# 地震時に地滑りを起こす層理面の静的および動的リングせん断特性

Static and Dynamic Ring Shear Characteristics on Bedding Plane as Slip Surface of Earthquake-induced Landslide

鈴木 素之 Motoyuki SUZUKI(山口大学大学院創成科学研究科) 井上 優朋 Yuho INOUE (山口大学大学院理工学研究科博士前期課程) Nguyen Van HAI (山口大学大学院理工学研究科博士後期課程)

本研究では、地震時に地滑りを引き起こす可能性のある層理面の静的および動的せん断特性を解明するため、固結強度の異なる土層を貼り合わせた供試体を作製し、それに対する2種類のリングせん断試験を実施した。一つは通常の圧密定圧定速リングせん断試験、もう一つは圧密定体積繰返し載荷リングせん断試験である。また、土試料はカオリン粘土と若干の粘性を与えた豊浦標準砂である。単一および貼り合わせ供試体に対する試験結果をもとに、せん断初期からせん断破壊を経て残留状態に至るまでのせん断挙動を調べた。本文では、静的および動的載荷時における層理面を含む試料のせん断挙動・強度特性について報告する。

キーワード: 層理面, セメンテーション, 繰返し載荷, 速度効果 (IGC: D-6)

#### 1. はじめに

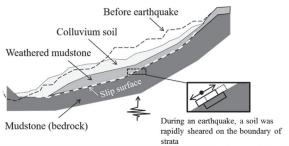
地震時あるいはその直後に発生する地滑りは、一般に 地震地滑りと呼称され、降雨や融雪が誘因となって発生 する地滑りとは異なり、急激に破壊が進展し大規模かつ 長距離滑動する特徴がある。一度発生すれば甚大な斜面 災害になる恐れがあるため、地震地滑りの発生の予測と その対策は重要な課題であるといえる。

地震地滑りに関する研究としては、平成7年兵庫県南 部地震 1), 平成 16 年新潟県中越地震 2~4)などで発生した 地滑りに関して報告がなされている。図-1に新潟県中越 地震における尼谷地地すべりの事例 5を示しているが、 この地滑りは泥岩の基盤岩と風化層との境界面で発生し たとみられている. 木下ら 4)は、新第三紀層地帯における 特定の層理面をすべり面とした地滑りが発生しているこ とを報告している.このことから、層理面のような強度 や透水性の力学的不連続面が斜面内の潜在的弱面となっ て、地震時にそれをすべり面として地滑りが発生するこ とを示唆している.一方,層理面の力学挙動については, Wakai et al.3), 木下ら4, 小松らのにより解明がなされて いるが、土層の境界面である層理面の静的あるいは動的 せん断挙動・強度特性は必ずしも十分に明らかになって いない. 特に, これらの動的強度特性は地震時の地滑り 斜面の安定性評価を行うために必要となる.

そこで、本研究では、固結強度の異なる固結土や非固結土を調製し、それらを貼り合わせることで、人工的な層理面を含む供試体を模造した。これらの供試体に対して静的および動的リングせん断試験を実施し、せん断破壊に至るまでのせん断挙動および強度特性を明らかにすることを目的とした。本研究で企画した実験では、カオリンあるいは豊浦標準砂を母材として、練返し再構成試料から作製した供試体(本研究では非固結試料と称す)

と、それにセメント系固化材を添加して固結強度を持たせた供試体(固結試料と称す)、および両者を貼り合わせた2層供試体に対してそれぞれ圧密定圧定速リングせん断試験(以下、静的載荷試験とする)を行い、各供試体の単調せん断挙動、ピークおよび残留強度特性を調べた.また、圧密定体積繰返し載荷リングせん断試験(以下、動的載荷試験とする)を実施し、せん断破壊に至るまでの繰返しせん断挙動・強度特性を調べた.本文では、これらのリングせん断試験結果に基づいて、各供試体のせん断破壊に至るまでの繰返しせん断挙動、破壊時の応力比と破壊に至るまでの繰返し回数の関係を中心に考察した.また、単調せん断挙動と繰返しせん断挙動の関係やせん断変位速度の影響を考察した.

### Amayachi landslide



Original drawing by PWRI (http://www.pwri.go.jp/jpn/aoout/pr/puoncation/nignews/nn59/newsu2.ntm)

図-1 尼谷地地滑りにおける層理面をすべり面として発生した地震地滑り(文献 5)の原図に著書らが加筆・修正した)

# 2. 静的および動的載荷リングせん断試験

# 2.1 圧密定圧定速リングせん断試験

写真-1 に圧密定圧リングせん断試験装置,図-2 に同装置の模式図を示す.設定した垂直応力のN,せん断変位速



写真-1 静的載荷リングせん断試験装置

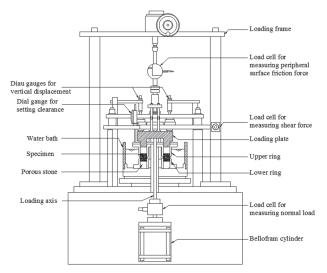


図-2 静的載荷リングせん断試験機(模式図)

度δの下で円周方向の変位制御方式で供試体を回転せん 断した, 本装置は供試体を収めるリングせん断容器, 垂 直力を加える装置, せん断力を加える装置から主に構成 される. せん断ではせん断容器の上部リングが固定され, 下部リングが回転する機構になっている。計測項目はせ ん断力,垂直力,垂直変位(2箇所),リング周面摩擦力 である. 供試体の寸法は外径 10cm, 内径 6cm, 高さ 2cm である. 供試体は底面から高さ 1cm のレベルでせん断さ れる. 直接せん断試験では供試体の周面に発生する摩擦 力は供試体が収縮する場合には鉛直上向きに, 供試体が 膨張する場合には鉛直下向きにそれぞれ生じるので、測 定したリング周面摩擦力を供試体断面積で除したものを 全垂直応力から収縮の場合は差し引き(膨張の場合は全 垂直応力に加える), せん断面に作用する正味の垂直応力 を算出した. 7). 本研究では試験中に測定したリング周面 摩擦力を考慮して, せん断面上の平均的な垂直応力を算 出した  $^{8)}$ . また、せん断変位  $\delta$  (mm) は内径と外径の中 間の回転変位であり、環状供試体の中心における回転角 であるせん断変位角 $\theta$  (rad) と併用した.

本試験で用いた試料はカオリンである. 表-1 にカオリンの物理的性質を示す. 非固結試料を作製する場合, 粉

表-1 カオリンの物理特性

Sample name	$\rho_s$ (g/cm3)	w <sub>⊥</sub> (%)	W P (%)	$I_{P}$	F <sub>clay</sub> (%)
Kaolin	2.627	78.9	41.4	37.5	90.2

末状のカオリンに初期含水比が液性限界の 2 倍になるように純水を加えて練り返し、数時間脱気した後、せん断試験における圧密圧力  $\sigma$  の 85%の圧力で予圧密し、直径 15 cm、高さ約 10 cm の円柱状試料を作成した.供試体は予圧密試料からトリミング法により成形した.固結供試体の場合、練り返し時に一般軟弱土用セメント系固化材(以下、固化材と略記)を乾燥質量比率 2%で添加し十分に撹拌混合した後、非固結試料の場合と同様に、予圧密した.試料は予圧密後 3 日間養生した後、供試体を切り出した.図-3 に単一および貼り合わせ供試体の概念図 9 を示す.貼り合わせ供試体は非固結供試体および固結供試体をそれぞれ高さ 1 cm に成形し、固結供試体を下部、非固結供試体を上部になるように貼り合わせて作製した.

# 2.2 圧密定体積繰返しリングせん断試験

写真-2 に圧密定体積繰返し載荷リングせん断試験装置 を、図-4に同試験機の模式図を示す. 地震時の繰返し載 荷を再現するため、Bishop 型リングせん断試験装置に定 体積制御装置および繰返し載荷装置を搭載したものであ る. 定体積条件でせん断応力 τ を円周方向に所定の周波 数で反転させながら繰返し載荷せん断を行うことができ る. せん断では静的載荷リングせん断試験装置と同様に 上部リングが固定,下部リングが回転する機構になって いる. 測定項目はせん断力, 垂直力, せん断変位, 垂直変 位(2箇所),リング周面摩擦力の5項目である.この試 験で用いた試料はカオリンと豊浦標準砂である.供試体 の寸法は外径 7 cm, 内径 4.2 cm, 高さ 2 cm であり, 底面 から高さ 1cm のレベルでせん断される. カオリンの供試 体の作製は、前述の単調せん断試験と同様である、豊浦 標準砂の供試体は, 非固結豊浦調整砂(以下, 非固結砂と 略記), 固結豊浦調整砂(以下, 固結砂と略記) および貼 り合わせ豊浦調整砂(以下, 貼り合わせ砂と略記)であ る.表-2に非固結,固結砂の配合条件を示している.豊 浦標準砂の物理特性は土粒子密度 2.639 g/cm3, 均等係数 2.1, 曲率係数 1.0 である. 豊浦標準砂は 0.85 mm ふるい を通して粒度調整し乾燥状態で用いた. また, 砂に粘性 を与えるため助材としてベントナイト(土粒子密度 2.716 g/cm<sup>3</sup>, 液性限界 479 %, 塑性限界 37 %), 固結強度を与 えるため安定材として前出の固化材を添加した. 図-5 に 固結, 非固結および貼り合わせ供試体の概念図を示す.

# 3. カオリンに対する静的リングせん断特性

# 3.1 試験手順および条件

供試体をリングせん断容器に設置した後、所定の $\sigma_c$ で 圧密した.  $\sigma_c$ の載荷時間は3t法により60 min とした. 圧

表-3	静的載荷	IJ	ング	ナム	断試験	$\mathcal{O}$	ケース	と結果

Soil sample	Test No.	$\sigma_{ m N}$	δ	$\theta$	d	$ au_{ m p}$	$ au_{ m r}$
Son sample	1031110.	(kPa)	(mm/min)	(deg/min)	(mm)	(kPa)	(kPa)
	1-1	98	0.2	0.29	0.1	53.1	18.1
	1-2	196	0.2	0.29	0.1	102.5	42.4
	1-3	392	0.2	0.29	0.1	184.6	82.6
Non-cemented kaolin (0%)	1-4	196	0.02	0.029	0.1	98.5	31.8
	1-5	196	0.1	0.145	0.1	97.8	33.1
	1-6	196	1	1.45	0.1	99.0	44.1
	1-7	196	10	14.5	0.1	80.4	51.8
	2-1	98	0.2	0.29	0.1	78.1	42.0
	2-2	196	0.2	0.29	0.1	123.9	63.7
	2-3	392	0.2	0.29	0.1	215.2	135.1
Cemented kaolin (2%)	2-4	196	0.04	0.058	0.1	121.3	61.4
	2-5	196	2	2.9	0.1	116.5	64.5
	2-6	196	6	8.7	0.1	130.5	79.4
	2-7	196	20	29	0.1	124.1	83.3
	3-1	98	0.2	0.29	0.1	67.9	21.6
	3-2	196	0.2	0.29	0.1	92.7	46.7
Combined kaolin (0%+2%)	3-3	392	0.2	0.29	0.1	147.0	66.2
	3-4	196	0.04	0.058	0.1	95.7	28.8
	3-5	196	10	14.5	0.1	85.2	51.3
	3-6	196	20	29	0.1	82.1	55.6

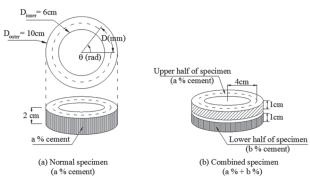


図-3 単一および貼り合わせ供試体の概念図 9

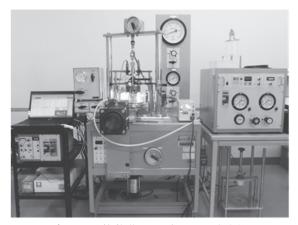


写真-2 動的載荷リングせん断試験装置

表-2 試料の配合条件

Sample name	Sand (%)	Bentonite (%)	Cement (%)	Water (%)	Total (%)
Non-cemented sand (0%)	75.6	5.7	0.0	18.7	100
Cemented Sand (2%)	73.7	5.6	2.0	18.7	100

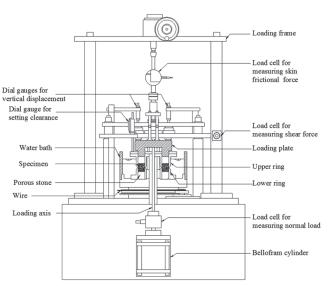


図-4 圧密・定体積繰返し載荷リングせん断試験置 (模式図)

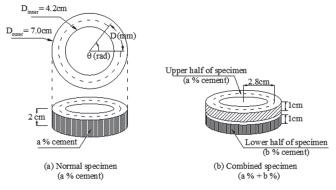
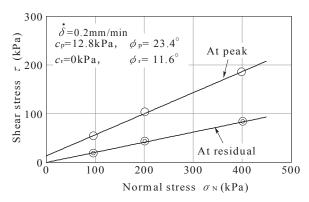
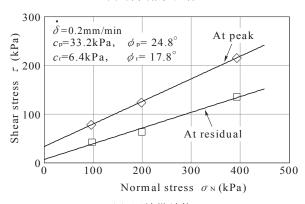


図-5 単一および貼り合わせ供試体(概念図) 9)



# (a) 非固結供試体



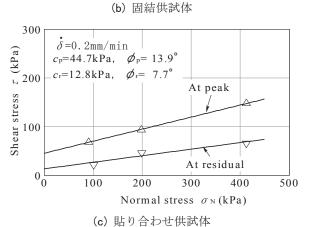


図-6 ピークおよび残留状態強度線

密終了後,上下部リングの隙間 d,せん断変位速度 $\delta$ を設定した後,直ちに定圧定速せん断を開始した.  $\mathbf{表}$ - $\mathbf{3}$  に圧密定圧定速リングせん断試験ケースと結果を示す. なお,リングせん断容器を水浸させた状態で試験を行った.

# 3.2 双曲線近似による土の残留強度の決定法

せん断の打ち切り時の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,最大応力後の応力比-せん断変位角の関係の計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する方法を用いた8).

# 3.3 ピーク時および残留状態強度線

図-6(a)~(c)に各供試体のピーク時および残留状態強度線を示す。(a)の非固結カオリン供試体(セメント添加率 0%)の場合、ピーク時内部摩擦角は含=23.4°、同粘着

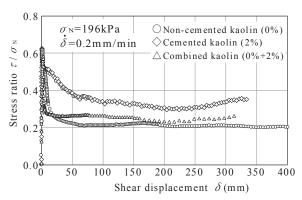
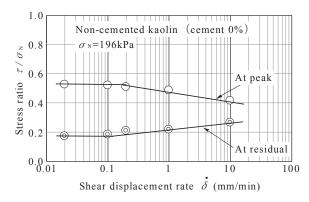
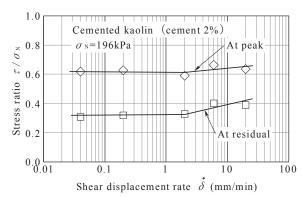


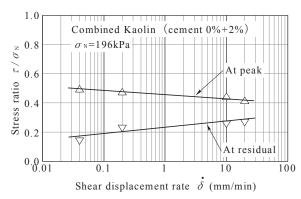
図-7 応力比  $\tau/\sigma_N$  とせん断変位  $\delta$  の関係



(a) 非固結供試体



(b) 固結供試体



(c) 貼り合わせ供試体

図-8 非固結,固結および貼り合わせ供試体におけるピーク時および残留状態応力比とせん断変位速度の関係

力は $c_p$ =12.8 kPa, 残留状態内部摩擦角は $\phi$ =11.6°, 同粘着力は $c_r$ =0 kPa となった. (b)の固結カオリン供試体(セメ

		1	1		1			
Soil sample	$\sigma_{\mathrm{c}}$	$\sigma_{ m N0}$	OCR	d	w <sub>0</sub> (%)	f	$N_{\rm f}$	$\tau/\sigma_N$
	(kPa)	(kPa)		(mm)	upper lower	(Hz)		
	300	300	1.0	0.1	57.5	0.5	8.9	0.35
	300	300	1.0	0.1	58.0	0.5	13.7	0.44
	300	300	1.0	0.1	58.2	0.5	55.0	0.27
	300	300	1.0	0.1	56.7	0.5	9.4	0.51
Non-cemented kaolin (0%)	200	200	1.0	0.1	57.8	0.5	11.0	0.60
Non-cemented Raolin (0%)	200	200	1.0	0.1	57.6	0.5	13.9	0.58
	200	200	1.0	0.1	57.6	0.5	23.0	0.49
	100	100	1.0	0.1	57.5	0.5	23.0	0.80
	100	100	1.0	0.1	59.0	0.5	13.0	0.81
	100	100	1.0	0.1	58.7	0.5	9.1	0.89
	300	300	1.0	0.1	57.1	0.5	18.9	0.66
	300	300	1.0	0.1	59.1	0.5	13.0	0.62
G . 177 F (00/)	300	300	1.0	0.1	57.4	0.5	85.7	0.50
Cemented Kaolin (2%)	200	200	1.0	0.1	55.9	0.5	18.0	0.83
	200	200	1.0	0.1	56.5	0.5	30.7	0.72
	200	200	1.0	0.1	56.1	0.5	54.7	0.69
	300	300	1.0	0.1	57.3 55.1	0.5	2.9	0.31
	300	300	1.0	0.1	57.9 55.3	0.5	5.0	0.28
	300	300	1.0	0.1	58.2 55.4	0.5	12.7	0.18
	300	300	1.0	0.1	57.8 55.4	0.5	16.9	0.15
	200	200	1.0	0.1	59.3 55.7	0.5	7.9	0.36
Combined Kaolin (0%+2%)	200	200	1.0	0.1	60.4 57.7	0.5	13.0	0.29
	200	200	1.0	0.1	59.9 57.3	0.5	21.0	0.24
	100	100	1.0	0.1	57.6 56.3	0.5	12.0	0.69
	100	100	1.0	0.1	58.8 57.8	0.5	19.0	0.64
	100	100	1.0	0.1	58.5 55.6	0.5	40.8	0.48

表-4 動的載荷リングせん断試験のケースと結果

ント添加率 2%) の場合, $\phi_p$ =24.8°,  $c_p$ =33.2 kPa, $\phi_p$ =17.8°,  $c_p$ =6.4 kPa となった.内部摩擦角および粘着力ともに,固結供試体の方が非固結供試体よりも大きく,固結効果が大きく現れていることがわかる.(c)には貼り合わせ供試体(セメント添加率 0%+2%)の結果を示している.貼り合わせた 2 層供試体の強度定数として $\phi_p$ =13.9°,  $c_p$ =44.7kPa, $\phi_p$ =7.7°,  $c_p$ =12.8 kPa が得られた.ピーク時および残留状態のいずれにおいても,単一供試体よりも内部摩擦角は低く,粘着力は高くなっていることがわかる.

# 3.4 単調せん断挙動

図-7 に各供試体の  $\sigma_N$ =196 kPa,  $\delta$ =0.2 mm/min における応力比  $\tau/\sigma_N$  と  $\delta$  の関係を示す。 せん断開始直後に  $\tau/\sigma_N$  はピーク値を迎え,その後急激に減少し,定常状態へ移行していることがわかる。ピーク時の応力比は,非固結供試体の場合( $\tau/\sigma_N$ ) $\rho$ =0.52,固結供試体の場合( $\tau/\sigma_N$ ) $\rho$ =0.58 であった。

次に、ピーク時および残留状態の応力比に及ぼすせん断変位速度の効果について検討した。これまでに Lemos et al.  $^{10}$ )、 $^{10}$ , $^{10}$ , $^{10}$ , $^{10}$ , $^{10}$ , $^{10}$ , $^{10}$ , $^{10}$ , $^{10}$ , $^{10}$  以上は et al.  $^{11}$ ),命木ら  $^{12}$ ,Suzuki et al.  $^{13}$ )により,一旦残留状態に達したせん断応力がせん断速度の増加に対して増加,一定あるいは減少することが明らかにしているが(それぞれ正,中立,負の速度効果と呼ばれる),固結した土あるいはプレカット面を含む土試料における速度効果は必ずしも十分に明らかにされていない  $^{14}$ )。 図-8(a)~(c)にそれぞれ非固結,固結および貼り合わせカオリン供試体の $^{14}$ )。 と対数表示のせん断変位速度  $^{14}$  回答の関係を示す。非固結カオリン供試体の場合, $^{14}$  にがの場合, $^{14}$  にある。これは,せん断によって発生した間隙水圧が十

分に消散せず、せん断面上の有効垂直応力が減少したためと考えられる  $^{12}$ ). このことは、応力比がピークになったときの有効垂直応力が初期の有効垂直応力よりも低下したことを意味する. また、固結供試体の $(\tau/\sigma N)_p$  は $\dot{\delta}=2.0$  mm/min までほぼ一定であるが、それよりも大きくなると若干増加する. 一方、残留状態の応力比 $(\tau/\sigma N)_p$  は、 $(\tau/\sigma N)_p$  が変化している $\dot{\delta}$ の区間で単調に増加している.

#### 4. 粘土の動的リングせん断特性

# 4.1 試験手順·条件

供試体をリングせん断容器に設置した後、所定の $\sigma$ 。で正規圧密した。圧密時間は3t法により圧密の打ち切り時間を確認し、圧密時間はそれを超える60 min に設定した。圧密終了後、上下部リングの隙間 d を設定し、垂直圧の負荷を手動から自動に切り替え、定体積コントロール装置を作動させた。垂直圧の変動が落ち着いた時点でベロフラムシリンダーに空圧を供給し、空圧サーボ制御により繰返し載荷を開始した。なお、せん断中は供試体を非浸水状態とした。 $\mathbf{表}$ - $\mathbf{4}$  に圧密定体積繰返し載荷リングせん断試験のケースと結果を示す。ここに、表中の $\sigma$ N0 はせん断開始時の垂直応力である。

## 4.2 破壊基準の決定

一連の試験ケースのなかで、繰返しせん断破壊の様態すなわち供試体に明確なすべり面の発生が確認できたものとできなかったものがあった。そこで、破壊時の応力状態および破壊までの載荷時間(繰返し回数)の関係をもとに供試体の破壊基準を検討した。 $\mathbf{Z}$ - $\mathbf{9}$  に  $\mathbf{o}_{N}$ ,  $\delta$  と載荷時間 t の関係を示す。t の進行に対して  $\delta$  は変動しながら増大し、 $\delta$  の進行速度 $\delta$ は  $\delta$ =-1 mm までほぼ一定であるが、それ以降で収束する傾向がある。このときの  $\mathbf{o}_{N}$ 

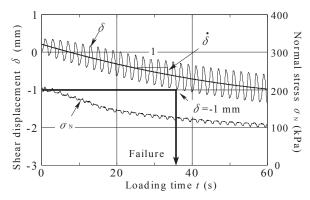


図-9 破壊基準の決定 (δ=-1mm 到達点)

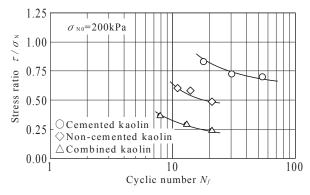


図-10 繰返しせん断応力比と破壊時の繰返し回数の関係

と  $\delta$ の関係に着目すると、 $\delta$ =-1 mm に達した時点で  $\delta$ のの変化が落ち着きほぼ一定となっていた。このことから、本研究では  $\delta$ =-1 mm に到達した時点を破壊基準として採用した。また、貼り合わせ供試体に対しても同様の基準を適用した。

# 4.3 応力比と繰返し回数の関係

図-10 に初期垂直応力 のNO=200 kPa における各供試体の  $\tau/\sigma_N$ と破壊時の繰返し回数  $N_f$ の関係を示す. 貼り合わせ, 非固結,固結供試体の順に N<sub>F-7</sub>/o<sub>N</sub> 曲線は上位に位置した. このことから,同じ ono 条件では,貼り合わせ供試体すな わち層理面を有す供試体の繰返しせん断強度は低く,破 壊に要す繰返し回数は少なくなる. 図-11 に貼り合わせ 供試体における試験前後の含水比の変化を示している. 供試体は上部,中央部(せん断面付近),下部に3等分し てそれぞれの部位の含水比を測定をした. 測定した含水 比は各部位の中間における代表値として図中にプロット した. 上部の非固結層から下部の固結層へ水分の移動が あったことが示唆される. しかしながら, 固結層は透水 性がさらに低下しているため, 固結層と非固結層の境界 面となるせん断面に非固結層から排水された水がたまり 水膜のように働き,繰返しせん断強度が低下したのでは ないかと考えている.一方,固結供試体は繰返しせん断 強度が大きく、破壊までの繰返し回数は多くなった. 図-12  $\dot{\alpha}$ と  $\tau/\sigma_N$  の関係を示す.  $\tau/\sigma_N$  が高くなるにつれて $\dot{\delta}$ が 大きくなっている. このことは前述の静的載荷試験でみ られた速度効果と概ね整合している.

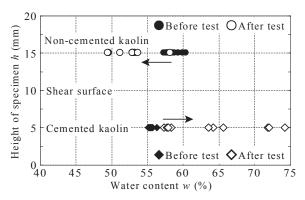


図-11 貼り合わせ供試体の試験前後の含水比分布

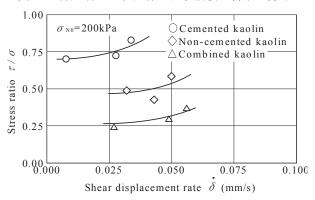


図-12 載荷応力比とせん断変位進行速度の関係

## 5. 静的および動的載荷試験結果の比較

図-13 および図-14 にそれぞれ非固結および貼り合わ せ供試体の動的載荷リングせん断試験から得られた有効 応力経路を示す. また,静的載荷リングせん断試験結果 をもとに決定したピーク時および残留状態強度線を併記 する. 非固結供試体の応力経路は, σ<sub>N0</sub>=200 kPa (N<sub>f</sub>=11) の供試体を除いて、ピーク時強度線に到達する前に供試 体は破壊している. また, ono および Nfの大きい供試体は 残留状態強度線に到達して破壊している. これより,比 較的小さい載荷せん断応力振幅 τA の場合, 長時間繰返し 載荷されることにより、間隙水圧が蓄積したため、垂直 応力が著しく減少し、破壊に至ったと考えられる. なお、 このときの垂直応力も計測したリング周面摩擦力を考慮 しているが、定体積条件なので、その影響は小さいと考 えられる. 図示していないが、固結供試体においても同 様の結果となった. 図-14 に示す貼り合わせ供試体の結 果においては残留状態強度線に到達した時点で破壊した と考えられる.

## 6. 砂の繰返しせん断挙動

# 6.1 繰返しせん断挙動

表-5 に豊浦調整砂の動的載荷リングせん断試験のケースと結果を示す。図-15(a)~(c)に非固結、固結および貼り合わせ砂供試体の $\tau$ ,  $\sigma$ N、 $\delta$ 、垂直変位vの時刻歴を示す。図中の $\tau$ A は載荷せん断応力振幅であり、点線は圧密定体積一面せん断試験の定体積基準を示す。リングせん断試験においては周面摩擦力の発生によって垂直応力はせん

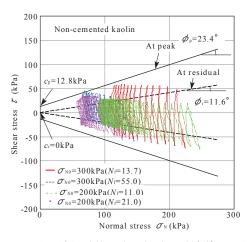


図-13 非固結供試体の応力経路と強度線の関係

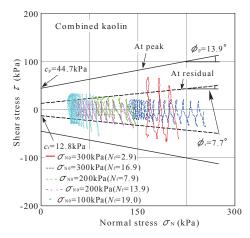


図-14 貼り合わせ供試体の応力経路と強度線の関係

断中に変動するため、前述のように、on の算出は周面摩 擦力を考慮している. (a)の非固結砂供試体において, せ ん断の進行に伴い供試体が膨張するのに対応して定体積 条件を保つために on は増加し、その後に一定になってい る. τはせん断開始後ピークを迎え, 最終的に一定になっ ている.  $\delta$  は振幅が一定のまま, 正値(供試体が回転軸に 対して反時計回りにせん断される方向) に偏った状態で 一様に繰返し載荷される状況になった.v はせん断中常に ほぼゼロであり、定体積を保っている. (b)の固結砂供試 体, (c)の貼り合わせ砂供試体の場合も, 非固結砂供試体 と同様な傾向を示している. 図-15(d)に τ<sub>A</sub> を変化させた 固結砂供試体の時刻歴を示す. (b)の固結砂供試体の結果 と比較して、 $\tau_A$ が大きくなると、 $\delta$ の負の方向への進行速 度が大きくなることがわかる. これは各供試体に同様の 挙動がみられた. そこで, 豊浦調整砂に対してもせん断 変位の進行速度について検討した.

### 6.2 破壊基準の決定

繰返しせん断試験結果から繰返しせん断破壊を定義し、その破壊基準から繰返しせん断強度を求めた。  $\mathbf{Z}$ -16 に非固結砂供試体のせん断変位  $\delta$ =1.5 mm および  $\delta$ =2.0 mm に到達したときの  $\tau$ / $\sigma$ N と  $N_f$ の関係を示す。図より  $\tau$ / $\sigma$ N と  $N_f$  との間には、多少のばらつきはあるものの、相関関係

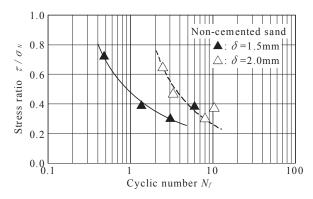


図-16 破壊基準となるせん断変位を変えた場合の繰返 しせん断応力比と繰返し回数の関係



写真-3 固結砂供試体のせん断面

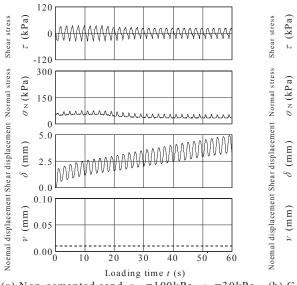
を示している. しかし,固結砂供試体の場合, $\delta$ =2.0 mm 以上でせん断容器を解体した時に供試体が破壊していることを確認した. そのときの固結砂供試体のせん断破壊面を**写真-3** に示す. したがって,非固結,貼り合わせ砂供試体の場合はそれぞれの挙動と供試体の試験後の状況観察をもとに $\delta$ =1.5 mm に達した時点を,固結砂供試体の場合は上記の理由により  $\delta$ =2.0 mm に到達した時点を破壊基準として採用した.

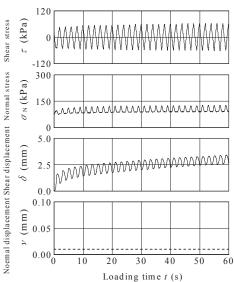
#### 6.3 応力比と繰返し回数の関係

図-17 に  $\sigma_{NO}$ =100 kPa における非固結,固結,貼り合わせ砂供試体の  $\tau/\sigma_N$  と  $N_f$  の関係を示す.いずれの供試体においても  $\tau/\sigma_N$  の増加に伴い  $N_f$ は少なくなる傾向が見られる.非固結,固結,貼り合わせ砂供試体の順に  $N_f$   $\tau/\sigma_N$  曲線は上位に位置した.この結果は,カオリンを用いた試験結果とは異なる.この理由は,図-18 に示す貼り合わせ砂供試体における試験前後の供試体の含水比変化から,上部の非固結層から下部の固結層へ間隙水が移動しているが,砂の場合は,粘土の場合と違って,固結しても透水性が比較的高いため,固結層が間隙水を吸水し,境界面となるせん断面で摩擦抵抗が発揮されたためと考えられる.すなわち,層理面を有する砂質土の供試体は,固結強度を持たせた供試体よりも,繰返しせん断強度は高く,破壊に至る繰返し回数が多くなる.図-19 に $\delta$ と  $\tau/\sigma_N$  の関係を示す. $\tau/\sigma_N$  が高くなるにつれて, $\delta$ が大きくなってい

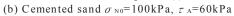
表-5 圧密・定体積繰返し載荷リングせん断試験ケース

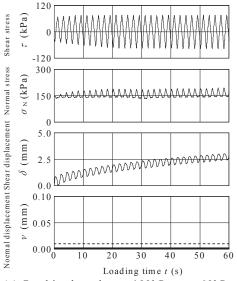
Soil sample	$\sigma_c$	$\sigma_{ m N0}$	OCR	d	W 0	w <sub>0</sub> (%)		DYNAMIC	$N_f$	$\tau/\sigma_{\rm N}$
	(kPa)	(kPa)	OCI	(mm)	upper	lower	(Hz)	D I I II III I	11)	070 N
	100	100	1.0	0.6	20.	30	0.5	500	1.5	0.52
	200	200	1.0	0.6	21.	21.66		500	2.4	0.36
	300	300	1.0	0.6	22.76		0.5	500	5.1	0.26
M	100	100	1.0	0.6	20.	99	0.5	500	2.2	0.42
Non-cemented sand (0%)	200	200	1.0	0.6	22.	77	0.5	500	6.5	0.34
	300	300	1.0	0.6	22.	66	0.5	500	5.1	0.26
	100	100	1.0	0.6	21.87		0.5	500	3.9	0.37
	200	200	1.0	0.6	22.46		0.5	500	9.4	0.37
	100	100	1.0	0.6	21.65		0.5	500	2.5	0.64
	200	200	1.0	0.6	20.17		0.5	500	3.3	0.47
C 1 1 (20/)	300	300	1.0	0.6	21.20		0.5	500	8.1	0.30
Cemented sand (2%)	100	100	1.0	0.6	21.33		0.5	500	10.0	0.37
	200	200	1.0	0.6	20.54		0.5	500	32.0	0.26
	300	300	1.0	0.6	21.53		0.5	500	32.1	0.22
	100	100	1.0	0.6	22.63	20.51	0.5	500	12.1	0.43
	200	200	1.0	0.6	22.71	19.15	0.5	500	3.2	0.72
Combined sand (0%+2%)	300	300	1.0	0.6	22.22	21.26	0.5	500	1.4	0.56
	100	100	1.0	0.6	22.48	21.05	0.5	500	5.6	0.63
	200	200	1.0	0.6	22.43	20.84	0.5	500	27.4	0.42
	300	300	1.0	0.6	22.95	20.98	0.5	500	5.2	0.32

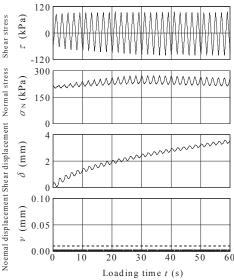




(a) Non-cemented sand  $\sigma_{\text{No}} = 100 \text{ kPa}$ ,  $\tau_{\text{A}} = 30 \text{ kPa}$ 







(c) Combined sand  $\sigma_{\text{N0}}=100\text{kPa}$ ,  $\tau_{\text{A}}=60\text{kPa}$ 

(d) Cemented sand  $\sigma_{\text{N0}}=100\text{kPa}$ ,  $\tau_{\text{A}}=100\text{kPa}$ 

図-15 非固結, 固結および貼り合わせ供試体の繰返しせん断挙動

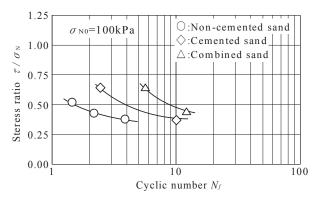


図-17 繰返しせん断応力比と破壊時の繰返し回数の関係

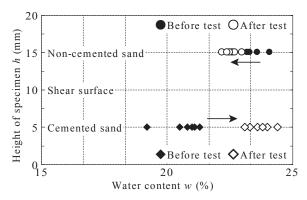


図-18 貼り合わせ供試体の試験前後での含水比分布

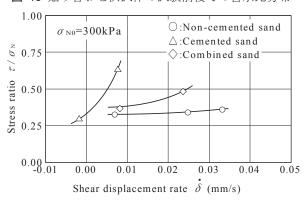


図-19 載荷応力比とせん断変位進行速度の関係

る. また,供試体の違いで比較すると,固結供試体,貼り合わせ供試体においてせん断速度依存性が認められるが, 非固結供試体ではせん断速度依存性はみられなかった.

# 7. まとめ

本研究から得られた結果を以下にまとめる.

- (1) 静的載荷試験の結果,カオリンのピークおよび 残留強度は固結,非固結,貼り合わせ供試体の順 に小さくなった.また,いずれの供試体において もせん断速度依存性が認められた.
- (2) 動的載荷試験の結果,カオリンの場合,貼り合わせ,非固結,固結供試体の順に繰返しせん断強度曲線は上位に位置した.同じ初期垂直応力の下では貼り合わせ供試体の繰返しせん断強度が小さく,破壊までの繰返し回数が少なくなった.
- (3) 繰返しせん断時の応力経路は静的載荷試験から

- 得られた残留強度線に達し、繰返しせん断破壊 が生じたとみられる.
- (4) いずれの供試体においても載荷応力比が高いほどせん断変位の進行速度が大きくなるせん断速度依存性が認められた.この傾向は静的載荷試験でみられたせん断速度効果と概ね整合する.
- (5) 豊浦調整砂の場合,非固結,固結,貼り合わせ供 試体の順に繰返しせん断強度曲線が上位に位置 した.同じ初期垂直応力の下では貼り合わせ供 試体の繰返しせん断強度が高く,破壊までの繰 返し回数が多くなった.
- (6) 固結および貼り合わせ供試体において載荷応力 比が高いほどせん断変位の進行速度が大きくな った.しかし,非固結供試体においてせん断速度 依存性はみられなかった.

#### 謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP23560591 (研究代表者:鈴木素之) の助成を受けたものである. ここに記して関係各位に謝意を表する.

#### 参考文献

- Sassa, K., Fukuoka, H., Scarascia-Mugunozza, G., Evans, S.: Earthquake-induced landslides: distribution, motion and mechanisms, *Soils and Foundations*, Special Issue on Geotechnical Aspects the January 17 1995 Hyogoken-Nanbu Earthquake, pp.59-64, 1995.
- Onoue, A., Wakai, A., Ugai, K., Higuchi, K., Fukutake, K., Hotta, H., Kuroda, S., Nagai, H.: Slope failures at Yokowatashi and Nagaoka College of Technology due to the 2004 Niigata-ken Chuetsu Earthquake and their analytical considerations, *Soils and Foundations*, Vol.46, No.6, pp.751-764, 2006.
- Wakai, A., Ugai, K., Onoue, A., Kuroda, S., Higuchi, K.: Numerical modelling of an earth-quake-induced landslide considering the strain-softening characteristics at the bedding plane, *Soils and Foundations*, Vol.50, No.4, pp.533-545, 2010.
- 4) 木下篤彦, 柴崎達也, 長谷川陽一, 山岡哲也, 山崎孝成: 地震時に風化軟岩層理面をすべり面として発生した高速地すべりの発生機構, 日本地すべり学会誌, 第50巻, 第3号, pp.103-112, 2013.
- 5) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ, 雪崩・地すべり研究センターたより, No.39, http://www.pwri.go.jp/jpn/about/pr/publication/nignews/n n39/news02.htm, 2006.
- 6) 小松順一, 荻野俊寛, 岩野利広, 及川 洋: 2013 年 8 月豪雨で発生した秋田県の主な土砂災害と今後の課題, 地盤工学会誌, Vol.63, No.11/12, pp.26-29, 2015.
- 7) 社団法人地盤工学会, 土質試験の方法と解説, 第一回

- 改訂版, pp.581-582, 2000.
- 8) 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.
- Suzuki, M., Hai, N. V.: Residual strength of cemented kaolin clays in ring shearing, *Proc. of 12th International* Symposium on Landslide, pp.1875-1882, 2016.
- 10) Lemos, L.J.L., Skempton, A.W., Vaughan, P.R.: Earthquake loading of shear surface in slopes, *Proc. of 11th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol.4, pp.1955-1958, 1985.
- 11) Tika, T.E., Vaughan, P.R., Lemos, L.J.L.: Fast shearing of pre-existing shear zones in soil, *Géotechnique*, Vol.46,

- No.2, pp.197-233, 1996.
- 12) 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.
- 13) Suzuki, M., Yamamoto, T. and Kai, Y., Rate effect on residual state strength of clay related with fast landslide, Proc. of International Symposium on Prediction and Simulation methods for Geohazard mitigation, IS-KYOTO' 09, pp.347-352, 2009.
- 14) Suzuki, M., Umezaki, T. and Takahara, H., Fast and cyclic shearing of cemented sand in earthquake-induced landslide, *Proc. of 15th World Conference of Earthquake Engineering*, 2012.

(2016年6月20日 受付)