

第5章 超高層鉄骨造建築物の地震観測

5.1 地震観測建物の挙動調査

5.1.1 NHSK ビルの地震観測 (H22 年度実施分)

(1) 建物概要

1) 建物諸元・地盤概要

地震観測対象建物 NHSK ビルの諸元を以下に示す。NHSK ビルは、33 階建ての高層棟と 6 階建ての低層棟からなる。高層棟を観測対象とし、高層棟と基礎構造の異なり建物規模の比較的小さい低層棟においても、1 階のみにセンサーを設置し観測する。

高層棟

建物位置：東京都千代田区

竣工：2007 年

階数：地上 33 階 地下 2 階 塔屋 1 階

軒の高さ：155.82m

最高部の高さ：156.67m

延床面積：132,253m²

基準階面積：2,999.69m² (12 階)

外径：短辺(X 方向)41.6m 長辺(Y 方向)71.9m

地上階構造：鉄骨造，制振部材付きラーメン構造

地下階構造：鉄筋コンクリート造，鉄骨鉄筋コンクリート造，耐震壁付きラーメン構造

設計用固有周期：X (短辺) 方向 3.75 秒，Y (長辺) 方向 3.61 秒

基礎構造：直接基礎と杭基礎の併用基礎

地盤種別：第 2 種地盤 (周期 0.24~0.27 秒)

地盤の土質及び N 値：表 5.1.1-1

(数値は日本 ERI 株式会社性能評価シートより)

低層棟 (1 階のみ観測)

階数：地上 6 階

構造：鉄骨鉄筋コンクリート造

基礎構造：杭基礎 (マルチペDESTAL 杭)

(高圧噴射攪拌型の地盤改良)

表 5.1.1-1 地盤の土質および N 値

GL±m	地盤	N値	
0.0 ~ -2.5	埋土	2以下	●
-2.5 ~ -3.7	粘土質細砂	4	●
-3.7 ~ -13.6	細砂	11~31	
-13.6 ~ -16.5	粘土及び砂質シルト	16	
-16.5 ~ -23.6	砂礫	60以上	
-23.6 ~ -30.6	細砂	60以上	

● 低層棟 1 階センサー設置レベル
● 高層棟 B2 階センサー設置レベル

2) 建物位置

観測対象建物 NHSK ビルおよび付近の K-NET 観測点の地図上の位置を図 5.1.1-1 に示す。



図 5.1.1-1 観測対象建物 NHSK ビルの位置

①～⑭：K-NET 観測点

①	TKY 007
②	TKY 015
③	TKY 023
④	TKY 022
⑤	TKY 021
⑥	TKY 014
⑦	TKY 028
⑧	TKY 020
⑨	TKY 026
⑩	TKY 019
⑪	TKY 018
⑫	TKY 013
⑬	TKY 016
⑭	TKY 017

(2) 観測概要

1) 観測点配置

観測点は、高層棟および低層棟の計4箇所とした。センサー（加速度計）は、高層棟では、32階、16階、地下2階の各階同位置（EPS内）に、低層棟では1階（EPS内）に設置し、収録装置は、19階（機械室）に設置した。加速度計および収録装置の平面図、立面図上の位置を図5.1.1-2、図5.1.1-3に示す。また、設置状況をP5.1-15の写真5.1.1-1に、平面上の詳細位置をP5.1-12～P5.1-14の図5.1.1-8～図5.1.1-10に示す。

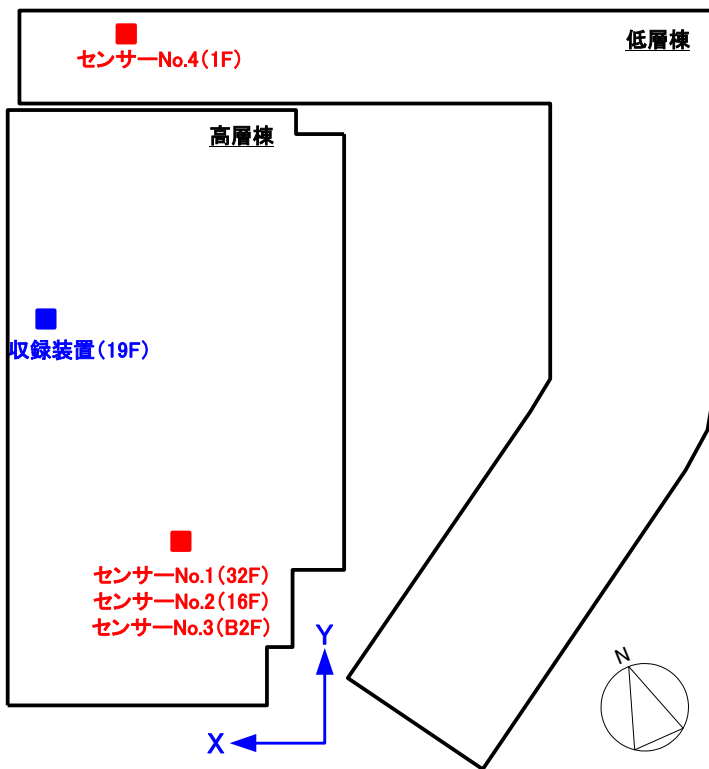


図 5.1.1-2 加速度計および収録装置の設置位置
(平面図)

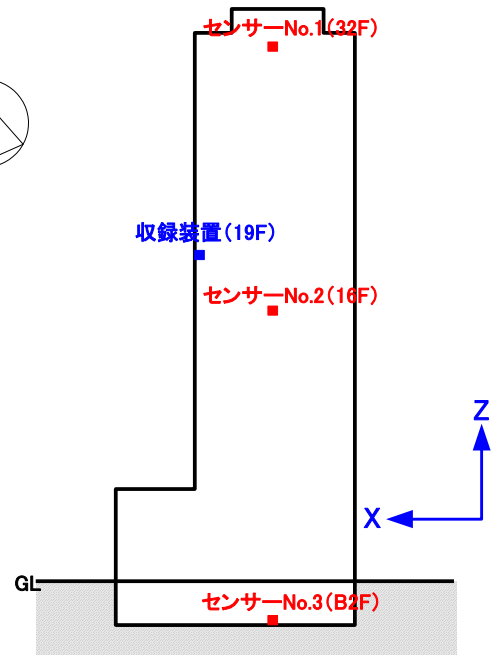


図 5.1.1-3 加速度計および収録装置の設置位置
(高層棟 断面図)

2) 地震観測装置の構成

地震観測装置は、加速度計（センサー）、データ集録装置および延長ケーブルで構成される。加速度計は常時振動を電気信号に変換し、接続された延長ケーブルでデータ集録装置に出力している。データ集録装置は、この電気信号の大きさを監視しており、信号の大きさが予め設定したレベルを超えると記録を開始し、震度等の演算と最大値検出などを行いながら記録媒体（コンパクトフラッシュメモリ）にデータを収録保存する。地震が終了すると最大値等の情報と演算処理結果を表示するとともに、接続された通信用パソコンに対して波形記録を伝送する。

表 5.1.1-2 に構成機器等一覧を示す。図 5.1.1-4 にシステムブロックを示す。

表 5.1.1-2 構成機器等一覧表

品名・名称	型名・規格	数量	備考
サーボ型加速度計	AS-303T1W1	3台	3G F/S
同上用保護カバー	SPCC製	3台	
サーボ型加速度計	AS-303D3W5	1台	3G F/S、低層棟1F用
同上用保護カバー	SPCC製	1台	
センサ電源付端子台	-	1台	
データ集録装置	VIP-19-12	1台	12成分用
小型パソコン	Epson Endeavor ST125E	1台	
小型ディスプレイ	Quixun QT1006B(AVG)	1台	
シャットダウン用UPS	OMRON BY50F	1台	
ルータ	YAMAHA RT-58i	1台	
耐雷トランス	1ST1-10211S	1台	
無停電電源装置	THA-1000R-10/EI	1台	10分間
機器収納ラック	W535*D600*H1105mm	1台	

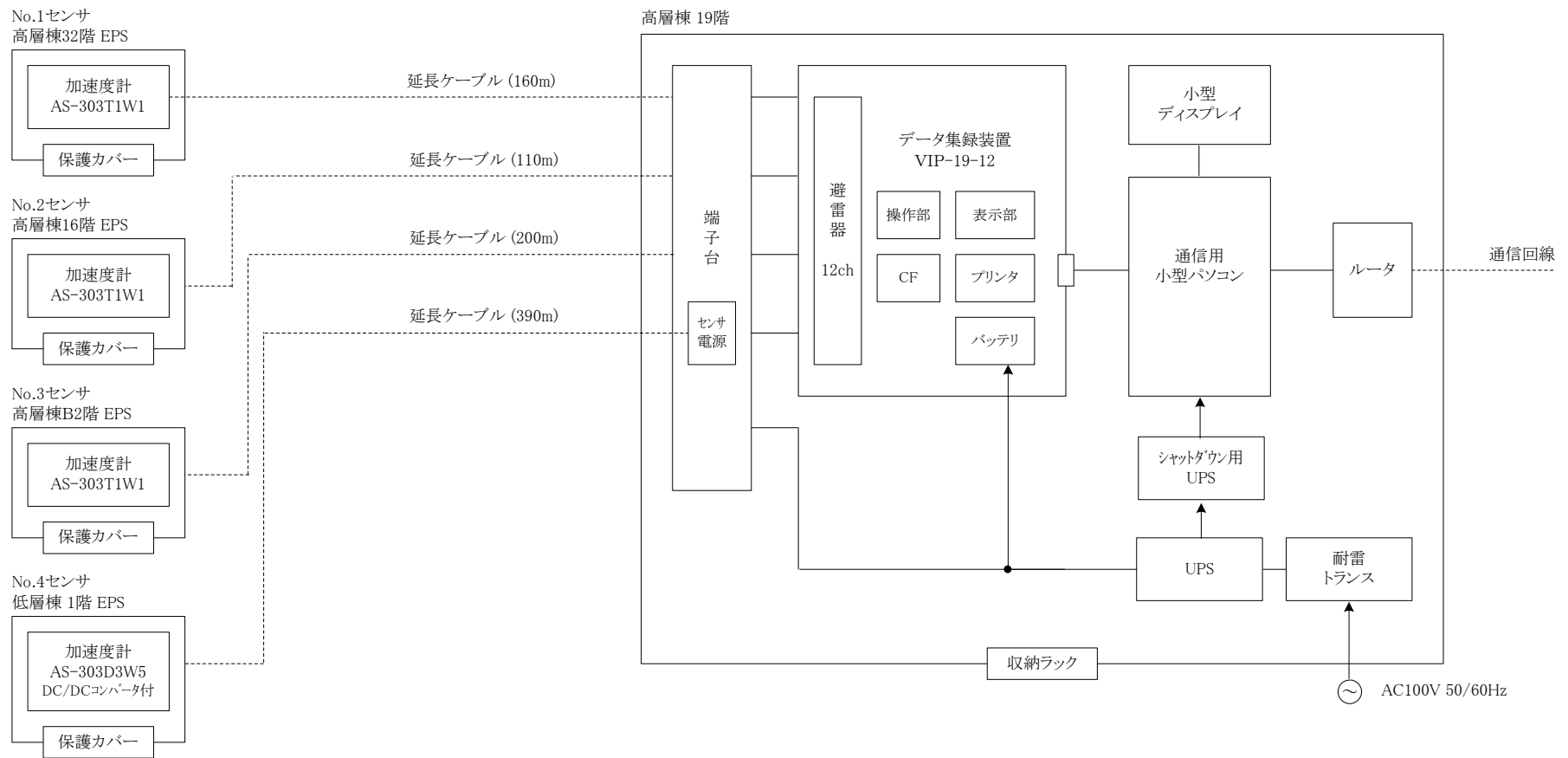


図 5.1.1-4 構成機器等一覧表

3) 機器仕様

観測点に設置するセンサー（サーボ型加速度計）の仕様を以下に、図面を図 5.1.1-5、図 5.1.1-6 に示す。低層棟 1 階のセンサーは、収録装置までのケーブル距離が長い為、電圧降下を防ぐために、電源内蔵としている。

サーボ型加速度計

- ・高層棟 32 階, 16 階, B2 階用

型 名 AS-303D1W1

成分数 加速度 水平 2, 鉛直 1 成分

変換制動方式 フォースバランスサーボ方式

測定周波数 DC~100Hz

測定範囲 加速度±3000Gal 以上

感 度 加速度 3.333mV/Gal

分解能 加速度 約 5mGal

最大出力電圧 ±10V

検定コイル 内蔵

電 源 DC±15V

使用温度範囲 -10°C~60°C

防水性 JIS-C-0920 保護等級 5 防滴型

外形寸法・重量 W240×D180×H108mm (ベース含む), 約 2.5kg

- ・同上用保護カバー

材 質 SPCC

外形寸法・重量 300×290×H160mm, 約 2kg

- ・低層棟 1 階用 (DC/DC コンバータ内蔵)

型 名 AS-303D3W5

成分数 加速度 水平 2, 鉛直 1 成分

変換制動方式 フォースバランスサーボ方式

測定周波数 DC~100Hz

測定範囲 加速度±3000Gal 以上

感 度 加速度 3.333mV/Gal

分解能 加速度 約 5mGal

最大出力電圧 ±10V

検定コイル 内蔵

電 源 DC±15V

使用温度範囲 -10°C~60°C

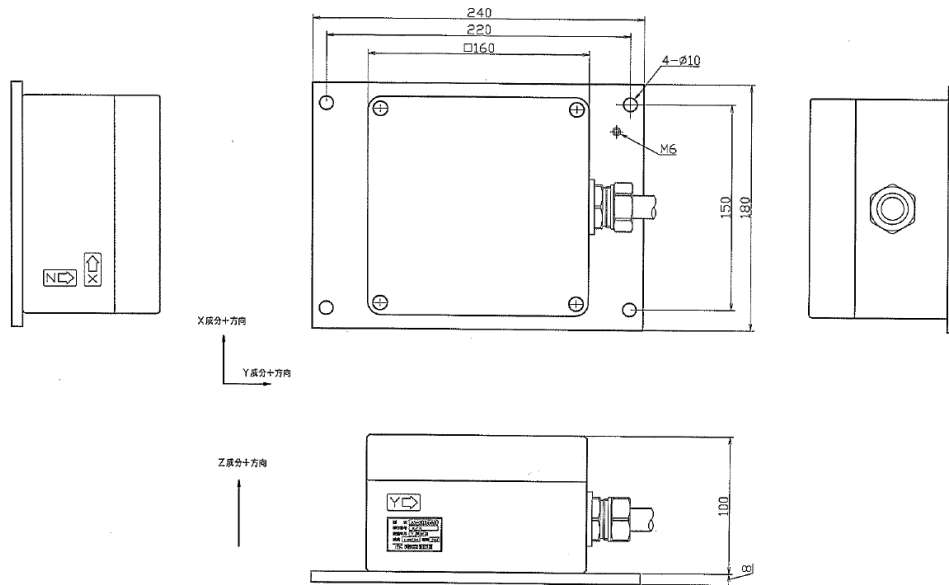
防水性 JIS-C-0920 保護等級 5 防滴型

外形寸法・重量 W400×D200×H106mm (ベース含む), 約 3kg

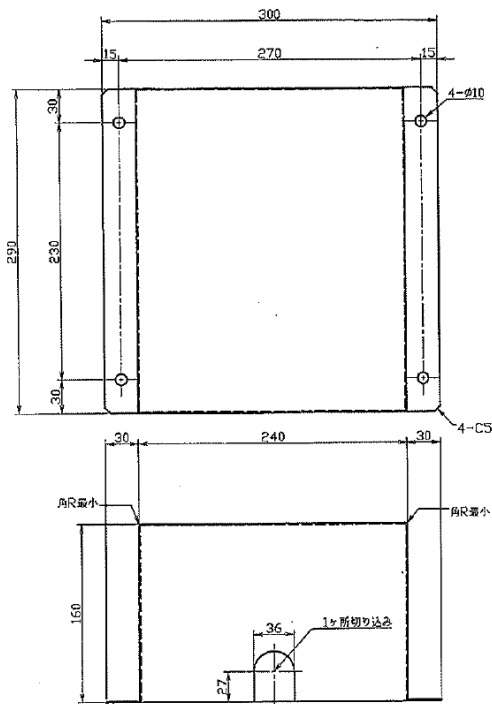
- ・同上用保護カバー

材 質 SPCC

外形寸法・重量 430×280×H130mm, 約 3kg

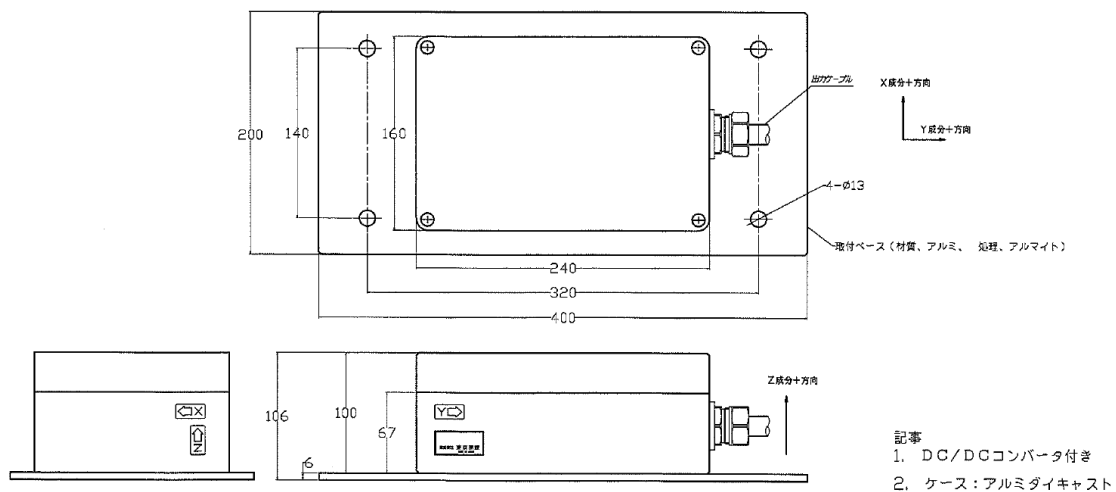


(センサー本体 AS303T1W1)

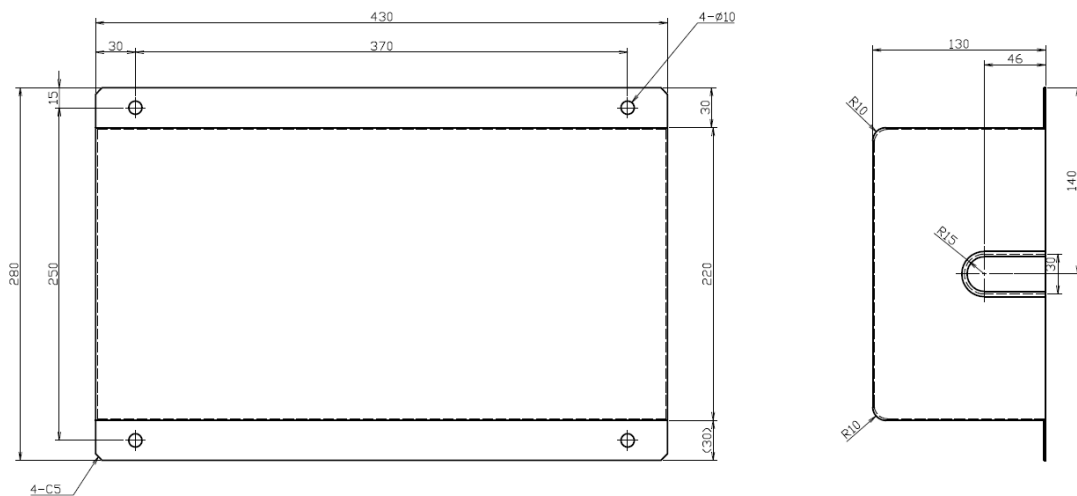


(保護カバー)

図 5.1.1-5 加速度計(AS303T1W1)およびカバー外形図
(高層棟 32 階, 16 階, B2 階 EPS 内設置)



(センサー本体 AS303D3W5)

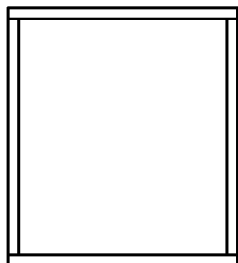


(保護カバー)

図 5.1.1-6 加速度計 (AS303D3W5) 及びカバー外形図
(低層棟 1 階 EPS 内設置)

データ集録装置

型名	VIP-19-12
入力部	
入力成分数	12成分
測定周波数範囲	DC～30Hz (-3dB)
入力感度	3.255mV/Gal
測定範囲	加速度±3072Gal
AD変換器	分解能:24bit
サンプリング周波数	100Hz 固定
ローパスフィルタ	遮断周波数 30Hz (-3dB), 減衰傾度-36dB/oct バタワースフィルタ
実効ダイナミックレンジ	120dB 以上
記録部	
記録媒体	コンパクトフラッシュ 最大 2GB
記録時間	1 地震記録 最大 10 分間
プリトリガ時間	最長 300 秒
ポストトリガ時間	最長 300 秒
主な記録内容	機番
記録編集	新しい記録ファイルを優先保存
通信部	
イーサネットポート	10/100Base-TX, 1ポート TCP/IP (telnet, FTP) 通信内容:波形転送および諸動作設定
電源部	
動作電源	AC100V±10%, 50/60Hz
停電補償	内蔵バッテリーで1時間以上のバックアップが可能
加速度計供給電源	DC±15V
動作環境	
温度	-10℃-45℃
湿度	90%RH 以下
避雷対策	アレスタを実装
外形寸法	W430×D300×H200mm, JIS ラック実装
重量	約 10kg
<u>収納ラック</u>	
構造	自立型収納キャビネット盤 1列盤構造
材質	アルミフレーム, 鋼板パネル, 等辺山型鋼ベース
実装機器等	端子台, データ集録装置, 小型パソコン, 小型ディスプレイ, シャットダウン用UPS, ルータ, 耐雷トランス, 無停電電源装置
塗装色	フレーム:白アルマイト 天井, サイドパネル, リアパネル:メーカー標準色 実装機器:メーカー標準色 フロントメクラパネル:メーカー標準色
寸法	W535×D600×H1105mm
その他	前面扉なし



平面図

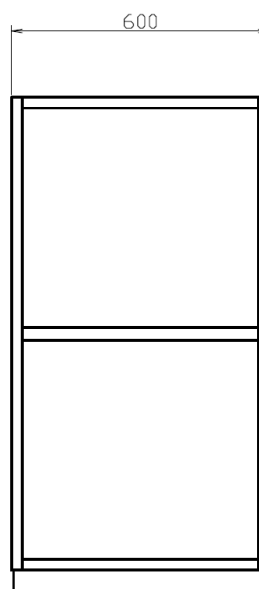
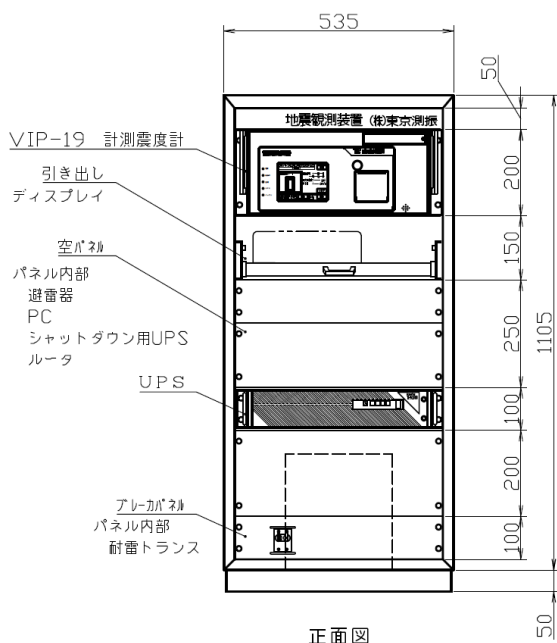


図 5.1.1-7 収納ラック外形図(高層棟 19 階 設置)

4) 収録条件

各観測点で水平2方向と上下方向の3成分, 4観測点で合計12成分を観測している。
表 5.1.1-3 にチャンネル対応を示す。

表 5.1.1-3 チャンネル対応表

CH	建物	階	方向
1	低層棟	1F	X(短辺)
2			Y(長辺)
3			Z(上下)
4	高層棟	B2F	X(短辺)
5			Y(長辺)
6			Z(上下)
7		16F	X(短辺)
8			Y(長辺)
9			Z(上下)
10		32F	X(短辺)
11			Y(長辺)
12			Z(上下)

収録開始の条件(起動値)は, B2階のXY方向のセンサーの観測値に対して設定し, 0.5Gal としている。プリトリガは20秒とする。収録終了の条件は, B2階のXY方向および32階のXY方向に対して設定し, B2階で0.5Gal, 32階では1.0Galとしている。終了判断時間は30秒とする。最大記録長は10分間である。サンプリング振動数は100Hzとする。

<起動条件>

	起動値	終了値
B2階 X	0.5Gal	0.5Gal
B2階 Y	0.5Gal	0.5Gal
32階 X		1.0Gal
32階 Y		1.0Gal

<記録条件>

プリトリガ時間	20秒
終了判断時間	30秒
記録上書きモード	最新
最大ファイル記録長	10分
サンプリング振動数	100Hz

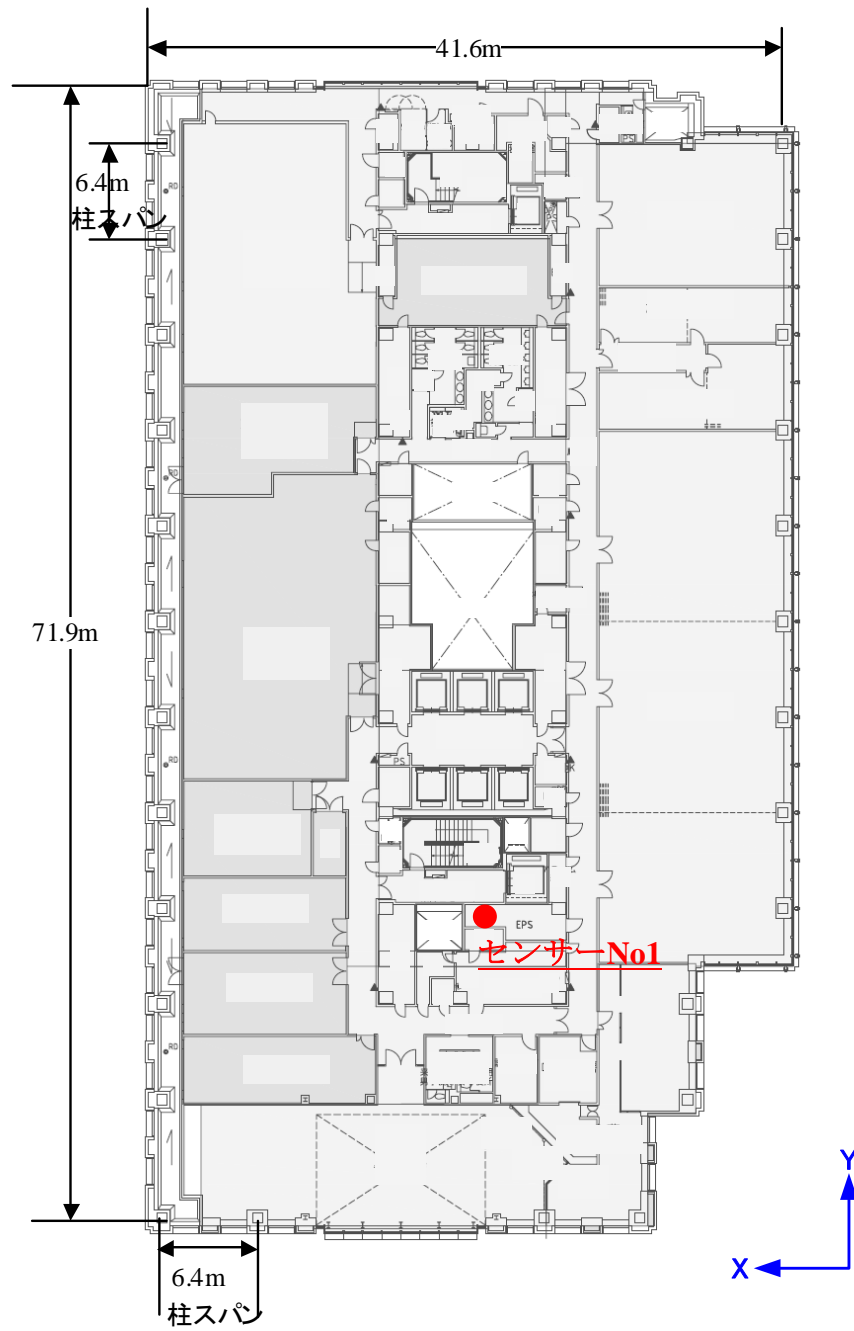


図 5.1.1-8 加速度計の設置位置(高層棟 32 階)

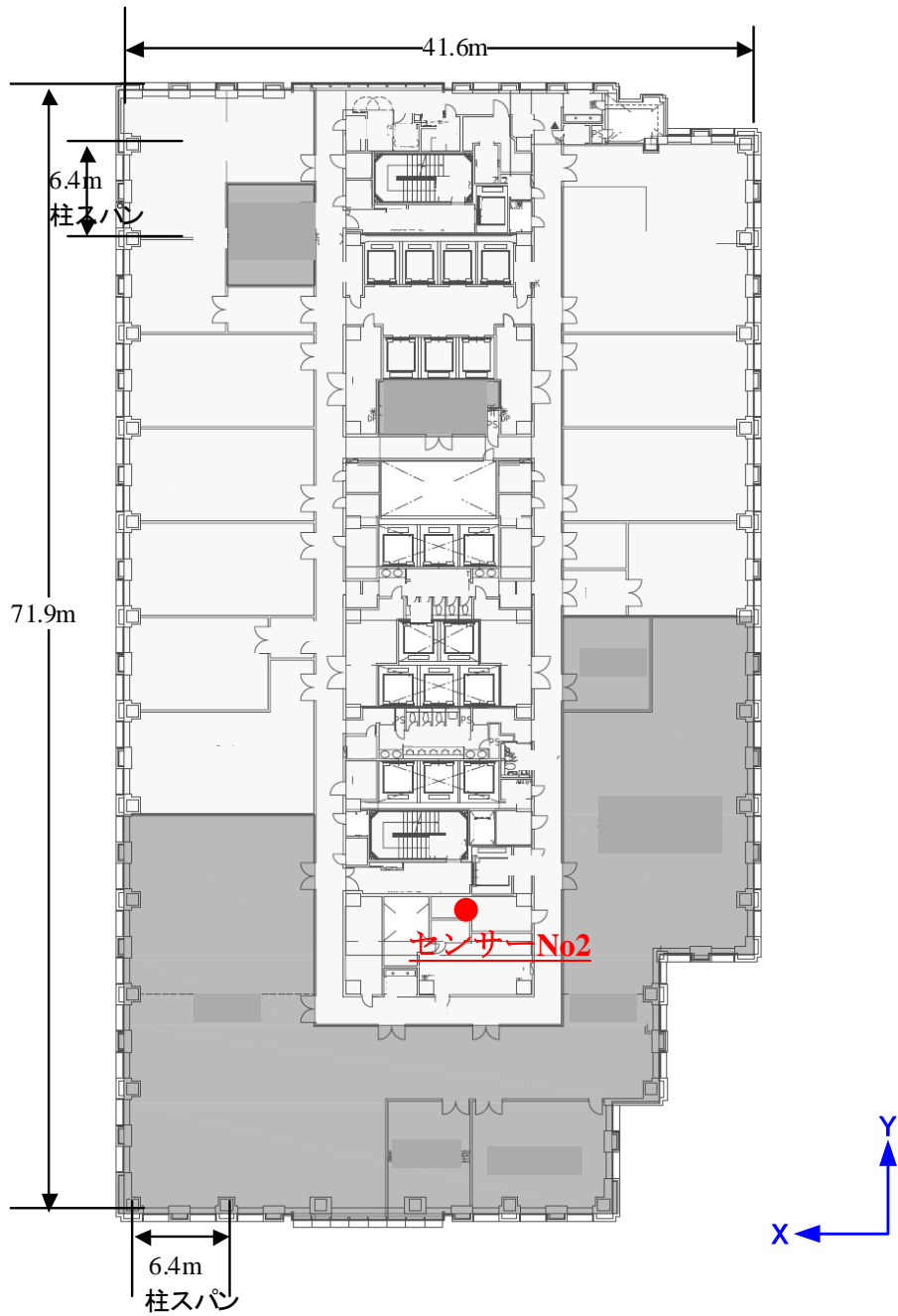


図 5.1.1-9 加速度計の設置位置(高層棟 16 階)

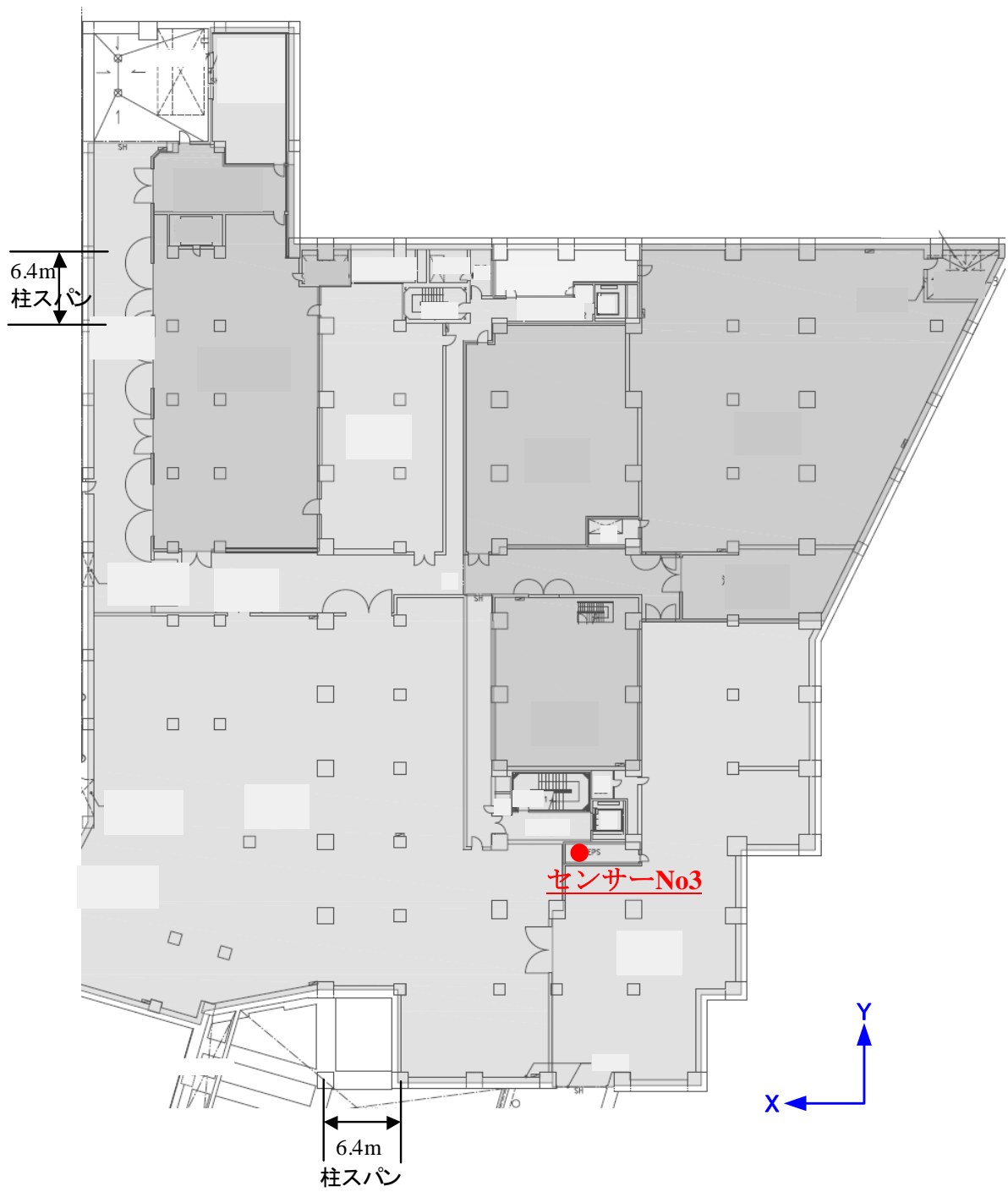


図 5.1.1-10 加速度計の設置位置(高層棟 B2 階)



センサーNo.1
(高層棟32F)



センサーNo.2
(高層棟16F)



センサーNo.3
(高層棟B2F)



センサーNo.4
(低層棟1F)



収録装置
(高層棟19F)

写真 5.1.1-1 加速度計および収録装置の設置状況

(3) 観測結果

1) 観測期間

2011年1月17日～2011年3月10日

2) 観測地震

前述の起動条件により，観測期間に検知された地震は3つであった。観測された地震の諸元および当観測点での計測震度（B2階，低層棟1階），32階，B2階の最大加速度を表5.1.1-4に示す。

表 5.1.1-4 観測地震一覧

発生日時	震源	M	深さ	計測震度		最大加速度(Gal)			
				B2F	低層棟1F	32F_X	32F_Y	B2F_X	B2F_Y
2011/2/5 10:56	千葉県南東沖	5.2	64	2.2	2.3	9.4	5.0	4.8	3.2
2011/2/10 22:03	福島県沖	5.4	48	0.6	0.7	1.2	1.9	0.7	0.8
2011/3/9 11:46	三陸沖	7.2	10	1.7	1.7	6.9	6.0	2.4	2.2

3) 観測記録の分析

観測された3つの地震について、観測記録の最大応答値を表5.1.1-5～表3.2.1-7に示し、高層棟B2階と低層棟1階における速度応答スペクトルを図5.1.1-11～図5.1.1-13に比較して示す。応答スペクトルは低層棟のほうが若干大きい、形状はよく対応している。

2011年2月5日の千葉県南東沖の地震については、より詳細な観測記録とその分析結果を次頁以降に示す。

千葉県南東沖の地震 2011年2月5日10時56分頃発生 M5.2 深さ64km

表 5.1.1-5 計測震度と各測定点の最大加速度

階	計測震度 (震度階)	最大加速度 (Gal)			最大相対変位 (cm)	
		X	Y	Z	X	Y
32F	—	9.4	5.0	2.7	0.2	0.2
16F	—	4.9	4.2	1.9	0.1	0.1
B2F	2.2 (2)	4.8	3.2	0.9	—	—
低層棟1F	2.3 (2)	5.4	3.6	2.2	—	—

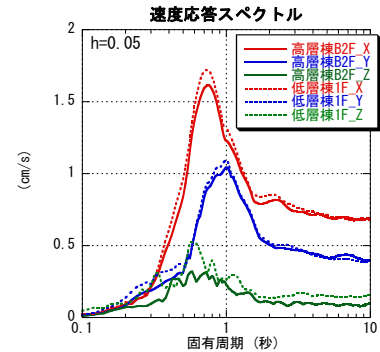


図 5.1.1-11 速度応答スペクトル

福島県沖の地震 2011年2月10日22時03分頃発生 M5.4 深さ48km

表 5.1.1-6 計測震度と各測定点の最大加速度

階	計測震度 (震度階)	最大加速度 (Gal)			最大相対変位 (cm)	
		X	Y	Z	X	Y
32F	—	1.2	1.9	1.6	0.1	0.1
16F	—	0.9	1.1	1.1	0.0	0.0
B2F	0.6 (1)	0.7	0.8	0.5	—	—
低層棟1F	0.7 (1)	1.0	1.0	0.9	—	—

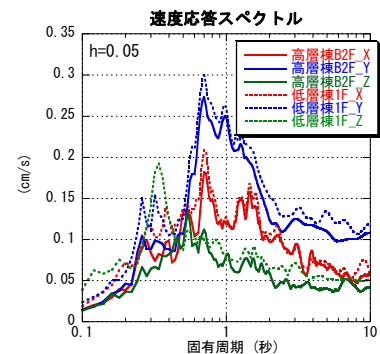


図 5.1.1-12 速度応答スペクトル

三陸沖の地震 2011年3月9日11時46分頃発生 M7.2 深さ10km

表 5.1.1-7 計測震度と各測定点の最大加速度

階	計測震度 (震度階)	最大加速度 (Gal)			最大相対変位 (cm)	
		X	Y	Z	X	Y
32F	—	6.9	6.0	3.7	1.9	1.4
16F	—	4.8	4.0	2.5	0.9	0.8
B2F	1.7 (2)	2.4	2.2	1.4	—	—
低層棟1F	1.7 (2)	2.7	2.4	1.5	—	—

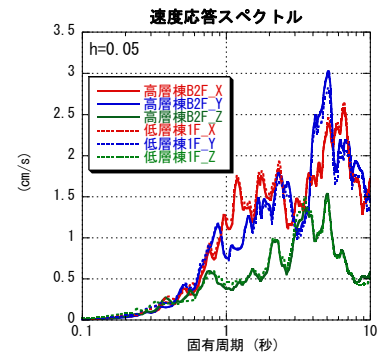


図 5.1.1-13 速度応答スペクトル

千葉県南東沖の地震（2011年2月5日）発生時に、各観測点で得られた加速度波形を図 5.1.1-14～図 5.1.1-16 に、加速度の積分により求めた速度波形を図 5.1.1-17～図 5.1.1-18 に、B2 階に対する 32 階および 16 階の相対変位波形を図 5.1.1-19～図 5.1.1-20 に示す。

また、各観測点の加速度フーリエスペクトルを図 5.1.1-21～図 5.1.1-24 に示す。

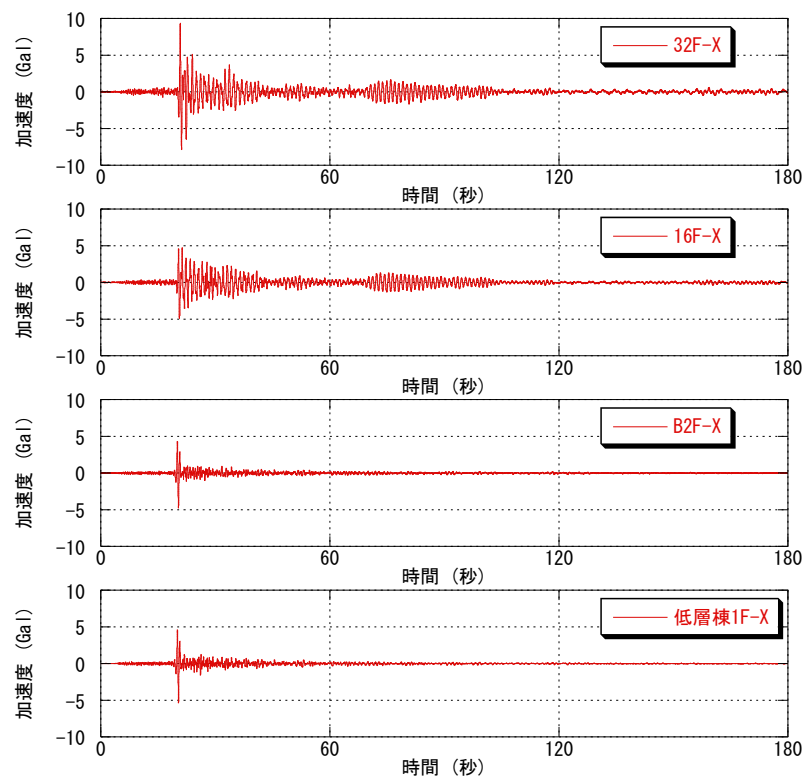


図 5.1.1-14 加速度波形(X(短辺)方向)
(千葉県南東沖の地震 2011年2月5日)

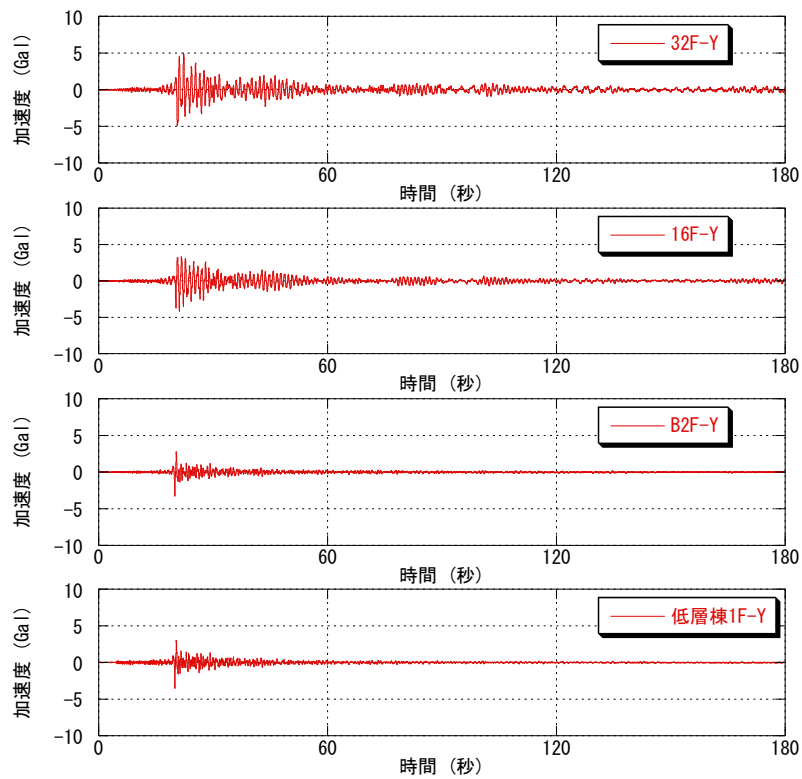


図 5.1.1-15 加速度波形(Y(長辺)方向)
(千葉県南東沖の地震 2011年2月5日)

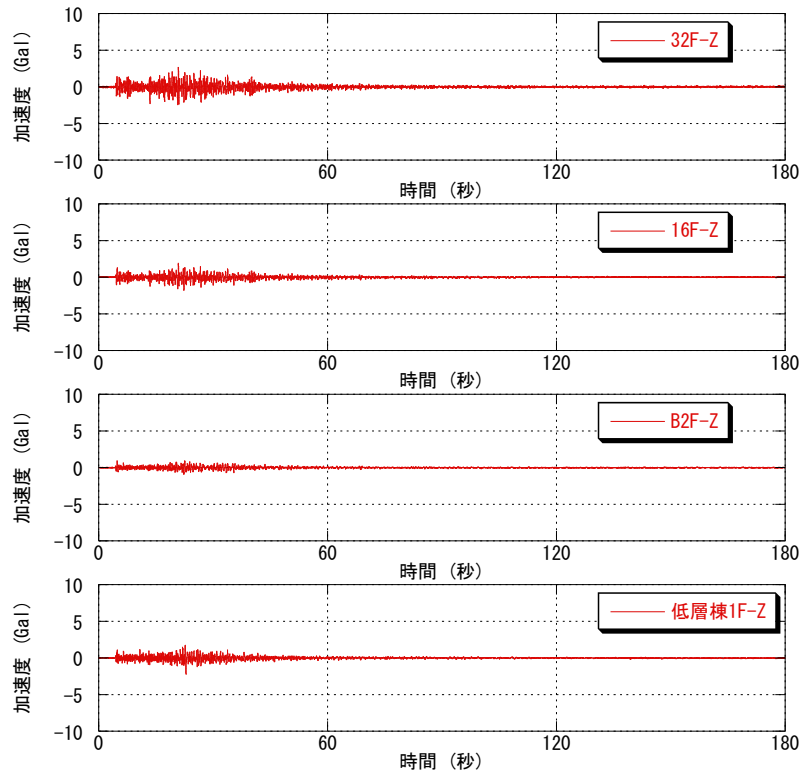


図 5.1.1-16 加速度波形(Z方向)
(千葉県南東沖の地震 2011年2月5日)

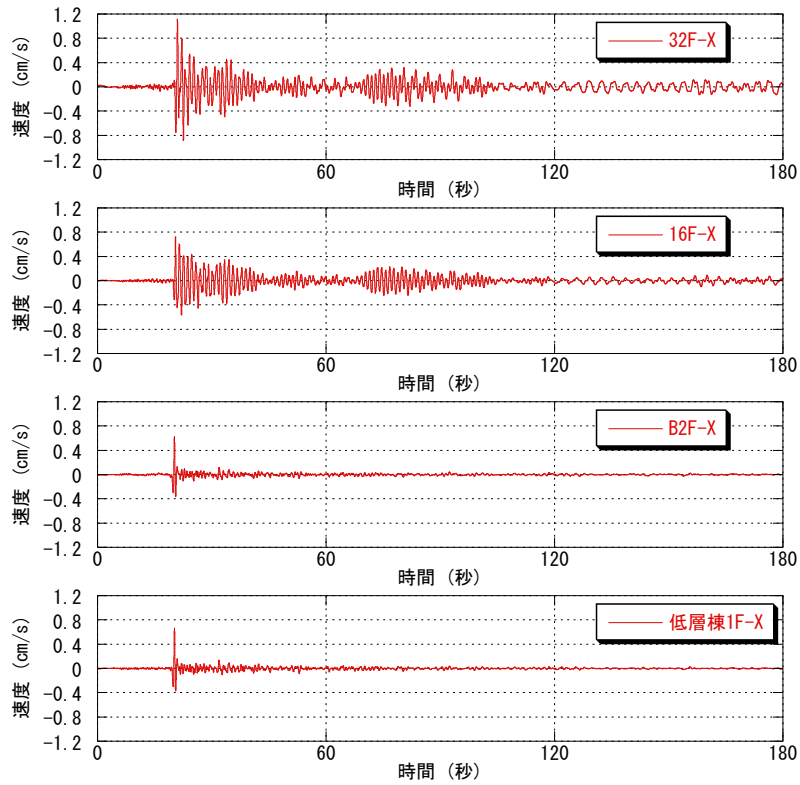


図 5.1.1-17 速度波形(X(短辺)方向)
(千葉県南東沖の地震 2011年2月5日)

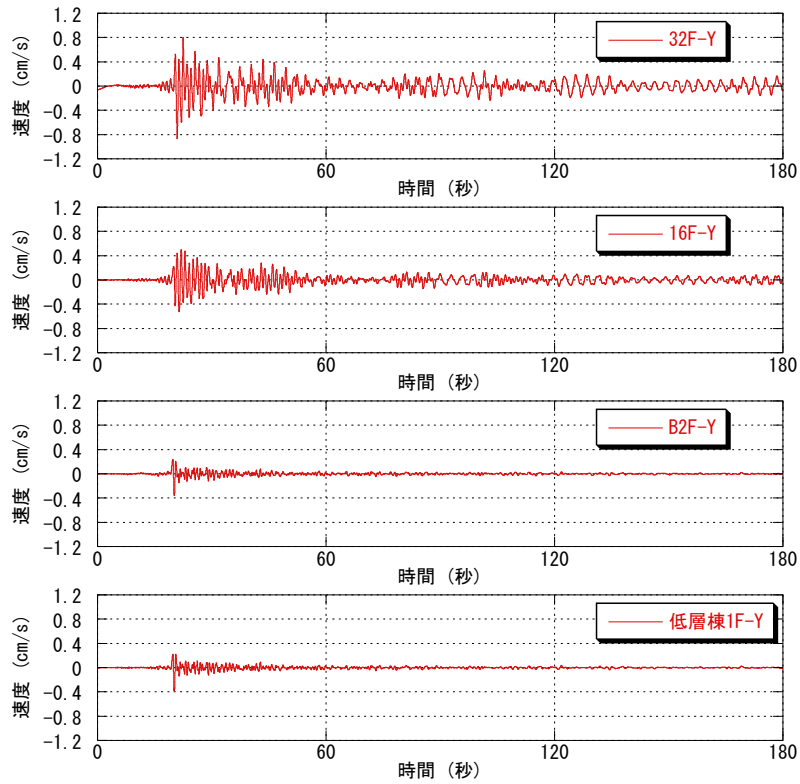


図 5.1.1-18 速度波形(Y(長辺)方向)
(千葉県南東沖の地震 2011年2月5日)

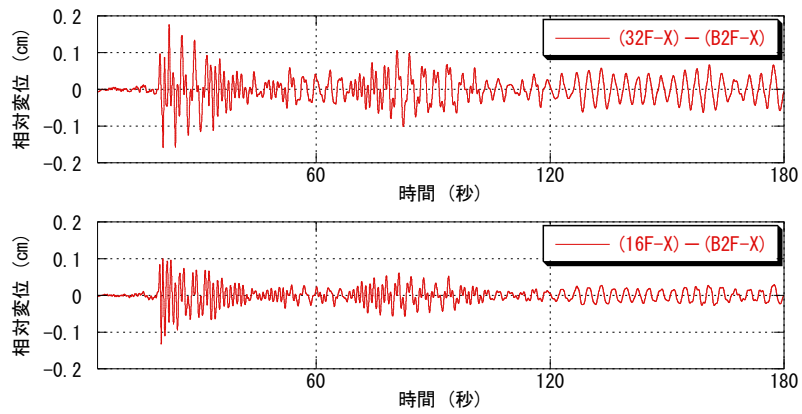


図 5.1.1-19 B2F に対する相対変位波形(X(短辺)方向)
(千葉県南東沖の地震 2011年2月5日)

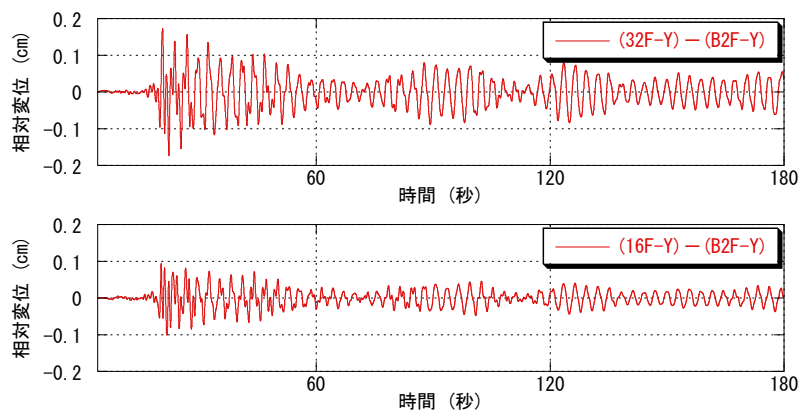


図 5.1.1-20 B2F に対する相対変位波形(Y(長辺)方向)
(千葉県南東沖の地震 2011年2月5日)

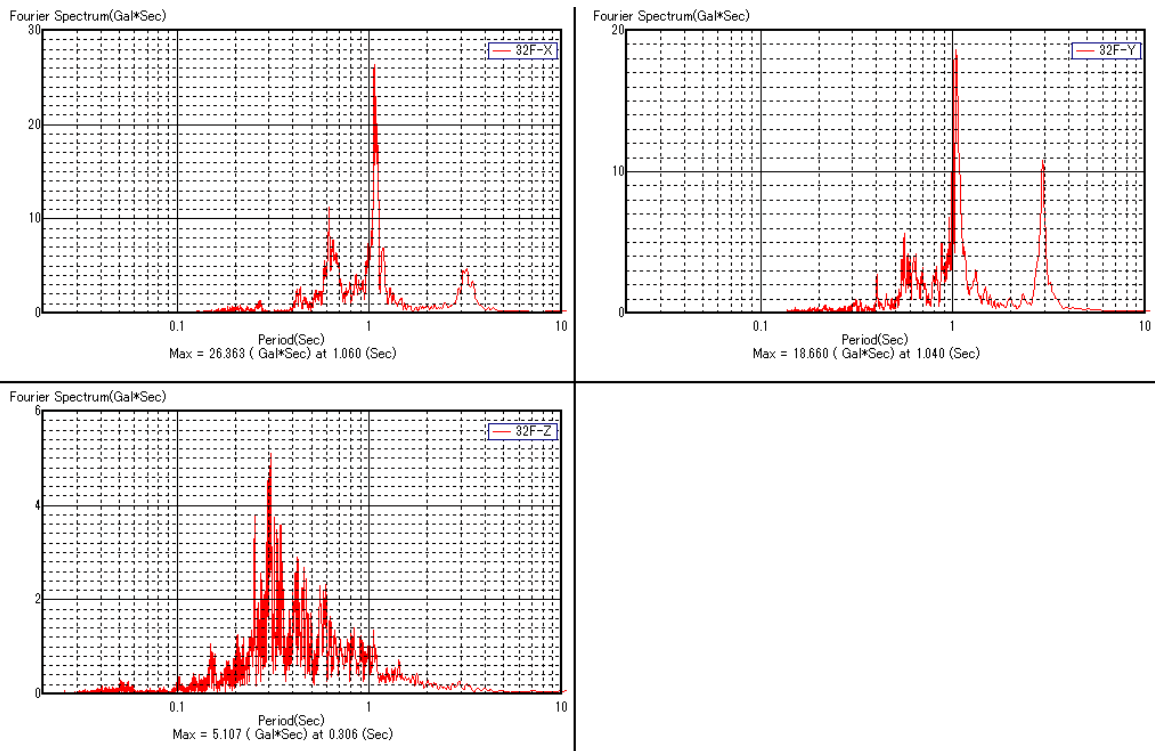


図 5.1.1-21 フーリエスペクトル(32 階)
(千葉県南東沖の地震 2011 年 2 月 5 日)

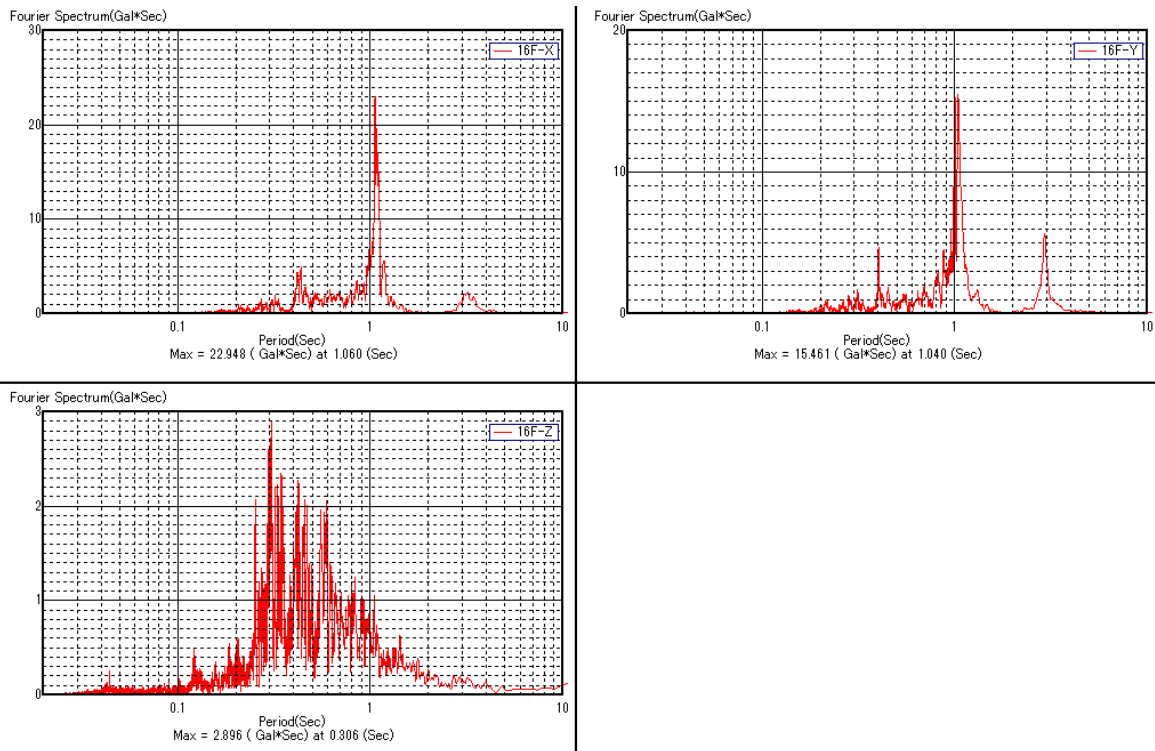


図 5.1.1-22 フーリエスペクトル(16 階)
(千葉県南東沖の地震 2011 年 2 月 5 日)

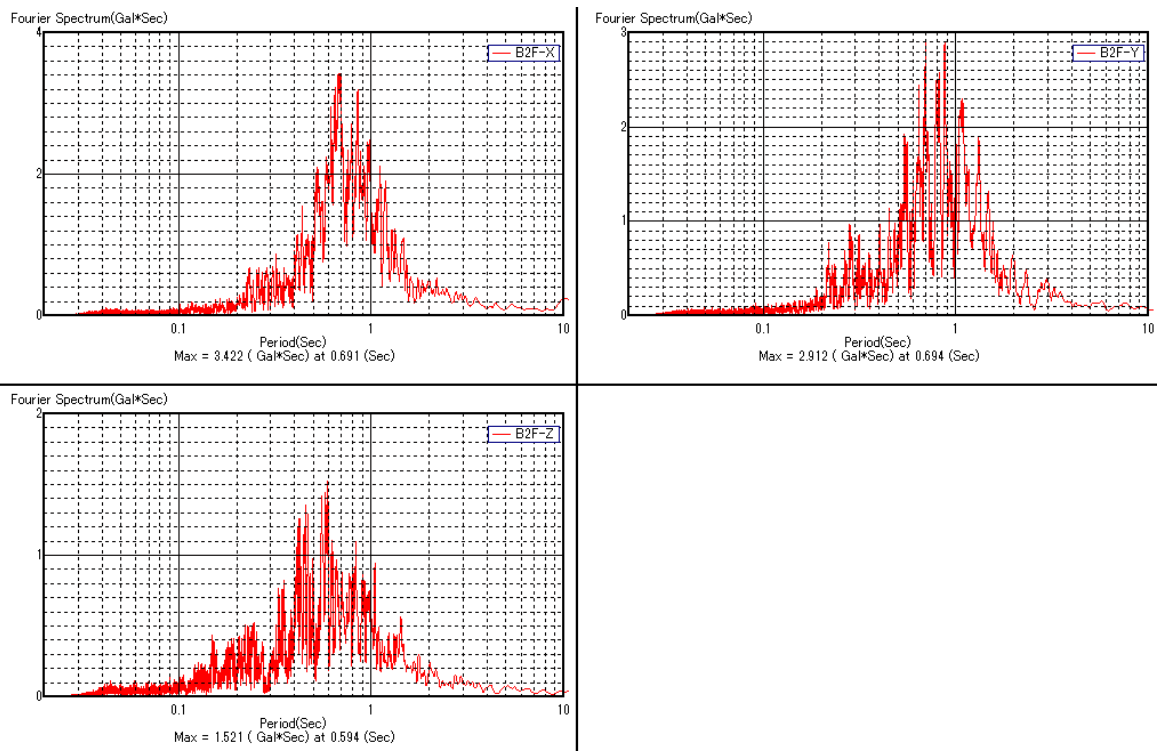


図 5.1.1-23 フーリエスペクトル(B2階)
 (千葉県南東沖の地震 2011年2月5日)

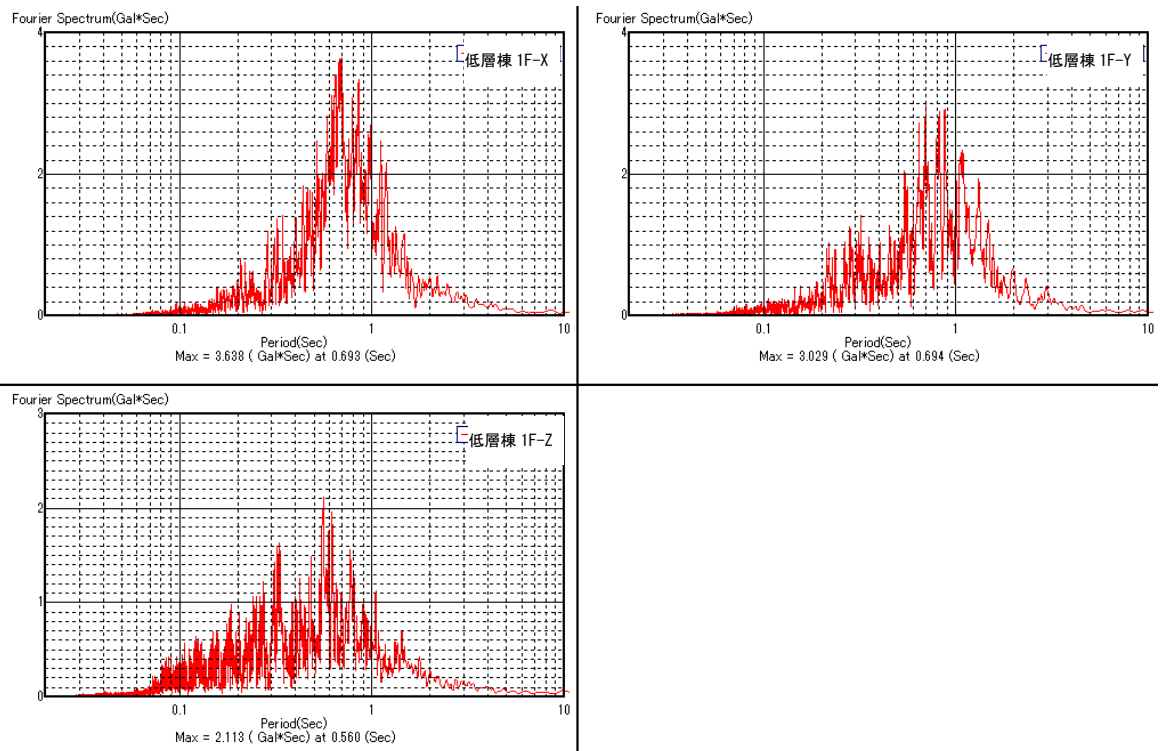
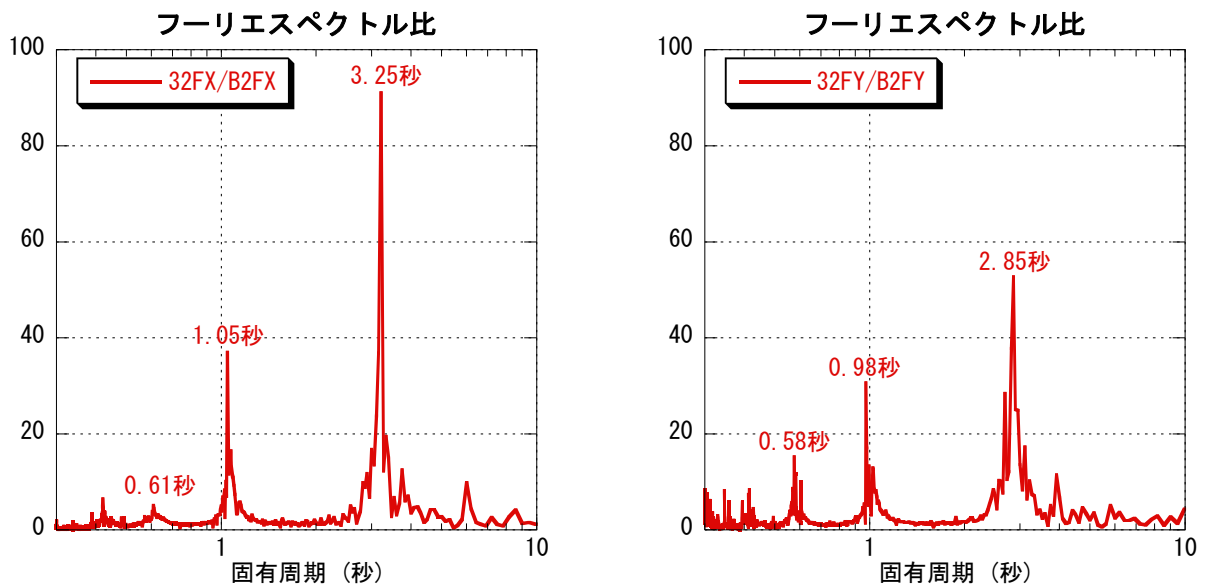


図 5.1.1-24 フーリエスペクトル(低層棟1階)
 (千葉県南東沖の地震 2011年2月5日)

建物の地震時における振動特性をみるため、B2階に対する32階のフーリエスペクトル比を算出した。図5.1.1-25に示す。固有周期は、X(短辺)方向1次で3.25秒、Y(長辺)方向1次で2.85秒であった。

1～3次モードの固有周期をまとめて表5.1.1-8に示す。



(a) X(短辺)方向

(b) Y(長辺)方向

図 5.1.1-25 フーリエスペクトル比 (32階/B2階)

(千葉県南東沖の地震 2011年2月5日)

表 5.1.1-8 地震時の固有周期

	固有周期(秒)	
	X	Y
1次	3.25	2.85
2次	1.05	0.98
3次	0.61	0.58

また、高層棟と低層棟での入力動の違いをみるため、B2階と低層棟1階のフーリエスペクトルにスムージング処理を施して、図 5.1.1-26 に重ねて示す。X および Y 方向ではおおよそ 0.5 秒より短い周期で、Z 方向ではおおよそ 0.8 秒より短い周期で、B2 階のほうが低層棟 1 階より振幅が小さい傾向がみられる。

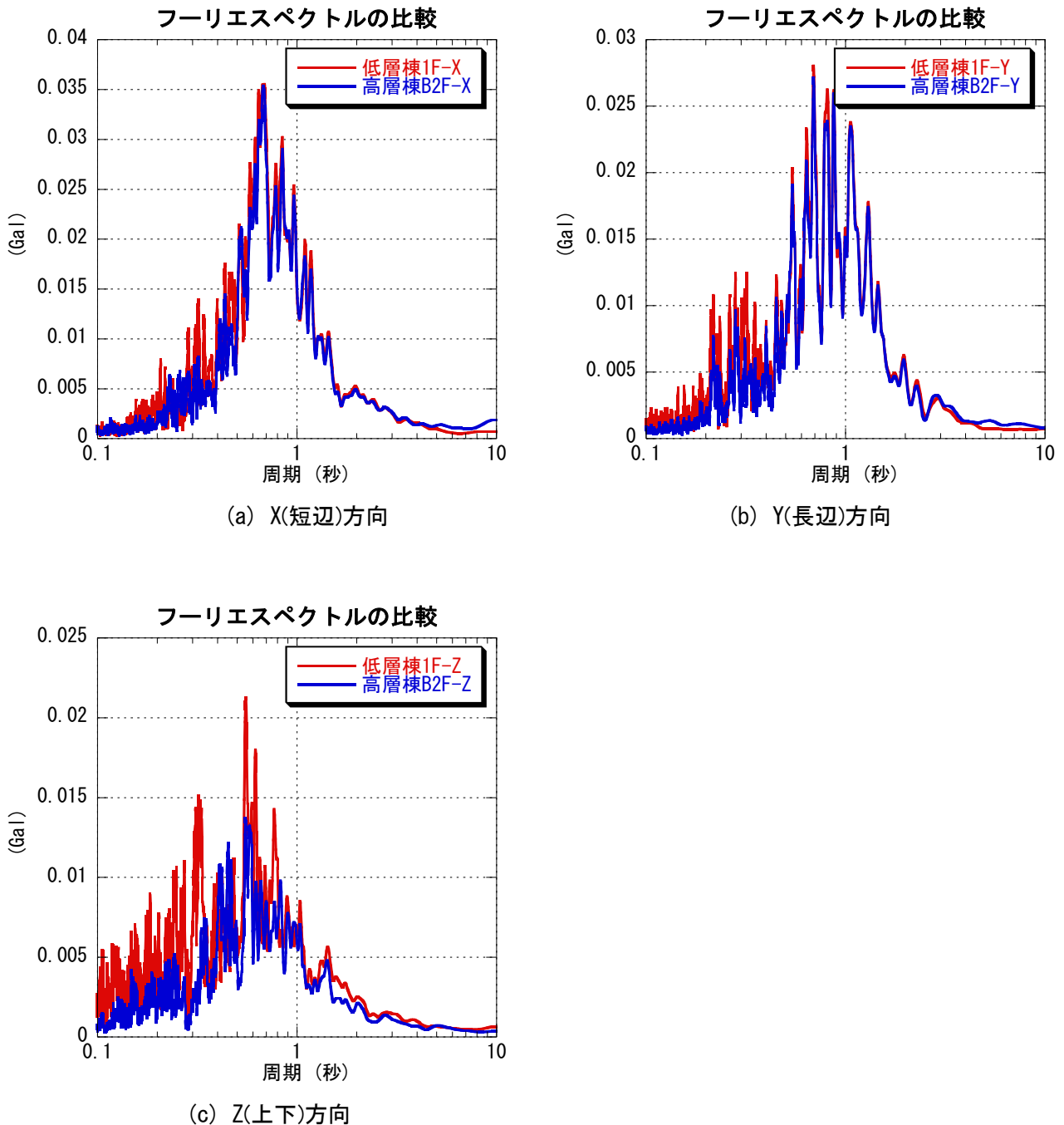


図 5.1.1-26 フーリエスペクトル (低層棟 1 階, 高層棟 B2 階)
(千葉県南東沖の地震 2011 年 2 月 5 日)

4) 常時微動記録の分析

地震観測システムを利用して常時微動計測を実施し、建物の参考特性として、微動時の固有周期および減衰定数を算出した。

測定条件

計測日時：2011年2月10日 午前0:00～午前1:40 (100分間)

サンプリング振動数：100Hz

分析方法

得られた加速度データより、B2階に対する32階の測定点の伝達関数を算出し、そのピークより建物の微動時の固有振動数を求める。伝達関数は、H1推定により求め、1フレームのデータ個数は65536個、オーバーラップは95%とした。

減衰定数は、32階の加速度データから、RD法により自由振動波形を算出し、自由振動波形に対数減衰の理論曲線を最小二乗法でフィッティングさせることにより求める。

測定結果

伝達関数(32階/B2階)を図5.1.1-27に示す。建物の固有振動数は、X(短辺)方向1次が3.15秒、X(短辺)方向2次が1.04秒、Y(長辺)方向1次が2.81秒、Y(長辺)方向2次が0.96秒であった。

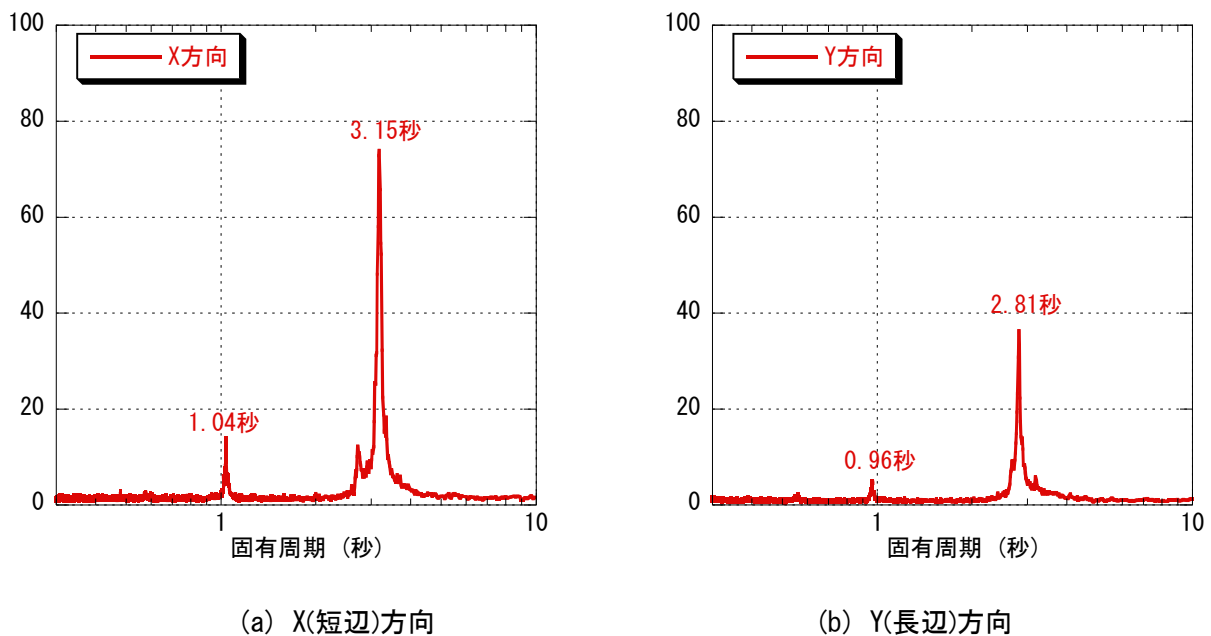


図 5.1.1-27 常時微動記録による伝達関数

1次モードについて、RD法で得られた自由振動波形と、自由振動波形に対数減衰の理論曲線をフィッティングさせた結果を図5.1.1-28に示す。RD法での波形の重ね合わせ数は、X(短辺)方向で1866、Y(長辺)方向で2114であった。X(短辺)方向1次モードの減衰定数は0.5%、Y(長辺)方向1次モードの減衰定数は0.9%であった。

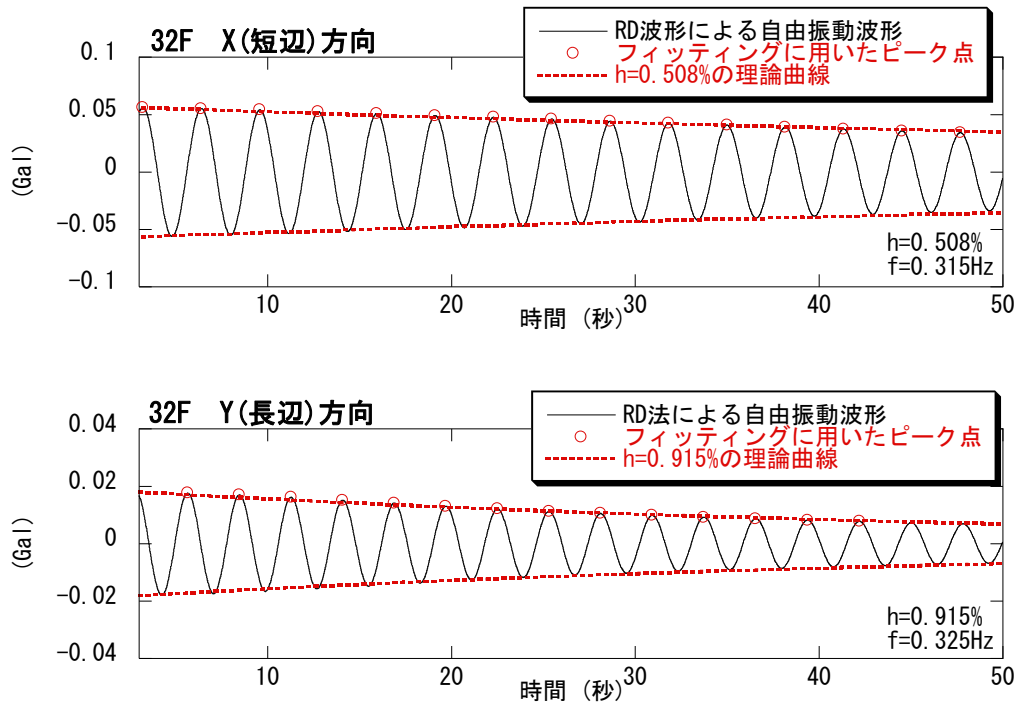


図 5.1.1-28 RD法による自由振動波形と減衰定数の同定

(4) まとめ

- ・ 観測対象建物 NHSK ビル（高層棟：鉄骨造 33 階建て，低層棟：鉄骨鉄筋コンクリート造 6 階建て）に地震観測装置を設置し，2011 年 1 月 17 日より地震観測を開始した。高層棟と低層棟では建物規模および基礎構造が異なり，高層棟は建物規模が大きく地階があるのに対して，低層棟は建物規模が比較的小さく地階がない。
- ・ センサーは高層棟の B2 階，16 階，32 階，および低層棟の 1 階の計 4 箇所に設置し，それぞれ水平 2 方向および上下方向，合計 12 成分を観測している。
- ・ 観測期間 2011 年 1 月 17 日～2011 年 3 月 10 日において，3 地震が観測され，千葉県南東沖を震源とする地震（2011 年 2 月 5 日）では計測震度 2.2，福島県沖を震源とする地震（2011 年 2 月 10 日）では計測震度 0.6，三陸沖を震源とする地震（2011 年 3 月 9 日）では計測震度 1.7 が観測された。
- ・ 千葉県南東沖の地震時において，高層棟の 1 次モードの固有周期は，X（短辺）方向で 3.25 秒，Y（長辺）方向で 2.85 秒であった。
- ・ 低層棟 1 階と高層棟 B2 階の地震時のフーリエスペクトルを比較すると，水平方向ではおおよそ 0.5 秒より短い周期において，上下方向ではおおよそ 0.8 秒より短い周期において，高層棟 B2 階のほうが振幅が小さい傾向がみられた。
- ・ 建物の振動の参考特性として，常時微動時の振動データを取得し分析した。その結果，1 次モードの固有周期は，X（短辺）方向で 3.15 秒，Y（長辺）方向で 2.81 秒であり，減衰定数は，X（短辺）方向で 0.5%，Y（長辺）方向で 0.9%であった。
- ・ 1 次モードの固有周期は，計測震度 2.2 の地震時では，微動時とほぼ同程度（1～3%程長い）であった。

(5) 2011年3月11日 東北地方太平洋沖地震 の観測速報

1) 東北地方太平洋沖地震（本震）の諸元

発震時刻 2011年3月11日 14時46分頃
 震央位置 北緯38.0度 東経142.9度
 発生位置 三陸沖
 震源深さ 約10km
 地震規模 気象庁マグニチュード9.0

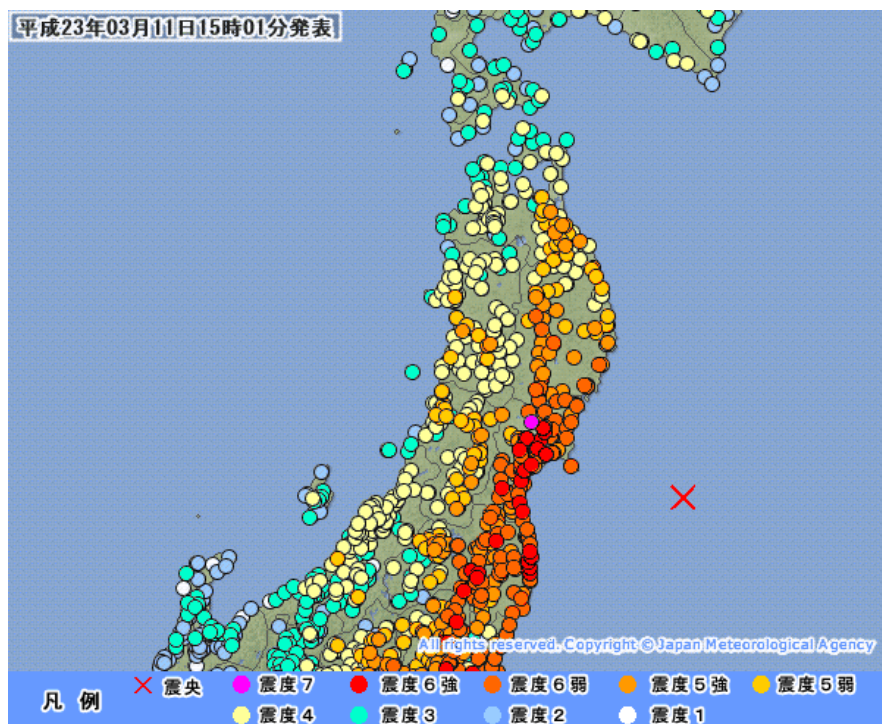


図 5.1.1-29 震度分布(気象庁 HP より)

震度 7

宮城県北部

震度 6+

宮城県南部 宮城県中部 福島県中通り 福島県浜通り 茨城県北部 茨城県南部 栃木県北部 栃木県南部

震度 6-

岩手県沿岸南部 岩手県内陸北部 岩手県内陸南部 福島県会津 群馬県南部 埼玉県南部 千葉県北西部

震度 5+

青森県三八上北 岩手県沿岸北部 秋田県沿岸南部 秋田県内陸南部 山形県村山 山形県置賜 群馬県北部 埼玉県北部 千葉県北東部 千葉県南部 東京都23区 新島 神奈川県東部 山梨県中・西部 山梨県東部・富士五湖

震度 5-

秋田県沿岸北部 山形県庄内 山形県最上 埼玉県秩父 東京都多摩東部 神奈川県西部 新潟県中越 長野県中部 静岡県東部

震度 4

石狩地方北部 石狩地方南部 渡島地方東部 渡島地方西部 檜山地方 空知地方南部 上川地方南部 胆振地方中東部 日高地方中部 日高地方東部 十勝地方北部 十勝地方中部 十勝地方南部 釧路地方中南部 青森県津軽北部 青森県津軽南部 青森県下北 秋田県内陸北部 東京都多摩西部 神津島 新潟県上越 新潟県下越 新潟県佐渡 長野県北部 長野県南部 岐阜県美濃中西部 静岡県伊豆 静岡県中部 静岡県西部 愛知県西部

2) 観測記録一覧

2011年3月11日～16日に観測された記録の一覧を表5.1.1-9に示す。57の記録が得られた。
(ただし、地震が絶え間なく発生している場合には、1記録と1地震は必ずしも対応していない。)

表 5.1.1-9 観測記録一覧(2011.3.11-2011.3.16)

発生日時	計測震度		最大加速度(Gal)				最大変位(cm)	
	B2F	低層棟1F	32F_X	32F_Y	B2F_X	B2F_Y	32F_X	32F_Y
2011/3/11 14:47	4.3	4.5	190.6	179.0	66.6	52.2	33.84	32.32
2011/3/11 14:57	1.4	1.5	11.3	7.7	3.5	2.2	3.05	2.14
2011/3/11 15:07	3.8	3.9	91.6	126.9	22.6	31.2	26.1	28.54
2011/3/11 15:17	2.9	2.9	59.8	72.1	10.0	11.4	20.02	21.99
2011/3/11 15:27	2.2	2.2	10.3	8.1	4.2	4.0	2.69	1.62
2011/3/11 15:38	0.4	0.4	2.2	1.8	0.6	0.7	0.39	0.4
2011/3/11 15:45	0.9	1.0	2.2	2.1	1.8	1.6	0.15	0.14
2011/3/11 15:57	1.5	1.5	6.2	6.1	2.1	1.8	1.05	1.32
2011/3/11 16:14	1.7	1.7	12.2	10.1	2.5	2.1	3.23	2
2011/3/11 16:27	1.7	1.7	8.6	7.0	2.5	2.2	1.89	1.78
2011/3/11 16:43	0.9	1.0	3.1	2.5	1.1	1.1	0.3	0.29
2011/3/11 17:12	2.2	2.4	10.8	12.7	4.7	3.3	2.07	2.45
2011/3/11 17:22	1.2	1.2	7.9	8.2	1.4	1.5	2.53	2.25
2011/3/11 17:32	1.0	1.2	2.8	3.3	1.4	1.5	0.37	0.33
2011/3/11 17:41	1.7	1.8	3.8	3.9	2.8	3.2	0.22	0.19
2011/3/11 17:45	0.6	0.5	1.7	1.8	0.7	0.5	0.34	0.25
2011/3/11 19:22	0.6	0.7	1.6	1.5	0.9	1.2	0.26	0.36
2011/3/11 19:36	0.6	0.7	1.2	1.7	0.6	1.0	0.09	0.06
2011/3/11 20:21	1.5	1.5	3.4	3.1	1.1	2.4	0.33	0.27
2011/3/11 20:38	1.0	1.1	3.7	2.9	0.7	1.2	0.79	0.64
2011/3/11 20:47	0.5	0.8	2.0	2.1	0.9	0.9	0.29	0.22
2011/3/11 21:14	1.1	1.1	3.2	3.3	1.3	1.3	0.53	0.62
2011/3/11 22:17	0.9	1.1	2.6	3.5	1.3	1.2	0.41	0.36
2011/3/11 23:01	1.0	1.1	2.6	2.1	1.1	1.1	0.17	0.23
2011/3/11 23:56	0.8	1.1	3.9	2.3	0.9	1.1	0.41	0.35
2011/3/12 0:13	1.6	1.6	10.4	8.5	2.2	2.5	3.53	2.35
2011/3/12 0:42	0.7	0.8	1.4	1.7	0.8	1.1	0.1	0.14
2011/3/12 3:12	1.1	1.1	4.0	4.5	1.2	1.1	0.69	0.79
2011/3/12 3:44	0.3	0.7	1.1	1.1	0.8	0.7	0.07	0.07
2011/3/12 4:00	1.5	1.5	8.6	6.7	2.9	2.6	2.82	1.75
2011/3/12 4:09	0.4	0.8	1.8	1.4	0.8	0.8	0.3	0.22
2011/3/12 4:24	1.3	1.4	3.7	4.2	2.1	1.8	0.38	0.3
2011/3/12 4:46	0.3	0.4	0.9	1.5	0.6	1.0	0.04	0.04
2011/3/12 5:35	0.9	1.2	1.8	1.5	1.6	1.3	0.04	0.04
2011/3/12 7:36	0.3	0.6	0.8	0.9	0.8	0.8	0.03	0.04
2011/3/12 10:12	0.4	0.4	1.0	1.1	0.6	0.8	0.04	0.06
2011/3/12 10:48	1.0	1.1	5.0	3.9	1.2	1.0	1.27	0.75
2011/3/12 15:44	0.0	0.2	0.9	0.7	0.6	0.7	0.03	0.03
2011/3/12 15:57	0.8	1.1	2.0	1.5	2.6	1.9	0.02	0.02
2011/3/12 22:16	1.4	1.4	2.9	3.1	1.5	1.8	0.32	0.31
2011/3/12 23:15	0.7	1.0	1.4	1.6	1.1	0.9	0.06	0.06
2011/3/13 7:14	0.6	0.7	1.5	2.3	0.8	0.8	0.32	0.34
2011/3/13 8:26	1.0	1.1	3.5	2.8	1.1	1.4	0.62	0.46
2011/3/13 9:33	0.3	0.6	1.4	1.0	0.6	0.8	0.06	0.03
2011/3/13 10:26	1.6	1.8	8.7	6.4	2.2	2.4	2.52	1.75
2011/3/13 20:38	0.6	0.7	2.4	1.9	0.6	0.7	0.37	0.31
2011/3/14 10:03	2.0	2.2	12.8	10.8	3.6	3.4	3.27	1.49
2011/3/14 15:19	0.0	0.4	1.7	1.2	0.6	0.6	0.37	0.18
2011/3/14 15:53	0.3	0.6	1.3	1.3	0.8	0.9	0.09	0.06
2011/3/15 1:36	0.3	0.6	1.1	1.1	1.7	1.6	0.01	0.02
2011/3/15 3:41	0.8	0.8	2.3	1.8	0.7	0.8	0.25	0.19
2011/3/15 4:59	2.0	2.2	8.5	3.8	8.4	10.2	0.05	0.05
2011/3/15 22:29	2.3	2.4	13.5	11.6	4.4	6.6	3.07	2.44
2011/3/16 5:30	0.7	0.8	3.0	3.2	0.7	0.9	0.71	0.85
2011/3/16 12:52	2.3	2.3	8.6	11.4	4.5	5.1	1.01	1.08
2011/3/16 13:15	0.5	0.5	2.9	1.6	1.0	0.8	0.81	0.22
2011/3/16 22:39	2.0	2.1	3.8	7.6	2.4	3.7	0.44	0.35

3) 観測記録の概要

得られた記録のうち、応答値の大きかった本震（2011年3月11日14:46頃発生）と茨城県沖を震源とする地震（2011年3月11日15:15頃発生）の2記録について、観測記録の最大応答値を表5.1.1-10～表5.1.1-11に、高層棟B2階と低層棟1階における速度応答スペクトルを図5.1.1-30～図5.1.1-31に、加速度波形を図5.1.1-32～図5.1.1-37に示す。

東北地方太平洋沖地震 2011年3月11日14時46分頃発生 M9.0 深さ10km

表 5.1.1-10 計測震度と各測定点の最大加速度

階	計測震度 (震度階)	最大加速度(Gal)			最大相対変位 (cm)	
		X	Y	Z	X	Y
32F	—	190.6	179.0	89.8	33.8	32.3
16F	—	140.9	116.5	63.1	17.4	17.2
B2F	4.3 (4)	66.6	52.2	57.7	—	—
低層棟1F	4.5 (5弱)	76.3	62.7	79.6	—	—

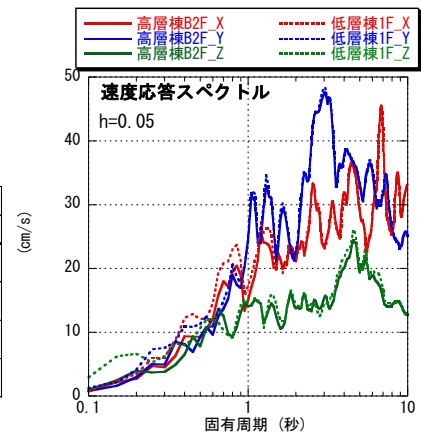


図 2.3.1-30 速度応答スペクトル

茨城県沖の地震 2011年3月11日15時15分頃発生 M7.4 深さ43km

表 5.1.1-11 計測震度と各測定点の最大加速度

階	計測震度 (震度階)	最大加速度(Gal)			最大相対変位 (cm)	
		X	Y	Z	X	Y
32F	—	91.6	126.9	31.1	26.1	28.5
16F	—	50.7	71.3	24.1	12.5	14.1
B2F	3.7 (4)	22.6	31.2	14.3	—	—
低層棟1F	3.7 (4)	23.7	34.9	21.9	—	—

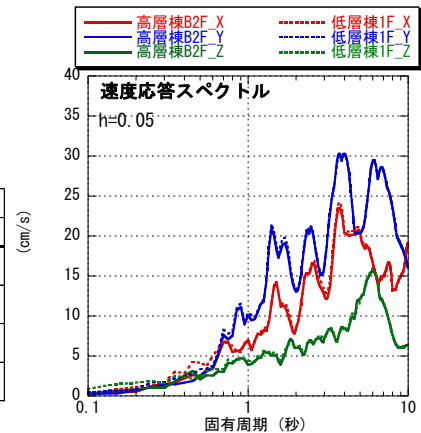


図 2.3.1-31 速度応答スペクトル

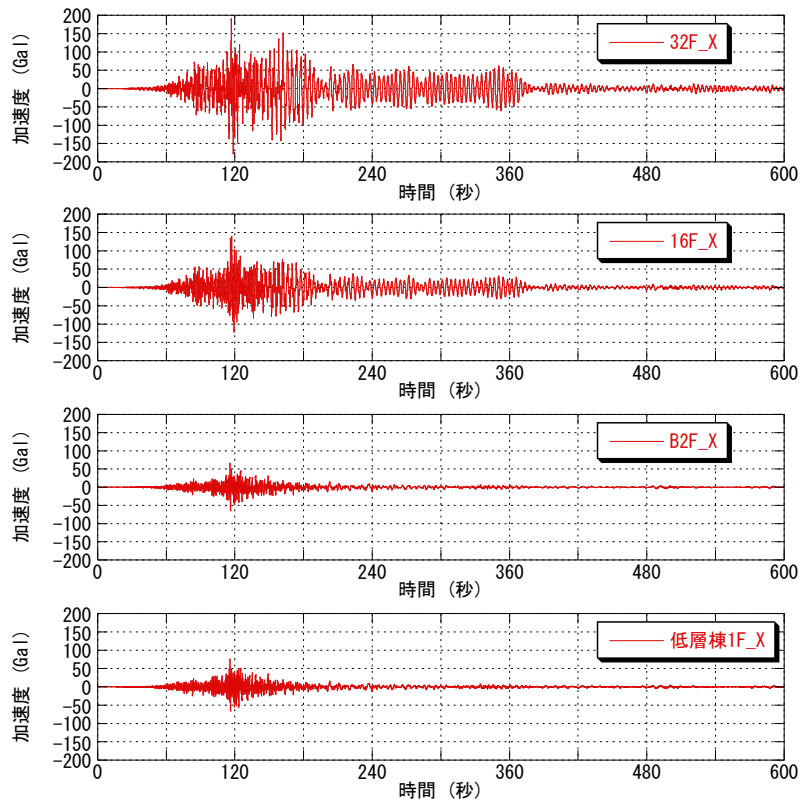


図 5.1.1-32 加速度波形(X(短辺)方向)

(東北地方太平洋沖地震 2011年3月11日 14時46分頃)

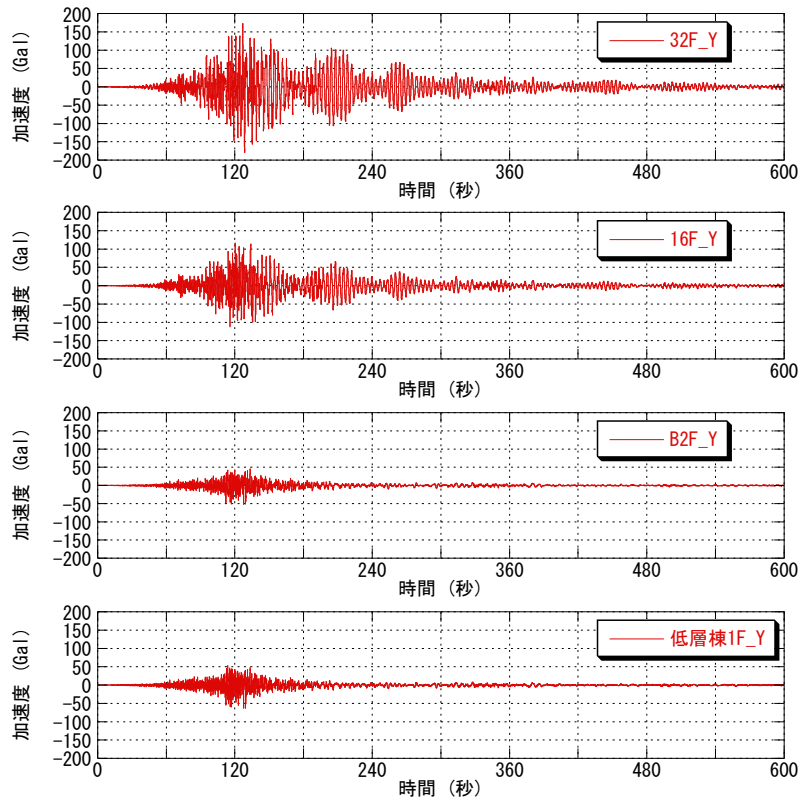


図 5.1.1-33 加速度波形(Y(長辺)方向)

(東北地方太平洋沖地震 2011年3月11日 14時46分頃)

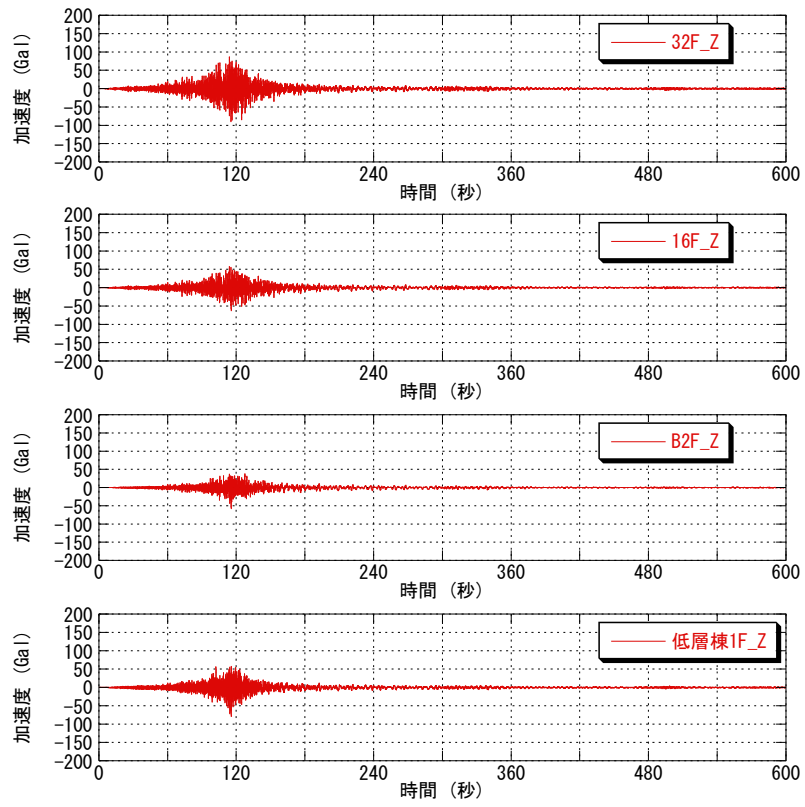


图 5.1.1-34 加速度波形(Z 方向)
 (東北地方太平洋沖地震 2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分頃)

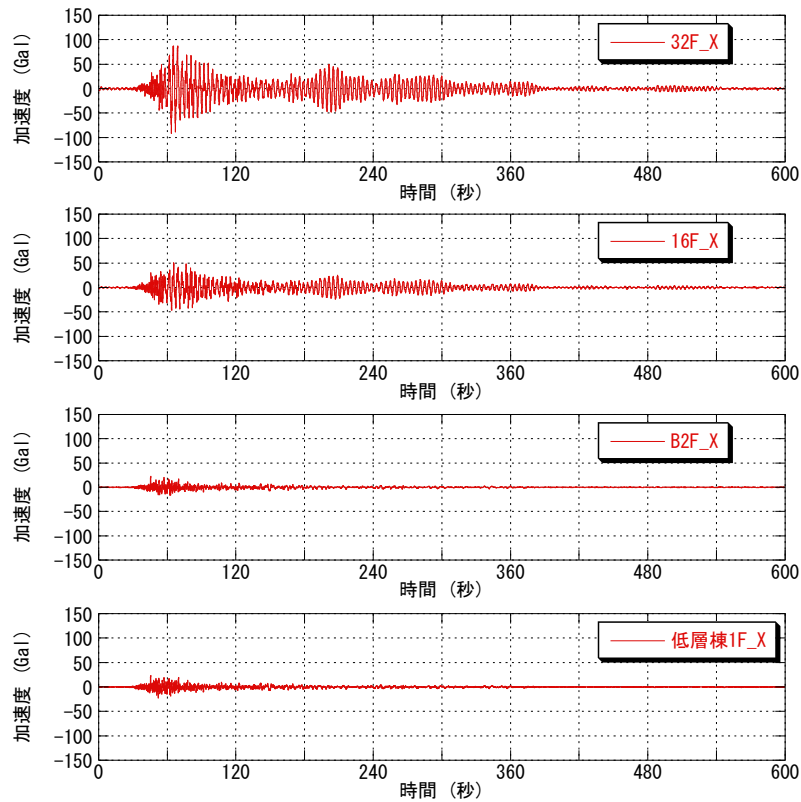


図 5.1.1-35 加速度波形(X(短辺)方向)

(茨城県沖の地震 2011年3月11日 15時15分頃)

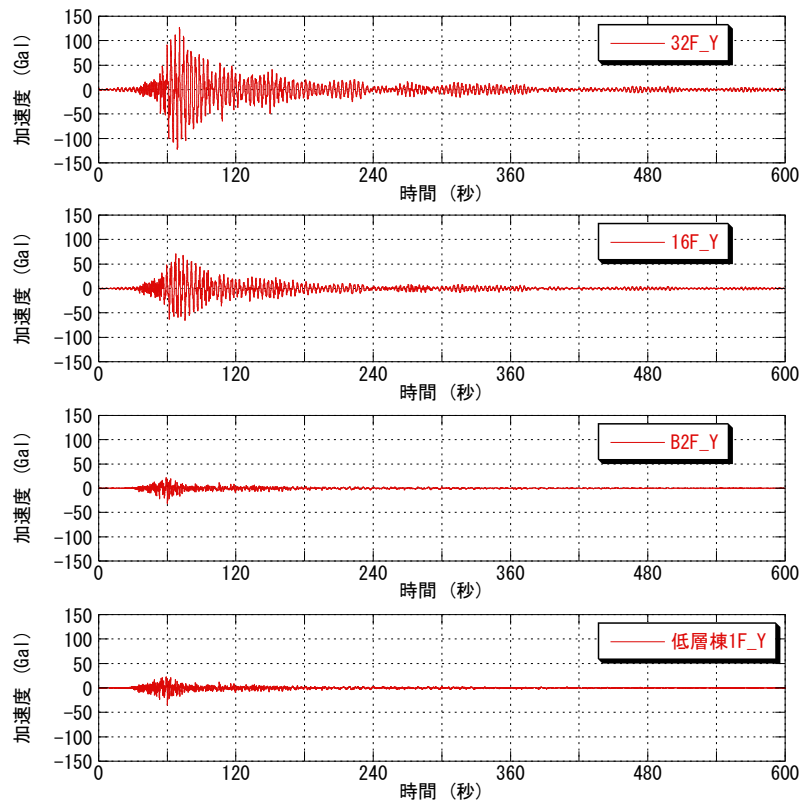


図 5.1.1-36 加速度波形(Y(長辺)方向)

(茨城県沖の地震 2011年3月11日 15時15分頃)

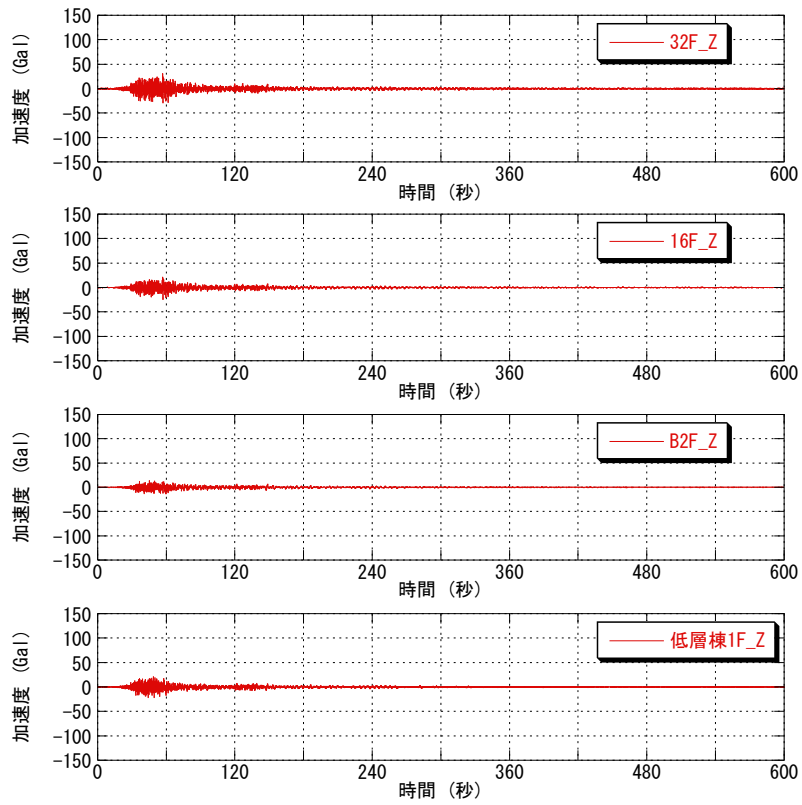


図 5.1.1-37 加速度波形 (Z 方向)
 (茨城県沖の地震 2011 年 3 月 11 日 15 時 15 分頃)

5.1.2 NHST ビルの地震観測 (H22 年度実施分)

1) 建物・地盤概要

建物名称 : B 建物 (記号 NHST)
 所在地 : 東京都中央区晴海
 構造種別 : 地上・鉄骨造, 地下・鉄骨鉄筋コンクリート造, 一部鉄筋コンクリート造
 建物規模 : 地上 33 階地下 4 階
 軒高 : 154.8m
 最高高さ : 154.8m
 基準階面積 : 2810m²
 設計時 1 次固有周期 : X 方向 : 3.95 秒, Y 方向 : 3.68 秒
 地盤概要 : 表 5.1.2-1

表 5.1.2-1 地盤概要

GL - m	地層	N 値 min~max
0.0 ~ 2.0	表土・盛土	1~6
2.0 ~ 5.5	有楽町層上部(沖積層)	0~13
5.5 ~ 22.5	有楽町層下部(沖積層)	0~5
22.5 ~ 26.5	七号地層(沖積層)	2~30
26.5 ~ 34.5	東京層(洪積砂・砂礫層)	26~60(支持層)
34.5 ~	上総層群	70 以上



図 5.1.2-1 建物所在地 (観測点●, ▲は K-net 観測点)

2) 観測装置概要

a) 観測システム・観測装置の概要と配置

建物内：強震計測装置 1 台を 33 階に、検出器(加速度計)3 台を 33 階、15 階、B4 階に配置し、連動させる。

地表面：建物群から数十メートル離れた位置に据え置き型の強震計測装置を設置し、独立で観測する。強震計測装置同士は連動しないが、GPS により時刻校正を行うことにより観測記録の同期をとる。

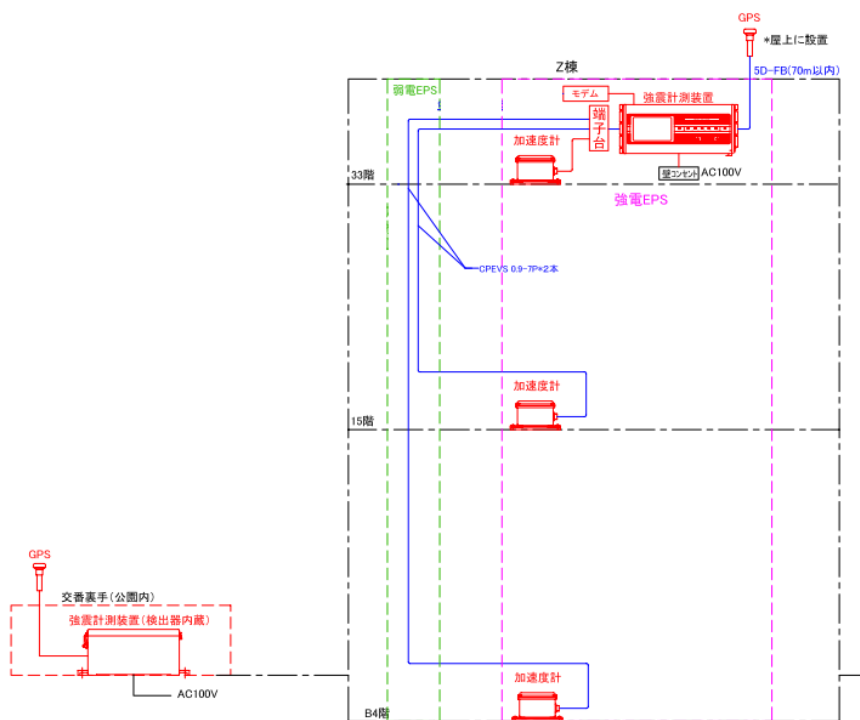


図 5.1.2-2 観測システム構成図

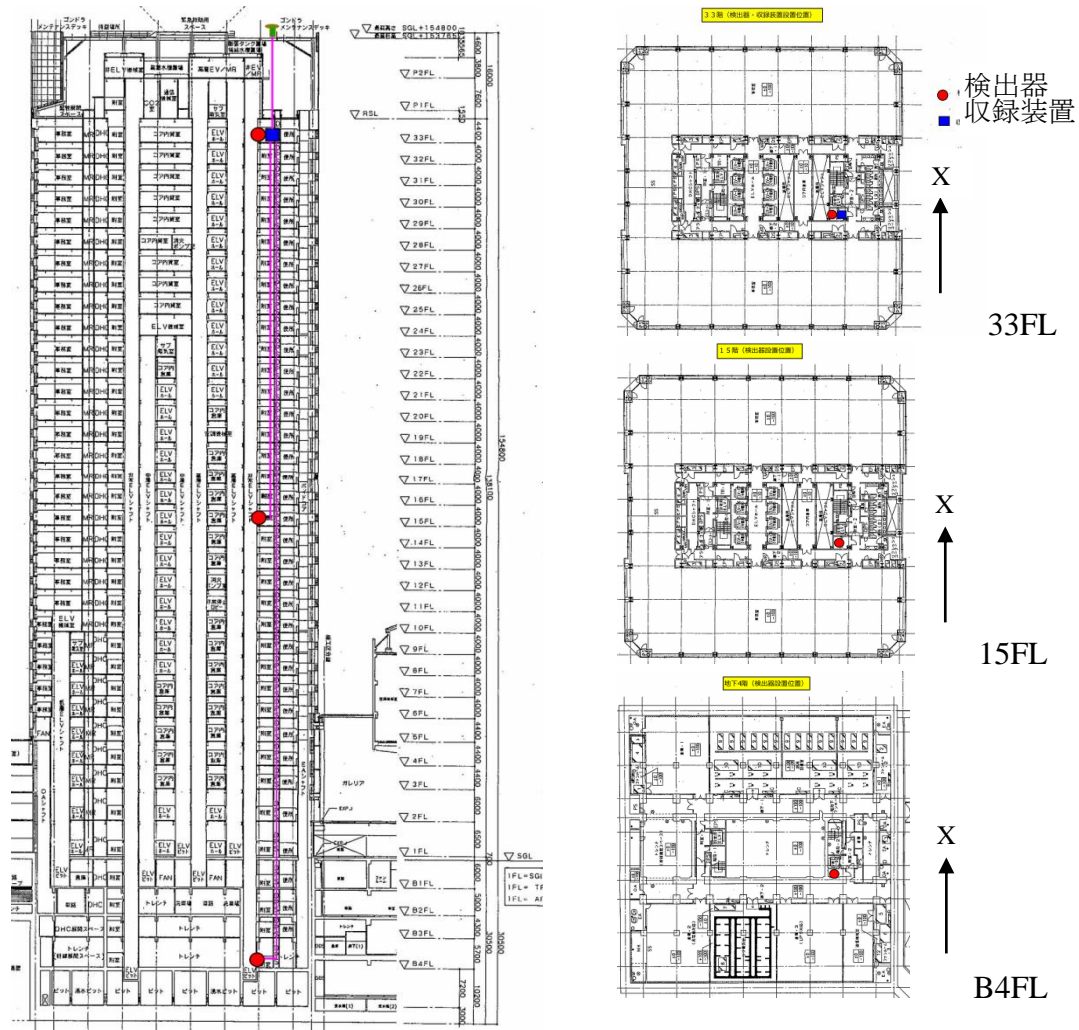


図 5.1.2-3(1) 観測装置の配置 (建物内)

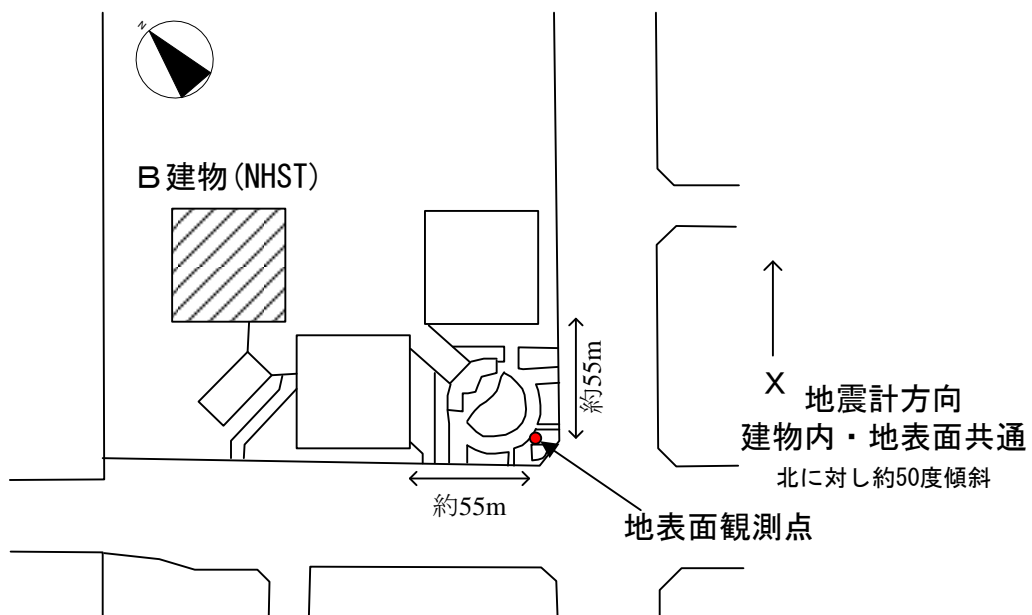


図 5.1.2-3(2) 観測装置の配置 (地表面・近隣公園内)



(1-1) 建物屋上設置 GPS アンテナ



(1-2) 建物 33 階強震観測装置設置用ラック
(強震観測装置, モデム, 検出器)



(2-1) 公園内強震観測装置カバー, 電源ポール
(上部 GPS アンテナ設置)



(2-2) 公園内強震観測装置

図 5.1.2-4 観測装置の設置状況

b) 観測装置の仕様

- ・ 検出器(加速度計) : ミットヨ製 JEP8A3
- ・ 収録装置 : ミットヨ製 SMAC-MDU
- ・ 観測可能 : $\pm 30\text{m/s}^2$
- ・ AD 分解能 : 24bit
- ・ サンプリング周波数 : 100Hz
- ・ 時刻校正 : GPS による

表 5.1.2-2 設置機器一覧

	機器名称	台数	設置位置
屋内	検出器: サーボ型加速度計 JEP8A3	3	33 階, 15 階, B4 階
	強震計測装置: SMAC-MDU	1	33 階
	モデム: DFML-560ME	1	33 階
	GPS アンテナ: GPA-016	1	屋上
屋外	強震計測装置: SMAC-MDU(据置(検出器内蔵)型)	1	公園内

c) 設置工事概要

工期 : 2011年2月5日～2月27日

観測開始 : 2011年2月27日

d) 観測設定条件 (今後設定変更の可能性あり)

観測起動トリガ

建物内 : B4階検出器3成分いずれか 1cm/s^2 以上

地表公園内 : 検出器3成分いずれか 2cm/s^2 以上

遅延時間 : 30秒間

記録時間 : 600秒間

e) 観測結果

2011年3月9日11時45分 三陸沖を震源とする地震 (Eq.1)

地震規模：M7.2

最大加速度一覧：表 5.1.2-3

表 5.1.2-3 最大加速度一覧(Eq.1, cm/s^2)

観測点		X方向	Y方向	UD方向
建物内	33FL	7.1	6.2	2.3
	15FL	5.2	4.4	1.9
	B4FL	1.6	2.6	1.1
地表面		4.2	4.0	1.4

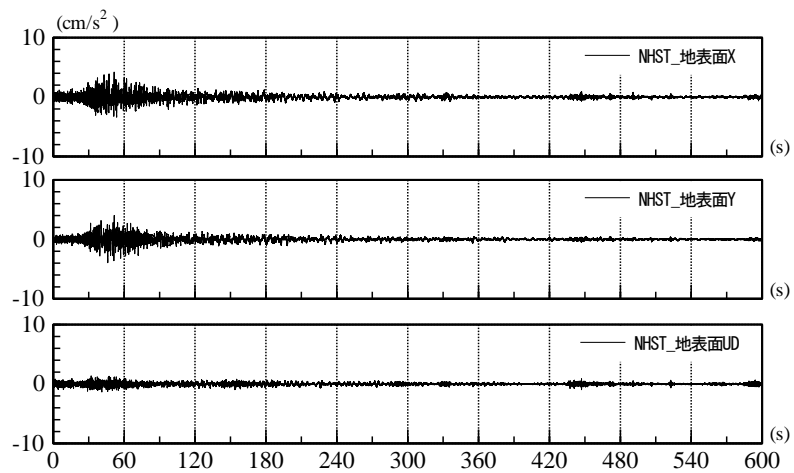


図 5.1.2-5 観測加速度時刻歴(Eq.1, 地表面観測点)

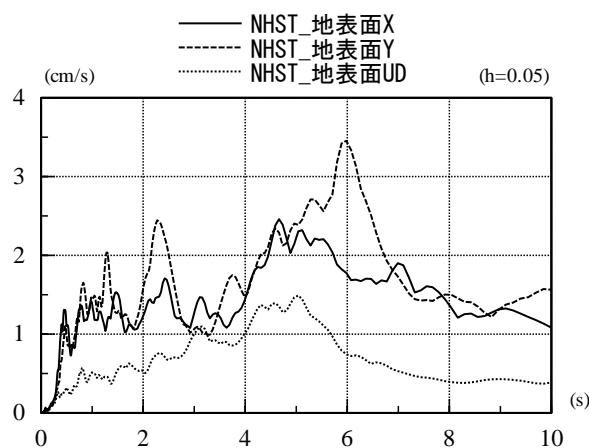
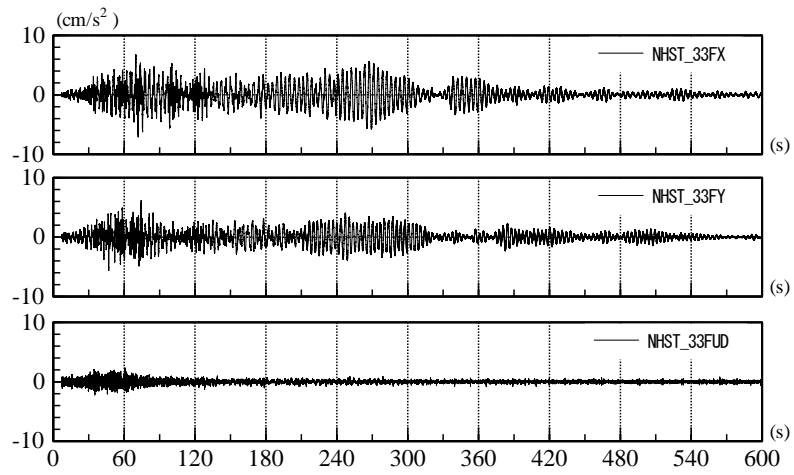
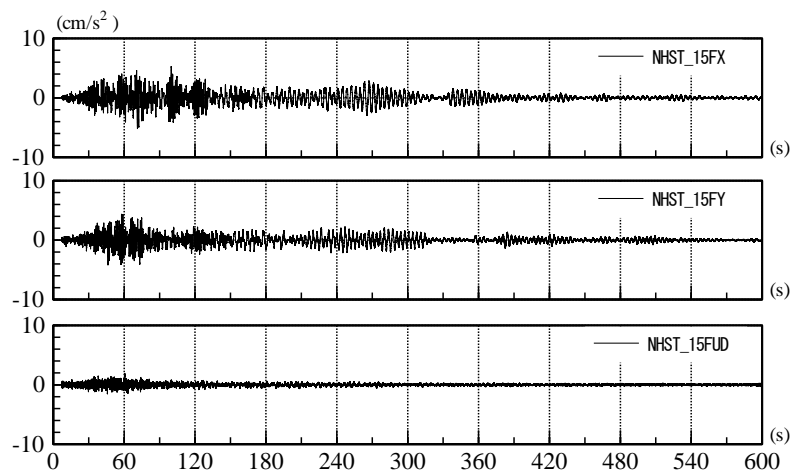


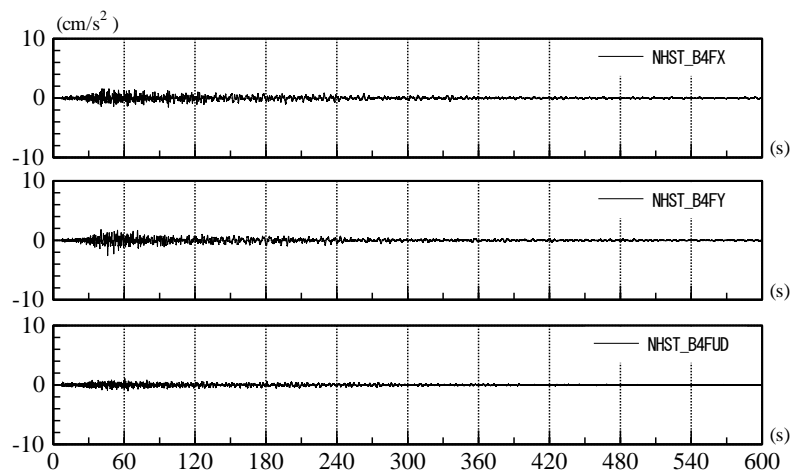
図 5.1.2-6 速度応答スペクトル(Eq.1, 地表面観測点)



(a) 33FL

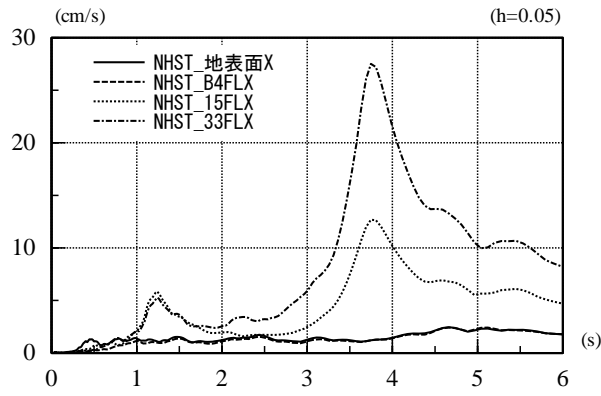


(b) 15FL

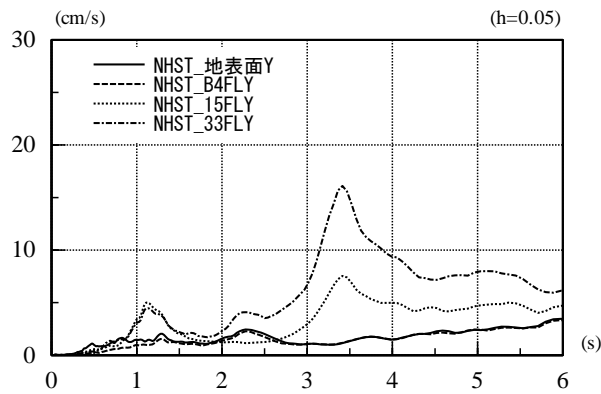


(c) B4FL

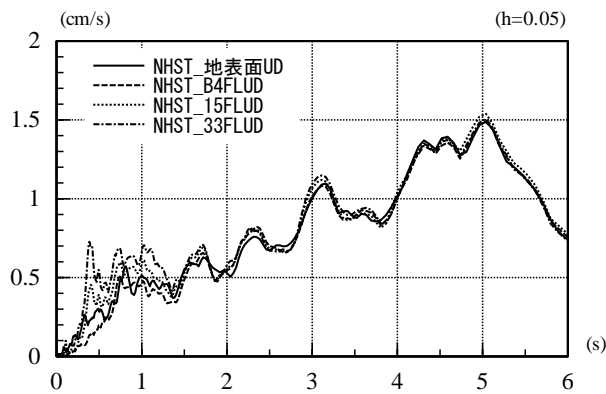
図 5.1.2-7 観測加速度時刻歴(Eq.1, 建物内観測点)



(1) X方向



(2) Y方向



(3) UD方向

図 5.1.2-8 速度応答スペクトル(Eq.1, 地表面, 建物内観測点重ね描き)

表 5.1.2-4 に、2011 年 3 月 11 日から 3 月 15 日までの観測記録をまとめる。ここに、3 月 11 日東北地方太平洋沖地震の本震・余震の観測記録は数多いため、地表面水平加速度 10Gal 以上の記録を一覧表に示す。

表 5.1.2-4 2011 年 3 月 11 日以後の地震観測記録一覧(cm/s²)

		地表面			建物内								
					B4F			15F			33F		
		X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
3/11	14:47	146.2	149.4	82.0	53.3	49.6	51.6	129.7	160.1	80.1	162.6	146.2	106.6
	15:16	47.0	52.4	31.5	22.4	27.9	15.2	69.3	74.2	27.7	131.5	87.6	40.7
	15:27	10.0	12.9	6.8	2.8	3.7	3.3	7.5	8.2	5.9	6.5	11.8	8.9
	17:12	11.0	10.5	3.6	4.4	5.7	2.3	14.8	8.9	4.4	14.6	10.1	6.0
3/14	10:03	16.6	12.9	4.0	3.6	4.1	2.8	7.4	8.9	5.6	8.2	9.9	7.2
3/15	04:59	26.7	30.8	15.2	11.0	8.8	5.0	7.0	8.7	4.6	2.9	3.7	9.8

このうち最大となった東北地方太平洋沖地震の本震記録を次にまとめる。

2011年3月11日14時47分 東北地方太平洋沖地震 (Eq.2)

地震規模：M9.0

震源：三陸沖（牡鹿半島の東南東約130km），深さ24km(推定値)

最大震度7，東京震度5強～5弱

最大加速度一覧：表 5.1.2-5

表 5.1.2-5 最大加速度一覧(Eq.2, cm/s²)

観測点		X方向	Y方向	UD方向
建物内	33FL	162.6	146.2	106.6
	15FL	129.7	160.5	80.1
	B4FL	53.3	49.6	51.6
地表面		146.2	149.4	82.0

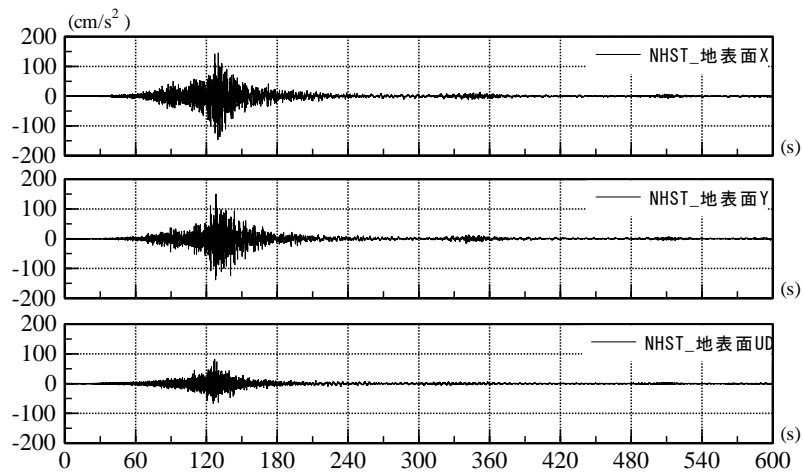


図 5.1.2-9 観測加速度時刻歴(Eq.2, 地表面観測点)

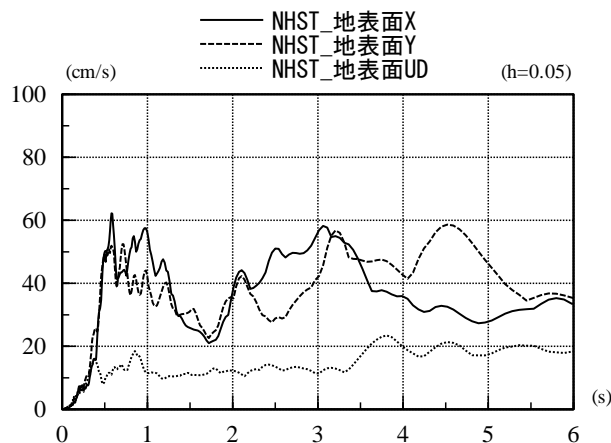
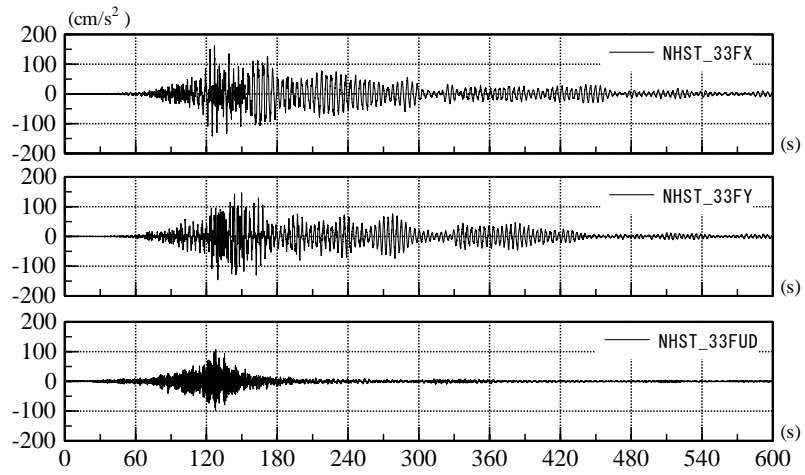
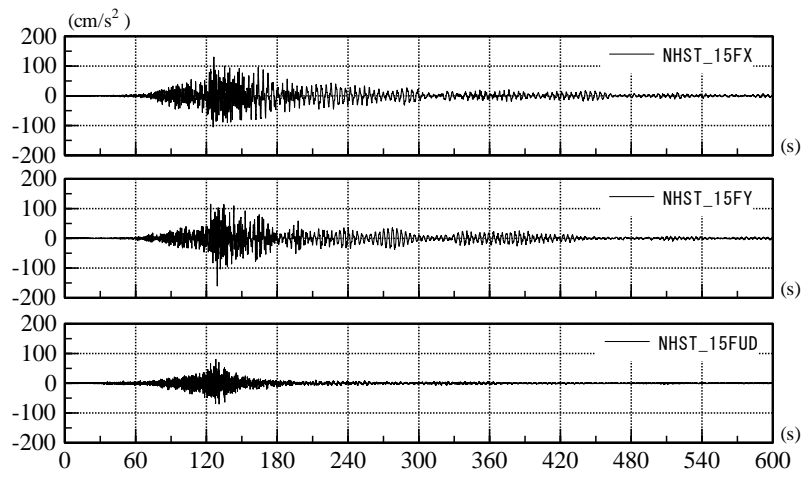


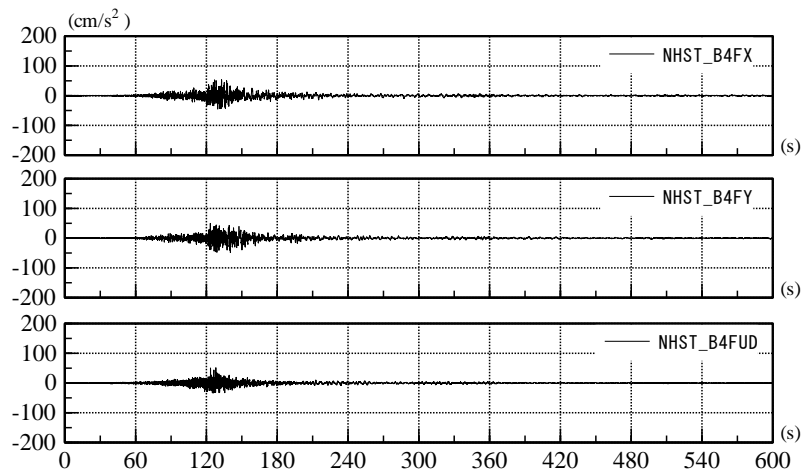
図 5.1.2-10 速度応答スペクトル(Eq.2, 地表面観測点)



(a) 33FL

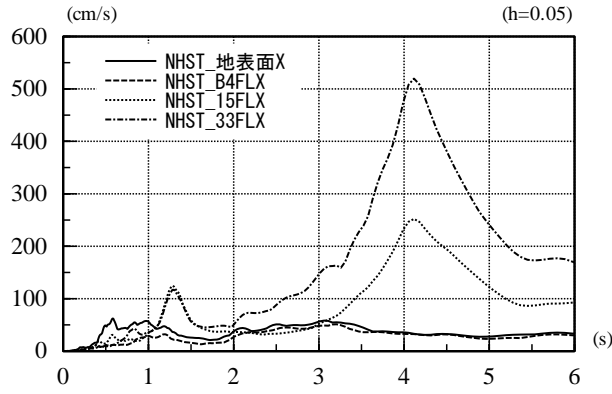


(b) 15FL

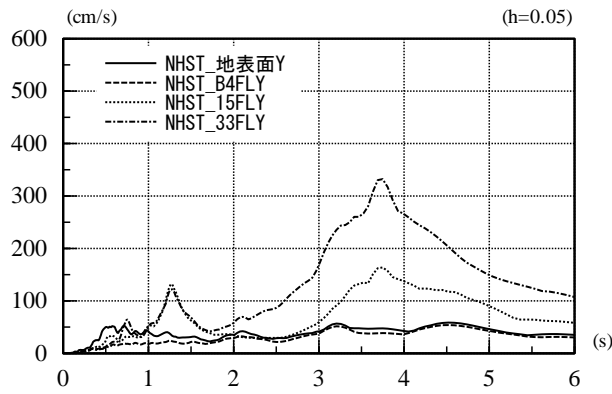


(c) B4FL

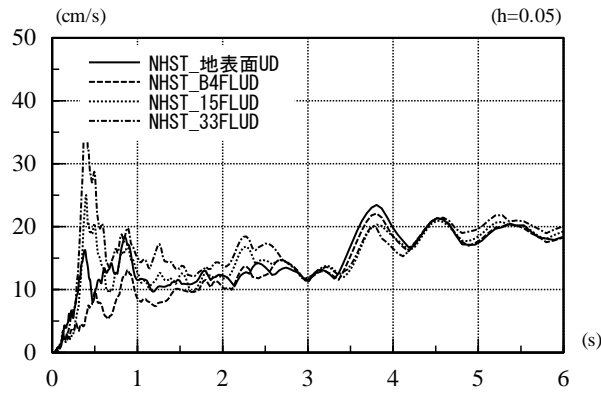
図 5.1.2-11 観測加速度時刻歴 (Eq.2, 建物内観測点)



(1) X方向



(2) Y方向



(3) UD方向

図 5.1.2-12 速度応答スペクトル(Eq.2, 地表面, 建物内観測点重ね描き)

強震計測装置 (SMAC-MDU) 仕様

1. 概要

本強震計測装置 (SMAC-MDU) は、地震災害軽減の目的とする地震工学及び地震学等の発展に必要な高精度の地震記録を得たり、さらに二次災害防止のためにも震度表示やS1値表示および警報出力や通信による通報機能など防災から研究目的まで広い分野でご利用いただけるように開発された強震計です。

SMAC-MDUは、加速度検出器(感度 $0.306V/m\ s^{-2}$)、A/D変換器(24ビット)、PCMCIA ATAフラッシュメモリーカード、DSP(Digital Signal Processor)ボード、メインボード、通信ポート1、2(RS-232C準拠、最大通信速度 230400bps)、バックアップバッテリー(停電保証時間：満充電時3時間以上)、GPS・起動運動入出力、警報出力等から構成されます。

予め設定された起動レベル(起動レベルと停止レベルが個別設定になっています)でそれぞれの設定が必要で)以上の地震を検出するとメモリーカードへの記録を開始し、同時に最大加速度や最大震度などの表示を開始します。また、地震波形の記録は停止レベルより下回ってから設定時間記録します。但し、最小記録時間15秒で最大記録時間は600秒になっています。その他、通信ポートそれぞれにモデム、T. A、パソコン等を接続し、ターミナル呼び出し(TCAコマンド参照)及びダイヤル設定することにより(各ポートで2ヶ所設定可能) 最大値転送が可能なるモードのほか、拡張モード(旧建設省強震計測装置仕様に準拠した動作・通信モード)も設定可能です。

仕 様

強震計測装置
(SMAC-MDU)

2. 構成

- 1) 強震計測装置 (SMAC-MDU) 構成
- ・ SMAC-MDU本体 1台
 - ・ PCMCIA ATAフラッシュメモリーカード又は、アダプタ付CF システム構成参照) 1本
 - ・ AUDIOケーブル 3本
 - ・ ヒューズ 1本
 - ・ AC電源ケーブル 1部
 - ・ 取扱説明書 1部
 - ・ 検査試験成績書 1部

J733Z0202-423(2/5)

3.仕様

1) 強震計測装置本体

①計測

- 信号入力
 - バックア出力
 - 計測範囲
- ±1.0V(差動入力)
 1倍(ただし、0入力時に-0.5V)
 2097Gal(0.306V/m s²での標準フルスケール)
 オプション入力(但し、マスターチャンネルに速度計は接続不可)
 1000Gal(1V/m s²での標準フルスケール)
 10.49cm/s(0.1V/cm s¹での標準フルスケール)
 DC~30Hz
- 周波数帯域
 - A/D変換器
 - ダイナミックレンジ
 - サンプリング周波数
- 2.4ビットΔΣ方式
 114dB(18ビット精度、2097Galフルスケール時)
 200Hz、100Hz、50Hz、(20Hz、10Hz、5Hz)

②演算

•演算機能

- デジタルフィルタ
 記録用 LPF IIR 3次フィルタ 30Hz
 +HPF IIR 1次フィルタ 0.02Hz/DC
 (ノットによる切換)
 起動用 LPF IIR 2次/6次フィルタ 10Hz
 (ノットによる切換)
 +HPF IIR 1次フィルタ 0.5Hz

震度演算

気象庁計測震度演算方式準拠
 S I値・応答値演算
 国土交通省(旧建設省)指定演算方式準拠

③記録

•起動および停止レベル

- 起動条件
 - 記録開始
 - 記録停止
- 0.1~99.9Gal(0.1Galステップ)
 (各設定レベルの±0.1Galまたは±10%のいずれか大きい方)
 $1 \times 10^{-3} \text{ cm/s} \sim 999 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ($1 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$ ステップ)
 指定3成分の論理演算組み合わせ(AND、OR)
 正秒記録開始
 停止設定レベルを下回って設定時間後に自動停止
 ただし最小記録時間 = 15秒
 最大記録時間 = 600秒

J733Z0202-423(3/5)

•カード記録

全チャンネル加速度波形データ、起動時刻、設定値、機器状態、
 最大加速度値、マスターチャンネルの最大計測加速度値、S I値

•記録モード

シーケンシャルモード：2枚のカードに連続記録
 ミラーモード：2枚のカードの同一記録[拡張(建設省)モードのみ]
 非上書きモード：カード残量0%で記録停止

•上書き記録

最大地震記録モード：マスターチャンネルの最大合成加速度が大き
 なものから残して上書き記録

最新地震記録モード：最新のファイルを残して、上書き記録

•記憶媒体

PCMCIA ATAFラッシュメモリーカード又は、
 アダプタ付CF
 SDP3B SanDisk社製(または相当品)
 プログラム/イレース回数 100000回
 規格 PCMCIA rev2.1準拠
 使用温度範囲 0~60℃
 270分以上(100Hz、3CH、標準16Mbyte)

④時計

- 水晶精度
 - 時刻修正
 - 校正精度
 - 最終修正時刻
- 誤差±1ppm以内
 GPSまたはラジオによる時刻修正
 時計修正をいれて1ms以内
 各波形記録データに最終修正時刻を記録

⑤通信

- 通信ポート
 - 規格
 - 通信速度
 - キャラクタ長
 - ストップビット
 - パリティ
 - 送信データ
 - 波形データ
 - モデム制御コマンド
 - 設定変更可能ポート
 - 通信プロトコル
- 2ポート(FIFO付きUART 16C550×2)
 RS-232C準拠
 230.4k, 115.2k, 57.6k, 38.4k, 19.2k, 9600, 4800, 2400, 1200bps
 8/7ビット
 1/2ビット
 偶数 / 奇数 / なし
 ASCIIコード
 SMC(M)フオオマーマットバイナリコード
 /Winフオオマーマット準拠ASCIIコード
 [拡張モード(旧建設省モード)時のポート2のみ]
 モデム制御コマンド: Hayes社 ATコマンド
 設定変更可能ポート: 通信ポート1
 ポート2 [拡張モード(旧建設省モード)では不可]
 通信プロトコル 無手順 (X-MODEM)
 /基本型伝送手順 [拡張モード(旧建設省モード)]

J733Z0202-423 (4/5)

⑥外部表示出力
 規格 RS-485 準拠
 通信速度 19.2 kbps
 接続可能台数 専用外部表示器 3 台
 送信タイミング 1 秒毎
 送信コード ASCIIコード
 出力内容 時刻、機器情報、設定 3 地点の最大加速度、最大震度、最大 S I 値、最大応答値
 設定制御 本体を含め 1 ケ所からのみ可能

⑥保守
 ・校正信号 電流出力(1Hz100Gal相当のSin波)、ただしV401、V403以外は不定
 ・校正タイミング 通信ポートからのコマンドによる手動または設定による自動
 ・保守機能 通信によりプログラムのアップグレードが可能

⑦運動
 ・マスタ/スレイブ切り替え 内部ジャンパ設定
 ・GPS 出力レベル RS-485
 出力内容 マスタのGPS情報、1PPS
 出力レベル RS-485
 タイミング マスタが記録動作中アクティブ
 ・AUDIO 出力信号 マスタのAUDIO信号を分岐

⑧警報
 ・警報出力部 無電圧 a 接点 4 回路
 定格接点容量：1A DC30V、0.5A AC125V
 警報判定チャネル：CH1からCH3
 警報内容 (各回路で設定可能)
 重故障： ハードウェア故障
 軽故障： 状態エラー
 起動 1： 異常値起動時 3 秒間 ON
 データ無効： 点検時及びイーシヤル時
 起動 2： 設定起動条件を満たした時
 計測震度： 設定計測震度を越えたとき
 S I 値： 設定 S I 値を越えたとき
 3 軸合成加速度： 設定 3 成分合成加速度を越えたとき
 水平合成加速度： 設定水平合成加速度を越えたとき

J733Z0202-423 (5/5)

鉛直加速度： 設定鉛直成分加速度を越えたとき
 復帰方法： 設定時間後自動復帰、ただし重故障、軽故障、起動 1、データ無効は除く

⑨表示・操作・設定
 ・表示器
 ・操作機能
 ・表示内容
 6. 5 インチ TFTカラー液晶 (640×480ドット)
 タッチパネル方式
 震度(計測震度)、3 成分合成最大加速度値、水平合成、最大加速度値、各成分の最大加速度値、応答値、機器状態、現在時刻、起動時刻、S I 値、過去の地震情報、設定変更画面
 リチウム電池により保護 (無通電時約 3 年)

⑩電源
 ・電源入力
 ・検出器供給電源
 ・内蔵バッテリー
 ・消費電力
 A C 入力 : AC100V 50/60Hz
 D C 入力 : DC 12V (オプション)
 D C15V (V403用)
 D C18V (V401用)
 D C 12V (ラック型 15Ah)
 満充電時 3 時間以上全機能維持
 充電方式：トリクル充電
 50VA以下

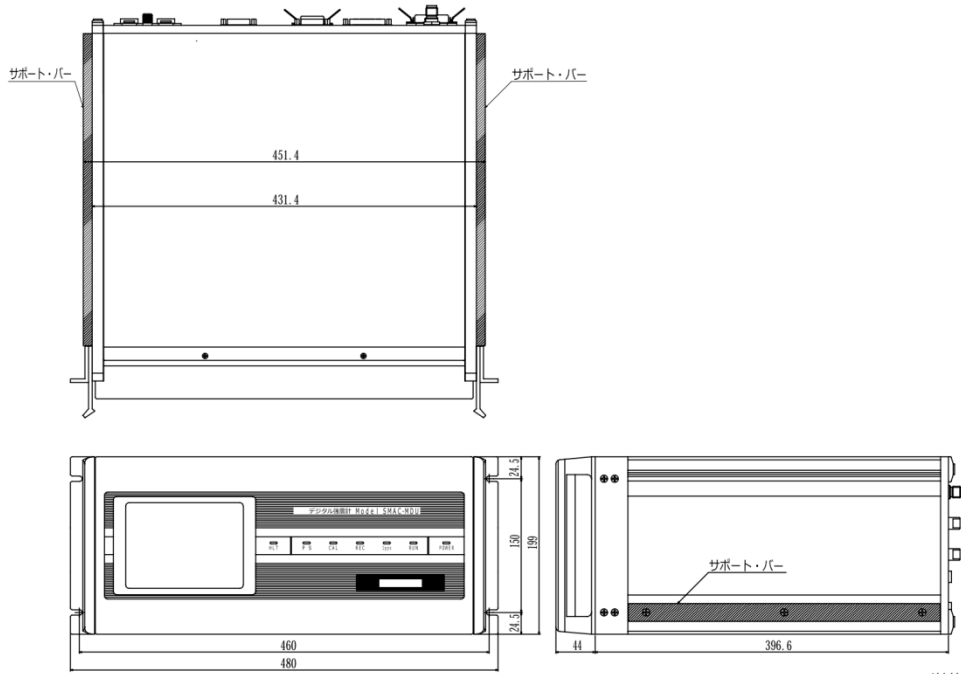
⑪ケース (ラック型)
 ・ケース構成
 ・外形・質量
 ・固定方法
 ・塗装色
 ・ケース (据置型)
 ・外形・質量
 ・固定方法
 ・塗装色
 ラック型 アルミ製 (JISラック適合)
 ラック型 約480(W)×441(D)×199(H)mm 約20kg
 ラック型 JISラックに取納
 メーカー標準色 (ミッド ケルグレ)
 据置型 約398(W)×418(D)×210(H)mm 約24kg
 アンカーボルト 3 本による固定
 メーカー標準色 (ミッド ケルグレ)

通信仕様

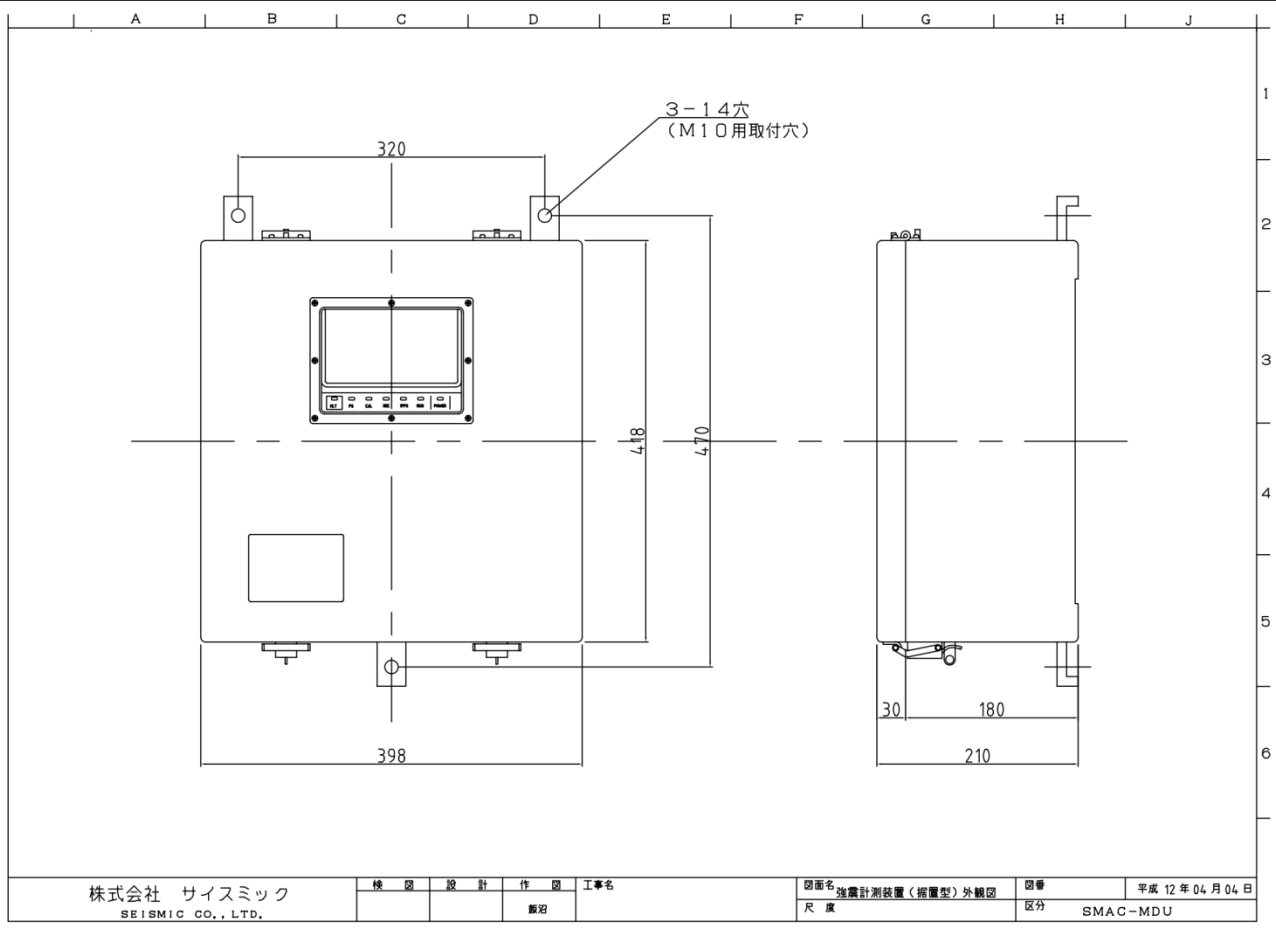
SMA C-MDUには使い方により、2つの通信方法を選択することができます

- ① 標準通信モード
無手順の通信で、SMA C-MDUの各種設定をコマンドにより変更が可能で、データはテキストで送受信されるため、汎用の通信ソフトを使い簡単に操作できます。また、波形データの転送はX-Modemプロトコルを使用したバイナリ転送で信頼性の高い伝送が可能です。
その他、発信機能も有し、記録終了後指定の地点（最大4地点）に各チャンネルの最大加速度値およびマスタチャンネルの最大震度値等を送信させることができます。
- ② 拡張通信モード(旧建設省通信モード)
基本型伝送手順準拠で、ポート1は地震情報送信信用でポート2は波形データ転送用となります。
ポート1はマスタチャンネルの震度が2.5以上になったとき地震情報を発信し、以後はホスト側の指示に従い地震情報を送信します。しかし、この通信方法では細かい設定変更などの保守が行えないため、拡張機能として保守の際は拡張通信モード(旧建設省通信モード)から標準通信モードに移行することが可能です。
ポート2は波形データ転送専用で、ホスト側の要求に従い指定された波形データファイルをWinPloフォーマットの圧縮形式で転送します。ただし、転送されるCH1～CH3のデータのみとなります。

ラック型強震計測装置 (SMAC-MDU) 外観図



単位 (mm)



株式会社 サイスマック
SEISMIC CO., LTD.

検 査	設 計	作 図	工 事 名
		藤 沼	

図面名	強震計測装置 (据置型) 外観図	図番	平成 12 年 04 月 04 日
尺 度		区分	SMAC-MDU

J733Z0105-335 (1/2)

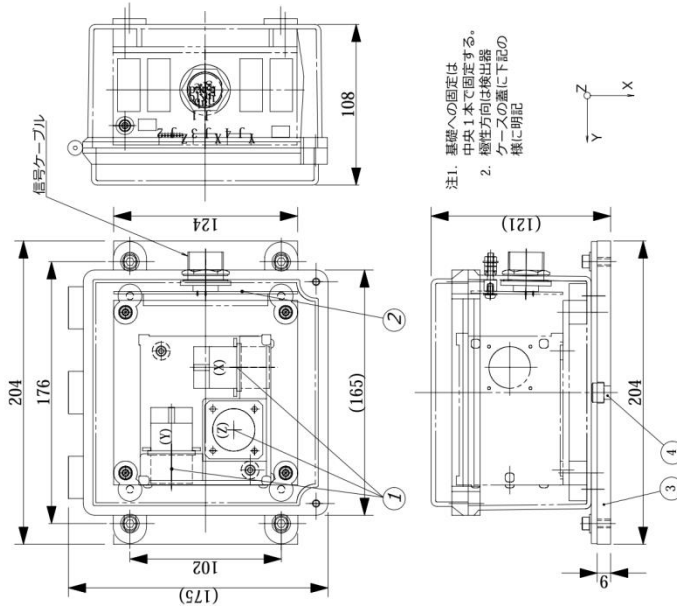
地上用検出器 (JEP-8A)仕様

- 形式
 - 測定範囲
 - 分解能
 - 周波数特性
 - 出力感度
 - 使用電源
 - ケース
 - 温度
 - 寸法
 - 質量
- サーボ型加速度計 (JEP-8A形)
 $\pm 30 \text{ m/s}^2$
 $1 \times 10^{-6} \text{ m/s}^2$
 DC~400Hz
 0.306 V/ms^{-2}
 V405: +15V
 防滴構造
 $-20 \sim +60^\circ\text{C}$
 $175(\text{D}) \times 165(\text{W}) \times 108(\text{H}) \text{ mm}$
 約1.5kg

J733Z0105-335 (2/2)

製品番号: 831-184-02

地上用検出器 (JEP-8A) 外觀図



注1. 基礎への固定は中央1本で固定する。
 注2. 感生方向は検出器ケースの蓋に下記の様に明記



1	サーボ形加速度計
2	コネクタ基板
3	基礎固定板
4	基礎ボルト(注1.)

単位 (mm)

GPSアンテナ仕様

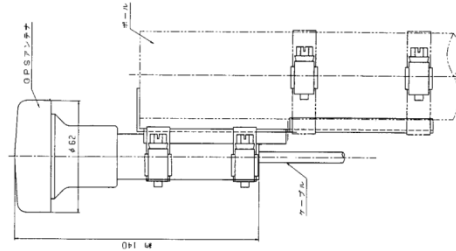
(GPA-016)

GPSアンテナ GPA-016仕様

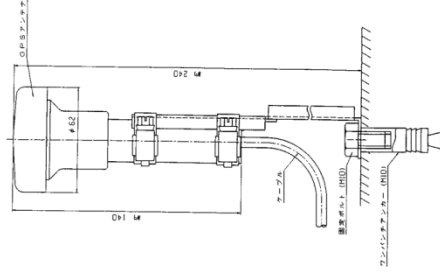
1.仕様

- 1) 受信周波数範囲 1575.42MHz
- 2) 総合利得 28~40dBi
- 3) 電源電圧 4.5~5.5V
- 4) 消費電力 11~27mA
- 5) 動作温度 -30~+75℃
- 6) 動作湿度 90%RH以下
- 7) 外形寸法 φ62(D)×57.4(H) 本体(ギョ型)
- 8) 材質 硬質プラスチック(耐熱)
- 9) 色 白(URUNO 口入り)
- 10) 重量 約100g(本体)

GPSアンテナ外観図 ボール取付け時



GPSアンテナ外観図 アンカー固定時



注記：GPSアンテナ上部は、出来る限り多くの空が見える場所に設置して下さい。
60度以上の範囲で見渡せる場所が理想的です。
ボール及びボールの固定用のステンレスボースクランプは、付属していませんのでボール及びボースクランプを用意して下さい。

仕 様

モデム (DFML-560ME)

モデム (データ通信用)

仕 様	
型式	DFML-560EM (相当品)
適用回線	2線式一般公衆アナログ回線
通信方式	モデム部 : 全二重通信方式 ファックス部 : 半二重通信方式
通信規格	モデム部 : ITU-T V.90 V.34 V.32 V.22 他 ファックス部 : ITU-T V.17 V.29 V.21 他
データ通信速度	115200 57600 38400 19200 9600 4800 2400 1200
同期方式	調歩同期式
制御コマンド	ATコマンド
データ圧縮(伸張)機能	ITU-T V.42bis MNP 5
エラー訂正機能	ITU-T V.42 (LAPM) MNP 2-4
ルビシフト方式	ITU-T MULTIMODE
送信出力レベル	-12~-15dBm
ダイヤル方式	トーン (プッシュ) 式 バルス (10/20pps) 式
インターフェイス規格	RS-232C (D-sub 9ピン・メス)
回線モニター	内蔵スピーカ、モニタランプ
電源	AC100V±10V (50/60Hz)
消費電力	約2.2W
外形寸法	128mm×94.5mm×30mm
重量	約155g
使用環境	温度 : 0~40℃ 湿度 : 35~85% 但し結露のないこと

5.1.3 NHSK ビルの地震観測（H23 年度実施分）

(A) 建物概要

1) 建物諸元・地盤概要

地震観測対象建物 NHSK ビルの諸元を以下に示す。NHSK ビルは、33 階建ての高層棟と 6 階建ての低層棟からなる。高層棟を観測対象とし、高層棟と基礎構造の異なり建物規模の比較的小さい低層棟においても、1 階のみにセンサーを設置し観測している。

高層棟

建物位置：東京都千代田区

竣工：2007 年

階数：地上 33 階 地下 2 階 塔屋 1 階

軒の高さ：155.82m

最高部の高さ：156.67m

延床面積：132,253m²

基準階面積：2,999.69m²（12 階）

外径：短辺(X 方向)41.6m 長辺(Y 方向)71.9m

地上階構造：鉄骨造，制振部材付きラーメン構造

地下階構造：鉄筋コンクリート造，鉄骨鉄筋コンクリート造，耐震壁付きラーメン構造

設計用固有周期：X（短辺）方向 3.75 秒，Y（長辺）方向 3.61 秒

基礎構造：直接基礎と杭基礎の併用基礎

地盤種別：第 2 種地盤（周期 0.24～0.27 秒）

地盤の土質及び N 値：表 5.1.3-1

（数値は日本 ERI 株式会社性能評価シートより）

低層棟（1 階のみ観測）

階数：地上 6 階

構造：鉄骨鉄筋コンクリート造

基礎構造：杭基礎（マルチペDESTAL 杭）

（高圧噴射攪拌型の地盤改良）

表 5.1.3-1 地盤の土質および N 値

GL±m	地盤	N値	
0.0 ～ -2.5	埋土	2以下	● 低層棟 1 階センサー設置レベル
-2.5 ～ -3.7	粘土質細砂	4	
-3.7 ～ -13.6	細砂	11～31	● 高層棟 B2 階センサー設置レベル
-13.6 ～ -16.5	粘土及び砂質シルト	16	
-16.5 ～ -23.6	砂礫	60以上	
-23.6 ～ -30.6	細砂	60以上	

2) 建物位置

観測対象建物 NHSK ビルおよび付近の K-NET 観測点の地図上の位置を図 5.1.3-1 に示す。



図 5.1.3-1 観測対象建物 NHSK ビルの位置

①～⑭：K-NET 観測点

①	TKY 007
②	TKY 015
③	TKY 023
④	TKY 022
⑤	TKY 021
⑥	TKY 014
⑦	TKY 028
⑧	TKY 020
⑨	TKY 026
⑩	TKY 019
⑪	TKY 018
⑫	TKY 013
⑬	TKY 016
⑭	TKY 017

(B) 観測概要

1) 観測点配置

観測点は、高層棟および低層棟の計4箇所とした。センサー（加速度計）は、高層棟では、32階、16階、地下2階の各階同位置に、低層棟では1階に設置し、収録装置は、19階に設置した。加速度計および収録装置の平面図、立面図上の位置を図5.1.3-2、図5.1.3-3に示す。

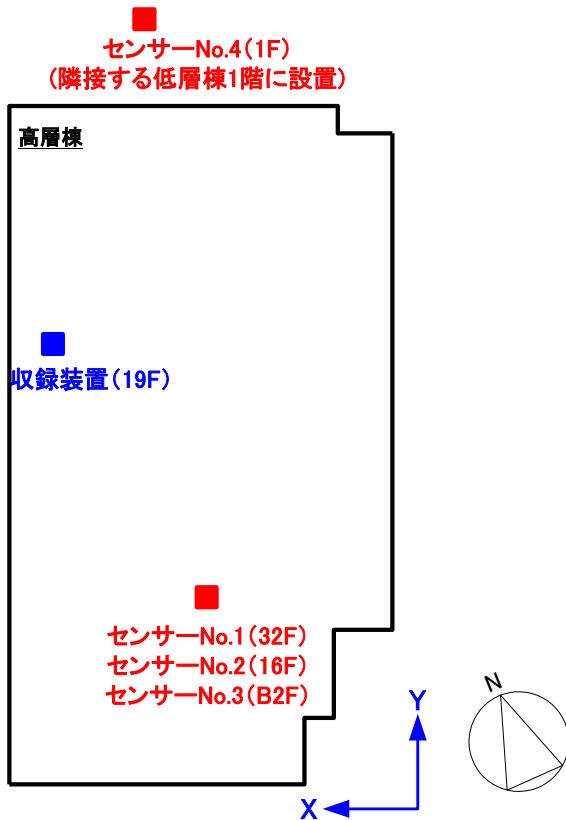


図 5.1.3-2 加速度計および収録装置の設置位置
(平面図)

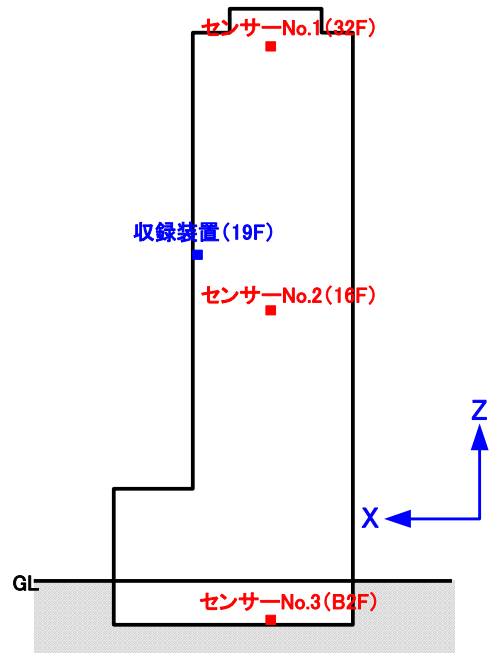


図 5.1.3-3 加速度計および収録装置の設置位置
(高層棟 断面図)

2) 収録条件

各観測点で水平2方向と上下方向の3成分, 4観測点で合計12成分を観測している。
表5.1.3-2にチャンネル対応を示す。

表5.1.3-2 チャンネル対応表

CH	建物	階	方向
1	低層棟	1F	X(短辺)
2			Y(長辺)
3			Z(上下)
4	高層棟	B2F	X(短辺)
5			Y(長辺)
6			Z(上下)
7		16F	X(短辺)
8			Y(長辺)
9			Z(上下)
10	32F	X(短辺)	
11		Y(長辺)	
12		Z(上下)	

起動条件と記録条件を以下に示す。収録開始の条件(起動値)は, B2階のXY方向のセンサーの観測値に対して設定し, 1.0Galとしている。プリトリガは30秒である。収録終了の条件は, B2階XYと32階XYで0.7Galとしている。終了判断時間は50秒(2011年7月以降180秒に変更)である。最大記録長は10分間, サンプリング振動数は100Hzである。なお, これらの条件は, データの収録状況を考慮して2011年4月7日に変更して設定したものである。変更前の条件も併せて示す。

2011年4月7日~

<起動条件>

	起動値	終了値
B2階 X	1.0Gal	0.7Gal
B2階 Y	1.0Gal	0.7Gal
32階 X		0.7Gal
32階 Y		0.7Gal

<記録条件>

プリトリガ時間	30秒
終了判断時間	50秒(7月以降180秒)
記録上書きモード	最新
最大ファイル記録長	10分
サンプリング振動数	100Hz

2011年1月17日~2011年4月6日

<起動条件>

	起動値	終了値
B2階 X	0.5Gal	0.5Gal
B2階 Y	0.5Gal	0.5Gal
32階 X		1.0Gal
32階 Y		1.0Gal

<記録条件>

プリトリガ時間	20秒
終了判断時間	30秒
記録上書きモード	最新
最大ファイル記録長	10分
サンプリング振動数	100Hz

(C) 観測結果

1) 観測期間

2011年1月17日～2012年3月31日

2) 観測地震

前述の起動条件により、観測期間に検知された地震は138であった。月ごとの観測記録数を図5.1.3-4に示す。記録は、東北地方太平洋沖地震から1か月程の期間に集中している。震度ごとの観測記録数を表5.1.3-3に示す。全体では、震度4が2回、震度3が5回、震度2が46回、震度1以下が85回観測された。

観測されたすべての地震について、B2階と低層棟1階の計測震度、32階、B2階、低層棟1階の最大加速度を表5.1.3-4～表5.1.3-5に示す。計測震度1.0以上の地震については、地震諸元（震源地、マグニチュード、震源深さ）も示す。

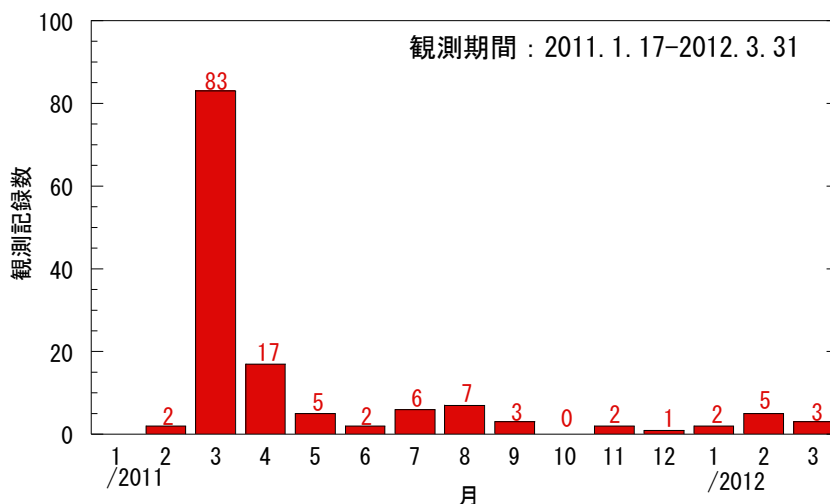


図 5.1.3-4 月ごとの観測記録数

表 5.1.3-3 震度ごとの観測記録数

震度5弱以上	0
震度4	2
震度3	5
震度2	46
震度1以下	85

表 5.1.3-4 観測地震一覧

発生日時	計測震度		最大加速度(cm/s ²)						最大変位(cm)		地震諸元		
	低層棟1F	B2F	低層棟1F X	低層棟1F Y	B2F X	B2F Y	32F X	32F Y	32F X	32F Y	震源地	M	深さ
2011/2/5 10:56	2.3	2.2	5.38	3.56	4.83	3.22	9.43	5.04	0.19	0.19	千葉県南東沖	M5.2	64km
2011/2/10 22:03	0.7	0.6	0.97	1.01	0.66	0.77	1.21	1.85	0.09	0.05	福島県沖	M5.4	48km
2011/3/9 11:47	1.7	1.7	2.75	2.43	2.36	2.17	6.9	6.03	1.9	1.42	三陸沖	M7.3	8km
2011/3/10 3:17	1.1	1.1	1.17	0.97	1.03	1.09	3.34	5.07	0.7	0.94	三陸沖	M6.4	29km
2011/3/10 6:24	1.3	1.3	1.78	1.45	1.68	1.41	7.05	5.46	1.07	0.88	三陸沖	M6.8	9km
2011/3/11 14:47	4.5	4.3	76.34	62.7	66.58	52.2	190.63	178.99	33.84	32.32	三陸沖	M9.0	24km
2011/3/11 14:57	1.5	1.4	3.65	2.6	3.45	2.2	11.34	7.7	3.05	2.14		M7.7	43km
2011/3/11 15:07	3.9	3.8	23.71	34.91	22.58	31.2	91.64	126.92	26.1	28.54	茨城県沖	M7.5	34km
2011/3/11 15:17	2.9	2.9	11.03	12.15	10.02	11.37	59.84	72.11	20.02	21.99	他 複数の余震		
2011/3/11 15:27	2.2	2.2	4.9	4.36	4.22	3.99	10.31	8.06	2.69	1.62	三陸沖		
2011/3/11 15:38	0.4	0.4	0.75	1.04	0.55	0.71	2.17	1.84	0.39	0.4	茨城県沖	M5.5	28km
2011/3/11 15:45	1	0.9	2.23	2.04	1.8	1.55	2.15	2.1	0.15	0.14	宮城県沖	M5.3	33km
2011/3/11 15:57	1.5	1.5	2.38	2.14	2.07	1.79	6.22	6.07	1.05	1.32	茨城県沖	M6.1	23km
2011/3/11 16:14	1.7	1.7	3.08	2.37	2.45	2.06	12.15	10.11	3.23	2	茨城県沖	M6.7	20km
2011/3/11 16:27	1.7	1.7	2.57	2.46	2.46	2.21	8.57	7	1.89	1.78	三陸沖	M6.4	46km
2011/3/11 16:43	1	0.9	1.55	1.64	1.07	1.09	3.13	2.51	0.3	0.29	岩手県沖	M5.8	9km
2011/3/11 17:12	2.4	2.2	5.88	3.61	4.68	3.28	10.82	12.65	2.07	2.45	茨城県沖	M6.6	29km
2011/3/11 17:22	1.2	1.2	1.83	2.4	1.4	1.52	7.89	8.21	2.53	2.25	茨城県沖	M6.7	? km
2011/3/11 17:32	1.2	1	2.11	2.4	1.39	1.52	2.75	3.26	0.37	0.33	福島県沖	M5.9	30km
2011/3/11 17:41	1.8	1.7	3.83	4.56	2.75	3.17	3.76	3.86	0.22	0.19	福島県沖	M6.1	27km
2011/3/11 17:45	0.5	0.6	0.79	0.7	0.69	0.52	1.67	1.76	0.34	0.25			
2011/3/11 19:22	0.7	0.6	1.07	1.54	0.85	1.21	1.59	1.54	0.26	0.36	福島県沖	M5.5	25km
2011/3/11 19:36	0.7	0.6	1	1.28	0.64	0.95	1.23	1.73	0.09	0.06	福島県沖	M5.0	42km
2011/3/11 20:21	1.5	1.5	1.39	2.49	1.09	2.4	3.42	3.09	0.33	0.27	茨城県沖	M5.7	35km
2011/3/11 20:38	1.1	1	0.89	1.4	0.73	1.22	3.66	2.89	0.79	0.64	岩手県沖	M6.7	24km
2011/3/11 20:47	0.8	0.5	1.19	1.15	0.89	0.88	1.95	2.14	0.29	0.22	茨城県沖	M5.6	39km
2011/3/11 21:14	1.1	1.1	1.36	1.27	1.26	1.27	3.18	3.32	0.53	0.62	宮城県沖	M6.1	10km
2011/3/11 22:17	1.1	0.9	1.49	1.68	1.3	1.24	2.62	3.48	0.41	0.36			
2011/3/11 23:01	1.1	1	1.84	1.55	1.08	1.06	2.64	2.09	0.17	0.23	茨城県沖	M5.4	37km
2011/3/11 23:56	1.1	0.8	1.48	1.65	0.92	1.09	3.88	2.31	0.41	0.35			
2011/3/12 0:13	1.6	1.6	2.49	2.43	2.17	2.48	10.38	8.53	3.53	2.35	茨城県沖	M6.6	22km
2011/3/12 0:42	0.8	0.7	0.92	1.2	0.79	1.07	1.38	1.74	0.1	0.14			
2011/3/12 3:12	1.1	1.1	1.39	1.15	1.24	1.11	4.03	4.49	0.69	0.79	福島県沖	M6.1	16km
2011/3/12 3:44	0.7	0.3	1.18	1.17	0.8	0.73	1.08	1.14	0.07	0.07			
2011/3/12 4:00	1.5	1.5	2.96	2.68	2.87	2.63	8.61	6.74	2.82	1.75	長野県北部	M6.7	8km
2011/3/12 4:09	0.8	0.4	1.09	1.21	0.83	0.81	1.76	1.41	0.3	0.22			
2011/3/12 4:24	1.4	1.3	2.29	2.02	2.05	1.78	3.66	4.17	0.38	0.3	千葉県東方沖	M5.7	34km
2011/3/12 4:46	0.4	0.3	1	1.12	0.64	1	0.86	1.45	0.04	0.04			
2011/3/12 5:35	1.2	0.9	2.4	2.21	1.59	1.25	1.76	1.51	0.04	0.04			
2011/3/12 7:36	0.6	0.3	1.32	1.04	0.78	0.82	0.77	0.87	0.03	0.04			
2011/3/12 10:12	0.4	0.4	0.92	0.85	0.6	0.75	1.04	1.09	0.04	0.06			
2011/3/12 10:48	1.1	1	1.41	1.05	1.18	1.04	5.04	3.86	1.27	0.75	福島県沖	M6.4	40km
2011/3/12 15:44	0.2	0	0.94	0.89	0.59	0.65	0.85	0.66	0.03	0.03			
2011/3/12 15:57	1.1	0.8	2.27	2.47	2.61	1.93	1.97	1.48	0.02	0.02			
2011/3/12 22:16	1.4	1.4	2.03	2.15	1.49	1.83	2.88	3.05	0.32	0.31	福島県沖	M6.2	40km
2011/3/12 23:15	1	0.7	1.68	1.31	1.14	0.92	1.41	1.59	0.06	0.06			
2011/3/13 7:14	0.7	0.6	1.08	0.99	0.81	0.83	1.52	2.29	0.32	0.34			
2011/3/13 8:26	1.1	1	1.55	1.82	1.08	1.36	3.48	2.76	0.62	0.46	宮城県沖	M6.2	15km
2011/3/13 9:33	0.6	0.3	1.03	1.34	0.62	0.75	1.38	0.97	0.06	0.03			
2011/3/13 10:26	1.8	1.6	3.27	2.63	2.15	2.38	8.65	6.39	2.52	1.75	茨城県沖	M6.6	11km
2011/3/13 20:38	0.7	0.6	0.67	0.86	0.6	0.74	2.36	1.93	0.37	0.31			
2011/3/14 10:03	2.2	2	5.56	4.43	3.61	3.42	12.82	10.84	3.27	1.49	茨城県沖	M6.2	32km
2011/3/14 15:19	0.4	0	0.88	0.79	0.57	0.61	1.67	1.24	0.37	0.18			
2011/3/14 15:53	0.6	0.3	1.19	1.09	0.75	0.92	1.29	1.33	0.09	0.06			
2011/3/15 1:36	0.6	0.3	1.33	1.3	1.72	1.59	1.14	1.08	0.01	0.02			
2011/3/15 3:41	0.8	0.8	0.97	0.94	0.74	0.78	2.25	1.78	0.25	0.19			
2011/3/15 4:59	2.2	2	9.87	11.96	8.39	10.19	8.46	3.79	0.05	0.05	東京湾	M4.1	23km
2011/3/15 22:29	2.4	2.3	5.54	7.11	4.42	6.61	13.49	11.56	3.07	2.44	静岡県東部	M6.4	14km
2011/3/16 5:30	0.8	0.7	0.78	0.86	0.7	0.85	3.04	3.23	0.71	0.85			
2011/3/16 12:52	2.3	2.3	5.39	5.49	4.47	5.11	8.55	11.38	1.01	1.08	千葉県東方沖	M6.1	10km
2011/3/16 13:15	0.5	0.5	1.19	0.93	0.96	0.8	2.91	1.57	0.81	0.22			
2011/3/16 22:39	2.1	2	2.7	4.31	2.39	3.71	3.8	7.55	0.44	0.35	茨城県南部	M5.4	49km
2011/3/17 13:10	0.8	0.3	1.29	1.41	0.85	1.25	0.87	0.56	0.03	0.02			
2011/3/17 21:32	2	1.7	3.23	4.03	2.1	3.04	5.58	5.32	0.53	0.47	千葉県東方沖	M5.7	28km
2011/3/17 21:55	1.3	1.1	2.24	2.19	1.55	1.64	3.91	3.31	0.35	0.25	茨城県沖	M5.7	47km
2011/3/18 17:02	1	0.8	1.29	1.27	1.08	0.94	2.18	2.49	0.2	0.17			
2011/3/19 8:50	0.6	0.6	0.71	0.79	0.64	0.72	2.54	1.62	0.27	0.26			
2011/3/19 18:57	2.5	2.3	7.09	7.86	6.27	5.21	9.32	13.96	1.29	1.06	茨城県北部	M6.1	5km
2011/3/20 10:31	0.7	0.5	1.01	1.4	0.93	0.93	1.16	1.32	0.12	0.11			
2011/3/22 12:39	1.6	1.6	1.69	2.28	1.56	2.18	5.21	6.84	0.77	0.85	千葉県東方沖	M5.9	37km
2011/3/22 16:19	1	1	1.11	1.35	1.04	1.19	2.8	3.49	0.69	0.89	福島県沖	M6.3	10km
2011/3/22 18:20	1.7	1.7	2.61	2.35	2.81	2.07	6.81	6.15	0.72	0.76	福島県沖	M6.4	43km
2011/3/22 21:05	1	1	1.11	1.03	1.24	1.02	3.9	2.37	0.37	0.28	茨城県沖	M5.9	48km
2011/3/22 22:51	1	0.9	1.09	1.22	0.96	0.87	2.52	2.73	0.29	0.4			
2011/3/23 7:13	1.2	1.2	1.45	1.73	1.61	1.82	2.72	3.48	0.77	0.56	福島県浜通り	M6.0	8km
2011/3/23 7:35	1.5	1.3	2.46	3.06	1.81	2.28	4.63	4.12	0.62	0.7	福島県浜通り	M5.8	7km
2011/3/24 5:33	0.7	0.2	1.23	1	0.78	0.64	0.97	0.79	0.04	0.04			
2011/3/24 5:43	0.7	0.4	1.2	1.34	0.92	0.77	1.3	0.97	0.15	0.13			
2011/3/24 8:57	2.2	2	7.16	5.21	5.82	4.53	5.08	3.87	0.1	0.08	茨城県南部	M4.8	52km
2011/3/24 17:22	0.8	0.8	0.99	1.12	0.8	0.98	1.75	2.41	0.38	0.25			

表 5.1.3-5 観測地震一覧(続き)

発生日時	計測震度		最大加速度(cm/s ²)								最大変位(cm)		地震諸元		
	低層棟1F	B2F	低層棟1F X	低層棟1F Y	B2F X	B2F Y	32F X	32F Y	32F X	32F Y	震源地	M	深さ		
2011/3/25 20:38	0.7	0.5	0.84	0.83	0.84	0.68	2.09	2.34	0.57	0.5					
2011/3/28 7:25	1	0.8	1.3	1.21	1.01	0.89	3.65	2.75	0.83	0.42					
2011/3/29 19:55	1.1	1	1.09	1.46	0.99	1.27	3.78	3.23	0.66	0.6	福島県沖	M6.6	13km		
2011/3/30 21:52	0.6	0.5	0.62	0.82	0.53	0.73	1.63	1.75	0.24	0.2					
2011/3/30 22:19	0.5	0.3	1.26	1.02	1.11	0.62	1	0.95	0.14	0.06					
2011/4/2 16:56	1.9	1.7	4.43	3.48	4.08	2.58	5.29	3.27	0.1	0.08	茨城県南部	M5.0	54km		
2011/4/5 4:30	0.7	0.6	1.16	1.11	0.79	0.87	1.16	1.06	0.04	0.03					
2011/4/7 23:33	2.5	2.4	8.18	8.52	5.45	6.79	16.95	15.16	3.56	4.01	宮城県沖	M7.1	66km		
2011/4/11 17:16	3	2.9	12.6	14.55	10.88	10.67	28.71	33.56	4.69	5.97	福島県浜通り	M7.0	6km		
2011/4/11 18:06	1.1	0.9	2.02	1.49	1.39	1.22	2.38	2.16	0.09	0.08					
2011/4/11 20:43	1.6	1.6	2.59	2.79	2.3	2.4	5.23	5.58	1.17	1.05	福島県浜通り	M5.9	11km		
2011/4/12 8:08	2.5	2.4	7.78	9.41	5.17	6.34	12.49	16.92	3.06	2.58	千葉県東方沖	M6.4	26km		
2011/4/12 14:08	2.6	2.5	4.51	8.37	3.7	7.93	11.23	13.89	2.37	1.69	福島県中通り	M6.4	15km		
2011/4/13 10:08	1.6	1.3	3.54	2.73	1.98	2.16	3.75	4.74	0.67	0.43	福島県浜通り	M5.7	5km		
2011/4/16 11:19	2.7	2.6	12.5	11.06	10.33	7.67	17.33	11.3	1.2	0.83	茨城県南部	M5.9	79km		
2011/4/18 3:09	1.4	1.2	2.46	3.84	1.66	2.96	2.74	1.95	0.08	0.05	千葉県北西部	M4.4	65km		
2011/4/19 23:10	1.3	1.1	2.51	2.5	2.01	2.31	3.39	2.45	0.11	0.09	茨城県南部	M5.0	53km		
2011/4/21 22:37	2	1.9	4.27	3.82	3.51	3.03	5.96	8.97	1.05	0.79	千葉県東方沖	M6.0	46km		
2011/4/22 1:12	1.3	0.8	2.03	1.45	1.18	1.09	2.4	2.04	0.18	0.13					
2011/4/24 12:25	1.2	0.5	1.71	2.1	1.54	1.8	1.63	1.66	0.02	0.02					
2011/4/25 18:00	1.3	0.9	2.36	2.23	1.4	1.63	2.15	1.8	0.11	0.1					
2011/4/26 21:12	1.6	1.4	3.5	3.53	2.61	3.21	3.35	3.15	0.16	0.08	茨城県南部	M5.0	46km		
2011/5/1 10:45	1	0.8	2.34	2.44	1.86	1.63	2.19	1.47	0.12	0.09					
2011/5/14 8:37	1.1	1	1.57	1.66	1.03	1.18	2.48	2.68	0.39	0.24	福島県沖	M5.9	41km		
2011/5/20 9:47	1.5	1.5	2.23	1.61	1.92	1.48	5.04	3.64	0.6	0.53	茨城県沖	M5.8	36km		
2011/5/20 17:53	1.3	1.1	2.03	2.3	1.56	1.89	3.18	3.39	0.11	0.06	茨城県南部	M4.6	64km		
2011/5/22 7:06	2	1.7	4.15	3.14	3.09	2.42	5.12	4.03	0.27	0.26	千葉県北東部	M5.5	40km		
2011/6/4 1:01	1.1	0.9	1.76	1.91	1.33	1.36	1.98	1.83	0.14	0.13					
2011/6/18 18:58	1	0.8	1.66	2.01	1.62	1.38	2.27	1.51	0.02	0.03					
2011/7/8 3:36	1.2	0.8	1.7	2.1	1.4	1.19	1.68	2.03	0.18	0.12					
2011/7/10 9:58	1.9	1.7	3.7	2.79	2.94	2.38	13.38	12.53	3.01	3.59	三陸沖	M7.3	34km		
2011/7/15 21:01	2.3	2.3	6.67	5.3	6.07	5.06	9.62	6.88	0.8	0.27	茨城県南部	M5.4	70km		
2011/7/25 3:52	1.3	1.2	2.04	2.21	1.82	1.7	4.92	4.11	0.42	0.48	福島県沖	M6.3	46km		
2011/7/25 20:55	1.3	1.2	1.02	1.74	0.9	1.49	3.85	5.07	0.38	0.53	千葉県東方沖	M5.7	37km		
2011/7/31 3:54	2.2	2.1	7.95	6.45	5.56	5.16	9.46	9.38	0.85	0.94	福島県沖	M6.5	57km		
2011/8/1 23:58	2	1.8	3.38	4.04	3.81	3.2	8.63	11.64	1.53	1.45	駿河湾	M6.2	23km		
2011/8/2 12:38	1.3	1	2.87	3.29	2.58	2.75	3.36	3.27	0.04	0.05	千葉県北西部	M4.1	64km		
2011/8/3 4:26	0.8	0.5	2.05	2.21	1.51	1.44	1.58	1.35	0.02	0.03					
2011/8/12 3:22	1.8	1.6	3.91	3.52	2.81	2.99	4.33	4.29	0.85	0.32	福島県沖	M6.1	52km		
2011/8/17 9:23	1.1	1	2.29	2.74	1.86	2.39	3.23	2.59	0.03	0.04	茨城県南部	M4.3	78km		
2011/8/19 14:37	1.6	1.5	2.65	2.54	2.29	2.11	5.42	5.34	1.13	1.24	福島県沖	M6.5	51km		
2011/8/31 18:33	2.2	2	6.86	7.7	5.86	4.66	5.34	4.66	0.11	0.07	千葉県北西部	M4.6	72km		
2011/9/4 5:53	1.7	1.6	4.22	4.6	3.58	3.68	4.72	3.78	0.07	0.14	埼玉県南部	M4.7	90km		
2011/9/11 19:09	1.7	1.6	3.94	3.1	3.11	2.3	4.78	2.21	0.09	0.03	千葉県北西部	M4.3	73km		
2011/9/15 17:01	1.9	1.9	3.19	3.77	2.66	3.58	11.71	10.98	1.8	2.23	茨城県沖	M6.3	51km		
2011/11/3 19:34	1.7	1.5	3.25	2.47	2.79	2.53	4.66	3.64	0.16	0.09	茨城県南部	M4.9	62km		
2011/11/24 4:25	1.2	1	1.87	1.64	1.84	1.22	3.26	2.89	0.64	0.42	福島県沖	M6.1	45km		
2011/12/3 5:55	1.8	1.7	3.11	3.16	3.27	2.33	4.21	3.8	0.19	0.21	千葉県南部	M5.2	20km		
2012/1/1 14:30	2.7	2.5	7.44	10.44	5.4	7.48	7.18	14.05	1.08	0.82	鳥島近海	M7.0	397km		
2012/1/28 7:43	1.9	1.8	5.07	6.12	3.46	4.16	5.02	4.05	0.33	0.3	山梨県東部・富	M5.4	18km		
2012/2/7 22:38	1	0.7	1.85	1.7	1.43	1.61	1.93	1.6	0.03	0.05					
2012/2/11 10:27	1.9	1.4	4.88	2.79	2.72	2.19	3.57	3.15	0.07	0.06	千葉県北西部	M4.7	46km		
2012/2/14 15:23	1.2	1.1	1.44	1.17	1.23	1.19	4.36	4.06	0.7	0.63	茨城県沖	M6.0	54km		
2012/2/19 14:55	1.5	1.3	2.45	2.85	1.85	1.82	2.73	3.28	0.17	0.15	茨城県北部	M5.2	7km		
2012/2/29 23:33	1.6	1.5	1.69	2.33	1.61	2.01	3.59	6.3	0.86	0.74	千葉県東方沖	M5.9	39km		
2012/3/1 7:33	1.9	1.5	5.16	3.25	3.26	2.15	4.7	2.91	0.12	0.07	茨城県沖	M5.3	56km		
2012/3/14 21:05	2.4	2.3	7.86	6.88	6.28	5.91	8.78	10.97	0.76	1.25	千葉県東方沖	M6.1	15km		
2012/3/16 4:20	2	1.8	6.99	6.98	4.84	4.72	5.45	3.56	0.34	0.2	埼玉県南部	M5.3	94km		

* 観測期間のうち 2011/4/1~2011/6/10 の観測値は国総研のデータを使用させていただきました。

観測された地震のうち震度2以上（計測震度1.5以上）の地震について、入力加速度（B2階の最大加速度）、応答加速度（32階の最大加速度）の分布を、震央距離を横軸にプロットしたものを図5.1.3-5～図5.1.3-6に示す。また、震央距離と加速度応答倍率（32階最大加速度／B2階最大加速度）の関係を地震の規模別に図5.1.3-7に示す。

入力加速度は、東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日14時46分頃発生）と茨城県沖の地震（2011年3月11日15時16分頃発生）をのぞいて、おおむね10Gal以下である。32階の応答加速度は、この2地震を除いて、おおむね30Gal以下である。

加速度応答倍率の平均は、X方向で2.5倍、Y方向で2.4倍であった。得られた記録の範囲では、応答倍率が大きいのは、震央距離が遠い場合が多い傾向がみられるが、近くで規模の大きな地震が発生していないことも影響していると考えられる。

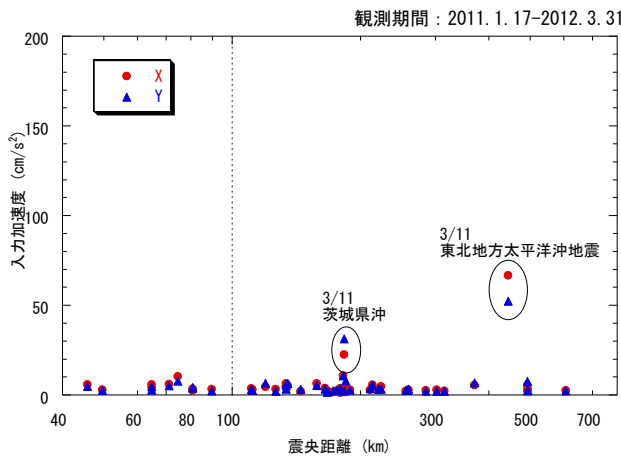


図 5.1.3-5 震央距離と入力加速度

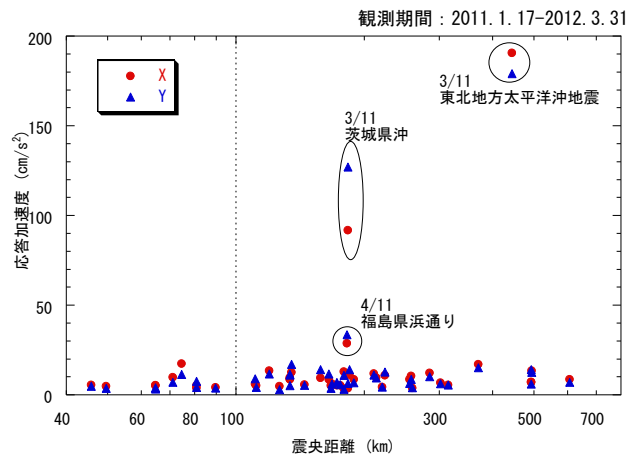


図 5.1.3-6 震央距離と応答加速度

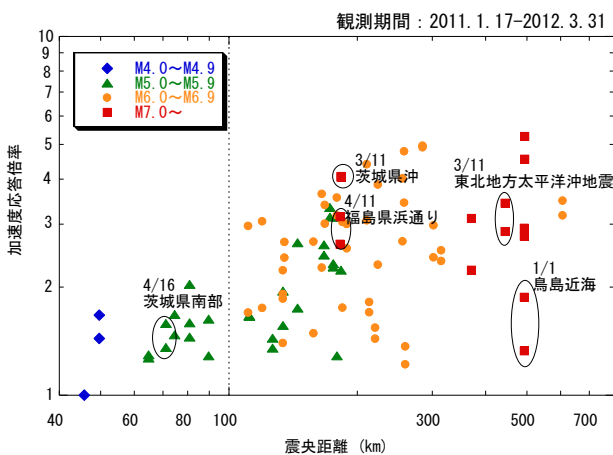


図 5.1.3-7 震央距離と加速度応答倍率

基礎での入力損失の影響をみるため、全観測記録について、低層棟 1 階の最大加速度を横軸に、高層棟 B2 階の最大加速度を縦軸にプロットしたものを、図 5.1.3-8 に示す。低層棟 1 階の最大加速度に対して、高層棟 B2 階の最大加速度は小さく、平均で 0.81 倍である。高層棟での基礎による入力損失がみられる。

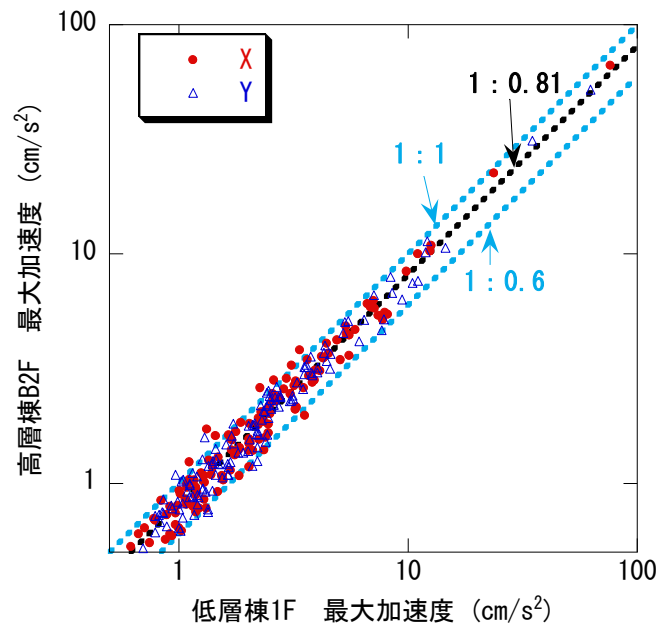


図 5.1.3-8 高層棟と低層棟の入力加速度の比較

3) 観測記録の分析

観測された地震のうち、計測震度の大きい以下の6つの地震について、観測記録の最大応答値を表5.1.3-6～表5.1.3-11に示し、高層棟B2階における速度応答スペクトルとエネルギースペクトルを図5.1.3-9～図5.1.3-14に示す。

東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日14時46分頃発生）については、より詳細な観測記録とその分析結果を5.1.3-14頁以降に示す。

・東北地方太平洋沖地震	2011年3月11日14時46分頃発生	M9.0	深さ24km	計測震度4.3
・茨城県沖の地震	2011年3月11日15時16分頃発生	M7.4	深さ43km	計測震度3.7
・福島県浜通りの地震	2011年4月11日17時16分頃発生	M7.0	深さ6km	計測震度2.9
・福島県中通りの地震	2011年4月12日14時8分頃発生	M6.4	深さ15km	計測震度2.6
・茨城県南部の地震	2011年4月16日11時19分頃発生	M5.9	深さ79km	計測震度2.6
・鳥島近海の地震	2012年1月1日14時30分頃発生	M7.0	深397km	計測震度2.5

表 5.1.3-6 計測震度と各測定点の最大加速度

階	計測震度 (震度階)	最大加速度 (Gal)			最大相対変位 (cm)	
		X	Y	Z	X	Y
32F	—	190.6	179.0	89.8	33.8	32.3
16F	—	140.9	116.5	63.1	17.4	17.2
B2F	4.3 (4)	66.6	52.2	57.7	—	—
低層棟1F	4.5 (5弱)	76.3	62.7	79.6	—	—

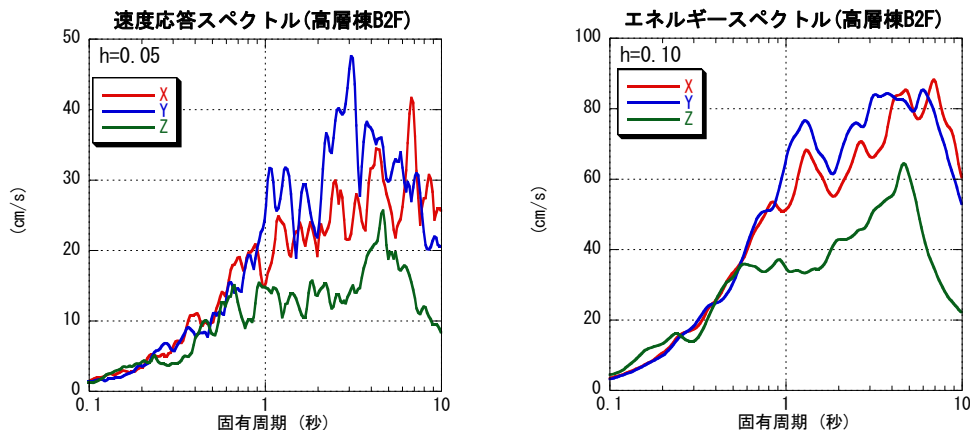


図 5.1.3-9 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル

表 5.1.3-7 計測震度と各測定点の最大加速度

階	計測震度 (震度階)	最大加速度 (Gal)			最大相対変位 (cm)	
		X	Y	Z	X	Y
32F	—	91.6	126.9	31.1	26.1	28.5
16F	—	50.7	71.3	24.1	12.5	14.1
B2F	3.7 (4)	22.6	31.2	14.3	—	—
低層棟1F	3.7 (4)	23.7	34.9	21.9	—	—

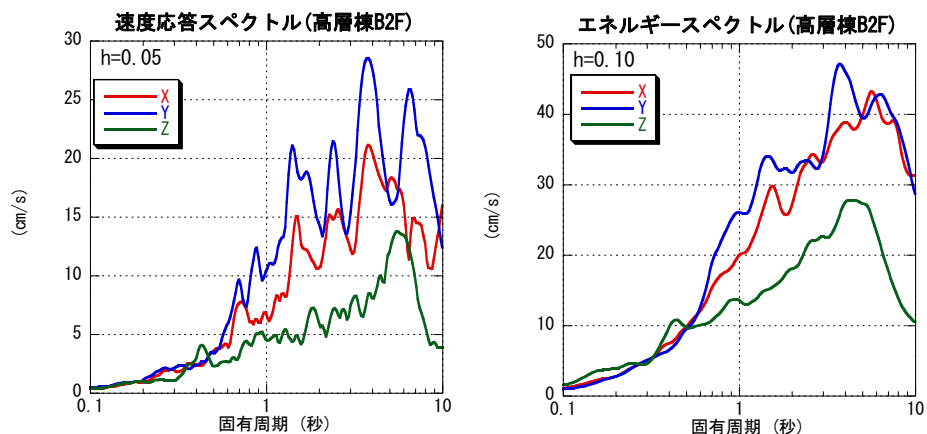


図 5.1.3-10 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル

福島県浜通りの地震 2011年4月11日17時16分頃発生 M7.0 深さ6km

表 5.1.3-8 計測震度と各測定点の最大加速度

階	計測震度 (震度階)	最大加速度 (Gal)			最大相対変位 (cm)	
		X	Y	Z	X	Y
32F	—	28.7	33.6	23.3	4.7	6.0
16F	—	24.6	21.1	16.9	2.4	3.0
B2F	2.9 (3)	10.9	10.7	7.5	—	—
低層棟1F	3.0 (3)	12.6	14.6	12.1	—	—

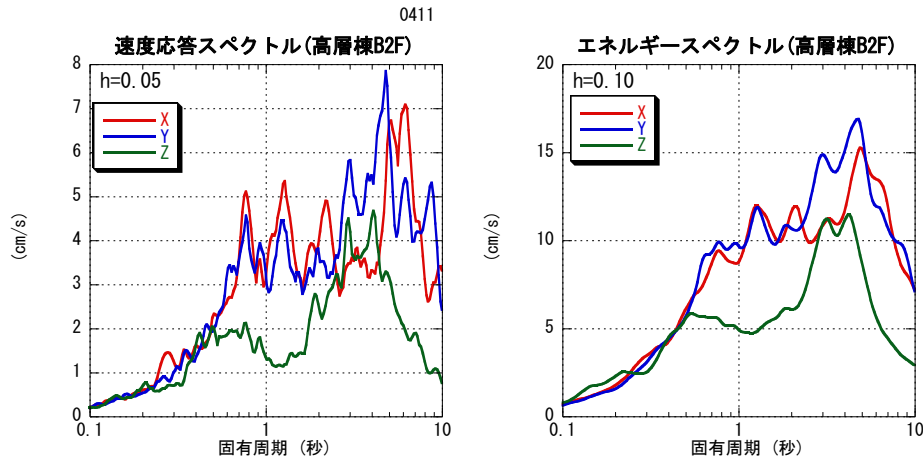


図 5.1.3-11 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル

福島県中通りの地震 2011年4月12日14時8分頃発生 M6.4 深さ15km

表 5.1.3-9 計測震度と各測定点の最大加速度

階	計測震度 (震度階)	最大加速度 (Gal)			最大相対変位 (cm)	
		X	Y	Z	X	Y
32F	—	17.3	11.3	22.6	1.2	0.8
16F	—	16.5	9.0	11.8	0.7	0.4
B2F	2.6 (3)	10.3	7.7	8.1	—	—
低層棟1F	2.7 (3)	12.5	11.1	13.6	—	—

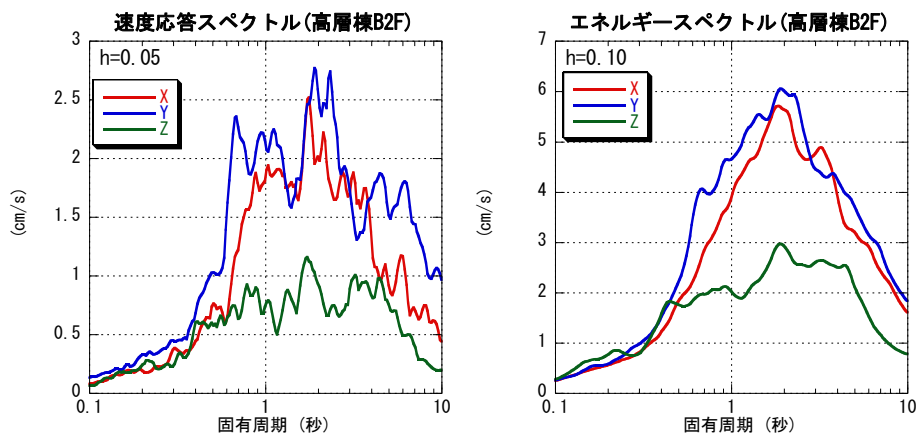


図 5.1.3-12 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル

茨城県南部の地震 2011年4月16日11時19分頃発生 M5.9 深さ79km

表 5.1.3-10 計測震度と各測定点の最大加速度

階	計測震度	最大加速度 (Gal)			最大相対変位 (cm)	
	(震度階)	X	Y	Z	X	Y
32F	—	17.3	11.3	22.6	1.2	0.8
16F	—	16.5	9.0	11.8	0.7	0.4
B2F	2.6 (3)	10.3	7.7	8.1	—	—
低層棟1F	2.7 (3)	12.5	11.1	13.6	—	—

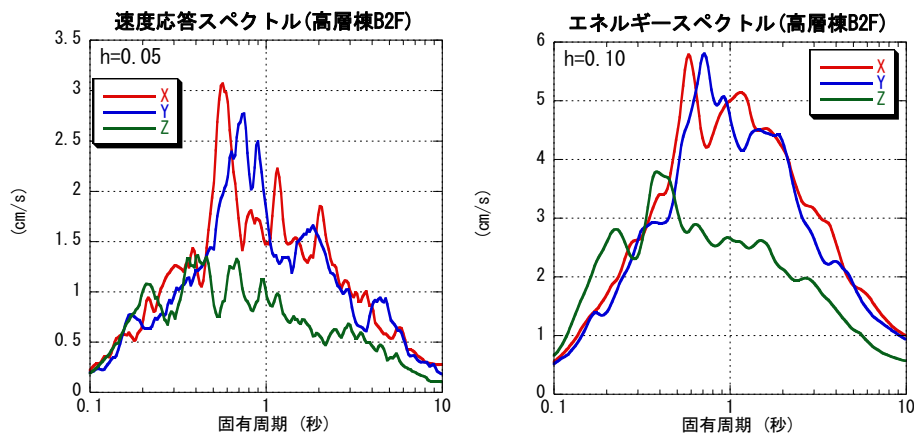


図 5.1.3-13 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル

鳥島近海の地震 2012年1月1日14時30分頃発生 M7.0 深さ397km

表 5.1.3-11 計測震度と各測定点の最大加速度

階	計測震度	最大加速度 (Gal)			最大相対変位 (cm)	
	(震度階)	X	Y	Z	X	Y
32F	—	7.2	14.0	13.4	1.1	0.8
16F	—	8.4	15.1	9.8	0.5	0.5
B2F	2.5 (3)	5.4	7.5	6.1	—	—
低層棟1F	2.7 (3)	7.4	10.4	8.5	—	—

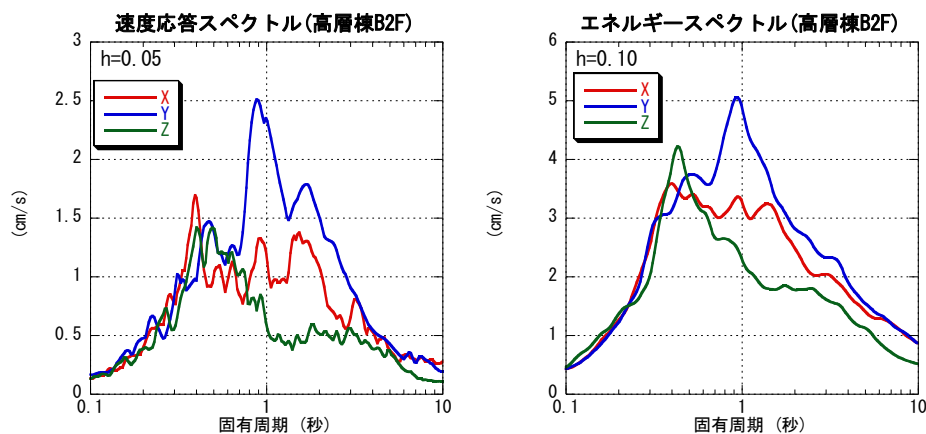


図 5.1.3-14 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル

東北地方太平洋沖地震（2011.年 3 月 11 日 14 時 46 分頃発生）において、各観測点で得られた加速度波形を図 5.1.3-15～図 5.1.3-17 に、加速度の積分により求めた速度波形を図 5.1.3-18～図 5.1.3-19 に、B2 階に対する 32 階および 16 階の相対変位波形を図 5.1.3-20～図 5.1.3-21 に示す。

地動（高層棟 B2 階）の最大加速度は、X 方向で 76.3cm/s^2 、Y 方向で 62.7cm/s^2 であり、高層棟 32 階での最大加速度は、X 方向で 190.6cm/s^2 、Y 方向で 179.0cm/s^2 であった。高層棟 32 階の B2 階に対する最大相対変位は、X 方向で 33.8cm 、Y 方向で 32.3cm であり、高さで除した平均層間変形角は、X 方向 $1/454$ 、Y 方向 $1/475$ であった。

各観測点の加速度フーリエスペクトルを図 5.1.3-22～図 5.1.3-24 に示す。

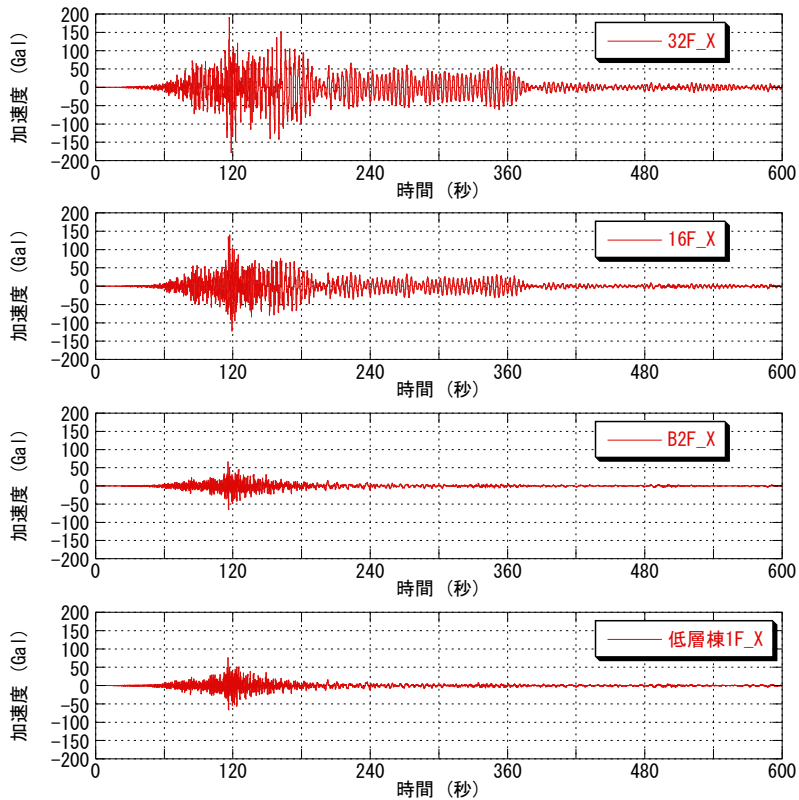


図 5.1.3-15 加速度波形(X(短辺)方向)
(東北地方太平洋沖地震 2011年3月11日 14時46分頃)

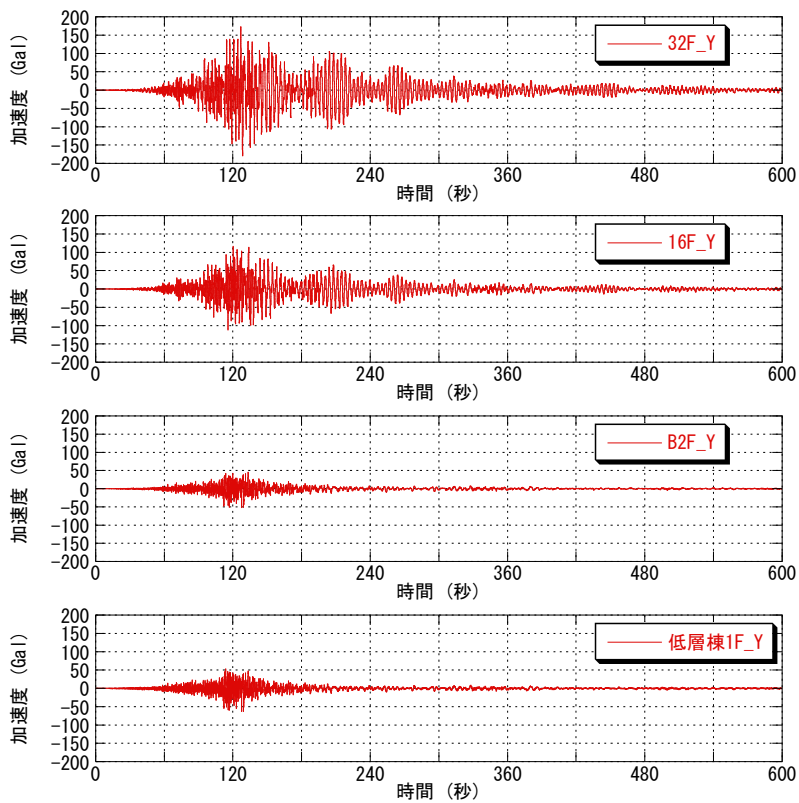


図 5.1.3-16 加速度波形(Y(長辺)方向)
(東北地方太平洋沖地震 2011年3月11日 14時46分頃)

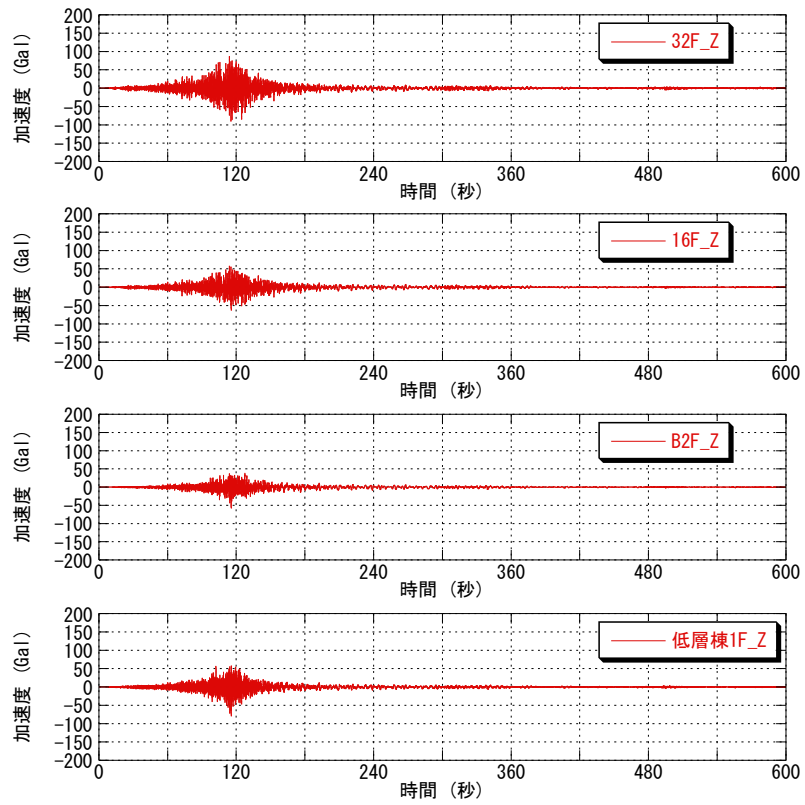


図 5.1.3-17 加速度波形(Z 方向)
 (東北地方太平洋沖地震 2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分頃)

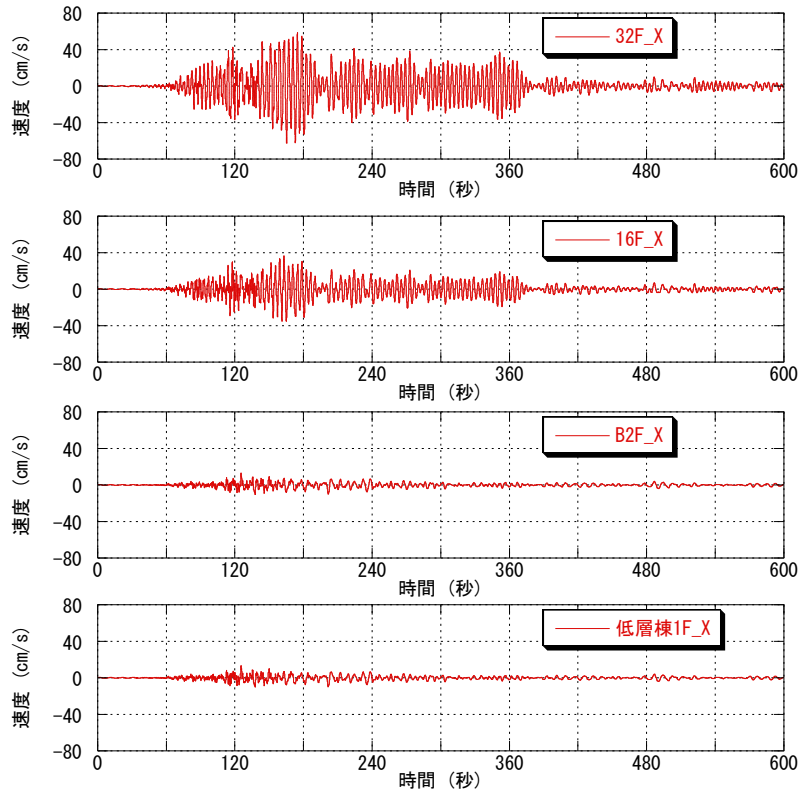


图 5.1.3-18 速度波形(X(短边)方向)

(東北地方太平洋沖地震 2011年3月11日 14時46分頃)

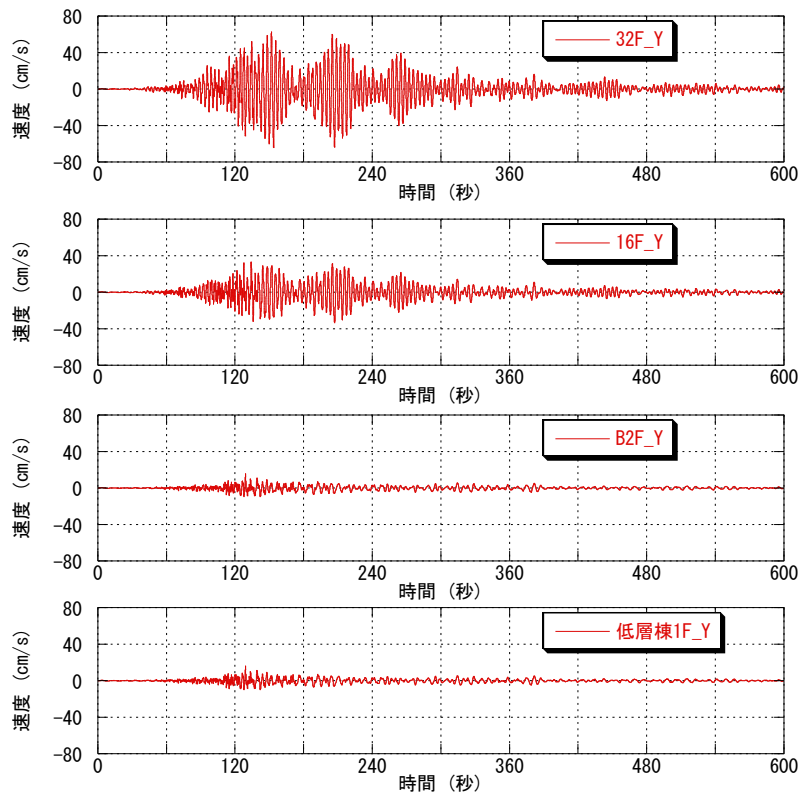


图 5.1.3-19 速度波形(Y(長边)方向)

(東北地方太平洋沖地震 2011年3月11日 14時46分頃)

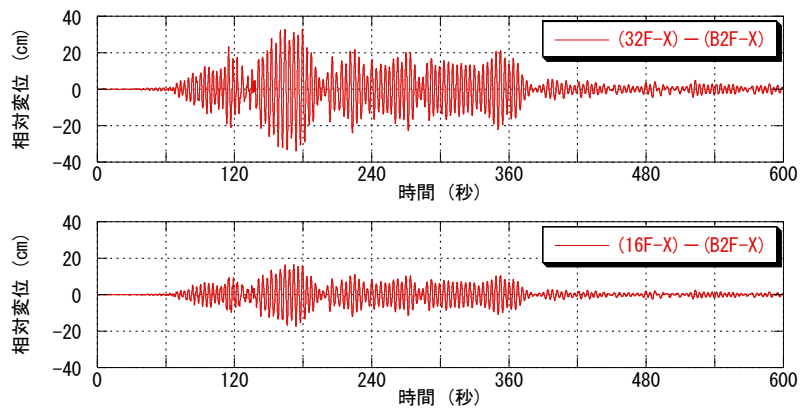


図 5.1.3-20 B2F に対する相対変位波形(X(短辺)方向)
 (東北地方太平洋沖地震 2011年3月11日 14時46分頃)

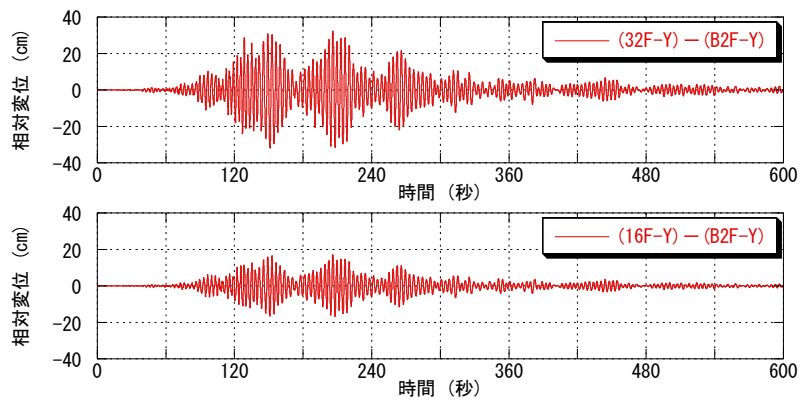


図 5.1.3-21 B2F に対する相対変位波形(Y(長辺)方向)
 (東北地方太平洋沖地震 2011年3月11日 14時46分頃)

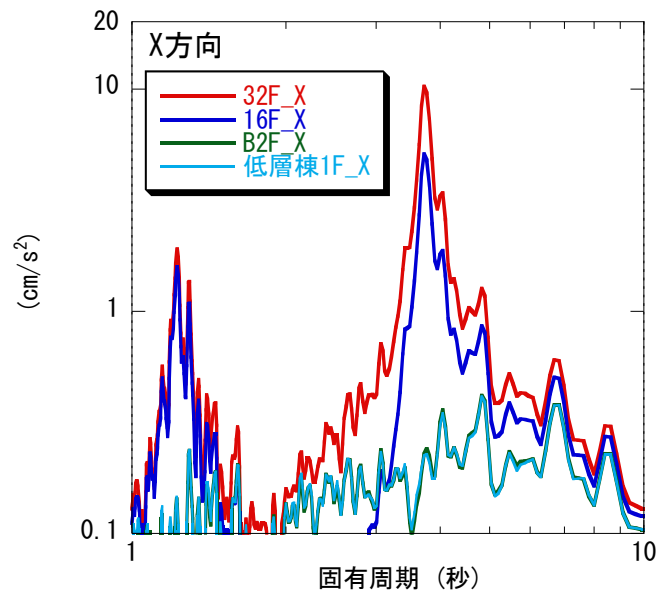


図 5.1.3-22 フーリエスペクトル(X(短辺)方向)
 (東北地方太平洋沖地震 2011年3月11日 14時46分頃)

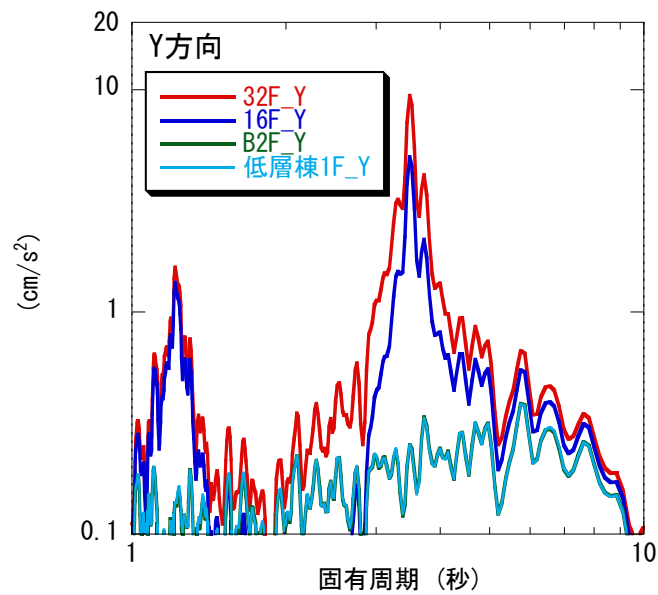


図 5.1.3-23 フーリエスペクトル(Y(長辺)方向)
 (東北地方太平洋沖地震 2011年3月11日 14時46分頃)

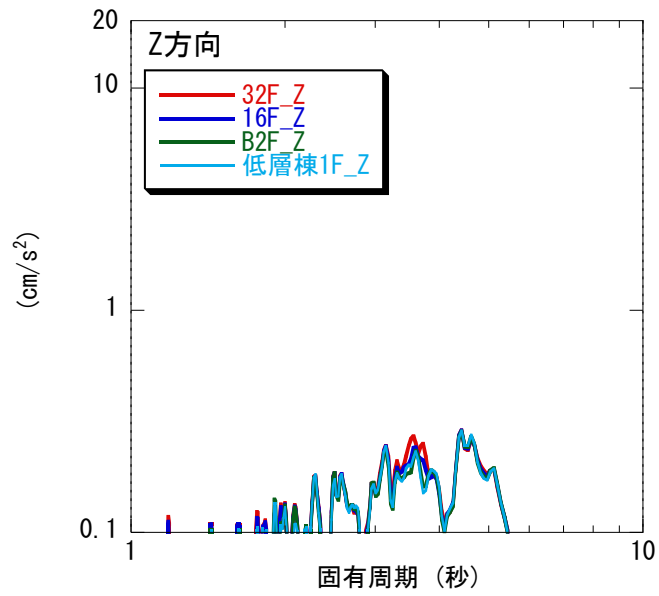
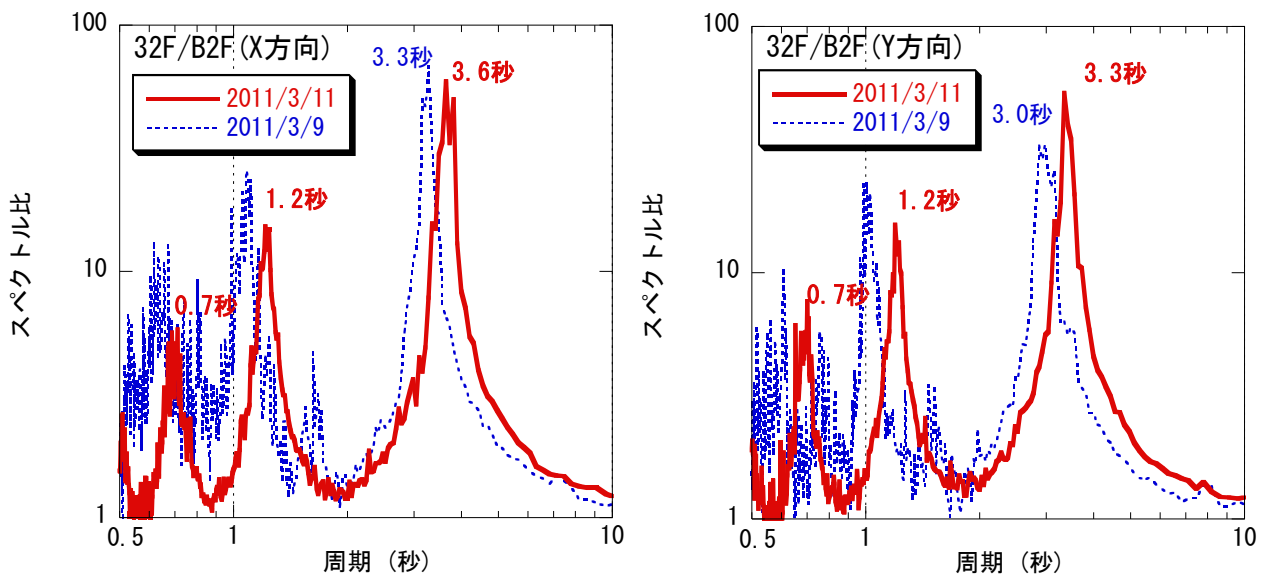


図 5.1.3-24 フーリエスペクトル(Z方向)
(東北地方太平洋沖地震 2011年3月11日 14時46分頃)

東北地方太平洋沖地震の発生時における建物の振動特性をみるため、B2階に対する32階のフーリエスペクトル比を算出した。図5.1.3-25に示す。固有周期は、X(短辺)方向1次で3.6秒、Y(長辺)方向1次で3.3秒であった。この地震の2日前に観測されている三陸沖の地震(2011年3月9日、計測震度1.7)での固有周期は、X方向が3.3秒、Y方向が3.0秒であり、10%程度長くなっている。



(a) X(短辺)方向

(b) Y(長辺)方向

図 5.1.3-25 フーリエスペクトル比 (32階/B2階)

(東北地方太平洋沖地震 2011年3月11日14時46分頃)

(D) まとめ

- ・ 観測対象建物 NHSK ビルは、高層棟が鉄骨造 33 階建て、低層棟が鉄骨鉄筋コンクリート造 6 階建てである。センサーを高層棟の B2 階、16 階、32 階、および低層棟の 1 階の計 4 箇所に設置し、それぞれ水平 2 方向および上下方向、合計 12 成分を観測している。
- ・ 観測対象建物 NHSK ビルで、観測期間 2011 年 1 月 17 日～2012 年 3 月 31 日において、合計 138 回の地震観測記録が得られた。記録は、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震後約 1 か月の期間に集中している。全観測記録のうち、震度 4 が 2 回、震度 3 が 5 回、震度 2 が 46 回、震度 1 以下が 85 回観測された。
- ・ 加速度応答倍率の平均は、X 方向で 2.5 倍、Y 方向で 2.4 倍であった。得られた記録の範囲では、応答倍率が高いのは、震央距離が遠い場合が多い傾向がみられるが、近くで規模の大きな地震が発生していないことも影響していると考えられる。
- ・ 高層棟 B2 階の最大加速度は、低層棟 1 階の最大加速度に対して平均で 0.81 倍であり、高層棟基礎における入力損失の影響がみられる。
- ・ 2011 年 3 月 11 日に発生した東北地方太平洋沖地震において、計測震度 4.3 (高層棟 B2 階) が観測された。地動 (高層棟 B2 階) の最大加速度は、 76.3cm/s^2 、高層棟 32 階での最大加速度は、 190.6cm/s^2 であった。高層棟 32 階の B2 階に対する最大相対変位は、33.8cm であり、高さで除した平均層間変形角は、 $1/454$ であった。
- ・ 東北地方太平洋沖地震において、高層棟の 1 次モードの固有周期は X (短辺) 方向で 3.6 秒、Y (長辺) 方向で 3.3 秒であった。

5.1.4 NHST ビルの地震観測 (H23 年度実施分)

1) 建物・地盤概要

建物名称 : NHST
 所在地 : 東京都中央区晴海
 構造種別 : 地上・鉄骨造, 地下・鉄骨鉄筋コンクリート造, 一部鉄筋コンクリート造
 建物規模 : 地上 33 階地下 4 階
 軒高 : 154.8m
 最高高さ : 154.8m
 基準階面積 : 2810m²
 設計時 1 次固有周期 : X 方向 : 3.95 秒, Y 方向 : 3.68 秒
 地盤概要 : 表 5.1.4-1

表 5.1.4-1 地盤概要

GL - m	地層	N 値 min~max
0.0 ~ 2.0	表土・盛土	1~6
2.0 ~ 5.5	有楽町層上部(沖積層)	0~13
5.5 ~ 22.5	有楽町層下部(沖積層)	0~5
22.5 ~ 26.5	七号地層(沖積層)	2~30
26.5 ~ 34.5	東京層(洪積砂・砂礫層)	26~60(支持層)
34.5 ~	上総層群	70 以上



図 5.1.4-1 建物所在地 (観測点●, ▲は K-net 観測点)

2) 観測装置概要

a) 観測システム・観測装置の概要と配置

建物内：強震計測装置 1 台を 33 階に、検出器(加速度計)3 台を 33 階、15 階、B4 階に配置し、連動させる。

地表面：建物群から数十メートル離れた位置に据え置き型の強震計測装置を設置し、独立で観測する。強震計測装置同士は連動しないが、GPS により時刻校正を行うことにより観測記録の同期をとる。

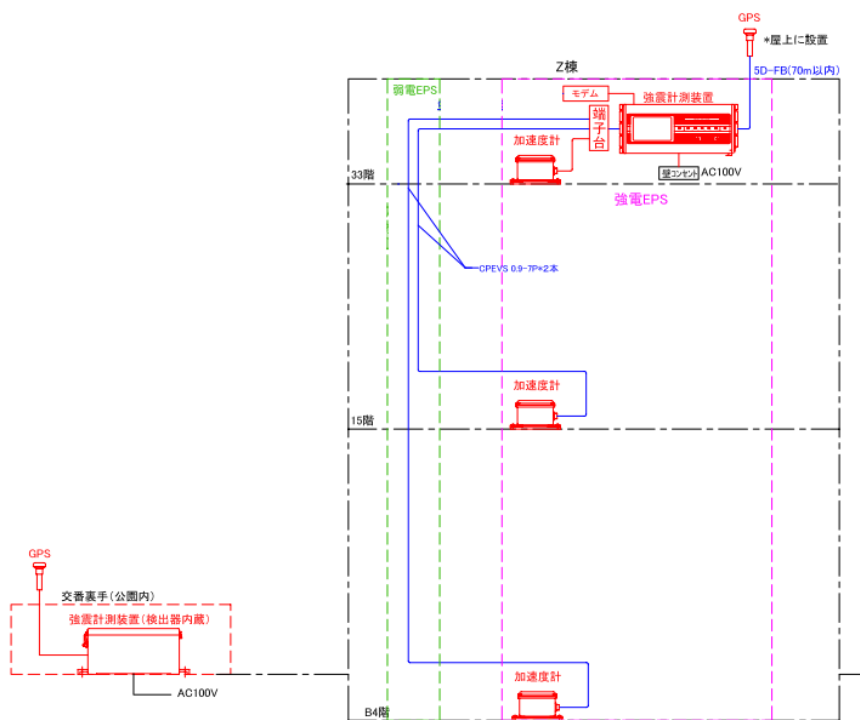


図 5.1.4-2 観測システム構成図

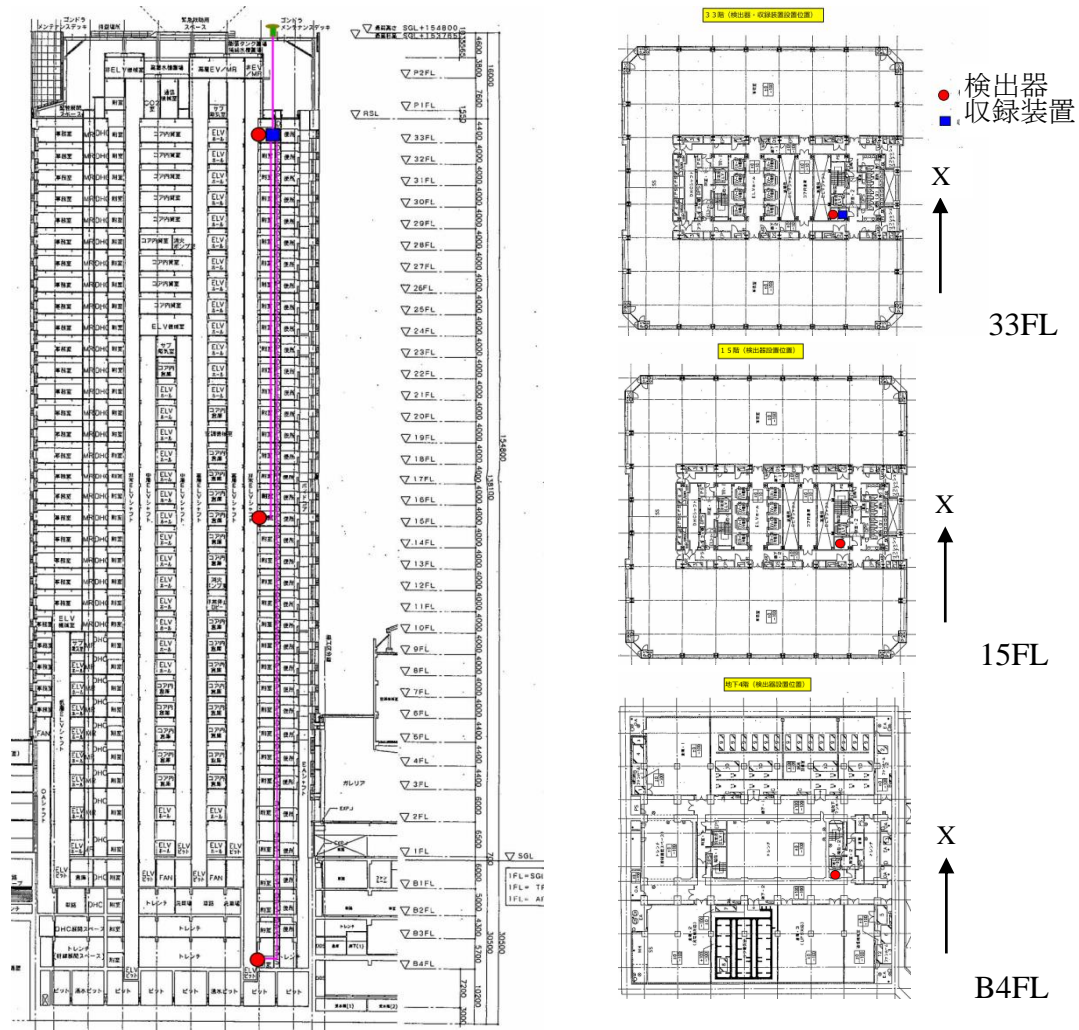


図 5.1.4-3(1) 観測装置の配置 (建物内)



図 5.1.4-3(2) 観測装置の配置 (地表面・近隣公園内)



(1-1) 建物屋上設置 GPS アンテナ



(1-2) 建物 33 階強震観測装置設置用ラック
(強震観測装置, モデム, 検出器)



(2-1) 公園内強震観測装置カバー, 電源ポール
(上部 GPS アンテナ設置)



(2-2) 公園内強震観測装置

図 5.1.4-4 観測装置の設置状況

b) 観測装置の仕様

- ・ 検出器(加速度計) : ミットヨ製 JEP8A3
- ・ 収録装置 : ミットヨ製 SMAC-MDU
- ・ 観測可能 : $\pm 30\text{m/s}^2$
- ・ AD 分解能 : 24bit
- ・ サンプリング周波数 : 100Hz
- ・ 時刻校正 : GPS による

表 5.1.4-2 設置機器一覧

	機器名称	台数	設置位置
屋内	検出器: サーボ型加速度計 JEP8A3	3	33 階, 15 階, B4 階
	強震計測装置: SMAC-MDU	1	33 階
	モデム: DFML-560ME	1	33 階
	GPS アンテナ: GPA-016	1	屋上
屋外	強震計測装置: SMAC-MDU(据置(検出器内蔵)型)	1	公園内

e) 観測結果

2011年4月1日から2012年3月31日までの観測記録一覧を表5.1.4-3に示す。また、網掛けした観測記録を以下に示す。

表 5.1.4-3 地震観測記録一覧 (cm/s²)

年	月	日	時	分	地表面			建物内								
					X	Y	Z	B4FX	B4FY	B4FZ	15FX	15FY	15FZ	33FX	33FY	33FZ
2011	4	2	16	56	8.1	6.8	3.8	-1.9	-1.7	2.0	-2.6	3.0	-3.3	-2.6	-3.0	5.2
2011	4	5	4	30	-5.1	-2.4	-1.4	-1.1	0.9	0.6	1.8	-1.1	1.2	1.4	1.3	1.9
2011	4	7	23	33	-18.2	23.9	-8.8	-5.9	-6.4	5.3	-13.2	11.9	9.1	10.9	-12.4	14.6
2011	4	10	6	23	8.1	-5.6	2.0	1.9	1.5	0.9	3.0	-2.3	-1.3	2.3	2.1	2.5
2011	4	11	6	36	3.6	4.7	1.9	-1.4	-1.8	-0.8	-2.0	-2.5	-1.7	-1.9	-2.4	2.8
2011	4	11	17	16	-31.9	27.5	-17.0	-12.2	-10.3	8.5	-20.1	-23.0	-12.1	-21.8	-26.6	18.1
2011	4	11	18	6	3.5	-2.9	-1.7	0.9	-1.0	0.8	-1.6	-1.5	2.0	0.9	-1.8	-2.6
2011	4	11	20	43	8.8	-5.9	3.2	3.2	-2.4	-2.0	5.3	5.2	3.2	4.0	6.0	-4.1
2011	4	12	8	8	20.4	20.9	-9.3	-5.6	6.9	5.4	-9.8	10.2	-7.2	11.4	-9.3	-14.8
2011	4	12	14	8	9.5	-10.6	-3.9	3.2	4.5	2.6	-8.9	-10.5	3.7	-7.1	11.0	4.7
2011	4	13	10	8	7.1	-6.7	5.6	2.5	1.9	1.2	4.6	-3.7	-3.5	-4.3	-2.9	-5.4
2011	4	18	3	9	-11.2	6.1	3.2	3.8	1.9	-1.2	-3.1	2.5	-1.5	2.4	1.4	2.8
2011	4	19	2	37	4.4	-5.6	-2.6	1.1	-1.4	1.4	1.2	-1.9	1.5	1.0	-0.7	-2.2
2011	4	19	23	10	5.6	-5.0	-3.8	1.7	1.6	2.4	2.4	3.3	2.1	-1.8	2.5	3.8
2011	4	21	22	37	9.0	8.1	5.3	2.7	-2.8	3.5	-6.4	6.7	-4.1	-6.7	7.6	7.0
2011	4	22	15	35	-5.0	-4.2	3.6	-2.5	-1.5	-3.3	-1.9	1.0	-2.7	-1.3	0.7	-3.1
2011	4	24	12	25	2.3	-3.2	-2.5	1.1	-1.4	-1.0	0.7	0.9	1.2	0.5	-0.7	1.7
2011	4	25	18	0	6.0	5.6	3.7	1.5	1.8	-1.3	1.7	2.3	-2.5	-1.5	-1.4	3.7
2011	4	26	21	12	-4.9	-4.2	3.1	2.0	2.0	-1.7	2.8	2.6	2.0	2.3	2.3	3.3
2011	5	1	2	12	-3.7	-3.4	-2.8	1.5	1.1	0.7	-1.9	2.1	-1.3	-1.6	1.4	2.2
2011	5	1	10	45	3.6	5.0	2.5	0.8	1.3	-0.8	0.9	1.9	0.9	-0.9	1.1	-1.3
2011	5	13	5	52	-4.3	-2.6	2.1	-1.1	1.0	-0.7	1.2	1.3	1.1	-1.2	1.1	-1.7
2011	5	14	8	36	3.4	-3.4	1.5	1.1	-0.8	-0.8	3.4	-2.4	1.1	3.2	-2.0	-1.9
2011	5	20	9	46	-4.7	-3.7	-1.7	2.4	1.5	1.2	3.3	-2.9	1.7	3.8	-3.9	2.5
2011	5	20	17	53	-4.7	6.8	-2.8	-1.2	-1.4	1.0	1.9	-3.7	1.6	2.2	-3.1	2.5
2011	5	22	7	6	6.4	5.6	-8.7	-1.9	2.2	-5.3	-3.9	-4.1	-5.0	4.5	4.1	-9.3
2011	5	25	9	19	4.6	2.8	2.7	1.3	1.0	0.8	1.4	1.6	-1.3	1.2	1.5	-1.9
2011	6	3	10	33	3.6	3.5	2.6	1.2	1.3	0.8	-1.5	1.9	-1.3	1.2	2.0	-2.0
2011	6	4	1	1	-4.4	-3.4	2.3	-1.1	-1.1	0.8	2.2	1.6	-1.3	1.7	-1.3	-1.7
2011	6	9	19	39	-4.7	-5.4	2.4	-1.1	-1.2	-0.9	2.5	-2.9	2.2	1.7	2.0	3.1
2011	6	18	18	58	4.1	2.4	3.9	1.5	0.8	1.6	1.4	1.2	1.5	1.2	0.8	1.5
2011	7	8	3	36	3.5	2.8	2.4	1.1	1.4	1.0	1.5	1.5	1.6	1.2	1.8	3.1
2011	7	10	9	58	6.2	6.1	3.7	2.1	2.9	1.7	7.0	8.5	3.6	10.2	9.9	5.7
2011	7	15	21	1	15.7	19.2	8.3	5.0	6.0	3.8	7.1	9.5	5.7	8.1	7.9	8.0
2011	7	25	3	52	5.4	4.3	3.6	1.5	1.5	1.0	5.9	3.5	2.0	4.5	4.5	3.7
2011	7	25	20	55	2.5	3.1	1.2	1.1	1.6	0.7	2.7	3.9	1.6	3.8	3.8	2.4
2011	7	31	3	54	14.2	13.4	8.7	4.3	3.9	4.1	11.6	10.1	6.9	7.7	8.2	9.0
2011	8	1	23	58	8.8	5.0	3.8	2.4	2.0	1.5	3.7	3.2	2.1	5.0	6.0	3.1
2011	8	2	12	38	10.5	6.9	3.6	3.7	1.8	1.3	3.2	2.2	2.2	2.6	1.3	3.3
2011	8	5	6	52	2.1	2.2	1.2	2.8	1.5	0.9	2.4	1.6	1.6	2.0	1.0	2.4
2011	8	12	3	22	6.7	5.6	5.3	2.0	2.1	2.3	4.6	5.1	5.0	4.8	3.7	6.9
2011	8	17	9	23	5.0	7.1	4.3	1.8	2.2	1.5	1.6	2.7	1.7	1.2	1.4	3.0
2011	8	19	14	37	5.8	4.1	3.6	1.8	1.5	1.6	5.0	3.2	3.3	6.3	4.8	4.5
2011	8	22	17	36	4.2	3.1	2.1	1.3	1.0	0.9	2.3	1.4	1.3	1.5	1.3	2.1
2011	8	31	18	33	11.1	8.3	5.7	3.6	3.1	1.8	3.5	3.7	1.9	2.6	2.7	4.1
2011	9	4	5	53	8.7	8.7	4.3	3.3	2.8	1.5	2.6	2.7	2.2	3.1	3.2	4.2
2011	9	11	19	9	6.7	7.0	2.9	2.7	2.9	0.9	2.8	3.3	1.4	1.8	2.8	2.3
2011	9	15	17	0	7.3	6.2	3.9	2.4	2.5	1.5	8.7	6.0	3.5	11.8	8.8	5.6
2011	9	21	22	31	3.3	4.4	2.6	1.1	0.8	1.2	1.5	1.6	1.6	1.1	1.4	2.6
2011	10	14	18	27	10.9	4.9	3.2	2.4	1.8	0.9	3.0	2.6	1.6	2.2	1.9	2.9
2011	11	3	19	34	13.5	11.2	7.5	4.1	3.1	2.2	5.4	6.1	4.3	4.0	4.2	6.7
2011	11	24	4	25	2.9	3.2	2.5	1.1	0.9	0.8	3.0	2.1	1.4	3.1	3.0	2.6
2011	12	3	5	55	17.9	13.3	5.1	3.9	5.6	2.9	5.7	7.3	3.9	5.1	3.6	6.8
2011	12	10	13	19	3.0	4.0	2.8	0.9	1.3	0.5	1.1	1.4	1.0	0.8	0.9	1.2
2012	1	1	14	29	35.4	27.6	15.0	9.5	9.0	5.2	14.3	11.1	7.5	10.9	9.0	13.9
2012	1	17	12	30	2.0	2.0	3.0	0.9	1.0	1.6	1.0	1.1	1.2	0.9	0.8	2.1
2012	1	18	10	25	5.3	2.1	1.5	1.5	0.6	0.5	1.2	0.8	1.0	1.0	0.8	1.6
2012	1	28	7	40	10.6	15.0	8.0	3.9	7.7	4.4	5.2	9.1	4.3	2.5	5.2	8.3
2012	1	29	16	47	5.7	5.7	3.3	1.2	2.0	1.1	2.0	2.6	1.4	1.3	2.1	2.5
2012	2	7	22	38	10.7	2.9	3.4	2.9	1.7	1.1	3.0	1.5	1.7	1.8	1.5	3.2
2012	2	11	10	27	7.1	7.3	3.3	2.5	2.1	1.8	2.8	3.4	2.5	1.8	2.9	3.9
2012	2	14	15	22	2.4	3.0	1.6	1.1	1.3	0.7	3.4	3.2	1.5	5.1	4.9	2.4
2012	2	18	13	56	6.4	4.2	2.8	1.9	1.7	1.6	1.4	1.2	2.1	0.9	0.7	2.4
2012	2	18	14	13	7.0	5.3	2.7	1.9	1.7	1.9	1.9	1.6	2.3	1.5	0.7	2.7
2012	2	19	14	55	4.9	9.1	3.1	1.9	2.3	1.6	2.9	3.1	2.5	2.8	3.2	4.6
2012	2	28	14	21	3.2	5.2	1.4	0.8	1.1	0.8	1.4	2.4	1.1	1.4	1.8	1.7
2012	2	29	23	33	3.7	3.0	2.3	1.7	1.6	2.0	4.5	4.2	3.2	4.5	4.2	4.4
2012	3	1	7	33	5.5	5.2	4.2	2.2	1.9	2.7	2.6	2.3	3.1	2.1	2.3	4.8
2012	3	8	3	51	1.9	1.8	3.4	0.8	0.8	2.6	0.7	1.0	2.0	0.6	0.6	2.5
2012	3	10	2	26	3.1	3.1	1.9	0.8	1.0	0.7	1.5	2.0	1.4	1.4	1.7	2.1
2012	3	14	21	5	15.8	16.1	7.8	4.5	6.4	4.4	10.9	10.4	7.1	8.6	9.2	9.6
2012	3	16	4	20	9.2	8.8	6.3	3.8	3.0	2.7	3.5	3.8	3.6	2.7	2.8	4.3

本表中、4/1~6/10の期間の記録は国土交通省国土技術政策総合研究所の提供による。

2011年4月11日17時16分 福島県浜通りを震源とする地震 (Eq. 1)

地震規模：M7.0

最大加速度一覧：表 5.1.4-3

表 5.1.4-3 最大加速度一覧 (Eq. 1, cm/s^2)

観測点		X方向	Y方向	UD方向
建物内	33FL	21.8	26.6	18.1
	15FL	20.1	23.0	12.1
	B4FL	12.2	10.3	8.5
地表面		31.9	27.5	17.0

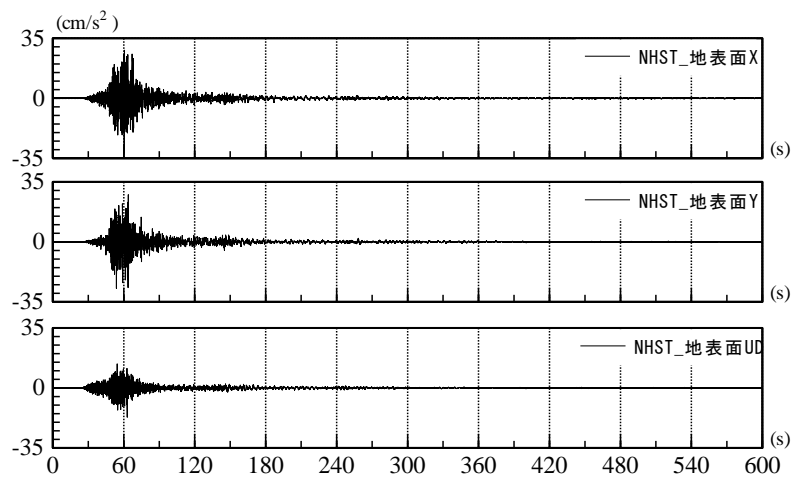


図 5.1.4-5 観測加速度時刻歴 (Eq. 1, 地表面観測点)

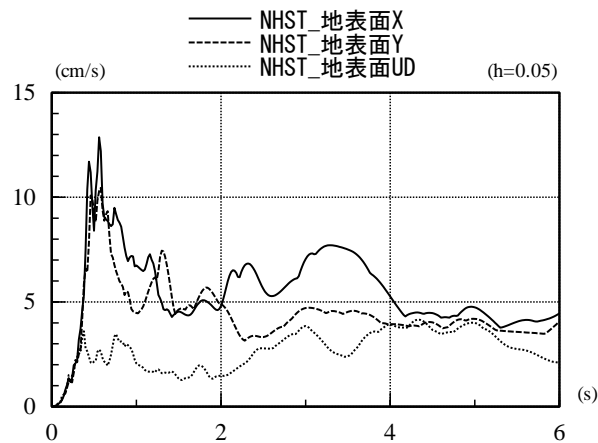


図 5.1.4-6 速度応答スペクトル (Eq. 1, 地表面観測点)

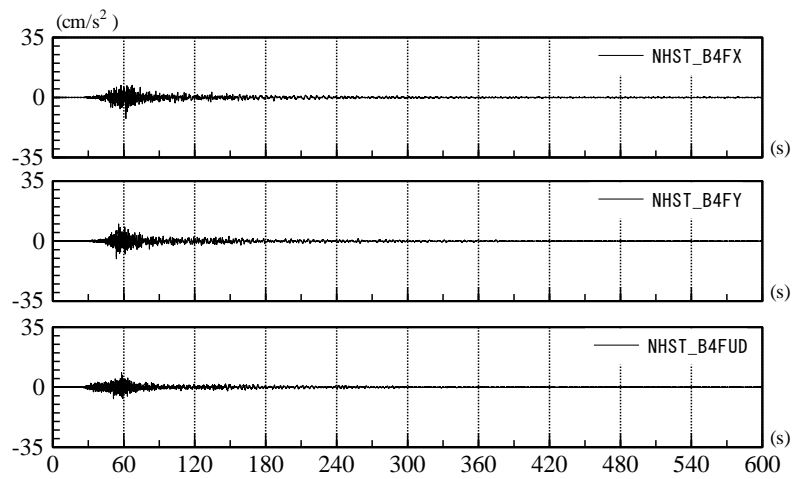
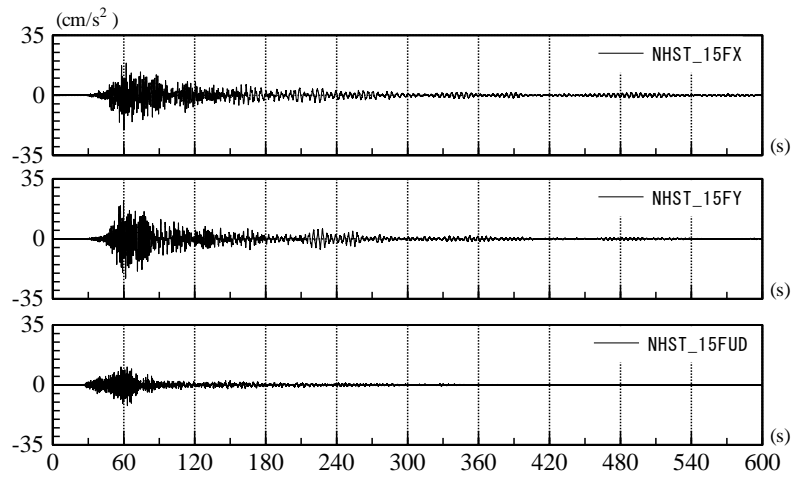
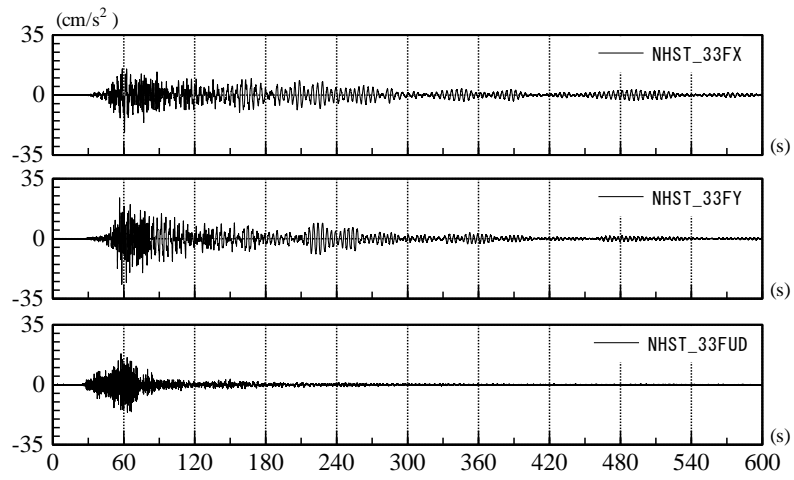
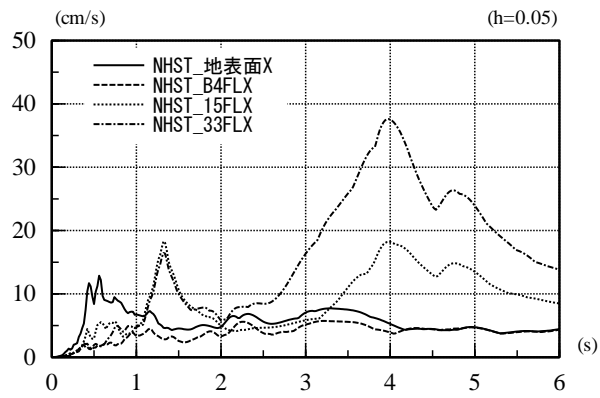
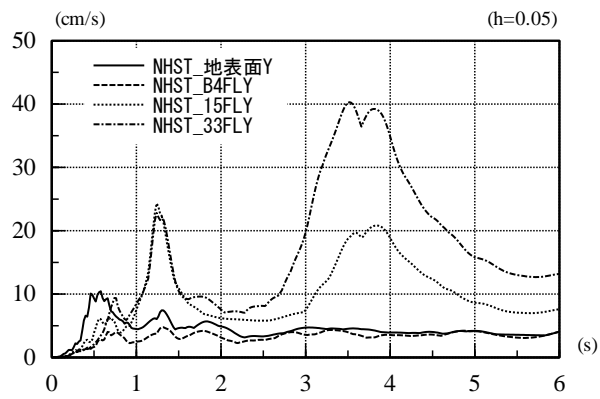


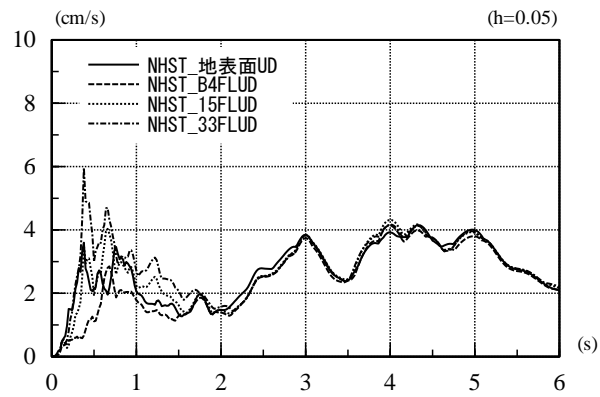
图 5.1.4-7 観測加速度時刻歴 (Eq. 1, 建物内観測点)



(1) X方向



(2) Y方向



(3) UD方向

図 5.1.4-8 速度応答スペクトル (Eq. 1, 地表面, 建物内観測点重ね描き)

2012年1月1日14時29分 鳥島近海を震源とする地震 (Eq. 2)

地震規模：M7.0

最大加速度一覧：表 5.1.4-5

表 5.1.4-5 最大加速度一覧 (Eq. 2, cm/s^2)

観測点		X方向	Y方向	UD方向
建物内	33FL	10.9	9.0	13.9
	15FL	14.3	11.1	7.5
	B4FL	9.5	9.0	5.2
地表面		35.4	27.6	15.0

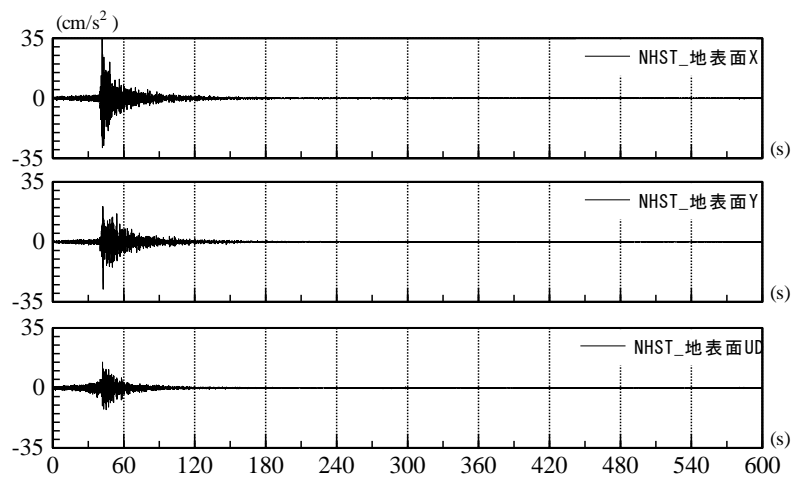


図 5.1.4-9 観測加速度時刻歴 (Eq. 2, 地表面観測点)

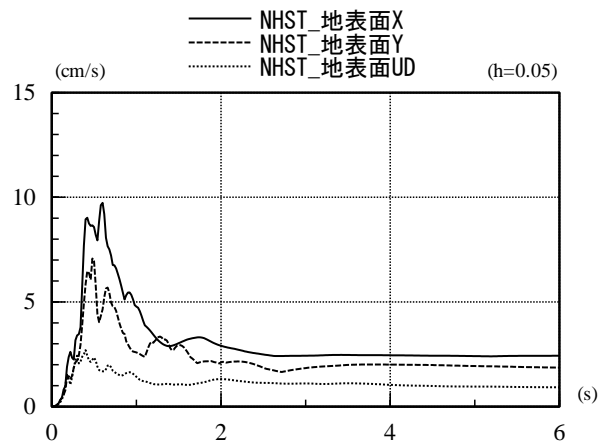
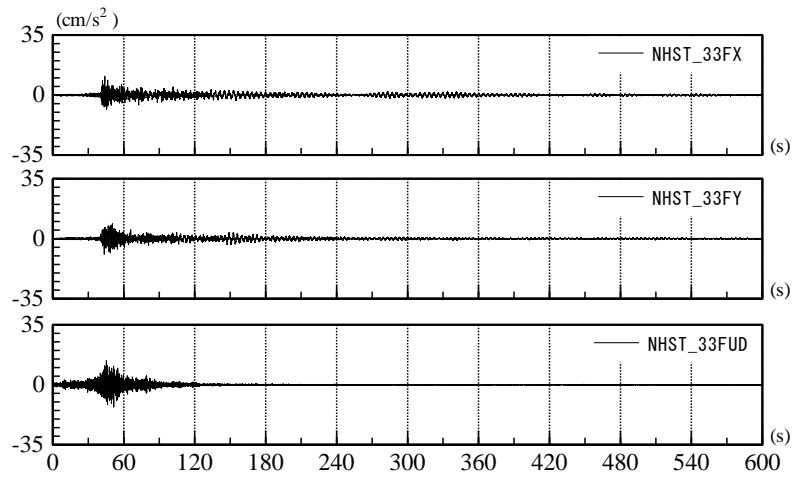
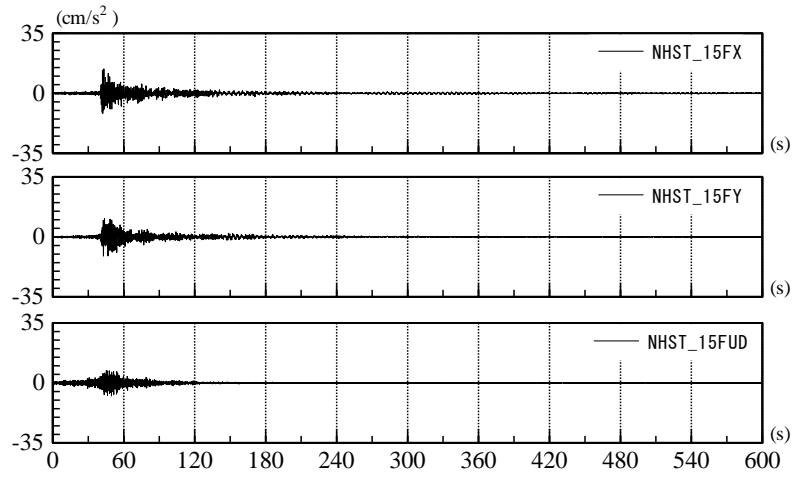


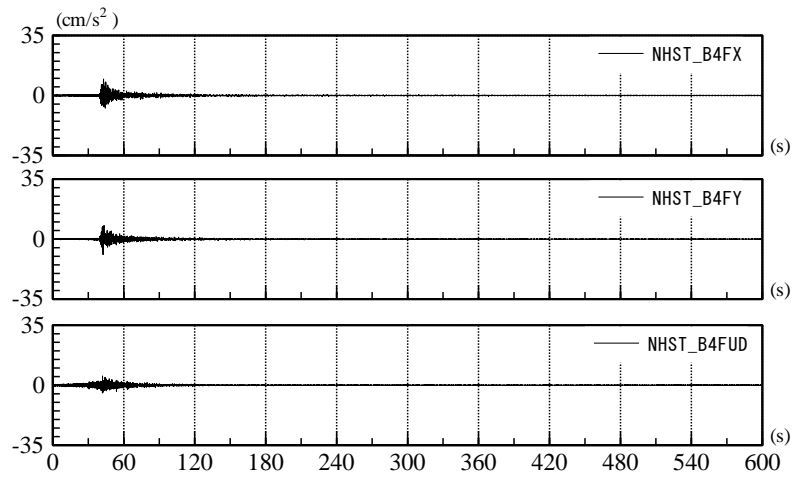
図 5.1.4-10 速度応答スペクトル (Eq. 2, 地表面観測点)



(a) 33FL

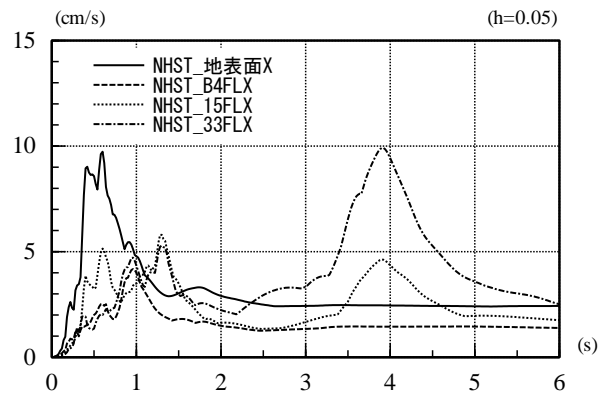


(b) 15FL

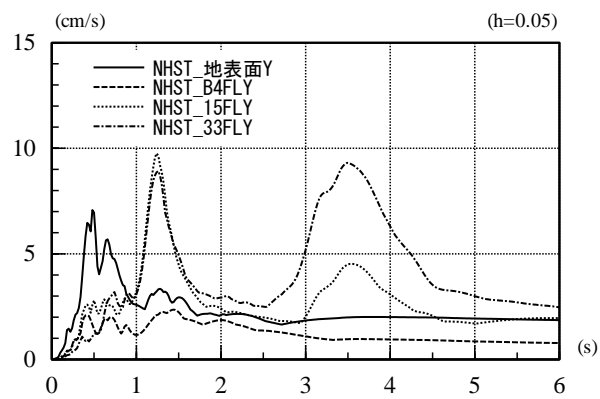


(c) B4FL

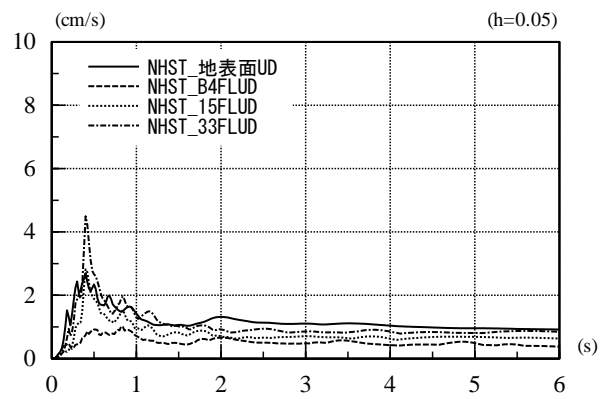
図 5.1.4-11 観測加速度時刻歴 (Eq. 2, 建物内観測点)



(1) X方向



(2) Y方向



(3) UD方向

図 5.1.4-12 速度応答スペクトル (Eq. 2, 地表面, 建物内観測点重ね描き)

2012年1月28日7時43分 山梨県東部を震源とする地震 (Eq. 3)

地震規模：M5.4

最大加速度一覧：表 5.1.4-6

表 5.1.4-6 最大加速度一覧 (Eq. 2, cm/s^2)

観測点		X方向	Y方向	UD方向
建物内	33FL	2.5	5.2	8.3
	15FL	5.2	9.1	4.3
	B4FL	3.9	7.7	4.4
地表面		10.6	15.0	8.0

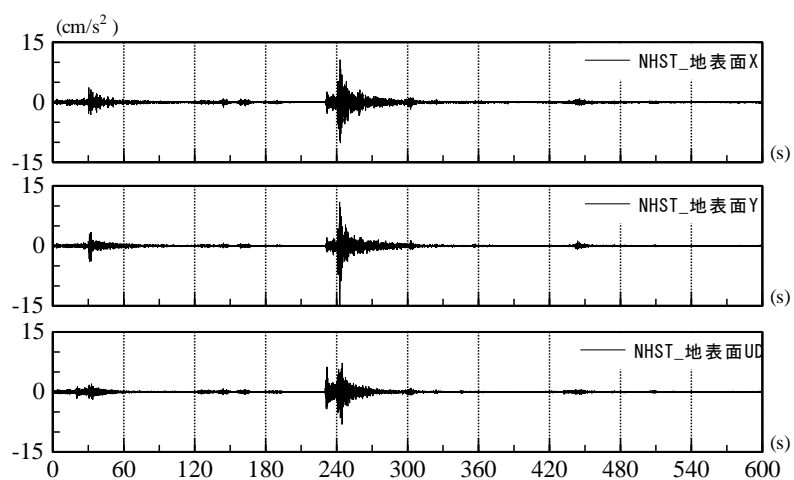


図 5.1.4-13 観測加速度時刻歴 (Eq. 3, 地表面観測点)

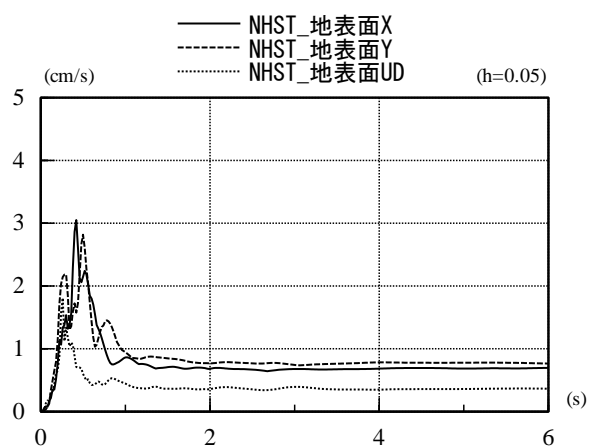
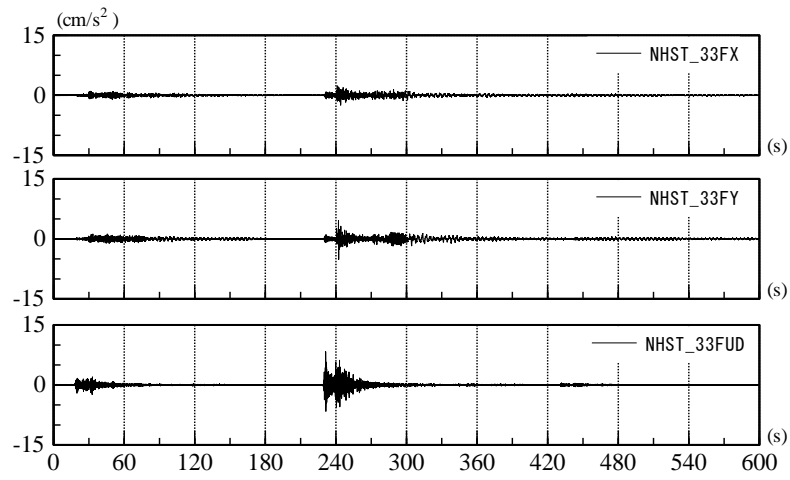
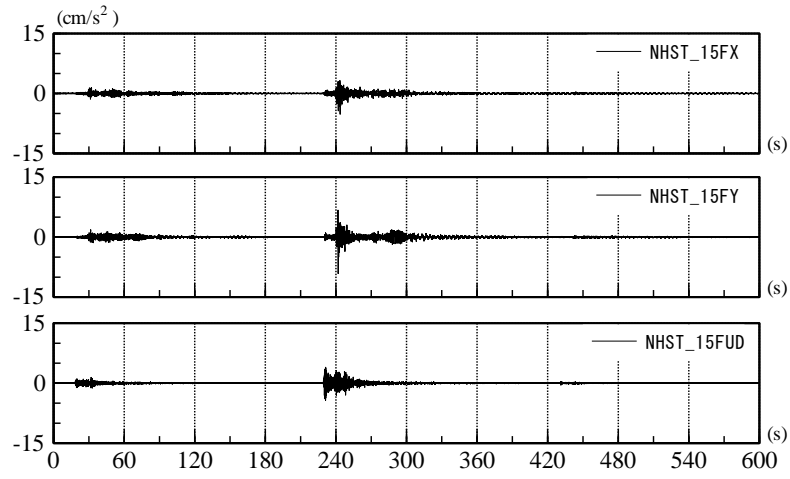


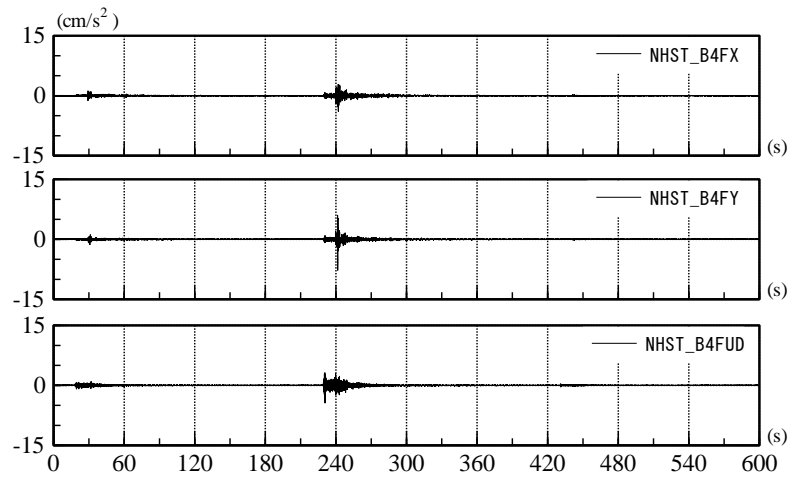
図 5.1.4-14 速度応答スペクトル (Eq. 3, 地表面観測点)



(a) 33FL

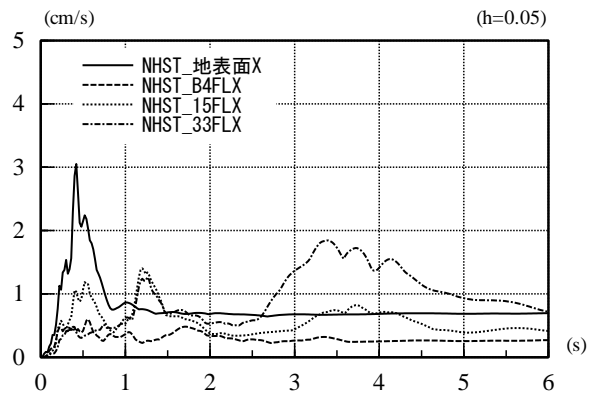


(b) 15FL

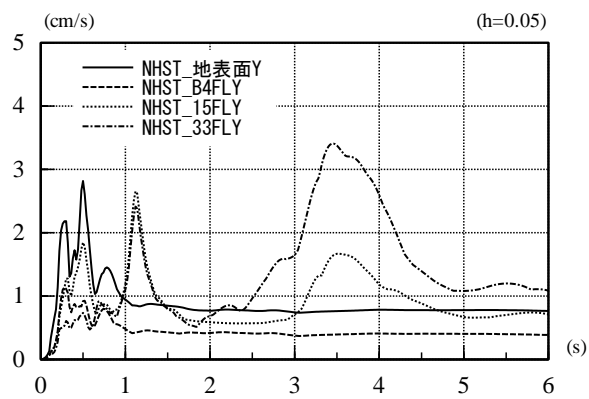


(c) B4FL

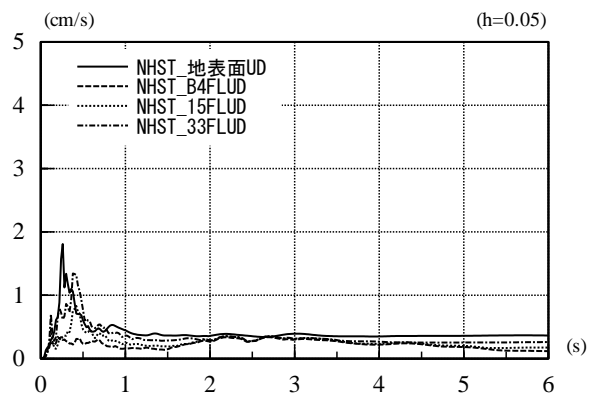
図 5.1.4-15 観測加速度時刻歴 (Eq. 3, 建物内観測点)



(1) X方向



(2) Y方向



(3) UD方向

図 5.1.4-16 速度応答スペクトル (Eq. 3, 地表面, 建物内観測点重ね描き)

5.1.5 NHSK ビルの地震観測（H24 実施分）

(1) 建物概要

1) 建物諸元・地盤概要

地震観測対象建物 NHSK ビルの諸元を以下に示す。NHSK ビルは、33 階建ての高層棟と 6 階建ての低層棟からなる。高層棟を観測対象とし、高層棟と基礎構造が異なり建物規模の比較的小さい低層棟においても、1 階のみにセンサーを設置し観測している。

高層棟

建物位置：東京都千代田区

竣工：2007 年

階数：地上 33 階 地下 2 階 塔屋 1 階

軒の高さ：155.82m

最高部の高さ：156.67m

延床面積：132,253m²

基準階面積：2,999.69m²（12 階）

外径：短辺(X 方向)41.6m 長辺(Y 方向)71.9m

地上階構造：鉄骨造，制振部材付きラーメン構造

地下階構造：鉄筋コンクリート造，鉄骨鉄筋コンクリート造，耐震壁付きラーメン構造

設計用固有周期：X（短辺）方向 3.75 秒，Y（長辺）方向 3.61 秒

基礎構造：直接基礎と杭基礎の併用基礎

地盤種別：第 2 種地盤（周期 0.24～0.27 秒）

地盤の土質及び N 値：表 5.1.5-1

（数値は日本 ERI 株式会社性能評価シートより）

低層棟（1 階のみ観測）

階数：地上 6 階

構造：鉄骨鉄筋コンクリート造

基礎構造：杭基礎（マルチペDESTAL 杭）

（高圧噴射攪拌型の地盤改良）

表 5.1.5-1 地盤の土質および N 値

GL±m	地盤	N 値	
0.0 ～ -2.5	埋土	2以下	● 低層棟 1 階センサー設置レベル
-2.5 ～ -3.7	粘土質細砂	4	
-3.7 ～ -13.6	細砂	11～31	● 高層棟 B2 階センサー設置レベル
-13.6 ～ -16.5	粘土及び砂質シルト	16	
-16.5 ～ -23.6	砂礫	60以上	
-23.6 ～ -30.6	細砂	60以上	

2) 建物位置

観測対象建物 NHSK ビルおよび付近の K-NET 観測点の地図上の位置を図 5.1.5-1 に示す。



図 5.1.5-1 観測対象建物 NHSK ビルの位置

①～⑭：K-NET 観測点

①	TKY 007
②	TKY 015
③	TKY 023
④	TKY 022
⑤	TKY 021
⑥	TKY 014
⑦	TKY 028
⑧	TKY 020
⑨	TKY 026
⑩	TKY 019
⑪	TKY 018
⑫	TKY 013
⑬	TKY 016
⑭	TKY 017

(2) 観測概要

1) 観測点配置

観測点は、高層棟および低層棟の計4箇所とした。センサー（加速度計）は、高層棟では、32階、16階、地下2階の各階同位置に、低層棟では1階に設置し、収録装置は、19階に設置した。加速度計および収録装置の平面図、立面図上の位置を図5.1.5-2、図5.1.5-3に示す。

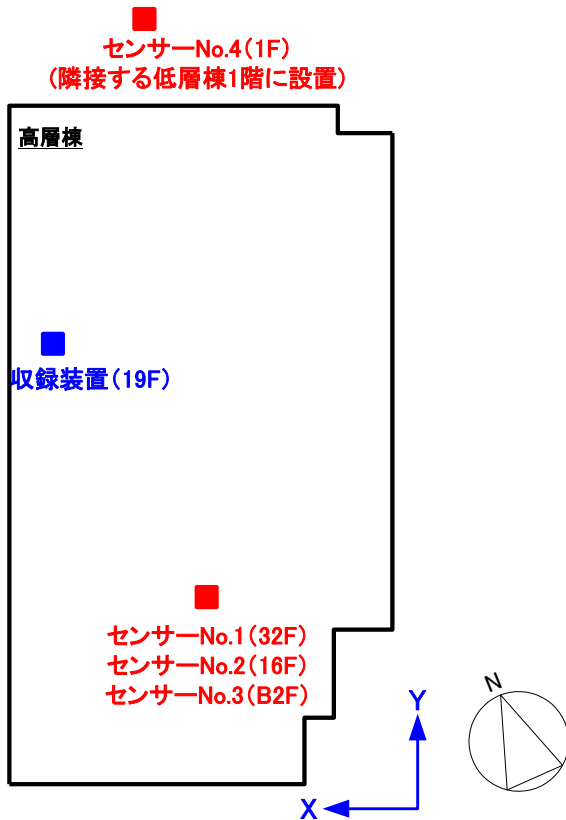


図 5.1.5-2 加速度計および収録装置の設置位置
(平面図)

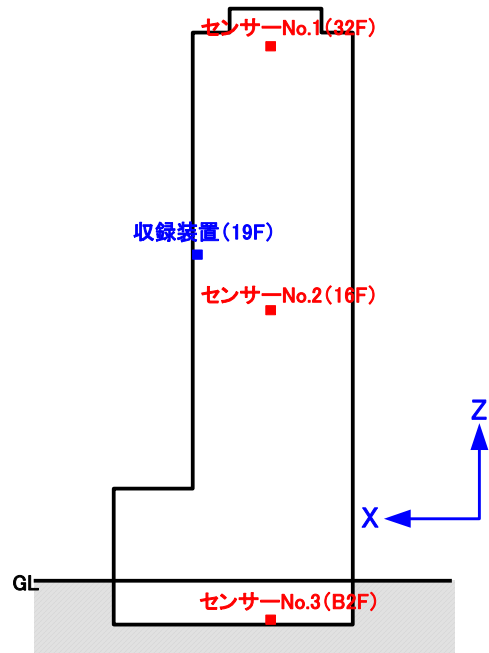


図 5.1.5-3 加速度計および収録装置の設置位置
(高層棟 断面図)

2) 収録条件

各観測点で水平2方向と上下方向の3成分, 4観測点で合計12成分を観測している。
表 5.1.5-2 にチャンネル対応を示す。

表 5.1.5-2 チャンネル対応表

CH	建物	階	方向
1	低層棟	1F	X(短辺)
2			Y(長辺)
3			Z(上下)
4	高層棟	B2F	X(短辺)
5			Y(長辺)
6			Z(上下)
7		16F	X(短辺)
8			Y(長辺)
9			Z(上下)
10	32F	X(短辺)	
11		Y(長辺)	
12		Z(上下)	

起動条件と記録条件を以下に示す。2011年1月に収録条件①で観測開始し, 2011年4月に, 収録状況を考慮して, 収録条件②に変更している。変更後の収録開始の条件(起動値)は, B2階のXY方向のセンサーの観測値に対して設定し, 1.0Galとしている。プリトリガは30秒である。収録終了の条件は, B2階XYと32階XYで0.7Galとしている。終了判断時間は180秒である。最大記録長は10分間, サンプリング振動数は100Hzである。

収録条件② (2011年4月7日~2013年3月8日)

<起動条件>

	起動値	終了値
B2階 X	1.0Gal	0.7Gal
B2階 Y	1.0Gal	0.7Gal
32階 X		0.7Gal
32階 Y		0.7Gal

<記録条件>

プリトリガ時間	30秒
終了判断時間	180秒(2011年7月に変更)
記録上書きモード	最新
最大ファイル記録長	10分
サンプリング振動数	100Hz

収録条件① (2011年1月17日~2011年4月6日)

<起動条件>

	起動値	終了値
B2階 X	0.5Gal	0.5Gal
B2階 Y	0.5Gal	0.5Gal
32階 X		1.0Gal
32階 Y		1.0Gal

<記録条件>

プリトリガ時間	20秒
終了判断時間	30秒
記録上書きモード	最新
最大ファイル記録長	10分
サンプリング振動数	100Hz

(3) 観測結果

1) 観測期間

2011年1月17日～2012年3月31日、2012年4月13日～2013年3月8日

2) 観測地震

前述の起動条件により、観測期間に検知された地震は156であった。うち、2012年度(2012年4月13日～2013年3月8日)に観測された地震は18である。月ごとの観測記録数を図5.1.5-4に示す。記録は、東北地方太平洋沖地震から1か月程の期間に集中している。震度ごとの観測記録数を表5.1.5-3に示す。観測期間全体では、震度4が2回、震度3が8回、震度2が53回、震度1以下が93回観測された。うち、2012年度に観測された地震では、震度3が3回、震度2が7回、震度1が8回であった。

上述の観測期間に観測された地震について、B2階と低層棟1階の計測震度、32階、B2階、低層棟1階の最大加速度、32階のB2階に対する最大相対変位を表5.1.5-4～表5.1.5-5に示す。計測震度1.0以上の地震については、地震諸元(震源地、マグニチュード、震源深さ)も示す。

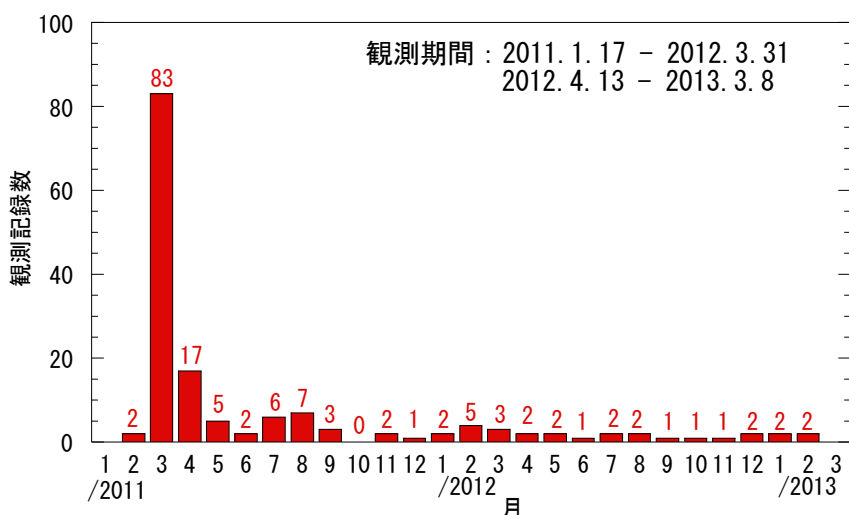


図 5.1.5-4 月ごとの観測記録数

表 5.1.5-3 震度ごとの観測記録数 (()内の数値は、2012年度の観測記録数)

震度5弱以上	0 (0)
震度4	2 (0)
震度3	8 (3)
震度2	53 (7)
震度1以下	93 (8)

図 5.1.5-5～図 5.1.5-6 に示す。また、震央距離と加速度応答倍率（32 階最大加速度／B2 階最大加速度）の関係を地震の規模別に図 5.1.5-7 に示す。

入力加速度は、東北地方太平洋沖地震(2011 年 3 月 11 日 14 時 46 分)と茨城県沖の地震(2011 年 3 月 11 日 15 時 16 分)をのぞいて、おおむね 10Gal 以下である。32 階の応答加速度は、この 2 地震を除いて、おおむね 30Gal 以下である。

加速度応答倍率の平均は、X 方向で 2.2 倍、Y 方向で 2.1 倍であった。得られた記録の範囲では、応答倍率が大きいのは、震央距離が遠い場合が多い傾向がみられるが、近くで規模の大きな地震が発生していないことも影響していると考えられる。

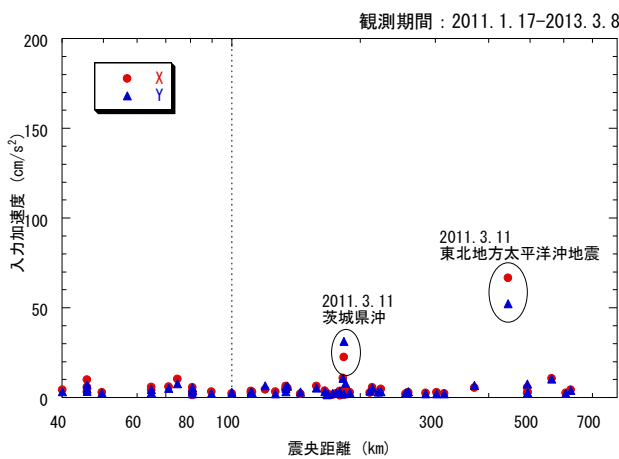


図 5.1.5-5 震央距離と入力加速度

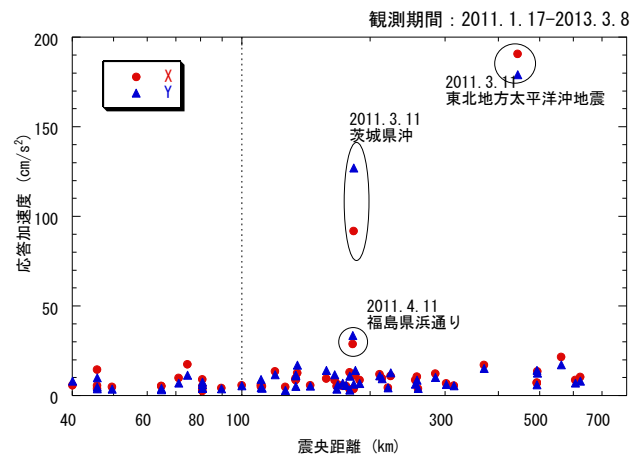


図 5.1.5-6 震央距離と応答加速度

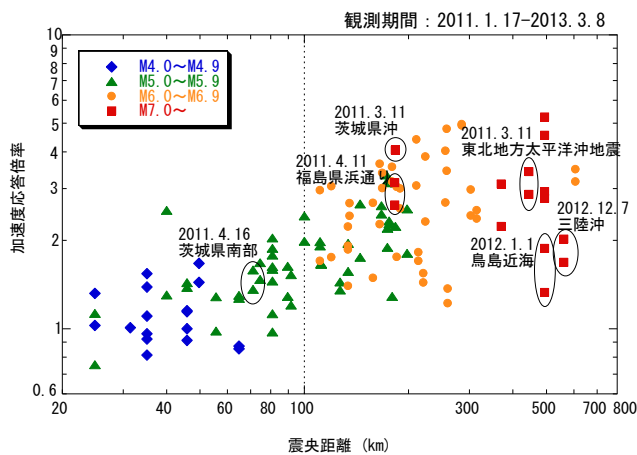


図 5.1.5-7 震央距離と加速度応答倍率

基礎での入力損失の影響をみるため、全観測記録について、低層棟 1 階の最大加速度を横軸に、高層棟 B2 階の最大加速度を縦軸にプロットしたものを、図 5.1.5-8 に示す。低層棟 1 階の最大加速度に対して、高層棟 B2 階の最大加速度は小さく、平均で 0.81 倍である。高層棟での基礎による入力損失がみられる。

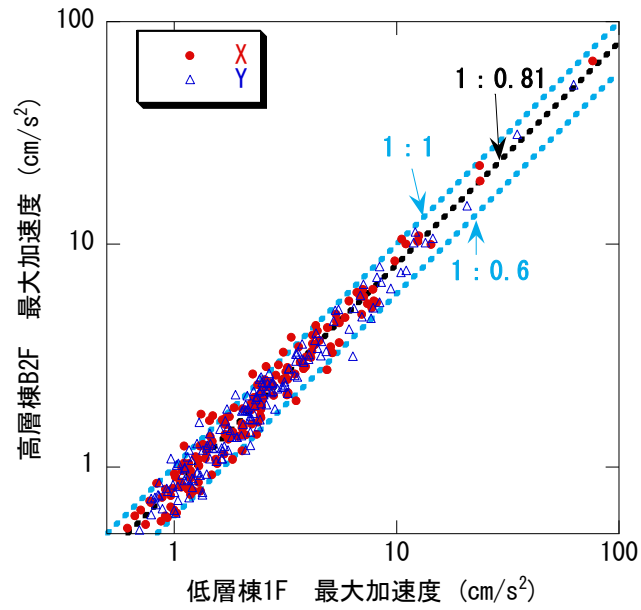


図 5.1.5-8 高層棟と低層棟の入力加速度の比較

3) 観測記録の分析

2012年度(2012年4月13日～2013年3月8日)に観測された地震のうち、計測震度の大きい下記の3つの地震について、観測記録の最大応答値を表5.1.5-6～表5.1.5-8に示し、高層棟B2階における速度応答スペクトルとエネルギースペクトル、および各計測点の加速度波形を図5.1.5-9～図5.1.5-20に示す。

2012年度に観測された地震のうち、計測震度が最も大きかった地震は、計測震度3.1の東京湾の地震(2012年11月24日)であった。地震自体の規模(M)が最も大きかったのは、M7.4の三陸沖の地震(2012年12月7日)で、計測震度は2.9であった。この2地震の速度応答スペクトルを比較すると、東京湾の地震が周期1秒以下の短周期成分が卓越しているのに対して、三陸沖の地震では、周期1秒以上の長周期の成分が卓越しており、高層棟における32階加速度やB2階に対する32階の相対変位が大きいのは、1次モードが卓越した三陸沖の地震であった。地震の継続時間も三陸沖の地震のほうが長く、建物の揺れは、東京湾の地震では地震発生から1分程度でおさまっているのに対して、三陸沖の地震では10分程継続している。

三陸沖の地震での地動(高層棟B2階)の最大加速度は、X方向で 10.6cm/s^2 、Y方向で 10.2cm/s^2 であり、高層棟32階での最大加速度は、X方向で 21.3cm/s^2 、Y方向で 17.1cm/s^2 であった。高層棟32階のB2階に対する最大相対変位は、X方向で4.1cm、Y方向で3.8cmであった。

- ・千葉県北西部の地震 2012年5月29日1時37分頃発生 M5.2 深さ64km 計測震度2.5
- ・東京湾の地震 2012年11月24日18時0分頃発生 M4.8 深さ72km 計測震度3.1
- ・三陸沖の地震 2012年12月7日17時19分頃発生 M7.4 深さ46km 計測震度2.9

表 5.1.5-6 計測震度と各測定点の最大加速度

階	計測震度 (震度階)	最大加速度 (Gal)			最大相対変位 (cm)	
		X	Y	Z	X	Y
32F	—	14.3	9.9	16.8	0.5	0.4
16F	—	16.4	8.0	10.2	0.3	0.2
B2F	2.5 (3)	10.0	7.1	4.3	—	—
低層棟1F	2.8 (3)	14.3	8.2	7.7	—	—

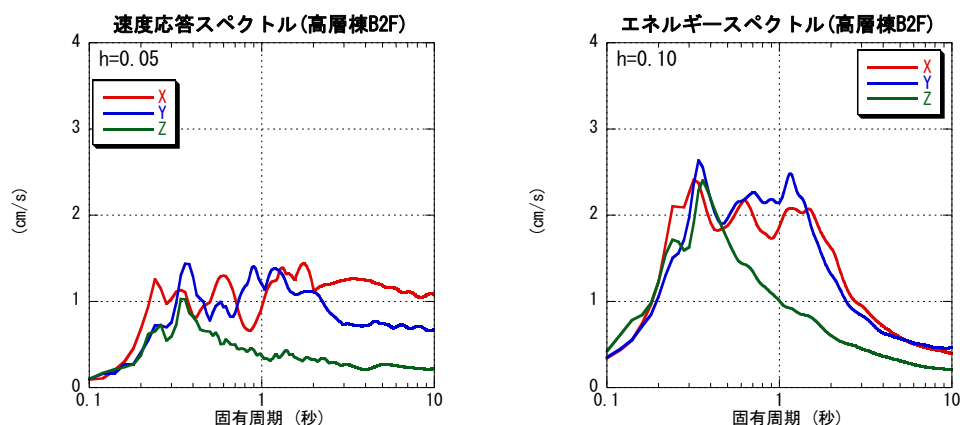


図 5.1.5-9 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル

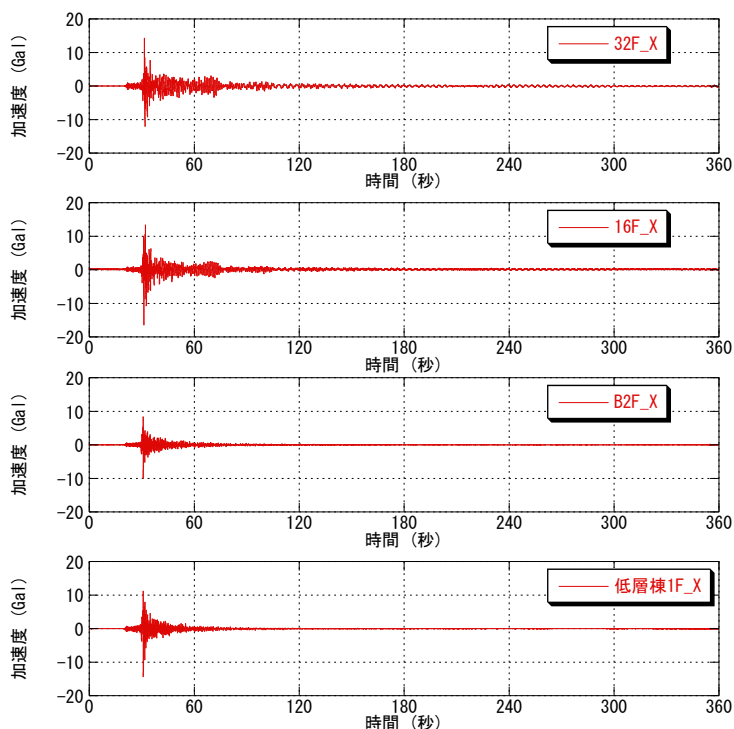


図 5.1.5-10 加速度波形(X(短辺)方向)

(千葉県北西部の地震 2012年5月29日1時37分頃)

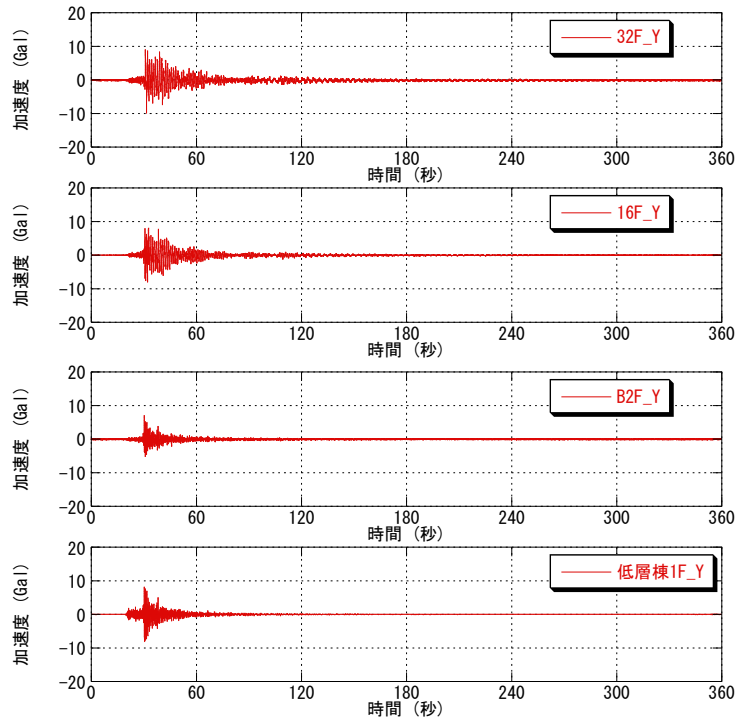


図 5.1.5-11 加速度波形(Y(長辺)方向)
(千葉県北西部の地震 2012年5月29日1時37分頃)

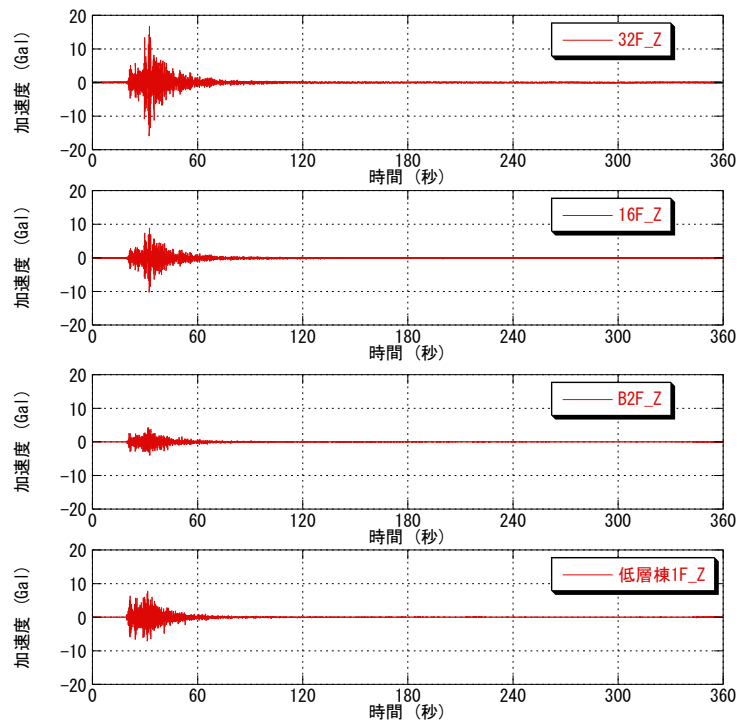


図 5.1.5-12 加速度波形(Z方向)
(千葉県北西部の地震 2012年5月29日1時37分頃)

表 5.1.5-7 計測震度と各測定点の最大加速度

階	計測震度 (震度階)	最大加速度 (Gal)			最大相対変位 (cm)	
		X	Y	Z	X	Y
32F	-	17.7	12.1	16.3	0.2	0.1
16F	-	22.1	16.9	10.3	0.2	0.1
B2F	3.1 (3)	19.2	14.9	4.5	-	-
低層棟1F	3.2 (3)	23.8	20.7	10.0	-	-

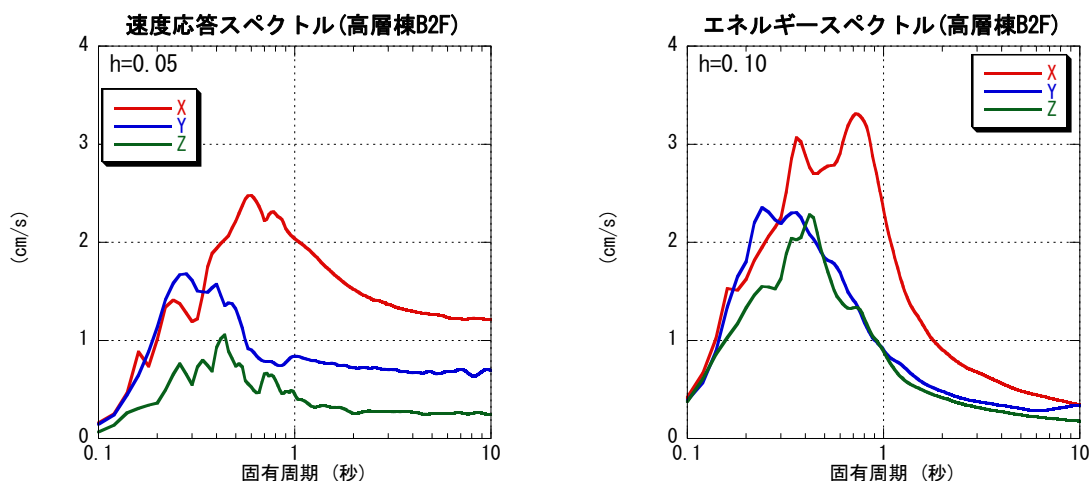


図 5.1.5-13 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル

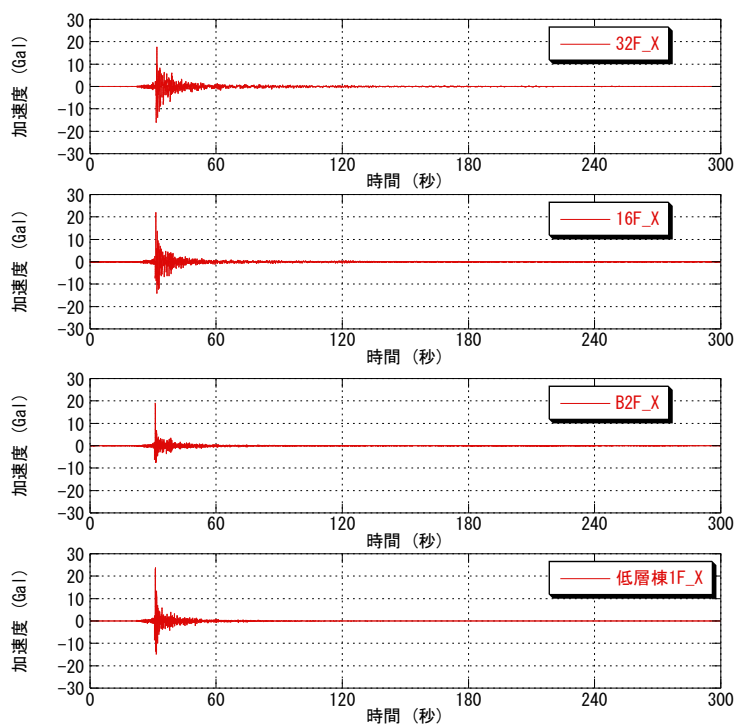


図 5.1.5-14 加速度波形(X短辺方向)

(東京湾の地震 2012年11月24日18時0分頃)

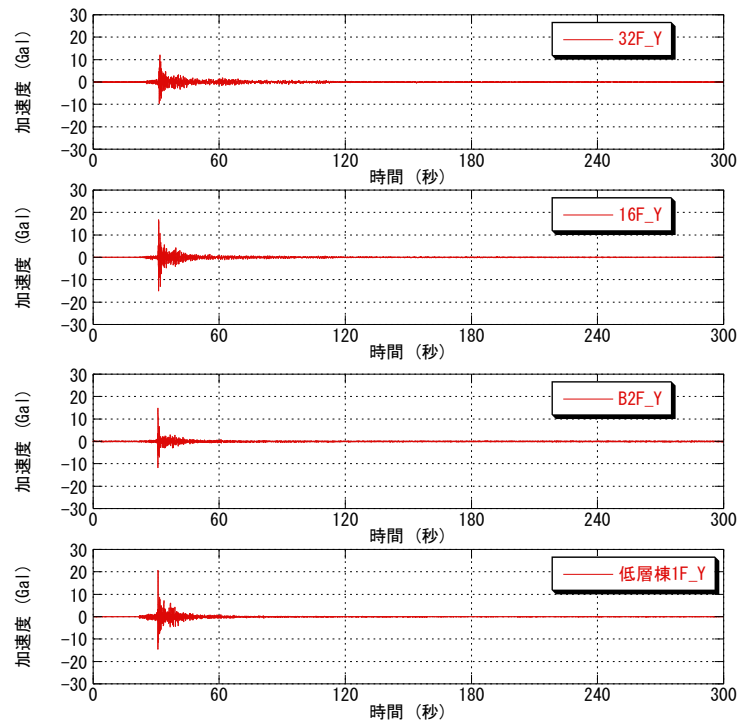


図 5.1.5-15 加速度波形(Y(長辺)方向)
(東京湾の地震 2012年11月24日18時0分頃)

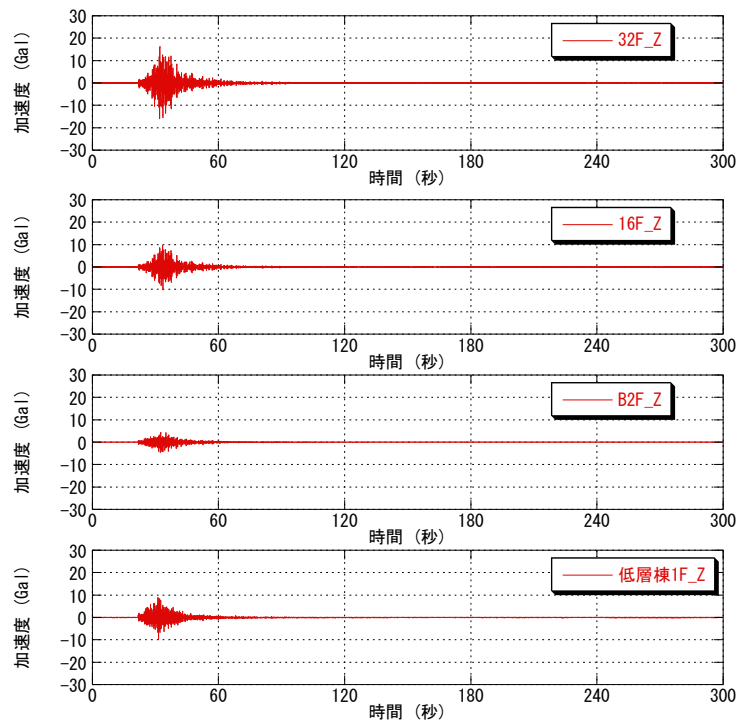


図 5.1.5-16 加速度波形(Z方向)
(東京湾の地震 2012年11月24日18時0分頃)

表 5.1.5-8 計測震度と各測定点の最大加速度

階	計測震度	最大加速度 (Gal)			最大相対変位 (cm)	
	(震度階)	X	Y	Z	X	Y
32F	-	21.3	17.1	20.1	4.1	3.8
16F	-	16.6	15.0	14.4	1.9	1.9
B2F	2.9 (3)	10.6	10.2	6.8	-	-
低層棟1F	3.0 (3)	10.6	13.5	12.6	-	-

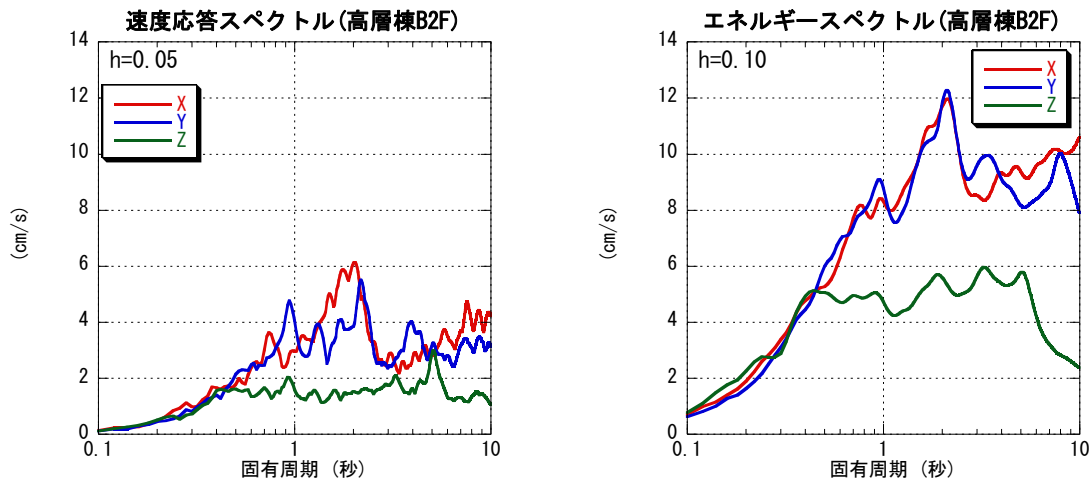


図 5.1.5-17 速度応答スペクトルとエネルギースペクトル

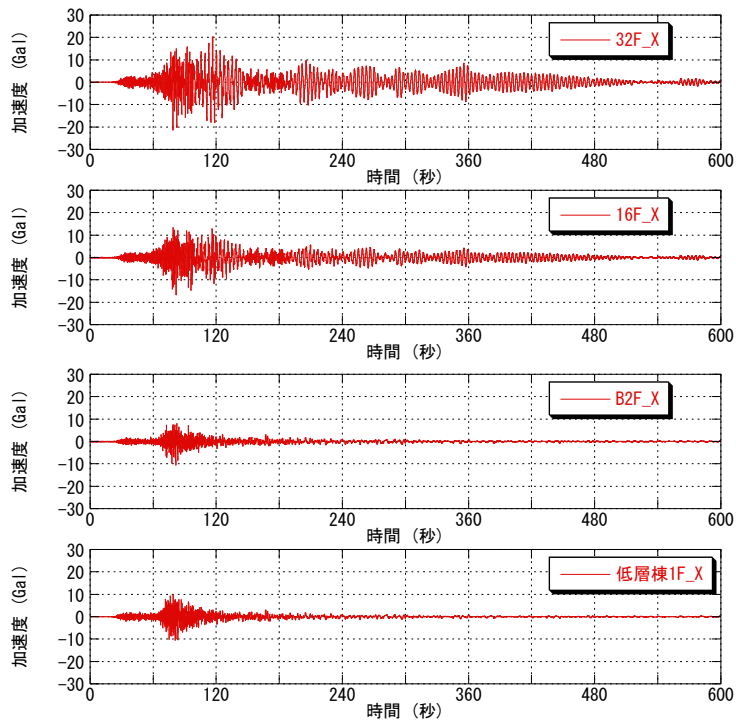


図 5.1.5-18 加速度波形(X[短辺]方向)
(東京湾の地震 2012年12月7日17時19分頃)

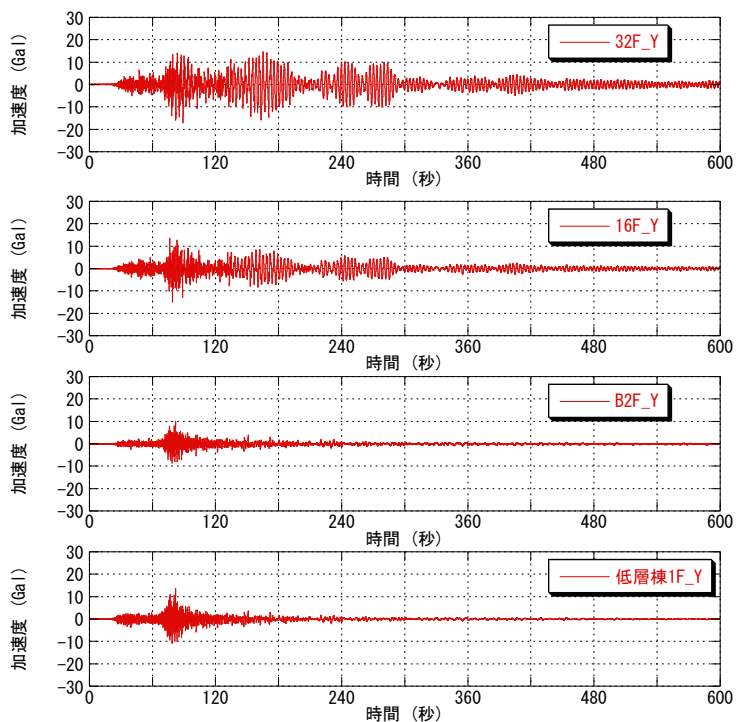


図 5.1.5-19 加速度波形(Y(長辺)方向)
(東京湾の地震 2012年12月7日17時19分頃)

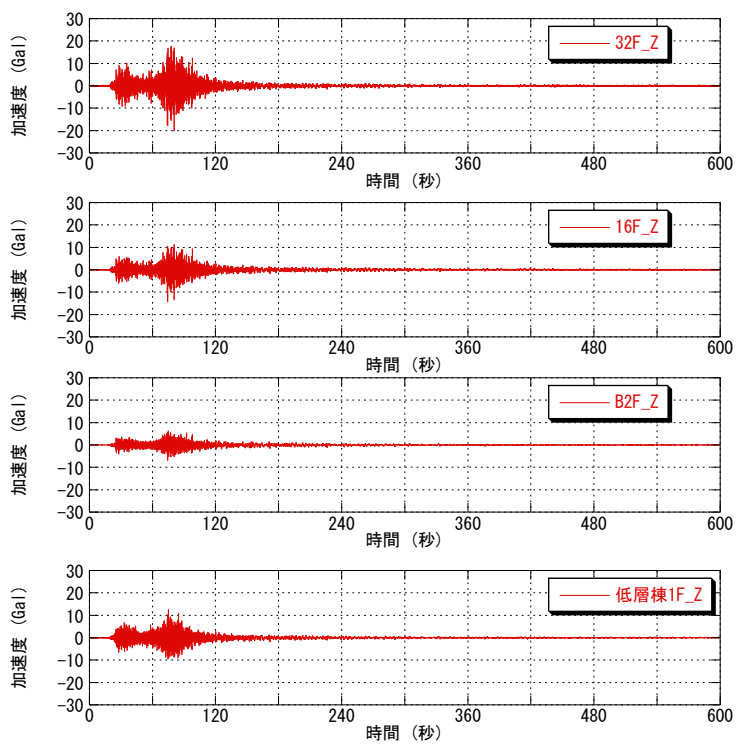


図 5.1.5-20 加速度波形(Z方向)
(東京湾の地震 2012年12月7日17時19分頃)

上記3地震での高層棟の振動特性をみるため、B2階に対する32階のフーリエスペクトル比を算出した。図5.1.5-21に示す。1次モードの固有周期は、三陸沖の地震（2012年12月7日、計測震度2.9）で、X（短辺）方向3.5秒、Y（長辺）方向3.3秒、千葉県北西部の地震（2012年5月29日、計測震度2.5）と東京湾の地震（2012年11月24日、計測震度3.1）で、X（短辺）方向3.3秒、Y（長辺）方向3.0秒であった。三陸沖の地震で他の2地震と比較して、固有周期が5%~10%程長くなっている。参考に東北地方太平洋沖地震（2011年3月11日、計測震度4.3）と、その2日前に観測された三陸沖の地震（2011年3月9日、計測震度1.7）でのフーリエスペクトル比を図5.1.5-22に示す。同様な固有周期の変動がみられており、振幅に依存する変動であると考えられる。

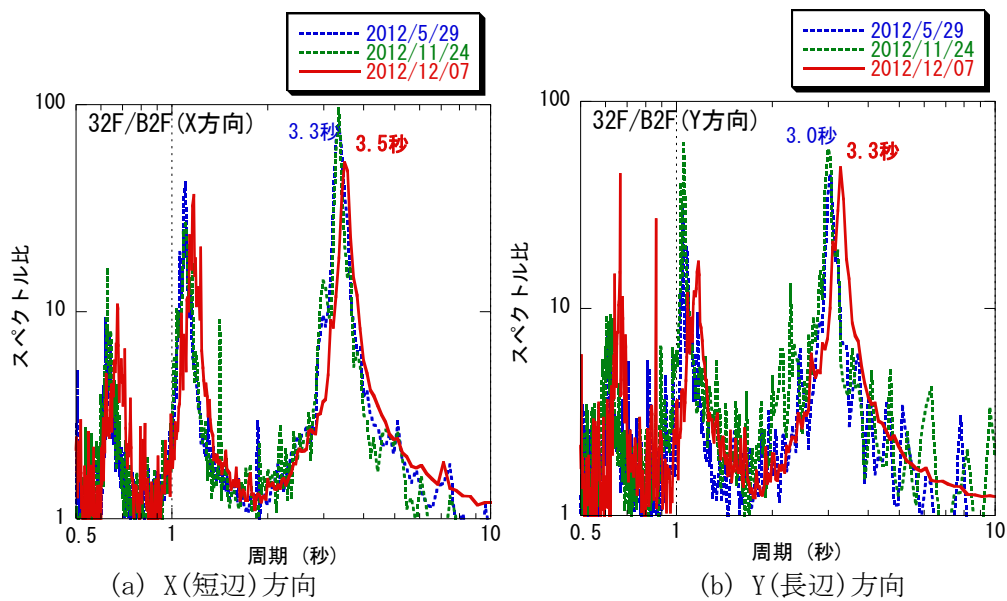


図 5.1.5-21 フーリエスペクトル比（32階/B2階）

（2012.5.29 千葉県北西部の地震, 2012.11.24 東京湾の地震, 2012.12.7 三陸沖の地震）

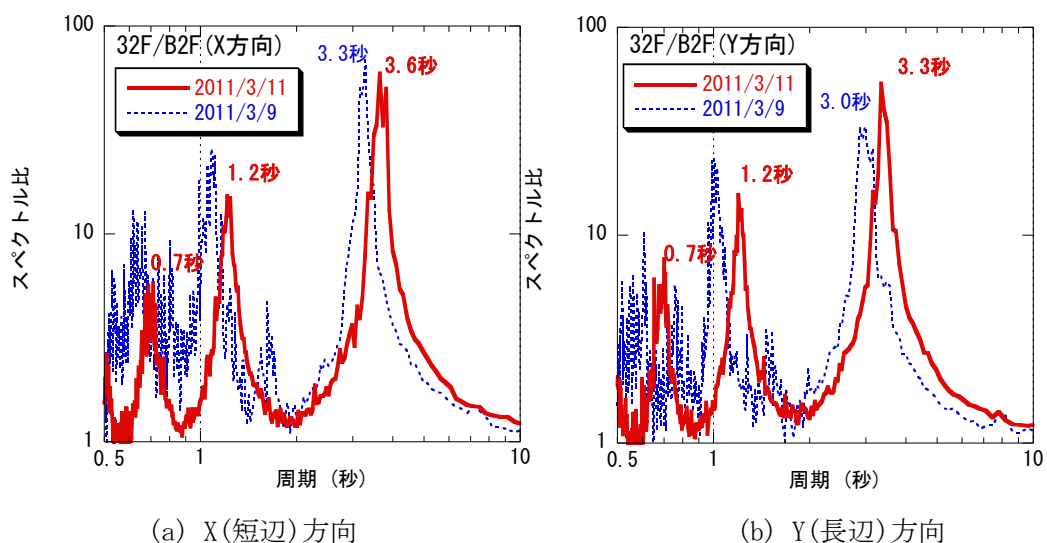


図 5.1.5-22 フーリエスペクトル比（32階/B2階）

（2011.3.11 東北地方太平洋沖地震と2011.3.9 三陸沖の地震）

(4) まとめ

- ・ 観測対象建物 NHSK ビルは、高層棟が鉄骨造 33 階建て、低層棟が鉄骨鉄筋コンクリート造 6 階建てである。センサーを高層棟の B2 階、16 階、32 階、および低層棟の 1 階の計 4 箇所に設置し、それぞれ水平 2 方向および上下方向、合計 12 成分を観測している。
- ・ 観測対象建物 NHSK ビルで、観測期間（2011 年 1 月 17 日～2012 年 3 月 31 日、2012 年 4 月 13 日～2013 年 3 月 8 日）において、合計 156 回の地震観測記録が得られた。記録は、2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震後約 1 か月の期間に集中している。全観測記録のうち、震度 4 が 2 回、震度 3 が 8 回、震度 2 が 53 回、震度 1 以下が 93 回観測された。このうち、2012 年度(2012 年 4 月 13 日～2013 年 3 月 8 日)に観測された地震は 18 回で、震度 3 が 3 回、震度 2 が 7 回、震度 1 が 8 回であった。
- ・ 加速度応答倍率の平均は、X 方向で 2.2 倍、Y 方向で 2.1 倍であった。得られた記録の範囲では、応答倍率が大きいのは、震央距離が遠い場合が多い傾向がみられるが、近くで規模の大きな地震が発生していないことも影響していると考えられる。
- ・ 高層棟 B2 階の最大加速度は、低層棟 1 階の最大加速度に対して平均で 0.81 倍であり、高層棟基礎における入力損失の影響がみられる。
- ・ 2012 年度に観測された地震のうち、最も高層棟 32 階の応答が大きかった地震は、2012 年 12 月 7 日に発生した三陸沖の地震で、地動（高層棟 B2 階）の最大加速度は、 10.6cm/s^2 、高層棟 32 階での最大加速度は、 21.3cm/s^2 であった。高層棟 32 階の B2 階に対する最大相対変位は、4.1cm であった。この地震における高層棟の 1 次モードの固有周期は、X(短辺)方向で 3.5 秒、Y(長辺)方向で 3.3 秒であった。

5.1.6 NHST ビルの地震観測 (H24 実施分)

1) 建物・地盤概要

建物名称	: NHST
所在地	: 東京都中央区晴海
構造種別	: 地上・鉄骨造, 地下・鉄骨鉄筋コンクリート造, 一部鉄筋コンクリート造
建物規模	: 地上 33 階地下 4 階
軒高	: 154.8m
最高高さ	: 154.8m
基準階面積	: 2810m ²
設計時 1 次固有周期	: X 方向 : 3.95 秒, Y 方向 : 3.68 秒
地盤概要	: 表 5.1.6-1

表 5.1.6-1 地盤概要

GL - m	地層	N 値 min~max
0.0 ~ 2.0	表土・盛土	1~6
2.0 ~ 5.5	有楽町層上部(沖積層)	0~13
5.5 ~ 22.5	有楽町層下部(沖積層)	0~5
22.5 ~ 26.5	七号地層(沖積層)	2~30
26.5 ~ 34.5	東京層(洪積砂・砂礫層)	26~60(支持層)
34.5 ~	上総層群	70 以上



図 5.1.6-1 建物所在地(観測点●, ▲は K-net 観測点)

2) 観測装置概要

a) 観測システム・観測装置の概要と配置

建物内：強震計測装置 1 台を 33 階に、検出器(加速度計)3 台を 33 階、15 階、B4 階に配置し、連動させる。

地表面：建物群から数十メートル離れた位置に据え置き型の強震計測装置を設置し、独立で観測する。強震計測装置同士は連動しないが、GPS により時刻校正を行うことにより観測記録の同期をとる。

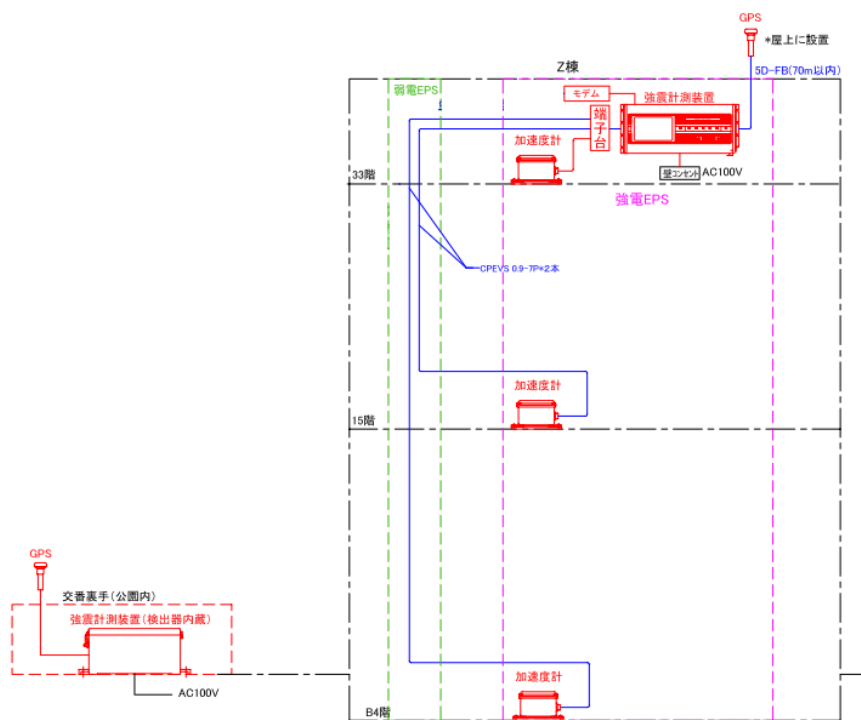


図 5.1.6-2 観測システム構成図

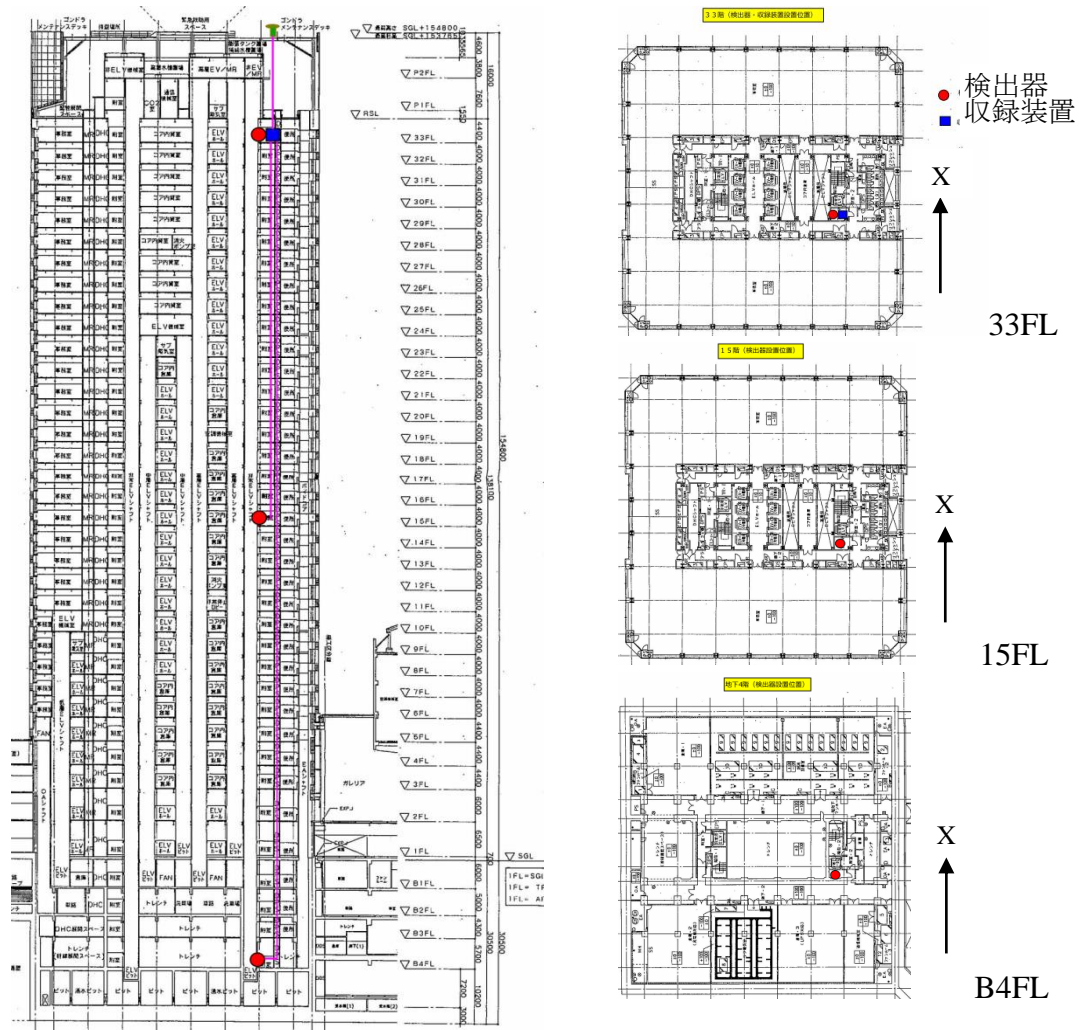


図 5.1.6-3(1) 観測装置の配置(建物内)

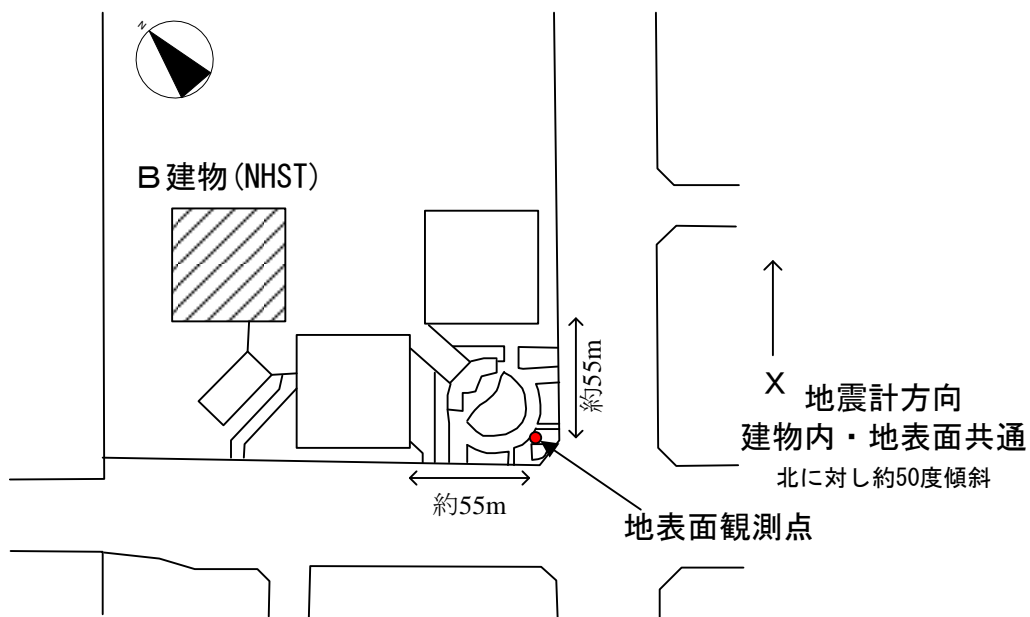


図 5.1.6-3(2) 観測装置の配置(地表面・近隣公園内)



(1-1) 建物屋上設置 GPS アンテナ



(1-2) 建物 33 階強震観測装置設置用ラック
(強震観測装置, モデム, 検出器)



(2-1) 公園内強震観測装置カバー, 電源ポール
(上部 GPS アンテナ設置)



(2-2) 公園内強震観測装置

図 5.1.6-4 観測装置の設置状況

b) 観測装置の仕様

- ・ 検出器(加速度計) : ミットヨ製 JEP8A3
- ・ 収録装置 : ミットヨ製 SMAC-MDU
- ・ 観測可能 : $\pm 30\text{m/s}^2$
- ・ AD 分解能 : 24bit
- ・ サンプリング周波数 : 100Hz
- ・ 時刻校正 : GPS による

表 5.1.6-2 設置機器一覧

	機器名称	台数	設置位置
屋内	検出器: サーボ型加速度計 JEP8A3	3	33 階, 15 階, B4 階
	強震計測装置: SMAC-MDU	1	33 階
	モデム: DFML-560ME	1	33 階
	GPS アンテナ: GPA-016	1	屋上
屋外	強震計測装置: SMAC-MDU(据置(検出器内蔵)型)	1	公園内

e) 観測結果

2012年4月1日から2013年2月27日までの観測記録一覧を表5.1.6-3に示す。また、網掛けした観測記録を以下に示す。

表 5.1.6-3 地震観測記録一覧 (cm/s²)

年	月	日	時	分	地表面			建物内								
					X	Y	Z	B4FX	B4FY	B4FZ	15FX	15FY	15FZ	33FX	33FY	33FZ
2012	4	13	19	11	3.1	2.9	1.8	1.3	0.9	0.6	4.6	2.5	1.7	5.0	3.1	2.8
2012	4	25	5	22	5.0	6.7	3.5	1.7	2.5	1.8	2.7	7.6	3.2	2.5	5.5	3.8
2012	4	29	19	29	6.9	6.2	4.3	2.1	1.9	2.8	5.8	5.5	3.1	5.5	6.6	5.8
2012	5	4	11	54	4.6	3.0	2.2	1.2	1.0	1.2	1.8	1.5	1.3	1.4	1.2	2.1
2012	5	18	17	19	8.5	6.3	8.3	2.6	1.9	5.7	3.5	3.0	6.2	4.1	2.3	8.1
2012	5	25	16	27	3.8	1.5	1.9	1.3	0.5	0.6	0.9	0.9	0.6	0.8	0.4	0.9
2012	5	29	1	37	34.8	21.2	13.7	10.3	9.7	4.9	11.6	10.6	8.5	11.2	8.0	13.8
2012	6	1	17	48	12.1	11.3	7.2	3.0	3.0	4.3	6.1	4.6	4.8	4.7	3.9	7.9
2012	6	6	4	32	3.1	3.3	1.3	1.4	1.3	1.2	3.1	4.1	1.8	5.0	4.4	2.4
2012	7	3	11	31	18.5	12.8	6.6	3.9	5.5	2.7	5.0	6.9	4.3	4.7	5.5	6.5
2012	7	16	4	31	3.7	4.0	3.3	1.4	1.2	1.7	1.9	2.2	1.5	2.2	2.1	2.3
2012	8	3	22	19	3.9	3.3	2.3	1.0	0.8	1.4	1.3	1.1	1.6	1.1	0.8	2.4
2012	8	20	20	43	4.3	3.2	2.0	1.5	1.2	0.8	2.4	3.2	1.5	2.6	2.3	3.1
2012	8	30	4	17	2.2	1.3	3.8	1.0	1.0	2.9	0.8	0.6	2.2	0.6	0.5	1.8
2012	9	14	2	22	6.5	7.0	6.3	1.9	2.8	3.0	3.9	2.8	3.2	3.3	2.2	5.0
2012	10	2	10	11	2.7	4.1	3.2	1.5	1.9	1.1	1.1	1.6	0.9	0.5	0.9	1.4
2012	10	12	13	57	3.6	4.2	3.3	1.1	1.5	1.2	2.2	2.4	2.2	1.7	2.5	3.6
2012	11	24	18	0	38.9	39.0	20.6	13.1	17.4	4.8	13.7	20.9	6.1	11.8	13.8	9.6
2012	12	7	17	19	33.3	37.2	13.6	8.3	12.3	6.0	19.5	23.4	11.7	19.3	22.6	17.0
2012	12	13	20	56	2.8	2.2	1.9	1.1	0.7	0.6	0.7	0.9	0.8	0.7	0.6	1.4
2013	1	22	4	47	6.0	5.4	3.1	1.7	1.4	1.2	2.4	2.6	1.7	1.7	2.6	2.8
2013	1	28	3	42	4.8	4.9	2.5	1.8	1.2	1.7	2.3	2.4	2.5	1.7	1.5	3.4
2013	2	1	23	7	7.5	7.2	3.9	2.3	3.5	1.4	2.3	4.6	1.5	2.0	4.0	3.0
2013	2	2	23	20	3.3	2.2	1.2	1.0	0.8	0.8	2.4	3.5	1.3	2.1	2.9	2.1
2013	2	19	21	28	2.1	2.8	1.2	1.0	1.1	1.1	3.8	2.5	2.0	4.1	2.6	2.6
2013	2	25	16	24	3.6	2.5	1.8	1.5	1.1	1.6	3.6	2.4	2.7	5.7	2.8	4.0

2012年5月29日1時37分 千葉県北西部を震源とする地震 (Eq.1)

地震規模：M5.2

最大加速度一覧：表 5.1.6-4

表 5.1.6-4 最大加速度一覧(Eq.1, cm/s²)

観測点		X方向	Y方向	UD方向
建物内	33FL	11.2	8.0	13.8
	15FL	11.6	10.6	8.5
	B4FL	10.3	9.7	4.9
地表面		34.8	21.2	13.7

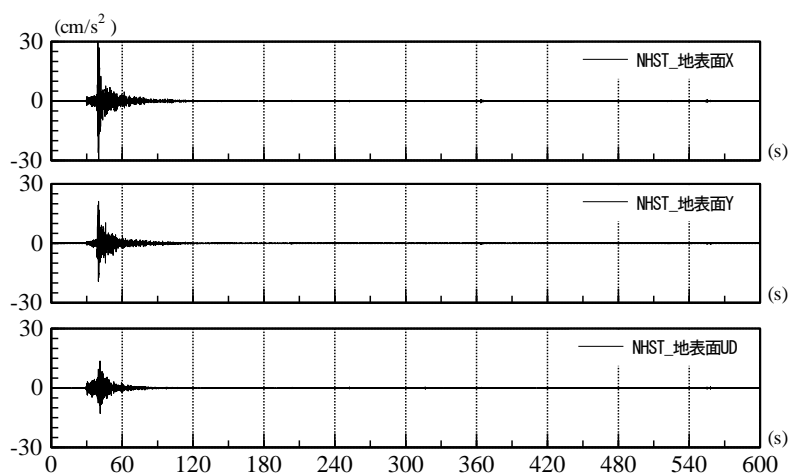


図 5.1.6-5 観測加速度時刻歴(Eq.1, 地表面観測点)

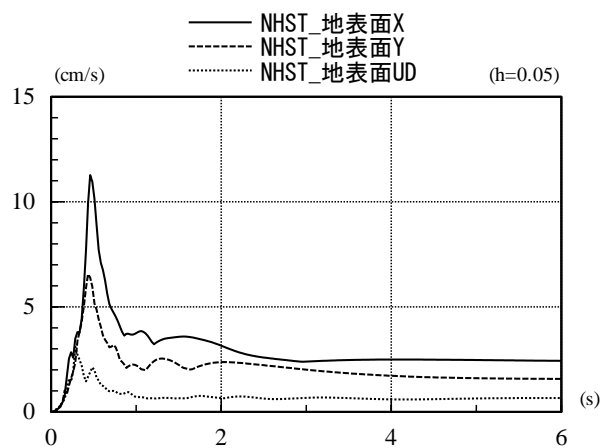
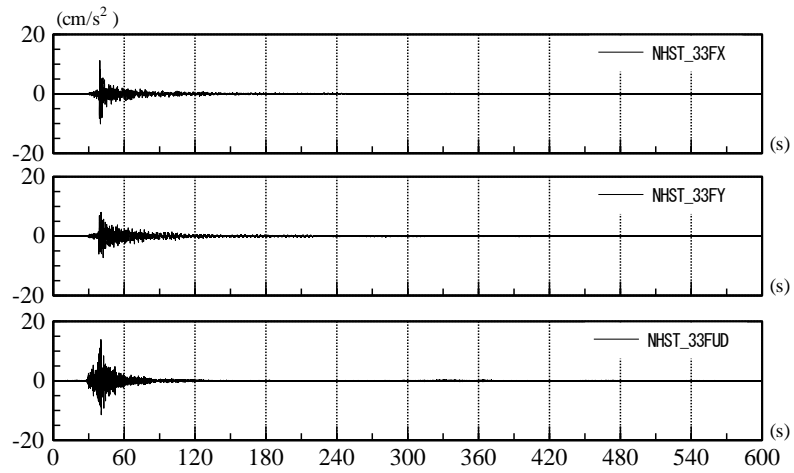
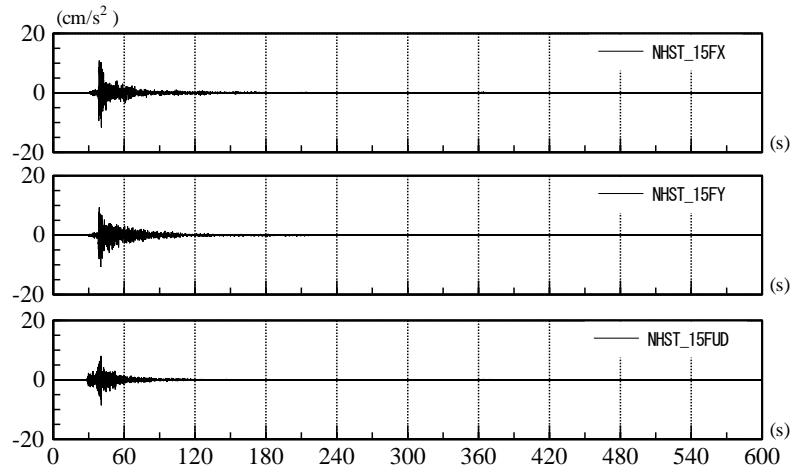


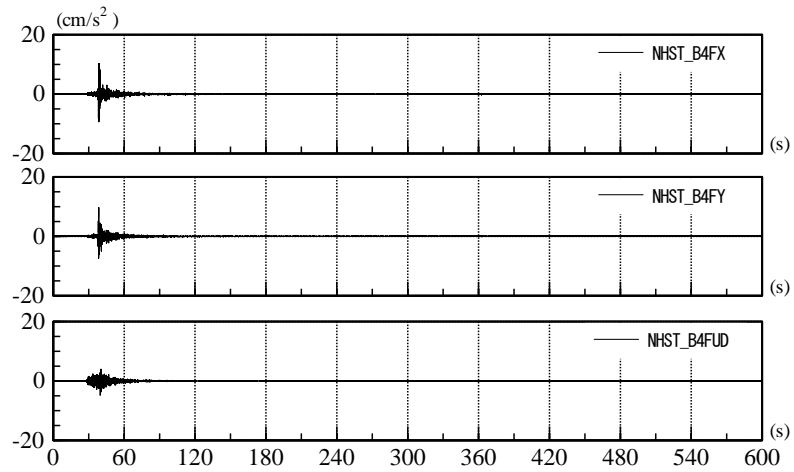
図 5.1.6-6 速度応答スペクトル(Eq.1, 地表面観測点)



(a) 33FL

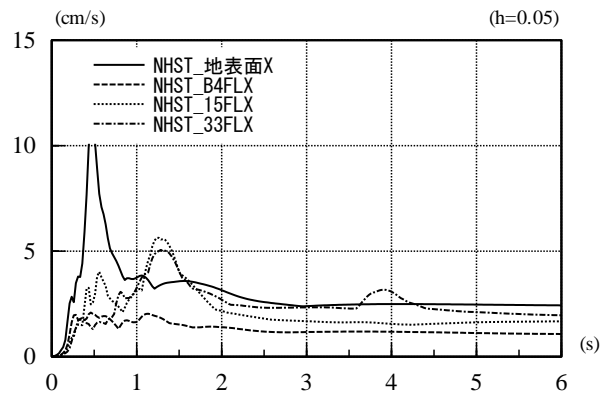


(b) 15FL

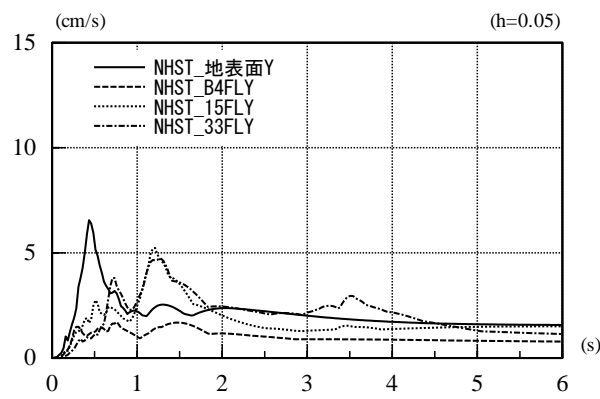


(c) B4FL

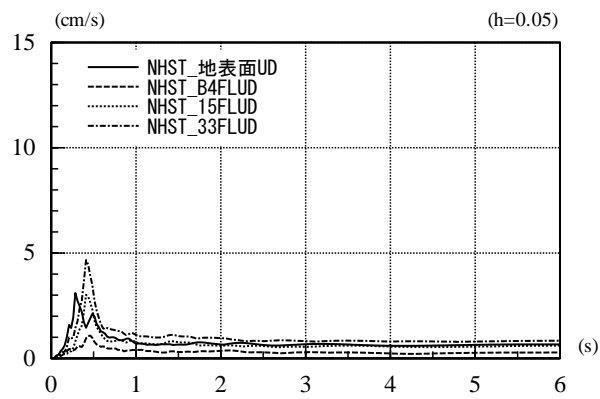
图 5.1.6-7 観測加速度時刻歴(Eq.1, 建物内観測点)



(1) X方向



(2) Y方向



(3) UD方向

図 5.1.6-8 速度応答スペクトル(Eq.1, 地表面, 建物内観測点重ね描き)

2012年11月24日18時00分 東京湾を震源とする地震 (Eq. 2)

地震規模：M4.8

最大加速度一覧：表 5.1.6-5

表 5.1.6-5 最大加速度一覧(Eq.2, cm/s^2)

観測点		X方向	Y方向	UD方向
建物内	33FL	11.8	13.8	9.6
	15FL	13.7	20.9	6.1
	B4FL	13.1	17.4	4.8
地表面		38.9	39.0	20.6

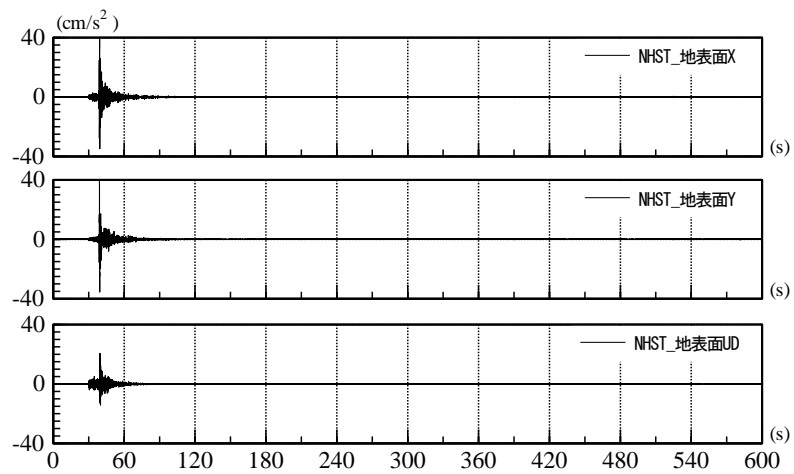


図 5.1.6-9 観測加速度時刻歴(Eq.2, 地表面観測点)

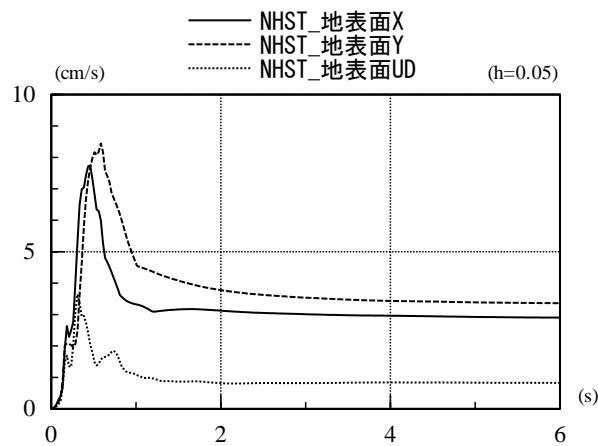
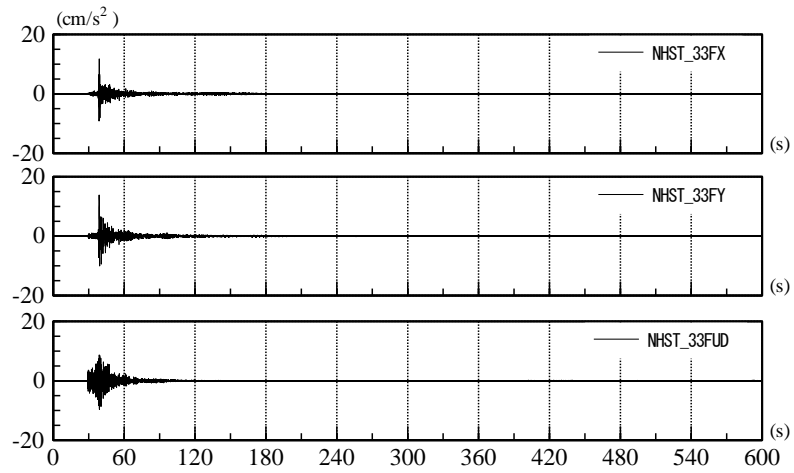
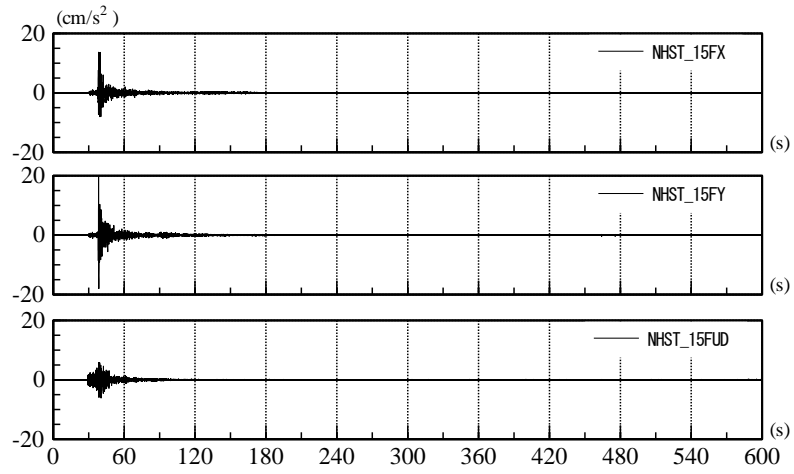


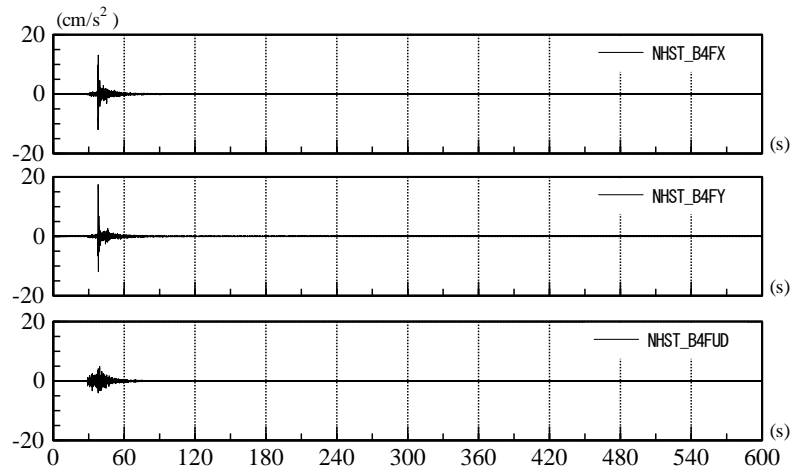
図 5.1.6-10 速度応答スペクトル(Eq.2, 地表面観測点)



(a) 33FL

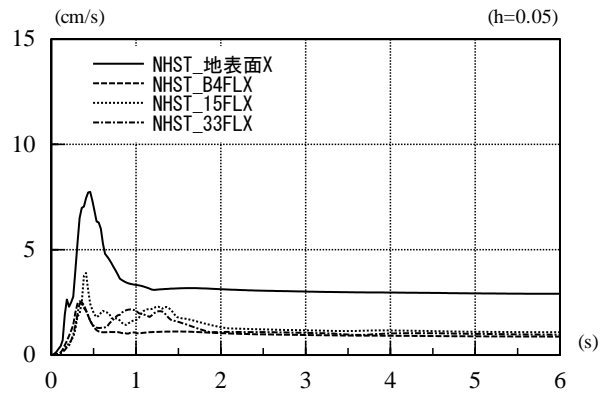


(b) 15FL

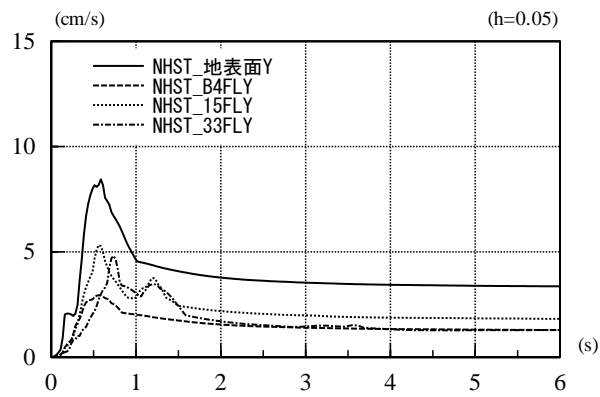


(c) B4FL

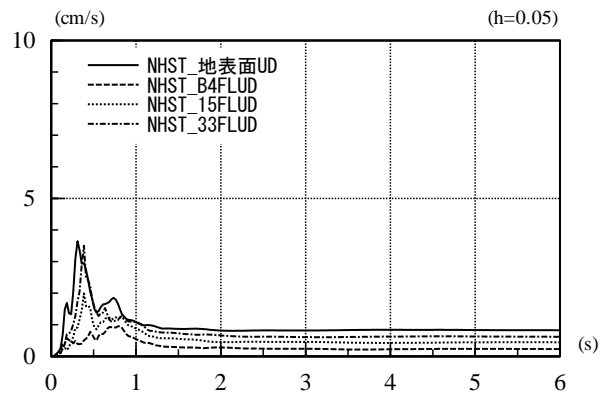
图 5.1.6-11 観測加速度時刻歴(Eq.2, 建物内観測点)



(1) X方向



(2) Y方向



(3) UD方向

図 2.4-12 速度応答スペクトル(Eq.2, 地表面, 建物内観測点重ね描き)

2012年12月7日17時19分 三陸沖を震源とする地震 (Eq. 3)

地震規模：M7.3

最大加速度一覧：表 2.4-6

表 2.4-6 最大加速度一覧 (Eq.2, cm/s^2)

観測点		X方向	Y方向	UD方向
建物内	33FL	19.3	22.6	17.0
	15FL	19.5	23.4	11.7
	B4FL	8.3	12.3	6.0
地表面		33.3	37.2	13.6

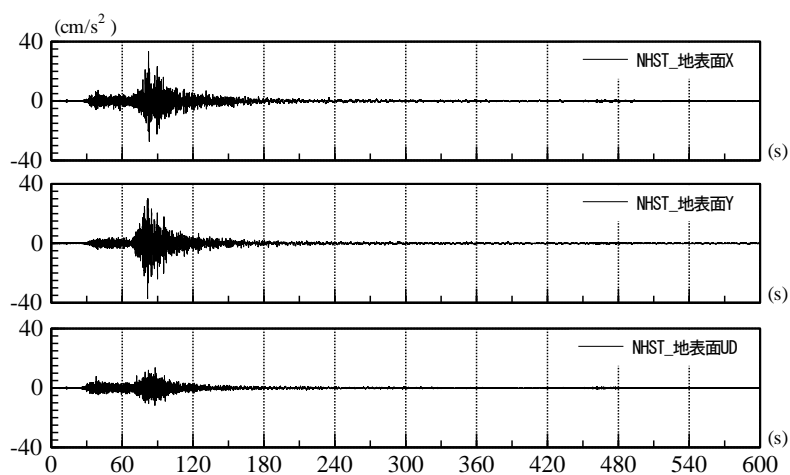


図 5.1.6-13 観測加速度時刻歴 (Eq.3, 地表面観測点)

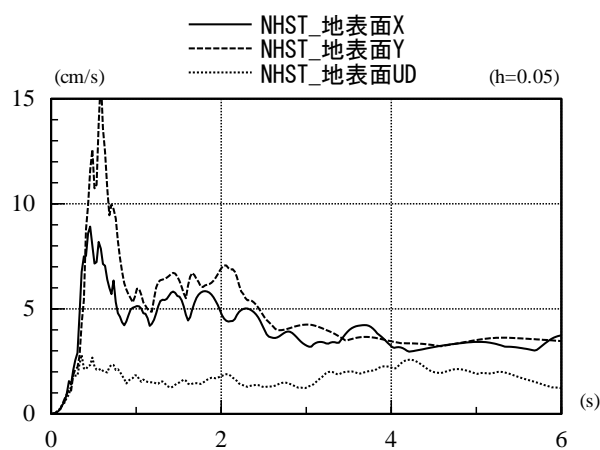


図 5.1.6-14 速度応答スペクトル (Eq.3, 地表面観測点)

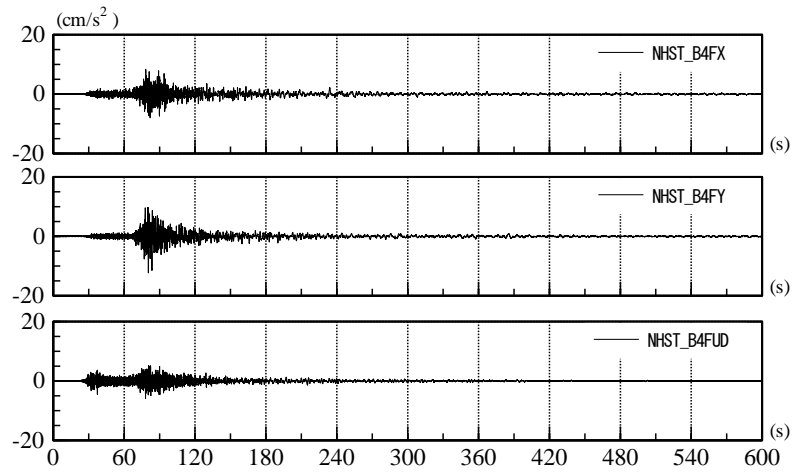
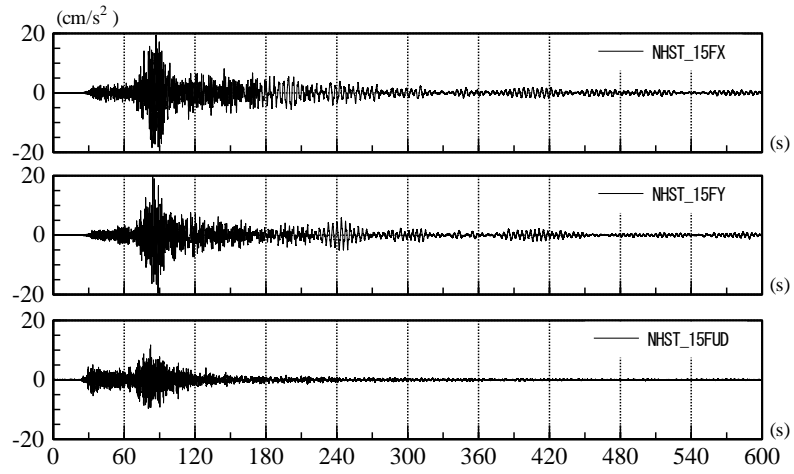
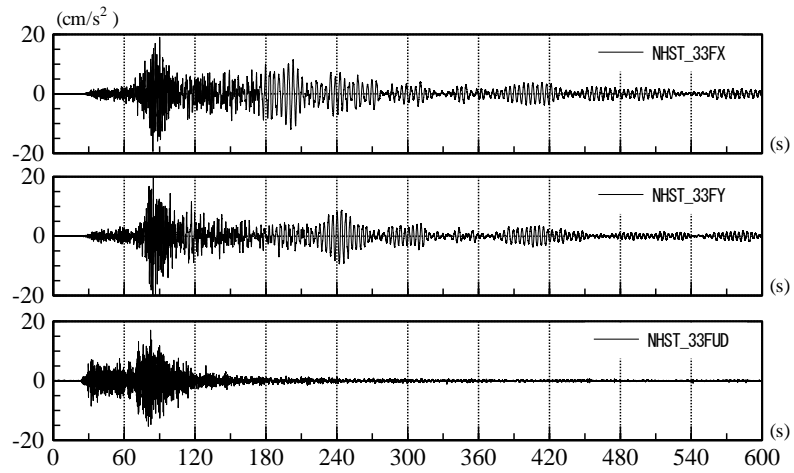
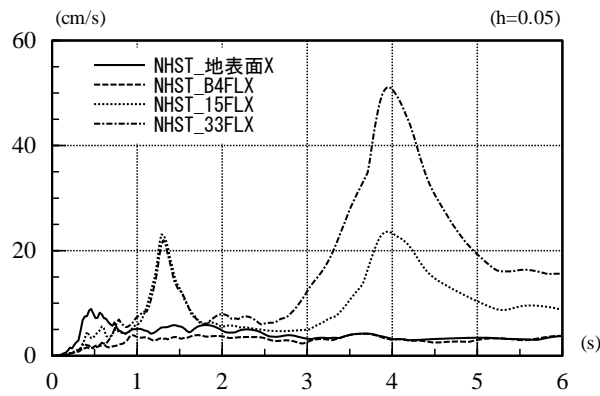
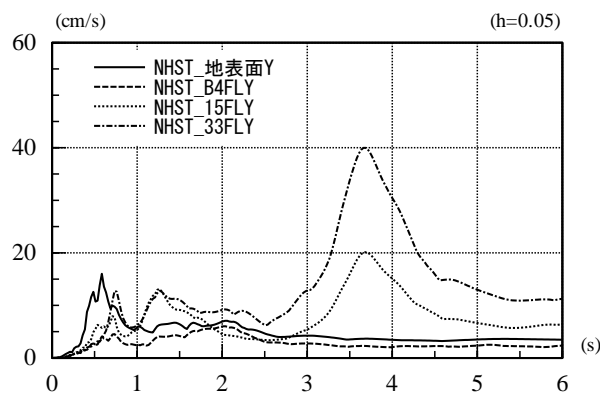


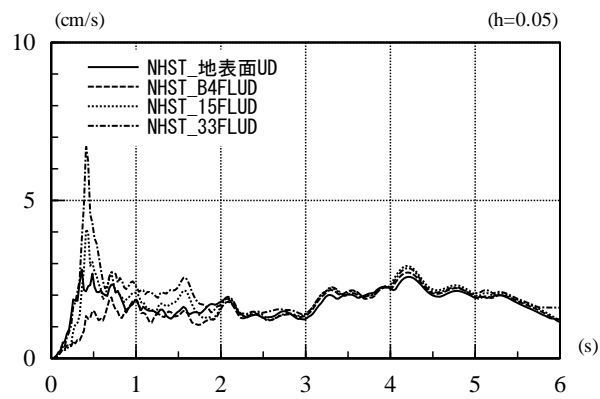
図 5.1.6-15 観測加速度時刻歴(Eq.3, 建物内観測点)



(1) X方向



(2) Y方向



(3) UD方向

図 5.1.6-16 速度応答スペクトル(Eq.3, 地表面, 建物内観測点重ね描き)

2013年2月25日16時19分 栃木県北部を震源とする地震 (Eq. 4)

地震規模：M6.3

最大加速度一覧：表 5.1.6-7

表 5.1.6-7 最大加速度一覧 (Eq. 2, cm/s^2)

観測点		X方向	Y方向	UD方向
建物内	33FL	5.7	2.8	4.0
	15FL	3.6	2.4	2.7
	B4FL	1.5	1.1	1.6
地表面		3.6	2.5	1.8

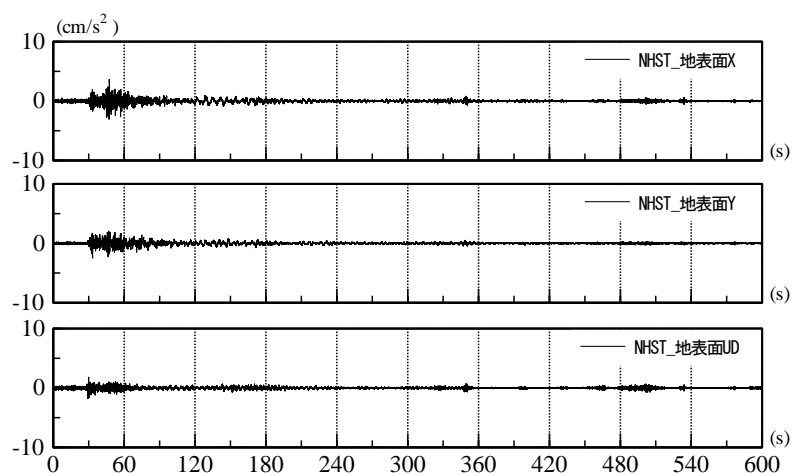


図 5.1.6-17 観測加速度時刻歴 (Eq. 4, 地表面観測点)

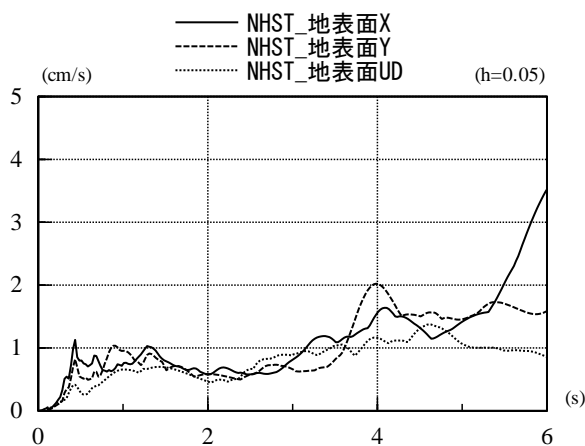
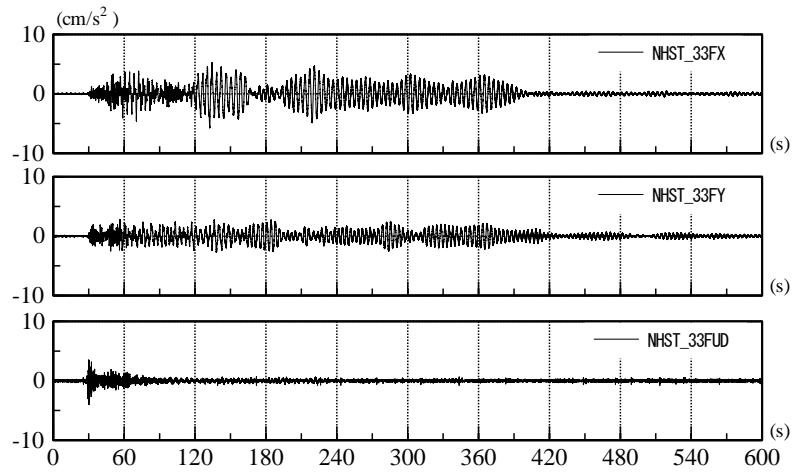
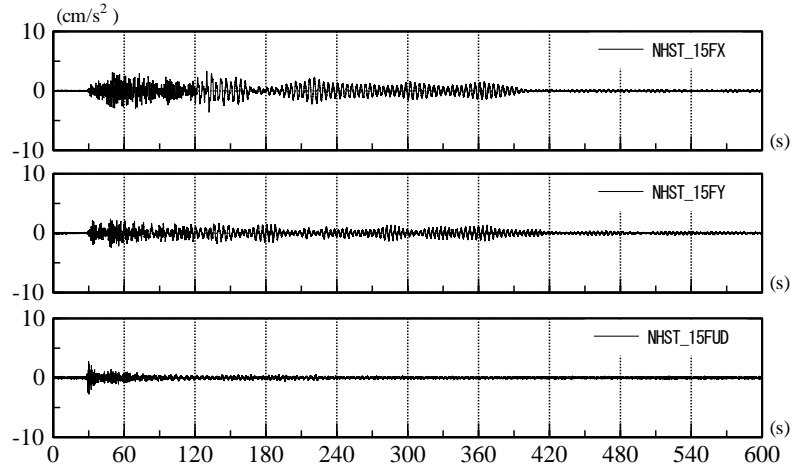


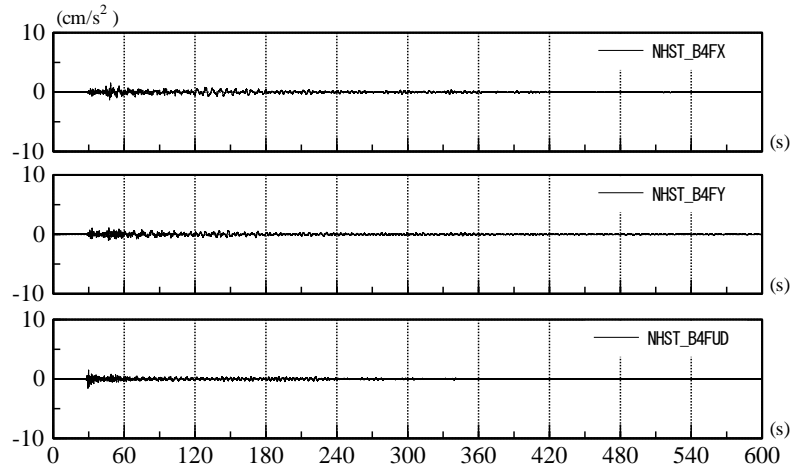
図 5.1.6-18 速度応答スペクトル (Eq. 4, 地表面観測点)



(a) 33FL



(b) 15FL



(c) B4FL

图 5.1.6-19 観測加速度時刻歴(Eq.4, 建物内観測点)

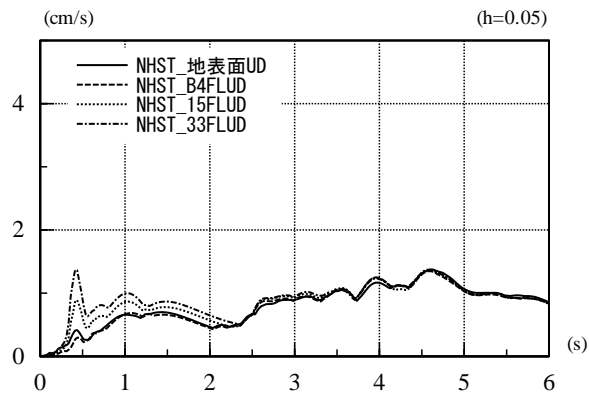
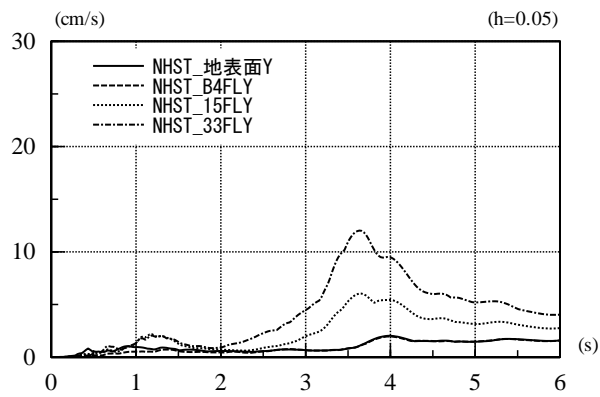
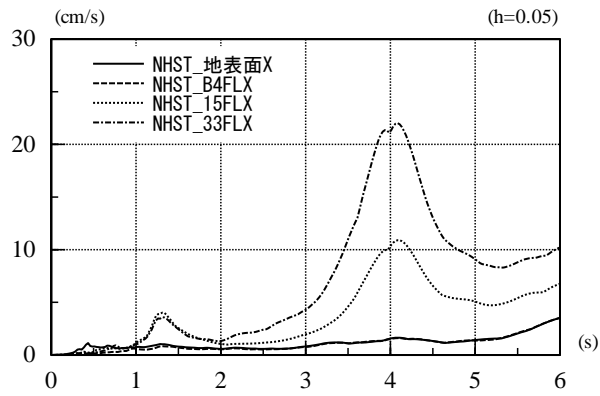


図 5.1.6-20 速度応答スペクトル(Eq.4, 地表面, 建物内観測点重ね描き)

5.1.7 まとめ

東京都内に建つ2棟の超高層鉄骨造建築物（NHSKビルとNHSTビル）に対して、平成22年度に地震観測装置を設置して地震観測を開始し、平成24年度まで観測を行った。

観測対象建物 NHSKビルは、高層棟が鉄骨造33階建て、低層棟が鉄骨鉄筋コンクリート造6階建てである。センサーを高層棟のB2階、16階、32階、および低層棟の1階の計4箇所に設置し、それぞれ水平2方向および上下方向、合計12成分を観測している。

観測対象建物 NHSTビルは、地上は33階建ての鉄骨造、地下は4階で、鉄骨鉄筋コンクリート造、一部鉄筋コンクリート造の建物である。建物内では、強震計測装置1台を33階に、検出器(加速度計)3台を33階、15階、B4階に配置し、連動させる。地表面には、建物群から数十メートル離れた位置に据え置き型の強震計測装置を設置し、独立で観測する。強震計測装置同士は連動しないが、GPSにより時刻校正を行うことにより観測記録の同期をとっている。

これらの建物では、観測開始後に、有感地震がいくつか発生した際、建物に設置した観測装置が確実に作動し、実観測データを取得することができた。これにより、観測対象建物の振動性状に関する基礎的な情報を得ることができた。また、平成23年3月11日に発生した「東北地方太平洋沖地震（M9.0）」の際にも観測装置が正常に作動し、入力、応答共に100cm/s²を超えるような大振幅の貴重な記録を回収することができた。

地震観測は長期にわたって継続的に実施することが重要であり、当調査業務終了後も引き続き観測体制を安定的に維持し、有用な観測データを蓄積していく必要がある。

5.2 東日本大震災による鉄骨造高層建築物の挙動調査

5.2.1 観測建物の挙動調査（その1）（H23 実施分）

(1) はじめに

ここでは、2011年東北地方太平洋沖地震において、強震記録が観測された超高層鉄骨造建築物を対象にして、それらの建物で観測された地震記録を用いて建物の振動特性や応答等の調査を行う。具体的内容としては、同定手法を用いた観測記録に基づく建物の振動特性等の分析、評価、及び、応答解析モデルを用いた地震応答解析と観測記録との比較、等の調査である。

(2) 解析対象建物と解析方法

1) 検討対象の超高層鉄骨造建築物の概要

検討対象とした建物は、表 5.2.1-1 に示す 3 棟である。建物 A 及び B は、(独) 建築研究所が強震観測を行っている建物である。建物 C は、国土交通省の建築基準整備促進事業において、平成 22 年度に地震計を設置し、現在も観測を実施している建物である。これらの解析対象建物の、所在地、建物階数、竣工年、構造形式、地震観測した階を、表 5.2.1-1 に示す。建物 B 及び C は、履歴型ダンパー付きの建物である。

表 5.2.1-1 解析対象建物

建物名称	所在地	建物階数	竣工年	構造形式	地震観測の階
建物 A	宮城県	地上 15 階 塔屋 2 階	1973	X, Y 方向：鉄骨ラーメン構造	15F, B2F
建物 B	埼玉県	地上 26 階 塔屋 2 階	2000	X, Y 方向：極軟鋼制振壁付き鉄骨ラーメン構造	PH1F, 10F, B3F, 別棟 1F
建物 C	東京都	地上 33 階 棟屋 1 階	2007	X, Y 方向：座屈拘束ブレース付き鉄骨ラーメン構造 (CFT 柱)	32F, 16F, B2F, 別棟 1F

2) 解析方法

表 5.2.1-1 に示した建物について、建物の地下階または 1 階で観測された加速度記録を入力地震動とし、建物の地下階は無視し、1 階を基礎固定として、1 階床位置に、これらの地震波を入力して解析を行う。各建物の X, Y 方向それぞれの地震応答解析を行い、建物の中間階や上層階で観測した加速度記録の最大値と地震応答解析から得られる加速度の最大値を比較する。また、入力地震動として、El Centro NS の 50kine を入力地震動とした場合の応答解析についても、建物 B で実施する。表 5.2.1-2 には、各建物の応答解析に用いた入力地震動とその最大加速度、継続時間を示す。

ここでの応答解析では、減衰の設定値が建物の地震応答結果に及ぼす影響を明らかにするため

に、減衰定数 2%の初期剛性比例型の場合と、同定解析から得られる各建物の 1 次, 2 次の減衰定数を用いたレーリー型減衰の場合の応答を比較する。

3) モデル化と復元力特性の設定

各建物のモデル化や復元力特性の設定方法を表 5.2.1-2 に示す。基本的には、入手した建物情報の応答解析モデルのモデル化の方法となるべく近いモデル化を行うこととしているが、解析モデルの詳細情報がわからない場合があり、オリジナルの解析モデルや解析条件とは、必ずしも一致していない。これらの建物では、基本的に質点系の等価せん断型モデルにより応答解析が行われているため、同様に質点系の等価せん断モデルによる解析を行う。

表 5.2.1-2 解析モデルの設定方法

建物名称	モデル化の方法と復元力特性の設定	入力地震動 (最大加速度, 継続時間)
建物 A	オリジナルの解析モデルは、D 値法を用いて各層剛性を計算し、トリリニアの復元力特性が設定され、2 次剛性, 3 次剛性は、初期剛性の 10%, 1%で設定、X, Y 方向は同一の解析モデル。本解析もそれと同じモデルで解析。	B2F-X (259.0cm/s ² , 301 秒) B2F-Y (163.3cm/s ² , 301 秒)
建物 B	オリジナルの解析モデルは、増分解析から得られた各層の層せん断力-変形関係から、制振壁ダンパーと柱梁フレームを組み合わせたトリリニア型復元力特性の質点系の等価せん断型モデル。本解析では、このトリリニアの復元力特性を、ダンパーは完全弾塑性型、フレームはバイリニア型に分離し、2 つのバネの組み合わせたモデルにより質点系の等価せん断型モデルで解析。	B3F-X (73.6cm/s ² , 599 秒) B3F-Y (62.6cm/s ² , 599 秒) 別棟 1F-X (90.9cm/s ² , 400 秒) 別棟 1F-Y (89.4cm/s ² , 400 秒) El Centoro NS 50kine (511cm/s ² , 53.7 秒)
建物 C	オリジナルの解析モデルは、増分解析から得られた各層の層せん断力-変形関係から、トリリニア型復元力特性の質点系の等価せん断型モデル (X 方向は曲げバネも考慮)。本解析では、このトリリニアの復元力特性を、ダンパーは完全弾塑性型、フレームはバイリニア型に分離し、2 つのバネの組み合わせたモデルにより質点系の等価せん断型モデルで Y 方向のみ解析。	B2F-X (66.6cm/s ² , 600 秒) B2F-Y (52.2cm/s ² , 600 秒)

(3) 同定手法による振動特性評価

ここでは、東北地方太平洋沖地震本震を含む強震観測記録を用いて、対象建築物の振動特性の同定を行う。適用した同定手法は、部分空間法のひとつである N4SID 法 (Numerical algorithm for Subspace based State-Space System IDentification method) ^{5.2.1-1)} である。

1) システム同定の概要

入力 (地下階または 1 階) と応答 (上層階) の加速度記録を用いて、システム同定手法により固有振動数と減衰定数の同定を行う。地震動データに対して N4SID 法 ¹⁾ によるパラメータ同定を行う。

システムの次数が n_{states} である n_{in} 入力 n_{out} 出力モデルの離散時間システムの状態空間表現は、次式で与えられる。

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{B}\mathbf{u}_k \quad (5.2.1-1)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \mathbf{D}\mathbf{u}_k \quad (5.2.1-2)$$

但し、 $\mathbf{x}_k \in \mathcal{R}^{n_{states}}$ は状態ベクトル、 $\mathbf{u}_k \in \mathcal{R}^{n_{in}}$ 及び $\mathbf{y}_k \in \mathcal{R}^{n_{out}}$ は入出力ベクトル、

$\mathbf{A} \in \mathcal{R}^{n_{states} \times n_{states}}$, $\mathbf{B} \in \mathcal{R}^{n_{states} \times n_{in}}$, $\mathbf{C} \in \mathcal{R}^{n_{out} \times n_{states}}$, $\mathbf{D} \in \mathcal{R}^{n_{out} \times n_{in}}$ は定数行列。

入力信号 \mathbf{u}_k 及び出力信号 \mathbf{y}_k から、システム特性行列 \mathbf{A} , \mathbf{B} , \mathbf{C} , \mathbf{D} を推定する。得られた行列 \mathbf{A} の固有値問題を解くことにより、伝達関数の極 p_j から、次式により j 次の固有振動数 f_j と減衰定数 h_j を推定する。

$$f_j = \frac{\sqrt{(\log|_z p_j|)^2 + (\arg_z p_j)^2}}{2\pi\Delta t} \quad (5.2.1-3)$$

$$h_j = \frac{-\log|_z p_j|}{2\pi f_j \Delta t} \quad (5.2.1-4)$$

モデル次数に関しては、次数を 20 から 60 に変化させて、インパルス応答のハンケル行列の特異値が急に小さくなるような次数を選択した。

2) 振動特性の同定結果

(a) 建物 A

図 5.2.1-1(a)に、東北地方太平洋沖地震本震のスペクトル比（15F/B2F）を示す。0.5Hz 付近に 1 次モードのピークが、1.6Hz 付近に 2 次モードのピークが見られる。得られた強震記録を 30 秒ごとに 10 分割して、区間ごとに固有振動数と減衰定数を求めた。同定結果を図 5.2.1-1(b)と図 5.2.1-1(c)に示す。入力層の最大加速度は 150gal 程度であるが、1 次振動数と 2 次振動数はほぼ一定の値をとっており、地震の最中に固有振動数はほとんど変化していないことが分かる。減衰定数については、ばらつきがあるものの、地震動のレベルが大きくなるにつれて、減衰が大きくなり、主要動を過ぎると減衰が低く安定する傾向が見られる。

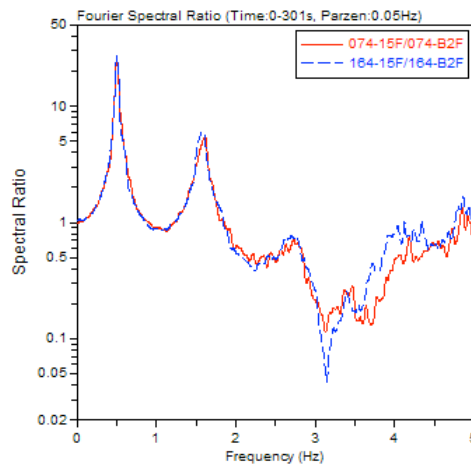


図 5.2.1-1 (a) フーリエスペクトル比 (15F/B2F)

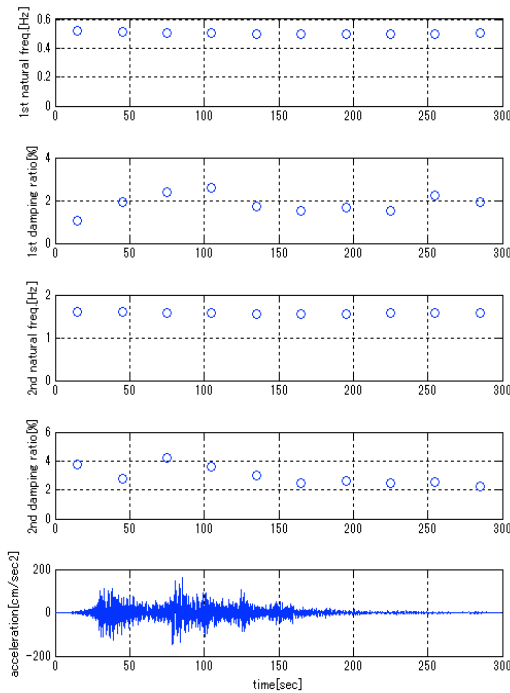


図 5.2.1-1 (b) 振動数・減衰定数の変化 (074 方向)

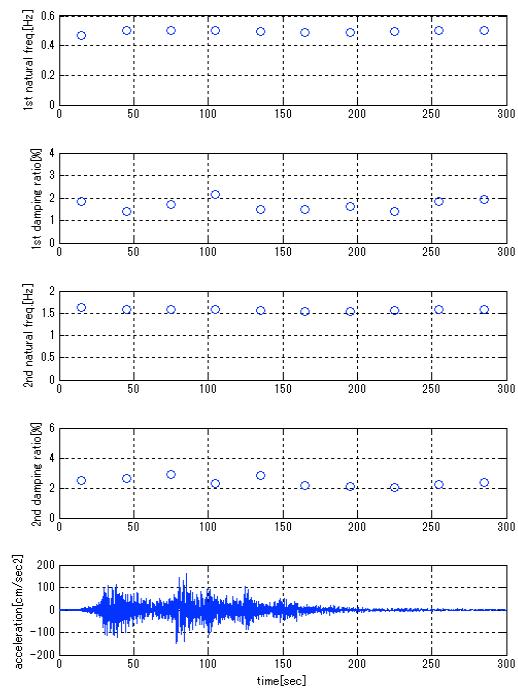


図 5.2.1-1 (c) 振動数・減衰定数の変化 (164 方向)

(b) 建物 B

図 5.2.1-2(a)に、東北地方太平洋沖地震本震のスペクトル比 (27F/B2F) を示す。0.4Hz 付近に 1 次モードのピークが、1.1Hz 付近に 2 次モードのピークが見られる。得られた強震記録を 30 秒ごとに 10 分割して、区間ごとに固有振動数と減衰定数を求めた。同定結果を図 5.2.1-2 (b)と図 5.2.1-2 (c)に示す。1 次振動数と 2 次振動数は、地震の最中に初期値に比べて 10%程度低下している。1 次減衰定数については、ばらつきがあるものの、主要動付近で 5-10%程度に上昇する傾向が見られる。これは、履歴型ダンパーが若干塑性化している等の影響が考えられる。

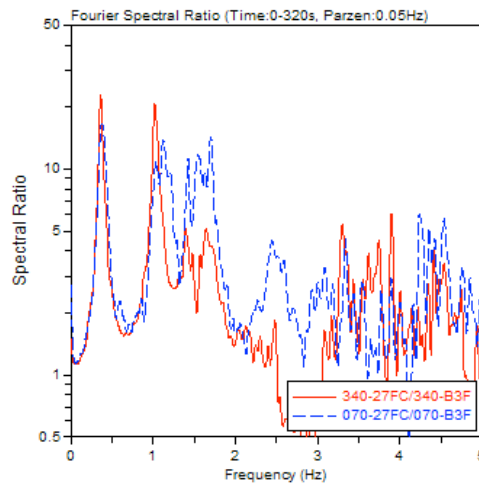


図 5.2.1-2(a) フーリエスペクトル比 (27F/B3F)

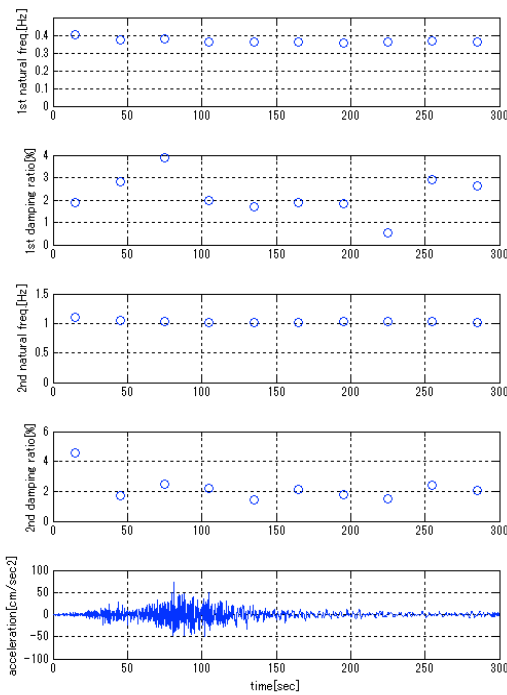


図 5.2.1-2 (b) 振動数・減衰定数の変化 (340 方向)

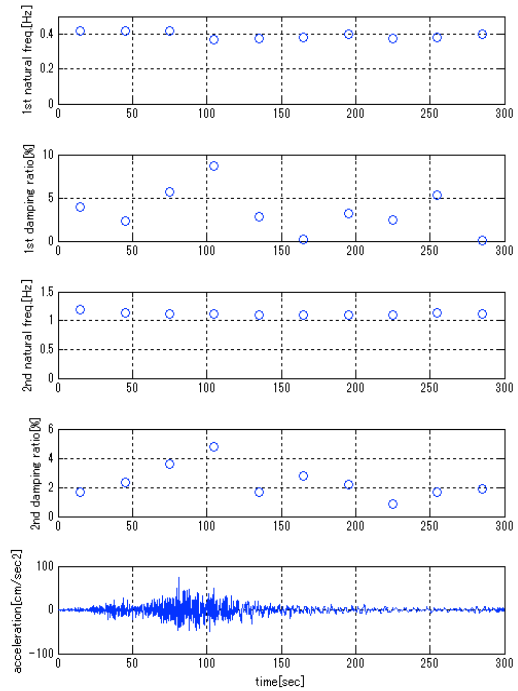


図 5.2.1-2 (c) 振動数・減衰定数の変化 (070 方向)

(c) 建物 C

図 5.2.1-3(a)に、東北地方太平洋沖地震本震のスペクトル比 (32F/B2F) を示す。0.3Hz 付近に 1 次モードのピークが、0.8Hz 付近に 2 次モードのピークが見られる。得られた強震記録を 30 秒ごとに 10 分割して、区間ごとに固有振動数と減衰定数を求めた。同定結果を図 5.2.1-3(b)と図 5.2.1-3(c)に示す。1 次振動数と 2 次振動数は、地震の最中に初期値に比べて 10-15%程度低下している。1 次減衰定数については、ばらつきがあるものの、一部の区間をのぞいて、1-2%程度の値をとっている。

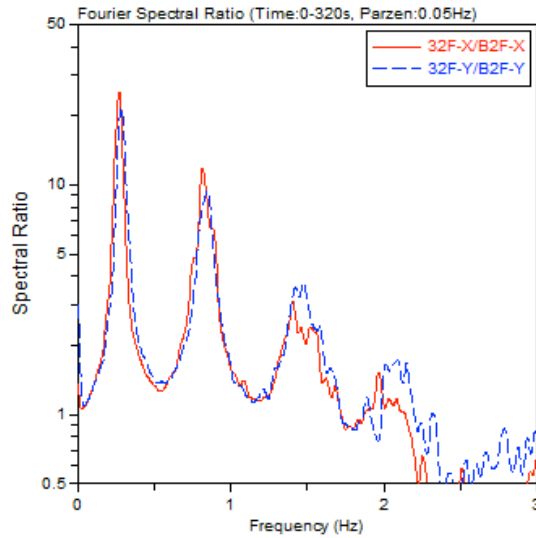


図 5.2.1-3(a) フーリエスペクトル比 (32F/B2F)

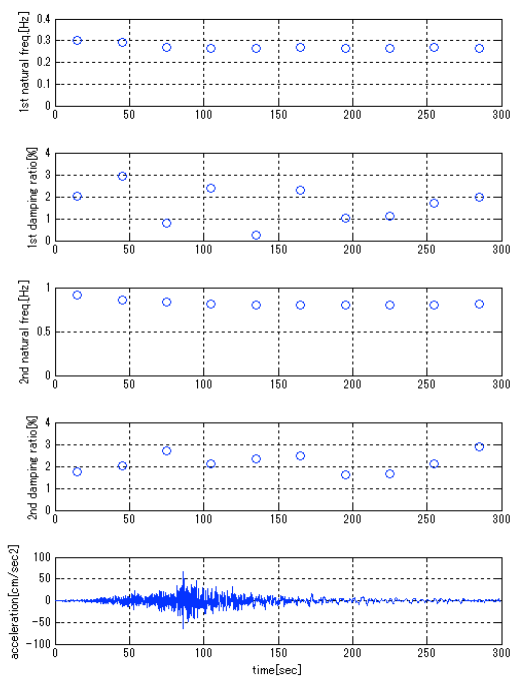


図 5.2.1-3(b) 振動数・減衰定数の変化(x 方向)

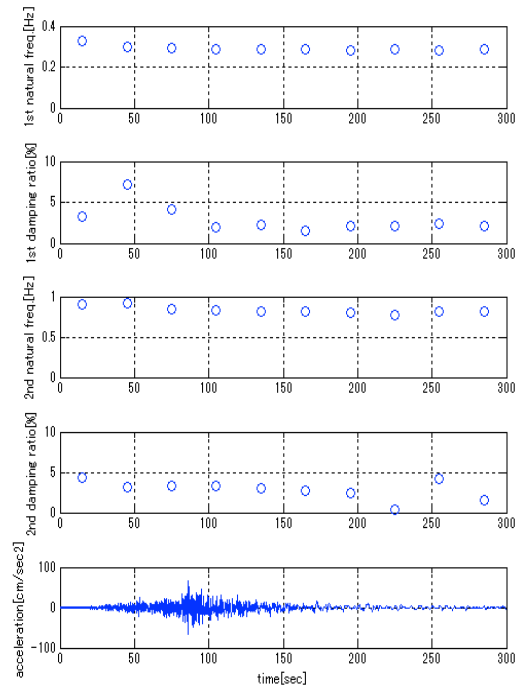


図 5.2.1-3(c) 振動数・減衰定数の変化(y 方向)

(4) 解析建物の動的特性

1) 同定解析から得られた減衰定数

前述の観測記録に基づく建物の同定解析の結果から、それぞれの建物の1次、2次の減衰定数を算定した。表5.2.1-3にそれらの値を記す。1次減衰定数は、1.67%~2.31%の範囲である。ここでの応答解析では、これらの値を用いたレーリー型減衰でも解析を行う。

表 5.2.1-3 同定解析から得られた減衰定数

建物名称	方向	1次減衰定数 (%)	2次減衰定数 (%)	2次減衰定数 / 1次減衰定数
建物 A	X 方向	1.67	2.39	1.43
	Y 方向	1.95	2.88	1.48
建物 B	X 方向	1.92	1.93	1.01
	Y 方向	2.31	1.87	0.81
建物 C	X 方向	---	---	---
	Y 方向	2.04	2.48	1.22

2) 検討建物の固有周期

観測記録に基づく建物の同定解析の結果から、それぞれの建物の1次、2次の固有周期を算定した。表5.2.1-4にそれらの値とともに本章の応答解析モデルの固有周期の値を比較して記す。1次固有周期の、同定解析/解析モデルの比は、1割程度の範囲内となっている。

表 5.2.1-4 固有周期

建物名称	方向	同定解析(sec.)		解析モデル(sec.)		同定解析/解析モデル	
		1次周期	2次周期	1次周期	2次周期	1次周期	2次周期
建物 A	X 方向	2.004	0.638	2.012	0.694	1.00	0.92
	Y 方向	1.994	0.638	2.012	0.694	0.99	0.92
建物 B	X 方向	2.760	0.978	2.517	0.988	1.10	0.99
	Y 方向	2.609	0.902	2.394	0.949	1.09	0.95
建物 C	X 方向	---	---	---	---	---	---
	Y 方向	3.502	1.232	3.683	1.417	0.95	0.869

(5) 解析建物の入力地震動の応答スペクトル

表5.2.1-2に示した各解析建物のX方向及びY方向の応答解析に用いた入力地震動の速度応答スペクトル(h=0.02)及びエネルギースペクトル(h=0.10)を、高層建築物の評定で用いられている50kine標準波3波(El Centro NS, Hachinohe EW, Taft EW)と比較して、図5.2.1-4(a)~(c)に

示す。

図 5.2.1-4(a)は、建物 A の入力地震動のスペクトルである。1~2 秒程度までの周期では、速度応答は、50kine の半分程度であるが、エネルギースペクトルの値は、50kine の地震動に近い値になっている。2 秒~6 秒程度の範囲では、速度応答スペクトル及びエネルギースペクトルともに 50kine の地震動と概ね等しいレベルである。

図 5.2.1-4(b)の建物 B では、4 秒以上の周期では、エネルギースペクトルは、50kine の地震動と同等レベルであり短周期に比べて、長周期領域で、比較的多くのエネルギーが入力していることがわかる。建物 C のスペクトルは、建物 B と概ね同様の傾向である。

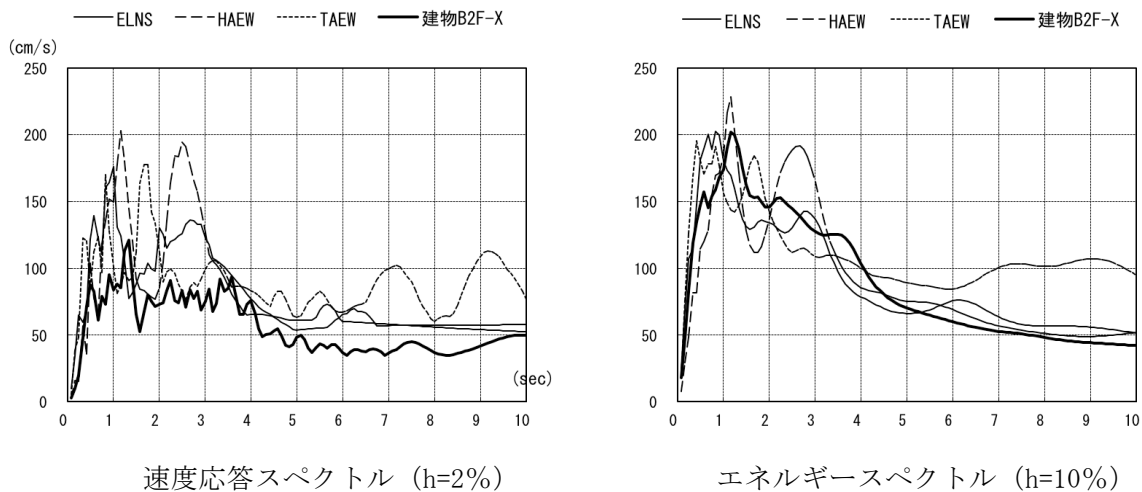


図 5.2.1-4(a) 建物 A(X 方向)の入力地震動 (B2F-X) の応答スペクトル

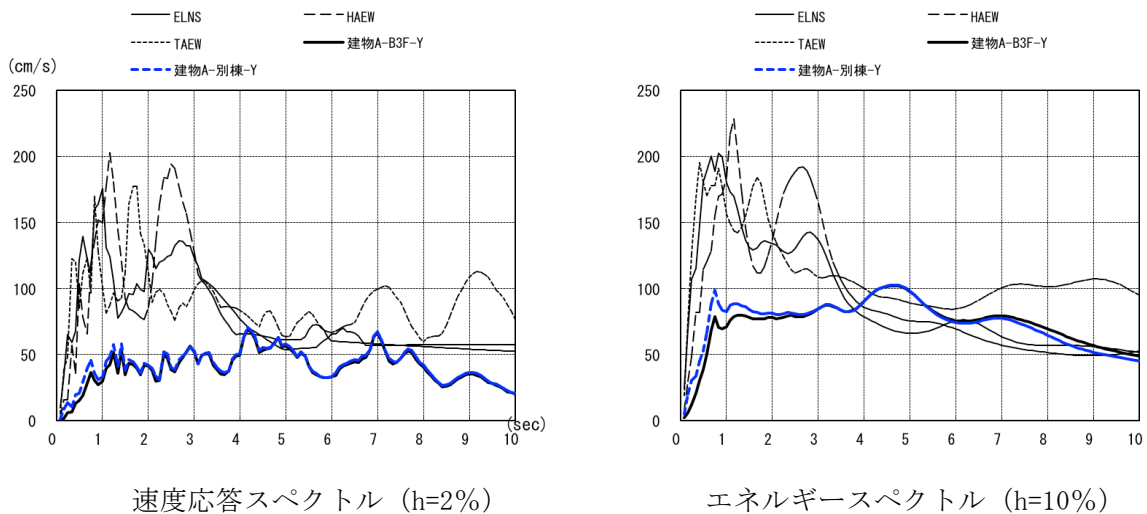
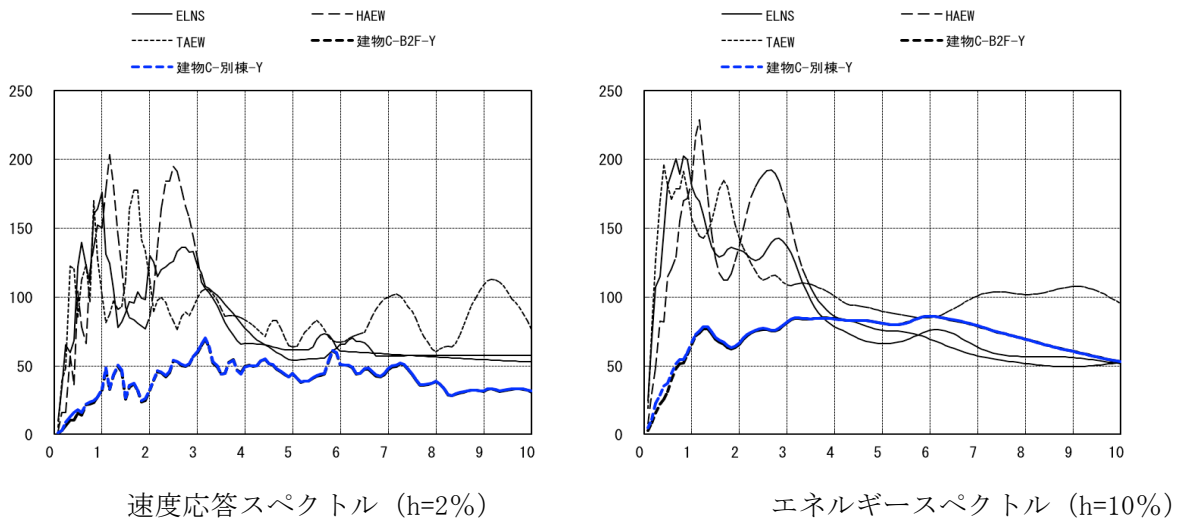


図 5.2.1-4(b) 建物 B(Y 方向) の入力地震動 (B3F-Y) の応答スペクトル



速度応答スペクトル (h=2%)

エネルギースペクトル (h=10%)

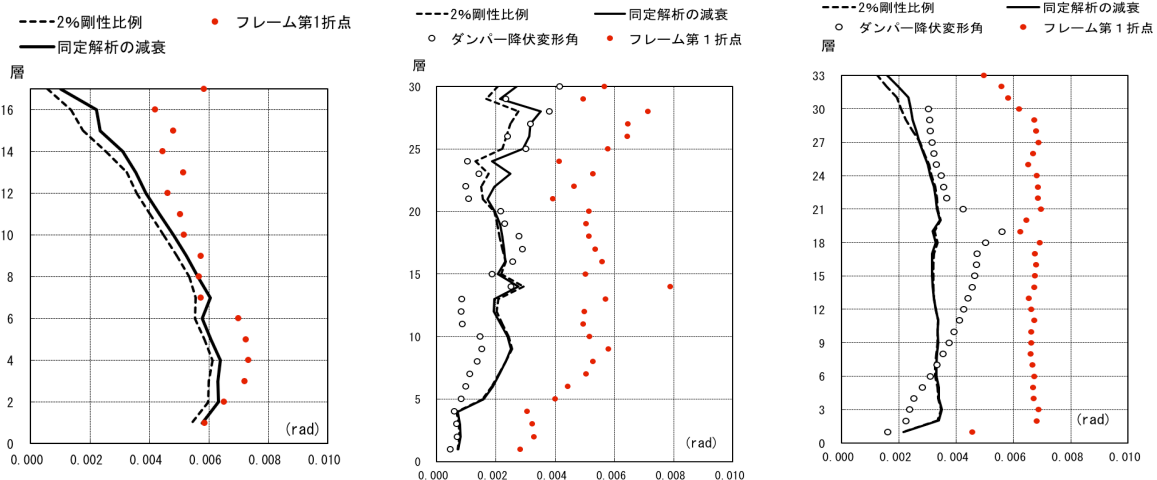
図 5.2.1-4(c) 建物 C(Y 方向) の入力地震動 (B2F-Y) の応答スペクトル

(6) 地震応答解析結果

1) 最大層間変形角

表 5.2.1-2 で示した各建物のモデル化を行い、それぞれの入力地震動を用いて、2%剛性比例型減衰と表 5.2.1-3 で示した観測記録の同定解析から得られた 1 次、2 次の減衰定数を用いたレーリ一型減衰による応答解析を行う。これらの応答解析から得られた各建物の各層の最大層間変形角を、2%剛性比例型の場合と同定解析から得られた減衰を用いた場合について、図 5.2.1-5(a)~(c) に比較して示す。ここでは変形が大きかった方向の結果を示す。

宮城県に建設されている建物 A では、第 7 層の最大層間変形角は、図中に示すフレームの第 1 折れ点の変形（塑性率計算の基点）を、わずかに越えている。また、建物 B 及び建物 C では、一部の層でダンパーが降伏するレベルの応答になっている。減衰の設定を観測記録の同定解析から得られた値にすることで、各層の層間変形応答はやや大きくなる傾向が見られる。



(a) 建物 A(X 方向)

(b) 建物 B(Y 方向)

(c) 建物 C(Y 方向)

図 5.2.1-5 最大層間変形角の比較

2) 最大加速度応答の比較

各建物における地震応答解析で、2%剛性比例型減衰による解析と同定解析から得られるレーリ一型減衰の最大加速度応答に関する解析結果について、図 5.2.1-6(a)～(c)に建物 A, B, C の結果を示す。減衰の設定を同定解析から得た値にすることで、加速度応答が大きくなる傾向が見られ、高次のモードの応答が顕在化するようである。また、同定解析から得られる値で解析した方が、実際の観測記録の加速度応答値に近くなっている。

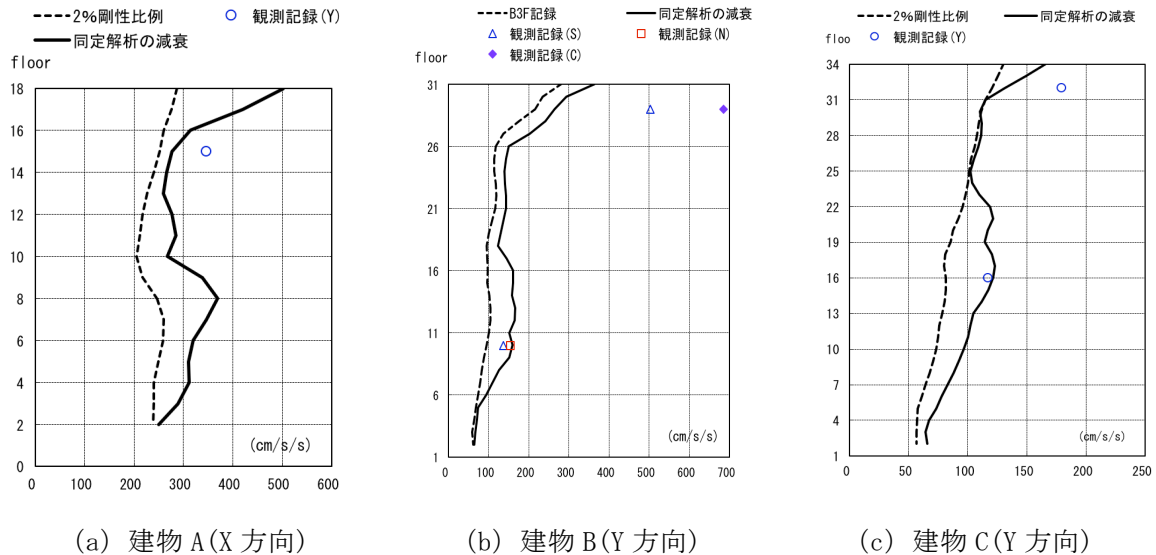


図 5.2.1-6 最大応答加速度の比較

3) 制振壁ダンパーを有する建物 B の応答

建物 B は低降伏点鋼を用いた制振壁を有する建物である。この建物では、建物の一部の階の制振壁ダンパーが降伏するレベルの応答であった。そのため、建物 B については、標準波である EL Centro NS 50kine に対する応答解析も行った。また、建物 B に隣接する建物の 1F の記録を用いた解析も行った。建物 B の Y 方向についてのこれらの応答解析結果として、図 5.2.1-7 には最大層間変形を、図 5.2.1-8 にはダンパーの平均累積塑性変形倍率に関して比較した結果を示す。

最大層間変形角については、今回の地震では、建物の B3F の記録による応答解析から得られた結果は、EL Centro NS 50kine の 1/3 程度である。ダンパーの平均累積塑性変形倍率 ($\bar{\eta}$) に関しては、B3F の記録によるこの制振壁ダンパーの平均累積塑性変形倍率は 20 程度で、EL Centro NS 50kine の地震動による平均累積塑性変形倍率は 45 程度であり、今回の地震は、EL Centro NS 50kine の半分程度の値である。この建物の制振壁ダンパーの平均累積塑性変形倍率の保有性能は、おおよそ 500 程度であることから、上記の応答値 20 は、ダンパーの保有性能に比べ、十分小さな値と考えられる。なお、平均累積塑性変形倍率 ($\bar{\eta}$) は、正側と負側の累積塑性変形倍率の平均であり、下式で定義される値である^{5.2.1-2)}。

$$\bar{\eta} = \frac{W_p}{2(Q_y \cdot \delta_y)} \quad (5.2.1-5)$$

ここで、 W_p は、ダンパーが吸収した塑性歪エネルギー、 Q_y はダンパーの降伏耐力、 δ_y はダンパ

一の降伏耐力時の変形である。

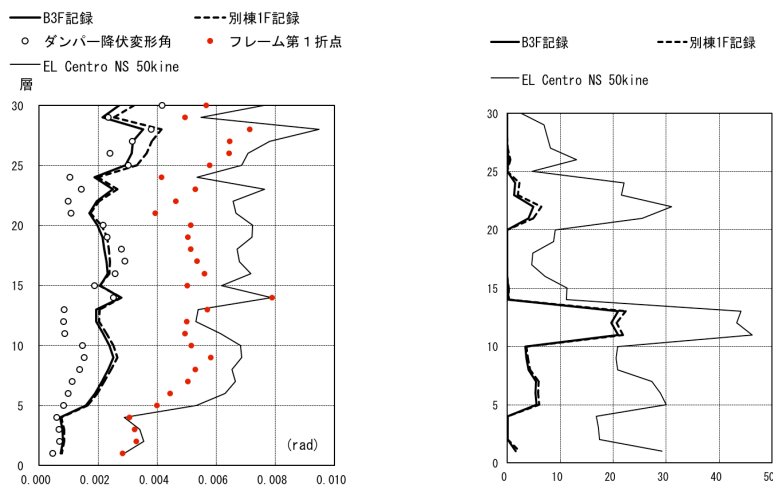
ダンパーでのエネルギー吸収に関して、東北地方太平洋沖地震の記録を用いた解析によるダンパーのエネルギー吸収と標準波である EL Centro NS 50kine の地震波によるエネルギー吸収について、建物各層のダンパーの最大塑性率 μ_{\max} から 1 を減じた値 ($\mu_{\max}-1$) とダンパーの平均累積塑性変形倍率 ($\bar{\eta}$) の関係を図 5.2.1-8 に示す。ダンパーの最大塑性率 (μ_{\max}) の定義は、以下である。

$$\mu_{\max} = \delta_{\max} / d\delta_y \quad (5.2.1-6)$$

ここで、 δ_{\max} は各層の最大層間変形であり、 $d\delta_y$ は各層のダンパーの降伏層間変形である。

図 5.2.1-8 では、ダンパーの $\mu_{\max}-1$ の値が 0.5 以上となった層についてプロットしている。EL Centro NS の解析では、全ての層のダンパーの $\mu_{\max}-1$ の値が 0.5 以上になっているが、東北地方太平洋沖地震の B3F 記録の解析では 14 カ所の層がプロットの対象になっている。この図から、EL Centro NS では、 $\mu_{\max}-1$ の値が 5 以下の範囲で、平均累積塑性変形倍率 ($\bar{\eta}$) と $\mu_{\max}-1$ の比である等価な繰返し回数 d_n ^{5.2.1-3)} が、おおよそ 5 程度となっている。

東北地方太平洋沖地震の B3F 記録による応答では、 $\mu_{\max}-1$ の値が 1 以上になっているのは 3 カ所の層だけであるが、これらの $\mu_{\max}-1$ の値は 1.3 程度で、平均累積塑性変形倍率 ($\bar{\eta}$) は 20 程度の値である。一方、EL Centro NS では、 $\mu_{\max}-1$ が 1.3 程度での平均累積塑性変形倍率の値は 5～8 程度である。このように、東北地方太平洋沖地震は、EL Centro NS に比べて、同一の塑性率での、繰返しによるエネルギー吸収が多くなっていて、この例では、等価な繰返し回数 d_n の値は、EL Centro NS の 3 倍程度になっている。本報の解析では、骨組が塑性化している例が他にないために、他の骨組で検証はできないが、建物 B のダンパーの応答結果からは、今回の東北地方太平洋沖地震による地震動は、EL Centro 等の標準的な地震に比べて、建物の塑性振幅の繰返し回数が多い地震動と考えられる。



(a) 最大層間変形角 (b) ダンパーの平均累積塑性変形倍率

図 5.2.1-7 ダンパーを有する建物 B の応答

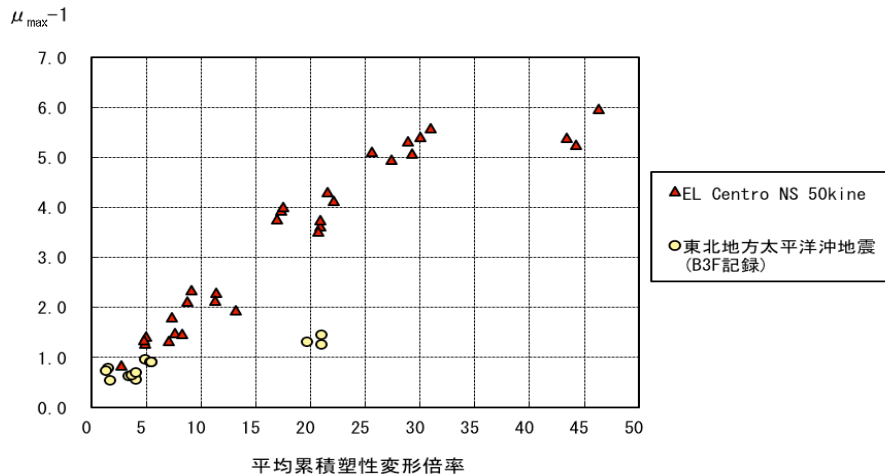


図 5.2.1-8 ダンパーの塑性率 ($\mu_{max}-1$) と平均累積塑性変形倍率 ($\bar{\eta}$) の関係

(7) まとめ

強震記録が観測された超高層鉄骨造建物 3 棟を対象にして、それらの建物で観測された地震記録を用いて、同定手法を用いた建物の振動特性等の分析、及び、各建物の応答解析モデルを用いた地震応答解析の実施と観測記録の応答との比較、等の調査を行なった。得られた結果を以下に示す。

- 1) 宮城県の建物 A では、フレームの第 1 折れ点を少し超える応答であった。
- 2) 同定解析から得られたレーリー型減衰を用いた場合には、2%剛性比例型に比べ、各層の最大応答加速度と最大応答変位が大きくなる傾向が有り、観測記録の応答に近くなる。
- 3) ダンパーを有する建物では、ダンパーが降伏するレベルの応答であった。制振壁ダンパーを有する建物 B のダンパーの平均累積塑性変形倍率は、EL Centro NS 50kine の解析の半分程度の値である。この建物の制振壁ダンパーの保有性能としての平均累積塑性変形倍率は 500 程度であり、今回の地震によるダンパーの損傷に比べ、十分大きな余裕があると考えられる。
- 4) 制振壁ダンパーを有する建物 B のダンパーの地震応答について、ダンパーの塑性率と平均累積塑性変形倍率の関係をプロットし、同一の塑性率での等価な繰り返し回数 (${}_d n_1$) について比較した。その結果、今回の東北地方太平洋沖地震による地震波による応答は、EL Centro 等の標準的な地震波の応答に比べると、建物の塑性振幅の等価な繰り返し回数が多いことを示した。

参考文献

- 5.2.1-1) 片山徹：システム同定一部分空間法からのアプローチ，朝倉書店，2004
- 5.2.1-2) 秋山宏：エネルギーの釣合に基づく建築物の耐震設計，技報堂出版，2002. 4
- 5.2.1-3) エネルギーの釣合に基づく耐震計算法の技術基準解説及び計算例と解説，(財) 日本建築センター，平成 17 年 10 月

5.2.2 観測建物の挙動調査（その2）（H23 実施分）

（1）はじめに

東北地方太平洋沖地震で観測された D 建物の本震および代表的な余震の観測記録を用いて、①観測記録の分析、②①の分析結果を反映した応答解析を実施して、構造体の損傷評価などの基礎資料とする、③入力損失の超高層ビルの応答に与える影響の把握、の各項目について検討を実施する。

（2）観測記録の分析

本震及び代表的な余震を選択し、その観測記録を用いて、同定手法により地震毎の固有周期、減衰定数、刺激関数を評価する。この振動特性の同定には ARX モデルを用い、質量や剛性などからなる物理モデルを介さない方法とする。

評価に用いた観測記録（本震及び余震、その後の地震）の一覧を表 5.2.2-1 に示す。これらの観測時刻歴波形について観測開始から 300 秒間の記録を用い、各方向 3 次まで ARX モデルによる固有周期、減衰定数、刺激関数を算定する。その結果を表 5.2.2-2 に示す。表 5.2.2-2 には 33 階観測加速度を CALTECH 積分により変形に変換した時の最大変形も併せて示す。

次に、観測記録より計算された固有周期と減衰定数を、横軸にイベント（時系列）をとって図 5.2.2-1 に示す。

（a）固有周期

イベント（地震）毎に算定される値は異なっている。X 方向については、1 次は 3.4 秒から 4.1 秒、2 次は 1.2 秒から 1.3 秒、3 次は 0.7 秒から 0.8 秒の間に分布している。Y 方向については、1 次は 3.1 秒から 3.7 秒、2 次は 1.1 秒から 1.2 秒、3 次は 0.6 秒から 0.7 秒の間に分布している。また、本震後に序々に短くなっている傾向は見られるが、ばらつきが大きい。

（b）減衰定数

固有周期と同様に、ばらつきは大きい。全 78 イベントの平均としては、X 方向が 1～3 次について 1.5%、1.9%、1.0%、Y 方向が 1.7%、1.9%、2.0%である。

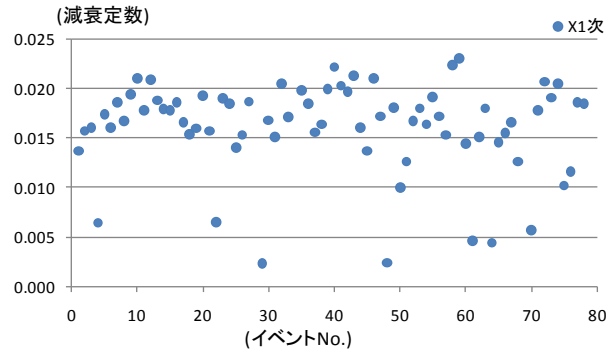
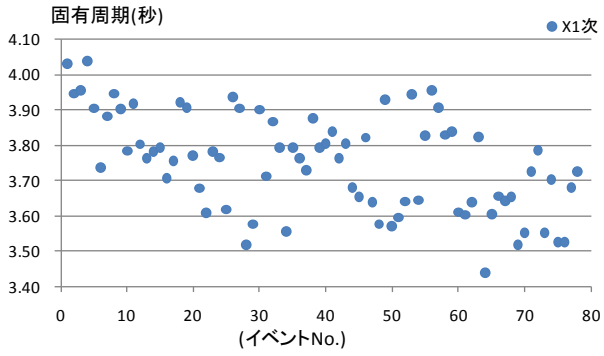
次に、横軸に 33 階の水平変形の最大値（観測加速度の CALTECH 積分結果の最大値）をとって図 5.2.2-2 に示す。

固有周期及び減衰定数ともに振幅依存性があることがわかる。固有周期は振幅が大きいほど大きい。減衰定数は微小振幅では小さいが振幅が大きくなるにつれて大きくなり、33 階振幅が 1cm 程度で頭打ちとなり、それより大きくなると小さくなる傾向がみられる。

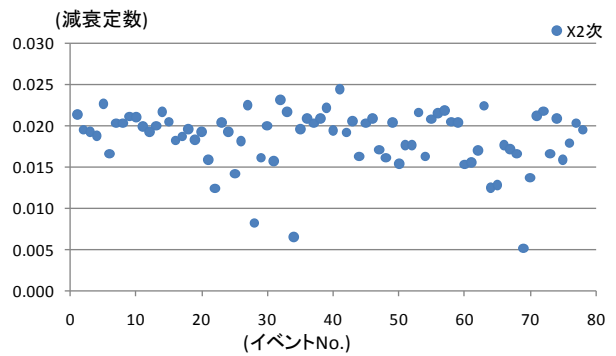
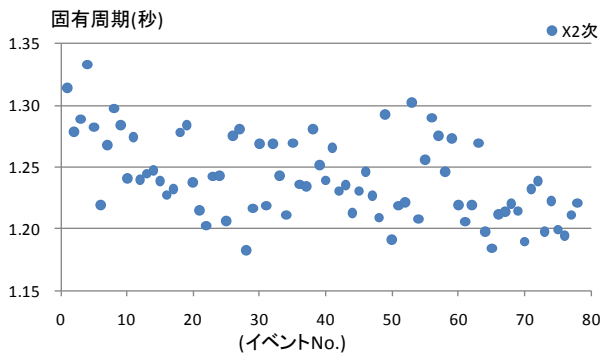
表 5.2.2-1 評価に用いた観測記録一覧

記録開始					最大値(Gal)									備考
月	日	時	分	秒	B4FX	B4FY	B4FZ	15FX	15FY	15FZ	33FX	33FY	33FZ	
3	11	14	47	33	53.3	49.6	51.6	129.7	-160.5	80.1	162.6	146.2	106.6	(1)本震
3	11	14	57	4	-2.3	-2.9	-1.4	7.9	-5.7	-2.3	-10.1	8.1	3.5	
3	11	15	8	0	-22.9	-27.9	-15.2	69.3	74.2	27.7	-131.5	-87.6	-40.7	(2)茨城県沖の地震(最大余震)
3	11	15	17	31	-8.6	-8.9	-6.8	44.9	35.6	-7.2	70.5	43.8	-9.8	
3	11	15	27	7	-2.8	-3.7	-3.3	7.5	8.2	-5.9	6.5	-11.8	-8.9	
3	11	15	45	38	-0.9	0.9	-1.2	-1.3	-1.3	1.3	-1.2	-1.2	-2.0	
3	11	15	57	36	2.1	2.4	1.2	4.5	4.3	2.2	5.3	5.3	-3.5	
3	11	16	15	44	3.0	3.0	-1.8	9.3	7.1	-3.5	-12.8	-9.4	6.0	
3	11	16	29	15	-2.5	-2.3	1.2	-9.1	-5.2	1.7	8.9	-5.6	3.2	
3	11	16	43	38	-1.1	-1.3	-1.0	-2.4	1.7	1.4	-2.1	2.2	2.7	
3	11	17	12	45	4.4	5.7	-2.3	14.8	-8.9	-4.4	14.6	-10.1	-6.0	
3	11	17	32	10	-1.7	-1.7	-1.1	1.9	-2.7	-1.7	2.2	3.5	3.2	
3	11	17	41	53	2.0	-2.6	1.9	-3.9	4.5	2.8	-3.5	-4.7	-4.4	
3	11	20	21	40	-1.6	1.7	1.0	-2.9	3.3	-1.9	-2.9	-3.8	2.9	
3	11	22	17	45	-1.0	-1.5	-1.0	-2.5	-2.6	-2.2	-2.6	-2.3	-2.9	
3	11	23	1	11	1.4	1.2	1.0	2.1	-2.4	1.8	-2.5	-2.2	-3.3	
3	11	23	57	14	-1.0	1.2	-0.8	-1.9	-4.0	-1.4	1.8	-4.0	2.3	
3	12	0	13	53	2.2	-2.8	-1.3	-5.8	-5.8	-2.7	-7.6	-7.1	-4.1	
3	12	4	0	15	-2.2	-2.5	-1.2	5.2	5.3	-2.2	-7.2	-8.4	2.9	(3)長野県・新潟県境付近の地震
3	12	4	24	52	-1.4	-1.3	-1.6	-2.4	3.2	2.4	-2.5	3.4	3.9	
3	12	5	35	34	1.3	1.2	-1.3	1.7	1.9	-2.4	-1.6	1.3	4.4	
3	12	15	57	44	2.6	-2.8	-1.3	2.8	2.5	1.6	1.2	-1.7	-3.6	
3	12	22	16	42	1.4	-1.3	1.0	-2.9	-3.0	2.1	2.9	-2.4	3.6	
3	13	8	26	10	0.9	1.2	-0.5	2.5	-2.8	1.2	2.2	3.2	-1.7	
3	13	9	33	29	0.8	1.3	-0.6	1.1	-2.1	1.1	-0.8	1.0	1.7	
3	13	10	27	1	2.1	2.1	1.6	-3.7	-4.2	2.6	8.5	-6.8	3.9	
3	14	10	3	4	3.6	4.1	2.8	7.4	-8.9	5.6	8.2	-9.9	-7.2	
3	15	1	36	19	1.2	-1.2	-2.6	-0.7	1.1	-2.0	0.6	0.6	2.0	
3	15	4	59	53	11.0	8.8	-5.0	7.0	8.7	-4.6	2.9	-4.0	-9.8	
3	15	22	29	34	6.1	-5.3	6.6	7.8	9.9	-9.5	7.5	9.3	15.7	
3	15	22	40	29	-0.3	0.3	1.9	0.5	0.6	-1.4	-0.8	0.6	2.7	
3	16	12	52	23	4.5	-4.8	-2.6	5.2	7.4	-4.0	-7.0	-8.1	-6.4	
3	16	22	39	18	2.2	-2.6	1.8	-4.2	4.4	-2.6	-3.8	3.7	-4.6	
3	17	13	10	18	1.5	1.0	-1.6	1.1	-1.3	-1.3	-0.7	0.7	-1.3	
3	17	21	32	24	-2.2	2.5	-1.4	6.0	6.6	2.9	6.3	5.4	4.5	
3	17	21	55	43	1.5	1.4	-1.6	-2.8	3.1	3.3	-2.7	2.7	4.5	
3	18	17	2	21	-0.8	-1.1	-0.7	2.1	-2.4	1.5	-2.1	2.3	-2.3	
3	19	18	57	18	-4.3	-4.5	4.3	-9.6	9.5	6.8	9.8	-11.0	10.6	
3	22	12	39	5	-1.9	-1.9	-1.1	4.0	5.6	2.3	-4.1	5.3	-3.7	
3	22	16	19	43	-0.9	1.1	1.2	2.2	2.5	1.8	-2.3	-2.3	2.4	
3	22	18	20	14	2.0	-1.8	-1.1	5.6	4.0	2.3	-5.9	-4.0	3.5	
3	23	7	13	27	-0.9	-1.4	-1.0	-1.8	-2.6	-1.6	2.1	-3.2	2.4	
3	23	7	35	48	1.9	-2.2	1.6	-2.6	-4.4	2.5	2.4	-3.7	-3.9	
3	24	5	43	53	1.3	0.9	0.8	1.2	-1.4	1.3	1.1	-1.1	-1.7	
3	24	8	57	4	3.3	5.2	-3.2	4.0	6.2	-4.7	2.9	4.7	-8.1	
3	29	19	56	1	1.3	1.1	0.6	-3.0	2.6	-1.1	-3.2	2.9	1.9	
4	2	16	56	8	-1.9	-1.7	2.0	-2.6	3.0	-3.3	-2.6	-3.0	5.2	
4	5	4	30	47	-1.1	0.9	0.6	1.8	-1.1	1.2	1.4	1.3	1.9	
4	7	23	33	35	-5.9	-6.4	5.3	-13.2	11.9	9.1	10.9	-12.4	14.6	
4	9	21	48	3	-0.9	-0.6	-1.2	-1.0	0.8	1.7	0.7	0.7	-2.6	
4	10	6	23	28	1.9	1.5	0.9	3.0	-2.3	-1.3	2.3	2.1	2.5	
4	11	6	36	41	-1.4	-1.8	-0.8	-2.0	-2.5	-1.7	-1.9	-2.4	2.8	
4	11	17	16	44	-12.2	-10.3	8.5	-20.1	-23.0	-12.1	-21.8	-26.6	18.1	(4)福島県浜通りの地震
4	11	18	6	13	0.9	-1.0	0.8	-1.6	-1.5	2.0	0.9	-1.8	-2.6	
4	11	20	43	22	3.2	-2.4	-2.0	5.3	5.2	3.2	4.0	6.0	-4.1	
4	12	8	8	36	-5.6	6.9	5.4	-9.8	10.2	-7.2	11.4	-9.3	-14.8	
4	12	14	8	16	3.2	4.5	2.6	-8.9	-10.5	3.7	-7.1	11.0	4.7	
4	13	10	8	45	2.5	1.9	1.2	4.6	-3.7	-3.5	-4.3	-2.9	-5.4	
4	16	11	19	49	8.5	-8.6	6.5	-16.7	-18.0	-9.9	7.8	-8.9	-16.8	
4	18	3	9	10	3.8	1.9	-1.2	-3.1	2.5	-1.5	2.4	1.4	2.8	
4	19	2	37	21	1.1	-1.4	1.4	1.2	-1.9	1.5	1.0	-0.7	-2.2	
4	19	23	10	34	1.7	1.6	2.4	2.4	3.3	2.1	-1.8	2.5	3.8	
4	21	22	37	19	2.7	-2.8	3.5	-6.4	6.7	-4.1	-6.7	7.6	7.0	
4	22	15	35	36	-2.5	-1.5	-3.3	-1.9	1.0	-2.7	-1.3	0.7	-3.1	
4	24	12	25	31	1.1	-1.4	-1.0	0.7	0.9	1.2	0.5	-0.7	1.7	
4	25	18	0	57	1.5	1.8	-1.3	1.7	2.3	-2.5	-1.5	-1.4	3.7	
4	26	21	12	21	2.0	2.0	-1.7	2.8	2.6	2.0	2.3	2.3	3.3	
5	1	2	12	39	1.5	1.1	0.7	-1.9	2.1	-1.3	-1.6	1.4	2.2	
5	1	10	45	41	0.8	1.3	-0.8	0.9	1.9	0.9	-0.9	1.1	-1.3	
5	13	5	52	32	-1.1	1.0	-0.7	1.2	1.3	1.1	-1.2	1.1	-1.7	
5	14	8	37	10	1.1	-0.8	-0.8	3.4	-2.4	1.1	3.2	-2.0	-1.9	
5	20	9	46	47	2.4	1.5	1.2	3.3	-2.9	1.7	3.8	-3.9	2.5	
5	20	17	53	27	-1.2	-1.4	1.0	1.9	-3.7	1.6	2.2	-3.1	2.5	
5	22	7	6	43	-1.9	2.2	-5.3	-3.9	-4.1	-5.0	4.5	4.1	-9.3	
5	25	9	19	39	1.3	1.0	0.8	1.4	1.6	-1.3	1.2	1.5	-1.9	
6	3	10	33	52	1.2	1.3	0.8	-1.5	1.9	-1.3	1.2	2.0	-2.0	
6	4	1	1	8	-1.1	-1.1	0.8	2.2	1.6	-1.3	1.7	-1.3	-1.7	
6	9	19	39	15	-1.1	-1.2	-0.9	2.5	-2.9	2.2	1.7	2.0	3.1	

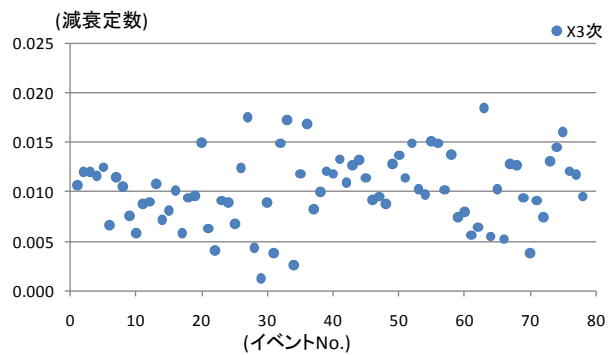
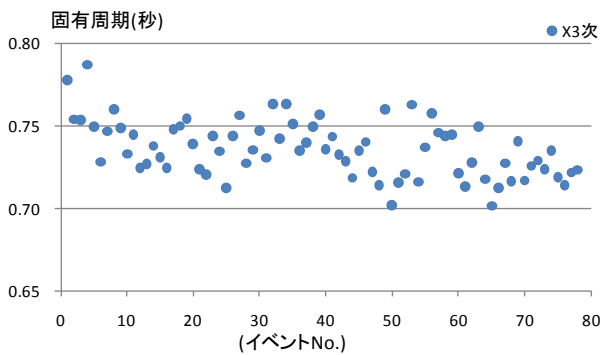
本表中、4/1~6/10の期間の記録は国土交通省国土技術政策総合研究所の提供による。



(1) X 方向 1 次

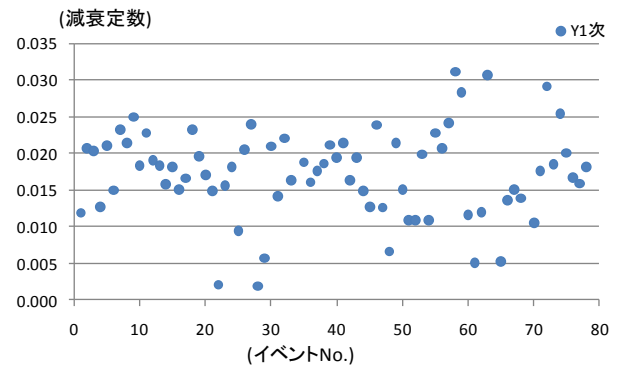
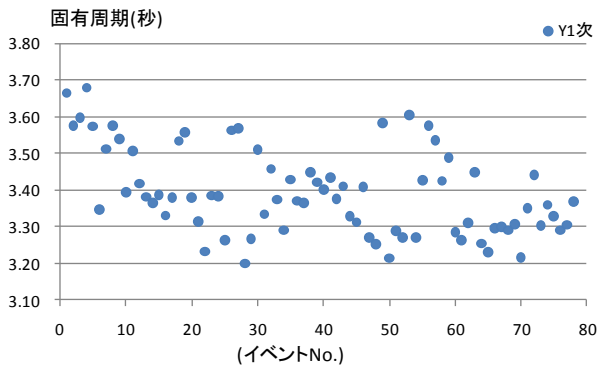


(2) X 方向 2 次

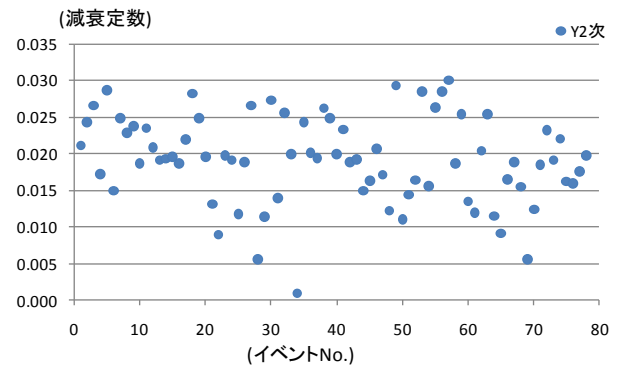
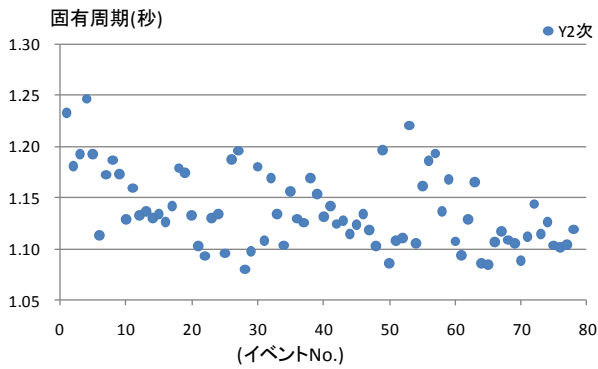


(3) X 方向 3 次

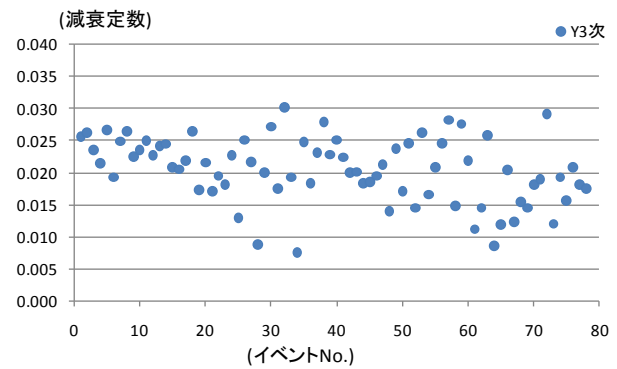
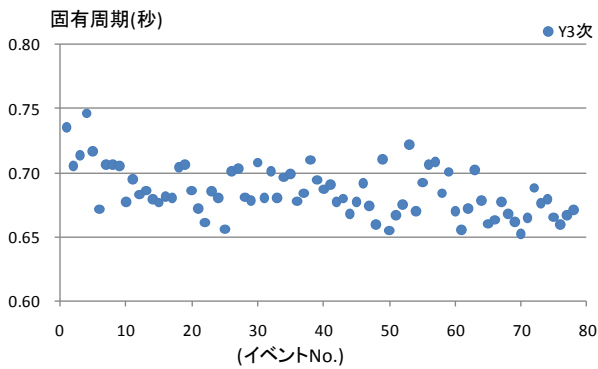
図 5.2.2-1(1) 観測記録より算定した固有周期と減衰定数 (X 方向, 横軸イベント)



(1) Y方向1次

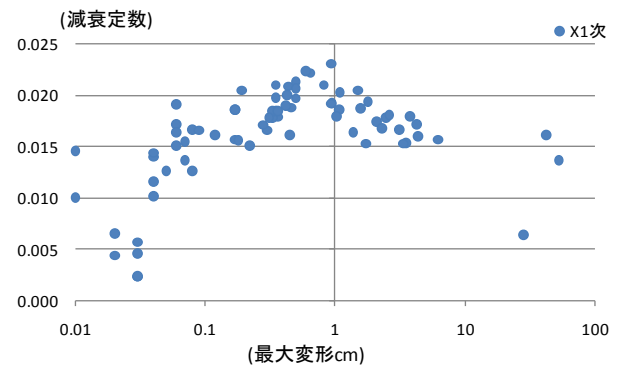
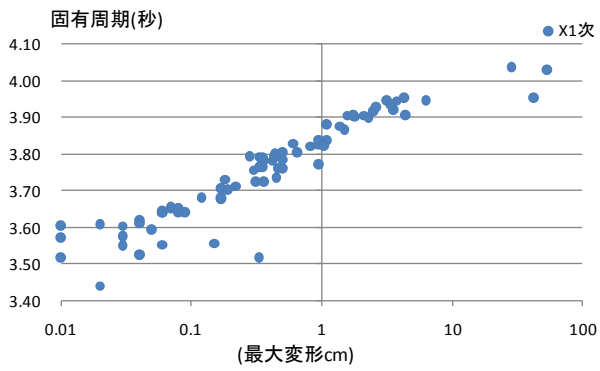


(2) Y方向2次

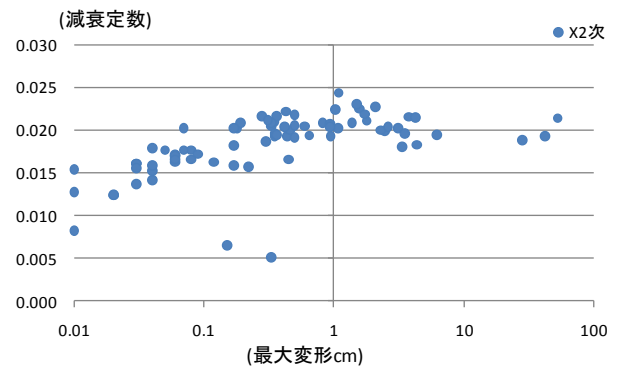
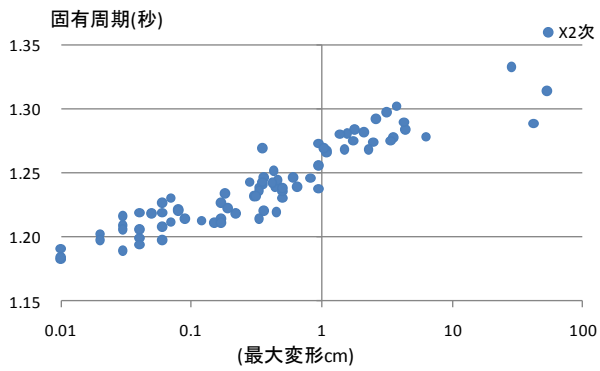


(3) Y方向3次

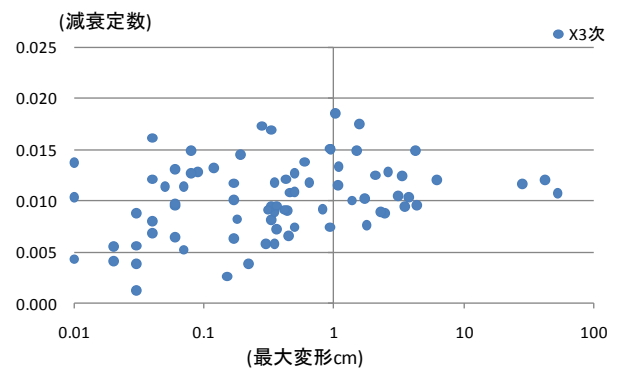
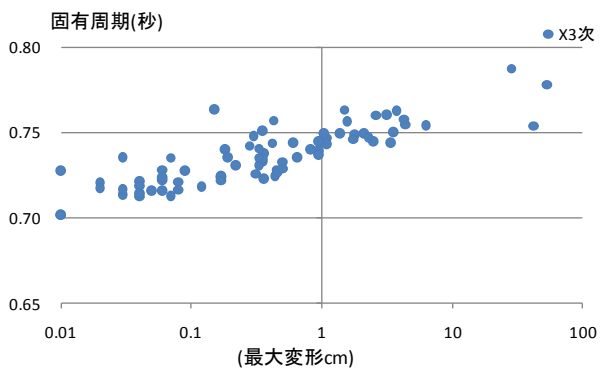
図 5. 2. 2-1 (2) 観測記録より算定した固有周期と減衰定数 (Y方向, 横軸イベント)



(1) X方向1次

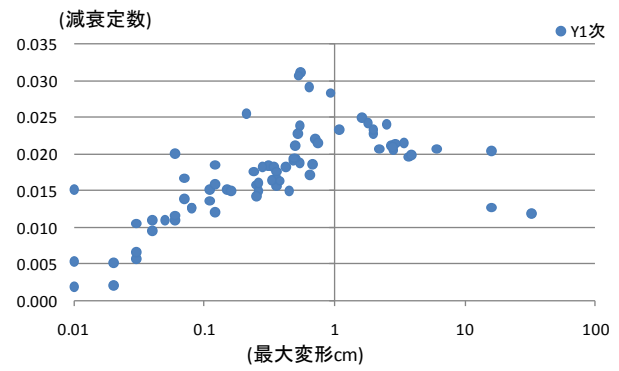
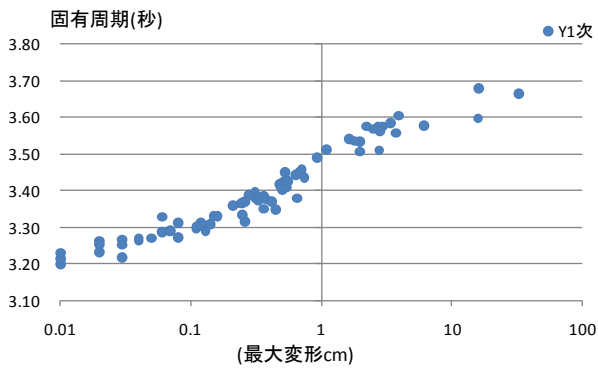


(2) X方向2次

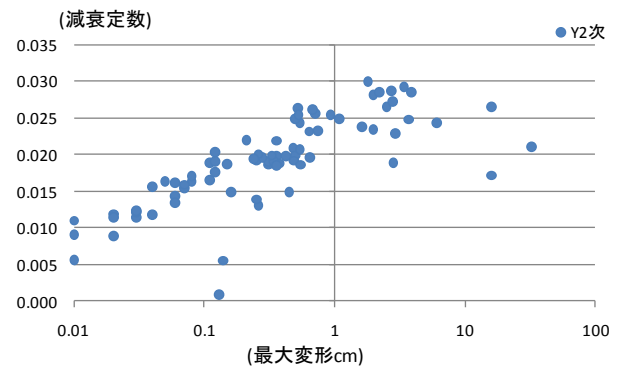
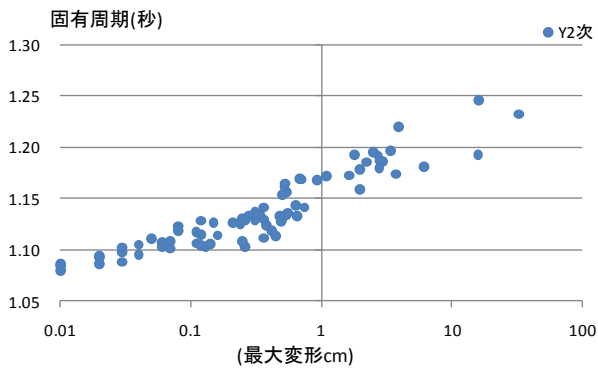


(3) X方向3次

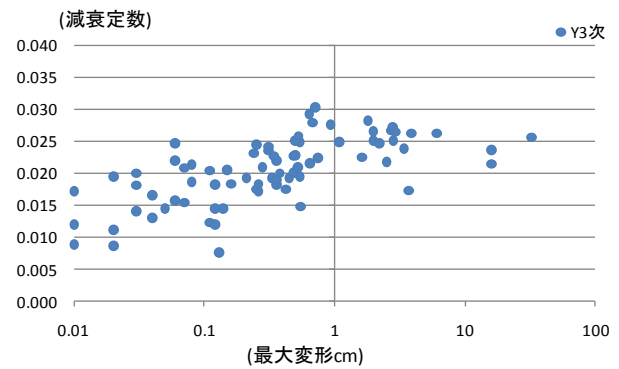
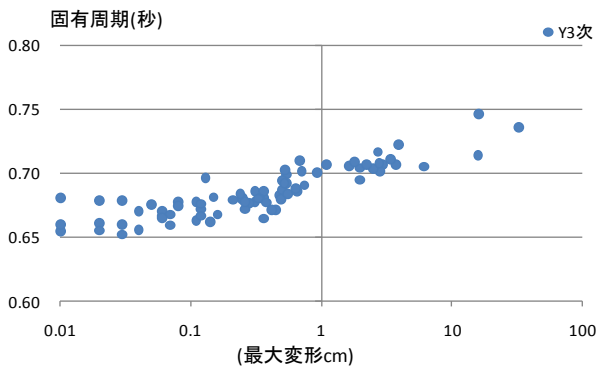
図 5. 2. 2-2(1) 観測記録より算定した固有周期と減衰定数 (X方向, 横軸最大変形)



(1) Y方向1次



(2) Y方向2次



(3) Y方向3次

図 5. 2. 2-2(2) 観測記録より算定した固有周期と減衰定数 (Y方向, 横軸最大変形)

(3) 建物の地震応答解析

(2) で評価した、各次の固有周期、減衰定数、刺激関数を用いて、時刻歴モーダル解析を実施し、本震時および余震時の各階の層間変形角や加速度を算定する。この時、入力地震動としては、B4 階で観測された加速度波形を用いる。

(3) -1 本震時の時刻歴モーダル解析と観測結果の比較

表 5.2.2-3 に示すパラメータを用い、各方向 1 次から 3 次を考慮した時刻歴モーダル解析を行う。設定したパラメータは、2 で評価した固有周期及び減衰定数とし、刺激関数についてはばらつきが大きく評価されていることを考慮し、設計モデルの刺激関数を用いることとした。

表 5.2.2-3 本震時の時刻歴モーダル解析諸元

	X 方向			Y 方向		
	1 次	2 次	3 次	1 次	2 次	3 次
固有周期 (秒)	4.03	1.31	0.78	3.67	1.23	0.74
減衰定数 (%)	1.4	2.1	1.1	1.2	2.1	2.6
33FL 刺激関数	1.34	-0.49	0.17	1.35	-0.51	0.18
15FL 刺激関数	0.63	0.49	0.14	0.61	0.49	0.14

表 5.2.2-3 に示すパラメータを用いて解析した結果と、観測時刻歴を重ね描いて示す。

図 5.2.2-3(1) 時刻歴モーダル解析と観測時刻歴の比較 (加速度, 0~600 秒)

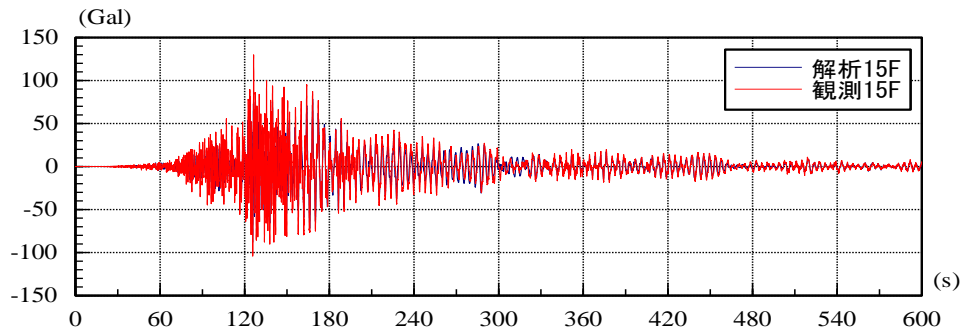
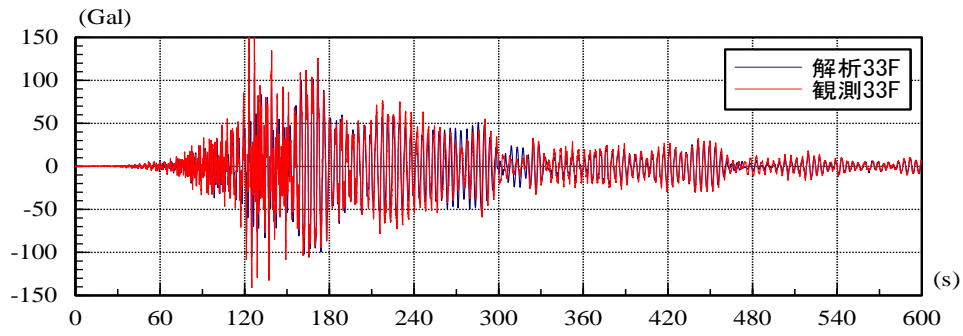
図 5.2.2-3(2) 時刻歴モーダル解析と観測時刻歴の比較 (加速度, 60~360 秒)

図 5.2.2-4(1) 時刻歴モーダル解析と観測時刻歴の比較 (B4 階からの相対変形, 0~600 秒)

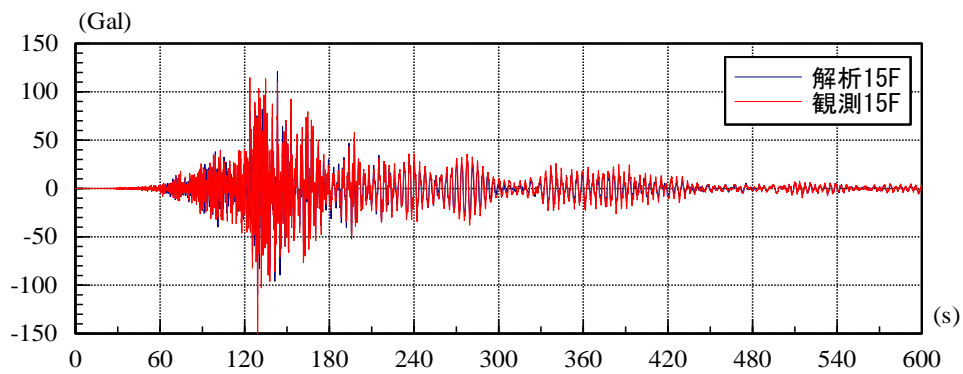
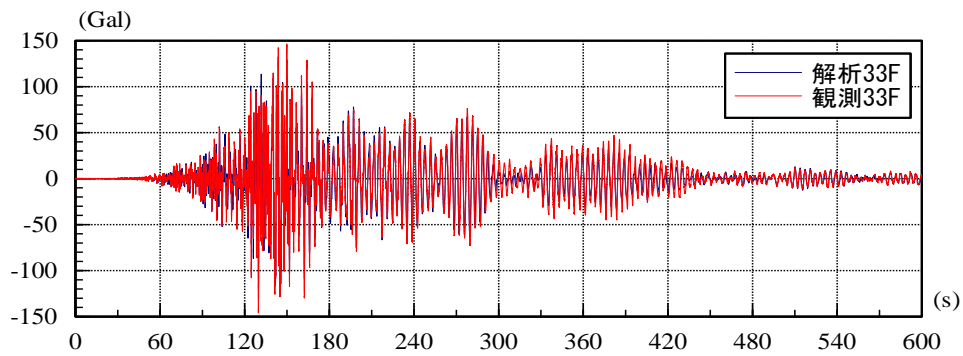
図 5.2.2-4(2) 時刻歴モーダル解析と観測時刻歴の比較 (B4 階からの相対変形, 60~360 秒)

図 5.2.2-3 及び図 5.2.2-4 より、120 秒~180 秒の短周期の加速度の大きい範囲では多少の位相のずれは見られるが、時刻歴全長を概観すると、最初に加速度が大きく、後半でゆっくりした 1 次周期の揺れが卓越する特徴をよくとらえている。相対変形ではピークで 1 割程度の差はあるものの、位相特性をよく表現できている。

以上より、時刻歴モーダル解析により、本震時の建物挙動を良好に表現できていると判断できる。

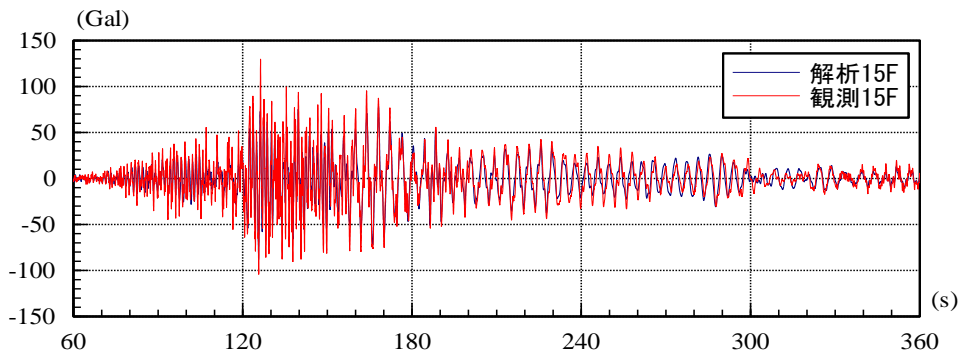
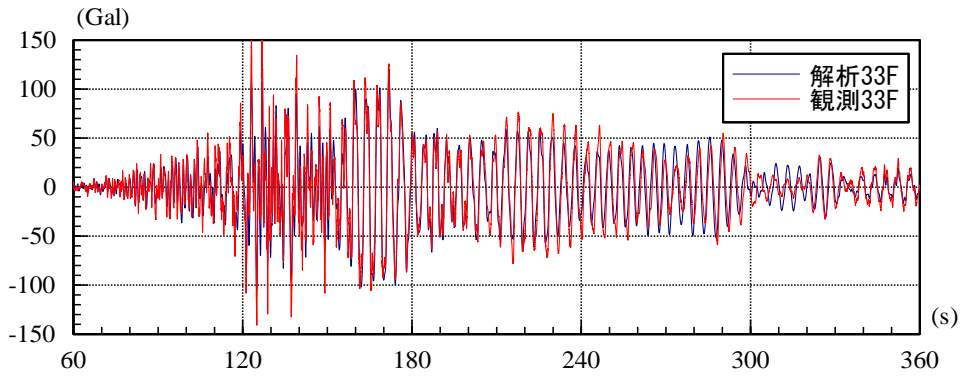


(a) X 方向

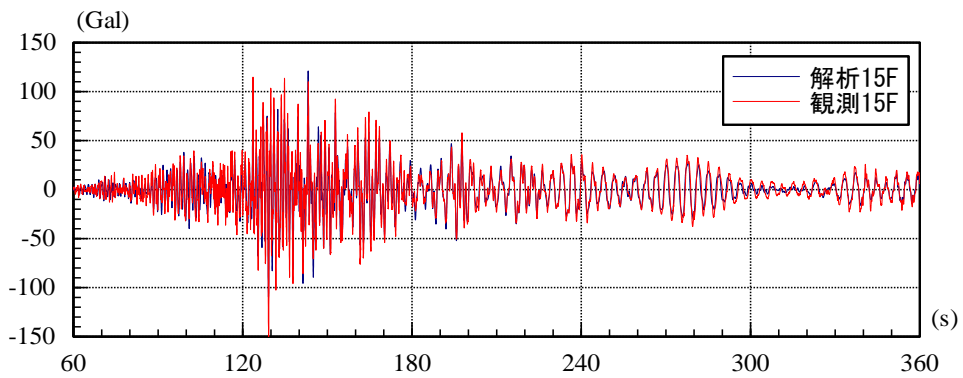
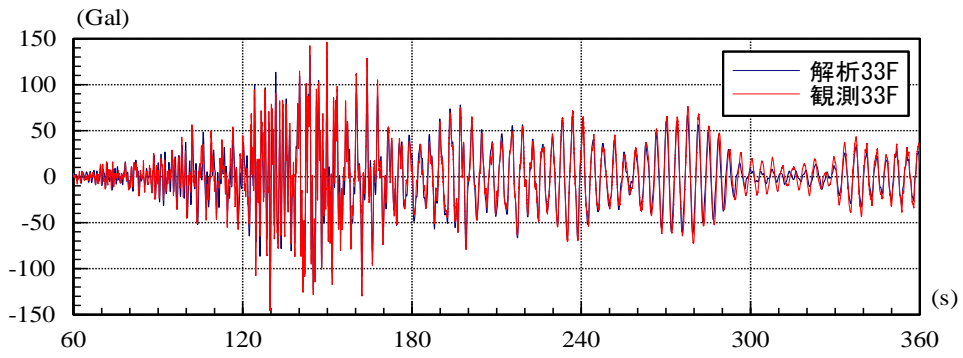


(b) Y 方向

図 5.2.2-3(1) 時刻歴モデル解析と観測時刻歴の比較 (加速度, 0~600 秒)

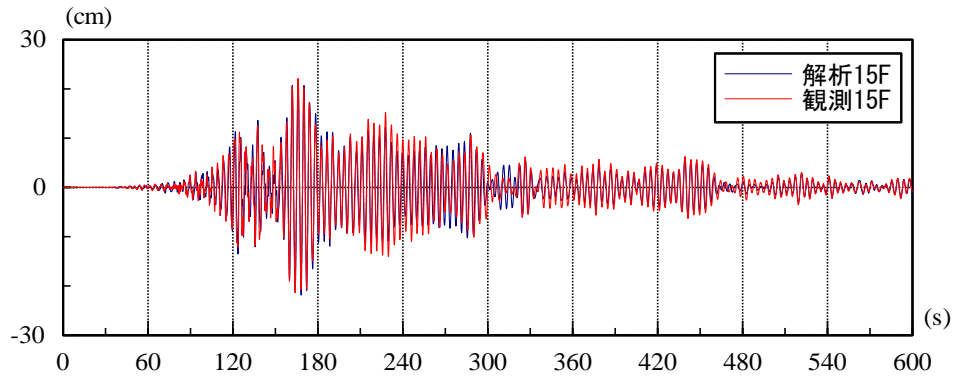
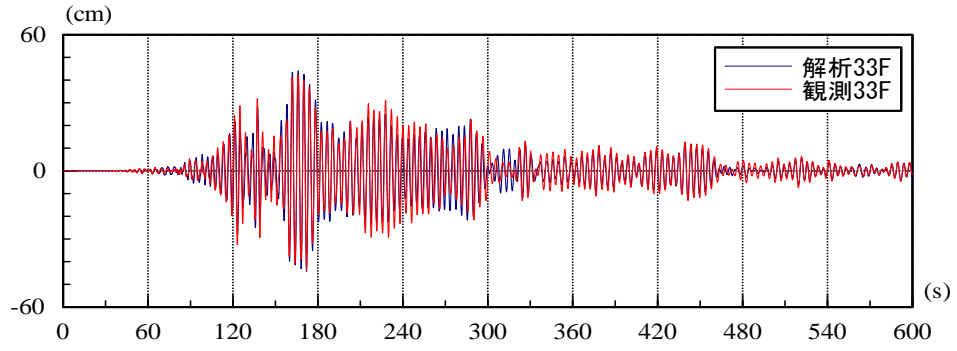


(a) X 方向

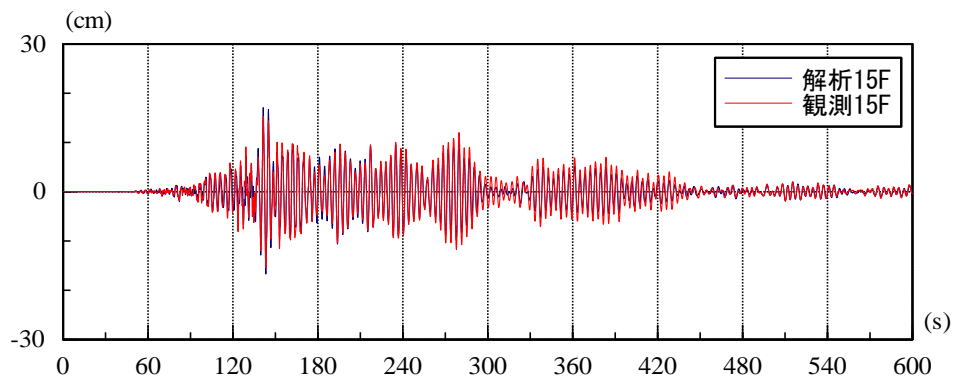
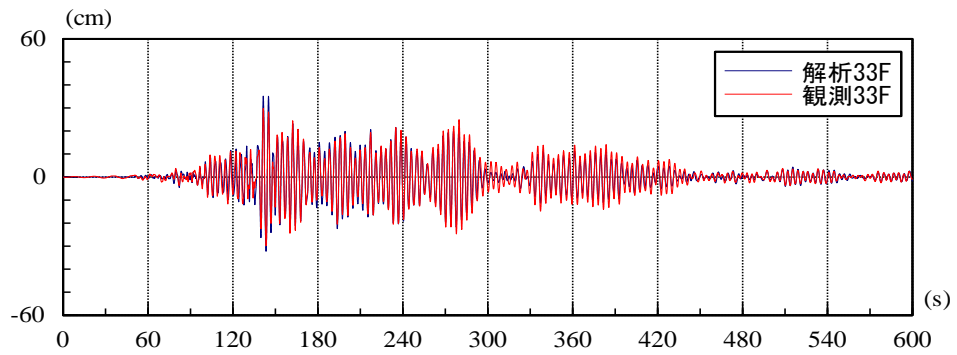


(b) Y 方向

図 5.2.2-3(2) 時刻歴モデル解析と観測時刻歴の比較 (加速度, 60~360 秒)

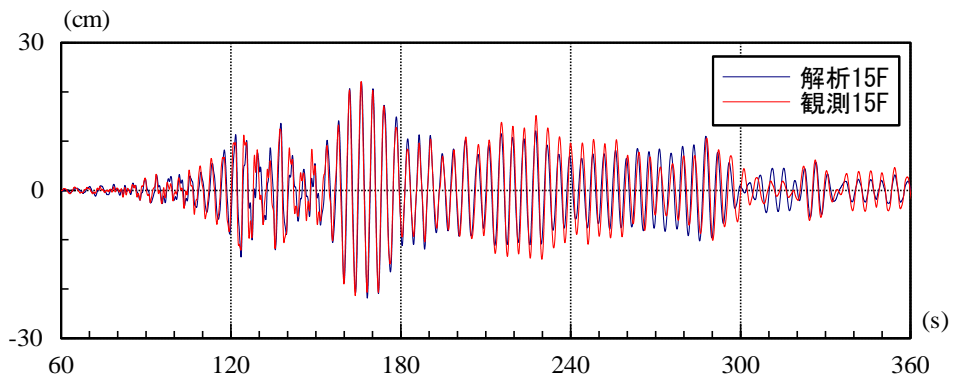
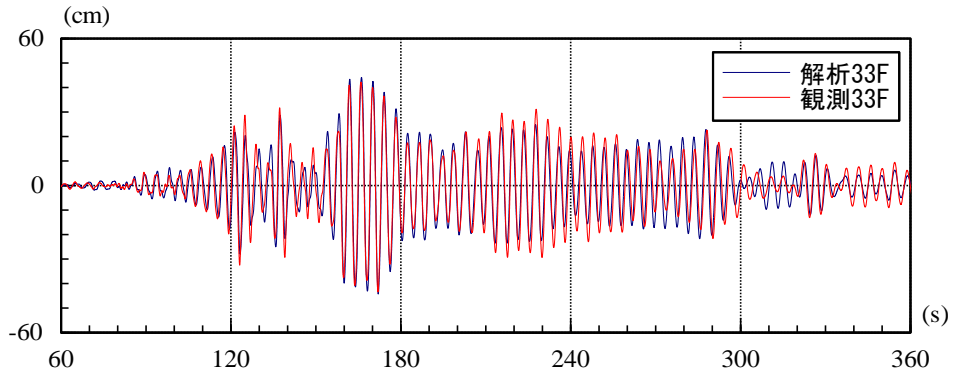


(a) X 方向

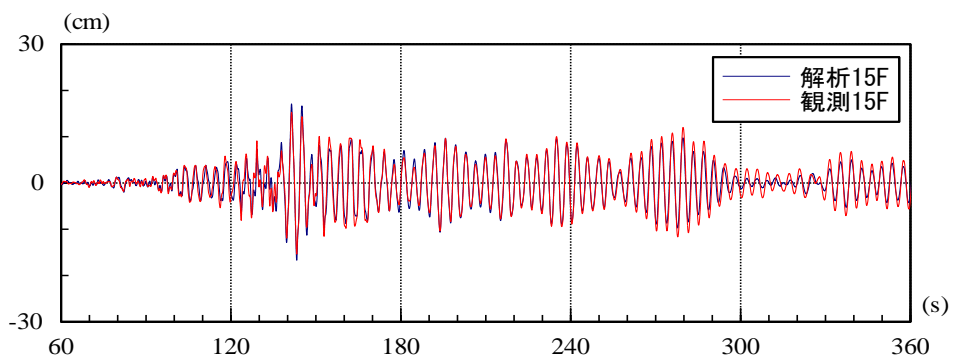
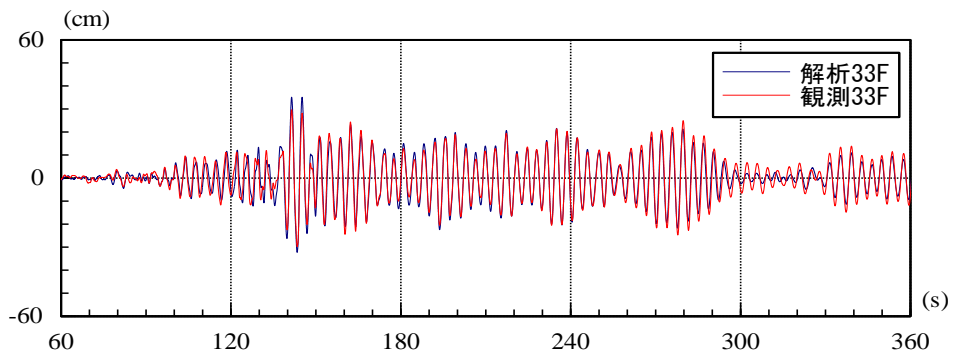


(b) Y 方向

図 5.2.2-4(1) 時刻歴モーダル解析と観測時刻歴の比較 (B4 階からの相対変形, 0~600 秒)



(a) X 方向



(b) Y 方向

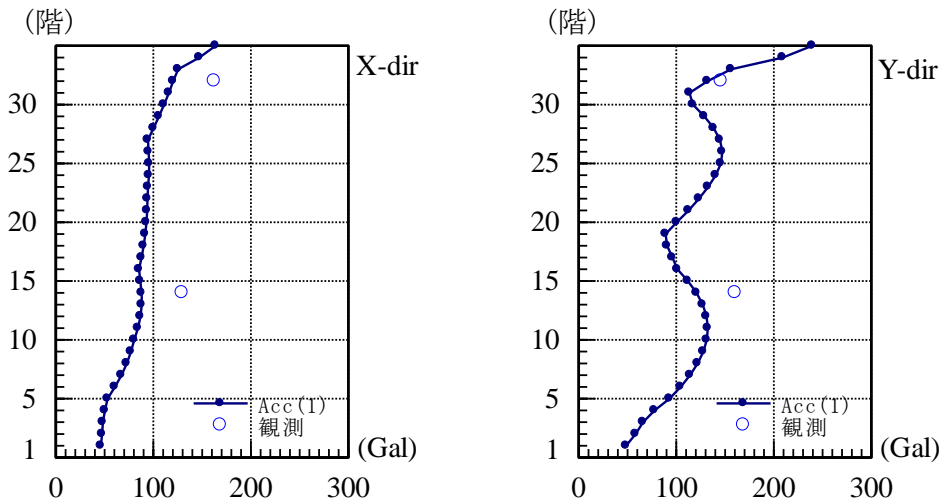
図 5. 2. 2-4 (2) 時刻歴モーダル解析と観測時刻歴の比較 (B4 階からの相対変形, 60~360 秒)

(3) -2 時刻歴モーダル解析による最大加速度分布と最大層間変形角分布

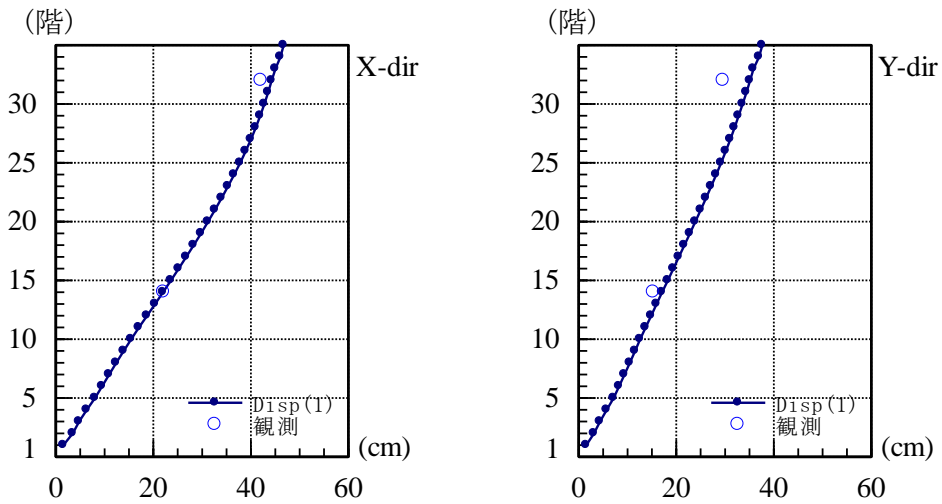
表 5.2.2-1 に示す(1)～(4)の地震について、時刻歴モーダル解析により最大加速度分布と層間変形角分布を算定する。ここでは、各階の応答を算定する場合に、設計モデルの刺激関数を用いる。その他のパラメータとしては、表 5.2.2-3 に示す、地震毎に算定した固有周期、減衰定数を用いる。固有周期と減衰定数を表 5.2.2-4 に抜粋して再掲する。

表 5.2.2-4 時刻歴モーダル解析のパラメータ

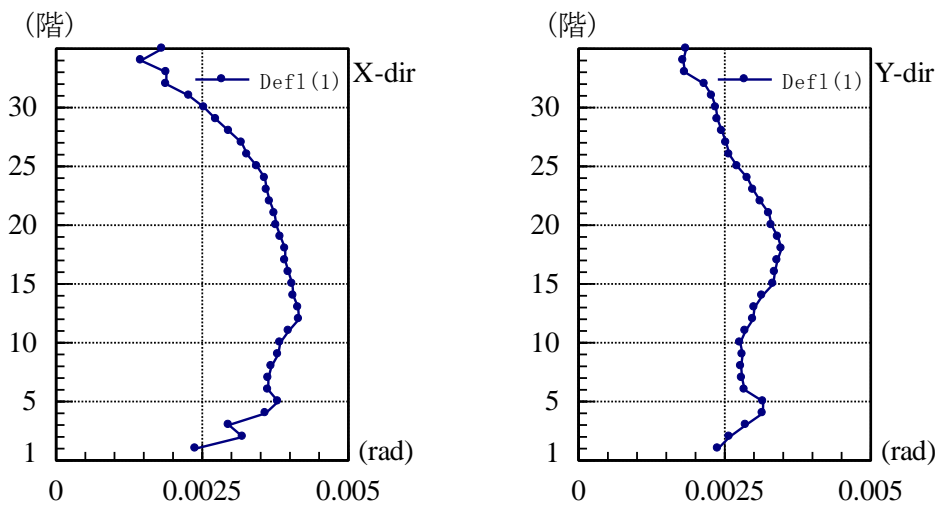
		X 方向			Y 方向		
		1 次	2 次	3 次	1 次	2 次	3 次
(1) 本震	固有周期 (秒)	4.03	1.31	0.78	3.67	1.23	0.74
	減衰定数 (%)	1.4	2.1	1.1	1.2	2.1	2.6
(2) 茨城県沖の 地震 (最大余震)	固有周期 (秒)	3.95	1.29	0.75	3.60	1.19	0.71
	減衰定数 (%)	1.6	1.9	1.2	2.0	2.7	2.4
(3) 長野県・新 潟県県境付近 の地震	固有周期 (秒)	3.91	1.28	0.75	3.56	1.17	0.71
	減衰定数 (%)	1.6	1.8	1.0	2.0	2.5	1.7
(4) 福島県浜通 りの地震	固有周期 (秒)	3.94	1.30	0.76	3.60	1.22	0.72
	減衰定数 (%)	1.8	2.2	1.0	2.0	2.9	2.6



(a) 最大加速度分布

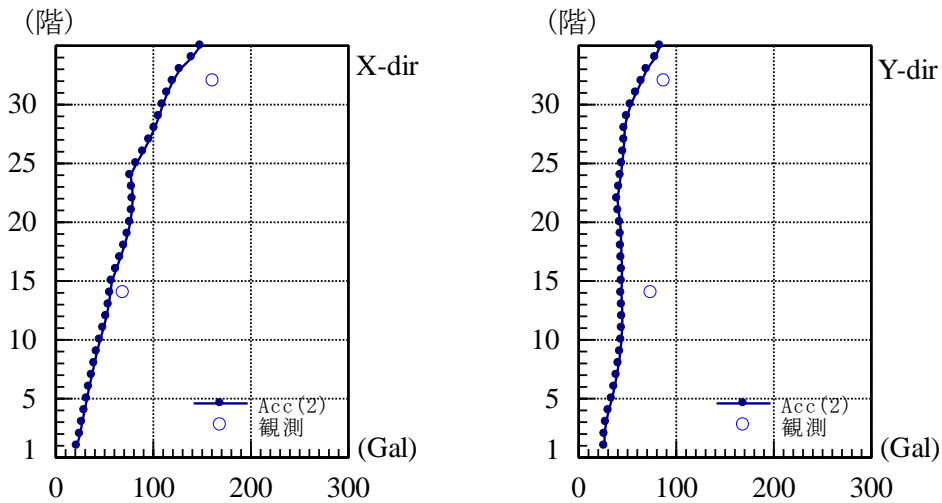


(b) 最大水平変形

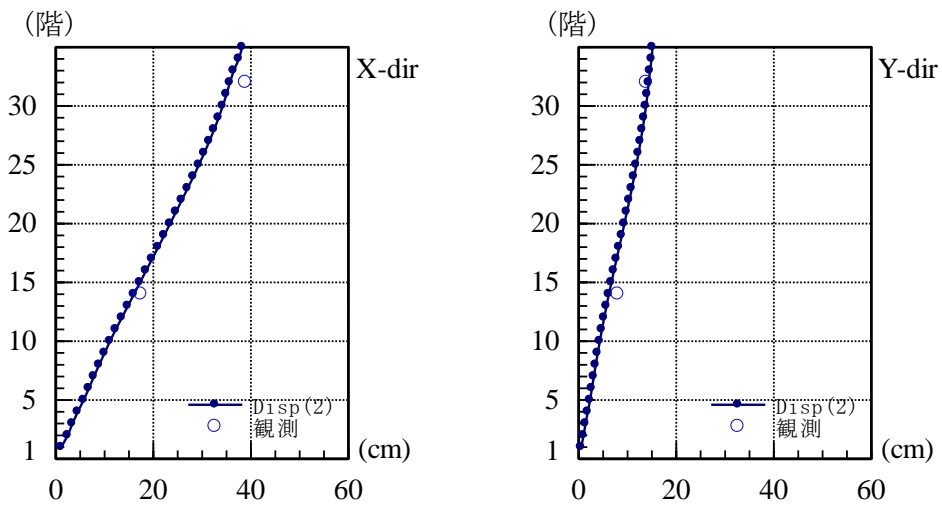


(c) 最大層間変形角

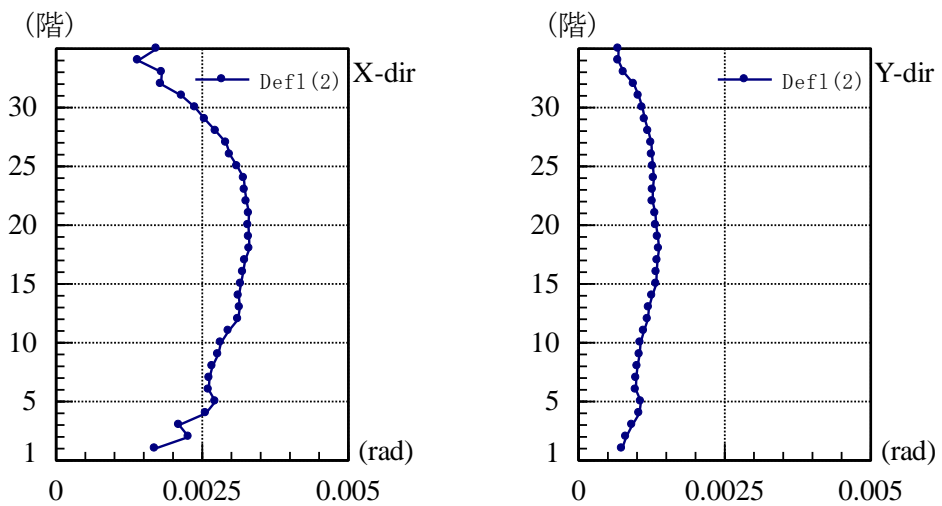
図 5.2.2-5 時刻歴モデル解析による応答最大値分布
(1)本震



(a) 最大加速度分布

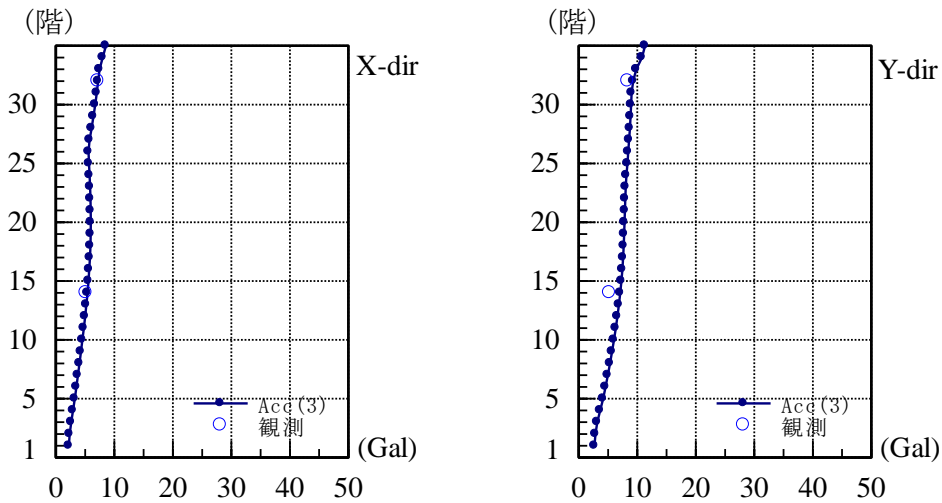


(b) 最大水平変形

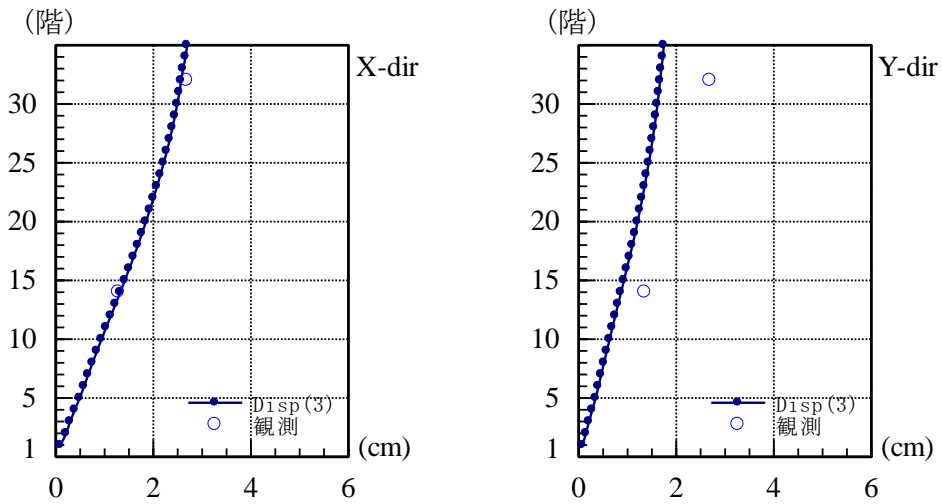


(c) 最大層間変形角

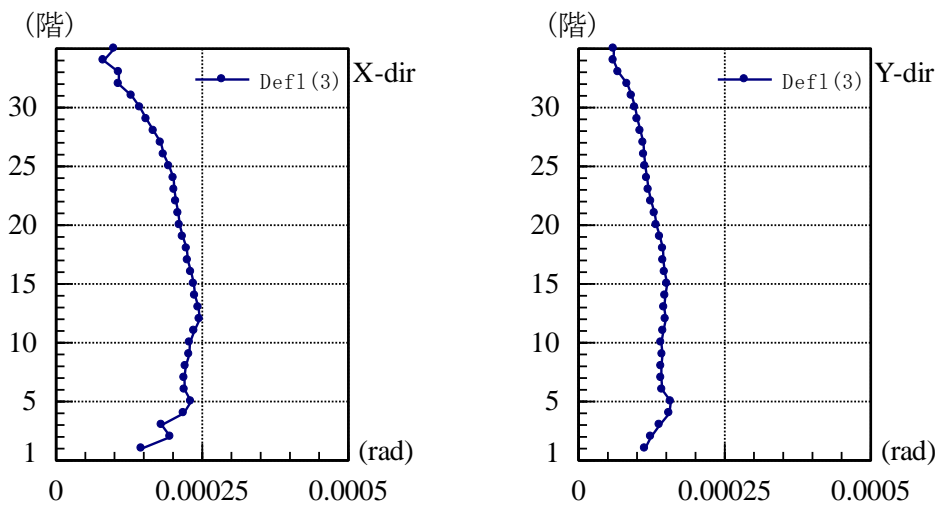
図 5.2.2-6 時刻歴モデル解析による応答最大値分布
(2) 茨城県沖の地震(最大余震)



(a) 最大加速度分布

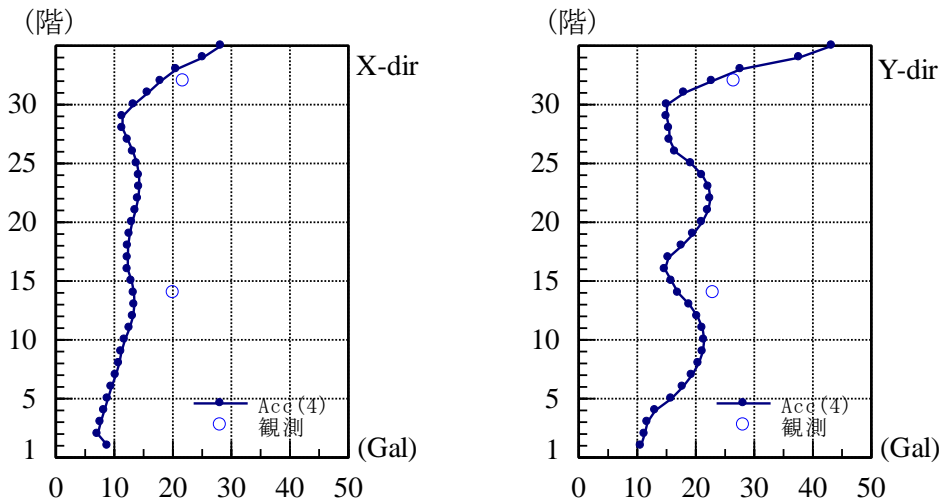


(b) 最大水平変形

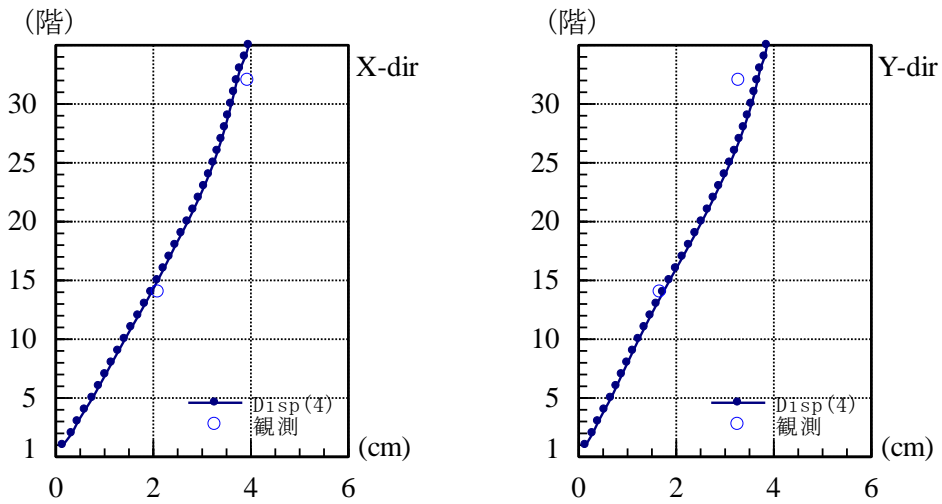


(c) 最大層間変形角

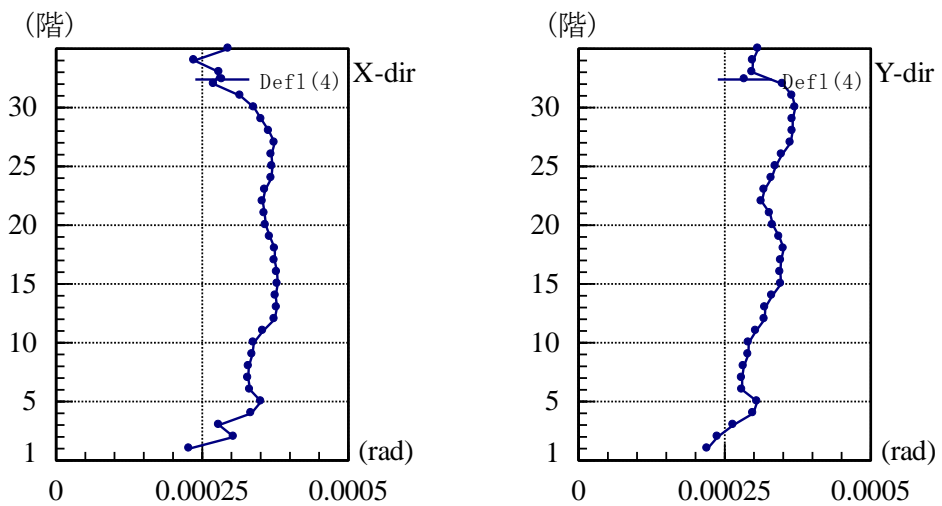
図 5.2.2-7 時刻歴モーダル解析による応答最大値分布
((3) 長野県新潟県県境付近の地震)



(a) 最大加速度分布



(b) 最大水平変形



(c) 最大層間変形角

図 5.2.2-8 時刻歴モーダル解析による応答最大値分布
((4) 福島県浜通りの地震)

(4) 入力損失及び表層地盤増幅の影響評価

(3) と同じ応答解析モデルで、入力地震動を自由地表面で観測された加速度波形とした場合の応答解析を実施し、入力損失が超高層建物の応答に及ぼす影響を把握する。ここでは代表例として、(1)本震について検討する。

(4) -1 建物内と地表面の観測記録の比較

図 5.2.2-9 に、建物内 (B4F) 観測記録と地表面 (GROUND) 観測記録による応答スペクトルを比較して示す。この時、減衰定数は 2% とした。図より、建物の 1 次固有周期近傍では、建物内と地表面の差がほとんどないが、2 次以上の高次の固有周期近傍では両者の差が明瞭に現れる。

この原因は、第一に①剛な建物基礎に地震動が入力する際の入力損失が考えられる。また、②基盤 (B4 階観測点 (地下最下階)、基礎は基盤位置に直接支持) から地表面までの表層の増幅も考えられるが、ここで得られた観測記録からはそれらを分けて評価することは困難である。

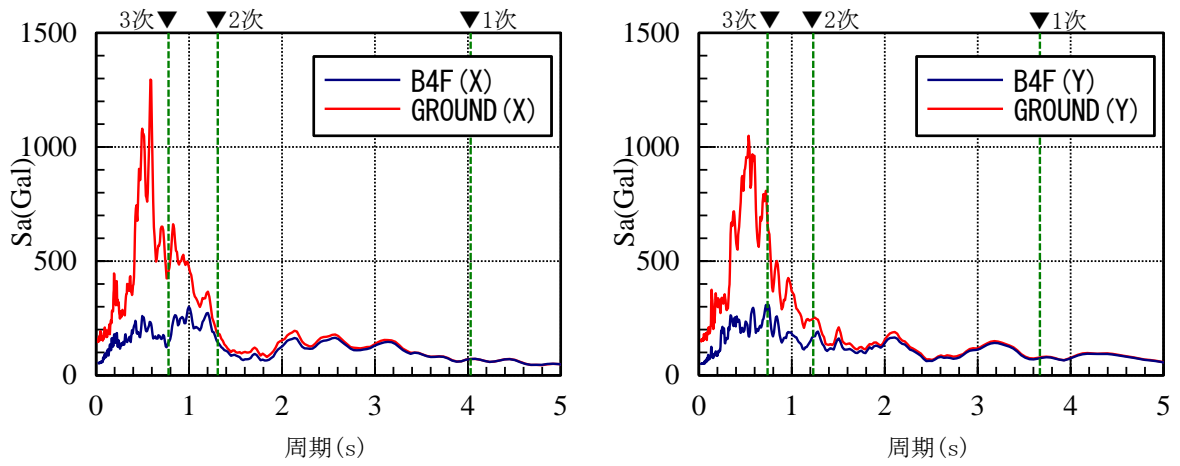
(4) -2 地表面の観測記録を用いた時刻歴モーダル解析

図 5.2.2-10 に、地表面 (GROUND) 観測記録による時刻歴モーダル解析結果を示す。ここで用いるパラメータは表 5.2.2-4 に示す(1)本震のケースと同一とする。図には、B4 階観測記録を用いたモーダル解析結果 (図 5.2.2-5 を再掲) もあわせて示す。

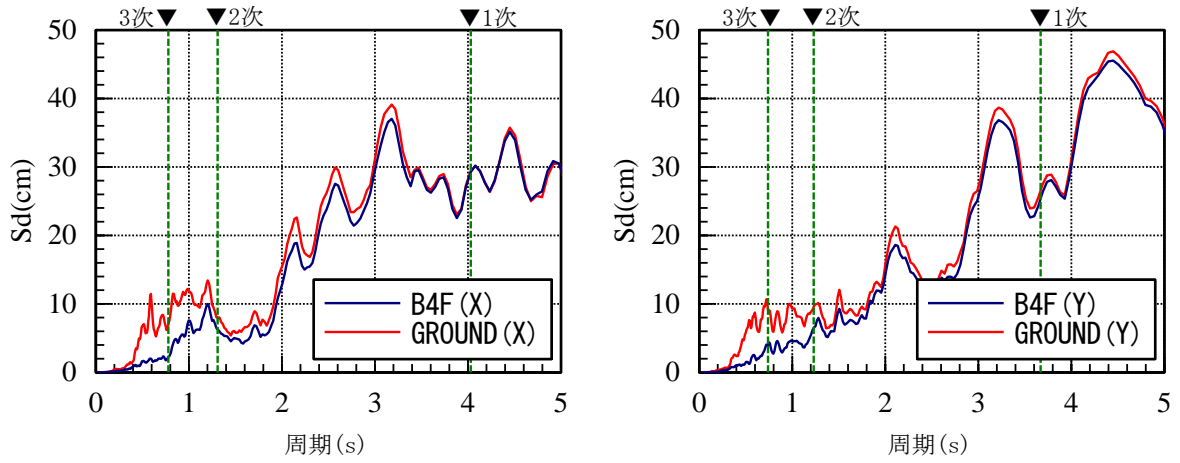
これより、高次振動の影響の大きい最大加速度は、両者で明らかに大きさが異なり、地表面観測記録によるものの方が大きい。1 次振動の影響の大きい最大水平変形及び層間変形角は、加速度ほどその違いは大きくはないが、層間変形角では最大部分で 2 割程度の差が生じている。

次に、設計で用いられる 1 次固有周期に対して 2% の内部粘性減衰を設定した場合の解析を試みた。その検討結果を図 5.2.2-11 に示す。ここで用いる固有周期は表 5.2.2-4 に示す(1)本震のケースと同一とする。図には、B4 階観測記録及び観測記録より得られた固有周期及び減衰定数を用いたモーダル解析結果 (図 5.2.2-5 を再掲) もあわせて示す。

これより、今回の検討ケースでは、地表面観測記録による地震応答解析にあたっては、1 次固有周期に対して 2% となる内部粘性減衰を設定すれば、方向により多少の大小はあるものの、概ね建物の最大応答値を表現できていることがわかる。

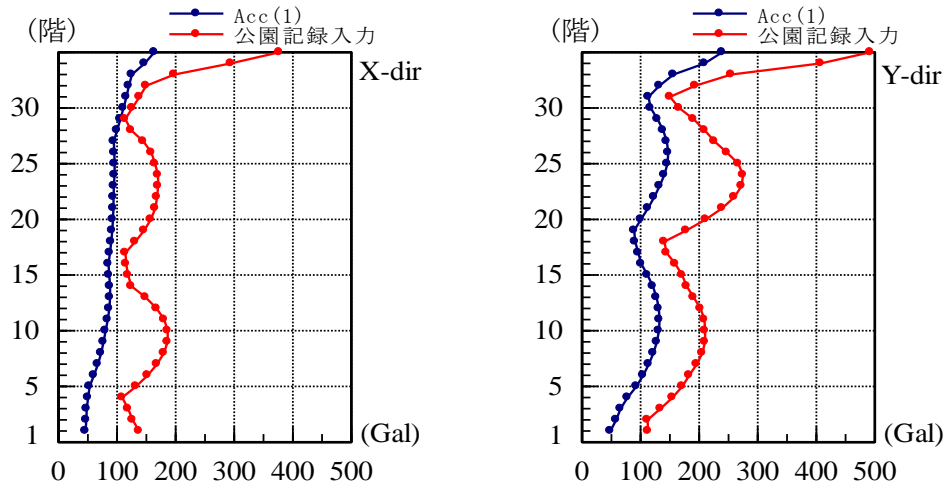


(a) 加速度応答スペクトル (h=0.02)

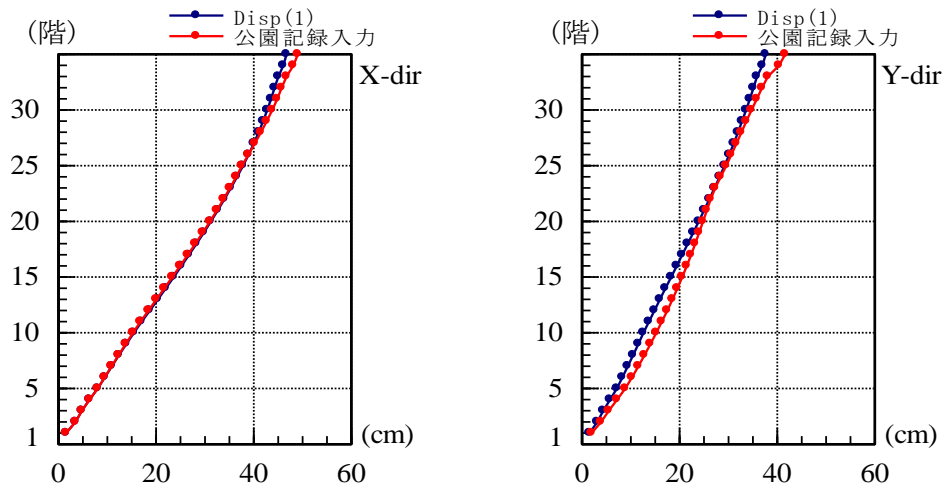


(b) 変位応答スペクトル (h=0.02)

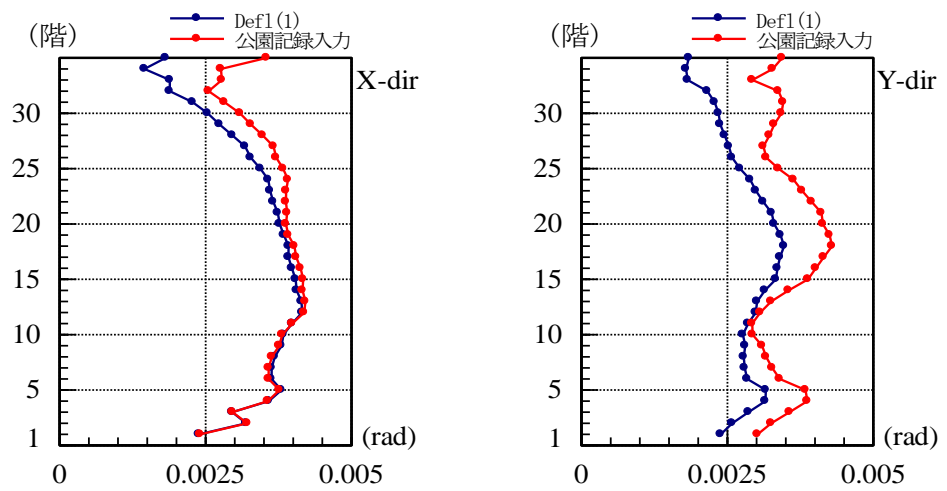
図 5.2.2-9 建物内 (B4F) 観測記録と地表面 (GROUND) 観測記録の比較



(a) 最大加速度分布

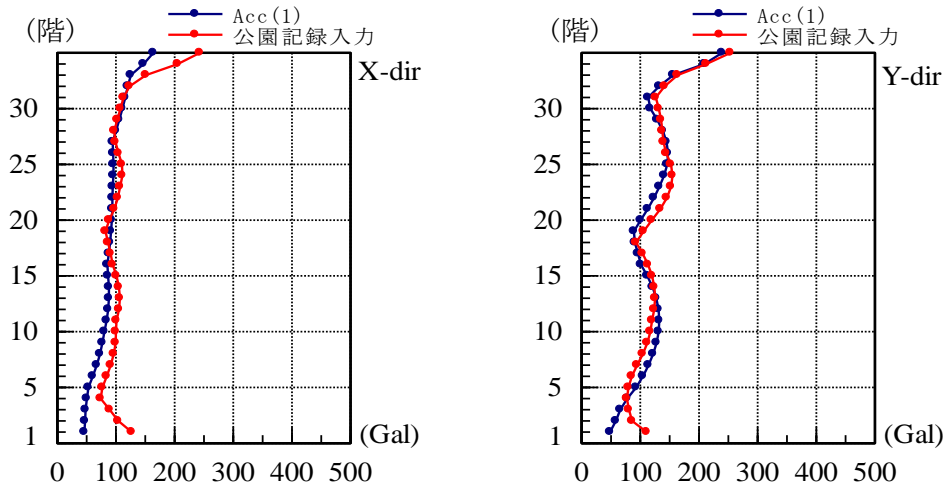


(b) 最大水平変形

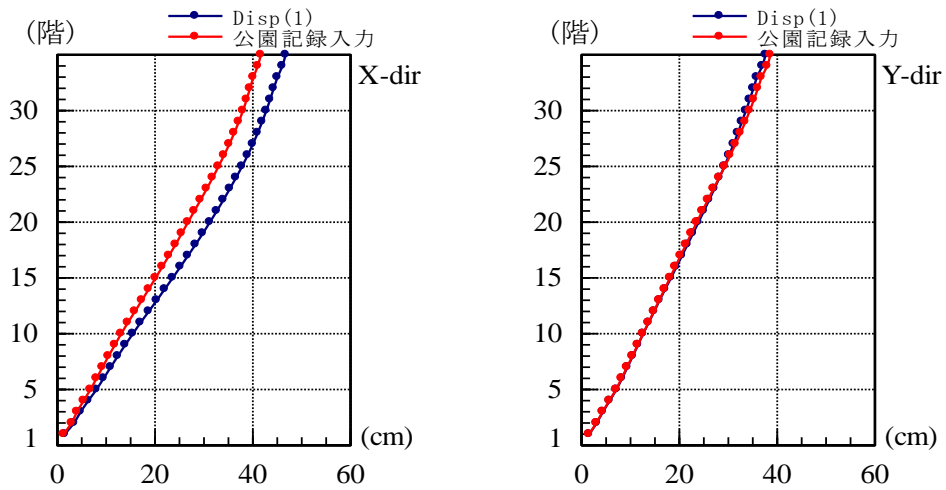


(c) 最大層間変形角

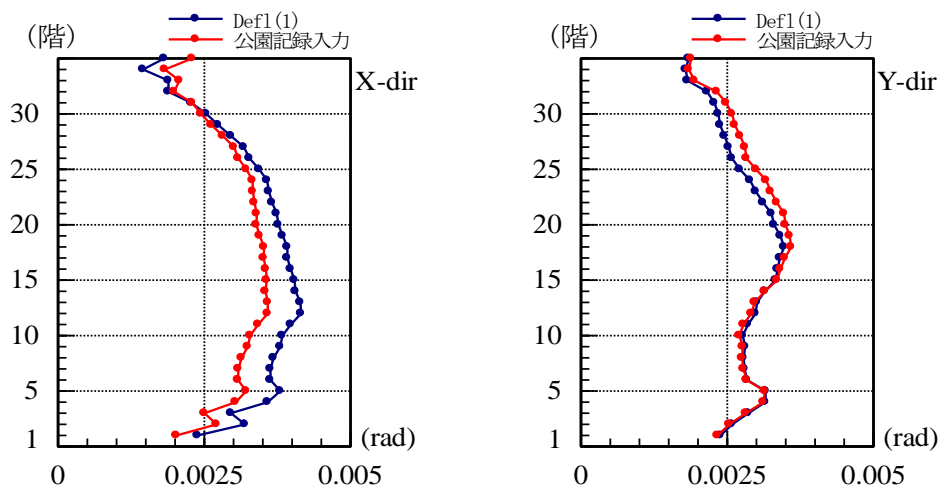
図 5.2-2-10 時刻歴モーダル解析による応答最大値分布
 ((1)本震, 公園(地表面観測)記録による時刻歴モーダル解析結果との比較)



(a) 最大加速度分布



(b) 最大水平変形



(c) 最大層間変形角

図 5.2.2-11 時刻歴モーダル解析による応答最大値分布

((1)本震, 公園(地表面観測)記録を用いた1次に対して2%内部粘性減衰の検討,
建物内観測記録による時刻歴モーダル解析結果との比較)

(5) 観測地震動のエネルギーに関する検討

東北地方太平洋沖地震の本震で観測された建物基礎観測記録について、エネルギーの観点で検討する。ここでは建物基礎観測記録及び告示波の応答スペクトルとエネルギースペクトルを比較する。観測記録については、2秒以上の周期で概ねフラットな特性を有するものと想定し、2秒～8秒の平均 pSv ($h=5\%$) を算定した。その結果 32cm/s と算定されたため、告示波については 0.64 秒以上の速度一定領域で概ね 32cm/s となるように、極稀に発生する地震動のスペクトルを $1/2.5$ 倍に規準化して図 5.2.2-12 に比較する。2秒以上については概ね同程度のスペクトルレベルである。あわせて図 5.2.2-13 には両者のエネルギースペクトルを比較して示す。応答スペクトルレベルを揃えた2秒以上の周期帯について、観測記録は告示波と比較してエネルギースペクトルが 1.5 倍程度大きいことがわかる。

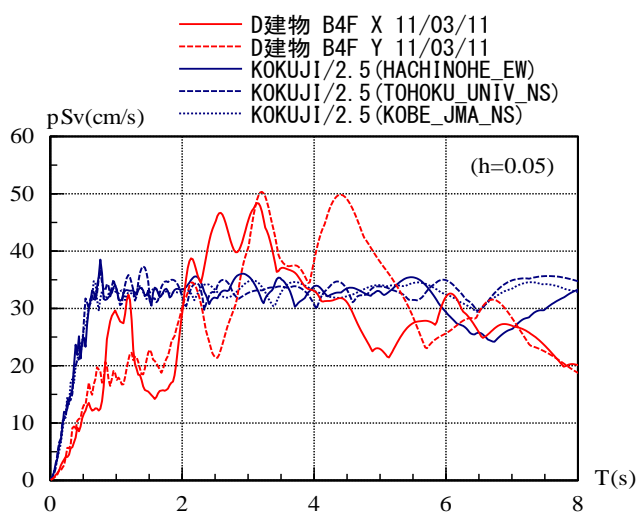


図 5.2.2-12 観測記録と最大応答レベルを揃えた告示波の比較 (擬似速度応答スペクトル)

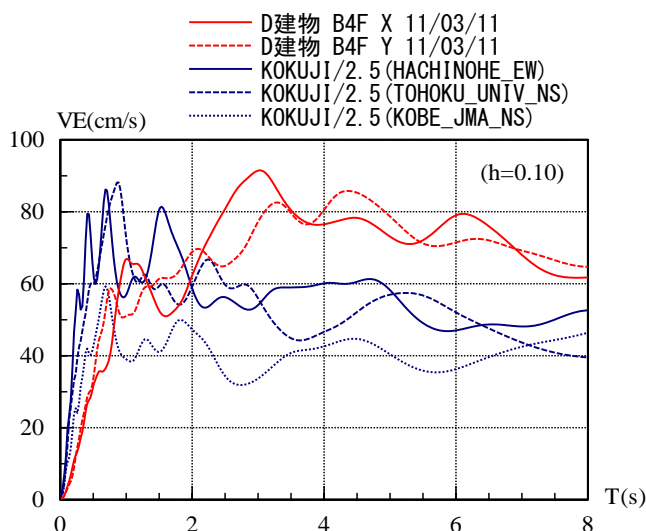


図 5.2.2-13 観測記録と最大応答レベルを揃えた告示波の比較 (エネルギースペクトル)

5.2.3 東日本大震災による S 造高層建築物の挙動の調査 (H24 実施分)

(1) はじめに

ここでは、2011 年東北地方太平洋沖地震において、強震記録が観測された超高層鉄骨造建物を対象にして、建物で観測された加速度記録を入力地震動とした地震応答解析を行う。ここでの応答解析で用いる解析モデルは、建設時の評定等で用いられたものと概ね同様である。これらの解析モデルを用いた地震応答解析から得られる応答結果が、実際の強震観測記録とどの程度整合しているか明らかにすることは重要と考えられる。そこで、これらの応答解析から得られる加速度と建物上部で実際に観測された加速度記録を比較して、解析モデルの妥当性や減衰定数が建物応答に及ぼす影響等を明らかにする。

また、今回の地震では、東北地方から関東、近畿地方にかけての広範囲で超高層建築物が応答した可能性が有り、それらの建物応答がどの程度であったかを推定するために、今回強震観測が行われた超高層鉄骨造建築物の各層の最大層間変形角や塑性率等明らかにして、層が降伏するレベルに至っているかどうかや、ダンパーが降伏するレベルを超えているかどうか、また、どの地域の建築物で応答が大きくなっているか等を明らかにする。

(2) 解析対象建物と解析方法

1) 検討対象の超高層鉄骨造建物の概要

検討対象とした建物は、(独)建築研究所が強震観測を実施している建物のうちの、2011 年東北地方太平洋沖地震において強震記録が観察され、地震応答解析のモデル化の情報が入手できた超高層鉄骨造建築物 8 棟と国土交通省の建築基準整備促進事業において、平成 22 年度に地震計を設置し、現在も観測を実施している建物 1 棟で、合計 9 棟ある。これらの解析対象建物の、所在地、建物階数、竣工年、構造形式、地震観測した階を、表 5.2.3-1 に示す。これらのうち建物 c が、建築基準整備促進事業で地震計を設置した建物であり、それ以外の 8 棟は、建築研究所が強震観測を実施している建物である。建築研究所で観測したこれらの建物の振動特性や応答解析結果の詳細は、文献 5.2.3-1) に詳しく記述しているので、そちらを参照されたい。本報では、それらの概要を述べる。

建物の所在地は、宮城県から大阪府までの範囲である。建物階数としては 15 階から 52 階の範囲である。竣工年は 1973 年～2000 年の範囲となっている。これらの建物の構造形式は、設計が 1990 年代の前半以前の建物では、純ラーメン構造や偏心 K 型ブレース付きラーメン構造、等となっているが、比較的新しい建物である建物 b と c では、制振ダンパー付きの構造である。表中にそれぞれの建物の地震観測を行った階を示している。建物の地下階または 1 階、中間階、上層階において、X, Y, 上下方向の加速度を観測している。また、建物に隣接する別棟の 1 階で観測を行っている建物もある。

表 5.2.3-1 解析対象建物

建物名称	所在地	建物階数	竣工年	構造形式	地震観測の階
建物 a	宮城県	地上 15 階 塔屋 2 階	1973	X, Y 方向：鉄骨ラーメン構造	15F, B2F
建物 b	埼玉県	地上 26 階 塔屋 2 階	2000	X, Y 方向：極軟鋼制振壁付き鉄骨ラーメン構造	PH1F, 10F, B3F, 別棟 1F
建物 c	東京都	地上 33 階 棟屋 1 階	2007	X, Y 方向：座屈拘束ブレース付き鉄骨ラーメン構造（CFT 柱）	32F, 16F, B2F, 別棟 1F
建物 d	東京都	地上 19 階 塔屋 1 階	1990	X 方向：鉄骨ラーメン構造 Y 方向：偏心 K 型ブレース付き鉄骨ラーメン構造	PH1F, 8F, B1F
建物 e	東京都	地上 20 階 塔屋 1 階	1994	X 方向：鉄骨ラーメン構造 Y 方向：偏心 K 型ブレース付き鉄骨ラーメン構造	20F, 1F
建物 f	東京都	地上 20 階 塔屋 1 階	1994	X 方向：鉄骨ラーメン構造 Y 方向：偏心 K 型ブレース付き鉄骨ラーメン構造	19F, 1F
建物 g	神奈川県	地上 23 階 塔屋 1 階	1996	X, Y 方向：偏心 K 型ブレース付き鉄骨ラーメン構造	23F, B2F
建物 h	大阪府	地上 15 階 塔屋 3 階	1974	X, Y 方向：ブレース付き鉄骨ラーメン構造	PH3F, B3F
建物 i	大阪府	地上 52 階 塔屋 3 階	1995	X 方向：鉄骨ラーメン構造 Y 方向：ブレース付き鉄骨ラーメン構造	52F, 38F, 18F, 1F

2) 解析方法

表 5.2.3-1 に示したこれらの建物について、それぞれの建物の地下階または 1 階（または別棟 1 階）で観測された加速度記録を入力地震動とし、それぞれの建物の地下階は無視し、1 階床を基礎固定として、1 階床位置に、これらの地震波を入力して解析を行う。評定等で用いられている解析モデルは通常 1 階から上部がモデル化されている。地下階で観測された記録を 1 階の床位置に入力する解析を行なう場合には、地下階の観測での加速度記録と 1 階の床位置の加速度記録の差が問題となる可能性があるが、一般的にはこれらの差は小さいと考えられ、ここではその影響を無視している。

解析対象建築物の X, Y 方向それぞれの地震応答解析を行い、建物の中間階や上層階で観測した加速度記録の最大値とこれらの建物の地震応答解析から得られる観測を行った階の加速度の最大値を比較する。また、入力地震動として、El Centro NS の 50kine を入力地震動とした場合の応答解析についても、一部の建物で実施する。表 5.2.3-2 に、それぞれの建物で用いた入力地震動とその最大加速度、継続時間を示す。

本解析の応答解析の減衰は、減衰定数 2%の初期剛性比例型で解析を行うが、減衰の設定値が

建物の地震応答結果に及ぼす影響を明らかにするために、文献 5.2.3-1) の建物の同定解析から得られた解析対象建築物の 1 次、2 次の減衰定数を用いたレーリー型減衰の場合の応答解析も比較として行う。同定解析から得られた減衰の値は次節に示す。

表 5.2.3-2 解析モデルの設定方法

建物名称	モデル化の方法と復元力特性の設定	入力地震動 (最大加速度, 継続時間)
建物 a	オリジナルの解析モデルは、D 値法を用いて各層剛性を計算し、トリリニアの復元力特性が設定され、2 次剛性、3 次剛性は、初期剛性の 10%、1% で設定、X、Y 方向は同一の解析モデル。本解析もそれと同じモデルで解析。	B2F-X(259.0cm/s ² , 301 秒) B2F-Y(163.3cm/s ² , 301 秒)
建物 b	オリジナルの解析モデルは、増分解析から得られた各層の層せん断力-変形関係から、制振壁ダンパーと柱梁フレームを組み合わせたトリリニア型復元力特性の質点系の等価せん断型モデル。本解析では、このトリリニアの復元力特性を、ダンパーは完全弾塑性型、フレームはバイリニア型に分離し、2 つのバネの組み合わせたモデルにより質点系の等価せん断型モデルで解析。	B3F-X(73.6cm/s ² , 599 秒) B3F-Y(62.6cm/s ² , 599 秒) 別棟 1F-X(90.9cm/s ² , 400 秒) 別棟 1F-Y(89.4cm/s ² , 400 秒) El Centoro NS 50kine (511cm/s ² , 53.7 秒)
建物 c	オリジナルの解析モデルは、増分解析から得られた各層の層せん断力-変形関係から、トリリニア型復元力特性の質点系の等価せん断型モデル (X 方向は曲げバネも考慮)。本解析では、このトリリニアの復元力特性を、ダンパーは完全弾塑性型、フレームはバイリニア型に分離し、2 つのバネの組み合わせたモデルにより質点系の等価せん断型モデルで Y 方向のみ解析。	B2F-X (66.6cm/s ² , 600 秒) B2F-Y (52.2cm/s ² , 600 秒)
建物 d	オリジナルの解析モデルは、増分解析から得られた各層の層せん断力-変形関係から、トリリニア型の復元力特性を設定した質点系の等価せん断型モデル。本解析もそれと同じモデルで解析。	B1F-X(69.0cm/s ² , 300 秒) B1F-Y(66.2cm/s ² , 300 秒)
建物 e	建物 E と建物 F はツインタワーであり、オリジナルの解析モデルは、各層をトリリニア型復元力特性とした質点系の擬似立体モデル。本解析では、ツインタワーを分離し、それぞれの建物をトリリニア型復元力特性の等価せん断型モデルで解析。	1F-X(90.8cm/s ² , 391 秒) 1F-Y(85.4cm/s ² , 391 秒)
建物 f	同上	同上
建物 g	オリジナルの解析モデルは、増分解析から得られた各層の層せん断力-変形関係から、トリリニア型の復元力特性を設定した質点系の等価せん断型モデル。本解析では X 方向のみ、それと同じモデルで解析。Y 方向は観測記録の不良により解析不可。	B2F-X(59.5cm/s ² , 511 秒)
建物 h	オリジナルの解析モデルは、バイリニアの復元力特性を設定した質点系の等価せん断型モデル。本解析もそれと同じモデルで解析。	B3F-X(10.9cm/s ² , 157 秒) B3F-Y(8.9cm/s ² , 157 秒)
建物 i	オリジナルの解析モデルは、増分解析から得られた各層の層せん断力-変形関係から、曲げ変形成分を考慮したトリリニア型復元力特性の質点系の等価せん断型モデル。本解析もそれと同じモデルで解析。	1F-X(33.5cm/s ² , 999 秒) 1F-Y(34.3cm/s ² , 999 秒)

3) モデル化と復元力特性の設定

本章における解析対象建築物の解析モデルと復元力特性の設定方法を表 5.2.3-2 に示す。基本的には、入手した建物情報の応答解析モデルのモデル化の方法となるべく近いモデル化を行うこととしているが、解析モデルの詳細情報がわからない場合もあるため、オリジナルの解析モデルや解析条件とは、必ずしも一致していないものもある。ほとんどの建物では、質点系の等価せん断型モデルにより、応答解析が行われているため、ここでも、同様に質点系の等価せん断モデルによる解析を行う。フレームの復元力特性はトリリニア型に置換している場合が多いが、それらのトリリニア型の第 1 折れ点の定義や第 2 折れ点の設定方法は、それぞれの建物の設計時の設定であるため、これらは必ずしも同一の定義、設定方法ではない。

(3) 解析建物の動的特性

1) 同定解析から得られた減衰定数

文献 5.2.3-1) の観測記録に基づく建物の同定解析の結果から、それぞれの建物の 1 次、2 次の減衰定数を算定した。表 5.2.3-3 にそれらの値を記す。1 次減衰定数は、概ね 1.5%~3%程度の範囲であり、2 次減衰定数は、2%弱~4%弱程度の範囲である。2 次の減衰定数と 1 次減衰定数の比は、0.8~3.2 の範囲であるが、平均は 1.48 である。なお、ここでの応答解析では、これらの値を用いたレーリー型減衰でも解析を行う。

表 5.2.3-3 同定解析から得られた減衰定数

建物名称	方向	1 次減衰定数 (%)	2 次減衰定数 (%)	2 次減衰定数/1 次減衰定数
建物 a	X 方向	1.67	2.39	1.43
	Y 方向	1.95	2.88	1.48
建物 b	X 方向	1.92	1.93	1.01
	Y 方向	2.31	1.87	0.81
建物 c	X 方向	---	---	---
	Y 方向	2.04	2.48	1.22
建物 d	X 方向	1.41	2.70	1.91
	Y 方向	2.03	3.30	1.63
建物 e	X 方向	1.51	1.93	1.28
	Y 方向	3.33	3.88	1.17
建物 f	X 方向	1.60	2.70	1.69
	Y 方向	2.51	3.08	1.23
建物 g	X 方向	2.61	3.36	1.29
建物 h	X 方向	1.60	2.29	1.43
	Y 方向	1.64	2.26	1.38
建物 i	X 方向	---	---	---
	Y 方向	0.95	3.01	3.17

2) 検討建物の固有周期

文献 5.2.3-1) の観測記録に基づく建物の同定解析の結果から、それぞれの建物の 1 次、2 次の固有周期を算定した。表 5.2.3-4 にそれらの値とともに応答解析モデルの固有周期の値を比較して記す。同定解析結果に基づく、解析対象建築物の 1 次固有周期の範囲は 1.47 秒～6.57 秒である。一方、これらの建物の解析モデル 1 次固有周期の範囲は、1.35 秒～6.50 秒である。1 次固有周期の、同定解析/解析モデルの比は、建物 H の X 方向で、2 割程度差が生じているが、その他は、1 割程度の範囲内となっていることがわかる。

表 5.2.3-4 固有周期

建物名称	方向	同定解析(sec.)		解析モデル(sec.)		同定解析/解析モデル	
		1次周期	2次周期	1次周期	2次周期	1次周期	2次周期
建物 a	X 方向	2.004	0.638	2.012	0.694	1.00	0.92
	Y 方向	1.994	0.638	2.012	0.694	0.99	0.92
建物 b	X 方向	2.760	0.978	2.517	0.988	1.10	0.99
	Y 方向	2.609	0.902	2.394	0.949	1.09	0.95
建物 c	X 方向	---	---	---	---	---	---
	Y 方向	3.502	1.232	3.683	1.417	0.95	0.869
建物 d	X 方向	1.906	0.659	1.915	0.739	1.00	0.89
	Y 方向	1.787	0.576	1.943	0.743	0.92	0.78
建物 e	X 方向	2.008	0.692	1.965	0.738	1.02	0.94
	Y 方向	1.821	0.622	1.917	0.725	0.95	0.86
建物 f	X 方向	2.017	0.694	1.966	0.740	1.03	0.94
	Y 方向	1.853	0.626	1.947	0.743	0.95	0.84
建物 g	X 方向	2.279	0.737	2.192	0.798	1.04	0.92
建物 h	X 方向	1.465	0.465	1.354	0.494	1.08	0.94
	Y 方向	1.656	0.517	1.370	0.508	1.21	1.02
建物 i	X 方向	---	---	(6.971)	(2.588)	---	---
	Y 方向	6.570	2.057	6.504	2.725	1.01	0.75

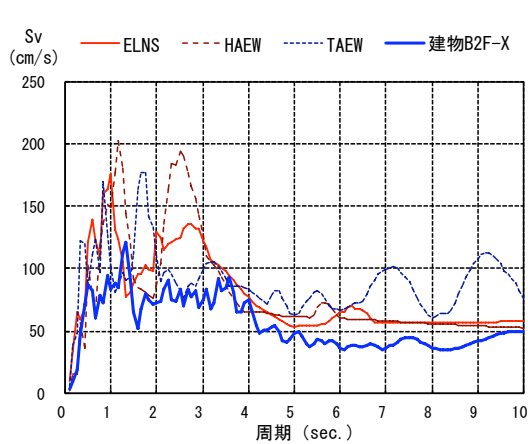
(4) 解析建物の入力地震動の応答スペクトル

表 5.2.3-2 に示した解析対象建築物の X 方または Y 方向の入力地震動の速度応答スペクトル ($h=0.02$) 及びエネルギースペクトル ($h=0.10$) を、高層建築物の評定で用いられている 50kine 標準波 3 波 (El Centro NS, Hachinohe EW, Taft EW) と比較して、図 5.2.3-1(a)～(i)に示す。

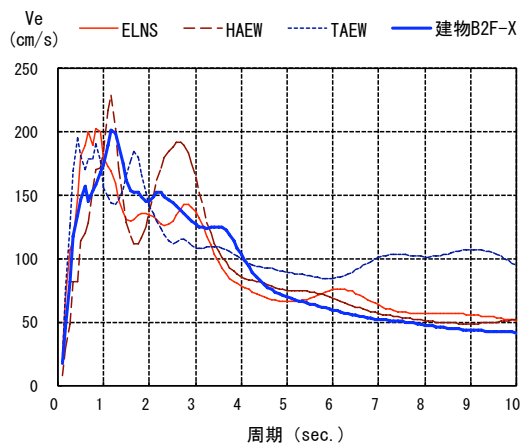
図 5.2.3-1(a)は、建物 a の入力地震動のスペクトルである。1～2 秒程度までの周期では、速度応答は、50kine の半分程度であるが、エネルギースペクトルの値は、50kine の地震動に近い値になっている。2 秒～6 秒程度の範囲では、速度応答スペクトル及びエネルギースペクトルともに 50kine の地震動と概ね等しいレベルである。

建物 b, c, d, e, f, g の地震動の応答スペクトルの形状やレベルは、比較的類似している。短周期の速度応答値は、50kine の地震動のスペクトルに比べれば、かなり小さな値であるが、4 秒以上の長周期領域のエネルギースペクトルの値は、50kine の地震動のスペクトルと概ね等しいレベルである。

建物 h, i は、ともに大阪に建設されている建物である。建物 h の応答スペクトルは、2.5 秒程度にピークが有るが、そのレベルは 50kine の地震動のスペクトルに比べ、かなり小さいことがわかる。一方、建物 i は、6.5 秒～7 秒程度にピークが有り、その速度応答スペクトル及びエネルギースペクトルともに、そのレベルは、50kine の地震動のレベルと概ね等しい程度になっていて 6～7 秒程度の長周期成分が大きくなっているのがわかる。

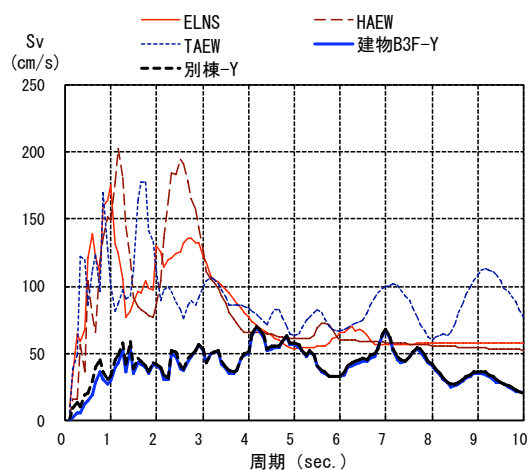


速度応答スペクトル (h=2%)

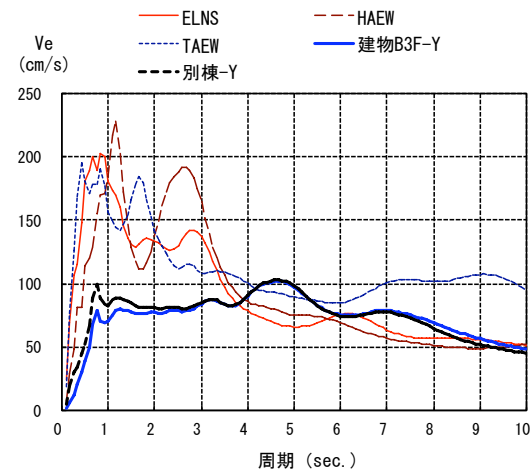


エネルギースペクトル (h=10%)

図 5.2.3-1(a) 建物 a(X 方向)の入力地震動(B2F-X)の応答スペクトル

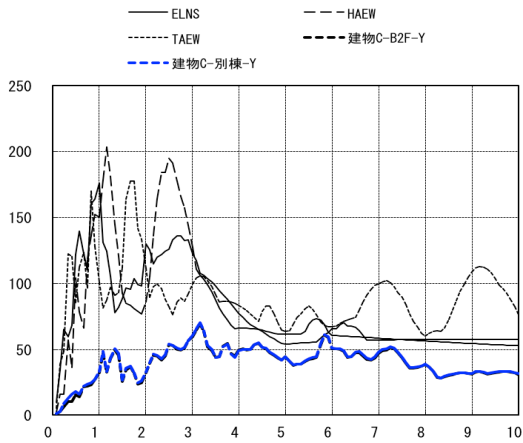


速度応答スペクトル (h=2%)

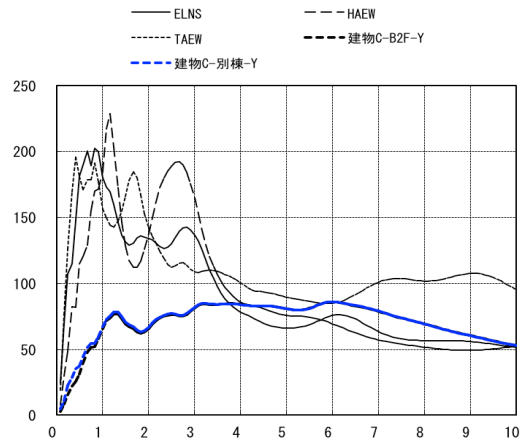


エネルギースペクトル (h=10%)

図 5.2.3-1(b) 建物 b(Y 方向) の入力地震動(B3F-Y)の応答スペクトル

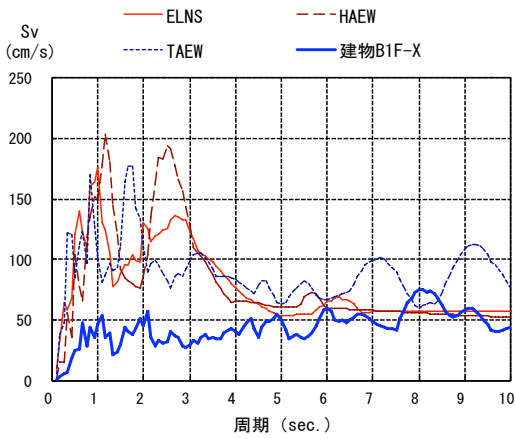


速度応答スペクトル (h=2%)

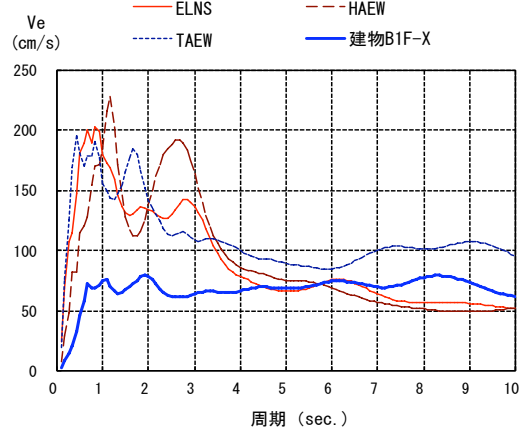


エネルギースペクトル (h=10%)

図 5.2.3-1(c) 建物 c(Y 方向) の入力地震動(B2F-Y)の応答スペクトル

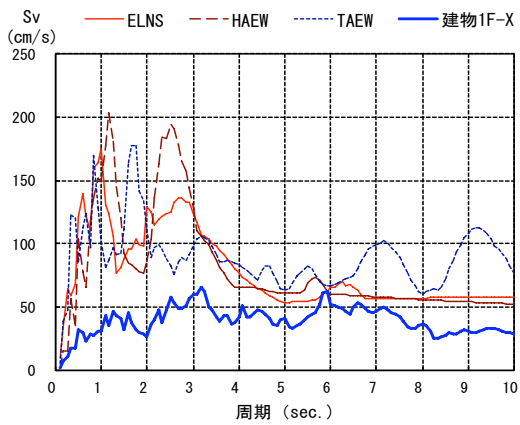


速度応答スペクトル (h=2%)

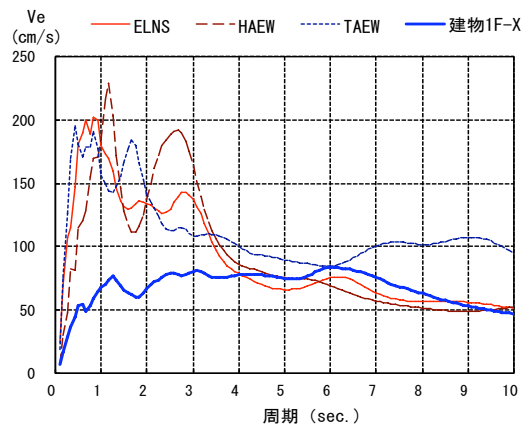


エネルギースペクトル (h=10%)

図 5.2.3-1(d) 建物 d(X 方向) の入力地震動(B1F-X)の応答スペクトル

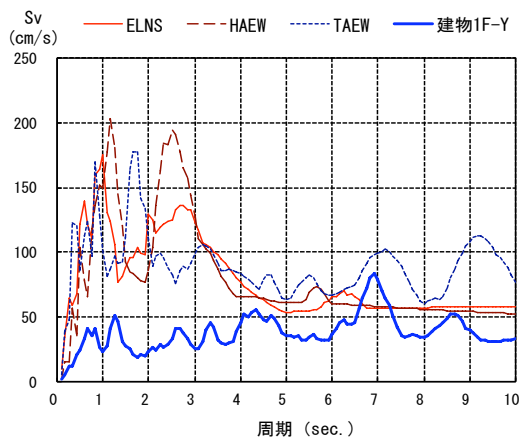


速度応答スペクトル (h=2%)

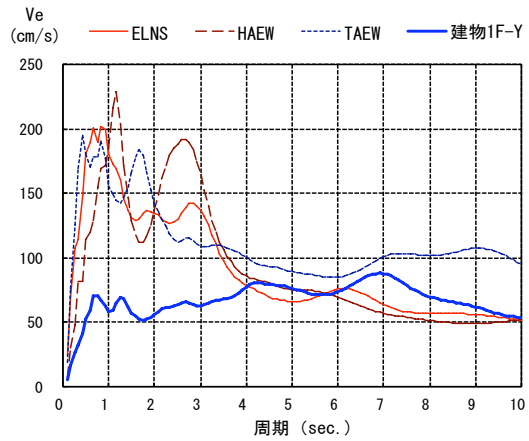


エネルギースペクトル (h=10%)

図 5.2.3-1(e) 建物 e(X 方向) の入力地震動(1F-X)の応答スペクトル

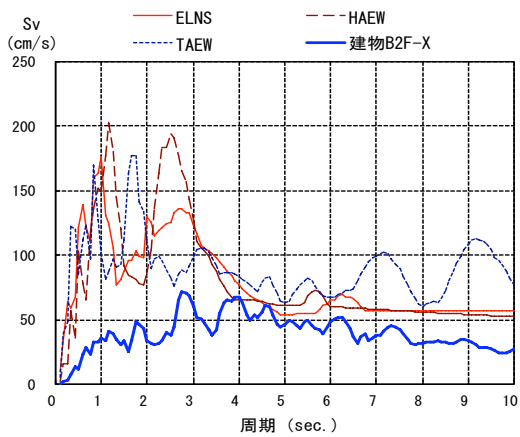


速度応答スペクトル (h=2%)

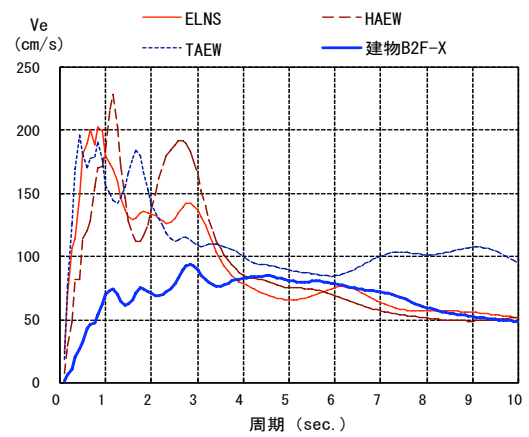


エネルギースペクトル (h=10%)

図 5.2.3-1(f) 建物 f(Y 方向) の入力地震動(1F-Y)の応答スペクトル

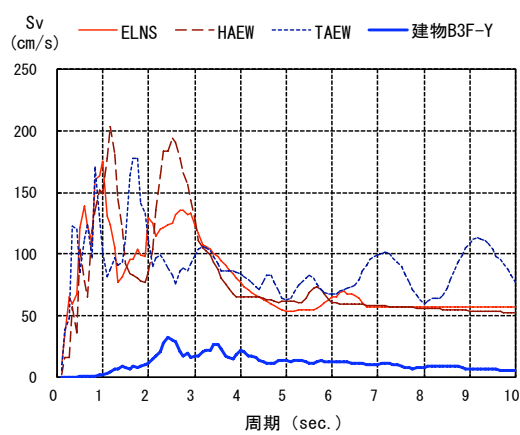


速度応答スペクトル (h=2%)

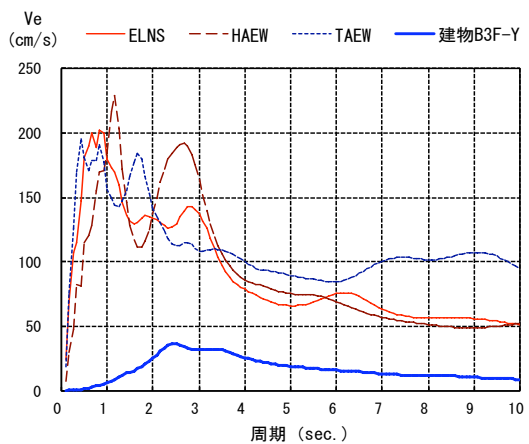


エネルギースペクトル (h=10%)

図 5.2.3-1(g) 建物 g(X 方向) の入力地震動(B2F-X)の応答スペクトル

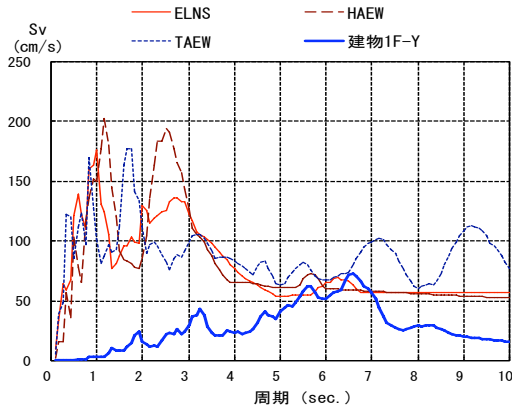


速度応答スペクトル (h=2%)

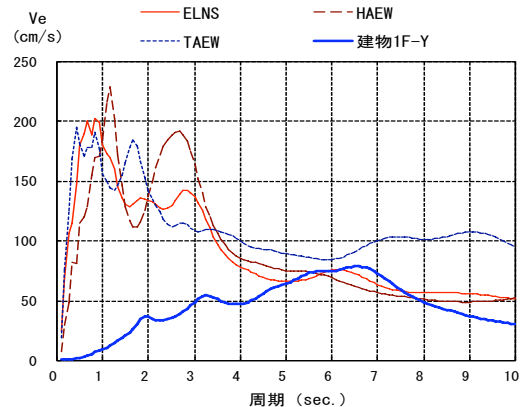


エネルギースペクトル (h=10%)

図 5.2.3-1(h) 建物 h(Y 方向) の入力地震動(B3F-Y)の応答スペクトル



速度応答スペクトル (h=2%)



エネルギー Spektrum (h=10%)

図 5.2.3-1(i) 建物 i(Y 方向) の入力地震動(1F-Y)の応答スペクトル

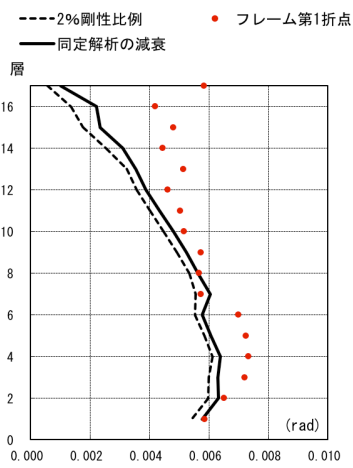
(5) 観測された地震動に対する地震応答解析結果

1) 建物の最大層間変形角の比較

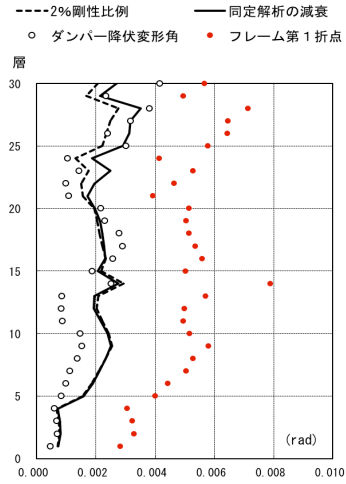
表 5.2.3-2 で示した各建物のモデル化を行い、それぞれの入力地震動を用いて、2%剛性比例型減衰と表 5.2.3-3 で示した観測記録の同定解析から得られた 1 次、2 次の減衰定数を用いたレーリー型減衰による応答解析を行う。これらの応答解析から得られた各建物の各層の最大層間変形角を、図 5.2.3-2(a)~(i)に比較して示す。ここでは、図 5.2.3-1 で示したスペクトルと同一の方向の結果を示している。なお、図中には、これらの建物のフレームの第 1 折れ点を示しているが、これは、表 5.2.3-2 のモデル化と復元力特性の設定で示したように、解析対象建築物それぞれの設計時に設定されたものであるため、必ずしも同一の定義ではないと考えられるが、一般的な鉄骨造ラーメン建築物をトリリニア型に置換した場合の第 1 折れ点は、当該層のいずれかの部材が最初に全塑性耐力に達する点と考えられる。また、各層の最大応答変位について、最大応答変位が比較的大きかった建物 d と建物 i について、図 5.2.3-3 に示す。

地震応答解析の結果、ここで解析対象とした 9 棟の建物の最大層間変形角は、0.0005rad~0.008rad の範囲であった。最大層間変形角が最も大きかったのは建物 i の Y 方向の応答であり、0.008rad 程度の応答であった。また、図 5.2.3-3 に示すように、建物 i では、建物頂部の最大変形が 136cm 程度になった。この建物では、図 5.2.3-1(i)に示すように、入力地震動が 6~7 秒付近の長周期成分で大きくなっており、これと建物の固有周期が一致したことによって、応答最大層間変形角が大きくなったと考えられる。また、宮城県の建物 a では、フレームの塑性率が 1.0 をわずかに越える階があったが、それ以外の建物では、柱、梁、ブレースで構成されるフレーム部分の塑性率が 1 を越えることはなかった。これらの建物のフレームの塑性率は、1.05~0.2 程度の範囲であった。また、建物 b と c はともに制振ダンパーを有する建物であるが、これらの建物ではダンパーが塑性化するレベルの応答変形に成っている。

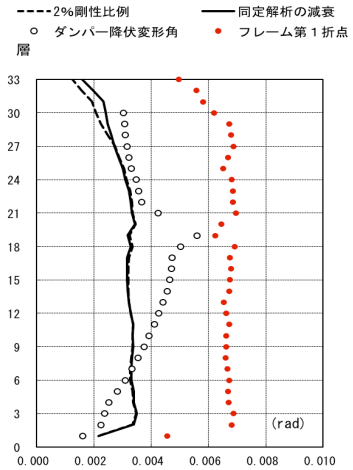
減衰定数の影響が比較的大きかったケースとして、建物 i では、2%剛性比例型減衰と同定解析から得られた 1 次、2 次の減衰定数を用いた場合を比較すると、層間変形角が 1.2 倍程度になっている。建物 i では、表 5.2.3-3 で示したように減衰定数が他の建物に比べて、小さかったこと等も影響していると思われる。



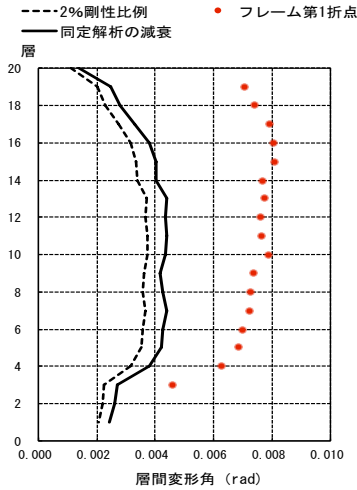
(a) 建物 a (X 方向)



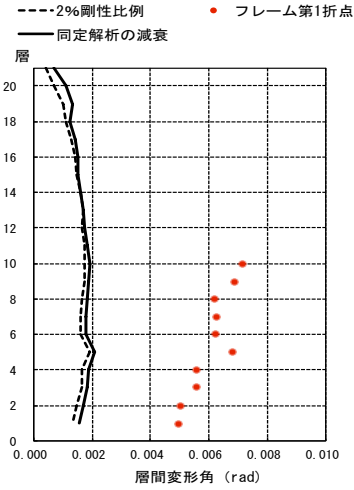
(b) 建物 b (Y 方向)



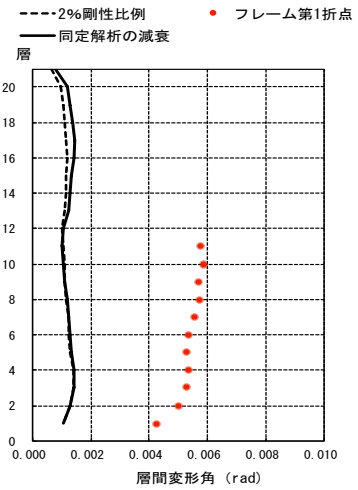
(c) 建物 c (Y 方向)



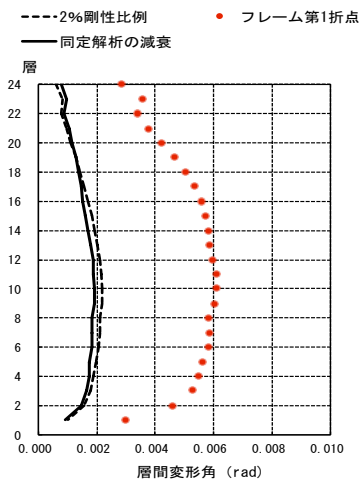
(d) 建物 d (X 方向)



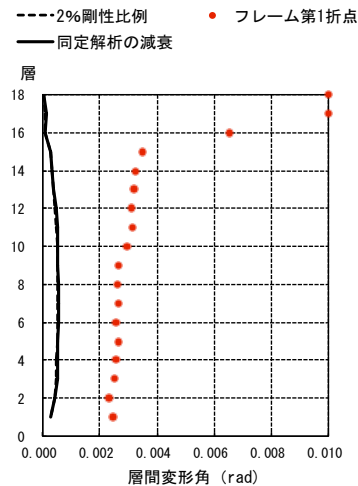
(e) 建物 e (X 方向)



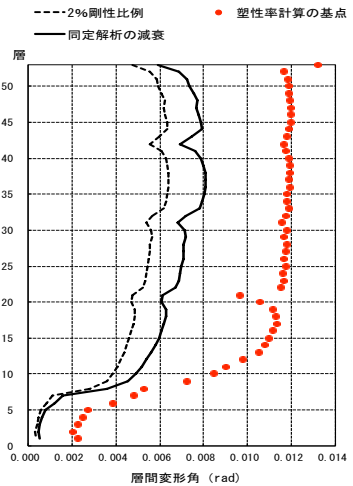
(f) 建物 f (Y 方向)



(g) 建物 g (X 方向)

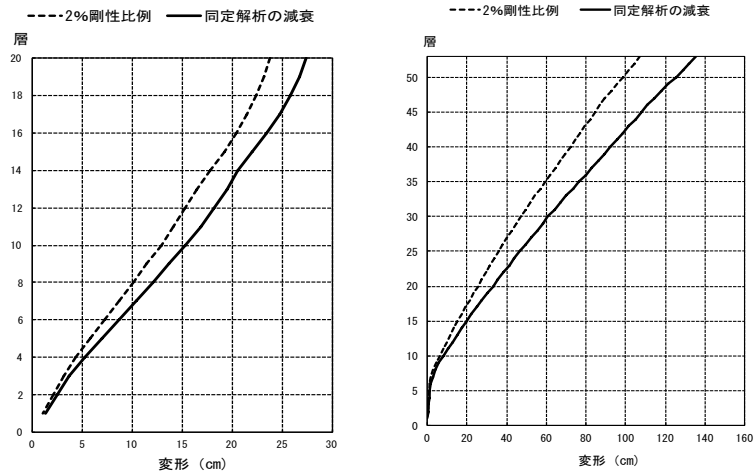


(h) 建物 h (Y 方向)



(i) 建物 i (Y 方向)

図 5.2.3-2 最大層間変形角の比較



(a) 建物 d (X 方向)

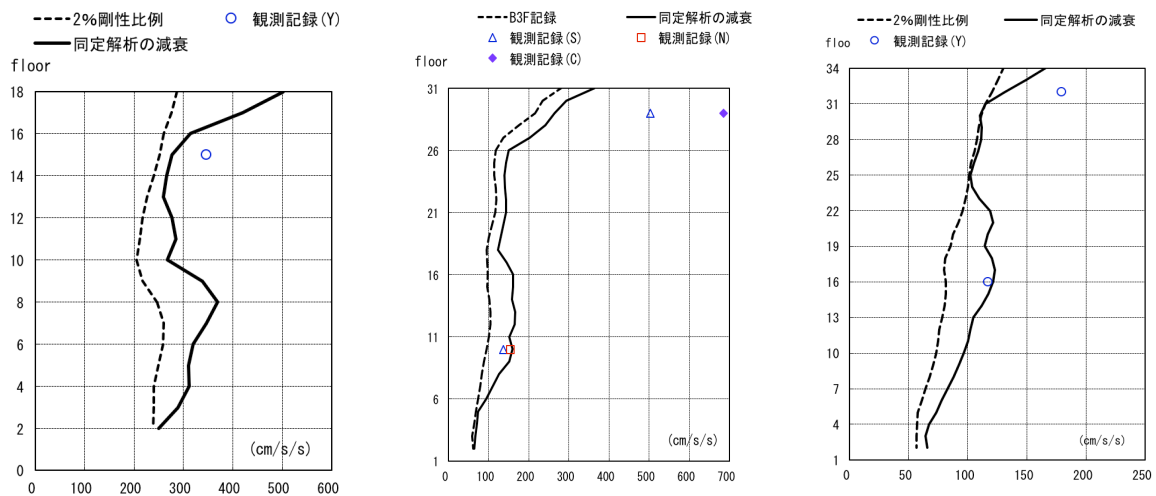
(b) 建物 i (Y 方向)

図 5.2.3-3 最大応答変位の比較

2) 最大加速度応答の比較

解析対象建築物における地震応答解析で、2%剛性比例型減衰による解析と同定解析から得られるレーリー型減衰での解析から得られる各層の最大応答加速度に関して、図 5.2.3-4(a)～(i)に、実際の観測記録の加速度応答との比較結果を示す。

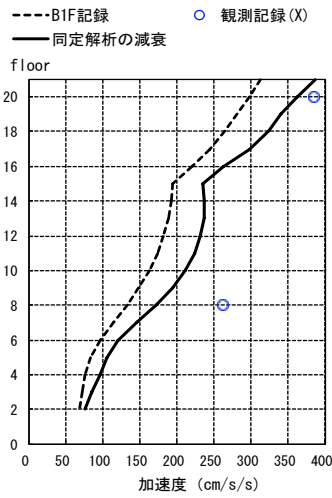
減衰の設定を同定解析から得られる減衰にすることで、2%剛性比例型減衰に比べて、加速度応答が大きくなる傾向が見られ、特に、高次のモードの応答が顕在化する傾向が見られる。また、同定解析から得られる減衰で解析した方が、実際の観測記録の加速度に近くなることかわかる。なお、建物 b については、上層階での観測記録が 700gal 程度とかなり大きな値になっているが、これは、この階の地震計の取り付け不備が、後日、確認されており、そのために加速度応答が大きくなった可能性が有る。



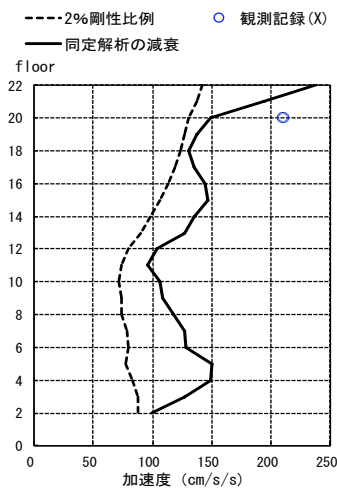
(a) 建物 a (X 方向)

(b) 建物 b (Y 方向)

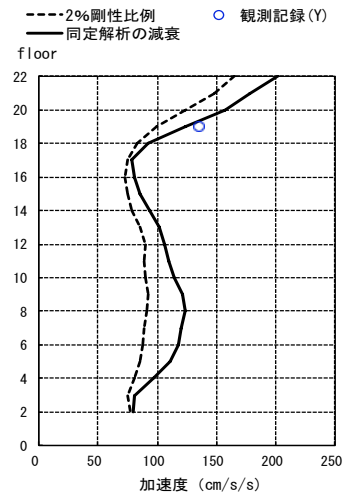
(c) 建物 c (Y 方向)



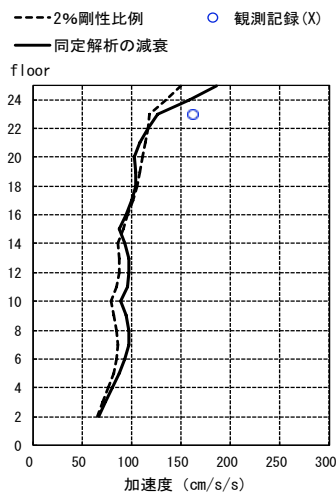
(d) 建物 d (X 方向)



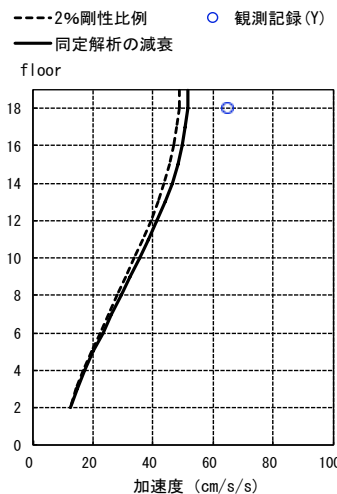
(e) 建物 e (X 方向)



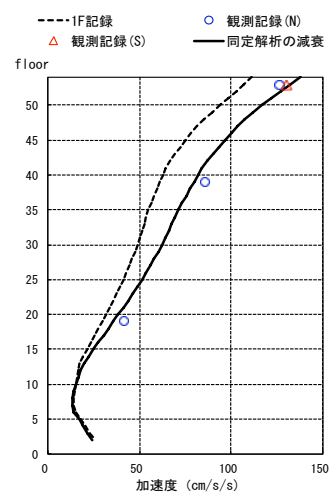
(f) 建物 f (Y 方向)



(g) 建物 g (X 方向)



(h) 建物 h (Y 方向)

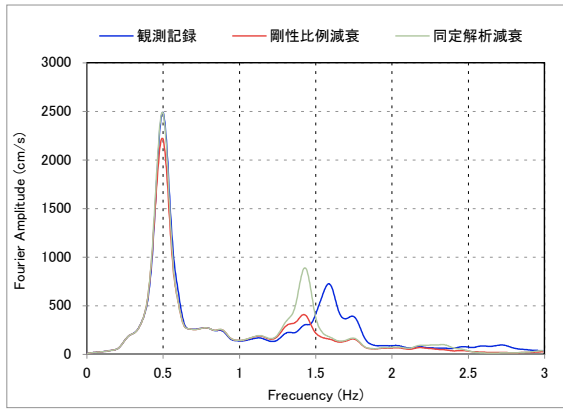


(i) 建物 i (Y 方向)

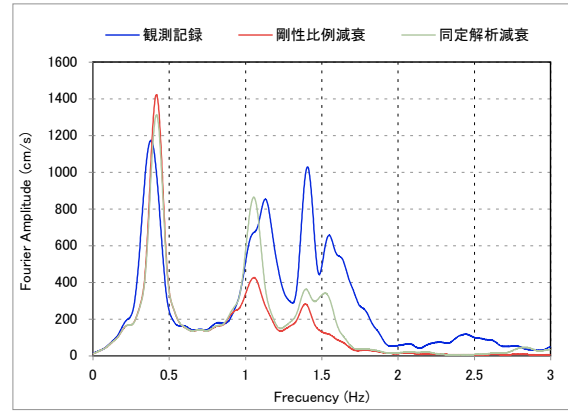
図 5.2.3-4 最大応答加速度の比較

3) フーリエスペクトルの比較

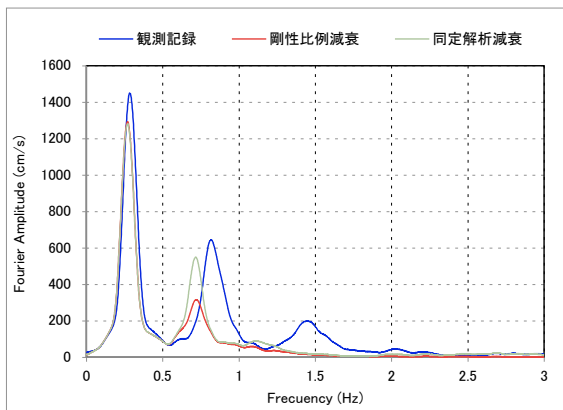
2%剛性比例型減衰及び同定解析から得られるレーリー型減衰での地震応答解析の結果と観測記録の応答を比較するために、図 5.2.3-5 には、9 棟の建物それぞれについて、建物上層階で観測された地震記録のフーリエスペクトルと 2%剛性比例型減衰及び同定解析での減衰による地震応答解析から得られた当該階の応答加速度のフーリエスペクトルを比較して示す。建物の 1 次振動数については、解析結果と観測は概ね一致していると言え、そのレベルは、ほとんどの場合で観測記録が応答解析結果を上回っている。2 次の振動数については、観測記録の 2 次振動数が応答解析結果の 2 次の振動数よりも少し大きくなる傾向が見られる。



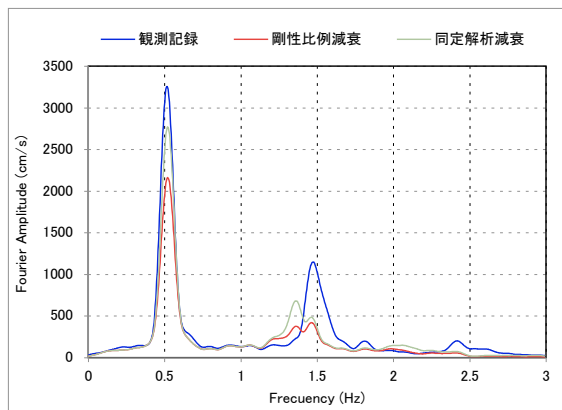
(a) 建物 a(15 階-X 方向)



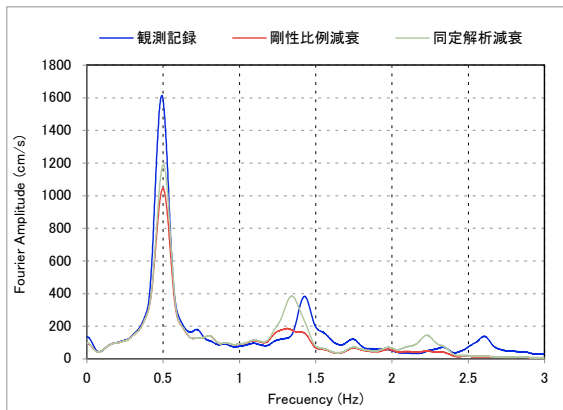
(b) 建物 b(PH1 階-Y 方向)



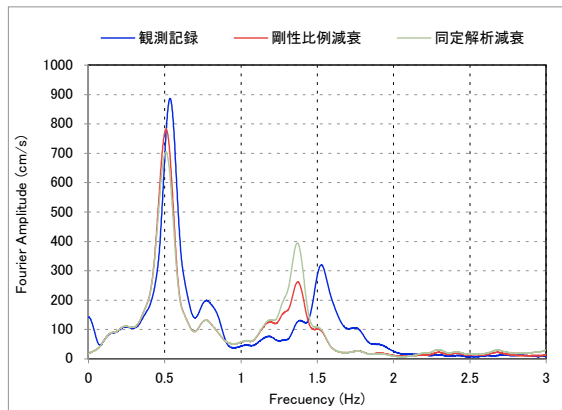
(c) 建物 c(32 階-Y 方向)



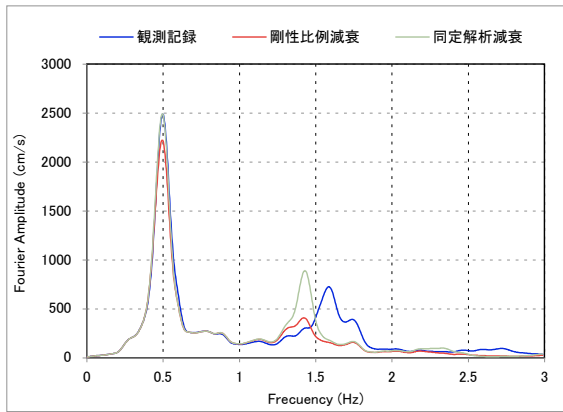
(d) 建物 d(PH1 階-X 方向)



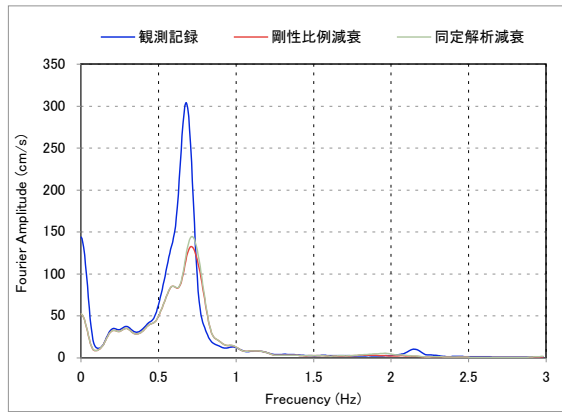
(e) 建物 e(20 階-X 方向)



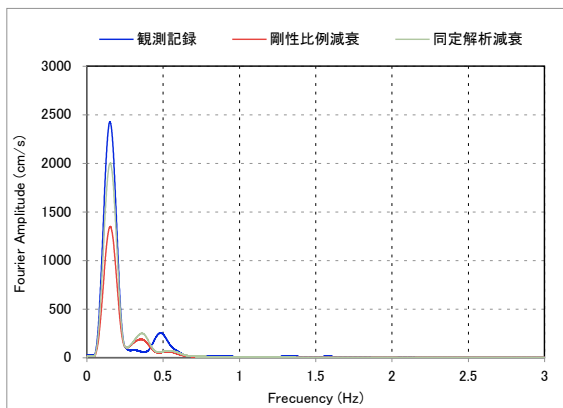
(f) 建物 f(19 階-Y 方向)



(g) 建物 g (23 階-X 方向)



(h) 建物 h (PH3 階-Y 方向)



(i) 建物 i (52 階-Y 方向)

図 5.2.3-5 フーリエスペクトルの比較

4) 制振壁ダンパーを有する建物の応答

建物 b 及び c は制振ダンパーを有する建物である。図 5.2.3-2 で示したように観測記録を用いた解析では、両方の建物でダンパーが塑性化するレベルの応答変形であった。そのため、ここでは建物 b について、より詳細な検討を行なうこととし、標準波である EL Centro NS 50kine に対する応答解析も行った。また、建物 b に隣接する建物の 1F の記録を用いた解析も行った。建物 b の Y 方向についてのこれらの応答解析結果として、図 5.2.3-6 には最大層間変形を、図 5.2.3-7 にはダンパーの平均累積塑性変形倍率に関して比較した結果を示す。

最大層間変形角については、今回の地震では、建物の B3F の記録による応答解析から得られた結果は、EL Centro NS 50kine の 1/3 程度である。ダンパーの平均累積塑性変形倍率に関しては、B3F の記録によるこの制振壁ダンパーの平均累積塑性変形倍率 ($\bar{\eta}$) は 20 程度である。一方、EL Centro NS 50kine の地震動による平均累積塑性変形倍率は 45 程度であり、その半分程度の値であった。この建物の制振壁ダンパーの平均累積塑性変形倍率の保有性能はおおよそ 500 程度であることから、上記の応答値 20 は、ダンパーの保有性能に比べ、十分小さな値と考えられる。

ダンパーでのエネルギー吸収に関して、今回の東北地方太平洋沖地震の記録を用いた解析によるダンパーのエネルギー吸収と標準波である EL Centro NS 50kine の地震波によるエネルギー吸収について、建物各層のダンパーの最大塑性率 (μ_{\max}) から 1 を減じた値 ($\mu_{\max}-1$) とダンパーの

平均累積塑性変形倍率($\bar{\eta}$)の関係を図 5.2.3-8 に示す。ダンパーの最大塑性率(μ_{\max})の定義は以下である。

$$\mu_{\max} = \delta_{\max} / {}_d\delta_y \quad (5.2.3-1)$$

ここで、 δ_{\max} は各層の最大層間変形であり、 ${}_d\delta_y$ は各層のダンパーの降伏層間変形である。

図 5.2.3-8 では、ダンパーの $\mu_{\max}-1$ の値が 0.5 以上となった層についてプロットしている。EL Centro NS の解析では、全ての層の $\mu_{\max}-1$ の値が 0.5 以上になっているが、東北地方太平洋沖地震の B3F 記録の解析では 14 の層がプロットの対象になっている。この図から、EL Centro NS では、 $\mu_{\max}-1$ の値が 5 以下の範囲で、平均累積塑性変形倍率($\bar{\eta}$)と $\mu_{\max}-1$ の比である等価な繰返し回数 (${}_d n_1$)^{4.5-2)} がおよそ 5 程度となっている。

東北地方太平洋沖地震の B3F 記録による応答では、 $\mu_{\max}-1$ の値が 1 以上になっているのは 3 つの層だけであるが、これらの $\mu_{\max}-1$ の値は 1.3 程度で、それらの平均累積塑性変形倍率($\bar{\eta}$)は 20 程度になっている。一方、EL Centro NS では、同一の $\mu_{\max}-1$ の値での平均累積塑性変形倍率($\bar{\eta}$)は 5~8 程度であり、今回の地震では、同一の塑性率での、繰返しによるエネルギー吸収が多くなっていて、この例では、 ${}_d n_1$ の値は EL Centro NS の 3 倍程度になっている。ここでの解析では、骨組が塑性化している事例がほとんどないために、他の骨組で検証はできないが、この建物 B のダンパーのエネルギー吸収の応答結果からは、今回の東北地方太平洋沖地震による地震動は、EL Centro 等の標準的な地震に比べて、建物の塑性振幅の繰返し回数が増える地震動であると考えられる。

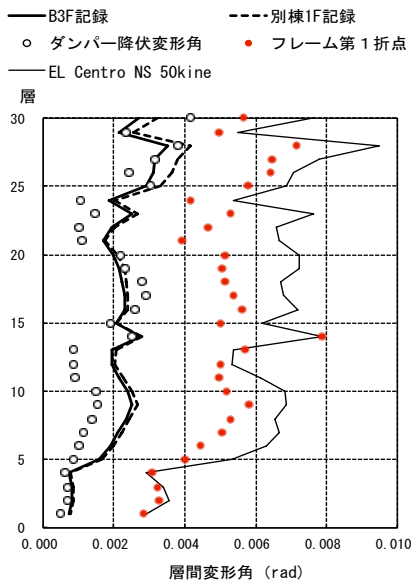


図 5.2.3-6 最大層間変形角

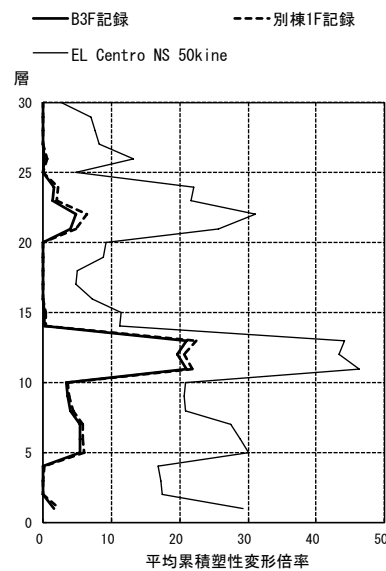


図 5.2.3-7 ダンパーの平均累積塑性変形倍率

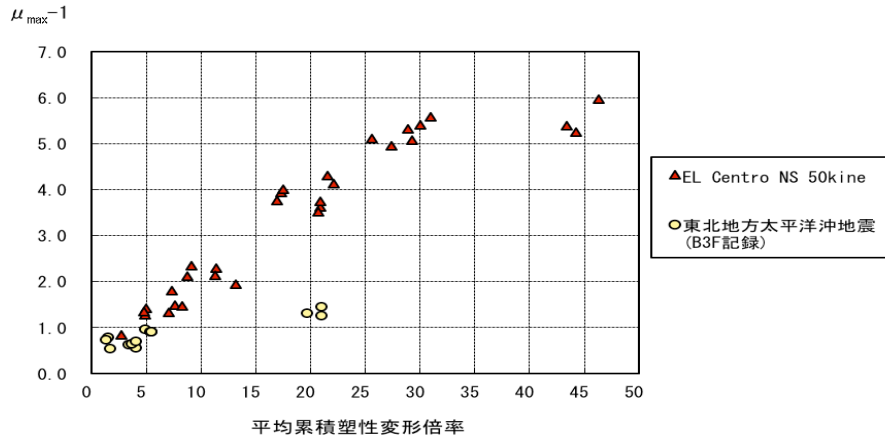


図 5.2.3-8 ダンパーの塑性率 ($\mu_{\max}-1$) と平均累積塑性変形倍率 ($\bar{\eta}$) の関係

(6) 設計用長周期地震動に対する応答解析

1) 提案波 (2009 年 8 月) の概要と解析方法

本報告で解析の対象にした表 5.2.3-1 に示した 9 つの建物のうち、建設地が関東平野である建物 b~g の 6 棟と大阪平野である h と i の 2 棟について、文献 5.2.3-2) に示されている提案波 (2009 年 8 月) の長周期地震動を用いて地震応答解析を行なう。ここで用いた地震波を表 5.2.3-5 に示す。これらは、地震波の予測地点としては関東平野の大手町と工学院大学の 2 地点と大阪平野の此花であり、想定地震として南海 (N)、東海-東南海 (T-TN)、南海-東南海 (N-TN) の 3 つの地震の場合について作成された長周期地震動である。文献 5.2.3-2) では、地震動の作成方法として、平均 (av) と平均+回帰誤差 (sd) の 2 つの方法で作成しており、ここでは、それらのうちの sd の波を用いて解析を行なう。本報の応答解析では、関東に建設されている b~g の 6 棟は、表 5.2.3-5 に示す T-TN-E4E-sd と T-TN-KGIN-sd の 2 波で解析し、大阪に建設されている h と i の 2 棟については、N-OSKH02-sd と N-TN-OSKH02-sd の 2 波で解析する。

図 5.2.3-9(a)及び(b)に、表 5.2.3-5 の地震動の応答スペクトルを示す。(a) (b) いずれも、6~7 秒程度の長周期帯でのスペクトルは大きく、速度応答で 200~350cm/s 程度の範囲の値となっている。また、av に比べ sd がやや大きいことがわかる。

表 5.2.3-5 解析に用いた提案波(2009 年 8 月)の概要

入力地震動				Max. Acc. (cm/s/s)	Max. Vel. (cm/s)	継続時間 (秒)
想定地震	予測地域	予測地点	作成方法			
東海-東南海 (T-TN)	関東平野	E4E (大手町)	平均 (av)	406.3	23.8	620.00
			平均+回帰誤差 (sd)	568.8	36.7	620.00
東海-東南海 (T-TN)		KGIN (工学院大)	平均 (av)	89.6	21.4	620.00
			平均+回帰誤差 (sd)	120.7	27.4	620.00
南海 (N)	大阪平野	OSKH02 (此花)	平均 (av)	70.9	33.8	625.36
			平均+回帰誤差 (sd)	105.2	46.9	625.36
南海-東南海 (N-TN)		OSKH02 (此花)	平均 (av)	91.6	39.0	655.36
			平均+回帰誤差 (sd)	167.1	74.6	655.36

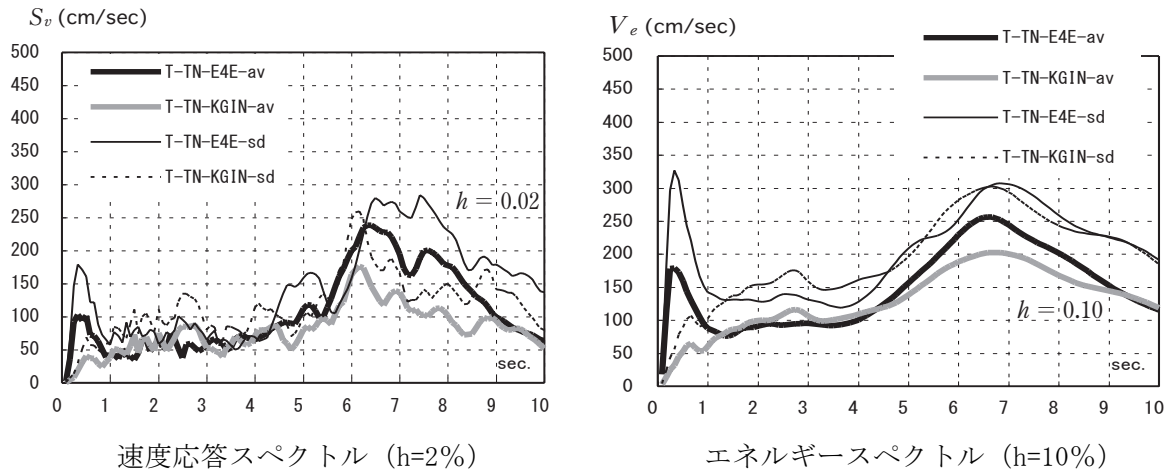


図 5.2.3-9(a) 関東平野の設計用長周期地震動(提案波)の応答スペクトル

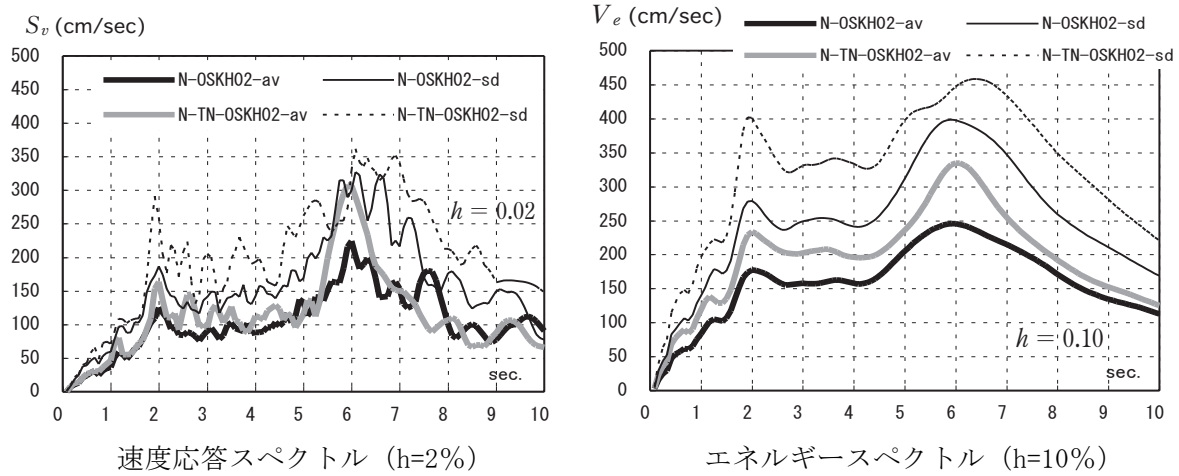
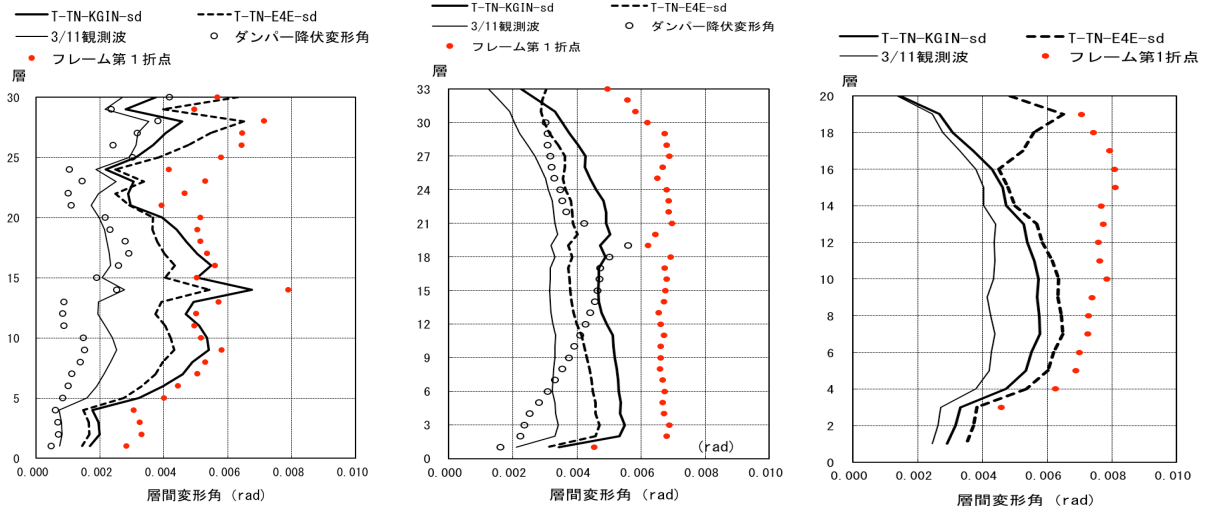


図 5.2.3-9(b) 大阪平野の設計用長周期地震動(提案波)の応答スペクトル

2) 地震応答解析の結果

図 5.2.3-10 は、関東平野に建設されている建物 b~g に対して、T-TN-E4E-sd と T-TN-KGIN-sd の 2 波の設計用長周期地震動で応答解析した結果の各層の最大層間変形角を、3/11 の観測波による解析結果と比較して示している。6 つの建物全てについて、3/11 の観測波による最大変形に比べて T-TN-E4E-sd と T-TN-KGIN-sd の 2 波の最大変形の方がかなり大きくなっていることがわかる。ただし、これらの 2 波の最大層間変形角で、フレームの第 1 折れ点を越える変形になっているのは、建物 e であり、そのほかは、概ね第 1 折れ点程度か、それよりも小さな変形となっている。

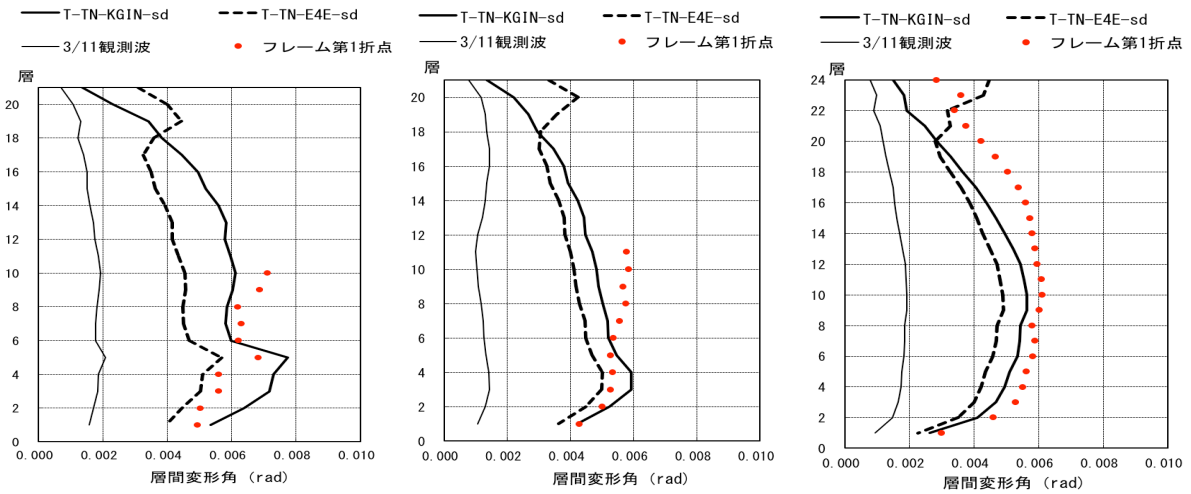
図 5.2.3-11 は、同様に、大阪平野に建設されている建物 h, i に対して、N-OSKH02-sd と N-TN-OSKH02-sd の 2 波の設計用長周期地震動で応答解析した結果の各層の最大層間変形角を、3/11 の観測波による解析結果と比較している。2 つの建物ともに、N-OSKH02-sd と N-TN-OSKH02-sd の 2 波による最大層間変形角は、フレームの第 1 折れ点を大きく越え、建物 i については、上層階の最大層間変形角は 0.025rad 程度に成っていることがわかる。今後、これらの建物が建設されている地点のサイト波を作成し、その波を用いた地震応答解析を行ない、想定される長周期地震動に対する建物応答を把握しておく必要が有る。



(a) 建物 b (Y 方向)

(b) 建物 c (Y 方向)

(c) 建物 d (X 方向)

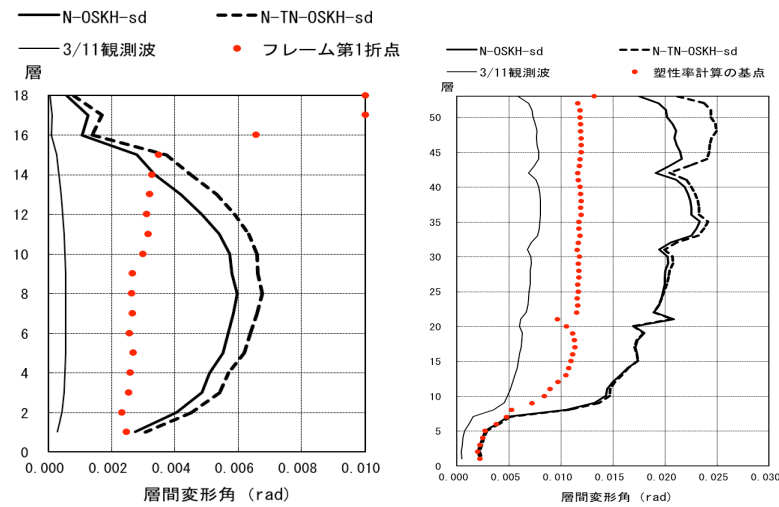


(d) 建物 e (X 方向)

(e) 建物 f (Y 方向)

(f) 建物 g (X 方向)

図 5.2.3-10 関東平野の設計用長周期地震動(sd 波)に対する最大層間変形角



(a) 建物 h (Y 方向)

(b) 建物 i (Y 方向)

図 5.2.3-11 大阪平野の設計用長周期地震動(sd 波)に対する最大層間変形角

(7) まとめ

建築研究所が強震観測を実施している建物のうち、2011年東北地方太平洋沖地震において、強震記録が観測された宮城県から大阪府までの範囲に建設されている地上15階から52階の超高層鉄骨造建物8棟と建築基準整備促進事業で地震計を設置した建物1棟の合計9棟について、観測された記録を入力地震動とした地震応答解析を行った。また、設計用の長周期地震動（提案波）を用いてこれらの建物の地震応答解析を行い、最大層間変形角を明らかにした。解析から得られた結果をまとめて以下に示す。

(1) 解析対象建築物の動的特性：

- ・ 文献5.2.3-1)の観測記録に基づく建物の同定解析の結果から、それぞれの建物の1次、2次の減衰定数、固有周期を算定した。1次減衰定数は、概ね1.5%～3%程度の範囲であり、2次減衰定数は、2%弱～4%弱程度の範囲である。2次の減衰定数と1次減衰定数の比は0.8～3.2の範囲であるが、平均は1.48である。
- ・ 同定解析結果に基づく、解析対象建物の1次固有周期の範囲は1.47秒～6.57秒であり、これらの建物の解析モデル1次固有周期の範囲は、1.35秒～6.50秒である。1次固有周期の、同定解析/解析モデルの比は、建物hのX方向で、2割程度差が生じているが、その他は、1割程度の範囲内となっている。

(2) 入力地震動の応答スペクトル：

- ・ 解析対象建物の応答解析に用いた入力地震動の速度応答スペクトルとエネルギースペクトルを、高層建築物の評定で用いられている50kine標準波3波（El Centro NS, Hachinohe EW, Taft EW）と比較して示した。
- ・ 建物aは、1～2秒程度までの周期では、速度応答は、50kineの半分程度であるが、エネルギースペクトルの値は、50kineの地震動に近い値になっている。2秒～6秒程度の範囲では、速度応答スペクトル及びエネルギースペクトルともに50kineの地震動と概ね等しいレベルである。
- ・ 建物b～gの入力地震動の応答スペクトルの形状やレベルは比較的類似している。短周期の速度応答値は、50kineの地震動のスペクトルに比べれば、かなり小さな値であるが、4秒以上の長周期領域のエネルギースペクトルの値は、50kineの地震動のスペクトルと概ね等しいレベルである。
- ・ 建物h及びiは大阪府に建設されている建物である。建物hの応答スペクトルは、2.5秒程度にピークが有るが、そのレベルは50kineの地震動のスペクトルに比べ、かなり小さい。一方、建物iは、6.5秒～7秒程度にピークが有り、その速度応答スペクトル及びエネルギースペクトルともに、そのレベルは、50kineの地震動のレベルと概ね等しい程度になっていて6～7秒程度の長周期成分が大きくなっていた。

(3) 3/11の地震の観測記録を用いた地震応答解析：

- ・ 3/11の地震で観測された地震動を用いた応答解析の結果、本報の建物の最大層間変形角は、0.0005rad～0.008rad程度の範囲であった。最大層間変形角が最も大きかったのは建物iのY方向の応答であり、0.008rad程度の応答であった。また、建物iでは、建物頂部の最大変形が136cm程度になった。この建物では、入力地震動のスペクトルが6～7秒付近の長周期成分

で大きくなっており、これと建物の固有周期が一致したことによって、応答最大層間変形角が大きくなったと考えられる。

- ・ 宮城県の建物では、フレームの塑性率が 1.0 をわずかに越える階があったが、ここで検討したそれ以外の建物では、柱、梁、ブレースで構成されるフレーム部分の塑性率が 1 を越えることはなかった。これらの建物のフレームの塑性率は、1.05~0.2 程度の範囲であった。
- ・ 応答解析の減衰として、2%剛性比例型減衰を用いる場合と同定解析から得られるレーリー型減衰を用いる場合の解析結果を比較した。各層の加速度応答については、2%剛性比例型減衰に比べて、加速度応答が大きくなる傾向が見られ、特に、高次のモードの応答が顕在化する傾向が見られた。また、同定解析から得られる減衰で解析した方が、実際の観測記録の加速度に近くなった。最大層間変形角は、2%剛性比例型減衰と同定解析の減衰では、建物によっては 1.2 倍程度の差になる場合があった。
- ・ 建物上層階で観測された地震記録のフーリエスペクトルと 2%剛性比例型減衰及び同定解析での減衰による地震応答解析から得られた当該階のフーリエスペクトルを比較した。建物の 1 次振動数については、解析結果と観測は概ね一致した。
- ・ 建物 b 及び c は制振ダンパーを有する建物である。これらの建物では、建物の一部の階の制振ダンパーが降伏するレベルの応答であった。建物 b について、より詳細な解析を行ない、3/11 の地震の波を用いた応答解析でのダンパーの平均累積塑性変形倍率は 20 程度であり、EL Centro NS 50kine の地震動による平均累積塑性変形倍率は 45 程度で、その半分程度の値であった。この建物の制振ダンパーの保有性能としての平均累積塑性変形倍率は 500 程度であり、今回の地震による損傷に比べ、十分大きな余裕を持っていると考えられる。
- ・ 建物 b のダンパーの地震応答について、ダンパーの塑性率と平均累積塑性変形倍率の関係をプロットし、同一の塑性率での等価な繰返し回数 (n_r) について比較した。その結果、今回の東北地方太平洋沖地震による地震波は、EL Centro 等の標準的な地震波に比べると、建物の塑性振幅の繰返し回数が増える地震波であることがわかった。

(4) 設計用長周期地震動（提案波）を用いた地震応答解析：

- ・ 地震応答解析の結果、建物 e, h, i の最大層間変形角は、フレームの第 1 折れ点を越える変形となった。特に、大阪平野の 2 棟は、第 1 折れ点からの変形角が大きく、建物 i に関しては、最大層間変形角が、上層階で 0.025rad 程度に達した。その他の建物の最大層間変形角は、概ね第 1 折れ点程度か、それ以下であった。

〈参考文献〉

- 5.2.3-1) 飯場正紀，大川出，斉藤大樹，森田高市，長谷川隆：平成 23 年（2011 年）東北地方太平洋沖地震において観測された強震記録に基づく建築物の地震時挙動の分析，建築研究資料 No. 138 号，独立行政法人建築研究所，平成 24 年 9 月
- 5.2.3-2) 大川出，斉藤大樹，他：長周期地震動に対する超高層建築物等の安全対策に関する検討，建築研究資料 No. 127 号，独立行政法人建築研究所，平成 22 年 12 月

5.2.4 挙動調査に基づく反映項目の整理・検討

2011年東北地方太平洋沖地震において、強震記録が観測された超高層鉄骨造建物を対象にした地震応答解析等の結果に基づいて、超高層鉄骨造建築物の長周期地震動に対する耐震安全性の検証方法を確立するために、今後、考慮すべき項目や検討する必要があると考えられる項目を以下に示す。

①建物固有周期

明確な振幅依存性が認められる。固有周期の変動により長周期化して変形が大きくなる可能性があるため、建物の耐震安全性を検討する場合には、ある程度余裕をもった耐震性判定を行うなどの配慮が必要である。

②建物減衰

建物基礎及び建物上層階観測記録により建物の減衰を評価すると、(検討した3次までは)各次一定減衰に近い結果が得られた。地震応答解析により建物挙動シミュレーションを行う際には仮定する減衰を適切に設定すれば挙動を比較的正確に追跡できる。

③地表面観測記録による応答解析

超高層建物内基礎と地表面の観測記録を比較すると、特に短周期側については表層地盤の増幅と入力損失によるものと考えられる差異がみられる。これは超高層建物が剛強で深い基礎を有することによるものと考えられる。そのため、地表面の観測記録による地震応答解析を行う際には対象建物の地盤条件や基礎条件を考慮した基礎入力動を用いる必要がある。また建物内の観測記録を別建物に用いる場合についても同様の配慮が必要である。

④地震動のエネルギーに着目した検討

最大応答を等しくするように地震動を規準化して比較すると、従来設計に用いられてきた入力地震動を上回るレベルのエネルギー入力観測された。そのため、耐震安全性を検討する場合には、最大値に加えて繰返し回数等に関するエネルギーに着目した検討及びその判定指標が必要である。

⑤累積塑性変形倍率等の繰返し変形を考慮した指標

ダンパー付きの超高層建物応答解析結果からは、今回の東北地方太平洋沖地震による応答は、EL Centro等の標準波による応答に比べ、同一の塑性率での等価な塑性繰返し回数が3倍程度であった。このような多数回の繰返し変形の影響を考慮できる累積塑性変形倍率等の判定指標が必要である。

5.2.5 まとめ

建築研究所が強震観測を実施している建物のうち、2011年東北地方太平洋沖地震において、強震記録が観測された宮城県から大阪府までの範囲に建設されている地上15階から52階の超高層鉄骨造建物8棟と建築基準整備促進事業で地震計を設置した建物1棟の合計9棟について、観測された記録を入力地震動とした地震応答解析を行った。これらの応答解析から得られる加速度と建物上部で実際に観測された加速度記録を比較して、解析モデルの妥当性や減衰定数が建物応答に及ぼす影響等を明らかにした。また、今回の地震では、東北地方から関東、近畿地方にかけての広範囲で超高層建築物が応答した可能性が有り、それらの建物応答がどの程度であったかを推定するために、今回強震観測が行われた超高層鉄骨造建築物の各層の最大層間変形角や塑性率等明らかにして、層が降伏するレベルに至っているかどうかや、ダンパーが降伏するレベルを超えているかどうか、また、どの地域の建築物で応答が大きくなっているか等を明らかにした。

この建築基準整備促進事業で地震計を設置したNHSTビルに関して、東北地方太平洋沖地震で観測された本震および代表的な余震の観測記録を用いて、観測記録の分析を行い、その分析結果を反映した応答解析を実施した。また、入力損失の超高層建築物の応答に与える影響を把握した。

また、これらの観測結果や分析に基づいて、超高層鉄骨造建築物の長周期地震動に対する耐震安全性評価に反映すべき項目等を整理した。

5.3 まとめ

第5章の地震観測等の検討の概要と得られた成果を以下にまとめて示す。

(1) 地震観測建物の挙動調査

東京都内に建つ2棟の超高層鉄骨造建築物に対して地震観測装置を設置し、地震観測を開始した。観測開始後、有感地震がいくつか発生した際、設置した観測装置が確実に作動し、実観測データを取得することができた。これにより、観測対象建物の振動性状に関する基礎的な情報を得ることができた。

また、平成23年3月11日に発生した「東北地方太平洋沖地震(M9.0)」の際にも観測装置が正常に作動し、入力、応答共に100cm/s²を超えるような大振幅の貴重な記録を回収することができた。地震観測は長期にわたって継続的に実施することが重要であり、当調査業務終了後も引き続き観測体制を安定的に維持し、有用な観測データを蓄積していく必要がある。

(2) 東日本大震災による鉄骨造高層建築物の挙動調査

建築研究所が強震観測を実施している建物のうち、2011年東北地方太平洋沖地震において、強震記録が観測された宮城県から大阪府までの範囲に建設されている地上15階から52階の超高層鉄骨造建物8棟と建築基準整備促進事業で地震計を設置した建物1棟の合計9棟について、観測された記録を入力地震動とした地震応答解析を行った。これらの応答解析から得られる加速度と建物上部で実際に観測された加速度記録を比較して、解析モデルの妥当性や減衰定数が建物応答に及ぼす影響等を明らかにした。この地震では、東北地方から関東、近畿地方にかけての広範囲で超高層建築物が応答した可能性が有り、それらの建物応答がどの程度であったかを推定するために、今回強震観測が行われた超高層鉄骨造建築物の各層の最大層間変形角や塑性率等明らかにした。

また、この建築基準整備促進事業で地震計を設置したNHSTビルに関して、東北地方太平洋沖地震で観測された本震および代表的な余震の観測記録を用いて、観測記録の分析を行い、その分析結果を反映した応答解析を実施した。また、入力損失の超高層建築物の応答に与える影響を把握した。

これらの観測結果や分析に基づいて、超高層鉄骨造建築物の長周期地震動に対する耐震安全性評価に反映すべき項目等を整理した。

