

鉛直アレー観測記録による地盤の S波速度とQ値の部分同定

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 鴻 池 組 山本敬祐

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ると、地震時における地盤の動特性値（S波速度とQ値）が推定でき、耐震工学上有益な情報が得られる。これまで筆者らは、水平成層地盤において基盤及び地中のいくつかの点で鉛直アレー観測記録が得られているという仮定のもとに、地盤各層の動特性値を周波数領域で定式化して同定を行った¹⁾。この手法によれば、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ことになる。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可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。本研究では、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。

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。

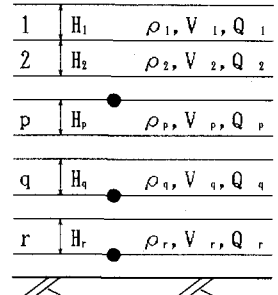


図-1 地盤モデル

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

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²⁾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。

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

ここで、 N_f は離散振動数点の数、 f_i は i 番目の周波数点である。なお、式(3)の評価関数を最小にする a をを決定するために、改良SLP法（改良反復線形計画法）³⁾を用いた。

3. 数値計算および考察 以上の方法を用いて、特定の層のS波速度とQ値を同定することの妥当性に

ついて検討する。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層厚、密度、S波速度、及びQ値を表-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層のみ同定を行った。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解析に用いた。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。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。また、同定に用いる式(3)の評価関数は、帯域幅0.1~10Hzの振動数領域を100等分した振動数点でのスペクトルを対象とした。このような条件により、第4層及び第5層を部分同定した結果を図-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、ほぼ完全に真値に一致収束することがわかる。また、図-5は、各パラメータの収束状況を示したもので、図の横軸は繰り返し回数、縦軸はS波速度、あるいはQ値を示している。この図より、各パラメータは約30回程の繰り返し回数で真値に収束することがわかる。以上の結果より、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。

4. 終わりに 水平成層地盤において、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手法を開発し、その妥当性を検討した。その結果、地中の3点で鉛直アレー観測記録が得られている場合、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、周波数領域で定式化した評価基準と最適化手法を用いて同定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) 土岐：構造物の耐震解析, pp. 80-90, 技報堂, 1981
- 3) 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

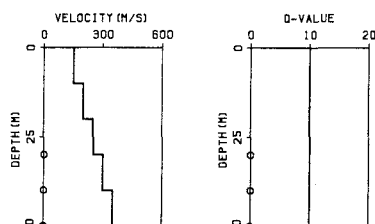


図-2 S波速度とQ値の深さ方向分布

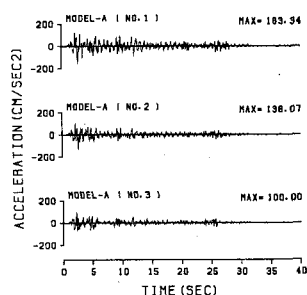


図-3 観測記録

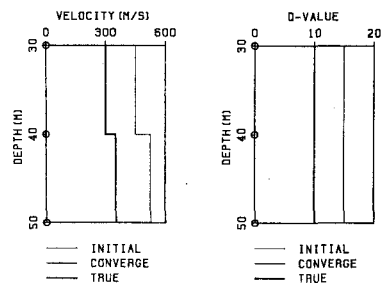


図-4 同定結果（第4層、第5層）

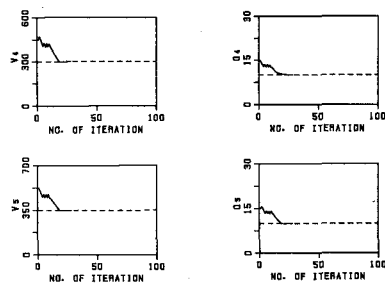


図-5 収束状況（S波速度、Q値）