

運輸省港湾技術研究所

港湾技術研究所 報告

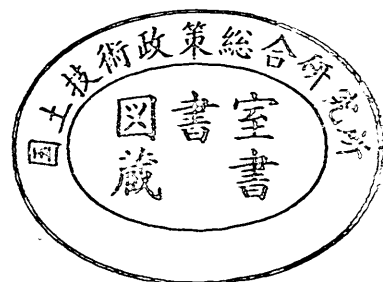
REPORT OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH
INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT

VOL. 12

NO. 4

DEC. 1973

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



1973

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第12巻 第4号 (Vol. 12, No. 4), 1973年12月 (Dec. 1973)

目 次 (CONTENTS)

1. 波と流れによる砂移動に関する実験
..... 田中則男・小笹博昭・小笠原昭..... 3
(Experiments on Sand Movement by Waves and Currents
.....Norio TANAKA, Hiroaki OZASA and Akira OGASAWARA)
2. 楕円柱体近似による固定船体に働く波力の理論および実験
..... 合田良実・高山知司・笹田 正..... 23
(Theoretical and Experimental Investigation of Wave Forces on a Fixed Vessel
Approximated with an Elliptic Cylinder
..... Yoshimi GODA, Tomotsuka TAKAYAMA and Tadashi SASADA)
3. 空港アスファルト舗装のわだちぼれ
..... 森口 拓・浅島豊明・渋谷英男..... 75
(Rutting of Asphalt Pavements for Airports
..... Hiraku MORIGUCHI, Toyoaki ASAJIMA and Hideo SHIBUYA)
4. 連続載荷方式による急速圧密試験
..... 梅原靖文・松本一明・成田 実・梅田裕史.....131
(Rapid Consolidation Test Under Continuous Loading
.....Yasufumi UMEHARA, Kazuaki MATSUMOTO, Minoru NARITA
and Hirojumi UMEDA)
5. 各種地盤における平均応答スペクトル
..... 土田 肇・倉田栄一・石坂徳三・林 聡.....171
(Average Response Spectra for Various Site Conditions
..... Hajime TSUCHIDA, Eiichi KURATA, Tokuzo ISHIZAKA
Satoshi HAYASHI)
6. 太径鉄筋を用いたコンクリートはりのひびわれ
..... 関 博.....201
(Crack Characteristics of Reinforced Concrete Beams with Large-sized Deformed Bars
.....Hiroshi SEKI)
7. ドラグヘッドに関する研究 (第1報)
——ドラグヘッドの基礎形状について——
..... 八木得次・奥出 律・是石昭夫.....233
(Study of Drag Suction Head (Part 1)—On the Basic Geometry of Draghead—
..... Tokuji YAGI, Tadasu OKUDE and Akio KOREISHI)

4. 連続載荷方式による急速圧密試験

梅原靖文*・松本一明**・成田 実**・梅田裕史***

要 旨

共通の試料を用いて、定率ひずみおよび定率漸増載荷の両方式による連続載荷圧密試験を実施し、標準圧密試験結果との対応性、載荷条件の影響および試験条件の影響を調べた。これらの試験においては間げき水圧の測定精度が非常に重要であり、高い測定精度を維持するためには、静水圧の75~100%程度のバックプレッシャーをかけることが予圧密よりも望ましいこと、過圧密領域では、圧密定数は載荷条件の影響を受け、遅い載荷条件のものが標準圧密試験結果との対応がよいのに反し、正規圧密領域では載荷条件の影響をほとんど受けないことが明らかにされた。また、全圧力に対する間げき水圧の割合にもとずき定率ひずみ試験結果を判定する方法および上述の特徴を考慮した修正定率漸増載荷圧密試験法を提案した。連続載荷圧密試験法はまた自動記録および自動処理が容易なこととあいまって、段階載荷法よりも急速圧密試験法としてより一層有効であることが確認された。

* 土質部 土性研究室長

** 土質部 土質試験課

*** 前土質部 土質試験課

4. Rapid Consolidation Test under Continuous Loading

Yasufumi UMEHARA*
Kazuaki MATSUMOTO**
Minoru NARITA**
Hirofumi UMEDA***

Synopsis

A series of continuously loading consolidation tests both at constant rate of strain and at constant rate of stress were performed on the same group of clay samples. The test results were compared with those of the standard consolidation test, in which the influences of loading conditions such as strain rate or loading rate were examined on consolidation parameters together with the effects of testing procedures including back pressures and preloads.

It was found that; back pressures are more effective than preloads not only for accurate measurements of pore pressures but also for reducing the test time and the suitable amount of back pressures is the 75 to 100 percent of the hydrostatic pressure encountered in the field; the consolidation parameters of the overconsolidated state are more or less dependent on strain rates or loading rates, whereas the consolidation parameters of the normally consolidated state show a considerably good agreement with those obtained from standard tests irrespective of widely varying loading conditions; the ratio of the pore water pressure at the base to the total pressure is available as a measure to judge the results of the constant rate of strain test without conducting the standard test, and the bilinear loading consolidation is more reasonable as a rapid consolidation test.

* Chief of the Soil Mechanics Laboratory, Soils Division

** Member of the Soil Investigations Section, Soils Division

*** Ex-Member of the Soil Investigations Section, Soils Division

目 次

要 旨	131
1. ま え が き	135
2. 連続載荷圧密試験法の概要	135
3. 実 験	137
3.1 装置および実験方法	138
3.2 試 料	140
3.3 試験条件	141
4. 定率ひずみ圧密試験	145
4.1 圧密定数および有効応力の評価法	146
4.2 予圧密とバックプレッシャーの効果	147
4.3 ひずみ速度と $e \sim \log p'$ 特性	150
4.4 ひずみ速度と圧密定数	152
4.5 間げき水圧特性	154
4.6 試験所要時間	155
5. 定率漸増載荷圧密試験	156
5.1 圧密定数および有効応力の評価法	156
5.2 予圧密とバックプレッシャーの効果	156
5.3 載荷速度と $e \sim \log p'$ 特性	158
5.4 載荷速度と圧密定数	160
5.5 間げき水圧特性と試験所要時間	161
5.6 定率漸増載荷時のひずみ速度	163
6. 連続載荷方式による急速圧密試験の適用限界	164
6.1 定率ひずみ圧密試験のひずみ速度	164
6.2 定率漸増載荷圧密試験の載荷速度	165
7. 結 論	166
8. あとがき	167
参考文献	167
記 号 表	168
付 録	169

1. ま え が き

粘土地盤上に建設された構造物、盛土などによる圧密沈下、あるいは被圧滞水層の水圧変動にもとづく地盤沈下の計算には、Terzaghiの一次元圧密理論とむすびついた、いわゆる標準圧密試験法により得られる圧密定数 m_v 、 c_v あるいは c_c が使用されている。この試験法自体については、従来、多くの研究者によりいろいろな角度から研究がなされ、問題点が指摘されながらも、試験法の簡便さのゆえに依然として実用的な価値が認識されている。しかし、現行の標準圧密試験法は、一定荷重を24時間載荷した後、荷重増分を倍増させながら段階載荷するものであり、その結果、全試験が完了するのに7~10日間を要し、土質試験法の中でも最も長期間を要するものの1つである。

そこで、沈下解析に必要な圧密定数を短期間に合理的に定めようとする研究が従来より試みられている。

その1つは、標準圧密試験における各段階、24時間という載荷時間は便宜的に定められたものであり、テルツァギーの一次元圧密理論で取り扱われる、いわゆる一次元圧密の部分、短時間に終了するので、各段階の載荷時間を短縮することにより圧密定数を得ようとするものである。この種のアプローチはNorthey²⁾、野田³⁾、小川⁴⁾などにより試みられており、標準圧密試験結果自体のパラッキを考慮すれば、急速圧密試験法として十分実用可能であるという結果を得ている。しかし、これらの方法では試験者がたえず1つの試験機のみを観測を続けねばならないため、数多くの試料を試験する場合には、多数の試験機を用いて標準圧密試験を実施するのに比べて、十分能率的とはいえないこと、また、自動自記化、電算機処理が困難なことなどの欠点を有している。

一方、電気計測法の発達とあいまって、新たな方法があいついで提案されている。これらはCrawford⁵⁾により試みられ、その後Byrne他⁶⁾、Smith他⁷⁾、Wissa他⁸⁾などにより各々理論的な取り扱いがなされた、定率ひずみ圧密試験(CRS-test)、網干他⁹⁾により提案された定率漸増載荷圧密試験(CLR-test)およびLowe他¹⁰⁾により提案された動水こう配一定試験である。各試験は制御する項目が、それぞれひずみ速度、載荷速度、動水こう配という相違はあるが、いずれも連続的に載荷し、供試体底部の間げき水圧の測定により有効応力にもとづく整理をする点で共通しており、圧密現象の解明のため

の手段としてもその有用性が期待されるものである。これらの試験法は制御条件の大きさを任意に変えられるのみならず、自動記録および自動処理が容易であるという点で急速圧密試験法としての実用的価値が高いと考えられるが、標準圧密試験法にとってかわるためには、現在のところデータも少なく、また、データの解釈方法ならびに試験方法にも検討を要する問題が多いようである。

本報告は、定率ひずみおよび定率漸増載荷による連続載荷圧密試験法を急速圧密試験法として用いる場合の妥当性、適用方法ならびにその適用限界に対する検討を行ない、連続載荷圧密試験法を標準圧密試験の代用として使用する場合の妥当性の判定方法を示したものである。

2. 連続載荷圧密試験法の概要

粘土層の圧密沈下量、沈下速度を推定するための定数を求める標準圧密試験は、非常に理想化された型ではあるが、現地の外力、変形、排水条件を一応、近似させた状態で行なわれる。連続載荷圧密試験は、変形は有効応力により規制され、変形に関係する定数は載荷方法によらないということを前提条件としている。データの解釈を容易にするため、荷重、変位、間げき水圧のうち、特定の項目を制御することにより3種類の試験法が可能であり、これらはいずれも間げき水圧の測定にもとづく有効応力による整理を根拠としている。しかし、間げき水圧は供試体の上下面でのみ計測可能なので、供試体内の間げき水圧の深さ方向の分布は不明であり、載荷にともなう変形を数学的に取り扱うためには、間げき水圧の分布を仮定する必要がある。この仮定の設定の仕方により、過去にいくつかの理論解が提示されており、以下ではこれらのうち本報告の実験に直接関係のある定率ひずみ試験および定率漸増載荷試験に関するものの概要ならびに相互関係について述べ、実験結果の解釈に利用することとする。

(1) 定率ひずみ圧密試験(CRS-test)

この試験法は元来Crawford⁵⁾により $e \sim \log p'$ 特性を短期間試験により求めるための一手法として、提案されたものであるが、その後、現地地盤の圧密沈下と室内圧密試験におけるひずみ速度の大きな相違が指摘され、ひずみ速度の影響を調べる手段としての有用性も強調されている。

Crawford¹¹⁾はCRS-testにおいて計測された供試体底部の間げき水圧が最大荷重の約5~15%程度であった

ため、CRS-test における圧密は動水効果よりも塑性変形にもとづくものであり、したがって2次圧密的な傾向を示すと報告している。一方、Wahls 他¹²⁾は、最大荷重の25~75%の間げき水圧の記録例を示し、CRS-test の圧密は塑性変形にもとづくという Crawford の見解に反論している。

これらの一見、相反する現象は、使用するひずみ速度および土の分類特性に関係するものであり、Smith 他⁷⁾、Byrne 他⁶⁾、Wissa 他⁹⁾などがCRS-test における圧密現象を理論的に取り扱い、有効応力および圧密速度に関する定数 (c_v) の決定方法を示した。

Smith 他⁷⁾は Terzaghi の一次元圧密理論と同様の仮定(一部不要)を採用し、圧密基本式として次式を示している。

$$\frac{k}{\gamma_w} \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} = \frac{1}{1+e} \frac{\partial e}{\partial t} \quad (1)$$

ここに、 k : 透水係数で位置に無関係、 e : 間げき比、 γ_w : 水の単位重量、 u : 過剰間げき水圧である。定率ひずみ試験における前提条件、すなわち体積変化速度が一定という条件

$$\frac{dv}{dt} = -RA \quad (2)$$

のほかに、間げき比の深さ方向の分布を線形として

$$e = e_0 - rt \left[1 - \frac{b}{r} \left(\frac{z - 0.5H}{H} \right) \right] \quad (3)$$

が仮定されている。

ここに、 V, A : 供試体の体積および断面積、 R : 沈下速度、 e_0 : 初期間げき比、 b : 定数、 r : 沈下速度に関する定数、 b/r : e の深さによる変化を示す定数 (0~2) である。

境界条件

$$u(0, t) = \frac{\partial u}{\partial z}(H, t) = 0 \quad (4)$$

のもとに、基本式を解き、間げき水圧分布を求め、供試体底部の間げき水圧 u_b として、次式が与えられる。

$$u_b = u_{z=H} = \frac{\gamma_w r H^2}{k(1+\bar{e})} \left[\frac{1}{2} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{12} \right) \right] \quad (5)$$

ただし、 \bar{e} : 平均間げき比である。

また、間げき水圧の分布を平均化し、供試体内の有効応力の平均 p' が次式で与えられる。

$$p' = p - \alpha \cdot u_b \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\bar{u}}{u_b} = \frac{\frac{1}{3} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{24} \right)}{\frac{1}{2} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{12} \right)} \quad (7)$$

α は $b/r=0 \sim 2$ に対して変化は小さく、0.667~0.750 の範囲にあるので、一般的には $b/r=1$ ($\alpha=0.7$) が採用される。この結果、求める圧密定数 m_v, c_v が次式で与えられる。

$$c_v = \frac{rH^2}{a_v u_b} \left[\frac{1}{2} - \frac{b}{r} \left(\frac{1}{12} \right) \right] = \frac{5}{12} \cdot \frac{RH^2}{m_v h_s (1+e) u_b} \quad (8)$$

$$m_v = \frac{\Delta e}{1+e} \frac{1}{\Delta p'} = \frac{\Delta e}{\Delta p'} \quad (9)$$

ここに、 a_v : 圧縮係数、 $\Delta e/\Delta p'$ 、 h_s : 粘土実質部分の高さである。

一方、Byrne 他⁶⁾は同様の圧密基本式および境界条件を用いているが、Smith 他とは異なり、間げき比、 e の分布を一様と仮定して、供試体底部の間げき水圧を与えている。この式は Smith 他⁷⁾の解の特別のものであり、(5) 式において $b/r=0$ の場合に相当する。この場合、 $\alpha=2/3$ となり、これは間げき水圧の分布を放物線と仮定したものになる。

Wissa 他⁹⁾は三笠¹⁾および Davis¹³⁾と同様に、圧密係数 $c_v = k/(\gamma_w \cdot m_v) = \text{一定}$ (k および m_v はかならずしも一定ではない) という Terzaghi よりも一般的な仮定を採用し、圧密基本式として (10) 式に示すように、間げき水圧 u のかわりにひずみの関係式を用いている。

$$c_v \frac{\partial^2 \varepsilon}{\partial z^2} = \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} \quad (10)$$

境界条件

$$v(H, t) = v(z, 0) = \frac{\partial^2 v(H, t)}{\partial z^2} = 0 \quad (11)$$

$$\left(\text{ただし、} v = \int^H \varepsilon dz: \text{鉛直変位} \right)$$

のほかにひずみ速度一定の条件

$$v(0, t) = rtH \quad (12)$$

を用いて (10) 式を解き、軸ひずみ ε が無次元高さ z/H 、および時間係数、 $T_v = c_v \cdot t/H^2$ の関数として次式で与えられる。

$$\varepsilon(z/H, T_v) = rt + \frac{rH^2}{c_v} \left(\frac{1}{3} - \frac{z}{H} + \frac{1}{2} \left(\frac{z}{H} \right)^2 \right) + \frac{rH^2}{c_v} \cdot \frac{2}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\cos \frac{n\pi z}{H}}{n^2} e^{-n^2 \pi^2 / T_v} \quad (13)$$

上式の3項はそれぞれ平均ひずみ、平均からの変動の定常的成分および平均からの変動の過渡状態成分を表わしている。ただし、第3項は $T_v > 0.5$ の時ほとんど無視できる。

圧密定数 m_v , c_v , k および応力～ひずみ関係が定率ひずみ圧密試験のデータを (13) 式を用いて解析することにより求められる。この場合、応力～ひずみ関係が線形 (m_v : 一定) および非線形 ($m_v \propto 1/p'$) の各条件に対し、過渡状態 ($T_v < 0.5$) および定常状態 ($T_v > 0.5$) の c_v の決定方法が示されている。

上記の各ケースのうち、線形、定常状態の場合のものは Byrne 他⁶⁾ あるいは Smith 他⁷⁾ の $b/r=0$ の場合のものに該当するものとなる。

(2) 定率漸増載荷圧密試験 (CLR-test)

前述の CRS-test がひずみ速度を一定に保ちながら連続載荷するのに対し、この試験では、連続載荷中に載荷速度が一定に保たれ、その間の荷重、変位および間げき水圧の時間的変化が計測される。網干他⁹⁾ は Shiffman¹⁴⁾ により解かれた線形載荷圧密の理論解を修正し、定率漸増載荷方式の連続載荷圧密試験の結果から、圧密係数 c_v および有効応力 p' を求める方法を提案している。

この場合の圧密基礎方程式は

$$\frac{\partial u}{\partial t} = c_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} + R_o \quad (14)$$

で与えられる。ここに u : 過剰間げき水圧, c_v : 圧密係数, R_o : 載荷速度で定荷重圧密の場合 0, 線形載荷の場合定数である。また, z 軸は供試体上面に原点をもち、鉛直下方を正としている。

境界条件

$$u(0, t) = \frac{\partial u}{\partial z}(H, t) = u(z, 0) = 0 \quad (15)$$

のもとに (14) 式を解き、不透水面 ($z=H$) における間げき水圧 u_b が次式で与えられる。

$$\frac{u_b}{p} = \frac{16}{\pi^3 T_v} \sum_{m=0}^{\infty} (-1)^m \frac{1}{(2m+1)^2} \times \left[1 - \exp \left\{ -\frac{(2m+1)^2 \pi^2}{4} T_v \right\} \right] \quad (16)$$

ここに, T_v は時間係数であり次式で与えられる。

$$T_v = t \cdot H^2 / c_v \quad (17)$$

また、圧密度 U として

$$U = 1 - \frac{32}{\pi^4 T_v} \sum_{m=0}^{\infty} \frac{1}{(2m+1)^4} \times \left[1 - \exp \left\{ -\frac{(2m+1)^2 \pi^2}{4} T_v \right\} \right] \quad (18)$$

が与えられるので、供試体内の有効応力の平均 p' は

$$p' = p \cdot U \quad (19)$$

により求められる。

上述の関係を定率漸増載荷圧密試験のデータに適用す

ることにより、圧密定数および $e \sim \log p'$ 曲線などが決定される。

3. 実験概要

3.1 装置

急速圧密試験法として2つの試験方法を採用し、標準圧密試験結果との比較実験を行なったことは 1. まえがきで述べたとおりである。

この2つの試験、すなわちひずみ速度をコントロールしながら連続載荷する方式、いわゆる定率ひずみ圧密試験および荷重速度をコントロールして漸増載荷する方式、いわゆる定率漸増載荷圧密試験に使用した装置について以下に述べる。

(1) 定率ひずみ圧密試験

定率ひずみ圧密試験の場合、載荷装置としては負荷変動に対しても一定ひずみ速度が得られる方式のものであればよく、従来から広く使用されている三軸圧縮試験機の利用が適当である。今回も写真-3.1に示すような小型三軸圧縮試験機の載荷機構を利用して行なった。この装置の性能については表-3.1に示すとおりである。

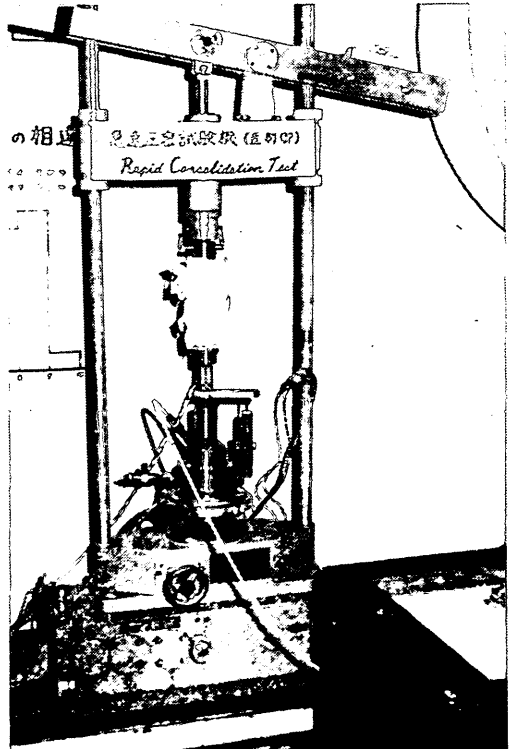


写真-3.1 定率ひずみ圧密試験装置 (小型三軸圧縮試験機)

表-3.1 小型三軸圧縮試験機の性能

小型三軸圧縮試験機仕様（ひずみ方式）

ひずみ速度	ギヤチェンジにより 2.4, 1.78, 1.2, 0.8, 0.5 mm/min の 5 段階を再度 1/1, 1/10, 1/100, 1/1000, 1/10000 の 5 段階に変速可能。したがって 25 段階
許容荷重	1000 kg
レバー比	1 : 5
許容変位置	150 mm

本装置では圧力検出に半導体圧力変換器（500 kg）が用いられている。このほか試験中の測定には両試験方法とも、変位（圧密沈下量）は差動トランスにより、また間げき水圧およびバックプレッシャーは半導体小型圧力変換器を用いており、それぞれの測定結果は多ペン式のアナログレコーダーに記録されている。バックプレッシャーは空気圧をレギュレーターによって正確に調整して、水圧を発生させる方式を採用し、最大圧力 5 kg/cm² まで加えられるようにした。

これら本試験に使用した計測器の性能については表-3.2 に一括して示す。

この試験で使用した圧密容器は 図-3.5 に示すように

表-3.2 各種計測器の性能

荷重測定器仕様

定率漸増載荷圧密試験			定率ひずみ圧密試験	
マ グ ネ セ ル			ロードセル（半導体圧力変換器）	
定格ひょう量値	300 kg	1000 kg	最大荷重	500 kg
型式 公称精度	TKMC-300K ±0.5%	TKMC-1T ±0.5%	1 kg 相当の出力	12 mV
過負荷	300%		過負荷	150%
温度特性	0~50°C の範囲で 0.025%/deg		零点移動温度特性	±0.05%/FS/°C
使用温度範囲	-20~80°C		使用温度範囲	0~50°C

間げき水圧、バックプレッシャー測定器仕様（共通）

半導体小型圧力変換器	
測定範囲	-1~5 kg/cm ²
過負荷	150%
出力	100 mV
使用温度範囲	-10~60°C
温度特性	±0.05%/FS/°C
受圧部直径	φ=5 mm

記録器仕様（共通）

6 ペン式レコーダー	
測定レンジ	10 mV~100 V の 10 段切換
応答速度	0.5 sec/FS
動的特性	0~1 Hz
精度	±0.3%/FS
感度	±0.1%/FS
チャート幅	250 mm
チャートスピード	600, 300, 150 mm/min 600, 300, 150 mm/h の 6 段切換

変位測定器仕様（共通）

差動トランス	
型式	DM-20 型
測定範囲	20 mm (20, 15, 10, 5, 2 mm の 5 段切換)
最大出力	10 mV

り、予圧密加圧の場合は急速用モーターにより、また直接漸増加圧の場合はサーボモーターに指令が送られる。この指令によってモーターが回転を始め、加圧用のスプリングが押し上げられて、密閉されたペロフラム内の油は圧力を発生し、その圧力はさらに载荷用のペロフラムシリンダーで増幅されて所定の圧密荷重に変換される。

圧力伝達にペロフラムによる油圧方式を採用したのは油もれが完全に防止でき、可動部の摩擦損失がほとんどない効率の高い圧力伝達ができることおよびサーボコントロールに際して最も重要視しなければならない応答性にすぐれていることなどがあげられる。

荷重測定にはマグネセル (Magnecell) と称する荷重検出器を使用した。マグネセルは 図-3.3 に示すように磁気増幅器鉄心を加圧したときに、その出力電圧が変化することを利用した荷重検出器である。本装置では荷重容量 300 kg および 1000 kg の 2 種類が使用できるようになっている。このマグネセルによって検出された荷重に比例する電圧はレコーダーの入力となり、また最初に設定した函数グラフに示す電圧の入っているアナログオ

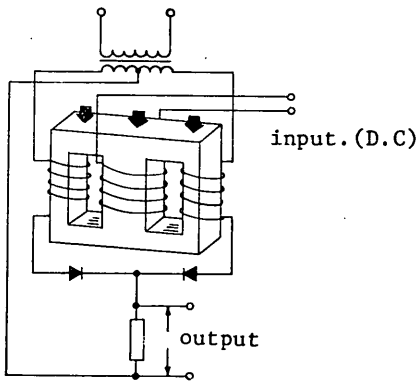
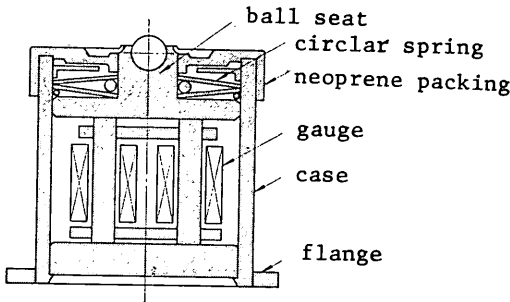


図-3.3 マグネセルの構造および原理

ペレーションアンプの入力となる。アナログオペレーションアンプは 図-3.4 のブロック図に示すようにつぎの演算が行なわれている。

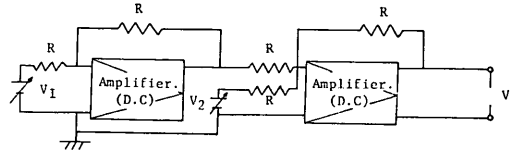


図-3.4 アナログオペレーションアンプのブロック図

$$V = K(V_1 - V_2)$$

ここに V : サーボアンプへの入力電圧

K : 増幅率

V_1 : 函数発生器の電圧

V_2 : マグネセルより発生する電圧

すなわち V の値がプラスであればサーボモーターは加圧方向へ回転し、マイナスならば減圧方向に回転する。したがって、函数発生器の電圧は設定にならって時間の経過とともに増減するが V の値がつねに零であるようにペロフラム内の圧力がコントロールされ、函数グラフに設定した荷重に対し正確にシュミレートできるようになっている。

本装置の場合、圧力検出にマグネセルを使用しているが、圧密容器をはじめ、検出器ならびに記録計は定率ひずみ圧密試験と同様の方式のものが使用されている。

3.2 試料

この種の比較実験では試料の均一性が重要な条件になることはいうまでもないが、本試験では 表-3.3 に示すような分類特性をもった横浜本牧地区から採取した粘土を大型混練機によって練り返し、それをさらにフィルターを通して貝殻、有機物など不純物を取除いた上、再圧密して必要数の試料塊を作製し、これをトリミングして供試体とした。

試料の作製は 写真-3.3 に示すような再圧密装置を用いて行なった。再圧密容器は直径 14 cm、高さ 20 cm の形状のものを使用し、試料の均一性を高めるため容器に詰めるさい空気を封じ込めないよう、どろどろした状態すなわち初期含水比を約 130% として、軸圧 0.5 kg/cm^2 の一次元圧密とした。しかし、反面では初期含水比をきわめて高く調整したためにフローの危険性が考えられるので、最初 0.1 kg/cm^2 の圧密荷重で予備圧密を行なったのち、所定の圧密荷重 0.5 kg/cm^2 で圧密したものである。

連続載荷方式による急速圧密試験

表-3.3 本牧粘土の分類特性

試料番号	Sample No.	本牧粘土	
単位体積重量	γ_t (t/m ³)	≒1.50	
含水比	w (%)	≒85.0	
間げき比	e	≒2.30	
飽和度	S_r (%)	≒99.9	
土粒子の比重	G_s	2.71	
コンシメーション特性	液性限界	w_L (%)	96.7
	塑性限界	w_p (%)	41.5
	塑性指数	I_p	55.2
	液性指数	I_L	0.788
粒度組成	礫	Gravel (%)	0
	砂	Sand (%)	8.7
	シルト	Silt (%)	40.1
	粘土	Clay (%)	51.2
	分類	三角座標	Clay

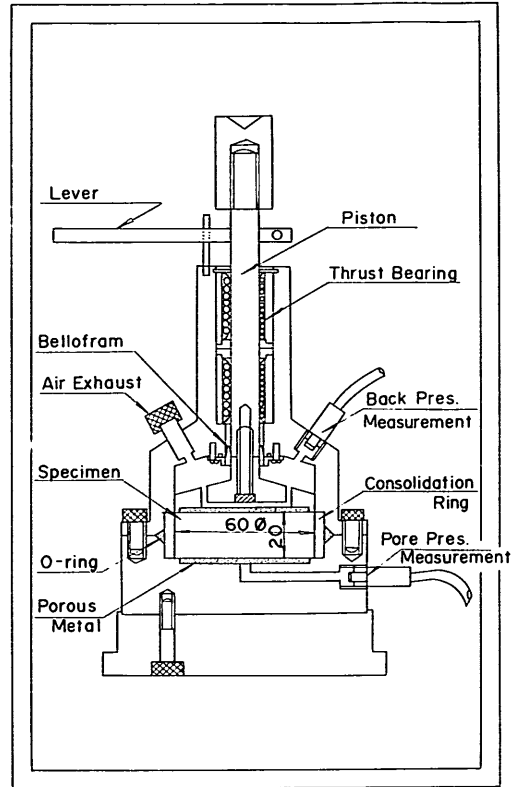


図-3.5 密閉型圧密容器構造図

本試験の最終目的は当然のことであるが、自然地盤から採取した試料に対して適用可能かどうかの検討であるから、乱さない試料については、横浜大黒町および岡山錦海湾の試料を用いて試験した。大黒町試料の分類特性などについて 図-3.6 および 図-3.7 に示し、錦海湾試料の分類特性を表-3.4 に示す。

3.3 試験方法および試験条件

(1) 標準圧密試験

再圧密試料を用いて JIS-A-1217-1960 および土質工学会セン断試験法委員会改訂案に基づいて実施した。試験個数については試験結果の再現性を調べるため同一条件で調整された9個の試料について行ない、その結果のすべてを採用して、ばらつきの幅として表わし、急速圧密試験結果との対比に用いた。

(2) 定率ひずみ圧密試験

本試験は 3.1 の装置のところで述べた小型三軸圧縮試験機の載荷機構を用いて実施した。試料は比較という意味から均一性に信頼のおける再圧密試料を使用し、ひず

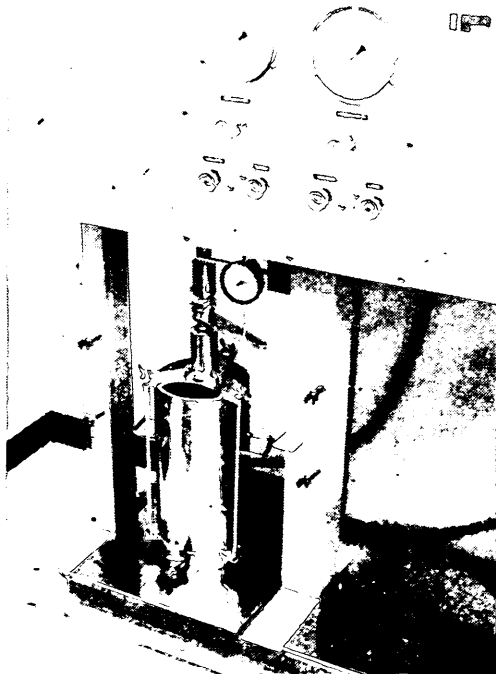


写真-3.3 再圧密試料作製装置

Bore Hole Daikoku-cho No.6
Date 1972.6 G.L.-790

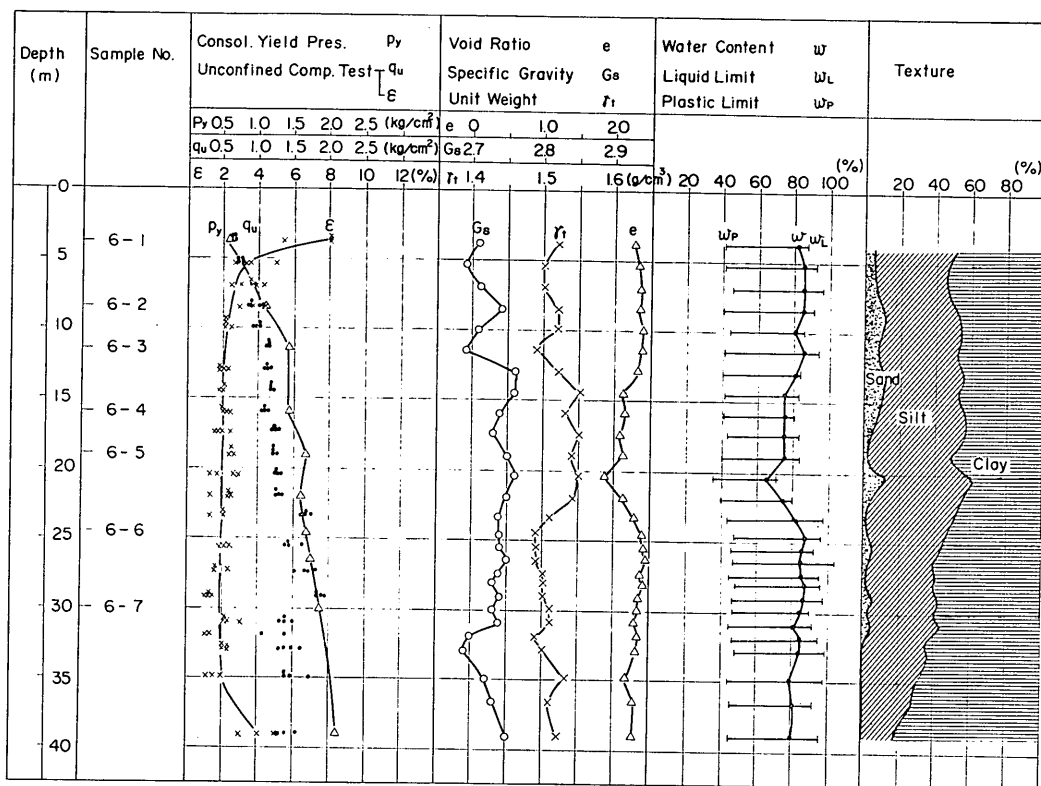


図-3.6 大黒町自然試料 (No. 6) の土質試験結果

表-3.4 錦海粘土の分類特性

試料番号	Sample No.	錦海 46-1	試料番号	Sample No.	錦海 46-1	
単位体積重量	γ_t (t/m ³)	1.41	コン シ ン ス テ ン 性	液性限界	w_L (%)	115.2
含水比	w (%)	115.1		塑性限界	w_p (%)	38.6
間げき比	e	3.09		塑性指数	I_p	76.6
				液性指数	I_L	0.999
飽和度	S_r (%)	99.9	粒 度 組 成	礫	Gravel (%)	0
土粒子の比重	G_s	2.68		砂	Sand (%)	2.3
				シルト	Silt (%)	37.9
				粘土	Clay (%)	59.8
			分類	三角座標	Clay	

連続載荷方式による急速圧密試験

Bore Hole Daikoku-cho No.12
Date 1972.6 G.L.-7.90

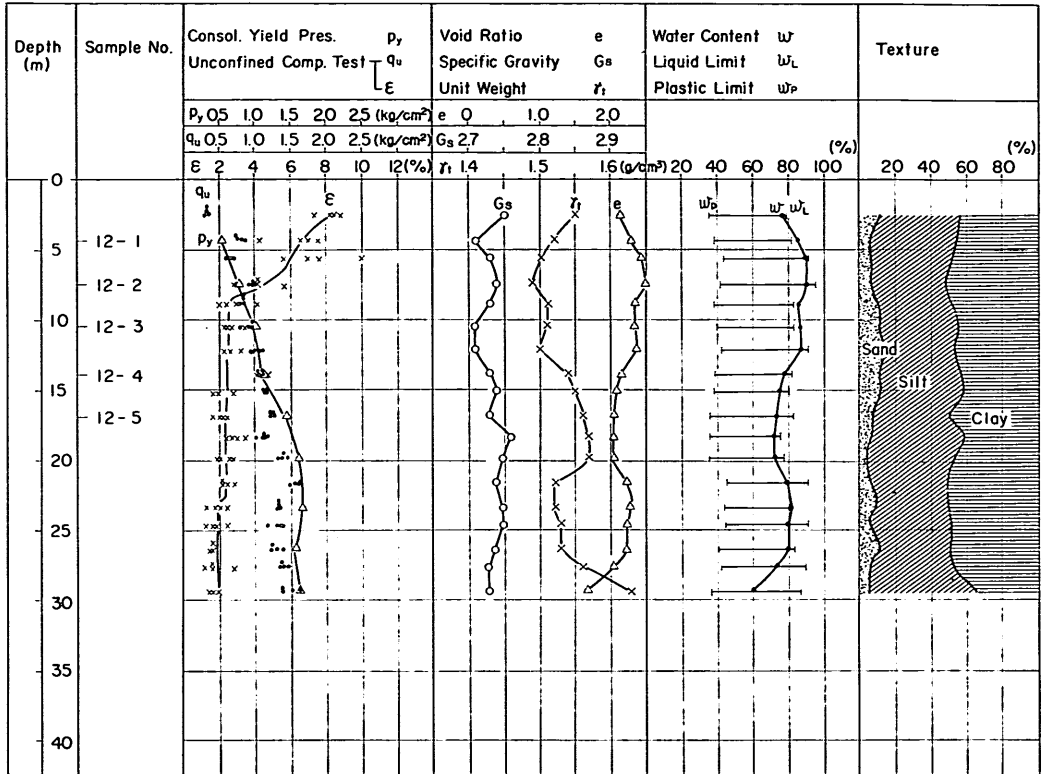


図-3.7 大黒町自然試料 (No. 12) の土質試験結果

表-3.5 再圧密試料による試験種類

ひずみ速度 (%/min)	圧密試験前の処理内容および圧力			ひずみ速度 (%/min)	圧密試験前の処理内容および圧力		
	予圧密 (kg/cm ²)	バックプレ ッシャー (kg/cm ²)	無処理		予圧密 (kg/cm ²)	バックプレ ッシャー (kg/cm ²)	無処理
0.60	0.5	0.5	0	0.089	0.5	0.5	0
	0.75	0.75			0.75	0.75	
0.40	0.5	0.5	0	0.060	0.5	0.5	0
	0.75	0.75			0.75	0.75	
0.24	0.5	0.5	0	0.040	0.5	0.5	0
	0.75	0.75			0.75	0.75	
0.12	0.5	0.5	0	0.024	0.5	0.5	0
	0.75	0.75			0.75	0.75	

み速度を8種類に変化させて試験した。一方、自然試料は再圧密試料による結果から実用可能なひずみ速度範囲についてのみ試験を行なった。

本試験のように間げき水圧の測定値を使って試験結果を解析する場合には、間げき水圧の測定精度によって試験精度が左右されるので、可能な限り正確に測定することが大切である。このためには精度のよい検出器で測定することは当然であるが、試料の飽和度を高い状態に維持することが必要である。したがって供試体の圧密容器へのセットは空気を封じ込めないように水中セットしたり、急速圧密試験に入る前に予圧密と称して小さい荷重で一旦圧密したり、あるいはバックプレッシャーを加えるなど飽和度を高める処理を行なっている。

表-3.6 自然試料による試験種類

試料番号	ひずみ速度 (%/min)	バックプレ ッシャー (kg/cm ²)
大黒町 6-1	0.06	1.4
6-2	0.06	1.0
	0.06	3.0
	0.06	5.0
6-3	0.06	2.2
6-4	0.06	2.6
6-5	0.06	2.9
6-6	0.12	2.5
	0.06	2.5
	0.024	2.5
	0.12	3.0
6-7	0.06	3.0
	0.024	3.0
	0.024	3.0
12-1	0.06	0
12-2	0.06	1.8
12-3	0.06	2.1
12-4	0.06	2.4
12-5	0.06	2.7
錦海 46-1	0.12	1.1
	0.06	1.1
	0.04	1.1
	0.024	1.1

表-3.7 再圧密試料による試験種類

漸増荷重速度 (kg/cm ² /min)	圧密試験前の処理内容および圧力		
	予圧密 (kg/cm ²)	バックプレ ッシャー (kg/cm ²)	無処理
0.160 (1h)	0.5	0.5	0
	0.7	0.7	
0.080 (2h)	0.5	0.5	0
	0.7	0.7	
0.053 (3h)	0.5	0.5	0
	0.7	0.7	
0.040 (4h)	0.5	0.5	0
	0.7	0.7	
0.020 (8h)	0.5	0.5	0
	0.7	0.7	

表-3.8 自然試料による試験種類

試料番号	漸増荷重速度 (kg/cm ² /min)	バックプレ ッシャー (kg/cm ²)
大黒町 6-1	0.0786 (3h)	1.4
6-3	0.0786 (3h)	2.2
6-4	0.0472 (5h)	2.6
6-6	0.0786 (3h)	2.5
	0.0472 (5h)	2.5
	0.0393 (6h)	2.5
	0.0337 (7h)	2.5
6-7	0.0786 (3h)	3.0
	0.0472 (5h)	3.0
	0.0337 (7h)	3.0
12-1	0.0589 (4h)	0
12-2	0.0786 (3h)	1.8
12-3	0.0786 (3h)	2.1
12-4	0.0472 (5h)	2.4
12-5	0.0472 (5h)	2.7
錦海 46-1	0.0786 (3h)	1.1
	0.0472 (5h)	1.1
	0.0393 (6h)	1.1
	0.0295 (8h)	1.1
	0.0295 (8h)	1.1

今回の試験では8種類のひずみ速度に対し、この事前処理を組合わせて、再圧密試験においては表-3.5のように、また自然試験については前述のように再圧密試験による結果からひずみ速度は実用可能範囲とし、事前処理もバックプレッシャーのみとした。この組合わせは表-3.6に示す。

(3) 定率漸増載荷試験

この試験は3.1で述べたように油圧サーボをエレクトロニクスによって制御する特殊装置を用いて実施した。

試験は再圧密試験を主体とし、自然試験は再圧密試験による結果から試験個数を決定した。載荷速度については網干らの実験結果⁹⁾を参考にして急速圧密試験として妥当な時間と1日の作業時間を考慮した1, 2, 3, 4および8時間の5段階とし、これに試験前の事前処理を組合わせて行なった。また自然試験については上述のように再圧密試験による結果から事前処理はバックプレッシャーのみとしたことは、定率ひずみ方式と同じである。それらの組合わせを表-3.7および表-3.8に示す。

なお急速圧密試験の両者とも間げき水圧は供試体底面で測定したので片面排水条件となり、標準圧密試験における排水距離の2倍となっている。

4. 定率ひずみ圧密試験

供試体は一定のひずみ速度のもとに連続的に載荷され供試体上面を排水面、下面を不透水面とする一方排水条件で圧密された。一連の試験において計測されるものは全圧力 p 、沈下量 d 、および供試体底面の間げき水圧 u_0 の時間的変化であり、写真-4.1に測定記録例を示す。

これらの定率ひずみ試験データより、圧密定数および間げき比の変化が時間 t および $t+\Delta t$ 内では一定として求められ対応する平均有効応力および有効応力に対する変化状況が標準圧密試験結果と対比させて調べられた。この場合、供試体処理方法およびひずみ速度が定率ひずみ試験結果を左右する要因と考えられるので、これらの影響を各種の試験について検討した。

定率ひずみ試験結果と標準圧密試験結果の対比を行なう場合、排水条件とか供試体処理方法などに関して、厳密には同一条件のもの同志を比較する必要がある。たとえば、片面排水と両面排水条件については、供試体高さの影響が現われるといわれている¹⁾。しかし、ここでは標準試験との対比という観点にたつて、標準圧密試験の場

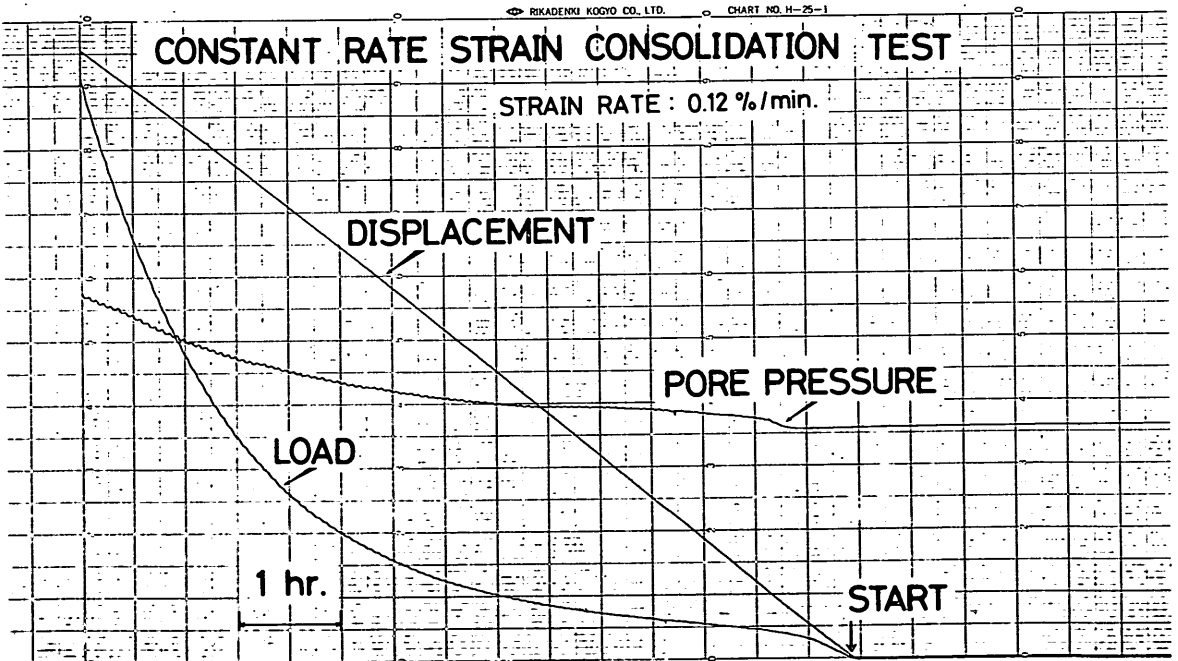


写真-4.1 定率ひずみ圧密試験測定記録例

合には、両面排水条件で実施し、かつまた、バックプレッシャーなどの処理は行っていない。

また、標準圧密試験の場合、試験機の相違、試料の不均一性、供試体作成時における人為的条件の相違などにより、同一の試料に対しても、試験結果の多少のばらつきはさげられない。とりわけ、自然試料の場合には、不均一性の傾向が強いのみならず、供試体数に限度があり、個々の場合に、誤差範囲を明確に定めがたい。そこで、主要な傾向の把握は人工的に再圧密して得られる均一な試料について行なうこととし、自然試料についての結果を補足することとした。

図-4.1 および 図-4.2 は本牧再圧密試料についての9個の供試体を9台の圧密試験機により同時に行なった標準圧密試験の $e \sim \log p'$ 特性、 $\log m_v \sim \log \bar{p}'$ および $\log c_v \sim \log \bar{p}'$ 関係を示したものである。図から明らかなように、均一と考えられる試料に対しても、試験機などの相違により多少のばらつきはさげがたいので、一点鎖線で示した平均値のほか、実線で標準圧密試験結果の上、下限を示した。定率ひずみ試験結果を標準圧密試験結果と対比させる場合、図に示す程度のばらつきがあることを念頭においておく必要がある。

4.1 圧密定数及び有効応力の評価法

定率ひずみ試験のデータより圧密定数および有効応力を求める場合、前述したように応力～ひずみ関係および間げき比の分布の仮定の仕方によって3種の方式があり、当然のことながら、異なった圧密定数および有効応力を推定することになる。応力～ひずみの関係の仮定については、Wissa の非線形材料としての仮定がより実際

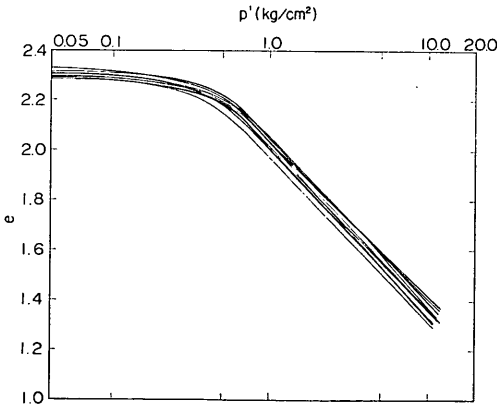


図-4.1 $e \sim \log p'$ 曲線 (本牧再圧密試料の標準圧密試験)

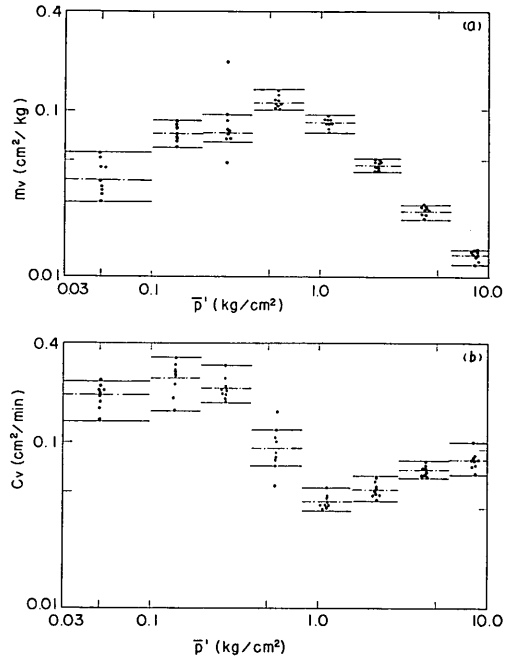


図-4.2 圧密定数 m_v, c_v (本牧再圧密試料の標準圧密試験)

的であると考えられるが、微小時間を考える場合には、線形と考えても実用上支障はないと考えられる。また、同じく Wissa による過渡状態の考慮については、その影響は圧密初期のみであり、一般的に必要なものは、ある程度大きい時間に対応するものであるので、定常状態のみを考えればよいと思われる。

つぎに、間げき比の深さ方向の分布の仮定については、Smith 他⁷⁾ によって考慮されているように想定可能な両極端をとっても、さほど大きな影響はないこと、および圧密試験の供試体が薄いものであることを考慮すれば、一様分布と仮定しても実用上許容しうるものと考えられる。

このような見地から、以下の検討においては主として Byrne 他⁸⁾ により採用された仮定、すなわち、特定時間 t における間げき比は深さ方向に一様であるという仮定にもとづく関係式を用いて定率ひずみ圧密試験のデータを解釈することとした。

この場合、 $t \sim t + \Delta t$ 時間内では圧密定数は一定であると考え、任意の時間 t における圧密定数および有効応力は、式 (7)～式 (9) において $b/r=0$ に対応するものとして次式で与えられる。

$$p' = p - \alpha u_b = p - \frac{2}{3} u_b \quad (20)$$

$$m_v = \frac{d\varepsilon}{dp'} \cdot \frac{1}{100} = \frac{de}{1+e} \cdot \frac{1}{dp'} \quad (21)$$

$$c_v = \frac{1}{2} \cdot \frac{RH^2}{m_v h_s (1+e) u_b} \quad (22)$$

ここに R : 沈下速度, $d\varepsilon/dt$, h_s は粘土実質部分の高さである。

時間 t に対応する有効応力 p' を式 (20) により求め、同時に対応する間げき比 e より $e \sim \log p'$ 曲線を得ることができる。また、時間 t , および $t + \Delta t$ 間の平均有効応力 \bar{p}' に対し、式 (21) および式 (22) で求まる圧密定数 m_v , c_v を両対数紙上でプロットすることにより $\log m_v \sim \log \bar{p}'$ および $\log c_v \sim \log \bar{p}'$ 曲線が求められる。

4.2 予圧密とバックプレッシャーの効果

連続載荷圧密試験の場合には、供試体底部の間げき水圧の測定精度が試験結果を左右する。載荷初期における供試体の安定性を良くし、かつ、気泡の混入による間げき水圧測定の誤差を小さくするため、連続載荷試験開始前にある圧力で予圧密をするか、あるいはバックプレッシャーをかけるなどの処置を行なった。このような処理方法の $e \sim \log p'$ 特性および圧密定数に及ぼす効果を以下では詳細に検討する。

(a) 再圧密試験

本牧再圧密試験料 (再圧密圧力 $p_0 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$) については、無処理, 予圧密 $P_p = 0.5 \text{ kg/cm}^2$, 予圧密 $P_p = 0.75 \text{ kg/cm}^2$, バックプレッシャー $B_p = 0.5 \text{ kg/cm}^2$, バックプレッシャー $B_p = 0.75 \text{ kg/cm}^2$ の5種類のケースを考慮し、各ケースについて同一のひずみ速度のものを比較の対象とした。図-4.3, 図-4.4 a および 図-4.4 b はそれらの中からひずみ速度 $R_s = 0.089\%/min$ の場合における供試体処理方法の $e \sim \log p'$ 特性, $\log m_v \sim \log \bar{p}'$ および $\log c_v \sim \log \bar{p}'$ 関係に及ぼす影響を示したものである。ここでの議論の主目的は標準圧密試験結果との対応を論ずることではないが、参考のため各図には標準圧密試験9個のバラツキ幅および平均値を示した。

図-4.3 に示した $e \sim \log p'$ 特性には、供試体処理方法による相違は全くみられず、特定のひずみ速度 $R_s = 0.089\%/min$ の場合には、処理方法の如何にかかわらず、標準圧密試験のばらつき範囲に入っている。ただ、予圧密を行なった場合には、当然のことながら、予圧密圧力以下の領域では $e \sim \log p'$ 曲線上のプロットは得ら

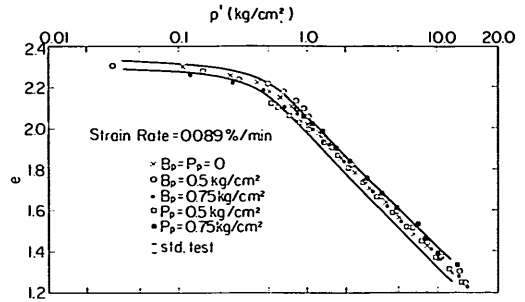


図-4.3 予圧密, P_p とバックプレッシャー, B_p の $e \sim \log p'$ 曲線に及ぼす効果 (本牧再圧密試験料)

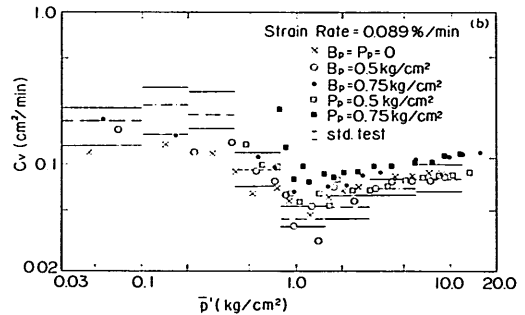
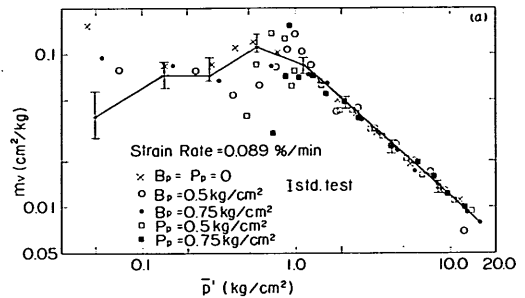


図-4.4 予圧密, P_p とバックプレッシャー, B_p の圧密定数に及ぼす効果 (本牧再圧密試験料)

れない。

体積圧縮係数 m_v については 図-4.4 a に示すようにバックプレッシャーをかけた場合 (無処理の場合も含める) には、過圧密領域において多少のばらつきがみられるものの、概してバックプレッシャーの大小による顕著な相違はみられない。また、特定のひずみ速度 $R_s = 0.089\%/min$ については、ごく小さい圧力領域を除いて標準圧密試験結果との対応も非常に良いようである。しかしながら、予圧密をかけた場合、定率ひずみ試験開始直後の圧力領域で、バックプレッシャーをかけた場合の

ものにくらべ m_v の値は極端に小さくなり、従ってこの場合、標準圧密試験の m_v よりも非常に小さい値を与える。この載荷直後の極端に小さい m_v の値はしだいに増加し、ある程度以上の圧力以上では、バックプレッシャーをかけた場合の変化傾向と全く一致する。このような現象は、他のひずみ速度についても、多かれ少なかれみられる一般的な現象のようであり、しかも、先行圧密圧力（この場合既知であり、約 0.5 kg/cm^2 ）以上の予圧密圧力をかけた場合にもみられるということから判断すると、過圧密領域における m_v のばらつきやすさにもとづくものとも考えられず、むしろ載荷の瞬間における非正常性に起因するものと思われる。予圧密の場合の試験開始直後にみられる m_v の値の急激な低下は、Lowe 他¹⁰⁾の動水こう配一定試験において圧密試験中断後の再試験直後にみられる圧縮係数 a_v ($a_v = m_v(1+e)$) の急激な低下と類似の現象と考えられる。このような現象は標準圧密試験の一定荷重載荷直後にとくにけん著にみられるものであり、載荷直後の荷重が過剰間げき水圧の発生により受けもたれるため圧縮性が異常に小さいことによるものであろう。標準圧密試験の場合には、一定荷重段階の初期の非常に小さい圧縮性が圧密の進行とともに増大するので、最終的には、一定段階の荷重に対し、平均的なかなり大きい m_v 値を与えるのに対し、連続載荷試験の場合には、短時間 (Δt) を考慮するため、その影響がしばらく持続すると考えられる。

圧密係数 c_v についても 図-4.4 b に示すようにバックプレッシャーの有無および大小によるけん著な相違はみとめられず、実験誤差範囲内ではほぼ一致しているとみてよい。また、ひずみ速度 $R_s = 0.089\%/min$ の場合、全体的には標準圧密試験の結果にほぼ対応していると考えられるが、過圧密領域においてやや小さく、標準圧密試験の c_v のばらつきの下限程度に対応している。Lowe 他¹⁰⁾がバックプレッシャーを使用することにより、過圧密領域の c_v が減少し、 $c_v \sim \bar{p}'$ 関係は総体的に平坦化する傾向を報告しており、バックプレッシャーが 0 の場合にも、定率ひずみ圧密試験においては、たえず過剰間げき水圧の発生した状態で圧密が進行し、これがバックプレッシャーと同様の効果を与えるということから、上述の傾向が現われたとも考えられるが、図-4.12 b に示すように、他のひずみ速度については、この傾向は明白ではない。

予圧密をかけた場合、定率ひずみ試験開始直後の圧力状態において、圧力 0 より連続載荷した場合のものにく

らべ、圧密係数 c_v の急激な上昇がみとめられる。図-4.4 b の場合には $p_p = 0.75 \text{ kg/cm}^2$ に対するものがとくにけん著に現われているが、この傾向は $p_p = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ に対するものも含めて他のひずみ速度の場合にもみとめられる一般的な傾向である。前述の Lowe 他¹⁰⁾も動水こう配一定試験における一定時間中断後の再試験において同様の現象を観測しており、透水係数 k が中断による影響をほとんど受けなかったため、 c_v の急上昇は主として圧縮係数 a_v の減少によるものであると報告している。予圧密後の定率ひずみ試験においても同様の推論が成り立つものと考えられ、圧密係数 c_v の急激な上昇は 図-4.4 a に示した体積圧縮係数 m_v の急激な低下に起因するものと思われる。

以上、本牧再圧密試料についての供試体処理条件の $e \sim \log p'$ 特性、圧密定数に及ぼす影響について 図-4.3、図-4.4 a および 図-4.4 b を用いて記述したが、予圧密の場合、 $e \sim \log p'$ 曲線が予圧密圧力以下で得られないことおよび予圧密圧力よりやや大きい圧力の領域まで m_v および c_v の値が、標準圧密試験結果より相当ずれることなどの問題のほか、予圧密するための時間だけ、無処理およびバックプレッシャーの場合より、試験時間が長くなる欠点を有している。一方、無処理の場合の結果は、バックプレッシャーをかけた場合と相違するものと予想していたが、バックプレッシャーの有無および大小は、本牧再圧密試料に関するかぎり、 $e \sim \log p'$ 特性および圧密定数にほとんど影響を与えていない。これは、人工的に作成された再圧密試料であること、しかも小さい先行圧密圧力 (0.5 kg/cm^2) で再圧密されたため、再圧密圧力の除荷ならびに圧密リングの解放による試料の膨張量も少なく、高い飽和度が維持できたことによるものと考えられる。

(b) 自然試料

自然試料の場合には、現地盤で完全飽和状態にあった試料もサンプリングや実験室内での圧密試験の結果、飽和度が低下しがちであり、正確な間げき水圧の測定は困難となる。サンプリングされた自然試料を室内試験のさい、現地盤の状態にもどすため適度な大きさのバックプレッシャーを使用するのがよいのは周知の事実である。理論的には採取試料が現地で受けていた静水圧に相当するバックプレッシャーをかけるのがよいが、実用的な見地から、本試験のような場合に、バックプレッシャーの大小がどの程度、圧密定数および圧縮性を支配するかを調べる目的で、静水圧の 0.5 倍、1.5 倍、2.5 倍の 3 種

類のバックプレッシャーを用いたものの $e \sim \log p'$ 特性および圧密定数の傾向を調べた。

図-4.5 および 図-4.6 は大黒町自然試料（採取深さ 8.5 m, 水深 10~11 m）から作成した供試体に $B_p = 1.0, 3.0, 5.0 \text{ kg/cm}^2$ の3種のバックプレッシャーを与え、ひずみ速度 $R_c = 0.06\%/min$ の定率ひずみ圧密試験を実施したさいの $e \sim \log p'$ 曲線、 m_v および c_v の平均有効応力 \bar{p}' に対する変化を示す。黒丸印のものは標準圧密試験の結果である。各供試体は同一サンプリング

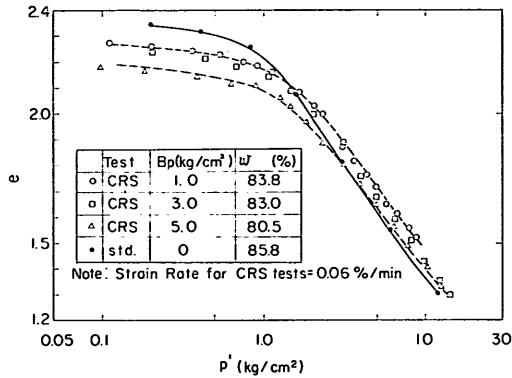


図-4.5 $e \sim \log p'$ 曲線に及ぼすバックプレッシャー、 B_p の効果（試料：大黒町 No. 6-2）

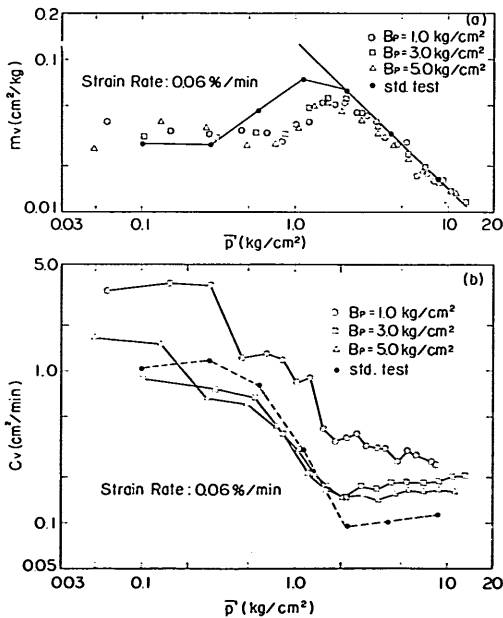


図-4.6 圧密定数に及ぼすバックプレッシャー、 B_p の効果（試料：大黒町 No. 6-2）

チューブの試料であるが、初期含水比にかなりの相違がみられる。とりわけ、標準圧密試験に使用したものの初期含水比が高いが、これは、一連の定率ひずみ試験の約9カ月前に実施したことによるものとも考えられる。

図-4.5 の定率ひずみ試験の $e \sim \log p'$ 曲線に注目すると、初期間げき比の多少のばらつきを考慮すれば、定率ひずみ試験の圧縮性はバックプレッシャーの大きさに影響を受けていないようにみえる。しかし、一連の定率ひずみ試験結果は標準圧密試験結果とその変化状況がかなり相違しており、一般に圧縮性が小さいようである。赤井他¹⁵⁾が三軸等方圧密の時間~沈下量曲線において、バックプレッシャーをかけない場合にみられる2次圧密的な現象がバックプレッシャーをかけたことにより消失し、したがって、最終沈下量が減少すると報告しており、上記のような場合にもバックプレッシャーの影響が圧縮性の減少という形で現われているとも考えられる。しかし、前述したように、標準圧密試験の供試体は初期含水比ならびに初期間げき比が一連の定率ひずみ試験の供試体のものよりも高いので、圧縮性に関する厳密な比較は困難である。

図-4.6 に示した m_v, c_v の変化状況にも標準圧密試験の結果がプロットされているが、これらは供試体の初期条件の相違があるため、参考値として示したものにすぎない。これらの図においては、 m_v, c_v に及ぼすバックプレッシャーの大きさの影響の定性的傾向に注目することとする。

まず、体積圧縮係数 m_v については、バックプレッシャーの大きさの影響は全くみられない。図-4.5 の $e \sim \log p'$ 曲線にみられる初期間げき比の相違によるばらつきも、 $\log m_v \sim \log \bar{p}'$ の型のプロットにはけん著に現われてこない。

圧密係数 c_v についてはバックプレッシャーの影響が明白に現われている。定率ひずみ試験の場合には、圧密係数 c_v の値は間げき水圧の測定にもついて決定されるので、沈下量~時間関係をベースにして c_v を決定する標準圧密試験の場合に比べ、サンプリングならびに試料セットなどともなう微視的な不飽和の影響を受けやすいと考えられる。とりわけ、長期間保存しておいた試料の場合、バックプレッシャーの大きさが十分でないと圧密係数 c_v の値を過大に評価することになる。図-4.6 b の場合、標準圧密試験の c_v はやや試料の条件が異なるが、一応の基準と考えると静水圧の 0.5 倍に相当する $B_p = 1.0 \text{ kg/cm}^2$ のバックプレッシャーの場合、 c_v の値

は過大評価となっているが、ある程度以上のバックプレッシャー（試料数に限度があり、具体例が示せないが、静水圧に相当する圧力）をかければ c_0 の値は一定値に近づくものと考えられる。

不飽和の程度を判断する目安としては、三軸圧密試験の場合、スケンプトンの定義した間げき水圧係数、 B ($0 \sim 1$, 完全飽和の場合、 $B=1$) が一般に使用される。赤井他は三軸等方圧密においてバックプレッシャーを使用することにより $B \rightarrow 1$ となることを示している¹⁵⁾。また奥村は $B \rightarrow 1$ とならしめるための必要な拘束圧について、理論的考察を行なっている¹⁶⁾。図-4.7 は赤井他のデータよりバックプレッシャーの静水圧に対する割合の型でプロットしなおしたものである。厳密な大きさの静水圧が不明のため斜線部分で原図の B の曲線を表示した。

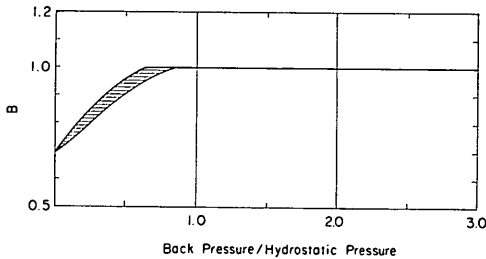


図-4.7 間げき水圧係数、 B とバックプレッシャーの関係

図の場合、静水圧の 80% 以上のバックプレッシャーを使用すれば完全飽和状態が得られることを示している。ただし、赤井他は、過大なバックプレッシャーは、粒子の骨格構造をかえるため好ましくないことを指摘している。しかし、図-4.5 および 図-4.6 に示すごとく、著者等の定率ひずみ圧密試験の結果には、過大なバックプレッシャーをかけたことによる悪影響は現われていない。

自然試料の場合、多かれ少なかれ微視的な不飽和状態になっていると考えられるが、側方拘束の圧密試験のような場合、不飽和度を定量的に評価する方法はない。そこで、自然試料の場合、上述の結果を参考にして、不飽和度の評価をすることなく、一様に静水圧の 75~100% 程度のバックプレッシャーをかけることとした。

4.3 ひずみ速度と $e \sim \log p'$ 特性

(a) $e \sim \log p'$ 曲線

本牧再圧密試料について 5 ケースの供試体処理方法のもとにひずみ速度を 0.024%/min~0.6%/min の範囲

で 7~8 段階変え、 $e \sim \log p'$ 曲線に及ぼすひずみ速度の影響を調べた。前述のごとく、供試体の処理方法による相違はけん著ではなかったため、バックプレッシャー $B_p=0.5 \text{ kg/cm}^2$ の場合の $e \sim \log p'$ 曲線を一例として図-4.8 に示した。図中、実線で標準圧密試験 9 個の $e \sim \log p'$ 曲線の変動幅を示した。

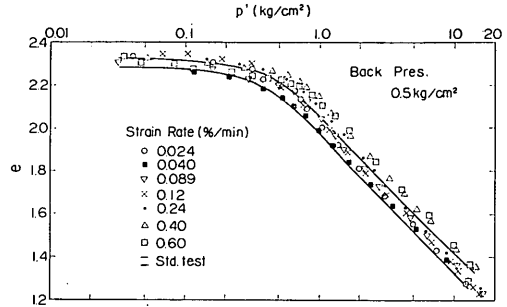


図-4.8 $e \sim \log p'$ 曲線に及ぼすひずみ速度の影響 (本牧再圧密試料)

図よりひずみ速度の小さい場合 (0.12%/min 以下) にはひずみ速度によるけん著な相違はみられず、標準圧密試験結果のばらつき範囲に入っており、定率ひずみ方式による連続載荷圧密試験の $e \sim \log p'$ 曲線は標準圧密試験結果とよい一致を示すとみなすことができる。ひずみ速度が相当高くなる (図-4.8 では 0.24%/min 以上) と先行圧密圧力に相当する圧力 (約 0.5 kg/cm^2) 以上で、標準圧密試験結果にくらべ圧縮性が小さくなり、正規圧密領域では、標準圧密試験の $e \sim \log p'$ 曲線とはほぼ平行に減少している。ひずみ速度が相当大きい場合に、見かけ上圧縮性が小さくなり、標準圧密試験の $e \sim \log p'$ とかけはなれる傾向を示す 1 つの原因は任意の時間における間げき比の深さ方向への一様性の仮定が許容できなくなり、したがって式 (20) で計算した平均有効応力が過大評価されることによるものである。他の原因としては、2 次圧密の影響のひずみ速度による量的な相違も考えられる。

自然試料の場合についても、ひずみ速度の影響を調べるための試験を実施した。ひずみ速度の範囲は、利用できる同一試料の個数に制約があるため、前述の再圧密試料に対する結果を参考にして、標準圧密試験結果と実用上よい一致を示した上限値以下のものを使用した。

図-4.9 は大黒町自然試料について、3 種のひずみ速度を用いた場合の結果を示す。バックプレッシャーとしてその試料が現地で受けていた試料の静水圧の約 75~

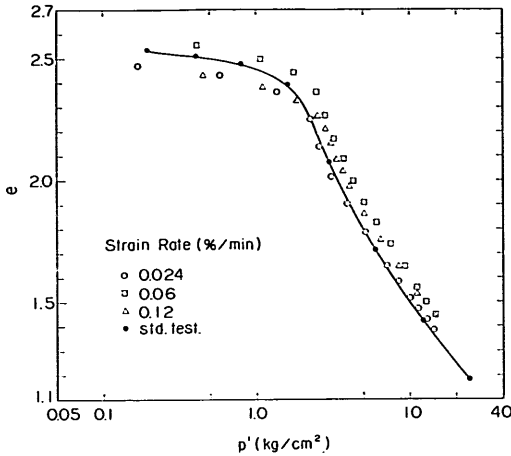


図-4.9 $e \sim \log p'$ 曲線に及ぼすひずみ速度の影響
(試料: 大黒町 No. 6-6)

80% に相当する 2.5 kg/cm^2 を与えた。

自然試料においては、避けられない初期間げき比の多少のばらつきのため、圧縮性についての相対的な傾向を不鮮明にしているが、 $R_v=0.12\%/min$ ではなお、多少、ひずみ速度依存性（ひずみ速度が過大であると標準圧密試験に比べて圧縮性が小さい）が現われているようにみえる。しかし、前に示したように、標準圧密試験結果自体のばらつきもあり、実用上の見地から、大黒町自然試料については少なくとも $R_v=0.12\%/min$ 以下のひずみ速度を使用すれば、定率ひずみ試験の結果より標準圧密試験の $e \sim \log p'$ 曲線を推定できると考えてもよい。

他の自然試料に対する例として、比較的浅い所より採取した錦海自然試料に対する $e \sim \log p'$ 曲線を 図-4.10 に示す。使用したひずみ速度は $0.024 \sim 0.12\%$ の間の 4 種類であり、各々 1.1 kg/cm^2 のバックプレッシャーを与えた。同一サンプリングチューブからの 2 個の標準圧密試験の $e \sim \log p'$ 曲線を黒丸印で示した。この場合にも、使用した範囲内では、ひずみ速度 $R_v=0.12\%/min$ のものがやや圧縮性が小さいが、それほど顕著なものではなく、標準圧密試験の $e \sim \log p'$ 曲線と実用上良い対応を示している。しかし、定率ひずみ試験の場合、いずれのひずみ速度の場合にも、過圧密領域が見かけ上大きくなっており、いわゆるカサグランデ法による圧密先行圧力をいくぶん大きい値として推定することになる。

(b) 圧密降伏応力

定率ひずみ試験の場合、みかけ上過圧密領域が大きくなる傾向については、多かれ少なかれ共通して認められ

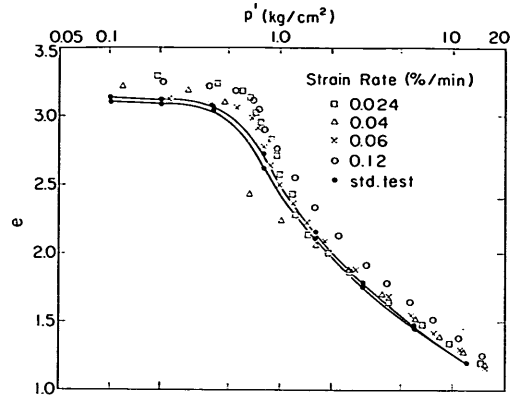


図-4.10 $e \sim \log p'$ 曲線に及ぼすひずみ速度の影響
(試料: 錦海 No. 46-1)

る現象のようであり、以下ではこの傾向を定量的に検討した。ただし、ここでは、カサグランデ法による圧密先行圧力のかわりに三笠法による圧密降伏応力 $p_{y,v}$ を用いることとする。この理由は、過去に受けた最大圧密圧力として定義される p_e が荷重履歴以外の要因により変わることがあるため、圧密先行圧力という名称が不適当であるといわれていることおよび、カサグランデの図解法自体に不備がある¹⁷⁾ためである。

標準圧密試験より求められる圧密降伏応力を $p_{y,std}$ 、同様の手法により、定率ひずみ圧密試験より求められる圧密降伏応力を $p_{y,CRS}$ とする。両者の比 $p_{y,CRS}/p_{y,std}$ を各ケースについて計算し、用いたひずみ速度に対してプロットしたものを 図-4.11 に示す。図-4.11 には、本牧再圧密試料、錦海自然試料および大黒町自然試料についての結果を 3 種の記号を用いて示した。本牧再圧密試料については、バックプレッシャーの大小による $p_{y,CRS}/p_{y,std}$ の相違が認められなかったため、同一の記号で示した。ただし、予圧密を行なったものについては、予

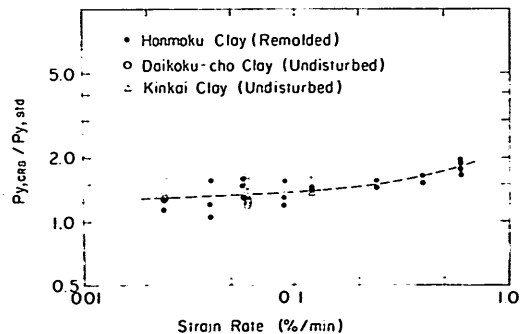


図-4.11 圧密降伏応力とひずみ速度

圧密圧力が大きく圧密降伏応力が図解的に求められないので、図-4.11には含まれていない。錦海試料については $B_p=1.1 \text{ kg/cm}^2$ 、また大黒町試料については $B_p=2.5\sim 3.0 \text{ kg/cm}^2$ を使用している。

図-4.11 から 3 種類の試料に関するかぎり、比率 $p_{y,CRS}/p_{y,std}$ はひずみ速度のみの影響を受けており、試料の状態（再圧密、自然試料）、荷重履歴、あるいはバックプレッシャーの大小とは無関係のようである。ひずみ速度 $R_e=0.12\%/min$ 以下では比率 $p_{y,CRS}/p_{y,std}$ は 1.2~1.4 程度であり、ひずみ速度がさらに大きくなるとこの比は増加する傾向がある。標準圧密試験との対応を考える場合、過大なひずみ速度を使用すると圧密降伏応力を過大に見積ることになり、 $R_e=0.024\%/min\sim 0.12\%/min$ の範囲でも標準圧密試験の p_y より 20~40% 大きく評価することになる。

4.4 ひずみ速度と圧密定数

ひずみ制御試験の観測データより、標準圧密試験の場合と同様に各種の圧密定数（体積圧縮係数 m_v 、圧縮係数 a_v 、圧縮指数 c_e 、透水係数 k 、圧密係数 c_v ）が決定される。これらのうち、沈下量および沈下速度の算定のため使用ひん度の高いものは、体積圧縮係数 m_v および圧密係数 c_v であるので、ここではこの2つの定数のみを取り上げることとする。前項に述べた本牧再圧密試料、大黒町自然試料および錦海自然試料を例にとり、これらの圧密定数が使用したひずみ速度によってどのように影響されるのかを吟味した。

(a) 本牧再圧密試料

図-4.12a は $R_e=0.024\%/min\sim R_e=0.06\%/min$ の範囲の6種類のひずみ速度に対する m_v 特性を示した。ただし、 $B_p=0.5 \text{ kg/cm}^2$ のバックプレッシャーを与えた場合のものである。また、標準圧密試験9個に対する各荷重段階の m_v のばらつき範囲および平均値が示されている。

通常の圧密理論では、体積圧縮係数 m_v は有効応力にかかわらず、一定と仮定されて解析されているが、実際には m_v は有効応力の関数となるものであり、 m_v の有効応力に対する関係は過圧密領域と正規圧密領域では極端に相違することはよく知られている。正規圧密領域では、通常、 $m_v\sim\bar{p}'$ 関係は両対数紙上で直線となる。図-4.12a の定率ひずみ試験結果を見ると、正規圧密の領域においては、 $\log m_v\sim\log \bar{p}'$ の直線関係が $R_e=0.024\sim 0.06\%/min$ の範囲のひずみ速度のいかんにかかわらず成り立っており、しかも標準圧密試験結果と非常によく対

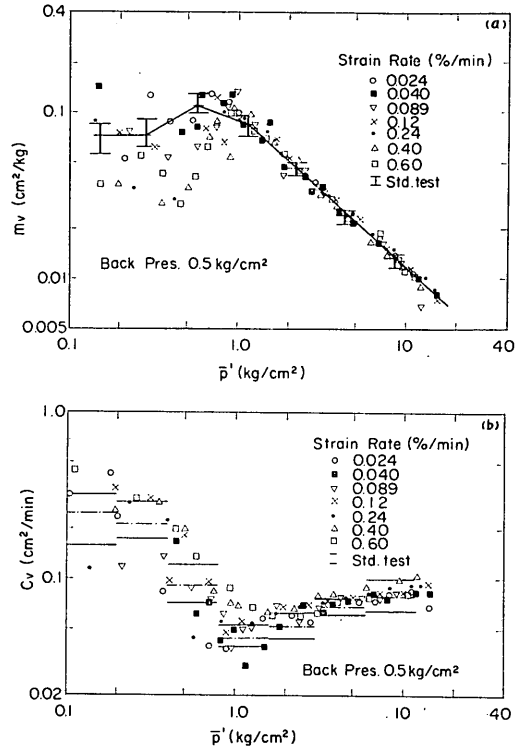


図-4.12 a, b 圧密定数に及ぼすひずみ速度の影響 (本牧再圧密試料)

応している。この場合の先行圧密圧力 p_c は再圧密圧力 $p_0=0.5 \text{ kg/cm}^2$ と同じものであり、正規圧密領域は $\bar{p}'>0.5 \text{ kg/cm}^2$ の領域であるが、 m_v 特性が完全な正規圧密領域の特性を示すのは先行圧密圧力の 2~3 倍の応力以上においてであるといわれており¹⁷⁾、 p_c から 2~3 p_c までは過渡的な傾向を示しているとみられる。

過圧密領域においてはひずみ速度の低い場合には、ある程度ばらつきがあるもののひずみ速度による顕著な相違は認められず、標準圧密試験結果と一応対応しているが、過大なひずみ速度 (0.24%/min 以上) の場合には、標準圧密試験の結果よりかなり小さくなる傾向がみられる。

一方、上記の本牧再圧密試料に対する圧密係数 c_v の平均有効応力に対する関係を使用したひずみ速度をパラメーターとしてプロットしたものを図-4.12bに示した。

本牧再圧密試料の定率ひずみ試験による c_v については過圧密領域および過渡領域（先行圧密圧力 p_c の約3倍位の応力範囲）においてばらつき幅が正規圧密領域に

比べてやや大きいですが、全応力範囲を通じてひずみ速度による顕著な相違はみられず、ほぼ標準圧密試験の c_v のばらつき範囲内にあるとみなし得る。図-4.12 a の m_v 特性が 0.24%/min 以上のひずみ速度の場合に過圧密領域において標準圧密試験結果に比べてかなり小さくなる実験事実とあわせて考えると、過圧密領域の c_v の傾向が標準圧密試験結果と割合よく対応していることに奇異な感じを受ける。このことは、過大なひずみ速度の場合に透水係数 k が m_v と同程度の比率で標準圧密試験の k より減少し、結果的に c_v はひずみ速度の影響を受けず標準圧密試験の c_v と対応しているということであり、間げき水圧特性と関連して検討する必要がある。しかし、いずれにしても、標準圧密試験との対応という見地から、定率ひずみ試験より求められる圧密定数は過大なひずみ速度（土の種類、応力履歴により影響を受けると考えられるが、本牧再圧密試料の場合に圧密定数に関するかぎり少なくとも 0.4%/min では過大といえる）の場合、標準圧密試験の圧密定数を正しく推定できないということができよう。

(b) 自然試料

図-4.13 (a) および 図-4.13 (b) は前述の大黒町自然

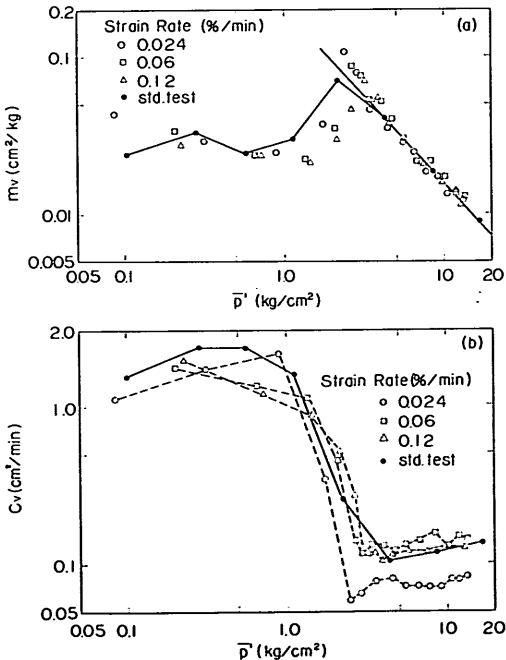


図-4.13 (a), (b) 圧密定数に及ぼすひずみ速度の影響 (試料: 大黒町 No. 6-6)

試料の m_v および c_v を平均有効応力に対してプロットしたものである。使用したひずみ速度は $R_e=0.024, 0.06, 0.12\%/min$ の3種類であり、定率ひずみ試験の場合にのみ $B_p=2.5 \text{ kg/cm}^2$ のバックプレッシャーを使用した。また、標準圧密試験の m_v および c_v を黒丸印で示した。

m_v については、全ての応力範囲内でひずみ速度の影響は認められず、また、これらひずみ制御試験のデータは、標準圧密試験の m_v 特性と非常によく対応している。また、 c_v については、最も遅いもの ($R_e=0.024\%/min$) が、とりわけ正規圧密領域において他のひずみ速度のものより一様に小さくなる傾向を示しているが、これらが、ひずみ速度の影響と断定する根拠もないので、むしろ自然試料には避けられないばらつきと考えるべきであろう。

図-4.14 (a) および 図-4.14 (b) に錦海自然試料に対する m_v および c_v 特性を示した。使用したひずみ速度

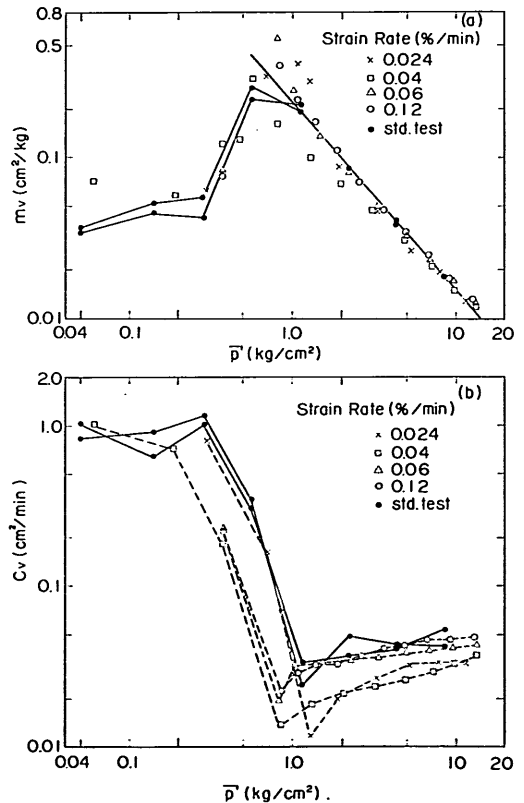


図-4.14 圧密定数に及ぼすひずみ速度の影響 (試料: 錦海 No. 46-1)

は $R_s=0.024\sim 0.12\%/min$ の間の4種類であり、それぞれバックプレッシャーを $B_p=1.1\text{ kg/cm}^2$ 与えて試験した。2個の標準圧密試験の結果を黒丸印で示した。この場合にも m_v についてはひずみ速度の影響を受けず、標準圧密試験ともよい対応を示しているが、 c_v については過圧密領域において、ばらつきは大きいもののひずみ速度の大小による定性的な傾向は見られない。一方、正規圧密領域においては、一見、ひずみ速度の大小による傾向が現われているように見え、大きいひずみ速度の場合ほど c_v の値は大きい。しかし、標準圧密試験結果と比較すると、定率ひずみ試験の場合の c_v は一樣に小さい傾向があり、従って、使用した範囲でひずみ速度の一番大きいものが標準圧密試験とよく対応しているという結果が得られている。 c_v の決定にとっては、ある程度、測定可能な間げき水圧の発生し得るひずみ速度以上を用いる必要があることを物語るものであるという解釈もできようが、後述するように、この程度のひずみ速度で間げき水圧が測定不能になるとも思われず、むしろ、自然試料の不均一性にともなうばらつきであると解釈せざるを得ない。

4.5 間げき水圧特性

定率ひずみ試験においては、供試体底部で測定された間げき水圧の量をベースにして圧密定数が決定され、また同時に対応する有効応力が求められる。一定速度の変位が連続的に与えられる間に、供試体間げき水圧が発生し、同時に生じた間げき水圧として計測されるものであり、その大きさはひずみ速度の大きさと土の透水性の関数である。理論的背景からも明らかなように定率ひずみ試験データを解釈する際、最も支配的な要因となるのが供試体内の間げき水圧の挙動である。

以下では、供試体底部の間げき水圧 u_b の全圧力 p に対する比 u_b/p の型で間げき水圧の特性を調べてみる。

図-4.15 および 図-4.16 は、それぞれ本牧再圧密試料、大黒町自然試料および錦海自然試料の u_b/p の有効応力 p' に対する変化をひずみ速度をパラメーターとして示したものである。

図-4.15 の場合、 u_b/p は一定の有効応力に対し、ひずみ速度の大きいほど大きくなり、有効応力の増大とともに単調減少の傾向がみられる。また、ひずみ速度の大きいもの（例えば $R_s=0.24\%/min$ 以上のもの）の u_b/p の減少の度合いが大きいのに反し、ひずみ速度の比較的小さいもの（たとえば $R_s=0.12\%/min$ 以下のもの）の u_b/p の減少の度合いは小さい。ひずみ速度が相当小さ

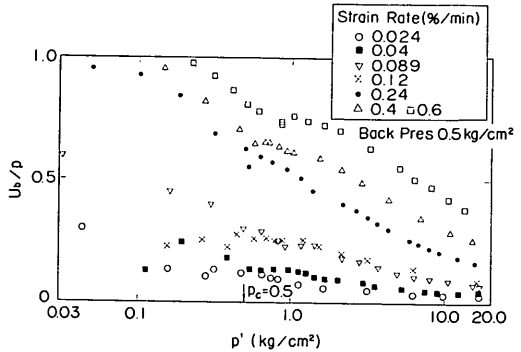


図-4.15 底部間げき水圧の全圧力に対する割合と有効応力の関係（本牧再圧密試料）

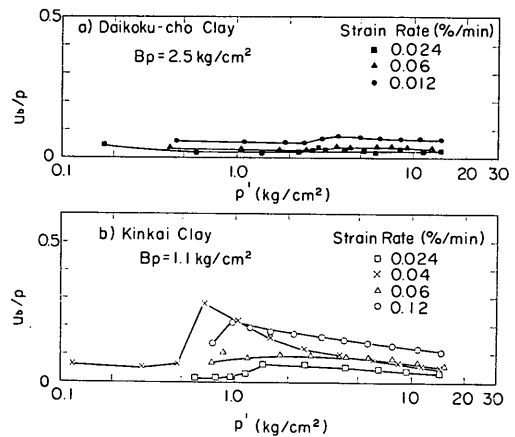


図-4.16 底部間げき水圧の全圧力に対する割合と有効応力の関係（試料：大黒町 No. 6-6 および錦海 No. 46-1）

いと u_b/p は有効応力の増大に無関係になる傾向がみられる。

図-4.16 の自然試料の場合、比較的小さいひずみ速度を用いているため、 u_b/p 比は有効応力の大きさにかかわらず、ほぼ一定の傾向を示す。ただし、錦海試料の $R_s=0.04\%/min$ のものが、ひずみ速度がかなり小さいにもかかわらず、他のものとやや異なった傾向を示した。

Crawford¹¹⁾ は、最大圧力に対する間げき水圧の比が非常に小さいため（5～15%程度）、定率ひずみ試験の圧密は動水勾配によるものよりも、土の塑性抵抗にもとづくものであり、従って、2次圧密であると指摘している。また、Smith は⁷⁾ 最大圧力に対する間げき水圧の比が、透水性の非常に小さいものも含めて 50% 以下で

あれば、定率ひずみ試験結果と標準圧密試験の対応は良いことを報告している。一方、Byrne 他⁶⁾、Wissa 他⁸⁾も標準圧密試験と定率ひずみ圧密試験の結果が良い対応を示したものの最大圧力に対する間げき水圧の割合はそれぞれ 10% および 5% 程度であったことを報告している。

しかし、各研究者により使用された最大圧力はそれぞれ相当異なっている。Smith 他⁷⁾の例では、非常に透水性の大きい場合のもの最大圧力は約 6.0 kg/cm² 程度であり、対応する有効応力は約 4.6 kg/cm² 程度と相当小さい。広範囲なひずみ速度を使用した図-4.15の結果から明らかなように、 u_b/p 値は一般には有効応力、従って、全圧力の大きさにより変わるものであり、しかも、最大圧力に対するものが最も小さくなるので、最大圧力に対する間げき水圧の割合のみによって議論するのは不十分と思われる。

図-4.15 および 図-4.16 において、ひずみ速度の小さい場合 ($R_c=0.12\%$ 以下)、応力の全段階において u_b/p 値は小さく (0.2~0.3 以下)、従って、この場合の圧密は動水勾配よりも塑性抵抗が支配的である。また、ひずみ速度が大きい場合、 u_b/p 値は小さい圧力段階のところで相当高い値を示しており、この場合、圧密は動水勾配が支配的となっている。これらの現象は、また定率ひずみ試験結果と標準圧密試験の対応性を間げき水圧特性と結びつけて論ずる場合、最大圧力に対する間げき水圧の割合よりも圧力の初期段階の u_b/p 値に注目した方が良いことをも意味している。

図-4.17 は広範囲なひずみ速度を使用した本牧再圧密

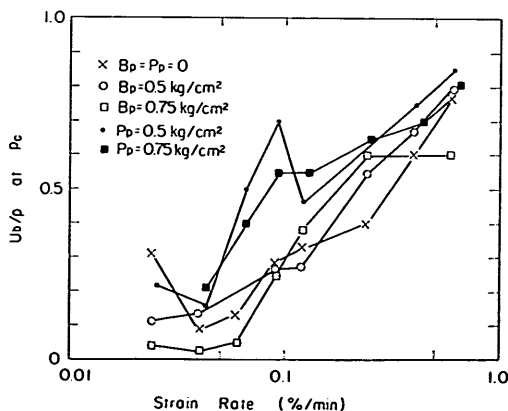


図-4.17 圧密先行圧力における u_b/p とひずみ速度の関係

試験について、先行圧密圧力 ($p_c=0.5 \text{ kg/cm}^2$) に対する間げき水圧の割合をひずみ速度に対してプロットしたものである。供試体処理方法による相違もあわせて示してある。ただし、予圧密の場合には u_b/p の最大値を使用している。また、全圧力 p としては、定率ひずみ試験中のもののみを考慮しているため、予圧密を行なった場合の予圧密圧力は加えられていない。

図より先行圧密荷重に対する間げき水圧の割合はひずみ速度につれて増加する。前項において、圧密諸特性のひずみ速度による影響を詳細に検討した結果によれば、使用したひずみ速度範囲内 ($R_c=0.024\%/min \sim R_c=0.6\%/min$) では、 $R_c=0.1\sim 0.2\%/min$ 以下のひずみ速度を用いれば、 m_v, c_v および $e \sim \log p'$ 特性のいずれもが標準圧密試験結果と比較的良好一致を示すことが、明らかになっている。このことから、対応する u_b/p が先行圧密圧力において 0.3~0.4 以下であれば (予圧密の場合は前述の理由により除外する) 先行荷重より大きい圧力範囲において、定率ひずみ試験結果は標準圧密試験結果と良好対応を示すと考えられる。このような基準は試験が十分飽和しているということが前提条件であり、自然試験の場合、静水圧の 75~100% 程度の十分のバックプレッシャーを作用させたものについては、大黒町および錦海試験料に対する結果から、同様に適用してもよいと考えられる。

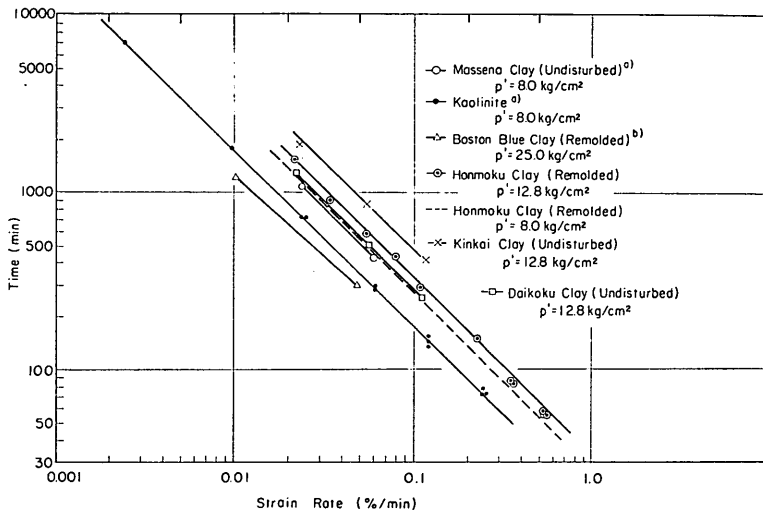
なお、標準圧密試験と良好対応を示したものの最大圧力 (約 15 kg/cm²) に対する間げき水圧の割合は約 5~10% 程度であった。

4.6 試験所要時間

大きなひずみ速度を使用すれば、試験所要時間は短かくてよいが、前述のように過大なひずみ速度は標準圧密試験結果との対応がわるいので、ある程度ひずみ速度は低くおさえるべきである。しかし、過小なひずみ速度は、圧密定数を定めるに足る量の間げき水圧が発生しない恐れがあるのみならず、試験所要時間も長時間を要し急速圧密試験法としての価値が失われる。ここでは、使用した範囲のひずみ速度と試験所要時間の関係を検討した。

標準圧密試験では、通常 12.8 kg/cm² まで載荷することになるので、定率ひずみ試験の計算結果より、有効応力が $p'=12.8 \text{ kg/cm}^2$ に達するまでに要する時間を前後の計算点より内そうまたは外そうにより求めた。

このようにして求めた所要時間を本牧再圧密試験料 (再圧密圧力: 0.5 kg/cm², $B_p=0.5 \text{ kg/cm}^2$)、錦海自然試



a): 文献 7), b): 文献 8)

図-4.18 特定有効応力に到達するに要する時間とひずみ速度

料 ($B_p=1.1 \text{ kg/cm}^2$), 大黒町自然試料 ($B_p=2.5 \text{ kg/cm}^2$) の場合の各ひずみ速度に対してプロットしたものを図-4.18 に示す。本牧再圧密試料については、 $p'=8.0 \text{ kg/cm}^2$ に到達するに要する時間も点線で示した。また、図-4.18 には他の研究者により報告された試験所要時間とひずみ速度の関係もプロットしてある。この場合、最大平均有効応力は $p'=p-\frac{2}{3}u_0$ として求めたものを使用した。

図中、各々のケースの各点はひずみ速度の大きな領域を除くと 45° の勾配を持つ直線上にほぼプロットされている。このことは、各ケースについて、有効応力を規定すれば、所要時間 t とひずみ速度 R_s の関係は $R_s \cdot t = c$ (一定の定数) すなわち、試験所要時間はひずみ速度に反比例するということである。この場合、定数 c は、透水性と圧縮性の関数である。

過大なひずみ速度の場合 (図-4.18 では約 $0.4\%/min$ 以上と考えられる), 試験所要時間は $\log R_s \sim \log t$ 直線よりややずれるが、これは前述のように、底部で過大な間げき水圧が発生する結果、間げき比の分布の一樣性が失われ、同時に平均有効応力を過大に見積ることによるものである。図-4.18 より、ひずみ速度が小さいと、相当長時間を要することになり、急速圧密試験に利用できるひずみ速度範囲は $0.02\%/min \sim 0.2\%/min$ 程度と考えられよう。

5. 定率漸増載荷圧密試験

5.1 圧密定数及び有効応力の評価法

この試験においても、計測項目は全圧力 p , 沈下量 d , および供試体底部の間げき水圧の時間的変動であるが、写真-5.1 に示すように、応力制御であるため全圧力の時間的変動は線形となる。

この場合の圧密定数および有効応力は、網干他により提案された方式により求めるものとする。まず、任意の時間 t に対応する有効応力 p' は式 (16) の $u_0/p \sim T_v$ 関係および式 (18) の $T_v \sim U$ 関係より時間係数 T_v を媒介として圧密度 U を求め、さらに $p'=pU$ として求められる。また、 c_v の値は、 u_0/p 比に対応して求められた T_v より、 $c_v=H^2/T_v \cdot t$ の関係を用いて決定される。一方 m_v については、時間 $t \sim t+dt$ の間のひずみの増分 $\Delta \epsilon$ および有効応力の増分 $\Delta p'$ より $m_v=\Delta \epsilon/\Delta p'$ として求められる。これらの量より、定率ひずみ試験の場合と同様にして $e \sim \log p'$, $\log m_v \sim \log \bar{p}'$ および $\log c_v \sim \log \bar{p}'$ の関係が求められる。

5.2 予圧密とバックプレッシャーの効果

本牧再圧密試料 (再圧密圧力 $p_0=0.5 \text{ kg/cm}^2$) について、供試体処理方法の相違の圧密特性に及ぼす影響を調べた。処理方法としては予圧密 $P_p=0.5 \text{ kg/cm}^2$ および $P_p=0.7 \text{ kg/cm}^2$, バックプレッシャー $B_p=0.5 \text{ kg/cm}^2$ および $B_p=0.7 \text{ kg/cm}^2$ の 4 ケースであり、各ケ-

連続載荷方式による急速圧密試験

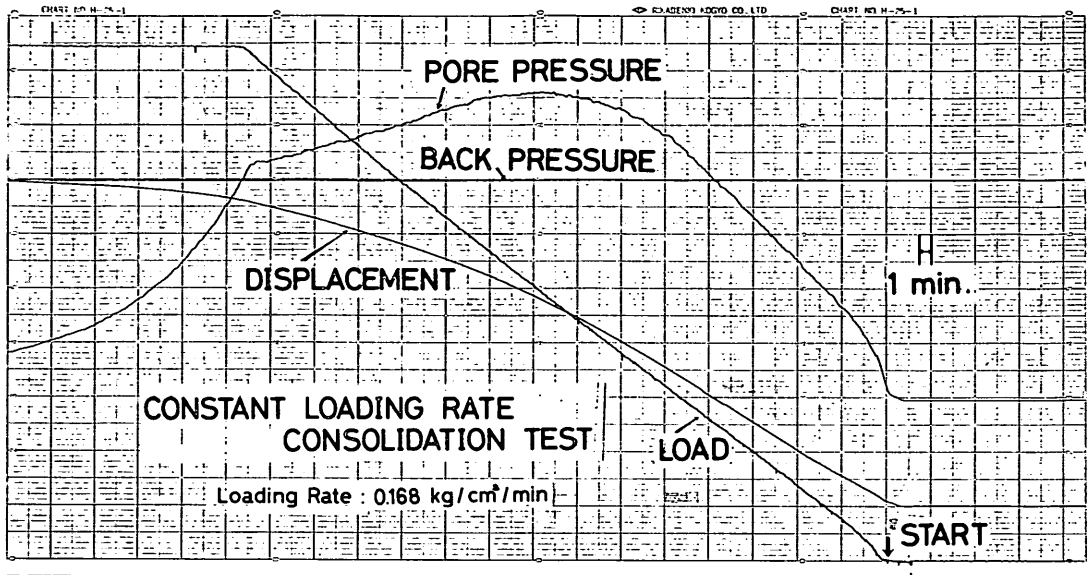


写真-5.1 定率漸増載荷圧密試験測定記録例

スについて共通の載荷速度のものを比較することとする。

図-5.1 は載荷速度 $0.021 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ ($400 \text{ kg}/8 \text{ hr.}$) の場合の $e \sim \log p'$ 曲線の供試体処理方法による影響を示したものである。図中の実線は 4. 章に示した標準圧密試験の結果のばらつき範囲を示すものである。予圧密をかけた場合、その圧力以下のプロットが得られないという相違はあるが、それ以上の応力領域ではバックプレッシャーをかけた場合との相違はみられず、また、バックプレッシャーの大小の相違も認められない。定率漸増載

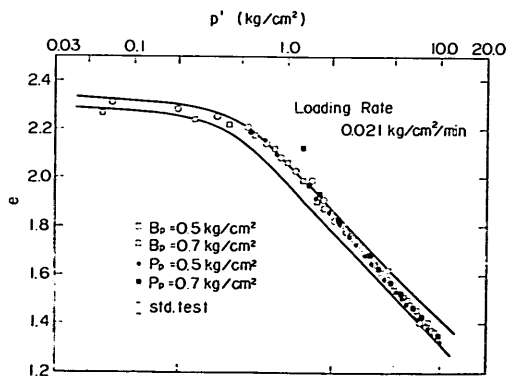


図-5.1 予圧密、 P_p およびバックプレッシャー、 B_p の $e \sim \log p'$ 曲線に及ぼす効果 (本牧再圧密試料)

荷試験の $e \sim \log p'$ 曲線は載荷速度 $R_c = 0.021 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ の場合には、標準圧密試験の $e \sim \log p'$ のばらつき範囲に入っているが、正規圧密領域のいわゆる直線とみなされる部分の勾配がやや大きい傾向がみられる。

図-5.2(a) および 図-5.2(b) は上記の載荷速度 $R_c = 0.021 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ の場合の m_v および c_v 値の平均有効応力 \bar{p}' に対する変化状況の供試体処理方法による影響を示している。各図には、標準圧密試験結果のばらつき範囲および平均値が参考のため示してある。

図-5.2(a) に示す m_v 値についてはバックプレッシャーの大きさによる相違はみられず、 $R_c = 0.021 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ の載荷速度の場合には、標準圧密試験による m_v の変化状況とかなりよく一致している。ただし、 0.1 kg/cm^2 以下の小さい応力領域における大きな相違は、定率ひずみ試験の場合と同様、試験初期の不安定性にともなう変動が、 m_v の計算の際に拡大されて現われたものである。一方、予圧密をかけた場合、 m_v の変化状況には定率ひずみ試験の場合と同様の傾向が現われる。すなわち、予圧密終了後、定率漸増載荷型の圧密過程に入ると本試験直後の応力領域では m_v の値が極端に小さくなり、その後次第に回復し、バックプレッシャー載荷の場合とほとんど同一の傾向を示す。

図-5.2(b) に示す c_v の変化についても、バックプレッシャーの大きさによる相違はみられないが、標準圧密試

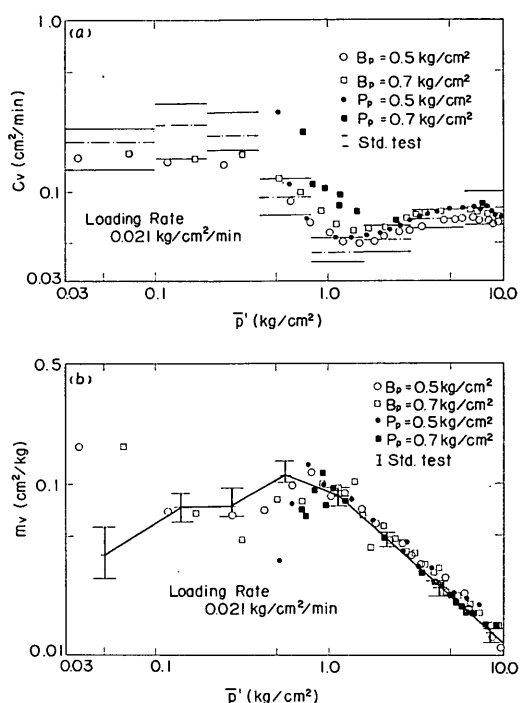


図-5.2 (a), (b) 予圧密, P_p およびバックプレッシャー, B_p の圧密定数に及ぼす影響 (本牧再圧密試料)

験の c_v の変化と比較すると全応力領域にわたって c_v の変化が平坦化する傾向がみられる。これについては、他の荷重速度についても一般的にいえる現象のようであり、前述したように Lowe の指摘するバックプレッシャーの効果の現われとも考えられる。予圧密をかけた場合の c_v の変化については、定率ひずみ試験の場合にみられた傾向がよりけん著に現われている。すなわち、予圧密後の本試験開始直後に c_v は極端に大きくなり、やがて圧力 0 より連続的に荷重した場合の変化傾向にもどる。自然試料についても網干他⁹⁾ が同様の傾向を観測しており、過圧密領域においても $c_v =$ 一定の理論を適用したことによると解釈している。しかし、標準圧密試験の場合にも同様の理論が適用されていること、および圧力 0 より連続的に荷重した場合には、そのような現象がみられないことにより、荷重の瞬間的非正常性が持続することによると考えた方が妥当ではないかと思われる。

5.3 荷重速度と $e \sim \log p'$ 特性

(a) $e \sim \log p'$ 曲線

本牧再圧密試料, 錦海および大黒町自然試料について

定率漸増荷重方式の場合の荷重速度が $e \sim \log p'$ 曲線に及ぼす影響を以下に検討した。

図-5.3 および 図-5.4 に本牧再圧密試料 (再圧密圧力約 0.5 kg/cm^2) について荷重速度の影響を示したものであり、それぞれバックプレッシャー $B_p = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ および $B_p = 0.7 \text{ kg/cm}^2$ に対するものである。両者とも荷重速度は $R_o = 0.021 \text{ kg/cm}^2/\text{min} \sim R_o = 0.168 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ の範囲で 5 段階に変えた。実線は 4. に示した標準圧密試験のばらつき範囲を示している。

$R_o = 0.021 \sim 0.168 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ の範囲の荷重速度では $e \sim \log p'$ 曲線に与える荷重速度の影響は早い荷重のものほど圧縮性が大きくなる傾向がわずかにみられるものの、全体的には標準圧密試験の $e \sim \log p'$ 曲線のばらつき

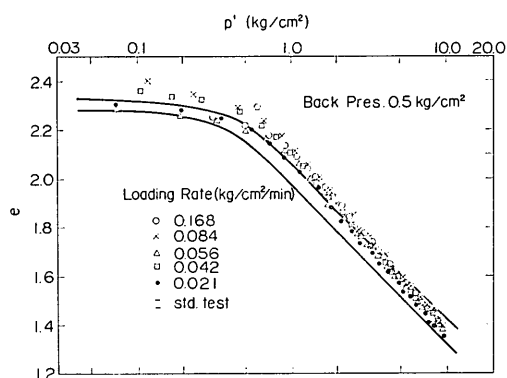


図-5.3 $e \sim \log p'$ 曲線に及ぼす荷重速度の影響 (本牧再圧密試料, バックプレッシャー: 0.5 kg/cm^2)

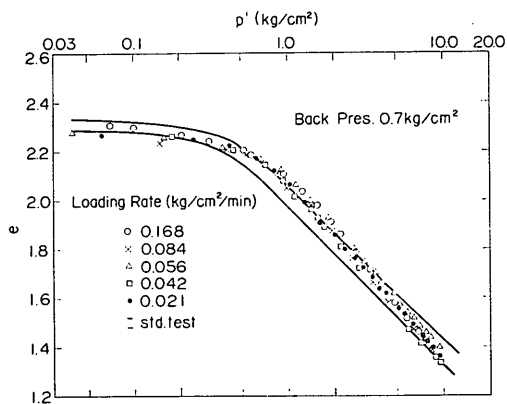


図-5.4 $e \sim \log p'$ 曲線に及ぼす荷重速度の影響 (本牧再圧密試料, バックプレッシャー: 0.7 kg/cm^2)

き幅にくらべて、それほど大きくはない。しかし、標準圧密試験結果との対応という見地からは、定率漸増荷の場合、みかけ上過圧密領域が大きく、かつまた、正規圧密領域の直線部の勾配がやや大きくなっている。この点は、同一試料に対する前述の定率ひずみ試験の場合の $e \sim \log p'$ 曲線のひずみ速度による変化状況と相違する点である。

自然試料の場合の例として、図-5.5 および 図-5.6 に大黒町試料および錦海試料の場合の $e \sim \log p'$ 曲線を示した。それぞれの試料に対する標準圧密試験の結果が黒丸印で示されている。

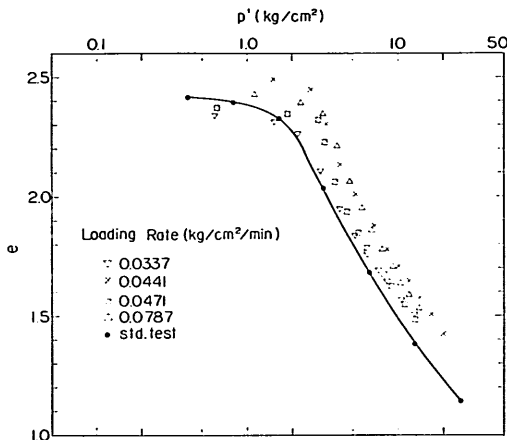


図-5.5 $e \sim \log p'$ 曲線に及ぼす荷速度の影響 (試料: 大黒町 No. 6-7, バックプレッシャー: 3.0 kg/cm^2)

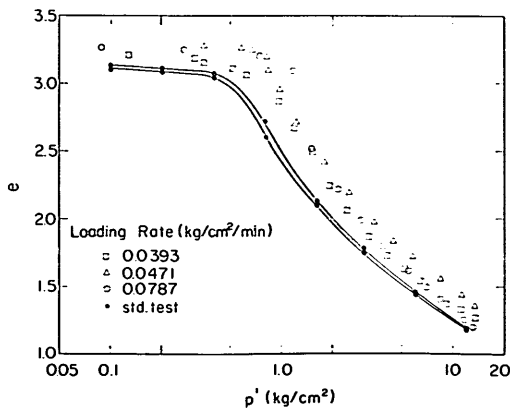


図-5.6 $e \sim \log p'$ 曲線に及ぼす荷速度の影響 (試料: 錦海 No. 46-1, バックプレッシャー: 1.1 kg/cm^2)

図-5.5 に示した大黒町試料の場合、初期間げき比 e_0 の多少のばらつきがあり、各荷速度の場合についての相対的な関係を比較しがたいが、一般的には定率漸増荷圧密の場合のものが圧縮性が小さくなり、その傾向は荷速度が大きいものほど著しい。このことは、初期間げき比のばらつきを考慮して、 $e \sim \log p'$ のかわりに $(e - e_0) \sim \log p'$ の型で整理すれば一そう明白になる。正規圧密領域では、いずれの荷速度の場合についても、標準圧密試験のものとはほぼ平行に減少している。

図-5.6 に示した錦海試料の場合もほぼ同様の傾向が見られる。

(b) 圧密降伏応力

定率漸増荷圧密試験の場合にも個々のケースの $e \sim \log p'$ 曲線より圧密降伏応力 $p_{y,CLR}$ が求められる。定率ひずみ圧密試験の場合と同様に、対応する標準圧密試験の場合の圧密降伏応力 $p_{y,std}$ を求め、両者の比 $p_{y,CLR}/p_{y,std}$ の荷速度に対する変化を検討した。

図-5.7 は、比率 $p_{y,CLR}/p_{y,std}$ の荷速度に対する変化を示したものである。図中、本牧再圧密試料、大黒町および錦海自然試料に対するものを3種の記号で示した。本牧再圧密試料についてはバックプレッシャー $B_p = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ および $B_p = 0.7 \text{ kg/cm}^2$ の場合について比率 $p_{y,CLR}/p_{y,std}$ の荷速度に対する変動傾向には顕著な相違は認められないので、両者に対する比率を同一の記号で示した。

土の種類、応力履歴、供試体処理方法などの相違があるにもかかわらず、比率 $p_{y,CLR}/p_{y,std}$ には、荷速度のみの影響が明白に現われている。比率 $p_{y,CLR}/p_{y,std}$ は荷速度の小さい所で1に近く、荷速度の増大とともに大きくなる。使用した荷速度の範囲内では、約 $0.04 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ 以下で $p_{y,CLR}/p_{y,std} \approx 1.3$ 、それ以上の

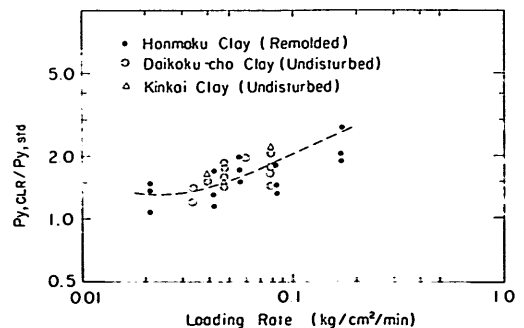


図-5.7 圧密降伏応力と荷速度の関係

載荷速度では比率は急激に大きくなる傾向がある。

5.4 載荷速度と圧密定数

定率漸増載荷圧密試験より求められる圧密諸定数は、理論的には載荷速度を考慮して決定されたものであるが、実際の土は、理論上の仮定通りには挙動しないので、おのずから使用可能な載荷速度にも限度があるものと考えられる。ここでは、前項で取り扱った試料について求められた圧密定数が載荷速度によりどのような影響を受け、それが標準圧密試験で求められた圧密定数との対応という点でどのような影響を受けるかを以下に検討した。

(a) 本牧再圧密試料

図-5.8 (a), (b) および 図-5.9 (a), (b) は本牧再圧密試料（再圧密圧力：約 0.5 kg/cm²）についての圧密定数 (m_v および c_v) の平均有効応力 \bar{p}' に対する変化状況を示すものであり、それぞれバックプレッシャー $B_p = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ および $B_p = 0.7 \text{ kg/cm}^2$ の場合のものである。使用した5段階の載荷速度がパラメーターとして示されており、また、標準圧密試験の m_v , c_v の平均値およびばらつきの範囲が示されている。

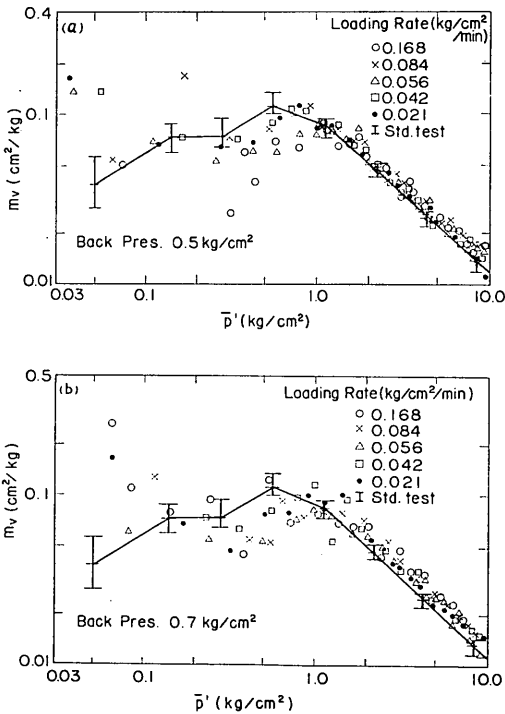


図-5.8 $m_v \sim \bar{p}'$ 関係と載荷速度（本牧再圧密試料）

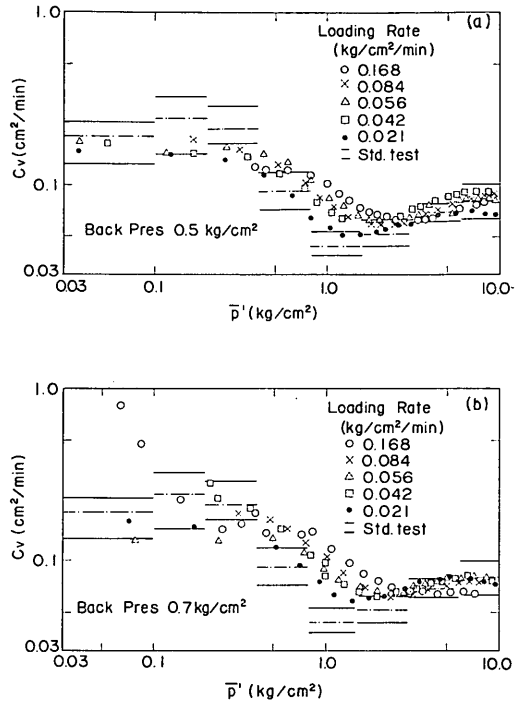


図-5.9 $c_v \sim \bar{p}'$ 関係と載荷速度（本牧再圧密試料）

m_v については、前述したように 0.1 kg/cm² 以下では初期の不安定性が現われているとみられ、検討の対象からははずすものとする。図-5.8 (a) および 図-5.8 (b) を比較すると $B_p = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ に対する最も早い載荷速度 ($R_o = 0.168 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$) のものが、過圧密領域において極端に小さい m_v を与えるということを除いて、前述したようにバックプレッシャーの大小による相違は認められない。 m_v の変化状況には、過圧密領域において多少ばらつきがあるが、載荷速度による相違は現われていないとみられる。定率漸増載荷圧密による m_v の値は、先行圧密圧力（この場合、既知であり再圧密圧力 = 0.5 kg/cm² に等しい）付近で、標準圧密試験の場合の m_v よりやや小さくなっている。このことは、前述したように、圧密降伏応力 $p_{v,CLR}$ が R_o にかかわらず、標準圧密試験の p_v より一般に大きくなることと関係がある。正規圧密領域の m_v の有効応力に対する変化状況は一般には両対数紙上で直線になるが、図-5.8 (a) または 図-5.8 (b) において、標準圧密試験の m_v の平均値を結ぶ直線と比較すると定率漸増載荷の場合の m_v はやや大きい。しかし、実用的な見地からは、この程度の相違はあまり問題にならないと考えられる。

図-5.9(a) および 図-5.9(b) に示す c_v については約 2 kg/cm^2 の応力 (先行荷重の約 4 倍に相当する) 以下の範囲では荷重速度による相違が現われており、荷重速度の大きいものほど c_v の値は大きい。しかし、約 2.0 kg/cm^2 以上 (完全な正規圧密領域) では、荷重速度に無関係になる。定率漸増荷重圧密の c_v の応力に対する変化状況は、標準圧密試験の c_v の変化状況に比べ、先行荷重 $p_c = p_0 = 0.5 \text{ kg/cm}^2$ から $4p_c = 2.0 \text{ kg/cm}^2$ の範囲 (過圧密領域から完全な正規圧密領域に至る過渡領域とみられる) では、一般的に大きい傾向がある。従って、全応力範囲内については、最も遅い荷重速度のもの ($R_o = 0.021 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$) が、標準圧密試験の結果に最も近い。しかし、過圧密領域においては、 R_o の如何にかかわらず、標準圧密試験の c_v のばらつきの下限にはほぼ一致するとともに、概して定率漸増荷重圧密試験の c_v は全応力範囲内において平坦化の傾向がみられる。Lowe 他¹⁰⁾ が動水勾配一定試験においてやはり、 c_v の変化状況が平坦化する傾向を報告しており、バックプレッシャーをかけたことによる現象とも考えられる。

(b) 自然試料

図-5.10(a), (b) は大黒町自然試料 ($B_p = 3.0 \text{ kg/cm}^2$) における m_v および c_v の平均有効応力 \bar{p}' に対する変化状況を 4 段階の荷重速度をパラメーターとして示したものである。図中、標準圧密試験の場合の m_v および c_v を黒丸印で示した。

この場合の m_v については、過圧密領域において荷重速度の相違の影響が現われており、荷重速度が大きいと m_v は小さくなる傾向がみとめられる。この領域における m_v 特性の標準圧密試験結果との対応性はかなり悪く、相対的には最も遅い荷重速度のものが、標準圧密試験の m_v と最もよく対応する。過圧密領域における m_v の低下が、前述の $e \sim \log p'$ 曲線における荷重速度の増大ともなう圧縮性の減少、さらには圧密降伏応力の増大をもたらすことになる。一方、正規圧密領域における m_v の変化状況には、荷重速度による相違は全く現われておらず、しかも、標準圧密試験の m_v の変化傾向とよく対応している。

c_v についても、過圧密領域においては、荷重速度の影響が現われており、荷重速度の大きいものが c_v は大きくなり、最も遅い荷重速度のものが標準圧密試験と対応している。正規圧密領域では c_v の変化状況に及ぼす荷重速度の影響は顕著ではなく、しかも荷重速度の如何に

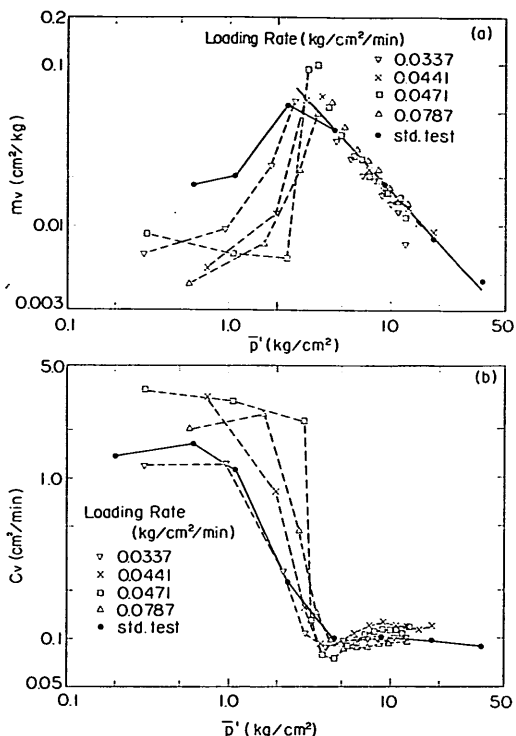


図-5.10 圧密定数と平均有効応力の関係と荷重速度 (試料: 大黒町 No. 6-7)

かかわらず、標準圧密試験の c_v の変化状況とよく対応している。

図-5.11(a), (b) に示した錦海試料の m_v , c_v の変化状況も、大黒町試料の場合と同様の傾向が現われている。

5.5 間げき水圧特性と試験所要時間

標準圧密試験のように、一定の圧力 (Δp) を載荷する場合、試料が十分飽和しておれば、圧力増分と同量の間げき水圧が発生し、同時にその透水性に応じて時間遅れをとる。定率漸増荷重試験の場合の荷重形式は、図-5.12 に模式的に示すように、微小時間 Δt を考慮すれば、一定圧力 Δp を Δt 時間載荷した後、段階的に所定の圧力まで増加したものと同等である。この場合、圧力増分 Δp により同量の間げき水圧が瞬間的に発生し、時間の経過とともに点線で示したような消散過程をたどる。次のステップの圧力増分により、新たな間げき水圧が発生し、同時に消散過程に入る。従って、各時間においては、これら各段階の合計の間げき水圧として、太線で示したものを計測することにな

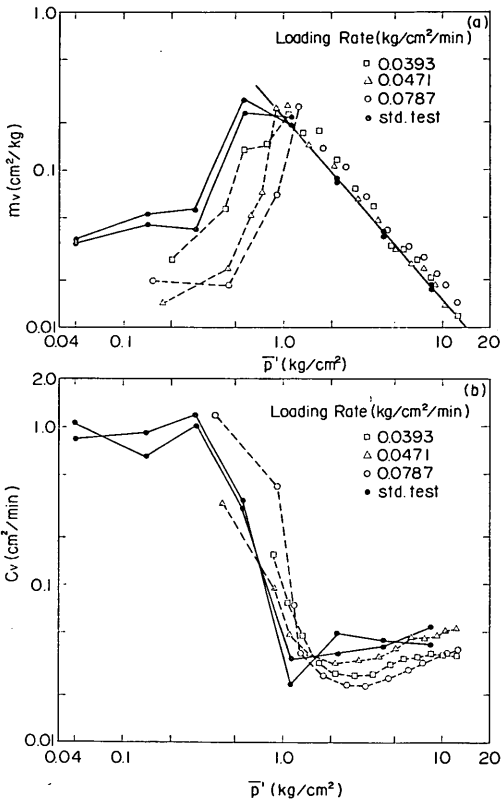


図-5.11 圧密定数と平均有効応力の関係と荷速度 (試料: 錦海 No. 46-1)

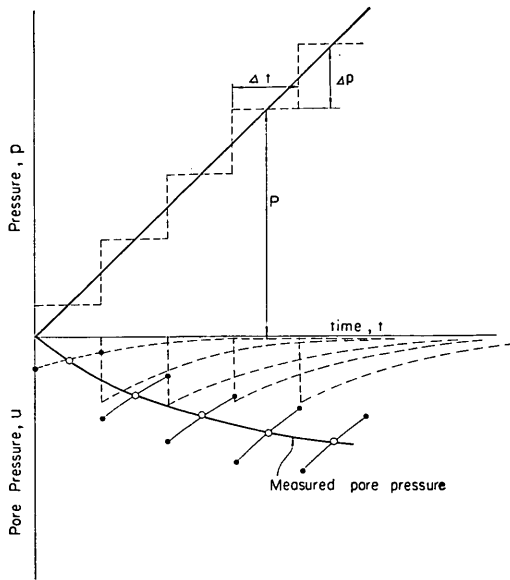


図-5.12 定率漸増荷試験における間げき水圧

る。

以下では、定率漸増圧密試験における間げき水圧の変化状況を全圧力 p に対する供試体底部の間げき水圧、 u_b の割合 u_b/p の形で調べる。

図-5.13 は本牧再圧密試料の場合の u_b/p を対応する有効応力に対してプロットしたものであり、荷速度をパラメーターとして描いてある。また、図-5.14 (a), (b) は、大黒町自然試料および錦海自然試料の $u_b/p \sim p'$ 関係を示す。各図には、それぞれの試料の標準圧密試験より求めた圧密降伏応力 p_y および定率漸増荷試験より求めた圧密降伏応力 $p_{y,CLR}$ をそれぞれ実線および点線の矢印で示した。

本牧再圧密試料と大黒町 および 錦海自然試料の u_b/p の有効応力に対する変化状況には著しい相違がみられる。図-5.13 の場合、各荷速度のものについて、 u_b/p 比は有効応力の小さい所で最も大きく、応力の増大につれて減少する。その際、圧密降伏応力 p_y よりやや大きい応力の所で u_b/p の変化が平坦になる部分が見られ、この平坦部は、荷速度の小さいものほど圧密降伏応力 p_y に近い応力の所に生じている。 $u_b/p \sim \log p'$ の初期の急勾配の直線部より平坦部に移る変曲点が、定

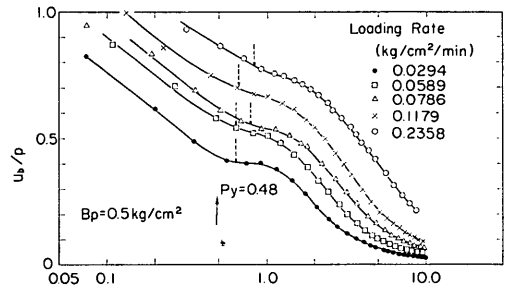


図-5.13 $u_b/p \sim p'$ 関係と荷速度 (本牧再圧密試料)

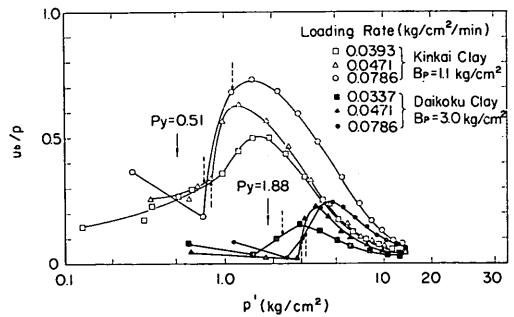


図-5.14 $u_b/p \sim p'$ 関係と荷速度 (試料: 大黒町 No. 6-7 および 錦海 No. 46-1)

率漸増載荷圧密試験の各載荷速度の場合の $e \sim \log p'$ 曲線より求められる圧密降伏応力 $p_{y,CLR}$ にほぼ対応しているように思われる。

図-5.14 (a), (b) に示した2種類の自然試料の場合、同一の載荷速度に対するものの u_b/p の絶対量は相違するが、その応力に対する変化状況は類似している。標準圧密試験より求めた圧密降伏応力より小さい応力領域で u_b/p は小さな値を示し、応力の増大につれて、ある応力までは増大し、さらに応力が大きくなると u_b/p 値は単調に減少する。各載荷速度の場合の u_b/p のピークは定率漸増載荷試験の $e \sim \log p'$ より求めた圧密降伏応力よりやや大きい所にあり、 u_b/p がピークを過ぎた応力領域より完全な正規圧密領域に入っているようである。

図-5.13 の本牧再圧密試料と図-5.14 (a), (b) に示した大黒町および錦海自然試料に対する u_b/p 値の変化状況の著しい相違が、再圧密試料と自然試料の過圧密領域の圧密特性の相違（例えば、セメンテーションの有無のようなもの）の型で提示されているが、両者の過圧密領域における圧縮性あるいは透水性の相違に起因するものかも知れない。自然試料と再圧密試料の特性の相違であるか否かは同一の試料を用いて比較すればよいが、今回の実験においてはそこまで検討していない。

つぎに、定率漸増圧密試験の場合の試験所要時間について、以下に多少の検討を行なった。

3種の試料について、一定の有効応力（標準圧密試験の場合にならって $p' = 12.8 \text{ kg/cm}^2$ とする）に到達するまでの所要時間を内そうにより求め、載荷速度に対しプロットしたものを図-5.15 に示す。定率漸増載荷試験の場合の試験所要時間は、最大圧力附近では間げき水圧の影響もかなり小さくなり、最大圧力と載荷速度より容易

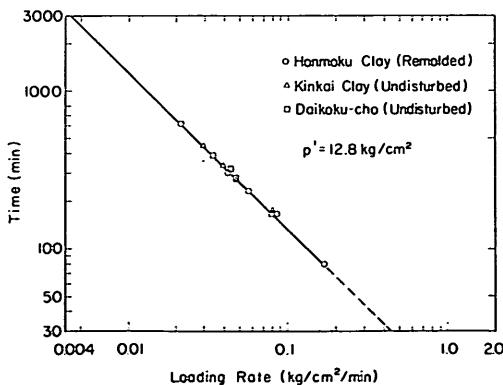


図-5.15 載荷速度と試験所要時間

に求めることができる。すなわち、試験所要時間は、最大圧力を規定すれば載荷速度に反比例して短くなる。

5.6 定率漸増載荷圧密におけるひずみ速度

標準圧密試験の場合のひずみ速度は、各荷重段階の圧密初期の大きい値から圧密終期の非常に小さい値まで広範囲に変動する。たとえば、Crawford によれば 4.0 kg/cm^2 の一定荷重の場合、初期の $1\%/min$ より終期の $1\%/week$ までの変動を示している⁵⁾。

定率漸増載荷圧密の場合、載荷速度は一定であるが、一般に土の応力 \sim ひずみ関係は非線形であるため、ひずみ速度は、応力とともに変動する。載荷速度を一定に保った場合のひずみ速度の応力に対する変化状況を以下に調べてみた。ただし、この場合のひずみ速度は任意の時間 t において時間間隔 Δt 内に生ずる変位量より計算されたものであり、これは、同一時点における有効応力と対応づけられる。

図-5.16 は本牧再圧密試料について5種類の載荷速度を用いて実施した定率漸増載荷圧密のひずみ速度 R_v と有効応力の関係を示したものである。図中、標準圧密試験より求めた圧密降伏応力 p_y および定率漸増載荷圧密試験における圧密降伏応力、 $p_{y,CLR}$ をそれぞれ矢印で示した。また、図-5.17 には錦海自然試料に対する同様の関係を示した。

本牧試料の場合、載荷速度の大きいものについては、定率漸増圧密開始後のひずみ速度は、ある応力まではほぼ一定となり、それより大きい応力領域では両対数紙上で直線的に減少する。一方、載荷速度の比較的小さいもの ($R_v \leq 0.056 \text{ kg/cm}^2/min$) については、ひずみ速度が一旦ピークを示した後、載荷速度の大きい場合の直線とはほぼ平行に減少している。錦海試料についても本牧試料

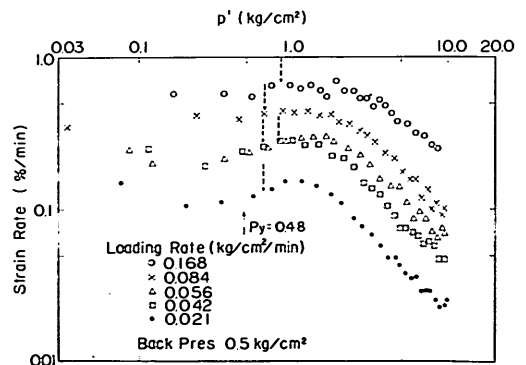


図-5.16 定率漸増載荷試験のひずみ速度の応力に対する変化と載荷速度（本牧再圧密試料）

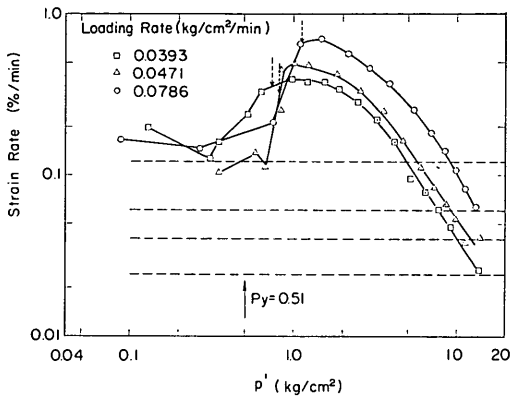


図-5.17 定率漸増載荷試験のひずみ速度の応力に対する変化と載荷速度 (試料: 錦海 No. 46-1)

の載荷速度の比較的小さいものと同様の傾向がみられ、ひずみ速度のピークがより明白である。これらのピークに対応する応力は載荷速度により異なっており、使用した載荷速度の範囲では、標準圧密試験の圧密降伏応力 p_y の 2~4 倍、定率漸増載荷試験より求められる圧密降伏応力 $p_{y,CLR}$ の 1.5~2 倍程度である。これらのピークに対応する応力の物理的意味は明らかでないが、その応力より大きい応力領域において完全な正規圧密の特性が現われているとみられる。標準圧密試験の m_v, c_v 特性については、中瀬他¹⁷⁾によれば、一旦圧密を受けた試料が再圧密を受けた場合、完全な正規圧密の状態にもどるためには先行圧密圧力 (p_c) の 2~3 倍の圧力を要する。このことは Ladd 他¹⁸⁾の試料の乱れと関係があると考えられている。ひずみ速度については、標準圧密試験の場合、一定の圧力段階においても広範囲に変化する⁵⁾ので、圧力に対する直接的な関係は定かでない。

定率漸増圧密の場合にも、同様の現象が想像され、 p_y との関係からみても (p_y は厳密には先行圧密圧力と等しくはないが、強いセメンテーションの影響がある場合などを除いて大差はないと考えられる¹⁷⁾) $R_e \sim p'$ のピークが完全な正規圧密に入っている応力に対応しているとみても不自然ではない。ピークに対応する応力は載荷速度の影響を受けており、載荷速度が大きいと完全な正規圧密領域に入っている応力が高くなる傾向が現われている。

つぎに、前述したように同一試料について、定率ひずみ試験を実施しており、ひずみ速度を基準にして両試験の結果を検討してみる。

ひずみ速度, R_e と載荷速度, R_o は一般に次のような

関係がある。

$$R_e = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta t} = \frac{\Delta \varepsilon}{\Delta p'} = \frac{\Delta p'}{\Delta p} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta t} = m_v \left(1 - \frac{\Delta u}{\Delta p} \right) \cdot R_o$$

定率漸増圧密試験においては、載荷速度 R_o は一定に保たれる。載荷速度が小さい場合には $\Delta u / \Delta p$ は 1 に比べて小さくなり、ひずみ速度 R_e は m_v に比例する。 m_v は応力により変化するので、ひずみ速度 R_e も図-5.15 および図-5.16 に示したように応力により変化する。

本牧再圧密試料の場合、前述したように圧密諸特性が標準圧密試験と良く対応するひずみ速度は 0.1~0.2%/min 以下とみられ、そのような点を考慮して図-5.16 をみると最も小さい載荷速度のもの以外は定率漸増載荷圧密のひずみ速度はかなり高いものを使用していることになる。錦海試料についても図-5.17 にひずみ制御圧密試験に使用したひずみ速度を点線で示したように、定率漸増圧密試験の場合のひずみ速度はかなり高い。

このようなことが m_v, c_v の過圧密ないしは過渡領域における標準圧密試験結果との対応の不十分な原因とみられ、また、図-5.17 に示した圧密降伏応力 $p_{y,CLR}$ の載荷速度による急激な増加の原因と考えられる。

6. 連続載荷方式による急速圧密試験の適用限界

本報告で取り扱った連続載荷圧密試験は、載荷方法にかかわらず有効応力とひずみの関係が一義的に定まるということに基礎を置いており、ひずみ速度一定ないしは載荷速度一定という制御条件は圧密定数の決定を容易にするために設定したものである。これらの制御条件は任意に変えることができるが、圧密沈下現象を数学的に取り扱うために設けられた仮定とも関連して、実用上の限界が存在する。制御条件をも含めた連続載荷圧密試験法の妥当性は、現実の圧密現象と対比させて論ずべきであるが、本報告では標準圧密試験の代用としての急速圧密試験という観点から、標準圧密試験結果と対比させて検討している。

以下では、前章までの検討をもとにして連続載荷試験を単独で実施する場合の制御条件 (定率ひずみ試験におけるひずみ速度および定率漸増載荷試験における載荷速度) の妥当な範囲の選定方法を示した。

6.1 定率ひずみ圧密試験のひずみ速度

ひずみ制御圧密試験法は、圧密現象の解明、とりわけひずみ速度の影響の解明のため有効な手法であると考えられるが、急速圧密試験法として用いる場合には、標準圧密試験を実施することなく、短時間に試験を終了する

ことができ、かつまた妥当な結果を与えるひずみ速度を選定しなければならない。大きなひずみ速度を使用すれば、試験所要時間は短縮されるが、標準圧密試験結果との対応は悪くなるので、使用可能なひずみ速度にある限界があるのは当然のことである。このようなひずみ速度は土の透水性と圧縮性に支配されるものであり、従って一般には土によって変わる。

Smith 他⁷⁾は、適切なひずみ速度を選定するための目安として、次式を提案している。

$$R = \frac{c_v \cdot c_c}{m^2 H_0 (1 + e_0)} \left(\frac{u_b/p}{1 - 0.7(u_b/p)} \right)$$

ここに、 c_v : 圧密係数 (cm/sec), H_0 : 初期高さ (in), c_c : 圧縮指数, e_0 : 初期間げき比, u_b/p : 最大圧力に対する底部間げき水圧の比, m : H/H_0 (H は試験終了時の供試体の高さ) である。上式において H_0 , e_0 は既知であるが他のものについては適当な仮定が必要である。 m については 0.6~0.8, u_b/p については 0.4~0.7 を想定し、 c_v および c_c は液性限界 w との統計的な相関関係を用いればよいとしている。

この方法においては、 u_b/p は圧力により変わり、しかも最大圧力において最も小さくなるのみならず、0.4~0.7 は最大圧力に対する u_b/p 比として過大であること。また、他の数値に対しても、多くの仮定が必要であるなどの問題点がある。

ここでは、適切なひずみ速度を選定するため、通常の沖積粘土を対象として次のような実用的な方法を提案する。

(1) 第1試行のためのひずみ速度の選定

土の物理的特性 (液性限界 w_L が適当) より最初に試みるためのひずみ速度を選定する。一般的には 0.1~0.2%/min 程度のひずみ速度を選べばよいと思われる。これは一応、液性限界を 60~100% 程度を対象としており、それ以下の粘土に対してはより大きいひずみ速度を選定しうる可能性があるが、0.1~0.2%/min 程度のひずみ速度は、十分急速試験としての意味のある速度である。

(2) 有効土被り重量相当の圧力における供試体底部の間げき水圧 u_b と全圧力 p の比 u_b/p の評価

4.5 では、先行圧密圧力に相当する圧力に対する u_b/p として整理しているが、適切なひずみ速度が選定されないと不明であるため、土質調査資料よりただちにわかる有効土被り重量を基準とする。この場合、対応する

u_b/p が 30% 以下であれば、適切なひずみ速度が選定されたものとし、得られた圧密定数を標準圧密試験結果の代用とする。 u_b/p が 30% 以上の時、(3) のステップに移る。

(3) 第2次試行のためのひずみ速度の選定

u_b/p が 30% 以上の場合、(1) で選んだひずみ速度より小さいひずみ速度を選んで再試験を実施する。この場合、図-4.18 の関係を利用すれば、(1) に選んだひずみ速度のもとでの試験所要時間 ($p'=12.8 \text{ kg/cm}^2$ までとする) を知ることで、新しいひずみ速度のもとでの試験所要時間が予想できるので、所要時間を考慮して新しいひずみ速度を選定することが可能である。これにより得られた土被り重量に対応する u_b/p を調べ、(2) と同様の判定を行なう。

以上、(1), (2), (3) の手順により、あるひずみ速度のもとで実施された定率ひずみ試験結果の適・不適を標準圧密試験の結果なしに判定する方法を示した。この方法では場合によっては、2個ないし3個 (液性限界が非常に高いなどのごく特殊な場合のみである) 必要となることに注意しなければならない。また、上記 u_b/p の判定基準は試料が十分飽和している場合にたいし、適用できるものであり、微視的な不飽和のある場合は、不飽和の程度にかかわらず、静水圧相当のバックプレッシャーをかけるべきである。

6.2 定率漸増載荷圧密試験の載荷速度

Schiffman により解かれ、網干他により定率漸増載荷圧密試験結果の解釈のために修正された圧密理論式には載荷速度の項が考慮されてはいるが、前述の試験結果に示すように、圧縮性ならびに圧密定数に程度の差はあるものの載荷速度の影響が現われてくる。具体的には、載荷速度の増大にともなう圧縮性の低下ならびに圧密降伏力の増大、過圧密領域ないしは過渡領域における m_v の低下および c_v の増大という型で現われる。ただし、完全な正規圧密領域においては、載荷速度による顕著な相違はほとんど現われてこない。標準圧密試験結果との対応という観点からは、全圧力範囲を通じて、使用した載荷速度のうち、遅い載荷速度のものが全般的には標準圧密試験の結果により近い値を与える。しかし、圧密定数 m_v , c_v については、正規圧密領域に関するかぎり、載荷速度の大きさにかわらず、標準圧密試験より求まる m_v , c_v と非常に良い一致を示している。

通常の沖積土を対象として、構造物による粘土層の沈下および沈下速度を推定する場合には、正規圧密状態の

土の方が問題になりやすく、このような場合、載荷速度は相当広範囲に選ぶことが可能である。従って、網干他⁹⁾の指摘するように、正規圧密状態の土を対象とするかぎり、最大圧力 (12.8 kg/cm² を想定する) を 2~3 時間程度の早い載荷速度 (0.1~0.07 kg/cm²/min) で載荷し終える定率漸増圧密試験を用いてもよい。

しかし、過圧密状態の粘土を対象とする場合 (たとえばサンド・ドレーンの場合、過圧密ないしは荷重履歴以外の要因にもとづく一見過圧密粘土に対する問題点が多い) には、載荷速度の影響が現われ、標準圧密試験結果との対応という観点からは、使用可能な載荷速度はかなり小さいものに限定される。過圧密領域に対しても標準圧密試験結果と実用上良い一致を得るためには、 $R_0 = 0.04 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ 程度以下の載荷速度を用いるのがよいと考えられる。

最大 12.8 kg/cm² 程度の全圧力領域に対して一定載荷速度 $R_0 = 0.04 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ を用いたとしても全試験時間は、図-5.14 に示すごとく、約6時間程度であり、十分急速試験の意味はある。しかし、この数値は一応の目安であり、分類特性の相違する他の試料についても、検討してみる必要があるかもしれない。

全圧力領域を通じて一定の載荷速度で定率漸増載荷試験を実施しようとする使用可能な載荷速度は、過圧密領域における条件により支配される。しかし、過圧密領域は一般的には小さい圧力範囲にしかすぎないので、この部分の条件を試験全体に適用するのは、急速圧密試験という観点からは不経済であるとも考えられる。そこで、過圧密領域においては、遅い載荷速度の方が良いということと、正規圧密領域においては載荷速度の影響は顕著ではないという一般的な傾向を考慮して、両者の特性を反映させた2段階の載荷形式 (図-6.1) が急速圧密試験法としてより望ましいと考えられる。この場合、有効上載重量 p_0' の 2~3 倍程度の圧力まで遅い載荷速度 R_0' を使用し、その後、載荷速度を R_0 にあげることになる。過圧密領域は一般的には全体からみて小さい圧力範囲であり、かなり遅い載荷速度を用いたとしても全体の試験時間には影響が小さいので、 R_0' としては $0.03 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ 程度以下を使用することとし、正規圧密領域においては R_0 として $0.07 \sim 0.10 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ 程度の載荷速度を使用することにすればよいと考えられる。

載荷速度の試験途上での切換は設定荷重不変で設定載荷時間を変更すればよいが、現在ある試験機は、この切換は手動で行なうことになっている。上述の載荷方式を

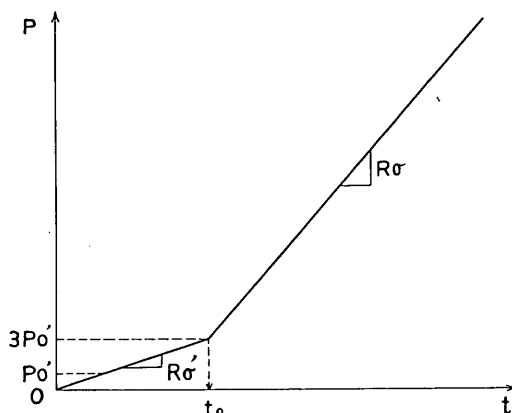


図-6.1 載荷速度を変化させる場合の載荷方式

急速圧密試験方法として十分有効にするためには、載荷速度の切換を自動化する必要があり、このためには機械に多少の改良が必要である。

また、上述の2段階載荷方式をとる場合、圧密定数および有効応力の決定方法が5.1と相違し、やや複雑になるが計算機処理の問題であり、多少の修正により同様の手法で求めることができる。

7. 結 論

共通の試料を用いて定率漸増載荷および定率ひずみ方式による連続載荷圧密試験を実施し、載荷方式による圧密特性の相違、急速圧密試験としての適用性、載荷条件を含む試験条件の選定方法などに関する検討を行なった。その結果、次の事が明らかにされた。

(1) 連続載荷圧密試験においては間げき水圧の測定精度が結果を左右する。高い測定精度を維持する手段としては、時間短縮という見地からも予圧密よりもバックプレッシャーが有効である。その大きさは不飽和度に応じて調整するのが合理的であるが、不飽和度の定量的評価が困難なため自然試料の場合、一律に静水圧の75~100%程度与えるのが望ましい。

(2) 連続載荷圧密試験の場合の圧密降伏応力は標準圧密試験の場合の p_y より一般に大きく、 p_y に対する比率は、ひずみ速度および載荷速度の増大とともに大きくなる。従って、これらの比率を一定限度内に押えるためには、ひずみ速度あるいは載荷速度を限定する必要がある。

(3) 圧密定数 (m_v, c_v) は完全な正規圧密領域では、ひずみ速度あるいは載荷速度の影響をほとんど受けず、

広範囲なひずみ速度または荷速度に対し、標準圧密試験とよい一致を示す。一方、過圧密ないしは過渡領域では、多かれ少なかれ荷条件の影響が見られ、早い荷の場合、標準圧密試験結果との対応性は悪い。

(4) 特定の有効応力(例えば、 12.8 kg/cm^2)に到達するに要する時間は、極端に早い荷の場合を除いて、ひずみ速度あるいは荷速度に反比例すると考えてよい。ただし、定率漸増荷の場合、比例定数 c は実用上常に 1 (土の種類、応力履歴に無関係) であるのに対し、定率ひずみ試験の場合は土の種類、応力履歴等により変わる。

(5) 定率ひずみ試験の使用可能なひずみ速度の上限は直接的には土の透水性および圧縮性、間接的には土の塑性指数により変わる。ひずみ速度の上限を仲介として、試験初期段階の u_0/p により定率ひずみ試験結果を判定する方法を提案した。

(6) 定率漸増荷圧密試験は $R_0 = 0.04 \sim 0.05 \text{ kg/cm}^2/\text{min}$ 程度の一定荷速度を用いても、6 時間前後で全試験が終了し、実用上満足すべき結果が得られた。しかし、一般的には、過圧密ないしは過渡領域をやや緩速で試験し、正規圧密領域を急速試験する方法が有効である。

以上の結果、定率ひずみおよび定率漸増荷のいずれの方式を用いてもデータの自動記録および自動処理が可能なこともあり、段階荷法による急速圧密試験にくらべ、圧密試験法の能率化をはかる上で一そう有力な方法であると考えられる。

8. あとがき

今回の連続荷圧密試験においては、正規圧密領域を問題にするかぎり、いずれの荷方式によっても、広範囲な試験条件(ひずみ速度および荷速度)に対し、圧密定数は実用上標準圧密試験の結果と全く一致させることが可能であることがわかった。このような事実は、緊急に沈下計算資料を入手する必要がある場合、3~4 時間程度でチェック的に行なうのに非常に有用であろう。

本報告では、過圧密領域ないしは過渡領域を含む全圧力範囲における標準圧密試験結果との対応性という観点から定率ひずみ試験結果の判定方法および定率漸増荷圧密試験の荷方法に関する提案を行なったが、分類特性の相違する多くの試料について、機会あるごとに標準圧密試験と併用で検証することが望ましい。

現在の試験手続については、自動記録およびデータの

電算処理によりかなりの能率化がはかられているが、なお一層の省力化をはかるためには電算機と連動した自動処理システムを導入する必要がある。

おわりに、物理試験などに協力をいただいた小川技官はじめ土質試験課の方々ならびに、本報告とりまとめの段階で適切な意見をいただいた中瀬土質部長および土性研究室小林技官に謝意を表したい。

(1973 年 9 月 29 日 受付)

参考文献

- 1) 最上武雄編著：“土質力学”，土木学会監修，技報堂，1969，pp. 443~471.
- 2) R. D. Northey: “Rapid Consolidation Tests for Routine Investigations”, Proc. 2nd Australia-New Zealand Conf. on S. M. F. E., 1956, pp. 20~26.
- 3) 野田健二：“急速圧密試験法について”土と基礎 8 卷 3 号，1960，pp. 34~37.
- 4) 小川富美子：“荷時間の圧密諸係数におよぼす影響について”，港研報告，Vol. 8, No. 2, 1969 年 6 月，pp. 21~49.
- 5) C. B. Crawford: “Interpretation of the Consolidation Test”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 90, SM No. 5, Sept., 1964, pp. 87~102.
- 6) P. M. Byrne and Y. Aoki: “The Strain Controlled Consolidation Test”, “Soil Mechanics Series No. 9, The University of British Columbia, 1969, pp. 1~25.
- 7) R. E. Smith and H. E. Wahls: “Consolidation under Constant Rates of Strain”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol. 95, No. SM 2, March, 1969, pp. 519~539.
- 8) A. E. Z. Wissa, J. T. Christian, E. H. Davis, and S. Heiberg: “Consolidation at Constant Rate of Strain”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, Vol. 97, No. SM10, Oct., 1971, pp. 1393~1413.
- 9) H. Aboshi, H. Yoshikuni, and S. Murayama: “Constant Loading Rate Consolidation Test”, Soils and Foundations, Vol. 10, No. 1, 1970, pp. 43~56.
- 10) J. Lowe III, E. Jonas, and V. Obrician: “Controlled Gradient Consolidation Test”, Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Vol. 95, No. SM 1, Jan., 1969, pp. 77~97.
- 11) C. B. Crawford: “The Resistance of Soil Structure to Consolidation”, Canadian Geotechnical Journal, Ottawa, Canada, Vol. 2, No.

- 2, May, 1965, pp. 90~115.
- 12) H. E. Wahls and N. S. DeGody: Discussion of "Interpretation of the Consolidation Test", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, Vol. 91, No. SM 3, May, 1965, pp. 147~152.
- 13) E. H. Davis and G. P. Raymond: "A Non-linear Theory of Consolidation", Geotechnique, 1965.
- 14) R. L. Schiffman: "Consolidation of Soil under Time Dependent Loading and Varying Permeability", Proc. Highway Research Board, No. 37, 1958.
- 15) 赤井浩一, 小谷章: "不攪乱飽和粘土の圧密とせん断特性におよぼす Back Pressure の効果", 土木学会論文集, Vol. 91, 1963 年 3 月, pp. 1~7.
- 16) 奥村樹郎: "粘土の攪乱に関する研究(第2報)", 港研報告, Vol. 8, No. 3, Sept., 1969, pp. 78~98.
- 17) 中瀬明男, 小林正樹, 兼近明男: "過圧密粘土の圧密特性", 港研報告, Vol. 12, No. 1, 1973 年 3 月, pp. 123~139.
- 18) C. C. Ladd and T. W. Lambe: "The Strength of Undisturbed Clay Determined from Undrained Tests, Laboratory Shear Testing of Soils, ASTM, STP, No. 361, 1963, pp. 342~371.

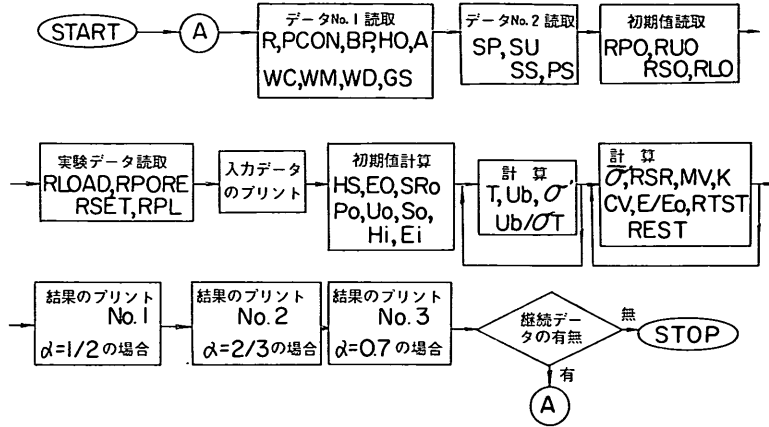
- h_s : 土粒子実質部分の高さ (cm)
- K : 増幅率
- k : 透水係数 (cm/min)
- m : 定数
- m_v : 体積圧縮係数 (cm²/kg)
- P_p : 予圧密圧力 (kg/cm²)
- p : 全圧力 (kg/cm²)
- p' : 有効応力 (kg/cm²)
- \bar{p}' : 平均有効応力 (kg/cm²)
- p_0 : 再圧密圧力 (kg/cm²)
- p_0' : 有効上載荷重 (kg/cm²)
- p_c : 圧密先行圧力 (kg/cm²)
- p_y : 圧密降伏応力 (kg/cm²)
- $p_{y,CRS}$: 定率ひずみ試験の p_y (kg/cm²)
- $p_{y,CLR}$: 定率漸増載荷試験の p_y (kg/cm²)
- R : 沈下速度 (cm/min)
- R_s : ひずみ速度 (%/min)
- R_d : 載荷速度 (kg/cm²/min)
- r : 定数
- T_v : 時間係数
- t : 時間 (min)
- U : 圧密度
- u : 間げき水圧 (kg/cm²)
- u_b : 供試体底部の間げき水圧 (kg/cm²)
- \bar{u} : 平均間げき水圧 (kg/cm²)
- V : サーボンプへの入力電圧 (V)
- V_1 : 函数発生器の電圧 (V)
- V_2 : マグネセルより発生する電圧 (V)
- V : 体積 (cm³)
- v : 鉛直変位 (cm)
- w : 含水比 (%)
- w_L : 液性限界 (%)
- w_p : 塑性限界 (%)
- z : 座標軸
- α : 定数
- γ_w : 水の単位体積重量 (g/cm³)
- ϵ : ひずみ (%)

記 号 表

- A : 断面積 (cm²)
- a_v : 圧縮係数 (cm²/kg)
- B : 間げき水圧係数
- B_p : バックプレッシャー (kg/cm²)
- b : 定数
- c : 定数
- c_c : 圧縮指数
- c_v : 圧密係数 (cm²/min)
- d : 沈下量 (mm)
- e : 間げき比
- e_0 : 初期間げき比
- \bar{e} : 平均間げき比
- H : 高さ (cm)
- H_0 : 初期高さ (cm)

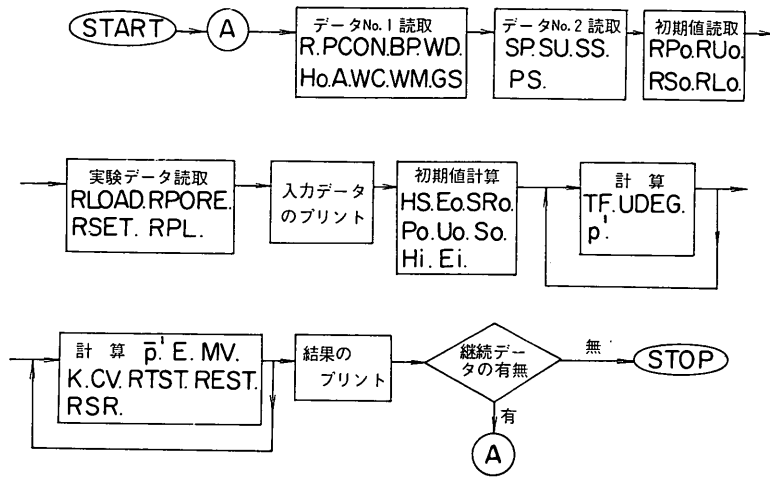
連続載荷方式による急速圧密試験

付 録



- | | | | |
|-------|------------------------------------|-----------------|---------------------------------------|
| R | : 公称ひずみ速度 (cm/min) | RPORE | : 各時間における間隙水圧計の読み (mV) |
| PCON | : 予圧密 (kg/cm ²) | RSET | : 各時間における沈下計の読み (mV) |
| BP | : バックプレッシャー (kg/cm ²) | RPL | : 各時間における紙の長さの読み (cm) |
| HO | : サンプル高さ (cm) | HS | : 土粒子実質部 (換算) (cm) |
| A | : 試料断面積 (cm ²) | E _o | : 圧密開始前初期間隙比 |
| WC | : 含水比 (%) | E _i | : 本試験開始前初期間隙比 |
| WM | : 湿潤重量 (g) | E | : 本試験中の間隙比 |
| WD | : 乾燥重量 (g) | SR _o | : 初期飽和度 (%) |
| GS | : 比重 | P _o | : 本試験開始前の全応力 (kg/cm ²) |
| SP | : ロードセル感度 (kg/mV) | U _o | : 本試験開始前の初期間隙水圧 (kg/cm ²) |
| SU | : 間隙水圧計感度 (kg/cm ² /mV) | S _o | : 本試験開始前の初期沈下 (cm) |
| SS | : 沈下計感度 (cm/mV) | σ _T | : 全応力 (kg/cm ²) |
| PS | : ペーパースピード (cm/min) | U _b | : 底部における間隙水圧 (kg/cm ²) |
| RPO | : 本試験前のロードセルの読み (mV) | σ' | : 有効応力 (kg/cm ²) |
| RUO | : 本試験前の間隙水圧計の読み (mV) | RSR | : 実測ひずみ速度 (cm/min) |
| RSO | : 本試験前の沈下計の読み (mV) | MV | : 体積圧縮係数 (cm ² /kg) |
| RLO | : 本試験前の紙の長さの読み (cm) | K | : 透水係数 (cm/min) |
| RLOAD | : 各時間におけるロードセルの読み (mV) | CV | : 圧密係数 (cm ² /min) |

付図-1 定率ひずみ試験の計算用ブロックチャート



- | | | | |
|-----------------|------------------------------------|-----------------|---------------------------------------|
| R | : 公称荷重速度 (kg/min) | PL ₀ | : 本試験前紙の長さ読み (cm) |
| TF | : 時間係数 | RLOAD | : 各時間におけるマグネセルの読み (mV) |
| UDEG | : 圧密度 | RPORE | : 各時間における間隙水圧計の読み (mV) |
| RTST | : 実測荷重速度 (kg/min) | RSET | : 各時間における沈下計の読み (mV) |
| RSR | : ひずみ速度 (cm/min) | RPL | : 各時間における紙の長さの読み (cm) |
| PCON | : 予圧密 (kg/cm ²) | HS | : 土粒子実質部高さ (換算) (cm) |
| BP | : パックプレッシャー (kg/cm ²) | E ₀ | : 圧密開始前初期間隙比 |
| H ₀ | : サンプル高さ (cm) | E | : 本試験中の間隙比 |
| A | : 試料断面積 (cm ²) | E _i | : 本試験開始前初期間隙比 |
| WC | : 含水比 (%) | SR ₀ | : 初期飽和度 (%) |
| WM | : 湿潤重量 | P ₀ | : 本試験開始前の全応力 (kg/cm ²) |
| WD | : 乾燥重量 (g) | U ₀ | : 本試験開始前の初期間隙水圧 (kg/cm ²) |
| GS | : 土粒子比重 | S ₀ | : 本試験開始前の初期沈下 (cm) |
| SP | : マグネセル感度 (kg/mV) | pT | : 全応力 (kg/cm ²) |
| SU | : 間隙水圧計感度 (kg/cm ² /mV) | UB | : 底部における間隙水圧 (kg/cm ²) |
| SS | : 沈下計感度 (cm/mV) | p' | : 有効応力 (kg/cm ²) |
| PS | : ペーパースピード (cm/min) | RSR | : 実測ひずみ速度 (cm/min) |
| RP ₀ | : 本試験前マグネセル読み (mV) | MV | : 体積圧縮係数 (cm ² /kg) |
| RU ₀ | : 本試験前間隙水圧計読み (mV) | K | : 透水係数 (cm/min) |
| RSo | : 本試験前沈下計の読み (mV) | CV | : 圧密係数 (cm ² /min) |

付図-2 定率漸増載荷試験の計算用ブロックチャート