

垂直応力変化を受けた粘土のリングせん断挙動

鈴木素之¹・梅崎健夫²・山本哲朗¹

¹社会建設工学科

²信州大学工学部社会開発工学科

降雨や融雪に起因する地すべり機構を解明するために、斜面内の間隙水圧の増加を模擬的に再現するリングせん断試験を実施した。実験では装置の構造上の問題を考慮して、供試体内部の間隙水圧を直接増加させるかわりに、それに相当する垂直応力を全応力として減少させた。その結果、①一定せん断応力の下での応力径路は初期応力状態に依らず垂直応力の減少に対して正規圧密状態の破壊強度線上に達する。②せん断破壊後の応力径路は破壊時の垂直応力の下でせん断変位の増加に伴って残留強度線上に達する。③残留状態に達した後のせん断応力と垂直応力の関係は、圧密履歴および垂直応力の変化速度に依らず、それ以降の垂直応力の変化に対して残留強度線上で変化する。

Key words: reactivated landslide, rainfall, increase of pore water pressure, clay, ring shear test, change of normal stress, stress path, failure strength line, residual strength line

1. はじめに

地すべりの多くは豪雨や融雪などが誘因となって発生している。このような自然斜面の破壊機構のモデルとして、一定のせん断応力が作用した下で、斜面内の間隙水圧の増加に伴うすべり面上の有効垂直応力の減少が考えられている。このことの直接的な原因には雨水や融雪水の浸透、定常的透水、被圧水圧上昇、地震による繰返しせん断、貯水位急降時の残留水圧の発生などが挙げられている¹⁾。

Fig.1 に雨水や融雪水の浸透によって地下水位が上昇する場合のすべり面の応力状態を模式的に示す。すべり面には上載している土塊の重量による初期せん断応力 τ_i と初期垂直応力 σ_{Ni} および初期間隙水圧 u_i が作用している。我が国の粘性土斜面では深さ30 cm以上まで含水比が低下するほど乾燥することはまれであり、降雨前後で土の単位体積重量はほとんど変わらないと考えられるので、実際には地下水位の上昇に伴うせん断応力増分および垂直応力増分はともにゼロとみなすことができる²⁾。Fig.2 にせん断応力が一定の下で間隙水圧が増加するときの応力径路³⁾を模式的に示す。すべり面の応力状態はその傾斜角 β と土塊の重量によって全応力表示で

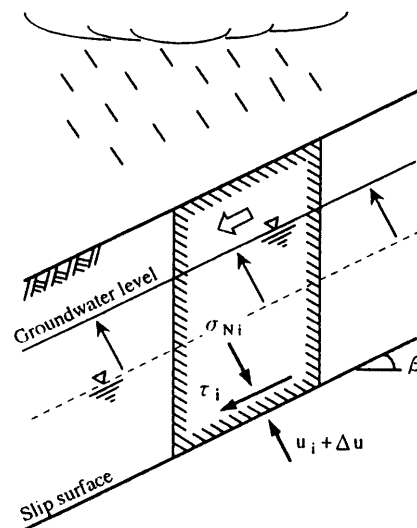


Fig.1 Stress condition of soil element on slip surface during a fluctuation of groundwater level

点Aのように定まり、このときの地下水位の静水圧分布による間隙水圧 u_i のみを考慮すれば、すべり

Table 1 Test cases and initial condition values of specimens

Test No.	ρ_t (g/cm ³)	w_0 (%)	σ_C (kPa)	σ_N (kPa)	OCR	$\dot{\theta}$ (rad/min.)	τ_i (kPa)	σ_{Ni} (kPa)	σ_{Nf} (kPa)	$\Delta\sigma_N^*$ (kPa)	Symbol
1	1.660	63.7	196	196	1.0	0.0025	51.5	196	129.1	66.9	○
2	1.706	56.0	392	392	1.0	0.0025	103.2	392	309.6	82.4	△

*: $\Delta\sigma_N = \sigma_{Ni} - \sigma_{Nf}$

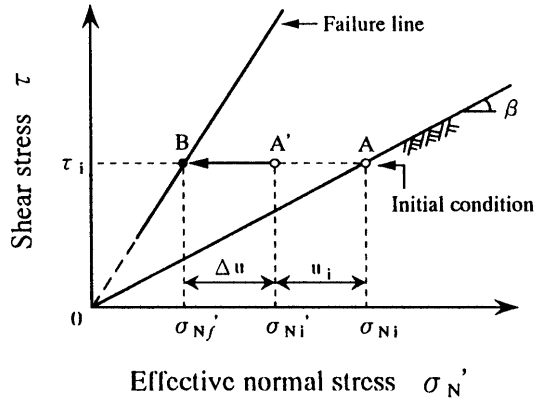


Fig.2 Stress path of soil element on slip surface subjected to pore water pressure increment

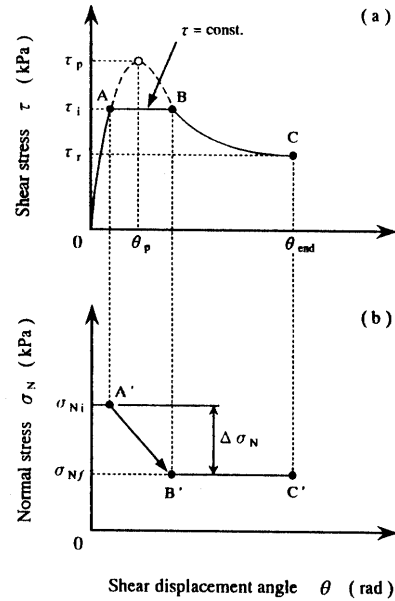


Fig.4 Test procedure controlling normal stress to maintain initial shear stress

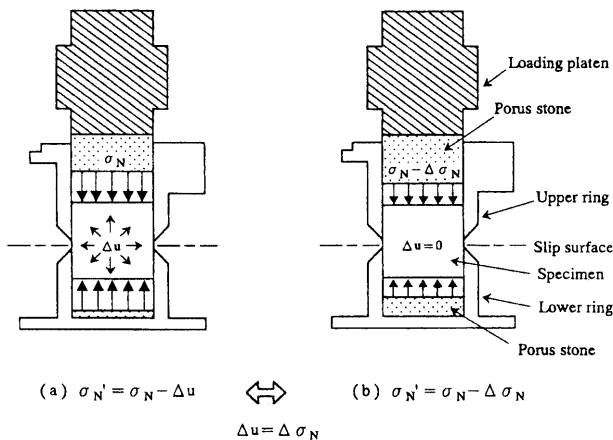


Fig.3 Change of pore water pressure simulated in ring shear test apparatus

面の有効応力状態は図中の点A'のように定まる。土は、地下水位の上昇による間隙水圧の増加 Δu に伴って有効垂直応力が減少して、破壊線上の点Bに達してせん断破壊するものと予想される。

このようなせん断破壊挙動を実験的に調べた研究^{4)~16)}のうち、片桐ら^{7), 10)}は三軸および中空ねじり試験装置を用いて、背圧を制御することにより初期せん断応力を受けた供試体の間隙水圧を段階的に増加させ、有効応力の減少過程における粘性土の変形特性について詳細に調べている。

また、久貝ら^{8), 9)}は、三軸スライスせん断試験装置を用いて、供試体内部の間隙水圧分布を均一にした状態で間隙水圧を連続的に増加させたときの粘土の応力・ひずみ挙動について考察している。従来の研究では、間隙水圧変化を受けた土の力学的挙動についてせん断破壊するまでの過程を対象としたものがほとんどであり^{4)~16)}、これに続く残留状態に至るまでの過程は十分に明らかにされていない^{17)~21)}。

本文では、このような間隙水圧変化をリングせん断試験装置において模擬的に再現する実験を実施し、一定の初期せん断応力の下で垂直応力の減少を受けた粘土のせん断破壊挙動を考察するとともに、残留状態において垂直応力の減少および再増加を受けた粘土のせん断挙動を考察する。

2. 間隙水圧変化を模擬的に再現したリングせん断試験

リングせん断試験では、その構造上の理由によ

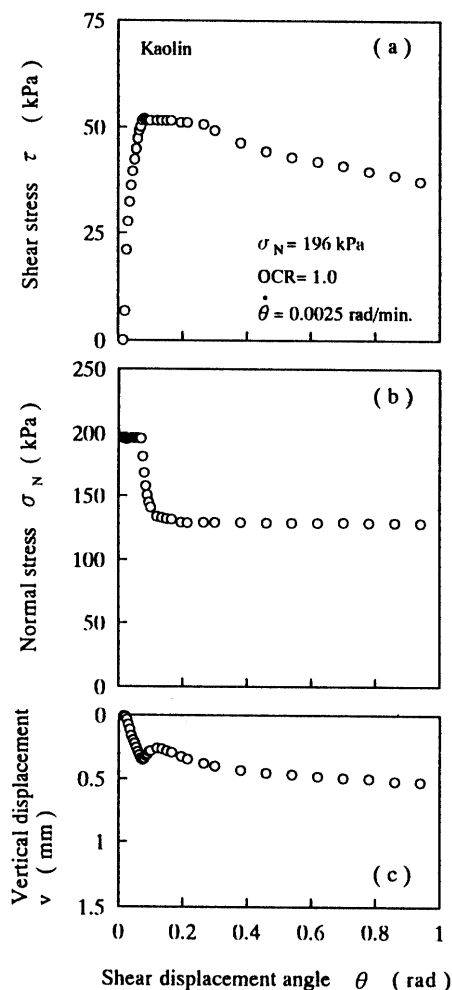


Fig.5 Relations of shear displacement angle with shear stress, normal stress and vertical displacement, respectively

り、排水条件を厳密に設定することはできず、供試体内部の間隙水圧を制御することは非常に難しい。小川ら^{17), 18)}は、リングせん断試験において間隙水圧変化を模擬的に再現するための便宜的な方法を提案した (Fig.3 参照)。この方法は、Fig.3 (a)における供試体内部の間隙水圧の変化量 Δu に対して、Fig.3 (b)において Δu に等しい垂直応力の変化量 $\Delta \sigma_N$ を全応力として変化させるものである。この操作によって供試体内部に過剰間隙水圧が生じないとき (Fig.3 (b)における $\Delta u = 0$)、両者の力学的意味は有効応力の立場で等価となる。しかし、実際には垂直応力の変化速度 $\dot{\sigma}_N$ の値が過大な場合、過剰間隙水圧の発生が懸念されることから²²⁾、4. (3)においてこの方法の適用限界を $\dot{\sigma}_N$ の観点で検討する。

3. 垂直応力の減少によるせん断破壊挙動

(1) 初期せん断応力を一定に制御する試験

Fig.4 に初期せん断応力を一定に制御したリング

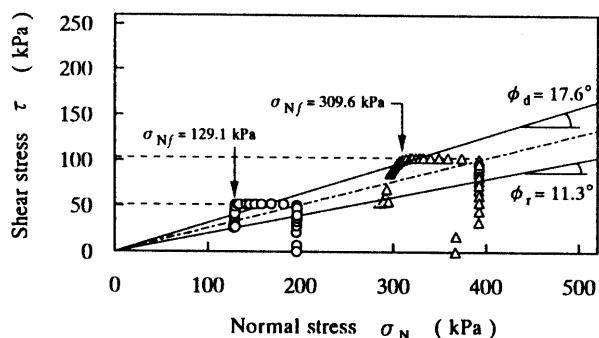


Fig.6 Stress path under condition of each constant shear stress

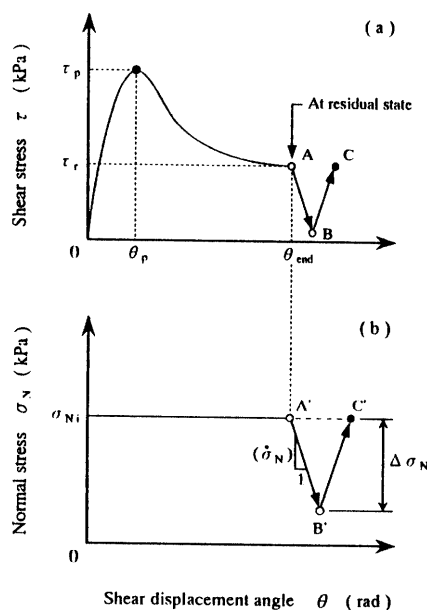


Fig.7 Test procedure changing normal stress after residual strength

せん断試験を模式的に示す。この試験では、Fig.4 (a)で点Aの初期せん断応力 τ_i を一定に保つように、Fig.4 (b)において σ_N を点A'の初期垂直応力 σ_{Ni} から減少させている。点B'の σ_{Nf} は τ_i を一定に保ちうる σ_N の下限値、 $\Delta \sigma_N (= \sigma_{Ni} - \sigma_{Nf})$ は垂直応力の変化量である。垂直応力が σ_{Nf} に達した後、せん断変位角 $\theta = 10$ rad (せん断変位 $D = 40$ cm)まで定圧せん断した。

Table 1 に試験ケースおよび供試体の初期状態を示す。試料はカオリン ($\rho_s = 2.724$ g/cm³, $w_L = 75.6$ %, $I_p = 39.3$)である。表中の記号はそれぞれ湿潤密度 ρ_t 、初期含水比 w_0 、圧密応力 σ_c 、垂直応力 σ_N 、過圧密比 $OCR (= \sigma_c / \sigma_N)$ 、せん断変位角速度 $\dot{\theta}$ である。なお、その他の試験の詳細は文献 23)を参照されたい。

Table 2 Test cases and initial condition values of specimens

Test No.	ρ_t (g/cm ³)	w ₀ (%)	σ_C (kPa)	σ_N (kPa)	OCR	$\dot{\theta}$ (rad/min.)	θ_{end} (rad)	σ_{Ni} (kPa)	$\Delta\sigma_N$ (kPa)	$\dot{\sigma}_N$ (kPa/min.)	Symbol
1	1.663	61.3	196	196	1.0	0.0025	10	196	196	0.98	○, ●
2	1.667	61.7	196	196	1.0	0.0025	10	196	196	4.9	▲
3	1.668	61.5	196	196	1.0	0.0025	10	196	196	98	△
4	1.666	61.1	196	196	1.0	0.0025	10	196	98	4.9	◇
5	1.735	52.9	392	196	2.0	0.0025	10	196	98	4.9	◆

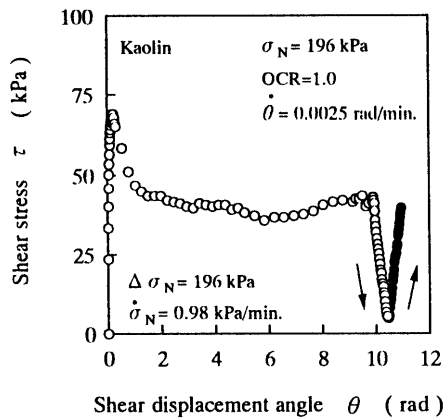


Fig.8 Relation between shear stress and shear displacement angle

(2) 応力経路・破壊強度線および残留強度線

Figs.5 (a)~(c)にそれぞれ Test No.1 から得られた θ の変化に伴う τ , σ_N および v の変化図を示す。ここで、 v は垂直変位である。Figs.5 (a)では、 $\sigma_N = 196$ kPa の下で、 τ は θ の増加とともに増加し、所定の値 ($\tau_i = 51.5$ kPa) に達する。その時点より、Figs.5 (b)において τ_i の値を一定に保つように σ_N を減少させている。 $\sigma_N = 129.1$ kPa 以下では、 σ_N をいくら減少させても τ_i を一定に保つことができなくなり、この応力状態 (σ_{Nf} , τ_i) をせん断破壊と定義する。このときの体積変化挙動は、Figs.5 (c) に示すように、 σ_N を減少させている領域で、 v ははじめ収縮しているが、その後膨張に転じている。Test No.2 の場合にも上記の挙動とほぼ同様な結果が得られた。

Fig.6 に Test No.1 および 2 の応力経路を示す。定圧せん断状態で初期応力状態 (σ_{Ni} , τ_i) に達した時点から、垂直応力を減少させることによりせん断応力は一定に保たれている。図中には、破壊強度線 (せん断応力最大時の見掛けの内部摩擦角 $\phi_d = 17.6^\circ$ およびその粘着力 $c_d = 0$ kPa) と残留強度線

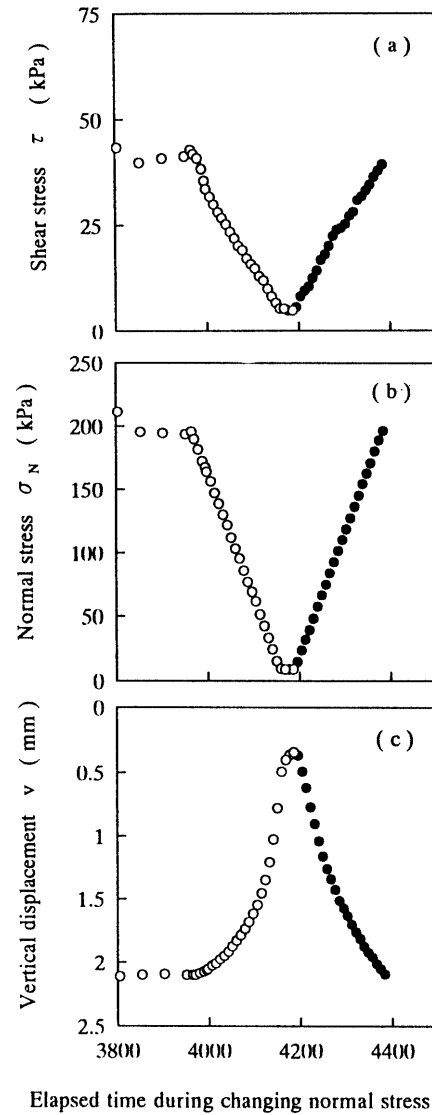
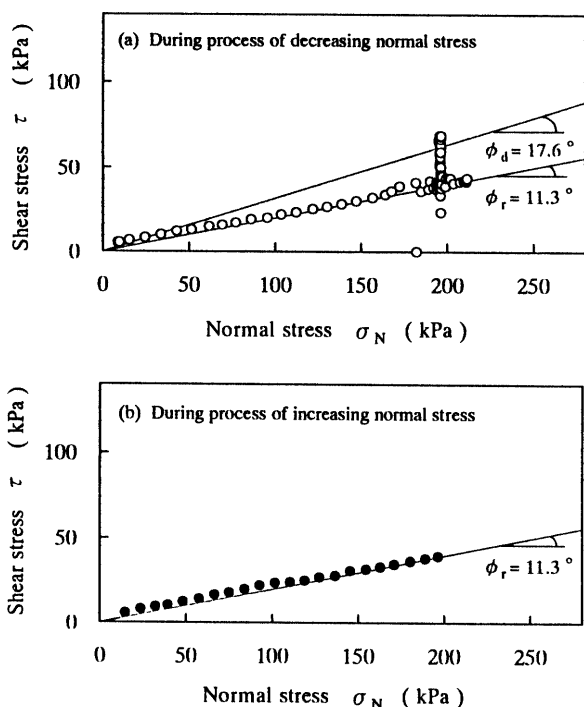


Fig.9 Relations of elapsed time with shear stress, normal stress and vertical displacement, respectively

(残留状態における見掛けの内部摩擦角 $\phi_r = 11.3^\circ$ およびその粘着力 $c_r = 0$ kPa) がそれぞれ示されている。これらはそれぞれ別途実施した異なる



Figs.10 Stress paths subjected to normal stress increment and decrement

垂直応力の下での定圧リングせん断試験結果から定めたものである。最終的な応力状態(σ_{Nf} , τ_i)はいずれも、初期応力状態に依らず、垂直応力の減少に対して破壊強度線上に達している。この実験結果は久貝ら^{8), 9)}が指摘したこととほぼ一致している。その後の応力径路は、垂直応力が一定の下、せん断変位の増加に伴って残留強度線上に達する。実際には、地形・地質条件や土質条件などにより間隙水圧の高いレベルがある期間継続するものと考えられる。これより、間隙水圧の増加に相当する垂直応力の減少によってせん断破壊した土は、Skempton²⁴⁾による従来の説明とは異なり、破壊時の垂直応力の下でせん断ひずみが累積することにより、残留状態に達するものと考えられる。

4. 残留状態における垂直応力変化に伴うせん断挙動

(1) 残留状態において垂直応力を増減させる試験

Figs.7 (a) および (b) に垂直応力 σ_N を変化させるリングせん断試験を模式的に示す。試験では、**Figs.7** (a) に示すように所定の垂直応力 σ_N の下で達した点Aの残留状態において、**Figs.7** (b) に示す点A'の σ_N を単調に減少し、その後増加させている。

Table 2 に試験ケースおよび供試体の初期状態を

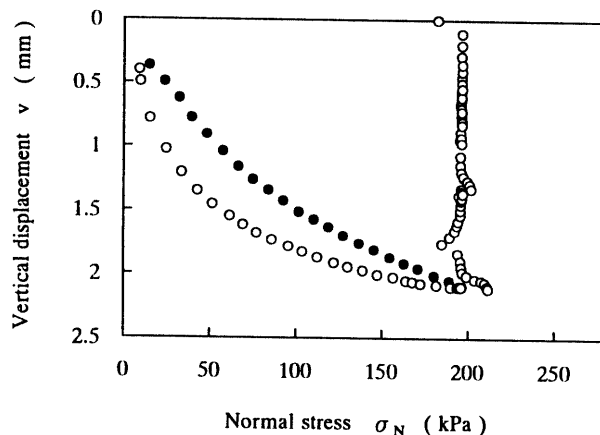


Fig.11 Behavior of vertical displacement subjected to normal stress increment and decrement

示す。試料は前述のカオリンを用いている。表中の記号のうち、 θ_{end} は定圧せん断終了時で σ_N の減少開始時のせん断変位角、 σ_{N1} は初期垂直応力、 $\dot{\sigma}_N$ および $\Delta\sigma_N$ はそれぞれ垂直応力の変化速度および変化量である。この他の記号は **Table 1** と同一である。

(2) 応力径路および残留強度線

Fig.8 に **Table 2** の Test No.1 の $\tau \sim \theta$ 関係を示す。 $\sigma_N = 196$ kPa の定圧せん断状態において、 τ は最大値を示した後、漸次低下して残留状態に達する。その時点より σ_N を単調に減少させると、 τ は減少する。その後 σ_N を再び増加させると、 τ は増加する。**Figs.9** (a) ~ (c) にそれぞれ τ 、 σ_N および v の経時変化図を示す。ここで、 T はせん断開始時点からの経過時間である。**Figs.9** (a) における τ の経時変化は、**Figs.9** (b) の σ_N の経時変化に対応しており、 σ_N の平均的な変化速度 $\dot{\sigma}_N$ は 0.98 kPa/min. である。**Figs.9** (c) の v の挙動は σ_N の減少に対して膨張を、 σ_N の再増加に対して収縮を示す。**Table 2** に示すその他の試験ケースにおいても、同様な挙動がみられた。

Figs.10 (a) および (b) にそれぞれ σ_N の減少および再増加過程における応力径路を示す。残留状態に達したせん断応力は、 σ_N の減少に対して、残留強度線を減少しており、その後の σ_N の再増加に対しても、残留強度線を増加している。**Fig.11** にこのときの $v \sim \sigma_N$ の関係を示す。膨張径路は σ_N の減少および再増加過程において異なる。この実験結果は残留状態において供試体の間隙水圧を直接増加させる三軸スライスせん断試験の結果とも一致している¹⁹⁾。

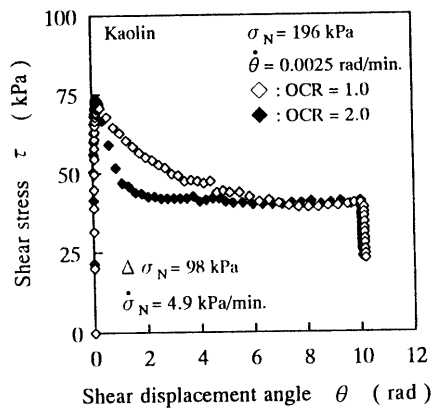


Fig.12 Relation between shear stress and shear displacement angle under conditions of several OCR

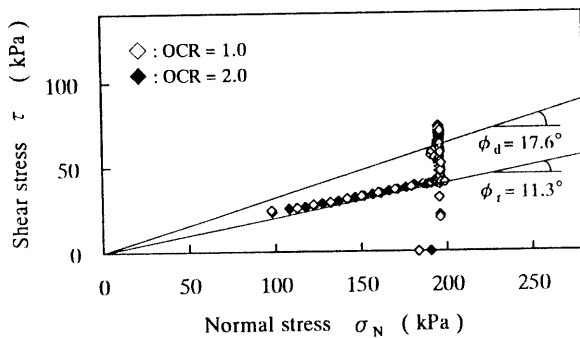
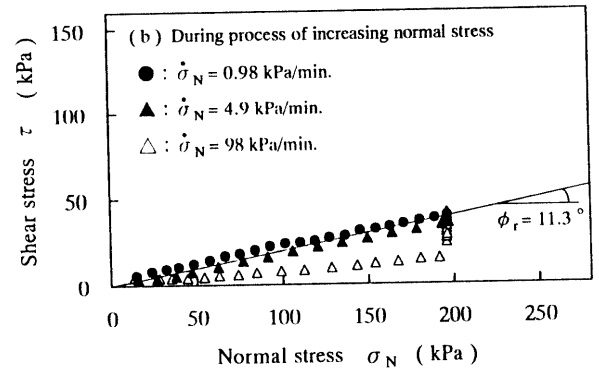
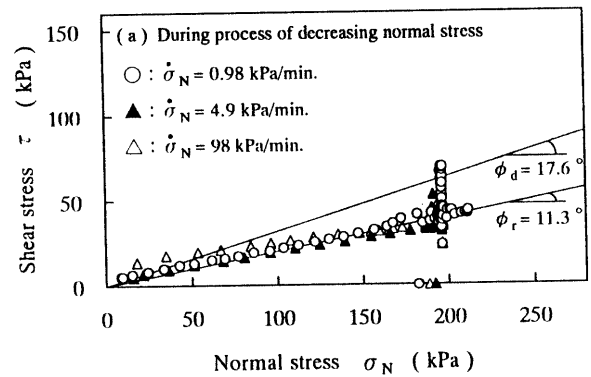


Fig.13 Stress paths under conditions of several OCR

Fig.12 および Fig.13 にそれぞれ過圧密比 OCR が異なる場合の $\tau \sim \theta$ 関係および σ_N の減少過程における応力径路を示す。これらより、残留状態に達した後のせん断応力と垂直応力の関係は圧密履歴の影響をほとんど受けないことがわかる。

(3) 応力径路に及ぼす垂直応力の変化速度の影響

Figs.14(a) および (b) に上記のせん断挙動に及ぼす垂直応力の変化速度 $\dot{\sigma}_N$ の影響を調べたものを示す。 $\dot{\sigma}_N$ は 0.98, 4.9, 98 kPa/min. の 3 通りである。Figs.14 (a) の σ_N の減少過程において、 $\dot{\sigma}_N$ の値が大きい場合、供試体に負の間隙水圧が発生することとなり、せん断面上の平均的な有効垂直応力が増加するものと考えられる。 $\dot{\sigma}_N = 98$ kPa/min. の場合の応力径路は、厳密に言えば、残留強度線の幾分上方に逸脱している。 $\dot{\sigma}_N = 0.98$ kPa/min. および 4.9 kPa/min. の場合の応力径路はいずれも残留強度線上を辿っており、 $\dot{\sigma}_N$ の影響をほとんど受けていない。一方、Figs.14(b) の σ_N の再増加過程において、 $\dot{\sigma}_N$ の値が大きい場合、供試体に正の間隙水圧が発生す



Figs.14 Stress paths under conditions of several change rate of normal stress

ることになり、せん断面上の平均的な有効垂直応力が減少するものと考えられる。 $\dot{\sigma}_N = 98$ kPa/min. の場合の応力径路は残留強度線のかなり下方に逸脱している。 $\dot{\sigma}_N = 0.98$ kPa/min. および 4.9 kPa/min. の場合の応力径路はいずれも残留強度線上を辿っており、 $\dot{\sigma}_N$ の影響をほとんど受けていない。以上の結果を総合すると、 $\dot{\sigma}_N = 4.9$ kPa/min. 程度以下の範囲では、応力径路は垂直応力の減少および再増加過程のどちらにおいても $\dot{\sigma}_N$ の影響をほとんど受けない。すなわち、これらの過程で供試体内部における過剰間隙水圧の発生と消散は常に平衡しているものと推測され、2. で述べた実験上の仮定は今回用いた試料および試験条件に対して十分妥当なもの判断できる。

5. 結論

本研究では、間隙水圧変化を模擬的に再現するリングせん断試験を実施した。試験結果に基づく考察から以下のことが明らかになった。

- (1) 一定せん断応力の下での応力径路は、初期応力状態に依らず、垂直応力の減少に対して正規圧

密状態の破壊強度線上に達する。

- (2) せん断破壊後の応力径路は、破壊時の垂直応力の下で、せん断変位の増加に伴って残留強度線上に達する。
- (3) 残留状態に達した後のせん断応力と垂直応力の関係はそれ以降の垂直応力の変化に対して残留強度線上で変化する。
- (4) 圧密履歴は上記(3)の挙動にほとんど影響を与えない。
- (5) 垂直応力の変化速度は、4.9 kPa/min.程度以下の範囲では、上記(3)の挙動にほとんど影響を与えない。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、川上 浩 信州大学名誉教授には終始変わらぬご指導を頂きました。ここに記して深甚なる感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 山口柏樹：土質力学（全改訂），技報堂出版，p. 300, 1984.
- 2) 川上 浩：自然斜面の安定性を評価する上での2,3の問題，土と基礎，Vol.35, No.11, pp.3~8, 1987.
- 3) 矢田部龍一，八木則男，榎 明潔：乱さない地すべり粘土のせん断特性，地すべり，Vol.26, No.4, pp.3~9, 1990.
- 4) 山田剛二，小橋澄治，草野国重：間隙水圧を変動した場合の土の挙動について-泥岩レキの強度を中心として-，地すべり，Vol.6, No.1, pp.11~18, 1969.
- 5) Eigenbrod, K.D., Burak, J.P. and Graham, J.: Drained deformation and failure due to cyclic pore pressure 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発表講演集，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，東京大学学位申請論文，1990.
- 8) 久貝壽之，梅崎健夫，川上 浩，長瀬主税：間隙水圧の増加に伴う粘土の応力・ひずみ挙動，平成6年度土木学会中部支部研究発表会講演概要集，pp.323~324, 1995.
- 9) 久貝壽之：間隙水圧変動に伴う粘土の応力・ひずみ特性に関する研究，信州大学修士論文，1995.
- 10) 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.
- 11) 廖 紅建，赤石 勝，山田道夫：関東ローム切土斜面の崩壊，土と基礎，第44巻，7号，pp.23~26, 1996.
- 12) 兒島大吾，大塚 悟，豊田浩史，五十嵐 央：間隙水圧載荷による飽和粘性土のせん断特性，第32回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.565~566, 1997.
- 13) 五十嵐 央，大塚 悟，豊田浩史，兒島大吾：間隙水圧増加試験における飽和粘性土破壊メカニズムの考察，第32回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.567~568, 1997.
- 14) 岩部 司，小川正二：間隙水圧を一定速度で上昇させたときのカオリン粘土のせん断挙動，第32回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.569~570, 1997.
- 15) 五十嵐 央，大塚 悟，豊田浩史，宮田善郁：初期せん断力を与えた粘性土の間隙水圧増加試験，第33回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.595~596, 1998.
- 16) 五十嵐 央，大塚 悟，豊田浩史，宮田善郁：間隙水圧増加試験による粘性土のせん断強度特性，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，pp.86~87, 1998.
- 17) 小川正二，池田俊雄，趙 茂吉，海津信廣，野地敦夫：地すべり安定解析を対象とした試験とその結果，第16回土質工学研究発表会発表講演集，pp.365~368, 1981.
- 18) 小川正二，池田俊雄，和田 正，目黒和則：有効垂直応力の減少を考慮した地すべり斜面の安定解析，第20回土質工学研究発表会発表講演集，pp.1439~1440, 1985.
- 19) 鈴木素之，梅崎健夫，川上 浩，山上友也：間隙水圧変化を受ける粘土の三軸スライスせん断特性，第32回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.571~572, 1997.
- 20) 鈴木素之，梅崎健夫，川上 浩：地すべりの滑動中に垂直応力変化を受ける粘土のせん断挙動，土木学会第52回年次学術講演会講演概要集，pp.94~95, 1997.
- 21) 鈴木素之，梅崎健夫，川上 浩，山本哲朗：垂直応力変化による土の破壊から残留状態に至るまでのリングせん断挙動，土木学会第53回年次学術講演会講演概要集，pp.106~107, 1998.
- 22) 丸山清輝，吉田克美：すべり面粘土のせん断特性，第31回地すべり学会研究発表講演集，pp.273~276, 1992.
- 23) 鈴木素之，梅崎健夫，川上 浩：リングせん断試験における粘土の残留強度とせん断変位の関係，土木学会論文集，No.575/III-40, pp.141~158, 1997.
- 24) Skempton, A.W.: Long-term stability of clay slopes, *Geotechnique*, Vol.14, No.2, pp.77-102, 1964.

(1998.11.14 受理)

RING SHEAR BEHAVIOR OF CLAY SUBJECTED TO CHANGE OF NORMAL STRESS

Motoyuki SUZUKI, Takeo UMEZAKI and Tetsuro YAMAMOTO

Ring shear tests to simulate the change of pore water pressure in clay specimen were performed. (1) The stress paths of the clay specimen under a constant shear stress reached the failure strength line of normally consolidated clay accompanied by the decrease of the normal stress, independent of the initial stress condition. (2) Once the stress paths of the clay specimen have reached the failure strength line, they moved toward the residual strength line accompanying the increase of the shear displacement under the normal stress at failure. (3) Once the stress paths of the clay specimen have reached the residual strength line, they moved along the residual strength line accompanying the change of the normal stress, independent of the overconsolidation ratio and the change rate of the normal stress.