

アレー観測記録を利用した地盤物性値の推定に関する研究

豊橋技術科学大学大学院 学生員 ○北畑雅義
豊橋技術科学大学 正会員 栗林栄一

1. はじめに 近年、地盤の鉛直アレー観測により地盤震動の同時観測記録が取得され、これらの記録の有効活用が望まれる。そこで各種同定手法による地盤特性の同定が行われている。本研究ではSH波の重複反射を仮定し、数値シミュレーションによりS波速度の同定を行い、本手法の有効性を検討するものである。

2. 定式化 図1に示すような地盤モデルに、鉛直下方よりSH波が入射するという仮定のもとに、地盤各層のS波速度 V_m を同定する問題を考える。

いま、地盤内の第 m 層内の m 点($Z_m=m$)および基盤層の上面($Z_n=0$)で、地盤振動加速度記録が得られているとする。これらの記録の加速度の複素振幅を $X_m(\omega, Z_m=m)$ 、 $X_n(\omega, Z_n=0)$ 、複素せん断応力を $\tau_m(\omega, Z_m=m)$ 、 $\tau_n(\omega, Z_n=0)$ とする。SH波の重複反射を仮定すると、それらと地表面(第1層の上面($Z_1=0$))の複素振幅 $X_1(\omega, Z_1=0)$ の間には次の関係がある。¹⁾

$$\begin{aligned} X_n(\omega, 0) &= R_{n-1, 11}(\omega, \alpha) X_1(\omega, 0) \cdots (1-1) & \tau_n(\omega, 0) &= R_{n-1, 21}(\omega, \alpha) X_1(\omega, 0) \cdots (1-2) \\ X_m(\omega, 0) &= R_{m-1, 11}(\omega, \alpha) X_1(\omega, 0) \cdots (2-1) & \tau_m(\omega, 0) &= R_{m-1, 21}(\omega, \alpha) X_1(\omega, 0) \cdots (2-2) \\ X_m(\omega, m) &= S_{m, 11}(\omega, \alpha) X_m(\omega, 0) \cdots (3-1) & \tau_m(\omega, m) &= S_{m, 21}(\omega, \alpha) X_m(\omega, 0) \cdots (3-2) \\ &+ S_{m, 12}(\omega, \alpha) \tau_m(\omega, 0) & &+ S_{m, 22}(\omega, \alpha) \tau_m(\omega, 0) \end{aligned}$$

ここに、 $X_m(\omega, 0)$ 、 $\tau_m(\omega, 0)$ はそれぞれ第 m 層内の上面($Z_m=0$)での複素振幅、複素せん断応力、 ω は円振動数で、 Z_m は第 m 層の任意点の深さである。 α は同定すべきパラメータ V_m を一般的に表したものである。また、 $R_{n-1, 11}(\omega, \alpha)$ 、 $R_{n-1, 21}(\omega, \alpha)$ はそれぞれ次に示す 2×2 行列 $[R_{n-1}]$ の第1行第1列および第2行第1列の係数である。

$$[R_{n-1}] = [S_{n-1}] [S_{n-2}] \cdots [S_m] \cdots [S_1] \cdots (4)$$

$$[S_m] = \begin{bmatrix} S_{m, 11}(\omega, \alpha) & S_{m, 12}(\omega, \alpha) \\ S_{m, 21}(\omega, \alpha) & S_{m, 22}(\omega, \alpha) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(k_m H_m) & \sin(k_m H_m) / (\rho_m V_m^2 k_m) \\ -\rho_m V_m^2 k_m \sin(k_m H_m) & \cos(k_m H_m) \end{bmatrix} \cdots (5)$$

ここに、 $k_m (= \omega / C_m)$ は波数、 $C_m (= V_m \sqrt{1 + i / Q_m})$ は第 m 層内での減衰を考慮した場合の伝播速度、 V_m は減衰を考えない場合の横波速度、 H_m は第 m 層の層厚、 ρ_m は第 m 層の密度、 Z_m は第 m 層の任意点での深さ、 i は虚数単位であり、式(2-1)、(2-2)の $R_{m-1, 11}(\omega, \alpha)$ 、 $R_{m-1, 21}(\omega, \alpha)$ も同様にして得られる。また、 Q_m は第 m 層での Q 値であるが、本研究では Q 値はすべて20とし、周波数によらず一定であると仮定している。

本研究の数値シミュレーションでは、重複反射法逆解析直接定式化法を採用しているため、以下に示す誤差関数が最小となるような α を最確値とし、対象とする振動数領域の各振動数ごとに決定することとする。次に、これらの最確値の平均をとりS波速度を求めるものである。なお、地盤各層の層厚 H_m および密度 ρ_m 、基盤層のS波速度 V_n は既知とする。

$$\varepsilon = \left(\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n (\tau_i^*(\omega_k, \alpha) - \tau_i(\omega_k, Z_i)) \right) / N \cdots (6)$$

ここで、 $\tau_i^*(\omega_k, \alpha)$ 、 $\tau_i(\omega_k, Z_i)$ はそれぞれ i 層目における複素せん断応力の解析値、測定値による計算値であり、 N は基盤層を除いた層数であり、 n は各層における解析値の総数である。また、 Z_j は各層を n 等分したときの j 番目の深さである。 ω_k は対象とする振動数領域を分割したときの k 番目の振動数点である。(6)式における $\tau_i^*(\omega_k, \alpha)$ は次式で定義される。

$$\tau_i^*(\omega_k, \alpha) = \frac{R_{i, 11}(\omega_k, \alpha)}{R_{n, 11}(\omega_k, \alpha)} X_n(\omega_k, \alpha) \cdots (7)$$

図2に解析フローチャートを示す。

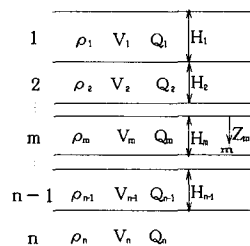


図1 地盤モデル

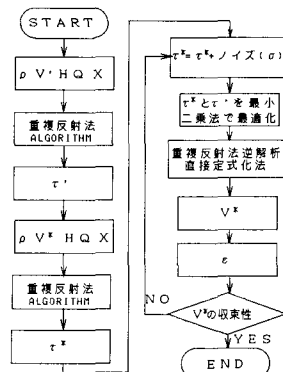


図2 解析フローチャート

3. 実地盤によるS波速度の同定 豊橋市南部で得られた記録を解析

対象記録として用い、当該地盤の同定を行った。表1に解析対象地震の諸元を示す。これら3地震は震央・規模は異なるが、いずれも最大数gal~10数galと比較的小さなものである。本研究では、SH波の重複反射を仮定している、これらの地震による水平方向2成分から震央直角方向を合成し、目視により主要動成分を取り出して解析に用いた。表2にボーリング調査によるN値から推定された地盤物性値を示す。ところで、これらの地盤物性値は空間的ばらつきもしくは試験誤差を有するものであり、数値シミュレーションにおいては、まず、各層についてS波速度の平均値の10%の標準偏差をもつ正規性の平均値0のノイズを与えて実際の地盤を想定したこととし、順解析によりせん断応力 τ^* を算定している。

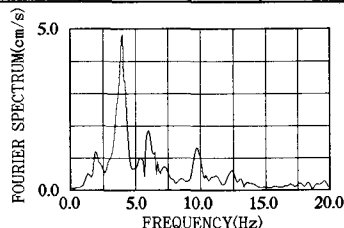
同定に際しては、地下1mと60mに埋設されている地震計による観測記録を用い、まずS波の初期値として、 $1.5 \times$ ボーリング調査によるN値から推定されたS波速度を用い、順解析により初期せん断応力 τ^* を算定している。次に各層ごとに得られたせん断応力の平均値の5%の標準偏差をもつ正規性のノイズを加え τ^* とし、これと τ^* を最小二乗法を用いて最適化し、せん断応力の入力値としている。こうして得られたせん断応力よりS波速度を逆算し、式(6)により ε を求めS波速度が収束するまで計算を繰り返す。これを対象とする振動数領域で個別に行うものである。対象とした周波数領域は0.1Hz~20.0Hzで、各層の解析点数nは80である。入力地震動のスペクトルはバンド幅0.4HzのParzenウィンドウにより平滑化されている。図3にS波速度の収束状況を示す。図4にはそれぞれのフーリエスペクトルを示す。(a),(b)はそれぞれ地下1mでのスペクトルであり、(a)はボーリング調査によるN値から推定された地盤物性値によるもの、(b)は同定結果より得られたS波速度によるものである。(c)は地下1mと60mにおける観測記録である。図5にその同定結果を示す。

表1 地震諸元

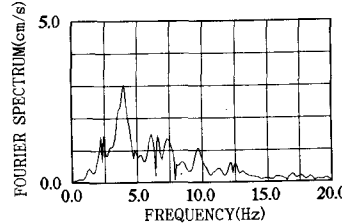
地震番号	EQ-1	EQ-2	EQ-3
発 生 年 月	1991年4月25日	1991年5月11日	1991年9月3日
震 域	静岡県中部	愛知県西部	東海南海沖
震 央	4.9	3.9	6.3
東 経	138° 12'	136° 59'	138° 50'
北 緯	35° 03'	35° 12'	33° 41'
深さ(km)	32	46	33

表2 地盤物性値

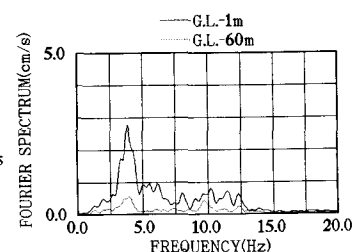
	単位体積重量 γ (t/m ³)	せん断弾性係数 G (tf/m ²)	層厚 H (m)	S波速度 V (m/sec)
第1層	1.75	6120	5.0	185.0
第2層	1.63	4160	5.0	160.0
第3層	1.95	10400	6.6	230.0
第4層	2.02	19160	3.3	305.0
第5層	2.10	43390	1.1	450.0
第6層	1.80	7340	1.3	200.0
第7層	1.90	9530	1.3	220.0
第8層	2.10	35830	26.8	410.0
基礎層	2.50	91840	—	600.0



(a) G.L.-1mのフーリエスペクトル



(b) G.L.-1mのフーリエスペクトル



(c) フーリエスペクトル

図4 加速度フーリエスペクトル

	S波速度 V (m/sec)
第1層	195.2
第2層	171.6
第3層	271.4
第4層	346.2
第5層	559.6
第6層	285.3
第7層	284.0
第8層	503.9

図5 同定結果

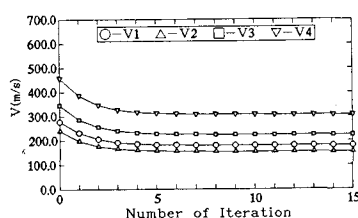
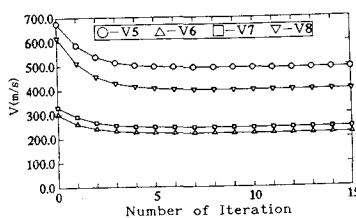
(a) $V_1 \sim V_4$ (b) $V_5 \sim V_8$

図3 S波の収束状況

4. まとめ アレー観測より得られた記録に基づき、地盤中物性値の空間

分布もしくは、試験誤差をノイズとして仮定し、実地盤のモデルを用いて

誤差関数が最小になるような最適推定値(S波速度)を数値シミュレーションにより求める解析を行った。同定結果については、N値より算定されたS波速度よりも5%~最大で30%もの相違を示し、同定値の方が観測記録に近いスペクトルを示すことからN値からの算定式では誤差が生じるものと考えられる。また、地盤物性値の空間分布によるばらつき、土質調査や試験誤差をノイズとして考慮したが、安定した結果が得られた。

参考文献:1)土岐:新体系土木工学11構造物の耐震解析,技報堂出版