

神戸市中央区に建つ高層集合住宅における地震観測 —(その4)2018年6月18日大阪府北部の地震による強震記録の分析—

境 茂樹^{*1}・仲野健一^{*1}・伊藤隆之^{*2}・小田 聡^{*3}

地盤—杭—建物系の地震時挙動を把握することを目的として、神戸市中央区に建つ杭支持高層集合住宅において地震観測を2000年3月より実施している。この建物で2018年6月18日大阪府北部の地震(気象庁マグニチュードMj=6.1)の強震記録が得られ、過去の観測記録の中で最大の加速度(最上階NS成分=208cm/s²)となった。この地震の観測記録を分析し、設計モデルによるシミュレーション解析を行った結果、地盤—建物の相互作用を考慮したスウェー・ロッキングモデル(S-Rモデル)による解析結果は、基礎固定モデルと比較して観測結果を良く説明し、杭基礎建物の設計において地盤—建物の相互作用効果を適切に評価することが重要であることを示した。

キーワード：大阪府北部の地震、強震観測、杭支持高層建物、地盤—建物連成系、S—Rモデル

1. はじめに

筆者らは、神戸市中央区において、関西地域の地盤震動特性および杭を有する高層建築物の地震時挙動を把握することを目的として2000年3月から地上33階建ての高層集合住宅で地震観測を実施している^{1)~4)}。

観測を開始して20年近くを経過し、135イベントの観測記録が得られたが、その中には2018年6月18日大阪府北部の地震(Mj=6.1)による強震記録が含まれている。この地震は内陸直下型の地震で、過去に本建物で得られた加速度記録の中で最大(最上階NS成分=208cm/s²)となった。

本報告は、この地震による観測データの分析と設計時の解析モデルによるシミュレーション解析を行い、建物の応答特性と設計モデルの妥当性について検討したものである。

2. 建物の概要

2.1 建物概要

対象建物は、神戸市中央区に建つ地上33階、地下1階、塔屋3階で、軒高98.457m、最高部高さ108.557mの共同住宅である(図-1参照)。基準階の平面形状は、北東面と南西面を1スパン切りかいた正方形に近い形状となっており、その大きさは1辺が、4.6、5.85m×4の5スパンで全長28.0mである。また、建物の24階で南面および西面が1スパンずつセットバックしている。

構造形式は、主体構造が鉄筋コンクリート造の純ラーメン構造で、地下階は鉄筋コンクリート造の耐震壁併用ラーメン構造である。基礎は根入れ深さ7.0mでマットスラブとして剛性を確保し、杭は場所打ちコンクリ

ート杭(ベント併用拡底アースドリル杭工法)で支持させている。

2.2 地盤概要

本敷地の地盤構成は、図-2に示すように、ボーリング調査の結果から、GL-3.8mまで盛土層、以下GL-13.0m程度まで礫混じり砂または砂層となり、それ以降のGL-23m程度までは粘土、砂、砂礫の互層となり、GL-23m以下で礫混じり砂または砂層となっている。GL-16m以下で深のほとんどの層でN値は50以上となっている。PS検層結果をみると、GL-23mでせん断波速度Vs=380m/s程度となっている。なお、杭先端はGL-29mの砂礫層に支持させている。

2.3 地震観測システムの概要

本建物における地震計設置位置を図-1に示す。この観測システムでは、建物および周辺地盤にサーボ型加速度計を配置し、建物内は1階スラブ下、17階スラブ下、および屋上スラブ下の剛心位置に、また、建物から12mほど離れた周辺地盤には、地表面(GL-1.5m)および杭先端レベル(GL-29m)に設置している。

チャンネル数は各地震計3成分の合計15chの同時観測であり、収録の起動は、GL-29mの地震計(起動レベル1cm/sec²)と超高層建物の後揺れや遠方の長周期地震動による応答を見るために最上階の地震計(起動レベル2cm/sec²)によって行われている。サンプリングは100Hz、トリガー前の収録時間は10秒、トリガー終了後の記録時間は60秒に設定している。なお、地震計の設置方向は建物の構面方向に合わせ、X方向が東西方向(EW)、Y方向が南北方向(NS)にほぼ一致している。

*1 建築研究部 *2 構造設計部 *3 都市再生機構

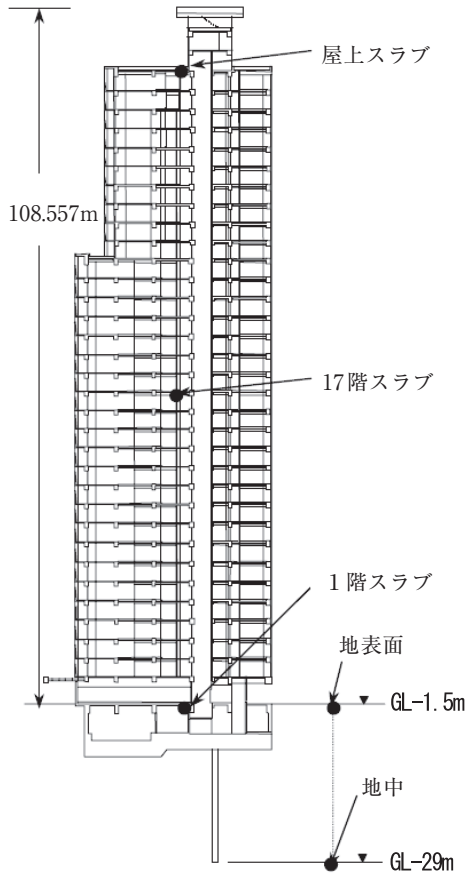


図-1 建物の軸組図と地震計設置位置

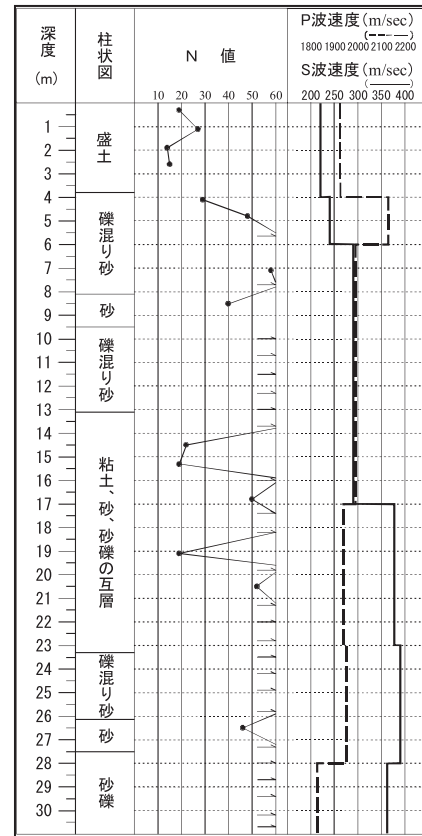


図-2 敷地の地盤構成とP S検層結果

3. 地震観測結果とシミュレーション解析

3.1 過去の強震観測記録による固有振動数の変化

2000年3月から観測を開始して以来、2019年3月現在で135イベントの観測記録が得られた。

これらの記録による建物の1次固有振動数と屋上の応答加速度との関係を図-3に示す。建物の固有振動数は1階と屋上の水平方向の伝達関数のピークから算出

した。その結果、建物の1次固有振動数は0.54～0.67Hzで屋上の加速度の増大に伴い振動数が低下する傾向が認められる。1次固有振動数は微小振幅時の結果は設計値（基礎固定モデル）の0.63Hzとほぼ対応し、振幅が50cm/s²程度以上になると、振動数が低下し設計値（S-Rモデル）の0.54Hzに近づく傾向が認められる。なお、ここには示していないが、2次、3次の固有振動数についても、同様に振幅依存性の傾向が認められる。

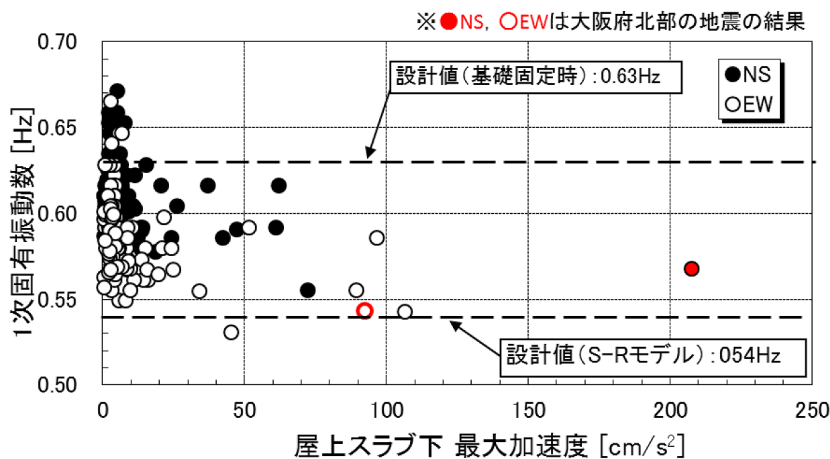


図-3 建物の1次固有振動数と最大加速度の関係

3.2 大阪府北部の地震による応答結果

対象建物と2018年6月18日大阪府北部の地震の震央位置を図-4に示す。建物は震央から約40km離れた所に位置し、建物が位置する神戸市中央区の震度は4であった。

建物に入力した地震動の特性と建物の周期特性を把握するため、周辺地盤 (GL-29m, GL-1.5m) および建物頂部の擬似速度応答スペクトルを算出し、その結果を図-5に示す。また、図-6には、建物の増幅特性を把握するため建物頂部と地表面 (GL-1.5m) のフーリエスペクトル比を示す。図-5の周辺地盤の応答スペクトルの結果から、NS方向、EW方向ともに周期1秒程度以下の短周期成分が優勢である。EW方向では、地中と地表面のいずれの記録にも周期2秒～3秒付近に優勢な成分が認められ、この特性は神戸地域における深い地盤構造の影響と考えられる。また、建屋頂部の応答スペクトルは周期1.8秒と0.6秒付近で卓越し、図-6のフーリエスペクトル比に示す、建物の1次、2次の固有振動数に対応したものとなっている。

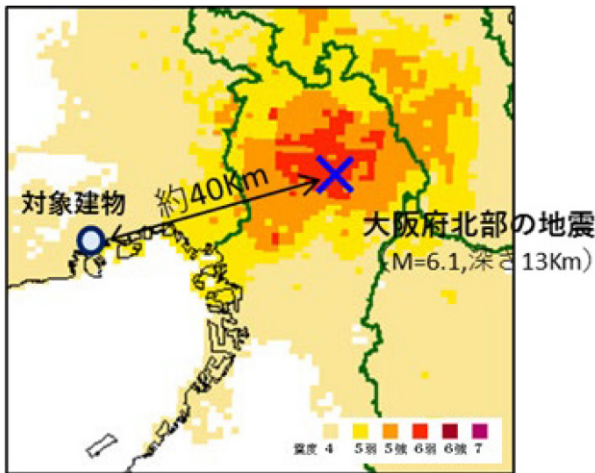


図-4 震央と建物の位置関係
(気象庁の予想震度マップに加筆)

3.3 設計モデルによるシミュレーション解析

(1) 解析モデル

設計時の解析モデルは、基礎固定の33質点等価せん断系モデルと、同様の解析モデルの基礎地盤にスウェイ・ロッキングバネを付けたS-Rモデルの2ケースで検討されている。

各層の復元力特性は、静的弾塑性解析の結果をトリリニア型に理想化して作成し、その履歴特性は、変形量に応じて剛性低下する剛性逡減型のモデルである。建物の減衰は、基礎固定モデルでは弾性時の1次固有周期に対して内部粘性系の瞬間剛性比例型とし、設計時は一律3%としたが、2005年紀伊半島南東沖地震のシミュレ-

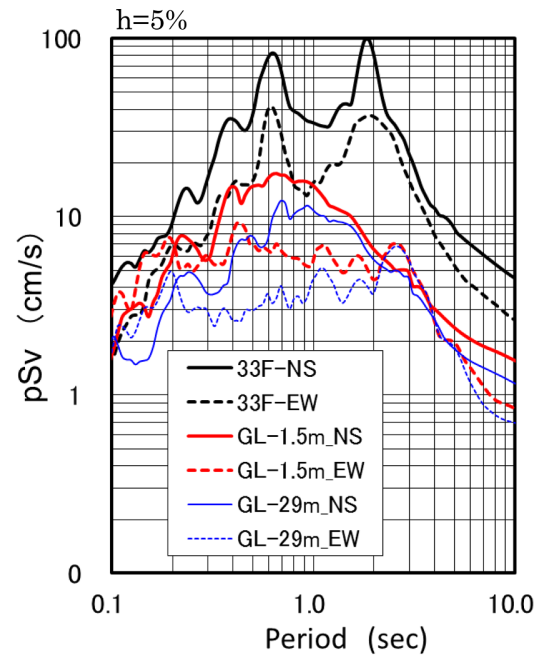


図-5 擬似速度応答スペクトル

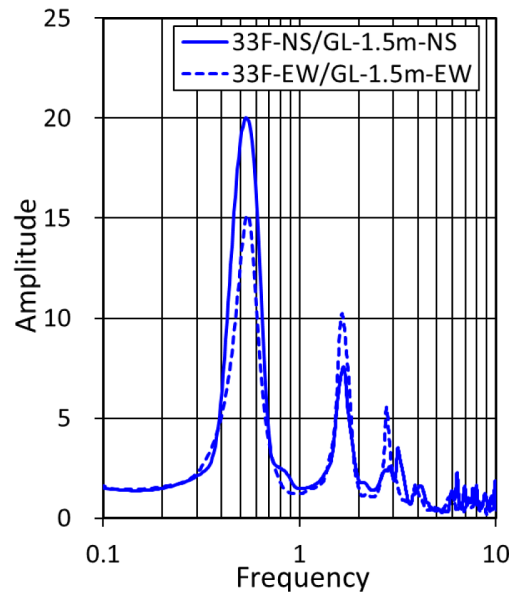


図-6 フーリエスペクトル比

ーション解析の結果⁴⁾と観測結果との対応から、一律2%に修正した。S-Rモデルでは上部構造は基礎固定とした時の弾性1次固有周期に対して2%、基礎については全体系の弾性時の1次モードに対してスウェイ10%、ロッキング5%の減衰を仮定した。スウェイバネは線形バネとし、ロッキングバネは端部の杭が引き抜かれる点を降伏点とするバイリニア型にモデル化した。

質点系モデルによる建物固有周期は、1次固有周期は両方向とも基礎固定モデルで約1.59秒(0.63Hz)、S-R

モデルで約 1.84 秒 (0.54Hz) となっている。

(2) 最大加速度分布

図-7 に観測と解析による最大加速度分布の結果を示す。解析結果の分布形を見ると、この地震が内陸直下型地震であり、先に述べたように入力地震動は短周期成分が優勢であるため、どちらの解析結果も 2 次以上の高次モードが卓越する分布形となっている。建物中間階での地震計が少ないため、解析結果の観測結果との対応は明らかではないが、建物頂部の応答結果から S-R モデルの方が観測結果に近いことがわかる。

(3) 加速度応答波形

図-8 に観測結果と解析結果の加速度波形を比較して示す。その結果、加速度波形の主要動部分は、基礎固定モデルがやや過少評価となり、また、主要動を過ぎた後続部分では、基礎固定モデルの位相が合わないのに対し、S-R モデルでは位相が観測結果とよく対応することが明らかと

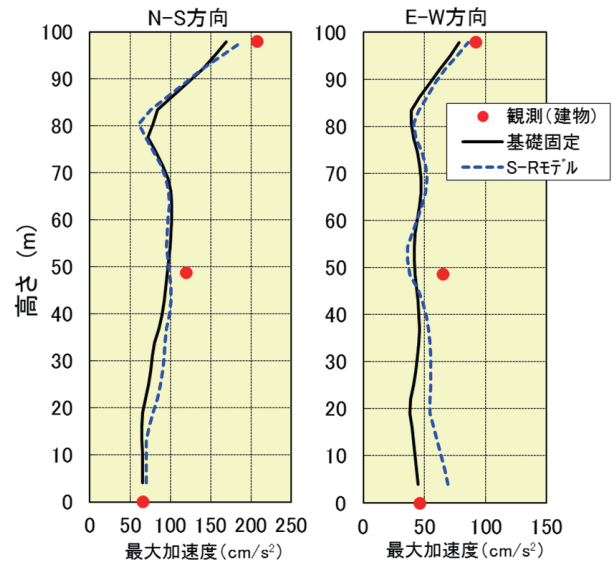
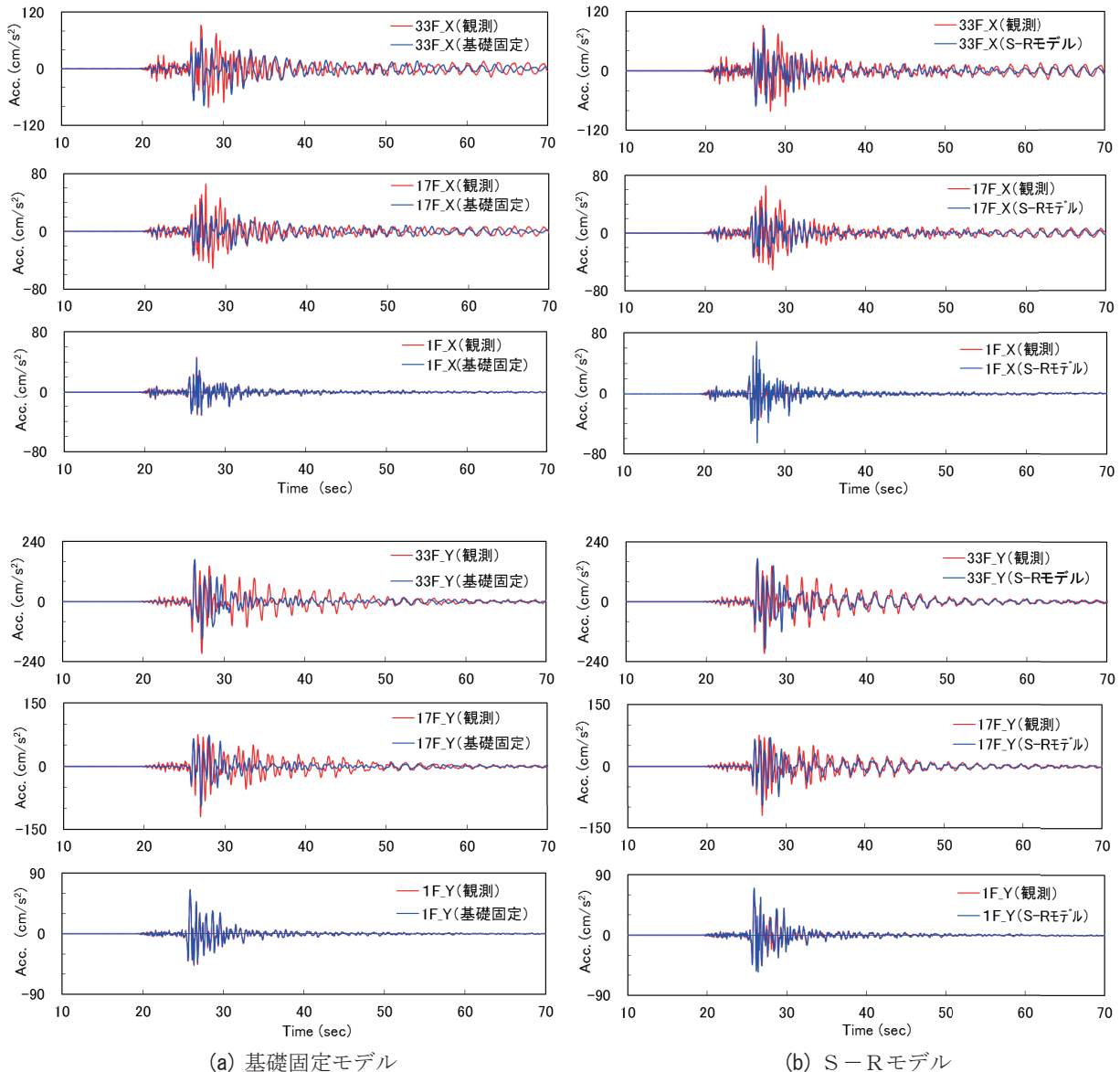


図-7 最大加速度分布



(a) 基礎固定モデル

(b) S-Rモデル

図-8 加速度時刻歴波形(上段3図:X方向,下段3図:Y方向)

なった。これらの結果は、既報で述べた2004年紀伊半島南東沖地震のシミュレーション結果⁴⁾とも対応し、設計時に建物基礎の回転を十分考慮することが重要であることを示唆している。

4. まとめ

神戸市に建つ高層RC建物について、2018年6月18日大阪府北部の地震の観測記録を分析し、設計モデルによる解析結果と比較して示した。その結果、S-Rモデルによる解析結果は、基礎固定モデルに比べ観測結果とよく対応することが明らかとなった。このことから、杭基礎を有する高層建物の設計においては、地盤-建物の相互作用効果を適切に評価することが重要であると考えられる。

参 考 文 献

- 1) 境, 加藤, 伊藤, 今津: 神戸市中央区に建つ高層集合住宅における地震観測, ハザマ研究年報, pp. 29-34, 2000.
- 2) 境, 加藤, 伊藤, 小田: 神戸市中央区に建設された杭支持高層建物の地震観測, 日本建築学会大会梗概集, pp. 309-310, B-2, 2002.
- 3) 境, 加藤, 伊藤, 大和田: 神戸市中央区に建つ高層集合住宅における地震観測 - 中小地震観測記録による振動特性 -, ハザマ研究年報, pp. 29-32, 2003.
- 4) 境, 加藤, 伊藤, 木村: 神戸市中央区に建つ高層集合住宅における地震観測 - (その3) 2004年9月5日紀伊半島南東沖地震の観測結果とシミュレーション解析 -, ハザマ研究年報, 2006.

Earthquake Motion Observation of High-Rise Residential Building in Kobe
- PART4 Observed Records of Osaka-Fu Hokubu Earthquake on June 18th in 2018 (Mj=6.1)
and a Simulation Analysis by the Analytic-Model in Design -

Shigeki SAKAI, Kenichi NAKANO, Takayuki ITO and Satoshi ODA

In order to study the dynamic behavior of the soil-structure interaction during a strong ground motion, earthquake motion has been monitored on the 33rd floor of a pile-supported high-rise residential building in Kobe City since March 2000. In this building, strong motion records of the earthquake in Osaka-Fu Hokubu on June 18th, 2018 (Mj=6.1) were observed. We performed a simulation analysis for the said earthquake using the structural design model to inspect the validity of the design model and compared it with the observation records. We conducted two analyses for the basic fixed model and S-R model that attached a sway rocking spring to the base foundation, assuming 33-mass shear system (MDOF). As a result, analysis results of the S-R model accorded with the observations well compared to the basic fixed model, and particularly, for the acceleration response wave phases. It is suggested that it is important to evaluate soil-structure interaction appropriately in the seismic design of a pile-supported high-rise building.