

# 地震地すべりを再現した 静的および動的載荷リングせん断試験による 土の変形・強度特性

DEFORMATION AND STRENGTH PROPERTIES OF SOIL BY STATIC AND  
DYNAMIC LOADING RING SHEAR TESTS TO SIMULATE  
EARTHQUAKE-INDUCED LANDSLIDE

藤井 朗汰<sup>1</sup>・鈴木 素之<sup>2</sup>・上鶴瀬 一真<sup>3</sup>

Rota FUJII, Motoyuki SUZUKI, Kazuma KAMIUSE

<sup>1</sup> 山口大学大学院創成科学研究科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

<sup>2</sup> 山口大学大学院創成科学研究科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: msuzuki@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>3</sup> 山口大学大学院創成科学研究科 (現 西日本高速道路株式会社)

**Key Words:** ring shear test, earthquake, landslide, cyclic loading, constant volume shear test

## 1. はじめに

日本の国土はおよそ 7 割が山地・丘陵であり, 地震, 降雨のいずれにおいても最大規模の災害が発生している. その中でも特に深刻な被害をもたらすものが地震時に発生する地すべり (以降, 地震地すべりと略記) である. 阿部ら<sup>1)</sup>は, 地震地すべりを誘発した過去の地震事例の分析から, 未固結な花崗岩堆積物による完落型地すべりや火山岩分布地域の浅層すべりなど主要な移動形態と発生場の地形・地質特性には関係性があることを指摘している. このうち, 大規模地震地すべりの素因として第三紀層堆積岩分布地域における砂層と泥岩層の地層境界 (層理面) が挙げられる. この地震地すべりの発生・進展過程を図-1 に模式的に示す. また, 大野ら<sup>2)</sup>によると, このタイプの地すべりでは, 土が地震動によって繰返しせん断 (動的載荷条件) されることで, すべり層の土が強度低下を引き起こしてせん断破壊した後, すべり面に沿って高速せん断 (静的載荷条件) されると考えられる. この 2 つのプロセスによって地すべりが発生し, 土質によっては流動化して長距

離地震地すべりすることがある. このような地震時の土のせん断強度特性を解明するためには, 動的載荷試験によるせん断強度の低下の把握と, 静的載荷試験による大変位に至るメカニズムの解明を行う必要がある. 地震時の土のせん断特性を解明した研究としては, 伊集院<sup>3)</sup>は残留状態に達した土に対して動的リングせん断試験を実施し, 土の残留状態における動的せん断強さを明らかにしている. また, 笠間ら<sup>4)</sup>は熊本地震における地すべり崩壊の原因の一つである火山灰質土の不攪乱試料に対して定圧および定体積繰返し一面せん断試験を実施し, 常時・地震時のせん断特性を明らかにするとともに, 地震地

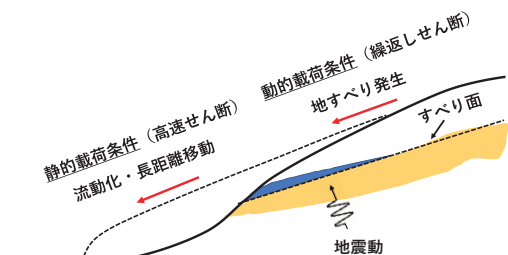


図-1 地震地すべりの発生・進展プロセス (模式断面図)

すべり発生機構の解明を行った。しかし、供試体に大変形状態を与えるのに有利なリングせん断試験装置を用いた静的および動的荷重試験、特に定体積条件の繰返しせん断試験は実現しておらず、すべり面上の高速せん断および繰返しせん断中の土のせん断特性が十分に明らかにされていない。

そこで、本研究では、上記のせん断が実現可能な試験装置システムの開発を行い、単調荷重リングせん断試験（静的荷重試験）によって、せん断速度がせん断強度に与える影響の解明、定体積繰返し荷重試験（動的荷重試験）によって、せん断破壊に至るまでのせん断挙動および強度特性の解明を目的とした。

## 2. リングせん断試験装置

### (1) 圧密定圧定速リングせん断試験装置

写真-1 に圧密定圧定速中型リングせん断試験装置の全体図を示している。本研究ではこの装置を用いて単調荷重試験を実施した。

### (2) 静・動的荷重兼用リングせん断試験装置

写真-2 に上述の装置とは別の静・動的荷重兼用小型リングせん断試験装置を示している。地震時における繰返し荷重条件を再現するため、従来のリングせん断試験装置に定体積制御装置および繰返し荷重装置システムを搭載した。

## 3. 単調荷重リングせん断試験

単調荷重試験では、垂直応力 $\sigma_N$ 、せん断変位速度 $\delta$ の下で変位制御で供試体を回転せん断した。試験装置は供試体を収めるせん断箱、垂直荷重を加える装置、せん断トルクを加える装置、垂直荷重、垂直変位（2箇所）、せん断荷重およびリング周面摩擦力を測定する計測器から構成されている。せん断変位のパラメータとしては、図-2 に示すように、環状供試体の中心における回転角すなわちせん断変位角 $\theta$  (rad) と内径および外径の中間における円周上の回転変位 $\delta$  (mm) を併用した。本研究で用いた土試料はカオリン粘土であり、その主な物理的性質は土粒子の密度  $2.607 \text{ g/cm}^3$ 、液性限界  $60.7\%$ 、塑性指数  $36.1$ 、粘土分含有率  $54.0\%$  である。試料は含水比が液性限界の2倍となるように純水を加えて練り返し、せん断試験における圧密圧力 $\sigma_c$ の85%の圧力で予圧密することで、直径  $15 \text{ cm}$ 、高さ約  $10 \text{ cm}$  の円柱状の試料を作製した。供試体は予圧密試料からトリミン



写真-1 単調荷重試験に用いた圧密定圧定速リングせん断試験装置



写真-2 繰返し荷重試験に用いた静・動的荷重兼用小型リングせん断試験装置

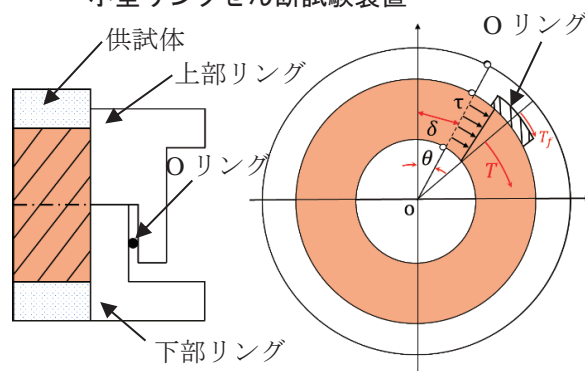


図-2 静・動的荷重兼用リングせん断装置における供試体のせん断方向に加わる荷重とOリングに起因した摩擦力（模式図）

グ法により高さ  $2 \text{ cm}$ 、内径  $6 \text{ cm}$ 、外径  $10 \text{ cm}$  の中型供試体を切り出した。

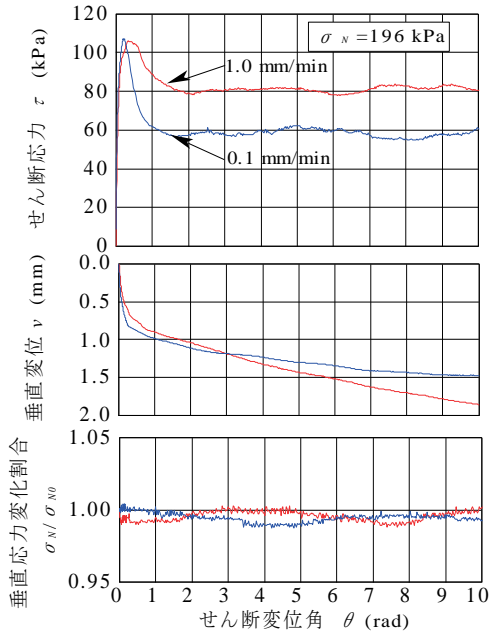
### (1) 試験手順・条件

中型供試体に対して $\sigma_c$ を  $196 \text{ kPa}$  とし、60分間圧密し、同じ大きさの $\sigma_N$ の下で定圧条件でせん断を行った。 $\delta$ は  $0.02 \sim 5.0 \text{ mm/min}$  に変化させた8ケースとした。せん断時の上・下部リングの隙間は  $0.1 \text{ mm}$  に設定した。

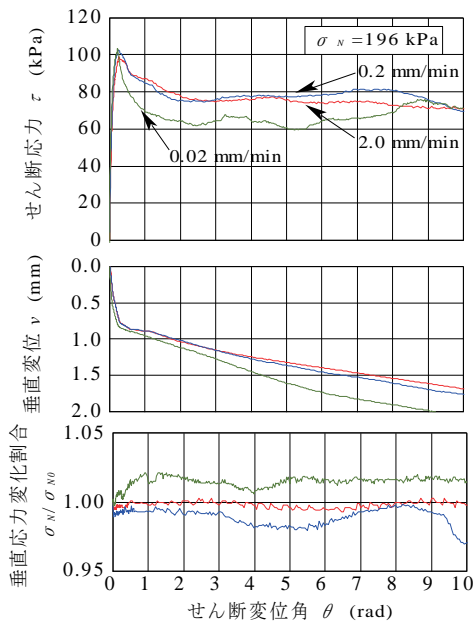
### (2) 単調せん断挙動

図-3(a)～(c)に $\delta$ を変化させた場合のせん断挙動を示す。各図において、せん断応力 $\tau$ のピーク値はせ

せん断速度の違いによらず、ほぼ同じせん断変位で同じ値をとっている。せん断速度が遅いほど、残留強度は低い値を示し、 $\delta$ が小さい時点で残留状態に到達していることが分かる。また、垂直変位 $v$ はせん断中常に増加する傾向であり、 $v$ の正方向を収縮としているため、供試体は収縮していることが確認できる。垂直応力変化割合 $\sigma_N/\sigma_{N0}$  ( $\sigma_{N0}$ :初期垂直応力)は、せん断中に若干の変動が認められるものの、5%以下の変化割合であることから、概ね定常状態は保持されているといえる。



(a) 0.1, 1.0 mm/min の2 ケース



(b) 0.02, 0.2, 2.0 mm/min の3 ケース

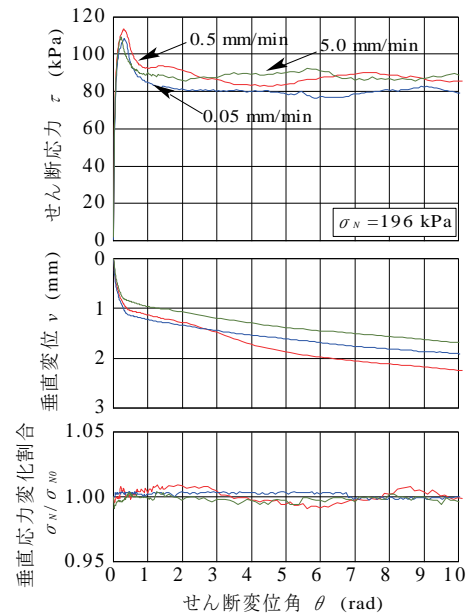
図-3 せん断速度を変化させた場合の単調せん断挙動

### (3) 応力比とせん断変位速度の関係

図-4 に $\sigma_N=196\text{kPa}$  の場合における常用対数表示の $\delta$ と応力比 $\tau/\sigma_N$ の関係を示す。残留状態の応力比 $(\tau/\sigma_N)_r$ は、若干のばらつきはあるものの、せん断速度が高くなるにつれて大きくなり、ピーク時の応力比 $(\tau/\sigma_N)_p$ はせん断速度によらずほぼ一定の傾向にある。

### (4) 供試体の含水比分布

図-5 に図-3 (b) のせん断試験前後の供試体を上部、せん断面および下部に分け、各せん断速度での含水比の高さ方向分布を示す。これより、せん断速度が



(c) 0.05, 0.5, 5.0 mm/min の3 ケース

図-3 せん断速度を変化させた場合の単調せん断挙動 (つづき)

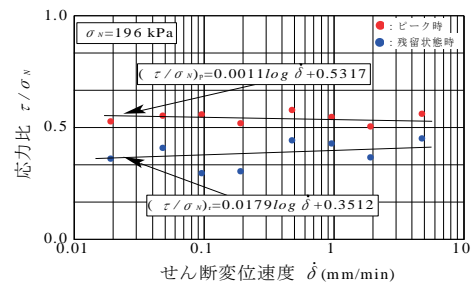


図-4 応力比とせん断変位速度の関係

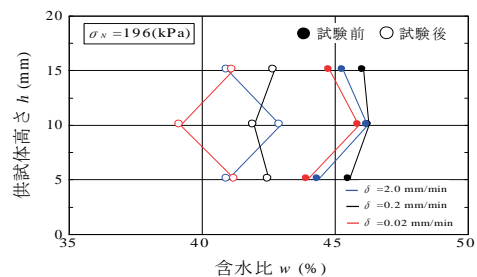


図-5 試験前後の供試体の含水比分布

低いほど、せん断面の含水比が上・下部に比べて低くなる。逆に、せん断速度が高いほど、せん断面の含水比は高くなっている。これより、低速せん断時には供試体の排水が十分に進んでいるが、逆に高速せん断時には過剰間隙水圧が残留していることが示唆される。

#### 4. 定体積繰返し載荷リングせん断試験

この試験では、所定の $\sigma_N$ の下、定体積条件でせん断応力を円周方向に所定の周波数および振幅で反復させながら供試体に作用させた。このときの測定項目は垂直荷重、垂直変位（2箇所）、せん断荷重、せん断変位、リング周面摩擦力の5項目である。供試体は予圧密試料からトリミング法により高さ2cm、内径4.2cm、外径7cmの環状に成形した。

##### (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、圧密圧力 $\sigma_c = 196 \text{ kPa}$ で圧密し、圧密の打切り時間は3*t*法により確認した。圧密終了後、上・下部リングの間隙間を0.1mmに設定し、垂直圧の負荷を手動から自動に切り替え、定体積条件制御装置を作動させた。次いで、載荷周波数*f*を1.0 Hzに、せん断荷重振幅を所定値に設定し、トルク制御による繰返し載荷を開始した。表-1に定体積繰返しリングせん断試験ケースと結果を示す。その他の条件として、せん断過程の $\sigma_N$ は196 kPaに固定し、せん断荷重振幅を8通りに変化させた。

##### (2) 繰返しせん断挙動

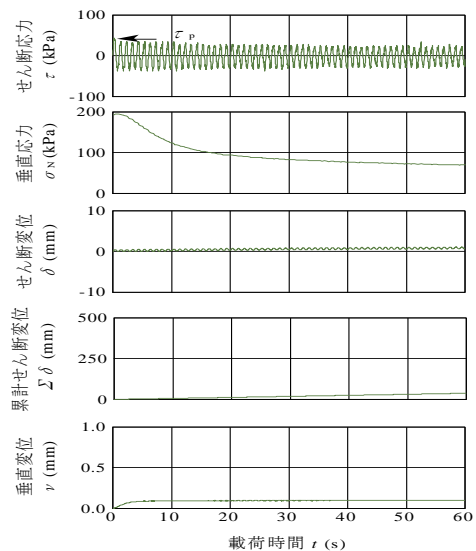
図-6(a)～(c)にそれぞれせん断振幅が異なるケースでのカオリンの $\tau$ 、 $\sigma_N$ 、 $\delta$ 、累計せん断変位 $\Sigma\delta$ および垂直変位*v*の時刻歴を示す。各図において、 $\tau$ はせん断開始時にピーク値を取った後わずかに低減し、その後一定となっている。*v*はせん断開始直後にわずかに生じている。これはせん断前に上下部リング

表-1 定体積繰返しせん断試験ケースと結果

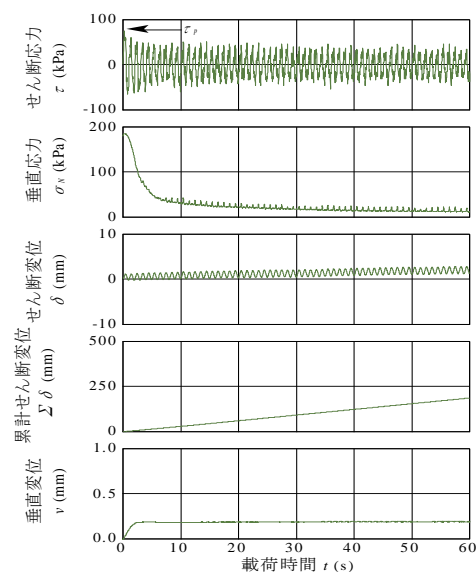
Test.No.	$\sigma_c$ (kPa)	$\sigma_N$ (kPa)	<i>f</i> (Hz)	$\tau_p$ (kPa)	$N_f$	$\tau/\sigma_N$	累積変位 (mm)
1-1	196	196	1.0	42.6	23.1	0.253	142
1-2				62.5	15.1	0.483	238
1-3				50.9	13.3	0.721	338
1-4				62.5	7.28	0.843	249
1-5				73.9	7.36	0.750	186
1-6				79.6	7.28	0.937	226
1-7				90.9	6.32	0.710	262
1-8				102	8.32	0.763	450

$N_f$ ：破壊点に達した時の繰返し回数

間の隙間をあけた際に生じた載荷版と供試体上面の間の空間を埋めるために生じたものと考えられる。しかし、その後*v*は一定となっているので、定体積を保っているといえる。 $\sigma_N$ はせん断開始直後から急激に減少し、徐々に緩やかに減少し、最終的に一定となっている。このことは、供試体がせん断に伴って収縮しているため、定体積条件を保つよう $\sigma_N$ が減少したことに他ならない。 $\delta$ は、振幅が一定のまま、正の値（供試体が回転軸に対して時計回りにせん断される方向）に偏った状態でシフトしていき、一様に繰返し発生している状況になった。また、すべての試験ケースにおいて同様の挙動がみられたが、その進行速度は異なっていることが判明した。 $\Sigma\delta$ は $\delta$ の増分を加算したものであり、せん断応力のピーク値 $\tau_p$ の大きさに応じて増加する傾向がみられた。



(a)  $\tau_p = 42.6 \text{ kPa}$



(b)  $\tau_p = 73.9 \text{ kPa}$

図-6 せん断応力振幅が異なる場合の繰返しせん断挙動

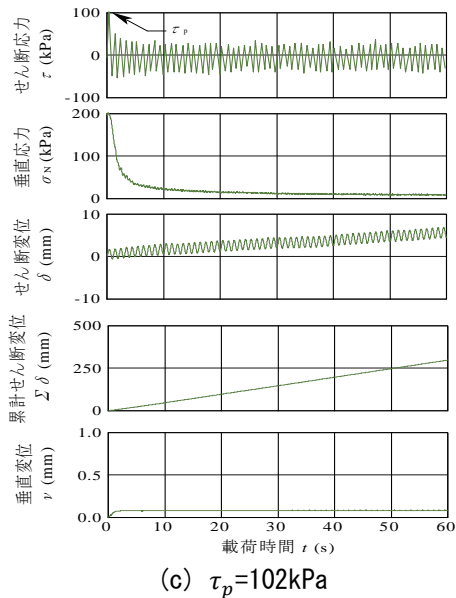


図-6 せん断応力振幅が異なる場合の繰返しせん断挙動（つづき）

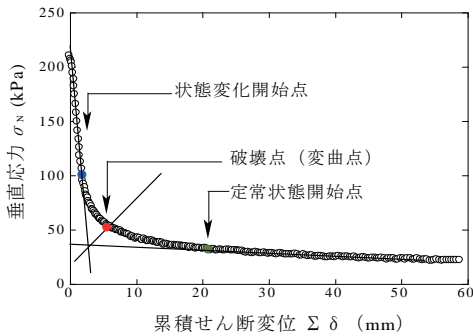


図-7 破壊基準の決定（模式図）

### (3) 破壊基準の決定

$\sigma_N$ の低減プロセスに着目し、破壊基準を $\sigma_N - \Sigma\delta$ 関係における変曲点として決定できるか検討した。そこで、図-7に示すように、破壊点（変曲点）、破壊前の状態変化開始点および定常状態開始点を決定した。破壊前の状態変化開始点は $\sigma_N - \Sigma\delta$ 関係の実測値が初期接線から逸脱した点と定義した。また、 $\sigma_N - \Sigma\delta$ 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 $\sigma_N$ の定常状態値と決定し、せん断開始時の垂直応力から定常状態の垂直応力に達するまでの $\sigma_N$ の減少分の95%となる点を定常状態開始点と定義した。破壊点は $\sigma_N - \Sigma\delta$ 関係における変曲点と定義し、破壊前の状態開始点と定常状態開始点を通る2つの接線がなす内角を二等分する線を引き、その線と $\sigma_N - \Sigma\delta$ 曲線の交点を破壊点と定義した。

### (4) 応力比と繰返し回数の関係

図-8に各状態点における応力比 $\tau/\sigma_N$ と各状態点に対応する繰返し回数 $N$ の関係を示す。また、図内の矢印は状態点の移行過程を示している。いずれのケ

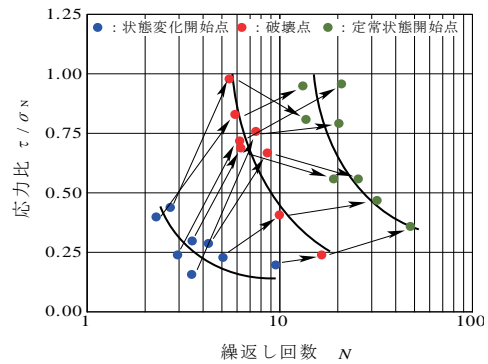


図-8 各状態点における応力比と繰返し回数の関係

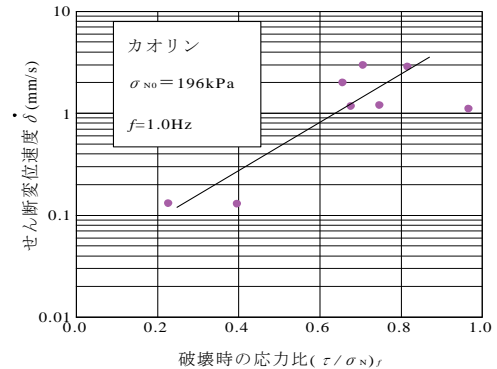


図-9 せん断変位進行速度と破壊時の応力比の関係

ースにおいても、 $\tau/\sigma_N$ が増加して状態変化開始点から破壊点に至り、 $\tau/\sigma_N$ が破壊点から増加もしくは減少して、定常状態へと移行する挙動がみられた。 $\tau/\sigma_N$ は $\sigma_N$ の低減によって増加することから、この挙動はせん断の進行に伴う $\sigma_N$ の減少の影響を受けていると考えられる。

### (5) せん断変位の進行速度

図-9に対数表示の $\deltȧ$ と破壊時の応力比 $(\tau/\sigma_N)_f$ の関係を示す。なお、 $\sigma_{N0}$ はせん断開始時の垂直応力である。 $(\tau/\sigma_N)_f$ と $\log \deltȧ$ において直線関係が認められ、破壊時の応力比が高いほど、せん断変位の進行速度が大きくなる傾向がみられた。このことは、状態変化に伴って供試体の変位速度が変化することを示唆している。

## 5. 単調・動的载荷リングせん断試験結果の関係

中型および小型供試体に対して $\sigma_N = 98, 147, 198$  kPa,  $\deltȧ = 0.0025$  rad/min の条件で実施したせん断試験結果をもとに、図-10に単調载荷、図-11に繰返し载荷の試験結果を示す。まず、図-10にピークおよび残留状態の強度線を示す。小型供試体の場合、ピーク時の内部摩擦角 $\phi_p = 28.1^\circ$ 、残留状態の内部摩擦

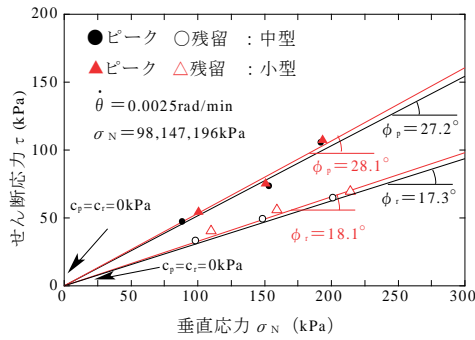


図-10 小型および中型供試体のピークおよび残留状態の強度線と強度定数

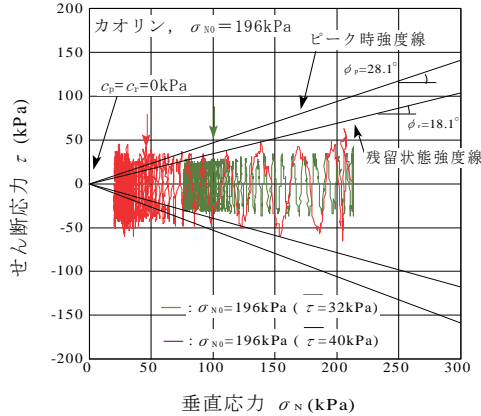


図-11 定体積繰返しせん断過程の応力経路と強度線の関係

角  $\phi_r = 18.1^\circ$  中型供試体の場合、 $\phi_p = 27.1^\circ$ 、 $\phi_r = 17.3^\circ$  で、ピーク時および残留状態の粘着力  $c_p$  および  $c_r$  は供試体サイズによらずゼロであった。これより、供試体サイズによる内部摩擦角に違いはないことが分かる。次いで、図-11 に  $\sigma_N = 200$  kPa の動的載荷試験から得られた応力経路と単調載荷試験で決定したピークおよび残留状態強度線を示す。また、図中の赤と緑の矢印は破壊点を示す。繰返しせん断応力の周期的変動を平均化した平均せん断応力  $\bar{\tau}$  が 30 kPa のケースを除く、全てのケースにおいて応力状態はピーク強度線を越えた領域に到達して定常状態となった。このことから、正規圧密粘土であっても、非排水繰返しせん断によって過圧密領域で破壊から定常状態に移行したと推測される。

## 6. 結論

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- 1) 静的載荷試験の結果、垂直応力が一定の条件において、せん断速度が高いほど、残留強度は大

きい値を示したが、ピーク強度はせん断速度による変化がみられなかった。

- 2) 低速せん断において、試験後のせん断面付近の含水比は上・下部よりも低くなり、高速せん断ではせん断面付近の含水比は上・下部よりも高くなった。このことから、高速せん断時はせん断面近傍の過剰間隙水圧が残留し、それが残留強度に影響を及ぼしていると考えられる。
- 3) 動的載荷試験の結果、いずれの状態点においても繰返し回数の増加に伴い応力比は減少していた。また、それぞれの状態点の応力比を結んだ移行過程により破壊前の状態変化開始点から応力比が増加して破壊点に至り、その後、一定または減少して定常状態開始点に移行していたことが分かった。
- 4) せん断変位速度と破壊時の繰返し応力比の関係から、応力比が大きいものほど、せん断変位速度が高いことが分かった。
- 5) 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正規圧密状態のピーク強度線を越えた領域で破壊に至ったことから、過圧密領域で破壊すなわち変位の進展が起こったものと推定する。

謝辞：本研究は JSPS 科研費（基盤研究 B, 18H01519, 池田隆明・長岡技術科学大学教授）および公益財団法人土科学センター財団 2019 年度研究助成を受けて実施した。ここに記して関係各位に謝意を表明する。

## 参考文献

- 1) 阿部真郎，林一成：近年の大規模地震に伴う地震地すべりの運動形態と地形・地質的発生の場合，日本地すべり学会誌，Vol.48，No.1，pp.52-61，2011.
- 2) 大野亮一，山科真一：地震時大規模地すべりの発生機構—荒砥沢地すべりを例として—，日本地すべり学会誌，Vol.47，No.2，pp.8-14，2010.
- 3) 伊集院玲子，石原研而，東畑郁生：残留強度状態における土の動的強度特性，第 23 回土質工学研究発表会発表講演集，pp.763-764，1988.
- 4) 笠間清伸，山縣史朗：南阿蘇山高野台地区に分布する火山灰質地盤の地震時安定性評価，地盤工学ジャーナル，Vol.13，No.3，pp.171-181，2017.

(2022. 5. 30 受付)