

I - B78

兵庫県南部地震の鉛直アレー余震記録に基づいた拡張ベイズ法による地盤物性の同定

中央大学理工学部 学生員 青柳 寮大  
正会員 國生 剛治

1. はじめに 兵庫県南部地震では、震源近傍の第4紀層の深部で最大 0.6Gを越える強い加速度が観測された。また、震源断層近傍の4地点に設置された鉛直アレー地震観測システムでの本震や多くの余震記録も得られている。この本震記録と余震記録を用いて動的地盤物性の同定解析を行い、強震記録と弱震記録の結果を比較する。今回はまず手始めに関西電力(株)総合技術研究所構内で観測された地震の余震記録をもとに、同構内における動的地盤物性の同定解析を行う。

2. 地震記録と解析地盤モデルの概要 今回用いた5つの余震記録の概要を表1に示す。また解析地盤モデルの地盤物性はPS検層の結果から与えたものであり(表2)、後に地盤調査が行われているがそれ以前のものである。

表 1 地震記録の諸元

No.	発震時	震央緯度	震央経度	震源深さ (km)	M	総合技術研究所のMax.gal		
						EW	NS	UD
1	1995.01.17 07:38:36.3	N34° 46.9'	E135° 26.3'	11.7	5.4	78.87	139.64	42.55
2	1995.01.17 08:58:19.6	N34° 35.0'	E135° 00.5'	18.9	4.5	13.26	13.96	7.62
3	1995.01.17 13:05:23.2	N34° 41.3'	E135° 10.4'	14.5	4.7	27.72	27.27	13.38
4	1995.01.25 23:15:57.2	N34° 47.4'	E135° 18.4'	14.8	5.1	62.33	42.76	30.83
5	1995.02.18 23:15					8.93	7	3.19

3. 拡張ベイズ法 ベイズ法における評価関数  $J$  は参考文献1)より

$$J = \frac{1}{2} \{ (x - \bar{x})^T M^{-1} (x - \bar{x}) + (z - h(x))^T R^{-1} (z - h(x)) \}$$

と表される。ベイズ法では、事前情報と事後情報の重みは同じであるが、実際の問題ではむしろそうではない場合が多い。拡張ベイズ法では、事前情報と事後情報の相対的な重みを評価するパラメータ  $d$  を用いて、

$$J = \frac{1}{2} \{ d(x - \bar{x})^T M^{-1} (x - \bar{x}) + (z - h(x))^T R^{-1} (z - h(x)) \}$$

のように書き直す。そして、ガウスニュートン法に基づいてこの式を最小にする  $x$  を

求めるための漸化式として次式を得る。収束が得られるまで  $k$  についての更新を行って、 $J$  が最小となる点を求める。

$$x_{k+1} = x_k + P_k \{ H_k^T R^{-1} (z - h(x_k)) + dM^{-1} (\bar{x} - x_k) \}$$

$$P_k = (dM^{-1} + H_k^T R^{-1} H_k)^{-1} = \frac{1}{d} M - K_k H_k M,$$

$$K_k = \frac{1}{d} M H_k^T \left( \frac{1}{d} H_k M H_k^T + R \right)^{-1}$$

ここで

- $x$  : 未知パラメータ
- $\bar{x}$  :  $x$  の平均値
- $z$  : 観測される変量
- $h(x)$  :  $z$  の最確値

表 2 解析地盤モデル

層No.	深度 (m)	層厚 (m)	土質	密度 (t/m <sup>3</sup> )	初期線形モデル		測点位置 (m)
					Vs (m/s)	h(%) / Q	
	GL-0		盛り土			2	VL-0
1	GL-5.0	5	砂・シルト	1.7	120	25	地下水位GL-2.0
2	GL-12.0	7	シルト	1.7	190	25	
3	GL-17.0	5	礫	2	310	25	
4	GL-22.0	5	粘土・砂	1.8	230	25	
5	GL-25.0	3	礫	2.2	375	50	GL-24.9

キーワード：鉛直アレー、同定解析、ベイズ法

連絡先：〒112 文京区春日 1-13-27 中央大学理工学部土木工学科土質研究室、TEL 03-3817-1799

ここで、 $H_k$ は  $h(x)$ の  $x$  についての微係数の  $x_k$  における値、 $R$ は観測値に対する共分散行列、 $M$ は未知パラメータ  $x$  の共分散である。

**4. 解析方法** 本研究では拡張ベイズ法を用いて、鉛直アレー観測記録から得られるスペクトル比と一次元重複反射理論による伝達関数とが適合するように地盤物性を同定する。同定する地盤物性はS波速度と減衰で、層厚、単位体積重量は既知とする。初期値には表2の値を用いる<sup>2)</sup>。また減衰の周波数依存性は考慮していない。スペクトル比を求めるにおいては、主要動を含む20秒間を抽出してフーリエスペクトルを求め、バンド幅0.3HzのParzen Windowにより平滑化をして2点間の割り算をして求めた。研究で用いたスペクトル比は、GL-0m/GL-24.9mのEW方向で表2の5つの地震の異なるスペクトル比の平均値を用いている。表2から分かるように比較的大きい加速度の余震記録も含んでおり、前報<sup>3)</sup>で報じたようにスペクトル比の値はばらつきが大きい、ピークの現れる周波数はよく一致している。理論値にも観測記録と同じ平滑化を行う。解析の対象振動数は、0.6Hz～10Hzとする。

**5. 解析結果** 図1に示したのが鉛直アレー記録から求めた実測のスペクトル比、初期値における一次元重複反射理論より求めた伝達関数、同定解析後の伝達関数との比較である。図2に示したのがS波速度の初期値と収束値および地震後に行った地盤調査による値で<sup>4)</sup>、図3に示したのがQ値の初期値と収束値である。図1より実測のスペクトル比と同定解析後の伝達関数が1次、2次ピークでよく一致している。図2よりS波速度は初期値よりも全体的に低い値で収束する傾向が見られ、特にGL-12mからGL-17mの層では25%ほど低く収束している。しかし、GL-5m付近からGL-20m付近まで地震後のVs検層結果とよく合う。図3より減衰  $h$  は1層目から4層目までは7%、5層目は2.6%とかなり大きな値となった。

**6. まとめ** S波速度については収束値がVs検層結果と調和的であり、本手法の妥当性を確認できたものと思われる。今後、他の鉛直アレー及び本震記録にも適用する予定である。

【謝辞】 今回用いた地震データを提供していただいた関西電力（株）建設部ならびに解析プログラムをご提供いただき、ご指導いただいた佐藤工業（株）の末富岩雄様に感謝の意を表します。【参考文献】 1) 佐藤忠信；逆解析の手法、講座「地盤工学における逆解析」、土と基礎、Vol.43, No5, pp.67～72, 1995年5月。2)

Sato, K., Kokusho, T., Matsumoto, M. and Yamada, E. "Nonlinear seismic response and soil property during 1995 Hyogoken Nanbu earthquake" Special Issue of Soils & Foundations, pp41-52, 1996 3) 國生剛治、青柳寮大、本間昌幸；兵庫県南部地震の鉛直アレー記録によるサイトの非線形増幅特性、土木学会第53回年次学術講演会講演概要集、1-B, pp/438-439, 1998. 4) 副田悦生ら；鉛直アレー強震記録の地震応答解析例、土木学会第51回年次学術講演会講演概要集、1-B, pp/356～357, 1996.

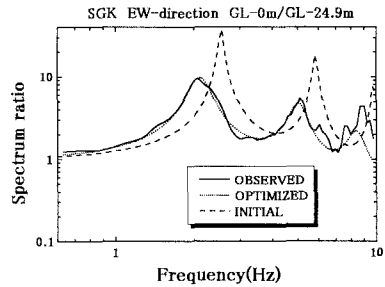


図1 スペクトル比と伝達関数の比較

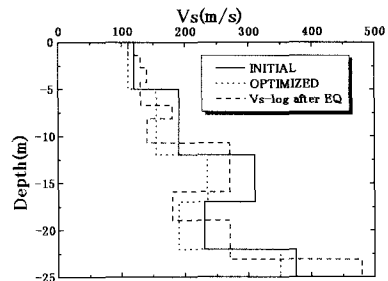


図2 S波速度の同定前後の比較

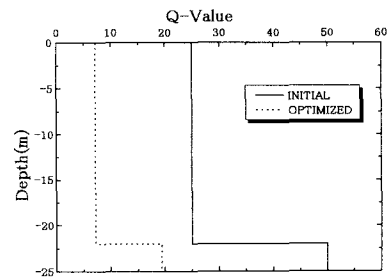


図3 Q値の同定前後の比較