

(51) 兵庫県南部地震の岩盤における地震動強さの推定

鹿島建設(株) 大野晋、丹羽正徳、武村雅之、高橋克也

1. はじめに

兵庫県南部地震では、六甲断層系の南側の神戸市内で甚大な被害が発生した。また神戸海洋気象台で800Galを超える加速度を観測するなど、大振幅の記録が複数観測されている。本論文では、筆者らが提案している震源域でも適用できるスペクトル評価式を用いて、兵庫県南部地震の岩盤での地震動強さを評価し、推定値と観測値の比較を通じて観測された大振幅の原因を推定する。

2. 震源近傍の記録を含む強震記録に基づく応答スペクトルの距離減衰式

筆者らは、米国カリフォルニア州の主要な17地震水平496成分に基づき、減衰定数5%の加速度応答スペクトルの距離減衰式を提案している(大野・高橋, 1994)。データベースの範囲はマグニチュードM5.0~7.5、断層からの最短距離 $X_{eq}=0.4\sim90\text{km}$ であり、S波到達以降の区間を対象とした。また地盤の影響を考慮するため、表1左欄の判断基準に基づき、岩盤(160成分)と堆積層(336成分)にサイトを層別し、軟弱地盤は除外した。このうち速度構造が分かっているサイトのS波速度 V_s (岩盤サイトでは10m以内の表層堆積層がある場合もその下の岩の速度を載せている)の頻度分布を図1に示す。岩盤に分類したサイトはほぼ $V_s>600\text{m/s}$ に分布しており、速度情報が無い他の岩盤のサイトの V_s も概ね $V_s>600\text{m/s}$ と思われる。岩盤における最大加速度の評価式は(近似的に周期0.02秒の減衰定数5%の加速度応答スペクトル値を用いて)下記のように推定されている。

$$\log A_{max} = 0.318M - \log X_{eq} - 0.00164X_{eq} + 1.597 \quad (1)$$

ここで X_{eq} は、断層を小領域に分けた場合の領域数を N 、領域 i のすべり量を d_i 、領域 i と観測点間の距離を X_i とするとき、各領域からのエネルギーの幾何減衰(X_i^{-2})のすべり量の2乗による重み付け平均

$$X_{eq}^{-2} = \frac{\sum_{i=1}^N d_i^2 X_i^{-2}}{\sum_{i=1}^N d_i^2} \quad (2)$$

として求められる。この距離(等価震源距離)は広がりを持つ断層を同じエネルギーを放つ点震源に置き換えたときの仮想点震源と観測点との距離を意味する(Ohno et al., 1993)。この定式化では破壊伝播効果やラディエーションパターンの影響は考慮していない。どちらもコーナー周期付近の長周期では無視できないが、最大加速度に寄与するような短周期では、断層上の破壊の不均質性や伝播経路の散乱の影響により長周期ほど顕著に現れない(武村, 1992)とされている。従って、これらを考慮していない距離減衰式でも短周期では比較的精度よい推定が可能と思われる。データベースの等価震源距離の範囲は $X_{eq}=7\sim100\text{km}$ となった。

ここでは上下動のスペクトル評価も行うため、大野・高橋(1994)の用いたデータセットのうち岩盤の記録(水平と同じS波到達以降の区間)について、減衰定数5%の加速度応答スペクトルの上下/水平をとり、その平均値と標準偏差を求めた(図2)。最大加速度比(周期0.02秒の値)の平均は0.53、周期によっては平均値で0.4~0.7であり、一般的には上下動の方が水平動よりも小さいことがわかる。

表1 地盤の分類に用いた基準

	大野・高橋(1994)におけるカリフォルニアの観測点の選定基準 (CDMGやUSGSのレポートの記述による)	兵庫県南部地震の観測点の選定基準
岩盤	・ Rock (Sandstone, Siltstone, Shale, Granite, Mudstone等)。 ・ 上記Rockまでの堆積層(Soil)の厚さが10m以内。 ・ もしくはShallow(Thin) Soil(Alluvium)の記述あり。	・ 観測点の記述に岩盤とあるもの (関西地震観測研究協議会) ・ 地質図で基盤岩類と記述されているもの
堆積層	・ Soil (Alluvium, Clay, Sand, Silt, Loam, Gravel等)	・ 観測点の記述に堆積層・砂・粘土等とあるもの (港湾技研・関西地震観測研究協議会) ・ 地質図で砂・礫・粘土等と記述されているもの
軟弱地盤	・ Bay Mud	・ なし

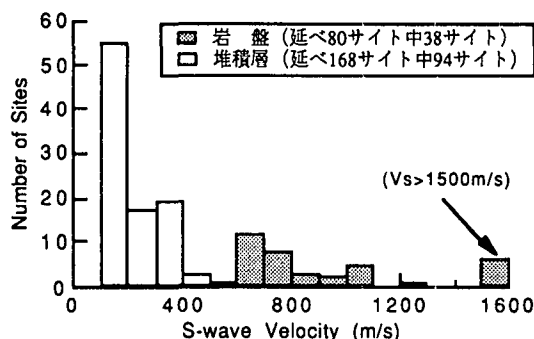


図1 カリフォルニアの岩盤と堆積層のS波速度
頻度分布 (速度構造が既知の地点のみ)

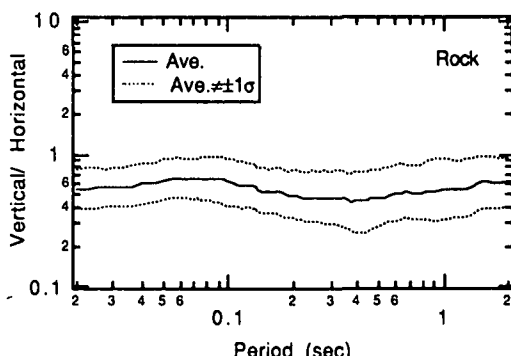


図2 カリフォルニアの岩盤の観測記録の
上下/水平比 (平均、平均±標準偏差)

3. 最大加速度値の検討

菊地(1995)の断層モデルと余震分布を参考として図3のように断層を仮定し、兵庫県南部地震で最大加速度が得られている諸機関の観測点55地点に対して等価震源距離を計算した。計算の際(2)式で領域に依らず $d_f=1$ と置き、滑り量の分布は全断層面で一様とした。観測点を表1右欄の基準により岩盤6地点と堆積層49地点に分類した。

断層近傍での岩盤における推定最大加速度分布(水平動)を観測値とともに図3に示す。断層近傍の岩盤で最大400~500Gal弱程度と推定されている。等価震源距離に対する水平動と上下動の最大加速度の分布を、岩盤での推定値とともに図4に示す。ここで水平動の推定値としては(1)式で $M_w=6.9$ とした値を、上下動は図1に基づき水平動の推定値の0.53倍を用いた。

これらの図から、岩盤での観測値は水平動・上下動とも平均±標準偏差の範囲内で推定式によりほぼ説明できること、一方堆積層上の観測値はばらつきが大きい、平均的には岩盤よりも大きい(水平動で推定値の約1.7倍、上下動で約1.5倍)ことがわかる。また、堆積層上の上下動は特に近距離で推定値よりも大きい($X_{eq}<35\text{km}$ では推定値の2倍以上)傾向が見られる。

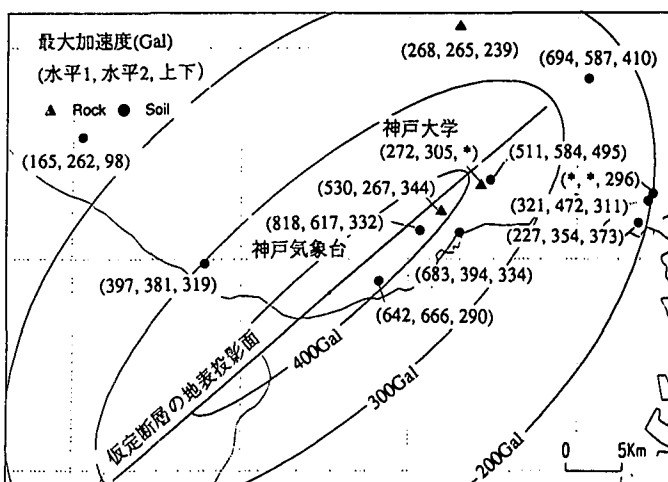


図3 仮定した断層面(深さ4~20km仮定)と観測点位置
及び岩盤における水平最大加速度推定値のコンター

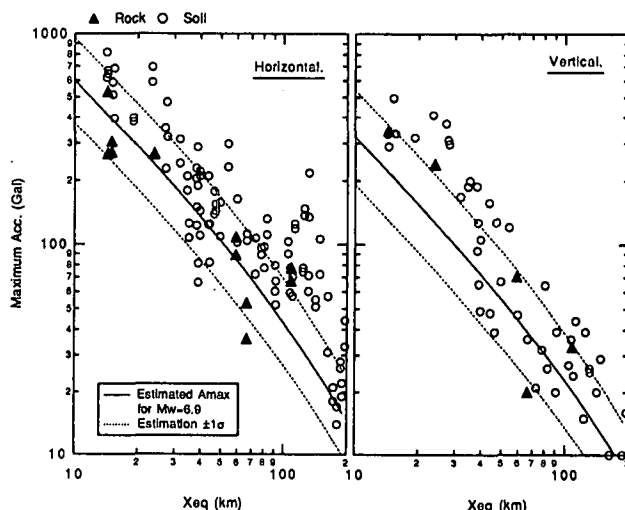


図4 最大加速度の推定値と観測値の比較

(水平動の推定値は大野・高橋(1994), 上下動の推定値は水平動の0.53倍)

4. 応答スペクトルの検討

断層近傍の神戸海洋気象台と神戸大学について、観測値と推定値の応答スペクトルの重ね書きを図5に示す。水平動の推定値は大野・高橋(1994)の応答スペクトル評価式を用い、上下動は水平動の推定値にカリフォルニアの岩盤での平均的な上下／水平応答スペクトル比(図2)を掛けたものである。なお神戸大学の上下動は地震計の挙動に疑問があり協議会で調査中のため比較は行わない。

推定値との比較では、神戸大学では短周期側でやや大きめに評価していることを除けば、平均±標準偏差の範囲内で観測値とよく対応するのにに対し、海洋気象台では周期0.3～1秒で観測値が大きくなっている。

これは、神戸大学は花崗岩(風化の度合いは不明)上にあるとされている(関西地震観測研究協議会)のに対して、神戸海洋気象台は洪積地盤上に位置し、かつ周辺より20m程度高い丘に位置している(北川他, 1995)ことから、この帯域で観測点近傍の地盤及び地形に起因する増幅を受けたためと考えられる。ただしどちらも速度構造は不明のため、更に検討する必要があるだろう。

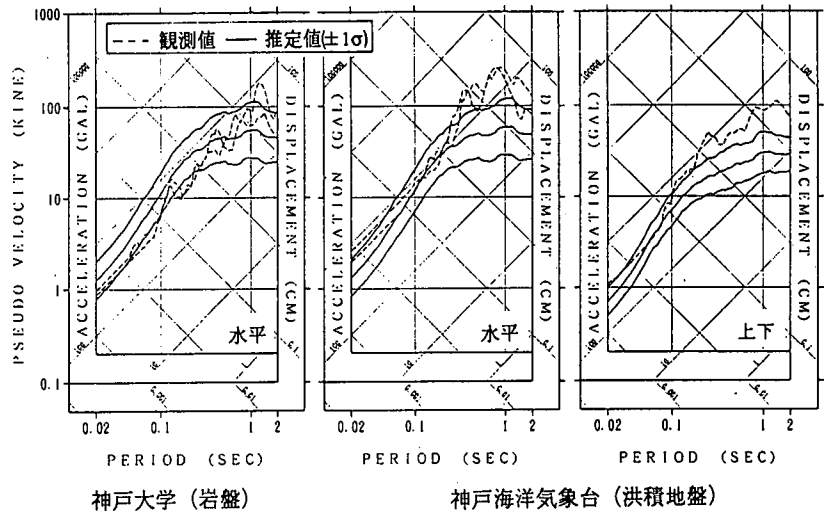


図5 観測値と推定値の擬似速度応答スペクトルの比較

複数地点において地盤の影響を検討するため、数値化記録を利用できた気象庁(神戸気象台)、関西地震観測研究協議会(神戸大・千早・福島・森河内・弥栄・境・忠岡・阿倍野)と港湾技研(神戸第8埠頭・尼崎)の11地点の記録について、岩盤での推定応答スペクトル値に対する観測値の比を求めた。観測点位置と地盤種別毎の比の重ね書きを図6に示す。このうち岩盤は神戸大学と千早の2点のみである。

岩盤と堆積層のみに大まかに分類しているためある程度のばらつきは避けられないものと思われるが、水平動については岩盤での推定値は観測値を平均的に良く説明している。一方堆積層上では系統的に推定値よりも大きく、最大加速度に見られたようにスペクトルでも表層地盤による増幅が確認できる。

上下動については、堆積層上では水平動と同じく観測値が推定値よりも大きい。岩盤では水平動と異なり、短周期で観測値の方が大きくなっている。岩盤のサイトは神戸大の上下動を除いたため千早のみである。千早の速度構造が不明のため詳細な検討はできないが、千早と神戸大(地震計調整後)の余震記録を距離減衰を補正して比較すると千早の方が短周期でやや大きいことから、千早のサイト特性の影響で短周期が大きくなっている可能性があると考えられる。

5. 議論

翠川他(1992)、翠川・作川(1993)は千葉県東方沖地震の応答スペクトルの地盤への依存性を検討し、最大加速度で1.4～1.6倍第四紀地盤の方が第三紀地盤よりも増幅すること、短周期よりも長周期で地盤による増幅が大きいことを推定している。また福島(1994)は日本の最大加速度について地盤の影響の検討を行い、地盤を考慮しない場合の推定値に対してRockは0.6倍、Hard/Medium Soilはほぼ1倍、Soft Soilは1.4倍増幅していると推定している。このように堆積層上の方が岩盤よりも最大加速度や応答スペクトル値が大きくなるという傾向は、兵庫県南部地震の記録に見られる傾向と整合している。

一方、大野・高橋(1994)のカリフォルニアの地震記録の検討では、堆積層の岩盤に対する増幅率は長周期に比べ短周期で少なく、最大加速度ではほとんど差がない(岩盤の1.1倍)と推定されている。この傾向はカリフォルニアの記録に基づく他の距離減衰式でも同じであり、高周波では表層地盤の減衰が岩盤とのインピーダンス比による増幅を打ち消すためではないかとされている(例えばJoyner and Boore, 1988)。また福島(1994)は日本と米国他からなるデータセットを用いて最大加速度の距離減衰式を評価し、日本の方が米国他よりも1.5倍ほど大きいと推定している。解析の際に地盤条件は考慮していないが、この差は日本と米国他との地盤特性の相違によるものではないかと述べており、実際に米国と日本の堆積層による増幅率の差にはほぼ対応する。

以上のように、地盤の影響が長周期でより顕著であるという点ではカリフォルニアの記録も日本の記録も共通しているが、表層地盤の特性(速度もしくは減衰)の相違により短周期側では日本の記録の方が地盤による差が大きいようである。なお、ここでの議論は地盤分類毎の平均特性を述べたものであるが、カリフォルニアでも観測点近傍の影響で最大加速度が大きく増幅した例がある(例えば大野・池浦, 1994)ため、個々の観測点の地盤構造を明らかにすることが重要と思われる。

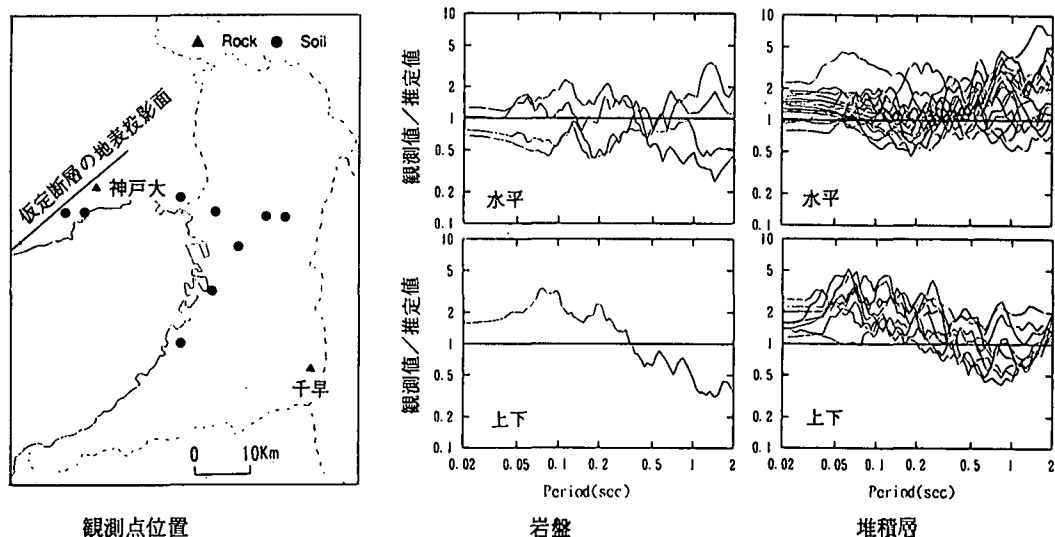


図6 解析に用いた観測点位置と推定値に対する観測値のスペクトル比

6. まとめ

米国カリフォルニア州の強震記録に基づく評価式を用いて岩盤での推定を行い、観測値と比較したところ、推定値は岩盤での観測値と概ね対応したが、(神戸市内の被害地域を含む)堆積層上の観測値はほとんどの点で推定値よりも大きかった。従って、兵庫県南部地震において震源から出たエネルギー自体は $M_w=6.9$ の地震として平均的なものであり、表層地盤による増幅が記録の大振幅や被害の主な原因と思われる。速度構造が分かっている地点がほとんどないため、今後は地盤構造を明らかにすることが重要と思われる。

謝辞: スペクトルの解析には、気象庁・関西地震観測研究協議会・港湾技研の記録を使わせて頂きました。関係各位に感謝します。参考文献: Joyner and Boore (1988) Proc. Conf. on Earthq. Eng. and Soil Dynamics II, 43-102; Ohno et al. (1993) Tectonophysics, 218, 69-81; 大野・池浦(1994)建築学会大会梗概集B, 405-406; 大野・高橋(1994)第9回日本地震工学シンポジウム, 625-630; 菊地(1995)兵庫県南部地震調査速報会資料, 第四紀学会, 17-20; 北川他(1995)建築学会大会梗概集、投稿中; 強震観測事業推進連絡会議(1995)強震速報No.46; 港湾技術研究所(1995)兵庫県南部地震による港湾被害について; 武村(1992)建築学会地盤震動シンポジウム, 11-16. 建築学会(1995)1995年兵庫県南部地震災害調査速報; 鉄道総合技術研究所(1995)JR地震情報No.23b; 福島(1994)東京工業大学博士論文; 翠川他(1992)建築学会構造系論文報告集, 442, 71-78; 翠川・作川(1993)建築学会構造系論文報告集, 447, 31-37.