

震動卓越方向の周波数依存性を考慮した 兵庫県南部地震の強震動シミュレーション

岐阜大学 古本吉倫
岐阜大学 杉戸真太
名古屋工業大学 梅原秀哲

1 はじめに

兵庫県南部地震においては、多くの土木構造物が大きな被害を受けたが、これらの被害分析を詳細に行うためには、それぞれの地点における強震動がどのような特性を有していたかを正確に知る必要がある。当該地震では、とくに断層近傍にあたる神戸市周辺地域において震動の強い方向卓越性が認められている。これらは、さらに周波数に応じても異なっている。本研究では、断層近傍で得られた強震動記録の非定常スペクトルの詳細な分析に基づき、著者らによる断層の広がりや破壊伝播方向を考慮できる強震動予測法 (EMPR)¹⁾ を兵庫県南部地震に適用するように修正し、任意地点での震動卓越方向性の周波数依存特性を取り入れた地震動の再現を試みた。

なお、本報告は土木学会コンクリート委員会に設置された「阪神・淡路大震災被害分析委員会」における検討課題の一つとして行われているものである。

2 強震動予測モデル (EMPR) の概要

2.1 解放基盤における強地震動データベース

著者らによる従来の強震動予測モデル (EMP-IIB)²⁾ で対象とした強震記録に兵庫県南部地震など比較的断層近傍で得られた記録を加えた 118 成分の加速度記録について、それらが得られた地点での地盤モデルから、S 波速度が 500 ~ 600m/sec 程度のいわゆる工学基盤での地震動を算出した。この計算には、等価ひずみの周波数依存性を考慮した等価線形化法 (FDEL)³⁾ を用いた。図 2~4 にこのようにして整理された基盤地震動波形のマグニチュード M と震源距離 R の分布、および最大加速度と R の分布を示す。

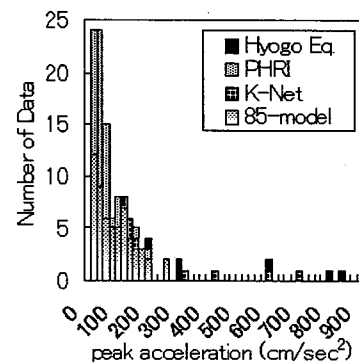
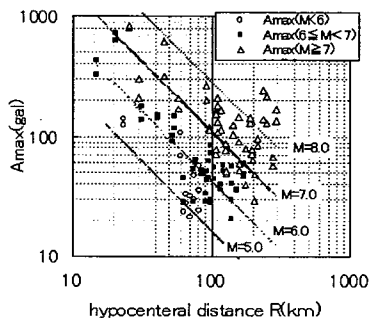
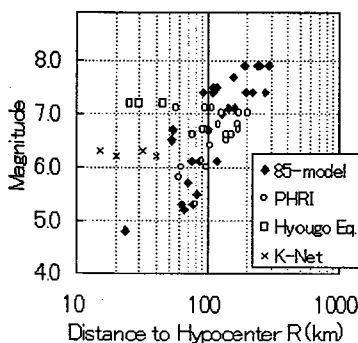


図 2 マグニチュード-震源距離の分布

図 3 最大加速度-震源距離の分布

図 4 最大加速度の頻度分布

2.2 非定常地震動の統計的予測モデル

非定常性を有する地震動は、時刻 t 、周波数 f_k における非定常パワースペクトル $\sqrt{G_x(t, 2\pi f_k)}$ を用いて次式のよりに表現できる⁴⁾。

$$x(t) = \sum_{k=1}^m \sqrt{4\pi \cdot G_x(t, 2\pi f_k) \cdot \Delta f} \cdot \cos(2\pi f_k t + \phi_k) \quad (1)$$

ここに、 Δf : 振動数の刻み幅、 ϕ_k : $t=0$ における位相 ($0 \sim 2\pi$ の一様乱数) である。さらに、非定常パワースペクトルは次式によりモデル化することができ、強度 (α_m)、立ち上がり時刻 (t_p)、継続時間 (t_s) を表す 3 つのモデルパラメータを得る (図 1)。

$$\sqrt{G_x(t, 2\pi f)} = \alpha_m(f) \frac{t - t_s(f)}{t_p(f)} \exp\left\{1 - \frac{t - t_s(f)}{t_p(f)}\right\} \quad (2)$$

(ただし、 $t_s < t$ 、 $0 \leq t \leq t_s$ では 0。)

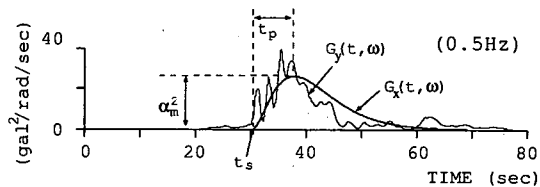


図 1 非定常パワースペクトルのモデル化

兵庫県南部地震を含む国内における主要強震記録 118 成分 (水平方向成分のみ) を対象に、FDEL による地盤応答計算により解放基盤相当波に変換した波形についてモデルパラメータを算出し、これらをマグニチュード (M) と震源距離 (R) に対して周波数ごとに重回帰分析することにより、与えられた M, R に対する解放基盤波形の予測式を得た (式 3~5)。

$$\log \alpha_m(f) = B_0(f) + B_1(f) \cdot M - B_2(f) \cdot \log R \quad (3)$$

$$\log t_p(f) = P_0(f) + P_1(f) \cdot M + P_2(f) \cdot \log R \quad (4)$$

$$t'_s(f) = t_s(f) - t_m = S_1(f) \cdot R \quad (5)$$

2.3 非定常パワースペクトルの重ね合わせによる断層近傍の地震動予測

断層の広がりや破壊方向、破壊伝播速度などを考慮した震源近傍における地震動波形は、大規模な断層破壊を $M=6$ 相当の小規模断層破壊の重ね合わせとしてとらえ、分割された各小規模断層からの非定常パワースペクトルを時間軸上で重ね合わせるにより予測することができる(図5~6)。

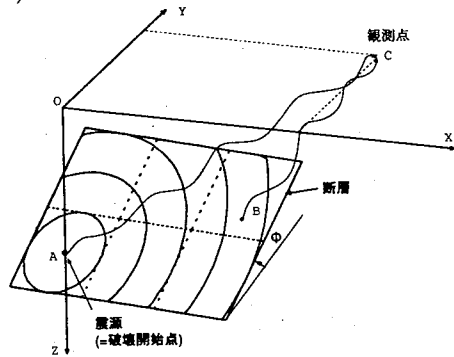


図5 大規模断層破壊による地震動伝播

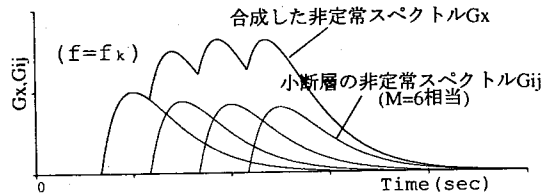


図6 非定常スペクトルの重ね合わせ

重ね合わせによる断層近傍の非定常パワースペクトルは次式により得られる。

$$\sqrt{G_x(t, 2\pi f)} = \frac{A_p(f)}{N_x \cdot N_y} \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \sqrt{G_{ij}(t, 2\pi f)} \quad (6)$$

ここに、 $\sqrt{G_{ij}}$ は、 $M=6$ 相当の小規模断層破壊による非定常パワースペクトルであり前述の予測式から震源距離に応じて求められる。 N_x, N_y は、断層の長さおよび幅方向の分割数を表している。 $A_p(f)$ は、振動数ごとに与えられる大規模断層破壊に対する小規模断層破壊の重ね合わせ数であり、今回の試みのように過去に発生した特定の地震を対象とし、その断層近傍の基盤相当の波形が得られている場合は、実際に得られた断層近傍の基盤波形より次式を用いて各震動数ごとに最適な重ね合わせ数を計算する。

$$A_p(f) = \frac{\alpha'_m(f) \cdot \bar{t}'_p(f)}{\bar{\alpha}_m(f) \cdot \bar{t}_p(f)} \quad (7)$$

ここに、 $\bar{\alpha}_m(f), \bar{t}_p(f)$ は、予測式により推定される等しい震源距離における $M=6$ 相当の小断層破壊によるモデルパラメータ、 $\alpha'_m(f), \bar{t}'_p(f)$ は実際に得られた断層近傍の基盤波形より計算されたモデルパラメータとする。

3 観測記録に基づく震源断層近傍の基盤波形の推定とその方向依存性の検討

図9~12(c)に、兵庫県南部地震において、神戸ポートアイランド(鉛直アレー観測システム GL-83m)、関西電力総合技術研究所(兵庫県尼崎市)(鉛直アレー観測システム GL-100m)、関西電力新神戸変電所(地表)ならびに気象庁神戸海洋気象台(地表)における観測波形をもとに推定した当該地点における工学的基盤波形を示す。なお、解放基盤波形への変換に際しては図9~12(a)に示す地盤モデルにより、周波数依存性を考慮した等価ひずみによる地盤震動解析法(FDEL)を用いた。

また、図9~12(b)にはそれぞれの地点の基盤波形の変位軌跡を描いた。震源断層に対して近傍にある対象地点では、地震動の方向依存性が明瞭に現れており、断層の走行方向に対してその直交方向成分(N38.4W)について、地震動が卓越していることがわかる。

4 強震動予測モデルによる地震動シミュレーション

4.1 水平成分の重ね合わせ数 $A_p(f)$

図7に、兵庫県南部地震における神戸ポートアイランド、関西電力総合技術研究所、関西電力高砂発電所、それぞれの観測地点の基盤波形より得られる $A_p(f)$ の方向成分ごとの平均値を示す。

地震モーメント $M_0 = 2.5 \times 10^{26} \text{ dyne} \cdot \text{cm}$ から推定される平均的な重ね合わせ数(図中 model)に比べ、兵庫県南部地震における基盤波形の平均の方が、両方向成分ともほぼ全周波数において大きくなっており、とくに低振動数になるにしたがって大きくなる傾向がある。また、断層の走行方向に対する直交成分(N38.4W)の方が、断層の走行方向成分(N51.6E)より大きく、方向性の違いによる強度の変化が現われている。

4.2 解放基盤波形の水平方向成分の推定

菊地⁵⁾によるメカニズムを参考に、表1のように震源パラメータを決定し兵庫県南部地震のシミュレーションを行った。このとき $A_p(f)$ に関して、断層の走行方向(N51.6E)の平均値とその直交方向(N38.4W)の平均値、それぞれを式(6)に代入し、方向成分ごとの地震動を得た。

図9~12(c)には、強震動予測モデルによるシミュレーション結果を示す。また、表2には、兵庫県南部地震において神戸ポートアイランド、関西電力総合技術研究所、関西電力新神戸変電所ならびに気象庁神戸海洋気象台における解放基盤波形と強震動予測モデルによるシミュレーションそれぞれについて、水平2成分(N38.4W, N51.6E)の方向成分ごとに最大加速度、実効加速度、最大速度を示した。いずれの観測地点においても、精度よく観測値を再現しており、方向成分ごとの違いが現れていることがわかる。

4.3 地表波形の鉛直成分の推定

兵庫県南部地震における地震動波形の鉛直方向成分に関しては、そのP波、S波の区別が困難であることから地盤応答計算によって観測記録から基盤波形を得ることが難しい。そこで簡便法として、上下動については工学的基盤から地表への増幅が水平動に比べて顕著でないと仮定し、地表で観測された波形の鉛直成分について、式(9)で定義される重ね合わせ数 $A_{p3}(f)$ を計算し、これを用いてシミュレーションを行うことにする。図8に鉛直成分に関する重ね合わせ数 $A_{p3}(f)$ を、図13に観測記録とシミュレーション結果を示した。

5 まとめ

兵庫県南部地震における任意地点での地震動時刻歴の再現を試みた。断層近傍での記録を加え改訂された非定常強地震動予測モデル(EMPR)を基本にしながら、兵庫県南部地震において実際に観測された波形から小断層破壊の重ね合わせ倍率を周波数ごとに決定する拡張を施した。実際の波形を用いて小断層破壊の重ね合わせ倍率を決定することにより、スペクトル特性まで含めて、当該地震による地震動を精度よく再現できることが示された。

なお本研究では、気象庁神戸海洋気象台、神戸市港湾整備局ならびに関西電力の強震記録を使わせて頂きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 洞谷元司, 杉戸真太, 古本吉倫, 杉山武「非定常スペクトル重ね合わせによる強震動予測法の再検討」土木学会第53回年次学術講演概要集, 1998.10.
- 2) Sugito, M. and Kameda, H : Prediction of Nonstationary Earthquake Motion on Rock Surface, Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng. Vol.2, No.2, pp149-159, 1985.
- 3) 杉戸真太・合田尚義・増田民夫: 周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察, 土木学会論文集, No.493/III-27, pp.49-58, 1994.6.
- 4) 亀田弘行: 強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察, 土木学会論文報告集, 第235号, pp.55-62, 1977.
- 5) 菊地正幸: 日本建築学会兵庫県南部地震災害調査緊急報告会, 社団法人日本建築学会, 1995.
- 6) K-Net ホームページ : <http://www.k-net.bosai.go.jp/>

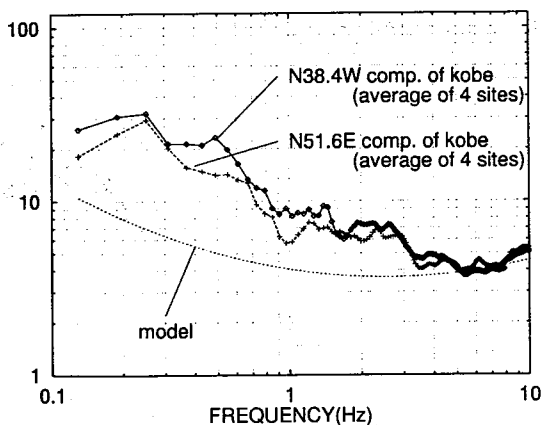


図7 水平方向の重ね合わせ数 $A_{p1}(f), A_{p2}(f)$

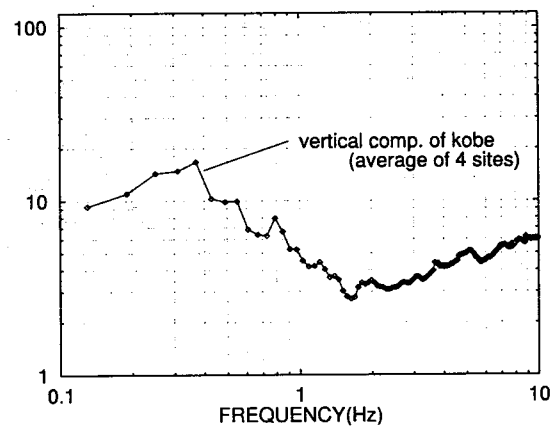
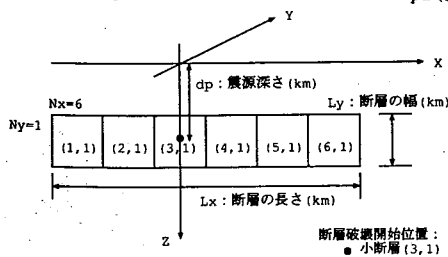


図8 鉛直方向の重ね合わせ数 $A_{p3}(f)$



小断層のモーメントの相対的比率:
 (1,1)=0.61 (2,1)=0.61 (3,1)=2.10
 (4,1)=0.61 (5,1)=0.86 (6,1)=1.22

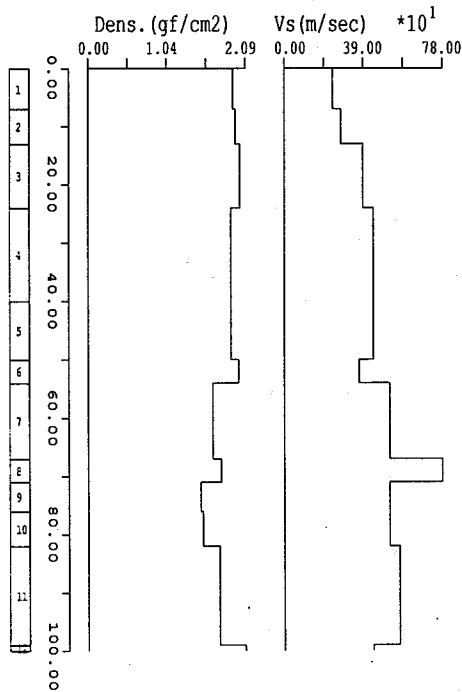
表1 シミュレーションに用いた断層パラメータ

地震モーメント (dyne-cm)	2.50E+26	小断層の重ね合わせ数	6
断層の長さ (km)	40.0	破壊開始要素番号	(3,1)
断層の幅 (km)	5.0	地震波伝播速度 (km/sec)	3.0
断層の傾き (X 軸)	90°	破壊伝播速度 (km/sec)	2.5
断層の傾き (Y 軸)	0°	震源深さ (km)	14.3

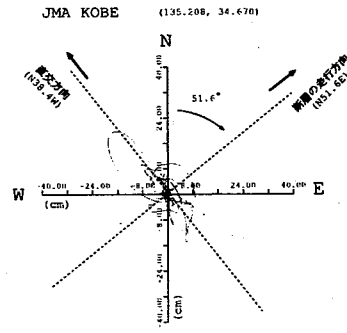
表2 シミュレーションと観測値の比較

* 工学的基盤相当の地震動に変換した波形による。

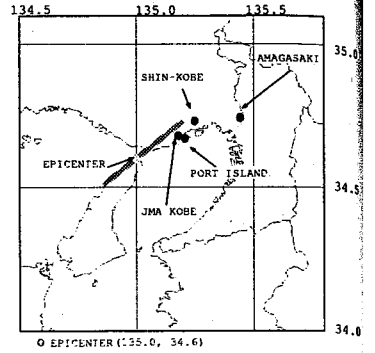
地点名	神戸海洋気象台		ポートアイランド		新神戸変電所		総合技術研究所	
	Amax(実効)	Vmax	Amax(実効)	Vmax	Amax(実効)	Vmax	Amax(実効)	Vmax
単位	(cm/sec ²)	(cm/sec)	(cm/sec ²)	(cm/sec)	(cm/sec ²)	(cm/sec)	(cm/sec ²)	(cm/sec)
観測値*(N38.4W)	716 (623)	97	975 (463)	94	496 (390)	80	482 (238)	39
観測値*(N51.6E)	433 (291)	42	391 (228)	40	407 (357)	58	433 (269)	37
模擬地震動 (N38.4W)	663 (404)	68	666 (386)	67	593 (416)	74	342 (236)	40
模擬地震動 (N51.6E)	620 (331)	53	623 (327)	54	557 (339)	54	321 (201)	29



(a) 地盤モデル



(b) 基盤波形の変位軌跡

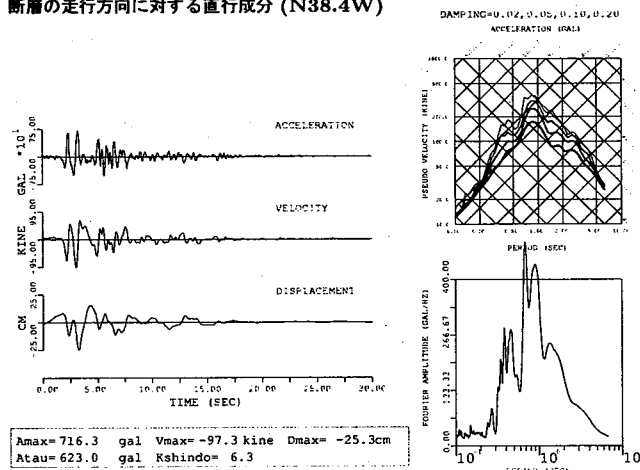


	SHINDO	Atau (cm/sec/sec)	Amax (cm/sec/sec)	Vmax (cm/sec)	Dmax (cm)
NS	6.1	519.0	644.8	85.5	19.5
EW	6.0	469.0	521.1	68.2	18.0
UD	5.4	235.0	332.2	40.1	9.9
N38.4W	6.3	623.0	716.3	97.3	25.3
N51.6E	5.6	291.0	433.5	42.4	8.1
N38.4W*	5.9	404.0	663.4	67.5	22.9
N51.6E*	5.7	331.0	620.4	53.4	17.7
UD*	5.4	214.0	401.3	35.2	10.6

* SIMULATED BY KBPR3

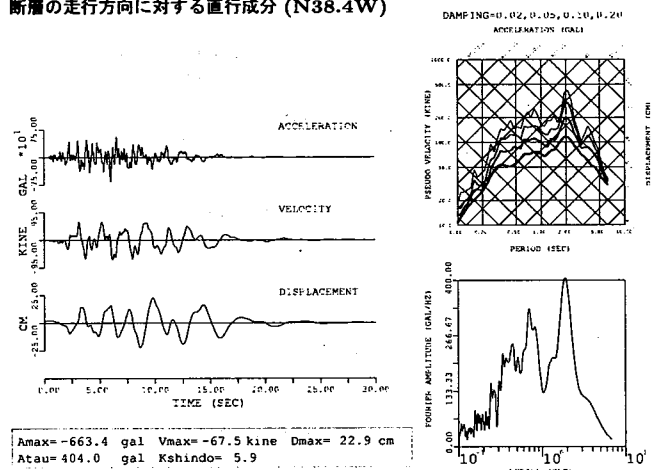
(c) 基盤波形の推定 (神戸海洋気象台観測点)

断層の走行方向に対する直行成分 (N38.4W)

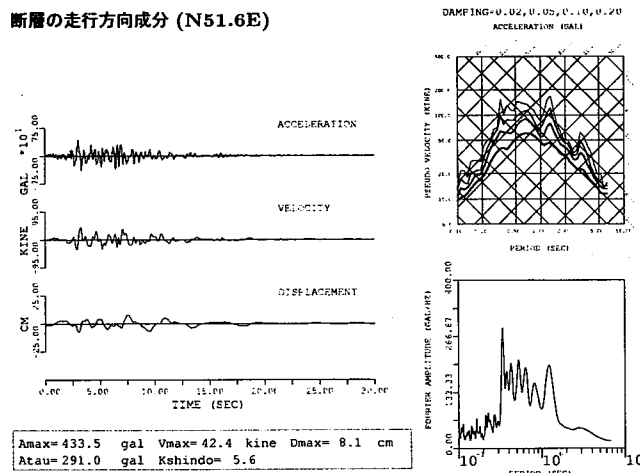


(d) シミュレーション地震動

断層の走行方向に対する直行成分 (N38.4W)



断層の走行方向成分 (N51.6E)



断層の走行方向成分 (N51.6E)

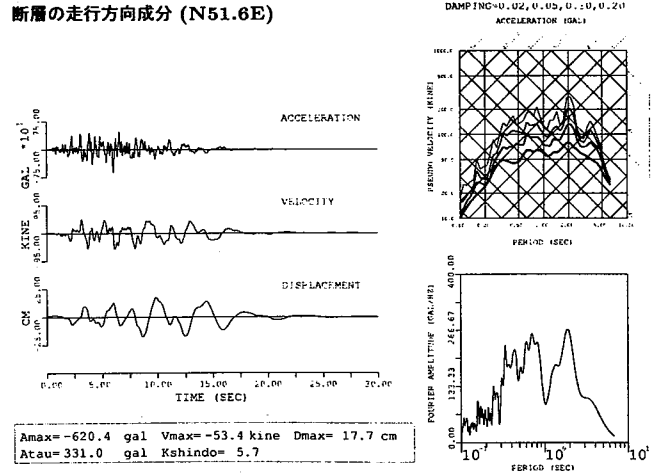
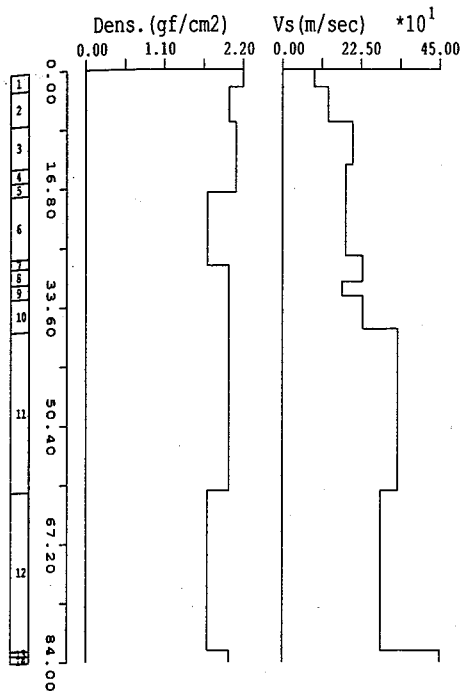
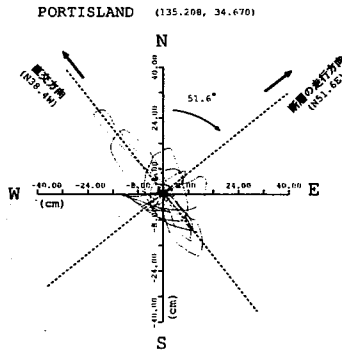


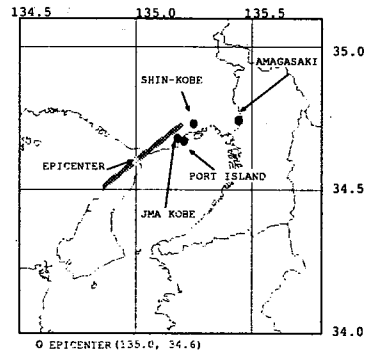
図9 神戸海洋気象台観測点における基盤波形



(a) 地盤モデル



(b) 基盤波形の変位軌跡

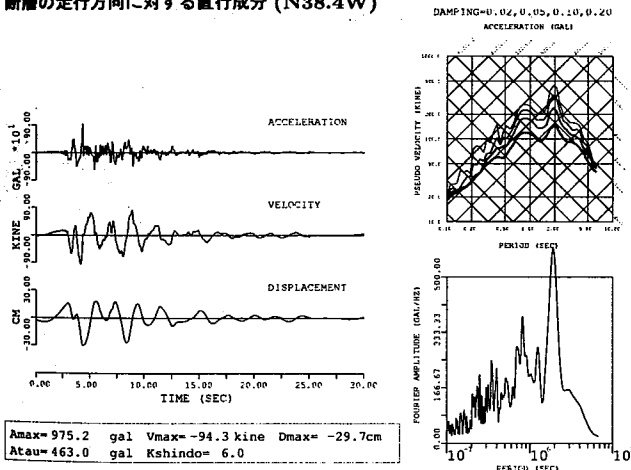


	SHINDO	Atau (cm/sec/sec)	Amax (cm/sec/sec)	Vmax (cm/sec)	Dmax (cm)
NS	5.9	400.0	700.3	72.2	23.2
EW	5.8	364.0	750.1	69.0	20.2
UD	5.6	275.0	555.9	62.8	25.5
N38.4W	6.0	463.0	975.2	94.3	29.7
N51.6E	5.4	228.0	391.0	39.5	13.5
N38.4W*	5.9	386.0	666.3	67.3	21.9
N51.6E*	5.7	327.0	623.3	53.5	16.9
UD*	5.3	202.0	403.0	32.9	10.1

* SIMULATED BY KBPR3

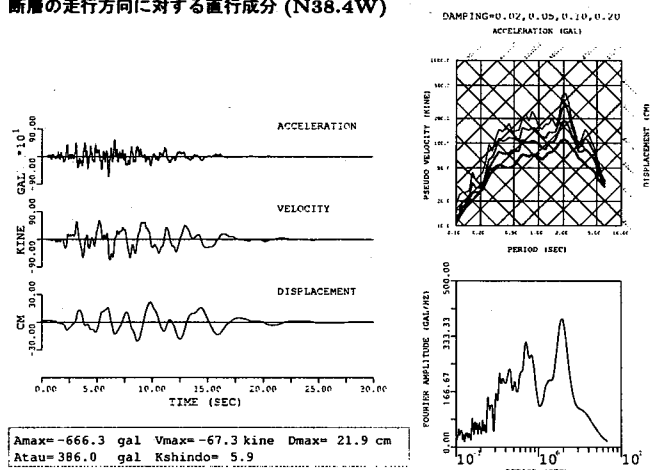
(c) 基盤波形の推定 (ポートアイランド観測点)

断層の走行方向に対する直行成分 (N38.4W)

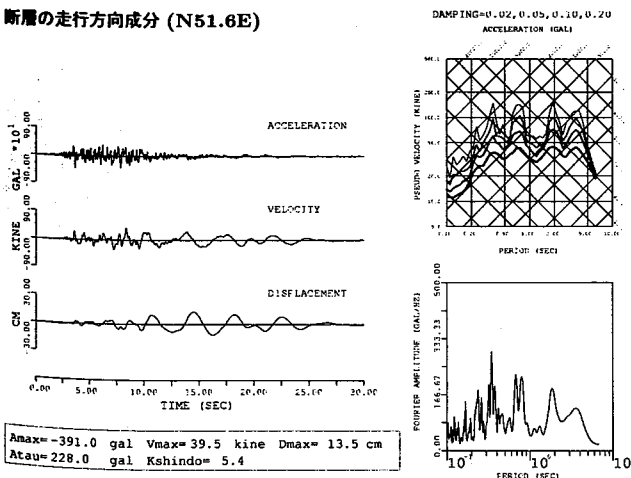


(d) シミュレーション地震動

断層の走行方向に対する直行成分 (N38.4W)



断層の走行方向成分 (N51.6E)



断層の走行方向成分 (N51.6E)

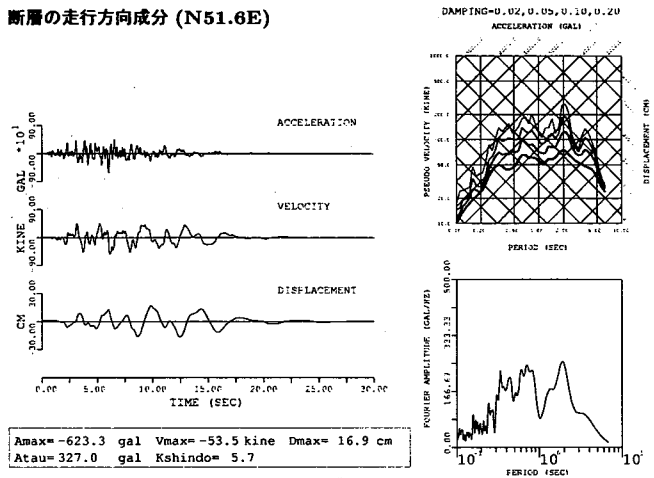
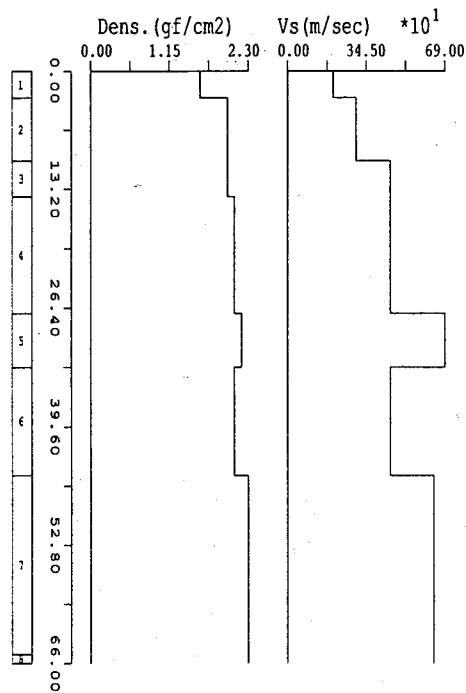
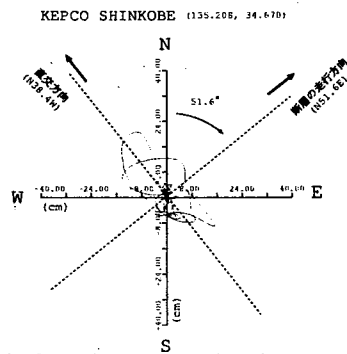


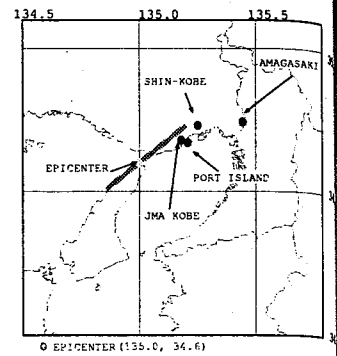
図 10 ポートアイランド観測点における基盤波形



(a) 地盤モデル



(b) 基盤波形の変位軌跡

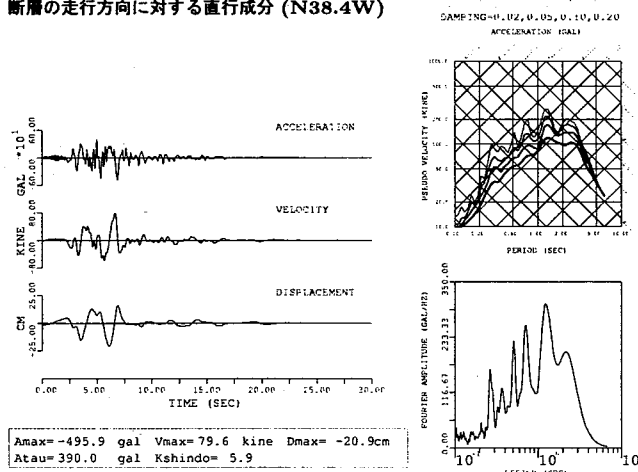


	SHINDO	Atau (cm/sec/sec)	Amax (cm/sec/sec)	Vmax (cm/sec)	Dmax (cm)
NS	5.8	352.0	378.0	57.0	18.4
EW	5.9	391.0	459.8	67.5	14.7
UD	5.2	168.0	455.6	23.5	5.0
N38.4W	5.9	390.0	495.9	79.6	20.9
N51.6E	5.8	357.0	406.8	57.6	10.9
N38.4W*	5.9	416.0	597.6	74.3	17.4
N51.6E*	5.8	339.0	556.9	54.2	13.5
UD*	5.4	229.0	428.6	37.9	9.5

* SIMULATED BY KBPR3

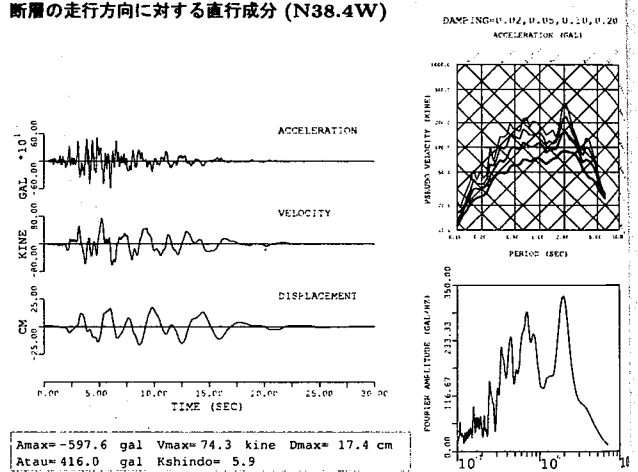
(c) 基盤波形の推定 (新神戸変電所観測点)

断層の走行方向に対する直行成分 (N38.4W)

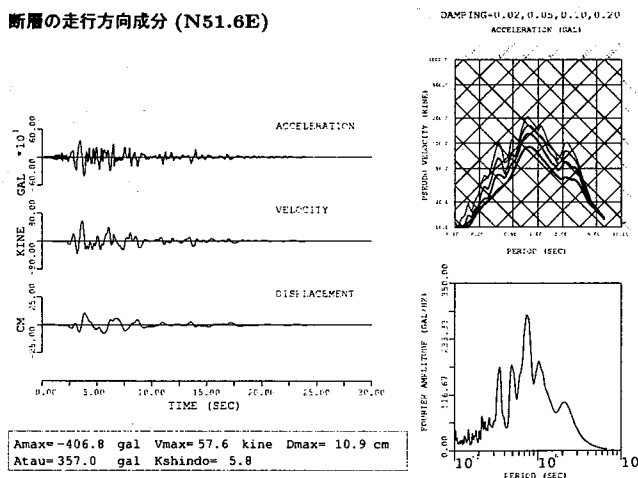


(d) シミュレーション地震動

断層の走行方向に対する直行成分 (N38.4W)



断層の走行方向成分 (N51.6E)



断層の走行方向成分 (N51.6E)

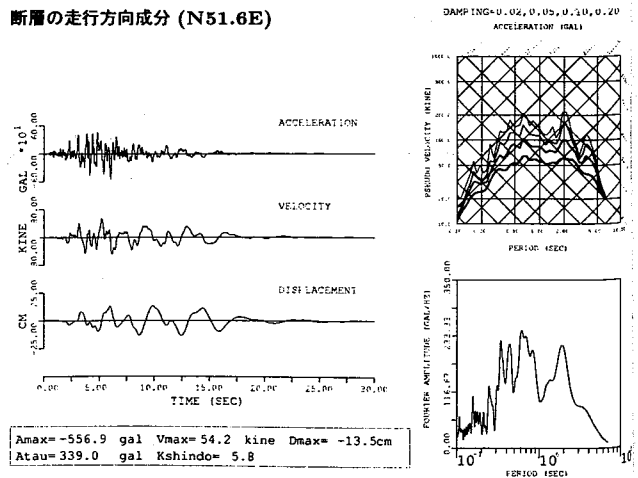
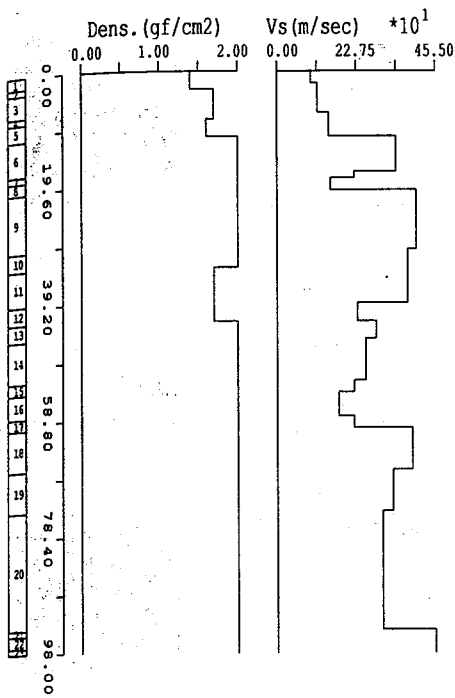
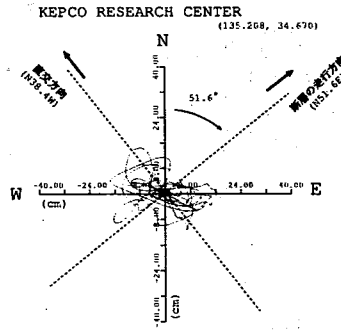


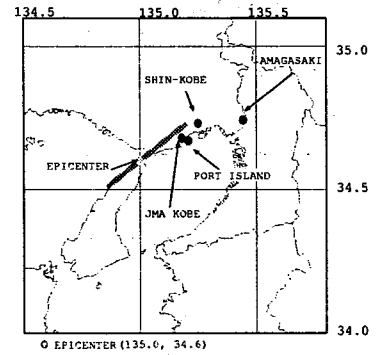
図 11 新神戸変電所観測点における基盤波形



(a) 地盤モデル



(b) 基盤波形の変位軌跡



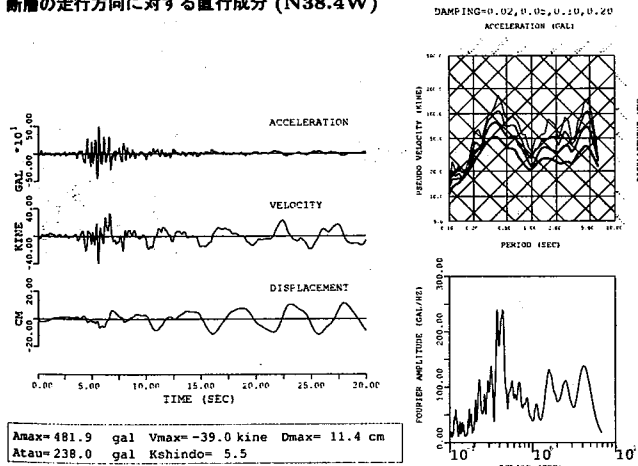
	SHINDO	Atau (cm/sec/sec)	Amax (cm/sec/sec)	Vmax (cm/sec)	Dmax (cm)
NS	5.2	183.0	376.2	33.2	11.8
EW	5.7	303.0	522.7	42.8	12.9
UD	4.7	97.0	205.0	19.7	5.7
N38.4W	5.5	238.0	481.9	39.0	11.4
N51.6E	5.6	269.0	433.1	37.2	13.9

N38.4W*	5.4	236.0	342.3	39.6	12.2
N51.6E*	5.3	201.0	320.8	29.2	10.7
UD*	4.9	130.0	262.7	20.4	6.5

* SIMULATED BY KBPR3

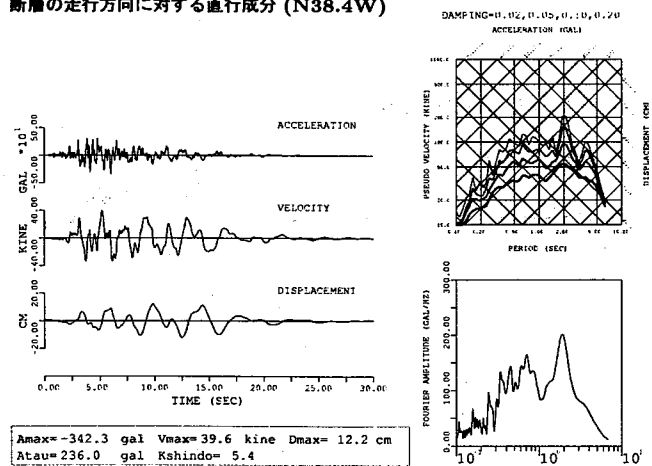
(c) 基盤波形の推定 (総合技術研究所観測点)

断層の走行方向に対する直行成分 (N38.4W)

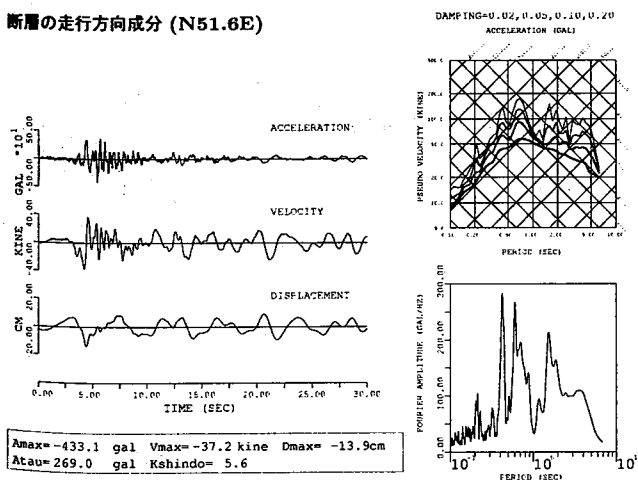


(d) シミュレーション地震動

断層の走行方向に対する直行成分 (N38.4W)



断層の走行方向成分 (N51.6E)



断層の走行方向成分 (N51.6E)

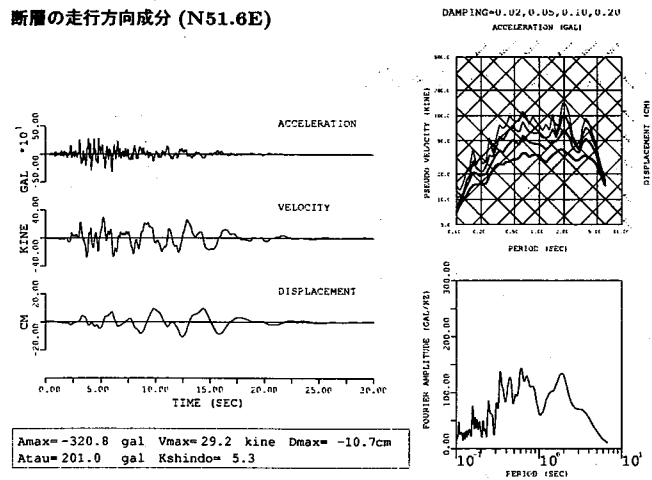
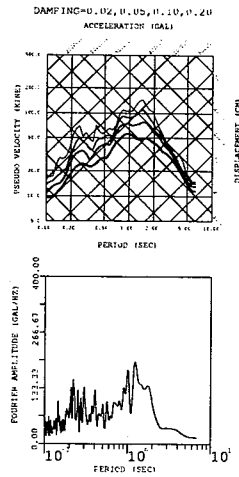
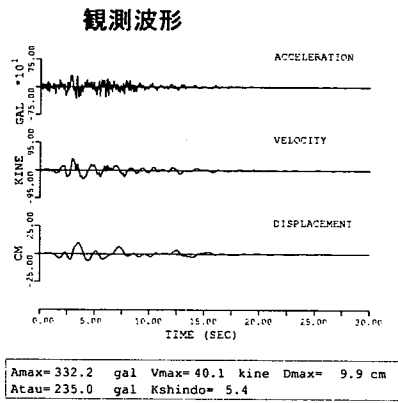
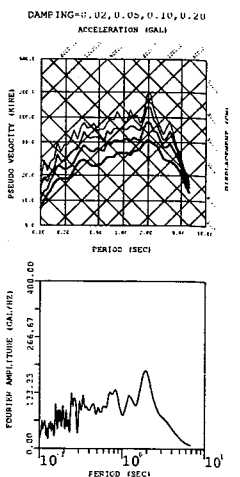
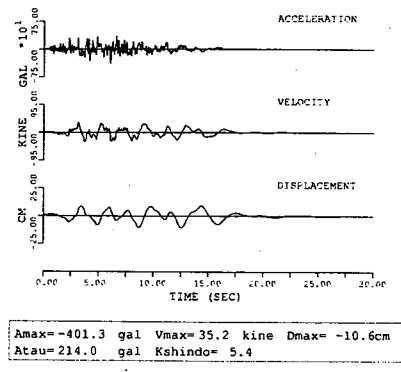


図 12 総合技術研究所観測点における基盤波形

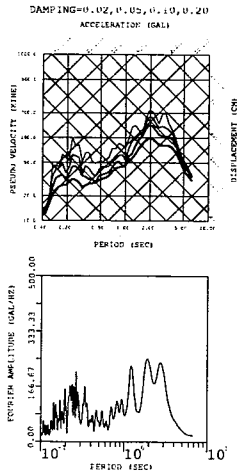
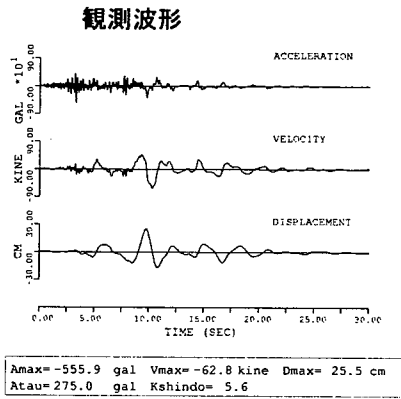
(a) 神戸海洋気象台観測点



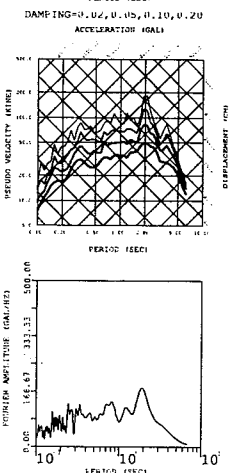
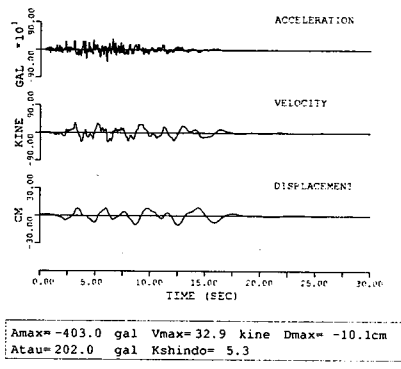
シミュレーション地震動



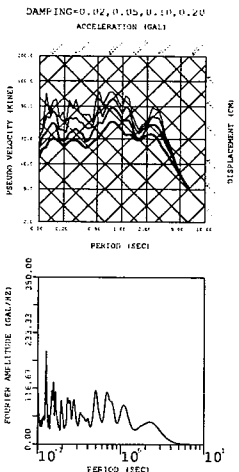
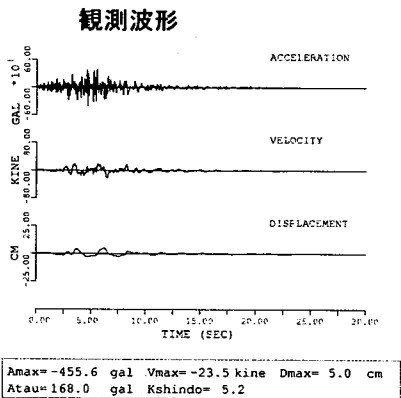
(b) ポートアイランド観測点



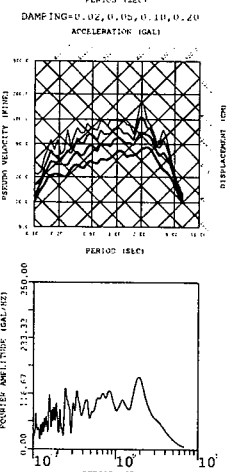
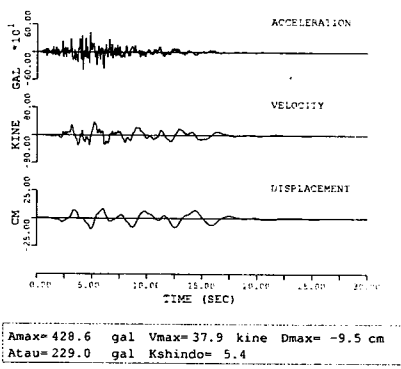
シミュレーション地震動



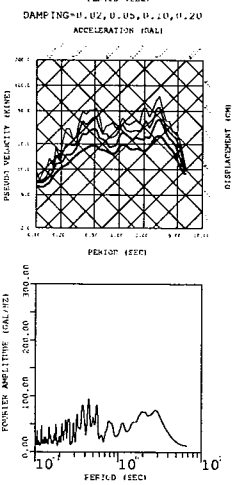
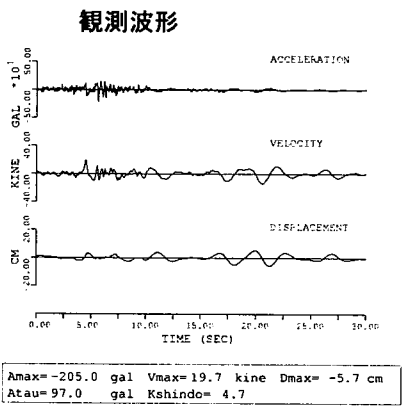
(c) 新神戸変電所観測点



シミュレーション地震動



(d) 総合技術研究所観測点



シミュレーション地震動

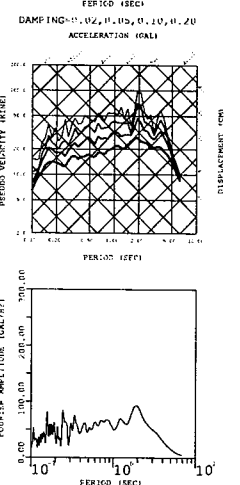
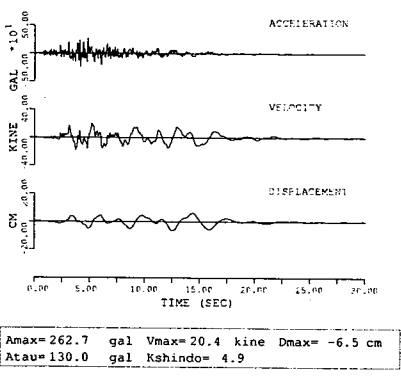


図 13 地表における鉛直成分