

地盤震動特性値の同定に関する一考察

和歌山工業高等専門学校 正員 ○ 辻原 治
徳島大学工学部 正員 沢田 勉

1. まえがき 近年、国内外で、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り、これらの記録を用いて地盤の動特性を同定しようとする研究が盛んに行われるようになった。筆者らも、鉛直アレー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関数を用いて、地盤のS波速度とQ値を推定した¹⁾。この手法では、観測記録より伝達関数を求める際に、通常スペクトルの平滑化がなされる。ところが、伝達関数において本来鋭いピークであるべきものが、平滑化を行うことで、そのピークレベルが低下してしまい、Q値の正しい評価のさまたげになる場合がある。本報告では、記録のスペクトルの平滑化とQ値の推定精度について考察し、また、記録のスペクトルとモデルの伝達関数とともに平滑化する方法により、Q値の推定精度向上の可能性を検討する。

2. 同定問題の定式化 図-1に示す水平成層地盤において、鉛直下方からSH波が入射することを仮定し、地表または地中で得られた鉛直アレー観測記録より、地盤各層の層厚 H_m および密度 ρ_m を既知として、S波速度 V_m とQ値 Q_m を同定する問題を考える。いま、地盤内の第m層および第n層上面で地盤震動の同時観測記録が得られているものとする。これらの記録より、周波数伝達関数 $H(f)$ が式(1)で推定される。

$$H(f) = S_{mn}(f) / S_{nn}(f) \quad (1)$$

ここに、 f は振動数であり、 $S_{mn}(f)$ 、 $S_{nn}(f)$ はそれぞれ、2点間のクロススペクトルと第n層上面での記録のパワースペクトルである。他方、SH波の一次元重複反射理論より、モデル地盤における2点間の周波数伝達関数 $H(f; \alpha)$ は地盤特性値の関数として表すことができる。ここに、 α は同定すべきパラメータを一般的に表したもので、各層の層厚および密度を既知とすれば、それらは V_i 、 Q_i 、 $i=1, 2, \dots, n-1$ である。 α が真値の場合には $H(f)$ と $H(f; \alpha)$ は一致するが、一般には α は未知である。そこで、これらの周波数伝達関数の残差平方和を評価関数として、これを最小にすることにより、最適なパラメータの値を得ることが考えられる。式で表せば、次式となる。

$$G(\alpha) = \sum_{j=1}^{Nf} \{H(f_j; \alpha) - H(f_j)\}^2 \quad (2)$$

ここに、 Nf は離散周波数点の数、 f_j はj番目の周波数点である。

ところで、式(1)の周波数伝達関数を求める際、 $S_{mn}(f)$ および $S_{nn}(f)$ に対して通常平滑化が行われる。それらより求めた $H(f)$ を同定の際の評価関数に用いる場合には、理論値 $H(f_j; \alpha)$ にも同じように平滑化の効果が考慮されていなければ、あやまった同定結果を導くおそれがある。以下の数値計算では、式(2)の評価関数において、周波数伝達関数の理論値 $H(f_j; \alpha)$ を平滑化する場合と、従来どおり理論値をそのまま用いる場合で、同定結果を比較してみた。なお、式(2)の最小化には筆者らが開発した改良SLP法²⁾を用いた。

3. 数値計算および考察 解析には実際の観測記録は用いず、計算機シミュレーションによる数値計算を行った。まず、図-2に示す基盤上の1層成層地盤を対象として解析を行った。 V_{10} と Q_{10} はそれぞれ V_1 と Q_1 の真値であることを表す。この地盤モデルの基盤加速度波は、0.1~10Hzの有帯域ホワイトノイズ($\Delta t=0.01\text{sec}$, $T=20.48\text{sec}$)として、地表での応答加速度を求めた。図-3にシミュレートした基盤および地表での加速度波を示す。これらの加速度波に、最大

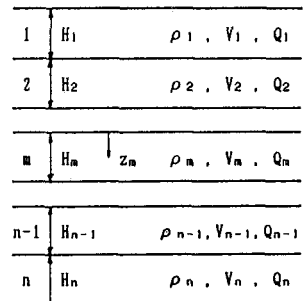


図-1 水平成層地盤モデル

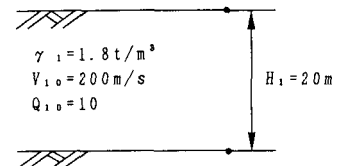


図-2 基盤上の1層地盤モデル

振幅の5%および10%の振幅をもつ同じ帯域幅のホワイトノイズを付加し、観測記録として用いた。同定に際しては、S波速度およびQ値の初期値として、ともに真値の1.2倍の値を与えた。図-4に、平滑化のバンド幅を種々変えたときのQ値の推定誤差を、真値に対するパーセントで示す。図の(a)には、周波数伝達関数の理論値は平滑化せず、記録のスペクトルのみ平滑化した場合(方法①とする)の同定結果を示す。(b)には、周波数伝達関数の理論値と記録のスペクトルを同じバンド幅で平滑化した場合(方法②とする)の同定結果を示す。図の横軸は平滑化のバンド幅で、縦軸はQ値の推定誤差(%)である。なお、平滑化にはParzenウィンドウを用いた。方法①では、Q値の推定誤差が平滑化のバンド幅によってかなり異なっている。一方、方法②では、平滑化のバンド幅の影響をあまり受けず、安定した推定値が得られている。方法②では、いずれのケースにおいてもQ値の推定誤差は正值であるが、これは、ランダムなノイズを含む観測値とノイズを含まない理論値を同じバンド幅で平滑化した場合に、理論値を過小評価することになるためだと考えられる。したがって、記録のスペクトルを平滑化して同定に用いる場合、理論値に対しては若干狭いバンド幅で平滑化することにより、より高精度の同定結果が得られる可能性がある。なお、S波速度については、すべてのケースにおいて、1%以下の誤差内で同定された。つぎに、図-5に示すような基盤上の3層からなる成層地盤に対し、方法②を適用した。表-1に、真値で正規化したS波速度とQ値の推定値を示す。記録にも理論値にも平滑化を行わなければ、ノイズ5%、10%の場合において、Q値の推定値はそれぞれ最大17%、28%の誤差を含んでいる。

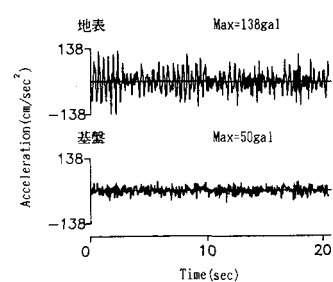


図-3 加速度波形

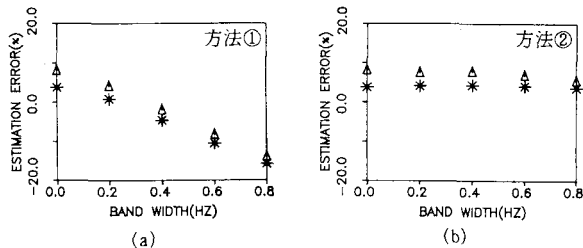


図-4 Q値の推定誤差(ノイズ5%*, 10%△)

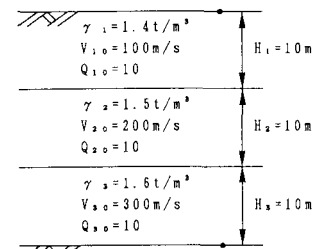


図-5 基盤上の3層地盤モデル

表-1 S波速度とQ値の同定結果(方法②による)

ノイズ	層番 i	平滑化しない		ノット幅0.2Hz		ノット幅0.3Hz		ノット幅0.4Hz		ノット幅0.5Hz	
		V_i/V_{i0}	Q_i/Q_{i0}	V_i/V_{i0}	Q_i/Q_{i0}	V_i/V_{i0}	Q_i/Q_{i0}	V_i/V_{i0}	Q_i/Q_{i0}	V_i/V_{i0}	Q_i/Q_{i0}
5%	1	0.997	1.086	1.003	1.010	1.002	0.998	1.003	0.996	1.000	1.009
	2	1.000	0.991	0.998	1.043	0.999	1.073	1.001	1.088	1.002	1.068
	3	1.002	0.825	0.993	0.971	0.992	0.979	0.992	0.979	0.995	0.962
10%	1	0.994	1.172	1.006	1.010	1.006	0.988	1.005	0.984	1.003	1.014
	2	1.002	1.012	0.994	1.085	0.998	1.146	1.001	1.164	1.002	1.122
	3	1.006	0.721	0.984	0.940	0.983	0.952	0.983	0.949	0.985	0.915

これとくらべて、平滑化を行った場合にはQ値の推定誤差は小さくなっている。とくに、バンド幅0.2Hzのときには、Q値の推定誤差は、最大で4%(ノイズ5%の場合)、9%(ノイズ10%の場合)と、記録

に含まれるノイズのパーセンテージより小さい誤差内で推定されている。また、平滑化のバンド幅が異なっても、Q値の推定誤差は各ノイズレベルに対して、それぞれ最大で9%、16%である。このように、方法②を用いれば、記録を平滑化せずに同定に用いる場合よりも、精度の高いQ値の推定値が得られることがわかる。

4. あとがき

記録の平滑化の効果を考慮した同定手法を用いて、記録に含まれるノイズとQ値の同定精度の関係について検討した。その結果、観測記録を同定に用いる場合、記録のスペクトルと周波数伝達関数の理論値を同じバンド幅で平滑化することにより、より信頼性のあるQ値の同定結果が得られることがわかった。

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:第2回システム最適化に関するシンポジウム講演論文集, pp. 105-110, 1991