

三軸試験におけるメンブレンペネトレーションの測定

三浦 哲彦・山本 哲朗*

Measurement of Membrane Penetration in Triaxial Test

Norihiko MIURA and Tetsuro YAMAMOTO

Abstract

Membrane penetration in high pressure triaxial tests were measured by two different methods and some discussions were made on the results obtained. For the dense sand, it was found that the membrane penetration obtained by the two methods gave approximately the same value. For the loose sand, however, the method based on the assumption that the material was isotropic, gave a significantly larger amount of membrane penetration than that measured by the alternative extrapolation method in which a set of compression tests were performed on several specimens which contain metal rods of different diameters. This was considered to be caused by the anisotropic fabric of the loose sand. Typical relation curves between membrane penetration and hydrostatic pressure were presented to be used for the correction of membrane misfit in high pressure triaxial tests.

1. ま え が き

土の強度・変形特性を調べるために広く用いられている三軸試験では、一般にうすい円筒状ゴム膜（メンブレン）で試料を包み、その外側から静水圧および軸荷重を加えることによって供試体にある応力条件が与えられる。供試体の直径は、メンブレンの外側で測定した値からゴムの厚さを差し引いて求められる。この供試体に静水圧を作用させたときの体積変化量は、試料に接続されたビューレットへの排水（気）量を測定するか、もしくは三軸室に送り込まれた液体（普通は脱気水）の量を観測することによって間接的に求めることが多い。ところが、この測定値には材料の骨格構造自身の容積変化量のほかに、それとは無関係な、メンブレンが試料表面の粒子間げきにくい込むことによって生じる量が含まれていて、供試体の体積ひずみや強度等を計算する場合に誤差を生じる原因となる。メンブレンペネトレーションと呼ばれるこの現象に起因する種々の誤差は、材料の平均粒子径が 60μ より大きい場合には無視できないとされている¹⁾。排水三軸試験におけるメンブレンペネトレーションの量は、通常次の二つの方法によって調べられている。第1の方法は、材料は等方性であると仮定して、実測された見かけの体積変化量から軸ひずみの3倍、 $3\varepsilon_1$ 、を差し引き、

その残りがメンブレンペネトレーションによる量であると考えられるものである。第2の方法は、Fig. 1に示されるように金属製のロッドを試料の中央に挿入したもののについて、所定の拘束圧を付加したときの排水量を調べ、ロッドの直径を変えて得られた数個のデータに基づき、ロッドの直径が供試体のそれに一致したときの排水量を外挿法によって求め、これをメンブレンのくい込み量であるとする（本文では、この第2の方法をかりにロッド挿入法と呼ぶことにする）。後者の方法は、前者に比べてはるかに煩雑であり、また、ロッドの直径を大きくした場合に測定値に誤差を生じやすいと考えられている。通常は、これら二つの方法で測

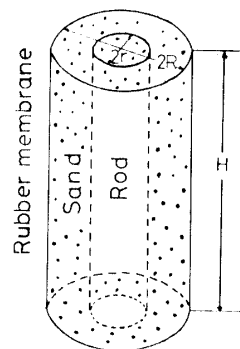


Fig. 1 Specimen used for estimating the membrane penetration

* 土木工学科

定した量がおおむね一致することを確認した上で、材料の等方性を仮定した第1の方法によってメンブレンペネトレーションによる量を決定することが多いようである。

さて、一般に行なわれている低い拘束圧の下での三軸試験においては、より正確なデータを得るためにメンブレンのくい込み量を考慮することが多いようであるが、高圧三軸試験においてそのような検討がなされた例はあまり見当たらない。筆者の一人は、先述の第1の方法によって、飽和豊浦砂に対する拘束圧力 500 kg/cm^2 までの条件下におけるゴム膜のくい込み量を求めたことがあるが²⁾、密度の低い供試体に対する計算結果は過大であると思われたので、それを利用することはこれまで差し控えてきた。

本報告は、豊浦標準砂を対象にして、飽和および乾燥の両湿潤条件に対して前記二つの方法によるメンブレンくい込み量の測定を行ない、この問題に対する結論を得ようとしたものである。

2. ロッド挿入法によるメンブレンくい込み量の測定

2.1 実験装置

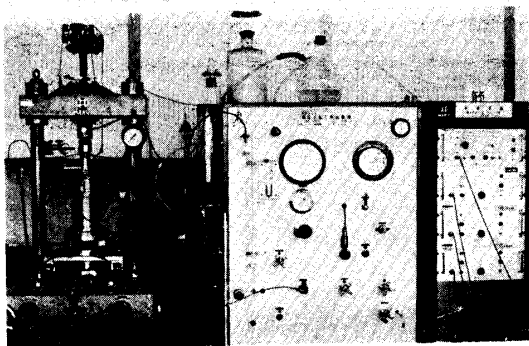


Fig. 2 General view of high pressure apparatus

実験はFig. 2に見られるような高圧三軸試験装置を用いて行なった。この装置で供試体に与えることのできる拘束圧力は最大 200 kg/cm^2 である。その基本的な仕様は、これまでの一連の研究で用いてきた装置（九州工業試験所所有）と同じであるが、供試体の体積変化、軸方向変位、軸荷重等を一層正確に測定できるようになった。また、精密オイルレギュレータとアキュムレータを併用することにより、試験中の拘束圧力の変動を小さくすることができた。さらに、三軸伸張試験も行なえるように載荷装置が工夫されている。

供試体の体積変化測定は、飽和供試体についてはビューレットに排水された水量によって、また、乾燥供試

体においては供試体に接続された閉じたビューレット内の水位を調節することによって行なった。ビューレットの水位変動はベローラム式の検出器によって変換され、レコーダ上に記録された。そのほか、軸荷重はロードセルで、供試体の軸方向変位はダイヤルゲージと変位検出器で、また拘束圧力は精密ブルドン管とゲージタイプの圧力変換器によって、それぞれ測定・記録された。

2.2 供試体の作製および試験の方法

実験に供した試料はこれまでの研究で用いてきたものと同じの豊浦標準砂であり、その粒度組成その他の物理的性質などは前報³⁾に記述されているので、ここでは省略する。

直径約 50 mm 、高さ約 125 mm のロッド入り供試体の作製は次の方法によって行なった。下部ペDESTALに厚さ約 1 mm の生ゴム製メンブレンを取付け、その中央に高さ 125 mm の鋼製ロッド（ロッドの直径： $10, 18, 26, 34$ および 42 mm ）をセットし、メンブレンとロッドとの間に試料を充てんした。試料の密度は、これまでの実験条件と合わせるために、密づめ供試体では初期間げき比 $e_0 = 0.61$ 、ゆるづめ供試体では $e_0 = 0.84$ にできるだけ近づけるようにした。密づめ供試体の試料充てんのために、Fig. 3に示されたゴムチップ付きタンパーをロッドの直径に合わせて5本

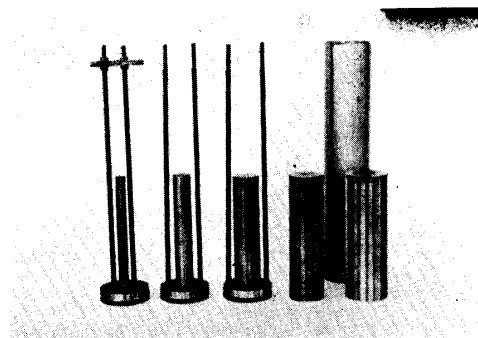


Fig. 3 Rod and tamper

用意した。乾燥密づめ供試体は、珪乾燥後にデシケータに保存しておいた試料を10数層に分けて、各層100回づつ突固めて作製し、一方飽和密づめ供試体は同じようにして得た試料に脱気水を供給するという方法で準備した。乾燥ゆるづめ供試体は、容器の先に取り付けた細いガラスパイプを通して試料を注ぐことにより作ったが、このときガラスパイプの先端を試料面からおよそ 5 mm の高さに保つように注意した。飽和ゆるづめ試料の作製は、メンブレンとロッドの間に満たした

水の中に試料を少しずつ落し込むことによって行なった。ゆるづめ供試体においては、上部ベDESTALをセットする際に生じやすい供試体上端部のくびれをなくするために、試料高さをロッド高さより若干高めにせざるを得なかった。

試料に対する拘束圧の付加は段階的に行ない、各圧力段階における供試体体積変化が、1時間当り 0.1cm^3 以下になるのをまって次の段階に移った。

3. 実験結果と考察

3.1 ロッド挿入法による測定結果

ある圧力変化の下で測定される供試体の見かけの体積圧縮量を ΔV_a 、試料の実質的な体積変化量を ΔV_s 、そしてメンブレンペネトレーションによって生じた過剰な測定量を ΔV_m とすると、 $\Delta V_a = \Delta V_s + \Delta V_m$ である。Fig. 1に示された記号を用いて、

$$\begin{aligned} \Delta V_s &= v_s V_s \\ &= v_s \pi H(R^2 - r^2) \\ &= v_s \pi HR^2(1 - k) \end{aligned} \quad (1)$$

ここに、 $k = (r/R)^2$ 、 v_s は試料の体積ひずみを表わす。次に、 ΔV_m は、鋼製ベDESTALに接した上下面を除く供試体の表面積 S のみに関係するので、

$$\Delta V_m = 2\pi RHt \quad (2)$$

ここに、 t はメンブレンの等値くい込み深さとも呼ぶべき量である。供試体は特定のモールドを用いて成形される限り、いつもほぼ同じ寸法を持つから、(1)および(2)式における H および R は定数であると考えてよい。また、 v_s および t は供試体に加えられる静水圧 p のみの関数であるので(v_s については、試料とロッドおよびベDESTALとの間の摩擦はないものとする)、一定の圧力変化の下ではある定まった値をとる。したがって、

$$\Delta V_a - \Delta V_m = v_s \pi HR^2(1 - k) = \alpha(1 - k) \quad (3)$$

の左辺は k の一次式となり、 $k \rightarrow 1$ 、すなわち $r \rightarrow R$ のとき ΔV_a は ΔV_m を与える。すなわち、直径の異なる一組のロッドを用いて一連の実験を行えば外挿によって ΔV_m の値が知れる。メンブレンペネトレーションを求めるのに、 $(\Delta V_a - \Delta V_m) \sim r$ 関係を外挿して求めるケースが多く見受けられるが、この関係は二次式であって外挿を誤る恐れがある。

3つの試料条件に対して調べた(3)式の関係はFig. 4に示されるようであった。飽和ゆるづめ砂についての限られたデータは同図(c)中に白丸でプロットされている。これらの結果から求められた ΔV_m の値を供試体の単位体積当りの値、 v_m 、に直して圧力 p との関係

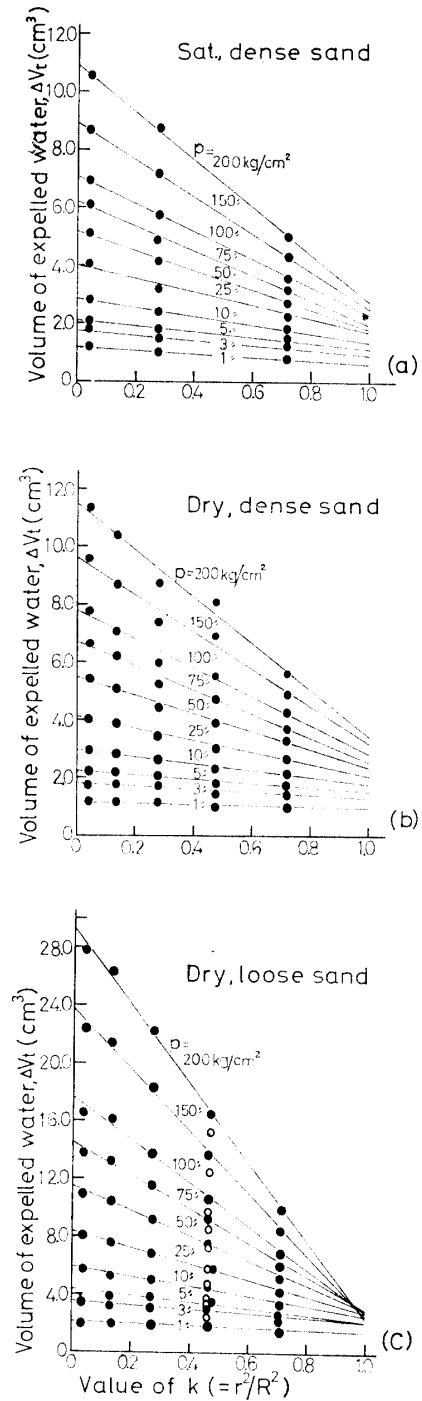


Fig. 4 Volume of water expelled from specimen

を調べたのが Fig. 5 である。El-Sohby は、数種類の砂について 6.3kg/cm^2 までの圧力範囲で v_m と圧力 p の対数との間に直線関係のあることを示しているが³⁾、同様な関係はかなり高い圧力に至るまで成り立つことがFig. 5 からうかがえる。なお、メンブレンのくい込み量は、本来試料とメンブレンの接触面積に關係する量であって、供試体の単位体積当りの量で表わすのはおかしいのであるが、利用するには v_m は

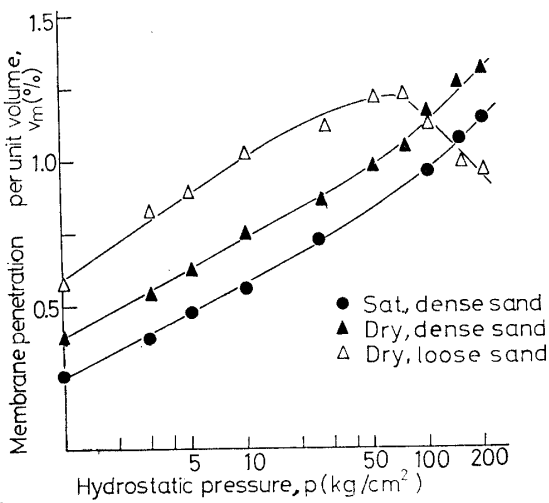


Fig. 5 Membrane penetration

便利な量であるので、ここでもそのように表わしている。

Fig. 5において、乾燥ゆるづめ砂の v_m 値はある圧力を越えると急に減少しはじめています。これは次節で述べる材料の等方性を仮定した方法による場合にも認められることで、粒子破碎現象と関係がありそうである。密づめ供試体においても、さらに高い圧力の下では同様な傾向を示すことが予測される。

3・2 材料の等方性を仮定して求めた v_m 値

等方性材料においては、等方圧力 p の作用によって生じる体積ひずみ v_{si} は主ひずみ $\epsilon_1 (= \epsilon_2 = \epsilon_3)$ の3倍にはほぼ等しい。したがって、この場合の v_m 値は、 $v_a (= \Delta V_a / V_0)$ を見かけの体積ひずみとして、

$$v_m = v_a - 3 \epsilon_1 \tag{4}$$

湿潤条件および密度条件の異なる4種類の試料について、これまでに行なってきた200個に近い高圧三軸圧縮試験結果を基に、(4)式の関係から v_m 値を求めたところバラツキがひどくて明確な傾向を見出すことは困難に思われた。そこで、次のようにデータを整理し直して v_m の値を推定してみた。(4)式を書き改めて、

$$v_m = v_a \left(1 - \frac{3 \epsilon_1}{v_a} \right) = v_a \left(1 - \frac{3}{x} \right) \tag{5}$$

上式右辺において、 v_a および $x (= v_a / \epsilon_1)$ の値は、おのおの圧力 p との間に比較的明確な関係を見出すことができた。これらの関係から、多数のデータを代表する1本の $p \sim v_a$ および $p \sim x$ 曲線をまず決定し、しかるのち(5)式に關係する2つの代表値を用いて v_m の値を求めてみたものである。

等方圧力 p と x との関係は Fig. 6に見られるよう

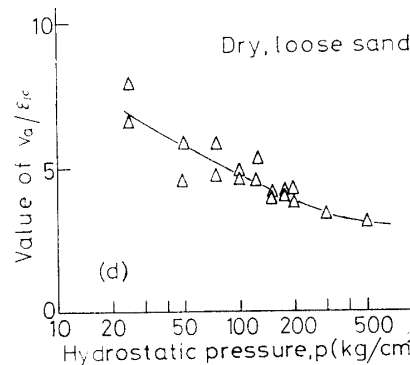
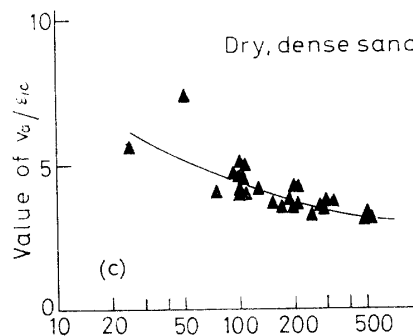
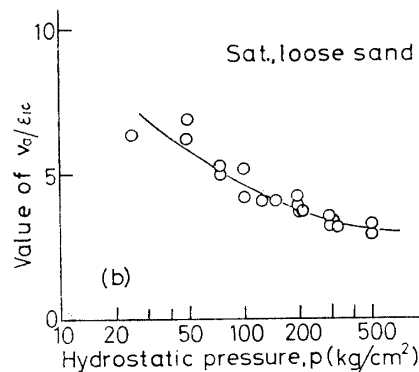
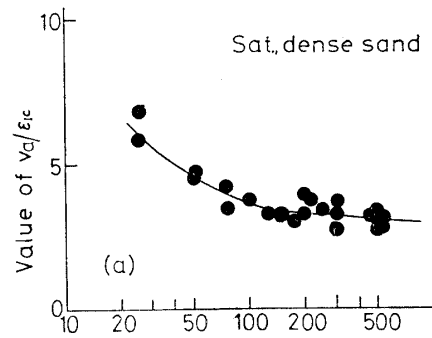


Fig. 6 Ratio of apparent volumetric strain to axial strain in function of hydrostatic pressures

であった。試料条件の異なる4本の代表曲線を比較して、密づめ飽和試料の曲線は乾燥試料のそれより少し

低い v_a/ϵ_1 値を与えること、ゆるづめ供試体では2本の曲線はほとんど重なること、などが知れる。また、4本の代表曲線はいずれも、圧力が高くなるにしたがって $v_a/\epsilon_1 = 3$ に漸近している。これは、加えられる圧力が高くなるほど材料の等方性は増すことを意味しており、同時に、高圧下ではメンブレンペネトレーションが小さくなることをも示唆するものである。

次に、 p と見かけの体積ひずみ v_a との関係は Fig. 7 に示されるようであった。飽和密づめ供試体の曲線

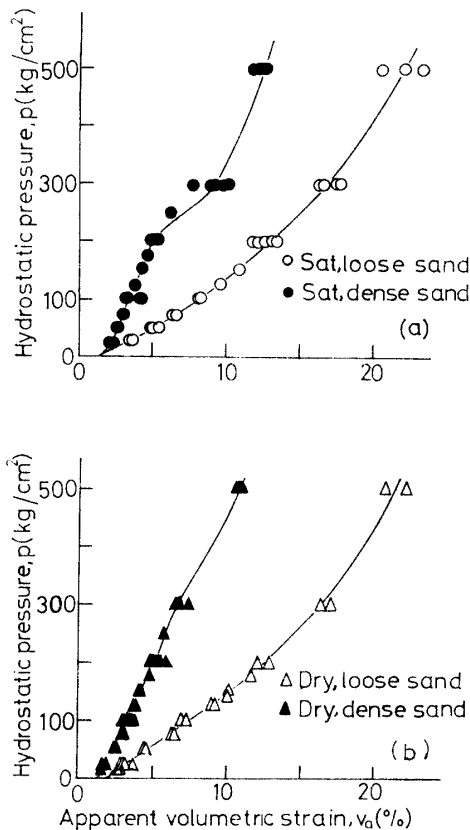


Fig. 7 Apparent volumetric strain under hydrostatic pressures

は、特異な変化を見せているが、これは粒子破碎に原因するものである⁴⁾。乾燥試料との挙動の差については、メカノケミカルな観点から説明できるものと考えている⁵⁾。Fig. 6 および7における各代表曲線で与えられる値を用いると、ある圧力 p における平均的 v_m の値は(5)式により求められ、このようにして Fig. 8 の $p \sim v_m$ 関係が得られる。密づめ供試体の $p \sim v_m$ 曲線は、おおむねロッド挿入法で求めた結果と重なるようである。そして、予測されたように、高圧域においては v_m の値はかえって減少する傾向を示している。

$p \sim v_m$ 曲線が高圧域において見せるこのような傾向は、同じ圧力域において試料間げき比が急速に減少し

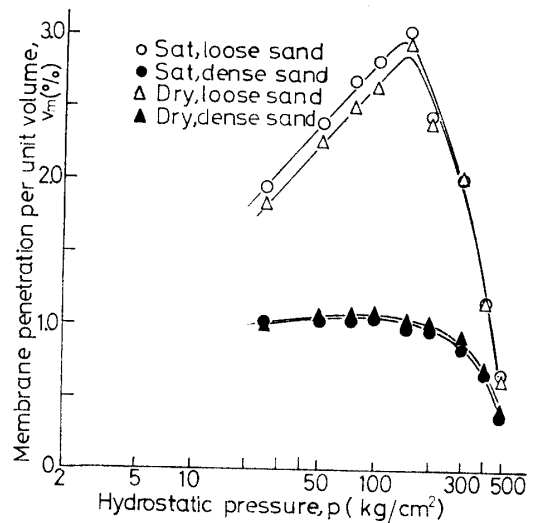


Fig. 8 Membrane penetration

ていくのとよく対応しているように思われる。 $e \sim \log p$ 曲線の勾配、すなわち圧縮指数、の急激な変化は粒子破碎現象と密接な関係にある⁶⁾ことから、高い圧力のもとで v_m が小さくなるのもやはり粒子破碎に原因していると推論される。すなわち、比較的低い圧力の下で粒子間げきに貫入し、その空間を満たしていたゴムは、主として粒子破碎に起因して、粒子間げきがせぼめられていくのに伴ってゴム自身も圧縮されるはずであり、その結果ゴムのくい込み量(容積)は減少するのである。

密づめ供試体に関しては、先述のように二つの方法によって求めた v_m 値はほぼ一致するのであるが、ゆるづめ供試体の場合には、二つの方法によって求めた v_m の値はかなりの違いを見せている (Fig. 5 と Fig. 8)。両者のうちいずれがより確からしいかについては、次のように判断される。二つの方法によって求めた v_m の値がほぼ接近していることから、Fig. 5 に与えられた密づめ供試体に対する v_m 値はほぼ正しいものとする。Fig. 8 に示された結果によれば、ゆるづめ供試体の v_m 値は密づめ供試体のそれに対してつねに2倍程度の大きさを示している。試料へのメンブレンのくい込み量は、先にも述べたように、供試体の間げき比あるいは、空げき率と密接な関係にあると考えられるが、両供試体の間げき比が、ほぼ接近する高圧域においても、なお両者の v_m 値に大きな開きが認められるところから、Fig. 8 に与えられたゆるづめ供試体の v_m 値は過大であると判断された。このような結果を生じた原因は、材料の等方性を仮定したところにあると思われた。

いま、乾燥ゆるづめ砂に対する正しい v_m 値は Fig. 5 で与えられるものとする。この値と Fig. 8 に示された値 (以後 \bar{v}_m と書く) との差 ($\bar{v}_m - v_m$) は、 $\epsilon_1 = \epsilon_2 = \epsilon_3$ と仮定したことによって生じたのであるから、これを用いて乾燥ゆるづめ砂を等方圧力で圧縮した場合の軸ひずみ、 ϵ_1 と $\epsilon_2 (= \epsilon_3)$ との大小関係を検討することができる。

$$\begin{aligned} v_a &= v_m + (\epsilon_1 + 2\epsilon_3) \\ &= \bar{v}_m + 3\epsilon_1 \end{aligned} \quad (6)$$

これから

$$\begin{aligned} \epsilon_3 - \epsilon_1 &= (\bar{v}_m - v_m) / 2 \\ \epsilon_3 &= (\bar{v}_m - v_m) / 2 + \epsilon_1 \end{aligned} \quad (7)$$

p の増加に伴う ($\epsilon_3 - \epsilon_1$) および ϵ_3/ϵ_1 の値の変化は Fig. 9 のようであった。このようにして求められた $\epsilon_3/\epsilon_1 \sim p$ 曲線は、等方圧力下で圧縮した供試体についての ϵ_3/ϵ_1 の実測値とよく連なるようである。なお、 ϵ_3/ϵ_1 の実測値は、一度圧縮圧力を受けた供試体は圧力解放の過程では等方的に膨脹する、と仮定して次の方法により求めたものである。所定の等方圧力で供試体を圧縮したあと 1 kg/cm^2 まで静水圧を低下させる。その後、飽和供試体では排水バルブを閉じて、供試体を非排水状態において、圧力を大気圧まで下げる。乾燥供試体については、静水圧を 1 kg/cm^2 に低下せしめ、しかるのち供試体に真空ポンプを接続して吸引しつつ静水圧を解放した。三軸室を解体したのちに供試体の直径ならびに高さをノギスで測定し、それぞれの収縮量を初期値で除して ϵ_1 および ϵ_3 を計算したものである。

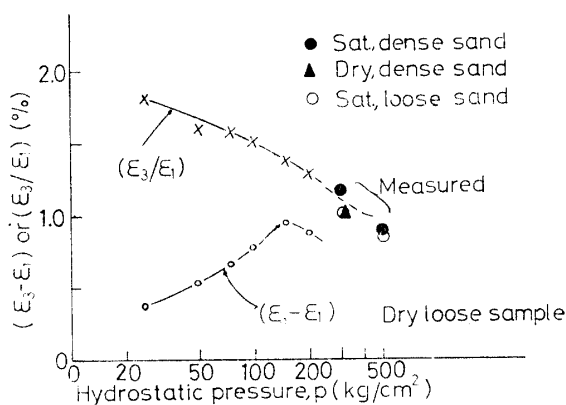


Fig. 9 Change of strain ratio under isotropic pressure

以上の検討によって、ゆるづめ供試体に対するメンブレンのくい込み量については、ロード挿入法で求めた値の方がより確からしいことが分かった。このことによって逆に、ゆるづめ供試体の静水圧負荷以前の粒

子の配列状態はかなり高い異方性を有するものと推察される。これに対して、密づめ供試体の場合には、初期状態における異方性は、かりにあるにしてもそれほど高いものでないと考えられる。

3.3 側方拘束条件での砂の圧縮特性

ロード挿入法における圧縮試験は、結果的に $\epsilon_2 \approx \epsilon_1 = 0$ なる側方拘束条件で圧縮を行なったことになる。Fig. 4 における $k=0$ ($r=0$) 軸上の切片の値を用いて、側方拘束条件における乾燥供試体の体積ひずみを計算し、これらを、等方圧力条件下で同一試料が示した体積ひずみと比較検討した。その結果は Fig. 10 に示されている。以上において、サブスクリ

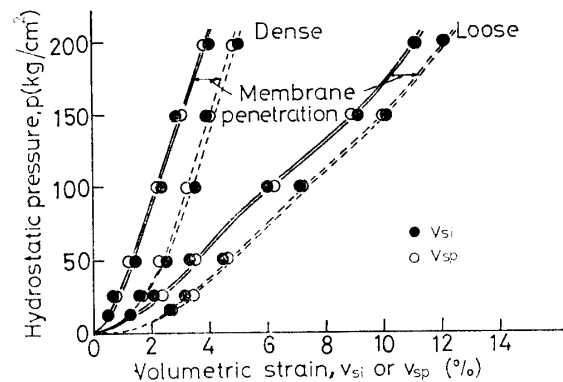


Fig. 10 Comparison of volumetric strain due to isotropic compression test, v_{si} and confined compression, v_{sp}

プト c は側方拘束条件を、同じく i は等方圧力条件を意味するものとする。図において、両条件下での体積ひずみ v_{sp} および v_{si} は、乾燥密づめおよび乾燥ゆるづめの両者ともに、ほぼ同じ値を示しているのが注目される。乾燥密づめ試料の場合には、二つの方法によって求めた v_m 値がほぼ一致することと前節での議論とによって、 $\epsilon_{1i} \approx \epsilon_{2i} = \epsilon_{3i}$ であると考えられることができるが、ゆるづめ供試体では $p \leq 200 \text{ kg/cm}^2$ の範囲では $\epsilon_{1i} < \epsilon_{2i} = \epsilon_{3i}$ であることに注意した上で、次のように $\sigma_3 (= \sigma_1 = \sigma_2 = p)$ に対する ϵ_{3c} と ϵ_{3i} の値を比較することができる。

$$\begin{aligned} v_{3c} &= \epsilon_{3c} \\ v_{3i} &= \epsilon_{1i} + 2\epsilon_{3i} \end{aligned} \quad (8)$$

Fig. 11 に示された結果によれば、密づめ供試体の場合、 v_{3c} は v_{3i} のおよそ 1.5 倍となっている。 σ_2 が同じ大きさである場合には、側方拘束条件における平均主応力は等方圧力条件下のそれより小さい。それにもかかわらず、前者では試料に偏差応力が作用してい

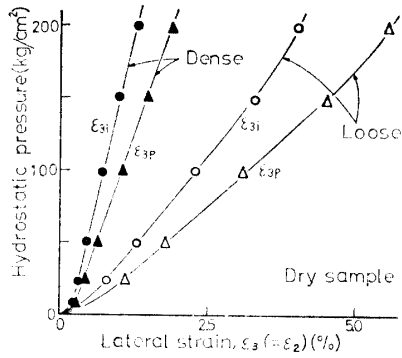


Fig. 11 Comparison of lateral strain due to isotropic compression test ϵ_{3i} and confined compression ϵ_{3c}

るために、その粒子破砕量は、後者のそれより多いであろうと予測された⁷⁾。そこで、 $p=200\text{kg/cm}^2$ で圧縮された乾燥密づめ試料について粒度組成を調べたところ、次のような差のあることが分かった。粒子破砕量を 149μ フルイ通過率で比較すると、原砂のそれが3.4%であったのに対し、等方圧力で圧縮したものは5.1%、そして側方拘束条件でのそれは6.0%であった。

4. ま と め

豊浦標準砂を対象にして、厚さ約1mmの生ゴム製メンブレンを用いた場合に、高拘束圧下で生じるメンブレンペネトレーションを測定し、次のような結果を得た。ロッド挿入法によって求めた密づめ供試体についての v_m 値は、材料の等方性を仮定して求めた v_m 値 (Fig. 8) とほぼ一致する。しかし、ゆるづめ供試体の場合には、後者の方法で求めたメンブレンのくい込み量は、前者のその2~3倍という大きな値であった。ゆるづめの場合に、二つの方法で求めた v_m 値が一致しないのは、材料の等方性を仮定したことに原因していると考えられた。このことから、ゆるづめ供試体のメンブレンくい込み量を求めるのに材料の等方性を仮定する方法は採用できないと結論できよう。

Fig. 5に示された結果およびFig. 8の密づめ供試体に関するデータをまとめて、本実験に用いた条件 (メンブレン厚さ約1mm, 豊浦砂, 供試体寸法 $2\pi RH \approx 2\pi \times 5 \times 12.5$) でのメンブレンくい込み量を求める図を Fig. 12のように与えておきたい。この図において湿潤条件を考慮せずに1本にまとめたのは、高压域では両者はほとんど一致すること、低压域では粒子破砕はほとんど生じないのであるから両者の間に差を生じるとは考え難いこと、などの理由による。

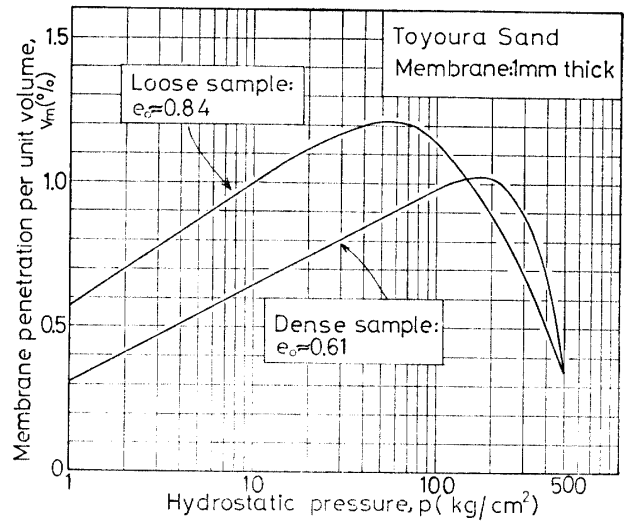


Fig. 12 Membrane penetration per unit volume to be used for the correction of membrane misfit in high pressure triaxial test

Fig. 12をもとにして、既発表の高圧三軸試験データを補正する必要がある。この補正によって数値が著しく変わるのは、Fig. 10で示されているように、等方圧力下における体積ひずみの量である。特に密づめ供試体の低圧域においては、補正後の体積ひずみは補正前の50%以下になってしまう。このような補正によって、たとえば文献8)中に示した、 $\log p \sim \log v_a$ 関係は広範な圧力域にわたって、直線性を示すようになる。

次に、せん断試験で得られた軸差応力などの供試体強度に関するデータも、ただだか2%程度ではあるが、補正值は低くなる。これは、応力計算に際して供試体の断面積補正を行なうので、そのときに用いるせん断前の供試体体積 V_0 および断面積 A_0 の値が補正の対象になることによって生じるものである。すでに与えられているデータを補正するのに、たとえば軸差応力 $(\sigma_1 - \sigma_3)$ の補正後の値 $(\sigma_1 - \sigma_3)^c$ は次の式を用いれば簡単である。

$$\left. \begin{aligned} (\sigma_1 - \sigma_3)^c &= (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot \left(\frac{1 - \nu}{1 - \nu + \nu_m} \right) \\ \text{ただし, } (1 + \nu_a)\nu_m &= \nu_m \\ \text{または, さらに簡単に,} \\ (\sigma_1 - \sigma_3)^c &= (\sigma_1 - \sigma_3) \cdot (1 - \nu_m) \\ \text{ただし } (1 + \nu_a)\nu_m &= \nu_m \\ (1 + \nu)\nu_m &= \nu_m \\ 1/(1 + \nu_m) &= (1 - \nu_m) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここで、 ν はせん断中に生じた体積ひずみ

($v = \Delta V/V_0$), v_a は対応する拘束圧力によって生じる圧縮ひずみ (Fig. 7 参照), そして v_m は Fig. 12 に与えられているメンブレンペネトレーション (ただし $\Delta V_m^*/V_0$) である. 軸差応力の補正值が得られれば, 主応力比 σ_1/σ_3 , あるいは平均主応力 $p (= \sigma_1 + 2\sigma_3/3)$ などの補正值も容易に求められる.

同様に, せん断中の体積ひずみ, 間げき比などについても, それぞれ若干量の補正を必要とする. 後日, これらの既発表データを補正した上で一括して提示したいと考えている.

最後に, 実験に用いた高圧三軸試験装置を製作するにあたって大原資生教授の暖い御指導と御援助を賜わったことを記し, 深謝の意を表します. また, 本研究は昭和49年度文部省科学研究費の補助を受けた.

文 献

- 1) P.L. Newland and B.H. Allely: *Geotechnique*, **9**, 174 (1959)
- 2) 三浦哲彦・山内豊聡: 土木学会論文報告集, **203**, 45 (1972)
- 3) M.A. El-Sohby: *Proc. ASCE*, **95**, SM 6, 1393 (1969)
- 4) 三浦哲彦・山内豊聡: 土木学会論文報告集, **193**, 69 (1971)
- 5) N. Miura and T. Yamanouchi: *Tech. Reps. of the Yamaguchi Univ.*, **1**, 409 (1974)
- 6) N. Miura and T. Yamanouchi: *Tech. Reps. of the Yamaguchi Univ.*, **1**, 271 (1973)
- 7) 三浦哲彦・山内豊聡・中村稔: 第25回 土木学会講演概要集, **1** (1970)
- 8) 三浦哲彦・山内豊聡: 第6回土質工学研究発表会講演集, **105** (1971)

(昭和49年10月15日受理)