高層 RC 建物の地震応答シミュレーション解析と深部地盤構造の影響

EARTHQUAKE RESPONSE SIMULATION ANALYSIS OF HIGH-RISE RC BUILDING AND EFFECT OF DEEP SUBSURFACE STRUCTURE

永野正行*, 山田有孝**, 辻 幸二***, 小田 聡****

Masayuki NAGANO, Ariyoshi YAMADA, Koji TSUJI
and Satoshi ODA

This study investigates earthquake response characteristics of a high-rise reinforced concrete building constructed within the damage belt of Kobe City during the 1995 Kobe earthquake. Weak nonlinearity is inferred from the top and base records of the building during the 2000 Tottori-ken Seibu earthquake. After dynamic parameters of the building are tuned up, the records in the building are well simulated in nonlinear earthquake response analyses. Then, the ground motions in the neighboring area are evaluated taking into account the deep subsurface structure. The seismograms obtained at GL-300m beneath the building and at the mountain area are well simulated from records on ground surface adjacent to the building. Finally, the effects of the deep subsurface structure on the seismic response of the building are studied, which is not negligible because of ground motion amplification in the basin-edge structure.

Keywords: *high-rise building, recorded motion, earthquake response, nonlinear, deep subsurface structure, 2000 Tottori-ken Seibu earthquake*
高層建物、観測記録、地震応答、非線形、深部地盤構造、2000年鳥取県西部地震

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震では神戸市街地を中心として東西方向の広い範囲で家屋等が壊滅的な被害を受け、いわゆる「震災の帯」が形成された。一方、新耐震設計法以降の建築物に関しては顕著な被害は比較的小さく¹⁾²⁾、高層建物に関しても甚大な被害は免れていた³⁾⁴⁾ことが報告されている。特に「震災の帯」内に建っていた高層建物に関しては、その被害は比較的軽微であることが報告されており⁴⁾、埋め込み基礎による地震動の入力低減効果も指摘されている⁵⁾。震災後は都市復興を目指し住宅を中心とした再開発が進行しており、高層建物もいくつか建設されている。この中には地震観測を実施している建物もあり、ここで得られる観測記録は、「震災の帯」の一因とされる深部地盤構造による地震動増幅⁶⁾⁷⁾と、高層建物の地震時挙動との関係を把握する上で貴重な基礎資料となる。本論文は神戸市街地に建つ高層 RC 住宅を検討対象として強震記録のシミュレーション解析を行うとともに、神戸市街地直下の深部地盤構造による地震動増幅が建物の地震応答特性に与える影響を検討したものである。

2000 年 10 月 6 日には鳥取県西部地震 ($M_j 7.3$ 、北緯 35.3° 、東経 133.4° 、深さ 11km) が発生し、K-net⁷⁾、KiK-net⁸⁾を含む多くの地点で地震動が観測された。長周期成分が卓越していたことが

ら、震源からかなり離れた場所に建つ高層建物の観測記録や検討例がいくつか報告されている⁹⁾¹⁰⁾。神戸市街地でも震度 4 を記録し、いくつかの地点で観測記録が得られた。本研究で検討対象とする高層建物でも、計測開始以来最も大きな最大加速度の地震記録を観測した。建物内には地震計が 3 フロアに設置されているほか、敷地内の地表面と直下深さ 300m 位置での地震観測が実施されている。これらの記録を分析し、シミュレーション解析を実施することにより、高層建物の地震時挙動を詳細に調べることが出来る。また地盤上や地中で得られた観測記録も併せて検討することにより、深部地盤の地形効果による地震動増幅特性や建物応答に与える影響を定量的に把握することができ、今後の地震防災へ反映させることができる。

本論文では最初に 2000 年鳥取県西部地震時に得られた観測記録を分析後、建物内で得られた観測記録に整合する多質点曲げせん断モデルを構築する。次に当該建物を通り六甲断層系に直交する方向で、六甲花崗岩から成るせん断波速度 3km/s 以上の地震基盤（以降、簡単に基盤と呼称。）の不整形性を考慮した深部地盤モデルを作成し、地表や地中で得られた観測記録のシミュレーション解析を行う。最後に深部地盤の基盤不整形性による地震動増幅が、高層建物の地震時挙動に与える影響を評価する。

* 鹿島小堀研究室 博士(工学)

** 鹿島小堀研究室

*** 鹿島関西支店建築設計部

**** 都市基盤整備公団総合研究所技術センター

Kobori Research Complex, Kajima Corporation, Dr. Eng.

Kobori Research Complex, Kajima Corporation

Architectural & Engineering Department, Kansai Branch, Kajima Corporation
Technology Center, Urban Development Corporation Research Institute

図-1 検討対象建物位置とその周辺図

図-2 検討対象建物の断面図、平面図、地震計設置位置

表-1 2000年鳥取県西部地震時の観測記録の最大値一覧

観測位置	NS方向 Amax (Vmax) cm/s ² (cm/s)	EW方向 Amax (Vmax) cm/s ² (cm/s)
36F	89.1 (26.2)	70.4 (17.8)
14F	52.2 (11.8)	36.7 (6.8)
1F	19.8 (4.7)	17.5 (3.9)
GS	18.1 (4.9)	18.5 (4.1)
GL-300m	12.4 (3.0)	9.0 (1.6)

図-3 2000年鳥取県西部地震時に観測された波形の加速度応答スペクトル (NS方向)

図-4 観測記録から評価した1Fに対する36Fのフーリエ振幅比

2. 建物、観測概要と観測記録

対象とする建物は、神戸市街地に建つ地下1階、地上37階のRC建物である。建物位置を図-1に、建物概要を図-2に示す。平面の主軸方向はほぼNS、EW方向と一致するため、以降の解析結果はNS、EW方向で統一する。正方形に近い平面形状の一边は約30m、軒高は約109mであり、設計時の地上部総重量は約37800tonである。各方向ともに主に4列のフレームで水平力に抵抗する。設計時の基礎固定モデルの固有周期は、1次2.06秒、2次0.66秒、3次0.30秒で、両方向で同じである。地下部は7.5mの埋め込みを有する杭基礎であり、杭先端は深さGL-22m位置にある洪積礫層に支持される。

強震観測は建物内では36F、14F、1Fの3点、地盤内では建物から約7m離れた地表面(GS)と建物直下GL-300mで行われている。36Fと14Fの地震計は建物の隅部に設置されているが、設計モデルによる地震応答解析の結果、並進方向入力時のねじれの影響は小さいことを確認しており、これらの記録は重心位置とほぼ同じ並進応答と見なすことができる。2000年鳥取県西部地震時に観測された建物と地盤の最大加速度、最大速度を表-1に、36F、1F、GL-300mで得られたNS方向の加速度応答スペクトルを図-3に示す。1F、GL-300mについては振幅を5倍に拡大した。36Fの最大加速度、速度は1Fに対し4倍以上増幅している。1F、GL-300mの応答スペクトルを見ると1秒より長周期側の地震動成分が比較的大きくなっており、震源深さが浅い2000年鳥取県西部地震時の各地の観測記録に見られる傾向¹⁾と整合する。

1Fに対する36Fのフーリエ振幅比を図-4に示す。同図には2000年鳥取県西部地震と、それ以前に観測された小振幅の7地震記録から評価したフーリエ振幅比を比較した。7地震中、36Fの最大応答加速度は 24cm/s^2 であり、鳥取県西部地震時に比べ約1/3の振幅レベルである。▼で示す鳥取県西部地震時のピーク振動数は、▽で示す鳥取県西部地震以前の結果に比べやや長周期化しており、建物がやや非線形領域に入ったことを示唆する。

3. 建物内観測記録のシミュレーション解析

3.1 建物のモデル化

各方向8本の曲げせん断系多質点モデルで上部フレーム構造を

表現し、各フロアレベルの並進自由度を剛床仮定することにより、3次元挙動を擬似的に表現した¹²⁾。振動解析モデルを図-5に示す。最初に柱、梁、パネルより構成される設計用の3次元立体骨組モデルに、Ai分布に基づく地震荷重を各階の重心位置に作用させ、1階柱脚位置を固定条件とした静的非線形漸増解析を行った。柱部材にはRC塑性論に基づく非線形特性¹³⁾を、梁部材には3折れ線近似した非線形特性を設定した。線形領域における各フレーム、各層の層間変形を曲げ変形、せん断変形に分離し、初期曲げ、せん断剛性を評価した。次に漸増解析より得られた層せん断力-せん断変形角の非線形骨格曲線を、3折れ線で近似した。解析結果の一例を図-6に示す。第一降伏点は、当該層上下の梁部材端部の多くが曲げひび割れモーメントに達する層せん断力(ベースシア係数は約0.03)に対応する。第二降伏点は、当該層上下梁の曲げ降伏が進行する層せん断力(ベースシア係数は約0.14)に対応する。初期剛性に対する第2剛性の接線剛性低下率は、0.25~0.30である。

上部フレーム構造と埋め込み杭基礎、地盤との動的相互作用を考慮するため、基礎床付け位置(GL-7.5m)に水平、ロッキング、ねじれの地盤ばねを付与した。動的インピーダンスは、基礎埋め込み部一杭一地盤を図-7に示す軸対称有限要素法¹⁴⁾でモデル化し評価した。地盤物性は建物直下のPS検層データを用い、下部の半無限層はS波速度 0.45km/s とした。深さ300m位置までの地盤の速度構造¹⁵⁾によればS波速度 0.45km/s の層以深では同等のせん断波

図-5 建物の解析モデル

図-6 静的漸増解析結果の一例

図-7 埋め込み杭基礎-地盤の軸対称有限要素モデル

表-2 地盤ばね一覧

	地盤ばね	減衰係数
水平方向	2.10×10^7 kN/m	6.69×10^5 kNs/m
回転方向	1.09×10^{10} kNm/rad	6.93×10^7 kNms/rad
ねじれ方向	4.45×10^9 kNm/rad	2.83×10^7 kNms/rad

速度の層厚が大きいため、より深部の地層が地盤ばね評価に及ぼす影響は小さいものと考えられる。また鳥取県西部地震のGSの記録を用い1次元重複反射理論で評価した表層地盤の平均的な最大応答せん断ひずみは約 3×10^{-5} rad であったため、非線形性によるせん断波速度の低減は小さいものと判断した。上部建物-地盤連成系の1次固有振動数に近い0.5Hz時の実部より地盤ばねを、虚部の傾きより粘性減衰係数を評価した。算定した地盤ばね値を表-2に示す。

3.2 線形挙動時のシミュレーション解析

2000年鳥取県西部地震以前に得られた小振幅の地震記録に対しシミュレーション解析を実施し、建物線形時の剛性、減衰を評価した。ここでは、1次固有振動モードが比較的大きく励起された地震(2000年5月16日、京都・大阪府境地震、 $M_4.3$ 、北緯 35.0° 、東経 135.5° 、深さ16km)時の観測記録を対象とした。

最初に31で設定した解析モデルに対し、上部建物の曲げ剛性EI、せん断剛性GAを変動させ、図-4のフーリエ振幅比に見られる共振振動数と整合するように設定した。3次モードまでの共振ピークを整合させた結果、EIを一律1.3倍、GAを1.5倍とした。観測による剛性評価が大きい要因として、①コンクリートの材料強度や弾性係数が設計時に比べ大きいこと¹⁶⁾、②設計時の立体骨組モデルで考慮されていない非構造部材である外壁、戸境壁、小梁等の剛性の影響、等が挙げられ、①によりEI、GAの両者が、②によりGAが設計値より大きくなったものと推察される。実測による高層建物の固有周期は設計用モデルに対し2~4割程度短いことが既往の研究⁷⁾で示されており、本解析モデルの剛性評価はこの傾向と対応する。基礎底面に地盤ばねをつけた連成モデルの固有周期は1次1.93秒、2次0.56秒、3次0.30秒であり、1階基礎固定モデルの1次固有周期1.73秒に対し、1割程度周期が変化する。1次固有モードの建物頂部変形に占める地盤変形の割合は、水平方向が約2%、ロッキング回転が約18%であり、後者の影響が大である。次に観測記録の応答波形、応答スペクトルと整合するように減衰特性を設定し、1次固有周期に対し0.2%の内部粘性減衰を仮定した。地

(a) 応答加速度波形 (36F, EW方向)

(b) 加速度応答スペクトル(h=3%)

図-8 建物線形挙動時のシミュレーション解析による36Fの応答加速度波形と加速度応答スペクトル

震応答解析では1階床位置のロッキング変形を許容した状態で、1Fの観測記録をNS、EWの2方向に同時入力した。解析時刻刻み

は 1/100s.とした。1F の観測記録を入力したときの 36F のシミュレーション加速度波形と加速度応答スペクトルを、観測記録と比較して図-8 に示す。最大値に若干の差異は見られるものの解析による加速度波形は観測記録と概ね一致する。また応答スペクトルについても、観測に見られる 3 次モードまでのピーク周期、スペクトル値は、シミュレーション解析により良好に再現される。

3.3 2000 年鳥取県西部地震のシミュレーション解析

2000 年鳥取県西部地震時の非線形シミュレーション解析を実施する。弾性時の剛性は 3.2 で設定した値を用いる。第一、第二降伏点のせん断力については、主に観測記録の応答スペクトルの卓越

(a) 応答加速度波形

(b) 加速度応答スペクトル(h=3%)

(c) 骨格曲線と最大応答点

図-9 2000 年鳥取県西部地震観測記録のシミュレーション解析による 36F の応答加速度波形と加速度応答スペクトル、主要フレームの最大応答点

周期と整合するように、3.1 で設定した値を基に調整した。減衰特性については主に応答スペクトルのピークと整合するように設定し、最終的に 14F、36F における両方向の観測加速度波形との対応を確認しながらこれらのパラメータを決定した。この結果、第一、第二降伏点のせん断力を 3.1 で設定した値の一律 1.1 倍とし、剛性劣化型の履歴特性を与えた。また減衰機構としてレイリー型減衰を仮定し、弾性時 1 次、2 次固有周期の減衰定数を 1.3%とした。応答解析法は 3.2 と同じであるが、非線形解析であることを考慮して時間刻みを 1/500s.とした。1F の観測記録を入力したときの 36F のシミュレーション加速度波形と加速度応答スペクトルを観測記録と比較して図-9(a)(b)に示す。最大値やスペクトルピーク値にやや差異が見られるものの、シミュレーション解析により観測記録が概ね良好に再現されている。主要フレームの最大応答値を骨格曲線上にプロットして図-9(c)に示す。最大応答変形時の割線剛性低下率の平均は約 0.8 であり、これは図-4 のフーリエ振幅比から示唆される周期の変化(約 10%)と概ね対応する。

実測より評価される建物の剛性や耐力、減衰特性が、設計時の解析モデルと異なることは従来から指摘されており^{17) 18)}、本解析結果においても設計時の解析モデルでは、地震時挙動の正確な予測が難しいことを示している。観測記録との対応による解析検証の積み上げが、建物の合理的な耐震設計手法を確立する上で重要となる。一方で 1995 年兵庫県南部地震時の建物のシミュレーション解析結果と被害状況、入力地震動との関係も、完全に整合したとは言い難い状況にある¹⁹⁾。本解析結果は、今後より大きな観測記録が得られた場合に、建物の耐力、変形性能を含む動特性を議論する際の基礎資料として位置付けられる。

4. 地盤で得られた観測記録のシミュレーション解析

4.1 深部地盤構造のモデル化

神戸市街地直下の深部地盤は盆地端部構造となっており、1995 年兵庫県南部地震時の地震動増幅に影響を及ぼした^{例え(6)}。また当該地点の近くの長田区で実施された余震アレー観測記録のシミュレーション解析では、深部地盤構造による地震動増幅が観測、解析の両方から確認されており²⁰⁾、本建物内外で得られた観測記録にもその影響が入っているものと考えられる。ここでは 2 次元有限要素法(FEM)を用いて基盤不整形性を考慮した深部地盤構造の地盤応答を算定し、GL-300m を含む地盤系の観測記録を対象に 2000 年鳥取県西部地震のシミュレーション解析を行った。

長田区から兵庫区の深部地盤構造は、断層平行方向で基盤深度の変化がやや見られるものの、ほぼ 2 次元的な基盤形状を呈する。前述の長田区のシミュレーション解析断面は建物建設地点に近接しており、余震アレー観測記録のシミュレーション解析により地盤構造の妥当性が検証されている。このときの地盤モデルをベースに、図-1 に示した当該地点を通り六甲断層系に直交する断面(N140° E)で地盤モデルを作成した。当該地点では建物直下の速度構造(図-7)のほかに、敷地内で深さ 300m 位置までの PS 検層が実施されている¹⁵⁾。図-7 の動的インピーダンス等の検討では地表近傍地盤の影響を考慮して細かい地層構造までモデル化した。これを数 km に及ぶ領域の深部地盤モデルに反映させることは難しい。このため深さ 297m の $V_s=880\text{m/s}$ 地層上面より浅い地

図-10 2次元解析に用いた地盤モデル

表-3 2次元解析モデルに用いた地盤物性

No.	S波速度 m/s	P波速度 m/s	密度 t/m ³	減衰定数	当該地点 直下の 上面深さ m
①	227	1521	1.9	0.030	0
②	418	1954	2.0	0.020	19
③	531	1888	2.0	0.020	44
④	618	1873	2.0	0.020	169
⑤	880	2270	2.0	0.015	297
⑥	1000	2500	2.1	0.015	425
⑦	3200	5400	2.7	0.010	1105
⑧	380	730	2.0	0.020	—
⑨	680	1580	2.2	0.020	—
⑩	1350	3100	2.2	0.015	—

太枠内は1次元モデルに用いた地層構成

層構造を V_s がほぼ同等の5層構造にまとめ平均化し、これを2次元モデルの地盤物性に適用した。これより深い地盤物性は既往のシミュレーション解析モデル⁶⁾²⁰⁾を参考に決定した。盆地端部に相当する須磨断層や伏在断層の位置、形状は、地盤調査結果²¹⁾²²⁾²³⁾を参考に設定した。検討対象地点は須磨断層より2.2km離れた位置とした。山側の地盤構造は須磨断層直上に位置するK-net観測点HYG021の地盤データ²⁴⁾や、既往研究⁶⁾²⁰⁾で用いた構造に基づき設定した。地盤モデルを図-10に、地盤物性を表-3に示す。FEMのメッシュは5Hz時のS波1波長を6メッシュ程度で表現できるように分割し、5Hzまでの周波数応答解析を実施した。

4.2 地表面観測記録に含まれる建物挙動の影響の除去

地表面観測記録(GS)は建物に近接して設置されているため、高層建物-基礎系の振動による影響を受けていると考えられる。そこで図-7に示した軸対称FEMに建物モデルを付け加え、GSの地震記録から建物振動の影響を除去した自由地表面位置の応答(以

図-11 建物線形挙動時の1F/GSの伝達関数

図-12 GSFに対するGSと基礎入力動の伝達関数

下、GSFと呼称。)を算定した。参考までに建物線形時の1F/GSの伝達関数を、図-4と同じ小振幅の7地震記録から評価したフリー振幅比と比較して図-11に示す。観測記録の傾向は解析により捕えられている。

軸対称FEMは線形解析であるため、鳥取県西部地震時の建物の非線形挙動を等価的に表現する必要がある。ここでの目的がGSの観測記録から建物応答の影響を除去することであるため、等価剛性、減衰によって建物の非線形挙動を評価する簡便な手法をとった。フレーム剛性は3.1で設定した建物モデルに対しEIを1.0倍、GAを1.3倍とし、減衰は3%の履歴減衰とした。フレーム剛性は前述の鳥取県西部地震時の剛性低下率と概ね対応する。等価線形解析により1Fの観測記録を入力して評価した14F、36Fの加速度波形、加速度応答スペクトルが、観測記録と概ね良好に対応することを別途確認している。この解析モデルにより得られた図-12(a)に示すGS/GSFの伝達関数を用いて、GSFの地震動を評価した。1次固有周期と短周期側で建物応答の影響がGSの伝達特性に若干現れることが分かる。

4.3 観測記録のシミュレーション解析

図-10の深部地盤モデルを用いてSV波、SH波鉛直入射解析を行い、GSFの地震動を用いてGL-300m位置の地盤応答を評価した。SV波入射時の応答は断層直交方向(N140°E)、SH波入射時の応答は断層平行方向(N230°E)の地盤応答として評価し、これらの波形を回転変換しNS、EW方向の地盤応答を求めた。震源から発生し当該地域に伝播する複雑な地震波動を厳密に評価するには、震源から神戸の地盤構造を一体とした解析検討が必要となる。しかしながら建物の3次モードまでの振動数を考慮した計算は現状では困難であり、また斜め入射を検討する場合もSV波入射時には臨界角を超え挙動の変化が大きくなる可能性があることから、ここでは簡単に面内、面外の波動伝播を組み合わせた鉛直入射により地盤増幅特性を評価した。

GL-300mのシミュレーション速度波形、5%擬似速度応答スペクトルを観測記録と比較して図-13に示す。GSFの地震動を用いたシミュレーション解析によって、GL-300mの観測記録が波形、スペクトルともに概ね良好に再現される。次にGSFから須磨断層のほぼ直上に位置するHYG021の地盤応答を算定し、シミュレーション解析を行った。算定した速度波形と擬似速度応答スペクトルを観測記録と比較して、図-14に示す。NS方向では観測波形の全般的な特徴や、スペクトル特性の傾向は解析により概ね良好に

図-13 シミュレーション解析による GL-300m の速度波形と応答スペクトル

図-14 シミュレーション解析による HYG021 の速度波形と応答スペクトル

捉えられている。EW 方向では観測記録が解析結果に比べ最大値、スペクトルともに大きめに現れる。これは当該地点が貯水池に近接しており、局所的な地盤増幅の影響が現れたことが原因の1つと考えられるが、現状では明らかではない。EW 方向の観測記録の最大値はパルス状の波形に現れており、これを除けば、振幅レベルは解析結果と概ね整合するものと考えられる。また六甲山側に位置する神戸大学や本山第一小学校で2000年鳥取県西部地震時に得られた最大速度は1.9~2.5cm/sである²⁵⁾ことから、山側で推定された地震動レベルは概ね妥当であるものと判断される。

GSF の地震動を用いて他地点の地震動を評価し、2次元断面の

図-15 解析断面の最大速度分布と観測記録の比較

地表面で得られた最大速度分布を図-15に示す。FEM 領域外のエネルギー伝達境界より遠方の地盤応答は薄層法に基づき算出した²⁶⁾。同図には HYG021 のほか、建物地点近傍で観測された気象庁²⁷⁾の地震観測点(中山手、荒田町、細田町、図-1参照)で得られた最大速度をプロットした。これらの観測点は解析対象断面からやや外れた位置にあるが、深部地盤構造が2次元的な盆地端部構造となっていることから、須磨断層からの距離で整理することにより最大値分布の傾向を把握することができる。併せて六甲山側に位置する神戸大学と本山第一小学校の最大速度も示した。観測記録に比べやや過小評価となる地点も見られるが、全体的な分布性状は解析により概ね良好に捉えられている。海岸線に向かって大きくなる分布性状は、断層より約1km前後離れた領域で増幅した1995年兵庫県南部地震時の分布性状とはやや異なる。図-13、14の速度波形に見られるように、2000年鳥取県西部地震時の地震動は5~6秒程度の長周期のパルス成分を含む。単純な盆地端部構造とリッカー波を用いた検討²⁸⁾では、中心周期が長くなるにつれて最大分布のピーク位置が盆地端部境界より離れる傾向を呈しており、堆積地盤側の1次共振振動数とリッカー波の中心振動数が同じ場合には、ピーク位置が盆地端部境界より堆積層厚さの3~4倍離れた領域に現れることが示されている。本ケースは概ねこの条件に対応しており、最大分布性状の違いは入射地震動の振動数成分の差異が現れたものと考えられる。

5. 深部地盤構造が建物応答に与える影響

深部地盤構造が高層RC建物の地震時応答に与える影響を検討する。最初にGSFと図-10の2次元地盤モデルを用いて、GL-1400m位置での入射地震動を基盤波として評価した。基盤波の波形やスペクトル特性は、HYG021のシミュレーション波形の振幅レベルを1~2割程度小さくしたものと類似しており、最大速度はいずれの方向も1.7cm/sである。この基盤波を建物直下の地盤を成層構造と仮定したモデル(表-3)に入力し、地表面の地震動を算定した。これは基盤不整形の影響を取り除いた地震動と解釈することができる。次に図-7の軸対称FEMを用い、建物のSRモデルを入力する埋め込み杭基礎の基礎入力動を評価した。GSFに対する基礎入力動の伝達関数を図-12(b)に示す。短周期域では入力低減効果が見られるが、建物の1次固有周期近傍の2秒ではほぼ1である。基盤不整形の影響を取り除いた基礎入力動の加速度波形と0.1HzのParzenウィンドウをかけたフーリエ振幅スペクトルを

(a) 基礎入力動の加速度波形

図-16 基盤不整形の影響の有無による基礎入力動の加速度波形とフーリエ振幅スペクトル

図-16 に示す。このケースを図中 CASE-1 と記す。また基盤不整形の影響を含む基礎入力動として、GSF の地震動から軸対称 FEM を用いて評価した基礎入力動 (CASE-2) を同図に比較して示す。CASE-1 の加速度波形には短周期成分がやや顕著に現れるが、これは基盤波逆算時に短周期成分が十分に除去しきれていなかったことが原因と考えられる。基盤不整形の影響が含まれる CASE-2 のスペクトルは、一部逆転する周期もあるが、周期 1 秒より長周期の成分については CASE-1 に比べ全般的に大きい。これは下方より堆積層を伝わる波動成分と、断層境界で励起され水平方向に伝播する波動成分とが干渉した結果と考えられる。

これらの基礎入力動を、建物の SR モデルに入力し非線形地震応答解析を実施した。時間刻み、剛性、減衰特性、復元力特性は 4.3 の解析条件と同じである。図-17 に 36F の応答加速度波形と加速度応答スペクトルを、図-18 に最大応答層間角を示す。CASE-2 の NS 方向波形は図-9 に示した観測記録の包絡形状と若干差異が見られるが、長い継続時間は同様に再現される。EW 方向の解析結果は観測記録と良好に一致する。一方、基盤不整形の影響を取り除いた CASE-1 の応答波形は NS、EW 方向ともに CASE-2 や観測記録の波形特性と異なり、応答時間が短い。CASE-1 の NS 方向の最大層間変形は、CASE-2 に比べ最大で 2/3 程度まで小さくなる。CASE-1 の NS 方向の応答スペクトルは、CASE-2 や図-9(b) の観測記録に比べ 1 次共振時のピーク値も小さく周期も短い。これは NS 方向の基礎入力動に見られる周期 2 秒前後の成分の違いが及ぼ

(a) 応答加速度波形

(b) 加速度応答スペクトル(h=3%)

図-17 基礎入力動を用いた 36F の応答加速度波形と応答スペクトル

図-18 重心位置の層間変形角の比較

す建物の非線形性による周期変動によるものであり、CASE-1 では建物ほぼ線形領域にあるのに対し、CASE-2 や観測記録では非線形領域に入り、周期が 1 割程度長くなる。建物周期による応答波形の違いを検討するために、弾性周期である周期 1.93 秒とその 1 割増の 2.12 秒の弾性 1 質点モデルに、1F の NS 方向の観測記録を入力したときの加速度応答波形を図-19 に示す。減衰定数は 1.3% とした。継続時間が短い周期 1.93 秒の包絡特性は CASE-1 に、継続時間が長い周期 2.12 秒は CASE-2 や観測記録に対応する。両ケースでの応答波形の違いは、CASE-2 や観測記録では基盤不整形の影響により周期 2 秒前後の成分が CASE-1 に比べ大きくなり、建物の周期が伸びたことにより応答波形の継続時間が長くなった

図-19 1F観測波入力時の1質点系の加速度応答波形

ことから生じたものと判断される。以上の解析検討から、深部地盤の基盤不整形が地震動特性に影響を与え、建物の非線形挙動を含む地震応答特性にも影響を及ぼしうることが示される。

大規模な地下構造調査により、多くの地域で堆積平野を含む深部地盤構造が明らかになりつつある。これらの地盤内を伝播する地震動に関し、盆地端部近傍での増幅や平野内を伝播する表面波による継続時間の延伸が、高層建物の地震時応答に影響を与える可能性がある。建物の耐震設計においては、不整形性を含む当該敷地の地盤増幅特性を適切に反映させた入力地震動を用いる必要があり、本検討結果はそれを示唆する事例の1つと位置付けられる。

6. まとめ

神戸市街地に建つ高層RC建物を対象に、建物内で観測された強震記録のシミュレーション解析を行った。また2000年鳥取県西部地震時に建物近傍の地表で得られた観測記録を用いて、当該地点直下の深部地盤構造を考慮した地盤震動解析を行い、敷地内深さ300mの地中位置や他地点で得られた観測記録との整合性を調べた。最後に深部地盤の基盤不整形性が、本建物の非線形挙動を含む地震応答特性に与える影響を解析的に評価した。これらの検討結果を以下にまとめる。

- ① 建物頂部と1階で観測された地震記録のフーリエ振幅比から、2000年鳥取県西部地震の応答時には建物がやや長周期化し、非線形領域に入ったことが分かった。次に地盤との動的相互作用を考慮した解析モデルに1階の観測記録を入力し、シミュレーション解析を行った。このとき14、36階の観測記録と整合するように、設計用モデルをベースに建物の剛性、減衰特性、復元力特性等の調整を行った。この結果、線形応答時、非線形応答時、いずれの場合もほぼ良好に観測記録を再現することができた。
- ② 当該建物敷地内の地表面で得られた観測記録と盆地端部構造を呈する直下の深部地盤構造を用いて、GL-300m位置で同時に観測された地震記録や、山側地点で観測された強震記録のシミュレーション解析を行った。この結果、観測による速度波形やスペクトル特性が概ね良好に再現され、断層に直交する解析断面の最大速度分布も観測記録の傾向と整合した。
- ③ 深部地盤構造における基盤不整形の影響を取り除いた入力地震動を評価し、これを建物モデルに入力することにより、基盤の不整形性が建物応答に与える影響を評価した。この結果、加速度波形や最大層間変形角が観測記録やシミュレーション結果と異なり、深部地盤の基盤不整形による地震動増幅が建物の地震時応答に影響を及ぼすことを示した。

謝辞

本研究は都市基盤整備公団と鹿島による共同研究の成果であります。深さ300m位置の強震観測は、独立行政法人・建築研究所と共同で実施したものであります。建築研究所、鹿嶋俊英氏には強震観測に関する有益な情報を頂きました。また本研究ではK-net、気象庁、関西地震観測研究協議会による観測記録を使わせていただきました。これらの地震観測や記録の提供に携わった関係各位に感謝いたします。2名の査読者より頂いたコメントは、本論文を修正する上で有益でした。

参考文献

- 1) 日本建築学会近畿支部鉄筋コンクリート構造部会：1995年兵庫県南部地震コンクリート系建物被害調査報告書、1996
- 2) 林 康裕、宮腰淳一、田才 晃、大野義照：1995年兵庫県南部地震におけるRC造建物群の耐震性能、日本建築学会構造系論文集、第528号、pp.135-142、2000.2
- 3) 阪神大震災（兵庫県南部地震）調査報告、竹中工務店、pp.206-217、1995
- 4) 木村 匡、田中幹夫、村上典文、中村 充、日下部馨：兵庫県南部地震における新長田駅前高層SRC造建物の解析的検討、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.533-538、1996
- 5) 安井 謙、井口道雄、赤木久真、林 康裕、中村 充：1995年兵庫県南部地震における基礎有効入力動に関する考察、日本建築学会構造系論文集、第512号、pp.111-118、1998.10
- 6) 永野正行、大野 晋、古山田耕司、加藤研一：兵庫県南部地震時の神戸市内における基盤地震動および地盤増幅特性、日本建築学会構造系論文集、第511号、pp.77-84、1998.9
- 7) Kinoshita, S: Kyosin Net(K-net), Seismol. Res. Let., 69, No.4, pp.309-332, 1998
- 8) 青井 真、堀 貞喜、笠原敬司：Hi-net(4)：基盤強震観測網(KiK-net)、日本地震学会2000年度秋季大会講演予稿集、P007、2000
- 9) 柳澤信行、高橋良典、福本晃治：大阪市内の高層建物における鳥取県西部地震観測とそのシミュレーション解析、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.523-530、2001
- 10) 欄木龍大、長島一郎：ギア振り子とリアモータを用いたアクティブ制振装置の開発と適用(その6鳥取県西部地震の観測記録に基づく制振効果の検証)、日本建築学会大会学術講演梗概集、構造Ⅱ、pp.459-460、2001
- 11) 加藤研一、山添正稔、武村雅之：中国・四国地方を対象としたKiK-net地中埋設地震計の設置方位の推定—鳥取県西部地震、芸予地震の強震記録に基づく検討—、地震第2輯、第54巻、pp.421-429、2001
- 12) 高橋元美、福澤栄治、磯崎 浩：高層RC造骨組の柱の変動軸力を考慮した等価曲げせん断モデルによる地震応答解析、構造工学論文集、Vol.39B、pp.147-154、1993
- 13) 磯崎 浩、福澤栄治、高橋元美：柱の変動軸力と2軸曲げモーメントを考慮したRC造立体骨組の弾塑性地震応答解析、日本建築学会構造系論文報告集、第441号、pp.73-83、1992.11
- 14) Tyson, T. R. and E. Kausel: Dynamic Analysis of Axisymmetric Pile Groups, Massachusetts Institute of Technology, Department of Civil Engineering, No.751, 1983
- 15) 辻本勝彦、二木幹夫、鹿島俊英、荒川総一郎、阿部秋男：神戸市兵庫付近の深層ボーリング結果について、第32回地盤工学研究発表会、B-0、pp.57-58、1997
- 16) 日本建築学会：鉄筋コンクリート造建物の靱性保証型耐震設計指針(案)・同解説、pp.38-40、1997
- 17) 日本建築学会：建築物の耐震設計資料、p.275、1981
- 18) 日本建築学会：建築物の減衰、pp.137-143、2000
- 19) 林 康裕：地震被害から見た地震荷重、pp.2-11、地震動と地震荷重を繋ぐ—現状と将来の課題—、2002年度日本建築学会大会構造部門(振動)パネルディスカッション資料、2002.8
- 20) 永野正行、工藤一嘉、武村雅之：神戸市長田区における地下構造の不整形性を考慮した1995年兵庫県南部地震(M_J=7.2)の余震アレイ観測記録のシミュレーション解析、地震2、52、pp.25-41、1999
- 21) 関西地盤情報活用協議会：新関西地盤、神戸および阪神間、1998
- 22) 佐野正人：大阪盆地の内部構造と伏在活断層、大阪盆地の内部構造と伏在活断層・地盤・強震動・“震災の帯”、断層研究資料センター第11回セミナー、pp.6-23、1998
- 23) 神戸市、建設工学研究所：阪神・淡路大震災と神戸の活断層、1998
- 24) 防災科学技術研究所：強震ネットワーク、<http://www.k-net.bosai.go.jp/k-net>
- 25) 関西地震観測研究協議会事務局：、関西地震観測研究協議会地震記録CD-ROM資料集、2001
- 26) Lysmer, J. and L. A. Drake: A Finite Element Method for Seismology, Methods in Computational Physics, 11, pp.181-216, 1972
- 27) 気象庁：95型震度計波形データ(平成12年鳥取県西部地震)気象業務支援センター、2000
- 28) 永野正行：2次元盆地端部構造の地震動増幅と表面波の干渉、日本建築学会構造系論文集、第552号、pp.85-92、2002.2

(2002年3月7日原稿受理、2002年8月8日採用決定)