

1. まえがき

土塊に静水圧的応力を作用させると土塊の体積は減少するか形状の変化は生ずる。しかしせん断応力も作用すると土塊はその体積ととも形状も変化する。つまり土に応力変化を与えた時の土の変形は体積の変化に關連する圧縮変形と形状の変化に關連するせん断変形とから成り、体積変化に關連するものは静水圧的応力によるものと、せん断応力によるものとから成り、てゝと考へられる。

それゆゑ 応力変化による土の体積ヒズミは一般に次式で表わされてゐる。

$$\Delta V/V = C \cdot (\Delta \sigma'_1 + \Delta \sigma'_2 + \Delta \sigma'_3) / 3 + d \quad \text{----- (1)}$$

ここに $\Delta \sigma'_1, \Delta \sigma'_2, \Delta \sigma'_3$ は有効応力の変化であり、 C は土の圧縮係数である。式 (1) の右辺の二項はせん断応力の変化による体積変化をタイレイトンシー (dilatancy) と呼ばれる。せん断によつて密な砂は膨張し、ゆるい砂は収縮する。膨張の場合を正のタイレイトンシー、収縮の場合を負のタイレイトンシーと呼んでゐる。このタイレイトンシート係数は強度成分が砂質土の強度のうち、大きな部分を占めることは Taylor によつて示唆されて以来、多くの研究者によつて認められてゐる。

本文では砂質土の破壊時の応力軸差 σ_f と平均主応力 p の比 σ_f/p によつて定まるという実験結果⁽¹⁾ をもととして、砂質土のタイレイトンシート係数のような応力によつて支配されるのかというところを把握しようとするものである。併せて、砂質土の変形についても考察を行は、た。

2. 試料および供試体

試験に用いた試料は九州大学構内砂を 74~2000 μ の範囲にフルイ分けを行つたもので、比重 $\gamma_s = 2.65$ 、均等係数 $U_3 = 1$ 、最大間隙比 $e_{max} = 0.85$ 、最小間隙比 $e_{min} = 0.56$ である。粒子の形状は海岸付近にみられる鋭い稜角を有する普通の砂である。供試体の初期間隙比は正のタイレイトンシーが顕著に現われる密な状態に調整した。また試験はすべて完全飽和状態の供試体について排水試験を行つた。体積変化は供試体内からの水の出入りを精度 $1/100$ cc のビューレットにより測定した。

3. 破壊時の軸差応力 σ_f と平均主応力 p について⁽¹⁾

軸応力を σ_1 、セル圧を σ_3 とすれば、軸差応力 $\sigma_f = |\sigma_1 - \sigma_3|$ と平均主応力 $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$ の間にはセル圧を一定に保つて通常の三軸試験にありては三軸圧縮試験で $\sigma_f = 3(p - \sigma_3)$ 、三軸伸張試験で $\sigma_f = -3(p - \sigma_3)$ という関係を生ずるから変化する。ところで破壊時の応力は等方的応力成分と偏差応力成分とに分けて考へることから、3つの主応力のうち2つが等しい三軸装置ではこれらの成分は平均主応力 p と軸差応力 σ_f によつて考へられる。図-1 は以下で行つた乾燥状態の九大砂について排水(急)三軸圧縮および伸張試験での破壊時(軸差応力が最大の時と定める)の σ_f と p の関係を示すものである。この図によれば試験を行つたセル圧の範囲(0.5~3.0 kg/cm^2) にありて σ_f と p の関係は直線を通る直線とみなすことから、その直線の傾きは間隙比により変化することからわかる。それゆゑ 同じ密度状態であれば破壊時の応力は応力比 σ_f/p によつて表わすことができ、同様な結果は乾燥状態の表面をメッキしたステールボール供試体についても得られてゐる。

4. 砂質土のタイレイトンシートについて

3. では破壊時の応力が等方的応力成分と偏差応力成分とに分けられるとの考えから 破壊時の応力状態が応力比 q/p によって表わされることを述べたが 砂質土のダイレイタンシーも同様の応力によって表わされると考えられる。この

ことはせん断力の作用によって生じるダイレイタンシーは土粒子で構成される骨格構造が、せん断変形を起す際に土粒子どうしの接触点ですべりや回転を生じるために発生するものであり 破壊を引き起すせん断応力やせん断ヒスミと接触面周縁があると考えられるからである。それゆえ次のように考えることもできるであろう。

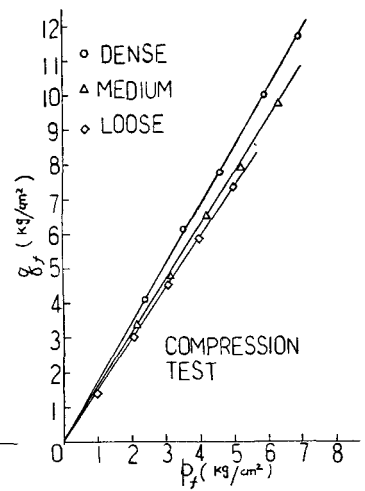
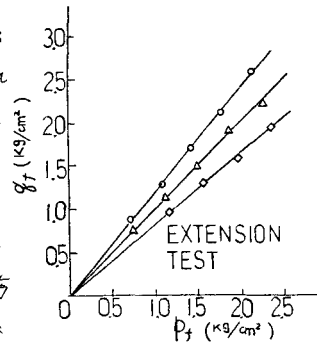


図-1 破壊時の軸差応力と平均主応力の関係

粒状体の集合体とみれば砂質土において 応力を受けている供試体のなかでは 土粒子どうしは図-2に示すように ある統計的面積 A_s をもって接触し その土粒子間には垂直力 P_s とせん断力 T_s が作用してゐると考えられる。このような接触面が土粒子どうしのすべりや回転を生じるためには、その接触面上のせん断力と垂直力の比 T_s/P_s がある一定値に達しなければならぬ。ところで供試体全体とみると 図-2のような接触面は無数にあり 接触面の方向も種々の方向にあるので 供試体全体としては接触面の方向の平均値を表わす正八面体上で考えられるであろう。正八面体上の応力は八面体垂直応力 σ_{oct} と八面体せん断応力 τ_{oct} と呼ばれ σ_1' , σ_2' , σ_3' を3つの有効主応力とすれば、有効応力で表わした σ_{oct}' と τ_{oct}' は次式で与えられる。

$$\sigma_{oct}' = \frac{1}{3} (\sigma_1' + \sigma_2' + \sigma_3') \quad \text{----- (2)}$$

$$\tau_{oct}' = \frac{1}{3} \sqrt{(\sigma_1' - \sigma_2')^2 + (\sigma_2' - \sigma_3')^2 + (\sigma_3' - \sigma_1')^2} \quad \text{----- (3)}$$

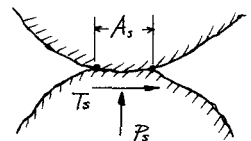


図-2

八面体垂直応力は平均主応力 p とも呼ばれてゐる。通常の軸対称の三軸試験において 有効主応力は $\sigma_2' = \sigma_3'$ であり したがって三軸圧縮試験と三軸伸張試験の場合を考へ 有効主応力 σ_a' 、周応力 σ_r' とすれば、式 (2) (3) は次のように書き改められる。

$$\sigma_{oct}' = \frac{1}{3} (\sigma_a' + 2\sigma_r') = p \quad \text{----- (4)}$$

$$\tau_{oct}' = \frac{\sqrt{2}}{3} |\sigma_a' - \sigma_r'| = \frac{\sqrt{2}}{3} q \quad \text{----- (5)}$$

ここに $q = |\sigma_a' - \sigma_r'|$ であり 軸差応力を表わす。それゆえ 軸対称の三軸試験で供試体全体としてのダイレイタンシーは八面体せん断応力と八面体垂直応力の比 $\tau_{oct}' / \sigma_{oct}'$ つまり軸差応力と平均主応力の比 q/p によって支配されると考えられる。

5 平均主応力一定試験

セル圧を一定に保ち 軸差応力を変化させる通常の三軸試験では測定した体積変化のほかに式 (1) の右辺第2項 すなわち等方的応力成分の変化による体積含まれるので せん断力の作用によるダイレイタンシーを調べるには 試験中平均主応力を一定に保ち試験を行ふのが適當であろう。この試験

に於てセル圧を減つたせゐると同時に軸圧力を増加
 させて三軸圧縮試験法とセル圧を増加させて軸圧
 力を減つたせゐる三軸伸張させる方法がある。こゝ
 こで三軸圧縮させる方法のみについて考察する。
 但し試験体平均主応力 σ_1 一定に保つた状態で三軸
 試験法は試験技術上非常に困難であるので応力
 制御式を用いた。このような平均主応力一定試験
 法で各種密度の試料に三軸圧縮試験を σ_1 と体積変化
 $\Delta V_d/V_i$ を測定した。 ΔV_d は平均主応力 σ_1 に対する体積
 変化量(試験体一定)とし $V_i = V_0 - \Delta V_c$ と置き
 換へて述べたことに三軸圧縮試験法は σ_1/ρ
 によつて支配されると考へて $\Delta V_d/V_i$ を σ_1/ρ
 に対してプロットすれば図-3が得られ比較時
 同一密度の試料であればほぼ同一曲線上に集まる。
 これゆゑ三軸圧縮試験法に伴はう体積比 $\Delta V_d/V_i$
 は σ_1/ρ に表わすことができる。次
 式によつて与えられるといふ。

$$\Delta V_d/V_i = D' \cdot \sigma_1/\rho \quad \text{--- (1)}$$

ここに D' は三軸圧縮試験係数である。

この図-3より D' の値は目される。三軸圧縮
 試験係数 D' は同一密度とあれば σ_1/ρ の大小
 の範囲ではほぼ一定の値となる。この σ_1/ρ の値
 が破断時の $(\sigma_1/\rho)_b$ に近づくにつれて急
 激に増加しはしめる。全体として同一密度の供試
 体であっても一定の値とはならない。これは三軸
 圧縮試験法に於ける粒子のすべりに密接は
 関係をもつてゐる。すなわち σ_1/ρ の値が
 破断時の値に近づくに連れてせん断領域も全粒
 子の移動領域も範囲に限り膨張が急激に生じ

その結果 D' も急激な増加を示すのであろう。また D' は図-3よりわかるように供試体の密度によ
 りても変化する。なお A W Shempton⁽²⁾は式(1)の右辺を2乗の形で表わし係数 D を三
 軸圧縮試験係数としてゐる。 $D = D' \sqrt{(\sigma_1' - \sigma_2')^2 + (\sigma_2' - \sigma_3')^2 + (\sigma_3' - \sigma_1')^2}$

このShemptonによるものに従つて $\Delta V_d/V_i$ を σ_1 に対してプロットすれば同一密度であつても一
 つの曲線では表わせず、係数 D は ρ によつても変化する。これゆゑ三軸圧縮試験法に伴はう体積比
 $\Delta V_d/V_i$ は式(1)で表わした方がより適当であるといふ。その時の係数 D はShemptonによる D といはる
 べく、上に述べたように三軸圧縮試験法と密接は関係をもつものであるから、こ

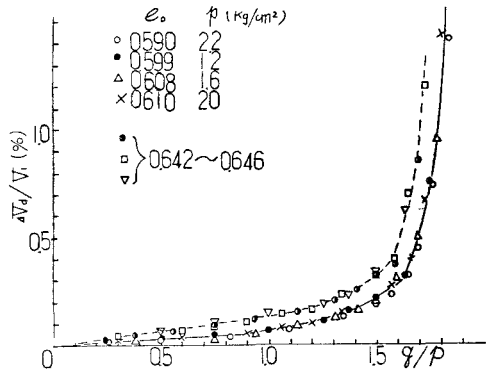


図-3 タイレイタンシートによる体積比 $\Delta V_d/V_i$ と応力比 σ_1/ρ の関係

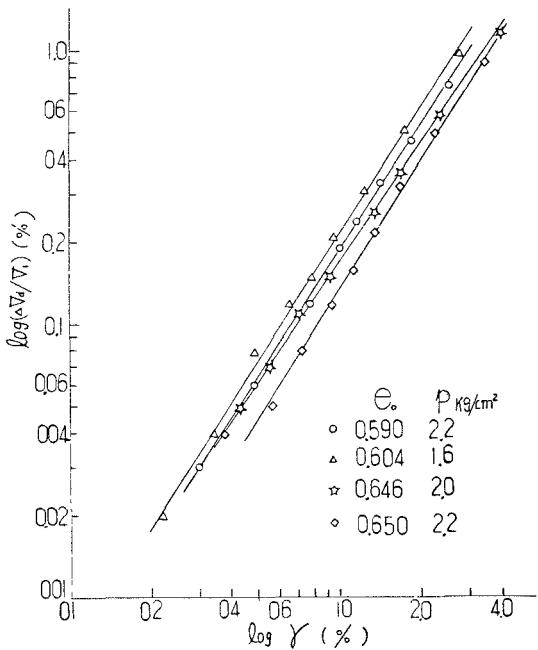


図-4 タイレイタンシートによる体積比 $\Delta V_d/V_i$ とせん断比 σ_1/ρ の関係

ン断とスミ δ も応力比 q/p の関数形と
 なるはずである。これをまとめること
 省略したが図-3と同様の関係式得られ
 る。またこのことより δ と $\Delta V_d/V_i$ の関
 係を両対数紙にプロットすれば 図-4
 に示すような直線関係が得られ 次式で
 表わされる。

$$\Delta V_d/V_i = \alpha \delta^\beta \text{ --- (17)}$$

ここに α, β は定数であり β の値は
 1.2~1.5 の範囲内にある。

6 等方圧縮試験

静水圧的応力による土の体積変化を調

へるための 飽和供試体三軸圧縮試験

し 試験中せん断力も作用させ 平均主応力 p を $0.1 \sim 0.8 \text{ kg/cm}^2$ の範囲で変化させ 体積変化量
 ΔV_c を測定した。圧縮試験によれば 一般に正規圧縮粘土では $e \sim \log p$ 関係は直線となるが 丸太
 砂についての等方圧縮試験では 載荷 除荷時ともにそのような直線関係は得られなかった。そこで
 $\Delta V_c/V_i$ と p を両対数紙にプロットすれば 図-5 が得られ 除荷時には明確な直線関係がみられ、し
 んどその直線の傾きは同ゲキ比によらず一定である。このことは砂質土のように速水性の低く、材料で
 は 除荷時には応力の減小による砂粒子自身の弾性回復と粒子配列の構造的な回復による部分の側定
 値の大部分を占めるためと考えられる。この量は除荷時の直線関係より、次式で表わされる。

$$\Delta V_c/V_i = C' \cdot p^{\alpha'} \text{ --- (18)}$$

ただし p は徐々に減少するものとし C' と α' は定数である。この定数 C' と α' は砂の形状 粒度分布
 同ゲキ比ほどより変化するものであるが 丸太砂については直線の傾きが一様であることから、 α'
 の値は一定となり $\alpha' \approx 0.18$ である。Jakobson⁽³⁾ は載荷時において式(18)と同様の形も示して
 いるが 本試験では 図-5 にみられるようにそのような関係はみられず、むしろ 除荷時の直線
 関係は 試験中平均主応力の減少させる三軸伸張試験結果の解析を容易にするであろう。

7 まとめ

応力を受けている砂質土の体積変化は等方応力による等方圧縮とせん断力によるダイレイタンシー
 から成るものと仮定のもとに、平均主応力一定試験と等方圧縮試験を行ない、次の点に明らかに
 した。 (i) 砂質土の破壊時の応力は軸差応力 q と平均主応力 p の比 q/p によらず、破壊時
 のこの比は同ゲキ比により定まる。 (ii) 同一密度であれば 砂質土のダイレイタンシーによる体積と
 スミは応力比 q/p によらず支配され 式(16)で示される。 (iii) ダイレイタンシーによる体積とスミと
 セン断とスミの関係は 式(17)の関係であり 両対数紙上で直線関係にある。 (iv) 等方圧縮試験の除荷
 時には、体積とスミと平均主応力の関係は 式(18)の関係であり 両対数紙上で直線関係にある。

参考文献 (1) 落合 山内 (1969): 粘着力の低い物質に対する破壊規準について、第24回土力学会講演会
 (2) Skempton, A W (1960): The Pore-pressure Coefficient in Saturated Soils, Geotechnique Vol 10 No.4.
 (3) Jakobson, B (1957): Some Fundamental Properties of Sand, Proc. 4th Int. Conf. S M F E Vol 1

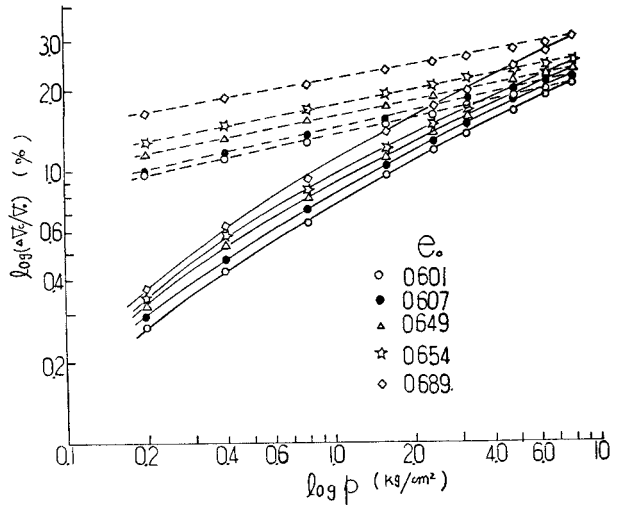


図-5. 等方応力と体積とスミの関係