

日本大学理工学部 正員 宮森建樹
北九州市 白石孝雄

1. まえがき

土のせん断時の挙動に関する研究は一般に三軸圧縮試験によることが多い。通常用いられている三軸圧縮試験機では円柱状試体の両端を剛な加圧板で押え上下方向に荷重を加えるというメカニズムにより、主応力面であるべき加圧板と試体の間に摩擦力が発生すること、また変形が加圧板によって規制されるなどの欠点を有している。応力状態は円柱状試体の周囲から液圧を加えるために $\sigma_2 = \sigma_3$ 、すなわち $\sigma_1 \neq \sigma_2$ (ここに σ_1 = 最大主応力, σ_2 = 中間主応力, σ_3 = 最小主応力) となり圧縮状態と引張り状態の2通りの応力状態しか実現することができない。応力条件あるいは変形条件は σ_1 , σ_2 および σ_3 , すなわち ε_1 , ε_2 および ε_3 (ε_1 , ε_2 , ε_3 はそれぞれ σ_1 , σ_2 , σ_3 方向のひずみ) が任意に与えられる場合が最も一般的であり、上記の3軸応力状態、平面応力状態および平面ひずみ状態などはひとつの特殊例でしかない。本研究では試体に任意の応力状態を実現するために6個の個別加圧室を組合せた立方体の圧縮室を製作し、それを用いて σ_2 及び σ_3 応力状態で乾燥砂の圧縮試験を行った。主として圧縮過程における砂の変形に応力条件がどのような影響を及ぼすかについて調べた。

2. 試験装置と試料

2-1. 試験装置

(1) 圧縮室：圧縮室は図-1に示すような6個の加圧室を立方体に組立てることによって構成される。加圧室には厚さ0.3mmのゴム膜が貼られ、それが加圧面になっている。上部加圧室を除いた5個の加圧室には試体を作成時に立方体を保持するためにアクリル樹脂の押え板が用意されている。上部加圧室にはチューブを挿入したゴム膜が貼られ、試体内の空気はこのチューブを介して排気される。加圧室の外周は厚さ10mmのアクリル樹脂の板から成っており、試体の挙動を外部より観察することが出来る(写真-1)。加圧室は体積変化測定装置および加圧装置に接続され、液圧によって加圧される。加圧室を組立てて構成される圧縮室は10×10×10cmの立方体である。試体は全面がゴム膜で

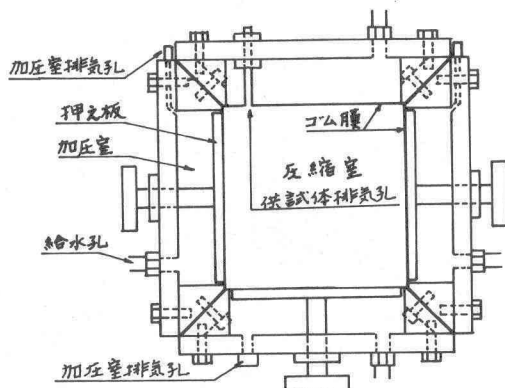


図-1, 反縮室

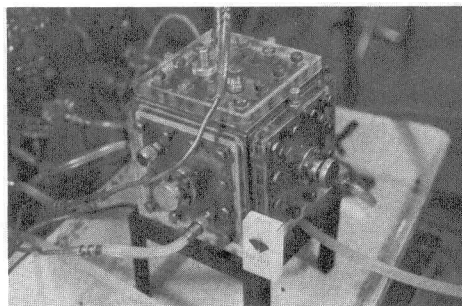


写真-1, 反縮室

覆われているので加圧面にはせん断応力が発生しないものと考えられる。

(2) 体積変化測定装置：2重管式の体積変化測定装置で加圧室と加圧装置の間に介在せられ、加圧室に流入・出る液体の量から供試体の体積変化を測定するものである。 σ_1 , σ_2 および σ_3 方向の体積変化を測定するために3個の2重管が用意されている。

(3) 加圧装置：水銀のヘッド差によって液圧を加える英国型の定液圧装置を3個備えたものである。1個の最大加圧力は約 4 kg/cm^2 で、3個とも連結すると 12 kg/cm^2 まで加圧可能である。加圧は水銀のボットを上下することによって行なわれるので試験方法は応力割ぎよ法になる。試験装置の概略を示すと図-2の通りである。

2-2. 試料

試料として用いた砂は標準細フルイ105 μ 残留の気乾燥状態の豊浦標準砂で、平均含水比は0.16%であった。

3. 試験方法

(1) 砂の充填：圧縮室を組み立て、押え板をセットした状態の圧縮室に砂を3層に分けて流し込み、突き棒で1層おき所定の回数締め固める。

(2) 実験開始時の応力条件：あらかじめ抱束圧を加えておかないと砂が崩壊するため実験開始時に 0.2 kg/cm^2 の等方圧を加え、後に押え板を除き、所定の初期応力条件まで圧縮した。

(3) 圧縮過程における応力条件：実験開始時からの応力軌跡を正8個体応力を用いて図-3に示した。

$$\sigma_{\text{out}} = \frac{1}{3} (\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3)$$

$$\epsilon_{\text{out}} = \frac{1}{3} \left\{ (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 \right\}^{1/2}$$

である。図中破線は等方圧 0.2 kg/cm^2 から初期応力条件（たとえば $\sigma_1 = \sigma_2 = 1.0 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_3 = 0.6 \text{ kg/cm}^2$ ）までの圧縮過程を示し、実線は σ_2 , σ_3 (側方向加圧) を一定に保ち、 σ_1 (上下方向加圧) だけを増加させる圧縮過程を示している。

4. 実験結果と考察

(1) 等方圧縮試験：異方圧縮試験に先立って行った等方圧縮試験の結果を図-4に示した。図中実線

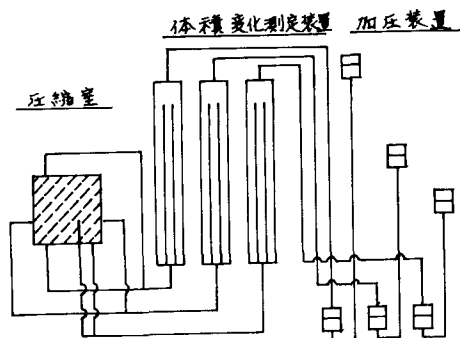


図-2. 試験装置概略図

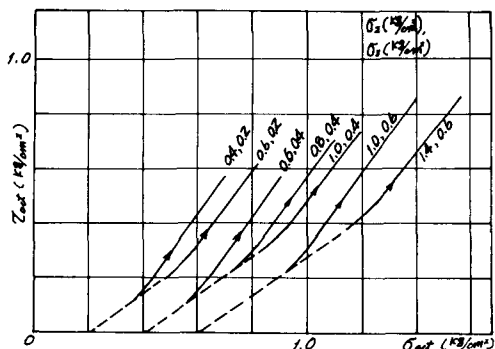


図-3. 試験時の応力軌跡

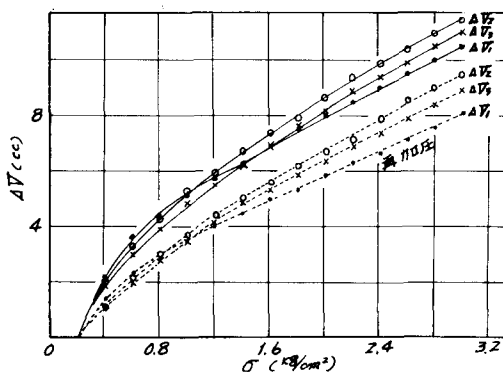


図-4. 等方圧縮試験結果

は1回目の加圧を、破線は2回目の加圧(再加圧)の結果を示している。この体積変化はゴム膜の砂粒子間への圧入や加圧室の膨張による影響を含んでいる。各応力方向の体積変化に若干の差がみられ、再加圧時には ΔV_i が他に比較して小さいが、これは加圧方向の相違によるものと考えられる。最初の加圧と再加圧との差は最初の加圧過程における砂粒子の再配列による体積変化を示している。この体積ひずみは等方圧が 3.0 kg/cm^2 のときに 0.58% でScottとKo⁽¹⁾の結果に較べて約2倍の大きさになっている。

(2) 異方圧縮試験 (i) 各応力方向の体積変化: 異方圧縮試験(σ_2 と σ_3)による体積変化の結果を図-5~8に示した。横軸は体積変化で右方向に圧縮を左方向に膨張をヒッてある。縦軸は $\sigma_1 - \sigma_2$ である。初期値としては3-(3)の初期応力条件の値を用いた。 ΔV_i ($i=1, 2, 3$)は砂粒子間へのゴム膜の圧入や加圧室の膨張などによる体積変化を除くために測定値からその応力に対応する等方圧縮試験の再加圧時の体積変化を差し引いた値を示した。したがって ΔV_i はほとんど砂粒子間の相対的な移動に起因する体積変化を示している。 ΔV_i については初期直線部分は4~6 cc程度の範囲(ひずみ表示では $0.4 \sim 0.6\%$)で非常に小さく、それ以降の圧縮過程では曲線的な傾向を示す。初期直線部分は初期抱束圧が大きくなるに従って勾配が大きくなるが、偏差応力の相違による影響は明瞭ではない。そこで8面体垂直応力 σ_{oct} とせん断応力 τ_{oct} を用いて整理したのが図-9である。この図における初期値は $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3 = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ の値を用いている。縦軸には τ_{oct}/σ_{oct} をヒッたが、これは正8面体面に作用している合応力の面の主線に対する傾きを表わしている。この図によれば $\sigma_2 = 0.4 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_3 = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ なる条件の結果を除いては全て近い値を示し、応力条件の如何によらず ΔV_i は τ_{oct}/σ_{oct} によって統一的に表示されることがわかる。同様にして縦軸に $(\sigma_1 - \sigma_2)/(\sigma_1 + \sigma_2)$ をヒッて整理したのが図-10である。このような整

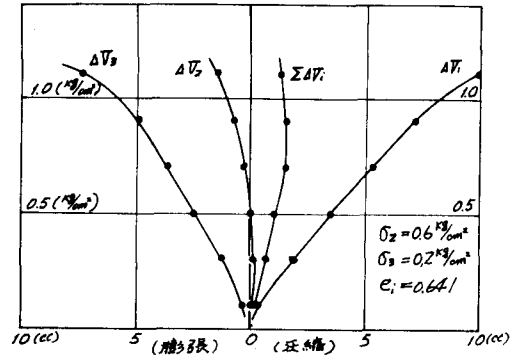


図-5. 異方圧縮試験結果

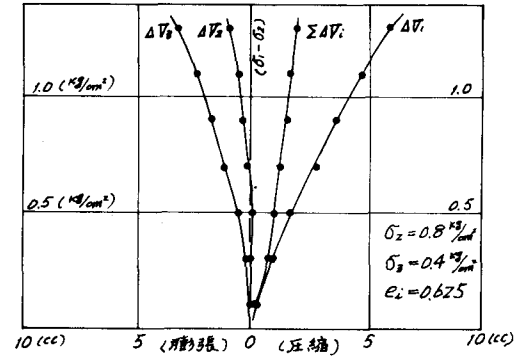


図-6. 異方圧縮試験結果

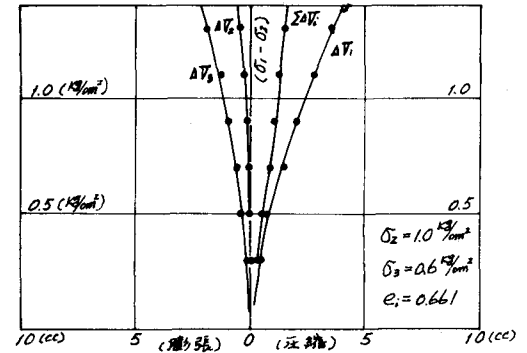


図-7. 異方圧縮試験結果

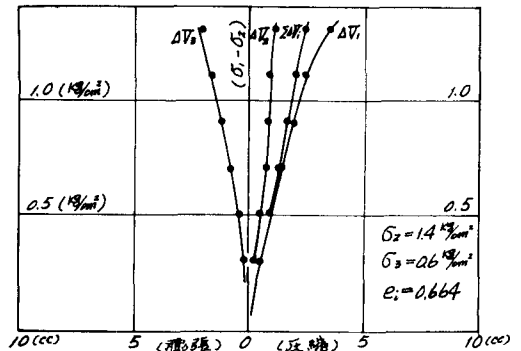


図-8. 異方圧縮試験結果

理法では中間主応力の影響を無視したことになる。

この図と前図を比較すると試験条件によるバラツキが著しくなるが、 $\sigma_2 = 0.4 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_3 = 0.2 \text{ kg/cm}^2$ なる応力条件も含めて全体のバラツキの範囲は小さくなる。また初期勾配も大きくそれに続く降伏の状況も明瞭に現われてくる。同じ試料の通常の3軸圧縮試験から求めた内部摩擦角は $\phi = 37^\circ 03'$ ($e_m = 0.625$) であつた。この ϕ から求めた $(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3)$ の値は 0.603 である。したがって $(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3)$ がこの値以上になるような応力状態を実現することはできないはずであるが、全2この値より大きな値を示している。図-5~8 から ΔV_2 は σ_2 と σ_3 の値によつて挙動が異なり、初期において圧縮が生ずる場合と生じない場合に分かれる。実験を行つた応力範囲では σ_2 と σ_3 が近いと ΔV_2 は圧縮が見られなく σ_2 が σ_3 の2倍以上になると圧縮が見られ、供試体が引張りの状態に近くなることがわかる。 ΔV_1 に関しては圧縮過程がなく膨張する一方であり、その量は σ_3 が小さいほどまた σ_2 が同じであれば σ_2 の大きいほど大きくなる。膨張量の大きさは σ_2 の相違よりもむしろ σ_3 の相違によって変化が著しい。全体積変化 $\Sigma \Delta V_i$ は抱束圧が小さいときには膨張する傾向を示すが、大きいときには膨張の傾向は見られない。

(ii) Z_{oct}/σ_{oct} とせん断変形の関係：供試体の全体的な変形挙動を知るために Z_{oct} に対応するせん断変形 d_o を求め、 Z_{oct}/σ_{oct} の関係を示したのが図-11 である。

$$d_o = \frac{2}{3} \{ (\Delta V_1 - \Delta V_2)^2 + (\Delta V_2 - \Delta V_3)^2 + (\Delta V_3 - \Delta V_1)^2 \}^{1/2}$$

これは図-9 の関係と非常に似ている。この図は正八面体面に作用する応力の傾きとせん断変形の関係を示したもので、せん断特性は上記のような応力条件よりむしろ応力の傾きに依存することになる。

5. あとがき

中間主応力 σ_2 を考慮した応力割き法による3軸圧縮試験を行つたが、通常の3軸圧縮試験 ($\sigma_2 = \sigma_3$) で破壊するような応力条件を与えることができたこと、 σ_2 方向の変形をも含めたせん断変形は正八面体面に作用する応力の面に対する傾きに依存することになった。

参考文献：O.H.Y. Ko and R.F. Scott "Deformation of Sand in Hydrostatic Compression" Proc. of the A.S.C.E. May, 1967

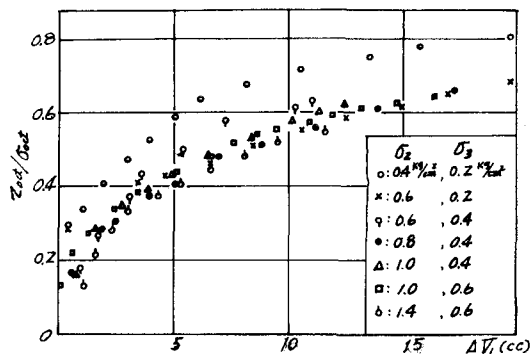


図-9. Z_{oct}/σ_{oct} と ΔV_1 の関係

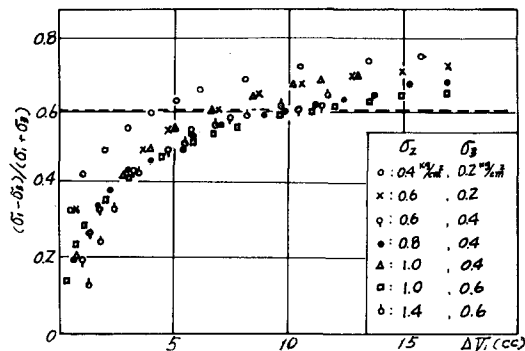


図-10. $(\sigma_1 - \sigma_3)/(\sigma_1 + \sigma_3)$ と ΔV_1 の関係

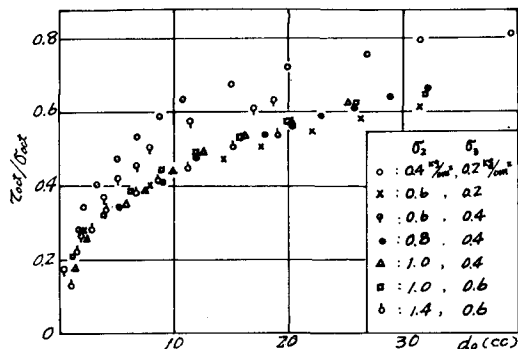


図-11. Z_{oct}/σ_{oct} とせん断変形の関係