

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

永野正行¹・加藤研一²・大野晋³・古山田耕司²

¹正会員 鹿島 小堀研究室 (〒107 東京都港区赤坂 6-5-30)

²鹿島 小堀研究室 (〒107 東京都港区赤坂 6-5-30)

³鹿島 技術研究所 (〒182 東京都調布市飛田給 2-19-1)

神戸市灘地域において断層に直交する3断面を対象として、反射法結果等の現在入手可能な情報に基づき深部地盤構造をモデル化し、2次元FEMを用いた1995年兵庫県南部地震時の強震動シミュレーション解析を実施した。神戸大学、本山小学校での観測記録から、両者の振幅レベルが概ね一致する基盤波を得た。2次元FEMの大阪層群上面で得られる波形を用いて軟弱表層地盤の時刻歴非線形解析を実施し、東神戸大橋、六甲アイランド地点での地震動を算定した結果、両地点での観測記録を概ね再現できる事を確認した。神戸大学、岡本、都賀川の各断面で得られる大阪層群上での最大応答加速度、速度分布を比較し、基盤の形状がその分布性状に与える影響や被害分布との対応を考察した。

Key Words : the 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake, reflection profile, deep irregular structure, 2-D FEM, simulation, strong ground motion

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分布する「震災の帯」が発生し、家屋等が壊滅的な被害を受けた。この「震災の帯」の発生原因に関し、筆者らは既に神戸市街地直下に存在する深部不整形構造における波動の干渉により、「震災の帯」に相当する地域で地震動が増幅することを、簡易な段差状の地盤モデルを用いて示した¹⁾。同様の結果は文献²⁾でも得られている。その後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、精度の高い地盤情報が公開されるようになってきた³⁾⁴⁾⁵⁾。また強震記録に関しても徐々に公開され、飽和記録も復元されるなど整備されつつある⁶⁾⁷⁾。本論文は反射法結果等の現在入手可能な情報に基づいて神戸市灘地域における深部地盤構造の断層直交断面をモデル化し、2次元有限要素法(FEM)を用いた強震動シミュレーション解析を実施するものである。

2. 解析対象断面と有限要素モデル

解析対象は図-1に示す神戸市灘地域の3断面である。断層に直交する断面の方向は、神戸大学での観測記録の主軸方向、地盤の段差境界の方向より

N160°Eとする。神戸大学、岡本、都賀川の各断面のモデル化は各測線で実施された反射法探査の結果³⁾⁵⁾に基づいて行った。ただし神戸大学断面、岡本断面の堆積層側の深部構造に関しては、深部地盤の基盤コンタ⁵⁾より推定した。神戸大学断面、岡本断面では六甲山麓より基盤が急激に1km程度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沈み込みが神戸大学、岡本断面に比べ浅く、海岸線に向かって傾斜する形状となっている。いずれも海岸線近くでは基盤の深さは1.5km以上となっている。

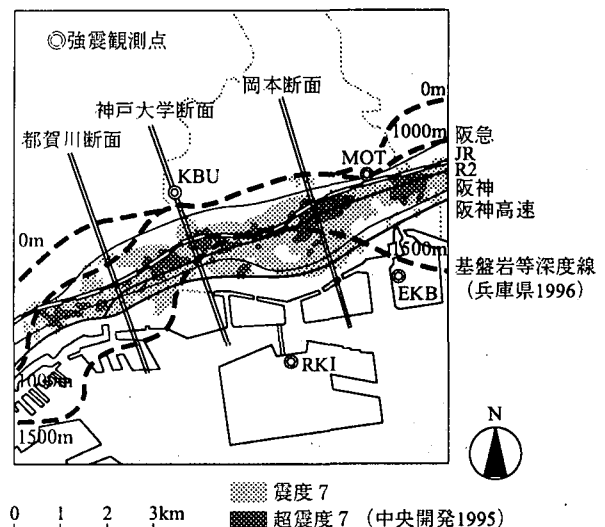


図-1 解析対象断面と基盤コンタ

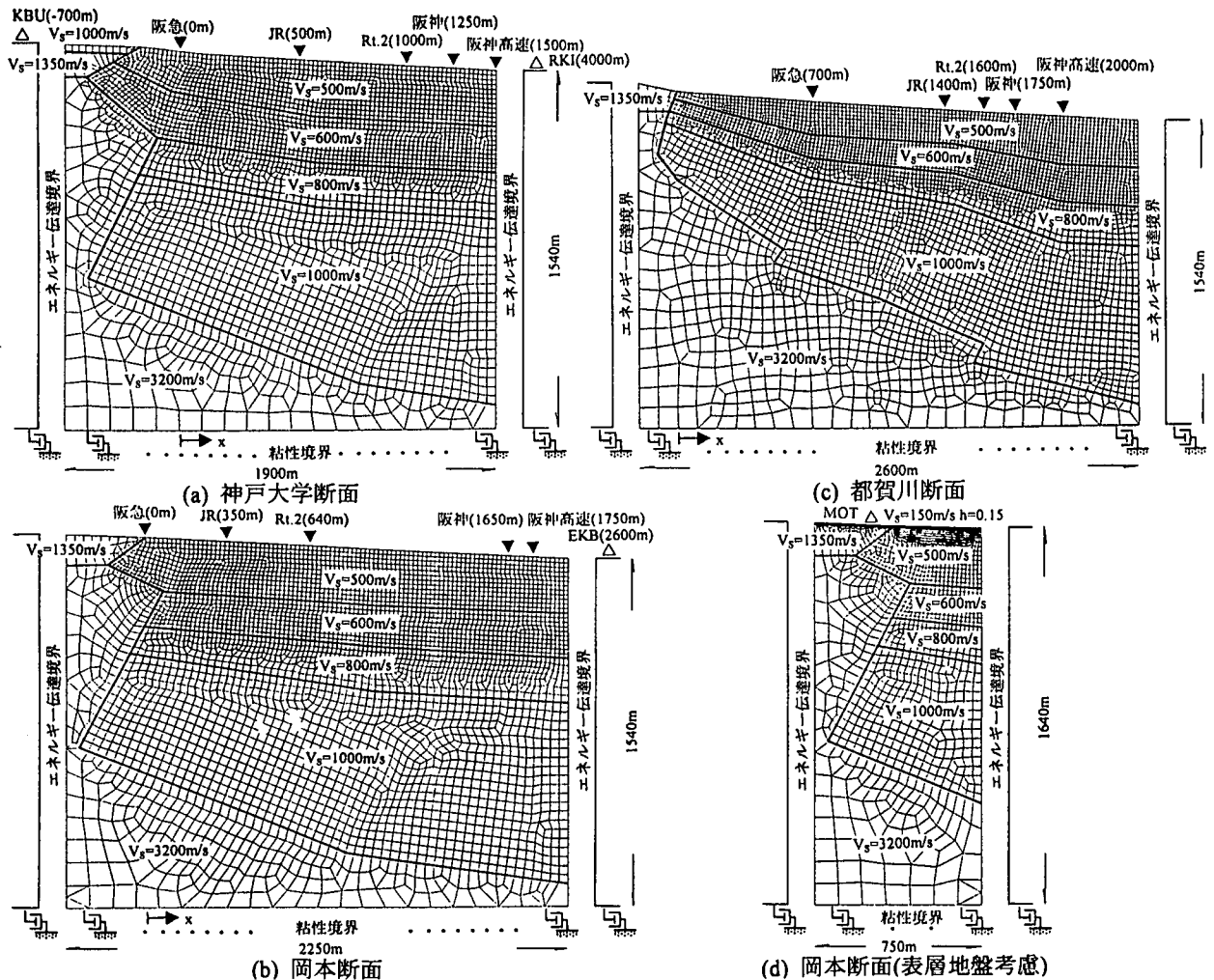


図-2 各断面の有限要素モデル

作成した FEM モデルを図-2(a)(b)(c)に示す。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⁸⁾による深層ボーリング結果、香川⁹⁾の推定構造より表-1に示す $V_s=500\text{m/s}\sim 3200\text{m/s}$ の5層構造を仮定した。図-2(d)の断面モデルは、本山小学校(MOT)での復元記録⁵⁾を用いて FEM 底面位置での基盤波を求めるため、岡本断面と同じ深部構造を仮定し、厚さ 10~20m の $V_s=150\text{m/s}$ の表層地盤を大阪層群上に設けたものである。MOT は段差境界近傍に位置するものの詳細な資料がないため、神戸大学(KBU)の観測記録より逆算した波形と観測記録を比較することによりその位置を推定した。また入射条件は文献¹⁾の検討より入射波の斜め方位角による影響が小さいことから、簡単に鉛直入射(この場合は鉛直 SV 波)とする。不整形領域は FEM でモデル化し、成層領域と見なせる両端位置にはエネルギー伝達境界を使用する。ただし不整形領域外の成層領域の応答は、薄層要素法の考えを適用して算出する¹⁰⁾。計算する振動数は 0~5Hz とし、有限要素分割は 5Hz で 1 波長 5~6 ポイントを目安に行う。

表-1 堆積層側の地盤物性

No.	$V_s(\text{m/s})$	$V_p(\text{m/s})$	$\gamma(\text{t/m}^3)$	$h(\%)$
1	500	1800	1.8	3
2	600	1900	1.9	3
3	800	2200	2.0	2
4	1000	2500	2.1	2
5	3200	5400	2.7	1

3. 解析結果

(1) 基盤波の推定

KBU、MOT の観測記録(N160°E)に変換、最大速度はそれぞれ 54、70cm/s)より FEM 領域底面での入射波を算定し、それを基盤波として検討する。ただし KBU 地点の観測記録は $V_s=800\text{m/s}$ 以下の表層地盤¹¹⁾の影響を SHAKE によりあらかじめ取り除いている。図-3 は得られた基盤波の加速度、速度波形と疑似速度応答スペクトルを示す。速度波形ではいずれも大きな振幅を有する 2 つの波が顕著に現れている。両地点での基盤波の最大速度は 50~60cm/s、最大加速度は 400cm/s^2 前後とほぼ同じ振幅レベルを示す。卓越周期は KBU で 1.2 秒、MOT で 1.0 秒となっている。卓越周期の差異を生じさせる要因の 1 つ

として、直線距離にして約4km離れている両地点で断層震源からの影響が異なることが考えられる。

(2) 観測記録のシミュレーション解析

(1) で得られた基盤波を用いて、海岸線寄りの東神戸大橋(EKB)¹²⁾や六甲アイランド(RKI)⁷⁾での地震動を算定し、観測記録と比較する。最初に2次元FEMにより大阪層群上面での地震波を工学基盤波として算定する。このときEKBではMOTの基盤波入射時の岡本断面 $x=2.6\text{km}$ 地点の波形を、RKIではKBUの基盤波入射時の神戸大学断面 $x=4.0\text{km}$ 地点の波形をそれぞれ用いる。次に大阪層群上に堆積する軟弱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では文献¹³⁾¹⁴⁾、RKIでは文献⁷⁾より初期地盤モデル(図-4)や非線形パラメータ等を設定した。EKBでは液状化解析¹⁵⁾を行ない、RKIでは地盤改良されていることから全応力解析を行なった。

得られた加速度、速度波形を観測記録と比較して図-5に示す。RKIでは観測記録が40階建てのSRC構造物の地下1階で得られているため、GL-7m位置の波形を示す。最初の数秒間は算定波と観測記録とは良く対応する。特にEKBではGL0m、-33mで両波形とも概ね良好に再現される。後半部分の算定波形と観測記録との差異については、地盤物性等のパラメータの調整も含め今後の課題とする。

(3) 大阪層群上面での最大値分布

神戸大学、岡本、都賀川各断面の大阪層群上面で得られる加速度、速度波形の最大値分布を図-6に示す。神戸大学、都賀川断面ではKBUの基盤波を、岡本断面ではMOTの基盤波を入射波として用い算定した。神戸大学、岡本断面では段差境界より1km

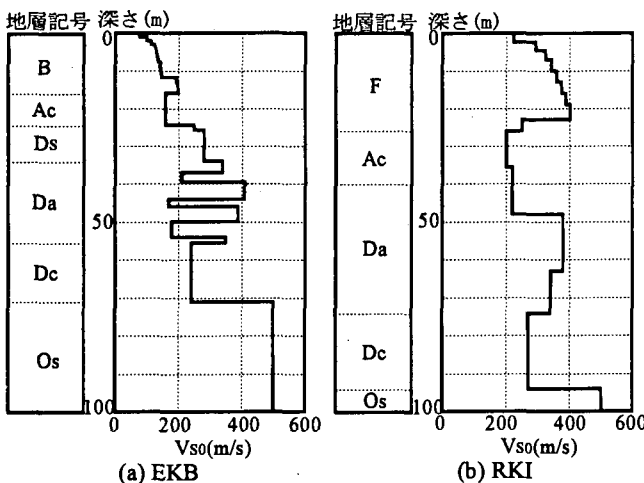
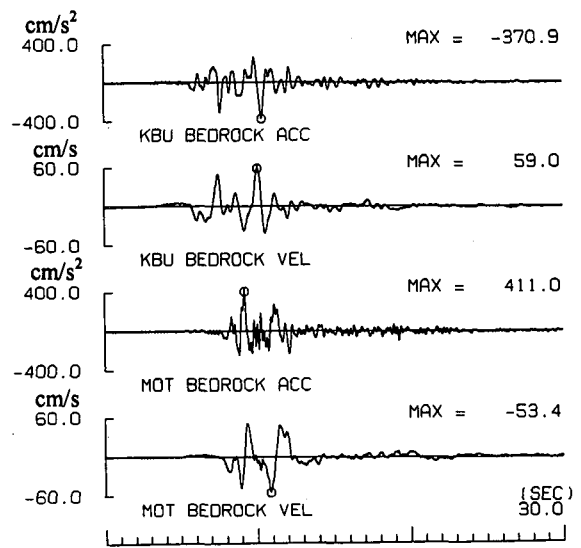
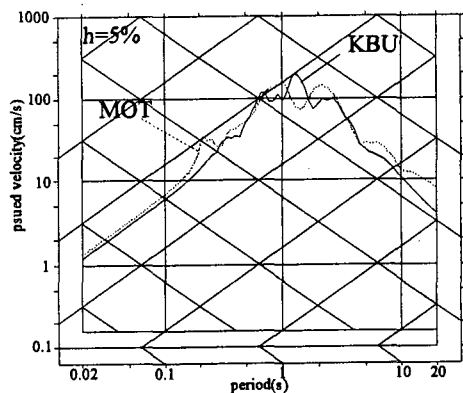


図-4 東神戸大橋と六甲アイランド地点の地盤モデル



(a) 加速度、速度波形



(b) 疑似速度応答スペクトル

図-3 基盤波の加速度、速度波形と応答スペクトル

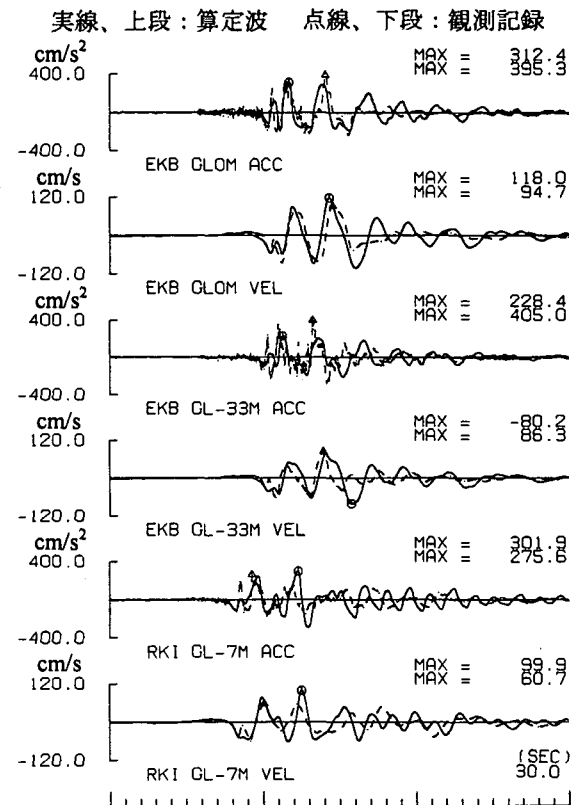


図-5 算定波形と観測記録の比較

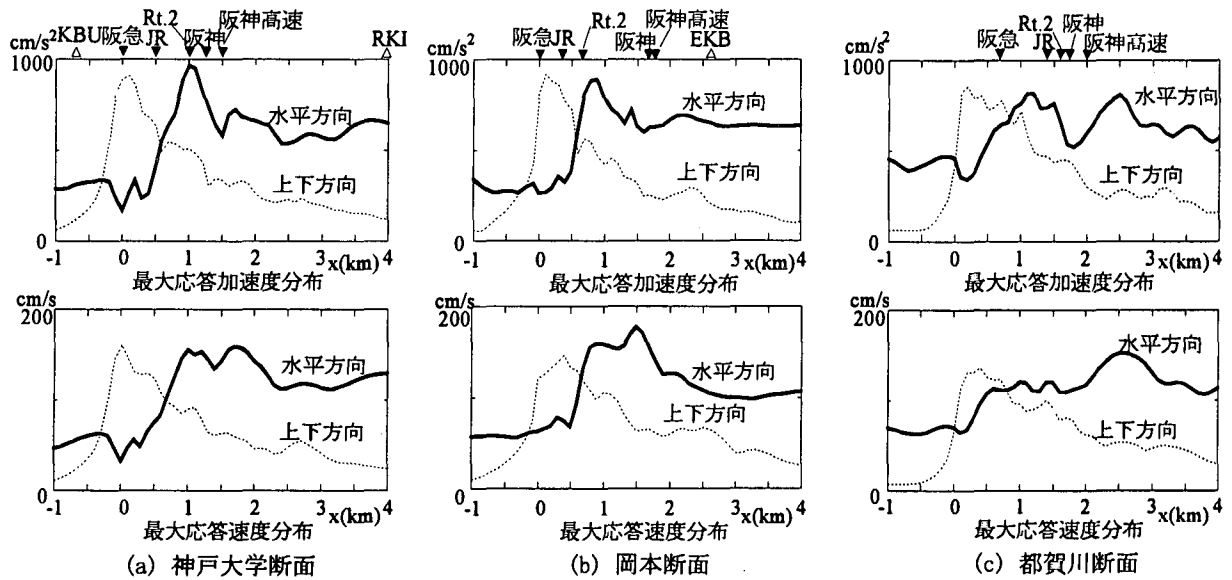


図-6 大阪層群上面における最大加速度分布と最大速度分布

程度離れた位置で水平加速度が大きく増幅しており、深部不整形構造による地震動の増幅が「震災の帯」を生じさせた原因の1つであることを示している。これは筆者らが既に示した結果¹⁾と対応する。一方、海岸線方向に傾斜した形の深部不整形構造となっている都賀川断面では、最大加速度分布が段差境界より1.2kmと2.5kmの2地点でピークを有している。これより深部構造の基盤の形状によって地震波の増幅特性が微妙に変化することが分かる。最大速度分布は加速度分布と概ね対応するが、やや緩い分布形状となっている。また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。図-1に示す被害分布¹⁶⁾との対応では、神戸大学、岡本断面ではやや海岸線寄りにずれているものの、水平加速度分布のピークと一致する。また都賀川断面では最大加速度や速度値が他の2断面に比べ小さくなっており、断面近傍の被害領域が小さくなっている事と対応する。

4. 結語

神戸市灘地域の断層に直交する3断面を対象として反射法結果等の現在入手可能な情報に基づき深部地盤構造をモデル化し、2次元FEMを用いた強震動シミュレーション解析を実施した。神戸大学、本山の強震記録より振幅レベルが概ね一致する基盤波が得られた。この基盤波と深部地盤のFEMモデル、軟弱表層地盤の1次元モデルを用いて東神戸大橋、六甲アイランドでの強震記録が概ね説明できること、深部地盤構造の基盤の形状により大阪層群上での最大応答加速度、速度分布が変化することを示した。

謝辞: 本研究で使用した1995年兵庫県南部地震の観測記録のうち、KBU、MOTは関西地震観測研究協議会、EKBは土木研究所、RKIは積水ハウス株式会社より提供されたものであります。これらの強震動観測や公開に携わった関係者各位にここに記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 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
- 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) 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
- 4) 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
- 5) 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
- 6) 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
- 7) 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
- 8) 小林啓美ほか：神戸市東灘区における反射法探査、日本地震学会講演予稿集、1996年度秋季大会、A38、1996年9月
- 9) 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
- 10) 永野正行、源栄正人：任意方位角を有する平面波斜め入射に対する2次元構造物の応答解析、日本建築学会構造系論文集、第474号、pp.67-76、1995
- 11) 岩崎好規、本郷隆夫、横田裕、伊藤伸一：関西地震観測研究協議会六甲台（神戸大学）観測点の地盤特性、日本地震学会講演予稿集、p.77、1995年秋季大会
- 12) 土木研究所彙報、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
- 13) 阪神高速湾岸線・東神戸大橋工事誌、阪神高速道路公団、1994
- 14) 田村敬一、二宮嘉朗、濱田禎：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
- 15) 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
- 16) 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