

I-194

地盤のS波速度とQ値の部分同定に関する2, 3の考察

徳島大学大学院 学生員○岡本 康 徳島大学工学部 正 員 沢田 勉
 徳島大学工学部 正 員 平尾 潔 和歌山高専 正 員 辻原 治

1. まえがき 近年、地震波を地表及び地中で同時観測する鉛直アレー観測が行われるようになり、これらの記録を用いて、地震時における地盤の動特性を同定しようとする研究が行われている。これまで筆者らも、観測記録から得られる伝達関数とモデルの自乗和誤差を最小にするという評価基準を用いて、地盤のS波速度とQ値を推定した¹⁾。この手法では、地中最も深く設置された地震計より地表までの地盤各層のパラメータを一度に推定する。そのため、地盤モデルの層数が増えればそれだけ演算時間も増え、さらに解の精度も低下すると考えられ、従来の手法では同定不能な場合も生じてくる。しかし、地震時の地盤では、ある特定の層の動特性のみ重要となる場合がある。本報告では、地中の3点で同時観測記録が得られているとし、これらの記録が得られた最上点と最下点の間の各層のS波速度とQ値を部分的に同定する、いわゆる部分同定法を開発しその妥当性を検討した。また、観測記録に含まれるノイズの影響を低減するため、スペクトルの平滑化を考慮した同定手法²⁾を解析に取り入れ解の推定精度を検討した。

2. 地盤同定問題の定式化及び最適化手法 図-1に示す水平成層地盤において鉛直下方よりSH波が入射すると仮定し、地中3点で得られた鉛直アレー観測記録より、記録が得られた最上点と最下点の間の各層のS波速度VとQ値Qを部分的に同定する問題を考える。層厚及び密度は、標準貫入試験等により比較的精度よく推定されるため既知とする。いま、第p層上面(p点)、第q層下面(q点)、及び第r層下面(r点)において同時観測記録が得られているとする。これらの複素フーリエスペクトルを $F_p(f)$, $F_q(f)$, 及び $F_r(f)$ とすると、次の関係が得られる。

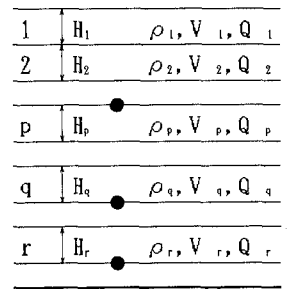


図-1 地盤モデル

$$F_p(f;a) = \frac{r_{12}(f;a)F_q(f) - q_{12}(f;a)F_r(f)}{r_{12}(f;a)q_{11}(f;a) - r_{11}(f;a)q_{12}(f;a)} \quad (1)$$

ここで、 f は振動数、 a は同定すべきパラメータ V , Q を一般的に表したものであり、 $F_p(f;a)$ は p 点の複素フーリエスペクトルを重複反射理論を用いて $F_q(f)$, $F_r(f)$ により表したものである。また、 q_{11} , q_{12} は以下に示す 2×2 行列 $[R_q]$ の $(1,1)$, $(1,2)$ 成分であり、 r_{11} , r_{12} も同様に、 2×2 行列 $[R_r]$ の $(1,1)$, $(1,2)$ 成分である。

$$[R_q] = [S_q][S_{q-1}][S_{q-2}] \cdots [S_{p+1}][S_p], \quad [R_r] = [S_r][S_{r-1}][S_{r-2}] \cdots [S_{p+1}][S_p] \quad (2)$$

上式に含まれる 2×2 行列 $[S_p]$, $[S_q]$, 及び $[S_r]$ は、第 p 層、第 q 層、及び第 r 層の状態を表す行列³⁾である。同定する地盤各層のS波速度 V 及びQ値 Q が真値の場合、式(1)の $F_p(f;a)$ と観測記録より得られる $F_p(f)$ は一致するが、一般に a は未知である。そのため、これらのスペクトル振幅の残差平方和を評価関数として次のような最小化問題が考えられる。

$$Se = \sum_{i=1}^{Nf} \{ |F_p(f_i;a)| - |F_p(f_i)| \}^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

ここで、 Nf は離散振動点数の数、 f_i は i 番目の周波数点である。また、同定に用いる観測記録には、種々の原因によりノイズが含まれていると考えられる。このノイズの影響を低減するために、記録のスペクトル振幅 $|F_p(f_i)|$ 、及び理論より求まるスペクトル振幅 $|F_p(f_i;a)|$ を同様に平滑化して同定を行う。なお、式(3)の評価関数を最小にする a を決定するために、改良SLP法(改良反復線形計画法)⁴⁾を用いた。

3. 数値計算および考察 以上の手法を用いて、特定の層のS波速度とQ値を部分同定することの妥当性、及びその同定過程に平滑化を考慮した手法を導入し、観測記録がノイズを含む場合の解の改善性について

て検討する。そのため、同定には実地震記録は用いず、計算機シミュレーションによる数値計算を行った。解析に用いた地盤モデルの諸元を表-1に示す。図-2は、この地盤モデルのS波速度とQ値の深さ方向の分布を示したものであり、このモデルの第4層及び第5層のみ同定する。部分同定法では、観測記録が最低3点必要であるため、地盤モデルの第4層及び第5層を同定するに

は、モデルの第4層上面、第4層下面、及び第5層下面（基盤面）で観測記録が得られている必要がある。そのため、これらの点を各観測点（図-2の○点）とし、モデルの基盤加速度波に最大加速度を100galに基準化したEl Centro 地震波（SE成分）を用いて、各観測点での応答加速度波を求めた。図-3は標本点間隔を0.02秒、継続時間を40.96秒としてシミュレートした各観測記録である。そして、これらの加速度波に対し、r.m.s.強度で5%の有帯域ホワイトノイズを加えたものをノイズ5%の観測記録とした。同定の際の初期値は、表-1に示したS波速度とQ値の1.5倍とし、改良SLP法による繰り返し回数は100回とした。まず、手法の妥当性を検討するために、図-3に示すノイズを含まない観測記録を用いて、式(3)の評価関数のスペクトルを平滑化せず

に同定を行った。この場合の同定結果を図-4に示す。図中の細線、中線、及び太線は、それぞれ初期値、収束値、及び真値に対応している。この図より、S波速度とQ値の収束値は、ほぼ完全に真値に収束することがわかる。これより、部分同定手法で地盤のS波速度とQ値を同定しても妥当な同定結果が得られると考えられる。次に、ノイズを含む観測記録を用いて、式(3)の評価関数のスペクトルを平滑化して同定する場合の推定精度を検討した。なお、平滑化にはParzenウィンドウを用いた。表-2は、ノイズ5%を含む観測記録を用いて、平滑化バンド幅を変化させた場合の推定誤差を%で示したものである。この表より、平滑化しない場合（バンド幅0.0Hz）のQ値の推定誤差は、最大で36.5%となるが、平滑化を行う場合、どのバンド幅でもQの推定誤差は減少している。特にバンド幅0.3Hzの場合、最大で4.3%の誤差となっている。また、S波速度については、どの場合でも1%以下の誤差内で同定された。このように、観測記録にノイズが含まれる場合、記録と理論値のスペクトルを同様に平滑化すると、Q値の推定精度が改善されることがわかる。

4. 終わりに ある特定の層のS波速度とQ値を同定することを目的とした部分同定法を開発してその妥当性を検討し、あわせてその手法にスペクトルの平滑化を導入した場合の同定精度も検討した。その結果、この手法による同定が可能であること、及び記録と理論値のスペクトルを同様に平滑化することで、ノイズの影響が低減できることがわかった。

参考文献

- 1) 辻原・沢田他：構造工学論文集，Vol. 36A，pp. 747-756，1990，
- 2) 辻原・沢田他：構造工学論文集，Vol. 39A，pp. 783-792，1993，
- 3) 土岐：構造物の耐震解析，技報堂，1981，4) 沢田・辻原他：土木学会論文集，No. 446/I-19，pp. 205-213，1992

表-1 地盤モデルの諸元

層番号	層厚 (m)	密度 (t/m ³)	S波速度 (m/s)	Q値
1	10	1.8	150	10
2	10	1.8	200	10
3	10	1.8	250	10
4	10	1.8	300	10
5	10	1.8	350	10

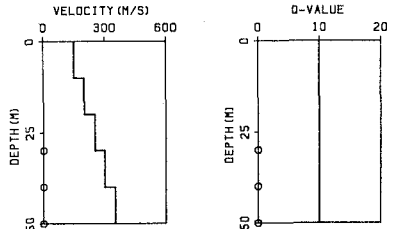


図-2 S波速度とQ値の深さ方向の分布

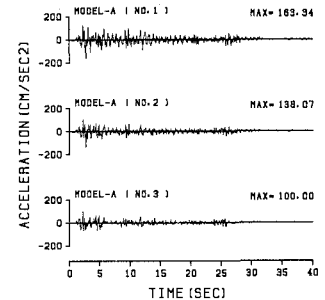


図-3 観測記録（ノイズ0%）

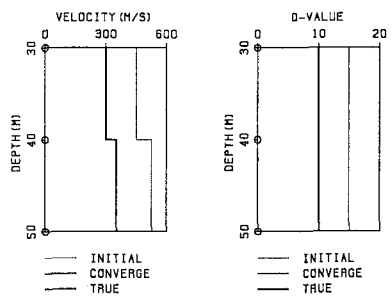


図-4 同定結果（ノイズ0%）

表-2 推定誤差（ノイズ5%）

バンド幅 (Hz)	S波速度の誤差 (%)		Q値の誤差 (%)	
	V ₄	V ₅	Q ₄	Q ₅
0.0	+ 0.7	- 0.7	+ 36.5	- 35.2
0.1	+ 0.1	- 0.5	+ 18.0	- 10.7
0.2	+ 0.1	- 0.3	+ 9.5	+ 0.5
0.3	+ 0.1	- 0.2	+ 4.2	+ 4.3
0.4	+ 0.1	- 0.1	- 2.3	+ 10.2
0.5	+ 0.0	- 0.0	- 6.5	+ 14.8