

日本道路公団 正会員 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、地盤のアレー観測により地盤震動の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推定が行われている。本研究ではSH波の重複反射を仮定した数値シミュレーションによりせん断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. 重複反射法による定式化 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、地盤各層のせん断波速度 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⁾

$$X_n(\omega, 0) = R_{n-1, 11}(\omega, \alpha) X_1(\omega, 0) \cdots (1-1)$$

$$\tau_n(\omega, 0) = R_{n-1, 21}(\omega, \alpha) X_1(\omega, 0) \cdots (1-2)$$

$$X_m(\omega, 0) = R_{m-1, 11}(\omega, \alpha) X_1(\omega, 0) \cdots (2-1)$$

$$\tau_m(\omega, 0) = R_{m-1, 21}(\omega, \alpha) X_1(\omega, 0) \cdots (2-2)$$

$$X_m(\omega, Z_m) = S_{m, 11}(\omega, \alpha) X_m(\omega, 0) + S_{m, 12}(\omega, \alpha) \tau_m(\omega, 0) \cdots (3-1)$$

$$\tau_m(\omega, Z_m) = S_{m, 21}(\omega, \alpha) X_m(\omega, 0) + S_{m, 22}(\omega, \alpha) \tau_m(\omega, 0) \cdots (3-2)$$

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。

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

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

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。

パラメータ α の値が正しい場合には、式(1-1)～式(3-2)は厳密に成立するが、一般には α の値は未知であるため、それらは近似的にしか成り立たない。そこで、式(6)に示す誤差関数が最小となるような α の値を最確値とし、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。そして、これらの最確値の平均値をとり、せん断波速度の最適推定値とするものである。なお、地盤各層の層厚 H_m および密度 ρ_m 、基盤層のせん断波速度 V_n は既知とする。

$$\varepsilon = \frac{1}{N} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^n \{ \tau_i^*(\omega_k, \alpha) - \tau_i(\omega_k, Z_j) \}^2 \cdots (6)$$

ここで、 $\tau_i^*(\omega_k, \alpha)$ 、 $\tau_i(\omega_k, Z_j)$ はそれぞれ i 層目における複素せん断応力の基盤面入力による解析値、表層測定値による計算値であり、 N は基盤層を除いた全層数であり、 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 番目の振動数点ある。式(6)における $\tau_i^*(\omega_k, \alpha)$ は次式で定義される。

$$\tau_i^*(\omega_k, \alpha) = \frac{R_{i-1, 21}(\omega_k, \alpha)}{R_{n-1, 11}(\omega_k, \alpha)} X_n(\omega_k, 0) \quad (Z_j=0) \cdots (7-1)$$

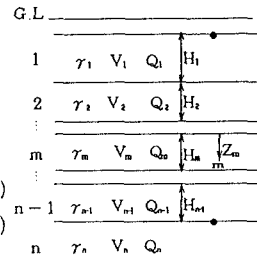


図1 地盤モデル

$$\tau_{i^*}(\omega_k, \alpha) = S_{i, 21}(\omega, \alpha) \frac{R_{i-1, 11}(\omega_k, \alpha)}{R_{n-1, 11}(\omega_k, \alpha)} X_n(\omega_k, 0) \\ + S_{i, 22}(\omega, \alpha) \frac{R_{i-1, 21}(\omega_k, \alpha)}{R_{n-1, 11}(\omega_k, \alpha)} X_n(\omega_k, 0) \quad (Z_j \neq 0) \cdots (7-2)$$

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

表1 地震諸元

地震番号	EQ-1	EQ-2	EQ-3
発 生 年 月	1991年1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
マグニチュード	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

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、観測値での各層各点の複素せん断応力 τ' の値を得るためにボーリング調査によるN値から推定されたせん断波速度の平均値の10%の標準偏差をもつ平均値0の正規性のノイズを

表2 地盤物性値(MODEL 1)

	単位体積重量 γ (tf/m ³)	せん断弾性係数 G(tf/m ²)	層厚 H(m)	せん断波速度 V(m/sec)
第1層	1.68	4950	9.7	170.0
第2層	1.95	10550	6.6	230.0
第3層	1.99	20150	5.7	315.0
第4層	2.04	33300	28.1	400.0
基盤層	2.50	91840	—	600.0

与え、実際の地盤を想定したこととし、あらかじめ地表面での観測地震動より、 τ' を算出している。同定に際しては、基盤に埋設されている地震計による観測記録を用い、せん断波速度の初期値として、1.5×ボーリング調査によるN値から推定されたせん断波速度を用い、順解析により初期せん断応力 τ^* を算定している。次に、得られたせん断応力 τ^* の平均値の1%の標準偏差をもつ正規性のノイズを加え τ^* とし、 τ^* と τ' の残差平方和を最小とするとす

表3 最適推定値

		EQ-1	EQ-2	EQ-3
MODEL 1	第1層	169.6 (-0.2)	169.2 (-0.5)	169.5 (-0.3)
	第2層	249.3 (8.4)	244.7 (6.4)	244.2 (6.2)
	第3層	355.3 (12.8)	339.8 (7.9)	338.8 (7.6)
	第4層	458.6 (14.7)	459.5 (14.9)	459.8 (15.0)
MODEL 2	第1層	137.8 (2.1)	137.9 (2.1)	137.8 (2.1)
	第2層	344.1 (9.2)	341.3 (9.3)	343.8 (9.1)
	第3層	489.2 (15.1)	487.5 (14.7)	488.4 (14.9)
MODEL 3	第1層	192.4 (1.3)	192.2 (1.2)	191.7 (0.9)
	第2層	472.0 (15.1)	471.6 (15.0)	471.2 (14.9)

るようにRosenbrock法を用いて最適化し、得られたせん断応力よりせん断波速度を逆算し、あわせて、式(6)により ε を求め、各層ごとに各点のせん断波速度の平均値をとり、全層でせん断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40である。なお、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。表3に各ケースにおけるせん断波速度の最適推定値を示す。また、図2にはEQ-2、MODEL 2の場合のそれぞれの地表面における加速度フーリエスペクトルを示す。

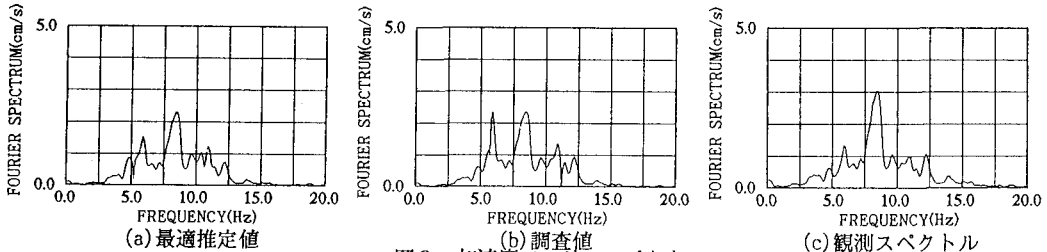


図2 加速度フーリエスペクトル

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（せん断波速度）を数値シミュレーションにより求める解析を行い、若干の考察を加えた。本検討の範囲内で得られた結果としては、解析対象地盤における原位置での弾性波試験などによるせん断波速度の値は得られていないが、使用した地震記録による最適推定値のばらつきが小さく、信頼できる結果が得られたのではないかと考えられる。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, 1981.