

# (66) 鉛直アレー観測記録を利用した地震時地盤の同定

和歌山工業高等専門学校 辻原 治  
徳島大学工学部 沢田 勉

## 1. はじめに

近年、国内外で種々の目的により、地表及び地中に設置した地震計による地盤震動の同時観測が多く実施されるようになった。このようなアレー観測記録の利用法として、地震時地盤の動特性の同定が考えられる。地震時の実地盤の動特性については、現在でも不明な点が多いため、鉛直アレー観測記録を用いて実地盤を同定することは耐震工学上有用であると考えられる。

これまで、水平成層地盤の各層のS波速度及びQ値を周波数領域の解析によって推定する問題において、記録のスペクトルの平滑化が同定精度に大きな影響を及ぼすことを明らかにした。そして、モデル応答に対しても平滑化することを同定のアルゴリズムに組み込む方法を提案し、数値シミュレーションによりS波速度及びQ値の推定精度が向上することを示した[1]。

本研究では、この手法を地盤震動の鉛直アレー観測記録に適用し、実地盤の同定を行う。

## 2. 地盤同定問題の定式化

図-1に示すような水平成層構造をもつモデル地盤に、鉛直下方よりSH波が入射するという仮定のもとに、地表または地中で得られた鉛直アレー観測記録より、地盤各層のS波速度 $V_m$ とQ値 $Q_m$ を同定する問題を考える。なお、Q値は周波数によらず一定であると仮定している。

いま、地盤内の第 $p$ 層内の $p$ 点および第 $q$ 層内( $p < q$ )の $q$ 点で、地盤震動加速度の同時観測記録が得られているとする。これらの記録のフーリエスペクトルを $X_p(\omega)$ 、 $X_q(\omega)$ とする。SH波の重複反射を仮定すると、それらと地表面加速度の複素振幅 $X_0(\omega)$ の間にはつぎの関係がある[2]。

$$X_p(\omega) = R_{p,11}(\omega, \alpha) X_0(\omega) \quad (1)$$

$$X_q(\omega) = R_{q,11}(\omega, \alpha) X_0(\omega) \quad (2)$$

ここに、 $\omega$ は円振動数であり、 $\alpha$ は同定すべきパラメータ $V_m, Q_m$ を一般的に表したものである。また、 $R_{p,11}(\omega, \alpha)$ は地表面に対する加速度スペクトル振幅の低減率であり、つぎに示す $2 \times 2$ 行列の第1行第1列の係数である。

$$[R_p] = [S_p][S_{p-1}] \cdots [S_m] \cdots [S_1] \quad (3)$$

上式に含まれる $2 \times 2$ 行列 $[S_m]$ は第 $m$ 層の状態を表す行列で、各係数は次式で与えられる。

$$\begin{cases} S_{m,11} = \{ \exp(i a_m \omega) + \exp(-i a_m \omega) \} / 2 \\ S_{m,12} = \{ \exp(i a_m \omega) - \exp(-i a_m \omega) \} / 2 i b_m \omega \\ S_{m,21} = i b_m \omega \{ \exp(i a_m \omega) - \exp(-i a_m \omega) \} / 2 \\ S_{m,22} = S_{m,11} \end{cases} \quad (4)$$

ここで、 $i$ は虚数単位であり、係数 $a_m, b_m$ は次式のようになる。

$$\begin{cases} a_m = H_m / (V_m \sqrt{1 + i/Q_m}) \\ b_m = \rho_m V_m \sqrt{1 + i/Q_m} \end{cases} \quad (5)$$

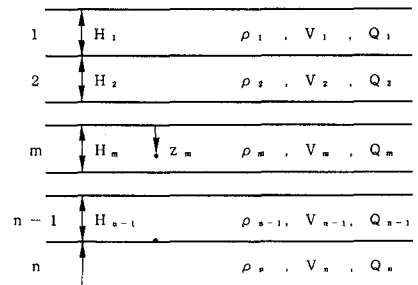


図-1 水平成層地盤モデル

式(2)の $R_{q,11}(\omega, \alpha)$ も同様にして得られる。

パラメータ $\alpha$ が正しい値の場合には、式(1)と(2)は厳密に成立するが、一般には $\alpha$ は未知であるので、それらは近似的にしか成り立たない。そこで、式(6)に示すように、 $p$ 点のフーリエスペクトルの残差平方和を評価関数とし、これを改良SLP法を用いて最小化することにより、 $\alpha$ の最適値を決定することとする。なお、

地盤各層の層厚  $H_m$  及び密度  $\rho_m$  は既知とする。

$$G = \sum_{j=1}^{N_\omega} \{X_p(\omega_j, \alpha) - X_p(\omega_j)\}^2 \quad (6)$$

式(6)において、 $\omega_j$ は対象とする振動数領域を分割したときの  $j$  番目の振動数点で、 $N_\omega$ はその振動数点の総数である。 $X_p(\omega_j, \alpha)$ は次式で表される。

$$X_p(\omega_j, \alpha) = \frac{R_{p,11}(\omega_j, \alpha)}{R_{q,11}(\omega_j, \alpha)} \cdot X_q(\omega_j) \quad (7)$$

ところで、観測記録には種々の原因でノイズが含まれており、その大小がパラメータの推定精度と深くかかわっている。したがって、精度の高い同定結果を得るためには、ノイズの影響を軽減する必要がある。周波数領域の解析では、一般に、スペクトルの平滑化がなされているが、そのような平滑化は、スペクトルに本来含まれている正しい情報までゆがめてしまう場合もあり、とくに減衰パラメータの推定に影響を及ぼすことになる。すなわち、平滑化のバンド幅を広げると減衰が大きく推定されるという結果になる。本研究では、記録のスペクトル  $X_p(\omega_j)$  のみならず理論値  $X_p(\omega_j, \alpha)$  も平滑化することを同定のアルゴリズムに組み込み、地盤の同定精度を改良する方法を導入している [1]。

### 3. アレー観測記録を用いた実地盤のS波速度とQ値の同定

最近、国内では、いくつかの研究機関で地震動のアレー観測が実施されており、得られた記録はデータベース化されている [3]。ここでは、文献 [3] の強震動アレー観測データベースに収録されている記録のうち、東京大学生産技術研究所千葉実験所構内で得られた鉛直アレー観測記録を使用し、当該地盤の同定を行った。表-1に今回用いた観測地震の諸元を示す。ここでは地震名をSE1～SE4としている。本研究では、SH波の重複反射を仮定しているので、これらの地震による水平動2成分から震央直角方向の震動を合成し、目視により、主要動部を余弦テーパデータウィンドウによって取り出して解析に用いた。地下5mでの最大加速度は、SE1～SE4でそれぞれ5.1gal, 33.8gal, 36.8gal, 39.6galである。同観測地区においては、各種の調査が実施されており、表層地盤は概略水平に近い層構造であることが報告されている [4]。図-2に、速度検層による地下20mまでのS波速度の推定値を示す。以下、同定結果について述べる。

同定に際しては、地下5mと20mに埋設されている地震計による観測記録を用い、地表から地下5mまでと地下5mから20mまでをそれぞれ1層とし、2層構造としてモデル化した。図-3にフーリエスペクトルを示す。図の(a)と(b)には、地下5mでのスペクトルの目標値(TARGET)、初期値(INITIAL; S波速度とQ値の初期値により計算した値)、収束値(ESTIMATED; S波速度とQ値の収束値により計算した値)を示す。また、図の(c)には地下20mでのスペクトルを示す。対象とした周波数領域は0.1Hz～10.0Hzで、 $N_\omega$ は100とした。地下5mでのスペクトルは、バンド幅0.40HzのParzenウィンドウにより平滑化されている。なお、S波速度の初期値は、速度検層による推定値140m/sec(第1層)、320m/sec(第2層)とし、Q値の初期値は10とした。図-4にはS波速度とQ値の収束状況を示す。どの記録を用いても、5回～10回程度の反復計算で、すべてのパラメータが一定値に収束している。このようにして同定されたS波速度とQ値を図-5に示す。図の縦軸は深さ(DEPTH)であり、横軸はS波速度(左;V)とQ値(右;Q)である。SE1～SE4による同定結果は線種により区別しているが、よく対応した推定値が得られている。S波速度については、比較のため、速度検層による推定値(WELL SHOOT)も示しているが、こ

表-1 地震の諸元 [4]

Event Name	JMA Magnitude	Focal Depth (km)	Epicentral Distance (km)
SE1	5.0	79	57
SE2	6.1	78	28
SE3	5.0	63	32
SE4	6.5	73	105

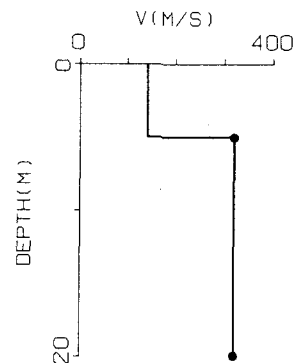
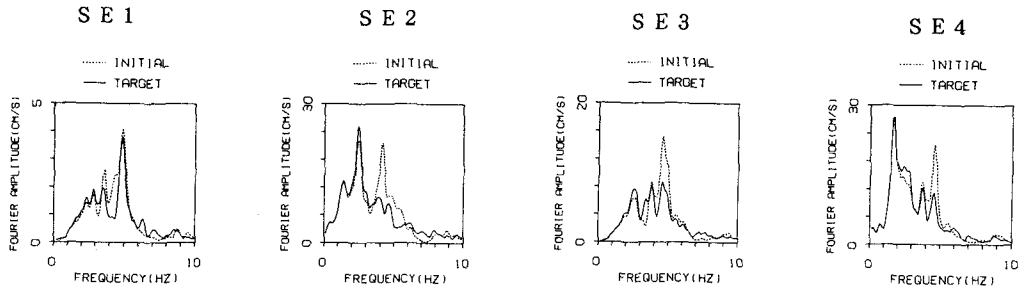
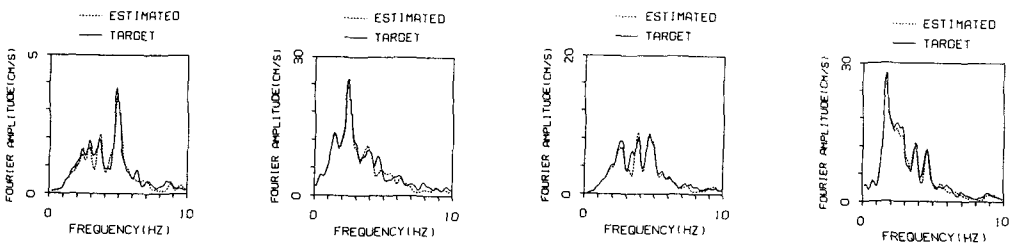


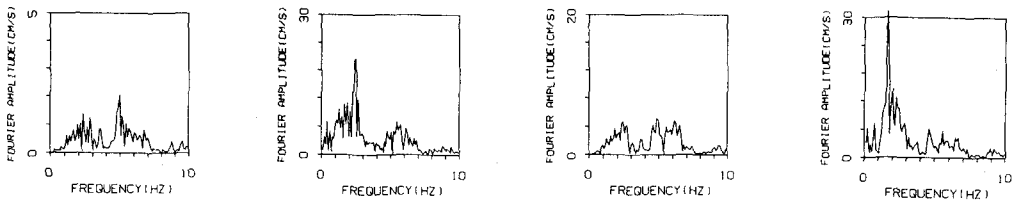
図-2 速度検層によるS波速度の推定値と地震計の位置(•) [4]



(a) G.L. -5mの加速度フーリエスペクトル (目標値と初期値)



(b) G.L. -5mの加速度フーリエスペクトル (目標値と収束値)



(c) G.L. -20mの加速度フーリエスペクトル

図-3 G.L. -5mとG.L. -20mの加速度フーリエスペクトル

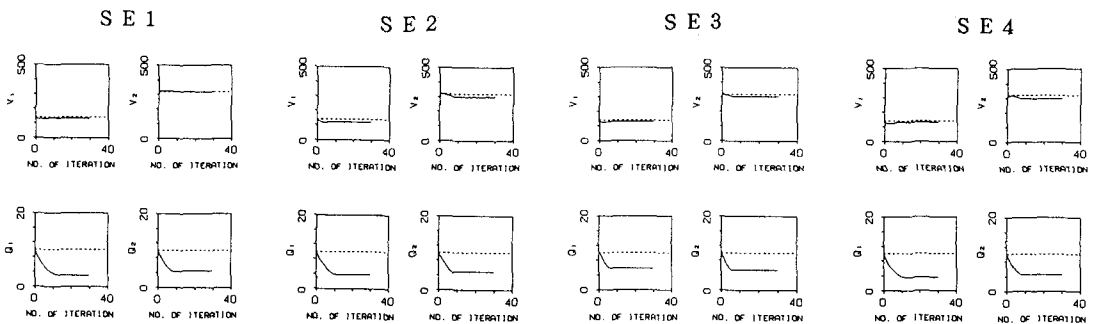


図-4 S波速度とQ値の収束状況

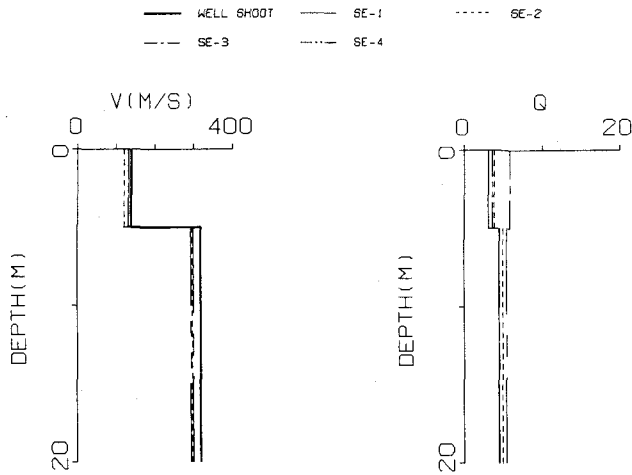


図-5 S波速度とQ値の収束値

れともよく対応している。SE1～SE4による地下5mでの震動は、最大加速度がせいぜい40galであり、それほど大きなものではないことから、地震時地盤のS波速度は速度検層による値と大差ないと考えられる。したがって、S波速度については妥当な結果が得られたと判断される。Q値については、あらかじめ試験等によって得られたデータがないので比較ができないが、S波速度の推定値と同様に、使用した地震記録による推定値のばらつきが小さく、かなり信頼できる結果が得られたのではないかと考えられる。

#### 4. 結論

本研究では、東京大学生産技術研究所千葉実験所構内の地盤において、地表から地下20mまでを2層からなる水平成層構造としてモデル化し、4つの異なる地震による地下5mと20mでの地盤震動の同時観測記録を用いて同定を行った。以下に得られた結果を要約する。

- 1) S波速度については、使用した地震記録によらず、速度検層とよく対応した値に収束しており、十分信頼できる同定結果が得られた。
- 2) Q値については、発散することもなく、すべてのケースにおいて収束解が得られた。また、使用した地震記録による収束値のばらつきが小さく、安定した結果が得られた。

本研究で使用した地盤震動記録は、東京大学生産技術研究所・片山研究室によって観測され、(財)震災予防協会の強震動アレー観測記録データベースに収録されていることを付記し、関係の方々に感謝の意を表す。

#### 参考文献

1. 辻原, 沢田他:地盤のS波速度とQ値の同定精度に及ぼすスペクトルの平滑化の影響, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.783-792, 1993年
2. 土岐:新体系土木工学 11 構造物の耐震解析, 技報堂出版, pp.82-90, 1982年
3. (財)震災予防協会:強震動アレー観測記録データベース・同解説資料集, 1992年
4. Katayama, T. and Yamazaki, F. et al., A Strong Motion Database for the Chiba Seismometer Array and its Engineering Analysis, E.E.S.D., Vol.19, pp.1089-1106, 1990