

鉛直アレー観測記録を用いた地盤動的定数の推定

Evaluation of Dynamic Properties of Surface Ground by Using Vertical Array Records

池本敏和*・宮島昌克**・北浦 勝**

Toshikazu Ikemoto, Masakatsu Miyajima and Masaru Kitaura

* 金沢大学助手, 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

** 工博, 金沢大学教授, 工学部土木建設工学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

Evaluation of ground motion at a ground surface is important for seismic resistant design of structures. However, estimation of amplification of surface ground motions in various soils is difficult. The amplification is greatly affected by dynamic soil parameters. Inverse analysis by combining the simplex optimum method with the multiple reflection theory was introduced in this study. The most suitable dynamic soil parameters were identified by using horizontal and vertical ground motions in the down-hole array records. Subsequently the application of the method to actual vertical acceleration records as well as horizontal one. The availability of these proposed methods was verified through comparison of the results of observation and calculation at the ground surface at the site of the Chiba station. The results were also compared with PS logging data in the down-hole.

Key Words : Soil parameter, Vertical array records, Inverse analysis, Genetic algorithm

キーワード: 地盤パラメタ, 鉛直アレー, 逆解析, 遺伝的アルゴリズム

1. まえがき

入力地震動の設定は工学的に極めて重要な課題であり, 設定時に問題となるのが地震時の地盤動特性である。特に, 表層部分の沖積層などの軟弱な地盤では, 地震波が大きく増幅されることが知られており, この増幅特性の解明が地表面における地震動の推定精度向上に深く関わっている。動特性の推定に関して様々な手法が開発されているが, それらの手法を大別すると, 室内試験と原位置試験に分けられる。

室内試験には, 振動3軸試験, 動的単純せん断試験, 動的ねじり試験, 共振試験などがあり, 土のせん断弾性係数, ポアソン比, 減衰定数などの地盤動的定数を調べることができる。室内試験の特徴は, 原位置試験では得られない大ひずみでの動特性値が求められることである。一方, サンプリングによる乱れや試験精度などの影響により, 原位置試験による結果との整合性がそれほど良好ではないことや, 試験法による結果に食い違いが見られるなどの問題点もある。

原位置試験としては速度検層が挙げられる。これは, ボーリング孔を利用して, 地盤を伝わるP波またはS波の伝播速度を直接測定する方法であり, 測定値と密度からせん断弾性係数やポアソン比を求めることができる。また, 常時微動観測も原位置試験の一種であり, 常時微動波形を観測することにより, 地盤の卓越周期などをある程度予測することができる。これらの試験法は地盤の微小振動時における動特性を推定する方法である。室内試験の結果から, 地盤の動特性は微小振動時と大変形時では異なることが知られている。したがって, 地震時の

ような大変形を受ける場合の地盤の動特性を求める新たな手法として, 近年, 観測されるようになった鉛直アレー記録を用いる手法が開発されている。

逆解析とは, 物理モデルの応答が既知である場合に, その応答値から物理モデルを構成する力学特性や境界条件を推定する方法である¹⁾²⁾。したがって, 地中と地表面の同時地震観測記録が得られている地盤に逆解析を適用すれば, 地震時の地盤動的定数を推定でき, 動特性の解明に有用な情報が得られることが期待される。

北浦ら³⁾は, 常時微動観測によって得られた地表における常時微動波形と, ホワイトノイズを入力して求めた1自由度系の応答波形との誤差二乗和を最小とすることで, 比較的均一な地盤における減衰定数を推定している。鉛直アレー観測記録による水平成層地盤の逆解析に関する研究が数多く報告されている⁴⁾⁵⁾。それらの研究のほとんどは, 観測記録のスペクトル振幅比とその理論値の誤差二乗和を目的関数として, 何らかの最適化手法を適用して地盤のS波速度およびQ値を推定している。辻原らの研究は¹⁰⁾ 観測記録に含まれるノイズの影響や層分割数の増加と同定精度の関係など, 逆解析手法が抱える問題点に取り組んだ数少ない研究という点で注目される。

一般の耐震設計においては, 水平動についての検討は精力的になされているものの, 上下動については十分な検討が行われていないのが現状である。これは, 上下動の加速度が水平動のそれと比べて小さいことや, 構造物の特性として, 上下動には比較的大きな強度を発揮することなどによる。しかし, 兵庫県南部地震に見られるような直下型地震では震央距離が短く, 地震動の上下動成分が十分に減衰していない場合が多い。

また、逆解析では多数の情報を利用した方が解の精度を上げることが容易であり、表層と基盤層上面の波形記録のみから各層の逆解析を行うには、多くの未知変量を最適化する必要がある。そのためには、遺伝的アルゴリズムのような手法が有効である。

本研究の目的は、鉛直アレー観測の水平及び上下地震動記録による逆解析手法の提案を行うことである。本手法が確立されれば、従来の原位置試験では行えなかった大ひずみ時における実地盤の動特性値の評価が行える。本論文の概要を以下に示す。2. では、本研究で用いる逆解析手法を定式化する。3. では、水平動による地盤動的定数の推定を行う。4. では、上下動による地盤動的定数の推定を行う。5. では、多層の未知変量を最適化するため遺伝的アルゴリズムを併用するアプローチを提案する。6. では、本研究で得られた結論を述べ、今後の課題について言及する。

2. 逆解析手法

2.1 概要

本研究では、基盤層上端面で観測された加速度時刻歴を入力として応答計算により得られる応答加速度と対象層上端面で観測された加速度との比較により、最適地盤動的定数を決定するという部分同定法による逆解析を基本とする。地震応答計算には、一般に重複反射法あるいは有限要素法が用いられる場合が多い。重複反射法は地盤の振動を一方向のみと仮定する1次元問題において、簡便な理論により応答加速度を計算できる利点があり、有限要素法には2次元、3次元に拡張できる利点がある。本研究では、地盤振動を1次元問題と仮定して逆解析を行う。したがって、地震応答計算には1次元問題の解法として優れている重複反射法を用いる。なお、例題により1次元問題における両者の応答計算結果はほぼ一致し、計算時間は有限要素法に比べ重複反射法の方が格段に早いことを予め調べている。次に、地震応答計算で得られた応答加速度と対象層上端面で観測された加速度との比較を評価関数を用いて行った。評価関数として、観測値と計算値の加速度時刻歴のフーリエスペクトルの誤差二乗和を定義する。このとき効率よく最適値を探索することができるようにシンプレックス法を用いる¹¹⁾。手法の詳しい説明については省略するが、本手法は計算やプログラミングが容易であり、未知数が少ない場合には収束計算の安定性が高いという長所をもっている。

2.2 逆解析に用いる各手法

(1) 地盤の運動方程式

震源からある程度離れている場合、一般に地表面付近において地震波はほぼ鉛直下方から入射するものと近似できる。さらに、作用する地震動を水平動及び上下動成分に分けて考えると、地盤の振動は水平方向と上下方向の1次元振動と仮定される。本研究では、水平動同様、上下動の解析法を開発し、地盤への適用を行っている。

鉛直方向への地盤変位は、水平動と同様、

$$u(z,t) = (Ae^{ikz} + Be^{-ikz})e^{i\omega t} \quad (1)$$

と表される¹²⁾。ここに A, B は積分定数であって、それぞれ上昇波、下降波の振幅を表す。また、 z は各層上面からの深さ、 ω は円振動数、 k は波数、 t は時間である。

地盤の減衰定数は振動数によらず一定と考えることが多いことから、地盤の減衰モデルとして、本研究では Voigt モデルを用いる¹³⁾。

(2) 重複反射理論

水平な境界をもって層を成した成層地盤を考える。各層内では密度、せん断弾性係数、減衰定数などの特性値はそれぞれ一定とする。上下動に対する第 r 層と第 s 層の上端面における加速度の間の振動数応答関数を示す。

$$Z_{r/s}(\omega) = -\frac{-ip_r(A_r e^{ik_r H_r/2} - B_r e^{-ik_r H_r/2})}{\omega^2(A_s + B_s)} \quad (2)$$

ここに、 H_r は層厚、 p_r は伝播定数、添え字 s, r はそれぞれ各層の物性値を表す。ここまでは地盤の振動を円振動数 ω なる正弦波としてきた。実際の地震波は様々の振動数成分が混在した波であるため、振動数応答関数は地震波に含まれる各振動数成分ごとに求められる。重複反射法により地盤の地震応答を以下のように求めることができる。

- ①地盤を水平成層地盤とおき、各層の厚さ H 、単位体積重量 γ 、せん断弾性係数 G 、水平方向の減衰定数 h_s (上下動の場合にはヤング率 E 、上下方向の減衰定数 h_p 、ポアソン比 ν) を求める。
- ②基準層 s に与えられた入力地震動の加速度時刻歴からフーリエスペクトルを求める。
- ③与えられた各層の厚さ H 、単位体積重量 γ 、せん断弾性係数 G 、水平方向の減衰定数 h_s (ヤング率 E 、上下方向の減衰定数 h_p 、ポアソン比 ν) から、対象層 r の基準層 s に対する振動数応答関数を求める。
- ④振動数応答関数を基準層 s のフーリエスペクトルに乗じて、対象層 r のフーリエスペクトルを求める。
- ⑤④をフーリエ逆変換することで、対象層における応答加速度の時刻歴を求める。

(3) 評価関数

観測値と計算値のフーリエスペクトルから次式の評価関数を定義した。

$$J = \sum_{j=1}^n \left(\frac{x_j - X_j}{X_j} \right)^2 \quad (3)$$

ここに、 J : 評価関数、 j は j 次の振動数 (または j 次成分) x_j は対象層 r における計算加速度の j 次成分のフーリエスペクトル、 X_j は観測波の j 次成分のフーリエスペクトル、 n は振動数の数である。

本研究では、遮断する振動数を試行錯誤的に求め、同定精度の良いと考えられる振動数を遮断振動数として採用した。すなわち、水平動に対しては $0.1 \sim 10\text{Hz}$ 、上下動に対しては $0.1 \sim 20\text{Hz}$ までの振動数成分を評価関数の計算領域とする。

2.3 解析諸条件および解析手順

(1) バンド幅

評価関数を計算する際、フーリエスペクトルの観測値と計算値の両者に対してParzenウィンドウによる平滑化を行う。平滑化を施すことによって観測加速度に混入したノイズの処理が可能となり、逆解析の精度が向上する。平滑化の際には、バンド幅を広くとりすぎないように注意する必要がある。バンド幅を広くとりすぎると、本来鋭いはずの共振時のピークを低下させてしまうことになり、特に減衰定数の推定精度に影響が現れる。一般にバンド幅の設定は難しいが、本研究では文献(14)を参考に水平動及び上下動ともバンド幅は0.4Hzと設定する。

(2) 地盤動的第数

層厚 H 、単位体積重量 γ はボーリング調査から比較的精度良く推定される。したがって、逆解析の対象を、水平動に対してはせん断波速度 V_s 、水平方向の減衰定数 h_s 、上下動に対しては疎密波速度 V_p 、上下方向の減衰定数 h_p 、ポアソン比 ν とする。

(3) 解析手順

逆解析の手順は以下のようである。

- ①地盤動的第数の初期値を設定する。
- ②基盤で観測された加速度時刻歴を用いて重複反射法により地震応答計算を行い、地表面における応答加速度を求める。
- ③②で得られた応答加速度と地表面で観測された加速度時刻歴を用いて評価関数を計算する。
- ④評価関数が最小かどうかを最適化手法（3.、4. ではシンプレックス法、5. ではシンプレックス法と遺伝的アルゴリズム法の併用法）で判断し、最小と判断されれば、そのときの値が推定値となる。

3. 水平動に対する地盤動的第数の逆解析

3.1 概要

逆解析の実地盤への適用に当って、まず問題になるのが地盤の不均一性である。地中最も深く設置された地震計から地表までの幾層にも重なった地盤を一度に逆解析する場合、地盤の特性は層ごとに異なるため、各層ごとの第数を推定しなければならない。このような多層地盤モデルに対して逆解析を行うと未知数が層数に比例して増加し、推定精度の低下や解が収束しないなどの問題が生じる。そこで逆解析の対象とする層数をできるだけ少なくすることが重要となる。本研究では、地盤内のある特定の層をターゲットとして、地盤動的第数を逆解析する部分同定法を用いることにする。

部分同定法を適用できる条件としては、地中深さ方向に各層ごとに鉛直アレー観測記録が得られていることが理想である。もしそうでない場合でも地震計が設置されている点と点の間に存在する層数はできるだけ少ないことが望ましい。地盤中のある層を逆解析する場合、重複

反射法を用いる上で対象層よりも上層の地盤動的第数がわかっている方が都合良い。したがって本部分同定法では、最も表層にある地盤から順番に解析を行っていき、表層から2番目の層からは先に行った上層の結果を用いて解析を行う。本法には下層ほど同定精度が低くなる欠点があるものの、各層の波形データを用いることにより、層間の伝達関数の評価が優れているメリットもある。

3.2 実地盤への適用

(1) 対象地盤

解析対象とするのは東大千葉実験所構内に設置されたボーリング孔C0である。ボーリング柱状図を図1に示す。地盤は比較的単純な成層構造をしており、まず地表から深さ5mまでは、 N 値10以下の関東ロームに被われ、ローム層の下に厚さ2~4mで N 値10以下の砂質粘土が存在する。さらにその下層は N 値20~30の洪積砂層が所々に N 値の小さな粘土層を挟んで続いている。この地点では地表より40mまでに、深さ1m、5m、10m、20m、40mの5地点に地震計が設置されており、地下20mまではひとつの層ごとに観測地点が設置されている。ここでは地盤を地下1~5m、5~10m、10~20mに分け、各層のせん断波速度 V_s 、減衰定数 h_s の値を推定する。地盤応答解析には一般的に用いられる地盤のひずみによって層内のせん断弾性係数 G と減衰定数 h_s の変化を考慮する等価線形化手法を用いた¹⁵⁾。このとき同定されるものは初期の物性値であり、ひずみ発生時の物性値は仮定された等価線形化の関係により求められる。

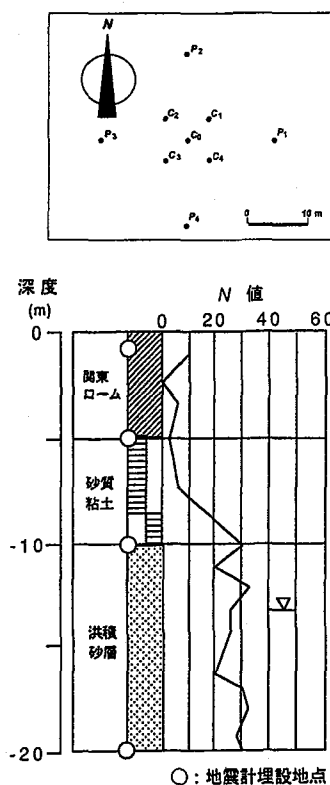


図1 東大千葉実験所C0孔のボーリング柱状図

表1 地震観測データの諸元

上下動の解析区間は0-10s

地震名	年月日	M (マグニチュード)	震源の深さ (km)	震央距離 (km)	水平最大加速度 (gal)	解析区間 水平動 (s)	上下最大加速度 (gal)
EQ.1	1986/6/24	6.5	73.3	104.5	53.4	15-25	21.5
EQ.2	1987/6/30	4.9	56.5	62.4	33.5	10-20	11.3
EQ.3	1987/12/17	4.4	58.0	42.4	23.8	6-16	9.4
EQ.4	1987/12/17	4.0	42.0	52.3	30.4	7-17	17.7
EQ.5	1988/1/15	4.2	42.0	37.4	40.8	1-11	10.1
EQ.6	1988/1/16	5.2	47.6	37.9	97.8	6-16	18.7
EQ.7	1988/1/18	4.1	32.0	16.9	26.2	1-11	9.8
EQ.8	1988/3/18	6.0	96.1	42.2	59.8	1-12	13.5
EQ.9	1988/8/12	5.3	69.4	62.4	45.9	10-20	12.0
EQ.10	1989/2/19	5.6	55.3	47.7	55.7	9-19	23.7
EQ.11	1989/3/6	6.0	55.7	55.2	28.9	8-18	13.3
EQ.12	1989/3/11	4.9	44.5	51.8	41.0	2-12	16.0

(2)対象波形

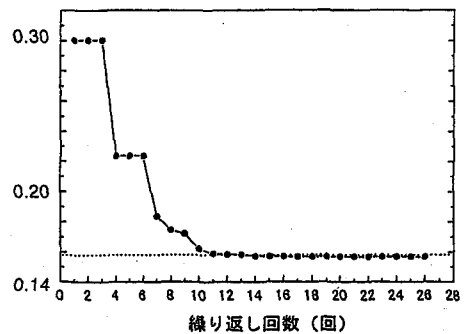
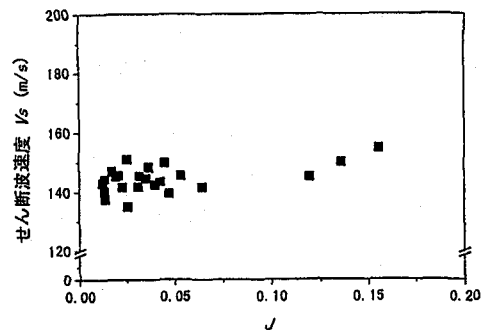
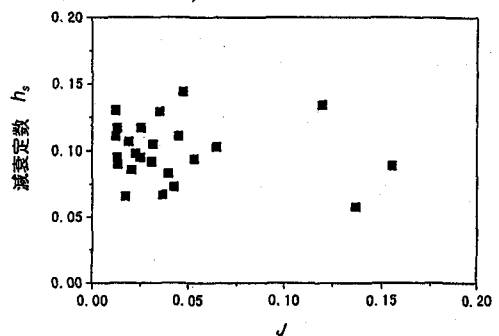
解析対象とした地震の諸元及び解析区間を表1に示す。東大千葉実験所では、観測が開始された1982年から数多くの地震が観測されている。本研究で対象とするのは1986～1989年までに観測された余震も含めた12の地震である。ひとつの地震に対してNS成分とEW成分の2つの波形が得られるため、解析に用いた波形は合計24個である。

解析対象とする地震動は、地盤が非線形挙動を顕著に示さないと考えられる地表面最大加速度100 gal以下のものとする。本加速度記録のゼロ秒の位置は強震記録がトリガーされた時点である。一般に波形の分離は難しいが、ここではS波のみを考慮できるように注意し、加速度時刻歴の主要動部分10秒間を解析に用いる。

3.3 対象地盤における V_s , h_s の推定

(1)地下1～5mにおける逆解析結果

図1のボーリング柱状図から地盤モデルを作成し、各層の単位体積重量 γ は文献(16)から求めた。評価関数 J を計算し、シンプレックスの停止条件に達するまで計算を繰り返した。なおシンプレックス法の初期値は $(V_{s0}(\text{m/s}), h_{s0}) = (80, 0.04), (90, 0.12), (100, 0.08)$ の3通りと仮定する。シンプレックス法の繰り返し計算は早いケースでは10回程度、遅いケースでも25回前後の繰り返しであった。解の収束状況の一例を図2に示す(EQ.1のEW方向の解析結果)。解は図中の点線で示した計算値に達した以降は特に変化せず、順調な収束過程を示していることがわかる。 J 値に対する V_s , h_s の逆解析結果を図3, 4に示す。 V_s の範囲は135～155m/s, h_s は0.05～0.15に分布していることがわかる。0.08未満のところに J 値が多く存在することから、推定精度は良好であると言える。計算波形と観測波形の最大加速度を図5で比較した。全体として計算波形の最大値の方が観測波形のそれよりも小さめの値となっている。これは、高い振動数領域におけるスペクト

図2 J 値の収束状況の一例 (EQ.1, EW 方向)図3 J 値に対するせん断波速度 V_s の推定結果 (深さ1～5m)図4 J 値に対する減衰定数 h_s の推定結果 (深さ1～5m)

ルの差が波形の最大値に現れたものと考えられる。しかしながら、各点がほぼ45°の線上に乗っており、最大加速度の推定精度は良好であると言える。 N 値が最も小さいEQ.1 EWの観測値と計算値のフーリエスペクトルを図6に示す。 N 値が示すように観測値と計算値のフーリエスペクトルは7 Hz付近を除くとほとんど合致している。 N 値が最も小さいEQ.1 EWの観測波形と収束点における計算波形を図7に示す。観測波形と計算波形の様相がほぼ一致しており、十分な推定精度を有していることがわかる。

(2)全層における逆解析結果

推定された V_s , h_s の各層毎の分布を図8, 9に示す。図8から、明らかに層毎の V_s の分布が異なっていることがわかる。一方、図9から h_s に関しては深さや土質による差は認められなかった。

逆解析結果より、各層ごとの平均値、分散、変動係数を表2に求めた。 V_s に関して、対象とした地盤において速度検層が実施されており、その結果は関東ローム層で140m/s、砂質粘土層、洪積砂層で320m/sとなっている¹⁶⁾。地盤のひずみが異なることから、解析結果と速度検層の結果は必ずしも一致する必要がないが、あえて両者を比較してみると、砂質粘土層における推定値は小さめであるが、関東ローム層、洪積砂層ではほぼ同じ推定結果となった。砂質粘土層の N 値の分布を見ると（図1参照）、深さ方向に大きく変化しており、地盤モデルの定数を分布の平均値として取り扱ったことが影響し、推定結果が小さめとなったと考えられる。しかしながら、得られた V_s の分布は地盤の特徴を表していると考えられる。

4. 上下動に対する地盤動的定数の逆解析

4.1 概要

水平動における地震時地盤応答解析法には多くの実績が蓄積されている。一方、上下動に関する地盤応答解析法はほとんど研究されていない。そこで線形領域はもとより、線形を越えた領域での地盤の応答解析が重要となる。したがって、ここではこれまでにあまり行われていない上下動の等価線形化解析法を開発するとともに、地盤への適用を行った。推定する値は各層の疎密波速度 V_p 、減衰定数 h_p 、ポアソン比 ν である。まず4.2では、地盤ひずみが小さいと考えられる東大千葉実験所の12個の

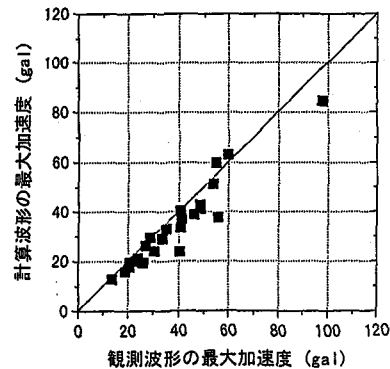


図5 計算波形と観測波形の最大加速度の比較 (深さ1～5m)

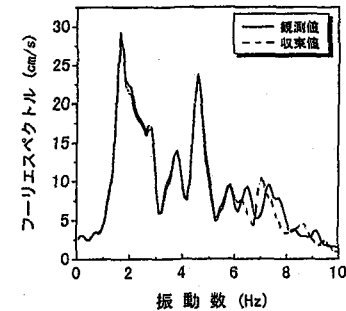


図6 計算波形と観測波形のフーリエスペクトル (深さ1～5m)

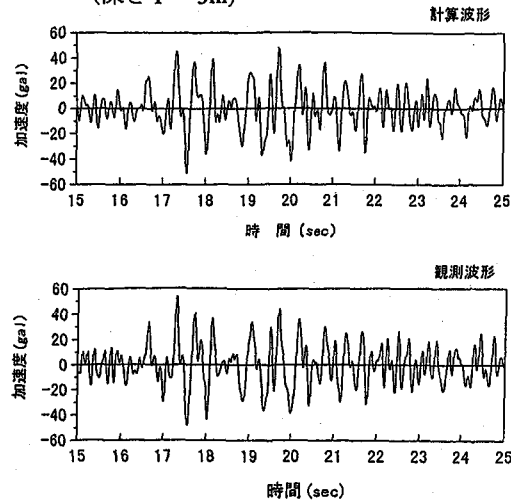


図7 収束点の計算波形と観測波形 (深さ1～5m)

表2 水平動から推定した地盤動的定数 (東大千葉実験所)

	関東ローム層		砂質粘土層		洪積砂層	
	V_s (m/s)	h_s	V_s (m/s)	h_s	V_s (m/s)	h_s
平均値	144	0.10	238	0.11	297	0.09
標準偏差	4	0.02	13	0.04	15	0.03
変動係数	0.03	0.20	0.05	0.36	0.05	0.33

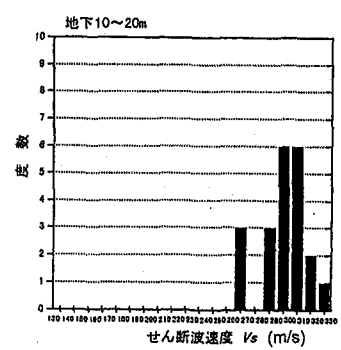
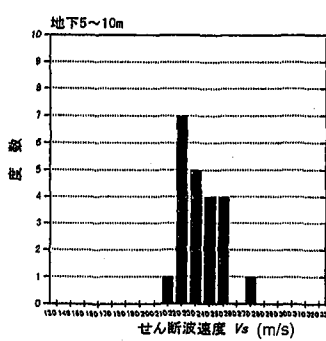
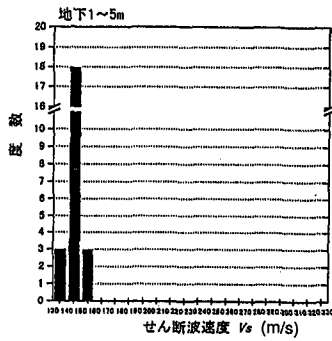


図8 せん断波速度 V_s の深さ方向分布

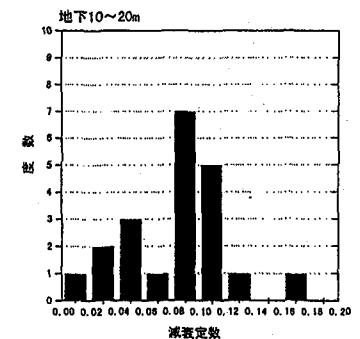
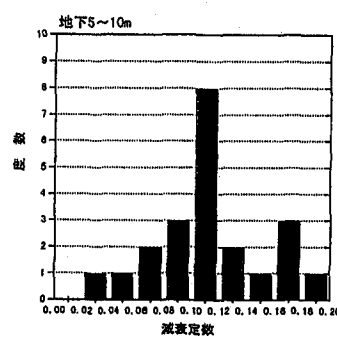
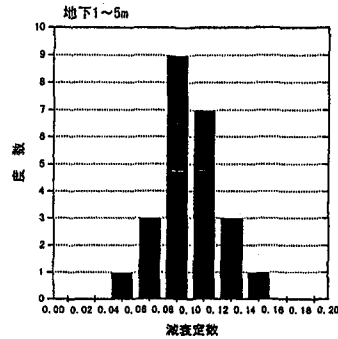


図9 減衰定数 h_s の深さ方向分布

地震波形を用いた。次に4.3で上下動に関する等価線形化手法の提案を行い、1995年兵庫県南部地震におけるポートアイランドの加速度記録を用いて解析を行った。

4.2 線形解析手法の実地盤への適用

(1)対象地盤

解析対象とするのは水平動と同様、東大千葉実験所構内に設置されたボーリング孔C0である。地下1mと5mの観測波形、地下5mと10mの観測波形、地下10mと20mの観測波形を用いて逆解析を行い、各層の地盤動的定数を推定する。

(2)対象波形

解析対象とする地震動は水平動の解析に用いたものとする。また上下動のみを対象とするため、地震計で観測されるUD成分の波形を用いる。さらに、疎密波であるP波成分のみを考慮できるように加速度時刻歴の最初の10秒間を解析に用いる。解析対象とした地震の諸元は表1の通りである。

(3)地下1~5mまでの逆解析結果

地震応答解析は第2層を基準層、第1層を対象層として行い、第1層の上端面における応答波形を求める。応答波形から評価関数 J 値を計算し、シンプレックスの停止条件に達するまで計算を繰り返す。なお、シンプレックス法に用いる初期値は $(V_{p0}(\text{m/s}), h_{p0}, \nu_0) = (200, 0.04, 0.40), (350, 0.12, 0.30), (300, 0.08, 0.35), (250, 0.16, 0.45)$ と仮定する。

解の収束状況の一例を図10に示す。解は図中の一点鎖

線で示した計算値に9回前後で達し、それ以降の値はほとんど変化せず、順調な収束過程を示していることがわかる。 J 値に対する逆解析結果を図11~13に示す。同図より、 V_p は280~300m/s、 h_p は0.09~0.14、 ν は0.37~0.40の範囲に分布している。 J 値がすべて0.025以下のところに点が存在することから、推定精度は高いことがわかる。また計算波形と観測波形の最大加速度を図14に示した。各点がほぼ45°の線に沿っており最大加速度の推定精度も良好であると言える。 J 値が最も小さいEQ.3における観測値と計算値のフーリエスペクトルを図15に示す。 J 値が示すように観測値と計算値のフーリエスペクトルは高い振動数領域までほぼ一致している。このように解析対象としたすべてのデータにおいて推定結果は良好であった。 J 値が最も小さいEQ.3における観測波形と収束点の計算波形を図16に示す。観測波形と計算波形はほぼ一致している。

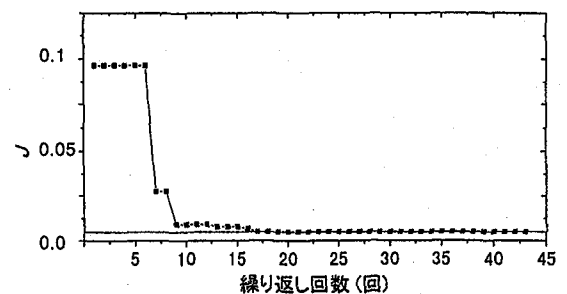


図10 J 値の収束状況の一例 (EQ.3, EW 方向)

(4)全層における解析結果

各層ごとの V_p , h_p , ν の推定値を表3に示す。表を見ると、洪積砂層(地下10～20m)では関東ローム層(1～5m)や砂質粘土層(5～10m)と比べ、 V_p , h_p , ν の変動係数が大きく、推定範囲も大きくなっていることがわかる。この原因として、洪積砂層を部分同定するに当って、層厚が他の2層と比べて大きかったこと、最下層であるため他の2層の推定誤差が影響していることなどが考えられる。ところで、今回対象とした地盤において速度検層が実施されており¹⁶⁾、その結果を表4に示す。表中のポアソン比 ν の値は各層の V_s と V_p から弾性論による次式¹⁵⁾を用いて求めたものである。

$$\frac{V_p}{V_s} = \sqrt{\frac{2(1-\nu)}{1-2\nu}} \quad (4)$$

表3と表4を比較してみると、疎密波速度 V_p の平均値は288m/s(地下1～5m)、498 m/s (地下5～10m)、827 m/s (地下10～20m)、速度検層の値は320 m/s (地下0～5m)、550 m/s (地下5～15m)、1670 m/s (地下15～24m)と、すべての層において推定値が小さく評価されているようである。特に第3層の速度検層結果は20m以下の深さ部分の影響を受けて、検層値が大きめとなったことが考えられる。さらにポアソン比 ν においては、推定された平均値が0.39(地下1～5m)、0.39(地下5～10m)、0.38(地下10～20m)であるのに対して、速度検層から式(4)を用いて求めた値は0.38(地下0～5m)、0.24(地下5～15m)、0.48(地

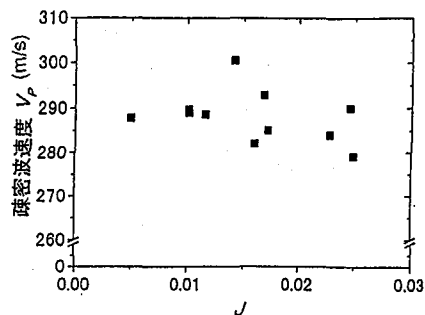


図11 J 値に対する疎密波速度 V_p の推定結果 (深さ1～5m)

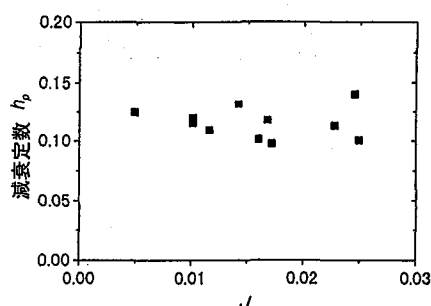


図12 J 値に対する減衰定数 h_p の推定結果 (深さ1～5m)

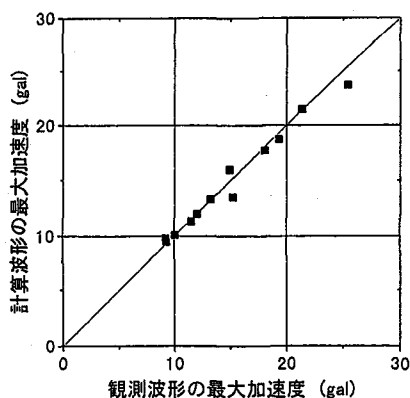


図14 計算波形と観測波形のフーリエスペクトル (深さ1～5m)

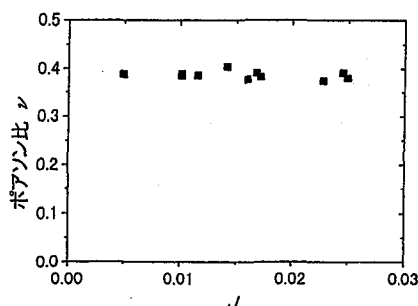


図13 J 値に対するポアソン比 ν の推定結果 (深さ1～5m)

表3 上下動から推定した地盤動学的定数 (東大千葉実験所)

	関東ローム層			砂質粘土層			洪積砂層		
	V_p (m/s)	h_p	ν	V_p (m/s)	h_p	ν	V_p (m/s)	h_p	ν
平均値	288	0.12	0.39	498	0.12	0.39	827	0.14	0.38
標準偏差	5	0.012	0.007	16	0.046	0.012	52	0.060	0.041
変動係数	0.02	0.11	0.02	0.03	0.38	0.03	0.06	0.43	0.11

表4 PS検層から推定した地盤動定的定数
(東大千葉実験所)

層	深さ (m)	せん断波速度 V_s (m/s)	疎密波速度 V_p (m/s)	ポアソン比 ν
1	0~5	140	320	0.38
2	5~15	320	550	0.24
3	15~24	320	1670	0.48
4	24~40	420	1670	0.47

下15~24m)であり、層によっては大きな違いがある。ポアソン比の推定に関しては、未だ十分な精度が得られておらず、今後改良の余地があると言える。

4.3 等価線形解析手法の実地盤への適用

(1)等価線形解析

4.2では、地盤を弾性体と仮定した線形解析による地盤動定的定数の推定を行った。しかし地盤の動特性は発生するひずみレベルに依存し、土を線形弾性体とみなせるのはひずみが $10^{-5} \sim 10^{-4}$ 程度までである。強震時には地盤ひずみが $10^{-3} \sim 10^{-2}$ にまで達することから、もはや地盤動定的定数の線形関係は成立せず¹⁷⁾、地盤の応答は非線形性を考慮した解析法によって評価されなければならない。

非線形性を考慮した解析法には、様々なものが提案されているが、本研究では、4.2で定式化した各手法に発生するひずみに対応して等価なヤング率 E および減衰定数 h_p を定める等価線形化を考え、地盤動定的定数の推定を行う。また解析対象としては、上下地震動においても非線形領域に至っていると考えられる兵庫県南部地震の強震記録を用いる¹⁸⁾。

1)ひずみ依存性

地盤の縦ひずみ ε が 10^{-5} より小さい場合、ヤング率 E および上下方向の減衰定数 h_p はほぼ一定値となるが、ひずみ振幅が大きくなると E は小さくなり、 h_p は大きくなる傾向を示す。図17は、本研究に用いた文献17)から求めたひずみ ε と E および h_p との関係を表す曲線である。上図はひずみが 10^{-5} のときのヤング率 E_0 を基準値として曲線 E/E_0 を表している。また、ここで示した等価減衰定数とは非線形性に起因する履歴減衰のことである。

2)地震時のひずみ振幅

地表面への鉛直方向に見かけ速度 V_p で伝わる波動による速度 $\dot{u}(z,t)$ とひずみ振幅 $\varepsilon(z,t)$ の関係は、

$$\varepsilon(z,t) = -\frac{1}{V_p} \dot{u}(z,t) \quad (5)$$

と表すことができる。

3)手順

等価線形解析の手順は以下のようである。

- ①重複反射法によって各層における加速度時刻歴を求める。
- ②各層の加速度波を積分して速度波とし、これと疎密波速度とによってひずみ振幅を求める。入力地震波が不規則振動の場合、最大ひずみ振幅の0.5倍が等価な正弦波のひずみ振幅と見なすことができるから、この等価なひずみに対応するヤング率 E および等価減衰定数 h_p を図17の関係より得る。
- ③新たに得られた定数を用いて再び①~②の応答計算を行い、前回に得られた定数と新たに得られた定数との誤差が5%以内になるまで計算を繰り返す。
- ④各層の誤差が5%以内になったときの E および h_p が、入

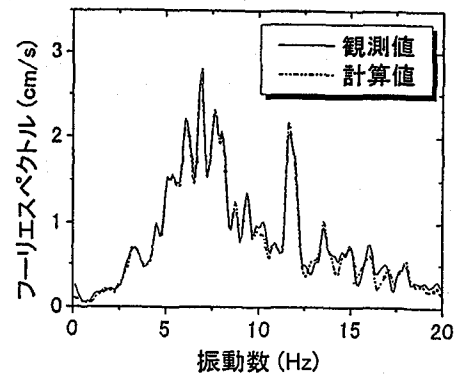


図15 計算波形と観測波形のフーリエスペクトル
(深さ1~5m)

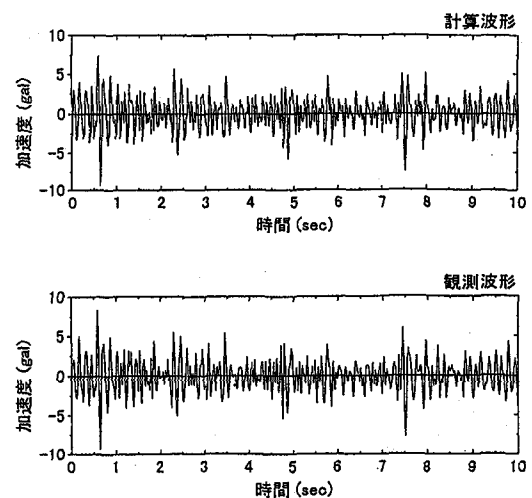


図16 収束点の計算波形と観測波形 (深さ1~5m)

力地震波によって生じるひずみレベルに対応した地盤の動的定数であると見なし、最終的な地盤応答計算を行う。

(2)対象地盤

解析対象とするのは、ポートアイランドに設置されたボーリング孔の地盤である¹⁷⁾。文献18)から作成したボーリング柱状図を図18に示す。図からわかるように、この地盤は比較的単純な成層構造を成している。この地点では、地表より83mまでに深さ0m, 16m, 32m, 83mの4地点に地震計が設置されている。解析に際しては、地下0～16m, 16～32m, 32～83mに分け、それぞれの観測波形を用いる。地盤モデルを作成するにあたり、地下0～16mを砂礫層、地下16～32mを沖積粘土層、地下32～83mを洪積砂礫層、地下83m～を洪積砂礫層と区分することにより、解析する層数をできるだけ少なくする。

(3)対象波形

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震のポートアイランドでは、地表面での上下動最大加速度が556galを記録し、水平動最大加速度の341galを大きく上回っている。本研究では、上下動最大加速度を示すと考えられる記録の10～20秒の10秒間を解析対象とする。

(4)地下0～16mにおける逆解析結果

シンプレックス法に用いた初期値を(V_{p0} (m/s), h_{p0} , ν_0) = (200, 0.04, 0.40), (350, 0.12, 0.30), (300, 0.08, 0.35), (250, 0.16, 0.45)と仮定した。図には掲載していないが、 J 値の収束は繰り返し回数40回前後であり、以降はほとんど変化せず、順調な収束過程を示した。観測値と計算値のフーリエスペクトルの比較を図19に示す。求められた地盤内の最大ひずみは約 10^{-3} 程度であり、地盤の剛性

が低下しているにもかかわらず、全体的なスペクトル形状は類似していることから、本手法の推定結果はほぼ良好であると言える。

(5)全層における逆解析結果

各層の疎密波速度 V_p , 減衰定数 h_p , ポアソン比 ν を表5に示す。また、 V_p の深さ方向の分布を図20に示す。 V_p の値は地下0～16mにおいては300m/sであり、地下16～32mおよび地下32～83mでは1500m/s付近であった。 h_p の値は0.03～0.09であり、 ν の値には層による大きな差は認められなかった。

今回対象とした地盤において速度検層が実施されており¹⁷⁾、その結果を表6に示す。本研究における層区分と速度検層の層区分が違っていることを考慮して両者を比較してみると、 V_p では表層付近と地下20, 45m付近の推定値がPS検層の結果に近いことがわかる。しかし地下50mでは、今回の逆解析による推定値は速度検層よりも小さい値となっている。全体的に推定値は速度検層と比べて小さい値となった。

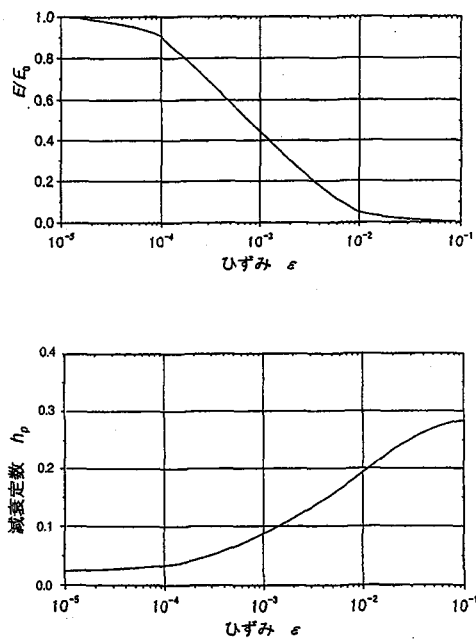


図17 ひずみに対するEおよび h_p

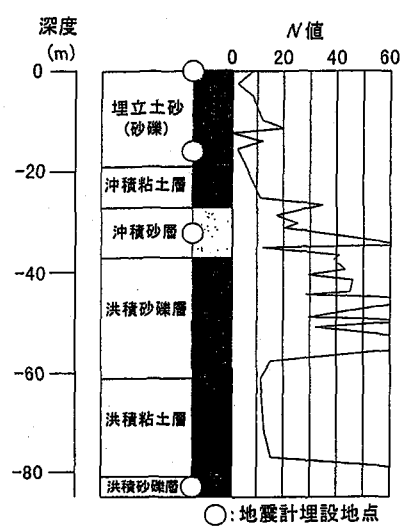


図18 ポートアイランドのボーリング柱状図

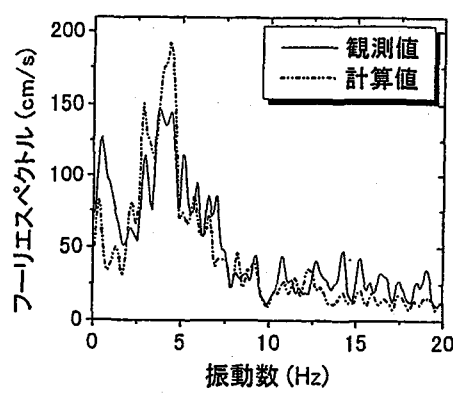


図19 計算波形と観測波形のフーリエスペクトル

表5 上下動から推定した地盤動定的定数
(ポートアイランド)

層	深さ (m)	疎密波速度 V_p (m/s)	減衰定数 h_p	ポアソン比 ν
1	0~16	300	0.03	0.49
2	16~32	1483	0.09	0.48
3	32~83	1469	0.04	0.48

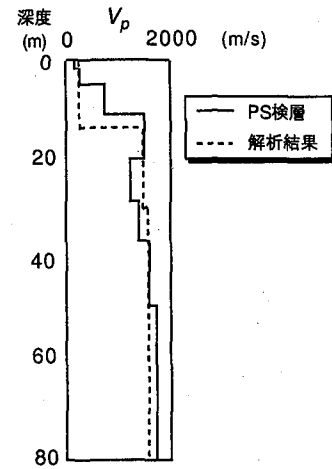


図20 疎密波速度 V_p の平均値の比較

5. 遺伝的アルゴリズムを併用した最適化法による未知変量増加への対応

表6 PS 検層の結果 (ポートアイランド)

5.1 概要

上記の部分同定法では、深さ方向に加速度記録のある地点をひとつのモデル地盤と考え、上層から下層へ順次、逆解析を行う必要があった。実際の鉛直アレー観測点においては、このような地盤は少ないことから、以後では表層と最下層における波形記録を用いて、解析を行う。そのためには、シンプレックス法では、十分な解の収束を得ることが難しい場合が多い。本研究では、遺伝的アルゴリズム (以後GAと呼ぶ) ¹⁹⁾を併用することによって未知変量の増加に対応する手法を提案する。このとき推定する動特性として、水平動に注目し、 V_p 及び層厚を既知とした場合と未知とした場合の2通りを考え、減衰定数については、部分同定法のように各層間の波形を用いないことから、全層を一定として取り扱う。

層	深さ (m)	疎密波速度 V_p (m/s)	ポアソン比 ν
1	0~2	260	0.13
2	2~5	330	0.32
3	5~12.6	780	0.46
4	12.6~19	1480	0.49
5	19~27	1180	0.49
6	27~37	1330	0.48
7	37~50	1530	0.48
8	50~61	1610	0.48
9	61~82.3		0.48
10	82.3~85.4	2000	0.49

GAは自然界における遺伝と自然淘汰のメカニズムを計算機上で模擬したものである。解くべき問題の解を染色体として表現し、数十世代~数百世代にわたって世代交代を繰り返すことによって、確率的に優れた解を求めようとするものである。このとき、それらを任意に複数個設定した上で、より優れた染色体 (解) はより多くの子孫を残すことができ、また子は親である2つの解の性質を受け継ぐ。

5.2 GAの解析条件

解析で用いるGAの条件を示すと次のようになる。

- ①遺伝子の表現 → {0,1}の2値を用いたコーディングとする。
- ②目的関数 → 観測波形と重複反射法により求めた応答波形のスペクトルの誤差二乗和
- ③スケーリング → 線形スケーリング
- ④選択 → ルーレット選択
- ⑤交叉 → 1点交叉

GAの主要部分は、適応度の高い個体を次世代により多く残す再生の手続きと、交叉と突然変異により新しい個体を生成しながら次世代の個体群を生成する手続きにある。GAはこのように、再生により望ましい解を重点的に探索すると同時に、交叉と突然変異によって解の探索範囲を広げているため、これらの両方の手続きが有効に作用すれば、その威力を十分に発揮することになる。

次にパラメタを以下のように設定した。

今回用いるGAでは、個体群サイズ N が十分大きければ、大数の法則により適合度に比例した確率で生き残る数が決まるという意味でのランダム性が取り入れられている。

- ①個体群サイズ $N=400$
- ②突然変異確率 $p_m=0.005$
- ③ 終了判定条件を次のように考えた。
 - ・個体群がすべて同じになった。
 - ・世代交代の回数が、400回を越えた。

せん断弾性係数と層厚を逆解析で推定するに当たり地盤モデルとして8層分割モデルを想定し、GAのパラメタとして初期収束を考慮し、400世代まで解析する。

5.3 解析ケース及び考察

逆解析では各層ごとにせん断波速度 V_s 、層厚 H を未知変数とし、地盤全体の水平方向の減衰定数 h_s を未知数とする。条件は次のようになる。

<評価関数>
 $J(V_s, h_s, H) \rightarrow \text{最小化}$
[H : 既知 or 未知]

<制約条件>
 $\sum_i H_i = \text{const.}$

評価関数としては前述した応答波と観測波のスペクトルの誤差二乗和を用いた。

(1) 層厚を既知とした場合 (未知変数: V_s, h_s)
層厚を既知とし、未知変数を V_s と h_s とした場合の逆解析結果を図21に示す。同図より、推定された平均値は部分同定法による結果と比較して精度は低いものの、部分的に合っているところもあり、中位の評価結果と言える。

(2) 層厚も未知とした場合 (未知変数: V_s, h_s, H)
層厚も未知とした場合の逆解析結果を図22及び表7に示す。第1層のPS検層の結果は140 m/sに対して、推定 V_s は133 m/sを得た。また第5層までのそれは291~416 m/sであり、PS検層の結果は320 m/sと420 m/sとなっている。したがって、本対象地盤のPS検層の結果と比較しても、推定精度は良く、本手法による同定が十分可能であると言える。
この解析では未知数が17個と多くっており、8層分

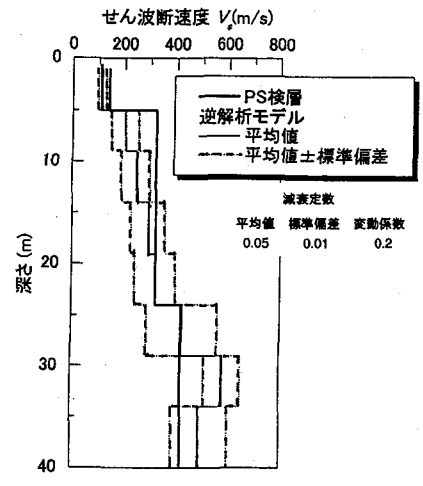


図21 せん断波速度 V_s の比較 (層厚を既知とした場合)

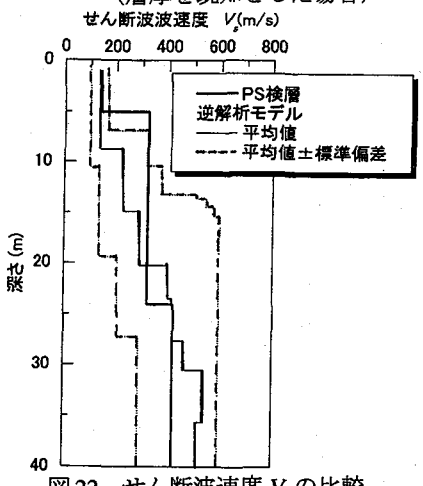


図22 せん断波速度 V_s の比較 (層厚を未知とした場合)

表7 GAを併用した方法による同定結果(東大千葉実験所)

層	せん断波速度 V_s			層厚 H			減衰定数 h_s		
	平均値 (m/s)	標準偏差 (m/s)	変動係数	平均値 (m)	標準偏差 (m)	変動係数	平均値	標準偏差	変動係数
1	133	34	0.26	7.7	1.8	0.23	0.06	0.03	0.5
2	225	90	0.40	6.2	2.7	0.44			
3	291	84	0.29	5.4	2.5	0.46			
4	400	109	0.27	3.3	2.8	0.85			
5	416	127	0.31	4.1	3.3	0.80			
6	460	16	0.25	2.9	2.0	0.69			
7	540	59	0.11	5.1	3.2	0.63			
8	514	80	0.16	4.4	2.3	0.52			

割モデルの地盤定数が十分収束することを明らかにした。

減衰定数に関しては、全層を単一としたモデルとして扱った。変動係数が0.5と地震波によるばらつきが大きく、推定の難しさを示唆していると考えられる。

6. 結論

本研究の2. では、水平動及び上下動の鉛直アレー観測記録による逆解析手法の定式化及び解析諸条件の設定に関する検討を行った。3. では水平動、4. では上下動に対する実地盤への適用を考えた。5. ではGAを併用する手法の提案を行った。

本研究で得られた結論をまとめると以下ようになる。

- (1)地盤動的定数の逆解析手法の定式化を行った。本逆解析手法では、地震応答解析手法として重複反射法、評価関数としてフーリエスペクトルの誤差二乗和、最適化手法としてシンプレックス法を採用した。これらの手法の利点としては、理論の簡潔さ、プログラミングの容易さ、計算の安定性などが挙げられる。また、解析諸条件の検討を行った。
- (2)水平動における逆解析手法を実地盤に適用し、対象地盤のせん断波速度 V_s 、水平方向の減衰定数 h_s を求めた。逆解析の結果、観測値と計算値の誤差を表す J 値はほとんどのケースで小さく、観測波形と計算波形の最大加速度やスペクトルが合致していることから、推定精度は良好であると言える。層毎に24の波形を用いて逆解析を実施し、推定値の平均値、標準偏差、変動係数を求めたところ、 V_s の平均値は各層ごとに違いがあり、推定値のばらつきも比較的小さかった。一方、 h_s の平均値には層ごとの違いは認められず、推定値のばらつきは V_s より大きかった。また、対象地盤で実施された速度検層によって推定された V_s と推定値を比較すると、関東ローム層と洪積砂層において良い対応を示した。
- (3)上下動における逆解析手法を実地盤に適用し、対象地盤の疎密波速度 V_p 、上下方向の減衰定数 h_p 、ポアソン比 ν を求めた。東大千葉実験所の12個の波形データを用いて逆解析を実施し、推定値の平均値、標準偏差、変動係数を求めたところ、洪積砂層における推定値のばらつきが比較的大きかった。2. で定式化した手法を大きなひずみ領域においても適用できるように改良した。この手法をポートアイランドで観測された兵庫県南部地震の強震記録に適用した結果、評価関数は小さくなり、逆解析による推定精度は良好であった。
- (4)部分同定法では各層の地震波形が必要となることから、限られた地盤にしか適用することが出来ない。そこで、表層と基盤層上面の波形記録のみから各層の逆解析を行うため、GAを併用するアプローチを提案した。同定結果から、比較的良好な結果を得たため、未知数の増加に伴う手法の拡張性を示すことができた。

本手法を用いて解析を進めるに当たって、等価線形化によるアプローチを行ったが、場合によっては、地盤の応答を非線形として捉えることが不可欠である。そのため

に著者らは文献20)のようなウェーブレット変換による逆解析法を開発中である。

謝辞

本論文を丁寧に査読していただき、貴重な意見を賜りました査読者に謝意を表します。また本研究を実施するに当り解析に協力いただいた金沢大学の元大学院生・和佐田慎吾君、毛利誠信君及び元学部学生・八木正雄君、丸山直幸君に、観測波形を利用させていただいた東京大学生産技術研究所ならびに関西地震観測協議会に対し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Kai QI and Tadanobu SATO : Structural Identification Using Neural-H[∞]Filter, Proceeding of Japan Earthquake Engineering, pp.2297-2302, 1998.
- 2) 星谷 勝, 斉藤悦郎: 拡張カルマンフィルターを用いた同定問題の各種振動系への応用, 土木学会論文集, Vol.339, pp.59-67, 1983.
- 3) 北浦 勝, 池本敏和, 日比野友亮: 地表面における常時微動の波形を用いた地盤の減衰定数の評価法, 構造工学論文集, Vol.31A, pp.485-490, 1985.
- 4) 太田 裕: 地盤工学への最適化手法の適用-1. 八戸港湾SMAC設置点の地下構造推定, 日本建築学会論文報告集, 第299号, pp.35-41, 1975.
- 5) 小島啓介, 荒井克彦, 中山浩明, 瀬尾和大, 栗田勝実: 福井平野の地震観測データに基づく地盤の動的物性定数の推定, 第4回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp.469-472, 1999.
- 6) Endi ZHAI, Masakatsu MIYAJIMA and Masaru KITAURA : Nonlinear Amplifications of Vertical Ground Motions in the 1995 Hyogoken Nambu Earthquake, J. Geotech.Eng., JSCE, No.582, pp.1-10, 1997.
- 7) 栗田哲史, 松井邦人, 新延泰生: 模型振動実験データを用いたせん断多層モデルの構造パラメータ同定, 応用力学論文集, Vol.1, pp.75-82, 1998.
- 8) 松川忠司, 神山 真: 地盤における微動の鉛直アレー観測とその考察, 第10回地震工学シンポジウム論文集, pp.1263-1268, 1998.
- 9) Yusuke HONJOU, Satoru IWAMOTO, Michio SUGIMOTO, Sadatomo ONIMARU and Matsuhiro YOSHIZAWA : Inverse Analysis of Dynamic Soil Properties Based on Seismometer Array Records Using the Extended Bayesian Method, Soils and Foundations, Vol.38, No.1, pp.131-143, 1998.
- 10) 辻原 治, 沢田 勉, 岡本 康: 地盤のS波速度とQ値の同定精度に及ぼすスペクトルの平滑化の影響, 構造工学論文集, Vol.39A, pp.783-792, 1993.
- 11) 今野 浩, 山下 浩: 非線形計画法, 日科技連, pp.284-288, 1978.
- 12) 金井 清: 地震工学, 共立出版, pp.99-108, 1969.
- 13) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, pp.168-172, 1994.
- 14) 辻原 治: 地震時地盤同定手法の確立とその地震工学的応用に関する研究, 京都大学提出博士学位論文, pp.95-159, 1994.
- 15) 土岐憲三: 新体系土木工学11 構造物の耐震解析, 第2章, 技報堂出版, pp.76-77, 1981.
- 16) (財)震災予防協議会強震動アレー観測記録データベース推進委員会, 強震動アレー観測記録データベース, 1992.
- 17) 澁谷 啓, 小高猛司, 龍岡文夫, 地盤材料の小ひずみでの非線形性と地盤変形問題への適用, 3. 地盤材料の変形特性(その1), pp.59-63, 1997.
- 18) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会: 阪神・淡路大震災調査報告(共通編2), pp.200-201, 1998.
- 19) 古田 均, 杉本博之: 遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用, 森北出版, pp.2-19, 1997.
- 20) 池本敏和, 宮島昌克, 北浦 勝: ウェーブレット変換を用いた非線形系の動特性評価, 構造工学論文集, Vol.46A, pp.627-632, 2000.

(2000年9月14日受付)