

地震観測とシミュレーション解析に基づく 超高層 RC 造集合住宅の振動特性変化に関する検討

STUDY ON CHANGING SEISMIC RESPONSE CHARACTERISTICS OF HIGH-RISE R/C RESIDENTIAL BUILDING BASED ON SEISMIC OBSERVATION AND RESPONSE SIMULATION

山本 健史*¹, 保井 美敏*¹
Takeshi YAMAMOTO and Mitoshi YASUI

Seismic response characteristics of structure change over the years, because to respond by large or middle-level earthquakes. First, this study gives review the changes of characteristics of a certain high-rise R/C residential building on the records of seismic observation for long period. The subject of experiment is measured seismic response for 16 years, and it was shaken by 2011 off the coast of Tohoku earthquake. Second, the pattern of changes was simulated by seismic response simulation, input the signal connected a number of seismic motion of observed records including 2011 off the coast of Tohoku earthquake.

The changes of seismic response characteristics relate to damage of the structure and soundness of the structure. And there is a possibility that the pattern of changes is functional to Structural Health Monitoring.

Keywords : Seismic Observation, High-Rise R/C Building, Response Characteristics, Natural Frequency, Response Simulation

地震観測, 超高層 RC 造, 振動特性, 固有振動数, 地震応答解析

1. はじめに

建築構造物が中・大規模の地震を経験することによって、その振動特性が経年変化し、固有振動数は低下していく様が報告されている¹⁾。その様子は、長期にわたる地震観測を行いその記録を観察することによって示される。これは、RC 部材の微細なひび割れなどによるものと考えられる。

筆者らは、関東地方に実在する超高層 RC 造集合住宅を対象として、1999 年の竣工以来 16 年に亘って地震観測を継続しており、構造物の振動特性の変化を観察してきた^{2,3)}。その間に、2011 年東北地方太平洋沖地震をはじめとする、比較的大きな地震による揺れも経験した。

筆者らはこれまでに、2011 年東北地方太平洋沖地震における RC 造超高層集合住宅の地震時応答を詳細なシミュレーション解析によって再現し、RC 構造物のひび割れ点を超える応答により、振動特性が変わる様子を確認している^{4,5)}。構造物の固有振動数の変化は、構造ヘルスマモニタリングの判定要素として用いることができると考えられ^{6,7)}、これを正確にとらえることは正確な構造物健全性の判定に繋がる。

本報告では、長期の地震観測記録に基づき、複数回の地震応答を経験して、超高層 RC 造集合住宅の振動特性が変化していく様子を示し、さらに観測された複数の地震を連続して入力する地震応答シミュレーション解析に基づいてその様子を再現し、地震応答により、順次、剛性低下していく様子確かめられることを検証した。

2. 検討対象建物の概要

検討の対象は、実在する地上 30 階/地下 1 階建て(高さ 95.9M, 平面寸法 X:38.4M×Y:32.4M)の RC 造集合住宅である。図 - 1 に建物の概要と地震計の配置を示す。この建物は、関東平野の比較的軟弱な地盤上に立地しており、先端深さ 49.7M の杭に支持されている。

地震計は、建物の屋上階、15 階、地下 1 階および地盤の GL-2M, GL-25M, GL-52M の合計 6 箇所に設

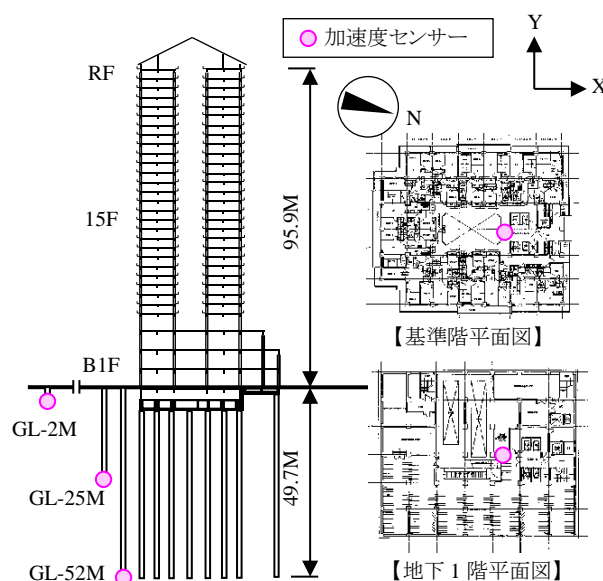


図 - 1 建物概要と地震計配置

*1 戸田建設備技術開発センター 修士 (工学)

Research and Development Center, TODA CORPORATION, M.Eng

表 - 1 地震観測記録一覧（一部省略）

| No. | 発生日時 | 震源地 | マグニチュード | No. | 発生日時 | 震源地 | マグニチュード |
|--------------|-------------|-----------|---------|--------------|-------------|--------|----------|
| 1 | 1999年4月8日 | ウツノオストク付近 | 7.3 | 266 | 2011年3月9日 | 三陸沖 | 7.3 |
| 2 | 1999年4月25日 | 千葉県北東部 | 4.6 | 267 | 2011年3月10日 | 三陸沖 | 6.4 |
| 3 | 1999年4月25日 | 茨城県北部 | 5.2 | 268 | 2011年3月10日 | 三陸沖 | 6.8 |
| 4 | 1999年5月13日 | 釧路支庁中南部 | 6.1 | 269 | 2011年3月11日 | 三陸沖 | 9.0 (Mw) |
| 5 | 1999年6月27日 | 茨城県南部 | 4.4 | 270 | 2011年3月11日 | 福島県沖 | 6.8 |
| 6 | 1999年7月15日 | 茨城県南部 | 4.8 | 271 | 2011年3月11日 | 茨城県沖 | 5.8 |
| 7 | 1999年8月9日 | 千葉県北西部 | 4.6 | 272 | 2011年3月11日 | 福島県沖 | 6.4 |
| 8 | 1999年8月11日 | 東京湾 | 4.2 | 273 | 2011年3月11日 | 茨城県沖 | 5.8 |
| 9 | 1999年9月13日 | 千葉県北西部 | 5.1 | 274 | 2011年3月11日 | 岩手県沖 | 7.4 |
| 10 | 1999年10月16日 | 茨城県沖 | 5.0 | 275 | 2011年3月11日 | 茨城県沖 | 7.7 |
| 11 | 1999年11月15日 | 宮城県沖 | 5.7 | 276 | 2011年3月11日 | 岩手県沖 | 6.1 |
| 12 | 1999年12月4日 | 茨城県沖 | 5.0 | 277 | 2011年3月11日 | 三陸沖 | 7.5 |
| 13 | 2000年1月28日 | 根室半島南東沖 | 6.8 | 278 | 2011年3月11日 | 三陸沖 | 6.8 |
| 14 | 2000年3月28日 | 父島近海 | 7.3 | 279 | 2011年3月11日 | 茨城県沖 | 5.5 |
| 15 | 2000年4月10日 | 茨城県南部 | 4.9 | 280 | 2011年3月11日 | 宮城県沖 | 5.6 |
| 16 | 2000年5月16日 | 鹿島灘 | 4.8 | 281 | 2011年3月11日 | 茨城県沖 | 6.1 |
| 17 | 2000年6月3日 | 千葉県北東部 | 5.8 | 282 | 2011年3月11日 | 福島県沖 | 6.7 |
| 18 | 2000年6月10日 | 東海道沖 | 6.7 | 283 | 2011年3月11日 | 茨城県沖 | 6.7 |
| 19 | 2000年6月29日 | 三宅島近海 | 5.0 | 284 | 2011年3月11日 | 福島県沖 | 6.4 |
| 20 | 2000年6月29日 | 三宅島近海 | 5.5 | 285 | 2011年3月11日 | 三陸沖 | 6.4 |
| 21 | 2000年7月1日 | 福島県沖 | 5.3 | 286 | 2011年3月11日 | 岩手県沖 | 6.5 |
| 22 | 2000年7月1日 | 新島・神津島近海 | 6.1 | 287 | 2011年3月11日 | 茨城県沖 | 6.6 |
| ... (中略) ... | | | | 288 | 2011年3月11日 | 茨城県沖 | 6.7 |
| 181 | 2005年5月15日 | 栃木県南部 | 4.8 | 289 | 2011年3月11日 | 福島県沖 | 5.9 |
| 182 | 2005年5月19日 | 千葉県東方沖 | 5.4 | 290 | 2011年3月11日 | 茨城県沖 | 5.2 |
| 183 | 2005年6月1日 | 東京湾 | 4.1 | 291 | 2011年3月11日 | 福島県沖 | 6.1 |
| 184 | 2005年6月1日 | 東京湾 | 3.7 | 292 | 2011年3月11日 | 茨城県沖 | 5.7 |
| 185 | 2005年6月1日 | 東京湾 | 4.2 | 293 | 2011年3月11日 | 岩手県沖 | 6.7 |
| 186 | 2005年6月2日 | 茨城県南部 | 4.0 | ... (中略) ... | | | |
| 187 | 2005年6月9日 | 千葉県北西部 | 4.5 | 435 | 2013年12月21日 | 茨城県南部 | 5.2 |
| 188 | 2005年6月10日 | 千葉県北西部 | 4.2 | 436 | 2013年12月21日 | 千葉県東方沖 | 5.5 |
| 189 | 2005年6月20日 | 千葉県北東部 | 5.6 | 437 | 2013年12月31日 | 茨城県北部 | 5.4 |
| 190 | 2005年7月10日 | 八丈島東方沖 | 5.8 | 438 | 2014年4月18日 | 茨城県南部 | 4.7 |
| 191 | 2005年7月23日 | 千葉県北西部 | 6.0 | 439 | 2014年5月5日 | 伊豆大島近海 | 6.0 |
| 192 | 2005年7月28日 | 茨城県南部 | 5.0 | 440 | 2014年5月13日 | 千葉県北西部 | 4.9 |
| 193 | 2005年8月7日 | 千葉県北西部 | 4.7 | 441 | 2014年6月16日 | 福島県沖 | 5.8 |
| 194 | 2005年8月8日 | 茨城県沖 | 5.6 | 442 | 2014年6月20日 | 千葉県北西部 | 4.4 |
| 195 | 2005年8月16日 | 宮城県沖 | 7.2 | 443 | 2014年7月12日 | 福島県沖 | 7.2 |
| 196 | 2005年8月21日 | 新潟県中越地方 | 5.0 | 444 | 2014年7月19日 | 茨城県南部 | 4.2 |
| 197 | 2005年8月24日 | 三陸沖 | 5.9 | 445 | 2014年8月24日 | 茨城県南部 | 4.3 |
| 198 | 2005年8月31日 | 三陸沖 | 6.3 | 446 | 2014年9月16日 | 茨城県南部 | 5.6 |
| 199 | 2005年9月9日 | 千葉県東方沖 | 4.9 | 447 | 2014年11月22日 | 長野県北部 | 6.7 |
| 200 | 2005年9月20日 | 千葉県北西部 | 4.3 | 448 | 2014年12月20日 | 福島県沖 | 6.0 |
| 201 | 2005年10月1日 | 千葉県北西部 | 3.9 | 449 | 2014年12月25日 | 茨城県南部 | 4.0 |
| ... (中略) ... | | | | (全 449 波) | | | |

置してある。ここでは、ほぼ南北方向にあたる構造軸方向を X 方向（北を正とする）とし、東西方向にあたる構造軸方向を Y 方向（西を正とする）とする。2011 年東北地方太平洋沖地震の際には、地盤の GL-2M と GL-25M の地震計は故障により欠測中であつたが、2012 年 3 月に復旧工事を行い、全観測点での地震観測を再開して現在に至る。

この建物では、1999 年 3 月の竣工直後から地震観測を行っており、2014 年末までに 447 の地震記録が得られている。代表的な地震観測記録を表 - 1 に示す。

3. 地震観測記録に基づく固有振動数の変化

3.1 経時変化

図 - 2 に地震観測記録および常時微動測定結果から求めた固有振動数の経時変化を示す。固有振動数は、フーリエスペクトル比のピークサーチによって求めた。

竣工時の常時微動測定結果(1999年3月11日実施)から推定された固有振動数は X 方向で 0.74Hz、Y 方向で 0.68Hz であつた。初期の小規模地震(2000年4月10日発生・茨城県南部・M4.9)の観測記録から推定した固有振動数は、X 方向で 0.71Hz、Y 方向では 0.65Hz である。

その後、時間が経つにつれて徐々に固有振動数が低下していくが、2005 年 7 月 23 日に発生した千葉県北西部地震・M6.0 では特に著しく固有振動数が低下している様子が見られる。このとき、最大で 220cm/s² の(屋上階・Y 方向)の応答が観測されている。固有振動数は X 方向で 0.62Hz (初期比 14%減)、Y 方向で 0.52Hz (同 22%減)でまで低下している。なお、地震観測記録から推定される構造物の固有振動数には振幅依存性があるため(振幅依存性については後

述する)、以後の地震ではこの地震における固有振動数よりも振動数は高く、次の地震(2005年7月28日発生・茨城県南部・M5.0)では、X 方向で 0.67Hz、Y 方向で 0.58Hz である。

ここから 2011 年までは固有振動数の変化があまり見られないが、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、再度大きく固有振動数が低下した。このとき、最大応答は 304cm/s² (屋上階・Y 方向)で、固有振動数は X 方向で 0.46Hz (初期比 36%減)、Y 方向で 0.43Hz (同 36%減)となつた。

これより、大きな地震による応答の結果、固有振動数が低下すると、その後固有振動数が元の値に戻ることはなく、再度大きな地震を受けるとさらに固有振動数が低下する様子が観察される。

2011 年東北地方太平洋沖地震後から約 1 年後の 2012 年 3 月 10 日に測定した常時微動測定の結果から求めた固有振動数は X 方向で 0.54Hz、Y 方向では 0.52Hz で、さらに 2014 年 11 月 29 日に測定した常時微動測定でも X 方向で 0.56Hz、Y 方向で 0.52Hz である。常時微動測定結果による固有振動数の低下率は X 方向で 24~27%、Y 方向で 24%と地震時と比べると若干小さいが、地震によって固有振動数が低下する現象と、それが元に戻ることはないという事象は地震記録と共通している。

3.2 振幅依存性

固有振動数の振幅依存性を確認するため、屋上階の観測記録から求めた加速度 RMS 値(記録の全区間から算出)と固有振動数の関係を図 - 3 に示す。ここでは、大きな地震を受けたことによる固有振動数の低下を考慮し、2005 年千葉県北西部地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震を境として記号を変えた。

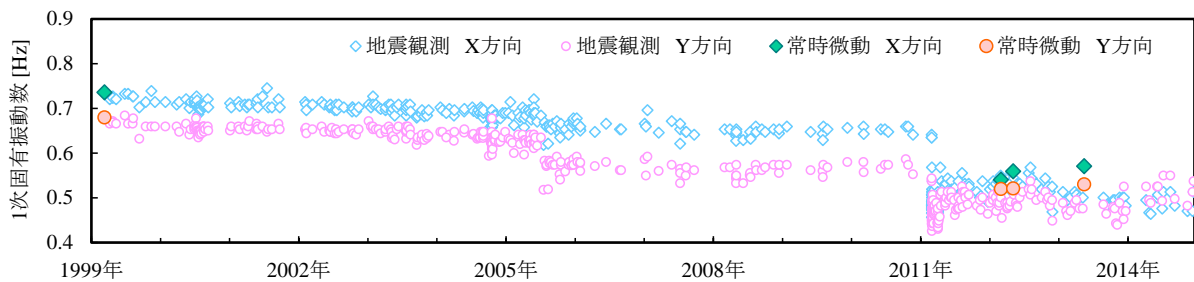


図 - 2 固有振動数の経時変化

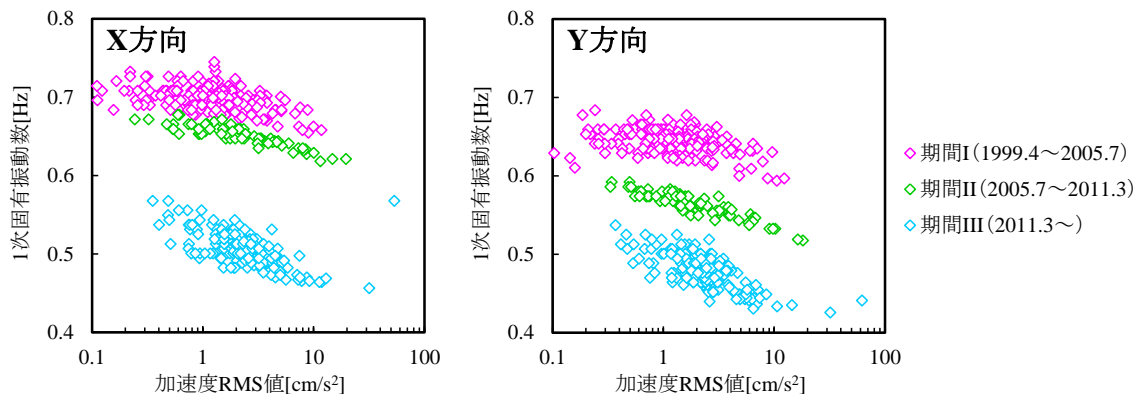


図 - 3 加速度 RMS 値と固有振動数の関係

X 方向、Y 方向ともに応答振幅（加速度 RMS 値）が大きくなるほど、固有振動数が低下する現象が明確に見られる。大きな地震を受けたことにより固有振動数が低下した後も、その固有振動数が低下した状態で振幅依存性を示し、再度大きな地震を受けて固有振動数が低下した際にもまた、その固有振動数周辺において振幅依存性を示す。ただし大きな地震により固有振動数が低下した後には、振幅-固有振動数関係の水準は、元の固有振動数周辺の振幅-固有振動数関係の水準と交わることはなく、一度低下した固有振動数は元には戻らないことを示している。

なお、振幅-固有振動数関係の傾きは、固有振動数が低下するほどに大きくなっているが、この原因についての究明は今後の課題とする。

4. シミュレーション解析

4.1 解析モデル

前章で述べた、建物が地震を経験することによって、その固有振動数が低下していく様子をシミュレーション解析によって確かめる。

解析モデルは、せん断を剛性逓減型トリリニア（武田型）で弾塑性を考慮した 31 質点の曲げせん断棒モデルとし、さらにロッキングを考慮する回転ばねをモデル化する。上部構造モデルは、シミュレーション解析の初期（線形域）で、実際の振動特性と解析モデルの振動特性を合わせるため、設計時の応答解析モデルの初期剛性を 1.4 倍した。ロッキングばねは PS 検層結果をもとに、地震観測記録に基づく地盤の伝達関数を再現できるように微調整した地盤物性を用いて、薄層法によって求めた線形のばね・ダッシュポットとする。減衰は Rayleigh 型減衰とし、1 次・2 次モードともに 1% とした。

4.2 対象とする地震

シミュレーション解析では表 - 2 に示す、固有振動数が低下する各ステップの代表的な 12 個の地震波をつなげた波形を入力し、前の地震による振動特性の変化をそのまま引き継ぎ、応答解析する。地震波形

のつなぎ目は、40 秒間のインターバルをとることにより、前の地震による応答が十分におさまるのを待ってから次の地震波が入力する設定とした。図 4 に入力に用いた時刻歴加速度波形を示す。入力は、No.4 や No.6 のように、非常に入力振幅の小さいものも含めたため、図 4 には振幅を対数軸で示した波形も併せて示した。

4.3 シミュレーション解析結果

シミュレーション解析結果を代表して、地震 No.1 における時刻歴加速度波形を図 - 5 に示す。{(屋上階) / (地下 1 階)} のフーリエスペクトル比は図 - 6 に、その時の 10 階における層間変位-層せん断力の関係を図 - 7 に示す。これらは、12 波のうちの代表として、地震 No.1, 5, 9, 10 の 4 地震のものを示した。さらに、解析結果から得られた固有振動数の経時変化を図 - 8 に示す。No.1 の地震において、X 方向は、加速度波形においても応答を非常によく再現できている。Y 方向の加速度波形はシミュレーション結果が過大であるが、周波数特性は再現できている。初期モデルは概ね正しいことが示された。このとき、

表 - 2 シミュレーションの入力地震

| No. | 発生日時 | 震源地 | マグニチュード* |
|-----|------------------|---------|----------|
| 1 | 2000 年 4 月 10 日 | 茨城県南部 | 4.9 |
| 2 | 2003 年 9 月 20 日 | 千葉県東方沖 | 5.5 |
| 3 | 2004 年 10 月 23 日 | 新潟県中越地方 | 6.5 |
| 4 | 2005 年 3 月 12 日 | 釧路支庁中南部 | 5.1 |
| 5 | 2005 年 7 月 23 日 | 千葉県北西部 | 6.0 |
| 6 | 2005 年 12 月 28 日 | 千葉県北西部 | 4.1 |
| 7 | 2007 年 7 月 16 日 | 新潟県中越沖 | 6.8 |
| 8 | 2011 年 3 月 9 日 | 三陸沖 | 7.3 |
| 9 | 2011 年 3 月 11 日 | 三陸沖 | 9.0 (Mw) |
| 10 | 2011 年 4 月 7 日 | 宮城県沖 | 7.1 |
| 11 | 2011 年 4 月 12 日 | 千葉県東方沖 | 6.4 |
| 12 | 2012 年 3 月 8 日 | 茨城県南部 | 4.2 |

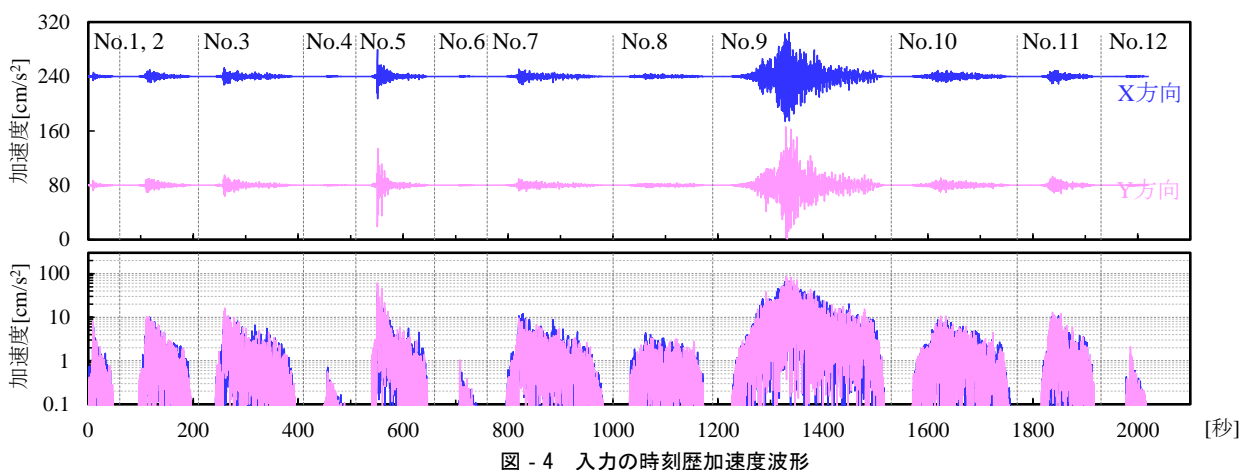
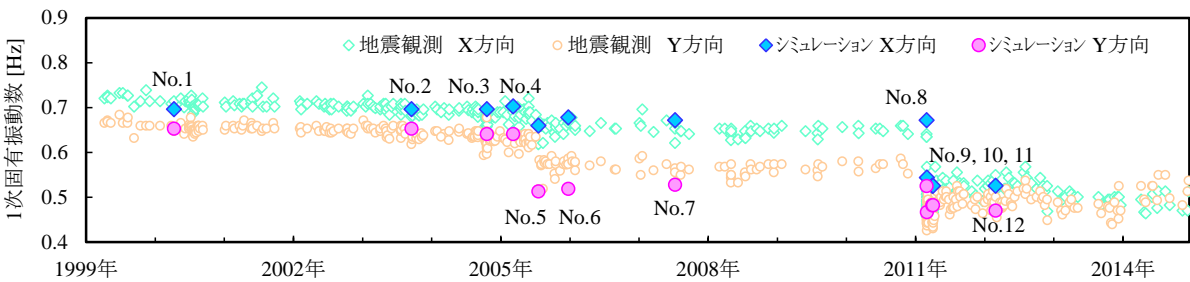
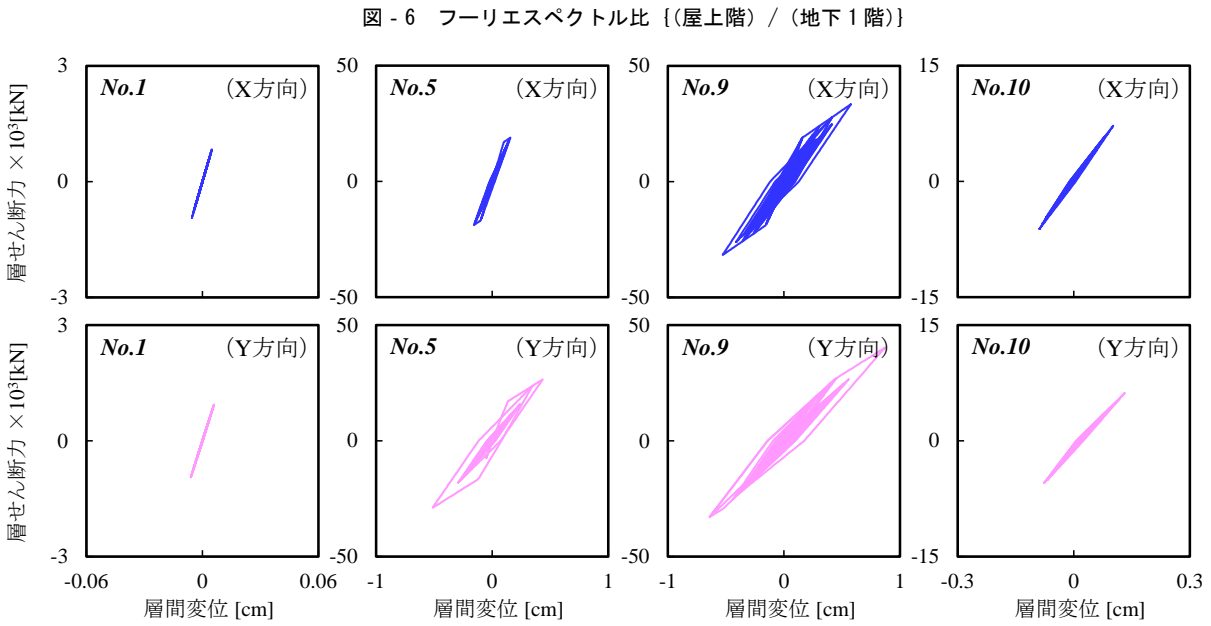
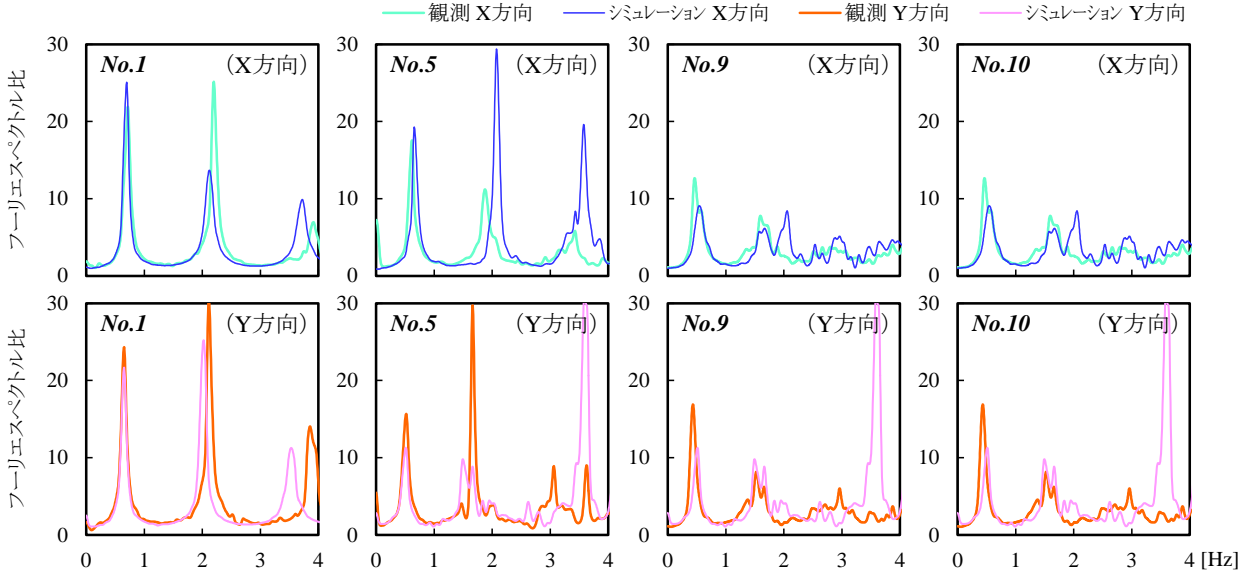
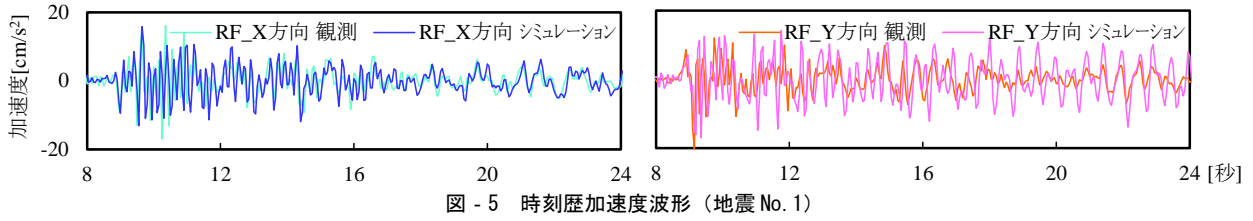


図 - 4 入力の時刻歴加速度波形



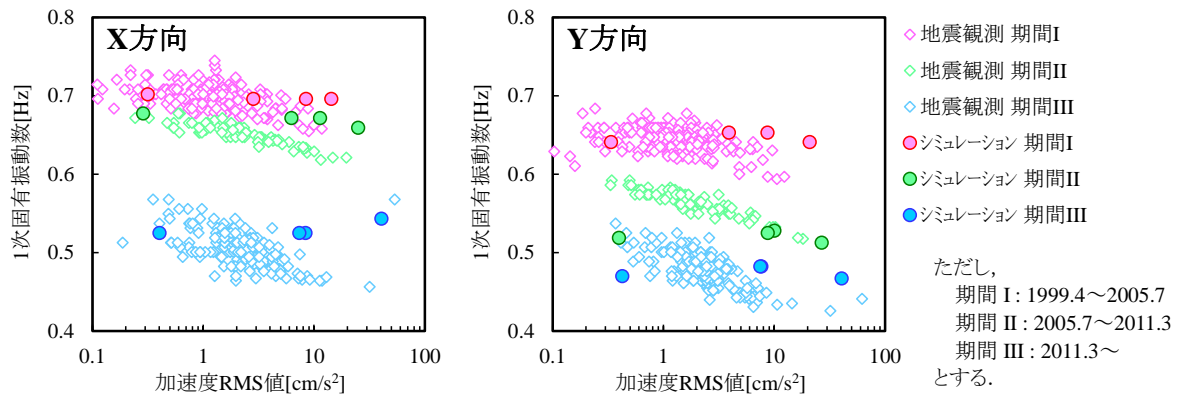


図 - 9 加速度 RMS 値と固有振動数の関係 (シミュレーション解析)

固有振動数は X 方向で 0.72Hz, Y 方向で 0.65Hz である。地震 No.1 から No.4 の間に、観測記録では若干固有振動数が低下しているが、解析上は線形領域となり固有振動数の変化はなく、小地震の経験による固有振動数の低下をシミュレーションでは再現できない。層間変位-層せん断力関係は No.1 地震のものと同様、直線になる。

地震 No.5 (2005 年千葉県北西部地震) では、ひび割れ点を越える応答となり、固有振動数の低下が再現されている。Y 方向の方が固有振動数の低下率が大きい点も再現できており、X 方向 0.62Hz (初期比 14%減)、Y 方向 0.52Hz (同 21%減) となった。層間変位-層せん断力関係もひび割れ点を越えて非線形領域に入り、履歴モデルに従ったループを描き、見かけの傾きが低下している。

その後、観測記録では地震 No.9 (2011 年東北地方太平洋沖地震) の前までは、振幅依存性によるものと思われる固有振動数の推定値のばらつきはあるものの、固有振動数はほぼ一定である。シミュレーション解析上でも No.5 で一度低下した固有振動数のままで特性が変わらない。

地震 No.9 では、No.5 での最大応答を越えて非線形化が進展し (但し、第二折れ点には至っていない)、再び固有振動数が低下して X 方向で 0.54Hz (初期比 25%減)、Y 方向 0.47Hz (同 28%減) となった。履歴ループは地震 No.5 よりも幅が増し、見かけの傾きが低下している。

それ以後、地震 No.10~12 では No.9 の最大応答を超えず、No.9 と同等の固有振動数となっている。また、地震 No.10 における履歴ループは、剛性低減型トリリニア (武田型) のルールに従い、若干の非線形性を示しているが、ループは非常に細く、ほぼ線形に近い。

図 - 9 に、図 - 3 と同様に加速度 RMS 値と固有振動数の関係を示すが、シミュレーション解析では、固有振動数の振幅依存性は再現できない。武田型の履歴ルールでは、上、ひび割れ点を越えた後は最大点と反対側のひび割れ点を結ぶ除荷剛性で戻り、荷重ゼロ点からは最大点を指向するため、ひび割れ点を越える瞬間、あるいは再度最大点を越える瞬間を

除いて、あまりループが幅を持たない。そのため、一度ひび割れ点を越えて非線形の応答に移行した後も、振幅が小さければ見かけの剛性がほとんど変化せず、振幅依存性を示さない。固有振動数は振幅依存性により、観測記録では大きいところでは 1 割以上の変化があるが、シミュレーション解析ではこれを再現できないため、小振幅域での実測とシミュレーション解析の乖離の原因となる。

なお、本検討では 1 次の固有振動数のみを対象としたが、高次モードでのフーリエスペクトル比の再現性は十分でなく、剛性バランスの再検討 (たとえばせん断と曲げの剛性の比や、曲げ非線形の考慮など) は今後の課題とする。

5. まとめ

長期にわたる地震観測の記録から、地震を経験することにより建造物の固有振動数が低下する現象が確認された。検討の対象とした建物では、2005 年千葉県北西部地震と 2011 年東北地方太平洋沖地震の 2 回大きく固有振動数が低下し、この傾向を 12 波の地震観測記録を連続的に入力するシミュレーション解析によって再現し、検証した。

また、固有振動数は振幅依存性を持ち、地震を経験することによって固有振動数が低下すると、低下した振動数付近において再度、振幅依存性を示すことが観測記録から確認できた。しかし、剛性低減型トリリニア (武田型) によるシミュレーション解析では振幅依存性を再現できず、小振幅域での実測とシミュレーション解析の乖離の原因となっていることがわかった。

謝辞

本研究は独立行政法人都市再生機構との共同研究において実施している地震観測の記録を用いた。地震観測システムの整備・保守等の手続きにおいては、同機構の田沼氏 (現・建築研究所出向) に多くの尽力をいただいた。また、シミュレーション解析に関しては、東京理科大学・永野正行教授とその研究室の研究生、東京大学・肥田剛典助教 (元・東京理科大学) および、超高層集合住宅地震観測合同研究会のメンバーの皆様からは多くの助言をいただいた。ここに感謝の意を記します。

参考文献

- 1) 森田ほか 2011 年東北地方太平洋沖地震とその前後の強震記録における SRC 造建物の振動特性変化, 日本建築学会学術講演会梗概集, 構造 II, p.1135-1136, 2012.9
- 2) 稲井ほか 軟弱地盤に建つ超高層 RC 造集合住宅の地震観測とシミュレーション解析, 戸田建設技術研究報告第 34 号, 2008.8
- 3) 保井ほか 軟弱地盤に建つ超高層 RC 造集合住宅の地震観測, 2011 年日本地震工学会年次大会梗概集, p.376-379, 2011.11
- 4) 山本ほか 軟弱地盤に建つ超高層 RC 造集合住宅の地震観測, 2012 年日本地震工学会年次大会梗概集, p.198-199, 2012.11
- 5) 山本ほか 軟弱地盤に建つ超高層 RC 造集合住宅の地震応答評価と被害の対応, 日本建築学会技術報告集 第 42 号, 2013.6
- 6) 林ほか 振動数変化に基づく構造物の減るモニタリングシステムに関する基礎的研究, 日本建築学会学術講演会梗概集, 構造 II, p.859-896, 2006.7
- 7) 上林ほか 微動観測に基づく超高層鉄筋コンクリート建物の強震時における動特性変化量の推定の可能性, 日本建築学会学術講演会梗概集, 構造 II, p.587-590, 2013.8