

リングせん断試験における 粘土の残留強度に及ぼすせん断速度の影響

鈴木 素之 (社会建設工学科)

小林 孝輔 (社会建設工学専攻)

山本 哲朗 (社会建設工学科)

松原 剛 (社会建設工学科)

福田 順二 (西日本工業大学工学部環境都市デザイン工学科)

Influence of shear rate on residual strength of clay in ring shear test

Motoyuki SUZUKI (Department of Civil Engineering)

Kosuke KOBAYASHI (Graduate school of Civil Engineering)

Tetsuro YAMAMOTO (Department of Civil Engineering)

Tsuyoshi MATSUBARA (Department of Civil Engineering)

Jyunji HUKUDA (Nishinippon Institute of Technology, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering)

This study aimed to develop a new stability analysis method considering displacement rate monitored in a landslide slope. This paper describes influences of shear displacement rate on residual strength of clays, based on results of ring shear test. The shear displacement rate adopted in the tests were changed in range from 0.02 to 2.0 mm/min. Soil samples tested were Kaolin, Shimajiri mudstone and 2 clays of Yuya landslide. Main conclusions are as follows. Firstly, the internal friction angle at residual increases linearly with increasing the shear displacement rate in logarithmic scale. Secondly, the stress ratio at residual changes with the accompanying change in shear displacement rate.

Key Words : landslide, residual strength, ring shear test, shear displacement rate, clay content, plasticity index, water content, scanning electron microscope

1. はじめに

粘土の残留強度は再活動地すべり斜面の安定性を評価するための重要な工学的指標の一つであり、リングせん断試験や繰返し一面せん断試験装置を用いて測定される(Skempton (1964), Bishop et al. (1973)). 残留強度は排水せん断あるいは定圧せん断においてせん断応力がピーク値を越え、漸次低下して究極的な定常せん断状態に達したときの値と定義される(Skempton (1964)). 残留状態においてはせん断に伴う体積変化がゼロであり、とりわけ扁平な形状の鉱物粒子を多く含む粘土においては粘土粒子のせん断方向への配向が終了したものと考えられる(Skempton (1964, 1985), Lupini et al. (1981)). 残留状態に達したせん断面では、試料の種類や垂直応力の大きさによって、粘土粒子の配向構造が十分に発達した光沢のある面いわゆる鏡肌が形成される(Gibo et al. (1987)). 残留強度は粘土粒子の配向構造が発達したすべり面に沿って発揮される最小のせん断強度であることから、構成鉱物の種類と量によって唯一定まる土固有の定数という考え方が主流である。Skempton (1965)や Kenney (1967)が最初に繰返し一面せん断試験により粘土の残留強度に及ぼすせん断速度の影響について調べた。それ以後、繰返し一面せん断試験装置(Ramiah et al.(1970), Ramiah

and Purushothama(1971), Skempton and Petley (1967)), あるいはリングせん断試験装置(La Gatta(1970), Bucher(1975), Nakamura and Shimizu(1978), Scheffler and Ullrich(1981), Lemos et al.(1985), Skempton(1985), Ijuin et al.(1988), Okada et al.(1988), Yatabe et al.(1991), Lehane and Jardine(1992), Tika et al.(1995), Suzuki et al.(2000)) を用いて, 種々の土の残留強度とせん断速度の関係が数多く示されている. Ramiah et al.(1970) は, 残留状態に達した後にせん断速度を変化させる繰返し一面せん断試験を実施し, Skempton and Petley (1967) および Kenney (1967) が示したせん断速度は土の残留強度に大きな影響を与えないという事実を確認した. Skempton (1985) は, Petley(1966)および Lupini (1980) の実験結果に基づいて, 通常の室内せん断試験におけるせん断変位速度の範囲(0.002~0.01 mm/min)では, 対数表示のせん断速度の変化に対する残留強度の変化は数パーセント以下であり, 事実上, 残留強度に及ぼすせん断速度の影響は無視できると結論づけた. また, Yatabe et al.(1991) は, 破碎帯地すべり粘性土のリングせん断試験結果に基づいて, せん断速度の大きいものの方が残留強度は若干大きくなる傾向があることを示し, 比較的大きい透水係数を持つ土の場合, 実用的にはせん断速度の違いは残留強度にほとんど影響を与えないと述べている. 一方, Lemos et al.(1985) は, リングせん断試験による 6 種類の土の残留強度とせん断変位速度(10^{-4} ~ 10^3 mm/min)の関係を調べ, せん断変位速度の増加に対して, 残留強度が増加するものは粘土含有量 $F_{\text{clay}}(<2\mu\text{m})\geq 40$ %の土であり, 残留強度が減少するものは $F_{\text{clay}}\leq 40$ %の土であることを示し, この性質を Lupini et al.(1981)が提唱した残留せん断挙動モードの“すべりせん断” および“過渡的せん断”に関連づけた. さらに, Tika et al.(1995)は, Lemos et al.(1985)の研究を発展させて, 残留強度が試料の種類やせん断速度の大きさによって一定値を保つか, あるいは増加・減少することがあることを示し, 急速せん断による残留強度の低下がせん断層の間隙比の増加によると結論付けた. 以上の研究において実施されたせん断試験には, 1 つの供試体を用いてせん断過程のある区間においてせん断速度を変化させる方式 (Lemos(1985), Tika et al.(1995), Skempton(1985), Ijuin et al.(1988), Ramiah et al.(1970), Ramiah and Purushothama (1971), La Gatta(1970), Tika et al.(1995)), 複数個の供試体を用いて異なる一定のせん断速度で実施する方式(Nakamura and Shimizu(1978), Scheffler et al.(1981), Okada et al.(1988), Yatabe et al.(1991))の 2 通りあり, 両者の結果は必ずしも区別して評価されていない点に注意する必要がある.

Suzuki et al.(2000) は, 複数個のカオリン供試体を用いて異なる一定のせん断速度で圧密・定圧リングせん断試験を実施した. その結果, 残留強度は排水条件が近似的に成立しているせん断速度の範囲においても対数表示のせん断速度の増加に対して直線的に増加すること, せん断速度の増加に伴う残留強度の増加の度合いは垂直応力に依らずほぼ一定であることを示した. また, 既往の研究結果を整理したところ, この他の種々の土においては, 上記の試験方法に依らず, 残留強度がせん断速度の増加に対して増加, 不変および減少するものがあることを明らかにした. しかし, 既往の研究結果においては供試体の排水条件やリング周面摩擦力を考慮したせん断面上の垂直応力の測定など試験方法を検証することは困難であり, 多数のデータに基づいて上記のせん断挙動を統一的に説明することは難しいことを指摘した.

本論文は, 複数個の供試体を用いて異なる一定のせん断速度の下で実施した圧密定圧リングせん断試験の結果と 1 つの供試体を用いて一度残留状態に達した後にせん断速度を変化させて実施した圧密定圧リングせん断試験結果に基づいて, 粘土の残留強度に及ぼすせん断速度の影響について考察したものである. 土試料は工業用粘土のカオリンと 3 種類の地すべり粘土である. 試験で用いたせん断速度は 0.02~2.0 mm/min の範囲である. 最大応力比(せん断応力と有効垂直応力の比)とせん断速度の関係から供試体の排水状態を検討した上で, 近似的な排水条件が認められるせん断速度の領域での残留強度とせん断速度の関係を調べ, その挙動を定量的に評価するために導入した速度効果係数を試料の粘土含有量や塑性指数などの物理的性質の観点から整理した. さらに, 残留状態に達した供試体の含水比分布を調べるとともに, 走査型電子顕微鏡によりせん断面の微視的構造を観察した.

Table 1 Physical property of soil samples used

Soil sample	Site	ρ_s (g/cm ³)	w_L (%)	w_p (%)	I_p	F_{clay}^* (%)	A
Kaolin B	Okayama	2.618	65.3	41.5	23.8	35.3 (11.9)	2
Shimajiri mudstone	Okinawa	2.586	91.4	30	61.4	55.5 (42.5)	1.45
Yuya B	Yamaguchi	2.592	43.3	23.4	19.9	32 (25.0)	0.8
Yuya C	Yamaguchi	2.519	49.0	20.4	28.6	34.5 (27.5)	1.04

* Each number in above parentheses indicates a percent finer content under 0.002 mm

2. 圧密定圧リングせん断試験

(1) 試料および供試体

本試験で用いた試料はカオリン(Kaolin B), 島尻泥岩(Shimajiri mudstone), 油谷 B(Yuya B), 油谷 C(Yuya C)の計4試料である。Table 1に試料の採取地とその物理的性質を示す。表には試料名, 土粒子の密度, 液性限界, 塑性限界, 塑性指数, 粘土含有量および活性度を記載している。

本試料の物理特性と残留強度特性を把握するために、Fig.1の塑性図に本試料のデータをプロットしている。図中には既往の研究から引用したデータも記載している(Skempton (1964, 1985), Townsend and Gilbert (1973), Kenney (1977), Wesley (1977), Mesri and Cepeda-Diaz (1986), Collotta et al.(1989), Lupini et al. (1981), Yatabe et al. (1991)). 本試料は既往の研究データの分布域に位置する。Figs.2にそれぞれ $\tan \phi_r$ と粘土含有量 F_{clay} および塑性指数 I_p の関係を示す。 ϕ_r は残留状態における内部摩擦角である。Fig.2(a)の $\tan \phi_r$ と F_{clay} の関係においてデータにばらつきがみられるものの、 $\tan \phi_r$ と F_{clay} の間に相関があることは知られている。また、本試料は既往の研究データの分布域に位置する。Fig.2(b)の $\tan \phi_r$ と I_p の関係においてもほぼ同様な傾向を示している。

(2) リングせん断試験

せん断速度の影響を調べるために、複数個の供試体を用いて異なる一定のせん断速度の下で圧密定圧リングせん断試験を実施した。Fig.3にリングせん断試験装置の模式図を示す。試験装置は Bishop et al. (1971)が開発した型とほぼ同じ構造である。供試体の寸法は内径6 cm, 外径10 cm および高さ2 cmの環状である。国内および国外の研究機関におけるリングせん断試験の供試体寸法の一覧を Table 2 に示している。本試験装置の供試体は小さい方に属している。計測項目はせん断力, 垂直力, リング周面摩擦力および垂直変位である。垂直応力は圧密やダイレイタンスに伴

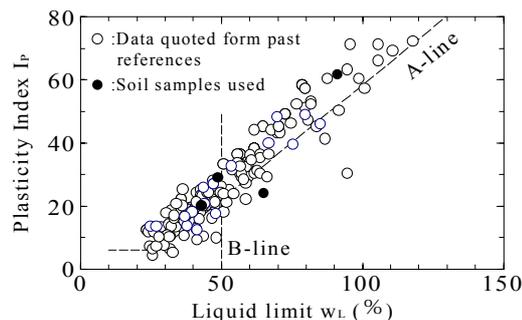
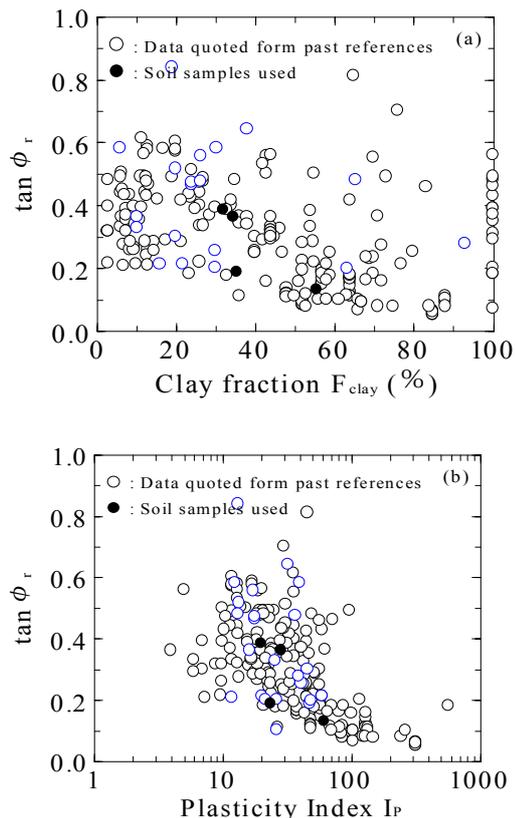


Fig.1 Physical properties of soil samples in plasticity chart



Figs.2 Relationships between $\tan \phi_r$, clay fraction F_{clay} and plasticity index I_p

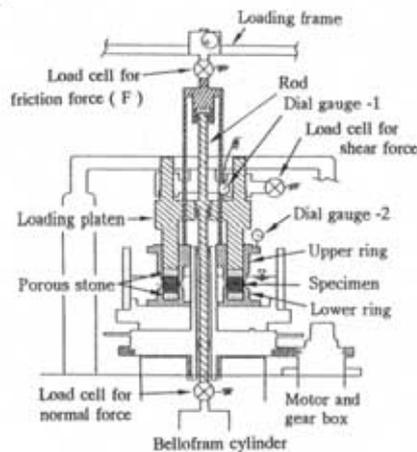


Fig.3 Essential features of ring shear test apparatus (after Suzuki et al. (1997))

Table 2 list of specimen size in known ring shear test apparatus

Researcher	Research organization	Outer diameter r_0 (cm)	Inner diameter r_i (cm)	r_i/r_0	Annulus thickness t (cm)	t/r_0	Height (cm)
Umezaki et al.	Shinshu Univ.	10.0	6.0	0.6	2.0	0.2	2.0
		7.0	4.2	0.6	1.4	0.2	2.0
Ochiai et al.	Kyushu Univ.	30.0	20.0	0.67	5.0	0.17	40.0?
Ogawa et al.	Nagaoka Univ.	15.0	10.0	0.67	2.5	0.17	2.0
Yatabe et al.	Ehime Univ. of Technology	16.0	10.0	0.63	3.0	0.19	2.0
		10.0	8.0	0.8	1.0	0.1	1.0
Nakamura et al.	Tokyo Univ. of Agriculture and Technology	12.0	6.0	0.5	3.0	0.25	3.0
Kamai et al.	Nihon Univ	12.0	8.0	0.67	2.0	0.17	2.0
Sasa et al.	Kyoto Univ.	35.0	25.0	0.71	5.0	0.14	—
Yamashita et al.	Aratani civil engineering consultants	21.5	10.0	0.47	5.75	0.27	2.0
Gibo et al.	Ryukyu Univ.	10.0	6.0	0.6	2.0	0.2	3.0
Yoshimi et al.	Tokyo Institute of Technology	26.6	21.4	0.8	2.6	0.1	2.7
Yasuda et al.	Tokyo Denki Univ.	15.0	10.0	0.67	2.5	0.17	2.5
Nakamura et al.	Public works research institute	25.0	17.0	0.68	4.0	0.16	0.9~1.9
		22.0	15.0	0.68	—	—	—
		15.0	10.0	0.67	—	—	—
Umemura et al.	Nihon Univ	35.0	200	?			
Bishop et al.	London Univ.	15.24	10.16	0.67	2.54	0.17	1.91
La Gatta et al.	Harvard Univ.	7.12	5.08	0.71	1.02	0.14	0.2, 0.25
Scheffler et al.	Leipzig Institute of Technology	9.4	4.96	0.53	2.22	0.24	1.6
Bucher	Swiss Federal Institute of Technology	24.0	16.0	0.67	4.0	0.17	1.6
Bromhead	Kingston Univ.	10.0	7.0	0.7	1.5	0.15	0.5
Stark et al.	Illinois Univ.	10.0	7.0	0.7	1.5	0.15	1.0
Suzuki et al.	Yamaguchi Univ.	10.0	6.0	0.6	2.0	0.20	2.0

Table 3 Ring shear test results under condition of different shear displacement rates

Soil sample	Test No.	σ_c (kPa)	σ_N (kPa)	OCR	$\dot{\theta}$ (rad/min)	\dot{D} (mm/min)	τ_p (kPa)	τ_r (kPa)	τ_p/σ_N	τ_r/σ_N
Kaolin B	2-1	98	98	1.0	0.0025	0.1	49.6	16.7	0.526	0.170
	2-2	196	196	1.0	0.0025	0.1	97.8	35.8	0.529	0.183
	2-3	294	294	1.0	0.0025	0.1	133.1	55.2	0.466	0.188
	2-4	196	196	1.0	0.0005	0.02	98.5	33.6	0.534	0.172
	2-5	196	196	1.0	0.0025	0.1	97.8	35.8	0.529	0.183
	2-6	196	196	1.0	0.005	0.2	100.2	40.2	0.525	0.205
	2-7	196	196	1.0	0.025	1	99.0	43.0	0.493	0.220
	2-8	196	196	1.0	0.05	2	87.8	42.5	0.461	0.217
Shimajiri mudstone	3-1	196	196	1.0	0.0005	0.02	95.0	27.5	0.498	0.140
	3-2	196	196	1.0	0.00125	0.05	91.6	31.2	0.494	0.159
	3-3	196	196	1.0	0.0025	0.1	99.5	38.1	0.545	0.194
	3-4	196	196	1.0	0.025	1	52.9	34.3	0.279	0.175
	3-5	196	196	1.0	0.005	0.2	89.2	39.0	0.456	0.199
	3-6	196	196	1.0	0.0125	0.5	70.1	38.0	0.354	0.194
Yuya B	4-1	98	98	1.0	0.0025	0.1	58.2	53.1	0.641	0.542
	4-2	196	196	1.0	0.0025	0.1	105.7	94.2	0.584	0.481
	4-3	294	294	1.0	0.0025	0.1	146.8	128.0	0.552	0.436
	4-4	196	196	1.0	0.0005	0.02	100.0	93.7	0.589	0.478
	4-5	196	196	1.0	0.001875	0.075	104.5	94.8	0.599	0.484
	4-6	196	196	1.0	0.0025	0.1	105.7	94.2	0.584	0.481
	4-7	196	196	1.0	0.005	0.2	105.0	98.0	0.598	0.500
	4-8	196	196	1.0	0.01	0.4	106.4	100.8	0.597	0.514
Yuya C	5-1	98	98	1.0	0.0025	0.1	49.6	45.5	0.547	0.464
	5-2	196	196	1.0	0.0025	0.1	92.8	91.8	0.518	0.468
	5-3	294	294	1.0	0.0025	0.1	128.8	116.2	0.472	0.395
	5-4	196	196	1.0	0.0005	0.02	98.3	91.2	0.549	0.465
	5-5	196	196	1.0	0.00125	0.05	96.9	89.4	0.536	0.456
	5-6	196	196	1.0	0.0025	0.1	92.8	91.8	0.518	0.468
	5-7	196	196	1.0	0.005	0.2	101.9	94.4	0.574	0.482
	5-8	196	196	1.0	0.0125	0.5	96.1	97.4	0.507	0.497
	5-9	196	196	1.0	0.025	1	87.8	91.5	0.483	0.467

って発生するリング周面摩擦力を考慮して算出している。せん断応力は供試体の半径方向に均一に分布すると仮定して算出している。Table 3に試験ケースと試験結果を示している。表には試料名、試験番号、圧密応力、垂直応力、過圧密比、せん断変位角速度、せん断変位速度、ピーク強度、残留強度、ピーク状態および残留状態における応力比を記載している。前述したように、リングせん断試験におけるせん断速度は 0.02~2.0 mm/min(0.0005~0.05 rad/min)の範囲で変化させた。試料は 0.425 mm 篩で裏ごし後、液性限界の約 2 倍の含水比で十分に練返した。リングせん断試験における圧密応力の 85%の圧密応力で 24 時間一次的に予圧密した。供試体は予圧密試料の含水比が高さ方向でほぼ等しい部分から切り出した。各試料ともリングせん断試験における圧密の打切り時間は 3t法に基づいて決定した。供試体を正規圧密状態とし、圧密応力の載荷直後に水浸させた。せん断時に上下部リングの隙間は 0.20 mmに設定した。せん断中はせん断面上の真の垂直応力が一定になるように垂直力は制御していない。せん断試験の打切り時のせん断変位角は一律に 10rad(400mm)とした。一部の試料に対しては試験終了後、供試体の高さ方向(3箇所)の含

水比を調べた。Table 2 に示したように、供試体寸法の異なるリングせん断試験の結果を比較するので、データ整理ではリングの回転角であるせん断変位角 θ (rad)を用い、供試体の内径 r_i と外径 r_o の中間におけるせん断変位 D (mm)を一部併記した。リングせん断試験におけるせん断応力とせん断変位の実測値の関係において厳密な定常状態に達しているかどうか判断することは難しく、せん断変位が十分でない場合には残留強度が過大に評価される。Suzuki et al.(1997) はせん断変位に依存しない客観的な残留強度の決定法としてリングせん断試験における最大せん断応力後のせん断応力とせん断変位角の関係に双曲線近似を適用し、残留強度を双曲線の漸近値として決定する方法を提案した。本論文では、この提案法を最大応力比後の応力比とせん断変位角の関係に適用し、残留状態における応力比を決定した。さらに、カオリンの場合には $\theta=5$ rad ($D=200$ mm)になるまで $\theta=0.0005$ rad/min ($\dot{D}=0.02$ mm/min)の下で定圧せん断して残留状態に至らしめた後、 $\theta=0.5$ rad($D=20$ mm)毎に $0.2 \rightarrow 0.5 \rightarrow 1.0 \rightarrow 2.0 \rightarrow 1.0 \rightarrow 0.5 \rightarrow 0.2 \rightarrow 0.02$ mm/min のように連続的に D を増減させる試験を実施した。

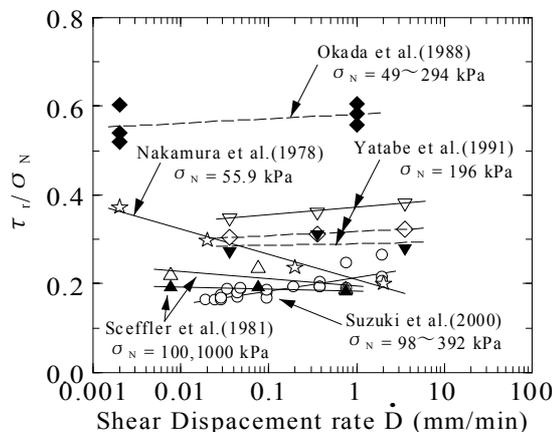


Fig.4 τ_r / σ_N plotted as a function of shear displacement rate for various soils (after Suzuki et al. (2000))

3. 試験結果と考察

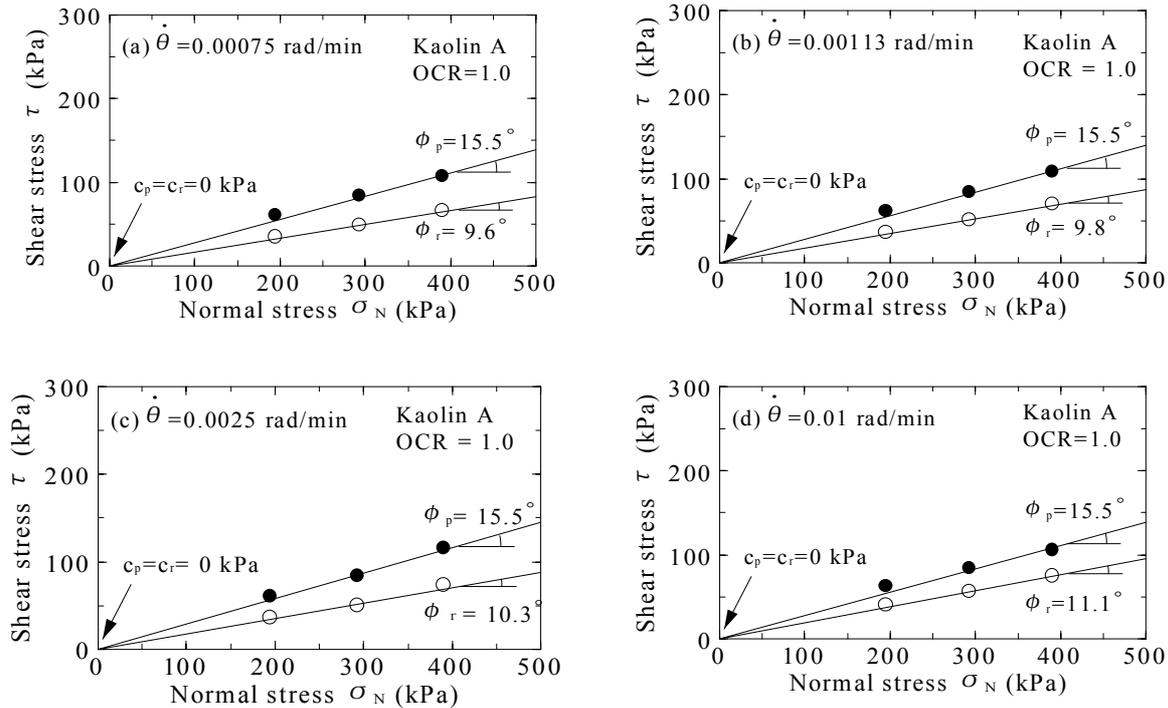
(1) 既往の研究データの整理

Fig.4 は筆者らが以前既往の研究データを再整理して作成した残留状態における応力比 τ_r / σ_N とせん断変位速度 \dot{D} の関係に新たにデータを加えて加筆したものである。図中のデータは参考文献から引用したものである(Yatabe et al. (1991), Nakamura and Shimizu (1978), Sceffler et al. (1981), Okada and So (1988), Suzuki et al. (2000)). また、データはすべてリングせん断試験により求められたものである。図中のデータフィッティングは原著者の考察を考慮しているが、明らかな速度依存性を示さないデータに対しては破線で直線近似している。 \dot{D} の増加に対して、 τ_r / σ_N が明らかに増加するものには Suzuki et al. (2002)のデータ($w_L=75.6, I_p=39.3, F_{clay}=70.3\%$), Yatabe et al. (1991)の一部のデータ($w_L=26.3\%, I_p=11.6, F_{clay}=7.5\%$)があり、 τ_r / σ_N が一定であるものには Sceffler et al. (1981)の一部のデータ($w_L=76 \sim 82\%, I_p=38 \sim 47$)があり、 τ_r / σ_N が減少するものには Nakamura and Shimizu (1978)のデータ($w_L=86\%, I_p=65$)がある。ここに示したデータに限れば、せん断変位速度の増加に対して、塑性指数の比較的小さい土の残留強度は増加し、塑性指数の大きい土の残留強度は減少する傾向を示している。また、残留強度がせん断変位速度の影響を受けることの別の原因として、せん断に伴う間隙水圧の発生によりせん断面上の有効垂直応力が変化していることが考えられる。Yatabe et al.(1991) は、リングせん断試験においてせん断面付近の間隙水圧を直接測定しており、せん断変位速度が大きいほど、せん断に伴って発生する間隙水圧は大きくなり、時間の経過とともに消散することを示している。一方、Nakamura and Shimizu(1978) は、残留強度とせん断速度の関係を時間で整理すれば、せん断応力が残留状態に達する時間はせん断速度によらず一定になるとして、せん断速度の影響をせん断

Table 4 Ring shear test results under condition of different shear displacement rates and normal stresses (after Suzuki et al. (2000))

Soil sample	Test No.	σ_c (kPa)	σ_N (kPa)	OCR	θ (rad/min)	\dot{D} (mm/min)	τ_p (kPa)	τ_r (kPa)	τ_p / σ_N	τ_r / σ_N
Kaolin A*	1-1	196	196	1.0	0.0005	0.02	61.6	31.5	0.314	0.161
	1-2	196	196	1.0	0.00063	0.025	62.6	31.3	0.319	0.16
	1-3	196	196	1.0	0.00075	0.03	59.2	33.7	0.302	0.172
	1-4	196	196	1.0	0.00088	0.035	61.2	36.2	0.312	0.185
	1-5	196	196	1.0	0.00113	0.045	60.7	34.5	0.310	0.176
	1-6	196	196	1.0	0.00125	0.05	61.2	36.5	0.312	0.186
	1-7	196	196	1.0	0.0025	0.1	58.8	34.4	0.300	0.176
	1-8	196	196	1.0	0.005	0.2	63.5	37.0	0.324	0.189
	1-9	196	196	1.0	0.01	0.4	61.6	39.4	0.314	0.201
	1-10	196	196	1.0	0.02	0.8	57.8	47.8	0.295	0.244
	1-11	196	196	1.0	0.05	2	53.5	51.5	0.273	0.263
1-12	294	294	1.0	0.00075	0.03	82.1	47.4	0.279	0.161	
1-13	294	294	1.0	0.00113	0.045	82.1	49.4	0.279	0.168	
1-14	294	294	1.0	0.0025	0.1	82.6	48.2	0.281	0.164	
1-15	294	294	1.0	0.01	0.4	82.6	55.5	0.281	0.189	
1-16	294	294	1.0	0.02	0.8	84.1	54.9	0.286	0.187	
1-17	294	294	1.0	0.05	2	79.8	62.5	0.271	0.213	
1-18	392	392	1.0	0.00075	0.03	105.5	64.6	0.269	0.165	
1-19	392	392	1.0	0.00113	0.045	107.0	68.6	0.273	0.175	
1-20	392	392	1.0	0.00125	0.05	112.7	73.6	0.288	0.188	
1-21	392	392	1.0	0.0025	0.1	114.2	71.7	0.291	0.183	
1-22	392	392	1.0	0.01	0.4	104.7	74.0	0.267	0.189	
1-23	392	392	1.0	0.05	2	103.7	80.0	0.265	0.204	

* After Suzuki et al. (2000), $\rho_s=2.724$ g/cm³, $w_L=75.6\%$, $w_p=36.3\%$, $I_p=39.3$, $F_{clay}(\leq 0.005$ mm)=93.0%, $F_{clay}(\leq 0.002$ mm)=70.3%, $A=0.56$



Figs. 5 Peak and residual strength lines under different shear displacement rates for Kaolin A

に伴う間隙水圧の消散に要する時間の問題に帰着させている。いずれにせよ、せん断速度の影響を検討する場合には供試体の排水状態すなわち有効応力状態を調べることが必要である。

Table 4 に著者らが以前実施したせん断速度が異なる場合のリングせん断試験の試験結果を示している (Suzuki et al. (2000)). 試験は複数個の供試体を用いて異なる一定のせん断速度で実施した。過圧密比は 1.0 の 1 通りに、垂直応力は 196, 294 および 392kPa の 3 通りに設定している。試料はカオリン(Kaolin A)であり、その物理的性質は **Table 3** の枠外に示しているが、本研究で用いたカオリン B(Kaolin B)とは異なる。**Table 4** のデータは **Fig.4** に加筆したデータでもあり、**Fig.4** を参照すると、 τ_p/σ_N は $\dot{\theta} = 0.2\text{rad/min}$ ($\dot{D} = 0.05\text{mm/min}$) 以下の領域ではほぼ一定であるが、それ以上の領域では減少している。このことは後述するせん断速度の変化に伴う供試体の排水状態の変化に起因すると考えられる。一方、 τ_p/σ_N は対数表示の $\dot{\theta}$ に対して直線的に増加している。ピークおよび残留状態における内部摩擦角および粘着力に及ぼすせん断速度の影響を調べるために、**Table 3** に示したデータを異なるせん断速度の下でピーク強度および残留強度と垂直応力の関係について整理したものが **Figs.5(a)~(d)** である。各図にはピーク強度線と残留強度線が示されている。いずれの場合も、ピークおよび残留強度線はともに直線近似することができる。低拘束圧領域では残留強度線が湾曲化する現象が知

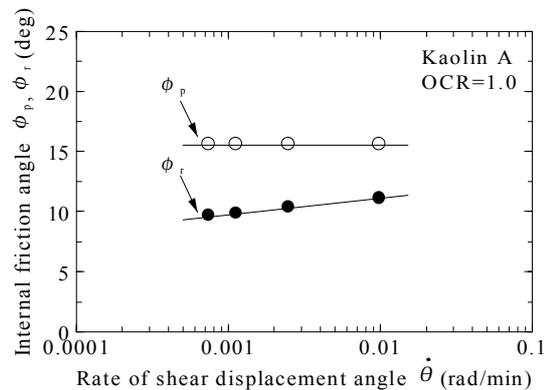


Fig.6 Relationship between strength parameter and rate of shear displacement angle for Kaolin A

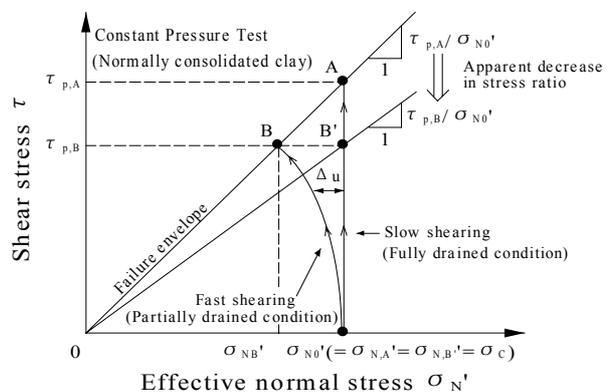


Fig.7 Variation of stress path due to change in rate of shear displacement

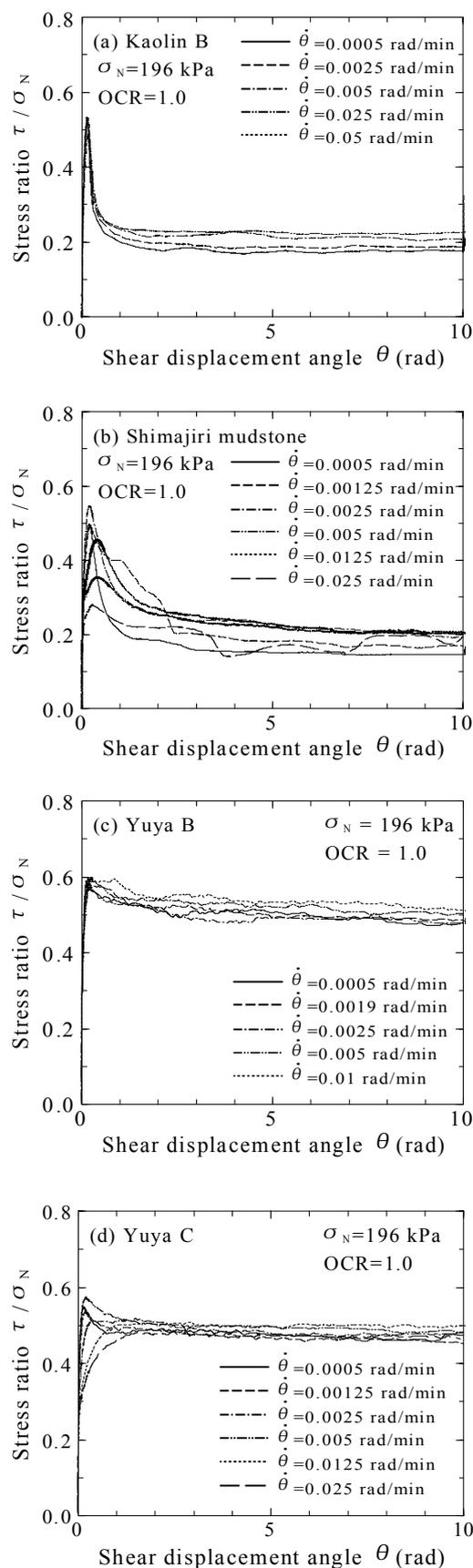
られているが、今回の場合には垂直応力が 196 kPa を超えているので、その影響は試験結果に現れていない。

Figs.5 に示した結果をせん断速度の観点から整理したものが **Fig.6** である。ピーク状態における内部摩擦角 ϕ_p は $\dot{\theta}=0.02$ rad/min 以下の領域ではほぼ一定であるが、残留状態における内部摩擦角 ϕ_r は対数表示のせん断変位角速度の増加に対して増加するといえる。また、ピークおよび残留状態における粘着力 c_p および c_r はともにせん断速度によらずゼロである。

Fig.7 に急速・緩速せん断時の供試体の排水条件に対応したせん断面上の応力経路を模式的に示す。図の縦軸にはせん断応力、横軸には有効垂直応力をとっている。初期有効垂直応力 σ_{N0}' の下で正規圧密粘土の定圧せん断試験を実施すると、せん断による間隙水圧の発生と消散が平衡するのに十分小さいせん断速度であれば、有効垂直応力は一定のまません断応力が増加し、破壊線上の点 A において最大せん断応力すなわち最大応力比を示す。このときの供試体は完全排水状態にある。せん断速度が大きくなると、せん断による間隙水圧の発生と消散は平衡せず、有効垂直応力は正の過剰間隙水圧 Δu だけ減少しながらせん断応力は増加し、破壊線上の点 B において最大応力比を示す。このときの供試体は部分排水状態にある。一般に、リングせん断試験において供試体内部の間隙水圧を測定できないので、点 B の応力比 $\tau_{p,B}/\sigma_{NB}'$ は点 B' の応力比 $\tau_{p,B'}/\sigma_{N0}'$ として算出され、見掛け上、点 A の応力比 $\tau_{p,A}/\sigma_{N0}'$ よりも小さくなる。したがって、せん断速度の増加に伴う供試体の排水条件の変化は σ_{N0}' で正規化した応力比 τ/σ_{N0}' の変化から判断することができる。換言すれば、 $(\tau/\sigma_{N0})_p$ がほぼ一定であるせん断速度の領域においては、せん断面上の過剰間隙水圧はほとんど生じておらず、供試体の排水条件は近似的に成立しているとみなすことができる。さらに、Yatabe et al. (1991)は、前述したことに加えて、供試体に大変位を与えることにより残留状態に近づけばせん断に伴う間隙水圧の発生はほぼゼロとなり、せん断初期に残留していた間隙水圧が消散していくことも述べている。このことは、残留強度に及ぼすせん断初期に発生した間隙水圧の影響はほとんどないことを示唆している。

(2) 他の試料の場合における異なるせん断速度の下でのリングせん断挙動

Figs.8 に異なるせん断速度の下での他の試料のリングせん断試験結果を示す。試料はカオリン B、島尻泥岩、油谷 B および油谷 C である。**Table 3** に試験ケースと試験結果を示している。試験は複数の供試体を用いて異なる一定のせん断速度で実施した。各図の縦軸は応力比 τ/σ_N 、横軸はせん断変位角 θ をとっている。 $\theta=10$ rad は $D=400$ mm に相当する。試験条件として $OCR=1.0$,



Figs.8 Stress ratio and shear displacement angle curves of various soils under different rates of shear displacement angle

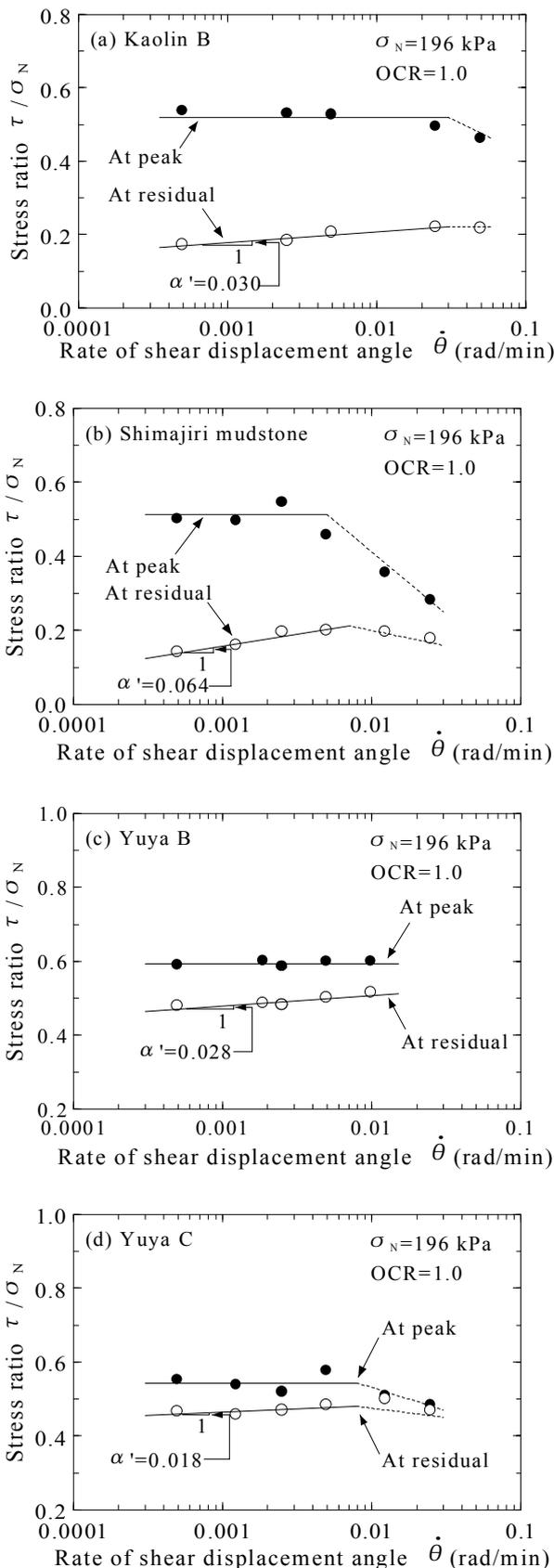
$\sigma_N=196$ kPa としている。Figs.8(a)のカオリン B の場合、 τ/σ_N は θ の増加に対して急激に増加し、 $\theta=0.3$ rad 程度で最大値を示した後、急激に減少し、 $\theta=3$ rad 程度でほぼ定常状態に達している。また、 $\dot{\theta}$ が小さいほど $\tau/\sigma_N \sim \theta$ 曲線は下方に位置することも読み取れる。Fig.8(b)の島尻泥岩の場合、 $\tau/\sigma_N \sim \theta$ 曲線に若干の変動がみられるものの、カオリン B とほぼ同じ傾向を示している。 $\dot{\theta}$ が大きいほど、最大応力比以降の θ の増加に対する τ/σ_N の減少の割合は小さくなる。

Figs.8(c),(d)の油谷 B, 油谷 C の場合、最大応力比($\tau/\sigma_N)_p$ 以降の θ の増加に対する τ/σ_N の減少の割合はカオリン B および島尻泥岩の場合と比較して顕著ではないが、 $\dot{\theta}$ が最小の $\tau/\sigma_N \sim \theta$ 曲線が最も下方に、 $\dot{\theta}$ が最大の $\tau/\sigma_N \sim \theta$ 曲線が最も上方に位置することがわかる。 θ が大きいほど、 θ の増加に対する τ/σ_N の増加の割合は小さい。これは過剰間隙水圧の発生による有効垂直応力の減少に起因するものと考えられる。いずれの場合も $\tau \sim \theta$ 曲線は $\dot{\theta}$ の影響を多少なりとも受けることがわかる。

Figs.9 に各試料の($\tau/\sigma_N)_p$ および($\tau/\sigma_N)_r$ と対数表示の θ の関係を示す。図中のデータは Fig.8 に示したものに对应する。Figs.9(a)のカオリン B の場合、 $\dot{\theta} = 0.025$ rad/min($D=1.0$ mm/min)以上の範囲で、($\tau/\sigma_N)_p$ は若干減少する傾向にある。このことは、Fig.7 において考察したように、せん断に伴う間隙水圧の発生の結果としてせん断面上の平均的な有効垂直応力が減少したことによるものと考えられる。しかし、 $\dot{\theta} = 0.025$ rad/min($D=1.0$ mm/min)以下の範囲では、($\tau/\sigma_N)_p$ は θ の変化に対してほぼ一定であることから、せん断面上の間隙水圧はほとんど生じておらず、排水条件は近似的に成立していると考えられる。一方、排水条件が近似的に成立していると考えられる $\dot{\theta}$ の範囲において、($\tau/\sigma_N)_r$ は対数表示の θ の増加に対してほぼ直線的に増加している。これらは以前に実施したカオリン A の試験結果と定性的に一致する。ここで、残留状態における応力比と対数表示のせん断変位角速度の間に直線関係があるものと仮定して、その直線の勾配 α' を速度効果係数として次の式(1)のように定義する。

$$\alpha' = \frac{d(\tau/\sigma_N)_r}{d(\log \dot{\theta})} \tag{1}$$

この場合、 $\alpha = 0.030$ min/rad が得られる。このことは、せん断速度が 10 倍になると残留状態におけ



Figs.9 Stress ratio at peak and residual plotted as a function of rate of shear displacement angle for various soils

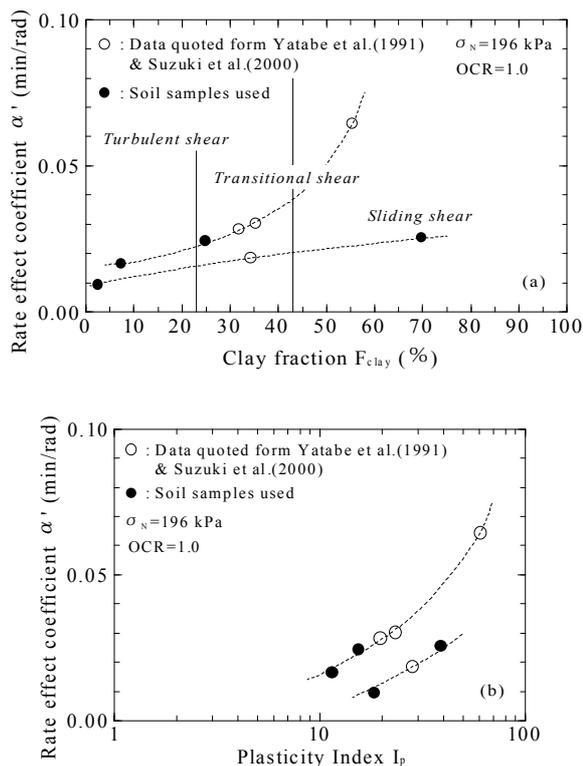
る応力比が 3 % 増加することを意味しており、Skempton (1985)が指摘した実験事実と一致する。**Figs.9(b)**の島尻泥岩の場合、 $\dot{\theta} = 0.005 \text{ rad/min}$ ($D = 0.2 \text{ mm/min}$)以上の範囲で $(\tau/\sigma_N)_p$ は著しく減少する傾向にある。このことは本試料の透水性がカオリン B のそれと比べて小さいためと考えられる。また、同じせん断速度領域で $(\tau/\sigma_N)_r$ は対数表示の $\dot{\theta}$ の増加に対して直線的に増加しており、この場合、カオリン B よりも大きい $\alpha' = 0.064 \text{ rad/min}$ が得られる。**Figs.9(c),(d)**に油谷 B、油谷 C の試験結果を示している。いずれの場合も、カオリン B および島尻泥岩と比較して、 $(\tau/\sigma_N)_p$ と $(\tau/\sigma_N)_r$ の差は小さく、また $\dot{\theta}$ の増加に対する $(\tau/\sigma_N)_r$ の増加の度合いも小さい。これらの α' は 0.018~0.028 の範囲で得られている。以上のことから、排水条件が近似的に満たされるせん断速度領域において残留状態の応力比が対数表示のせん断速度の増加に対して増加することが明らかになった。**Fig.6**の結果を参考にすれば、このことはせん断速度の増加によって残留状態における内部摩擦角が増加することを意味する。**Fig.2**に示したように、残留状態における内部摩擦角は試料の物理的性質と関係することから、残留強度のせん断速度依存性も各試料の物理的性質と深く関係するものと考えられる。

(3) 速度効果係数と物理的性質の関係

Figs.10(a),(b)にそれぞれ粘土含有量 F_{clay} および塑性係数 I_p と速度効果係数 α' の関係を示す。図中の一部のデータは参考文献から引用したものである(Suzuki et al. (2000), Yatabe et al. (1991))。 **Figs.10(a)**では、全体的に F_{clay} が高い試料ほど、 α' は大きい傾向にある。また、データに多少のばらつきがみられるものの、両者の間に相関が認められる。 F_{clay} が 23 %以下の“乱れせん断”モードを示す領域では α' は 0.01~0.02 と小さく、 F_{clay} が 43 %以上の“すべりせん断”モードを示す領域では α' は 0.2~0.6 となる。 F_{clay} が高い領域では、 α' は含有粘土鉱物の種類に依存するものと考えられる。両者の中間である“過渡的せん断”モードでは α' は 0.2~0.3 となっている。**Figs.10(b)**では、全体的に I_p が高い試料ほど α' は大きい傾向にある。また、**Figs.10(a)**の F_{clay} と α' の関係と比較して、 I_p と α' の関係においてデータのばらつきは小さい。**Fig.11**に活性度 A と速度効果係数 α' の関係を示す。活性度は塑性指数を 0.002mm 以下の細粒分含有率で除したものである。全体的に A が高い試料ほど α' は大きい傾向にあり、A が 1.25 より大きい活性粘土では α' は幾分大きめの値を示す。以上のことから、高い塑性を有する試料ほど、残留強度のせん断速度依存性は大きいといえる。

(4) 残留状態に達した供試体の微視的構造

これまでせん断速度が残留強度に大きな影響を与えることを述べてきたが、本節では残留状態に達した供試体の状態を定性的・定量的に検討する。**Photos. 1**に一例としてカオリン B の走査型電子顕微鏡写真を示す。各写真におけるせん断変位角速度は異なる。カオリン B はせん断面の癒着が少なく、せん断面を乱さないように観察試料を成形することができた。乾燥収縮の影響を少なくするために、緩やかに空気乾燥



Figs.10 Relationship between α' , clay fraction F_{clay} and plasticity index I_p

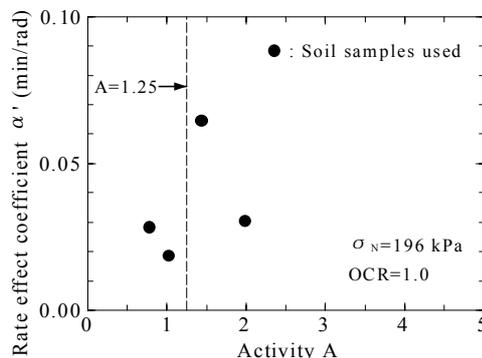
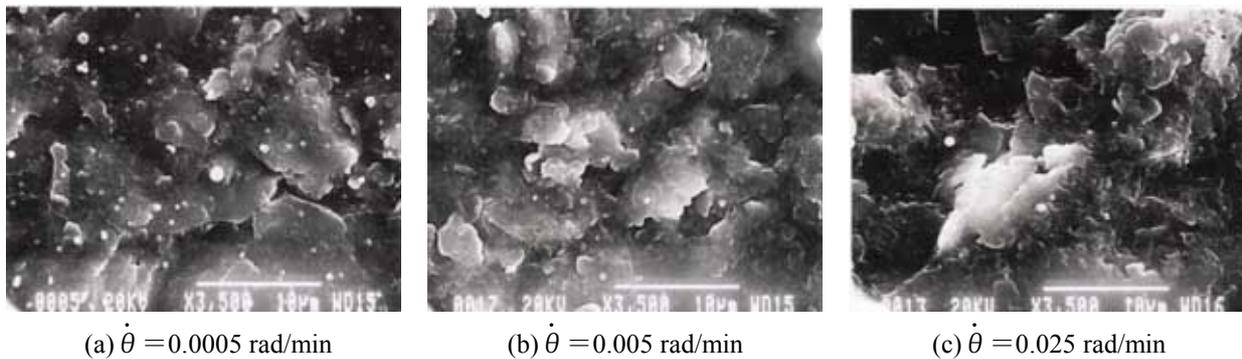
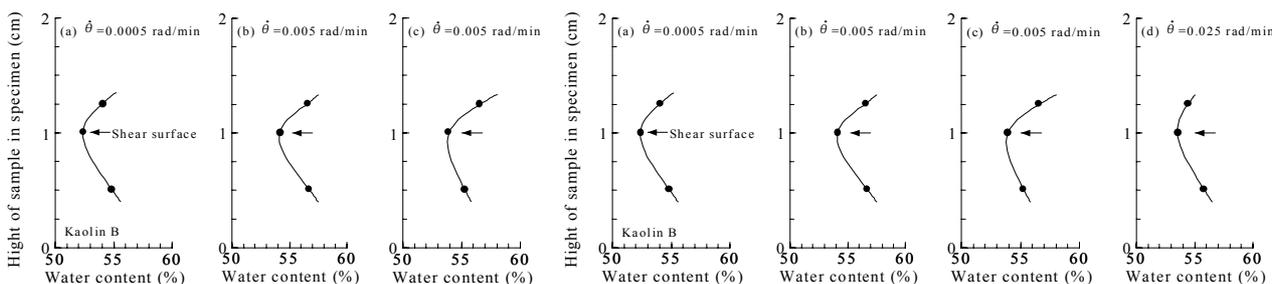


Fig.11 Relationship between α' and activity A



Photographs 1 Microstructure of Kaolin B observed by SEM



Figs.12 Distribution of water content in specimen after shearing for Kaolin B

Figs.13 Distribution of water content in specimen after shearing for Shimajiri mudstone

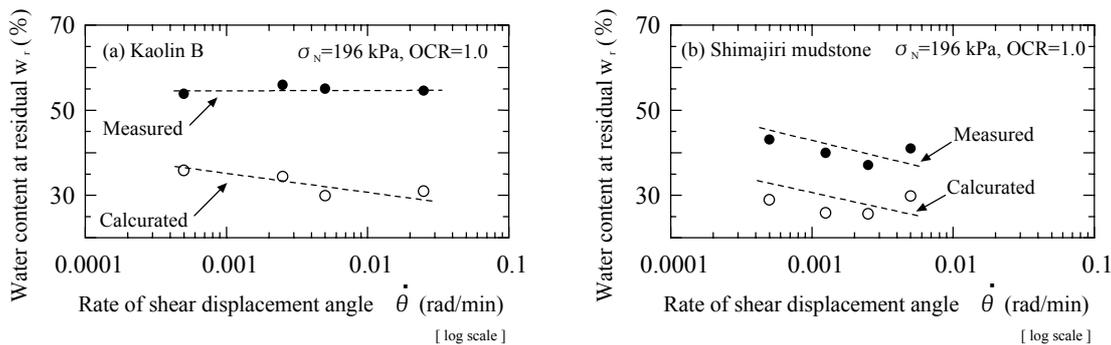


Fig.14 Relationships between water content at residual and rate of shear displacement angle

させた後、炉乾燥した。走査型電子顕微鏡の倍率は 3,500 倍であり、観察方向はせん断面に垂直な方向である。せん断速度が小さいときには、各土粒子は押し付けられたような状態にあるが、せん断速度が大きくなると、せん断面の起伏がやや大きくなる様相を示す。次に、Figs.12 に試験終了後におけるカオリン B の供試体の含水比分布を示す。各図におけるせん断変位角速度は異なる。縦軸に測定した箇所の高さ、横軸に含水比をとっている。試験終了後に垂直応力を除荷する前に、試験装置の水槽から水を抜き、上下部リングの隙間の水を布でよくふき取った。その後、リングせん断箱を速やかに解体し、環状供試体の中間径の部分から試料を高さ別に 3 箇所採取した。図中の矢印はせん断面の位置を指す。いずれの場合もせん断面付近で含水比は減少し、上・下端部で含水比が高くなっている。含水比分布の形状はせん断速度によって大きく変化しない。また、せん断面付近の含水比もせん断速度によらず 53~54 %である。Figs.13 に島尻泥岩の含水比分布を示す。この場合には、せん断変位角速度が大きくなるほど、含水比分布の幅は狭くなり、せん断面付近の含水比も低下するようである。Figs.14 には両試料の試験終了後の含水比と対数表示のせん断変位角速度の関係を示す。図中には上記の実測した含水比の平均値とリングせん断試験におけるせん断変位角と垂直変位の関係から計算した含水比が示されている。実測値と計算値の間に大きな差があるが、これは除荷に伴う供試体の吸水膨張とせん断試験中の試料の漏出が原因として考えられる。両者ともこのような誤差を含んでいるが、試験終了後すなわち残留状態における供試体の含水比はせん断速

度が大きくなるほど減少する傾向にあるといえる。せん断速度の増加に対して残留強度が増加する原因として供試体の含水比すなわち間隙比の減少も大きな原因として考えられる。

(5) 残留状態に達した後せん断速度を変化させたリングせん断挙動

Fig.15 に残留状態においてせん断速度を連続的に変化させた場合のリングせん断試験結果を示す。試料はカオリン B である。Table 4 に試験ケースと試験結果を示している。図の縦軸は応力比 τ/σ_N 、横軸はせん断変位角 θ をとっている。試験条件として OCR=1.0, $\sigma_N=98, 196, 294, 392$ kPa に設定した。ここでは、 $\dot{\theta}=5$ rad を起点として $\theta=0.5$ rad 毎にせん断変位角速度を $0.005 \rightarrow 0.0125 \rightarrow 0.025 \rightarrow 0.05 \rightarrow 0.025 \rightarrow 0.0125 \rightarrow 0.005 \rightarrow 0.0005$ rad/min のように変化させることとした。Fig.16 に残留状態後の τ/σ_N と θ の関係を示す。横軸の θ は残留状態に達した時点 ($\theta=5$ rad) をゼロと再定義した。ここで注目すべき点として、98~392kPa の範囲のいずれの σ_N に対してもせん断変位角速度 $\dot{\theta}$ を増加させると、それに追従して τ/σ_N が増大し、これに引き続いて $\dot{\theta}$ を低下させると τ/σ_N が減少していることである。Figs.17 に τ/σ_N と対数表示の $\dot{\theta}$ の関係を示す。各図は σ_N ごとに $\dot{\theta}$ の増加過程と減少過程に分けて示している。いずれの τ/σ_N においても $\dot{\theta}$ が上がると、残留状態における τ/σ_N の上限値および下限値はともに増加することが分かる。図中の α' は前述の式(1)で定義している。カオリンの α' は 0.010~0.033 である。

Figs.17(c),(d)にはせん断初期からせん断速度を変えたリングせん断試験、すなわち複数個の供試体を用いて異なるせん断速度の下で実施したリングせん断試験の結果を併記している。Figs.17(c)のせん断速度増加過程においてはせん断初期から一定のせん断速度で実験した結果は若干上方に位置しているが、Figs.17(d)のせん断速度減少過程においてはよく一致している。これより、 $\sigma_N=196$ kPa の場合、残留状態においてせん断速度を変化させた結果とせん断初期から一定のせん断速度で実験した結果は傾向としてほぼ等しいといえる。

Table 5 Ring shear test results under condition of different normal stresses

Test No	1	2	3	4
σ_N (kPa)	98	196	294	392
$\dot{\theta}$ (mm/min)	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
$(\tau/\sigma_N)_p$	0.504	0.453	0.457	0.426
$(\tau/\sigma_N)_r$	0.146	0.143	0.152	0.145
1st step $\dot{\theta}$	0.005	0.005	0.005	0.005
$(\tau/\sigma_N)_p$	0.178	0.170	0.173	0.177
$(\tau/\sigma_N)_r$	0.158	0.158	0.157	0.155
2nd step $\dot{\theta}$	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
$(\tau/\sigma_N)_p$	0.191	0.184	0.190	0.188
$(\tau/\sigma_N)_r$	0.179	0.169	0.171	0.174
3rd step $\dot{\theta}$	0.025	0.025	0.025	0.025
$(\tau/\sigma_N)_p$	0.204	0.193	0.199	0.196
$(\tau/\sigma_N)_r$	0.195	0.181	0.188	0.185
4th step $\dot{\theta}$	0.05	0.05	0.05	0.05
$(\tau/\sigma_N)_p$	0.215	0.204	0.210	0.204
$(\tau/\sigma_N)_r$	0.198	0.193	0.200	0.195
5th step $\dot{\theta}$	0.025	0.025	0.025	0.025
$(\tau/\sigma_N)_p$	0.225	0.199	0.207	0.200
$(\tau/\sigma_N)_r$	0.209	0.196	0.202	0.196
6th step $\dot{\theta}$	0.0125	0.0125	0.0125	0.0125
$(\tau/\sigma_N)_p$	0.209	0.192	0.202	0.194
$(\tau/\sigma_N)_r$	0.202	0.189	0.199	0.191
7th step $\dot{\theta}$	0.005	0.005	0.005	0.005
$(\tau/\sigma_N)_p$	0.198	0.198	0.203	0.196
$(\tau/\sigma_N)_r$	0.191	0.179	0.189	0.181
8th step $\dot{\theta}$	0.0005	0.0005	0.0005	0.0005
$(\tau/\sigma_N)_p$	0.188	0.175		0.177
$(\tau/\sigma_N)_r$	0.166	0.150		0.157

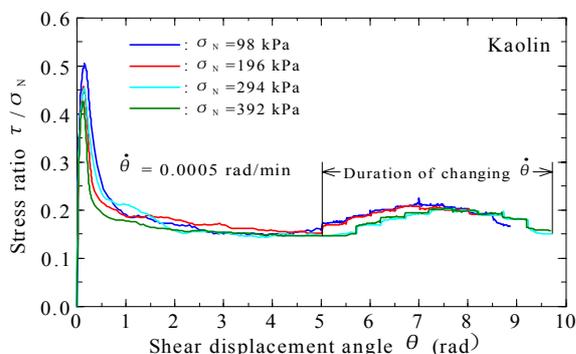


Fig.15 Stress ratio and shear displacement angle curves of Kaolin under several normal stress

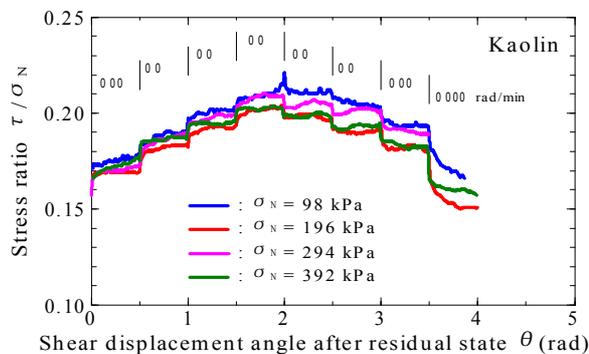
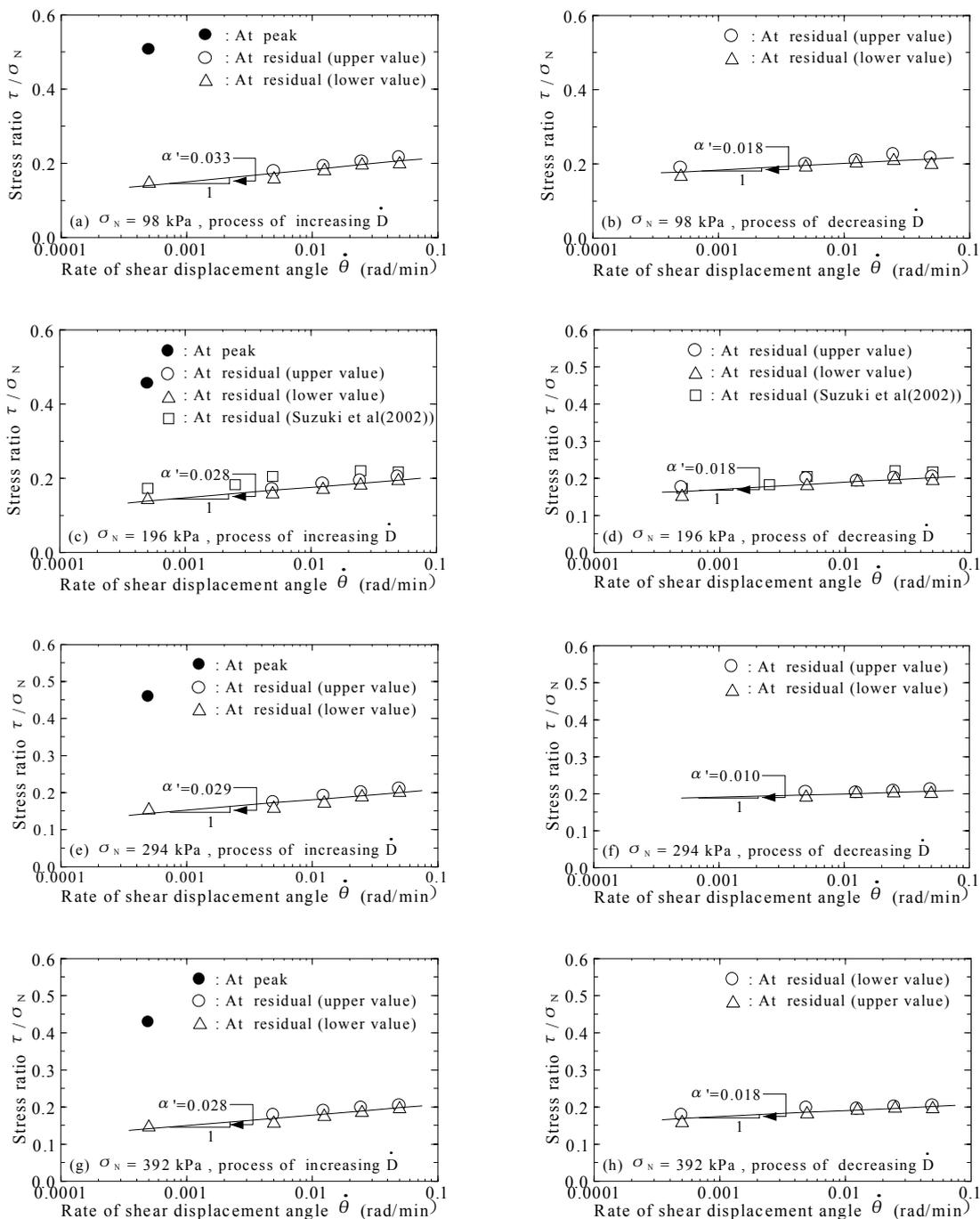


Fig.16 Stress ratio and shear displacement angle curves of Kaolin under several normal stress



Figs.17 Stress ratio at peak and residual plotted as a function of rate of shear displacement angle for Kaolin

4. 結論

本論文では、4種類の粘土に対して0.02~2.0 mm/minの範囲でせん断速度を変化させた圧密定圧リングせん断試験結果に基づいて、粘土の残留強度に及ぼすせん断速度の影響について考察した。得られた知見は以下のとおり要約される。

- (1) 排水条件が近似的に満たされるせん断速度領域において、残留状態の粘着力はせん断速度の変化に対してゼロと仮定できるので、残留状態の内部摩擦角が対数表示のせん断速度の増加に対して直線的に増加する。
- (2) 他の土試料の場合も、排水条件を近似的に満たすせん断速度領域において、残留強度は対数表示のせん断速度の増加に対して直線的に増加する。

せん断速度の増加に対して直線的に増加することが確認された。

- (3) 0.02～2.0 mm/min のせん断速度領域におけるせん断速度の増加に対する残留強度の増加の割合は2～6 %程度と小さい。
- (4) 粘土含有量あるいは塑性指数が大きい土試料ほど、せん断速度の増加に伴う残留強度の増加の割合は大きくなる傾向にある。
- (5) 活性度が高い試料ほど、せん断速度の増加に伴う残留強度の増加の割合は大きくなる。
- (6) 残留状態における供試体の含水比はせん断速度の増加に対して減少する傾向にあり、せん断面付近の間隙比の減少が上記(2)の原因として有力である。
- (7) 残留状態においてせん断速度を増減させると、そのときの応力比の上限および下限値はともにそれに追隨して増加する。
- (8) せん断初期からせん断速度を変えた結果と残留状態でせん断速度を変化させた結果はほぼ一致する。

参考文献

- 1) Bishop, A.W., Green, G.E., Garga, V.K., Andresen, A. and Brown, J.D. (1971): A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength, *Geotechnique*, Vol.21, No.4, pp.273-328.
- 2) Bucher, F.: Die Restscherfestigkeit natulicher Boden, ihre Einflussgrossen und Beziehungen als Ergebnis experimenteller Untersuchungen, Report No.103, Institutes fur Grundbau und Bodenmechanik Eidgenossische Technische Hochschule, Zurich, Switzerland, 1975 (in German).
- 3) Collotta, T., Cantoni, R., Pavesi, U., Ruberl, E. and Moretti, P.C. (1989): A correlation between residual friction angle, gradation and the index properties of cohesive soils, *Geotechnique*, Vol.39, No.2, pp.343-346.
- 4) Ijuin, R., Ishihara, K. and Kuwano, J. (1987): Static and dynamic residual strengths of soil on slip surface, *Proc. of the 42th Annual conference of the Japan Society of Civil Engineers*, pp.148-149 (in Japanese).
- 5) Ijuin, R., Ishihara, K. and Touhata, I. (1988): Dynamic strength of presheared sample, *Proc. of the 23rd Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, The Japanese Geotechnical Society, pp.763-764 (in Japanese).
- 6) Kenney, T.C. (1967): The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils, *Proc. Geotechnical Conference*, Oslo, Vol.1, pp.123-129.
- 7) Kenney, T.C. (1977): Residual strength of mineral mixtures, *Proc. of the 9th I.C.S.M.F.E.*, pp.155-160.
- 8) La Gatta, D.P. (1970): Report on residual strength of clay and clay-shales by rotation shear tests, U.S. Army Corps of Engineers Waterways Experiment Station as fulfillment of contract No. DACW39-69-C-0028 and partial fulfillment of contract No. DACW39-67-C-0024, Harvard University, Cambridge, Massachusetts.
- 9) Lehane, B.M. and Jardine, R.J. (1992): Residual strength characteristics of Bothkennar clay, *Geotechnique*, Vol.42, No.2, pp.363-367.
- 10) Lemos, L., Skempton, A.W. and Vaughan, P.R. (1985): Earthquake loading of shear surfaces in slopes, *Proc. 11th I.C.S.M.F.E.*, Vol.4, pp.1955-1958.
- 11) Leroueil, S. (2001): Natural slope and cuts: movement and failure mechanisms, *Geotechnique*, Vol.51, No.3, pp.197-243.
- 12) Lupini, J.F., Skinner, A.E. and Vaughan, P.R. (1981): The drained residual strength of cohesive soils, *Geotechnique*, Vol.31, No.2, pp.181-213.
- 13) Mesri, G. and Cepeda-Diaz, A.F. (1986): Residual shear strength of clays and shales, *Geotechnique*, Vol.36, No.2, pp.269-274.
- 14) Nakamori, K., Yang, P. and Sokobiki, H. (1996): Strength characteristics of undisturbed landslide clays in tertiary mudstone, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.3, pp.75-83.
- 15) Nakamura, H. and Shimizu, K. (1978): Soil tests for the determination of shear strength along the sliding surface, *Journal of the Japan Landslide Society*, Vol.15, No.2, pp.25-32 (in Japanese).
- 16) Okada, F. and So, E. (1988): Relation between residual strength and microstructure, *Proc. of the 23rd Japan National Conference on Geotechnical Engineering*, The Japanese Geotechnical Society, pp.227-228 (in Japanese).
- 17) Ramiah, B.K., Dayalu, N.K. and Purushothama Raj, P. (1970): Influence of chemicals on residual strength of silty clay, *Soils and Foundations*, Vol.10, No.1, pp.25-36.

- 18) Ramiah, B.K. and Purushothama Raj, P. (1971): Influence of strain rate on the residual strength of a kaolinitic clay, *Proc. Geotechnical Engineering, J.S.E.A.S.S.E.*, Vol.2, pp.151-158.
- 19) Scheffler, H. and Ullrich, W. (1981): Determination of drained shear strength of cohesive soils, *Proc. 10th I.C.S.M.F.E.*, Vol.10, pp.775-778.
- 20) Skempton, A.W. (1964): Long-term stability of clay slopes, *Geotechnique*, Vol.14, No.2, pp.77-102.
- 21) Skempton, A.W. (1965): Discussion - Earth and Rock dams, Slope and Open Excavations, Session 8, *Proc. 6th I.C.S.M.F.E.*, Vol.3, pp.551-552.
- 22) Skempton, A.W. (1985): Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Geotechnique*, Vol.35, No.1, pp.3-18.
- 23) Skempton, A.W. and Petley, D.J. (1967): The strength along structural discontinuities in stiff clays, *Proc. Geotechnical Conference*, Oslo, Vol.2, pp.29-46.
- 24) Suzuki, M., Umezaki, T. and Kawakami, H. (1997): Relation between residual strength and shear displacement of clay in ring shear test, *Journal of Geotechnical Engineering*, Japan Society of Civil Engineering, No.575/III-40, pp.141-158 (*in Japanese*).
- 25) Suzuki, M., Umezaki, T., Kawakami, H. and Yamamoto, T. (1998): The correlation between the residual strength and the index properties of soils in landslides, *Proc. International Symposium on Problematic Soils (IS-TOHOKU '98)*, pp.661-664.
- 26) Suzuki, M., Umezaki, T., Kawakami, H. and Yamamoto, T. (2000): Residual strength of soil by direct shear test, *Journal of Geotechnical Engineering*, Japan Society of Civil Engineering, No.645/III-50, pp.37-50 (*in Japanese*).
- 27) Tika, T.E., Vaughan, P.R. and Lemos, L.J.L.J. (1995): Fast shearing of pre-existing shear zone in soil, *Geotechnique*, Vol.46, No.2, pp.197-233.
- 28) Townsend, F.C. and Gilbert, P.A. (1973): Tests to measure residual strengths of some clay shales, *Geotechnique*, Vol.23, No.2, pp.267-271.
- 29) Wesley, L.D. (1977): Shear strength properties of halloysite and allophane clays in Java, Indonesia, *Geotechnique*, Vol.27, No.2, pp.125-136.
- 30) Yatabe, R., Yagi, N. and Enoki, M. (1991): Ring shear characteristics of clays in fractured-zone-landslide, *Journal of Geotechnical Engineering*, Japan Society of Civil Engineering, No.436/III-16, pp.93-101 (*in Japanese*).

(平成 16 年 12 月 27 日受理)