

# SH波を用いた 地盤動的定数の推定に関する研究

山下順也<sup>\*1</sup>・池本敏和<sup>\*2</sup>・宮島昌克<sup>\*3</sup>・北浦 勝<sup>\*4</sup>

<sup>\*1</sup> 金沢大学大学院 環境基盤工学専攻 博士前期課程 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

<sup>\*2</sup> 正会員 金沢大学助手 工学部土木建設学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

<sup>\*3</sup> 正会員 工博 金沢大学教授 工学部土木建設学科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

<sup>\*4</sup> フェロー 工博 金沢大学大学院教授 自然科学研究科 (〒920-8667 金沢市小立野 2-40-20)

構造物の動的解析を行う上で入力地震動の設定は重要な課題である。このとき問題となるのは地震時の表層地盤動特性である。地盤動特性の把握には、鉛直アレー観測記録からS波の一次元重複反射理論を用いた地盤動的定数の推定が行われている。本研究では、地震の震央距離と震源深さが地盤動的定数の推定精度にどのような影響を与えるのかについて、いくつかの地震動を用いて解析を行い、その結果を比較、考察した。

**KeyWord :** Soil parameter, Vertical array record, Inverse analysis, Genetic algorithm

## 1. はじめに

構造物の動的解析を行う上で、入力地震動の設定は重要な課題である。このとき、問題となるのは地震時の表層地盤動特性である。それは、表層地盤と呼ばれる沖積層などの軟弱な地盤で地震動が大きく増幅されるからである。

地震動特性の把握には、鉛直アレー観測記録からS波の一次元重複反射理論を用いた地盤動的定数の推定が行われている。一次元重複反射理論では、水平方向に等方な地盤に、鉛直下方から入射する実体波を仮定している。そのため、解析にはSH波が用いられることが多い。

一般に地盤動的定数の推定には、地表面における観測値と応答計算によって求められる計算値のフーリエスペクトルもしくは周波数応答関数を比較することによって地盤動的定数の推定が行われている。しかし、観測値と計算値が一致したからといってPS検層から得られた値と推定値が一致するとは限らず、両者に相関性が見られないのが現状である。相関性が見られない原因として、地震動の震源特性が逆解析の精度に影響を与えていることが考えられる。

そこで、本研究では、SH波を用いて地盤動的定数

を推定するにあたって、震央距離、震源深さが推定精度にどのような影響を与えるのかについて、いくつかの地震動を用いて解析を行い、その結果を比較、考察した。

## 2. 解析モデル

### (1) 解析対象

解析対象は、東京大学生産技術研究所千葉実験所に設置された3次元アレー観測記録網における中央観測点である。鉛直アレーとしては、GL-1, -5, -10, -20, -40mに観測点が配置されている。解析には、GL-1, -40mにおける観測点の記録を用いた。当地は深さ5mまでが関東ローム層、その下4m程度が砂混じり粘性土層、さらにその下が比較的均一な砂層から成っている。また、周辺におけるボーリング調査結果から、当地付近は概ね水平成層地盤であることが確かめられている。表-1に地下1m~40mにおける、PS検層とボーリング調査から得られたせん断波速度と土質定数を示す。

## (2) 地震の諸元

用いた地震の緒元を表-2 に示す。地震動の特徴を述べると EQ.1 は震央距離が近距離であり、震源が深い地震動である。EQ.2 は EQ.1 と同様に近距離であり、震源深さが EQ.1 と比べて浅い地震である。EQ.3 は震央距離が遠距離であり、震源が深い地震動である。EQ.4 は EQ.3 と同様に遠距離であり、震源深さが EQ.3 に比べて浅い地震動である。また、いずれの地震動も解析対象における最大加速度が小さいので、地盤のひずみは小さいと考えられる。

## (3) 地震波形

今回の解析には SH 波を用いるため、鉛直アレー観測記録<sup>1)</sup> から得られた EW, NS 方向の加速度時刻歴を地震伝播経路直角方向である TRANSVERSE 方向成分に変換した。

解析区間は、GL-1m における UD, TRANSVERSE 方向の速度オービットにおいて地盤の振動が水平方向に卓越している部分 3 秒間とした。波形を取り出すにあたっては、解析区間の前後に 0.5sec のコサイン型テーパをつけたウィンドウを用いた。

## 3. 逆解析手法

### (1) 同定手法

本研究では、地盤動的定数の推定を以下のように行っている。

- 1) GL-40m, GL-1m で観測された加速度波形をフーリエスペクトルに変換する。なお、観測波形のフーリエスペクトルには平滑化バンド幅 0.4Hz の Parzen Window を施し、観測記録に含まれるノイズの影響を低減した。
- 2) 地盤動的定数の初期値を設定し、一次元重複反射理論により、対象地の周波数応答関数を求める。
- 3) GL-40m におけるフーリエスペクトルに周波数応答関数を乗じ、GL-1m におけるフーリエスペクトルの計算値を求める。
- 4) GL-1m における観測値のフーリエスペクトルと比較する。
- 5) 観測値と計算値の差が最小となる最適値を得るまで 2) ~ 4) を繰り返す。

表-1 セン断波速度と土質定数

| 深度(m) | 土質    | $W$<br>(kN/m <sup>3</sup> ) | $N$<br>値 | $V_s$<br>(m/s) |
|-------|-------|-----------------------------|----------|----------------|
| 1-5   | 関東ローム | 11.3                        | 5        | 140            |
| 5-9   | 砂質土層  | 14.7                        | 16       | 320            |
| 9-24  | 洪積砂層  | 18.6                        | 27       | 320            |
| 24-40 | 洪積砂層  | 18.6                        | 50       | 420            |

表-2 地震の諸元

| EQ. | 震央距離<br>(km) | 震源深さ<br>(km) | マグニチュード<br>$M_j$ |
|-----|--------------|--------------|------------------|
| 1   | 7.9          | 81.0         | 4.9              |
| 2   | 16.0         | 32.0         | 4.1              |
| 3   | 104.5        | 73.3         | 6.5              |
| 4   | 218.0        | 35.0         | 6.7              |

### (2) 評価関数

評価関数  $J$  は、GL-1m における観測値のフーリエスペクトルと計算値のフーリエスペクトルの誤差二乗和とし、以下のように設定した。

$$J = \frac{\sum_{k=1}^{N_f/2-1} \{x_r(f_k) - X_r(f_k)\}^2}{\sum_{k=1}^{N_f/2-1} X_r(f_k)^2}$$

ここで、 $x_r$  は計算値のフーリエスペクトル、 $X_r$  は観測値のフーリエスペクトル、 $N_f$  は加速度時刻歴のサンプリング数である。

### (3) 最適化手法

本研究では、最適化手法に遺伝的アルゴリズム (GA) を用いた<sup>2), 3)</sup>。GA は、初期値をランダムに個体数の数だけ発生させることによってシンプレックス法のように初期値を正しく与えないと局所収束するという問題点を解決している。また、交差と突然変異によって、広域探索を行うと同時に局所探索を行うことを可能にしている。本研究では、GA のパラメータに一般的な問題に用いられている値を採用し、個体数を 200 個、総世代数を 400 個、突然変異確率を 0.005 に設定した。

#### (4) 解析条件

重複反射法<sup>4)</sup>において必要になる地盤定数は、層厚 $H$ 、質量密度 $\rho$ 、せん断波速度 $V_s$ 、減衰定数 $h$ などである。これらのうち、層厚 $H$ 、質量密度 $\rho$ はボーリング調査によって比較的精度よく推定することができる。したがって、ここでは、地盤動的定数の未知変数をせん断波速度 $V_s$ 、減衰定数 $h$ に設定した。

### 4. 地盤動的定数の推定

#### (1) 逆解析結果

表-3 に地震動ごとの観測値と計算値のフーリエスペクトルの誤差2乗和を示した。表からEQ.3, EQ.1, EQ.4, EQ.2の順に誤差2乗和が大きくなっている。

観測値と計算値のフーリエスペクトルの比較を図-1に示す。誤差2乗和が最も小さかったEQ.3では、観測値と計算値がフーリエスペクトルのピーク位置、形状はともに一致している。その他の地震動においても計算値と観測値はほぼ一致している。このことから、今回最適化手法に用いたGAは良い値を探索したのではないかと考えることができる。フーリエスペクトルの比較を行うと、震央距離が短いEQ.1, EQ.2は6~8Hz付近においてピークが存在している。それに対して震央距離が長いEQ.3, EQ.4は2~3Hzにおいてピークが存在している。

表-3 観測値と計算値の誤差2乗和

| EQ. | 観測値と計算値の<br>フーリエスペクトル<br>の誤差2乗和 |
|-----|---------------------------------|
| 1   | 8.17                            |
| 2   | 15.89                           |
| 3   | 6.29                            |
| 4   | 12.06                           |

観測値と計算値の増幅率の比較を図-2に示す。いずれの地震波も地盤の周波数応答関数とほぼ一致した結果となった。

PS 検層から得られた速度検層モデルと逆解析結果を図-3に示した。同図から第1層、第2層においては地震動による推定値の違いはあまり見られないが、第3層、第4層において震央距離による推定値の違いが見られる。このことから、震央距離の遠い地震動は、震央距離が近い地震動より、地盤動的定数を推定することが難しいことがわかる。また、観測値と計算値のフーリエスペクトルの誤差2乗和が一致したからといってPS 検層から求められた $V_s$ と一致しているとは言えないということもわかる。

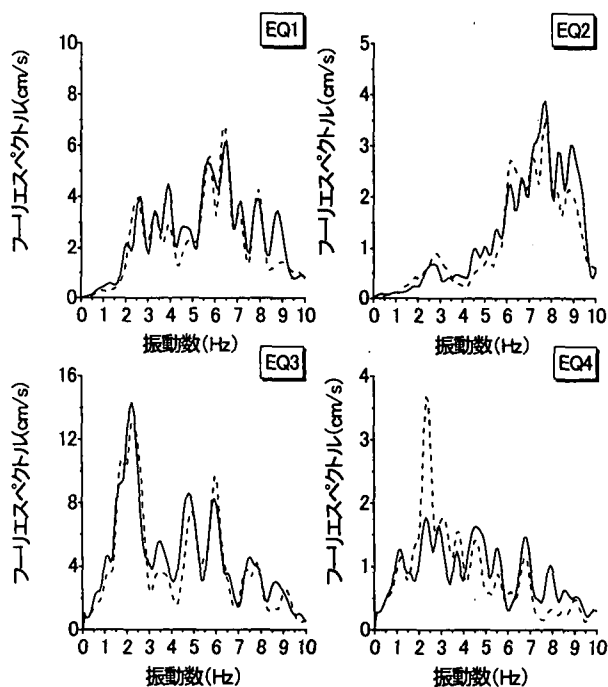


図-1 フーリエスペクトルの比較

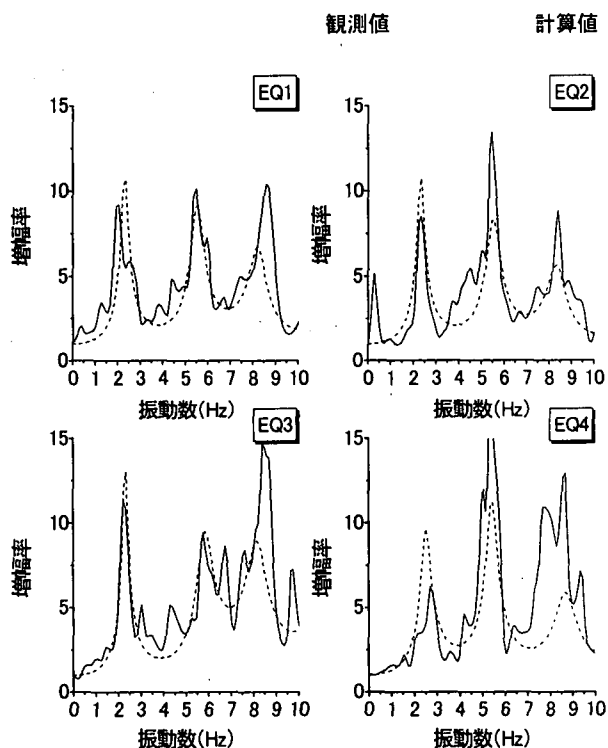


図-2 増幅率の比較

## (2) 震央距離と震源深さによる推定精度の違いの原因

震央距離と震源深さによって推定精度が異なることがわかったので、この原因について検討する。原因としては、震央距離と震源深さの違いにより波形が何らかの影響を受けていることが考えられる。震央距離が遠い地震動は主要動部分に表面波が卓越してくることが多いことが知られている。そこで、解析に用いた波形の速度時刻歴のフーリエスペクトルを求めてみた。

それぞれの地震動の速度時刻歴のフーリエスペクトルを図-4に示す。図からEQ.2, EQ.3, EQ.4ではフーリエスペクトルのピークの位置が1Hz以下の位置にあることがわかる。このことから、EQ.1以外の波形は、長周期な波形の影響を強く受けていることがわかる。したがって、EQ.3, EQ.4は震央距離が遠いことにより、表面波の影響を受け地盤動的定数の推定値が悪くなったと考えられる。EQ.2については、ある程度の値を得ることが出来たが、震源深さが浅いため表面波の影響を受けていることがわかった。

## 4. おわりに

SH波を用いて地盤動的定数を推定するにあたって、震央距離、震源深さが推定精度にどのような影響を与えるのかについて、いくつかの地震動を用いて解析を行った。今回行った1つのケースでは、震央距離が遠い場合、地盤動的定数の推定値は悪くな

った。その原因の一つとして、速度のフーリエスペクトルから観測波形に長周期な波形が含まれているためだとわかった。また、震央距離が近くても震源が浅いと表面波が含まれること、震央距離が近く震源が深い地震を用いることが本解析手法を用いるにあたって良いことがわかった。

謝辞：本研究では、東京大学生産技術研究所によって観測され、(財)震災予防協会の強震動アレー観測データベースに収録されている地震観測記録を使用させていただきました。記して関係各位に感謝の意を示します。

## 参考文献

- 1) (財)震災予防協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。
- 2) 坂和正敏、田中雅博：遺伝的アルゴリズム、朝倉書店、pp.8-58、1995
- 3) 吉田 均、杉本博之：遺伝的アルゴリズムの構造工学への応用、森北出版株式会社、pp.2-19、1997。
- 4) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門、鹿島出版会、1994。

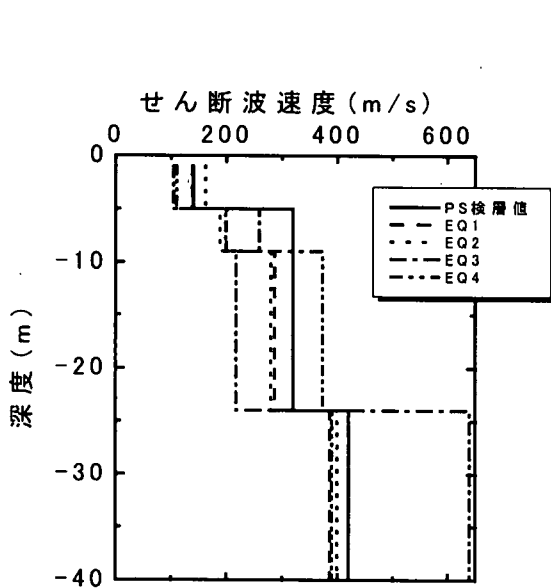


図-3 速度検層モデルと逆解析結果の比較

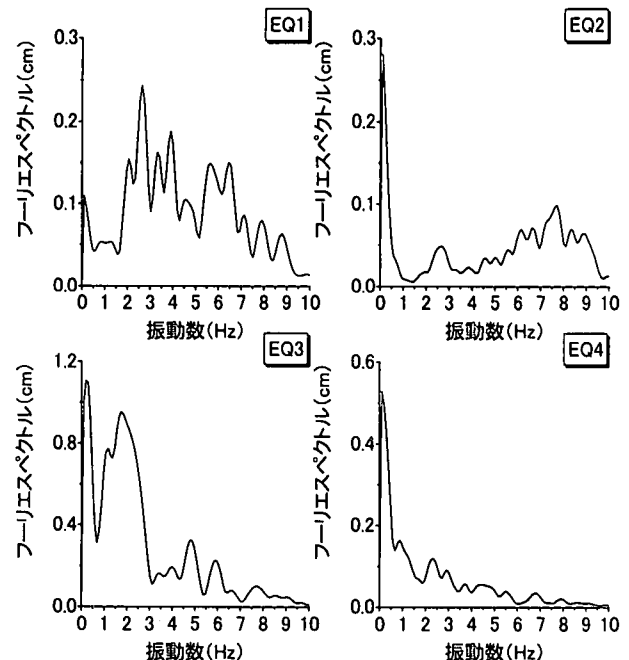


図-4 速度時刻歴のフーリエスペクトル