

恒圧圧縮試験装置の製作について

山野 隆康* 坂田 資宏**

1. ま え が き

筆者らは、締固めた不飽和粘性土の強度特性を研究するうえで、従来から用いられている一面セン断や三軸試験機の機能が、十分とはいえない現状を打開する一つの試みとして、標題の装置を製作した。この呼び名はまだ仮のもので、内容的に確に表わしてはいないが、一応三軸圧縮を含む広範な変形挙動を、精密に測定するための装置ということができる。

フィルダムなど、転圧締固めをしながら築造する土構造物の安定解析には、モール・クーロンの破壊基準により定義される粘着力 C と、内部摩擦角 ϕ が常用されており、その多くがローム系の細粒土とレキの混合物であることから、 $C \cdot \phi$ 型のセン断抵抗を示すものとして扱われている。すなわち、飽和した軟弱粘土のような、 $\phi = 0$ methodの対象となるものでなく、また清浄な砂のように $C = 0$ として扱うべき材料でもない。そして現実には最も使用頻度が高く、最も普遍的な状態である不飽和粘性土のセン断問題が、比較的等閑に付されている結果、調査試験の実務を担当する者にしばしば、困惑と不便を与えているのである。

その第一はセン断抵抗が、土の状態の変化によって変わるものであることはわかっていながら、ある一つの状態について求めたセン断抵抗力から、他のそれを類推するなんらの手順も示されていないことである。土の状態は、一応間ゲキ比 e と飽和度 S_r だけで規定できるが $e = \text{const}$ のもとで、 S_r の変化が C_u 、 ϕ_u をどのように変動させるかということや、そのような $C_u \cdot \phi_u$ の変化に関する集団が、 e の変化にどう対応していくのか、ということについて、現在のところ模式的な説明すらなされていないのである。

第二は、三軸試験の結果を有効応力に基づいて整理し、 C' 、 ϕ' という形で安定解析に用いる方法が提案されて久しくなるが、不飽和土の場合間ゲキ圧 u を、信頼するに足る状態で求めるためには、理想的な測定技術が必要とし、現状では再現性も少なく、客観性に乏しいデータしか得られていない。そしてこのことが、第一の問題を突きつめるうえでのネックになっているのである。

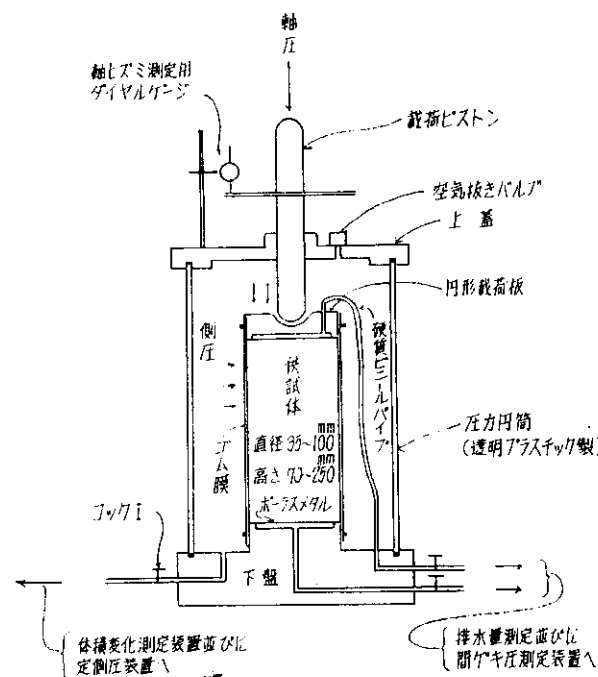
これらについての詳述は避けるが、要するに従来のセン断試験が、 C 、 ϕ 決定に直接関与する応力の相互関係

に重点をおいて行なわれ、初期状態から破壊に至る供試体のヒズミ変化が、十分にはあくされていない点を反省すべきであると思う。不飽和土は、排水(気)を許す状態ではもちろん、非排水(気)状態においても体積ヒズミ $\Delta V/V$ を起こすものであり、それにもなつて e 、 S_r が変化するため、一連の試験によって C 、 ϕ を決定しても、それが直ちにある特定の e 、 S_r をもつ土の強度定数であるとはいえないことがある。よってセン断抵抗の変化を、 $e \cdot S_r$ との関連で統一的に説明せんがためには、供試体の初期寸法はもちろん、等方圧縮、軸圧の各段階を通じて、軸ヒズミ e および $\Delta V/V$ を連続的に測定することが必要である。また $\Delta V/V$ と u は互いに補い合う内容をもつから、供試体の状態を損わない範囲でできるだけ精密に測定しなければならない。

以上の見地から、最近海底探査や医学その他の方面で、積極的に使用され始めている、高圧室を、土質部門にとり入れることを思いつき、種々検討のすえ一応所期の機能を有する装置に仕上げることができた。以下にその構造と操作の状況を報告する。

2. 三軸試験機の問題点

土のセン断試験には、一面および二面セン断、ペーン



図一 三軸圧縮試験機の中核部

*特殊土質開発研究室副室長 **同室 主任研究員

セン断、一軸および三軸圧縮試験、三軸伸張試験、ねじりセン断、振動およびくり返し圧縮試験など、多くの種類があり、それぞれ長短を有しているが、排水条件と応力状態が、最も明確に規制できるとされている三軸圧縮試験についても問題は残っている。

図一1は一般に使われている三軸圧縮試験機の中核部であるが、等方的に負荷された一定側圧のもとで、供試体が破壊時に示す軸差応力を見いだすための装置であるのはいうまでもない。しかし、この簡単な目的を果すだけでも厳密に考えると、

- 1) 供試体の寸法は、下盤上に直立させた状態で測定するが、その後圧力円筒などをセットし、側圧を負荷したとき、高さも体積も縮小するはずである。しかし、この方式では、それを測定することができない。飽和試料に対して排水を許す場合のみ、体積変化がわかるだけである。
- 2) 載荷ピストンの自重は、通常それを上まわる反力によって消去されるが、このため軸圧初期の軸差応力があいまいになっている。
- 3) 不飽和粘性土の体積ヒズミを求めるためには、圧力円筒内の水収支を計算しなければならないが、コックIを通じての出入量のほかに、載荷ピストン周辺からの漏水、圧力円筒の膨張、硬質ビニールパイプの収縮といった予測困難な補正要因が多いため、実際には測定不能に近い。また脱気水を用いたとしても、内壁各部に滞留しようとする微小気泡を、空気抜きバルブに誘導する操作は至難なことである。
- 4) 砂や軟弱粘土のように、自立困難な試料を用いるときは、さらに特殊な操作を加えなければならないが、通気度の高い乾燥砂以外は、操作が容易でなく前項のような体積ヒズミの測定が、ますます適用できなくなる。

などの欠陥を指摘することができる。

3. 恒圧圧縮試験装置の構造

1) 概要

1963年から構想を練り、'65年半ばに完成したこの装置は、直径2.0 m長さ4.4 mの鋼製気密室が主な駆体で、内部に圧縮試験装置を備えている。この中に測定者が入ったまま室内気圧を高めて側圧とし、供試体に対して一軸方向の圧縮を行なえば、すなわち三軸圧縮となるわけで、従来の三軸試験機がもつ欠陥を容易に補い得る特徴がある、図一2はその全体の系統を示す。三軸圧縮だけに限定すれば、測定者を室内にとどめなくてもよいように改造できるはずであり、早晚実行する考えでいるが、平面ヒズミや引張りに対する凝集抵抗などを将来手がけ

るためには、やはり複雑な手作業が残るので、このような方法に踏み切ったのである。

2) 鋼製気密室

厚さ9~12mmの鋼板を溶接して組み立てた円筒状タンクを横に据えたもので、外径2.0 m総延長4.4 mである。一端に内径0.6 mの開孔部を設け、気密ドアを内開きに取り付けてある。これから約1.5 mの位置に、同様のドアを有する隔壁を設けて予備室としている。これは実験の途中で測定者が出入するのに備えたもので、食事や排便を室内では行なわないことを前提にしているからである。

許容最大圧力は 4.0kg/cm^2 であるが、現在までのところ大半の試験を 2.0kg/cm^2 以下に抑制している。 1.0kg/cm^2 以上になると、労働省令第5号に規定する「高圧室内業務」に該当するので、'60年5月同規則に準拠して「土木試験所高気圧試験室就業規則」を制定し、事故の防止に努めている。最も注意しなければならないのは、高気圧下で体内に溶け込んだ窒素ガスが、十分排出されなかった場合に発生する減圧症で、皮膚に発疹が出たり、重症のときは神経障害を起こすといわれている。したがって減圧速度が重要視されるわけであるが、同就業規則ではこれを $0.07\text{kg/cm}^2/\text{min}$ とし、省令による場合よりもはるかに緩速化している。もとより、風邪気味の者や、耳鼻に疾患を有する者、高血圧者などは室内の測定に就業させられない。

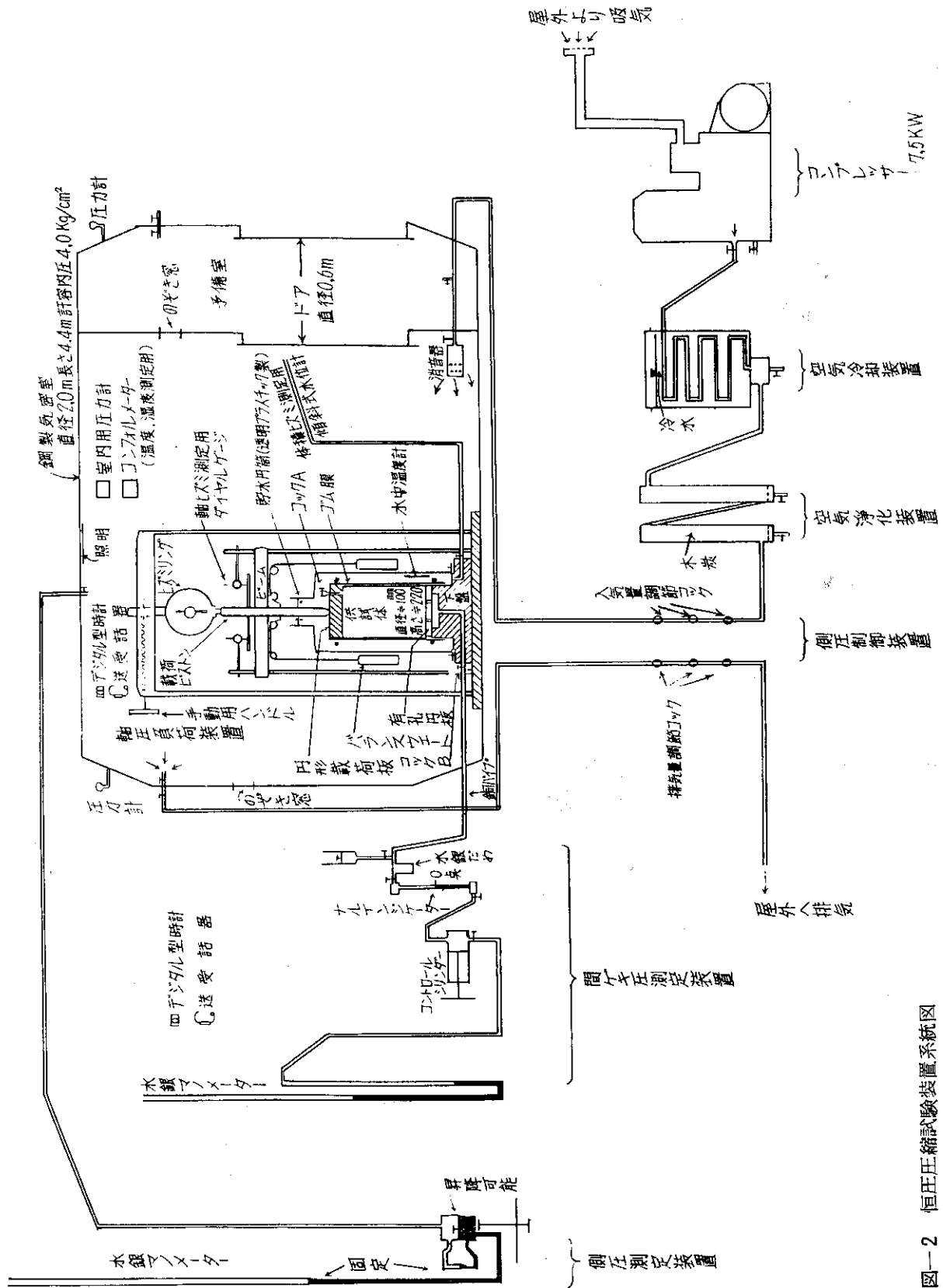
気密室には径10cmの強化ガラスを用いたのぞき窓を3箇所に取りつけ、内部塗装をクリーム色に、そして蛍光灯による照明を施した。また内外の測定者に、同一回路の送受話器を装着させるよう私設電話を設け、さらに実験開始後の経過時間を明示させるため、デジタル型電気時計を内外に配置し、同時起動装置をつけるなど、測定者全員が終始一体感をもって作業できるように配慮している。

3) 側圧制御の機構

室内気圧を高めることにより、供試体に等方的な圧力を加えれば、三軸試験という周圧または側圧になる。便宜上これらをすべて側圧と呼ぶことにする。

屋外から風洞管(25×30cm)で導入した空気を、堅型一段空冷式空気圧縮機で圧縮する。これは7.5kWモーターで駆動され、 7.0kg/cm^2 の高圧空気を $1.3\text{m}^3/\text{min}$ の割合で送気する能力がある。基礎は実験室の床コンクリートと絶縁し、振動の波及を防いでいる。

圧縮された空気の温度は、かなり上昇しているので、空気冷却装置に導き冷却と除湿を行なう。これは内径12



図一2 恒圧圧縮試験装置系統図

mmの銅パイプ25mを、螺旋状にまらめて冷水中に没入させ、凝結した水滴を底部に貯溜させるようにしたものである。

空気は圧縮機やホースを通ると、臭みがつくほか、ガ

ス、塵埃などで汚染されたまま送気されることもあるので、空気浄化装置を通過させている。これは内径15cm長さ1.0mの鋼管2本に木炭を充填したもので、端末をフェルトで抑え、凝結した水滴はここでも底部に貯溜させ

ている。

気密室に放流された空気は、駆体の縦方向に流れて排気系統に入り屋外に放出される。実験中は連続的に空気を貫流させて換気を促進する。そして側圧は入気量と排気量の差で制御するものとする。気密室の上部からビニールパイプで水銀マンオメーターまで連結し、側圧を表示させている。このマンオメーターのすぐ脇に側圧制御装置を設置し、測定者が後者に併設された梯子を昇降しながら入排気のコックを操作できるようにしてある。マンオメーターの容量は 4.0kg/cm^2 である。その一端はステンレス函（上下可動式）に連通させることにより、側圧の直読を容易にさせている。

4) 圧縮試験装置

最大容量5 tonを有する手動式軸圧負荷装置の枠内にビームで直立させられた載荷ピストンを、下方に押し下げようヒズミリングを取付けた。載荷ピストンの自重はバランスウェイトで相殺させ、ビーム貫通部には毎回上質オイルを塗布するなど、軸差応力ならびに軸ヒズミの測定には細かく気を使っているが、現状では載荷ピストンの起動に $0.2\sim 0.5\text{kg}$ の力を加えなければならない。したがって、等方圧縮時の軸ヒズミを確実に現わすため、そのダイヤルゲージの圧力は、フルに下方へ作用させている。

体積ヒズミは、貯水円筒の水位変化と載荷ピストンの移動量から、体積変化量を求めて算出する。貯水円筒の水位は、十倍に拡大した傾斜式水位計で読む。現在三軸圧縮試験用の供試体は、直径約100 mm高さ約220 mmに成型しているから、測定値の精度はおおむね表一1のようになる。

表一1 測定値の精度

測定項目	精 度	備 考
側 圧	kg/cm^2 0.00136	水銀マンオメーターの最小目盛 1.0mm
軸差応力	kg/cm^2 0.014	ヒズミリングの最小目盛に対する荷重差 1.1kg
軸ヒズミ	% 0.0005	ダイヤルゲージの最小目盛 $\frac{1}{1000}\text{mm}$
体積ヒズミ	% 0.005	水位計のよみ0.5 mmに対する貯水円筒の容積 0.092cm^3

注 供試体寸法を直径100mm高さ220mmとして算出した

気密室内の気温は、側圧の変化にともなって上下するため、貯水円筒内の水温もこれに追随する。しかし現在までのデータでは、前者で 5°C 、後者で 3°C 程度なの

で、体積ヒズミの計算にあたってはその影響を無視している。

5) 間ゲキ圧測定装置

供試体下面に生ずる空気圧を、脱気水で満たした銅パイプ（内径2.0 mm）で室外へ誘導し、ナルインジケーターと水銀マンオメーターにより測定する。これらは成書に示されている方法と、同一の原理に立つものである。不飽和土を非排水状態で試験する場合、毛管作用によって脱気水が供試体側に吸引されるおそれがあるから、供試体下面には終始微量の空気層を残留させる必要がある。

4. 操作の状況

高気圧作業に対する測定者の訓練は、'64年2月から開始し、各種装置に対する予備テストとその改良を進めながら、'66年6月に至りようやく本格的な試験体制をつくりあげた。そして一連の供試体に対する非圧密・非排水条件での三軸圧縮試験を行なうかわら、載荷方法についての検討をも進めてきた。これらの詳細は別途に報告したとおりであるが、試験操作についてとくに感じた事項を抽出すれば、次のとおりである。

1) ヒズミリングや載荷ピストンは、正しく供試体の中心軸上に保持されていなければならない。

当然のことながらこれらが狂っていると、軸圧に対する供試体の抵抗は、正確にヒズミリングに現われなくなり、ひいては円形載荷板が傾斜する原因にもなる。また等方圧縮時の軸ヒズミを微細に追求するうえでも載荷ピストンの偏心は許しがたくなる。現在は供試体を載せた下盤諸共、微動させながら調整しているが、かなり熟練を要する作業となっている。

2) 体積ヒズミや間ゲキ圧測定のためには、気泡排除を徹底的に行なわないと所定の精度が得られない。

水は前もって煮沸などにより脱気しておくが、これが金属やゴム、プラスチックなどに接する界面には、微小な気泡が残留して膨張収縮を起し、非圧縮性であるべき水の機能を損いがちである。この解決法を種々検討した結果、脱気水に数%のグリセリンを溶解させる一方、これを脱気水に接する区域の個体表面に、あらかじめ塗布しておくこと効果的であることがわかった。細長い銅パイプの場合は、大量の脱気水を用意しておき、流速を間欠的に急変させながら、一方向へ連続して通水させ、気泡を出口まで誘導することになっている。

3) 間ゲキ圧測定についての問題点

前項の気泡排除に対する検査を行なうために、直

径100mm高さ220mmの鋼製円筒を用いているが、これを供試体と同様にセットして、側圧がどの程度ナルインジケータに伝播するかを調べてみた。その結果、貯水円筒に注水した時点で、鋼製円筒の上下周囲にある空気を排除すればするほど、側圧と下面間ゲキ圧の差が縮まっていくことがわかった。軽卒には断定できないが、非圧密・非排水で行なう下面間ゲキ圧の測定値に、上記のことから類推される側圧伝播の影響が、ないといえないのではなかろうか。

供試体の初期空気含有率と体積ヒズミを用いて、ボイル・ヘンリーの法則により、算出した平均間ゲキ圧との比較では、多分にこれと符合する傾向がみられるのである。

- 4) 荷重増加の速度は、できるだけ遅くするのが望ましいようである。

等方圧、軸圧とも供試体に加える外力は、極力緩慢に増大させていくことが、応力伝播やヒズミの進行を一様にするうえで望ましいことが経験的にわかってきた。また実験中に破壊への接近を認知するうえで、緩速載荷が合理的である。現在筆者らは、

等方圧縮段階で約 $0.05\text{kg/cm}^2/\text{min}$ 、軸圧段階では約 $0.04\text{kg/cm}^2/\text{min}$ の応力制御方式をとっている。

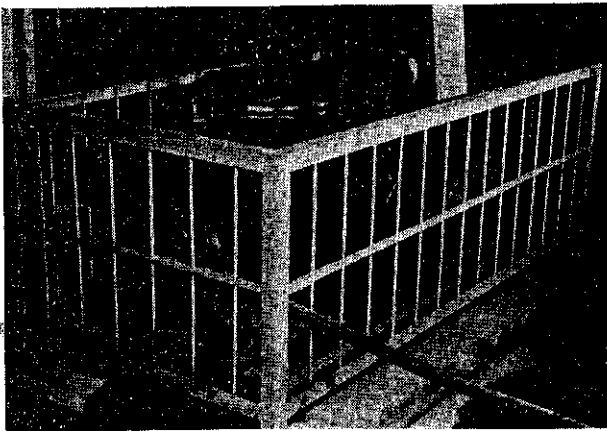
5. あとがき

不飽和粘性土のせん断抵抗を、初期の $e \cdot S_r$ と関係づけ、その体系化をはかるべく変形挙動の究明に重点をおいて製作した標題の装置について、従来の三軸試験機と比較しながら、機能上の特徴をやや詳細に記述した。しかし実験はようやく軌道に乗ったばかりであり、前途には予想外の困難が待ち受けているかも知れない。

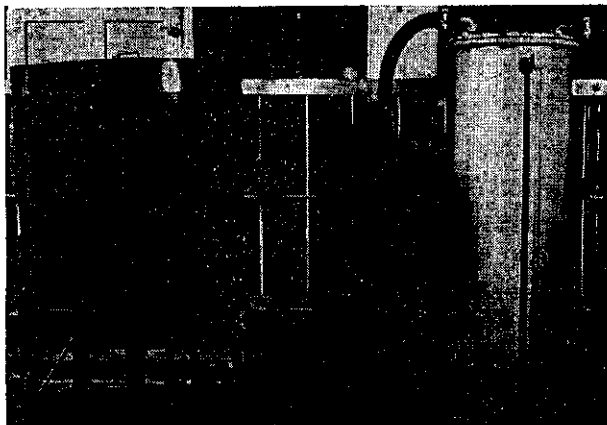
この装置の企画・製作を通じて、懇切な指導をいただいている仲矢室長に対し感謝いたします。

参 考 文 献

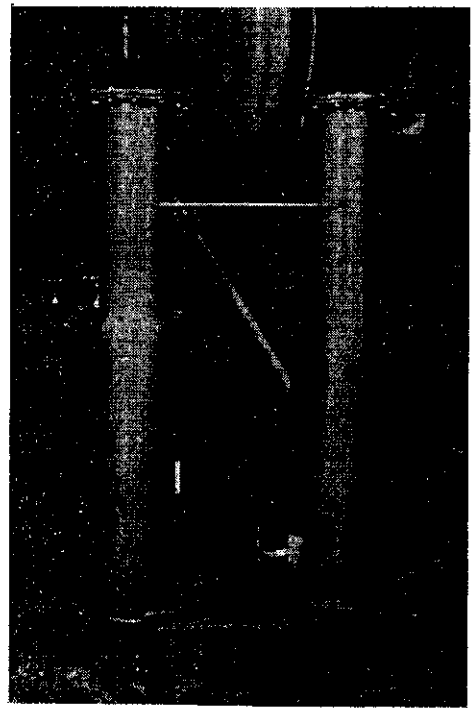
- 1) たとえば、土質試験法P.318~319, 土質工学会(昭和39年3月)
- 2) 山野隆康, 坂田資宏; 締固めた不飽和粘性土の変形について, 第11回土質工学シンポジウム発表論文集 P. 73~79 (昭和41年)



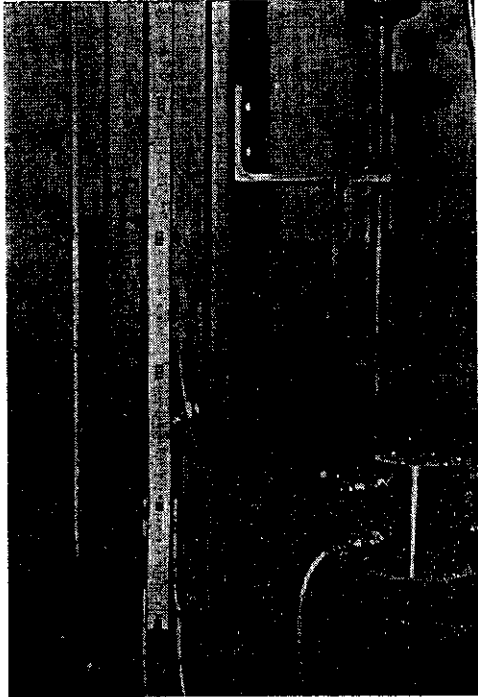
写真一 立形一段空冷式空気圧縮機



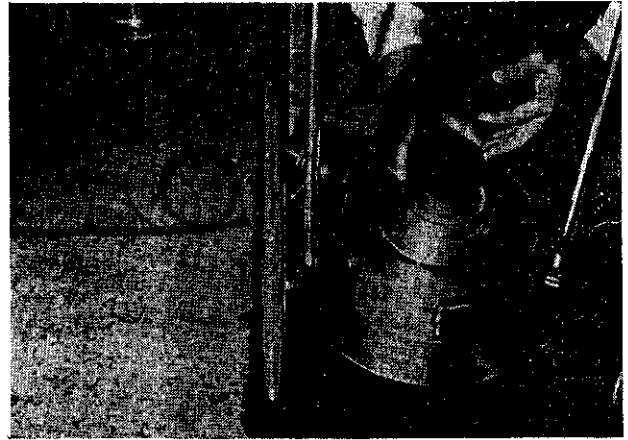
写真二 空気冷却装置



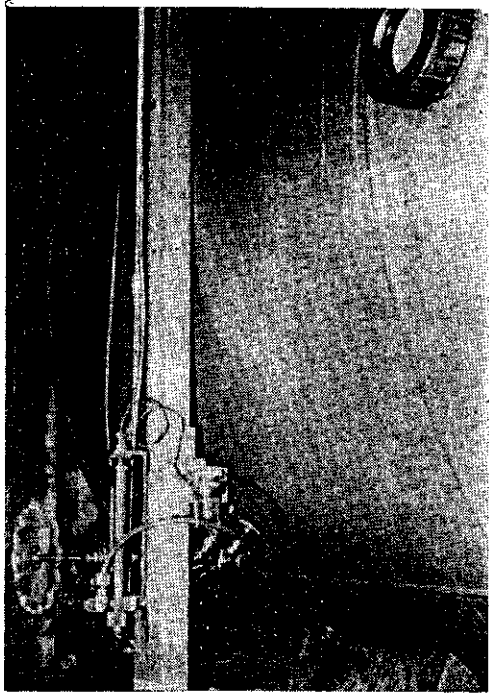
写真三 空気浄化装置



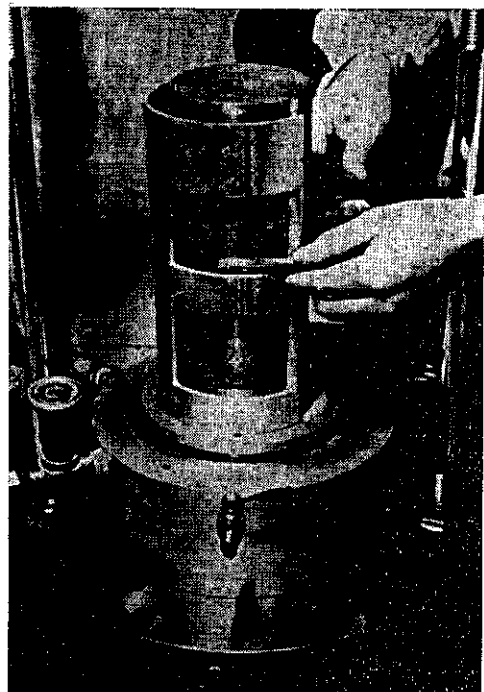
写真一4 水銀マノメーター (側圧測定)



写真一6 下盤と銅パイプ
(手に持っているのは有孔円板)



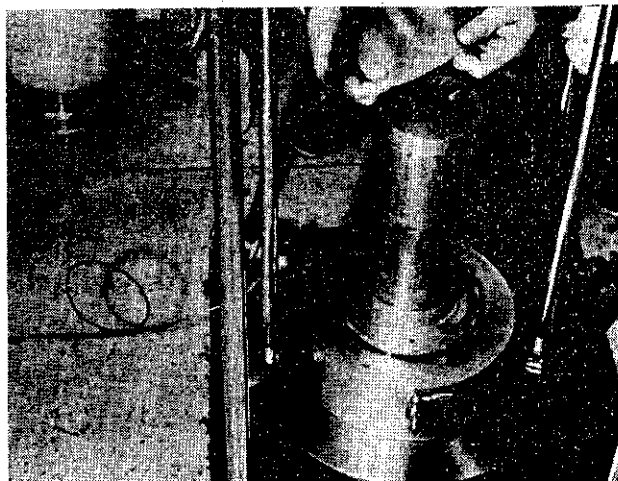
写真一5 ナルインジケータ



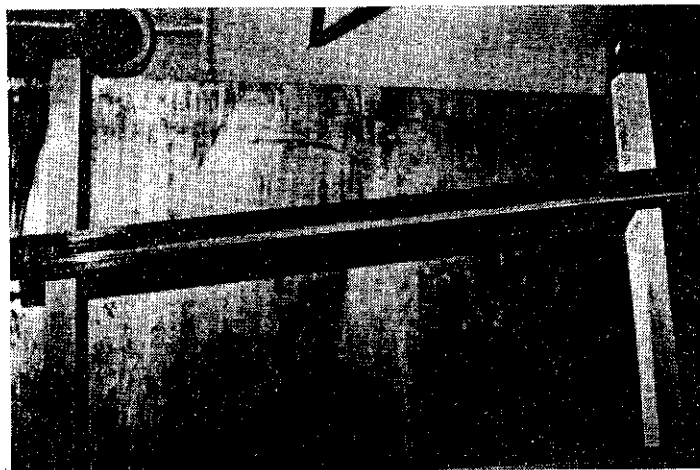
写真一7 供試体寸法の測定



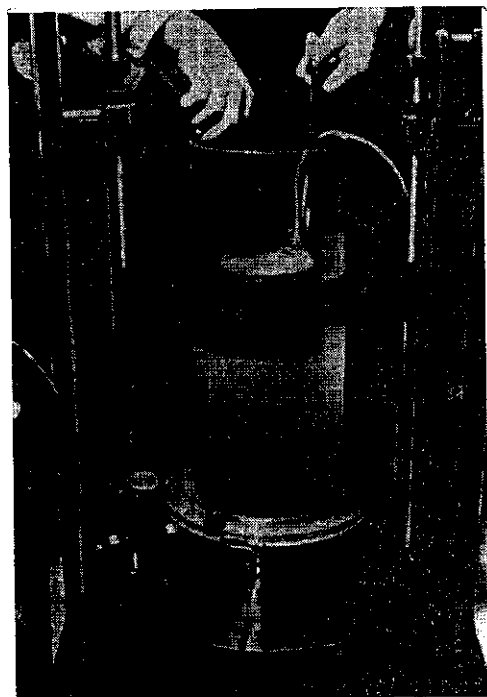
写真—9 グリセリン溶液を塗布しているところ



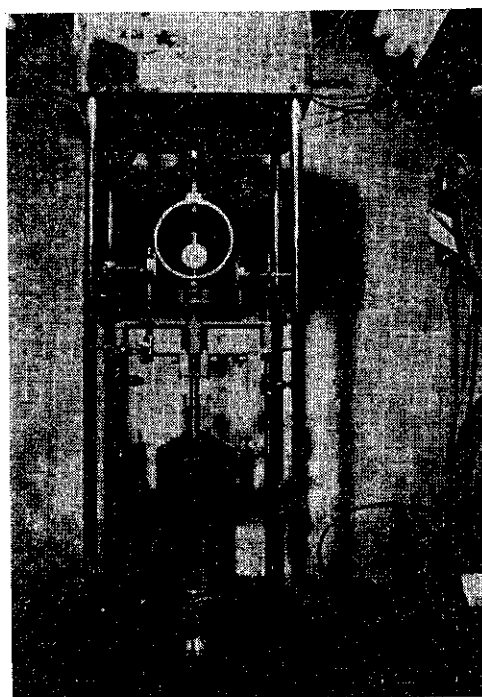
写真—8 供試体を下盤上に載せたところ



写真—11 傾斜式水位計



写真—10 コックAの緊結



写真—12 セット終了状態