

2 被災地域における地形・地質と地盤構成

関西における地盤研究は表-2.1.1にあるように、時代時代の要請に合わせて行われてきた。しかしながら研究の中心は大阪を中心とした地域の浅層地盤であり、神戸や京都については研究や実体説明が遅れていることを素直に認めなければならない。特に兵庫県南部地震以前の神戸から阪神間にかけての地盤研究では、神戸市が1980年に発刊した「神戸の地盤」¹⁾と1989年発刊の「新修神戸市史」²⁾の他には、大阪地盤の研究の中で大阪の周辺地域として阪神間(尼崎市、西宮市、伊丹市)も取り上げられてきた程度であった。また付け加えるならば、1950年代から70年代にかけて行われた阪神間都市での市史編纂における自然地盤(主として地質学的な検討)の研究^{3)~6)}が進められていたが、地盤工学的な研究というのは皆無に近かった。その後、大阪中心の地盤研究から神戸や京都などの大都市の地盤研究に目が向き始め、1992年の「関西地盤」⁷⁾では、神戸と京都の地盤についてのまとめも行われた。このような背景を踏まえて、被災地域における地形・地質と地盤特性について簡単に紹介する。

表-2.1.1 関西における地盤研究史

研究題目	組織&代表者	研究年次
大阪市地質概観	山根新次	1930年
大阪府天然瓦斯調査報告書	大阪府商工部	1949年
大阪湾の地質	委員長: 藤田和夫	1964年
大阪地盤図	日本建築学会近畿支部・土質工学会関西支部(委員長: 鷺尾健三)	1966年
Report on Land Subsidence in Osaka	Editorial Committee	1969年
大阪地盤-洪積層の研究-	土質工学会関西支部(委員長: 村山朔郎)	1977年
京都市の地盤について	京都市(委員長: 小堀鐸二)	1978年
大阪地区地盤区分図	委員長: 西垣好彦	1980年
神戸の地盤	神戸市(監修: 藤田和夫)	1980年
泉州地域の洪積層における地盤沈下に関する調査研究	土質工学会関西支部(委員長: 村山朔郎)	1981年
関西国際空港地盤地質調査	災害科学研究所(中世古幸次郎編著)	1984年
大阪湾泉州沖海底地盤の工学的性質	運輸省港湾技術研究所	1984年
土質解析調査(大阪湾奥部の地盤研究)	大阪湾広域臨海環境整備センター・大阪土質試験所	1984年
新編大阪地盤図	土質工学会関西支部・関西地質調査業協会(委員長: 柴田 徹)	1987年
豊中地盤図	豊中市	1990年
大阪湾海底地盤	土質工学会関西支部(委員長: 赤井浩一)	1990年
関西地盤	土質工学会関西支部・地下空間の活用に関する研究協議会(監修: 土岐憲三・足立紀尚)	1992年
本州四国連絡橋地質地盤調査誌	本州四国連絡橋公団	1993年
海底地盤-大阪湾を例として-	土質工学会関西支部(委員長: 松井 保)	1995年
丘陵地の地盤環境	日本応用地質学会・関西地質調査業協会(委員長: 藤田 崇)	1998年
関西陸域の地盤研究が進行中	関西地盤情報活用協議会	1995年
大阪湾海底の地盤研究が進行中	大阪湾地盤情報研究協議会	1998年

2.1 兵庫県南部地震以前・以降における地盤特性の把握

この節では、兵庫県南部地震以前に分っていたこと、地震以降に行われた調査によって新たに分ったことの概要を説明する。

2.1.1 地震以前にわかっていたこと

(1)地盤構成

兵庫県南部地震で被害の大きかった神戸市から西宮市まで間の地形、地質、地盤の特性については、「神戸～芦屋」と西宮に分けることができる。

まず、六甲山麓に広がる神戸と芦屋の市街地は、六甲山から流れ出た東は夙川、西は妙法寺川までの間の小河川が作る扇状地が東西に連なった堆積地盤の上に発展してきた。明治のころの地形図を見ると、集落は扇状地末端の海岸寄りの水が豊富な場所などに発達し、現在の市街地は全て農地などであったことが分る。また、無数の溜池が見られ、市街化された現在この地域に溜池をほとんど見ることができないことからすれば、全てが埋立られたと考えられ、地震被害の大きさに大きく関与していることは指摘されているとおりである。

西宮は北部に六甲山麓の急傾斜地部とその下に広がる大阪層群に覆われた丘陵地と、さらに海岸まで広がる沖積低地に分けられる。西宮はこのように山地、丘陵地、沖積低地、更には埋立地と多様な地盤からなっていることと、地震被害も震度7の「震災の帯」も走り、今回の地震においても多様な被害が発生していることから研究の対象としては適切な地域でないかと考えられる。

須磨から西宮までの旧海岸線は白砂青松の海岸として知られ、戦前から戦後の臨海埋立造成が始まるころまでは市民の憩いの場であった。この海岸の砂は六甲山系からの小河川が運んできた真砂が潮流で運ばれて沿岸に堆積したものであり、場所によっては緩い状態で厚く堆積したり、また風浪の影響で若干締まった砂堆的な堆積状態を示している所もある。これが西宮域にはいと武庫川の三角州として広がり、緩い砂層が広い範囲にわたって地表面から堆積していた。このような沖積の砂層が液状化したことも今回の地震では明らかになったが、自然堆積の砂に対する液状化の研究も関西ではほとんどなされていなかったことも事実である。

図-2.1.1 は大阪湾沿岸部の断面図である⁸⁾。震源付近から遠く離れた泉南地域までの地盤の構成に大

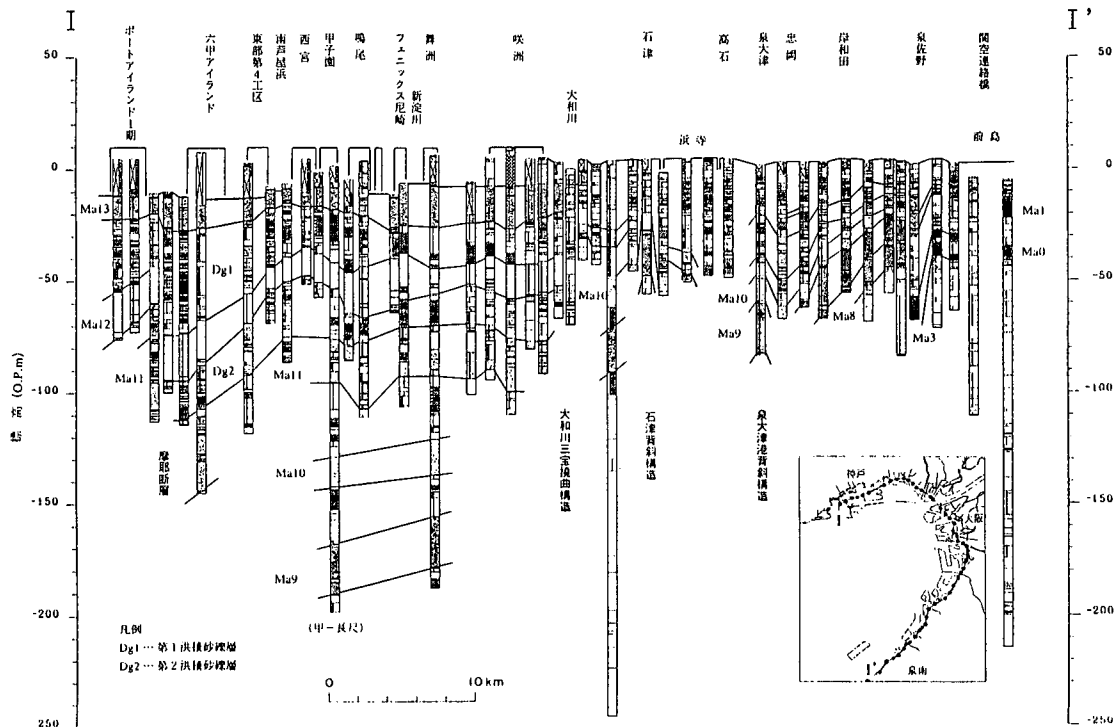


図-2.1.1 大阪湾沿岸部の断面図⁸⁾

きな変化はなく、表-2.1.2⁹⁾のような層序をしていることが知られていた。また、この図には沿岸域の大規模埋立地の概略の地層も示してあり、埋立層厚が10~20mに達している。埋立地の造成に用いた埋立材料を平面的に示したのが図-2.1.2¹⁰⁾であり、埋立材料は大きく分けて浚渫土(混合土)、浚渫粘土、まさ土、海砂、和泉層群、廃棄物(一般・産廃、建設発生土)に分類される。その中でもまさ土は古くから地震の大きさによっては液状化の対象になるといわれて^{11) 12)}いながら、系統的な液状化の研究が行われてこなかった。これは全国的に見ても同じことで、1993年の北海道南西沖地震で火山岩を含む砂礫層が液状化したことで、砂礫層の液状化が研究対象にされ始めたところであったことから考えてもやむを得ないことであったのかも分らない。

(2)地盤の特性

神戸付近の地盤の特徴の一つは海域に出れば別であるが、沖積層と洪積層の境界が明確に分らないことである。それは地表面から扇状地性の砂質土堆積物が分布しており、沖積の砂質土層と洪積の砂質土層をボーリング柱状図からだけの情報で分離する合理的な手段を持っていないことに起因している。この点については、神戸陸域でのボーリング調査において年代決定がなされたものがほとんど無かったことからやむを得ない点ではあるが、大阪地区や大阪湾では10年くらい前から行われてきたことなどを考えると、地盤の良さが裏目に出た感がある。

図-2.1.3 に沖積層の分布を平面的に示しているが、神戸や芦屋では国道2号線より山地側に追跡することは困難である。西宮では沖積粘土(Ma13)が内陸まで分布していたりするので、低地部では沖積層の追跡は比較的容易である。海域においては、陸域に比べボーリングの本数は少ないが厚い沖積粘性土層が存在するために、豊富な土質試験が行われているのと、地質学的な研究(地層の年代決定法の適用など)がなされているので、沖・洪境界については割と明確に把握されている。図-2.1.4¹³⁾には沖積海成粘土層(Ma13)および洪積海成粘土層(Ma12)の層厚分布を示している。この分布からは、両層ともに神戸沖が最も厚くなるような分布をしている。Ma13層は神戸市域ではほとんど旧海岸線付近で消滅しており陸域に追跡できない。しかし西宮市に入ると内陸に相当は入り込んでおり、海進の最大期にはこの付近まで海が入り込んでいたと考えられる。Ma12層もほぼMa13層と同じ分布をしており、Ma13層とMa12層ともに同じような堆積環境であったことが推定される。

表-2.1.2 大阪盆地及びその周辺を構成する地層⁹⁾

地質時代	絶対年代(万年)	地質区分	地質の特徴		
第四紀	完新世	沖積層	1 (2)	軟弱な粘性土層、緩い砂・砂礫層から成り、沖積低地、微高地(砂堆、砂州、自然堤防など)、扇状地などを形成する。その他、大阪湾岸を取り囲むように人工の埋立地が形成されている。	
			上部洪積層	13 (20)	海成の粘土・砂層と淡水性の砂礫・砂・粘土層が交互に現われる。 砂・砂礫層は通常構造物支持層となる。
	更新世	大 阪 層	上部 垂層群	(60)	海成の粘土・砂層と淡水性の砂礫・砂・粘土層が交互に現われる。山地に近い地域では全体的に砂礫層が優勢となる一方で、現在の堆積盆地より外側(内陸地域)にまで広く分布している。
			中部 垂層群	70 (120)	海成の粘土・砂層と淡水成の砂礫・砂・粘土層が交互に現われる。 現在、山地となっている基盤の小起伏面上にまで海成粘土層が分布している。
	鮮新世	170 (300)	下部 垂層群	淡水成の砂礫・砂・粘土の互層から成り、海成層は見られない。粘性土は一般に固く締まり軟弱を呈する。 現在、山地となっている基盤の小起伏面上にも、わずかながら残存している。	

大阪層群堆積以前は、基盤岩類が長期にわたって浸食され、小起伏面を形成していた。

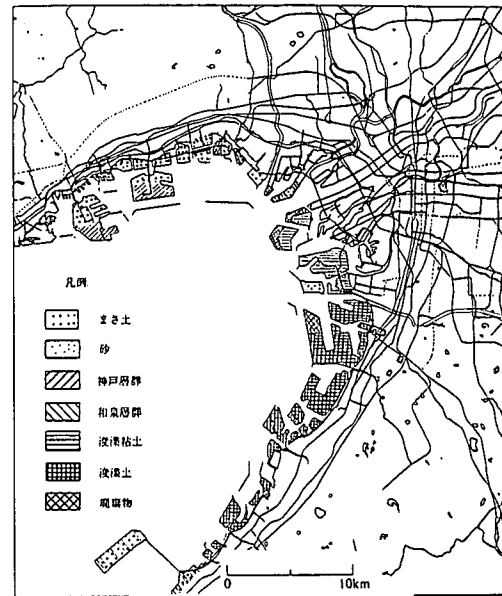


図-2.1.2 埋立材料¹⁰⁾

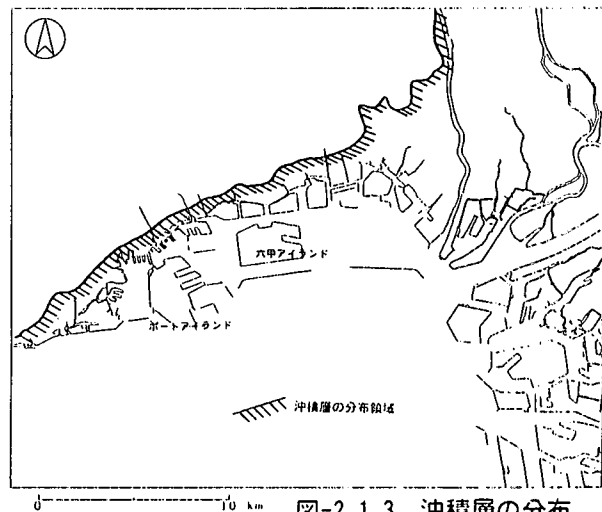
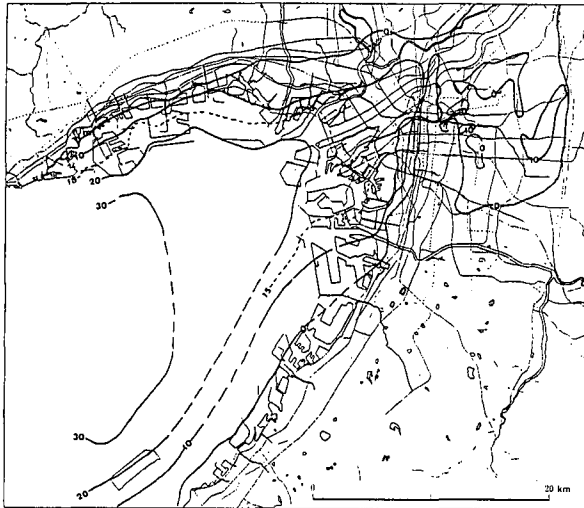
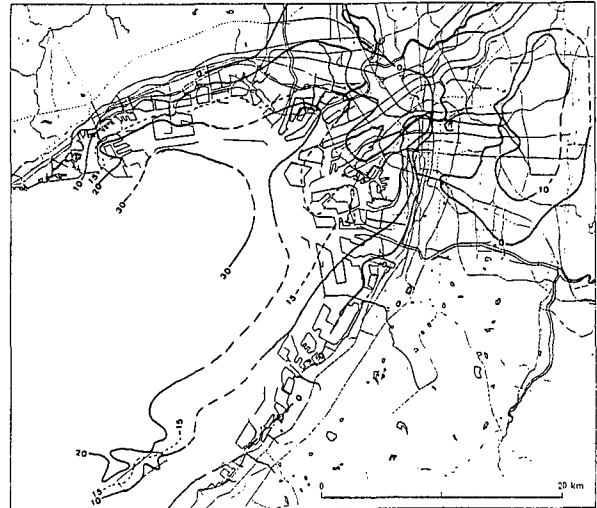


図-2.1.3 沖積層の分布



(a)Ma13



(b)Ma12

図-2.1.4 海成粘土層の層厚分布

2.1.2 地震以降の調査

表-2.1.3 に示すように地震以後に活断層調査や地震のための深層ボーリング、反射法地震探査を始めと

表-2.1.3 兵庫県南部地震以降に行われた地盤調査

調査目的	機関名	調査項目	内容
活断層・地質構造の把握と地震原因	通産省 地質調査所	反射法地震探査（陸・海上）	三田から六甲山を横断して神戸市街地など多数。大和川沿いで上町断層の続きらしいものを確認。泉州地域でも多数実施し、上町断層の南への延長を確認。海上は大阪湾・明石海峡で多数。
		深層ボーリング	神戸市魚崎浜（1500m+200m、オールコア）、神戸市石屋川（700mオールコア）、尼崎末広町（500m検層）、尼崎市若王子（500m検層）
		地震予知のための地下水観測井	池田市猪名川（1000mオールコア）、宝塚（1000m）、大阪市夕陽ヶ丘（600mオールコア）、その他11本
		トレンチ調査	野島断層、有馬・高槻構造線
		活断層調査	近畿～中部にかけての8断層（反射法地震探査、踏査、トレンチ、他） 生駒断層、奈良盆地東縁断層、中央構造線、琵琶湖西岸断層、花折断層、金剛断層、敦賀断層、桑名断層
	文部省 大学連合	反射法地震探査（陸・海上）	淡路島の野島断層を横断。播磨灘から大阪湾へ
		科学技術庁	深層ボーリング
	反射法地震探査（陸上）		大阪市舞洲、大阪府りんくうタウン
	深層ボーリング		猪名川群発地震、1000m以上と推定、岩盤応力測定、大阪市舞洲（2036m）、大阪府りんくうタウン（1535m）
	常時微動		阪神間で200点
	活断層調査		自治体の活断層調査に補助金
	海上保安庁 水路部	シングルチャンネル音波探査	地震直後に大阪湾西域、明石海峡を多数
		反射法地震探査（海上）	大阪湾奥
	兵庫県	反射法地震探査（陸・海上）	阪神間陸上も海上も多数。
		深層ボーリング	摩耶埠頭（500mオールコア）、東震50m級2本。
		成果	「兵庫の地質」出版
	大阪府	常時微動	府下1000点
		反射法地震探査（陸上）	坂本断層～久米田池撓曲
		浅層群列ボーリング	坂本、久米田、佛念寺で実施
	神戸市	反射法地震探査（海上）	神戸空港2測線（既に公表）
「神戸の地盤」		改訂に向け委員会が活動中（既存ボーリングの再収集・分析）	
大阪市	反射法地震探査（陸上）	浪速筋（南北測線）、25号線（東西測線）	
	深層ボーリング	西成区、中央区、城東区で各250mオールコア、検層	
関西電力	和歌山火力予定地	反射法地震探査（新聞情報）	
地盤の工学的性質把握	震災復興実施機関	ボーリング・原位置試験・室内土質試験（物理・力学・動的試験他）	土木構造物の復旧に必要な地盤の物理・力学・動的性質把握のための地盤調査・室内土質試験が多数実施された

する、多数の深部地盤調査が各機関で行われてきた。さらには震災復興関連で地盤の工学的性質を求める調査・試験が多数実施されてきた。この中には凍結サンプリングを行ない液状化強度を求めるなど、今まで関西圏では余り実施されてこなかったものも多数行われた。これらの調査結果は公表されつつあるが、多種多様な調査結果を総括するにはまだまだ時間を要するものと考えられる。

特筆すべきは神戸市東灘区魚崎浜において地質調査所の手で 1500m を越える大深度ボーリングがオールコア採取で実施され、地質学的な分析はもとより、動的特性検層、温度検層などの地球物理的調査のほか、圧密試験などの工学的試験も行われたことである¹⁴⁾。ここでは 1546m の深さで花崗岩が出現したといわれており、詳細は後述する。

基盤構造探査や大深度ボーリングにより大深度地盤の実体が判明してきたことは喜ばしいことでは有るが、6000 人を超える犠牲が無ければこのような実態把握が進まなかったと考えれば技術の進歩というもの社会性について考えさせられること多い災害であった。特に兵庫県や地質調査所が神戸やその周辺で実施した反射法地震探査による地質構造調査は、活断層の存在をあらためて認識させると共に、まだまだ細かい調査を行わないと、細かな断層線を引くことの困難さが浮かび上がってきた。

2.1.3 活断層

関西においては活断層は古くから知られていた。特に六甲山などは第四紀の地殻変動で出来上がったとされており、六甲山南麓には大きな活断層が北東から南東方向に走っている。古い研究ではあるが神戸市街地でブロック塀や擁壁、道路の縁石などに微小なずれが見られ、それが活断層の延長上にあることが指摘されたりしていたし¹⁵⁾、神戸市自身が実施した調査でも地震の危険性については把握していた¹⁶⁾。新神戸駅が諏訪山断層をまたがって作られたことも周知の事実であった。

阪神・淡路大震災以降、大阪湾内および神戸・阪神間で国、県及び市が反射法地震探査、深層ボーリングを実施している。

図-2.1.5 には反射法地震探査測線位置、調査ボーリングの位置を示している¹⁷⁾。図中の既存の東西測線では大阪湾断層の位置が確認されており¹⁸⁾、地震後の調査ではこの既存測線とクロスする形で探査が多く実施されている。

図-2.1.6 には反射断面と調査ボーリングの比較である¹⁹⁾。測線は市街地を通るものを選んで有る。この結果、震災の帯の直下には連続した活断層は存在しないという結論が導きだされている。魚崎浜の 1500m の東灘深層ボーリングの地質柱状図を図

2.1.7 に示す¹⁴⁾。この柱状図では 1500m までしかないが、地震計を設置するために更に掘り進み、1546m で花崗岩に到達している。

兵庫県でも摩耶埠頭の付根において、583.65m の大深度ボーリングを実施した。その結果は図-2.1.8²⁰⁾であり、アズキ火山灰などが確認され Ma 4 ~ Ma 1 層と Ma13、Ma12 層は確定されたが、Ma11 ~ Ma5 層の同定については今後の詳細な分析が必要で有るとされている。

この他にも、大阪舞洲で 2036m、大阪府りんくうタウンで 1535m のボーリングが行われ²¹⁾、基盤岩の

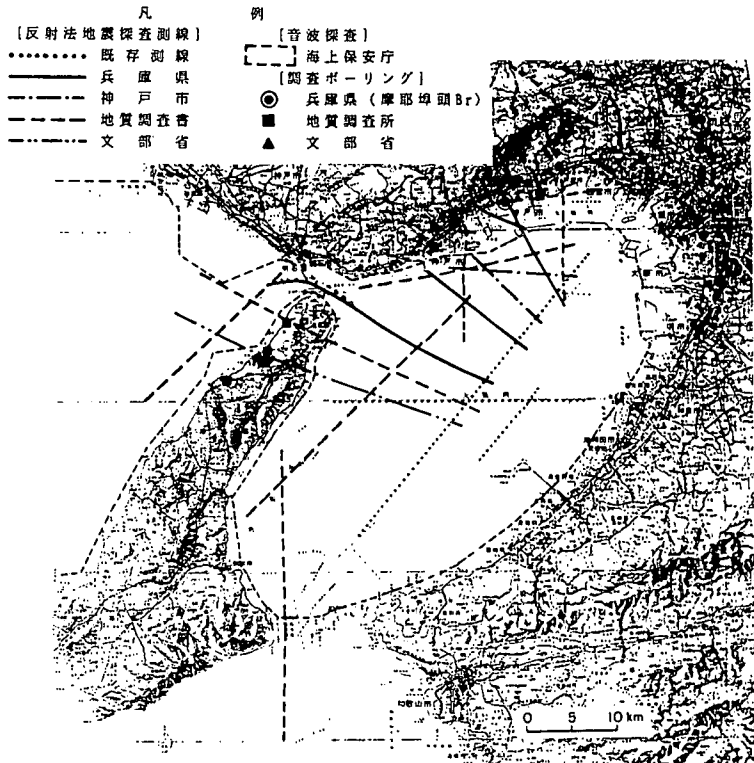


図-2.1.5 反射法地震探査測線位置及びボーリング位置¹⁷⁾

深さなどはまだ公表されていないが、舞洲では以前に行われた発破探査から約 1600m 程度、りんくうタウンでの反射法地震探査では約 700m 程度で岩盤に達するとされている。

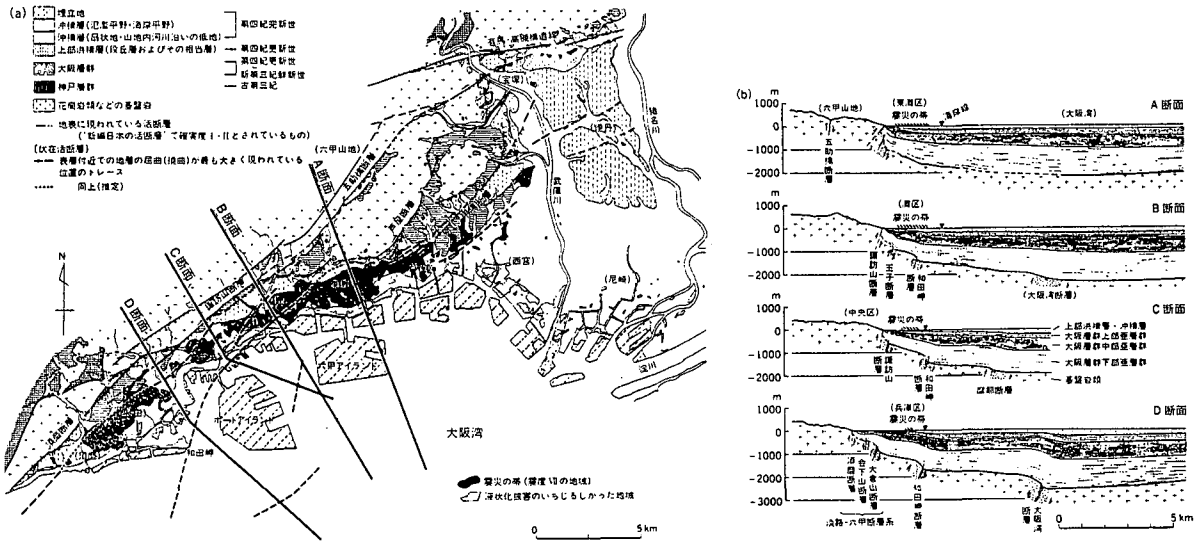


図-2.1.6 反射断面と調査ボーリングとの比較¹³⁾

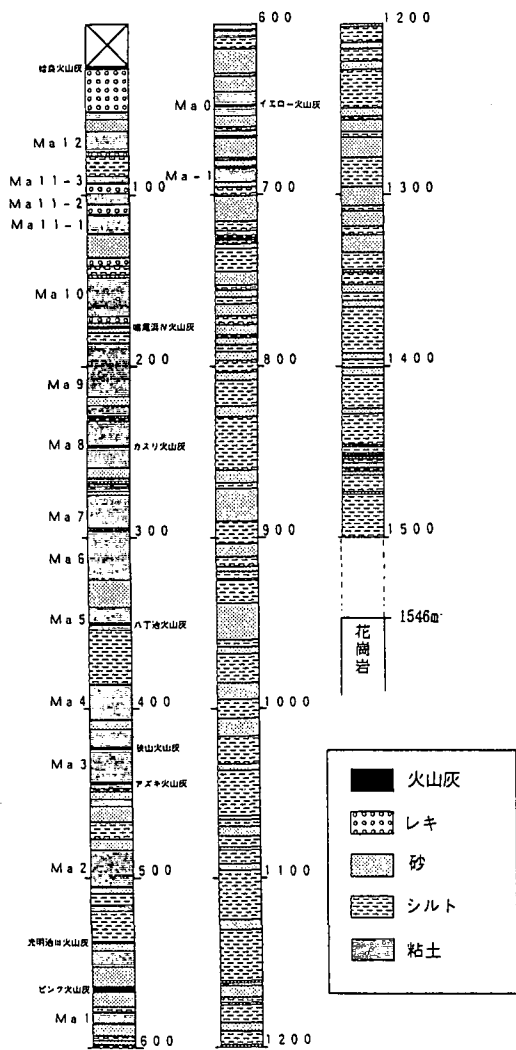


図-2.1.7 東灘深層ボーリング¹⁴⁾

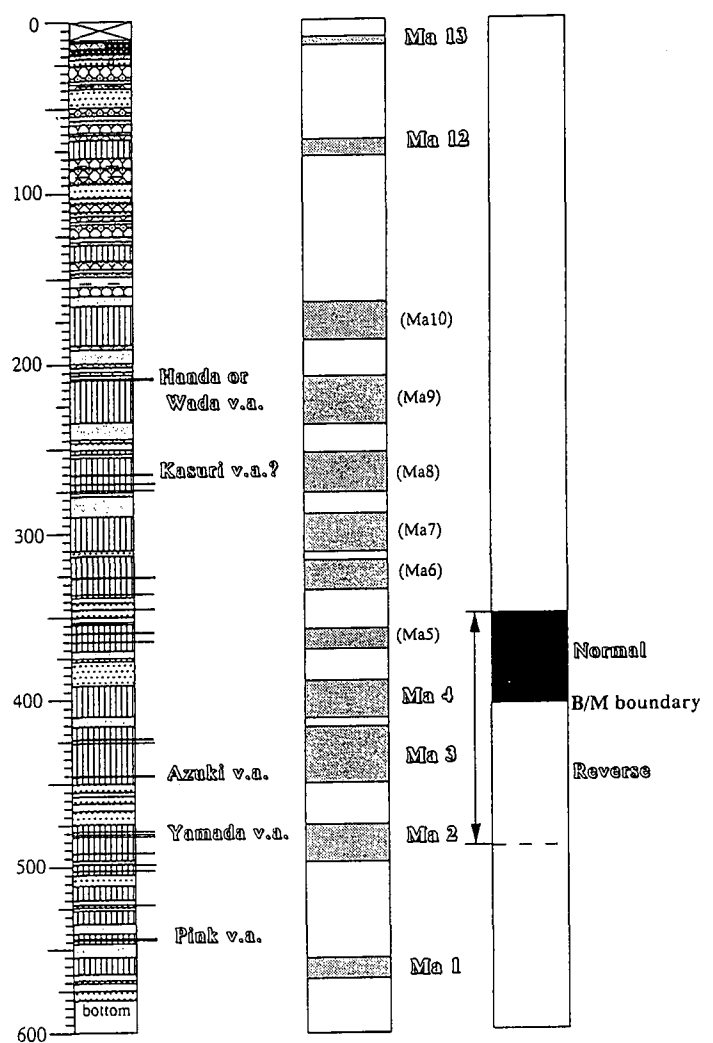


図-2.1.8 摩耶埠頭ボーリング¹⁵⁾

2.1.4 深部地質構造

関西では地震以前に深部地下構造を把握した調査は限られていた。例えば大阪湾、中之島沿い、淀川河川敷、南港（現咲洲）などで行われた反射法地震探査と、北港（現舞洲）で行われた発破による弾性波探査くらいで²³⁾、基盤岩に達する調査ボーリングは最近は皆無であった。

しかし、温泉掘削のためのボーリングが基盤岩に達しているものがあり、ようやく物理探査と温泉ボーリングなどにより基盤構造が少しずつ分り始めてきたところであった。地震以後は先述の通り、多数の反射法地震探査（海上、陸上）、重力探査、大深度ボーリングなどが行われるようになり、基盤構造が相当明確に分ってきた。

図-2.1.9²³⁾に、六甲山から大阪湾にかけての基盤岩の構造を示す。六甲山南麓沿いの急傾斜部が陸地から明石海峡にかけて続いていることと、大阪湾断層の北東への延長が六甲アイランド付近まで延びていることが分る。また、重力探査結果などによって大阪盆地（大阪平野と大阪湾を合わせた呼称）全体での基盤岩の構造も図-2.1.10²⁴⁾のように推定され、西大阪では1500~1900m、東大阪では1500~1700mの深さになる。

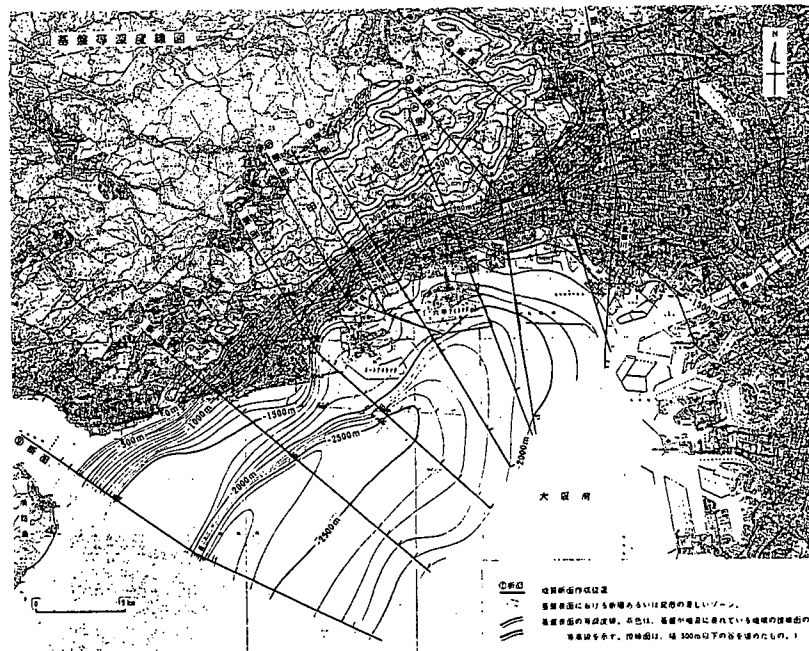


図-2.1.9 基盤岩表面深度線図²³⁾

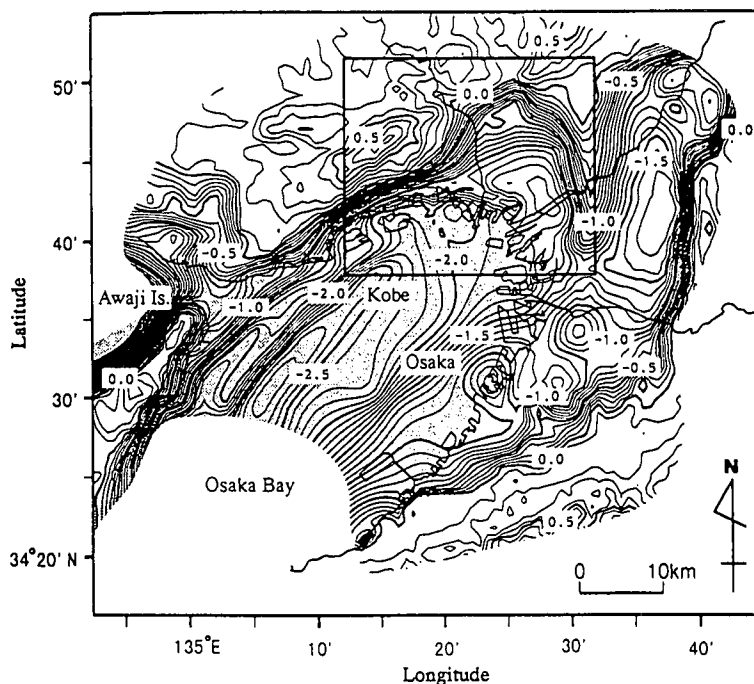


図-2.1.10 基盤岩の形状²⁴⁾

前節で述べた神戸市東灘において地質調査所が実施した 1500m ボーリングにおいては、コアの一部を用いて工学的特性が求められている。その結果を図-2.1.11~2.1.13²⁵⁾に示す。図-2.1.11 は物理特性を示しているが、粒度組成的には Ma 2 層から下位で粘土分含有量が若干低くなる傾向を見せ、同じく Ma 2 層から下位での含水比が塑性限界より小さい値を示しており、相当な過圧密状態であることが推定できる。

図-2.1.12 は圧密特性を示す。Ma 2 層より下位で圧密降伏応力が若干大きくなる傾向を示し、過圧密比が 2 以上になっている。圧密曲線 ($e - \log p$) でも Ma 3 層以浅と Ma 2 層以深とでは明らかに e_0 の大きさが異なり、 p_c が大きく異なっている。図-2.1.13 はサンプルの状態と室内で測定した V_p 、 V_s 速度や飽和度を示しており、Ma 2 層くらいから V_p は大きくなり飽和度が低下している。

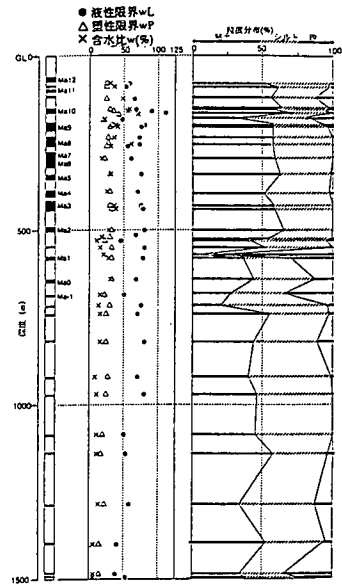


図-2.1.11 コンシステンシー、粒度分布²⁵⁾

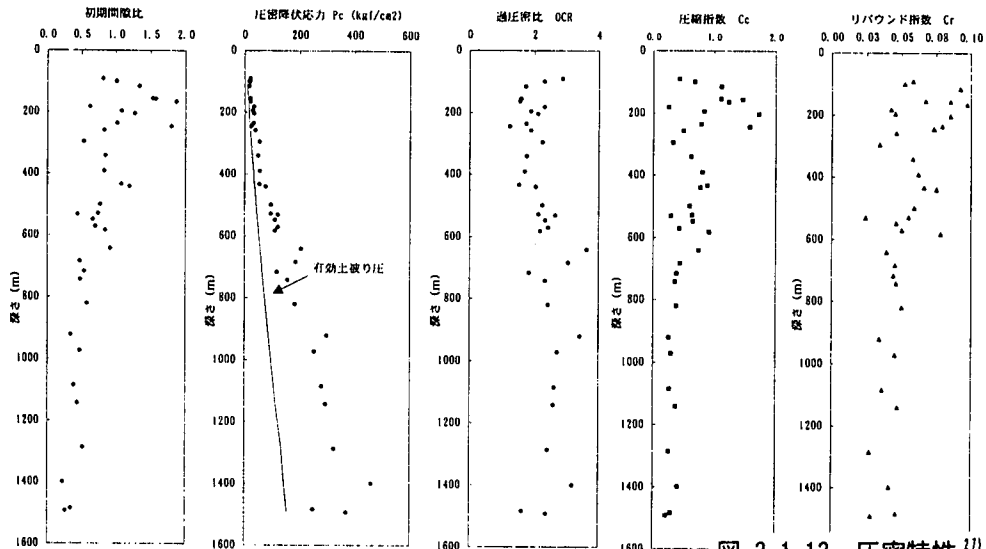


図-2.1.12 圧密特性²⁷⁾

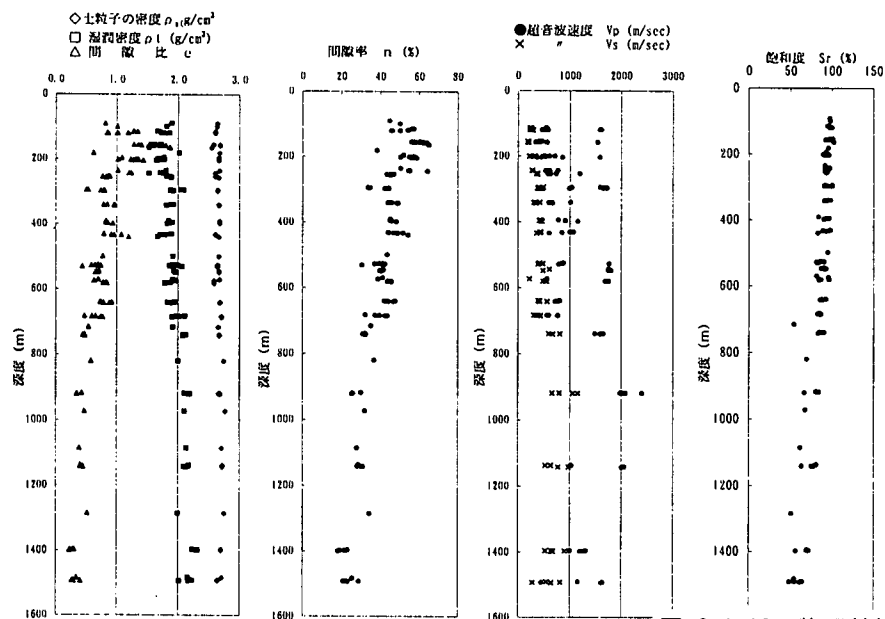


図-2.1.13 物理特性²⁵⁾

2.2 地形・地質の概要

2.2.1 地形

図-2.2.1 (カラーページ参照) には田中真吾が作成した神戸・阪神間の地形区分を示した²³⁾。この図によれば、先に述べたように扇状地が発達しており、この扇状地を新しい河川が削り取ったり複雑な地形を形成している。

扇状地堆積物や段丘堆積物からなる地盤は一般的には比較的良好な地盤と考えられてきたが、今回の地震のようにこの地域に「震災の帯」が横たわっていることを考えるならば、動的な地盤特性としては問題が多いのかも分らないが、地形の特徴と地震被害についての関係は明確ではない。

図でわかるように、神戸野中央区付近から芦屋は六甲山麓の扇状地地形の海岸低地～緩傾斜～中くらいの傾斜面に発達している。兵庫・長田区は和田岬砂堆や砂堆の背後の後背湿地部に当たっている。西宮は六甲山地、山麓丘陵部、沖積低地と多様な地形分布をしている。

2.2.2 地質

図-2.2.2 (カラーページ参照) に佐野正人が作成した大阪盆地の地質図²⁴⁾を示す。大阪盆地の回りは基盤岩が山地になっており、市街地が発達している低平地や緩傾斜地は沖積低地や丘陵である。山地の裾には、北は伊丹台地、千里丘陵、東には枚方丘陵、南には泉北丘陵が広がっている。

神戸の地盤は、表層から沖積砂質土層、上部洪積層、大阪層群という順で構成されていると推定されるが、陸域では深層ボーリングが少なく地層構成については不明な点が多い。しかし、反射法地震探査によれば基盤岩までは約1000mくらいあり、厚い堆積層の上に発達した都市である。

西宮は六甲山と沖積低地との間に丘陵地が広がり良好な住宅地を形成しているが、この丘陵地は山地との間と、低地との間を断層で切られている。丘陵地には大阪層群が出現する。低地は武庫川の三角州であり、沖積の砂地盤を形成している。また、この沖積の砂層は宮水として知られる豊富な地下水を賦存している。

2.3 自然地盤の構成と地域特性

2.3.1 自然地盤の概要

神戸・阪神間の山地側から陸域にかけての地層断面を先に示した図-2.1.5 で見てみると、六甲山表層に出ている花崗岩系の基盤岩が、低地部になると急に落ち込み、市街地では標高-1000~-1500m 付近になっている。この基盤岩の出現標高は、大阪湾中央部では標高-2000~2500m にまでなっている。このように基盤岩の上に厚い第四紀堆積物が整層状態で存在している。最上部は沖積の砂質土や粘性土が覆っており、平野や海岸低地は軟弱な沖積地盤を形成している。

(1) 表層地盤

図-2.3.1(a)(b) (カラーページ参照) は各々国道2号および国道43号沿いの地層断面である。国道2号の断面は西灘から東はほぼ忠実に2号線沿いであるが、西灘から西へはJRを北に越え中山手通りから地下鉄沿いの上沢通りを長田付近までの断面である。

国道2号断面では、地表面標高は河川を横断する場所で高く、河川と河川の間で低くなり、最大20mくらいの高低差が見られる。西宮市では地表面から沖積砂層、沖積粘土(わずかに見られるのみである)、天満砂礫相当層から洪積層に変化することが分るが、芦屋市から中央区の西側まで砂や砂礫主体の地層であり、特に河川付近で砂礫層が卓越していることが伺える。同図には地層の種類を色別で、N値の大きさを円の大小で示している。西宮地区では沖積の砂層のN値が小さいが他の地区でN値が小さいのは表層部分がほとんどで、砂礫や砂ともに大きなN値を示している。

国道43号断面はほぼ阪神高速道路神戸線をトレースしているので、三宮付近からは国道2号線を西に進み、ほぼ湊川ランプ付近までの断面を示している。この断面は国道2号断面より浜側に位置しているので、河川横断部での起伏が余り目立たなくなって、5m程度の高低差になっている。また、西宮市では地表面から沖積砂層、沖積粘土(Ma13層)、天満砂礫相当層、洪積粘土層(Ma12層)と変化することが分る。

住吉川を挟んだ東灘では深度2～4m付近から厚さ2～3m程度の連続性のよいN値が30～40程度の礫層が約6kmの区間に分布している。また、その下位に、N値が25～50程度の砂層が同じ区間に分布している。これから西は三宮付近までほとんど砂質土で連続性が見られない。中央区の中ほどから、Ma12層と推定される地層が西に向かって急上昇している。兵庫区にはいると深度7～10m付近に沖積粘土(Ma13)ほぼ水平に分布している。このようにMa12層の急上昇などは大深度の基盤岩における構造運動に起因していると考えられ、活断層の存在を伺わせている。

図-2.3.2(カラーページ参照)に、神戸～西宮の地盤の深さごとの土質とN値分布を示す。この図は深さを地表面から5m単位に分割し、その5mの間の土質を、砂礫、砂、粘性土の3つに分類して色別に示し、またその間の平均N値を円の大きさで示したものである。この図から次のような事が言える。

- ①深度0～5m: 神戸は砂礫と砂層が半々程度で混ざり合って分布している。N値は砂が小さく砂礫が大きくなっている。西宮では砂層が大半でN値も小さい値を示している。和田岬から長田にかけてN値はそう大きくないが、東西に広がる砂礫が見られ、これが深度5～10mではN値が大きく東西に連なる分布が明確に分る。
- ②深度5～10m: 神戸では砂礫と砂が棲み分けたような分布をしている。すなわち、六甲山からの河川本流付近は砂礫で、河川と河川の間は砂層のようであり、扇状地の形成過程から考えると首肯ける分布である。更に興味深いのは住吉川の東側にN値が2～40くらいの砂層が広がっている。これは住吉川から運ばれてきた砂が潮流により東に砂堆のように移動してできたものではないかと考えられる。西宮では沖積砂層の下位に有る沖積粘性土層の分布が見える。砂層のN値は小さく液状化発生を説明できる砂層である。
- ③深度10～15m: 神戸では砂礫と砂層が混在して分布している。西宮では粘性土が見られる。和田岬から長田にかけての砂礫は消滅し、砂層に変わり、N値も余り大きい値ではない。
- ④深度15～20m: 神戸でも粘性土も分布しているが、どちらかという砂礫優勢の地盤である。西宮では砂礫が見られこれは天満砂礫相当層である。海岸近くではまだ沖積粘性土が分布している。

(2)地下水位分布

図-2.3.3(カラーページ参照)は神戸・阪神間で実施されたボーリングの孔内水位の分布である。背景には都市圏活断層図³⁰⁾を利用している。ボーリングによる孔内水位のために正確に地下水位の分布を示しているかは検討の余地があるし、ボーリング時期の大きく異なるデータもあるために、地下水位として評価するには整合性がとれたデータではないが、概略の地下水位の目安を付ける意味では多に参考になる図である。この図からは、地下水位の低い(G.L.-1.5m以深)地区と高い(G.L.-1.5m以浅)地区が存在しているのが分る。低い地区は芦屋川扇状地、住吉川扇状地、生田川扇状地や六甲山の山麓よりに分布しており、高い地区は西宮低地、芦屋川と住吉川に挟まれた地区、住吉川と都賀川二挟まれた地区、長田地区である。この地下水位が低い地区はいずれも扇状地形で、河川を中心にした扇状地の中心では透水性がよく、地表面標高が高いために必然的に地下水が低くなっているようである。一方このような扇状地と扇状地に挟まれた地区は地表面標高が低くなるのと堆積物も細粒が増えるために、必然的に地下水位が高くなっているものである。しかし、長田地区は和田岬を形成する砂堆の背面の低湿地帯であり、そのために地下水位が高くなっているものである。震災の帯の中では地下水位が高い地区ほど地震被害が大きいという指摘も有るが、地盤構成も地下水位の低い地区も同じような被害を受けている場合も有り、一概に地下水位の影響とするには問題があると考えられる。

2.3.2 地域の地盤

(1)神戸の地盤

神戸地域は北側に六甲山地を持ち、その南側に幅約3kmの平野・扇状地となっている。六甲山地は、六甲花崗岩を主とし、布引花崗閃緑岩・お多福山“古生層”などから構成されている。六甲山地の南麓の神

戸市街地は、地形的に山地側から、山麓扇状地、海岸平野および埋立地に分けることができる。

山麓扇状地は、急峻な六甲山地より流れ出す河川によって運搬された土砂が堆積した地域であり、一般に粗粒な河成堆積物からなる。海岸平野は、山麓扇状地と旧海岸線（明治時代の海岸線）との間に見られる狭い沖積低地で、地表面付近は主として砂質土が分布する。埋立地付近には旧海底から軟弱な粘土層が厚く堆積する。

図-2.3.4¹¹⁾に平地から海岸に向けての断面線を示す。埋立地では Ma13 層に相当する沖積粘土層が厚く堆積しており、層厚は約 15m 程度見られる。この沖積粘性土の下には洪積砂礫層と粘性土層が互層をなして堆積している。海岸平野では沖積粘性土層から沖積砂質土層に漸移している。

Ma13 層は旧海岸線より陸域にはほとんど追跡が不可能であるが、Ma12 層は国道 2 号くらいまでは連続性が確認できる。いずれにしても表層地盤は砂質土主体であり、N 値も高く構造物の支持地盤としては良好である。

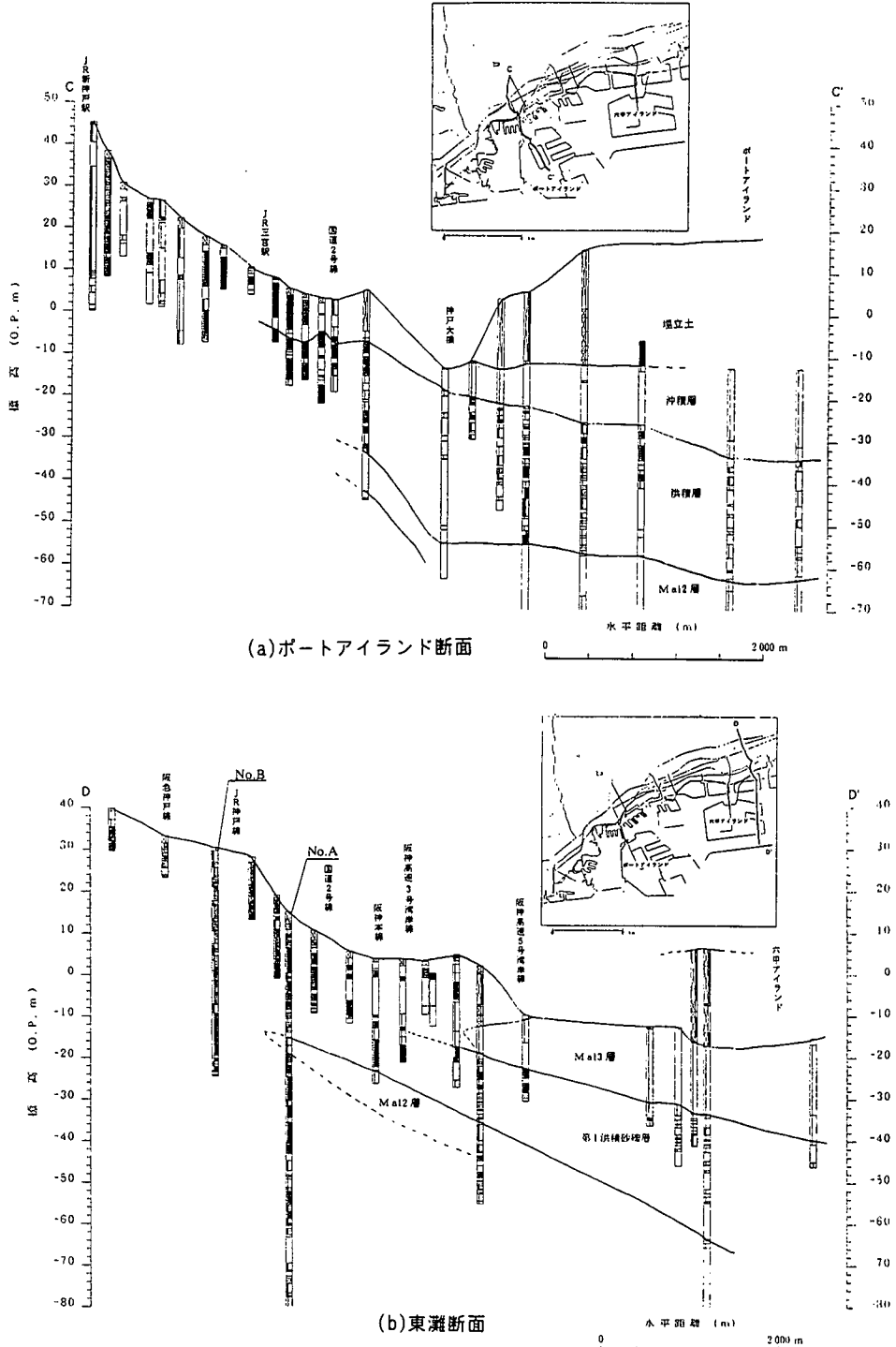


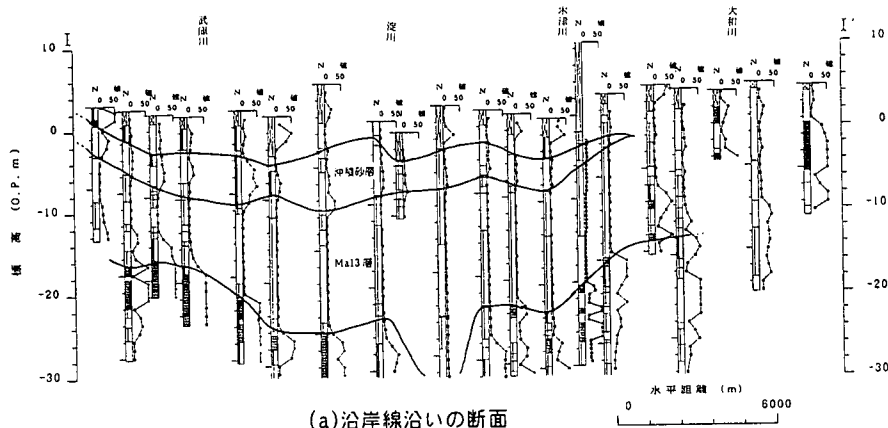
図-2.3.4 平地から海岸に向けての断面図¹¹⁾

(2) 阪神間～大阪の地盤

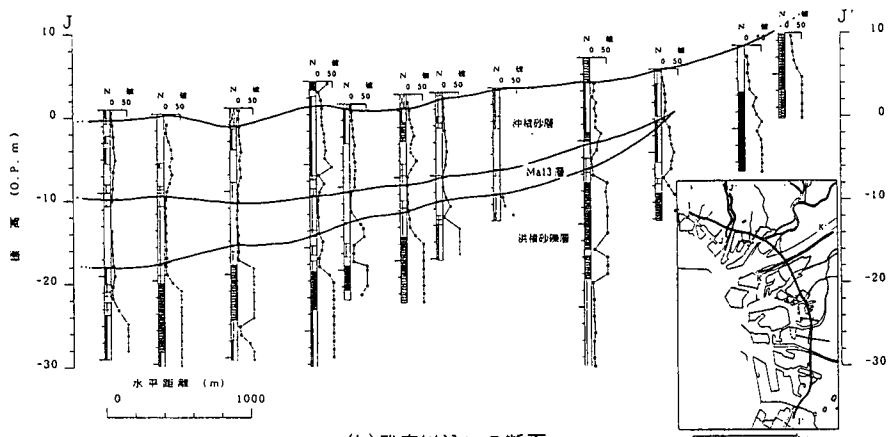
阪神間から大阪にかけての表層地盤は、図-2.3.5¹²⁾に示すように地表面から沖積上部砂層、沖積粘土層(Ma13層)、沖積下部砂層、天溝砂礫層(伊丹礫層)、Ma12層、以下砂質土と海成粘土層(Ma11、Ma10、・・・)の互層が続いている。

今回の地震による大阪地区での被害は、ほとんどが液状化に起因するものであった。しかし、豊中などでは家屋被害の大きい地区があり、それらは佛念寺断層～上町断層系の直近の西側に位置しており液状化は発生していない。これには断層との関連や地震動によるもの考えなければならないが、その場合には地盤の動的特性などの分析も必要になる。

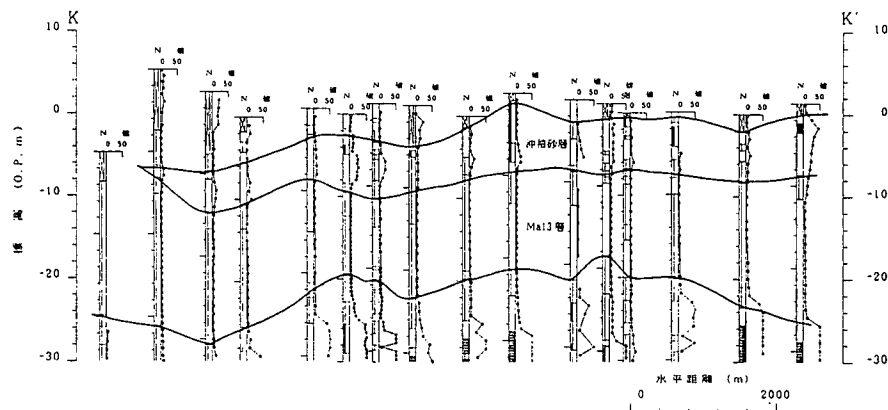
図の沖積上部砂層は2層に区分されることが分っており、上部はN値が低いが下部はN値が15を越え簡単には液状化しないような状態と推定されるが、西宮から大阪にかけての液状化でどの部分が液状化し噴砂となって現われたのか確定できていない。



(a) 沿岸線沿いの断面



(b) 武庫川沿いの断面



(c) 淀川沿いの断面

図-2.3.5 大阪湾沿岸部の断面¹²⁾

2.4 埋立地盤の構成と地域特性

ここでは、埋立地の全般的な特徴を記述し、個別あるいは詳細については「3.3 埋立・廃棄物」記述される。また、大阪湾の埋立の歴史的な経緯については、文献（文献No.33）を参照されたい。

2.4.1 埋立地盤の概要

大阪湾沿岸域の埋立地の変遷を図-2.4.1 に示す³⁴⁾。大阪湾沿岸域の埋立は江戸時代、尼崎から淀川を挟んで堺におよんで行われている。明治から昭和20年の埋立は神戸市中突堤付近、大阪市此花区、大正区などで行われている。昭和20年以降は活発に埋め立てが行われ、現在に至っている。

埋立材料の種類は表-2.4.1³⁵⁾と先の図-2.1.2に示しているように、神戸・阪神間においては良質土（まさ土、神戸層群）による埋立、大阪港では浚渫粘土による埋立が主体である。最近ではそこに、建設発生土、安定型廃棄物なども一緒に埋められている。

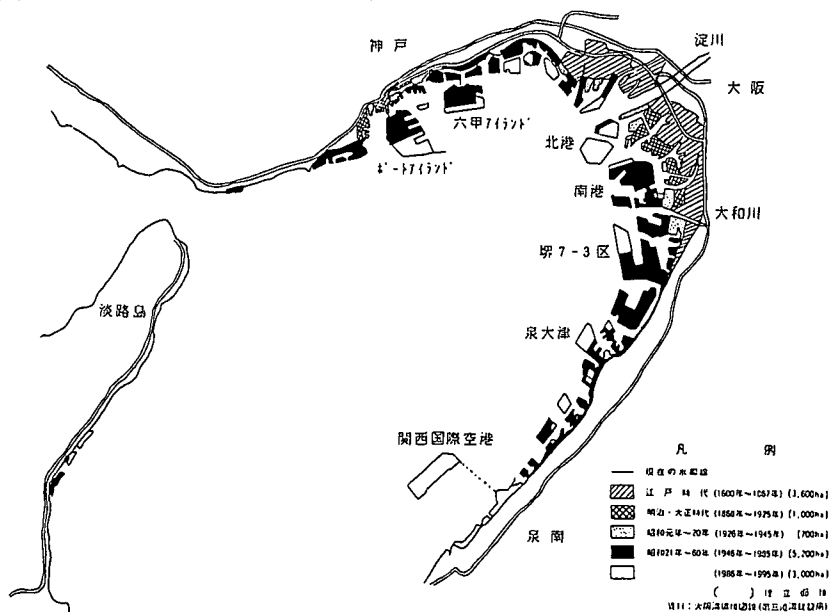


図-2.4.1 大阪湾沿岸域の埋立変遷³⁴⁾

表-2.4.1 埋立材料の種類³⁵⁾

材 料	土質分類	材料評価*1	適用埋立地
陸上土	まさ土	良	神戸東・西部、PI*2、RI*2（一部）、関空、りんくうタウン、芦屋浜、南芦屋浜、西宮、甲子園浜、鳴尾浜
	和泉層群	良	関空、りんくうタウン、南芦屋浜
	家島採石ずり	良	南芦屋浜
	神戸層群	普通	神戸 RI、PI 2期
	大阪層群	普通～不良	神戸 RI、PI 2期
	建設残土（砂質土）	良～普通	神戸～大阪～泉州の多数の埋立地で受け入れている
建設残土（粘性土）	不良	神戸～大阪～泉州の多数の埋立地で受け入れている	
海底土	粘性土	不良	大阪南港、北港、大阪府下の一部の埋立地
	砂質土	良～普通	大阪南港の一部
	礫質土	良	播州（明石～加古川）の埋立地
	混合土*3	普通～不良	大阪府下埋立地
廃棄物	一般、生ゴミ	不良	大阪北港
	焼却灰、汚泥	不良～普通	西宮、大阪北港、堺 7-3 区、フェニックス埋立地
	安定型廃棄物	普通	西宮、丸島、堺 7-3 区、大阪北港、フェニックス埋立地

(注) *1 材料評価は材質としての評価であり、地盤としての評価ではない。

*2 PI：ポートアイランド、RI：六甲アイランド

*3 混合土：海底の地盤が層厚の薄い砂質土と粘性土の互層からなり、これを浚渫したような場合を指す。

2.4.2 神戸・阪神間の埋立地

(1) 神戸地区

神戸の埋立は古くは平清盛の築港に始まるといわれているが、近代港湾としての整備は明治初期に居留地が神戸に置かれてからである。戦前は国の直轄港として発達してきたが、戦後は神戸市が管理する西の国際港として国とともに港湾整備を進めてきた。

神戸港の発展を支えたのは国の積極的な投資と安価な港湾利用料にあると言って過言ではない。その安価な港湾利用料を支えたのが神戸方式といわれる埋立方法であった。これは、神戸市背後の六甲山から土砂を採取してこの土で埋立地を造成し、土砂を採取した跡地は都市機能用地や住宅地として整備し、この両方の土地を売却するという方法である。これは山を削った良質土で埋立ることから急海岸に接した埋立地では、土地ができれば直に利用が可能であった。当初の東・西部埋立、ポートアイランドまでは六甲山の風化花崗岩（まさ土）で埋立られたが、六甲アイランドになって埋立土の採取が西神戸の丘陵地帯に移ると、埋立材は神戸層群と呼ばれる第三紀の堆積岩になってきた。そのために、図-2.4.2¹⁵⁾に示すように、六甲アイランドの北側一部にまさ土で埋立られた区域があるのみであとは全て神戸層群の土砂である。神戸層群は地山では固結しているが、発破をかけなくても重機で取り崩すことができる程度の固結度であるために、埋立た後で直ぐに風化がはじまり、簡単に土砂化してしまう。その上、泥岩、砂岩の互層状態であるために泥岩が風化すると元の粘土に戻ってしまうので、粒度分析結果ではまさ土の細粒分が最大でも20%程度であるのに対し、六甲アイランドやポートアイランド2期では細粒分が最大では30%程度となっている。液状化の度もまさ土で大きく神戸層群の土では小さかったことが分っており、埋立材料によって液状化の程度が異なったことが判明している。

しかし、ポートアイランド以降沖合に埋立地を出していくにつれ沖積粘土層が厚く堆積しているために、この地盤改良が必要になってきた。

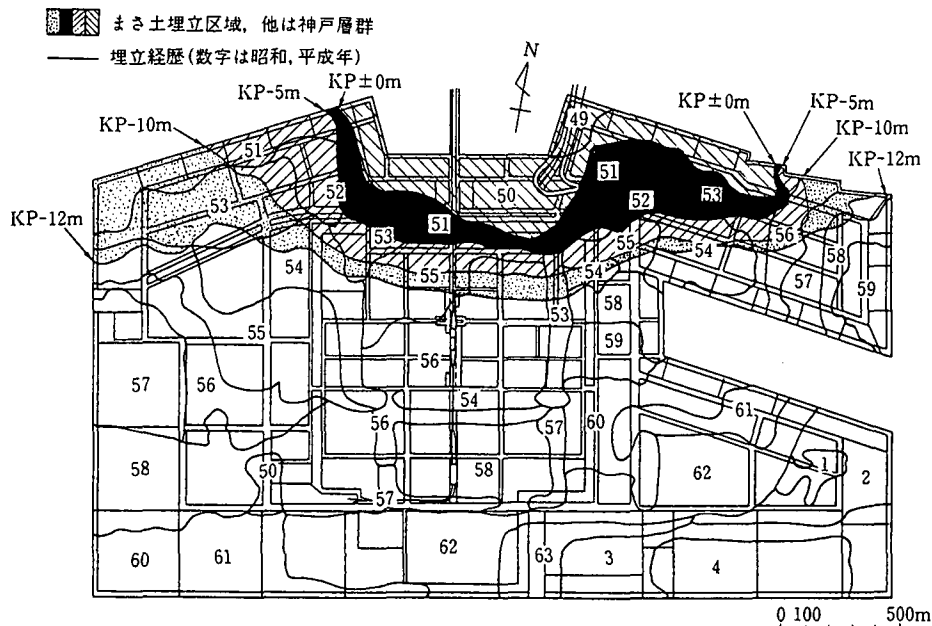


図-2.4.2 六甲アイランドの埋立履歴¹⁵⁾

(2) 阪神間地区

阪神間地区の埋立は兵庫県が実施してきた、尼崎・西宮・芦屋港における埋立地である。古くは尼崎で浚渫による埋立が行われていたが、最近のものは良質土による埋立かあるいは廃棄物による埋立がほとんどである。良質土とは淡路産まさ土、家島産岩屑、淡路島産和泉層群岩屑、瀬戸内産海砂などである。廃棄物は安定型産廃、建設発生土などが主体である。

尼崎丸島地区と西宮埋立地西地区は廃棄物最終処分場として埋立られ、最近では尼崎にフェニックス事業と呼ばれる廃棄物最終処分場としての埋立が行われており、一般廃棄物の焼却灰などの管理型埋立と建設発生土や浚渫土などの安定型埋立が行われている。西宮埋立地、甲子園浜埋立地、芦屋浜埋立地、南芦屋浜埋立地はいずれも良質土で埋立られてきた。この中で、芦屋浜埋立地の一部に海砂が使われておりこれが大きな液状化を発生させた。

また、鳴尾浜埋立地は民間が行なった埋立事業の最後になったもので、やはりまさ土で埋立られていたため液状化の発生が見られた。

2.4.3 大阪の埋立地

大阪の埋立地は、大阪港域は大阪市が行い、それ以外は大阪府が行なっている。埋立方法は基本的には浚渫埋立であるが、大阪府が関西国際空港関連で行なったりんくうタウン（関空前島）はまさ土と和泉層群岩屑による良質土の埋立である。

大阪市の埋立は浚渫といっても海域には沖積粘土しか存在しないのでほとんどが軟弱な粘土で埋立られている。一部急ぐ場合などに海砂やまさ土が用いられている。したがって咲洲（南港）、舞洲（北港北地区）などではほとんど液状化が見られていない。液状化の発生した個所も砂を使って埋立場所に限定されている。最近の埋立も最終処分場として行われているもので埋立地の一部を管理型、残りの大半を安定型埋立とし、管理型には一般廃棄物を安定型には河川や航路浚渫土、港湾工事発生土、建設発生土を投入しているが、埋立る場合にポンプ船による方法なので超軟弱な埋立地盤が造成され数年かけて地盤改良を行ない利用可能な土地にしている。

大阪府の埋立も経済性追及からほとんどが浚渫埋立であるが、大阪市と異なり堺から南では旧海岸線付近の海底には沖積粘性土がほとんど見られず、洪積層が海底から分布しているために、浚渫される土砂は洪積層が主体であり、洪積層は砂層と粘性土層の互層で存在するために、埋立後の水切りを速やかに行なえば特に地盤改良を行なわなくても土地利用が可能であった。しかし、最近では沖合に埋立地が出ていることもあって二色の浜埋立地では軟弱な沖積粘土を埋立ざるを得ず、その結果超軟弱な埋立地盤が造成されて地盤改良によって土地利用を計っている。

大阪府下埋立地でも液状化が発生しているがやはり部分的に砂で埋立られた所など限定されている。

参考文献

- 1) 神戸市 (1980) : 神戸の地盤
- 2) 藤田和夫、前田保夫、吉岡久昭 (1989) : 第3章 神戸の地形と地質、神戸市、新修神戸市史、pp.149-290
- 3) 藤田和夫、笠間太郎 (1959) : 第3章 西宮地方の地質と構造、西宮市、西宮市史、第1巻、pp.174-316
- 4) 藤田和夫 (1966) : 第1章 尼崎平野の形成、尼崎市、尼崎市史、第1巻、pp.9-64
- 5) 藤田和夫、前田保夫 (1971) : 第1章 伊丹の地質構成、伊丹市、伊丹市史、第1巻、pp.7-70
- 6) 前田昇 (1971) : 第1章 芦屋の自然環境、芦屋市、新修芦屋市史、第1巻、pp.9-62
- 7) (社)土質工学会・地下空間の技術と活用に関する研究協議会 (1992) : 関西地盤
- 8) (社)土質工学会関西支部 (1995) : 海底地盤—大阪湾を例として—、pp.資料—7
- 9) (社)土質工学会関西支部・関西地質調査業協会 (1987) : 新編大阪地盤図、pp.285
- 10) 諏訪靖二、濱田晃之、田淵俊幸 (1995) : 兵庫県南部地震によるウオータフロント建造物の被害、第四紀学会・第四紀研究連絡委員会、1995年1月17日兵庫県南部地震調査速報会記録、pp.75-80
- 11) 谷本喜一、菅好徳、大浦智 (1970) : 真砂土の液状化発生条件について、(社)土木学会第25回年次学術講演会講演集、第III部門、pp.203-206
- 12) 岩崎好規、柴田徹、諏訪靖二、本郷隆夫、藤原正明、山内淑人 (1986) : 粗粒材の密度変化に伴うN値特性とその施工管理への利用、(社)土質工学会・粗粒材料の変形・強度特性とその試験法に関するシンポジウム発表論文集、pp.99-104
- 13) 藤田崇、西垣好彦、諏訪靖二、濱田晃之 (1998) : 第2編 地盤・地質 第2章 自然地盤、(社)地

- 震学会・(社)地盤工学会・(社)土木学会・(社)日本建築学会・(社)日本機会学会、阪神・淡路大震災調査報告、Vol.共通-2、pp.388
- 14) 衣笠義博、水野清秀 (1996) : 神戸の地下地質、第 11 回地質調査所研究講演会資料、兵庫県南部地震の地質学的背景、財団法人日本産業技術振興会、pp.77-80
 - 15) 津田景三 (1972.9) : 構築物に対する六甲地域の活断層の影響、日本応用地質学会、応用地質、Vol.13、No.3、pp.1-11 (Ser.pp.101-111)
 - 16) 神戸市 (1974.11) : 神戸と地震、p.1-56 (編著者：笠間太郎・岸本兆方、発行者：神戸市総務局・土木局)
 - 17) (社)土木学会関西支部：阪神・淡路大震災調査研究委員会 中間報告会講演集
 - 18) 岩崎好規・澤田純男、香川敬生、松山紀香、大志万和也、井川 猛 (1990) : 大阪湾における反射法地震探査、物探学会論文集、pp.54-57
 - 19) 兵庫県 (1996) : 兵庫の地質-兵庫県地質図解説書・地質編一、pp.追補
 - 20) 兵庫県立人と自然の博物館 (1997) : 阪神・淡路大震災と六甲変動、兵庫県南部地震域の活構造調査報告書、pp.34
 - 21) 笠原敬司他 (1997) : 舞洲及び関空前島地殻活動観測井周辺の反射法及び VSP 調査、日本地震学会講演予稿集、1997 年度秋季大会、論文 No. P-36
 - 22) (社)土質工学会関西支部関西の大深度地盤の地質構造とその特性研究委員会・地下空間の活用と技術に関する研究協議会 (1992) : 関西地盤、pp.192-212
 - 23) 文献 19) に同じ、pp.追補
 - 24) 中川康一、佐野正人、三田村宗樹 (1998) : 第 2 編 地盤・地質 第 1 章 地形・地質、(社)地震学会・(社)地盤工学会・(社)土木学会・(社)日本建築学会・(社)日本機会学会、阪神・淡路大震災調査報告、Vol.共通-2、pp.364
 - 25) 小池章久、松本正毅、藤原吉美、竹澤請一郎、本郷隆雄 (1997) : 大阪平野深部の土質特性調査 (その 1) -概要および物理試験一、第 32 回地盤工学研究発表会、pp.213-214
 - 26) 赤井俊文、本郷隆雄、松本正毅、小池章久、山田雅行 (1997) : 大阪平野深部の土質特性調査 (その 2) -ボーリングコアの物理特性一、第 32 回地盤工学研究発表会、pp.215-216
 - 27) 伊藤佳洋、竹澤請一郎、松本正毅、堀江正人、本郷隆雄 (1997) : 大阪平野深部の土質特性調査 (その 3) -一定ひずみ速度圧密試験一、第 32 回地盤工学研究発表会、pp.217-218
 - 28) 田中真吾 (1995) : 3.2 神戸・阪神間の地形分類、日本応用地質学会、兵庫県南部地震-地質と災害-報告書、pp.口絵①-②、pp.23-32
 - 29) 文献 19) に同じ、pp.追補
 - 30) 建設省国土地理院 (1996) : 都市圏活断層図
 - 31) 文献 13) に同じ、pp.390
 - 32) 文献 13) に同じ、pp.398
 - 33) 嘉門雅史、諏訪靖二、小林正樹 (1998) : 第 2 編 地盤・地質 第 3 章 埋立地と人工島、(社)地震学会・(社)地盤工学会・(社)土木学会・(社)日本建築学会・(社)日本機会学会、阪神・淡路大震災調査報告、Vol.共通-2、pp.401-441
 - 34) 文献 8) に同じ、pp.62
 - 35) 文献 33) に同じ、pp.406
 - 36) 神戸市開発局 (1995) : 兵庫県南部地震による埋立地地盤変状調査 (ポートアイランド、六甲アイランド) 報告書、pp.18