

阪神・淡路大震災の地震の概要と土木構造物の被害

1. はじめに
2. 兵庫県南部地震の概要
3. 土木構造物の被害
4. 今後の課題

岩 橋 敏 広*

要 約

平成7年1月17日午前5時46分に明石海峡付近を震源とする直下型の大地震（兵庫県南部地震：M = 7.2）が発生し、神戸・淡路島を中心として、死者5348**人、負傷者33222人、倒・損壊家屋10万9464棟（2月15日現在）さらに、鉄道、港湾、地下鉄、ライフライン施設等、都市の中枢をなす土木関連施設が致命的な被害を受け、内陸地震として同規模の1948年福井地震（M = 7.1、死者3769人）を上回る戦後最悪の大震災（阪神・淡路大震災）となった。この地震は、都市の機能にも甚大でかつ長期にわたる打撃を与えると予想され、今後の土木構造物の耐震設計、都市の防災対策の在り方に大きな問題を投げかけるものである。

筆者は、今回の阪神・淡路大震災（都市直下型地震被害）の教訓を今後の研究・教育活動に生かすとともに東京都（多摩地区）の防災に資するため、地震（直）後に地震被害調査を行った。また、構造物の地震被害と地盤・地形等との関係を明らかにするため芦屋地区一帯の常時微動観測を行った。更に、土木学会耐震工学委員会の地下構造物の被害調査グループに参加し地下構造物を中心に被害の調査分析を行っている。本報告は、これらの調査結果に基づいて、地震および土木構造物の地震被害の概要と今後の問題点について述べたものである。

1. はじめに

平成7年1月17日午前5時46分に明石海峡付近を震源とする直下型の大地震（兵庫県南部地震：M = 7.2）が発生した。この地震は、日本列島内陸部（有馬-高槻-六甲断層帯）沿いに発生した横ずれ型の発震機構の内陸地震であり、神戸、淡路島で

震度7（烈震）を記録したのを始め近畿地方を中心として西日本から東日本にかけて広い範囲で強い揺れを記録した。

この地震では、神戸、淡路島を中心として、死者5348人、負傷者33222人、倒・損壊家屋10万9464棟（2月15日現在）、さらに、鉄道、港湾、地下鉄、ライフライン施設等、都市の中枢をなす土木関連施設が致命的な被害を受け、内陸地震とし

* 東京都立大学工学部土木工学科

** 6308人（最終的な人数：27日：自治省消防庁）

て同規模の1948年福井地震 (M = 7.1、死者3769人) を上回る戦後最悪の大震災 (阪神・淡路大震災) となった。この地震によって引き起こされた災害は、地震によって起きる災害のうち津波を除くほとんどが発生したと言っても過言ではない。

筆者は、今回の都市直下型地震被害の教訓を今後の研究・教育活動に生かすとともに東京都 (多摩地区) の防災に資するため、地震直後に地震被

害調査を行った。また、地震被害と地盤・地形の関係を明らかにするため芦屋地域を対象 (約120地点) に常時微動観測を行った。更に、土木学会耐震工学委員会の地下構造物の被害調査グループに参加し被害の調査分析を行っている。本報告は、これらの調査結果に基づいて地震および土木構造物の地震被害の概要と今後の問題点について述べたものである。

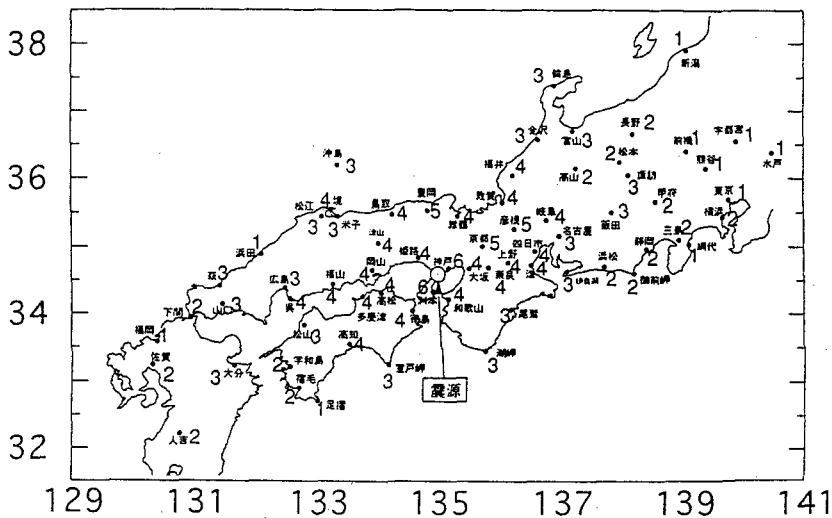


図1 (a) 1995年兵庫県南部地震の震源と各地の震度

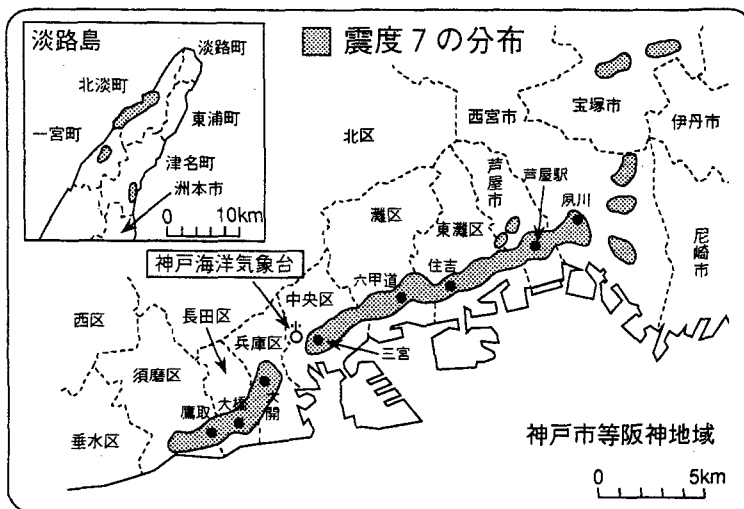


図1 (b) 1995年兵庫県南部地震の震度7の地域 (気象庁の現地調査結果に基づき作成)

2. 兵庫県南部地震の概要

2.1 本震の緒元（気象庁の発表）

発震時：平成7年1月17日5時46分52秒
 震源：北緯34度36.4分、東経135度2.6分
 深さ14.3km
 マグニチュード：7.2
 各地の震度：(図1)

また、図1に震度7と確認された地域を示す(2月17日朝日新聞)。

2.2 活断層^{2), 5)}

神戸市周辺には、六甲山地と沖積低地を画すよ

うに六甲断層系に属する多くの活断層が並走している。これらの活断層は、神戸市東灘区から芦屋市付近でやや北に走向を変え、宝塚市付近で有馬高槻構造線に合流する。これらの多くが北西に急傾斜した北西側隆起の逆断層であり、一部で右横ずれ成分があることが確認されており、個別にはB級の変位速度(0.数m/1000年)をもつが、その運動の総和はA級である。日本の活断層では、淡路島北部に、野島断層、楠本断層、仮屋断層、東浦断層、水越とう曲、浅野断層を活断層として図示している(図2)。電力中央研究所が行った地震断層の調査では、淡路島において、北西海岸沿の野島断層に沿って明らかな右横ずれの地震断層が北炭町江崎灯台から富島にかけて9kmに渡って認められた。図3は、工業技術院地質調査所の野島断

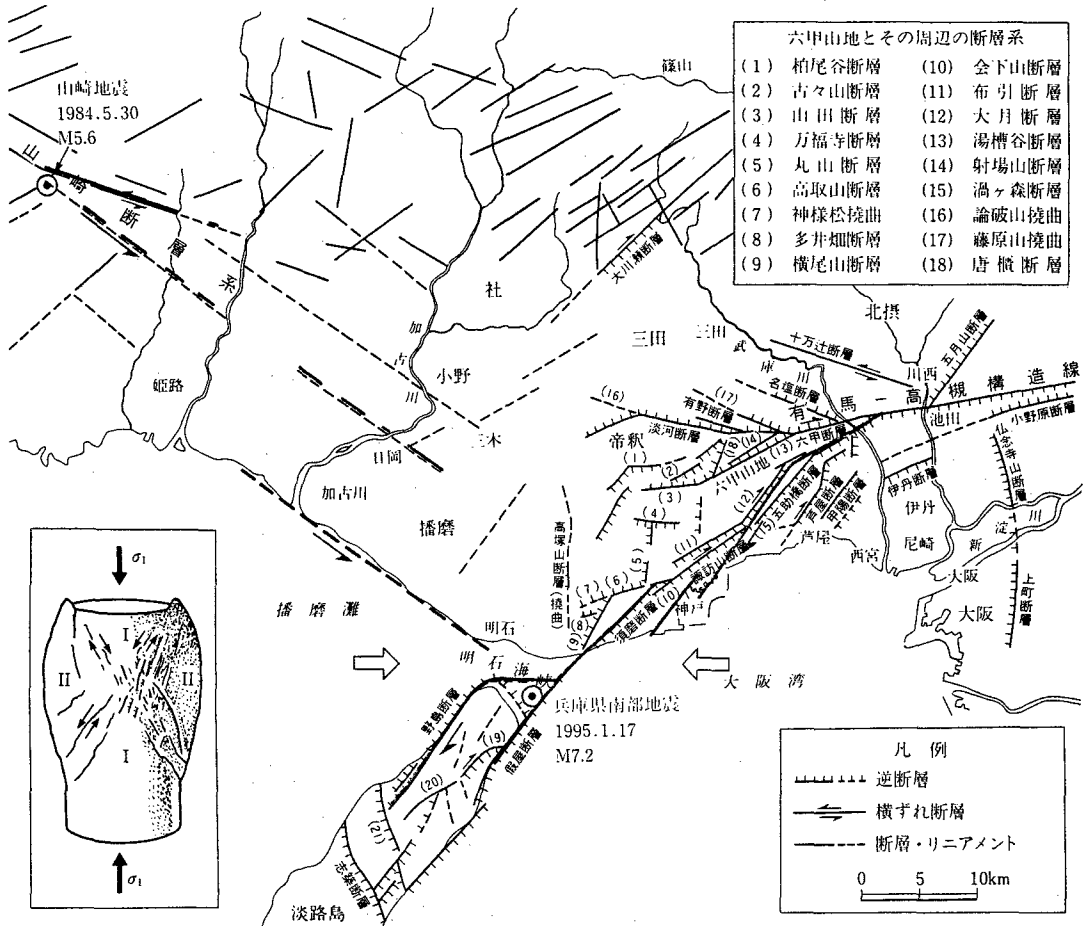
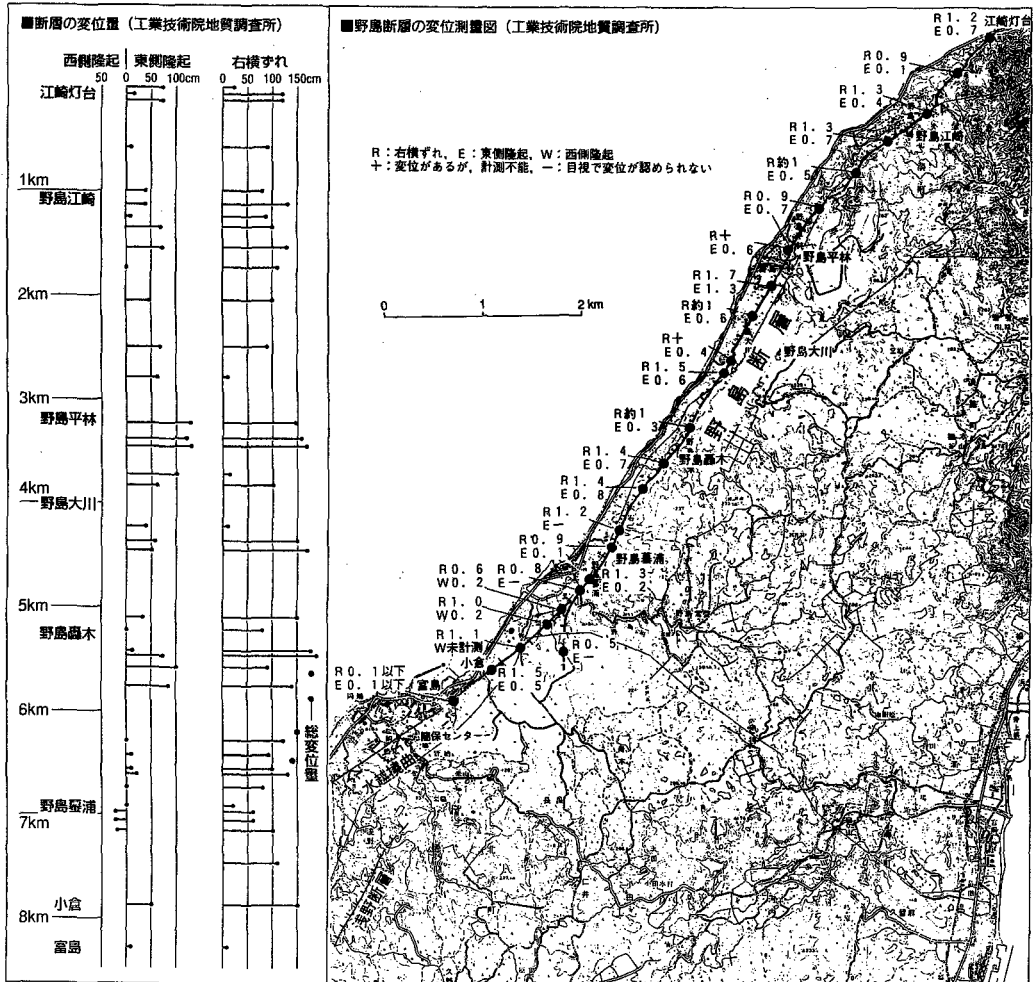


図2 兵庫県南部地震の起震構造図



●活断層の爪あとがくっきり (工業技術院地質調査所・水野清秀氏 (左)、棚栄吉氏 (右)、提供)

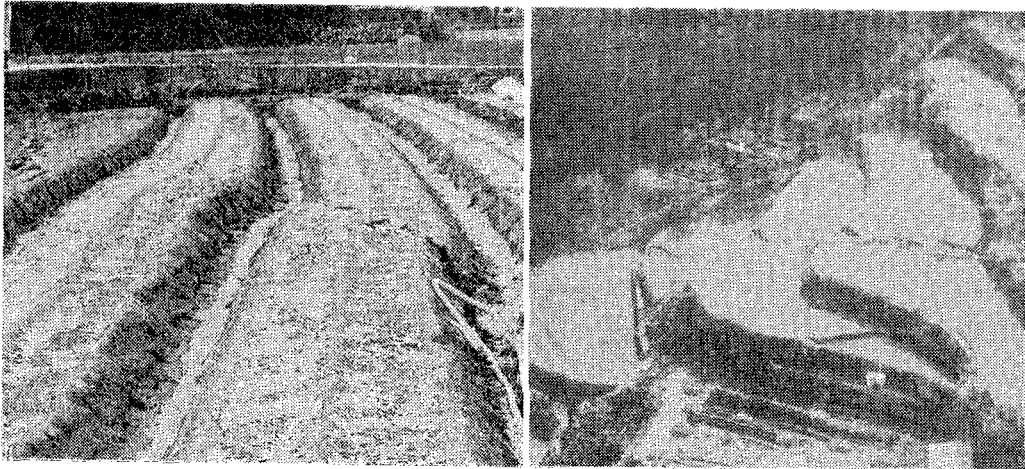


図3 野島断層の変位測量図 (工業技術院地質調査所)

層の変位測量図である。地表に現れた最大変位は、右横ずれ1.7m、東隆起の垂直変位1.3mであった。尚、神戸市側においては、東灘区の甲南女子大学正門付近で断層らしきものを確認したとの報告や神戸側の建物の倒壊が激しい地域が带状に分布している点に注目し、神戸駅西から須磨にかけて、会下山断層の延長部の伏在断層が動いた可能性を指摘するものもいるが、現在まで淡路島のように地

表に現れた変位の大きい明確な地震断層は確認されていない。

2. 3 近畿地方の過去の地震活動^{2), 5)}

図4に1943年鳥取地震以降に発生したM7以上の地震の震央分布を示す。また、図5に近畿・中国・四国の活断層と浅い地震の分布(1961年1月~1995年1月、深さ20km以浅)を示す。1948年以降、

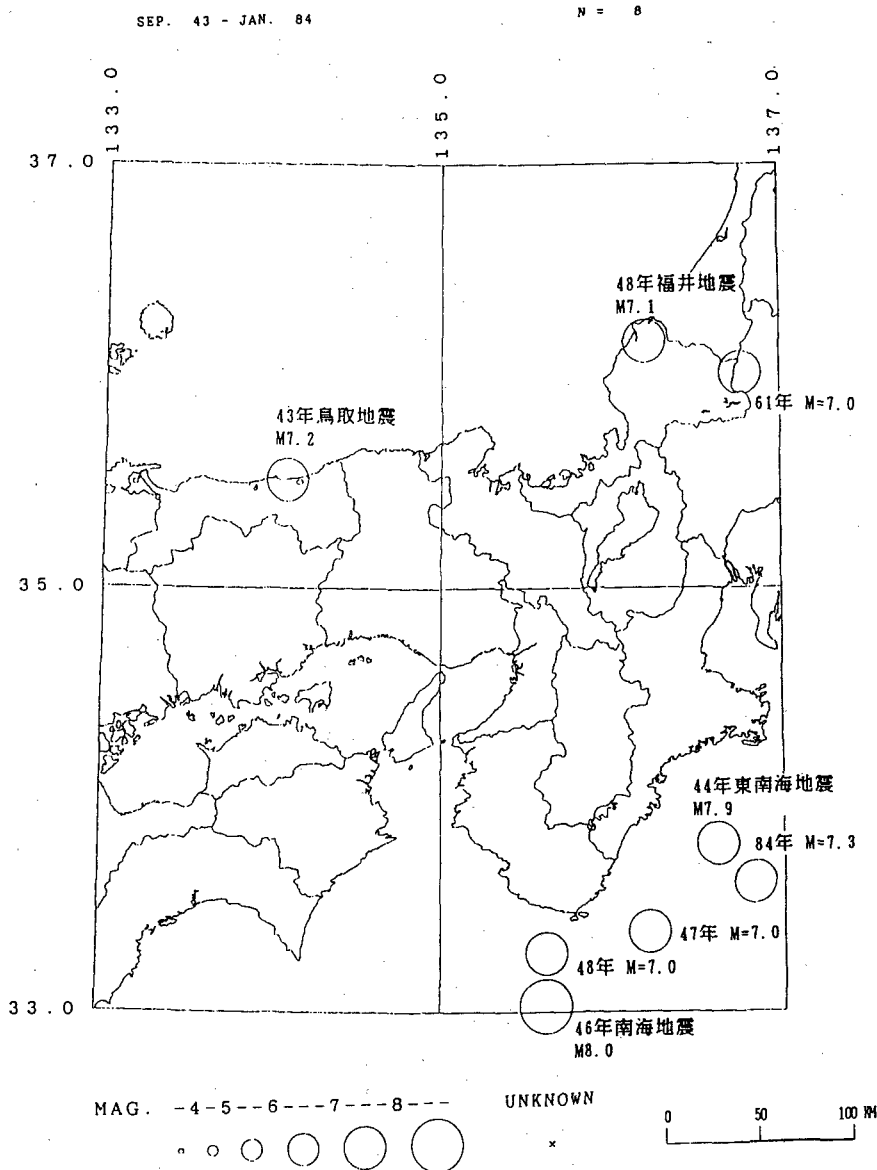
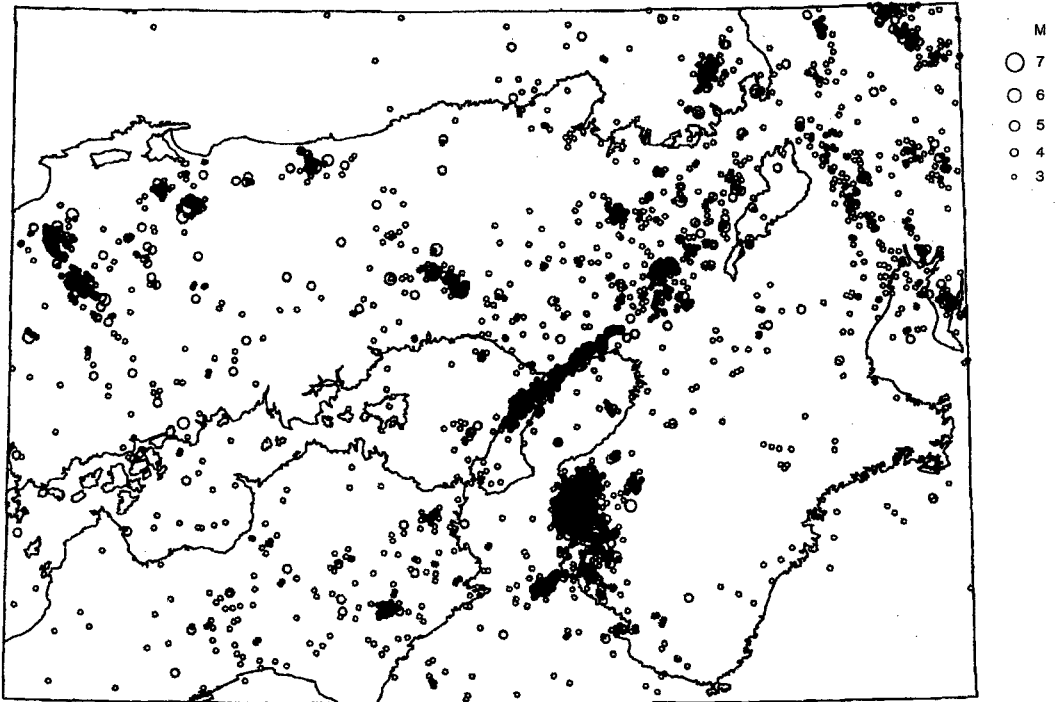


図4 1943年鳥取地震以降に近畿地方に発生したM7以上の地震の震央分布 (電中研) (文献2)

- (a) 1961年1月～1994年9月と、1995年1月の地震分布
(深さ20キロ以浅、94年まではM3以上、95年はM3未満も含む)



- (b) 近畿・中四国の活断層と1961年1月～1994年9月の地震分布。
明石海峡から神戸付近の地震活動空白域では地震活動は少なかった

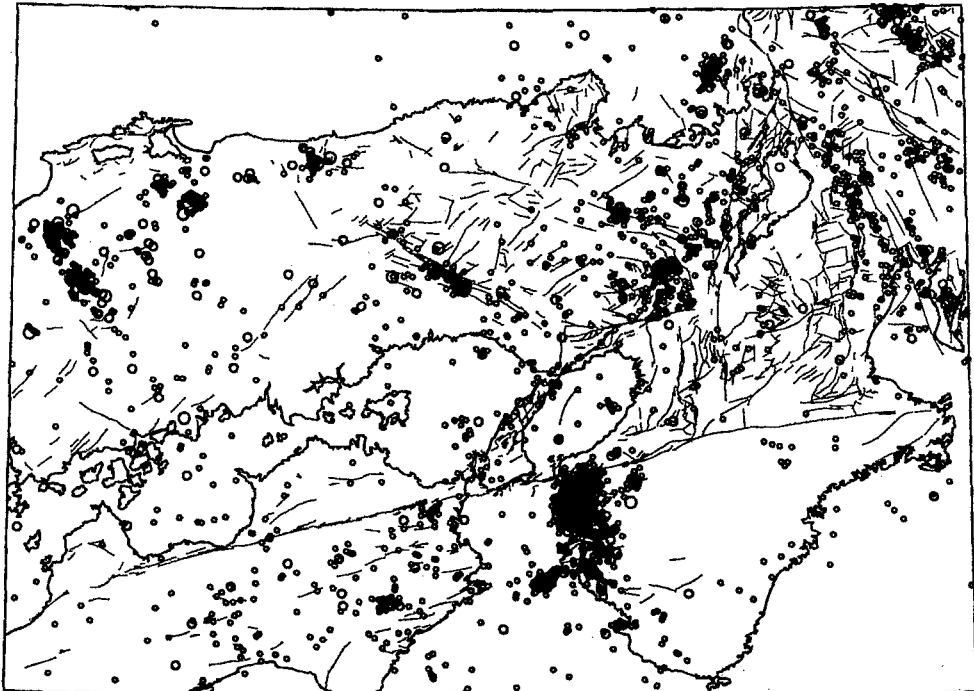
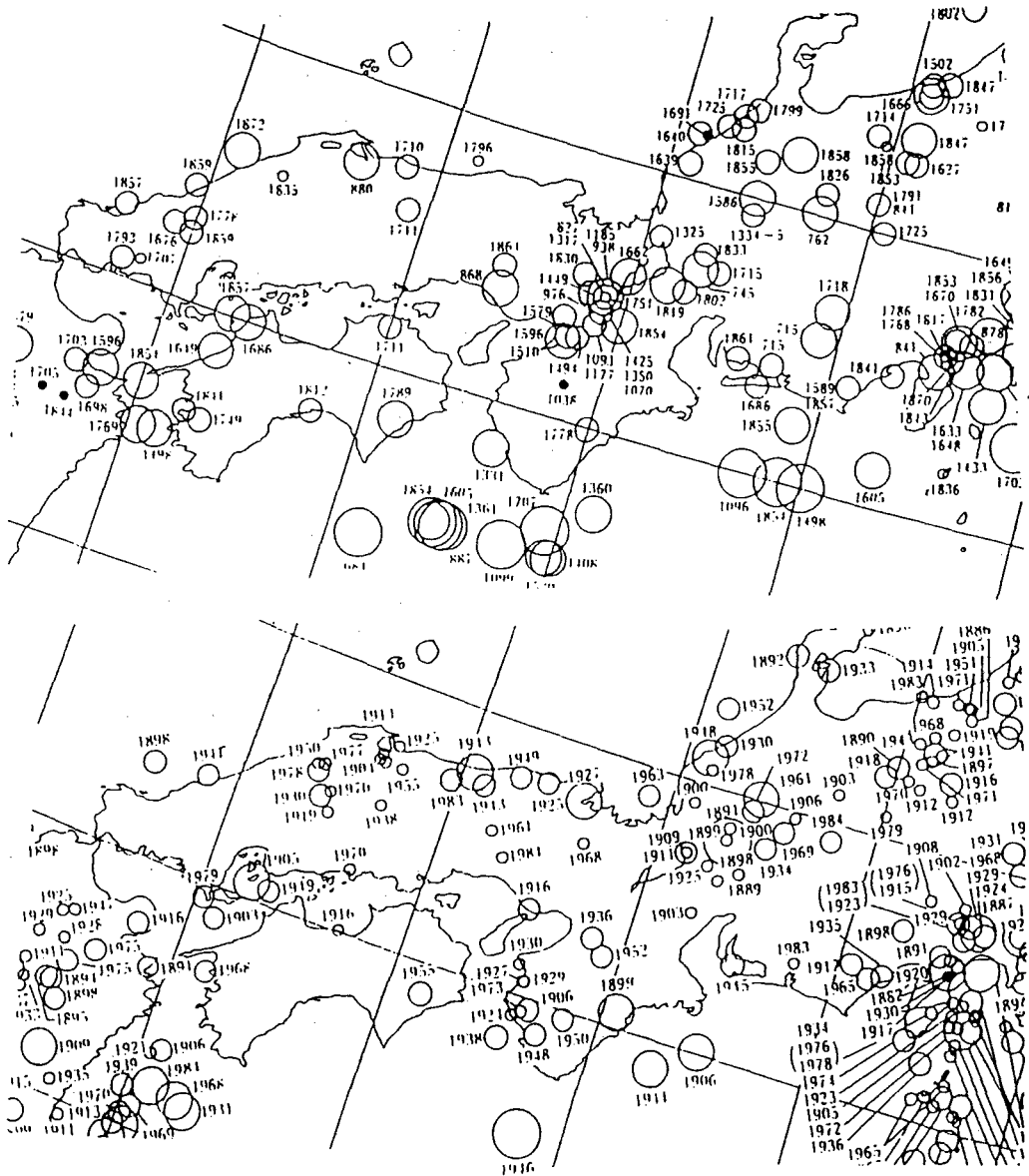


図5 近畿・中国・四国の活断層と地震分布



・868 VIII 3 (貞観10 VII 8) 播磨・由城 $\lambda=134.8^{\circ}\text{E}$ $\varphi=34.8^{\circ}\text{N}(D)$ $M \geq 7.0$ [11] 播磨諸郡の官舎、諸定額寺の堂塔ごとごとく傾倒。京都では垣根崩れるものあり。震央は一応播磨の国府(現姫路)とする。山崎断層の活動によるとも考えられる。

・1864 III 6 (文久4<元治1>I 28) 1時 播磨・丹波 $\lambda=134.8^{\circ}\text{E}$ $\varphi=35.0^{\circ}\text{N}$ $M \approx 6\frac{1}{4}$ 加古川上流の杉原谷で家屋多く破壊するという。あるいは29日午前4時ころのことか。加西市吉野町で大地震を感ず。

・1916 XI 26 (大正5) 15時08分 神戸 $\lambda=135.0^{\circ}\text{E}$ $\varphi=34.6^{\circ}\text{N}(A)$ $M=6.1$ 死1、傷5。神戸・明石・淡路北部で家屋倒潰3、破損数十、山崩れ1、その他の小被害あり。有馬温泉の泉温が 1°C 上がって 53.4°C となった。明治32年7月に鳴動がしきりに起こり、その前に 37°C だった泉温が翌年10月は 47.9°C になった。

図6 西日本における過去の主な被害地震の震央と兵庫県南部地域を震央とする被害地震の概要(電中研)

表1 近畿地方における主な被害地震（電力中央研究所）

年代	被災地域	推定M	名称・他	年代	被災地域	推定M	名称・他
734	畿内・七道諸国			1494	大和	6	
827	京都	6.5~7		1510	摂津・河内	6.5~7	
856	京都	6~6.5		1520	紀伊・京都	7~7.75	
868	播磨・山城	7以上	山崎断層?	1579	摂津	6	
881	京都	6.4		1596	畿内	7.5	
887	五畿・七道	8~8.5		1662	山城・大和・河内・他	7.25~7.6	花折断層?
890	京都	6		1664	山城	5.9	
934	京都	6		1664	紀伊熊野		
938	京都・紀伊	7		1665	京都	6	
976	山城・近江	6.7以上		1694	丹後		
1038	紀伊			1707	五畿・七道	8.4	宝永地震
1041	京都			1708	紀伊・伊勢・京都		
1070	山城・大和	6~6.5		1731	近江八幡・刈谷		
1091	山城・大和	6.2~6.5		1751	京都	5.5~6	
1093	京都	6~6.3		1802	畿内	6.5~7	
1096	畿内・東海道	8~8.5	東海沖?	1819	伊勢・美濃・近江	7.25	
1099	南海道・畿内	8~8.3		1830	京都	6.5	
1177	大和	6~6.5		1854	伊賀・伊勢・大和	7.25	
1185	近江・山城・大和	7.4		1854	畿内・他	8.4	安政東海、南海地震
1245	京都			1858	丹後宮津		
1317	京都	6.5~7		1858	紀伊		
1325	近江北部・若狭	6.5		1864	播磨・丹後	6.25	
1331	紀伊	7以上		1899	紀伊半島南東部	7	
1350	京都	6		1909	滋賀県姉川付近	6.8	江濃（姉川）地震
1360	紀伊・摂津	7.5~8		1916	神戸	6.1	
1361	畿内・土佐・阿波	8.25~8.5	南海トラフ?	1925	但馬北部	6.8	北但馬地震
1408	紀伊・伊勢	7~8		1927	京都府西北部	7.3	北丹後地震
1425	京都	6		1936	大阪・奈良	6.4	河内大和地震
1449	山城・大和	5.75~6.5		1946	南海道沖	8	南海地震
1456	紀伊			1948	福井平野	7.1	福井地震
1466	京都			1952	奈良県中部	6.8	吉野地震
1586	畿内・東海・北陸	7.8	白川断層?				

近畿圏に大きな被害を及ぼすような地震は発生していない。しかし、過去の近畿地方における主な被害地震（表1）に示すように、この地域は、頻繁に地震による被害を受けている地域と考えられる。これらの被害地震には、南海トラフ沿いで周期的に発生するM8クラスの巨大地震に加えて、内陸型の活断層による直下型地震も多く含まれている。表3の中で、特に、震央が神戸南部地域に推定される地震を図6に示した。これらの地震の内、特に震央

今回の地震と近いのは1916年の地震である。

2. 4 余震の分布^{1), 2), 6)}

本震発生直後に京大防災研、東大地震研、名大理学部等全国の大学の共同研究として実施した緊急活動調査に基づく余震分布（1月25日から2月9日まで）を図7に示す。余震の震央は、本震震央から東北-南西方向に延びており、北東側は、宝塚市付近まで、南西側は、淡路島の一宮町付近ま

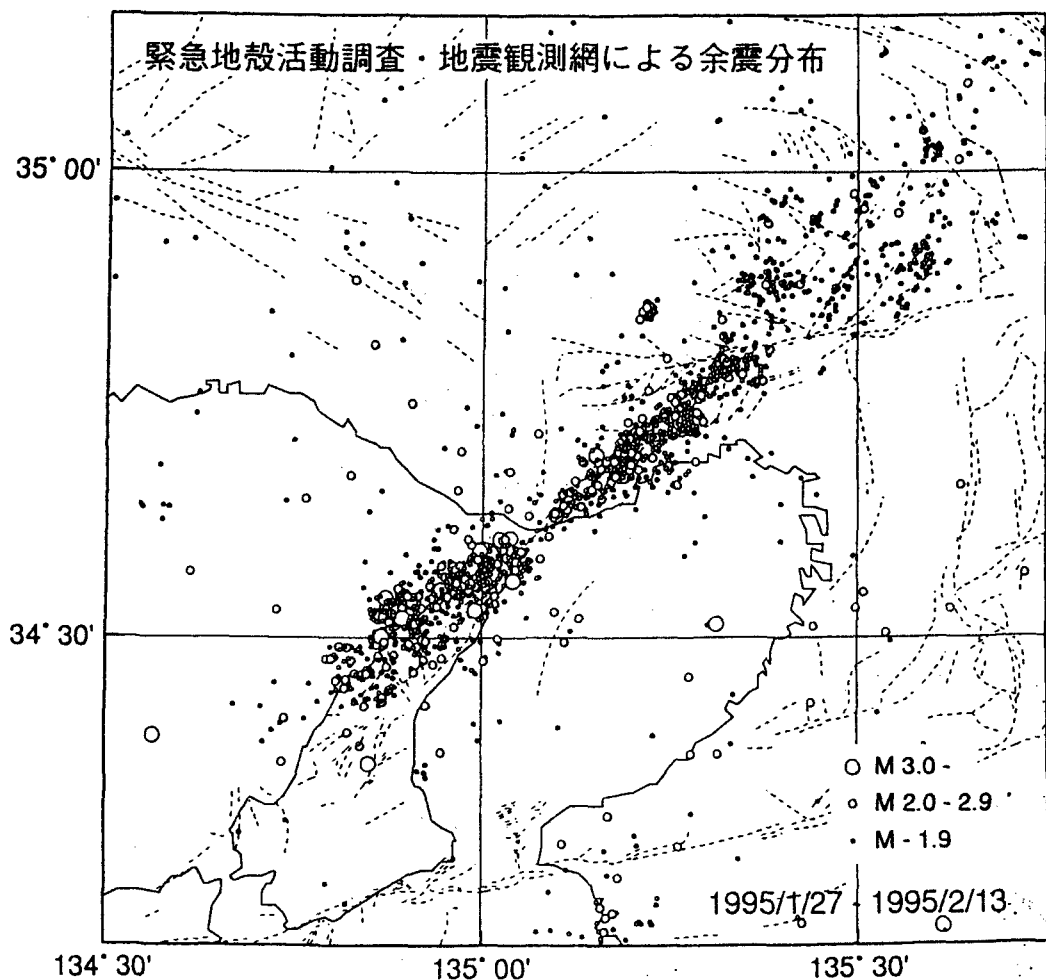


図7 兵庫県南部地震の余震分布（京大防災研、東大地震研、名大理学部等の緊急地殻活動調査・地震観測網）

で達している。淡路島では、北西部の野島断層とほぼ同じ地点で横ずれの地表断層が確認されているが、余震の震央分布は、今回認められた地表断層とは、完全に一致しておらず、島北部では仮屋断層あるいは楠本断層側に移っているように見える。2月3日までに発生した余震のうち、最大のマグニチュードは、4.9であった。

余震観測の他、GPSによる地殻変動観測、稠密多点観測による断層破碎帯調査、海底震観測、断層調査等が実施されている。

2. 5 本震の発生メカニズム

USGS（米国地質調査所）によるCMT解から

表2 断層パラメータ（横浜市大：菊地教授による）

地震 No.	走行(角度)	傾斜(角度)	すべり(角度)	地震モーメント (dyne xcm)	モーメント マグニチュード (Mw)	断層面積 (km×km)	平均変位量 (m)	応力降下量 (bar)
1	229°	86°	171°	1.81×10^{28}	6.8	24×12	2.1	93
2	214°	66°	136°	0.30×10^{28}	6.3	9×4.5	2.5	130
3	70°	85°	-6°	0.59×10^{28}	6.4	12×6	2.7	242
Total	233°	85°	165°	25×10^{28}	6.9	40×10	2.1	100~200

本震の発生メカニズムは、東西圧縮による横ずれであり、断層面は余震分布から東北-南西方向と考えられる(図8-1)。

また、横浜市立大学の菊池正幸教授による解析結果を図8-2に示す。菊池教授の遠地変位波形を用いたインバージョン解によれば、本震は、3つの

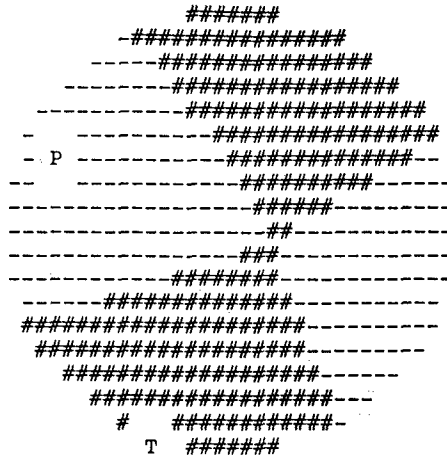
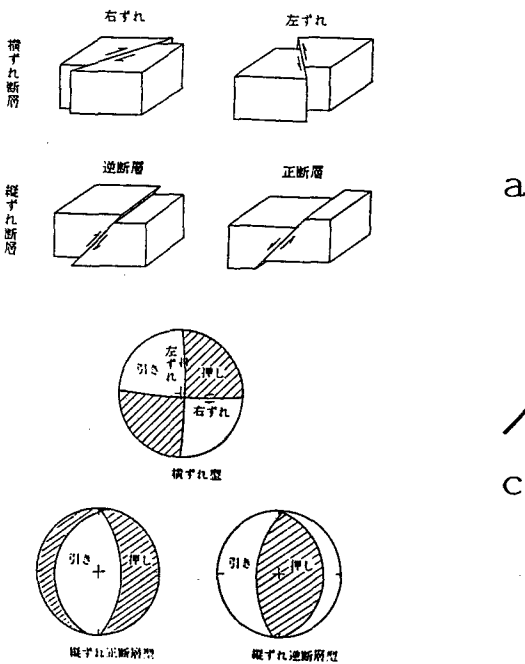


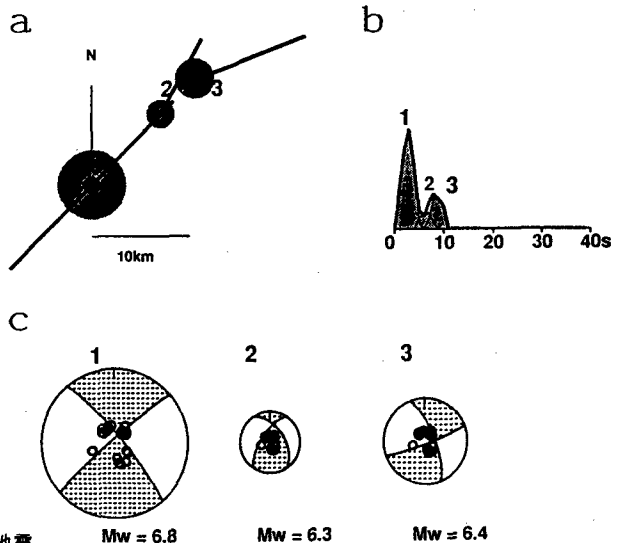
図8-1 USGSによる本震のメカニズム解



断層の型と震源メカニズムの表示法 (宇津著「地震学」、宇津編「地震の事典」より転載)

Hyogo 1995/01/17

$M_0 = 2.5 \times 10^{26}$ dyne-cm $M_w = 6.9$ Depth = 8 km



(a) 断層の長さや空間配置 (b) 3つの断層運動の時系列 (c) 各断層のメカニズム

図8-2 本震のインバージョン解 (横浜市大、菊池教授による)

断層運動から成っている。表2に3つの地震の断層パラメータを示す。破壊の開始点（気象庁の震源）から1つ目の破壊（淡路島側野島断層沿いの右横ずれ断層）が南西・北東に進み、北東の第2、第3の断層運動を引き起こしたものと考えられる。断層の総延長は50km～60km、最大変位量は水平方向に約1.9m、上下方向に1.3m、全体の破壊に要した時間は、11秒程度と推定される。神戸に大きな被害をもたらした断層は3番目の断層の可能性が高い。この横ずれ断層の走行は、1番目の断層（淡路島側）よりも東に傾斜しており、神戸で被害の大きかった地域の走行に類似している。重力異常のパターンも同様の傾向を示している。2番目と3番

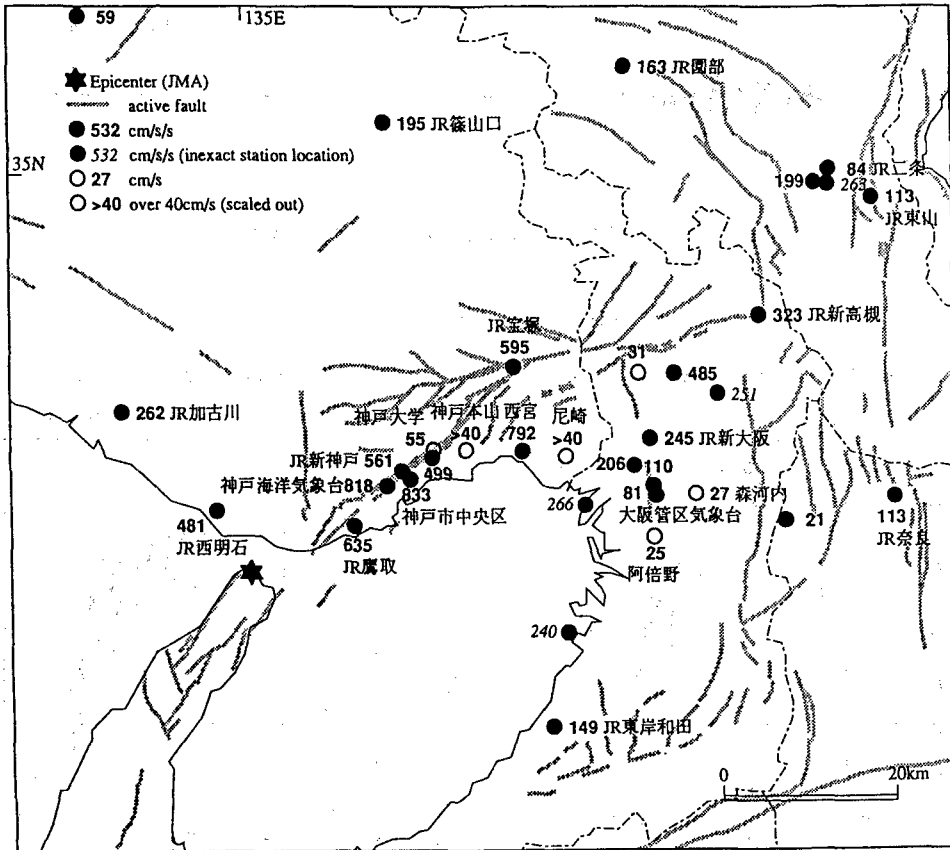
目のイベントに相当する活断層は現時点では特定されていない。

2. 6 地震動の特徴^{1), 4), 6), 10)}

(1) 観測記録について

本震の強震記録は、気象庁の他、大学、民間の研究機関によって運営されている関西地震観測研究協議会、JR、大阪ガス等でも得られている。図9にこれらの主な観測サイトの最大速度、および最大加速度分布を示す。これらによると、今回被害の大きかった宝塚市から神戸市までの地域における最大水平加速度は、神戸気象台の818gal（NS成分）を初めとして、各地で500gal～800galと非

Maximum Accelerations and Velocities of the 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake



Note: Most values have not been checked by using waveforms.
東京大学地震研究所 瀬戸川一先生による図に加筆

図9 1995年兵庫県南部地震の最大水平加速度・速度分布

h1170546.kob

95/01/17 05:46:27,KOBE,770,U,34.413,135.108,59

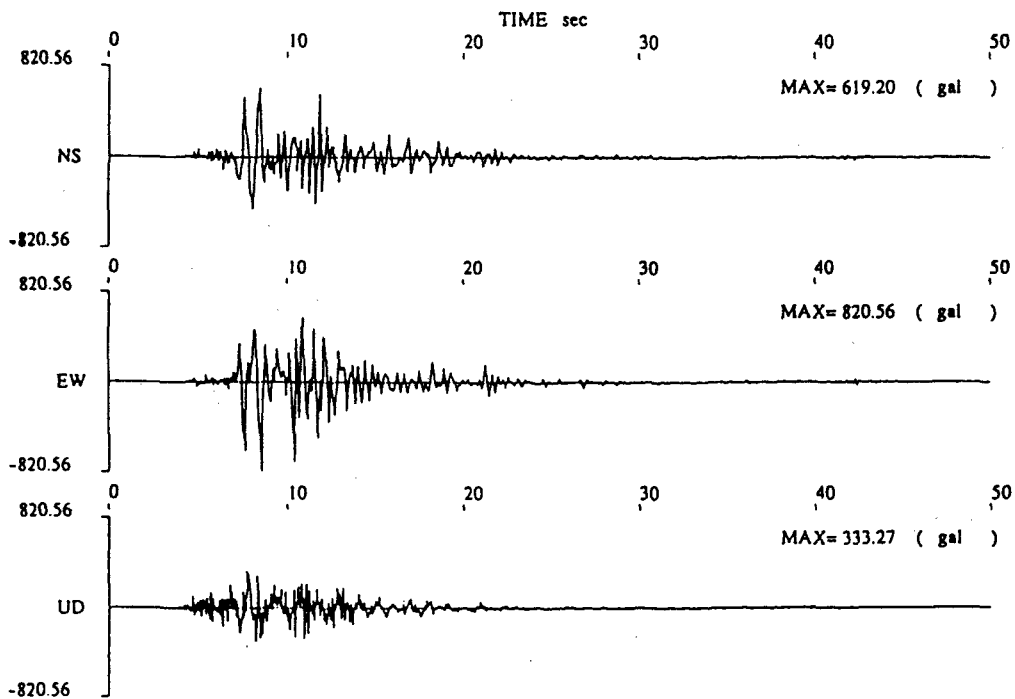


図10 (a) 神戸気象台で記録された本震の加速度波形

95/01/17 05:46:27,KOBE,770,U,34.413,135.108,59

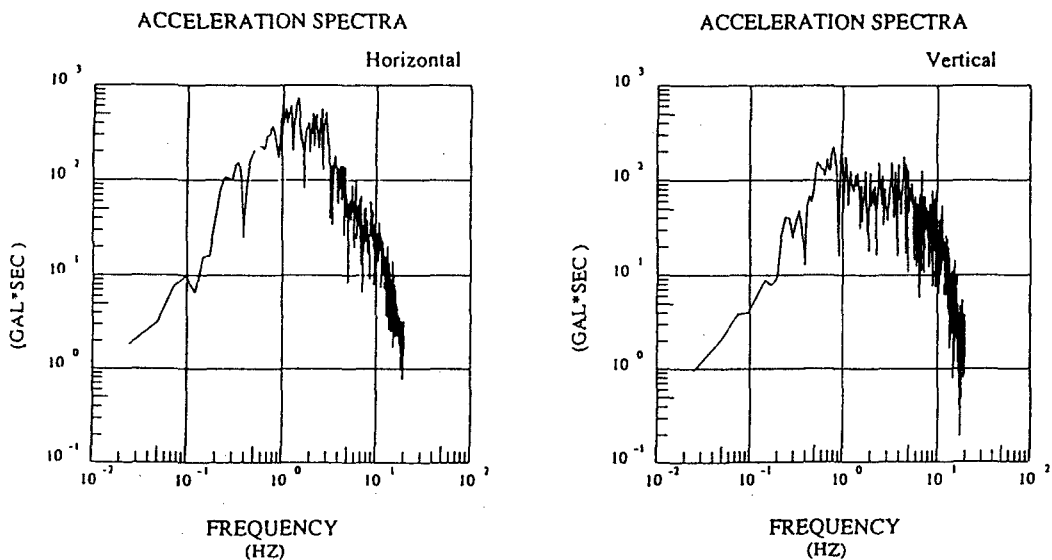


図10 (b) 本震の水平動、上下動のフーリエスペクトル (電中研の解析)

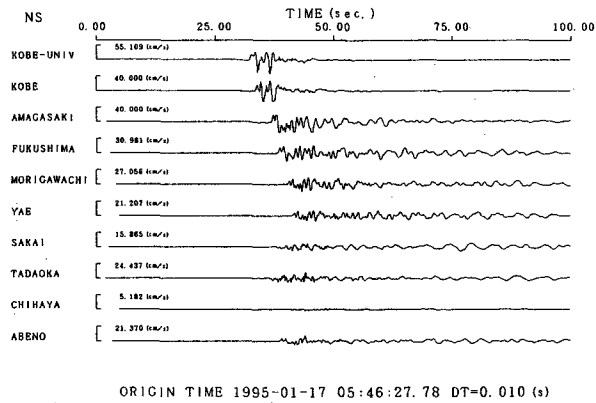


図 11 関西地震動観測研究協議会によって観測された速度波形 (NS成分)

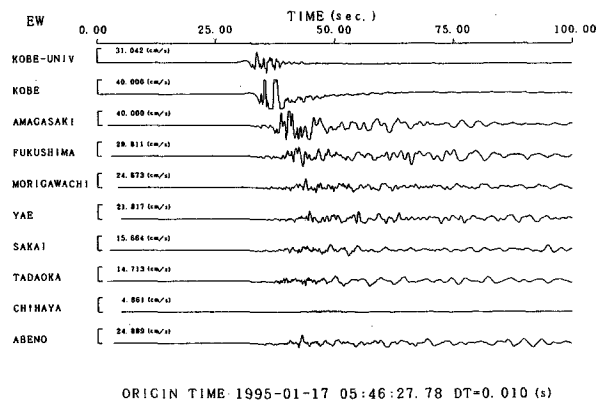


図 12 関西地震動観測研究協議会によって観測された速度波形 (EW成分)

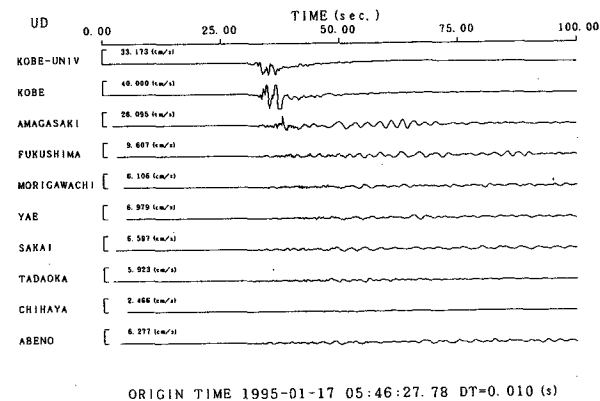


図 13 関西地震動観測研究協議会によって観測された速度波形 (UD成分)

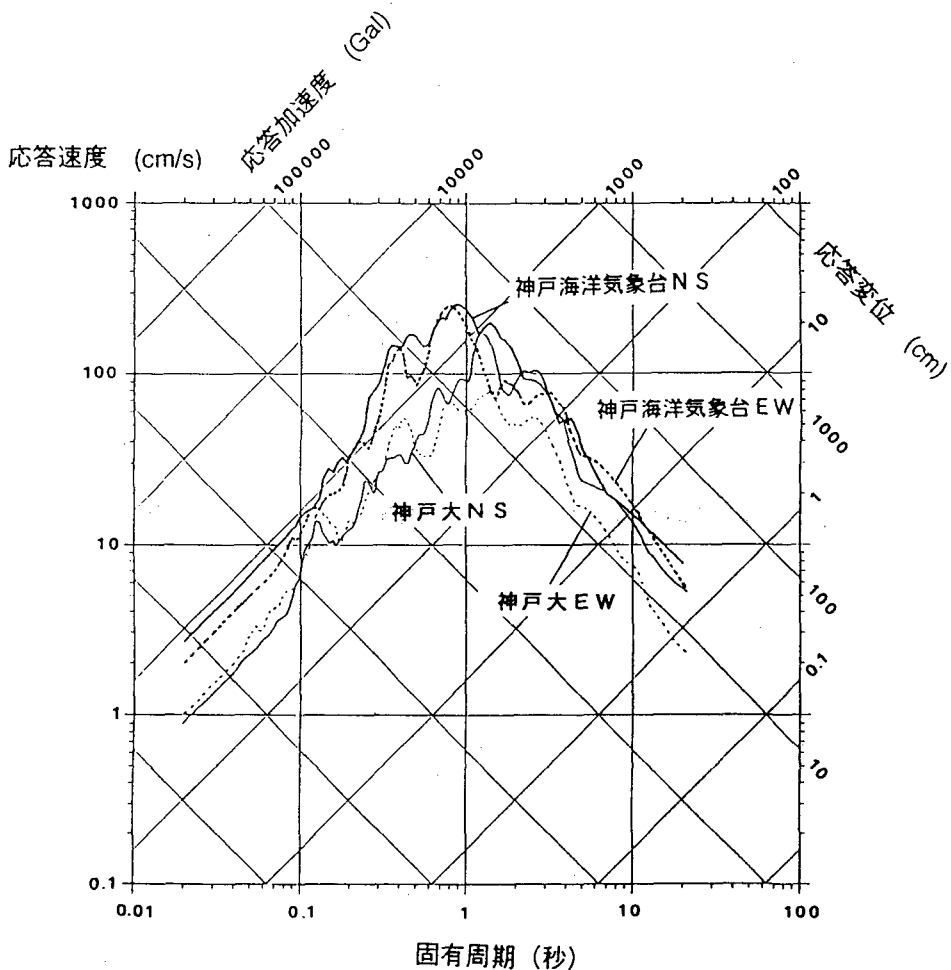


図14 神戸気象台及び神戸大学における本震の応答スペクトル（減衰5%）（電中研報告より引用）

常に高い値を示した。最大水平速度は、神戸大学の観測点で55kine（NS成分）、神戸本山の観測点で40kine以上（スケールオーバー）となった。一方、JRの観測点の最大水平速度、最大水平変位は鷹取駅で生じており、それぞれ138cm/s、42cmであった。

・図10（a）に神戸海洋気象台で得られた87型強震計の加速度波形記録を示す。また図10（b）に水平成分（NSとEWの和）および上下成分のフーリエスペクトルを示す。

・図11～図13に関西地震観測研究協議会の各観測点で得られた速度記録（有償公開）を示す。

・図14に神戸海洋気象台および神戸大学の観測記録の水平成分の応答スペクトル（減衰5%）を示す。

図より、気象台の応答スペクトルは、周期0.3秒から1.0秒付近の範囲で100kine以上、特に周期1.0秒弱で約300kineの大きな値を示しているのに対し、神戸大学では同様な周期範囲で気象台の1/2～1/3程度の値となっている。この相違が地盤条件によるかどうか今後の検討が待たれる。

(2) 上下動と水平動について

今回の地震では、構造物の被害に関連して、地震波の上下成分がかなり大きかったのではないかと問題提起がなされているが神戸海洋気象台の記録を見る限り、上下動の最大加速度は332galで水平動に比べて小さい。神戸大学の記録では、残念ながら上下動の観測記録は得られていないが、関西地震観測研究協議会の各測点の記録やJRの各測点

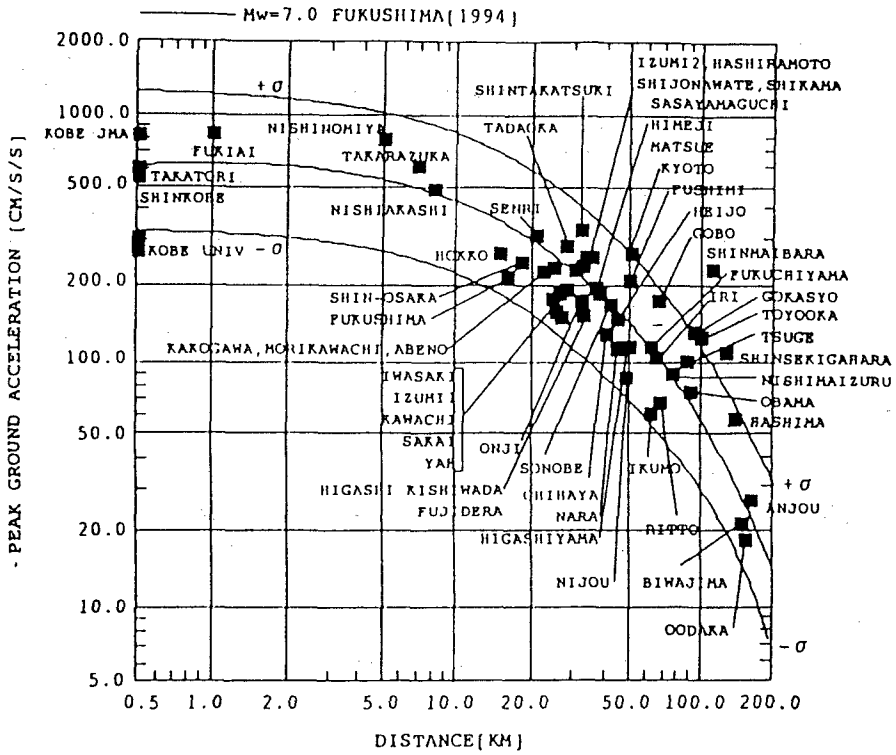


図15 本震の最大加速度距離減衰

実線はFukushima (1994) によるMw = 7.0の地震に対する標準地盤における経験式
破線はその標準偏差 ($\sigma = \pm 1\%$) 福島・入倉に電中研が加筆

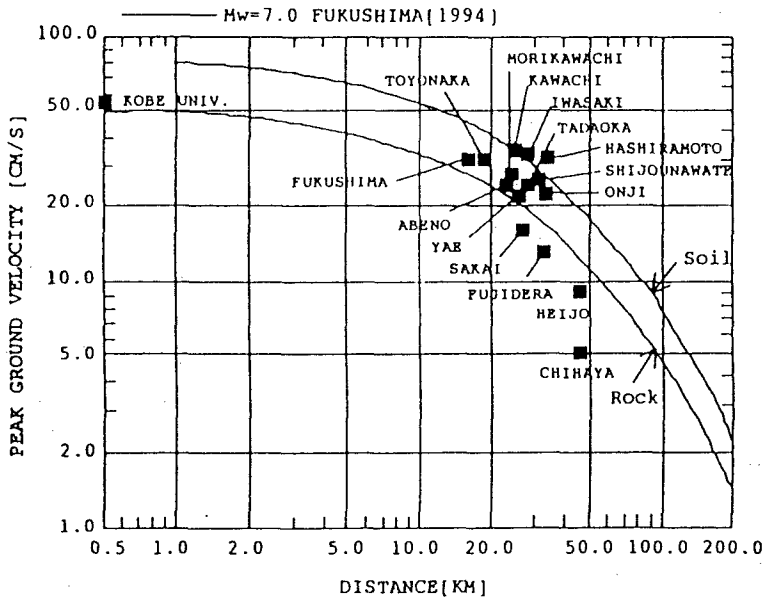


図16 本震の最大速度距離減衰

実線はFukushima (1994) によるMw = 7.0の地震に対する岩盤及び堆積地盤における経験式
福島・入倉に電中研が加筆

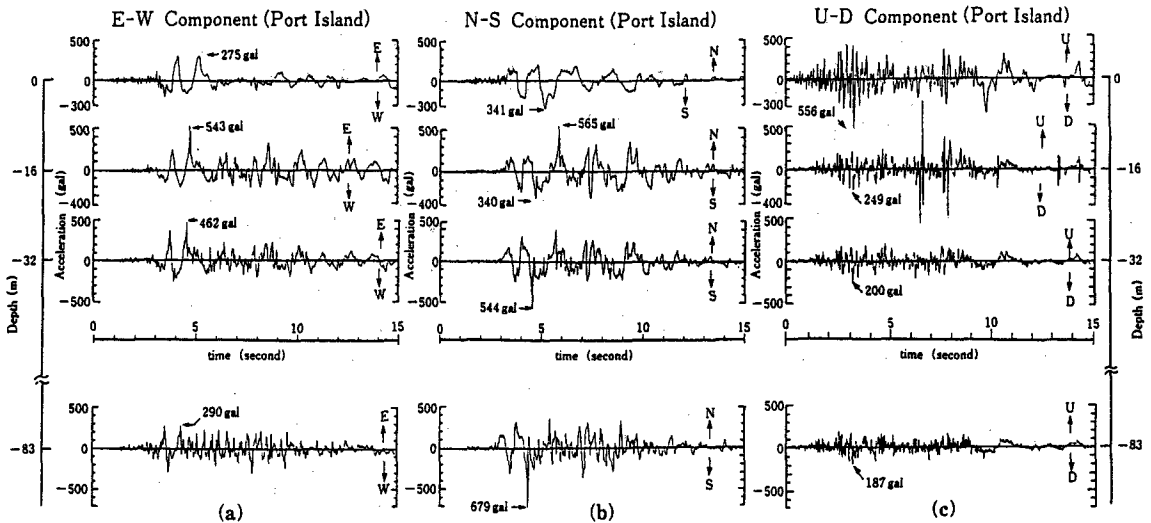


図17 ポートアイランドの地震記録 (関西地震記録研究協議会提供)

の記録を見ても上下動は水平動に比べて小さい値を示しており、上下動の極端な卓越を裏付ける地震記録は、現在までに公表されている地震記録の中には無い。

2. 7 地震動の距離減衰^{2), 8)}

福島・入倉は米国の内陸地震データを元に策定された福島の距離減衰式を今回の地震に適用している。その結果が電力中央研究所の報告書(図15、図16)に示されているが、これによると、今回各地で得られた強震記録は最大加速度分布、最大速度分布とも $M_w = 7.0$ を仮定した福島の式に良く一致している。

1993年釧路地震では、各地の記録が距離減衰式を上回る最大加速度を示す事が指摘されたが(例えば武村1993年)、今回の地震はそのマグニチュードから予想される最大加速度値を示したという点では、特別の地震とは言えないようである。

2. 8 ポートアイランドでの観測波形⁹⁾

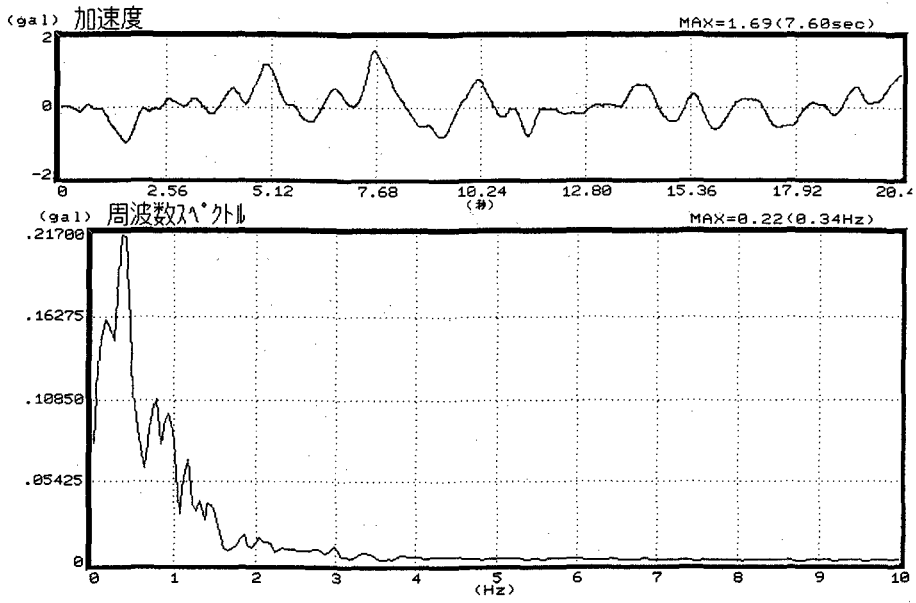
ポートアイランドでは、地表、および洪積地盤中の3カ所で加速度記録が得られた。図17に地表、

深さ-16m、-32m、-83mの加速度波形を示す。地表における最大加速度値は、341gal(NS成分)、275gal(EW成分)、556gal(UD)成分である。また、深さ-83mでは、679gal(NS成分)、290gal(EW成分)、187gal(UD成分)となった。水平成分では、地中で大きかった地震動が地表に達するまでにかなり減衰しているのに対して、上下成分は、3.6倍まで増幅されている。佐藤(電中研)らは、これらの記録を用いて、水平動および上下動の増幅特性に適合する地盤物性(S波速度、P波速度、Q値)を同定し、地盤調査(PS検層)の結果と比較して、水平加速度の減衰した要因、地表面の上下動の最大加速度が水平動を上回った要因の1つが地盤の非線形性の効果であると推定している。しかし、上下動の増幅については十分な検討はなされていない。今後、地盤構造や地震動の伝播特性について検討し説明を図る必要がある。

さらに、東京都立大学の逗子観測点(K3:岩盤)で観測した兵庫県南部地震の観測記録を図18に示す。最大加速度は、岩盤上で1.7gal(水平成分)、0.6gal(上下成分)であった。

地震感知日時 1月17日5時49分10秒56

機器No.003 NS方向



地震感知日時 1月17日5時49分10秒56

機器No.003 LID方向

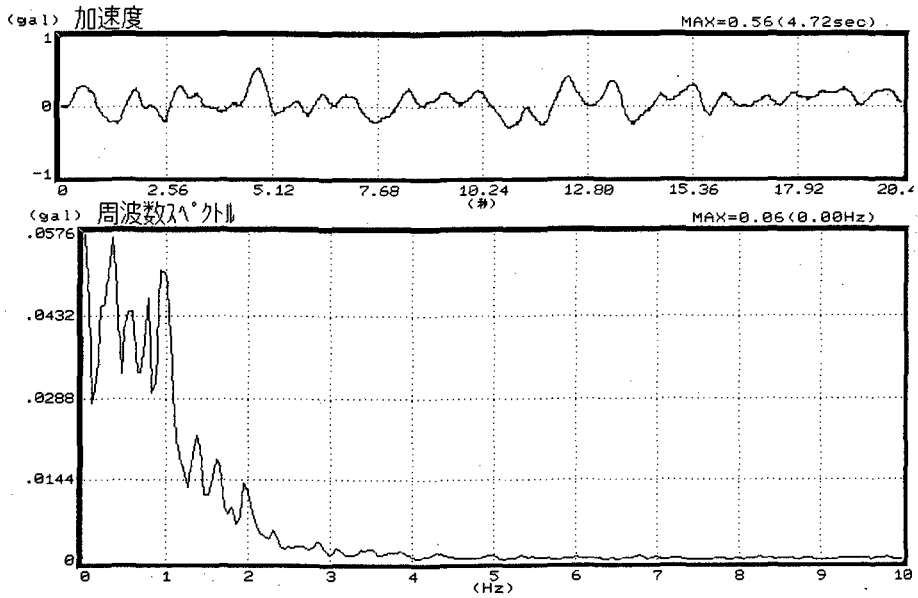


図18 兵庫県南部地震の都立大学逗子観測点 (K3: 岩盤) での観測波形 (NS成分、UD成分)

3. 土木構造物の被害^{1), 2), 3), 9), 10)}

3. 1 道路橋の被害

阪神高速道路(3号神戸線)、阪神高速道路(5号湾岸線)に大きな被害が集中し、名神高速道路、中国縦貫自動車道でも大きな被害があった(表3)。

阪神高速道路3号神戸線は、全長約40Kmの道路で、1970年の大阪万博に間に合わせるため昭和40~44年に供用が開始された。この区間では、橋脚1075本の内600本以上が損傷を受け、約150本以上が撤去が必要で、復旧費用約500億円掛かるとみている。神戸市深江本町では、約630mに渡って橋脚、橋桁が屏風状に倒壊し、今回の地震による被害事例の中で最も大きな被害が発生した地点

表3 道路橋(RC橋脚を持つもの)の被害のまとめ

被災地点	構造形式		被害の種類							備考	
	上部構造	下部構造	橋桁の落下	上部構造部材の損傷	落下防止装置の損傷	伸縮継手の損傷	橋脚本体の損傷	沓本体の損傷	地割れ・噴砂跡		RC橋脚部損傷度(I~V)
			*1				*2				
1 一般国道171号線 門戸高架橋	I型断面の鋼製主桁+RC床版(跨線部分のみ)	2径間・1層ラーメンRC橋脚	②		○				○	I~II	阪急今津線をオーバーパスする桁が落下。
	RC製主桁+RC床版	円形断面RC張り出し式					①			III	線路西側のスロープ部分、RC製主桁には損傷見られず。
2 阪神高速道路3号神戸線 深江地区	PCゲルバー桁	円形断面RC張り出し式	①				③			V	橋脚本体には、主鉄筋段落位置に損傷。桁全体が600mにわたり横倒し。
	I型断面の鋼製主桁+RC床版	円形断面、矩形断面RC張り出し式	①		○		①, ②, ③			III~V	損傷度の異なるものが断続的に並んでいる。
3 阪神高速道路3号神戸線 高潮町付近	I型断面の鋼製主桁+RC床版	矩形断面RC張り出し	①				①, ③			III~V	損傷度の異なるものが断続的に並んでいる。
4 阪神高速道路5号湾岸線西宮港大橋東側側径間部	箱形構造の鋼製主桁+RC床版	1層ラーメン鋼製橋脚(西宮港大橋支点部分)1層ラーメンRC橋脚	②		○					-	本路線は平成6年春に開通。橋脚本体には被害なし。
5 名神高速道路瓦木西高架橋	PCホロースラブ形式	3柱式両端ヒンジ橋脚	①				③			V	一般道をオーバーパスする桁が落下。
6 阪神高速道路3号神戸線 大橋町付近	I型断面の鋼製主桁+RC床版	円形断面RC張り出し式					①, ②			I~V	交差点部のみ鋼製橋脚が使用されている。損傷度の異なるものが断続的に並んでいる。
7 第2神明高速道路JR山陽本線跨線橋付近	箱形構造の鋼製主桁+RC床版	1層I型ラーメンRC橋脚					②			V	上部構造の沈下あり。跨線部分の桁は、ゆるやかな円弧形状。
8 国道2号線・浜手バイパス 新港町付近	I型断面の鋼製主桁+RC床版	円形断面RC張り出し式					①, ②		○	III	阪神高速3号神戸線と立体交差したり、分岐したり複雑に入り組んだ地点、海岸に近い
9 阪神高速道路3号神戸線 弁天町付近	鋼製主桁+RC床版	矩形断面RC橋脚		○			①, ②	○	○	III~IV	連続桁支点部で矩形断面柱2本を用いた支持構造。上部構造の沈下あり。

* 1 [①橋脚倒壊による
②落橋防止装置の損傷による

* 2 [①主鉄筋の露出・はらみ出し
②躯体の傾斜・沈下
③完全倒壊

の一つである。この区間の構造型式は、PCゲルバー桁と呼ばれるもので、昭和40年当時ヨーロッパ、特にドイツで多く採用されていたピルツ（きのこ）橋と似た形式で、橋脚は、円形断面を有するRS張り出し式（高さ10m～12m、直径3.1m）で、主桁（縦約20m、横約13.7m）と一体構造をしており、橋脚間はつり桁（約22m）で結ばれている。同一規格のため製品化しやすく、工期短縮と経費削減が図れるメリットがあるが、桁自重が重くなり

橋脚1カ所にかかる重量は、他の工法に比べて大きくなるデメリットがある。この区間のゲルバー桁形式の桁の被害を写真1、2に示す。橋脚を支えていた17本の橋脚すべて破壊し桁全体が屏風状に山側（橋軸に直行する方向）に倒壊した。この橋脚は、直径35mmの主鉄筋が約180本入り、主鉄筋を束ねるが横方向の帯鉄筋（直径16mm）が20cm間隔で巻かれていたが、主鉄筋の段落とし部分で倒壊している。主鉄筋は圧接部で破断しているの

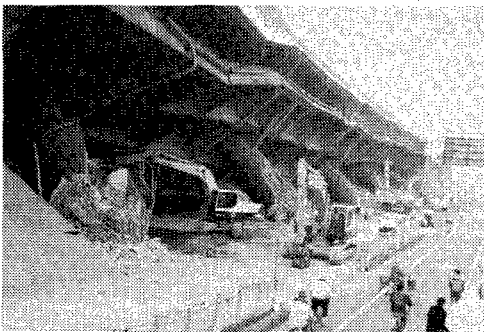


写真1 PCゲルバー橋（ピルツ橋）の被害

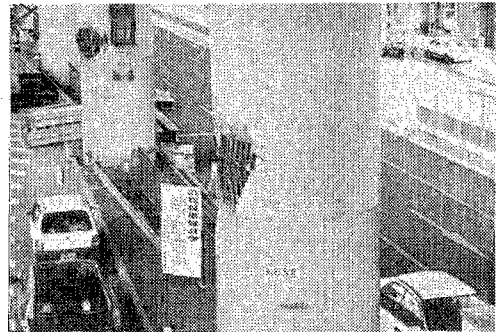


写真4 RC橋脚中間部でのせん断破壊

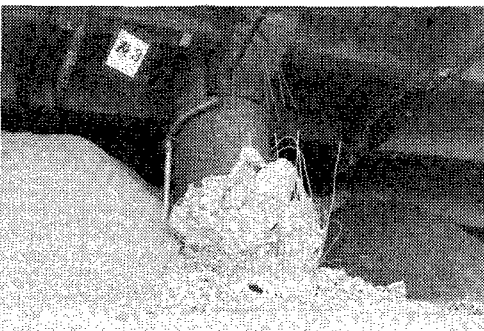


写真2 PCゲルバー橋（ピルツ橋）の橋脚の倒壊

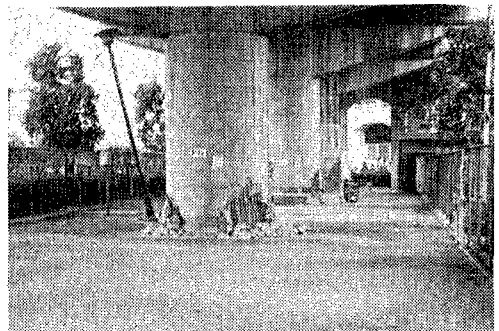


写真5 RC橋脚の基礎の曲げ破壊

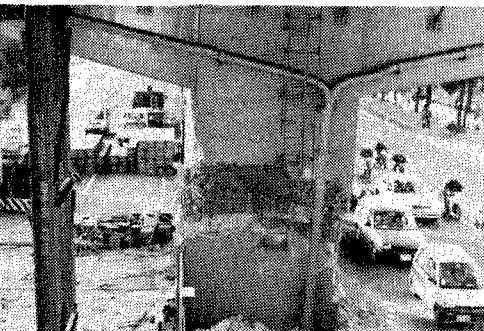


写真3 矩形断面RC橋脚のせん断破壊

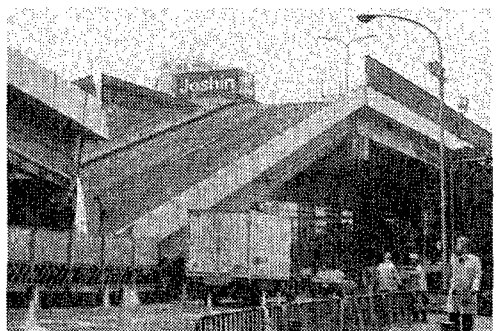


写真6 RC橋脚の崩壊による落橋

が認められた。また、写真3は、RC単橋脚の壊
 状況である。せん断破壊により、かぶりコンクリー
 トが剥落し鉄筋はバラバラに露出している。地上
 から2~3mの段落としの部分で、破壊しており、構
 造上、この部分に問題があったと思われる。神戸
 線では、その他、RC橋脚中間部での破壊(写真破
 4)、基礎部の曲げ破壊(写真5)、落橋(写真6)等
 が見られ崩壊した単柱橋脚は55本以上に及んだ。
 これらの崩壊の原因究明は、今後の研究を待たね
 ばならないが、今回の地震の水平加速度が、設計
 値を大きく上回った(400gal以上と推定)事は明
 らかであり、多くの橋脚が鉄筋の降伏する以上の
 力を受けてせん断破壊したものと考えられる。また、こ
 れらの橋脚の多くは、大阪万博前後(昭和40年)
 に旧基準によって設計施工されたものであり、鉄
 筋の段落とし位置の選択、水平打継目、鉄筋のガ
 ス圧接継手、帯鉄筋の定着等の施工が、耐震安全
 性上十分であったかどうか等検討する必要がある。
 また、コンクリート橋脚の被害は、新しい基準で
 施工されたものもあり、今後、詳細な調査研究に
 よって、破壊原因、特に構造物が受けた地震動と
 被害との関係等を究明し、コンクリート構造物の
 耐震設計法に反映する必要がある。

3. 2 地下構造物の被害

今回の地震では、神戸高速鉄道(大開駅、高速
 長田駅、大開~長田間のトンネル部)、市営地下鉄
 (上沢駅、三宮駅、駅間トンネル部)、JR六甲トン
 ネル、神戸トンネル、電力、通信の地中線洞道、神
 戸市の上下水道施設など多くの被害を受けた。こ
 れらの被害は、今までの耐震設計の常識を越えた
 ものであり、国内で、地下構造物でこのような大
 きな被害を受けたのは始めてである。土木学会で
 は、耐震工学委員会、地下構造物調査グループ(主
 査:都立大学岩楯教授)を組織し、被害の実態に
 ついて調査検討中である。表4に調査対象の被災
 した地下構造物を示す。ここでは、その中で特に被
 害の大きかった地下鉄の被害を中心にその概要を
 示す。

(1) 大開駅舎の被害

(1-1) 被害の概要

表4 地下構造物の被害一覧

被災施設	被災構造物の種類	被災場所
神戸高速鉄道 1) 大開駅 2) 高速長田駅 3) 大開~高速長 田間のトンネル部	1) 地下鉄駅舎(1963年頃 施工) 2) 地下鉄駅舎 3) 地下鉄トンネル(開削工 法)	神戸市兵庫区~ 長田区
神戸市営地下鉄 1) 三宮駅 2) 上沢駅 3) 新長田駅 4) 駅間トンネル部	1) 地下鉄駅舎 2) 地下鉄駅舎 3) 地下鉄駅舎 4) 地下鉄トンネル(開削工 法)	神戸市中央区~ 長田区
三宮地下街 「さんちか」	1) 地下街 2) 地下駐車場	神戸市中央区 三宮駅近く
ハーランド地下街	1) 地下街 2) 地下駐車場	神戸市中央区 JR神戸駅近く
阪神電鉄 本線 岩屋駅~三宮駅間	地下鉄トンネル(1933年施 工)	神戸市灘区~中 央区
三陽新幹線 1) 六甲トンネル 2) 神戸トンネル	山岳トンネル	西宮市~神戸市 須磨区
北神急行電鉄 新神戸駅~谷上駅 間のトンネル	山岳トンネル	神戸市中央区~ 北区
公園下駐車場	地下駐車場(公園下)	神戸市長田区
神戸電鉄 有馬線 1) 会下山トンネル 2) 東山トンネル 3) 有馬トンネル	山岳トンネル(1928年施 工)	1), 2): 神戸市兵 庫区 3): 神戸市北区
西宮北道路 盤滝トンネル	山岳トンネル(NATM工 法で1991年頃完成)	西宮市中部(県 道・大沢西宮線)
塩谷台放水路トン ネル	水路トンネル(NATM工 法)	神戸市垂水区 (位置不詳)

大開駅舎は、昭和39年1月に竣工した地下2階
 鉄筋コンクリート構造である(図19)。駅舎底部は、
 GL-12.02mに位置し、土被りは地下1階部で約
 1.9m~2.0m、地下2階部で約4.9mとなっている。
 地盤は沖積層の砂、砂質ローム、砂礫、粘性土か
 らなり、N値は10~50と変化しており、地下水位
 は、地下面下約3~4mと思われる。駅舎部、線路
 部は、いずれも開削工法で施工されている。駅舎
 地下2階の鉄筋コンクリート製中柱(幅100cm×
 奥行き40cm×高さ約4mの角柱)が完全に圧壊し、
 上部スラブが線路に沿って押し潰された状態
 であった。中央の支柱は、基礎部と頂部でせん断破
 壊しており、軸鉄筋は大きく線路方向、直角方向
 に曲がって露出し、帯鉄筋も完全に破断していた

(図20、写真7、8)。側壁部は、四つ隅角部で破壊していたが、損傷の程度は中柱に比べて小さかった。大開駅舎直上の地表面（国道28号線）では、長さ約100m、幅28mに渡って最大で約3m陥没

していた（図21、写真9）。これは、駅舎の倒壊によるものとする。長田駅舎から大開駅舎にいたる約600mのトンネル部では、中央の支柱の倒壊（せん断破壊）が見られたほか、海側の側壁と底盤

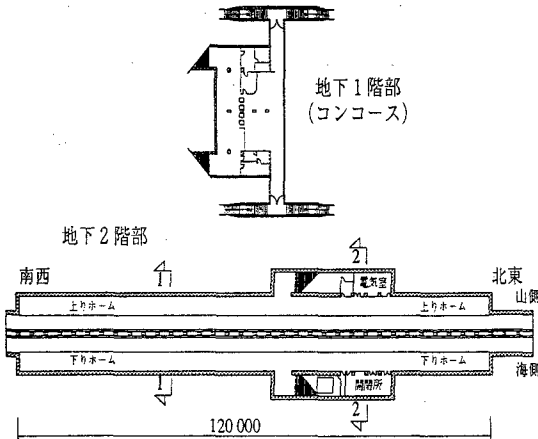


図19(a) 大開駅平面

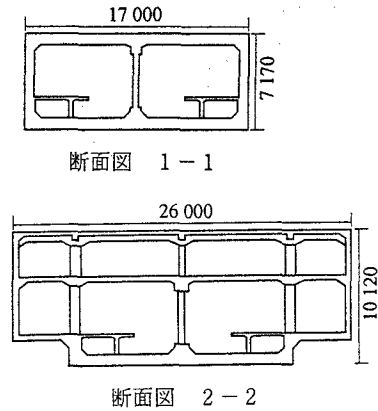


図19(b) 代表断面

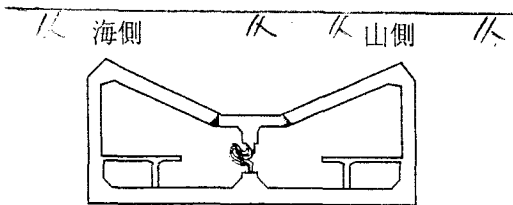


図20(a) 中柱 (No.10) の破壊状況

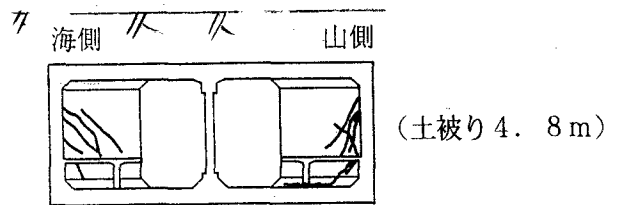


図20(b) 妻壁のひび割れ状況



写真7 神戸高速鉄道大開駅地下2階の中柱の被害 (a)



写真8 神戸高速鉄道大開駅地下2階の中柱の被害 (b)

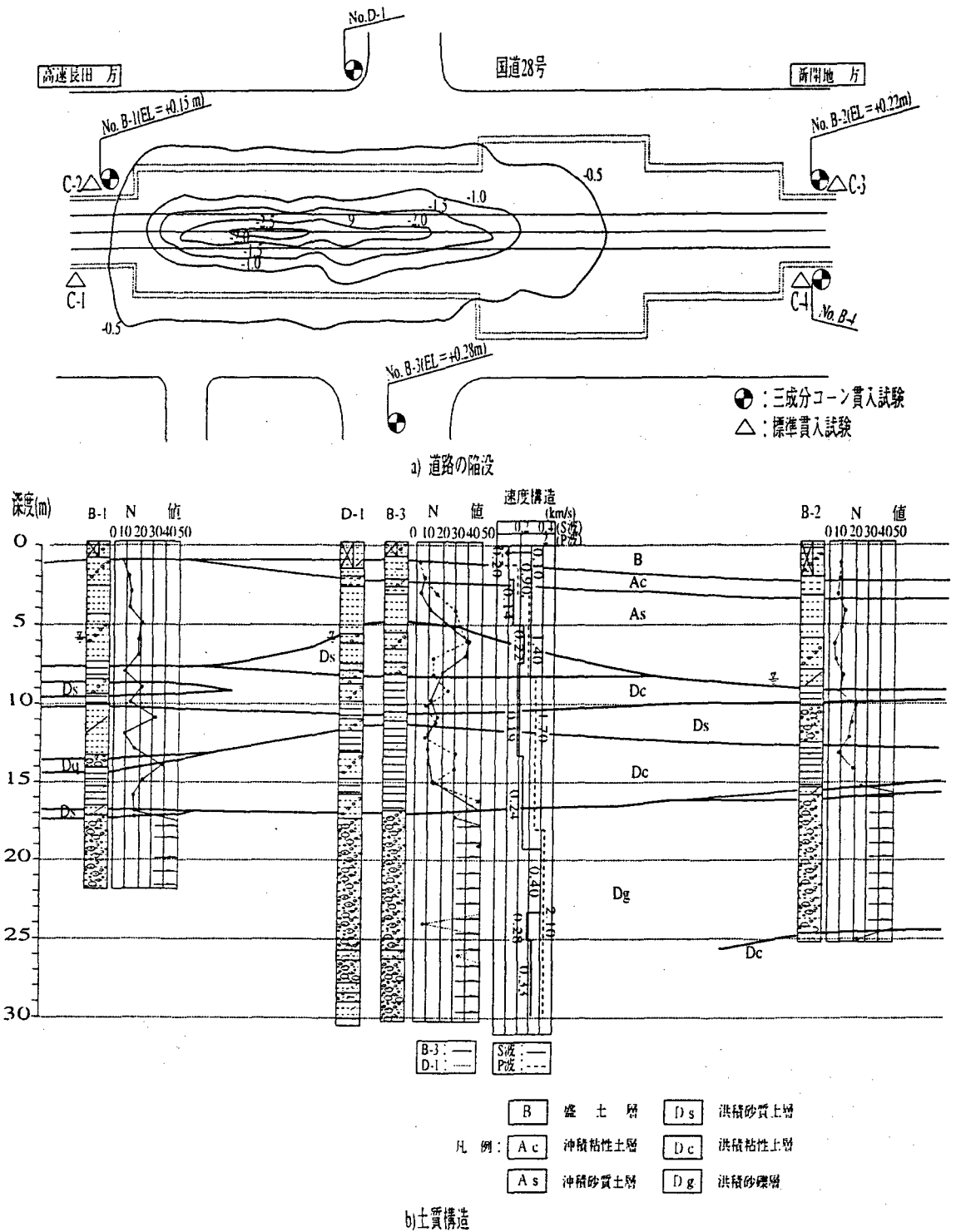


図21 道路の陥没および土質構造

の打ち継ぎ目で内側に最大15cm程度ずれており地震時に側壁が動いた形跡が観察された(写真10)。中柱の破壊の程度は大開駅に近づくほど大きかっ

た。大開駅舎から長田駅舎にいたるトンネル部でも同様の被害がみられた。



写真9 神戸高速鉄道大開駅地上部の陥没



写真10 神戸高速鉄道地下鉄の被害(大開駅~長田駅間の側壁と底盤ジョイント部の破壊内側に15cm移動)

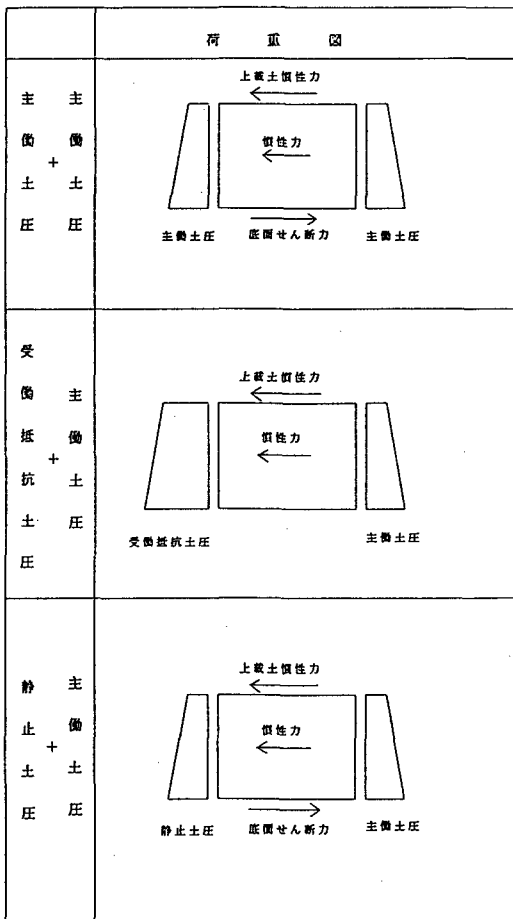
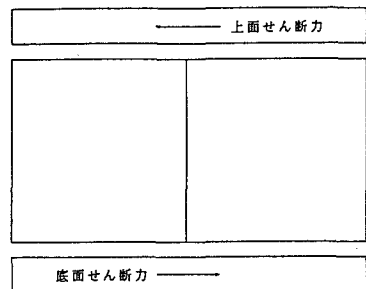
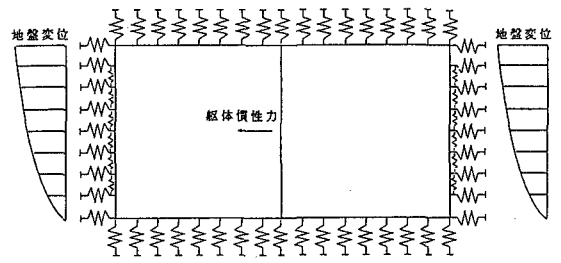


図22 震度法による地震荷重の作用パターン図



(a) 上・底面に作用させる地盤のせん断荷重



(b) 側面に地盤バネを介して作用させる自由地盤変位

図23 応答変位法の構造モデルと地震荷重系の例
- (a)と(b)とを同時に考慮する -

(1-2) 大開駅舎の倒壊の原因

神戸高速鉄道の設計では、自重および側壁に作用する常時土圧および、上載土重を考慮しているのみで、特に地震の影響（地震時土圧）は考慮していないとの事である。被害原因についてはどのような地震力が大開駅舎に作用したか明らかでないため特定できないが、今後の詳細な検討により明らかにしたいと考えるが、ここでは今までの検討した解析結果に基づいて現時点における見解を述べる。前述の神戸大学の観測記録やポートアイランド観測記録を用いて、大開駅舎に作用する地震力を推定し、現行の震度法、応答変位法により検討した（図22、23）。この場合、地震を受ける前は、側壁、中柱の上下端部がいずれも上下床版に剛結されている場合を想定している。その結果、駅舎には、水平地震動により周辺の地盤より側壁に設計値以上の大きな土圧（変位）が作用したほか、自重による慣性力に加えてかなり大きな上載土の水平慣性力が駅舎上部床版にせん断力として作用したものと推定できる。また、中柱の圧壊については、次のような仮定が考えられる。すなわち側壁、中柱とも、上下床版に剛結されている場合には、水平慣性力はほとんど側壁によって分担され、中柱に作用する曲げモーメントは小さい。水平震度を増加させても側壁の分担率は低減せず中柱の曲げモーメントは、降伏モーメントを越える事はない。しかし、側壁と上床版あるいは下床版がピン結合である場合（側壁部に何らかの損傷があった場合）は、中柱の分担する水平荷重が増大し、曲げモーメントも増加する。このような場合、水平震度が、0.6~0.65に達すると中柱には降伏モーメント以上の曲げモーメントが作用する事が算定できた（図24）。また、これらの結果を動的解析法による解析結果と比較すると上載土の慣性力をせん断荷重として適正に評価すれば比較的良い対応を示す事が分かった。以上の解析から、大開駅の倒壊のメカニズムとして次のように考えられる。大きな水平地震力（水平震度0.6以上：主として上載土の慣性力）により、側壁下端部の底盤部との打ち継ぎ部付近、あるいは側壁と上床版との接続部が破壊し、側壁と上床版あるいは下床版がピン結

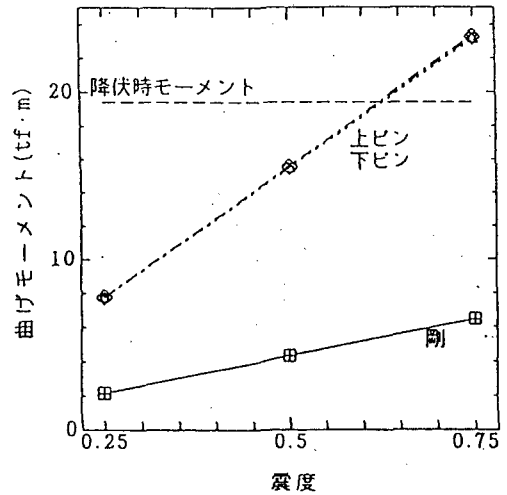


図24 上載土の震度と中柱に生ずる曲げモーメント

合に近い状態あるいは水平方向に移動し、側壁の受けていた地震荷重が解放され中柱に集中したため曲げ破壊し、上載土を支持出来なくなったため、中柱が圧壊したと考えられる。これらの破壊形態は、特に上下動による大きな影響が無くても起こり得るものと考えられる。このような見解が正しいかどうかは今後の調査検討で明らかとなる。また、どの程度の地震力がどのような分布で構造物に作用したかは正確には判らないものの設計値以上である事は十分考えられる。

(2) 神戸市営地下鉄上沢駅の被害

上沢駅舎は、市街地型トンネル地下2階鉄筋コンクリート構造で、1、2階一体構造となっている。地下2階は中央がホーム、左右が線路部となっている。地下鉄は昭和58年6月に開通した。また西側線路部も市街地型トンネル構造である。駅舎周辺の地盤構造と地下水位は、大開駅とほぼ同様である。駅舎、線路部は削開工法で施工されており、土被りは駅舎部で約5m、線路部で約11mである。駅舎地下1階ならびに2階において鉄筋コンクリート支柱（幅1.4m、奥行き0.7m、高さ4mの角柱）が約40本、地下2階に相当する深さの線路部でコンクリート支柱（幅1.5m、奥行き0.6m、高さ4.3mの角柱）約50本が損傷を受けている（写真11）。損傷の程度は、大開駅の場合より小さいが、コン

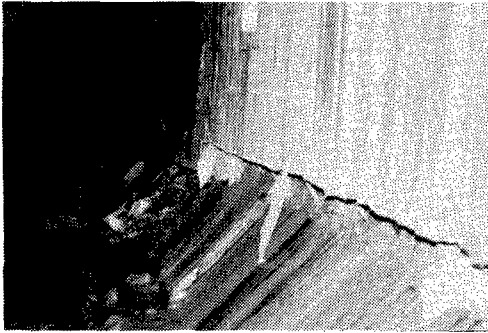


写真11 神戸市営地下鉄上沢駅地下2階のRC支柱の破壊

クリートと主鉄筋、帯筋が分離し、鉄筋の露出が見られた。支柱の破壊形態は水平力による曲げとせん断破壊と考えられる。今回の地震では、大開駅の場合と同様設計値以上の水平力が作用したものと考えられる。一方、駅舎2階の鋼製円柱（直径約80cm）には被害が認められなかった。

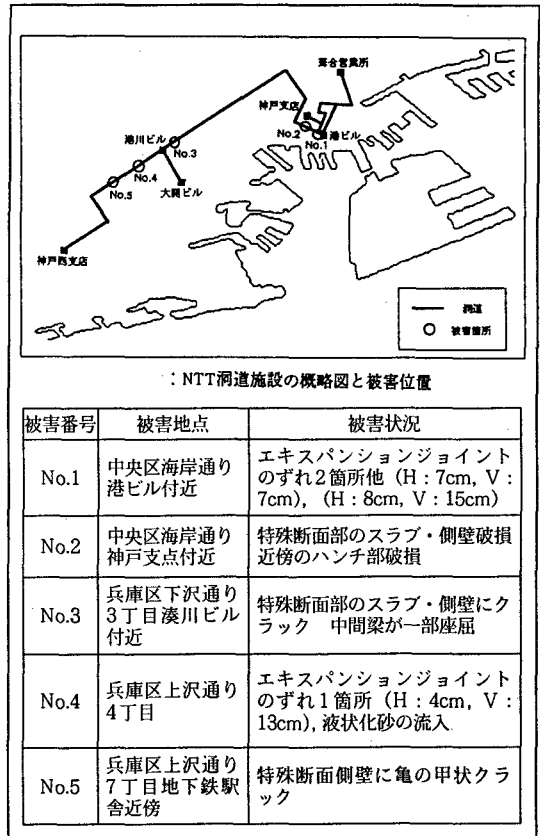
(3) 神戸市営地下鉄三宮駅の被害

三宮駅では、駅舎や地下1階、2階の電気室、換気用機械室の鉄筋コンクリート製中柱（幅0.9m×奥行0.7m×高さ4mの角柱）約30本に損傷が生じたが（せん断破壊によるコンクリートの剥離・鉄筋の露出）、上の2つの駅舎の被害に比べて小さく、地下2・3階の鋼管柱の被害はなかった。

(4) NTT 洞道、その他の被害¹¹⁾

神戸市内のNTT施設は各営業所間を結ぶ全長約11kmの洞道施設と全長約11km、約4000スパンの地中管、架空線路から構成されている。洞道施設は、東灘区の3kmのシールド式洞道と中央区から長田区にかけての8kmの洞道（開削式、シールド式）からなる。設備被害としては、シールド洞道には被害はなく、中央区から長田区にかけて約4kmに渡り被害が集中している。主な被害は、表5に示すように矩形洞道の特殊断面、その近傍のジョイント部の破損である。また、神戸市内に埋設された約360km、約4000スパンからなる埋設管の2～3割に被害が生じていると報告されている。主な被害は、管路のマンホール内への押し出し、マンホール管の折損などであり、ケーブルには大きな被害はないようである。ケーブルは、建物との

表5 NTT 洞道施設の被害状況



取付部や電柱への引き上げ部において切断が見られた。ポートターミナル共同溝では、延長約1km何れも震度7に位置するにも関わらず、エキスパンションジョイント部でずれや開口が見られたが構造物本体には大きな被害がなかった。

電話通信施設は、震度7の領域で開削式洞道の一部に被害があったものの、機能的に致命的な被害には至っていない。

(5) 山岳トンネルの被害

今回の阪神・淡路大震災の被災地域内には、100を越える山岳工法トンネルが存在する。図25、表6に土木学会耐震工学委員会地下構造物の被害調査グループ（JR総研）が調査対象としたトンネルの位置および基本データと地震被害の概要を示した。この中で軽微な被害を含めて20余本のトンネルが地震の影響を受け、補修・補強を要するような大きな被害を受けたトンネルは、約10本であった。

表6-1 震災域の山岳トンネル一覧

No.	被害程度	トンネル名	企業体	種類1	種類2	単複別	長さ(m)	土被り(m)	覆工(t=cm)	幅、高さ(m)	地形、地質〔著名断層〕	被害状況
1	A	六甲	JR西日本	鉄道	山陽新幹線	複線	16250	460	C	9.6、8.7	六甲型花崗岩類〔甲陽F、芦屋F、五助橋F、大月F、布引F〕	T-7天端のせん断クラック・剥落、側壁・T-7打継部の圧さ・剥落、中央通路壁の前傾、インバート隆起
2	B	神戸	JR西日本	鉄道	山陽新幹線	複線	7970	272	C	9.6、8.1	布引花崗閃緑岩が基盤をなし、須磨工区から神戸層群、〔布引F〕	アーチ肩部のクラック、湧水量増加、打継ぎ目の軽微な剥離
3	無	須磨	JR西日本	鉄道	山陽新幹線	複線	2388	45	C	9.6、8.1	神戸層群-砂岩、泥岩、礫岩	
4	無	奥畑	JR西日本	鉄道	山陽新幹線	複線	363	90	C	9.6、8.1	神戸層群-凝灰岩	
5	無	高塚山	JR西日本	鉄道	山陽新幹線	複線	3264	85	C	9.6、8.1	神戸層群-砂岩、泥岩、礫岩、凝灰岩 大阪層群-礫岩、〔高塚山F〕	
6	B	長坂	JR西日本	鉄道	山陽新幹線	複線	625	20	C	9.6、8.1	大阪層群-砂岩、泥岩、礫岩	打継ぎ目の軽微な剥離
*7	無	第1名塩	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	1470	150	C	8.5、7.2	一部神戸層群-角れき凝灰岩、大部分は有馬層群-流紋岩~石英安山岩角れき凝灰岩	
*8	無	生瀬	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	1430	250	C	8.5、7.2		
*9	無	第1武田尾	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	570	95	C	8.5、7.2	有馬層群-流紋石英安山岩~角れき凝灰岩	
10	A	東山	神戸電鉄	鉄道	有馬線	複線	141	4~8	CB、C	8.4、6.5	大阪層群-泥岩、〔会下山F〕	アーチ肩部トンネル軸方向剥落、トンネル坑口面壁の既住クラック開口
11	A	会下山	神戸電鉄	鉄道	有馬線	複線	253	2~12.5	CB、C	8.1、6.2	大阪層群-砂岩、泥岩、礫岩、〔会下山F〕	坑口上部道路面にクラック
12	A	有馬	神戸電鉄	鉄道	有馬線	単線	450	6~43.5	CB、C	4.6、5.8	有馬層群-流紋岩	既住クラック(引張クラック)の伸び
13	無	五社	神戸電鉄	鉄道	三田線	単線	115	40	C	4.6、5.8		
*14	A	北神	北神急行	鉄道	北神急行線	複線	6983	350	RC(35)	8.4、6.93	花崗岩〔布引F〕	覆工コンクリートが圧縮破壊により剥離。クラック幅増大
*15	A	盤滝	県道路公社	道路	西宮北有料道路	2車線	1743	20~250	C(30) RC(35)	8.8、6.3	六甲花崗岩〔五助橋F、F1断層〕	鉄筋びり・圧さ、コンクリート剥落、路盤浮き上がり、輪切りクラック多数
*16	B	舞子(上り)	本四公団	道路	本州四国連絡道路	3車線	3293	4~50	C	14.7、9.9	大阪層群(礫質層)-花崗岩	クラック、天端沈下、仮インバートにクラック、切羽吹付け一部剥離
*17	B	舞子(下り)	本四公団	道路	本州四国連絡道路	3車線	3250	4~50	C	47.7、9.9	大阪層群(礫質層)-花崗岩	クラック、天端沈下、仮インバートにクラック、切羽吹付け一部剥離
18	A	布引(上り)	市道路公社	道路	山麓バイパス	2車線	3032	260	C(75)	9.5、7.6	破碎花崗岩	SL付近の覆工コンクリートの剥落、輪切り状ひび割れ
*19	B	第2布引	市道路公社	道路	山麓バイパス	2車線	3032	240	C	9.5、7.4	花崗岩	一部の両側監査路が沈下
20	無	平野	市道路公社	道路	山麓バイパス	2車線	622	85	C	9.9、7.4	花崗岩	
21	無	菊水山第1	市道路公社	道路	山麓バイパス	2車線	85	32	C	10.4、7.4	花崗岩	
22	無	菊水山第2	市道路公社	道路	山麓バイパス	2車線	116	25	C	10.1、8.2	花崗岩	
23	無	鶴越第1	市道路公社	道路	山麓バイパス	2車線	101	29	C	10.4、7.6	花崗岩	
24	B	鶴越第2	市道路公社	道路	山麓バイパス	2車線	207	40	C	10.4、7.6	花崗岩	目地に浮き、剥落
25	無	鶴越第3	市道路公社	道路	山麓バイパス	2車線	388	47	C	10.4、7.6	花崗岩	
*26	無	ひよどり台	市道路公社	道路	山麓バイパス	2車線	240	40	C(50)	9.3、7.2	花崗岩	
27	B	新神戸	市道路公社	道路	新神戸トンネル有料道路	2車線	6910	330	C(50)	9.3、7.5	花崗岩〔布引F〕	SL、アーチの打継ぎ目に浮き、剥落、側壁コンクリートに剥離
*28	B	第2新神戸	市道路公社	道路	新神戸トンネル有料道路	2車線	7175	330	C(50)	9.5、7.2	花崗岩	目地の浮き、剥落あり。ひび割れのひび割れ
29	A	唐櫃	市道路公社	道路	六甲北有料道路	2車線	1245	145	C	9、7	流紋岩質凝灰岩	目地の浮き、剥落、ひび割れ
30	無	有野第1	市道路公社	道路	六甲北有料道路	2車線	118	25	C	9.7、8.1	流紋岩質凝灰岩	
31	無	有野第2	市道路公社	道路	六甲北有料道路	2車線	369	35	C	9.7、8.1	流紋岩質凝灰岩	
32	B	六甲山	市道路公社	道路	六甲北有料道路	2車線	2843	280	C	10.1、6.7	花崗岩	目地の浮き、剥落。リンク状のひび割れ

表6-2 震災域の山岳トンネル一覧

No.	被害程度	トンネル名	企業体	種類1	種類2	単複別	長さ(m)	土被り(m)	覆工(t=cm)	幅、高さ(m)	地形、地質 [著名断層]	被害状況
33	無	篠原	市道路公社	道路	六有料道路	甲路	23	15	C	10.7, 6.7	花崗岩	
34	B	ひよどり	市道路公社	道路	西神戸有料道路	2車線	452	67	C	9.0, 7.0	花崗岩	目地の浮き、剥落
*35	A	塩屋谷川	市土木局	水路	河川		1705	4~80	C		大阪層群、六甲花崗岩	覆工コンクリートの施工ジョイントの目開き。クラック発生、断層部で8cmのずれ
*36	無	須磨	市開発局	水路			6000	140	C	5.6, 4.0	六甲花崗岩、神戸層群	
*37	無	須磨(延伸)	市開発局	水路			7451		C			
38	無	井吹	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	195	20	C(80)	10.2, 8.3	大阪層群	
39	無	太山寺第1(東行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	283	53	C(60)	10.6, 7.8	花崗岩、神戸層群	
40	無	太山寺第1(西行き)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	257	37	C(60)	10.6, 7.7	花崗岩、神戸層群	
41	無	太山寺第2(東行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	78	25	C(60)	10.6, 7.8	花崗岩、神戸層群	
42	無	太山寺第2(西行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	66	17	C(60)	10.6, 7.7	花崗岩、神戸層群	
43	無	藍那(東行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	1176	68	C(60)	10.4, 7.8	神戸層群	
44	無	藍那(西行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	1175	65	C(60)	10.4, 7.8	神戸層群	
45	無	長坂山(東行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	745	68	C(40)	10.6, 7.8	丹波層群、粘板岩	
46	無	長坂山(西行)	阪神高速道路公団	高速道	7号北神戸線	2車線	715	68	C(40)	10.6, 7.8	丹波層群、粘板岩	
47	B	宝塚東(上り)	日本道路公団	高速道	中自動車国道	3車線	364	62	C(80)	13.2, 8.2	チャート	打継ぎ目に剥落
48	B	宝塚東(下り)	日本道路公団	高速道	中自動車国道	3車線	362	59	C(80)	13.2, 8.2	チャート	打継ぎ目に剥落
49	B	宝塚西(上り)	日本道路公団	高速道	中自動車国道	3車線	347	42	C(80)	13.2, 8.2	花崗岩	打継ぎ目に段差、剥落
50	B	宝塚西(下り)	日本道路公団	高速道	中自動車国道	3車線	244	42	C(80)	13.2, 8.2	花崗岩	打継ぎ目に段差、剥落
51	無	高倉山第一(上り)	日本道路公団	高速道	第二神明	2車線	530	97	C(50)	9.3, 7.3	花崗岩	
52	B	高倉山第二(上り)	日本道路公団	高速道	第二神明	2車線	538	86	C(50)		花崗岩	打継ぎ目に剥落、肩部にひび割れ
*53	B	高倉山(下り)	日本道路公団	高速道	第二神明	2車線	579	87	C(30)	10.2, 7.5	六甲花崗岩	剥落、ひび割れ
54	B	月見山(上り)	日本道路公団	高速道	第二神明	2車線	236	43	C(80)	9.1, 7.7		左右肩部に縦断方向ひび割れ
55	B	月見山(下り)	日本道路公団	高速道	第二神明	2車線	228	34	C(80)	9.1, 7.7		左右肩部に縦断方向ひび割れ
56	無	的形	山陽電鉄	鉄道	山陽電鉄線	複線	196		BR(57)		流紋岩	
57	無	妻鹿	山陽電鉄	鉄道	山陽電鉄線	複線	181		BR(57)			
58	無	西神第2	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄線	複線	585	7	RC		大阪層群	
59	無	西神第1	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄線	複線	100	3	RC Box		大阪層群	
60	無	表山第2	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄線	複線	100		RC Box		大阪層群	
*61	無	表山第1	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄線	複線	770	41	C(30)	8.6, 7.1	大阪層群	
62	無	小寺	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄線	複線	425	7	RC Box		大阪層群	
63	無	落合	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄線	複線	1273		C	8.4,	神戸層群	
64	無	第1横尾	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄線	複線	247		C	8.4,	六甲花崗岩	
65	無	第2横尾	神戸市交通局	地下鉄	市営地下鉄線	複線	1803		C	8.4, 6.8	六甲花崗岩	

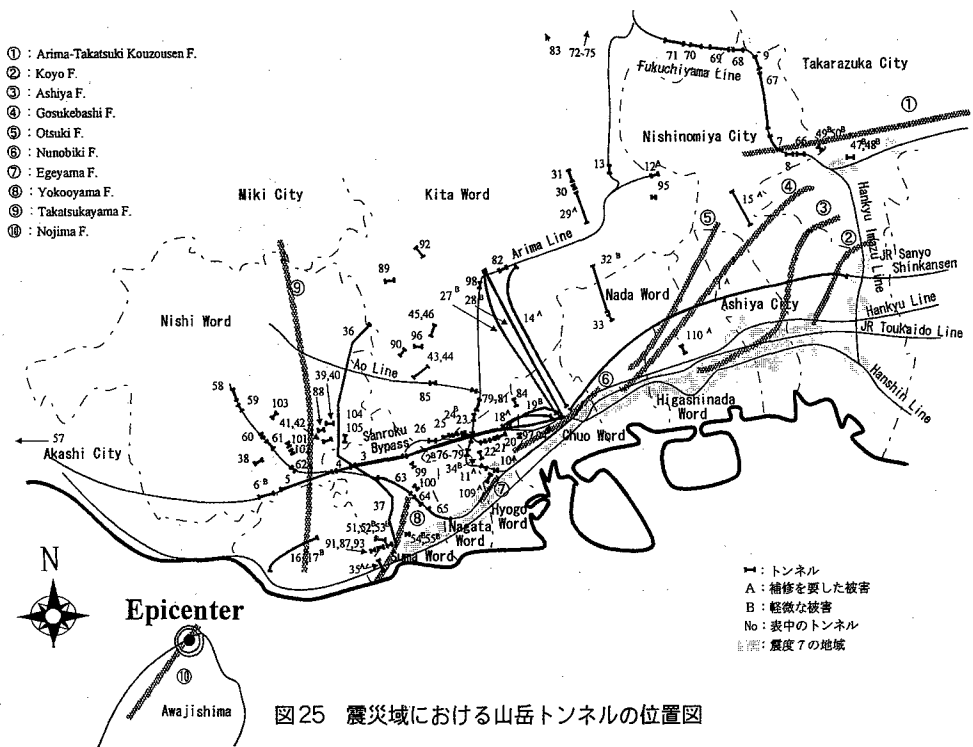
表6-3 震災域の山岳トンネル一覧

No.	被害程度	トンネル名	企業体	種類1	種類2	単複別	長さ(m)	土被り(m)	覆工(t=cm)	幅、高さ(m)	地形、地質[著名断層]	被害状況
*66	無	城山	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	65		C	8.5、7.2	有馬層群-流紋岩	
*67	無	第2名塩	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	2960		C	8.5、7.2		
*68	無	第2武田尾	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	705		C	8.5、7.2	有馬層群-流紋岩質溶結凝灰岩	
*69	無	第1道場	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	1235		C	8.5、7.2	有馬層群-流紋岩質溶結凝灰岩~凝灰岩質頁岩	
*70	無	第2道場	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	150		C	8.5、7.2	有馬層群-凝灰岩質頁岩~泥質凝灰岩の互層	
*71	無	第3道場	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	475		C	8.5、7.2	同上及び角れき凝灰岩	
72	無	日出阪	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	380		C	8.5、7.2		
73	無	第1古市	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	200		C	8.5、7.2		
74	無	第2古市	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	120		C	8.5、7.2		
75	無	丹南	JR西日本	鉄道	福知山線	複線	475		C	8.5、7.2		
76	無	鶴越	神戸電鉄	鉄道	有馬線		70		C			
77	無	中山	神戸電鉄	鉄道	有馬線		236		C			
78	無	角山	神戸電鉄	鉄道	有馬線	複線	46		C	7.7、6.1		
79	無	鳥原(下り)	神戸電鉄	鉄道	有馬線	単線	59		C			
80	無	鳥山(上り)	神戸電鉄	鉄道	有馬線	単線			C			
81	無	菊水山(上り)	神戸電鉄	鉄道	有馬線	単線	1184		C			
82	無	谷上	神戸電鉄	鉄道	有馬線		240		RC			
83	無	有井	神戸電鉄	鉄道	都市公園線		890		C			
84	無	小部	神戸電鉄	鉄道	粟生線		79					
85	無	藍那	神戸電鉄	鉄道	粟生線		78					
86	無	小部	市土木局	道路	4 2 8号	2車線	482	50	C	8.62、6.3	花崗岩	
87	無	鉄拐山	市土木局	道路	神戸明石線	2車線	466	20	C	9.06、6.0	神戸層群	
88	無	太山寺	市土木局	道路	明石宝塚線	2車線		50	C	8.48、5.9	花崗岩【高塚山F】	
89	無	衝原	市土木局	道路		2車線	249	20	C	8.0、6.15	有馬層群	
90	無	藍那	市土木局	道路	小部明石線	2車線	209	2	C	8.74、6.3	花崗岩	
91	無	下畑	市土木局	道路	神戸明石線	2車線	163	20	C	8.2、6.0	神戸層群	
*92	無	福地	市土木局	道路	4 2 8号	2車線	149	20	C	8.8、6.1	有馬層群	
93	無	須磨寺	市土木局	道路	神戸明石線	2車線	121	15	C	8.45、7.0	神戸層群	
94	無	再度	市土木局	道路		2車線	98	20	C	5.42、5.0	花崗岩	
95	無	新有馬	市土木局	道路		2車線	78	20	C		神戸層群	
96	無	東藍那	市土木局	道路	小部明石線	2車線	75	10	C	7.96、6.3	神戸層群	
97	無	服山	市土木局	道路	4 2 8号	2車線	44	15	C		花崗岩	
*98	無	箕谷	市土木局	道路	4 2 8号	2車線	330	20	C		花崗岩	
99	無	谷山東	市土木局	道路		2車線	125	30	C	10.89、6.1	花崗岩	
100	無	玉坂	市土木局	道路		2車線	200	10	C	8.25、5.0	神戸層群	
101	無	吹上	市開発局	道路	西神中央線	2車線	252	30	C	9.4、6.4	大阪層群	
102	無	前開	市開発局	道路	西神中央線	2車線	64	10	C	8.0、5.3	大阪層群	
103	無	西神2号線	市開発局	道路	西神2号線	2車線	105	20	C	9.0、6.0	大阪層群	
*104	無	布施畑上	市開発局	道路		2車線	227	30	C	11.0、6.0	神戸層群	
*105	無	布施畑下	市開発局	道路		2車線	321	30	C	9.0、6.0	神戸層群	
106	無	送水	市水道局	上水道								
107	無	隧道配水池	市水道局	上水道								
108	無	管路隧道	市水道局	上水道								
109	A	会下山		河川	新湊川		670	37	BR、ST	6.7、7.6	花崗岩、【会下山F】	煉瓦の剝離、剥落、亀裂
110	A	本山横坑			共同坑		344	96		3.0、3.0	花崗岩	天端、側壁、肩部の損傷

被害程度 A: 補強、補修を必要とした被害 B: 補強、補修を必要としなかった軽微な被害

覆工 C: コンクリート CB: コンクリートブロック RC: 鉄筋コンクリート BR: レンガ ST: 石造

No *: NATMによる施工



しかし、全体的には、地上部の構造物の甚大な被害に比較して、トンネルの被害は軽微なものが多かった。また、トンネルの被害箇所は、地盤地質条件、活断層と深い関連が見られ、断層破碎帯の周辺に集中していることが明らかとなった。

3. 3 ウォーターフロント部の液状化による被害⁹⁾

液状化の被害が大きかったウォーターフロント地域は、昭和35年より以前に埋め立てられた旧人工島地域と、昭和42年以降に埋め立てられたポートアイランド・六甲、アイランドの2つに大別される。ポートアイランドは、須磨の丘陵地から採取された土砂（平均粒径D50：0.2mm - 8mm、礫分15% - 65%、シルト分：3% - 35%）により造成され、六甲アイランドの埋立材は神戸の山中から採取した凝灰岩質の細粒分を多く含んでおりかなりの礫を含んでいる。図26に2つの人工島の埋立材料の代表的な粒径加積曲線を示す。これらは粒度配合が良好で締め固まりやすく、内部摩擦角も35度以上であり静的には安定した材料で、液

状化強度も大きい。図27にポートアイランド北部の代表的な地点の土質柱状図である。マサの埋立が18m深さまでなされており、それ以深に軟弱な沖積粘土層が存在している。30~60mの深度にN = 10~50の砂礫と粘土砂層の互層が存在しているが、高層建物の杭基礎はこの層を支持層としている。

筆者の研究グループは、地震の1週間後に2つの人工島の海岸線および本土側川の埋立地をトレスに被害状況をしらべた。六甲アイランド、ポートアイランドとも島全体が液状化していた。液状化したのは主として埋立に用いたマサ土と考えられる（写真12）。

(1) 護岸の被害

2つの人工島とも一部の護岸を除いてほとんどが被害を受けたと思われる。ケーソン護岸、矢板護岸とも被害を受けた。ケーソン護岸の典型的なものは、軟弱な粘性土の海底地盤を掘削しこれを砂地盤に置換した上に設置されている。被害の形態は、図28、写真13、14に示すように前面に大きく移動しその後が沈下していた。北側岸壁は水

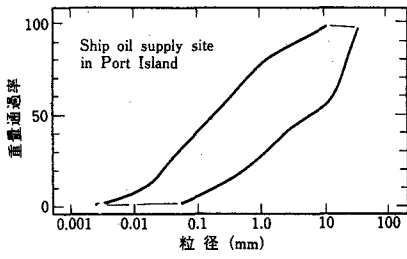


図26(a) ポートアイランド埋立地の粒径加積曲線

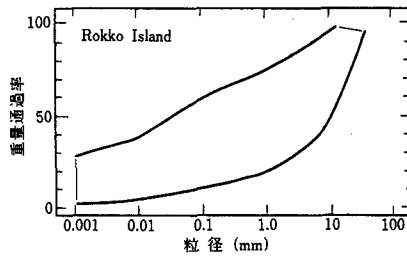


図26(b) 六甲アイランドの代表的な土の粒度曲線

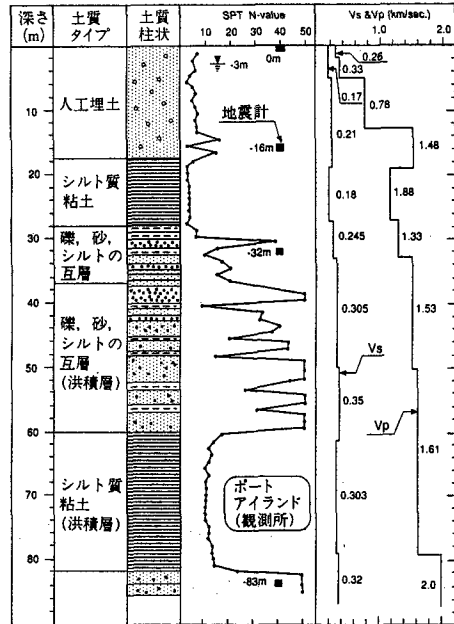


図27 ポートアイランド地震計位置の土質柱状

ケーソンが海に押しだされる

港湾施設損壊の最大の原因となったのが、広い範囲で起きた液状化現象。ポートアイランドでは島全域が液状化し、噴砂によって一面が泥沼のようになった。地盤も最大で60cmも沈下した



写真12 ポートアイランドの液状化による被害

没した。移動量は1m~3m、沈下量は2m~3mに達しているものもあった(図29、30)。ケーソン護岸の移動の原因は、護岸の基礎地盤の液状化による水平土圧(泥水圧)の増加によるものと考えられる。基礎地盤-構造物がどの程度液状化したか現段階では定かではない。ボーリング調査等によって明らかにする必要がある。港湾護岸の被害は、本土側の埋め立て地にも発生しており、特に建設年代の古い護岸が壊滅的な被害を受けた。これらの護岸のほとんどが、設計値以上の加速度を受けたものと考えられる。しかし摩耶埠頭の第一突堤の西側の耐震護岸(鋼管杭で支持された栈橋k式護岸で、設計水平震度:0.25)では、背面の一部にわずかな沈下がみられ、エプロンの境界部の継ぎ目に20cm程度の段差が生じた程度の軽微な被害にとどまり、耐震設計の有効性を証明していると言えよう。液状化によるライフラインの埋設管の被害の詳細は現時点では不明であるが、ガス、上下水道、通信等は、本土側の埋め立て地等でかなりの被害があったものと推定される。

(2) 液状化対策の効果

ポートアイランド、六甲アイランドとも全地域が液状化したわけではなく、両島ともサンドコンパクションパイル等で液状化対策が施工されていた区画では、噴砂や地割れなど液状化の痕跡は見あたらなかった。この地域の地表面の加速度は、250gal以上に達している事が港湾技研の観測データ(図31)等から明らかであるが、写真に示す事

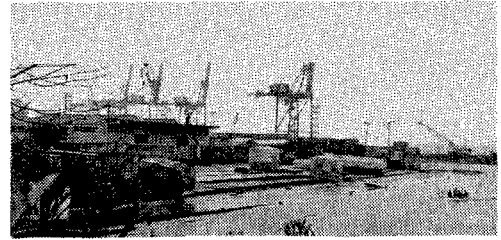


写真13 ポートアイランドの北側岸壁の水没

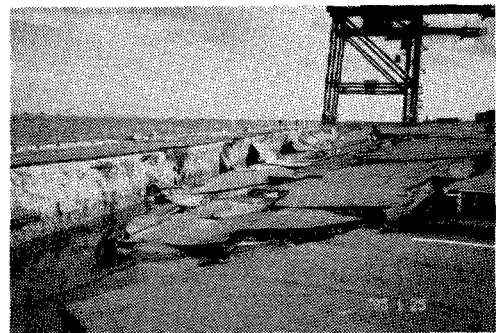


写真14 六甲アイランド護岸の液状化による被害

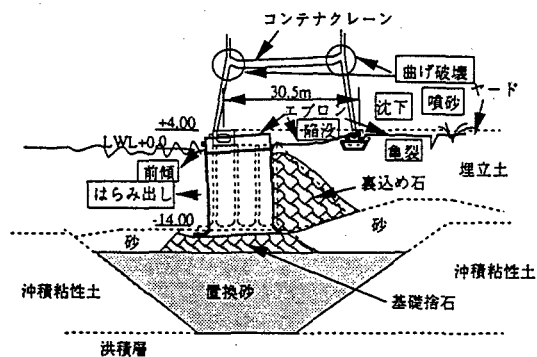


図28 ケーソン基礎岸壁被害模式断面図

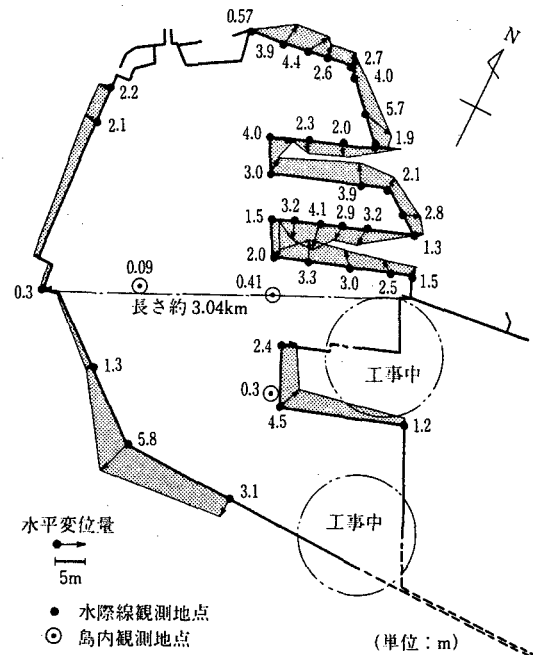


図29 ポートアイランドの岸壁の地震後水平変位(運輸省第三港湾建設局によるG.P.S.測量結果による)

例は液状化対策の効果が発揮された事を確認するものであり、今後の液状化対策を考える上で貴重な資料を提供している。また、両島とも、高層ビルは、建物と周辺地盤に数10cm程度の段差が生じたものの構造的被害を生じていない(写真15)。ポートアイランドのポートピアホテルの場合、建物の総重量100,000tに対し口径60cmのプレストレストレス杭が洪積砂礫層に約1000本打設されており、液状化に対する構造物対策が十分なされていた。

(3) 液状化に伴う地盤の側方流動

液状化による地盤の水平移動(側方流動)は、1983年の日本海中部地震を契機に始めて浜田等により発見されたが、今回の地震においても、ポートアイランド、六甲アイランドの海岸線、および本土側の埋め立て地の海岸線で多く観察され、浜田等により詳細な検討がなされている。液状化による地盤の側方移動により、六甲ライナーの六甲アイランド取付部橋脚の移動・傾斜、ポートアイランドにかかる神戸大橋の橋脚の落下等がある。

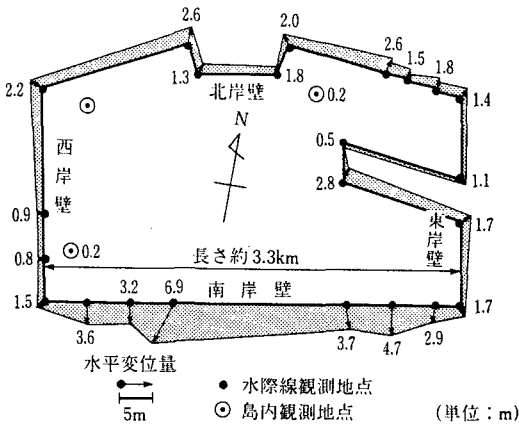


図30 六甲アイランドの岸壁の地震後水平変位(運輸省第三港湾建設局によるG.P.S.測量結果による)



写真15 ポートアイランドの高層住宅(高層ビル)周辺地盤噴砂少なく、ビルに被害無し)

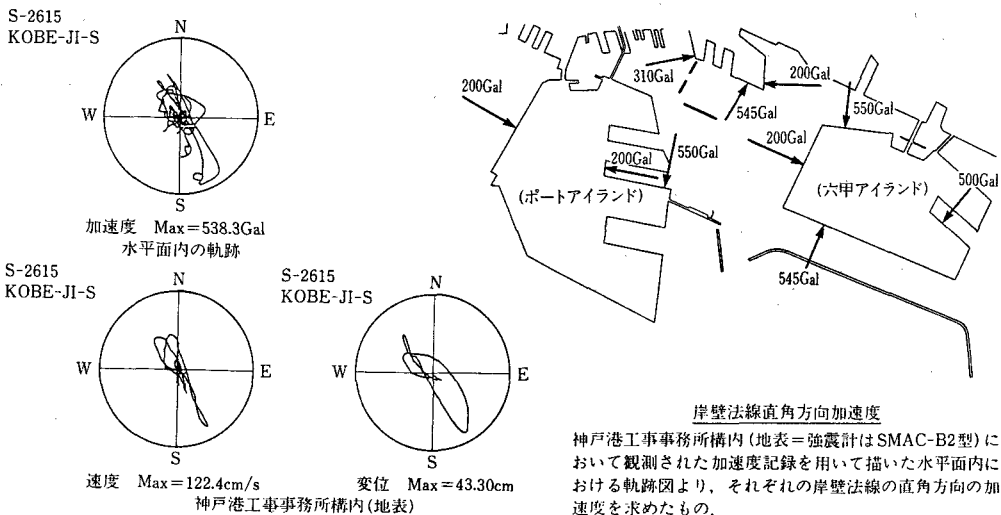


図31 神戸港の各岸壁における最大加速度ベクトル成分

常時微動観測日時 1995年8月7日21時22分11秒95

西宮市寿町(18N-3地点 NS成分)

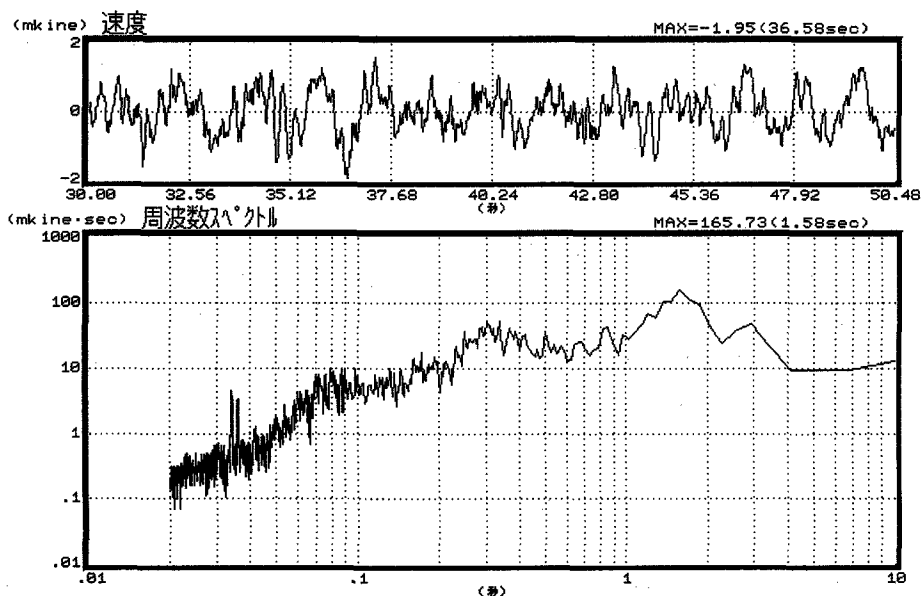


図32 常時微動解析データ

3. 4 常時微動観測による表層地盤の応答特性 と地震被害の関連性の検討

東京都立大学工学部土木工学科地盤工学講座では、平成7年8月7日～12日まで「文部省科学研究・総合研究(A)兵庫県南部地震の被害調査に基づいた実証的分析による被害の検証(研究代表者・京都大学防災研究所・藤原悌贈三教授)」の一環として神戸地域の地震被害と地盤・地形等との関係を明らかにするため、東灘区本山周辺-芦屋地区を対象に常時微動観測(約120点)を実施した。図32は、西宮市寿町の観測点(18N-3)における水平NS方向の時刻歴波形、および速度応答スペクトルの1例である。0.6Hz、2Hz～5Hzに卓越振動数が得られ表層地盤の応答特性が示された。今後、詳細な検討を行い観測結果と地盤条件、被害との関係などを明らかにする予定である。

4. 今後の課題

阪神・淡路大地震を教訓として、土木構造物を

対象に、今後の問題と研究テーマについて述べる。

- (1) コンクリート構造物の被害特性の分析
地中構造物を対象に、衝撃的かつ大振幅の地震動に対する地盤・構造物の動的挙動、破壊のメカニズムの検討を行う。
- (2) ライフライン施設の耐震性評価法、液状化および側方流動が及ぼす影響および、液状化対策法、保全対策法の確立
- (3) 常時微動観測による表層地盤の応答特性の把握
実施した常時微動観測データの分析により地盤・構造物の被害と地盤地形との関連性の把握

これらの研究をベースとして今後、兵庫県南部地震(直下型地震)や関東大地震を想定し

- (4) 多摩地域の地盤・構造物の地震時挙動の把握と被害想定を行い防災対策シナリオの検討を行う。

参 考 文 献

- 1) 社団法人土木学会 (1995) 『阪神大震災災害調査緊急報告会資料』
- 2) (財)電力中央研究所 (1995) 『1995年兵庫県南部地震被害調査速報 (調査報告: U94042)』
- 3) 鹿島 (1995) 『平成7年兵庫県南部地震被害調査報告書 (第一報)』
- 4) 鉄道総合技術研究所 (1995) 「1995年兵庫県南部地震による最大加速度の分布および被害について」、『JR地震情報』No.23b
- 5) 『科学朝日』緊急増刊「地震科学最前線」1995.3
- 6) 東京大学地震研究所 (1995) 広報 No. 8
- 7) Fukushima (1994) 「地震波の発生・伝播の理論を背景とした入力地震動の経験的予測」、『ORI 研究報告』93-07
- 8) 武村雅之 (1993) 「1993年釧路沖地震の発生メカニズムと地震動ーやや深発地震による強震動の特徴ー」、『第21回地盤振動シンポジウム』3-14.
- 9) 土木学会 (1995) 「阪神・淡路大震災特集 (1回~6回)」土木学会誌4月号~9月号
- 10) 清水建設技術研究所 (1995) 『1995年兵庫県南部地震調査報告』
- 11) 高田至郎他 (1995) 「兵庫県南部地震における電気通信施設の被害と復旧」、『土木学会第50回年次学術講演会』I-802、1604-1605.

Key Words (キー・ワード)

The Great Hanshin-Awaji Earthquake (阪神・淡路大震災), Earthquake Damage Investigation (地震被害調査), Underground Civil Engineering Structure (土木地下構造物), Seismic Design (耐震設計), Urban Disaster (都市災害)

Characteristics and Damage Investigation of the 1995 Great Hanshin- Awaji Earthquake

Takahiro Iwatate*

*Faculty of Engineering, Tokyo Metropolitan University
Comprehensive Urban Studies, No.57, 1995, pp.19- 53

The Great Hanshin-Awaji Earthquake (M=7.2) occurred at 5:46, 17th January 1995, caused unprecedented damages around Kobe City and Awaji Island, for example, more than 5500 human damages and a hundred thousand housing damages. Although the magnitude of this earthquake is similar to that of the Fukui Earthquake (M=7.1), the urban function will be injured for long term due to severe damages of urban infrastructures (high way, rail road and life lines).

Damage investigation were carried out immediately after the earthquake and the characteristics of disaster of civil engineering structures, especially underground structures has been clarified.