

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

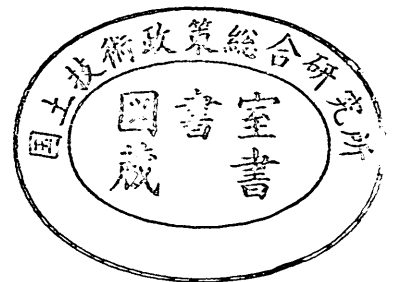
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 14

NO. 4

DEC. 1975

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I.)

第14巻 第4号 (Vol. 14, No. 4), 1975年12月 (Dec. 1975)

目 次 (CONTENTS)

1. 不規則波による防波護岸の越波流量に関する実験的研究
..... 合田良実・岸良安治・神山 豊..... 3
(Laboratory Investigation on the Overtopping Rate of Seawalls by Irregular Waves.....Yoshimi GODA, Yasuharu KISHIRA and Yutaka KAMIYAMA)
2. 超軟弱粘土の圧密定数の決定法..... 梅原靖文・善 功 企..... 45
(Determination of Consolidation Constants for very Soft Clays
.....Yasufumi UMEHARA and Kouki ZEN)
3. 重力式岸壁の震度と地盤加速度
..... 野田節男・上部達生・千葉忠樹..... 67
(Relation Between Seismic Coefficient and Ground Acceleration for Gravity QuaywallSetsuo NODA, Tatsuo UWABE and Tadaki CHIBA)
4. 海水に浸漬したコンクリートのアクに関する実験的研究
..... 関 博・善 一章・阿部正美・藤澤孝夫.....113
(pH Change of Sea Water due to Immersion of Hardened Concrete
.....Hiroshi SEKI, Kazuaki ZEN, Masami ABE and Takao FUJISAWA)

2. 超軟弱粘土の圧密定数の決定法

梅原靖文*・善 功企**

要 旨

本論文は、標準圧密試験が困難な高含水比粘性土の圧密定数の決定法として、定率ひずみ方式による圧密試験法を提案している。この方法は片面排水条件のもとで供試体に強制的変位を一定速度で与え、供試体上下面で実測される圧密圧力、間げき水圧および沈下量から $f \sim \log p'$ 関係を、また層厚の減少を考慮して圧密係数 C_c を決定するものである。

一方、層厚 90 cm の模型粘土地盤の自重による圧密沈下ならびに間げき水圧が深さ 10 cm 毎に測定された。これらの圧密現象を定率ひずみ方式の圧密試験から得られた結果を用いて解析することにより、定率ひずみ方式の圧密試験が、高含水比粘性土の圧密定数を決定するための試験法として有用であることが確認された。

* 土質部 土性研究室長

** 土質部 土性研究室

2. Determination of consolidation constants for very soft clays

Yasufumi UMEHARA*

Kouki ZEN**

Synopsis

The conventional oedmeter test based on Terzaghi's one dimensional consolidation theory is not applicable to very soft clays with high water content. As an alternative method, the constant rate of strain consolidation test (CRS-test) is proposed to determine the consolidation constants for them. By measuring the axial load, the axial displacement and pore pressure at the base of the specimen during CRS-consolidation process, the f - $\log p'$ relationship and the coefficient of consolidation, C_v , are determined on the basis of consolidation theory in which the thickness of clay specimens is variable.

The self-weight consolidation test was performed in the model clay layer with depth of 90 cm, in which settlements and pore pressures were measured in every layer of 10 cm. These consolidation phenomena were analysed by using the consolidation constants obtained from the above-mentioned procedure.

It is found that CRS-test may be applicable to very soft clays as an alternative method of the conventional oedmeter test.

* Chief of the Soil Mechanics Laboratory, Soils Division

** Member of the Soil Mechanics Laboratory, Soils Division

目 次

要 旨	45
1. ま え が き	49
2. 埋立地盤の一般的特性	49
3. 標準圧密試験とその適用限界	49
4. 超軟弱粘土に関する圧密試験	50
4.1 圧密基礎方程式	50
4.2 定率ひずみ圧密試験	50
4.3 圧密定数の決定法	51
5. 実 験 概 要	53
5.1 定率ひずみ圧密試験装置	53
5.2 試 料	53
5.3 試験方法および試験条件	53
5.4 模型粘土地盤による自重圧密実験	54
6. 結果および考察	55
6.1 周 面 摩 擦	55
6.2 $f \sim \log p'$ 特性および圧密係数	56
6.3 圧密定数の実用的な求め方	57
6.4 模型粘土地盤の解析	58
7. 結 論	61
8. あ と が き	62
参 考 文 献	62
記 号 表	62
付 録	64

1. まえがき

我国の港湾地域では、軟弱な沖積層の推積している所が多く、これらをしゅんせつすることによって造成された埋立地盤は、含水比が著しく高く、埋立直後は未圧密の状態にある。このような超軟弱な粘土から成る埋立地盤は、埋立後ブローディング工法やサンドドレーン工法などによって地盤改良が行なわれることが多いが、自重圧密などによってある程度のトラフィカビリティが確保されるまで自然放置されているのが現状である。しかしながら、自重によって生じる埋立地盤の圧密沈下量の推定や、その後の圧密による地盤改良工法の設計計画などにおいては、このような超軟弱地盤の圧密諸定数を正しく把握しておく必要性が生じる。

圧密試験によって試料の圧密定数を決定する方法として、一般に標準圧密試験が行なわれているが、超軟弱粘土を対象とした場合には、この方法には圧密理論や試験方法に関して幾つかの制約が存在し、また、得られた $f \sim \log p'$ 関係や圧密係数の値は、圧密圧力の小さな範囲ではバラツキが大きく信頼性が低い。

本報告では、定率ひずみ圧密試験装置を用いて、ひずみ速度の比較的緩やかな定率ひずみ圧密試験を実施し、これらの試験結果から $f \sim \log p'$ 関係や圧密係数を決定する一方法を提案している。

さらに、その方法によって決定された $f \sim \log p'$ 関係、圧密係数を用いて、初期含水比の大きな模型粘土地盤の自重圧密現象を解析し、実測値と比較することによってこの方法の妥当性について検討を加えた。

2. 埋立地盤の一般的特性

これまで我国では数多くの埋立工事が施工されてきた。それらの中で幾つかの代表的な埋立工事施工例が柳瀬他¹⁾によってとりまとめられている。ここではそのなかで本報文に関係のある埋立地盤の土質状態に関する項目を抜萃して簡単に述べることにする。

これまでに造成された埋立地盤は層厚が 10~20 m 程度のものが過半数をしめている。浚深によって埋立てられた粘性土の含水比は埋立直後で 300% にも達する場合があります。この地盤はほとんど支持力をもたないスラリー状態にある。このような地盤が自然放置されると表面付近の蒸発乾燥により含水比は低下するが、乾燥が進行するのは地表面付近の 50~60 cm 程度までであるといわれ、また、埋立後 4 ヶ月経過した場合でも水位が地表面

付近に存在する場合には粘土層中の含水比は 140~160% の値をとるケースもあるといわれる。このようなケースは特殊な例ではなく、一般的に埋立地盤の含水比は 50~180% の値をもつようである。また粘土粒子の比重を 2.65、飽和度 100% として埋立地盤の間げき比を推定してみると 1.3~4.8 程度の値になる。

埋立粘性土の圧密特性に関する資料は非常に少ないが、一例によれば圧密係数 C_v は $10^{-2} \sim 10^{-1} \text{ cm}^2/\text{min}$ の間に幅広いバラツキがみられ正確な値を決定することができない。これは超軟弱粘土に対する圧密試験法が確立していないことによるものであろう。

本報文では上記のような埋立地盤を構成する超軟弱粘土を対象にしてその圧密諸定数の決定法について述べるものである。

3. 標準圧密試験とその適用限界

粘性土地盤の圧密現象を解明するためには、あらかじめ室内試験を行なって圧縮指数、体積圧縮係数、圧密係数などの圧密諸定数を把握する必要がある。土の圧密諸定数の決定は、我国では一般に JIS A 1217-1960 および土質工学会セン断試験法委員会案(1969)にもとづく標準圧密試験法によって行なわれる。この方法は Terzaghi の一次元圧密理論にその理論的根拠を置くものであり、これまで建設工事の分野で取扱われてきた種々の粘性土に対して数多くの実績を蓄積してきた。しかしながら、しゅんせつによる埋立地盤などのように含水比の著しく高い、いわゆる超軟弱粘土を対象にした標準圧密試験の実施例は少なく、またこの場合に上記の標準圧密試験法には幾つかの問題点が存在し、その適用にあたっては何らかの限界が生じる。これらは圧密理論に関するものと試験方法に関するものが挙げられる。

(1) 圧密理論に関する適用限界

Terzaghi の圧密理論は有効圧力の概念にもとずき式 (1) のような圧密基礎方程式を与える。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \quad (1)$$

上式の誘導過程において幾つかの仮定がもうけられており、これらの仮定の妥当性に関して多くの研究がなされてきた。

浚深による埋立地盤のように超軟弱な粘土から構成される地盤では圧密によって層厚が著しく減少する。このような場合には層厚の減少を無視した圧密基礎方程式 (1) では圧密速度を過小に評価することになる。層厚の

変化を考慮した圧密基礎方程式は三笠²⁾, Gibson³⁾ 他によって導びかれている。(式(2), (3))

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \zeta^2 \cdot C_v \frac{\partial \zeta}{\partial z_0^2} \quad (2)$$

$$\frac{\partial e}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 e}{\partial a^2} \quad (3)$$

ここに, $\zeta = f_0/f$: 圧密比, f_0, f : 体積比, z_0 : 圧密開始前の固定座標系の値であり, また (a, t) は Lagrange 座標系を表わす。

式(2), (3)によれば層厚の変化が大きくなると方程式(1)の結果との差違が大きくなる。三笠は標準圧密試験における圧密度 U ~ 時間係数 T の関係において初期層厚に対する最終ひずみが 0.5 に達した場合に両者の T_{50} の間には 32.2% の誤差が生じることを指適している。超軟弱粘土の圧密試験では層厚が初期の半分以下になることもあり, このような場合には式(1)の適用は大きな誤差を含むことになる。

(2) 試験方法に関する適用限界

超軟弱粘土の圧密試験を実施するさいに普通の粘性土と異なる点は供試体がスラリー状をなしいわば未圧密の状態にあるということである。このような状態の試料を圧密リングに流し込んで加圧板をセットし圧密荷重を載荷した場合に, 標準圧密試験法で規定されている第1段階の圧密荷重 $0.05 \sim 0.1 \text{ kg/cm}^2$ を瞬間的に加えると, 加圧板と圧密リングの間隙から試料のもれ出しがみられる。また実際の超軟弱地盤の自重圧密現象を取扱う場合に, たとえば土の水中単位体積重量 0.3 g/cm^3 , 層厚 10 m とすると土中の最大有効応力は 0.3 kg/cm^2 にしかならない。このように小さな圧密圧力に対しては現行の標準圧密試験法の荷重段階で得られた $f \sim \log p'$ 関係や圧密係数の値にはバラツキが大きく, 沈下予測のための定数を定めるさいにいかなる値を採用すべきか苦慮することが少なくない。以上のことから超軟弱粘土の圧密試験ではできるだけ小さな圧密荷重から試験を開始する必要がある。

4. 超軟弱粘土に関する圧密試験

4.1 圧密基礎方程式²⁾

粘土層厚の変化および自重を考慮したひずみ表示による圧密基礎方程式は

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} + \frac{dC_v}{d\varepsilon} \left(\frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right)^2$$

$$- \frac{d}{d\varepsilon} (C_v m_v \gamma') \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \quad (4)$$

$$\frac{d\varepsilon}{dz} = m_v \gamma' + \frac{v_0}{C_v} \quad (5)$$

によって与えられる。上式を $\zeta = f_0/f$, および圧密開始前の固定座標系 z_0 を用いて表示すると

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \zeta^2 \left\{ C_v \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z_0^2} + \frac{dC_v}{d\zeta} \left(\frac{\partial \zeta}{\partial z_0} \right)^2 - \frac{d}{d\zeta} (C_v \cdot m_v \gamma') \frac{\partial \zeta}{\partial z_0} \right\} \quad (6)$$

$$\frac{d\zeta}{dz_0} = m_v \gamma' + \frac{v_0}{C_v} \quad (7)$$

となる。式(6)において, 圧密係数 C_v が一定の場合および自重の影響を考えない場合には右辺カッコ内の第2項, 第3項は消える。小さな供試体を用いた圧密試験では自重の影響は無視することができるので, 第3項は消去される。また一般に行なわれているように圧密係数は圧密荷重に無関係に一定という仮定が成立すれば第2項も消去される。

式(6)は解析的には解けないので差分式に変換して数値解を求めることが行なわれる。式(6)の差分式は圧密係数一定として,

$$\begin{aligned} \zeta(z_0, t + \Delta t) &= \zeta(z_0, t) \\ &+ C_v \cdot \bar{\zeta}^2 \cdot \frac{\Delta t}{\Delta z_0^2} \left[\zeta(z_0 + \Delta z_0, t) \right. \\ &- 2\zeta(z_0, t) + \zeta(z_0 - \Delta z_0, t) \\ &\left. + \frac{1}{2L\bar{\zeta}} \{ \zeta(z_0 + \Delta z_0, t) - \zeta(z_0 - \Delta z_0, t) \} \right] \quad (8) \end{aligned}$$

ここで,

$$\begin{aligned} \frac{1}{L\bar{\zeta}} &= \left(1 - \frac{0.8686 C_c}{f} \right) \frac{\gamma_0'}{p'} \\ f &= \frac{f_0}{\zeta}, \quad p' = 10 \frac{f_1 - f}{C_c} \end{aligned}$$

で与えられる。式(8)は初期条件, 境界条件および圧密試験から得られる定数 f_1, C_c ($f \sim \log p'$ 関係において $f = f_1 - C_c \log p'$), 圧密係数 C_v を与えれば, 差分間隔 $\Delta t, \Delta z_0$ を適当に選択することによって容易に解が得られる。圧密係数 f_1, C_c, C_v は圧密試験によって求められなければならない。これらの定数を求めるための試験法および解析方法について 4.2, 4.3 で述べる。

4.2 定率ひずみ圧密試験

3で述べたように超軟弱粘土を対象にした標準圧密試験法には適用限界が存在する。試験方法に関する適用限

界は、5.1で詳述する圧密試験装置を用いることにより圧密荷重の瞬間的荷重による試料のもれ出しを防止し、圧密荷重の小さな範囲における試験精度を向上させることによって解消される。この装置による荷重方式は標準圧密試験の段階的な荷重とは異なり一定のひずみ速度によって圧密を行なう定率ひずみ圧密試験である。

これまで行なわれた定率ひずみ圧密試験は試験期間の短縮という目的のもとで、この方法が標準圧密試験の代用として適用可能か否かという観点から研究が行なわれてきた。これらの結果は比較的小さなひずみ速度では、正規圧密領域において標準圧密試験の結果と良い一致を示すといわれている⁴⁾。標準圧密試験法が適用できないような超軟弱粘土は、普通正規圧密状態にあることから、このような試料を対象にした圧密試験法として、定率ひずみ圧密試験法の可能性が示唆される。

定率ひずみ圧密試験から圧密定数を決定する方法については、これまで Byrne 他⁵⁾, Smith 他⁶⁾, Wissa 他⁷⁾などによる理論的研究が報告されている。これらは供試体の層厚変化を無視した圧密基礎方程式によっており、供試体の層厚の変化が微小な場合に適用できるものである。超軟弱粘土を対象とした圧密試験の場合にはこれらの方法では有意の誤差を含むことになり、超軟弱粘土の圧密試験では4.1で述べた圧密基礎方程式によって圧密定数の決定が行なわれなければならない。従来の研究では圧密基礎方程式を何らかの仮定のもとに解析的に解き圧密定数を求めているが、層厚の変化を考慮した圧密基礎方程式は解析的に解くことが困難であるので差分法による数値解を求めることによって圧密定数が決定される。

4.3 圧密定数の決定法

定率ひずみ圧密試験を行なうことによって得られる実測データは、圧密時間、沈下量(変形量)、供試体上下端面の応力および間げき水圧である。これらのデータから実際の時間～沈下量関係を求め、この時間～沈下量関係を供試体の変形条件として圧密基礎方程式を解くことにより圧密定数が求められる。標準圧密試験と同様に定率ひずみ圧密試験においても、供試体の寸法は小さいので自重による影響を無視し、また一般に行なわれているように圧密係数は圧密期間を通して一定とすると式(6)は、

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \zeta^2 C_v \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z_0^2} \quad (9)$$

となる。式(9)の差分式は式(8)より

$$\begin{aligned} \zeta(z_0, t + \Delta t) &= \zeta(z_0, t) \\ &+ C_v \bar{e}_v^2 \frac{\Delta t}{\Delta z_0^2} \{ \zeta(z_0 + \Delta z_0, t) \\ &- 2\zeta(z_0, t) + \zeta(z_0 - \Delta z_0, t) \} \end{aligned} \quad (10)$$

によって表わされる。式(10)は初期条件として供試体の初期体積比 $f(z_0, 0)$ ($\zeta(z_0, 0) = 1$)、初期厚さ H_0 、境界条件として供試体上端面の体積比 $f(0, t)$ ($\zeta(0, t)$)、供試体下端面の不透水条件を与え、圧密係数 C_v を与えると、差分間隔 Δt 、 Δz_0 を適当に選択することによって数値解が得られる。さらに得られた ζ の値から時間～沈下量関係が計算されるが、計算によって求められた時間～沈下量関係は供試体の変形条件(実測された時間～沈下量関係)を満たさなければならない。

(1) 供試体の境界条件および変形条件

供試体上端面の境界条件 $f(0, t)$ は、圧密試験によって実際に測定することが不可能であるので、圧密試験によって実測される供試体の平均体積比 f_{av} またはそれから求める ζ_{av} を第1近似として用いることにする。ひずみ速度 r で圧密試験を実施した場合に得られる f_{av} 、 ζ_{av} と時間 t との関係は、供試体の土粒子実質部厚さ H_s として

$$f_{av} = (H_0/H_s) - (r/H_s) \cdot t \quad (11)$$

で求められる。初期体積比 $f(z_0, 0)$ は、供試体内で均一とすると、 $\zeta_{av} = f(z_0, 0)/f_{av}$ より

$$\zeta_{av} = \frac{H_0}{H_0 - rt} = \frac{1}{1 - \left(\frac{S}{H_0}\right)} \quad (12)$$

で表わされる。上式は、 H_0 が等しい供試体は沈下量(変形量) S のみの関係であるので、 ζ_{av} は沈下量 S のみによって決定される。また、供試体下端面の境界条件は供試体底面が不透水ということにより与えられる。

このような境界条件のもとで圧密基礎方程式(9)を差分計算によって解き、求められた $\zeta(z_0, t)$ の値から供試体の全沈下量 \bar{S} は式(13)で与えられる。

$$\bar{S} = \int_0^{H_0} \bar{\varepsilon}_{av} dz_0 = \int_0^{H_0} \left(1 - \frac{1}{\zeta_{av}}\right) dz_0 \quad (13)$$

上式から求められる時間～沈下量の関係は境界条件 $f(0, t)$ を近似的に

$$f(0, t) \doteq f_{av} \quad (14)$$

と置いたことによる誤差を含んでいるので、実測によって得られた供試体の変形条件を完全に満たしていない。したがって計算によって求められた時間～沈下量関係が

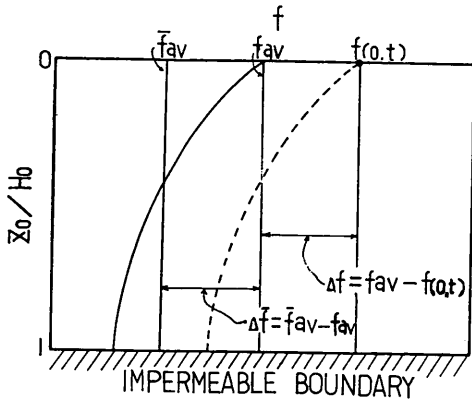


図-1 供試体内の体積比分布

供試体の変形条件を満たさない場合には、境界条件 f_{av} に対して補正を行ない変形条件を満足するようにしなければならない。

$f(0, t) \doteq f_{av}$ と近似したことによって生じる境界面の体積比の誤差を $\Delta \bar{f}$ とし、境界条件を f_{av} として計算により求められる供試体の平均体積比を \bar{f}_{av} とすると、図-1 に示すように任意の時間 t において、

$$\Delta \bar{f} = \bar{f}_{av} - f_{av}$$

となる。一方境界面において与えられた体積比の誤差 Δf は、

$$\Delta f = f_{av} - f(0, t) \quad (15)$$

で表わされる。境界条件として実測値 f_{av} を用いて計算された体積比分布は真の体積比 $f(0, t)$ を用いた場合に比較し大きな値をもつことになるが、 $\Delta \bar{f}$ が小さいときには両者は相似形をなすと考えられるので、

$$\Delta f = \Delta \bar{f} \quad (16)$$

と置くことができる。図-1 において実線は境界条件として f_{av} を用いて求められた供試体内の体積比分布を示している。この両者は相似形をなすとしているので f_{av} は破線の平均値を表わすことになり、また、この値は圧密試験によって実測された平均体積比を意味しているので、補正後の体積比分布から求められる時間～沈下量関係は実測された時間～沈下量関係と等しくなり、供試体の変形条件を満足している。尚、以上の理論計算において、式(10)中の C_0 の値は未知であるので C_0 の値としてある任意の値 \bar{C}_0 が用いられている。

(2) $f \sim \log p'$ 関係および圧密係数の決定法

標準圧密試験法では体積比（間げき比）と圧密圧力の

関係が一義的に定まるといふ仮定のもとに、1つの荷重段階における圧密終了後の沈下量から体積比（間げき比）を求め $f \sim \log p'$ ($e \sim \log p'$) 関係を求めている。定率ひずみ圧密試験では圧密圧力は時間の経過とともに変化し、供試体内部の体積比分布も一様ではなく何らかの分布をなすと考えられる。この場合にも標準圧密試験の場合と同様に体積比と有効応力の関係が一義的に定まるとすれば、任意の時間において供試体内における有効応力 $p'(z_0, t)$ と体積比 $f(z_0, t)$ の間には、試料の $f \sim \log p'$ 関係を満たす

$$f(z_0, t) = f_1 - C_c \log p'(z_0, t) \quad (17)$$

の関係が成立しなければならない。定率ひずみ圧密試験から試料の $f \sim \log p'$ 関係を求める場合に供試体上下端面における有効応力 $p'(0, t)$ または $p'(H_0, t)$ とそれに対応する $f(0, t)$ 、 $f(H_0, t)$ を実測して両者の関係を定めればよいが $f(0, t)$ 、 $f(H_0, t)$ は実測することが困難であるので、4.3(1) に述べたように供試体の変形条件を用いて理論的に $f(0, t)$ 、 $f(H_0, t)$ を求める。

定率ひずみによる圧密試験では供試体に強制変位を与えるので、ひずみ速度が等しければ実測される時間～沈下量関係すなわち変形条件は試料の透水性、圧縮性に無関係に等しくなる。これらの試料の特性は圧密係数の中に含まれており、圧密係数の相違によって図-2(a) に示すように供試体内部の体積比分布は異なってくるが、ある任意の \bar{C}_0 について、供試体の変形条件を満足するようにして体積比分布を求めると、そのときの供試体上下端面の体積比 $f(0, t)$ 、 $f(H_0, t)$ が得られる。各時間において供試体の変形条件を満足するようにして求められた $f(0, t)$ 、 $f(H_0, t)$ と実測された $p'(0, t)$ 、 $p'(H_0, t)$ を片対数紙上にプロットすると

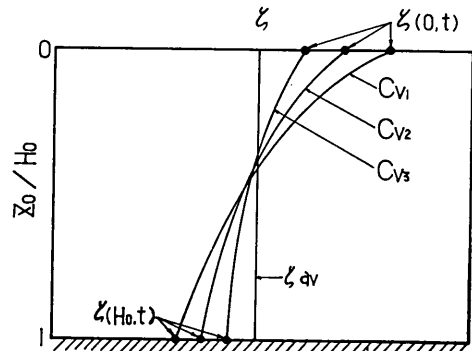


図-2(a) 定率ひずみを受ける供試体内の z の分布

$$f(0, t) = f_1' - C_c' \log p'(0, t) \quad (18)$$

$$f(H_0, t) = f_1'' - C_c'' \log p'(H_0, t) \quad (19)$$

の関係が求まる。式(18), (19)で求められた関係がこの試料の真の $f \sim \log p'$ 関係であるとするれば、体積比と有効応力の間に一義的な関係が成立するとしているので、圧密定数 f_1', f_1'', C_c', C_c'' の間に

$$f_1' = f_1'' \quad \text{かつ} \quad C_c' = C_c'' \quad (20)$$

が成立しなければならない。式(20)が成立しない場合には理論計算により求められた供試体上下端面の体積比が実際の体積比と異なることを表わし、これは理論計算に用いた \bar{C}_0 の値が供試体の圧密係数と異なることによるものである。いいかえれば、 \bar{C}_0 が供試体の真の圧密係数 C_0 を与えていれば式(20)が成立するので、このとき $f \sim \log p'$ 関係は式(18)または式(19)によって決定され、同時に圧密係数 C_0 も $C_0 = \bar{C}_0$ により決定される。以上のようにして試料の $f \sim \log p'$ 関係および圧密係数が定められるが、さらにチェックの意味で図-2(b)のよ

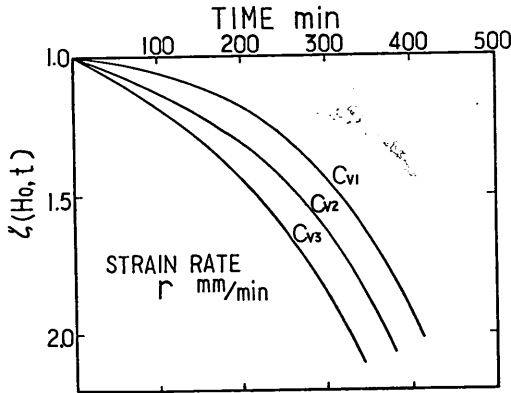


図-2(b) 供試体底部の $z(H_0, t)$ と時間の関係

うに供試体底部の $z(H_0, t)$ と時間の関係を各 \bar{C}_0 に対して描いておき、実測で得られる $p'(H_0, t)$ から $f \sim \log p'$ 関係を用いて $z(H_0, t)$ を求め図上にプロットすると、プロットされた点は求めるべき圧密係数に対する線上の点になってくることになる。

5. 実験概要

5.1 定率ひずみ圧密試験装置

この装置はひずみ制御装置、荷重反力受枠、圧密容器、圧密ピストンから構成される。図-3に本装置の概略図を示している。ひずみ制御装置は小型の特殊モータによる有段変速機構を備えたコンパクトな装置で、ひずみ

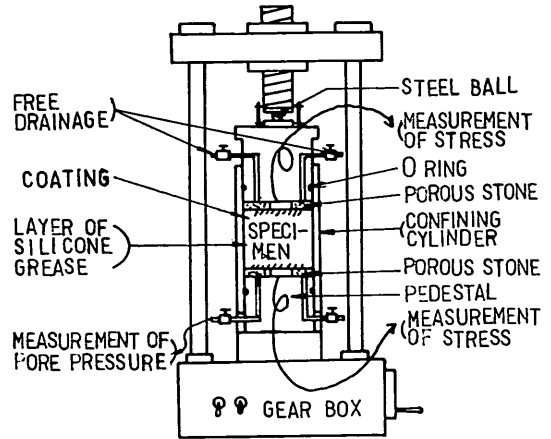


図-3 定率ひずみ圧密試験装置

速度は 0.0307, 0.0620, 0.125, 0.250 mm/min の 4 段階であり荷重の変動に対しても一定のひずみ速度が得られる。荷重反力受枠は最大荷重 250 kg で上部圧密ピストンが固定されている。圧密容器はステンレス鋼が用いられその内面を精密仕上げしたテフロンコーティングが施されている。圧密容器の寸法は直径 60 mm 高さは 100 mm で供試体の厚さは 100 mm まで任意にとることが可能である。圧密ピストンは圧密容器との間から試料のもれ出しを防ぐために O リングが取付けられている。圧密試験中の供試体上下端面の応力は圧密ピストンが供試体に接する面に埋込まれている直径 23 mm 容量 10 kg/cm² の圧力変換器により電気的に計測される。供試体底面における間げき水圧は半導体間げき水圧計により計測される。検出された圧密圧力、間げき水圧は圧密試験自動記録装置に時間とともに自動的に記録される。

5.2 試料

実験に使用された試料は、横浜本牧地区の海底から採取されたものである。採取された試料は、土塊・貝殻・有機物などが混入しているのでこれを大型練混機にかけて練返し、更に網目のフィルターを通して不純物を除去してできるだけ均一な試料を作成した。この試料は含水比 170% 程度に調整され、圧密試験の供試体や模型粘土地盤の実験に用いられた。本牧粘土の物理的性質は表-1 に示す通りである。

5.3 試験方法および試験条件

(1) 定率ひずみ圧密試験

5.1 で述べた圧密試験装置の圧密容器内面にグリース

表-1 本特粘土の特性

項 目	記号・単位		
土粒子の比重	G_s	2.71	
コ テ ン シ ー 特 性	液性限界	w_L (%)	96.7
	塑性限界	w_p	41.5
	塑性指数	I_p	55.2
	液性指数	I_L	0.788
粒 度 粗 成	礫	Gravel (%)	0
	砂	Sand (%)	8.7
	シルト	Silt (%)	40.1
	粘土	Clay (%)	51.2
	分類	三角座標	Clay

を塗布し含水比 160~180%の本牧粘土を静かに流し込み供試体の初期厚さが約 20 mm になるように調整した。圧密容器を装置にセットし上部圧密ピストンに取付けられた排水コックを開放すると同時に圧密を開始した。使用したひずみ速度は 0.0307 mm/min および 0.0620 mm/min である。圧密試験は供試体上端面の有効応力が 5~6 kg/cm² に達するまで行なったが、試験終了までの所要時間は前者で 400 分、後者で 200 分程度である。排水条件は上部排水、下部透水とし、供試体の上下端面における応力および供試体下端面の間げき水圧を測定した。さらに周面摩擦の影響を調べる目的で両面排水条件における試験も行なわれた。この方法は供試体底部の間げき水圧の測定が重要なポイントとなるので試験は恒温室において実施された。

(2) 段階載荷圧密試験

直径 200 mm 高さ 100 mm の大型圧密容器を用いて段階的載荷による圧密試験が行なわれた。圧密圧力は 0.02 kg/cm² から始め \sqrt{t} 法により t_{90} が確認された後荷重増加率が 1 となるように最大 2.56 kg/cm² までの圧密荷重が載荷された。用いられた試料は(1)と同様本牧粘土を含水比 160~180%に調整したものである。この試験を Atest と呼ぶことにする。

(3) 標準圧密試験

本牧粘土を練返し 1.0 kg/cm² の圧密圧力で再圧密した試料が用いられた。試験方法は JIS A 1217-1960 および土質工学会セン断委員会案 (1960) にもとづいてい

る。この試験を STD test と呼ぶ。練返されたスラリー状の粘土は正規圧密状態もしくは未圧密状態と考えられるので、後述の模型地盤の解析では標準圧密試験結果のうち正規圧密領域の結果が採用された。

5.4 模型粘土地盤による自重圧密実験

縦 150 cm, 横 100 cm, 深さ 100 cm の鉄製の模型粘土槽を用いて自重圧密の観測が行なわれた (図-4)。槽

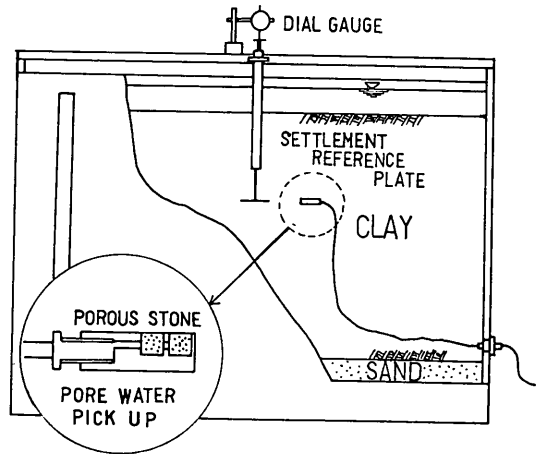


図-4 模型粘土槽

の内壁面と粘土試料の摩擦を減少させるために内壁面にグリースを塗り、槽底面から 5 cm の厚さに粗砂を敷き、砂層上面にろ紙を敷いてその上部に 5.2 で述べた方法で調整されたスラリー状の本牧粘土を流し込んだ。圧密沈下量を測定するために粘土層底部から各々 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 cm の位置に二重管構造をもつ沈下板が設置された。間げき水圧の測定は、実験期間が長期に渡り季節による温度変化の影響が予想されたので、電気計測による方法を避けて間げき水圧検出用チ

表-2 模型粘土地盤の初期条件

項 目	記号, 単位	
粘土層厚	H_0 (cm)	90
含水比	w_0 (%)	178.5
間げき比	e_0	4.83
体積比	f_0	5.83
湿潤単位体積重量	γ_t (g/cm ³)	1.33
乾燥単位体積重量	γ_d (g/cm ³)	0.48

チップから圧力をマンメータに導いて測定する方法が採用された。間げき水圧検出用チップは沈下板と同じ深さに埋設されたが、沈下による影響を少なくするため沈下板の位置からできるだけ離して埋設された。作成された模型粘土地盤の初期状態を表-2に示す。圧密は底部非排水、上部排水の境界条件のもとで行なわれ、圧密開始後約7ヶ月間観測が続けられ沈下量と間げき水圧が測定された。

6. 結果および考察

6.1 周面摩擦

標準圧密試験のように供試体の側面を剛性の圧密リングによって拘束し水平方向の変形が生じないようにして一次元的な圧密試験を実施すると、圧密リング壁面と供試体間に接線方向の応力が発生する。この接線応力は摩擦力とは幾分異なった性質のものであると思われるが、普通周面摩擦とか側面摩擦と呼ばれており周面摩擦の存在によって、加えられた圧密荷重と供試体内部の圧密圧力が異なってくるという問題が生じる。これまでの研究では有効圧密圧力が小さくなると Taylor によって定義された周面摩擦係数が大きくなることが明らかにされているが超軟弱粘土を用いた圧密試験において圧密圧力の小さなところで周面摩擦の影響がどのようになるかを調べた。標準圧密試験では得られたデータを有効圧密圧力で整理するとよいといわれているが⁹⁾、定率ひずみ圧密試験では有効圧密圧力が決まらないので供試体上端面における圧密圧力 $p'(0, t)$ を用いてデータの整理を行なった。この場合、両面排水条件によって試験を実施しているので、 $p'(0, t) = p(0, t)$ 、 $p'(H_0, t) = p(H_0, t)$ である。

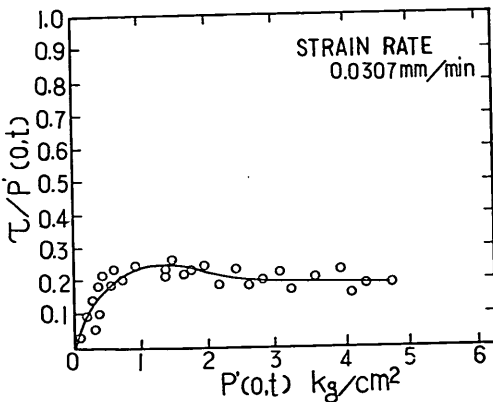


図-5 周面摩擦

周面摩擦を供試体周面に作用する平均的な接線応力で表わすと力のつりあいから

$$\frac{\tau}{p'(0, t)} = \frac{R}{2H} \left\{ 1 - \frac{p'(H_0, t)}{p'(0, t)} \right\} \quad (24)$$

となる。上式で求められる $\tau/p'(0, t)$ と $p'(0, t)$ の関係を示すと図-5のようになり $p'(0, t)$ が 1.3 kg/cm^2 以下においては $\tau/p'(0, t)$ の値は減少している。この結果から圧密圧力が 1.3 kg/cm^2 以下では、周面摩擦が供試体内の圧密圧力減少におよぼす影響は小さくなると考えられる。図-6は Taylor⁹⁾ による周面摩擦係数を式

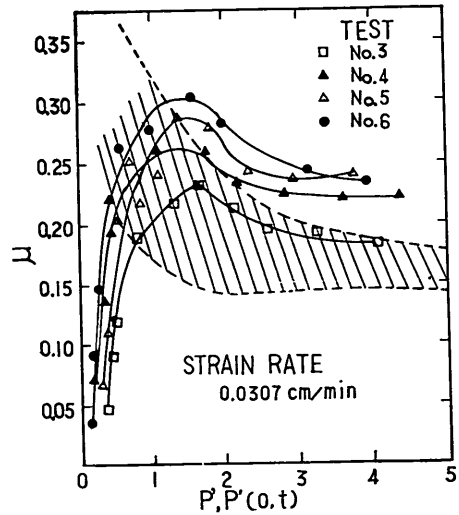


図-6 周面摩擦係数

(25)で求め $p'(0, t)$ に対してプロットした結果である。

$$\mu = \left(\frac{R}{2H} \right) \log_e \left(\frac{p'}{p' - \Delta p'} \right) \quad (25)$$

ここで $\Delta p'$ は供試体上下面圧力差である。式(25)は一次圧密終了後、供試体中の過剰間げき水圧が零になったときの力のつりあいから求められた式である。圧密過程における周面摩擦係数を求めるためには、標準圧密試験の場合、別の式が導きかかれている¹⁰⁾。定率ひずみ圧密試験の場合にも、標準圧密試験の圧密中と同様に供試体内部に過剰間げき水圧が発生しているので、式(25)はそのまま適用できないが、緩やかなひずみ速度で圧密試験を実施すると、供試体内部に発生する過剰間げき水圧は微小であるので、式(25)が近似的に適用されるものとして、周面摩擦係数 μ を求めた。また、定率ひずみ圧密試験の結果は有効圧密圧力かわりに供試体上端面の圧密

圧力を用いているのでそのまま標準圧密試験の結果との比較はできないが図にはこれまで報告されている結果もまとめて斜線で示している。定率ひずみ圧密試験の結果では周面摩擦係数は圧密圧力の小さな範囲では標準圧密試験によるこれまでの結果と異なる傾向を示しており $f'(0, t)$ が 1.3 kg/cm^2 以下では μ の値は減少している。この理由として供試体が圧密圧力の小さな所ではスラリー状をなしていること、および圧密容器内面にテフロンコーティングが施されていることが考えられるが、 $f'(0, t)$ が 1.3 kg/cm^2 以上では μ の値は従来の結果と同様な傾向を示しているので、主な理由としては前者があげられよう。また、図-6をみると圧密圧力が小さな範囲においては超軟弱粘土の周面摩擦は小さくなることが明らかであり、超軟弱粘土の圧密試験では周面摩擦の影響は普通の粘土の標準圧密試験でみられるよりも小さいと考えられる。図-7は $p'(0, t)$ および $p'(H_0, t)$ と

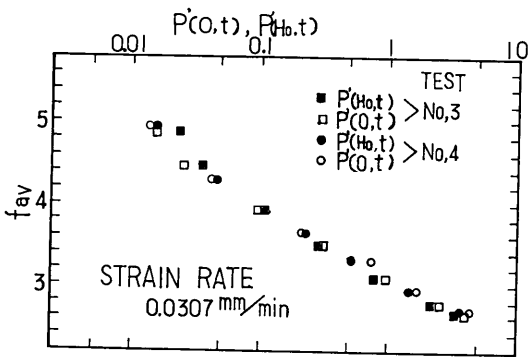


図-7 供試体の体積比と上下面の有効応力の関係

f_{av} の関係を示している。この場合の試験は両面排水条件により実施されているのでこの両者の相違は周面摩擦によるものと考えられる。しかし図より明らかなように周面摩擦が $f_{av} \sim \log p'$ 関係におよぼす影響は無視できる程度に小さい。

6.2 $f \sim \log p'$ 特性および圧密係数

4.3(2)で述べた方法にしたがって、超軟弱な本牧粘土の $f \sim \log p'$ 関係を求めた結果を図-8に示す。図には \bar{C}_v が 0.0135 および $0.0068 \text{ cm}^2/\text{min}$ の場合を表わしている。 $\bar{C}_v = 0.0068 \text{ cm}^2/\text{min}$ の場合においては供試体の上下端面でそれぞれ求められた $f(0, t) \sim \log p'(0, t)$ $f(H_0, t) \sim \log p'(H_0, t)$ 関係は一致していない。供試体の体積比と有効応力が一義的に定まるのであれば両者は等しくならなければならないので、これは供試体の変形

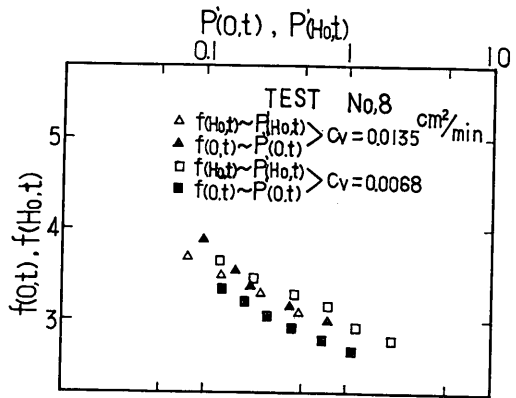


図-8 $f(0, t) \sim \log p'(0, t)$ および $f(H_0, t) \sim \log p'(H_0, t)$ 関係

条件から $\bar{C}_v = 0.0068 \text{ cm}^2/\text{min}$ として差分計算により求められた $f(0, t)$, $f(H_0, t)$ の値が正しくない、すなわち供試体の上下端面で実測された $p'(0, t)$, $p'(H_0, t)$ に一義的に対応すべき体積比が正しく求められていないことになる。このことは理論計算を行なうにあたって与えられた \bar{C}_v の値が、試料の圧密係数に等しくないことによるものである。 $\bar{C}_v = 0.0135 \text{ cm}^2/\text{min}$ の場合には $f(0, t) \sim \log p'(0, t)$ と $f(H_0, t) \sim \log p'(H_0, t)$ は等しくなっており、 $p'(0, t)$, $p'(H_0, t)$ に対応する体積比 $f(0, t)$, $f(H_0, t)$ が正しく求められている。よって \bar{C}_v の値は試料の圧密係数 C_v を表わしていることになる。以上のことからこの試料の $f \sim \log p'$ 関係として、 $f = 2.95 - 0.85 \log p'$ が決定される。

図-9の実線は図-10に示すように幾つかの \bar{C}_v に対し

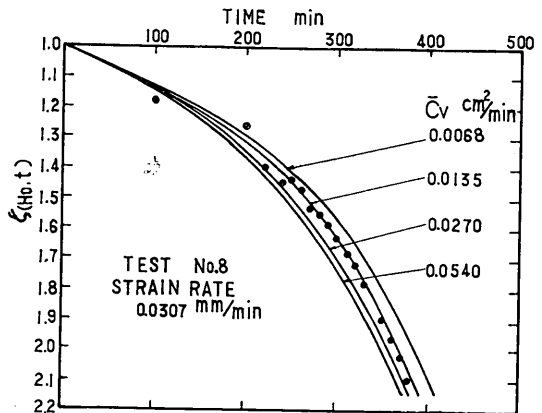


図-9 定率ひずみ圧密試験から求まる圧密係数

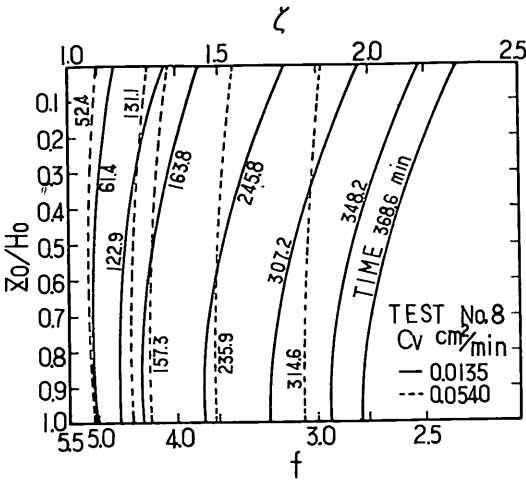


図-10 圧密係数の異なる場合の供試体内の体積比分布

て供試体内の e 分布を求め、それから試体底部の $e(H_0, t)$ と時間の関係を求めたものである。各時間において実測された $p'(H_0, t)$ から $f \sim \log p'$ 関係を用いて $e(H_0, t)$ を求め図-9にプロットするとこれらの点は $\bar{C}_v = 0.0135 \text{ cm}^2/\text{min}$ 上のものであり、この試料の圧密係数 $C_v = 0.0135 \text{ cm}^2/\text{min}$ であることが確認される。時間が小さい範囲における結果のバラツキは実測された $p'(0, t)$, $p'(H_0, t)$ の値が非常に小さく、圧力変換器の精度を越えることによるものである。圧密圧力が小さな範囲における $f \sim \log p'$ 関係や圧密係数を正確に求めるためには、供試体上下端面に設置された圧力変換器の容量を小さくとりこの範囲における測定精度を向上させればよいであろう。

図-11には標準圧密試験（再圧密試料 STD test）および

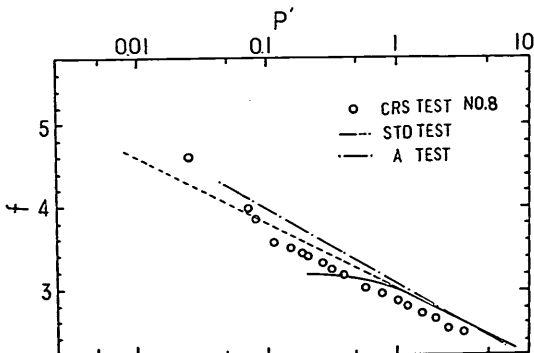


図-11 各圧密試験から求められた $f \sim \log p'$ 関係

び段階荷荷による圧密試験（A test）から求められた $f \sim \log p'$ 関係と定率ひずみ圧密試験（CRS test）の結果を示している。A testによって得られる $f \sim \log p'$ 関係は再圧密試料の STD test や CRS test の結果に比較して著しいバラツキがみられ圧密定数 f_i , C_v も各々異なる値となり平均的な値を定めることが不可能であったので、図中にはそれらのなかから適当と思われる1ケースについての結果を描いている。STD test の結果は 1.0 kg/cm^2 で再圧密した試料に関するものであるので、それより小さな圧力範囲では正規圧密部分の $f \sim \log p'$ 関係をそのまま直線的に延長して破線で表わしている。CRS test の結果は STD test の結果に比較してやや左下に位置している。

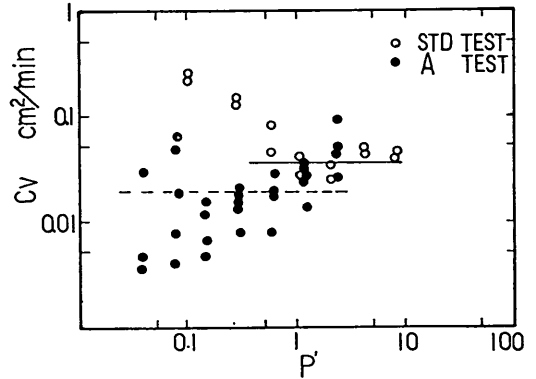


図-12 STD test および A test から求められた圧密係数

図-12には STD test, A test によって得られた圧密係数を示している。これらの結果の平均値をとると STD test の正規圧密領域では $C_v = 0.035 \text{ cm}^2/\text{min}$, A test の場合にはバラツキが大きい $C_v = 0.020 \text{ cm}^2/\text{min}$ となる。図-10と図-12を比較すると CRS test によって求められる C_v の値は A test の場合よりもバラツキが小さく、また層厚の減少を含んだ圧密基礎方程式によって試験結果の信頼性は高いものと思われる。さらに定率ひずみ圧密試験法によると標準圧密試験などでみられる二次圧密現象が含まれないので、一次圧密現象だけを取り出して理論構成が行なわれている現在の圧密試験においては有利な点と考えられよう。

6.3 圧密定数の実用的な求め方

6.2において厳密な $f \sim \log p'$ 関係の決定法について述べたが、実的にはできるだけ簡単な方法でかつ精度よく $f \sim \log p'$ 関係を求める方法が望ましい。これまで

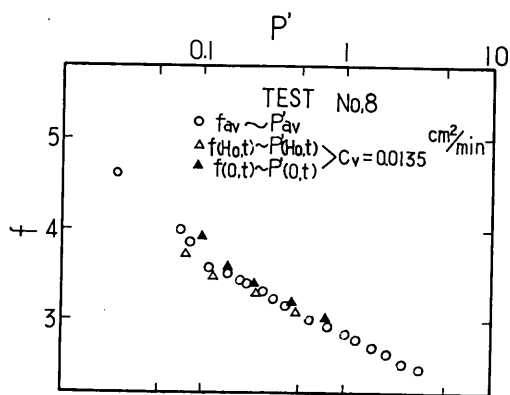


図-13 $f_{av} \sim \log p'_{av}$ 関係と $f(0, t) \sim \log p'(0, t)$, $f(H_0, t) \sim \log p'(H_0, t)$ 関係

の定率ひずみ圧密試験に関する Byrne 他, Smith 他, Wissla 他らの研究をまとめると, 平均圧密圧力 p'_{av} は

$$p'_{av} = p(0, t) - \alpha \cdot u(H_0, t), \quad \alpha = \frac{2}{3} \sim \frac{3}{4} \quad (21)$$

によって求められることが報告されている。一方, 平均体積比 f_{av} は 4.3(1) の式(11)によって求められるから $f_{av} \sim \log p'_{av}$ の関係を求めてみると 図-13 のようになる。この関係は 6.2 で得られた $f \sim \log p'$ 関係とよく一致しており, 実用的には, $f \sim \log p'$ 関係として $f_{av} \sim \log p'_{av}$ 関係を採用することができることを表わしている。一般に定率ひずみ圧密試験から求められる $f_{av} \sim \log p'_{av}$ 関係は供試体に作用するひずみ速度の影響を受けるといわれている。梅原他¹¹⁾は本研究で用いた試料と同一の本牧粘土についてひずみ速度が $f_{av} \sim \log p'_{av}$ 関係におよぼす影響について報告している。その結果ひずみ速度が 0.1~0.2%/min 以下の場合には, ひずみ速度による顕著な相違はみられず標準圧密試験の結果と一致

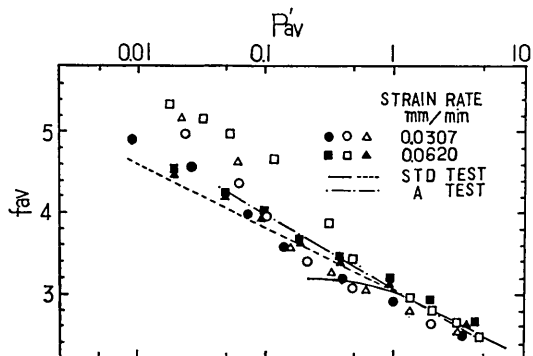


図-14 ひずみ速度の相違による $f_{av} \sim \log p'_{av}$ 関係

することが明らかにされた。図-14 はひずみ速度 0.0307 mm/min および 0.0620 mm/min (初期供試体厚さに対して 0.14%/min および 0.28%/min 程度) で試験を行なったときの $f_{av} \sim \log p'_{av}$ 関係である。

図-14 から明らかなようにこれらは標準圧密試験の結果と大きな相違はみられない。ひずみ速度が 0.28%/min の場合の $f_{av} \sim \log p'$ 関係は, 0.14%/min の場合に比較してやや右上に位置する傾向にあるが, これは平均圧密圧力を求めるさいに一定とした α の値が必ずしも一定ではなく, ひずみ速度の変化によって, 間げき水圧の分布形が異なりその結果 α の値も変わることによるものであろう。

このような場合には 4.3(2) にしたがって $f \sim \log p'$ 関係を定めなければならないが, ひずみ速度が小さい場合には $f \sim \log p'$ 関係として $f_{av} \sim \log p'_{av}$ 関係を用いても実用的には大差ないものと思われ, ひずみ速度の上限としては 0.20%/min 程度が考えられる。

以上のようにして $f \sim \log p'$ 関係が定まれば, たとえば 図-9 のようにあらかじめ試験を行なう供試体の厚さとひずみ速度について, $\zeta(H_0, t) \sim t$ の関係図を求めておけば, 各時間において実測された $p'(H_0, t)$ から $f \sim \log p'$ 関係を用いて $\zeta(H_0, t)$ を求めて図上にプロットすることにより容易に圧密係数が定められる。

6.4 模型粘土地盤の解析

(1) $\bar{\zeta}$ の値の決定

圧密基礎方程式を差分形に直した式(8)を解くにあたって, $\bar{\zeta}^2$ の値は $\zeta(z_0, t)$ と $\zeta(z_0, t + \Delta t)$ の間の値をとらなければならない。しかしながら, $\zeta(z_0, t + \Delta t)$ の値が未知であるので以下の手法により $\bar{\zeta}$ の値を計算した。

第1段階:

$$\bar{\zeta} = \frac{1}{2} \{ \zeta(z_0, t) + \zeta(z_0, t + \Delta t) \}$$

として, 算術平均により $\bar{\zeta}$ を求める。ただし計算始めの $\zeta(z_0, t + \Delta t)$ の値は $\zeta(z_0, t)$ の値を代用する。 $\bar{\zeta} = \zeta(z_0, t)$

第2段階:

第1段階で得られた $\bar{\zeta}$ の値を

$$\begin{aligned} \zeta(z_0, t + \Delta t) = & \zeta(z_0, t) \\ & + C_v \bar{\zeta}^2 \frac{\Delta t}{\Delta z_0^2} \left[\zeta(z_0 + \Delta z_0, t) \right. \\ & \left. - 2\zeta(z_0, t) + \zeta(z_0 - \Delta z_0, t) \right] \\ & + \frac{1}{L \bar{\zeta}} \left[\zeta(z_0 + \Delta z_0, t) - \zeta(z_0 - \Delta z_0, t) \right] \end{aligned}$$

に代入して, $\zeta(z_0, t + \Delta t)$ の値を計算する。

第3段階：

第1段階における $\zeta(z_0, t + \Delta t)$ の値と第2段階において、求められた $\zeta(z_0, t + \Delta t)$ を比較し、両者の差が許容範囲内であれば ζ は求められたことになる。許容範囲内でなければ第2段階で得られた $\zeta(z_0, t + \Delta t)$ の値を第1段階の $\zeta(z_0, t + \Delta t)$ に代入して以下同様の繰返し計算を行なう。

(2) 差分間隔

差分計算を行なう場合に問題となるのは収束性、安定性および精度である。さらにこれらの条件を許容範囲内に収めるという前提のもとに電子計算機の演算時間をできるだけ短くすることが望ましい。以上のことを考慮して模型地盤を 図-15 のような格子間隔に切り差分計算を行なった。

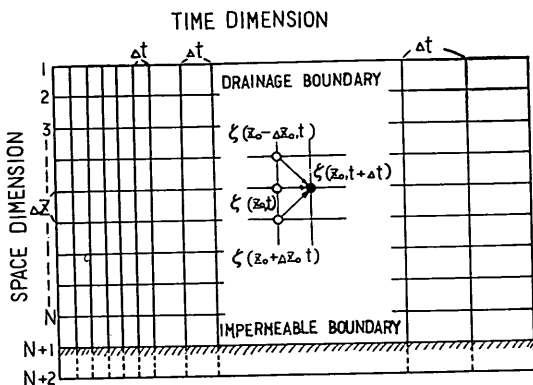


図-15 差分間隔の切り方

(1) $\Delta z_0 = 5 \text{ cm}$, $\Delta t = 10^{-7} \text{ min}$

このケースでは粘土層底部不透水境界において収束性が悪い。これは Δt が Δz_0 に対して小さすぎることによる。

(2) $\Delta z_0 = 5 \text{ cm}$, $\Delta t_0 = 10^{-3} \text{ min}$

Δt を(1)の10000倍にして計算を行なうと収束性は向上するが演算時間はこの場合も長く運輸省港湾技研究所の TOSBAC-5600 で圧密度0.023までに12分間要する。

(3) $\Delta z_0 = 5 \text{ cm}$, $\Delta t_0 = 10^{-3} \text{ min}$, 時間間隔 Δt を圧密進行とともに拡大

(1), (2)のように差分間隔を一定にして圧密解析を行なうことは圧密現象の複雑さからみて合理的な方法とはいえない。そこで圧密初期の段階においては時間間隔を小さくとり、圧密の進行とともに大きくしていくようにした。すなわち時間 0.5 min (Δt が 500 回) 毎に圧

密度を計算し、圧密度の増加量が 0.008 以下であれば順次 Δt を 2 倍に広げていった。この場合は圧密度 0.9999 までに要した演算時間は 4.128 分であった。以後同様な方法で差分間隔のみを変えて計算を行なった。(4)~(6)

(4) $\Delta z_0 = 1 \text{ cm}$, $\Delta t_0 = 10^{-3} \text{ min}$

Δz_0 を(3)よりも細かく 1/5 にして計算を行なうと、圧密度 0.71 までは(3)とほぼ等しい結果を得るが、さらに圧密度が進むと Δt が Δz_0 に対して過大になるため誤差が大きくなる。

(5) $\Delta z_0 = 5 \text{ cm}$, $\Delta t_0 = 10^{-5} \text{ min}$

Δt_0 を(3)の 1/100 にする。計算結果は(3)とほとんど等しく Δt_0 の違いによる差はみられない。

(6) $\Delta z_0 = 5 \text{ cm}$, $\Delta t_0 = 10^{-7} \text{ min}$

Δt_0 を(3)の 1/10000 にすると(3), (5)の計算結果とやや差がみられる。(3), (4), (5), (6)により得られた時間~沈下量の関係を 図-16 に示す。

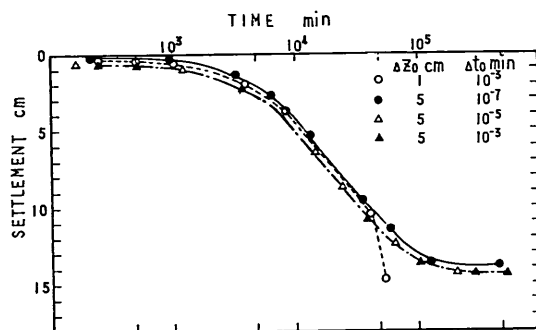


図-16 差分間隔の相違による時間~沈下曲線

以上の差分計算においてどのような差分間隔を選べばよいかということになるが、差分計算はいかなる方法によるにしろ誤差を含んだ数値の四則演算であるので、できるだけ厳密解(普通厳密解が得られない場合が多い)に近い精度のよい結果を得るようにしなければならない。差分計算の精度を判定するには厳密解との比較が最上の方法であるが、圧密基礎方程式の厳密解が得られないので、差分計算により得られる圧密度 1 (0.999 以上) における全沈下量 S と、圧密終了後の定常状態の式

$$\frac{\partial \zeta}{\partial z_0} = m_v \gamma' \quad \text{or} \quad \frac{\partial p'}{\partial z_0} = \gamma' \quad (27)$$

から求まる最終沈下量 S^* (これは、差分計算によらな

* 粘土層内の p' が求まれば f の分布がわかる。各要素 dz_0 の圧密度は $dS = \frac{df}{f} dz_0$ であるから、粘土層の全沈下量は $S^* = \frac{1}{f_0} \int_0^{H_0} df dz_0$ により求められる。

表-3 差分間隔と精度

	差分間隔		演算時間 (min)	精 度 (%)
	Δz_0 (cm)	Δt_0 (min)		
(3)	5.0	10^{-3}	4.128	2.253
(4)	1.0	10^{-3}	14.502	—
(5)	5.0	10^{-5}	4.800	2.198
(6)	5.0	10^{-7}	12.000	3.619

い)とを比較して $|S'-S|/S'$ により精度を判定した。結果は表-3に示すように、差分計算による誤差は2~4%内に納まるが、 $\Delta z_0=5$ cm, $\Delta t_0=10^{-5}$ の場合が最も精度がよい。演算時間も考慮すれば(3), (5)の差分間隔が適当である。

(3) 境界値問題

差分方程式を解くにあたって境界値問題は初期値問題よりも一般に困難であるが、適当なくふうを施すことによって解くことが可能である。

模型粘土地盤の自重圧密実験は上部透水、底部不透水の条件下において実施されているので、これらの境界値問題の差分解法について述べる。

上部透水面における境界条件は上載荷重が零で時間の経過にかかわらず体積比は初期の状態のまま一定であることから $\zeta=f_0/f=1$ とおける。

底部不透水面における境界条件は底部不透水面で間げき流体と土粒子の相対的な移動速度 v が零ということから、以下のように与えられる²⁾。圧密過程における速度 v は

$$v = C_v \left(\frac{\partial \zeta}{\partial z_0} - m_v \gamma' \right) \tag{28}$$

で与えられ、不透水境界において $v=0$ であるから、

$$\frac{\partial \zeta}{\partial z_0} = m_v \gamma' \tag{29}$$

となる。また $m_v \gamma'$ は ζ のみの関数としてここで、

$$\left. \begin{aligned} m_v \gamma' &= \frac{0.4343 C_c \cdot \zeta \cdot \gamma'}{f_0 \cdot p'} \\ p' &= 10 \frac{f_1 - f_0 / \zeta}{C_c} \end{aligned} \right\} \tag{30}$$

である。

差分計算を行なうにあたって、模型粘土地盤を 図-15 のように深さ方向に N 等分し層上面から番号を施すと層

底部境界面は $N+1$ 点となる。時間 $t+\Delta t$ における $N+1$ 点の値を計算するには、時間 t における $N, N+1, N+2$ 点の各々の値が既知でなければならないので、さらに深さ方向に等間隔に架空の点 $N+2$ をもうける。初期状態においては、模型粘土地盤内の体積比は均一であるから ζ の値は各点において1である。 $N+2$ 点も同じく1とする。これらの ζ の値から差分方程式を用いて時間 Δt 経過後の $N+1$ 点の ζ を計算する。求められた $N+1$ 点の値 ζ_{N+1} から式(29) $d\zeta/dz_0 = \Delta\zeta_{N+1}/\Delta z_0 = m_v \gamma'$ により計算された値を $(m_v \gamma')_1$ とする。次に、同じ ζ_{N+1} から式(30)を用いて計算された値を $(m_v \gamma')_2$ とする。この両者が許容範囲内で等しければ ζ_{N+1} は、時間 Δt における $N+1$ 点の正しい値を与える。許容範囲外であれば、 $N+1$ 点において N 点に対して $\{ (m_v \gamma')_1 + (m_v \gamma')_2 \} / 2$ の勾配をもつ ζ_{N+1} の値を与え、式(29), (30)を使って同様の計算を繰返す。適当な差分間隔を選択すれば、上記の計算は少なくとも10回以下の繰返し計算により収束する。計算精度の問題は、 $z_0/H_0 \sim \zeta$ の関係(図-17)から、任意の ζ に対する不透水境界の ζ

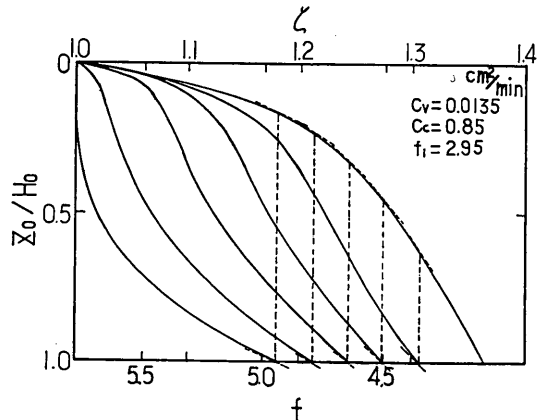


図-17 不透水境界の決定

の勾配と、圧密終了後の定常状態における ζ の勾配を比較することによってチェックできる。図から判断すると両者は精度的に満足いく範囲内で十分一致している。

(4) 時間~沈下曲線および間げき水圧分布

模型粘土地盤の自重圧密沈下量の実測値を 図-18 に示す。6.2 および 6.3 で得られた $f \sim \log p'$ 関係、圧密係数は表-4 に示す通りであるが、模型粘土地盤の最大圧密圧力は層底部において 0.027 kg/cm² であり圧密試験の結果はそれより大きな圧密圧力に対するものであるから $f \sim \log p'$ 関係は直線部分をそのまま延長して用いて

超軟弱粘土の圧密定数の決定法

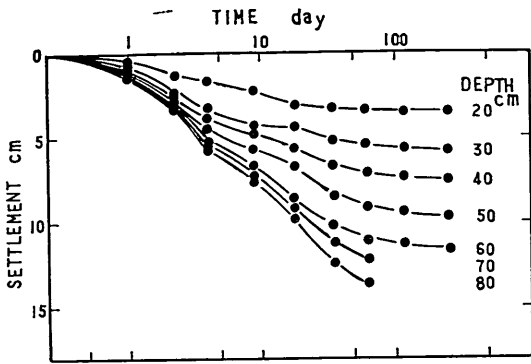


図-18 模型粘土地盤の実測沈下～時間曲線

表-4 各試験法による圧密定数

	CRS test	STD test	A test
f_1	2.95	3.02	2.99
C_c	0.85	0.78	0.96
C_v (cm ² /min)	0.0135	0.035	0.020

いる。標準圧密試験の場合の圧密係数は、試料の圧密係数を一定と仮定しているため正規部分における値をそのまま採用した。

図-19 に理論沈下量と実測沈下量を示している。沈下量の測定において模型粘土地盤表面から 10 cm, 20 cm の位置の沈下板が途中で測定不可能になったので地表面から 30 cm の位置における値を用いて理論値との比較を行なった。図から定率ひずみ圧密試験法による結果を用いた理論曲線は実測沈下曲線にはほぼ一致していることが明らかである。最終沈下量において実測値と理論値に若干差がみられるがこれは圧密圧力が非常に小さな箇所における $f \sim \log p'$ 関係が図-8(a) に示されるように

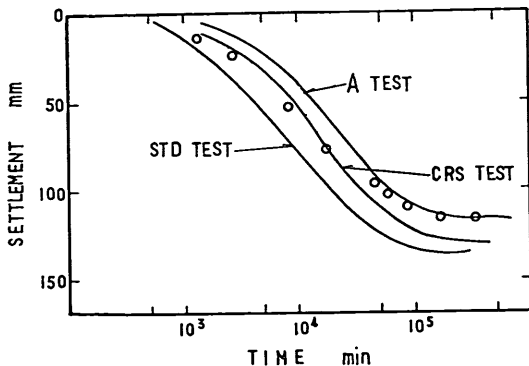


図-19 時間～沈下曲線の実測値および理論値

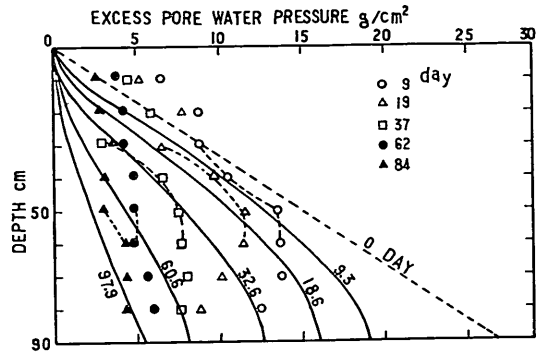


図-20 過剰間げき水圧の実測値と理論値

やや上にずれることを考慮すると理論沈下量は実測沈下量に近づくことが予想される。

図-20 には定率ひずみ試験から求められた結果を用いて模型粘土層内の間げき水圧分布を求めたものである。実測間げき水圧は、絶対量が小さくかつ間げき水圧計埋設位置のずれなどを考えると求められた結果の信頼性は低いが、初期 (9 day) の間げき水圧分布が妥当と思われる深さ 30, 40, 50, 60 cm の位置の間げき水圧の、時間的な推移をみれば、理論計算とはほぼ一致している。

以上のことは超軟弱粘土の圧密定数の決定法としてひずみ速度の小さな定率ひずみによる圧密試験法が十分適用できることを示しており、4.3 で述べた $f \sim \log p'$ 関係および圧密係数の決定法の妥当性を示すものである。

7. 結 論

超軟弱粘土とよばれる高含水比粘土の圧密試験法として定率ひずみによる圧密試験を実施し試験より得られるデータを用いて $f \sim \log p'$ 関係および圧密係数 C_v を決定する方法を提案した。この方法によって求められた $f \sim \log p'$ 関係、 C_v を用いて模型粘土地盤の自重圧密現象の解析を行ない実測値と比較した結果次の事項が明らかとなった。

1. 従来の研究では周面摩擦係数は有効圧密圧力に反比例するとされているが、超軟弱粘土の圧密試験の結果では圧密圧力が 1.3 kg/cm² 以下になると周面摩擦係数は減少する傾向にある。したがって超軟弱粘土の $f \sim \log p'$ 関係におよぼす周面摩擦の影響は圧密圧力の小さな箇所ではほとんど無視できる。

2. 定率ひずみ圧密試験では供試体の変形条件をみたとすように圧密基礎方程式を解き供試体上下端の $f(0, t)$, $f(H_0, t)$ を求め、実測された $p'(0, t)$, $p'(H_0, t)$ との関

係を求めることにより $f \sim \log p'$ 関係および圧密係数を同時に決定することができる。

3. $f \sim \log p'$ 関係は実用的には 4.3(1) の式(11) による f_{av} および 6.3 の式(21)による p'_{av} の関係として求めることができるが、ひずみ速度が過大になると $f_{av} \sim \log p'_{av}$ によって $f \sim \log p'$ 関係を求めることはできない。 $f_{av} \sim \log p'_{av}$ が実用的に採用されるひずみ速度は 0.1~0.2%/min 以下であろう。

4. $f_{av} \sim \log p'_{av}$ が定められればあらかじめ $\zeta(H_0, t) \sim t$ の関係図を描いておき、各時間において実測された $p'(H_0, t)$ から $f_{av} \sim \log p'_{av}$ 関係を用いて $\zeta(H_0, t)$ を求め図上にプロットすることにより容易に圧密定数が決定される。

5. 本報文中で提案された超軟弱粘土の圧密定数の決定法によって求められた $f \sim \log p'$ 関係、 C_v を用いて模型粘土地盤の自重圧密現象を解析した結果は実測された時間~沈下曲線および粘土層中の間げき水圧分布をよく説明する。

8. あとがき

本報文中で提案した超軟弱粘土の圧密試験によって得られた $f \sim \log p'$ 関係および圧密係数を用いて模型粘土地盤の自重圧密現象を解析し、実測時間~沈下曲線および間げき水圧分布と比較することによってその妥当性を調べた結果、ひずみ速度が比較的緩やかな定率ひずみ圧密試験によって超軟弱粘土の圧密諸定数が決定できることが明らかになった。この方法はこれまで浚渫による埋立地盤のように著しく含水比の高い粘性土に対する厳密な試験法がみあたらない現状においては有効な手段といえよう。また浚渫後埋立地盤を早急に造成する必要性が生じた場合などにはサンドドレーンやプレローディング工法などが行なわれることが予想されるが、その際地盤の圧密特性を把握するのに本方法は非常に有用な手段であろう。

おわりに、本研究にあたって元研修生早川秀行氏(東亜建設工業株式会社)および元東海大学学生余吾伊佐男氏、また土性研究室吉沢光三氏に御協力いただいた。図面の作成にあたっては土性研究室佐藤長成運輸技官の手をわずらわせた。さらに本報文のとりまとめ段階で松並仁茂土質部長、地盤改良研究室奥村達郎室長、松本一明サンプリング主任研究官から有益な助言をいただいた。関係各位の方々に深謝の謝意を表します。

なお本研究の全般的指導は梅原がこれにあたり、善が

実験結果の解析、報告のとりまとめを行なった。

(1975年9月30日受付)

参 考 文 献

- 1) 柳瀬重靖：軟弱地盤における埋立工事施工例，港湾技術研究所資料，第18号，1965年7月
- 2) 三笠正人：軟弱粘土の圧密—新理論とその応用—，鹿島出版会，1963年10月
- 3) Gibson, R. E., G. L. England and M. J. L. Hussey: The Theory of One-dimensional Consolidation of Saturated Clays, Geotechnique, Vol. 17, 1967
- 4) 奥村達郎：急速圧密試験について，第19回土質工学シンポジウム—圧密試験とその結果の解釈—，土質工学会，1974年
- 5) P. M. Byrne and Y. Aoki: The Strain Controlled Consolidation Test, Soil Mechanics Series No. 9, The University of British Columbia, 1969
- 6) R. E. Smith and H. E. Wahls: Consolidation under Constant Rate of Strain, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 95, No. SM 2, March, 1969
- 7) A. E. Z. Wissa, J. T. Christian, E. H. Davis, and S. Heiberg: Consolidation at Constant Rate of Strain, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 97, No. SM 10, Oct., 1971
- 8) H. Monden: Characteristics of Side Friction in the One-dimensional Consolidation, Soils and Foundations, Vol. 9, No. 1, 1969
- 9) D. W. Taylor: Research on Consolidation of Clays, Rept. MIT, Aug., 1942
- 10) A. Nakase: Side Friction in Conventional Consolidation Tests, Report of Port and Harbour Technical Research Institute, No. 3, Jun., 1963
- 11) 梅原靖文，松本一明，成田実，梅田裕史：連続載荷方式による急速圧密試験，港湾技術研究所報告，第12巻，第4号，1973年12月

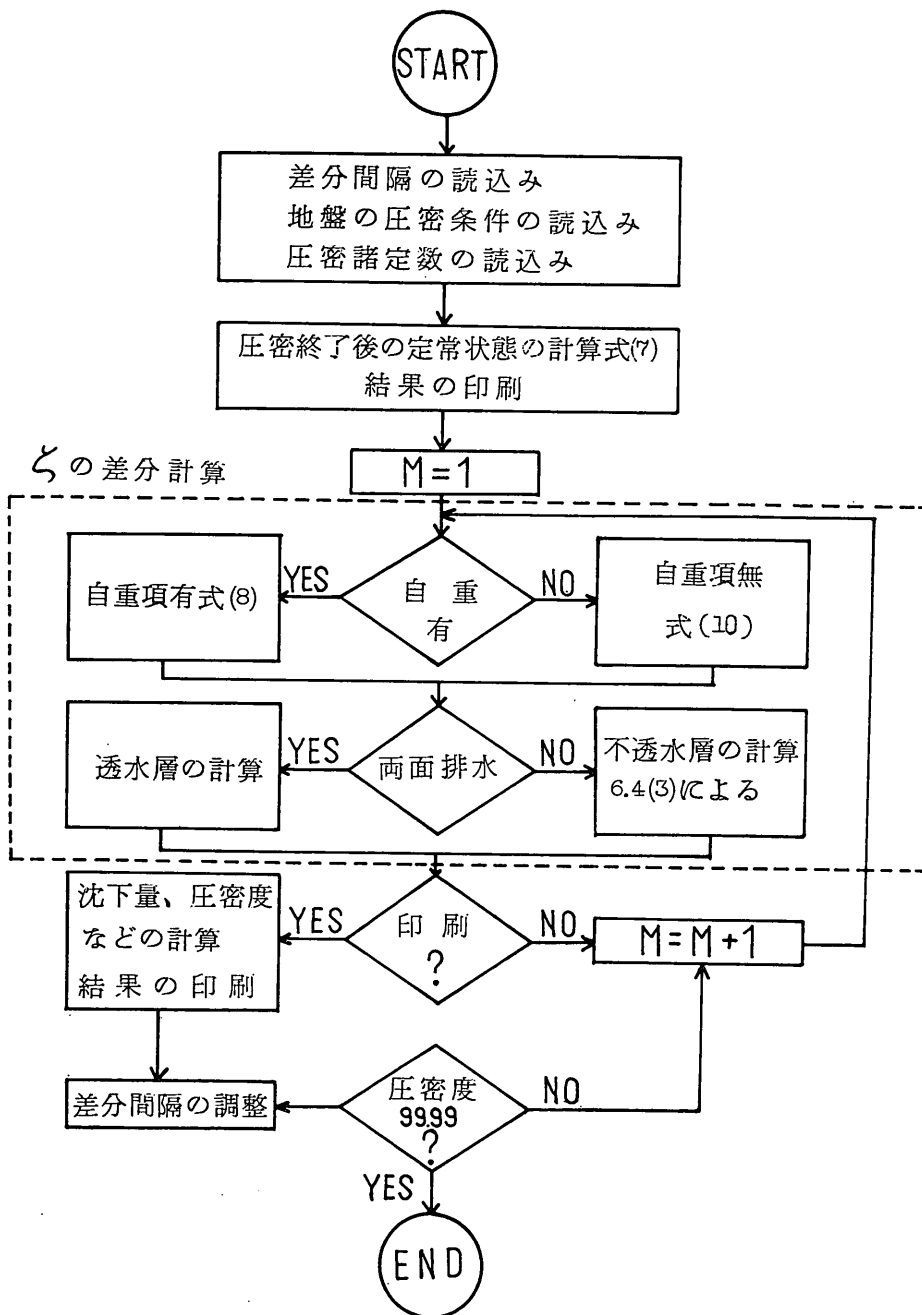
記 号 表

- a : 座標軸
- C_c : 圧縮指数
- C_v : 圧密係数
- e : 間げき比
- e_0 : 初期間げき比
- f : 体積比
- f_0 : 初期体積比
- f_1 : 定数
- $f(0, t)$: 時間 t における供試体上端面の体積比
- $f(H_0, t)$: 時間 t における供試体下端面の体積比

超軟弱粘土の圧密定数の決定法

f_{av} : 実測平均体積比	v : 間げき水の土粒子に対する相対的流速
\bar{f}_{av} : 計算平均体積比	v_0 : 圧密終了後の間げき水の定常的な流速
Δf : $f_{av} - f(0, t)$	w : 含水比
$\Delta \bar{f}$: $\bar{f}_{av} - f_{av}$	w_0 : 初期含水比
G_s : 土粒子比重	w_L : 液性限界
H_0 : 初期層厚	w_p : 塑性限界
H_s : 土粒子実質部分の厚さ	z : 座標軸
I_L : 液性指数	z_0 : 座標軸
I_p : 塑性指数	ϵ : ひずみ
m_v : 体積圧縮係数	ϵ_{av} : 平均ひずみ
p' : 有効圧密圧力	γ' : 水中単位体積重量
$p'(0, t)$: 時間 t における供試体上端面の有効応力	γ'_0 : 初期水中単位体積重量
$p'(H_0, t)$: 時間 t における供試体下端面の有効応力	γ_t : 湿潤単位体積重量
p'_{av} : 平均圧密圧力	γ_d : 乾燥単位体積重量
$\Delta p'$: 供試体上下面の圧力差	ζ : f_0/f
R : 供試体半径	$\zeta(0, t)$: 時間 t における供試体上端面の ζ
r : ひずみ速度	$\zeta(H_0, t)$: 時間 t における供試体下端面の ζ
S : 全沈下量	ζ_{av} : f_0/f_{av}
\bar{S} : 全沈下量	$\bar{\zeta}$: 時間 t と $t + \Delta t$ 間の平均的な ζ
t : 時間	μ : 周面摩擦係数
u : 過剰間げき水圧	τ : 接線応力

付図-1 圧密計算フローチャート



超軟弱粘土の圧密定数の決定法

付表-1 圧密解析プログラムの入力と出力

	項 目	細 目	記 号	単 位
入	差 分 間 隔	空間メッシュ数(偶数) 時間メッシュ単位	n Δt	min
	地盤の初期条件	初期層厚 土粒子水中単位体積重量 初期体積比 上 載 荷 重	H_0 γ'_0 f_0 p	cm kg/cm ³ kg/cm ²
	圧 密 条 件	不透水層の有無 載荷条件(定荷重, 定率ひずみ, 定率漸増) 自重項の有無		
力	圧 密 定 数	$f \sim \log p'$ 関係 (f_1, C_c) 圧 密 係 数 C_v		cm ² /min
出	全層について	圧密経過時間 全 沈 下 量 平均圧密度	t S U	min cm
	各深さについて	深さの無次元量 ひずみ (z_0 に対するもの) 各深さの圧密度 体 積 比 有 効 応 力 過剰間げき水圧	z_0/H_0 ε U_{z_0} f p' u	kg/cm ² kg/cm ²