

1995年兵庫県南部地震における鉛直アレー記録を用いた地震動増幅特性

中央大学理工学部 正会員 國生剛治
中央大学理工学部 学生会員 ○吉邑一平 江尻健太

1. はじめに

表層地盤での地震応答特性は、基本的には地盤の層厚・弾性波速度・減衰定数・密度等の地盤パラメータにより支配されるが、強地震時にはさらに地盤物性の非線形性が重大な影響を及ぼす。本研究では近年発生した強地震動データを対象とし、地盤の震動増幅に与える地盤構造と地盤物性の影響を検討することを目的としている。これまでに地盤の卓越振動数を励起する表層厚を1/4波長則と観測スペクトル比の比較により求め、その平均Vsと基盤のVsとの比から地表-基盤間の増幅率を算定する方法を提案した1)。今回は1995年兵庫県南部地震の鉛直アレー観測点での本震と余震の水平動について地震動増幅特性を調べ、それ以外の強地震による研究結果との比較を行った。

2. 表層の決め方と解析方法

今回の研究では兵庫県南部地震において4つの鉛直アレー記録の観測点であるポートアイランド(PI)、総合技術研究所(SGK)、高砂火力発電所(TKS)、海南港変電所(KNK)を解析地点として用いた。各観測点の地盤は、基盤の上に複数の層が1次元成層構造をなしていると考えられる。そのような1次元成層地盤のSH波による震動増幅特性は、基盤と地表層との間のS波速度の比(Vs比)に大きく依存することが示されている1)。基盤としては層厚が大きくS波速度(Vs)の代表値を求めやすい地中地震計が設置されている層と仮定しているが、地表層は数10cm~数mと薄いものが多く、そのVsを表層の代表値として採用してよいか疑問がある。そこで以前より本研究では、スペクトル比のピークを生み出す表層は複数の層からでも成り得るとものとし、その平均Vs(Vs_bar)を表層のS波速度とすることを提案してきた2)。すなわち、鉛直アレー記録を用いて、地表と基盤でのフーリエスペクトルを算出し、0.3HzのParzen Windowをかけて平滑化し、図-2に例示するようなスペクトル比(地表/基盤)を計算する。それより、各ピーク値での振動数を読み取り、その値と地盤データから式-(1)で計算した固有振動数fを比較し、一致度が高い境界層までを観測スペクトル比のピーク振動数に対応した表層とする。表層の平均Vs(Vs_bar)は式-(2)で計算される。同一観測点においても、異なるピーク振動数に対しては表層も異なることになる。また、基盤のVsをVs_barで割ることによりVs_bar比を算出した。

f=1/4 * sum(H_i / Vs_i) * (1) Vs_bar = 4Hf, H = sum(H_i) * (2)

(H_i:1次元成層地盤の各層の層厚, Vs_i:1次元成層地盤の各層のS波速度)

これまで、8つの強地震(2000年鳥取県西部地震, 2001年広島県芸予地震, 2003年十勝沖地震, 2004年新潟県中越地震, 2005年福岡県西方沖の地震, 2007年能登半島地震, 2007年新潟県中越沖地震, 2008年岩手・宮城内陸地震)の本震を用い、解析を行ってきた3)。今回は1995年兵庫県南部地震の4観測点での本震と余震(PIでは本震前の小地震)記録を用いて解析を行った。なお、今回対象とする4地点は地表と基盤間の中間深度にも図-1に示すように、地震計があるため、ここを地表間の増幅率も同様に中間深度でのVs_bar比を用いて評価した。

3. スペクトル比による地震動増幅特性

地震動の増幅を観測するためには図-3に示す(a)平面アレーと(b)鉛直アレーの2種類がある。ここにAs, Abは地表と基盤露頭での上昇波, Bbは地中基盤での下降波を表している。このうち、(a)平面アレー観測で求まるスペクトル比2As/2Abは2地点の地表での振幅の比を表しており、地域の地震動ゾーンネーションに直接使われる。一方(b)鉛直アレー観測で求ま

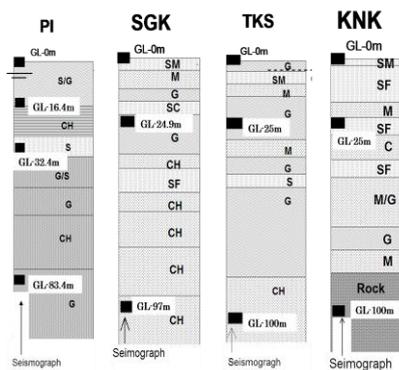


図-1 各地点の地震計位置

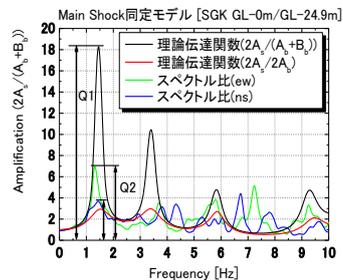


図-2 スペクトル比と理論伝達関数

るスペクトル比 $2A_s/(A_b+B_b)$ は下降波 B_b の影響が入っているため、これより重複反射理論を用いて $2A_s/2A_b$ の値を算出する必要がある。図-2 は例として、兵庫県南部地震で解析対象とした総合技術研究所(SGK)における観測スペクトル比と、地盤の減衰定数を $D=2.5\%$ とした場合の理論伝達関数(観測波と同じウィンドウをかけたもの)を示している。このグラフから両者のピーク振動数の対応が見つかるものについて、理論伝達関数 $2A_s/(A_b+B_b)$ のピーク値を観測スペクトル比と一致させるために、次式により地盤の減衰定数 D をピーク毎に求めた。ここで、 Q_1 は理論伝達関数のピーク値、 Q_2 は観測スペクトル比のピーク値である。

$$D = \frac{Q_1}{Q_2} \times 2.5 \text{ [%]} \quad \dots (2)$$

EW, NS 方向について求めた減衰定数の平均を使って理論伝達関数($2A_s/2A_b$)を計算し、そのピークを読み取った。

図-4 は兵庫県南部地震について入射波の理論伝達関数($2A_s/2A_b$)の1次ピークの増幅率と \bar{V}_s 比の関係の本震と本震前の小地震について地盤モデルごとに比較したものである。ここで Mainshock 同定モデルとは本震から逆解析して得られた地盤物性値のモデル⁴⁾であり、初期線形モデルとは PS 検層から得られた初期の地盤物性値のモデルである。また、塗りつぶし記号は基盤～地表間、白抜き記号は中間深度～地表間の増幅率を示す。このグラフから、基盤あるいは中間深度いずれに着目した場合も本震の増幅率 $2A_s/2A_b$ と \bar{V}_s 比に関して、Mainshock 同定モデルが良い相関を持つだけでなく、初期線形モデルもまたほぼ同様の傾向を示すことがわかる。また、ポートアイランド(PI)はこれらの傾向より多少下方に位置しており、地盤の激しい液状化による影響が考えられる。しかし、総じて言うと以前の研究²⁾と同様に、 $2A_s/2A_b$ のピーク増幅率と \bar{V}_s 比の間には地盤物性の非線形性の影響が予想外に少なく、本震と余震ではほぼ同様の関係が成り立つことが分かる。

また、図-5 では兵庫県南部地震の本震の結果をこれまでに分析した8強地震の結果と比較している。これより、海南港変電所(KNK)に関して \bar{V}_s 比に対して増幅率 $2A_s/2A_b$ が大きくなってしまふものの兵庫県南部地震は、他の8つの強地震とほぼ同様の傾向を示し、文献²⁾で提案した経験式(図中の直線)がほぼ当てはまることが分かる。

4. まとめ

(1) Mainshock 同定モデルだけでなく初期線形モデルにも基盤あるいは中間深度と地表との間の増幅率 $2A_s/2A_b$ と \bar{V}_s 比の間に良い相関が見られるが、ポートアイランド(PI)は地盤の激しい液状化による影響により増幅率が多少下回る。

(2) 兵庫県南部地震についても過去に解析した8つの強地震の結果と同様に地震動ゾーンネーションに用いる増幅率 $2A_s/2A_b$ と \bar{V}_s 比にはよい正の相関が認められ、 \bar{V}_s 比の大きい地盤ほどピーク増幅率は大きい明瞭な関係がある。また、このデータ分析手法による限りは、本震と余震の間に大きな差は見られない。

<謝辞>本研究に当たり、貴重な地震記録を提供して下さった関西電力(株)土木建築室、(株)ニュージック、関西地震観測研究協議会の関係各位に深謝の意を表します。

<参考文献>1) Shima, E.: Seismic Microzoning map of Tokyo, Proc. Second Inter. Conf. on Microzonation,(1): pp433-443, 1978. 2) 國生剛治, 佐藤克晴, 長尾晋悟: KiK-net 地震記録を用いた基盤から地表への振動増幅評価法, 日本地震工学会論文集(電子ジャーナル), 第8巻 第2号, 2008. 3) Kokusho, T., Sato, K. and Ejiri, K.: Site amplification formula based on Kik-net strong motion records, 3rd Taiwan-Japan Joint Workshop on Geotechnical Natural Hazards 495-503, 2008. 4) Kokusho, T., Aoyagi, T. and Wakunami, A.: Insitu soil-specific nonlinear properties back-calculated from vertical array records during 1995 Kobe Earthquake, Journal of GGE, ASCE.131(12),1509-1521,2005

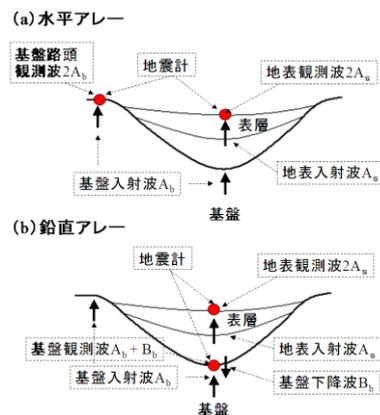


図-3 2種類のアレー観測システム

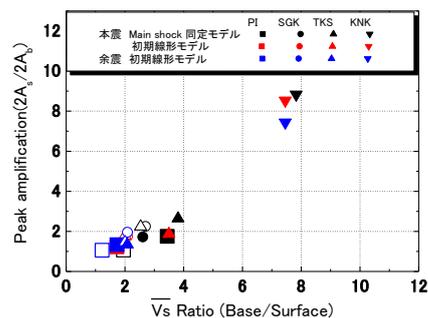


図-4 兵庫県南部地震の本震と余震での増幅率 $2A_s/2A_b \sim \bar{V}_s$ 比関係の比較

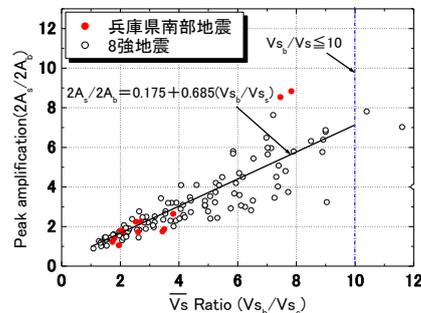


図-5 兵庫県南部地震本震とそれ以外の8強地震における増幅率 $2A_s/2A_b \sim \bar{V}_s$ 比関係の比較