

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

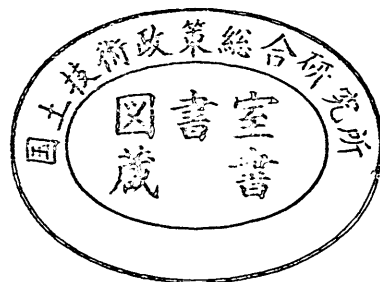
---

VOL. 18

NO. 1

MAR. 1979

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第18巻 第1号 (Vol. 18, No. 1), 1979年3月 (Mar. 1979)

## 目 次 (CONTENTS)

|                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 港湾技術研究所報告および港湾技研資料に用いる量記号および単位記号について.....                                                                                | 3   |
| 1. A Review on Statistical Interpretation of Wave Data<br>.....Yoshimi GODA.....                                         | 5   |
| (波浪資料の統計的取扱いに関する考察.....合田良実)                                                                                             |     |
| 2. 超軟弱粘土の圧密試験法とその適用.....梅原靖文・善巧企.....                                                                                    | 33  |
| (Consolidation Test Method of Very Soft Clays and Its Application<br>.....Yasufumi UMEHARA and Kouki ZEN)                |     |
| 3. 矢板岸壁地震時被災の分析.....北島昭一・上部達生.....                                                                                       | 67  |
| (Analysis on Seismic Damage in Anchored Sheet-piling Bulkheads<br>.....Shoichi KITAJIMA and Tatsuo UWABE)                |     |
| 4. 港湾計画における財政に関する研究(第一報)——港湾管理者財政の現状<br>と特徴——.....矢島道夫・中村松子・稲村肇.....                                                     | 129 |
| (An Analysis of Financial Conditions of Port Management Body<br>.....Michio YAJIMA, Matsuko NAKAMURA and Hajime INAMURA) |     |
| 5. 超高圧水ジェットによる岩盤掘削.....東海林秀幸・中島忠男.....                                                                                   | 177 |
| (Rock Excavation by High Pressure Water Jets<br>.....Hideyuki SHOJI and Tadao NAKAJIMA)                                  |     |

## 2. 超軟弱粘土の圧密試験法とその適用

梅 原 靖 文\*・善 功 企\*\*

### 要 旨

浚渫による埋立地盤のような超軟弱地盤の沈下予測には、自重ならびに層厚変化の影響が無視できない。このような場合に対する圧密沈下計算法は三笠により提案されているが、慣用の標準圧密試験法により計算に必要な圧密定数を合理的に定めるのは困難である。そこで、定率ひずみ圧密試験法の活用を前に提案したが、本報告では実用上の便をはかるため、定率ひずみ条件ならびに層厚変化を考慮した無次元表示の圧密基本式の差分分解より作成した図表を用い、超軟弱粘土の圧密定数を合理的に決定する方法を新たに提案している。本方式の圧密試験法により我国の代表的な港湾の超軟弱土の特性を調べ、さらに沈降実験により超微小応力領域における特性を調べ、あわせて両者の連続性を検討した。さらに、模型地盤における自重圧密実験を実施し、観測結果を上述の方法により得られた圧密定数を用いて解析し、その妥当性を検討するとともに、現地埋立地盤への適用方法に関する考察を行った。

---

\* 土質部動土質研究室長

\*\* 土質部振動土性主任研究官

## 2. Consolidation Test Method of Very Soft Clays and Its Application

Yasufumi UMEHARA\*

Kouki ZEN\*\*

### Synopsis

The conventional oedometer test based on Terzaghi's one dimensional consolidation theory is not applicable to very soft clays with high water content. As an alternative, the constant rate of strain consolidation test (CRS-Test) was proposed to determine the consolidation constants for very soft clays in the previous report.

In the present report, more convenient method based on the new interpretation of the CRS-Test results is proposed. Three kinds of diagrams are constructed on the basis of the finite difference solutions for the basic equation of consolidation under the large strain effects. The experimental data of consolidation under constant rate of strain can be analysed for determining consolidation constants by using such diagrams.

The CRS-tests and sedimentation tests were conducted on the very soft soils taken in several harbors in Japan. From two types of test results, the consolidation characteristics of such soils were examined in the extensive range of pressure. For one of such very soft soils, the self-weight consolidation experiment was conducted to observe the settlement and the pore water pressure distribution of the model fill. Analytical results show a reasonably good agreement between the calculated and measured values enough to confirm the validity of consolidation constants determined in the procedure described above.

A general procedure for predicting the settlement in the reclamation land is also presented.

---

\* Chief of Soil Dynamics Laboratory, Soils Division

\*\* Senior Research Engineer, Soils Division

## 目 次

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| 要 旨                                             | 33 |
| 1. ま え が き                                      | 37 |
| 2. 従来に関連研究                                      | 37 |
| 3. 大ひずみを考慮した定率ひずみ圧密試験の解釈                        | 38 |
| 3.1 圧密基本式と定率ひずみ条件のもとでの差分表示                      | 38 |
| 3.2 定率ひずみ条件のもとでの差分解                             | 38 |
| 3.3 応力ひずみ関係の導入                                  | 44 |
| 3.4 圧縮曲線 $f = \log \sigma'$ 関係および圧密係数 $c_v$ の決定 | 44 |
| 4. 超軟弱粘土の圧密および沈降試験                              | 45 |
| 4.1 実 験 装 置                                     | 45 |
| 4.2 試 料                                         | 46 |
| 4.3 実 験 方 法                                     | 47 |
| 5. 超軟弱粘土の圧密定数                                   | 49 |
| 5.1 定率ひずみ圧密試験結果                                 | 49 |
| 5.2 超低応力下の圧密定数                                  | 54 |
| 5.3 広範囲のオーダーの圧力領域における圧密定数                       | 56 |
| 6. 埋立地盤の圧密沈下解析への適用                              | 60 |
| 6.1 実 験 装 置                                     | 60 |
| 6.2 試料および実験方法                                   | 60 |
| 6.3 時間沈下曲線の検討                                   | 60 |
| 6.4 過剰間げき水圧の時間的変化の検討                            | 61 |
| 6.5 現地埋立地盤の圧密沈下解析への適用                           | 62 |
| 7. 結 論                                          | 63 |
| 8. あ と が き                                      | 64 |
| 参 考 文 献                                         | 64 |
| 記 号 表                                           | 65 |

## 1. ま え が き

我国の港湾地域には、軟弱な沖積粘土層が多く、これらをしゅんせつすることにより造成された埋立地盤は、一般に高含水状態となり、しかも、埋立直後は末圧密状態にある。したがって、埋立地の沈下は、自重によるものが支配的となるのみならず、沈下量自体も埋立層厚にくらべて大きくなる。このような場合の沈下予測は、慣用のテルツァギ理論を用いて行うことができず、三笠<sup>1)</sup>や Monte 他<sup>2)</sup>のように、自重ならびに層厚変化を考慮した圧密理論に依存する必要がある。

この場合、特に問題となるのは、応力レベルの低い領域における超軟弱粘土の圧密定数の求め方である。一般の標準圧密試験法の超軟弱粘土への適用は理論的にも、また、実験手法的にもいくつかの制約が存在し、著しく信頼性の低いものとなる。このような問題点に対処するため、定率ひずみ方式にもとづく圧密試験法を用いることを以前に提案した<sup>3)</sup>。同様の観点から、今井<sup>4)</sup>は浸透力による圧密試験法を提案している。

前に報告した提案では、定率ひずみ圧密試験結果からフィッティング法により三笠の圧密理論に適合する定数を求める方法を用いたため、試験結果の解釈が煩雑となり実用上の不便をもたらしていた。今回、このような不便を解消するため、三笠の圧密基本式を定率ひずみ圧密条件を考慮した無次元表示の差分方程式になおし、その差分解にもとづいて作成された図表を用い、超軟弱地盤の沈下解析に必要な圧密定数を合理的に決定する方法を新たに提案し<sup>5)</sup>、この方法により、我国の代表的な港湾における超軟弱土の圧密特性を調べた<sup>6)</sup>。この試験は、定率ひずみ条件のもとにおける応力および間げき水圧の時間的変化を計測するものであり、供試体の自重が無視できる程度 ( $10^{-3}$  kgf/cm<sup>2</sup>) 以上の圧力領域に対して、原理的には適用可能である。実際の埋立地盤における自重圧密沈下計算は  $10^{-2}$  kgf/cm<sup>2</sup> ~  $0.5$  kgf/cm<sup>2</sup> 程度の範囲を計測できれば十分であるが、今回、とくに、超微小応力領域における特性との連続性を検討するため、沈降実験結果を利用する方法<sup>7)</sup>も併用しており、合わせて報告する。さらに、超軟弱粘土により作成された模型地盤の自重圧密過程における間げき水圧と沈下の深さ方向分布性状の観測結果を本方式により求めた圧密定数を用いて解析し、その適用性ならびに問題点を検討した。

## 2. 従来の関連研究

慣用の標準圧密試験法は超軟弱粘土に対しては、理論的かつ実験手法的な適用限界を有している。理論的な限界としては層厚の変化を無視しているが、超軟弱粘土の圧密の場合にはこの影響が大きいことが指摘される。一方、実験手法的には、供試体がスラリー状をなし、衝撃的な載荷による試料のもれ出しが生ずること、まさつの影響を含め、小さい応力領域の測定精度が低いことがあげられる<sup>8)</sup>。したがって超軟弱粘土の圧密試験法は、上述のような問題点に対処しうるものでなければならない。

層厚の変化を考慮した圧密理論は、三笠<sup>1)</sup>、Gibson 他<sup>9)</sup>により導かれている。圧密にともなう層厚の変化を考慮した圧密基礎方程式を導くにあたって、両者で、座標系のとり方が異なっており、三笠がオイラー座標を用いているのに対し、Gibson 他はラグランジェ座標系を採用している。また、Monte 他<sup>2)</sup>もラグランジェ座標系を用い、大変形を考慮した一次元数学モデルを導いている。

一方、標準圧密試験における瞬間載荷にともなう試料のもれ出しならびに低い応力領域における測定精度の問題点は、非常に小さい応力または変位を徐々にかつ連続的に与えられる試験法を用いることにより対処可能と考えられる。このような試験法は、荷重、変位、間げき水圧のうちの一つを制御する方式の圧密試験法にもとめられ、それぞれ、定率漸増載荷圧密試験法<sup>9), 10)</sup>、定率ひずみ圧密試験法<sup>10) ~ 16)</sup>、動水こう配一定圧密試験法<sup>17)</sup>がある。これらはいずれも、急速圧密試験を主目的として用いられている。これらの方式のうち、いずれのものが最適であるかは、目的に応じて変わるものであり、一がいに断定できないが、急速圧密試験法としての観点からは、定率ひずみ型式が若干良いとも考えられている<sup>18)</sup>。

定率ひずみ圧密試験法は Hamilton 他<sup>11)</sup>により、先行圧密圧力および  $e \sim \log p$  曲線の早期決定法として最初に用いられたものであるが、その後、Smith 他<sup>14)</sup>、Byrne 他<sup>15)</sup>により  $e \sim \log p$  関係の他に、圧密試験のもう一つの目的である圧密係数  $c_v$  を求めるための理論的アプローチが試みられた。Smith 他<sup>14)</sup>は、土の透水係数は任意の時間において、供試体内で一定であり、間げき比に比例して変化するという仮定を設けている。これらの仮定のもとで誘導された間げき水圧分布の式にもとづき、圧密係数  $c_v$  と平均圧密圧力の両者を決定する式を示している。

Wissa 他<sup>18)</sup>は微小ひずみを仮定し、三笠<sup>1)</sup>や Davis 他<sup>19)</sup>により提示されたひずみによる圧密基礎方程式を用い、任意の透水係数  $k$  および体積圧縮係数  $m_v$  の変化に対する圧密係数  $c_v = \frac{k}{\gamma_w m_v} = \text{一定}$  と仮定して定率ひずみ条件のもとにおける供試体内のひずみ分布の式を導いている。これらの式は過渡状態および定常状態におけるひずみの両成分からなっている。これらの解にもとづいて、圧密係数  $c_v$  および平均有効応力を線形ならびに非線形材料に対して求めている。Wissa 他<sup>18)</sup>の微小変形を仮定した場合の非線形材料に対する圧密定数決定法は、大変形を仮定した圧密理論の場合に拡張され、後述の超軟弱土の圧密試験法に活用されている。

### 3. 大ひずみを考慮した定率ひずみ圧密試験の解釈

#### 3.1 圧密基本式と定率ひずみ条件のもとでの差分表示

従来、主として、急速圧密試験法として採用されている定率ひずみ方式の圧密試験の場合には、微小ひずみを仮定した圧密理論式にもとづいて圧密定数が決定されている。ところが、超軟弱土の場合を対象として、スラリー状態から圧密する場合には、もはや、微小ひずみの存在の仮定は成立しなくなる。

粘土層厚の変化、すなわち、大ひずみの影響および自重の影響を考慮した圧密理論式は三笠<sup>1)</sup>により提案されている。小さい供試体に関する圧密試験の場合には、自重の影響は無視できるので、層厚変化のみを考慮するものとする。圧密係数  $c_v$  が一定とみなしう場合には、圧密基本式は (3.1) 式で与えられる。

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = c_v \zeta^2 \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z_0^2} \quad (3.1)$$

ここに、 $\zeta = f_0/f$ : 圧密比、 $f_0, f$ : 初期および任意の時間における体積比、 $z_0$ : 圧密開始前の固定座標系の値で、上端に原点をとる。また、 $\zeta$  とひずみ  $\bar{\epsilon}$  の間には  $\zeta = 1/(1-\bar{\epsilon})$  の関係がある。

圧密基本式 (3.1) を採用することにより、大ひずみを考慮し、定率ひずみ条件で圧密した場合の (3.1) 式の解を以下のようにして求める。

供試体が一定の変位速度  $R$  で載荷されるものとする。と、時間  $t$  における供試体の高さ変化  $\Delta H_0$  は  $\Delta H_0 = Rt$  となるので、この時の平均ひずみ  $\Delta H_0/H_0$  は

$$\frac{\Delta H_0}{H_0} = \frac{Rt}{H_0} = T' \quad (3.2)$$

ここに、 $H_0$ : 初期高さ、 $T'$ : 無次元時間である。

(3.1) 式は、解析解が得られない型であるので、差分方程式を用い、数値解を求めることとする。(3.1) 式を差分式になおすと (3.3) 式で表わされる。

$$\begin{aligned} & \zeta(z_0, t + \Delta t) \\ &= \frac{c_v \Delta t}{\Delta z_0^2} \cdot \bar{\zeta}^2 \{ \zeta(z_0 + \Delta z_0, t) - 2\zeta(z_0, t) + \zeta(z_0 - \Delta z_0, t) \} \\ &+ \zeta(z_0, t) \end{aligned} \quad (3.3)$$

ここに、 $\bar{\zeta}$  は  $\zeta(z_0, t)$  と  $\zeta(z_0, t + \Delta t)$  の中間の値である。

深さ方向の差分間隔を  $n$  等分するものとし、また、計算結果の整理の便宜上、定率ひずみ条件を考慮に入れて次の無次元表示を用いる。

$$\left. \begin{aligned} Z_0 &= \frac{z_0}{H_0} \\ \Delta Z_0 &= \frac{1}{n} \\ \frac{c_v \Delta t}{\Delta z_0^2} &= n^2 \left( \frac{c_v}{RH_0} \right) \frac{R \Delta t}{H_0} = n^2 \left( \frac{c_v}{RH_0} \right) \cdot \Delta T' \end{aligned} \right\} \quad (3.4)$$

これらの無次元表示を用い、変数  $(z_0, t)$  の関数  $\zeta(z_0, t)$ 、 $\bar{\epsilon}(Z_0, t)$  が無次元変数  $(Z_0, T')$  の関数  $\zeta(Z_0, T')$ 、 $\bar{\epsilon}(Z_0, T')$  に対応するものとする (3.3) 式は次のように表わされる。

$$\begin{aligned} & \zeta(Z_0, T' + \Delta T') - \zeta(Z_0, T') \\ &= n^2 \left( \frac{c_v}{RH_0} \right) \Delta T' \cdot \bar{\zeta}^2 \{ \zeta(Z_0 + \Delta Z_0, T') \\ &- 2\zeta(Z_0, T') + \zeta(Z_0 - \Delta Z_0, T') \} \end{aligned} \quad (3.5)$$

(3.5) 式において  $\bar{\zeta}$  は  $\zeta(Z_0, T')$  と  $\zeta(Z_0, T' + \Delta T')$  の中間の値である。

#### 3.2 定率ひずみ条件のもとでの差分分解

上面排水、下端不透水の片面排水条件とすると供試体の初期条件および境界条件はそれぞれ (3.6) 式、(3.7) 式で与えられる。

$$\text{初期条件: } \zeta(Z_0, 0) = 1 \quad (3.6)$$

$$\left. \begin{aligned} & \text{境界条件: } \zeta(0, T') = \phi(T') \\ & \left( \frac{\partial \zeta(Z_0, T')}{\partial Z_0} \right)_{Z_0=1} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (3.7)$$

頭部境界では圧密比  $\zeta$  が時間とともに変動していくが、定率ひずみ条件 (変位速度  $R$ : 一定) のもとで、この関数型  $\phi(T')$  を確定した型で与えることはできない。そこで、定率ひずみ圧密試験の過程において、実測されるものは供試体の平均ひずみ  $\Delta H_0/H_0$  であり、これが無次元時間係数  $T'$  に等しい、すなわち  $\Delta H_0/H_0 = T'$  で

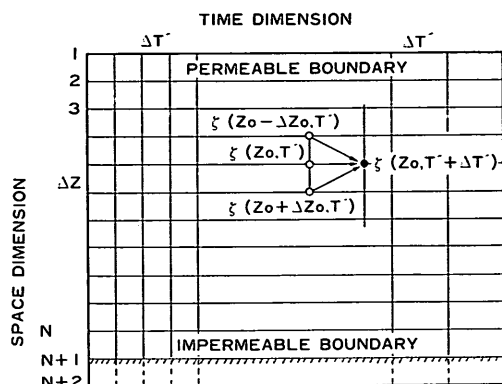


図-3.1 差分計算における差分メッシュ

あることから、第1近似として、 $\Delta T'$  経過後の  $\phi(T')$  の値を

$$\phi(\Delta T') = \frac{1}{1 - \bar{\epsilon}(0, \Delta T')} \quad (3.8)$$

とおく。式 (3.8) で与えられる頭部境界条件のもとで、図-3.1 に示した格子間隔の無次元時間  $\Delta T'$  において、差分計算を実施し、 $\Delta T'$  におけるひずみ分布を求め、その積分の値として算定される変位が供試体の変形条件を満足するよう  $\phi(T')$  の値を修正し、次のステップの差分計算の頭部境界条件として用いる。

下端面の境界条件は図-3.1 に示したように、不透水層下端に等間隔の仮想分割点を仮定することにより求める。

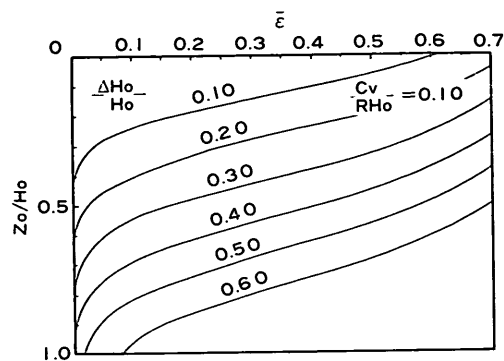
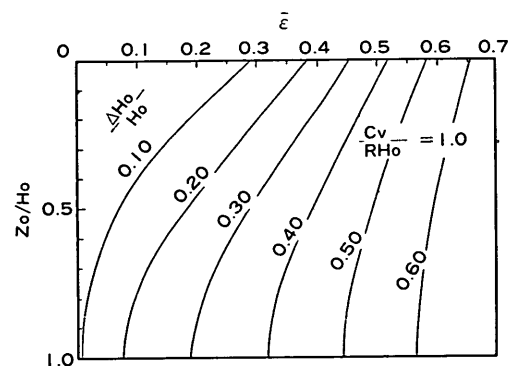
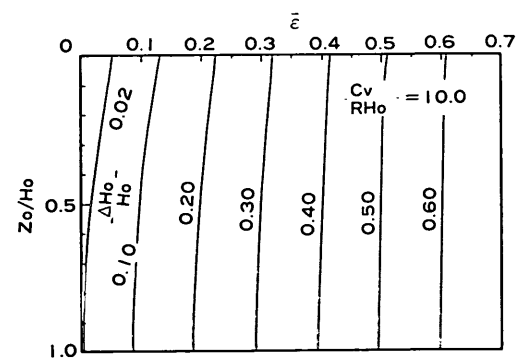
上述のようにして、(3.6) 式の初期条件および (3.7) 式の境界条件を満たす (3.5) 式の数値解、すなわち、圧密比  $\zeta$  が与えられた圧密係数の無次元量  $c_v/RH_0$  に対し、無次元表示の深さ  $Z_0$  および無次元時間  $T'$  の関数として求められる。

図-3.2a, b, c はパラメーター  $c_v/RH_0 = 0.1, 1.0, 10$  に対する供試体内部のひずみ分布の変化を示す。図中のひずみ  $\bar{\epsilon}$  と圧密比  $\zeta$  あるいは体積比  $f$  の間には次の関係がある<sup>1)</sup>。

$$\bar{\epsilon} = 1 - \frac{1}{\zeta} = 1 - \frac{f}{f_0} \quad (3.9)$$

図-3.2a~c のパラメーター  $\Delta H_0/H_0$  は供試体の平均ひずみを表わすものであるが、同時に定率ひずみ条件より、(3.2) 式で表わされるように無次元時間をも表わす。

つぎに、図-3.2a, 図-3.2b および 図-3.2c のように  $c_v/RH_0$  が与えられた時の供試体上下両端における圧密

図-3.2a 平均ひずみの変化に対する供試体内のヒズミ分布 ( $c_v/RH_0=0.1$  の場合)図-3.2b 平均ひずみの変化に対する供試体内のヒズミ分布 ( $c_v/RH_0=1.0$  の場合)図-3.2c 平均ひずみの変化に対する供試体内のヒズミ分布 ( $c_v/RH_0=10.0$  の場合)

比  $\zeta = f_0/f$  (式 (3.9) の関係からひずみ  $\bar{\epsilon}$  より求められる) の平均ひずみ  $\Delta H_0/H_0$  に対する変化を調べる。

図-3.3, 図-3.4a, 図-3.4b は、供試体上下両端面の圧



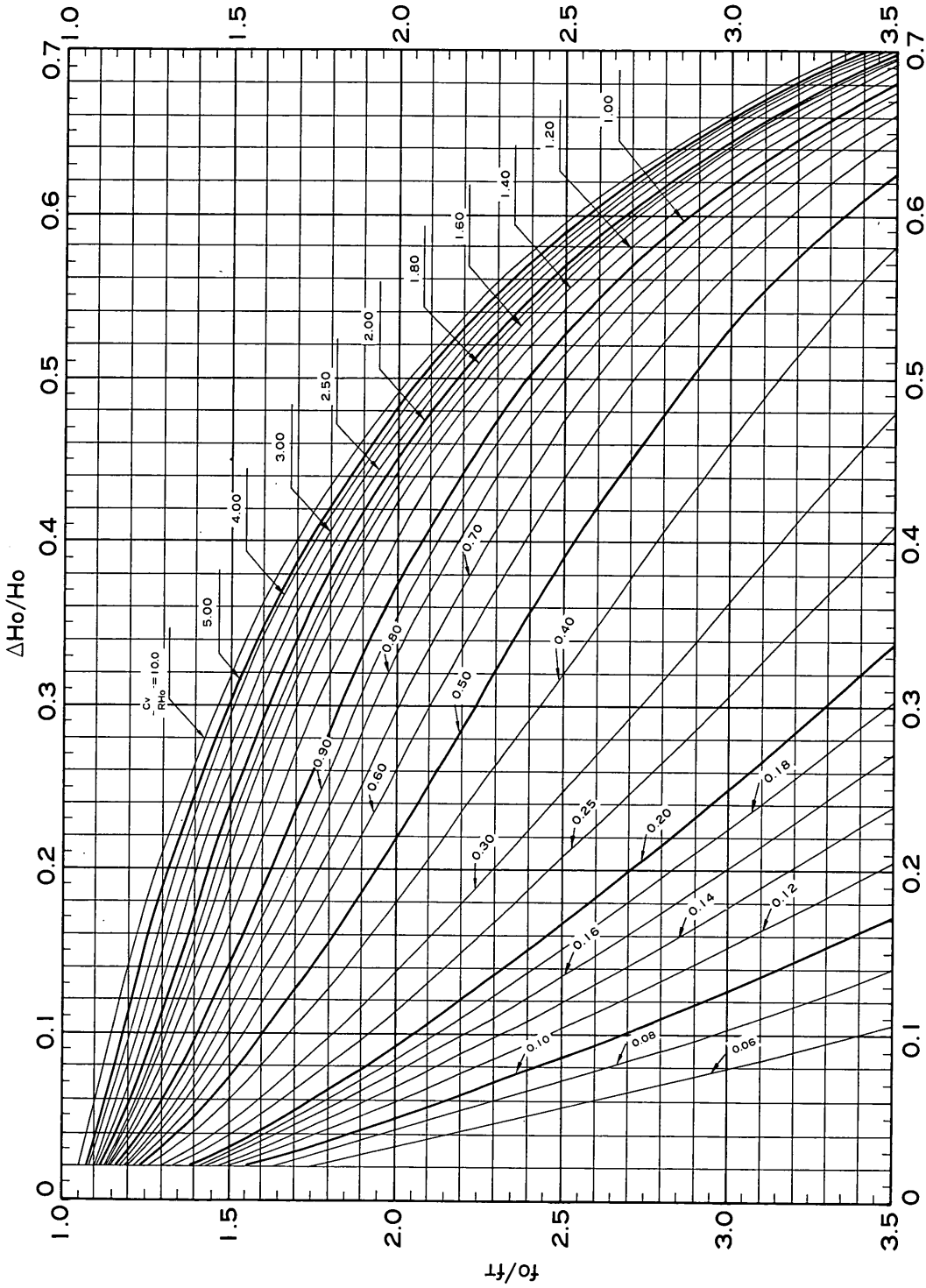


図-3.3 上端面の圧密比の平均ひずみに対する変化

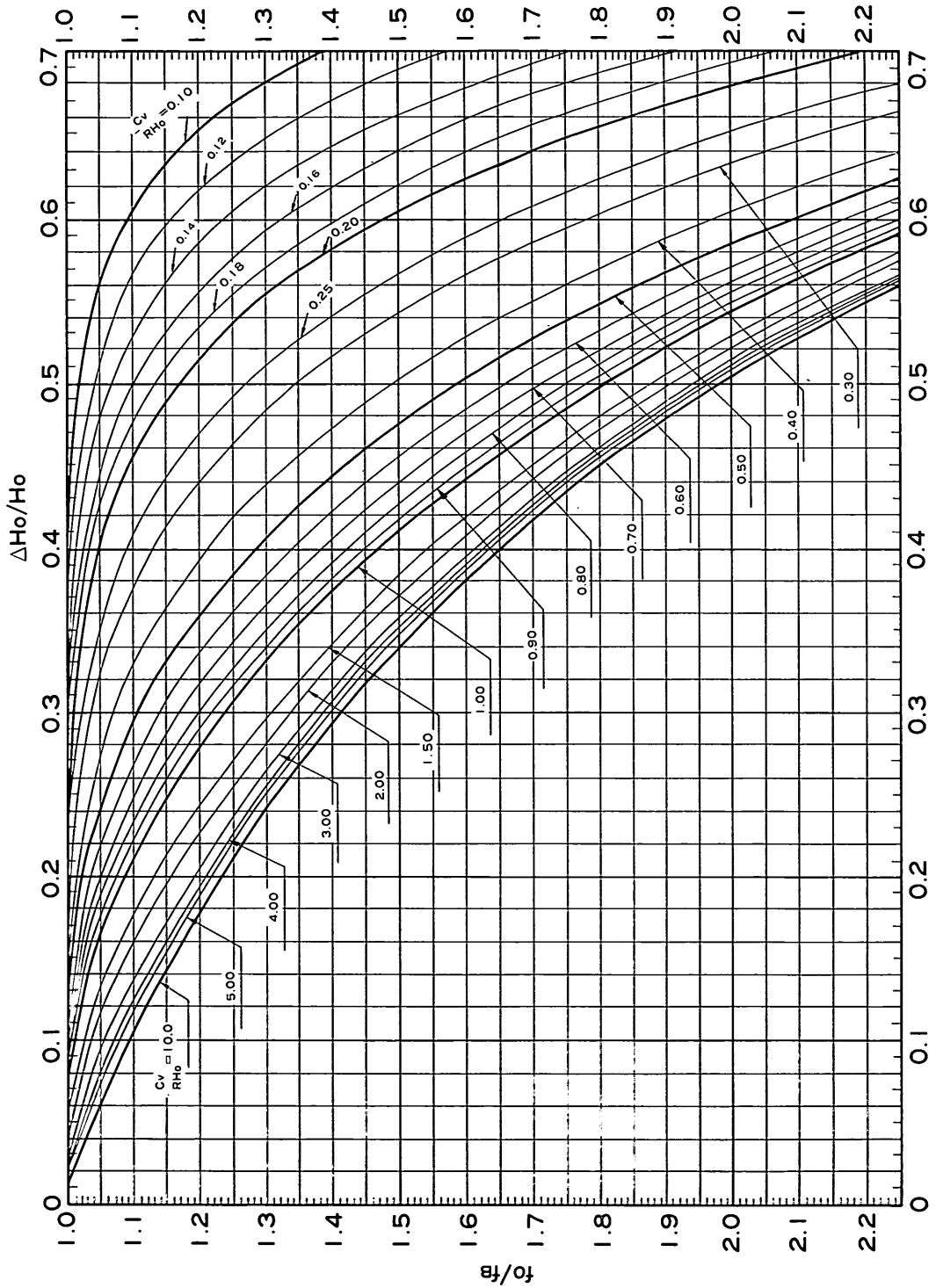


図-3.4 a 下端面の圧密比の平均ひずみに対する変化

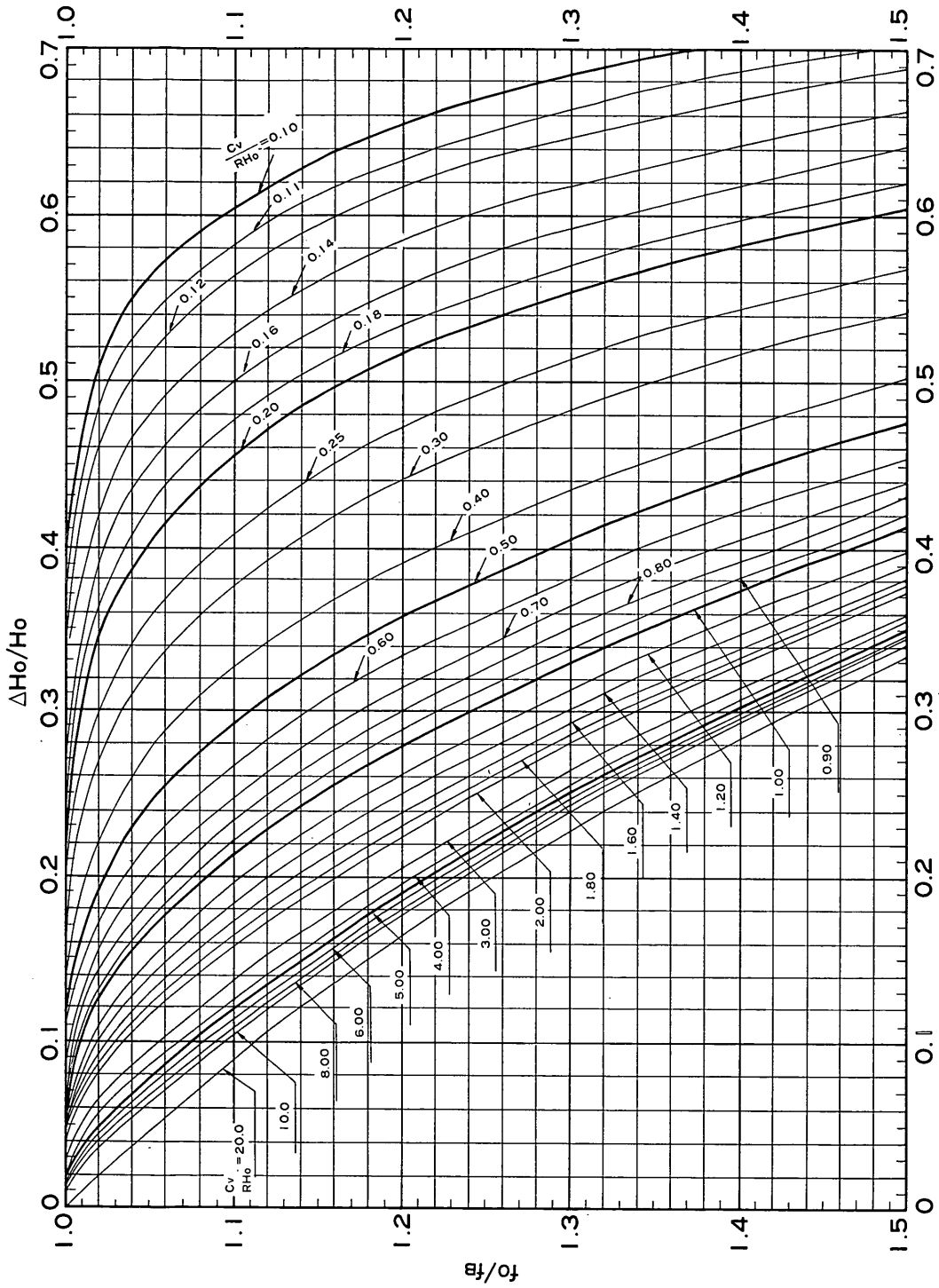


図-3.4b 下端面の圧密比の平均ひずみに対する変化 (図-3.4a の拡大図)

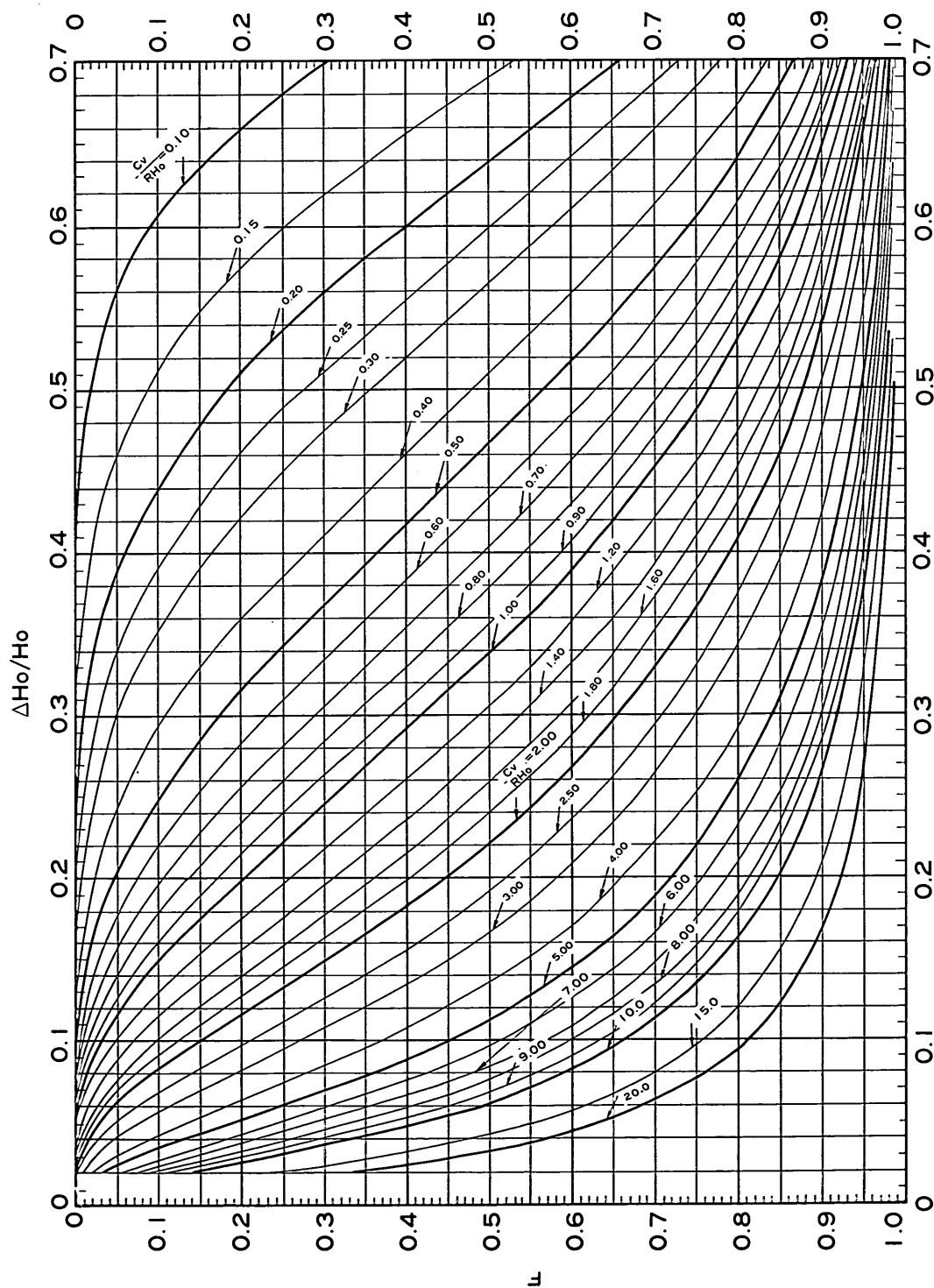


図-3.5 上下両端面のひずみの比の平均ひずみに対する変化

密比の平均ひずみ  $\Delta H_0/H_0$  に対する変化を  $c_0/RH_0$  をパラメーターとして表示したものである。ただし、図-3.4b は図-3.4a の縦軸を拡大して描いたものである。また、上下両端面のひずみの比をとり、平均ひずみ  $\Delta H_0/H_0$  に対する変化を  $c_0/RH_0$  をパラメーターとして表示したものを図-3.5 に示した。図-3.5 の  $F$  は上下両端面のひずみの比であり、(3.10) 式で与えられる。

$$F = \frac{\bar{\varepsilon}_{at Z_0=1}}{\bar{\varepsilon}_{at Z_0=0}} = \frac{1 - \frac{f_B}{f_0}}{1 - \frac{f_T}{f_0}} = \frac{\left(\frac{f_0}{f_B} - 1\right) \times \frac{f_0}{f_T}}{\left(\frac{f_0}{f_T} - 1\right) \times \frac{f_0}{f_B}} \quad (3.10)$$

ここに、 $f_T, f_B$  は上下両端面の体積比であり、また  $f_0/f_T, f_0/f_B$  はそれぞれ、上下両端面の圧密比を表わす。

図-3.3、図-3.4a、図-3.4b および 図-3.5 は、後述のように定率ひずみ圧密試験結果から、圧密定数を定めるために活用される。

### 3.3 応力ひずみ関係の導入

(3.5) 式の解、ならびに、それらをもとに作成された図-3.3、図-3.4a、図-3.4b、および 図-3.5 は応力-ひずみの関係とは無関係に成り立つものであるが、定率ひずみ圧密試験の結果を解釈するためには、応力-ひずみ関係を仮定することが必要である。慣用の一次元圧密理論では、ある有効応力増分  $\Delta\sigma'$  に対し、この間のひずみを  $\Delta\varepsilon$  とすると、体積圧縮係数  $m_v = \Delta\varepsilon/\Delta\sigma' = \text{一定}$  で与えられる線形的な応力-ひずみ関係を仮定している。微小な応力増分を考慮するかがり、線形的な応力-ひずみ関係は妥当なものと考えられるが、広範囲な応力領域を考慮する場合には、応力-ひずみ関係は非線形となり、体積比  $f$  (または間げき比  $e$ ) と有効応力  $\sigma'$  の関係は、半対数紙上で直線となる関係の存在が経験的事実として、一般的に知られている。そこで、このような事実を考慮して、本文では (3.11) 式で表わされるような非線形応力ひずみ関係を仮定するものとする。すなわち、

$$f = f_0 - C_c \log \left( \frac{\sigma'}{\sigma_0'} \right) \quad (3.11)$$

ここに、 $\sigma'$ : 有効応力、 $\sigma_0'$ : 初期平衡状態における有効応力、 $C_c$ : 圧縮指数、 $f$ : 体積比、 $f_0$ : 初期平衡状態における体積比である。

### 3.4 圧密係数 $c_v$ および $f \sim \log \sigma'$ 関係の決定

定率ひずみ圧密試験 (底面不透水、上面排水の片面排水条件) において実測されるものは、供試体の上下両端面における全応力  $\sigma_T, \sigma_B$  (まさつが無視できる場合、 $\sigma_T = \sigma_B = \sigma$ )、供試体底面の過剰間げき水圧  $u_h$ 、変位量

$\Delta H_0$  である。上下両端面の有効応力をそれぞれ  $\sigma_T', \sigma_B'$  とするとこれらはそれぞれ (3.11) を満足しなければならない。まさつが無視できるものとする、 $\sigma_T' = \sigma, \sigma_B' = \sigma - u_h$  であるので、頭部および底部のひずみ  $\bar{\varepsilon}_T, \bar{\varepsilon}_B$  はそれぞれ次式で表わされる。

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_T &= 1 - \frac{f_T}{f_0} = 1 - \frac{1}{f_0} \left( f_0 - C_c \log \frac{\sigma_T'}{\sigma_0'} \right) \\ &= \frac{C_c}{f_0} \log \frac{\sigma_T'}{\sigma_0'} = \frac{C_c}{f_0} \log \frac{\sigma}{\sigma_0'} \end{aligned} \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \bar{\varepsilon}_B &= 1 - \frac{f_B}{f_0} = 1 - \frac{1}{f_0} \left( f_0 - C_c \log \frac{\sigma_B'}{\sigma_0'} \right) \\ &= \frac{C_c}{f_0} \log \frac{\sigma_B'}{\sigma_0'} = \frac{C_c}{f_0} \log \frac{\sigma - u_h}{\sigma_0'} \end{aligned} \quad (3.13)$$

(3.10) 式により表わされた上下両端面のひずみの初期状態からの増分の比、 $F$  は、(3.12) 式および (3.13) 式を用いることにより、(3.14) 式により表わされる。

$$F = \frac{\bar{\varepsilon}_B}{\bar{\varepsilon}_T} = \frac{\log(\sigma - u_h) - \log \sigma_0'}{\log \sigma - \log \sigma_0'} \quad (3.14)$$

(3.14) 式は、圧密試験において計測できない上下両端面におけるひずみのかわりに、計測可能な上下両端面の有効応力によりひずみ増分の比を表示したものである。

(3.14) 式の  $F$  は、(3.10) 式中の  $F$ 、したがって、図-3.5 の  $F$  と同一と考えてよい。Wissa 等<sup>16)</sup>は、微小ひずみ理論にもとづくものではあるが、非線形材料の場合に対して、同様の考え方により、ひずみ増分比  $F_3$  を (3.15) 式のように表わしている。

$$F_3 = \frac{\log(\sigma_V - u_h) - \log(\sigma_V \text{ at } t=0)}{\log \sigma_V - \log(\sigma_V \text{ at } t=0)} \quad (3.15)$$

ここに、 $\sigma_V$ : 鉛直軸荷重

$u_h$ : 過剰間げき水圧

荷重 0 の状態より開始した定率ひずみ圧密試験結果を解釈する際、(3.15) 式を用いると  $t=0$  における鉛直荷重が定義されておらず不都合が生ずる。Christian は、荷重 0 から開始する場合には、圧縮曲線の初期部分が過圧密領域になるため、非線形解析法を適用することが非常に困難になることを述べている\*。

(3.15) 式におけるこのような不都合をさけるため、(3.14) 式では、 $t=0$  における軸荷重として、初期応力  $\sigma_0'$  の規定を定義したものである。

(3.14) 式および、図-3.5 さらには、図-3.3 および 図-3.4a または 図-3.4b を用いて圧密係数および  $f$  -

\* A. W. Wissa 教授 (MIT) への私信に対する共著者 J. T. Christian 氏 (コンサルタント技師) の回答

$\log \sigma'$  が次のようにして決定される。

① 初期状態における有効応力  $\sigma'_0$  の決定

(3.14) 式中の初期状態の有効応力  $\sigma'_0$  は、本試験開始前に一様応力状態にあることが必要である。このため、定荷重により予圧密するか、または、所定の応力まで非常に緩速の定率ひずみ試験 ( $u_h \div 0$ ) を行なうことによって定める。 $\sigma'_0$  の値の決定は、自重圧密沈下を予測する場合のように、微小な応力状態の圧密定数を定める必要があるときには、計測装置の精度を考慮して決定する必要がある。

② 応力、間げき水圧および変位の測定

供試体上下両端面の応力、底面間げき水圧、および変位の時間的変化を記録する。

③ 上下両端面の有効応力および  $F$  の計算

任意の時間において、供試体上下面の有効応力を計算し、(3.14) 式により、 $F$  の値を計算する。

④ 平均ひずみ  $\Delta H_0/H_0$  の計算

変位の時間的変化より、対応する時間の変位を求め、供試体初期高さに対する平均ひずみを求める。

⑤ 圧密係数  $c_v$  の決定

③、④ より求めた  $F$  および  $\Delta H_0/H_0$  の値より、図-3.5 を用いて、 $c_v/(RH_0)$  を求め、変位速度  $R$  および初期高さ  $H_0$  より、圧密係数  $c_v$  を決定する。

⑥ 上下両端面の体積比  $f_T$  および  $f_B$  の計算

⑤ で求めた  $c_v/(RH_0)$  の値と  $\Delta H_0/H_0$  の値より図-3.3 を用いて供試体頂部の体積比を求め、また、同様にして  $c_v/(RH_0)$  の値と  $\Delta H_0/H_0$  の値から図-3.4a または図-3.4b を用いて供試体底部における体積比を求める。

⑦  $f \sim \log \sigma'$  関係の決定

半対数紙上に供試体上下両端面の有効応力と対応する体積比の関係をプロットすることにより  $f \sim \log \sigma'$  関係が求められる。この場合、上下面それぞれについて求められる  $f \sim \log \sigma'$  関係は、ほぼ一致するべきであり、上下いづれか一方について求めておけばよい。

③ 平均圧密圧力  $\sigma'_{av}$  の決定

圧密係数  $c_v$  の値が圧密圧力に対して変動する場合には、平均圧密圧力の値を求めておくことが必要である。この場合、平均有効圧密圧力  $\sigma'_{av}$  は⑦で求めた  $f \sim \log \sigma'$  関係より、平均体積比  $f_{av} = f_0(1 - \Delta H_0/H_0)$  に対応する圧力として求められる。 $c_v$  の値が平均有効圧密圧力に対してプロットされる。

## 4. 超軟弱粘土の圧密および沈降実験

### 4.1 実験装置

#### (1) 定率ひずみ圧密試験装置

本装置は一定速度の変位を連続的に与えることのできるもので、荷重装置、荷重反力受枠、圧密容器、荷重ピストンより構成されている。図-4.1 に本装置の模式図を写真-4.1 に本装置の全景を示す。荷重装置は負荷変

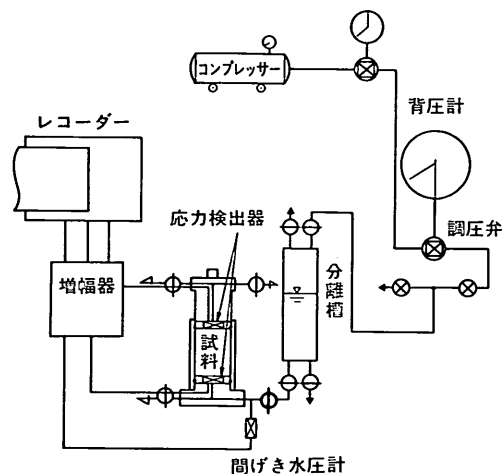


図-4.1a 定率ひずみ圧密試験装置系統図

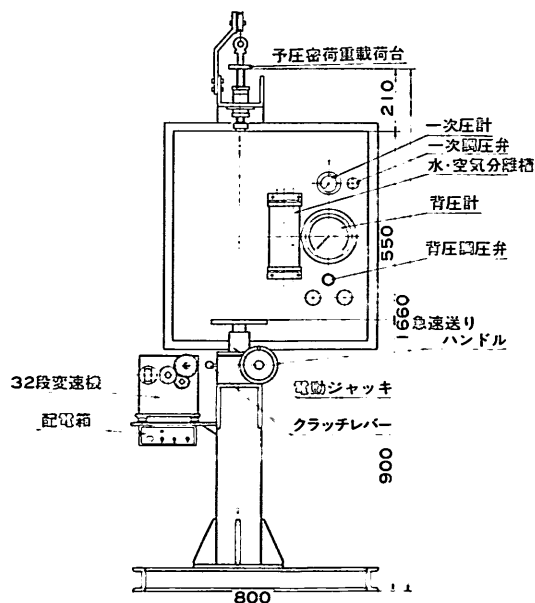


図-4.1b 定率ひずみ荷重装置

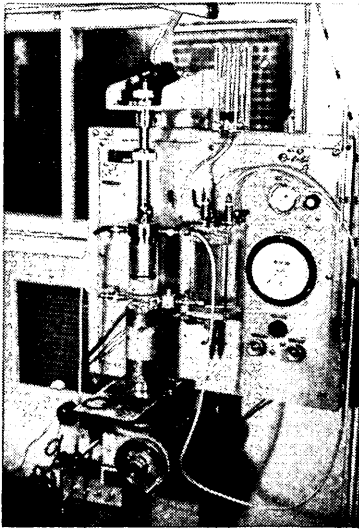


写真-4.1 定率ひずみ圧密試験装置

動に対しても一定のひずみ速度が得られるよう配慮したもので、有段変速機構をそなえ、ひずみ速度は  $4.4 \times 10^{-4} \text{ mm/min} \sim 5.0 \text{ mm/min}$  まで変速可能である。本載荷装置により最大圧密圧力  $15.0 \text{ kgf/cm}^2$  ( $\phi 60 \text{ mm}$ ) までの載荷が可能であるが、対象とする応力領域に応じて、圧密容器および検出器を取りかえることにしている。圧密容器はステンレススティールおよびプラスチック製で前者は  $10 \text{ kgf/cm}^2$  までの通常の応力領域までに使用し、後者は  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  以下の微小応力領域の圧密に使用する。容器の内面は精密仕上げした上、テフロンコーティングがほどこされている。圧密容器の寸法は、直径  $60 \text{ mm}$ 、高さ  $130 \text{ mm}$ 、供試体の厚さは  $100 \text{ mm}$  まで調節可能である。載荷ピストンには試料のもれ出しを防止するため、O-リングが取り付けられている。圧密試験中の供試体上下両端面の応力は載荷ピストンおよび下部ベ

デスタルの供試体に接する面に埋込まれた圧力変換器により、まさつの影響を含まない量を直接検出している。また、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。応力ならびに間げき水圧の検出器は対象応力領域に応じて使い分けられており、大きい応力領域に対しては、応力検出のため、共和電業社製圧力変換器（容量  $10 \text{ kgf/cm}^2$ ）、間げき水圧検出のため豊田工機製圧力変換器（PMS-5、容量  $5.0 \text{ kgf/cm}^2$ ）を用い、微小応力領域に対しては、ST 研究所製圧力変換器（PS25-05、容量  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$ ）および圧力変換器（PM10-05、容量  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$ ）を用いることとしている。いずれの場合にも、検出された圧密圧力および間げき水圧は、デジタルポルトメータにより直読するかまたはペン書きオシログラフに記録される。

## (2) 二重円筒型沈降実験装置

本装置は、通常の沈降実験に用いるシリンダを外筒（内径  $68 \text{ mm}$ 、高さ  $360 \text{ mm}$ ）とし、リング型の細片（内径  $62 \text{ mm}$ 、高さ  $10 \text{ mm}$ ）を積み上げて内筒とする二重円筒型の装置である（写真-4.2）。内外筒はいずれも透明プラスチック製である。



写真-4.2 二重円筒型沈降試験装置

表-4.1 試料の物理的性質

| 試 料           | $G_s$ | $w_L$<br>(%) | $w_P$<br>(%) | $I_p$ | 砂 分<br>(%) | シルト分<br>(%) | 粘土分<br>(%) | 強熱減量<br>(%) |
|---------------|-------|--------------|--------------|-------|------------|-------------|------------|-------------|
| 本 牧 粘 土       | 2.71  | 96.7         | 41.5         | 55.2  | 8.7        | 40.1        | 51.2       | 11.0        |
| 東 京 湾 泥 土     | 2.65  | 125.3        | 38.6         | 86.7  | 22.1       | 53.4        | 24.5       | 13.8        |
| 横 浜 港 泥 土     | 2.71  | 73.4         | 39.2         | 34.2  | 24.1       | 40.9        | 35.0       | 10.6        |
| 名 古 屋 港 泥 土   | 2.57  | 164.0        | 45.9         | 118.1 | 6.3        | 44.2        | 49.5       | 24.8        |
| 大 阪 湾 泥 土     | 2.59  | 102.8        | 45.8         | 57.0  | 20.0       | 43.0        | 37.0       | 18.1        |
| 伏木富山港 (B-南)   | 2.62  | 59.4         | 35.0         | 24.4  | 15.4       | 49.6        | 35.0       | 7.5         |
| 伏木富山港 (B-北)   | 2.63  | 97.6         | 48.2         | 49.4  | 2.3        | 53.7        | 44.0       | 12.7        |
| 水 俣 湾 泥 ( J ) | 2.71  | 96.0         | 38.5         | 57.5  | 10.1       | 45.9        | 44.0       | 21.5        |

## 超軟弱粘土の圧密試験法とその適用

### 4.2 試 料

実験に使用した試料は、図-4.2 に示したような我国の港湾地域より採取した海底土であり、含水比を調整することにより、超軟弱土供試体を作成した。各粘土試料の物理的性質を 表-4.1 に一括して示す。

### 4.3 実験方法

超軟弱地盤の沈下予測を行なう場合には、特に応力レベルの低い領域における圧密時性が必要であり、最大容量の小さい応力および間げき水圧検出器を用い、さきに述べた定率ひずみ方式の圧密試験を実施することにより、応力レベルの低い領域の圧密定数を決定することが可能である。定率ひずみ方式の圧密試験により超軟弱地盤の沈下予測にとって、実用上十分な範囲の領域の応力レベルの圧密特性を調べることができるが、沈降現象が支配的となるような高含水比状態の特性を調べることはできない。このような場合、実物と相似な応力状態を近



図-4.2 使用試料採取地点

似して行なう遠心力自重圧密試験法<sup>20)</sup>があるが、より簡便な方法として円筒容器内の沈降実験により、高含水状

表-4.2 定率ひずみ圧密試験試験条件

| 試料名・番号 |       | 予 圧 密 前            | 定率ひずみ圧密試験開始前          |                |                                               |                        |
|--------|-------|--------------------|-----------------------|----------------|-----------------------------------------------|------------------------|
|        |       | 初期含水比<br>$w_i$ (%) | 初 期 高 さ<br>$H_0$ (cm) | 初期体積比<br>$f_0$ | 初 期 応 力<br>$\sigma'_0$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | ひずみ速度<br>$R$ (cm/min)  |
| 本 牧    | H-1*  | 230                | 1.391                 | 4.013          | 0.077                                         | $3.07 \times 10^{-3}$  |
|        | H-2*  | 230                | 1.963                 | 3.958          | 0.103                                         | 3.07                   |
|        | H-3*  | 230                | 2.518                 | 4.950          | 0.014                                         | 3.07                   |
|        | H-6   | 230                | 2.370                 | 5.205          | 0.008                                         | 2.748                  |
|        | H-8   | 206                | 2.155                 | 4.650          | 0.025                                         | 2.726                  |
| 東 京    | T-1   | 231                | 1.505                 | 4.295          | 0.050                                         | $2.700 \times 10^{-3}$ |
|        | T-2   | 232                | 1.555                 | 4.291          | 0.054                                         | 2.717                  |
| 横 浜    | Y-1   | 219                | 1.425                 | 3.130          | 0.019                                         | $2.713 \times 10^{-3}$ |
|        | Y-2   | 108                | 1.655                 | 3.033          | 0.034                                         | 2.722                  |
| 名 古 屋  | N-1   | 461                | 2.105                 | 11.216         | 0.013                                         | $2.733 \times 10^{-3}$ |
|        | N-2   | 458                | 1.575                 | 9.830          | 0.010                                         | 2.729                  |
| 大 阪    | O-1   | 338                | 1.470                 | 6.257          | 0.044                                         | $2.713 \times 10^{-3}$ |
|        | O-2   | 320                | 1.430                 | 6.604          | 0.027                                         | 2.723                  |
| 伏木富山   | B S-1 | 128                | 1.905                 | 3.132          | 0.034                                         | $2.703 \times 10^{-3}$ |
|        | B S-2 | 121                | 2.005                 | 3.037          | 0.059                                         | 2.739                  |
|        | B N-1 | 193                | 1.640                 | 4.295          | 0.044                                         | 2.717                  |
|        | B N-2 | 191                | 1.870                 | 4.430          | 0.031                                         | 2.738                  |
| 水 俣    | J-2   | 211                | 4.074                 | 4.885          | 0.031                                         | $5.456 \times 10^{-3}$ |
|        | J-3*  | 213                | 3.389                 | 4.501          | 0.043                                         | 5.446                  |

注) \*印: 最大容量 10 kgf/cm<sup>2</sup> 応力検出器, 5 kgf/cm<sup>2</sup> 間げき水圧検出器使用  
無印: 最大容量 0.5 kgf/cm<sup>2</sup> 応力および間げき水圧検出器使用



態の圧密沈降特性を把握する方法がある。そこで、沈降現象が支配的となる微小応力状態の特性も同時に把握するため、上述の定率ひずみ圧密試験とあわせて、二重円筒型容器を用いた沈降実験を実施した。両者の試験の方法および条件はそれぞれ下記のようなのである。

#### (1) 定率ひずみ圧密試験

適当な含水比で調整されたスラリー状態の試料を圧密容器に注ぎ、高さ 30 mm～50 mm の供試体とした後、初期応力  $\sigma'_0 = 0.01 \sim 0.04 \text{ kgf/cm}^2$  に相当するごく軽量の重錘を載荷し、24 時間の予圧密を行なった。予圧密の目的は、前述のごとく、定率ひずみ圧密試験結果の解釈に必要な初期状態を規定することである。対象とする応力領域に応じて任意の初期状態からはじめてよい。小さい圧密圧力の領域の特性を主体に調べる場合には、初期状態はできるかぎり小さい応力により規定することが望ましいが応力検出のための圧力変換器の許容測定精度が限度（供試体の自重以上）である。定荷重による予圧密の際、まさつにともなう有効荷重の減少が、とくに予圧密初期にはさけがたいので、圧密容器内で検出される応力を確認しながら必要な調整（付加重錘の追加）を行った。以上のようにして、予圧密終了後の供試体高さ  $H_0$  より求められる体積比  $f_0$  および圧密容器内で検出されている応力  $\sigma'_0$  を本試験（定率ひずみ圧密試験）開始前の初期状態（ $f_0, \sigma'_0$ ）とした。

定荷重による予圧密終了後、供試体頭部の載荷ピストンをロックし、この状態より定率ひずみ圧密試験を開始した。この間、軸ひずみ、供試体上下両端面鉛直応力および供試体底面間げき水圧を測定した。

表-4.2 に本シリーズの実験に使用した試験条件を一括して示す。

#### (2) 沈 降 実 験

表-4.1 に示した各グループの試料について、海水を加えることにより 200～2000% の範囲の初期含水比の異なるスラリー状供試体を 3～4 種類作成し、各々の供試体を二重円筒型沈降実験装置の内筒に注いだ。土質試験法、粒度分析試験<sup>24)</sup>における要領に従い、円筒全体を十分振った後、実験台の上に静置し、下部排水用コックを開け、両面排水状態にして、沈降を開始させ、所定の時間毎に表面の沈降量を記録した。本シリーズの実験に使用した試験条件を 表-4.3 に一括して示した。なお、沈降実験に用いた円筒容器一本の長さは 360 mm であるので必要に応じ継ぎ足して使用している。

沈降実験終了後、図-4.3 に示すように、内筒の細片

表-4.3 沈降実験試験条件

| 試 料 名            | 初期含水比<br>$w_0$ (%) | 初期高さ<br>$H_0$ (cm) | 初期体積比<br>$f_0$ |
|------------------|--------------------|--------------------|----------------|
| 本 牧 粘 土          | 287                | 35.7               | 9.118          |
|                  | 483                | 35.8               | 19.419         |
|                  | 800                | 34.8               | 39.603         |
|                  | 938                | 34.7               | 50.796         |
|                  | 1712               | 34.9               | 79.556         |
| 東 京 湾 泥 土        | 266                | 36.1               | 8.574          |
|                  | 266                | 33.8               | 8.477          |
|                  | 397                | 38.5               | 12.689         |
|                  | 397                | 35.2               | 12.577         |
|                  | 640                | 35.9               | 21.641         |
|                  | 640                | 33.8               | 21.290         |
| 横 浜 港 泥 土        | 199                | 35.4               | 6.773          |
|                  | 199                | 33.0               | 6.862          |
|                  | 235                | 35.8               | 8.024          |
|                  | 235                | 32.8               | 8.023          |
|                  | 342                | 34.8               | 11.423         |
|                  | 342                | 36.5               | 11.623         |
| 名古屋港泥土           | 494                | 34.3               | 16.367         |
|                  | 494                | 32.8               | 16.234         |
|                  | 727                | 34.9               | 27.656         |
|                  | 727                | 33.9               | 25.127         |
|                  | 1020               | 35.8               | 39.290         |
|                  | 1004               | 33.9               | 39.247         |
| 大 阪 湾 泥 土        | 308                | 34.0               | 10.119         |
|                  | 308                | 35.9               | 10.271         |
|                  | 436                | 34.9               | 14.719         |
|                  | 556                | 34.9               | 19.191         |
|                  | 556                | 33.9               | 19.276         |
| 伏木富山港泥土<br>(B)   | 124                | 34.9               | 4.389          |
|                  | 124                | 33.9               | 4.389          |
|                  | 191                | 33.0               | 6.399          |
|                  | 191                | 38.5               | 6.351          |
| 水 俣 湾 泥 土<br>(J) | 382                | 35.0               | 12.863         |
|                  | 382                | 35.0               | 12.783         |
|                  | 382                | 35.9               | 12.899         |
|                  | 400                | 79.1               | 13.043         |

を一個づつ押し上げ、細片内の試料の全重量及び乾燥重量を測定し、矢野<sup>27)</sup>にならい含水比分布を求めた。ただし、矢野らは、単一円筒から、試料を直接押し出す方法を用いているのに対し、本実験では、二重円筒型とし、

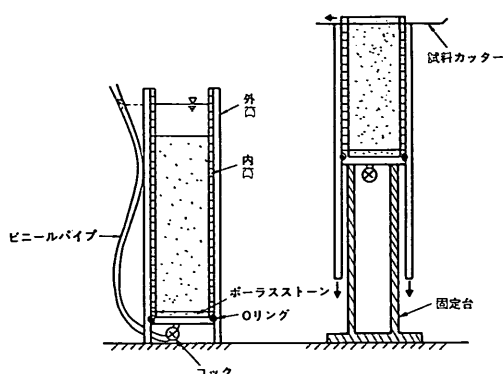


図-4.3 沈降実験装置模式図

分割細片からなる内筒とともに試料を押し出す方法を用いている。これは、沈降実験終了後の試料は非常に軟らかく、直接、押し出すと圧縮され、正しい含水比測定が懸念されたため、二重円筒型とすることにより試料押し出し時の力が、試料に直接伝わらないように配慮したものである。

## 5. 超軟弱粘土の圧密定数

### 5.1 定率ひずみ圧密試験結果

#### (1) 定率ひずみ条件下の応力及び間げき水圧

超軟弱粘土を定率ひずみ条件下で圧密する前に、供試体の初期状態を明確にする必要がある。このための処置として、今回の実験では、いずれも定荷重により予圧密する方法を用いた。

24時間の予圧密により、初期状態の規定された供試体に対し、一定の変位速度をもつ定率ひずみ圧密試験を実施した。荷重および過剰間げき水圧の記録には、デジタルボルトメーターを用いた。図-5.1は、この時の荷重および供試体底部過剰間げき水圧の時間的変化の例を示す。供試体に加えられたひずみ速度  $R=2.748 \times 10^{-3} \text{ cm/}$

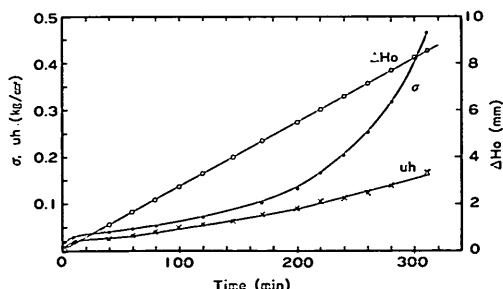


図-5.1 定率ひずみ圧密試験例

minにより最大圧力約  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  まで定率ひずみ条件下で圧密を行った結果である。

定率ひずみ圧密試験の結果による圧密係数  $c_v$  および体積比-有効応力関係の決定は、前述の3.4に従って行なわれる。実験データの処理および計算過程の一例を以下に示す。

表-5.1は、定率ひずみ圧密試験の原データのデータシート記入例、表-5.2は計算過程の例を示す。その要点を3.4の決定法に従って具体的に示すと下記のようになる。

#### ① 初期状態における有効応力 $\sigma_0'$ の決定

予圧密終了後の応力の計測により  $\sigma_0'$  を決定する。圧密終了後の過剰間げき水圧は0であること、かつ計測された全応力より静水圧を差しひくことにより  $\sigma_0'$  を求めるものとする（表-5.1）。

#### ② 応力、間げき水圧および変位の測定

#### ③ 上下両端面の有効応力および $F$ の計算

$$F = \frac{\log(\sigma - u_h) - \log \sigma_0'}{\log \sigma - \log \sigma_0'} = \frac{\log \frac{\sigma - u_h}{\sigma_0'}}{\log \frac{\sigma}{\sigma_0'}}$$

の値を計算する。

#### ④ 平均ひずみ $\Delta H_0/H_0$ の計算

#### ⑤ 圧密係数 $c_v$ の決定

③, ④より求めた  $F$  および  $\Delta H_0/H_0$  の値を図-3.5上にプロットする（図-5.2参照）。 $c_v/RH_0$  の値を読みとり、表-5.2に記入する。 $R$  および  $H_0$  の値から、平均ひずみ  $\Delta H_0/H_0$  に対応する圧密係数  $c_v$  を求める。

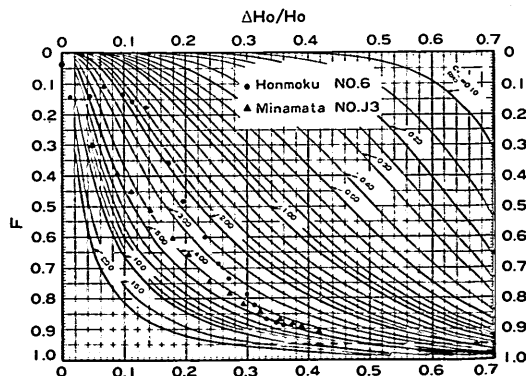


図-5.2  $F \sim \Delta H_0/H_0$  プロット例

#### ⑥ 上下両端面の体積比 $f_T$ および $f_B$ の計算

⑤で求めた  $c_v/RH_0$  の値と  $\Delta H_0/H_0$  の値より 図-

3.3 を用いて供試体頂部の圧密比  $f_0/f_T$  より体積比  $f_T$  を求め、図-3.4 を用いて、供試体下端の圧密比  $f_0/f_B$  より体積比  $f_B$  を求める (図-5.3, 図-5.4 参

照)。

⑦  $f \sim \log \sigma'$  関係の決定

$f_T \sim \sigma$  および  $f_B \sim (\sigma - u_h)$  の関係をプロットする

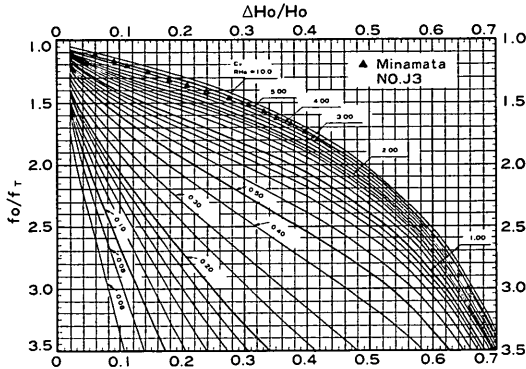
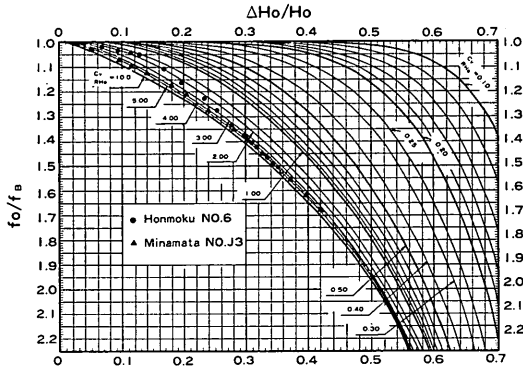
表-5.1 定率ひずみ圧密試験の原データ記入例

| 港 湾 技 術 研 究 所           |              | C R S — T E S T ( 応 力 測 定 ) |                            | 報 告 用 紙 ( I )                     |                                                |                                   |       |                            |                              |
|-------------------------|--------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------|------------------------------------------------|-----------------------------------|-------|----------------------------|------------------------------|
| Sample 本 牧              |              | Test No. 6                  |                            | 年 月 日                             |                                                |                                   |       |                            |                              |
| 予圧密前<br>高さ $H_i$        | 5.915 cm     | 比重 $G_s$                    | 2.712                      | 上部応力<br>感度                        | — kgf/cm <sup>2</sup> /mV                      |                                   |       |                            |                              |
| 予圧密沈<br>下量 $\Delta H_i$ | 3.545 cm     | 実質部高<br>さ $H_s$             | 0.455 cm                   | 下部応力<br>感度                        | $1.549 \times 10^{-4}$ kgf/cm <sup>2</sup> /mV |                                   |       |                            |                              |
| 初期高さ<br>$H_0$           | 2.370 cm     | 初期体積<br>比 $f_0$             | 5.205                      | 間げき水<br>圧感度                       | $2.307 \times 10^{-4}$ kgf/cm <sup>2</sup> /mV |                                   |       |                            |                              |
| 乾燥重量<br>$w_d$           | 34.74 g      | 初期応力<br>$\sigma_0'$         | 0.0081 kgf/cm <sup>2</sup> | ひずみ速<br>度                         | $2.748 \times 10^{-3}$ cm/min                  |                                   |       |                            |                              |
| No.                     | $t$<br>(min) | ①                           | ②                          |                                   | ③                                              |                                   | ④     |                            | ⑤                            |
|                         |              | 変 位                         | 軸 応 力 (上)                  |                                   | 軸 応 力 (下)                                      |                                   | 全 水 圧 |                            | 間げき水圧                        |
|                         |              | $\Delta H_0$ (cm)           | 読 み                        | $\sigma_T$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 読 み                                            | $\sigma_B$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | 読 み   | $u$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) | $u_h$ (kgf/cm <sup>2</sup> ) |
| 0                       |              |                             |                            |                                   | 149                                            | 0.02038                           | 65    | 0.015                      |                              |
| 0                       | 0            |                             |                            |                                   |                                                | (0.0081 )                         |       | ( $=u_s^*$ )               | 0                            |
| 1                       | 1            | $3.0 \times 10^{-3}$        |                            |                                   | 216                                            | 0.0335                            | 109   | 0.0251                     | 0.0101                       |
| 2                       | 10           | 28.5                        |                            |                                   | 291                                            | 0.0451                            | 153   | 0.0353                     | 0.0203                       |
| 3                       | 40           | 109.5                       |                            |                                   | 338                                            | 0.0524                            | 184   | 0.0424                     | 0.0274                       |
| 4                       | 60           | 164.7                       |                            |                                   | 382                                            | 0.0592                            | 214   | 0.0494                     | 0.0344                       |
| 5                       | 80           | 220.0                       |                            |                                   | 435                                            | 0.0674                            | 247   | 0.0570                     | 0.0420                       |
| 6                       | 100          | 274.0                       |                            |                                   | 493                                            | 0.0764                            | 283   | 0.0653                     | 0.0503                       |
| 7                       | 120          | 330.0                       |                            |                                   | 565                                            | 0.0875                            | 316   | 0.0729                     | 0.0579                       |
| 8                       | 145          | 400.0                       |                            |                                   | 643                                            | 0.0996                            | 331   | 0.0764                     | 0.0614                       |
| 9                       | 170          | 468.0                       |                            |                                   | 773                                            | 0.1197                            | 400   | 0.0923                     | 0.0773                       |
| 10                      | 200          | 549.0                       |                            |                                   | 966                                            | 0.1496                            | 459   | 0.1059                     | 0.0909                       |
| 11                      | 220          | 602.0                       |                            |                                   | 1148                                           | 0.1771                            | 502   | 0.1158                     | 0.1008                       |
| 12                      | 240          | 658.0                       |                            |                                   | 1383                                           | 0.2142                            | 554   | 0.1278                     | 0.1128                       |
| 13                      | 260          | 714.5                       |                            |                                   | 1688                                           | 0.2615                            | 608   | 0.1403                     | 0.1253                       |
| 14                      | 270          | 742.0                       |                            |                                   | 1871                                           | 0.2898                            | 625   | 0.1442                     | 0.1292                       |
| 15                      | 280          | 769.0                       |                            |                                   | 2110                                           | 0.3268                            | 669   | 0.1543                     | 0.1393                       |
| 16                      | 290          | 796.0                       |                            |                                   | 2366                                           | 0.3665                            | 699   | 0.1613                     | 0.1463                       |
| 17                      | 300          | 824.0                       |                            |                                   | 2716                                           | 0.4207                            | 757   | 0.1746                     | 0.1596                       |
| 18                      | 305          | 838.0                       |                            |                                   | 2879                                           | 0.4459                            | 767   | 0.1769                     | 0.1619                       |
| 19                      | 310          | 852.0                       |                            |                                   | 3080                                           | 0.4771                            | 792   | 0.1827                     | 0.1677                       |
| 20                      |              |                             |                            |                                   |                                                |                                   |       |                            |                              |

\*  $u_s$ : 静水圧

表-5.2 定率ひずみ圧密試験の計算過程例

| 港 灣 技 術 研 究 所 |                  |                                       |                                | C R S — T E S T ( 計 算 書 )                 |                                |                                                                                                           |            | 報 告 用 紙 ( II )                            |           |       |           |       |          |                                       |
|---------------|------------------|---------------------------------------|--------------------------------|-------------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-------------------------------------------|-----------|-------|-----------|-------|----------|---------------------------------------|
| Sample 本 收    |                  |                                       |                                | Test No. 6                                |                                |                                                                                                           |            | 年 月 日                                     |           |       |           |       |          |                                       |
|               |                  |                                       |                                | $\sigma_0' = 0.00808 \text{ kgf/cm}^2$    |                                |                                                                                                           |            | $f_0 = 5.205$                             |           |       |           |       |          |                                       |
|               |                  |                                       |                                | $H_0 = 2.37 \text{ cm}$                   |                                |                                                                                                           |            | $R = 2.748 \times 10^{-3} \text{ cm/min}$ |           |       |           |       |          |                                       |
| No.           | (6)              | (7) = (3) - (4)                       | (8)                            | (9)                                       | (10)                           | (11) = (9) ÷ (10)                                                                                         | (12)       | (13)                                      | (14)      | (15)  | (16)      | (17)  | (18)     | (19)                                  |
|               | $\Delta H_0/H_0$ | $\frac{\sigma - u_h}{(\sigma_B - u)}$ | $\sigma$<br>$(\sigma_B - u_s)$ | $\log(\sigma - u_h)$<br>$-\log \sigma_0'$ | $\log \sigma - \log \sigma_0'$ | $\frac{\log \left( \frac{\sigma - u_h}{\sigma_0'} \right)}{\log \left( \frac{\sigma}{\sigma_0'} \right)}$ | $c_v/RH_0$ | $c_v$<br>$(\text{cm}^2/\text{min})$       | $f_0/f_T$ | $f_T$ | $f_0/f_B$ | $f_B$ | $f_{av}$ | $\sigma_{av}'$<br>$(\text{kgf/cm}^2)$ |
| 0             | 0                | 0.0081                                | 0.0081                         |                                           |                                |                                                                                                           | —          |                                           |           |       |           | 5.205 |          |                                       |
| 1             | 0.001            | 0.0083                                | 0.0185                         | 0.0117                                    | 0.3598                         | 0.032                                                                                                     | —          |                                           |           |       |           |       |          |                                       |
| 2             | 0.012            | 0.0098                                | 0.0301                         | 0.0838                                    | 0.5712                         | 0.147                                                                                                     | —          |                                           |           |       |           |       |          |                                       |
| 3             | 0.046            | 0.0100                                | 0.0374                         | 0.0926                                    | 0.6655                         | 0.139                                                                                                     | —          |                                           |           |       |           |       |          |                                       |
| 4             | 0.069            | 0.0098                                | 0.0442                         | 0.0838                                    | 0.7380                         | 0.110                                                                                                     | 2.80       | $1.82 \times 10^{-2}$                     |           |       | 1.01      | 5.153 | 4.845    | 0.017                                 |
| 5             | 0.093            | 0.0104                                | 0.0524                         | 0.1096                                    | 0.8119                         | 0.135                                                                                                     | 2.00       | 1.30                                      |           |       | 1.03      | 5.053 | 4.721    | 0.021                                 |
| 6             | 0.116            | 0.0111                                | 0.0614                         | 0.1379                                    | 0.8808                         | 0.157                                                                                                     | 1.80       | 1.17                                      |           |       | 1.04      | 5.005 | 4.601    | 0.025                                 |
| 7             | 0.136            | 0.0146                                | 0.0725                         | 0.2569                                    | 0.9529                         | 0.270                                                                                                     | 1.60       | 1.04                                      |           |       | 1.05      | 4.957 | 4.481    | 0.032                                 |
| 8             | 0.169            | 0.0186                                | 0.0846                         | 0.3621                                    | 1.0200                         | 0.355                                                                                                     | 1.95       | 1.27                                      |           |       | 1.11      | 4.732 | 4.325    | 0.040                                 |
| 9             | 0.197            | 0.0274                                | 0.1047                         | 0.5303                                    | 1.1125                         | 0.477                                                                                                     | 2.40       | 1.56                                      |           |       | 1.16      | 4.487 | 4.180    | 0.048                                 |
| 10            | 0.232            | 0.0437                                | 0.1346                         | 0.7331                                    | 1.2216                         | 0.600                                                                                                     | 2.50       | 1.63                                      |           |       | 1.23      | 4.232 | 3.997    | 0.066                                 |
| 11            | 0.254            | 0.0620                                | 0.1621                         | 0.8850                                    | 1.3024                         | 0.678                                                                                                     | 3.00       | 1.95                                      |           |       | 1.27      | 4.098 | 3.883    | 0.100                                 |
| 12            | 0.278            | 0.0864                                | 0.1992                         | 1.0291                                    | 1.3919                         | 0.739                                                                                                     | 3.50       | 2.28                                      |           |       | 1.33      | 3.914 | 3.758    | 0.135                                 |
| 13            | 0.301            | 0.1212                                | 0.2465                         | 1.1761                                    | 1.4844                         | 0.792                                                                                                     | 3.30       | 2.15                                      |           |       | 1.37      | 3.799 | 3.638    | 0.180                                 |
| 14            | 0.313            | 0.1456                                | 0.2748                         | 1.2557                                    | 1.5316                         | 0.820                                                                                                     | 4.00       | 2.60                                      |           |       | 1.40      | 3.718 | 3.576    | 0.190                                 |
| 15            | 0.324            | 0.1725                                | 0.3118                         | 1.3294                                    | 1.5865                         | 0.838                                                                                                     | 3.900      | 2.54                                      |           |       | 1.43      | 3.640 | 3.519    | 0.230                                 |
| 16            | 0.335            | 0.2052                                | 0.3515                         | 1.405                                     | 1.6385                         | 0.857                                                                                                     | 5.00       | 3.26                                      |           |       | 1.47      | 3.541 | 3.461    | 0.270                                 |
| 17            | 0.348            | 0.2460                                | 0.4057                         | 1.483                                     | 1.7008                         | 0.872                                                                                                     | 5.00       | 3.26                                      |           |       | 1.49      | 3.493 | 3.394    | 0.330                                 |
| 18            | 0.354            | 0.2690                                | 0.4309                         | 1.522                                     | 1.727                          | 0.881                                                                                                     | 5.00       | 3.26                                      |           |       | 1.51      | 3.447 | 3.362    | 0.360                                 |
| 19            | 0.359            | 0.2943                                | 0.4621                         | 1.561                                     | 1.757                          | 0.889                                                                                                     | 5.00       | 3.26                                      |           |       | 1.52      | 3.424 | 3.336    | 0.390                                 |
| 20            |                  |                                       |                                |                                           |                                |                                                                                                           |            |                                           |           |       |           |       |          |                                       |


 図-5.3  $f_0/f_T \sim \Delta H_0/H_0$  プロット例

 図-5.4  $f_0/f_B \sim \Delta H_0/H_0$  プロット例

ことにより  $f \sim \log \sigma'$  関係を求める。

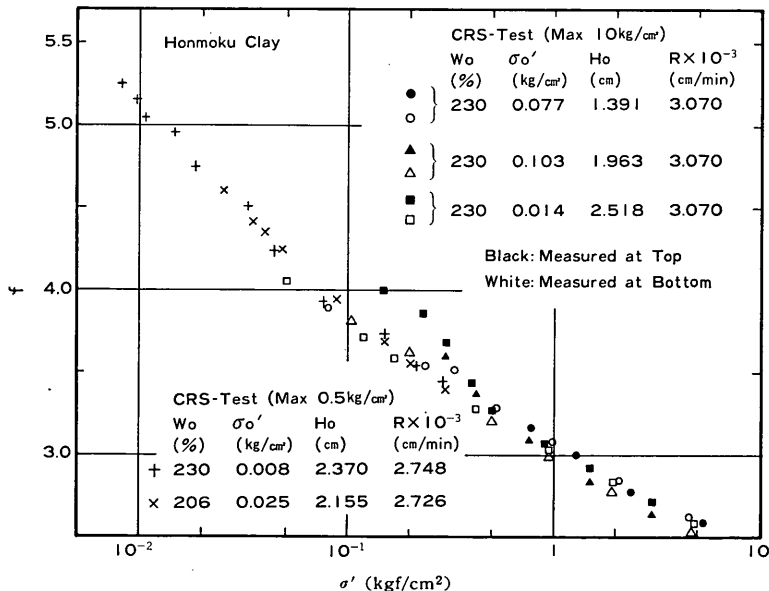
(8) 平均圧密圧力  $\sigma_{av}'$  の決定

⑦ で求めた  $f \sim \log \sigma'$  関係より平均体積比  $f_{av} = f_0(1 - \Delta H_0/H_0)$  に対応する圧力として求められる。

⑤ で求めた  $C_0$  の値を  $\sigma_{av}'$  に対してプロットする。

(2)  $f \sim \log \sigma'$  関係と諸要素の影響

定率ひずみ圧密試験の結果から、図-5.3 または 図-5.4 のようにして、供試体の頭部の体積比  $f_T$  と頭部の有効応力の関係、または、供試体の底部の体積比  $f_B$  と底部の有効応力の関係が求められる。(3.11) 式で与えられる応力-ひずみの関係は、供試体の頭部および底部とともに成立するはずであるから、供試体頭部および底部における体積比-有効応力関係は一致しなければならない。このことを確認するため、異なった条件のもとにおける  $f \sim \log \sigma'$  関係の変化傾向を調べてみた。図-5.5 は本牧粘土の場合の例を示す。図-5.5 には、容量の大きい検出器 (応力: 10 kgf/cm<sup>2</sup>, 間げき水圧: 5 kgf/cm<sup>2</sup>) を用いた場合の供試体頭部の  $f \sim \log \sigma'$  関係を黒印の記号で、また、底部でのそれを白抜きの記号で示している。さらに、容量の小さい検出器 (応力, 間げき水圧とも 0.5 kgf/cm<sup>2</sup>) による  $f \sim \log \sigma'$  関係もあわせて示す。これらより初期状態 ( $\sigma_0'$  および  $f_0$ ) の相違の影響が調べられる。図-5.5 において、容量の大きい検出器を用いた場合の結果に注目すると初期応力の小さいところから定率ひずみ圧密試験をはじめた場合、応力の小さい領域で、


 図-5.5 定率ひずみ試験による  $f \sim \log \sigma'$  (本牧粘土)

供試体頭部および底部のそれぞれにおいて求められた  $f \sim \log \sigma'$  関係がかなり相違し、応力の大きい領域では両者の相違はほとんど認められなくなる。応力の小さい領域における頭部および底部の応力-ひずみ関係のギャップは、応力および間げき水圧検出器の測定精度に帰因するものであり、とくに、頭部において定められた関係が、本来成立すべき関係とはなれる傾向があるようである。もし、検出器の許容精度からみて妥当な値以上の初期応力状態より定率ひずみ圧密試験を開始すれば、頭部および底部における  $f \sim \log \sigma'$  関係は一致し、どちらか一方で求めてもよいといえる。

埋立地における超軟弱粘土の自重圧密沈下を対象とするような場合には、最大容量  $10 \text{ kgf/cm}^2$  の検出器は測定精度がかなりあらく、不適当となるおそれがある。このような場合を対象として、最大容量  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  の応力及び間げき水圧検出器を用いた場合の  $f \sim \log \sigma'$  関係が図-5.5 に示されている。ただし、荷重は下部検出のものを使用した。最大容量の小さい検出器を用いることにより、初期応力状態の設定精度が高くなり応力の小さい領域において、 $f \sim \log \sigma'$  の信頼性が上がることを示している。

### (3) 圧密係数 $c_v$ と諸要素の影響

定率ひずみ圧密試験のデータより圧密係数  $c_v$  が求められる。圧密係数  $c_v$  の値は、標準圧密試験の場合には連続した荷重段階の平均圧密圧力に対してプロットしたものが報告されるのが普通である。そこで、定率ひずみ圧密試験の場合にも、同様の整理を行なうため、さらに

求められた体積比-有効応力関係 ( $f \sim \log \sigma'$ ) から、平均体積比  $f_{av} = f_0(1 - \Delta H_0/H_0)$  に対応する平均有効応力  $\sigma'_{av}$  を求め、この値と  $c_v$  の関係を整理し、定率ひずみ圧密試験における圧密係数の平均有効応力  $\sigma'_{av}$  に対する変化傾向を各種の条件の場合について検討してみた。

図-5.6 は本牧粘土の  $\log c_v \sim \log \sigma'_{av}$  関係に及ぼす各種要因の影響の有無を前述の  $f \sim \log \sigma'$  関係の場合と同様に調べたものを一括して示している。 $\log c_v \sim \log \sigma'_{av}$  関係に影響を及ぼす可能性のある要因としては、前述のごとく、変位速度  $R$ 、供試体の寸法（初期高さ  $H_0$ ）、初期含水比  $w_0$ 、初期状態における応力  $\sigma'_0$  さらには、応力ならびに間げき水圧検出器の容量及び精度などが考えられる。図-5.6 は、各種要因の任意の組合わせの場合の結果を示したものであり、各種潜在影響要素を一々詳細に検討したものではないが、検出器の精度による影響以外、特に、各要素の影響は現われていないと考えられる。図-5.6 中、白印の記号で示したものは、圧力変換器として最大容量  $10 \text{ kgf/cm}^2$  間げき水圧検出器として最大容量  $5 \text{ kgf/cm}^2$  のものを用いており、一方、黒印の記号で示したものは、応力および間げき水圧の両者とも最大容量  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  の検出器を用いている。ある一定応力にて予圧密した後、定率ひずみ圧密試験が実施されるが、容量の大きい検出器を用いた場合、定率ひずみ圧密試験開始直後の圧密係数  $c_v$  の値は異常に高い値を与えている。最大容量  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  の測定精度の高い検出器を使った場合には、同じ応力領域においてはるかに低い  $c_v$  の値を示すことから、定率ひずみ圧密開始直後の  $c_v$

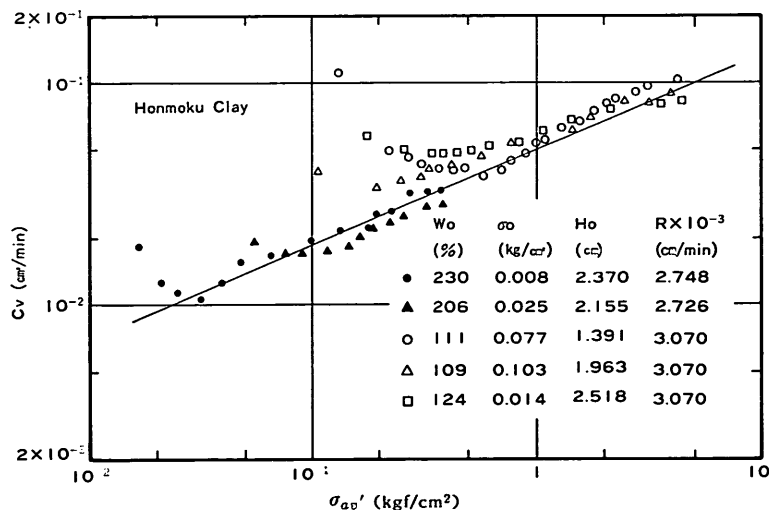


図-5.6 定率ひずみ試験による  $\log c_v \sim \log \sigma'_{av}$  (本牧粘土)

の過大な値は、測定精度に起因するものと思われる。定率ひずみ圧密試験開始前に応力状態の様な初期状態を規定するための一手段として適用される予圧密载荷にあたっては検出器の最小精度（最大容量の 1~2%）を加味した最小予圧密荷重の選定が必要となる。

図-5.6 に示した本牧粘土の場合の  $c_v$  の平均有効応力に対する変化傾向は、容量の小さい検出器により求めた結果と大容量の検出器による結果をあわせた広い応力領域についてみると実線で示したような傾向を持ち、正規圧密領域において通常指摘されるような  $c_v$  一定の傾向は本試料についてはみとめられず、平均有効応力の小さい所では  $c_v$  の値はかなり小さく、平均有効応力の増加とともに単調に増加する傾向がみとめられる。このことについては、他の試験法による結果ならびに他の各種の超軟弱粘土試料に関する結果とともに後に検討する。

## 5.2 超低応力下の圧密定数

### (1) 沈降実験結果とその活用

前述した定率ひずみ圧密試験により、初期応力状態 ( $\sigma'_0$ ) より大きい応力領域に対して、 $f \sim \log \sigma'$  特性および圧密係数などの沈下解析に必要な圧密定数が求められる。非常に低い応力領域における圧密特性は、検出器の最小精度を上げた試験を実施し、前述の方法を用いて、原理的には評価することが可能である。しかし、最小精度を上げれば、応力および間げき水圧の最大測定可能値を下げざるを得ないため、両者の要請を勘案して適切な検出器を選定することが必要となるわけである。本実験では、現地における通常の埋立地盤の自重圧密問題を対象として、最大容量  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  の応力および間げき水圧検出器を用いており、可能測定範囲は  $0.01 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$  と考えられる。

定率ひずみ圧密試験において設定可能な初期応力状態より小さい応力領域の圧密特性については、沈降実験の自重圧密過程の領域の特性が参考になる。一般に懸濁物質の沈降特性は濃度（含水比）と凝集性によって支配されることが知られており<sup>21)</sup>、初期含水比がある限度以下であれば沈降過程は生じず、直ちに自重圧密過程が始まる。このような限界の含水比は、粘土の種類により相違し、矢野らの報告によれば、カオリン、ベントナイトでそれぞれ 250, 350%, 東京湾粘土で 700% 程度といわれている<sup>7)</sup>。

図-5.7 は初期含水比を 287~1712% の範囲に調整した本牧粘土について、前述の装置および方法により実施した沈降特性の結果を示している。スラリー状態の試料の

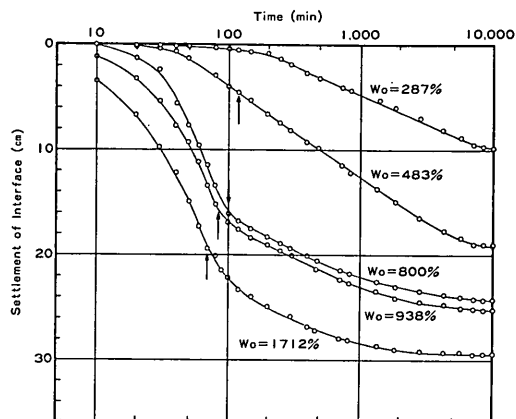


図-5.7 沈降実験例（本牧粘土）

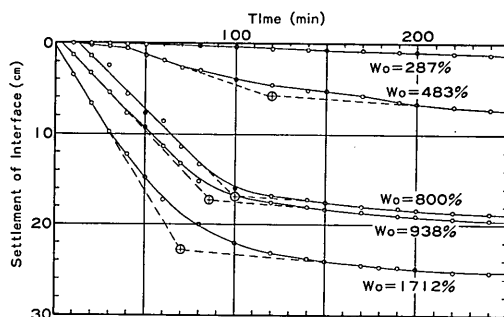


図-5.8 沈降過程初期の界面沈降～時間関係（本牧粘土）

攪拌終了後からの経過時間を横軸に、界面の沈降量を縦軸にとっている。

図-5.7 は沈降過程の開始から自重圧密過程の終了までの界面沈降の時間的変化を示すものであるが、このうち、沈降過程開始初期の界面沈降量と時間の関係を算術目盛で表わしたものが 図-5.8 である。

初期含水比の非常に高い沈降実験によれば、沈降過程の初期のフロック形成に要するほとんど界面沈降の生じない時間があり、等速沈降過程、干渉沈降過程を経て自重圧密過程が卓越する。フロック形成に要する時間や各沈降過程の沈降量と初期含水比の関係など詳細な検討が McRoberts, Nixon<sup>22)</sup>や今井ら<sup>4)</sup>の報告にみられる。含水比の高い粘土の界面は等速沈降過程、干渉沈降過程を経て自重圧密過程に従った沈下を示すが、自重圧密過程の開始を明確に区別することは困難である。一つの便宜的な区分法としては、沈降曲線の特徴を考慮し、図-5.8 のように、2 直線の交点として自重圧密過程の開始点を定める方法<sup>4), 22)</sup>がある。初期含水比の高い場合には、明白

な等速沈降過程が現われる。一方、初期含水比の低い場合には、等速沈降過程はほとんど現われず、ただちに干渉沈降過程、自重圧密過程がはじまり、界面沈降量の大きさも自重圧密過程により支配されることになる。図-5.7には、図-5.8のように、2直線の交点として定めた自重圧密開始点とみられる位置を矢印で示した。

(2) 沈降および自重圧密終了後の  $f \sim \log \sigma'$  関係

微小応力における粘土の圧縮曲線は、沈降実験における自重圧密過程終了後の容器内堆積物の含水比分布を測定することによって求めることが矢野ら<sup>7)</sup>により報告されている。本実験でも、微小応力における超軟弱粘土の圧縮曲線を定めるため、矢野らの方法を適用しているが、前述のごとく、試料押出し時のまさつによる試料の収縮にともなう誤差を防止するため、二重円筒型としている。

自重圧密終了後の二重円筒内の堆積物の含水比分布は4.1 (2) に示した装置の内筒を押し出し、適当な個数のスライス毎に、試料の全重量、乾燥重量を計測し、単位体積重量 (湿潤、乾燥、水中)、含水比を求めた。なお、含水比が高い場合、水に含まれる塩分により、含水比の測定値にかなりの誤差が生ずるといわれており、塩分濃度の補正を次式を用いて行なっている<sup>7)</sup>。

$$w = \frac{1 + \beta}{1 - \beta w_m} w_m \quad (5.1)$$

ここに、

$w$  : 塩分を水に含まれると考えた時の含水比 (真の含水比)

$w_m$  : 塩分を土の重量に含むと考えた時の含水比 (通常の方法 (JIS-A-1203-1970) で求めた時の含水比)

$\beta$  : 粘土内の水に含まれる塩分重量の真水重量に対する比

自重圧密終了後の容器内堆積物において、任意の点を考慮するとその点より上方の鉛直有効上載圧力により、ある体積比  $f$  で平衡していると考えられる。したがって、含水比分布から、体積比  $f_i$  および有効上載圧力は完全飽和状態にあると仮定することにより、次のようにして求められる。

$$f_i = \frac{G_s}{G_f} w_i + 1 \quad (5.2)$$

$$\bar{\sigma}_i' = \frac{1}{2} \left( \sum_{j=1}^{i-1} \tau_{j'} \cdot dz_j + \sum_{j=1}^i \tau_{j'} \cdot dz_j \right) \quad (5.3)$$

ここに、

$G_s$  : 土粒子の比重

$G_f$  : 海水の比重

$w_i$  : 真の含水比

$\bar{\sigma}_i$  : 第  $i$  番目の計測点の平均有効鉛直応力

$\tau_{j'}$  : 第  $j$  番目の計測点より上方の任意の点の水中有効単位体積重量

$dz_j$  : 任意の点のスライスの厚さ

以上のようにして求めた体積比  $f_i$  と平均有効鉛直圧力  $\bar{\sigma}_i'$  を互いにプロットすることにより  $f \sim \log \sigma'$  関係が求められる。

図-5.9 は、粘土の沈降実験より定めた圧縮曲線 ( $f \sim \log \sigma'$  関係) の一例であり、初期含水比を変えた場合の影響が示されている。図-5.9 から、高含水比の場合、バラツキは大きい、超低応力下の圧縮曲線はほぼ半対数紙上で直線で表わしうる。これらの圧縮曲線は、初期含水比により影響を受け、初期含水比の大きいほど圧縮曲線のこう配は大きく、かつ上方にくる傾向があるが、各圧縮曲線は圧力の比較的大きい領域では、同一の圧縮曲線に収束する傾向がみとめられる。同様の現象は今井<sup>1)</sup>の報告にもみられる。図-5.9 で圧力の大きい領域の体積比  $f$  および圧力  $\sigma'$  は、円筒下部のスライスから求められた値であるが、これらの値が初期含水比に依存しない理由は、円筒下部のスライス部分では、沈降現象が比較的短時間に終了し、分級作用の影響が小さく自重圧密が支配的なことによるものと考えられる。また、このことは図-5.9 で初期含水比  $w_0=287\%$ ,  $w_0=483\%$  の試料 (図-5.8 から明らかなように沈降現象が小さく自重圧密現象が支配的) の  $f \sim \log \sigma'$  曲線がほぼ等しくなることから明らかであろう。一方、圧力の小さい領域は、円筒上部のスライスに対応するもので、得られた  $f$  と  $\sigma'$  の関係は初期含水比により影響をうけるが、その理由として、実験開始時には均質であった円筒内の試料

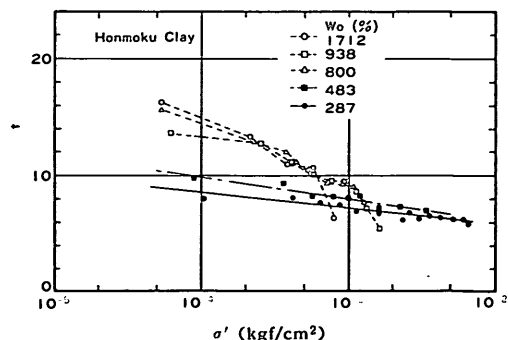


図-5.9 沈降実験より定めた  $f \sim \log \sigma'$  関係 (本牧粘土)



が、初期含水比に対応して分級作用をうけ、自重圧密開始時(沈降終了時)において、すでに各々別の特性をもつ土になっていることによるものと考えられる。

### (3) 沈降実験におけるみかけの圧密係数

つぎに、微小応力における圧密係数を求めるため、沈降実験における自重圧密過程に注目する。前述のように粘土の沈降現象のパターンは、初期含水比により大きな影響を受ける。1000% 以上の高含水比の場合には、一般にフロック形成に要する過程、等速沈降過程、干渉沈降過程を経て、自重圧密過程が現われるのに対し、比較的低含水比の場合には、干渉沈降過程ないしは、自重圧密過程がただちに始まる。この場合の圧縮曲線  $f \sim \log \sigma'$  関係は初期含水比のいかんにかかわらず、同一の手法、すなわち、自重圧密終了後の含水比分布の測定により求められた。一方、圧密係数  $c_v$  を自重圧密過程から定めようとする場合、沈降過程における自重圧密開始時点は図-5.8 のような手法により定められるが、近似的な方法であり、自重圧密過程のみが生ずる状態を対象とした方が望ましい。したがって、初期含水比のある程度低い状態の沈降実験の結果を用いることとする。

沈降実験における自重圧密過程が、三笠の圧密理論により表わし得るものとして、適当な定数を設定しいくつかの理論沈下曲線を計算により求め、実測値とフィッティングさせることにより圧密係数  $c_v$  を定めた。この場合、必要となる圧縮曲線  $f \sim \log \sigma'$  は、沈降試験より、前述のようにして定めたものの中から、対応する初期含水比に対するものを用いた。なお、圧密係数  $c_v$  および

圧縮曲線  $f \sim \log \sigma'$  関係が与えられた場合の三笠式を用いた沈下-時間関係は、前報で述べたように差分法による数値計算の実施によって求められる<sup>3)</sup>。

図-5.10 は沈降実験データより求めた圧縮曲線に対し、 $c_v$  をいくつか変化させた理論沈下計算を行い、沈降データと対比させたものである。

本法は、汎用性のある方法ではないが、超微小応力における状態を調べ、前述した定率ひずみ圧密試験の結果を補足するために活用される。

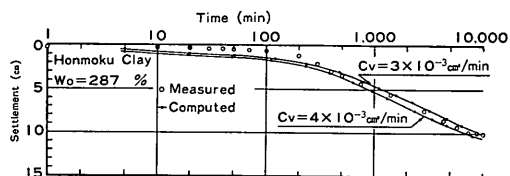


図-5.10 自重圧密過程の理論曲線のフィッティング

## 5.3 広範囲のオーダーの圧力領域における圧密定数

### (1) 圧縮曲線 $f \sim \log \sigma'$ と土のタイプ

前述したように、定率ひずみ圧密試験の結果から、圧縮曲線  $f \sim \log \sigma'$  が求められ、さらに、沈降実験の結果にもとづいて超低応力下の圧縮曲線が求められる。そこで、両試験の結果をあわせることにより、広範囲のオーダーの圧力領域にわたって、圧縮曲線の特性が調べられる。

図-5.11 は本牧粘土について、沈降実験の結果 (Cyli. Test) と定率ひずみ圧密試験結果 (CRS-Test) さらに、

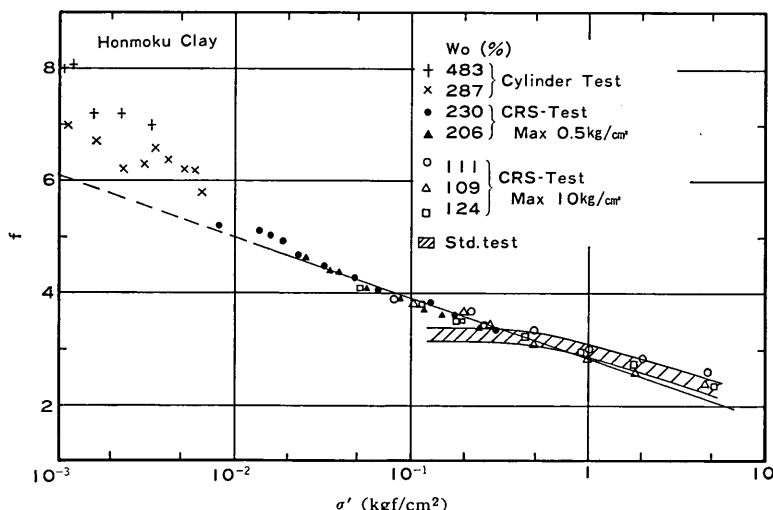


図-5.11 広範囲の領域における  $f \sim \log \sigma'$  関係 (本牧粘土)

標準圧密試験の結果 (Std. Test) をあわせて示している。定率ひずみ圧密試験については、小容量の検出器 (応力, 間げき水圧とも最大容量  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$ ) を用いた場合と容量の大きい検出器 (最大容量, 応力  $= 10 \text{ kgf/cm}^2$ , 間げき水圧  $= 5 \text{ kgf/cm}^2$ ) を用いた場合が示されている。また, 標準圧密試験の場合については,  $p_0 = 0.5 \text{ kgf/cm}^2$  で再圧密した試料 9 個のばらつき範囲が示されている。

超低応力領域における圧縮曲線は, 図-5.9 に示したように, 初期含水比の影響を受け, 応力の小さい領域では, 初期含水比の大きいほど圧縮曲線はかなり上側にくるが, 応力の大きい領域では, 両者の曲線は収れんする傾向があることがみとめられている。また, ある程度以下の初期含水比では, 圧縮曲線の相違はほとんどなくなっている。定率ひずみ圧密試験結果と標準圧密試験の正規部分のこう配はほとんど差がなく, 両者に共通な直線は, 初期含水比の低い場合の沈降実験結果より求まる圧縮曲線にほとんど一致する。したがって, 圧縮曲線のこう配に関するかぎり, 応力領域の小さい所では若干大きくなるが, 実用上は標準圧密試験の正規圧密部分のほぼ延長線上にあるとみてよい。しかし, 圧力の大きい領域の結果から小さい領域の結果を外挿する場合には誤差を生じやすいから, 実際問題において想定される範囲の試験の結果を用いるのがよいことはいままでのことである。

以上, 本牧粘土について, 広範囲のオーダーの圧力領域における圧縮曲線の傾向を各種の方法により調べた。他の試料 (東京, 横浜, 名古屋, 大阪, 伏木富山, 水俣各試料) については, 通常の埋土地盤の自重圧密計算に必要な圧力範囲を規定して, 最大容量  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  の応力, および間げき水圧検出器を用いた定率ひずみ圧密試験を主体に, 超微小応力領域を沈降実験により補足する方法を用い, 各試料の圧縮曲線を求めた。これらの圧縮曲線を図-5.12~5.17 に示した。なお, 各図の実線は定率ひずみ圧密試験結果より, 平均的な傾向として表示したものである。

沈降実験より求まる圧縮曲線に及ぼす初期含水比の影響は図-5.12, 5.14 の例に顕著に現われている。すなわち, 初期含水比の大きいものは, 沈降過程の影響を強く受け, 定率ひずみ圧密試験の圧縮曲線のこう配よりもかなり大きい。初期含水比が減少し, 自重圧密過程が支配的となる場合には, 沈降実験と定率ひずみ圧密試験より求まる圧縮曲線は, ほぼ同一直線上にある。

以上のことから, 自重圧密が支配的となる含水比以下

の超軟弱粘土に対しては, 広範囲のオーダーの圧力領域にわたり,  $f \sim \log \sigma'$  関係の直線性が成り立つと考えられる。

## (2) 圧密係数と土のタイプ

圧密係数  $c_\alpha$  についても, 広い範囲のオーダーの圧力に対する変動傾向を各種試料について調べた。図-5.18 は本牧試料について沈降実験 (Cyli. Test), 定率ひずみ圧

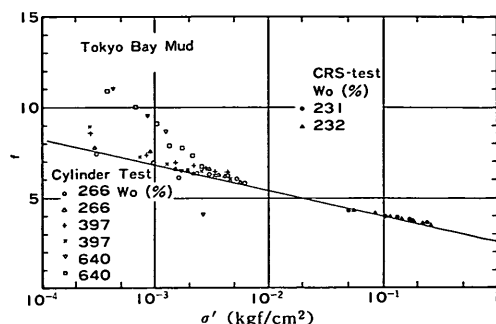


図-5.12 沈降試験および定率ひずみ圧密試験にもとづく  $f \sim \log \sigma'$  関係 (東京湾泥土)

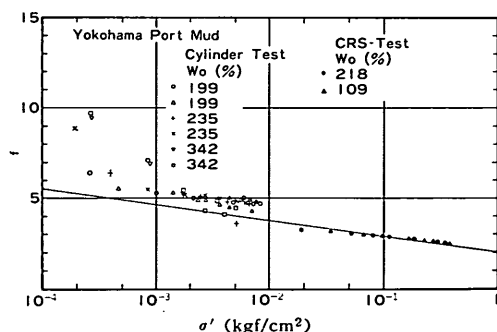


図-5.13 沈降試験および定率ひずみ圧密試験にもとづく  $f \sim \log \sigma'$  関係 (横浜港泥土)

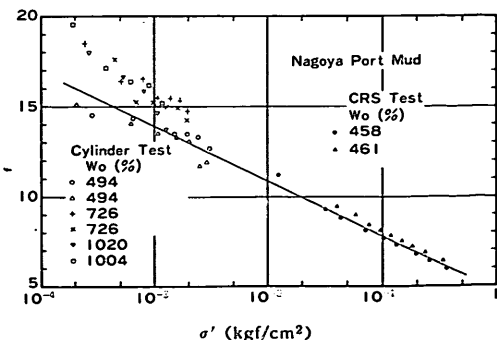


図-5.14 沈降試験および定率ひずみ圧密試験にもとづく  $f \sim \log \sigma'$  関係 (名古屋港泥土)

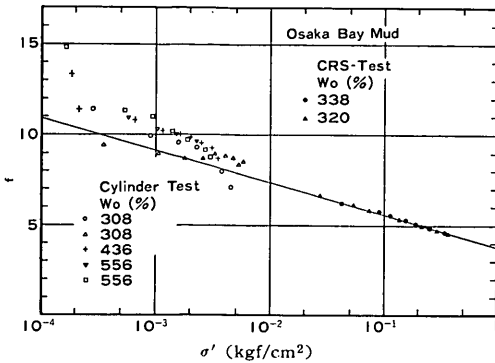


図-5.15 沈降試験および定率ひずみ圧密試験にもとづく  $f \sim \log \sigma'$  関係 (大阪湾泥土)

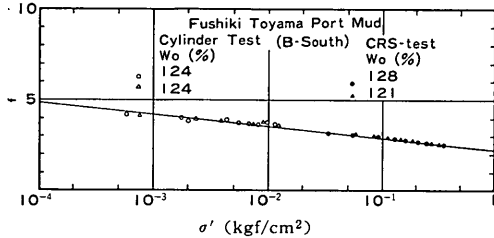


図-5.16a 沈降試験および定率ひずみ圧密試験にもとづく  $f \sim \log \sigma'$  関係 (伏木富山港泥土 B-South)

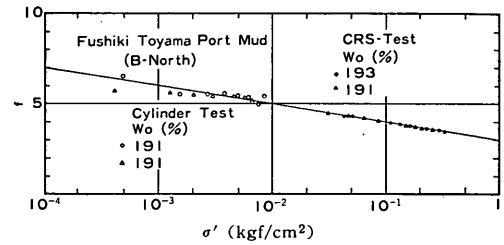


図-5.16b 沈降試験および定率ひずみ圧密試験にもとづく  $f \sim \log \sigma'$  関係 (伏木富山港泥土 B-North)

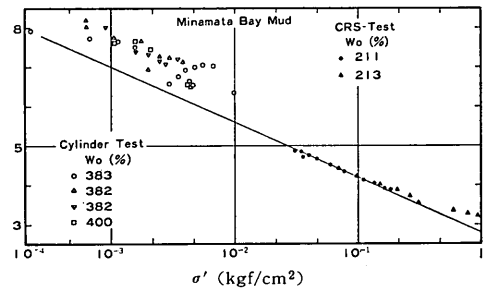


図-5.17 沈降試験および定率ひずみ圧密試験にもとづく  $f \sim \log \sigma'$  関係 (水俣湾泥土)

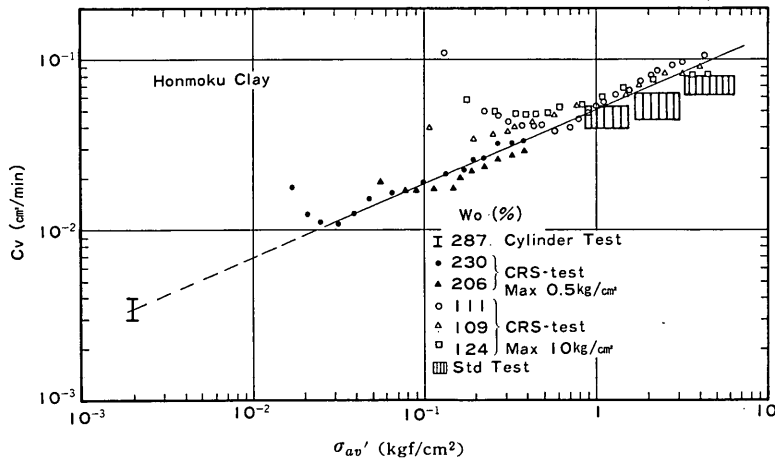


図-5.18 広範囲の圧力領域における  $\log c_v \sim \log \sigma_{av}'$  関係 (本牧粘土)

密試験 (CRS-Test) および標準圧密試験 (Std. Test) の結果から求められた圧密係数の平均有効応力に対する変化を示したものである。沈降実験による圧密係数は 5.2 (3) のようにして求めたものであり、最適値を適合させるのが困難であるため、平均有効応力に対して、ある幅

をもたせた型でプロットしている。また、定率ひずみ圧密試験については、容量の小さい場合と大きい場合の両者が示されている。さらに、標準圧密試験については、正規圧密部分のもののみをハッチして示す。本牧粘土試料については、定率ひずみ圧密試験のみならず、標準圧

密試験, 沈降実験の結果からも, 圧密係数  $c_v$  の平均有効応力  $\sigma_{av}'$  に対する変化傾向は, 圧密係数  $c_v$  が  $\sigma_{av}'$  の減少につれて小さくなっており, 正規圧密領域について通常指摘されているような  $c_v$  一定の傾向は本牧試料については認められない。

図-5.19~5.24 に他の試料 (東京, 横浜, 名古屋, 大

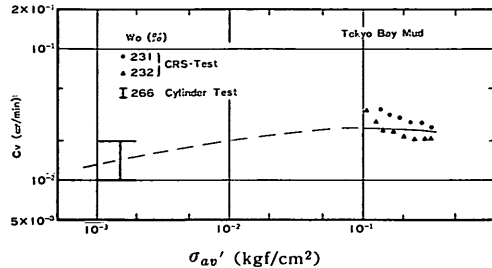


図-5.19 沈降試験および定率ひずみ圧密試験にもとづく  $\log c_v \sim \log \sigma_{av}'$  関係 (東京湾泥土)

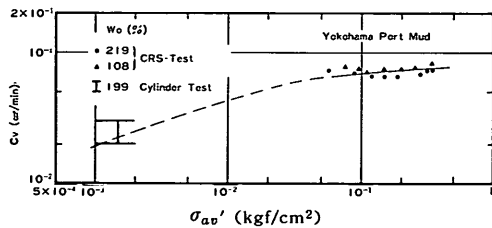


図-5.20 沈降試験および定率ひずみ圧密試験にもとづく  $\log c_v \sim \log \sigma_{av}'$  関係 (横浜港泥土)

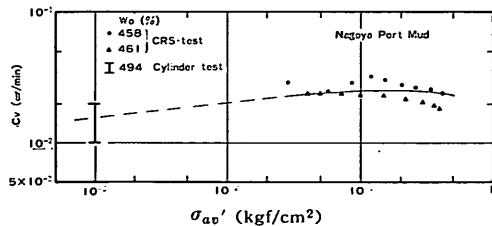


図-5.21 沈降試験および定率ひずみ圧密試験にもとづく  $\log c_v \sim \log \sigma_{av}'$  関係 (名古屋港泥土)

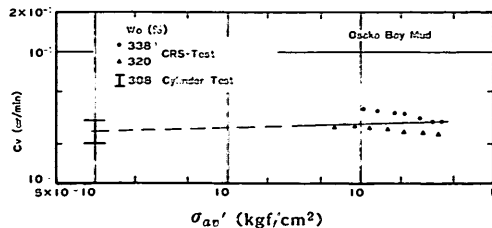


図-5.22 沈降試験および定率ひずみ圧密試験にもとづく  $\log c_v \sim \log \sigma_{av}'$  関係 (大阪湾泥土)

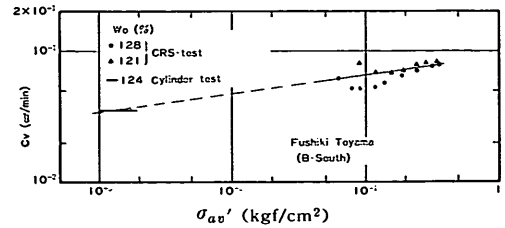


図-5.23a 沈降試験および定率ひずみ圧密試験にもとづく  $\log c_v \sim \log \sigma_{av}'$  関係 (伏木富山港泥土 B-South)

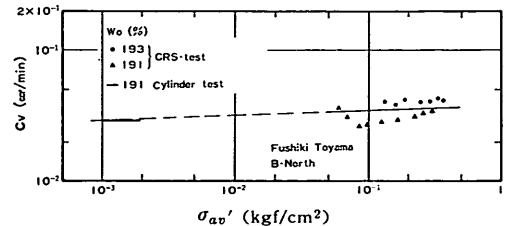


図-5.23b 沈降試験および定率ひずみ圧密試験にもとづく  $\log c_v \sim \log \sigma_{av}'$  関係 (伏木富山港泥土 B-North)

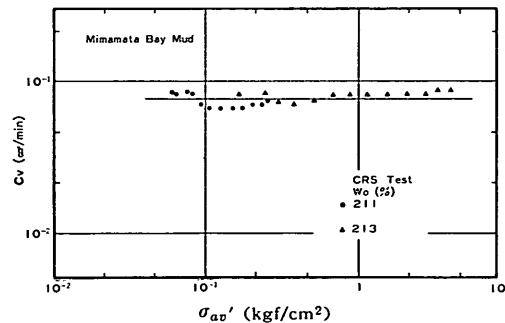


図-5.24 定率ひずみ圧密試験にもとづく  $\log c_v \sim \log \sigma_{av}'$  (水俣港泥土 J-地点)

阪, 伏木富山, 水俣各試料) についての定率ひずみ圧密試験 (最大容量  $0.5 \text{ kgf/cm}^2$  の応力および間げき水圧検出器使用) により求められた圧密係数  $c_v$  の平均有効応力に対する変化傾向を示す。また, 沈降実験の結果より定められた圧密係数があわせて示されている。これらの試料の圧密係数の平均有効応力に対する平均的な変化傾向を定率ひずみ試験結果に対し実線, 沈降試験結果をむすぶ領域を破線により表示するものとする。圧密係数の絶対値は通常の堆積試料の場合と同様に<sup>29)</sup>塑性指数が大きいほど小さくなる傾向があり, また, 圧密係数の圧力依存性の程度も試料の種類により異なり, 塑性指数の大きいものほど, 圧密係数  $c_v$  の圧密圧力に対する変動が小さい傾向が現われるようである。

## 6. 埋土地盤の圧密沈下解析への適用

6章では、前章までに述べられた定率ひずみ圧密試験法によって求められる圧密定数の妥当性および適用性が、模型粘土地盤の自重圧密沈下解析により検討された。また、現地における超軟弱粘土地盤の圧密沈下解析方法についても言及されている。

### 6.1 実験装置

実験に使用された模型粘土槽は、縦 150 cm、横 100 cm、深さ 100 cm の鉄製の矩形槽である<sup>3)</sup>。槽の側壁中央部分には、内部の状況が観測可能なように、アクリルの窓がもうけられている。沈下量の測定に用いられた沈下計は、二重管構造になっており、周面の粘土と沈下棒との摩擦をきるためのアクリル製外管（固定）の中に沈下棒が設置されている。沈下棒の先端には、棒の自重が無視できるように接地面積の大きいアクリル板が取付けられている。沈下板は粘土層表面から深さ 10 cm の位置に設置された。間げき水圧の測定は、実験期間が長期にわたること、過剰間げき水圧の絶対量が微小なことから水マノメータが用いられた。マノメータと粘土層中の間げき水圧検出地点までは、軟質のビニールチューブで接続され、ビニールチューブの先端には目づまり防止用のポーラスストーンをもつピックアップが取り付けられている。ピックアップの埋設位置は深さ 10 cm、20 cm、30 cm、40 cm、50 cm、60 cm、70 cm、80 cm の 8 点であり、地盤の沈下とともにピックアップも沈下するようになっている。

### 6.2 試料および実験方法

実験に用いられた試料は大阪湾泥土で表-4.1 に示されている物理的特性をもっている。この試料をドラム罐の中でスラリー状にし、均質になるようにかきまぜて、槽内に流し込んだ。流し込む前に各ドラム罐内の試料の含水比を測定している。試料の搬入時間は約 2 時間程度を要した。粘土層は自重によって圧密され、排水条件は底部不透水、上部排水である。表-6.1 に圧密開始前の模型粘土地盤の初期状態を示している。

表-6.1 模型粘土地盤の初期条件

| 項 目      | 記号, 単位                           |       |
|----------|----------------------------------|-------|
| 粘 土 層 厚  | $H_0$ (cm)                       | 80    |
| 含 水 比    | $w_0$ (%)                        | 303.3 |
| 間 げ き 比  | $e_0$                            | 7.849 |
| 体 積 比    | $f_0$                            | 8.849 |
| 湿潤単位体積重量 | $\gamma_0$ (gf/cm <sup>3</sup> ) | 1.180 |
| 乾燥単位体積重量 | $\gamma_d$ (gf/cm <sup>3</sup> ) | 0.293 |

### 6.3 時間-沈下曲線の検討

5章では、大阪湾泥土に関する定率ひずみ圧密試験から、圧縮指数  $C_c=1.75$ 、圧密係数  $c_v=0.025$  cm<sup>2</sup>/min が得られている。また、 $f \sim \log \sigma'$  関係を  $f=f_1-C_c \log \sigma'$  という形で定めると、 $f_1=3.8$  が得られる。ここに、 $f_1$  は  $\sigma'=1.0$  kgf/cm<sup>2</sup> のときの体積比である。以上の結果と、模型地盤の初期状態から、この模型粘土地盤の自重圧密沈下量-時間の関係を計算し、実測値とともに示す

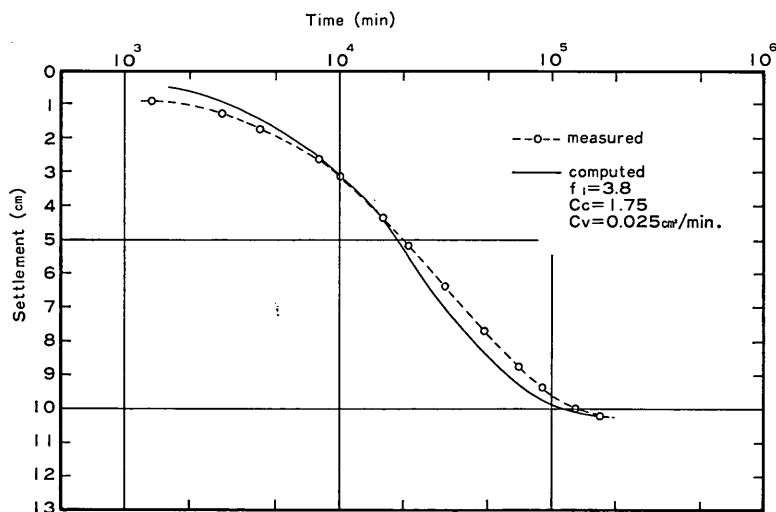


図-6.1 自重圧密沈下曲線（大阪湾泥土）

図-6.1 のようになる。計算はプログラム CONSOLID<sup>3)</sup>を用いて、自重および層厚の変化を考慮し、片面排水条件のもとで行っている。図-6.1 には、粘土表層から 10 cm の深さの位置の沈下量を示しているが、実測値と計算値はよく一致している。模型粘土地盤の自重による応力範囲は  $0 \text{ kgf/cm}^2$  (粘土層表面) から  $0.0144 \text{ kgf/cm}^2$  (粘土層底面) であり、解析に用いられた定率ひずみ圧密試験から求められた  $f \sim \log \sigma'$  関係は、上記の応力領域を直接的にはカバーしていない。しかしながら、図-6.1 に示される実測値と計算値の一致はより低応力領域に対してもこの  $f \sim \log \sigma'$  関係が成立つことを表わしていると考えられる。すなわち、沈降現象を含まない自重圧密現象が支配的な状況では、 $f \sim \log \sigma'$  関係は広範な応力領域にわたって直線と考えてよい。このことは、図-5.15 に示されている沈降実験で求められた  $f \sim \log \sigma'$  関係の下限値 (沈降現象を含まない初期含水比において沈降実験を実施した結果) と定率ひずみ圧密試験からの  $f \sim \log \sigma'$  関係が一致することからも明らかである。なお、実際の埋立地盤などにおいては、層厚および含水比にもよるが自重による応力レベルは  $0.01 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$  程度と想定されるので、本論の定率ひずみ試験で得られる応力範囲で充分カバーできるものと思われる。

#### 6.4 過剰間げき水圧の時間的変化の検討

図-6.2a は、各深さにおける過剰間げき水圧の時間的変化の実測値を示している。圧密開始後 2 日程度でマノ

メータの読みがピークに達し、その後、自重圧密の進行とともに過剰間げき水圧は漸減している。粘土層中に埋設したピックアップからマノメータまでに距離があるため、マノメータのヘッド差から求められた過剰間げき水圧には、タイムラグが生じていることが推測されるが、図-6.2a ではタイムラグの補正は行なわれていない。図-6.2b は、図-6.2a の結果から、模型粘土地盤中の過剰間げき水圧分布を求めたものである。また、図-6.2b には、6.3 の条件で計算した過剰間げき水圧分布の計算値も示されている。図-6.2b において、10 日における実測値および計算値はほぼ一致するが、50 日および 80 日における両者はあまりよい一致がみられない。この両者の相違は、6.3 の結果から判断して、圧密定数のとり方にもとづくものではなく、粘土層中に埋設されたピックアップのポーラスストーン部の目づまりによるタイムラグに起因するものと思われる。このことは図-6.2a の深さ 80 cm におけるピックアップが、目づまりにより、途中 (×印) で測定不可能となったことから推測されよう。このような理由により、図-6.2b では同一時間において実測過剰間げき水圧分布が計算値より大きくなったものと思われる。

以上 6.3, 6.4 の考察から、本論文で提案された方法によって求められた圧密定数を用いることによって、超軟弱粘土地盤の圧密現象を説明しうることが明らかとなり、この試験法の妥当性が裏付けられたものと思われる。

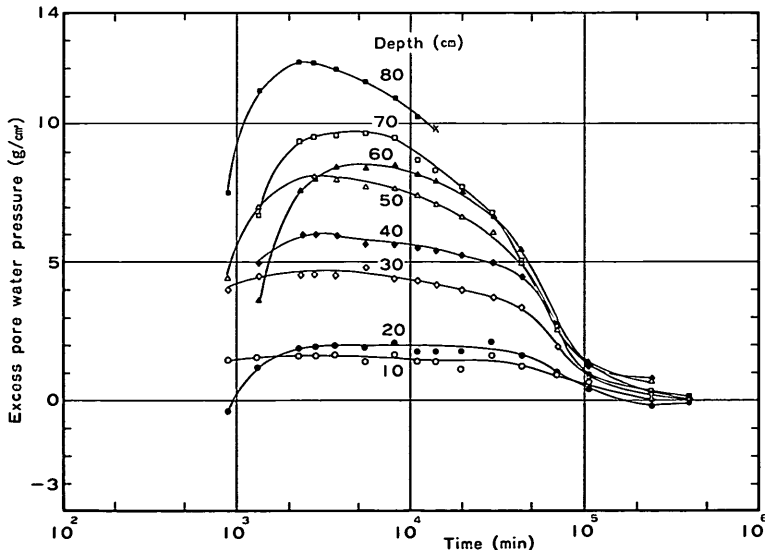


図-6.2a 各深さの過剰間げき水圧の時間的変化

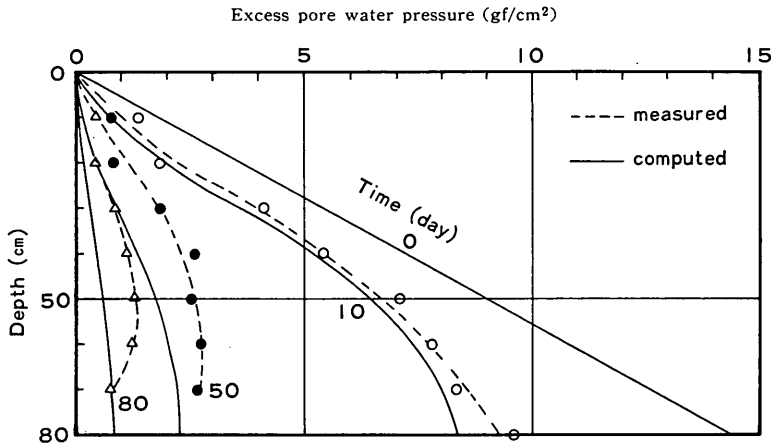


図-6.2b 過剰間げき水圧分布の変化

### 6.5 現地埋立地盤の圧密沈下解析への適用

近年問題になっているヘドロの浚渫工事においては、浚渫土砂を投棄する土捨場の容量を適正に確保しなければならない。そのためには、浚渫により生じた超軟弱ないわゆる未圧密状態の土が、沈降および自重圧密によって、どの程度沈下するか、沈下速度はどの程度かを把握しておかなければならない。また、自重圧密終了後、埋立地盤の活用にさいしても、その地盤の圧密特性を把握しておくことが不可欠となる。実際の埋立地盤では、自重によって生ずる応力レベルは  $0.01 \sim 0.5 \text{ kgf/cm}^2$  程度

と考えられるので、この領域に対応する圧密定数を求めればよい。そのための一方法として、定率ひずみによる圧密試験法が提案されたが、超軟弱粘土埋立地盤の沈下解析方法として、定率ひずみ圧密試験を導入したフローチャートが図-6.3に示されている。図-6.3は浚渫による埋立地盤の沈下解析を対象にしたもので、沈降現象と圧密現象は混在することなく各々独自に現われると仮定している。この仮定は、図-5.7、図-5.8の室内実験の結果において自重圧密開始点以前は沈降、その後は圧密現象のみ存在すると考えることに相当する。図-6.4は、図-5.8から初期含水比  $w_0$  と沈降による沈下量  $S$ 、初期層厚  $H_0$  との比  $S/H_0$  の関係を示したものである。図-6.4から、初期含水比が高いほど沈降量が大きいこと、また、沈降現象が生じないで最初から自重圧密現象が現

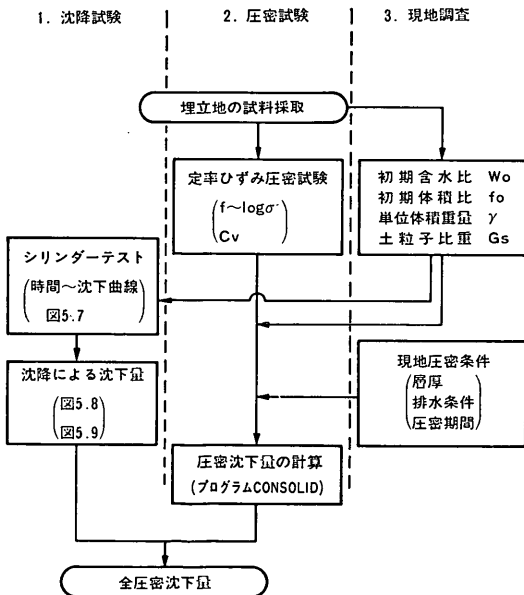


図-6.3 超軟弱地盤の沈下解析フローチャート

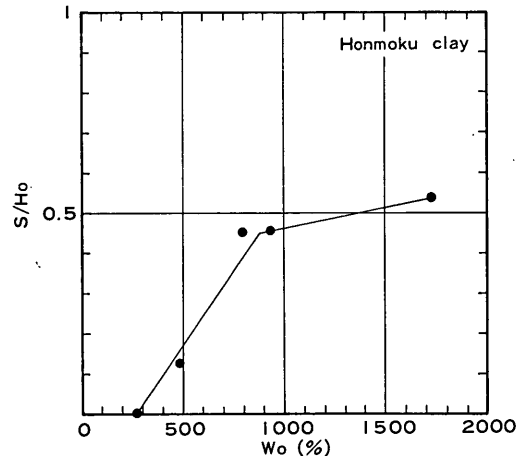


図-6.4 沈降量・初期層厚比と初期含水比の関係

われる含水比が存在することがわかる。したがって、埋立地盤の沈下を解析する場合には、埋立地盤の初期含水比が著しく高いときには、図-6.3の1.の沈降試験を実施することになるが、この初期含水比の目安としてほしい200~300%とみてよいであろう。初期含水比が200%以下の場合には圧密現象のみとして取扱うことが可能で、図-6.3のフローチャートの1.沈降試験は不要となる。なお、2.の圧密試験では、現地試料はスラリー状態で未圧密の状態にあることから、必ずしも乱さない試料でなくともよい。むしろ、3.の現地調査で、現位置における初期含水比（初期体積比）もしくは浚渫埋立土の初期含水比（初期体積比）を正確に把握することが必要である。その理由は、超軟弱地盤の沈下量が上記の初期状態によって著しく影響されるためである。

## 7. 結 論

標準圧密試験法の適用の困難な超軟弱粘土の圧密試験法として、微小ひずみ、微小応力から出発する定率ひずみ方式の圧密試験法の活用をすでに提案した。本報告では、試験結果の解釈にともなう実用上の不便さを解消するため、無次元表示の圧密基本式の差分解にもとづいて作成された図表を用い、超軟弱地盤の沈下解析に必要な圧密定数を合理的に決定する方法を新たに提案し、この方法により、我国の代表的な港湾における超軟弱土の圧密特性を調べた。この際、沈降実験結果を併用し、超微小領域における特性との連続性をあわせて調べている。さらに、得られた結果を用い、模型地盤における自重圧密観測結果を三笠の圧密理論にもとづいて解析し、解析結果の妥当性、適用上の問題点を検討した。

以上の結果、下記のことを明らかにした。

1. 定率ひずみ方式の載荷条件を用いることにより、スラリー状態の試料の圧密特性が調べられる。
2. 応力および間げき水圧検出器の最大容量を適切に選択することにより、実用上問題となる範囲の応力領域の圧密特性を十分にカバーしうる。必要に応じて沈降実験の結果を併用すれば、微小応力における特性が明らかとなる。
3. 沈降現象の著しい超微小応力下における圧縮性( $f \sim \log \sigma'$  関係)は、初期含水比により影響を受け、初期含水比が大きいほど圧縮曲線は上方に位置するが、応力の大きい領域では、初期含水比の影響は消える傾向にある。
4. 自重圧密が支配的となる含水比以下の超軟弱土に

対しては、広範囲の応力領域にわたり、 $f \sim \log \sigma'$ の直線性が認められる。しかし、大きい応力領域の圧縮曲線より外挿して、小さい応力領域の結果を推定することは誤差が大きく、問題とする応力領域についての圧密試験を行なうべきである。

5. 超軟弱粘土の圧密係数 $c_0$ は、小さい応力領域においては、一般に一定とはならず、応力の増大につれ、増加する傾向がある。 $c_0$ の応力依存性は土質により異なり、 $I_p$ の大きいほど応力依存性が小さく、 $I_p$ が小さいほど、応力依存性が強くなる傾向が認められる。したがって、沈下解析に必要な圧密係数については、想定される応力領域に対する値を選定することも必要となる場合がある。

6. 本論文で提案されている定率ひずみ圧密試験法により求められた $f \sim \log \sigma'$ および圧密係数 $c_0$ の妥当性が、模型粘土地盤の自重圧密試験により検証された。

## 8. あとがき

浚渫土を用いた埋立地のような超軟弱地盤の沈下予測は、浚渫埋立計画やその後の地盤改良工法の選定ならびに設計に関連して重要となる。とくにポンプ浚渫による埋立のように超高含水比状態の埋立地盤が造成される場合には、沈降及び圧密の両過程に従った沈下が生ずることになる。このうち、沈降過程は比較的短期間に終了するのに対し、圧密過程は長期間におよぶため、浚渫埋立計画にとってはその精度向上が期待される。この場合の一つの大きな問題点は超軟弱土の圧密定数をいかに合理的かつ精度よく評価するかということである。

上述の観点からこれまで各種の圧密試験、自重圧密実験を実施し、前報において、定率ひずみ圧密試験方法の活用を提案し、さらに本論文において、より合理的かつ実用的な圧密定数決定法を提案した。

埋立は、従来より実施されているが、最近のように、海底土の処理、とりわけ汚染底質土の処理を目的とするような場合には、埋立地のスペースは浚渫土量にくらべ十分余裕をもって確保され得ないのが普通であり、それだけに一層の埋立地における沈下予測精度の向上をはかることが必要となってくるものと考えられる。本報で述べた方法はそのような場合に有効に活用されることと期待される。

おわりに、本報告に述べた各種の圧密実験の実施は、元研修生の日本国土開発株式会社山本邦雄氏の助力に負うものであり、また、奥村樹郎土質部長には、本報告と



りまとめの段階で有益な意見をいただいた。ここに、記して謝意を表したい。

なお、本研究は著者等が土質部土性研究室在籍時に着手したものをとりまとめたものである。

# 参 考 文 献

- 1) 三笠正人, “軟弱粘土の圧密——新圧密理論とその応用——” 鹿島出版会, 1963年10月
- 2) J. L. Monte and R. J. Krizek, “One-dimensional mathematical model for large-strain consolidation”, *Geotechnique* 26, No. 3, 1976
- 3) 梅原靖文, 善 功企, “超軟弱粘土の圧密定数の決定法”, 港湾技術研究所報告, 第14巻, 第4号, 1976年1月
- 4) 今井五郎, “液状粘土の一次元圧密特性に関する基礎的研究”, 東京大学学位論文, 1978年5月
- 5) 梅原靖文, 善 功企, “超軟弱粘土の定率ひずみ圧密試験とその解釈について”, 第12回土質工学研究発表会, 1977年5月
- 6) 梅原靖文, 善 功企, 山本邦雄, “定率ひずみ圧密試験による超軟弱粘土の圧密特性”, 第33回土木学会年次学術講演会, 第3部, 1978年
- 7) 矢野弘一郎, 今井五郎, 鶴谷和夫, “粘土の沈降実験”, 第12回土質工学研究発表会, 1977年5月
- 8) R. E. Gibson, G. L. England and M. J. L. Hussey, “Theory of one-dimensional consolidation of saturated clays”, *Geotechnique*, Vol. 17, 1967
- 9) H. Aboshi, H. Yoshikuni and S. Murayama, “Constant loading rate consolidation test”, *Soils and Foundations*, Vol. 10, No. 1, 1970
- 10) 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, Vol. 12, No. 4, 1973年12月
- 11) J. J. Hamilton and C. B. Crawford, “Improved determination of preconsolidation pressure of a sensitive clay”, *ASTM, STP*, No. 254, 1959
- 12) C. B. Crawford, “Interpretation of the consolidation test”, *Proc. ASCE*, Vol. 90, No. SM5, 1964
- 13) H. E. Wahls and N. S. DeGodoy, “Discussion on Crawford (1964)”, *Proc. ASCE*, Vol. 91, No. SM3, 1965
- 14) R. E. Smith and H. E. Wahls, “Consolidation under constant rates of strain”, *Proc. ASCE*, Vol. 95, No. SM2, 1969
- 15) P. M. Byrne and Y. Aoki, “The strain controlled consolidation test”, *Soil Mech. Series*, No. 9, Dept. of Civil Eng., Univ. of British Columbia, 1968
- 16) A. E. Z. Wissa, J. T. Christian, E. H. Davis, and S. Heiberg, “Consolidation at constant rate of strain”, *Proc. ASCE*, Vol. 97, No. SM10, 1971

- 17) J. Lowe, III, E. Jonas and V. Obrician, “Controlled gradient consolidation test”, *Proc. ASCE*, Vol. 95, No. SM2, 1969
- 18) 奥村樹郎, “急速圧密試験について”, 第19回土質工学シンポジウム——圧密試験法とその結果の解釈——, 1974年
- 19) E. H. Davis and G. P. Raymond, “A non-linear theory of consolidation”, *Geotechnique*, Vol. 15, No. 2, 1965
- 20) 三笠正人, 高田直俊, 李 幸植, “超軟弱粘土の圧密特性”, 第11回土質工学研究発表会, 1976年6月
- 21) 土木学会編, 水理公式集——昭和46年改訂版, 1971年
- 22) E. C. McRoberts and J. F. Nixon, “A theory of soil sedimentation”, *Canadian Geotech. J.* Vol. 13, 294, 1976
- 23) 松本一明, 小川富美子, “港湾地域における土の工学的諸係数の相関性について(第1報)”, 港湾技術研究所資料, No. 71, 1969
- 24) 土質工学会, 土質試験法

# 記 号 表

|              |                          |
|--------------|--------------------------|
| $C_c$        | : 圧縮指数                   |
| $c_v$        | : 圧密係数                   |
| $e$          | : 間げき比                   |
| $f$          | : 体積比                    |
| $f_{av}$     | : 平均体積比                  |
| $f_0$        | : 初期体積比                  |
| $f_T$        | : 供試体頭部における体積比           |
| $f_B$        | : 供試体底部における体積比           |
| $F$          | : 供試体の底部のひずみの頭部のひずみに対する比 |
| $G_f$        | : 海水の比重                  |
| $G_s$        | : 土粒子の比重                 |
| $H$          | : 供試体の高さ                 |
| $H_i$        | : 供試体の予圧密前初期高さ           |
| $H_0$        | : 定率ひずみ圧密試験開始前の供試体の初期高さ  |
| $\Delta H_0$ | : 沈下量                    |
| $I_p$        | : 塑性指数                   |
| $k$          | : 透水係数                   |
| $m_v$        | : 体積圧縮係数                 |
| $n$          | : 分割数                    |
| $p$          | : 圧力                     |
| $p_0$        | : 再圧密圧力                  |
| $R$          | : 定率ひずみ圧密試験におけるひずみ速度     |

超軟弱粘土の圧密試験法とその適用

|                         |                             |
|-------------------------|-----------------------------|
| $S$ : 沈降量               | $Z_0$ : $z_0$ を無次元表示した場合の高さ |
| $t$ : 時間                | $\Delta Z_0$ : 差分間隔         |
| $dt$ : 時間の増分            | $\beta$ : 塩分濃度              |
| $T'$ : 無次元時間            | $\gamma_w$ : 水の単位体積重量       |
| $\Delta T'$ : 差分間隔      | $\gamma$ : 土の単位体積重量         |
| $u_h$ : 過剰間げき水圧         | $\bar{\epsilon}$ : ひずみ      |
| $u_s$ : 静水圧             | $\zeta$ : 圧密比               |
| $w_d$ : 乾燥重量            | $\sigma$ : 応力               |
| $w$ : 含水比               | $\sigma'$ : 有効応力            |
| $w_0$ : 初期含水比           | $\sigma_B$ : 供試体底部の全応力      |
| $w_L$ : 液性限界            | $\sigma_T$ : 供試体頭部の全応力      |
| $w_p$ : 塑性限界            | $\sigma_{av}'$ : 平均有効応力     |
| $w_m$ : 塩分を土の重量に含ませた含水比 | $\sigma_0'$ : 初期応力          |
| $z_0$ : 固定座標系で表わした高さ    |                             |