

招待論文
INVITED
PAPER

招待論文

大阪湾海底地盤の土質工学的諸問題

GEOTECHNICAL ASPECTS OF SEABED IN OSAKA BAY

赤井浩一

Koichi AKAI

正会員 工博 (財) 大阪土質試験所理事長
(〒550 大阪市西区西本町 3-1-23)Keywords: seabed database, in-situ measurement,
pleistocene clay

1. 序

わが国の国土は人口に比して狭隘なうえ、四方を海に囲まれているため、大都市は主に沿岸地域に発達し、従来からその周辺の海域を埋め立てて人工の陸地とするなど、沿岸近傍の開発が進められてきた。さらに最近では、東京湾横断道路や関西国際空港を例とするような、内湾の沿岸からはるか離れた沖合いでの大規模な開発工事が計画され、実施されるようになってきた。このような沿岸あるいは沖合いの海底地盤では、表層に軟弱な沖積層が厚く堆積し、その下に過圧密比の小さい洪積粘土層が続き、構造物の支持層となるべき砂礫層はきわめて薄い、あるいは全く存在せず、基礎の設計に対する地盤条件がきびしくなっている。さらに近年、各種構造物の大型化・重量化につれて、陸上部においても構造物の基礎を従来のような沖積地盤上に置くのでは支持力が不足することが多く、したがってさらに深部の段丘層や上部洪積層に支持層を求めねばならない事例が増しつつある。しかるに、この種の地層は十分深所にある洪積層に比べて堆積年代が比較的若く、過圧密比が小さいうえに、地史的にみて必ずしもその荷重履歴が現在の有効上載圧を超えているとはみなしがたい場合も少なくなく、このような地層上の構造物の沈下性状に問題が生じている。

本文では、本州四国連絡橋明石海峡大橋や関西国際空港の建設をはじめ各種の大規模開発が実施されている大阪湾の海底地盤の土質工学的諸問題を述べ、そこに建設される巨大構造物の基礎工の事例を概説するものである。

2. 地質学的考察

(1) 地形・地質の概要¹⁾

近畿地方で最も広い沖積低地をもつ大阪平野は、その

西側が大阪湾に面した海岸平野であり、軟弱な海成粘土層を伴った沖積層が厚く分布する。その北側は北摂山地と千里丘陵、東側は枚方丘陵と生駒山地、南側は泉北・泉南丘陵と和泉山脈で囲まれた低平地である(図-1参照)。周辺の山地は丹波帯中・古生層、領家帯花崗岩類、変成岩類などの基盤岩からなり、これらの基盤岩は大阪平野の地下600~1500mに分布する。また、山麓部には垂直変位2000m以上に達する活断層が存在し、低地部との明瞭な境界をなしている。

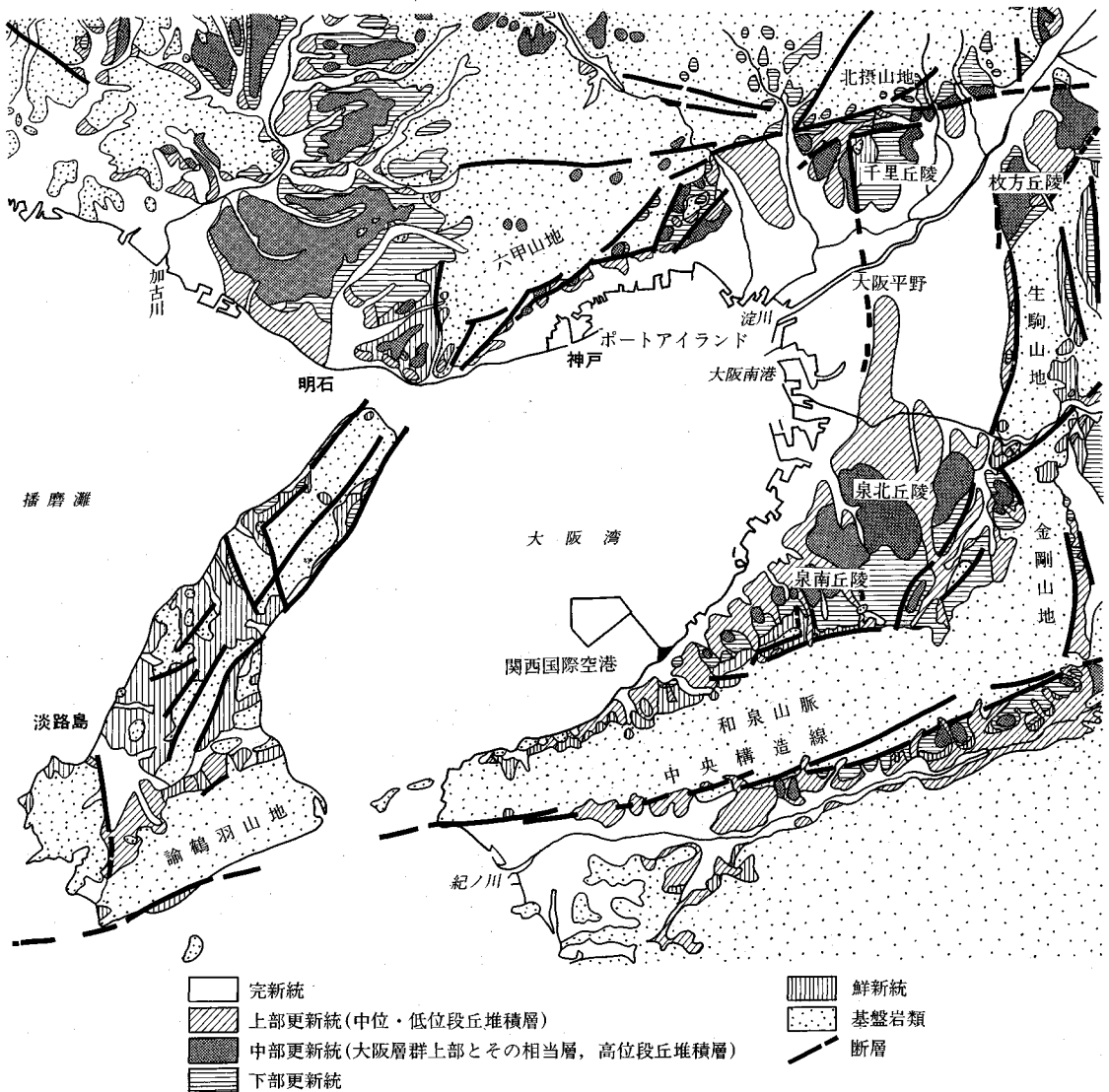
一方、神戸地域の北側に東西方向に延びる六甲山地は、主として花崗岩から構成されている。その南麓には部分的に丘陵地が認められるほかは、扇状地が比較的広く発達している。これら山麓部には断層が顕著で、花崗岩や神戸層群・大阪層群などの堆積層が分布している。

(2) 地質層序

大阪湾を囲む地域の地盤を構成する地質は、主として第三紀後半から現在までにかけて堆積した地層で占められる。それらは、その形成時期や層相などから、大阪層群、上部洪積層および沖積層に大きく区分されている。

a) 大阪層群

大阪層群(鮮新統~更新統)は京阪神地域の丘陵地や大阪平野の地盤を構成し、その下半部は砂礫主体の淡水成の粘土・シルト・砂・礫の互層で、上半部は12枚の海成粘土層と淡水成の砂礫層(一部淡水成~汽水成の粘土層を含む)との互層となっている。特に、海成粘土層と火山灰の薄層(40層以上存在するといわれる)は層序を決定する上での重要な鍵層となり、大阪平野の南部の泉北・泉南地域では、これらの鍵層をもとに大阪層群の標準層序が確立されている。大阪地盤に埋没する大阪層群については、地盤沈下対策のための深層ボーリング調査(OD-1~OD-9)が実施され、その分布の概略が把握された。



図一 大阪平野とその周辺部

b) 上部洪積層

上部洪積層は上述の OD-1 ボーリングで定義されたものであり、大阪層群 (Ma 10 層以深) の上位に存在する最も新しい洪積層である。OD-1 では層厚 85 m で、礫・砂・粘土の互層からなり、Ma 11 と Ma 12 の 2 枚の海成粘土を挟む (後掲図-7 参照)。上部洪積層の最上部は、いわゆる天満層や伊丹層と呼ばれる砂礫主体の地層である。

c) 沖積層

沖積層の層相は、一般に粘土層と砂層の互層からなる下部層、海成粘土層からなる厚い中部層 (梅田層または Ma 13 と呼ぶ) および砂層を主とする上部層に区分されるが、大阪湾沖合い海底地盤では後者の上部層を欠く

ことが多い。

3. 海底地盤データベースの構築と活用

(1) データベースの概要²⁾

「大阪湾海底地盤データベース」は土質工学会関西支部大阪湾海底の地盤研究委員会 (1984~1990) によってまとめられ、大阪湾周辺を含む広域な海域の地盤の地質・土質工学的性質の研究に活用されつつある。

データベースの構築にあたっては、まず使用するシステムについて慎重に検討し、ハード非依存型の汎用性を有し、多階層性・大集積性のものが採用された。そして、大阪湾に関係する官庁や公益企業体 14 機関から地盤調査データの提供と援助を得て、ボーリング数約

3 000 本, 報告書約 500 冊を収集した. そのうち入力ボーリングは約 1 300 本で, その選定にあたってはデータの代表性と信頼性の確保が図られている. その結果, 大阪湾内で実施された地盤調査データのほとんどが収集されており, 特に神戸・大阪・堺各市を中心とする北東側の湾奥部の調査に関しては, ほぼ全部が収録されている.

(2) データベースの構築

地盤情報データベースの構築にあたっては, まず収集したボーリング全部の調査内容(調査件名, 発注・調査者, 調査深度, 試験個数など)を簡易なデータベースに整理し, それを用いて調査位置図と調査内容リストを作成してデータの全容を把握した. 次に, それらの整理資料を参照して, データベースへ入力すべき約 1 300 本のボーリングを選定したが, さらにその中から, 地質学的検討がなされ, かつ調査深度が深いものを厳選して, 大阪湾海底地盤の大きな枠組を構成するミニ・データベース(269 本)に編集され, 前記研究委員会の研究活動に利用された. なお, このデータベースの構築には, 従来陸域の大阪地盤に対して開発された地盤情報データベースシステム(DIG: Data-base for Information of Ground)を使用し, 柱状図(地盤, N 値)のみならず標準的な調査報告書の内容が再現できるまでのレベルで行われた. 例えば, 粒径加積曲線や圧密曲線が再現でき, 一軸圧縮試験の供試体条件(含水比, 飽和度, 形状など)を含み, さらに明石海峡の岩盤試験データも扱えるような項目で入力されている.

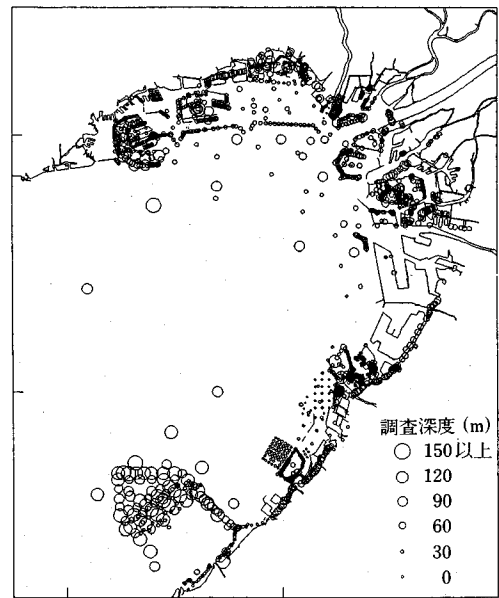
大阪湾海底地盤調査の現状に関して, 図-2 は調査深度の平面分布とその調査年代との関係を示している³⁾.

(a) 図では調査深度を円の大きさで示しているが, 大阪湾における地盤調査の多くは 30 m 前後と 60~90 m の深度で実施されている. 前者は沖積粘土層の層厚, またはそれに数 m (洪積砂礫層)を加えた深度に対応しており, 軟弱な沖積粘土層を対象とした調査に相当する. 一方, 後者は洪積粘土層(Ma12, Ma11, ……)を含めた調査に相当するが, 新空港海域の調査を除いては, ほとんどが Ma12 層までを調査の対象としている. (b) 図によれば, 1970 年代以降調査深度が 100 m 級以上の調査は全部で 100 本前後あるが, そのほとんどは湾央付近と新空港海域に分布し, 沿岸部では数本しか実施されていない. なお, ほとんどすべての調査で乱さない試料の採取が行われている.

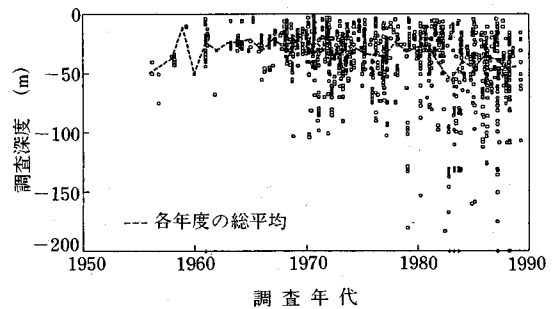
(3) 原位置調査

a) 概説

地盤調査のためのボーリングは土試料の採取を主目的としており, 一般に砂質土層に対しては標準貫入試験による N 値測定, また粘性土層に対しては固定ピストン型薄肉サンプラーまたは二重管方式のデニソン型サンプラーによる乱さない試料採取が行われる. このほか最近



(a) 調査深度の平面分布



(b) 調査深度と調査年代の関係

図-2 大阪湾における地盤調査深度

では, プレッシャーマーターによる地圧測定などの種々の原位置調査が実施されるようになっているが, ここでは大阪湾海底地盤に対して行われた孔内 PS 検層を中心に述べる.

b) 漂遊型 PS 検層システムの概要⁴⁾

海底地盤に対する PS 検層においては, 通常用いられる地表振源の使用は困難であるので, 関西国際空港建設に伴うボーリング孔内 PS 検層においては孔内振源方式が用いられている. このシステムの最大の特徴は, 孔内水を介して孔壁に力を加える間接加振型振源と孔内水の動きを検出する漂遊型受振器が組み込まれたプローブにある. 実際の検層においては, このプローブをボーリング孔内の任意の深さまで挿入し, 2つの受振器で振源からの波を受信する.

c) 波速からの地盤定数の推定⁵⁾

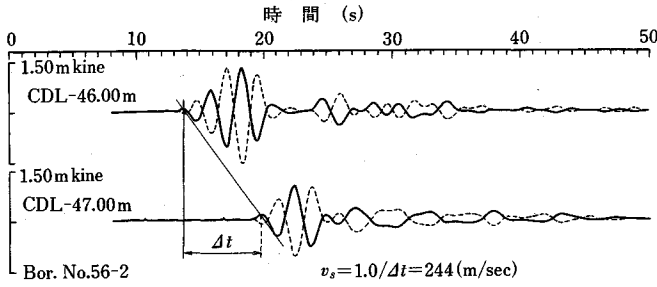


図-3 泉州沖海底地盤の洪積粘土層での横波記録

一般に地盤内を伝播する波の速度から地盤の変形係数(ヤング率 E , せん断弾性係数 E), ポアソン比 ν が算定される. 図-3はボーリングNo.56-2地点(水深15.2m)の海面下約46~47mの洪積層で得られた横波(S波)の変位速度波形である. 上半の波は振源に近いほう(振源からの距離2.7m)の受振器で, 下半の波は遠いほう(距離3.7m)の受振器で受けたものである.

また, 実線と点線はそれぞれ振源で逆方向に打撃を加えたものであり, その対称性からして横波の発生が良好であることがわかる. 図に示したこの2点での波の到達時間の差 Δt から波速が計算され, この地層では横波速度は244 m/sとなる. 図-4にこのようにして計算された波速の深度分布を示す. これより, 海底面からの深度を $z(m)$ として縦波速度 $v_p(m/s)$, 横波速度 $v_s(m/s)$ は, 図中に示すようにそれぞれ次式で近似できる.

$$v_p = 1400 + 1.5z, \quad v_s = 30z^{0.5} \dots \dots \dots (1)$$

段丘礫層(Tg)や砂層および上部洪積層(Ma12, Ma11)では, 上式より大きい波速が得られているが, 当該海底地盤では粘性土が優勢であるので, 上式はこの地点の大阪層群全体に適用できると考えてよいであろう.

地盤のせん断弾性係数 G は横波速度 v_s から次式により求めることができる.

$$G = \rho v_s^2 \dots \dots \dots (2)$$

ここに, ρ は地盤の密度である. 式(2)に式(1)の第2式の関係代入することにより,

$$G = 900\rho z \dots \dots \dots (3)$$

が得られ, 地盤の密度 ρ が深さ z により大きく変化しないかぎり G は z にほぼ比例することになる. 後掲の図-8にこの海域の地盤の総土質柱状図があるが, その中で洪積層の一軸圧縮強度の深度分布がほぼ直線的な増加となることと斉合している.

図-5は横軸と縦軸としてそれぞれ横波速度 v_s , 縦波速度 v_p を水中での圧縮波の伝播速度 v_w (≈ 1400 m/s) で除して基準化し, その中に当該海底地盤の各粘土層の波速をプロットしたものである. なお, その地層で実際

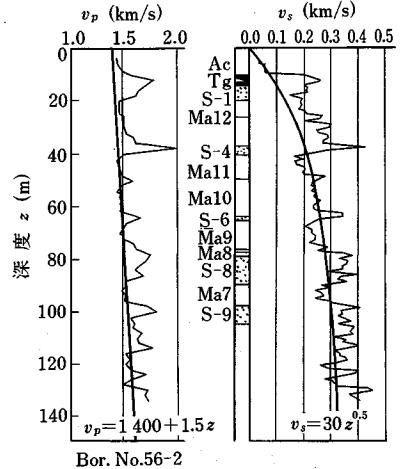


図-4 泉州沖海底地盤のPS検層結果

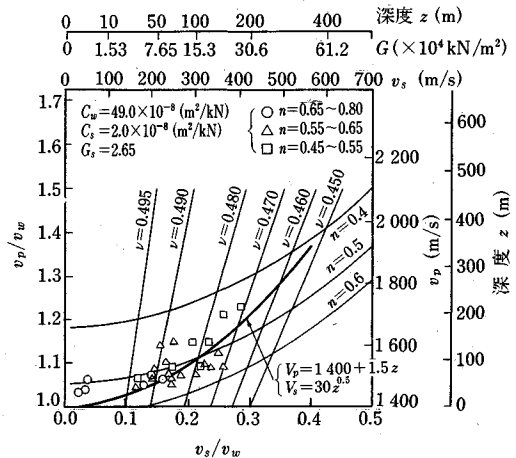


図-5 縦波・横波両波速間関係

に採取された粘土の間隙率 n により点の種類を区別し, 図面の上側にはせん断弾性係数の値を示している. また, 図中には以下の関係を表す直線・曲線群が描かれている.

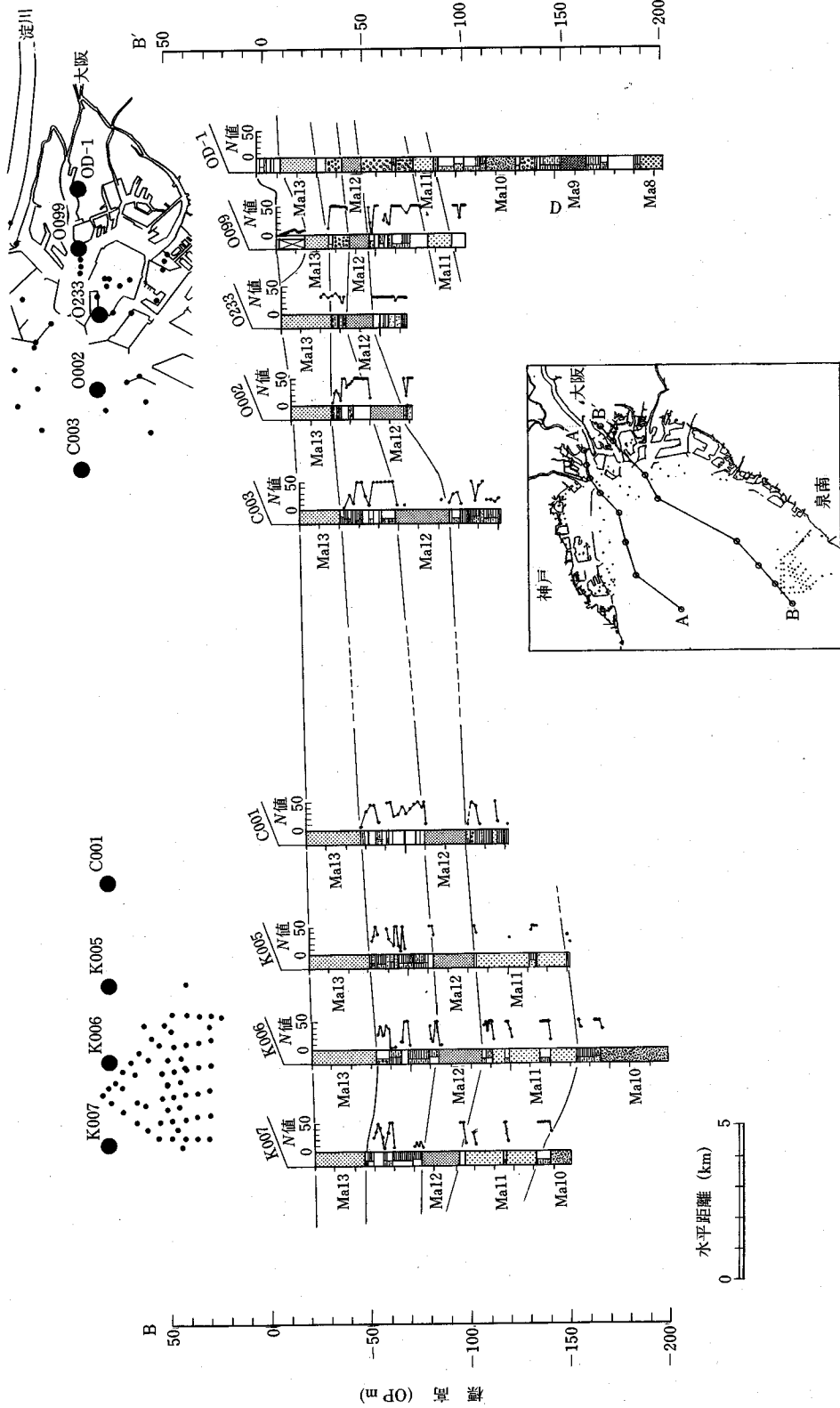
- 1) 深度 z を介した $v_p \sim v_s$ 関係 (曲線: 太線)
波速の近似式である式(1)から深さ z を消去し, 同一の深度に対する両者の関係を次式で表したものを.

$$\frac{v_p}{v_w} = 1 + 7 \left(\frac{v_s}{v_w} \right)^{\frac{2}{5}} \dots \dots \dots (4)$$

この曲線と図中の実測値の点とを比較することにより, 式(1)による波速の近似がほぼ妥当であることがわかる.

- 2) 地盤を多孔質弾性体と仮定した $v_p \sim v_s$ 関係 (曲線群: 実線)

Biotの多孔質弾性体理論⁶⁾により, 地盤の間隙率 n をパラメーターとした v_p と v_s の関係式



図—6 地層断面図 (B-B':大阪湾中央~淀川河口)

$$\left(\frac{v_p}{v_w}\right)^2 = \left\{ \frac{1}{C_s + n(C_w - C_s)} + \frac{4\rho v_s^2}{3g} \right\} \frac{C_w}{n + (1-n)G_s} \dots\dots\dots (5)$$

を示したものである。ここで用いられた定数は

- v_w : 水中での圧縮波の伝播速度 (≒1400 m/s)
- G_s : 土粒子の比重 (≒2.65)
- C_s : 粘土粒子実質部分の体積圧縮率 (≒2.0 × 10⁻⁸m²/kN)
- C_w : 水の体積圧縮率 (≒49.0 × 10⁻⁸m²/kN)

当該海底地盤の粘性土の間隙率は、沖積層を除いてこの曲線群が表す間隙比と比較的よい一致を見ている。この関係を用いることにより、間隙率・横波速度・縦波速度のうち2つがわかれば、残りの地盤係数を推量することができる。

3) ポアソン比νを介した $v_p \sim v_s$ 関係 (直線群)

土が弾性体であるときの

$$\frac{v_p}{v_s} = \left\{ \frac{2(1-\nu)}{1-2\nu} \right\}^{\frac{1}{2}} \dots\dots\dots (6)$$

によって表される関係を、ポアソン比をパラメーターとしてプロットしたものである。この直線群により、構造物基礎の耐震設計に必要なポアソン比を評価することが可能である。一般に耐震設計を行う際には、地盤のポアソン比は一定と仮定することが多いようであるが、ポアソン比は深さ方向に変化しており、これを解析にとり入れるべきであると考えられる。

(4) 海底地盤の地層構成と洪積層粘土の圧縮性

a) 地層構成

中世古ら⁷⁾が1984年に新空港の地質学的調査結果を報告して以来、ボーリングで採取された試料に含まれるナンノプランクトン、珪藻、花粉化石などを調べる微化石分析は、大阪地盤の地層層序や堆積環境を明らかにする手法として定着しつつある。その際、Maナンバを主体に地質区分を行う方法が最も普遍的であるのでこれを採用した。

大阪湾の海底には未固結の堆積層が厚く存在し、基盤岩が出現するのは浅くとも深度1000~1500m以上であり、湾央では約3000mに達している。一例として、泉州沖から北東部湾奥へ向かうB-B'断面線に沿った地層断面図を図-6に示す⁸⁾。この断面の右端にあるボーリングは、1963年に大阪市が地盤沈下の調査のために港区田中元町において実施したOD-1と呼ばれるもので掘削長は907mに達し、大阪付近の地盤の未固結堆積層の層序の基本タイプになっている。その詳細が図-7に示されるが、上部から沖積層、上部洪積層、大阪層群と名づけられている。この大阪層群は第三紀鮮新世から第四紀更新世へかけての堆積で、砂と粘土の互層になっており、粘土は海進期の堆積物、砂は海退期の堆積物である。海水中に堆積した粘土を海成粘土 (Marine

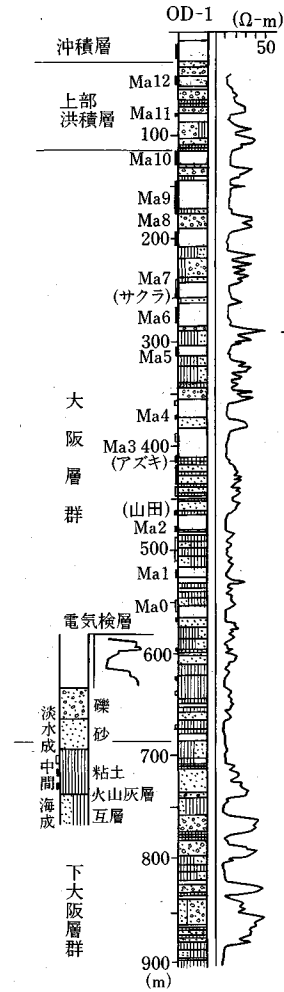


図-7 深層ボーリング OD-1 (大阪市港区田中元町) の層序区分

clay) と呼ぶが、大阪層群と上部洪積層中には海成粘土が14枚見つかっており、下位からMa-1 (泉南で確認)、Ma0, Ma1, ~Ma12と名づけられている¹⁰⁾。なお、大阪層群の粘土の中でMaナンバーのついていないものが何枚かあるが、これらは汽水または淡水中に堆積した非海成粘土である。また最近では、最上部の沖積粘土層(いわゆる梅田層)をMa13と書くことも多い。このように地層は海底から沖積粘土層、第1洪積砂質土層、上部洪積粘土層 (Ma12) と続き、以下砂質土と粘土の互層が1000m以上に及ぶ。

b) 海底粘土の圧縮性

図-8は大阪湾泉州沖5km、関西国際空港建設地点海底地盤の深層ボーリング (No.56-9, 水深18.15m) における深度200mまでの総合土質柱状図を示している¹¹⁾。さきの図-7に示したOD-1は大阪市内西端の陸

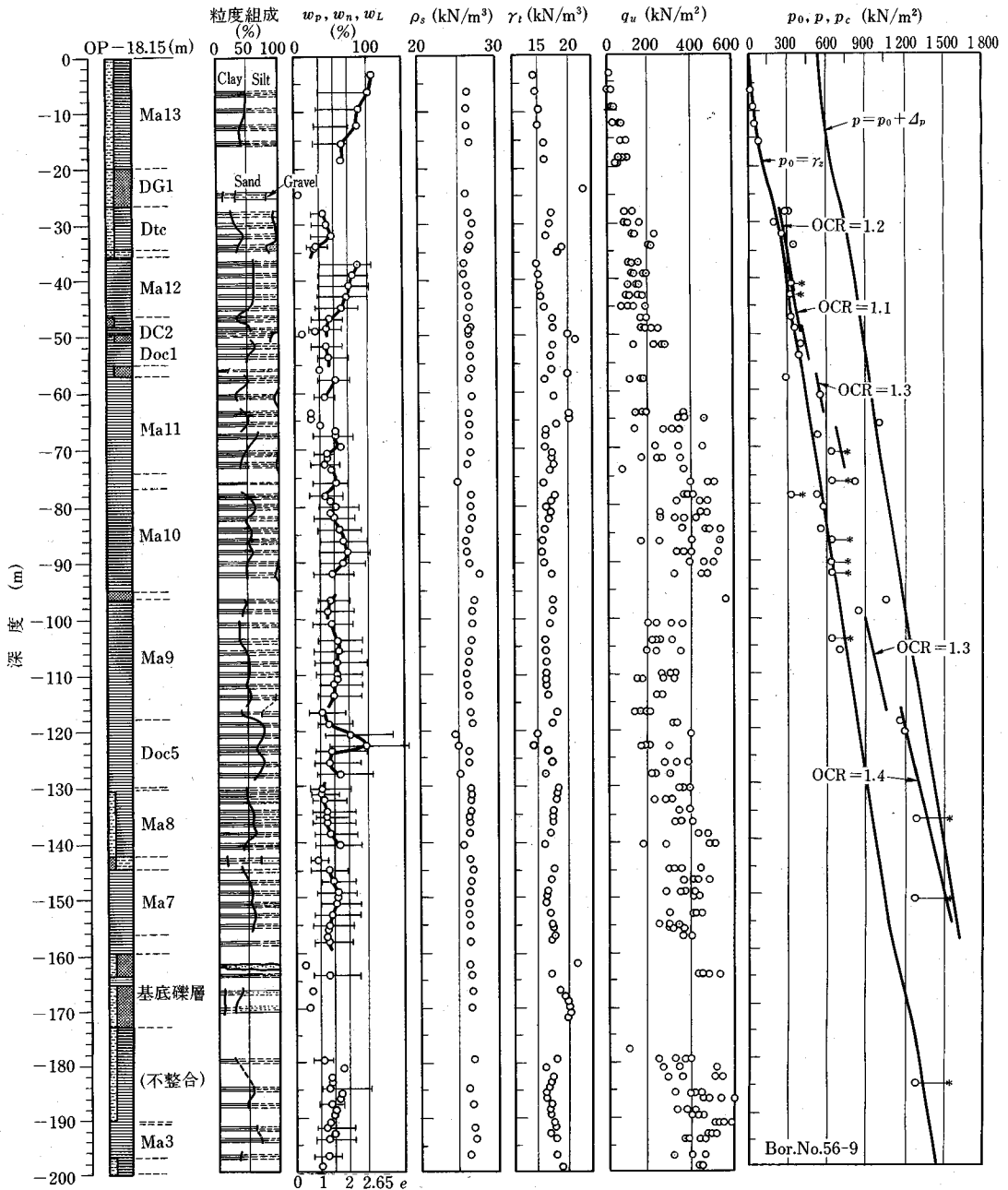
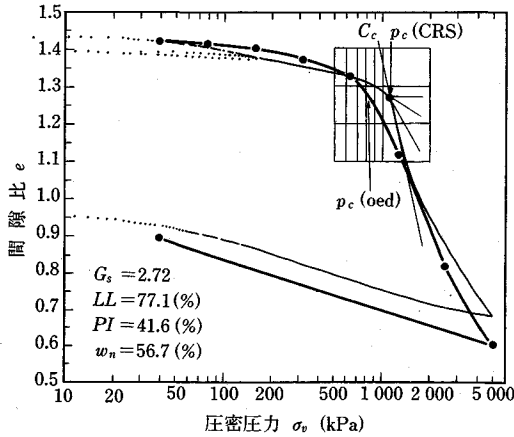


図-8 泉州沖海底地盤の総合土質柱状図

上部での土質柱状図であったが、それと比較してこの図-8ではいわゆる「海型」地盤の特徴がよく現れている。すなわち、海底面直下の沖積層 (Ma13) とその下方の大阪層群の土層構成の層序は両者とも類似しているが、各層の出現深度には相当な違いがあり、全体として砂や礫の層はきわめて薄い。また、図-8では海底面下160mの深さにあるMa7層直下の基底礫層の下に不整合面があり、その下部にアズキ火山灰 (約87万年前) を鍵

層として含むMa3層が出現する。Ma番号のついた海成粘土層のほかに、DtcやDocという記号の淡水成ないし汽水成粘土層が存在するが、特に深度120m付近のDoc5は特異なコンシステンシーをもつ珪藻主体の粘土であって、圧縮性も著しく大きい。図ではコンシステンシーの欄の下に飽和土に対する $e = wG_s (G_s \approx 2.65)$ なる関係を用いて間隙比のスケールを記入してある。これによって各粘土層の自然含水比 w より自然間隙比 e

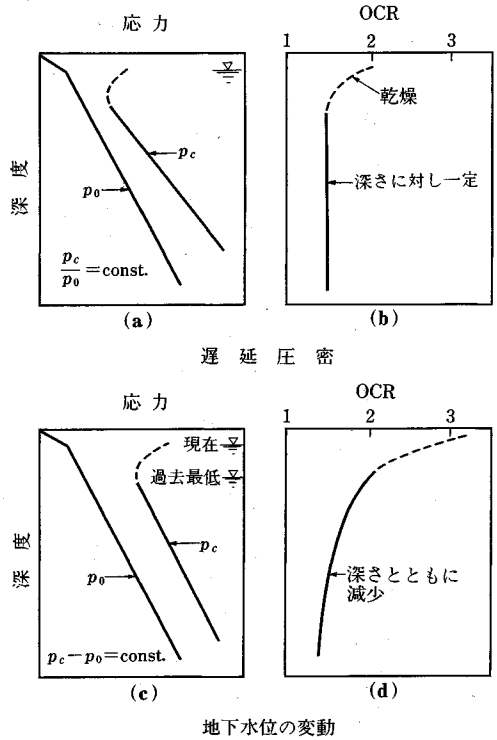


図—9 標準圧密試験と定ひずみ速度圧密試験の結果の比較

の大きさをただちに読みとることができる。

粘土の一軸圧縮強度の深度分布は、深さ約100 mのMa10層まではほぼ直線的増加を示すが、それ以深は試験結果に散らばりが大きく傾向がつかめない。これは硬質粘土にみられる一般的特徴であって、同様なことが圧密試験から求められる圧密降伏応力 p_c にもいえる。すなわち、沖積層粘土 Ma13 は OCR=1.0 の正規圧密状態、上部洪積層粘土 Ma12, Ma11 は OCR=1.1~1.2、それ以深の洪積層粘土 Ma10~Ma7 は OCR=1.3~1.4 であるが、いずれもきわめて軽度の過圧密状態であり、恐らく次節に述べる遅延圧密の結果としての疑似過圧密粘土であると推察される。なお、図—8の右端欄の $p = p_0 + \Delta p$ は新空港の埋立（最大層厚 33.5 m）後の地中鉛直応力の深度分布であり、面積 511 ha に及ぶ広大な空港島の地盤では応力分散がほとんどなく、Ma7層までのすべての粘土層が正規圧密状態となり、埋立土層の圧縮と沖積層の圧密沈下約 6 m（平成 6 年夏頃の開港時までに収束予定）に加えて洪積層の圧縮も優に 5~6 m が予想されている¹²⁾。

洪積層粘土のような比較的硬質の土の圧密降伏応力 p_c を正確に求めるのに、現行の標準圧密試験は不適當である。それは倍倍と載荷を重ねるやり方では、ちょうど p_c の付近の鉛直応力が大きく跳んでしまうからである。これに対して定ひずみ速度圧密試験（CRS 試験）は、この欠点を補う試験法として有効である。図—9 は大阪地盤の陸上部（東区城見）での Ma6 層粘土に対する両試験法による結果を比較したものである。供試体寸法はいずれも直径 6 cm、高さ 2 cm であり、CRS 試験ではひずみ速度を 0.01%/min とし、供試体底面に 98 kPa の背圧を作用させている。図によると、両試験での圧密曲線は全般的にはそれほど差異はないが、 p_c を超える前後で両者に大きい違いが認められる。すなわち、標準圧密試験では $p_c = 830$ kPa、 $C_c = 0.98$ 、一方 CRS 試験



図—10 遅延圧密または地下水位変動による圧密降伏応力と過圧密比の深度分布

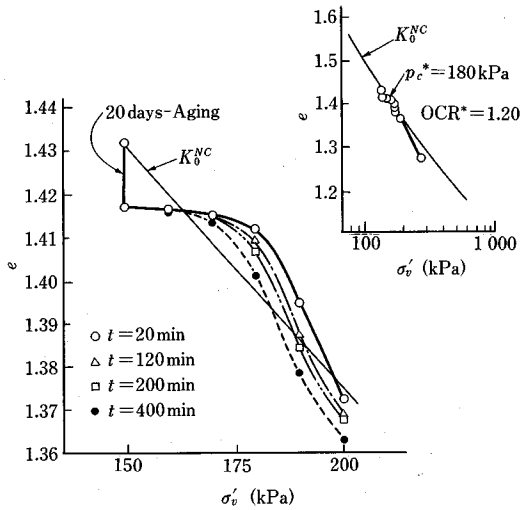
では $p_c = 1130$ kPa、 $C_c = 2.07$ であり、後者の試験法がより正確な結果を与えるといえる。

(5) 疑似過圧密粘土への載荷における応力超過現象

a) 遅延圧密に伴う先行効果

Bjerrum¹³⁾ はたとえ正規圧密粘土であっても、経時効果によって圧密降伏応力 p_c が有効上載圧 p_0 より大きく出る現象に注意し、このような遅延圧密土の特性を先行効果 (p_c -effect) と呼んだ。この先行効果は有効上載圧に比例して増加し、同年代に堆積した層の p_c/p_0 は実在する上載荷重のもとで粘土に生じる二次圧密の量とともに増加する。また、二次圧密は粘土の塑性とともに増すから、 p_c/p_0 が塑性指数 I_p とともに増大することも知られている。

Wroth ら¹⁴⁾ は上載圧不変のまま遅延圧密をした疑似過圧密粘土と、既往の地下水位変動などによる載荷履歴を受けた通常の過圧密粘土との両者で、 p_c と OCR の深度分布に現れる相違を図—10のように説明している。これによると、後者は OCR が深さとともに減少するのに対し、前者はその深度分布が一定という特性をもつ。一方、静止土圧係数 K_0 と OCR との間には粘土に固有の関係がある¹⁵⁾ ので、原位置における K_0 値がわかれば OCR が求まり、これが深さにかかわらず一定ならば、その粘土の過圧密特性が疑似的なものに過ぎないことが



図—11 aging 後の K_0 三軸荷重時の圧縮曲線 ($\sigma'_v=150$ kPa)

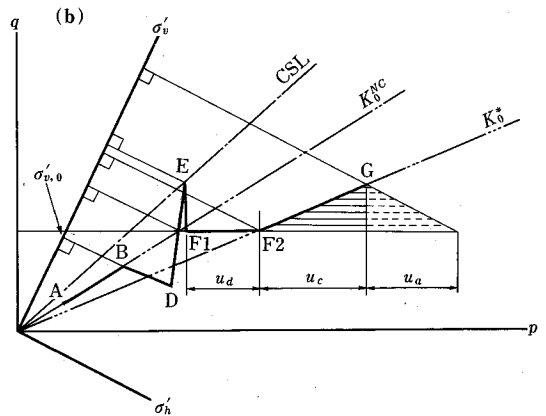
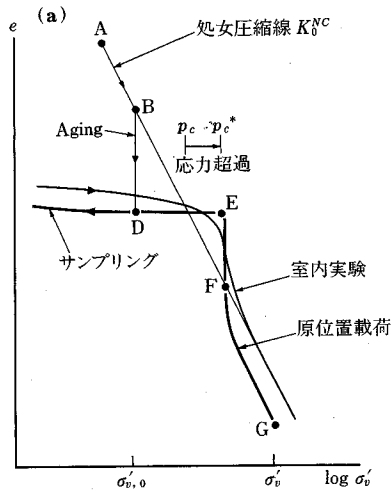
知られる。

b) 荷重時の粘土の圧縮挙動試論

沿岸または沖合いの造成地の安定を論議する際に、海底の若い洪積粘土層の沈下挙動が問題となっているので、遅延圧密土への荷重後の変形は興味大きい。この現象を調べるために、カオリン試料に対して 150 kPa の軸圧のもとで 20 日間の aging を与えた後、 K_0 状態を保ちながら $t=20$ 分ないし 400 分ごとに微少幅で新たな荷重を加える実験を行ったが、その結果の一例を図—11 に示す¹⁶⁾。この図により、圧密降伏応力 p_c^* (通常の過圧密粘土の際の p_c と区別するため * 印を付けた) までは間隙比 e の減少がほとんどない (これをロッキングという) 疑似過圧密挙動をとることが知られる。また、この図のように軸圧が低い場合には、 p_c^* 値が処女圧縮線を超過する現象がみられるが、高い軸圧下ではこのようなことは現われない。さらに p_c^* 以降の圧縮指数の C_c は正規圧密状態のものより大きく、 $e-\sigma'_v$ 曲線が処女圧縮線の下方に位置することも特徴的である。これらの実験結果から、埋立地表面がまだ水中にある間はほとんど深層の地盤は圧縮せず、その表面が海上に出てから突如急激な沈下が起こるといふ神戸ポートアイランド¹⁷⁾や泉南沖の空港島¹⁸⁾の沈下挙動を説明することが可能となる。

図—12 (a) は大阪層群上部洪積層粘土などのような疑似過圧密粘土が荷重を受けて一次元圧縮を生じるときの圧密曲線を模式的に描いたものであり、(b) はこれに対応する有効応力経路を示している。さきに観察された変形特性から、以下の試論が可能である。

1) 堆積後の B 点の応力が適当な大きさ (過大でも過小でもない) のとき、遅延圧密をした粘土 D は荷重



図—12 疑似過圧密粘土への一次元荷重時の圧縮曲線と有効応力経路

時に応力超過して E 点まではロッキングとなり、その後セメンテーションでできたケミカルボンドの急激な崩壊 (destructuring) により F 点まで圧縮し、その後はもとの堆積時の処女圧縮線の傾斜でひずみが進行する。これに伴って初めて過剰間隙水圧が発生する。つまり順序としてはひずみのほうが先で、その結果としての間隙水圧は後で発生すると、この試論では考えている。

2) B 点の応力が小さ過ぎると aging 期間が短くてケミカルボンドが十分発現しない。逆に B 点の応力が大き過ぎるとセメンテーションよりも aging 効果が卓越したり、通常の荷重・除荷に起因する過圧密特性が出て応力超過が生じない。

3) 顕著な超過現象は応力 $\sigma'_{v,0}$ にある原位置の遅延圧密土 D に直接荷重したときに生じるのであって、採取試料ではそれまでの遅延圧密履歴が消滅して、実験室での圧密曲線は通常の過圧密土のような緩やかな形とな

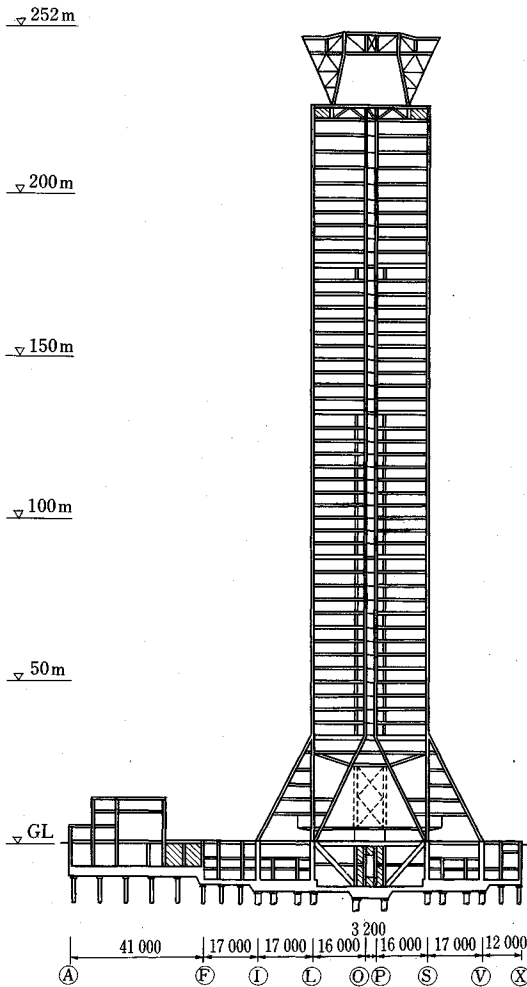


図-13 大阪 WTC ビル立面図

る。 $\sigma_{v,0}$ の圧力下で短期間放置したり、繰り返し載荷した定ひずみ速度圧密試験では若干超過現象が見られる場合があるが、原位置載荷におけるほど顕著ではないと考えられる。

二次圧密を経た粘土に一次元載荷を行うと、圧密降伏応力が処女圧縮線を超えていったん大きく出てその後急激に間隙比の減少が生じ、究極には処女圧縮線にもどることは Leonards ら¹⁸⁾ によって指摘され、また Leroueil ら¹⁹⁾ のより詳しい研究がある。

4. 沿岸埋立地の超高層ビル基礎の設計施工

(1) 地盤概要

大阪ワールドトレードセンター (WTC) ビル (図-13) は、大阪の都心部から西に約 7 km の大阪南港コスモスクエア地区に建設されている地上 52 階、地下 3 階、高さ 252 m、総重量 22 万トンの超高層ビルである (1994 年 12 月竣工予定)²⁰⁾。この敷地は大阪ポートタウン (南

港埋立地 930 ha) の北側に位置しており、1965 年から 1971 年にかけて埋立が行われた。当該敷地は OP+9~9.5 m 程度の高さがあり、周辺の道路に比べ 2 m ほど余盛りされていた。なお、ここは埋立前に海底の粘土に対する地盤改良は行われていず、1985 年頃に埋立レベルの OP+8 m から -26 m (埋立層と沖積層) まで直径 12 cm のバックドレーン (2.4 m 間隔、正方形配置) を施工し、その後 2.5~3 m 程度の載荷盛土がなされている。

敷地内の 5 箇所のボーリング (深度 80 m~117 m) から、地層はほぼ水平に成層していることが知られる。地表面下約 150 m に出現する大阪層群の洪積粘土層 (Ma 10) までは上部洪積層の砂層および粘土層の互層であり、この粘土層 Ma 12, Ma 11 (Dc 2, Dc 3, Dc 4 の 3 枚からなる) はいわゆる疑似過圧密粘土である。建物基礎の設計検討の対象となる Ma 11 層の多段階圧密試験による圧密降伏応力の深度分布の詳細を図-14 に示す。

(2) 基礎構造の設計方針

GL(OP+7.5 m)-47 m 付近から出現する砂層 (第 1 天満層と仮称) 以深の地層は粘土、砂、砂礫の互層構成であり、その中の粘土層は元來過圧密状態にあったが、上部の埋立盛土の厚さが約 20 m に及ぶため、現在も長期にわたる圧密が進行中である。また、天満砂礫層はこの地点では層厚が薄く、その直下の粘土層 (Ma 12) の圧密降伏応力 p_c が有効垂直応力 σ'_v をやや上回っている程度であり、かつ層厚も小さいので高層建物の支持層としては不適当と考えられる。

一方、GL-63 m 以深の第 2 天満層 (仮称) は中間に層厚約 3 m の粘土層 (Dc 2) を挟むが、この粘土層は $p_c - \sigma'_v \approx 300$ kPa 以上でかなり過圧密状態にある。この砂主体の第 2 天満層の層厚は全体で 13 m 程度であり、高層建物の支持地盤として適当であるといえる。これにより、当該建物は GL-63 m 以深の第 2 天満層に杭基礎で支持する。杭は上部にある第 1 天満層以浅の地層の負の摩擦力を低減対策したものとす。ただし、第 2 天満層直下の上部洪積粘土層 (Dc 3 と Dc 4) の過圧密の度合いが小さいので、支持層下部の粘土層 (Dc 2~Dc 4) の二次圧密を含めた圧密沈下予測を行い、上部構造に及ぼす影響を検討する。

基礎構造計画における留意項目としては次の諸点があげられる。

- 1) 高層部の大きい荷重は、できるだけ周辺に分散させて均等化する。
- 2) 地震などの水平力による転倒モーメントに対し、浮き上がりが生じない基礎平面の広がりをもたせること。
- 3) 荷重の小さい周辺地下構造を分離し、エキスパンションジョイントを設けて圧密による不同沈下を吸収する方法は、漏水対策や建築計画上の制約が大きいので採

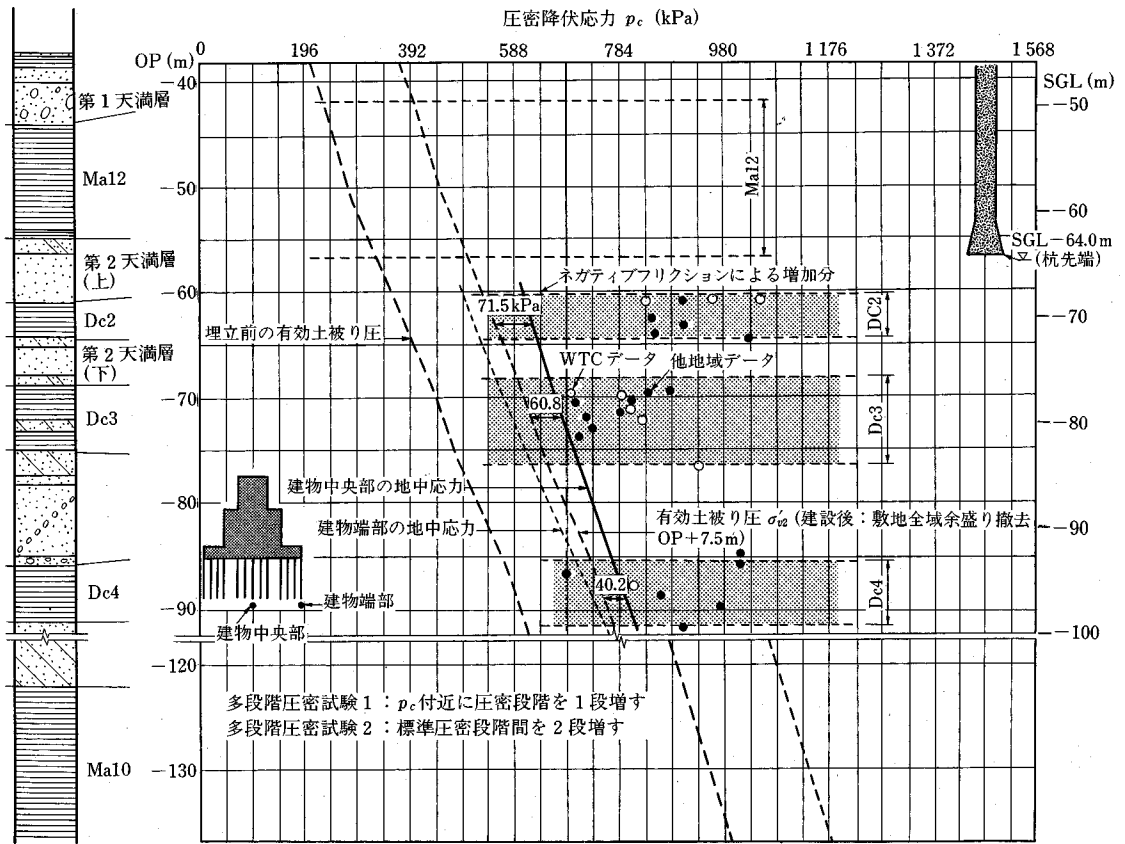


図-14 多段階圧密試験による上部洪積層粘土の圧密降伏応力

用しない。

その解決方法として、高層部の柱を7階レベルで外側柱・内側柱ともに外側に拡げ、鉛直荷重を負担する面積を1階で基準階面積の約2倍になるよう設計された(図-13参照)。また、高層部周囲に地下3階の駐車場を設け、全体の排土重量を建物全重量以上として下部地盤にかかる増加応力を低下させるとともに、建物荷重は負の摩擦力を低減する杭工法によって支持地盤に直接伝達するようにしている。

(3) 杭の設計方針

建物地下の構造は、周辺の地下部分を含んで全体を構造的に一体化して設計する。すなわち、高層部地下は軸力の大きい柱を連続的に結ぶ耐力壁により超高層ビルの基礎として必要な剛性と耐力を確保する。また、この耐力壁と一体化した基礎梁で、高層部の荷重を杭に均等に分散するようにした。高層部の杭(φ1800mm)は大口径の拡底杭(φ3000mm)で、耐力壁の下に中心間隔6m前後に均等配置とした。一方、周辺部地下は荷重が小さく柱軸力に多少差があるが、水平力を考えて高層部の周辺を補強する耐震杭として全部の杭が平均して有効に働くように拡底杭の寸法(φ1100mm, 拡底部φ1800

mm)とし、高層部と同様に間隔6m前後に均等配置した。いずれの杭もGL-53mより上部は鋼管巻きとし、その外周はスリップレヤー材(厚さ6mm)を塗布して、沖積粘土層(Ma13)および上部洪積層(Ma12)の圧密沈下による負の摩擦力の低減をはかった。

なお、支持層として考慮している第2天満層は全体として層厚約13mの堅固な地盤であるが、その中間に厚さ約3mの過圧密の洪積粘土層(Dc2)を挟むので、杭先端の局部応力がこの層の圧密降伏応力を超過するかどうかについて検討した結果、設計段階での建物の最大一次圧密沈下量は高層部中央で7.2cm、不同沈下量は二次圧密を考慮した場合2.2cmと算定され、十分な安全率があることが確認された。

(4) 杭基礎の施工

代表的な土質柱状図と鋼管巻き場所打ち拡底杭の断面図を図-15に示す。鋼管は上部28mが内面リブ付き鋼管、その下部に普通鋼管が接合されている。また、施工手順は図-16に示される。

鋼管巻き場所打ち拡底杭工法は、拡底杭頭部に作用する大きい曲げモーメントやせん断力に対応させるため、杭頭部も内面リブ付き鋼管で巻いた複合場所打ち拡底杭

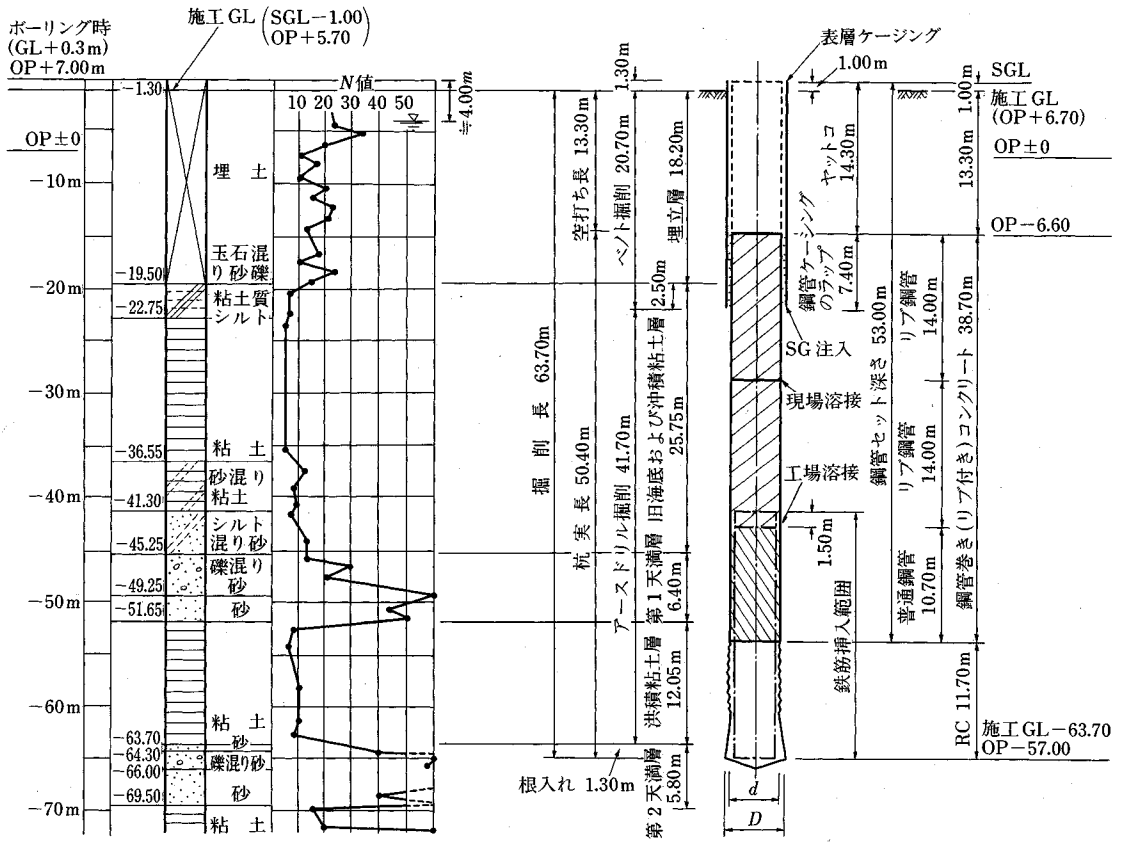


図-15 土質柱状図と鋼管巻き場所打ち掘削杭断面図

工法である。大阪WTCビルの工事では、固有な地盤条件により図-16のように鋼管部がかなり長尺で、下部に普通鋼管を接合したうえ、外周にスリップレヤー材を塗布してある。施工管理の重点は、この長尺鋼管を同径掘削工法で如何にして所定の深度にセットさせ、とかく肌落ちの多いMa12層の孔壁崩壊を防ぐとともに、孔底に堆積するスライムを除去するかということであった。その対策を含めて、いくつかの新たな施工技術や管理手法が考案され、安全確保と品質保証および工程遵守を目指して施工が行われたのであるが、その詳細は別の報告²⁰⁾にゆずる。

5. 結 び

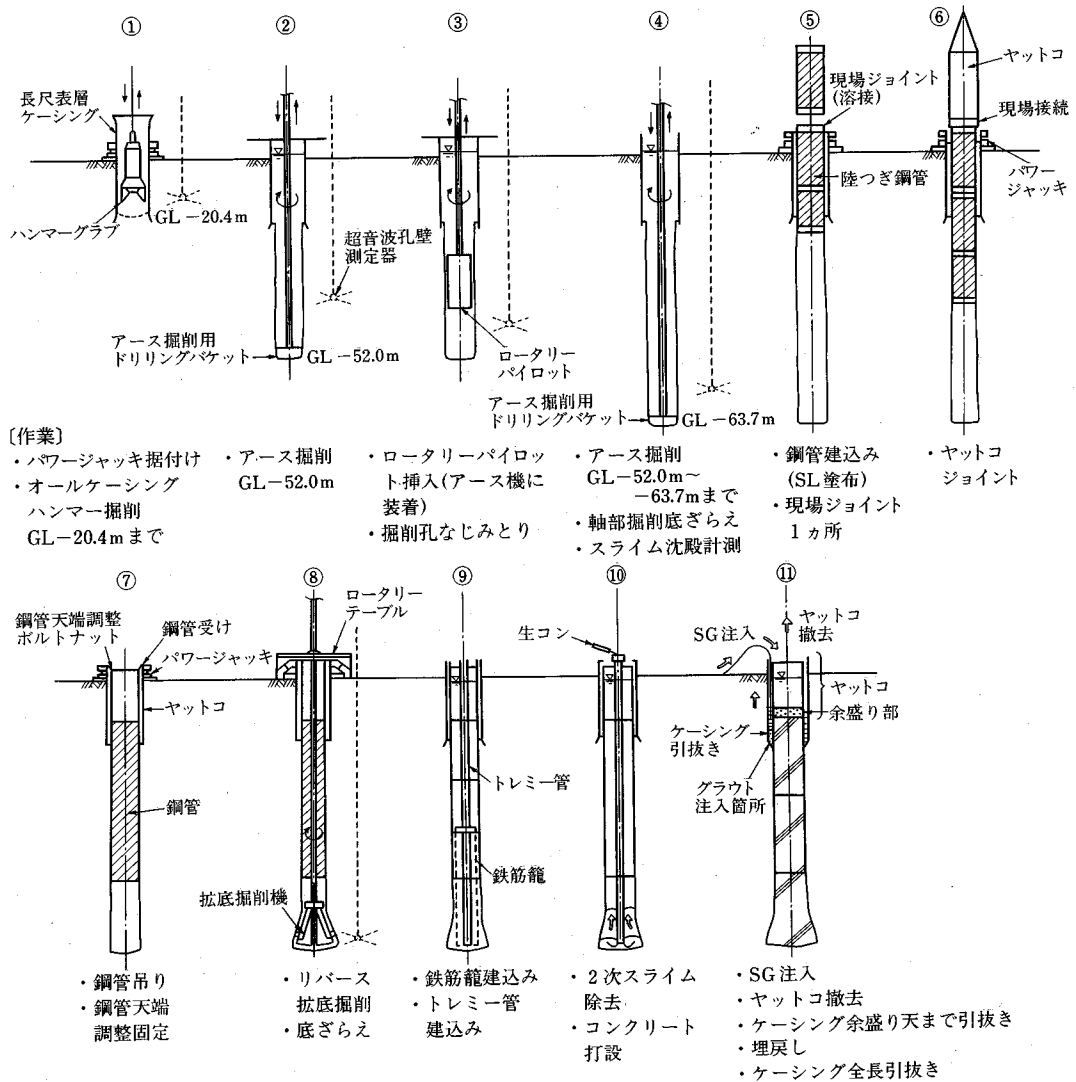
本文では、近時各種の大規模開発が実施されている大阪湾の海底地盤の土質工学的諸問題の全体像について記述した。元来、土の物性の本質はローカルな地史的環境に支配されるところが多く、この意味でこの種の土質問題の解決には地元の土質研究者の熱意と努力が要請されている。いうまでもなく、このような大規模建設工事は、従来の技術の延長でなしうる部分にはおのずから限界があり、土木技術の革新(イノベーション)によりそれを

克服せねば遂行し得ない隘路は少なくない。例えば、地盤調査法や原位置試験を含む各種の土質試験法、それにもとづく質の高い設計パラメーターの選定、設計計算の原理や手法、実工事における施工管理などといった一連の流れの中で、これらの未経験の工事が土質基礎工学の最新の学理に期待するところのものはきわめて多い。また一方、このような大事業が逆に土質関連分野の学術の飛躍の進展を促す機会となることも事実であり、この意味で土質工学の実務と研究との間の相互の協力と研鑽が望まれるのである。

謝辞 本文を記述するにあたって、関西国際空港(株)ならびに(株)大阪ワールドトレードセンタービルディングより資料の提供と種々の便宜を受けたことを付記して、感謝の意を表す。

引用文献

- 1) 土質学会関西支部委員会報告：関西地盤の地質構造と土質特性に関する最近の知見シンポジウム発表論文集、pp.7-13, 1992.
- 2) 土質学会関西支部委員会報告：大阪湾海底地盤データベースの構築、地盤情報のデータベースに関するシンポ



図一16 杭基礎の施工手順

ジウム発表論文集, pp.151-156, 1991.

3) 山本幸司他：大阪湾海底の地盤情報データベース，大阪湾海底地盤（土質工学会関西支部委員会編），pp.12-14, 1990.

4) 狐崎長狼・中庄一：2振源式漂遊型ゾンデによるS波検層（1）理論的検討，秋田大鉱山学部資源地学研究所施設報告52, pp.25-35, 1987.

5) 赤井浩一・田村 武・辻 泰志：海底地盤の検層情報と動的応答解析への応用，京大防災研究所年報，33 B-2, pp.51-67, 1990.

6) 石原研而：土質動力学の基礎，鹿島出版会，pp.50-69, 1976.

7) 中世古幸次郎他：関西国際空港地盤地質調査，災害科学研究所報告，pp.7-12, 1984.

8) 前出3) pp.60-68.

9) 前出3) pp.51-52.

10) 三田村宗樹：関西地盤の地形・地質と層序の概要，関西地盤（土質工学会関西支部編），pp.25-32, 1992.

11) Akai, K. : Soil Improvement Performance in Off-Shore Reclamation—KIA Project (Guest Lecture), Intern. Symp. on Soil Improvement and Pile Foundation, Nanjing, 1, pp.1-13, 1992.

12) 中瀬明男：関西国際空港の沈下問題（招待論文），土木学会論文集，454/Ⅲ-20, pp.1-9, 1992.

13) Bjerrum, L. : Engineering Geology of Norwegian Normally-Consolidated Marine Clays as Related to Settlements of Buildings (7th Rankine Lecture), Geotechnique, 17-2, pp.88-117, 1967.

14) Wroth, C.P. & R.H.C. Parry : Shear Properties of Soft Clay, Report 4, Intern. Symp. on Soft Clay, Bangkok, pp.6-10, 1977.

15) Wroth, C.P. : In Situ Measurement of Initial Stresses and

- Deformation Characteristics (SOA Report), Proc. ASCE Specialty Conf. on In Situ Measurement of Soil Properties, 2, pp.181-230, 1975.
- 16) 赤井浩一他：遅延圧密に関する実験的研究，京大防災研究所年報，27 B-2, pp.49-63, 1984.
- 17) 三笠正人：埋立地盤の土質工学的諸問題，土木学会誌，63-4, pp.50-52, 1978.
- 18) Leonards, G.A. & A.G. Altschaeffl : Compressibility of Clay, Proc. ASCE, 90, SM 5, pp.133-155, 1964.
- 19) Leroueil, S. *et al.* : Behavior of Destructured Natural Clays, Proc. ASCE, 105, GT 6, pp.759-778, 1979.
- 20) 花島 晃・梅原弘記・加藤克巳：大阪ワールドトレードセンター(大阪府)基礎杭の設計と施工，基礎工，19-12, pp.56-67, 1991.
- (1992. 12. 24 受付)