

神戸港の洪積層について

The diluvium layers in Kobe Port

わた なべ よし みち みず ま しゅう ぞう
渡 辺 嘉 道* 水 間 収 三**

た なか のぶ よし
田 中 伸 佳***

まえがき

近年、産業用地、港湾機能用地、都市機能用地等の需要に応えるべく臨海地域における土地造成は沖へ沖へと進み、大水深の地点における大規模な埋立へと変化している。これに伴って埋立により地盤に加わる荷重も非常に大きくなり、沖積粘土層だけでなく深層の洪積層にまで影響が及ぶようになってきた。

この事実は、過圧密の洪積層を沈下対象層として重視しなかった従来の常識的な考え方を改めさせるものであり、沈下問題を検討する際に十分認識しておく必要がある。そこで本文は、神戸港ポートアイランド・六甲アイランドの造成中に得られた種々の資料に基づき大規模埋立と洪積層の関連について記述するものである。

1. 神戸の埋立事業

神戸の市街地は大阪湾と六甲山系に挟まれ、東西 30 km の海岸線に沿って細長く伸びている。このような地理的条件から、都市発展のエネルギーは必然的に海面へと向けられた。

慶応3年(1867年)の開港以来、神戸港では小規模ながら埋立が行われてきた。戦後日本経済の成長に伴い第1期埋立事業として臨海工業地帯の造成に着手し、昭和28年度から45年度にかけて神戸港の東西海面に543ha(埋立土量6262万 m^3)の埋立地を造成した。埋立地前面法線の水深は、当時としては経済的限界を越えた10mという深さに設定された。これは沿岸部の海岸勾配がきついで、従来のような水深5m位の埋立では十分な面積が確保できなかったためである。

更に日本経済の飛躍的發展に伴い、国際港としての神戸港の拡充整備、国際港湾都市としての都市機能充実を図るため、第2期埋立事業として昭和41年度からポートアイランド、昭和46年度から六甲アイランドの埋立に着手した。ポートアイランドは神戸港中央部

に位置し、平均水深 12m、総面積 436ha、埋立土量 8 000 万 m³ の大人工島であり、既に昭和55年度にしゅん功している。六甲アイランドは、神戸港東部の平均水深13mの地点において現在造成中であり、総面積 580 ha、埋立土量 12 000 万 m³ というポートアイランドよりひと回り大きい人工島である（図－1）。

このように、神戸港の埋立は日本の高度経済成長とともに発展し、より沖へ、より大規模にと変遷してきたのである。

2. 神戸港の地盤

神戸港の地層構成および各地層の特性などについて以下に述べる。

2.1 地層構成と土質概要

神戸港の地層は図－２に示すとおりが多層地盤である。海底には粘土およびシルトからなる厚さ約13mの沖積粘土層があり、その下は厚さ30～40mの砂・砂礫・粘土の互層となっている。この互層の上部は、支持杭基礎構造物の支持層であり、また沖積粘土層下面の排水層でもある。次に厚さ約20mの洪積粘土層が続き、その下は再び砂・砂礫・粘土の互層となっている。

沖積粘土層の連続性は良好で、東西方向には大きな変化はないが、北から南に向かって緩い傾斜で次第に厚くなっている。洪積粘土層はほぼ一様の厚さで連続しており、北

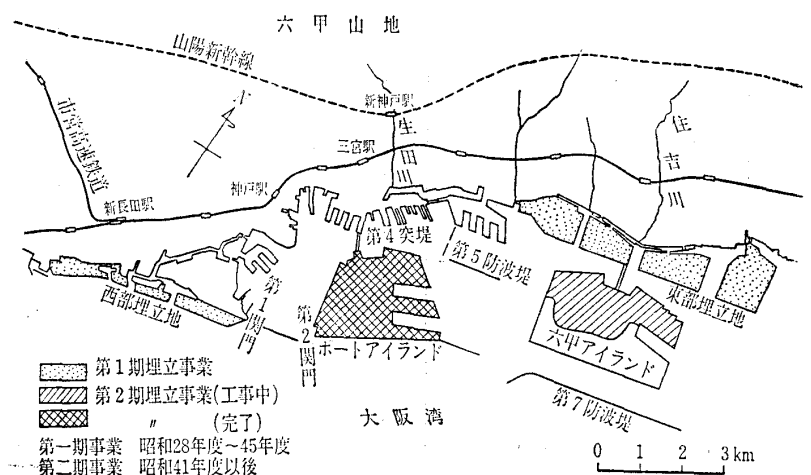


图-1 位置图

*神戸市開発局 工務課長

****神戸市開発局** 工務課臨海工務係長

***神戸市開発局 工務課

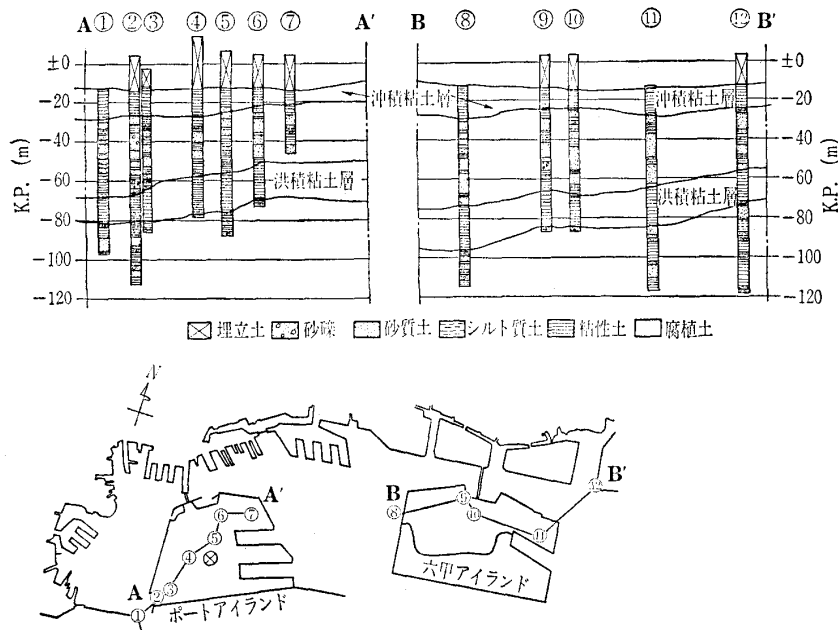
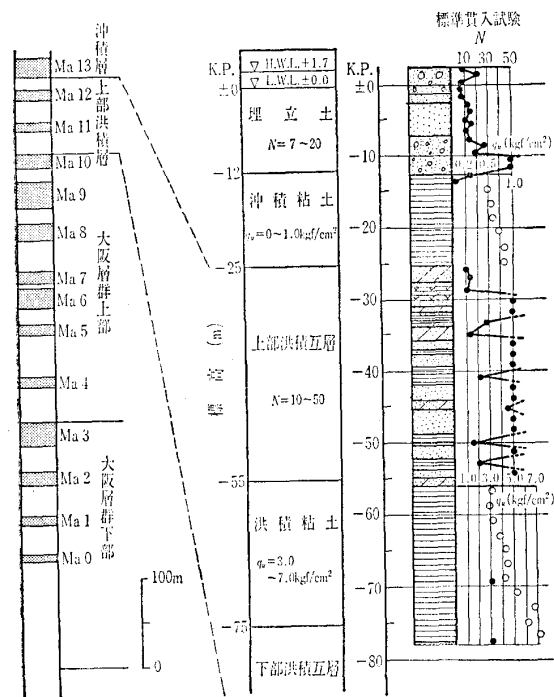


図-2 神戸港地層断面図

東から南西へ向けて傾斜している。

洪積層については、便宜上、上部洪積互層・洪積粘土層・下部洪積互層と称して区別している。現状では海成粘土層が大阪層群中の Ma の何番に相当するのか明確にされていないので、これら3層の地質学的位置づけははっきりしない。しかしいずれにしても、上部洪積互層・洪積粘土層および下部洪積互層の一部が上部洪積層に、その下位が大阪層群上部に属すると考えられる。

図-3 は、ポートアイランドにおける標準的な地層構成である。六甲アイランドの場合もほぼ同様の地層構成であ



ボーリング位置は図-2の⊗印 H.W.L. L.W.L. は潮位

図-3 ポートアイランドの地層構成

るが、各層厚が若干厚くなる傾向がある。

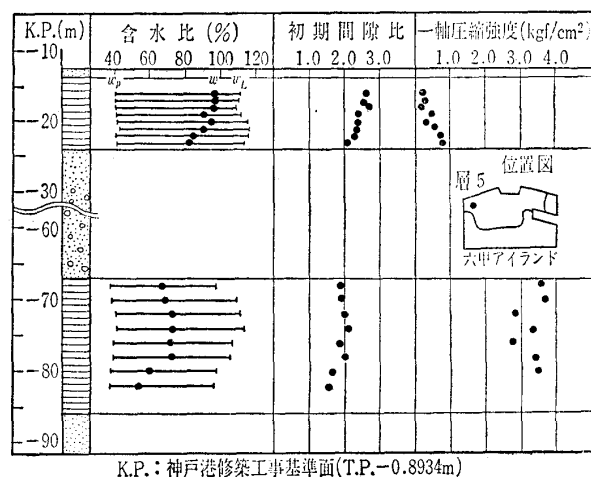
埋立用土砂には良質の山土（まさ土）を使用しており、シルト分以下が10%までで、透水性良好、取扱い・締固めが容易な埋立に最適の材料である。密度は $1.8 \sim 2.1 \text{ g/cm}^3$ 、 N 値は7~20である。

図-4 は、沖積・洪積粘土の液性および塑性限界と初期間隙比・一軸圧縮強度の深度分布の1例を示したものである。両粘土層とも高塑性を示している。含水比(w)をみると沖積粘土層は80~100%の間に分布し非常に軟らかく、洪積粘土層は50~70%の間に分布し比較的固い。またここには紹介していないが、上部洪積互層中の粘土層は20~40%、下部洪積互層中の粘土は30~40%を示し非常に固い。初期間隙比(e_0)をみると、沖積粘土層では2.0~2.6の間にあり、粘土層の堆積環境・圧密進行を示すよ

うに深さ方向に減少する傾向がある。洪積粘土層では1.5~2.0の間にあるが、沖積粘土層のように深さ方向に小さくなるというような傾向はみられない。一軸圧縮強度(q_u)についてみると、沖積粘土層は $0 \sim 1.0 \text{ kgf/cm}^2$ の間に分布し、深度とともに増加の傾向を示している。洪積粘土は $3.0 \sim 7.0 \text{ kgf/cm}^2$ の間に分布している。

2.2 海底粘土の圧密特性

沖積粘土・洪積粘土および下部洪積互層中の粘土の代表的な圧密曲線($e-\log p$)を図-5に示す。なおこのデータは埋立完了後1年を経過した地点のボーリング調査によるものである。また下部洪積互層中の粘土は、1層の厚さ約10m(深度K.P.-130~140m)のところから採取したものである。この図から分かるように圧縮指数(C_c)は、沖積粘土で約1.0~1.3の範囲であるのに対して、洪積粘土は約1.4~1.6を示している。また下部洪積互層中の粘土は約0.5~0.7の範囲である。圧密特性で注目されるのは圧密降伏応力を越える鉛直応力が発生すると洪積粘土は沖積粘土



K.P.: 神戸港修築工事基準面(T.P.+0.8934m)

図-4 液性、塑性限界、初期間隙比、一軸圧縮強さ

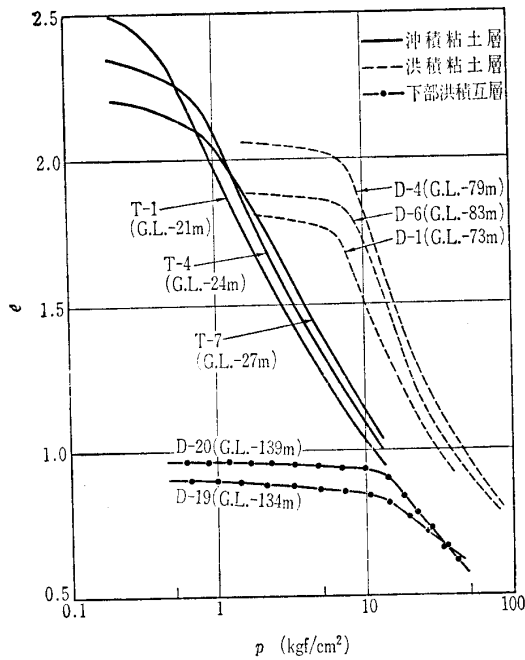


図-5 $e - \log p$ 曲線

より高い圧縮性を示すことである。このことは、埋立荷重等によって洪積粘土の圧密降伏応力に近づく鉛直応力が発生する可能性がある場合は、洪積粘土の圧密沈下を十分考慮する必要があるということである。下部洪積互層中の粘土は、沖積・洪積粘土のような高い圧縮性は見られないものの1層の厚さ10m程度のものが深度200mまでに4層（ポートアイランドの場合）挟在していることから、洪積粘土層同様埋立荷重等による鉛直応力が大きい場合は沈下について十分考慮しておく必要がある。

図-6に $\log m_v - \log p$ 曲線、図-7に $\log c_v - \log p$ 曲線を示す。 $\log m_v - \log p$ 曲線から洪積粘土が過圧密領域から正規圧密領域に移行した時には比較的大きな圧縮性を示すことが分かる。また $\log c_v - \log p$ 曲線からは、洪積粘土の c_v が過圧密領域と正規圧密領域とでは極端に差があることが分かる。過圧密領域での c_v 値は約 $1400 \text{ cm}^2/\text{d}$ で

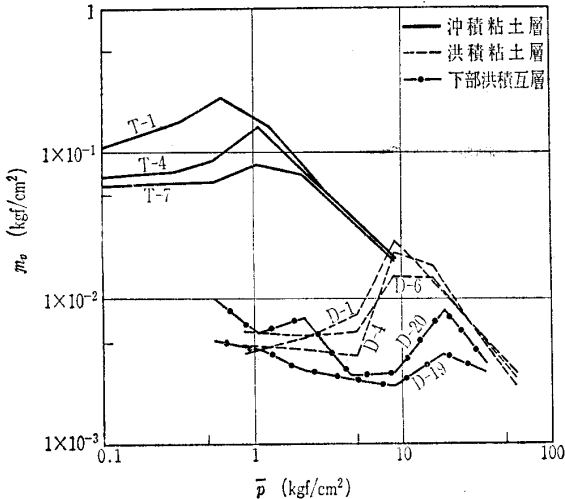


図-6 $\log m_v - \log p$ 曲線

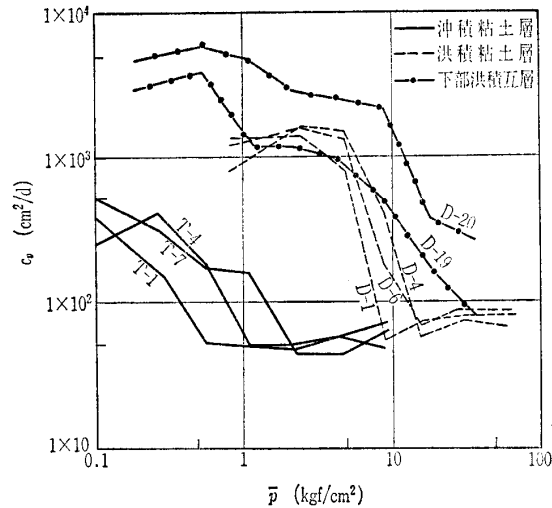
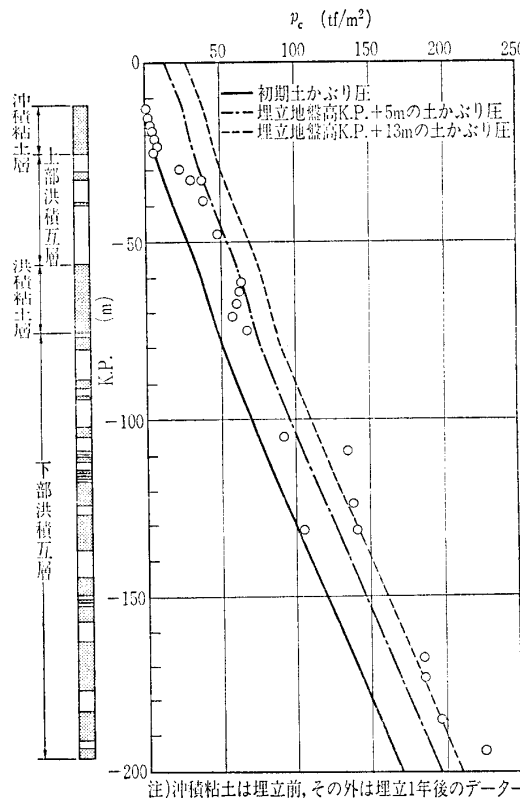


図-7 $\log c_v - \log p$ 曲線



注) 沖積粘土は埋立前、その外は埋立1年後のデータ

図-8 圧密降伏応力の深度分布（ポートアイランド中央部における）

あるが、正規圧密領域では約 $80 \text{ cm}^2/\text{d}$ と実に18倍もの違いがある。これらのことから、埋立荷重等による応力が洪積粘土の圧密降伏応力を越えると沈下量が急増し、しかも長期間その沈下が継続するのではないかと考えられる。

2.3 圧密降伏応力と土かぶり圧

図-8は、ポートアイランド中央部における圧密降伏応力の深度分布である。図中の折線は土かぶり圧を示す。洪積層は埋立後のボーリング調査によるものであるため圧密降伏応力が若干大きな値を示している可能性が考えられる。初期土かぶり圧に対して沖積粘土は若干過圧密の状態にあり、洪積層もデータにばらつきはあるものの過圧密の状態である。埋立後の圧密状態についてみると、上部洪積互層および洪積粘土層とも埋立地盤高さ K.P.+5m（約 25tf

(m^2) でほぼ正規圧密領域に移行するものと思われる。下部洪積互層はデーターにばらつきが大きいが埋立地盤高さ K.P.+5 m では大部分が過圧密状態であり、埋立地盤高さ K.P.+13 m (約 39 tf/m^2) になると粘土層厚の厚いところでは過圧密領域から正規圧密領域へと移行する過渡状態になるとと思われる。

3. 洪積層の沈下測定

当初に予定した埋立土量には、圧密沈下分を推定して見込んであるので、その量に見込み違いがないかチェックし、また構造物の設計において沈下量推定のための基礎的資料を得るために、地盤の沈下測定が行われる。

ポートアイランドでは、昭和43年から埋立て前の海底に沈下盤を設置して埋立造成中の地盤の動きを追ってきた。当初は沖積粘土層だけが沈下対象層と考えられており、実際海面下の埋立中においてはこの考え方に全く問題はなかった。ところが陸域の埋立が進むにつれ埋立荷重が大きくなると、沖積粘土層の圧密圧縮量だけでは説明のつかない沈下が生じるようになった。そこで、この原因を調査し、将来の沈下傾向を把握するために、昭和51年から層別沈下計を設置して洪積層の沈下も測ることにしたのである。

3.1 測定方法

洪積層の沈下測定は、スクリーポイント型・沈下素子型・羽根式アンカー型・深層沈下盤の各種層別沈下計を洪積層に埋設して、水準測量（沈下素子型は専用測定器を併用）により行っている（図-9）。

スクリーポイント型・深層沈下盤は先端が異なるほかはほぼ同じ構造で、ロッドの天端高さを測定して沈下量を求める。沈下素子型は、保孔管の天端高さの測定と保孔管～沈下素子間の距離の測定により行う。羽根式アンカー型は、沈下を測定する深度に羽根式アンカーを定着させ、緊

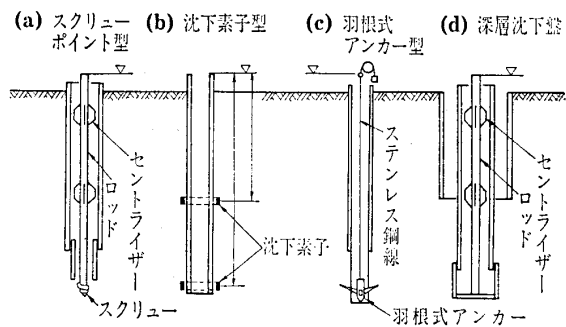


図-9 採用した層別沈下計の種類

張用のステンレス鋼線に印したポイントを水準測量することにより沈下量を測定する。

スクリーポイント型・深層沈下盤は、その構造上、測定値の信頼性が高いが、規模が大きくなり設置費用がかさむ欠点がある。また沈下素子型は、1本のボーリング孔で何点もの深度の沈下量を測定できる利点があるが、保孔管の曲がりや詰まりによって測定不能になることが多い。これらに比較すると、羽根式アンカー型は構造が簡単で経済性にすぐれ、信頼性も高いので、最近はこの型式の層別沈下計を採用することが多い。

3.2 測定記録

図-10はポートアイランドの南公園に設置した層別沈下計（層4）およびポートアイランドの西南端に設置した層別沈下計（層2-1）の沈下測定記録である。層4を設置した南公園は、大阪湾を一望に見渡すことができる展望台として台地状に造成した高盛土地盤で、高さは K.P.+13 m（埋立荷重約 39 tf/m^2 ）である。一方層2-1を設置した場所は、ポートアイランドの平均的な埋立地盤で、高さは K.P.+5 m（埋立荷重約 25 tf/m^2 ）である。

層2-1の平均的な埋立地盤についてみると、洪積層の沈下は小さく既に収束の方向に向かっている。 25 tf/m^2 位ま

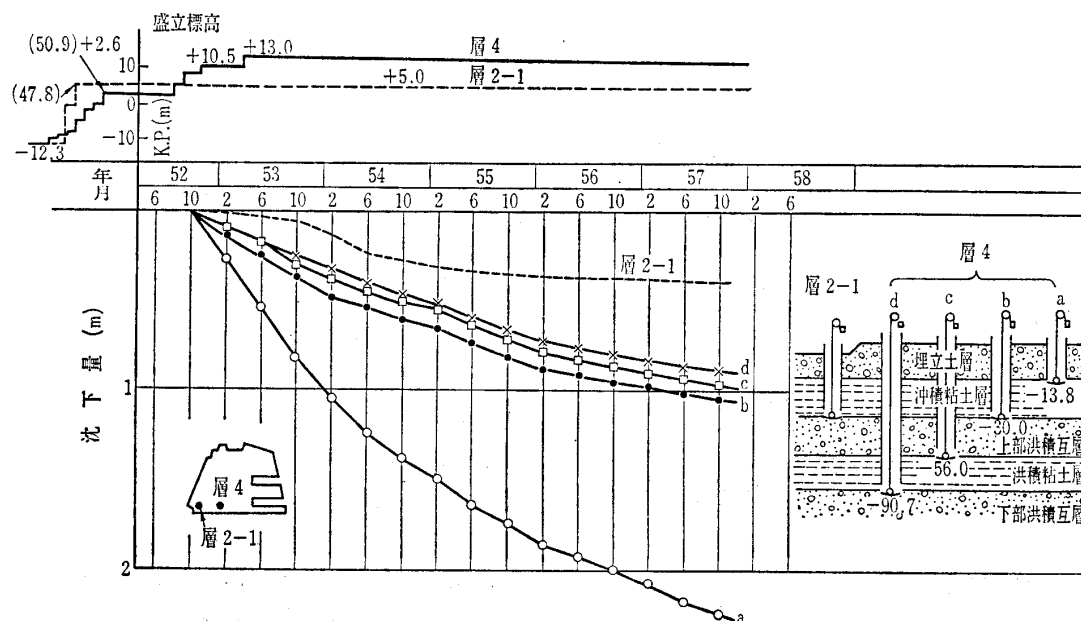


図-10 層別沈下計測定記録

での埋立荷重であれば洪積層に及ぼす影響は少ないと考えられる。

層4の高盛土地盤についてみると、測定期間中(1876日間)の沖積粘土層以深の沈下量は230 cmで、このうち沖積粘土層が121 cm (53%)を、洪積層が109 cm (47%)を占めている。洪積層沈下量の内訳は、上部洪積互層が10%、洪積粘土層が8%と小さいのに対し、K.P.-90.7m以深の下部洪積互層は82%を占めており、埋立荷重が深層にまで影響を及ぼしていることが分かる。

各層の圧縮量の変化をみると、上部洪積互層および洪積粘土層の圧縮量は小さく、既に収束して安定した状態に入っていると推察される。しかし下部洪積互層以深の圧縮量は非常に大きく、圧縮傾向も沖積粘土層に似ており今後も長期にわたって圧縮が続くものと思われる。

4. 考 察

神戸港の洪積層について、土質調査、沈下測定結果から考察してきたが、ここでもう一度整理すると次のようになる。

- (1) 埋立荷重が25 tf/m²位までであれば、洪積層に及ぼす影響は少ないが、これを越えて高盛土をする場合は洪積層の沈下を十分考慮する必要がある。
- (2) 上部洪積互層は圧縮量が小さい。これは圧密降伏応力を上回る埋立荷重が生じて互層中に挟在する粘性土の厚さ(1~3 m)が薄く、全層厚に占める割合も10~15%と非常に少ないためではないかと推察される。
- (3) 洪積粘土層の圧縮量も上部洪積互層と同様に小さい。層厚、深度から見ても下部洪積互層と比較してももう少し圧縮されるのではないかと予測していたが意外と小さい。この要因が何であるのか今のところ判断し難い。
- (4) 下部洪積互層は、沖積粘土層に次いで大きな圧縮傾向を示している。これは、互層中に挟在する粘性土の中に、1層厚約10mのものが深度200mまでに数層存在し、全体に占める粘性土の割合は50~60%にのぼること、および埋立荷重が大きくなると深部にまで影響を及ぼし沈下対象層が大きくなっていくこと等が考え

られる。

あ と が き

洪積層の沈下に関する取組みは、ポートアイランドの埋立工事が佳境に入った昭和50年ころからであった。ほぼ埋立が終わったところから層別沈下計を埋設してゆき測定を始めたのであるが、当初はまだ沖積粘土に重点が置かれ、洪積層はどちらかと言えば参考に測っておくという感じであった。

ところが観測を続けるうちに、洪積層の沈下も無視することができないということがだんだんと分かってきた。なかでも市民病院(12階建、1000ベッド)の建物建設前に実施した地盤改良工事(プレローディング工法)では、2年間の載荷盛土(高さ10m、36万m³)中に沖積粘土層とともに洪積層もかなり沈下するのが観測された。

大きな載荷重のもとでは、洪積層の沈下量が増加し、しかも非常に深層まで荷重の影響が及ぶことがはっきりしてきたのである。

その後、ポートアイランド・六甲アイランドの埋立の進捗に伴って順次計器を設置し、測定工法を工夫しながら、洪積層の沈下傾向の把握に努めてきた。しかしながら現段階では、まだまだ土質調査資料、沈下実測データが乏しく、土かぶり圧がどの程度になると圧密降伏応力を越えるのか、また沈下解析の対象深度をどこまで考慮したらいいのかなど、なかなか予測が困難な状況である。したがって、今回はこれまでの実測記録のうちから主なものを紹介し、若干の考察を加えるだけにとどめた。今後、埋立地の地盤沈下を解析してゆくうえで、更に深層部のボーリング調査・沈下観測等を行い、より多くのデータを収集し、検討を加えてゆきたいと考えている。

参 考 文 献

- 1) 渡辺嘉道：神戸沖人工島造成の歴史と現状，建設機械，Vol. 18, No. 9, pp. 26-36, 1982.
- 2) 軟弱地盤ハンドブック編集委員会：軟弱地盤ハンドブック，建設産業調査会，pp. 949-963, 1982.

(原稿受理 1983.3.30)