

## 地震観測記録の水平・上下両成分による地盤同定解析について — 逗子市地域の地盤特性 —

(株)パイブラントシステム開発 正会員 工博 ○ 安藤幸治  
地震予知総合研究振興会・首都大学東京名誉教授 フェロー会員 工博 岩楯敏広  
首都大学東京准教授 正会員 工博 小田義也

### 1. はじめに

土木・建築構造物の耐震設計や地震被害予測を行う場合、地震時挙動に大きな影響を及ぼす表層地盤の動的特性を把握することは重要である。首都大学東京では、逗子市の地域防災計画の一環として地盤構造の異なる地表面上と基盤層に地震計を設置し地震観測を実施している<sup>1)</sup>。本研究では、同市内で観測された水平及び上下両方向の鉛直アレー地震記録を同時に用いて傾斜基盤を有する観測点周辺地盤の地盤構造を二次元FEMで同定し、その動的特性について検討した。

以下に、数値モデル同定解析手法<sup>2)</sup>の概略と解析結果について述べる。

### 2. 数値モデル同定解析手法

数値モデル同定解析は、対象系の運動が次の運動方程式に従うことを前提とする。

$$M\ddot{\mathbf{x}}(t) + C\dot{\mathbf{x}}(t) + K\mathbf{x}(t) = \mathbf{f}(t) \quad (1)$$

ここに、 $M$ 、 $C$ 及び $K$ は、それぞれ質量、減衰、剛性の行列であり、 $\mathbf{x}$ 、 $\mathbf{f}$ は相対変位、外力の各ベクトルである。入力が加速度であれば外力 $\mathbf{f}$ は慣性力となる。

同定解析は、最小二乗法により、式(1)の理論解と観測値間の誤差を評価して、系定数、 $M$ 、 $C$ 及び $K$ の各行列を構成する物性値に修正を加えて同定し、系の地震時挙動を把握することを目的とする。ここに、観測値としてモード解析<sup>2)</sup>から得られた伝達関数を使用し周波数領域で検討する。モード解析は時間領域で式(1)の解と観測記録間の誤差を評価して2つのパラメータ固有値と固有ベクトルを求め系の動的特性を明らかにすることを目的とするが、同定解析で参照される伝達関数は、それらパラメータより次のように表される。

$$T(\omega) = \sum_r \frac{\omega^2 \beta_r \mathbf{u}_r}{i\omega - \lambda_r} + I \quad (2)$$

ここに、 $\lambda_r$ 、 $\mathbf{u}_r$ はそれぞれ第 $r$ 次固有値、固有ベクトルである。また、 $\beta_r \mathbf{u}_r$ は刺激関数であり、 $I$ は単位

ベクトルである。

一方、運動方程式(1)より、理論解は次のようになる。

$$T(\omega) = \sum_r \frac{\omega^2 \mathbf{u}_r^T M \mathbf{e}}{i\omega - \lambda_r} \mathbf{u}_r + I \quad (3)$$

ここに、 $\mathbf{e}$ は加速度入力点に要素1を他の要素に0を持つベクトルである。

同定解析手法は、式(3)の伝達関数 $T(\omega)$ が物性値に対して非線形の関係にあるので予めテーラーの定理に従い物性値修正量の一次までとって線形化を行い、最小二乗法により定式化される。各物性値をベクトル $\mathbf{p}$ の成分で表し、その修正量を $\delta \mathbf{p}$ とすれば伝達関数 $T(\omega)$ は次のようになる。

$$T(\omega) \approx T(\omega, \mathbf{p}_0) + \sum_{n=1}^N \mathbf{a}_n \frac{\partial T(\omega, \mathbf{p}_0)}{\partial p_n} \Delta p_n \quad (4)$$

ここに、 $\mathbf{a}_n$ は、摂動法によって算出される $n$ 番目の物性値成分 $p_n$ の摂動 $\Delta p_n$ に対する伝達関数の一次摂動 $\Delta T_n(\omega) = \partial T / \partial p_n \cdot \Delta p_n$ の展開係数であり、修正量 $\delta p_n$ は $\mathbf{a}_n \cdot \Delta p_n$ である。 $\mathbf{p}_0$ は物性値の初期値である。

展開係数 $\mathbf{a}_n$ は、式(2)と(4)間の誤差を評価して求められる。これより修正量 $\delta p_n$ が与えられ、物性値は更新される。以上、誤差の二乗和あるいは物性値修正量 $\delta p_n$ の相対変化率が所定の値以下になるまで演算は繰り返される。

### 3. 解析結果—逗子市地域の地盤特性—

図1は逗子市の地盤断面図<sup>3)</sup>である。解析では谷部の右側半分を対象とし、深さ30m、幅300mをモデル化した(図4参照)。設定したパラメータはヤング率、ポアソン比、減衰定数で、初期値として地盤調査結果を与え解析した結果、谷部第三地層のヤング率のみ大きく変化し、他は殆ど変わらなかった。図2、3は同定されたモデルの伝達関数及び加速度波形(EW)である。これらはともに良好であり、妥当な結果と言える。UDは省略する。表1にモデルの固有周波数及び

キーワード：数値モデル同定解析，FEMモデル，モード解析，不整形地盤，地震観測，逗子市

連絡先：〒207-0014 東京都東大和市南街5-39-16 tel 042-563-6751

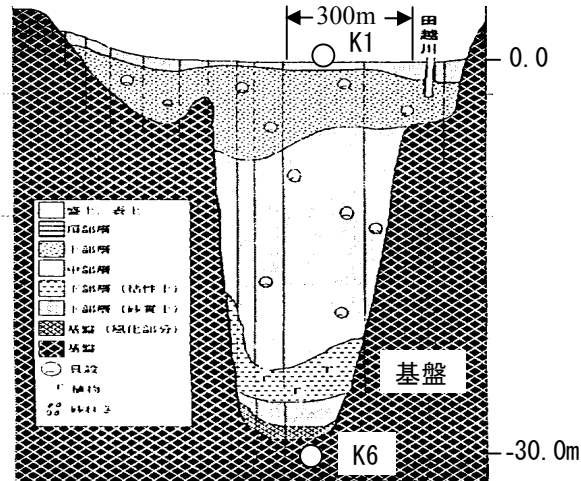


図1 逗子市地域の表層地盤 K1,K6:観測点

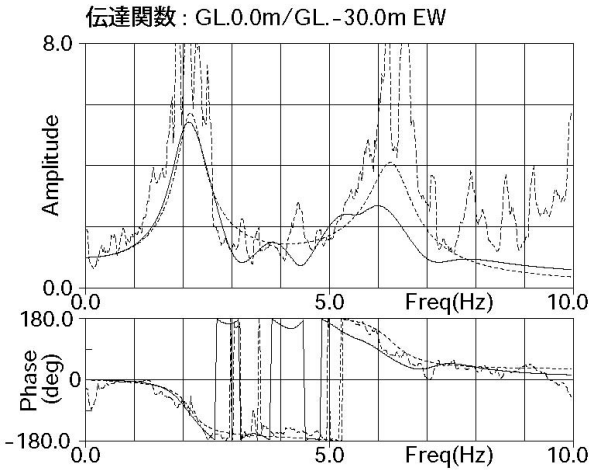


図2 伝達関数の比較

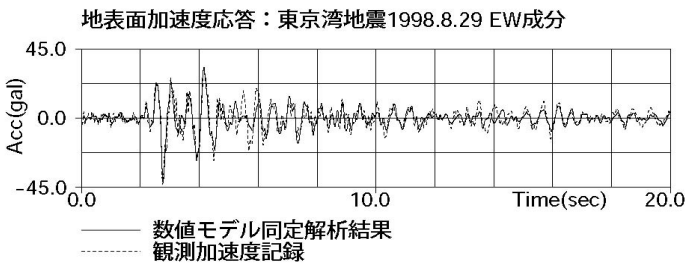


図3 加速度波形の比較(東京湾地震 1998.8.29)

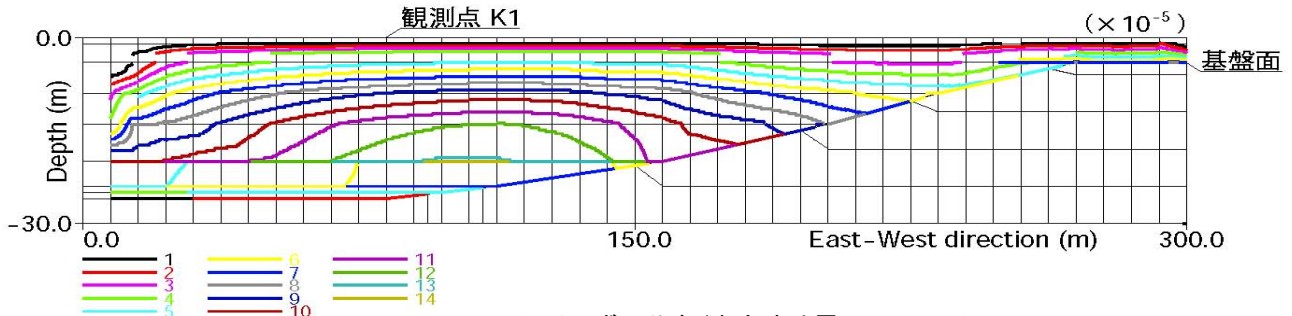


図4 せん断ひずみ分布(東京湾地震 1998.8.29)

減衰定数を示す。水平 EW, 上下 UD の両成分とも同表のモード解析結果の各モードに対して 3 個のモードが対応する。EW の第 1 次モードは谷中央部で卓越するせん断モードであり, 第 2, 3 次モードは双方とも傾斜部で卓越する。刺激関数はいずれも大きい。図 4 はせん断ひずみ分布である。特徴としてインピーダンスの大きく異なる傾斜した基盤面や底面付近に, せん断モードが卓越する谷中央部に比較して, 同レベルのひずみが広い領域に現れていることが挙げられる。

4. おわりに

地震被害は不整形地盤に多く見られるが, 本研究で扱った FEM モデルのモード構成やせん断ひずみ分布によって, その要因の一部が検証されたとと言える。

参考文献

- 1) Takahiro IWATATE, Akira OHOKA: Surface Ground Motion Characteristics of Zushi-site, Memoirs of Faculty of Engineering Tokyo Metropolitan University 1996
- 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, PP.151~160, 1992.7
- 3) 逗子市地域防災計画(地震対策編) 策定事業調査研究報告書, 財団法人都市防災研究所, 1994 年 2 月

表 1 固有周波数 ( $f(\text{Hz})$ ) 及び減衰定数 ( $h(\%)$ )

| 成分 | 同定解析結果 |                |         |       | モード解析結果        |         |
|----|--------|----------------|---------|-------|----------------|---------|
|    | 次数     | $f(\text{Hz})$ | $h(\%)$ | 刺激関数  | $f(\text{Hz})$ | $h(\%)$ |
| EW | 1      | 2.03           | 16.9    | 0.060 | 2.10           | 13.0    |
|    | 2      | 2.28           | 15.6    | 0.024 |                |         |
|    | 3      | 2.69           | 14.2    | 0.016 | 6.27           | 6.9     |
|    | 22     | 5.37           | 10.5    | 0.007 |                |         |
|    | 24     | 5.67           | 10.2    | 0.007 |                |         |
| UD | 26     | 5.92           | 11.1    | 0.009 | 3.86           | 19.4    |
|    | 7      | 3.93           | 28.7    | 0.026 |                |         |
|    | 8      | 3.97           | 29.2    | 0.009 |                |         |
|    | 9      | 4.02           | 29.7    | 0.005 |                |         |