

地盤構造の推定における解の収束性について

徳島大学大学院 学生員 ○川本 若之
徳島県立貞光工業高校 正 員 椎野 彰祐
徳島大学工学部 正 員 沢田 勉

1. はじめに 地表で得られた強震記録から、強震計設置点の地盤条件を推定しようとする試みが行われてきた¹⁾。この方法は、地表で得られた記録のフーリエスペクトルが地盤の増幅度関数と相似であるという仮定のもとに、地震基盤以浅の地盤特性値を推定するものである。解析において、重複反射理論および非線形最適化手法を用いているが、得られた最適解の全域性と、解の信頼性等についての検討が不十分であった。本報告では、モデル地盤を対象にして、地盤特性の推定における解の収束性と、推定精度の向上について検討を加えた。

2 地盤特性値の推定方法 地震基盤から表層地盤に鉛直に入射する波の増幅度特性は、表層地盤の層厚、せん断波速度等によって変化し、各周波数における周波数伝達関数として表わされる。これは、重複反射理論によって算出される。したがって、基盤入射波の加速度フーリエスペクトルが工学的に重要な周波数領域(0.1~10 Hz)で一定と考えると、地表の記録のフーリエスペクトルと地盤の周波数伝達関数は相似形となる¹⁾。いま、Fig.1に示すような m 層からなる成層地盤を考えると、地盤の周波数伝達関数は次のようになる。

$$U(f) = 2 / |R_{n+1}(1,1) - iR_{n+1}(2,1) / G_m^* K_m| \quad \cdots \cdots (1)$$

ここで、 $R_{n+1}(1,1)$ および $R_{n+1}(2,1)$ は、 (2×2) 行列 $R_{n+1} = a_{n+1} \cdot a_{n+2} \cdots a_m \cdots a_1$ の $(1,1)$ 成分および $(2,1)$ 成分であり、行列 a_m は第 m 層の地盤特性値を用いて次のように表わされる。

$$a_m = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}$$

ここで、
$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= \{ \exp(iK_m H_m) + \exp(-iK_m H_m) \} / 2 \\ a_{12} &= \{ \exp(iK_m H_m) - \exp(-iK_m H_m) \} / 2iG_m^* K_m \\ a_{21} &= iG_m^* K_m \{ \exp(iK_m H_m) - \exp(-iK_m H_m) \} / 2 \\ a_{22} &= a_{11} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$G_m^* = \rho_m V_m^2 (1 + \frac{i}{Q_m}), \quad K_m = \sqrt{\frac{\omega^2 \rho_m}{G_m^*}} \quad \cdots \cdots (3)$$

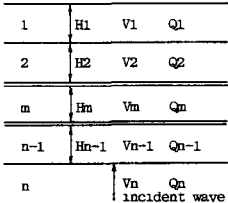


Fig. 1 One-Dimensional Model for the Subsurface Layers

ここで、 ρ_m, V_m, H_m, Q_m は、それぞれ第 m 層の密度、せん断波速度、層厚、 Q 値である。これらを推定するために、次のような基準を設ける。すなわち、地表での加速度フーリエスペクトル $F_S(f)$ と周波数伝達関数 $U(f)$ の各周波数における残差平方和を最小にする。

$$S_e = \sum_j \{ F_S(f) - \alpha_{k+j} U(f) \}^2 = G(\alpha_1, \alpha_2, \cdots, \alpha_{k+1}) \longrightarrow \min. \quad \cdots \cdots (4)$$

$$\alpha_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \cdots, k+1 \quad \cdots \cdots (5)$$

ここで、 $\alpha_1 \sim \alpha_k$ は地盤特性値であり、 α_{k+1} は基盤入射波のスペクトルレベルである。以上により、地表記録のフーリエスペクトル $F_S(f)$ が与えられたときに表層の地盤特性値を推定する問題は、式(5)の制約条件のもとに式(4)の残差平方和を最小にする問題に置きかえられる。式(4)、(5)の非線形最適化問題を解くため、ここでは反復線形計画法を用いた¹⁾。

3. 解の収束性の検討 文献1)では、式(4)、(5)の非線形最適化問題を解くために、多くの初期値を与え、それから得られる収束解のうち最適と思われる解を視察により決定した。ところで、地盤特性値のうち、各層のせん断波速度 V と層厚 H は、地盤の増幅度関数に対して相互する影響を与える。たとえば、 V_j が増加すると地盤増幅度が小さくなるのに対し、 H_j が増加すると地盤増幅度は大きくなる。このため、文献1)のように、 V_j, H_j を独立変数とした場合には、式(4)、(5)の最適化問題の解の収束性は良くなかった。ここでは、以上のことを考慮して、

V_j , H_j , Q_j に若干の変数変換を施して、解の精度の向上を図った。対象とした地盤は、Table 1に示すような地盤特性値をもつもので、このモデル地盤は、八戸港湾の地盤構造²⁾を3層地盤で近似したものである。なお、地震基盤以東のせん断波速度、密度およびQ値は、それぞれ 3000 m/s, 2.5 g/cm³, 200とした。本報告では、解の精度と収束性の検討を目的とするため、式(4)(5)の最適化問題を次のように考えた。すなわち、式(4)の中の $F_S(f)$ としては Table 1のモデル地盤より求められる周波数伝達関数をそのまま用いることにし、Table 2に示すような特定の初期値より出発して、式(4)、(5)を漸次解を求めた。式(4)、(5)の最適化問題の独立変数としては、次の2つのケースを考えた。

Case 1 $V_j, H_j, Q_j \quad j=1\sim 3$ (従来の方法)

Case 2 $V_j, T_j=H_j/V_j, R_j=1/Q_j \quad j=1\sim 3$

Table 3には、Table 2の初期値より得られる各ケースの最適解を示した。これらを Table 1(厳密解)と比較すると、Case 1の解が厳密解とかなり離れているのに対し、Case 2の解はほぼ厳密解に近いことがわかる。このように特定の初期値から出発したにもかかわらず、Case 2の場合には、全域的な最適解に近い値が得られた。このことから、Case 2のように独立変数に変数変換を施した場合には、全域的な最適解が得られる可能性があることがわかった。Fig. 2は、前述の2つのケースについて解の収束性を示したもので、図中の残差平方和の図からも Case 2の解の精度が良いことがわかる。

4. おわりに 本報告では、地盤特性値の推定における解の収束性について検討を行なった。その結果、地盤特性値に対して変数変換を施すことにより解の収束性は従来の方法よりも向上し、全域的な最適解に近い値も得られた。このことは、実地震動記録を用いて地盤構造の推定を行なう際に、本手法が有効な手段となることを示している。

参考文献

1) 権野・沢田；強震記録による深層地盤構造の概略推定について、第6回 日本地震工学シンポジウム PP 185~192, 1982年。 2) 土田・倉田・須藤；港湾地域強震観測点資料(その2)、港湾技術資料, No. 107, 1970年。 3) 太田；地震工学への最適化法の適用、日本建築学会論文報告集、第229号、PP 35~41, 1975年。

Table 1 Subsurface Parameters of 3 Layers Model

Lay No.	D	V	H	Q
1	1.8	220	30	10
2	1.9	380	150	30
3	2.0	730	200	100

D: Density

V: Shear Wave Velocity(m/s)

H: Thickness(m) Q: Q-value

Table 2 Initial Value of Shear Wave Velocity, Thickness and Q-value

Lay No.	V(m/s)	H(m)	Q
1	200	30	10
2	800	260	30
3	1200	246	100

Table 3 Optimal Solutions

Case	Lay No.	V(m/s)	H(m)	Q
1	1	223	27	5
	2	559	251	46
	3	1052	262	100
2	1	221	30	8
	2	387	154	38
	3	744	202	100

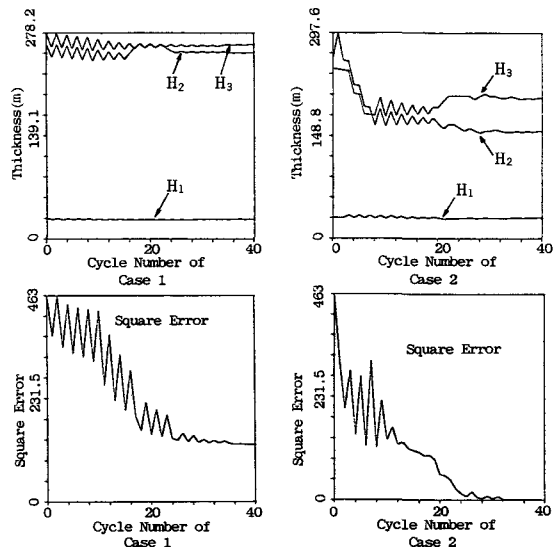


Fig. 2 Variation of Characteristic Parameters