

港湾技研資料

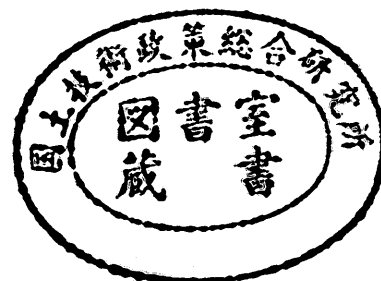
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 813 Sept. 1995

兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察

港湾施設被害検討委員会編

運輸省港湾技術研究所



序 文

稲富 隆昌*
稲垣 紘史**
輪湖 建雄***

平成7年1月17日午前5時46分に淡路島北部を震源とするマグニチュード7.2の地震が発生した。「平成7年（1995年）兵庫県南部地震」と命名されたこの地震は、高度に発達した都市を襲った初めての活断層型直下地震である。神戸市、芦屋市などでは震度7の激震を記録した。この強震により、神戸市を中心に5,500名を越す犠牲者を出すとともに、港湾施設、高速道路、新幹線、ライフラインなどの土木施設、また住宅、ビルなどの建築構造物に未曾有の被害を出し、長期間にわたり都市機能を麻痺させた。同時に、神戸港のポートアイランド、六甲アイランドなどの埋立地では、埋立土の「まさ土」が液状化し、その噴泥が地表面を大規模に覆い、液状化現象を全国に再認識させた。

運輸省第三港湾建設局神戸港工事事務所では、水平加速度が502Gal、上下加速度が283Galの地震動を記録した。被害が集中した神戸港の岸壁の多くはケーソン式岸壁で、被害形態は岸壁の移動と傾斜およびその背後地盤の沈下であった。全国のコンテナ貨物量の約3割を取り扱う神戸港のコンテナ埠頭においても、岸壁が数m移動するなど同様な被害が発生したため、クレーンの脚に損傷が生じ、港湾荷役は完全にその機能を喪失した。一方、このような被災状況下において、耐震性を高めた耐震強化岸壁はほとんど損傷することなくその機能を保持した。この耐震性の保証は、神戸港のみならず、全国に展開する港湾施設の耐震性強化にきわめて重要な技術情報を与えた。

地震から7カ月を経過した現在、被災地港湾では地震に強い港湾を目指して復興が始まっている。同時にケーソン式岸壁の被害の原因究明の調査、研究も図-1に沿って鋭意進められている。本報

兵庫県南部地震に対する ケーソン式岸壁の被害考察 —— 地震動・液状化を中心に ——

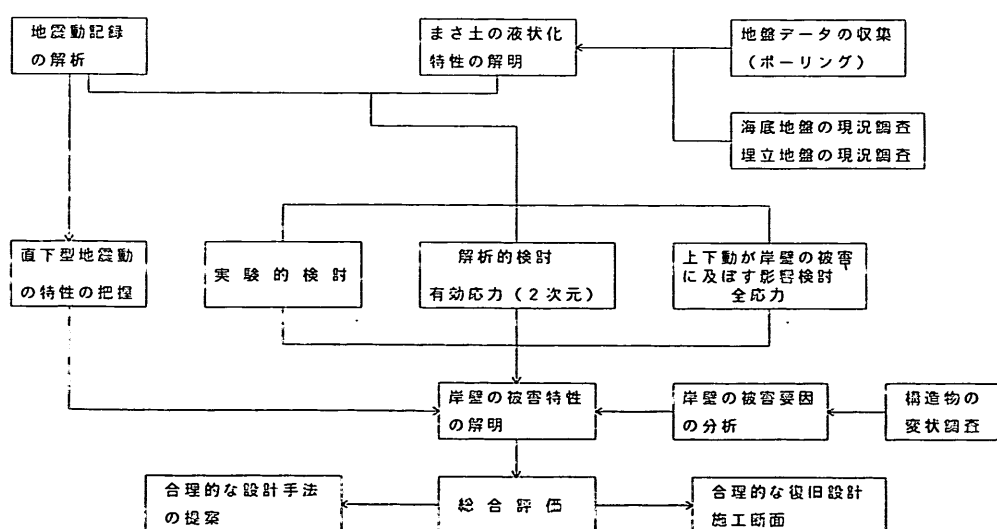


図-1 調査研究フロー

- * 構造部長
- ** 前 運輸省第三港湾建設局長
- *** 運輸省第三港湾建設局 震災復興建設部長

告は現在までに明らかになった研究成果等を速報的に紹介するものである。したがって、復興事業に伴って明らかになる現地情報の内容によっては成果の一部変更もあり、また、解析、実験的研究も継続して実施しているため、最終的な成果は後日に待つ必要がある。

報告では、港湾施設の被害状況および地震動の特性紹介から始まり、液状化を含む埋立地盤の特性、ケーソン式岸壁の変状の要因を明らかにし、また、実験的、解析的検討からケーソン式岸壁の変状を考察した。また、コンテナクレーンについても現地データを用いて被災の実態を明らかにした。

なお、本報告を取りまとめるに際して、運輸省港湾局、同第三港湾建設局、神戸市港湾局、同開発局、兵庫県土木部港湾課、神戸港埠頭公社等から多大なる支援をいただいた。ここに関係の方々に謝意を表す。

平成7年9月

兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察

目 次

序 文

- (その1) 強震記録宮田正史・佐藤幸博・井合 進..... 5
- (その2) 被災状況
- 岸壁、防波堤、海岸保全施設—外山進一・松永康男 51
 - 港湾荷役施設—藤本健幸 77
 - 臨港交通施設—横田 弘 95
- (その3) 神戸港のケーソン式大型岸壁の被災分析
.....上部達生・高野剛光・松永康男..... 127
- (その4) 埋立地盤の特性善 功企・山崎浩之・南 兼一郎・中島由貴..... 147
- (その5) 液状化の判定に関する検討山崎浩之・善 功企・佐渡篤史・館下 徹..... 167
- (その6) ケーソン式岸壁の被災に関する模型振動実験 ...菅野高弘・三藤正明・及川 研..... 207
- (その7) ケーソン式岸壁の有効応力解析井合 進・一井康二・森田年一..... 253
- (その8) ケーソン式岸壁の地震時滑動に関する数値解析
.....野津 厚・上部達生・高野剛光..... 281
- (その9) 神戸港ケーソン式岸壁の安定性に関する一考察
.....長尾 毅・小泉哲也・木阪恒彦・寺内 潔・細川浩二・門脇陽治・宇野健司..... 301
- (その10) コンテナクレーンの地震時挙動吉田由治..... 337

兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察

(その1) 強震記録

宮田 正史*
佐藤 幸博*
井合 進**

要 旨

1995年1月17日05時46分、兵庫県の明石海峡付近を震源とする気象庁マグニチュード7.2の地震が発生した。気象庁によって、この地震は「平成7年(1995年)兵庫県南部地震」と命名された。港湾地域強震観測網では、神戸港を中心とする16港20地点において強震計が作動し、11港12地点でデジタルデータとしての加速度記録が得られた。

本資料では、まず地震の概要を示すとともに、港湾地域強震観測網で得られた記録として、神戸港工事事務所(地表)、神戸港第八突堤(岸壁上)、尼崎港(地表)の地震動の時刻歴・軌跡・応答スペクトル等を示す。次に、今回の地震における水平最大加速度の距離減衰の関係、および水平最大加速度と鉛直最大加速度の関係を示す。最後に、近年の大地震(1993年釧路沖地震および1994年三陸はるか沖地震)と本地震との比較を、各地震動の時刻歴・軌跡・応答スペクトル等を通じて行う。これらの結果より、今回の地震動の特徴として以下の事実が判明した。

- (1) 今回の地震において、神戸市・淡路島の一部では気象庁震度Ⅶの激震を記録した。港湾地域強震観測網では、神戸港をはじめとする16港において強震記録が得られた。
- (2) 神戸港では、SMAC-B2型強震計により地表記録が得られた。その観測記録(未補正記録)の最大値は502Gal(N43W), 205Gal(E43N), 283Gal(UD)であった。また、計器特性補正後の最大加速度は525Gal(N43W), 230Gal(E43N), 446Gal(UD)であった。強い水平動とともに強い上下動を受けたことが、今回の地震動の特徴と見られる。但し、本観測地点では液状化が認められ、N43W成分は振り切れていた。従って、この記録の利用に関しては十分な注意が必要である。また、今回の地震動では、加速度・速度・変位のいかなを問わず、全て明確な方向性を有していた(北北西～南南東方向)。この振動方向は、推定されている地震断層に対して直交方向にあたった。
- (3) 神戸港における地震動の水平加速度成分の卓越振動数は約0.8Hzであった。この値は、現在港湾地域の設計入力地震動に用いられている1968年十勝沖地震(マグニチュード7.9)の八戸港における強震動の卓越振動数(約1Hz)および1978年宮城沖地震(マグニチュード7.4)の大船渡港における強震動の卓越振動数(約2.4Hz)に比較して小さい値であった。
- (4) 本観測記録(神戸とよぶ)を、1993年釧路沖地震の際に釧路港で得られた記録(釧路とよぶ)、および1994年三陸はるか沖地震の際に八戸港で得られた記録(八戸とよぶ)と比較したところ、水平面内で最も卓越する方向の最大補正加速度は、八戸(751Gal), 神戸(538Gal), 釧路(468Gal)の順となった。また鉛直加速度では、順位が入れ替わり、神戸(446Gal), 釧路(342Gal), 八戸(132Gal)の順となった。
- (5) 速度・変位について同様の比較を行ったところ、水平方向の最大値に関しては、神戸(122cm/s, 43.3cm), 釧路(63.0cm/s, 19.5cm), 八戸(50.5cm/s, 16.3cm)の順となった。水平速度および変位の最大値は、兵庫県南部地震の値が非常に大きく、三陸はるか沖地震・釧路沖地震の約2~3倍程度の値を有した。これに対し、鉛直方向の最大速度・変位は、神戸(33.8cm/s, 10.9cm), 八戸(11.7cm/s, 3.1cm), 釧路(7.2cm/s, 1.0cm)の順となっており、水平方向の順位と三陸はるか沖地震・釧路沖地震が入れ替る結果となった。

* 構造部 地盤震動研究室
** 構造部 地盤震動研究室長

Mechanism of Damage to Port Facilities during 1995 Hyogo-ken Nanbu Earthquake

(Part 1)

— Strong-Motion Earthquake Records in Port Areas —

Masafumi MIYATA*
Yukihiro SATHO*
Susumu IAI**

Synopsis

At 05:46, January 17, 1995, an earthquake of JMA (Japan Meteorological Agency) Magnitude 7.2 hit middle part of Japan. The epicenter of the earthquake was located south of Hyogo Prefecture in Japan. This earthquake was named as 'The 1995 Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake' by the Japan Meteorological Agency. Due to the strong ground motion, many structures and life line facilities were damaged and more than 5,000 lives were lost by the earthquake.

In order to investigate the cause of damage to the port facilities, this report presents the strong-motion earthquake observation results, attenuation relations of horizontal acceleration and relations between horizontal and vertical acceleration of the earthquake. Strong-motion characteristic of the Hyogo-Ken-Nanbu Earthquake was identified through the comparison with the 1993 Kushiro-Oki Earthquake and the 1994 Sanriku-Haruka-Oki Earthquake.

Key Words : Earthquake, Strong Ground Motion

* Research Engineer, Geotechnical Earthquake Engineering Laboratory,
Structural Engineering Division

** Chief, Geotechnical Earthquake Engineering Laboratory, Structural Engineering Division

目 次

要 旨	5
1. はじめに	9
2. 地震の概要	9
3. 強震記録	9
3. 1 港湾地域における強震観測	9
3. 2 強震計と取得記録	12
3. 3 強震記録	14
3. 4 最大加速度の距離減衰と上下・水平加速度比	17
4. 近年の大地震との比較	37
4. 1 強震記録の比較	37
4. 2 応答スペクトルの比較	41
5. まとめ	49
謝 辞	50
参考文献	50

1 はじめに

1995年1月17日05時46分、兵庫県明石海峡付近を震源とする気象庁マグニチュード7.2の地震が発生した。気象庁によって、この地震は「平成7年(1995年)兵庫県南部地震」と命名された。本地震により沿岸部の広い範囲で被害が発生し、5千名以上の犠牲者が出た。

本地震により、神戸港の港湾施設は壊滅的な被害を受け、ほとんどの岸壁が使用不能になった。また、岸壁上の荷役機械(コンテナクレーン)も同じく大きな被害を受け、荷役作業ができない状態に陥った。

これらの被害の原因究明において基本になるデータの一つに、地震および強震動に関するものがある。本資料では、まず今回の地震の概要を示すとともに、本地震の際に港湾地域強震観測網で得られた記録として、神戸港工事事務所(地表)、神戸港第八突堤(構造物上)、尼崎港(地表)の地震動の時刻歴・軌跡・応答スペクトル等を示す。次に、今回の地震における水平最大加速度の距離減衰の関係、および水平最大加速度と鉛直最大加速度の関係を示す。最後に、今回の地震動と近年の大地震(1993年釧路沖地震および1994年三陸はるか沖地震)との比較を、各地震動の時刻歴・軌跡・応答スペクトル等を通じて行う。

以上の内容によって、今回の地震および地震動の特徴を明らかにする。

2 地震の概要

本地震の震央位置を図-1に、その諸元を表-1に示す¹⁾。各地の揺れの大きさとして、気象庁による各地の震度を図-2に示す¹⁾。同図に示すとおり、本地震によって、兵庫県の神戸・洲本で震度VIの烈震を記録したのをはじめ、神戸市を中心とした各地に激しい地震動をもたらした。また、地震後の調査で判明した震度VIIの激震を記録した地域を図-3に示す¹⁾。本地震の本震および余震(1995年1月17日05:46(本震)～1月31日24:00)の震源分布を、図-4に示す¹⁾。同図に示すとおり、震源の分布は北東から南西方向に長い分布を呈している。

表-1 1995年兵庫県南部地震の地震諸元

名称	平成7年(1995年)兵庫県南部地震
発震月日	1995年 1月17日
時刻	05時46分
震源	
震央位置	淡路島北部
北緯	34°36'
東経	135°03'
深さ	14 km
マグニチュード	7.2(気象庁)

神戸を襲った今回の地震は、1000年に一度起きるか起きないか程度の、極めて稀な規模の地震動である。今回の地震は「プレート内地震」の一種である。「プレート内地震」とは、プレート内に蓄積されたひずみが開放される時に生じ、プレートの一部が破壊すること(断層)により生じる地震である。日本の場合、大陸プレート内で起きる地震は、陸地に近い箇所を震源とするため、このタイプの地震を「内陸直下型地震」と呼ぶことが多い。これに対して、日本の太平洋岸沖を震源とする巨大地震は、「プレート境界型地震」である。海洋プレート(太平洋プレート等)が大陸プレート(ユーラシアプレート等)を引き込みながら下方に沈み込み、ある限界を越すと大陸プレートが跳ね上がるが、この際に生じる地震のことを言う。

今回の地震のような「プレート内地震」は「プレート境界型地震」に比較して、その発生頻度は小さい。また、今回の地震動をもたらした断層は活断層とよばれているが、活断層の「活」は「地質学的に活動的」という意味で、過去の数千～数十万年の時間スケールで見た場合、間欠的に活動し続け、今後の数千～数十万年間に活動する可能性があるという意味である²⁾。従って、これらの活断層による地震の発生時期を確定することは非常に困難である。

本地震の断層は、破壊開始点をほぼ中心として、北東-南西方向にそれぞれ10～15Km ずつの破壊が進行した断層(横ずれ断層)と更に北東側に破壊が枝分かれするように進行した断層(逆断層)からなるものと推定されている³⁾(図-5)。現在活断層として確認されている断層を図-6に示す¹⁾。今回の地震では、断層の近傍に被害が集中したが(図-3、図-6)、被害程度と断層の位置関係については不明な点が多く、さらに詳細な調査および検討が必要である。

3 強震記録

3.1 港湾地域における強震観測

港湾地域においては、1962年より強震観測を実施している。1994年12月末現在、56港89地点において観測を行っている。港湾地域強震観測網では、今回の地震によって、神戸港を中心とする16港20地点で強震計が作動し、11港12地点でデジタルデータとしての加速度記録を得ることができた。本地震によって強震計が作動した観測地点の一覧を、強震計の種類等とともに表-2に示す。同表に示すように、本地震によって強震計が作動した港は、神戸港、尼崎港、和歌山港、小松島港、境港、高知港、松山港、広島港、敦賀港、富山港、金沢港、大阪港、御前崎港、衣浦港、名古屋港、四日市港の16港であった。

今回の地震で得られた補正加速度(3.2を参照)の最大値を、観測地点名および観測地点の気象庁震度とと

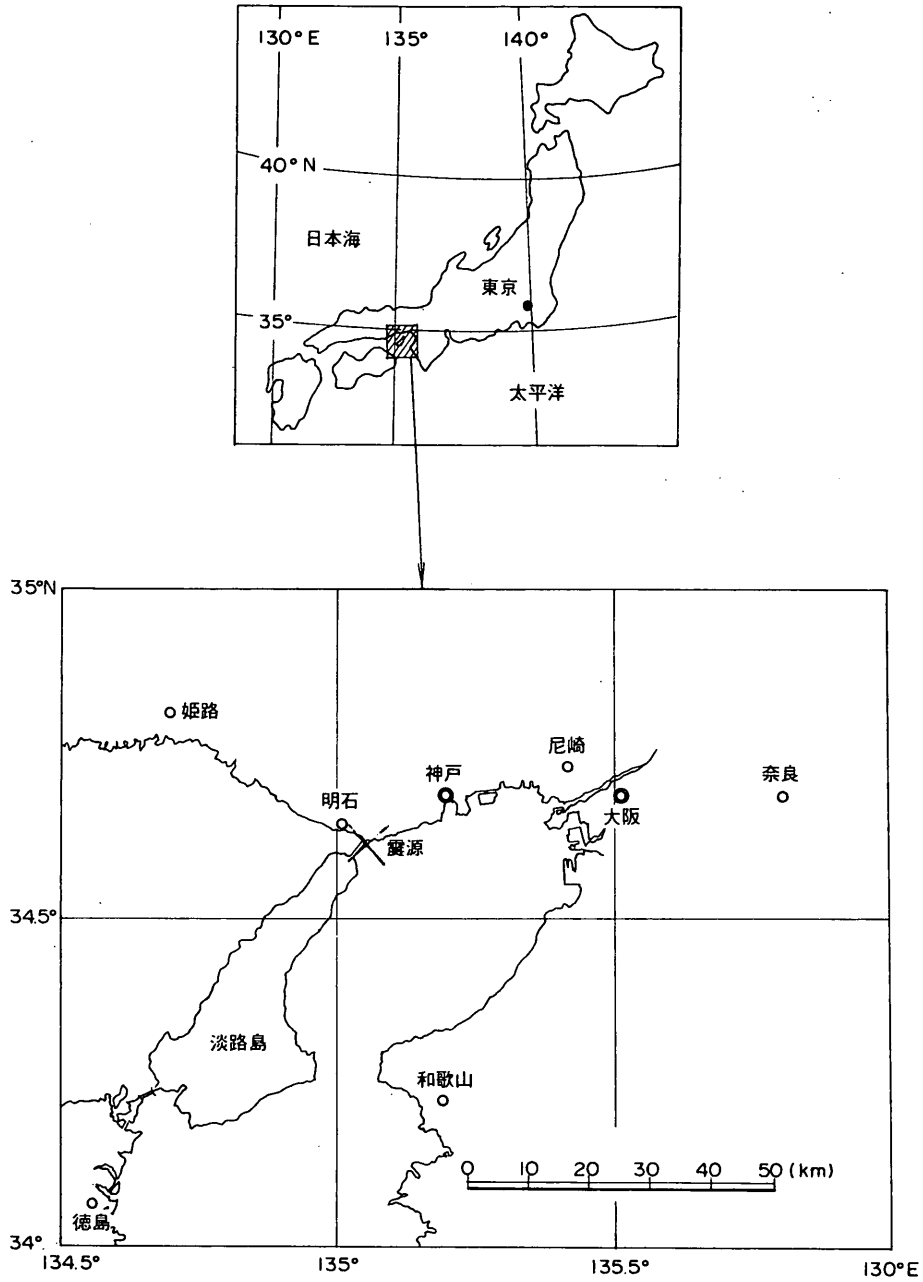


図-1 本震位置

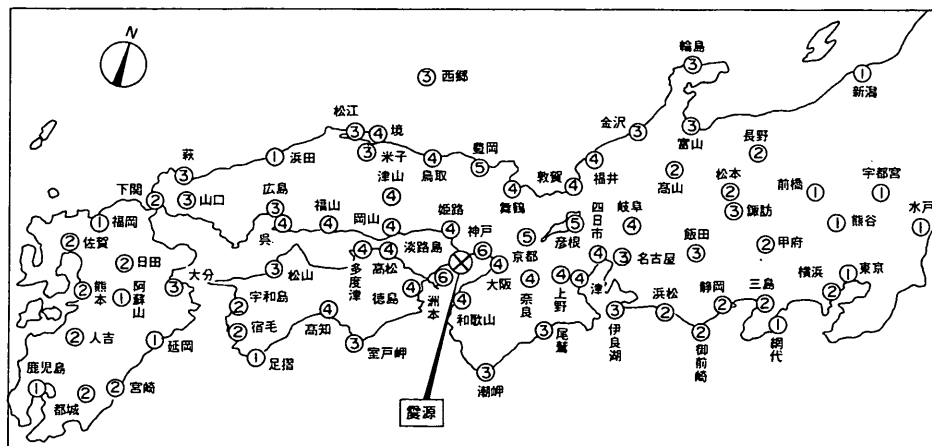


図-2 各地の震度 (大阪管区気象台発表)

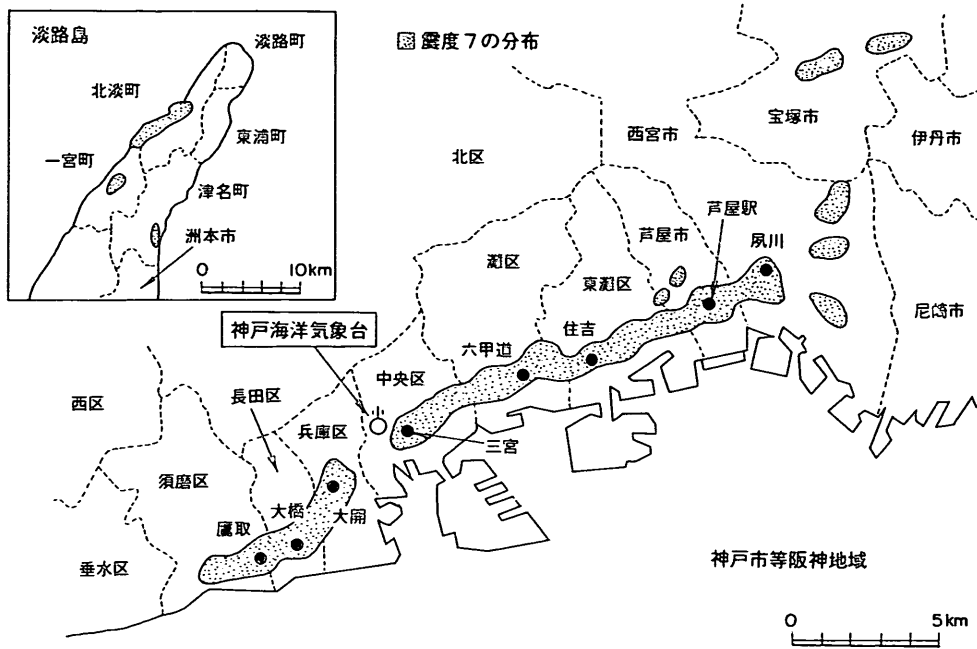


図-3 神戸市周辺の詳細な震度分布 (気象庁発表)

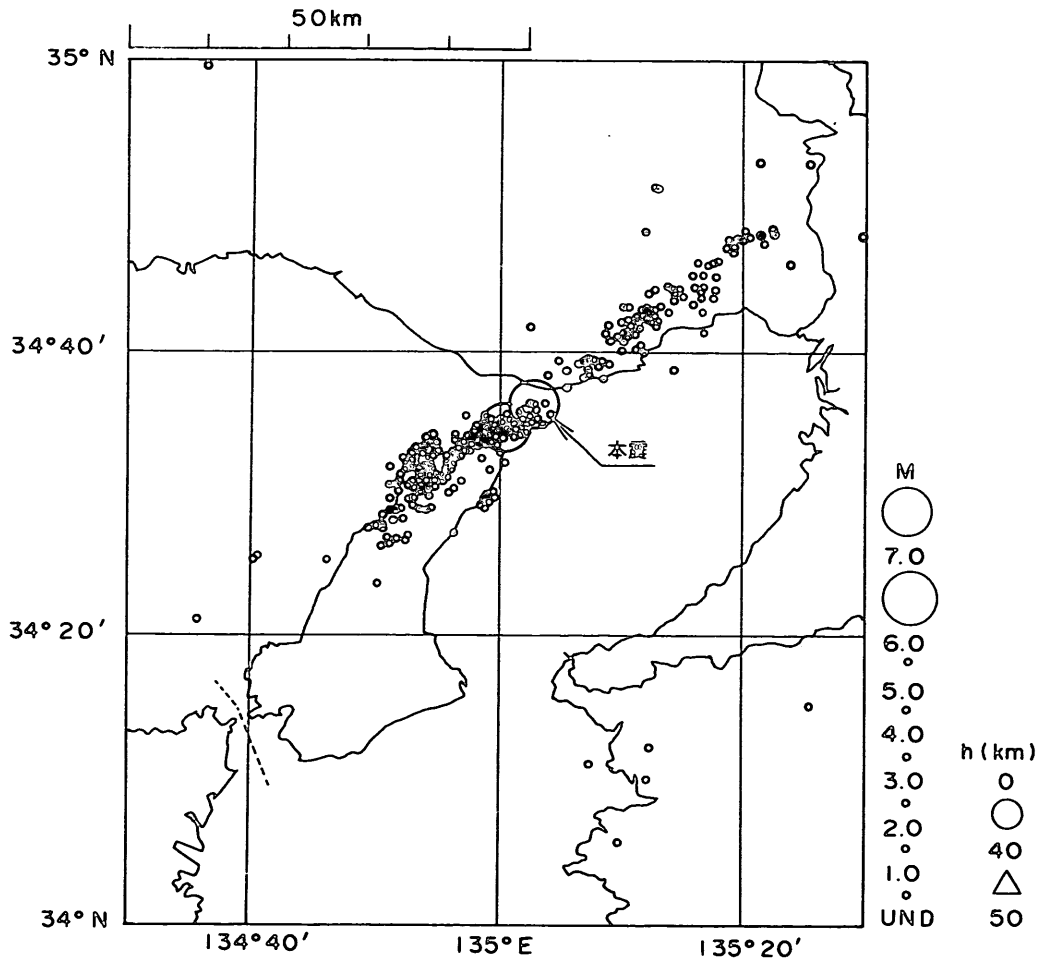


図-4 本震位置および余震の震源分布 (大阪管区気象台発表、期間1995年1月17日 05:46~1月31日 24:00)

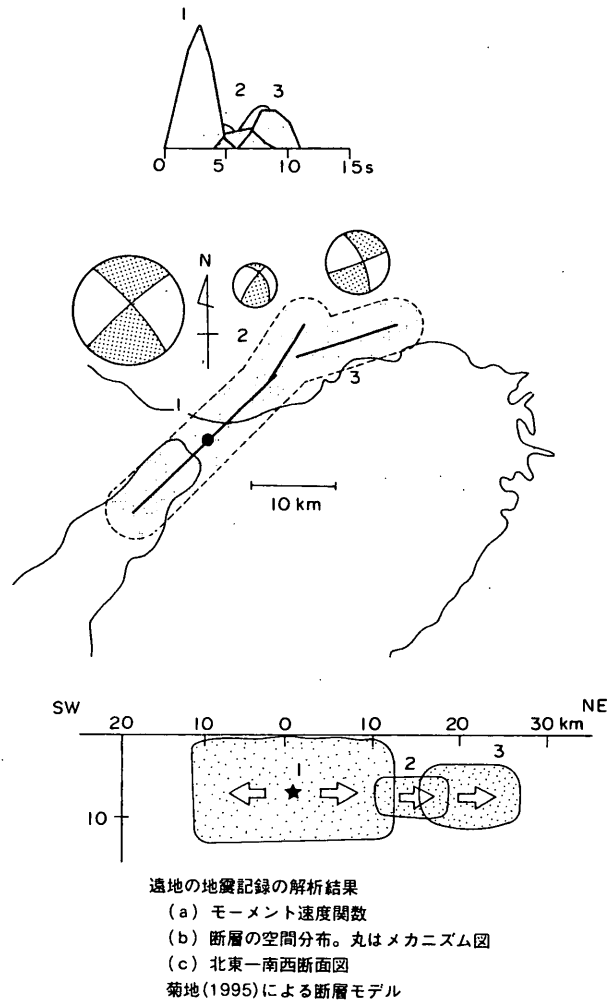


図-5 断層モデル(菊池 1995)

もに図-7にまとめて示す。なお、図中に示されている観測値(未補正記録)とは、基線の補正のみを行い、計器特性による補正を行っていない記録を示している(3.2を参照)。同図中では、観測地点の気象庁震度をローマ数字で示し、最大加速度をアラビア数字(単位: Gal= cm/s^2)で示している。最大加速度に続けて示されている括弧内のアルファベットは、強震計の計測成分を示すものであり、NS, EW, UDはそれぞれ南北, 東西, 上下成分を表している。ただし、強震計の計測水平振動成分と南北, 東西方向が一致していない場合には、方向を表す成分をN43Wのように示している。これは、地震計の北方向を示す計測成分が 43° 西側に傾いていることを示している。すなわち、強震計のN43W成分は北西~南東方向の振動成分を計測していることになる。また、表-2および図-7に示されているように、港湾地域強震観測網における観測地点名は、設置地点名およびアルファベット2文字から成っている。設置地点名に続く最初のアルファベットは強震計の種類を表すものであり、後のアルファベットは強震計の設置状況を表すものとなっている。これらの説明は、図-7中の凡例に示さ

れている通りであるが、その詳細については別報に報告されている⁵⁾。

3.2 強震計と取得記録

港湾地域強震観測網では、図-7中の凡例に示されている通り、4種類(細かくは6種類)の強震計が用いられている。使用されている強震計は、機械式のSMAC-B2型強震計、電磁式アナログ記録方式のERS-B, -C, -D型強震計、電磁式デジタル記録方式のERS-F, -G型強震計の6種類である⁵⁾。これらの中で、SMAC-B2型強震計は観測開始当初から使用されていた。同強震計によって得られた記録は、1968年十勝沖地震における八戸港の記録⁶⁾をはじめとして、耐震工学関連の研究や設計実務において中心的な役割を果たしてきた。1994年12月末現在、全国の港湾地域強震観測網では25台のSMAC-B2型強震計が使用されているが、今後数年の内にその多くが最新のERS-G型強震計に更新される予定である。

これら強震計の計器特性は型式によって異なる。SMAC-B2型強震計は、高周波数領域で感度が低下する特性を持っており、7.1Hzで $1/2$ 程度、10Hzで $1/3$ 程度感度が低下する⁵⁾。従って、地盤加速度に高周波数成

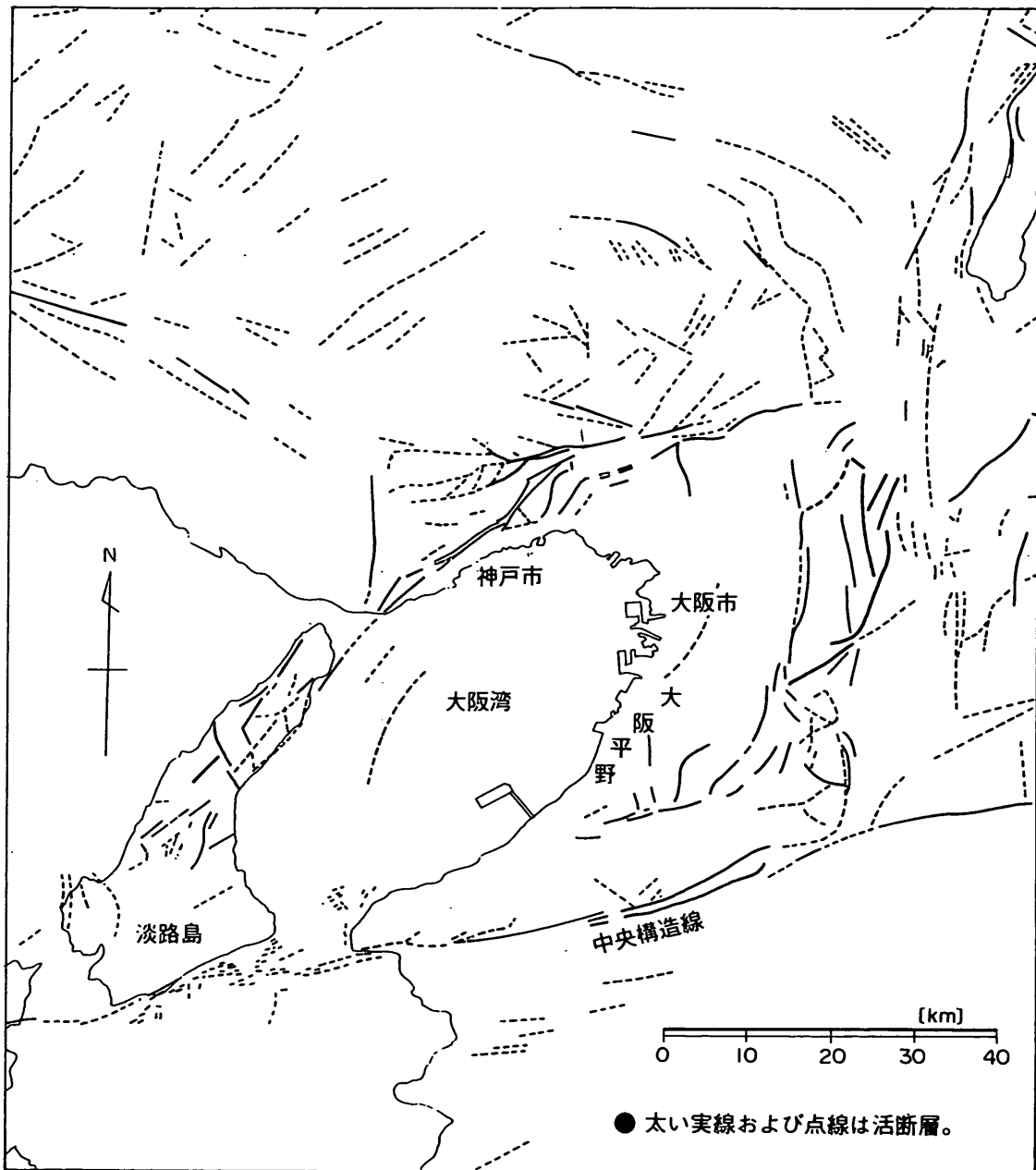


図-6 活断層の位置（〔新編〕日本の活断層より作成）

分が多く含まれている場合には、SMAC-B2型強震計では加速度を忠実に計測することはできない。そのため、SMAC-B2型強震計で得られた最大加速度は、実際に生じた加速度よりも小さくなることもある。これに対してERS型強震計は、高周波数領域においても感度が低下しないため、SMAC-B2型強震計よりも実際の地盤加速度を忠実に計測することができる。従って、実際の地震動に高周波数成分が多く含まれているほど、最大加速度としてはERS型強震計から得られた記録の方がSMAC-B2型強震計から得られた記録よりも大きくなる。逆に、実際の地震動に高周波数成分があまり含まれず、その多くが低周波数成分（極低周波数成分を除く）からなるものであれば、SMAC-B2型強震計から得られた記録もERS

型強震計から得られた記録も、最大加速度としてはほぼ同一のものとなる。

港湾構造物をはじめとする土木構造物は、一般に大重量かつ大型であり、これらの構造物に破壊力として実効的に作用する成分としては、短時間に変動する高周波数成分よりも、むしろ低周波数成分の方が大きく寄与するものと考えられる。したがって、これらの構造物に対しては、高周波数成分までも忠実に計測するERS型強震計から得られた記録よりも、むしろ計器特性としてのハイカットフィルターを持つSMAC-B2型強震計から得られた記録の方がより直接的な関係を持つものと考えられる。また、港湾構造物の設計実務に取り入れられている、最大加速度と設計震度との関係⁷⁾を利用する上におい

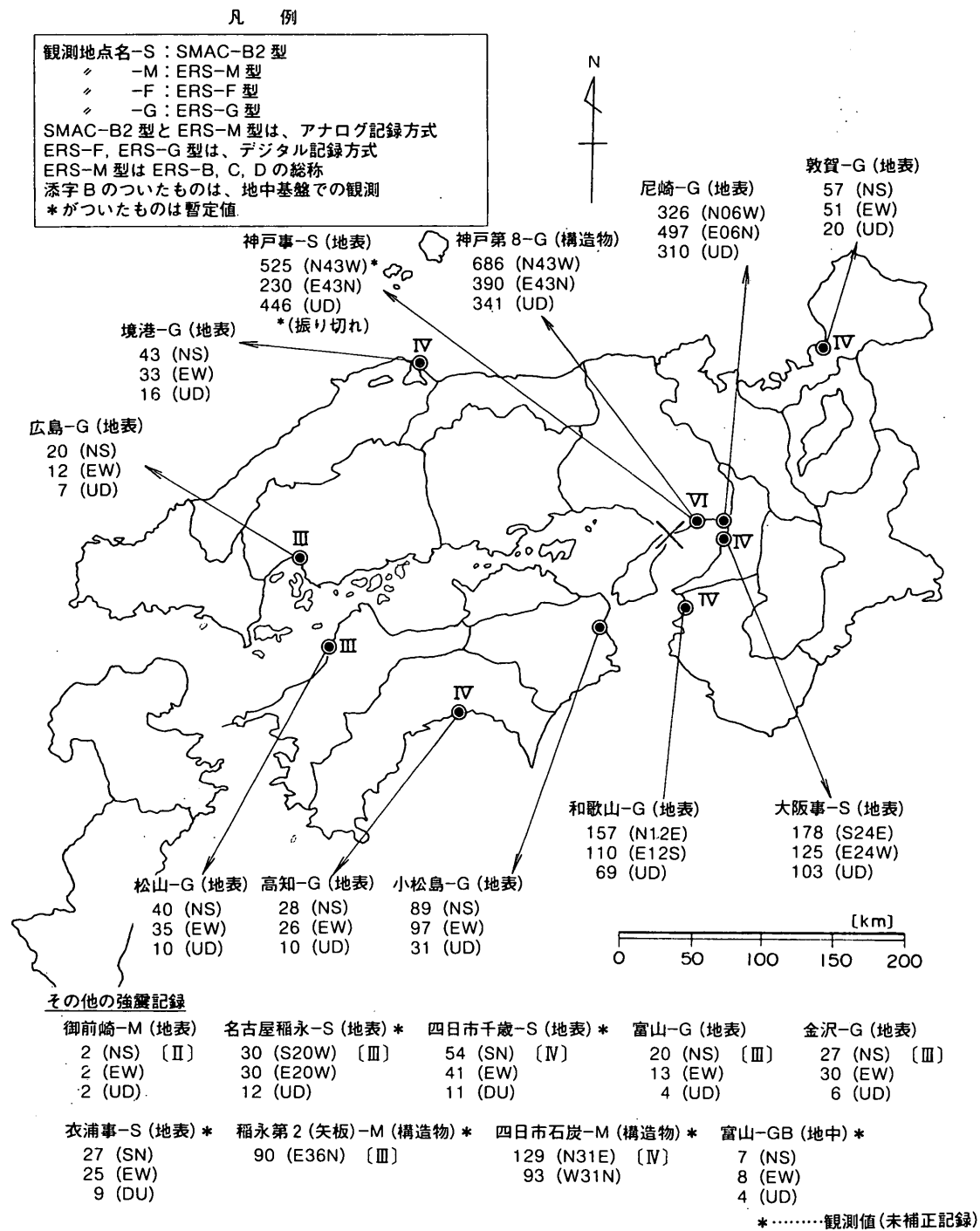


図-7 各地の震度と港湾地域強震観測網による補正最大加速度

でもSMAC-B2型強震計による最大加速度が必要となる。

これらの点を考慮して、本地震によって観測された最大加速度を相互に比較しやすい形に変換したものを表-3にまとめて示す。同表では、3種類の最大加速度、すなわち観測記録・補正記録・SMAC EQ記録を示している。観測記録は記録の基線補正のみを行った後の加速度記録、補正記録は各強震計の計器特性による補正を行った加速度記録、SMAC EQ (SMAC EQUIVALENT)記録はERS型強震計から得られた記録を SMAC-B2型強震計により得られる加速度記録に換算 (高周波数領域をSMAC

B2型強震計の計器特性に応じてカット) したものを表している。

3.3 強震記録

図-7および表-3に示されている港湾地域強震観測網によって得られた記録の中から、ここでは、代表的な観測点として神戸港工事事務所 (震央距離:約17km)、神戸港第八突堤 (震央距離:約17km) および尼崎港 (震央距離:約35km) で得られた記録を示す。各地点の名称は表-3に示す通り、神戸事-S、神戸第8-G、尼崎-Gである。神戸事-Sおよび神戸第8-Gの強震観測位

表-2 1995年兵庫県南部地震による港湾地域強震観測網の強震計作動観測点

港湾	地点名	強震計	設置状況
神戸	神戸事-S	SMAC-B2	地表
	神戸第8-G	ERS-G	構造物
尼崎	尼崎-G	ERS-G	地表
和歌山	和歌山-G	ERS-G	地表
小松島	小松島-G	ERS-G	地表
境港	境港-G	ERS-G	地表
高知	高知-G	ERS-G	地表
松山	松山-G	ERS-G	地表
広島	広島-G	ERS-G	地表
敦賀	敦賀-G	ERS-G	地表
富山	富山-GB	ERS-G	地中
	富山-G	ERS-G	地表
金沢	金沢-G	ERS-G	地表
大阪	大阪-S	SMAC-B2	地表
御前崎	御前崎-M	ERS-C	地表
衣浦	衣浦事-S	SMAC-B2	地表
名古屋	名古屋橋永-S	SMAC-B2	地表
	橋永矢板-M	ERS-B	構造物
四日市	四日市千歳-S	SMAC-B2	地表
	四日市石炭-M	ERS-B	構造物

置を図-8に、尼崎-Gの強震観測位置を図-9に示す。なお、ここで言う震央距離とは、図-1および表-1に示す本震の震央からの距離を表し、2. で触れた断層の破壊域からの距離とは異なるものである。各観測地点の強震計の種類は、表-2、図-7等に示されている通りである。

神戸港工務所に設置されている強震計は SMAC-B2型強震計（機械式）であり、地表の地震動の観測が行われている。神戸第8-Gおよび尼崎-Gで使用されている強震計の形式はERS-G型（電磁式デジタル記録方式）である。神戸第8-Gでは構造物（岸壁）上で、尼崎-Gでは地表の観測が行われている。なお、ERS-G型強震計とSMAC-B2型の感度特性は異なるため、この2つの記録の比較は単純にはできない。従って、加速度の記録として、SMAC-B2型で得られた記録（神戸事-S）に関しては未補正加速度（Original Acceleration）と補正加速度（Corrected Acceleration）を示し、ERS-G型で得られた記録（神戸第8-Gおよび尼崎-G）に関しては、SMAC EQ 加速度と補正加速度を示す。これにより感度特性の異なる両地震計より得られた記録が比較可能となる。すなわち、各記録の補正加速度同士、およびSMAC-B2型で得られたオリジナル加速度とERS-G型より得られたSMAC EQ加速度が比較対象となる。

神戸港の強震観測地点（神戸事-S）における地震直後のボーリングにより得られた土質柱状図を、図-10に示す。土質条件としては、表層からGL-15m程度までは、N値が5前後の砂層が続いている（一部、シルトおよび粘土層を含む）。GL-15m~GL-65m程度の深度では、N値50以上の砂層とN値20前後の砂を含んだシルトもしくは粘土層が互層となっている。

神戸事-Sの加速度時刻歴を図-11(a)に、速度・変位時刻歴を図-11(b)に示す。なお、速度・変位は固定フィルター⁵⁾を用いて求めた。神戸事-Sの水平最大加速度（N43W成分:北西~南東方向）は、未補正加速度としては約502Gal、補正加速度としては約525Galを記録した。但し、SMAC-B2型強震計の観測可能な最大加速度は約500Galであり、今回の強震動によりN43W成分は振り切れていたことになる（時刻 5.2sec 付近）。神戸周辺他機関による観測記録の最大加速度は、概ね600~800Gal程度を記録しているため、神戸事-Sの記録に関しても600Gal以上の加速度が生じた可能性がある。さらに、神戸事-Sの強震計設置地点では液状化の痕跡が見られ、地震後には強震観測小屋が若干E43N方向に傾いてた。従って、この記録の利用に関しては十分な注意が必要である。

観測記録の特徴としては、地震動の継続時間が約10秒間と短いこと、また、その間に振幅が大きく周期の長い波（周期1~2秒前後）が2~3波含まれていること、さらに地震動がある時刻を境に急に小さくなっていること等が挙げられる。上に示した振幅が大きく周期の長い2~3の波は、断層の破壊過程と関係あるとされている（例えば文献^{8),9)}）。一方、鉛直最大加速度は、未補正加速度としては約283Gal、補正加速度としては約446Galであった。強い水平動とともに、強い上下動が生じていたことが今回の地震動の特徴であった。表-4に加速度・速度・変位の最大値をまとめたものを示す。

神戸第8-Gの強震計は、構造物上（岸壁上）に設置されている。地震計の設置されている神戸第8突堤は、2本の突堤が水路を挟む構造となっている（図-8）。強震計は、西側の突堤中央に設置されている。地震計が設置されている部分の構造断面図を図-12に示す。但し、第八突堤上の大部分には、図-13に示す3階建ての上屋が設置されていた。突堤の幅は51.80m、長さは400mである。また、この突堤は50mずつの8区間に分かれており、各区間は構造上絶縁されている。構造形式は鉄筋コンクリート造りの栈橋であり、1区画は8m角の脚柱9本に支えられている。脚柱はニューマチック・ケーソン工法によって、-15.5m付近の硬い地盤まで沈下され、その上部はプレキャスト桁によって強固にコンクリートでつなぎ合わされている。本地震によって、上屋1階部分の柱が損傷・破壊し、上屋は使用不可能となった。また、脚柱部分については、脚柱上部に水平方向のクラックが発生した。

神戸第8-Gの加速度時刻歴を図-14(a)に、速度・変位時刻歴を図-14(b)に示す。速度・変位は固定フィルター⁵⁾を用いて求めた。加速度記録より周期2秒程度の周期的な波が卓越していることがわかる。全体的な波形の形は、近隣の約900m離れた神戸事-Sの記録と大

表-3-① 1995年兵庫県南部地震による港湾地域強震観測網の最大加速度一覧

観測地点&記録番号	強震計機種	距離 (km)	記録種類	N.S成分	E.W成分	U.D成分
神戸事-S S-2615	SMAC-B2	震央距離=17.3	観測記録	502.0 N43W	204.8 E43N	282.8
		震源距離=22.4	SMAC EQ 補正記録	524.8 N43E	229.7 E43N	445.9
神戸第8-G F-764	ERS-G	震央距離=17.3	観測記録	683.1 N43W	394.0 E43N	333.6
		震源距離=22.4	SMAC EQ 補正記録	629.2 N43W 686.1 N43W	355.8 E43N 389.6 E43N	215.0 341.3
尼崎-G F-765	ERS-G	震央距離=34.8	観測記録	321.2 N06W	472.0 E06N	310.8
		震源距離=37.6	SMAC EQ 補正記録	267.5 N06W 325.7 N06W	383.9 E06N 497.0 E06N	222.6 310.3
和歌山-G F-795	ERS-G	震央距離=43.0	観測記録	157.0 N12E	109.0 E12S	67.2
		震源距離=45.3	SMAC EQ 補正記録	95.9 N12E 157.2 N12E	86.5 E12S 110.2 E12S	34.2 68.7
小松島-G F-794	ERS-G	震央距離=74.7	観測記録	89.4	96.1	31.6
		震源距離=76.0	SMAC EQ 補正記録	83.3 88.9	90.6 96.7	25.9 31.2
境港-G F-793	ERS-G	震央距離=194	観測記録	43.6	33.0	16.0
		震源距離=195	SMAC EQ 補正記録	40.9 43.4	31.0 33.2	14.4 15.8
高知-G F-791	ERS-G	震央距離=183	観測記録	27.8	26.0	10.0
		震源距離=183	SMAC EQ 補正記録	26.3 27.5	24.1 26.0	8.8 9.8
松山-G F-792	ERS-G	震央距離=230	観測記録	39.7	35.3	10.3
		震源距離=231	SMAC EQ 補正記録	38.0 39.8	32.6 35.2	9.0 10.2
広島-G F-790	ERS-G	震央距離=239	観測記録	20.1	11.9	6.8
		震源距離=239	SMAC EQ 補正記録	18.6 20.3	9.9 11.9	6.2 6.9
敦賀-G F-789	ERS-G	震央距離=149	観測記録	56.1	50.9	20.1
		震源距離=150	SMAC EQ 補正記録	44.8 56.6	39.2 50.8	14.4 19.7
富山-GB F-787	ERS-G GL-72.3m	震央距離=305	観測記録	6.9	8.2	3.9
		震源距離=305	SMAC EQ 補正記録	6.7 6.8	8.1 8.2	3.7 3.8
富山-G F-788	ERS-G	震央距離=305	観測記録	19.9	12.9	4.4
		震源距離=305	SMAC EQ 補正記録	19.5 19.8	12.1 12.9	4.3 4.4
金沢-G F-800	ERS-G	震央距離=264	観測記録	26.6	30.0	6.2
		震源距離=264	SMAC EQ 補正記録	24.8 26.6	28.5 29.8	6.1 6.1
大阪事-S S-2618	SMAC-B2	震央距離=36.5	観測記録	178.1 S24E	125.0 E24N	103.1
		震源距離=39.2	SMAC EQ 補正記録	----- -----	----- -----	----- -----
御前崎-M M-1552	ERS-C	震央距離=291	観測記録	2	2	2
		震源距離=291	SMAC EQ 補正記録	----- -----	----- -----	----- -----
衣浦事-S S-2621	SMAC-B2	震央距離=101	観測記録	26.9	25.0	9.4
		震源距離=102	SMAC EQ 補正記録	----- -----	----- -----	----- -----

(注) 観測記録: 基線の補正のみ行ったもの、SMAC EQ: SMAC-B2型強震計の計器特性に換算したものの補正記録: 強震計の計器特性による補正を施したもの。

表-3-②

観測地点&記録番号	強震計機種	距離 (km)	記録種類	N S成分	E W成分	UD成分
名古屋稲永-S S-2616	SMAC-B2	震央距離=176 震源距離=176	観測記録 SMAC EQ 補正記録	30.0 S20W ----- -----	31.9 E20S ----- -----	11.9 ----- -----
稲永矢板-M M-1553	ERS-B	震央距離=177 震源距離=177	観測記録 SMAC EQ 補正記録	----- ----- -----	90.3 E36N ----- -----	----- ----- -----
四日市千歳-S S-2619	SMAC-B2	震央距離=146 震源距離=147	観測記録 SMAC EQ 補正記録	53.8 ----- -----	40.6 ----- -----	11.3 ----- -----
四日市石炭-M M-1555	ERS-B	震央距離=146 震源距離=146	観測記録 SMAC EQ 補正記録	128.9 N31E ----- -----	92.7 W31N ----- -----	----- ----- -----

(注) 観測記録：基線の補正のみ行ったもの(未補正記録)
SMAC EQ：SMAC-B2型強震計の計器特性に換算したもの
補正記録：強震計の計器特性による補正を施したもの

大きく異なる。従って、岸壁の構造が第8突堤上で観測された地震波形に影響を与えている可能性が高い。表-4に、加速度・速度・変位の最大値をまとめたものを示す。

尼崎-Gの強震計は、地表面に設置されている。地震後に得られた土質柱状図を図-15に示す。土質条件は、GL-80m程度まで砂層と粘土・シルト層が互層となっている。尼崎-Gの加速度時刻歴を図-16(a)に、速度・変位時刻歴を図-16(b)に示す。加速度記録においてスパイク状の波形が生じており、観測地点においては液状化の発生を示す噴砂や地割れ等が一面に見られた。表-4に、加速度・速度・変位の最大値をまとめたものを示す。

神戸事-Sで得られた加速度・速度・変位の平面内の軌跡を図-17に示す。神戸事-Sの記録に限って見ると、今回の地震動は強い方向性を有していることがわかる(北北西~南南東方向)。この卓越振動方向は2で述べた地震断層に対してほぼ直交方向となっている。図-18に神戸事-Sの補正加速度記録を、ポートアイランドや六甲アイランドの各岸壁の法線直角方向に投影した加速度ベクトルを示す。これによると、岸壁の方向によって、その法線直角方向の最大加速度は大きく異なることがわかる。但し、地震動の方向性と被害程度の関係については詳細な検討が必要である。

次に、神戸事-Sで得られた加速度・速度・変位の鉛直面内の軌跡を図-19に示す。鉛直方向の加速度は大きな値をとるが、速度・変位で見ると水平方向のそれに比較して非常に小さいことがわかる。また、鉛直方向と水平方向の最大加速度が発生する時刻は異なっていた。

神戸事-S、神戸第8-G、尼崎-Gの加速度記録より求めたフーリエスペクトルおよび加速度応答比スペクトルを図-20~図-25に示す。フーリエスペクトルより求めた3地点の水平方向の卓越振動数は、いずれも0.8Hz前後である。この卓越振動数は、現在の港湾施設の

設計に用いられている1968年十勝沖地震(マグニチュード7.9)の八戸港における強震動の卓越振動数(約1.0Hz)および1978年宮城県沖地震(マグニチュード7.4)の大船渡港における強震動の卓越振動数(約2.4Hz)に比較して小さい値であった。この結果より、今回の地震動は、上の2つの地震動に比較して長周期成分が卓越していることが示された。

加速度応答比スペクトルの結果より、水平方向の加速度応答は周期2秒程度まで1.0倍以上の値を保っており、比較的長周期まで応答倍率が高いことが今回の地震動の特徴であった。一方、鉛直方向の加速度応答比は、周期0.1秒前後に大きなピークを有していた。

3.4 最大加速度の距離減衰と上下・水平加速度比

港湾地域の強震観測により得られた既往の水平最大加速度の距離減衰式には、以下のものがある¹⁰⁾。

$$\log a = 0.552M - 1.965 \log (\Delta + 30) + 2.103 \quad (1)$$

$$\log a = 0.559M - 2.057 \log X + 2.187 \quad (2)$$

$$\log a = 0.490M - \log X - 0.00173X + 0.634 \quad (3)$$

ここに、a：水平最大加速度 (Gal=cm/s²)

M：気象庁マグニチュード

Δ：震央距離 (km)

X：震源距離 (km)

これらの回帰式は、種々の強震計による未補正の最大加速度を基に回帰分析により得られたものである。また、使用した記録の震央距離としては概ね50km以上となっている。今回の地震で得られた記録については、神戸港・尼崎港・大阪港・和歌山港の震央距離が50km以内と比較的近距離にあり、既往の回帰式の震源域近傍への適用

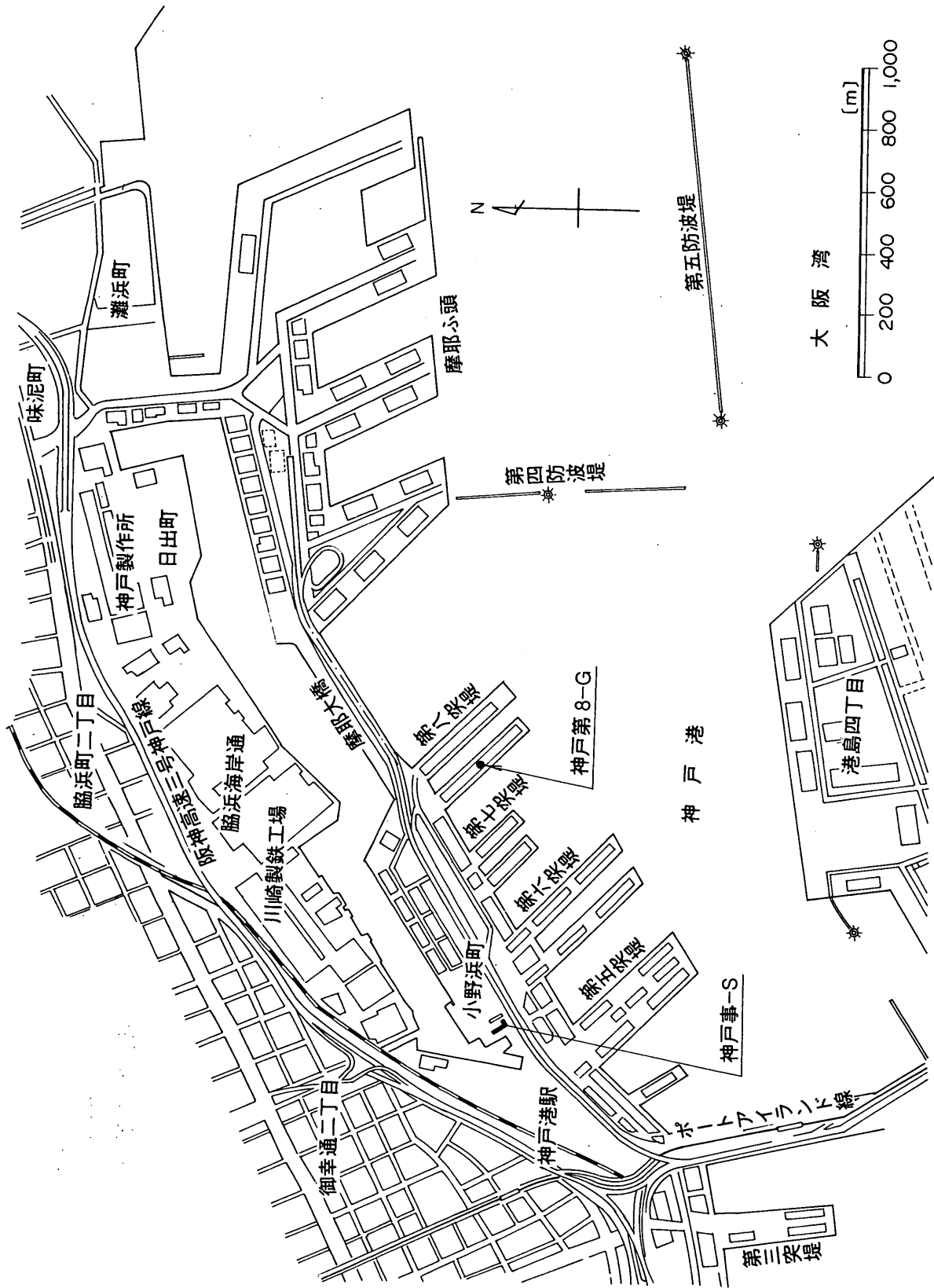


図-8 神戸事-Sと神戸第8-Gの強震観測地点の位置

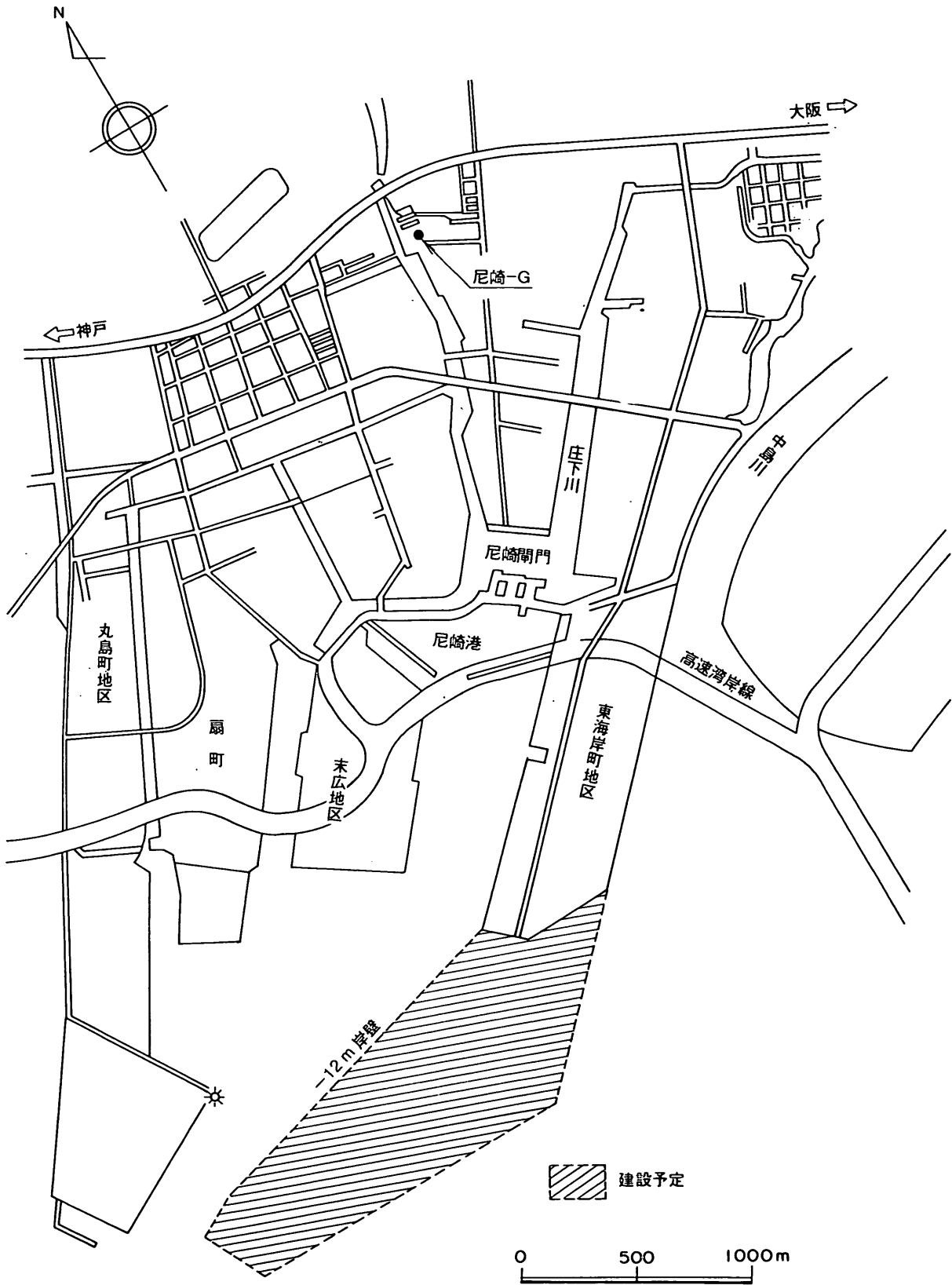


図-9 尼崎-Gの強震観測地点の位置



図-10-① 神戸事-S強震観測点における土質柱状図(地震後, 1995年1月)



図-10-②

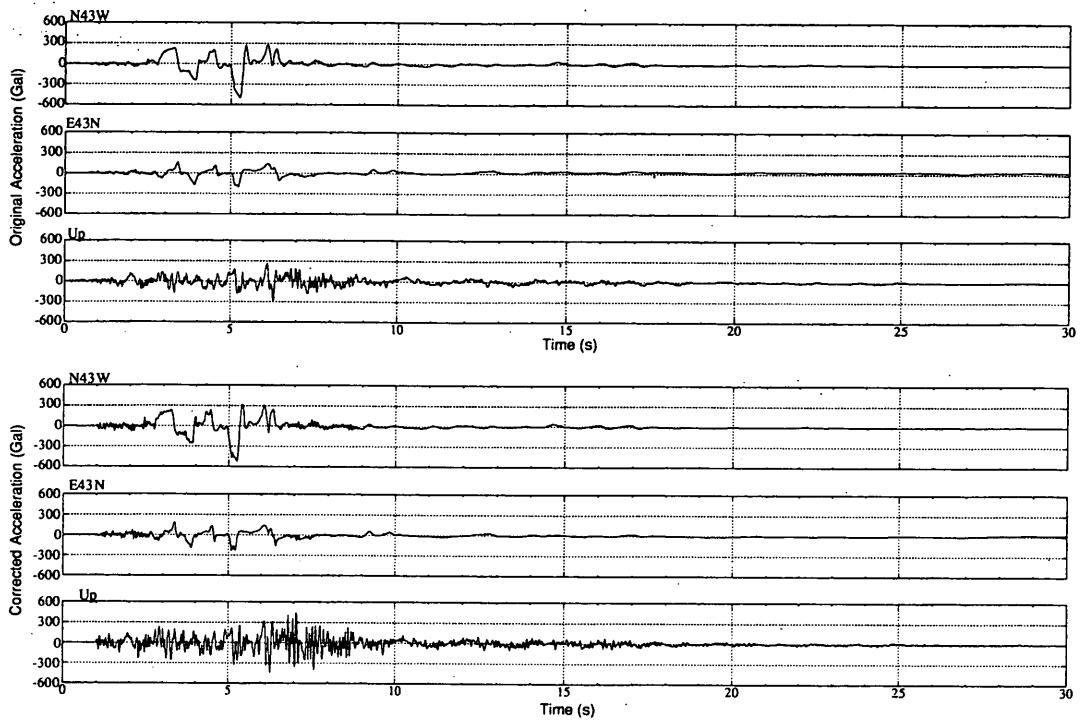


図-11 (a) 加速度時刻歴 (神戸事-S) (上段: オリジナル加速度, 下段: 補正加速度)

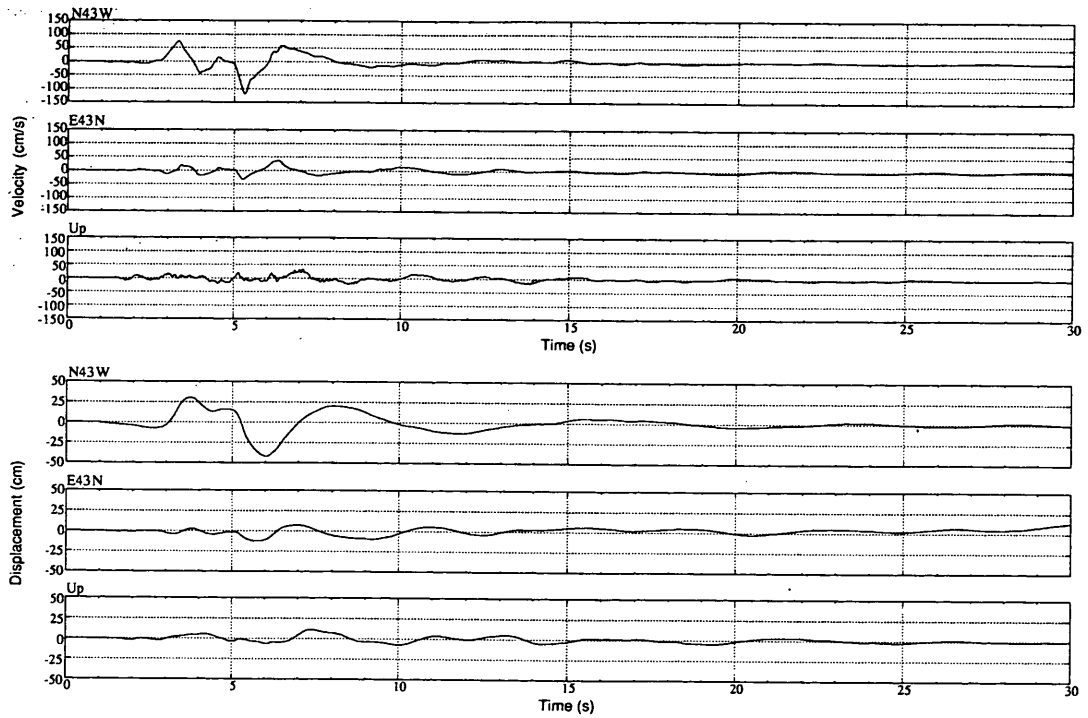


図-11 (b) 速度・変位時刻歴 (神戸事-S) (上段: 速度, 下段: 変位)

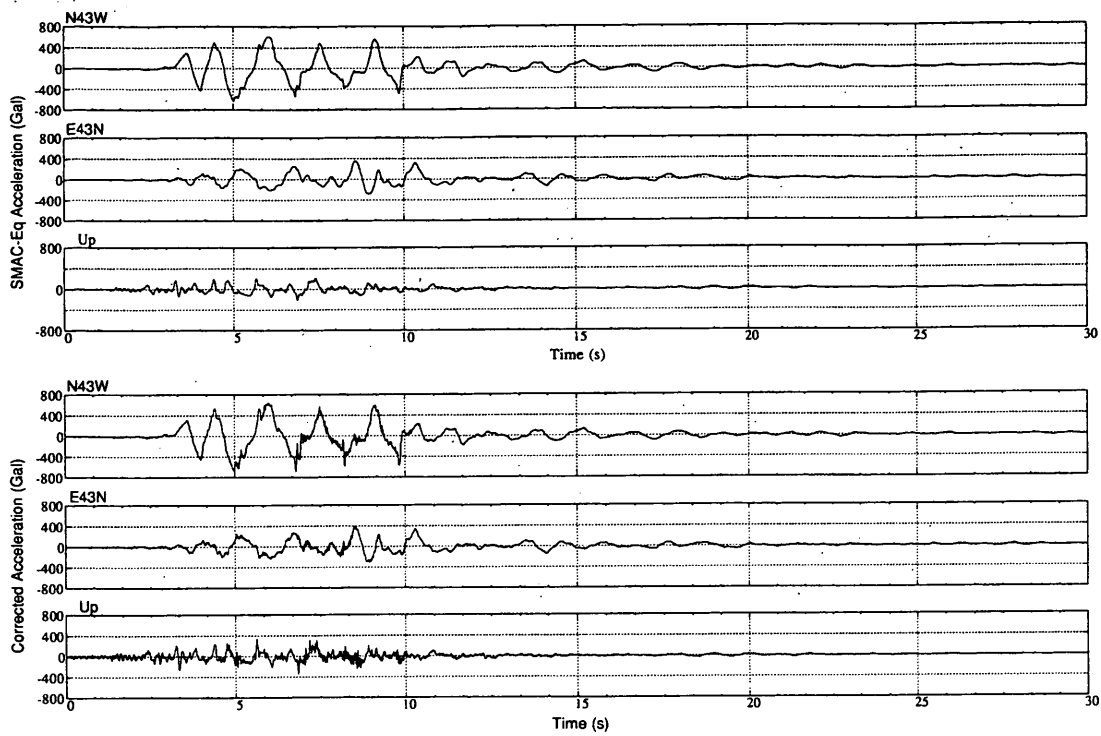


図-14 (a) 加速度時刻歴 (神戸第八-G) (上段: SMAC-EQ加速度, 下段: 補正加速度)

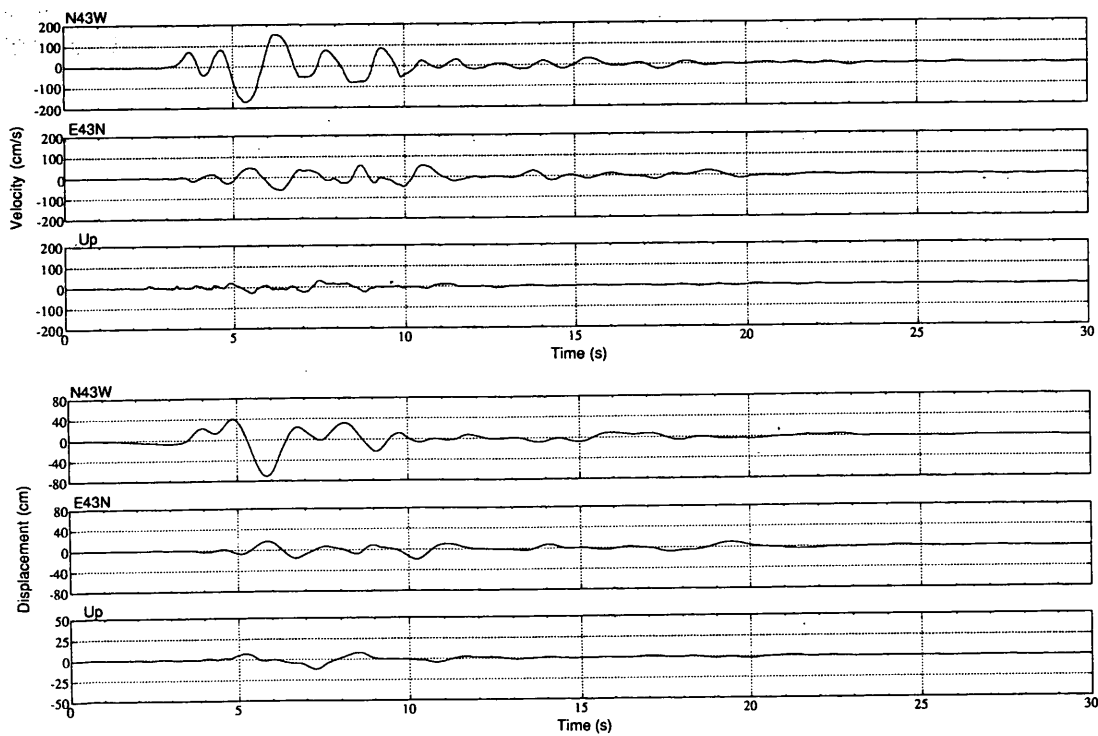


図-14 (b) 速度・変位時刻歴 (神戸第八-G) (上段: 速度, 下段: 変位)

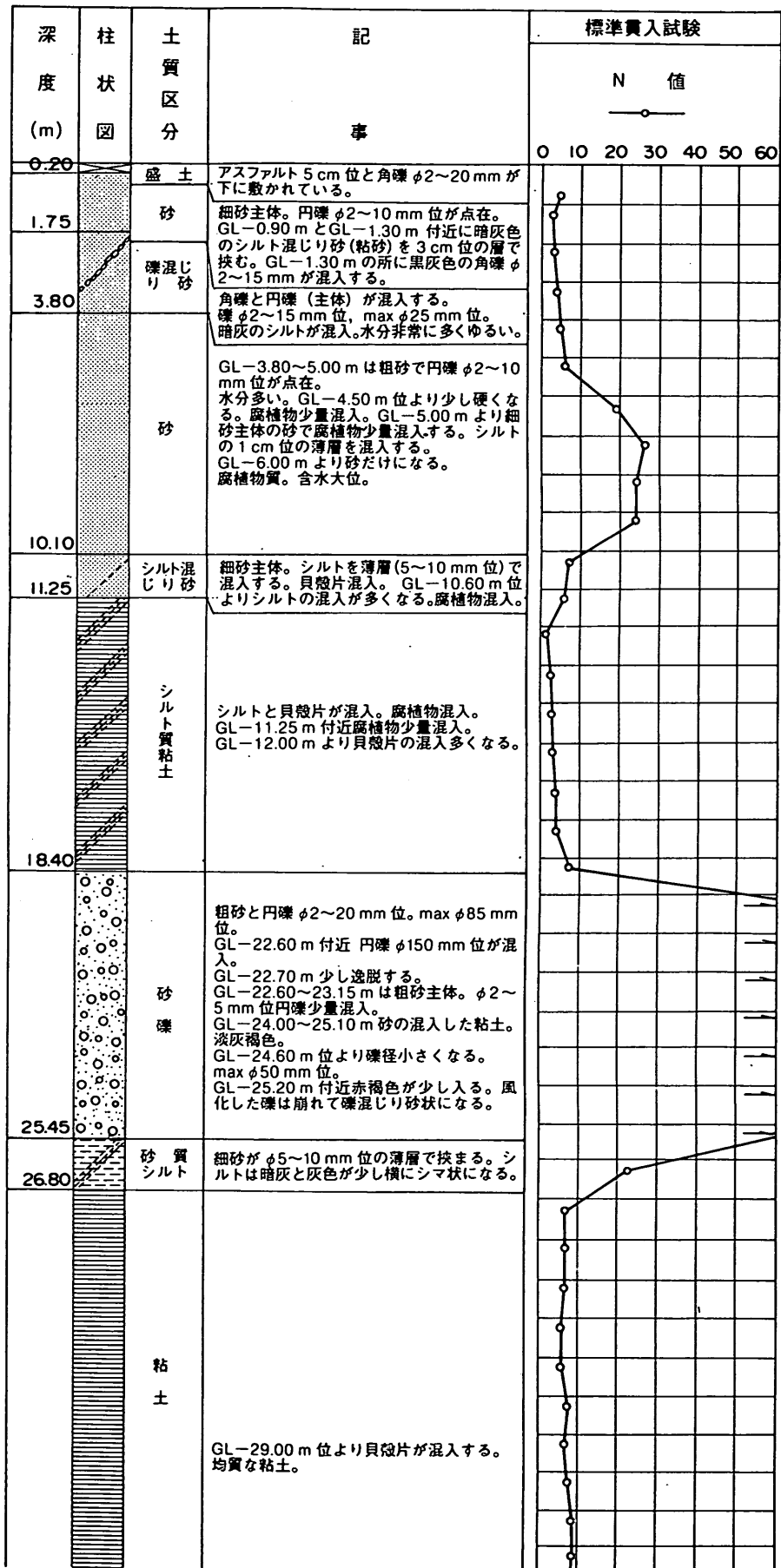


図-15 ① 尼崎-Gの強震観測点における土質柱状図(地震後)

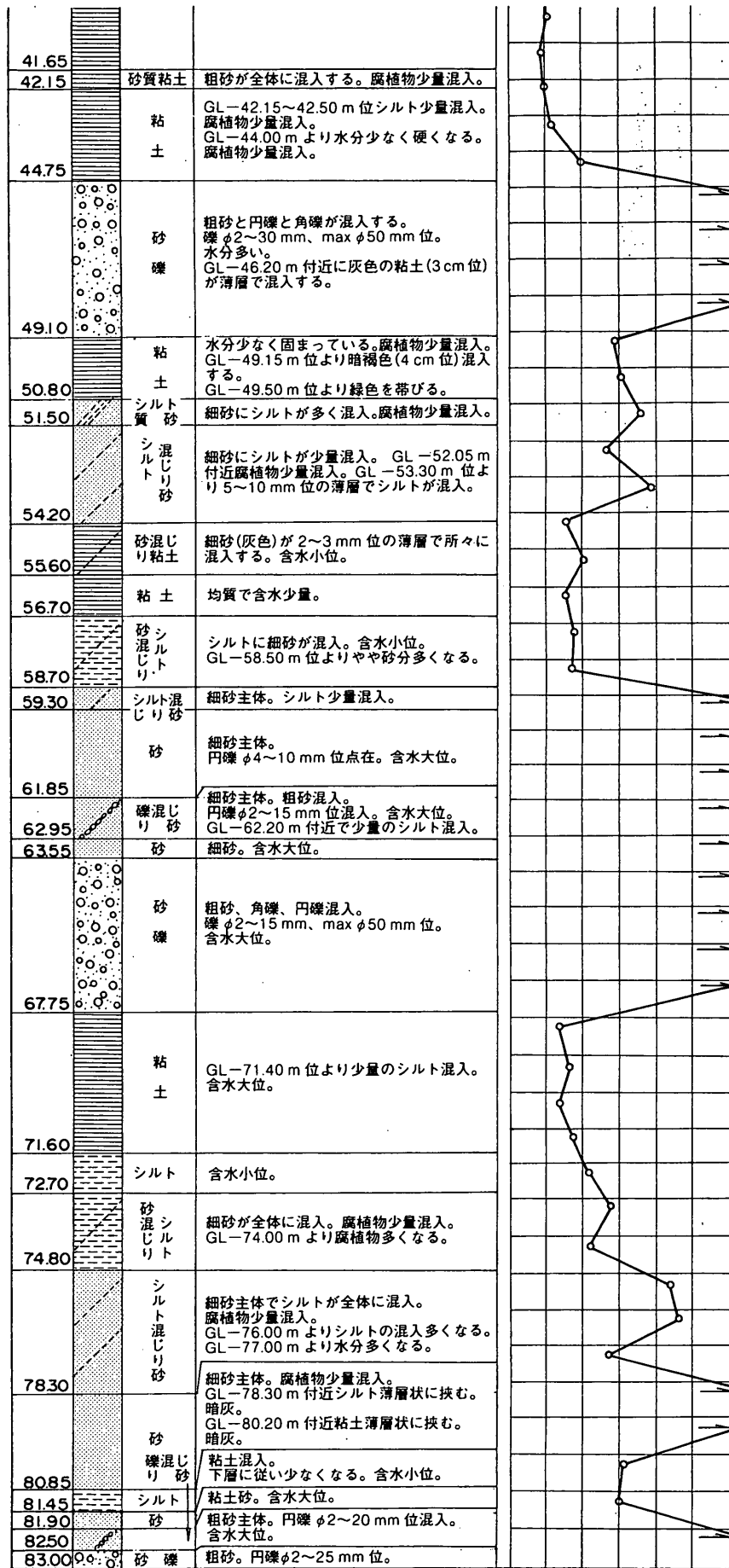


図-15 ②

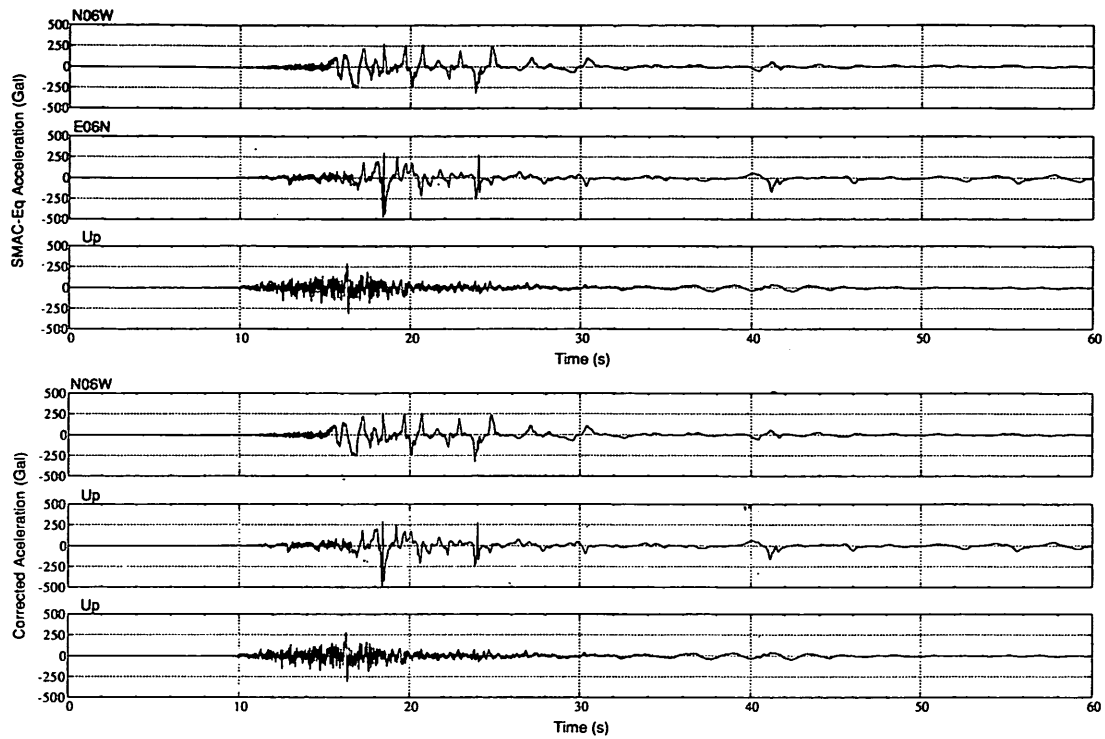


図-16 (a) 加速度時刻歴 (尼崎-G) (上段: SMAC-EQ加速度, 下段: 補正加速度)

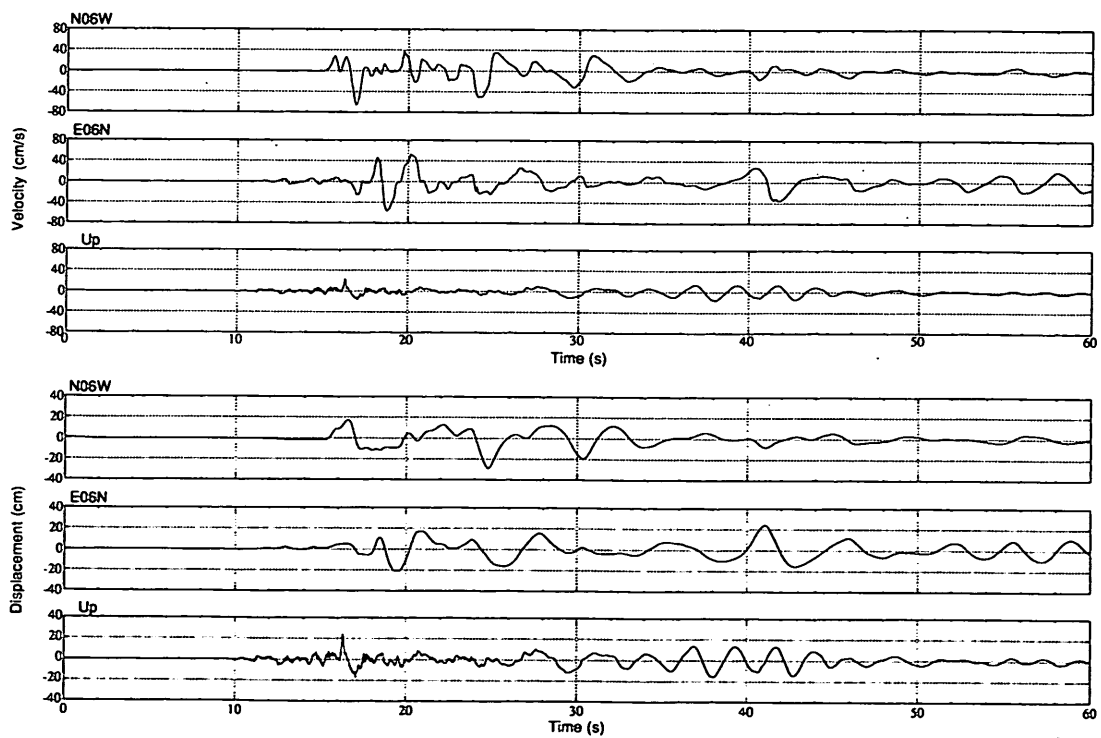


図-16 (b) 速度・変位時刻歴 (尼崎-G) (上段: 速度, 下段: 変位)

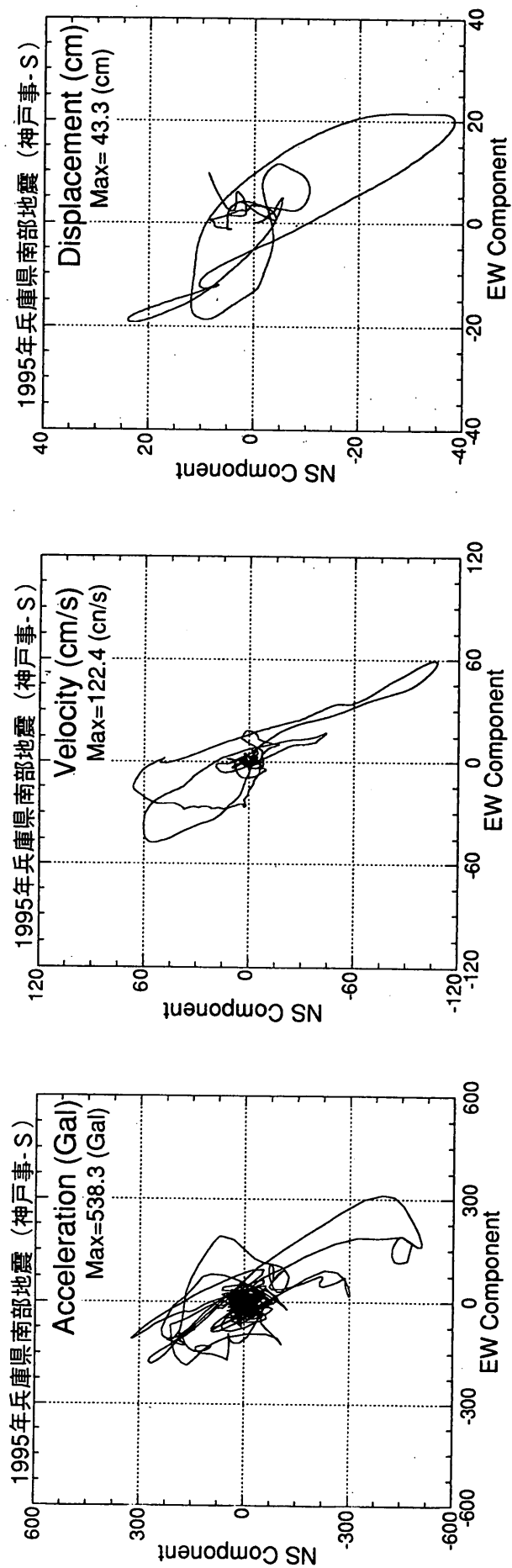
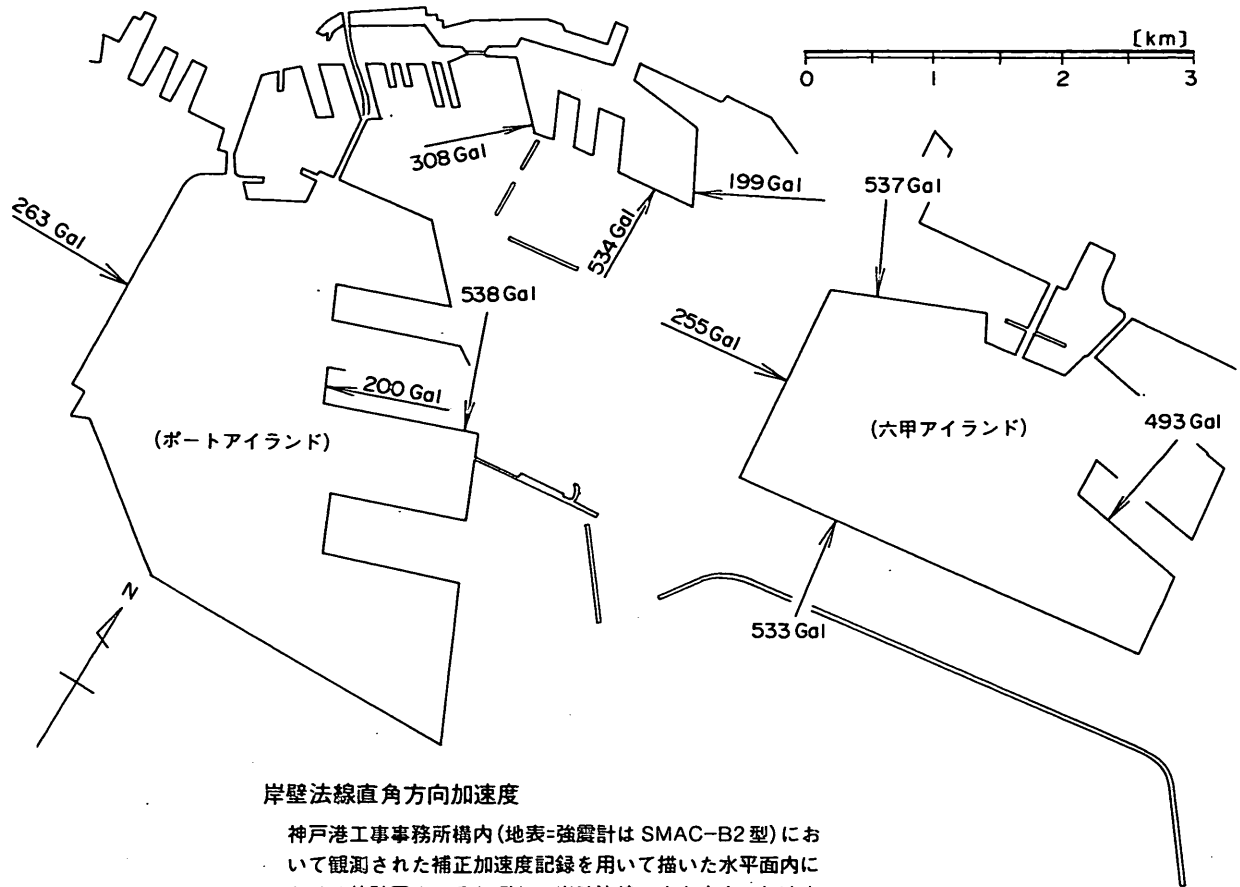


図-17 補正加速度・速度・変位の水平面内の軌跡 (神戸事-S)



岸壁法線直角方向加速度

神戸港工事事務所構内(地表=強震計はSMAC-B2型)において観測された補正加速度記録を用いて描いた水平面内における軌跡図よりそれぞれの岸壁法線の直角方向の加速度を求めたもの。

図-18 岩壁法線方向の加速度(神戸港)

性についての検討が可能となった。ここでは、式(1)~(3)を対象として、今回の地震の条件(気象庁マグニチュード7.2)のもとに、最大加速度と既往の距離減衰式との比較を試みた。

今回の地震で観測された各港の水平最大加速度と震央距離および震源距離の関係を図-26(a),(b)~図-28(a),(b)に示す。図-26には距離減衰式(1)を、図-27には式(2)を、図-28には式(3)の計算結果を併せて示してある。図中にプロットされている最大加速度値は、SMAC EQ加速度((a)に対応)および補正加速度((b)に対応)の水平方向最大値であり、各観測地点の地盤条件等による影響は考慮していない。また、ここで言う震央距離および震源距離は、表-1に示す地震諸元から求められたものであり、2で触れた主破壊域からの距離とは若干異なるものである。この結果によると、今回の地震動においては、式(1)および式(3)の、震源もしくは震央からの距離が100Km以内での適用性が比較的良好いようである(図-26、図-28)。しかし、式(1)(2)(3)とも、震源もしくは震央からの距離が100Kmを越えると、今回の地震動の際に得られた加速度が、既往の距離減衰式より大きな値を示す傾向にあった(図-26、図-27、図-28)。また、今回の地震の場合、SMAC EQ加速度(a)と補正加

速度(b)の大きな差異は認められなかった。

最後に、今回の地震で各強震観測点で得られた地表の水平最大補正加速度と鉛直最大補正加速度の関係を図-29示す。この結果によると、加速度レベルが小さい水平加速度100Gal程度以下の領域では、鉛直/水平加速度の比は1/3~1/5程度であった。一方、これより大きな加速度レベルでは、その比は1/2程度となった。

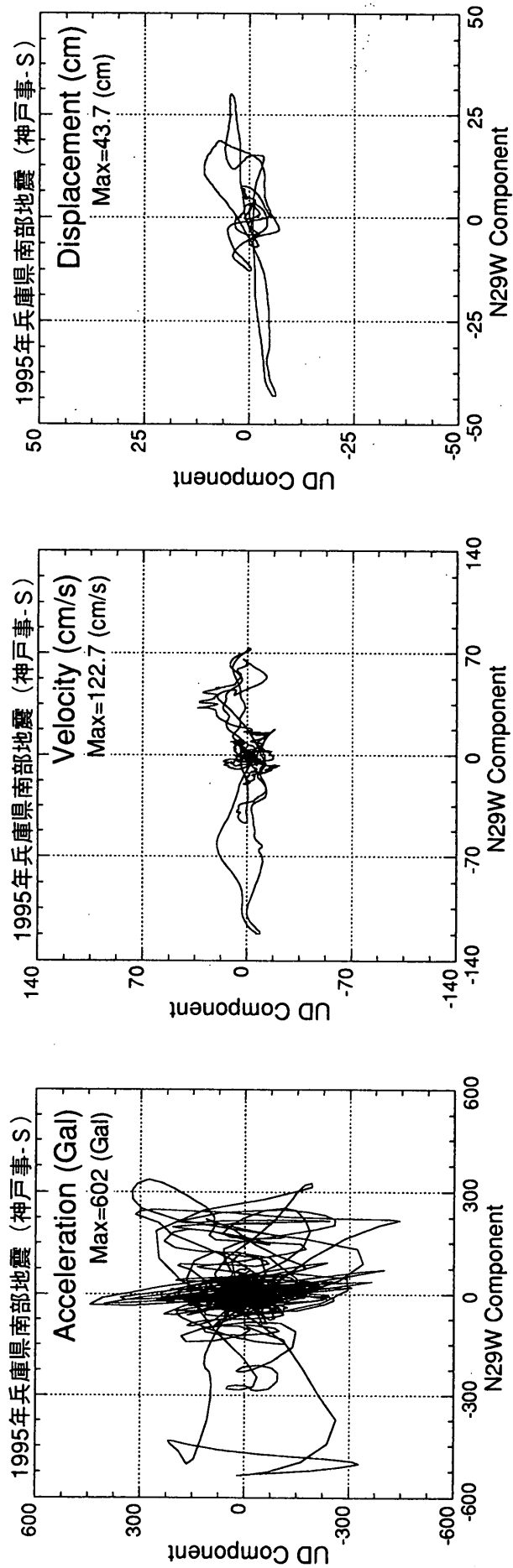


図-19 補正加速度・速度・変位の鉛直面内の軌跡(神戸事-S)

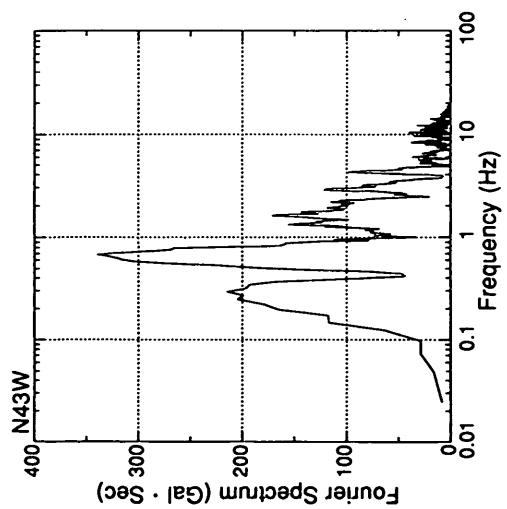
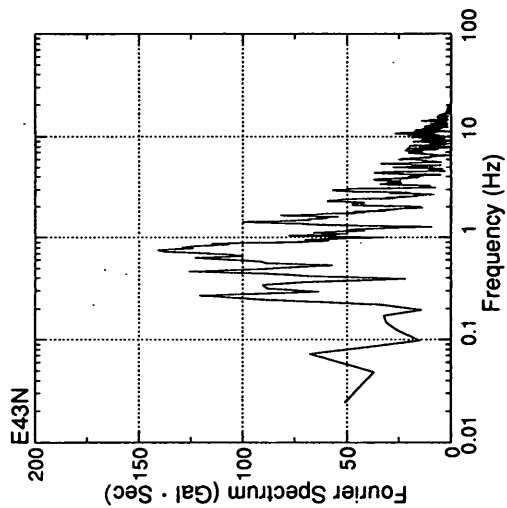
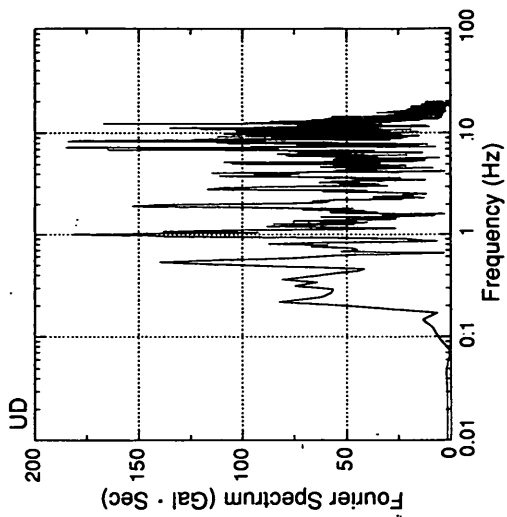


図-20 フーリエスペクトル (神戸事-S)

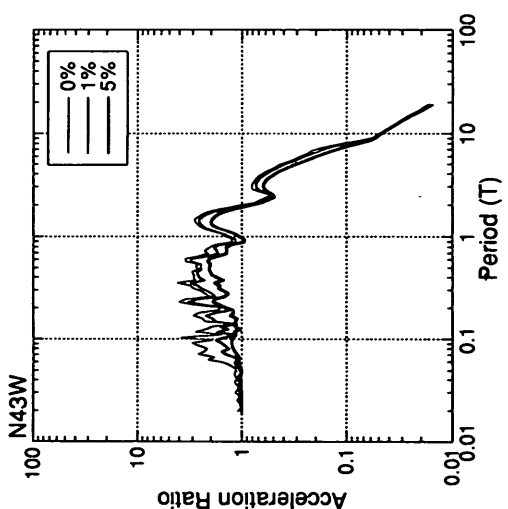
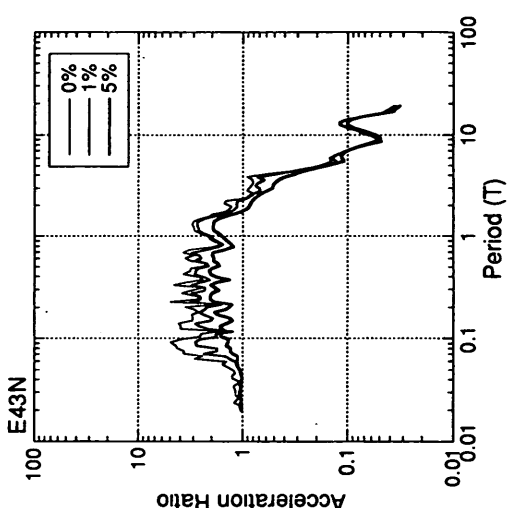
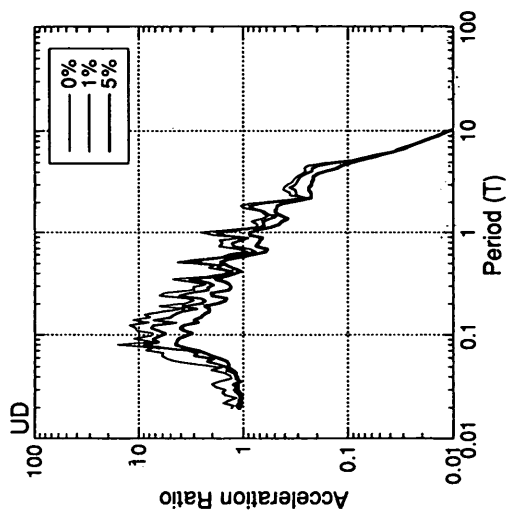


図-21 加速度応答比スペクトル (神戸事-S)

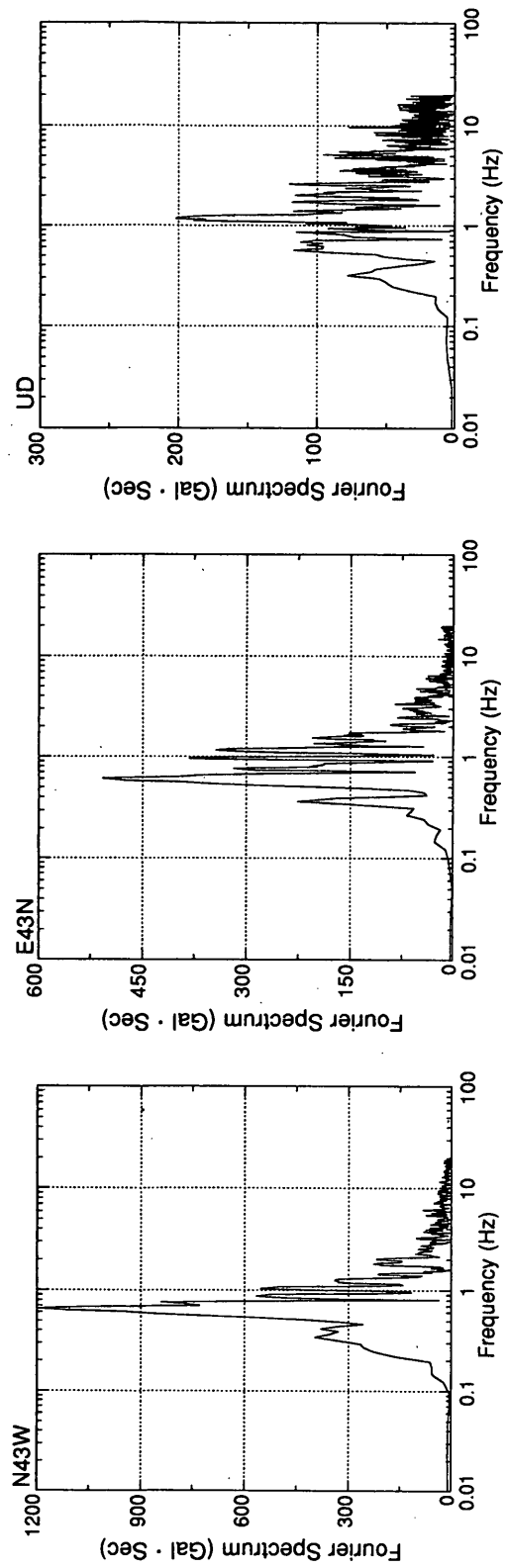


図-22 フーリエスペクトル (神戸第八-G)

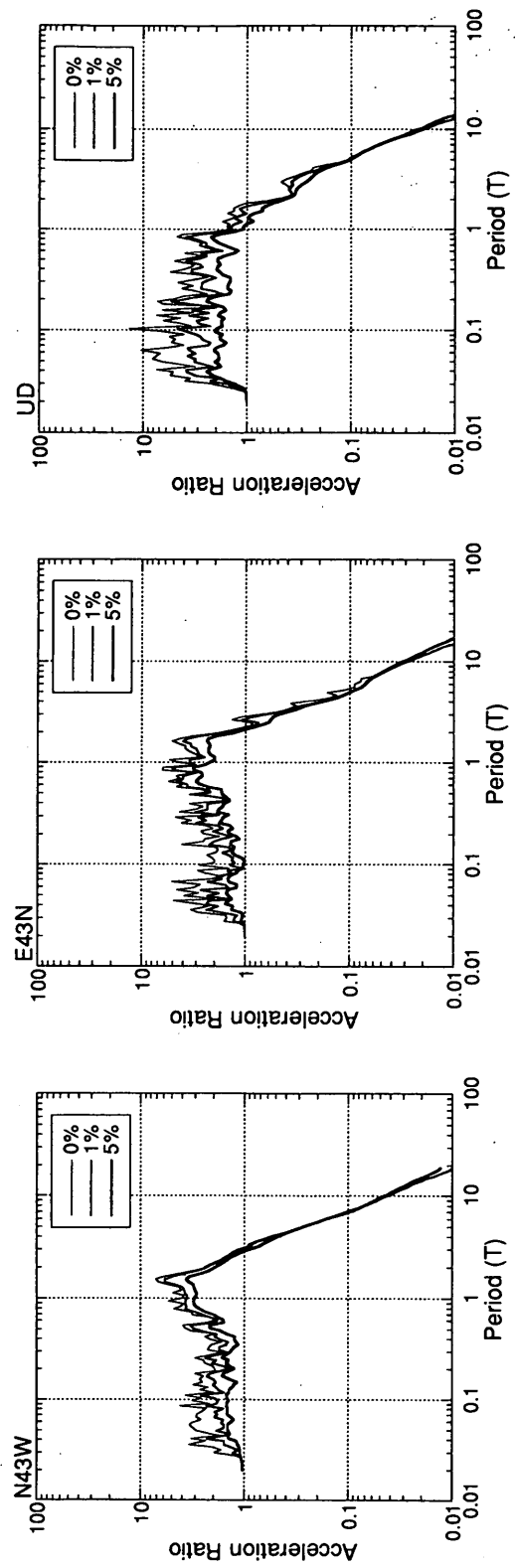


図-23 加速度応答比スペクトル (神戸第八-G)

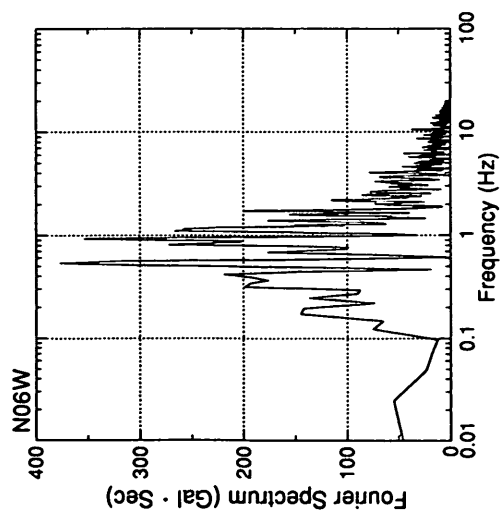
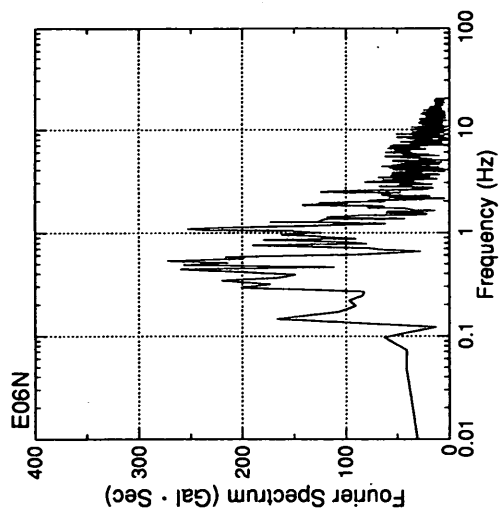
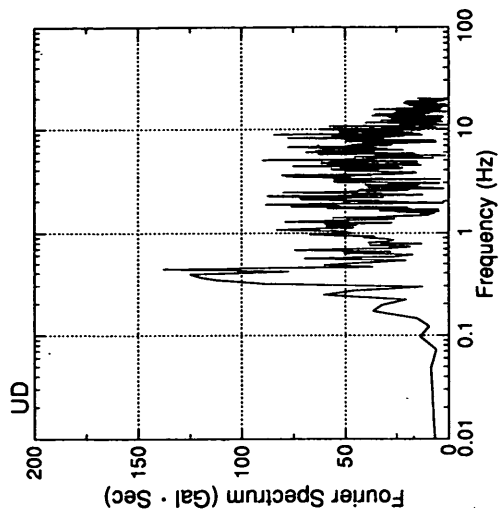


図-24 フーリエスペクトル (尾崎-G)

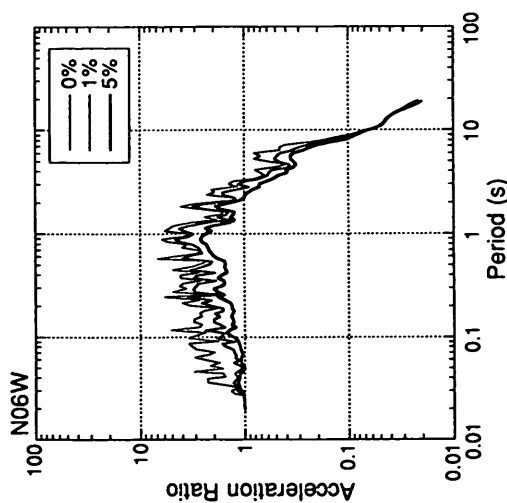
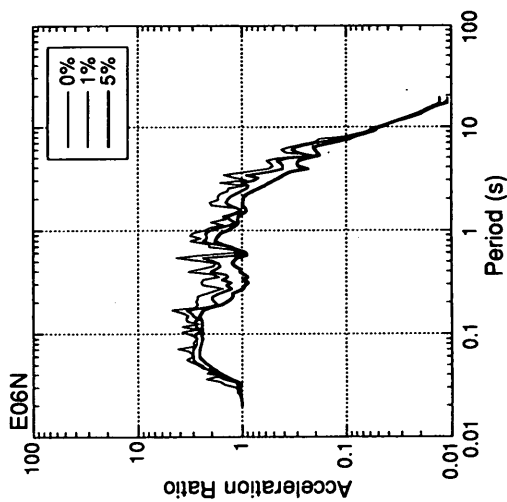
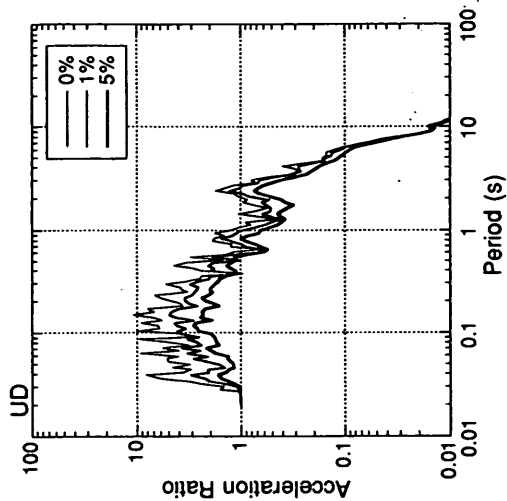


図-25 加速度応答比スペクトル (尾崎-G)

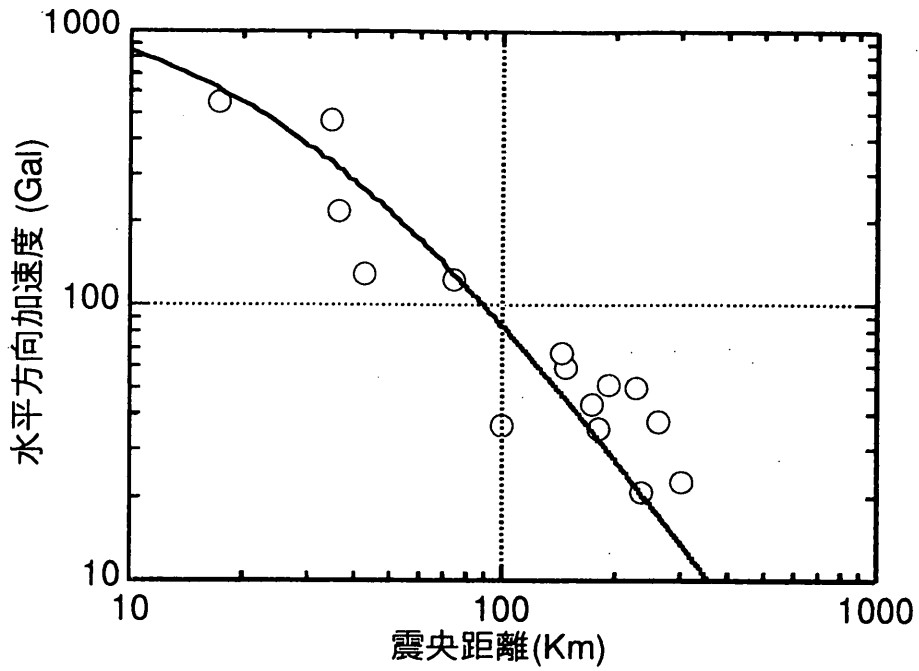


図-26 (a) 震央距離と水平最大加速度の関係
(SMAC加速度, 図中のラインは距離減衰式 (3))

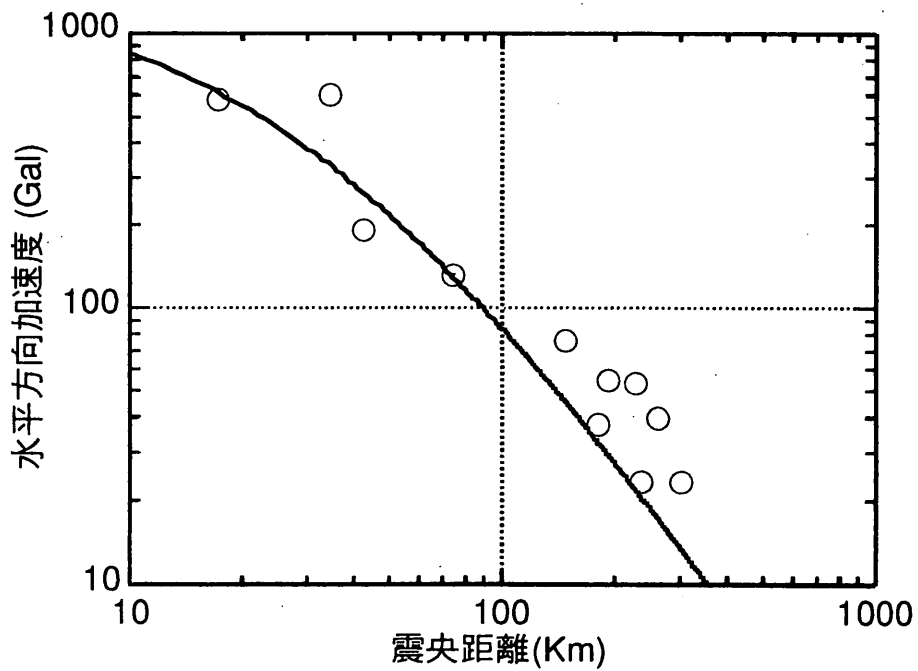


図-26 (b) 震央距離と水平最大加速度の関係
(補正加速度, 図中のラインは距離減衰式 (3))

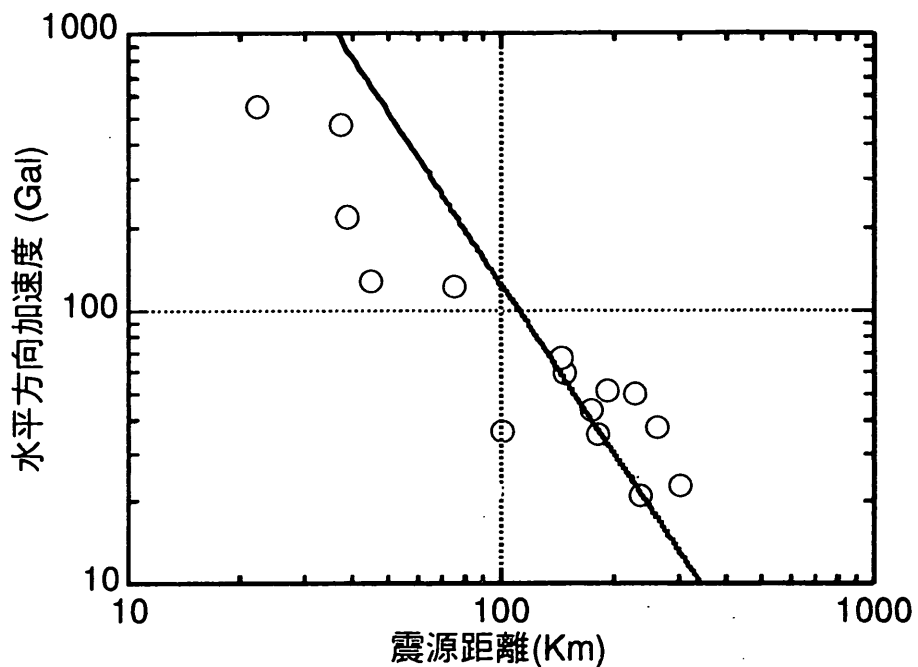


図-27 (a) 震源距離と水平最大加速度の関係
(SMAC加速度, 図中のラインは距離減衰式 (2))

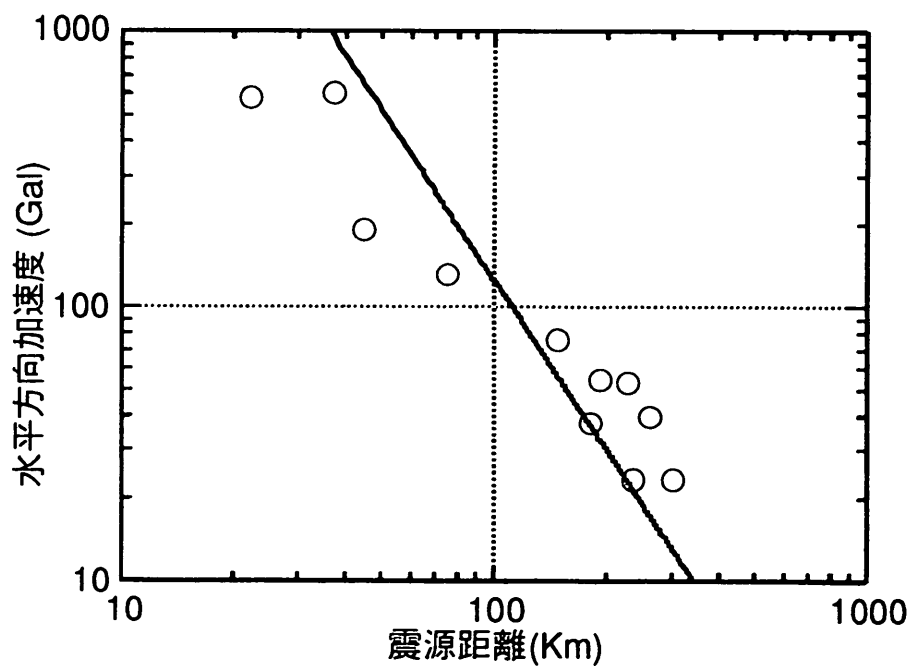


図-27 (b) 震源距離と水平最大加速度の関係
(補正加速度, 図中のラインは距離減衰式 (2))

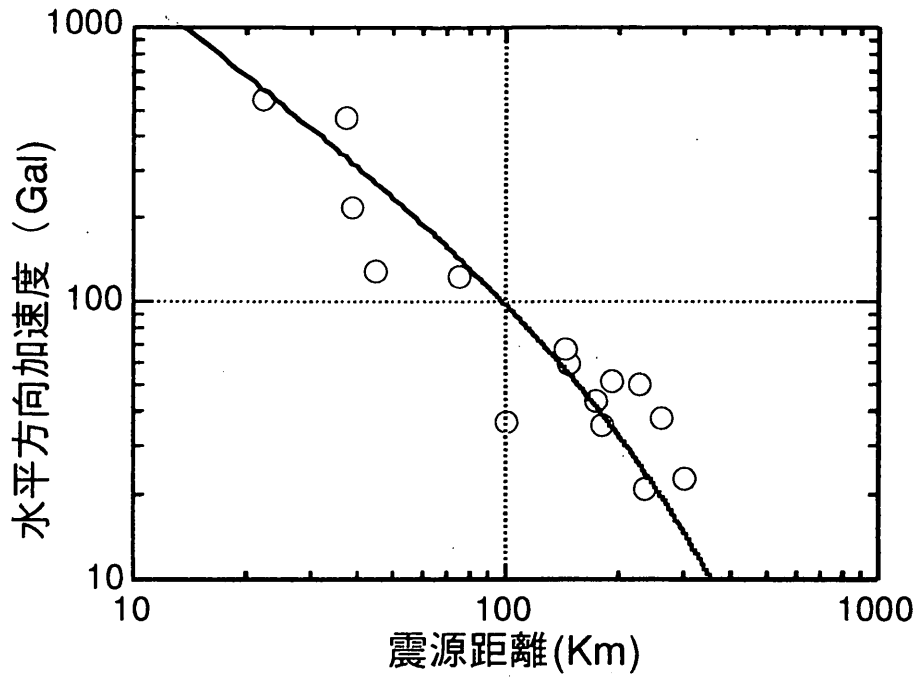


図-28 (a) 震源距離と水平最大加速度の関係
(SMAC加速度, 図中のラインは距離減衰式 (1))

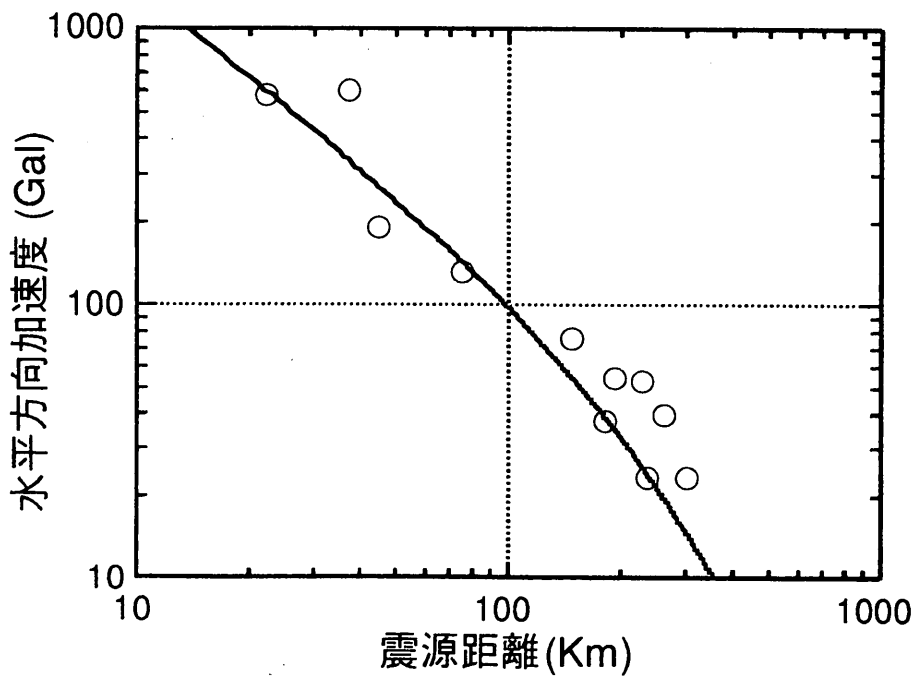


図-28 (b) 震源距離と水平最大加速度の関係
(補正加速度, 図中のラインは距離減衰式 (1))

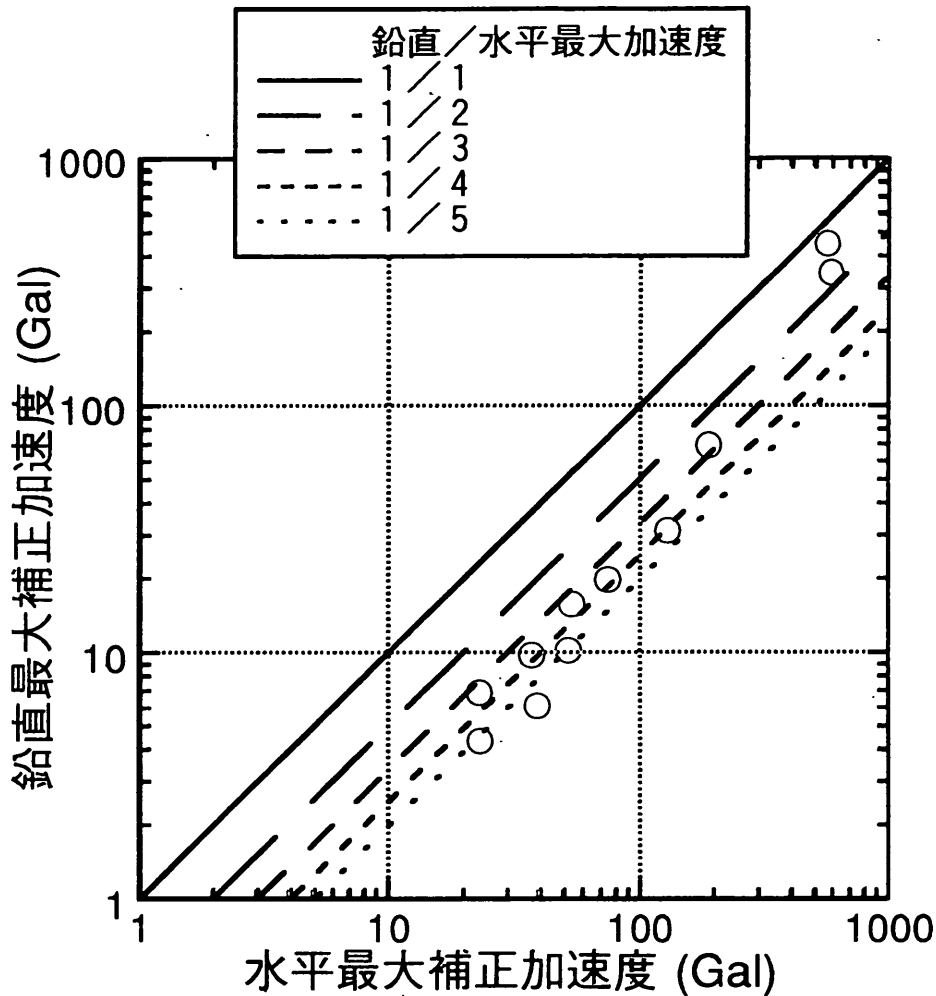


図-29 水平方向最大加速度と鉛直方向最大加速度の関係

4 近年の大地震との比較

この章では、今回の地震動の際に神戸港工務所（神戸事-S）で得られた記録に併せて、1993年釧路沖地震の際に釧路港（釧路-G）で得られた記録および1994年三陸はるか沖地震の際に八戸港（八戸事-S）で得られた記録を示し、これらの3地震の比較を行う。以下では、各記録を、兵庫県南部地震、釧路沖地震、三陸はるか沖地震とよぶことにする。

1993年釧路沖地震は、1993年1月15日20時06分に釧路沖を震源とするマグニチュード7.8の地震であった。各地の震度は釧路で震度VIの烈震、浦河、帯広、広尾、八戸で震度Vの強震であり、この地震により北海道東部太平洋岸の釧路港、十勝港等で大きな被害が発生した。地震諸元を表-5に示す。本地震の際には釧路港のERS-G型の強震計が作動し、強震記録が得られた。釧路港の強震観測点における土質柱状図を図-30に示す。なお、1993年釧路沖地震の港湾地域の施設被害に関しては、文献11)に、釧路-Gの強震記録に関しては文献12)に詳しい。

1994年三陸はるか沖地震は、1994年12月28日21時19分に八戸沖を震源とするマグニチュード7.5の地震であった。各地の震度は、八戸で震度VIの烈震、盛岡、青森、むつで震度Vの強震であり、この地震により港湾地域では八戸港、青森港、むつ小川原港で被害が発生した。地震諸元を表-6に示す。地震の際には八戸港のSMAC-B2型の強震計が作動し、強震記録が得られた。八戸港の強震観測点における土質柱状図を図-31に示す。

4.1 強震記録の比較

神戸事-S（1995年兵庫県南部地震）で得られた補正加速度の時刻歴を釧路-G（1993年釧路沖地震）の記録と八戸事-S（1994年三陸はるか沖地震）の記録とともに図-32(a),(b),(c)に示す。(a)は卓越方向、(b)は非卓越方向、(c)は鉛直方向の時刻歴であり、上から順に釧路沖地震、三陸はるか沖地震、兵庫県南部地震の記録を示す。なお、ここで言う卓越方向とは、水平面内の軌跡から定めた卓越する振動方向とし、非卓越方向はその卓越方向に直角な方向とした。これにより、3地震の地震動の比較を行う。これらの3地震の卓越・非卓越方向の角度の一覧を表-7に示す。

表-5 1993年釧路沖地震の地震緒元

名称	平成5年(1993年)釧路沖地震
発震月日	1993年1月15日
時刻	20時06分
震源	
震央位置	釧路沖
北緯	42°54'
東経	144°22'
深さ	103km
マグニチュード	7.8(気象庁)

表-6 1994年三陸はるか沖地震の地震緒元

名称	平成6年(1994年)三陸はるか沖地震
発震月日	1994年12月28日
時刻	21時19分
震源	
震央位置	三陸はるか沖
北緯	40°27'
東経	143°43'
深さ	ごく浅い
マグニチュード	7.5(気象庁)

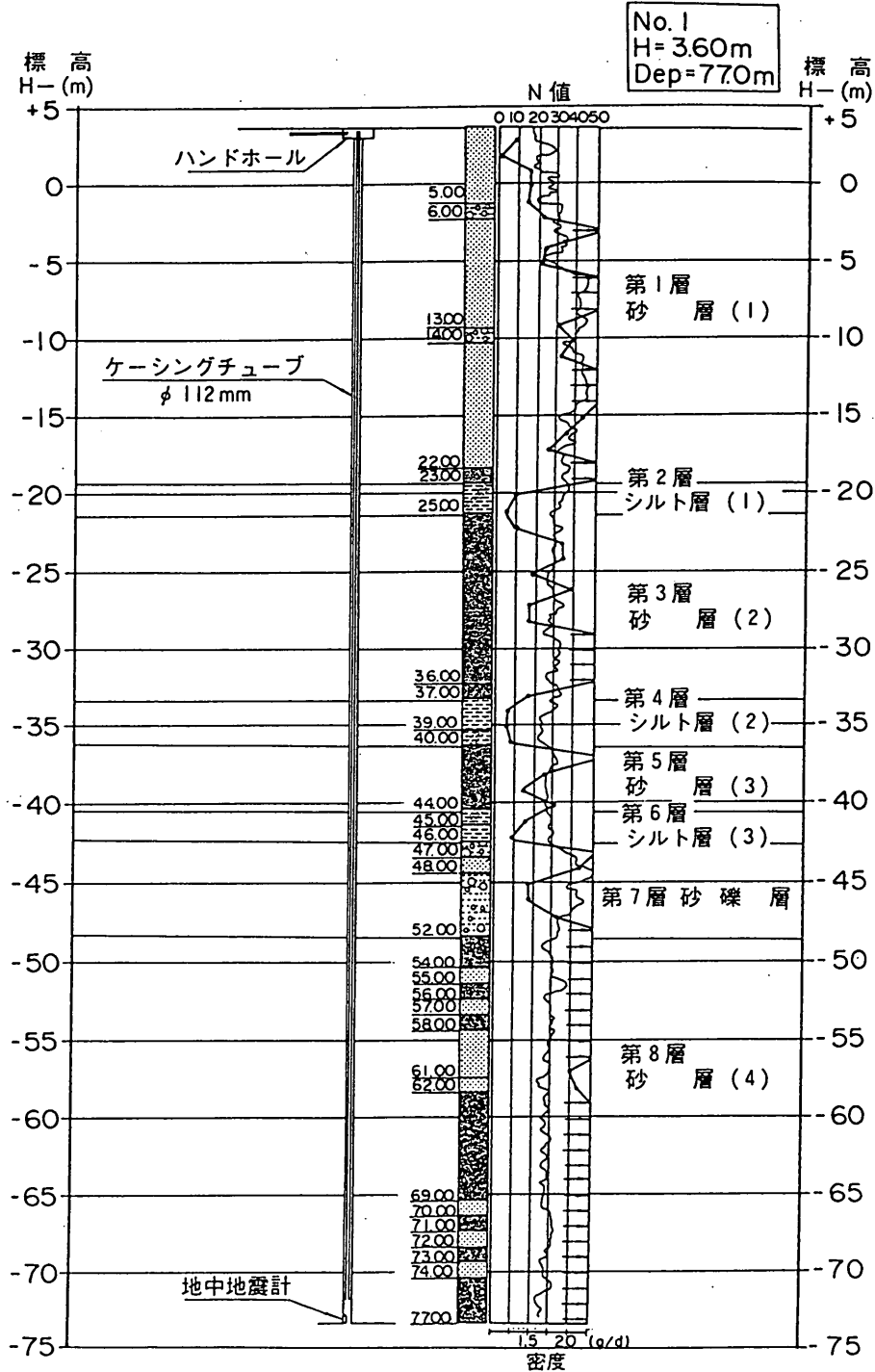


図-30 釧路-Gの強震観測点における土質柱状図

土質柱状図

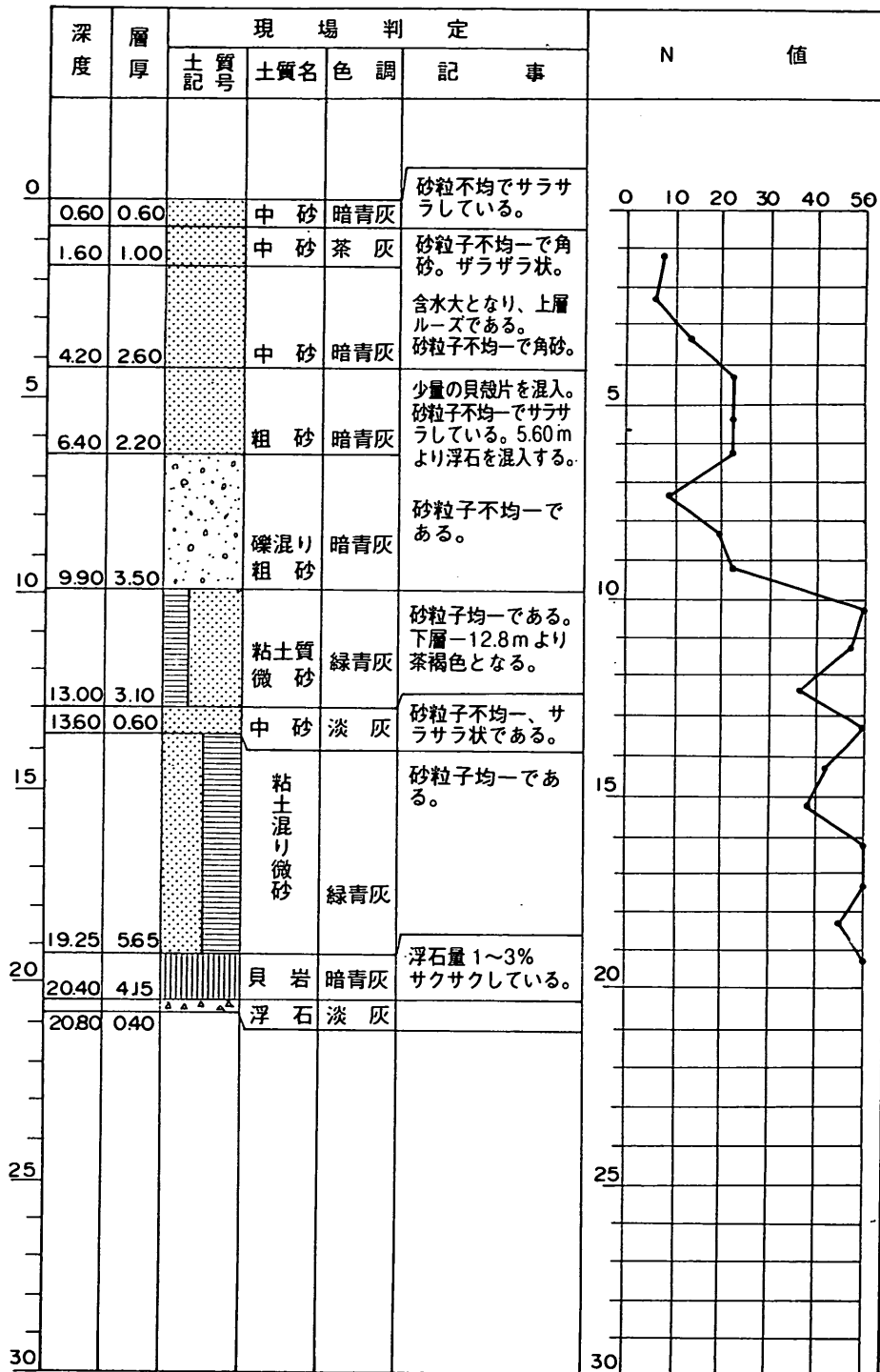


図-31 八戸事-Sの強震観測点における土質柱状図

水平最大補正加速度は、いずれの地震も450Galを越える大きな地震動であった。水平最大補正加速度は、三陸はるか沖地震が最大であり(約751Gal)、これに兵庫県南部地震(約538Gal:但し、この成分は振り切れのため、注意が必要である。他機関の記録から推定すると約600~800Gal程度の加速度が生じた可能性がある)、釧路沖地震が続く(約468Gal)。三陸はるか沖地震においては、約751Galという大きな加速度が生じたが、港湾施設の被

害としては他の2地震に比較して軽微に留まった。一方、SMAC-B2型の計器特性に合わせた最大加速度でみると、水平最大加速度は同じく1994年三陸はるか沖地震が最大であり(約556Gal)、これに兵庫県南部地震(約521Gal:但し、この成分は振り切れのため、前に同じく注意が必要である)、釧路沖地震が続く(約342Gal)。表-8に3地震の補正加速度、SMAC加速度の最大値の一覧を示す。なお、三陸はるか沖地震の際の地震動記録および港湾施

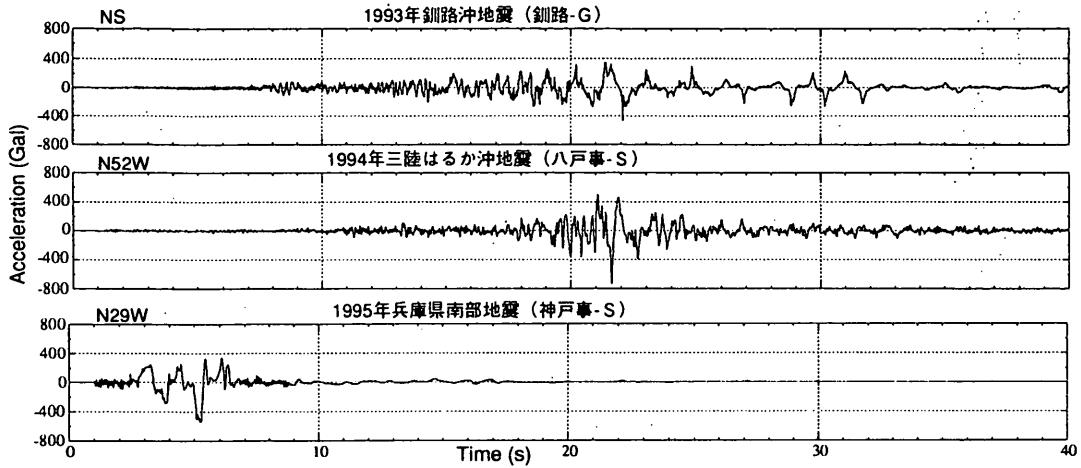


図-32 (a) 補正加速度時刻歴 (卓越方向) (上から順に鉏路, 八戸, 神戸の記録を示す)

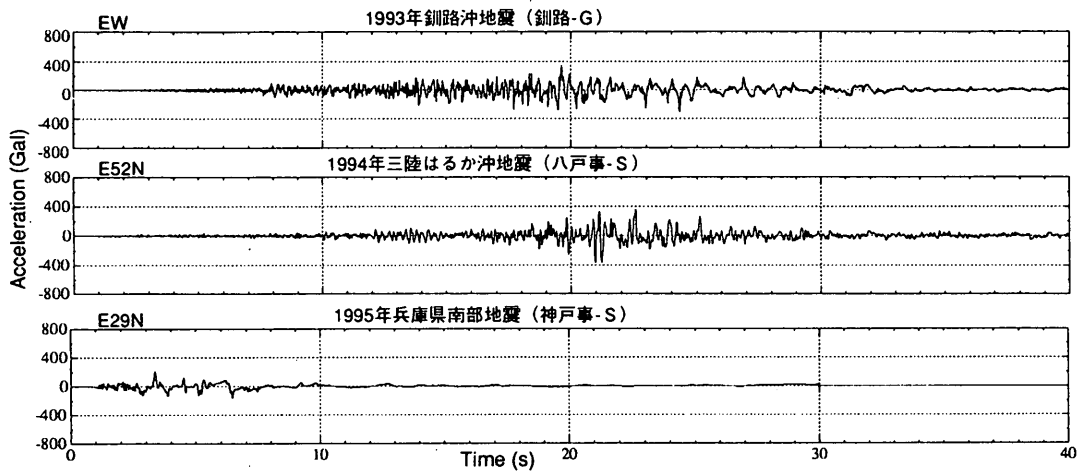


図-32 (b) 補正加速度時刻歴 (非卓越方向) (上から順に鉏路, 八戸, 神戸の記録を示す)

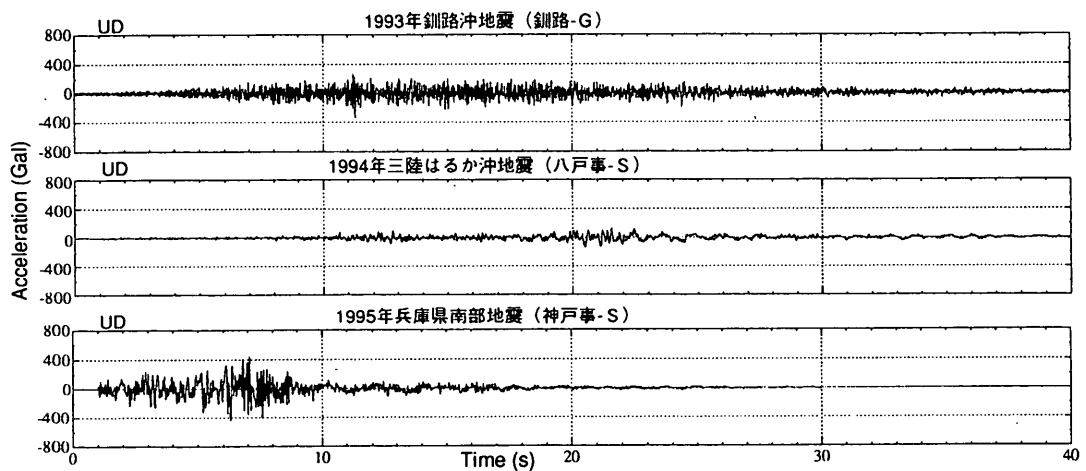


図-32(c) 補正加速度時刻歴 (鉛直方向) (上から順に鉏路, 八戸, 神戸の記録を示す)

表-7 卓越・非卓越方向の角度一覧

地震名	卓越方向	非卓越方向
1993年釧路沖地震 (釧路-G)	N S (南北)	E W (東西)
1994年三陸はるか沖地震 (八戸事-S)	N 5 2 W (北西~南東)	E 5 2 N (北東~南西)
1995年兵庫県南部地震 (神戸事-S)	N 2 9 W (北北西~南南東)	E 2 9 N (東北東~西南西)

設被害の詳細については別途報告される予定である。

鉛直最大補正加速度は、兵庫県南部地震において約446Galという大きな加速度を記録した。これに、釧路沖地震(約342Gal)、三陸はるか沖地震(約132Gal)が続く。また、SMAC加速度と比較すると、兵庫県南部地震(約283Gal)、三陸はるか沖地震(約107Gal)、釧路沖地震(約91Gal)の順であった(表-8)。鉛直方向の加速度が大きいことが、今回の地震動の特徴であった。

兵庫県南部地震の水平方向加速度の波形の特徴としては、他の2地震に比べて、継続時間が約10秒と短いこと、地震動の振幅がある時刻を境に急激に小さくなっていること等が挙げられる。

補正加速度記録を積分して得られた、速度時刻歴を図-33(a),(b),(c)に、変位時刻歴を図-34(a),(b),(c)に示す。(a)は卓越方向、(b)は非卓越方向、(c)は鉛直方向の時刻歴であり、上から順に釧路-G、八戸事-S、神戸事-Sの記録を示す。なお、釧路沖地震および三陸はるか沖地震の積分には可変フィルターを、兵庫県南部地震には固定フィルターを用いて積分を行っている。

水平最大速度・変位の大きさは、兵庫県南部地震(122cm/s、43.3cm)、釧路沖地震(63.0cm/s、19.5cm)、三陸はるか沖地震(50.5cm/s、16.3cm)の順であった。水平速度および変位の最大値は、兵庫県南部地震の値が非常に大きく、三陸はるか沖地震・釧路沖

地震の約2~3倍以上の値を有した。

これに対し、鉛直最大速度・変位の大きさは、兵庫県南部地震(33.8cm/s、10.9cm)、三陸はるか沖地震(11.7cm/s、3.1cm)、釧路沖地震(7.2cm/s、1.0cm)の順となっており、三陸はるか沖地震・釧路沖地震が入れ替る結果となった。兵庫県南部地震の際の鉛直方向の速度・変位の最大値が、他の2地震の最大値を大きく上回る結果となった。

次に、各港で得られた、記録の補正加速度、速度、変位の水平面内の軌跡を図-35に示す。兵庫県南部地震の場合、加速度・速度・変位の全てにおいて明確な方向性がみられた(北北西~南南東方向)。この卓越振動方向は、推定されている地震断層のほぼ直交方向にあたる。他の2地震の場合、兵庫県南部地震と比較すると、加速度の方向性は顕著ではないが、速度と変位に関しては明確な方向性を持った。

各港で得られた、記録の補正加速度、速度、変位の鉛直面内の軌跡を図-36に示す。水平方向の加速度は、卓越方向成分の記録を用いた。この結果によると、兵庫県南部地震と釧路沖地震の場合、鉛直方向の加速度は水平方向とほぼ同じレベルであるが、速度・変位に関してみると、三陸はるか沖地震と同様に、鉛直方向の速度・変位の最大値は水平方向のそれに比較して非常に小さいことがわかる。また、兵庫県南部地震においては、鉛直方向と水平方向の最大加速度の発生時刻は異なっていた。

4.2 応答スペクトルの比較

神戸港(神戸事-S)の地表で得られた補正加速度記録から求めた絶対加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を、1993年釧路沖地震の際に釧路港で得られた記録(釧路-G)および1994年三陸はるか沖地震の際に八戸港で得られた記録(八戸事-S)より得られた応答スペクトルとともに図-37に示す。左から卓越方向成分、非卓越方向成分、鉛直成分を示す。卓越方向の絶対加速

表-8 最大加速度・速度・変位の一覧

地震名	成分		鉛直最大速度 (cm/s)	水平最大速度 (cm/s)	鉛直最大変位 (cm)	水平最大変位 (cm)
	鉛直最大補正加速度 (Gal)	水平最大補正加速度 (Gal)				
1993年釧路沖地震 (釧路-G、F-507)	-342 (-91) ※	468 (342) ※	7.2	63.0	1.0	19.5
1994年三陸はるか沖地震 (八戸事-S、S-2597)	-132 (-107) ※	751 (556) ※	11.7	50.5	-3.1	16.3
1995年兵庫県南部地震 (神戸事-S、S-2615)	446 (-283) ※	538 (521) ※	33.8	122.4	10.9	43.3

※水平最大加速度および鉛直最大加速度の()内の値は、SMAC記録の最大値を示す。

注1: 鉛直方向は、上向きを正(+)、下向きを負(-)として表す。

注2: 釧路-G・八戸事-Sは可変フィルター、神戸事-Sは固定フィルターを用いて積分を行っている。

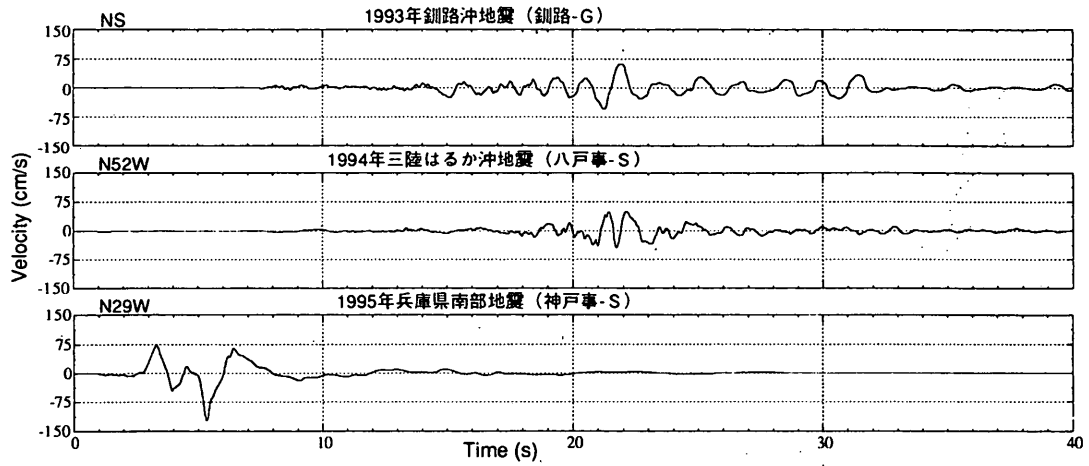


図-33 (a) 速度時刻歴 (卓越方向) (上から順に、釧路、八戸、神戸の記録を示す)

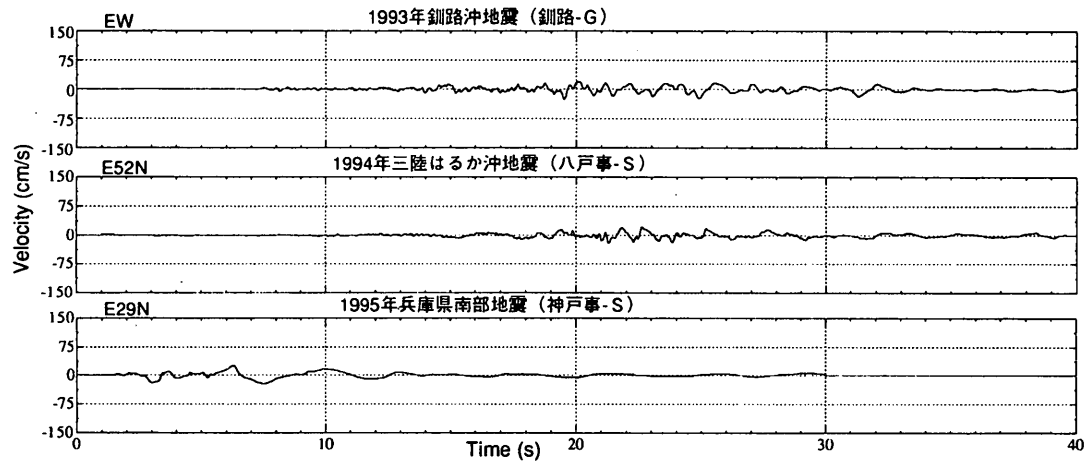


図-33 (b) 速度時刻歴 (非卓越方向) (上から順に釧路、八戸、神戸の記録を示す)

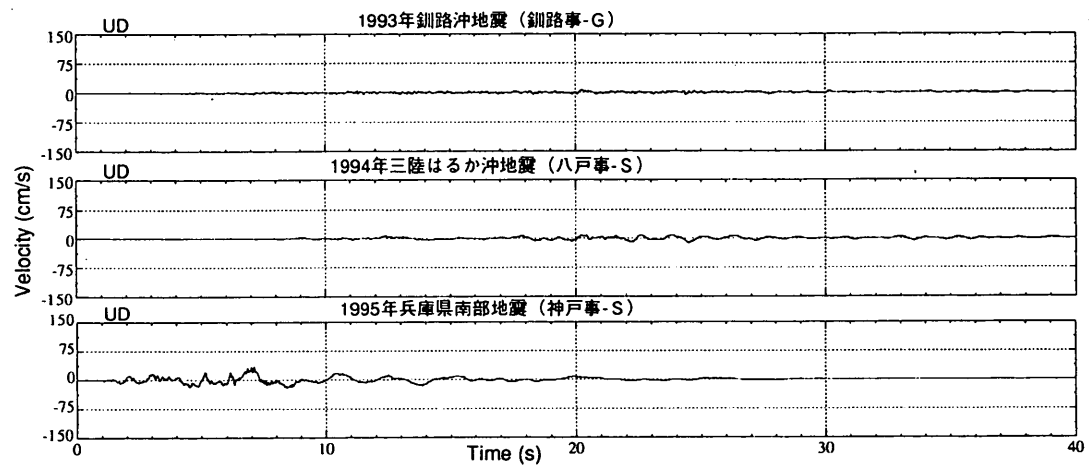


図-33 (c) 速度時刻歴 (鉛直方向) (上から順に釧路、八戸、神戸の記録を示す)

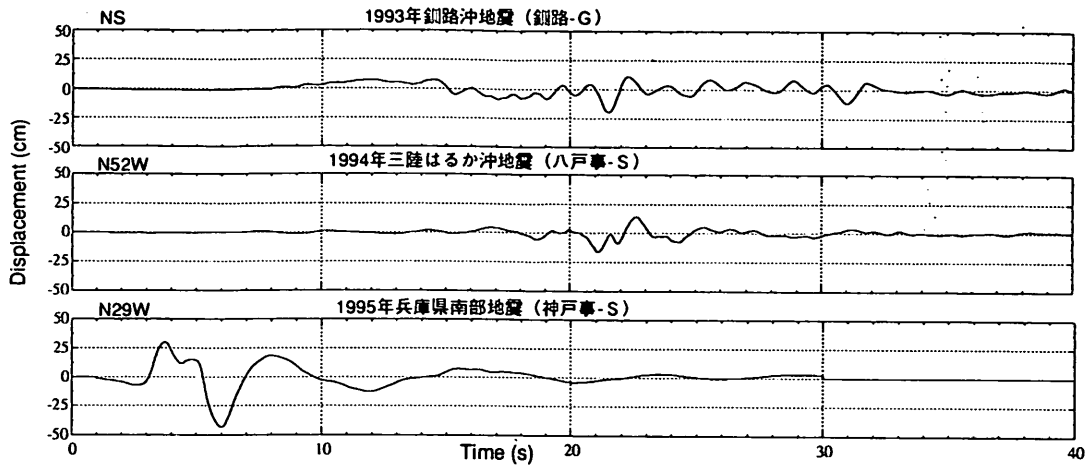


図-34 (a) 変位時刻歴 (卓越方向) (上から順に釧路, 八戸, 神戸の記録を示す)

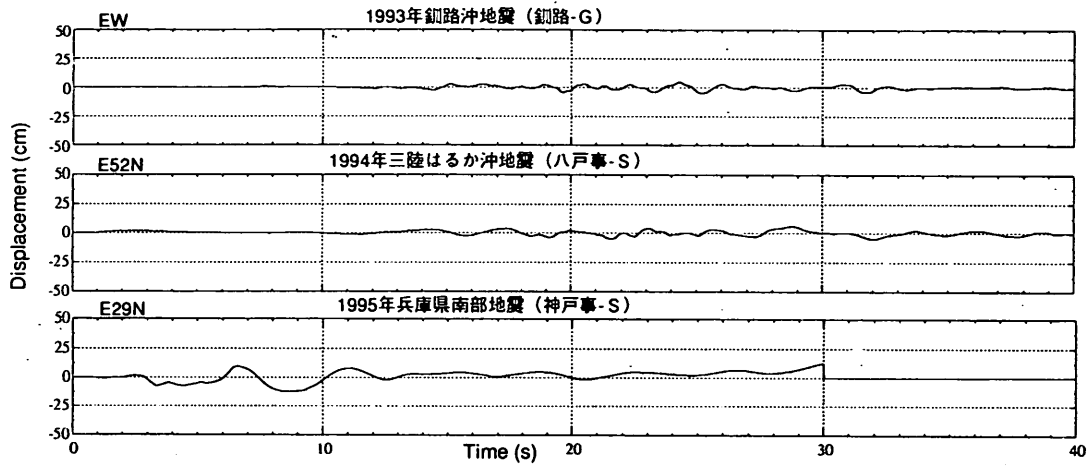


図-34 (b) 変位時刻歴 (非卓越方向) (上から順に釧路, 八戸, 神戸の記録を示す)

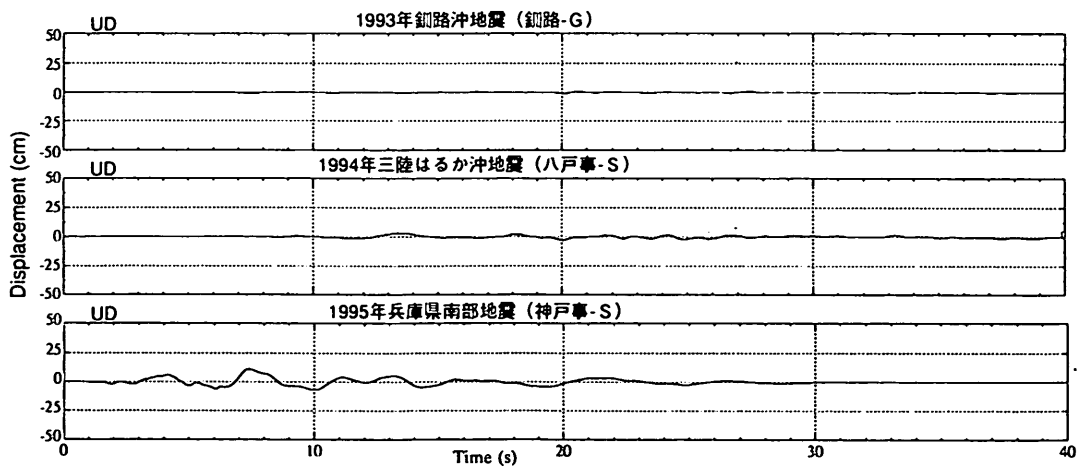


図-34 (c) 変位時刻歴 (鉛直方向) (上から順に釧路, 八戸, 神戸の記録を示す)

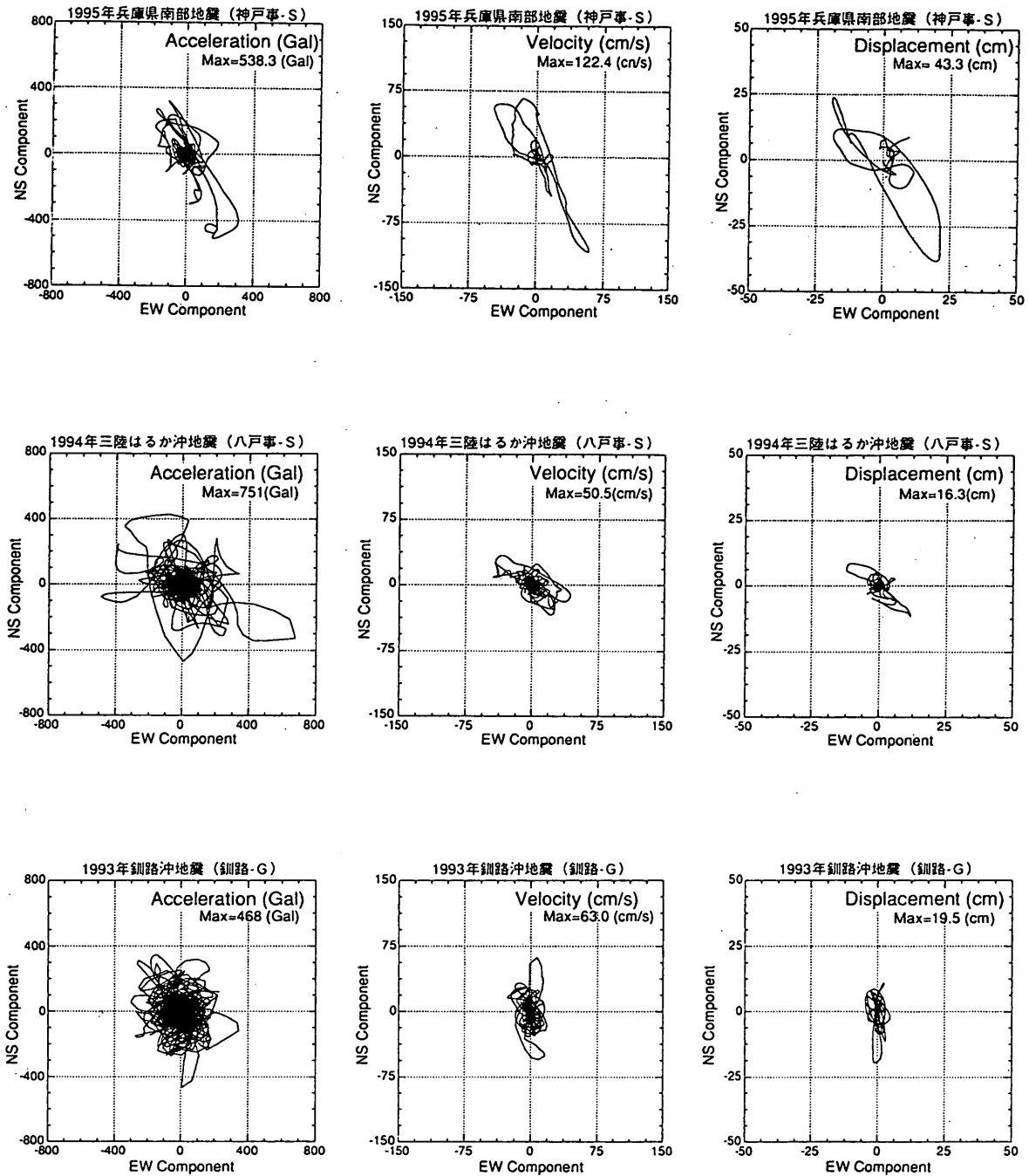


図-35 補正加速度・速度・変位の水平面内の軌跡
(上から順に神戸、八戸、釧路の記録を示す)

度応答スペクトルの比較によれば、周期約0.4秒より短周期側では、三陸はるか沖地震の加速度応答値が最も大きく、周期約1.0秒より長周期側では兵庫県南部地震の応答値が最大となっている。神戸事-Sの地震動の特徴としては、長周期領域における絶対加速度応答が大きいことが挙げられる。また、鉛直動の絶対加速度応答は、ほぼ全ての領域で兵庫県南部地震の応答加速度が他の2地震より大きくなっている。

神戸事-Sの補正加速度記録から求められた加速度比応答スペクトル(減衰定数5%)を、釧路-Gの記録お

よび八戸事-Sの記録より求めた結果とともに図-38に示す。ここで言う加速度比応答スペクトルとは、入力最大加速度に対する絶対加速度応答の比として表示している。左から卓越方向成分、非卓越方向成分、鉛直成分を示している。水平方向の加速度比応答スペクトルによると、周期約1.0秒以上の長周領域では兵庫県南部地震の応答倍率が最も大きい結果となった。鉛直方向の加速度比応答スペクトルによると、3地震の加速度応答の最大となる周期は異なり、短周期から順に、釧路沖地震(約0.04秒)、兵庫県南部地震(約0.08秒)、三陸はるか沖地

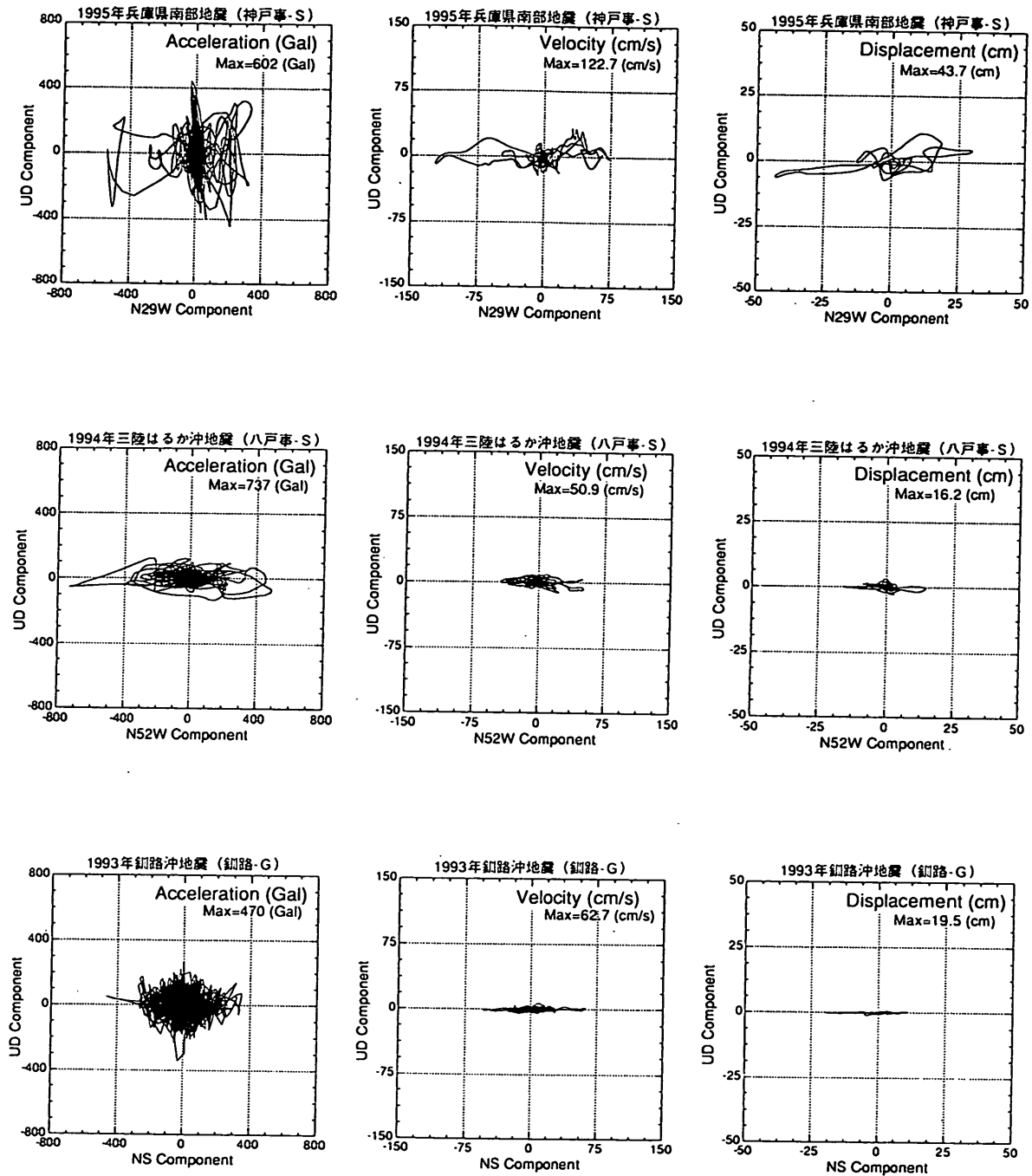


図-36 補正加速度・速度・変位の鉛直面内の軌跡
(上から順に神戸, 八戸, 釧路の記録を示す)

震(約0.2秒)となった。

神戸事-Sの補正加速度記録から求められた疑似速度応答スペクトル(減衰定数5%)を, 釧路-Gの記録および八戸事-Sの記録より得られた応答スペクトルとともに図-39に示す。左から卓越方向成分, 非卓越方向成分, 上下成分を示している。卓越方向の疑似速度応答スペクトルより, 周期1.0秒程度より短周期側では3地震の差異は小さいが, 周期約1.0秒より長周期側では兵庫県南部地震の応答速度が最も大きくなる結果となった。ま

た, 鉛直方向の疑似速度応答は, ほぼ全ての周期帯において兵庫県南部地震の値が最も大きい結果となった。

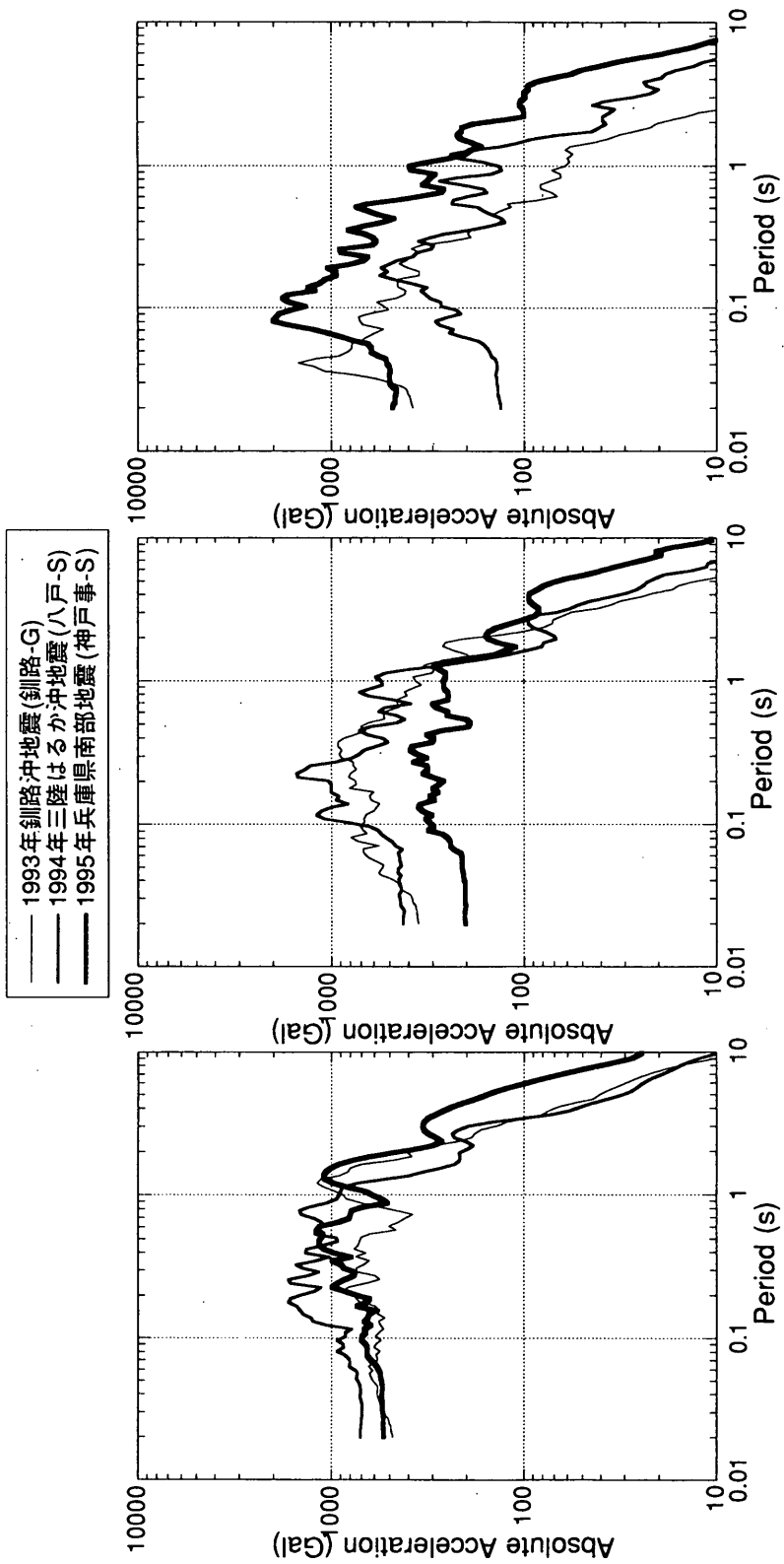


図-37 絶対加速度応答スペクトル (左から順に卓越・非卓越・上下方向)

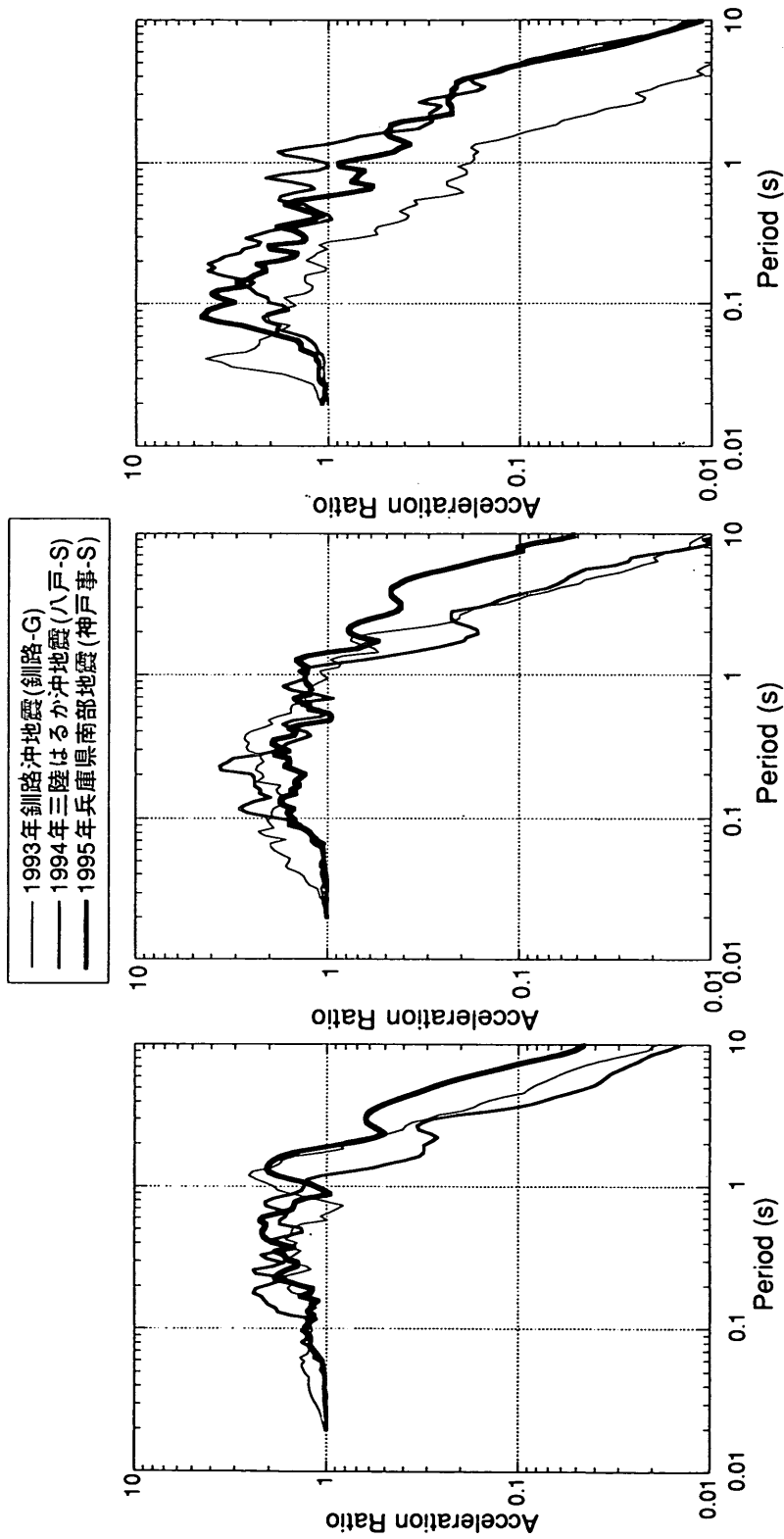


図-38 加速度応答比スペクトル (左から順に卓越・非卓越・上下方向)

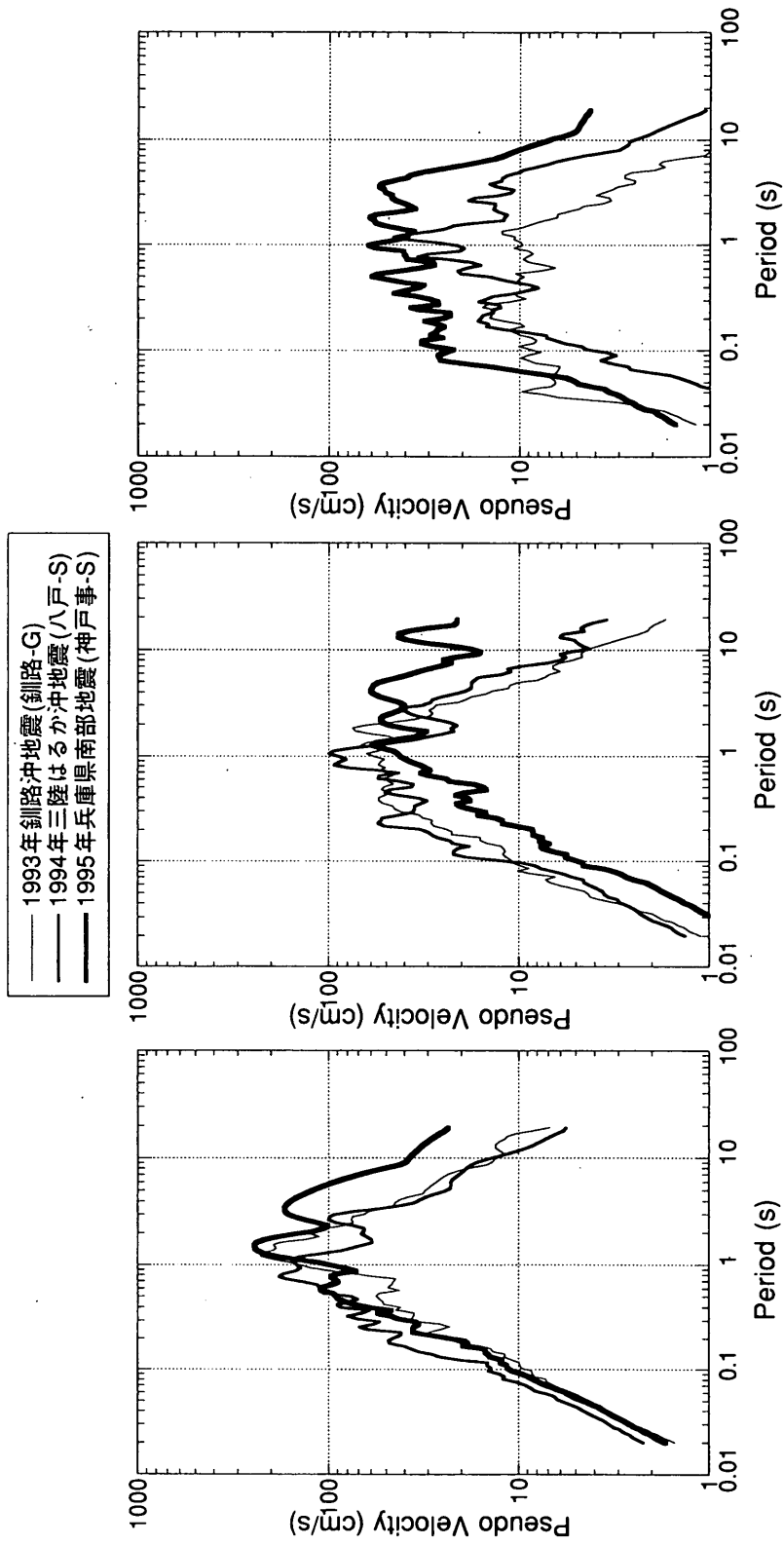


図-39 疑似速度応答スペクトル (左から順に卓越・非卓越・上下方向)

5. まとめ

今回の地震は、1995年1月17日5時46分、兵庫県南部の明石海峡付近を震源とするマグニチュード7.2の地震であり、気象庁により「平成7年（1995年）兵庫県南部地震」と命名された。この地震により、神戸市や淡路島の一部では、気象庁震度Ⅶの激震を記録した。

港湾地域強震観測網では、神戸港を中心とする16港20地点において強震計が作動し、11港12地点でデジタルデータとしての加速度記録が得られた。本資料では、震源に近い神戸港工事事務所（神戸事-S）、神戸港第八突堤（神戸第8-G）、尼崎港（尼崎-G）で得られた記録より求めた加速度・速度・変位の時刻歴およびフーリエスペクトル、加速度応答スペクトル等を示した。また、近年の大地震（1993年釧路沖地震および1994年三陸はるか沖地震）との比較を行うことにより、今回の地震動の特徴を示した。以上の結果により、下に示す事実が判明した。

- (1) 神戸港の地表においては、SMAC-B2型強震計により記録が得られ、その観測記録（未補正記録）の最大値は、502Gal（N43W）、205Gal（E43N）、283Gal（UD）であった。また、計器特性補正後の最大加速度は525Gal（N43W）、230Gal（E43N）、446Gal（UD）であった。強い水平動とともに、強い上下動を受けたことが、今回の地震動の特徴と見られる。但し、強震計により計測されたN43W成分は振り切れており、また本観測地点では液状化が認められた。従って、本記録の取り扱いは十分な注意が必要である。
- (2) 神戸港の水平方向の加速度波形の特徴は、継続時間が約10秒と短いこと、またその間に周期1~2秒程度の振幅の大きい波が2~3波含まれていること、さらにある時刻を境に加速度振幅が急激に小さくなることが挙げられる。
- (3) 神戸港における水平方向の地震動は、加速度・速度・変位のいかなを問わず、全て明確な方向性を有していた（北北西~南南東方向）。この振動方向は、推定されている地震断層に対して直角方向にあたった。また、鉛直面内の軌跡より、水平方向と鉛直方向の最大加速度の発生時刻は異なることが示された。
- (4) 今回の地震で各港で観測された水平最大加速度と震央距離および震源距離の関係より以下のことが明らかになった。

既往の距離減衰式(1)と(3)（3.4を参照）は、今回の地震において、震源もしくは震央からの距離が100Km以内での適用性が比較的良好いよう

であった。しかし、式(1)(2)(3)（3.4を参照）とも、震源もしくは震央からの距離が100Kmを越えると、今回の地震動の際に得られた加速度が、既往の距離減衰式よりも大きな値を示す傾向にあった。また、今回の地震の場合、SMAC-EQ加速度と補正加速度の大きな差異は認められなかった。

- (5) 各強震観測点で得られた地表の水平最大補正加速度と鉛直最大補正加速度の関係より、今回の地震では、加速度レベルが小さい水平加速度100Gal程度以下の領域では、鉛直/水平加速度の比は1/3~1/5程度であり、これより大きな加速度レベルでは、その比は1/2程度となることがわかった。
- (6) 神戸港における地震動の水平成分の卓越振動数は約0.8Hzであった。これは、現在港湾地域の設計入力地震動に用いられている1968年十勝沖地震（マグニチュード 7.9）の八戸港における強震動の卓越振動数（約1Hz）および1978年宮城沖地震（マグニチュード 7.4）の大船渡港における強震動の卓越振動数（約2.4Hz）より小さい値であった。
- (7) 本観測記録（神戸とよぶ）を、1993年釧路沖地震の際に釧路港で得られた記録（釧路とよぶ）、および1994年三陸はるか沖地震の際に八戸港で得られた記録（八戸とよぶ）と比較したところ、水平面内で最も卓越する方向での最大補正加速度は、八戸（751Gal）、神戸（538Gal、振り切れ）、釧路（468Gal）の順に、また鉛直加速度では、順位が入れ替わり、神戸（446Gal）、釧路（342Gal）、八戸（132Gal）の順であった。

一方、SMAC-B2型の計器特性に合わせた最大加速度でみると、水平最大加速度は同じく八戸が最大であり（556Gal）、これに神戸（521Gal、振り切れ）、釧路（342Gal）が続いた。また鉛直加速度においては、神戸（283Gal）、八戸（107Gal）、釧路（91Gal）の順であった。
- (8) 速度・変位について（7）と同様の比較を行ったところ、水平方向の最大値に関しては、神戸（122cm/s、43.3cm）、釧路（63.0cm/s、19.5cm）、八戸（50.5cm/s、16.3cm）の順となった。水平速度および変位の最大値は、神戸の値が非常に大きく、八戸・釧路の約2~3倍程度の値を有した。

これに対し、鉛直方向の最大速度・変位は、神戸（33.8cm/s、10.9cm）、八戸（11.7cm/s、3.1cm）、釧路（7.2cm/s、1.0cm）の順となっており、水平方向の順位と八戸・釧路が入れ替る結果となった。
- (9) 神戸・八戸・釧路の水平面内の軌跡の比較より、

神戸のみが加速度・速度・変位の全てにおいて明確な方向性を有していることが示された。八戸・釧路に関しては、速度・変位の方向性はあるが、加速度の方向性は認められなかった。

- (10) 神戸・八戸・釧路の鉛直面内の軌跡より、いずれの地震の場合においても、鉛直方向の速度・加速度の最大値は、水平方向のそれに比較して非常に小さいことが示された。加速度に関しては、神戸と釧路の場合、鉛直方向と水平方向成分の最大値はほぼ同じレベルであった。八戸の場合、鉛直方向の加速度は水平方向に比べて非常に小さいレベルであった。
- (11) 神戸・釧路・八戸の絶対加速度応答スペクトルの比較より、卓越方向の加速度応答においては周期約0.4秒より短周期側では八戸の応答が最大で、周期約1.0秒より長周期側では神戸の応答が最大となった。また、鉛直動に関しては、ほぼ全ての領域で神戸の応答が最大となった。
- (12) 神戸・釧路・八戸の加速度比応答スペクトルの比較より、水平方向の加速度比は周期約1.0秒以上の長周期領域では神戸の応答比が最大となりことが示された。鉛直方向では3地震の加速度応答比の最大となる周期は異なり、短周期側から順に、釧路(約0.04秒)、神戸(約0.08秒)、八戸(約0.2秒)となった。
- (13) 神戸・釧路・八戸の疑似速度応答スペクトルの比較より、水平方向の速度応答は周期約1.0秒より短周期側では3地震の差異は小さいが、周期約1.0秒以上の長周期領域では神戸の速度応答が最大となった。一方、鉛直方向ではほぼ全ての周期帯において神戸の応答が最大となった。

謝 辞

本報告執筆のための現地調査ならびに資料収集に直接ご協力を頂いた機関は以下の通りである。

(1995年兵庫県南部地震)

運輸省 港湾局 海岸・防災課

運輸省 第三港湾建設局 神戸港調査設計事務所
神戸港工事事務所

(1994年三陸はるか沖地震)

運輸省 第二港湾建設局 八戸港工事事務所

(1993年釧路沖地震)

北海道開発局 釧路港湾建設事務所

本報告に掲載された強震記録は、以下に示す各機関の強震観測担当者の多大なる協力のもとに取得された。以下に記して、深甚の謝意を表します。

強震観測担当者(当時)

運輸省

〃 第三港湾建設局

〃 〃 神戸港工事事務所：山本正男，中山茂昭

〃 〃 〃 尼崎工場：津田行男，山下 仁

〃 第二港湾建設局

〃 八戸港工事事務所：伊勢 博，原田 久

北海道開発局

釧路港湾建設事務所：黒萩徳昭，廣田正俊，
鈴木勝春

参考文献

- 1) 気象庁地震火山部：1995年1月地震火山概況，気象庁発行，1995
- 2) 加藤偵一：地震と活断層の科学，朝倉書房，1995，pp.80
- 3) 菊池正幸：遠地の強震記録による震源メカニズム，兵庫県南部地震調査報告会記録，第四紀世学会，1995
- 4) 活断層研究会編：[新編]日本の活断層(分布と資料)，東京大学出版会，1991，pp.272-285，pp.296-299
- 5) 松永康男，桜井博孝，森田年一，井合 進：港湾地域強震観測年報(1992&1993)，港湾技研資料，No.776，1994
- 6) 土田 肇，倉田 栄一，須藤 克子：1968年十勝沖地震とその余震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料，No.80，1969
- 7) 野田節男，上部達生，千葉忠樹：重力式岸壁の震度と地盤最大加速度，港湾技術研究所報告，第14巻，第4号，1975
- 8) 香川 敬生，入倉孝次郎：平成7年兵庫県南部地震で得られた神戸市域の強震観測記録の検討，第23回地震工学研究発表会港講演概要，pp.189-192，1996
- 9) 中村 豊：強震記録から推測される兵庫県南部地震の断層運動，第23回地震工学研究発表会港講演概要，pp.205-208，1996
- 10) 井合 進・倉田栄一・向井 健：地震最大加速度の距離減衰，港湾技研資料，No.724，1992
- 11) 上田 茂，稲富隆昌，他：1993年釧路沖地震港湾施設被害報告，港湾技研資料，No.766，1993
- 12) 松永康男，桜井博孝，森田年一，井合 進：1993年釧路沖地震の港湾地域における強震記録，港湾技研資料，No.777，1994

港湾技研資料 No.813

1995・9

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 (有)つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute. Nagasaki, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1995) by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted into a machine language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複製は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。