

地震観測記録による FEM モデルを使用した地盤同定解析について
— 逗子市地域の地盤特性 —

正会員 ○ 安藤幸治

首都大学東京 都市環境学部 フェロー会員 岩楯敏広

1. はじめに

土木・建築構造物の耐震設計や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特性を把握することは重要である。特に、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事例より明らかである。

本研究は鉛直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。一般に地盤の動特性の検討では成層構造を仮定して一次元モデルを使用することが多いが、不整形地盤の場合は二次元あるいは三次元の地盤構造を考慮したモデルが要求される。

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震被害想定に必要な基礎的な地震データを取得するため、地盤構造の異なる地表面上と基盤層に地震計を設置し、水平アレーおよび鉛直アレー地震観測を実施している¹⁾。本研究では鉛直アレー地震記録を用いて傾斜基盤を有する観測点周辺の表層地盤を二次元 FEM よりモデル化して同定解析を行い、その動的特性について検討した。解析結果については、一次元重複反射理論²⁾の結果と比較して評価した。はじめに数値モデル同定解析手法³⁾についてその概略を述べる。

2. 数値モデル同定解析手法

同定解析手法は地盤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、外力を意味するベクトルである。入力加速度であれば外力 $\mathbf{f}$ は慣性力となる。

同定解析は系の運動方程式(1)により地震時挙動を把握することが目的であり、最小二乗法により式(1)の解と観測値間の誤差を評価して、その系定数、 M 、 C 及び K の各行列を構成する物性値に修正を加えてい

くという方法を採用。ここに、観測値としてモード解析³⁾から得られた伝達関数を使用し、周波数領域で検討する。

対象振動系が運動方程式(1)に従う場合、伝達関数 $T(\omega)$ は次のようになる。

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

ここに、 λ_r 、 $\mathbf{u}_r$ は系の第 r 次固有値、固有ベクトルである。 $\mathbf{e}$ 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。

ところで物性値の修正量は、式(2)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テーラーの定理に従い微小な修正量の一次までとってこれについて線形化を行い、誤差の最小化を条件に算出される。各種物性値をベクトル $\mathbf{p}$ 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。

$$T(\omega, \mathbf{p}) \approx T(\omega, \mathbf{p}_0) + \sum_{n=1}^N \mathbf{a}_n \frac{\partial T(\omega, \mathbf{p}_0)}{\partial p_n} \Delta p_n \quad (3)$$

ここに、 $\mathbf{a}_n$ は n 番目の物性値成分 p_n の摂動 Δp_n による伝達関数一次摂動 $\Delta T_n(\omega) = \partial T / \partial p_n \cdot \Delta p_n$ の展開係数であり、修正量 δp_n は $\mathbf{a}_n \cdot \Delta p_n$ である。 Σ は物性値の個数 N 個の総和を意味する。 $\mathbf{p}_0$ は、はじめに仮定した物性値である。 $\Delta T_n(\omega)$ は固有方程式より摂動法を用いて求められるモード定数 λ_r 、 $\mathbf{u}_r$ の一次摂動の関数である。

展開係数 $\mathbf{a}_n$ は誤差の最小化より求められる。これより修正量 δp_n が与えられ、物性値は初期値 $\mathbf{p}_{n0}$ に計算されて更新される。以上誤差の二乗和あるいは物性値修正量 δp_n の相対変化率が所定の値以下になるまで演算が繰り返される。

3. 計算例—逗子市地域の地盤特性—

同定解析で対象とした地盤構造⁴⁾を図1に示す(縦横の縮尺率は異なる)。このように水平方向に基盤の形状は変化をしている。図中のK1、K6は観測点である。

キーワード：数値モデル同定解析、FEMモデル、不整形地盤、地震観測、摂動法、逗子市

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

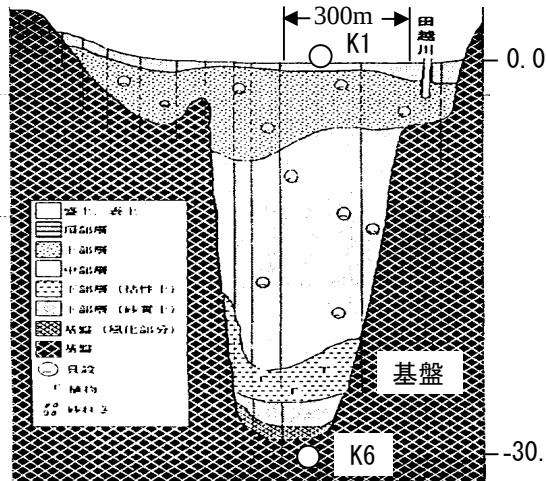


図1 逗子市地域の表層地盤 K1, K6: 観測点

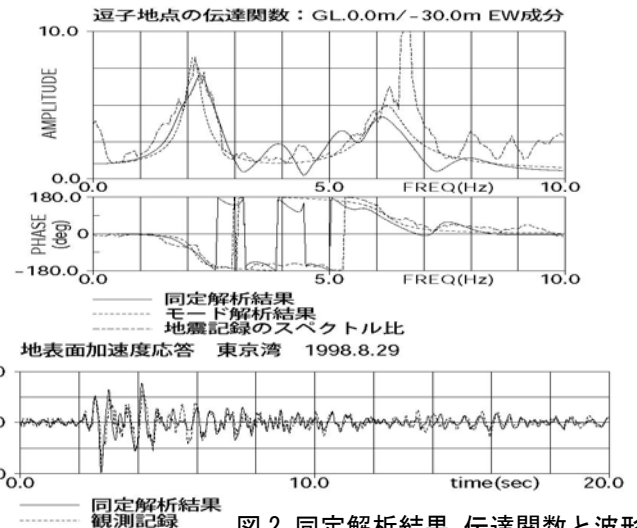


図2 同定解析結果 伝達関数と波形

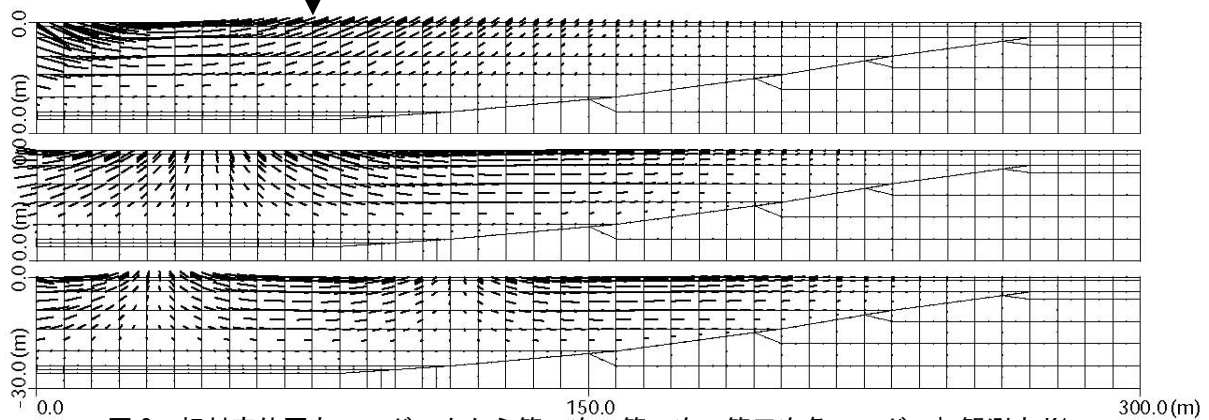


図3 相対変位固有モード 上から第一次, 第二次, 第三次各モード ↓: 観測点 K1

解析に使用したモデルは谷部の右側半分をモデル化したものである。図3にそのモデルを示す。深さ30m, 幅300mである。地盤は8節点アイソパラメトリック要素で表現した。底面は固定し側面は粘性境界とした。以上の条件下で行った水平成分の同定解析では中部層のせん断波速度の変化率が最も大きく+0.87である。他は0.1前後である。伝達関数, 加速度波形の比較図を図2に示す。双方共に良好である。重複反射理論の結果(モード解析結果とほぼ同様)と比較して大きく異なる点は2Hz付近の周波数特性にある。同理論は2.1Hzの第一次モードのみであるのに対して, FEMモデルの方は第一次~第三次の3個のモード(1.9Hz, 2.3Hz, 2.7Hz)が存在し, スペクトル比にも指摘されるが, 比較的幅のある周波数帯を成している。図3にそれら3個のモード(相対変位固有モード)を示す。第一次モードは, 谷中央部のせん断型モードであり, 他の2個は重複反射理論では見られない傾斜部で卓越するモードである。ここに, ベクトルの方向は入射波に対する位相差を表す。第二次モードは傾斜基盤から

左方へ $-\pi/2$, $-\pi$, $-3\pi/2$, 第三次モードは $-\pi/2$, $-\pi$, $-3\pi/2$, -2π , $-5\pi/2$ へと変化をしているがその分だけ応答が遅れる。上下成分は下位では卓越しない。

4. おわりに

FEMモデル同定解析は複雑な不整形地盤における地盤・構造物の耐震性評価や被害予測の精度を向上させる上で有意であると考ええる。

参考文献

- 1) Takahiro IWATATE, Akiro OHOKA Surface Ground Motion Characteristics of Zushi-site 'Memoirs of Faculty of Engineering Tokyo Metropolitan University No.' 1996
- 2) 安藤幸治, 岩楯敏広: 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, 土木学会論文集, No.731/I-63, pp.213~229, 2003.7
- 3) 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
- 4) 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