

観測記録に含まれるノイズが地盤同定精度に及ぼす影響について

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

1. まえがき 近年、国内外で地震波を地表、地中で同時観測する鉛直アレー観測が行われ、それより得られた記録はデータベース化されつつある。このような鉛直アレー観測記録を利用すると、地震時における実地盤の動特性値（S波速度とQ値）を推定でき、耐震工学上有用な情報が得られる。一般に、観測された地震記録には、地震計の器械的な短所や記録する場所の環境により、ノイズが含まれている可能性が高い。そのため、上記の鉛直アレー観測記録を用いて地盤の動特性値を同定する場合、記録に含まれるノイズが同定精度に影響を及ぼすと考えられる。本研究では、重複反射理論を用いて周波数領域で定式化した地盤同定問題の解の精度に、観測記録に含まれるノイズがどのような影響を及ぼすかを数値計算により検討する。同定問題の解析には、改良反復線形計画法（MSLP法）¹⁾を用いた。

2. 地盤同定問題の定式化及び最適化手法 図-1に示すような水平成層構造をもつ地盤に、鉛直下方よりSH波が入射するという仮定のもとに、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。層厚および密度は、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、地盤内の第 m 層上面より Z_m なる点および第 n 層の上面で、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 $F_m(f)$ 、 $F_n(f)$ とすると、これらは地表面の記録のフーリエスペクトル $F_1(f)$ と次の関係にある。

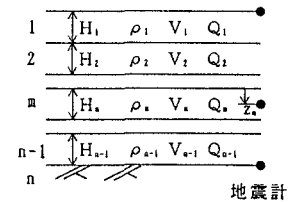


図-1 地盤モデル

$$F_m(f) = \gamma_m(f; \alpha) F_1(f), \quad F_n(f) = \gamma_n(f; \alpha) F_1(f) \quad (1)$$

ここで、 f は振動数、 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$ 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、 γ_m および γ_n は地表に対する第 m 層上面より Z_m なる点および第 n 層上面の複素低減率である〔文献(2)〕。地盤各層のS波速度 V_m およびQ値 Q_m が適切な値であれば、式(1)は厳密に成立するが、 V_m 、 Q_m を同定する過程においては、 V_m 、 Q_m は正解値ではないので、式(1)は近似的にしか成立しない。地盤各層のS波速度 V_m およびQ値 Q_m を同定するための評価基準として、次のような最小化問題が考えられる。

$$Se = \sum_{i=1}^{Nf} |F_m(f_i) / \gamma_m(f_i) - F_n(f_i) / \gamma_n(f_i)|^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

$$Se = \sum_{i=1}^{Nf} \{ |F_m(f_i) / \gamma_m(f_i)| - |F_n(f_i) / \gamma_n(f_i)| \}^2 \rightarrow \min \quad (3)$$

ここで、 Nf は離散振動数点の数、 f_i は i 番目の離散振動数である。これらの評価関数のうち、式(2)は複素フーリエスペクトルの一致を基準とし、式(3)はスペクトル振幅の一致を考えた場合である。

式(2) または 式(3) の評価関数を最小にする α_k 、 $k=1, 2, \dots, N$ を決定するため、MSLP法（改良反復線形計画法）を適用する。MSLP法では、繰返し計算の第 r 段階における評価関数 Se を、2次の項まで含む次式で近似する。

$$Se \approx Se_r + \sum_{k=1}^N [\partial Se / \partial \alpha_k] \Delta \alpha_{kr} + 1/2 \sum_{k=1}^N \sum_{i=1}^N [\partial^2 Se / \partial \alpha_k \partial \alpha_i] \Delta \alpha_{kr} \Delta \alpha_{ir} \rightarrow \min \quad (4)$$

上式を、従来のSLP法を用いて解くことにより、同定すべきパラメータ α_k の増分 $\Delta \alpha_k$ を求める。この過程をくり返し、順次解を改良することにより収束解が求められる。

3. 数値計算および考察 以上の方法を用いて、観測記録に含まれるノイズが地盤のS波速度およびQ値の同定精度に及ぼす影響について検討する。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

ンにより観測記録を作成し解析に用いた。図-3の太線は、この地盤モデルのS波速度およびQ値の深さ方向の分布を示す。この地盤モデルの基盤加速度波に、最大加速度を 100cm/sec^2 に基準化したエル・セントロ (El Centro) 地震波 (SE成分) を用いて、地中または地表の応答加速度を求めた。そして、これらの加速度に加えるノイズとして、 $0.1 \sim 20\text{ Hz}$ の有帯ホワイトノイズを作成した。そして、有帯ホワイトノイズのRMS値 (自乗平均値; Root Means Square) が、各加速度のRMS値に対して0%, 5%となる有帯ホワイトノイズを作成し、各観測記録に加えた。図-2に、観測記録の一例 (図-3の○点の観測記録) を示す。まずノイズを含まない観測記録を用いて、地盤のS波速度とQ値を同定した。同定の際の初期値

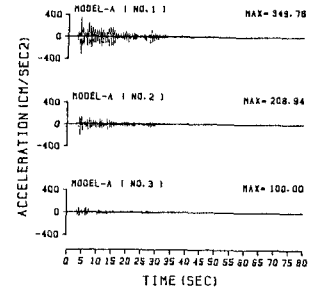


図-2 観測記録の一例

は真値 (図-3の太線) の1.2倍とし、MSLP法による反復回数は100とした。図-3は、評価関数を式(3)とした場合の同定結果を示したものである。図中の細線、中線、および太線は、それぞれ初期値、収束値、および真値に対応する。この図より、記録にノイズが含まれていない場合には、収束値と真値がほぼ完全に一致することがわかる。次に、観測記録に含まれるノイズが同定精度におよぼす影響を調べるため、5%のノイズを含む観測記録を用いて同定する。解析における同定手法および初期値は、ノイズを含まない場合と同様である。図-4は、5%のノイズを含む観測記録を用いて同定した結果である。図中の細線、中線、および太線は、それぞれ初期値、収束値、および真値に対応する。S波速度の同定精度に及ぼすノイズの影響は比較的少ないようであるが、Q値の同定精度は低下する。図-5は、重複反射理論より求まる周波数応答倍率 (N_0 , $1/N_0$, 2 および N_0 , $2/N_0$, 3) の真値および収束値と、観測記録から得られる周波数応答倍率を示したものである。この図において、真値を太線、収束値を中線、観測値を細線で表している。これらの図によると、観測記録の周波数応答倍率の高振動成分がノイズのため増加している。この高振動成分の増加により、Q値の同定精度が低下したものと考えられる。

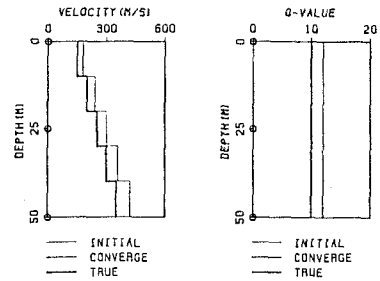


図-3 同定結果 (ノイズ0%)

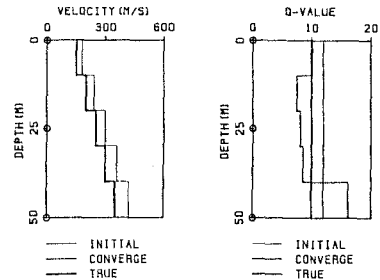


図-4 同定結果 (ノイズ5%)

4. 終わりに 鉛直アレー観測記録が得られたという仮定のもとに、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、地震時の地盤定数を同定し、観測記録に含まれるノイズが同定精度に及ぼす影響を調べた。その結果、観測記録にノイズが含まれる場合には、S波速度の同定精度への影響は比較的少ないが、Q値の同定精度が低下することがわかった。

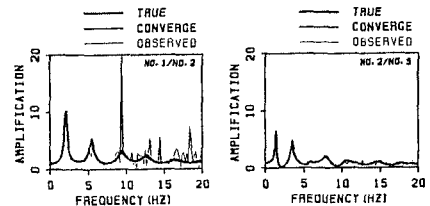


図-5 周波数応答倍率

参考文献 (1) 沢田他: 土木学会第46回年次学術講演会講演概要集, I-634, pp. 1306-1307, 1991. (2) 土岐: 構造物の耐震解析, 1981.