

# 東北地方太平洋沖地震における RC 造超高層建物の地震応答評価

## Evaluation of Earthquake Response of High-rise Building during the 2011 off the Pacific Coast of Tohoku Earthquake

井川 望\*<sup>1</sup> 藤井 睦\*<sup>1</sup>  
Nozomu Ikawa Atsushi Fujii  
伊藤 真二\*<sup>1</sup> 古城 豊光\*<sup>2</sup>  
Shinji Ito Toyomitsu Furuki

### 要旨

千葉県浦安市の RC 造超高層集合住宅において地震観測を行っている。2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震では、最上階で  $366\text{cm/s}^2$  の今までで最も大きな加速度が観測された。この記録について、数値解析による検証を行い、設計時のモデルより、剛性を 15%低減させることにより、観測記録と良い対応を示すことが分かった。さらに、4 月 11 日の地震について検討を行い、東北地方太平洋沖地震と連続して解析を行うことにより、同じモデルで良い対応を示すことが分かった。

さらに、長期間にわたり観測された記録から、建物の 1 次固有周期の変化について検討を行い、東北地方太平洋沖地震前後でかなり変化しているが、それ以前においても時間の経過とともに固有周期が徐々に長くなっていることが確認された。

キーワード：超高層住宅 東北地方太平洋沖地震 地震観測 応答解析

## 1. はじめに

地震時の建物応答の特性を把握し、耐震設計の基礎資料を得るために千葉県の超高層建物において地震観測を行っている。2011 年 3 月 11 日の東北地方太平洋沖地震では、最上階で  $366\text{cm/s}^2$  の今までで最も大きな加速度が観測された。この記録とその後の地震記録について、数値解析による地震時の応答評価を行った。また、長期間にわたり観測された記録から、建物の固有周期の変化について検討を行った。これらの検討の概要を報告する。



写真 1 建物外観

## 2. 建物概要

本建物は千葉県浦安市に 1996 年に竣工した 28 階建ての超高層集合住宅である。写真 1 に建物外観を、図 1 に軸組図と基準階伏図を示す。鉄筋コンクリート造のラーメン構造であり、基準階階高は 2.85m、軒高は 81.5m である。東西、南北方向ともスパン 5.2m の 5 スパンの平面形状で、建築面積は  $826\text{m}^2$ 、延床面積は  $18,828\text{m}^2$  である。基礎は場所打ちコンクリート拡底杭と地中連続壁杭を併用している。

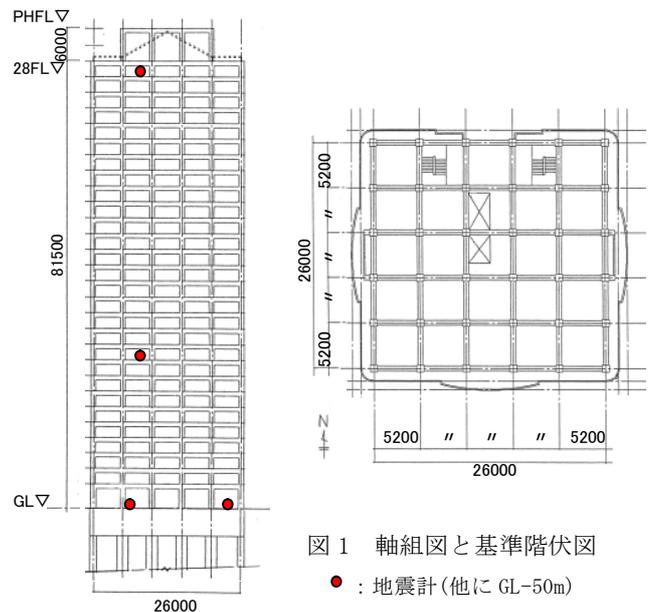


図 1 軸組図と基準階伏図

●：地震計(他に GL-50m)

\*1 技術研究所 建築技術研究部門 \*2 東京本店 建築設計部

この建物には加速度計が28階、10階、1階（2ヶ所）と地盤（杭先端レベルGL-50m）のあわせて5ヶ所に1～3成分設置され、全部で12成分である。地盤加速度が1 cm/s<sup>2</sup>を超えた場合に、100Hz サンプリングで収録を行っている（遅延時間 20 秒）。

表1 最大加速度(単位: cm/s<sup>2</sup>)

	南北	東西	上下
28階	366.5	264.6	94.8
10階	181.8	143.1	-
1階	90.0	93.6	46.2,48.5
杭先端	63.3	85.1	33.6

### 3. 観測記録<sup>1)</sup>

東北地方太平洋沖地震での28階と1階の水平方向加速度波形を図2に示す。なお、708秒の記録が得られているが、最初の300秒のみ表示している。また、全観測点の最大加速度を表1に、1階に対する28階と10階の水平方向の最大相対変位を表2に示す。28階の最大加速度は366.5 cm/s<sup>2</sup>（南北方向）、264.6 cm/s<sup>2</sup>（東西方向）であり、約90cm/s<sup>2</sup>である1階の3～4倍に増幅している。加速度から求めた1階の速度は両方向とも約20cm/sであり、1階の計測震度は4.7(震度5弱)である。加速度から求めた1階に対する相対変位を観測位置の高さで割ることにより求めた変形角は南北方向で1/180、東西方向で1/300程度である。地表では観測していないが、約2.5km離れたK-NET浦安(CHB008)の水平2方向の最大加速度はともに100 cm/s<sup>2</sup>を超え、最大速度はともに約27cm/sである。

表2 最大相対変位(cm)

	南北	東西
28階	44.6	26.5
10階	17.8	9.9

### 4. 解析モデル

設計時には、地上28階、塔屋2階を南北、東西方向ごとに1層1質点(計30質点)とする曲げせん断型モデルが用いられ、1階柱脚位置に線形のスウェイ・ロッキングばねが考慮されている。静的荷重増分解析結果をもとに、ひび割れ耐力、初期降伏点を折れ点とするトリリニアモデルが設定されている。復元力特性は原点指向 Degrading Tri-Linear で、減衰は、上部構造3%(瞬間剛性比例)、スウェイ5%、ロッキング3%であった。

今回の検討では、各階重量、剛性、ロッキングのばね剛性、減衰、復元力特性などは設計時のものを基本とし、1階での観測記録を入力地震波とする。ただし、1階での記録を入力地震波とするため、スウェイ成分は入力に含まれているものと考え、スウェイばねは考慮しないものを基本とする。設計時に用いられたスウェイ・ロッキングモデル(以下、SRモデル)、スウェイばねを除いたロッキングモデル(以下、Rモデル)、さらにロッキングばねも除いた基礎固定モデルの固有周期を表3に示す。

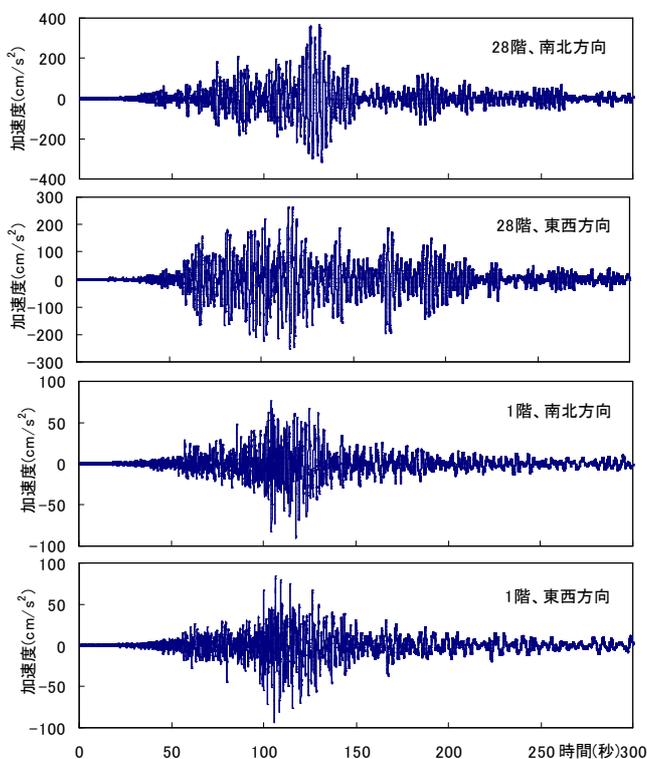


図2 観測記録の加速度波形

表3 解析モデルの固有周期(単位:秒)

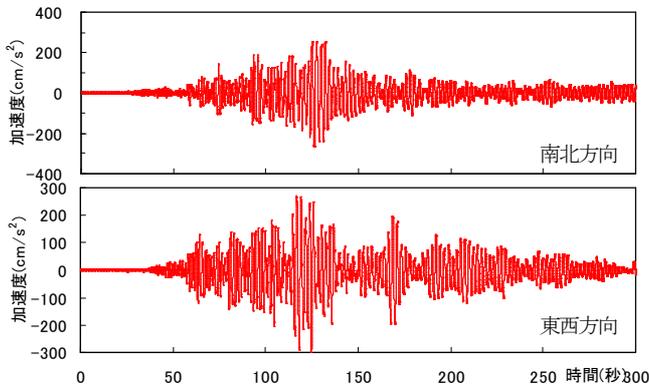
	南北方向		東西方向	
	1次	2次	1次	2次
SRモデル	1.60	0.50	1.61	0.51
Rモデル	1.55	0.46	1.55	0.47
基礎固定モデル	1.40	0.46	1.41	0.47

### 5. 解析結果

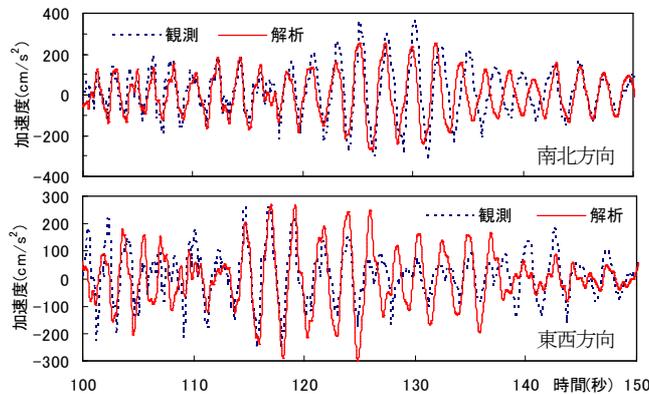
#### 5.1 東北地方太平洋沖地震

設計時のSRモデルからスウェイばねを除いたRモデルによる加速度波形を図3に示す。観測記録は708秒得られているが、図2に示した300秒について解析を行った。解析結果は観測記録のある28階と10階で検討したが、以下の波形は28階を中心に紹介する。また、他のモデルも合わせて、28階と10階の加速度と変位の最大値を観測値とともに表4に示す。

このモデルによる応答結果は観測記録とあまり対応が良くない。波形を詳細に見ると、解析のほうがやや周期が短いことが分かる(特に南北方向)。ロッキングばねは設計時のままとして、上部構造の剛性を変化させ、観測記録と良い対応を示すモデルを探した。また、減衰定数も幾つかの値について計算した。その結果、南北、東西方向とも 15% 剛性を低下させた場合が最も良い対応を示すことが分かった。なお、減衰については東西方向は設計値の 3% でほぼ良い対応を示したが、南北方向については 3% ではやや大きく、2.5% が良い対応を示したので、2.5% とした。このモデル(剛性調整 R モデル)の加速度波形を図 4、最大値を表 4 に示す。



(a) 解析結果

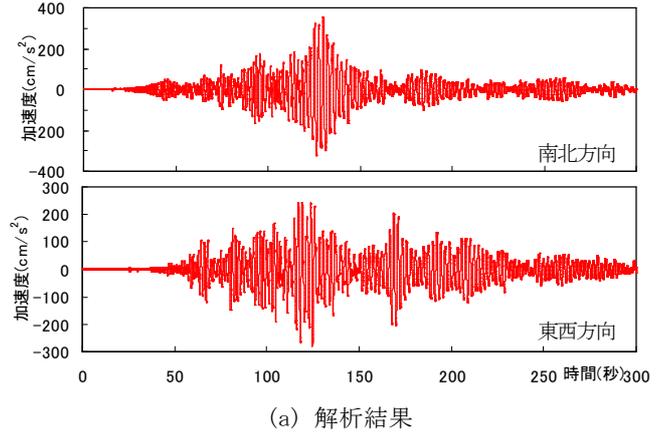


(b) 拡大図(観測記録との重ね書き)  
図 3 加速度波形 (R モデル、28 階)

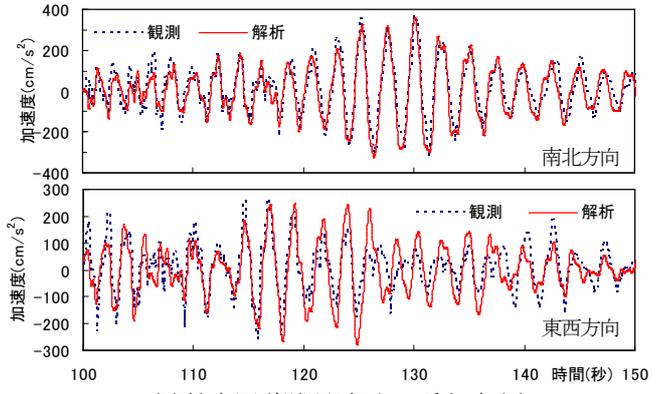
表 4 最大値一覧

	南		北		東		西	
	加速度(cm/s <sup>2</sup> )	変位(cm)						
観測	366.5	181.8	44.6	17.8	264.6	143.1	26.5	9.9
SRモデル	345.4	195.2	49.2	20.1	298.3	167.9	37.0	15.2
	(0.94)	(1.07)	(1.10)	(1.13)	(1.13)	(1.17)	(1.40)	(1.53)
Rモデル	267.1	146.4	36.7	14.5	301.0	147.7	34.3	12.4
	(0.73)	(0.81)	(0.82)	(0.81)	(1.14)	(1.03)	(1.29)	(1.24)
剛性調整 Rモデル	357.4	189.9	50.1	19.4	279.2	139.0	32.3	11.7
	(0.98)	(1.04)	(1.12)	(1.09)	(1.06)	(0.97)	(1.22)	(1.18)

カッコ内は観測記録に対する比

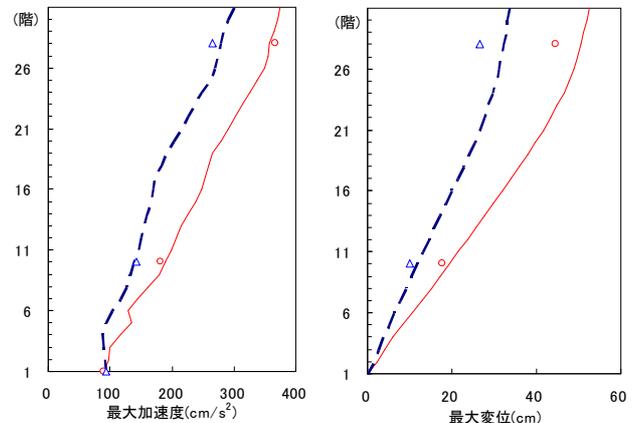


(a) 解析結果



(b) 拡大図(観測記録との重ね書き)  
図 4 加速度波形 (剛性調整 R モデル、28 階)

剛性を調整した R モデルによる最大応答値分布を図 5 に示す。解析による変位は観測記録の積分値より求めた変位よりやや大きい、層間変位の最大は南北方向で 2.3cm (7 階)、東西で 1.3cm (14 階) である。なお、両方向とも、上から数層を除き復元力特性の第 1 折れ点(ひび割れ耐力)を超え、非線形領域に達しているが、保有水平耐力には余裕があり、構造安全性は問題ないものと考えられる。



(a) 最大加速度分布  
図 5 最大応答値分布

(b) 最大変位分布  
南北方向 東西方向  
観測 解析

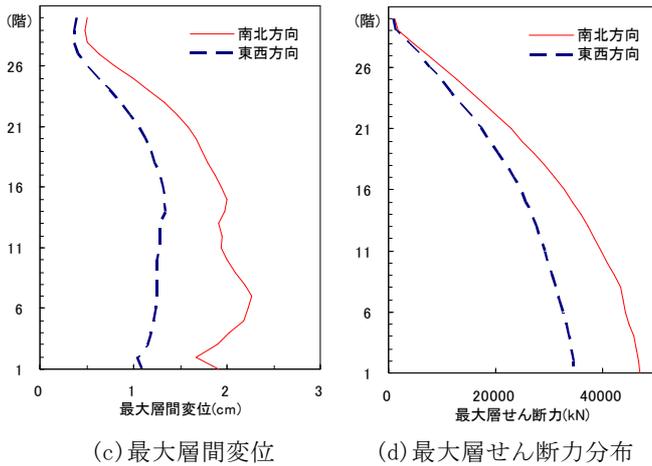


図5 最大応答値分布(続き)

### 5.2 2011年4月11日の地震

東北地方太平洋沖地震後の地震についても検討を行った。一例として4月11日の地震(マグニチュード7.0、震源 福島県浜通り 深さ6km)についての結果を示す。28階加速度の観測記録を図6に示す。この地震でも設計時のモデルをもとにしたRモデルでは観測記録との対応がよくなく、両方向とも、建物剛性を設計モデルの40%程度に低減させるとほぼ観測記録と対応する結果が得られた。次に、東北地方太平洋沖地震の解析後、4月11日の地震を続けて解析する連続解析(東北地方太平洋沖地震の入力加速度データの後に、建物応答が十分に小さくなる長さの0データを加え、その後4月11日の入力加速度を加え、1つの入力加速度として解析)を実施した。東北地方太平洋沖地震の解析で用いたモデル(上部構造の剛性を設計モデルから15%低下させたもの)を用いた。28階解析結果を図7に示す。ほぼ観測記録と対応する結果となっており、東北地方太平洋沖地震以後の地震については、この地震による影響を考慮する必要があり、連続して解析を行うことにより評価できるものと考えられる。

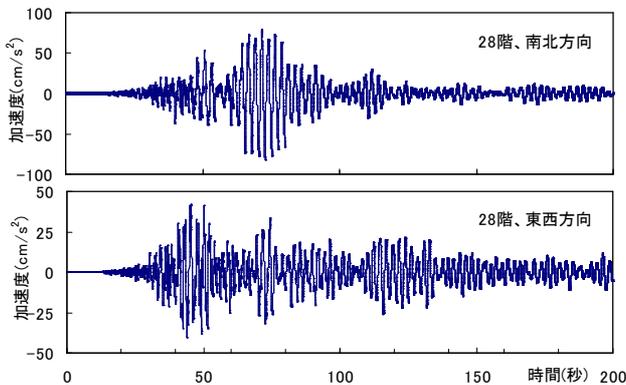
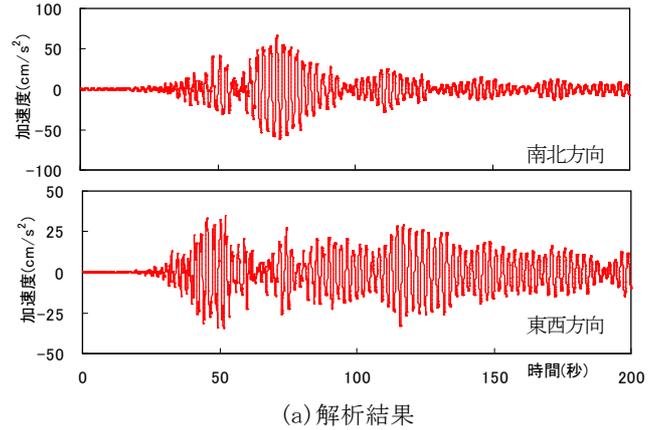
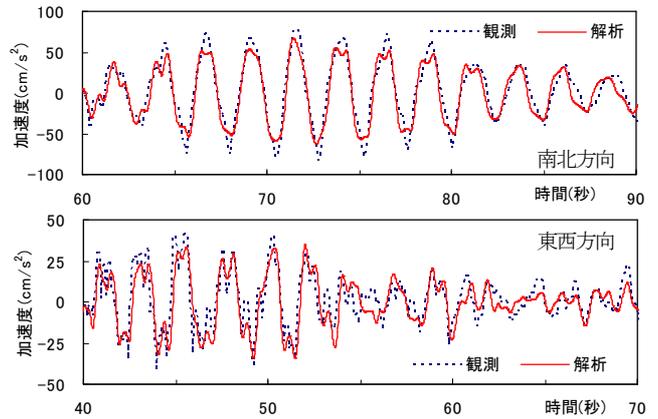


図6 観測記録の加速度波形(2011年4月11日の地震)



(a) 解析結果



(b) 拡大図(観測記録との重ね書き)

図7 加速度波形 拡大図(2011年4月11日の地震、28階) 剛性調整Rモデル、2011年3月11日との連続解析

### 6. 1次固有周期の変化

RC造超高層建物における観測記録から得られる固有周期は、設計時の解析モデルの固有周期より短く評価される場合が多い。解析モデルでは考慮されていない非構造部材の影響、コンクリートの材料強度・弾性係数の設計値との相違等により上部構造の剛性が解析モデルよりやや硬くなっているものと考えられる。本建物においても、1996年9月の地震(28階最大加速度が $60\text{cm/s}^2$ 程度)についての検討<sup>2)</sup>においては設計時の剛性を30%弱大きくすることにより、観測記録と良い対応を示した。今回、東北地方太平洋沖地震では、逆に剛性を小さく評価する必要があることがわかった。建物の固有周期については、経年変化が見られることが報告されている<sup>3,4)</sup>ので、本建物においても、固有周期の経年変化について検討を行った。

図8に観測開始からの地震記録から求めた1次固有周期の変化を示す。1次固有周期は1階に対する28階応答加速度の伝達関数から求めた。なお、固有周期に振幅依存性があるので、28階加速度が $10\text{cm/s}^2$ 以上と未満を分けて示す。東北地方太平洋沖地震前後でかなり変化しているが、それ

以前においても時間の経過とともに固有周期が徐々に長くなっている(南北方向で 15 年で 20%程度、東西方向でそれよりやや大)。東西方向では、2003 年 5 月 26 日の地震時に、設計時の R モデルと同程度、2004 年 10 月 6 日の地震時には設計時の R モデルより長く、さらに、2005 年 7 月 23 日の地震以降では、設計時の SR モデルの周期よりも長い場合が幾つかみられる。

東北地方太平洋沖地震についての検討と同様に、それ以前の表 5 に示す地震について解析による検討を行った。その結果、2003 年 5 月 26 日の地震と 2005 年 7 月 23 日の地震の東西方向、2003 年 8 月 16 日の地震の南北・東西方向では 28 階で  $100\text{cm/s}^2$  を超え、解析モデルの第 1 折れ点(ひび割れ耐力)を超え、非線形領域に達していることが確認された。また、非線形領域に達する地震の前後で、最適な解析モデルの周期が変化することも分かった。

図 9 に 28 階最大加速度と 1 次固有周期の関係を示す。2003 年 5 月 26 日、2005 年 8 月 16 日、2011 年 3 月 11 日で区切り、記号を変えて表示している。2011 年 3 月 11 日だけでなく、2003 年 5 月 26 日(東西方向のみ)、2005 年 8 月 16 日など応答が非線形領域に達する大きな変形を生じた地震の前後で、固有周期が変化していることが分かる。なお、同じ期間内の記録では、加速度が大きくなると固有周期が長くなる振幅依存性が見られる。

表 5 観測された代表的な地震の諸元

観測日時	震央	マグニチュード*	深さ(km)	最大加速度( $\text{cm/s}^2$ )
2003 年 5 月 26 日 18:26	宮城県沖	7.0	71	112.5
2004 年 10 月 6 日 23:41	茨城県南部	5.8	60	101.5
2005 年 7 月 23 日 16:42	千葉県北西部	6.0	90	140.7
2005 年 8 月 16 日 11:47	宮城県沖	7.2	42	147.2

最大加速度は 28 階東西方向の最大加速度

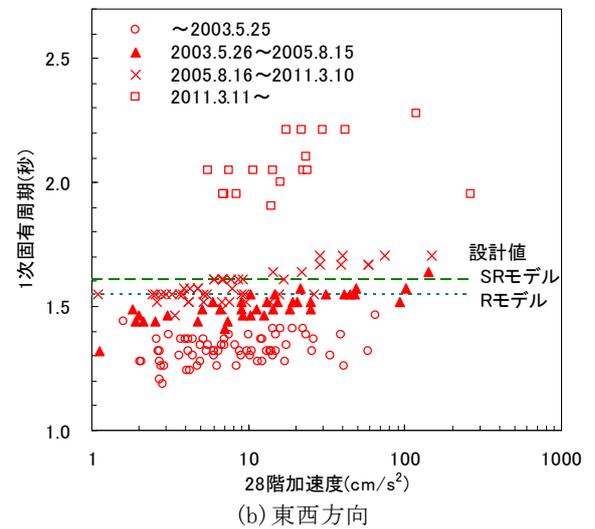
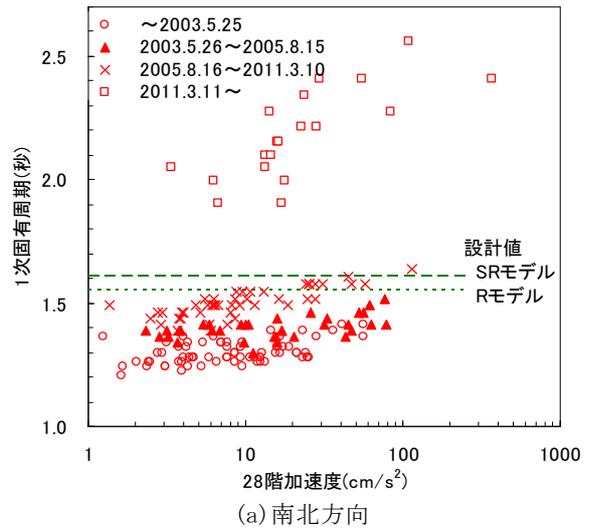


図 9 28 階最大加速度と 1 次固有周期

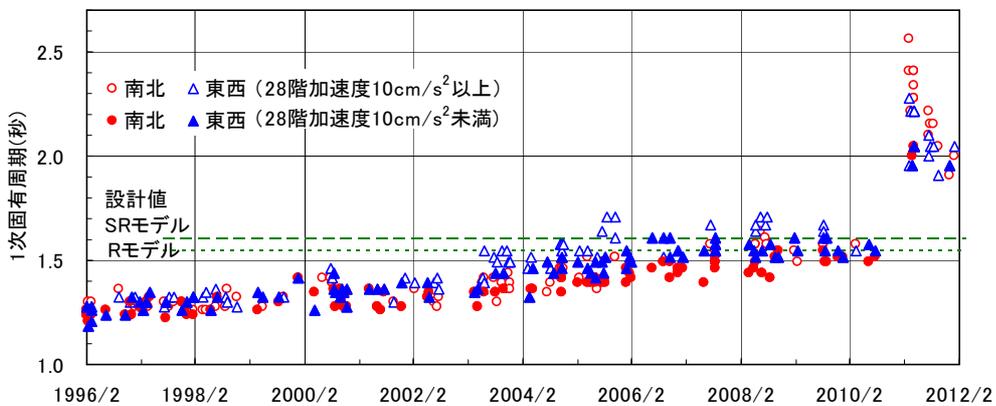


図 8 1 次固有周期の経年変化

## 7. まとめ

地上 28 階建ての RC 造超高層集合住宅において東北地方太平洋沖地震で観測された地震記録を用いて検証を行った。設計時のモデルをもとにしたロッキングモデルでは、あまり観測記録を再現できず、上部建物の剛性を調整（南北、東西方向とも 15%低下）したモデルを用いることにより、観測記録をよく再現できることが確認された。

東北地方太平洋沖地震後の地震については、東北地方太平洋沖地震時の解析モデルより剛性を低下させることにより、観測記録をよく再現できた。また、東北地方太平洋沖地震との連続解析を行うことにより、同じ解析モデルでも良い対応を示した。

さらに、長期間にわたり観測された記録から、建物の 1 次固有周期の変化について検討を行い、東北地方太平洋沖地震前後で変化しているが、それ以前においても時間の経過とともに固有周期が徐々に長くなっている（15 年で 20%程度）ことが確認された。

今後も地盤特性を考慮した解析など本建物の応答特性の検討をさらに行う予定である。

## 謝辞

本建物の地震観測は独立行政法人都市再生機構との共同研究として行っているものである。ご協力いただいた関係各位に厚くお礼申し上げます。

## 参考文献

- 1) 井川望、藤井睦、伊藤真二：東北地方太平洋沖地震における地震観測建物の観測記録、鴻池組技術研究報告、Vol. 21、pp. 45-48、2011. 7
- 2) 井川望、伊藤真二ほか：軟弱地盤に建つ鉄筋コンクリート造超高層住宅の振動特性、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 II、pp. 723-724、1997. 9
- 3) 川島学、永野正行、鹿嶋俊英、井口道雄：長期間に亘る地震観測記録により観察される建物動特性の変化と回帰推定式による予測精度、第 13 回日本地震工学シンポジウム、pp. 1530-1537、2010. 11
- 4) 炭村晃平、土肥博、千葉大輔、余湖兼右：長期地震観測記録による高層建物の振動特性評価、日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 II、pp. 163-164、2008. 9