

## 鉛直アレー観測記録による地盤震動特性値の同定

IDENTIFICATION OF PARAMETERS OF SUBSURFACE LAYERED SOIL USING VERTICAL ARRAY RECORDS

辻原 治\* 沢田 勉\*\* 谷 高博\*\*\*

By Osamu TSUJIHARA, Tsutomu SAWADA and Takahiro TANI

The objective of this study is to formulate the identification of the properties of subsurface layered soil by using vertical array records, and to examine the validity of the method. Identification problem of S-wave velocity and Q-value is formulated in the frequency domain. The soil properties are estimated so as to match the transfer function of subsurface ground, which are calculated from multiple reflection and refraction theory, to that obtained from array records. In numerical study, the subsurface ground which consists of 5 layers are identified. And the results are compared with elastic S-wave velocity estimated by well shooting.

## 1. まえがき

地表の地震動特性は、震源特性、伝播経路および地表近くの軟弱層によって生ずる波動の増幅特性などの影響を受け複雑に変化する。特に、わが国のように比較的軟らかい層をもつ平野部の地盤では、表層の地盤条件は地表地震動特性に大きな影響を及ぼし<sup>1),2)</sup>、近接する2地点でも地盤条件が異なれば地震動強度にかなりの差異が生じる。したがって、ある地点の地震動特性を知るためには、その地点の地盤条件を何らかの方法により求めることが必要となる。

従来より、地盤の動特性は弾性波探査やP S検層によって推定されているが、これらの方法による結果は土の微小震動時の値である。強震時には、土は顕著な非線形性を示すため、このような方法による地盤の動特性の推定値は地震時のそれとかなり異なることが予想される。強震時の土の非線形特性を明らかにするため多くの室内実験も行われているが、それらの試験結果は必ずしも地震時の実地盤の動特性と対応するものではない。近年、国内外で、地表および地中に設置した地震計による同時観測、すなわちアレー観測が行われるようになり、それより得られた記録はデータベース化されつつある<sup>3),4)</sup>。このようなアレー観測記録を用いて地震時地盤の動特性を推定する、つまり地盤構造を同定することにより、耐震工学上有用な情報が得られると考えられる。

---

\* 工修 和歌山工業高等専門学校助手 (〒644 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)  
 \*\*\* 徳島大学大学院 工学研究科修士課程 (同上 )

各種振動系の同定問題については、これまでに多くの研究があるが<sup>たとえは5)~8)</sup>、最近、拡張カルマンフィルター<sup>9)</sup>を適用した研究がいくつかみられる。この方法は、順次観測データを取り込み、系の動特性の推定値を逐次改良していくものであり、とくに時間領域の解析にその効果を発揮する。星谷らは<sup>10), 11)</sup>線形多自由度系の動特性を拡張カルマンフィルターを用いて同定する方法を定式化し、常時微動観測記録を用いて建物の動特性を推定している。これに対して、従来から振動系の同定問題に多く用いられている周波数領域の解析法は、スペクトルのスムージングに伴う減衰項の推定精度の低下などの欠点が指摘されているが<sup>11)</sup>、地盤構造の同定問題に関しては、地盤震動の解析方法として広く用いられているSH波の重複反射法(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、解析の手続きも比較的簡単である。

そこで本研究では、表層地盤を水平な成層構造を持つ連続体としてモデル化し、深さ方向の複数観測点で記録された波形のスペクトル比と、SH波の重複反射を仮定して得た計算値との残差平方和を最小にすることで、地盤のS波速度およびQ値を等価線形的に同定する方法を定式化する(ただし、地盤各層の層厚と密度は、標準貫入試験等により比較的精度よく推定できるので既知として扱う)。また、いくつかのモデル地盤に対して本手法を適用し、解の収束性を検討する。さらに、鉛直アレー観測記録を用いて実地盤のS波速度およびQ値を同定し、手法の適用性と問題点について若干の考察を加える。

## 2. 成層地盤構造の同定問題の定式化

一般に、地殻は地表に近くなるほど軟らかくなる構造を持つため、地表付近においては、地震波(屈折波)はほぼ鉛直下方から入射すると近似できる<sup>12)</sup>。また、地表付近での地盤震動が実体波によるものであると仮定すると、その水平動はS波によるものであり、さらに水平動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に示すように、表層地盤を水平成層構造としてモデル化し、SH波が鉛直下方から入射するという仮定のもとに、地盤震動記録から各層の地盤パラメータを同定する問題を考える。

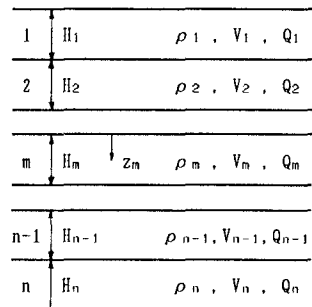
いま、第n層(基盤)と第m層内の任意点(第m層上面より $z_m$ の深さ)に設置された2つの地震計により地盤震動記録が得られたものとする。それらの波形をフーリエ変換して得られるフーリエスペクトルをそれぞれ $X_n(f)$ および $X_m(f)$ とすると、基盤に対する第m層任意点の周波数応答倍率 $U_{mn}(f)$ は次式で表される。

$$U_{mn}(f) = |X_m(f) / X_n(f)| \tag{1}$$

ここで、 $f$ は振動数である。他方、SH波の重複反射を仮定すると、基盤に対する第m層任意点の周波数応答倍率 $U_{mn}(f)$ が以下のように誘導される。地表面( $z_1=0$ )での変位振幅を $u_1(0)$ とすると、第m層任意点および基盤の変位 $u_m(z_m)$ 、 $u_n(0)$ は次式のように与えられる<sup>12)</sup>。

$$u_m(z_m) = R_m(1, 1) u_1(0) \tag{2}$$

$$u_n(0) = R_{n-1}(1, 1) u_1(0) \tag{3}$$



ここで、 $R_m(1, 1)$ および $R_{n-1}(1, 1)$ は、次に示す行列 $[R_m]$ および $[R_{n-1}]$ の第1行第1列成分である。

$$[R_m] = [T_m][S_{n-1}] \cdots [S_1] \tag{4}$$

$$[R_{n-1}] = [S_{n-1}][S_{n-2}] \cdots [S_1] \tag{5}$$

図-1 表層地盤モデル

上式において  $[S_j]$ ,  $j=1, 2, \dots, n-1$  は次式で表される。

$$\begin{cases} S_{j-11} = [\exp(ia_j \omega) + \exp(-ia_j \omega)] / 2 \\ S_{j-12} = [\exp(ia_j \omega) - \exp(-ia_j \omega)] / 2ib_j \omega \\ S_{j-21} = ib_j \omega [\exp(ia_j \omega) - \exp(-ia_j \omega)] / 2 \\ S_{j-22} = S_{j-11} \end{cases} \quad (6)$$

また、式(4)の右辺第1項の  $[T_m]$  は、式(6)で定義される行列  $[S_m]$  において  $\Pi_m$  の代わりに  $z_m$  を代入したものである。ただし、 $\omega$  は角振動数、 $i$  は虚数単位であり、係数  $a_j$ ,  $b_j$  は次式で与えられる。

$$\begin{cases} a_j = H_j / (V_j \sqrt{1+i/Q_j}) \\ b_j = \rho_j V_j \sqrt{1+i/Q_j} \end{cases} \quad (7)$$

式(2)および式(3)から、基盤に対する第  $m$  層任意点の周波数応答倍率が次のように得られる。

$$\hat{U}_{mn}(f) = |R_m(1,1) / R_{n-1}(1,1)| \quad (8)$$

行列  $[R_m]$  および  $[R_{n-1}]$  を構成する  $[S_j]$ ,  $j=1, 2, \dots, n-1$  および  $[T_m]$  は式(6), (7)からわかるように、地盤各層の層厚、密度、S波速度およびQ値を含むから、式(8)の  $\hat{U}_{mn}(f)$  はこれら地盤パラメータの非線形関数となる。ここで、地盤各層の層厚および密度は標準貫入試験等により精度よく推定できるので既知とすると、同定すべきパラメータは地盤各層のS波速度  $V_j$  とQ値  $Q_j$ ,  $j=1, 2, \dots, n-1$  となる。これらの同定すべきパラメータを一般的に  $\alpha_j$ ,  $j=1, 2, \dots, 2(n-1)$  で表し、式(8)の  $\hat{U}_{mn}(f)$  を  $\hat{U}_{mn}(f; \alpha_1, \dots, \alpha_{2(n-1)})$  で表示すると、 $\alpha_j$  を同定するための評価関数は次式のように表される。

$$S_e = \sum_{k=1}^{N_f} [\hat{U}_{mn}(f_k; \alpha_1, \dots, \alpha_N) - U_{mn}(f_k)]^2 \rightarrow \min \quad (9)$$

ここで、 $f_k$  は対象とする振動数領域をいくつか分割したときの振動数点、 $N_f$  はそのときの振動数点数、 $N$  は同定すべきパラメータの数であり  $N=2(n-1)$  である。また、3個以上の地震計で地盤震動が観測されている場合、たとえば、第  $n$  層上面、第  $m$  層内の1点に加えて第  $r$  層内でも地盤震動記録が同時に観測されているような場合は、次式に示す評価関数が考えられる。

$$S_e = \sum_{l=m, r} w_l \sum_{k=1}^{N_f} [\hat{U}_{ln}(f_k; \alpha_1, \dots, \alpha_N) - U_{ln}(f_k)]^2 \rightarrow \min \quad (10)$$

ただし、上式における  $w_l$  は1点の周波数応答倍率に対する重み係数であり、地表または地中観測点の周波数応答倍率の下の面積を同一にする係数である。

以上のように、地盤各層のパラメータを同定する問題は、式(9)あるいは式(10)の目的関数を最小にする  $\alpha_j$ ,  $j=1, 2, \dots, N$  を決定する非線形最適化問題に帰着する。このような非線形最適化問題を解くために各種の非線形計画法が用いられているが、ここでは、SLP法 (Sequential Linear Programming Method) とDFP法 (Davidon-Fletcher-Powell Method)<sup>13)</sup> を併用する。すなわち、反復計算の初期の段階では、初期値の影響を比較的受けにくいSLP法を用い、解がある程度収束した後は、精度面で優れているDFP法を用いることとした。

### 3. 数値計算による本手法の妥当性の検討

ここでは、いくつかの地盤モデルを対象に、数値計算によって本手法の妥当性を検討する。地盤モデルはすべて基盤上の5層からなる成層構造とした。表-1に、用いた地盤モデル (Model 1~Model 4) の諸元を示す。

表-1 地盤モデルの諸元

Model 1~Model 3は、地表面下 50mまでの各薄層の層厚およびS波速度が異なる構造であり、密度とQ値は同じ値としている。また、Model 4は、後に本手法を用いて同定を行う東京大学生産技術研究所千葉実験所における地盤構造で<sup>15)</sup>、Q値以外はボーリング調査、速度検層などで推定された値である。以下では、次の2つのケース

モデル名	層番号	層厚 [m]	単位体積重量[t/m <sup>3</sup> ]	S波速度 [m/s]	Q値
Model 1	1	10.0	1.80	100.0	10.0
	2	10.0	1.80	200.0	10.0
	3	10.0	1.80	300.0	10.0
	4	10.0	1.80	400.0	10.0
	5	10.0	1.80	500.0	10.0
Model 2	1	10.0	1.80	100.0	10.0
	2	5.0	1.80	200.0	10.0
	3	10.0	1.80	300.0	10.0
	4	15.0	1.80	150.0	10.0
	5	10.0	1.80	500.0	10.0
Model 3	1	5.0	1.80	150.0	10.0
	2	10.0	1.80	80.0	10.0
	3	15.0	1.80	200.0	10.0
	4	5.0	1.80	100.0	10.0
	5	15.0	1.80	400.0	10.0
Model 4	1	5.0	1.35	140.0	10.0
	2	3.5	1.50	320.0	10.0
	3	6.0	1.70	320.0	10.0
	4	10.9	1.70	320.0	10.0
	5	14.6	1.80	420.0	10.0

Case 1 : 基盤上面 (Model 1~Model 3はG.L.-50m, Model 4はG.L.-40m) とG.L.-5mの周波数応答倍率を評価関数に用いる。

Case 2 : 基盤上面と中間点 (Model 1~Model 3はG.L.-25m, Model 4はG.L.-20m) の周波数応答倍率を評価関数に用いる。

について、同定すべきパラメータの初期値を種々変えて与えたときの解析結果を示す。S波速度の初期値としては、各モデル (表-1に示す値、以後真値と呼ぶ) に対して真値の0.7~0.9倍および1.1~1.5倍した値を用いた。また、Q値については、全てのケース15とした。解析にあたっては、モデルパラメータの真値によって、0.1Hz~10.0Hzの振動数域を等間隔に分割した100振動数点 ( $f_1, f_2, \dots, f_{100}$ ) において周波数応答倍率を計算機でシミュレートし、これを式(9)の  $U_{mn}(f_k)$  として用いた。

図-2には、Case 1のModel 4について、S波速度の初期値を真値の0.7倍とした場合の各パラメータの収束状況を示す。図中の破線は各パラメータの真値を表している。図より、10回程程度の反復計算でS波速度はほぼ真値に収束しているのに対し、Q値は多くの反復計算を要して徐々に収束していく様子がわかる。このよ

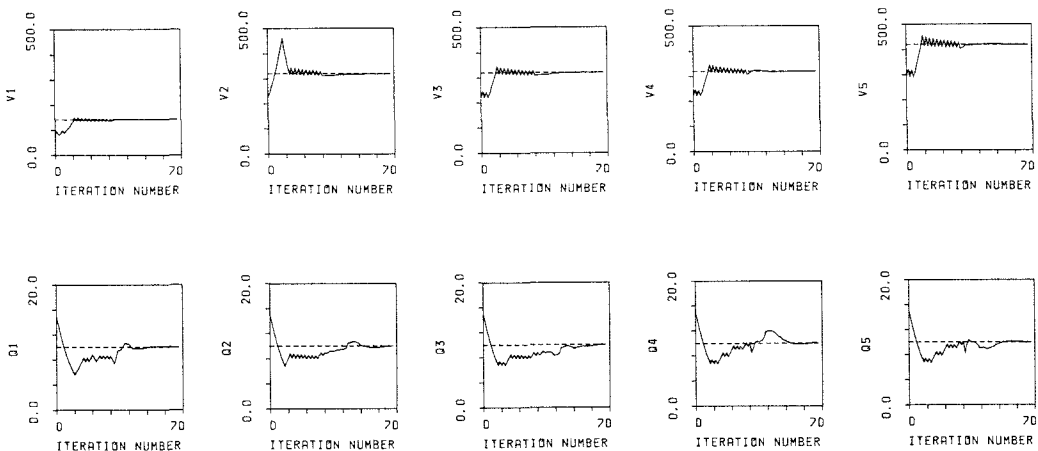


図-2 パラメータ (S波速度およびQ値) の収束状況

うなQ値の収束速度の違い傾向は全てのケースにみられた。これは、周波数伝達関数に対するQ値の影響度が一般にS波のそれよりも小さいという指摘<sup>14)</sup>と対応しており、Q値同定の困難さを示唆するものと思われる。表-2は、各モデルについて、種々の初期値を用いて同定を行った場合に、解が真値に収束したか否かを示したものである。表中の○印は解が真値に収束したことを示し、×印は真値とは異なる値に収束したかあるいは発散したことを示す。表より、Model 2のCase 1を除き、各モデルともに真値に対して0.8~1.4倍というかなり離れた初期値からでも解が真値に収束することがわかる。

このように、本手法を用いれば、5層程度からなる成層地盤の各層S波速度とQ値を、地中2点の鉛直アレー観測記録から同定し得ることが数値計算によって明らかにされた。なお、この種の同定において問題となる解の uniqueness problem に対しては、未だ理論的証明がなされておらず、ここで行ったように、いくつかの異なった初期値から出発して同一解に収束するか否かを確認してみる必要がある。

#### 4. アレー観測記録を用いた実地盤のS波速度とQ値の同定

最近国内では、いくつかの研究機関でアレー観測が実施され、得られた観測記録はデータベース化されつつある<sup>3), 4)</sup>。ここでは、文献3)のアレー観測記録データベース (SMARD) に収録されている記録のうち、東京大学生産技術研究所千葉実験所構内の地点 C0 (図-3 参照) で得られた鉛直アレー観測記録を使用させていただいた。なお、同観測地区においては前述のとおり、ボーリング調査や速度検層などが実施されており、表層地盤は概略水平に近い層構造を持つことが報告されている<sup>15)</sup>。各種調査や試験から予め推定されている地盤条件 (Q値を除く) は表-1のModel 4に示す。この観測地区では、過去に多くの地震記録が得られている。ここでの解析では、それらのうち、マグニチュードが比較的大きく、かつ、震源が深い位置にある地震による記録を用いた。表-3には今回用いた観測地震の諸元を示す。以下ではこれらの地震をSE1~SE5で表す。地点C0の鉛直アレーでは、図-4に示すように、地表より深さ1m, 5m, 10m, 20m, 40mの計5箇所にて地震計が埋設されている。SE1~SE5の地震による各深さでの地盤震動記録を図-5に示す。図において、上から順に地表に近い箇所にて得られた加速度波形を示している。

表-2 数値計算による同定結果

ケース	モデル名	0.7	0.8	0.9	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5
Case 1	Model 1	×	○	○	○	○	○	○	×
	Model 2	○	○	○	○	○	×	×	×
	Model 3	○	○	○	○	○	○	○	○
	Model 4	○	○	○	○	○	○	○	○
Case 2	Model 1	×	○	○	○	○	○	○	×
	Model 2	○	○	○	○	○	○	○	○
	Model 3	○	○	○	○	○	○	○	×
	Model 4	×	○	○	○	○	○	○	○

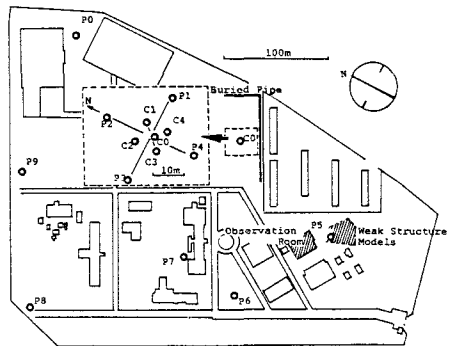


図-3 アレー観測ネットワーク<sup>15)</sup>  
(東京大学生産技術研究所千葉実験所構内)

表-3 地震の諸元

地震名	マグニチュード	震源深さ [km]	震央距離 [km]
SE1	7.3	388	374
SE2	5.0	79	57
SE3	6.8	415	635
SE4	6.1	78	28
SE5	6.5	73	105

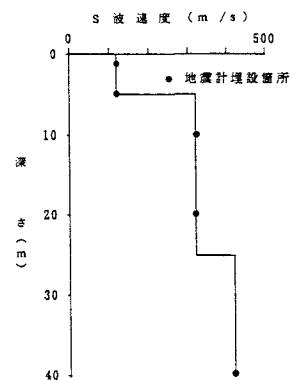


図-4 速度検層によるS波速度と地震計の設置位置

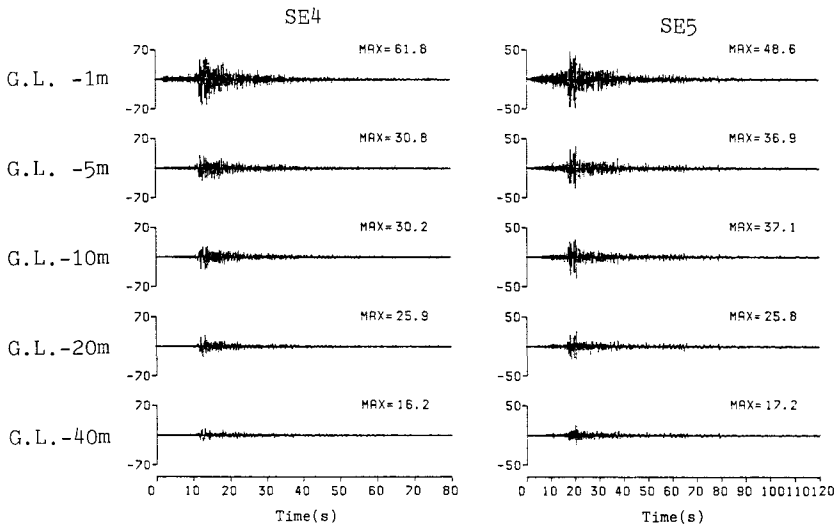
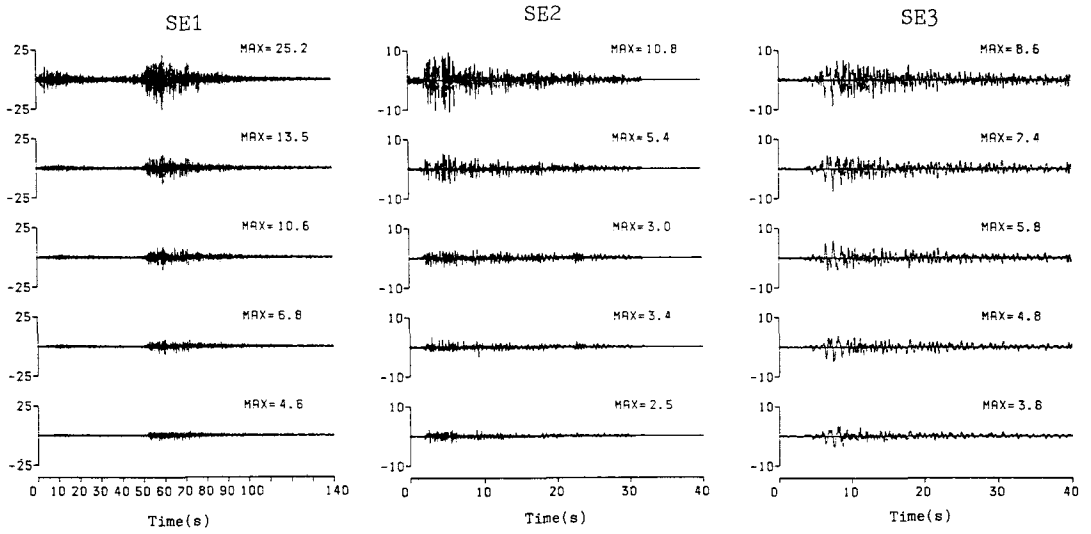


図-5 観測地震の加速度記録（水平動・震央直角方向成分）

これらの記録を用いて地盤構造の同定を行う際には、本手法ではS波の重複反射を仮定しているため、記録波形に含まれるS波のみを分離抽出して用いることが望まれる。しかし、そのような波形分離は容易ではなく、現実には記録波形のうちS波が卓越して含まれる区間を使用せざるを得ない。そこで、まず一組の記録について、全記録長をいくつかの区間に分け、それぞれの区間の波形から同定したパラメータ値を比較してみることにした。図-6には、SB1の深さ5mと40mでの記録において、① 0~50秒 ② 50~70秒 ③ 70~140秒 ④ 30~100秒の区間の波形を使用して同定を行った結果を示す。図には、それぞれの使用区間で求めた周波数応答倍率および推定されたS波速度とQ値を示している。また、比較のために速度検層によるS波速度の推定値も示している。記録の周波数応答倍率は使用区間によってかなり異なっており、当然

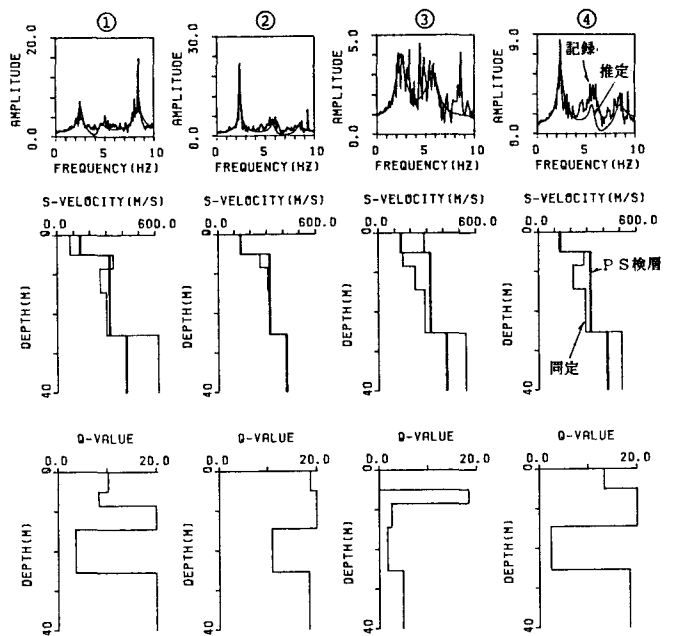


図-6 各区間の波形による同定結果

のことながらパラメータも異なった値に収束している。その中で、主要動部分である②の50~70秒の区間の波形より同定されたS波速度は速度検層による値とよく対応している。また、このときの周波数応答倍率の対応性もよい。このSB1の地震における基盤（深さ40m）最大加速度は5gal程度と小さいことから表層地盤の挙動はほぼ線形であったと考えられ、速度検層による推定値が土の微小変形（線形挙動）時の値であることを考え合わせれば、記録の主要動部分から妥当な同定結果が得られたと判断できる。そこで以下の解析では、それぞれの地震記録の主要動部にS波が卓越して含まれるとし、その区間の波形から式(9)の  $U_{nn}(f_k)$  を求めた。

つぎに、地震SE1~SE5の記録を用いて解析した結果について述べる。各地震において、深さ方向計5箇所まで地盤震動記録が得られているが、ここでは同定に使用する地震記録の組合せとして表-4に示す5ケースを考えた。すなわち、Case 1~Case 4はG.L.-40mの記録と他の地震計埋設箇所の記録を用いるケースであり、Case 5は全ての地震計による記録を同時に考慮して同定を行うケースである。解析に際しては、パラメータの初期値として次の値を用いた。

S波速度の初期値 . . . . . 速度検層から得られた値  
Q値の初期値 . . . . . 10

また、Q値の発散を防ぐために上限値（20）を設定した。

以下に解析結果を示す。図-7には、Case 1~Case 4について、観測記録から得られた周波数応答倍率〔太線〕と解の収束値から求めたそれ（以後推定値という）〔細線〕を示す。図において、左よりSE1~SE5の、また上よりCase 1~Case 4の周波数応答倍率を示している。図より、記録から得られた

表-4 解析ケース

深さ	Caes 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
1m	○				○
5m		○			○
10m			○		○
20m				○	○
40m	○	○	○	○	○

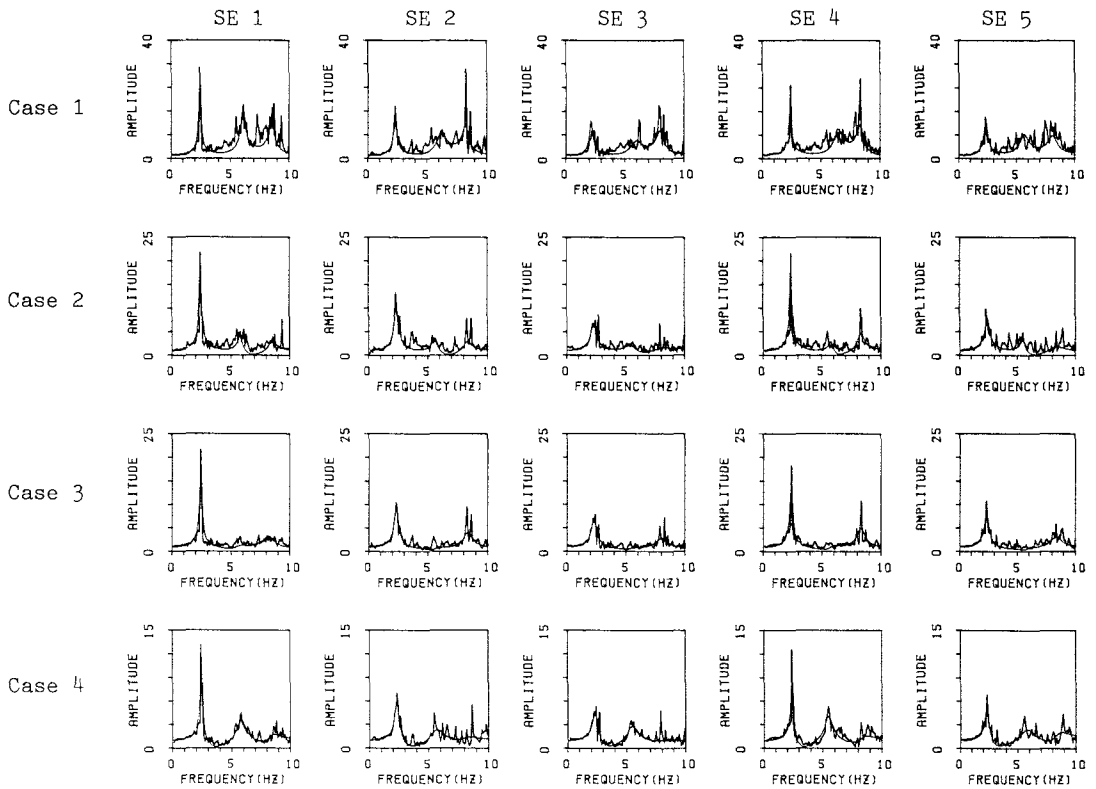


図-7 観測記録から得られた周波数応答倍率とパラメータの収束解に対する周波数応答倍率

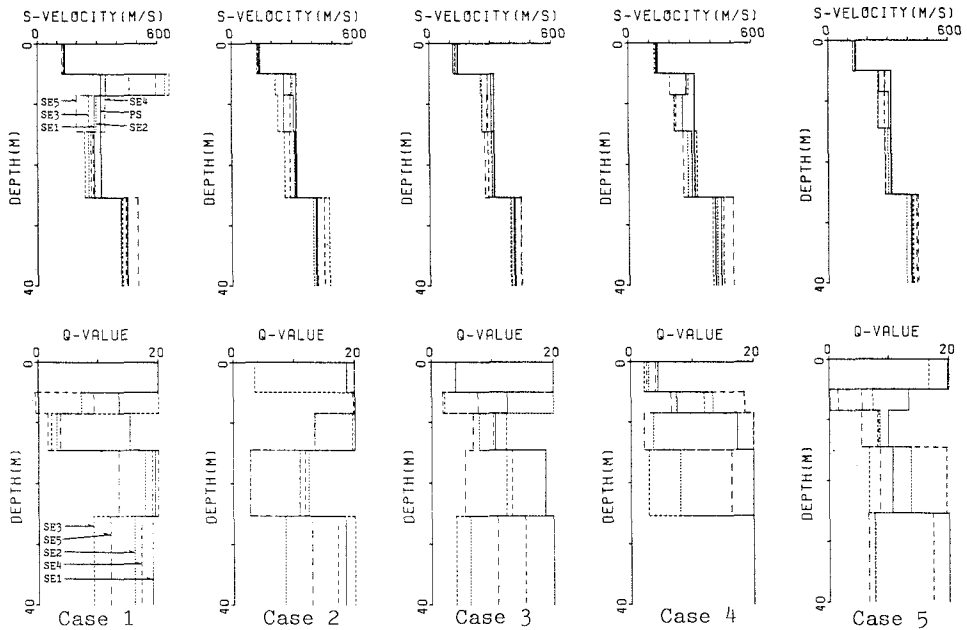


図-8 S波速度およびQ値の同定結果



周波数応答倍率とその推定値はよく対応している。しかし、記録から得られた周波数応答倍率は、同じケースでも用いる地震記録によって形状の異なっているものがある。とくに、G.L.-1mの記録を用いたCase 1においては、周波数応答倍率が高振動数域(7Hz~9Hz)で大きく増幅されており、そのために2次および3次のピークが不明瞭になっている。そして、このCase 1から同定されたS波速度およびQ値はともにばらつきが大きい(図-8参照)。この理由として、ノイズの影響以外に、記録に含まれるS波以外の波が地表近くで大きく増幅されたことや、周りの構造物から何等かの影響があったこと等いくつか考えられるが、実際のところよくわからない。一方、Case 2~Case 4については、周波数応答倍率の低次モードのピークが比較的明瞭に現れており、各地震記録による周波数応答倍率の推定値のピーク振動数はおおむね一致している。

図-8には、Case 1~Case 4およびCase 5についてのS波速度とQ値の同定結果を示す。図より、S波速度の収束値は各ケースとも近い値が得られており、またそれらは速度検層による推定値とも良い対応を示すことがわかる。これらのケースでは、S波速度の同定結果と速度検層による推定値の差異は10%程度以内である。本研究で用いたSE1~SE5の地震の基盤最大加速度はせいぜい20 galであり、それほど大きなものではないことから、地震時地盤のS波速度は速度検層による値と大差ないと考えらる。したがって、Case 2~Case 4では信頼できるS波速度の同定結果が得られたと判断できる。しかし、Q値の同定結果をみると、上限値20に収束している層もあり、ケース毎また地震記録毎に収束値が異なっている。地盤のQ値は、エネルギー伝達の程度を表す指標であり、おもに周波数応答倍率のレベルに関係する。各地震記録から得られた周波数応答倍率は、当該地盤において最もエネルギーの大きい1次モードのレベル(倍率)が異なっている。そのため、使用した地震記録毎にQ値の収束値がばらついたのは当然であるが、1組の地震記録からであっても、信頼できる同定結果は得られなかった。以上はCase 1~Case 4の、地中2箇所の記録を用いた場合の解析結果について述べた。次にCase 5(5箇所すべての地震計による記録を同時に考慮した場合)の解析結果について述べる。図-8より、S波速度の収束値は、地中2箇所の記録から同定した場合に比べて、使用した地震記録によるばらつきが小さく、また、速度検層による推定値ともよく対応しており、両者の差異は5%程度である。しかし、Q値については、使用地震記録によって異なった値に収束しており、精度のよい同定はできなかった。

このように、地盤各層のS波速度については、鉛直アレー観測記録から信頼できる同定結果が得られたが、Q値の同定は現段階では困難であることがわかった。

#### 4. むすび

本研究では、鉛直アレー観測記録を用いた表層地盤構造の同定問題を周波数領域で定式化し、数値計算により手法の妥当性を検討した。さらに、実地震記録を利用して地盤のS波速度およびQ値の同定を行い、その結果について若干の考察を加えた。得られた結果を要約すると以下ようになる。

- 1) いくつかのモデル地盤を対象として数値計算を行った結果、成層地盤における各層のS波速度およびQ値の同定は可能であることがわかった。
- 2) 鉛直アレー観測記録を用いて実地盤の同定を行ったところ、つぎのような結果が得られた。
  - I) 地中2点の鉛直アレー観測記録からS波速度はかなり精度よく推定できた。しかし、地表付近の記録を用いた場合には、S波速度の同定結果に大きなばらつきが生じた。
  - II) 地中複数点の鉛直アレー観測記録を同時に考慮して同定を行ったところ、S波速度については精度のよい同定結果が得られた。
  - III) Q値については、いずれの場合も信頼できる推定値が得られなかった。

以上のように、中小地震による鉛直アレー観測記録を用いた場合には、地盤各層のS波速度を、速度検層による推定値と同程度の精度で同定できることがわかった。したがって、本研究で用いた同定手法は、大地

震時の地盤の非線形性を等価線形的に推定する際に有効となる。今後、強震時の鉛直アレー観測記録を用いた地盤の同定を行い、強震時の地盤の非線形挙動を明らかにしたい。

## 謝辞

本研究で使用したアレー観測記録は、東京大学生産技術研究所千葉実験所で得られたものを同大学・片山恒雄教授のご好意により提供して頂いたものである。具体的なデータの利用については、アレー観測記録データベース (SMARD)<sup>3)</sup> に依った。また、本研究を進めるに当たり、京都大学防災研究所・亀田弘行教授ならびに京都大学工学部・杉戸真太助手には貴重な御助言をいただいた。ここに記して謝意を表する次第である。

## 参考文献

- 1) 田中・吉沢：強震地動に含まれる地盤特性，第4回日本地震工学シンポジウム講演集，pp.161～167，1974年
- 2) 翠川・小林：地震動の地震基盤からの入射波スペクトルの性質，日本建築学会論文報告集，第273号，pp.43～53，1978年
- 3) 杉戸・亀田・高山：アレー強震データベース (SMARD) の開発，第19回地震工学研究発表会講演概要集，pp.13～16，1987年
- 4) 童・片山：地震動データベースの構築とその有効性に関する検討，第19回地震工学研究発表会講演概要集，pp.17～20，1987年
- 5) Udawadia, F.E., Sharma, D.K., Shah, P.C.: Uniqueness of damping and stiffness distribution in identification of soil and structural system, ASME, Vol.45, pp.181～187, 1978
- 6) Mcverry, G.H.: Structural identification in the frequency domain from earthquake records, EESD, Vol.8, PP161～180, 1980
- 7) 太田：地盤工学への最適化法の適用，日本建築学会論文報告集，pp.35～41，1975年
- 8) 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
- 9) Jazwinski, A.H.: Stochastic Processes and Filtering Theory, Academic press, 1970
- 10) 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，第344号/I-1，pp.289～298，1984年
- 11) 星谷・斉藤：常時微動記録を用いたEK-WGI法による建物の動特性の推定，土木学会論文集，第350号/I-2，pp.263～270，1984年
- 12) 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
- 13) Kowalik, J., Osborne, M.R. (山本他訳)：非線形最適化問題，培風館，1972年
- 14) 沢田：地震動の工学的特性の解析とその応用に関する研究，京都大学学位論文，pp.84～88，1988年
- 15) 片山：地震動の工学的距離相関特性に関する実証的研究，科学研究費補助金研究成果報告書，1986年  
(1989年10月2日受付)