

不飽和土の三軸試験装置および計測システム

MEASURING SYSTEM OF TRIAXIAL COMPRESSION TEST FOR UNSATURATED SOIL

西垣 誠* (Makoto Nishigaki)

河野 伊一郎** (Ichiro Kono)

竹下 祐二*** (Yuji Takeshita)

楠見 和紀**** (Kazuki Kusumi)

キーワード：三軸試験機 / 残積土 / 不飽和土 / まさ土 / (I G C : D - 6)

1. まえがき

集中豪雨によって、多くの斜面崩壊が発生している。さらに近年は、住宅事情などに伴って、斜面を切土して宅地とする場合も少なくなく、被害も自然災害だけでなく人災として取り扱われる場合もでてくる。またこれらの斜面崩壊における原因を考えると、不飽和土の力学挙動を明確にしなければならぬ。しかしながら、土の不飽和土としての力学は、飽和の力学に比べて複雑で、室内試験においても計測が困難である。本報告では、室内試験において、不飽和土の力学に関するパラメータである、軸ひずみ、体積ひずみ、間隙水圧、間隙空気圧、そして軸荷重の経時の変化を連続的に正確な計測法を可能とする不飽和三軸試験装置を作成し、精度および、試験方法について述べる。

2. 三軸圧縮試験装置

三軸セルの概略図を図-1に示す。三軸セルは、二重構造セルとなっている。内部セルは、従来の天上部まで達する三軸セルでは、側圧を加えた時、アクリル製のセル壁が鉛直方向に伸びるため、製作したセルは、内部セルを上部より低く押え、内部セルの変位による影響を除去している。

内部セルにはシリコンを満たしている。これは、セル流体は、メンブランを通して、供試体中の間隙流体(間隙中の気体)が逸散することを防ぐためである。さらに外部セルには、セルの安全性を高めるため水を満たしている。供試体上部のキャップは、図-2に示すように、間隙空気圧測定用、間隙空気圧作用、排気排水用、さらに、飽和試験用のものがあり、試験法によって異なる。

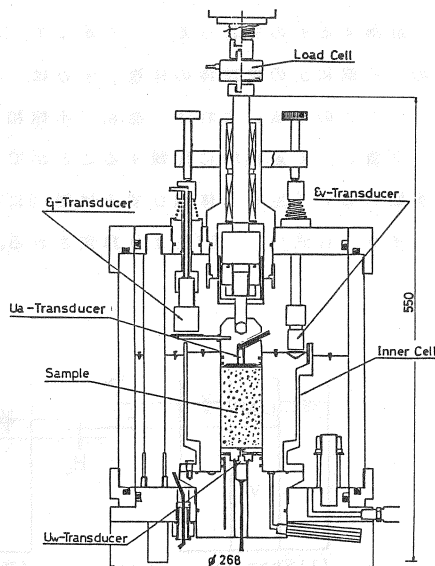


図-1 不飽和土用三軸試験装置

*岡山大学工学部助教授, **同 教授, ***同 助手, ****和歌山県土木部

2-1 軸ひずみ測定系

軸ひずみは、供試体の軸方向変位を計測し、計測値を供試体の高さで除すことにより求めた。軸方向変位は、載荷キャップの側面に取り付けられた電導性金属板の変位を非接触変位計を用いて、電気的に計測を行なった。

これは、渦電流の原理によって被測物である電導体表面との間の距離を計測するものである。なお、渦電流の原理のため距離と出力の関係は非線形であるが、この変位計には、アナライザーが設けられており線形範囲を大きくしている。

| 飽和試験用 (排水用) | 排気試験用 | 非排気試験用 (内部空気圧測定用) (低側圧時使用) | 非排気試験用 |
|----------------------------|--|----------------------------------|--------|
| | | | |
| 金網 (供試体との間に 円形ろ紙が必要) | ポーラスストーン (高側圧時) ガラスフィルター (低側圧時) | 圧力変換器 ガラスフィルターと サミコトン | なにもない |

図-2 キャップの種類

2-2 体積ひずみ測定系

体積ひずみは供試体の体積変化および載荷キャップ貫入に供う内部セル内のシリコン液面の上下変動量、すなわちシリコン液面に浮かべられている電導性フロートの変動量を、軸ひずみ計測に用いられた同種の非接触変位計を用いて電気的に計測することにより求めた。従来体積ひずみの計測において、二重ビュレットが最も一般的に用いられてきたが、それは供試体内の間隙水をビュレット内に排水させて計測するものであった。したがって、水と空気が存在する不飽和土では計測不可能である。そのため、不飽和土の供試体の体積ひずみは、内部セル内の潤液表面の変動によって計測されるものである。またこの方法によれば、飽和、不飽和あるいは、排水条件を問わず、供試体全体の体積変化をアナログ量として連続的に記録することができる。¹⁾

実験において生じる体積ひずみは図-3に示されるように側圧を与えた時点、およびせん断中に対して、それぞれ式(1)、式(2)より算定される。

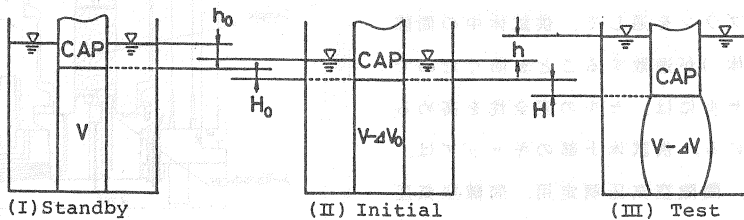


図-3 供試体の体積変化挙動

$$\Delta V_0 = A \cdot H_0 + a \cdot h_0 - \Delta v_0 \quad (1)$$

$$\Delta V = A \cdot H - a \cdot h + \Delta v_0 \quad (2)$$

ΔV_0 : 側圧載荷時の供試体の体積減少量

Δv_0 : 側圧載荷時のシリコン圧縮量

ΔV : せん断時の供試体の体積減少量

A : 載荷キャップの断面積

a : シリコン液面の面積

h_0 : 側圧載荷時のシリコン液面の下降量

H_0 : 側圧載荷時の軸方向変位

h : せん断時のシリコン液面上昇量

H : せん断時の軸方向変位

2-3 軸荷重測定系

軸荷重は荷重変換器 (load cell) によって、バランスユニットを介し電氣的に計測を行なった。軸荷重測定系において特に改良されている点は、軸荷重の径と載荷キャップの径を等しくすることによって、側圧を軸荷重と独立に制御できる点にある。そのため、通常行なわれている試験の応力経路とは、別の応力経路に対しても制御可能である。従来の三軸セルでは軸応力は次式より求められていた (図-4参照)。

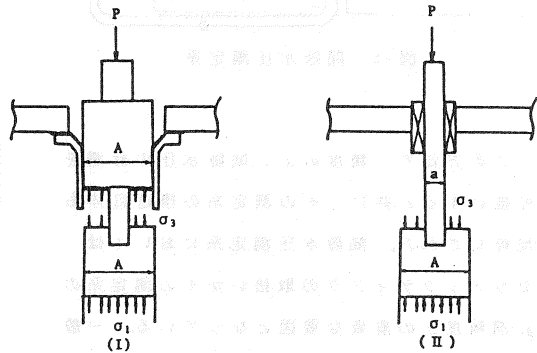


図-4 軸荷重計測システム

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} + \sigma_3 - \frac{\sigma_3 a}{A} \quad (3)$$

ここで、 σ_1 : 軸応力 σ_3 : 側圧 P : 軸方向荷重 A : 載荷キャップの断面積
 a : 載荷軸の断面積

式(3)より軸応力に側圧が関与し、軸応力と側圧の分離制御の困難性は明らかである。しかしながら、実験に用いた三軸セルは、載荷軸の径と載荷キャップの径が等しいため $a = A$ となり軸応力は次式のように簡略化できる。

$$\sigma_1 = \frac{P}{A} + \sigma_3 - \frac{\sigma_3 a}{A} = \frac{P}{A} \quad (4)$$

2-4 間隙水圧測定系

間隙水圧は、供試体下端部でセラミックディスクを通して半導体小型圧力変換器を用い、電氣的にバランスユニットを介し計測を行なった。間隙水圧測定系の概略図を図-5に示す。従来の間隙水圧測定方法では、図-6に示すように三軸セル外に間隙水圧を取出し、計測する方法を用いていた。このシステムは、圧力の伝播経路が長くなり、系内に気泡を含む恐れがある。また、過大な負の間隙水圧を計測しなければならない不飽和土用の三軸セルでは、その間隙水圧測定系内にキャビテーションを生じる可能性がある。そこで本研究では間隙水圧測定系の圧力の伝播を最小に押えるため、ベDESTALの下部に直接圧力変換器を取り付け計測を行なった。

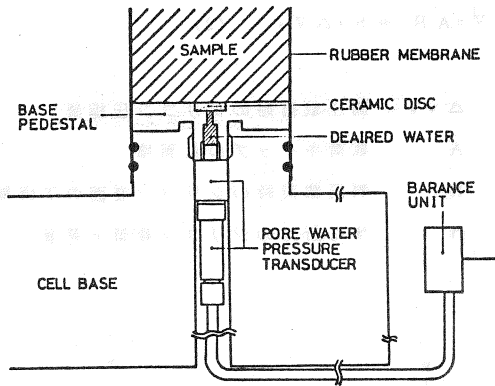


図-5 間隙水圧測定系

この方法で、精度のよい間隙水圧の計測を可能にすると共に、その測定系の構造自体も簡略化された。間隙水圧測定系においては、セラミックディスクの取扱いがその測定系の計測精度上の重要な要因となっている。一般に間隙空気圧は表面張力によって間隙水圧より大きな値を持つ。図-7に示すように飽和した目の細かい親水性のセラミックディスクを空気が透過しようとするれば、セラミックディスクの細孔の管壁と水の間にある表面張力で受け持たれ、ある特定の圧力までは空気がセラミックディスクを透過できない。その空気の透過に抵抗できる最大圧力差($u_a - u_w$)を、Air Entry Value (A.E.V)という。そして、A.E.V以上のサクションが供試体内に発生すれば、間隙水圧測定系にキャビテーションを来たす結果となる。またセラミックディスクのA.E.Vは図-8に示すようにセラミックディスク上を水で満たしペダスタルの裏面より空気圧を作用させ求めた。その結果、用いたセラミックディスクのA.E.Vは 4.8 kgf/cm^2 であり、計測範囲を十分満足するものであった。

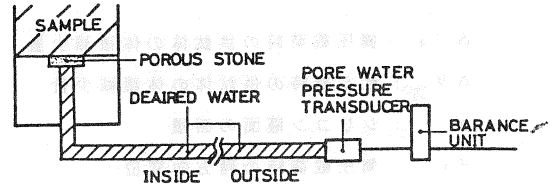


図-6 従来の間隙水圧測定系

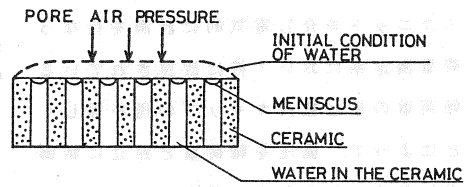


図-7 セラミックディスク²⁾

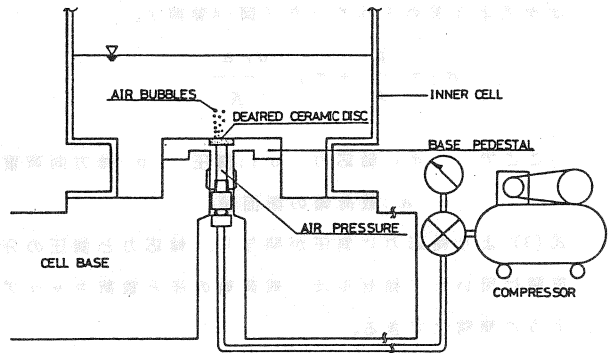


図-8 A.E.V測定装置

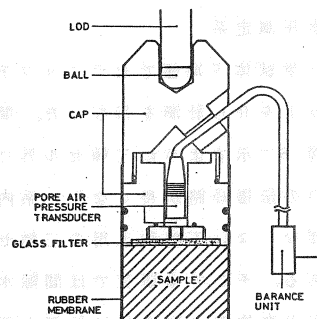


図-9 間隙空気圧測定系

2-5 間隙空気圧測定系

間隙空気圧は、供試体上端部でガラスフィルターを通して、半導体小型圧力変換器を用い、電気的にバランスユニットを介し計測を行なった。間隙空気圧の計測は、ガラスフィルターから感圧部までの空気量を供試体内の空気量と比較して、できるだけ小さくする方が望ましいため、図-9の測定系の概略図に示されるように、圧力変換器を載荷キャップ内にガラスフィルターの裏面と密着させて組み込んでいる。また使用したガラスフィルターの特性としては、撥水性を有するため供試体内からの間隙水の吸収を防止でき、しかも供試体内と測定系内の空気を直結できる利点を持っていることである。以上は非排気試験での間隙空気圧測定法であるがそれとは別に、排気試験または間隙空気圧一定試験を行なう場合は、三軸セルの外部に開放もしくは、外部より空気圧を作用させるために、先に図-2に示したとおり載荷キャップは圧力変換器を中に組み込んでいないものを用いている。

表-1 各測定系の計測器の定格容量

| Measuring System | Measuring Instrument | Rated Capacity | Rated Accuracy of Full Scale Value |
|-------------------------|------------------------------|---|--|
| Pore Air and Pore Water | PD-104K-1FW PMS-5Type 10H | $\pm 1\text{Kgf/cm}^2$ $-1\text{Kgf/cm}^2 \sim +10\text{Kgf/cm}^2$ | $\pm 0.2\text{gf/cm}^2$ $-10\text{gf/cm}^2 \sim +100\text{gf/cm}^2$ |
| Axial Strain | VC-10CZ | 0 ~ 10mm | $\pm 0.1\text{mm}$ |
| Volumetric Strain | VC-6CZ | 0 ~ 6mm | $\pm 0.06\text{mm}$ 0.08% (Volumetric Strain) |
| Axial Load | U2MI-500K | 0 ~ 500Kg | $\pm 0.5\text{Kg}$ |

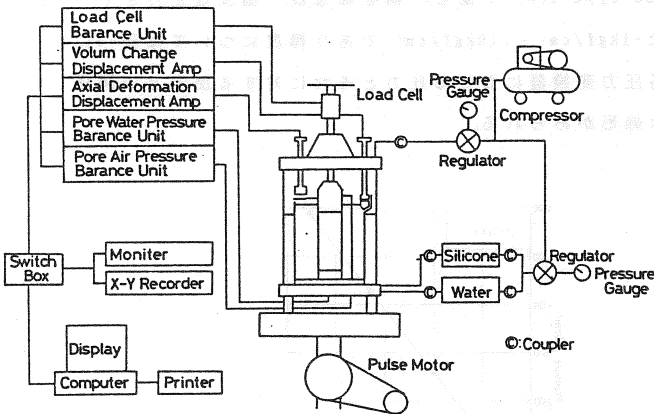


図-10 三軸試験装置のシステム図

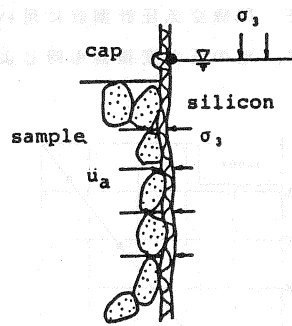


図-11 供試体の表面モデル

以上より、本実験装置における各測定系の計測器の定格容量および、定格精度を表-1に要約する。また三軸試験装置の概略的な全体図を図-10に示す。

3 試験装置の測定精度の検定

3-1 間隙空気圧の逸散

間隙圧計測において特に問題となるのは、図-11に示されているように、間隙流体がメンブランを通してセル流体へ逸散することである。検定として、間隙空気のシリコンへの溶解に関して行なった。試験には、三軸セルを用い試料としてアクリル製の仮多孔供試体を用いて行なった。側圧としては0、0.5kgf/cm²の2種類で経時変化として非排気条件で2時間計測した。この検定の結果を図-12,13に示す。図において、初期の間隙空気圧に対しその後生じた若干の変動は、計測に用いた圧力変換器の計測誤差の範囲(±6×10⁻²gf/cm²)であり、圧力変換器の特性によるものと考えられる。すなわち検査時間内ではほぼ一定の間隙空気圧が得られた。このことからメンブランを通しシリコンへの間隙空気の逸散が生じていないことがわかる。本実験では主にまさ土を用いており、せん断試験が3時間程度であるので十分気密性が保てることがわかった。

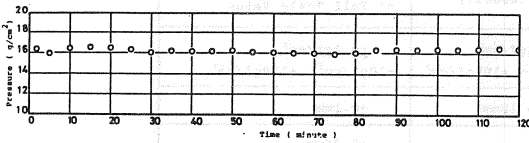


図-12 (0gf/cm²)

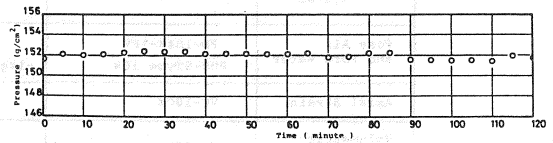


図-13 (0.5kgf/cm²)

3-2 間隙水圧計測系

間隙水圧計測に用いた圧力変換器は、拡散型半導体小型ゲージ圧力変換器、(豊田工機製, PD104K-1Fw)および、半導体小型圧力変換器(同社, PMS5-Type-10H)である。前者は感度、温度補正付きで、計測範囲は-1.0kgf/cm²~+1.0kgf/cm²で後者は-1kgf/cm²~+10kgf/cm²であり精度については表-1に示す。間隙水圧、間隙空気圧計測計に用いた各圧力変換器における圧力とそれに対する出力との関係は図-14に示す。他の圧力変換器も同じような線形がみられる。

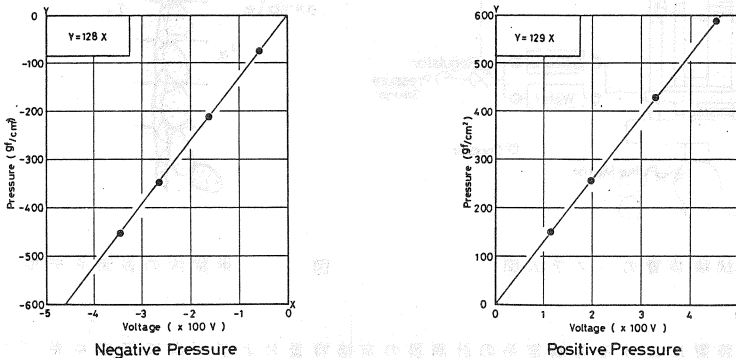


図-14 圧力変換器のキャリブレーション (PD104K-1Fw)

3-3 軸歪み計測系

軸ひずみ計測に用いた変位計(新川電機製 非接触形変位計 VC-10CZ)で、計測範囲は、0~10mm、計測精度はフルスケールの1%(0.1mm)である。また計測の線形性を図-15に示す。

3-4 体積ひずみ計測系

体積ひずみ計測の際、その計測精度に影響を及ぼす要因は、式(2)の右辺に示されている。まず第一に側圧の増加に伴う内部セルの断面変化が掲げられる。側圧の増加による内部セルの鉛直方向への伸びを測定し、その値より算定した内部セルの断面積の変化量を表-2に示している。この変化量は、初期のシリコン液面の面積に比べ十分無視しえる量であることが分かる。

表-2 内部セルの断面積変化

| CONFINING PRESSURE kg/cm ² | $\Delta A \times 10^2 \text{ cm}^2$ | $\Delta A/A \%$ |
|---------------------------------------|-------------------------------------|-----------------|
| 0.5 | 0.55 | 0.028 |
| 1.0 | 0.64 | 0.033 |
| 1.5 | 0.83 | 0.042 |
| 2.0 | 0.95 | 0.048 |

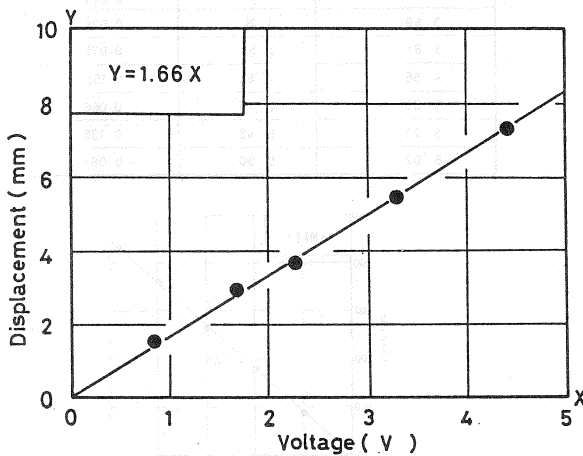


図-15 軸ひずみ計のキャリブレーションカーブ

表-3 シリコンの圧縮率

| CONFINING PRESSURE kg/cm ² | $\Delta V/V \times 10^3$ |
|---------------------------------------|--------------------------|
| 0.5 | 5.30 |
| 1.0 | 7.34 |
| 1.5 | 9.58 |
| 2.0 | 11.11 |

次に、シリコンが側圧の増加に伴い圧縮され、シリコン液面が低下することを考慮する必要がある。これは、実験を行ない側圧を加えた場合のシリコン液面の変動には、供試体の体積変化とシリコン自体の圧縮によるものが含まれているからである。このシリコンの体積圧縮率を表-3に示している。なお、シリコン液体は載荷、除荷ともに弾性的な挙動をした。以上述べた要因を考慮した上で、本研究で用いた変位計の精度を図-16に示すような二重ビュレットを用いる体積ひずみ計測手法との比較より求めた。変位計とビュレットを用い、計測したそれぞれの値とビュレットを用いた計測による値を基準とした場合の変位計による計測値の誤差を表-4に示す。変位計の計測精度より算定した体積ひずみの計測誤差は、表-4に示す値の平均値と一致している。このことから、体積ひずみの計測精度に及ぼす要因を考慮した場合、変位計による体積ひずみの精度は、0.08%以内と考えられる。なお、本研究で用いた体積ひずみ計測用の変位計は、計測範囲0~6mm、計測精度はフルスケールの1%($6 \times 10^{-2} \text{ mm}$)の非接触形変位計(新川電機, VC-6CZ)で、変位と出力の間には図-17に示すような線形性が存在する。

3-4 軸荷重計測系

軸荷重は、次にあげる2点に工夫をほどこし、計測精度および取扱いを容易にした。まず第一に載荷用のピストン部にベロフロムを用いることで、ピストン部の摩擦による計測精度への影響を押えた。第二に2-3で述べたように軸の径とキャップの径を等しくすることで側圧を軸荷重と独立に制御させている点である。

各軸荷重に対応するロードセルの出力はロードセルとブルーピング・リングを用いて求めた。この軸荷重と電圧の関係を図-18に示している。ロードセル(新興通信工業製、U2MI-500K)は計測範囲0~500kg(圧縮側)である。

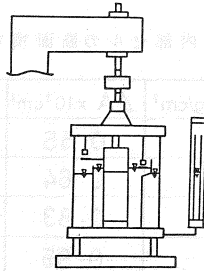


図-16 二重ビュレットによる装置

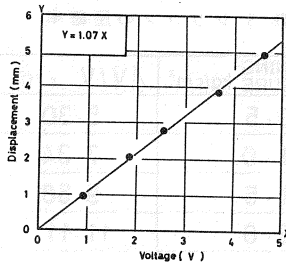


図-17 体積ひずみ計のキャリブレーションカーブ

表-4 体積ひずみの計測誤差

| VOLUME CHANGE of WATER in BURETTE cm ³ | MEASURED VOLUME CHANGE cm ³ | ERROR of VOLUMETRIC-STRAIN % |
|---|--|------------------------------|
| 0.36 | 0.49 | 0.066 |
| 3.69 | 3.74 | 0.025 |
| 3.81 | 3.96 | 0.076 |
| 4.56 | 4.86 | 0.153 |
| 5.02 | 5.15 | 0.066 |
| 5.21 | 5.48 | 0.138 |
| 6.02 | 5.90 | -0.061 |

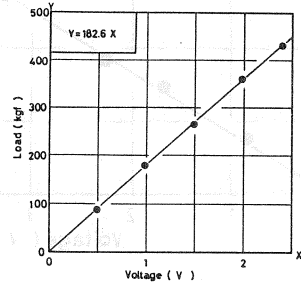


図-18 軸荷重計のキャリブレーションカーブ

4 供試体作成と試験方法

4-1 試料および間隙流体

三軸試験に用いた試料は、岡山県岡山市郊外で採取した花崗岩の風化した残積土で、一般にまさ土と呼ばれている。まさ土は粒度調整を行ない、1.19mm以上の礫分および砂分を取り除いたものを用いた。粒度調整後の粒径加積曲線を図-19に試料1として示す。また、同じ場所で粒度調整を行わずに粒径加積曲線を求めた結果を試料2として示す。これらより、試料1としては粘土分5%、シルト分17%、砂分78%であり三角座標系では砂質ロームに分類される。また、比重は試料1で2.66、試料2で2.68であった。これとは別に粘性土を用いた場合、普通行なわれているサクシオン計測方法では、試料にある程度不飽和化が進めば、測定系にキャピテーションを来す。しかしながら、本研究に用いた試料は粘土分を多少含むものの砂質土であるため、実験に選定された含水比範囲内において、完全

不飽和の場合(サクシオン計測不可能)を除き、間隙水圧測定系にキャピテーションは生じなかった。本研究においてキャピテーションは間隙水圧が負圧で、 -0.85kgf/cm^2 以上で発生した。

供試体の作成において間隙流体を水、アルコールの2種類を用いてサクシオン($u_s - u_w$)の項を独立制御した。これは、等乾燥密度において、等体積含水率が等しくなるように各種間隙流体を用いて供試体を成形すれば、土粒子自身の骨格構造および含水状態をほぼ等しく、しかも表面張力の差によりサクシオンの異なる供試体の成形を可能にすると考えられる。用いたアルコールは、n-プロピルアルコール($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$)比重 $0.804 \sim 0.812$ で濃度を 3.2mol 、 6.4mol の水溶液を用い、表面張力を毛管上昇法により求めた(図-20,表-5)。またこれらの締固め曲線を図-21に示す。

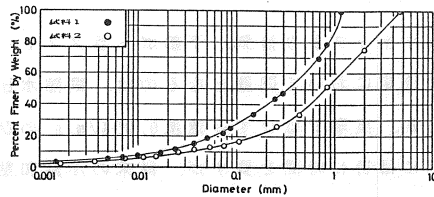


図-19 試料の粒径加積曲線

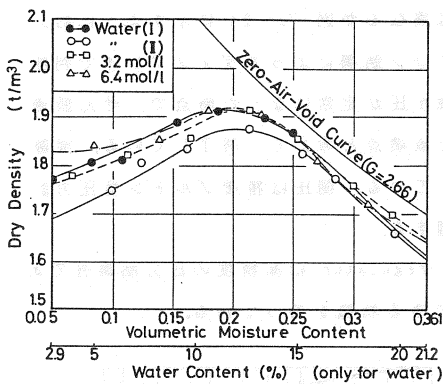


図-21 締固め曲線

4-2 供試体作成法

供試体は粒度調整を行なった試料を所定の含水比を目標に間隙流体を混合した後、それを三割りモールド(内径 5cm ,高さ 10cm)に4層に分けて締固めた。また、自立不可能な、絶乾試料や砂質土試料においては、三軸セルベース上に直接メンブランを取り付け、金属性のサポーターで支持する方法をとった。この方法によって直接セルベース上で締固めを行なうことができ、供試体が作成される。また飽和の三軸試験を行なう場合は、あらかじめ任意の飽和度(最適含水比付近)で供試体を作成し、三軸試験装置を組み立てその後、供試体中の空気を、二酸化炭素(CO_2)で置換する方法をとった。 CO_2 で置換する方法としては、 CO_2 が水に溶解しやすいため、供試体中の気相を CO_2 に置換し、そこに脱気水を供試体中に送れば、飽和度が増し、従来の試験方法より、より高いB値が得られるためである。

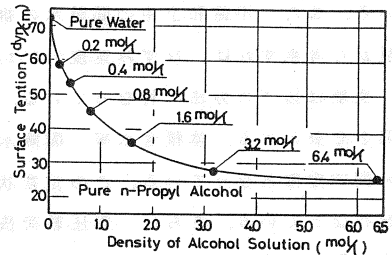


図-20 アルコールの表面張力

表-5 間隙流体の性質

| Pore Water | Specific Gravity (at 20°C) | Surface Tention (dyne/cm) |
|------------------|----------------------------|---------------------------|
| Water | 0.997 | 72.50 |
| Alcohol Solution | 3.2(mol/l) | 27.77 |
| | 6.4(mol/l) | 25.89 |

4-3 試験方法

(a) 一軸圧縮試験

一軸圧縮試験は原則的には自然地盤から採取した乱されない飽和粘土に適用される試験である。実験に用いたまき土はある範囲の含水状態の下では締固めモールド内で締固めれば、自立可能な供試体を成形できる。本研究では、間隙水として水、アルコールを用いて表面張力(サクシオン)の違いによって、等体積含水率、等乾燥密度の下でのサクシオンの一軸圧縮強度への影響、並びに、等体積含水率の下で乾燥密度を変化させた場合のサクシオンの一軸圧縮強度への影響を考察するために、この試験を行なっている。さらに試験中のひずみ速度は1%/minとしている。

(b) 排水(排気)せん断試験

排水せん断試験は、供試体上部の載荷キャップより排気、下部ポーラスストーンを通して排水を行なう。せん断過程におけるひずみ速度の決定において問題となるのは、間隙水圧の応答並びに間隙水の排水に対する過剰間隙水圧の発生である。実験ではひずみ速度0.05%/minのひずみ制御で行なっている。また、不飽和土中の間隙水の排水には特に時間を要すが、従来の不飽和粘性土を用いた三軸試験から考察すれば、ひずみ速度0.05%/minは十分満足し得るものと考えられる。

実験は以下の方法で行なっている。最初、供試体設置後初期サクシオンが定常状態となるまで、時間を必要とする。体積含水率、間隙水の種類により要す時間は異なるが図-22~24に示すように約3時間で定常となっている。この定常状態を判断するには、マイコン制御によってディスプレイで判断を行なっている。さらに、側圧載荷後、十分圧縮が完了し間隙水圧が定常になった時点で、せん断過程へ移る。実験終了は載荷が最大すなわち、軸差応力の最大を破壊点と考えて、終了している。実験における側圧は、空気圧を水圧に置換することによって載荷している。側圧は精密ブルドン型圧力計(0.15級、フルスケール6kgf/cm²最小目盛0.02kgf/cm²)で制御する。

この圧力制御は、air-regulatorにより行なっている。air-regulatorは高精度の圧力制御弁であり、一次圧の変化に影響されず、所定の二次圧を得ることができる特徴を持っている。

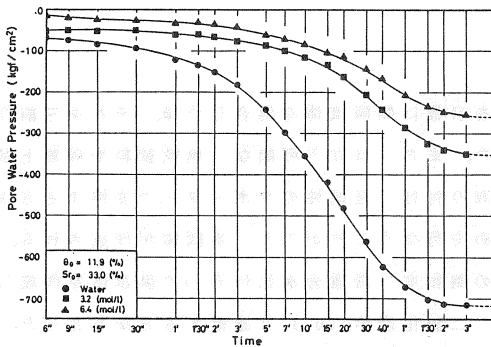


図-22 間隙水圧の時間変化(Sre=30%)

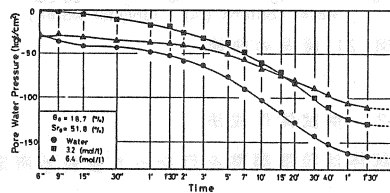


図-23 間隙水圧の時間変化(Sre=50%)

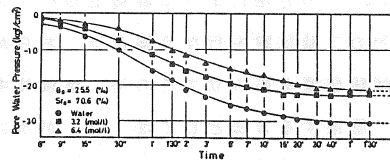


図-24 間隙水圧の時間変化(Sre=70%)

一次圧の許容最大圧力は 17.5kgf/cm^2 、二次圧の制御範囲は、 $0\sim 10.5\text{kgf/cm}^2$ 、精度は 7mm 水頭(0.0007kgf/cm^2)である。また実験に用いたパルスモーターは、4段変速方式であり、 $0.004\text{mm/min}\sim 2.7\text{mm/min}$ の範囲の定ひずみ速度が得られるようになっている。

(c) 非排水(非排気)せん断試験

非排水せん断試験は、間隙水の排水がないため比較的速いひずみ速度 $0.5\%/min$ のひずみ制御で行なっている。間隙空気圧は供試体上端面で計測しているが、このひずみ速度の下でも間隙空気圧の変化に十分追従すると考えられる。実験方法は、供試体側面にろ紙を巻かないこと、ひずみ速度が異なることを除けば全て排水せん断試験と同様である。

(d) 等方圧縮試験

等方圧縮試験は、排水、非排水を問わず段階的に例えば、 $0.2, 0.4, 0.8, 1.6, 3.2, 4.8\text{kgf/cm}^2$ として時間間隔を、供試体の圧縮と間隙水圧が定常となる時間を考慮して各3時間に統一して行なっている。実験方法は、側圧載荷の時点までは、せん断試験法と同じであり側圧を変化させる試験である。

(e) 平均主応力一定試験

平均主応力一定試験は、排水(排気)状態の下で行なっている。この実験方法も側圧載荷の時点までは前述の実験方法と同じである。等方圧縮後、軸方向圧縮における軸応力の増加に伴い平均主応力を一定に保つために、側圧を減少させる操作をしなければならない。つまり、供試体には、せん断応力のみが発生することになる。この制御は軸応力をマイコンのディスプレイで監視して、ブルドン型圧力計を見ながらair-regulatorにより行なっている。なお、軸方向圧縮のひずみ速度も排水試験と同様 $0.05\%/min$ のひずみ制御で行なっている。実験は主応力差が一定となった時点で中止している。

5 おわりに

本報告では、不飽和土用の3軸セルを試作し、そのセルの構造、あるいは各計測系の精度について述べた。試験の結果のデータは、マイコンに集録し、解析できるようにした。また、代表的な5種類の試験法の概要について述べた。今後、側圧の制御を可能にして、K₀圧縮試験装置へと改良を行なう予定である。

謝辞 本実験を行うに当たり、助力をいただいた頼木清隆君(愛媛県、S.56年大学院修了)、安原敏君(岡山市、S.58年大学院修了)、川崎元君((株)大本組、S.60年大学院修了)、木村裕史君((株)三井建設、S.62年大学院修了)らに深く感謝の意を表します。また、本研究の遂行にあたり土質工学会中国支部の「不飽和まさ土の諸問題に関する研究委員会」の方々より貴重な助言を頂きました。

参考文献

- 1) 足立紀尚, 西垣誠, 小川豊和: 不飽和土の実験装置及びその試験例, 第31回土木学会年次学術講演会講演概要集, 第Ⅲ部門, 1976, pp.413-414.
- 2) 川上浩, 阿部広史: 不飽和土三軸試験時の体積変化挙動と構造崩壊, 信州大学工学部紀要, 第44号, 1978, pp.109-121.