

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

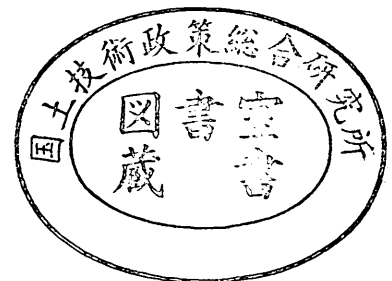
VOL. 7

NO. 2

JUNE 1968

運輸省港湾技術研究所
研修教材図書
番号
設計基準部研修資料課

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



港湾技術研究所報告は第7巻第1号より年4回定期的に刊行する。ただし第1巻から第6巻および欧文編第1号から第15号までは下記のとおり不定期に刊行された。
報告の入手を希望する方は論文番号を明記して港湾技術研究所長に申し込んで下さい。

和文篇 (Japanese Edition)

- Vol. 1. No. 1 (1963)
- Vol. 2. Nos. 1~3 (1963~1964)
- Vol. 3. Nos. 1~7 (1964)
- Vol. 4. Nos. 1~11 (1965)
- Vol. 5. Nos. 1~15 (1966)
- Vol. 6. Nos. 1~8 (1967)

欧文篇 (English Edition)

- Report Nos. 1~15 (1963~1967)

The Report of the Port and Harbour Research Institute is published quarterly, either in Japanese or in occidental languages. The title and synopsis are given both in Japanese and in occidental languages.

The report prior to the seventh volume were published in two series in Japanese and English as listed above.

The copies of the Report are distributed to the agencies interested on the basis of mutual exchange of technical publication.

Inquiries relating to the Report should be addressed to the director of the Institute specifying the numbers of papers in concern.

港湾技術研究所報告 (REPORT OF P.H.R.I.)

第7巻 第2号 (Vol. 7, No. 2), 1968年6月 (June 1968)

目 次 (CONTENTS)

1. 高知港津波防波堤に関する模型実験 (第3報)
..... 木村久雄・工藤国守・柴山煒彦..... 3
(A Model Experiment on the Tsunami Breakwaters at the port of Kochi
(3rd Report)Hisao KIMURA, Kunimori KUDO and Akihiko SHIBAYAMA)
2. くいの横抵抗における地盤常数に関する研究 沢口正俊..... 65
(Soil Constants of FillsMasatoshi SAWAGUCHI)
3. 沖積粘土のボーリングおよびサンプリングに関する研究 (第3報)
..... 松本一明・堀江宏保・山村真佐明..... 95
(Study on Boring and Sampling of Saturated Alluvial Clays (3rd Report)
..... Kazuaki MATSUMOTO, Hiroyasu HORIE and Masaaki YAMAMURA)
4. 土の三軸圧密試験 (第1報)
——三軸圧密試験装置と静止土圧係数——
..... 中瀬明男・野村健司・伊藤昌英.....115
(Triaxial Consolidation Test of Soils (1st Report) —Triaxial Consolidation
Test Apparatus and Coefficient of Earth Pressure at Rest—
.....Akio NAKASE, Kenji NOMURA and Masahide ITO)

土の三軸圧密試験 (第1報)

— 三軸圧密試験装置と静止土圧係数 —

中瀬明男*・野村健司**・伊藤昌英**

要 旨

自然地盤における一次元圧密と同様の条件で試験を行なうために試作した三軸圧密試験装置について、その、装置の詳細と試験方法を報告する。乱さない粘土試料を用いて標準圧密試験との比較を行なった結果は次の通りである。

- 1) 三軸圧密試験で生ずる二次圧密量は標準圧密におけるものよりかなり少ない。
- 2) 三軸圧密試験より求められる圧密係数値は標準圧密試験で求められたものの約半分である。
- 3) 粘土の膨脹過程は圧密過程と同様に扱うことができる。

三軸圧密試験によって求められた正規圧密粘土の静止土圧係数 K_0 は、初期値 $K_0=1.0$ が時間とともに減少し、圧密終了時に $K_0=0.5$ となる。過圧密状態における静止土圧係数は過圧密比とともに増大する。

* 土質部 土性研究室長

** 土質部 土性研究室

Triaxial consolidation test of soils (1st Report)

(Triaxial consolidation test apparatus and coefficient of earth pressure at rest)

Akio NAKASE*
Kenji NOMURA**
Masahide ITO**

Synopsis

The design and test procedures of a triaxial consolidation test apparatus, restoring the condition of in-situ one-dimensional consolidation, are described. Results of comparison between the triaxial and standard consolidation tests on an undisturbed clay have shown that;

- 1) Relative amount of secondary compression in the triaxial consolidation test is smaller than that in the standard test.
- 2) The value of coefficient of consolidation obtained in the triaxial consolidation test is about half the value in the standard test.

Coefficient of earth pressure at rest K_0 is measured in the triaxial consolidation test. In consolidation processes, K_0 is equal to unity at the start of consolidation, then decreases with time and tends to be about 0.5 at the completion of consolidation. In the rebound processes, however, K_0 increases more or less with time. K_0 values at the completion of rebound are found to increase with the overconsolidation ratio.

* Chief of the Soil Mechanics Laboratory

** Member of the Soil Mechanics Laboratory

目 次

1. ま え が き	119
2. 三軸圧密試験装置	119
2.1. 装置の概要	119
2.2. 三軸圧密室	121
2.3. 載荷装置	122
2.4. 圧力制御装置	123
2.5. 間ゲキ圧測定装置と体積変化測定装置	124
3. 試験方法	124
3.1. 供試体のセット	124
3.2. 調整と測定	128
4. 試験結果	130
4.1. 試料	130
4.2. 圧密過程	130
4.3. 膨脹過程	137
5. 結 論	142
6. あ と が き	142
参考文献	142
記号表	143

1. まえがき

飽和した粘土層の上に荷重を加えておくと、時間とともに粘土内の水が排出されて圧密沈下が生ずる。粘土層表面の載荷範囲が土の層厚に比して非常に大きい場合、載荷区域の中央部における粘土の圧縮は鉛直方向のみで、水平方向の変形は生じないものと考えられる。このような圧密現象を一次元圧密といひ、実さい問題における圧密沈下のかかりのものは、この一次元圧密の条件で生じているものと思われる。

圧密圧力に対応する圧縮量や圧縮速さは、圧密試験を行なってこれを推定するが、対象とする圧密が一次元圧密の条件であれば圧密試験の条件もこれと等しくしなければならない。標準的な圧密試験においては、剛性の大きい圧密リング内に円筒形供試体を入れて軸圧力を加える。この場合に生ずる供試体の圧縮は軸方向のみに限られるから、変形条件のみについては標準圧密試験は厳密に一次元圧密の条件を充たしている。

しかし圧密リングを使用する場合には、供試体と圧密リングの間に摩擦抵抗が生じ、しかもこの摩擦抵抗が時間と共に変化することから、標準圧密試験における圧密圧力は地盤中のものとは異なっている^{1)~3)}。したがって、一次元圧密の条件を充たすためには、圧縮が一次的であって側面摩擦のないような試験機を用いることが必要である。

上述のような一次元圧密の条件を充たす試験を行なうために三軸圧密試験機を試作した。これは原理的には三軸圧縮試験機と同じもので、Bishop 等の特殊三軸圧縮試験機⁴⁾や赤井等の一次元供密試験機と同様⁵⁾に、三軸試験供試体の半径方向の変形がないように側圧を制御して圧密を行なうものである。供試体側面は薄いゴムスリーブを介して三軸セル内の流体に接しているため、標準圧密試験におけるような側面摩擦は生じない。

三軸圧縮試験機の利点の一つは供試体内の間ゲキ圧の測定が容易なことである。土の圧密の進行は有効応力または間ゲキ圧の時間的変化によって規定されるが、圧密試験において土の有効応力を直接に測定することは困難なので、間ゲキ圧の測定が可能ということは圧密試験機としても有利な点である。

一般に地盤中の土の要素に加わる鉛直圧力 p_v と水平圧力 p_h の比、 $K=p_h/p_v$ を土圧係数という。とくに水平変位のない一次元圧密条件にある場合の土圧係数を静

止土圧係数といひ K_0 なる記号で表わす。このことから、三軸試験において供試体の側方変位のないという条件を K_0 条件と呼んでいる。三軸圧密試験では K_0 条件を充たすために三軸セル圧を制御するから、全圧密過程における静止土圧係数の値を連続的に測定することができる。

今回試作した三軸圧密試験機にはいくつかの改良すべき点があるが、ここに第一報として試験機の構造と試験法を紹介する。また、標準圧密試験と三軸圧密試験の試験結果の比較および静止土圧係数の測定結果もあわせて報告する。

2. 三軸圧密試験装置

2.1. 装置の概要

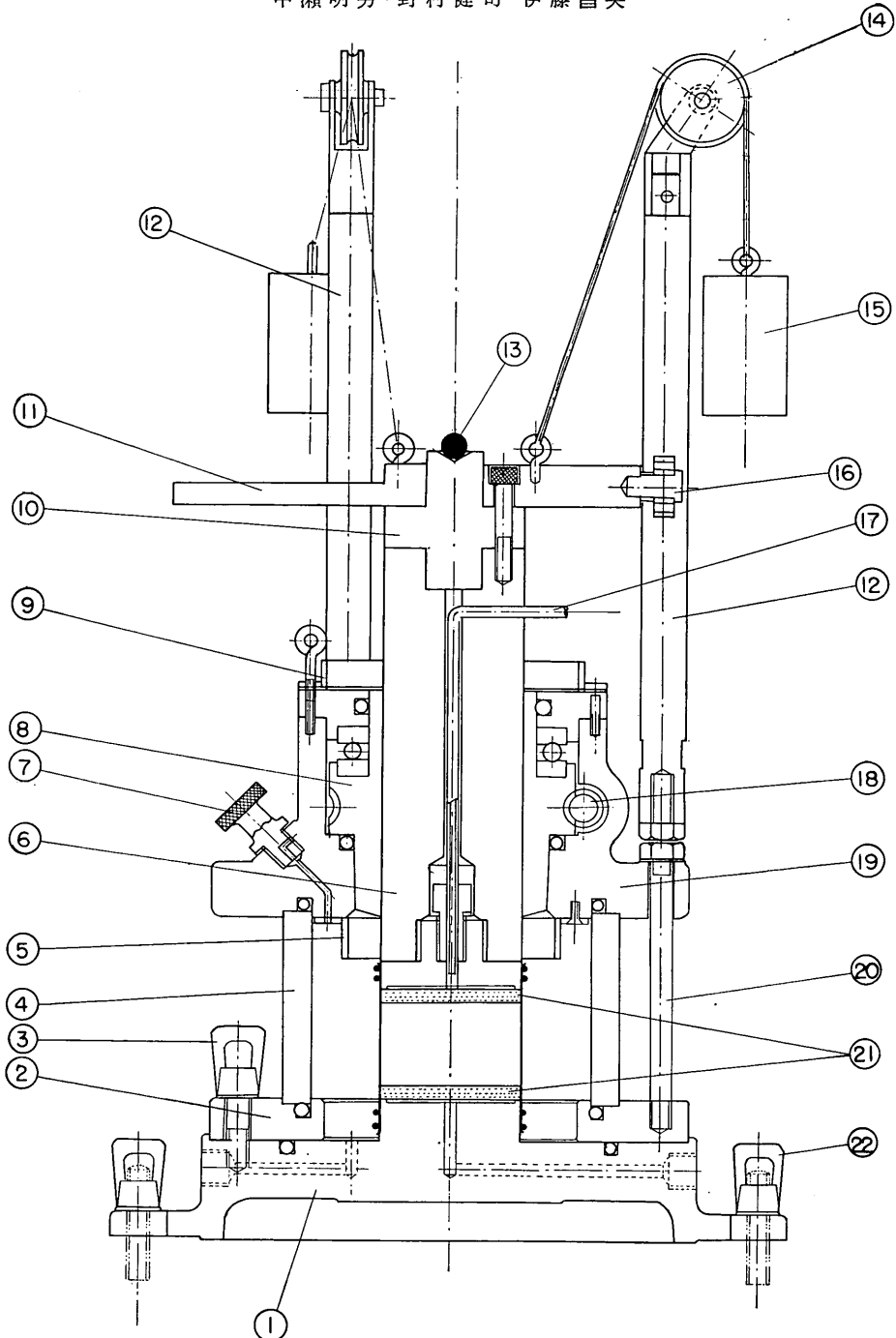
三軸圧密試験装置は、三軸圧密室、載荷装置、圧力制御装置の三つの主要部分よりなる。測定装置としては間ゲキ圧測定装置と体積変化測定装置があり、 K_0 条件の制御のためには側方ヒズミ指示器を用いる。この試験における供試体のセットは慎重に行なう必要があり、特別な組立て装置を用いている。以下その主要部分の説明をしよう。

2.2. 三軸圧密室

三軸圧密室は供試体に圧密圧力を加えるもので、三軸圧密装置の中でもっとも重要な部分である。その構造は図-1 に示すように普通の三軸圧縮試験機の三軸圧縮室と同様なものである。供試体は直径 5 cm の円筒型で、その高さは 2~3 cm である。載荷ピストンの直径は供試体直径と同じく 5 cm であり、供試体を薄いゴムスリーブによってピストンとペDESTAL にシールすることにより、三軸圧密室内の流体圧による揚圧力がピストンに加わらぬようになっている。

ピストン下端とペDESTAL 上端にはポーラスメタルがついている。供試体よりの排水は供試体上面より行なわれ、中空ピストンの中を通るプラスチックの排水チューブの端はビューレットまたは体積変化測定装置に連なっている。供試体下面に接するポーラスメタルは間ゲキ圧測定装置に通じている。間ゲキ圧測定は零位方式によって行なっているため、供試体下面は不透水境界面となっている。

載荷ピストンの自重が供試体に加わらぬように、ピストンは3つのカウンターウェイトで吊り上げられている。ピストンすり合わせ部分の摩擦力を減少せしめるため回転プッシュを用いているが、回転プッシュの回転速



- 1) ペDESTアル 2) セル下板 3) セル下板据付用蝶ネジ 4) 透明プラスチック円筒 5) オイル受け
 6) 载荷ピストン 7) 空気抜きバルブ 8) 回転ブッシュ 9) オイル受け 10) ピストンキャップ
 11) 変形測定用アーム 12) 支柱 13) 鋼球 14) プーリー 15) カウンターウェイト 16) ボール
 ペアリング 17) 排水用プラスチックチューブ 18) ウォームギア 19) セル上板 20) セル固定用
 ロッド 21) ポーラスメタル 22) ペDESTアル据付用蝶ネジ

図-1 三軸圧密室

土の三軸圧密試験 (第1報)

さは毎分1回転である。供試体の軸方向の変形量はピストンの変位によって測定する。このためにピストンには変形測定用アームが付けてあるが、このアームの先端はボールベアリングでセル上板上の支柱に接しており、アームの上下動における回転プッシュのトルクによる摩擦力を減少せしめるようになっている。

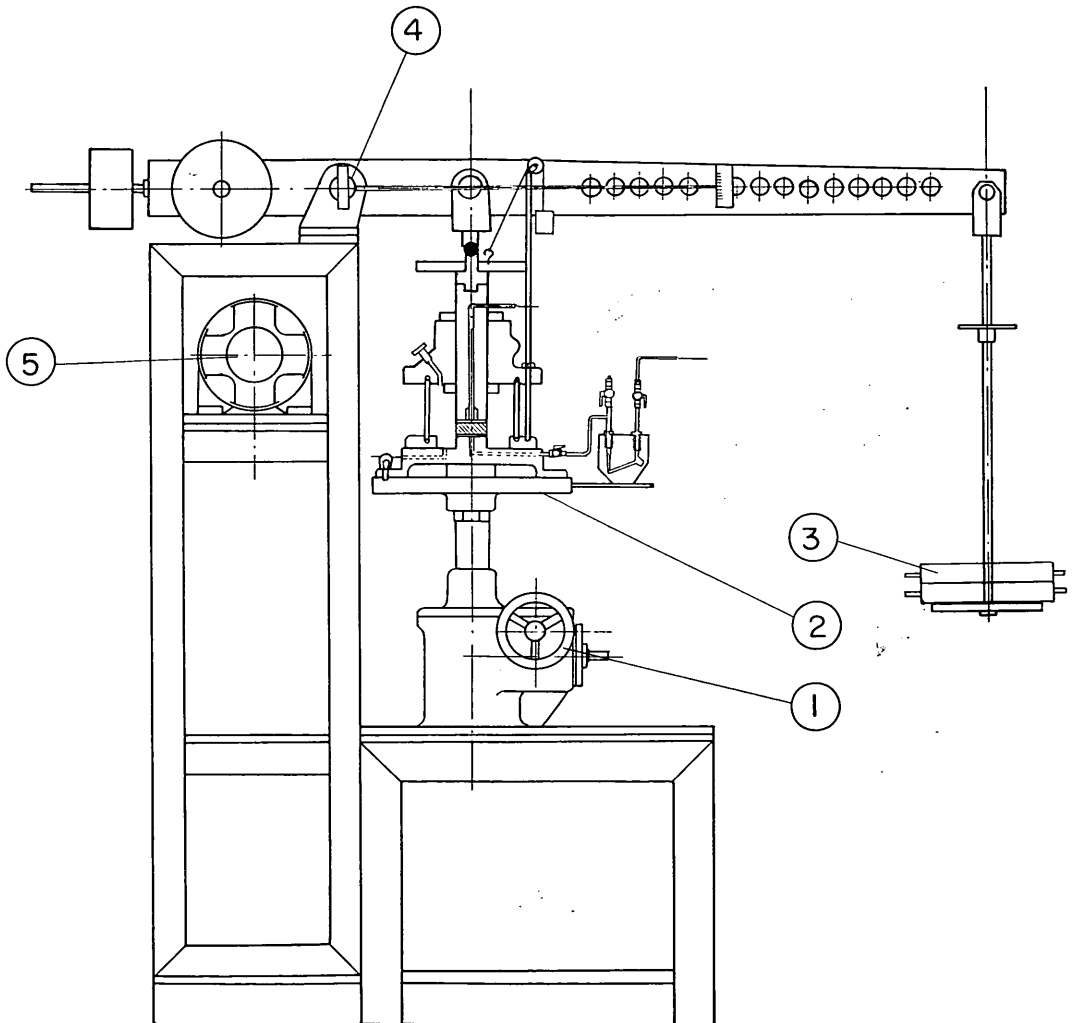
三軸圧密室内には水を充たすが、ピストンすり合わせ部分よりの漏洩を防ぐために、セル上板の下面にオイル受けを付け、この中にはカストル油を充たしておく。セル上板には空気抜き用と給油用の2つのバルブが付いている。三軸圧密室の給排水はペDESTALのバルブを通し

て行なう。

三軸圧密室はセル上板、透明プラスチック円筒、セル下板およびペDESTALよりなっている。セル上板、透明プラスチック円筒およびセル下板は普通はロッドで固定しておき、組み立てる場合はこれらをペDESTALにボルト締めする。

2.3. 載荷装置

載荷装置は図-2に示すようにレバー式のもので、レバー比は1:5である。三軸圧密室のペDESTALはジャッキの受け台の所定の位置にボルトで固定する。レバーの支点はボールベアリング付きの回転軸となっているが、



1) ジャッキ 2) ペDESTAL受け台 3) 重錘 4) ボールベアリング 5) 回転プッシュ用モーター

図-2 載荷装置

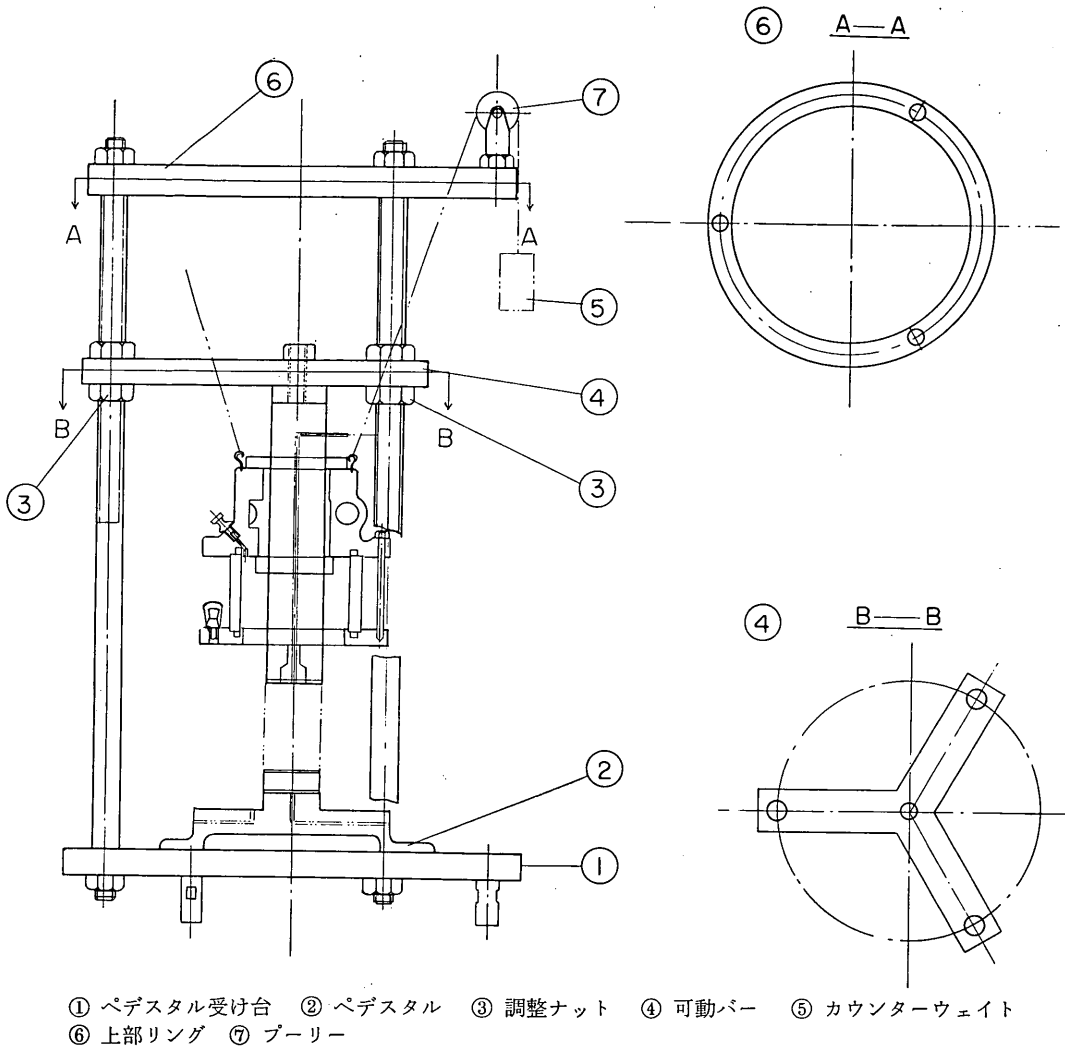


図-3 組立装置

ピストン載荷部分は固定しており鋼球を介してピストンに荷重を加える。ジャッキは三軸圧密室の据え付けや取り外しのさいの操作、ならびに試験中レバーを水平に保つための微調整のために、シャフトの動きは二段切換えができるようになっている。

載荷装置のフレームには回転プッシュ用の1/4HPモーターが据え付けてある。このモーターの軸と三軸圧密室上板の回転プッシュのウォーム軸はユニバーサル・ジョイントで連結されている。載荷装置のフレームにはこの他に間げき圧測定装置や定圧装置の分岐管などが取り付けられている。

2.4. 圧力制御装置

三軸圧密室内の水圧、すなわち供試体の水平方向の圧力は、コントロールシリンダーまたは水銀のヘッド差を利用する自己補償型定圧装置によって制御される⁶⁾。比較的短時間の間における圧力の急激な変化に対してはコントロール・シリンダーを用い、圧力の時間的変化が非常に小さい場合には自己補償型定圧装置を用いる。

水銀ヘッド差による自己補償型定圧装置の容量は2段切換えとなっており、1対の水銀ポットを用いる場合には 3.5 kg/cm^2 、2対を直列に使用する場合には 7.0 kg/cm^2 までの圧力を発生することができる。一方コントロール

土の三軸圧密試験（第1報）

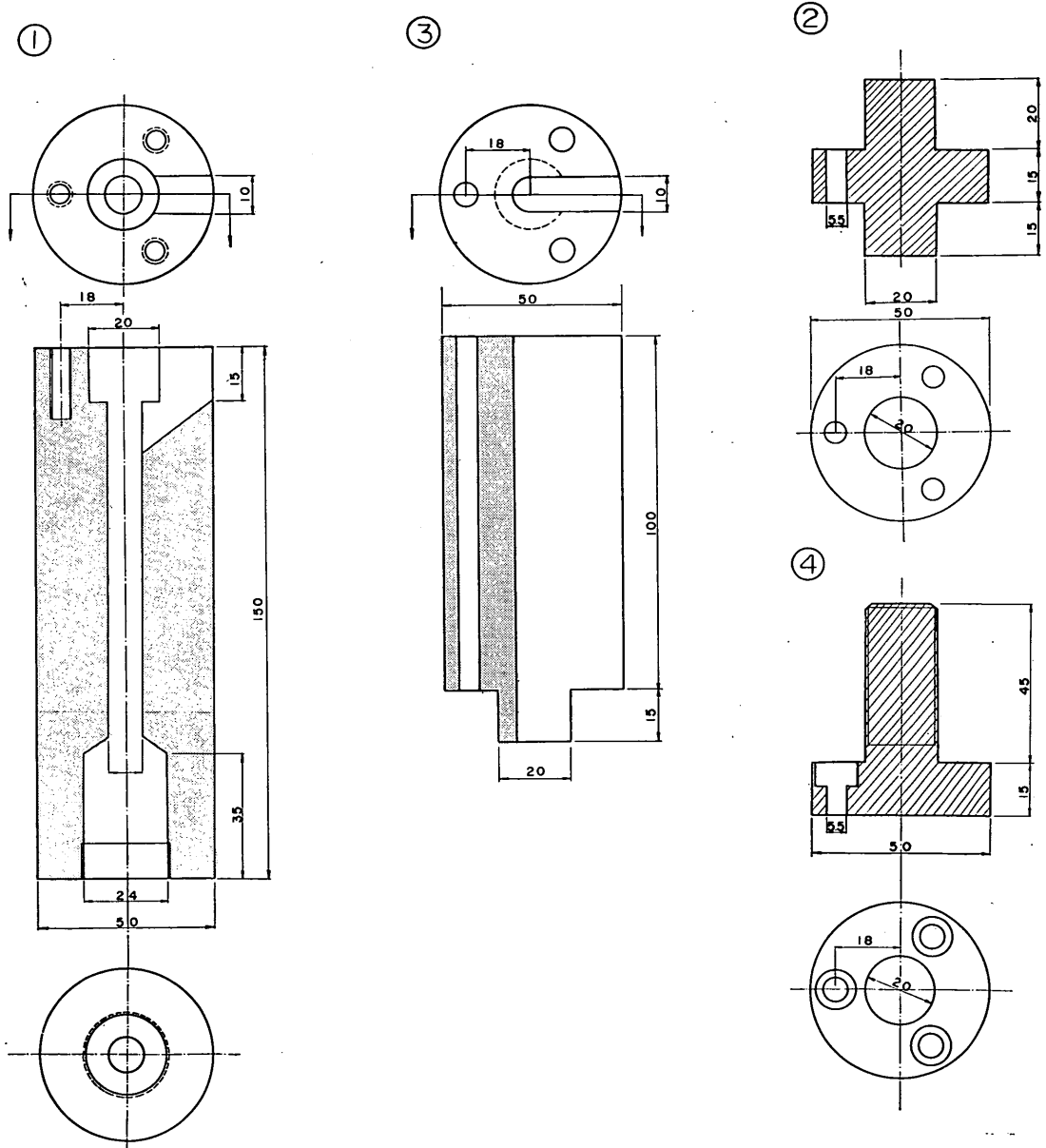
・シリンダーによれば 10 kg/cm^2 程度までの圧力変化を行なうことが可能である。

三軸圧密室内の圧力は供試体の半径方向の変形が生じないように制御される。制御された圧力の測定はブルドン管および水銀マンメーターで行なわれるが、測定精度の理由により主として水銀マンメーターを使用する。水

銀マンメーターには 3.0 kg/cm^2 用と 1.2 kg/cm^2 用の2種類があり、測定圧力の大きさにより適宜切り換えて使用する。

2.5. 間ゲキ圧測定装置と体積変化測定装置

供試体下端面における間ゲキ圧はナルインディケータ⁶⁾により零位方式で測定される。圧力の測定はブルド



① ピストン ② ピストンキャップ ③ スペーサー ④ スペーサーキャップ

図-4 ピストンおよびスペーサー

ン管と水銀マンノメーターによるが、精度の点から主として水銀マンノメーターが用いられる。

供試体の水の排出入の量は、ビューレットまたは着色灯油を用いた反覆式の体積変化指示装置^①で測定される。普通の試験においてはビューレットを用いるが、後に述べるバック・プレッシャーを加える場合には反覆式の体積変化指示装置を用いることが必要となる。

3. 試験方法

3.1. 供試体のセット

三軸圧密試験においては供試体はピストンとペダスタルの両方にシールされることから、供試体のセットは三軸圧縮試験の場合よりも複雑である。供試体の上下面はピストンとペダスタルのおおのに正しく接していなければならないし、ピストンの重量が供試体に加わってはならない。

供試体をセットするには 図-3 に示すような組立て装置を使用する。この装置は3本の支柱よりなるフレームである。この装置を用いる場合には、操作の都合上、載荷ピストンにスペーサーをとりつけなければならない。

ピストンのスペーサーは 図-4 に示すようにスペーサーとスペーサー・キャップよりなっている。試験時の載荷ピストンはピストンにピストン・キャップを付けた状態になっているが、供試体のセットの場合には、ピストン・キャップをはずしてスペーサー・ピストンとスペーサー・キャップを3本のボルトでピストンに固定する。排水用のプラスチック・チューブを傷めぬように、スペーサーにはその全長にわたってピストン軸に達する切り込みをつけてある。

三軸圧密室のペダスタルを組立て装置のペテスタル受け台の所定の位置にボルトで固定したのち、スペーサー・キャップを可動バーに固定する。セル上下板および透明プラスチック円筒よりなる圧密室上部は、3つのカウンター・ウェイトによって自由に吊った状態にしておく(図-5)。ここで所定寸法に成型した供試体を、その上下面にコシ紙をつけて、ペダスタルの上ののせる。

供試体をゴムスリーブでシールするためのスリーブ引張器およびゴムOリング嵌め金具には、図-6 に示すような特殊なものを用いる。ゴムスリーブ引張器はピストンが供試体上面に接するさいの供試体の保護にも利用される。Oリング嵌め金具はゴムOリングでゴムスリーブをシールしたのち取りはずしができるようになっており、図-5 の状態においてピストンにかぶせておく(図-7)。ピ

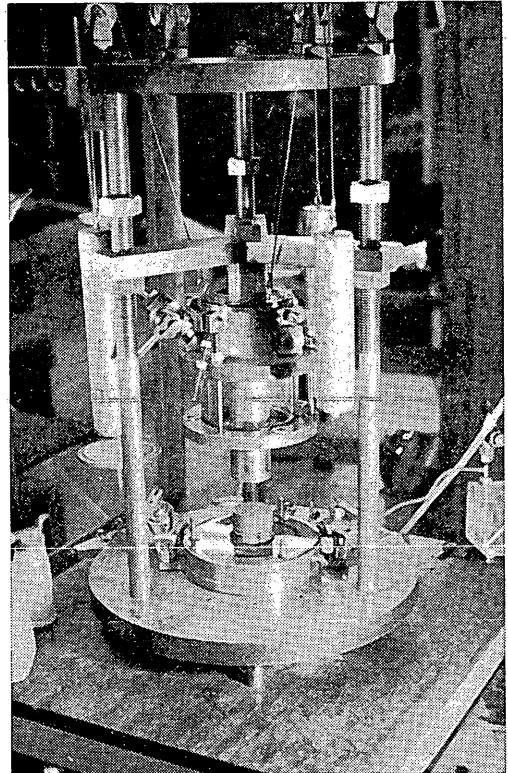
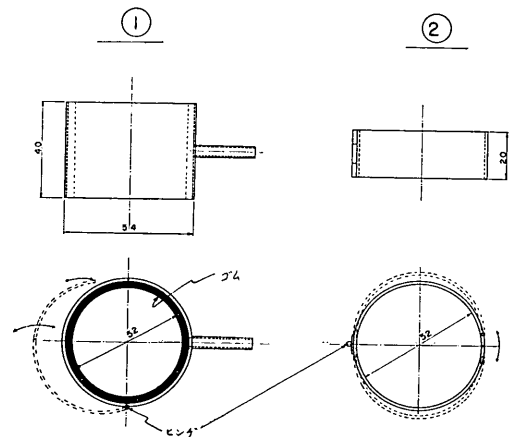


図-5 組立て装置と三軸圧密室



① ゴムスリーブ引張器 ② Oリング嵌め金具

図-6 供試体シール用器具

ストンを下げて供試体に正しく接するための操作は、3本の支柱の調整ナットによって行なう。

供試体をゴムスリーブでシールしたのち、側方ヒズミ

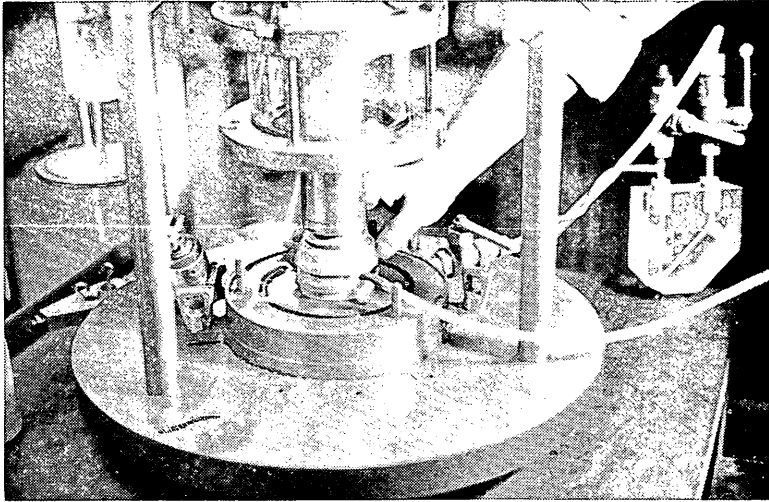


図-7 供試体のシール

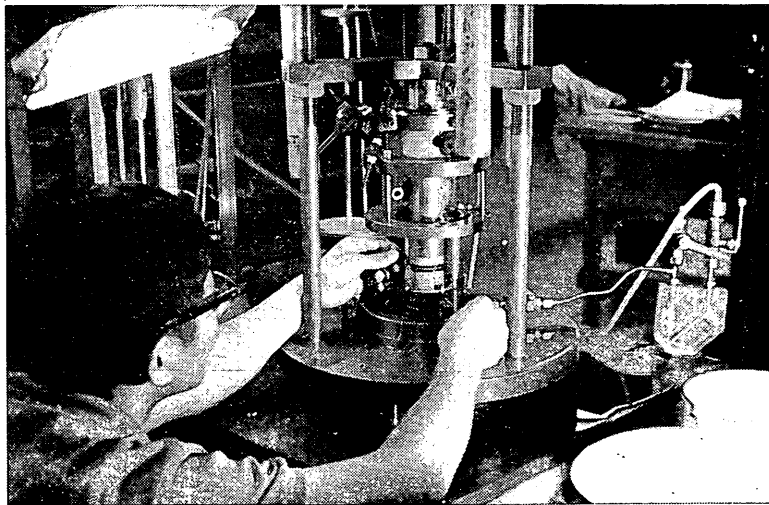


図-8 側方ヒズミ指示器取り付け

指示器⁹⁾をとりつける。この指示器はスプリングの作用で供試体側面に取り付けるようになってはいるが、今回の試験においては指示器のリングの3ヶ所に糸をつけてゴムOリングに吊るすことにした(図-8)。

次に圧密室上部を吊り下げてペダスタルにボルト締めする(図-9)。この状態においてはピストンの重量が供試体に加わっていないが、組み立てを終了した圧密室を載荷装置に移す前に載荷ピストンをセル上板に固定しておく必要がある。ピストンの固定のためには、図-10に

示すようなピストンホルダーおよびセル上板ホルダーを用いる。この2種類のホルダーで載荷ピストンを固定したのち、スペーサーキャップとピストンスペーサーをはずし、変形測定用アームとピストンキャップをつける。次に圧密室を載荷装置受け台に固定し、載荷ピストン用のカウンターウェイトを吊るしたのち、ピストンホルダーとセル上板ホルダーを取りはずす(図-11)。載荷レバーが水平の状態ではピストンに接するようにジャッキを調整して供試体のセットを完了する。

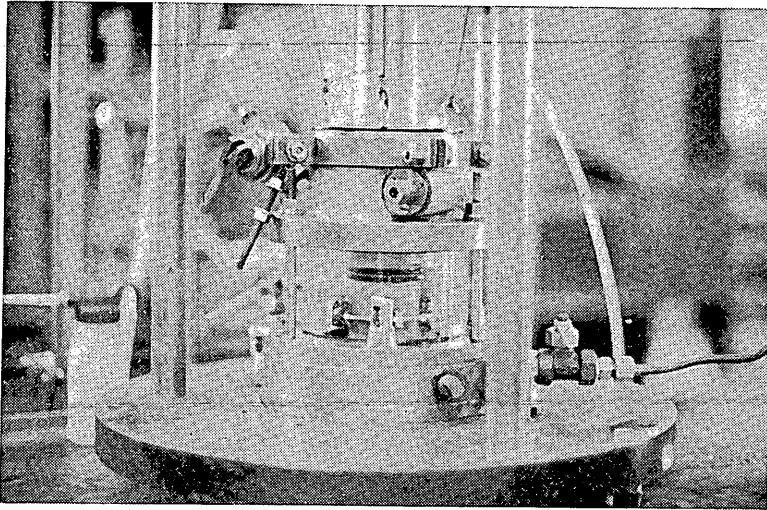


図-9 ペダスタルの固定

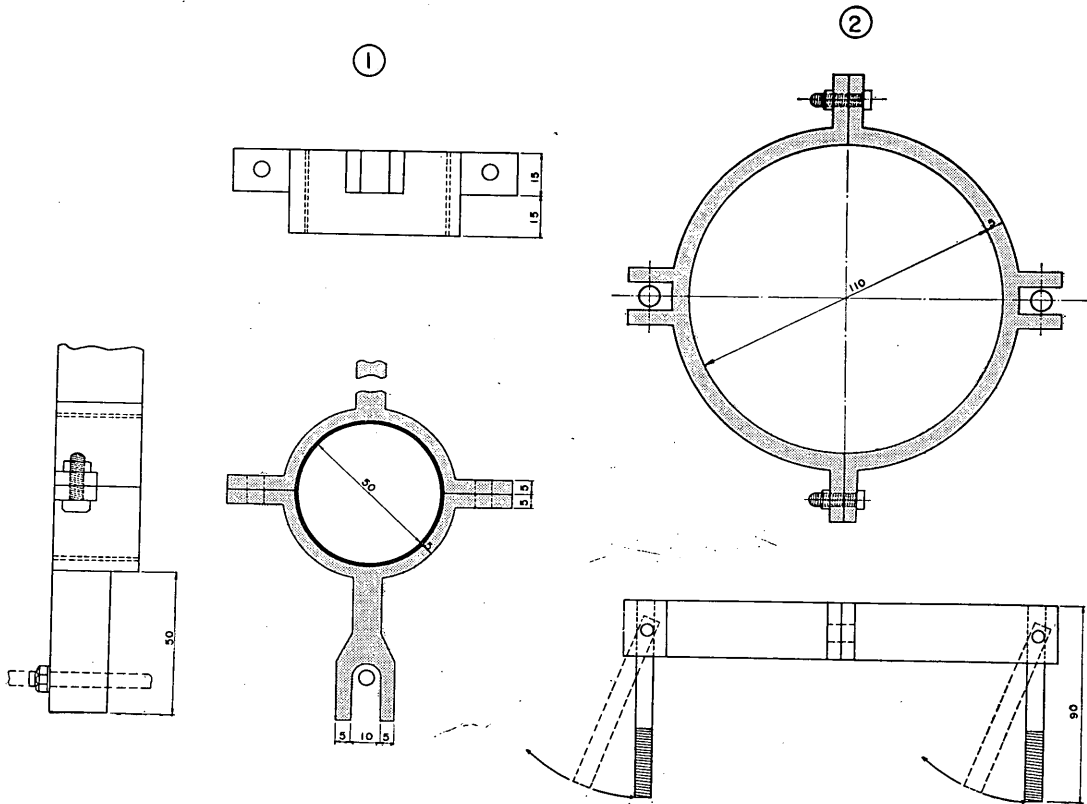
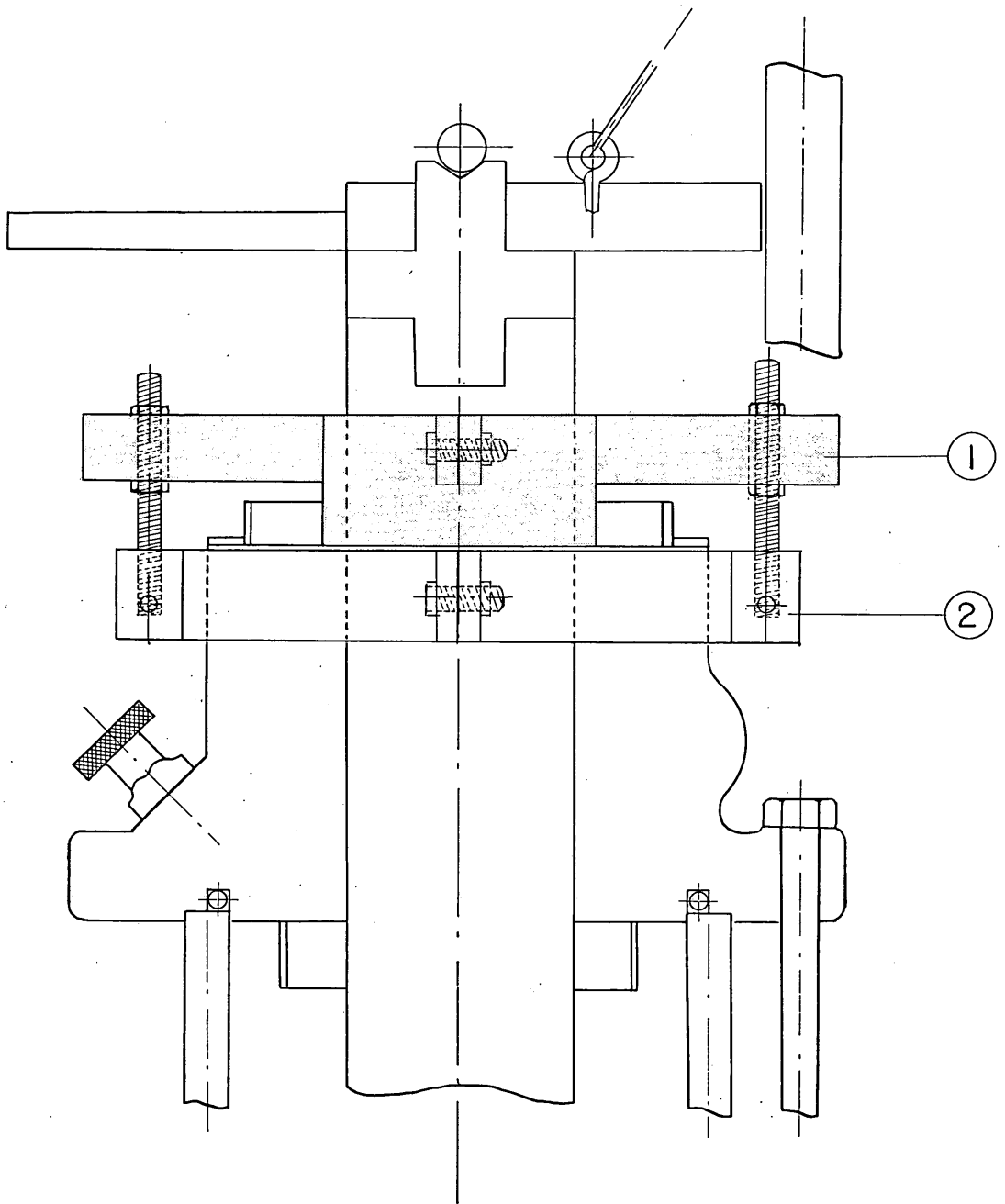


図-10(a)



(b)

① ピストンホルダー ② セル上板ホルダー

図-10 ホールダー

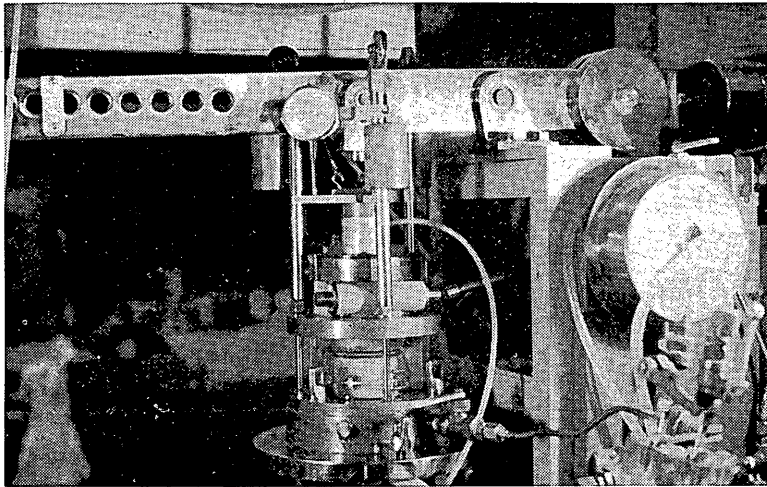


図-11 荷重装置と三軸圧密室

3.2. 調整と測定

三軸圧密試験装置の配管を図式的に示したものが図-12である。以下この図を用いて圧密試験方法の説明をしよう。

圧密圧力を加える以前に間げき圧および側圧の測定装置の零点を正しく決めておく必要がある。今回の試験における圧力の測定は、圧密圧力荷重直前の状態における供試体の中央高さに相当する水面を基準面として行なった。したがって、水銀マンオメーターの検定においてもこの水位に相当する読みをもって零点としている。

供試体をセットする前に間げき水圧測定装置のナルインディケーター、フラッシュを行なって管内の気泡を除去する。フラッシュをした後にV字型毛細管に入る水銀の量は微調整ができないため、次のような方法で基準線を決める。図-12を参照して、バルブ N_1 を閉じて N_2 と N_3 を開き、ポット中の自由水面を供試体中央高さに合わせる(図-13)。このときには水銀マンオメーターの水銀位置は必ずしも検定した零点と一致しない。そこで、この水銀位置が検定した零点に一致するようにコントロールシリンダーで圧力を調整し、そのときのナルインディケーター内の水銀位置をインディケーターの基準線とする。

供試体の軸方向変位は変形測定用アームの変位によって測定する。試験中は回転プッシュを動かすため、変形測定の零点は回転プッシュを動かしてからダイヤルゲージの零点を合わせる。回転プッシュの動きによってピストンが回転せぬように、供試体セットの場合のピストン

の方位は注意して決める必要がある。

所定の圧密圧力を加えるには、重錘を用いて段階的に圧力を増加してゆく。今回使用した重錘は1個 0.5 kg であり、 0.127 kg/cm^2 の圧密圧力に相当する。各段階の重錘荷重にともなって、 K_0 条件を充たすために側圧の制御が必要となる。 K_0 条件の成立は、側方ヒズミ指示器のスタンドパイプ中の水銀位置が変化しないことによって確かめられる。

側方ヒズミ指示器のスタンドパイプは高さ 3cm で等間隔に25の目盛がついている。検定の結果によれば、この1目盛の変化は供試体直径の変化量にして $1/100 \text{ mm}$ である。圧密圧力荷重中は ± 3 目盛程度の変化があったが、圧密開始後の動きは ± 2 目盛以下に制御することができた。圧密初期の状態ではわずかな側圧の変化に対してヒズミ指示器の感度は良好であるが、圧密終了段階に近づくにしたがってこの感度は低下する。

圧密圧力荷重中および圧密の初期段階においては、 K_0 条件をみたすための側圧の値の変化速さが大きいため、コントロールシリンダーによって圧力の手動制御を行なった。圧密の後期段階になってこの圧力の変化速さが小さくなれば、自己補償型定圧装置に切り換え、上部水銀ポットの位置の調整を行なうことにした。

今回の試験装置にはバックプレッシャーを加える配管がなされている。バックプレッシャー σ_b とは、供試体を飽和せしめたり、間げき水圧測定の精度を向上するために間げき水に外部的に加える定圧力のことである。この σ_b を加える場合には、土の有効応力の変化が生じない

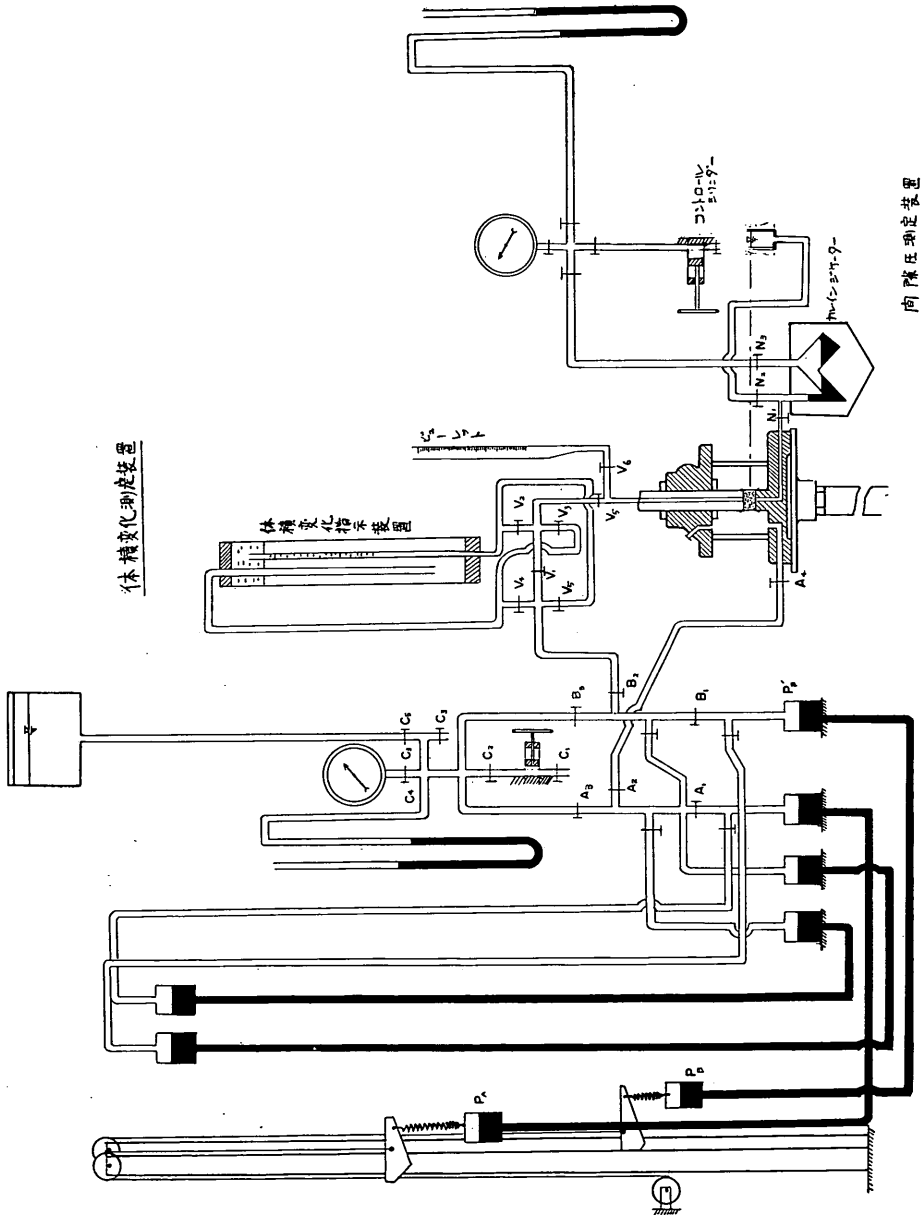


図-12 三軸圧密試験装置の配管図

圧力制御装置

向隙圧測定装置

体積変化測定装置

体積変化指示装置

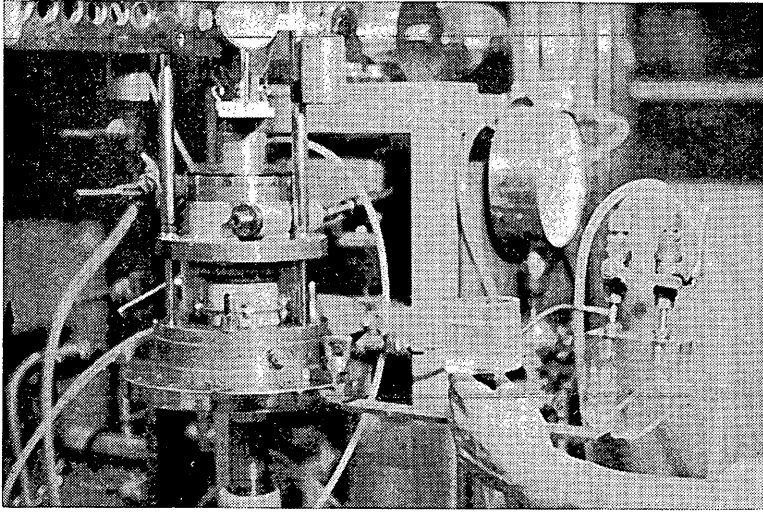


図-13 間げき圧測定装置の調整

ように、供試体外の拘束圧力も同時に σ_b だけ増加せしめる。

図-12 を参照して σ_b の加え方を説明しよう。まず圧力制御装置のバルブ $B_1, B_2, B_3, V_1, V_3, C_4, A_2, A_3, A_4$ を開き、水銀ポット P_B をゆっくりと上昇せしめて、水銀のヘッド差による圧力を土の間げき流体と圧密室内の水に同時に加える。この圧力が所定の値に達したときに水銀ポット P_B の位置を固定し、バルブ B_3 を閉じる。この状態における間げき圧は、バックプレッシャー σ_b に等しい。

上の操作が終了したらピストンに圧密圧力を加え、所要の側圧制御はバルブ C_2 を開いてコントロールシリンダーで行なうか、あるいはバルブ A_1 を開いて水銀ポット P_A の高さの調整によって行なわれる。

バックプレッシャーを加える場合、供試体の間げき水の排入量は体積変化指示装置によって測定しなければならない。この場合には排水管の端部の圧力が σ_b になっていることが必要であり、供試体よりの排水量と等しい量の水が水銀ポット P_B に流れ込むことになる。このためにポット P_B の水銀面は上昇するが、ポットを吊っているスプリングが伸びて、 P_B と P_B' の間の水銀のヘッド差は一定に保たれる。体積変化指示装置を用いるさいは、バルブ V_1 を閉じ V_2 と V_4 を開く。指示装置内のビューレットの読みが上限に達したら、バルブ V_2 と V_4 を閉じ、 V_3 と V_5 を開くことによってビューレット内を下降する読みをとればよい。

バックプレッシャーを加えない場合の体積変化測定は、バルブ B_2 と V_5 を閉じ、 V_6 を開いてビューレットを用いればよい。このビューレット内の水面には少量の灯油を浮かせて水の蒸発を防ぐ。

4. 試験結果

4.1. 試料

圧密試験に用いた試料は、名古屋港金城埠頭で採取した乱さない粘土である。試料はサンプルチューブ内にシールして運搬されたが、チューブ相互の間さらに同一のチューブ内でも場所によって、土の性質の変化があった。

供試体は主として C-2-7198 と C-3-7168 の2本の試料より作成した。この2つの試料の分類特性は次の通りである。

	C-2-7198	C-3-7168
土粒子比重 G_s	2.68	2.67
液性限界 $w_L(\%)$	76.2(70.6~81.3)	67.7(65.6~69.7)
塑性限界 $w_P(\%)$	34.3(32.9~35.2)	33.1(32.1~33.7)
塑性指数 I_P	41.9(37.7~46.3)	34.5(33.5~36.0)
含水比 $w(\%)$	87.6(87.1~88.0)	87.8(87.4~88.1)

この2つの試料の粒度分布曲線を図-14 に示す。

4.2. 圧密過程

今回実施した三軸圧密試験は、過圧密状態における静

土の三軸圧密試験 (第1報)

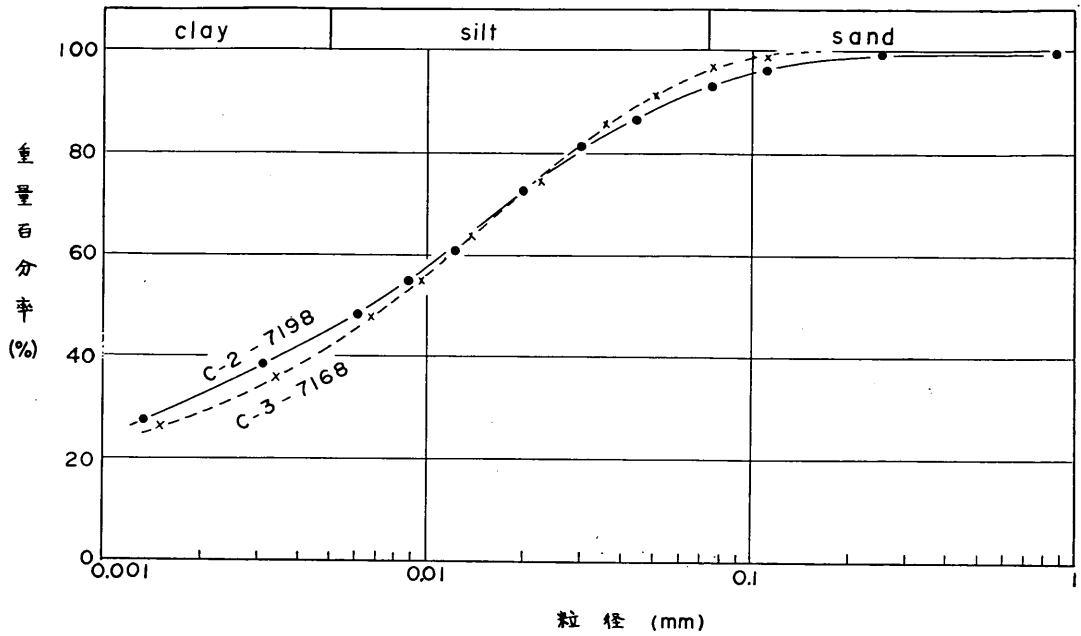


図-14 粒度分布曲線

止土圧係数の測定を主目的としたため、正規圧密状態を確実にする目的で最初から 3.0 kg/cm^2 という大きい圧密圧力を加えた。この圧力で圧密が終了したのち、圧密圧力を減じて膨張過程の観測に入った。したがって、段

階的に圧密圧力を増加するという普通の方法は採用しなかった。

供試体は直径 5 cm、高さ 2 cm のものを用いた。三軸圧密試験における測定項目は、供試体の圧縮量 d 、排

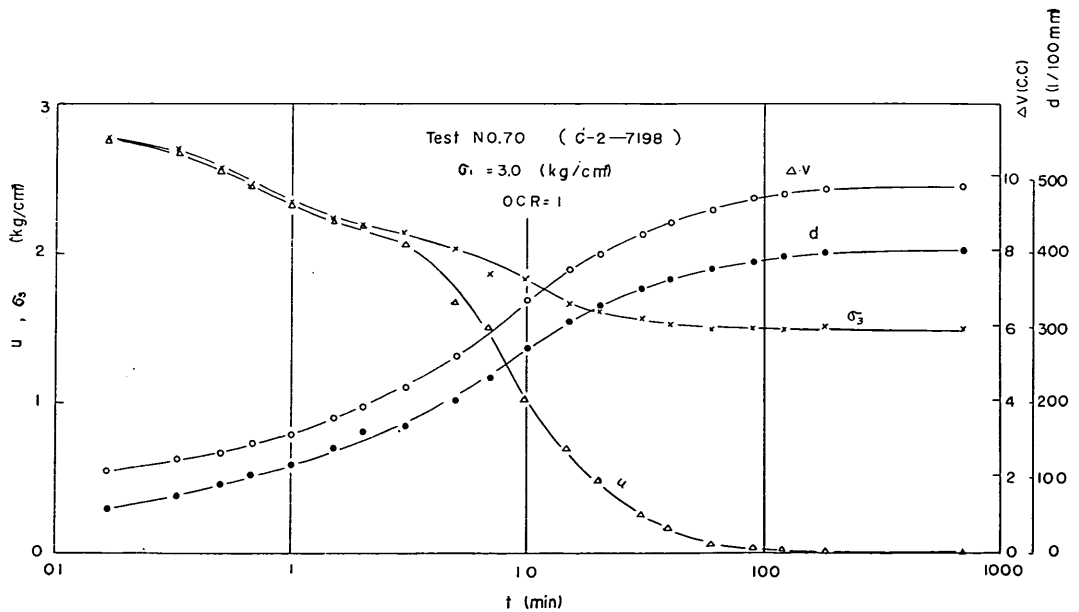


図-15 圧密過程における測定結果例

水量 ΔV 、供試体下端における間げき圧 u および K_0 条件をみとすための側圧の値 σ_3 である。今回の試験ではバックプレッシャーは使用せず、供試体よりの排水管の端部の圧力は大気圧とした。圧密中の状態変化の測定は、供試体よりの排水管のバルブを開いて10秒後より開始し12時間ないし24時間まで継続した。

測定結果の一例を図-15に示す。3.0 kg/cm² の圧密圧力を加えるため重量 0.5 kg の重錘を24個用いたが、載荷途中でも K_0 条件をみとすための圧密室内水圧の制御を行なう必要があり、この載荷には約3分間を要した。載荷中は供試体の排水管を閉じているが、試験機の機構上の理由から、供試体上端面とバルブの間に約1.5 m のプラスチックチューブを使用しているため、載荷中にもある程度の供試体の圧縮が認められた。載荷途中に生じた供試体の圧縮量は 0.25~0.75 mm であり軸ヒズミにして 1.25%~3.75% の範囲であった。一方排水量はプラスチックチューブの端のビューレットで観測するた

め、チューブの膨張の影響は直接に測定結果には入らない。

図-15 より分るように、供試体圧縮量 d と時間の関係は、排水量の場合に比してパラつきが大きい。これは回転ブッシュの影響であると思われる。すなわち、ピストンと回転ブッシュの中心軸の一致が悪いため、毎分1回転をする間に変形測定用アームには約0.1 mm の周期的上下動が認められた。圧縮量と排水量の測定精度の相違は図-16に示す \sqrt{t} fitting のさいにも明瞭に現われる。図-15 に示したように、今回の試験結果に対して $\log t$ 法による fitting は適用し難いため、圧密理論による解析のためにはすべて \sqrt{t} 法による fitting を行なった。そのさいには、図-16 に示すように $\sqrt{t} \sim \Delta V$ の関係より求める方が信頼性が高い。

K_0 条件がみとされている場合、供試体断面積を A_0 (cm²)、圧縮量を d (cm)、排水量を ΔV (c.c.) とすれば $A_0 d = \Delta V$ となるはずである。供試体直径が 5 cm であ

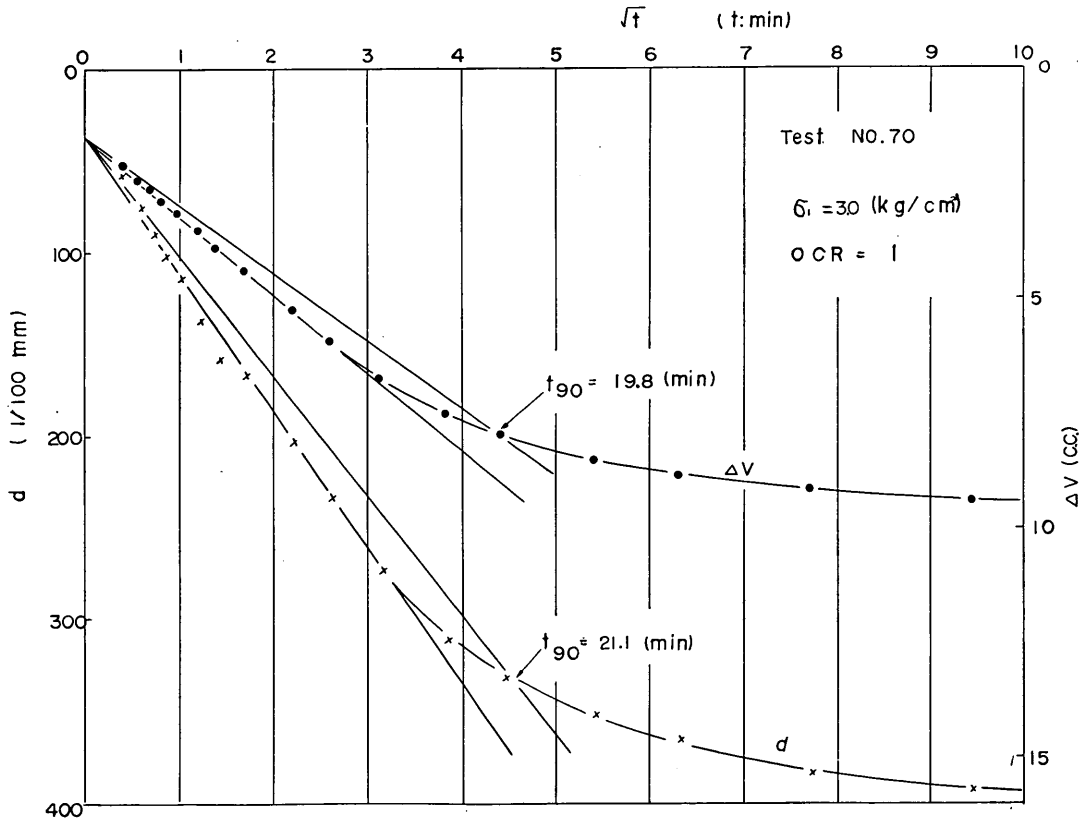


図-16 圧密過程における \sqrt{t} fitting 例

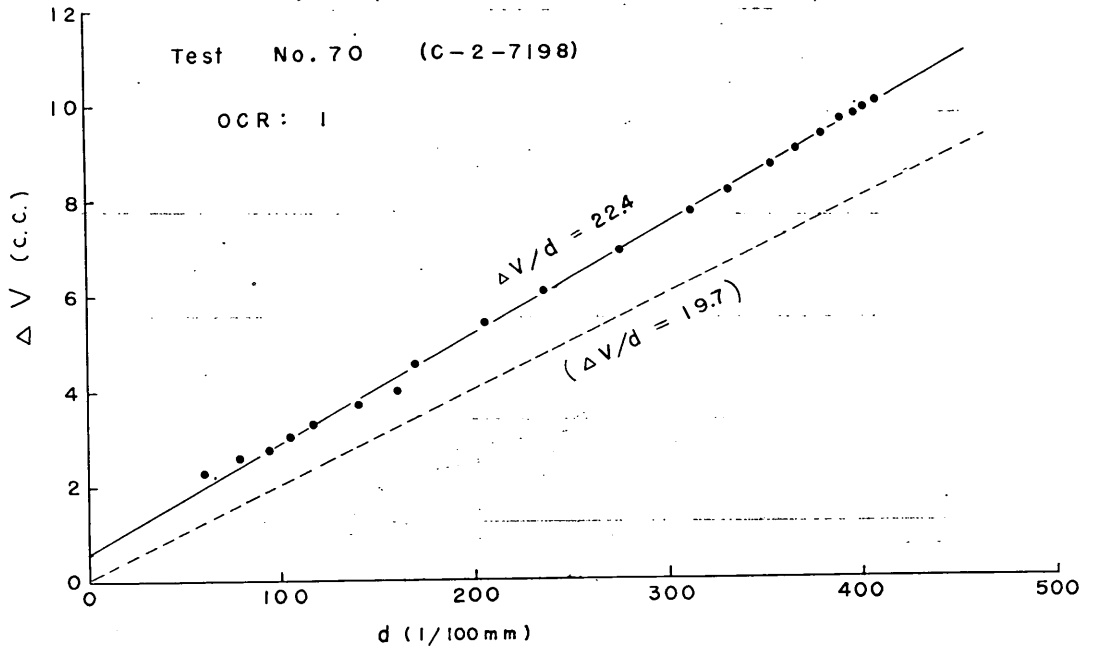


図-17 圧縮量と排水量の関係

れば A_0 は 19.64 cm となるが、実測の平均は $A_0 \approx 19.7 \text{ cm}^2$ であった。図-17 は $d \sim \Delta V$ の関係を示したものであるが、 $\Delta V/d = 19.7$ となるはずのものが、この場合には 22.4 となっている。8個の供試体についての $\Delta V/d$ の平均値は 22.9 であった。このような $\Delta V/d$ 値の相違の原因としては、ビューレットの目盛の精度の他にプラスチックの排水チューブの変形が考えられる。排水開始前に約 3.0 kg/cm^2 に上昇したチューブ内の水圧は、排水開始と同時に大気圧になるので、圧密過程においてチューブは時間とともに収縮をすることが考えられる。

他の原因としては、供試体内部の有効応力の不均等性が考えられる。供試体上面では常に $u=0$ であるのに反し、供試体下部では u の消散が遅く、したがって有効応力は上部で大きく下部で小さい。この結果、供試体上部は下部に比して圧縮量が大きくなる傾向がある。今回の試験では $\sigma_1 = 3.0 \text{ kg/cm}^2$ という大きな圧力を用いているので、供試体中央で K_0 条件をみたしているとはいえ、供試体高さ方向の圧縮量の相違はかなり大きいものと考えられる。

図-17 に示したように、実測された ΔV と d の関係は K_0 条件より決まるものとは多少異なっている。しかし、

圧密終了の値をそれぞれ $\Delta V_f, d_f$ とした場合、平均圧密度の尺度となる $\Delta V_f/\Delta V_f$ および d'/d_f と t の間の関係は実用上一致している。ここに $d', \Delta V'$ は、 \sqrt{t} 法による初期補正量を $d_0, \Delta V_0$ として、 $d' = d - d_0, \Delta V' = \Delta V - \Delta V_0$ である。また図-16 に示したように \sqrt{t} 法で求めた t_{90} の値も、普通の圧密試験の精度を考えれば一致しているといえよう。

圧密圧力の荷重は非排水条件のもとで段階的に行なうが、荷重中 K_0 条件を保つように側圧 σ_3 を制御している。荷重終了時の軸圧 σ_1 に対する側圧 σ_3 の比、すなわち初期の静止土圧係数は $0.984 \sim 1.017$ の範囲にありその平均は 0.995 であった。一方、圧密圧力荷重中の供試体中の間げき水圧は圧力とともに増加する。荷重終了時に $K_0 \approx 1.0$ であるから、この場合には供試体に等方圧力 σ_1 が加わっていることになる。等方圧 σ_1 のもとで発生した間げき圧と圧力の比 u/σ_1 は間げき圧係数 B といわれるものである。実測の結果、間げき圧係数 B の値は $0.98 \sim 1.02$ の間にあり、平均は 1.0 であった。 $B > 1.0$ となったのは圧力測定上の誤差によるものである。初期静止土圧係数と間げき圧係数がともに 1.0 であることは、試料が飽和していることを示すものである。

供試体中の間げき水圧は圧密の進行とともに減少す

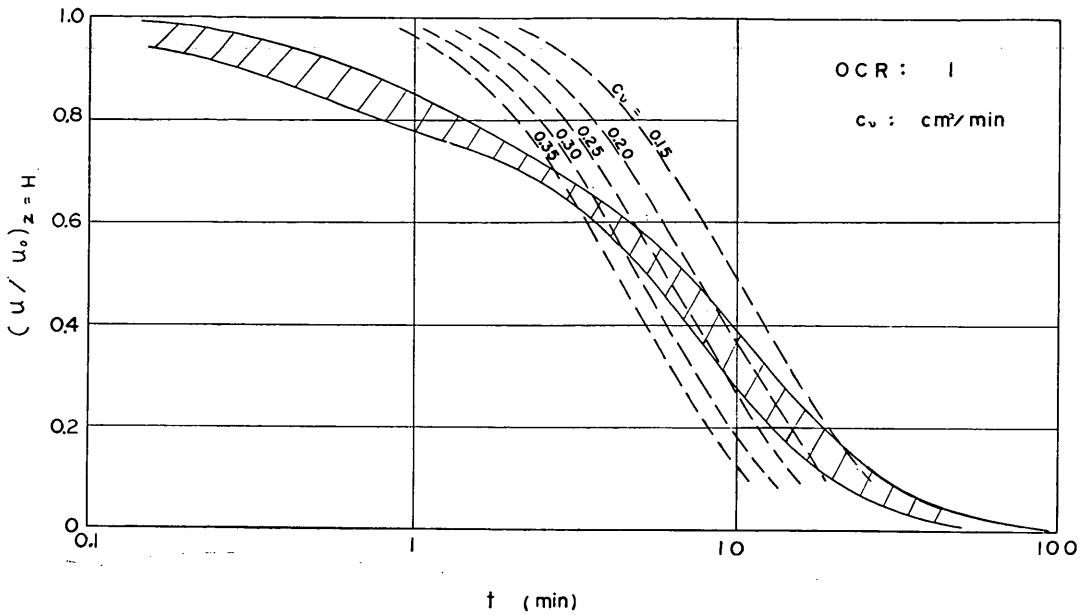


図-18 間げき圧測定結果

る。図-18 は供試体下端で測定した間げき圧の時間的減少を示したもので、図中の斜線を引いた領域は測定値のバラつきの範囲を示したものである。間げき水圧の測定は零位方式によっているので、ここに示した間げき水圧は不透水面における値ということになる。図中に破線で示した曲線は、種々の圧密係数値に対応して Terzaghi の一次元圧密理論より求めた不透水面における間げき水

圧の減少状況である。図より分るように、実測間げき水圧の消散は圧密理論と較べて圧密初期に早く後期になって遅れている。このような理論値との相違の原因の一つは排水チューブの膨張であろう。このチューブの膨張によって、載荷中にすでにある程度の圧密が生じていたことが考えられる。

圧密初期には 供試体上面で $u=0$ ，下面で $u=3.0$

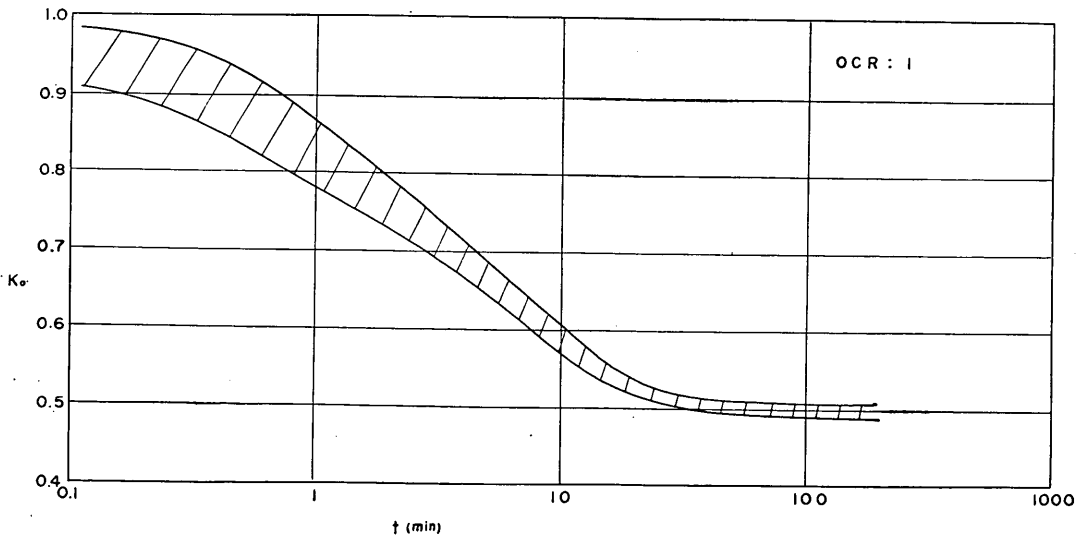


図-19 静止土圧係数の時間的变化

土の三軸圧密試験 (第1報)

kg/cm² となり水圧の勾配は非常に大きい。図-18 に示したような実測値と理論値の差の原因として過大な水圧勾配ということも考えられるが、前に述べた排水量と圧縮量の関係とともに今後の問題として残されている。

圧密の進行とともに K_0 条件をみとすための側圧 σ_3 も変化する。この側圧の変化を $K_0 = \sigma_3 / \sigma_1$ として表わしたものを図-19 に示す。図中の斜線部分は実測値のパラッキの範囲を示したものである。今回使用した試料についての静止土圧係数と平均圧密度の関係は図-20 のようになる。平均圧密度を求めるための圧密係数は、 \sqrt{t} 法による fitting の結果の平均として $c_v = 0.2 \text{ cm}^2/\text{min}$ としてある。圧密終了時の静止土圧係数は 0.5 前後となっているが、正規圧密粘土の場合に $K_0 \approx 0.5$ となることは一般に認められている⁵⁾⁷⁾⁸⁾。

次に三軸圧密試験と標準的圧密試験の比較について説明しよう。標準的圧密試験では浮動型リングを用い、供試体は直径 6 cm、高さ 2 cm であった。試験条件を合わせるため、標準圧密においても $\sigma_1 = 3.0 \text{ kg/cm}^2$ の圧密圧力を一時的に加えた。前にも述べたように試料の性質は同じサンプル・チューブの中でも異なることがあるので、比較試験のため供試体は近接した部分よりとるように注意した。

三軸圧密および標準圧密の両試験における供試体圧縮量と時間の関係を図-21 に示す。ここに用いた圧縮量 d' は \sqrt{t} 法によって初期補正を行ない $d' = d - d_0$ としたものである。ここに示した試験結果は C-3-7198 の試料についてのものであるが、初期補正量 d_0 の大きさは、標準圧密で 0.35~0.45 mm であるのに対し、三軸圧密

では 0.85~0.88 mm と大きかった。ただし、これは一般的なものとは思われず、C-2-7168 の試料を用いた場合の d_0 は、標準圧密で 0.35~0.42 mm なのに対し三軸圧密では 0.33~0.38 mm であった。ただし三軸圧密の場合には、前にも述べたように載荷中にも 0.25~0.75 mm の圧縮が生じているので、圧密開始時の供試体高さは三軸圧密の方が小さい。

標準圧密試験では供試体の圧縮量を測定するだけであり、その結果から Terzaghi の圧密理論によって圧密係数や体積圧縮係数を求めるのである。そこで両者の結果

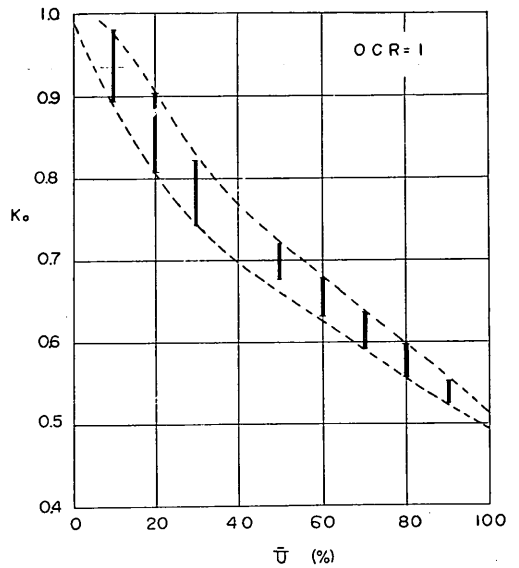


図-20 平均圧密度と静止土圧係数の関係

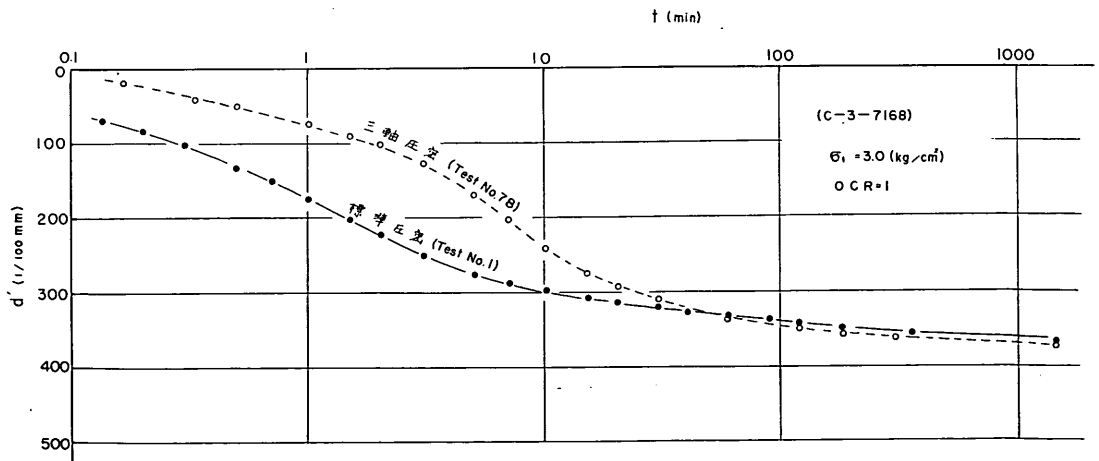


図-21 供試体圧縮量と時間の関係

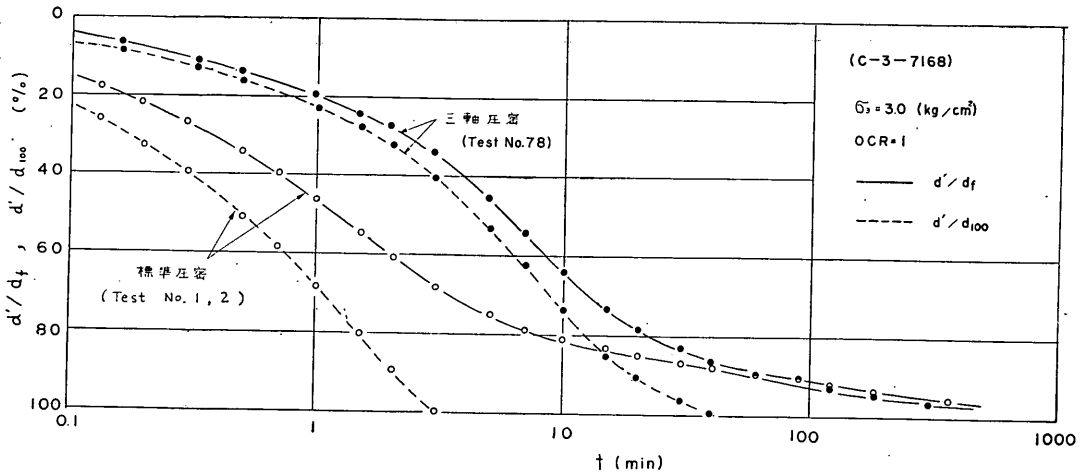


図-22 平均圧密度と時間の関係

を比較するため、圧縮量の測定結果のみに着目してみよう。図-22 は最終圧縮量に対する比として表わした平均圧密度 (\bar{U}) と時間の関係を示したものである。図中の実線は24時間の間に生じた圧縮量 d_f に対する比として表わした場合で、破線は一次圧密に相当する圧縮量 d_{100} を考えた場合のものである。 d_{100} の値は、 \sqrt{t} 法の fitting で求めた d_0 と d_{90} より $d_{100} = \frac{10}{9}(d_{90} - d_0)$ として求めた。 d_f については初期補正量 d_0 を差引いてあり図中の d' は $d - d_0$ である。三軸圧密と標準圧密のおのおのに対する $\bar{U} \sim t$ 曲線の位置が異なっているのは、最大排水長さ H の相違によるものである。三軸圧密では $H \approx$

2cm であるのに対し、上下面より排水する標準圧密では $H \approx 1$ cm である。

圧密係数 c_v を求めるには、ある与えられた最大排水長さ H に対して種々の c_v 値を仮定して、理論的な $\bar{U} \sim t$ 曲線を描き、図-22 の $d'/d_{100} \sim t$ 曲線と比較すればよい。Terzaghi の圧密理論は一次圧密のみを考えるものであるから、この比較に用いるものは二次圧密量を補正した d'/d_{100} すなわち図中の破線である。標準圧密および三軸圧密の各供試体の初期高さより決まる最大排水長さ H に対応する理論的な $\bar{U} \sim t$ 曲線を 図-23 に示す。この図には 図-22 の測定値もプロットしてある。こ

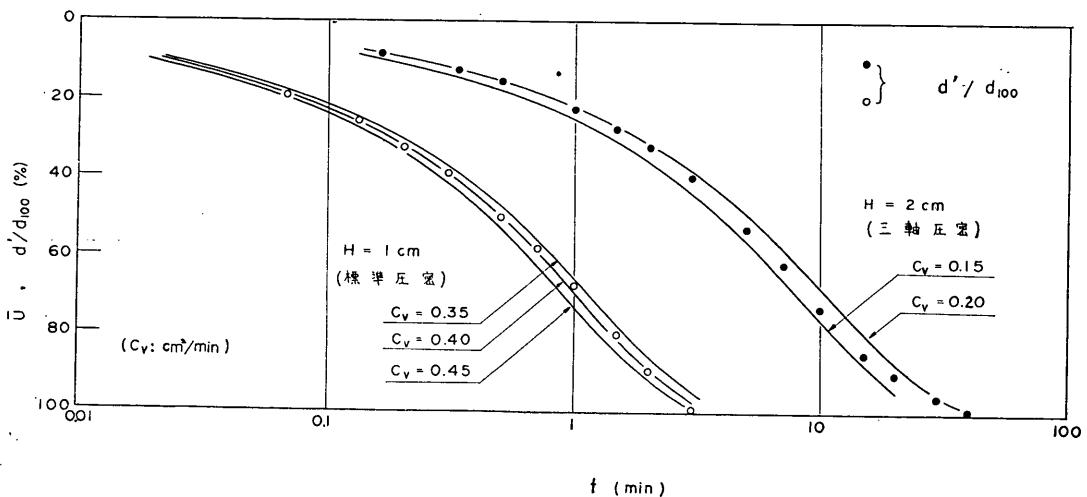


図-23 圧密係数の決定

の比較の結果、C-3-7198 の試料については、標準圧密の場合に $c_v \approx 0.40 \text{ cm}^2/\text{min}$ であり三軸圧密では $c_v \approx 0.18 \text{ cm}^2/\text{min}$ である。C-2-7168 の試料の c_v 値についてもほぼ同様な結果を得ている。

上述の比較結果より、今回の試料の三軸圧密試験による c_v 値は、標準圧密試験結果より求めた値の約半分であるといえる。圧密試験結果を \sqrt{t} 法で整理して c_v 値を求めるには、 $c_v t_{90}/H^2 = T_{90} = 0.848$ の関係を用いるのが普通である。ここに t_{90} および T_{90} は、平均圧密度 $\bar{U} = 90\%$ に対応する時間および時間係数である。しかし、この方法では $\bar{U} \sim t$ 曲線上の $\bar{U} = 90\%$ の点の比較をするだけである。今回のような c_v 決定法によれば圧密の全過程を考えることになるので、より合理的な c_v 値を求めることができる。

標準圧密および三軸圧密のおのおのより求めた c_v 値の相違は、図-22 の破線を見ても明らかであろう。すなわち、圧密の進行速さは最大排水長さ H の2乗に反比例するから、 c_v 値が等しいものとすれば、ある圧密度に対応する時間はおのおのの試験の供試体の H の2乗の比となっていなければならない。標準圧密供試体の場合は $H = 1 \text{ cm}$ で三軸圧密において $H = 2 \text{ cm}$ であることから、上述の時間の比は $1:4$ となるはずである。しかし、図-22 によればこの時間の比はほぼ $1:10$ となっている。

次に試験結果より描いた $\bar{U} \sim t$ 曲線の形を検討してみよう。24時間圧密に対応する $\bar{U} \sim t$ 曲線すなわち $d'/d_f \sim t$ 曲線と理論的な曲線を比べてみると、 \bar{U} がある値以上になると $d'/d_f \sim t$ 曲線は理論曲線からはずれてくる。これが二次圧密の影響である。二次圧密部分の圧縮量を補正した $d'/d_{100} \sim t$ 曲線はほぼ全長にわたって理論曲線と一致する。図-22 に示した $d'/d_f \sim t$ 曲線の場合について理論曲線と一致するのは、標準圧密の場合に $d'/d_f \leq 40\%$ であり、三軸圧密では $d'/d_f \approx 70\%$ までかなりよい一致を示している。C-2-7168 の試料についても同様な結果が得られている。

二次圧密現象については解明すべき問題が残されているが、この現象の原因の一つとして供試体に働らく側面摩擦が挙げられている⁹⁾。上の結果によれば、側面摩擦のない三軸圧密試においては、二次圧密量の相対的大きさが明らかに減少するといえる。

体積圧縮係数 m_v について、日本工業規格 JISA 1217 では、24時間荷荷によって生ずる全圧縮量によって求めることが規定されている。この方法で求めた m_v 値は、

図-21 に示したように両試験における d_f の大きさがほぼ等しいことから、三軸圧密試験における荷荷中の圧縮量を考えてもその値はほぼ等しいものと思われる。ただし一次圧密のみに着目すれば、 $\bar{U} \approx 100\%$ に到達する時間に対応する圧縮量の大きさが異なることから、三軸圧密の方がかなり大きい m_v 値を与えることになる。

4.3. 膨張過程

間げき水圧が完全に消散した時をもって圧密の終了とし、直ちに膨張試験に移った。圧密圧力を減らす場合は、初期の荷荷と同様に重錘を一個づつ除いて行くが、除荷中も K_0 条件をみたすように σ_3 を制御した。圧密終了から除荷終了までの間は、供試体よりの排水チューブは閉じておく。

圧密終了後に圧密圧力のある値に減ざると供試体は膨張するが、膨張を終了した土を過圧密の状態にあるという。過圧密の程度は過圧密比 (OCR) の値で表わす。過圧密比 OCR は膨張過程における σ_1 と膨張前の圧密過程における σ_1 の比である。今回の膨張試験で採用した最大の過圧密比は 30 である。この場合は 3.0 kg/cm^2 の σ_1 を 0.1 kg/cm^2 に減ざるのである。

膨張過程で測定した項目は、供試体の伸張量 d 、吸水量 ΔV 、間げき水圧 u 、および K_0 条件をみたすための側圧 σ_3 などである。圧密終了時に $u = 0$ となった間げき水圧は、除圧と同時に負圧となる。この負の間げき圧は膨張とともにその絶対値が減少し、膨張終了時に $u = 0$ にもどる。

膨張過程における測定結果の一例を図-24 に示す。OCR が小さい場合には d と ΔV の変化量が小さく、とくに回転プッシュによるピストンの上下動の大きさが d の全変化量に近くなることから、伸張量 d についての測定精度は低い。また OCR の大きい場合には d と ΔV の変化量は大きい、 σ_3 の絶対値が小さいため K_0 値の精度が低くなる。間げき水圧測定の精度は OCR の値に影響されることが少ない。測定された d と ΔV の関係の一例を図-25 に示す。 K_0 条件をみたした場合には 19.7 であるべき $\Delta V/d$ の値がかなり大きくなっている。膨張過程における $\Delta V/d$ の実測値は圧密過程におけるものより多少大きいようである。膨張の場合にも圧密時と同様に排水チューブの変形の影響が入ってくるものと思われる。

膨張は圧密の逆の現象であるが、その時間的な進行状態は圧密現象と同様に考えることができよう。 d および ΔV と \sqrt{t} の関係の一例を図-26 に示すが、圧密の場

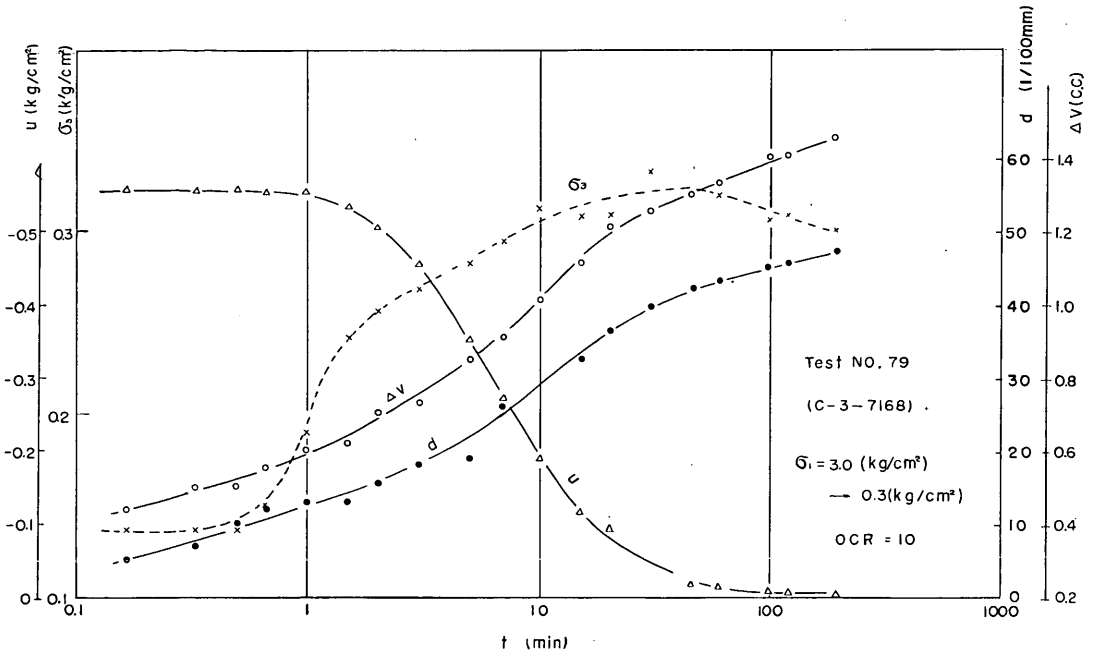


図-24 膨張過程における測定結果例

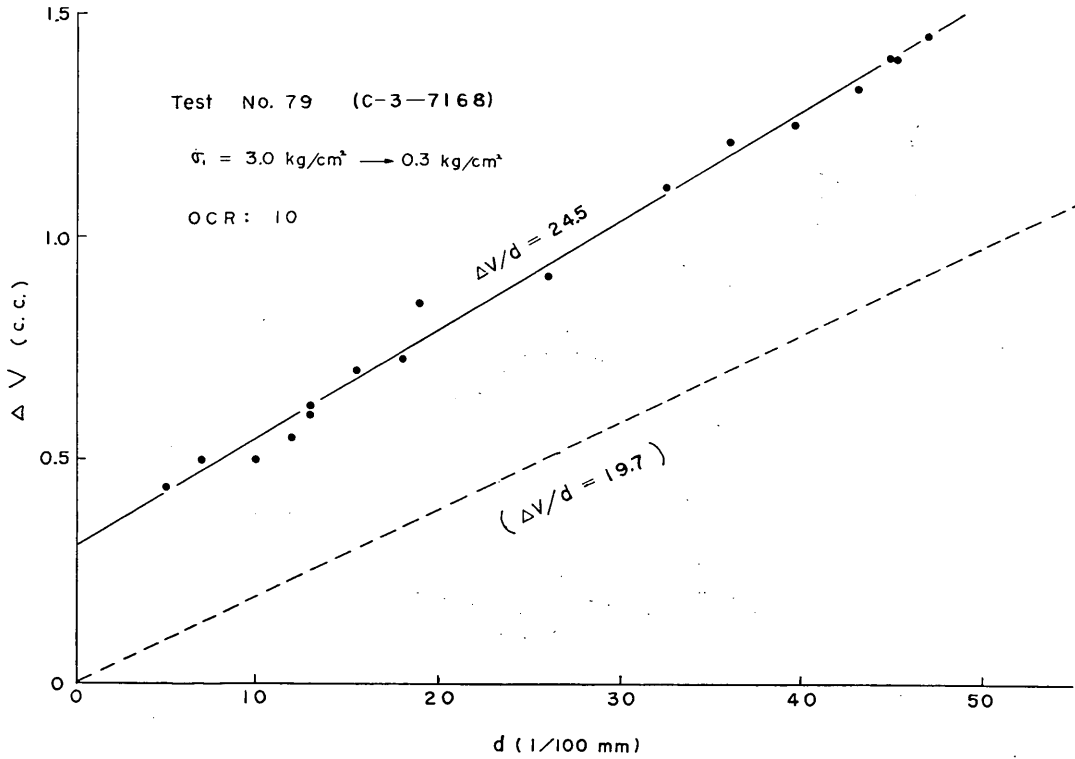


図-25 伸張量と吸水量の関係

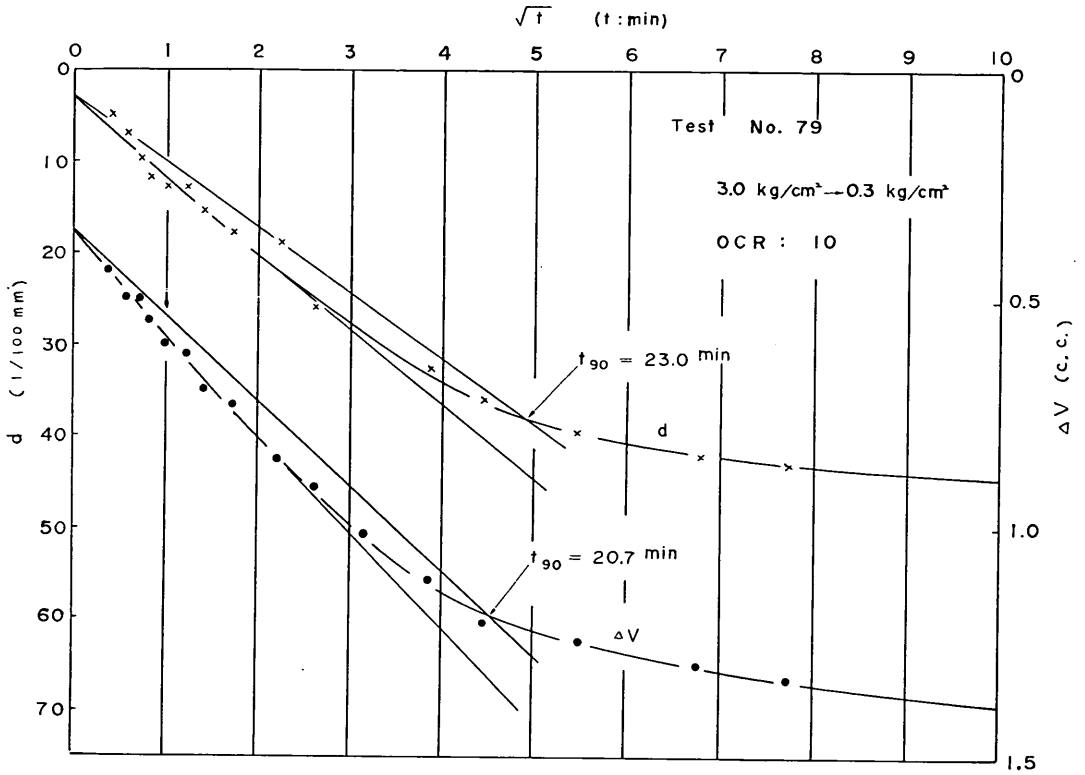


図-26 膨張過程における \sqrt{t} fitting 例

合と同様に膨張の初期の進行状況は \sqrt{t} に比例することが分かる。この図からも d の測定精度が ΔV の場合より低いことが分かるであろう。

除荷を終了した直後に発生した負の間げき水圧は、排水チューブを開くまでの間にその絶対値がやや減少する傾向があった。過圧密比と除荷直後の間げき水圧の関係を 図-27 に示す。図より分かるように間げき水圧の絶対値は $\log(\text{OCR})$ に対してほぼ直線的である。ここに示した結果は一段除荷の場合のみである。多段的に膨張を行なう場合、すなわちある OCR 値に対応して膨張を終了したのち、さらに圧力を減少せしめて次の膨張を行なうような場合には、第2段階以降の初期間げき水圧の絶対値は OCR 値によらずに 0.2 kg/cm^2 以下であった。

過圧密状態の土の静止土圧係数が正規圧密状態の場合のものより大きいことはすでに知られている¹⁰⁾。図-28 は今回の膨張試験における $K_0 \sim t$ 関係の実測例を示したものである。図中の斜線を引いた領域は、圧密試験で測定された K_0 値の範囲を表わしている。この図より、膨張過程における K_0 値は、その大きさと時間的変化状況

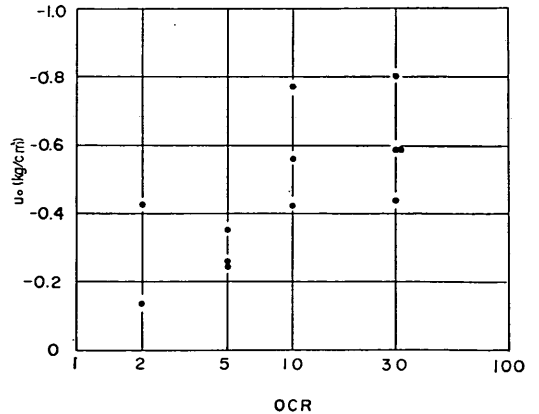


図-27 初期間げき圧と過圧密比の関係

のいずれもが圧密過程とは異なっていることが分かる。 K_0 値の測定精度が OCR の増大とともに低下するのは、 σ_3 の値そのものが小さくなるためである。OCR=30 の場合には K_0 の初期値が負となったこともあった。

一段除荷の場合について、膨張終了時の K_0 値との関

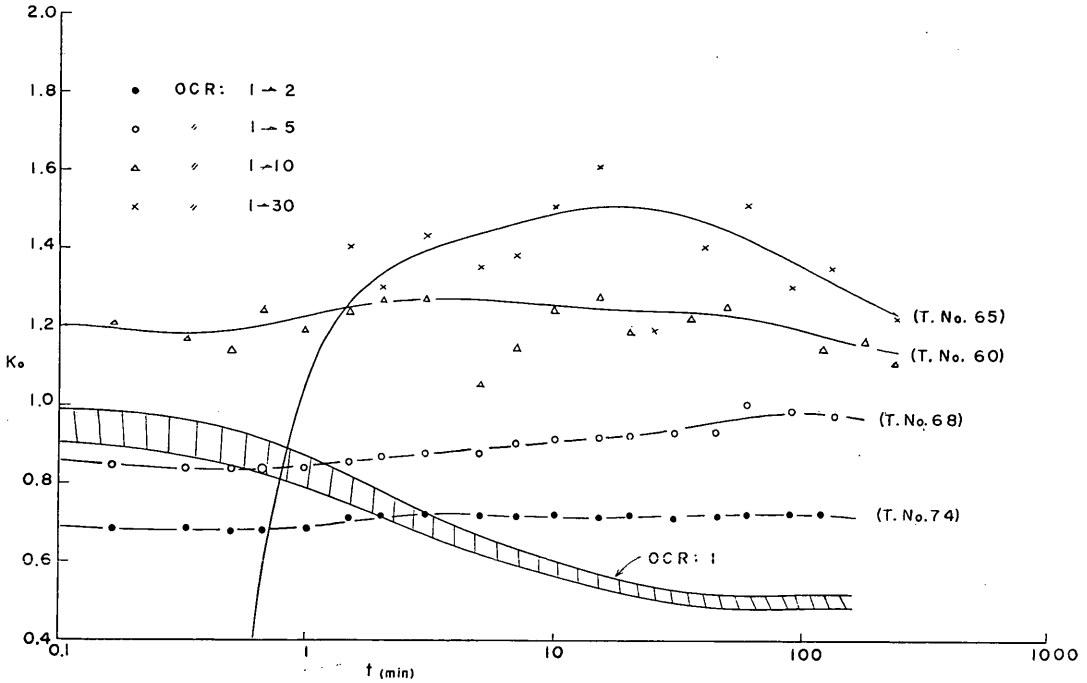


図-28 静止土圧係数の時間的变化

係を示したものが図-29である。OCR=30に対応する K_0 値にかなりのバラつきがあるが、 K_0 値がOCRの増大とともに大きくなる傾向は明瞭である。図中の2本の曲線は、Brooker等の実験結果⁸⁾およびLaddの報告した既往の結果¹¹⁾を表わしたものである。図より分かるように、今回の試験結果とBrookerやLaddらによる結果とはかなり異なっている。 K_0 値とOCRの関係は土の種類によって当然変わるものと考えられるが、土の

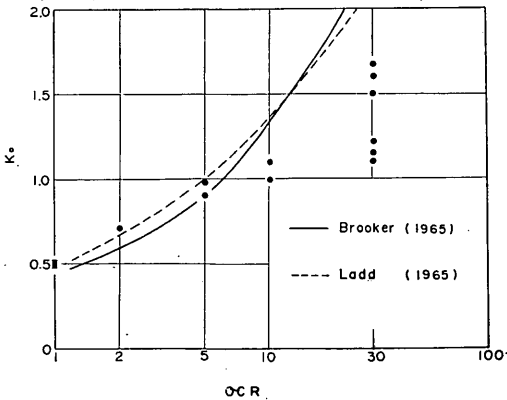


図-29 静止土圧係数と過圧密比の関係

分類特性と K_0 値の相関性を調べるためには、さらに多くの試験を行なうことが必要であろう。

次に膨張過程における標準圧密試験と三軸圧密試験の結果を比較してみよう。図-30はOCRが10および30の場合の供試体伸張量 d' と時間の関係を示したものである。この場合の d' は、圧密過程の場合と同様に \sqrt{t} 法によって d_0 の初期補正を行なったものである。

圧密過程と同様な方法によって求めた $d'/d_f \sim t$ および $d'/d_{100} \sim t$ の関係を図-31に示す。標準圧密および三軸圧密の両試験機による膨張過程において、 $d'/d_f \sim t$ 曲線の形と c_v 値の相対的關係に関してはいずれも圧密過程の場合と同様な傾向が現われている。すなわち、標準圧密における c_v 値(膨張係数)は三軸圧密におけるものよりも大きく、標準圧密における $d'/d_f \sim t$ 曲線は三軸圧密に比して小さな d'/d_f 値において理論的な $\bar{U} \sim t$ 曲線からはずれる。

今回の膨張試験の結果によれば、標準圧密試験機を用いた場合の膨張過程における c_v 値は圧密過程におけるものよりも大きく、三軸圧密試験機を用いた場合にはこれと反対な傾向が示されている。しかし、この傾向を結論づけるには試験の個数が少なすぎる。

土の三軸圧密試験 (第1報)

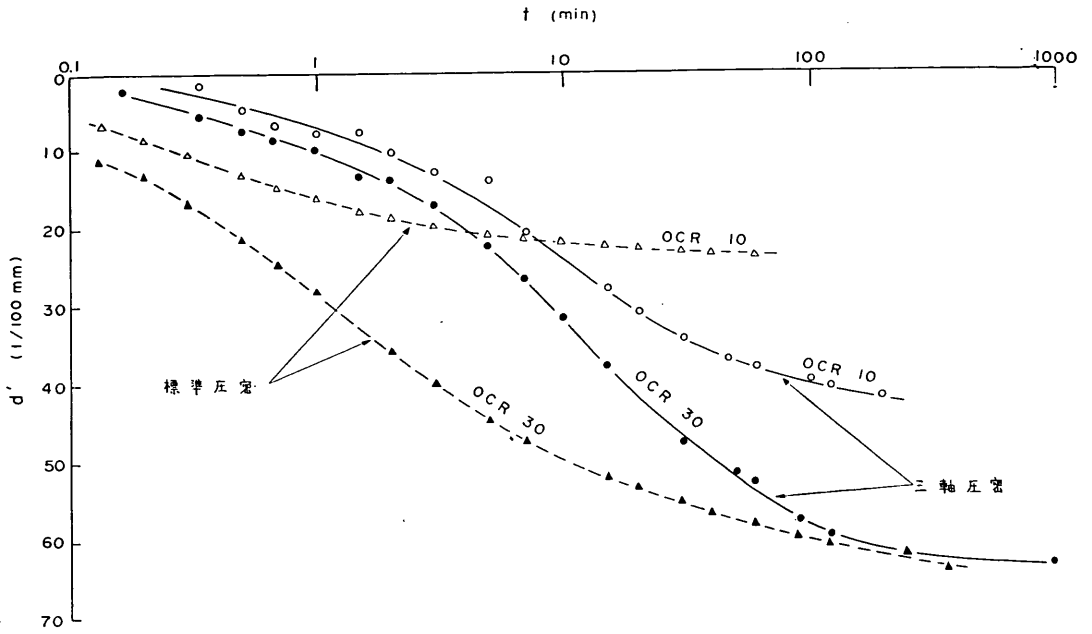


図-30 供試体伸張量と時間の関係

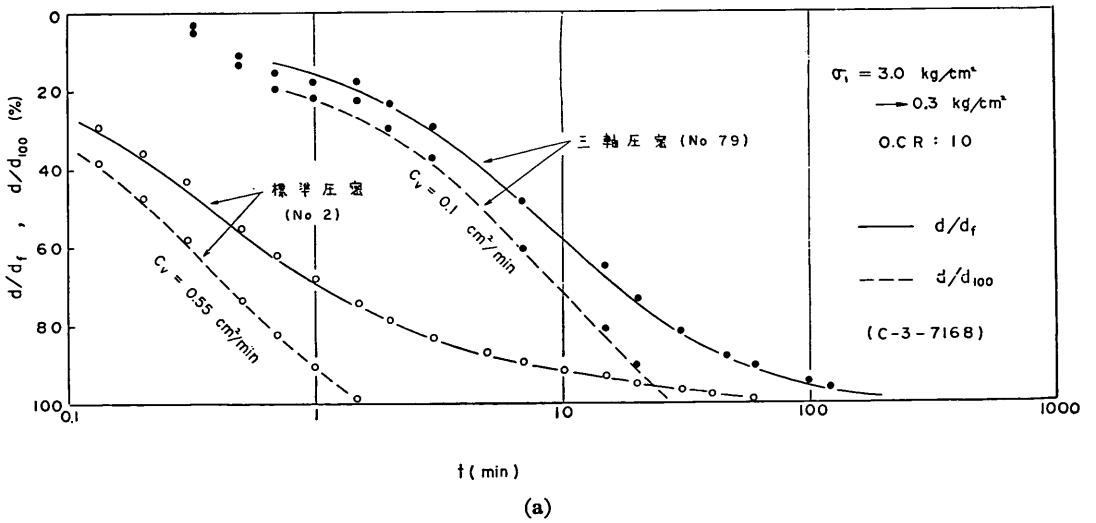


図-31 伸張量の比と時間の関係

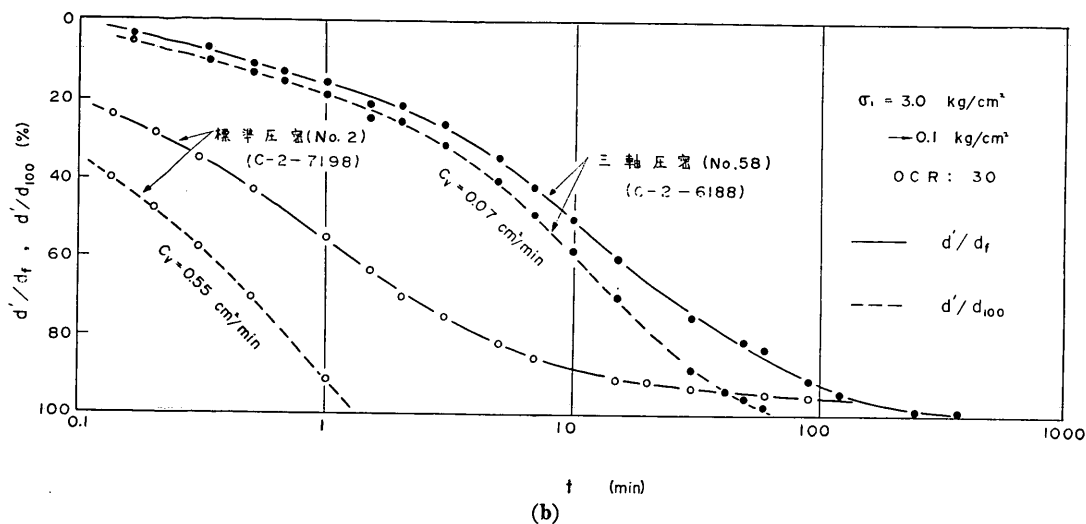


図-31 伸張量の比と時間の関係

5. 結 論

ここに報告した三軸圧密試験装置は、標準的な圧密試験装置に比してより厳密に一次元圧密の条件をみたしている。名古屋港金城埠頭地区の粘土試料を用いて実施した一連の試験結果より、次のことが結論できよう。

- 1) 圧密圧力と載荷時間を等しくした場合、三軸圧密において現われる二次圧密量は標準圧密におけるものよりかなり少ない。
- 2) 三軸圧密試験結果より求められる圧密係数の値は、同様な条件で行なった標準圧密試験で求められた値の約半分である。
- 3) 圧密終了後に圧密圧力を一定値に減じた場合の膨張の進行状況は、圧密過程における圧密の進行と同様に扱うことができる。
- 4) 正規圧密粘土の圧密過程における静止土圧係数は、圧密圧力載荷直後に $K_0 \approx 1.0$ であり、時間とともに減少して圧密終了時には $K_0 \approx 0.5$ となる。
- 5) 正規圧密粘土の膨張過程における静止土圧係数は、時間とともに多少増大するか、あるいは膨張終了以前に極大値を示す。
- 6) 膨張終了時の静止土圧係数は過圧密比とともに増大するが、著しく過圧密された状態の K_0 は欧米の粘土における測定結果に比して小さい。

6. あとがき

試験に使用した試料は乱さない粘土試料であるが、その採取および運搬の労をとって載いた第5港湾建設局調査設計室および名古屋港工事事務所に感謝の意を表したい。

圧密試験装置の整備と試験の実施においては、土性研究室の勝野克技官に負う所が大きい。併わせて感謝する次第である。

参 考 文 献

- 1) Taylor, D. W.: Research on consolidation of clays, Rept. MIT. Serial 82, pp. 147, 1942
- 2) Nakase, A.: Side-friction in conventional consolidation tests, Rept. Port & Harbour Research Institute., No. 3, pp. 24, 1963.
- 3) 門田博知: 一軸圧密試験における側面摩擦の影響, 第10回シンポジウム, 土質工学会, pp. 151~156, 1965.
- 4) Bishop, A. W. and D. J. Henkel: The measurement of soil properties in triaxial test, Edward Arnold, London, pp. 228, 1957.
- 5) 赤井浩一, 足立紀尚: 有効応力よりみた飽和粘土の一次元圧密と強度特性に関する研究, 土木学会論文集, No. 113, pp. 11~27, 1965.
- 6) 中瀬明男, 岸正平, 勝野克: 土の三軸圧縮試験(第1報), [港湾技術研究所報告, Vol. 4, No. 1, pp. 1~27, 1965
- 7) Tschebotarioff, G. P.: Soil mechanics, founda-

土の三軸圧密試験 (第1報)

- tions, and earth structures. McGraw-Hill, New York., pp. 250~252, 1951.
- 8) Brooker, E. W. and H. O. Ireland: Earth pressures at rest related to stress history, Canadian Geotechnical Journal, Vol. 2, No. 1, pp. 1~15. 1965.
- 9) 網干寿夫, 三笠正人: 土の圧縮と圧密, 土質工学ハンドブック第6章, 技報堂, pp. 135~166, 1965
- 10) Skempton, A. W.: Horizontal stresses in over-consolidated Eocene clay, Proc. 5th, Int. Conf. S.M.F.E., Vol. 1., pp. 351~357, 1961.
- 11) Ladd, C. C.: Stress-strain behaviour of anisotropically consolidated clays during undrained shear, Proc. 6th Int. Conf. S.M.F.E., Vol. 1, pp. 282~286. 1965.

記号表

B : 間げき圧係数
 c_0 : 圧密係数
 d : 供試体の軸方向変形量
 d' : $(d-d_0)$
 d_f : 圧密(膨張)終了時の d (d_0 補正あり)
 d_0 : d の初期補正量
 d_{90} : 90% 圧密に対応する d
 d_{100} : $\frac{10}{9}(d_{90}-d_0)$
 G_s : 土粒子比重

H : 最大排水長さ
 I_P : 塑性指数
 K : 土圧係数
 K_0 : 静止土圧係数
OCR: 過圧密比
 p_h : 水平圧力
 p_v : 鉛直圧力
 t : 時間
 t_{90} : 90% 圧密に対応する時間
 T_{90} : 90% 圧密に対応する時間係数
 u : 間げき圧
 u_0 : 初期間げき圧
 \bar{U} : 平均圧密度
 w : 含水比
 w_L : 液性限界
 w_P : 塑性限界
 ΔV : 供試体の体積変化量
 $\Delta V'$: $(\Delta V - \Delta V_0)$
 ΔV_f : 圧密(膨張)終了時の ΔV (ΔV_0 補正あり)
 ΔV_0 : ΔV の初期補正量
 σ_1 : 供試体の軸圧力
 σ_3 : 圧密室内の流体圧
 σ_b : バック・プレッシャー

(43.4.20 受付)