

地盤同定問題における評価関数についての考察

和歌山工業高等専門学校 正会員 辻原 治
 徳島大学工学部 正会員 澤田 勉

1. 目的

地盤震動の鉛直アレー観測記録を利用した地震時地盤の動特性の同定が数多く行われている。それらの多くは、鉛直アレー観測記録のスペクトル比の絶対値をターゲットとし、地盤モデルの周波数伝達関数の絶対値との残差平方和を評価関数としてモデルパラメータを同定する方法をとっている。しかし、鉛直アレー観測記録のスペクトル比を求める際、一般にそれぞれのスペクトルの平滑化が行われる関係で、減衰パラメータの評価が正しくできないとの指摘がある。スペクトルの平滑化に整合する方法も提案されている¹⁾一方で、地盤同定問題を時間領域で解析することによって、この問題に対処する研究²⁾も行われている。

地盤同定問題では、水平成層地盤モデルにおけるS波の一次元重複反射を仮定することが一般的であり、応答計算は周波数領域で処理される。この仮定に基づく限り、同定の際に地盤震動の時刻歴をターゲットとしても、すべての解析が時間領域で行えるわけではなく、地震計設置点における周波数応答を計算した後、これをフーリエ逆変換によって波形にして用いることになる。また、勾配法等を用いて同定問題を解く場合に必要な評価関数の偏微分係数についても、周波数領域で求めたものを同様にフーリエ逆変換する必要があり、従来の周波数領域による同定解析に比べて煩雑となる。また、繰り返し計算を行うことを考えた場合、計算量の増大も無視できない。

周波数領域による地盤同定の解析法には、手順が単純で計算量も節約できるメリットがあり、捨て難いところもある。はたして周波数領域の解析では、精度の良い結果は得られないのだろうか。

このような背景から、本研究では、従来用いられてきた鉛直アレー観測記録のスペクトル比の絶対値をターゲットとする評価関数と、時刻歴をターゲットとする評価関数を用いて、モデルパラメータの推定精度の比較を行う。さらに周波数領域の解析による新たな評価関数を提案する。

2. 鉛直アレー観測記録を利用した地盤同定問題と評価関数

鉛直アレー観測記録 $y_1(t)$, $y_2(t)$ が得られているものとする。 $y_2(t)$ より計算したフーリエスペクトル $Y_2(\omega)$ を地盤モデルへの入力とし、S波の重複反射を仮定して地盤の周波数伝達関数 $\tilde{U}(\omega)$ をこれに乗じると、地震計設置点におけるモデルの周波数応答 $\tilde{Y}_1(\omega)$ が得られる。また、これを式(1)に表すようにフーリエ逆変換することで応答の波形 $\tilde{y}_1(t)$ を求めることができる。

$$\tilde{y}_1(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{Y}_1(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad (1)$$

ここに、 $\tilde{Y}_1(\omega) = \tilde{U}(\omega) Y_2(\omega)$

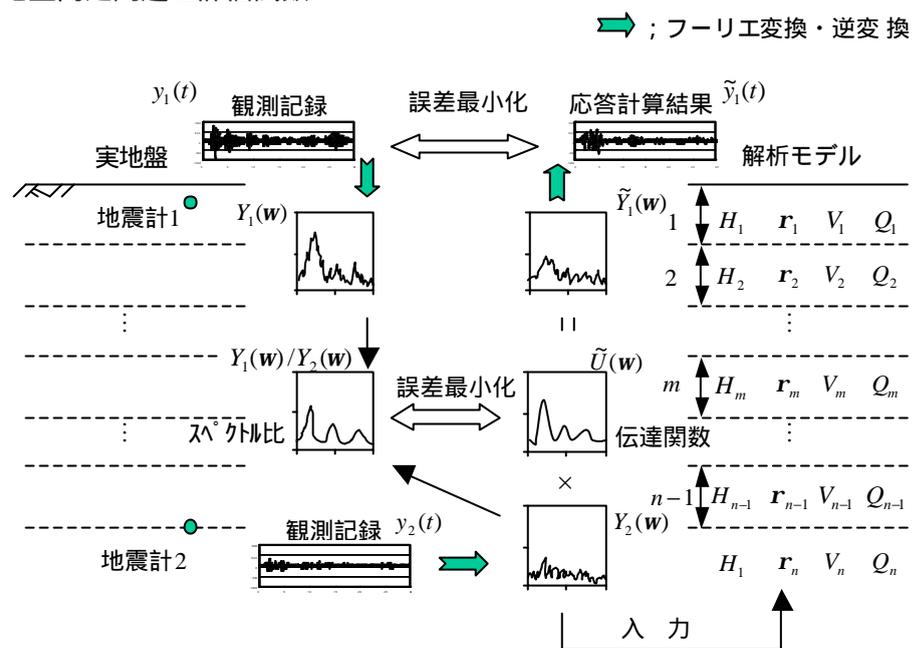


図-1 鉛直アレー観測記録を利用した地盤同定問題の概念図

キーワード 鉛直アレー，地盤，同定

連絡先 〒644-0023 和歌山県御坊市名田町野島 77 和歌山工業高等専門学校 TEL 0738-29-8455

周波数伝達関数 $\tilde{U}(\omega)$ は地盤モデルのパラメータの関数として表される。パラメータのうち、剛性（S 波速度；V）と減衰（Q 値；Q）を未知数とすることが多い。これらの未知数を同定するために、地盤震動記録のスペクトル比の絶対値をターゲットとする評価関数（評価関数 1）や、地表に近い側の観測波形をターゲットとする評価関数（評価関数 2）が用いられる。これらと比較すると、用いる情報量において評価関数 2 の方が有利と考えられる。評価関数 1 では、位相の情報を用いていないため情報量は半分になる。このことは、平滑化の有無にかかわらず言えることである。

$$\text{評価関数 1: } S_1 = \sum_{i=1}^{n/2+1} \left\{ |U(\omega_i)| - |Y_1(\omega_i)/Y_2(\omega_i)| \right\}^2 \quad \text{評価関数 2: } S_2 = \sum_{i=1}^n \left\{ \tilde{y}_1(t) - y_1(t) \right\}^2$$

評価関数 1 の場合、平滑化の関係で位相の情報を用いづらい面がある。そこで、次に示す第 3 の評価関数が考えられる。

$$\text{評価関数 3: } S_3 = \sum_{i=1}^{n/2+1} \left\{ \text{Re}[\tilde{Y}_1(\omega_i)] - \text{Re}[Y_1(\omega_i)] \right\}^2 + \sum_{i=1}^{n/2+1} \left\{ \text{Im}[\tilde{Y}_1(\omega_i)] - \text{Im}[Y_1(\omega_i)] \right\}^2$$

ここに $\text{Re}[\cdot]$ と $\text{Im}[\cdot]$ はそれぞれ $[\cdot]$ 内の実数部と虚数部を表す。この評価関数を用いると、スペクトルを平滑化することもなく、また、同定に用いる情報量も評価関数 2 と同等であることから、評価関数 2 を用いた場合と同程度の精度が期待できる。

3. モンテカルロシミュレーション

図-2 に示す地盤モデルを対象として数値計算を行った。G.L.および G.L.-20m の模擬観測記録を次のように作成した。G.L.-20m は 0.1~25Hz の有帯域ホワイトノイズとしてシミュレートし、地盤モデルの G.L.における応答を計算した。そのようにして得られた波形に対して、rms パワーでそれぞれ 10 パーセントのホワイトノイズを付加し、合計 500 組の異なる模擬観測波形を作成した。時刻歴のサンプル時間間隔は 0.02 秒、データ数は 1024 個とした。同定の計算に際しては、第 1 層目と第 2 層目の S 波速度と Q 値を未知変数とし、図-2 に示す値とは異なる初期値を与え、繰り返し計算を行って収束値を得る。ただし、Q 値は各層独立とし、周波数に依存しない性質を持たせている。

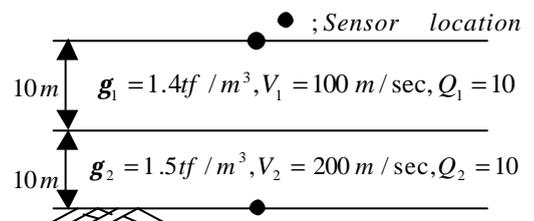


図-2 地盤モデル

表-1 Q 値の収束値の統計量

	平均値		標準偏差	
	Q ₁	Q ₂	Q ₁	Q ₂
評価関数 1	10.14	10.03	0.349	0.764
評価関数 2	9.89	9.96	0.263	0.557
評価関数 3	9.89	9.96	0.263	0.556

500 組の模擬観測記録に対して同定の計算を行い、得られた Q 値の収束値の統計量を表-1 に示す。S 波速度については、紙面の都合で割愛する。今回は、それぞれの評価関数における情報量の違いが同定結果に及ぼす影響を比較するために、評価関数 1 を用いる場合にスペクトルの平滑化は行っていない。表より、評価関数 1 を用いた場合、他の評価関数に比較して推定値のばらつきが大きいことがわかる。これに対し、評価関数 2 と評価関数 3 を用いた場合には、ほぼ同じ結果が得られている。

4. 結論

地盤震動の鉛直アレー観測記録を用いた地盤動特性値の同定問題において、スペクトルの振幅比をターゲットとした評価関数を用いると、スペクトルの平滑化による同定精度への影響の他に、観測記録に含まれる情報が十分に活かされていないために生じる推定精度の低下を招く恐れがある。しかし、同じ周波数領域による解析であっても、本研究で示した評価関数（評価関数 3）を用いれば、スペクトルの平滑化を行う必要がなく、かつ時間領域の解析と同程度の精度が期待できる。

参考文献

- 1) 辻原他；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.
- 2) 中村他、拡張ベイズ法を用いた時間領域で同定された表層地盤の減衰特性、第 11 回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.211-216, 2002.