

間隙水圧増加過程におけるすべり面粘土の膨潤・せん断特性と斜面安定

梅崎 健夫¹・鈴木 素之²・山本 哲朗³

¹正会員 博(工) 信州大学助教授 工学部社会開発工学科 (〒380-8553 長野市若里 4-17-1)
E-mail: umezaki@gipwc.shinshu-u.ac.jp

²正会員 博(工) 山口大学助手 工学部社会建設工学科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: msuzuki@yamaguchi-u.ac.jp

³正会員 工博 山口大学教授 工学部社会建設工学科 (同上)
E-mail: tyamamot@yamaguchi-u.ac.jp

三軸スライスせん断試験装置を用いて、一定の初期せん断応力が作用したせん断破壊前の状態において飽和正規圧密粘土供試体の間隙水圧を増加させる試験を実施し、この過程における粘土の膨潤特性とせん断特性を検討した。その結果、間隙水圧の増加に伴い、すべり面のせん断応力と有効垂直応力の関係は限界状態線上で定常状態に達しせん断ひずみが急増し累積すること、すべり面で稼動されるせん断強度は限界状態線に沿って減少することを明らかにした。また、間隙水圧の増加に伴う間隙比増加量と正規化した有効垂直応力およびせん断強度の関係はいずれも膨潤指數によって一義的に定まることを見出した。さらに、初生地すべり斜面の安全部がすべり面における間隙水圧増加量もしくは間隙比増加量によって概略評価できることを示した。

Key Words: landslide, slip surface, clay, pore water pressure, effective stress, shear strength, critical state, swelling, void ratio, safety factor

1. まえがき

地すべりは、斜面破壊のうち、主として地質構造的要因によって斜面が比較的広い範囲にわたって滑動するものであり¹⁾、既存すべり面の有無により初生地すべりと再活動地すべりに大別される²⁾。また、地すべりの誘因の一つとしては降雨や融雪水の地盤内への浸透に伴う間隙水圧の増加とせん断応力の増加が挙げられる³⁾。ただし、我が国における粘性土斜面では降雨の前後で土の単位体積重量はほとんど変わらないので⁴⁾、せん断応力が一定の下で間隙水圧のみが変動することにより、すべり面の粘土がせん断破壊に到るものと考える。

間隙水圧の変動を受ける粘土のせん断特性に関する実験的研究が現在まで多数報告されている^{5)~14)}。Katagiri and Imai⁵⁾は、一定の軸差応力を作用させた供試体に背圧載荷と同じ原理で間隙水圧を段階的に増加させる三軸圧縮試験を実施し、間隙水圧の増加すなわち有効応力の減少に伴う供試体の過圧密化とそのときの排水せん断挙動について報告している。このような研究の多くは、初期せん断応力が作用したせん断破壊前の状態において供試体内部の間隙水圧を強制的に増加させてせん断破壊させ

るものであり、初生地すべりを対象としている^{5)~12)}。一方、Ikeda et al.¹³⁾およびSuzuki et al.¹⁴⁾は、垂直応力の減少を間隙水圧の増加と等価であるとしたリングせん断試験を実施し、残留状態において間隙水圧の変動を受けるすべり面の粘土の強度特性について報告している。これらの研究はすべり面の粘土がせん断破壊後の大変形によって残留状態に達した後における間隙水圧の変動を模擬したものであり、再活動地すべりを対象としている^{13), 14)}。

初生地すべりを対象とした既往の研究で示された一連の成果は、間隙水圧の変動によるすべり面の粘土の破壊機構が限界状態理論の下で説明されることを示唆しているが^{7)~12)}、これらの試験のほとんど^{9)~12)}は主応力載荷型せん断試験であり、また、いずれの試験^{7)~12)}もすべり面のせん断応力と垂直応力の関係を斜面の安定解析と関連付けて考察していない。さらに、間隙水圧の変動過程における供試体内部の有効応力状態の不均一性や供試体に加えることができる最大のせん断変形量など試験上の問題点も指摘される。これらのこと踏まえて、著者らは、すべり面をモデル化し、それを再現するために供試体の間隙水圧を強制的に増加させる三軸スライスせん断試験を実施した。本文では、練返し再構成粘土に対する試験

表-1 間隙水圧変動試験の特徴

| 試験方法 | 間隙水圧の制御 | 有効応力の測定 | 体積変化 | せん断変形 | 強度定数 |
|----------------------------|---|---|----------------|------------------|--|
| 三軸圧縮試験 ^{9~12} | ○長時間不均一 | ○長時間後測定 | ◎排水量 | 軸ひずみ15~20%まで | ϕ' , c' ϕ_s , c_s |
| リングせん断試験 ^{13, 14} | ○ $\Delta \sigma_v = \Delta u$ (排水条件) | ○ $\Delta \sigma_v = \Delta \sigma'_v$ (排水条件) | △軸変位 (排水漏出) | せん断変位無限大 | ϕ'_v , c'_v ϕ'_s , c'_s |
| 三軸スライスせん断試験 | ◎短時間で均一 | ◎短時間で測定 | ◎排水量 | せん断ひずみ30~50%程度まで | ϕ'_s , c'_s |

◎良好, ○良好(条件つき), △要検討

結果に基づいて、一定の初期せん断応力が作用したせん断破壊前の状態においてすべり面の飽和正規圧密粘土が間隙水圧の増加を受ける場合の膨潤特性とせん断特性について考察する。さらに、すべり面の粘土の間隙水圧増加量および間隙比増加量とすべり面における安全率の関係について定量評価する。

2. 間隙水圧を増加させる三軸スライスせん断試験

(1) 間隙水圧変動試験に関する既往の研究

表-1に既往の研究における間隙水圧変動試験の特徴を示す。ただし、表中に併記した三軸スライスせん断試験については後述する試験結果に基づいて説明する。既往の間隙水圧変動試験では三軸圧縮試験装置や中空ねじりせん断試験装置およびリングせん断試験装置が用いられており、各試験装置の特性によって供試体の間隙水圧を変動させる方法が異なる。三軸圧縮試験では、間隙水圧の制御方法として、上下端面いずれかの片面排水条件で背圧を段階的に増加させる方法がとられている。背圧変動の直後には供試体内部の有効応力状態は時間的・空間的に一様ではないので、各段階で供試体内部の間隙水圧の均一性を確認する必要がある。ただし、供試体内部の間隙水圧の均一化には長時間を要し、有効応力は長時間経過後に測定する必要がある。例えば、片桐⁷による試験では1段階につき100~1000分間以上の長時間を要している。また、この段階における体積変化は排水量として精度良く測定される。中空ねじりせん断試験の場合も基本的に三軸圧縮試験と同様である。一方、リングせん断試験では、供試体内部の間隙水圧を直接制御することができないので、間隙水圧の変動量 Δu を与える代りに、排水条件において垂直応力の変動量 $\Delta \sigma_v$ を与える方法がとられている。ただし、排水条件を満たすためにはせん断速度および垂直応力の変化速度を十分に小さくする必要があり、このとき垂直応力の変動量 $\Delta \sigma_v$ を有効垂

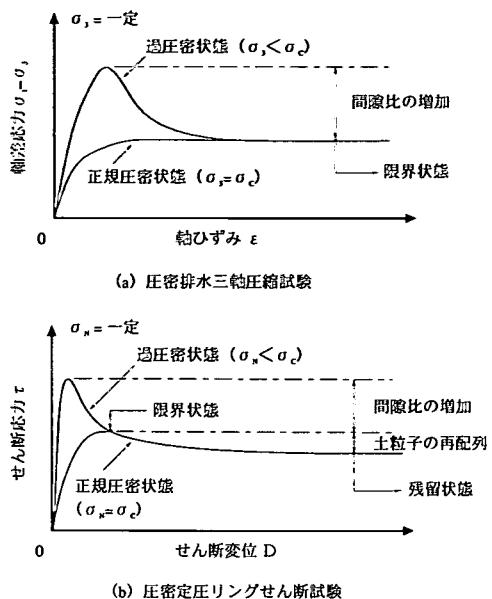


図-1 圧密排水三軸圧縮試験および圧密定圧リングせん断試験におけるせん断挙動の模式図((b)は文献 16, 17 を加筆修正)

直応力の変動量 $\Delta \sigma_v$ とみなす^{14, 15}。また、リングせん断試験では体積変化は軸変位として測定されるが、上下部リングの隙間からの試料漏出を完全に防止することは困難であり、体積変化の測定精度については検討が必要である。

せん断試験の方法によっては限界状態もしくは残留状態に達するせん断挙動が大きく異なる。図-1に三軸圧縮試験およびリングせん断試験^{16, 17}における飽和粘土の排水せん断挙動を模式的に示す。図-1(a)の圧密排水三軸圧縮試験では、正規圧密状態($\sigma_3 = \sigma_c$, σ_c : 最小主応力, σ_v : 壓密応力)の場合には、軸差応力 $\sigma_1 - \sigma_3$ (σ_1 : 最大主応力)は単調に増加する。一方、過圧密状態($\sigma_3 < \sigma_c$)の場合には、 $\sigma_1 - \sigma_3$ は最大値を示した後、間隙比の増加を伴って漸次減少する。その後、いずれの場合も軸ひずみ $\epsilon = 15\sim 20\%$ 程度で限界状態に達する(表-1)。また、図-1(b)の圧密定圧リングせん断試験では、正規圧密状態($\sigma_3 = \sigma_c$, σ_c : 垂直応力)および過圧密状態($\sigma_3 < \sigma_c$)によらず、せん断応力 τ はせん断変位 D の増加に伴って最大値を示した後、いずれの場合も限界状態からさらに残留状態に達する。限界状態から残留状態に到るまでの τ の低下は扁平な形状の粘土粒子のせん断方向への再配列によるものとされている^{16, 18}。したがって、三軸圧縮試験では、せん断変位を無限に与えることができるリングせん断試験とは異なり(表-1), Skempton¹⁸のいう残留状態まで供試体をせん断することは不可能である。

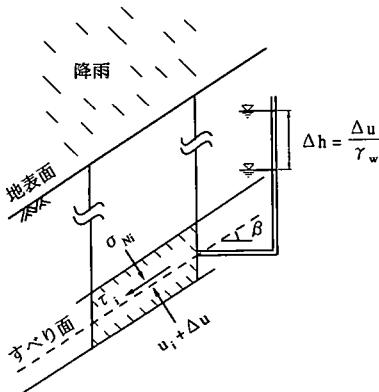


図-2 間隙水圧が増加する場合のすべり面の応力状態
(模式図)

(2) すべり面のモデル化

図-2 に間隙水圧が増加する場合のすべり面の粘土の応力状態を模式的に示す。 β はすべり面の傾斜角を、 τ_i 、 σ_{Ni} および u_i はそれぞれ初期状態におけるすべり面に作用するせん断応力、垂直応力および間隙水圧を、 Δu は間隙水圧の変動量を、 Δh は圧力水頭増分 (γ_w : 水の単位体積重量) を表している。すべり面の粘土は τ_i が一定の下で間隙水圧の増加すなわち有効垂直応力 σ'_N の減少に伴ってせん断強度が減少し、最終的にせん断破壊に到ると説明される。このようなすべり面モデルを再現するために、本文では、表-1 で説明した内容を踏まえて、ノルウェー地盤工学研究所 (NGI) で開発された三軸スライスせん断試験装置を用いた間隙水圧増加試験を実施した。本試験におけるスライス円板状の供試体はすべり面近傍の粘土要素をモデル化したものである。ただし、すべり面の傾斜角は種々異なるものと考えられるが、本文では三軸スライスせん断試験で一般に用いられる $\beta=45^\circ$ の試験を実施している。

(3) 三軸スライスせん断試験装置

図-3 に本文で用いた三軸スライスせん断試験装置を模式的に示す。三軸スライスせん断試験は、柴田ら¹⁹⁾によると、①単純せん断と近似できるような一様なせん断変形を与える得る、②せん断前の圧密がきわめて短時間に終了し、かつ非排水せん断中はせん断面付近の間隙水圧を正確に把握できる、③残留強度を求め得るなどの大変形を与えることが可能であると報告されている。その一方で、梅崎ら²⁰⁾は、④せん断変形が大きくなると、供試体の応力状態が不明確になると報告している。それによれば、供試体に等方応力を負荷して試験を行えば、軸圧縮応力が偏心しない限り供試体に作用する力はつりあつ

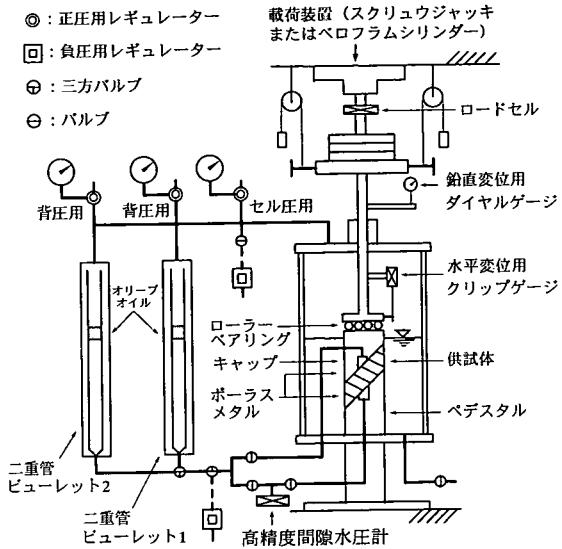


図-3 三軸スライスせん断試験装置(模式図)

ている。しかし、供試体のせん断変形が大きくなると、厳密には供試体に作用する力のつりあいが保てなくなる。本装置では、供試体直径に比べて供試体高さを小さくすることにより、その影響を除くように工夫している。

供試体は直径 $D=50$ mm の円柱試料から切り出され、厚さ $t=10$ mm、角度 $\beta=45^\circ$ のスライス円板状に成形され、 45° の傾斜を有するペデスタルにろ紙を介して設置される。キャップはガイド付きのローラーベアリングを介して水平方向だけに滑らかに動き、回転することはない。キャップとペデスタルにはろ紙と供試体のすべり防止用にサンドペーパーが貼り付けてある。なお、試験後の供試体はろ紙と完全に密着しており、その間ですべりが生じていないことを確認している。軸力を供試体に載荷すると、供試体の上下端面にせん断応力と垂直応力が作用する。供試体が単純せん断変形する場合には供試体は 45° の方向で下方に動く。このとき供試体の水平変位と鉛直変位はそれぞれクリップゲージとダイヤルゲージによりいずれもアンプを介して測定される。水平変位の最小読み取り精度は 0.001 mm、鉛直変位のそれも 0.001 mm (鉛直ひずみ $0.007 \sim 0.008\%$ に相当) であり、十分な精度で測定される。供試体からの間隙水の排水経路には高精度間隙水圧計および容量が異なる 2 つの二重管ビューレットが接続されている。間隙水圧を増加させる場合には供試体上面から二重管ビューレットを介して背圧を載荷し、体積変化も同時に測定する。そして、供試体下面で伝達された間隙水圧を測定する。

(4) 供試体の応力・変形状態

図-4 にせん断過程における供試体の応力・変形状態を

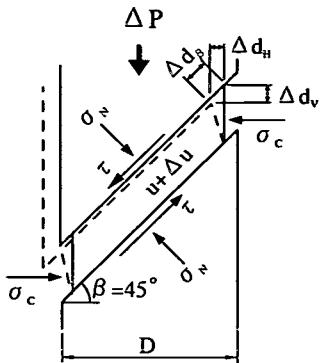


図-4 供試体の応力・変形形状(模式図)

模式的に示す。圧密過程における供試体の上下端面および側面には圧密応力 σ_c が作用しており、せん断過程において軸力増分 ΔP を載荷すると、供試体の上下端面にはせん断応力 τ と垂直応力 σ_v が作用する。 σ_v と τ はそれぞれ次の式(1)および(2)から算出する。

$$\sigma_v = \left(\frac{\Delta P}{A'_c} \right) \cos^2 \beta + \sigma_c \quad (1)$$

$$\tau = \left(\frac{\Delta P}{A'_c} \right) \sin \beta \cdot \cos \beta \quad (2)$$

ただし、 A'_c はせん断中の供試体断面積であり、次の式(3)で補正する。

$$A'_c = \frac{A_c \cdot H_c \cdot (1 - \varepsilon_v / 100)}{H_c - |\Delta d_v - \Delta d_h \tan \beta|} \quad (3)$$

ここに、スライス供試体の傾斜角 $\beta (=45^\circ)$ 、圧密後の供試体高さ $H_c (=H_0 - \Delta H)$ 、 H_0 ：初期状態における供試体高さ、 ΔH ：圧密中の軸変位)、圧密後の供試体断面積 $A_c (=V_0 - \Delta V_c) / H_c$ 、 V_0 ：初期状態における供試体体積、 ΔV_c ：圧密中の排水量)、せん断中の鉛直変位 Δd_v および水平変位 Δd_h 、せん断中の体積ひずみ $\varepsilon_v (= \Delta V_s / V_c)$ 、 ΔV_s ：せん断中の排水量、 V_c ：圧密後の供試体体積)である。なお、 ε_v および ΔV_s と ΔV_c はそれぞれ圧縮および排水を正とする。また、せん断ひずみ γ は次の式(4)から算出する。

$$\gamma = \frac{\Delta d_\beta}{H_c \cdot \cos \beta} \times 100 \quad (\%) \quad (4)$$

ここに、 $\Delta d_\beta (= \Delta d_h / \cos \beta)$ は $\beta=45^\circ$ 面上のせん断方向変位である。

(5) 試料および試験手順

試料として市販のカオリン(土粒子の密度 $\rho_s=2.724$ g/cm³、液性限界 $w_L=75.6\%$ 、塑性指数 $I_p=39.3$ 、 $2\mu m$ 以

表-2 試験ケース

| 試験番号 | σ_c' (kPa) | σ_{v0}' (kPa) | OCR | τ_i (kPa) | 凡例 |
|------|-------------------|----------------------|-----|----------------|----|
| U-1 | 49 | 49 | 1.0 | 0 | ○ |
| U-2 | 196 | 196 | 1.0 | 0 | □ |
| U-3 | 294 | 294 | 1.0 | 0 | △ |
| U-4 | 392 | 49 | 8.0 | 0 | ● |
| P1-1 | 196 | 196 | 1.0 | 9.8 | ▽ |
| P1-2 | 196 | 196 | 1.0 | 18.6 | ◀ |
| P1-3 | 196 | 196 | 1.0 | 24.5 | + |
| P1-4 | 196 | 196 | 1.0 | 33.3 | × |
| P1-5 | 392 | 392 | 1.0 | 19.9 | ● |
| P1-6 | 392 | 392 | 1.0 | 38.9 | △ |
| P1-7 | 392 | 392 | 1.0 | 48.9 | ■ |
| P1-8 | 392 | 392 | 1.0 | 61.5 | ◆ |
| P1-9 | 392 | 392 | 1.0 | 65.9 | ▽ |
| P2-1 | 98 | 98 | 1.0 | - | ▷ |
| P2-2 | 196 | 196 | 1.0 | - | ◇ |
| P2-3 | 392 | 196 | 2.0 | - | ◆ |

下の細粒分含有率 $F=70\%$ 、圧縮指数 $C_c=0.65$ 、膨潤指数 $C_s=0.27$ を用いた。試料は液性限界の約 2 倍の含水比 150 %で十分練返し、鉛直圧密応力 49 kPa の下で 7 日間一次元的に圧密した。供試体は予圧密試料からトリミング法で作製した。供試体の飽和は内部に負圧-93.1 kPa とセル圧-73.5 kPa を 24 時間負荷する二重負圧法²¹⁾と背圧 196 kPa を 24 時間負荷することによって行い、B 値 ≥ 0.95 を確認した。実施した試験は非排水せん断試験と 2 種類の間隙水圧增加試験である。表-2 にこれらの試験ケースを示す。表中の記号のうち、 σ_c' は有効圧密応力、 σ_{v0}' はせん断前($\Delta P=0$)の初期有効垂直応力、OCR($=\sigma_c'/\sigma_{v0}'$)は過圧密比、 τ_i は初期せん断応力を表している。U-1~4 は非排水せん断試験、P1-1~9 は一定の初期せん断応力が作用したせん断破壊前の状態における間隙水圧增加試験、P2-1~3 はせん断破壊後の変形中の状態における間隙水圧增加試験である。非排水せん断試験の手順は通常の圧密非排水三軸圧縮試験(CU)と同じである。

(a) 一定の初期せん断応力が作用したせん断破壊前の状態における間隙水圧增加試験(初生地すべりを模擬した場合)の手順は以下の①~③である。

①供試体を応力制御方式で所定の初期せん断応力 τ_i に達するまで非排水せん断する。せん断応力増分は 1.96 kPa とし、軸ひずみ速度が 0.1 %/min 以下に収束してから、次のせん断応力を載荷する。

②上記①の過程で発生した過剰間隙水圧を背圧に加えた後、非排水条件から排水条件に切り換える。

③間隙水圧を背圧として段階的に増加させる。間隙水圧増分は 3.92 kPa とし、その載荷値が供試体下面での

間隙水圧の測定値に等しく、かつ軸ひずみ速度が $0.1\%/\text{min}$ 以下に収束してから、次の間隙水圧を載荷する。この操作をせん断ひずみ $\gamma=50\%$ 程度に達するまで続行する。

- (b) せん断破壊後の変形中の状態における間隙水圧増加試験(初生地すべりにおけるすべり面の粘土のせん断強度特性の検討)の手順は以下の①～③である。
 - ①供試体をひずみ制御方式(軸ひずみ速度は $0.1\%/\text{min}$)でせん断ひずみ $\gamma=30\%$ 程度になるまで非排水せん断する。
 - ②上記①の過程で発生した過剰間隙水圧を背圧に加えた後、非排水条件から排水条件に切り換える。
 - ③間隙水圧を一定の速度($1.96\text{ kPa}/\text{min}$)で増加させながら、せん断ひずみ $\gamma=40\sim50\%$ 程度に達するまでせん断を続行する。なお、この間隙水圧の増加速度においては間隙水圧の載荷値と測定値が随時等しくなることを確認している。

3. 試験結果および考察

(1) 非排水せん断特性と強度定数

非排水せん断試験の結果を図-5～7に示す。図中の記号は表-2のU-1～4に対応している。

図-5に供試体のせん断ひずみ $\gamma=50\%$ 程度までの鉛直変位 Δd_v と水平変位 Δd_H の関係を示す。せん断が進行するにつれて、 Δd_v が Δd_H よりも若干大きくなるものもあるが、 $\Delta d_v/\Delta d_H=1.07\sim1.19$ であり、概ね $\Delta d_v/\Delta d_H=1.0$ である。すなわち非排水せん断過程においては供試体は鉛直方向に若干圧縮されながら、柴田ら¹⁹⁾が報告しているように近似的な単純せん断変形をしている。ただし、本試験でのせん断変形は、小田²²⁾が指摘しているように、Cambridge型やNGI型の単純せん断試験の場合と同様に、単純せん断の制約条件を完全に満足しているわけではない。また、小田²²⁾は斜面崩壊の場合にはそのすべり面に沿う変形は単純せん断的であることも示唆している。

図-6にせん断応力 τ 、過剰間隙水圧 Δu およびせん断ひずみ γ の関係を示す。正規圧密状態の場合には、いずれの σ_{N0}' においても $\gamma=30\%$ 程度で τ および Δu はともにほぼ定常状態となる。また、過圧密状態の場合にも、 τ および Δu はともに最大値を示した後、漸次減少して、 $\gamma \geq 30\%$ の領域ではほぼ定常状態となる。このように三軸スライスせん断試験においても三軸圧縮試験と同様な非排水せん断挙動が得られる。ただし、表-1に示したように三軸圧縮試験における最大の軸ひずみは $15\sim20\%$ 程度であるのに対して、三軸スライス試験においてはせん断ひずみ 50% 程度までのせん断変形を与えることができる。

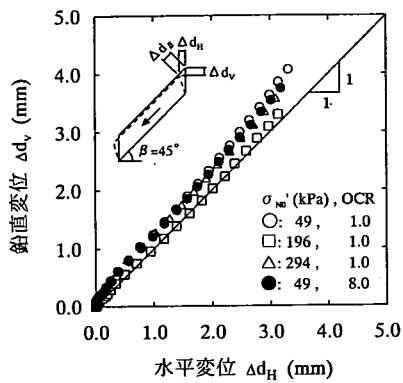


図-5 非排水せん断過程における供試体の変形状態(U-1～4)

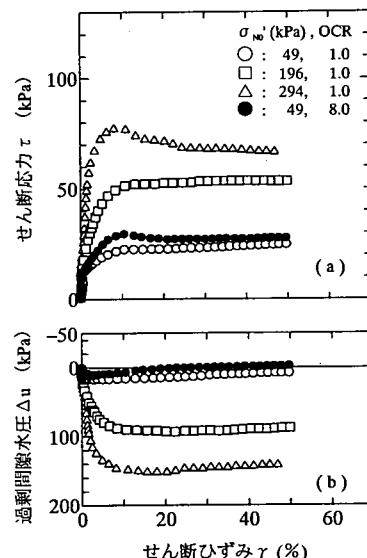


図-6 三軸スライスせん断試験の非排水せん断挙動(U-1～4)

図-7にせん断応力 τ と有効垂直応力 $\sigma'_N (= \sigma_{N0}' - \Delta u)$ の関係を示す。いずれの有効応力経路も図中の実線で示される同一の破壊線に収束する。この破壊線より算定される内部摩擦角および粘着力はそれぞれ $\phi_s'=19.3^\circ$ および $c_s'=0\text{ kPa}$ である。一方、通常の圧密非排水三軸圧縮試験(CU)からは $\phi'=18.8^\circ$ および $c'=0\text{ kPa}$ が得られている。また、圧密定圧リングせん断試験¹⁵⁾からはピークおよび残留状態における強度定数として $\phi_p'=17.6^\circ$ 、 $c_p'=0\text{ kPa}$ および $\phi_r'=11.3^\circ$ 、 $c_r'=0\text{ kPa}$ が得られている。すなわち、三軸スライスせん断試験から得られる強度定数 (ϕ_s', c_s') は (ϕ', c') および (ϕ_p', c_p') とほぼ等しい。したがって、三軸スライスせん断試験における強度定数は限界状態における強度定数であり、 $\gamma=50\%$ 程度においても Skempton¹⁸⁾のいう残留状態(図-1(b)参

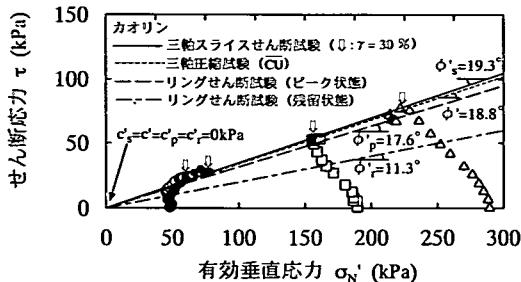


図-7 三軸スライスせん断試験(U-1~4)およびその他のせん断試験における強度定数

照)には到らない。また、図-5~7の考察により、 $\gamma=50\%$ までの本試験の結果は比較した他の試験と同等の信頼性を有するものと考える。なお、限界状態については次節においてさらに詳しく考察する。

(2) 一定の初期せん断応力が作用したせん断破壊前の状態で間隙水圧を増加させる場合

図-8~14に $\sigma_{N0}'=196$ または 392 kPa の場合の試験結果を示す。図中の記号は表-2のP1-1~9に対応している。

図-8に $\sigma_{N0}'=196\text{ kPa}$ の場合の間隙水圧増加過程における間隙水圧の載荷値と測定値の関係を示す。いずれのデータも、初期せん断応力 τ_i の値によらず、 $u_L=u_M$ 線上にある。間隙水圧の測定値は2分程度で間隙水圧の載荷値に等しくなる。なお、 $\sigma_{N0}'=392\text{ kPa}$ の場合も同様の結果が得られている。2.(1)でも述べたように、片桐⁷は等方応力状態で供試体下面に間隙水圧を強制的に加えた場合の供試体上面で測定される間隙水圧の経時変化を調べ、間隙水圧の均一化に100~7000分程度要することを述べている。供試体厚さの薄い三軸スライスせん断試験では、円柱供試体を用いた三軸圧縮試験の場合とは異なり、供試体の間隙水圧を短時間で均一に増加させることができる。

図-9に $\sigma_{N0}'=196\text{ kPa}$ の場合の供試体の鉛直変位 Δd_v と水平変位 Δd_H の関係を示す。 $\tau_i=9.8\text{ kPa}$ の場合の初期段階においてデータが $\Delta d_v=\Delta d_H$ 線より大きく逸脱している。間隙水圧増加試験は排水せん断試験の一種であり、ダイレイタンシーによる体積変化と有効圧密応力の減少による体積変化が生じていると考えられる。すなわち、せん断変形しながら膨潤を生じる(図-10(c))。その結果、初期せん断応力が最も小さい $\tau_i=9.8\text{ kPa}$ における供試体は間隙水圧の増加直後には比較的大きく鉛直方向にも膨潤しているため $\Delta d_v=0$ であると考えられる。しかし、その後は $\Delta d_v/\Delta d_H=1.01\sim1.12$ であり、せん断初期を除けば、いずれの供試体も単純せん断に近い変形をしている。なお、 $\sigma_{N0}'=392\text{ kPa}$ の場合における供試体の変形状態も図-9と同様の傾向を示している。

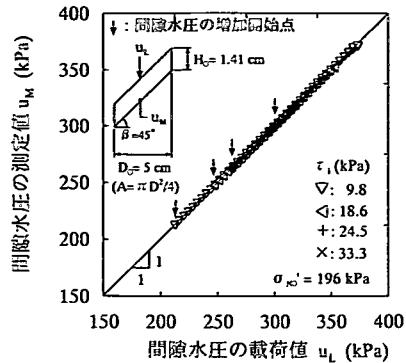


図-8 間隙水圧増加過程における間隙水圧の載荷値と測定値の関係(P1-1~4)

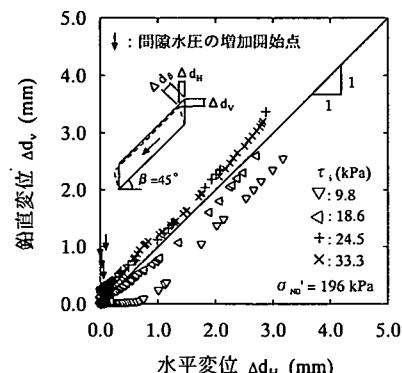


図-9 間隙水圧増加過程における供試体の変形状態(P1-1~4)

図-10(a)~(c)に $\sigma_{N0}'=196\text{ kPa}$ の場合におけるせん断応力 τ 、過剰間隙水圧 Δu 、体積ひずみ ε_v およびせん断ひずみ γ の関係を示す。図-10(a), (b)の $\tau \sim \Delta u \sim \gamma$ 関係において、 τ_i が一定の下で間隙水圧を増加させると、 $\gamma=30\%$ 程度で Δu をさらに増加させることができなくなり、そのままの状態で γ はさらに増加して $\gamma=50\%$ 程度にまで達する。図-10(c)の $\varepsilon_v \sim \gamma$ 関係において、粘土供試体は間隙水圧の増加に伴って膨潤し、 Δu をさらに増加させることができなくなる $\gamma=30\%$ 程度で ε_v もほぼ定常状態になるような傾向を示す。図-11(a)~(c)に示す $\sigma_{N0}'=392\text{ kPa}$ の試験結果も $\sigma_{N0}'=196\text{ kPa}$ の場合とすべて同じ傾向にある。

図-12(a)および(b)にそれぞれ $\sigma_{N0}'=196$ および 392 kPa の場合におけるせん断応力 τ と有効垂直応力 σ_N' (= $\sigma_{N0}' - \Delta u$)の関係を示す。有効応力状態はいずれも初期せん断応力が一定の下で間隙水圧の増加すなわち有効垂直応力の減少に伴って破壊線に向かって移動する。なお、この破壊線は図-7より求めたものである。

ここで、図-12において有効応力状態($\sigma_N(\infty)', \tau_i$)

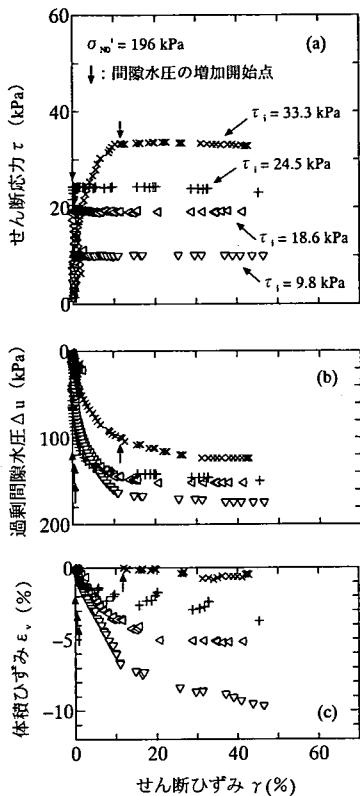


図-10 間隙水圧増加過程におけるせん断挙動(P1-1~4)

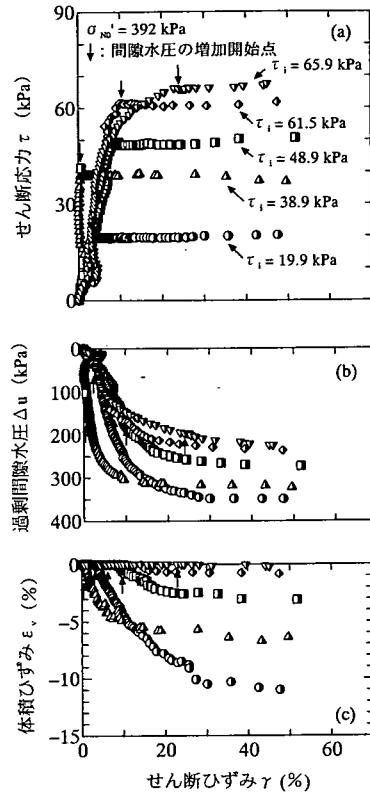


図-11 間隙水圧増加過程におけるせん断挙動(P1-5~9)

を図示するために、せん断ひずみ γ が無限大となる場合の有効垂直応力 $\sigma'_N(\infty)$ を間隙水圧の増加開始以後における $\sigma'_N \sim \gamma$ 関係の実測値に対する双曲線近似により決定した。図-13(a)および(b)にそれぞれ $\sigma_{no}'=196$ および392 kPaの試験結果における $\gamma/\sigma'_N \sim \gamma$ の関係に最小二乗法で直線近似した結果を示す。図中に示す双曲線近似パラメータaおよびbはそれぞれ直線の切片および傾き、rは近似曲線と実測値の相関係数である。 γ が無限大的ときの $\sigma'_N(\infty)$ 値はbの逆数で与えられる。 τ_i および σ_{no}' によらず、 $r \geq 0.995$ であり、双曲線近似の適合性が非常に良好である。決定した有効応力状態($\sigma'_N(\infty), \tau_i$)はいずれもほぼ上記の破壊線上に位置する。すなわち、図-10～12に基づけば、この破壊線は限界状態線(CSL)であり、初期せん断応力が一定の下で間隙水圧を増加させると、すべり面のせん断応力と有効垂直応力の関係は限界状態線上で定常状態に達する。このまま間隙水圧が維持される場合には、有効応力状態や体積変化が定常状態のまません断ひずみだけが急増し累積していく。

図-14(a)および(b)にそれぞれ $\sigma_{no}'=196$ および392 kPaの場合における $\sigma'_N(\infty)/\sigma'_N(\gamma)$ とせん断ひずみ γ の関係を示す。ただし、図中のデータは間隙水圧増加開

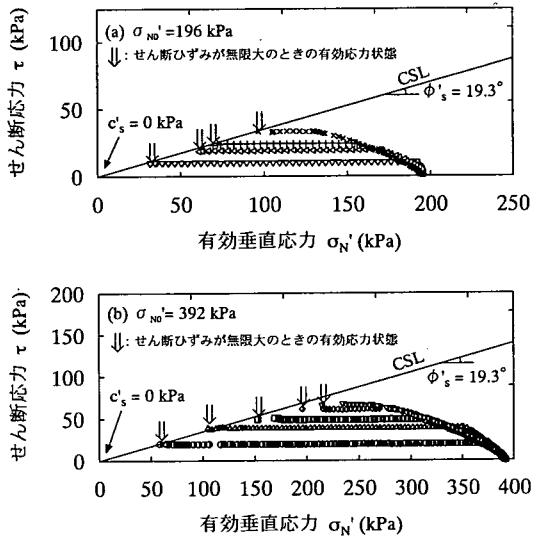


図-12 間隙水圧増加過程における有効応力経路(P1-1~9)

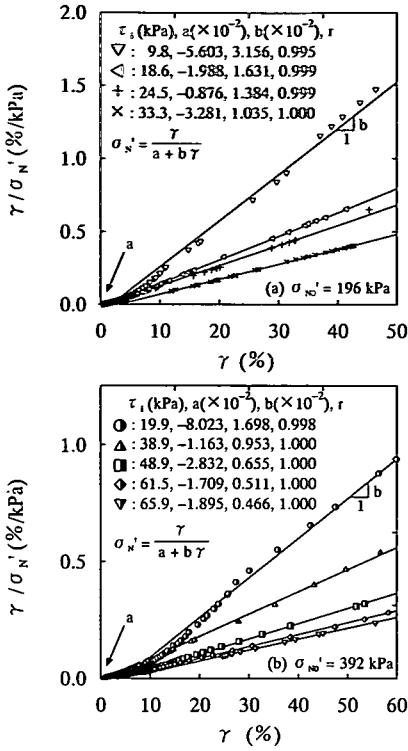


図-13 せん断ひずみ無限大における有効垂直応力の決定(P1-1~9)

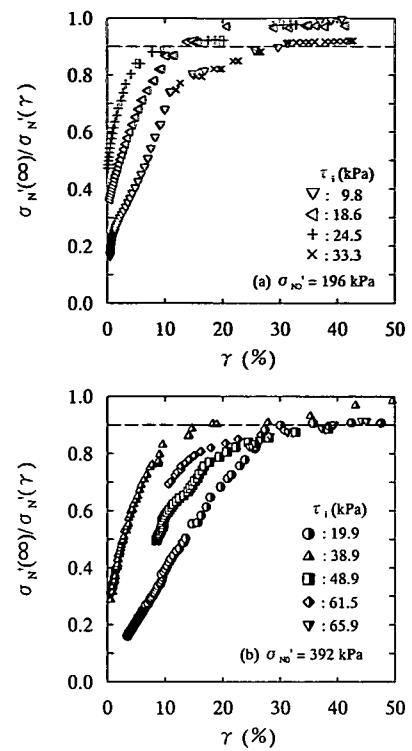


図-14 $\sigma'_N(\infty)/\sigma'_N(\gamma)$ とせん断ひずみ γ の関係(P1-1~9)

始点以降のものである。ここで、 $\sigma'_N(\gamma)$ はある γ における実測した有効垂直応力である。 $\sigma'_N(\infty)/\sigma'_N(\gamma)$ は、いずれのケースも、 γ が ∞ のときは 1.0 に収束する。 $\gamma = 30\%$ 付近においては、 $\sigma'_N(\infty)/\sigma'_N(\gamma)$ はすべて 0.90 程度以上の値であり、間隙水圧増加試験においても非排水せん断試験と同様に $\gamma = 30\%$ 程度で有効応力状態はほぼ限界状態に達する。

図-15 に $\sigma'_{N0} = 196$ および 392 kPa の場合の間隙水圧増加過程における間隙比増加量 Δe と正規化した有効垂直応力 σ'_N/σ'_{Ni} の関係を示す。 σ'_{Ni} は間隙水圧を増加する直前の有効垂直応力である。 Δe は σ'_N/σ'_{Ni} の対数の減少に対して概略直線的に増加する。この直線関係の勾配は段階載荷による圧密試験(JIS A 1217)により別途求めた膨潤指数 $C_s = 0.27$ にほぼ等しい。ただし、 $\sigma'_N/\sigma'_{Ni} \leq 0.2$ では、 Δe の値はその直線上の値よりもいくぶん大きくなる。これは、膨潤・再圧密過程における粘土の間隙比・有効応力関係のヒステリシスに起因すると考えられる。

(3) せん断破壊後の変形中の状態で間隙水圧を増加させる場合

U-1~4 および P1-1~9 の試験結果から、いずれもすべり面のせん断応力と有効垂直応力の関係はせん断ひずみ $\gamma = 30\%$ 程度ではほぼ限界状態線に達する。すべり面の

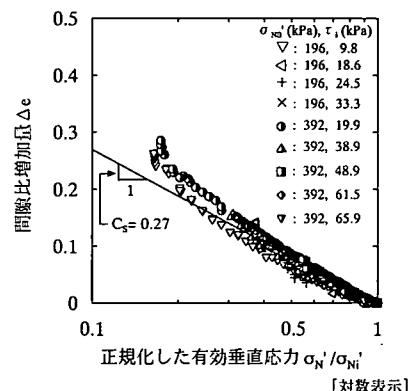


図-15 間隙水圧増加過程における供試体の膨潤挙動(P1-1~9)

粘土のせん断強度特性を検討するために、非排水せん断試験の $\gamma = 30\%$ において間隙水圧を単調に増加させる試験(P2-1~3)を実施した。図-16~21 に $\sigma'_{N0} = 98$ および 196 kPa (いずれも $OCR=1$) と $\sigma'_{N0} = 196 \text{ kPa}$ ($OCR=2$) における試験結果を示す。図中の記号は表-2 の P2-1~3 に対応している。

図-16 に間隙水圧の載荷値 u_L と測定値 u_u の関係を、図

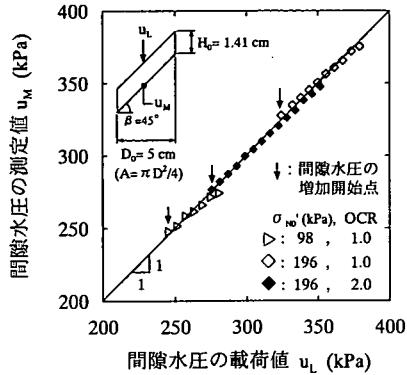


図-16 間隙水圧増加過程における間隙水圧の載荷値と測定値の関係(P2-1~3)

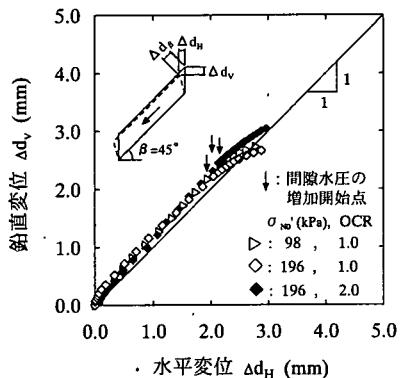


図-17 間隙水圧増加過程における供試体の変形状態(P2-1~3)

-17 に供試体の鉛直変位 Δd_V と水平変位 Δd_H の関係を示す。前述の P1-1~9 の試験と同様に、供試体の間隙水圧を短時間で均一に増加させることができる。また、供試体は単純せん断に近い変形をしている。

図-18(a)～(c)にせん断応力 τ 、過剰間隙水圧 Δu 、体積ひずみ ε_v およびせん断ひずみ γ の関係を示す。 τ や σ'_N が定常状態となる $\gamma \geq 30\%$ の領域で間隙水圧を単調に増加させると、せん断応力はその時点から漸次減少し、それと同時に体積ひずみは負の値を示し、供試体は膨潤し始める。

図-19 にせん断応力 τ と有効垂直応力 σ'_N の関係を示す。上述したように、非排水せん断過程においては $\gamma = 30\%$ においてほぼ限界状態線(CSL)に達する。そのときの有効応力状態(σ'_N , τ_{II})から間隙水圧を単調に増加させると、せん断強度 τ_I は有効垂直応力の減少に伴って限界状態線に沿って減少する。

図-20 に間隙比増量 Δe と正規化した有効垂直応力 σ'_N / σ'_{Ni} の関係を示す。 σ'_{Ni} は間隙水圧を増加する直前の有効垂直応力であり、限界状態線上にある。この場合

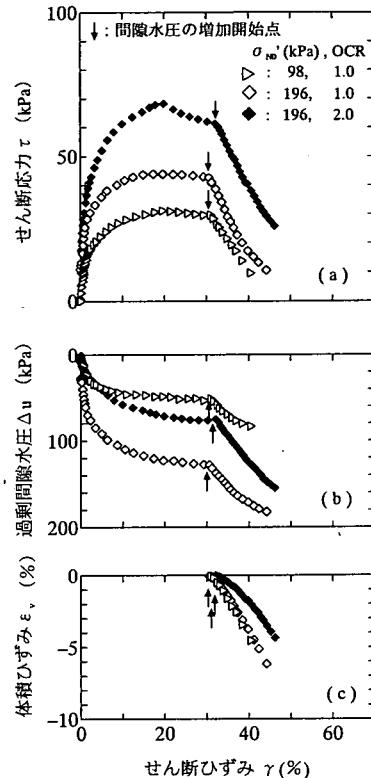


図-18 間隙水圧増加過程におけるせん断挙動(P2-1~3)

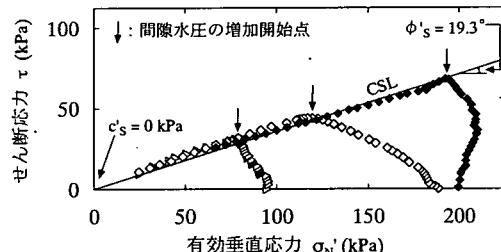


図-19 間隙水圧増加過程における有効応力経路(P2-1~3)

にも P1-1~9 の試験と同様に、 σ'_N / σ'_{Ni} の対数と Δe の間には直線関係が認められ、その勾配は膨潤指数 $C_s = 0.27$ にほぼ等しい。したがって、図-15 および 20 より、間隙水圧の増加に伴うすべり面の粘土の膨潤特性はすべり面の有効垂直応力により評価できることが示された。

図-21 に Δe と正規化したせん断強度 τ_I / τ_{II} の関係を示す。 τ_{II} は間隙水圧増加前のすべり面の粘土のせん断強度であり、 τ_I は間隙水圧増加過程におけるすべり面の粘土のせん断強度である。また、 τ_I / τ_{II} はせん断強度の減少割合を表す。 τ_I / τ_{II} の対数と Δe の間には直線関係

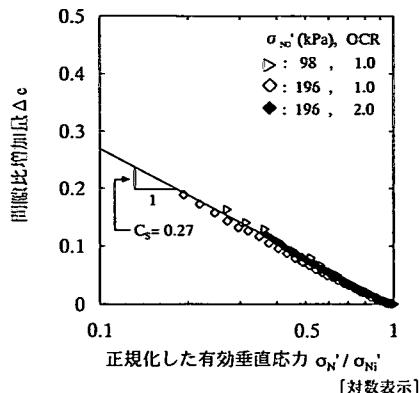


図-20 間隙水圧増加過程における供試体の膨潤挙動(P2-1～3)

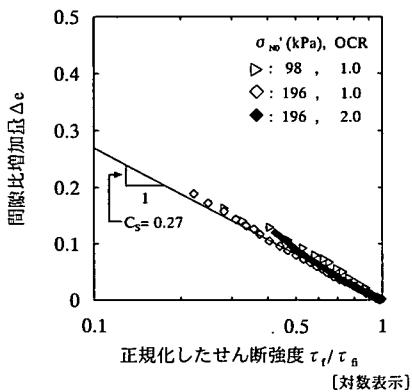


図-21 間隙水圧増加過程におけるせん断強度の減少(P2-1～3)

が認められ、その勾配は膨潤指数 $C_s = 0.27$ にほぼ等しい。間隙水圧増加過程におけるせん断強度の減少割合は Δe と C_s によって概略評価することができる。

さらに、図-15, 20 および 21 の関係から、 $(\tau_i / \tau_{fi}) = (\sigma_n' / \sigma_{ni}')$ の関係が得られる。したがって、初生地すべりにおいてすべり面の間隙水圧の変動量が測定できれば、せん断強度の減少割合が概略評価できることが示唆される。さらに、後述するように、すべり面の粘土の強度定数 (ϕ' , $c' = 0$) が得られていれば、すべり面の安全率 $F_s = \tau_i / \tau_{fi}$ (式(9)) も算出することができる。

(4) 間隙比増加量と安全率の関係

図-22 は一定の初期せん断応力の下で間隙水圧が増加する場合における有効応力状態およびせん断強度の変化を模式的に示したものである。初期せん断応力 τ_i は式(5)のように表される。

$$\tau_i = \sigma_{ni}' \cdot \tan \phi_m' \quad (5)$$

ここに、 ϕ_m' は初期応力状態 (σ_{ni}', τ_i) において発現さ

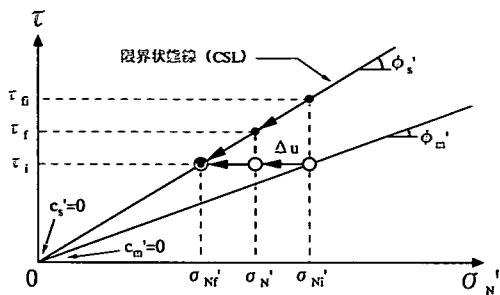


図-22 間隙水圧の増加に伴う有効応力状態およびせん断強度の変化(模式図)

れている内部摩擦角 ($c_m' = 0$) と仮定する。また、このときすべり面で稼動される初期せん断強度 τ_{fi} は式(6)のように表される。ただし、図-7 に示したように、 $\phi_s' = \phi_n' = \phi_p'$ である。

$$\tau_{fi} = \sigma_{ni}' \cdot \tan \phi_s' \quad (6)$$

したがって、初期状態における安全率(初期安全率) F_{so} は式(7)のように定義される。

$$F_{so} = \frac{\tau_{fi}}{\tau_i} = \frac{\tan \phi_s'}{\tan \phi_m'}, \quad (7)$$

一方、3.(3)で述べたように、初生地すべりにおけるすべり面の粘土のせん断強度は間隙水圧の増加に伴って境界状態線に沿って減少する。すなわち、すべり面で稼動されるせん断強度はすべり面に作用する有効垂直応力によって一義的に定まる。このことから、間隙水圧が Δu だけ増加すなわち有効垂直応力が $\sigma_n' (= \sigma_{ni}' - \Delta u)$ まで減少したときのせん断強度 τ_i は式(8)のように表される。

$$\tau_i = \sigma_n' \cdot \tan \phi_s' \quad (8)$$

したがって、初生地すべりにおける安全率 F_s は式(9)のように定義される。

$$F_s = \frac{\tau_i}{\tau_{fi}} = \left(\frac{\sigma_n'}{\sigma_{ni}'} \right) \cdot \left(\frac{\tan \phi_s'}{\tan \phi_m'} \right) \quad (9)$$

式(9)より正規化した有効垂直応力 σ_n' / σ_{ni}' は式(10)のようになる。

$$\left(\frac{\sigma_n'}{\sigma_{ni}'} \right) = F_s \cdot \left(\frac{\tan \phi_m'}{\tan \phi_s'} \right) \quad (10)$$

一方、図-15において考察したように、一定の初期せん断応力が作用したせん断破壊前の状態においてすべり面の飽和正規圧密粘土が間隙水圧の増加を受ける場合の間隙比増加量 Δe と σ_n' / σ_{ni}' の間には次の式(11)のような関係が実験的に認められる。

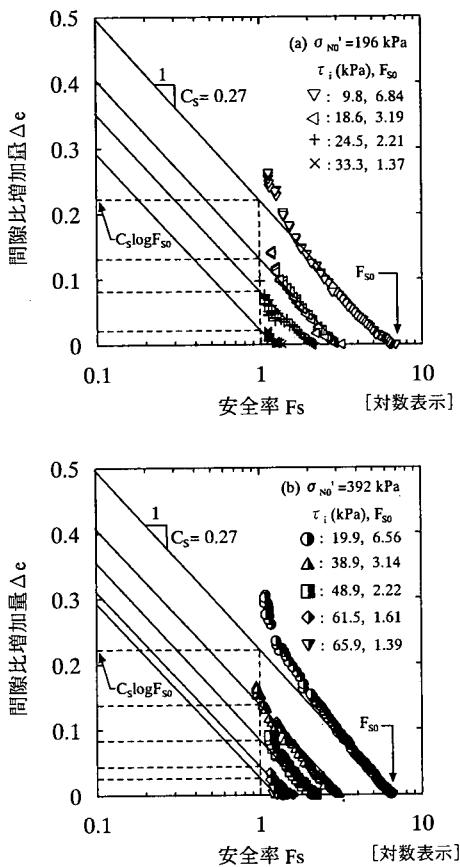


図-23 間隙比増加量と安全率の関係

$$\Delta e = -C_s \cdot \log \left(\frac{\sigma_N}{\sigma_{N_i}} \right) \quad (11)$$

式(11)に式(7)および式(10)を代入して整理すると、間隙比増加量と安全率の関係式として式(12)が得られる。

$$\Delta e = -C_s \cdot \log F_s + C_s \cdot \log F_{s0} \quad (12)$$

また、式(12)より安全率は式(13)のように表される。

$$F_s = F_{s0} \cdot \exp \left(\frac{-\Delta e}{C_s} \right) \quad (13)$$

さらに、式(12)より、せん断破壊時すなわち $F_s=1.0$ のときの間隙比増加量 Δe_f は式(14)のように表され、 F_{s0} と C_s によって一義的に定まる。

$$\Delta e_f = C_s \cdot \log F_{s0} \quad (14)$$

図-23(a)および(b)にそれぞれ $\sigma_{N_0}' = 196$ および 392 kPa の場合の Δe と F_s の実測値の関係を示す。図中には

各試験ケースの τ_i および初期安全率 F_{s0} も示している。 Δe と F_s の間には、式(12)に示したように、傾き $-C_s$ 、切片 $C_s \cdot \log F_{s0}$ の直線関係が概略認められる。したがって、初生地すべりにおいては、すべり面の飽和粘土の間隙水圧もしくは間隙比の変化量が測定できれば、安全率を概略算定することができる。

4. まとめ

すべり面の飽和正規圧密粘土に対して以下のようないかでんが得られた。

- (1) 一定の初期せん断応力が作用したせん断破壊前の状態においてすべり面の粘土が間隙水圧の増加を受ける場合、有効垂直応力は限界状態線上で定常状態となる。
- (2) 有効垂直応力が限界状態線に達したときのせん断ひずみは 30% 程度であり、このまま間隙水圧が維持される場合には有効応力状態や体積変化が定常状態のままさらにせん断ひずみだけが急増し累積していく。
- (3) 有効垂直応力が限界状態線に達するまでの過程においてすべり面の粘土は間隙水圧の増加に伴って膨潤する。そのときの間隙比増加量は正規化した有効垂直応力と膨潤指数によって概略評価することができる。
- (4) 初生地すべりにおけるすべり面の粘土のせん断強度は間隙水圧の増加に伴って限界状態線に沿って減少する。
- (5) このときのせん断強度の減少割合は間隙比増加量と膨潤指数によって、また、間隙比増加量は正規化した有効垂直応力と膨潤指数によって概略評価することができる。
- (6) 間隙水圧の増加に伴う間隙比増加量と対数表示の安全率の間には直線関係が認められる。また、せん断破壊時の間隙比増加量は初期安全率と膨潤指数によって一義的に定まる。
- (7) 初生地すべりにおいては、すべり面の粘土の間隙水圧もしくは間隙比の変化量が測定できれば、安全率を概略算定することができる。

謝辞：本研究を遂行する上で、川上 浩 信州大学名誉教授には懇切丁寧なご指導とご助言を頂いた。また、豊田 富晴 信州大学技官には試験装置の製作でご助力を頂いた。久貝壽之氏(現 東京消防庁)、長瀬主税氏(現 岐阜県庁)、山上友也氏(現 応用地質(株))には試験の実施と結果の整理で多大なるご助力を頂いた。ここに記して、上

記の方々に深甚なる感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) 地盤工学会編：土質工学用語辞典、地盤工学会、p. 126, 1985.
- 2) 青山清道、板垣治、中村浩之：土砂災害の予知と対策、土質基礎工学ライブラー27、地盤工学会、p. 49, 1986.
- 3) 落合博貴：地盤工学ハンドブック、第5編自然災害・環境問題と対策、第3章 斜面災害と対策、地盤工学会、pp. 1336-1341, 1999.
- 4) 川上 浩：自然斜面の安定性を評価するまでの2,3の問題、土と基礎、Vol. 35, No. 11, pp. 3-8, 1987.
- 5) Eigenbrod, K.D., Burak, J.P. and Graham, J.: Drained deformation and failure due to cyclic pore pressures in soft natural clay at low stresses, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, pp.208-215, 1987.
- 6) 常田亮、橋本正樹、池田俊雄、小川正二、亀井健史：間隙水圧の上昇が応力履歴を受けた粘性土のせん断特性に与える影響、第22回土質工学研究発表会講演概要集、pp. 467-468, 1987.
- 7) 片桐雅明：飽和粘性土の有効応力減少過程における変形特性、東京大学学位請求論文、1990.
- 8) Katagiri, M. and Imai, G.: Deformation characteristics of a saturated cohesive soil subjected to increase in pore pressure, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.3, pp.1-12, 1996.
- 9) 廉紅建、赤石勝、山田道男：関東ローム切土斜面の崩壊、土と基礎、Vol. 44, No. 7, pp. 23-26, 1996.
- 10) Ohtsuka, S., Miyata, Y. and Toyota, H.: Pore water pressure loading test, *Proc. of International Symposium on Slope Stability Engineering (IS-SHIKOKU'99)*, pp.731-734, 1999.
- 11) 岩部司：間隙水圧載荷試験において粘土含有率が粘性土のせん断特性に及ぼす影響、第34回地盤工学研究発表会発表講演集、pp. 589-590, 1999.
- 12) 高畠勝行、三田地利之、九田敬行、川口貴之：有効応力減少過程における粘土の変形特性に基づく強度定数の決定法、第35回地盤工学研究発表会発表講演集、pp. 581-582, 2000.
- 13) Ikeda, T., Ogawa, S., Konagai, K. and Kamei, T.: Field investigations in landslide areas and shearing strength of soil for use in stability analysis, *Natural Disaster Science*, Vol.8, No.1, pp.29-44, 1986.
- 14) Suzuki, M., Umezaki, T. and Yamamoto, T.: Shear behavior of clay subjected to change of normal stress, *Proc. of International Symposium on Slope Stability Engineering (IS-SHIKOKU'99)*, pp.735-740, 1999.
- 15) 鈴木素之、梅崎健夫、川上 浩、山本哲朗：直接型せん断試験における土の残留強度、土木学会論文集、No. 645/III-50, pp. 37-50, 2000.
- 16) Skempton, A.W.: Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Geotechnique*, Vol.35, No.1, pp.3-18, 1985.
- 17) 石原研而：土質力学、丸善、p. 202, 1988.
- 18) Skempton, A.W.: Long-term stability of clay slopes, *Geotechnique*, Vol.14, No.2, pp.77-102, 1964.
- 19) 柴田徹、星野満：粘土の三軸スライスセン断試験について、土と基礎、Vol. 16, No. 1, pp. 3-9, 1968.
- 20) 梅崎健夫、落合英俊、林重徳、内田浩平：粘土と鋼矢板の接触面における摩擦特性、九州大学工学集報、Vol. 65, No. 6, pp. 565-572, 1992.
- 21) たとえば龍岡文夫：土質せん断試験機の設計と製作—試験法あれこれ一、地質と調査、No. 3, pp. 53-58, 1986.
- 22) 小田匡寛：技術手帳 純粹せん断、単純せん断、土と基礎、Vol. 27, No. 9, pp. 55-56, 1979.

(2002. 8. 13 受付)

SWELLING AND SHEAR CHARACTERISTICS OF CLAY IN SLIP SURFACE AND SLOPE STABILITY DURING INCREASE IN PORE WATER PRESSURE

Takeo UMEZAKI, Motoyuki SUZUKI and Tetsuro YAMAMOTO

This paper describes swelling and shear characteristics of a clay in a slip surface during an increase in pore water pressure due to rainfall, snow melting and so on. A saturated clay specimen before failure was subjected to such the increase in pore water pressure under a constant shear stress using triaxial slice shear test apparatus. As the pore water pressure inside the specimen is increased monotonously, effective stress path moves toward a critical state line. Shear strength mobilized on the slip surface decreases along the critical state line, simultaneously. During the increase in pore water pressure, relationships between an increase in void ratio and normalized effective normal stress or shear strength are determined by swelling index, respectively. Safety factor at first-time sliding can be approximately estimated by the changes in void ratio or pore water pressure.