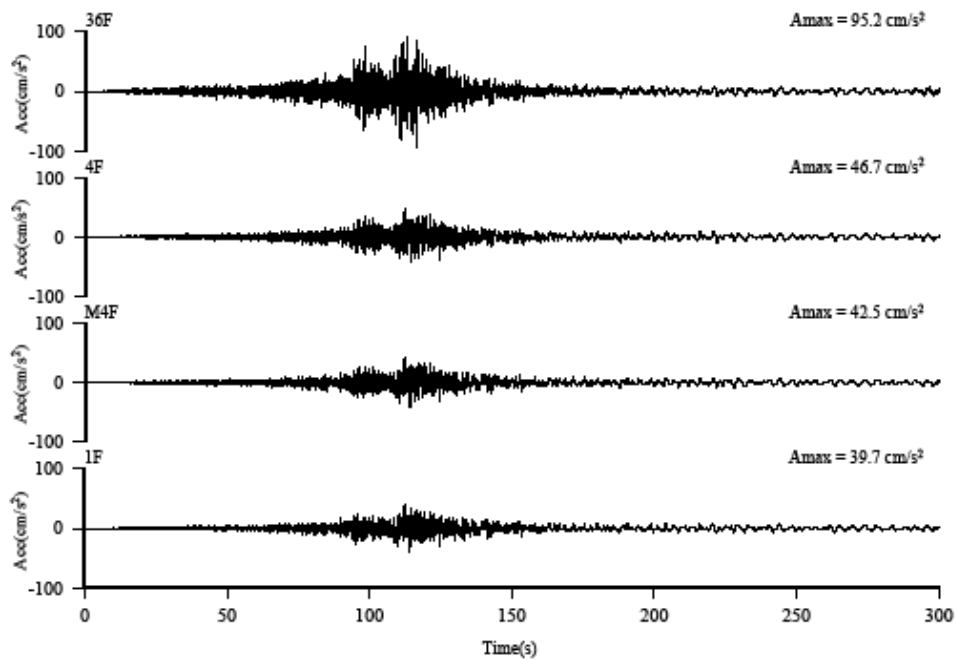
SKK(201103111447,X)

図 1.3.1-12 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震 観測記録 (X 方向)



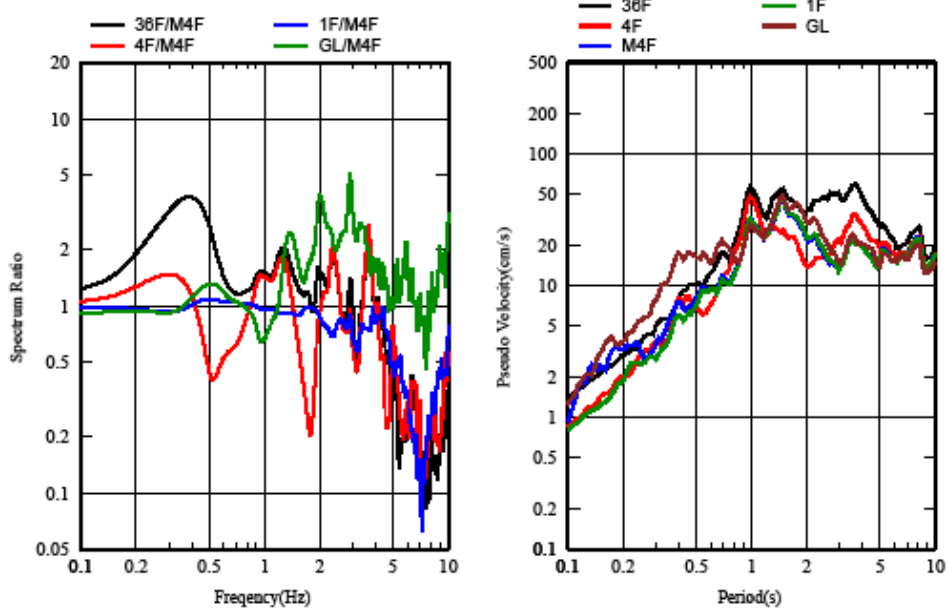
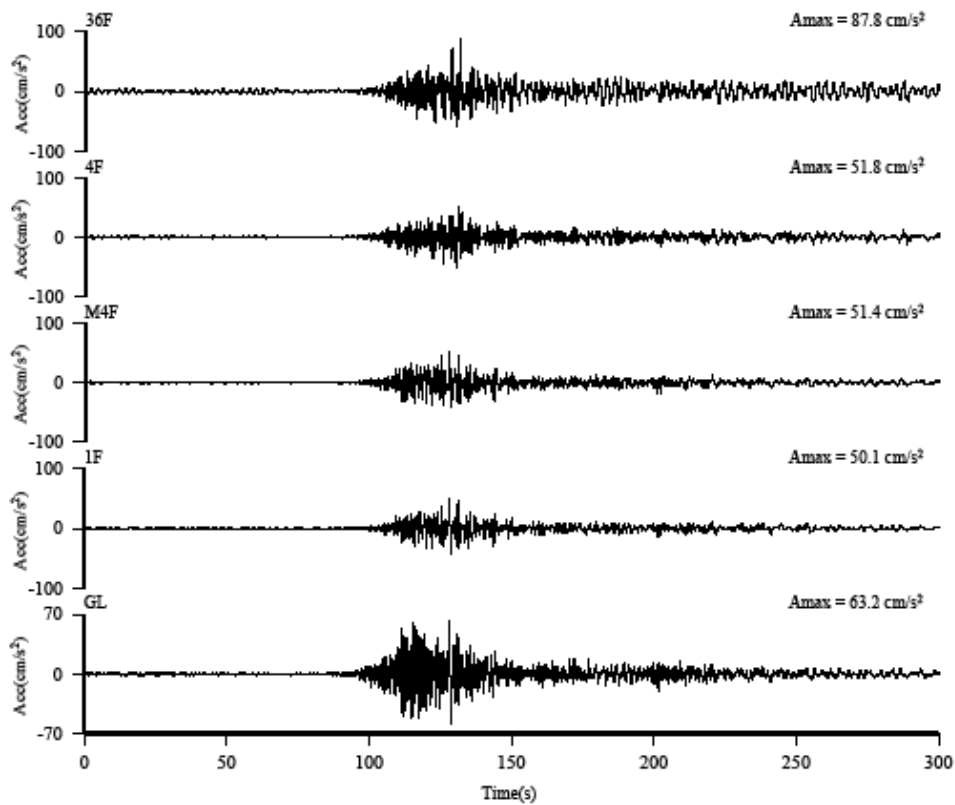
SKK(201103111447,Y)

図 1.3.1-13 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震 観測記録 (Y 方向)



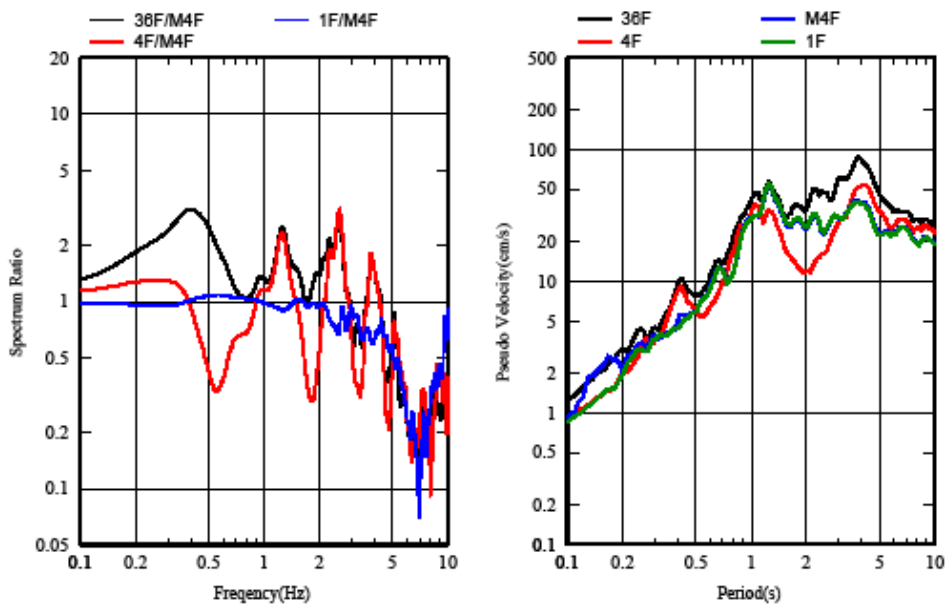
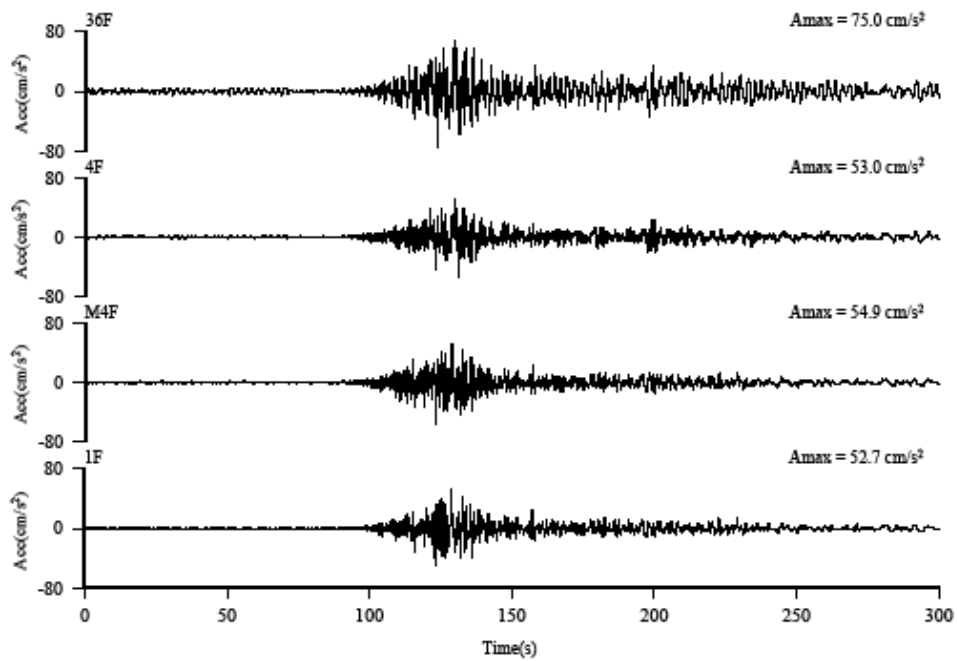
SKK(201103111447,Z)

図 1.3.1-14 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震 観測記録 (Z 方向)



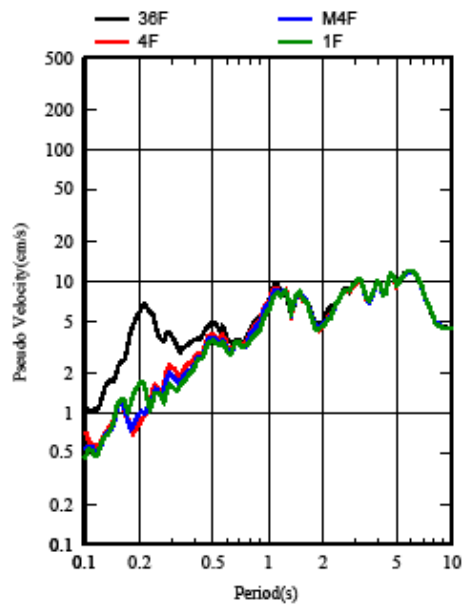
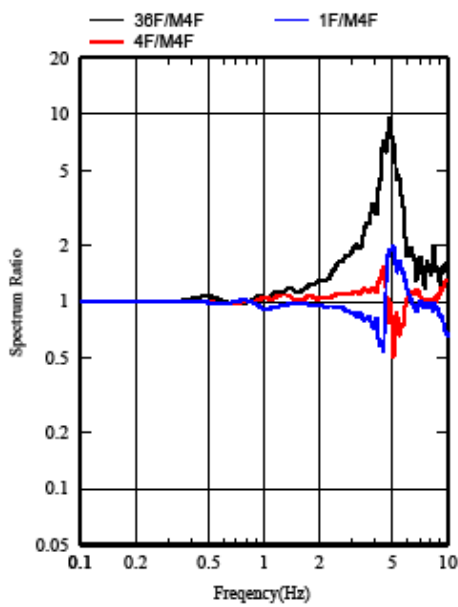
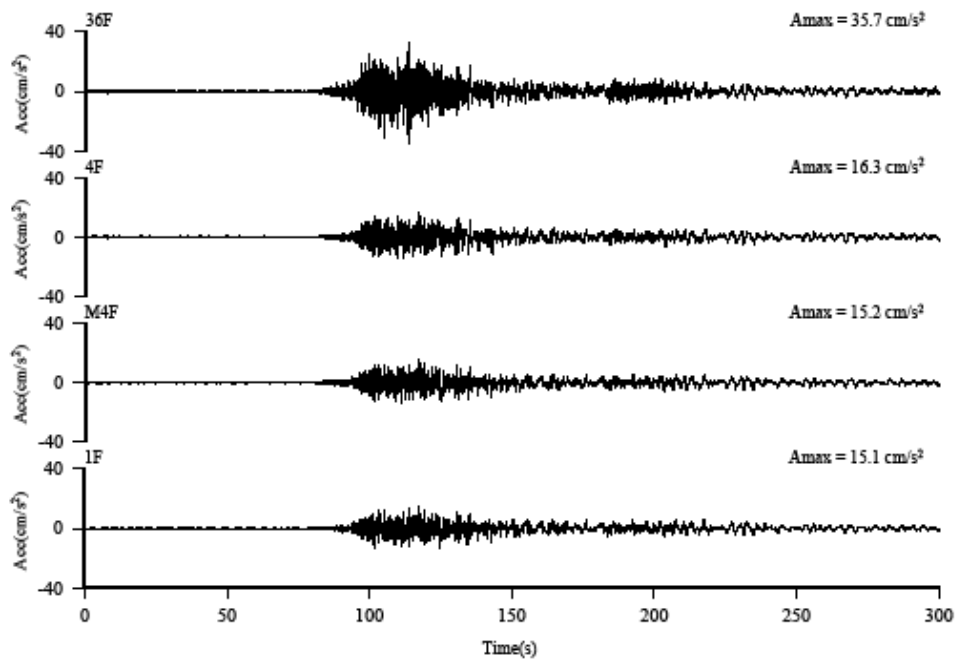
SKK(201103111514,X)

図 1.3.1-15 2011年3月11日15:14 茨城県沖の地震 観測記録 (X方向)



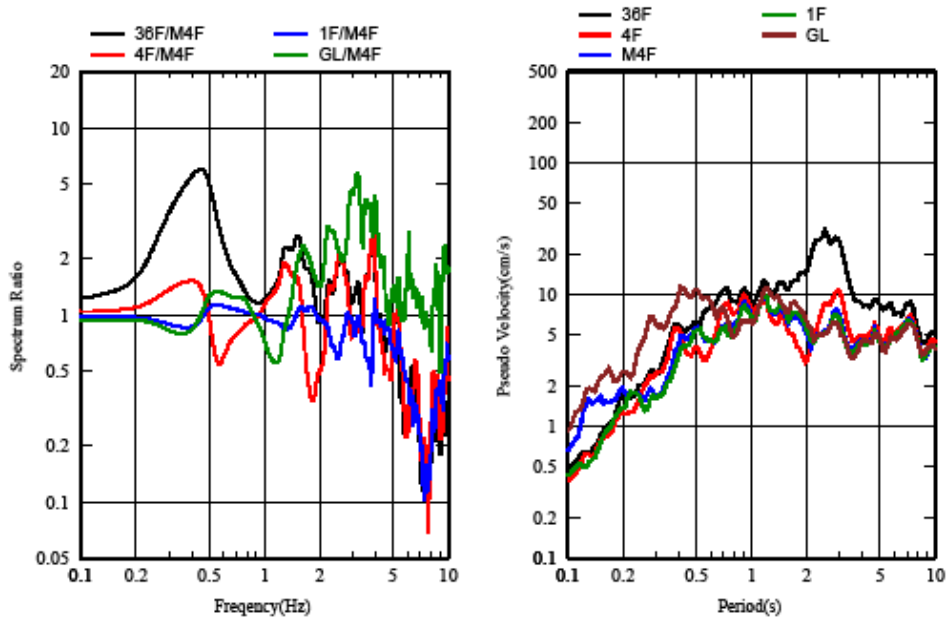
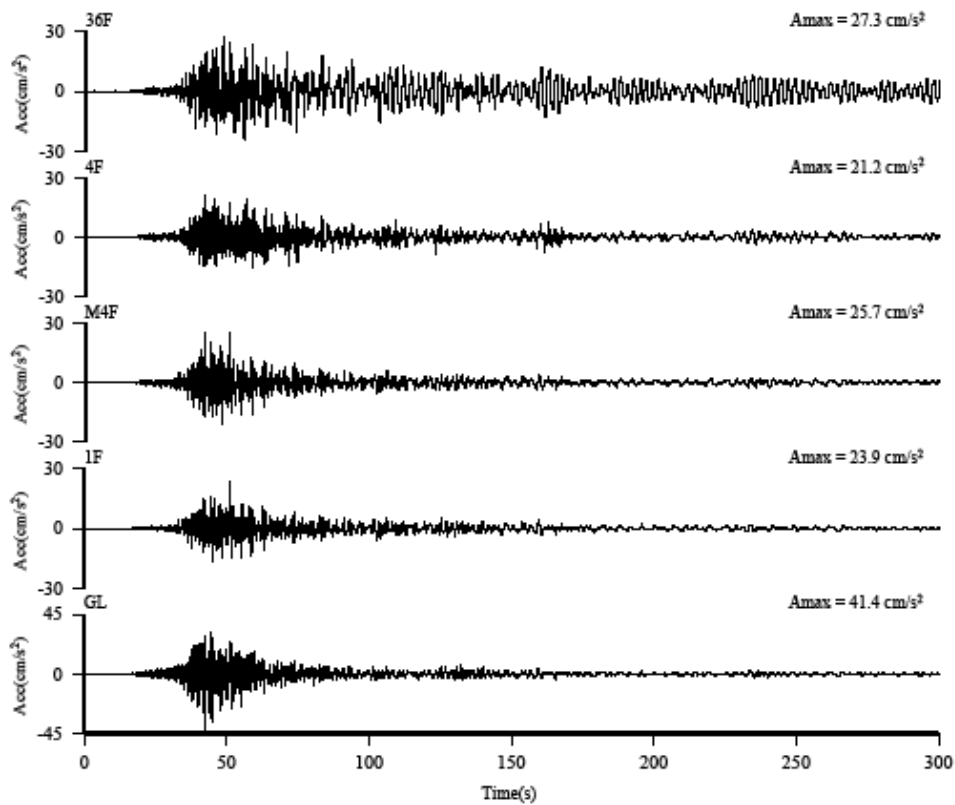
SKK(201103111514,Y)

図 1.3.1-16 2011年3月11日15:14 茨城県沖の地震 観測記録 (Y方向)



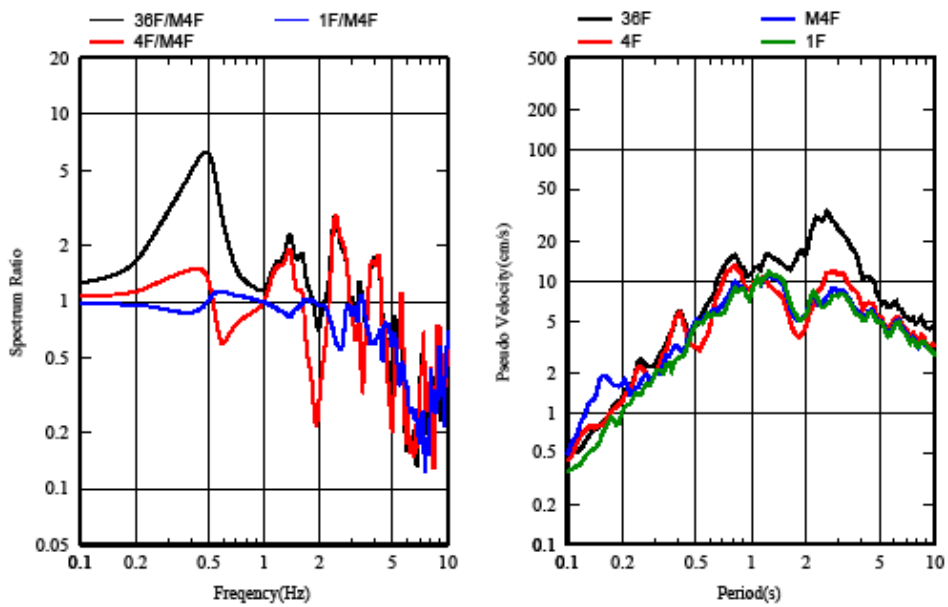
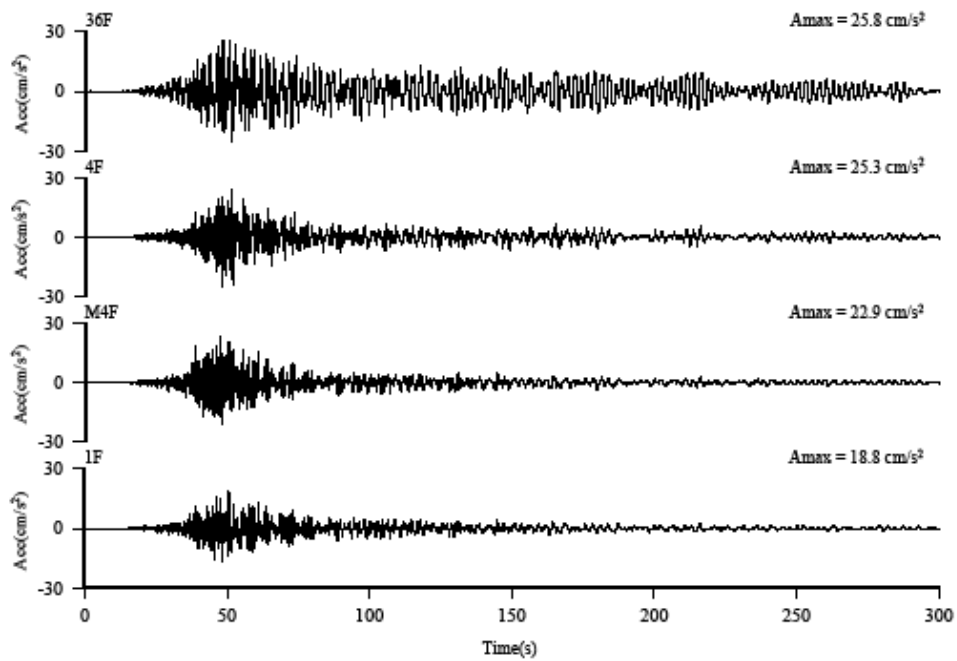
SKK(201103111514,Z)

図 1.3.1-17 2011年3月11日15:14 茨城県沖の地震 観測記録 (Z方向)



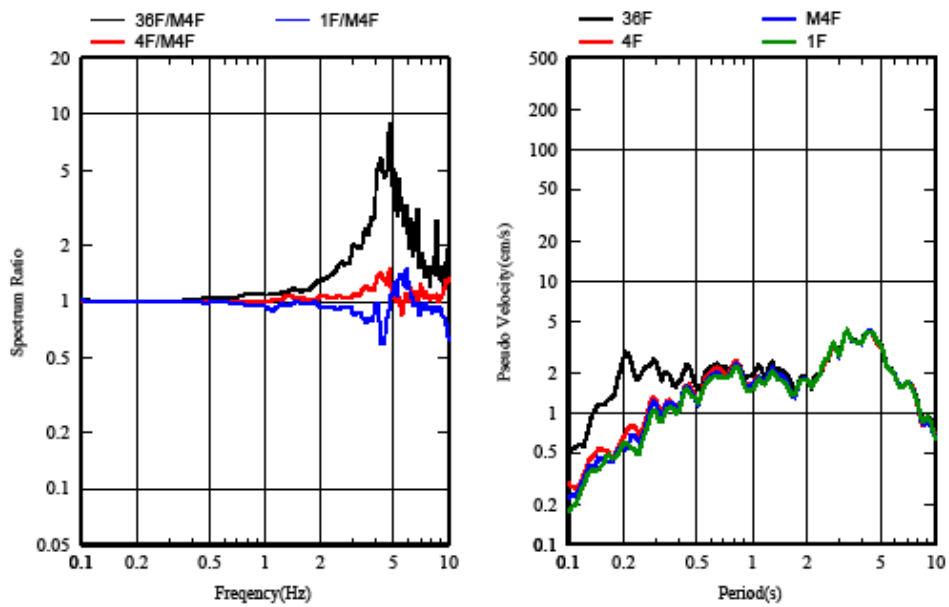
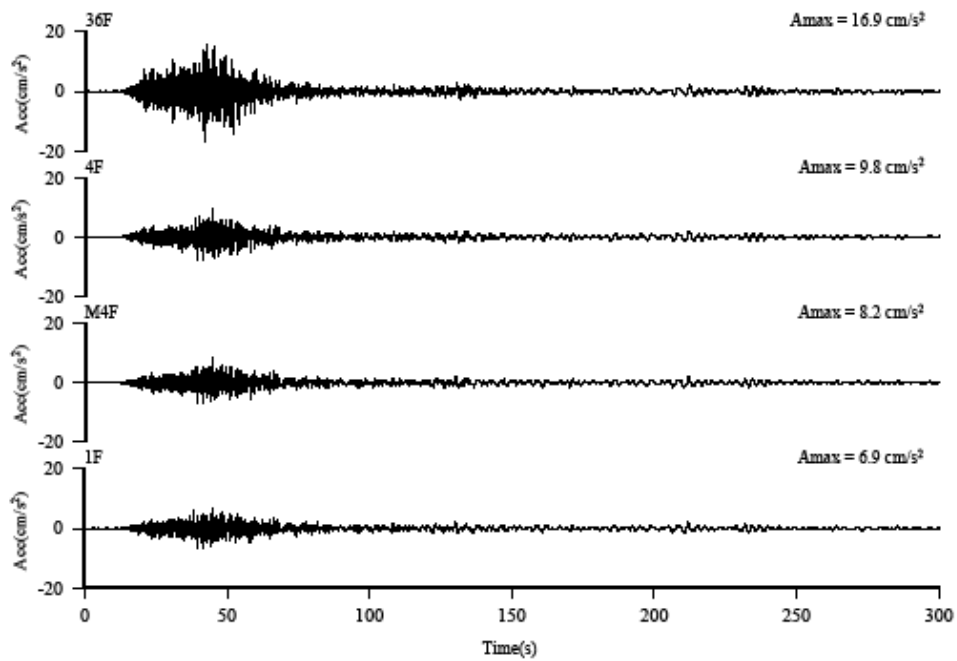
SKK(201104111716,X)

図 1.3.1-18 2011年4月11日17:16 茨城県沖の地震 観測記録 (X方向)



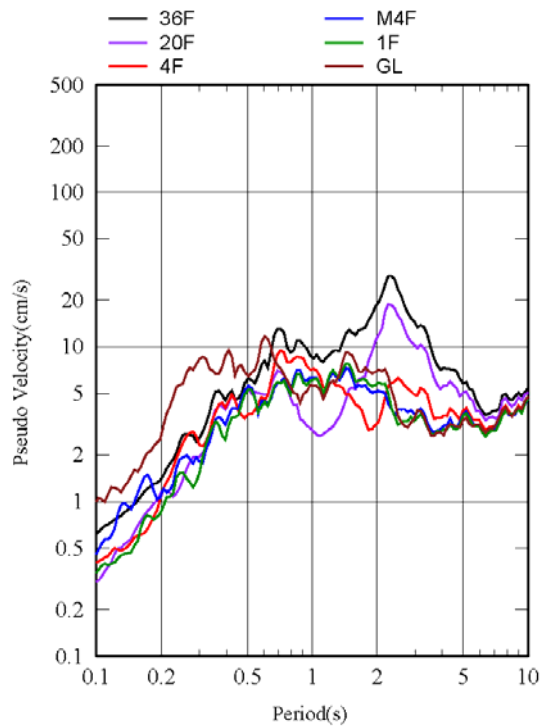
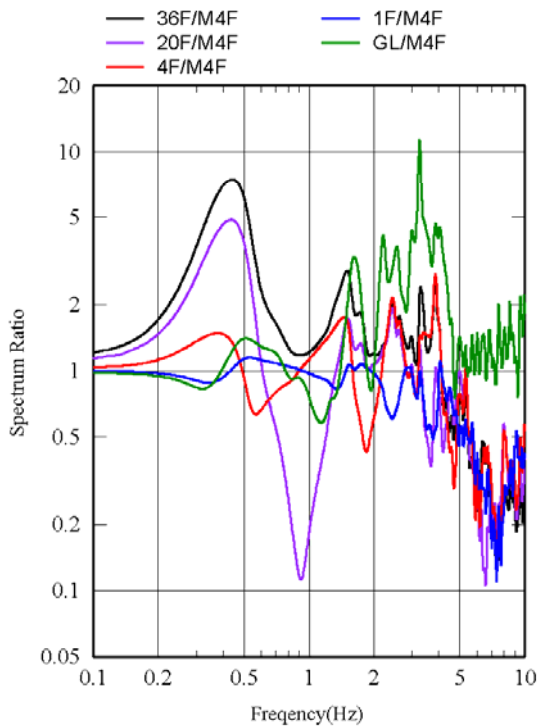
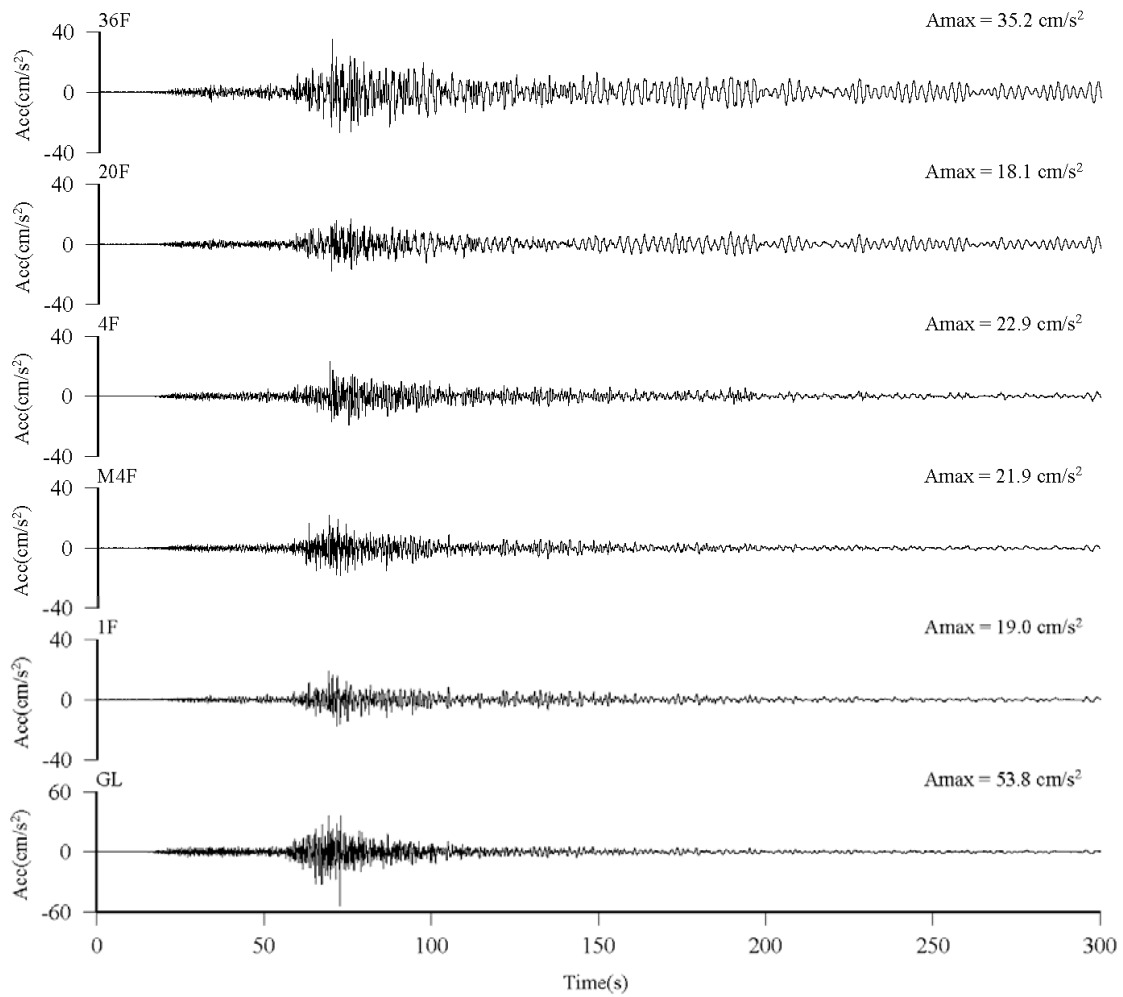
SKK(201104111716,Y)

図 1.3.1-19 2011 年 4 月 11 日 17:16 茨城県沖の地震 観測記録 (Y 方向)



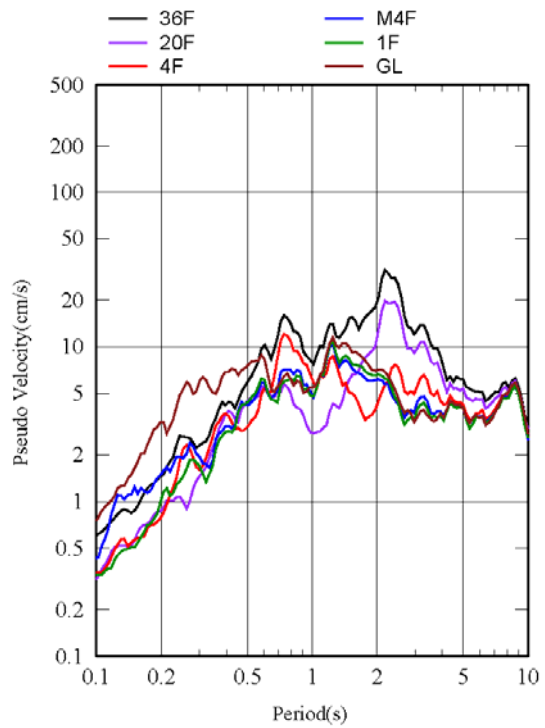
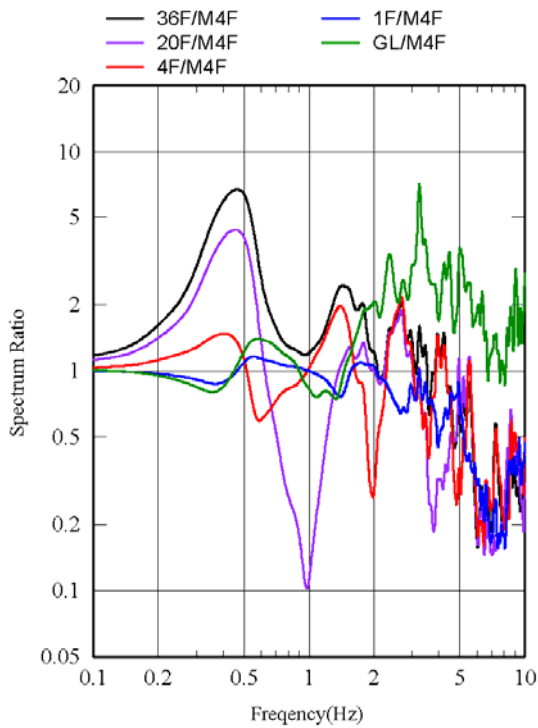
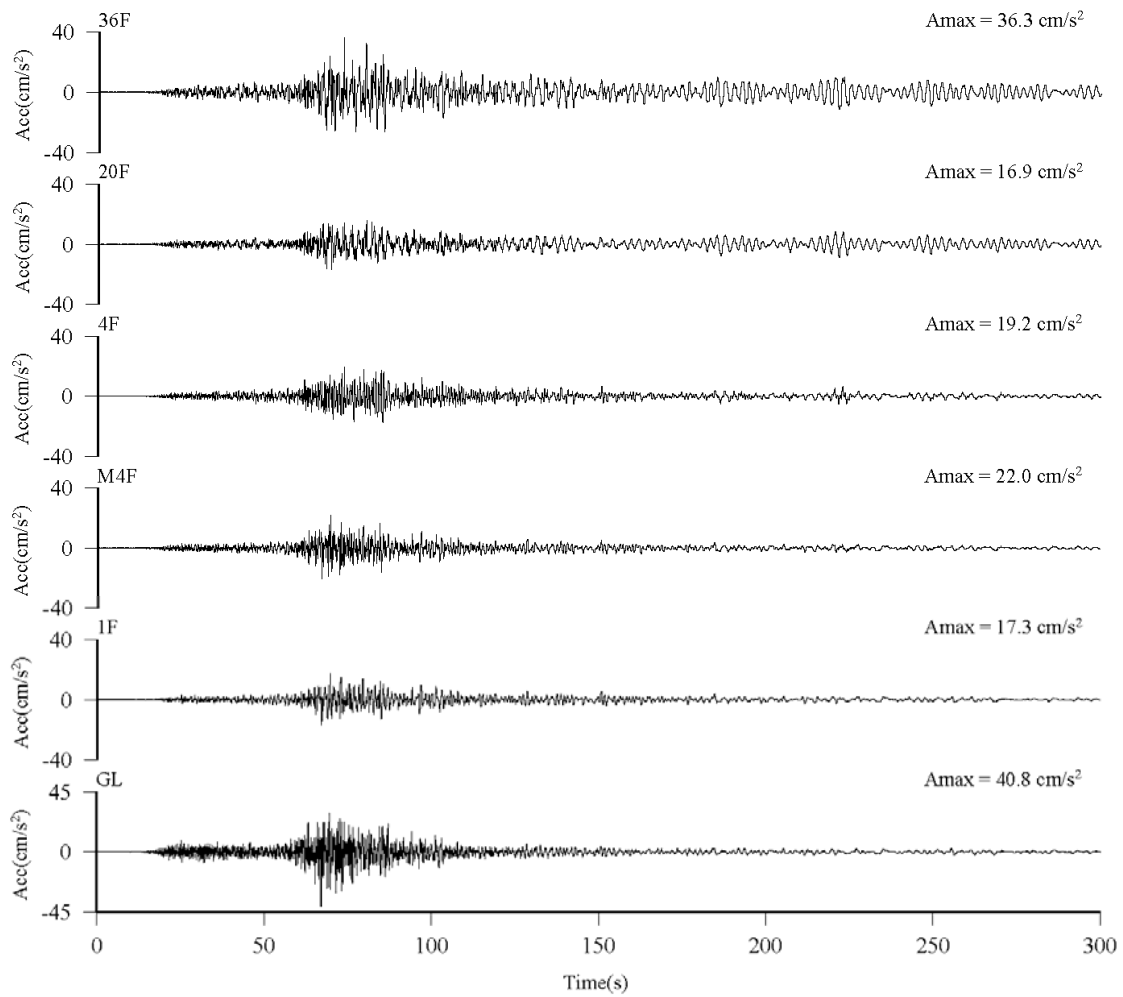
SKK(201104111716,Z)

図 1.3.1-20 2011年4月11日17:16 茨城県沖の地震 観測記録 (Z方向)



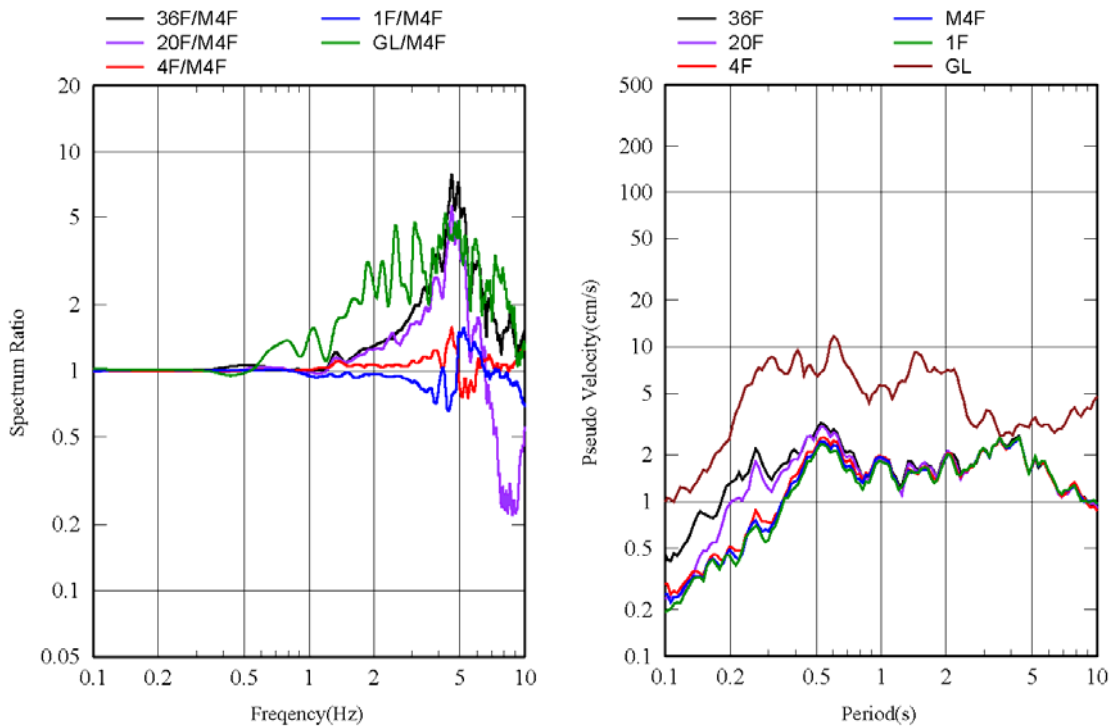
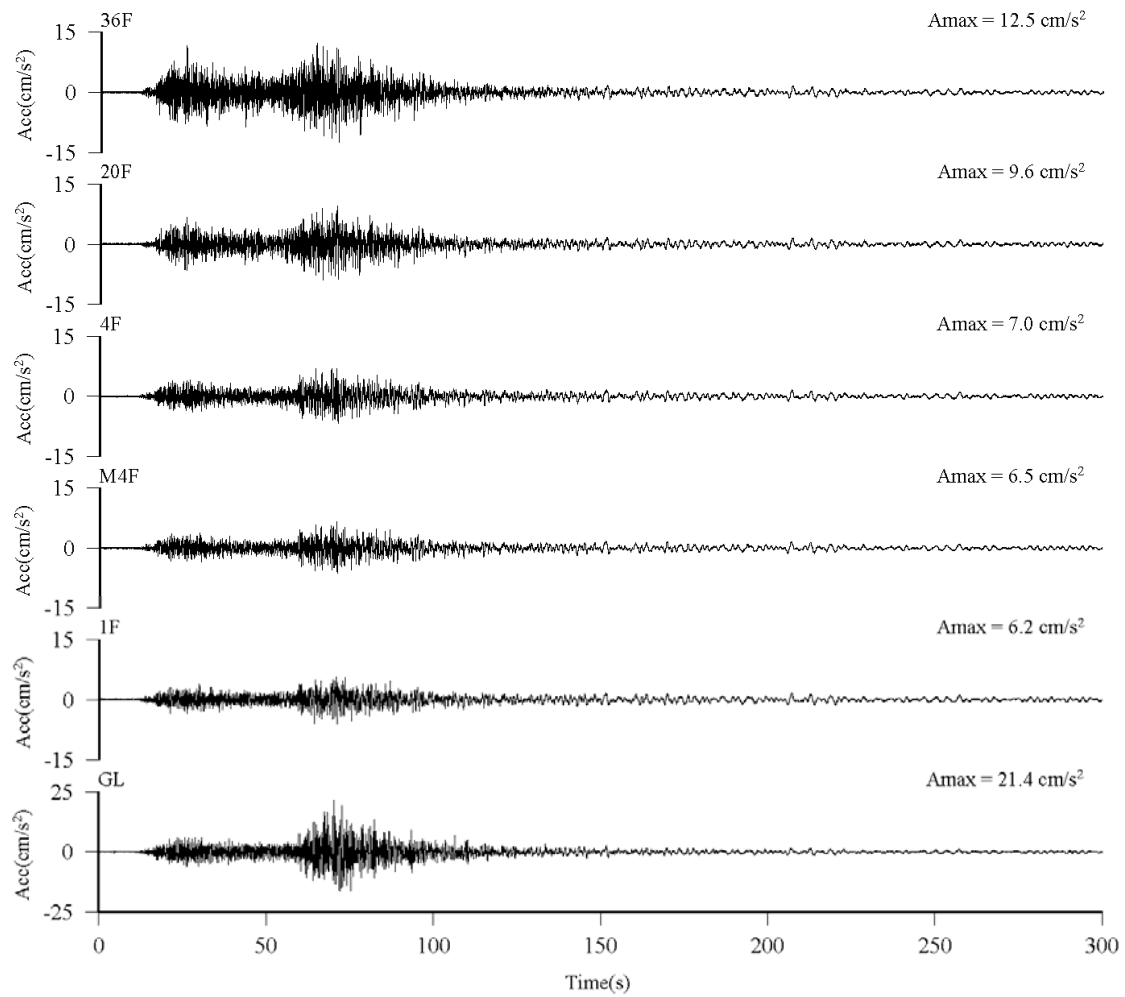
SKK(201212071719,X)

図 1.3.1-21 2012年12月7日17:19 三陸沖の地震 観測記録 (X方向)



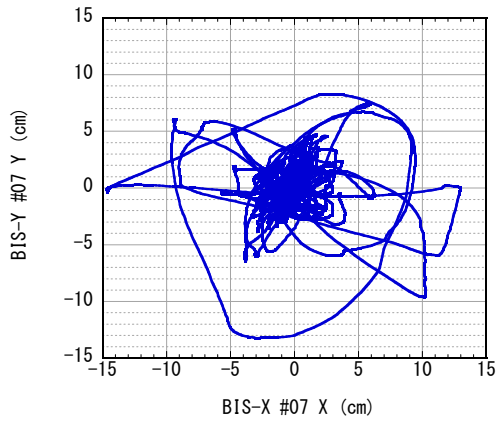
SKK(201212071719,Y)

図 1.3.1-22 2012 年 12 月 7 日 17:19 三陸沖の地震 観測記録 (Y 方向)

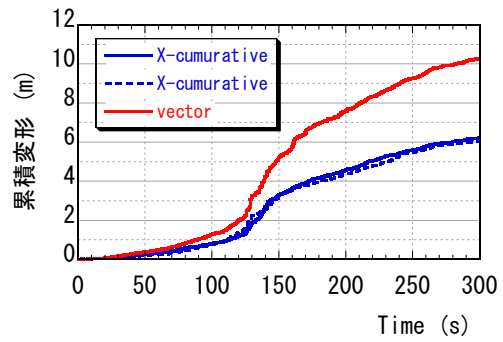


SKK(201212071719,Z)

図 1.3.1-23 2012 年 12 月 7 日 17:19 三陸沖の地震 観測記録 (Z 方向)

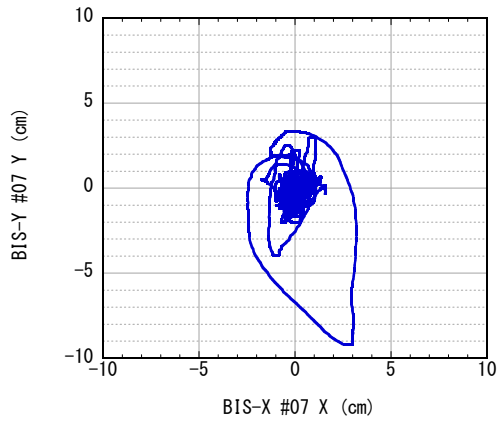


(1) 免震層相対変形オービット

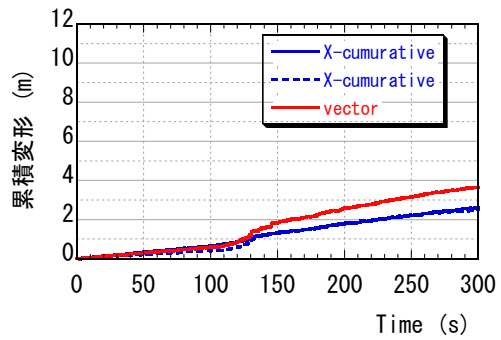


(2) 累積変形

図 1.3.1-24 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震（免震層相対変形と累積変形）



(1) 免震層相対変形オービット



(2) 累積変形

図 1.3.1-25 2011年3月11日15:14茨城沖の地震（免震層相対変形と累積変形）

1.3.2 観測免震建築物のシミュレーション解析

1) 解析モデル

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震本震時の建物応答を再現するため、シミュレーション解析を実施した。図1.3.2-1に、解析モデルの概念図を示す。モデルは37質点の曲げ-せん断型の弾性モデルである。建物の減衰は、免震層固定時の1次固有振動数に対して、 $h=2\%$ の剛性比例型減衰とする。免震層は、鉛プラグ入り積層ゴムと天然ゴム系積層ゴムをそれぞれひとつのMSSに集約し、ふたつのMSSを並列配置した。建物1階床を固定として、1階におけるX、Y方向の観測記録の同時入力により、シミュレーション解析を実施した。

解析条件としては、免震層および建物の諸元をすべて設計値通りとしたケース(Normal)に加え、表1.3.2-1に示す免震部材の製造時のばらつき、温度変化、経年変化による性能変動を考慮して、免震層の水平剛性と降伏荷重が最も高くなるケース(Hard)と、最も低くなるケース(Soft)を設定した。さらに、2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震本震時の状態を再現するケースとして、免震部材に対しては、製品検査結果を本震発生時の環境温度(10°C と想定)により補正し、入居前であったため建物重量から積載荷重を差し引き、また、コンクリートの4週強度を基に推定した推定長期強度が設計強度の1.6倍であることから、コンクリートのヤング係数を1.2倍としたケース(110311)も設定し、計4ケースでシミュレーション解析を実施した。表1.3.2-2に、Normalケースにおける解析モデルの1次固有周期を示す。また、表1.3.2-3に解析ケース一覧を示す。

表 1.3.2-1 免震部材の性能変動
(通常設計値に対して)

	水平剛性	降伏荷重
製造時	-10%~+10%	-10%~+10%
環境温度	-3%~+5%	-9%~+19%
経年変化	0%~+11%	0%

表 1.3.2-2 解析モデルの1次固有周期

	X方向	Y方向
免震固定時	2.36sec	2.25sec
免震 $\gamma=100\%$ 時	4.71sec	4.68sec

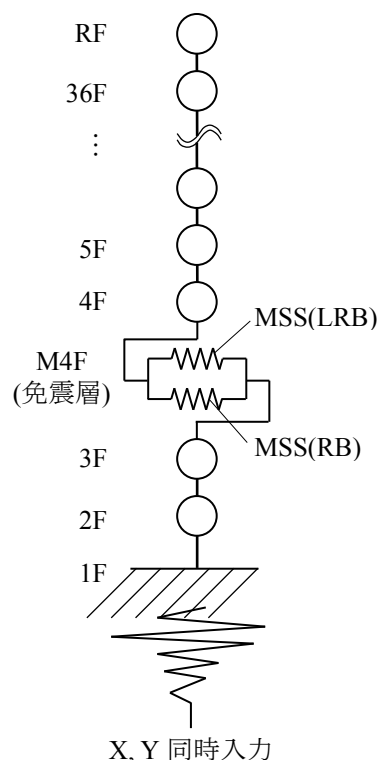


図 1.3.2-1 解析モデル概念図

表 1.3.2-3 解析ケース一覧

	建屋		免震層	
	ヤング係数	重量	水平剛性	降伏荷重
Normal	設計値	設計値	設計値	設計値
Hard	設計値	設計値	設計値×1.26	設計値×1.29
Soft	設計値	設計値	設計値×0.85	設計値×0.81
110311	設計値×1.2	設計値－地震時積載荷重	設計値×1.03	設計値×1.09
110311 修正	設計値×1.2	設計値－地震時積載荷重	LRB 設計値×1.01 RB 設計値×1.10	設計値×1.12

■積層ゴムの製品検査結果と解析条件の設定

表 1.3.2-4 に、RB の製品検査結果の水平剛性を、表 1.3.2-5 に LRB の製品検査結果の降伏後剛性および降伏荷重を示す。製品検査時の温度は 20～26℃程度であった。計測値の 20℃換算値を設計値で除した値を対設計値として示している。RB の製品検査による水平剛性の対設計値の平均は 1.067、LRB の製品検査による降伏後剛性の対設計値の平均は 0.984、降伏荷重の対設計値の平均値は 1.028 である。また、2011 年 3 月 11 日の環境温度は 10℃程度であり、以下の式より温度依存性の性能変動を考慮すると、水平剛性の対設計値は 1.03、降伏荷重の対設計値は 1.09 である。

水平剛性の補正係数： $C_K = \exp(-0.00271(t_0 - t))$

降伏荷重の補正係数： $C_Q = \exp(-0.00879(t_0 - t))$ (t_0 : 補正温度、 t : 補正前温度)

以上より、110311 ケースについて RB および LRB の補正値を以下のように設定する。

RB : 水平剛性設計値×1.067×1.03 = 設計値×1.10

LRB : 降伏後剛性設計値×0.984×1.03 = 降伏後剛性設計値×1.01

降伏荷重設計値×1.028×1.09 = 降伏荷重設計値×1.12

表 1.3.2-4 RB 製品検査の水平剛性

種類	台数	水平剛性 K_r			
		設計値 (kN/mm)	計測値 (kN/mm)	20℃換算値 (kN/mm)	対設計値
RB-S1300	1	2.598	2.519	2.564	0.987
RB-S1300A	2	2.598	2.547	2.581	0.993
			2.534	2.567	0.988
RB-S1000	8	1.907	2.044	2.074	1.088
			2.042	2.07	1.085
			2.074	2.104	1.103
			2.029	2.058	1.079
			2.065	2.094	1.098
			2.021	2.051	1.076
			2.106	2.135	1.120
平均値			2.104	2.134	1.119
					1.067

表 1.3.2-5 LRB 製品検査の降伏後剛性と降伏荷重

種類	台数	降伏後剛性Kd				降伏荷重Qd			
		設計値 (kN/mm)	計測値 (kN/mm)	20℃換算値 (kN/mm)	対設計値	設計値 (kN)	計測値 (kN)	20℃換算値 (kN)	対設計値
LRB-S1200	12	2.328	2.019	2.047	0.879	202.9	210.7	220.4	1.086
			2.022	2.048	0.880		218.7	227.9	1.123
			2.31	2.321	0.997		209.6	212.7	1.048
			2.35	2.361	1.014		210.6	213.8	1.054
			2.296	2.306	0.991		212	215	1.060
			2.362	2.374	1.020		214.5	217.9	1.074
			2.321	2.33	1.001		209.9	212.6	1.048
			2.317	2.321	0.997		211.3	212.6	1.048
			2.337	2.343	1.006		210.8	212.5	1.047
			2.366	2.37	1.018		213.8	215.1	1.060
			2.381	2.385	1.024		211.7	212.8	1.049
			2.362	2.374	1.020		211.1	214.6	1.058
LRB-S1100	6	2.094	1.929	1.942	0.927	360.6	347.5	355.2	0.985
			1.923	1.937	0.925		348.7	356.8	0.989
			1.865	1.878	0.897		348.4	356.1	0.988
			1.916	1.933	0.923		346.1	356	0.987
			1.873	1.887	0.901		351	359.4	0.997
			1.916	1.929	0.921		349.8	357.3	0.991
LRB-S1000	14	1.945	1.864	1.88	0.967	250.4	254.3	261.3	1.044
			1.853	1.867	0.960		241.8	247.8	0.990
			1.823	1.838	0.945		250.3	257	1.026
			1.879	1.895	0.974		250.8	257.9	1.030
			1.846	1.862	0.957		250.4	257.3	1.028
			1.866	1.881	0.967		253	259.5	1.036
			1.902	1.918	0.986		250.9	257.8	1.030
			1.858	1.873	0.963		251.1	257.6	1.029
			1.842	1.857	0.955		250	256.7	1.025
			1.845	1.859	0.956		250.5	256.8	1.026
			1.845	1.86	0.956		250.5	257.2	1.027
			1.805	1.819	0.935		252.9	259.2	1.035
			1.932	1.947	1.001		250.9	257.3	1.028
			1.89	1.903	0.978		253.6	259.4	1.036
LRB-S1000A	8	1.945	2.055	2.075	1.067	250.4	244.1	251.7	1.005
			2.027	2.051	1.054		240.5	250	0.998
			2.073	2.09	1.075		241.4	248.1	0.991
			2.049	2.063	1.061		243	248.4	0.992
			2.04	2.056	1.057		248.7	254.8	1.018
			2.046	2.071	1.065		246.1	256	1.022
			2.045	2.064	1.061		247.1	254.9	1.018
			2.046	2.063	1.061		240.3	246.7	0.985
平均値				0.984				1.028	

2) 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震時 シミュレーション解析結果

図 1.3.2-2 に、最大応答加速度分布の解析結果と観測記録を比較して示す。X 方向は、4 階(免震層上階)において、どの解析ケースにおいても解析結果の応答加速度が観測記録に比較して小さな値を示しているが、Y 方向においては 4 階(免震層上階)および 36 階の応答加速度において、110311 ケースの解析結果は、Normal ケースの解析結果よりもやや小さな値を示し、観測記録によく一致している。

また、図 1.3.2-3 に、1 階に対する 36 階の伝達関数の比較、および 4 階に対する 36 階の伝達関数の比較を示す。上部建屋の伝達関数においては免震部材の性能変動は関わらないため、4 階に対する 36 階の解析結果の伝達関数は、Normal と 110311 のケースのみ示す。1 階に対する 36 階の X 方向伝達関数においては、2.5 秒付近で解析結果は観測記録に見られないピークを示しており、X 方向観測記録と解析結果の不一致の要因のひとつと考えられる。Y 方向では、解析結果は観測記録の免震 1 次固有周期とよく一致しているが、建物の特性変動を考慮しない Normal ケースが観測記録に最も近い結果となっている。4 階に対する 36 階の伝達関数においては、X, Y 方向とも建物の特性変動を考慮した 110311 ケースが観測記録の 1 次固有周期に最もよく一致している。また、0.1~0.4 秒の短周期領域での不一致が見られるが、これは減衰定数の評価等の影響によるものと考えられる。

図 1.3.2-4 に、免震層の相対変位の解析結果と観測記録の比較、および解析結果による免震層の荷重変形関係を示す。解析結果は、観測記録に対して、やや大きな最大変位を示しているが、観測記録に見られる真円に近い軌跡をよく再現している。

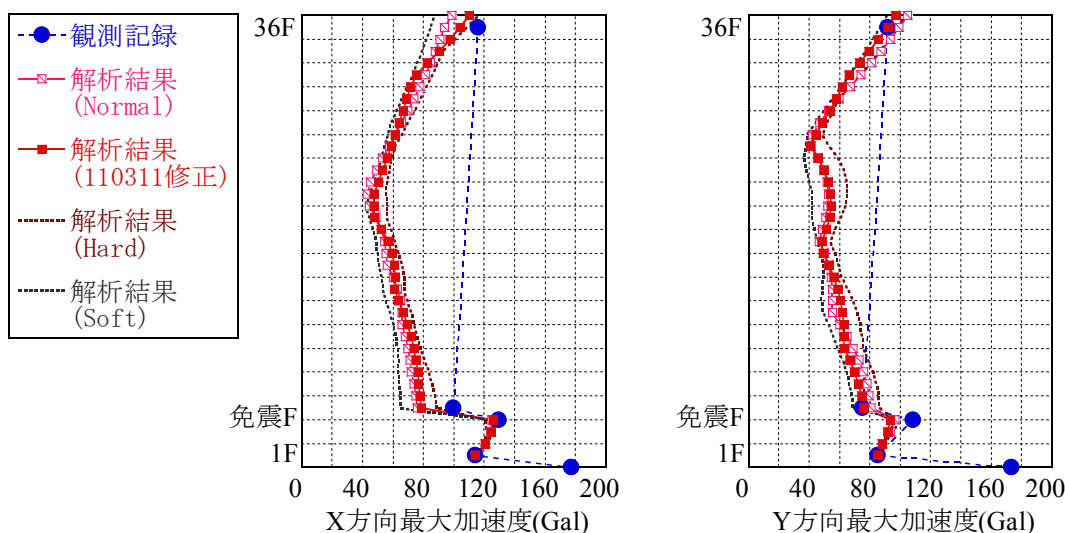


図 1.3.2-2 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震時 最大加速度分布

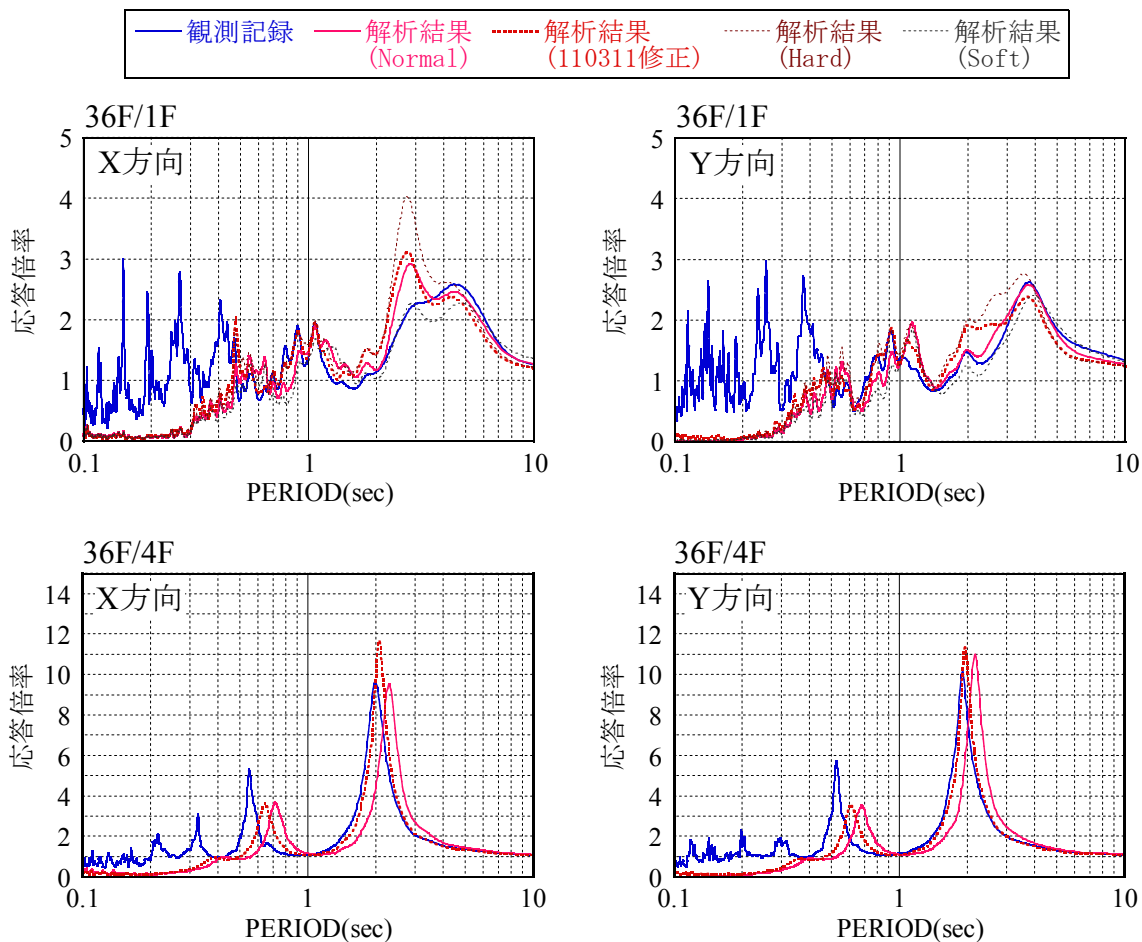


図 1.3.2-3 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震時 伝達関数

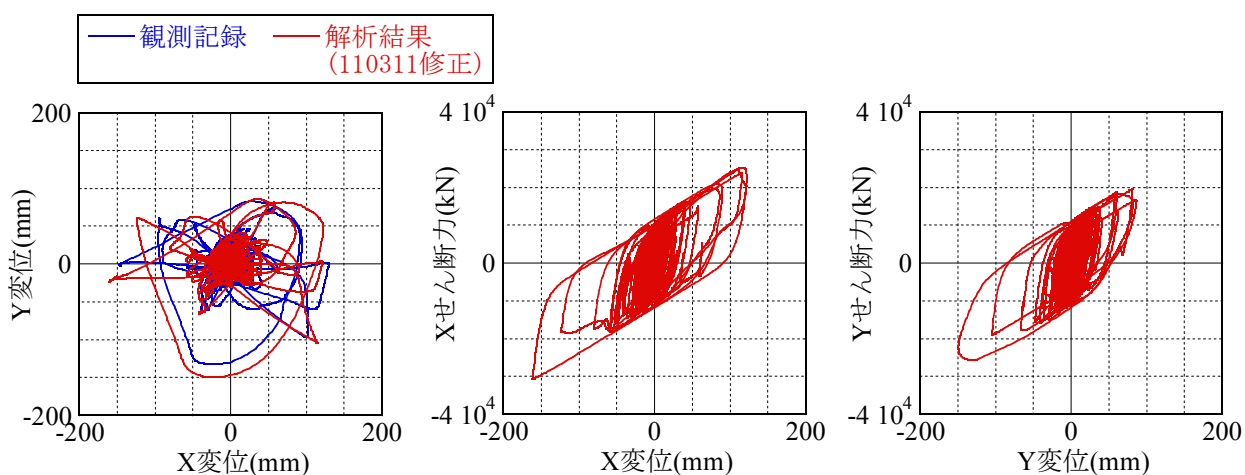


図 1.3.2-4 2011年3月11日東北地方太平洋沖地震時 免震層変位および解析結果の荷重変位関係

表 1.3.1.2-6 に、観測記録と解析結果(Normal ケースおよび 110311 ケース)の最大値一覧を示す。Normal ケースの解析結果は、X 方向の加速度は観測記録よりも小さく、Y 方向の加速度は観測記録よりもやや大きく評価している。110311 ケースの解析結果は、X, Y 方向とも加速度を観測記録よりも小さくめに評価し、免震層変位は観測記録よりも大きい評価となっているが、Normal ケースよりも観測記録に近い値を示している。

表 1.3.2-6 2011 年 3 月 11 日東北地方太平洋沖地震時 最大値一覧

		観測記録	解析結果 (Normal)	解析結果 (110311 修正)
36 階最大加速度 (Gal)	X 方向	116	93.8	104
	Y 方向	91.9	99.3	91.5
4 階最大加速度 (Gal)	X 方向	100	75.8	78.6
	Y 方向	75.1	80.6	75.7
免震階最大加速度 (Gal)	X 方向	129	124.9	126
	Y 方向	109	96.7	93.5
免震層最大変位 (mm)	X 方向	147	172	161
	Y 方向	132	118	150

1.4 南海トラフの巨大地震における観測免震建築物のシミュレーション解析

1) 解析モデル

a) モデル概要

東北地方太平洋沖地震本震時の建物応答を再現した解析モデル（B 建物）を用い、南海トラフの巨大地震における観測免震建物のシミュレーション解析を実施した。図 1.4-1 に解析モデルの概念図を示す。1.3.2 1)と同様に、モデルは 37 質点の曲げ-せん断型の弾性モデルである。建物の減衰は、免震層固定時の 1 次固有振動数に対して、 $h=2\%$ の剛性比例型減衰とする。免震層は、鉛プラグ入り積層ゴムと天然ゴム系積層ゴムをそれぞれひとつの MSS に集約し、ふたつの MSS を並列配置した。建物 1 階床を固定として、1 階における X、Y 方向の同時入力により、シミュレーション解析を実施した。

解析モデルの各種設定値を表 1.4-1 に示す。ここでの建屋の設定は、ヤング係数にはコンクリートの 4 週強度を考慮した設計値の 1.2 倍を採用し、重量には積載荷重も考慮している。

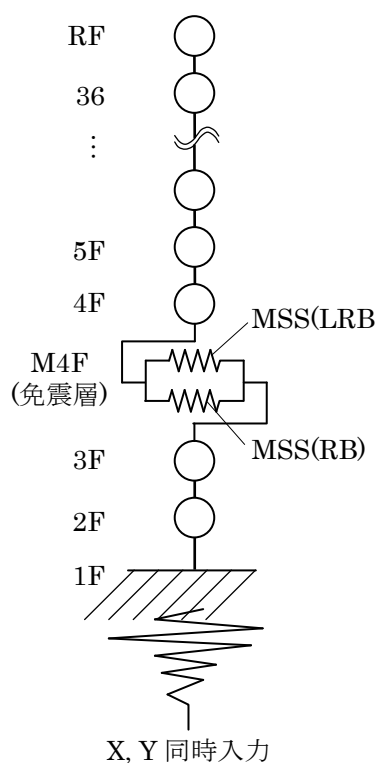


図 1.4-1 解析モデル概念図

表 1.4-1 各種設定値

建屋		免震層	
ヤング係数	重量	水平剛性	降伏荷重
設計値×1.2	設計値	設計値	設計値

b) 入力地震動

東雲における3連動地震及び4連動地震の波形を図1.4-2、スペクトルを図1.4-3に示す。波形は建築基準整備促進事業42（H23年度及びH24年度）で作成された地震動である。なお、3連動地震に関しては、平均波およびばらつきを考慮した平均+標準偏差波の2種類の波形が作成されている。3連動地震波および4連動地震波では、6~7秒付近の成分が卓越している。

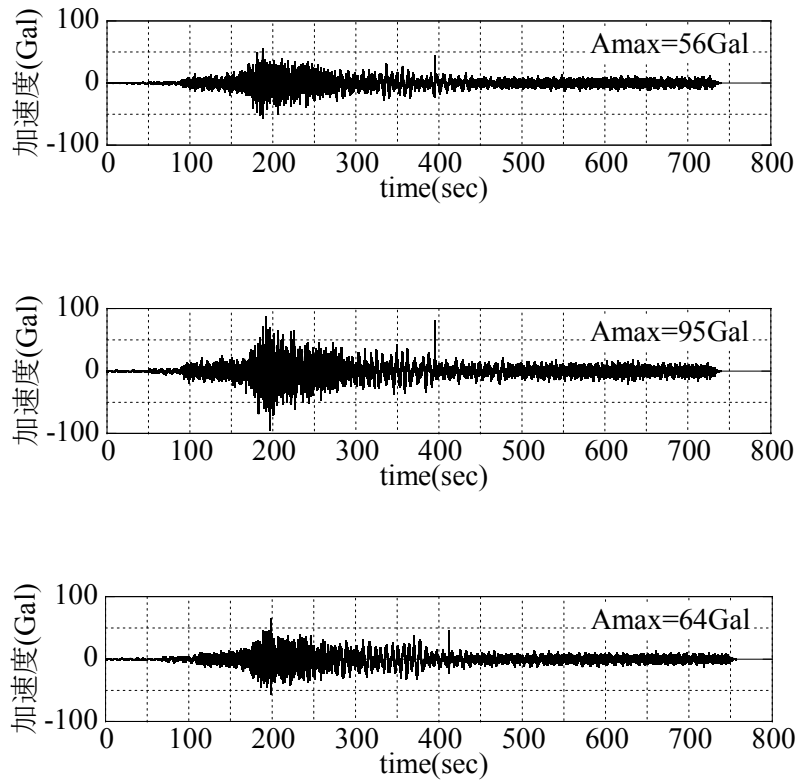


図 1.4-2 時刻歴波形

(上段：3連動（平均）、中段：3連動（平均+標準偏差）、下段：4連動）

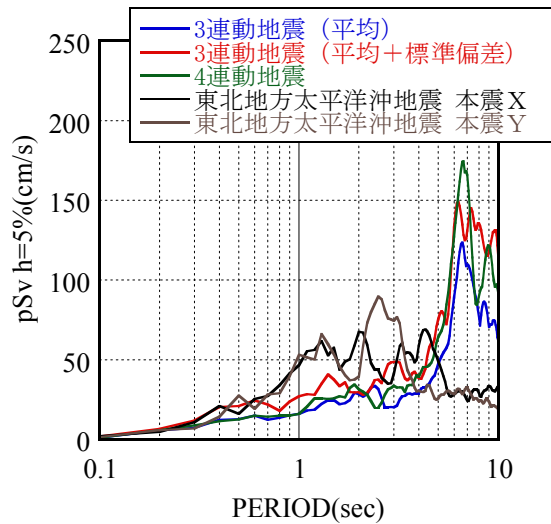


図 1.4-3 擬似速度応答スペクトル (h=5%)

2) 南海トラフの巨大地震のシミュレーション解析結果

図 1.4-4 に最大加速度分布を示す。3 連動地震時においては、4 階の加速度は免震階の概ね 2/3 程度に低減されている。なお、4 連動地震時にはその傾向がやや異なっているが、高次モードの寄与度が高くなっている影響と推察される。

図 1.4-5 に、1 階に対する 36 階および 4 階に対する 36 階の伝達関数の比較を示す。1 階に対する 36 階の応答倍率をみると、4 連動地震時には 2 次モードに相当する 1 秒付近の増幅が極めて大きくなっている。

図 1.4-6 に免震層の荷重変形関係を示す。3 連動地震 (平均+標準偏差) 時や 4 連動地震時には、免震層の最大変位が 45cm 程度生じている。

解析結果の最大値一覧を表 1.4-2 に示す。東北地方太平洋沖地震本震時の応答と比較すると、3 連動地震 (平均) 時には免震層の最大変位は 2 割程度大きく、免震層より上層の加速度は 0.5~1.0 倍程度となっている。また、3 連動地震 (平均+標準偏差) や 4 連動地震発生時の免震層の最大変位は 3 倍程度になっているものの、免震層より上層の加速度は 1.0~2.0 倍程度である。

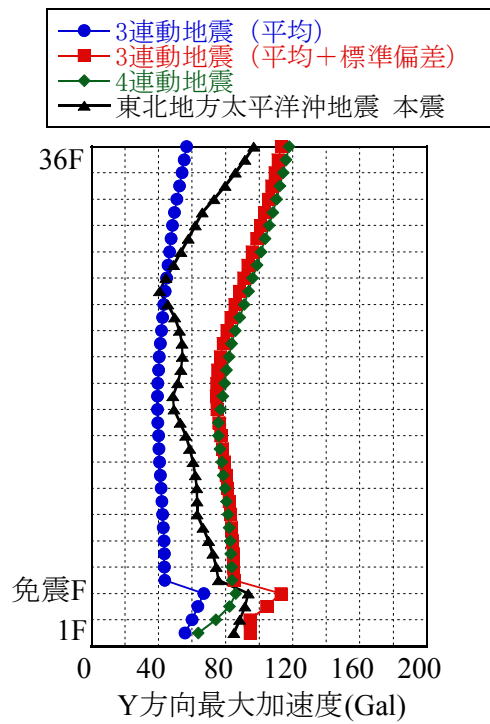
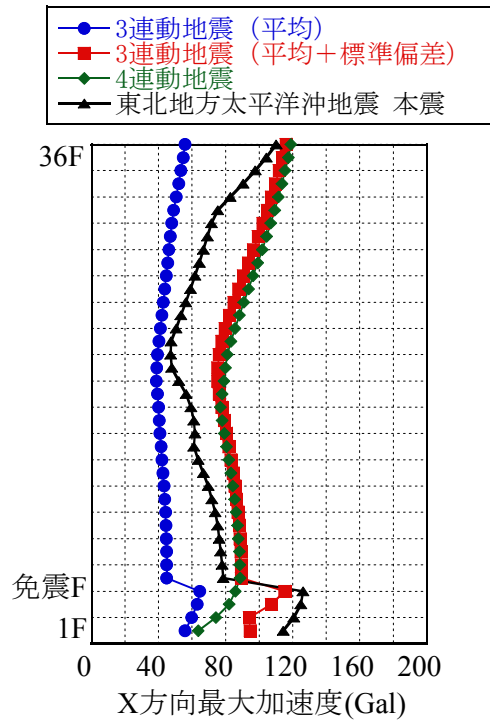


図 1.4-4 最大加速度分布

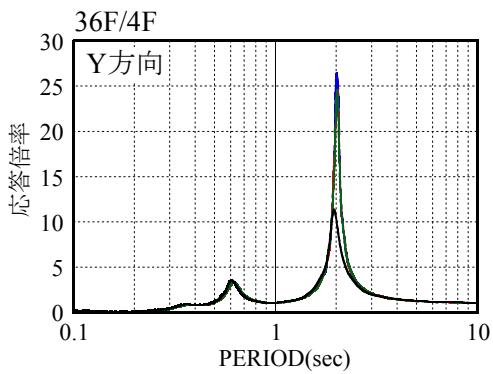
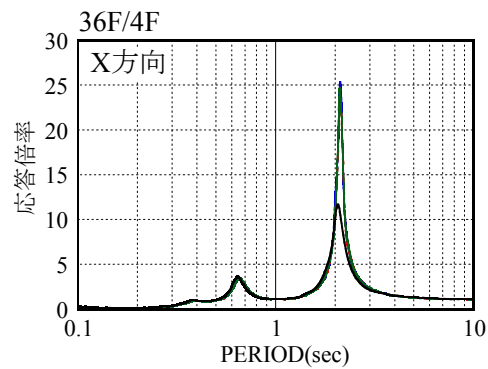
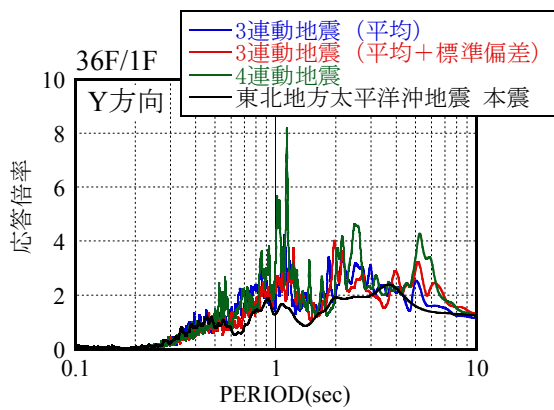
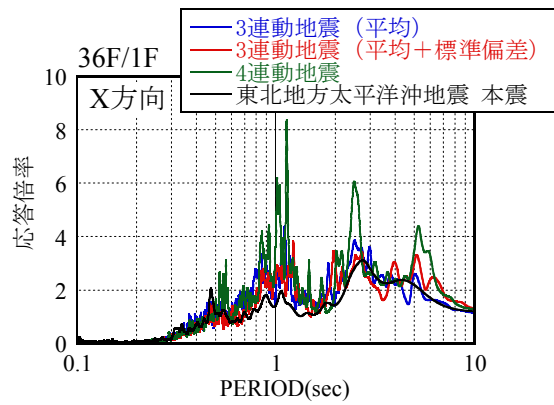


図 1.4-5 伝達関数

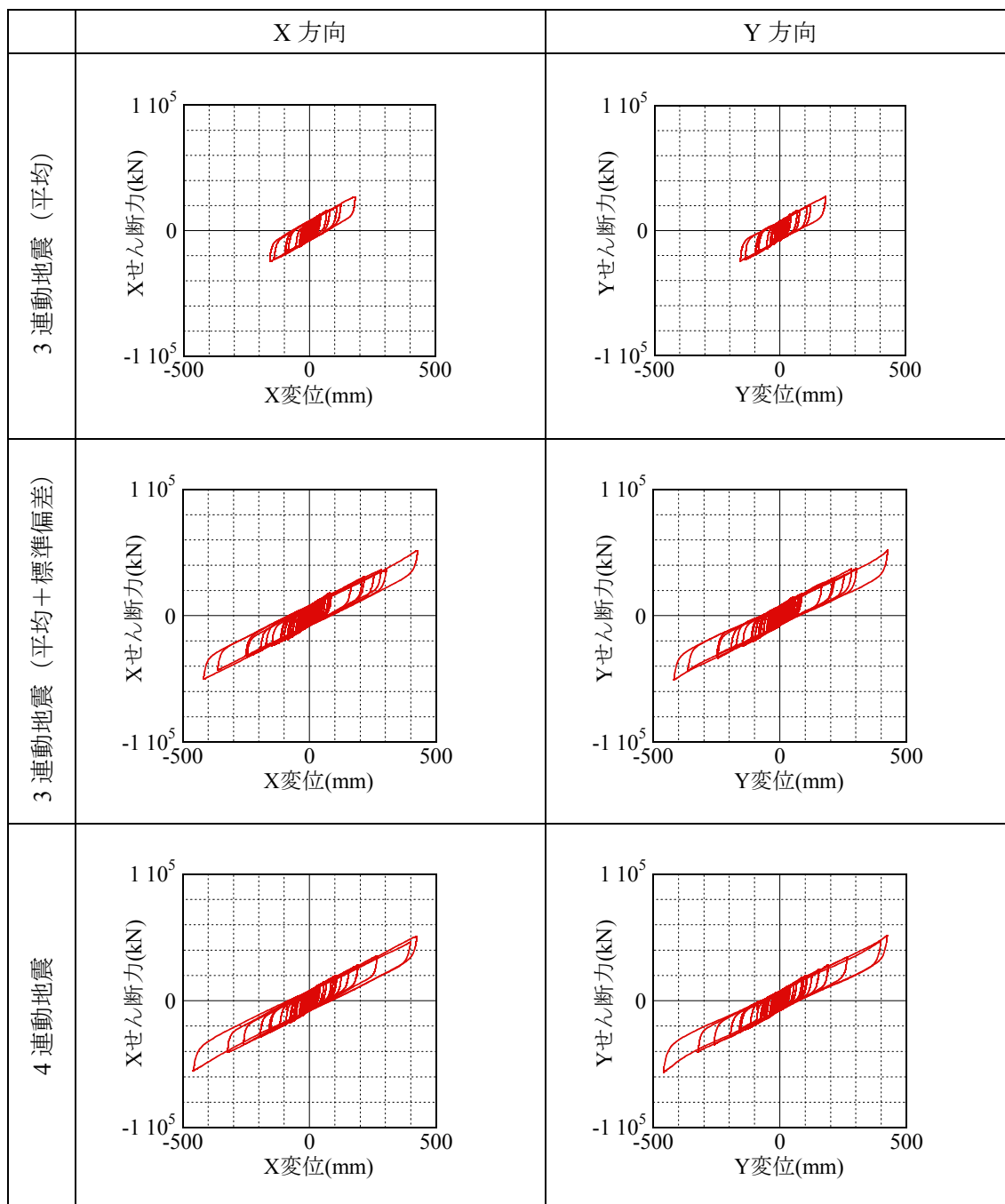


図 1.4-6 荷重変形関係

表 1.4-2 解析結果の最大値一覧

	方向	南海トラフの巨大地震			東北地方太平洋沖地震	
		3連動		4連動	本震	
		平均	平均+標準偏差		観測結果	解析結果
36階最大加速度 (Gal)	X	55	114	117	116	104
	Y	55	111	116	92	92
4階最大加速度 (Gal)	X	45	89	88	100	79
	Y	44	85	84	75	76
免震階最大加速度 (Gal)	X	64	115	86	129	126
	Y	67	113	86	109	94
免震層最大変位 (mm)	X	183	427	459	147	161
	Y	183	426	459	132	150

1.5 まとめ

大阪および東京にて、1棟ずつの免震建物の地震観測を継続して実施した。

大阪の建物では、計5件の観測記録が得られたが、免震構造が効果を発揮する入力レベルでは無かった。

東京の建物では、2010年度85件、2011年度87件、2012年度29件、計201件の観測記録が得られ、免震構造としての効果が確認された。また、観測記録を入力とするシミュレーション解析を実施し、2011年3月11日東北地方太平洋沖地震時の建物応答の再現を試みた。シミュレーション解析は、設計値通りに設定したケースに加え、免震部材の製造時のばらつき、温度変化、経年変化を考慮したケースと、地震発生当日の環境温度や建屋の状態を考慮した解析ケースを設定して解析を行った。解析結果は、X方向についてはまだ検討の余地を残した結果となったが、Y方向については地震発生当日の状態を考慮した解析結果は、観測記録とよい一致を示した。

東京の建物の解析モデルを用いて、南海トラフでの巨大地震時の応答を確認した。東北地方太平洋沖地震本震時の応答と比較すると、3連動地震（平均）時には免震層の最大変位は2割程度大きく、免震層より上層の加速度は0.5～1.0倍程度となっていた。また、3連動地震（平均+標準偏差）や4連動地震発生時の最大変位は3倍程度になっているものの、免震層より上層の加速度は1.0倍～2.0倍程度であった。

第2章 公表観測記録の整理・分析

2.1 観測記録の収集

2011～2012年度において、学術誌や、公的機関及び民間企業による各種報告書とホームページ等の公表資料^{2-1)～2-33)}を調査し、東北地方太平洋沖地震における免震建築物の地震観測に関するデータを収集した。

収集したデータの総数は、表 2.1-1 に示す 65 棟分である。同表では、観測地、上部構造種別、階数、支承材と減衰材の構成、最大加速度、最大変位等がまとめられている。

なお、公的施設の観測結果と免震建築物の被害調査結果を報告したものとして、国土交通省国土技術総合研究所（以降、国総研）と建築研究所によるものが挙げられる。国総研と建築研究所では、地震発生翌日から 2012 年 1 月 27 日まで計 43 回にわたり被害地域の現地調査が行われてきた。2011 年 5 月に速報版の報告書²⁻¹⁾が、2012 年 3 月に最終報告書²⁻²⁾が公表された。免震建築物については最終報告書の第 5 章の 5.5 節に被害調査や観測記録がまとめられている。収集された観測記録に関する情報の一覧を表 2.1-2 に示す。紹介されている建物は、7 棟である。これらは表 2.1-1 に含まれている。

次節以下では、以上にデータを収集した表 2.1-1 に示す 65 棟を対象に分析を行う。

表 2.1-1 データ一覧表

No.	出典	観測地	都道府県	震央距離(km)	建物用途	構造種別-階数	軒高(m)	竣工年	支承材	減衰材	設計周期(秒)	設計周期(レベル1)(秒)	設計周期(レベル2)(秒)	計測震度	加速度(cm/s ²)			免震層変位(cm)	累積変位(m)
															入力	直上階	最上階		
1	⑦	宮城県仙台市／	宮城	172	事務所	SRC-6F,B2F			HDR						381	200	209	18.1	14.6
2	③	宮城県仙台市宮城野区／A建築物	宮城	172	事務所	SRC-9F		2009	HDR	オイル					289	121	142	18.0	
3	③⑤⑥⑧	宮城県仙台市／仙台MTビル	宮城	173	事務所	RC-18F,B2F	75	1999	NRB+すべり		5.4			5.3	311	173	194	23.0	
4	⑦	宮城県仙台市宮城野区／事務所	宮城	173	事務所	SRC,S-9F,B2F	39.2	2009	NRB+LRB					5.5	289	121	142	15.1	11.0
5	⑦	宮城県仙台市泉区／	宮城	175	事務所	RC-5F			HDR						345	177	224	10.5	12.5
6	①⑥⑦⑧	宮城県仙台市青葉区青葉山／東北大学免震試験建物	宮城	177	研究所	RC-3F	9.9	1986	HDR		1.67			5.5	301	362	344	11.5	21.9
7	④⑧	福島県双葉郡／福島第一原子力発電所免震重要棟	福島	178	事務所	SRC(S)-2F	11.95	2010	NRB+LRB+すべり	オイル				6.1	756	213	185	24.0	12.3
8	⑤	宮城県仙台市	宮城	179	事務所	S-14F,B1F	59.55	2008	LRB		3.501	3.501	3.786		353	198	235	13.2	
9	④⑤	福島県双葉郡／福島第二原子力発電所免震重要棟	福島	184	事務所	SRC(S)-3F	15.7	2007	LRB+すべり	オイル				5.3	411	184	154	4.3	7.8
10	⑤⑧	宮城県仙台市／Aビル	宮城	195		S-9F		2006	NRB+LRB		2.82			5.3	299	152		8.0	
11	⑤⑧	岩手県北上市／岩手県立中部病院	岩手	205	病院	RC-6F,B1F	28.4	2009	NRB+LRB+すべり	鋼製					305	83	183	9.4	
12	⑤	茨城県那珂郡東海村／東海研究開発センター内	茨城	272	研究所	RC-5F	27	2003	NRB	鉛					305	238	203	18.9	
13	⑤⑦⑧	茨城県水戸市／水戸市超高層集合住宅	茨城	288	共同住宅	RC-21F	64.05	2001	NRB+すべり	鉛、鋼棒	3.8			5.7	402	185	181	13.9	9.0
14	②	青森県八戸市／	青森	292	事務所	SRC-10F,B1F	42.83	1998	LRB		3.37	3.37	4.02	4.7	104	122	123	2.3	3.6
15	⑤⑥⑧	茨城県つくば市／鴻池組技術研究所管理研究棟	茨城	330	研究所	RC-3F	14.3	1997	NRB	鉛、鋼棒	2.1	2.1	2.55	5.7	296	117	121	5.6	
16	⑧	茨城県つくば市／奥村組技術研究所管理棟	茨城	332	研究所	RC-4F	13.75	1986	NRB	鋼棒、オイル	1.4	1.4	2.1	5	270	148			
17	⑧	茨城県つくば市／Bビル	茨城	334		S-6F,B1F	31	2008	NRB+すべり	オイル				5.2	295	101	110	10.0	
18	②⑦	茨城県つくば市／	茨城	334	事務所	RC-7F	32.2	2010	NRB+LRB	鋼材	2.58	2.58	3.11	5.2	327	92	126	5.9	6.2
19	⑧	新潟県新潟市／Bマンション	新潟	334	共同住宅	RC-24F		2009	HDR					3.6	30	30			
20	⑦⑧	千葉県船橋市／西船橋免震社宅LRB棟	千葉	370	共同住宅	RC-4F	11.65	1992	LRB		1.66	1.66	2.03		170	101	107	2.9	4.3
21	⑦⑧	千葉県船橋市／西船橋免震社宅HRB棟	千葉	370	共同住宅	RC-4F	11.65	1992	HDR		1.55	1.55	1.9		169	149	139	4.4	6.2
22	⑦	千葉県／	千葉	370	事務所	SRC-8F			HDR+NRB						219	98	137	4.7	8.5
23	①⑥⑦⑧	千葉県船橋市／船橋竹友寮	千葉	371	共同住宅	RC-3F	10.9	1987	NRB	粘性体	2.1			4.8	150	70	75	7.8	14.0
24	⑤⑧	東京都足立区／Cビル	東京	376	共同住宅	RC-14F	41.64		NRB+LRB+すべり						173	109	165		
25	⑤⑧	東京都江戸川区／Aビル	東京	377	共同住宅	5F	15.08		NRB+すべり						119	71	85		
26	⑤	東京都江東区／芝浦工業大学豊洲キャンパス	東京	380	文教施設	S-14F,B1F	67.3	2005	NRB+すべり		5.95			4.8	118	95		11.0	
27	②	東京都台東区／	東京	382	文教施設	RC-3F,B1F	10.01	1998	HDR		2.169	2.169	2.651	4.5	100	76	100	4.1	5.8
28	①⑥⑦⑧	東京都江東区／フラッツ東陽	東京	383	共同住宅	RC(S)-12F	37.8	2008	NRB+LRB		3.52	3.52	4.57	4.8	100	53	61	6.5	8.1
29	⑧	東京都千代田区／日本大学駿河台キャンパス5号館	東京	384	文教施設	SRC-9F,B1F	31	2008	NRB+LRB	粘性流体	2.26			4.7	140	145	190	3.3	
30	⑤	埼玉県ふじみ野市／安藤建設技術研究所	埼玉	385	研究所	RC-3F	11.6	1991	LRB		1.01	1.01	1.77		76	64	46		
31	⑦⑧	東京都千代田区／	東京	385	事務所	SRC,RC-10F	29.9	1999	NRB	粘性制振壁	3.41			4.9	245	166	137	2.9	7.5
32	⑥	東京都豊島区／豊島区役所	東京	385	事務所	RC-4F,B1F,P3F	18.45	2000	NRB+すべり		2.386	2.386	2.857		95	75	75	3.0	
33	①⑤⑥⑧	東京都江東区／清水建設技術研究所安全安震館	東京	385	研究所	RC,S-4F	13.95	2006	NRB	オイル	5.14			5.25	204	132	89	7.7	10.9
34	①⑤⑥⑦⑧	東京都江東区／清水建設技術研究所本館	東京	385	研究所	S(RC)-6F	26.8	2003	LRB		3.5	3.5	4.03	5.25	142	73	70	7.6	9.4
35	①⑤⑥⑧	東京都江東区／清水建設技術研究所風洞実験棟	東京	385	研究所	RC(S)-2F,B1F	13.8	2006	HDR		3.12	3.12	3.72	4.75	110	52	250	7.7	11.2
36	②⑦	東京都千代田区／	東京	386	事務所	SRC-11F,B2F	44.9	2009	NRB+LRB	オイル	3.89	3.89	4.33	4.5	104	55	94	5.1	4.3
37	⑤⑧	東京都江東区／	東京	386	共同住宅	RC-36F	114	2011	NRB+LRB		4.71				129	100	116	14.2	
38	①	東京都豊島区／鹿島テラハウス南長崎	東京	387	共同住宅	RC-5F	13.7	1998	LRB+すべり		1.09	1.89	2.25	4.8	134		109	3.6	
39	⑥⑧	東京都渋谷区／代ゼミタワー	東京	389	文教施設	SRC-26F,B3F	131.1	2008	NRB	オイル	5.5			4.4	98	29	46	7.7	
40	⑦	東京都港区／慶応義塾大学三田南館	東京	389	文教施設	RC-13F,B3F		2005	NRB+すべり	オイル	4.2				65	38	59	14.2	13.0
41	⑧	東京都港区／奥村組東京本社ビル	東京	389	事務所	SRC-9F		2007	HDR	オイル				4.5	94	62			
42	⑤⑧	東京都杉並区／阿佐ヶ谷「知粋館」	東京	392	共同住宅	RC-3F	8.9	2011	NRB	オイル	2.9				89	51	87	4.0	
43	③	神奈川県川崎市／	神奈川	401	共同住宅	RC-6F								4.7	104	65	68	4.8	4.7
44	⑦	神奈川県横浜市／慶応義塾大学創想館	神奈川	403	文教施設	S,SRC,CFT-7F,B2F	30.89	2000	NRB	オイル	4.03				71	54	57	12.0	15.0
45	⑧	神奈川県川崎市／Cマンション	神奈川	403	共同住宅	RC-14F		1998	LRB					4.4	96	72			
46	⑦	神奈川県横浜市／慶応義塾大学日吉キャンパス来往舎	神奈川	403	文教施設	S-7F	27.5	2002	HDR						147	51	99	6.8	7.0
47	①⑦	東京都調布市／鹿島技術研究所音響実験棟	東京	403	研究所	RC-2F	10.2	1986	NRB	鋼棒	2			4.7	143	113	125	4.0	7.4
48	⑤⑧	東京都府中市／Dビル	東京	405		5F	14.75		LRB						97	77			
49	⑧	東京都立川市／Dマンション	東京	407	共同住宅	RC-17F		2003	LRB+すべり						69	79			
50	⑤	神奈川県横浜市／神奈川大学23号館	神奈川	410	文教施設	RC-8F,B2F	30.1	2001	NRB	鉛、鋼棒					75			6.6	
51	⑦	神奈川県／	神奈川	412		RC(S)-14F,B1F	74.3		NRB+すべり	オイル	2.14				49	42	90	9.5	7.8
52	⑧	東京都八王子市／Eビル	東京	412		RC-2F		1996	すべり・転がり	粘性					151	33			
53	⑤⑦	神奈川県横浜市／東京工業大学すずかけ台キャンパスJ2棟	神奈川	416	文教施設	S(RC)-20F	85.3	2005	NRB	鋼製、オイル	3.79	3.79	4.38		69	70	116	9.0	
54	⑤⑧	東京都町田市／Eビル	東京	416		8F	29.28		LRB+すべり						116	110			
55	①⑦⑧	神奈川県横浜市／技術センターJ棟	神奈川	420	研究所	RC-4F	19.1	1988	すべり・転がり		1.2	1.2	2.5	4.5	97	118	143	4.2	7.2
56	②⑤	山梨県甲府市／	山梨	468	事務所	RC-8F,B1F	28.2	2002	LRB					3.9	47	37	41	1.5	
57	②	北海道釧路市／	北海道	558	事務所	SRC-9F,B1F	43.7	2000	NRB	鉛、鋼棒	4.01	4.01	4.01	2.6	12	16	19		
58	⑧	静岡県浜松市／Fマンション	静岡	598	共同住宅	RC-6F		1990	NRB	鋼棒、鉛				2.5	8	18			
59	⑧	愛知県豊田市／Gマンション	愛知	612	共同住宅	RC-14F		2007	NRB+LRB					3.3	16	22			
60	⑤	名古屋市中区／名古屋大学鶴舞キャンパス内	愛知	623	病院	SRC-7F,B2F	33.82	2005	NRB+すべり	U型	1.5	1.5	4.2	3.5	21	25	30	1.0	
61	⑤	名古屋市中区／名古屋大学鶴舞キャンパス内	愛知	623	病院	SRC-4F			NRB+すべり	U型				3.5	21	25	26	1.5	
62	⑧	大阪府大阪市／	大阪	759	事務所	SRC-8F,B1F		2008	NRB+すべり						11	13	13	0.3	
63	⑧	大阪府大阪市／Hマンション	大阪	762	共同住宅	RC-43F		2007	NRB+すべり	オイル、粘性				2.9	10	17			
64	⑧	兵庫県芦屋市／Iマンション	兵庫	773	共同住宅	RC-6F		1996	NRB	鋼棒、鉛				2.3	6	9			
65	⑧	／			事務所	S-5F,B2F	22.5	1995	NRB	鉛、摩擦	2.75			4.9	164	80	70	5.0	

出典：①事業主体②建築研究所強震観測③国総研・建研調査報告書④東電福島原子力発電所⑤2011年度、2012年度 AIJ 大会梗概集⑥ゼネコンホームページ⑦JSSI 応答制御建築物調査委員会⑧その他（協会誌、各社技術研究所報等）

表 2.1-2 国総研・建研調査報告書による観測結果

記号	観測地点	建物用途	建物概要	罫書き記録の有無	位置	免震層下部(基礎・地下)の計測震度	最大加速度 (cm/s ²)			最大層間変位(cm)			累積変位 (m)	
							Y	X	Z	Y	X	XY		
KA	宮城県 仙台市	事務所	SRC造 地上9F 地下2F	○		5.5、5.6 隣接(JMA)	9F	142	170	524				
							1F(免震上)	121	144	374	2.63	1.69*		
							B1F(免震下)	289	251	235	13.49	14.42	15.7	10.9
KB	福島県	事務所	地上2F				2F	155	185	621				
							1F(免震上)	176	213	516	0.6	0.66		
							B1F(免震下)	582	756	446	8.02	24.45	24.6	12.3
KC	福島県	事務所	地上3F			5.3	3F	154	157	581				
							1F(免震上)	184	226	463	0.94	0.69		
							B1F(免震下)	411	334	324	4.24	4.34	5.81	7.79
KD	茨城県 つくば市	事務所	RC造 地上7F			5.2、5.9(地表面・震度計)	6F	126	91	243				
							1F(免震上)	92	76	198	0.65	0.6		
							B1F(免震下)	327	233	122	4.81	5.93	6.81	6.24
KE	東京都 台東区	文教施設	RC造 地上3F 地下1F			4.5、4.9 地表面	4F	100	77	84				
							1F(免震上)	76	89	87	0.48	0.66		
							B1F(免震下)	100	79	84	3.66	4.12	4.21	5.76
KF	東京都 千代田区	事務所	SRC造 地上12F 地下1F	○		4.5	12F	94	82	104				
							B2F(免震上)	55	41	62	1.43	1.28		
							B3F(免震下)	104	91	58	5.05	3.7	5.1	4.3
KG	神奈川県 川崎市	宿舎	RC造 地上6F			4.7、4.8 地表面	7F	86	104	34				
							1F(免震上)	58	65	49	0.79	2.26*		
							BF(免震下)	63	68	55	4.81	3.24	5.22	4.73

*ノイズあり

2.2 観測記録の整理・分析

表 2.1-1 の 65 棟を対象に、これらの地震観測データから東北地方太平洋沖地震における免震建築物の挙動について考察を行う。

(1) 収集データの内容

1) 建設地について

建設地の都道府県の内訳を図 2.2-1 に示す。東京都が 23 件と最も多く、宮城県、神奈川県が 8 件が続く。地方別では、関東地方が 42 件、東北地方が 12 件、それ以外が 11 件となっている。

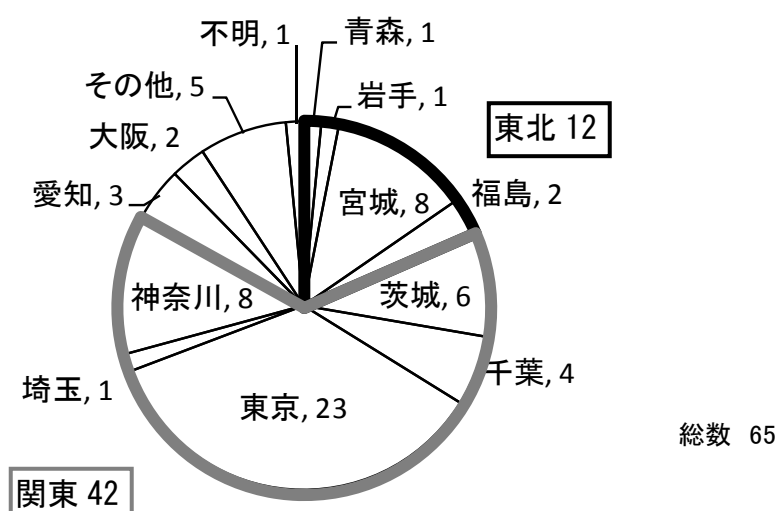


図 2.2-1 建設地の都道府県の内訳

2) 竣工年について

収集したデータを文献 2-34)の提案に従って年代別に分類した。改修の場合は、改修を行った年を採用している。竣工年による年代別の内訳を図 2.2-2 に示す。図 2.2-2 より、第 4 期に竣工した建築物が最も多いことが分かる。全免震建築物に占める第 1 期の建築物の割合は 1%程度と僅かである²⁻³⁵⁾が、本調査では 8%と比較的が多い。これは、免震の草創期におけるゼネコンの自社施設で観測が多いためと思われる。

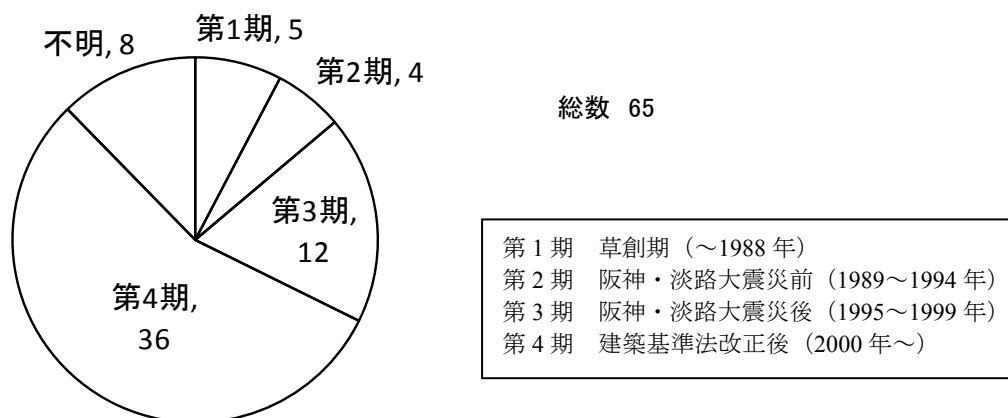


図 2.2-2 竣工年による年代別の内訳

3) 建物用途について

建物用途の内訳を図 2.2-3 に示す。免震建築物全体では共同住宅が約半数を占める²⁻³⁶⁾が、庁舎を含む事務所が最も多く、共同住宅が続く。共同住宅や研究所が多いのは、収集したデータにゼネコンの自社施設での観測結果が含まれているためである。また文教施設が多いのは大学キャンパス内の施設で観測を行っている例も多いためである。

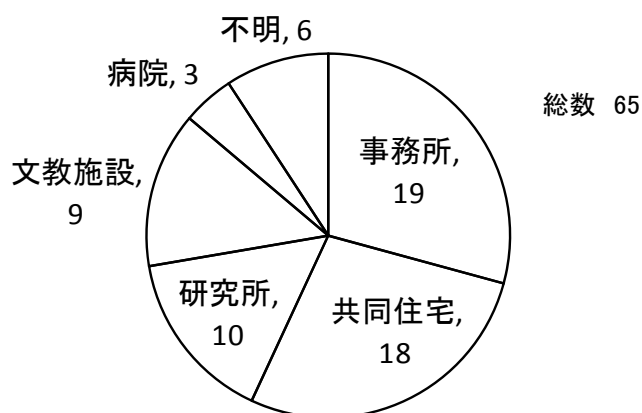


図 2.2-3 建物用途の内訳

4) 支承材の種類について

支承材の内訳を図 2.2-4 に示す。本調査では天然ゴム系積層ゴム単独の使用が最も多く、次に天然ゴム系積層ゴムとすべり支承との組み合わせが続く。以降、支承材の違いによる影響を調べる際は、大きく以下のように分類する。

NRB : 天然ゴム系積層ゴム単独、天然ゴム系積層ゴムとすべり支承の併用

LRB : 鉛プラグ入り積層ゴム単独、鉛プラグ入り積層ゴムと天然ゴム系積層ゴムまたはすべり支承、またはその両方との併用

HDR : 高減衰積層ゴム単独、高減衰積層ゴムと天然ゴム系積層ゴムとの併用

すべり : すべり・転がり単独

またセミアクティブ免震が 2 件含まれる。2 棟とも上記の分類の **NRB** に含まれる。

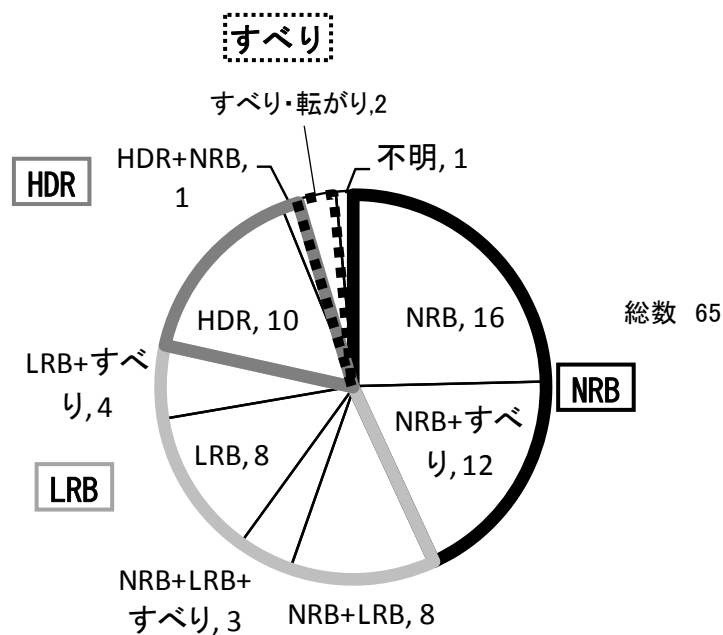


図 2.2-4 支承材の内訳

5) 建物用途と支承材について

建物用途毎の支承材の内訳を図 2.2-5 に示す。事務所と共同住宅では LRB の占める割合が最も大きく、研究所、文教施設、病院では NRB の占める割合が最も大きい。

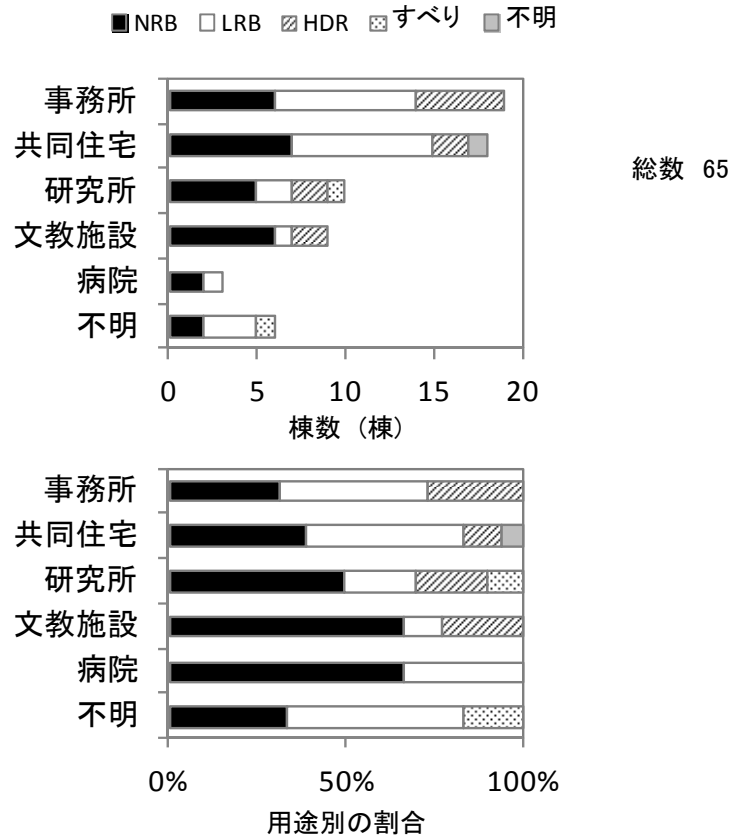


図 2.2-5 建物用途と支承材の関係

6) 軒高と設計周期について

図 2.2-6 に軒高と設計周期の関係を示す。2.1 項に示す参考文献で軒高が不明な場合、別の文献^{2-37)~2-41)}および一般財団法人日本建築センター機関誌「ビルディングレター」^{2-42)~2-48)}に記載の値を採用した。設計周期が複数レベルある場合、レベル毎に示した。設計周期は軒高が高くなる程長くなる傾向がみられるが、高さ 40m 以上ではその傾向が小さくなる。

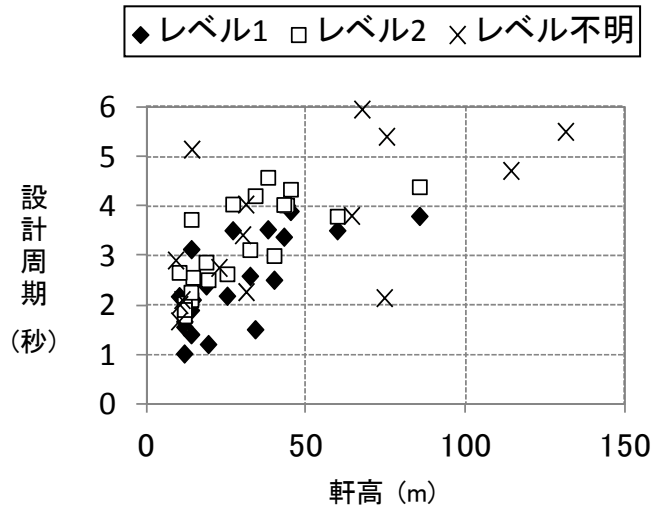


図 2.2-6 軒高と設計周期の関係

7) 竣工年と設計周期について

竣工年と設計周期との関係を図 2.2-7 に示す。竣工年が新しいほど、設計周期が長くなる傾向が見られる。理由としては、積層ゴムの高面圧化や上部構造の高層化等が考えられる。1990 年前半の免震建築物には、レベル 2 で設計周期が 2 秒以下の建築物も含まれる。

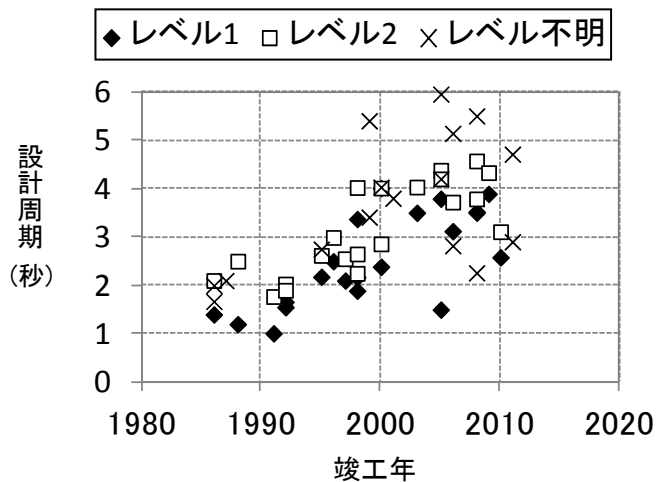


図 2.2-7 竣工年と設計周期

(2) 収集データの分析

1) 入力加速度について

震央距離と入力加速度の関係について調べた。ここで、震央距離は、詳細な所在地が不明な場合（〇〇区や〇〇市まで）、区役所や市役所との距離を震央距離とした。入力加速度は免震層下の水平加速度の2方向の大きい方と定義する。震央距離と入力加速度の関係を図 2.2-8 に示す。入力加速度は $6\sim 756\text{ cm/s}^2$ の範囲である。東北地方と茨城県の記録は震央距離 350 km 以内に含まれる。震央距離 350 km 以内では2点を除き、入力加速度が 250 cm/s^2 を超えている。以降、2点を除く震央距離 350 km 以内の地域を「(東北・茨城) 地域」、震央距離 350 km 以上の地域を「(東北・茨城) 地域以外」と呼ぶこととする。

震央距離と計測震度との関係を図 2.2-9 に示す。計測震度は、公開情報で6弱、5強等と書かれている場合、平均値（例：6弱→5.75、5強→5.25）とした。計測震度は震央距離が小さい程大きくなり、大きい程小さくなる傾向が見られる。

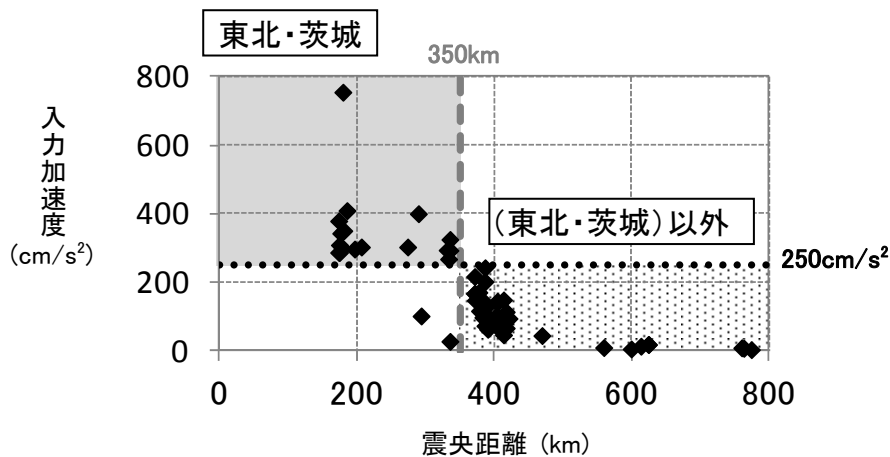


図 2.2-8 震央距離と入力加速度の関係

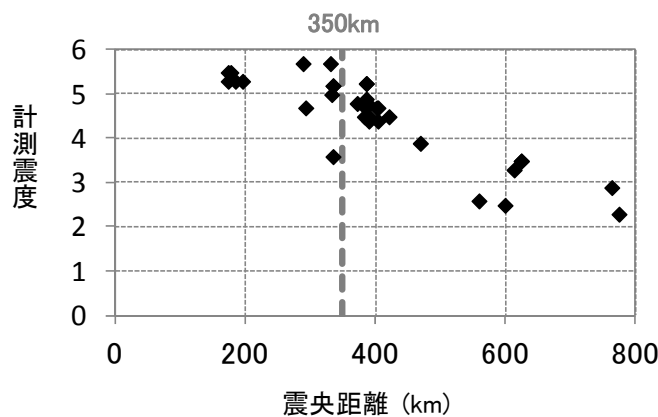


図 2.2-9 震央距離と計測震度の関係

各建設地の入力加速度波形をみると、宮城県と岩手県では主要動が2回あるが、関東以西では1回である。青森県と福島県ではその中間的な時刻歴波形であった。一例として各地の時刻歴を文献 2-21), 2-30), 2-49)から引用して図 2.2-10 に示す。観測記録時間は5分程度またはそれ以上継続する記録が多い。文献 2-21)でつくば市と新潟市が比較されており、震央距離はほぼ等しいが、加速度は大きく異なることが示されている。

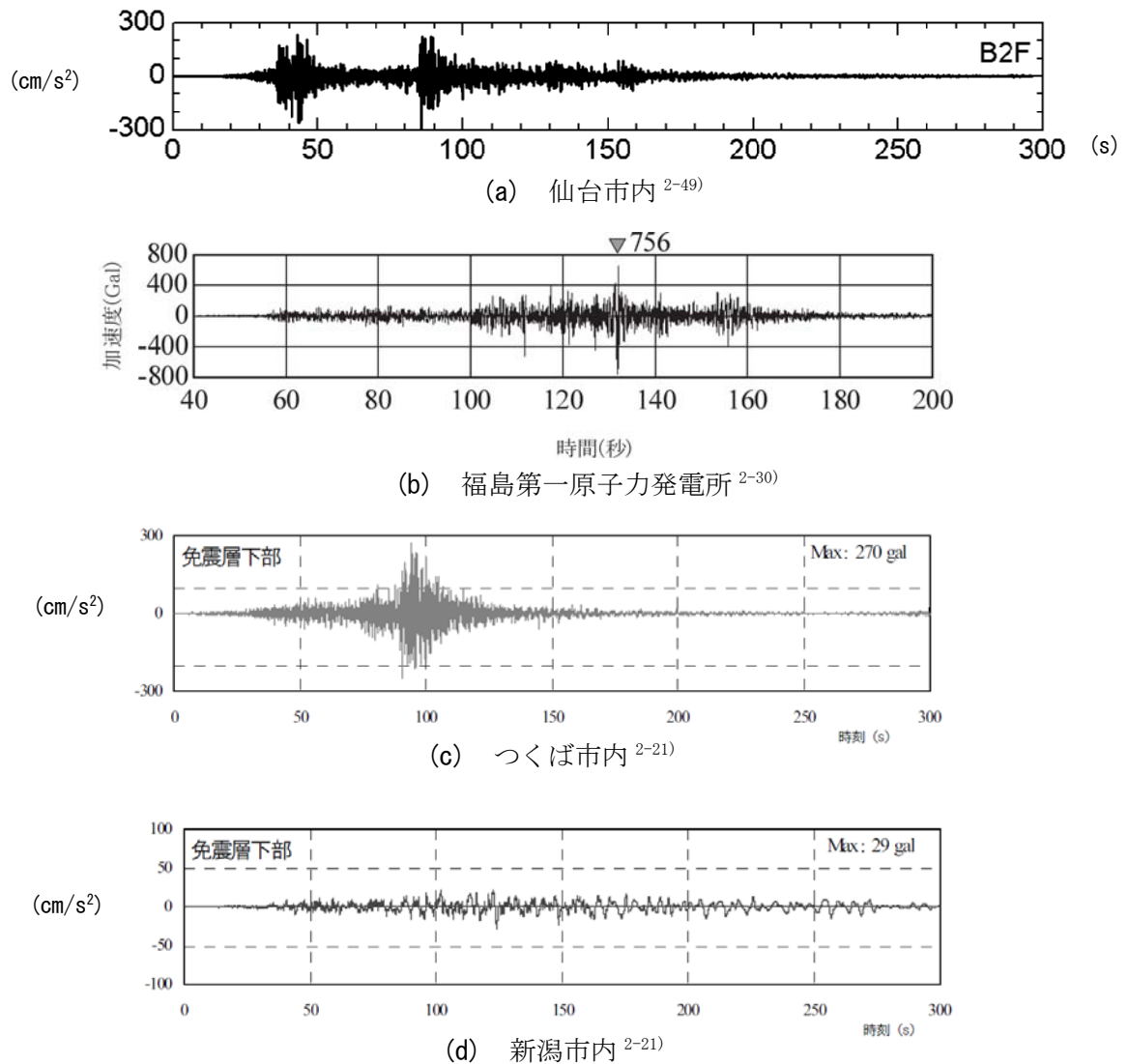
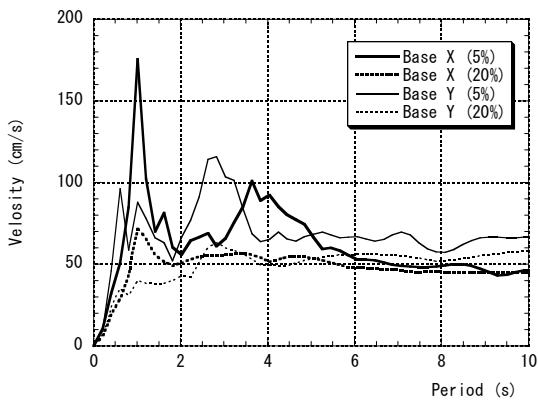
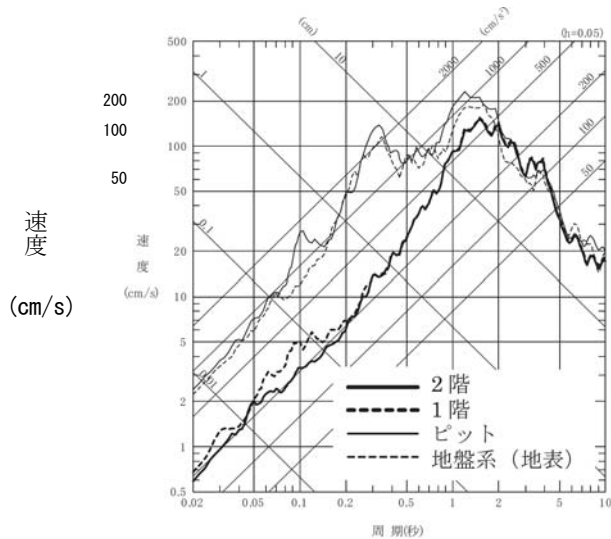


図 2.2-10 入力加速度時刻歴

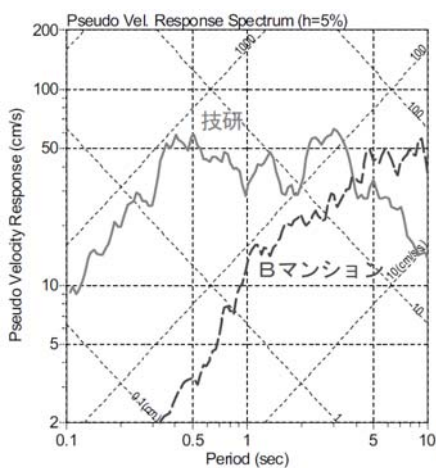
擬似速度応答スペクトルの例を文献(2-15), (2-21), (2-30), (2-49)より引用して図 2.2-11 に示す。仙台市やつくば市では、速度一定域において 50cm/s 程度、ピークでは 80~100cm/s 程度である。福島第一原子力発電所ではピークが 200cm/s を超えていた。茨城県以外の関東においては 30~40cm/s 程度である。つくば市と新潟市のは震央距離はほぼ等しいが、応答スペクトルは大きく異なっている。断層最短距離が異なるためと考えられる。



(a) 仙台市内²⁻¹⁵⁾

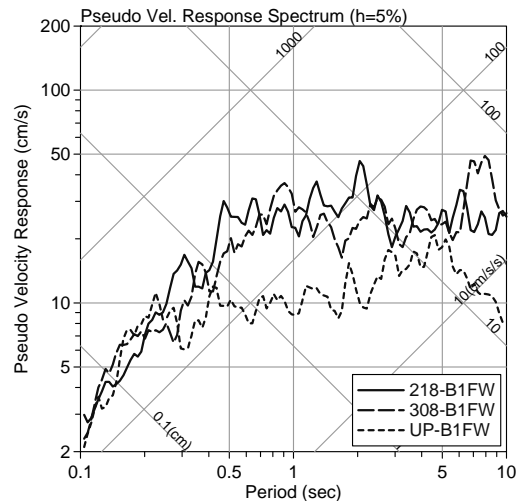


(b) 福島第一原子力発電所²⁻³⁰⁾



※技研はつくば市内、Bマンションは新潟市内である

(c) つくば市内と新潟市内²⁻²¹⁾



(d) 東京都内²⁻⁴⁹⁾

図 2.2-11 擬似応答速度スペクトル

2) 入力加速度と応答加速度の関係

免震層直上階および観測位置の中での最上階（以降、直上階および最上階）の加速度（以降、応答加速度と呼ぶ。）の最大値と入力加速度の最大値との関係を図 2.2-12 に示す。観測値が水平 2 方向で得られている場合、応答加速度は入力加速度が大きい方の方向の値とした。直上階、最上階共、入力より小さくなる建物が多い。最上階でも概ね 250cm/s^2 で頭打ちとなり、入力加速度が大きくなるほど応答低減効果が大きくなる傾向が見られる。入力加速度が 100cm/s^2 程度と比較的小さい場合、最上階が入力より若干増幅する建物も見られた。一方、入力加速度が 300 cm/s^2 程度でも増幅している建物がある。これは、設計周期 2 秒未満の初期の免震建物であるが、最上階では隣接の同規模耐震建物の半分以下に応答が低減されている²⁻⁷⁾等。

入力加速度の最大値と直上階の応答倍率（=応答加速度÷入力加速度）の関係を 2.2 (1), (4)で示した支承材の分類に従って、図 2.2-13 にプロットした。NRB については特にオイルダンパーまたは粘性ダンパーなどの流体系ダンパーを併用した場合を区別した。セミアクティブ免震 2 件はいずれも NRB と流体系ダンパーの併用であり、さらに区別して示す。セミアクティブ免震の結果は入力加速度が比較的小さくても、応答倍率が小さくなっている。

図 2.2-14 に上下方向の入力加速度の最大値と応答倍率の関係を示す。上下方向の入力加速度は最大で 446cm/s^2 である。（東北・茨城）地域では 120cm/s^2 を超え、（東北・茨城）地域以外では一部を除き、 120cm/s^2 以下であった。応答倍率は直上階では概ね 1 前後であるのに対し、最上階では $0.74\sim 4.3$ とばらつき、特に入力加速度が小さいほどばらつきが大きい。上下免震建物が 1 件含まれており、応答倍率は最も小さくなった。

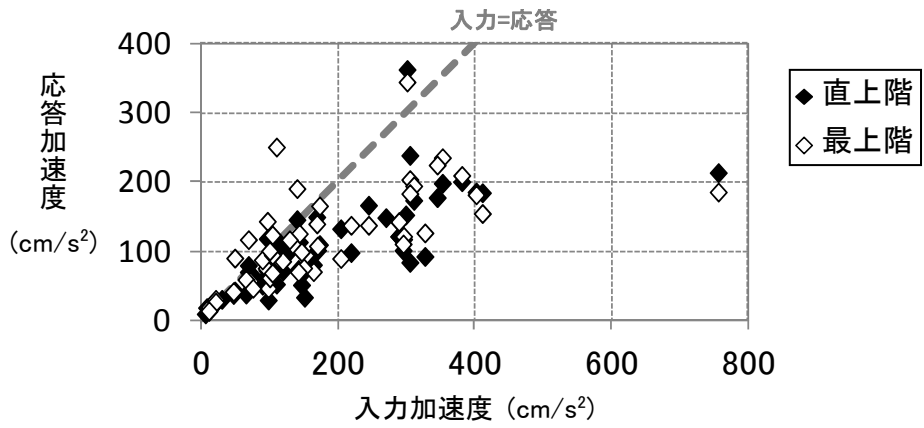


図 2.2-12 入力加速度と応答加速度 (水平)

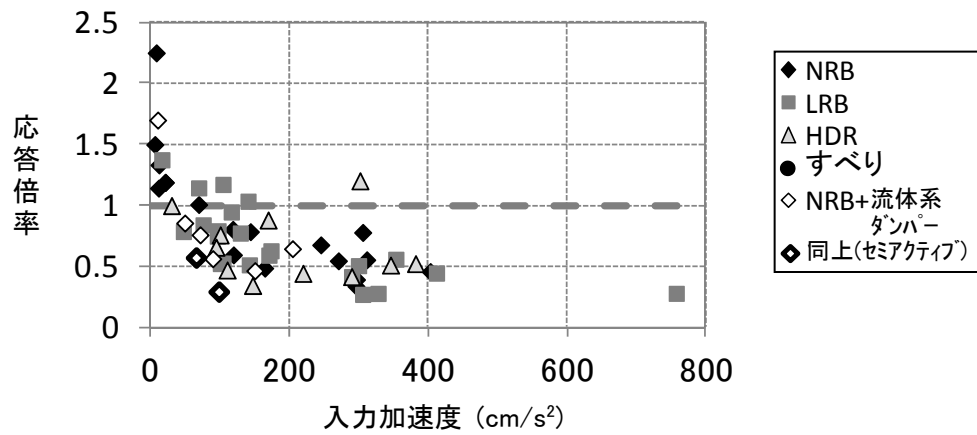


図 2.2-13 入力加速度と直上階応答倍率 (水平)

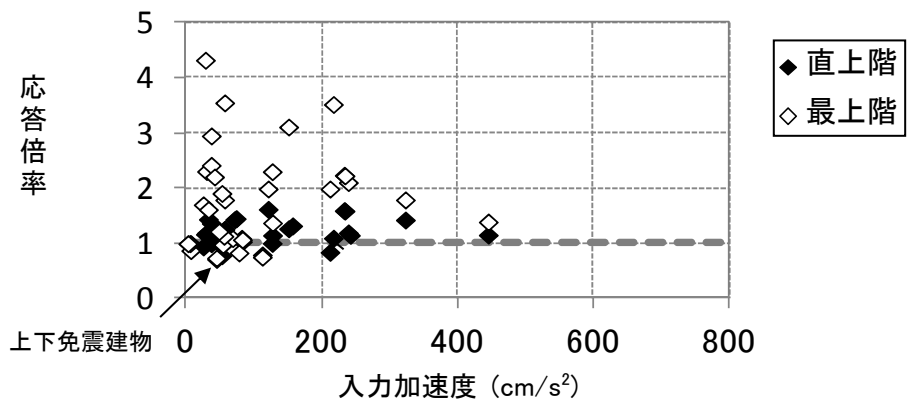


図 2.2-14 入力加速度と応答倍率 (上下)

3) 震央距離と応答倍率の関係

震央距離と応答倍率との関係を図 2.2-15 に示す。これより、震央距離が大きくなるほど、応答倍率は大きくなる傾向が見られる。これは、図 2.2-8 に示した通り、震央距離が大きくなるほど入力加速度が小さくなる傾向に対応するものである。すなわち、震央に近い「(東北・茨城) 地域」では入力加速度が大きいため、応答倍率が小さくなり、一方、震央から遠い「(東北・茨城) 地域以外」では、入力加速度が小さいため、免震効果が明確に見られないことが分かる。

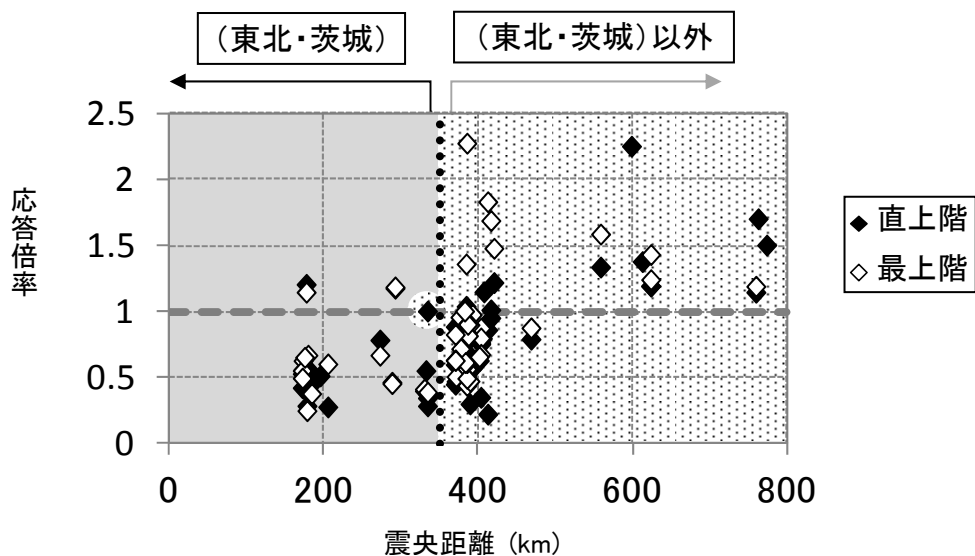


図 2.2-15 震央距離と応答倍率の関係

4) 軒高と増幅率の関係

軒高と直上階と最上階の最大加速度応答の比（以降、増幅率）の関係を調べた。軒高と増幅率の関係を地域別に図 2.2-16 と図 2.2-17 に示す。「(東北・茨城) 地域」では 1 点を除き、1.0 付近でありほとんど増幅していない。「(東北・茨城) 地域以外」は、1.0 よりやや大きい点が多くなり、軒高が大きくなると増幅率も若干大きくなる。

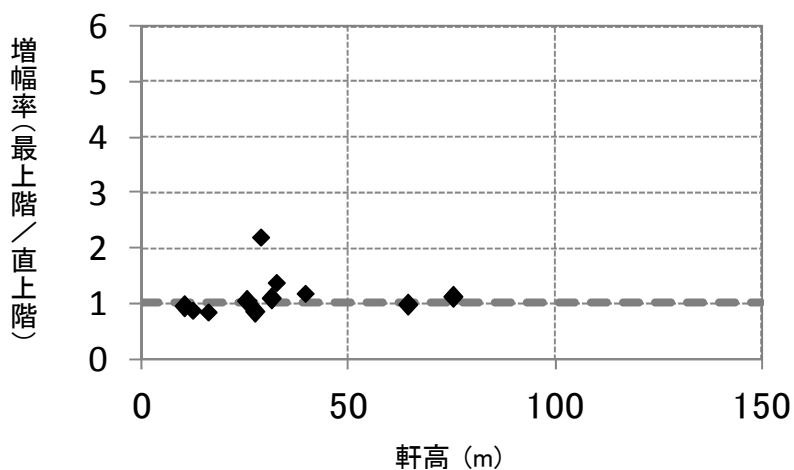


図 2.2-16 軒高と増幅率の関係 「(東北・茨城) 地域」

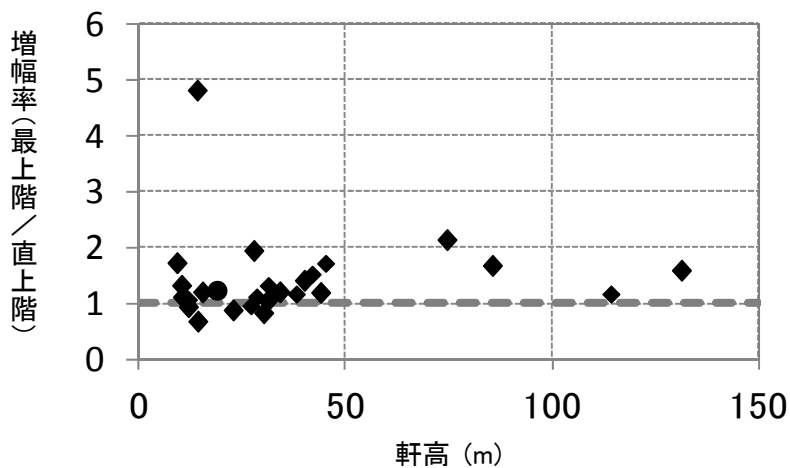


図 2.2-17 軒高と増幅率の関係 「(東北・茨城) 地域以外」

5) 入力加速度と免震層変位との関係

入力加速度と免震層変位との関係を図 2.2-18 に示す。ここで、免震層変位は、観測値が水平 2 方向ある場合、大きい方の値を採用した。なお、文献によっては、各方向の最大値と 2 方向の合成の最大値が混在し、入力加速度と変位の方向は一致していない可能性もある。

図 2.2-18 より入力加速度が大きい程、免震層変位が大きくなる傾向がある。「(東北・茨城) 地域」では 5cm 以上であり、本調査での最大値は約 24cm であった。「(東北・茨城) 地域以外」は 5cm 付近が多い。

支承材による違いを見ると、NRB はややばらつきが大きく、HDR や LRB は (LRB は中間層免震の 1 棟を除くと) ややばらつきが小さく、入力加速度とともに、免震層変位が大きくなる傾向が見られる。NRB において流体系ダンパーを用いた場合、免震層変位はやや大きくなる傾向が見られる。

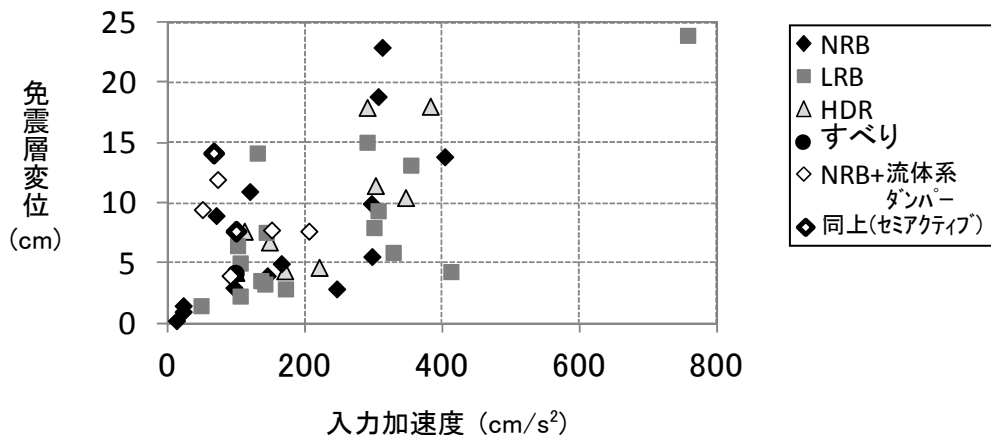
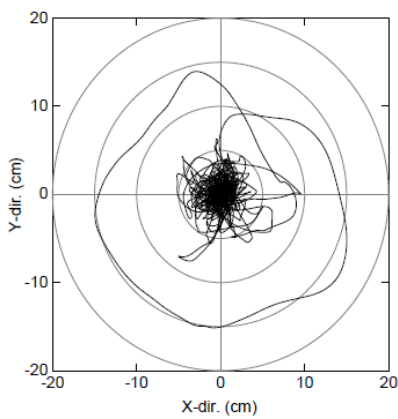
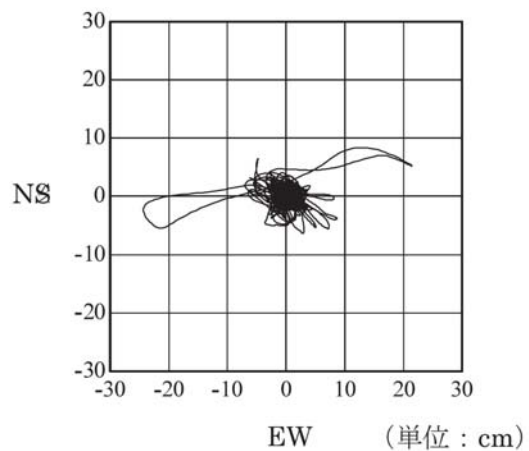


図 2.2-18 入力加速度と免震層変位の関係

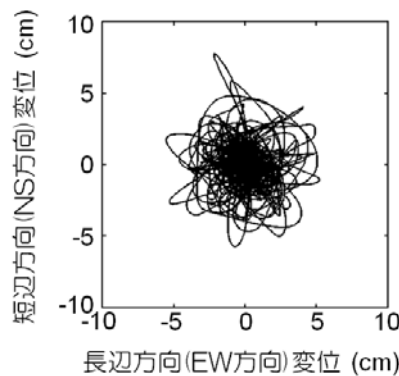
変位履歴の例を文献 2-15), 2-26), 2-30)より引用して図 2.2-19 に示す。大半は(c)のようにランダムな軌跡を描くが、(a)や(b)のように1周期大きく動き、真円に近い軌跡や1方向に大きい軌跡を描く物もあった。(a)仙台市では90度の位相差でXY方向に同程度の地震動が、(b)福島第一原子力発電所はEW方向が特に大きい地震動が作用したためと考えられる。変位履歴は、変位計や加速度の積分によって算出されたものが多いが、同時にけがき計が設置されている建物もあり、けがき計で変位の概要がわかることが確認されている²⁻⁵⁰⁾等。



(a) 仙台市内²⁻¹⁵⁾



(b) 福島第一原子力発電所²⁻³⁰⁾



(c) 船橋市内²⁻²⁶⁾

図 2.2-19 変位履歴

6) 設計周期と免震層変位との関係

設計周期と免震層変位との関係を地域別に図 2.2-20、図 2.2-21 に示す。2.1 の公開情報の参考文献内で設計周期が不明な場合、別の文献^{2-37)~2-41)}および(財)日本建築センター機関誌「ビルディングレター」^{2-42)~2-48)}の値を採用した。ここでの設計周期は、その算出時に用いた変位がなるべく観測された免震層変位に近い周期とした。図 2.2-20、図 2.2-21 より設計周期が長い程、免震層変位が大きくなる傾向がある。NRB において流体系ダンパーを用いた場合、免震層変位がやや大きくなる傾向が見られる。

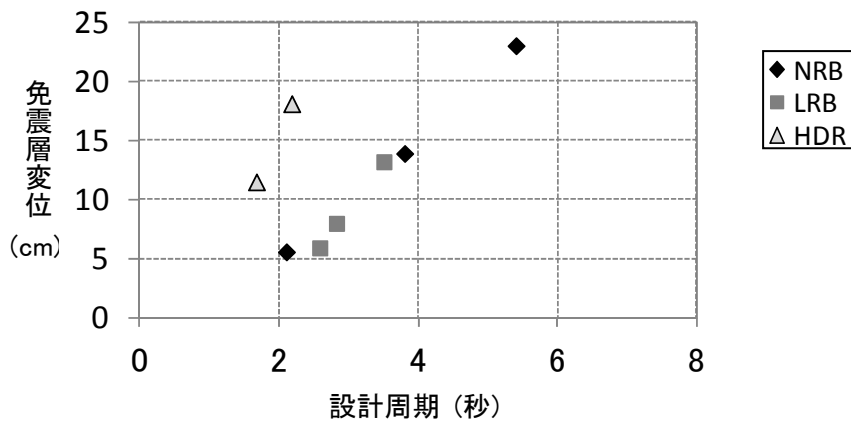


図 2.2-20 設計周期と免震層変位の関係 「(東北・茨城) 地域」

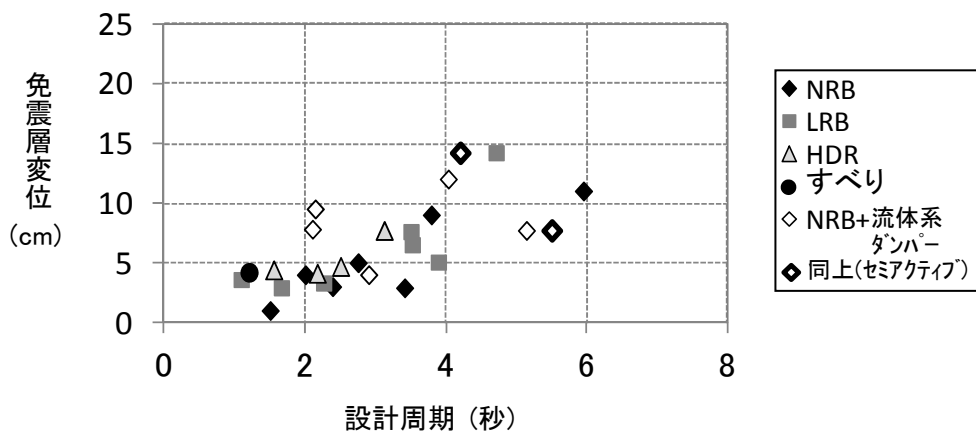


図 2.2-21 設計周期と免震層変位の関係 「(東北・茨城) 地域以外」

7) 設計周期と応答倍率との関係

設計周期と直上階応答倍率との関係を地域別に図 2.2-22、図 2.2-23 に示す。ここでの設計周期は「6) 設計周期と免震層変位との関係」と同じものである。これより、設計周期が長い程、応答倍率が小さくなる傾向が見られる。応答倍率は NRB において流体系ダンパーを用いた場合とそれ以外とで、違いはほとんど見られない。

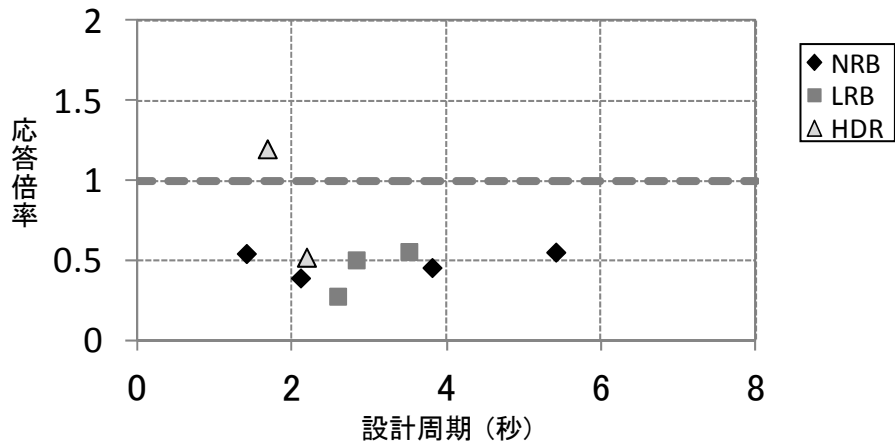


図 2.2-22 設計周期と応答倍率の関係 (直上階) 「(東北・茨城) 地域」

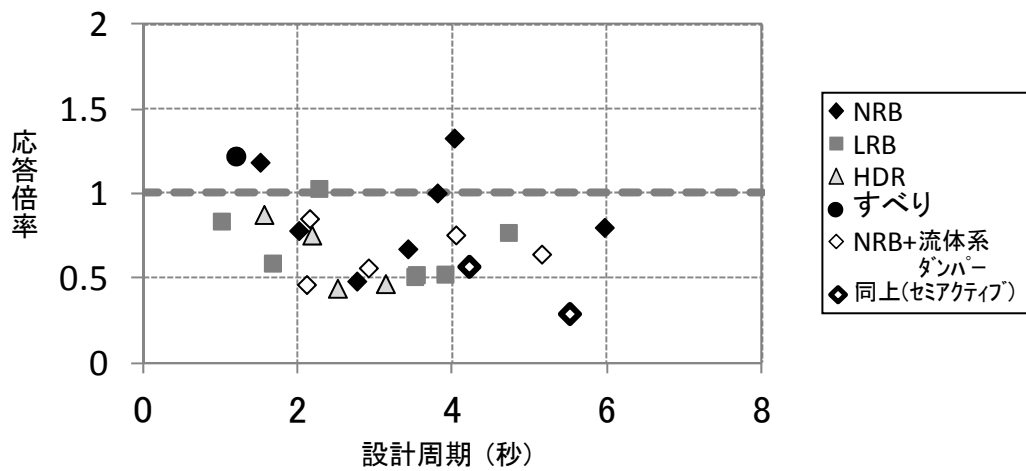


図 2.2-23 設計周期と応答倍率の関係 (直上階) 「(東北・茨城) 地域以外」

8) 累積変位について

入力加速度と累積変位の関係を図 2.2-24 に示す。入力加速度が大きくなる程、累積変位は大きくなる傾向があり、本調査では最大で 22m であった。NRB において流体系ダンパーを用いた場合、入力加速度が 100cm/s^2 前後でも累積変位が 12~15m とやや大きくなっており、最大変位と同様の傾向が見られる。

最大変位と累積変位との関係を図 2.2-25 に示す。累積変位は最大変位の 50~200 倍の範囲に分布しており、平均して 100 倍程度となっている。最大変位と同様に、NRB と流体系ダンパーの併用では、入力加速度が比較的小さくても累積変位がやや大きくなる建物もあった。

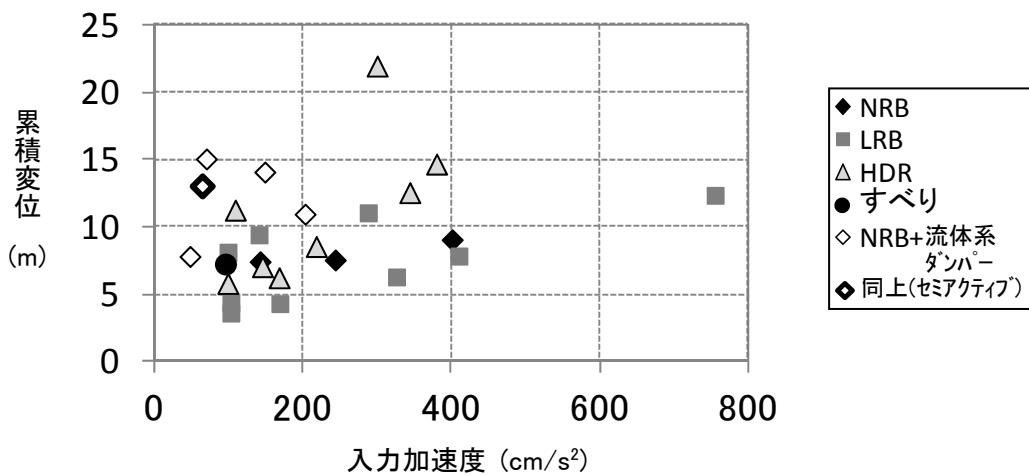


図 2.2-24 入力加速度と累積変位の関係

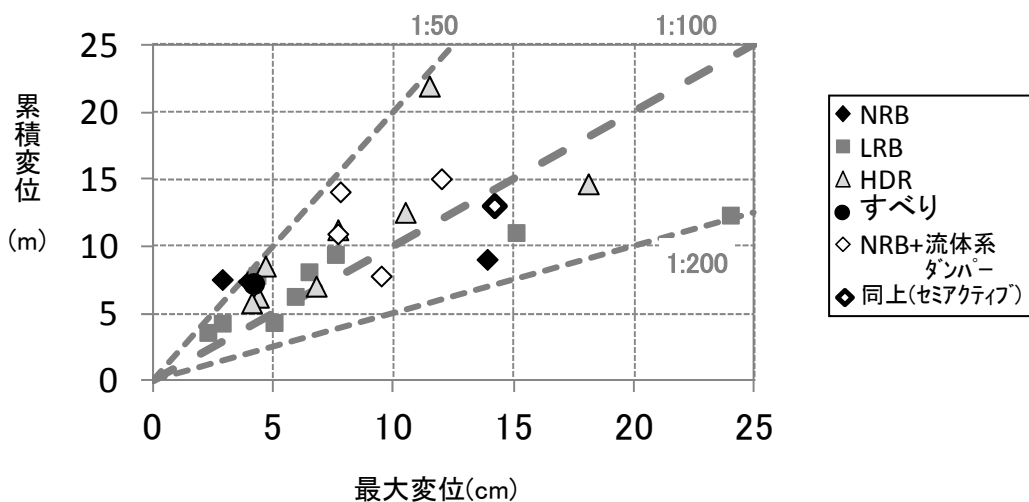


図 2.2-25 最大変位と累積変位

2.3 まとめ

表 2.1-1 に示すデータを収集し、これらに基づき東北地方太平洋沖地震による免震建築物の地震時挙動を分析した。データの総数は 65 であり、その内関東は 42、東北は 12 であった。建物用途は事務所が最も多く、続いて共同住宅であった。支承材は天然ゴム系積層ゴム単独やすべり支承との併用が半数近くを占めた。竣工年では 2000 年以降の建築物が最も多い。しかし 1988 年以前の割合も比較的多く、固有周期は 2 秒以下の建築物も含まれる。これは今回収集したデータに初期の免震でゼネコンが自社の施設で観測しているデータが多く含まれているためであると考えられる。収集したデータの分析結果から以下の知見を得た。

- ・ 免震層下の水平加速度は $6\sim 756\text{ cm/s}^2$ の範囲であり、震央距離 350km を境界に 250 cm/s^2 を超えるデータとそれ以下とに大きく分けることが出来る。
- ・ 免震層下の水平加速度が大きくなっても、免震層直上階と最上階の水平加速度は概ね 250 cm/s^2 で頭打ちとなった。最上階でも水平加速度が免震層下より小さくなるケースが多かった。免震層下の水平加速度が 100 cm/s^2 程度で比較的小さい場合、最上階が免震層下より若干増幅するケースも見られた。
- ・ 入力加速度が大きい程、免震層の変位は大きくなる傾向が見られた。免震層の変位は震央距離 350km 以内の「(東北・茨城) 地域」では $5\sim 24\text{ cm}$ 、震央距離 350km 以上の「(東北・茨城) 地域以外」では 5 cm 前後の物が多いが、天然ゴム系積層ゴムと流体系ダンパーを組み合わせた場合、 5 cm よりもやや大きくなる傾向が見られる。
- ・ 免震層の変位の最大値は支承材の種類によりばらつきに違いが見られた。天然ゴム系積層ゴムは、すべり支承やダンパーと組み合わせられて用いられるため、その組み合わせに応じて、免震層の特性が異なるため、免震層の変位の差異が大きくなると考えられる。
- ・ 変位履歴で一部特徴的な軌跡が見られた。免震部材の維持管理には最大変形量を知ることが重要であるのは言うまでもないが、変位履歴も重要な情報である。
- ・ 変位履歴は、変位計の記録または加速度記録の積分により免震層の変位履歴を得たが、罫書き変位計でも同様の情報を得る事が出来ため、今後は、全ての免震建築物に罫書き変位計を取り付け、免震層の変位状況が把握できるようになれば、免震建築物の地震時挙動は飛躍的に解明される。
- ・ 設計周期が長い程、直上階の応答倍率は若干小さくなり、免震層の変位は大きくなる傾向が見られた。
- ・ 累積変位は最大変位の約 100 倍であった。天然ゴム系積層ゴムと流体系ダンパーを組み合わせた場合、入力と比較的小さくても累積変位が $12\sim 15\text{ m}$ となることもあった。

参考文献

- 2-1) 国土交通省国土技術政策総合研究所、独立行政法人建築研究所：平成 23 年東北地方太平洋沖地震による建築物被害第 1 次調査、2011.8
- 2-2) 国土交通省国土技術政策総合研究所・独立行政法人建築研究所：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震被害調査報告、2012.3
- 2-3) 建築研究所の強震観測 <http://smo.kenken.go.jp/ja/>、（参照 2012/10/3）
- 2-4) 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、2011.8
- 2-5) 日本建築学会大会学術講演梗概集 B-2、2012 年 9 月
- 2-6) 東京電力ホームページ、<http://www.tepco.co.jp/cc/press/11092910-j.html>、（参照 2012/10/3）
- 2-7) 清水建設ホームページ、<http://www.shimz.co.jp/theme/earthquake/effect.html>、（参照 2012/10/3）
- 2-8) 大成建設ホームページ、http://www.taisin-net.com/solution/taiseis_eye/87lvn7000001579e.html、（参照 2012/10/3）
- 2-9) 竹中工務店ホームページ、<http://www.takenaka.co.jp/news/2011/07/03/index.html>、（参照 2012/10/3）
- 2-10) 鴻池組ホームページ、<http://www.konoike.co.jp/et/detail/000562.html>、（参照 2012/10/3）
- 2-11) 芝浦工業大学ホームページ、<http://www.eq.db.shibaura-it.ac.jp/Mensin/index.shtml>、（参照 2012/10/3）
- 2-12) 神奈川大学ホームページ、http://f0303176.yb12.kanagawa-u.ac.jp/TEDCOM/3_eqdata/index.htm、（参照 2012/10/3）
- 2-13) 東北地方太平洋沖地震による神奈川県地震の震度分布・観測記録
<http://www.serc.titech.ac.jp/~kasailab/acceleration.pdf>、（参照 2012/10/3）
- 2-14) 第 97 回建築物理研究センター講演会「東北地方太平洋沖地震における建物強震記録」、
http://www.serc.titech.ac.jp/~kasailab/20110927/sercseminar_20110927.html、（参照 2012/10/3）
- 2-15) 日本免震構造協会：応答制御建築物調査委員会報告書、2012.1
- 2-16) 秦一平：駿河台・船橋キャンパスの地震観測結果（特集号 2011 年東北地方太平洋沖地震被害調査報告）、日本大学工学部理工学研究所研究ジャーナル（125）、pp.67-70、2011.8
- 2-17) 川島学他：東北地方太平洋沖地震における関東地域の免震建物の挙動：三井住友建設技術開発センター報告、第 9 号、2011.9
- 2-18) 森下真行他：地震観測結果に基づく免震構造物の動特性について、前田建設技術研究所報 Vol.52、2011.10
- 2-19) 山本雅史：観測記録に基づく免震建物の評価、竹中技術研究報告、No.67、2011.12
- 2-20) 井川望他：東北地方太平洋沖地震における地震観測建物の観測記録、鴻池組技術研究報告、p.45-48、2011.7
- 2-21) 上寛樹他：免震建物の地震観測－2011 年東北太平洋沖地震における免震建物の地震応答－、奥村組技術研究年報 No.37、pp.57-62、2011.8
- 2-22) 半澤徹也他：2011 年東北地方太平洋沖地震における東京湾沿岸の免震構造物の挙動、清水建設研究報告、第 88 号、2012.1
- 2-23) 欄木龍大他：東北地方太平洋沖地震における免震・制振建物の効果観測記録の分析に基づく免震・制振効果の検証、大成建設技術センター報、第 44 号、pp.05-1-8、2011.12

- 2-24) 鹿島俊英他：2011 東北地方太平洋沖地震における免震建物の挙動、振動技術 第 24 号、pp.9-13、2011.10
- 2-25) 猿田正明他：2011 東北地方太平洋沖地震における東北大学免震実証試験建屋の挙動、振動技術 第 24 号、pp.14-16、2011.10
- 2-26) 山本雅史：東北地方太平洋沖地震における免震建物の観測記録、振動技術 第 24 号、pp.17-21、2011.10
- 2-27) 高橋治他：阿佐ヶ谷「知粋館」、MENSHPIN、No.73、pp.15-18、2011.8
- 2.28) 古澤健他：東北地方太平洋沖地震における免震構造の観測記録と居住者のアンケート調査及び応急点検、MENSHPIN、No.73、pp.23-28、2011.8
- 2-29) 仲山雅一他：岩手県立中部病院、MENSHPIN、No.74、pp.14-17、2011.11
- 2-30) 土方勝一郎他：東北地方太平洋沖地震における福島原子力発電所「免震重要棟」の挙動について、MENSHPIN、No.75、pp.21-26、2012.2
- 2-31) 小室努他：仙台 MT ビル、MENSHPIN、No.75、pp.35-38、2012.2
- 2-32) 平成 22 年度 国土交通省建築基準整備促進事業 27-3 長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討 調査報告書、2011.3
- 2-33) 2011 年東北地方太平洋沖地震災害調査速報、日本建築学会、2011.7
- 2-34) 日本建築学会：長周期地震動と建築物の耐震性、2007
- 2-35) 日本免震構造協会運営委員会：2010 年度免震制振建物データ集積結果、MENSHPIN No.73、pp.29-33、2011.8
- 2-36) 田中佑治他：国内免震建物データベース構築と現状分析、日本建築学会技術報告集、第 17 巻(第 35 号)、pp.79-84、2011.2
- 2-37) 広野衣美他：高密度強震観測に基づく免震建物の立体振動特性の分析と分析支援ツールの開発、日本建築学会学術講演梗概集、pp.965-966、2007.8
- 2-38) 大森一紘他：免震構法開発に関する研究（その 3 技術研究所研究等の免震構法）、日本建築学会大会梗概集、PP.727-723、1990.10
- 2-39) 広瀬景一他：日本大学工学部駿河台校舎 5 号館の免震改修、MENSHPIN No.60、pp.7-11、2008.5
- 2-40) 大竹透他：免震建築紹介 芝浦工業大学豊洲キャンパス--軟弱地盤に建つ L 字型免震建築物の構造設計、MENSHPIN、No.50、pp.4-8、2005.11
- 2-41) 藤波健剛他：免震建築訪問記 慶應義塾大学（三田）南館、MENSHPIN、No.54、pp.23-28、2006.11
- 2-42) 日本建築センター性能評定シート 1987 BCJ-免 2：奥村組筑波研究所管理棟新築工事、ビルディングレター、pp.155-156、1987.3
- 2-43) 日本建築センター性能評定シート 1989 BCJ-免 36：（仮称）社員施設新築工事、ビルディングレター、pp.87-90、1989.12
- 2-44) 日本建築センター性能評定シート 1996 BCJ-免 184：釧路合同庁舎、ビルディングレター、pp.77-78、1996.10
- 2-45) 日本建築センター性能評定シート 1997 BCJ-免 231：（仮称）（株）鴻池組筑波技術研究所新築工事、ビルディングレター、pp.117-118、1997.3

- 2-46) 日本建築センター性能評定シート 1998 BCJ-免 463：慶應義塾理工学新棟（仮称）、ビルディングレター、pp.73-74、1998.9
- 2-47) 日本建築センター性能評定シート 1998 BCJ-免 464：東京都豊島区役所本庁舎耐震補強工事、ビルディングレター、pp.75-76、1998.9
- 2-48) 日本建築センター性能評定シート 2000 BCJ-免 609：神奈川県（仮称）新3・4号館、ビルディングレター、pp.169-170、2000.4
- 2-49) 平成23年度 国土交通省建築基準整備促進事業 27-3 長周期地震動に対する免震建築物の安全性検証方法に関する検討 調査報告書、2012.3
- 2-50) 山際創他：多点同時地震動観測記録に基づく超高層免震建物の地震応答性状の考察、日本建築学会学術講演梗概集 B-2、pp.333-334、2011.8

第3章 東日本大震災の本震・余震観測記録に基づく免震建築物の地震時挙動の分析

3.1 検討方針

1) はじめに

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震では、主に東北地方から関東地方に建設された免震建築物が継続時間の長い地震動を受け、免震建築物の地震時挙動について多くの知見が得られている。「平成23年度国土交通省建築基準整備促進事業27-3」において実施した検討では、事業者から提供された免震建築物の地震観測結果および学術誌やWeb等で公表されている地震観測資料に基づいて、免震建築物の特徴（免震部材、固有周期等）と地震応答（最大加速度、免震層最大変位、加速度低減効果等）についてまとめた。

一方、今回の地震ではマグニチュード9.0の本震の後、数多くの余震が発生したが、これらの余震の中には、マグニチュードが6~7程度と比較的大きな規模を持つものも含まれていた。よって、免震建築物が複数の余震による揺れを受けることで、免震層の累積変位が過大になるなど、その特性に影響を及ぼす可能性もある。ここでは、東北地方太平洋沖地震の後に発生した余震を対象とし、これらの地震が免震建築物に与えた影響を定量的に把握するため、観測記録に基づく建物挙動について検討を行った。

2) 対象建物の選定

検討の対象とした建物は、事業者から提供された免震建築物であり、以下の6棟とする。

- A 建物【鹿島建設】
- B 建物【竹中工務店】
- C 建物【竹中工務店】
- D 建物【大成建設】
- E 建物【清水建設】
- F 建物【建築研究所】

3) 対象とする地震

2011年3月11日の本震後に発生した余震を対象とする。このうち、観測結果から得られた基礎の最大加速度、免震層の最大変位あるいは計測震度のうち一つの要因が、一定の水準以上となるものを選定した。これらの要因と水準は、次項以降の各建物の項で示した。

4) 検討項目

余震の地震観測記録を整理するに際して、各建物について、以下の項目に沿った整理を行った。

a) 建物概要

建物の所在地、構造、規模、免震部材などの建物情報を開示可能な範囲で示した。

b) 累積変位や固有周期等

最大加速度、免震層最大変位、免震層累積変位ならびに建物の固有周期と減衰定数を求めた。免震層累積変位は、地震の全継続時間ならびに主要動継続時間における値を算定した。ここでは、主要動継続時間を地震による総エネルギー入力の5%~95%に相当する時間で定義した。固有周期と減衰定数はARX法などを用いて同定した。

c) 観測記録やその他の情報

加速度、免震層変位、免震層累積変位の時刻歴波形、免震層の変位オービット、建物基礎に

おける擬似速度応答スペクトル他を示した。

次項以降に、各建物についての観測結果を示す。

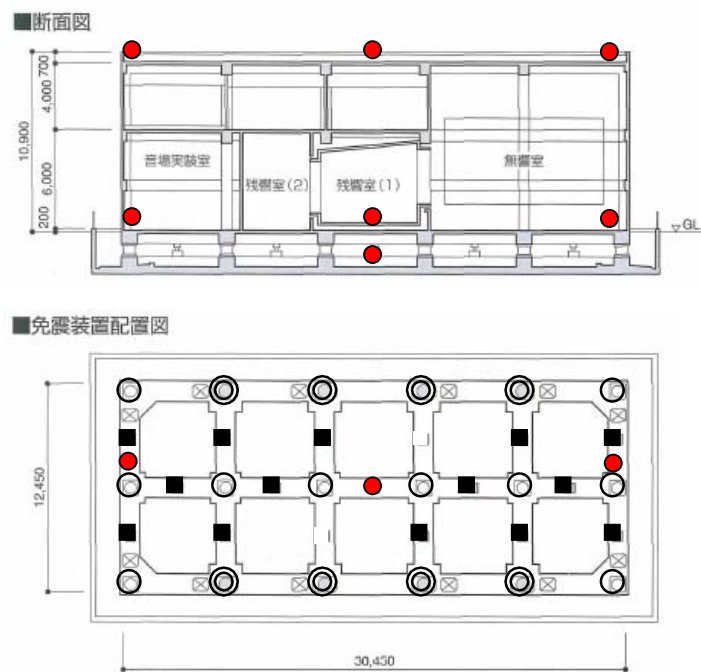
3.2 本震・余震による免震層の累積変位等の整理

1) A 建物

a) 建物概要

対象とした建物の概要を以下に示す。また、建物の平面図、断面図および加速度計の設置位置を図 3.2-1 に示す。

- ・所在地：東京都調布市
- ・竣工年：1986 年
- ・建物用途：研究施設
- ・構造種別：鉄筋コンクリート造
- ・基礎形式：杭基礎
- ・建物規模：地上 2 階、高さ 10.2m
- ・免震部材：天然ゴム系積層ゴム $\phi 1000 \times 8$ 、 $\phi 800 \times 10$ 、鋼棒ダンパー $\times 14$ 、オイルバッファ $\times 12$
- ・固有周期：2.0 秒（積層ゴムのみ）、0.83 秒（鋼棒ダンパー弾性時）



(○積層ゴム $\phi 1000$ 、○：積層ゴム $\phi 800$ 、■：鋼棒ダンパー、●：加速度計)

図 3.2-1 建物平面図、断面図および加速度計設置位置

b) 累積変位や固有周期等

本検討では、上記建物の基礎での入力加速度が 10cm/s^2 以上の余震を選定した。検討対象の余震について、地震発生日時、震央および規模（マグニチュード M ）を表 3.2-1 に示す。参考のために 2011 年 3 月 11 日の本震についても示している。

表 3.2-2 に各地震における最大加速度と免震層最大変位を示す。対象とした地震が $M6\sim7$ 程度と比較的大きい規模を有するものの、震源から建設地までの距離が離れているため、基礎における入力の大きさは本震と比較して小さくなっている。建物基礎（BF）における加速度は $10\sim30\text{cm/s}^2$ 程度であり、免震層の水平変位も 1cm 以下であった。上部構造の加速度は、4/16 では基礎の加速度 $20\sim30\text{cm/s}^2$ に対して 50% 程度に低減されているが、3/15、3/19、4/7、4/11 では、基礎の加速度 $10\sim20\text{cm/s}^2$ 程度に対して概ね同程度あるいは増幅される傾向になっている。

表 3.2-3 に各地震における免震層累積変位を示す。また、図 3.2-2 に、本震と余震の免震層累積変位を比較して示す。各余震の主要動継続時間における免震層累積変位は、 $0.267\sim0.925\text{m}$ となっており、本震の 4.76m と比べて小さい。また、これらの値は、それぞれの地震の記録全時間の累積変位に対して $67\sim80\%$ 程度となっている。また、余震について、主要動継続時間における免震層累積変位の総和を求めると 2.57m であった。この値は、地震記録全時間の同総和 3.61m に対して 71% に、本震の主要動継続時間における免震層累積変位 4.76m に対して 54% になっている。

表 3.2-4 と図 3.2-3、図 3.2-4 に各地震における建物の固有周期と減衰定数をそれぞれ示す。余震における建物の固有周期は長辺方向が $0.90\sim0.92$ 秒、短辺方向が $0.79\sim0.87$ 秒となっている。両方向ともに本震時の固有周期（ 1.03 秒および 1.05 秒）よりもやや短くなっているが、余震による固有周期の変化は小さい。減衰定数は長辺方向が $0.085\sim0.120$ 、短辺方向が $0.144\sim0.192$ であり、地震による値のばらつきが認められる。また、短辺方向の減衰定数が大きくなっている。

表 3.2-1 対象とした地震

地震発生日時	震源	規模
2011/3/11 14:46 (本震)	三陸沖	M9.0
2011/3/15 22:31	静岡県東部	M6.4
2011/3/19 18:56	茨城県北部	M6.1
2011/4/7 23:32	宮城県沖	M7.2
2011/4/11 17:16	福島県浜通り	M7.0
2011/4/16 11:19	茨城県南部	M5.9

表 3.2-2 最大加速度と免震層最大変位

地震 発生日	最大加速度 (cm/s ²)						免震層最大変位 (cm)	
	長辺方向			短辺方向			長辺方向	短辺方向
	BF	1F	RF	BF	1F	RF		
2011/3/11 (本震)	108.8	121.1	124.2	143.4	112.8	124.9	3.99	3.61
2011/3/15	12.0	19.3	19.8	19.6	17.9	43.4	0.43	0.43
2011/3/19	7.22	8.05	8.94	10.5	7.97	11.2	0.15	0.16
2011/4/7	12.5	14.5	15.0	15.1	23.7	28.8	0.31	0.92
2011/4/11	21.1	20.0	20.6	17.4	15.5	16.9	0.46	0.32
2011/4/16	22.3	12.36	14.2	29.9	12.3	15.5	0.20	0.22

表 3.2-3 免震層の累積変位

地震発生日	地震記録全時間 (m)			主要動継続時間 (m)			
	長辺	短辺	2方向	継続時間(s)	長辺	短辺	2方向*
2011/3/11 (本震)	4.98	4.35	7.37	70~160	3.27	2.73	4.76 (0.65)
2011/3/15	0.501	0.367	0.682	30~80	0.330	0.259	0.459 (0.67)
2011/3/19	0.257	0.173	0.341	30~100	0.200	0.139	0.267 (0.78)
2011/4/7	0.559	1.03	1.28	50~150	0.437	0.725	0.925 (0.72)
2011/4/11	0.578	0.432	0.800	40~120	0.422	0.309	0.577 (0.72)
2011/4/16	0.316	0.228	0.431	30~110	0.253	0.183	0.346 (0.80)
総累積変位	余震		3.61		余震		2.57 (0.71)
	本震+余震		10.98		本震+余震		7.33 (0.67)
	余震/本震		0.49		余震/本震		0.54

* () 内は地震記録全時間の値に対する割合

表 3.2-4 建物の固有周期と減衰定数

地震発生日	固有周期 (s)		減衰定数	
	長辺方向	短辺方向	長辺方向	短辺方向
2011/3/11 (本震)	1.03	1.05	0.167	0.185
2011/3/15	0.922	0.867	0.120	0.183
2011/3/19	0.905	0.788	0.085	0.157
2011/4/7	0.916	0.818	0.097	0.177
2011/4/11	0.919	0.839	0.107	0.192
2011/4/16	0.922	0.803	0.090	0.144

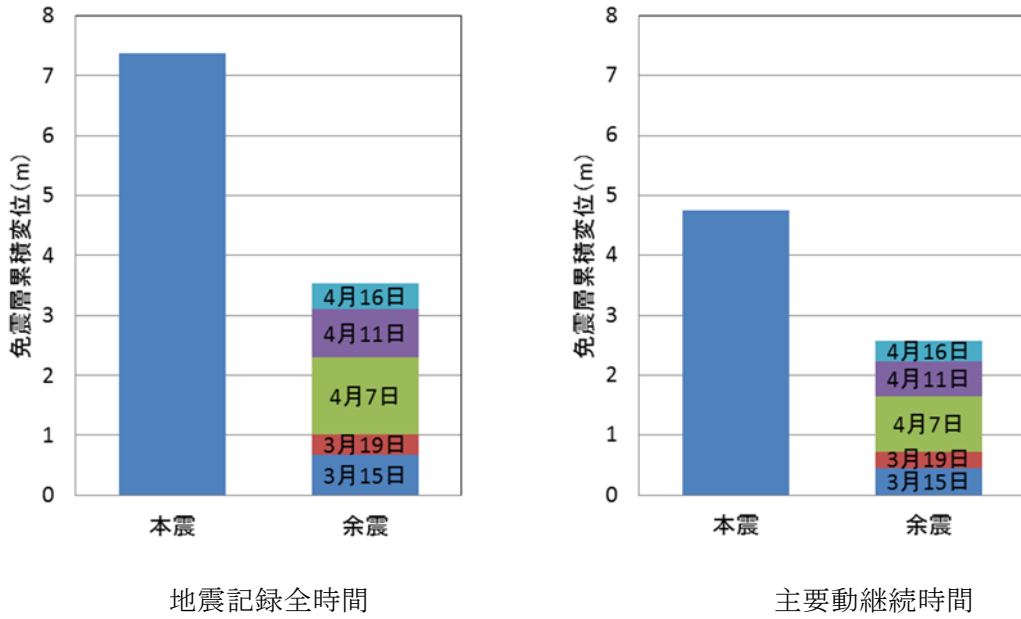


図 3.2-2 免震層累積変位の比較

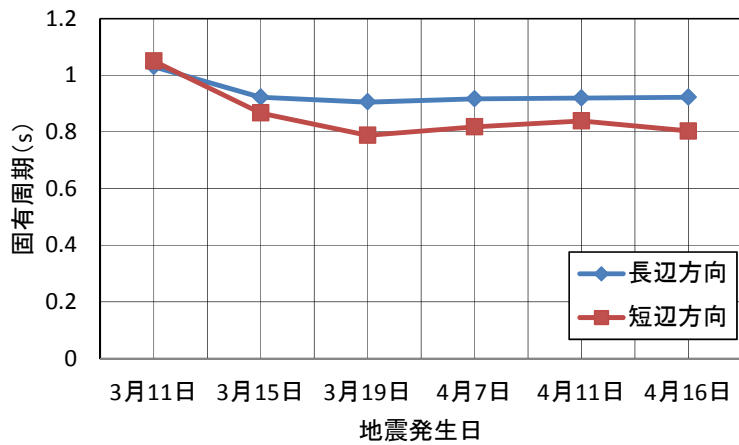


図 3.2-3 各地震における建物の固有周期

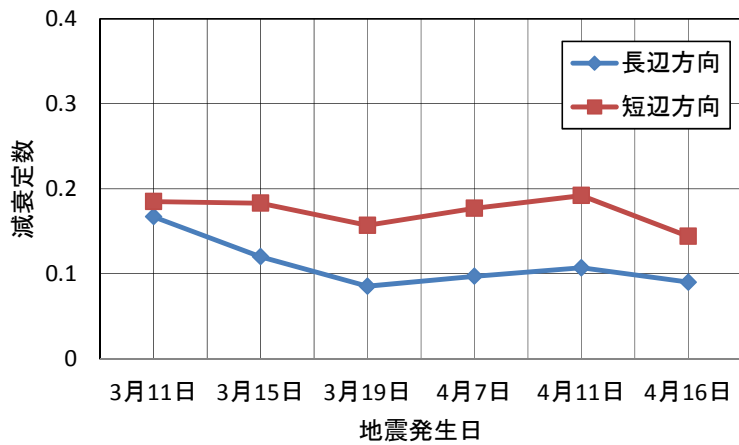
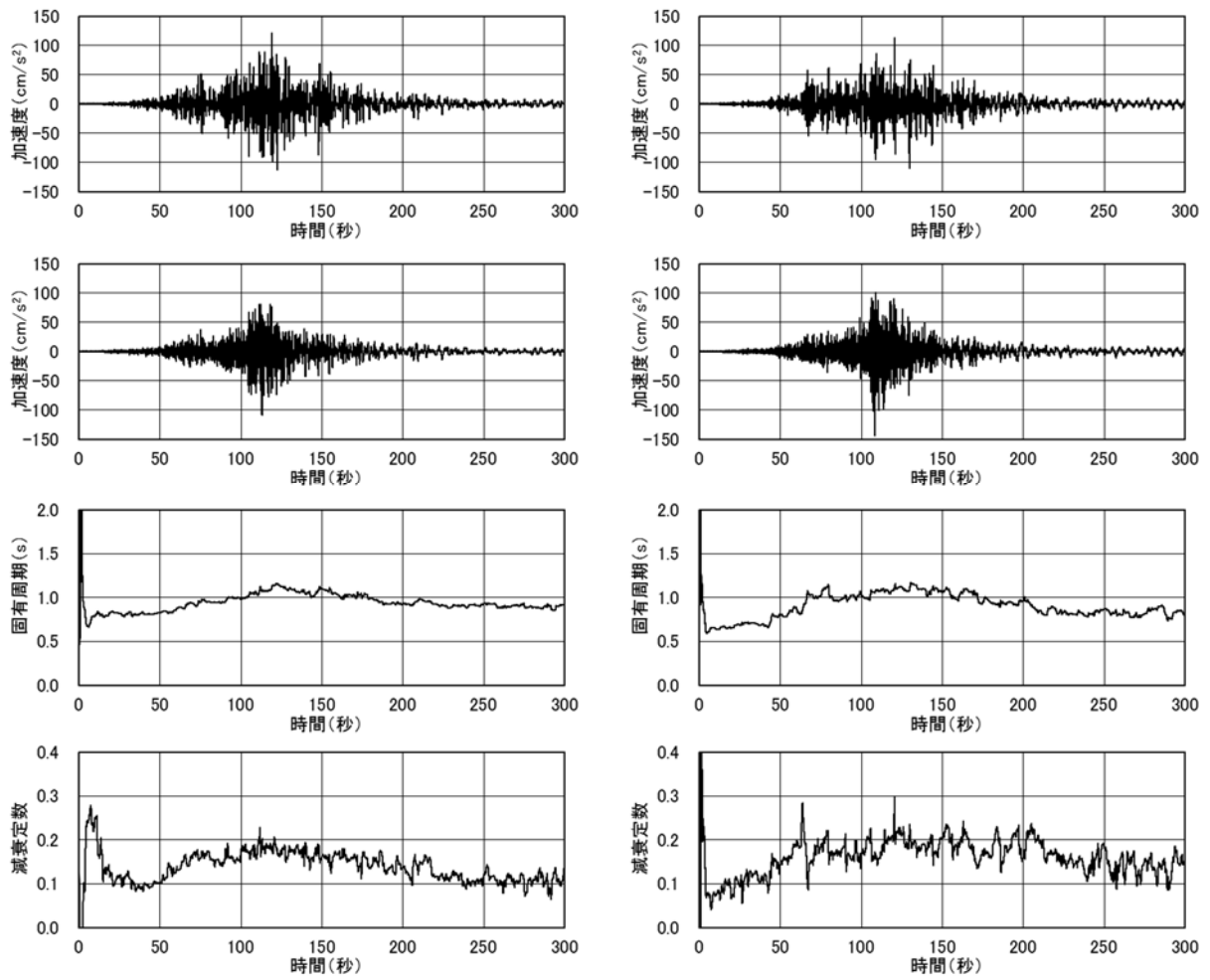


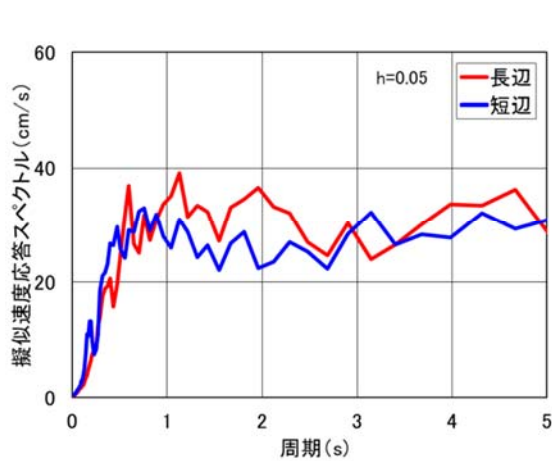
図 3.2-4 各地震における建物の減衰定数

c) 観測記録のその他の情報

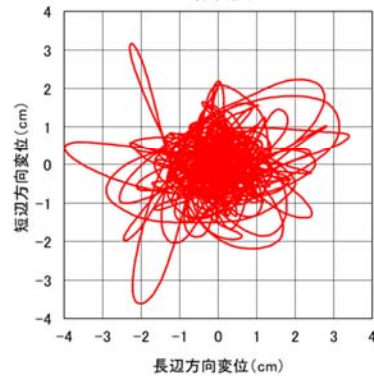
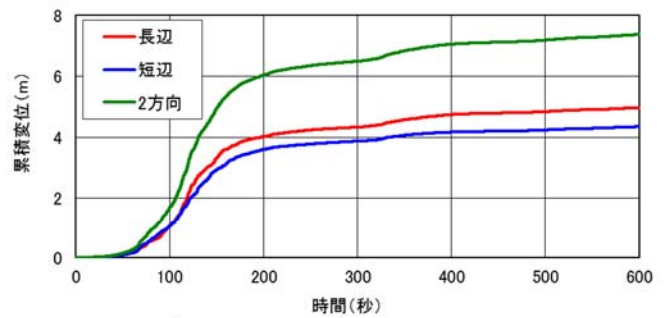
図 3.2-5～図 3.2-10 に、各地震について、加速度、固有周期、減衰定数および免震層累積変位の時刻歴波形、免震層の変位オービット、ならびに建物基礎における擬似速度応答スペクトルを示す。時刻歴波形によると、固有周期は地震の継続時間においてほとんど変化しないが、減衰定数は、基礎の加速度の増加に伴い大きくなり、加速度の最大値付近で最大となり、その後加速度の減少に伴い小さくなる傾向が認められる。



時刻歴波形



擬似速度応答スペクトル (基礎)



免震層水平変位

図 3.2-5 2011/3/11 三陸沖 M9.0 (本震)

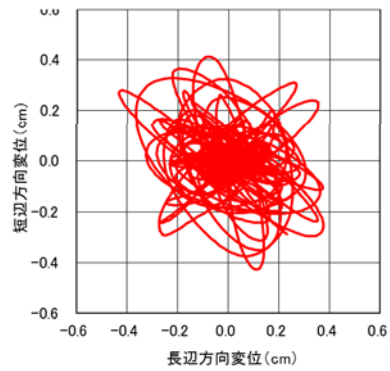
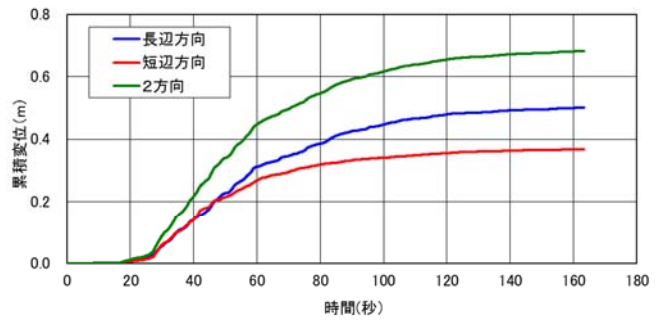
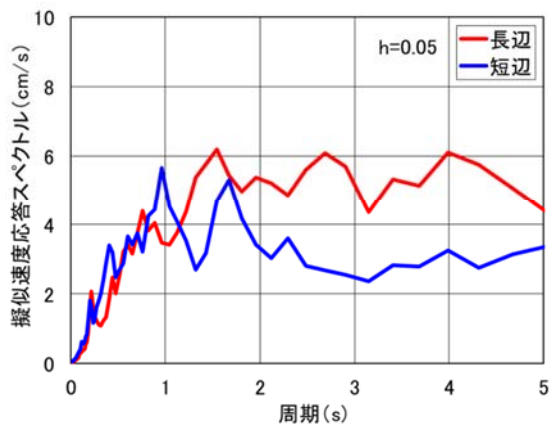
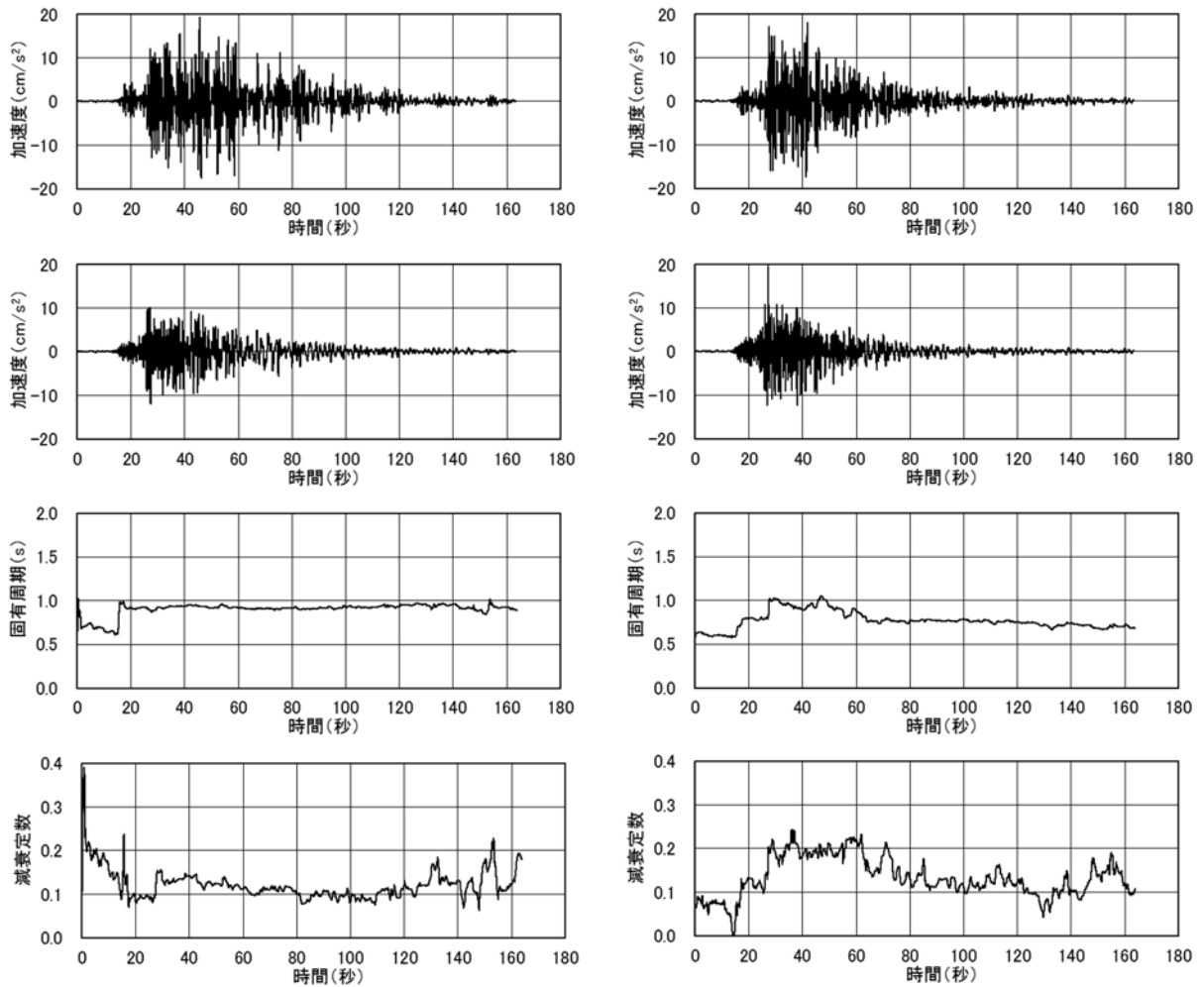
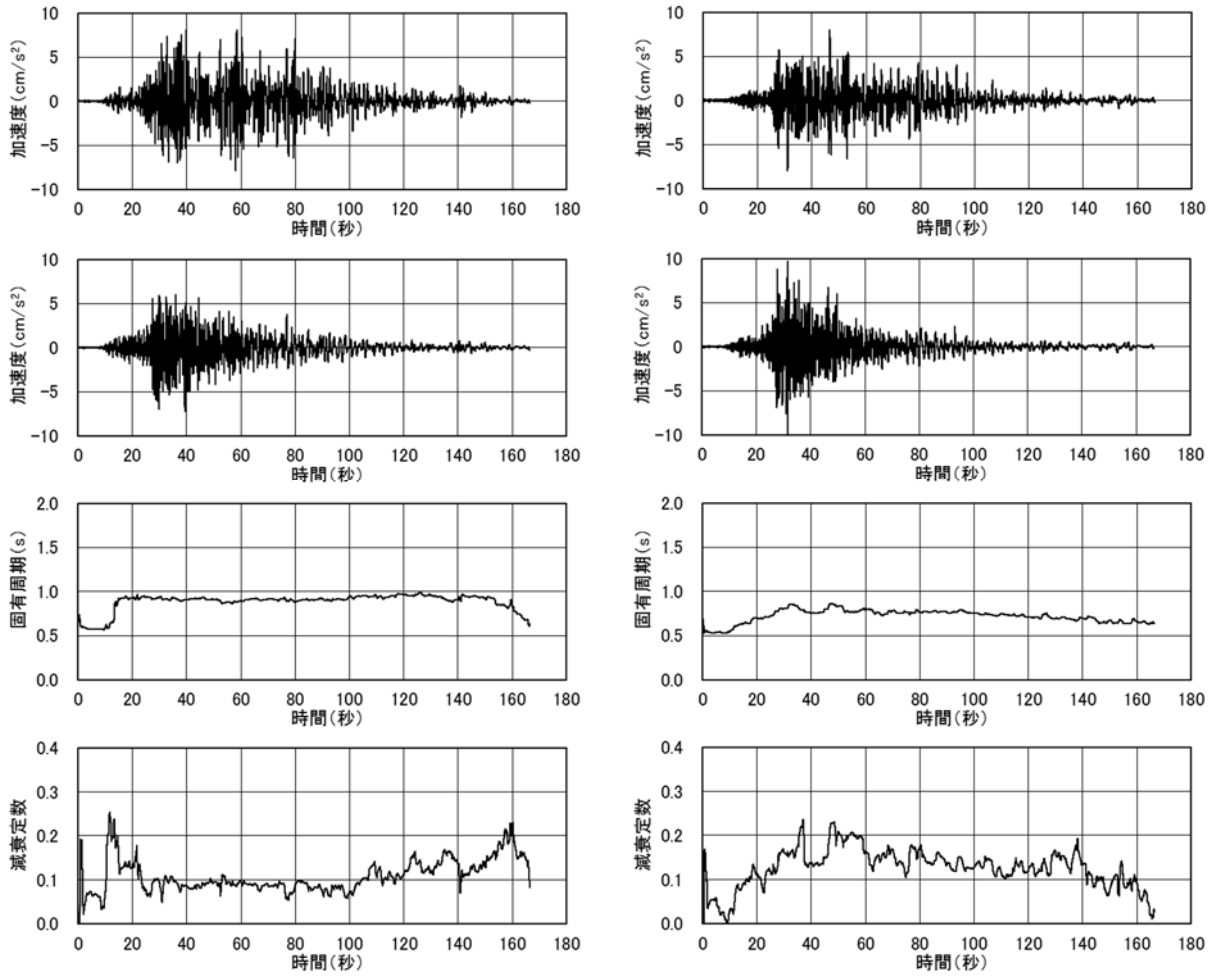
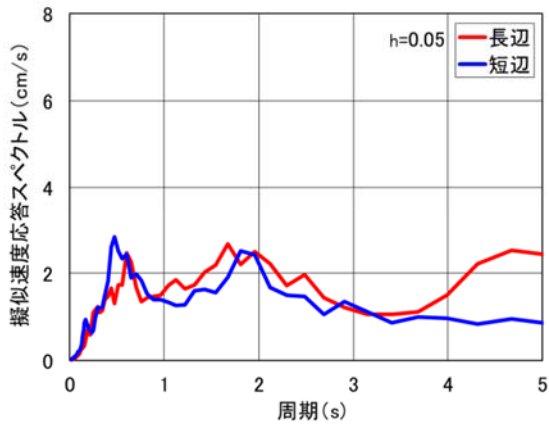


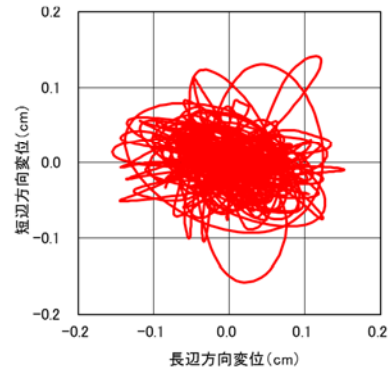
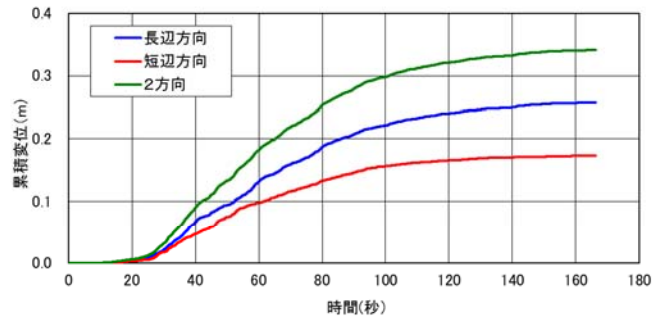
図 3.2-6 2011/3/15 静岡県東部 M6.4



時刻歴波形

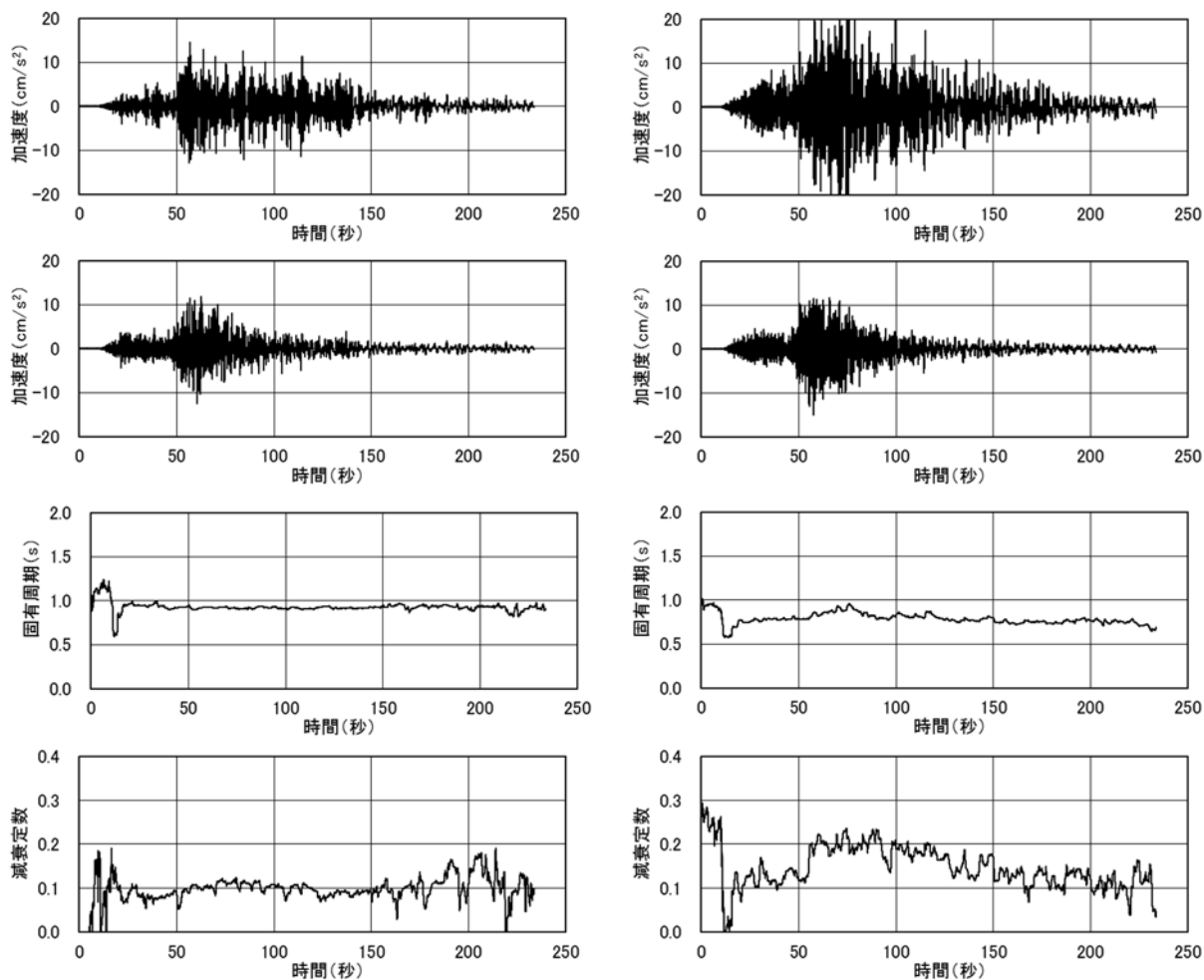


擬似速度応答スペクトル (基礎)

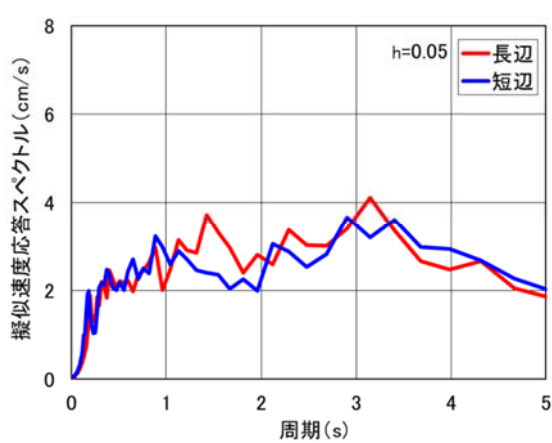


免震層水平変位

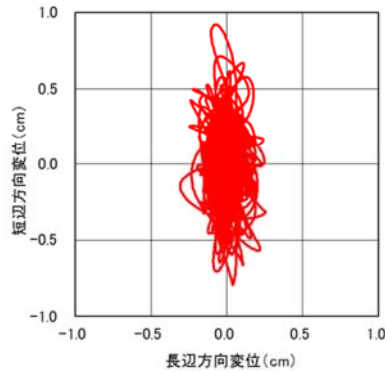
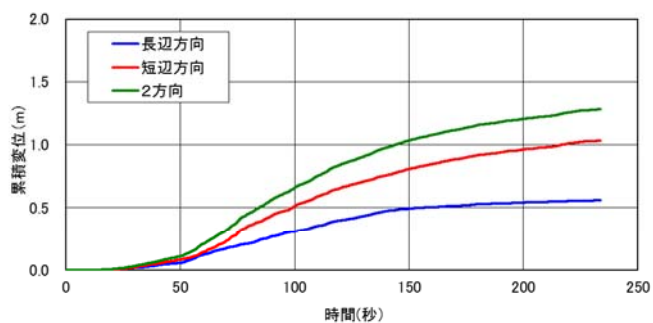
図 3.2-7 2011/3/19 茨城県北部 M6.1



時刻歴波形

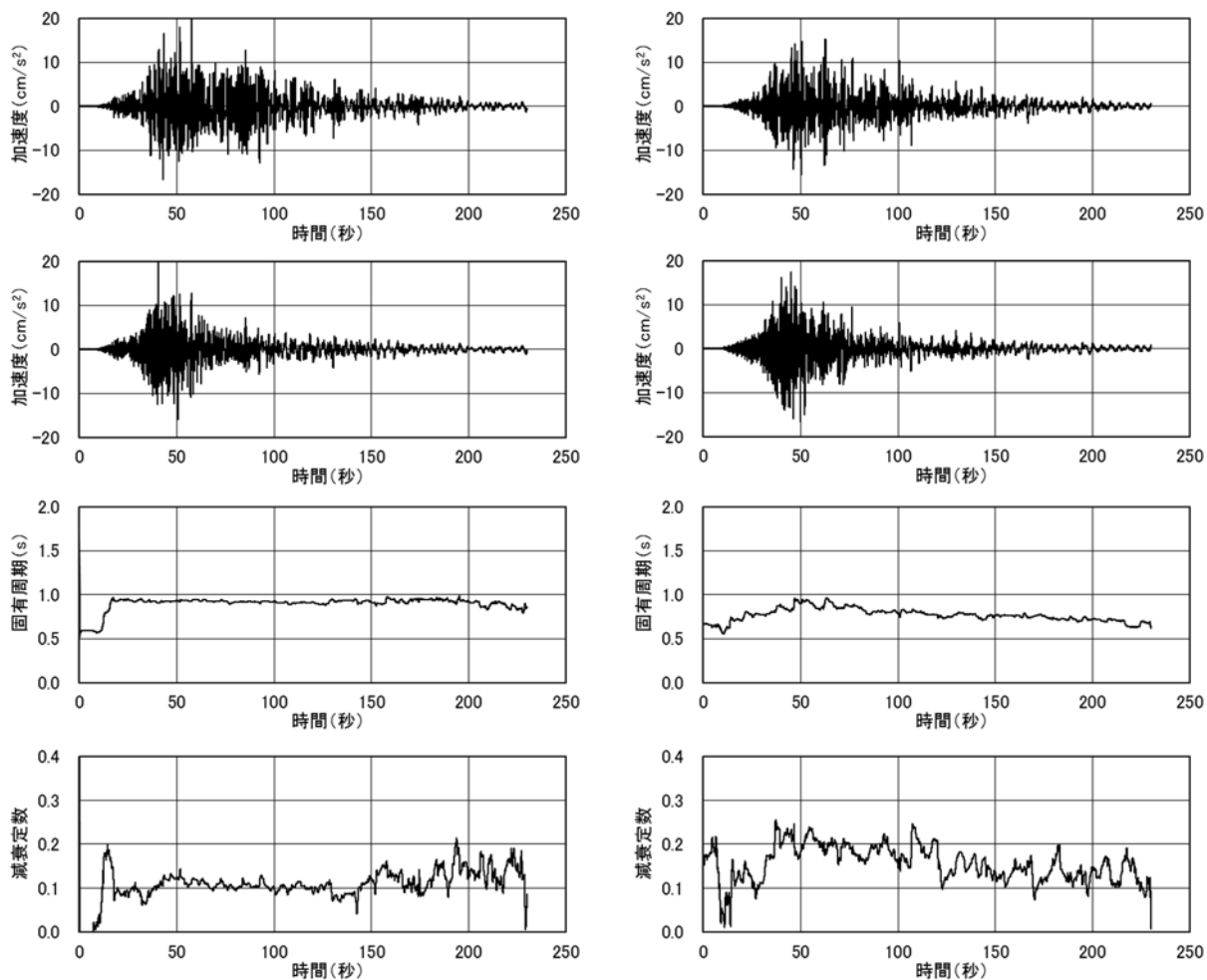


擬似速度応答スペクトル (基礎)

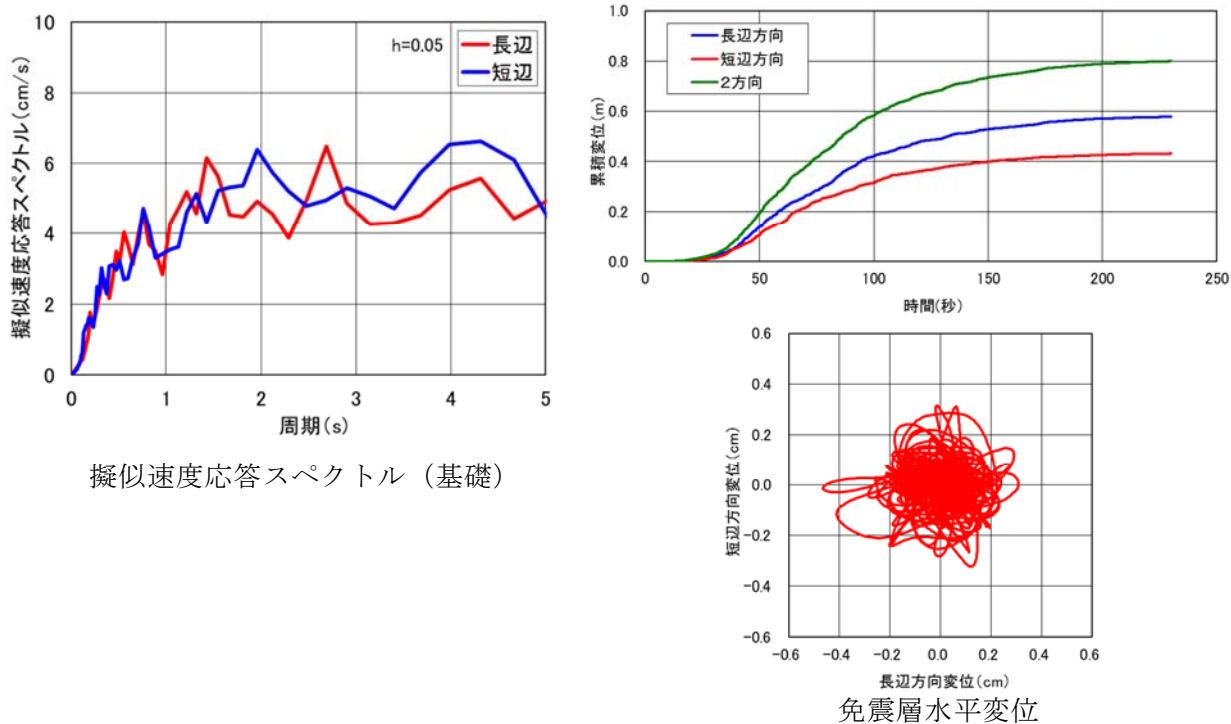


免震層水平変位

図 3.2-8 2011/4/7 宮城県沖 M7.2



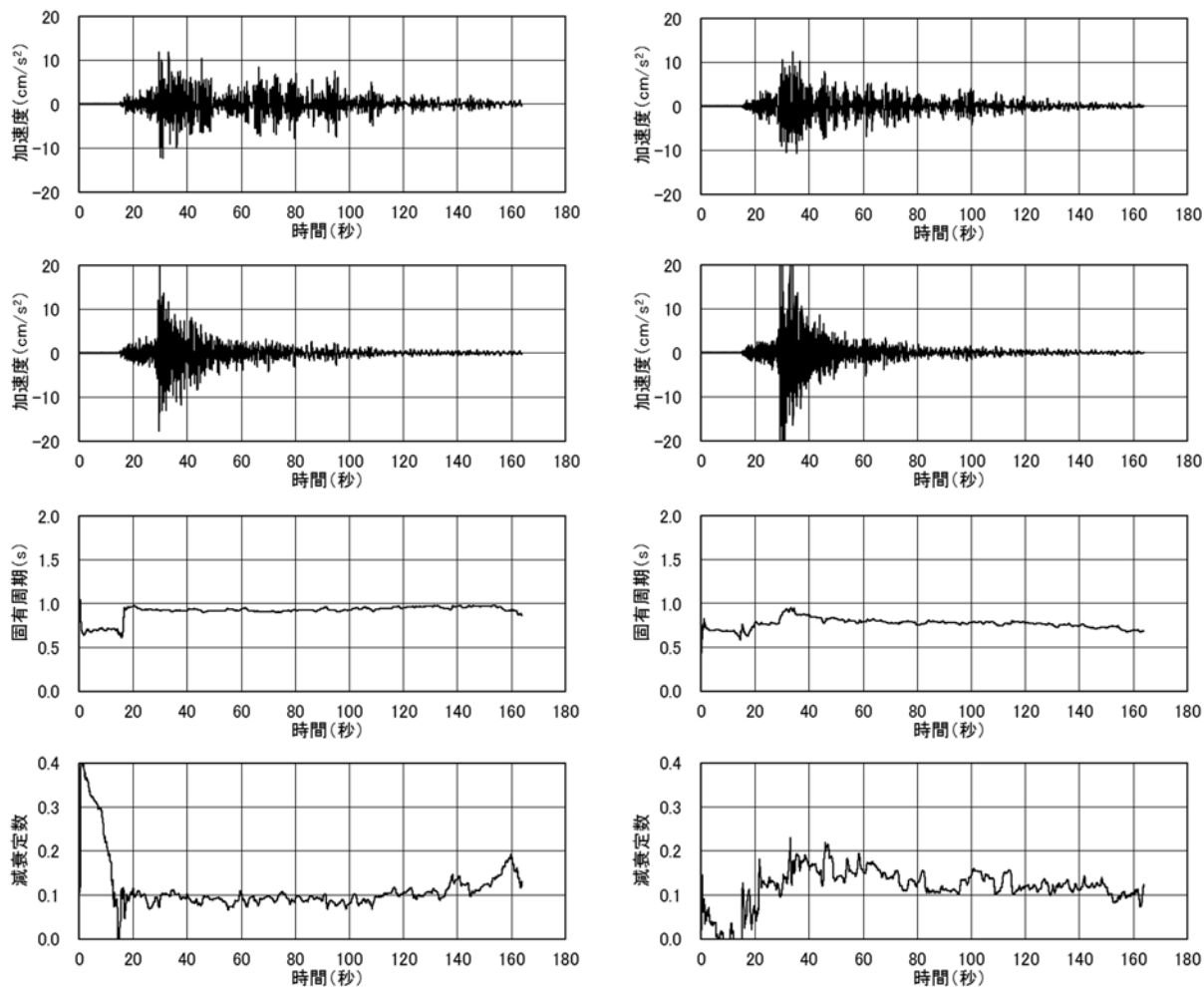
時刻歴波形



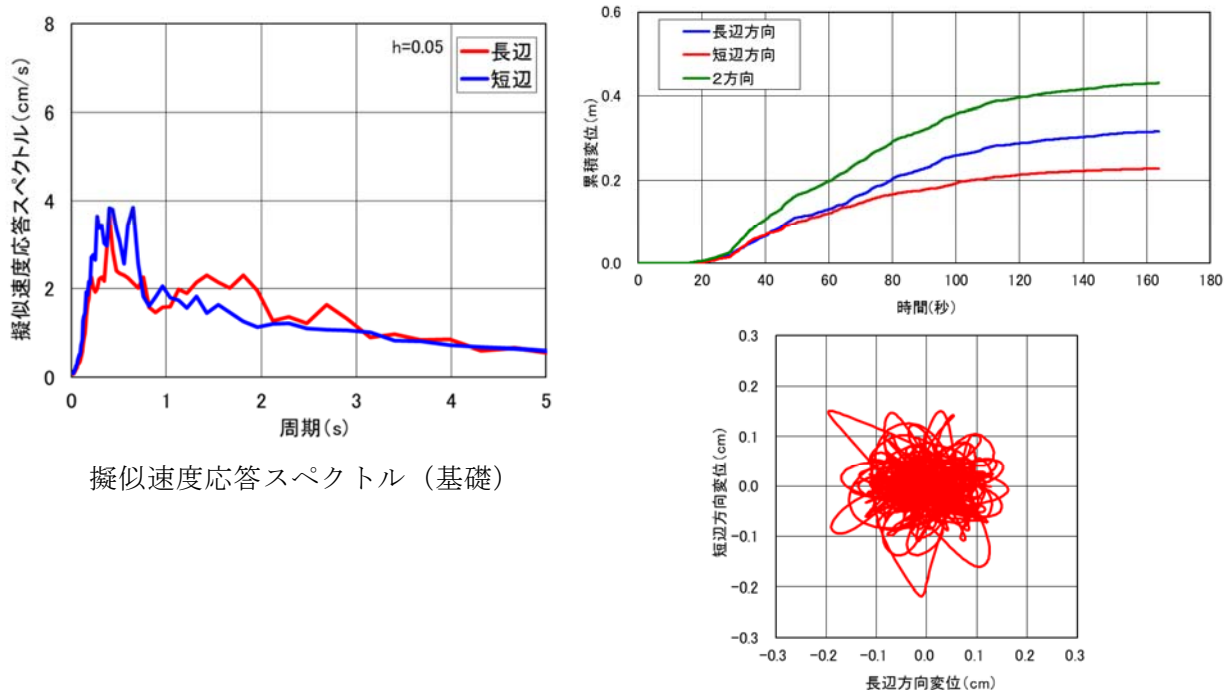
擬似速度応答スペクトル (基礎)

免震層水平変位

図 3.2-9 2011/4/11 福島県浜通り M7.0



時刻歴波形



擬似速度応答スペクトル (基礎)

免震層水平変位

図 3.2-10 2011/4/16 茨城県南部 M5.9

2) B 建物

a) 建物概要

- ・ 所在地：東京都江東区東陽3丁目
- ・ 竣工年：2008年
- ・ 構造種別：鉄筋コンクリート造 一部S造
- ・ 基礎形式：パイルド・ ラフト基礎
- ・ 建物規模：地上12階建、軒高37.75m
- ・ 免震部材：鉛プラグ入り積層ゴム ϕ 750 4個、 ϕ 900 6個、 ϕ 950 2個
 天然ゴム系積層ゴム ϕ 1400 2個、 ϕ 1300 2個
 回転摩擦ダンパー4基 1組 \times 1
 オイルダンパー-X・Y各2基 計4基
- ・ 固有周期：レベル1 10cm 3.52秒(X)、3.54秒(Y)
 レベル2 40cm 4.57秒(X)、4.58秒(Y)

建物の平面図、断面図および加速度計の設置位置を図 3.2-11 に示す。

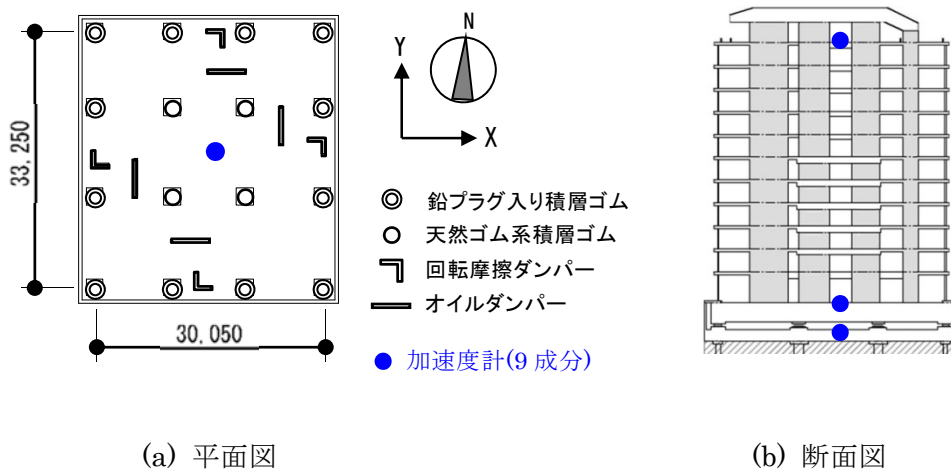


図 3.2-11 加速度計の設置位置

b) 累積変位や固有周期等

2011年3月9日の地震に加え、本震以降に観測された地震観測記録の内、最大変位が0.3cm以上の記録を検討対象の余震とした。対象とした地震を表3.2-5に示す。

表 3.2-5 対象とした地震

No.	観測日時		震源	M
1	2011/03/09	11:45	三陸沖 (311 前震)	7.3
2	2011/03/11	14:46	三陸沖 (311 本震)	9.0
3	2011/03/11	15:15	茨城県沖 (311 余震)	7.6
4	2011/03/15	22:31	静岡県東部	6.4
5	2011/04/07	23:32	宮城県沖	7.2
6	2011/04/11	17:16	福島県浜通り	7.0
7	2011/04/12	8:08	千葉県東方沖	6.4
8	2011/04/16	11:19	茨城県南部	5.9
9	2011/07/15	21:01	茨城県南部	5.4
10	2012/01/01	14:27	鳥島近海	7.0

表 3.2-6 に各地震による最大加速度、最大変位を示す。表 3.2-7 に累積変位、周期および減衰を示す。累積変位は、全時刻における値と主要動（エネルギー入力 5~95%区間）における値の 2 種類を求めた。周期および減衰は ARX 法を用い、上記の主要動における値を 1 点求めた。前処理として、7Hz で 3 次のローパスフィルターを適用し、20Hz にリサンプルを実施している。モデル次数は $n_a=20$ 、 $n_b=21$ 、 $n_k=0$ とした。

図 3.2-12 に本震の累積変位と余震の累積変位の合計の比較を示す。余震の累積変位の合計より、本震の累積変位の方が大きい。また、主要動で求めた累積変位は全時刻で求めた累積変位の 70~80%程度であった。

図 3.2-13 に各地震における周期と減衰を示す。周期は本震では 1.6 秒、余震では 1 秒前後である。減衰は本震では 55%となっている。これは、免震層の変形は 6.5cm 程度であることから鉛プラグ入り積層ゴムが降伏するが、それほど大きな変形ではなかったためと考えられる。余震では 10%前後となっている。これは免震層の変形が小さく、鉛プラグ入り積層ゴムが降伏していないためと考えられる。

表 3.2-6 観測結果一覧 1

No	計測震度	最大加速度 (cm/s ²)						最大変位 (cm)	
		X 方向			Y 方向			X 方向	Y 方向
		BF	1F	12F	BF	1F	12F		
1	2.1	4.7	7.7	10.2	3.5	6.7	8.1	0.22	0.16
2	4.8	100.2	52.7	61.9	91.1	43.6	58.5	6.54	6.46
3	4.0	29.6	28.3	33.5	35.1	31.8	38.3	3.15	3.07
4	2.5	8.7	7.8	10.8	7.1	9.6	12.8	0.19	0.33
5	2.6	8.1	11.3	15.6	8.9	12.1	16.2	0.29	0.39
6	3.0	12.5	16.3	20.3	13.0	15.9	20.2	0.61	0.62
7	2.9	10.9	12.0	18.1	13.6	16.3	20.5	0.34	0.58
8	2.3	9.5	9.2	13.0	8.2	10.8	14.9	0.28	0.23
9	2.6	17.5	10.8	13.9	8.4	8.9	11.5	0.35	0.14
10	2.5	10.4	11.0	15.5	8.6	9.8	12.8	0.16	0.35

表 3.2-7 観測結果一覧 2

No	全時刻		主要動					
	累積変位 (m)	総累積変位(m)	累積変位 (m)	総累積変位(m)	周期(秒)		減衰(%)	
					X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
1	0.28	—	0.21	—	0.95	1.00	14.1	13.5
2	8.08	8.08	6.29	6.29	1.60	1.63	55.0	51.3
3	2.39	10.48	1.95	8.24	1.25	1.29	32.6	25.5
4	0.29	10.77	0.23	8.47	1.03	0.99	10.1	11.6
5	0.61	11.38	0.43	8.90	1.03	1.00	16.6	13.2
6	0.72	12.10	0.51	9.40	1.04	1.00	17.7	18.8
7	0.55	12.65	0.38	9.79	1.02	1.06	9.2	7.6
8	0.35	13.00	0.26	10.05	0.98	0.95	13.3	11.1
9	0.20	13.21	0.15	10.20	0.94	0.93	6.6	10.8
10	0.37	13.57	0.28	10.48	0.93	0.94	7.2	9.2

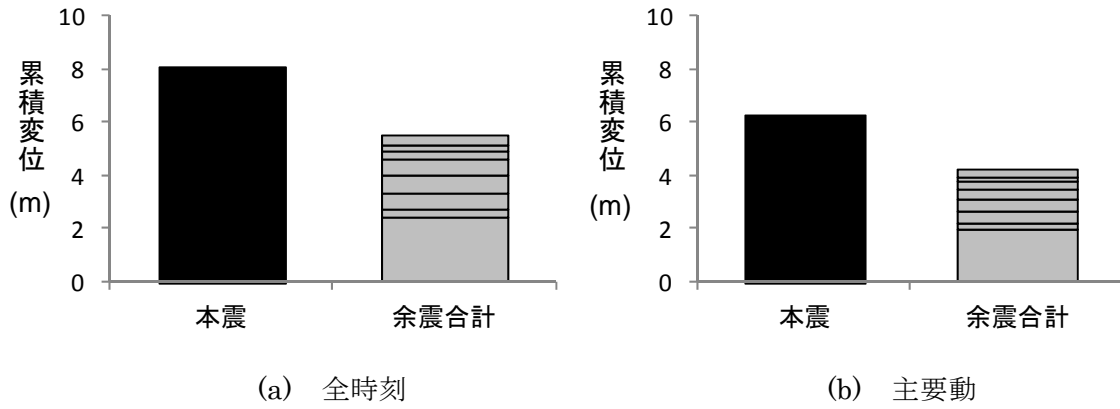


図 3.2-12 累積変位

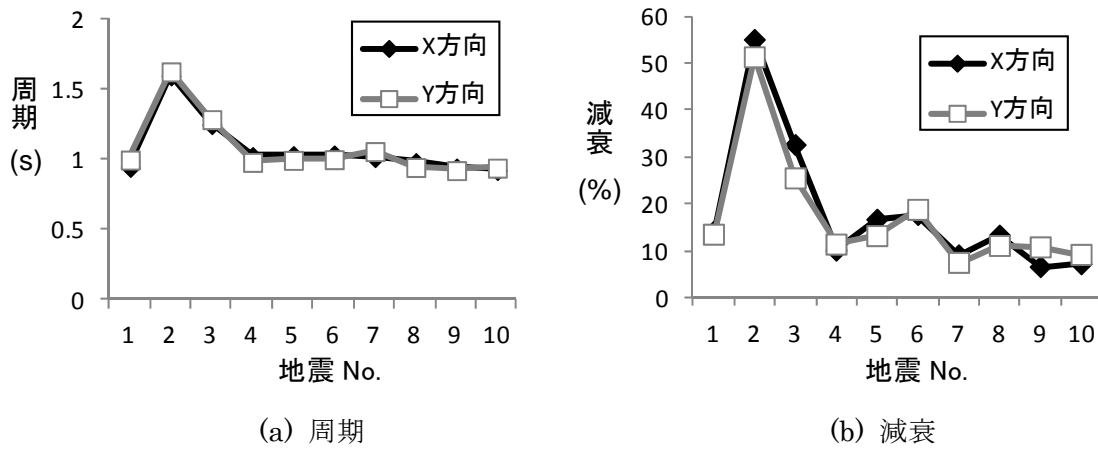


図 3.2-13 各地震における周期と減衰

c) 観測記録のその他の情報

表 3.2-6 に示した値を図 3.2-14～図 3.2-17 に示す。入力加速度が 30cm/s^2 程度以下の余震では応答倍率が 1 を超えるものも多い。全時刻で求めた累積変位は最大変位の約 120 倍、主要動の区間で求めた累積変位は最大変位の約 84 倍であった。

応答変位が大きい 3 つの地震について、加速度時刻歴、累積変位時刻歴、変位オービット、擬似速度応答スペクトル、変位時刻歴、ARX 法で算出した主要動区間における周期、減衰の時刻変化を図 3.2-18～図 3.2-23 に示す。周期、減衰の時刻変化は評価区間を 10 秒とし、0.5 秒毎にプロットしている。

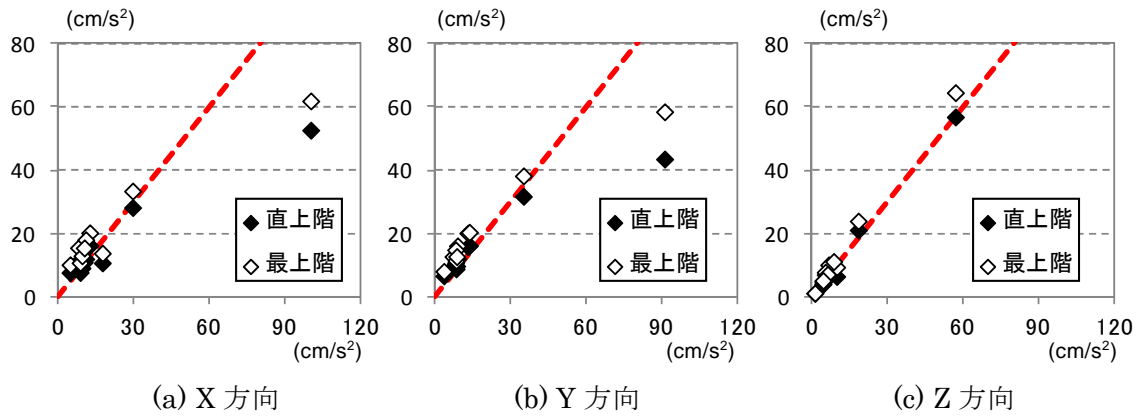


図 3.2-14 入力加速度と応答加速度

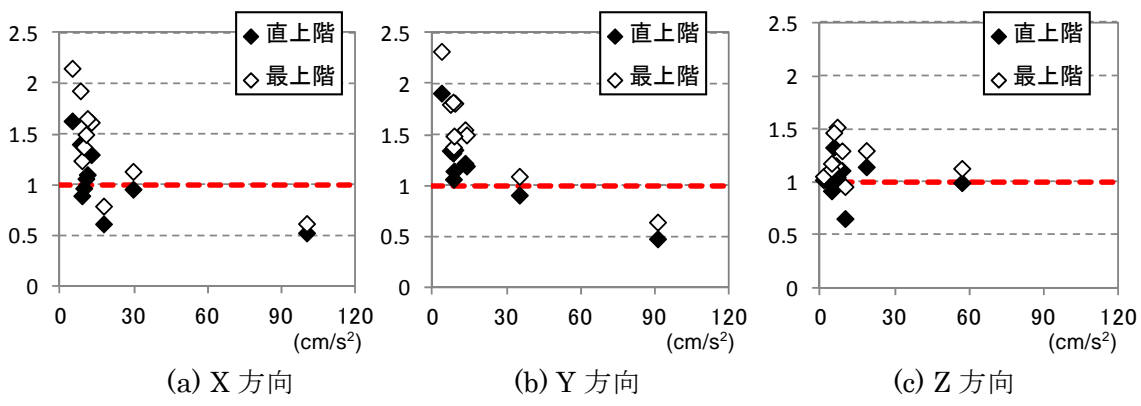


図 3.2-15 入力加速度と応答倍率

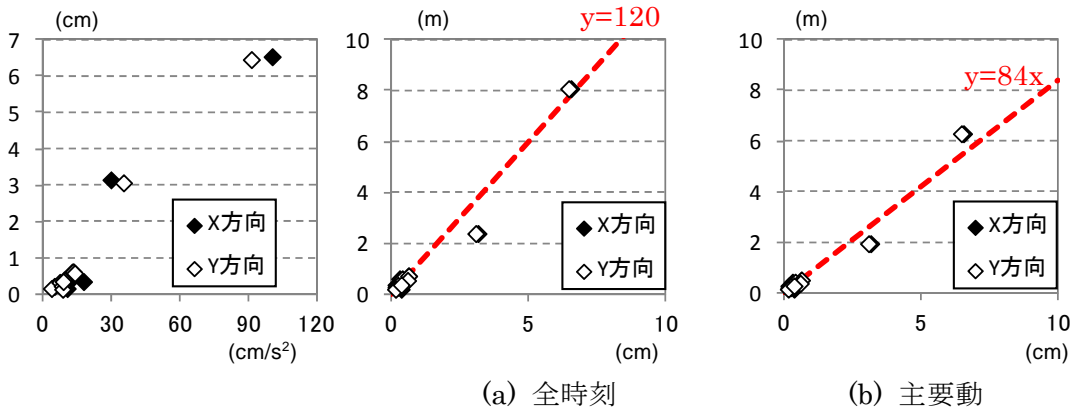
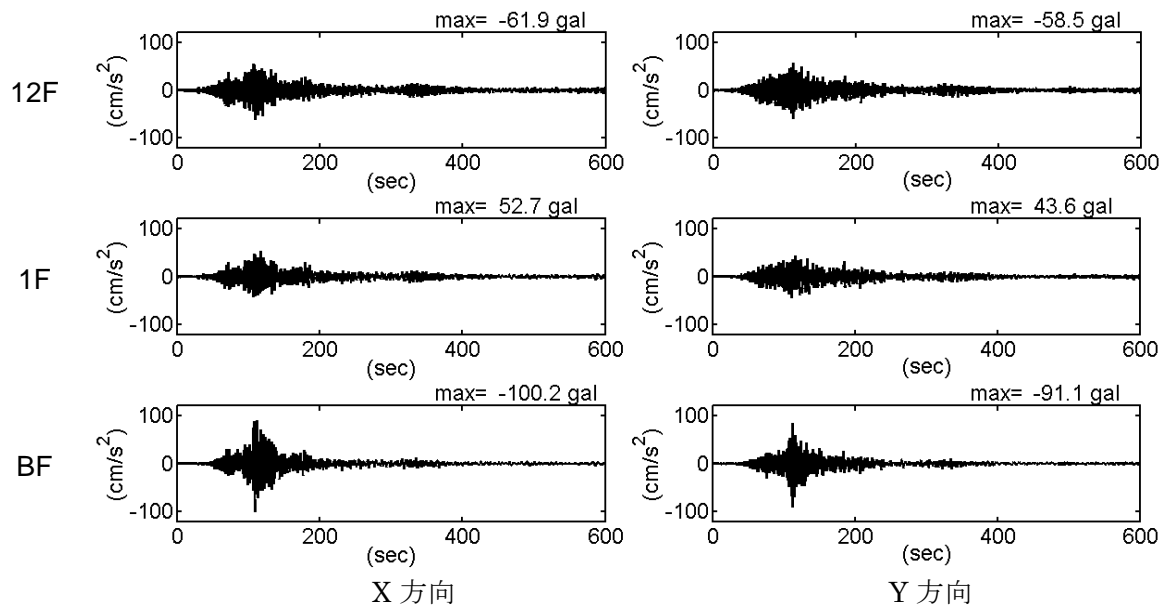
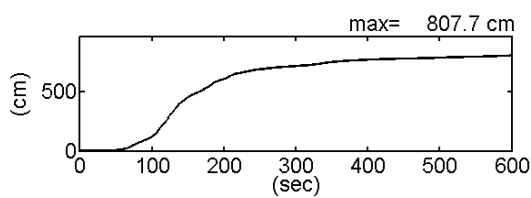


図 3.2-16 入力加速度と最大変位

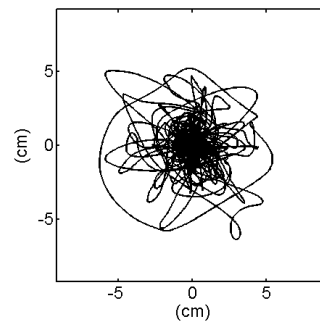
図 3.2-17 最大変位と累積変位



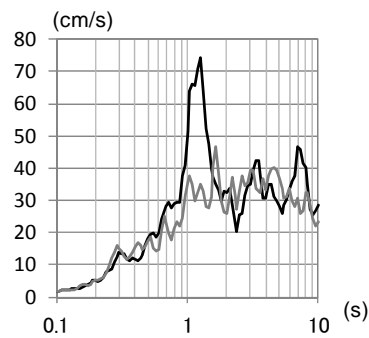
(a) 加速度時刻歴



(b) 累積変位

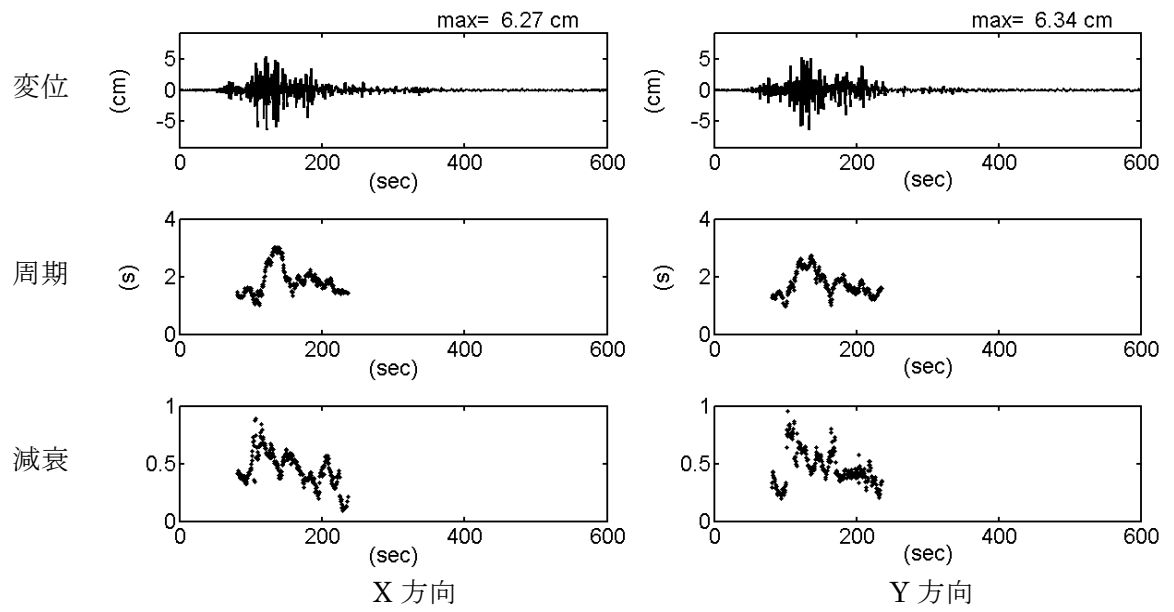


(c) 変位オービット



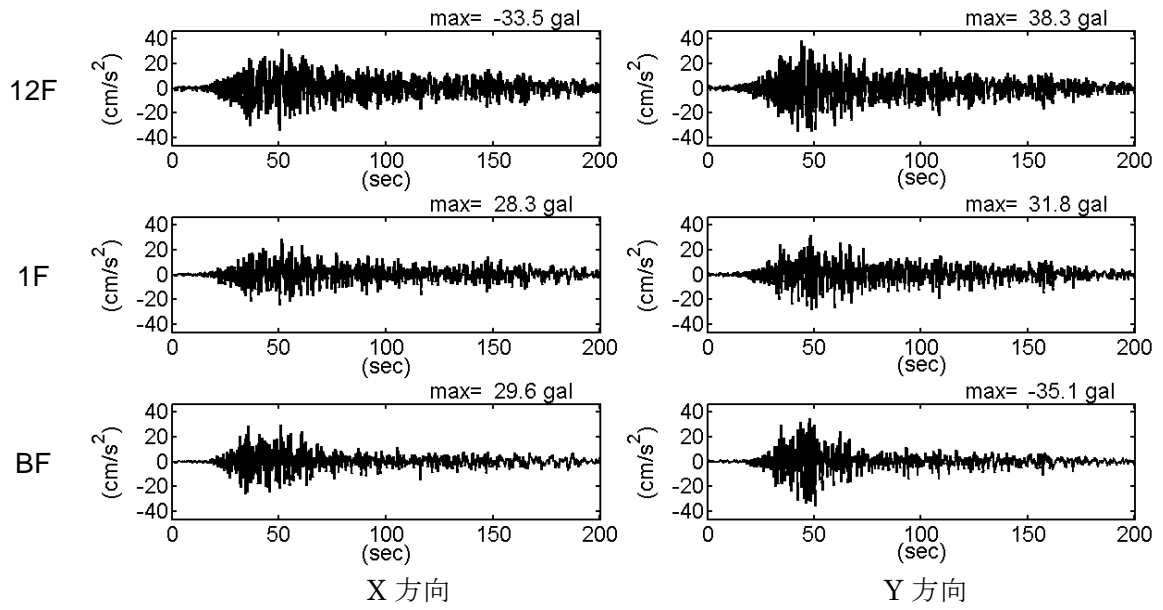
(d) 擬似速度応答スペクトル (黒 : X 方向、灰 : Y 方向)

図 3.2-18 No.2 2011/3/11 本震時 観測記録 1

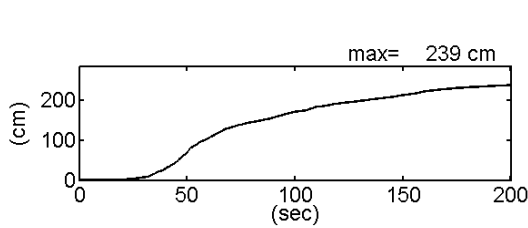


変位、周期、減衰の時刻変化

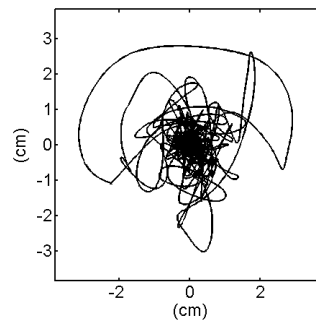
図 3.2-19 No.2 2011/3/11 本震時 観測記録 2



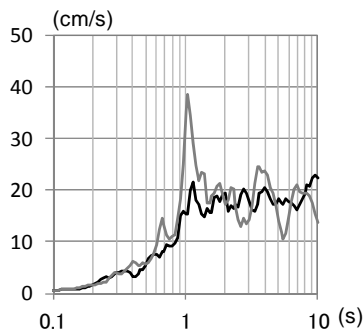
(a) 加速度時刻歴



(b) 累積変位

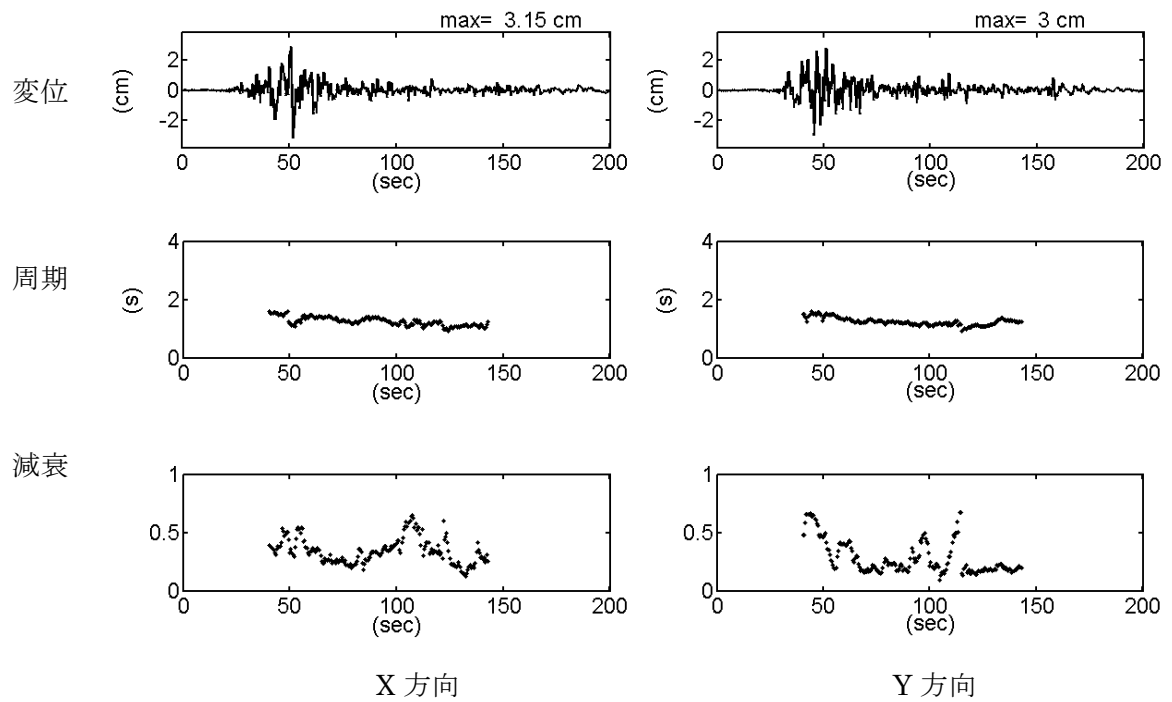


(c) 変位オービット



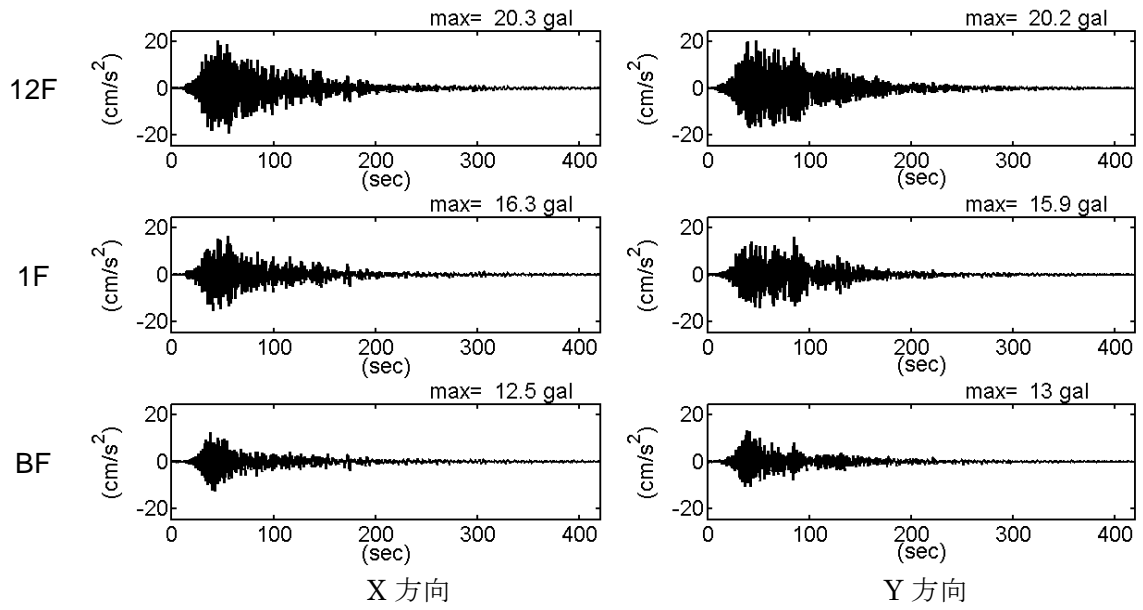
(d) 擬似速度応答スペクトル (黒 : X 方向、灰 : Y 方向)

図 3.2-20 No.3 2011/3/11 最大余震 観測記録 1

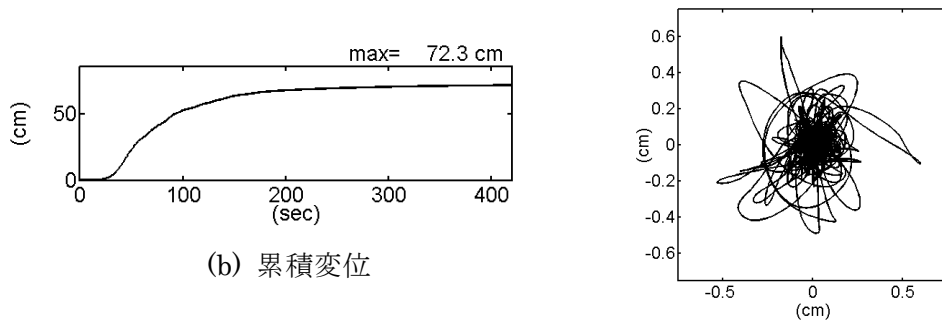


変位、周期、減衰の時刻変化

図 3.2-21 No.3 2011/3/11 最大余震 観測記録 2

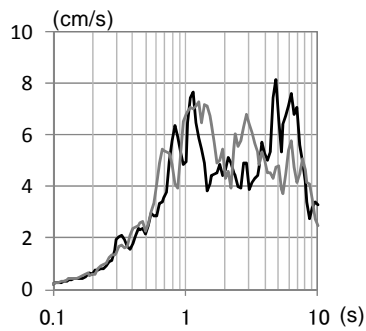


(a) 加速度時刻歴



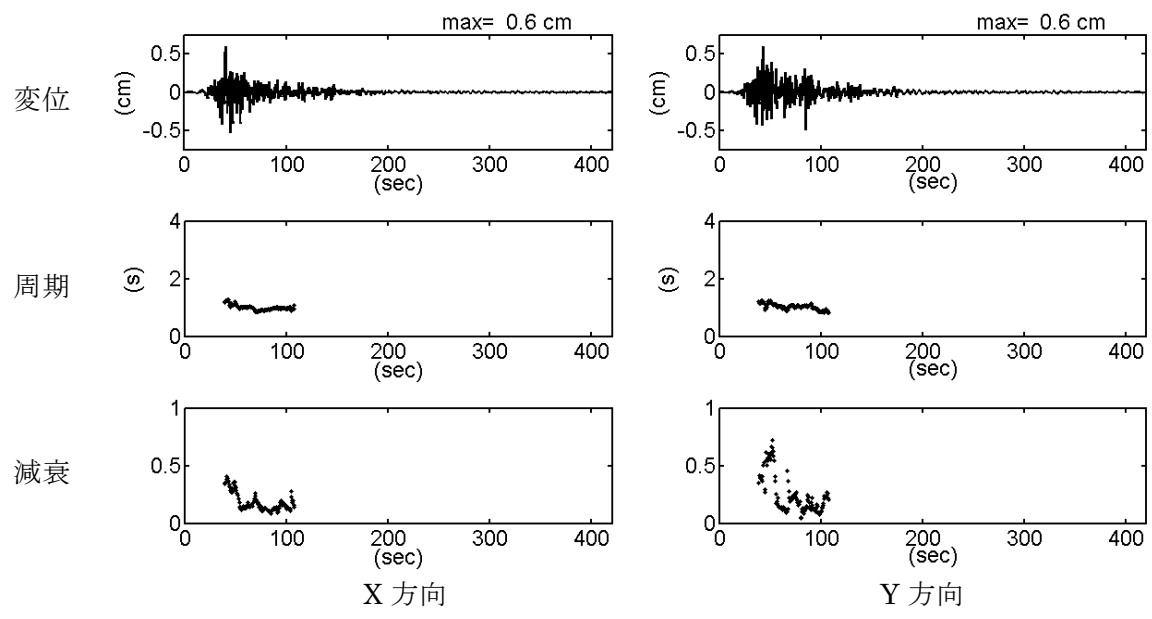
(b) 累積変位

(c) 変位オービット



(d) 擬似速度応答スペクトル (黒 : X 方向、灰 : Y 方向)

図 3.2-22 No.6 2011/4/11 本震の 1 ヶ月後 観測記録 1



変位、周期、減衰の時刻変化

図 3.2-23 No.6 2011/4/11 本震の1ヶ月後 観測記録2

3) C 建物

a) 建物概要

- ・ 所在地：千葉県船橋市
- ・ 竣工年：1987年
- ・ 構造種別：鉄筋コンクリート造
- ・ 基礎形式：場所打ち鉄筋コンクリート杭
- ・ 建物規模：地上3階、軒高10.9m
- ・ 免震部材：天然ゴム系積層ゴム $\phi 670$ 8個、 $\phi 790$ 6個
粘性体ダンパー抵抗板 $\phi 680$ 8個
- ・ 固有周期：2.1秒

建物の平面図、断面図および加速度計の設置位置を図 3.2-24 に示す。

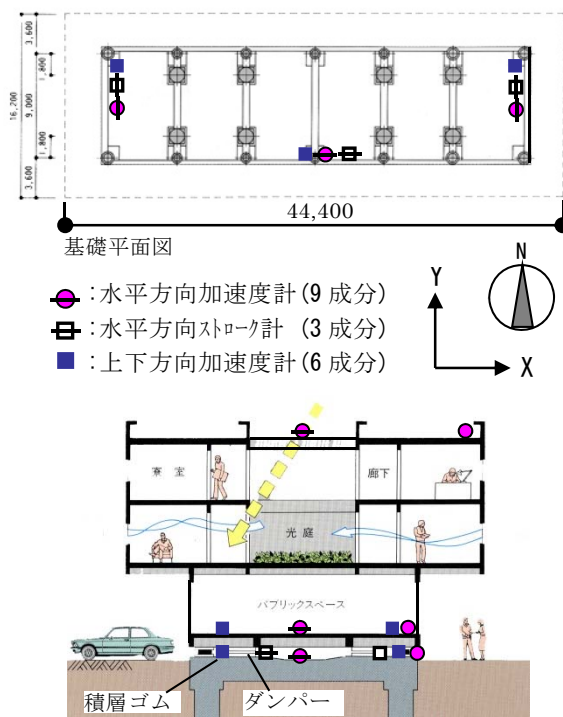


図 3.2-24 加速度計、変位計の設置位置

b) 累積変位や固有振動数等

本震以降に観測された地震観測記録の内、最大変位が 0.3cm 以上の記録を対象とした。地震観測記録を表 3.2-8 に示す。

表 3.2-8 対象とした地震

No.	観測日時		震源	M
1	2011/03/11	14:46	三陸沖 (311 本震)	9.0
2	2011/03/11	15:15	茨城県沖 (311 余震)	7.6
3	2011/03/16	12:52	千葉県東方沖	6.1
4	2011/04/07	23:32	宮城県沖	7.2
5	2011/04/11	17:16	福島県浜通り	7.0
6	2011/04/12	8:08	千葉県東方沖	6.4
7	2011/04/16	11:19	茨城県南部	5.9
8	2011/07/31	3:53	福島県沖	6.5
9	2012/01/01	14:27	鳥島近海	7.0
10	2012/03/14	21:05	千葉県東方沖	6.1
11	2012/05/29	1:36	千葉県北西部	5.2
12	2012/12/07	17:18	三陸沖	7.3

表 3.2-9 に各地震による最大加速度、最大変位を示す。表 3.2-10 に累積変位、周期および減衰を示す。累積変位は、全時刻における値と主要動（エネルギー入力 5～95% 区間）における値の 2 種類を求めた。周期および減衰は ARX 法を用い、上記の主要動における区間で 1 点求めた。前処理として、7Hz で 3 次のローパスフィルターを適用し、20Hz にリサンプルを実施している。モデル次数は $na=10$ 、 $nb=11$ 、 $nk=0$ とした。

図 3.2-25 に本震の累積変位と余震の累積変位の合計の比較を示す。余震の累積変位の合計より、本震の累積変位の方が大きい。また、主要動で求めた累積変位は全時刻で求めた累積変位の 70～85% 程度であった。

図 3.2-26 に各地震における周期と減衰を示す。周期は本震、No.2 では 1.7 秒、その他の余震の多くは 1.4 秒前後である。減衰は本震、No.2、No.7 では 13～14% である。その他の余震の多くは 20% 前後である。

表 3.2-9 観測結果一覧 1

No.	計測震度	最大加速度 (cm/s ²)						最大変位 (cm)	
		X 方向			Y 方向			X 方向	Y 方向
		BF	1F	RF	BF	1F	RF		
1	4.8	149.8	69.9	75.2	133.8	91.8	95.5	5.55	7.78
2	4.1	58.1	62.4	64.9	65.1	56.4	53.8	4.74	4.45
3	2.8	20.8	7.6	8.4	24.7	9.0	10.3	0.38	0.41
4	2.9	22.0	8.2	9.3	17.7	11.0	11.6	0.39	0.51
5	3.3	36.8	15.1	15.7	34.2	19.6	21.3	0.95	1.26
6	3.2	33.2	9.7	10.3	44.7	11.4	12.8	0.52	0.37
7	3.2	48.6	9.9	10.4	24.0	8.0	8.0	0.43	0.32
8	3.3	39.8	11.9	13.0	36.7	14.4	16.7	0.33	0.28
9	2.9	16.4	8.5	8.5	19.0	5.1	5.2	0.30	0.12
10	3.0	31.4	7.5	8.2	31.5	12.1	12.7	0.30	0.41
11	3.2	27.7	8.5	8.7	29.0	7.3	6.2	0.38	0.20
12	3.3	28.2	19.4	20.8	24.6	18.1	20.3	0.95	0.88

表 3.2-10 観測結果一覧 2

No.	全時刻		主要動					
	累積変位 (m)	総累積変位(m)	累積変位 (m)	総累積変位(m)	周期(秒)		減衰(%)	
					X 方向	Y 方向	X 方向	Y 方向
1	14.03	14.03	9.87	9.87	1.74	1.75	14.3	14.2
2	5.04	19.06	4.04	13.91	1.71	1.71	12.6	12.6
3	0.34	19.40	0.27	14.18	1.36	1.40	20.6	20.0
4	1.14	20.54	0.88	15.06	1.43	1.46	19.0	18.5
5	1.53	22.07	1.18	16.24	1.49	1.53	18.1	17.7
6	0.76	22.83	0.66	16.90	1.41	1.43	19.4	18.8
7	0.54	23.37	0.45	17.35	1.43	1.45	18.2	17.7
8	0.34	23.71	0.28	17.63	1.52	1.53	13.3	14.0
9	0.45	24.15	0.32	17.95	1.22	1.23	23.9	23.4
10	0.53	24.69	0.38	18.33	1.26	1.30	22.5	22.0
11	0.19	24.87	0.10	18.43	1.45	1.42	16.7	18.2
12	0.91	25.78	0.64	19.07	1.38	1.41	21.4	21.0

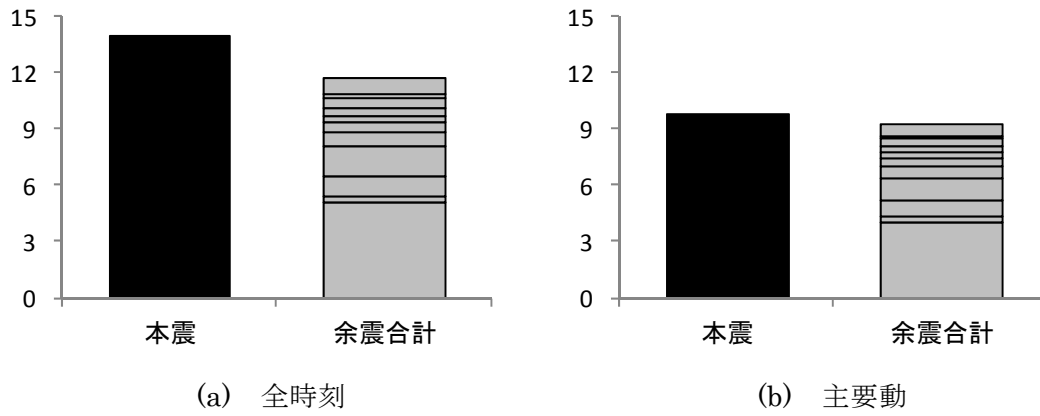


図 3.2-25 累積変位

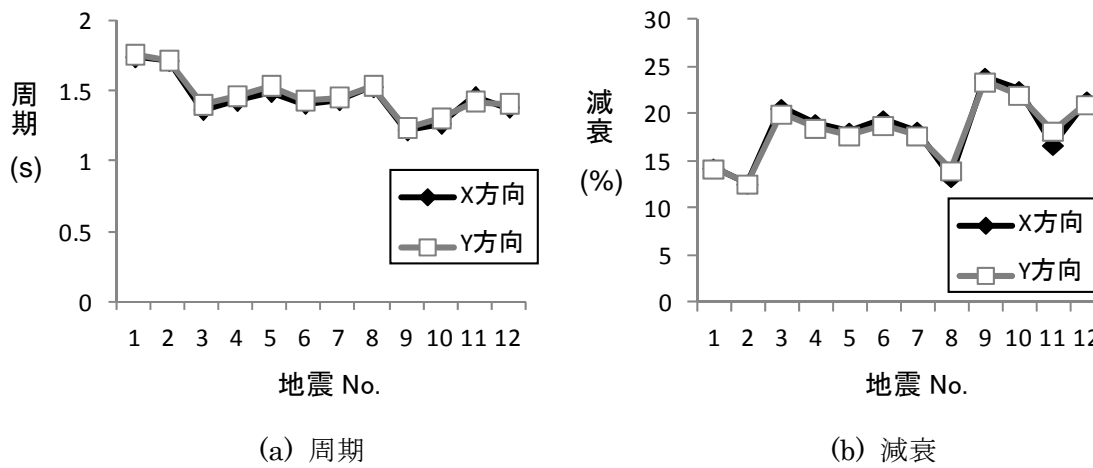


図 3.2-26 各地震における周期と減衰

c) 観測記録のその他の情報

表 3.2-9 に示した値を図 3.2-27～図 3.2-30 に示す。最大余震を除き、応答加速度が入力加速度より小さくなり、余震においても応答が低減されている。全時刻で求めた累積変位は最大変位の約 200 倍、主要動の区間で求めた累積変位は最大変位の約 140 倍であった。

応答変位が大きい 3 つの地震について、加速度時刻歴、累積変位時刻歴、変位オービット、擬似速度応答スペクトル、変位時刻歴、ARX 法で算出した主要動区間における周期、減衰の時刻変化を図 3.2-31～図 3.2-36 に示す。周期、減衰の時刻変化は評価区間を 10 秒とし、0.5 秒毎にプロットしている。

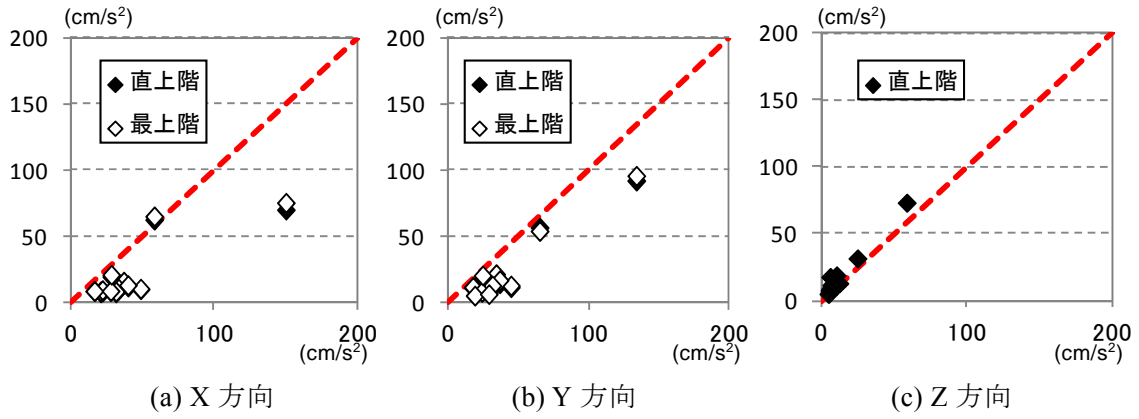


图 3.2-27 入力加速度と応答加速度

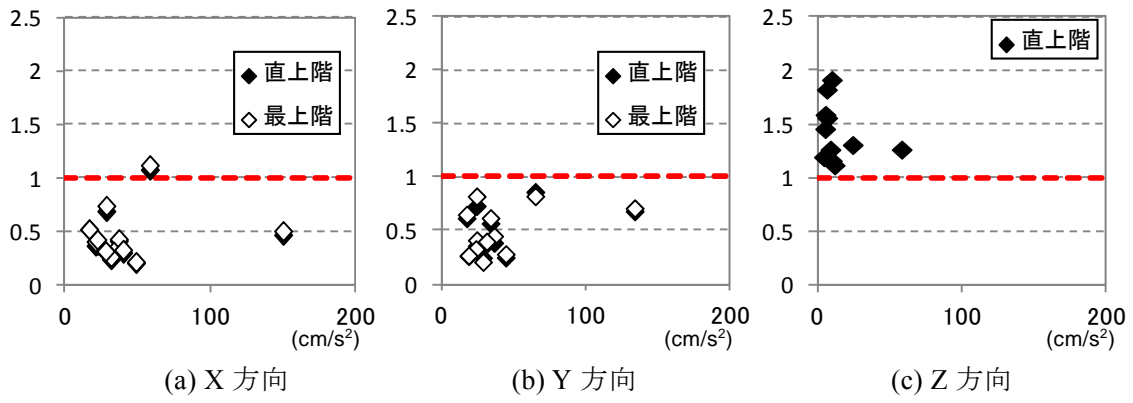


图 3.2-28 入力加速度と応答倍率

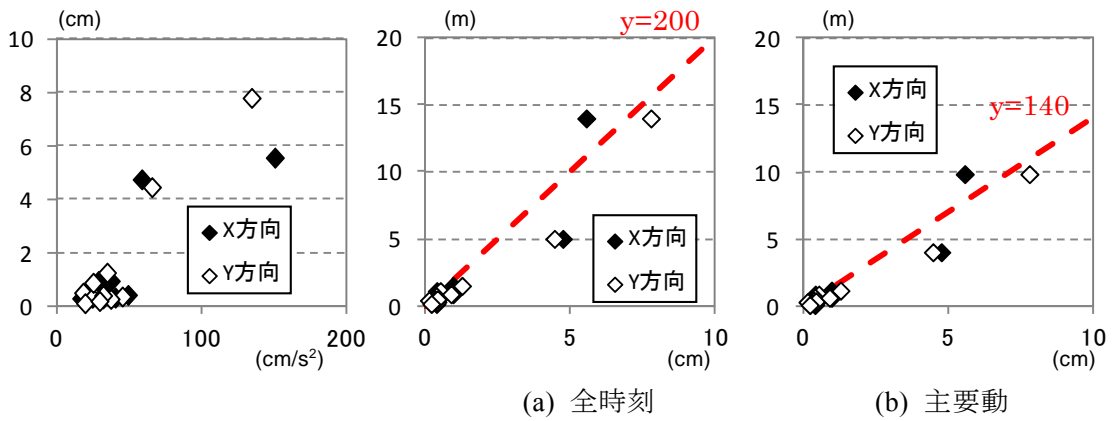
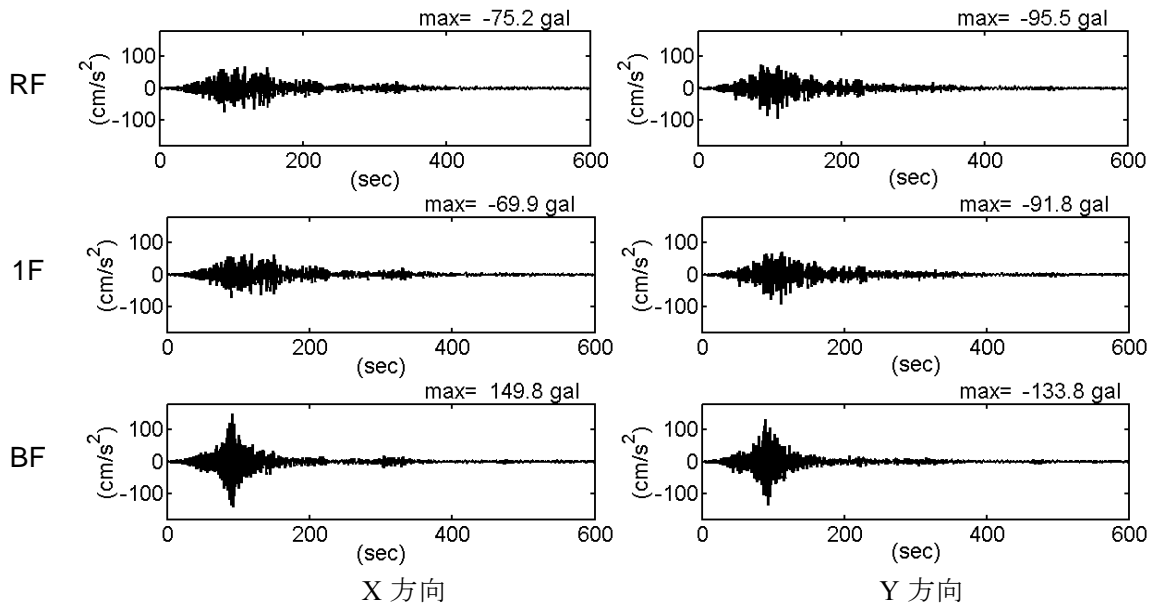
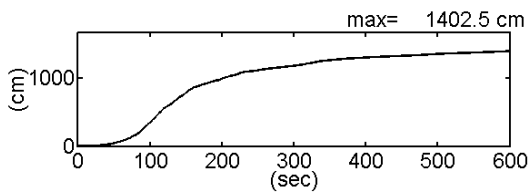


图 3.2-29 入力加速度と最大変位

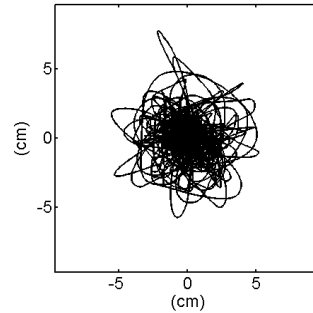
图 3.2-30 最大変位と累積変位



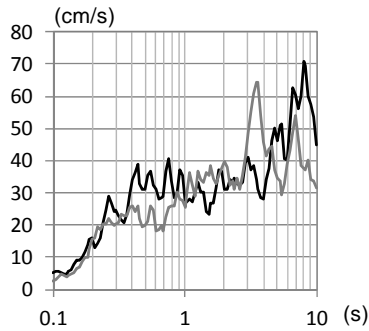
(a) 加速度時刻歴



(b) 累積変位

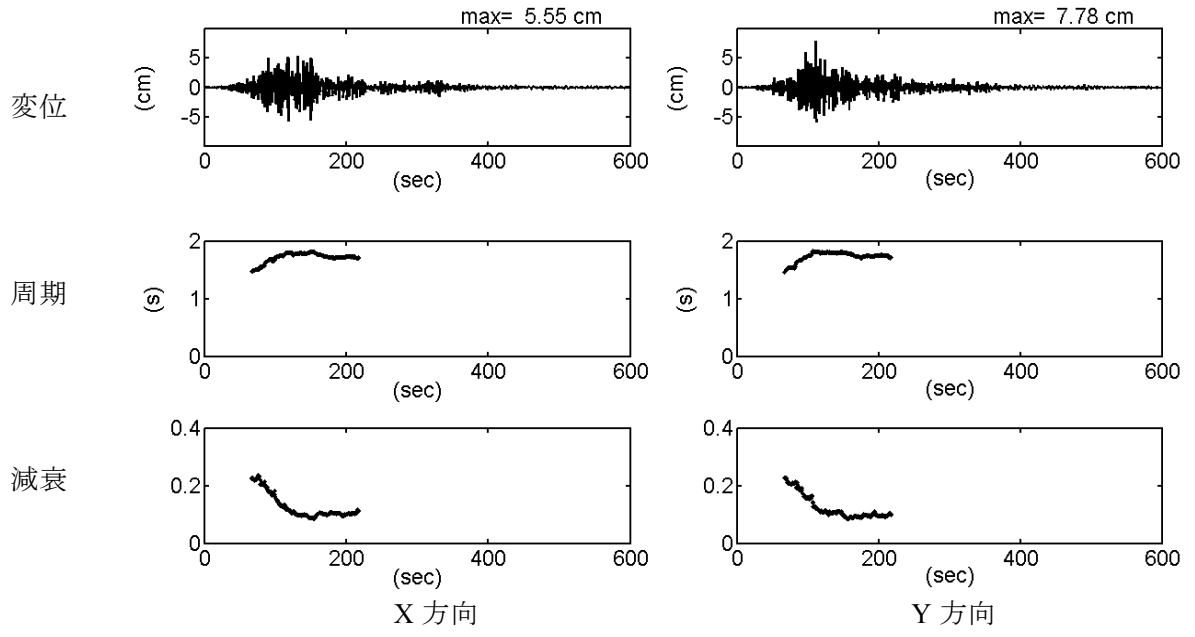


(c) 変位オービット



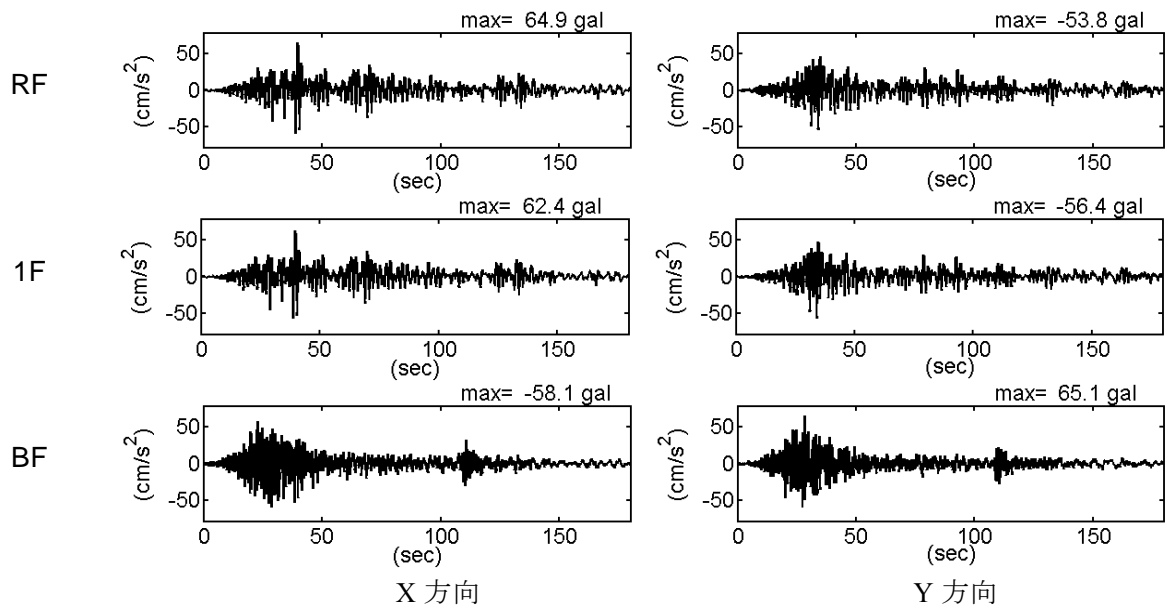
(d) 擬似速度応答スペクトル (黒: X 方向、灰: Y 方向)

図 3.2-31 No.1 2011/3/11 本震時 観測記録 1

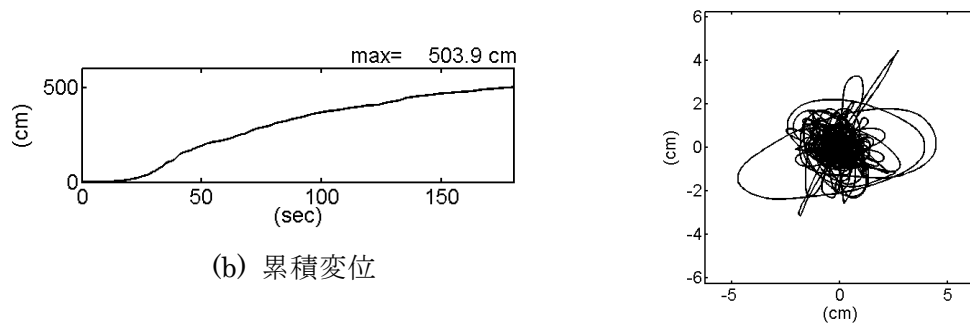


変位、周期、減衰時刻変化

図 3.2-32 No.1 2011/3/11 本震時 観測記録 2

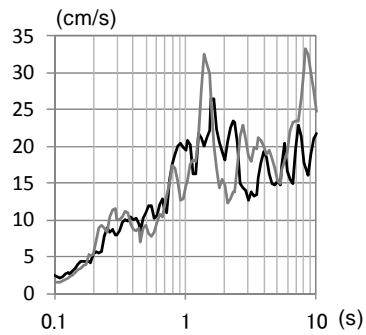


(a) 加速度時刻歴



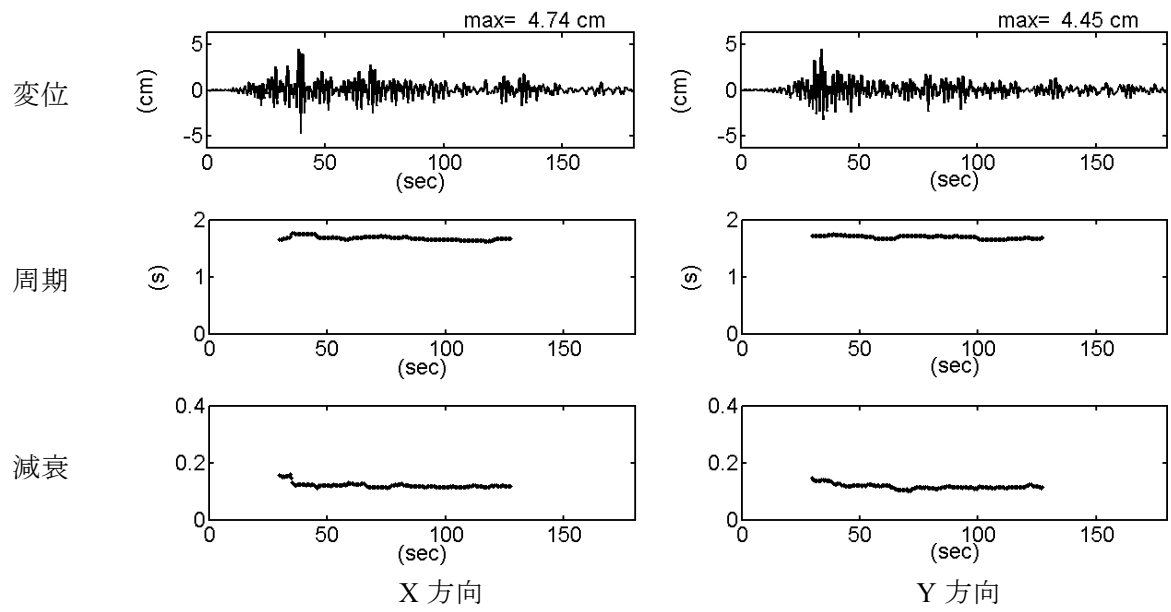
(b) 累積変位

(c) 変位オービット



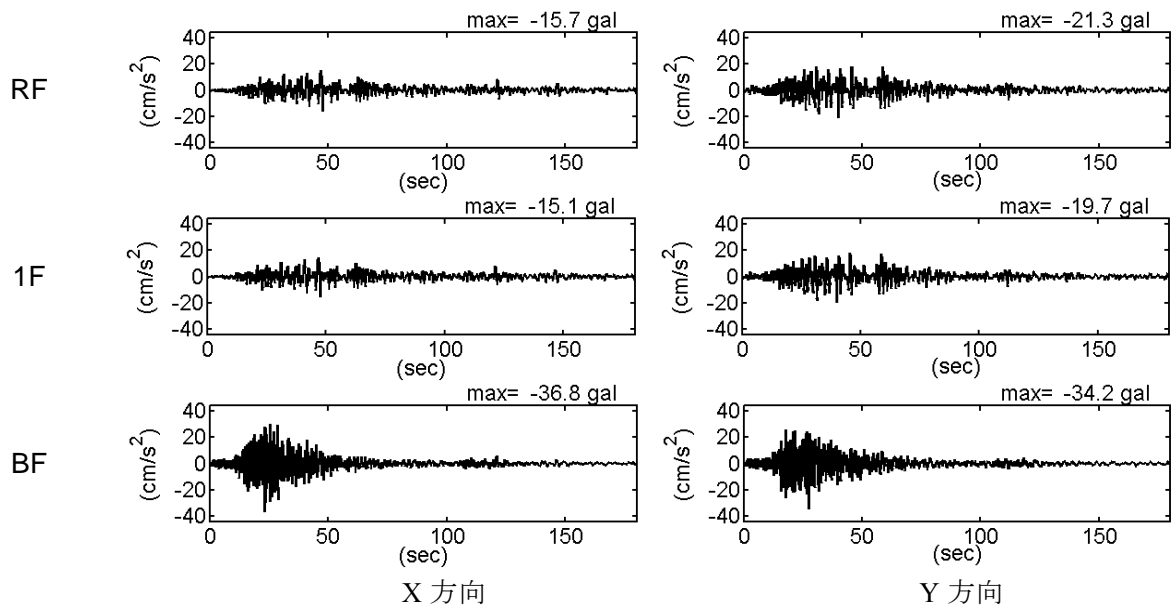
(d) 擬似速度応答スペクトル (黒 : X方向、灰 : Y方向)

図 3.2-33 No.2 2011/3/11 最大余震 観測記録 1

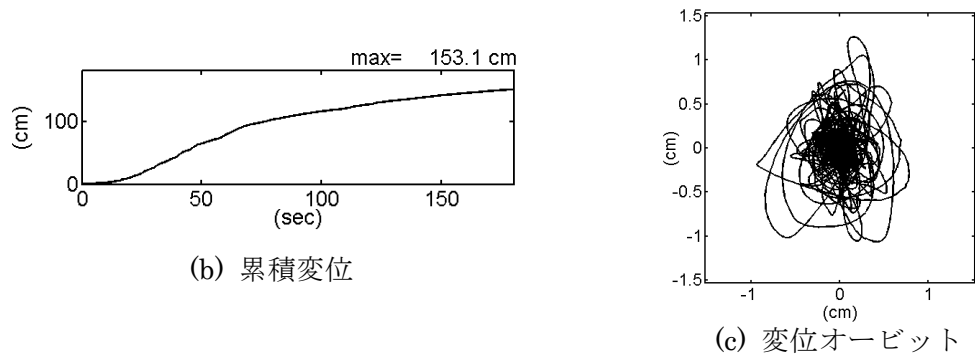


変位、周期、減衰時刻変化

図 3.2-34 No.2 2011/3/11 最大余震 観測記録 2

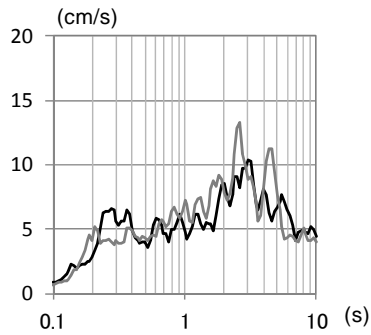


(a) 加速度時刻歴



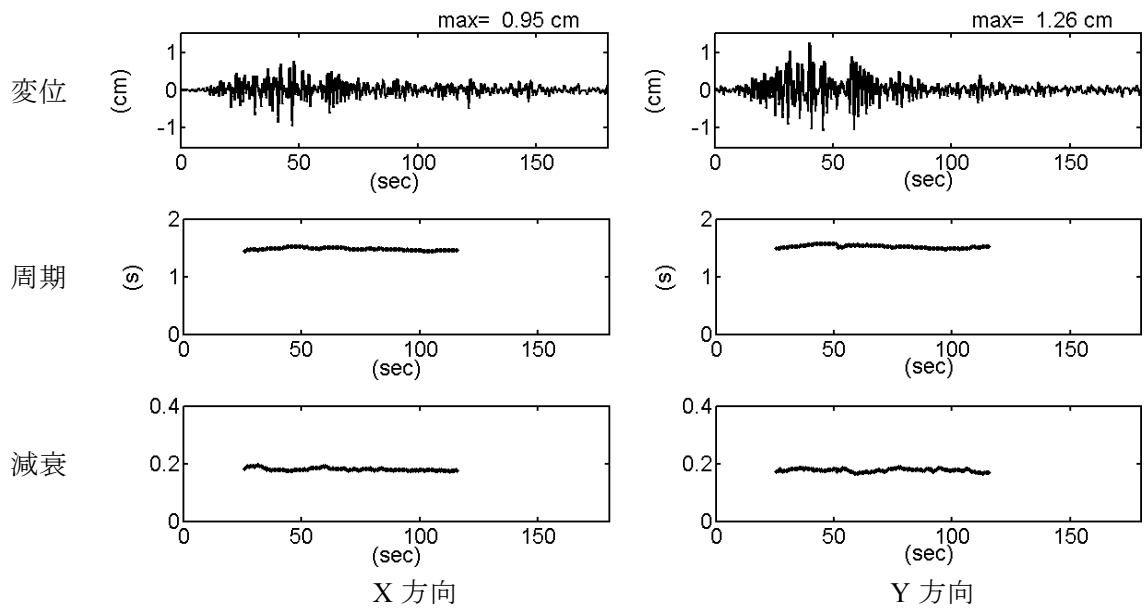
(b) 累積変位

(c) 変位オービット



(d) 擬似速度応答スペクトル (黒 : X 方向、灰 : Y 方向)

図 3.2-35 No.5 2011/4/11 本震の 1 ヶ月後 観測記録 1



変位、周期、減衰時刻変化

図 3.2-36 No.5 2011/4/11 本震の1ヶ月後 観測記録 2

4) D 建物

茨城県つくば市に建設されている免震建築物（積層ゴム支承+オイルダンパー）における観測記録の分析を行った。2011年3月11日の本震では、基礎上面の記録で震度5強を観測している。

a) 建物概要

対象とした免震建築物の概要を以下に示す。

- ・所在地：茨城県つくば市
- ・構造種別：上部構造S造
- ・建物規模：地上6階
- ・免震部材：積層ゴム支承+オイルダンパー（基礎免震）

b) 累積変位や固有周期等

本震以降に観測された地震記録のうち、免震層の最大変位が5mmを超えた地震（10地震）を分析の対象とした。表3.2-11に対象とした地震の諸元を示す。表3.2-12に各観測記録の計測震度、最大加速度、免震層最大変位、免震層累積変位および固有周期、減衰定数の評価結果を示す。免震層累積変位は、観測記録の全区間と主要動区間（エネルギー入力5~95%の区間）の2種類を求めた。また、建物の固有周期および減衰定数は、上記の主要動区間についてARX法を用いて同定した。

図3.2-37に、本震と余震の累積変位量（2方向）を、観測記録の全区間と主要動区間で合計した結果について比較して示す。主要動区間（エネルギー入力5~95%の区間）の累積変位量は、記録全区間の累積変位量の75%程度の値となっている。2011年3月および4月の余震（主要動区間）における累積変位量の合計値は8.8mであり、本震（主要動区間）の累積変位量7.7mよりも14%程度大きな値となっている。

図3.2-38、図3.2-39に各地震の固有周期と減衰定数を示す。固有周期は2.2~2.5秒を示しており、本震と余震でほとんど変化がなかった。一方、減衰定数は、免震層の最大変位が3cmを超える地震（本震および3.11茨城県沖の地震）では0.3程度の値となっているが、免震層の最大変位が2cm以下の小さな余震では、0.1程度の値となっている。

表 3.2-11 対象とした地震

NO.	発生日時	震源	M
(本震) 0	2011/3/11 14:46	三陸沖	M9.0
1	2011/3/11 15:14	茨城県沖	M7.5
2	2011/3/14 10:02	茨城県沖	M6.2
3	2011/3/16 12:51	千葉県東方沖	M6.1
4	2011/3/19 18:56	茨城県北部	M6.1
5	2011/4/7 23:33	宮城県沖	M7.1
6	2011/4/11 17:16	福島県浜通り	M7.0
7	2011/4/11 20:43	福島県浜通り	M5.9
8	2011/4/12 8:08	千葉県東方沖	M6.4
9	2011/4/12 14:08	福島県中通り	M6.4
10	2011/4/16 11:19	茨城県南部	M5.9

表 3.2-12 観測結果一覧

NO.	観測記録の全時間									主要動(総エネルギー入力の5%~95%に相当する時間)					
	計測震度	最大加速度(cm/s ²)				免震層最大変位(cm)		免震層累積変位(m) 2方向	免震層の累積変位(m)			固有周期 (s)		減衰定数	
		ピットX	ピットY	1F X	1F Y	X	Y		X	Y	2方向	X	Y	X	Y
(本震) 0	5.2	271.6	295.2	76.2	100.7	9.81	6.14	11.30	5.09	4.72	7.68	2.5	2.3	0.31	0.34
1	4.2	98.0	73.7	31.9	38.5	3.45	2.67	6.34	2.20	2.11	3.38	2.3	2.2	0.26	0.26
2	2.8	13.0	20.5	8.6	8.2	1.02	0.83	0.56	0.24	0.21	0.36	2.3	2.2	0.13	0.11
3	2.8	13.2	16.7	6.7	9.3	0.74	0.61	0.46	0.26	0.25	0.39	2.3	2.2	0.12	0.12
4	3.5	48.8	41.3	10.5	14.3	0.73	0.55	0.49	0.26	0.29	0.43	2.4	2.3	0.11	0.10
5	3.0	20.9	28.0	10.3	11.9	0.93	0.63	1.24	0.74	0.59	1.04	2.3	2.3	0.12	0.09
6	4.1	57.7	60.0	19.9	29.8	1.92	1.89	2.09	0.73	0.81	1.19	2.3	2.3	0.15	0.13
7	3.4	21.2	20.1	7.8	10.8	0.90	0.84	0.59	0.31	0.27	0.45	2.4	2.3	0.22	0.13
8	2.9	17.6	24.7	6.1	10.2	0.42	0.82	0.61	0.28	0.33	0.49	2.3	2.3	0.14	0.11
9	3.1	19.9	29.0	10.0	11.4	1.01	0.79	0.70	0.35	0.31	0.52	2.4	2.3	0.09	0.09
10	3.2	22.9	45.1	9.4	15.3	0.53	0.38	0.34	0.21	0.18	0.30	2.3	2.4	0.11	0.09

*No.1の余震記録は、地震の途中60秒間分のデータ欠測があり、それ以外の時間について評価した。

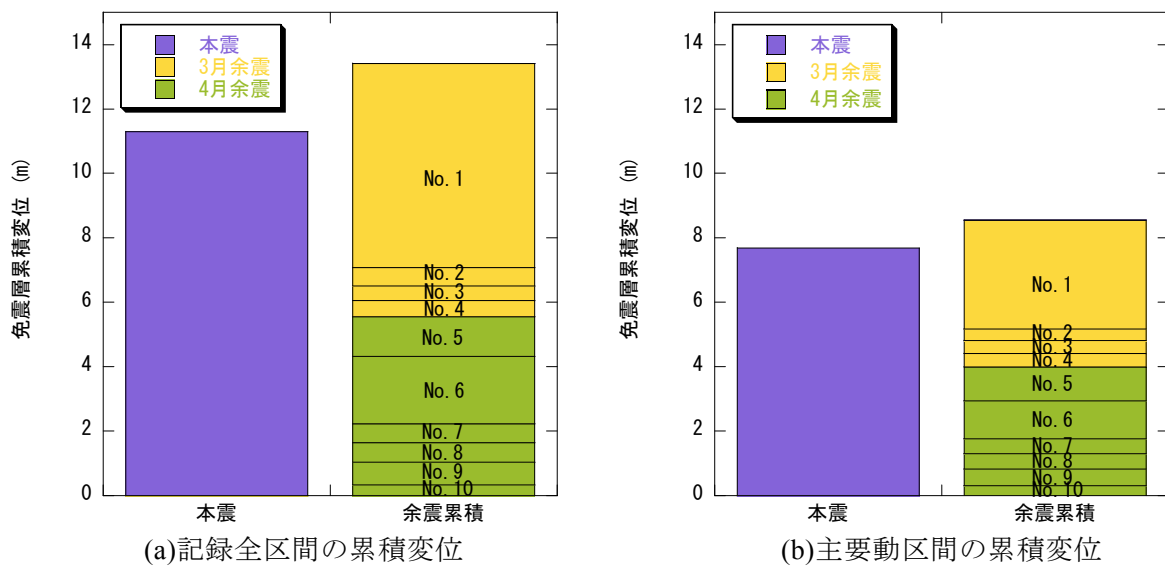


図 3.2-37 免震層累積変位の比較

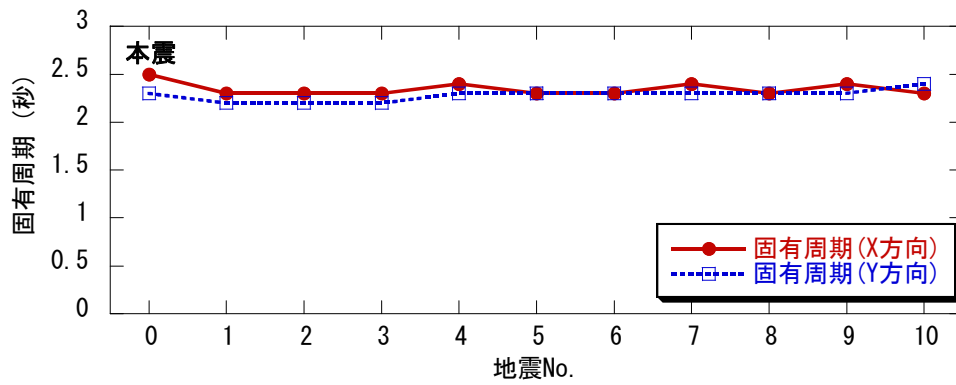


図 3.2-38 各地震における建物の固有周期

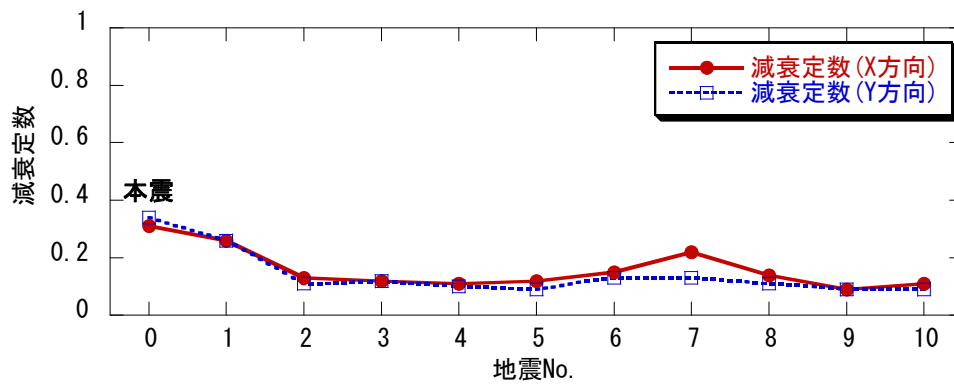
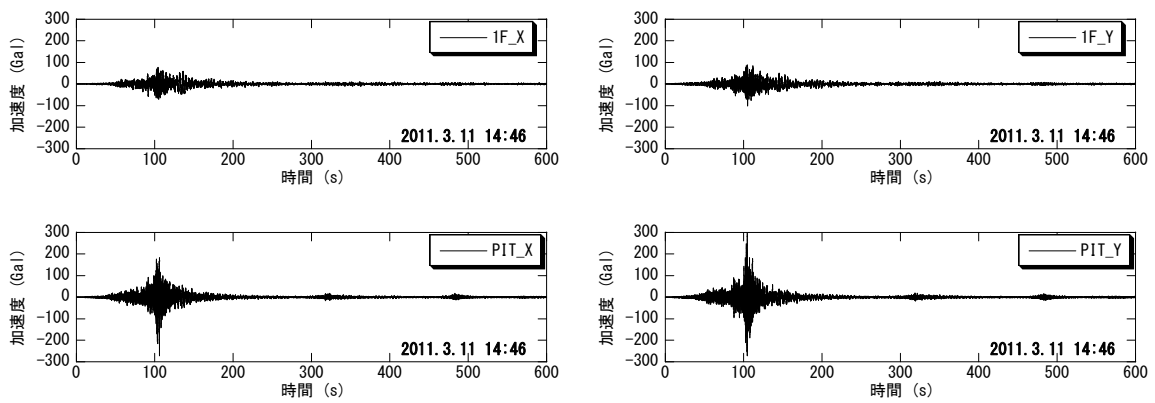


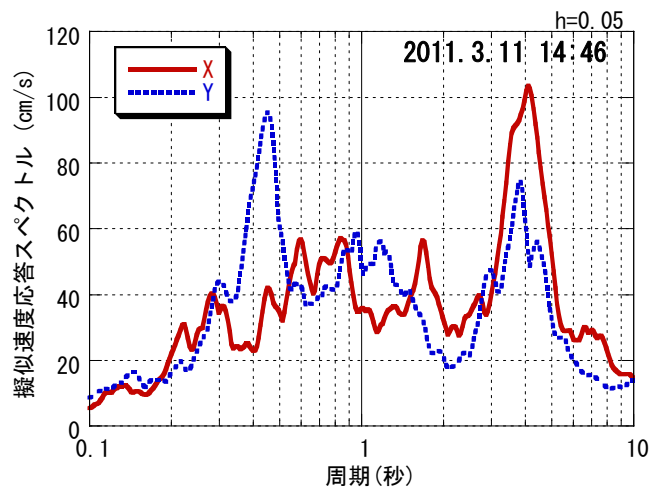
図 3.2-39 各地震における建物の減衰定数

c) 観測記録のその他の情報

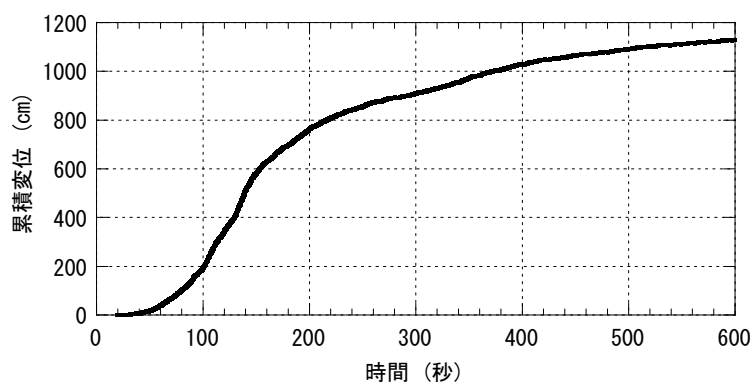
図 3.2-40～図 3.2-42 に、本震、2011.4.7 宮城県沖の余震 (No.5) および 2011.4.11 福島県浜通りの余震 (No.6) について、加速度の時刻歴波形、擬似速度応答スペクトル、免震層累積変位の時刻歴波形ならびに免震層の変位オービットを示す。



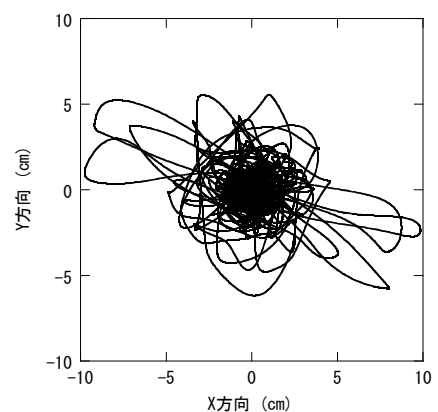
(a) 加速度波形



(b) 擬似速度応答スペクトル (ピット)

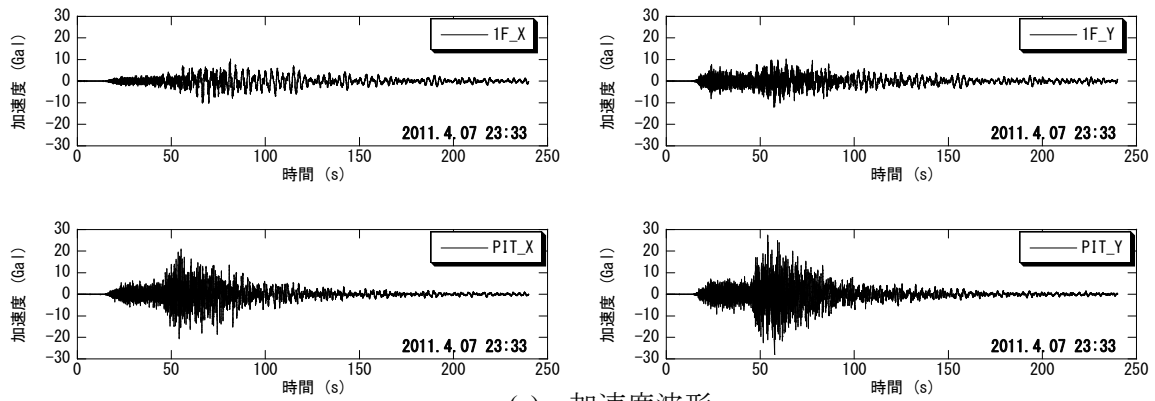


(c) 免震層累積変位(2方向)

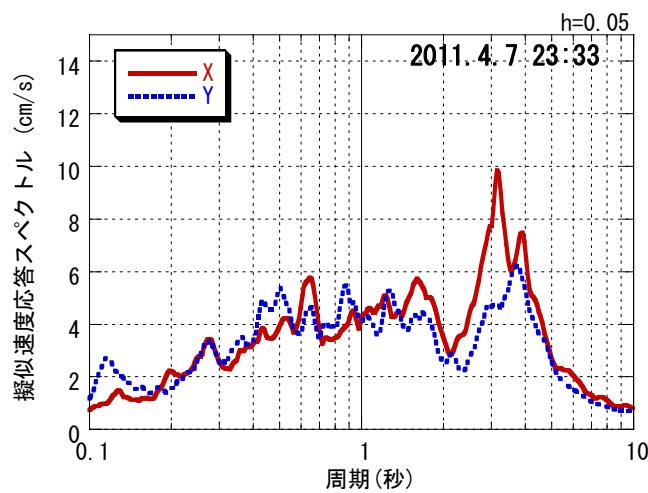


(d) 免震層変位オービット

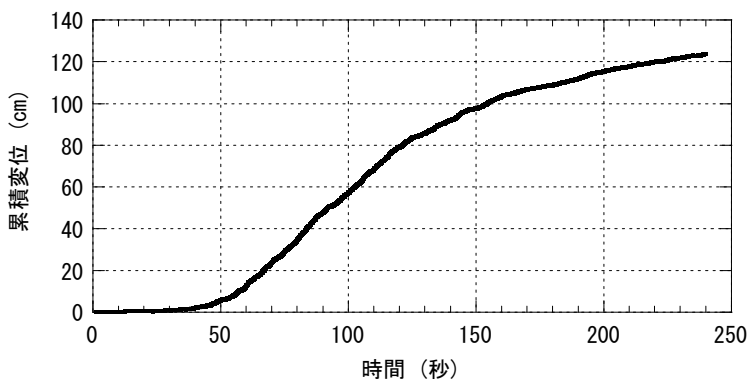
図 3.2-40 2011.3.11 本震の観測記録



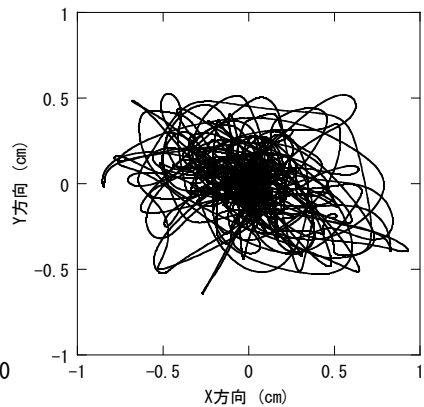
(a) 加速度波形



(b) 擬似速度応答スペクトル (ピット)

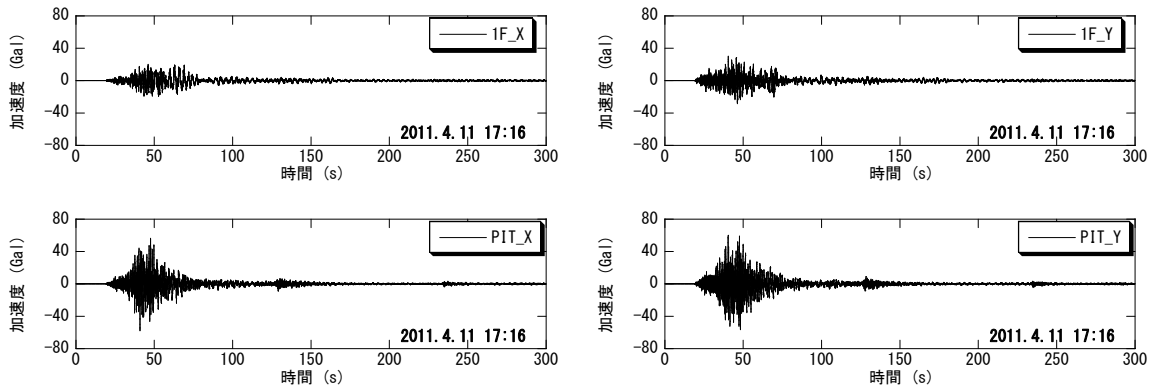


(c) 免震層累積変位(2方向)

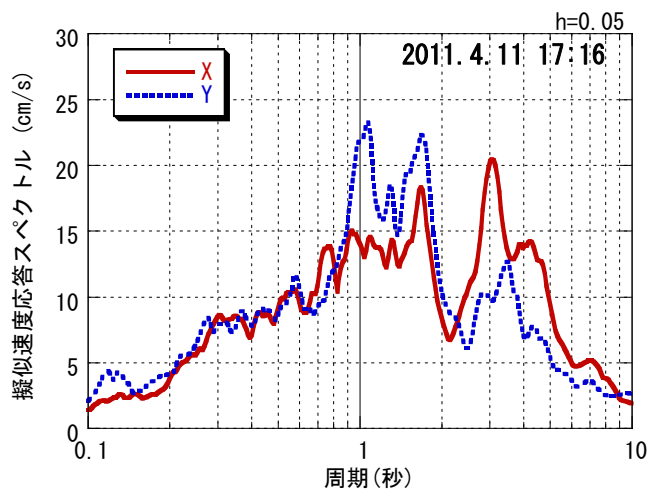


(d) 免震層変位オービット

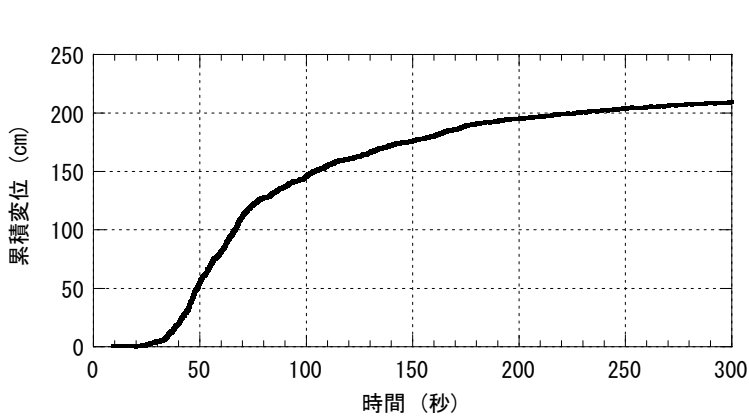
図 3.2-41 2011.4.7 宮城県沖の余震の観測記録 (No.5)



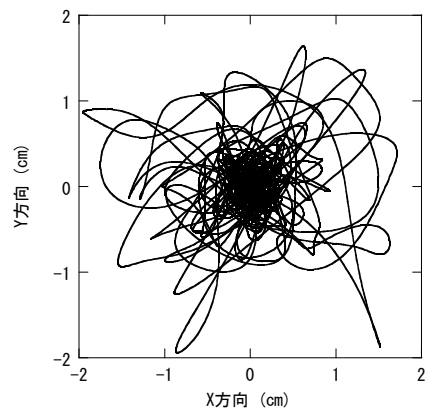
(a) 加速度波形



(b) 擬似速度応答スペクトル (ピット)



(c) 免震層累積変位(2方向)



(d) 免震層変位オーバービット

図 3.2-42 2011.4.11 福島県浜通りの余震の観測記録 (No.6)

5) E 建物

a) 建物概要

対象とした免震建築物と観測内容の概要を示す。

- ・所在地：東京都江東区
- ・竣工年：2011年2月
- ・建物用途：共同住宅、駐車場
- ・構造種別：RC造、免震構造（3-4階間に免震層）
- ・基礎形式：杭基礎（場所打ちコンクリート拡底杭）
- ・敷地面積：7,380m²
- ・建築面積：3448m²
- ・延床面積：51,856m²
- ・建物規模：地上36階、塔屋1階、軒高114m、最高高さ123m
- ・免震部材：鉛プラグ入り積層ゴム40台、天然ゴム系積層ゴム11台
- ・観測概要：地震計は、GL-1m・1階・免震ピット階・4階・36階に設置している。

b) 累積変位や固有周期等

観測記録の中から、本震発生後の2011年4月までの記録より、建物1階での加速度記録より求めた計測震度が2以上のものについて検討を行った。

対象とした、地震の一覧を表3.2-13に示す。

表 3.2-13 対象観測地震一覧

No.	観測日時		1階 免震層変位			発震時 震源情報										震央距離 (km)	震源距離 (km)
			計測震度	X(cm)	Y(cm)	日時	緯度	経度	深さ	M	震央	最大震度					
1	2011/03/11	14:47:14	4.8	-15.8	-11.9	2011/3/11_14:46:18.1	38	6.2	142	51.6	24	9.0	三陸沖	7	386	387	
2	2011/03/11	15:14:37	4.4	3.62	-8.24	2011/3/11_15:15:34.4	36	6.5	141	15.9	43	7.6	茨城県沖	6強	142	148	
3	2011/03/11	15:26:06	2.3	0.26	-0.31	2011/3/11_15:25:44.4	37	50.2	144	53.6	34	7.5	三陸沖	4	515	516	
4	2011/03/14	10:02:49	2.5	0.35	0.23	2011/3/14_10:02:38.7	36	27.5	141	7.5	32	6.2	茨城県沖	5弱	149	153	
5	2011/03/15	22:31:48	2.7	0.34	0.33	2011/3/15_22:31:46.3	35	18.5	138	42.8	14	6.4	静岡県東部	6強	106	107	
6	2011/03/16	12:52:02	2.5	0.17	-0.21	2011/3/16_12:52:2.7	35	50.2	140	54.3	10	6.1	千葉県東方沖	5弱	102	102	
7	2011/03/19	18:57:10	2.5	0.14	0.16	2011/3/19_18:56:48.0	36	47.0	140	34.2	5	6.1	茨城県北部	5強	144	144	
8	2011/04/11	17:16:26	3.3	0.64	-0.87	2011/4/11_17:16:12.0	36	56.7	140	40.3	6	7.0	福島県浜通り	6弱	164	164	
9	2011/04/12	8:08:19	2.9	0.36	-0.45	2011/4/12_08:08:15.8	35	28.9	140	52.0	26	6.4	千葉県東方沖	5弱	98	102	
10	2011/04/16	11:19:29	2.7	0.17	0.15	2011/4/16_11:19:31.6	36	20.4	139	56.7	79	5.9	茨城県南部	5強	78	111	
11	2011/04/21	22:37:00	2.4	-0.10	-0.19	2011/4/21_22:37:2.1	35	40.5	140	41.1	46	6.0	千葉県東方沖	5弱	80	92	

免震層の最大変位・累積変位及び免震建物の固有周期と減衰定数の結果を、表 3.2-14 に示す。最大変位、累積変位ともに、本震が圧倒的に大きいことが分かる。

図 3.2-43 に累積変位を示す。本震以外の余震での累積変位の総和は、本震の累積変位の 79% であった。

免震ピット階を入力、36 階を出力として、主要動部分の記録から、ARX 法を用いて固有周期・減衰定数の同定を行った。

固有周期は、大きな差は見られないが、減衰定数は、本震および本震直後の茨城県沖の余震で、大きな値を示している。

表 3.2-14 各地震動による免震層の累積変位と免震建築物の固有周期・減衰定数

No.	観測日時		震央	免震層変位		全時間		5~95%区間		固有周期 (s)		減衰定数 (%)	
				X (cm)	Y (cm)	累積変位 (m)	総累積 (m)	累積変位 (m)	総累積 (m)	X	Y	X	Y
1	2011/03/11	14:47:14	三陸沖	-15.8	-11.9	9.98	9.98	8.11	8.11	0.9	2.5	12.2	77.0
2	2011/03/11	15:14:37	茨城県沖	3.62	-8.24	3.00	12.97	2.91	11.01	2.2	2.4	48.9	33.7
3	2011/03/11	15:26:06	三陸沖	0.26	-0.31	0.43	13.40	0.43	11.44	2.2	2.2	4.8	6.2
4	2011/03/14	10:02:49	茨城県沖	0.35	0.23	0.45	13.85	0.35	11.80	2.3	2.2	9.7	6.6
5	2011/03/15	22:31:48	静岡県東部	0.34	0.33	0.45	14.31	0.33	12.13	2.2	2.1	5.3	4.1
6	2011/03/16	12:52:02	千葉県東方沖	0.17	-0.21	0.26	14.57	0.24	12.37	2.2	2.1	4.9	4.7
7	2011/03/19	18:57:10	茨城県北部	0.14	0.16	0.28	14.84	0.26	12.63	2.2	2.1	5.8	4.8
8	2011/04/11	17:16:26	福島県浜通り	0.64	-0.87	1.00	15.84	0.94	13.57	2.3	2.2	9.2	11.2
9	2011/04/12	8:08:19	千葉県東方沖	0.36	-0.45	0.61	16.45	0.57	14.14	2.2	2.2	8.2	8.8
10	2011/04/16	11:19:29	茨城県南部	0.17	0.15	0.30	16.75	0.19	14.32	2.2	2.1	5.6	4.4
11	2011/04/21	22:37:00	千葉県東方沖	-0.10	-0.19	0.23	16.98	0.18	14.51	2.1	2.1	4.0	6.0

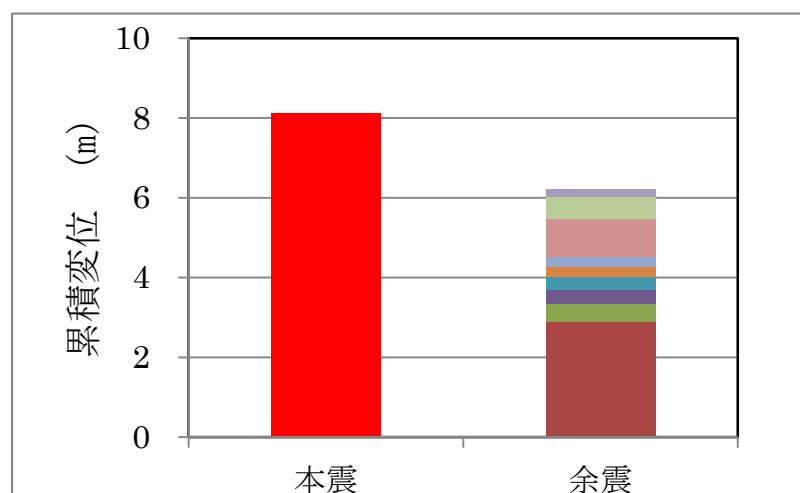


図 3.2-43 本震の累積変位と余震を合計した累積変位の比較

6) F 建物

茨城県つくば市に建設されている免震建築物における観測記録の分析を行った。2011年3月11日の本震では、基礎上面の記録で震度5強を観測している。

a) 建物概要

対象とした免震建築物と観測内容の概要を示す。

- ・所在地：茨城県つくば市
- ・竣工年：2010年
- ・建物用途：事務所
- ・構造種別：PCaPS コンクリート造
- ・基礎形式：杭基礎
- ・建物規模：地上7階、高さ33m
- ・免震部材：天然ゴム系積層ゴム11基、鉛プラグ入り積層ゴム45基、鋼材ダンパー一体型鉛プラグ入り積層ゴム9基
- ・地震観測：地震計は免震層下部（基礎上面、ピット）、1階床、6階床に設置されている。各階で3成分の加速度記録が収録される。地震計と建物の方向については、建物のX（長辺）、Y（短辺）方向は、それぞれ北から94度、4度、東に回転した方向となっている。

b) 累積変位や固有周期等

観測記録の中から、本震発生後の約1年間の記録の中から、免震層下部の計測震度が3.0以上となる地震動における記録を対象とし、免震層の最大変位・累積変位及び免震建物の固有周期と減衰定数の結果を、表3.2-15と表3.2-16に示す。地震の震央は、茨城県沖から三陸沖にかけての範囲が多いが、一部福島県や茨城県の内部で発生している地震もある。建物1階の最大加速度は、基礎上面（ピット）の値に対して、1地震記録の1方向を除いてすべて小さくなっている。免震層の累積変位は、地震動により、大きな差が見られ、M9の地震に対して、M5程度になると、1/40～1/50程度に小さくなる。

図3.2-44に、全観測時間に対して、90%のエネルギーが入力される時間における、本震と余震を合計したXY面内での累積変位を示す。余震の累積変位に比べて、本震の累積変位の8割強の値となっている。

図3.2-45に、各地震動における免震建物の固有周期と減衰定数を示す。地震の番号は、表3.2-15の記録番号と対応している。本震や3.11の最大余震では、免震建物の周期は大きくなっているが、その他の地震では、0.6～0.8秒を示す場合が多い。減衰定数は、0.1～0.3の値となり、地震動におけるばらつきが大きい。本震や3.11の最大余震では、免震建物の減衰定数は、0.3前後の値を示している。

表 3.2-15 各地震動による免震層の最大変位・累積変位（全観測時間）

記録番号	観測日時	地震諸元		計測震度	最大加速度(cm/s ²)				免震層最大変位 (cm)		免震層累積変位(m) 2方向
		震源	M		ピットX	ピットY	1FX	1FY	X	Y	
1	2011/03/11 14:47	三陸沖	9.0	5.2	232.6	326.9	76.1	91.7	5.91	4.72	6.24
2	2011/03/11 15:14	茨城県沖	7.6	4.3	92.3	95.2	56.7	46.2	1.66	2.01	2.24
3	2011/04/11 17:16	福島県浜通り	7.0	4.0	53.3	77.4	45.2	46.4	1.30	0.95	1.11
4	2011/03/19 18:56	茨城県北部	6.1	3.5	29.1	39.7	19.7	29.7	0.316	0.333	0.350
5	2011/04/11 20:42	福島県浜通り	5.9	3.3	19.7	31.2	15.8	28.0	0.207	0.757	0.209
6	2011/04/16 11:19	茨城県南部	5.9	3.3	35.6	26.8	28.7	28.7	0.445	0.194	0.280
7	2012/03/14 21:05	千葉県東方沖	6.1	3.2	34.4	23.5	22.4	21.3	0.509	0.177	0.253
8	2011/04/12 14:07	福島県中通り	6.4	3.2	25.0	28.9	22.4	23.3	0.260	0.316	0.316
9	2011/04/07 23:32	宮城県沖	7.2	3.1	23.5	24.0	23.2	22.8	0.267	0.235	0.472
10	2011/07/15 21:01	茨城県南部	5.4	3.1	31.1	22.2	27.1	16.6	0.363	0.102	0.172
11	2012/03/01 07:32	茨城県東方沖	5.3	3.0	39.6	37.5	20.0	14.3	0.218	0.123	0.136
12	2011/03/16 12:52	千葉県東方沖	6.1	3.0	28.3	22.1	21.9	18.9	0.336	0.136	0.206

表 3.2-16 各地震動による免震層の累積変位と免震建築物の固有周期・減衰定数（90%エネルギー入力時）

記録番号	観測日時	地震諸元		計測震度	主要動継続時(総入力エネルギー入力の5-95%に相当する時間)						
		震源	M		免震層累積変位(m)			固有周期(s)		減衰定数	
					X	Y	2方向	X	Y	X	Y
1	2011/03/11 14:47	三陸沖	9.0	5.2	2.84	2.79	4.41	1.54	1.92	0.28	0.31
2	2011/03/11 15:14	茨城県沖	7.6	4.3	0.98	0.86	1.44	1.33	1.28	0.30	0.30
3	2011/04/11 17:16	福島県浜通り	7.0	4.0	0.425	0.457	0.695	1.02	0.88	0.30	0.25
4	2011/03/19 18:56	茨城県北部	6.1	3.5	0.128	0.165	0.229	0.81	0.73	0.20	0.17
5	2011/04/11 20:42	福島県浜通り	5.9	3.3	0.068	0.097	0.129	1.19	0.66	0.39	0.16
6	2011/04/16 11:19	茨城県南部	5.9	3.3	0.129	0.107	0.187	0.63	0.81	0.09	0.26
7	2012/03/14 21:05	千葉県東方沖	6.1	3.2	0.116	0.090	0.163	0.66	0.85	0.15	0.30
8	2011/04/12 14:07	福島県中通り	6.4	3.2	0.127	0.135	0.206	0.72	0.68	0.19	0.17
9	2011/04/07 23:32	宮城県沖	7.2	3.1	0.181	0.212	0.310	0.68	0.65	0.15	0.15
10	2011/07/15 21:01	茨城県南部	5.4	3.1	0.084	0.061	0.115	0.63	0.92	0.10	0.27
11	2012/03/01 07:32	茨城県東方沖	5.3	3.0	0.056	0.049	0.082	0.58	0.74	0.09	0.20
12	2011/03/16 12:52	千葉県東方沖	6.1	3.0	0.090	0.065	0.124	0.64	0.78	0.12	0.25

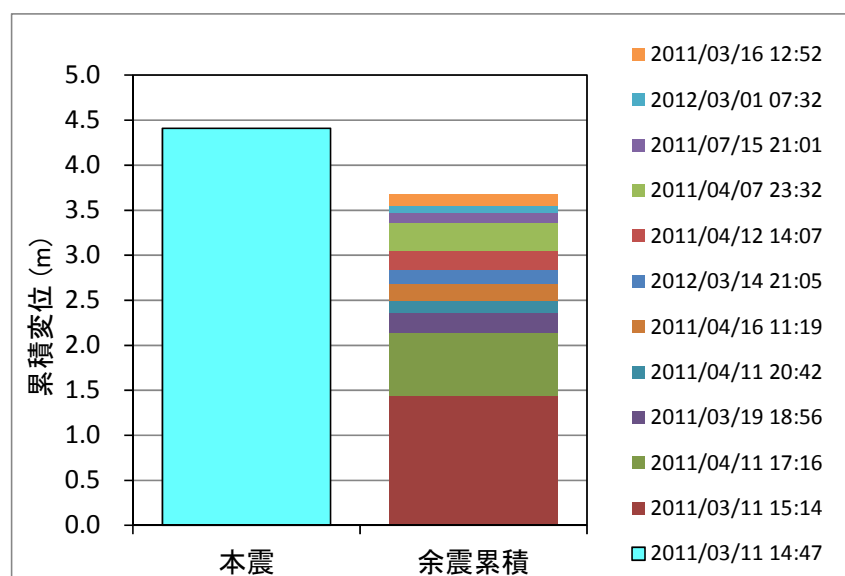


図 3.2-44 本震の累積変位と余震を合計した累積変位の比較

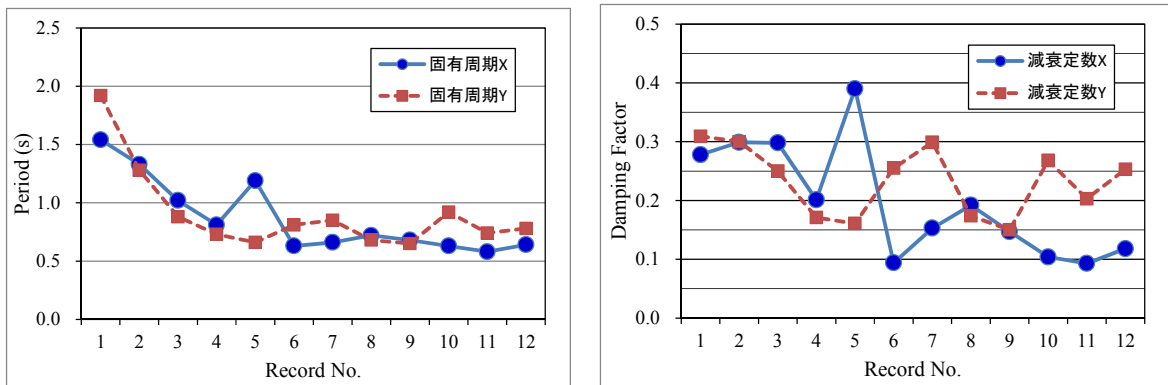
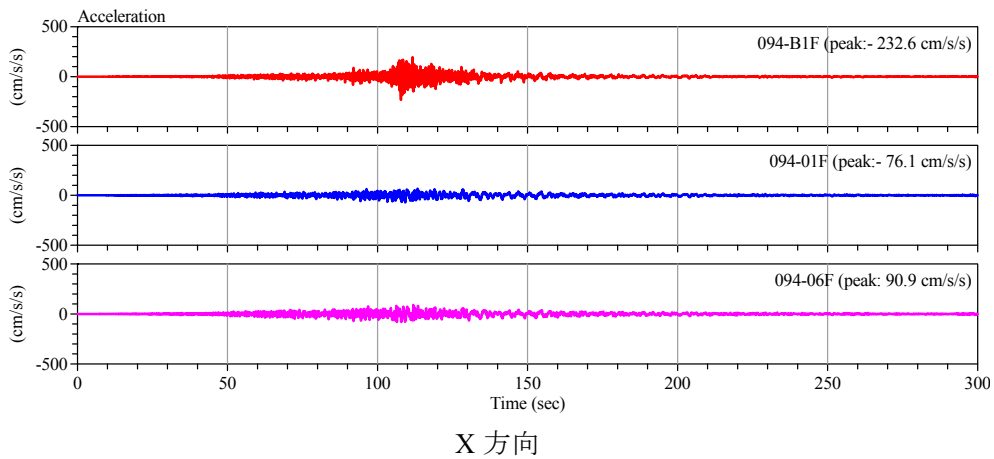


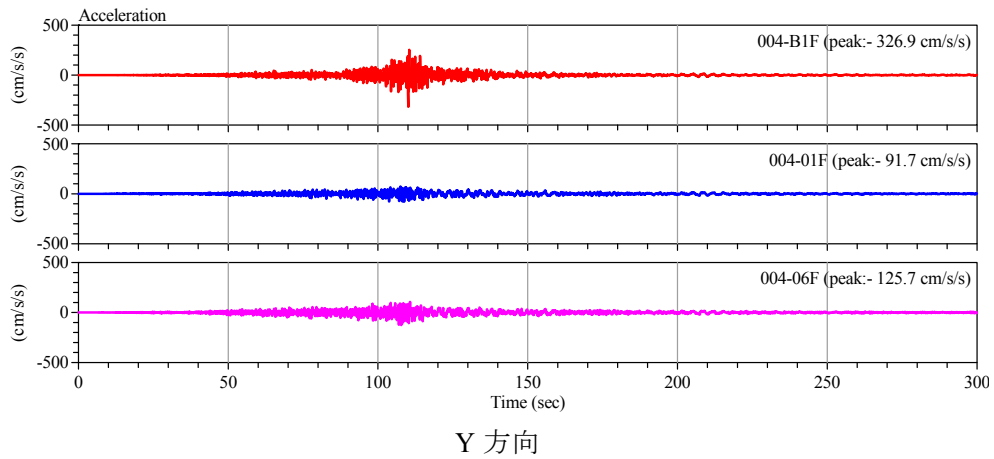
図 3.2-45 地震動別免震建物の固有周期と減衰定数（地震動の番号は、表 3.2-15 参照）

c) 観測記録のその他の情報

2011.3.11 の本震で得られた免震建物の観測結果の概要を、以下に示す。図 3.2-46、図 3.2-47、図 3.2-48 および図 3.2-49 に、それぞれ免震建物の加速度時刻歴、免震層の変位時刻歴、免震層の変位オービット及び入力地震動の擬似速度応答スペクトルを示す。



X 方向



Y 方向

図 3.2-46 免震建物の加速度波形（2011.3.11 本震）

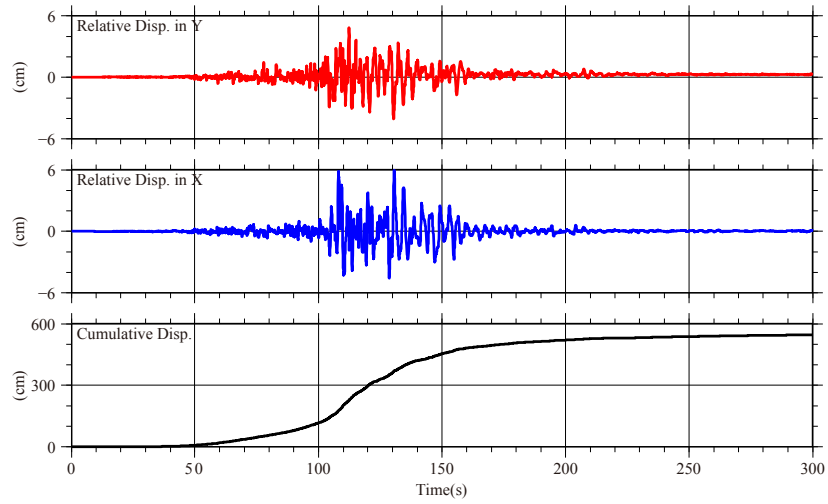


図 3.2-47 免震建物の免震層変位及び累積変位の波形 (2011.3.11 本震)

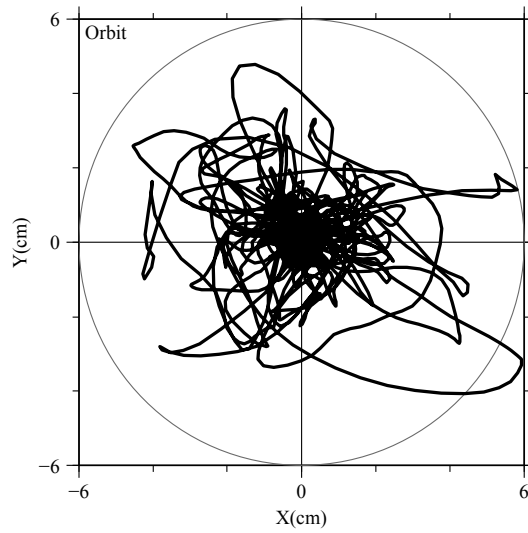


図 3.2-48 免震建物の免震層変位オービット (2011.3.11 本震)

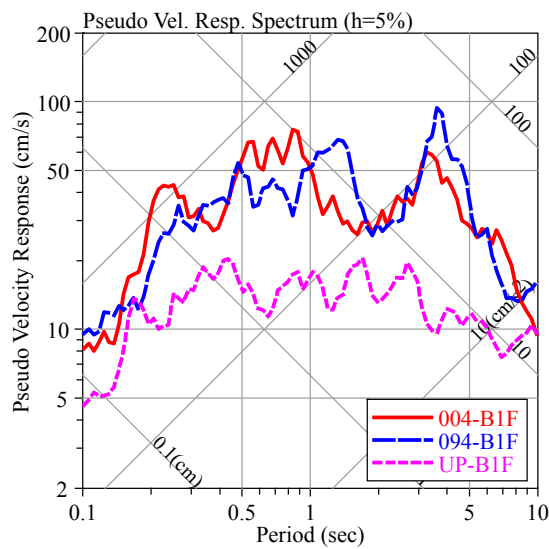


図 3.2-49 免震層下部の記録の擬似速度応答スペクトル (減衰定数 5%) (2011.3.11 本震)

3.3 まとめ

2011年3月11日の東北地方太平洋沖地震の後に発生した余震を対象とし、これらの地震が免震建築物に与えた影響を定量的に把握するため、観測記録に基づく建物挙動について検討を行った。検討の対象とした建物は、事業者から提供された免震建築物6棟（A～F建物）とし、観測結果から得られた加速度、免震層変位あるいは計測震度が一定の水準以上となる余震に対して、加速度、免震層変位、免震層累積変位ならびに建物の固有周期と減衰定数について整理した。

本検討から得られた主な知見は以下の通りである。

1) 加速度と免震層変位

対象とした免震建築物6棟の所在地は、D建物とF建物が茨城県、A建物、B建物およびE建物が東京都、C建物が千葉県となっている。D建物とF建物では、建物から距離の近い場所で余震が発生しており、その他の建物と比較して、大きい加速度と免震層水平変位が生じている。これら2つの建物について、千葉県のC建物の応答値が大きくなっている。

2) 免震層累積変位

免震層累積変位は地震の全継続時間ならびに主要動継続時間における値を算定した。主要動継続時間を地震による総エネルギー入力の5%～95%に相当する時間で定義した。本検討によれば、主要動継続時間における免震層累積変位は地震の全継続時間の値と比較して概ね60～85%程度となっていた。また、余震の主要動継続時間における免震層累積変位の総和（総累積変位）を求め、本震の累積変位と比較した。これより、余震の総累積変位は本震の累積変位に対して、A建物で50%、B建物で67%、C建物で93%、D建物で114%、E建物で79%、F建物で83%であり、D建物の総累積変位は本震の累積変位を超えていた。すなわち、免震建築物が複数の余震による揺れを受けることで、本震に匹敵するあるいはそれを上回る累積変位が免震層に生じる可能性があることが分かる。

3) 固有周期と減衰定数

建物の固有周期と減衰定数をARX法などを用いて同定した。固有周期については、いずれの建物についても、本震における値が最大（1.0～2.5秒）となる。また、基礎（ピット）における入力加速度が大きくなるほど固有周期が大きくなる傾向があるが、余震による固有周期の変化は小さい。減衰定数についても、固有周期と同様の入力加速度に対する傾向が認められるが、地震に対するばらつきが大きくなっている。

