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

BEDROCK MOTIONS AND SITE AMPLIFICATIONS IN KOBE CITY
DURING THE 1995 HYOGO-KEN NANBU EARTHQUAKE

永野正行*, 大野 晋**, 古山田 耕司*, 加藤 研一***

Masayuki NAGANO, Susumu OHNO, Kohji KOYAMADA

and Kenichi KATO

This study investigates bedrock motions on an outcrop of Rokko granite rock and site amplification characteristics due to deep irregular underground structures in Kobe City during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake. Six sections normal to Rokko Fault are modeled based on 2-D seismic profiles determined from geological surveys. Peak velocities of bedrock motions deconvolved from 6 records show almost the same level, 50-60cm/s, while those on an outcrop of Osaka group are 86-137m/s. Ground motions at sea side area can be well simulated, indicating that bedrock motions are expected to be properly evaluated. In soil responses on Osaka group, the large amplifications can be commonly seen at area about 1km away from basin edge to seaside, while the transfer functions from the bedrock are varied according to the bedrock shapes. Distributions of maximum responses are accountable for the distributions of damaged structures.

Keywords: Hyogo-ken Nanbu Earthquake, bedrock motion, site amplification, deep irregular underground structure, 2-D finite element method, simulation analysis
兵庫県南部地震、基盤波、地盤増幅、深部不整形地下構造、2次元FEM、シミュレーション解析

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に帯状に分布する被害地域、いわゆる震災の帯が形成され、多数の家屋等が壊滅的な被害を受けた。震災の帯地域での大被害の主原因として、神戸市街地直下の深部不整形地下構造による地震動増幅¹⁾⁴⁾が指摘された。地震直後より神戸市内では反射法探査等の地盤調査が精力的に行われ、最近ではより精度の高い地盤情報が公開されている⁵⁾⁹⁾。また強震記録の公開⁷⁾⁸⁾や飽和記録の復元⁹⁾により、被害解明のための情報環境が整いつつある。これらの情報を基に震源から観測点に至る3次元解析を行った研究¹⁰⁾¹¹⁾も行われているが、計算機能力の限界や震源モデル¹²⁾の推定精度の限界により0~1Hz前後の検討にとどまっている。特に兵庫県南部地震で重要となる1Hz前後の振動数成分の定量的な評価が不十分な場合もあり、実際の被害との対応の検討や、強い非線形挙動が予測される軟弱表層地盤の挙動予測が困難となる¹³⁾。一方、2次元解析では震源断層からの複雑な入射場や3次元地形効果は考慮できないが、観測記録をコントロールモーショントして用いることにより、最大値評価を含む地震動の定量的な評価が可能となる。

神戸市内では同じ段差状の深部地下構造でも、その形状が東西方向で微妙に変化することが反射法探査等⁵⁾⁹⁾により明らかになっ

ている。本論文ではこれらの結果に基づき2次元断面を用いた強震動シミュレーション解析を実施し、基盤波の評価や地盤増幅特性の検討を行う。解析対象は神戸市内の東西に分布する6つの断層直交断面であり、解析手法は2次元有限要素法(FEM)である。まず神戸市内6地点の強震観測記録を用いて、神戸市直下の大阪層群と六甲花崗岩の露頭面における基盤波を評価し、最大値と応答スペクトルを比較する。次にこの基盤波を用いて海側の地点での観測記録のシミュレーション解析を行い、逆算基盤波の妥当性を検討する。最後に断層直交6断面における大阪層群上面での最大応答加速度、速度分布を算定し、最大応答分布と実際の被害分布との関係を考察する。川瀬・林²⁾、林・川瀬³⁾は気象台、三宮断面で地震動の定量評価を含む同様の検討を行っているが、本論文はこれを神戸市内のより広範囲に適用し一般化したものであり、更に深部地下構造の形状の差異による地震動の地盤増幅特性の変化を調べたものである。なお本論文は灘地域3断面を対象とした既発表の検討¹⁴⁾に、更に3断面を追加検討し、上記の各種考察を加えた内容となっている。

2. 解析対象断面と有限要素モデル

Fig.1に示す神戸市内の断層方向に直交する6断面を解析対象と

* 鹿島小堀研究室

** 鹿島技術研究所

*** 鹿島小堀研究室 工博

Kobori Research Complex, Kajima Corporation
Technical Research Institute, Kajima Corporation
Kobori Research Complex, Kajima Corporation, Dr. Eng.

Fig.1 Selected fault-normal sections and bedrock contour in Kobe City

Fig.2 Finite element meshes of fault-normal sections in deep irregular underground structure

する。東側から岡本断面、神戸大学断面、都賀川断面、三宮断面、気象台断面、鷹取断面と呼ぶ。各断面の方向は、六甲山地形の方向を考慮し、前半の3断面に関してはN160°E、三宮断面、気象台断面はN150°E、鷹取断面はN140°Eとする。作成した2次元FEMモデルをFig.2に示す。各断面のモデル化は神戸市内で実施された反射法探査による地盤情報や基盤の深度コンタ⁵⁰⁾、常時微動観測

に基づく推定地下構造¹⁵⁾¹⁶⁾等に基づき行った。ここでは地表近くの沖積層や上部洪積層は取り除き、大阪層群以深の地盤構造をモデル化する。堆積層の地層構造は、小林ら¹⁷⁾による深層ボーリング結果、香川ら¹⁸⁾の推定構造よりTable 1に示すせん断波速度 V_s が500m/s～3200m/sの5層構造とした。地盤の減衰定数は川瀬・林³⁾を参考に1～3%を仮定した。

Table 1 Soil profile used in 2-D FEM models

area	V_s (m/s)	V_p (m/s)	γ (t/m ³)	h (%)
Osaka group	500	1800	1.8	3
	600	1900	1.9	3
	800	2200	2.0	2
	1000	2500	2.1	2
bedrock	3200	5400	2.7	1
weathered rock	1350	3100	2.2	2
	2100	4200	2.4	2
surface(MOT)	200	660	1.7	5

いずれの断層直交断面もせん断波速度 $V_s=3200\text{m/s}$ の六甲花崗岩（以降、基盤と記す）が六甲山麓で落ち込み、海側に徐々に深くなり、その上に大阪層群が堆積する形状となっている。岡本、神戸大学断面では六甲山麓より基盤が 1km 程度急激に落ち込む形状を呈しているのに対し、都賀川断面では基盤の落ち込みが神戸大学、岡本断面に比べ浅く、基盤が 2つの伏在断層を経て海側に徐々に深くなる。上記 3断面では海岸線近くの基盤の深さは約 1.5km である。三宮断面では六甲山麓で基盤が 600m 程度落ち込み、海側に緩く傾斜する。基盤形状のモデル化には二宮町での温泉ボーリングによる基盤深度 724m¹⁹⁾も参考にした。海岸線付近では和田岬断層の存在により基盤が再び落ち込み、ポートアイランドでの基盤深さは 1.5km 以上となる。気象台断面では六甲山麓近傍で幾つかの断層が近接して存在し、断層間が破碎帯となっている。気象台近傍断面での反射法探査による結果²⁰⁾に基づき、海側からの低角逆断層（元町断層²⁰⁾）と会下山断層に挟まれ隆起した台地上に神戸海洋気象台（JMA）が位置するものと仮定する。会下山断層から須磨断層間の破碎帯は成層構造を仮定した。気象台断面では和田岬断層は海岸線位置までに現れないため、その存在は無視した。鷹取断面は三宮断面と同様に六甲山麓で 600m 程度基盤が落ち込み、海側に徐々に基盤が深くなる構造とした。海岸線位置での基盤深度は約 1.2km である。三宮断面より西の地域では $V_s=500\sim 600\text{m/s}$ の低速度層の厚さが、灘地域に比べ比較的薄くなっている¹⁶⁾。六甲山側の地盤に関しては神戸大学でのボーリング調査結果²¹⁾より、厚さ 100m 程度の風化層($V_s=1350\text{m/s}$)を基盤上に仮定した。

深部不整形地下構造への入射条件は、神戸側でのアスペリティが深い位置(10~20km)で顕著に見られること¹²⁾、斜め入射の影響が小さい⁴⁾ことから、簡単に鉛直 SV 波入射を仮定した。不整形領域は FEM でモデル化し、ほぼ成層領域と見なせる左右両端位置にエネルギー伝達境界を設定する。計算対象とする振動数は 0~5Hz とし、有限要素分割は 5Hz で 1 波長 5 ポイント以上を目安に行った。

3. 基盤波の評価

3. 1 用いる観測記録と基盤波の評価方法

神戸市内で得られた観測記録を用いて、大阪層群上面位置や基盤位置における露頭波（以下、これを基盤波と表記する。）を算定する。地震波は液化化等による地震波動への影響の比較的小さい本山小学校(MOT)、神戸大学(KBU)、葺合(FUK)、GL-83m位置のポートアイランド(POI)、神戸海洋気象台(JMA)、鷹取(TKT)での観測記録を用いた（Fig.1参照）。MOT、KBUは断面方向のN160°Eに、FUK、POI、JMA、TKTは速度波形のオービットから決定した卓越方向を主軸方向（それぞれN140°E、N130°E、N140°E、N145°E）とし変換

Fig.3 Velocity waveforms of recorded motions

した。POI(GL-83m)の記録に関しては地震計設置方向の推定誤差²²⁾を考慮して変換した。各記録の主軸方向と断面の方向は若干異なる場合もあるが（最大で20°）、その影響は小さいものとして断面方向の波形と見なした。用いた観測記録の速度波形をFig.3に示す。

KBUでは $V_s=850\text{m/s}$ 以下の表層地盤²¹⁾の影響を1次元等価線形解析により、あらかじめ除去する。段差境界近傍に位置するMOTに関しては、表層地盤と段差境界との連成により複雑な波動場となることが予想されるため、表層地盤を考慮した境界周辺の2次元FEMモデルを作成し直接基盤波を評価した。このとき岡本断面を基に作成した既往のモデル¹⁴⁾では、段差境界より堆積地盤側にあるMOTの位置が整合しなかったため、余震記録のシミュレーション解析を行ったPitarkaら²³⁾の段差構造境界を参考とし、Fig.2(g)に示す解析モデルを用いた。MOT地点直下ではせん断波速度 $V_s=200\text{m/s}$ 、厚さ20mの表層地盤を大阪層群上に仮定した。FUK、POI、JMA、TKTは、2次元FEMモデルで考慮していない大阪層群上の軟弱表層地盤や不整形地形の影響を受けるため、次で述べる方法によりこれらの影響を除去し大阪層群上面での露頭波を評価した後、2次元FEMによって基盤波を評価する。

3. 2 大阪層群上面位置における露頭波の評価

FUK、POI、JMA、TKTの観測記録に対し、大阪層群上の軟弱表層地盤や不整形地形の影響を取り除き、大阪層群上面での露頭波を算出する。FUK、TKTでは $V_s=500\text{m/s}$ 以下の軟弱表層地盤の影響を非線形時刻歴応答の反復法²⁴⁾により取り除いた。POIではGL-83m位置での観測記録を含む本震時の鉛直アレー記録より推定した最適な等価地盤物性を用い、SHAKEによりGL-83m位置での露頭波を求めた。FUK、POI、TKT各地点の地層モデルと解析に用いた初期せん断波速度をFig.4に示す。POIの初期せん断波速度はPS検層結果²⁵⁾を、FUK、TKTは各地点でのボーリングデータ^{26,27)}のN値を時松らの提案式²⁸⁾により換算して求めた。地盤の非線形特性はRamberg-Osgoodモデルを用い、非線形パラメータは現位置試料による室内試験結果に基づいて設定した。Fig.4にはPOIでの最適な等価せん断波速度も併せて示した。JMAは高さ約20mの高台に位置しその影響が3次元

的に現れることが予想されるため、藤堂・西川²⁹⁾のモデルを参考とし、高さ20m、直径80mの円筒台地モデル（せん断波速度 $V_s=400\text{m/s}$ ）を大阪層群上に仮定し、軸対称hyperelement³⁰⁾を用いてその影響を除去した。FUK、POI、JMA、TKTの大阪層群上面位置での速度波形、擬似速度応答スペクトルをFig.5とFig.6に示す。4波の最大速度値は86~137cm/sとなっており、地点毎にばらつきが見られる。この傾向は末富・吉田³⁰⁾による解析結果(72~109cm/s)でも同様に示されている。

3.3 2次元FEMを用いた基盤波の算出

深部不整形地下構造の2次元FEMモデルを用いて、FEM領域底面での入射波を基盤波として算出する。このときKBUは神戸大学断面、FUK、POIは三宮断面、JMAは気象台断面、TKTは鷹取断面の2次元FEMモデルをそれぞれ用いる。基盤波に対する各地点での伝達関数をFig.7に示す。KBU、MOT以外の地点では0.5秒以上の周期帯域で基盤波に対し大きく増幅する傾向が見られる。他地点に比べ段差境界より離れた位置にあるPOIは、成層地盤の増幅特性に後続の表面波の影響が加わり、変動の大きい複雑な伝達特性を示す。Fig.8とFig.9はFig.7を用いて逆算した基盤波の速度波形と擬似速度応答スペクトルである。Table 2に観測記録、大阪層群上面での露頭波、基盤波の最大速度値、最大加速度値を一覧にして示す。ただしPOIの基盤波の最大加速度値に関しては、Fig.9の応答スペクトルに見られるように他基盤波に比べ短周期成分が過大評価されているため、3Hzカットで評価した。

観測記録で54~151cm/s、大阪層群上面位置で86~137cm/sと地点毎にばらつきが見られた最大速度値は、基盤位置では50~60cm/sの同振幅レベルに収束する。基盤波の最大加速度値もTKTを除くと350~390cm/s²程度となる。これらの値はJMAを対象として

Fig.4 Soil models of soft surface layers at FUK, POI and TKT

Fig.5 Deconvolved velocity waveforms on Osaka group

Fig.6 Pseudo velocity spectra of deconvolved motions on Osaka group

検討した川瀬・林²⁾の結果とほぼ対応する。Fig.8の基盤波形に見られるようにMOTとKBUの基盤波形は2つの大きなパルス波（図中▼）が、FUKとPOIとJMAは最初の3~4秒間の大振幅の波形（図中下線部）がそれぞれ特徴的であり、各地点グループが比較的接近していることから主要動部分は最大振幅、位相ともに類似した波形となっている。大阪層群上面位置の応答スペクトルでは、特に1秒以上の長周期領域で地点毎に大きく異なる振幅レベルを示すが、基盤波はほぼ同じ振幅レベルとなる。これらより工学的基盤と考えられる大阪層群上面での強震動でも、深部不整形地下構造の影響を強く受けることが指摘される。

4. 海岸線位置での観測記録のシミュレーション

算出した基盤波を用いて海側の地点での地震動を算定し観測記録と比較する。対象とする地点はFig.1に示す東神戸大橋(EKB)、六甲アイランド(RKI)、神戸港湾事務所(KBH)である。最初に六甲山側

Fig.7 Transfer functions from bedrock motions

Table 2 Peak velocities of recorded and deconvolved motions

site	recorded motions	on Osaka group	bedrock motions
MOT	70(458)	—	53(370)
KBU	54(311)	—	59(371)
FUK	131(854)	129(752)	49(372)
POI(GL-83m)	72(486)	96(693)	53(385*)
JMA	104(835)	86(621)	55(357)
TKT	151(713)	137(617)	54(261)

(): peak accelerations, 5Hz cut except *3Hz cut

Fig.8 Velocity waveforms of bedrock motions

Fig. 10 Soil models of soft surface layers at EKB, RKI and KBH sites (▼: input level)

Fig. 11 Comparison of simulated and recorded motions at EKB, RKI and KBH sites

に位置し各地点に近いMOT、KBU、JMAの基盤波を用い、2次元FEMにより大阪層群上面での地震波を算定する。このときEKBは岡本断面 $x=2.6\text{km}$ 地点、RKIは神戸大学断面 $x=4.0\text{km}$ 地点、KBHは三宮断面 $x=2.1\text{km}$ 地点の波形を用いる。次に大阪層群上に堆積する軟弱表層地盤の非線形挙動を考慮するため、各地点で1次元モデルを設定し、上記の波形を上昇波として入力した時刻歴非線形解析を行う。EKB、RKI、KBHの地層モデルと初期せん断波速度をFig.10に示す。初期せん断波速度の設定はEKBでは文献3233に、RKIでは文献8に基づき設定し、KBHでは基盤波の算定時と同様にN値³⁰からの換算式を用いた。EKB、KBHではYUSAYUSAを用いた液状化解析³⁹を行ない、基礎直下で地盤改良され液状化の痕跡が少なかったRKIでは全応力解析を行なった。地盤の非線形パラメータは現位置試料による室内試験結果や、室内試験結果のない地層については各土質に応じた標準的な物性³⁰を用いた。液状化パラメータはポートアイランドの液状化解析³⁷で用いた液状化強度のうち当該土質等に応じた値を仮定した。

得られた速度波形を観測記録と比較してFig.11に示す。EKB³⁰、RKI⁶、KBH³⁴の観測記録は主軸方向（それぞれN145°E、N150°E、N155°E）に変換し比較する。RKIの観測記録は40階建てのSRC構造物の地下1階（GL-7m）で得られているが、上部構造物との相互作用の影響は小さいものと仮定した。いずれも最初の数秒間の主要動部分に関しては算定波は観測記録と良く対応する。特にEKBの速度波形ではGL0m、-33mともに概ね良好に再現される。設定した地盤モデル、解析手法・仮定等が正しく評価されているという条件の下に限られるものの、これらの結果より算定した基盤波が妥当であることが期待できる。

5. 大阪層群上面での最大応答値分布と被害分布との対応

3. で評価した基盤波と断層に直交する6断面の2次元FEMモデルを用いて、大阪層群上面位置での地盤応答を評価する。岡本断面ではMOT、神戸大学、都賀川断面ではKBU、三宮、気象台断面ではJMA、鷹取断面ではTKTの基盤波を入射波として用いた。Fig.12に6断面の加速度、速度波形の最大値分布を示す。図中○□は当該地点の地表面位置での観測記録の最大値を示す。

いずれの断面でも段差境界位置から海側に1km前後離れた領域で地震動が増幅するのは共通であり、水平方向の最大加速度値は800~1200cm/s²、最大速度値は150~200cm/sとなる。最大値分布の形状は深部地下構造により若干異なる。基盤深度が急激に低下する岡本断面、神戸大学断面では最大応答値の大きなピークが見られるのに対し、基盤深度が徐々に低下する都賀川断面では、最大応答値はなだらかな分布性状を示す。また基盤の段差が数箇所見られる気象台断面では、段差の位置に対応して最大応答のピークが見られる。神戸大学断面の最大値分布は、地盤速度構造、厚さ等の仮定はやや異なるものの源栄・永野⁴¹による分布とほぼ同じ傾向を示す。一方、三宮断面では単一のピークを有する川瀬・林²の分布に比べ、やや複雑となり幾つかのピークが見られる。これは基盤が段差境界より徐々に低下する構造となっていること、また和田岬断層で再び段差構造を形成することが原因と考えられる。上下方向の応答は段差境界位置で大きく励起されており、その最大値は水平方向の応答と同程度となっている。

最大値分布で見られるピークを検討するため、神戸大学、都賀川、三宮断面を例に取り、大阪層群上面での基盤波に対する伝達関数、加速度応答スペクトルの分布をFig.13に示す。各断面の伝達関数を見ると、卓越振動数に差はあるものの $x=1.0\text{km}$ 近傍で地震動増幅が顕著となるのは共通して見られる。基盤が段差境界で急激に低下し大阪層群の厚さがほぼ一定となる神戸大学断面では、横縞の線に相当する1次元的な増幅に、段差境界より励起され水平方向に伝播する波動（右下がりの曲線に相当）が干渉する形の増幅特性を示す。一方、基盤深度が徐々に低下する都賀川、三宮断面では神戸大学断面に比べ複雑な増幅特性を示す。加速度応答スペクトルを見ると、神戸大学断面では $x=1\text{km}$ で約0.8Hz、1.5Hzの基盤波の卓越成分が増幅し、これが大きなピークを形成する。一方、都賀川断面では約1.5Hzの基盤波の卓越成分の増幅が $x=1.0\text{km}$ に、約0.8Hzの基盤波の卓越成分の増幅が $x=2.5\text{km}$ に現れ、これが最大値の2つのピークにそれぞれ対応する。三宮断面では約1.2Hzの基盤波の卓越成分が増幅する領域 $x=0.8\text{km}$ 、 1.7km 、 3.0km がそれぞれ最大値のピークに対応する。

Fig.12には中央開発³⁹（図中CK）、建築研究所⁴⁰（同BRI）、藤原ら⁴¹、Akamatsu et al.⁴²による被害調査結果も、各断面における最大応答分布と比較して示した。CKは木造とRC造を対象とした被害率であるが、調査断面が解析断面と一致しない断面では比較的近い位置での結果を示す。BRIに関しては解析断面を挟む断層平行方向の3~4ブロックで住宅用低層構造物の大破率を集計した結果を、藤原らに関しては三宮、気象台断面での木造全壊率を3~4ブロックで集計した結果を示す。Akamatsu et al.は神戸大学断面での木造建物の大破率である。同図には林ら⁴³が示した最大速度と被害率の回帰式を用いて、大阪層群上面での最大速度から求めた結果

Fig.12 Distribution of peak responses of seismic motions on Osaka group and ratios of damaged structures

Fig. 13 Transfer functions and acceleration response spectra of seismic motions on surface of Osaka group

Fig. 14 Soil models of soft surface layers at B&C sites

(算定被害率と呼ぶ。)も併せて示す。

各断面での被害率分布にはばらつきが見られるが、算定被害率の分布は概ねその平均的な傾向を捕らえており、震災の帯地域では大阪層群上面での最大速度により被害率を説明できるものと考えることが出来る。大阪層群上面位置では最大加速度と最大速度は同様な分布性状を示すことから、被害率分布と最大加速度分布を対応させることも可能であると思われる。都賀川断面ではCK(line-9)の分布がやや異なりむしろ神戸大学断面に近い性状を示すが、都賀川断面と神戸大学断面の間での3次元的な基盤形状の変化の影響を受けていることも考えられる。一方、埋立領域 (Fig.12 中、一点鎖線) 付近から海側では被害率は急激に小さくなり、最大速度から求めた算定被害率は過大評価となる。埋立地、もしくは人工島部で液状化した地点 (EKB, KBH, POI) の地表面での観測記録の最大値を大阪層群上面位置と比較すると、最大速度はほぼ同レベルであるが、最大加速度は大阪層群上の軟弱表層地盤の影響により低減する。Fig.1 に示す神戸大学断面近くの2地点 (B 地点、C 地点) でのボーリングデータから推定した地盤モデル⁴⁰⁾ (Fig.14) を用いて、軟弱表層地盤の非線形解析を行った。B 地点は震災の帯の中に、C 地点は埋立地域に位置し、軟弱表層地盤の層厚はそれぞれ 21m、61m である。解析手法、モデル化等は文献 44)による。本検討で得られた大阪層群上面位置の地震波を入力として用い、算定した地表

Fig. 15 Acceleration response spectra of seismic motions at B&C sites on both Osaka group and ground surface

Fig. 16 Strength demand spectra of ground motions at B&C sites

面位置での最大加速度、速度を Fig.12(b)に■印で示す。B 地点の最大加速度、速度は大阪層群上面とほぼ同じであるが、C 地点では最大加速度が最大速度に比べ急激に低下する。Fig.15 に両地点の大阪層群上面、地表面位置での加速度応答スペクトルを示す。C 地点では 0.6~0.7 秒の周期成分が減少しており、これが最大加速度の低減に影響するものと考えられる。

最大加速度と建物被害との関係を考察するために、B、C 地点での地表面波形を用い、1 質点パイリニア弾塑性系における設定塑性率 μ に対する必要耐力スペクトルを算定した。Fig.16 は塑性率 $\mu=1,3,5$ に設定したときのベースシア係数であり、減衰定数は 2%、塑性後剛性は初期剛性の 0.01 倍である。弾性固有周期 0.5 秒以下の建物の必要耐力は、 $\mu=3, 5$ のいずれのケースでもほぼ最大加速度に

よる慣性力に相当し、C地点の必要耐力はB地点の半分以下となる。これより埋立地近傍での被害率の急激な低下は、軟弱表層地盤の影響による最大加速度の低減に対応する結果であるものと考えられる。

6. まとめ

神戸市内の東西に分布する断層直交6断面を対象とし、基盤波の算定と地盤増幅特性の検討を行った。結果を以下にまとめる。

- ① 神戸市内6地点の観測記録を用いて、大阪層群上面位置での露頭波や基盤波を評価した。大阪層群上面での露頭波の最大速度値は86~137cm/sと地点毎にばらつきがみられるが、基盤波は50~60cm/sとほぼ同振幅レベルに収束する。
- ② 基盤波と深部地下構造の2次元FEMモデル、軟弱表層地盤の1次元モデルを用いて海岸線近くの3地点での強震記録のシミュレーション解析を行った。その結果、計算波形と観測記録とは概ね対応し、設定した地盤モデル、解析手法・仮定等が正しく評価されているという条件の下に限られるものの、算定した基盤波が妥当であることが期待できる。
- ③ 6つの断層直交断面における大阪層群上面での最大応答加速度、速度分布を算定し、深部地下構造の形状の差異による地震動の地盤増幅特性の変化を検討した。いずれの断面でも段差境界位置から海側に1km前後離れた領域で地震動が増幅するのは共通に見られるが、深部地下構造の形状により基盤からの増幅特性が複雑に変化すること、基盤波の卓越周期との関係により最大値分布のピーク位置が決定されることを示した。また震災の帯地域では大阪層群上面での最大速度を用いて被害率を概ね説明できること、埋立地域での急激な被害率低減は軟弱表層地盤による最大加速度の低減に対応することを確認した。

謝辞: 1995年兵庫県南部地震の強震動観測や公開に携わった関係各位にここに記して感謝いたします。TKTは地震情報利用研究協議会より提供されたJR警報地震計(鷹取駅、FDシリアル番号R-053)によるものであります。また地盤調査や建物被害調査を通じ貴重な資料を残された各機関の関係者の努力に敬意を表します。本論文を作成するに当たり武村雅之博士を始めとする鹿児島小堀研究室の方々には有益な御助言を頂きました。

参考文献

- 1) 入倉孝次郎: 兵庫県南部地震の強震動と被害の特徴、京大防災研究所年報、第38号A、pp.53-67、1995
- 2) 川瀬 博、林 康裕: 兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション、日本建築学会構造系論文集、第480号、pp.67-76、1996
- 3) 林 康裕、川瀬 博: 1995年兵庫県南部地震における神戸市中央区の地震動評価、日本建築学会構造系論文集、第481号、pp.37-46、1996
- 4) 源栄正人、永野正行: 深部不整形地下構造を考慮した神戸市の地震動の増幅特性解析、日本建築学会構造系論文集、第488号、pp.39-48、1996
- 5) 藤田和夫: 阪神地域活断層調査について、大阪湾の深部構造を考える・資料集、pp.1-10、1996
- 6) 応用地質、第37巻第4号、特集・兵庫県南部地震—応用地質学からの視点、II地震動・地盤と構造物の被害: 日本応用地質学会、1996
- 7) 1995年兵庫県南部地震強震記録資料集、日本建築学会、1996
- 8) 六甲アイランド CITY、1995年兵庫県南部地震の地震動観測記録と分析: 積水ハウス、1996
- 9) Kagawa, T., Irikura K. and Yokoi I.: Restoring Clipped Records of Near-Field Strong Ground Motion During the 1995 Hyogo-ken Nanbu(Kobe), Japan Earthquake, J. Natural Disaster Science, Vol.18, No.1, pp.43-57, 1997
- 10) 古村孝志、竹中博士、藤澤一起: Pseudospectral法による地震波動の3次元計算、物理探査、第49巻第6号、pp.536-548、1996
- 11) 入倉孝次郎: 阪神大震災を引き起こした強震動、京都大学防災研究所年報、第39号A、pp.17-33、1996
- 12) 武村雅之: どこまで解明されたか兵庫県南部地震の震源過程 その1.

- 波形インバージョンによる結果、日本地震学会 1996 年度秋季大会、A49
- 13) 永野正行、源栄正人、山田有孝: 深部不整形地下構造を考慮した神戸市の強震動分布の推定、過大入力を受ける建築構造物の動的崩壊過程の解明シンポジウム、日本建築学会、pp.9-16、1996
 - 14) 永野正行、加藤研一、大野 晋、古山田耕司: 反射法結果に基づく2次元モデルを用いた神戸市灘地域の強震動シミュレーション解析、第24回地震工学研究発表会講演論文集、pp.77-80、1997
 - 15) 石田寛、野沢貴、古屋伸二、高井剛、加藤研一、丹羽正徳: 神戸市街地直下における基盤岩深度分布の推定、一や長周期微動の水平/上下スペクトル比に基づく評価一、日本建築学会構造系論文集、第485号、pp.63-72、1996
 - 16) 木下繁夫ほか5名: 常時微動群列判定による神戸地域の地下構造推定、物理探査、第49巻第6号、pp.452-458、1996
 - 17) 小林啓美ほか5名: 神戸市東灘区における反射法探査、日本地震学会 1996 年度秋季大会、A38
 - 18) 香川敬生、澤田純男、岩崎好規、南荘淳: 大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化、第22回地震工学研究発表会、pp.199-202、1993
 - 19) 岩見義男、神戸のまちと地盤、神戸新聞出版センター、p.14、1987
 - 20) 横倉隆伸ほか6名: 1995年兵庫県南部地震震源域周辺の断層・基盤構造について(概報)、物理探査、第49巻第6号、pp.435-451、1996
 - 21) 阪神・淡路大震災調査報告書(資料編 Vol.1)、地盤工学会阪神大震災調査委員会、pp.64-70、1996
 - 22) 関口宏二ほか5名: 兵庫県南部地震における鉛直アレー強震記録に基づく地震動非線形増幅特性と地盤震動解析法の検討、阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp.109-116、土木学会、1996
 - 23) Pitarka, A., Irikura, K., Iwata, T. and Kagawa, T.: Basin Structure Effects in the Kobe Area Inferred from the Modeling of Ground Motions from Two Aftershocks of the January 17, 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, J. Phys. Earth, 44, pp.563-576, 1996
 - 24) 飛田 潤、杉村義広: 釧路気象台および釧路市内の地震動特性における表層地盤の影響、1993年釧路沖地震に関する総合シンポジウム、pp.59-64、日本建築学会、1994
 - 25) 神戸市開発局: ポートアイランド土質調査及び地震計設置業務報告書、1991
 - 26) 岩見義男: 神戸の地盤、神戸市企画局総合調査課、1980
 - 27) 中村 豊、上半文昭、井上英司: 1995年兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(II)、JR 地震情報 No.23d、財団法人鉄道総合技術研究所ユレダス開発推進部、1996
 - 28) 時松孝次、新井 洋、浅香美治: 微動観測から推定した神戸市住吉地区の深部S波速度構造と地震動特性、日本建築学会構造系論文集、第491号、pp.37-45、1996
 - 29) 藤堂正喜、西川孝夫: 兵庫県南部地震強震記録の建物応答への影響について、日本建築学会大会学術講演梗概集B-2、pp.203-204、1996
 - 30) Kausel, E. and Roesset, J.M.: Semianalytic Hyperelement for Layered Strata, J. Engng. Mech., ASCE, 103(4), pp.569-588, 1977
 - 31) 末富岩雄、吉田 望: 兵庫県南部地震における地盤の非線形挙動(その2)、第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集、pp.65-72、1997
 - 32) 阪神高速湾岸線・東神戸大橋工事誌、阪神高速道路公団、1994
 - 33) 田村敏一、二宮嘉朗、濱田慎: 液状化を考慮した簡易な地震応答解析、土木学会第51回年次学術講演会、III-A168、pp.336-337、1996
 - 34) 稲富隆昌ほか: 1995年兵庫県南部地震による港湾施設等被害報告、港湾技術資料、No.857、運輸省港湾技術研究所、1997
 - 35) Ishihara K. and Towhata I.: One-Dimensional Soil Response Analysis during Earthquakes Based on Effective Stress Method, J. Faculty of Eng., Univ. of Tokyo, Vol.35, No.4, 1980
 - 36) 原 昭夫: 土の動的変形特性と地盤の応答解析に関する研究、東京大学学位請求論文、1980
 - 37) 宮本裕司、酒向裕司、古山田耕司、三浦賢治: 1995年兵庫県南部地震の観測記録を用いた液状化地盤における杭基礎構造物の応答に関する解析的検討、日本建築学会構造系論文集、第493号、pp.23-30、1997
 - 38) 土木研究所集報、第64号、土木構造物における加速度強震記録(No.21): 建設省土木研究所、1995
 - 39) 中央開発株式会社: 1995年兵庫県南部地震・阪神大震災災害調査報告書、1995
 - 40) 建設省建築研究所: 平成7年兵庫県南部地震被害調査最終報告書、1996
 - 41) 藤原徳三、鈴木祥之、北原昭男、鈴木 有: 地震に強い町づくりをめざして、平成7年度日本建築学会近畿支部研究報告集、pp.233-236、1995
 - 42) Akamatsu, J., Morikawa, H., Saito, H. and Jido, M.: Relation Between the Distribution of Damage Caused by the 1995 Hyogoken-Nambu Earthquake and Ground Vibration Characteristics Inferred from Microseisms, Journal of Natural Disaster Science, Vol.16, No.2, pp.63-70, 1995
 - 43) 林 康裕、宮腰淳一、田村和夫、川瀬 博: 1995年兵庫県南部地震の低層建物被害率に基づく最大地動速度の推定、日本建築学会構造系論文集、第494号、pp.59-66、1997
 - 44) 酒向裕司ほか5名: 1995年兵庫県南部地震における地盤条件を考慮した構造物の地震応答解析(その1) 神戸大学~六甲アイランドでの表層地盤の違いによる構造物の応答、1995年度日本建築学会関東支部研究報告集、pp.65-68、1996

(1997年9月10日原稿受理、1998年3月16日採用決定)