

軟弱地盤に建つ高層 RC 集合住宅の地震観測結果とシミュレーション解析



稲井 慎介*

藤堂 正喜* 松本喜代隆*
渡壁 守正* 山本 健史*

概 要

軟弱地盤に建設された RC 造の高層集合住宅の地震観測を、平成 12 年より行っている。これまで、233 波の地震観測結果が得られており、これらの観測記録の中には屋上階で 200gal 以上を記録した地震をはじめ、中越地震、宮城県沖地震など数多くの特徴的な記録が含まれている。本論ではこれら数多く観測された地震の中から特徴的なものを抽出して分析した結果について報告する。また、これらの観測記録を用いたシミュレーション解析を行い、観測記録と比較した結果について報告する。

Result of Seismic Observation of a Tall R/C Condominium Located on Soft Ground and Simulation Analysis

Shinsuke INAI* Masanobu TODO*
Kiyotaka MATUMOTO* Morimasa WATAKABE*
Takeshi YAMAMOTO*

Seismic observation of a tall R/C condominium located on soft ground is performed from 2000. Until now, observation record of 233 is obtained. Many characteristic earthquakes are included in these observation records (The earthquake which record 220gal on roof floor, the earthquake of Tyuetsu, the earthquake of Miyagiken-oki ,etc).

This paper reports the analyzed about these observation results. And simulation analysis using observation record was carried out and it compared with observation record.

* 戸田建設(株) 技術研究所

* Technical Research Institute, Toda Corp.

軟弱地盤に建つ高層 RC 集合住宅の地震観測結果とシミュレーション解析

稲井 慎介* 藤堂 正喜*
 松本喜代隆* 渡壁 守正*
 山本 健史 *

1. はじめに

1999年4月より高層RC集合住宅において地盤と建物の地震観測を実施している。当該建物は、比較的軟弱な地盤に建つ地上30階の高層鉄筋コンクリート造建築物であり、地震観測は当該建物の地震時の挙動および地盤・基礎の挙動を把握することを目的として実施されている。本報では、これらの地震観測結果のまとめと分析、および観測波を用いたシミュレーション解析結果について報告する。

2. 観測概要

2.1 建物概要

建物の概要を図-1に示す。本建物は駅前施設群の建替えによる総合的な再整備計画の一環を構成するものである。敷地の北側は、駅前広場に面し、西側、南側はそれぞれ18mの公道に接している。地上30階・地下1階・塔屋3階のRC造である。図-2に観測位置を示す。

建築場所：埼玉県草加市
 主用途：商業・共同住宅・事務所
 竣工：1999年4月

敷地面積：21,797㎡
 延床面積：36,369㎡
 軒高：95.9m 最高高さ：104.5m
 構造種別：RC造（一部S造）



図-1 建物概要と外観



図-2 観測位置

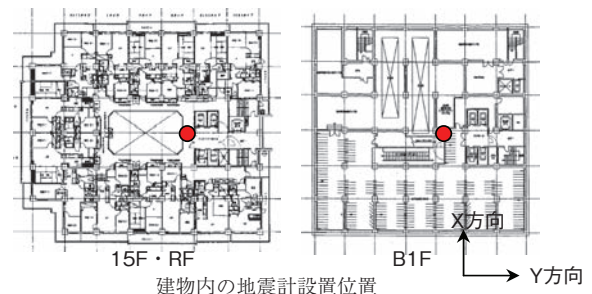
2.2 観測の概要

観測点を図-3に示す。観測点は、地盤系では杭支持地盤位置GL-52m、地盤構造が変化するGL-25mおよび自由地盤として建物から約80m離れた公

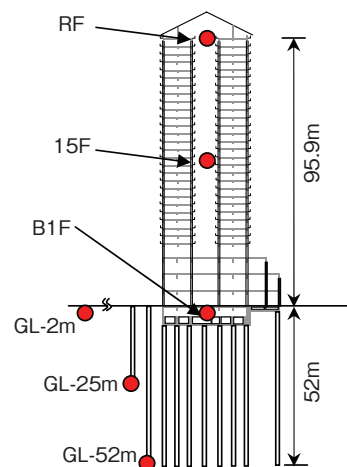
園敷地内の地表GL-2.0mの3ヵ所、建物系ではB1F（地下1階）、15FおよびRFの3ヵ所としている。測定方向は、地盤系、建物系とも構造軸にあわせた水平成分と上下成分の3成分であり、建物系のX方向は地盤系の北方向とほぼ一致している。表-1に本観測で用いている加速度計、収録装置の主な仕様を示す。



観測建物の位置と地表地震計設置位置



建物内の地震計設置位置



地震計設置位置(断面図)

図-3 観測点(地震計設置位置)

* 戸田建設(株) 技術研究所

表-1 加速度計と収録装置の仕様

加速度計	センサー方式	フォースバランスサーボ型
	測定範囲	±0.015gal ~ ±2000gal
	周波数特性	DC ~ 40Hz (-3dB以下)
	形式	SM-24MR
収録装置	方式	デジタルインターフェース方式 18ch
	A/D変換	20ビット, 100Hz サンプリング
	起動レベル	2.0gal
	時刻校正	GPS
	収録内容	水平、上下加速度最大値 計測震度、SI値 時刻歴波形

表-2 観測記録一覧

No.	発生年月日	震源地	深さ (km)	M	震央距離 (km)	緯度	経度
1	1999年4月8日22時11分	ウラジオストク付近	590	7.3	1157	43.2	130.3
2	1999年4月25日18時13分	千葉県北東部	100	4.6	57	35.3	140.2
3	1999年4月25日21時27分	茨城県北部	50	5.2	97	36.3	140.3
4	1999年5月13日02時59分	釧路支庁中南部	100	6.1	870	43.0	143.5
5	1999年6月27日19時50分	茨城県南部	50	4.4	29	36.1	139.5
6	1999年7月15日07時56分	茨城県南部	70	4.8	85	36.0	140.3
7	1999年8月9日06時39分	千葉県北西部	110	4.9	12	35.5	139.5
8	1999年8月11日18時28分	東京湾	60	4.2	49	35.2	139.5
9	1999年9月13日07時56分	千葉県北西部	80	5.1	43	35.4	140.1
10	1999年10月16日17時14分	茨城県沖	30	5	169	36.3	141.3
224	2007年3月25日09時41分	能登半島沖	11	6.9	288	37.2	136.7
225	2007年6月2日14時43分	茨城県南部	50	4.6	40	36.1	140.0
226	2007年7月16日10時13分	新潟県中越沖	17	6.8	250	37.6	138.6
227	2007年7月16日15時37分	新潟県中越沖	23	5.8	233	37.5	138.6
228	2007年7月16日23時17分	京都府沖	374	6.7	453	36.9	135.1
229	2007年8月16日04時15分	千葉県東方沖	31	5.3	94	35.4	140.5
230	2007年8月18日16時55分	千葉県南部	20	5.2	72	35.3	140.3
231	2007年9月28日22時38分	マリアナ諸島	268	7.6	1573	22.0	143.1
232	2008年3月8日01時54分	茨城県北部	57	5.2	154	36.5	140.6
233	2008年4月4日19時01分	茨城県南部	53	5.0	59	36.1	139.8

3. 観測記録

3.1 全観測記録

これまでに得られた主な観測記録の一覧（途中略）を表-1に示す。観測開始以来、2008年4月現在までに全233波の記録が得られている。図-1にB1FとRFにおいて得られた観測記録を最大加速度別に示す。B1Fで観測された記録のうち、約90%が5gal以下であり、RFにおいては約90%が30gal以下であった。また、50gal以上の記録は8波観測された。

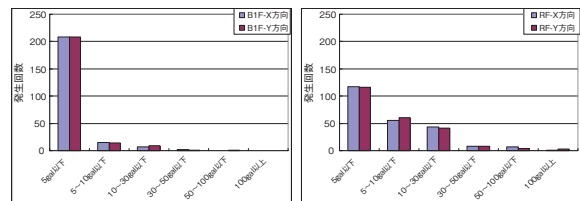


図-4 全観測記録の最大加速度分類 (B1FとRF)

3.2 主な観測記録

表-3に主な観測記録のマグニチュード、最大加速度、計測震度の詳細を示す。これまでに観測された最大の記録は、2005年7月23日に発生した千葉県北西部の地震で、この際のRFの最大加速度は220gal（計測震度5.7）であった（図-5）。また、新潟県中越地方（ケース4）、および新潟県中越沖地震（ケース10）においては、RFでそれぞれ最大83galと87galの記録が観測された。遠方の地震では、能登半島沖地震をはじめ福岡県西方沖地震（RFで約8gal）などが記録は小さいが観測されている。

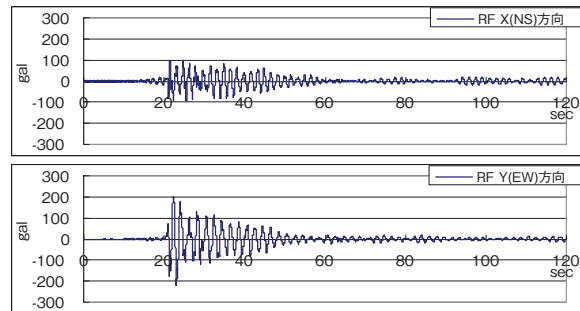


図-5 加速度時刻歴 (ケース6)

表-3 主な地震の観測記録詳細

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10		
発生年月日	2002年7月13日	2003年5月26日	2004年10月23日	2004年10月23日	2005年4月11日	2005年7月23日	2005年8月16日	2005年10月16日	2007年3月25日	2007年7月16日		
発生時刻	21時45分	18時25分	17時56分	18時34分	7時22分	16時34分	11時46分	16時05分	9時41分	10時13分		
震源地	茨城県南部	宮城県沖	新潟県中越地方	新潟県中越地方	千葉県北東部	千葉県北西部	宮城県沖	茨城県南部	能登半島沖	新潟県中越沖		
マグニチュード (M)	4.8	7.0	6.8	6.5	6.1	6.0	5.1	5.1	6.9	6.8		
震央距離 (km)	38	448	188	188	128	38	65	65	288	250		
最大加速度 (gal)	RF	X	24.8	35.0	59.4	82.5	57.3	98.6	78.3	33.1	14.0	87.3
		Y	21.7	52.6	45.1	59.6	55.4	220.0	106.9	44.9	12.0	47.4
		Z	9.4	7.3	13.6	12.8	8.1	29.8	8.5	30.4	1.6	6.6
	15F	X	13.3	17.9	27.5	39.4	30.1	61.7	36.6	23.4	6.4	43.3
		Y	11.0	25.1	23.4	35.3	25.6	117.1	54.2	15.4	5.3	27.9
		Z	7.4	5.5	10.8	9.3	5.3	33.8	7.6	13.7	0.8	4.9
	B1F	X	9.6	9.5	12.2	12.7	6.7	42.8	13.5	13.1	2.0	12.1
		Y	7.7	10.9	17.2	16.1	10.5	63.9	16.4	15.6	1.8	9.6
		Z	2.9	4.0	6.5	7.2	3.7	12.0	6.6	7.8	0.6	3.8
	GL-2m	X	31.2	15.3	26.0	23.7	12.6	99.8	28.9	40.7	(1.78)	(17.6)
		Y	20.5	15.6	32.2	29.0	17.1	92.2	23.3	49.3	2.0	14.0
		Z	15.3	7.9	13.1	12.3	5.8	25.1	11.4	18.5	1.1	7.6
計測震度	RF	3.36	4.43	4.49	4.70	4.64	5.69	3.70	3.72	3.35	4.92	
	15F	2.82	3.71	3.88	4.17	3.95	4.95	3.03	3.04	2.71	4.33	
	B1F	2.39	2.88	3.11	3.29	2.96	4.41	2.86	2.87	1.55	3.09	
	GL-2m	3.03	3.21	3.50	3.71	3.27	4.84	3.36	3.36	(1.54)	(3.39)	

※ () 内の数値は地震計故障のため計算により求めた推定であることを示す

3.3 地盤と建物の振動特性

図-6に主な観測記録のフーリエスペクトルを示す。建物系においては、X方向で0.6～0.7Hz、Y方向で0.5～0.6Hzにピークが確認でき、これが建屋の一次固有振動数と考えられる。X、Y方向とも加速度振幅の違いにより、固有振動数に多少のばらつきがみられる。地盤系においては、X、Y方向とも0.7～1.0Hzにピークが確認でき、新潟県中越地方（ケース3）、新潟県中越沖地震（ケース10）においては、2～5秒の比較的長周期成分が卓越しているのが確認できる。

図-7にB1FとRFの主なケースのフーリエスペクトル比（ParazenWindow 0.2Hz）を示す。最大加速度を記録した千葉県北西部の地震（ケース6）では、建屋の一次固有振動数がX方向で0.6Hz、Y方向で0.5Hzであるのに対し、それより小さい加速度記録では、X方向、Y方向ともやや固有振動数が高くなっていることがわかる。表-4にこれらの観測された1次固有振動数と設計固有振動数の一覧を示す。2003年、2004年に観測された地震の固有振動数がX方向で0.65～0.66 Hz、Y方向で0.61Hzであったのに対し、最大加速度が観測された地震（ケース6）ではそれより固有振動数がやや低くなっていることがわかる。その後観測された2007年の地震においては再び固有振動数が2004年と同程度になっていることがわかる。

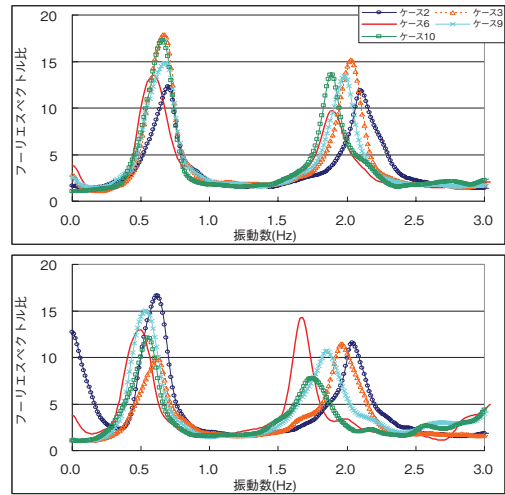


図-7 フーリエスペクトル比

表-4 固有振動数一覧

	発生日時	震源地	固有振動数(Hz)			
			X方向		Y方向	
			観測値	設計値	観測値	設計値
2	2003年5月26日18時25分	宮城県沖	0.66		0.61	
3	2004年10月23日17時56分	新潟県中越地方	0.65		0.61	
6	2005年7月23日16時34分	千葉県北西部	0.60	0.63	0.50	0.59
9	2007年3月25日09時41分	能登半島沖	0.64		0.58	
10	2007年7月16日10時13分	新潟県中越沖	0.64		0.57	

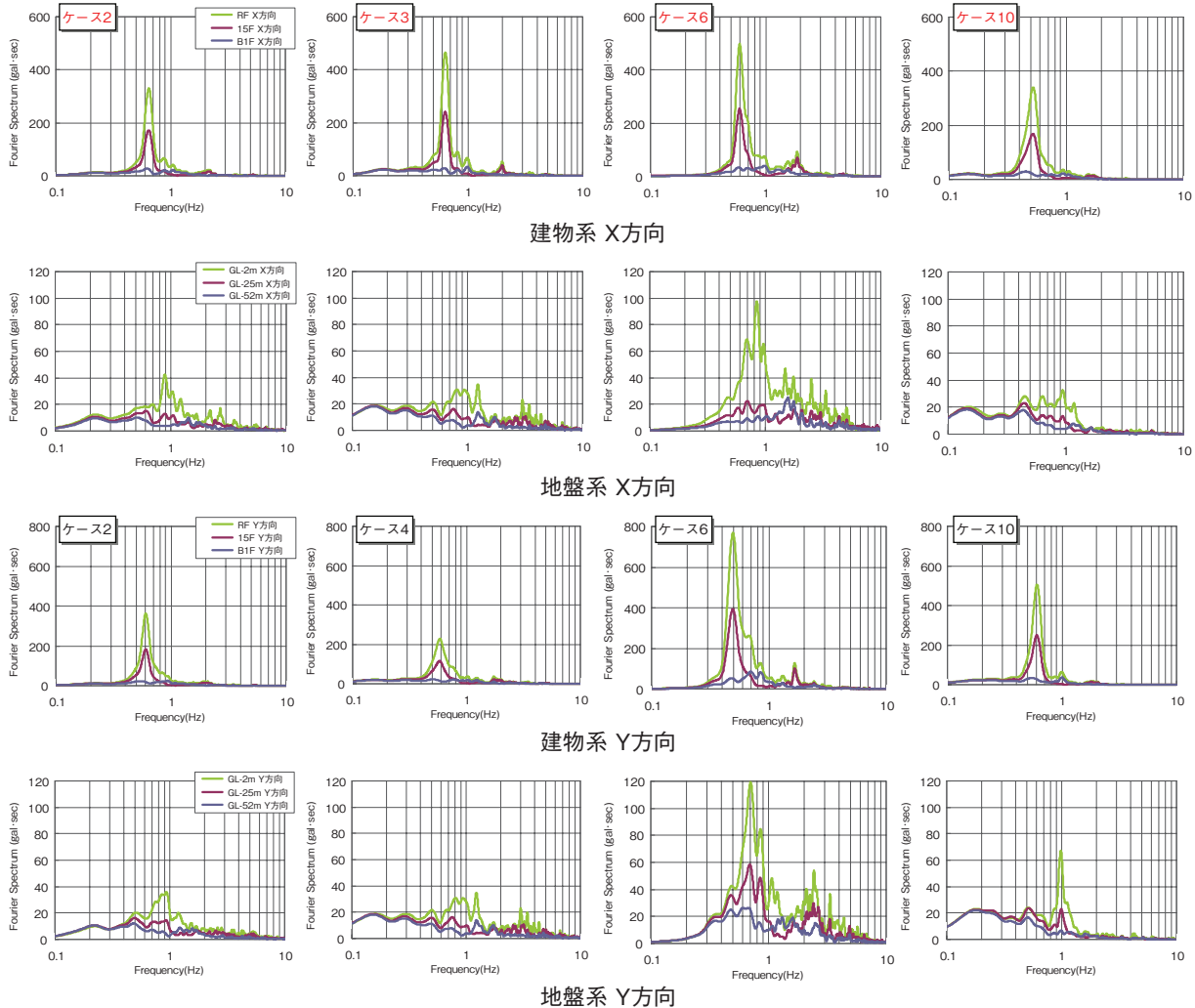


図-6 主な観測記録のフーリエスペクトル

4. シミュレーション解析

4.1 解析の概要

解析モデルは、静的増分解析結果より得られた曲げせん断バネ（剛性逓減型トリリニア）を用いた質点系モデルとした。入力波はB1Fでの観測記録とし、基礎の境界条件は固定とした。建屋の減衰は剛性比例型で1次に対して3%を考慮した。解析は、直接積分法（ニューマークβ法 $\beta = 0.25$ ）により行った。

解析ケースを表-5に示す。解析ケースは、観測された主な地震9波とした。方向ごとの入力波（B1Fの観測波）のフーリエスペクトルをまとめて図-8に示す。観測点がB1Fであることから、建物の振動数成分（約0.5～0.6Hz）も確認できる。図-9に最も大きい加速度が観測されたケース6の時刻歴を示す。

表-5 解析ケース

ケース	発生日時	震源地	深さ (km)	マグニチュード	震央距離 (km)	B1F最大加速度 (gal)	
						X方向	Y方向
1	2002年7月13日21時45分	茨城県南部	70	4.8	38	10	8
2	2003年5月26日18時25分	宮城県沖	60	7.0	448	9	11
3	2004年10月23日17時56分	新潟県中越地方	13	6.8	188	12	17
4	2004年10月23日18時34分	新潟県中越地方	14	6.5	188	13	16
5	2005年4月11日07時22分	千葉県東部	60	6.1	128	7	10
6	2005年7月23日16時34分	千葉県西部	73	6.0	38	43	64
7	2005年8月16日11時46分	宮城県沖	42	7.2	352	13	16
8	2005年10月16日16時05分	茨城県南部	47	5.1	65	13	16
10	2007年7月16日10時13分	新潟県中越沖	17	6.8	250	12	10

※ケース9は観測された加速度が小さいため解析を省略

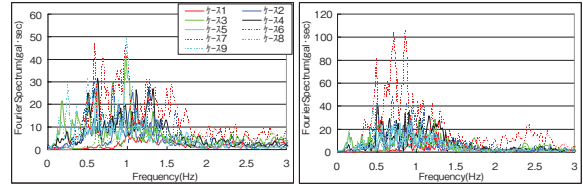


図-8 入力波のフーリエスペクトル

4.2 解析結果

図-10に最大加速度分布の解析結果と観測結果の比較を示す。ケースごとに多少のばらつきはあるものの、両者は比較的良好な対応を示しており、解析モデルの妥当性が確認できる。ただし、ケース8についてはX、Y両方向とも観測値とかなり異なる結果となった。この原因として、入力波に含まれる高振動数成分と解析モデルの減衰特性が挙げられる。図-11、図-12にそれぞれケース8とケース4（観測値との対応が比較的良好なケース）のフーリエスペクトルとRFの加速度時刻歴の比較を示す。ケース4では1Hz以

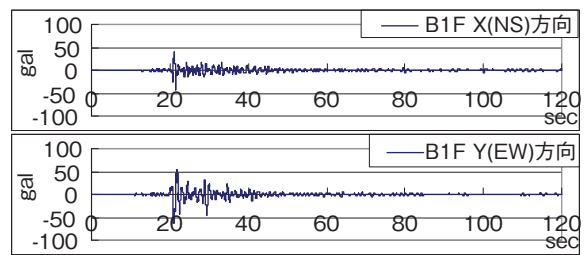


図-9 入力波の加速度時刻歴（ケース6）

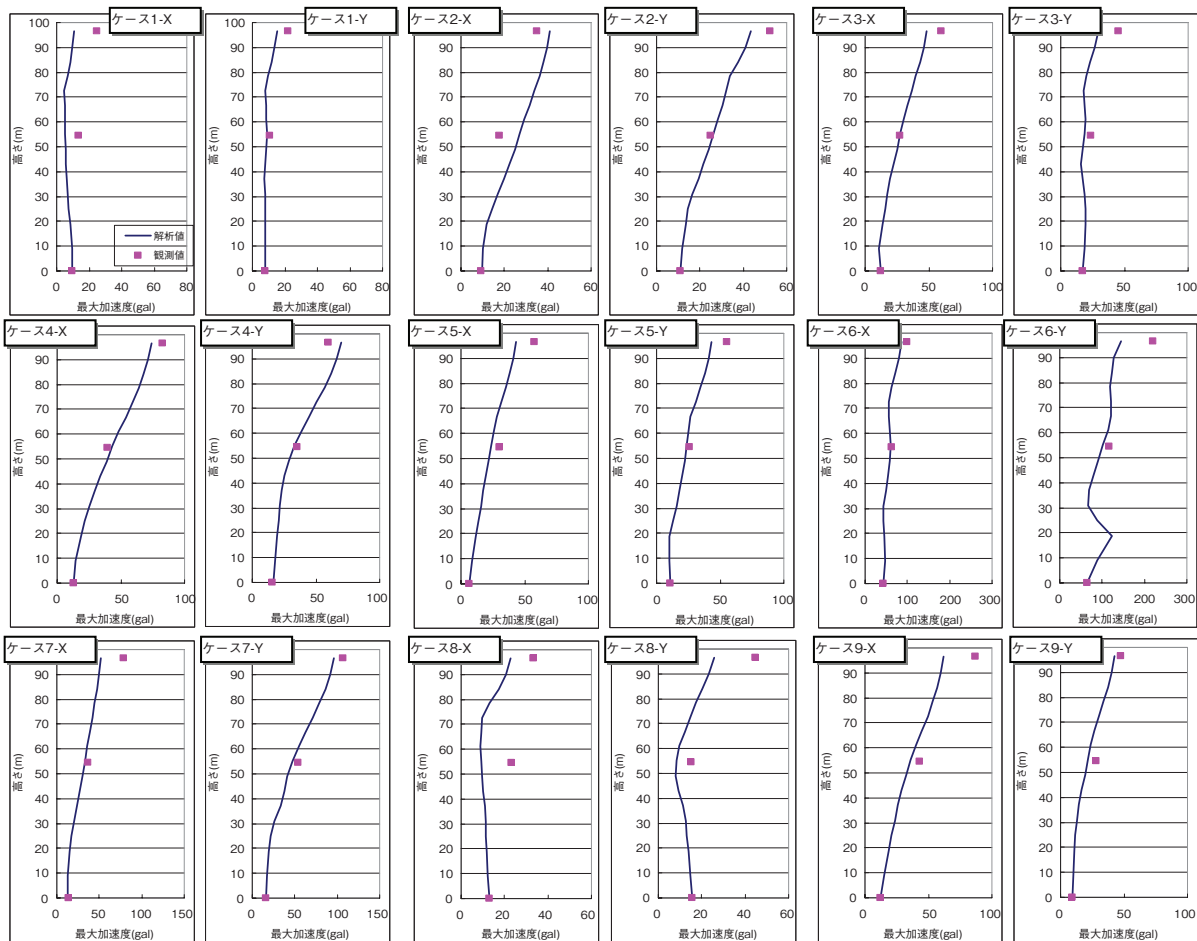


図-10 最大加速度分布

下の振動数成分が卓越しているのに対し、ケース8では2Hz以上の成分が卓越しているのが確認できる。本解析モデルは減衰を剛性比例型としているため、高振動数帯での減衰が大きくなり、解析値は観測値より小さくなっていると考えられる。

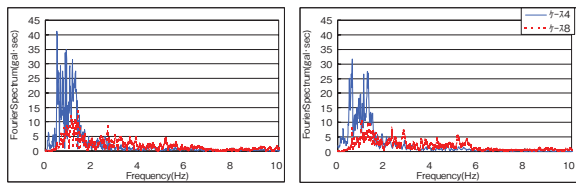


図-11 フーリエスペクトルの比較 (ケース4とケース8)

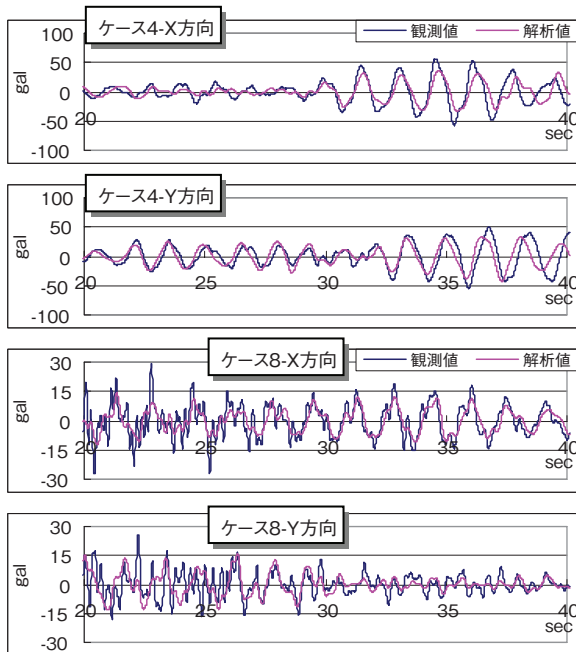


図-12 RF時刻歴の比較 (ケース4とケース8)

次に、RFで最大220galの加速度を記録した千葉県北西部の地震(ケース6)における各階の変形とせん断力の解析結果を図-13に示す。図中の線は建屋各層の復元力を、□印は解析結果を示している。X方向においては、第1折れ点を超えるせん断力が生じる階はないものの、Y方向においてはほとんどの階で第1折れ点を超えるせん断力が生じたことが推測される。ただし、図-14に示す設計用せん断力に対して十分小さな値であり、建屋の健全性にはまったく問題のないレベルであると言える。図-15に各階の層間変形角の解析結果を示す。最大層間変形角は、Y方向において1/500を上回る程度であった。X方向においては最大でも1/1800程度であった。

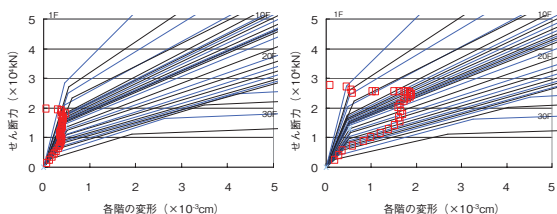


図-13 各階の最大せん断力

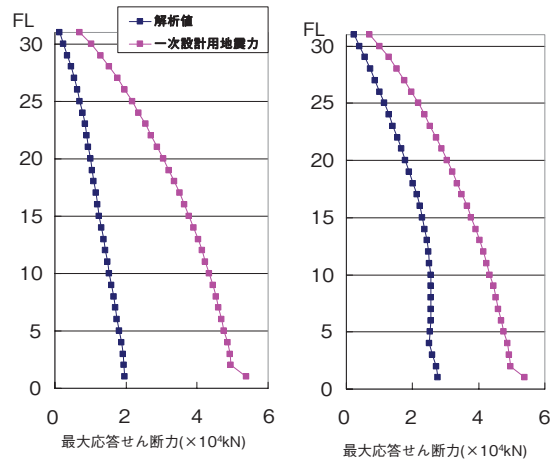


図-14 最大せん断力と設計用せん断力の比較

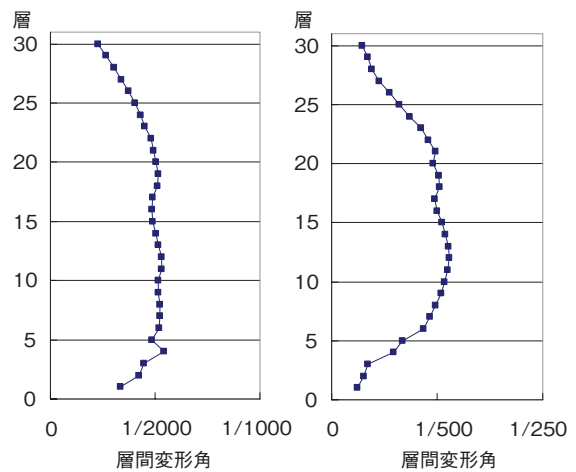


図-15 建屋の層間変形角

5. まとめ

1999年4月より地震観測を実施し、この間233波の地震が観測され、さまざまな有用なデータが得られた。最大の観測記録は2005年7月23日に発生した千葉県北西部における地震で、RFにおいて最大220gal(計測震度5.7)であった。また、中越地方地震、中越沖地震においても50galを超える地震が観測され、さらに遠方の能登半島沖、福岡県西方沖地震においても規模は小さいものの観測されている。

最大加速度を記録した地震については、詳細なシミュレーション解析により最大せん断力、層間変形角を求め、建屋の安全性に問題がないことを確認した。また、この地震の前後における建物の振動特性を比較し、比較的大きな地震と、小規模な地震では建物の振動特性が異なることを確認した。

観測結果とシミュレーション解析は良好な対応を示し、解析モデルの妥当性が確認できた。

現在までの観測においてGL-2mの観測装置が故障しているものの、その他の観測装置は順調に作動しており、今後も引き続き観測を続けていく予定である。