

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

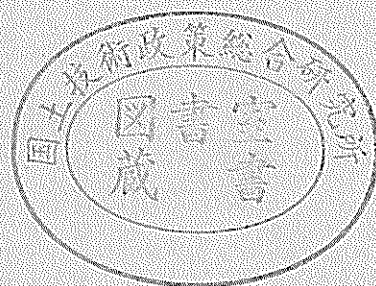
---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 30      NO. 3      SEPT. 1991

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第30巻 第3号 (Vol.30, No. 3) 1991年9月 (Sept.1991)

## 目次 (CONTENTS)

1. 沖積粘土地盤に対する定率ひずみ圧密試験の適用性  
.....水上 純一・小林 正樹・小泉 和広..... 3  
(Constant Rate of Strain Test of Undisturbed Alluvial Marine Clay  
..... Jun-ichi MIZUKAMI, Masaki KOBAYASHI and Kazuhiro KOIZUMI)
  
2. 港湾コンクリート構造物の補修方法としての電着工法の適用性  
.....阿部 正美・福手 勤・横田 優・佐々木晴敏.....25  
(Applicability of Electrodeposition as a Repairing Method  
for Deteriorated Marine Structures  
..... Masami ABE, Tsutomu FUKUTE, Masaru YOKOTA and Harutosi SASAKI)
  
3. 水中施工管理用小型計測機の開発  
.....石塚 浩次・根本 孝志.....65  
(Development of Small-size Measuring Instrument for Underwater execution control  
..... Koji ISHIZUKA and Takashi NEMOTO)

## 沖積粘土地盤に対する定率ひずみ圧密試験の適用性

水上純一\*・小林正樹\*\*・小泉和広\*\*\*

### 要 旨

定率ひずみ圧密試験は、連続載荷方式の圧密試験の一種である。この試験法は、連続載荷方式であるために、段階載荷の標準圧密試験法と比べて、いくつかの利点を持っている。まず第一に、連続的な応力-ひずみ曲線が得られることであり、圧密降伏後に大きな圧縮性を示す試料に対して適している。第二番目は、短期間で試験が終了する急速圧密試験であることである。第三番目は、試験の自動化が容易なことである。一方、定率ひずみ圧密試験から得られる圧密降伏応力は、標準圧密試験から得られるものよりも大きくなることが知られている。これは、ひずみ速度による時間効果に起因している。

本研究では、ひずみ速度による影響を調べるために、二種類の再圧密試料に対して定率ひずみ圧密試験を実施した。その結果を基にして、応力緩和を用いた簡便な圧密降伏応力の補正法を提案している。また、三種類の不攪乱沖積粘土に対して定率ひずみ圧密試験と標準圧密試験を実施し、その補正法を適用している。

主要な結論は、以下のとおりである。

- (1) 圧密降伏応力比と、ひずみ速度の対数の間には直線関係が認められる。
- (2) 本研究で提案した補正法を用いると、定率ひずみ圧密試験から得られる圧密降伏応力は、標準圧密試験から得られる圧密降伏応力とほぼ同じ値になる。

キーワード：圧密試験、応力-ひずみ曲線、時間効果、粘土

---

\* 土質部 土性研究室

\*\* 土質部 土性研究室長

\*\*\* 前研修生 (㈱ダイヤコンサルタント)

## Constant Rate of Strain Test of Undisturbed Alluvial Marine Clay

Jun-ichi MIZUKAMI\*  
Masaki KOBAYASHI\*\*  
Kazuhiro KOIZUMI\*\*\*

### Synopsis

Constant Rate of Strain (CRS) tests were carried out on three types of undisturbed and two types of remolded clays. CRS test is one of the continuous loading test and has advantages over conventional incremental loading test (STD test) : (1) CRS test can be obtain continuous stress-strain curve that is useful for sensitive clay : (2) it is completed in shorter duration : (3) test method can be easily automated. However it is well known that the consolidation yield stress,  $p_c$  estimated by CRS test is greater than that obtained by STD test due to strain rate effect.

In this report, in order to investigate strain rate effect, a series of CRS test was carried out on two types of remolded clays. A simple method to modify  $p_c$  using stress relaxation test is proposed and applied to CRS test results on three types of undisturbed clays.

Main conclusions are as follows :

- (1) The consolidation yield stress,  $p_c$  from CRS test increases linearly with the strain rate.
- (2) Using the method proposed in this report, the  $p_c$  from CRS test agrees favorably with  $p_c$  from STD test.

Key Words : Consolidaion Test, Stress-strain Curve, Time Effect, Clay

---

\* Member, Soil Mechanics Laboratory, Geotechnical Engineering Division

\*\* Chief, Soil Mechanics Laboratory, Geotechnical Engineering Division

\*\*\*Ex-trainee, Soil Mechanics Laboratory, Geotechnical Engineering Division (Dia Consultant Co., Ltd)

# 目 次

要 旨 .....	3
1. まえがき .....	7
2. 定率ひずみ圧密試験に関する既往の研究 .....	7
2.1 定率ひずみ圧密理論 .....	7
2.2 ひずみ速度が試験結果に及ぼす影響 .....	10
3. 試験方法 .....	12
3.1 試験装置 .....	12
3.2 試験手順 .....	12
3.3 試験結果の整理方法 .....	13
4. 再圧密試料での試験結果 .....	13
4.1 試験概要および試料 .....	13
4.2 応力-ひずみ挙動および圧密降伏応力 .....	14
4.3 体積圧縮係数および圧密係数 .....	15
4.4 圧密降伏応力に関する考察 .....	17
5. 不攪乱試料での試験結果 .....	18
5.1 試験概要および試料 .....	18
5.2 試験結果 .....	19
5.3 圧密降伏応力の補正法に関する考察 .....	21
6. 結 論 .....	23
7. あとがき .....	24
参考文献 .....	24

## 1. まえがき

定率ひずみ圧密試験は、1960年代半ばに急速圧密試験として提案された試験法である。この試験法は、標準圧密試験のような段階的荷重ではなく、供試体に一定のひずみ速度で変形を与えることにより圧密を行う試験法である。主な特徴は、短期間に試験を行える急速圧密試験法であることと、試験中の応力-ひずみ関係を連続的に得られる連続荷重試験であることである。通常用いられている標準圧密試験では、洪積粘土など年代効果の大きな試料の場合には、圧密降伏後に急激に大きな圧密沈下が生じるために  $e-\log p$  関係が求められず、圧密降伏応力の評価が困難である例が多かった。定率ひずみ圧密試験は、このような試料についても、容易に圧密降伏応力を決定することができる非常に有効な試験法であることが、最も大きな利点である。

一方、定率ひずみ圧密試験から得られる圧密降伏応力は、標準圧密試験から得られる圧密降伏応力よりも大きくなることが知られている。このことから、わが国では標準圧密試験が設計体系の中に根付いているため、定率ひずみ圧密試験は実務ではほとんど採用されず、研究レベルでのみ実施されているのが現状である。しかし、最近では、圧密降伏応力はひずみ速度の関数として定まるとの説がでてきており、学会内でも標準化の動きがでるなど注目を集めてきている。

本研究の目的は、定率ひずみ圧密試験を実務で用いるために、ひずみ速度と試験結果の関係をあきらかにすることと、国内での報告例が少ない不攪乱試料を用いた定率ひずみ圧密試験結果と標準圧密試験結果との関係を調べることである。そこで、室内で調整・作製した再圧密試料と、沖積粘土地盤から採取した不攪乱試料に対して、定率ひずみ圧密試験を実施して、ひずみ速度と圧密降伏応力および圧密定数の関係について検討を行った。検討の方法は、実務で用いることを考慮して、主に標準圧密試験結果との比較をとおして行った。また、圧密降伏応力の簡便な補正法を提案した。

## 2. 定率ひずみ圧密試験に関する既往の研究

### 2.1 定率ひずみ圧密理論

定率ひずみ圧密試験は、 $e-\log p$  関係を短期間に求めることを目的に、1964年に Crawford によって、急速圧密試験として提案された試験法である<sup>1)</sup>。その後、理論的研究が進み、圧密係数などの他の圧密定数も求められるようになった。

定率ひずみ圧密試験における供試体の挙動についての測定可能な項目は、供試体がうける鉛直荷重、供試体下端面での過剰間隙水圧、供試体全体の平均ひずみ速度である。供試体内の応力、変形の分布については測定できないので、仮定する必要がある。種々の理論的取扱いが提案されている。この仮定については、層厚変化の取扱いについて大きく二つに分類できる。一つは、層厚の変化を考慮しない微小ひずみ理論であり、Smith-Wahls<sup>2)</sup>、Byrne-Aoki<sup>3)</sup>、Wissa<sup>4)</sup>らの研究があげられる。もう一つは、層厚の変化を考慮する有限ひずみ理論で、Umehara-Zen<sup>5)</sup>、Lee<sup>6)</sup>、Znidarcic<sup>7)</sup>らの研究がある。Znidarcicらによってこれらの理論が整理されており、善ら<sup>8)</sup>が表-1のようにまとめたものを示している。ここで、Byrne-Aokiの解は、Smith-Wahlsの解で  $b/r_e=0$  としたものと一致するので、この表にはのせていない。ここに、 $b$  は実験定数、 $r_e$  は平均間隙比  $e_{av}$  の変化速度  $\partial e_{av} / \partial t$  である。また、微小ひずみ理論から求められる圧密定数の計算法を表-2に示す。

Smith-WahlsとWissaらの解による供試体内のひずみ分布形状を示したのが図-1である。図からわかるように、Smith-Wahlsの解ではひずみ分布は直線となり、 $b/r_e=0$  のとき、供試体内のひずみ分布は平均ひずみと一致する。Wissaらの解は、時間係数  $T_v (=c_v t / H^2)$  の値により、定常状態と非定常状態に分けられる。これは、表-1のWissaらの基礎方程式の解の非定常項と呼ばれる右辺第二項が、 $T_v > 0.5$  のとき無視しうるほど小さくなるため、 $T_v > 0.5$  を定常状態、 $T_v \leq 0.5$  を非定常状態と呼んでいる。定常状態では、任意時間において、ひずみ分布は、ひずみ速度一定の条件に対して  $rH^2/c_v$  のみの関数となる。図-1に定常状態の解によるひずみ分布を示すが、ひずみ分布は放物線形状となる。

微小ひずみ理論と有限ひずみ理論から得られるひずみ分布の比較を行うために、Wissaらの線形・定常状態の解とUmehara-Zenの解によるひずみ分布を図-2に示す。この解は、平均ひずみ  $rt$  と  $rH_0^2/c_v$  をパラメータとしている。ここで  $r$  はひずみ速度を表し、 $r = \partial e / \partial t$  である。 $t$  は時間、 $H_0$  は有限ひずみ理論における初期高さ、 $c_v$  は圧密係数である。この図から、 $rH_0^2/c_v$  が0.1で、平均ひずみが0.2~0.3程度では、分布形状の差が小さく、微小ひずみ理論を用いても、有限ひずみ理論との差は小さいと考えられる。Leeは、微小ひずみ理論によりひずみ分布を説明できる条件として、 $rH_0^2/c_v < 0.2$ 、測定間隔  $\Delta t \leq 0.1 (H_0^2/c_v)$  をあげている。

以上のことから、本研究では微小ひずみ理論から導いたWissaらの解を用いて整理を行うこととした。非定常

表-1 定ひずみ速度圧密試験の基礎方程式と解

著者	基礎方程式	微小/有限ひずみ理論	解析法	基礎方程式の解
Smith-Wahles (1969)	$\frac{1}{1+e_{av}} \frac{\partial e}{\partial t} = \frac{k}{r_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ <p><math>e</math>: 間隙比, <math>u</math>: 過剰間隙水圧, <math>e_{av}</math>: 平均間隙比</p>	微小ひずみ	解析解	$e(z, t) = e_o - r_e t \cdot [1 - (\frac{b}{r_e}) \{ (\frac{z}{H}) - 0.5 \}]$ $u(z, t) = \frac{\gamma_w r_e H^2}{k(1+e_{av})} [ \{ (\frac{z}{H}) - \frac{1}{2} (\frac{z}{H})^2 \} - (\frac{b}{r_e}) \{ \frac{1}{4} (\frac{z}{H})^2 - \frac{1}{6} (\frac{z}{H})^3 \} ]$ <p><math>e_o</math>: 初期間隙比, <math>r_e</math>: 平均間隙比較の変化速度  <math>H</math>: 供試体初期高さ, <math>b</math>: 実験定数, <math>b/r_e = 0 \sim 2</math></p>
Wissarā (1971)	$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2}$ <p><math>\varepsilon</math>: 軸ひずみ</p>	微小ひずみ	解析解	$\varepsilon(z, t) = r t + \left( \frac{r H^2}{c_v} \right) \left[ \frac{1}{3} - \left( \frac{z}{h} \right) + \frac{1}{2} \left( \frac{z}{H} \right)^2 \right]$ <p style="text-align: center;">定常項</p> $- \left\{ \left( \frac{2}{\pi^2} \right) \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{1}{n^2} \right) \cos(n \pi \frac{z}{H}) \exp(-n^2 \pi^2 T_v) \right\}$ <p style="text-align: center;">(非定常項)</p> <p><math>r</math>: ひずみ速度, <math>T_v</math>: 時間係数</p>
Umehara-Zen (1980)	$\frac{\partial \zeta}{\partial t} = \zeta c_v \frac{\partial^2 \zeta}{\partial z^2}$ <p><math>\zeta = f/f_o = 1 + e / 1 + e_o = 1 / (1 - \varepsilon)</math></p>	有限ひずみ	差分解	$\varepsilon(z, t) = F \left( \frac{z}{H_o}, \frac{R t}{H_o}, \frac{c_v}{R H_o} \right)$ <p><math>R</math>: 変位速度 (<math>R = r H_o</math>)  <math>H_o</math>: 有限ひずみにおける供試体初期高さ</p>
Lee (1981)	$\frac{\partial n}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 n}{\partial z^2}$ <p><math>n</math>: 間隙率  <math>n = e / (1 + e)</math></p>	有限ひずみ	差分解 近似解	$\varepsilon(z, t) = F \left( \frac{z}{H_o}, T_v, \frac{r H_o^2}{c_v} \right)$ $\varepsilon(z, t) \approx \frac{\beta T_v}{1 - \beta T_v} + \frac{\beta}{2(1 - (1/3)\beta(1 - \beta T_v))} \cdot \left\{ \left( \frac{2/H_o}{H/H_o} \right)^2 - \frac{1}{3} \right\}$ <p><math>\beta = r H_o^2 / c_v</math></p>
Znidarricic (1986)	$\frac{\partial e}{\partial t} = g(e) \frac{\partial^2 e}{\partial z^2}$ $g(e) = \frac{k(e)}{\gamma_w - (1+e)} \frac{\partial \sigma'}{\partial e}$ <p><math>\approx \bar{g}(e_{av}) = const.</math></p>	有限ひずみ	解析解	$E(Z, T) = \int_0^1 E'(Z') dZ' + V_1 T + B(Z, T)$ <p><math>E = \frac{e}{e_o}</math>, <math>E'</math>: <math>\Delta T</math>時間前の<math>E</math>, <math>Z = \frac{z}{H_o}</math>, <math>T = \frac{\bar{g} t}{H_o}</math></p> <p><math>V_1 = \frac{V_1}{e_o \bar{g}}</math>, <math>V_2 = \frac{V_2}{e_o \bar{g}}</math> (<math>V_1, V_2</math>: 供試体上下面変化速度)</p> <p><math>B(Z, T)</math>: <math>Z, T, V_1, V_2</math>の関数, <math>H_s</math>: 供試体実質部高さ</p>

沖積粘性土地盤に対する定率ひずみ圧密試験の適用性

表-2 微小ひずみ理論にもとづく試験データの整理法

著者	応力-ひずみ関係	間隙比, 圧密圧力, 圧密定数等	試験データの整理方法
Smith-Wahles	線形	$e(z, t) = e_0 - r_e t \cdot \left[ 1 - \left( \frac{b}{r_e} \right) \left( \frac{z}{H} \right) - 0.5 \right]$ $\sigma'_{av} = \sigma - \left\{ \frac{1/3 - 1/24 (b/r_e)}{1/2 - 1/12 (b/r_e)} \right\} \cdot u_b$ $k = \frac{\gamma_w r_e H^2}{(1 + e_{av}) u_b} \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{12} \left( \frac{b}{r_e} \right) \right\}$ $c_v = \frac{k(1 + e)}{\gamma_w a_v} = \frac{r_e H^2}{a_v u_b} \left\{ \frac{1}{2} - \frac{1}{12} \left( \frac{b}{r_e} \right) \right\}$ <p style="text-align: center;">(<math>e \approx e_{av}</math>)</p>	$e_{av} = \frac{1}{H} \int_0^H e dz = e_0 - r_e t$ $= e_0 - \frac{rt}{H_s} = e_0 - \frac{\Delta H}{H_s}$ <p><math>\sigma'_{av}, k, c_v</math>は左式で <math>b/r_e = 1, r_e = r/H_0</math>とする。</p> $a_v = \Delta e_{av} / \Delta \sigma'_{av}$ <p>(圧縮係数)</p>
Wissaら	[定常状態: $T_v > 0.5$ ]	$\varepsilon(0, t) = rt + \frac{rH^2}{3c_v}, \quad \varepsilon(H, t) = rt - \frac{rH^2}{6c_v}$ $c_{av} = 1/3 \{ 2c(H, t) + \varepsilon(0, t) \} = rt \text{ (放物線形ひずみ分布)}$	
	線形	$\sigma'_{av} = 1/3 \{ 2\sigma'(H, t) + \sigma'(0, T) \}$ $= \sigma - (2/3) u_b$ $m_v = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta \sigma'} = r \left( \frac{\Delta t}{\Delta \sigma'} \right) \text{ (}\Delta t \text{間の差)}$ $m_v = \frac{\varepsilon(0, t) - \varepsilon(H, t)}{\sigma'(0, t) - \sigma'(H, t)} = \frac{rH^2}{2u_b c_v}$	$e_{av}, \sigma'_{av}: \text{Smithらと同様}$ $m_v = r (\Delta t / \Delta \sigma)$ $c_v = \frac{H^2}{2u_b} \left( \frac{\Delta \sigma}{\Delta t} \right)$ $k = \frac{\gamma_w r H^2}{2u_b}$
	非線形	$\sigma'_{av} = 1/3 (\sigma^3 - 2\sigma^2 u_b + \sigma u_b^2)^{1/3}$ $C_\varepsilon = \frac{r \Delta t}{\log \sigma(t + \Delta t) - \log \sigma(t)}$ $= \frac{r \Delta t}{\log (\sigma_{t1} / \sigma_{t2})} \text{ (}\Delta t \text{間の差)}$ $C_\varepsilon = \frac{\varepsilon(0, t) - \varepsilon(H, t)}{\log \sigma'(0, t) - \log \sigma'(H, t)}$ $= \frac{-rH^2}{2c_v \log (1 - u_b / \sigma)}$ <p style="text-align: center;">(供試体上下面の差)</p>	$\sigma'_{av} \text{は左式で算定する。}$ $m_v = \frac{0.434 C_\varepsilon}{\sigma}$ $c_v = - \frac{H^2 \log (\sigma_{t2} / \sigma_{t1})}{2 \Delta t \log (1 - (u_b / \sigma))}$ $k = \gamma_w m_v c_v$



状態 ( $T_v \leq 0.5$ ) は圧密初期に終わり、工学的に結果が必要となる応力状態にはあまり影響を与えないことから、試験結果を定常状態として整理する。また、表-2からわかるように、供試体内の応力-ひずみ関係の仮定により、線形解と非線形解の二つがある。実際の応力状態は、非線形であると考えられるが、微小時間を考えると線形として扱っても、実用上問題はないと考えられる。したがって、Wissaらの解の線形・定常状態の整理法を用いることにした。善らも、一般の試料に対しては、微小ひずみ理論に基づく線形・定常解析法を用いて整理するのが一般的であると述べている。

2.2 ひずみ速度が試験結果に及ぼす影響

定率ひずみ圧密試験は、標準圧密試験のような段階荷方式ではなく、連続荷方式の圧密試験であるため、試験結果も連続的に得られる利点がある。しかし、ひずみ速度が  $e-\log p$  曲線に影響を与え、圧縮指数  $C_c$  の変化は小さいものの、圧密降伏応力を大きく評価すること

が知られている。模式図を図-3に示すが、ひずみ速度が大きくなるにつれて、 $e-\log p$  曲線は右側に平行移動した形となる。このひずみ速度が  $e-\log p$  曲線に及ぼす影響については、圧密降伏応力を用いて整理すると、定量的な比較が容易である。

Swedish Geotechnical Institute (SGI) の基準では、ひずみ速度が  $4 \times 10^{-5} \text{ mm/s}$  ( $\dot{\epsilon} = 0.012\%/\text{min}$ ) 以下で試験を行えば、定率ひずみ圧密試験と標準圧密試験の圧密降伏応力  $p_c$  が一致するととして、このひずみ速度を基準の標準値としている。Larssonら<sup>9)</sup> は、この標準値が種々の試料に適用できるかを調べるために、有機質粘土と一般の粘土を用いて試験を行い、結果を図-4のように示した。縦軸は圧密降伏応力比、横軸はひずみ速度である。この図では、ひずみ速度がある境界の値（この例では、 $5 \sim 7 \times 10^{-5} \text{ mm/s}$  程度）よりも小さい場合には、

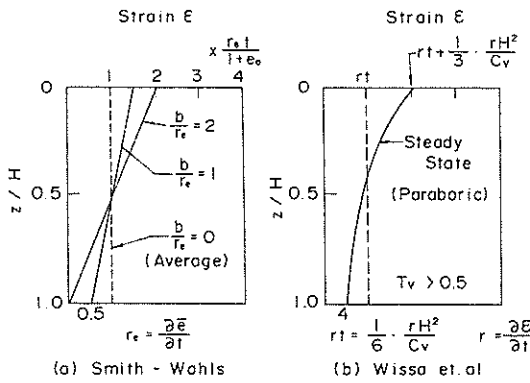


図-1 微小ひずみ理論のひずみ分布

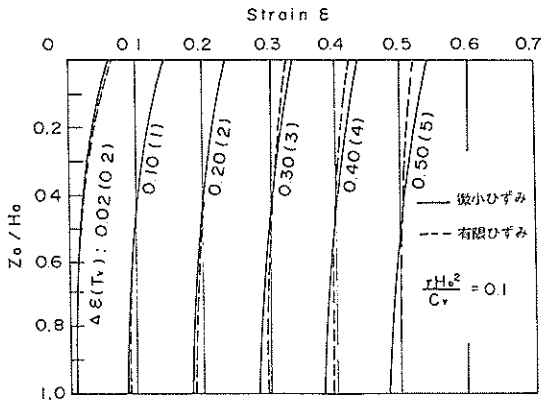


図-2 ひずみ分布の比較

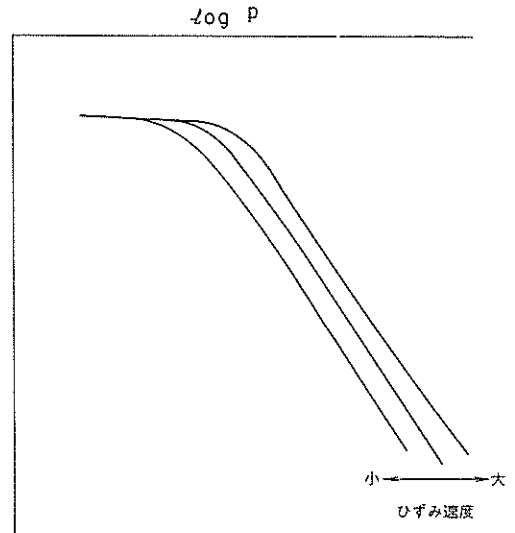


図-3  $e-\log p$  曲線の模式図

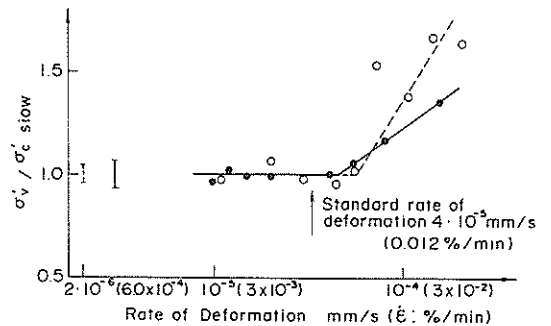


図-4 圧密降伏応力とひずみ速度の関係 (Larssonら<sup>9)</sup>)

圧密降伏応力は一定値となっている。一方、その境界のひずみ速度よりも大きい場合には、圧密降伏応力は、ひずみ速度の対数に対して直線的に増大することを示している。Larssonらは、Canadaの粘土の試験結果も図-4と同様な傾向であると、基準のひずみ速度の標準値は妥当であり、この標準値は適用範囲が大きいと報告している。

Leroueilら<sup>10)</sup>は、Canada東部の粘土に対して、種々の圧密試験を実施して、応力-ひずみ関係をくわしく調べている。図-5は、種々のひずみ速度で実施した定率ひずみ圧密試験から得られた、Batiscan粘土の応力-ひずみ曲線の一部を示したものである。この図中で、最もひずみ速度が大きい $\dot{\epsilon}_1$  ( $\dot{\epsilon}_1 = 8.58 \times 10^{-2} \% / \text{min}$ )と、最も小さい $\dot{\epsilon}_6$  ( $\dot{\epsilon}_6 = 1.01 \times 10^{-8} \% / \text{min}$ )に対応する曲線は、他のひずみ速度に対応する曲線群とは明確に異なった形状を持っている。また、これらの曲線を、圧密降伏応力で正規化した圧密圧力と、ひずみの関係として整理すると、あるひずみ速度の範囲では、非常にせまい領域に収束すると報告している。そのひずみ速度の範囲とは、 $6.0 \times 10^{-4} \% / \text{min} < \dot{\epsilon} < 1.2 \times 10^{-1} \% / \text{min}$ である。この範囲の外にあるひずみ速度に対応する曲線形状が、他と異なる理由を以下のように考察している。 $1.2 \times 10^{-1} \% / \text{min}$ よりも大きなひずみ速度の場合、間隙水圧比（供試体底部で測定される間隙水圧と鉛直荷重の比、 $\Delta u_b / \Delta \sigma_v$ ）が0.89と大きくなり、定率ひずみ圧密理論を適用することに疑問があることと、粘土の粘性挙動に差があることが考えられるとしている。一方、非常に小さなひずみ速度で試験を行った場合には、試験中にシキントロピーにより粘土の骨格構造に硬化が生じていることが考えられると考察している。

定率ひずみ圧密試験から得られた圧密降伏応力と、ク

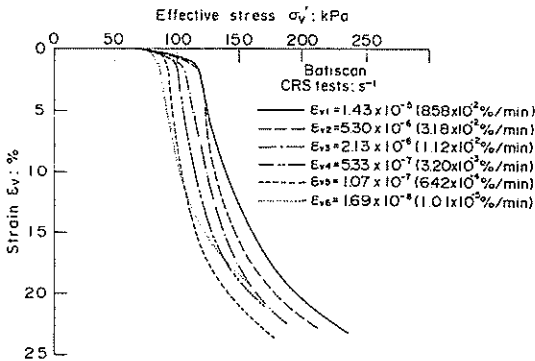


図-5  $\epsilon - \sigma$  曲線に及ぼすひずみ速度の影響 (Leroueilら<sup>10)</sup>)

リープ試験から得られたものを、ひずみ速度に対して整理して示したものが、図-6である。この図は、圧密試験によって得られる圧密降伏応力は、載荷方式とは無関係で、供試体に作用するひずみ速度のみによって決まることを示している。なお、図中の圧密降伏応力が88kPa (約0.9kgf/cm<sup>2</sup>) に対応する実線は、標準圧密試験での圧密降伏応力である。また、他の粘土に対して、定率ひずみ圧密試験と定動水勾配圧密試験を実施して得られた圧密降伏応力についても整理しており、図-6と同様の結果を得ている。

以上の結果から、Leroueilらは、圧密降伏応力はひずみ速度のみによって定まることと、圧縮ひずみは正規化した圧密圧力 $\sigma / \sigma_v$  ( $\sigma_v$ : 圧密降伏応力)のみで定まることを結論としている。今井<sup>11)</sup>は、Leroueilらの研究結果と、圧密中の挙動を供試体内の各層別に確認できる分割型圧密試験機を用いた独自の研究結果から、次のような主要な結論を得た。

- ①  $\sigma_v$  は、要素の $\dot{\epsilon}$  (間隙比の変化速度、 $\dot{\epsilon}$ と変換可能)によって一義的に定まる可能性が高い。 $\dot{\epsilon}$ が大きいほど $\sigma_v$ も大きい。
- ②  $\sigma_v < \sigma$ の範囲で、 $\dot{\epsilon}$ 一定の $e - \log p$ 曲線は、それぞれ互いに平行である。

以上の結論から、一次元圧密の構成方程式は $e$ 、 $\dot{\epsilon}$ と $\sigma$ の三者のみの関数として成立することを示唆している。

梅原<sup>12)</sup>は、わが国の自然沖積粘土について、多数の定率ひずみ圧密試験結果を報告している。図-7は、標準圧密試験から得られる圧密降伏応力 $p_{c, std}$ で正規化した $p_c$ を、ひずみ速度に対して整理したものである。各試料の塑性指数 $I_p$ は、本牧粘土で55、大黒粘土で60程度、錦海粘土で77程度である。梅原はこの結果から、 $p_c / p_{c, std}$ はひずみ速度のみの影響をうけており、試料の状態（不攪乱試料か再圧密試料か）、荷重の履歴、バックプレッ

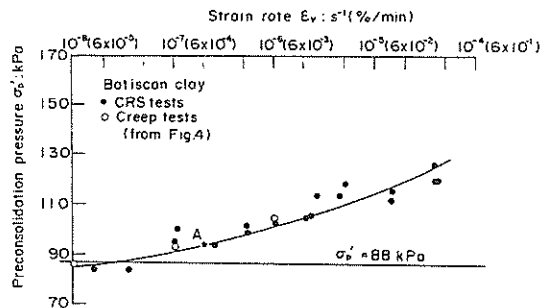


図-6 圧密降伏応力とひずみ速度の関係 (Leroueilら<sup>10)</sup>)

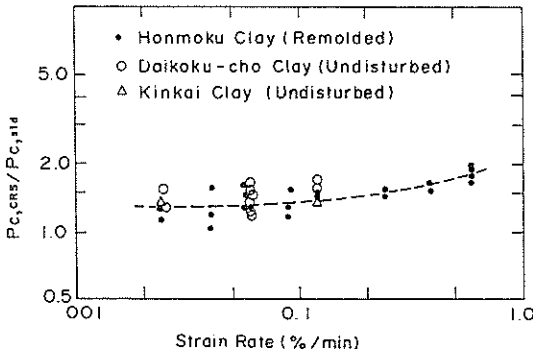


図-7 圧密降伏応力とひずみ速度の関係 (梅原<sup>12)</sup>)

シャーの大小などとは無関係であるとしている。 $m_v$ 、 $c_v$ などの圧密定数は、正規圧密領域ではひずみ速度の影響をほとんどうけず、広範囲のひずみ速度に対して、標準圧密試験結果とよい一致を示すとしている。また、標準圧密試験との対応という観点から、0.1~0.2 %/min以下のひずみ速度を用いることを実用上の目安としている。また、シルトを多く含む低塑性の粘性土に対しては、標準圧密試験よりも定率ひずみ圧密試験の方が適用性が高いと報告している。

### 3. 試験方法

#### 3.1 試験装置

定率ひずみ圧密試験を行うための試験装置が満足すべき条件は、供試体に与えるひずみ速度を一定にする必要があるため、試験中の負荷変動に対して常に一定変位を与えること、および試験結果を有効応力で整理するため、精度よく間隙水圧を測定しうることが特に重要であると考えられる。また、これら二点のほか、できるだけ既存の試験装置を併用しうることに留意して試験装置を構成した。

載荷装置は、通常三軸試験で用いているものを使用した。この載荷装置は、変位速度をサーボ回路を用いて制御しているため、試験中の負荷変動に対して、一定の変位速度を維持しうる。また、変位速度は無段変速の可変抵抗で設定するため、任意の変位速度を設定できることが特徴である。載荷枠の載荷限度は公称で2tfである。

圧密容器は、間隙水圧を精度よく測定するために、図-8に示すように、バックプレッシャーを負荷できる密閉型のものを用いた。ピストン摺動部は、ペロフラムでシールして密閉している。供試体寸法は、標準圧密試験と同様に、直径60mm、高さ20mmである。図に示すように

間隙水圧は、供試体底面で測定しており、試験時の排水条件は片面排水である。間隙水圧の測定精度をあげることに、供試体の飽和度を高めるために、各試験で1kgf/cm<sup>2</sup>のバックプレッシャーを負荷した。

測定項目は軸荷重、軸変位、間隙水圧の三項目である。各測定項目に対するセンサーの容量および分解能を表-3に示す。試験は、供試体作製およびセットを除いて、パーソナルコンピュータを用いて自動的に実施し、データ整理も、パーソナルコンピュータで行った。

#### 3.2 試験手順

今回行った定率ひずみ圧密試験の試験手順の概略は、以下のとおりである。

成形した試料を圧密リングにセットし、あらかじめ排水系統および間隙水圧測定系統を脱気水で飽和させた圧密容器に供試体を設置する。次に圧密容器を組み立て、載荷台にセットし、変位計のゼロ点をとる。ここで、載荷台に取り付けた荷重計をモニターしながら載荷台を上昇させ、圧密容器の載荷ロッドと荷重計を接触させる。

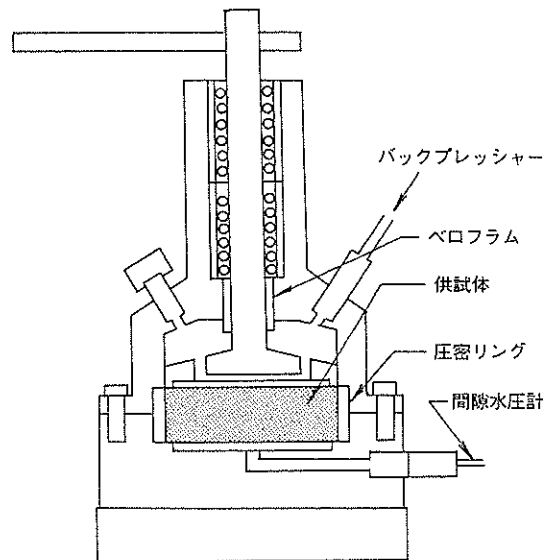


図-8 圧密試験容器

表-3 測定器の容量および分解能

種別	タイプ	容量	分解能
荷重計	ひずみゲージ	500kgf	$1.25 \times 10^{-1}$ kgf
変位計	同上	10mm	$2.00 \times 10^{-3}$ mm
間隙水圧計	同上	5 kgf/cm <sup>2</sup>	$2.921 \times 10^{-3}$ kgf/cm <sup>2</sup>

この状態で圧密容器に脱気水を満たし、1 kgf/cm<sup>2</sup>のバックプレッシャーを負荷する。

供試体底部で測定する間隙水圧が、作用させたバックプレッシャーに一致するまで放置し、載荷を開始する。載荷中の測定項目は、軸荷重、軸変位、間隙水圧である。測定間隔は、載荷開始から10分までは1分間隔、1時間までは5分間隔、それ以降は10分間隔を目安とした。実際に試験を実施する場合には、設定したひずみ速度に応じて測定間隔を適宜変更し測定を行った。ひずみ速度に応じて可変抵抗を調整することにより、変位速度を設定して載荷した。標準圧密試験と比較するため、鉛直有効応力が12.8kgf/cm<sup>2</sup>に達するまで載荷を行っている。載荷終了後圧密容器を解体し、供試体の乾燥重量を測定した。

圧密試験結果を比較するため、標準圧密試験も実施した。試験方法はJIS A 1217-1990にしたがって行った。

### 3.3 試験結果の整理方法

試験結果の整理は、2.1で述べたWissaらの理論を用いて以下のように行う。

#### ①応力-ひずみ関係(圧密圧力と間隙比、ひずみの関係)

各時間における平均ひずみ  $\varepsilon_{av}$  と平均間隙比  $e_{av}$  は、次式から計算される。

$$\varepsilon_{av} = \Delta H / H_0 \quad (1)$$

$$e_{av} = e_0 - \Delta H / H_0 \quad (2)$$

ここに、 $\Delta H$ : 初期からの鉛直変位(cm)

$H_0$ : 初期高さ(cm)

$e_0$ : 初期間隙比

$H_s$ : 土粒子の実質部高さ(cm)

圧密圧力(平均鉛直有効応力)  $\sigma'_{av}$  (kgf/cm<sup>2</sup>)は、次式で計算される

$$\sigma'_{av} = \sigma - (2/3) u_b \quad (3)$$

ここに、 $\sigma$ : 全応力(kgf/cm<sup>2</sup>)

$u_b$ : 過剰間隙水圧(kgf/cm<sup>2</sup>)

(3)式中の  $u_b$  の係数  $2/3$  は、供試体中の間隙水圧分布を放物線と仮定したときの間隙水圧比  $u_{av}/u_b$  である。

#### ②体積圧縮係数 $m_v$

体積圧縮係数  $m_v$  (cm<sup>2</sup>/kgf) は、 $m_v = \Delta \varepsilon / \Delta \sigma'$  で定義される。計算法には場所的増分を用いる方法と、時間的増分を用いる方法がある。実測値を整理するには時間的増分を用いた方が便利なので、時間  $(t - \Delta t) \sim t$  における  $m_v$  を次式から求める。

$$m_v = \Delta d / (h_{av} \Delta \sigma) \quad (4)$$

ここに、 $\Delta d$ :  $(t - \Delta t) \sim t$  までの間の軸変位量(cm)

$H_{av}$  (cm) は供試体の平均高さで、 $(t - \Delta t)$ ,  $t$  のときの供試体高さを  $H_t - \Delta t$  (cm),  $H_t$  (cm) とすると、次式で求められる。

$$H_{av} = (H_t - \Delta t + H_t) / 2 \quad (5)$$

#### ③圧密係数 $c_v$ , 透水係数 $k$

時間  $(t - \Delta t)$  から  $t$  までの圧密係数  $c_v$  (cm<sup>2</sup>/d) は、次式から求められる。

$$c_v = (\Delta \sigma H_{av}^2) / (2 u_b \Delta t) \times 1440 \quad (6)$$

ここで  $u_b$  は、時間  $t$  に対応する  $u_b$  である。

また、透水係数  $k$  (cm/s) は、次式で計算される。

$$k = \gamma_w m_v c_v / 864 \times 105 \quad (7)$$

## 4. 再圧密試料での試験結果

### 4.1 試験概要および試料

本章では、ひずみ速度が定率ひずみ圧密試験結果に及ぼす影響を調べた結果を報告する。速度効果を調べる際の比較対象として、標準圧密試験結果を用いている。試験条件として、ひずみ速度とバックプレッシャーの大きさを設定する必要がある。本章の目的は、ひずみ速度の影響を調べることであり、数種類の異なるひずみ速度で試験を行った。梅原は、バックプレッシャーの大きさはほとんど圧密挙動に影響しないと報告していることから、1 kgf/cm<sup>2</sup> の一種類と設定している。

試料は、大量に均質な供試体が作製できる再圧密試料2種類(大阪湾沖積粘土, 川崎沖積粘土)を用いた。大阪湾沖積粘土試料の再圧密は、高温再圧密法を用いて試料を作成した。高温再圧密法とは、土田ら<sup>13)</sup>によって提案された方法で、不攪乱試料と類似した力学挙動を再現できる再圧密試料を作成する方法である。この方法を用いて作製した試料は、通常の室温で作成した再圧密試料よりも、応力-ひずみ挙動において、明確な降伏点を再現できる。この特徴は、本研究の目的の一つである圧密降伏応力とひずみ速度の関係を調べやすい利点であると考え、高温再圧密法を採用した。川崎粘土試料は、室温で再圧密した試料である。川崎粘土の試験結果については、土質工学会で実施した一斉試験に参加した際に得られた試験結果の一部を用いたものである。

試料は、420  $\mu$ mふるいを通させ貝殻片等の異物を取り除いた粘土スラリーを、攪拌しながら真空で脱気し、含水比200%に調整して準備した。高温再圧密の場合は温度を75°Cに設定した水槽に再圧密容器を置き、室温再圧密の場合には室温(25°C)で、鉛直圧密圧力1 kgf/cm<sup>2</sup>まで段階的に再圧密を行った。いずれの方法でも圧密圧力の最終段階では、3 $t_e$ 法で圧密終了を確認してい

る。大阪湾粘土試料と川崎粘土試料の物理特性を表-4に示す。また、試験に用いたひずみ速度を表-5に示す。

表-4 再圧密試料の物理特性

	$w_l$ (%)	$w_p$ (%)	$I_p$	$G_s$
川崎試料	82.6	39.9	42.7	2.713
大阪湾試料	93.1	37.1	56.0	2.68

表-5 ひずみ速度

試料名	ひずみ速度 (%/min)					
	0.002	0.005	0.01	0.03	0.1	
川崎試料						
大阪湾試料	0.01	0.02	0.05	0.1	0.2	0.5

4.2 応力-ひずみ挙動および圧密降伏応力

応力-ひずみ挙動を表す場合、圧密試験では通常変形を間隙比で、応力を片対数で整理した  $e-\log p$  曲線を用いる。図-9(a), (b)は、川崎試料と大阪湾高温再圧密試料(以下大阪湾試料)の  $e-\log p$  曲線を、標準圧密試験結果とあわせて示したものである。両試料とも、定率ひずみ圧密試験から得られる  $e-\log p$  曲線の方が、標準圧密試験のものよりも右上にあるように見える。しかし、初期状態(初期間隙比)にばらつきがあるため、正確な比較が困難である。通常の圧密試験の整理のように、応力-ひずみ関係から圧密降伏応力と圧縮指数を求めることが目的である場合には、 $e-\log p$  曲線を用いることは有効である。ところが、今回のような比較試験を行う場

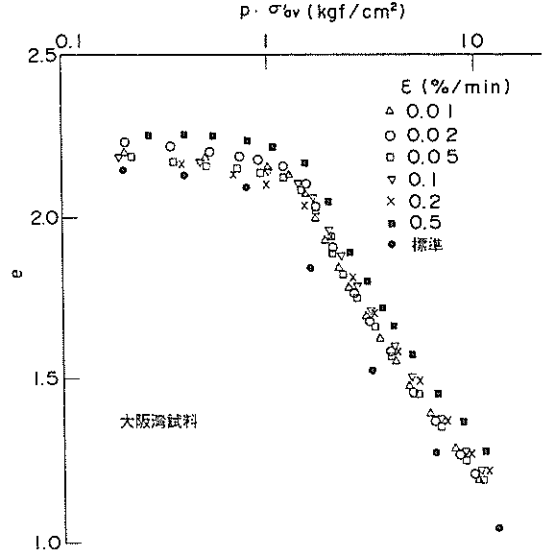


図-9 (b)  $e-\log p$  曲線 (大阪湾粘土)

合には、初期状態がばらつくことによって結果の比較が困難となり、間隙比を用いた整理は適していないことがわかる。

応力-ひずみ挙動を、間隙比ではなくひずみで整理すると、初期状態、特に初期間隙比のばらつきの影響を無視でき曲線の比較に便利である。そこで、供試体の平均ひずみ  $\epsilon_{av}$  と圧密圧力  $\sigma'_{av}$  の関係として示したのが図-10(a), (b)である。川崎試料の場合では、ひずみ速度が 0.1%/min のものを除いた結果は、標準圧密試験結果も含めて、ひずみ速度による影響はあまり大きくなく、ば

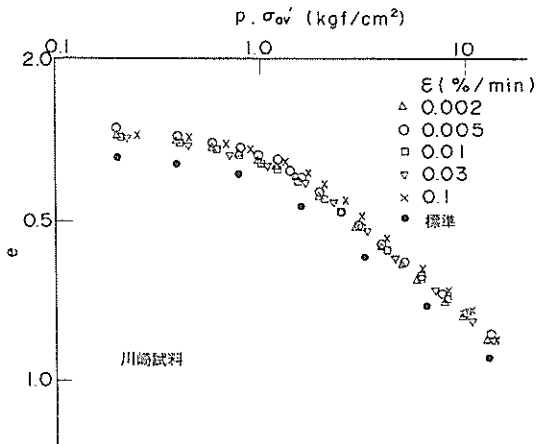


図-9 (a)  $e-\log p$  曲線 (川崎粘土)

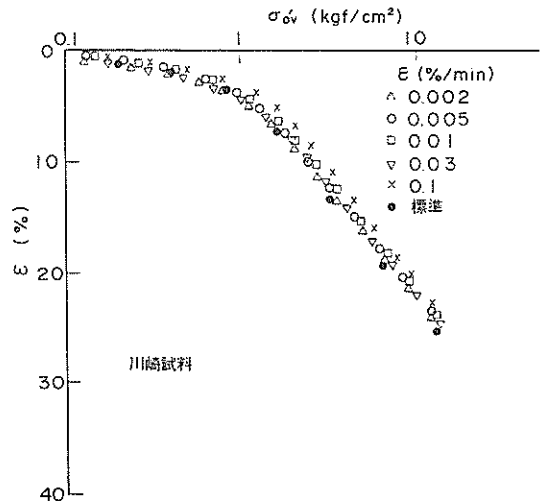


図-10 (a)  $\epsilon-\log \sigma$  曲線 (川崎粘土)

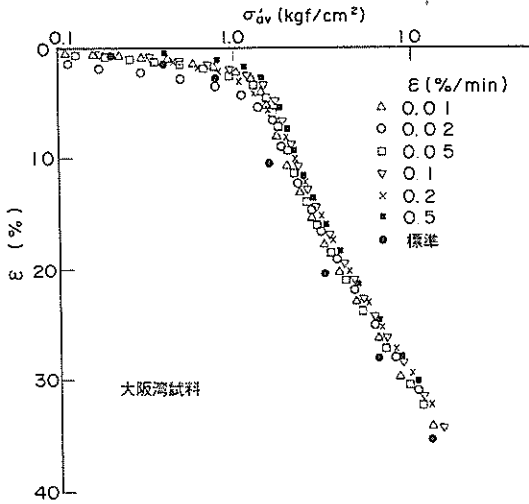


図-10 (b)  $\epsilon - \log \sigma$  曲線 (大阪湾粘土)

らつきの範囲にあるといえる。一方、大阪湾試料の場合には、標準圧密試験結果と定率ひずみ試験結果では、明らかに差が認められ、定率ひずみ試験結果は右側にシフトしていることがわかる。ひずみ速度の影響は、横軸が対数であるため、正規圧密領域ではひずみ速度による違いはあまりはっきりと表れない。しかし、オーダーとしてとらえると  $10^{-1} \% / \text{min}$  の結果と  $10^{-2} \% / \text{min}$  の結果では差が認められる。今回の試験条件の範囲では、ひずみ速度が応力-ひずみ曲線に与える影響は、ひずみ速度が2~3倍程度では明確とはならないことがわかる。

これらの応力-ひずみ挙動から得られる両試料の圧密降伏応力を、ひずみ速度の対数に対してプロットしたものが図-11である。ここでは、圧密降伏応力は  $e - \log p$  曲線からキャサグランデの方法で求めている。また、川崎試料と大阪湾試料では圧密降伏応力が異なるので、標準圧密試験の圧密降伏応力  $p_{c, std}$  で、定率ひずみ圧密試験の圧密降伏応力  $p_c$  を正規化した圧密降伏応力比  $p_c / p_{c, std}$  を縦軸として示してある。この図から、ひずみ速度がログスケールで3サイクルとかなり広い範囲で直線関係があることが読み取れる。今回試験を行った二つの試料に関しては、ひずみ速度が  $0.02 \% / \text{min}$  の場合、定率ひずみ圧密試験の  $p_c$  は、標準圧密試験の  $p_{c, std}$  よりも約25%大きい。2.の既往の研究で述べたように、再圧密試料と不攪乱試料を用いた梅原らの研究においても同様の直線関係がみられ、試料の状態の差はないと結論している。

しかし、今回の図-10の  $\epsilon - \sigma$  曲線を見ると、高温再圧密試料と常温試料では違いがはっきりしている。つま

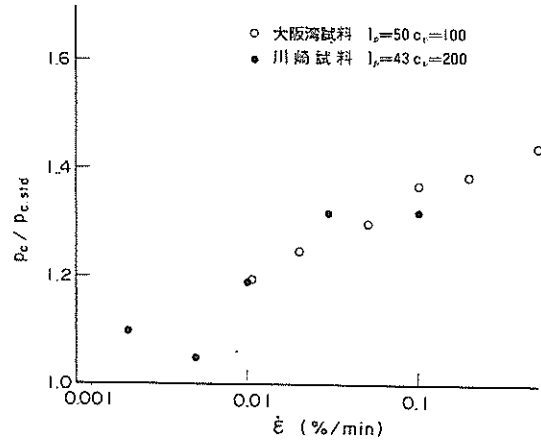


図-11 圧密降伏応力比とひずみ速度の関係

り、高温再圧密の場合の定率ひずみ試験結果は、標準圧密試験結果と比べて右側にシフトしているのに対して、常温試料ではばらつきの範囲にある。このように試料の状態の違いによって  $\epsilon - p$  曲線に差があるにも関わらず、 $p_c$  で整理したとき両者の関係は同一の直線関係となる。梅原らの試験結果について、 $e - \log p$  曲線をよくみると、不攪乱試料の試験結果は右側にシフトしているのに対して、再圧密試料の試験結果はやはりばらつきの範囲にあり、今回の試験結果と同様である。以上のことから、圧密中の応力-ひずみ挙動には、試料の状態による差があると考えられる。

しかし、圧密降伏応力としてみた場合にその差が現れないのは、キャサグランデの方法で圧密降伏応力を求めていることに起因していると考えられる。

#### 4.3 体積圧縮係数および圧密係数

体積圧縮係数および圧密係数は、理論式から導いているため、ひずみ速度の影響をうけない圧密定数となっているはずである。採用した理論は層厚の変化を考慮しない微小ひずみ理論であるが、実際には有限ひずみが発生するため、試験結果を整理する場合には層厚の変化を取り入れた折衷案となっている。また、理論が適用できるひずみ速度の範囲を確認する必要がある。以上の観点から、ひずみ速度をパラメーターとして圧密定数の検討を行った。

図-12(a), (b)は、体積圧縮係数  $m_v$  と平均圧密圧力  $\sigma_{av}'$  の関係を示したものである。正規圧密領域をみると、大阪湾試料の  $\dot{\epsilon} = 0.5 \% / \text{min}$  のものを除くと、今回用いたひずみ速度の範囲では、両者の関係はほぼ一本の直線に乗っている。しかし、過圧密領域では標準圧密試

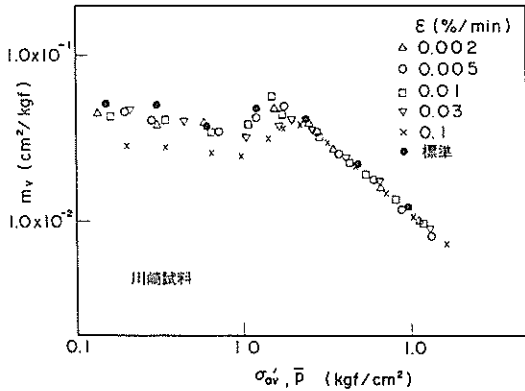


図-12 (a) 体積圧縮係数 $m_v$ に及ぼすひずみ速度の影響 (川崎粘土)

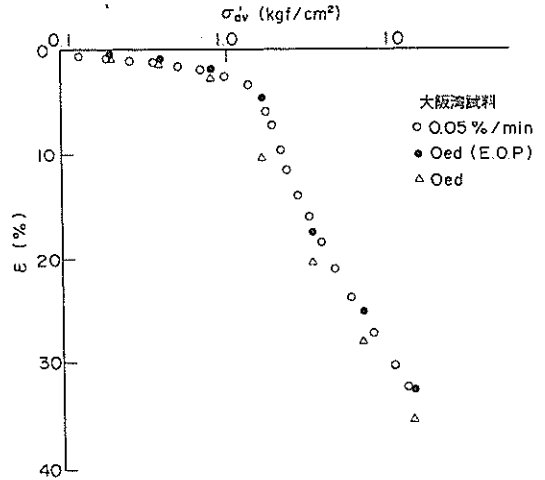


図-13  $\epsilon - \log \sigma$  曲線

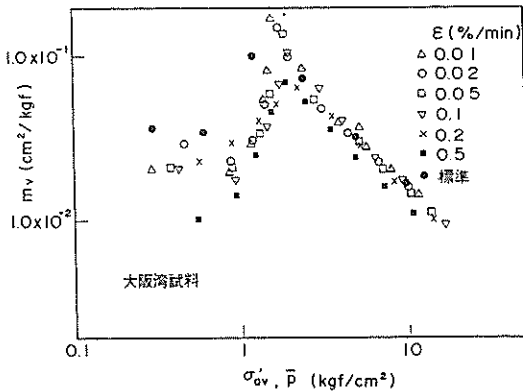


図-12 (b) 体積圧縮係数 $m_v$ に及ぼすひずみ速度の影響 (大阪湾粘土)

験結果と比較すると、定率ひずみ試験結果の体積圧縮係数は低くなっていることがわかる。この結果は、大阪湾試料で特に顕著にみられる。標準圧密試験の場合、過圧密領域では全沈下量に占める二次圧密沈下量の割合が大きい（一次圧密比が約0.35）ため、定率ひずみ試験よりも大きな体積圧縮係数を与えていることが考えられる。

そこで、大阪湾試料の標準圧密試験の $\epsilon - p$ 曲線を一次圧密終了時のE.O.P.(End of primary consolidation)曲線として整理したものと、 $\dot{\epsilon}=0.05\%/min$ の定率ひずみ圧密試験結果を合わせてプロットしたものが図-13である。図-13から、このひずみ速度では、定率ひずみ圧密試験結果は、E.O.P.曲線と同じ挙動を示していることがわかる。つまり、大阪湾試料の定率ひずみ圧密試験における全沈下量は、二次圧密による沈下量をほとんど含んでいないために、標準圧密試験よりも小さくなり、体

積圧縮係数を低く評価していることが考えられる。逆に正規圧密領域では、一次圧密量が支配的となり（一次圧密比が0.6~0.7）、24時間沈下曲線とE.O.P.曲線（この試料の場合定率ひずみ圧密試験での曲線とほぼ一致）がほぼ平行になるため、体積圧縮係数にはあまり差がでないと考えられる。

今回の試験結果から、正規圧密領域に対しては、ひずみ速度が0.2%/min以下の条件で定率ひずみ圧密試験を行えば、得られる体積圧縮係数は標準圧密試験と変わらないことがわかった。なお、今回の研究で用いたE.O.P.曲線は、各段階毎に一次圧密沈下量に対応するひずみを算出したものである。各段階の初期条件は、前段階までの全沈下量に対応するひずみである。また、一次圧密沈下量は、 $\sqrt{t}$ 法から求めた一次圧密沈下量 $d_{100}$ を用いた。

圧密係数と平均圧密圧力の関係を示したものが図-14(a),(b)である。体積圧縮係数と同様に、正規圧密領域ではひずみ速度によらず、標準圧密試験結果と一致する。川崎試料の $\dot{\epsilon}=0.005\%/min$ のものは、正規圧密領域においても、他の試験結果と大きく異なっている。これは、供試体底面での過剰間隙水圧の値を用いて圧密係数を計算するため、このひずみ速度では過剰間隙水圧は、鉛直全応力が13kgf/cm<sup>2</sup>になっても0.066kgf/cm<sup>2</sup>程度しか発生しないため、測定精度が下がり、誤差が大きくなったためであると考えられる。他の供試体についても、過圧密領域での結果がばらついているのは、やはり沈下量が小さいことと間隙水圧の測定精度に起因していると考えられる。過圧密領域での圧密係数はもともと信頼性が低いことと、正規圧密領域での圧密係数はひずみ速度の影響をあまりうけないこと、また標準圧密試験結果とも

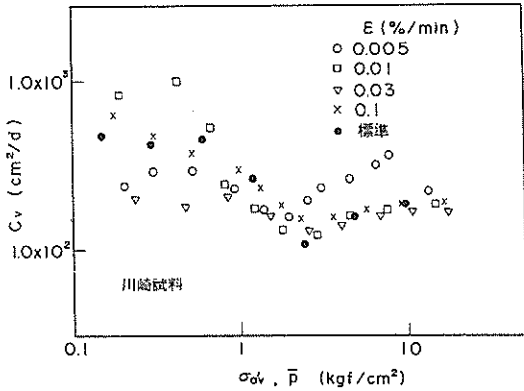


図-14 (a) 圧密係数  $c_v$  に及ぼすひずみ速度の影響 (川崎粘土)

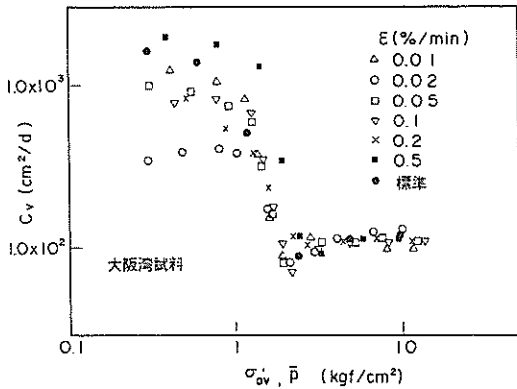


図-14 (b) 圧密係数  $c_v$  に及ぼすひずみ速度の影響 (大阪湾粘土)

よく一致することから、定率ひずみ圧密試験から得られる圧密係数は十分実用性があると考えられる。

以上をまとめて整理すると、定率ひずみ圧密試験から得られる体積圧縮係数と圧密係数は、正規圧密領域においてはひずみ速度の影響をあまり受けず、安定した値であることがわかった。実用的なひずみ速度は、理論を適用できるひずみ速度の範囲としてとらえると、今回の試験結果からは、最大で0.2%/min程度であると考えられる。それ以上のひずみ速度では、過剰間隙水圧の放物線分布の仮定が成立しなくなり、理論の適用性を失うと考えられる。また、通常の試験で用いている測定機器の精度から、ある程度の過剰間隙水圧の発生が必要で、精度よく測定するためには0.01%/min以上のひずみ速度が必要であると考えられる。

#### 4.4 圧密降伏応力に関する考察

圧密降伏応力を定率ひずみから求める場合、用いるひずみ速度を決定する際の目安として間隙水圧比の最大値を考へることが多い。

間隙水圧比とは、供試体底部で測定される過剰間隙水圧  $u_b$  と鉛直全応力  $\sigma$  との比、 $u_b/\sigma$  である。普ら<sup>8)</sup>は、間隙水圧比の最大値  $(u_b/\sigma)_{max} < 0.5$  を目安として、ひずみ速度を決定する例が多いとしている。今回実施した試験で測定された間隙水圧比と、無次元化時間  $t/t_f$  ( $t_f$ : 所定の圧密圧力に達するまでに要した時間) の関係の代表例を図-15に示す。この例では、ひずみ速度は0.03%/minであるが、 $(u_b/\sigma)_{max}$  は載荷開始後の初期部分に対応して現れる。この時点では、供試体は非定常状態にあるか、定常状態にあっても非定常の影響が残っていることが考えられ、過剰間隙水圧の値自体に対する信頼性が乏しく、ひずみ速度選定の目安とは考えにくい。

梅原らは、圧密降伏応力  $p_c$  に対応する時点での間隙水圧比とひずみ速度の関係を、本牧再圧密試料について整理している。図-16は、この関係をプロットしたものであるが、かなりよい相関が認められる。この考え方をを用いて、圧密降伏応力比  $p_c/p_{c, std}$  と、 $p_c$  のときの間隙水圧比  $(u_b/\sigma)$  の関係を示したのが図-17である。大阪湾粘土と川崎粘土のデータを合わせて最小自乗法で求めた回帰直線を図中に示した。今回用いた試料の結果では、圧密降伏応力比と間隙水圧比の対数との間には直線関係があることがわかる。

ここで、圧密試験から得られる圧密降伏応力について考えてみる。2.で紹介したように、試験で得られる圧密降伏応力は、供試体に加えるひずみ速度の関数として変化する値である。したがって、定率ひずみ圧密試験から得られる圧密降伏応力は、その試験で用いた条件に対

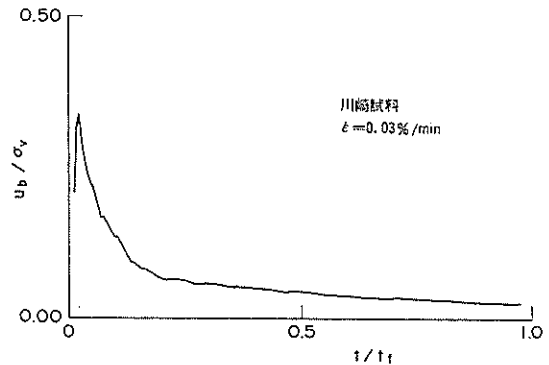


図-15 間隙水圧比と無次元化時間の関係 (川崎粘土,  $\dot{\epsilon} = 0.03\%/min$ )



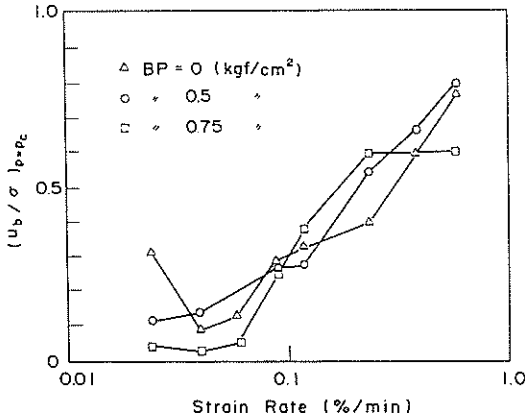


図-16 圧密降伏応力時の間隙水圧比とひずみ速度の関係 (梅原<sup>1,2)</sup>)

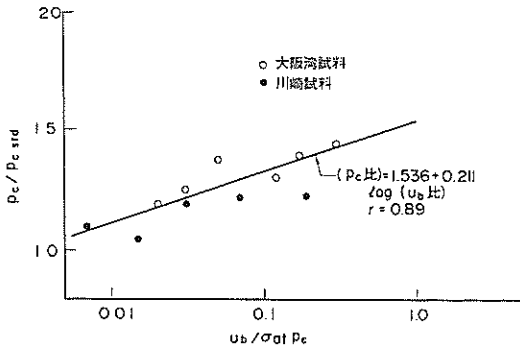


図-17 圧密降伏応力時の間隙水圧比とひずみ速度の関係

する値として示すことが妥当である。一方、標準圧密試験から得られる圧密降伏応力は、一段階の載荷時間24時間で行った段階載荷試験で得られた値である。この両者の値が異なるのは当然であるといえる。しかし設計等の実務で定率ひずみ圧密試験を用いる場合を考えると、標準圧密試験から得られる結果とのすり合わせが必要となる。また、可能な限り試験条件を規格化し、簡素化することも必要である。試料の塑性指数  $I_p$  に応じて、数種類のひずみ速度から適切なものを選択するという考え方もあるが、圧密降伏応力は力学量であり、物理的な指数で整理することには疑問がある。ひずみ速度をある程度固定して試験を行い、その結果の解釈によって標準圧密試験とのすり合わせを考えるのが妥当である。また、試験条件をそろえておくと、他のデータとの比較も容易であるという利点もある。

4.3の体積圧縮係数、圧密係数に関する結果から、ひずみ速度は過剰間隙水圧の測定精度の制約上0.01%/

min以上必要であることがわかった。また、供試体内の過剰間隙水圧の分布形状に関する理論の適用性から0.2%/min以下の範囲で試験を行う必要がある。これらの条件から、ひずみ速度は $10^{-2}\%$ /minのオーダーで考えるのが妥当であると考えられる。なかでもひずみ速度を0.02%/minに設定すると、試験時間が24時間程度となり、試験のサイクルからみると実用的なひずみ速度であるといえる。

## 5. 不攪乱試料での試験結果

### 5.1 試験概要および試料

本章では、沖積粘土地盤から採取された不攪乱試料に対する、定率ひずみ圧密試験を行った結果を報告する。試験に用いた不攪乱試料は、東京湾横浜粘土試料、錦海湾粘土試料および出雲粘土試料である。それぞれの試料について、同一深度で採取した供試体に対して定率ひずみ圧密試験と標準圧密試験を行い、その試験結果を比較することによりひずみ速度効果の検討を行った。また、比較的簡便な圧密降伏応力の補正法について提案している。ここでいう補正法とは、標準圧密試験結果とのすり合わせという意味である。

試料の物理的性質を図-18(a), (b), (c)に示す。横浜試料、錦海試料は塑性指数  $I_p$  が70前後、出雲試料では80~110と非常に高塑性の粘土である。定率ひずみ圧密試験の試験条件は、全試験共通でひずみ速度が0.02%/min、バックプレッシャーは1 kgf/cm<sup>2</sup>である。

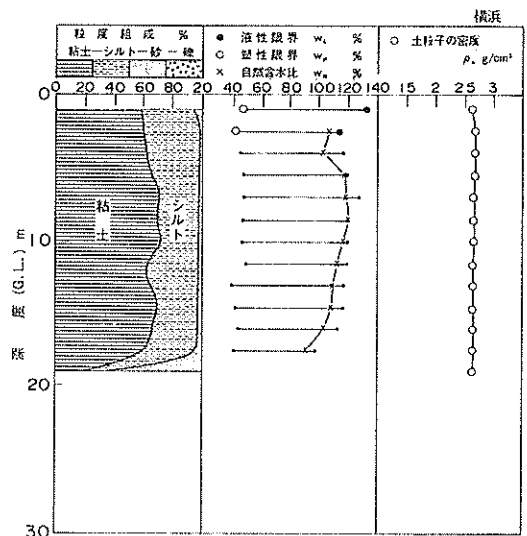


図-18 (a) 試料の物理的性質 (横浜粘土)

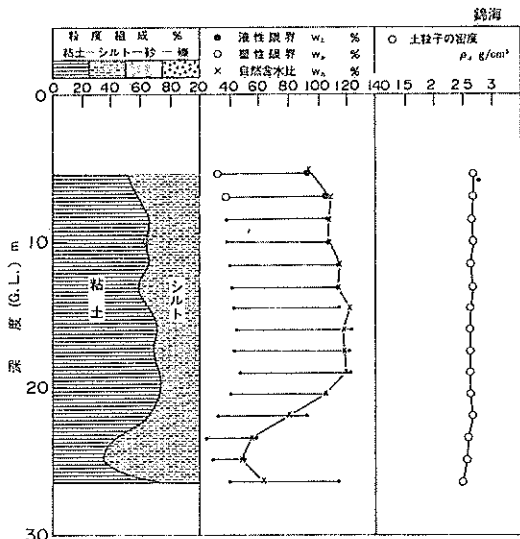


図-18 (b) 試料の物理的性質 (錦海湾粘土)

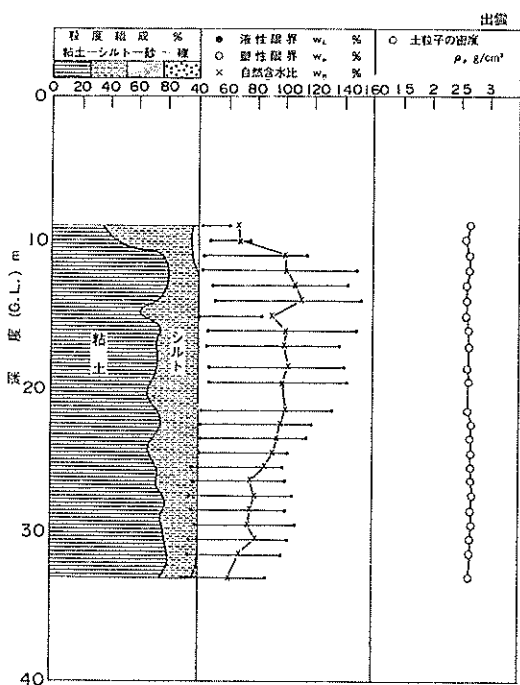


図-18 (c) 試料の物理的性質 (出雲粘土)

5.2 試験結果

応力-ひずみ関係の代表例を、図-19(a), (b), (c)に示す。図は4.と同様に  $\epsilon - \log \sigma$  曲線として整理してある。また、図中には標準圧密試験から得られる24時間載荷後の曲線と、E.O.P.時の曲線をあわせて示してある。

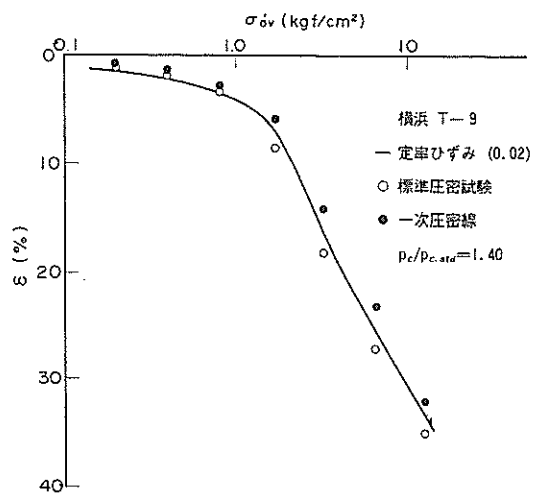


図-19 (a)  $\epsilon - \log \sigma$  曲線の代表例 (横浜粘土)

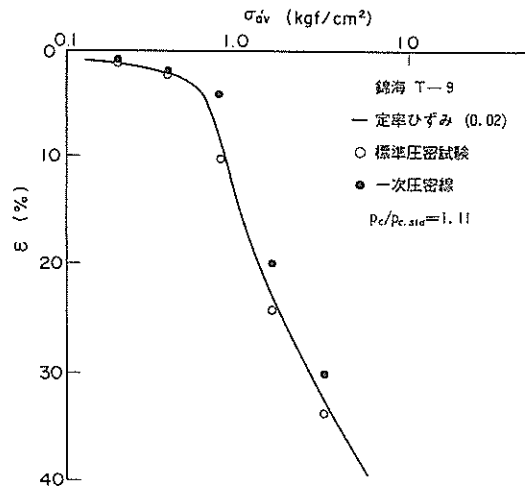


図-19 (b)  $\epsilon - \log \sigma$  曲線の代表例 (錦海湾粘土)

横浜試料では、標準圧密試験から得られる曲線は24時間線とE.O.P.曲線のほぼ中央にあることがわかる。一方、錦海湾試料では24時間線に、出雲試料ではE.O.P.曲線とほぼ一致する。この違いは後で考察するが、試料がもつ二次圧密係数が異なることに起因していると考えられる。

体積圧縮係数と平均圧密圧力の関係を図-20(a), (b), (c)に、圧密係数と平均圧密圧力の関係を図-21(a), (b), (c)に示す。これは  $\epsilon - \log \sigma$  曲線の例で用いた供試体による試験結果である。体積圧縮係数については各試料とも、定率ひずみ圧密試験結果と標準圧密試験結果とがよく一致している。圧密係数については、横浜試料と錦海湾試料では、正規圧密領域で定率ひずみ圧密試験からの

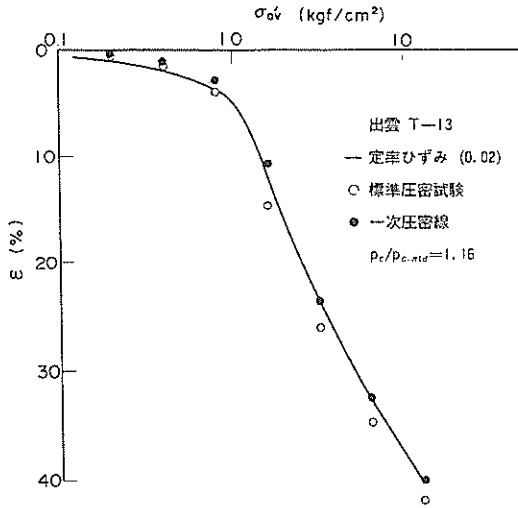


図-19 (c)  $\varepsilon - \log \sigma$  曲線の代表例 (出雲粘土)

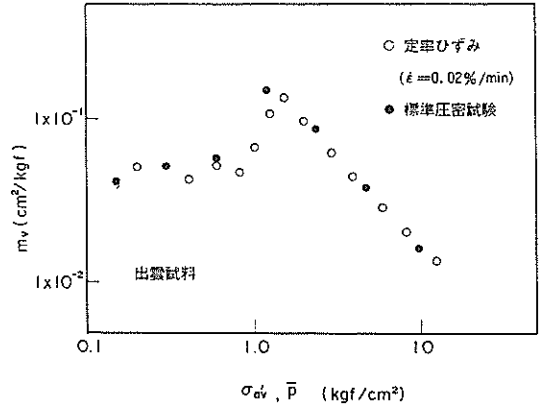


図-20 (c) 体積圧縮係数と圧密圧力の関係の代表例 (出雲粘土)

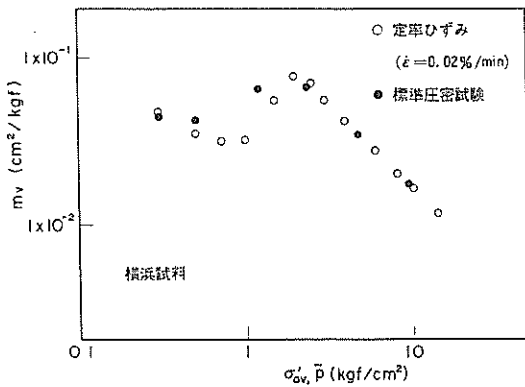


図-20 (a) 体積圧縮係数と圧密圧力の関係の代表例 (横浜粘土)

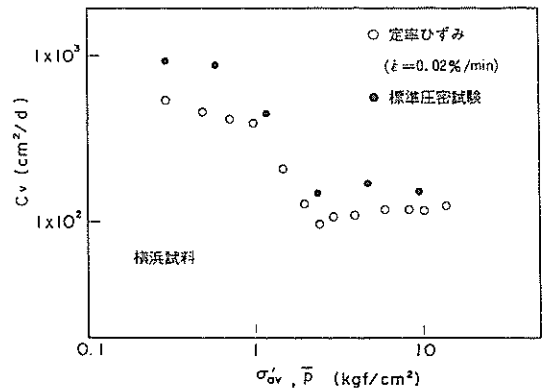


図-21 (a) 圧密係数と圧密圧力の関係の代表例 (横浜粘土)

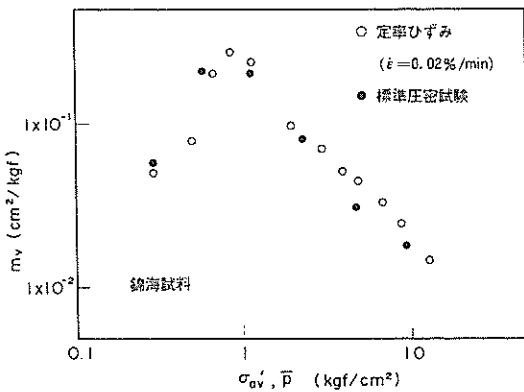


図-20 (b) 体積圧縮係数と圧密圧力の関係の代表例 (錦海湾粘土)

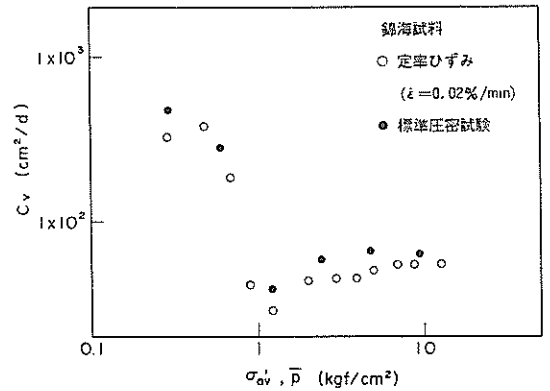


図-21 (b) 圧密係数と圧密圧力の関係の代表例 (錦海湾粘土)

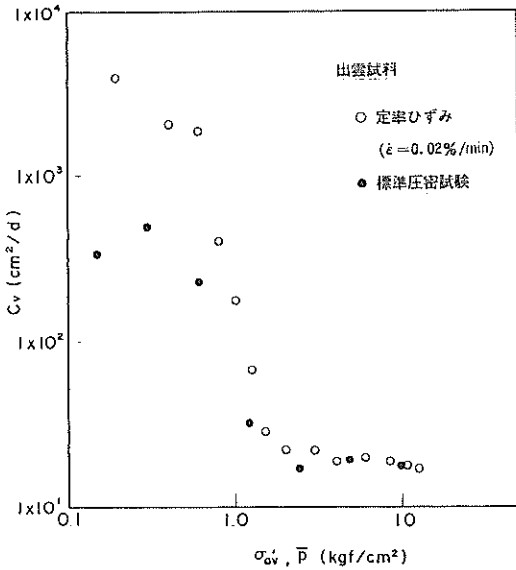


図-21 (c) 圧密係数と圧密圧力の関係の代表例 (出雲粘土)

ものの方が若干低くなっている。一方、出雲試料ではよく一致している。横浜試料および錦海湾試料でも他の例では一致している例が多かったことから、図-21(a), (b)の違いは試料のばらつきによるものと考えられる。

### 5.3 圧密降伏応力の補正法に関する考察

各深度の試料に対して、定率ひずみ圧密試験と標準圧密試験から得られた圧密降伏応力を比較した。また、圧密降伏応力の補正法を検討するため、本章で実施した定率ひずみ圧密試験は、所定の圧密圧力に達した後、載荷台を停止した状態で24時間の放置を行い、排水状態で応力緩和させた。補正法の概念を図-22に示す。標準圧密試験は一段階の載荷時間を24時間として行っているが、一次圧密終了まではたかだか1時間程度であり、残りの時間は排水状態でのクリープ試験である。そこで、標準圧密試験と比較し、ひずみ速度の影響を調べるためには、二次圧密を考慮して、定率ひずみ条件で載荷終了後、引き続きクリープ試験を行うことが望ましい。三笠は、このクリープ試験を行い、圧密降伏応力を補正する方法を提案している<sup>13)</sup>。しかし、載荷終了後に軸荷重を調整するときに、応力が変化してしまうことが考えられることと、試験装置が複雑になる欠点がある。時間効果を調べるには、クリープ試験の他に応力緩和試験がある。この応力緩和試験は、複雑な試験装置が必要でなく、試験手順も簡単であることから、本研究では応力緩和による

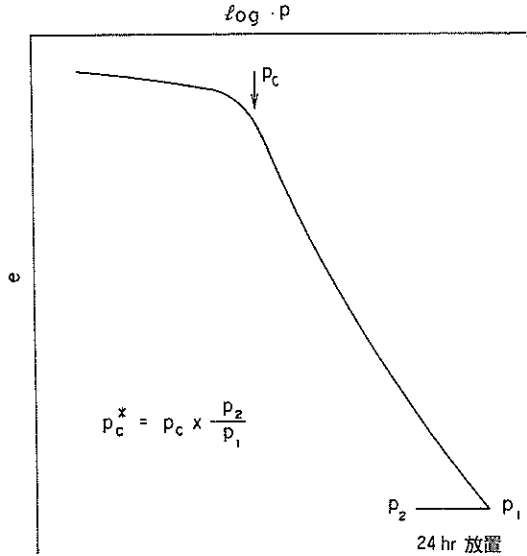


図-22 応力緩和法の概念図

補正法を採用した。この方法を以下では、応力緩和法と呼ぶ。

横浜粘土試料について、深度に対して圧密降伏応力をプロットしたものが、図-23である。この図から、定率ひずみ圧密試験の  $p_c$  は標準圧密試験の  $p_c$  よりも、平均すると24%大きいことがわかる。この結果は、再圧密試験で行った試験結果（図-11でひずみ速度0.02%/minで約25%大きくなる）とほぼ一致する値である。この結果に対して応力緩和法を用いて  $p_c$  を補正すると、両者はほぼ一致するという結果が得られた。

もう一つ簡便な補正法を検討するために、4.4で求めた正規化圧密降伏応力と圧密降伏応力に対応する間隙水圧比の関係（図-17）を用いて、定率ひずみ圧密試験の圧密降伏応力に対する修正率を求めた。この補正法を便宜的に間隙水圧比法と呼ぶ。

全試験結果について定率ひずみ圧密試験から得られる無補正の  $p_c$  と、応力緩和法、間隙水圧比法により補正した  $p_c$  を標準圧密試験の  $p_c$  に対して、それぞれ整理したものが図-24~26である。図-24をみると、無補正の場合定率ひずみ圧密試験の  $p_c$  は標準圧密試験よりも平均で20%大きい値となることがわかる。一方、図-25, 26をみると、補正した平均での  $p_c$  は、標準圧密試験の  $p_c$  の約95%の値となる。補正を行うことにより、定率ひずみ圧密試験から得られる  $p_c$  は、標準圧密試験から得られる  $p_c$  にかかなり近い値となることがわかる。

個々の試料について詳しくみるために、図-25と同様

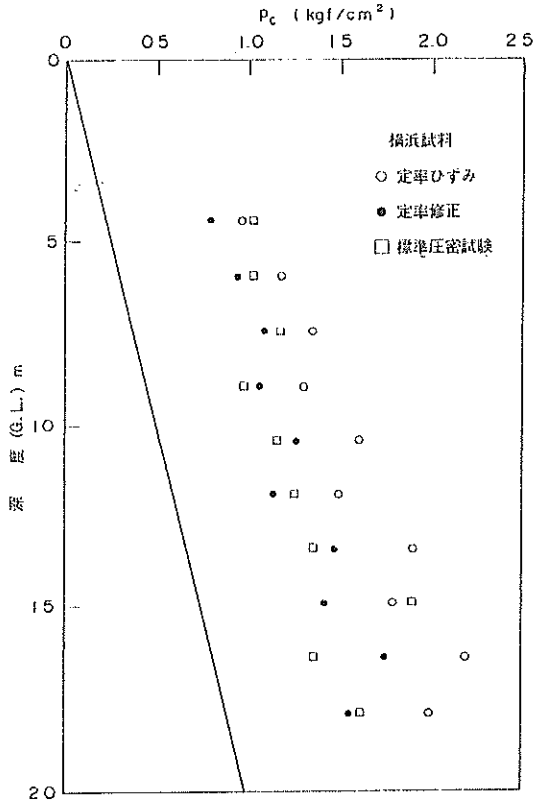


図-23 深度と圧密降伏応力の関係(横浜粘土)

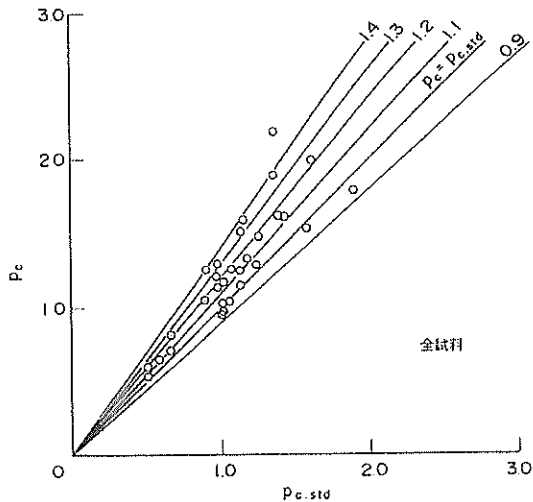


図-24 圧密降伏応力の比較(無補正, 全試料)

に応力緩和法で補正した  $p_c$  と標準圧密試験の  $p_c$  を整理したものが図-27(a), (b), (c)である。各試料とも、そ

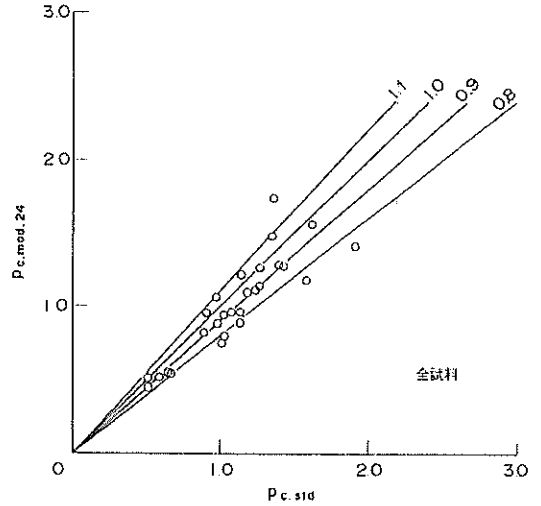


図-25 圧密降伏応力の比較(応力緩和法, 全試料)

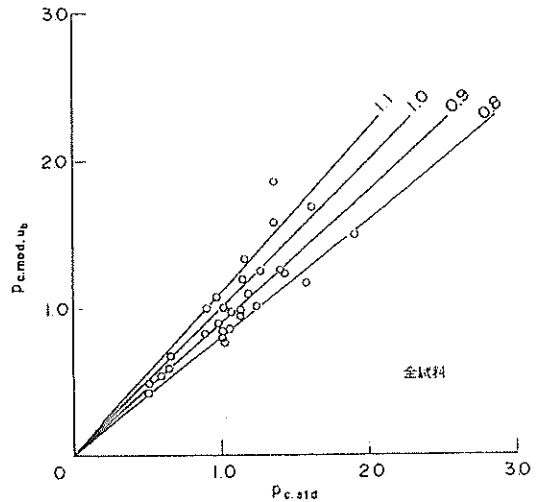


図-26 圧密降伏応力の比較(間隙水圧比法, 全試料)

れぞれ補正により直線の勾配が1に近いことがわかる。以上の結果から、試料により差はあるものの定率ひずみ圧密試験から得られる  $p_c$  は、標準圧密試験の  $p_c$  より約20%大きい。しかし、応力緩和法のような補正を行うと両者はかなり近い値となることがわかった。図-28に間隙水圧比法と応力緩和法で補正した  $p_c$  の関係を示すが、両者は一致している。このことは、間隙水圧を精度よく測定することによって、応力緩和法のように24時間の放置を行わなくても標準圧密試験と変わらない  $p_c$  を求めることができることを示している。

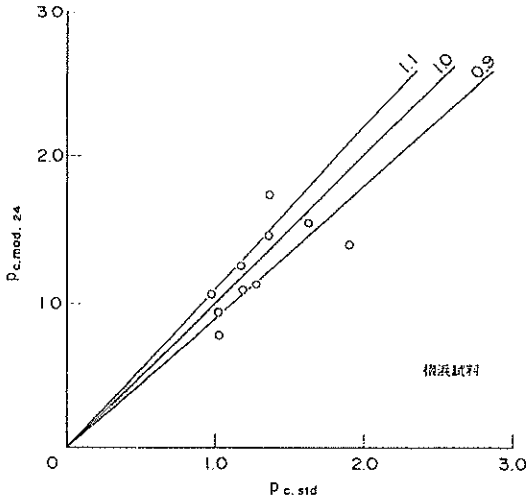


図-27 (a) 圧密降伏応力の比較 (応力緩和法, 横浜粘土)

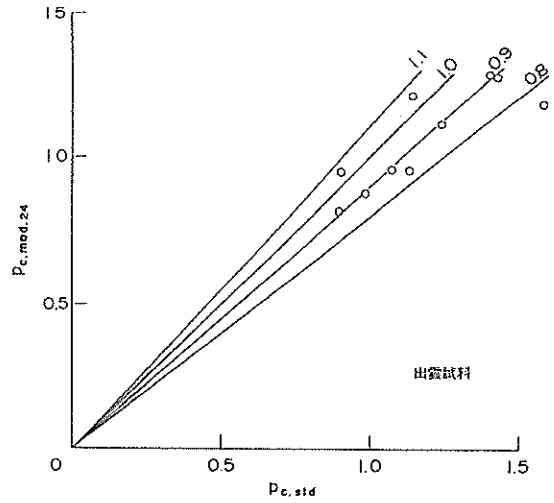


図-27 (c) 圧密降伏応力の比較 (応力緩和法, 出雲粘土)

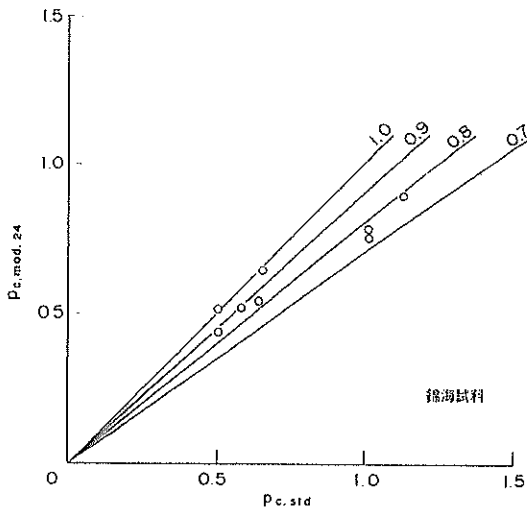


図-27 (b) 圧密降伏応力の比較 (応力緩和法, 錦海湾粘土)

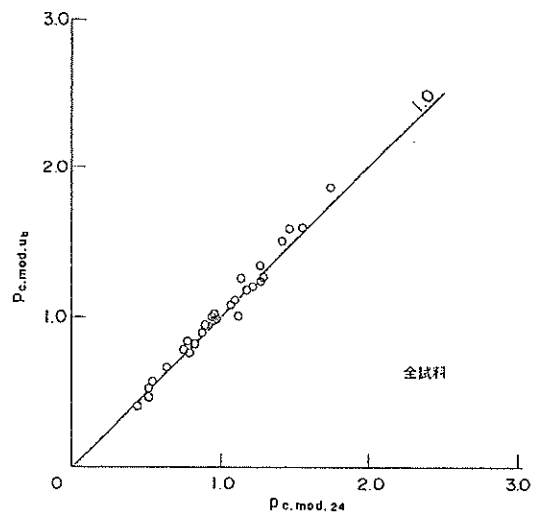


図-28 間隙水圧比法と応力緩和法の圧密降伏応力の比較

## 6. 結論

今回行った室内再圧密試料に対する一連の試験結果から、以下の結論を得た。

(1) 圧密降伏応力比と、ひずみ速度の対数の間に直線関係が認められた。今回不攪乱試料に対して設定したひずみ速度0.02%/minでは、この直線関係から求めると定率ひずみ試験の $p_c$ は標準圧密試験のものよりも、約25%大きくなる。

(2) ひずみ速度 $\dot{\epsilon}$ が、 $0.01 < \dot{\epsilon} < 0.2\%/min$ の範囲に

ある場合、正規圧密領域では体積圧縮係数、圧密係数ともにひずみ速度の影響は認められない。

(3) 圧密降伏応力比と圧密降伏応力時に対応する間隙水圧比とのあいだに直線関係がみられた。

不攪乱試料に対する試験結果から、以下の結論を得た。

(4) 正規圧密領域では、定率ひずみ圧密試験と標準圧密試験から求められる体積圧縮係数と圧密係数の二つの圧密定数は一致する。

(5) 今回提案した応力緩和を用いた圧密降伏応力の補正法はかなり有効な方法であり、標準圧密試験から得ら

れる  $p_c$  とはほぼ同じ値を得ることができる。また、間隙水圧比を用いた補正法でも応力緩和法と同様の結果が得られた。

(6) 今回用いた三種類の試料では、圧密降伏応力は塑性指数のような物理的性質には影響を受けないことがわかった。

## 7. あとがき

本研究では、主に沖積粘土の圧密降伏応力について考えてきた。今回用いた不攪乱試料は何れも、従来はひずみ速度の影響が大きいとされてきた高塑性の粘性土である。しかし、試験結果は定率ひずみ圧密試験も実務で取り入れることが可能であることを示している。今後は、さらに多くの不攪乱試料に対して試験を行っていきたいと考えている。

現在は沖積粘土よりも、連続載荷の圧密試験が必要であると考えられる洪積粘土について試験を実施中である。さらに、有限要素法を用いた数値解析も行っており、現時点では応力-ひずみ挙動に最も大きな影響を及ぼす因子は、二次圧密係数ではないかとの知見を得ている。定率ひずみ圧密試験がより実務で活用されるように今後も研究を続けていく予定である。

なお、佐藤勝久土質部長には本稿をまとめるにあたって、貴重なご指導をいただいた。試験の一部は前研修生江口哲志氏(岡三興業㈱)によって実施されたものである。試料の採取、運搬にあたっては関係各位に非常にお世話になった。ここに記して深く感謝の意を表します。

(1991年6月30日受付)

## 参考文献

- 1) Crawford, C. B. : Interpretation of the Consolidation test, Proc. ASCE, Vol. 90, No. SM5, pp. 87-102, 1964
- 2) Smith, R. E. and Wahls, H. E. : Consolidation under constant rates of strain, Proc. ASCE, Vol. 95,

No. SM2, pp. 519-539, 1969

3) Byrne, P. M. and Aoki, Y. : The Strain Controlled Consolidation Test, Soil Mechanics Series No. 9, Dept. of Civil Engineering, University of British Columbia, pp. 1-25, 1969

4) Wissa, A. E. Z. et al. : Consolidation at constant rate of strain, Proc. ASCE, Vol. 97, No. SM10, pp. 1393-1413, 1971

5) Umehara, Y. and Zen, K. : Constant rate of strain consolidation for very soft clayey soils, Soils and Foundations, Vol. 20, No. 2, pp. 79-90, 1980

6) Lee, K. : Consolidation with constant rate of deformation, Geotechnique 31, No. 2, pp. 215-229, 1981)

Znidarcic, D. et al. : The theory of one-dimensional consolidation of saturated clays : Part III, existing testing procedure and analyses, Geotechnical Testing Journal, Vol. 7, No. 3, pp. 123-133, 1984

8) 善ら: 定ひずみ速度圧密試験について、特殊圧密試験方法に関する研究委員会報告、特殊圧密試験に関するシンポジウム, pp. 27-46, 1988

9) Larsson, R. L. and Sallfors, G. : Automatic Continuous Consolidation Testing in Sweden, Consolidation of Soils, STP 892, ASTM, pp. 299-328, 1986

10) Leroueil, S. et al. : Stress-strain-strain rate relation for the compressibility of sensitive natural clays, Geotechnique, Vol. 35, No. 2, pp. 159-180, 1985

11) 今井五郎: 粘性土の圧密機構 - 原論 -, わかりやすい土質力学原論, 土質工学会, pp. 45-134, 1987

12) 梅原靖文: 土の圧密特性とその試験法に関する研究, 港湾技研資料, No. 469, 1983

13) 三笠正人他: 定ひずみ速度圧密試験結果の補正について、代44回年次学術講演会講演概要集, pp. 366-367, 1989