

セメンテーションを有する 地すべり粘土の残留強度特性

鈴木 素之 (社会建設工学科)

山本 哲朗 (社会建設工学科)

都築 俊輔 (社会建設工学専攻)

Residual strength characteristics of landslide clays with cementation

Motoyuki SUZUKI (Department of Civil Engineering)

Tetsuro YAMAMOTO (Department of Civil Engineering)

Shunsuke TSUZUKI (Graduate school of Civil Engineering)

This paper describes influences of normal stress, shear displacement rate, consolidation and shear stress histories on residual strength of undisturbed and artificially cemented clays having cementation. A series of reversal box shear tests was carried out on undisturbed and remolded samples of 3 landslide clays, remolded sample of kaolin, remolded and intact samples of kaolin mixed with ordinary Portland cement. As a result, the residual strength of the samples with cementation is as same as those without cementation. The residual strengths of the undisturbed and the cemented samples, as well as the remolded sample, linearly increase with increasing the shear displacement rate. The residual strengths of the undisturbed and the cemented samples are not affected by consolidation stress history.

Key Words : landslide, clay, residual strength, aging, cementation, reversal box shear test

1. はじめに

残留強度は再活動地すべり斜面の安定性を検討するための重要な強度定数の1つである¹⁾。これまでにリングせん断試験や繰返し一面せん断試験により種々の土の残留強度特性が調べられており、①土の種類に関する影響因子として粘土分、砂分および礫分、水素イオン濃度指数、ナトリウムやカルシウムなどの陽イオン濃度など、②土の状態に関する影響因子として供試体の初期含水比および飽和度、供試体の水浸、試料の乱れや繰返しの程度など、③試験条件に関する影響因子として垂直応力、過圧密比、せん断速度、温度など、④土の種類に関する指標として液性限界、塑性限界および塑性指数などが取り上げられている²⁻⁴⁾。しかし、Nakamoriら⁵⁾のような一部の研究を除けば、既往の研究の多くにおいて、乱した試料をスラリー状態にして室温で再圧密した土を対象としており、ほとんどの場合、原位置における土の構造

が消失していると考えられる。

一方、年代効果は、自然粘土地盤が長年月を経て形成される過程において二次圧密やセメンテーション、溶脱などにより構造が形成されることにより生じると考えられている^{6), 7)}。年代効果によって先行圧密降伏応力よりも大きな圧密降伏応力を有するに至った事例は多く⁸⁾、このようにして構造が発達した粘土は $e \sim \log p$ 関係において“応力の飛出し現象”を示すとされている⁷⁾。室内試験において年代効果を再現する方法としてセメントのような化学物質を添加する方法^{7), 9)-11)}やスラリー状態の粘土を高温で再圧密する方法¹²⁾が提案されている。人工的にセメンテーションが与えられた粘土は見掛け上過圧密土の挙動を示すことが多くの研究において報告されている。地すべりなど進行性破壊を顕著に示す土は風化によって徐々に分解される化学的固結力を持っている粘土や頁岩であり、セメンテーションの根源となる化学的固結力は風化によって消失するとされている¹³⁾。人工的に

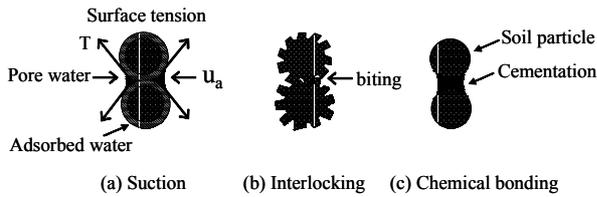


Fig.1 Schematic diagram of mechanism producing apparent cohesion

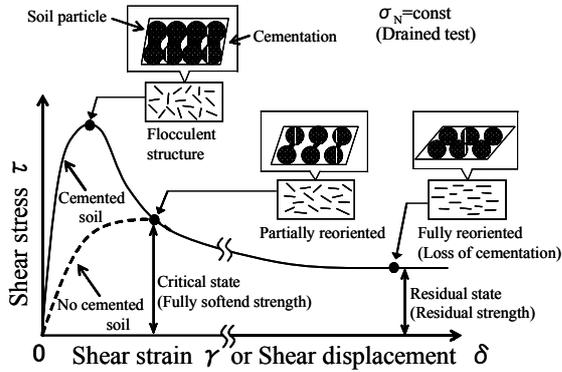


Fig.2 Schematic diagram of shear behavior of soil with and without cementation

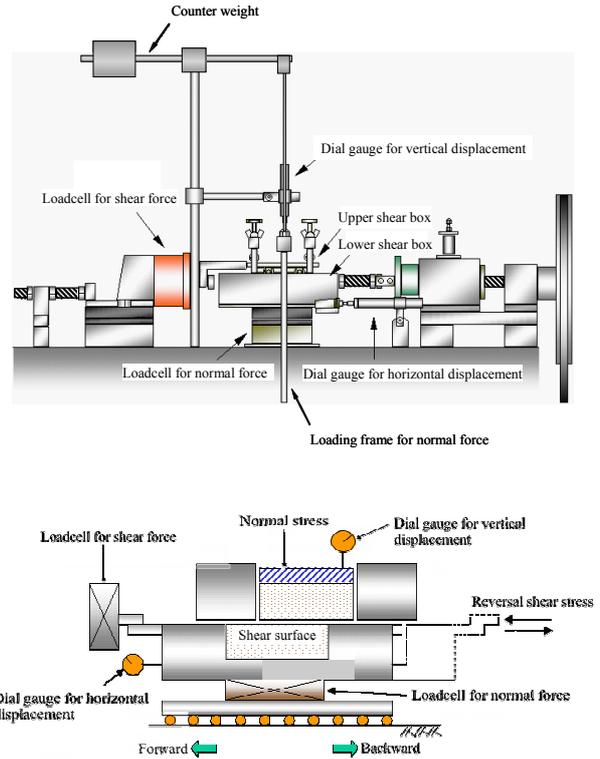
Table 1 Comparison between reversal box shear test and ring shear test

Item	Test	Reversal box shear test (RBST)	Ring shear test (RST)
Shear mode			
Soil sample	Quantity	Little	Much
	Condition	Remolded / Undisturbed	Remolded
Increment of shear displacement		Intermittent	Continuous
Cross sectional area of specimen		Changed	Constant
Leakage of soil sample		Little	Much
Reorientation of platy soil particle		Straight	Circumferential

セメンテーションを与えることにより見掛け上の粘着成分が増加することが示されており⁹⁾、見掛けの粘着力が生成されるメカニズムにはサクションやインターロッキング、セメンテーションなどが考えられる (Fig.1 参照)。Fig.2 にセメンテーションを有する土が残留状態に至るまでのせん断挙動の概念図を示しているが、セメンテーションを有する土がせん断を受けることにより、従来から説明されている扁平な粘土粒子のせん断方向への再配列現象の他に、セメンテーションの喪失も重要な現象として残留強度の概念は拡張される。

以上のことから、地すべり粘土も年代効果を受けた土の一つといえるものの、現在までのところ乱さない試料のような自然状態でセメンテーションを有する土の残留強度と上述の影響因子の関係についてはほとんど検討されていない。

本文では、以上の点を踏まえて、3種類の乱さない地



Figs.3 Essential features of reversal box shear test apparatus

すべり土、繰返し再構成カオリンおよび人工的にセメンテーションを与えたカオリンに対して繰返し一面せん断試験を実施し、垂直応力、せん断変位速度、圧密履歴などがセメンテーションを有する土の残留強度に与える影響について検討した結果を述べる。

2. 繰返し一面せん断試験

残留強度を測定する方法には繰返し一面せん断試験やリングせん断試験などがある。Table 1 に繰返し一面せん断試験とリングせん断試験の特徴を示す。

繰返し一面せん断試験は試料の大きさが小さく少量で済むことから、試験の準備が簡単であり、しかも乱さない試料の残留強度を求めるのに都合がよい。また、試験装置の機構が簡単なので、試験の実施が容易である。しかし、せん断方向が順次反転するために、せん断面の状態を乱す恐れがあることが指摘されている。

本研究では Nakamori ら⁵⁾が開発した在来型の繰返し一面せん断試験装置を一部改良したものをを用いた。Figs.3 に試験装置の概要を示す。供試体は直径 60 mm、高さ 20 mm の円板状である。せん断箱は上部固定・下部可動であり、下部せん断箱に高剛性ロードセルを取付け反力板側での垂直力を測定している。せん断変位速度は 0.02~1.0 mm/min の範囲で変化させることができる。せん断時の上部および下部せん断箱の隙間は一律に 0.20 mm とした。

Table 2 Physical properties of soil samples used

Soil samples	Kaolin	Landslide clay A	Landslide clay B	Landslide clay C
ρ_s (g/cm ³)	2.618	2.687	2.677	2.833
D_{50} (mm)	0.007	0.03	0.018	0.007
D_{max} (mm)	0.2	5.1	11.0	0.5
w_L (%)	62.0	34.4	91.3	33.2
w_p (%)	40.2	17.5	31.4	23.7
I_p	21.8	16.9	59.9	9.5
F_{clay} (%)	35.3	25.5	45.5	44.5
F_c (%)	56.4	63.9	54.2	78.1
Soil classification	MH	CL	CH	ML

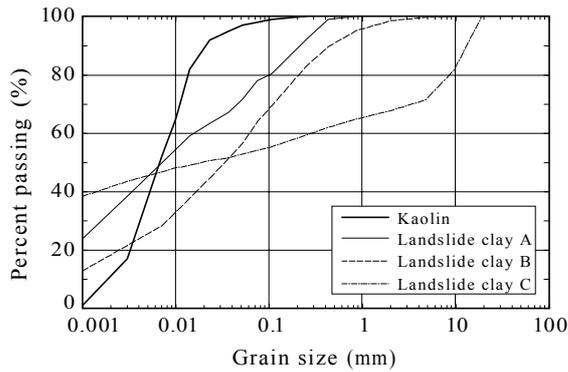


Fig.4 Grading curve of soil samples used

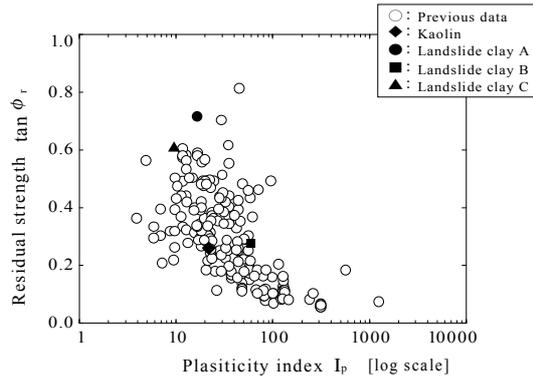
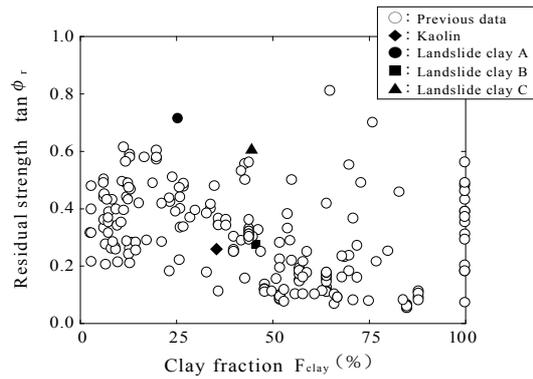


Fig.5 Relationship among clay fraction, plasticity index and residual strength

Table 3 Test case and initial condition of specimen for kaolin

Item	Test No.	w_0 (%)	ρ_{10} (g/cm ³)	S_0 (%)	e_0	σ_N (kPa)	OCR	$\dot{\delta}$ (mm/min)	$\Delta \delta$ (mm)
Normal stress	1-1	66.7	1.549	96.1	1.871	49	1	0.1	7
	1-2	63.1	1.469	86.6	1.906	98	1	0.1	7
	1-3	59.1	1.588	95.3	1.624	196	1	0.1	7
	1-4	56.7	1.601	95.1	1.562	294	1	0.1	7
	1-5	51.0	1.661	96.7	1.380	392	1	0.1	7
Amplitude of displacement	2-1	65.9	1.586	97.9	1.804	98	1	0.1	3
	2-2	66.5	1.613	100.0	1.768	98	1	0.1	7
Shear displacement rate	3-1	64.2	1.595	97.8	1.760	98	1	0.02	7
	3-2	62.0	1.619	98.8	1.683	98	1	0.05	7
	3-3	64.6	1.616	100.0	1.730	98	1	0.1	7
	3-4	62.5	1.619	99.1	1.691	98	1	0.2	7
	3-5	62.5	1.613	98.5	1.700	98	1	0.5	7
	3-6	64.2	1.583	96.6	1.781	196	1	0.02	7
	3-7	63.0	1.590	96.6	1.748	196	1	0.05	7
	3-8	59.1	1.588	95.3	1.624	196	1	0.1	7
	3-9	63.6	1.621	99.9	1.706	196	1	0.2	7
	3-10	63.7	1.606	98.6	1.733	196	1	0.5	7
Consolidation history	4-1	63.1	1.469	86.6	1.906	98	1	0.1	7
	4-2	62.5	1.536	92.5	1.769	196	2	0.1	7
	4-3	63.6	1.519	91.5	1.820	392	4	0.1	7
	4-4	63.9	1.536	93.3	1.794	784	8	0.1	7
	4-5	62.2	1.622	99.2	1.682	98	1	0.1	7
	4-6	63.2	1.618	99.5	1.704	98	2	0.1	7
	4-7	62.5	1.616	98.8	1.695	98	4	0.1	7
	4-8	62.9	1.601	97.6	1.728	196	1	0.1	7
	4-9	63.9	1.589	97.1	1.766	392	2	0.1	7
	4-10	62.9	1.611	98.6	1.711	784	4	0.1	7
Shear history	5-1	64.6	1.616	100.0	1.730	98	1	0.1	7
	5-2	61.0	1.599	96.3	1.699	196	1	0.1	7
	5-3	64.2	1.584	96.7	1.780	392	1	0.1	7
	5-4	63.1	1.587	96.3	1.756	784	1	0.1	7

Table 4 Test case and initial condition of specimens for natural landslide clays

Test No.	Samples	Specimen condition	w_0 (%)	ρ_{t0} (g/cm ³)	S_{r0} (%)	e_0	σ_N (kPa)	$\dot{\delta}$ (mm/min)	D_{max} (mm)	
6-1	Landslide clay A	Undisturbed	18.4	1.951	78.4	0.630	98	0.02	-	
6-2			19.1	1.975	82.7	0.621	196	0.02	-	
6-3			19.1	1.944	79.4	0.646	294	0.02	-	
6-4		Remolded	19.2	1.964	81.8	0.630	98	0.02	-	
6-5			19.1	1.975	82.7	0.621	196	0.02	-	
6-6			17.5	1.918	72.7	0.646	294	0.02	-	
6-7			8.6	1.788	36.5	0.632	196 →147 →98	0.1	0.425	
6-8		2.0	1.679	8.5	0.632	196 →147 →98	0.1	0.850		
7-1		Landslide clay B	Undisturbed	28.8	1.773	81.5	0.945	98	0.05	-
7-2				29.5	1.879	93.5	0.845	196	0.05	-
7-3				29.8	1.819	87.6	0.909	294	0.05	-
7-4			Remolded	30.6	1.814	88.4	0.927	98	0.05	-
7-5				30.6	1.851	92.1	0.889	196	0.05	-
7-6				30.6	1.860	93.1	0.880	294	0.05	-
7-7	Undisturbed			28.5	1.851	89.0	0.859	196	0.02	-
7-8			29.5	1.879	93.5	0.845	196	0.05	-	
7-9			24.0	1.888	84.7	0.758	196	0.5	-	
7-10	Remolded		27.7	1.825	84.9	0.873	196	1	-	
7-11			32.4	1.833	93.0	0.934	196	0.02	-	
7-12			30.6	1.851	92.1	0.889	196	0.05	-	
7-13			38.5	1.846	100.0	1.009	196	0.5	-	
7-14	35.4		1.861	99.9	0.948	196	1	-		
8-1	Landslide clay C	Undisturbed	13.5	2.187	81.4	0.471	98	0.1	-	
8-2			13.8	2.149	78.1	0.500	196	0.1	-	
8-3			12.6	2.252	85.9	0.417	294	0.1	-	
8-4		Remolded	27.5	2.129	100.0	0.697	98	0.1	-	
8-5			23.9	2.027	92.5	0.731	196	0.1	-	
8-6			23.9	2.119	100.0	0.656	294	0.1	-	

Table 5 Test case and initial condition of specimens for kaolin with OPC

Test No.	State of soil sample	w_0 (%)	ρ_{t0} (g/cm ³)	S_{r0} (%)	e_0	σ_N (kPa)	$\dot{\delta}$ (mm/min)	t_c (days)
9-1	Kaolin + OPC (Intact)	72.5	1.522	95.3	2.039	98	0.1	14
9-2		66.3	1.580	97.6	1.823	98	0.1	28
9-3		64.6	1.577	94.4	1.834	98	0.1	56
9-4		68.1	1.523	93.1	1.959	98	0.1	91
9-5		71.0	1.522	94.6	2.011	196	0.1	28
9-6		68.4	1.544	95.3	1.924	294	0.1	28
9-7		68.6	1.552	96.1	1.913	196	0.02	28
9-8		67.7	1.572	97.6	1.859	196	0.05	28
9-9		72.1	1.569	99.6	1.941	196	0.2	28
9-10		69.7	1.554	96.9	1.926	196	0.5	28
9-11	Kaolin + OPC (Remolded)	69.0	1.557	96.8	1.910	98	0.1	28
9-12		69.5	1.574	98.8	1.886	196	0.1	28
9-13		65.7	1.542	93.6	1.880	294	0.1	28

用いた土試料は地すべり土 A, B, C およびカオリンの計 4 種類である。地すべり土は地すべり地から乱さない状態で採取したものである。Table 2 に試料の物理的性質を、Fig.4 に試料の粒径加積曲線を示す。各試料の土質分類は、地すべり土 A は CL (粘質土)、地すべり土 B は CH (粘土)、地すべり土 C は ML (低液性限界シルト) およびカオリンは MH (高液性限界シルト) である。Figs.5 に既往の研究から引用したデータおよび本研究で使用した試料の粘土含有量 F_{clay} および塑性指数 I_p と残留強度 $\tan \phi_r$ の関係を示す。図中では Lupini ら²⁾ がまとめた研究データを引用している。 F_{clay} が 23~43% は過渡的せん断挙動、 F_{clay} が 43% 以上はすべりモード、 F_{clay} が 23% 以下は乱れモー

ドとされており、 $\tan \phi_r \sim I_p$ と F_{clay} に相関があることが指摘されている。今回のデータは $F_{clay} = 25 \sim 50\%$ の範囲であり、既往の研究データの分布域にプロットされている。また、カオリンに人工的にセメンテーションを与えるために普通ポルトランドセメントを用いた。なお、本文に示すデータの一覧を Table 3~5 に示す。Table 3 はカオリンを、Table 4 は地すべり土 A~C を、Table 5 は人工的にセメンテーションを与えたカオリンの結果を記載しており、それぞれ試験ケースと供試体の初期状態量を示している。表中の記号のうち、 w_0 は初期含水比、 ρ_{t0} は初期湿潤密度、 S_{r0} は初期飽和度、 e_0 は初期空隙比である。

以下に、繰返し一面せん断試験の基本的な強度特性と

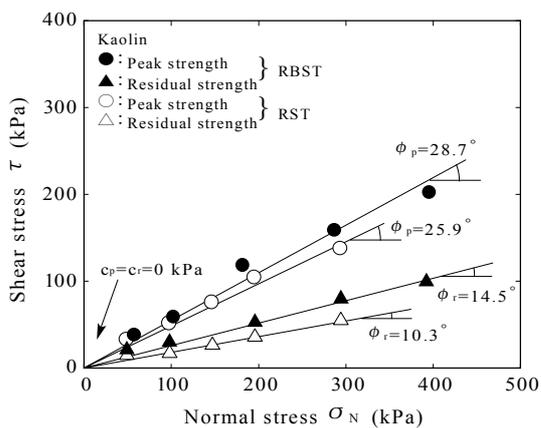


Fig.6 Peak and residual strength lines obtained from RBST and RST

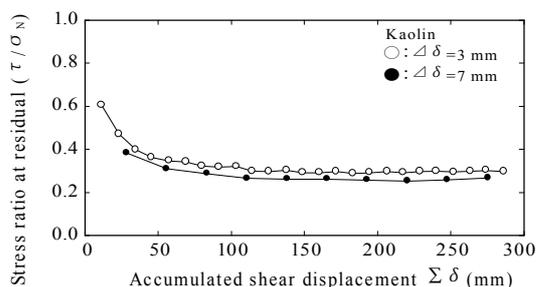
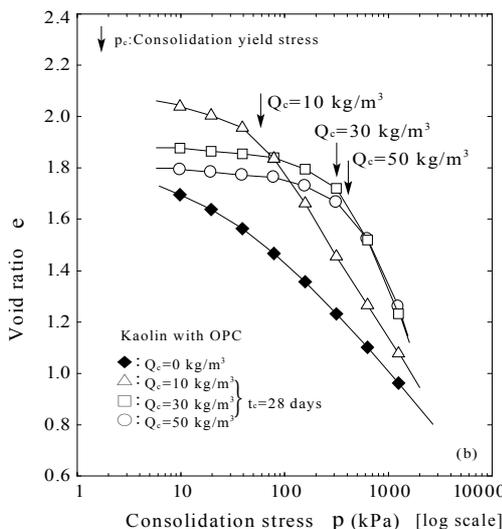
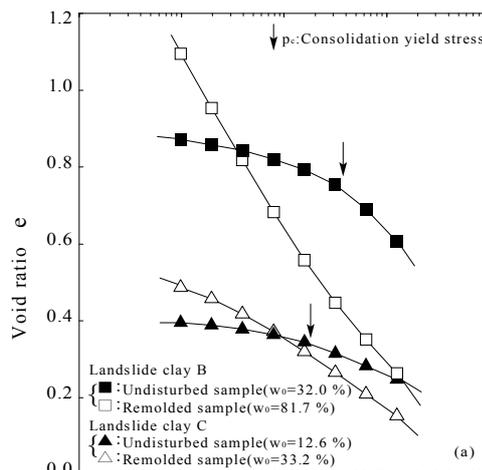


Fig.7 Relationship between accumulated shear displacement and stress ratio at residual

これまでに検討されていない試験条件の影響について述べる。Fig.6に繰返し一面せん断試験およびリングせん断試験から得られたピーク強度線と残留強度線を示す。ピークおよび残留状態における強度定数(ϕ_p, c_p)および(ϕ_r, c_r)は繰返し一面せん断試験ではそれぞれ(ϕ_p, c_p)=(28.7°, 0 kPa)および(ϕ_r, c_r)=(14.5°, 0 kPa)であり、リングせん断試験ではそれぞれ(ϕ_p, c_p)=(25.9°, 0 kPa)および(ϕ_r, c_r)=(10.3°, 0 kPa)である。繰返し一面せん断試験から得られた ϕ_p, ϕ_r はともにリングせん断試験のそれよりも大きくなる結果が得られた。この理由として、繰返し一面せん断試験の場合には、前述したようにリングせん断試験の場合と異なり、せん断方向が順次反転してせん断面の土粒子の配向が乱されることが考えられる。矢田部ら³⁾は、リングせん断試験と繰返し一面せん断試験の強度定数を比較して同様の結果を示しているが、在来型の繰返し一面せん断試験装置を用いているので、周面摩擦力の影響が含まれていることに注意する必要がある。

Fig.7にせん断変位振幅 $\Delta\delta$ を ± 3 および ± 7 mmとした場合の累積せん断変位 $\Sigma\delta$ と残留状態における応力比(τ/σ_N)_rの関係を示す。 $\Delta\delta$ の大きさによらず、(τ/σ_N)_r~ $\Sigma\delta$ 曲線はほぼ同じである。残留強度のみを求める繰返し一面せん断試験においては、せん断変位振幅は試験結果にほとんど影響を与えない。



Figs.8 Relationship between consolidation stress and void ratio

3. 試験結果と考察

(1) 圧密降伏応力

地すべり土B, Cの乱さない試料, 同繰返し再構成試料およびセメントを添加したカオリンに対して段階荷重による圧密試験を実施した。Figs.8に圧密試験から得られた $e \sim \log p$ 曲線を示す。Figs.8(a)に示す地すべり土Bの乱さない試料からは圧密降伏応力 $p_c=375$ kPaが得られ、地すべり土Cの乱さない試料からは $p_c=180$ kPaが得られた。Figs.8(b)に示すセメントを添加したカオリンは養生時間 $t_c=28$ daysの条件下で養生し、セメント添加量 Q_c を10, 30, 50 kg/m³の3通りで変化させた。比較のために、セメント無添加($Q_c=0$ kg/m³, 初期含水比 $w_0=65.3$ %)の結果を示している。セメント添加供試体は大気圧下で湿潤養生したものであるが、見掛上の p_c が生じている。また、 Q_c の大きいものほど p_c が大きくなっている。添加量の少ない $Q_c=10$ kg/m³の場合、セメンテーションによる応力の飛出し現象は顕著ではないが、 $Q_c=30$ および 50 kg/m³の場合には明確である。

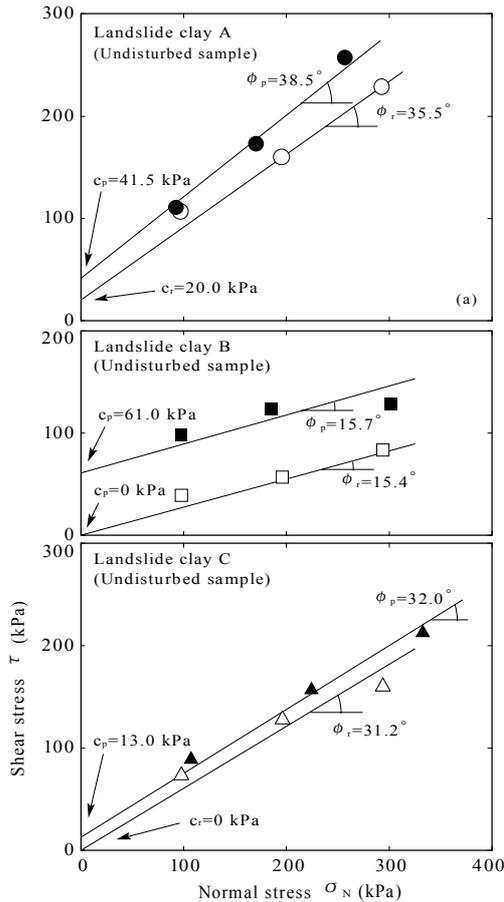


Fig.9 Peak and residual strength lines of undisturbed natural clays

(2) 乱さない試料および練返し試料の残留強度

Fig.9 に地すべり土 A~C の乱さない試料における σ_N とピーク強度 τ_p および残留強度 τ_r の関係を示す。地すべり土 A では $(\phi_p, c_p)=(38.5^\circ, 41.5 \text{ kPa})$ および $(\phi_r, c_r)=(35.5^\circ, 20.0 \text{ kPa})$ 、地すべり土 B では $(\phi_p, c_p)=(15.7^\circ, 61.0 \text{ kPa})$ および $(\phi_r, c_r)=(15.4^\circ, 0 \text{ kPa})$ 、地すべり土 C では $(\phi_p, c_p)=(32.0^\circ, 13.0 \text{ kPa})$ および $(\phi_r, c_r)=(31.2^\circ, 0 \text{ kPa})$ である。地すべり土 A を除いて、地すべり土 B, C はともにせん断へ伴って見掛けの粘着力が減少し、残留状態においてゼロになっている。

Fig.10 に地すべり土 A~C の乱さない試料および練返し試料における σ_N と τ_r の関係を示す。地すべり土 A の残留強度定数は乱さない試料(記号:●)および練返し試料(記号:○)ともに同じ値が得られ、 $(\phi_r, c_r)=(35.5^\circ, 20 \text{ kPa})$ である。地すべり土 B の残留強度定数は乱さない試料(記号:■)および練返し試料(記号:□)ともに $(\phi_r, c_r)=(15.4^\circ, 0 \text{ kPa})$ が得られ、地すべり土 A と同様に両試料の間に強度差はみられない。本研究では、練返し試料は乱さない試料と同じ含水比で練返した後、原粒度の状態で作製している。このことは、試料の物理特性が変化しなければ、乱さない試料と練返し試料の残留強度は本質的には同じ値になるという Skempton¹⁾ の示

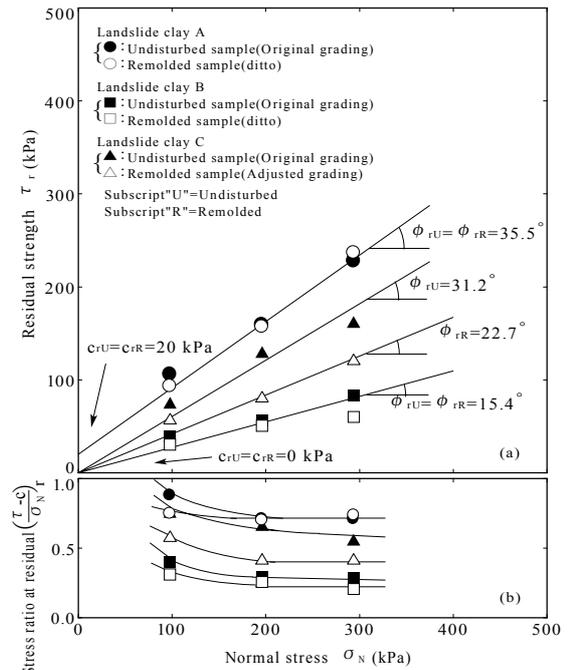


Fig.10 Relationship between normal stress, residual strength and stress ratio at residual state

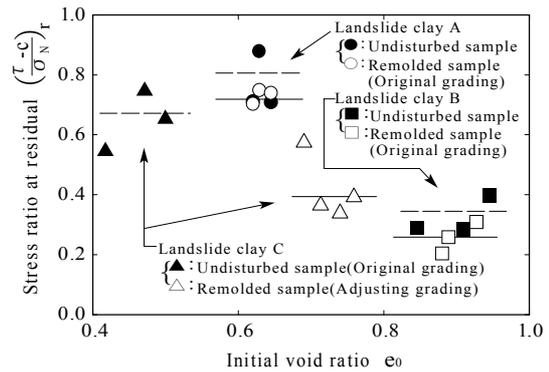


Fig.11 Relationship between initial void ratio and stress ratio at residual state

唆を裏付けている。しかし、地すべり土 C の残留強度定数は乱さない試料(記号:▲)では $(\phi_{rU}, c_{rU})=(31.2^\circ, 0 \text{ kPa})$ 、練返し試料(記号:△)では $(\phi_{rR}, c_{rR})=(20.8^\circ, 0 \text{ kPa})$ となり、練返し試料は 425 μm 篩を通過させる粒度調整過程により c_r はゼロのまま ϕ_r が約 10.4° 低下している。このことにより、残留強度を求める際に試料の粒度を人為的に調整すると、残留強度を過小評価する可能性があるため、試料準備時の粒度調整には極力注意が必要である。

Fig.11 にこれらの試料の初期間隙比 e_0 と $(\tau/\sigma_N)_r$ の関係について整理した。図中のデータは Fig.10 で示したものに对应している。多少のばらつきはあるものの、 e_0 によらず $(\tau/\sigma_N)_r$ はほぼ一定である。

(3) 人工的にセメンテーションを与えた試料の残留強度
人工的にセメンテーションを与えた試料について検討

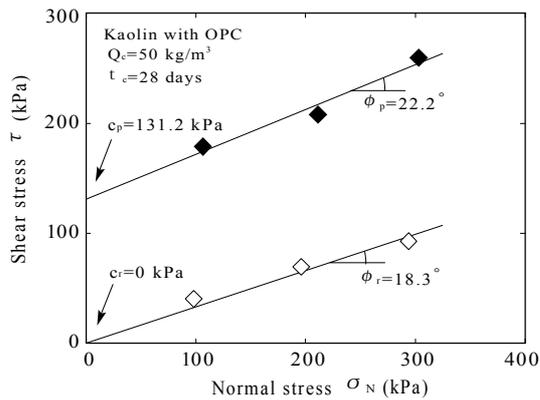


Fig.12 Peak and residual strength lines of kaolin with OPC

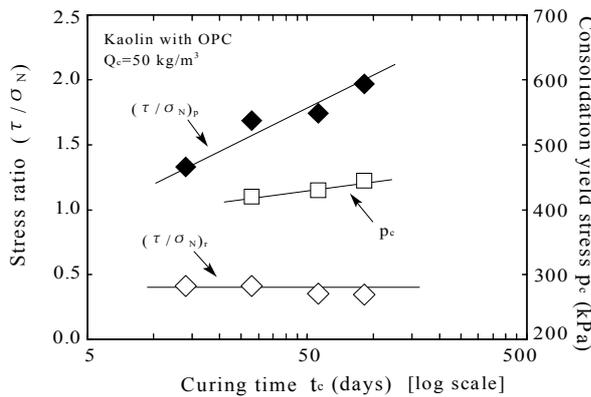


Fig.13 Relationship between curing time, consolidation yield stress and stress ratio at peak and residual

する。Fig.12 に $Q_c=50 \text{ kg/m}^3$, $t_c=28 \text{ days}$ の条件でセメントを添加養生したカオリンの σ_N と τ_p , τ_r の関係を示す。 $\phi_p=22.2^\circ$ および $c_p=131.2 \text{ kPa}$, $\phi_r=18.3^\circ$ および $c_r=0 \text{ kPa}$ が得られている。地すべり土 B, C の乱さない試料と同様に、せん断に伴って見掛けの粘着力が減少し、最終的にゼロになる。Fig.13 に t_c と p_c , $(\tau/\sigma_N)_p$ および $(\tau/\sigma_N)_r$ の関係を示す。 t_c が増加するにつれて、 $(\tau/\sigma_N)_p$ が高くなる結果が得られた。これは t_c の増加に伴い、 p_c の増加からわかるように、セメンテーションが発達したためと考えられる。一方、 t_c の増加に対して $(\tau/\sigma_N)_r$ はほぼ一定であることから、残留強度とセメンテーションは無関係である。Fig.14 にセメンテーションを与えたカオリン、セメンテーションを与えた後に練返したカオリンおよびセメンテーションを与えていないカオリンの垂直応力 σ_N と残留強度 τ_r の関係を示す。3 試料ともに残留強度はほぼ同じになる結果が得られた。

(4) せん断変位速度の影響

鈴木ら⁴⁾は、練返し再構成カオリンを用いたリングせん断試験により、せん断変位速度 $\dot{\delta}$ が大きくなるにつれて、 $(\tau/\sigma_N)_r$ が大きくなることを確認し、さらに既往の研究データから、土の種類やせん断速度の変化方法によ

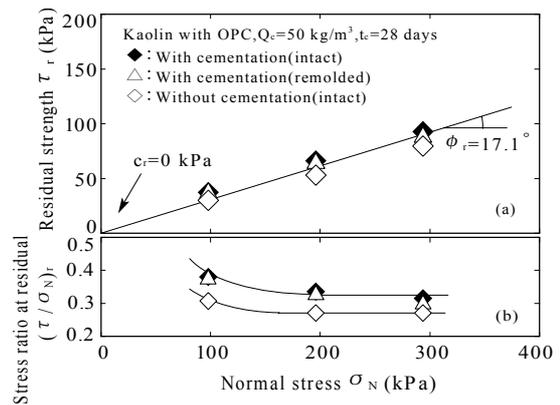


Fig.14 Relationship between normal stress, residual strength or stress ratio at residual state

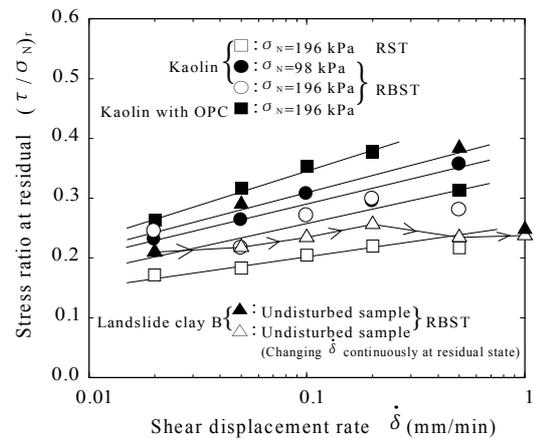


Fig.15 Relationship between shear displacement rate and stress ratio at residual state

って残留強度はせん断速度の増加に対して増加・不変・減少のように複雑な傾向を示すことを明らかにしている。しかし、これまでに $\dot{\delta}$ が乱さない試料の残留強度に及ぼす影響はほとんど報告されていない。Fig.15 に地すべり土 B の乱さない試料、練返し再構成カオリンおよびセメントを添加したカオリンの $(\tau/\sigma_N)_r$ と $\dot{\delta}$ の関係を示す。試験は複数個の供試体を用いて異なる $\dot{\delta}$ の下で実施した。 $\dot{\delta}$ が大きくなるにつれて、練返し再構成試料と同様に、 $(\tau/\sigma_N)_r$ は直線的に大きくなる傾向にある。練返し一面せん断試験においては $\dot{\delta}$ の影響は非常に小さいことが報告されているが^{14), 15)}, $\dot{\delta}$ の変化方法として 1 個の供試体を残留状態に至らせた後、連続的に $\dot{\delta}$ を変化させている点に注意する必要がある。本試験でも、同様の方法で、地すべり土 B の乱さない試料に対して $\dot{\delta}$ を変化させており、その結果を示しているが、 $\dot{\delta}$ の増加に対する $(\tau/\sigma_N)_r$ の増加傾向は複数個の供試体を用いた試験結果と異なる。なお、カオリンの場合、比較のためにリングせん断試験の結果を示しているが、試験装置の種類によらず同様な傾向を示している。

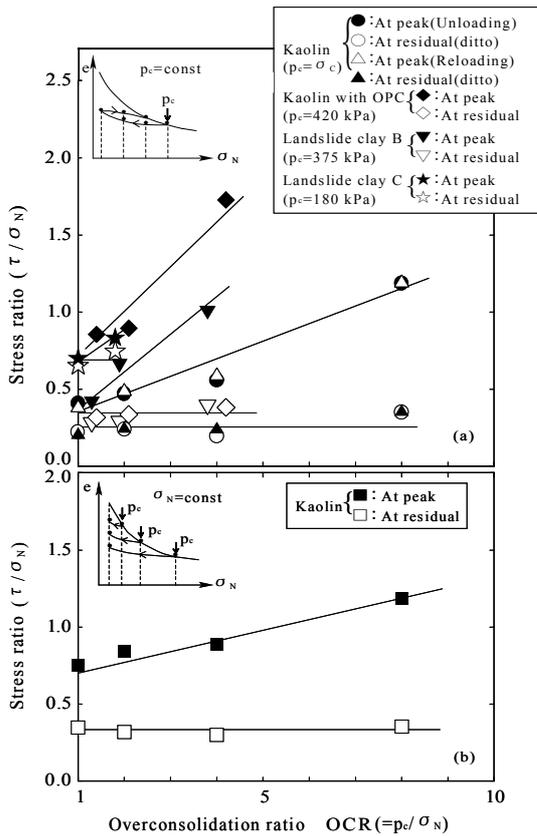


Fig.16 Relationship between overconsolidation ratios and stress ratio at peak and residual state

(5) 圧密履歴およびせん断履歴の影響

これまでに残留強度に及ぼす圧密履歴の影響は再三確認されているが、乱さない試料が有する p_c に対して試験時の σ_N を変化させた場合の圧密履歴の影響についての報告はない。Figs.16 にそれぞれ過圧密比 $OCR(=p_c / \sigma_N)$ と $(\tau / \sigma_N)_p$ および $(\tau / \sigma_N)_r$ の関係を示す。OCR は 1.0~8.0 の範囲で変化させている。OCR が高くなるにつれて、 $(\tau / \sigma_N)_p$ は高くなるが、 $(\tau / \sigma_N)_r$ はほぼ一定になる結果が得られた。Figs.16(a)には膨潤線上で再載荷させた場合の結果を示しており、膨潤線上で再載荷させた場合もその線上で除荷させた場合とほぼ同じ結果が得られた。地すべり地のすべり面では地下水位の変動などに伴う有効応力の増減による一種の繰返し圧密が想定されるが、この結果から、このことは残留強度にほとんど影響を与えないといえる。

最後に、せん断履歴が残留強度に及ぼす影響について検討する。実際の地すべり現場のすべり面は動いたり、止まったりを繰返している。この挙動を再現するために、せん断履歴として供試体に異なる初回のせん断時の垂直応力 $\sigma_{N,1st}$ の下で $\sum \delta = 28$ mm のせん断を与えた後、一定の再せん断時の垂直応力 $\sigma_{N,2nd} = 98$ kPa の下で再せん断した。Fig.17 に初回のせん断過程終了時の応力比 $(\tau / \sigma_{N,1st})_{end}$ と再せん断時のピークおよび残留状態における応力比 $(\tau / \sigma_{N,2nd})_p$ および $(\tau / \sigma_{N,2nd})_r$ の関係を示す。

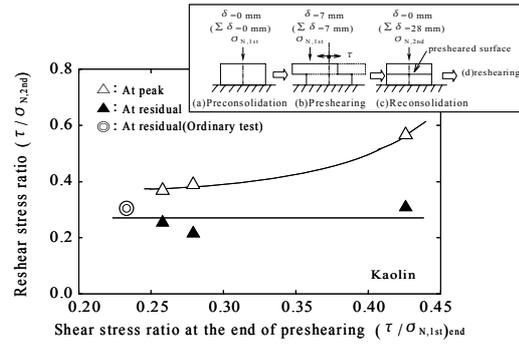


Fig.17 Relationship between stress ratio at the end of preshearing and stress ratio during reshearing

この結果から、多少のばらつきはあるものの、 $(\tau / \sigma_{N,1st})_{end}$ の大きさによらず再せん断時の残留強度はほぼ一定になる。

4. 結論

本文では、繰返し一面せん断試験の結果に基づいて、3種類の乱さない地すべり土、繰返し再構成カオリンおよび人工的にセメンテーションを与えたカオリンの残留強度に及ぼす垂直応力、せん断変位速度、圧密履歴などの影響について検討した。得られた知見は以下のようである。

- (1) 残留強度のみを求める繰返し一面せん断試験においては、せん断変位振幅は結果にほとんど影響しない。
- (2) 乱さない試料および繰返し再構成試料の残留強度は粒度が変化しなければ同じ値になる。しかし、粒度調整すると当然のことながら残留状態における内部摩擦角は低下する。
- (3) 初期間隙比によらず、残留状態における応力比はほぼ一定である。
- (4) 人工的にセメンテーションを与えた試料と与えていない試料の残留状態の内部摩擦角はほぼ同じであり、残留状態の粘着力はゼロである。
- (5) 人工的にセメンテーションを与えた試料や乱さない試料においても、繰返し再構成試料と同様に、せん断変位速度が大きくなるにつれて、残留状態における応力比は大きくなる。また、繰返し一面せん断試験において見られたこの傾向はリングせん断試験のそれと同様である。ただし、せん断変位速度の変化方法によってその傾向は異なる。
- (6) 人工的にセメンテーションを与えた試料や乱さない試料においても、繰返し再構成試料と同様に、残留強度は過圧密比によらずほぼ一定である。また、繰返し再構成試料においては膨潤線上で再載荷さ

せた場合もほぼ同じ傾向である。

- (7) 初回のせん断過程終了時のせん断応力の大きさによらず、再せん断時の残留状態の応力比はほぼ一定である。

参考文献

- 1) Skempton, A.W. : Long-term stability of clay slopes, *Geotechnique*, Vol.14, No.2, pp.77-102, 1964.
- 2) Lupini, J.F., Skinner, A.E. and Vaughan, P.R. : The drained residual strength of cohesive soils, *Geotechnique*, Vol.31, No.2, pp.181-213, 1981.
- 3) 矢田部龍一, 八木則男, 向谷光彦, 榎明潔 : 土の残留強度に与える試験法ならびにすべり面の拘束条件の影響, 土木学会論文集, No.554/III-37, pp.139-146, 1996.
- 4) 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.
- 5) Nakamori, K., Yang, P. and Sokobiki, H. : Strength characteristics of undisturbed landslide clays in tertiary mudstones, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.3, pp.75-83, 1996.
- 6) 土田 孝 : 地盤工学ハンドブック, 第2編地盤力学, 第3章土質力学, 3.2.4 粘性土のせん断特性, 地盤工学会, pp.96-97, 1999.
- 7) Bjerrum, L. : Engineering geology of norwegian normally consolidated marine clays as related to settlements of buildings, Seventh Rankin Lecture, *Geotechnique*, Vol.17, pp.83-118, 1967.
- 8) 地盤工学会編 : 土質工学用語辞典, p.96, 1985.
- 9) Fisher, K.P., K.H. Andersen and J.Moum : Properties of an artificially cemented clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.15, pp.322-331, 1978.
- 10) 嘉門雅史, 長尾 毅 : 人工的にセメンテーションを与えた粘性土の土質工学的性質について, 第21回土質工学研究発表会発表講演集, pp.389-390, 1986.
- 11) 上 俊二 : 擬似過圧密粘土の力学的性質に関する研究, 山口大学学位請求論文, 1997.
- 12) 土田 孝, 小林正樹, 水上純一, 田中正典 : 高温再圧密による海成粘土の年代効果の再現, 港湾技術研究所報告, Vol.28, No.1, pp.121-147, 1989.
- 13) Abramson, L.W., Lee, T.S., Sharma, S. and Boyce, G.M. : Slope stability and stabilization methods, John Wiley & Sons, 1996.
- 14) 九田敬之, 三田地利之, 大河原正文, 石橋正弘 : 粘性土の残留強度に及ぼすせん断速度と応力履歴の影響, 第36回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.311-312, 2001.
- 15) Mitachi, T., Kuda, T., Okawara, M. and Ishibashi, M. : Determination of strength parameters for landslide slope stability analysis by laboratory test and inverse calculation engagement, *Journal of the Japan landslide society*, Vol.40, No.2, pp.105-116, 2003.

(平成16年8月30日受理)