

粘性土の非排水せん断試験におけるダイレイタンシー特性

池 浦 勲*・中 村 努**

Dilatancy Characteristics in Undrained Shear Test on Cohesive Soils

Isao IKEURA and Tsutomu NAKAMURA

要旨

飽和粘性土を用いて K_0 圧密排水せん断試験と非排水せん断試験を実施し、ダイレイタンシー特性について考察した。

Abstract

Several K_0 -consolidated drained shear test and undrained shear test were carried out on saturated cohesive soils. Dilatancy characteristics were investigated based on those test results.

1. ま え が き

筆者らはこれまで主に、一方向の変位を拘束したいわゆる K_0 圧密履歴を与えた粘性土を対象とした各種応力経路のもとでの排水せん断試験結果を報告してきた^{1)~3)}。それらは K_0 圧密状態にある自然地盤が、多様な経路の応力を受けた場合の変形を予測することが目的であり、ダイレイタンシーを明確に捉えるために排水せん断条件下で実験を実施してきた。

しかしながら粘性土は透水性が低いことから、実際の地盤は非排水条件下でせん断されることが多い。

そこで今回は排水せん断試験とともに非排水せん断試験も実施して、ダイレイタンシーの間接的指標と考えられる間隙水圧がどの程度までダイレイタンシーを表示できるかを考察した。

2. 実 験

2. 1 応力及びひずみパラメータ

以下において用いる応力パラメータは平均有効主応力 p 、軸差応力 q と応力比 η であり、それぞれ次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} p &= \frac{\sigma_1' + 2\sigma_3'}{3} \\ q &= \sigma_1' - \sigma_3', \quad \eta = \frac{q}{p} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに σ_1' : 有効軸圧 = 最大主応力 ($= \sigma_1 - u$)

σ_3' : 有効側圧 = 最小主応力 ($= \sigma_3 - u$)

u : 過剰間隙水圧

ひずみパラメータは体積ひずみ ε_v と、せん断ひずみ ε であってそれぞれ次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_1 &= 100 \ln \left(\frac{H_0}{H} \right) \\ \varepsilon_v &= 100 \ln \left(\frac{V_0}{V} \right) \\ \varepsilon &= \varepsilon_1 - \frac{\varepsilon_v}{3} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに ε_1 : 軸ひずみ (%)

ε_v : 体積ひずみ (%)

H_0, H : 初期および試験中の供試体高さ

V_0, V : 初期および試験中の供試体体積

2. 2 試料及び実験の種類

実験に用いた試料は勇払群早来町から採取した自然粘性土をスラリー状態にした後、鉛直圧力 80kPa で再圧密したものである。その物理的性質は液性限界 $w_L = 63\%$ 、塑性指数 $w_I = 30$ 、土粒子密度 $\rho_S = 2.68 \text{ gr/cm}^3$ である。

実験の条件は、1) 等方圧密試料の非排水せん断試験・平均主応力 p 一定排水せん断試験・応力

* 教 授 環境都市工学科

** 助 手 環境都市工学科

増分比一定排水せん断試験, 2) K_0 圧密試料の非排水せん断試験・ p 一定排水せん断試験である。

2. 3 圧 密

等方圧密は所定の σ_3 まで1日の時隔で3段階に分けて载荷を行った。

K_0 圧密は前報で報告した⁴⁾コンピュータ制御法によった。それは、まず $\sigma_3' = 30\text{kPa}$ の圧力で等方圧密した後に、目標の σ_1' を漸増させつつ、軸方向変位量 ΔH と体積変化量 ΔV とが常に K_0 圧密条件を満足するようにパソコンとアクチュエータによって σ_1 と σ_3 を調節するものである。

σ_1' の増加速度は0.2から0.6 (kPa/min) まで時間とともに漸増させ、 p が所定の値(圧密圧力 p_c)に達した後は σ_1 を一定に保った。

間隙水圧 u は供試体下端中心部で測定し、体積変化量 ΔV は供試体周囲に巻いた濾紙を通しての吸・排水量として差圧計で測定した。この際に σ_3' の増加による濾紙自身からの排水量の補正を施した。⁵⁾

また供試体の飽和度を高めるために、全試験課程を通して100kPaの背圧を負荷した。

2. 4 せん断

非排水せん断試験は側圧 σ_3 を一定に保ちながら一定軸ひずみ速度(0.04mm/min)でせん断するものであり、今回は等方、 K_0 圧密試料共に2種類の圧密圧力 p_c で実験を行った。

排水せん断も K_0 圧密と同様にコンピュータによる応力制御方式で実施した。具体的には、応力増加度を指定して(p 一定試験では $\Delta q/\Delta p = \infty$, 応力増分比一定試験では $\Delta q/\Delta p = 3$)、目標の σ_1' と σ_3' の値を漸増させていき、測定された応力が目標値と等しくなるようにペロフラムシリンダー上室圧力用及び側圧用アクチュエータをパソコンで制御する操作を繰り返すというものである。

σ_1' の増加速度は、発生する間隙水圧 u の大きさにより0.02kPa/min ($u \leq 1\text{kPa}$) から0 ($u > 4\text{kPa}$) まで逓減させた。

3. 実験結果と考察

3. 1 K_0 圧密課程

(1) K_0 値の時間経過

図-1は圧密課程における $K_0 (= \sigma_3'/\sigma_1')$ 値、および ε_1 と ε_v から逆算した ε_3 を示す。

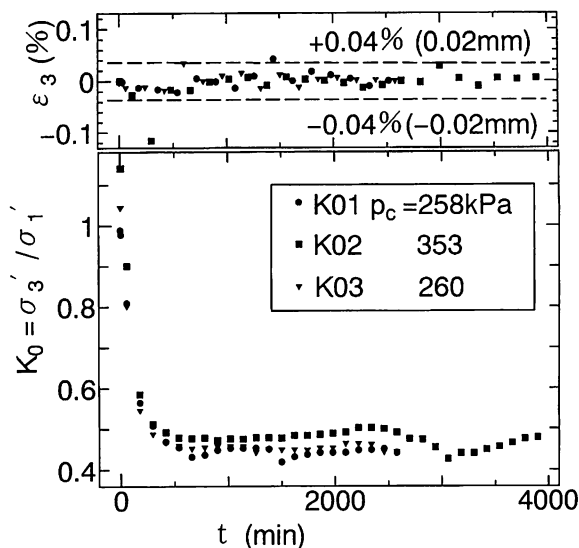


図-1 K_0 および ε_3 の時間経過

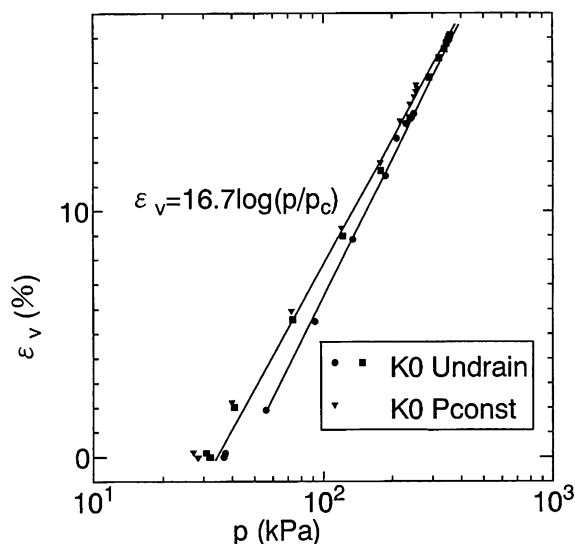


図-2 p と ε_v の関係

K_0 圧密は側方変位ゼロの圧密方式を指すのであるから ε_3 は K_0 圧密の誤差を示すものであるが、図のように全期間を通して最大 $\pm 0.04\%$ 程度の ε_3 が生じるのみであり、パソコン制御法は十分な精度で K_0 条件を充たしているといえよう。

K_0 値については、 p_c が大きく圧密時間の長い試料では一旦乱れが認められるものの、他試料と同じく圧密終了時の K_0 値は0.46から0.48程度である。

(2) 圧縮特性

図-2は K_0 圧密中の ε_v と $\log p$ の関係を示す。 $p \geq 40\text{kPa}$ では両者はほぼ直線関係にあることが分かる。図中の直線の傾きは16.7 (ε_v : %表示) 程度であった。

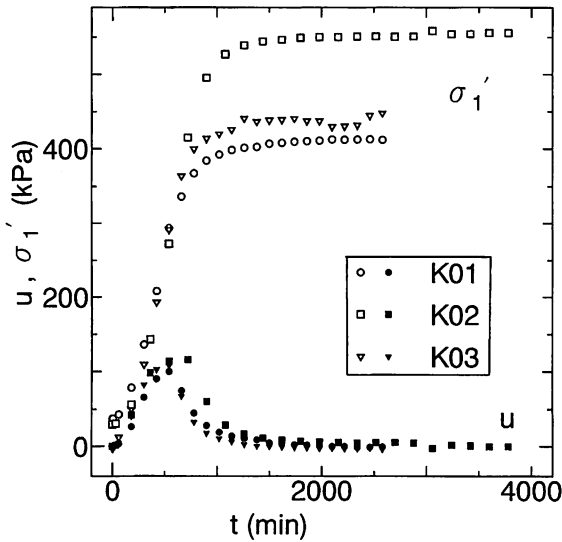
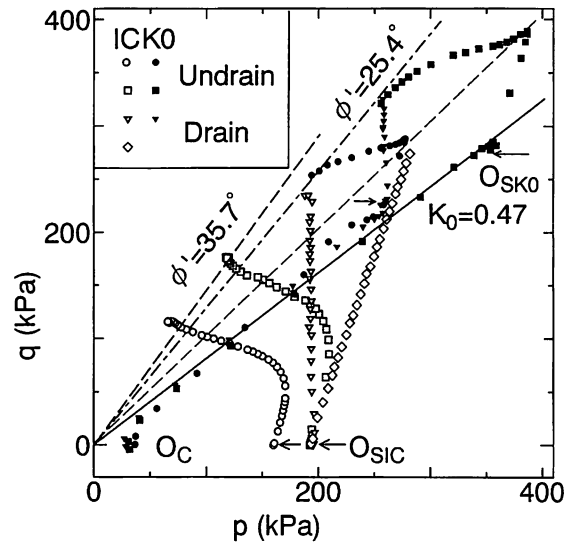
図-3 σ_1 および u の時間経過

図-4 応力経路

(3) σ_a および u の時間経過

図-3は σ_1 と u の発生状況を示す。 u は圧密開始後500分まで上昇を続けて最大100kPa程度に達しており、この時間帯における載荷速度をさらに工夫する必要がある。

3. 2 せん断課程

(1) 応力経過

図-4は実験での圧密、せん断を通しての応力経路を示す。圧密原点 O_C から出発して、等方圧密では $q=0$ を保ったまません断原点 O_{SIC} に至り、 K_0 圧密ではほぼ一定の傾きを保って O_{SK0} に至る。

せん断課程をみると、排水せん断試験では p 一定試験、応力増分比 $\Delta q/\Delta p$ 一定試験ともに指定通りに応力の載荷がされていると見なすことが出来る。

非排水試験では等方圧密試料が滑らかな曲線を辿りながら q が増加していくのに対して、 K_0 圧密試料ではせん断初期に q が増加から減少に反転する。したがって q が最大となるときの η から計算される有効せん断抵抗角 ϕ' は等方試料の 35.7° に対して K_0 圧密試料は 25.4° とかなり小さい値である。

また、圧密圧力 p_c が大きくなるにつれて非排水経路は扇形に拡大していくことから、 q 、 p を p_c で正規化した応力経路が図-5である。等方圧密試料では2本の経路は一致していないものの、 K_0 圧密試料ではほぼ一致しており正規化の意義が認められるので、以下では応力諸量を正規化して考察を進めることとする。

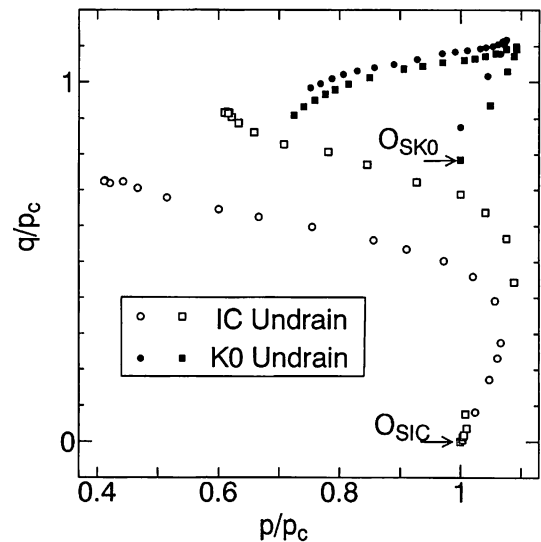


図-5 正規化応力経過

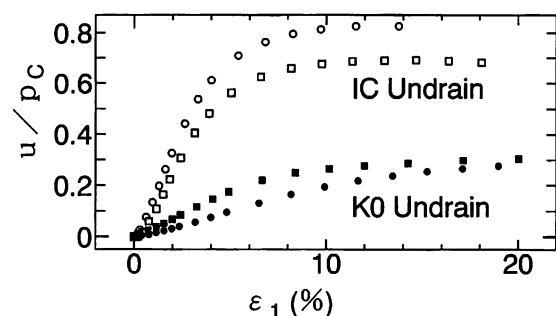
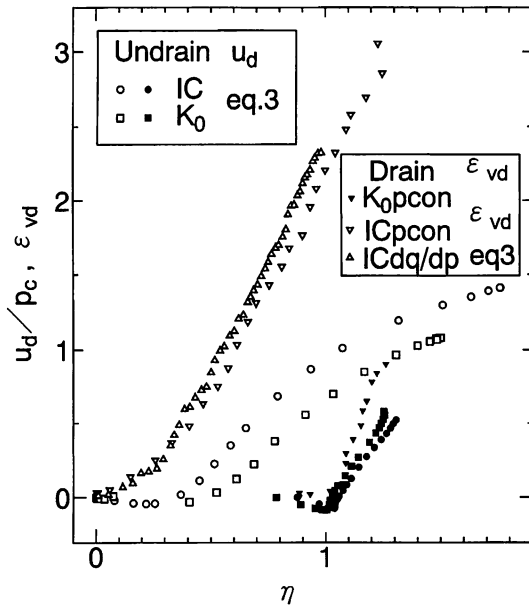
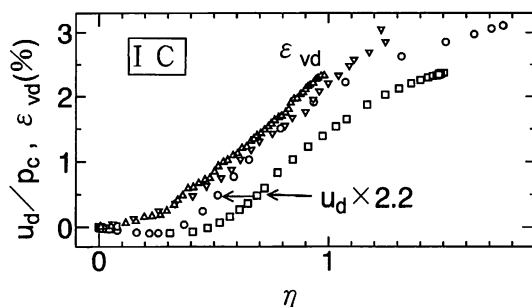
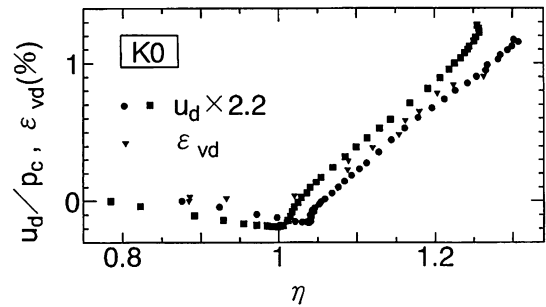
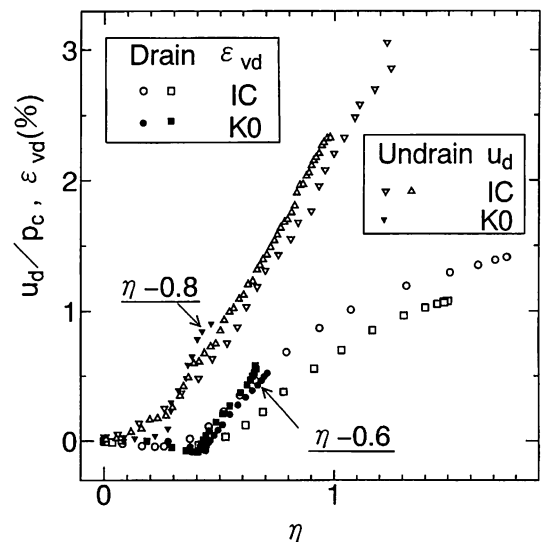
図-6 ε_1 と u の関係(2) 間隙水圧 u の発生状況

図-6はせん断中の ε_1 と u との関係を示す。同じひずみレベルでは K_0 圧密試料は等方圧密の半分以下の u しか発生しない。これは前者が圧密時からせん断応力を受けており、せん断中の土構造の変化が後者に較べて小さいためと解される。

図-7 η と u_d , ε_{vd} の関係図-8 η と u_d , ε_{vd} の関係 (等方圧密)図-9 η と u_d , ε_{vd} の関係 (K_0 圧密)図-10 η と u_d , ε_{vd} の関係 (平行移動)

(3) u と体積ひずみ ε_v の関連

排水せん断では土粒子間隙の接近等の土構造の変化の結果として ε_v の発生が抑制されるために u が生じる。したがって非排水せん断時の u と排水せん断時の ε_v とは表裏一体の関係とされる。

一般に ε_v は Δp によるものとせん断応力によるものとの和として考えられ、それぞれ圧密成分・ダイレイタンシー成分と呼ばれている。

u も同様の成分と考えると、 ε_v や u のダイレイタンシー成分 ε_{vd} , u_d は次の式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_{vd} (\%) &= \varepsilon_v - 16.7 \log \left(\frac{p}{p_c} \right) \\ u_d &= u - \Delta p \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで第一式は図-2に示す圧密中の関係がせん断中でも成り立つと仮定したものである。

図-7は ε_{vd} および正規化した u_d と η との関係を示す。等方圧密試料においては、応力増分比一定試験で得られた ε_{vd} と p 一定試験の測定値

である ε_{vd} とほぼ一致しており(3)式の妥当性が窺える。また $\Delta \eta$ の小さい内はダイレイタンシーが小さく、ある η からはほぼ直線的に増加する傾向にあり、その傾きは ε_{vd} の方が大きい。一方、 K_0 圧密試料においても、せん断初期に負の u_d がみられるなどダイレイタンシーの発生が遅れる点を除けば等方圧密試料と同様の傾向である。ちなみに図-8 (等方圧密) と図-9 (K_0 圧密) のように u_d を2.2倍すると ε_{vd} とほぼ同じ曲線となる。すなわちダイレイタンシーを u_d で表したり、 η の変化によって生じると捉えることは妥当であると考えられる。

次に図-7において等方圧密と K_0 圧密試料のダイレイタンシーがほぼ平行な関係と思われるので、図-10には K_0 圧密試料の曲線を u_d では0.6、 ε_{vd} では0.8だけ左方に移動させたものを描いた。図にみるように、それらはそれぞれが等方試料のものと一致しており、 K_0 圧密試料は単にせん断時の η の変化が小さいためにダイレイタンシーが小さいということが出来よう。

4. ま と め

飽和粘性土の等方圧密や K_0 圧密試料の非排水せん断試験と 2, 3 の経路による排水せん断試験を実施して、主としてダイレイタンスに関して考察を加えた。考察の要点をまとめると以下のようである。

- 1) 体積のひずみや間隙水圧は p 成分と q 成分の和とするのが妥当である。
- 2) その内のダイレイタンス成分 (q 成分) の ε_{vd} と u_d はほぼ等価と見なすことができる。
- 3) K_0 圧密試料は等方圧密試料に較べて有効せん断抵抗角 ϕ' が小さい。

今後は、せん断ひずみ ε や塑性ひずみ増加比に関する考察を進めるとともに、圧密・せん断経路を変えた実験等によって本報告を発展させていきたい。

結びにあたり、装置や制御プログラムなどご指導を頂いている北海道大学三田地利之教授、福田文彦助手、実験を実施した本校卒業生の櫻庭宏宇（現中部電力）、谷口浩二（現北大学生）両君に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 北郷繁，池浦勲，三田地利之，下越仁；異方圧密年度の変位特性について，土質工学会北海道支部技術報告集，第22号（1982）
- 2) 池浦勲，三田地利之；異方圧密粘土の応力－ひずみ関係に及ぼす応力経路の影響，土質工学会論文報告集，第26巻 3号（1986）
- 3) 池浦勲，小野丘；異方圧密粘土の応力－ひずみ挙動について（第4報），土質工学会北海道支部技術報告集，第29号（1989）
- 4) 池浦勲，中村努；パソコン制御による粘性土の飽和粘土の K_0 圧密排水せん断試験，苫小牧工業高等専門学校紀要，第31号（1996）
- 5) 三田地利之，成田孝；三軸試験の体積変化測定におよぼす紙の圧縮性およびゴム膜の透水性の影響，第20回土質工学研究発表会（1985）

（平成8年11月29日受理）

