

深層の沖積・洪積粘土の工学的特性と沈下挙動

上野孝之 高橋真一
西林清茂

Consolidation Characteristics of Deep Alluvial Clay and Diluvial Clay

Takayuki Ueno Shinichi Takahashi
Kiyoshige Nishibayashi

Abstract

Consolidation problems are observed with deep alluvial clay and diluvial clay not only in the normal consolidation range, but also in the overconsolidation range. The engineering characteristics required for study of the consolidation settlement in this overconsolidation range has not been explained adequately. Sampling of soil was done at a point in the Tokyo Bay area to investigate physical properties and consolidation properties to analyze the settlement observed at that site. The consolidation test in which the maximum load was 10 times as much as that of the standard consolidation test was carried out to study consolidation characteristics in the high-pressure range. It was also shown that numerical analysis using rheology theory is effective for predicting secondary consolidation.

概要

通常地盤改良の対象とならない深い粘土層の沈下問題は、上載荷重が P_c を越え正規圧密領域となる場合はもちろんのこと、過圧密領域においても生じている例があるが、この過圧密領域の圧密沈下の検討に必要な工学的特性についてはあまり明らかにされていない。東京湾臨海埋立地で観測された深層の沖積・洪積粘土層の沈下観測結果を解析するため、ボーリングによる採取試料を用い各種の室内試験を行なって物理的特性、圧密沈下特性を把握した。このうち圧密試験は、最大荷重が通常の試験機の約10倍の載荷能力のある高圧圧密試験機を用いて行ない、通常の圧密試験では検討できない高応力域における圧密特性を検討した。圧密試験から得られた圧密特性のうち、二次圧密係数を圧密応力について整理し、レオロジー理論を用いた二次圧密沈下解析手法に適用したところ、現場の沈下観測結果が説明でき、この手法が深い粘性土層の二次圧密の予測に適用できることを確認した。

1. はじめに

最近、大水深港湾構造物、海上空港、大規模埋立や大型構造物等の建設に伴い、深層の沖積層および堆積年代の比較的新しい洪積層の沈下挙動が問題となることが増えてきている。これまで深層の沖積・洪積粘土層は、比較的浅い沖積粘土層とは全く別の工学的特性を持つ粘土層であり、しかも有為な沈下は発生しないものと考えられていたが、最近では埋立海底地盤の工学的問題の1つに洪積粘土層の沈下問題が提起され、従来からの沖積粘土層の沈下の問題に加えて、洪積粘土層の圧密問題を解決することが重要なものとなりつつある²⁾。

深層の沖積粘土、および洪積粘土の沈下問題は、これまで深い層の沈下・変形挙動を考慮しなければならない問題が少なかったために、深層部の試料をサンプリングする機会が少なかったことも影響して、比較的浅い位置にある沖積粘性土層に比べてその工学的特性やその評価方法に未解明な点が多いのが実状である。また深い沖積、洪積粘土層は、その深度ゆえに圧密促進による地盤改良を進めること

が難しいことから、地盤の圧密特性を把握し構造物構築後の沈下挙動をより精度良く推定し、その対策を考えることの重要性が増している。

深層の沖積・洪積粘土の沈下性状の例として、図-1に東京湾臨海埋立地における圧密沈下挙動観測結果を示す。この例ではAP-25 m～AP-60 mの深さにおいて2年間に約4 cmの沈下が測定されている。この沈下量は、通常地盤改良の対象とされる沖積粘土層に比べて小さいが、圧密促進の地盤改良が行なわれないため、今後長期に継続すると考えられる。したがって今後建設される構造物の種類によっては、有害な沈下量となり得ると考えられ、沈下性状の把握が重要な課題となることが予想される。

この報文では、上記の沈下挙動を検討するために、①ボーリングによる採取試料を用い各種の室内試験を行ない、深層の沖積粘土・洪積粘土の物理的特性・圧密特性を把握し、②これらの室内試験結果をもとに行なった沈下解析と沈下観測データの比較検討によって得られたいくつかの知見について報告したものである。

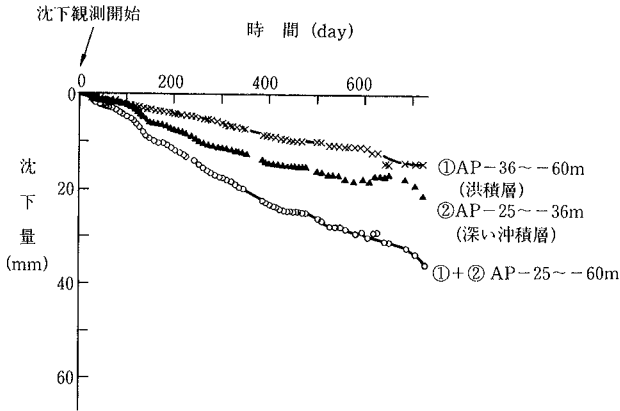


図-1 深層の沖積・洪積粘土の圧密沈下挙動

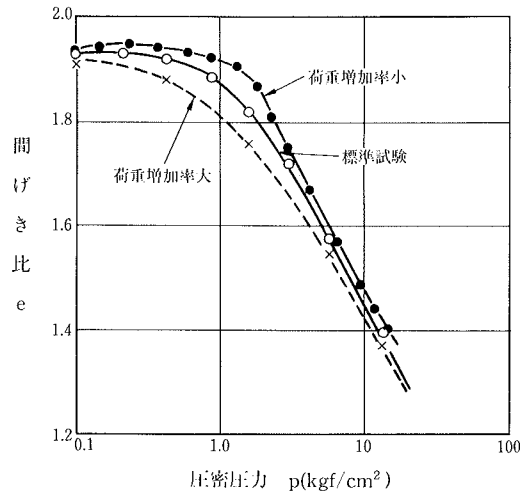


図-2 荷重増加率による圧縮曲線の相違⁷⁾

2. 工学的特性に関する既往の研究

深層の沖積、および洪積粘土は、ほとんどの場合現在の土被り圧に比べて大きな圧密降伏応力を示す過圧密粘土である。過圧密粘土は、その生成過程が土被り圧の減少に伴って発生する場合と、時間効果によって見掛けの圧密降伏応力が増加する場合の2種類に分けられ、特に後者を疑似過圧密粘土と称している。これらの深層の沖積、および洪積粘土に関する既往の研究は、大阪地盤の特性についてまとめられた文献^{3), 4)}のほか、各区域ごとに編集・出版されている「地盤図」、また洪積粘土についてまとめられた文献⁵⁾で取り上げられているものが代表的である。ここでは特に圧密特性の研究における問題点と研究の動向について簡単に示す。

まず、室内試験によって圧密特性を検討する場合、標準圧密試験を行なって圧密特性を評価することが多いが、深層の沖積・洪積粘土は圧密降伏応力 P_c が大きいため、通常行なう最大荷重 12.8 kgf/cm^2 の圧密試験では P_c 以降の測定結果が少なくなりがちとなり、 P_c の決定や圧縮指数 C_c の決定をあやふやにすることが多い(最大荷重の問題)。また、荷重増加率一定の条件で進めた場合、土田ら⁶⁾が指摘しているように荷重が大きい範囲においては荷重の増分量が大きくなってしまい、その結果 $e-\log p$ 曲線の描き方によって P_c の値が変動する(荷重増分の影響)。これらの問題に対し、通常行なう標準圧密試験の試験条件を、1つは最大荷重の増加、もう1つは荷重増加率を小さくすることによって圧密特性を評価している。しかし、圧密試験の載荷方法を変えた場合、図-2に示す荷重増加率による圧密曲線の相違点⁷⁾としてよく知られている問題が常に付随することに注意しなければならない。

また、上記の標準圧密試験の抱える問題点を試験条件の変更によって解決する試みのほか、三軸圧縮試験機を用いた K_0 排水三軸試験⁸⁾、あるいは連続載荷圧密試験⁹⁾を行ない圧密降伏応力をより明確に決定することが試みられている。これらの試験で圧密時間を変更した場合の試験結果に与える影響については、先の標準圧密試験における荷重増加率の影響と同様注意を要するものである。

一方、試験試料は、これまでほとんどがボーリング試料を用いているが、最近では臨海地域における大規模掘削工事が行なわれていることも手伝って、試料採取時の乱れが比較的少ないと考えられるブロックサンプル試料を用いた実験的研究^{10), 11)}も進められている。

深層の沖積・洪積粘土層を対象とした沈下観測結果は、大阪湾臨海埋立地^{1), 12), 13)}、東京湾臨海埋立地¹⁴⁾でいくつか報告されているが、その観測数は沖積粘土層のそれに比べて少なく、その結果圧密沈下と解析結果の比較検討を進めた研究も非常に少ないのが現状である。

3. 乱さない試料の物理的特性と圧密特性

3.1 試料採取位置

試料は、東京湾臨海埋立地(試料A)と大阪湾臨海部(試料B)の2か所でボーリングによって採取した乱さない深層の沖積粘土および洪積粘土である。図-3にボーリングから得られた土質柱状図を示す。

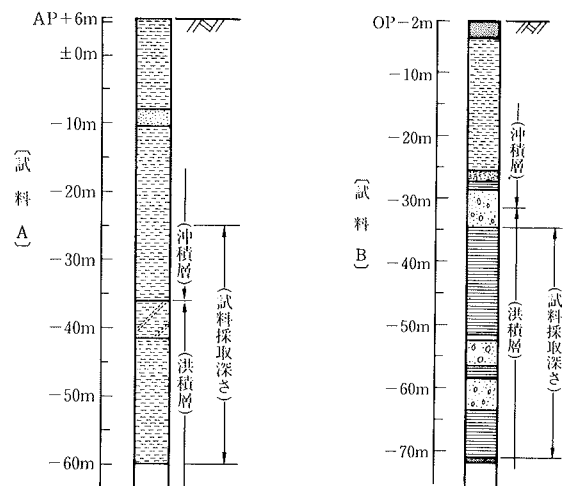


図-3 土質柱状図

3.2 物理的特性

図-4、図-5に試料Aと試料Bの深度ごとの物理特性を示す。

図-4の試料Aは、AP-36m~AP-42mに砂分を比較的多く含む砂質シルトが中央部に存在し、上部は沖積粘土層(Ac層)、下部は洪積粘土層(Dc層)である。粒度特性はAc層とDc層とで差は見られない。含水比、コンシステンシー特性はそれぞれの層においてはほぼ一様であるが、その大きさは含水比がAc層で約80%、Dc層で約60%、またIpはAc層で50~70%、Dc層で30~50%を示し、Dc層はAc層に比べて低塑性、低含水比の粘性土である。

図-5の試料Bは、OP-35m~OP-45mに粒度分布が一般的な粘土層が認められ、OP-45m以深は砂層をはさむ互層状態となっている。含水状態、コンシステンシー特性は上部と下部で異なり、試料Aと同様に下部のDc層は上部のAc層に比べて低塑性、低含水比の粘性土である。

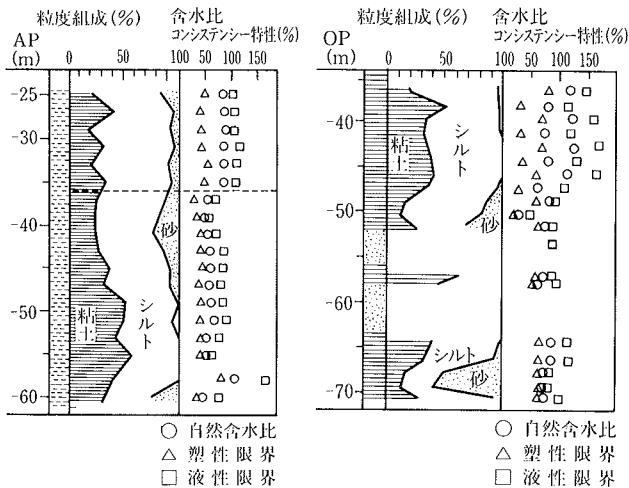


図-4 物理特性(試料A) 図-5 物理特性(試料B)

図-6、図-7に塑性図を示す。図中には、小川ら¹⁵⁾が整理した港湾地域ごとの沖積粘土層の試験結果を付記している。試料A、試料BともCHあるいはCH'に属し、中~高塑性を示している。また両試料とも、付記した沖積粘土層の結果と同じ傾向を示していることから、比較的深い沖積粘土層や洪積粘土層は一般の沖積粘土と同じ傾向を示し、またその値には少し地域性が認められる。

図-8に活性度を示す。Ac層、Dc層の試料ともサンプリング地点ごとのはっきりした傾向は認められず、その活性度の値は、活性度>1.25と大きく活性粘土に属する粘土に分類される。

3.3 圧密特性

(1) 試験方法

表-1に圧密試験方法を示す。高圧圧密試験は、2節の圧密試験の問題点で示したように標準圧密試験法の最大荷重不足を補うために実施したものである。高圧圧密試験機は、単純に荷重用の分銅を増設すればよいわけであるが、

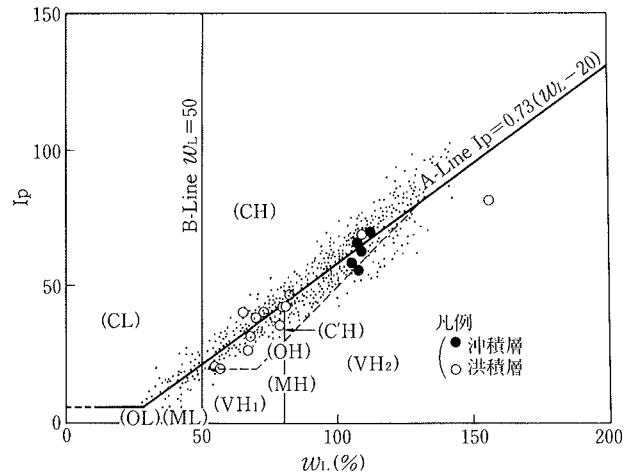


図-6 塑性図(試料A)

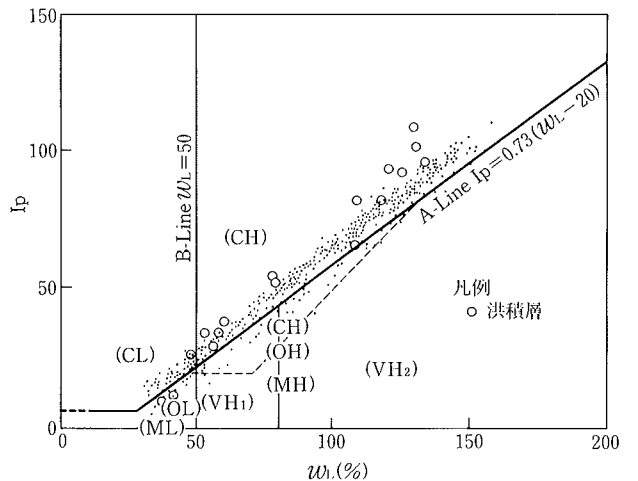


図-7 塑性図(試料B)

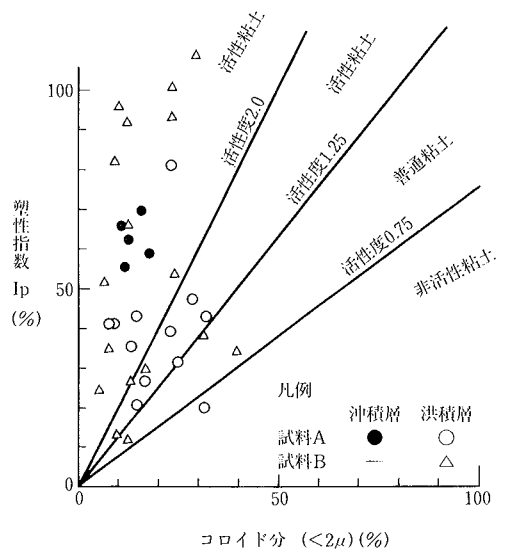


図-8 活性度

増加荷重が非常に大きいため試験機の荷重容量の不足等の問題点が生じてくる。そこで圧密荷重には油圧を利用することによってより大きな圧密荷重の圧密試験が行なえる構造の高圧圧密試験装置を用い試験した。

表-1 圧密試験方法

試験方法	試験条件		試験数	
	荷重増加率 ($\Delta P/P$)	最大荷重 (kgf/cm^2)	試料A	試料B
標準圧密試験	1	12.8	9	4
高圧圧密試験	1	102.4	9	13
	0.5	102.4	9	12

(2) 試験結果

① $e \sim \log p$ 関係

図-9, 図-10に, $e \sim \log p$ 関係を示す。図-9に示した試料Aは, Dc層がAc層に比べて圧縮性は小さく, 圧密降伏応力 P_c は大きい。また同じサンプリング試料では, 荷重増加率が大きくなるほど少し小さい圧密降伏応力を示すがほぼ同様の傾向を示しており, 今回の試験結果では荷重増加率の $e \sim \log p$ 曲線に与える影響は比較的小さいようである。図-10に示した試料Bの結果においても同様の傾向が認められる。

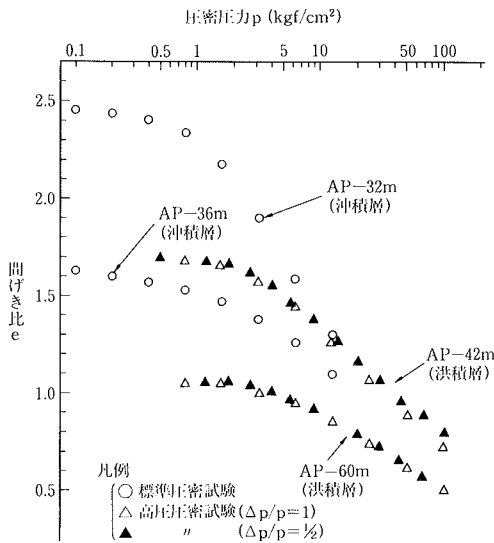


図-9 $e \sim \log p$ 関係 (試料A)

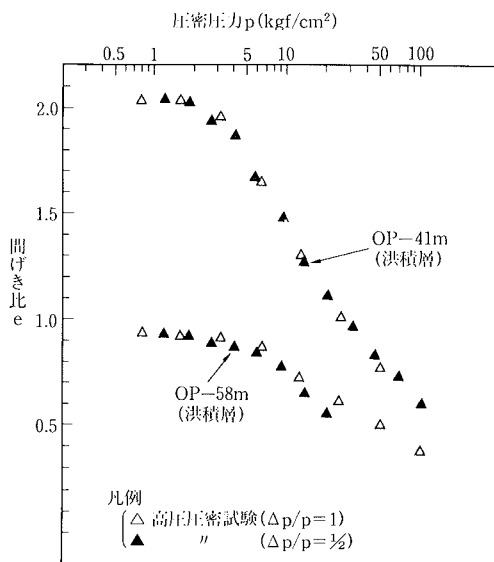


図-10 $e \sim \log p$ 関係 (試料B)

図-11, 図-12は, それぞれ試料A, 試料Bの P_c と c_c の分布を示したもので, 図中には土被り圧を付記している。圧密降伏応力 P_c と土被り圧を比べると, Ac層では両者はほぼ同じで正規圧密状態を示すが, Dc層では大きい差があり過圧密状態であることがわかる。Dc層における過圧密状態を過圧密比(O.C.R.)で示すと, 圧密試験方法によって少し異なるが $O.C.R.=1.1 \sim 1.5$ 程度である。

圧縮指数 c_c は, Ac層では深さとともに減少するが, Dc層では $c_c=0.6$ 程度とほぼ一定の値を示している。また Dc層の c_c は Ac層に比べて小さい。

図-13は, $c_c \sim w_L$ 関係を示したもので, 図中には小川ら¹⁵⁾が示した全国の港湾地域の沖積粘土層の結果も付記している。この関係は大きな地域性は見られず, 図中に付記した沖積粘土の結果と同じ傾向を示している。

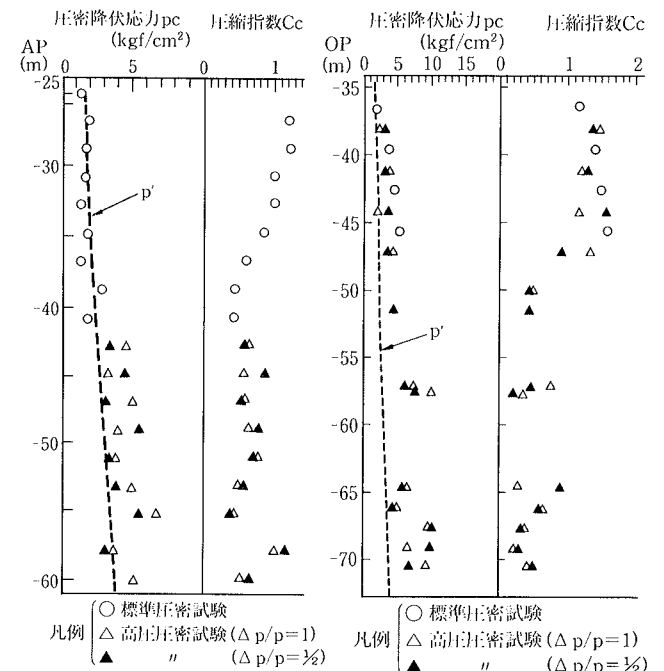


図-11 P_c, c_c の分布 (A 試料)

図-12 P_c, c_c の分布 (B 試料)

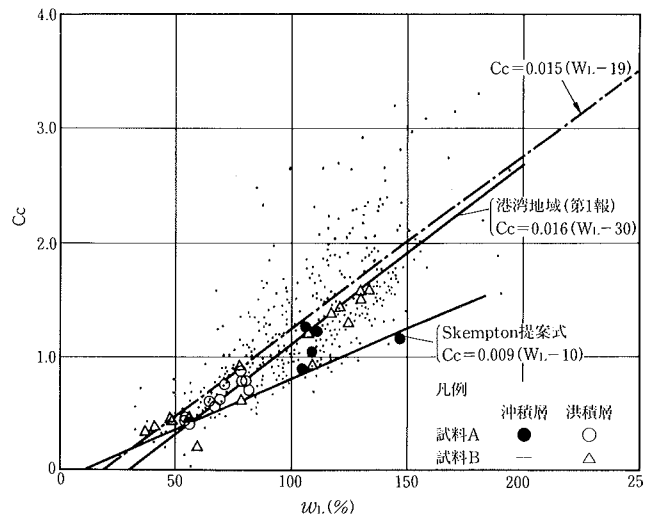


図-13 $c_c \sim w_L$ 関係

㊦ 圧密係数

図-14は、試料 A の沖積層部分の c_v の深度分布を示したものである。ここで示した荷重範囲 ($p=1.2, 9.6 \text{ kgf/cm}^2$) ではすべての試料で荷重の増加に伴って過圧密状態から正規圧密状態となり c_v 値は減少する。しかし減少した後の c_v 値の大きさは $130 \sim 360 \text{ cm}^2/\text{day}$ と比較的浅い通常の沖積粘性土に比べて大きな値を示している。

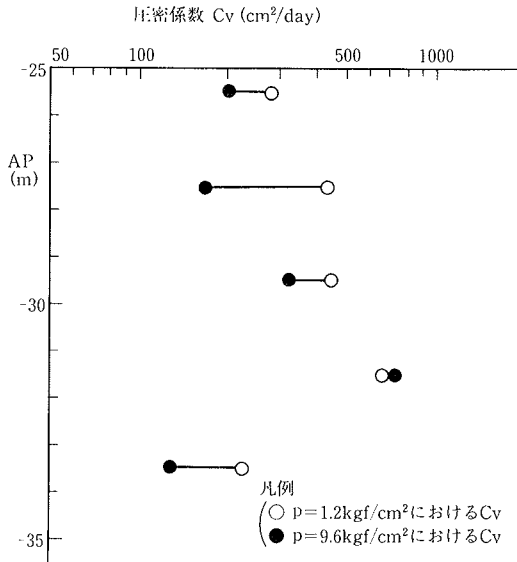


図-14 圧密係数 C_v の深度分布

㊦ 二次圧密係数

圧密圧力 p と二次圧密係数 c_a の関係を図-15に示す。二次圧密係数 c_a は、圧密荷重の比較的小さな範囲では圧密圧力にほぼ比例して増加している。圧密降伏応力付近においてほぼピーク値に達した後、ほぼ一定値を示す。洪積粘土層の c_a のピーク値は、沖積粘土層のそれに比べ $1/2 \sim 1/3$ と小さな値となっている。

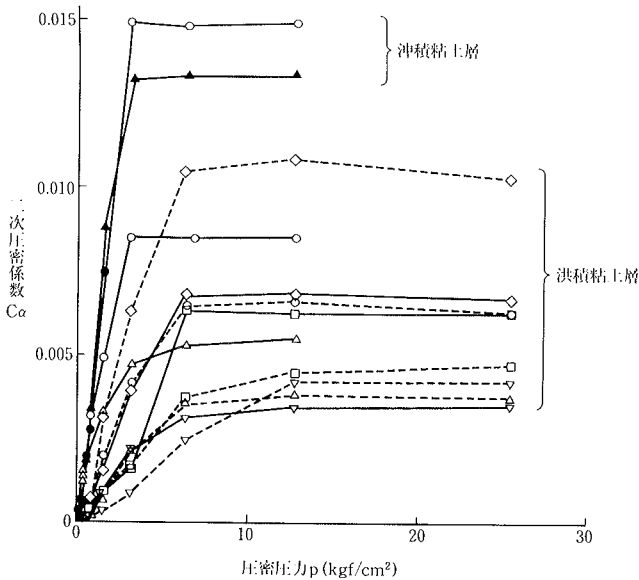


図-15 二次圧密係数 c_a ~ 圧密圧力 P 関係

4. 過圧密粘土の圧密沈下解析

4.1 沈下解析手法の現状

沈下対象層が過圧密状態である場合、一次圧密は発生せず二次圧密のみが発生するものと考えられる。現場の二次圧密沈下予測に、試験結果から得られた二次圧密係数を適用する方法がいくつか提案されている。

柴田¹⁶⁾は、圧密現象をレオロジー的モデルで表した理論を過圧密粘土の圧密問題に適用している。これによると圧密試験から得られた二次圧密係数の圧密応力の変化に伴う増加を考慮するものである。

また、関口¹⁷⁾は、二次圧密係数をパラメータの1つに持つ弾・粘塑性圧密理論(関口・太田モデル)を適用し、洪積粘土の圧密特性を検討している。

これに対し、赤井¹⁰⁾らは、圧密試験結果に基づく疑似圧密粘土の二次圧密速度は、圧密降伏応力よりも小さな荷重においても正規圧密状態の二次圧密速度を用いることを提案している。

4.2 深層の粘性土層の沈下測定概要

図-16に沈下計の設置深さを示す。AP-60 m にスクリュウ型アンカーを、また AP-25 m, AP-36 m に層別沈下計を設置して

AP-25 m ~ AP-36 m (深層の沖積粘土層)

AP-36 m ~ AP-60 m (洪積粘土層)

の圧縮沈下の計測を行なった。測定対象の粘土層は、図-11に示したように圧密降伏応力が土被り圧よりも大きい過圧密領域である。なお、測定された時間沈下曲線は、前述の図-1に示したとおりで、約2年間の沈下量は約4 cmであった。

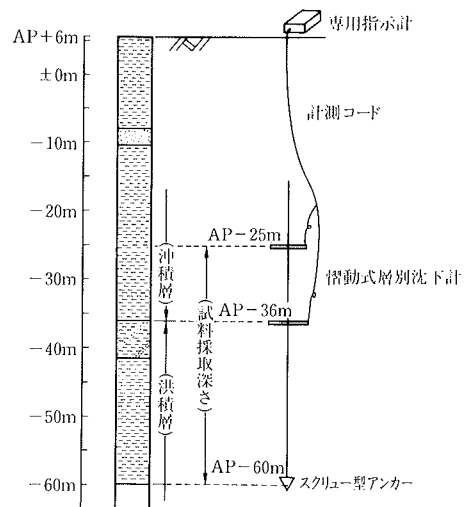


図-16 沈下計設置深さ

4.3 沈下解析

(1) 解析方法と解析条件

図-11で示したように沈下測定対象層は過圧密状態であることから、二次圧密のみが発生するものと考えられる。二次圧密の算定方法は、図-15に示した C_a の応力

依存性を柴田のレオロジー理論¹⁶⁾で表わし、圧密試験から得られた二次圧密係数を図-17に示すように圧密応力 σ の関数としてモデル化を行なって計算した。

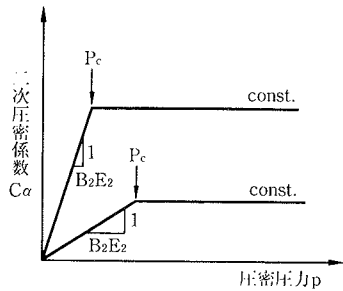


図-17 二次圧密係数のモデル化

図-18は、二次圧密係数 $\sim\sigma$ 関係の整理において折れ曲がり点を P_c として求めた P_c の深度分布である。 P_c は深度方向に滑らかに増加し、図中に付記した $e\text{-log } p$ 関係から求めた P_c の分布と同様の傾向を示している。以下の計算ではこの二次圧密係数 $\sim\sigma$ 関係からもとめた P_c を用いて沈下解析を行なった。

入力条件は、実施した圧密試験結果をそのまま解析に取りこめるようにサンプリング位置ごとに層区分し、計12層の多層地盤の一次元圧密として解析を行なった。表-2に、沈下計算に用いた入力条件を示す。

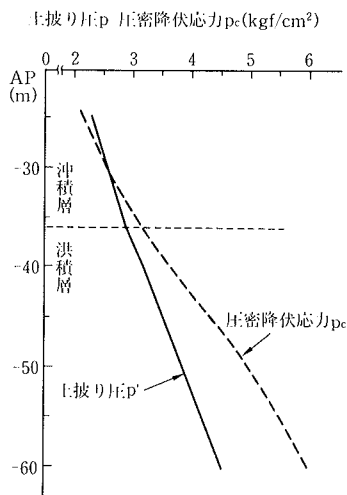


図-18 P_c の分布

表-2 入力条件

層区分	p_c (kgf/cm ²)	B_2E_2	層厚 (m)	層区分	p_c (kgf/cm ²)	B_2E_2	層厚 (m)
1	2.30	137	6.0	7	3.65	1471	1.5
2	2.65	182	6.0	8	3.73	696	1.5
3	2.95	308	3.0	9	3.90	1143	3.0
4	3.15	588	3.0	10	4.15	1509	1.8
5	3.30	792	3.0	11	4.25	440	2.7
6	3.50	784	3.0	12	4.33	2484	1.5

(2)解析結果

図-19に解析で得られた時間 \sim 沈下曲線と実測沈下曲線を対比して示した。解析結果は、圧密開始時期の設定によって沈下曲線は異なるため、ここでは圧密計算開始時期の設定を沈下観測開始時の1,000日前、1,500日前、2,000日目の3通り計算し比較した。沈下開始時期が古く圧密時間が経過していると計算した結果ほど現在の沈下曲線の勾配は小さく表されている。実測結果は、(3)の2,000日前とした計算結果がAc層、Dc層の実測値によく近似している。実際

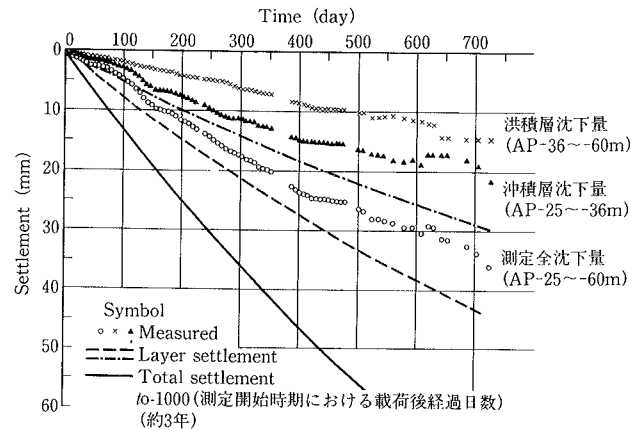


図-19 (1) 時間 \sim 沈下曲線 ($t_0=1,000$ 日前)

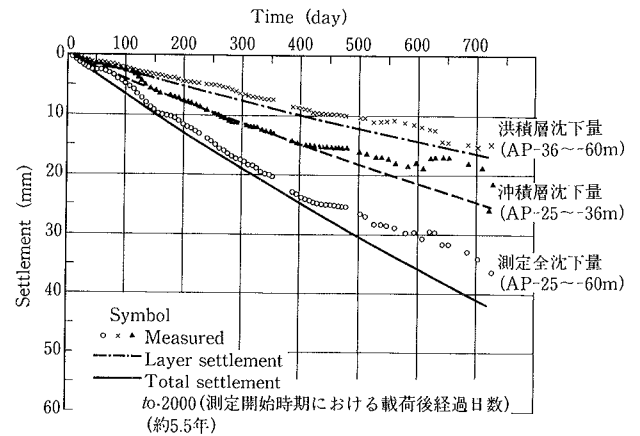


図-19 (2) 時間 \sim 沈下曲線 ($t_0=1,500$ 日前)

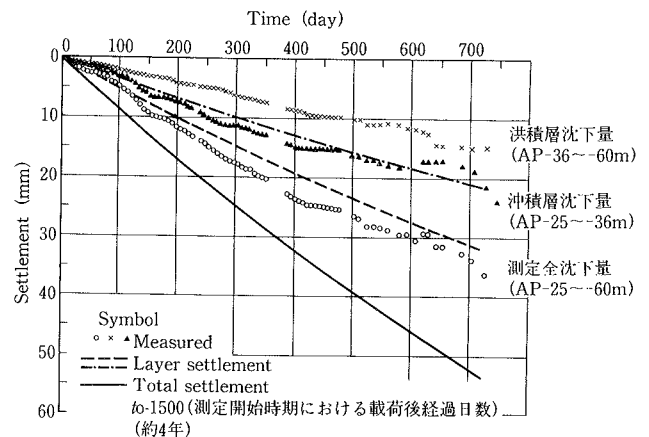


図-19 (3) 時間 \sim 沈下曲線 ($t_0=2,000$ 日前)

の埋立造成経過の調査から、沈下観測地点付近では沈下観測開始時期の約4年前にはすでに造成が完了し、載荷荷重は現在の状態であったと考えられることから、計算開始時期の設定を造成終了時期付近に設定する方法の妥当性に1つの示唆を与え、また二次圧密係数を用いた計算方法によって十分圧密沈下を予想できることが確認された。

5. まとめ

この報告は、深層の沖積粘土および堆積年代の比較的新しい洪積粘土の沈下挙動について、室内試験結果と現場の沈下測定結果から検討したものである。以下にその成果のまとめを示す。

- (1) 洪積粘土に関する既往の研究内容から工学的特性が比較的良く知られている沖積粘性土との相違点や工学的特性を決定する試験方法における注意点等を示した。
- (2) 深層の粘土試料を採取し、物理試験、力学試験などの室内試験によって洪積粘土の工学的特性を検討した。このうち圧密特性の検討では、通常行なう圧密試験では圧密降伏応力 P_c が大きい洪積粘土の高応力領域の検討ができなことから、最大圧密荷重 100 kg/cm^2 の高圧圧密試験機を用い高応力領域の圧密特性を検討した。
- (3) 深い沖積粘土地盤、洪積粘土地盤の圧密沈下観測を行ない、室内試験結果から得られた土質定数を用いた解析結果と実測沈下測定結果との比較検討を行なった。その結果クリープ的に生じる圧密現象をレオロジー理論を用いた2次圧密解析手法を適用することによって過圧密粘土の沈下挙動を検証することができた。

ここで取り扱った深層の沖積粘土、および堆積年代の比較的新しい洪積粘土は、構造物の大型化や水深の大きな海上における埋立造成など地盤の上載荷重の増加に伴って脚光を浴びるようになった比較的新しい研究分野である。今後は深い粘性土層の沈下、変形データの収集やその解析を進めることによって、深い粘性土地盤の工学的特性のデータベース化や、より精度の良い解析を進めていくことが望まれる。

参考文献

- 1) たとえば 中北, 他: ケース2・神戸ポートアイランド, 土質工学ケースヒストリー集 第1集, p. 430~441, (1983)
- 2) たとえば 木山, 他: 土質工学的諸問題とその対応 臨海埋立地一埋立造成, 土と基礎, Vol. 36, No. 11, p. 85~90, (1988)
- 3) 大阪地盤図, コロナ社
- 4) 土質工学会, 等編著: 新編大阪地盤図, コロナ社, (1987)
- 5) 土質工学会編: 大阪地盤・特に洪積層の研究とその応用, (1977)
- 6) 土田, 他: 大阪湾泉州沖地盤の力学特性, 第10回海洋開発シンポジウム, p. 13~18, (1985)
- 7) Leonards, G. A. et al: The effect of time in the consolidation of clays, ASTM, STP 254, p. 116, (1959)
- 8) 谷本, 他: 大阪湾上部洪積粘土層 (Ma12) の圧密特性について, 海底地盤に関するシンポジウム論文集, p. 133~138, (1987)
- 9) 柴田, 他: 大阪・洪積粘土の降伏特性の評価, 第23回土質工学研究発表会, p. 445~448, (1989)
- 10) 赤井, 他: 大阪湾上部洪積粘土の二次圧密挙動について, 第23回土質工学研究発表会, p. 441~444, (1989)
- 11) 嘉門, 他: 大阪湾上部粘土層の沈下挙動と二次圧密特性, 第23回土質工学研究発表会, p. 259~260, (1989)
- 12) 三笠, 他: ケース5・大阪南港(水位低下による地盤改良) 土質工学ケースヒストリー集 第1集, p. 459~480, (1983)
- 13) 谷口, 他: 磁気式深度別沈下計による大阪湾海底地盤の沈下計測について, 海底地盤に関するシンポジウム論文集, p. 163~168, (1987)
- 14) 森, 他: 羽田空港沖合展開事業における沈下観測と将来不同沈下の予測, 土と基礎, Vol. 37, No. 8, p. 45~50, (1989)
- 15) 小川, 他: 港湾地域における土の工学的諸係数の相関性, 港湾技術研究所報告, Vol. 17, No. 3, p. 3~89, (1978)
- 16) 柴田: 粘土の圧密に関するレオロジー的考察, 土木学会論文集, Vol. 69, p. 29~37, (1960)
- 17) 関口, 他: 圧密と有効応力—特に洪積粘土を中心として, 土と基礎, Vol. 36, No. 6, p. 25~30, (1988)