

水平アレー地震観測記録による表層地盤特性の同定とその適用

東電設計 技術開発本部地震技術部 正会員 ○安藤幸治
 東京都立大学 大学院工学研究科 フェロー会員 岩楯広広

1. はじめに

地震動を予測する際には震源破壊過程、伝播経路の媒質特性および表層地盤の増幅特性を考慮しなければならない。この中で特に建築・土木構造物の地震時挙動に影響を及ぼすのは表層地盤の増幅特性であり、複雑な不整形地盤上の構造物が地震時に大きな被害を被ったことは過去の地震被害や兵庫県南部地震により明らかである¹⁾。本研究は水平アレー地震観測記録を用いた表層地盤の構造および動的特性の同定を目的とする。その解析手法は、近接する2地点の地表面地震記録から次元重複反射理論によって求められる共通基盤内の各入射波はほぼ等しくなるという仮定の下に定式化したものである。水平アレー観測形態によれば比較的容易に広範囲に亘って地震観測が実施できるため、ここに提案する解析手法は耐震設計や被害予測の精度を向上させる上で有意であると考えられる。

2. 水平アレー地震記録による地盤構造同定手法の定式化

今、地表面上の近接する2つの地点で観測された地震記録があり、それら波形は各々の地点で次元重複反射理論に従うものと仮定する。即ち、図-1は近接する2観測地点 S_1 、 S_2 の地盤構造を含む地盤模式図であるが、両地点の周辺地盤は各々水平成層地盤構造を成しているとみなす。これより、必要な地盤物性値が与えられれば重複反射理論に従って各々の地表面観測記録 a_1 、 a_2 から任意の深さにおける入射波（上昇波） z_1 、 z_2 の計算が可能である。例えば、その深さとして同図の十分な深さにある基盤層の上面のように、両地点に共通な地層内の標高の同じ点を選定したならば、それら入射波は似たような波形になるはずである。これより、地表面観測点2地点において、それぞれの地震記録から共通地層内（基盤層）同一標高の入射波の波形を計算し、それらが同一になるという条件より双方の物性値の

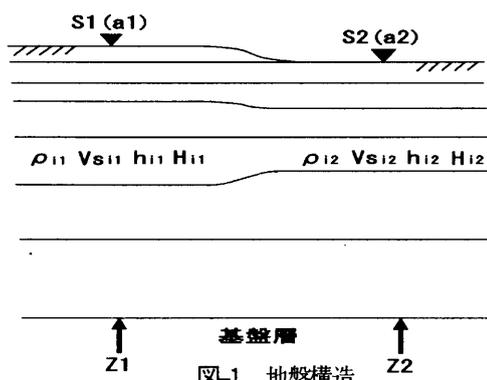


図-1 地盤構造

キーワード：同定、表層地盤特性、水平アレー地震記録、
 連絡先：〒110-0015 台東区東上野 3-3-3 東電設計（株）

同定が可能となる。

表層地盤の層毎の局所座標として層上面を原点にとり深さ方向に x 軸をとれば、鉛直下方の入射波に対する各層の運動方程式は次のようになる。

$$\rho \partial^2 u(x,t) / \partial t^2 = G \partial^2 u(x,t) / \partial x^2 \quad (1)$$

ここに、 u 、 ρ 、 G はそれぞれ変位、密度、せん断弾性係数である。

上式の解は、次のようになる。

$$u(x,t) = Ce^{i(\omega t + kx)} + De^{i(\omega t - kx)} \quad (2)$$

ここに、 $k = \sqrt{\rho/G_0(1+2hi)}\omega = \omega/Vs_0\sqrt{1+2hi}$ であり、 G_0 、 Vs_0 は、各々無減衰時の剪断弾性係数、剪断波速度である。 h は減衰定数であるが、周波数依存性を $h = h_0 f^n$ という式で考慮している。ここに、 h_0 は周波数依存性のなるときの内部減衰定数であり、 n は周波数依存度である。

よって、基盤層を第 N 層とすれば、同層上面の入射波（式(2)の第一項）スペクトルは次のようになる。

$$z_N(\omega) = C_N(\omega) = A(\omega)C_1(\omega) \quad (3)$$

ここに、 $A(\omega)$ は地盤構造から決定される定係数である。

2地点の基盤層上面における入射波スペクトルの差の二乗和を評価するために、目的関数 ε を次のように定義する。

$$\varepsilon = \sum |z_{N1}(\omega) - z_{N2}(\omega)|^2 \quad (4)$$

ここに、 z_{N1} 、 z_{N2} は、それぞれ観測地点1、2の基盤層上面の入射波スペクトルである。

式(4)の入射波スペクトル z_{N1} 、 z_{N2} は、物性値に関して非線形の関係にあるので、これら物性値の近似値 p_0 に対する微小補正量 Δp についてテーラー展開をして、その一次まで考慮し次のように線形化を行う。

$$z_N(\omega) \approx z_{N0}(\omega) + \sum \partial z_N(\omega) / \partial p_i \Delta p_i \quad (5)$$

物性値の微小補正量 Δp の最適解は、式(4)の最小化必要条件式より正規方程式をたて、それを解いて求められる。必要条件式は次のようになる。

$$\partial \varepsilon / \partial \Delta p_{sr} = 0 \quad (s = 1, 2, r = 1, 2, 3, \dots) \quad (6)$$

3. 同定手法の適用

本研究で対象とした逗子市は、ほぼ東西に刻み込んでいる田越川の流域にあり、図-2は同河川河口部から上流部にかけての地盤の深さ方向の断面図である。同図に水平アレー観測地点 $K_1 \sim 5$ を示す。地点 K_1 には地中観測地点 K_6 （GL-30m）が埋設されている。ここでは、水平アレー地震観測地点5地点の内 K_1 と K_4 を対象とした場合の同定解析結果について述べ、地点 K_1 の鉛直アレー地震記録を使用し

逗子、モード解析
 地震技術部

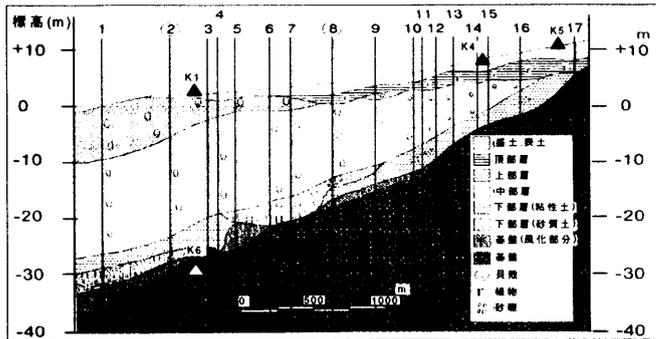


図-2 田越川流域の断面図

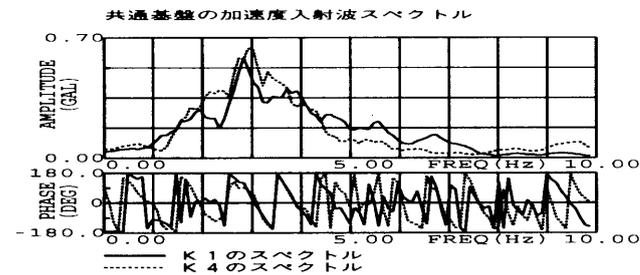


図-3 地点K1とK4の入射波スペクトル

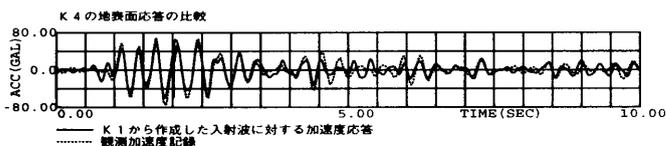
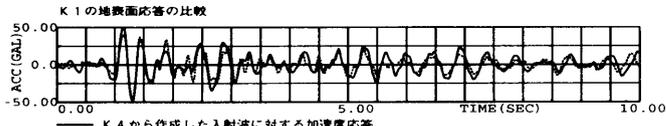


図-4 地点K1とK4の地表面加速度波形（上段K1，下段K4）

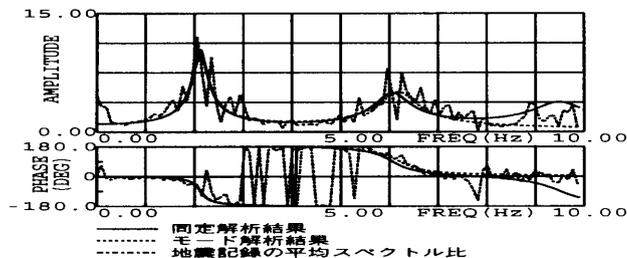


図-5 伝達関数の比較

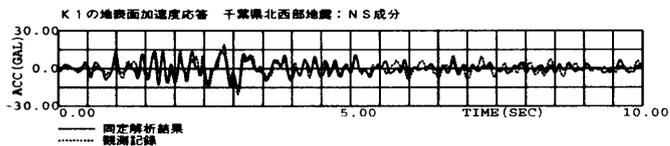


図-6 同定解析結果：地表面加速度応答

て求められたより精度の高い地盤構造を参照して結果を検証する。解析では3個の記録を使用した。同定解析では、各観測地点の基盤の深さを考慮して深さ30mで解析対象2地点の入射波を比較し、物性値パラメータとしてせん断波速度と減衰定数を選定した。

解析は、双方の地盤モデルに表-1に示したせん断波速度の初期値（地盤調査結果）を与えて式(4)の目的関数値を評価しながら繰り返し演算を行い、その収束を図った。解析結果を同表の平均値の欄に示す（K4は省略する）。図-3は3個の記録の内の一つの解析結果である。図-4は互いの他

表-1 K1の同定解析結果

層番号	土質	深度 (m)	剪断波速度(m/s)	
			初期値	平均値
1	ローム	1.0	150.0	150.1
2	砂質土	4.0	130.0	138.8
3	粘性土	20.0	100.0	216.8
4	粘性土	24.0	220.0	249.9
5	粘性土	25.0	250.0	257.7
6	風化土	26.0	400.0	404.9

表-2 固有値（固有周波数(f(Hz)及び固有減衰定数(h(%))

次数	f(Hz)	h(%)
1	2.12	7.1
2	6.20	5.9

表-3 鉛直アレー記録によるK1の同定解析結果

層番号	密度 (t/m ³)	剪断波速度(m/s)	減衰定数
		同定値	同定値
1	1.70	149.8	0.07
2	1.80	131.5	0.05
3	1.50	205.3	0.08
4	1.90	232.0	0.03
5	2.00	252.1	0.03
6	2.00	400.5	0.03

の入射波に対する地表面応答と地震記録との比較図である。共に良好である。一方、鉛直アレー地震記録による同定解析²⁾は、①地盤が運動方程式に従うことを前提に時間領域でモード解析を行い、固有値と固有ベクトルを求めて動的特性を把握する、②この結果を対象に数値モデル同定解析を行い地盤構造を同定する、という手順に従って実施した。2個の記録を使用して求められたモード解析結果を表-2に、同定解析結果を表-3に示す。図-5は同定解析結果（実線）、モード解析結果（点線）、記録の平均スペクトル比（一点鎖線）の比較図であり、図-6は波形の比較図である。共に良好な結果を得ている。表-1, 3より、水平アレー地震記録による同定解析結果は鉛直アレー地震記録による結果にほぼ等しいと言える。よって共通基盤において近接する2地点の入射波は一致すると仮定して導いた同定手法は、地盤構造を把握する手法として適用性があると判断される。

4. おわりに

震源断層の破壊過程を想定して広域に亘って地震動を予測する場合は、地盤構造の不整形性の影響が現れるより深い地盤を含めて検討される。従って、同域に関わる表層地盤構造は厳密に把握されなければならない。今後、本解析手法を多くの地震記録に適用して解析精度の向上を図り、耐震設計や地震防災に役立てたいと考えている。

謝辞：本研究を進める上で、神奈川大学の荏本孝久先生にご検討をいただきました。ここに厚く御礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 岩楯敏広：阪神・淡路大震災の地震の概要と土木構造物の被害、総合都市研究 第57号 1995
- 2) 安藤幸治、岩楯敏広：時間領域のモード解析による振動系の動的特性の同定とその適用、土木学会論文集, No.450 I-20.