2.4 地形・地質・地盤(Topography, geology, and ground)

2.4.1 地形及び地質(Topography and geology)

近畿地方は、地形的には、南部の紀伊山地を中心とし た山岳地帯,北西部の丹波高地に代表される高原地域と、 京阪神地域を含む近畿中部から北東部に掛けての大阪盆 地、琵琶湖を含む近江盆地などの低地の三つに大きく区 分される.このうち、近畿中部から北東部に至る、敦賀 湾、播磨灘、伊勢湾で囲まれる地域を近畿三角地帯と呼 び、このような地形・地質構造をもたらした第四紀地殻 変動を六甲変動と呼ぶ¹⁾.この地域は、太平洋プレートに より東から、フィリピン海プレートにより南東から押さ れ、複雑な地形構造をしているとともに、多くの断層が ある. 図 2.4.1 は六甲山地から大阪湾,大阪泉南地区に至る断 面模式図を示している.六甲山地より西側では花崗岩基 盤は明石方面に緩やかに傾斜しているのに対し,東側で は五助, 芦屋,甲陽断層などの断層により急な変化をし ている.大阪湾より南東側では,基盤は盆地構造となり, 湾中央部ではその上に1000m以上の堆積層がある.こ の堆積層は上部ほど湾曲が少なく,六甲山体の隆起と大 阪湾一帯の沈降の進行に伴って堆積していったものと考 えられている.

図 2.4.2 に大阪盆地周辺の地質図を,また,表 2.4.1 に この地域の被覆層区分を示す.大阪盆地では基盤の大部 分は花崗岩類である.基盤岩を覆って分布する大阪層群 は第三紀末に堆積を始めた地層で,テクトニック的な観 点からは三つの亜層群(上部,中部,下部)に分けられ る.大阪層群の上部には,段丘を構成する上部洪積層, 沖積低地や河川沿いの低地を構成する沖積層が分布している.

神戸,阪神地域では地質は地形とよく対応している.



図 2.4.1 六甲山地から大阪湾・大阪泉南地域の模式断面図²⁾ (Geological profile along the line between the Rokko Mountain and Sen-nan Region)





総集編

すなわち,花崗岩類などの基盤岩が露出している地域が 六甲山地,大阪層群・神戸層群などの第三紀,第四紀の 地層が露出しているところが丘陵地,阪神一神戸間に広 がる細長い低地は洪積扇状地,さらにこれらを開析して 広がる沖積扇状地,河川沿いの氾濫平野,臨海部の海岸 平野などに分けられる.更に,この南には,臨海部の埋 文地や人工島がある.

反射法地震探査などによる数 km の深さまでの地質断面の例を図 2.4.3 に示す.また,主要な活断層を図 2.4.4 に

示す.この地域では六甲山地から市街地直下の広い範囲 で、その中に須磨断層、諏訪山断層などの既知の活断層 と仮谷沖断層、大倉山断層などの伏在活断層を含む、淡 路一六甲断層系とその南東およそ 5km のところを通り、 これと平行な大阪湾断層系が通っている.また、この両 者の間には、和田岬断層、摩耶断層が南北方向に存在し ている.

表 2.4.1 大阪盆地周辺の被覆層の区分とその特徴3)

(Stratigraphic division of the sedimentary covers in and around the Osaka Sedimentary Basin)

地質時代			絶対年代 (万年)	地質区分		地質の特徴
第	完親	所世 期 後	$ \begin{array}{cccccccccccccccccccccccccccccccccccc$	沖積層		軟弱な粘性土層,ゆるい砂・砂礫層からなり,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。海成粘土層の Mal3 層準,人工の埋立地は大阪 湾岸を取り囲まように造成されている。
	更			上部洪積層		海成の粘土,砂層と淡水世の砂礫・砂・粘性土の互層。ただし、山地に近い地域では 非海成層だけからなる。海成粘土層 Mall~Mal2 層準。
四	新	中 #8		*	上部	海成層(粘土,砂層)と淡水成層(砂礫・砂・粘土層)の互層。現在の堆積盆地より 外側(内陸地域)にまで広く分布し、山地に近い海域では全体的に砂礫層が優勢とな る。 海成層(粘土・砂層)と淡水成層砂礫・砂・粘土層)の互層。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。
紀	世	世 前 期		阪	中部 亜群層	
			(120)	層	淡水成層(砂礫・砂・粘土層)の互層で,海成層は見られない。粘性土は一般に固く 締まり軟岩状を呈する。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。	
新第三紀	鮮新世		- - -	群		下部 亜群層
(300) 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。						







()内断層名は,阪神地域活断層調査委員会による

図 2.4.4 神戸・阪神地区とその周辺の主な活断層²⁾ (Distribution of main active faults in and around Kobe-Hanshin region)

2.4.2 地盤構造(Geological sctting)

(1) 深層構造

大阪湾岸地域を構成する大阪層群は, Ma0~Ma10と 呼ばれる海成粘土と河成の砂と礫の互層構造をしてお り, 層厚は1~3kmである.下部の粘土層は圧密が終了 し,軟岩状である,上部の粘性土は含水比が大きく,比 較的柔らかである.大阪層群の上部には広く上部洪積層 が堆積している.これらは,主に河成の砂質土で,その 間に,Mal1,Ma12の二つの粘土層が含まれる.洪積層の 粘土層は構造物の支持地盤としては十分な強度を持って いるが,いまだ圧密が終了していない.

大阪湾岸部では,200m 級の深層ボーリングがいくつ か行われている.これらを基に,大阪湾岸地域の大阪層 群上部から洪積層の地質層序が図2.4.5の様に描かれて いる. Mall層は場所によっては3層に分かれている.

深層ボーリングにより, Ma9より上の粘性土の力学特 性についてはいくつかの研究が行われている.全体的に 見て,初期せん断弾性定係数 G₀は間隙比eの関係でみる とばらつきが大きいのに対して,液性指数との関係はよりばらつきが小さくなっている⁶⁾. Mall に対して行われ た動的変形特性試験では地域による差が小さいことも指 摘されている⁵⁾.

(2) 表層地盤

表層地盤は、縄文海進の際に最も海岸線が奥まで入っ ていた約6000年前の海岸線までは Mal3と呼ばれる沖 積粘性土層と武庫川をはじめとするいくつかの河川によ る河床堆積物層で構成されている。神戸~芦屋間では河川 勾配は急峻で、礫、玉石なども多く含まれる地盤となっ ている。また、沿岸流により形成された和田岬の背後に は後背湿地があり、表層には腐植物に富む粘性土が分布 している。西宮~尼崎間は武庫川による扇状地で、やは り礫分を多く含む地盤となっている。

Mal2, Mal3の粘土層については多くの調査が行われている.これらによると、粘土層には地域性が見られ、 神戸地域ではシルト分が多く、液性限界は90~100%と



図 2.4.5 大阪湾岸に沿う地質断面図⁵⁾ (Cross section along the bay areas of the Osaka Basin)

総集編

深度方向に一定, 圧縮指数もほぼ一定であるのに対し, 大阪地域では粘土含有量が多く, 液性指数は粘土層の中 央で最大となり弓形分布を示し, 含水比, 液性限界, 圧 縮指数とも神戸地域より大きくなっている⁵. (3) 埋立地と人工島



図 2.4.6 大阪湾における埋立地の変遷⁷⁾ (History of fill in Osaka Bay area)



図 2.4.7 大阪湾埋立地の埋立材料⁸⁾ (Reclamation materials in Osaka Bay)

図 2.4.6 に大阪湾における埋立地の変遷を、図 2.4.7 に 埋立てに用いられた材料を示す.

神戸港は古くから知られた港で,平清盛による経ヶ島 の築島,江戸末期の兵庫港の開港などの経緯を経て発展 してきた.特に明治に行われた河川付け替えなどにより 河川土砂による港の埋没のおそれがなくなったこともあ り,広範囲に発達してきた.神戸港では,海岸から沖に 出ると急に水深が増大するので,海底浚渫の必要がない ことから,六甲山の一部を削り,これを埋立材料として 用いることにより,埋立地では良質の地盤を安価で供給 で,一方では切土した山地は市街地として供給できると いう利点がある.

神戸市では,第1期事業として 1953 年から 1970 年に かけて神戸市西部地域,灘浜,住吉浜,魚崎浜,深江浜 等が造成され,また,第2期事業として 1966 年から人工 島である,ポートアイランド,六甲アイランド,そして ポートアイランド2期が造成された.東部・西部の埋立 とポートアイランド埋立に用いられたのはまさ土や風化 花崗岩であるが,六甲アイランド以降の埋立では,土砂 採取地が内陸部に延びたために,新第三紀の神戸層群や 第四紀の大阪層群が埋立てに用いられている.

芦屋~尼崎に至る地域では工業用地や住宅用地として 埋立地が作られてきた.1971年以降には、南芦屋浜、西 宮浜、甲子園浜が造成されている.この地区の埋立てに は種々の方法が用いられており、尼崎港では浚渫埋立て、 西宮、芦屋、甲子園浜では購入した良質土による埋立て であるが、この他にも、廃棄物の埋立地もある.

大阪湾では,水深の浅い場所では河川浚渫土による埋 立てが行われてきた.しかし,南港以降では,海底の浚 渫土を用いる方法で埋立てが行われてきた.これは,海 底が浅く,航路や泊地のための浚渫が必要なこと,後背 地に埋立土を供給できる山地がないことも原因となって





いる。

兵庫県南部地震では、それまで液状化しにくいと考え られていたまさ土地盤で大規模な液状化が発生したこと から、多くの調査が地震後行われた.図2.4.8には粒径加 積曲線の例を示す.粒径加積曲線は試料の採取方法に よっても異なるが、地震前後では大きな相違はないと考 えられている⁶⁾.凍結試料を用いた試験も行われている が、動的変形特性は、港湾で用いられる標準的な曲線¹⁰⁾と よく一致していること、液状化強度は、吉見ら¹¹¹による換 算 N 値と液状化強度の関係とほぼ一致していることな どが明らかにされている。

2.4.3 地表面の変状 (Ground deformation)(1) 地表面の変状

地盤変状には、断層による地盤変状と、液状化や斜面 崩壊などの地盤の破壊に伴うものがある.後者には、地 震動による動的な挙動の結果発生する変位も含まれる. このうち、断層による変状をここで扱い、それ以外は次 項以降に述べる.

断層に伴う地殻変動は、すでに 2.1.4 項に示されている. このような動きに伴う大局的な水平移動量は図 2.4.9 に示すように、六甲山系が北東に、淡路島が南西へ移動している.

市街地の地表面変状は,道路やアスファルトの亀裂の 調査などにより推定される。神戸市街地,宝塚・西宮の 一部では詳細な調査も行われている.しかし,一方では, 地表面の亀裂は埋設管などの地下構造物,切り盛り境な どの人為的な地形要因による事も多く,注意が必要であ る.また,亀裂は道路に直交する傾向にあるが,道路の 斜交する亀裂はせん断性の亀裂であることが多く,地盤 そのものの変形を反映している可能性も強い.西宮では, このような亀裂が甲陽断層に一致していることも示され ている⁶⁾.

断層に沿って跳ね石も見つかっているが、その数は少ない^の.

(2) 液状化

地盤の液状化の発生は、噴砂などの痕跡より同定される.図2.4.10に液状化の発生が観察された地点を示す. 液状化の発生は、自然地盤、埋立地盤の両方で確認されている.

自然地盤(江戸時代以降の埋立境界線より内陸部の自 然堆積地盤)の液状化は、神戸市垂水区以西,淡路島及 び大阪府以南の地域についてはほとんど報告されていな い.

自然地盤では,液状化に起因すると考えられる大規模 な被害は発生していない.また,大きな変位も観測され ていない.従って,一般に自然地盤の液状化地点の判定 は主として噴砂痕によって行われている.このような噴 砂の分布は,液状化指数 PL値に基づく危険度判定とよく 対応している⁹.噴砂の集中しているのは,和田岬周辺と 神戸市東部より西宮市東部にかけての海浜地域である.

和田岬周辺では運河や隆起部を除けば、鉛直には0.8



図 2.4.9 高度基準点測量により得られた阪神・淡路地方の地殻水平運動¹²⁾ (Horizontal movement of the crust in Hanshin-Awaji district)

総集編

~9.5cm の沈下, 水平方向には 9.6~26.8cm の変位が観測 されている.この変位は,次に述べる埋立地における変 状と比べれば格段に小さい.この地域では礫混じり砂で 構成される埋土層が 2~3mの厚さで分布し,その下部に 層厚 2~3m で N 値が 10 以下の沖積の礫混じり砂質土 および砂礫層が分布している.その下部には N 値が 30 以上の沖積砂礫層がある.地下水位は 2~3m で,埋土層, 及びその下のN値の小さい礫混じり砂質土や砂礫層が 液状化したものと考えられる.

西宮では海岸線から内陸部に向かって,埋立地,噴砂 が多数観察された自然地盤,ほとんど観察されなかった 自然地盤に区分することができ,沈下はそれぞれ5.8 ~20.8cm, 2.2~10.4cm, 0.3~4.1cmとなっている.噴砂 の多かった地域では,2m弱の盛土層の下部に層厚6



図 2.4.10 液状化の発生した地点¹³⁾ (Locations of liquefied site)



図 2.4.11 神戸・阪神地域の噴砂¹⁴⁾ (Sand boils in Kobe-Hanshin region)





図 2.4.12 ポートアイランドにおける護岸の変位¹⁵⁾ (Horizontal movement of quay wall at Port Island)



図 2.4.13 護岸からの水平変位の減衰

(Attenuation of horizontal displacement from the qua wall (a) Measured from crack (b) Based on aerial photos) ~9m の沖積砂質土層があり, N 値が 10 以下と小さいの で,この層が液状化したと考えられる.なお,地下水位 は GL-1~3m である.この層の下部には沖積の粘土層, さらに沖積の砂層があるが,下部の砂層では N 値も大き くなっている.

図 2.4.11 に神戸・阪神地区の噴砂の分布を示す. ほとんどの埋立地で噴砂が見られ大規模な液状化が発生していることが分かる.

前述のようにポートアイランド1期ではまさ土が埋立 材料として用いられたのに対し,六甲アイランド南部と ポートアイランド2期では神戸層群や大阪層群が用いら れている.図2.4.8にこれらの材料の粒径加積曲線を臨海 部の砂と共に併せて示しているが,まさ土に比べれば神 戸層群は細粒分を多く含むので液状化しにくく,このた め,ポートアイランド1期に比べ,2期と六甲アイランド は液状化の程度が低い.また,両人工島には各種の液状 化対策が行われているが,これらのサイトでは,対策の 程度に応じて液状化の発生や地盤の沈下量に差があり, 液状化対策の有効性が確認されている.

両人工島及び多くの埋立地では,護岸が大きく水平変 位する変状が見られている.図2.4.12にポートアイラン ドにおける護岸の変位を示すが,その量は最大で5mに 及ぶ大きさである.六甲アイランドや埋立地でも同様な オーダーの変位が観察されている.なお,地震後行われ た実験や解析から,護岸の変位には,ケーソン下部の置 換砂の変形が大きく寄与していることが明らかにされて いる.

このような護岸の変位に伴い,内陸部でも護岸方向の 水平変位が見られる.図2.4.13(a)は亀裂を合計して護岸 方向の変位を求めたものであるが,護岸の変位の影響は 護岸近傍で著しく,50~150mの範囲にわたっているこ とがわかる.この地震では地震前後の航空写真より地盤 の変位が求められている.これによれば,図2.4.13(b)の ように,さらに内陸部の地盤でも変位が発生している例 もある.しかし,同じサイトでもこのような変位が生じ ていない計測結果もあり,内陸部の大きな水平変位が, 実際に生じたのか,また,この変位が護岸の変位によっ て生じたものであるかなどについては研究者の意見もま とまっていない.

2.4.4 地すべり・山腹崩壊

(Landslides and Mountain failures)

兵庫県南部地震では,674箇所の地すべり・山腹崩壊が 発生した¹⁸⁾.また,図 2.4.14 では662箇所の崩壊が示され ている.崩壊は夙川上流,芦屋川,住吉川下流に集中し



図 2.4.14 崩壞分布図19) (Distribution of landslides induced by the earthquake)



図 2.4.15 仁川地すべりの地質断面図 (Geological section of Nigawa landslide)



図 2.4.16 淡路島における地すべり発生地点と運動方向 (Landslide sites and direction of movement in Awaji Island)

ており、震源に近い西部には少ない⁶⁾.崩壊は、30度より も急勾配の斜面で多く発生しており、降雨による崩壊よ りも急な斜面に多い.また、凹凸との関係で見ると、凸 斜面に多く発生しており、凹斜面に発生する降雨時の崩 壊と対照的である¹⁹⁾.また,地震により地盤強度が低下す るため、地震直後のみならず、その後も崩壊の拡大や新 規崩壊の可能性がある.六甲山系では地震後4箇月の間 に69箇所で崩壊が拡大しており、また、多くの新たな斜 面崩壊が発生している.特に、灘区の鶴甲地区では、地 震直後には240m²であった崩壊面積が8月4日までに 7100m²と拡大している.

本土側では西宮市仁川地区,東灘区西岡本と二カ所で 市街地の大規模な地すべりが発生している. 仁川地区で は11~12万m³の土塊が移動した.土塊の移動速度は数 m/sで,地すべりの移動範囲にあった家屋の住民全員が 生き埋めとなった. 図2.4.15 は地質断面図であるが,大 阪層群の上に大阪層群の材料の盛土と考えられる二次堆 積土層が存在し,この二次堆積層が地すべりの原因に なったと考えられている⁶.

西岡本の地すべりでは約60万m³の土塊が移動し,被 災人家約200戸,被災面積約12haであった.すべり面は 強風化花崗岩下面付近で地震動によるすべり面のせん断 強度の低下が原因と考えられている.

図 2.4.16 に淡路島における地すべりの発生地点を示 す. 神戸側の二つの地すべりはに比べれば,淡路島の地 すべりの規模は相対的に小さく,人的被害に直結したも のはない.

引用文献

 Huzita, H. : Tectonic development of the Median Zone (Setouchi) of Southwest Japan, since the Miocene with special reference to the characteristic structure of Central Kinki Area, Jour. Geosci. Osaka

第2章 地震・地震動および地形・地質・地盤の概要

City Univ., Vol. 6, pp.103-144,1962

- 2) 阪神地域活断層調査会: 阪神·淡路地域活断層調査 報告書, 225pp, 1996
- 3) 土質工学会関西支部・関西地質調査業協会編著:新 編大阪地盤図, コロナ社, 285p., 1987
- 4)藤田和夫・佐野正人:阪神・淡路大震災と六甲変動, 科学, Vol. 66, pp.693-803, 1996
- 5) 土質工学会関西支部:海底地盤-大阪湾を例にして-,406+184pp.1995
- 6) 阪神・淡路大震災調査報告書編集委員会:阪神・淡路大震災調査報告書,共通編2,丸善,577pp,1998
- 7) 運輸省第3港湾局:大阪湾, 1996
- 8) 諏訪靖二・濱田晃之・田淵俊幸:兵庫県南部地震によるウオーターフロント構造物の被害,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.75-80,1995
- Shibata, T., F. Oka and Y. Ozawa: Characteristics of ground deformation due to liquefaction, Special Issue of Soils and Foundations on Geotechnical Aspects of the January 17, 1995 Hyogoken-nambu Earthquake, pp.65-79, 1996
- 運輸省港湾局監修:港湾の施設の技術上の基準・同 解説,日本港湾協会,1989
- Yoshimi, Y., K. Tokimatsu and Y. Hosaka: Evaluation of liquefaction resistance of clean sands based on high-quality undisturbed samples, Soils and Foundations, Vol. 29, No. 1, pp.93-104, 1989
- 12) 国土地理院:第13 回地震予知連絡会提出資料

- 13) 若松加寿江:わが国における液状化履歴(1885~1997)とその特徴,第33回地盤工学研究発表会発表論文集,pp.905-906,1998
- Hamada, M., R. Isoyama and K. Wakamatsu: Liquefaction-induced ground displacement and its damage to lifeline facilities, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, pp.81-97, 1996
- 15) Inagaki, H., S. Iai, T. Sugano, H. Yamazaki and T. Inatomi : Performance of caisson type quay walls at Kobe Port, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, pp.119-136, 1996
- 16) Ishihara, K., Yasuda, S. and Nagase, H. (1996) : Soil Characteristics and Ground Damage, Soils and Foundations, Special Issue on Geotechnical Aspects of the January 17 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, pp.109-118
- 17) 濱田政則・若松加寿江:液状化による地盤の水平変位の研究,土木学会論文集 No. 596/III-43, pp.189-208, 1998
- 18) 地盤工学会・阪神大震災調査委員会編: 阪神・淡路 大震災調査報告書(解説編), pp.263-283, 1996
- 19)西田顕郎・小橋澄治・水山高久:土砂災害データベー スを活用した兵庫県南部地震による山腹崩壊分布の 解析,砂防学会誌,49-1, pp.19-24, 1996