

RC造超高層建物の立体解析モデルに基づく地震応答評価

森下 真行*1・齊藤 芳人*1・龍神 弘明*1・永野 正行*2・肥田 剛典*2・田沼 毅彦*3

An Evaluation on the Earthquake Response of Super High-Rise RC Building Based on a 3-D Frame Analysis

Tadayuki MORISHITA, Yoshihito SAITO, Hiroaki RYUJIN, Masayuki NAGANO, Takenori HIDA, Takehiko TANUMA

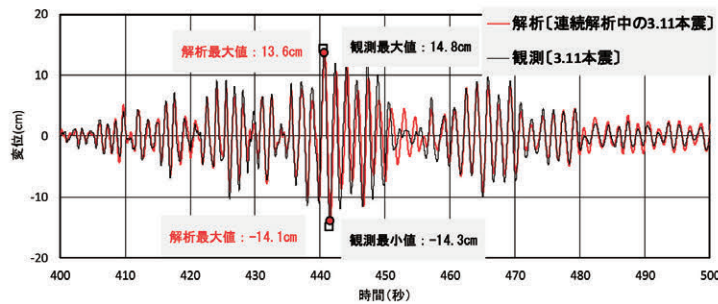


図-1 3.11 本震時の相対変位に関する解析結果と観測記録との比較

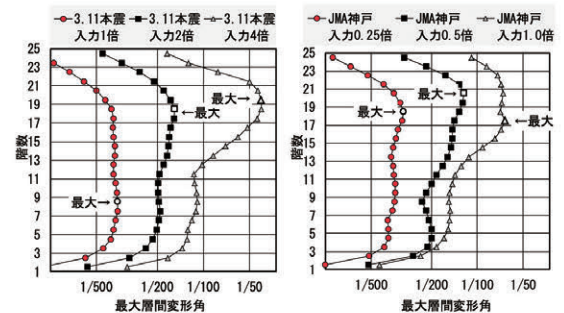


図-2 最大層間変形角の高さ方向分布

研究の目的

2011 年東北地方太平洋沖地震において、首都圏に建つ建物は継続時間の長い比較的大きい地震動を経験しており、地震観測記録の分析に解析的な検討を交えた総合的な建物動特性の把握が重要課題である。本報では、既報にて建物動特性を評価した RC 造超高層建物を対象に、ロッキングばね付の 3 次元立体フレームモデルによる非線形応答解析を通じて、地震観測結果の再現性を確認するとともに、入力地震動特性ならびに入力レベルの違いが建物応答特性に与える影響を把握することを目的とする。

技術の説明

検討対象としたのは、千葉県に建つ地上 24 階建の RC 造超高層建物である。解析モデルは、地盤および杭部を軸対称 FEM によりモデル化して求めたロッキングばねを、剛体と仮定した建物モデル最下層に付与したロッキングばね付の立体フレームモデルである。入力地震動は、長周期地震動の特性を持つ波として 2011 年東北地方太平洋沖地震時の当該建屋 1 階での観測記録を、パルス的な地震動の特性を持つ波として JMA 神戸波を選定し、前者は加速度振幅を 1 倍、2 倍、4 倍した波を、後者は加速度振幅を 0.25 倍、0.5 倍、1 倍した波を採用した。各入力波による建物の層間変形角および層間変形が最大となる時刻での 1 次および 2 次の振動成分に関する層間変形の変化について検討を行い、層間変形角と各次の層間変形との関係について考察を行った。

主な結論

- 解析により得られた相対変位および 1 次の固有振動数の時間変動ならびにその応答振幅依存性は、地震観測結果と概ね整合することが確認された。
- 層間変形角の分布特性は、入力レベルの増大とともに変化する建物の層間変形に依存することが確認された。長周期の特性を持つ入力波の場合は、層間変形角が最大を示す階が低層部から上層部に移行する傾向があり、パルス的な特性を持つ入力波の場合は、層間変形角の最大は入力レベルによらず上層階で最大を示す傾向がある。

*1 本店 技術研究所 防災・構造研究室
*2 東京理科大学 理工学部 建築学科

*3 都市再生機構 技術・コスト管理部

R C造超高層建物の立体解析モデルに基づく地震応答評価

森 下 真 行^{*1} 永 野 正 行^{*2}齊 藤 芳 人^{*1} 肥 田 剛 典^{*2}龍 神 弘 明^{*1} 田 沼 毅 彦^{*3}

要 旨

2011年東北地方太平洋沖地震において、首都圏に建つ建物は継続時間の長い比較的大きい地震動を経験しており、地震観測記録の分析に解析的な検討を交えた総合的な建物動特性の把握が重要課題である。本報では、既報にて建物動特性を評価したRC造超高層建物を対象に、ロッキングばね付の3次元立体フレームモデルによる非線形応答解析を通じて、地震観測結果の再現性を確認するとともに、入力地震動特性ならびに入力レベルの違いが建物応答特性に与える影響について報告する。

- (1) 解析により得られた相対変位および1次の固有振動数の時間変動ならびにその応答振幅依存性は、地震観測結果と概ね整合することが確認された。
- (2) 層間変形角の分布特性は、入力レベルの増大とともに変化する建物の層間変形に依存することが確認された。長周期の地震動特性を持つ入力波の場合は、層間変形角が最大を示す階が低層部から上層部に移行する傾向があり、パルス的な地震動特性を持つ入力波の場合は、層間変形角の最大は入力レベルによらず上層階で最大を示す傾向がある。

キーワード 地震観測／RC造超高層建物／地震応答解析／固有振動数／振動モード／層間変形角

目 次

- | | |
|-------------------|----------------------|
| 1. はじめに | 4. 入力地震動の違いによる建物応答評価 |
| 2. 対象建物と解析モデルの概要 | 5. まとめ |
| 3. 観測地震波による建物応答評価 | 6. おわりに |

AN EVALUATION ON THE EARTHQUAKE RESPONSE OF SUPER HIGH-RISE RC BUILDING BASED ON A 3-D FRAME ANALYSIS

Tadayuki MORISHITA
Yoshihito SAITO
Hiroaki RYUJIN

Masayuki NAGANO
Takenori HIDA
Takehiko TANUMA

Synopsis:

The buildings in the Tokyo metropolitan area had experienced strong earthquake motion of The 2011 off the Pacific coast of Tohoku Earthquake. The clarification of the dynamic properties of buildings include analytical examination based on the building motion records is important issue for the seismic design. This paper describes the simulation and the evaluation of the high-rise RC building motion by the 3-D nonlinear response analysis with rocking model.

- (1) The relative displacement and hysteretic behavior of the natural frequency based on the 3-D analysis are consistent with the earthquake observation records.
- (2) The distribution of story drift angle depends on the characteristic of vibration mode which varies by the input level of earthquake motion.

* 1 本店 技術研究所 防災・構造研究室

* 3 都市再生機構 技術・コスト管理部

* 2 東京理科大学 理工学部 建築学科

1. はじめに

2011 年東北地方太平洋沖地震（以降、3.11 本震と呼ぶ）により、首都圏に建つ建物は長周期成分が卓越し長い継続時間を有する比較的大きな揺れを経験した。著者らは既報¹⁾にて、首都圏に建つ RC 造超高層建物での地震観測結果ならびに建物動特性の時間変動について報告している。その結果、3.11 本震により RC 造超高層建物の固有振動数は、最大で約 4 割程度低下しており、3.11 本震後も元の値には戻りきっていないことが判明している。

他方、建物の被害に関しても精力的な調査が実施されており、アンケート調査結果^{例えば 2)}では、RC 系の超高層建物における内装材や躯体コンクリート部分の亀裂は低層階ほど多くなっている、と報告されている。

本報では、既報にて建物動特性を評価した RC 造超高層建物を対象に、ロッキングばね付の 3 次元立体フレームモデルによる非線形応答解析を実施した結果について報告する。まず、3.11 本震時の地震観測結果の再現性を確認する。さらに、余震時の建物応答の再現性についても検討を加える。最後に、入力地震動特性ならびに入力レベルの違いが建物応答特性に与える影響について考察する。

2. 対象建物と解析モデルの概要

2.1 解析モデル

検討対象とした RC 造超高層建物および地震観測の概要を図-1に示す。建物は千葉県に建つ 1992 年竣工の地上 24 階建（軒高 69.95m）の建物であり、RC 造の純ラーメン構造である。本報で採用した解析モデルは、地盤および杭部を軸対称 FEM によりモデル化して求めたロッキングばねを、剛体と仮定した建物立体モデル最下層（地中梁成の中間高さ位置）に付与したロッキングばね付の立体フレームモデルとした。建物、杭および地盤のモデル化はすべて設計図書に基づき作成し、梁要素には剛性低減型の材端弾塑性モデルを、柱要素には MS（マルチスプリング）モデルを、最下層以外の床には剛床仮定を採用した。

ロッキングばね算定用の軸対称 FEM に関しては、GL-6m までの地下根入部は等価面積となる円筒剛体で、GL-28.1m を支持位置とする RC 拡底杭は全体の断面 2 次モーメントが等価となる位置に配置したリングパイル要素で、周辺地盤は標準的な非線形特性を持つ地盤モデルで構成されている。なお、地震観測は 1 階および屋上階（以降、25 階と表記）の 2 点のみで実施されていることから、1 階観測記録から地下入力波を逆算する手法を採用した。まず、軸対称 FEM による弾性解析により GL-50m 部に対する基礎部の伝達関数を求め、得られた伝達関数と 1 階観測記録とから入力波を推定する。次いで、推定された入力波を用いた非線形応答解析を実施し、有効せん断ひずみ（最大せん断ひずみの 0.65 倍を採用）を算定する。最終的に、有効せん断ひずみを基に設定した等価せん断

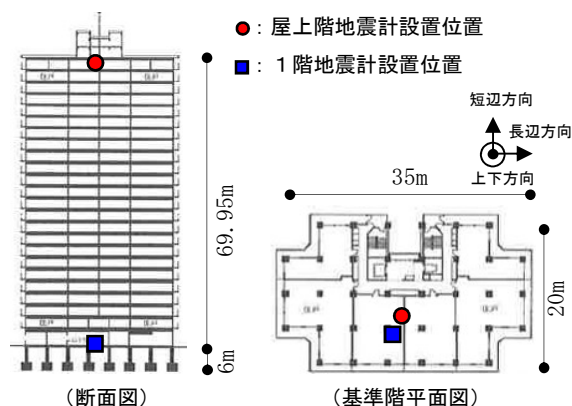


図-1 検討対象とした建物概要

表-1 地盤ばね定数

	長辺方向	短辺方向
ロッキングばね	1.3×10^{10} (kN·m/rad)	1.0×10^{10} (kN·m/rad)

表-2 検討対象とした地震諸元

地震種別	地震発生		震央地名	規模	震源深さ	気象庁* 震度階級
	年月日	時間		(M)	(km)	
前震	2011/3/9	11:45	三陸沖	7.3	8	2
3.11本震	2011/3/11	14:46	三陸沖	9.0	24	5強
余震	2011/4/12	8:08	千葉県東方沖	6.4	26	3

*最寄りの気象庁震度観測点での公表値

波速度および等価減衰定数から等価線形解析時の動的地盤バネを算定し、参考文献 1) を参考に上部構造の固有振動数に近い 0.5Hz でのばね定数をロッキングばねとして採用した。表-1 に採用したロッキングばね定数を示す。

2.2 解析条件

設計図書を基に作成したロッキングばね付の立体フレームモデルによる建物短辺方向の 1 次固有振動数を、3.11 本震前の小地震記録による 1 次固有振動数と一致するようにコンクリートのヤング係数で調整した（以降、解析モデルとはヤング係数調整モデルを指す）。なお、目標とした 1 次固有振動数は、後述する前震での値（0.85Hz）とした。

減衰定数は瞬間剛性比例型 1% の部材減衰とした。また、解析は水平 2 方向入力としたが、本報では、地震観測結果にて建物の最大相対変位が大きく出ている短辺方向の応答のみを検討対象としている。

3. 観測地震波による建物応答評価

3.1 入力地震動の概要

ここでは、1 階での観測地震波を入力とした場合の 25 階での応答を地震観測記録と照合することにより、解析モデルの妥当性を検証する。なお、検証に用いた観測波は表-2 に示す 3 地震とし、2011 年 3 月 9 日の地震を前震、2011 年 4 月 12 日の地震を余震に選定し、3.11 本震での

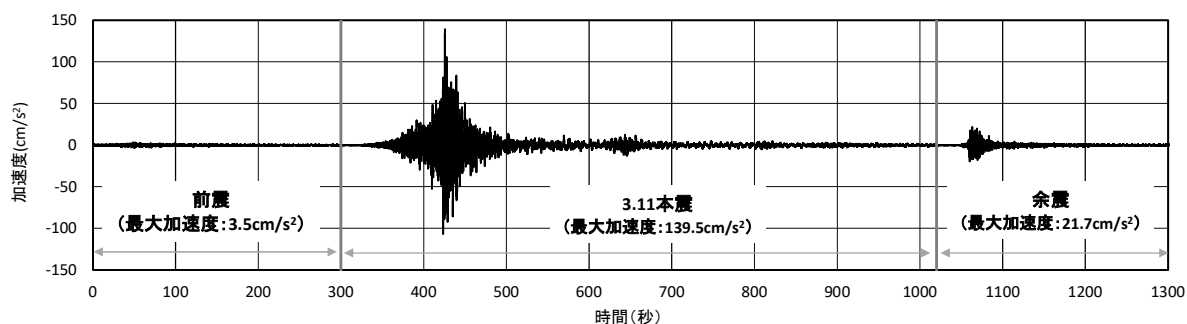


図-2 解析に用いた入力地震波（建物短辺 1 階での観測結果）

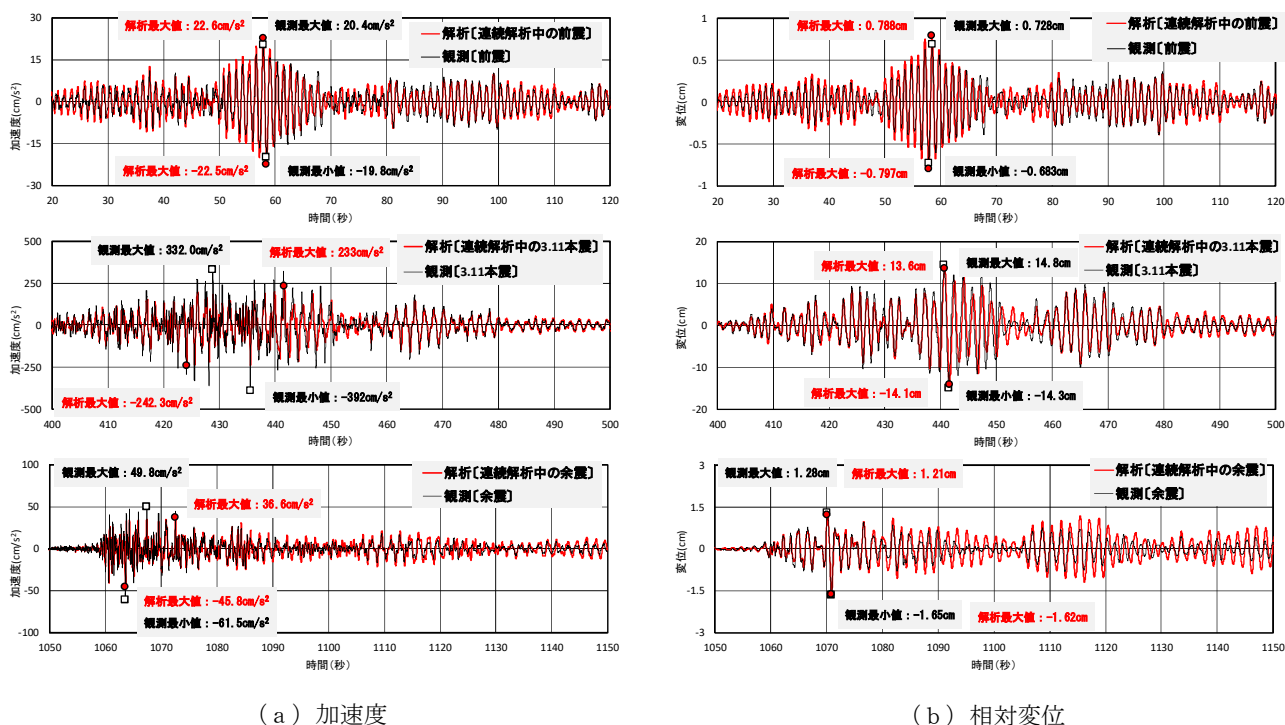


図-3 連続解析時の前震，3.11 本震および余震時の解析応答と観測記録との比較（25 階）

1 階観測波の前後に前震および余震時の 1 階観測波を連続させた波を解析での入力波として採用した．図-2 に解析で採用した建物短辺方向での入力地震波を示す．なお，長辺方向の入力地震波に関しては，長辺方向での観測記録を基に別途作成している．前震での建物短辺方向の最大加速度は 3.5cm/s^2 ，3.11 本震での最大加速度は 139.5cm/s^2 ，余震での最大加速度は 21.7cm/s^2 であり，地震動継続時間は前震 300 秒，3.11 本震 720 秒，余震 280 秒の計 1300 秒とした．ここに，前震での比較は解析モデルによる比較的小さな応答振幅時の建物挙動の再現性を，3.11 本震での比較は比較的大きな応答振幅時の建物挙動および動特性の再現性を，余震での比較は 3.11 本震後の解析モデルの連続性を評価対象とするものである．

3.2 解析結果と観測記録の比較

図-3 に連続解析時の前震，3.11 本震および余震時の解析応答と観測記録との比較を，各地震での主要動付近の

100 秒を拡大して示す．前震においては，加速度応答，相対変位ともに解析結果は観測記録と振幅および位相ともによく対応していることが確認できる．各最大値が発生する時刻も完全に対応している．このことから，設定した解析モデルは比較的小さな応答振幅時の建物短辺方向の特性をよく再現できていると考えられる．なお，前震の特徴として，以下に示す高次モードの影響が比較的小さい点が挙げられる．

3.11 本震時においては，加速度応答は振幅および位相に関する全体的な傾向は概ね捉えられていると考えられる．しかしながら，加速度最大値の比較では，観測記録はパルス的と推測される高次モードの局所的な応答を受けており，その値および発生時刻ともに解析結果とは差異が認められる．相対変位の比較では，振幅および位相ともに解析結果は観測記録をよく再現できている．最大値発生時刻も完全に対応していることから，一般に相対変位の主成分となる低次のモードに関しては，概ね妥当

なモデル化がなされていると考えられる。このことから、加速度最大値に差が生じた要因として、高次モードの影響が想定され、別途検討を行う。

余震の比較においては、加速度最大値の発生時刻およびその値に差が認められるものの、全体的な振幅および位相はよく対応している。相対変位に関しては概ね対応した結果となる。これらの傾向は 3.11 本震時の傾向と概ね対応した結果である。

加速度応答の最大値に差が生じた要因と推測される高次モードの影響について検討を行う。図-4 に 3.11 本震時の 25 階加速度応答波形のモード分解結果を、加速度最大値発生時刻を含む 3 秒間を拡大して示す。ここに、加速度最大値は 3 区分された振動成分ごとに示すこととし、1 区分目は 1 次の振動成分に、2 区分目は 2 次の振動成分に、3 区分目は 3 次以上の振動成分を含んだ振動成分に該当させた。なお、1 次と 2 次の固有振動数の中間値以下の振動成分を 1 次モード、2 次と 3 次の固有振動数の中間値以上の振動成分を 3 次モード以上、その間の振動成分を 2 次モードと定義し、各次の固有振動数は相対変位に対する周波数分析結果を基に決定した。観測記録での最大値発生時刻においては、1 次、2 次および 3 次以上の振動成分を含む

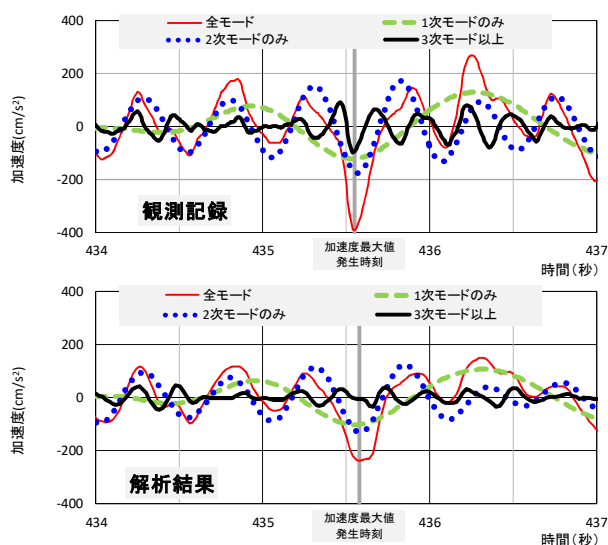


図-4 25 階加速度応答波形のモード分解

波形のすべてが各応答波形での極大値近傍を示しており、その値が重ねあわさることにより大きな加速度最大値が形成されている現象が確認できる。

解析結果での最大値発生時刻においては、1 次および 2 次モードの応答波形は極大値近傍を示してはいるが、値自体は観測記録に比較して小さめに評価されている。3 次モード以上の応答波形においては、極大値近傍からはずれるとともに、その値自体も小さく評価されていることがわかる。すなわち、3 次モード以上の応答波形は 1 次および 2 次モードよりも観測記録との差異が大きくなる傾向にあることが示された。このことより、加速度最大値に大きな差が生じた 1 要因として、解析において高次モードの振幅および位相が精度よく再現できていない点が挙げられる。

3.3 固有振動数の時間変動評価

図-5 に 1 次の固有振動数の時間変動の比較を、各区間での最大相対変位とともに示す。ここで、固有振動数の推定には代表的なパラメータ同定手法である ARX モデルを用いた同定手法を採用する。具体的な推定手順は参考文献 1) に準拠しており、本報では省略する。なお、参考文献 1) では、同定区間幅の設定条件として 1 次の固有周期の 10 倍に相当する幅を対象地震ごとに設定する方法を採用している。ここでは、解析結果と観測記録の比較を行うため、同定区間幅を一律 10 秒と設定して推定を行った。その他の条件は参考文献 1) と同一である。

前震においては、観測記録による固有振動数の推定結果は概ね一定の値を示しており、この傾向は解析結果ともよく整合している。なお、最大相対変位は小さく、固有振動数にほとんど変動がみられないことから、建物は弾性的な挙動を示していると推測される。

3.11 本震での観測記録からは、最大相対変位の増大とともに 0.6Hz 程度まで固有振動数が急激に低下する傾向が確認でき、解析結果はこの特性をよく再現できている。しかしながらその後の固有振動数の推移に関しては、観測記録では最大相対変位の減少とともに固有振動数は回復傾向にあるのに対して、解析結果はほぼ同じ値を示している。これは解析モデルで設定した部材の復元力特性

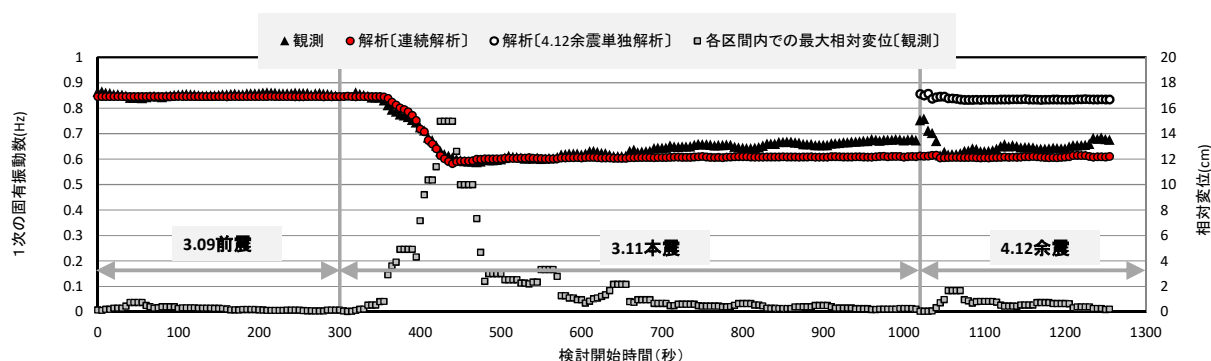


図-5 1 次の固有振動数の時間変動の比較

によるものである。

余震での観測記録より推定された 1 次の固有振動数は、主要動前においては徐々に長周期化する傾向を示すが、解析結果ではその傾向を再現できていない。また、主要動後は 3.11 本震時での傾向と同様、最大相対変位の減少とともに回復する傾向にある。これらの特性は解析結果では再現できていない。しかしながら、主要動付近のみを比較した場合、余震時の最大相対変位は 3.11 本震時に比較して非常に小さいにも関わらず、3.11 本震時と同程度の固有振動数を示している。この特性に関して解析結果は観測記録とよく対応している。なお、同図中には余震を単独で解析した結果を併記している。単独解析の場合は、前震での固有振動数と同程度の値を示すこととなり、明らかに観測記録との整合性は取れていないことがわかる。このことから、3.11 本震のような比較的大きな応答振幅を経験した建物について、その後の中小地震時の特性を解析により評価する際には、例えば本報で示したような連続地震応答解析を実施する、あるいは事前に直近の観測記録により固有振動数を調整するなどして、固有振動数の低下を間接的に評価できる手法を選定する必要がある。

図-6 に 3.11 本震時での 1 次の固有振動数の応答振幅依存性を示す。最大相対変位が最大を示すまでは解析結果は観測記録と良く対応していることが確認できる。すなわち、建物の特性を示す指標の一つである最大相対変位（あるいは最大層間変形角）に関しては、良い精度を持って推定可能であることを示す知見である。

4. 入力地震動の違いによる建物応答評価

4.1 入力地震動の概要

ここでは、入力地震動特性ならびに入力レベルの違いによる建物応答の変化を把握する目的で、長周期およびパルス的な地震動特性を持つ入力波に対して、入力レベルを係数倍した波をそれぞれ単独入力として検討を実施する。長周期の地震動特性を持つ入力波には、3.11 本震時の当該建物 1 階での加速度記録の振幅を 1 倍（短辺方向の速度最大値は約 19cm/s）、2 倍（同 37cm/s）および 4 倍（同 74cm/s）した波を、パルス的な地震動特性を持つ入力波には、JMA 神戸波の加速度振幅を 0.25 倍（同 23cm/s）、0.5 倍（同 46cm/s）および 1 倍（同 91cm/s）した波を採用した。なお、3.11 本震波の入力方向は観測と同方向とし、JMA 神戸波の入力方向は、本報で検討対象とした建物短辺方向に最大加速度の大きな NS 波を、長辺方向に EW 波を対応させた。

4.2 応答評価

図-7 に最大層間変形角の建物高さ方向の分布を示す。3.11 本震波の場合、倍率 1 倍時の層間変形角は上下層階を除き同程度の層間変形角が連続して分布する傾向を示

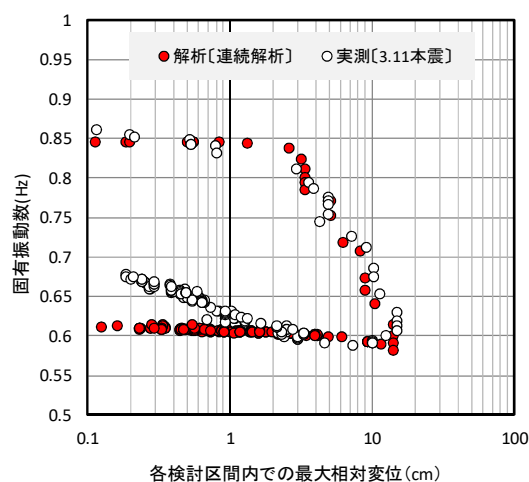


図-6 1 次の固有振動数の応答振幅依存性

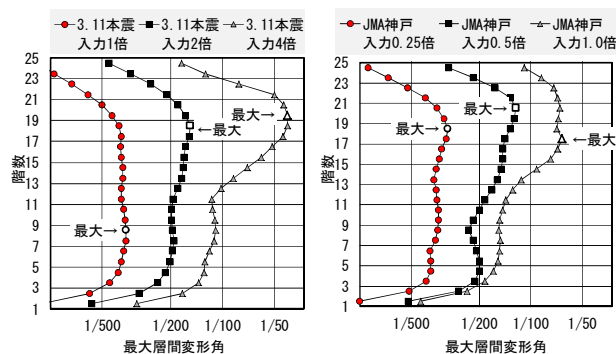


図-7 最大層間変形角の高さ方向分布

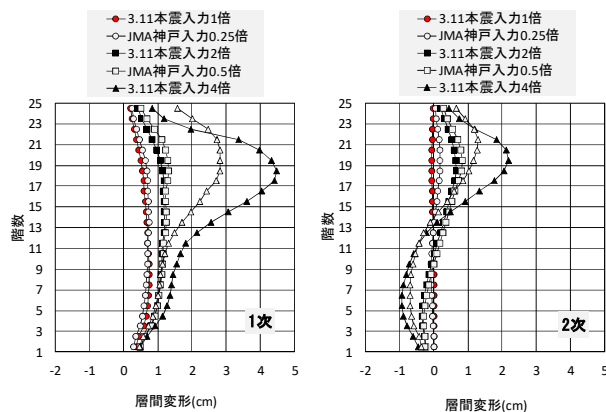


図-8 最大層間変形角発生時刻での層間変形分布

し、層間変形角がわずかではあるが最大を示す階は中間階よりも下方に位置することが確認できる。倍率 2 倍時は、層間変形角が最大を示す階は中間階よりも上方に移行し、その値は相対的に大きくなる。倍率 4 倍時は倍率 2 倍時と同様の傾向を示すとともに、層間変形角の最大は相対的にさらに大きくなっていることが確認できる。

JMA 神戸波の場合、倍率 0.25 倍時の層間変形角は上下層階を除き同程度の層間変形角が連続して分布する傾向を示し、層間変形角がわずかの差ではあるが最大を示す階は中間階よりも上方に位置することが確認できる。倍

率 0.5 倍時および 1 倍時も倍率 0.25 倍時と概ね同様の傾向を示し、層間変形角の最大は上層階で相対的に大きな値を示している。両入力地震波ともに、入力レベルの増大とともに上層階での層間変形角が相対的に大きくなる現象が共通の傾向として確認された。

図-8 に最大層間変形角の最大が発生する時刻での層間変形分布を示す。ここに、層間変形分布は相対変位の主成分となる 1 次と 2 次の振動成分のみ抽出して評価することとし、各次の振動成分の分離は 3.2 節で示した方法に準拠して実施した。なお、固有振動数は各入力波に対する解析結果において、25 階での相対変位波形に対する周波数分析結果を基にそれぞれ決定している。

1 次の振動成分について、3.11 本震 1 倍および 2 倍時ならびに JMA 神戸 0.25 倍および 0.5 倍時は、上下層階を除き同程度の層間変形が連続する傾向にある。3.11 本震 4 倍時および JMA 神戸 1 倍時は中間階より上方での層間変形が相対的に大きくなる傾向にある。これらの傾向は先に示した最大層間変形角の分布と概略的には対応する結果となる。ただし、3.11 本震 2 倍時および JMA 神戸 0.5 倍時では、層間変形が最大を示す階は先の最大層間変形角の分布ほど明確には表れていない。

2 次の振動成分に関しては、3.11 本震 1 倍時を除き中間階より上方での層間変形が 1 次の層間変形と同位相であり、層間変形自体も大きくなる傾向にある。これらの点より、最大層間変形角の分布特性は 1 次の振動成分による層間変形が支配的ではあるものの、最大層間変形角が最大となる位置は 1 次の振動成分だけでは決まらず、2 次の振動成分による層間変形にも少なからず影響を受けている可能性のあることが確認された。

5. まとめ

RC 造超高層建物を対象に、ロッキングばね付の 3 次元立体フレームモデルによる非線形応答解析を通じて、地震観測記録の再現性を確認するとともに、入力地震動特性ならびに入力レベルの違いが建物応答特性に与える影響について考察した。以下に得られた知見を示す。

- (1) 解析により得られた相対変位および 1 次の固有振動数の時間変動ならびにその応答振幅依存性は、地震観測結果と概ね整合することが確認された。
- (2) 層間変形角の分布特性は、入力レベルの増大とともに変化する建物の層間変形に依存することが確認された。長周期の地震動特性を持つ入力波の場合は、層間変形角が最大を示す階が低層部から上層部に移行する傾向があり、パルス的な地震動特性を持つ入力波の場合は、層間変形角の最大は入力レベルによらず上層階で最大を示す傾向がある。

6. おわりに

2011 年東北地方太平洋沖地震による建物動特性の変化は、解析による評価で概ね再現できることが確認できた。今後は、観測記録の分析および解析検討より得られた知見を活用し、構造健全性診断技術として展開する予定である。

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実施しているものであり、UR 超高層集合住宅地震観測合同研究会の関係者各位よりご助言を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 森下真行，齊藤芳人，龍神弘明，田沼毅彦，渡辺一弘：RC 造超高層建物の長期地震観測結果に基づく動特性評価，日本建築学会技術報告集，pp.51-60，2014.6.
- 2) 肥田剛典，永野正行：東日本大震災後の超高層集合住宅のアンケート調査による室内被害と強震記録との関係から推定される建物応答，日本建築学会構造系論文集，Vol.78,No.683,pp.51-60,2013.1.