

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

INFLUENCE OF SMOOTHING OF SPECTRA ON IDENTIFICATION OF SHEAR WAVE VELOCITY
AND QUALITY FACTOR OF SUBSURFACE GROUND

辻原 治*・沢田 勉**・平尾 潔***・岡本 康****

By Osamu TSUJIHARA, Tsutomu SAWADA, Kiyoshi HIRAO and Yasushi OKAMOTO

The object of this paper is to investigate the influence of smoothing of spectra of earthquake ground motions on the accuracy in identification of shear wave velocity and quality factor of subsurface ground and to present the better formulation in the frequency domain. The basis of formulation is to minimize the measure-of-fit between the spectral responses or transfer functions of ground and model. Through this study, it becomes clear that reliable estimates of parameters can be obtained by the technique of smoothing not only the spectral response of ground but also that of model.

1. まえがき

本研究の目的は、鉛直アレー観測記録を用いて地盤の S 波速度および Q 値を同定する問題において、記録のスペクトルの平滑化が同定精度に及ぼす影響を考察し、より信頼できる Q 値の推定値を得るための手法を提案することである。

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ている。これらの記録を用いて地盤構造の同定を行うことは、構造物の耐震設計において、また、震害予測の観点からみてきわめて重要である。

各種振動系の同定問題については、これまで多くの研究がなされている。同定問題の解析法は、時間領域の解析と周波数領域の解析に分類することができる。時間領域の解析には、Kalman フィルター^{1), 2)}や自己回帰移動平均 (AR-MA) モデル^{3), 4)}などのフィルタリング理論に基づいたものがある。また、出力誤差を最小化する方法として、Gauss-Newton 法により系定数 (剛性及び減衰行列) を推定した研究⁵⁾や、単純な一次元探索により低次モードから順次モードパラメータ (各次モードの固有振動数, 減衰定数, 刺激係数) を推定した研究⁶⁾などがある。一方、周波数領域の解析としては、線形多自由度系の同定において、解の一意

-
- * 工修 和歌山工業高等専門学校講師 土木工学科 (〒644 和歌山県御坊市名田町野島 77)
 - ** 工博 徳島大学助教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町 2-1)
 - *** 工博 徳島大学教授 工学部建設工学科 (〒770 徳島市南常三島町 2-1)
 - **** 徳島大学大学院 工学研究科 (〒770 徳島市南常三島町 2-1)

性やセンサーの最適配置に言及したUdwadiaらの研究^{7), 8), 9)}やモードパラメータをGauss-Newton法を用いて同定した研究^{10), 11)}、系定数を改良SLP法¹²⁾を用いて分割同定した研究¹³⁾などがある。また、地盤に対しては、成層地盤構造の同定を周波数領域で定式化し、地盤震動の鉛直アレー観測記録に適用した研究^{14), 15)}などがある。

以上、同定手法を時間領域と周波数領域の解析に分類し、それぞれいくつかの研究について述べたが、近年、同定問題は時間領域の解析に主眼がおかれ、周波数領域の解析はあまり用いられていない。周波数領域の解析では、一般に、入出力の観測記録のスペクトルより推定した周波数伝達関数とモデルのそれとの残差平方和を評価関数とし、これを最小にすることで同定がなされる。多くの場合、観測記録に含まれるノイズにより、周波数伝達関数の振幅が無意味なピークが無数に出現するため、なんらかの平滑化をほどこし、共振のピークを明瞭にする必要がある。ところが、平滑化を行うことで、周波数伝達関数において本来鋭いピークであるべきものが低下するため、とくに減衰パラメータの精度良い推定が妨げられることが指摘されている。このことが、周波数領域の解析における最大の欠点になっている。しかし、水平成層地盤の同定問題において、周波数領域の解析は、地盤震動の解析方法として広く用いられているSH波の重複反射理論(周波数領域の解析法)を取り込んだ定式化が可能であり、地盤パラメータを直接推定できるという利点がある。また、解析の手続きが比較的簡単である。

本研究では、周波数領域の解析により、水平成層地盤の各層のS波速度およびQ値を等価線形的に推定する問題において、記録のスペクトルの平滑化が同定精度に及ぼす影響について考察する。そして、記録のみならず理論周波数応答倍率に対しても平滑化を行う方法を提案し、この手法によるQ値の推定精度向上の可能性を、数値シミュレーションにより検討する。

2. 地盤同定問題

(1) 周波数領域における定式化

一般に、比較的深い震源の近距離地震による地盤震動の強震部ではS波が卓越し、その震央直角方向成分はSH波であると考えられる。本研究では、図-1に示すような水平成層構造をもつモデル地盤に、鉛直下方よりSH波が入射するという仮定のもとに、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S波速度 V_m とQ値 Q_m を同定する問題を考える。なお、本論文では、地盤モデルの層厚 H_m 及び密度 ρ_m は既知とし、Q値は周波数によらず一定であると仮定している。

いま、地盤内の第 p 層内の p 点および第 q 層内($p < q$)の q 点で、地盤震動加速度の同時観測記録が得られているとする。これらの記録のフーリエスペクトルを $X_p(f)$ 、 $X_q(f)$ とする。SH波の重複反射を仮定すると、それらと地表面加速度の複素振幅 $X_0(f)$ の間にはつぎの関係がある¹⁶⁾。

$$X_p(f) = \gamma_p(f; \alpha) X_0(f) \quad (1)$$

$$X_q(f) = \gamma_q(f; \alpha) X_0(f) \quad (2)$$

ここで、 f は振動数であり、 $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_N)$ は同定すべきパラメータ V_j 、 Q_j , $j=1, 2, \dots, q-1$ を一般的に表したものである。また、 $\gamma_p(f; \alpha)$ 、 $\gamma_q(f; \alpha)$ は地表面に対する加速度スペクトル振幅の低減率であり、つぎに示す 2×2 行列 $[R_p]$ および $[R_q]$ の第1行第1列成分である。

$$[R_p] = [T_p][S_{p-1}] \cdots [S_1] \quad (3)$$

$$[R_q] = [T_q][S_{q-1}] \cdots [S_1] \quad (4)$$

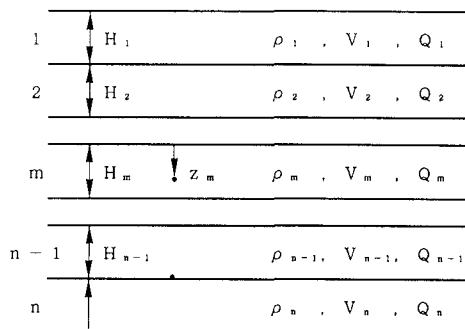


図-1 水平成層地盤モデル

上式に含まれる 2×2 行列 $[S_m]$ は、第 m 層の状態を表す行列で、その成分は次式で与えられる。

$$\begin{cases} S_{m \cdot 11} = [\exp(i a_m \omega) + \exp(-i a_m \omega)]/2 \\ S_{m \cdot 12} = [\exp(i a_m \omega) - \exp(-i a_m \omega)]/(2 i b_m \omega) \\ S_{m \cdot 21} = i b_m \omega [\exp(i a_m \omega) - \exp(-i a_m \omega)]/2 \\ S_{m \cdot 22} = S_{m \cdot 11} \end{cases} \quad (5)$$

ここで、 $\omega (=2\pi f)$ は円振動数、 i は虚数単位であり、係数 a_m 、 b_m は次式のようになる。

$$a_m = H_m / (V_m \sqrt{1+i/Q_m}) \quad (6)$$

$$b_m = \rho_m V_m \sqrt{1+i/Q_m} \quad (7)$$

式(3)、(4)の右辺第一項の $[T_m]$ 、 $m=p$ または $m=q$ は、式(5)で定義される行列 $[S_m]$ において、 H_m の代わりに Z_m を代入したものである。 $Z_m = 0$ の場合には、 $[T_m] = [I]$ 、すなわち単位行列となる。式(1)と(2)より、 q 点に対する p 点の周波数応答倍率の重複反射法による解 $H_{pq}(f; \alpha)$ が次式のように得られる。

$$H_{pq}(f; \alpha) = |\gamma_p(f; \alpha) / \gamma_q(f; \alpha)| \quad (8)$$

パラメータ α が正しい値の場合には、式(1)と(2)は厳密に成立するが、一般には α は未知であるので、それらは近似的にしか成り立たない。そこで、未知パラメータ α を推定する問題を最適化問題に置換することを考える。式(1)、(2)より最適化の際の評価関数（目的関数）としていくつか考えられるが、本論文では2点間の周波数応答倍率あるいは p 点のフーリエスペクトルに着目して、つぎに示す3種類の評価関数 S_E を採用した。そして、これらを改良SLP法¹⁵⁾を用いて最小化することで、 α を推定することとする。

$$\text{評価関数①} \quad S_E = \sum_{j=1}^{N_f} \left\{ H_{pq}(f_j; \alpha) - \frac{|X_p(f_j)|}{|X_q(f_j)|} \right\}^2 \rightarrow \min \quad (9)$$

$$\text{評価関数②} \quad S_E = \sum_{j=1}^{N_f} \left\{ H_{pq}(f_j; \alpha) - \frac{|S_{pq}(f_j)|}{S_{qq}(f_j)} \right\}^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

$$\text{評価関数③} \quad S_E = \sum_{j=1}^{N_f} \{ H_{pq}(f_j; \alpha) \cdot |X_q(f_j)| - |X_p(f_j)| \}^2 \rightarrow \min \quad (11)$$

ここで、 f_j は対象とする振動数領域を分割したときの j 番目の振動数点、 N_f はそのときの振動数点の数である。 $H_{pq}(f_j; \alpha)$ は未知パラメータ α に適当な値を与えて式(8)より計算した周波数応答倍率の理論値、 $X_p(f_j)$ と $X_q(f_j)$ は観測記録から得られるフーリエスペクトル、 $S_{pq}(f_j)$ と $S_{qq}(f_j)$ はそれぞれ p 、 q 点間のクロススペクトルと q 点でのパワースペクトルである。評価関数①および②は、 p 、 q 点間の周波数応答倍率の理論値と観測記録より得られた値との残差平方和である。両者の違いは、観測記録より周波数応答倍率を推定する方法で、評価関数①では観測記録のスペクトル比より求めるのに対し、評価関数②では記録のクロススペクトルとパワースペクトルの比から求める。スペクトルの平滑化を行わなければ、どちらも同じ周波数応答倍率の推定値を与える。評価関数③は、 q 点で得られた観測記録に対する p 点での周波数応答の理論値と観測記録より得られたスペクトルの残差平方和である。

(2) スペクトルの平滑化を考慮した同定手法

観測記録には種々の原因でノイズが含まれており、その大小がパラメータの推定精度と深くかかわっている。したがって、精度の高い同定結果を得るためには、ノイズの影響を軽減する必要がある。ノイズの性質

がわかっている場合には、フィルターに通す等により除去することが可能であるが、一般にはわからない。また、観測記録は標本記録であるから、それより得られるスペクトルは生の推定値であり、統計的な誤差も含んでいる。そこで、周波数領域の解析では、スペクトルの平滑化がなされている。しかし、そのような平滑化は、スペクトルに本来含まれている正しい情報までゆがめてしまう場合もあり、とくに減衰パラメータの推定に影響を及ぼすことになる。従来の研究では、式(9)～(11)におけるフーリエスペクトル、クロススペクトルおよびパワースペクトル $|X_p(f)|$ 、 $|X_q(f)|$ 、 $S_{pq}(f)$ 、 $S_{qq}(f)$ のみ平滑化して、観測記録より周波数応答倍率の推定値を求め、それと理論周波数応答倍率 $H_{pq}(f; \alpha)$ の対応より未知パラメータを同定した。ところが、観測記録より推定した周波数応答倍率は、平滑化バンド幅により形状が異なり、バンド幅が広がるほど周波数応答倍率のピークが下がることになる。このことは、Q値が適正に同定できない原因となる。本研究では、スペクトルのみならず理論周波数応答倍率 $H_{pq}(f; \alpha)$ をも平滑化することにより、地盤の同定精度、とくにQ値の同定精度を改良する方法を導入する。

以下では、観測波形のスペクトルを平滑化して同定に用いることを前提とし、これを考慮した同定法、すなわち、モデルの周波数応答倍率に対しても平滑化することを同定の手続きに組込む手法について述べる。評価関数①においては、観測波形のパワースペクトル $S_{pp}(f)$ と $S_{qq}(f)$ をそれぞれ平滑化した後、それらの平方根をとることにより $|X_p(f)|$ と $|X_q(f)|$ が推定される。他方、理論周波数応答倍率 $H_{pq}(f; \alpha)$ に対しても次式により平滑化を行う。

$$\hat{H}_j = \sum_{k=-N_b}^{N_b} W_k H_{j+k} \quad (12)$$

ここに、 $H_j = H_{pq}(f_j; \alpha)$ 、 $H_{j+k} = H_{pq}(f_{j+k}; \alpha)$ であり、 $\hat{}$ は平滑化後のものであることを意味する。 W_k は振動数点 f_j において周波数応答倍率の平均をとるときの重み係数である。 N_b は、その時に考慮する振動数点の数を表し、平滑化のバンド幅によって決まる。また、最適化の際に必要な $\hat{H}_j$ の偏微分係数 $\partial \hat{H}_j / \partial \alpha_i$ は次式で得られる。

$$\partial \hat{H}_j / \partial \alpha_i = \sum_{k=-N_b}^{N_b} W_k (\partial H_{j+k} / \partial \alpha_i) \quad (13)$$

したがって、同定に際しては、式(12)および(13)で得られた $\hat{H}_j$ 、 $\partial \hat{H}_j / \partial \alpha_i$ 、 $j=1, \dots, N_t$ 、 $i=1, \dots, N$ を H_j 、 $\partial H_j / \partial \alpha_i$ のかわりに用いることにより、平滑化の効果を考慮した解析を行うことができる。同様に、評価関数②では、観測波形のクロススペクトル $S_{pq}(f)$ の実数部と虚数部およびパワースペクトル $S_{qq}(f)$ の平滑化を行い、理論値については、式(8)の $\gamma_p(f; \alpha) / \gamma_q(f; \alpha)$ の実数部と虚数部をそれぞれ平滑化して $H_{pq}(f; \alpha)$ を計算する。また、評価関数③では、パワースペクトル $S_{pp}(f)$ の平滑化を行って $|X_p(f)|$ を得、理論値についても $\gamma_p(f; \alpha) / \gamma_q(f; \alpha) \cdot X_q(f)$ を平滑化する。

ところで、実記録を用いて同定を行う場合、対象とする周波数帯において、FFT等によりスペクトルが得られている周波数点の総数 (N_T とする) に対して、一般に同定で用いる周波数点の数 N_t はそれよりも少なくなると。これは、いたずらに多くの周波数点を対象として演算時間が増大することを避けるためである。このとき、式(12)および(13)の $\hat{H}_j$ 、 $\partial \hat{H}_j / \partial \alpha_i$ は、同定の各反復過程において、いったん N_t 個の周波数点について計算し、平滑化を行った後、 N_t 個を用いることになる。 $\hat{H}_j$ 、 $\partial \hat{H}_j / \partial \alpha_i$ 、 $j=1, \dots, N_T$ の計算のうち前者は比較的少ない演算量の追加ですむ。しかし、後者については、各未知パラメータについて計算し、さらに平滑化することになるため、モデルの層数が増えれば演算量は膨大になり、実用的ではない。幸い、最適化手法として用いる改良SLP法では、評価関数の偏微分係数における正負の符号のみが必要な情報であることから¹⁵⁾、 $\partial \hat{H}_j / \partial \alpha_i$ については、平滑化される前の周波数応答倍率について求めることとし、次式で近似した。

$$\partial \hat{H}_j / \partial \alpha_i \approx \partial H_j / \partial \alpha_i, \quad j=1, \dots, N_t \quad (14)$$

以下の数値計算においては、平滑化の手法としてParzenウィンドウを用いる。

3. 数値解析結果および考察

(1) 同定手法の妥当性の検討

スペクトルの平滑化を考慮した同定手法において、周波数応答倍率の偏微分係数を式(14)で近似することの妥当性を検討する。

表-1に同定の対象とした地盤モデルの諸元を示す。観測記録の代わりとして、G.L.-30mでの加速度波を有帯域ホワイトノイズ（帯域幅0.1Hz～10.0Hz, $\Delta t = 0.02\text{sec}$, 最大振幅50gal）とし、これに対する地表での応答を表-1のパラメータと重複反射理論により計算して用いた。図-2にシミュレートした加速度波形を示す。ここでは、手法の妥当性を検討することが目的であり、ノイズを含まない観測波形に適用したときに、パラメータが真値に収束することを確認する。同定に際しては、それらの波形から得られるスペクトルに対してバンド幅0.2HzのParzenウィンドウを適用した。また、0.1Hz～10.0Hzの100周波数点を解析周波数点の数 N_t とした。よって、 N_t は N_r の約1/4となる。以下、解析結果について述べる。

図-2に示す波形を観測記録として、それぞれの評価関数に基づいた同定手法を適用した。S波速度およびQ値の初期値はともに真値の1.3倍とした。図-3にパラメータの収束状況を示す。図の横軸は反復回数、縦軸は各層のS波速度あるいはQ値である。すべての未知パラメータが真値に対して1%以下の誤差であることを収束判定基準としたところ、どの評価関数を用いてもこの基準を満足して反復計算を停止した。

このように、スペクトルの平滑化を考慮した同定手法において、理論周波数応答倍率の偏微分係数については、平滑化しない形で近似しても妥当な結果が得られることを確認することができた。

以下では、シミュレートした波形にノイズを付加して解析を行い、本同定手法によるQ値の同定精度向上の可能性を検討する。

(2) ホワイトノイズ入力の場合

図-2に示す波形に対し、r.m.s.強度で5%および10%のホワイトノイズを付加し、観測記録として用いた。図-4にノイズ10%を付加したときのフーリエスペクトルとそれらのスペクトルの比を示す。ただし、スペクトルの平滑化は行っていない。一例として、図-5に、ノイズ10%、平滑化のバンド幅0.2Hzと

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/sec)	Q 値
1	10	1.40	150	10
2	10	1.50	200	10
3	10	1.60	250	10

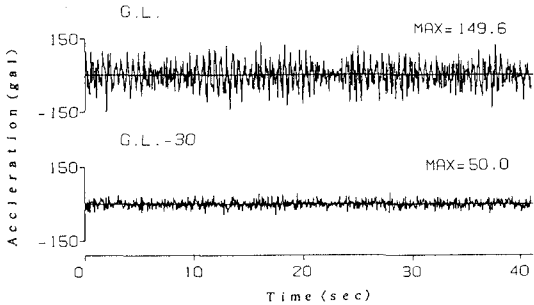


図-2 加速度波形（ホワイトノイズ入力）

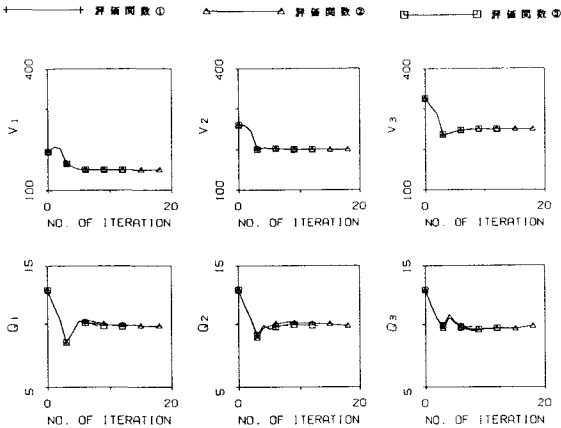


図-3 S波速度とQ値の収束状況

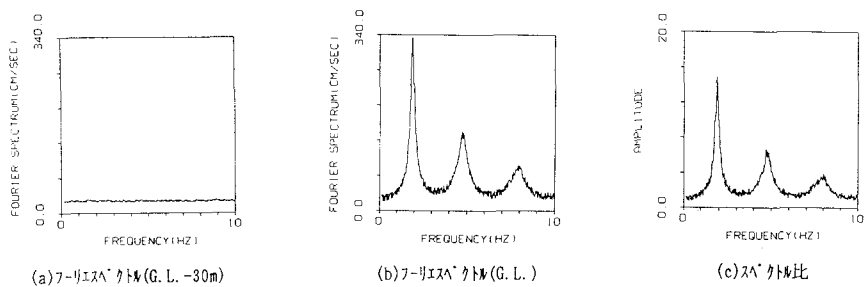


図-4 フーリエスペクトルとスペクトル比 (ホワイトノイズ入力)

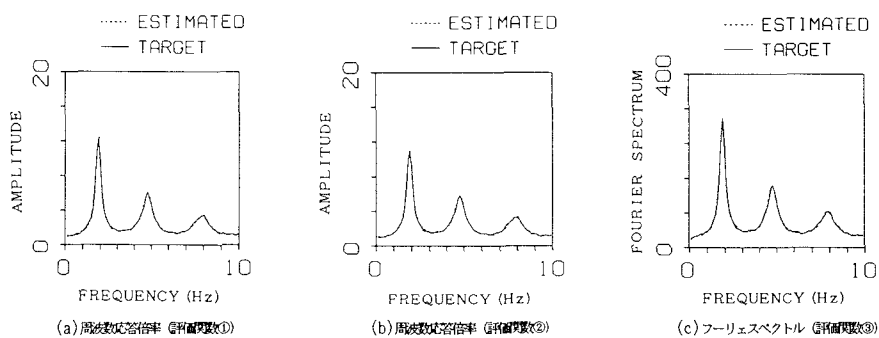


図-5 周波数応答率及び地表のフーリエスペクトルの目標値と推定値 (ホワイトノイズ入力)

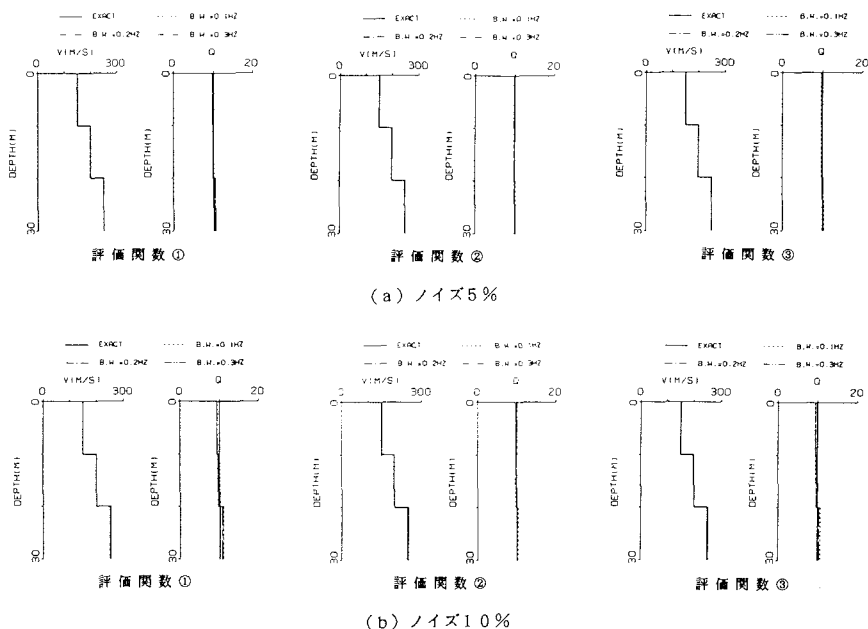


図-6 本同定手法によるS波速度とQ値の推定値 (ホワイトノイズ入力)

して本同定手法を適用した際の、周波数応答倍率あるいはフーリエスペクトルの目標値 (TARGET) と推定値 (ESTIMATED) をそれぞれ実線と破線で示す。図-6 には、平滑化のバンド幅 (B.W.) を 0.1, 0.2, 0.3Hz として解析した結果を示す。図には、S 波速度 (V [M/S])

表-2 S 波速度と Q 値の推定誤差 (ホワイトノイズ入力)

ノイズ (%)	平滑化のバンド幅 (Hz)	評価関数 ①					評価関数 ②					評価関数 ③				
		r.m.s. 誤差 (%)		最大誤差 (%)			r.m.s. 誤差 (%)		最大誤差 (%)			r.m.s. 誤差 (%)		最大誤差 (%)		
		V	Q	V	Q	V	V	Q	V	Q	V	V	Q	V	Q	V
5	0.1	0.48	3.71	0.73	5.32	0.39	2.33	0.60	3.10	0.48	3.23	0.73	4.06			
	0.2	0.48	2.96	0.70	4.08	0.41	1.68	0.60	1.98	0.40	2.07	0.58	2.41			
	0.3	0.53	3.43	0.77	4.70	0.42	1.87	0.62	2.41	0.41	2.30	0.59	2.66			
10	0.1	1.00	7.06	1.52	10.00	0.64	3.30	1.02	3.61	0.99	6.17	1.52	7.62			
	0.2	0.98	5.24	1.43	6.85	0.64	2.13	0.92	3.04	0.97	4.24	1.39	5.01			
	0.3	1.05	6.38	1.52	8.46	0.70	2.26	1.03	3.49	0.97	3.99	1.38	4.90			

と Q 値 (Q) の収束値を示している。表-2 に、各解析ケースにおける S 波速度と Q 値の推定誤差 (%) を、2 乗平均誤差の平方根 (r.m.s. 誤差) および最大誤差として示す。表より、いずれの評価関数を用いても、S 波速度と Q 値はともにかなり良い精度で推定値が得られており、平滑化のバンド幅による推定値のばらつきも小さいことがわかる。なお、ここでは適切な収束判定基準を設定するのが容易ではないため、反復計算回数に上限を設けることとし 50 回とした。図-3 の収束速度を考慮すれば、十分な回数であると考えられる。

比較のために、観測記録のスペクトルのみ平滑化し、理論周波数応答倍率は平滑化せずに同定を行った結果を図-7 に示す。どちらにも平滑化を行わないケース (UNSMOOTHED) を含め、Q 値の推定精度は劣っているのがわかる。

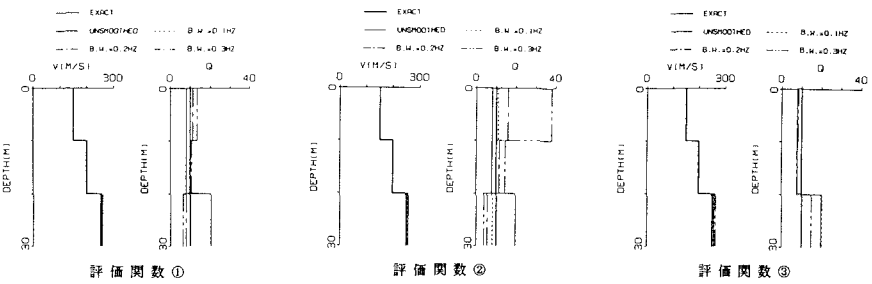


図-7 観測記録のスペクトルのみ平滑化する方法による S 波速度と Q 値の推定値 (ホワイトノイズ入力)

以上のことより、本同定手法、すなわち、観測記録より得られるスペクトルのみならず理論周波数応答倍率をも平滑化して同定する手法を用いることにより、Q 値の同定精度が大幅に改良されることがわかった。

(3) エルセントロ地震波入力の場合

E1 Centro地震波 N S 成分の最大振幅を 50gal に縮尺したものと、これに対するモデルの地表における応答 (図-8 参照) にホワイトノイズを付加して、それぞれ G.L.-30m と地表での観測記録として用いた。図-9 にノイズ 10% を付加したときのフーリエスペクトルとそれらのスペクトルの比を示す。ホワイトノイズを入力とした場合に比較して、スペクトル比の高周波数側で多くのピークが現れている。これは、G.L.-30m でのスペクトルにおいて、とくに 5Hz 程度より高い周波数帯で振幅が小さく、比をとったときにノイズの影響が顕著に現れるためである。解析結果を図-10, 11 および表-3 に示す。図-10 に、一例として、ノイズ 10%, 平滑化のバンド幅 0.2Hz として本同定手法を適用した際の、周波数応答倍率あるいはフーリエスペクトルを示す。図-11 には、平滑化のバンド幅を 0.1, 0.2,

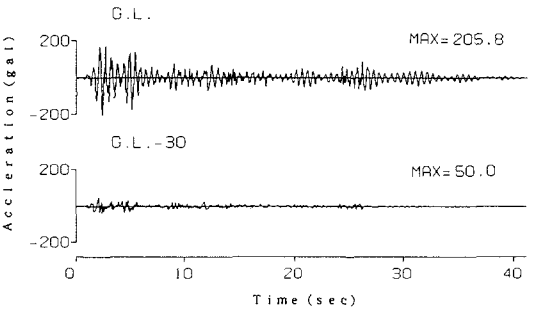


図-8 加速度波形 (エルセントロ波入力)

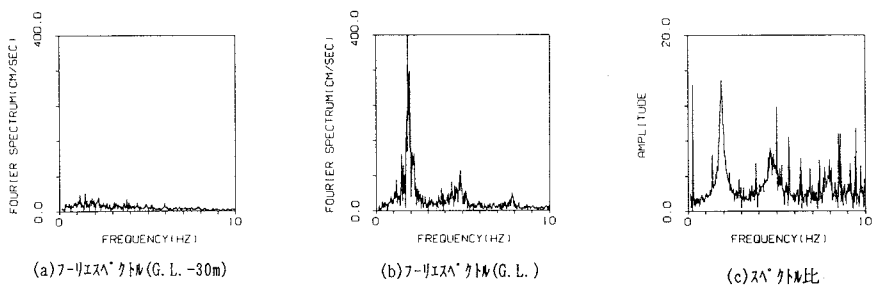


図-9 フーリエスペクトルとスペクトル比 (エルセントロ波入力)

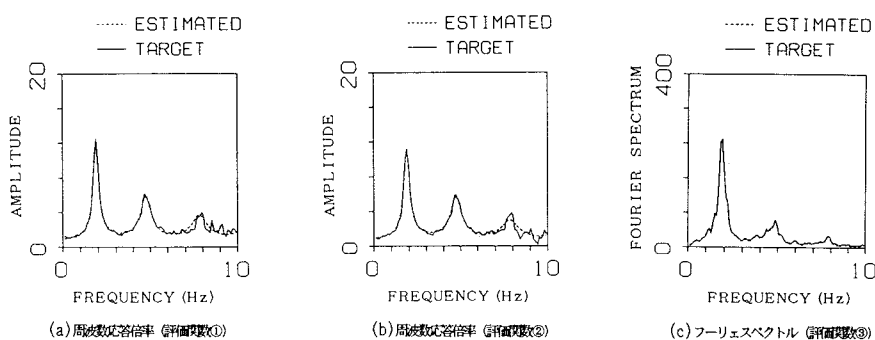


図-10 周波数応答倍率及び地表のフーリエスペクトルの目標値と推定値 (エルセントロ波入力)

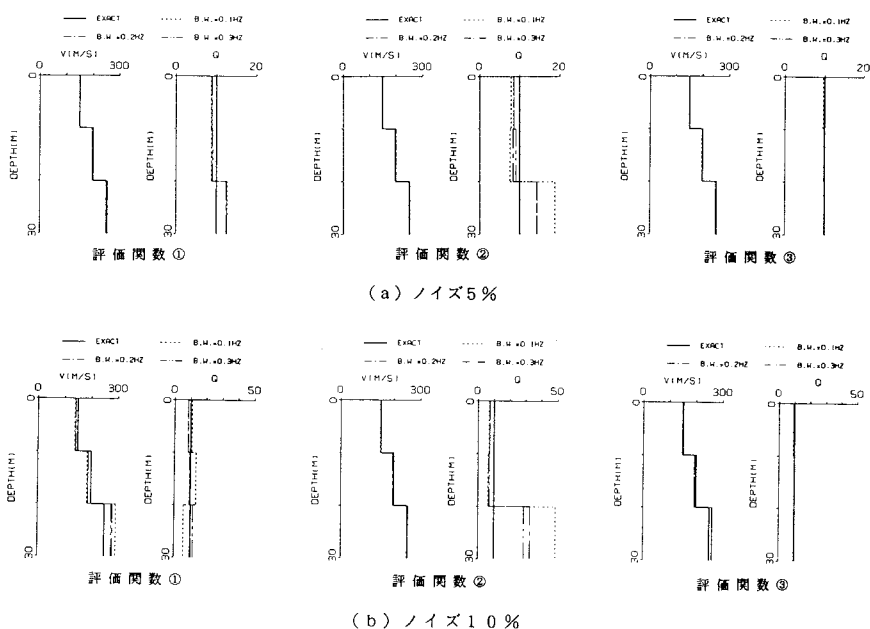


図-11 本同定手法によるS波速度とQ値の推定値 (エルセントロ波入力)

0.3Hzとして同定を行った結果を示す。最適化の過程における反復計算の回数はすべて50回である。表-3に、各解析ケースにおけるパラメータの推定誤差を示す。表より、評価関数③を用いた場合に、Q値の推定誤差が最大で9%程度と、他の評価関数を用いた場合と

表-3 S波速度とQ値の推定誤差（エルセントロ波入力）

ノイズ (%)	平滑化のバンド幅 (Hz)	評価関数①				評価関数②				評価関数③			
		r.m.s. 誤差 (%)		最大誤差 (%)		r.m.s. 誤差 (%)		最大誤差 (%)		r.m.s. 誤差 (%)		最大誤差 (%)	
		V	Q	V	Q	V	Q	V	Q	V	Q	V	Q
5	0.1	1.80	19.07	2.33	27.48	1.50	54.24	1.74	88.21	1.23	2.47	1.51	4.11
	0.2	1.88	16.70	2.40	24.49	1.17	27.76	1.52	42.94	1.08	1.08	1.31	1.50
	0.3	1.53	17.50	1.80	26.50	1.12	26.88	1.70	43.31	1.12	1.47	1.35	1.86
10	0.1	11.98	32.47	17.25	42.69	1.68	223.66	2.18	384.33	3.45	5.26	4.44	9.11
	0.2	8.35	8.78	11.71	14.18	1.53	132.35	2.17	225.19	3.32	3.03	4.27	5.01
	0.3	7.54	15.02	10.45	18.15	1.51	110.92	2.50	188.20	3.62	3.83	4.67	6.05

比較してかなり良い結果が得られている。また、S波速度の推定誤差も最大で4%程度である。周波数応答倍率を合わせるという評価関数①および②では、スペクトルの振幅が小さい5~10Hzの周波数帯における入力側のノイズに、モデル全体がひきずられる恰好になったのではないかと考えられる。これに対して、スペクトルを合わせる評価関数③では、入力側のノイズの影響は、モデルの周波数応答倍率との積の形で現れるため、スペクトルの振幅が小さい高周波数側の影響は全体からみれば小さくなる。

以上、スペクトルの平滑化を前提とした同定法を適用したが、式(11)に示す評価関数③を用いることで、より信頼できる同定結果が得られることを示した。

4. まとめ

本研究では、水平成層地盤の同時観測記録から、周波数領域の解析により地盤各層のS波速度およびQ値を同定する問題において、スペクトルの平滑化が同定の精度に及ぼす影響について考察した。そして、記録のスペクトルのみならず、理論周波数応答倍率に対しても平滑化を行うことを同定の手続きに組み込み、3種類の評価関数を対象として、その手法の妥当性を数値解析により検討した。以下に得られた結果を要約する。

- 1) 観測記録より得られるスペクトルのみならず理論周波数応答倍率をも平滑化することにより、地盤のS波速度およびQ値の同定精度を大幅に改善することができた。本手法は、記録にノイズが含まれる場合にも有効であり、実用的であると考えられる。
- 2) スペクトルの平滑化を考慮した同定手法において、理論周波数応答倍率の偏微分係数については、平滑化しない形で近似しても妥当な結果が得られる。このことにより演算量を大幅に節約することができる。
- 3) ノイズを含む観測波形のスペクトルを平滑化せずそのまま用いた場合、または、観測波形のスペクトルのみ平滑化し理論値は平滑化しない場合には、Q値の精度良い推定値は得られない。
- 4) ホワイトノイズを入力としたシミュレーション波形にスペクトルの平滑化を考慮した同定手法を適用したところ、どの評価関数を用いてもS波速度及びQ値の精度良い推定値を得ることができた。しかし、高周波数側でフーリエスペクトルの振幅が小さいエルセントロ波を入力としたシミュレーション波形に対しては、周波数応答倍率を合わせる評価関数(①および②)よりも、地表のスペクトルを合わせる評価関数(③)の方がQ値のより信頼できる推定値を与えるという結果が得られた。

評価関数①、②では、地盤震動同時観測記録から周波応答倍率を推定すること自体に困難を伴う。とくに、比をとるときの分母となる側のスペクトルの振幅が小さいときに大きな誤差を生じる可能性がある。さらに、観測記録のスペクトルを平滑化する際、理論周波数応答倍率を平滑化するときと同じバンド幅でよいのかという点で疑問が残る¹⁷⁾。このような観点から、実際の観測記録を用いて同定を行う場合は、評価関数③を用いる方がよいであろうと考えられる。

なお、この種の同定手法では解の一意性の問題が重要であるが、これについては別途報告する予定である。

参考文献

1) 星谷・斉藤：拡張カルマン・フィルターを用いた同定問題の各種振動系への応用，土木学会論文報告集，

- No. 339, pp. 59-67, 1983年
- 2) 星谷・斉藤: 線形多自由度系の動特性の推定, 土木学会論文集, No. 344/I-1, pp. 289-298, 1984年
 - 3) Gersh, W.・Taoka, G. T.・Liu, R.: Structural System Parameter Estimation by Two-Stage Least-Squares Method, Proc. ASCE, EM. 5, pp. 883-899, 1976
 - 4) 土岐・佐藤・生木: 自己回帰・移動平均法による構造物の動的パラメータの推定, 京都大学防災研究所年報, 第21号, B-2, pp. 1-12, 1978年
 - 5) 栗田・松井: 加速度波形を利用した時刻歴領域における構造物の同定, 土木学会第43回年次学術講演会講演概要集, 第I部, pp. 1064-1065, 1988年
 - 6) Beck, J. L.・Jennings, P. C.: Structural Identification Using Linear Models and Earthquake Records, E. E. S. D., Vol. 8, pp. 145-160, 1980
 - 7) Udawadia, F. E.・Shah, P. C.: Identification of Structures Through Records Obtained During Strong Earthquake Ground Motion, ASME J. Eng. Industry, pp. 1347-1362, 1976
 - 8) Udawadia, F. E.・Sharma, D. K.: Some Uniqueness Results Related to Building Structural Identification, SIAM J. APPL. MATH., Vol. 34, No. 1, pp. 104-118, 1978
 - 9) Shah, P. C.・Udawadia, F. E.: A Methodology for Optimal Sensor Locations for Identification of Dynamic Systems, ASME J. APPL. MECH., Vol. 45, pp. 188-196, 1978
 - 10) McVerry, G. H.: Structural Identification in the Frequency Domain from Earthquake Records, E. E. S. D., Vol. 8, pp. 161-180, 1980
 - 11) 小原: 地震応答記録に基づく構造系の動特性に関する研究, 東北大学学位論文, 1984年
 - 12) 辻原・沢田: 線形多自由度系同定問題における改良 S L P の開発, 第2回システム最適化に関するシンポジウム論文集, pp. 105-110, 1991年
 - 13) 山本・沢田・平尾・辻原: 線形多自由度系の分割同定とその評価, 土木学会第47回年次学術講演会講演概要集, 第I部, pp. 1330-1331, 1992年
 - 14) 辻原・沢田・谷: 鉛直アレー観測記録による地盤震動特性値の同定, 構造工学論文集, Vol. 36A, pp. 747-756, 1990年
 - 15) 沢田・辻原・平尾・山本: 地盤のS波速度とQ値の同定問題におけるS L P法の改良とその適用, 土木学会論文集, No. 446/I-19, pp. 205-213, 1992年
 - 16) 土岐: 新体系土木工学 11 構造物の耐震解析技報堂出版, pp. 80-81, 1982年
 - 17) 辻原・沢田・岡本: Q値の同定精度に及ぼすスペクトルの平滑化の影響, 土木学会第47回年次学術講演会, pp. 848-849, 1992年

(1992年9月21日受付)