研究ノート 砂の高圧三軸圧縮試験の結果に及ぼす2, 3の要因について

(Some Factors Affecting the Results of High Pressure
Triaxial Test on Sands)

三 浦 哲 彦* (Norihiko Miura)
山 本 哲 朗* (Tetsuro Yamamoto)

キーワード：圧縮／応力-ヒズミ曲線／三軸圧縮試験／砂／測定／摩擦
IGC: D0

1. ま え が き

高圧三軸試験によって高圧下の土の挙動を調べようとする場合に、通常の三軸試験におけるのと同様、メンブレンペネトレーションなどの誤差要因について検討しておくことが望まれる。しかし、高圧三軸試験に関するこの種の検討はこれまでのところごく限られた数しか行なわれていない。

本文は、高圧下における砂のせん断試験に関連して、メンブレンの強さ、メンブレンペネトレーション、および供試体とペDESTAL間の摩擦（端面摩擦）などの要因が試験の結果にどの程度の影響を及ぼすかを調べたものである。

2. 実験に用いた試料およびメンブレン

実験に用いた豊浦砂および石英砂のおもな性質は表-1および図-1に示されるとおりである。石英砂はケイ石

表-1 試料の諸性質

試 料	比重 G_s	最大粒径 $D_{max}(mm)$	50%粒径 $D_{50}(mm)$	均等係数 U_s	最大間隙比 e_{max}	最小間隙比 e_{min}
豊浦砂	2.646	0.30	0.20	1.5	0.91	0.58
石英砂	2.643	0.59	0.28	3.0	1.40	0.60

表-2 試験に用いたメンブレン

呼び名	厚さ (mm)	材 質	弾性係数 (kg/cm ²)
A	0.4(0.2×2枚)	天 然 ゴ ム	10
B	1.2	天 然 ゴ ム	10
C	1.5	ニトリルゴム	60

* 山口大学工学部土木工学科（宇部市常盤台）

• この研究ノートに対するディスカッションは昭和 52 年 7 月 1 日までにご投稿下さい。

図-1 試料の粒度分布

をクラッシャーで粉砕したのちふるい分けて用意したものであり、その粒子形状は豊浦砂のそれに比べてかなり角ばっている。

次に、メンブレンは表-2に示される3種類のものを実験の対象にした。このうちメンブレン A は、通常の三軸試験に用いられる 0.2mm 厚さのメンブレンを2重に使用したものである。各メンブレンの弾性係数は Bishop らが示した方法¹⁾に準じて測定した。

3. メンブレンの強さの影響

メンブレンの厚さあるいは材質が砂のせん断試験の結果に及ぼす影響を調べるために、前記の3種類のメンブレンを用いて豊浦砂の飽和密締め供試体（初期間隙比 $e_0 \approx 0.61$ ）を作製し、拘束圧一定の排水せん断試験を行った。得られた結果のうち、拘束圧 $\sigma_3 = 25 \text{ kg/cm}^2$ および 50 kg/cm^2 の場合の応力-ヒズミ曲線は図-2に見られるようであった。図中、A 供試体とはメンブレン A を用いた供試体を意味する（B, C についても同じ）。なお、各試験条件ごとに2～3個の実験を行ない、初期間隙比が同じであれば結果の再現性は良好であることを確かめている。また、各供試体の応力を計算するにあたっては、後述のメンブレンペネトレーションを考慮している。

図-2 拘束圧一定排水せん断試験における応力-ひずみ特性に及ぼすメンブレンの影響

さて、AおよびB供試体の応力-ひずみ曲線を比較すると両者はおおむね重なっていて、メンブレンの厚さの影響の差はほとんどないことがわかる。これに対してA、B両供試体とC供試体との間には、明らかな差異が認められる。まず、前2者に比べて後者の軸差応力は高くでているが、これは合成ゴム製メンブレンCが天然ゴム製のメンブレンAまたはメンブレンBに比べて厚い上に硬質であることから生じたものと考えられる。

次に、C供試体の体積変化はA、B両供試体のそれに比べて収縮側にやや大きく出ている。この原因の1つは、C供試体においてはメンブレンによる側方拘束が他の2者の場合に比べて幾分強く作用したことにあると思われる。このことは、試験後の供試体において次のような違いが観察されたことからもうかがえる。すなわち、AおよびB供試体においては側方への膨らみは全体的に生じているのに対して、C供試体の場合は側方への膨らみはペDESTAL付近で小さく中腹部で著しいというものであった。

拘束圧がさらに高い場合には3種類の供試体間の応力-ひずみ曲線の違いは小さくなるが、これは側圧に対するメンブレンによる側方拘束力の割合ならびに砂試料の強度に対するメンブレンの軸方向強度の割合がどちらも小さくなるためであろう。

以上の比較実験によって、砂の高圧三軸試験の結果に及ぼすメンブレンの強さの影響については天然ゴム製のメンブレンAとメンブレンBとの間に明らかな差異は認められないことがわかった。薄いメンブレンを2重に使用するのに比べて、厚さ1.2mm程度の天然ゴム製メンブレンを用いれば次のような利点がある：供試体の作製が容易である；ピンホールを生じる危険性が小さい；

数回の繰返し使用に耐え経済的である。しかし、角ばった粗粒材料を試験する場合にはメンブレンBを用いてもピンホールを生じることがある。そのような時はメンブレンの強さの影響を考慮した上でメンブレンCを用いるとよい。

4. メンブレンペネトレーションの測定

4.1 第1の方法による測定

試料の中央に金属製円柱を入れた供試体を作製し、これに等方圧力を加えたときの体積変化量を測定する。そして金属製円柱の直径が供試体のそれに一致するときの体積変化量を外そう法によって求め、これをメンブレンペネトレーションとする²⁾。

金属製円柱として5本の鋼製円柱（直径：10, 18, 26, 34 および 42mm。高さ：各々125mm）を用意した。各円柱をメンブレンの中央にセットしたのち、これとメンブレンとの間に次の方法で砂試料を充てんして直径50mm、高さ125mmの供試体を作製した。まず密づめ乾燥供試体では、円柱の直径に合わせて用意したゴムチップ付きタンパー（図-3）を用いて乾燥試料を10数層に分けて各層100回ずつ突き固めた。密づめ飽和供試体は、前述の乾燥供試体に脱気水を供給して準備した。次にゆるづめ乾燥供試体は、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製した。これと同じ密度の飽和供試体は、メンブレンと円柱との間に満たした水の中に試料を少しずつ落としこむことによって用意した。

高圧三軸圧縮試験機を用いて各供試体に等方圧力を与え次の方法によってそれぞれの見かけの体積変化量を測定した。飽和供試体の場合はそれに接続したビューレットの水位変化を直接読み取って、また乾燥供試体の場合には供試体に接続した閉じたビューレット内の空気圧がつねに一定になるようビューレット内水位をコントロールする方法¹⁾によって、それぞれの見かけの体積変化量

図-3 鋼製円柱とタンパー

図-4 $\Delta V_a \sim r^2/R^2$ 関係

を測定した。このとき圧力は段階的に増加していき、水量変化が $0.1 \text{ cm}^3/\text{hr}$ 以下になったときのビューレット水位を読み取り、その後次の圧力段階に進むようにした。

さて、ある等方圧力 p を受けた供試体について見かけの体積変化量を ΔV_a 、砂の実質の体積変化量を ΔV_s およびメンブレンペネトレーションを ΔV_m とすれば、次の関係がある。

$$\begin{aligned}\Delta V_a &= \Delta V_s + \Delta V_m \\ &= v_s \pi H (R^2 - r^2) + \Delta V_m\end{aligned}$$

ここに、 v_s は試料の体積ヒズミ、 H は供試体および鋼製円柱の高さ、また R および r は供試体および鋼製円柱の半径である。

豊浦砂および石英砂について、密度および湿潤条件を変えて $\Delta V_a \sim (r^2/R^2)$ 関係を求める実験を行なった。実験結果の1例を図-4に示す。同曲線における $r^2/R^2 = 1$ のときの ΔV_a 、すなわち ΔV_m の値を読みとり、それを供試体の初期体積 V_0 で割った値 v_m に換算し、これと等方圧力 p との関係をプロットして図-5の結果を得た。同図には煩雑になるのを避けて乾燥供試体についての結果のみを示している。同じ密度の飽和供試体についての関係曲線は乾燥供試体のそれとほぼ一致するものであった。

4.2 第2の方法による測定

材料が等方性であるとするれば、等方圧力 p によって生じる体積ヒズミ v_s は主ヒズミ $\varepsilon_1 (= \varepsilon_2 = \varepsilon_3)$ の3倍にほぼ等しい。したがってこの場合の供試体の単位体積当りのメンブレンペネトレーション v_m は、 v_a を見かけの体積ヒズミ ($\Delta V_a/V_0$) として次式で求められる。

$$v_m = v_a - 3\varepsilon_1$$

図-5 第1の方法で求めたメンブレンペネトレーション v_m と等方圧力 p との関係 図-6 第2の方法で求めたメンブレンペネトレーション v_m と等方圧力 p との関係

湿潤条件および密度条件の異なる4種類の豊浦砂供試体について上述の方法によってメンブレンペネトレーションを求めたところ図-6に示すような結果を得た。この図において、高い圧力域では圧力の増加に伴ってメンブレンペネトレーションはかえって減少するのが注目される。また、図-6の結果は先に第1の方法で求めた結果(図-5)と若干異なっている。これらのことについて以下に検討する。

4.3 測定結果についての検討

図-5と図-6に示された豊浦砂供試体のメンブレンペネトレーション測定結果を比較して、密づめ砂供試体においては2つの方法で測定した結果はほぼ一致するが、ゆるづめ砂供試体の場合には両測定値はかなりくい違う

ことがわかった。ゆるづめ砂供試体についての両測定値の違いはおもに材料の等方性を仮定したことの原因していることは、次のような実験から明らかであろう。

飽和および乾燥両供試体について所定の圧力で圧縮した後、 1kg/cm^2 まで圧力を徐々に低下せしめる。その状態で排水バルブを閉じ、圧力の解放および三軸室の解体を行ない、しかるのちにノギスによって供試体の直径および高さを測定する。これらの値と圧縮前に測定しておいた値との差から、供試体の軸方向および半径方向の不可逆的ヒズミ $\bar{\epsilon}_1$ および $\bar{\epsilon}_3$ を求める。 $\bar{\epsilon}_1$ および $\bar{\epsilon}_3$ の中には可逆的なヒズミ量は含まれていないが、可逆的ヒズミ量はほぼ等方的であると考えられるので、 $\bar{\epsilon}_3/\bar{\epsilon}_1$ の値を調べることによってその材料の等方性を判断することができよう。3種類の豊浦砂供試体についての実験

図-7 ヒズミ比 $\bar{\epsilon}_3/\bar{\epsilon}_1$ と等方圧力 p との関係

図-8 等方圧力下における豊浦砂ならびに石英砂供試体のメンブレンペネトレーション

結果は 図-7 に示されるようであった。この図から、密づめ供試体はほぼ等方性であると考えてよいが、ゆるづめ供試体の場合には、低い圧力域では特に材料の等方性を仮定することは問題であることがわかる。

以上の検討により、メンブレンペネトレーションの測定において密づめ砂供試体では2つの方法のうちのいずれによってもほぼ同じ結果が得られるが、ゆるづめ砂供試体については面倒でも第1の方法によらなければならないことが明らかになった。2つの方法によって得られた実験データの中で妥当と思われるものを総合して、高さ 125mm, 直径 50mm の供試体に対する単位体積当りのメンブレンペネトレーション v_m と等方圧力 p との関係を 図-8 のように与えておく。この図において乾燥試料と飽和試料の区別をつけていないのは、両者の差は測定誤差の範囲に入ると考えたからである。メンブレンBを用いた豊浦砂供試体および石英砂供試体の $v_m \sim p$ 曲線は山形をなして高圧域で v_m の値は減少しているが、これは粒子破碎現象と密接に関係していると思われる⁸⁾。すなわち、比較的低い圧力の下で粒子間ゲキに貫入しその空間を埋めていたゴムは、主として粒子破碎に起因して粒子間ゲキがせばめられていくのに伴ってゴム自身も圧縮され、その結果 v_m の値は減少するものと推察される。また、石英砂供試体のメンブレンペネトレーションは豊浦砂供試体のそれよりわずかに大きいことが、これは石英砂の最大粒径が豊浦砂の最大粒径より大きいことによるものと考えられる。さらに、豊浦砂供試体のメンブレンペネトレーションはゴムの厚さが薄いほど、また材質が軟らかいほど増加することがわかった。

5. 端面摩擦の影響

砂の高圧三軸圧縮試験における端面摩擦の影響はすでに Roy と Lo⁴⁾ によって詳細な報告がなされている。それとほぼ同じ方法によって乾燥密づめ豊浦砂供試体について実験を行ない次のような結果を得た。

供試体の端面摩擦を減じるために用いたペダスタル（潤滑性ペダスタルと呼ぶ）の構造は次のようである。ペダスタルの直径は 56mm であり、その中央部に直径 10mm のポーラスメタルがはめこまれている。この部分をそれよりやや広い口紙で覆い、その上にシリコングリースを薄く塗った

図-9 応力-ヒズミ特性に及ぼす供試体の端面摩擦効果

図-10 摩擦性ペDESTALおよび潤滑性ペDESTALを用いた供試体のセン断中における比表面積増加量の分布

ドーナツ状ゴムシート (0.2mm 厚) を置く。この潤滑性ペDESTALを用いた供試体の作製方法ならびに三軸圧縮試験方法は、従来のペDESTAL (摩擦性ペDESTALと呼ぶ) の場合と同じである。

乾燥密づめ豊浦砂供試体について前述の2つのペDESTALを用いて拘束圧一定の排水セン断試験を行ない、図-9に示すような結果を得た。摩擦性ペDESTALを用いた供試体においては、最大軸差応力に達したあとの応力低下がはっきり認められる。これに対して潤滑性ペDESTALを用いたものでは、前者より大きな軸ヒズミにおいてピークに達したあと、応力はほぼ一定の状態を保っている。このような摩擦性ペDESTALならびに潤滑性ペDESTALを用いた供試体の軸差応力の違いは石英砂につ

いても認められた⁵⁾。

試験後の供試体の形状は、Roy らがすでに示した⁴⁾ように摩擦性ペDESTALを用いた場合にはタル状であったが、潤滑性ペDESTALを用いた供試体ではシリンダーに近い形状であった。端面の拘束条件はセン断中の粒子破碎の分布にも影響を及ぼすことが知られている。そこで試験試料を軸方向に5段階に分割し、そのおのおのについて著者らが粒子破碎量の尺度として用いている比表面積増加量⁶⁾を調べ、図-10のような結果を得た。これによると、軸ヒズミ (自然ヒズミ) が33%程度に達するまでは潤滑性ペDESTALを用いた場合の供試体内部の粒子破碎量の分布は比較的均一であることがわかる。しかしさらに大きい軸ヒズミを与えた場合には、潤滑性ペDESTALの効果は減少していくようである。一方、供試体全体にわたる平均的な比表面積増加量については、両供試体の差はあまり大きくない。これは摩擦性ペDESTALを用いたものでは、端面部と中央部との粒子破碎量の著しい違いが相殺されたためと考えられる。

6. ま と め

砂の高圧三軸圧縮試験を行なう場合の問題点の中で、メンブレンの強さの影響、メンブレンペネトレーションおよび端面摩擦の影響について実験的検討を行ない、次のような結果を得た。

(1) 天然ゴム製のメンブレンであれば厚さ 1.2mm 程度のものを用いても試験結果に大きな影響を及ぼさない。この程度の厚さのメンブレンを用いれば、薄いメンブレンを2重にして使用するのに比べて供試体の作製が容易であり、ピンホールの発生危険は少なく、また経済的である。

(2) 密づめ砂供試体においては2つの方法で測定したメンブレンペネトレーションはほぼ同じような値であった。しかし、ゆるづめ砂供試体の場合は材料の等方性を仮定することには問題があり、面倒ではあるが金属製ロッドをそう入する方法 (第1の方法) によらなければならない。測定の結果を総合して、豊浦砂供試体および石英砂供試体に対するメンブレンペネトレーション v_m と等方圧力 p との関係図を与えた。

(3) ペDESTALの端面摩擦は応力-ヒズミ特性およびセン断中の試料の粒子破碎特性に影響を及ぼす。これらの影響は潤滑性拡張ペDESTALを用いることでかなり取り除くことができる。しかし、試料全体の平均的粒子破碎量に関しては、両ペDESTALを用いた供試体間で大きな差はないことがわかった。

最後に、本実験を行なうにあたって種々便宜を計っていただいた山口大学大原資生教授に感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) Bishop, A.W. and Henkel, D.J. (1962): The Measurement of Soil Properties in the Triaxial Test, Edward Arnold Ltd., London, 2nd ed., pp. 71—168.
- 2) Roscoe, K.H., Schofield, A.N. and Thurairajah, A. (1963): "An evaluation of test data for selecting a yield criterion for soils," Laboratory Shear Testing of Soils, STP 361, ASTM, pp. 114—117.
- 3) Miura, N. and Yamanouchi, T. (1973): "Compressibility and drained shear characteristics of a sand under high confining pressures," Technology Reports of the Yamaguchi Univ., Vol. 1, No. 2, pp. 274—279.
- 4) Roy, M. and Lo, K.Y. (1971): "Effect of end restraint on high pressure tests of granular materials," Canadian Geotechnical Journal, Vol. 18, pp. 579—588.
- 5) 三浦哲彦・山本哲朗・東島俊二 (1975): 石英砂の高圧下のせん断特性に及ぼす初期粒度の影響, 「土木学会中国四国支部第 25 回年次学術講演会一般講演概要」, pp. 97~98.
- 6) 三浦哲彦・山内豊聡 (1975): せん断応力下の砂の粒子破碎に関する実験的考察, 「九州大学工学集報」, Vol. 48, No. 2, pp. 69~73.

(原稿受付, 1976. 1. 12)