

神戸市の地下構造に基づく 3次元シミュレーション

佐藤清隆¹・東貞成²・阿部信太郎³・小田義也⁴
石川博之⁵・武田智吉⁶

¹正会員 工修 電力中央研究所 地盤耐震部 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

²非会員 理博 電力中央研究所 地盤耐震部 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

³非会員 理博 電力中央研究所 地質地盤部 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

⁴非会員 工修 電力中央研究所 地質地盤部 (〒270-11 千葉県我孫子市我孫子1646)

⁵正会員 東京電力株式会社 技術開発本部 (〒230横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

⁶正会員 工修 東京電力株式会社 技術開発本部 (〒230横浜市鶴見区江ヶ崎町4-1)

神戸市東灘区における東西、南北2測線(各8点)の人工地震観測を行い、六甲から神戸湾にかける速度構造について検討した。その結果、基盤のP波速度は5.1kmであり、既往の探査結果により指摘されている山側と湾岸での基盤深度の差は約1.0kmであると推定された。この地下構造とボーリング孔内検層に基づき、3層の堆積層を構成する3次元地盤モデルを考えた。このモデルに、矩形の断層の一様なすべりを想定した場合と平面波を想定した場合の3次元シミュレーション(疑似スペクトル法)を行い、震源からの入射波の違いによる基盤深度の急峻な変化を有する堆積地盤の増幅効果に関して、入射実体波と盆地生成表面波との重なりによる増幅と断層のすべりによるディレクティビティによる増幅の相互作用について考察した。

Key Word : *Kobe city, underground structure, 3-D simulation, basin-induced surface wave, seismic fault, directivity*

1.人工地震波による地下構造探査

(1) 神戸における屈折法地震探査

大学および国の研究機関のメンバーで構成される爆破地震動グループは、1995年兵庫県南部地震の震源断層帯に沿う淡路島・神戸・宝塚を結ぶ測線において、平成7年12月に火薬を震源とする人工地震探査を実施した。

図-1に示すように、発破は京都府の京北町から淡路島西淡町にかけて大小あわせて15点が計画され、実施されたのはU2を除く14点であった。本報告では、六甲アイランド北側の震災の帯を横切る南北測線、および御影山手から六甲学院に至る東西測線の2測線、計16点で人工地震の観測を行った。観測点はほぼ等間隔(約200m)である。

観測には固有周波数1Hzの速度型地震計を用い、UD、NS、EWの3成分観測を行った。収録にはオフラインのDAT型デジタルレコーダを用いた。収録

後各観測点の絶対時刻をGPS時刻に較正した。アンプ倍率は上下60dB、水平40dB、サンプリングは100Hzである。

(2) 観測記録と走時解析

得られた観測記録のうち、U1ショット(大阪北港南地区)の東西測線の波形を図-2に示す。縦軸は発破時刻からの経過時間を示し、記録はすべて上下動成分である。南北測線の交通ノイズレベルは非常に高く、東西測線においても東側の観測点ほどノイズレベルが高くなる。

また、U1の記録を見ると、一見8.0sec付近の大振幅のフェイズが初動にも見えるが、発破点と観測点との距離から大振幅の波の平均速度を出すと約2.4km/sとなり非常に遅いことから基盤屈折波とは考えにくい。そこで、4.0secの付近に見えるP波初動に着目し、図中の観測点E8で2つの発破点(U1およびS3)の記録を比較すると、P波初動の到達時間は約

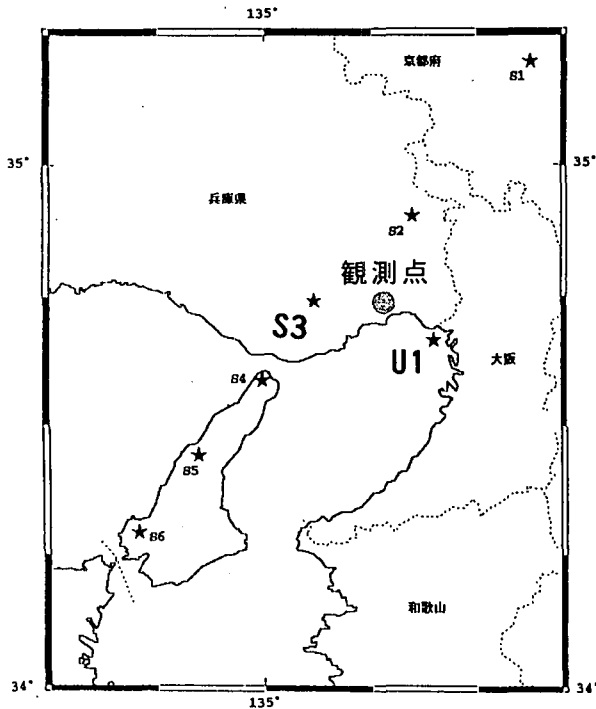


図-1 人工地震探査の発破点と観測点の位置

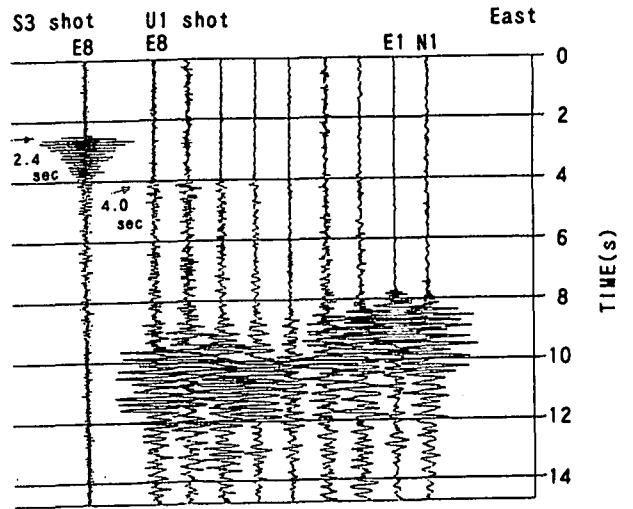


図-2 東西測線観測記録

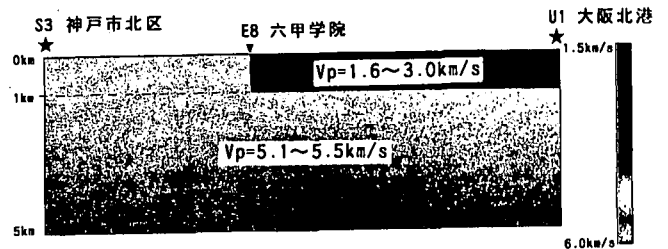


図-3 推定される地下構造

1.6secの差がある。その結果、S3ショットの記録では初動走時が2.4secであり、発破点と観測点の距離を初動走時で割った平均速度は5.0km/sとなるが、U1ショットの記録では初動走時が4.0secで求められる平均速度は4.35km/sとなる。

観測点と2つの発破点U1, S3との距離はそれぞれ17.4kmおよび12.0kmであり、その差は5.4kmとなる。基盤のP波速度を見かけ速度から5km/sと仮定すると距離の差により生じる走時差は1.08secとなり、1.6secという初動走時の差は距離の差だけでは説明ができず、この地域の基盤構造の落差に起因する走時差と考えられる。

石屋川に沿った反射法地震探査結果¹⁾および、地質調査所による東灘区の深層ボーリング結果から堆積層のP波速度を1.6km/sから3.0km/sまでグラジエントに変化するものとした。また、基盤のP波速度が初動の見かけ速度から5km/s前後で考慮し、U1ショット、S3ショットそれぞれの記録に対してレイトレーシングを行った結果、初動走時のずれを説明するには、約1kmの基盤深度であることがわかった。図-3にレイトレーシングによる解析結果から推定される解釈図を示す。

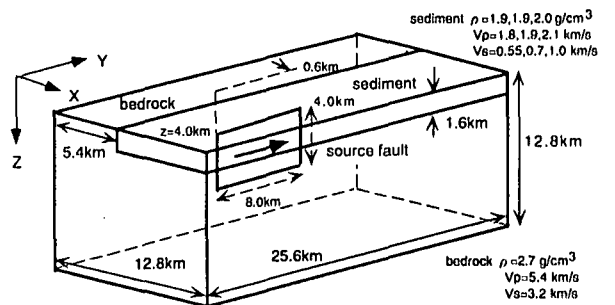


図-4 3次元地下構造モデル

2. 地下構造に基づく三次元シミュレーション

(1) 解析モデルと解析条件

前節に示す人工地震探査の結果や東灘地区における深層ボーリングの結果に基づき、堆積層と基盤とを単純な3次元地下構造で、また震源断層を一様な鉛直横ずれでモデル化した、疑似スペクトル法²⁾による3次元シミュレーションを実施した。同手法は、運動方程式の空間微分を離散化フーリエ変換を用いて波数空間で解析的に行うため、差分法や有限要素法に比べて粗い格子点間隔で同精度の解析が可能となる利点をもつ。

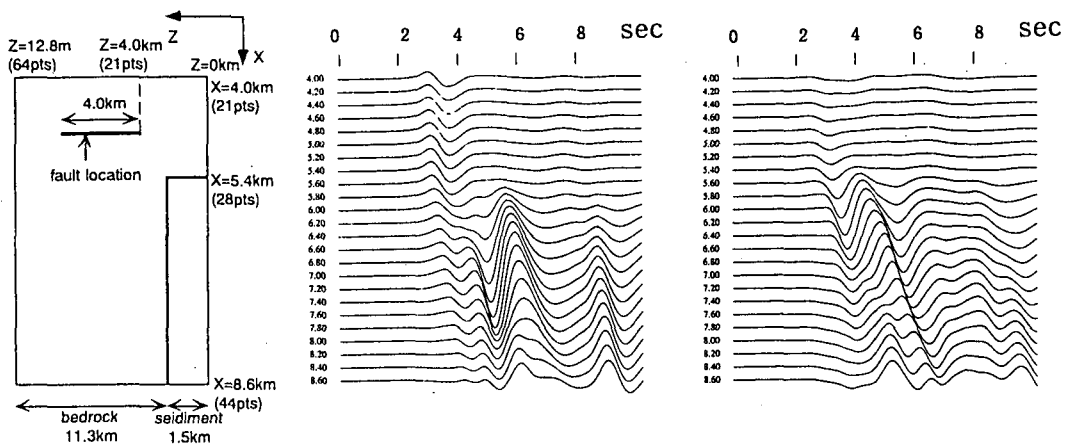


図-5 断層に直交する断面（断層端部）での地表の速度応答波形

（左側：断層に直交する水平成分，右側：断層に平行な水平成分）

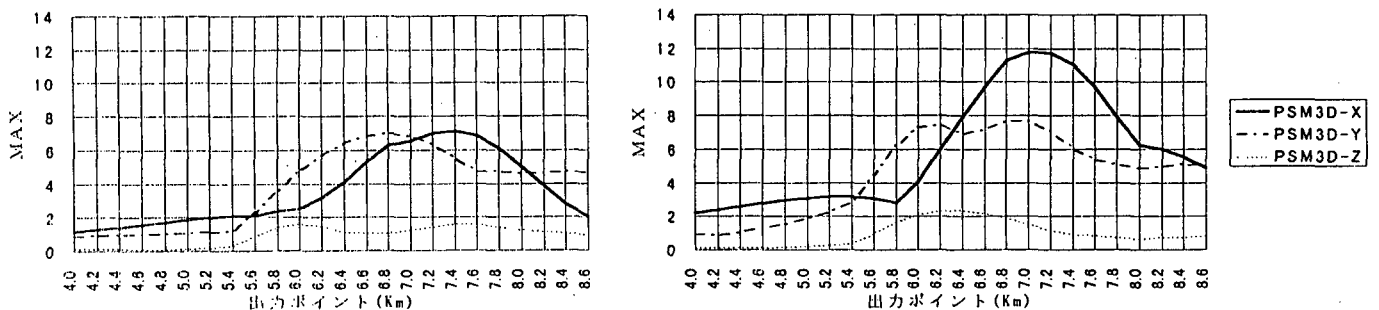


図-6 断層に直交する断面での正規化した最大速度分布（左側：断層中間部，右側：断層端部）

3次元モデルは、図-4に示すように六甲山系の花崗岩を基盤($V_p=5.4\text{km/s}$, $V_s=3.2\text{km/s}$, $\rho=2.7\text{g/cm}^3$)とし、厚さ1.6kmの3層構造の堆積層($V_p=1.8, 1.9, 2.1\text{km/s}$, $V_s=0.55, 0.7, 1.0\text{km/s}$, $\rho=1.9, 1.9, 2.0\text{g/cm}^3$)から構成され、x軸に沿って基盤が1.6km鉛直に落ち込む単純な構造を示し、y軸に沿って一様な地盤構造をもつ完全弾性体モデルである。モデルは200m間隔で離散化し、大きさは12.8km(x)×25.6km(y)×12.8km(z)とした(64×128×64グリッド)。対象とする周波数帯域は1.37Hz以下である。モデルの周辺部20グリッドは、モデル境界からの人工的なノイズ波を除去するため吸収領域とした。

震源は、鉛直横ずれの矩形断層(8km×4km)の上端を、4kmの深さで露頭基盤側の堆積層との境界から0.6km離れた位置にy軸に平行に設定し、断層破壊を水平方向(図中の矢印)に2.5km/sで一様に進行させた。震源はモーメント・テンソルを点震源として断層面上に複数配列し、各震源の破壊時刻は破壊速度に応じた時間遅れを与え、震源時間関数は時間幅1秒の疑似デルタ関数を想定した。前地震モーメント量は断層の大きさから $M=5.6$ で、マグニチュードと地震モーメントとの関係式³⁾から $4 \times 10^{17}\text{Nm}$ となる。

(2)解析結果

図-5に断層の末端に直交する線上の基盤および堆積層上の水平速度応答波形を示す。振幅は、断層の破壊開始点の直上の地表波形で正規化し、堆積層上の増幅効果や波動特性を確認した。震源が鉛直横ずれで、基盤と堆積層との境界も鉛直、水平の単純構造を示すため、鉛直方向の地震動はほとんど励起されない。基盤上の速度波形は、初動の立ち上がりが同位相で断層直交成分の方が振幅レベルが増大している。

堆積層上の地震波動は、基盤との境界から遠ざかるにつれて、基盤上での波動との位相のずれが大きくなるとともに基盤との境界から1.6~2.0km($x=7.0\sim 7.2\text{km}$)で振幅が最大となる傾向を示している。この現象は、基盤の地下構造の変化によって基盤との境界から水平に堆積層に2次的な表面波が励起され、堆積層直下の基盤面から入射して増幅される地震動と重なることによって生じる増幅効果である。兵庫県南部地震での神戸市内の深度7の分布が帯状に発生したことを、定性的に証明している。

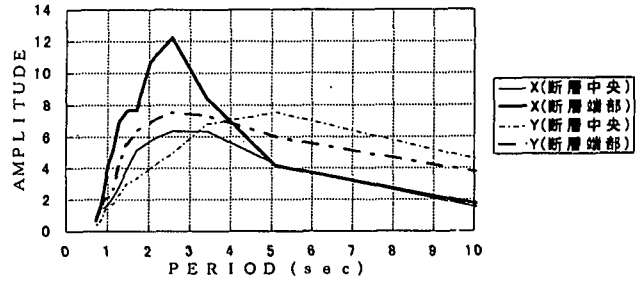
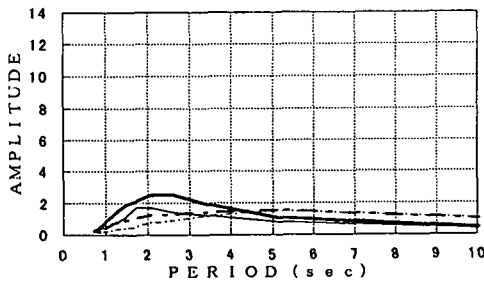


図-7 断層に直交する断面での速度波形のスペクトル

(左側：断層近傍の岩盤上B1・B2，右側：堆積層上S1・S2)

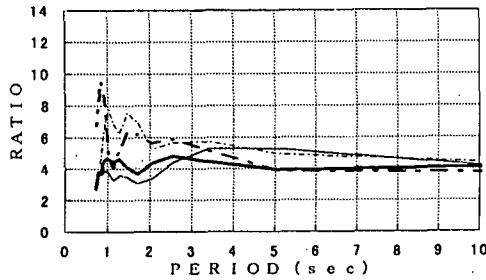
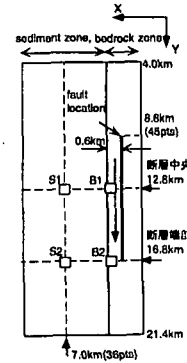


図-8 基盤に対する堆積層のスペクトル比 (S1/B1, S2/B2)



(3)堆積層の増幅特性

図-6に断層中央，末端における正規化した最大速度分布を示す。断層に直交するx成分では，断層の破壊方向への波動エネルギーの指向性⁴⁾（ディレクティビティ）による基盤の最大値の増加に伴い振幅が増大する相関関係が強く認められる。一方，最大振幅の分布は，堆積層上の最大振幅のピークが基盤との境界側に少しずれていることがわかる。また，断層に平行なy成分では基盤上でのディレクティビティによる増幅はx成分ほど明瞭でないが，堆積層上の振幅分布がx成分に比べて基盤に近い方にピークを示し，分布形状が断層中央と端部で異なる挙動を示している。

図-7に断層近傍の岩盤上(x=5.2km)の波形と最大増幅を示す堆積層上(x=7.0km)の波形のスペクトルを断層中央と断層端部とで重ねて比較した。その結果，岩盤，堆積層上ともに周期2~3秒で，断層端部の振幅が増大している。両者のスペクトル比を図-8に示すと，スペクトルのピーク周期2~3秒で断層中央，端部ともほとんど等しい増幅率を示し，ディレクティビティ効果は岩盤に対する堆積層の増幅特性に大きく影響していないことがわかる。

3. まとめ

(1)人工地震記録により基盤と堆積層との基盤段差1.0kmの存在が推定された。

(2)岩盤内の震源断層に平行に分布する堆積層の地震動は，基盤と堆積層との境界から生成される表面波が下方からの波と重なる部分で大きく増幅する。

(3)震源近傍の断層破壊のディレクティビティによって岩盤上，堆積層では振幅が増幅するが，断層に直交する断面内の岩盤に対する堆積層の増幅特性にはほとんど影響していない。

謝辞：本研究の一部は，電力9社と日本原子力発電（株）による電力共通研究として実施した。関係各位に謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 入倉孝次郎：兵庫県南部地震の震源断層，強振動と被害の特徴，物理探査48，pp463-489，1995。
- 2) 東貞成，佐藤清隆：震源を含む3次元的地下構造を考慮した地震波動解析手法の開発—疑似スペクトル法の改良と内陸地震への適用，電中研報告，1997（印刷中）。
- 3) 佐藤良輔編著：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版会，1989。
- 4) 古村孝志，額綱一起：数値シミュレーションで見る兵庫県南部地震の強振動，物理探査学会第95回学術講演論文集，1996。