

深部および表層地質特性と地震動

久保田隆二¹・趙志新²・脇坂安彦³・梶川昌三⁴

¹理博 建設省土木研究所地質研究室招聘研究員(現在川崎地質株式会社, 〒108-8337 東京都港区三田 2-11-15)

²理博 川崎地質株式会社技術本部 (〒108-8337 東京都港区三田 2-11-15)

³正会員 理博 建設省土木研究所地質研究室 室長 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)

⁴理修 建設省土木研究所地質研究室 主任研究員 (〒305-0804 茨城県つくば市旭 1 番地)

深部基盤構造の形状や表層地盤物性の非線形特性と地表地震動について検討した。深部基盤構造については 2 次元の擬似スペクトル法を、表層地盤物性については 1 次元重複反射理論に基づく方法を用いた。深部基盤構造では堆積盆地端部(エッジ)で生じる 2 次生成波と下方からの入射波の干渉により、エッジ(断層)の形状に関係なくその近傍で顕著な増幅効果を生むが、エッジから遠ざかる部分での振幅分布はその形状に大きく左右される。また表層地盤については、非線形効果により S 波速度が減少し、減衰定数が増大するが、その結果表層の厚い部分での減衰効果や、薄い部分での増幅効果が見られる場合がある。したがって非線形効果をどの程度の深さまで考慮するのか、すなわち工学的基盤の設定が重要な問題となる。

Key Words : Basin structure effects, Surface soil amplifications, Pseudo-spectral method

1. はじめに

1995 年兵庫県南部地震で見られたいわゆる「震災の帯」を説明するために当初議論された伏在断層起震説等は、地震学的・測地学的検討から現在ではほぼ否定されており、むしろ被害が激甚であった地区の、深部地質構造や表層の地盤構成・地形など、複雑な構造要素の複合結果として見るべきであるとされている^{1), 2), 3)}。

特に「震災の帯」の大まかな形状は、深部地質構造の影響、すなわち六甲山から大阪湾に向かって急激に落ち込む基盤(花崗岩質層)の断層構造による、波動伝播現象の特異性から生じたものである、という議論が多くなされている^{1), 2), 3), 4), 5), 6), 7)}。

一方、表層の地盤特性が地震被害に大きく影響していることも明らかになっている^{3), 7)}。これらは主に地盤の増幅特性や、あるいは軟弱な表層地盤の非線形特性による減衰効果も指摘されている⁸⁾。

以上の観点から、今後の強震動予測において表層地盤の調査だけでなく、深部地質構造調査の重要性が指摘され、また計画されている。

筆者らは、今後の強震動予測を目的とする地質構造調査を計画する際に、はたしてどの程度までの調査精度が要求されるのか、という観点にたつて、今回数値シミュレーションによってそれを検討してみることとした。

2. 深部地質構造と地震動

深部基盤構造は主に堆積盆地端部の基盤の落ち込み形状を変化させた 2 次元モデルについて、擬似スペクトル法を用いて地表地震動を計算した。その際に入力地震波について、下方からの平面波入射および点震源、線震源の違いについても検討した。

図-1 に検討した構造モデルを示す。モデルの内容は、堆積層の S 波速度の変化(1, 2)、正・逆断層モデル(3, 4)、階段構造モデル(5-8)、多層堆積層モデル(9, 10)、震源モデルの違い(11, 12)である。計算は SH 波についてであり、震源関数は卓越周期が 1sec の擬似デルタ関数である。モデル 1~10 は下方からの平面波入射であり、11 および 12 は、断層より左側 2km にそれぞれ線震源(深さ 6km)、面震源(深さ 3-10km)を仮定している。

各モデルについて、左端(図上 0 の点)の露岩域の最大加速度振幅を 1 としたときの最大振幅分布を図-2 に示す。実際の計算領域は、12.7km×12.7km であるが、表示は中心部の 6km 部分である。

モデル 1 と 2 は、堆積盆地端部(エッジ)付近でのピークの形状に違いはあるものの、遠ざかるにしたがって、ほぼ一定の振幅となる。断層付近のピークは、川瀬他²⁾も述べているようにエッジで 2 次的に生成された回折波・表面波と下方からの入射波が重なり合う干渉効果によって振幅が大きくなっている。

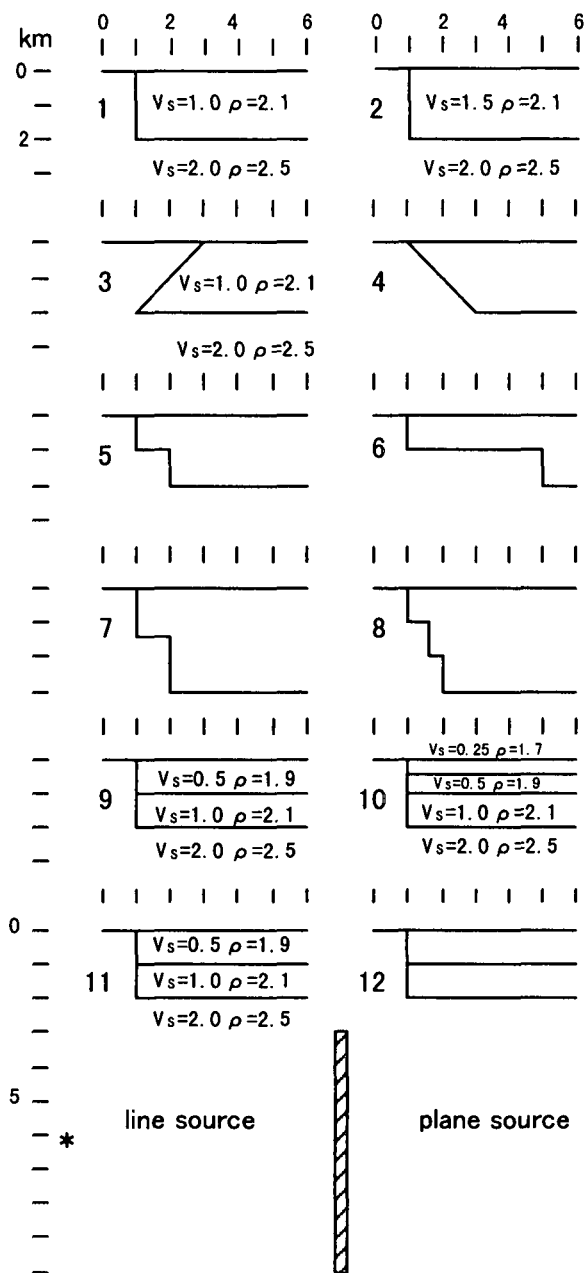


図-1 深部地質構造モデル
Vs は S 波速度(km/s), ρ は密度(g/cm³).

ピークの形状の違いは、両モデルの速度の違いによる 2 次生成波と下方からの入射波の重なり合う点の違いを反映していると解釈される。また図上右端部で振幅がやや大きくなるが、これは堆積層内の多重反射波と 2 次生成波が重なり合って生じた結果である。

逆断層型の 3 と正断層型の 4 では、ピークの形状が大きく異なり、特に 4 の結果は、2 つの顕著なピークを示している。左側の最初のピークは前述したような干渉効果によるが、2 番目のピークは基盤変曲部による波線の焦点効果によって生じていると見られる。これに対し 3 では干渉効果によるピークの

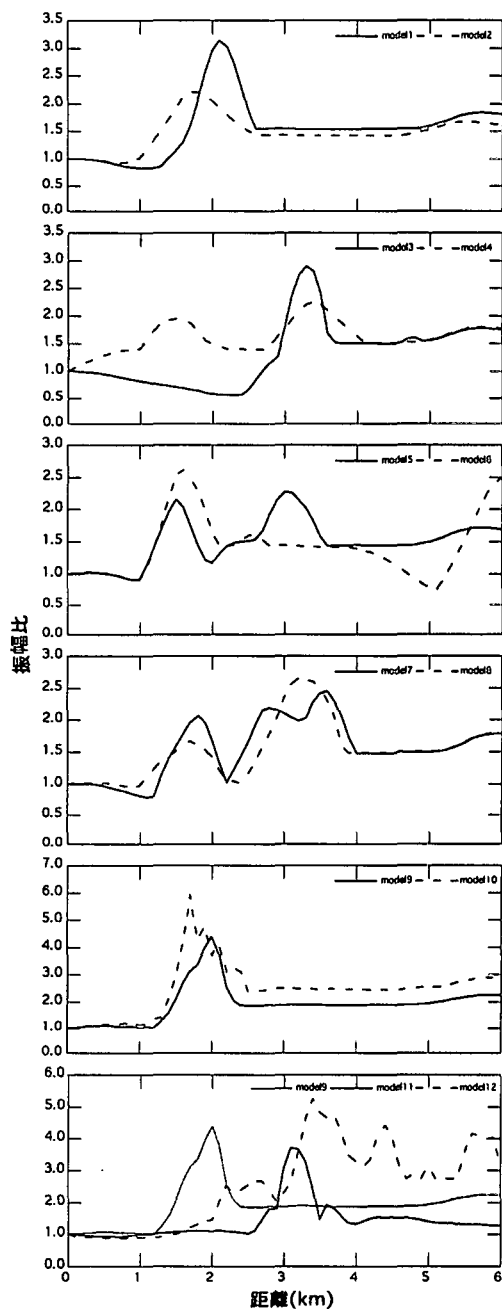


図-2 最大加速度分布
露岩域(左端 0 の点)の最大加速度で基準化。

みが現れている。

5~8 は階段モデルであるが 7 と 8 は堆積層が厚いモデルである。これらの結果では、それぞれの階段のエッジで生成した回折波が下方からの入射波と重なり合ってピークを形成していることがわかる。また 7 と 8 は階段の分割数が異なっているが、両者ともほぼ同様な分布を示していることがわかる。

9 と 10 の結果は、当然ながら浅部の低速度層による増幅効果を示している。11 と 12 の構造モデルは、9 と同様であるが、震源の幾何学的形状により振幅分布が大きく異なる。特に 12 は増幅効果の大きな範囲が広範囲にわたっている。

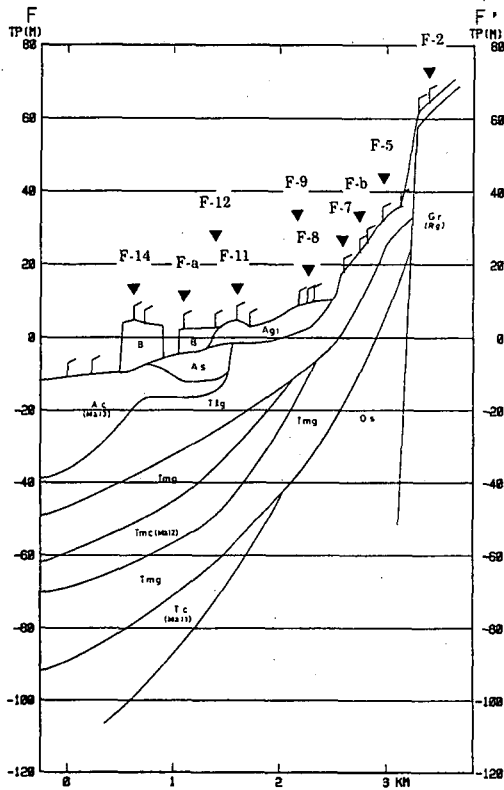


図-3 検討に用いた地質断面

3. 表層地盤物性と地震動

表層地盤物性については、主に物性パラメータの変化の割合が、地盤の増幅率を評価する際にどの程度影響するかを検討することとした。増幅率の計算には Haskell 法を用いたが、非線形効果を考慮できるように等価線形化法を用いて改良した。

物性パラメータは、図-3³⁾に示す神戸地区で実際に得られているボーリングデータを基に、S波速度、ひずみ依存曲線 ($G/G_0 \sim \gamma$, $h \sim \gamma$) のそれぞれを変化させることとした。変化の割合は、いずれも実測値の 0.5 から 2.0 とした。ただし工学的基盤の物性値は固定した。例として用いたボーリングデータは、海岸側の工学的基盤が比較的深い (F-a: 57m) ものと、六甲山側の浅い (F-b: 15m) ものである。また最下層からの入力地震波は、兵庫県南部地震の KBU の水平成分から震源断層と垂直な方向の成分を合成し、かつ観測点直下の地盤増幅分を取り除いたものである。その波形を図-4 に示す。

図-5 は、S波速度を変化させた場合の増幅効果 (最大加速度振幅) の変化を示したものである。ただし実測値に対する振幅を 1 として基準化してある。当然ながら、S波速度の変化は地盤の増幅率を直接的に決定する要因であることから、その影響が大であることがわかる。またピークを示しているのは、

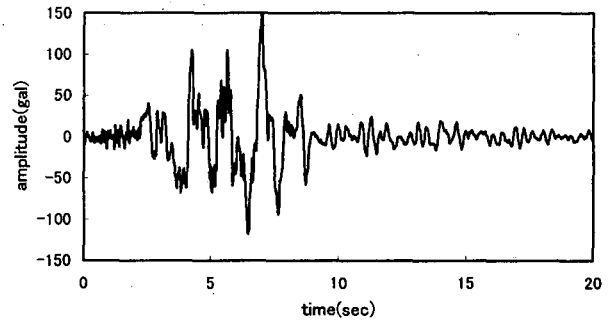


図-4 入力地震動 (KBU 記録から合成)

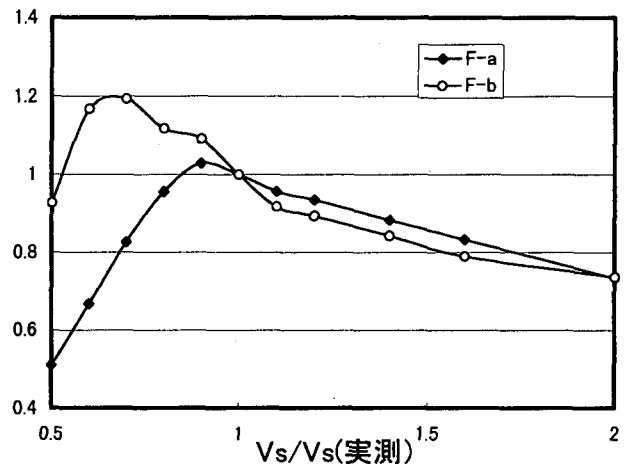


図-5 S速度の変化と増幅効果の変化

その速度値付近で、地盤の卓越周波数と入力地震動の卓越周波数が一致するからである。

$G/G_0 \sim \gamma$ 曲線の変化は、本来の曲線の形にもよるが、今回の 2 点の結果を見る限り増幅効果にさほど大きな変化は認められなかった。これは曲線の形が多少変化しても、剛性率の変化分は、その平方根に比例して S 波速度が変化するので、したがって増幅率の変化もそれに応じたものとなる。また $h \sim \gamma$ 曲線については、当然ながらその変化に比例して減衰効果が現れる。

つぎに表層地盤の非線形効果と入力地震動の関係を見るために、図-3 に示された全点について増幅効果 (最大加速度振幅) を見てみた。結果を図-6 に示す。図には、図-4 の波形に対して非線形効果を考慮しない場合と、非線形効果を考慮して、さらに入力地震動振幅を 0.5, 1.0, 2.0 倍としたときの結果を示してある。

非線形効果を考慮しない場合は、工学的基盤が深くなるほど、その増幅度が増していく。しかし、非線形効果を考慮すると、入力地震動が小さい場合には、さほど増幅度は考慮しない場合とでは変わらないが、大きくなるにしたがって、その影響が大きくなって現れてくる。これは歪みが大きくなるにしたがって、

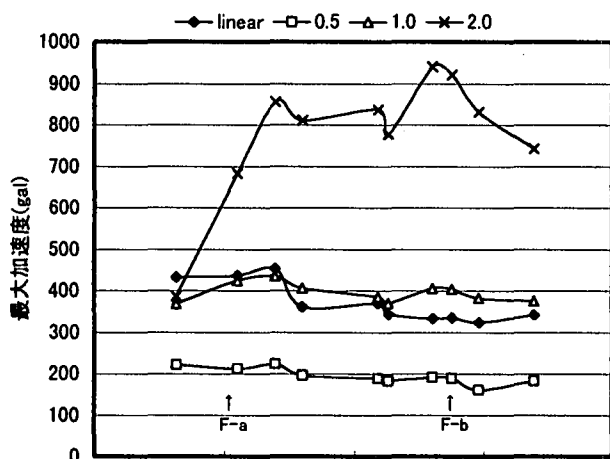


図-6 図-3の断面にそった地震動分布

表層地盤のS波速度が減少し、かつ減衰効果が大きくなるためである。

特に表層が厚い部分では、S波速度の減少に伴い表層内の地震波伝播時間が増大し、同時に減衰定数も大きくなることから、結果として地表での振幅が減衰する。一方表層が薄い部分は、本来地盤の卓越周波数が高いにもかかわらず、S波速度が減少することによって、卓越周波数が低くなり、入力地震動の卓越周波数と重なり合って増幅する。このとき表層内の地震波伝播時間がさほど長くないことから、増幅効果が減衰効果を上回るものと考えられる。

4. おわりに

深部地質構造と地震動の増幅効果との関係を考える場合に、第一に重要なのは、堆積盆地端部(エッジ)で生じる2次生成波と下方からの入射波の干渉による増幅効果が、断層の形状にあまり関係せず発生することである。

断層の形状の影響は、むしろエッジから遠ざかる部分で見られる。特に正断層、あるいは階段構造の場合は、断層の傾斜あるいは階段の幅に応じてエッジから離れて増幅効果が現れる。しかし、モデル4, 5, 7, 8のピークの現れ方は細かい点を除けば類似しており、このことは実際の調査において正断層型の基盤形状を、どの程度まで近似すればよいかを議論するための手がかりとなるであろう。

また震源の影響は大きく、遠方場での議論には直下からの平面波入射で十分であると思われるが、近傍場では、震源の条件が増幅効果の議論に大きく影響する。

表層地盤と地震動の関係については、単純な一次元重複反射理論に基づいて考察をおこなったが、こ

の中で非線形効果による増幅率と減衰効果の変化の掛け合わせで、表層地盤の地震動特性が大きく左右されることがわかる。このことはすでに兵庫県南部地震の被害分布、あるいは地震動振幅についても数多く議論されており、海岸部での減衰効果についても説明されている⁸⁾。

表層地盤の物性パラメータは、実測されることに越したことはないが、広い範囲でデータを満足することは困難である。特にS波速度は $V_s \sim N$ 値の経験式によるのが一般的で、現在最も実用的な手法であるが、その精度を把握して検討する必要がある。

一方、非線形効果をどの程度の深さまで考慮するかで、減衰効果の影響が大きく異なる。すなわち工学的基盤の設定であるが、これらの問題について今後の議論に期待したい。

参考文献

- 1) 中川康一: 地震動特性と解析結果, 応用地質, Vol. 37, pp. 313-332, 1996.
- 2) 川瀬博・松島信一・Graves, R. W.・Somerville P. G.: 「エッジ効果」に着目した単純な二次元盆地構造の三次元波動場解析, -兵庫県南部地震の際の震災の帯の成因-地震II, Vol. 50, pp. 431-449, 1998.
- 3) 脇坂安彦・梶川昌三: 平成7年兵庫県南部地震による被害の地形・地質学的検討(その2)-地質学的検討-, 土木研究所資料, No. 3609, 1999.
- 4) Pitarka, A., Irikura, K., Iwata, T. and Kagawa, K.: Basin structure effects in the Kobe area inferred the modeling of ground motions from two aftershocks of the January 17, 1995, Hyogo-ken Nanbu earthquake, J. Phys. Earth, Vol. 44, pp. 563-576, 1996.
- 5) Motosaka, M. and Nagano, M.: Analysis of ground-motion amplification characteristics in Kobe city considering a deep irregular under-ground structure interpretation of heavily damaged belt zone during the 1995 Hyogo-ken Nanbu earthquake, J. Phys. Earth, Vol. 44, pp. 577-590, 1996.
- 6) 趙志新・久保田隆二: やや深い地下構造の変化による強震動分布, 物探学会97回, pp. 71-74, 1997.
- 7) 日本応用地質学会地震防災技術委員会: 都市の地震防災と深部地盤構造, 日本応用地質学会, 1998.
- 8) Aguirre, J. and Irikura, K.: Nonlinearity, liquefaction and velocity variation of soft soil layers in Port Island, Kobe, during the Hyogo-ken Nanbu Earth-quake, Japan, Bull. Seismol. Soc. Am., Vol. 87, 1244-1258, 1997.