

2次元FEMモデルによる数値モデル同定解析 － 逗子地域の表層地盤 －

株式会社 **バイブラントシステム開発**

Vibrant System Development Co.,Ltd.

〒207-0014 東京都東大和市南街5-39-16

TEL (FAX) 042-507-2731

E-mail ando@vsdc.co.jp

URL <http://www.vsdco.jp>

目次

1. はじめに	1
2. 地盤構造	1
3. 2次元FEMモデルによる数値モデル同定解析	2
3.1 物性値について	2
3.2 固有周波数および減衰定数について	4
3.3 固有ベクトルについて	4
3.4 伝達関数および加速度応答について	7
3.5 せん断ひずみについて	8
4. おわりに	9

1. はじめに

解析で対象とした地盤は逗子地域の表層地盤である。使用した地震記録は、都立大学が逗子市の地域防災計画¹⁾策定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、長年に亘って観測してきた記録である。観測地点 6 点の位置を図 1-1~3 に示す。解析では、この内の鉛直アレー観測地点 K1 と K6 の記録を使用した。はじめに、これら記録に対して時間領域のモード解析を適用して伝達特性を明らかにし、次いで、同特性を参照して数値モデル同定解析を行い、表層地盤の構造および動的特性について検討した。

2. 地盤構造¹⁾

地盤の断面図を図 1-1 に、深度分布図を図 1-2 にそれぞれ示す。図 1-1 の右図断面図に示した観測地点 K1 周辺地盤の EW 方向（地図上の方位と多少異なります）については、縦横の縮尺の違いから（横が縦のおよそ 50 倍）谷部を形成する両側の基盤の傾斜が強調されて描かれているが、深度分布図 1-2 より、NS 方向に比較して無視し得ない程度に傾斜を有していることが指摘される。そこで EW, UD の両方向について、断面図 1-2 を基にして基盤形状を反映させた 2 次元 FEM モデルを作成して数値モデル同定解析を実施し、K1 周辺地盤の構造および動的特性について検討した。観測値として参照した伝達関数は、時間領域のモード解析より求められた EW 成分および UD 成分の 2 成分である。同解析で使用した地震記録を図 1-3 に、解析結果を表 1-3 および図 1-4 に示す。ここに、数値モデル同定解析は、図 1-4 の実線で描いた伝達関数を目標とした。

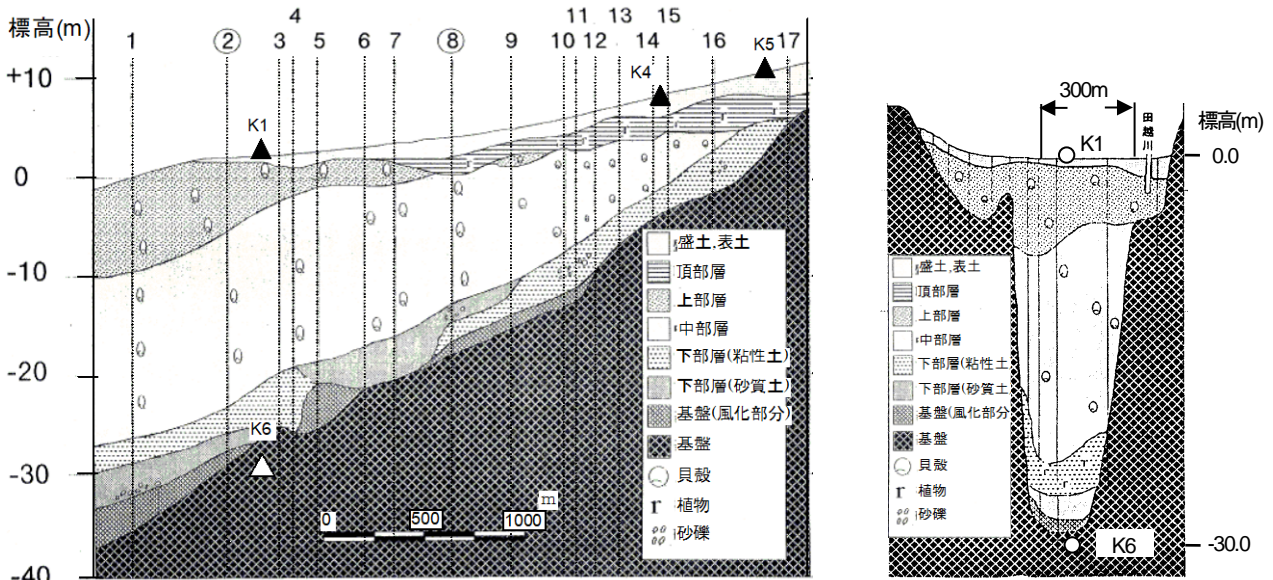


図 1-1 田越川流域の断面図 (左図 図 1-2A-A', 右図 図 1-2 C-C')

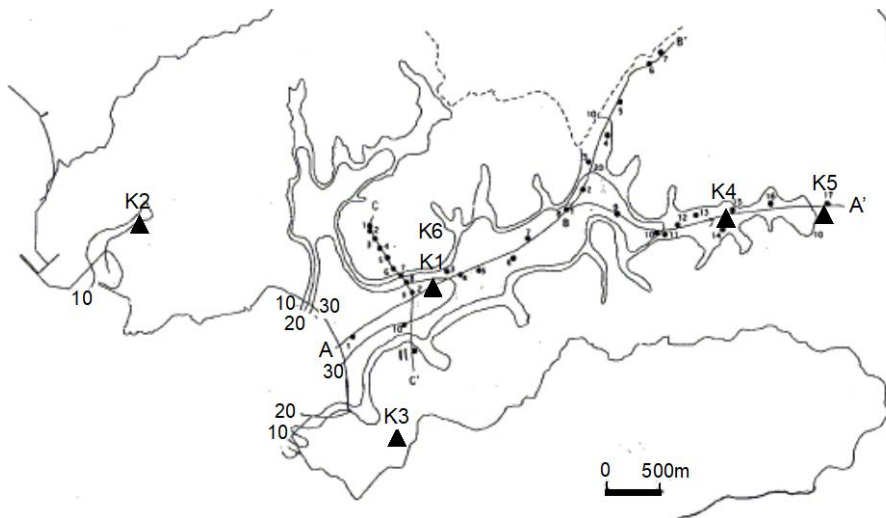


図 1-2 逗子市の基盤深度分布および強震アレー観測点

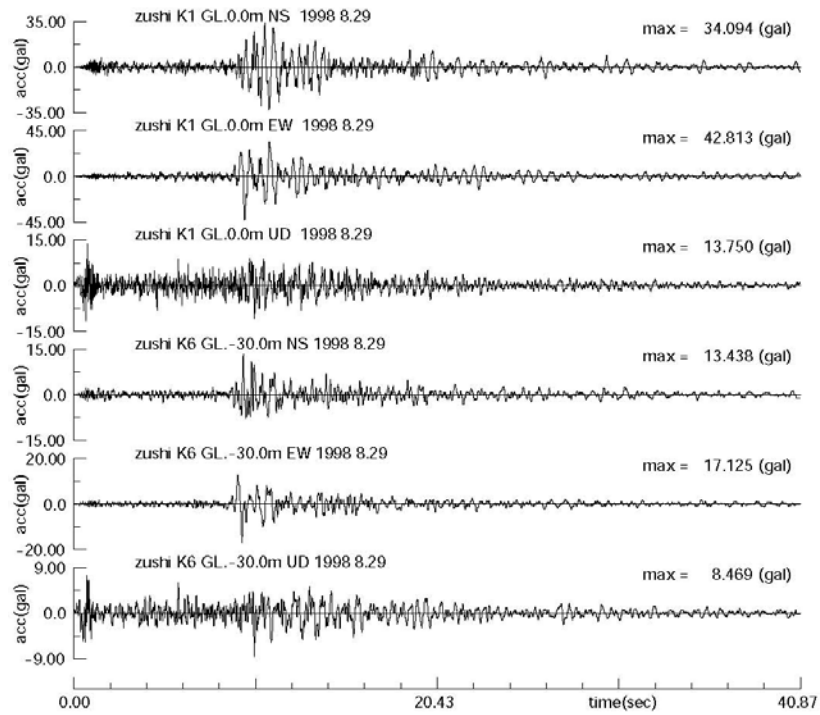


図 1-3(1) 地震観測データ(東京湾地震 8/29/98) 上 3 波 K1 : 地表面記録 下 3 波 K6 : 地中記録

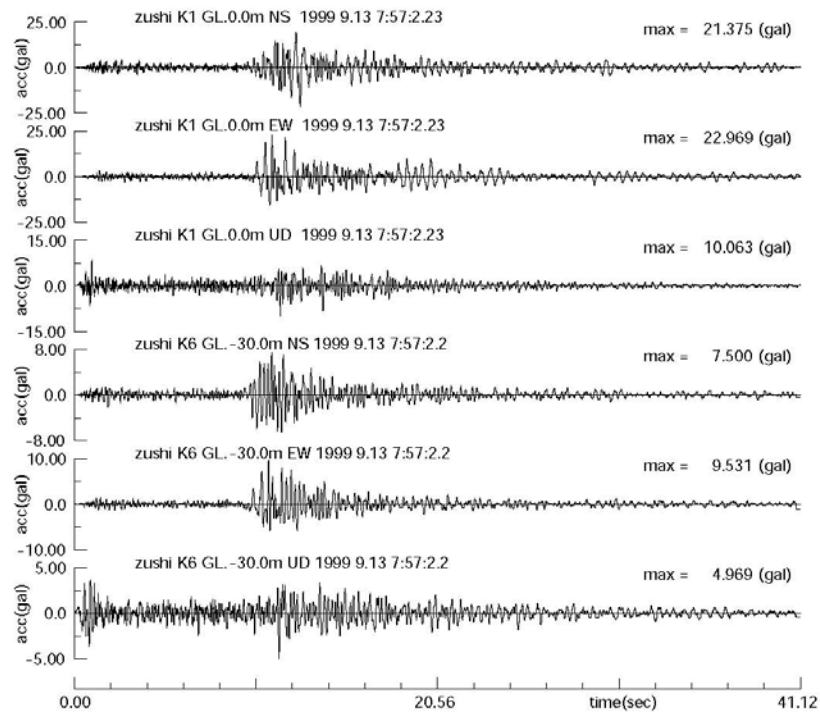


図 1-3(2) 地震観測データ(千葉県北西部地震 8/29/98) 上 3 波 K1 : 地表面記録 下 3 波 K6 : 地中記録

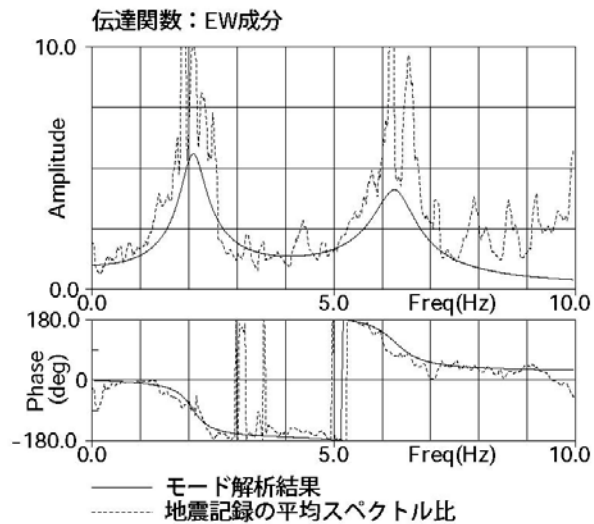


図 1-4(1) 解析値と観測値（平均スペクトル比）の伝達関数の比較（EW 成分）

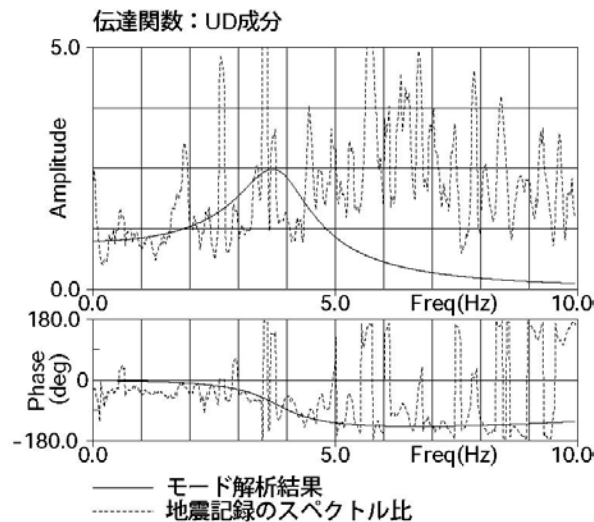


図 1-4(2) 解析値と観測値（平均スペクトル比）の伝達関数の比較（UD 成分）

3. 2次元 FEM モデルによる数値モデル同定解析^{2) 3) 4)}

解析では断面図 1-1 右図の谷部の右側半分を対象とした。図 1-5 に谷部の層構造を、図 1-6 に解析に使用した FEM モデルをそれぞれ示す。モデルの大きさは、図 1-1 右図に示した深さ 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。境界条件は底面を固定し、側面は粘性境界とした。モデルに与えた初期物性値（図 1-5）は地盤調査による結果である。

3.1 物性値について

数値モデル同定解析は、パラメータとして、ヤング率、ポアソン比および各要素に与えた減衰係数を設定した。ただし、これら量は、各層について同一の値を取るようグルーピングして実施した。各要素の密度および層構造は固定した。以上の条件より、次のような結果が得られた。

同定されたヤング率およびポアソン比から、せん断波速度 V_s 、P 波速度 V_p に換算して表 1-1 に EW の値を、表 1-2 に UD の値をそれぞれ示す。これらは図 1-4(1)、(2)に示した EW と UD の 2 成分の時間領域のモード解析結果を同時に対象として同定された物性値である。減衰係数は両成分で構成が異なるが、UD 成分は、ヤング率、ポアソン比および EW 成分の減衰係数が収束した後に、改めて同成分のみで解析した結果である。

最も大きく変化したパラメータは、第 3 地層（砂質シルト）のヤング率である。その変化率は、せん断波速度に換算して +0.82 である。他は +0.1 以下である。UD 成分にも同様の傾向が見られる。

土質	$w(t/m^3)$	$V_{so}(m/sec)$	$V_{po}(m/sec)$	深さ (m)
ローム・砂	1.7	150.0	281.0	0.0 K1
砂質土	1.8	130.0	243.0	-1.0
砂質シルト	1.5	100.0	187.0	-4.0
砂質シルト	1.9	220.0	412.0	-20.0
砂質シルト	2.0	250.0	468.0	-24.0
礫質土	2.0	400.0	749.0	-25.0
基盤	2.1	700.0	1310.0	-26.0
				-30.0 K6

図 1-5 観測地点 K1 周辺の地盤構造 (K1, K6 : 地震観測地点)

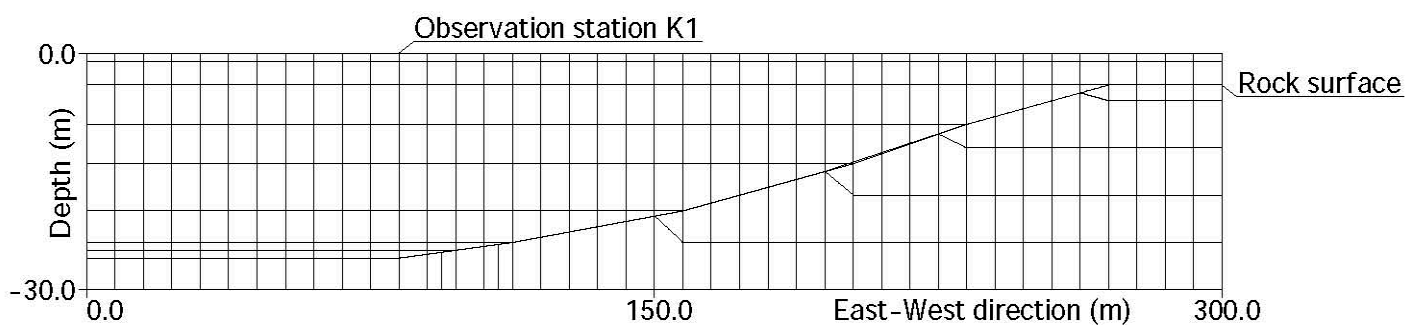


図 1-6 解析に使用した FEM モデル

表 1-1 同定された物性値 (EW 成分)

番号	土質	$w(t/m^3)$	$V_s(m/sec)$		h	
			初期値	同定値	初期値	同定値
1	埋土	1.70	150.0	153.3	0.07	0.06
2	砂質土	1.80	130.0	140.8	0.07	0.06
3	砂質シルト	1.50	100.0	182.0	0.07	0.14
4	砂質シルト	1.90	220.0	227.5	0.03	0.04
5	砂質シルト	2.00	250.0	251.2	0.03	0.03
6	基盤風化層	2.00	400.0	400.7	0.03	0.03
7	基盤	2.10	700.0	712.8	0.03	0.03

表 1-2 同定された物性値 (UD 成分)

番号	土質	$w(t/m^3)$	$V_p(m/sec)$		h	
			初期値	同定値	初期値	同定値
1	埋土	1.70	281.0	286.7	0.07	0.21
2	砂質土	1.80	243.0	263.3	0.07	0.21
3	砂質シルト	1.50	187.0	340.6	0.07	0.38
4	砂質シルト	1.90	412.0	425.6	0.03	0.21
5	砂質シルト	2.00	468.0	469.9	0.03	0.21
6	基盤風化層	2.00	749.0	749.7	0.03	0.21
7	基盤	2.10	1310.0	1333.0	0.03	0.21

3.2 固有周波数および減衰定数について

表 1-3 に解析より求められた固有周波数および減衰定数を示す。EW, UD の両成分ともモード解析から求められた各モードに対応する周波数帯に 3 個のモードが存在する。EW 成分の刺激関数は第 1 次モードが最も大きく、モード解析結果の第 1 次モードに属する第 2 次, 3 次のおよそ 3~4 倍である。UD 成分の刺激関数は第 7 次モードが最大で、他のモードのおよそ 3~5 倍の大きさである。

表 1-3 固有振動数($f(\text{Hz})$)と減衰定数($h(\%)$)

成分	数値モデル同定解析結果				時間領域のモード解析結果	
	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		
	22	5.37	10.5	0.007	6.27	6.9
	24	5.67	10.2	0.007		
	26	5.92	11.1	0.009		
UD	7	3.93	28.7	0.026	3.86	19.4
	8	3.97	29.2	0.009		
	9	4.02	29.7	0.005		

3.3 固有ベクトルについて

各成分のはじめの 3 個の固有ベクトルを EW 成分について図 1-7 に, UD 成分について図 1-8 に, 各次毎に規格化してそれぞれ示す。ここに, ベクトルの方向は入射波 (鉛直下方) に対する位相差である。

EW の第 1 次ベクトル図 1-7(1) は, 谷中央部で卓越している。一方, 同じ卓越周波数帯に属する第 2 次および第 3 次ベクトルは, 谷部に加えて傾斜部においても卓越していることがわかる。

ベクトルの位相差は, 傾斜部から西側にかけて大きくなっていく。即ち, 東側水平方向を規準にして, 第 1 次ベクトルはおよそ $\pi/4$ から $-\pi/4$ まで, 第 2 次ベクトルは $0, -\pi/2$ そして $-\pi$ へ, 第 3 次ベクトルは $0, -\pi/2, -\pi, -3\pi/2$

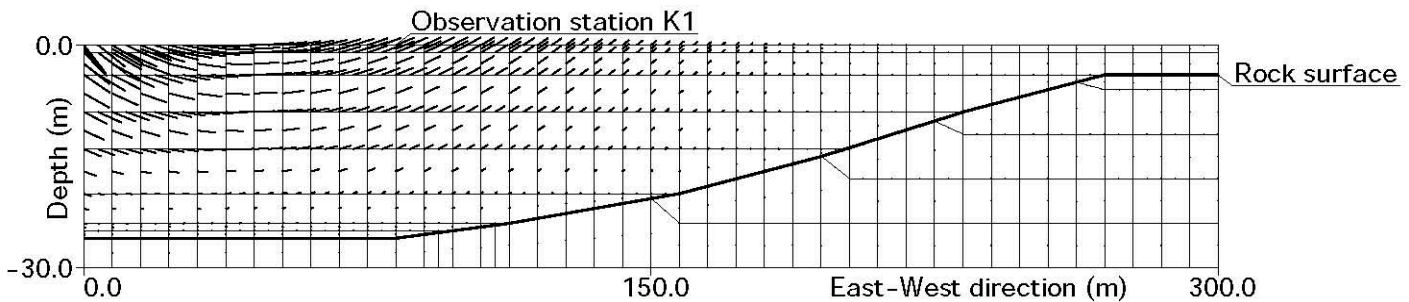


図 1-7(1) 第 1 次固有ベクトル (EW 成分)

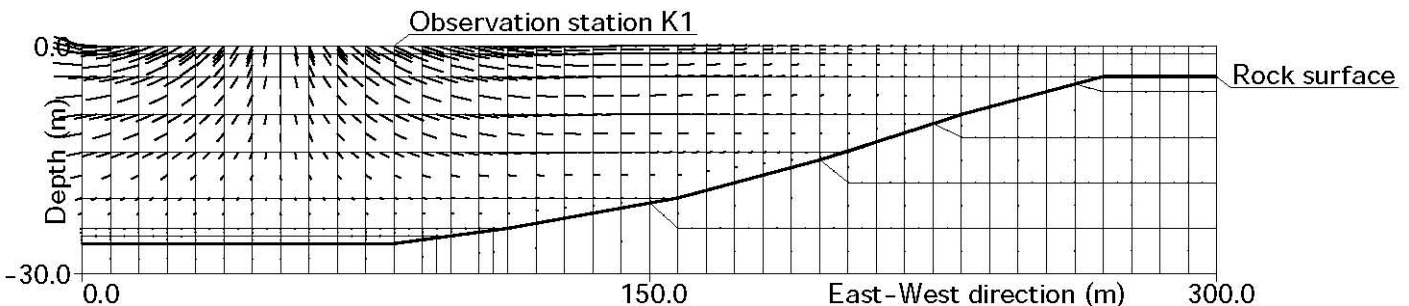


図 1-7(2) 第 2 次固有ベクトル (EW 成分)

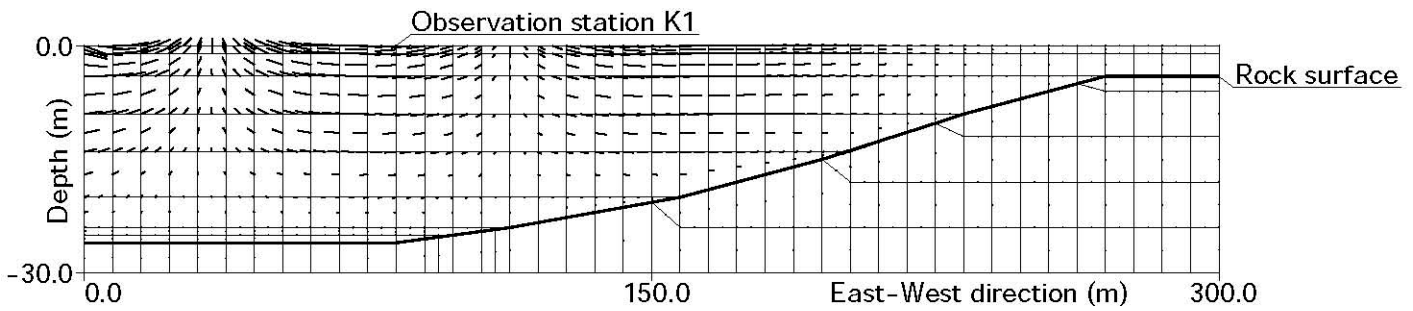


図 1-7(3) 第 3 次固有ベクトル (EW 成分)

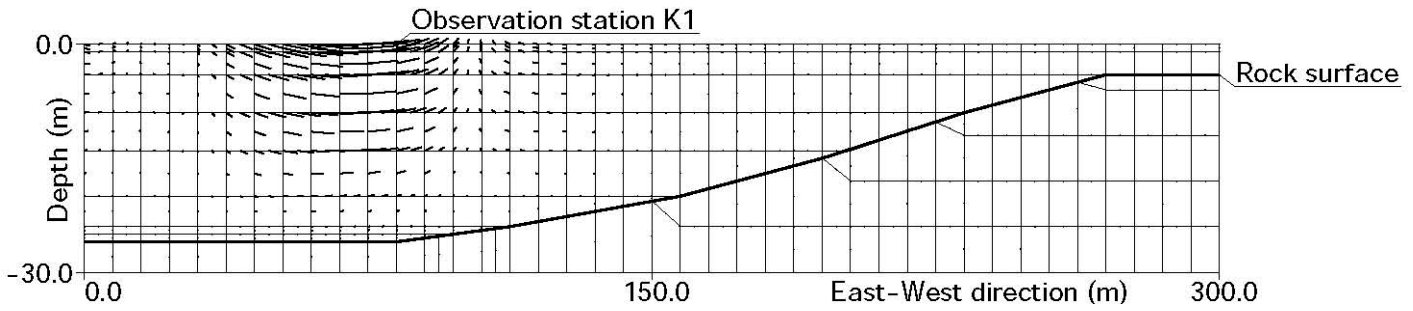


図 1-8(1) 第 7 次固有ベクトル (UD 成分)

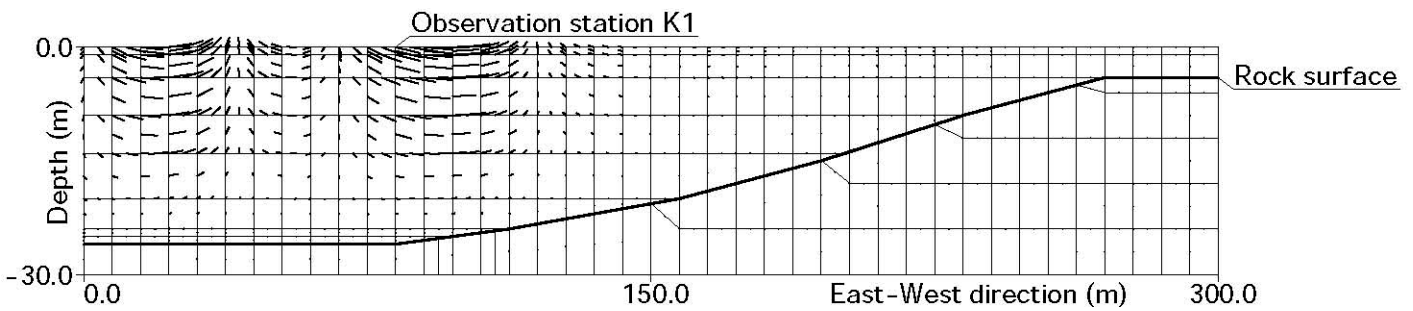


図 1-8(2) 第 8 次固有ベクトル (UD 成分)

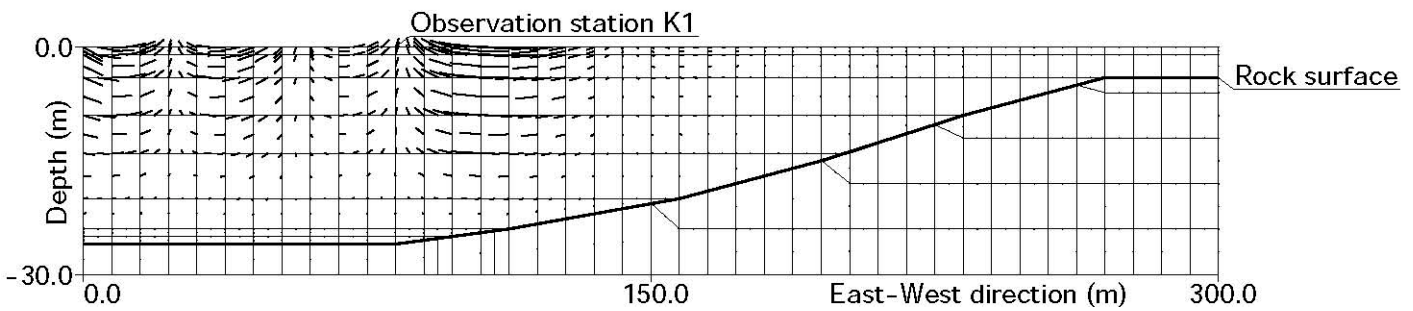


図 1-8(3) 第 9 次固有ベクトル (UD 成分)

そして -2π へと変化をしている。変化幅は、 $\pi/2$, π , 2π と 2 次以降は π ずつ増えていく性質がある。これは、 $-\pi/2$ の奇数倍のところにある節の両端で位相差が π だけ変わることに依る。節の個数はモード次数から 1 を引いた値である。

図 1-8 に示した UD 成分についても同様のことが指摘される。即ち、最も卓越した第 7 次ベクトルは谷部で大きく卓越し、第 8 次および 9 次ベクトルは傾斜部でも卓越している。位相についても、卓越している箇所に限れば、EW 成分と同様である。ただし、第 8 次および 9 次ベクトルの節の個数は EW 成分の第 2 次、3 次ベクトルと比較して 1 個多いので、各次の位相の変化幅は、それぞれ 2π , 3π である。

3.4 伝達関数および加速度応答について

図 1-8, 9 は伝達関数および加速度波形の比較図である。図 1-8 より、解析で目標としたモード解析結果（点線）は、同定されたモデルによって良好に再現されていると言える。また、図 1-9(1), (2) に示した加速度波形は UD 成分に多少残差があるものの良好な結果である。ここに、使用した入力加速度はモード解析で使用した記録である。

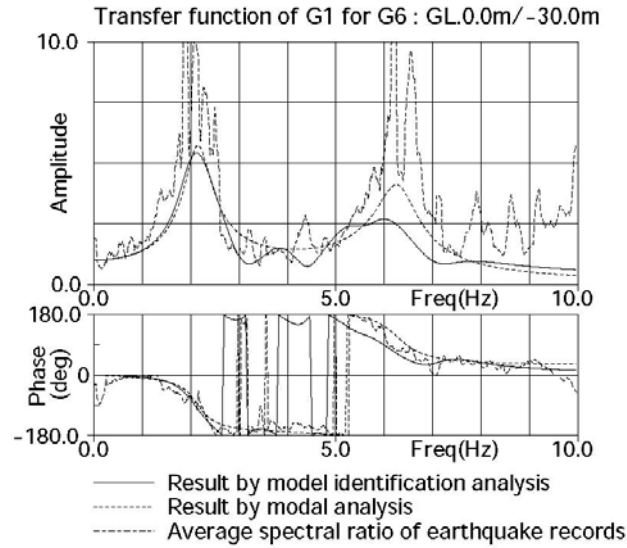


図 1-8(1) 解析値と観測値の伝達関数の比較 (EW 成分)

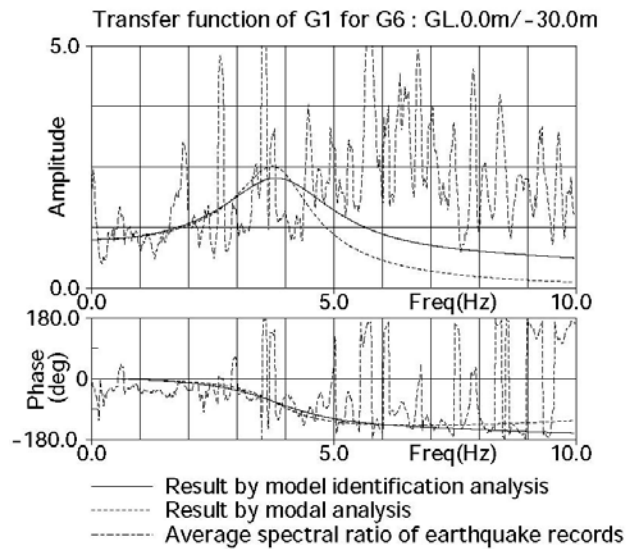


図 1-8(2) 解析値と観測値の伝達関数の比較 (UD 成分)

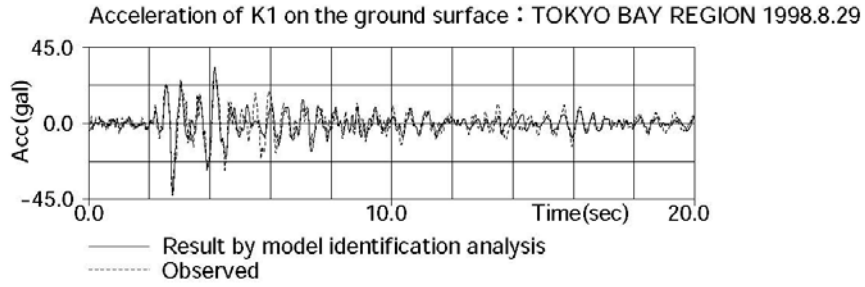


図 1-9(1) 加速度波形の比較：東京湾地震 EW 成分

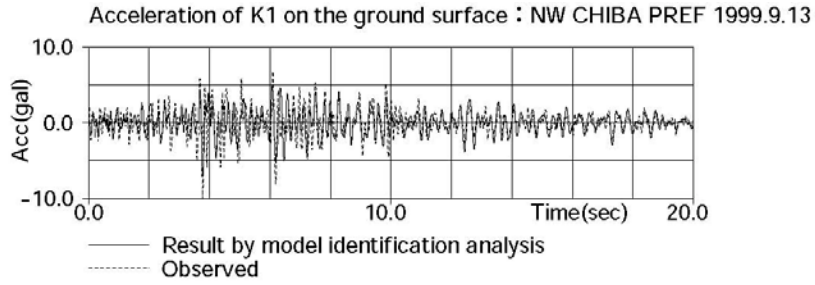


図 1-9(2) 加速度波形の比較：千葉県北西部地震 UD 成分

3.5 せん断ひずみについて

図 1-10 は東京湾地震の EW および UD の加速度記録を同時に入力して求められたせん断ひずみの分布図である。下層部に曖昧な部分があるが、分布の特徴として、傾斜下端部付近に最大歪みが発生し、層境界に当たる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、進展しやすいことが挙げられる。これより、耐震設計では、構造物や地盤の挙動に対して多大な影響を与える表層地盤の層構造や地形に留意する必要があることが理解される。

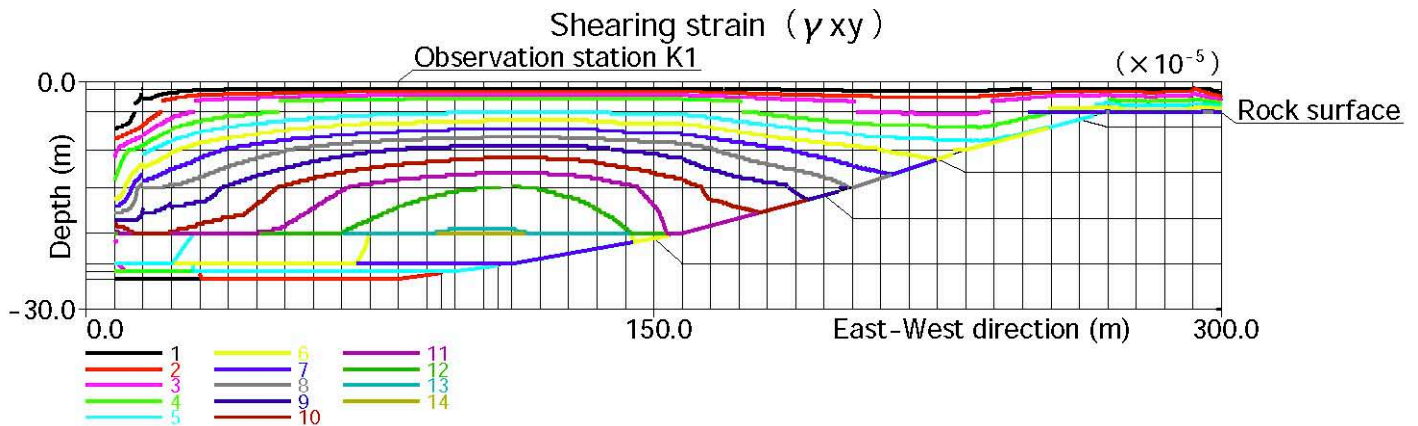


図 1-10 せん断ひずみ分布

4. おわりに

数値モデル同定解析を適用して得られた成果を要約すれば以下ようになる。

- (1) 観測記録のスペクトル比の比較的幅のある卓越周波数帯に対して、時間領域のモード解析では一個のモードで対応したが、FEM モデルは、傾斜基盤の影響を受けたモードを含めて、複数個のモードを持つことが確認され、基盤の形状を考慮した地震時挙動の検討の重要性を示す結果であった。
- (2) FEM モデルと一次元重複反射理論に基づくモデル⁵⁾ の各々の物性値の同定解析結果を比較して、FEM モデルの方がより小さい変化率で最確値が得られた（最大変化率を示した表 1.1 第 3 層の V_s 値が 2 割減）。対象系に対して想定したモデルによって物性値の変化率は当然異なるが、解析上、物性値の変動は最小に抑えられるため、小さい変化率で収束した FEM モデルの方が、より現実の地盤構造に近い数値モデルであると考えられる。
- (3) 地震被害は、地形的に、層構造的に不整形な地盤に多く見られるが、本件で被害要因の一部が検証されたように、それら表現可能な FEM モデルを使用した数値モデル同定解析は、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) 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
- 2) 安藤幸治・岩楯敞広：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) 安藤幸治，岩楯敞広，小田義也：数値モデル同定解析手法とその適用，機械学会年次大会，2011.9
- 4) 岩楯敞広，内藤伸幸，安藤幸治，小田義也：東北地方太平洋地震による逗子地域の表層地盤の地震応答特性，土木学会論文集 A1 特集号地震工学論文集 Vol.33，2014.6
- 5) Takahiro Iwatate, Yoshiya Oda, Nobuyuki Naito, Koji Ando: The seismic characteristics of surface ground of Zushi-site during The 2011 East Japan Great Earthquake, 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2012