

土の残留強度を測定するための 繰返し一面せん断試験の方法と結果の解釈

鈴木 素之 (社会建設工学科)

山本 哲朗 (社会建設工学科)

北村 一也 (社会建設工学専攻)

中森 克己 ((株)復建調査設計)

福田 順二 (西日本工業大学)

Method of reversal box shear test for determining residual strength of soil and exposition of test result

Motoyuki SUZUKI (Department of Civil Engineering)

Tetsuro YAMAMOTO (Department of Civil Engineering)

Kazuya KITAMURA (Graduate school of Civil Engineering)

Katsumi NAKAMORI (Fukken Co., Ltd)

Junji FUKUDA (Nishinippon Institute of Technology)

To determine residual strengths of a kaolin and a landslide clay, reversal box shear tests were carried out. In this paper the normal stress, the shear displacement rate, the overconsolidation ratio, and the disturbance and the grading of the soil samples are taken up among many factors affecting test results. Consequently, residual strength of kaolin is not significantly influenced by the normal stress above 200 kPa, the overconsolidation ratio and the shear displacement rate below 1.0 mm/min. Also, there exists no difference between residual strengths of undisturbed and disturbed samples. Furthermore, residual strength of disturbed samples passed through 0.42 mm and 0.85 mm sieves respectively, was much lower than that of sample having an original grading.

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

1. はじめに

地すべり斜面の安定解析において登場する3つの強度パラメータすなわちピーク強度, 完全軟化強度および残留強度を従来の逆算法に取り入れて, 設計強度定数を決定する方法が提案されている¹⁾. この方法は, 安定解析に採用すべき強度定数(c , ϕ)の組み合わせは, ピーク強度と残留強度との間で, 過圧密比の関数として連続的に変化するものと考え, 対象とする地盤の強度特性を反映させた形での $c - \tan \phi$ 図の利用法を提案したものである²⁾. 不攪乱土のせん断強度の決定に有効な繰返し一面せん断試験はこれらの強度パラメータを簡便に求めることができるので, この方法にお

ける必要不可欠な項目として位置付けられる.

土の残留強度に関する研究は Skempton³⁾により創始され, これまでに種々の土の残留強度特性が概略把握されたと言ってよい. また, 土の残留強度を測定するための試験方法として, 繰返し一面せん断試験^{2), 4)}などが開発されている. しかし, 地すべり調査から対策工の設計までの一連の実務において, これら土質試験はほとんど活用されていない. この背景として, 地すべり土のせん断強度を測定する場合, 不攪乱試料はもとより攪乱試料においてもすべり面土の採取が難しく, また試料が採取できたとしても礫分を含んでいる場合が多く, 粒度の面で試験の適用限界を超えることが指摘される. 繰返し一面せん断試験は実用上多くの利点

を有し、地すべり調査業務で普通に利用される土質試験として期待される。そのためには、繰返し一面せん断試験における残留強度の決定法を確立した上で、残留強度に及ぼす垂直応力、せん断変位速度、過圧密比などの影響因子を整理しておく必要がある。

本文では、繰返し一面せん断試験における双曲線近似による土の残留強度の決定法を提案するとともに、カオリンを原料とする繰返し再構成粘土の試験結果に基づいて垂直応力、せん断変位速度および過圧密比が残留強度に及ぼす影響について検討した。次いで、山口県東部の地すべり地から採取した不攪乱試料と攪乱試料の試験結果に基づいて残留強度に及ぼす試料の乱れの影響、また人工的に粒度調整した攪乱試料の試験結果に基づいて残留強度に及ぼす最大粒径の影響について検討した。

2. 既往の研究

土の残留強度は、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であり、特に過圧密粘土において問題となる³⁾。通常、土の残留強度を測定するために繰返し一面せん断試験やリングせん断試験が実施される。繰返し一面せん断試験は、Skempton³⁾が一面せん断試験において残留強度を簡単に求めるために考案したものであり、供試体のせん断方向を順次反転させることにより土に大変形を与えるものである。繰返し一面せん断試験が実施され始めたごく初期に Cullen et al.⁵⁾により試験方法が検討されている。試験装置の仕様は Nakamori et al.⁴⁾や佐野ら⁶⁾の型に代表され、Fig.1 に模式的に示すように、試験装置の構造は基本的な部分で通常の一面せん断試験装置と同じであるが、繰返しせん断を可能にする載荷機構が付加されている。繰返し一面せん断試験は一面せん断試験と同じ長所と短所を有している。ここでは本試験に特有な点のみを以下に列挙する。

- ・ 試料の大きさは小さく少量で済むことから、試験の準備が簡単であり、しかも不攪乱試料の残留強度を求めるのに都合がよい。
 - ・ 試験装置の機構がリングせん断試験よりも簡単なので、試験の実施が比較的容易である。
 - ・ せん断方向が順次反転するために、すべり面(せん断面)の状態を乱す恐れがある。
- これより、試験結果の解釈の際には上記の点に留意することが大切である。

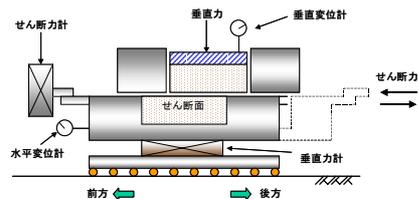


Fig.1 Outline of reversal box shear test

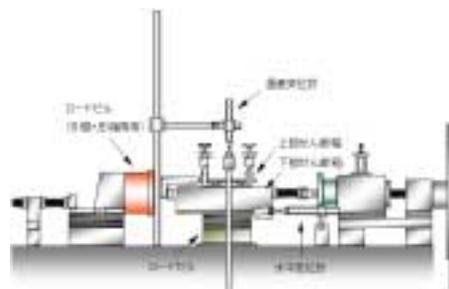


Fig.2 Essential features of test apparatus

3. 繰返し一面せん断試験の方法

(1) 試験装置

試験装置は Nakamori et al.⁴⁾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である (Fig.2 参照)。供試体は直径 60 mm、高さ 20 mm の円板である。せん断箱は上部固定・下部可動である。測定項目はせん断力、せん断変位、垂直力および垂直変位であり、下部せん断箱に高剛性ロードセルを取り付け反力板側での垂直力の測定を可能にしている。

(2) 試料

用いた試料はカオリンと地すべり土である。カオリンは工業用粘土であり、鉱物組成はカオリナイトと石英である。地すべり土は山口県東部の地すべり地のすべり面付近から不攪乱状態で採取したものである。両試料の物理特性および粒度加積曲線をそれぞれ Table 1 および Fig.3 に示す。

Table 1 Physical property of soil samples

試料	カオリン	地すべり土
s (g/cm^3)	2.618	2.687
D_{50} (mm)	0.007	0.030
D_{max} (mm)	0.200	5.100
W_L (%)	65.8	34.4
W_p (%)	41.5	17.5
I_p	23.8	16.9
F_{clay} (%)	35.3	25.5
F_c (%)	56.4	63.9
土質分類	MH	CL

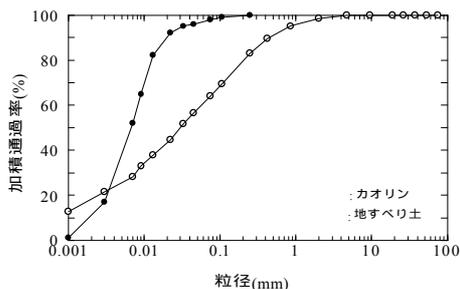


Fig.3 Grading of soil samples

(3) 試験手順

カオリンの場合，試料は液性限界の約2倍の含水比で十分に練り返した後，せん断試験における圧密応力 σ_c 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を直径6 cm，高さ2 cmの円板に成形し，所定の圧密応力 σ_c の下で24時間圧密した後，直ちに定圧せん断した。本試験では，せん断変位振幅 D ，せん断変位速度 \dot{D} ，垂直応力 N ，過圧密比 OCR を変化させている。なお，累積せん断変位 D は280 mm とした。地すべり土の場合，不攪乱試料は土塊に含まれるすべり層から切り出した。攪乱試料は使用済みの不攪乱試料を含水比が変化しないように十分こね返した。供試体は $N=98, 196, 294$ kPa の3通りで24時間圧密した後，直ちに $\dot{D}=0.1$ mm/min， $D=7$ mm， $D=140$ mmまでせん断した。さらに，この攪乱試料を0.425 mmおよび0.85 mmふるいで裏ごしし，最大粒径 D_{max} を各ふるい目に調整した試料(以後，粒度調整試料とする)に対して繰返し一面せん断試験を実施した。試験では $N=196, 147, 98$ kPa のように段階的に垂直応力を減少させている。なお，予備試験結果に基づいて，排水条件を満たす \dot{D} として0.1 mm/minを採用した。

4. 試験結果と考察

(1) 双曲線近似による土の残留強度の決定法

繰返し一面せん断試験における土の残留強度の決定法は既往の研究において明確に規定されておらず，実際には個々の判断において試験を打ち切り，残留強度が決定されている。得られるせん断応力～せん断変位曲線の形状はデータ整理における軸のスケールの取り方によって異なるので，この曲線から客観的にせん断応力が一定である残留状態を判定することは難しい。すなわち，せん断変位が十分でない場合，残留強度がいくらか高めに測定される可能性がある。著者らは，リングせん断試験において，せん断変位の大きさに依存しない客観的な残留強度の決定法として，最大せん断

断応力後のせん断応力とせん断変位角の関係の実測値に対して双曲線近似を適用し，その漸近値を残留強度と決定する方法を提案した⁷⁾。ここでは，この方法を繰返し一面せん断試験のデータ整理に応用し，応力比 σ/N (σ :せん断応力)と繰返し回数 N の関係を次の式のような双曲線関数で表す。

$$\frac{\sigma}{N} = \frac{N}{a + bN} \tag{1}$$

ここに， a および b はともに実験定数であり，それぞれ $N/(\sigma/N)$ と N の関係の実測値に対して最小二乗法によってフィッティングした直線の切片および傾きで与えられる。そして，式(1)と実測値の適合性が良好であれば，残留状態における応力比は上式の漸近値として次の式のように決定される。

$$\left(\frac{\sigma}{N}\right)_r = \frac{1}{b} \tag{2}$$

Fig.4 に典型的な繰返し一面せん断試験の結果を示す。図の縦軸は応力比 σ/N ，横軸は累積せん断変位 D である。試料はカオリンであり，試験条件は $\dot{D}=0.1$ mm/min， $D=7$ mm， $N=98$ kPa，OCR=1.0 である。各サイクルにおいて σ/N は最大値を示した後，減少・再増加している。ここで， σ/N の最大値($\sigma/N)_{max}$ と最小値($\sigma/N)_{min}$ ， $D=0$ (供試体がせん断前の初期の位置に戻る)ときの値($\sigma/N)_{D=0}$ を読み取り，これらに対応する N を次の式から求める。

$$N = \frac{D}{4 \cdot \left| \frac{D}{D} \right|} \tag{3}$$

また，式(3)を式(1)に代入すると，次のような式が得られる。

$$\frac{\sigma}{N} = \frac{D}{4a \left| \frac{D}{D} \right| + b} \tag{4}$$

Fig.5 に ($\sigma/N)_{max}$ ，($\sigma/N)_{min}$ および ($\sigma/N)_{D=0}$ と N の関係を示す。($\sigma/N)_{max}$ は N の増加に対して若干変動しつつ減少するのに対して，($\sigma/N)_{min}$ および ($\sigma/N)_{D=0}$ は N の増加に対して単調に減少する。この理由として， $D=0$ のときには供試体断面面積の変化の影響が除去されることが考えられる。($\sigma/N)_{D=0}$ と ($\sigma/N)_{min}$ の値はほぼ等しいので，本文では ($\sigma/N)_{D=0}$ とそのときの N に対して上述の双曲線近似による残留強度の決定法を適用する。Fig.6 に実験定数 a, b を決定するた

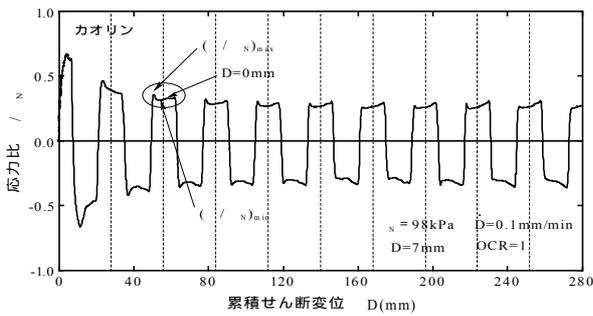


Fig.4 Relationship between σ/N and D

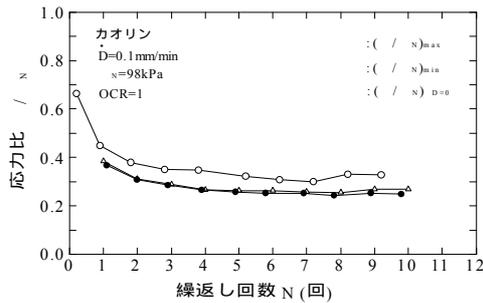


Fig.5 Relationship between σ/N and N

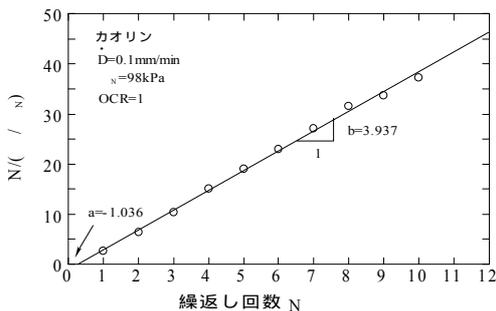


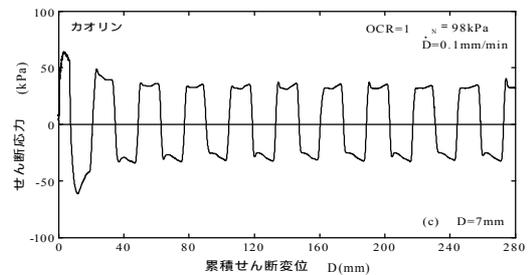
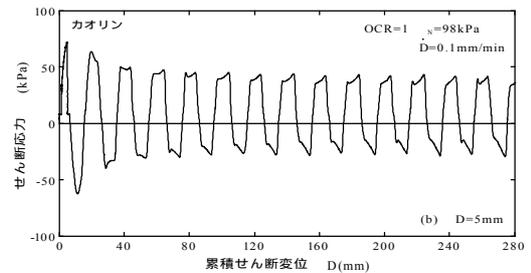
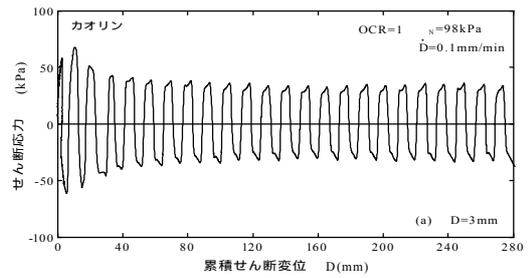
Fig.6 Relationship between $N/(\sigma/N)$ and N

めの $N/(\sigma/N)$ と N の関係の一例を示す。 $(\sigma/N)_r$ は b の逆数として与えられる。

Figs.7 に D を変化した場合の σ/N と D の関係を示す。いずれの D においても D が大きくなるにつれて σ/N は小さくなる。Fig.8 に D を変化した場合の $N=10$ のときの応力比 $(\sigma/N)_{N=10}$ によって正規化した応力比 $(\sigma/N)/(\sigma/N)_{N=10}$ と N の関係を示す。 D が大きいほど、少ない N で正規化した応力比は一定値に収束する。これより、これ以降の試験ケースでは $D=7$ mm とした。

5. 繰返し再構成粘土の残留強度特性

(1) 典型的な試験結果



Figs.7 Relationship between σ/N and D under different D

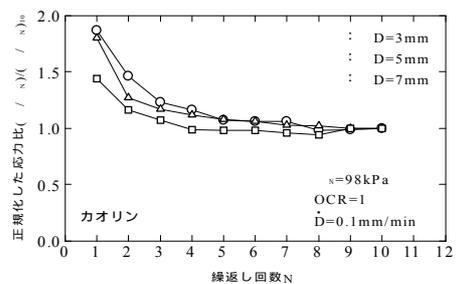


Fig.8 Normalized stress ratio plotted against N

Table 2 にカオリンの試験ケースと供試体の初期状態を示す。Fig.9 に $c_u=49, 98, 196, 294, 392$ kPa の場合における圧密過程における対数表示の圧密時間 t と圧密沈下量 v の関係を示す。 $\sigma_u=392$ kPa の場合を除いて、 c_u が大きくなるほど、当然ながら v は大きくなる。Fig.10 にこのときの σ/N と D の関係を示す。いずれの N においても最初のせん断過程 ($N=1$) で σ/N は単調増加して最大値を示す。それ以降 ($N \geq 2$) では σ/N は

Table 2 Test cases and results of kaolin

試験番号	w_0 (%)	ρ_0 (g/cm ³)	ρ_w (g/cm ³)	S_{r0} (%)	e_0	N (kPa)	OCR	\dot{D} (mm/min)	D (mm)
1	64.5	1.595	0.970	98.0	1.764	98	1	0.02	7
2	66.5	1.613	0.969	100.0	1.768	98	1	0.1	7
3	67.8	1.633	0.973	100.0	1.756	98	1	0.2	7
4	65.6	1.612	0.974	100.0	1.754	98	1	1.0	7
5	65.9	1.586	0.956	97.9	1.804	98	1	0.1	3
6	68.1	1.646	0.979	100.0	1.739	98	1	0.1	5
7	66.5	1.613	0.969	100.0	1.768	98	1	0.1	7
8	63.1	1.469	0.901	86.6	1.906	98	1	0.1	7
9	62.5	1.536	0.945	92.5	1.769	196	2	0.1	7
10	63.6	1.519	0.928	91.5	1.820	392	4	0.1	7
11	63.9	1.536	0.937	93.3	1.794	784	8	0.1	7
12	66.7	1.549	0.929	96.1	1.871	49	1	0.1	7
13	63.1	1.469	0.901	86.6	1.906	98	1	0.1	7
14	59.1	1.588	0.998	95.3	1.624	196	1	0.1	7
15	56.7	1.601	1.022	95.1	1.562	294	1	0.1	7
16	51.0	1.661	1.100	96.7	1.380	392	1	0.1	7

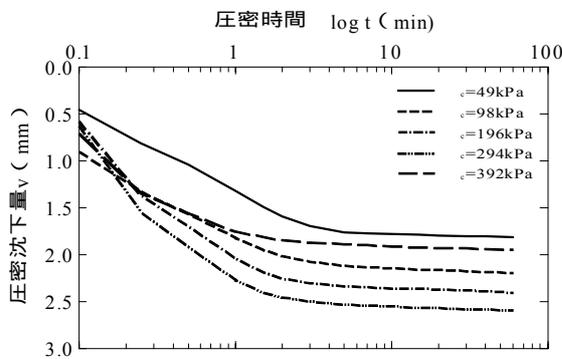


Fig.9 Consolidation curves of kaolin

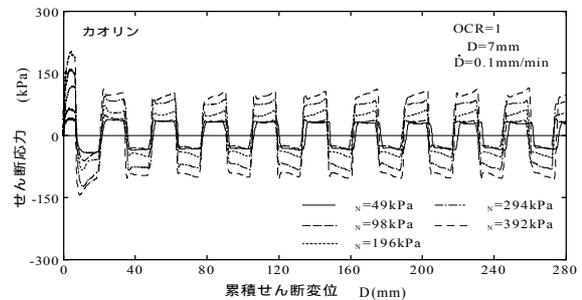


Fig.10 Relationship between OCR and D under different N

D 曲線はほぼ同じ形状であるものの、 ρ_0 の最大値は小さくなる。Fig.11 に垂直変位 v と D の関係を示す。

N の大きさによって v に大きな差はみられない。

Fig.12 に ρ_0 と N の関係を示す。 ρ_0 が正の領域におけるピークおよび残留状態における強度定数はそれぞれ $\rho_0=28.8^\circ$, $c_p=0$ kPa および $\rho_0=14.8^\circ$, $c_r=0$ kPa である。 ρ_0 が負の領域におけるピークおよび残留状態における強度定数はそれぞれ $\rho_0=22.6^\circ$, $c_p=0$ kPa および $\rho_0=14.2^\circ$, $c_r=0$ kPa である。 ρ_0 はせん断箱を押し方向を正, 引く方向を負としており, 繰返しせん断は押し側から開始するので, 引き側の ρ_0 は当然のことながら一回せん断されているので, 押し側の ρ_0 よりも小さくなっている。他方, ρ_0 は押し側, 引き側で大きな違いがみられない。本文では ρ_0 が正となる押し側のデータを整理した。

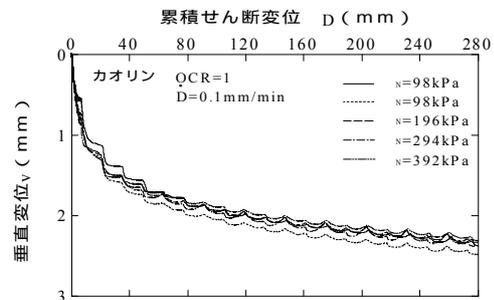


Fig.11 Relationship between v and D under different N

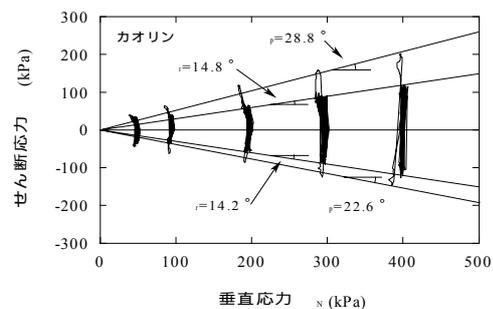


Fig.12 Stress paths obtained from reversal box shear test on kaolin

Fig.13 にピークおよび残留状態における応力比(ρ_0 / N_p)および(ρ_0 / N_r)と初期垂直応力 N_0 ($= \rho_0$)の関係を示す。 $N_0=294$ kPa 以上で(ρ_0 / N_p)は N_0 に対して一定になり, $N_0=196$ kPa 以上で(ρ_0 / N_r)が N_0 に対

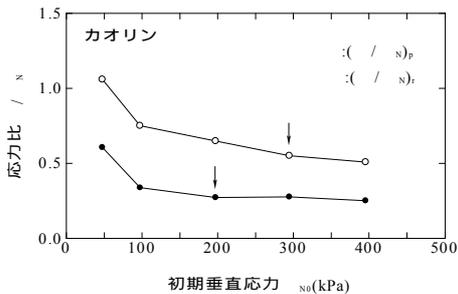


Fig.13 Relationship between τ / N and N_0

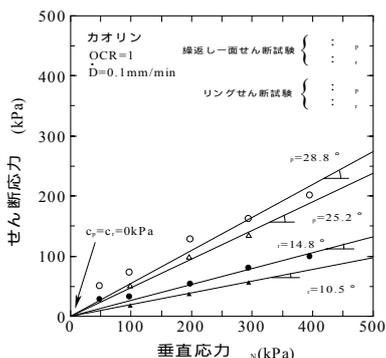


Fig.14 Strength lines from reversal box and ring shear tests

して一定になる。このことは、比較的高い垂直応力の範囲ではピーク強度および残留強度はともに粘着力をゼロとした破壊線と良く適合するといえる。逆に、低い垂直応力の範囲ではピーク強度および残留強度は高い垂直応力で描いた破壊線よりも高くなり、破壊包絡線は湾曲化する。

Fig.14 では繰返し一面せん断試験とリングせん断試験から得られたピークおよび残留状態の強度定数を比較している。試料はカオリンであり、供試体の作製方法は同じである。両試験ともに $\dot{D}=0.1 \text{ mm/min}$ である。垂直応力は、繰返し一面せん断試験では 98 kPa 、リングせん断試験では 196 kPa としている。繰返し一面せん断試験から得られた ϕ_p と 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、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するため、せん断面の土粒子のせん断方向への定方向配列が乱されることが考えられる。

(4) せん断変位速度の影響

Fig.15 に $\dot{D}=0.02, 0.1, 0.2, 1.0 \text{ mm/min}$ の場合における τ と D の関係を示す。 τ - D 曲線は多少なりと

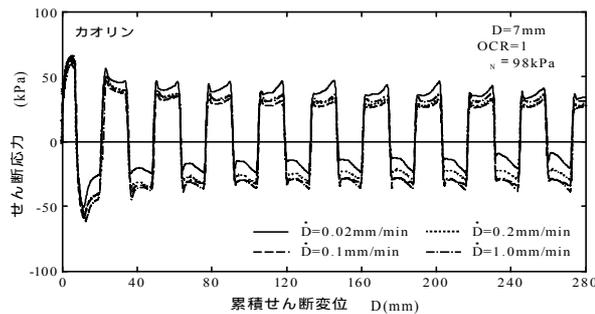


Fig.15 Relationship between τ and D under different \dot{D}

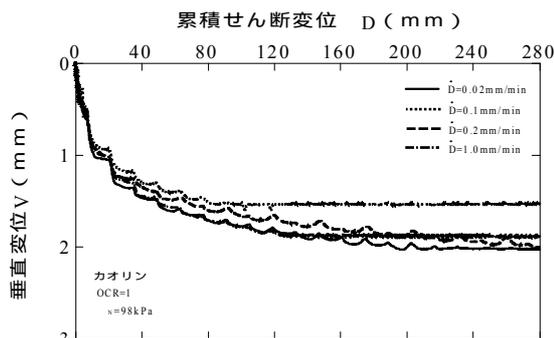
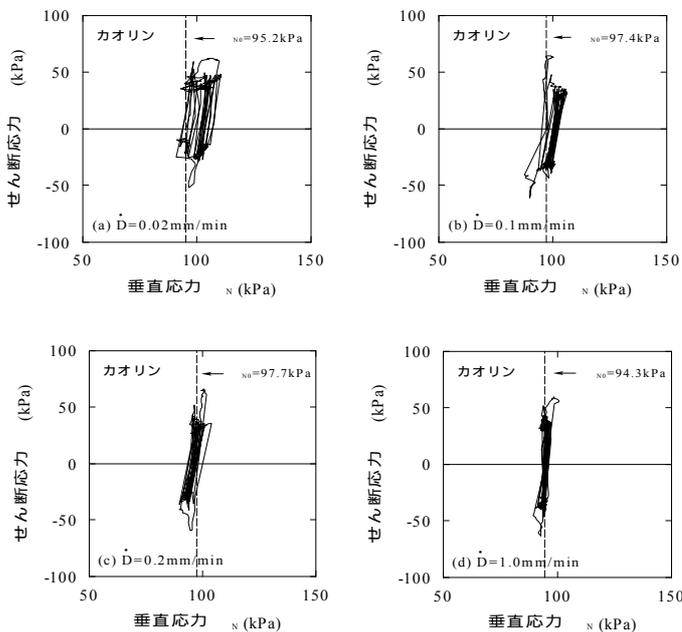


Fig.16 Relationship between v and D under different \dot{D}



Figs.17 Stress paths of kaolin under different \dot{D}

も \dot{D} の影響を受けるようである。Fig.16 には v と D の関係を、Figs.17 には \dot{D} が異なる場合の応力経路を示す。 \dot{D} が大きいほど、繰返しせん断に伴う N の変化は小さい。 \dot{D} が大きいほど、供試体は非排水条件すなわち定体積条件に近くなり、供試体とせん断箱との間で

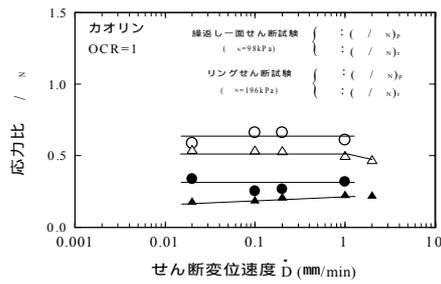


Fig.18 Relationship between v/N and D for kaolin

生じる周面摩擦力が小さくなるためと考えられる。Fig.18 に $(v/N)_p$ および $(v/N)_r$ と D の関係を示す。 $D=0.02 \sim 1.0 \text{ mm/min}$ の範囲では、 $(v/N)_p$ および $(v/N)_r$ はともに D に対してほぼ一定である。 $D=0.2 \text{ mm/min}$ 以上の範囲では $(v/N)_p$ および $(v/N)_r$ がわずかに減少するようである。これは、せん断面に発生する過剰間隙水圧によって有効垂直応力が減少したことによるものと考えられる。比較のために、リングせん断試験から得られた結果を示すと、 $(v/N)_p$ は D の増加に対してほぼ一定であるが、 $(v/N)_r$ は D の増加に対して若干増加する。

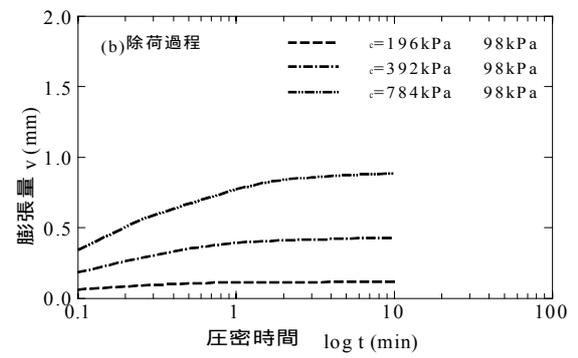
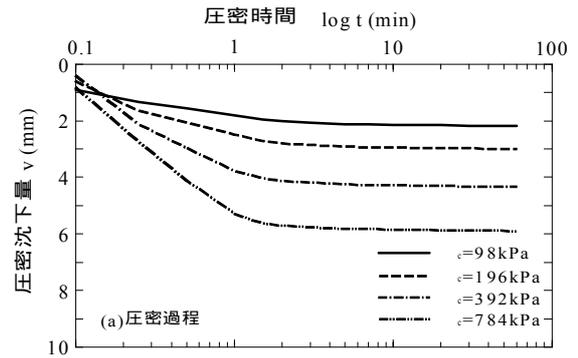
(5) 過圧密比の影響

Figs.19 に $OCR=1.0, 2.0, 4.0, 8.0$ の場合における圧密挙動と膨潤挙動を示している。Fig.20 にこれに引き続く v と D の関係を示す。 OCR が大きければピーク強度が大きくなっており、2 回目以降においてはほぼ同じ挙動を示している。また、Fig.21 に v と D の関係を示す。 OCR が大きいほど、供試体の体積膨張が顕著に現れている。Figs.22 には OCR を変化させた場合の応力経路を、Fig.23 には $(v/N)_p$ および $(v/N)_r$ と OCR の関係を示す。 $(v/N)_p$ は OCR の増加に対して増加するのに対して、 $(v/N)_r$ は OCR の増加に対してほぼ一定である。

5. 不攪乱および攪乱地すべり土の残留強度特性

(1) 地すべり地の概要

地すべり土は、山口県東部にある地すべり地のすべり面付近から不攪乱状態で採取したものである。現場の地質は中生代ジュラ系の玖珂郡で、岩種は泥岩である。この泥岩は活断層によって破碎され、亀裂面に沿って断層ガウジを挟在する。当該地すべりはこの泥岩層中で粘土化の進んだゾーンをすべり面として発生したものとみられる。



Figs.19 Consolidation and swelling curves of kaolin

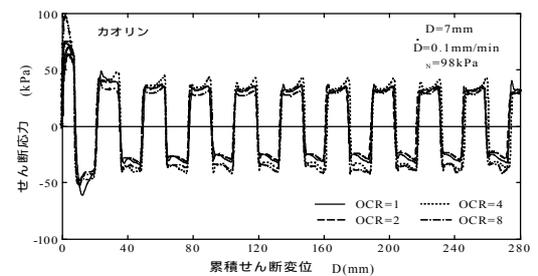


Fig.20 Relationship between v/N and D under different OCR

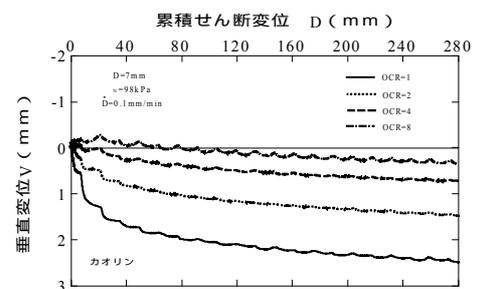


Fig.21 Relationship between v and D under different OCR

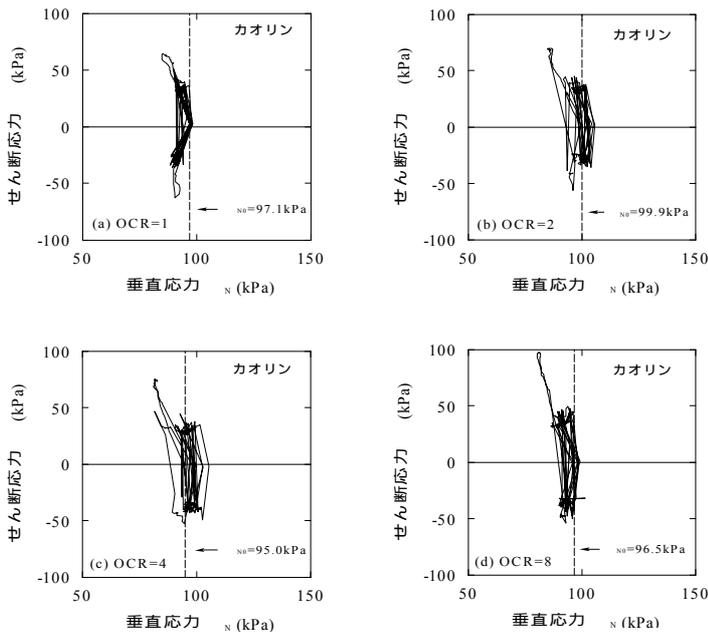


Fig.22 Stress paths of kaolin under different OCR

(2) 圧密挙動

Table 3 に地すべり土の試験ケースと供試体の初期状態量を示す。Figs.24(a),(b)に地すべり土における不攪乱試料と攪乱試料の圧密挙動を示す。各圧密応力における最終沈下量は不攪乱試料の方が攪乱試料よりも大きい。両試料ともほぼ同じ乾燥密度にしているものの、不攪乱試料の方が攪乱試料よりも圧縮性が高い。この理由として、不攪乱試料は自然状態において土粒子間に膠結物質が付いた状態で骨格構造を有しているのに対して、攪乱試料は締固めによって土粒子間のインターロッキングした状態で骨格構造を有しているものと考えられ、圧密沈下量は不攪乱試料の方が大きいと考えられる。また、圧密沈下量は載荷に対して即時的に生じ、その後ほぼ一定となっており、軟弱粘土でみられるような圧密挙動はみられない。

(3) 繰返しせん断挙動と強度特性

a) 不攪乱および攪乱試料の場合

Skempton³⁾は、残留強度は応力履歴に依らず同じであることを示唆している。また、Bishop et al.⁸⁾や Townsend and Girbert⁹⁾も不攪乱試料と繰返し試料の残留強度に差異はないことを述べている。一方 Nakamori et al.⁴⁾は繰返し一面せん断試験により測定した不攪乱試料と繰返し試料の残留強度が異なること、さらに、電子顕微鏡による観察結果に基づいて、それはせん断面に形成される間隙構造の差異に起因することを示している。Figs.25(a),(b)にそれぞれ不攪乱試料および攪乱試料の τ / N と OCR の関係を示す。試験時の垂直応力は $N = 98, 196, 294$ kPa である。不攪乱試料の場合、最初のせん断過程 ($D=7$ mm) では単調増加し、最大値を示す。2 往復以降では τ / N 曲線はほぼ同じ形状であるが、その最大値は小さくなっている。攪乱試料の場合、不攪乱試料ほどに明確な強度低下を示さず、 D が増えても τ / N はほとんど変わらないようである。Figs.26(a),(b)にそれぞれ不攪乱試料および攪乱試料の v と D の関係を示す。不攪乱および攪乱試料ともに D の増加に伴って v は増加している。また、せん断方向の反転直後に供試体は沈下し、せん断が進むにつれて v が減少するようである。これはせん断方向が反転したときにせん断面の土粒子の配列状況が乱れ、緩んだ部分が密度増加したものと考えられる。Figs.27 に不攪乱試料と攪乱試料のピーク強度線を示す。不攪乱試料の場合には $\phi_p = 41.9^\circ$ および $c_p = 27.0$ kPa、攪乱試料の場合には $\phi_p = 39.4^\circ$ および $c_p = 0$ kPa が得られた。Figs.28 に不攪乱試料と攪乱試料の残留強度線を示す。不攪乱試料、攪乱試料ともに $\phi_r = 39.4^\circ$ および $c_r = 0$ kPa が得られた。Nakamori et al.⁴⁾は不攪乱試料と攪乱試料の残留強度が必ずしも同じ値にならないことを指摘しているが、その実験では攪乱試料は不攪乱試料を液性限界以上の含水比で繰返した後、2.0 mmふるいを通過させているので、両者の物理的性質は変化している点に注意する必要がある。本試験では、攪乱試料は不攪乱試料と同じ含水比で繰返した後、粒度を変化させず供試体を作製している。以上より、不攪乱試料と攪乱試料の残留強度は本質的には同じ値になると考えられる。

b) 粒度調整試料の場合

Fig.29 にそれぞれ最大粒径 D_{max} を 0.85 mm および 0.425 mm に調整した試料の τ / N と D の関係を示す。試験時の N は $D=140$ mm ごとに段階的に減少させている。いずれも N の各段階において τ / N の明確な低下はみられず、 $\tau / N \sim D$ 曲線は $D_{max}=0.85$ mm の方が $D_{max}=0.425$ mm よりも総じて高いようである。Fig.30 に最大粒径 D_{max} を 0.85 mm と 0.425 mm に調整した試料の残留強度線を示す。0.85 mmふるい通過試料から $\phi_r = 40.5^\circ$ 、 $c_r = 0$ kPa、

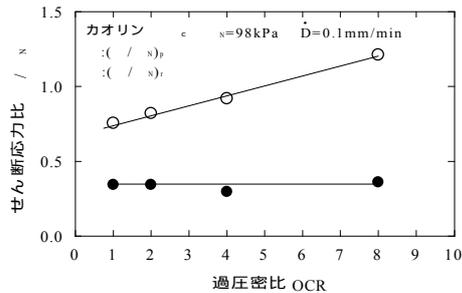
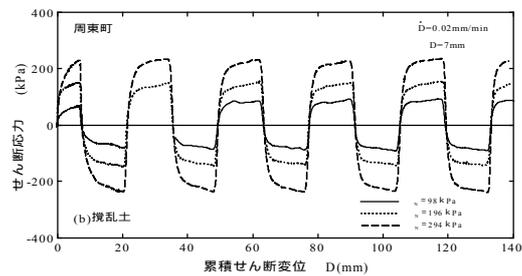
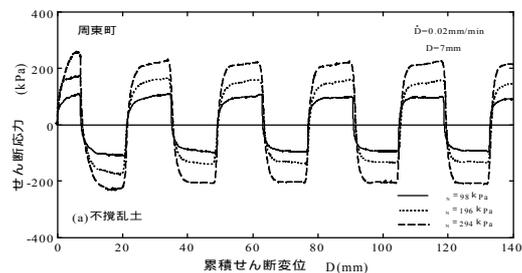
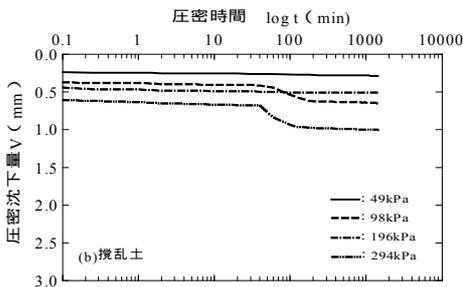
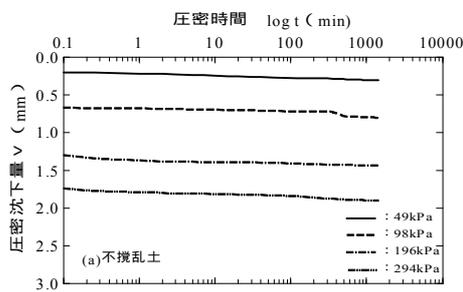


Fig.23 Relationship between τ / N and OCR

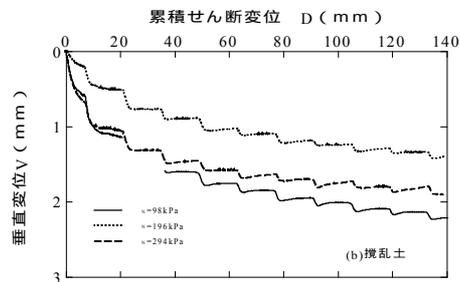
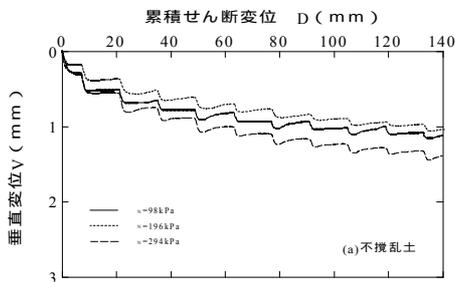
Table 3 Test cases and results of landslide clay

試験番号	試料の状態	W_0 (%)	ρ_d (g/cm^3)	e_0	N (kPa)	\dot{D} (mm/min)	D_{max} (mm)
1	不攪乱	18.4	1.648	0.615	98	0.02	5.1
2	不攪乱	19.1	1.658	0.603	196	0.02	5.1
3	不攪乱	19.1	1.632	0.640	294	0.02	5.1
4	攪乱	19.2	1.648	0.630	98	0.02	5.1
5	攪乱	19.1	1.658	0.621	196	0.02	5.1
6	攪乱	17.5	1.632	0.646	294	0.02	5.1
7	攪乱	8.6	1.646	-	196 147 98	1.0	0.425
8	攪乱	8.6	1.646	-	196 147 98	1.0	0.850



Figs.24 Consolidation curves of undisturbed and disturbed samples

Figs.25 Relationship between τ and D for undisturbed and disturbed samples



Figs.26 Relationship between v and D curves of undisturbed and disturbed samples

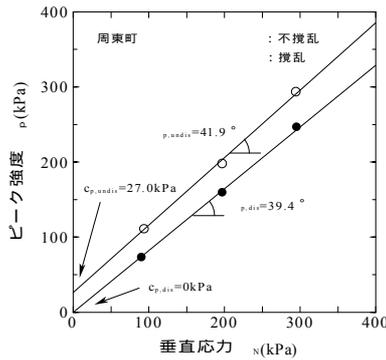


Fig.27 Peak strength lines of undisturbed and disturbed samples

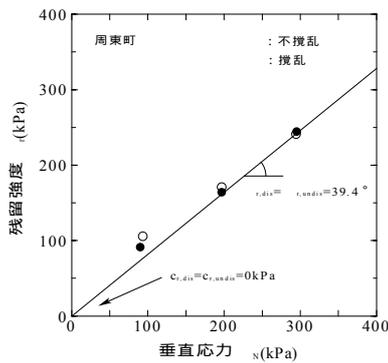


Fig.28 Residual strength lines of undisturbed and disturbed samples

0.425 mmふるい通過試料から $r_i=31.7^\circ$, $c_i=0$ kPa を得た。0.425~0.85 mmの粒径範囲の土粒子を除去した結果, c_r はゼロのまま, r_i は約 8.8° も低下する。したがって, 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。

5. 結論

繰返し一面せん断試験における双曲線近似を適用した土の残留強度の決定法を提案するとともに, カオリンおよび地すべり土の試験結果に基づいて 垂直応力, せん断変位速度, 過圧密比, 試料の乱れ, 粒度の影響について検討した。本文で得られた知見を以下に要約する。

- (1) 繰返し一面せん断試験において双曲線近似による残留強度の決定法を提案した。
- (2) 繰返し一面せん断試験における残留強度はせん断速度の影響をほとんど受けない。
- (3) 残留強度は過圧密比の影響を受けない。
- (4) ピークおよび残留状態における強度定数は繰返

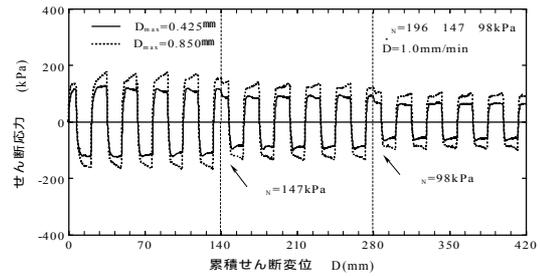


Fig.29 Shear behavior of samples of which maximum grain size changed artificially

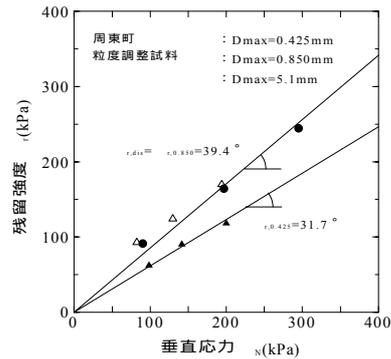


Fig.30 Residual strength lines of samples having original and changed gradings

し一面せん断試験の方がリングせん断試験よりも大きい。

- (5) 不攪乱試料と攪乱試料の残留強度はほぼ同じである。
- (6) 残留状態における強度定数は試料の最大粒径の影響を受ける。

謝辞：復建調査設計(株)東京支社長福田直三氏には不攪乱試料の入手で便宜を図って頂いた。大学院生村上俊秀氏(現 井森工業株)ならびに小山泰正氏には試験の実施と結果の整理でご助力頂いた。最後に復建調査設計(株)所有の繰返し一面せん断試験装置を使用させて頂いたことに対して関係各位に感謝の意を表す次第である。

参考文献

- 1) Mitachi, T., Okawara, M. and Kawaguchi, T.: Method for determining design strength parameters for slope stability analysis, *Proc. International Symposium on Slope Stability Engineering: Geotechnical and Geoenvironmental Aspects*, Vol.2, pp.781-785, 1999.
- 2) 大河原正文, 三田地利之, 小野寺賢一: 地すべり解析用小型自動繰返し一面せん断試験装置の開発と試験方法の最適化, 地すべり, Vol.37, No.1, pp.35-37, 2000.
- 3) Skempton, A.W.: Long-term stability of clay slopes,

- Geotechnique*, Vol.14, No.2, pp.77-102, 1964.
- 4) Nakamori, K., Yang, P. and Sokobiki, H.: Strength characteristics of undisturbed landslide clays in tertiary mudstone, *Soils and Foundations*, Vol.36, No.3, pp.75-83, 1996.
 - 5) Cullen, R.M. and Donald, I.B.: Residual strength determination in direct shear, *Proc.1st Australia-New Zealand Conference on Geomechanics*, Vol.1, pp.1-10, 1971.
 - 6) 佐野 彰, 三田地利之, 澁谷 啓, 大河原正文: 繰返し一面せん断試験による軟岩の残留強度測定と地すべり安定問題への適用, 直接型せん断試験の方法と適用に関するシンポジウム発表論文集, pp.239-244, 1995 .
 - 7) 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/ - 40, pp.141-158, 1997 .
 - 8) Townsend, F.C. and Gilbert, P.A.: Tests to measure residual strengths of some clay shales, *Geotechnique*, Vol.23, No.2, pp.267-271, 1973.
 - 9) Bishop, A.W., Green, G.E., Garga, V.K., Andresen, A. and Brown, J.D.: A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength, *Geotechnique*, Vol.21, No.4, pp.273-328, 1971.

(平成14年12月27日受理)