

地中観測記録を活用した超高層集合住宅の 動的相互作用特性と建物応答への影響に関する研究

Study on Dynamic Soil-Structure-Interaction Characteristics of Super High-Rise Residential Buildings and Their Effects on Structural Responses Using Strong Motion Records in Deep Borehole

森清 宣貴*¹
Nobuki Morikiyo

要旨

近年は大地震後のレジリエンス評価に関連し、建物の機能継続性が注目され、杭基礎を含めた建物全体の耐震性能評価が重要な課題となっている。このために必要となる地盤－建物連成系の振動特性の検討には地盤ばね評価が不可欠となり、特に軟弱地盤に建つ超高層集合住宅では、回転地盤ばねの影響によりロッキング応答が大きくなる。地震動の振幅レベルが大きい場合には、周辺地盤の非線形化等の影響を含め回転地盤ばねも非線形となり、これが上部建物の非線形応答に影響を与えることも予想される。一方、耐震設計に用いられる地盤ばね評価は計算ベースで行われることが多く、実測等で検証した事例は少ない。また、地盤ばねの非線形挙動の時間変化を観測記録で扱った例もない。そこで本研究では、超高層集合住宅を対象に、基礎のロッキング変形を評価可能な強震観測記録を用い実測に基づく回転地盤ばね評価を行い、その非線形化が建物応答に与える影響を評価する。

キーワード：超高層集合住宅 強震観測 回転地盤ばね 非線形 建物応答

1. はじめに

国内では1995年兵庫県南部地震($M_7.3$)や2011年東北地方太平洋沖地震($M_9.0$)、2016年熊本地震(本震、 $M_7.3$)などで、超高層建物が大振幅レベルの地震動を経験した。強震観測を実施していた超高層集合住宅では貴重な記録が得られ、その分析結果が数多く報告されている¹⁾²⁾。この中には、建物近傍における自由地盤の地中や地表に地震計が設置されている超高層建物も存在する。そこで得られた記録を活用し、地盤－杭－建物の動的相互作用を考慮したシミュレーション解析による応答評価¹⁾³⁾や上下方向の振動特性・動的相互作用の分析⁴⁾などが行われている。近年は大地震後のレジリエンス評価に関連し、建物の機能継続性が注目され、杭基礎を含めた建物全体の耐震性能評価が重要な課題となっている。このために必要となる地盤－建物連成系の振動特性の検討には地盤ばね評価が不可欠となり、特に軟弱地盤に建つ超高層集合住宅では、回転地盤ばねの影響によりロッキング応答が大きくなる。地震動の振幅レベルが大きいときは、周辺地盤の非線形化等の影響を含め回転地盤ばねも非線形となり、これが上部建物の非線形応答に影響を与えることも予想される。

超高層建物等の耐震設計に用いられる地盤ばね評価は計算ベースで行われることが多く、実測等で検証した事例は

少ない。地震記録や実験を通じ地盤ばねを評価した事例として、岡野ら⁵⁾はスウェイモデルまたはスウェイ・ロッキングモデルと強震観測記録を用いて地盤ばねを同定した。田守ら⁶⁾は塑性地盤材料を用いた地盤－杭－建物連成系の振動台実験に基づき等価線形化法により地盤ばねを算定した。上野ら⁷⁾は強震観測記録から基礎のロッキング回転角および上部建物応答を評価し地盤ばねを算定した。ただし、これらは主に中低層建物を対象とした検討である。基礎のロッキングの非線形挙動を考慮した地震応答解析や実験の事例として、源榮ら⁸⁾は直接基礎の浮き上がりによる非線形挙動を考慮した時刻歴応答解析を行った。富安ら⁹⁾は根入れのある直接基礎の建物を想定したモデルによる振動台実験を行い、スウェイ・ロッキングに伴う基礎周辺地盤の非線形挙動と建物応答の関係について検討した。ただし、実在する杭基礎建物を対象に観測記録を用いた検討で、ロッキングの非線形挙動の経時変化や上部建物に与える影響を扱った事例はない。

そこで本研究では、地中・地表・上部建物での同時観測が実施されている超高層集合住宅、特に兵庫県南部地震時の強震記録が得られている建物を対象に、以下の検討を行った。

- (1) 杭先端・地表・上部建物での同時強震記録を用いて、動的特性および動的相互作用特性を明らかにする¹⁰⁾。

*1 技術研究所

- (2) 基礎のロッキング変形を評価可能な強震記録を用い、強震記録から直接回転地盤ばねの評価を行う。さらに、大振幅レベルの記録から、回転地盤ばねの非線形化特性を解明する¹¹⁾。
- (3) 回転地盤ばねの非線形特性をモデル化し、超高層集合住宅の地震応答解析モデルに組み込んで解析することで、回転地盤ばねの非線形特性が超高層集合住宅の地震時挙動に与える影響を明らかにする¹¹⁾。
- 本研究は、地中観測記録を活用し超高層集合住宅の動的

特性や動的相互作用特性を把握するとともに、実測ベースで回転地盤ばねおよびその非線形特性を明らかにする点、またそれが建物の非線形応答に与える影響を検討している点が大きな特徴である。

2. 対象建物と強震観測の概要および観測記録

本研究で対象とする超高層集合住宅 4 棟の地震計設置位置と建物・地盤構造概要を図 1 に示す。建物名称は文献 2)

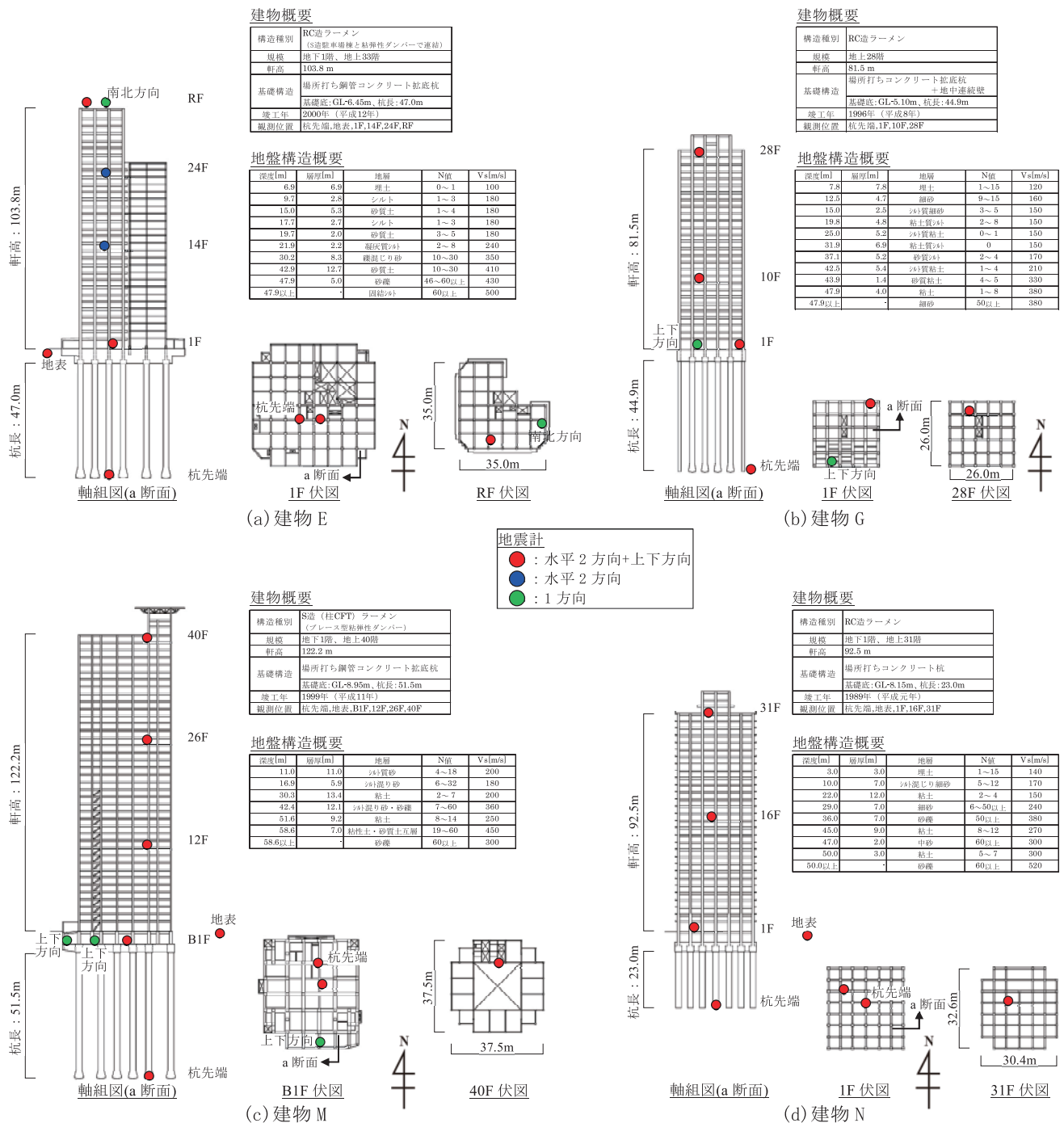


表 1 検討対象地震一覧

対象地震	発生日時	深さ[km]	マグニチュード
滋賀県北部の地震	1994.05.28 17:04	44	M_J 5.3
兵庫県南部地震	1995.01.17 5:46	16	M_J 7.3
鳥取県西部地震	2000.10.06 13:30	9	M_J 7.3
東海道沖の地震	2004.09.05 23:57	44	M_J 7.4
千葉県北西部の地震	2005.07.23 16:34	73	M_J 6.0
東北地方太平洋沖地震	2011.03.11 14:46	24	M_W 9.0
大阪府北部の地震	2018.06.18 7:58	13	M_J 6.2
千葉県北西部の地震	2021.10.07 22:41	75	M_J 5.9

と同じとした。図 2 には建物の建設位置と、本検討で用いた地震の震央位置を示す。建物 E、G は関東地方の東京湾沿岸、建物 M、N は関西地方の大阪湾沿岸に建設されている。強震観測はいずれも杭先端・地盤・上部建物の同時観測で行われ、一部の建物では建物基部平面内に複数の上下観測も行われている。図 1 の各階伏図には、本研究で利用した地震計設置位置のみを掲載している。竣工時より約 20 年以上にわたる観測により、1995 年兵庫県南部地震、2011 年東北地方太平洋沖地震、2018 年大阪府北部の地震 (M_J 6.2) を含み、中小地震から比較的規模の大きな地震まで、200 以上の地震で記録が得られている。このため、大小振幅レベルの観測記録を用いて、回転地盤ばねの変化を評価することが可能となる。本研究で対象とする地震の一覧を表 1 に、各建物の主要強震観測記録の擬似速度応答スペクトル ($h=5\%$) を図 3 に示す。観測期間の長い建物 N では 1995 年兵庫県南部地震時の記録が得られており、周期 2 秒、5 秒前後で 100cm/s を超える応答レベルの地震動となっている。また、全建物で共通して 2011 年東北地方太平洋沖地震時の記録が得られており、東京湾沿岸部に建つ建物 E、G では、一部の周期帯で 60cm/s を超える地震動が観測されている。

3. 動的相互作用特性の分析

動的相互作用特性について、杭先端と上部建物の強震記録を用いて、地盤・杭の水平変形率、ロッキング率を検討する。図 4 に示すように、杭先端から建物頂部の水平相対変位（全体変位）を、地盤・杭の水平変位（杭先端から建物基部の水平相対変位）、ロッキング変位（建物基部の回転による変位）、上部建物変形に分け、地盤・杭の水平変位およびロッキング変位の全体変位に対する割合をそれぞれ「地盤・杭の水平変形率」「ロッキング率」とする。ロッキング変位については基礎回転角を算出し、建物基部と建物頂部の高さの差を乗じて計算した。基礎回転角は図 5 に示す通り、建物基部の 2 点あるいは杭先端と建物基部 1 点の上下相対変位を検討方向の水平距離で除して求める。また、基礎回転角は 1 次成分のみを対象とするため、観測記録には 1 次成分をおおむね包含するバンドパスフィルタを適用する。建物基部での上下観測位置に応じて、検討する方向、

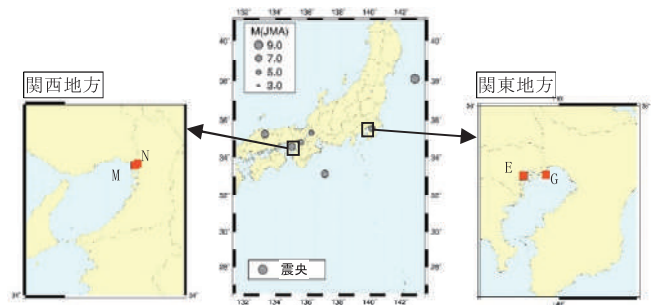


図 2 対象建物の建設地

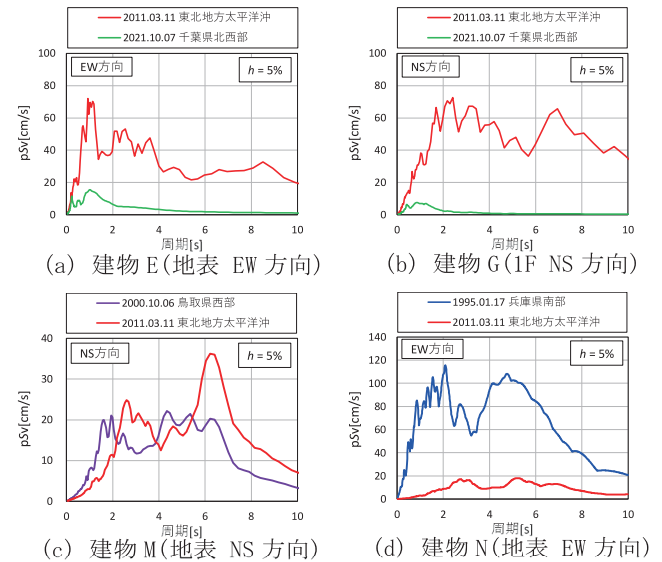


図 3 主要観測地震の擬似速度応答スペクトル

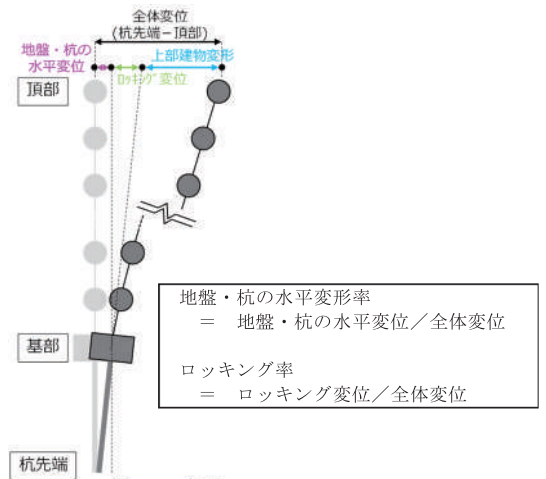


図 4 変位の分離

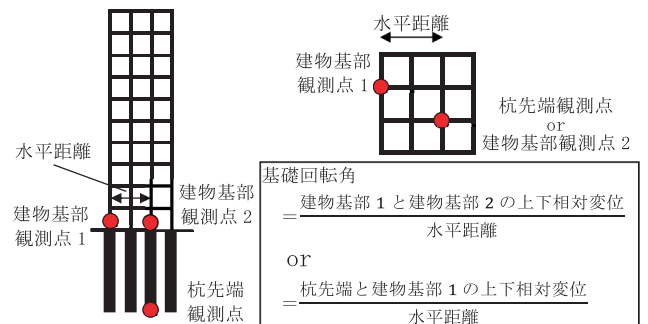


図 5 基礎回転角の算出概念図

利用する記録は異なる。建物 E では EW 方向(杭先端と建物基部 1 点)、建物 G では NS 方向(建物基部の 2 点)、建物 M では NS 方向(建物基部の 2 点)、建物 N では EW 方向(杭先端と建物基部 1 点)をそれぞれ対象とする。2 点の位置関係が検討方向から若干傾くケースもあるが、これと直交方向の影響は小さいものと仮定した。

地盤・杭の水平変形率、ロッキング率の変動について、2011 年東北地方太平洋沖地震時の数値とその経時変化に対応する相対変位(建物頂部－杭先端)と対応させて図 6 に示す。また、検討対象地震のそれぞれの最大相対変位時の地盤・杭の水平変形率、ロッキング率の一覧を表 2 に示す。図 6 より、地盤・杭の水平変形率は各建物とも振幅依存性は見られず大半が 5%以下である。ロッキング率にも振幅依存性は見られず、水平変形率より割合が大きく、5～20%となっている。表 2 より、検討対象地震でもおおむね地盤・杭の水平変形率よりもロッキング率の割合が大きくなっており、基礎回転による変位は建物応答に比較的大きな影響があることがわかる。

4. 回転地盤ばねの評価

4.1 回転地盤ばねの算出方法

強震記録を用いた回転地盤ばねは、上部建物の応答値から推定される転倒モーメントと、建物基部および杭先端の上下変位から算出した基礎回転角を用いて求める。なお、回転地盤減衰については、ばね値に比べてばらつきが大きく直接的な評価が困難なため、検討対象外とする。

転倒モーメントの評価では、最初に検討方向における建物頂部と建物基部の観測記録と、設計時の固有値解析から得られる基礎固定の 1 次固有モードを用い建物全階の加速度応答を推定する。図 7 に示す通り、建物基部に対する建物頂部の相対応答を求め、非観測点(推定点)の相対応答を 1 次固有モードで補間して推定し、それに基部の応答を足すことで非観測点の絶対応答とする¹²⁾。また、基礎回転角と同様、1 次成分のみを対象とするため、観測記録には 1 次成分をおおむね包含するバンドパスフィルタを適用する。一例として、建物 N の 1995 年兵庫県南部地震および 2018 年大阪府北部の地震を対象に、1F、31F の加速度とモード比を用いて、16F の中間観測点での加速度を推定した結果を図 8 に示す。観測値と推定値は振幅、位相ともに良好に対応する。1995 年兵庫県南部地震時にはひび割れによる剛性低下が見られたが、2018 年大阪府北部の地震においても良好に推定できていることから、地震によるモードの変化は考慮せず、全建物で共通して設計時の 1 次固有モードを用いることとする。建物全階で得られた加速度応答と各階

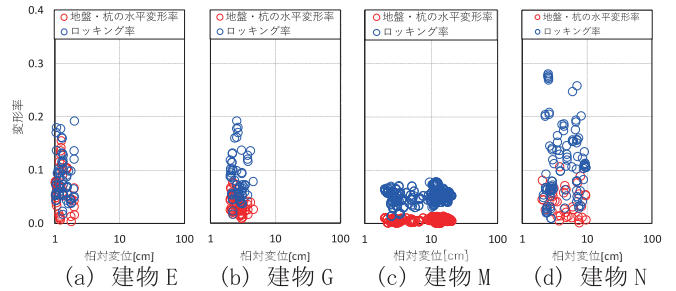


図 6 地盤・杭の水平変形率およびロッキング率の変動

表 2 地盤・杭の水平変形率およびロッキング率の一覧

対象地震	発生日時	地盤・杭の水平変形率				ロッキング率			
		建物E	建物G	建物M	建物N	建物E	建物G	建物M	建物N
滋賀県北部の地震	1994.05.28 17:04	-	-	-	5%	-	-	-	32%
兵庫県南部地震	1995.01.17 5:46	-	-	-	4%	-	-	-	15%
鳥取県西部地震	2000.10.06 13:30	-	-	1%	-	-	-	6%	-
東海道沖の地震	2004.09.05 23:57	-	-	1%	-	-	-	6%	-
千葉県北西部の地震	2005.07.23 16:34	4%	8%	-	-	11%	21%	-	-
東北地方太平洋沖地震	2011.03.11 14:46	14%	2%	1%	2%	8%	13%	4%	19%
大阪府北部の地震	2018.06.18 7:58	-	-	2%	2%	-	-	5%	15%
千葉県北西部の地震	2021.10.07 22:41	5%	4%	-	-	7%	11%	-	-

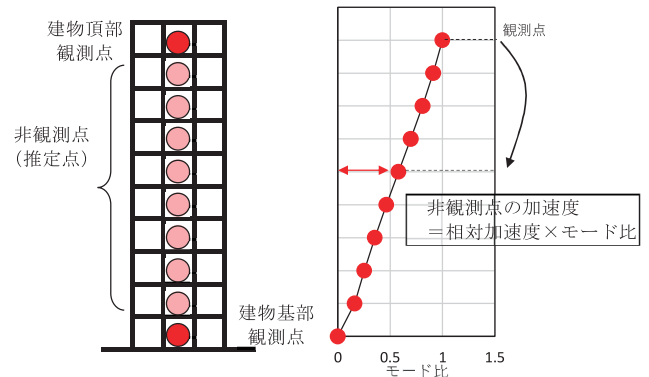
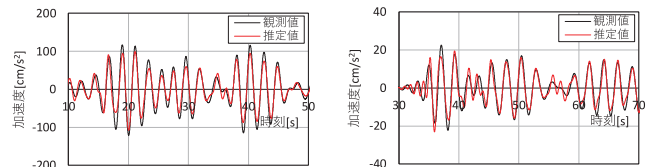


図 7 上部建物の応答推定概念図



(a) 1995 年兵庫県南部地震 (b) 2018 年大阪府北部の地震

図 8 応答推定精度の検証(建物 N, 16F, EW 方向)

質量、高さを用いて、建物基部の転倒モーメントの時刻歴応答を求める。

基礎回転角は 3 章で示した通り、建物基部の 2 点あるいは杭先端と建物基部 1 点の上下相対変位を検討方向の水平距離で除して求める。

建物基部と杭先端では深さ方向の位置が異なるが、検討対象とする建物の 1 次モード近傍ではその影響は小さく、剛体仮定によりロッキング変形するものと仮定した。建物基部 2 点、杭先端 1 点で同時観測が行われている建物 M の記録を用いて、杭先端と建物基部 1 点を用いて評価した基礎回転角を、建物基部の 2 点を用いて検証を行い、おおむ

ね妥当であることを確認している¹¹⁾。

4.2 建物Mの回転地盤ばね

はじめに、小振幅レベルの地震のみを経験し非線形化の影響が比較的小さいS造(柱CFT)建物の建物M²⁾¹³⁾について、NS方向の回転地盤ばねの評価を行う。

2011年東北地方太平洋沖地震時の観測記録を用いた評価について、前章の方法で算出した転倒モーメントと基礎回転角の時刻歴、5秒幅の遅れ0の相互相関関数を用いた相関関係、履歴曲線を図9に示す。

図9(a)に示す時刻歴波形では転倒モーメントと基礎回転角の位相がおおむね一致し、図9(b)に示す両者の相互相関関数でも地震中の大部分で高い相関関係を示す。図9(c)には図9(b)に網掛けした相互相関関数が大きい範囲の履歴曲線を示す。図中には最小二乗法により求めた等価な回転地盤ばねを表す近似直線(緑線)を併せて示しており、0-100秒では 1.72×10^{10} kN・m/rad.、160-220秒では 1.66×10^{10} kN・m/rad.、390-430秒では 1.91×10^{10} kN・m/rad.となる。

建物Mでは微小振幅時の回転地盤ばねを評価するために、2021年7月に上部建物のほかB1Fに上下方向加速度計を高密度に配置した常時微動計測を実施している¹⁴⁾。常時微動計測時の回転地盤ばねは 1.50×10^{10} kN・m/rad.と若干小さ目ではあるが地震時の値と整合しており、当該地震中では回転地盤ばねがおおむね線形であることが確認できた。

2000年鳥取県西部地震($M_7.3$)、2004年東海道沖の地震($M_7.4$)、2018年大阪府北部の地震時の回転地盤ばねの評価結果を図10に示す。転倒モーメントー基礎回転角の関係は相互相関関数が小さい範囲が多い、あるいは観測記録の継続時間が短い地震もあることから、各地震とも転倒モーメントが大きくなる範囲を抜粋しており、図中には最小二乗法により求めた等価な回転地盤ばねを表す近似直線(緑線)および数値を併せて示す(以下、図12~図14も同様)。転倒モーメントー基礎回転角の関係は相互相関関数が小さい範囲も対象としているため、履歴にばらつきが見られるものもあるが、等価な回転地盤ばねは $1.62 \sim 2.16 \times 10^{10}$ kN・m/rad.で、2011年東北地方太平洋沖地震時や常時微動時の結果とおおむね同等となっている。

4.3 建物Nの回転地盤ばね

小振幅レベルの地震に加えて、大振幅レベルの1995年兵庫県南部地震を経験した建物Nの回転地盤ばねを評価する。

1995年兵庫県南部地震時の観測記録を用いた評価について、転倒モーメントと基礎回転角の時刻歴、履歴曲線を図11に示す。図11(a)から転倒モーメントと基礎回転角の

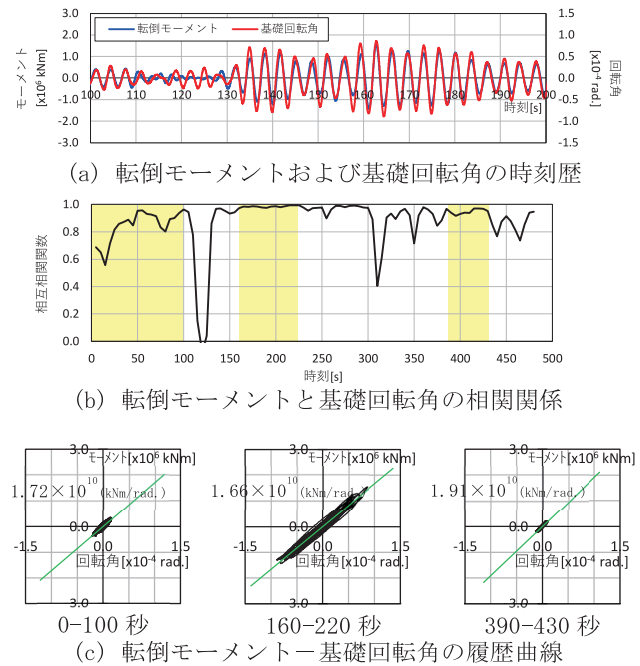


図9 回転地盤ばねの評価

(建物M, 2011年東北地方太平洋沖地震, NS方向)

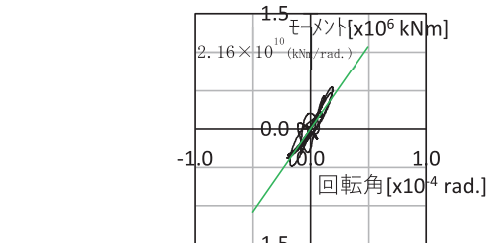
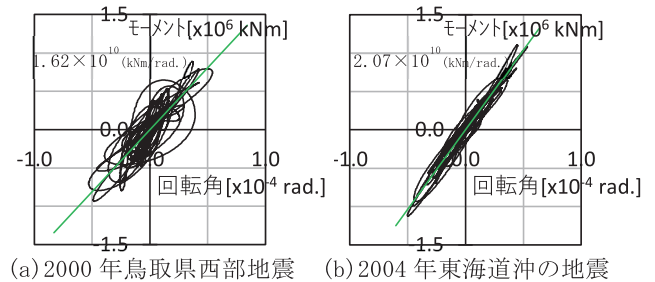


図10 回転地盤ばねの評価(建物M)

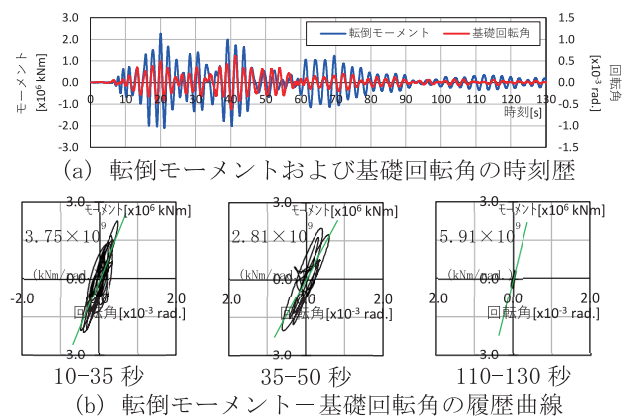


図11 回転地盤ばねの評価

(建物N, 1995年兵庫県南部地震, EW方向)

時刻歴波形は位相が一致していることが確認できる。図 11 (b) には地震中で相互相関関数が大きい時間区間の履歴曲線を示す。等価な回転地盤ばね値は 10-35 秒で 3.75×10^9 kN・m/rad.、35-50 秒で 2.81×10^9 kN・m/rad.、110-130 秒で 5.91×10^9 kN・m/rad. となった。建物 M と同様に実施した常時微動計測時の回転地盤ばねは 6.91×10^9 kN・m/rad. となっており、大振幅レベルの地震動を受け地震中にばね値が大きく低下したと考えられる。

1994 年滋賀県北部の地震 ($M_5.3$)、2011 年東北地方太平洋沖地震、2018 年大阪府北部の地震時の回転地盤ばねの評価結果を図 12 に示す。1995 年兵庫県南部地震時に等価な回転地盤ばねが 2.81×10^9 kN・m/rad. まで低下するものの、1994 年滋賀県北部の地震と 2018 年大阪府北部の地震、1995 年兵庫県南部地震の後続部におけるばね値は同等であり、大振幅レベルの地震動を受けたばね値の低下は一時的なものであると考えられる。この回転地盤ばねの非線形挙動については 6 章で検討を行う。

4.4 建物 G の回転地盤ばね

建物 G では、2005 年千葉県北西部の地震 ($M_6.0$)、2011 年東北地方太平洋沖地震、2021 年千葉県北西部の地震 ($M_5.9$) 時の回転地盤ばねの評価結果を図 13 に示す。等価な回転地盤ばねは 2011 年東北地方太平洋沖地震時以外で $4.64 \sim 4.73 \times 10^9$ kN・m/rad. となっており、振幅レベルの大きな 2011 年東北地方太平洋沖地震時に 3.16×10^9 kN・m/rad. とやや低下傾向が見られる。

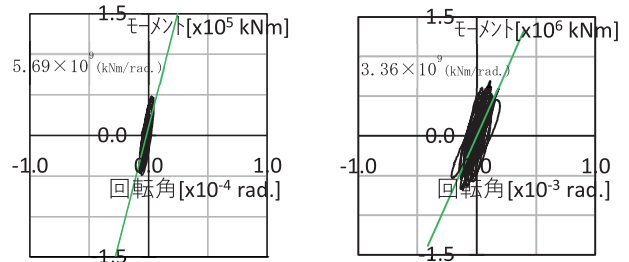
4.5 建物 E の回転地盤ばね

建物 E では杭先端と建物基部 1 点の記録を用いて、EW 方向の回転地盤ばね評価を行う。2005 年千葉県北西部の地震、2011 年東北地方太平洋沖地震、2021 年千葉県北西部の地震時の回転地盤ばねの評価結果を図 14 に示す。等価な回転地盤ばねは 2011 年東北地方太平洋沖地震時以外で $1.15 \sim 1.28 \times 10^{10}$ kN・m/rad. と同程度となっており、振幅レベルの大きな 2011 年東北地方太平洋沖地震時に 9.40×10^9 kN・m/rad. とやや低下傾向が見られる。いずれの建物でも 2011 年東北地方太平洋沖地震時にばね値が低下し、この原因として長時間の繰り返し震動による杭と地盤の摩擦抵抗の低下が考えられるが、詳細な検証は今後の課題としたい。

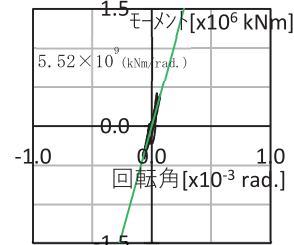
5. 回転地盤ばねの計算値との比較

5.1 回転地盤ばねの計算方法

4 章で得られた回転地盤ばねを計算値と比較する。計算

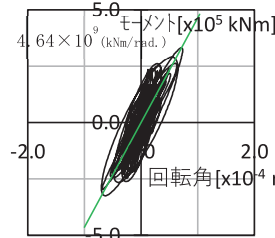


(a) 1994 年滋賀県北部の地震 (b) 2011 年東北地方太平洋沖地震

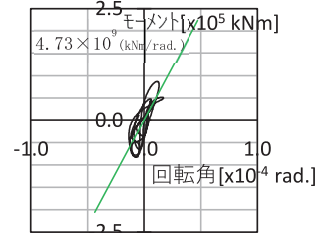


(c) 2018 年大阪府北部の地震

図 12 回転地盤ばねの評価 (建物 N)

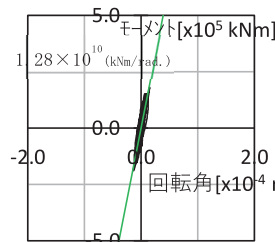


(a) 2005 年千葉県北西部の地震 (b) 2011 年東北地方太平洋沖地震

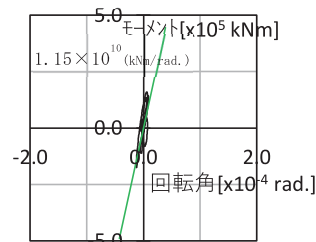


(c) 2021 年千葉県北西部の地震

図 13 回転地盤ばねの評価 (建物 G)



(a) 2005 年千葉県北西部の地震 (b) 2011 年東北地方太平洋沖地震



(c) 2021 年千葉県北西部の地震

図 14 回転地盤ばねの評価 (建物 E)

方法は杭基礎・周辺地盤を一体とした図 15 に示す軸対称有限要素法（以下、軸対称 FEM）と、群杭と杭周地盤ばねから構成される Penzien モデルである。

軸対称 FEM では、杭はリングパイル要素¹⁵⁾でモデル化し、杭配置を考慮した群杭全体の断面二次モーメントが等価となるように杭位置の半径を設定した。地下部分の底面は剛と仮定する。リングパイル要素の杭頭部の水平、回転、上下自由度は、地下部分の底面と剛拘束した。埋め込み部の側面地盤は水平方向のみ基礎部と剛拘束した。地盤の物性は図 1 中に示す S 波速度を含む PS 検層結果を参照する。境界条件は側面をエネルギー伝達境界、底面を粘性境界とした。なお、サイトノンリニアリティやリングパイル要素と地盤要素とのすべり・剥離条件は設定していない。回転地盤ばねは、動的インピーダンス算定により得られた回転成分 K_{RR} から評価する。

Penzien モデルでは、Randolf による杭周上下地盤ばね¹⁶⁾と杭先端上下地盤ばねを用いて単杭の杭頭での上下ばねを求め、杭配置を考慮して回転地盤ばねを求める¹⁷⁾。

5.2 解析モデルによる回転地盤ばね評価

それぞれの計算方法から算出した回転地盤ばねを、観測記録と微動計測¹⁴⁾による回転地盤ばねと併せて図 16 に示す。軸対称 FEM に比べて Penzien モデルの方がばね値を高めに評価しており、全建物同様の傾向である。これは、文献¹⁷⁾に示される結果と同様の傾向である。線形応答範囲では軸対称 FEM のばね値が、強震記録から得られた値と良く対応する。

5.3 1995 年兵庫県南部地震時に見られた回転地盤ばねの低下要因の検討

4.3 節の建物 N の観測記録による回転地盤ばね評価では、1995 年兵庫県南部地震時にばね値が 40~50%程度まで低下する現象が確認された。このばね値の低下を、Penzien モデルを用いて検討する。工学的基盤を除く表層地盤について S 波速度（せん断剛性）を一律の倍率で調整し、周辺地盤の非線形化と杭周上下地盤ばねの低下を等価的に考慮して、回転地盤ばね値の変化を確認する。

周辺地盤の S 波速度の低下率とそれに伴う回転地盤ばねの変化を図 17 に示す。周辺地盤の S 波速度を低下させることで杭周上下地盤ばねの値が小さくなり、全体の回転地盤ばねが低下する。回転地盤ばねが 40~50%程度に低下した建物 N の場合には、周辺地盤の非線形化の他、杭周での上下方向の摩擦切れにより、杭周地盤のせん断剛性が大きく低下した可能性も考えられる。

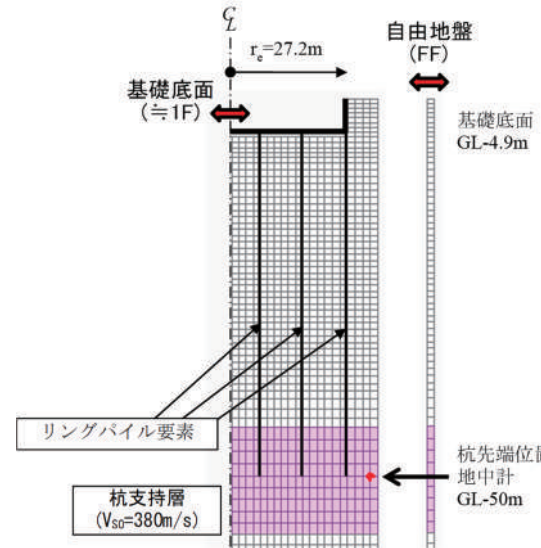


図 15 杭基礎・周辺地盤を一体とした軸対称 FEM (建物 G)

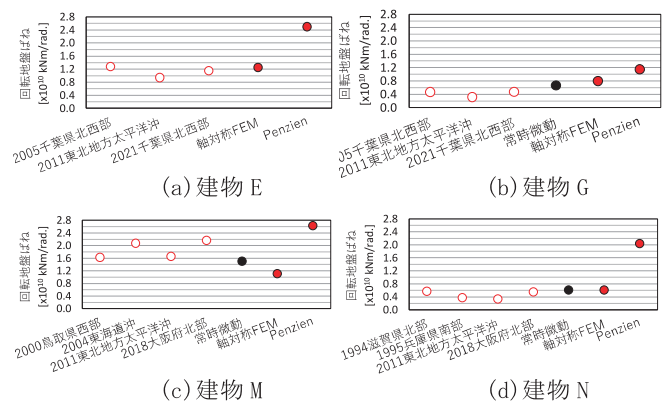


図 16 観測記録による回転地盤ばねと計算値の比較

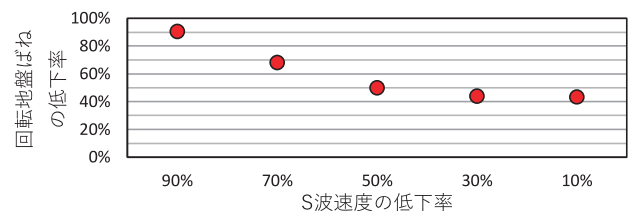


図 17 S 波速度の低下率と回転地盤ばねの変化

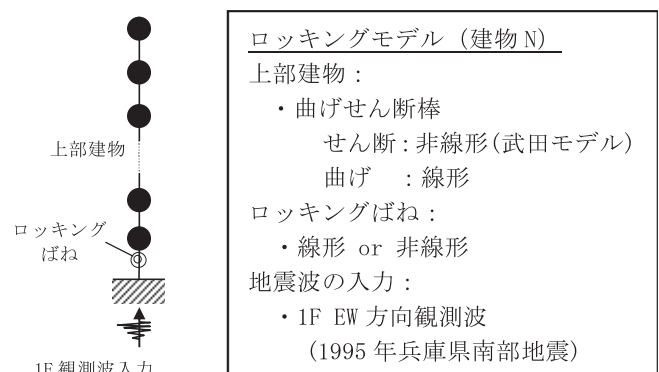


図 18 地震応答解析モデルの概要

6. 回転地盤ばねの非線形性が建物応答に与える影響の検討

建物 N で確認された回転地盤ばねの低下現象が、上部建物の地震応答に与える影響を検討する。

6.1 上部建物のモデル化

地震応答解析モデルは設計図書をベースに、図 18 に示すように上部建物（ペントハウス含む）を 33 質点でモデル化し、最下部に回転地盤ばねを配置したロッキングモデルとする。上部建物は曲げせん断棒でモデル化し、せん断はトリリニア型の武田モデル、曲げは線形とする。建物応答の確認に用いる入力地震波は、図 19 に示す 1995 年兵庫県南部地震の 1F の観測記録（EW 方向）とする。観測記録を用いた予備解析により上部建物の剛性および減衰定数を調整した。減衰は瞬間剛性比例型で弾性 1 次固有周期に対し 1.0% で設定した。回転地盤ばねを等価線形、非線形としたケースで時刻歴応答解析を行う。

6.2 等価線形の回転地盤ばねを用いたシミュレーション解析

等価線形ばねは、5.1 節で示す軸対称 FEM に 1995 年兵庫県南部地震時の表層地盤の応答解析より得られたサイトノンリニアリティを追加して得られた回転地盤ばね（ $5.03 \times 10^9 \text{ kN}\cdot\text{m/rad.}$ ）を採用する。このアプローチは耐震設計でも用いられている。等価線形の回転地盤ばねの解析モデルによるシミュレーション解析結果を図 20 に示す。上部建物の 31F および 16F の観測点における加速度波形と擬似速度応答スペクトルは、観測と解析でおおむね良く対応している。

6.3 非線形回転地盤ばねの履歴モデル

回転地盤ばねの非線形特性は、図 16(d) に示す軸対称 FEM の値を初期剛性とし、転倒モーメント-回転角の履歴則に Masing 則を適用した R-0 モデル¹⁸⁾を採用する。非線形ばねは、図 11(b) に示す 1995 年兵庫県南部地震の主要動で確認された 2 つの時間帯「10-35 秒」「35-50 秒」の回転地盤ばねを対象にモデル化する。図 21 に R-0 モデルの骨格曲線と各パラメータを示す。 α 、 β 、 M_f は転倒モーメントと基礎回転角の履歴特性が整合するように設定した。 α と β は固定値とし、 M_f によりそれぞれの時間帯の非線形ばねを設定した。他の解析条件は 6.1 節と同じである。

地震応答解析により得られた、基礎位置での転倒モーメントと回転角の関係を図 22 に示す。同図には、2 つの時間帯での観測結果と計算結果の結果を比較して示す。設定し

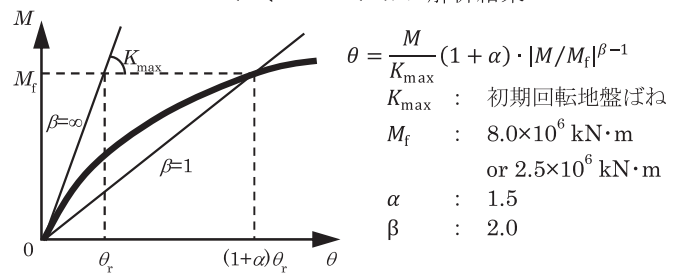
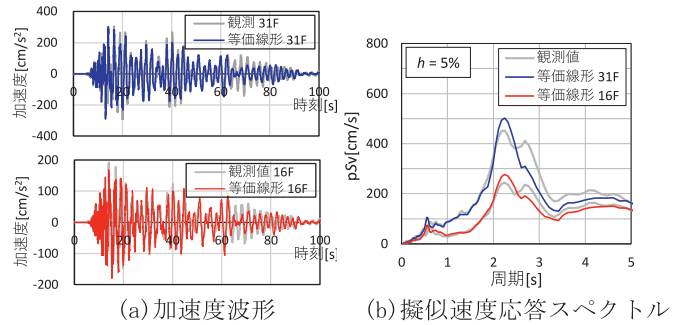
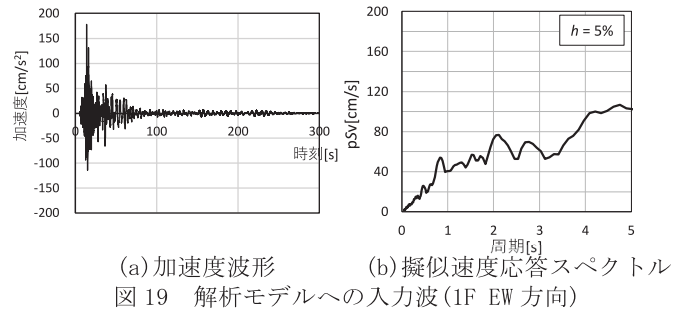
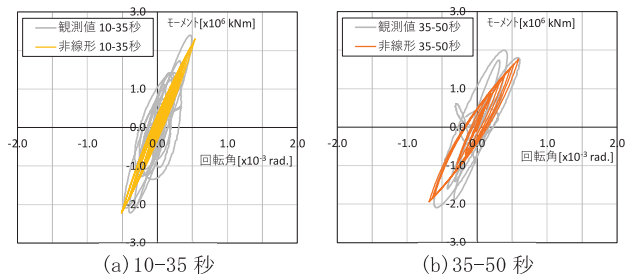


図 21 R-0 モデルの復元力特性



た R-0 モデルにより、各時間帯の履歴曲線が観測値から評価した結果とおおむね良好に対応している。

6.4 建物応答への影響

各時間帯で計算した 16F、31F の加速度波形を観測記録と比較して図 23 に示す。やや周期特性の違いが見られる部分もあるが、両者はおおむね対応する結果となっている。各時間帯で発生する上部建物の最大応答値を比較して図 24、図 25 に示す。同図では、等価線形の回転地盤ばねを用いた結果と比較する。いずれの結果も等価線形の回転地盤ばねを用いた結果に比べ小さくなるものの、その変化は小さい。これは、回転地盤ばねが線形範囲では表 2 に示すように 15%

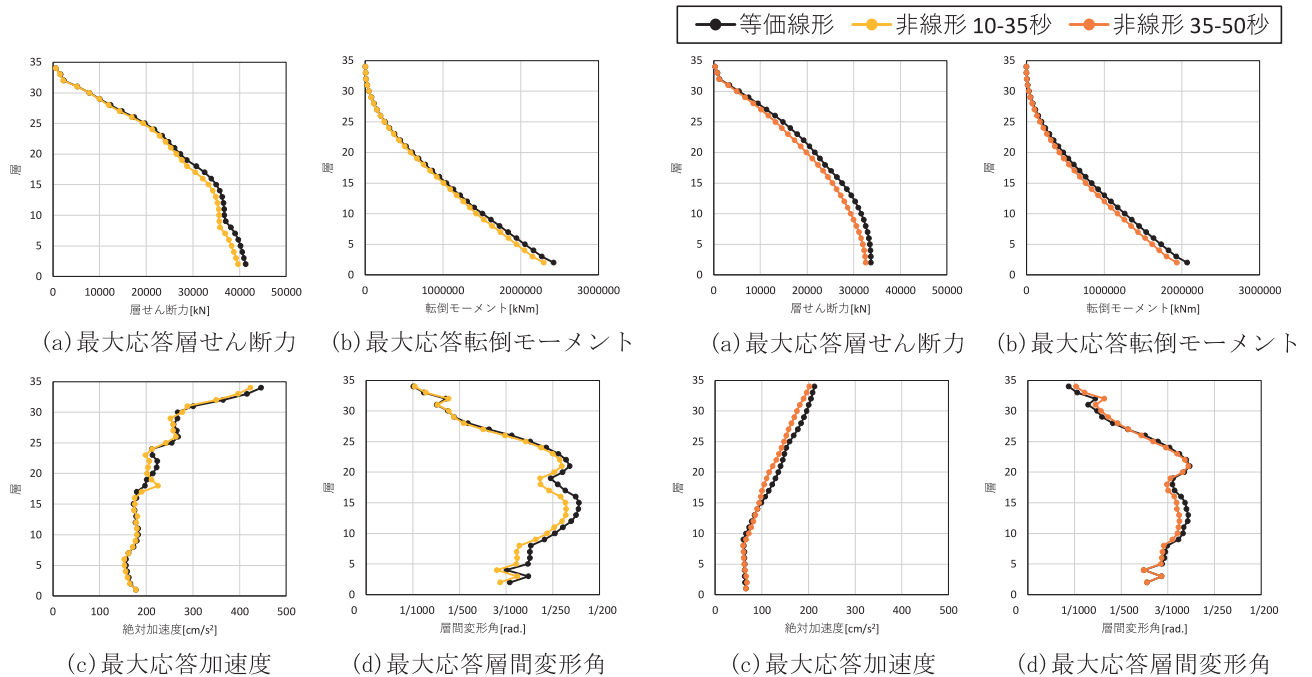
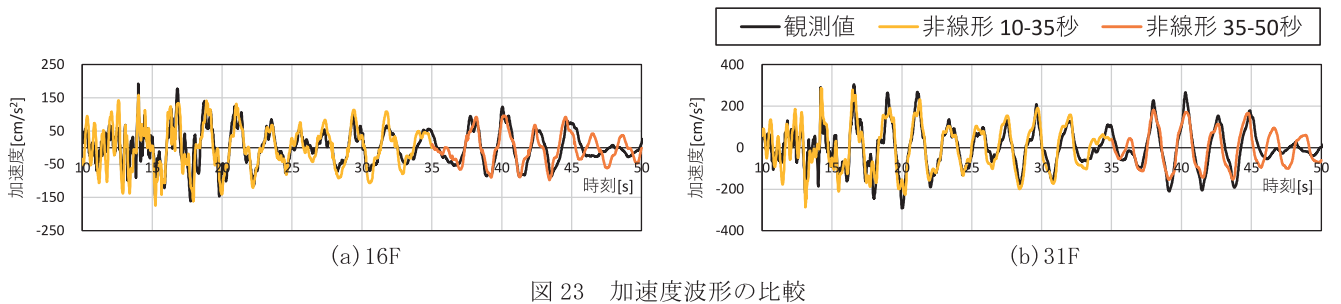


図 24 建物応答値の比較 (10-35 秒)

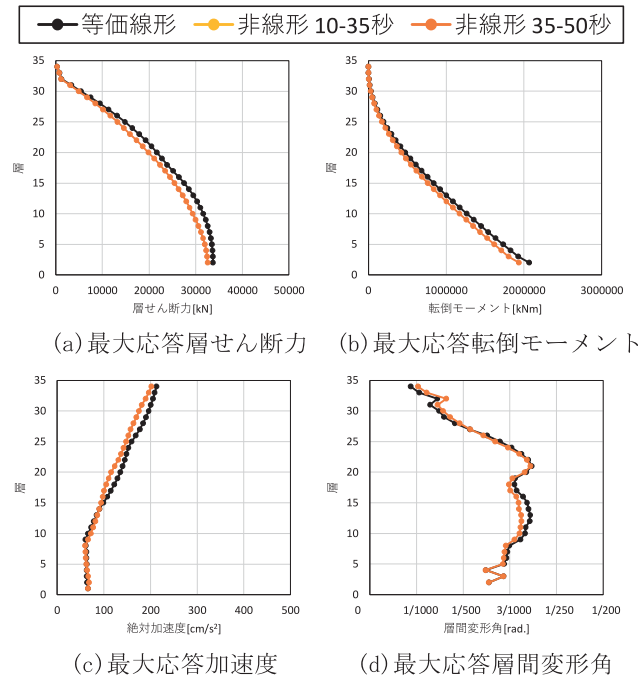


図 25 建物応答値の比較 (35-50 秒)

程度のロッキング率で影響は小さくないものの、ひび割れにより上部架構が非線形化するような場合には、回転地盤ばねの非線形化の影響が相対的に小さくなるためと考えられる。これより、回転地盤ばねの非線形挙動が建物応答の最大応答に与える影響は小さく、また適切な等価線形の回転地盤ばねを利用することにより安全側の評価となる。ただし、回転地盤ばねの非線形化により上部建物の変形成分比率が変化することが推測されるため、上部建物の損傷評価には回転地盤ばねを適切に評価する必要があると考えられる。

7. まとめ

超高層集合住宅を対象に大振幅レベルを含む強震観測記録を用い、動的相互作用特性を分析した上で、非線形領域まで考慮した回転地盤ばね評価を行った。さらに、回転地盤ばねの非線形モデルを設定し、建物応答に与える影響を調べた。得られた知見を以下に示す。

(1) 地盤・杭の水平変形率およびロッキング率を算出し、

地震時あるいは地震後の変化を検討した。本研究で対象とする超高層集合住宅では、地中観測記録を含む強震記録の分析からロッキング率の割合が大きくなることを示した。この特性は今までも計算上では知られたものであり実際の耐震設計でも考慮されているものではあるが、複数の超高層集合住宅における地中観測記録を含む強震記録から実証的に示された点に意義がある。

- (2) 強震観測記録を用いて、上部建物の応答値から求める転倒モーメントと、建物基部および杭先端の上下変位から算出した基礎回転角から回転地盤ばねを算出し、対象建物の回転地盤ばね評価を行った。線形応答範囲で強震記録から得られた回転地盤ばねは、常時微動計測結果から算出したばねや軸対称 FEM で計算したばねとおおむね対応する。
- (3) 建物 N で得られた 1995 年兵庫県南部地震時の観測記録から評価した回転地盤ばねには非線形挙動が見られた。Penzien モデルで杭周地盤ばねの低下に起因すると仮定した検討を行った結果、周辺地盤の非線形

化の他、杭周での上下方向の摩擦切れにより、杭周地盤のせん断剛性が大きく低下し、回転地盤ばねが低下する可能性を示した。

- (4) 回転地盤ばねの非線形性が超高層集合住宅の地震時挙動に与える影響について、時間帯を分けて観測値から得られた履歴曲線にフィッティングさせた非線形モデルと等価線形モデルで建物応答を比較した。回転地盤ばねの非線形挙動が建物応答の最大応答に与える影響は小さく、また適切な等価線形の回転地盤ばねを利用することにより安全側の評価となる。ただし、上部建物の損傷評価には回転地盤ばねを適切に評価する必要があると推測される。

謝辞

本報告は、筆者が株式会社鴻池組において行った 2019 年から 2022 年までの研究を基に、東京理科大学大学院 永野正行教授のご指導の下で取りまとめた研究成果の概要報告です。博士論文をまとめるにあたり、ご指導、ご支援賜りました皆様に心より深く感謝申し上げます。

本研究で利用した強震観測記録は、独立行政法人都市再生機構との共同観測により得られたものです。建物 G、M、N の高密度常時微動計測は居住者の方々のご理解のもとで実施し、東京理科大学 永野研究室のメンバーにご協力いただきました。また、一部図の作成には GMT を利用させていただきました。

参考文献

- 1) 住宅・都市整備公団、鴻池組：1995 年兵庫県南部地震 高見フローラルタウン 15 号棟超高層 RC 造集合住宅の地震応答記録からの耐震性に関する調査報告、255p.、1996
- 2) 永野正行ほか：2011 年東北地方太平洋沖地震時の強震記録に基づく関東・関西地域に建つ超高層集合住宅の動特性、日本地震工学会論文集、第 12 巻、第 4 号、pp. 65-79、2012
- 3) 山本健史ほか：地盤一杭一建物の動的相互作用を考慮した超高層集合住宅の地震応答解析による 2011 年東北地方太平洋沖地震の観測記録の再現、日本地震工学会論文集、第 16 巻、第 8 号、pp. 75-81、2016
- 4) 田村彩女ほか：観測記録に基づく超高層集合住宅の上下振動特性と動的相互作用効果、日本建築学会技術報告集、第 26 巻、第 63 号、pp. 484-489、2020
- 5) 岡野創ほか：観測記録から推測される地盤一構造物の動的相互作用による建物応答低減効果、日本建築学会構造系論文集、第 79 巻、第 696 号、pp. 237-246、2014
- 6) 田守伸一郎ほか：地盤の大歪み領域における地盤・杭・建物連成系の地震時挙動の簡易評価法に関する研究、日本建築学会構造系論文集、第 65 巻、第 531 号、pp. 71-78、2000
- 7) 上野大輔ほか：IT 強震計による中層鉄筋コンクリート造学校校舎の振動特性評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、pp. 961-962、2014
- 8) 源栄正人ほか：周波数領域における動的な地盤剛性を用いた相互作用力の再帰的評価法に基づく 3 次元成層弾性地盤上に建つ構造物の浮き上がり振動解析、日本建築学会構造系論文集、第 451 号、pp. 79-88、1993
- 9) 富安祐貴ほか：根入れを有する直接基礎建物のスウェイ・ロッキング動と周辺地盤の非線形挙動の関係、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造 II、pp. 1087-1088、2012
- 10) 森清宣貴ほか：1995 年兵庫県南部地震を経験した超高層 RC 造建物の長期観測記録に基づく動的特性の分析、日本建築学会技術報告集、第 26 巻、第 63 号、pp. 479-483、2020
- 11) 森清宣貴ほか：超高層集合住宅の強震観測記録を用いた回転地盤ばねの評価とその非線形特性がその建物応答に与える影響、日本建築学会構造系論文集、第 87 巻、第 801 号、pp. 1013-1021、2022
- 12) 森清宣貴ほか：建物の構造ヘルスマニタリングに関する基礎的研究、鴻池組技術研究報告、Vol. 29、pp. 53-60、2019
- 13) 井川望ほか：粘弾性ダンパーを用いた超高層集合住宅における地震・風観測とその評価、鴻池組技術研究報告、Vol. 23、pp. 41-48、2013
- 14) 海老原知弥ほか：常時微動計測に基づく超高層集合住宅の回転地盤ばねの評価、日本建築学会技術報告集、第 30 巻、第 75 号、pp. 626-631、2024
- 15) Tyson, T. R.: Dynamic analysis of axisymmetric pile groups, MIT Department of Civil Engineering, Order (751)、1983
- 16) Randolph, M. F. and C. P. Wroth: Analysis of Deformation of Vertically Loaded Piles, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, GT12, pp. 1465-1488、1978
- 17) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計、2006
- 18) 日本建築学会：入門・建物と地盤との動的相互作用、1996