

山口大学大学院 正会員 鈴木素之  
 山口大学大学院 学生会員 大谷直毅  
 山口大学大学院 学生会員 ○山本拓矢

**1. はじめに** 地震地すべりは、降雨や融雪に起因する通常の地すべりとは異なり、地震動が誘因となって発生する地すべりである。また、発生頻度は比較的少ないが、発生した場合には甚大な被害をもたらす。近年の地震地すべりの発生例には、平成16年新潟県中越地震、平成19年新潟県中越沖地震、平成20年岩手・宮城内陸地震が挙げられる。これらの地震地すべりに共通してみられた特徴は、砂岩泥岩互層や砂岩シルト岩互層などの層理面のような強度不連続面での再活動地すべりが発生しているということである。しかし、層理面あるいは単一地層内の発生箇所のうち、どちらの地層の部分で破壊が発生するのか、また、層理面の動的せん断挙動は明らかになっていない。図-1に層理面で発生した尼谷地すべりの概略図を示す。そこで、本研究では、層理面を模擬した強度不連続面での繰返しせん断を再現するため、硬さの異なる粘土供試体および、それらを貼り合わせた供試体の破壊に至るまでの単調および繰返しせん断特性を明らかにすることを目的とした。非固結土、固結土および貼り合わせ供試体に対して、それぞれ圧密・定体積繰返し載荷リングせん断試験を行い、破壊に至るまでの繰返しせん断挙動を調べた。また、圧密・定圧単調載荷リングせん断試験を行い、各供試体の単調せん断挙動およびピーク・残留強度特性を調べた。

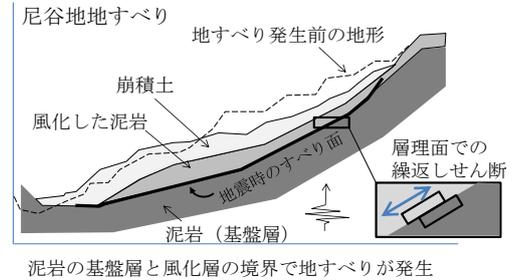


図-1 尼谷地すべりにおける層理面をすべり面として発生した地震地すべり

表-1 カオリンの物理特性

試料名	$\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	w <sub>L</sub> (%)	w <sub>p</sub> (%)	I <sub>p</sub>	F <sub>clay</sub> (%)
カオリン	2.63	78.9	41.4	37.5	90.2

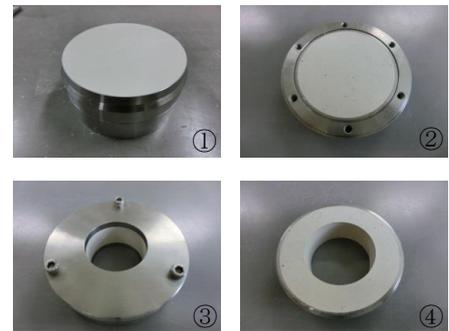


写真-1 供試体成形の様子

**2. 土試料** 本研究で用いた試料はカオリン粘土である。物理的性質を表-1に示す。供試体の作成は、試料の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、予圧密法により直径15cm、高さ約10cmの試料を作成する。圧密終了後、カッターリングを用いて、トリミング法にて予圧密試料から外径7cm、内径4.2cm、高さ2cmの小型環状供試体を成形する。写真-1に供試体成形の様子を示す。固結カオリンの作成では、練り返し時にセメント系固化材を乾燥質量比率2%で加え、予圧密終了後3日間養生したものを用いた。貼り合わせカオリンは、非固結カオリンおよび固結カオリンを高さ1cmに作成し、固結カオリンを下部に、非固結カオリンを上部になるように貼り合わせた。

**3. リングせん断試験**

**3.1 圧密・定圧単調載荷リングせん断試験** 写真-2に本研究で用いた圧密・定圧単調載荷リングせん断試験装置を示す。設定したせん断速度にて円周方向変位制御で供試体を回転せん断した。

**3.2 圧密・定体積繰返し載荷リングせん断試験** 写真-3に圧密・定体積繰返し載荷リングせん断試験装置を示す。地震時の繰返し載荷を再現するため、従来のリングせん断試験機に定体積制御装置と繰返し載荷制御装置を付加したものである。所定の垂直応力において定体積条件を維持したまま、せん断応力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。

**3.3 測定項目** 測定項目は垂直荷重, 垂直変位 (2箇所), セン断荷重, セン断変位, リング周面摩擦力の6項目である. 供試体周面の摩擦力は, 負のダイレイタンス (収縮) の場合には鉛直上向きに, 正のダイレイタンス (膨張) の場合には鉛直下向きにそれぞれ生じる. リングセン断試験において, セン断面上の平均的な垂直応力が一定になるように, ロードセルによって測定したリング周面摩擦力を考慮して垂直応力を随時補正した.

**4. 試験手順・条件** 供試体をセン断箱に設置し, 所定の垂直応力で60分圧密する. 圧密終了後, 直ちにセン断を開始する.

**4.1 圧密・定圧単調載荷リング試験** 非固結カオリンおよび固結カオリンを用いて, 一つの供試体に対して, 残留状態以降, 垂直応力  $\sigma_N$  を随時減少させて, 残留強状態度線を決定した. セン断速度は  $0.00714\text{rad/min}$  ( $0.2\text{mm/min}$ ), 最大変位角を  $10\text{rad}$  ( $280\text{mm}$ ) とし,  $\theta=0\sim 8\text{rad}$  の間は  $\sigma_N=300\text{kPa}$ ,  $\theta=8\sim 9\text{rad}$  の間は  $\sigma_N=200\text{kPa}$ ,  $\theta=9\sim 10\text{rad}$  の間は  $\sigma_N=100\text{kPa}$  でセン断した.

**4.2 圧密・定体積繰返し載荷リングセン断試験** 非固結カオリン, 固結カオリンおよび貼り合わせカオリンを用いて, 複数個の供試体に対して, 異なるセン断応力下で実施した. 垂直応力は  $\sigma_N=100, 200, 300\text{kPa}$  とした. 載荷セン断応力は正弦波で変化させ, 設定周波数は  $0.5\text{Hz}$  とした.

**5. 圧密・定圧単調載荷リングセン断試験結果**

**5.1 単調セン断挙動** 図-2 に非固結カオリンのセン断変位角  $\theta$  と応力比  $\tau/\sigma_N$  の関係を示す.  $\tau/\sigma_N$  はセン断開始直後にピークを迎えた後, 急激に減少し残留状態に入る. ピーク時セン断応力は  $\tau_p=128\text{kPa}$  ( $\tau_p/\sigma_N=0.46$ ) であった. 残留状態以降,  $\sigma_N$  が減少すると  $\tau_p/\sigma_N$  は僅かに増加する傾向が見られる. 垂直応力がセン断強度に与える影響は小さいと考えられる. 図-3 に固結カオリンの結果を示す.  $\tau$  はセン断開始直後にピークを迎えた後, 急激に減少し, 一時的な増減を示しながら残留状態に入る.  $\tau_p=192\text{kPa}$  ( $\tau_p/\sigma_N=0.66$ ) であった. 非固結カオリンと比べて固結カオリンが顕著に大きい値を示した.  $\sigma_N=300\text{kPa}$  の残留状態の挙動が乱れているが, これは, リングセン断試験において, セン断時のリング周面摩擦応力を考慮して垂直応力を一定に調整するが, 固結カオリンの  $\sigma_N=300\text{kPa}$  ではリング周面摩擦力の挙動が安定せず, 垂直応力の調整が困難となったためである. 残留状態以降,  $\sigma_N$  の減少に伴い,  $\tau/\sigma_N$  は急激に増加する傾向が見られた. 非固結カオリンと比べて, 増加傾向が顕著に大きく, 固結力を与えた試料では垂直応力がセン断強度に与える影響が大きいと考えられる.

**5.2 ピーク時強度線および残留状態強度線** 図-4 に非固結カオリンのピーク時および残留状態強度線を示す. ピーク時内部摩

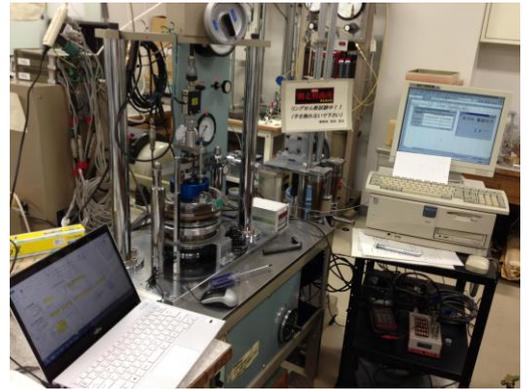


写真-2 圧密・定圧単調載荷リングセン断試験機



写真-3 圧密・定体積繰返し載荷リングセン断試験機

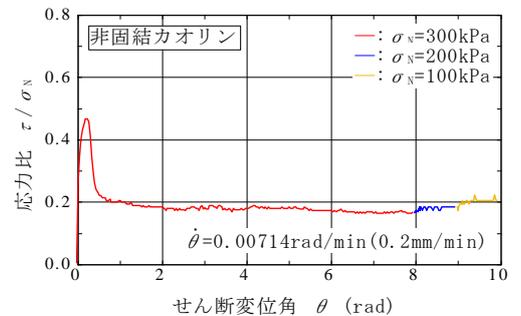


図-2 非固結カオリンのセン断挙動

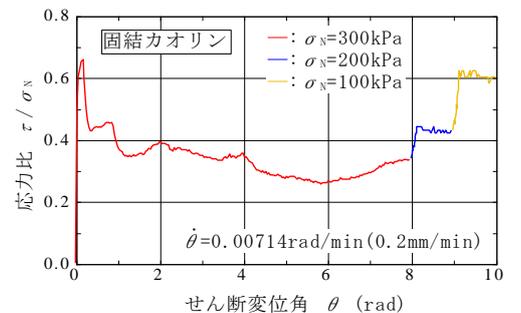


図-3 固結カオリンのセン断挙動

擦角  $\phi_p=24.8^\circ$  , ピーク時粘着力  $c_p=0\text{kPa}$ , 残留状態内部摩擦角  $\phi_r=8.5^\circ$  , 残留状態粘着力  $c_r=4.7\text{kPa}$  の結果が得られた. 図-5 に固結カオリンのピークおよび残留状態強度線を示す. 固結力を与えた試料のピーク強度線には粘着力が生じる可能性があるが  $\sigma_N=300\text{kPa}$  でのピーク強度しか得られていないため, ここでは  $c_p=0\text{kPa}$  として  $\phi_p$  を決定した.  $\phi_p=33.3^\circ$  ,  $\phi_r=11.7^\circ$  ,  $c_r=38.3\text{kPa}$  である. 内部摩擦角および粘着力ともに, 固結カオリンが非固結カオリンよりも大きく, 固結力の効果が大きく現れている.

## 6. 圧密・定体積繰返載荷リングせん断試験結果

**6.1 繰返しせん断挙動** 図-6(a)~(c)に非固結カオリン, 固結カオリンおよび貼り合わせカオリンのせん断応力  $\tau$ , 垂直応力  $\sigma_N$ , せん断変位  $\delta$ , 垂直変位  $v$  の時刻歴を示す. 図中の  $\tau_A$  は載荷せん断応力の振幅である. 各供試体とも  $\tau$  はせん断開始直後に負の領域にピークを示し, その後一定となっている.  $v$  はせん断中常にほぼゼロであり, 定体積を保っている. また,  $\sigma_N$  はせん断開始直後から減少し, その後一定となっている. このことから, せん断に伴い供試体は収縮しており, 収縮を抑えるため  $\sigma_N$  は漸次減少した.  $\delta$  の振幅はせん断開始後徐々に大きくなっており, その後一定となる. また,  $\delta$  は負の方向に進行しており, すべての供試体において同様の挙動が見られたが, 進行速度は供試体ごとに異なっている. 図-6(d)に  $\tau_A$  を変化させた非固結カオリンの  $\tau, \sigma_N, \delta, v$  の時刻歴を示す. また, 非固結カオリンの  $\sigma_{N0}=100\text{kPa}$  および固結カオリンの  $\sigma_{N0}=100\text{kPa}$  で,  $\tau_A$  を大きくした供試体においては, 破壊を確認できなかった.

**6.2 応力比と繰返し回数の関係** 図-7, 図-8 に  $\sigma_{N0}$  別の非固結カオリン, 固結カオリン, 貼り合わせカオリンの  $\tau/\sigma_N$  と  $N_f$  の関係を示す.  $\sigma_{N0}=300, 200\text{kPa}$  の場合はともに, 貼り合わせカオリン, 非固結カオリン, 固結カオリンの順に  $N_f-\tau/\sigma_N$  曲線は上位に位置した. このことから, 同じ  $\sigma_{N0}$  条件では, 貼り合わせカオリンすなわち強度不連続面を有す供試体の繰返しせん断強度は低く, 破壊に要す時間は短いと言える. その次に, 非固結カオリン, 固結力を与えた固結カオリンが応力比も大きく破壊までの時間も長くなる結果となった.

## 7. 繰返し・単調載荷リングせん断試験結果の関係

図-9, 図-10 に非固結カオリンおよび固結カオリンの定体積繰返し載荷せん断試験から得られた応力経路と圧密・定圧単調載荷リングせん断試験で決定したピーク時および残留状態強度線を示す. 図中の矢印は各供試体の応力経路がピーク時強度線に達した時点を示している. 非固結カオリンにおける繰返しせん断応力経路は, 正の領域のピーク時強度線に到達して破壊しているといえる.  $\sigma_{N0}=300\text{kPa}$  ( $N_f=55.0$ ) の供試体は強度線に到達しなかった. 固結カオリンにおける繰返し

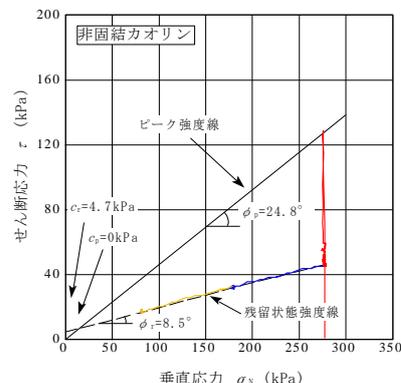


図-4 非固結カオリンの強度線

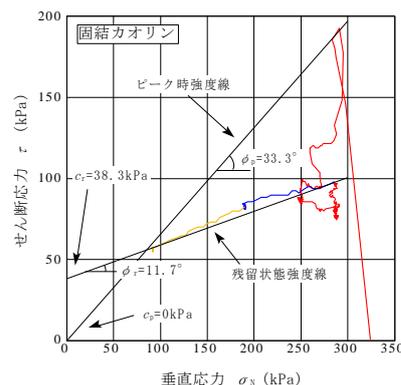


図-5 固結カオリンの強度線

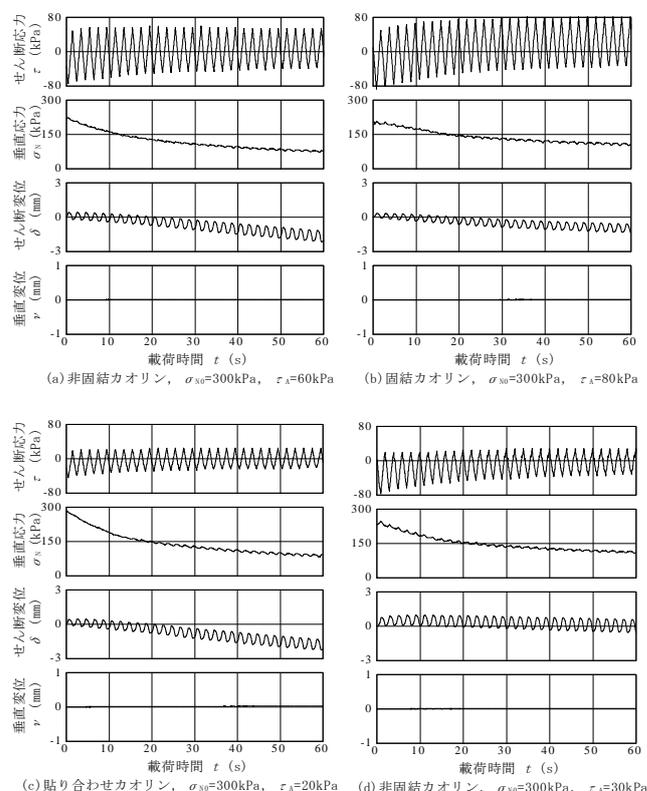


図-6 繰返しせん断挙動

せん断応力経路は、正と負の領域のピーク時強度線に到達している。 $\sigma_{N0}=300\text{kPa}$  ( $N_f=85.7$ ) の供試体は強度線にほぼ到達している。一部の供試体においては応力経路がピーク時破壊線に到達していない。このことから、比較的小さい $\tau_A$ でも、長時間繰返し载荷されることで垂直応力が大きく減少し $\tau/\sigma_N$ がピーク時強度線に近づき破壊に至ったと考えられる。また、供試体によっては破壊基準の $N_f$ よりも早い段階でピーク時強度線に達しているものもある。これは、ピーク時強度線に到達した後、強度線に沿って $\tau$ が低下していることから、ピーク時強度線に到達した時点で供試体の一部に亀裂が入り、そこから徐々にせん断面が形成されると同時に、 $\tau$ も小さくなり、全般破壊に進展したものと考えられる。

**8. まとめ** 本研究から得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 固結カオリンの単調せん断強度は非固結カオリンのピークおよび残留強度よりも大きい値を示した。
- (2) 非固結カオリンでは、残留状態以降、垂直応力の減少に伴い単調せん断応力比は僅かに増加する。
- (3) 固結カオリンでは、残留状態以降、垂直応力の減少に伴い単調せん断応力比は急激に増加する。
- (4) 破壊時の繰返しせん断応力比 $\tau/\sigma_N$ および繰返し回数 $N_f$ は、すべての試料において、せん断応力 $\tau_A$ の増加に伴い $\tau/\sigma_N$ は大きくなり、 $N_f$ は小さくなる。
- (5) すべての試料において、 $\sigma_{N0}$ の大きい試料ほど $N_f\text{-}\tau/\sigma_N$ 曲線は下位になり、破壊時のせん断強度が低くなる。
- (6) 貼り合わせカオリン、非固結カオリン、固結カオリンの順に $N_f\text{-}\tau/\sigma_N$ 曲線は上位に位置し、 $N_f$ の大きい結果となり、同じ $\sigma_{N0}$ 条件では、貼り合わせカオリン、すなわち強度不連続面を有す試料の繰返しせん断強度は低く、破壊までの時間が短い。
- (7) 非固結カオリンおよび固結カオリンの繰返しせん断時の応力経路は、別途実施したリングせん断試験から得られたピーク強度線に達し、繰返しせん断破壊が生じた。その後、地震動による繰返し载荷が終了した後、せん断速度に応じた残留状態強度線に沿う挙動になる。

**謝辞** 本研究は科研費・基盤研究(C) (研究課題番号:23560591, 代表者:鈴木素之)の助成を受けて実施した。単調载荷リングせん断試験の実施は信州大学工学部の梅崎健夫准教授・河村隆助教のご協力を得た。ここに記して関係各位に謝意を表す次第である。

**参考文献** 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

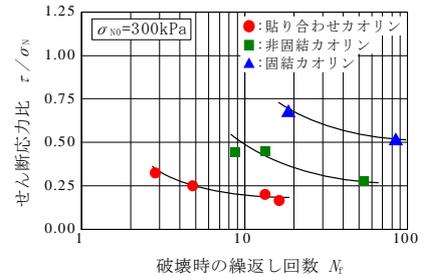


図-7 各試料のせん断応力比と破壊時の繰返し回数の関係 ( $\sigma_{N0}=300\text{kPa}$ )

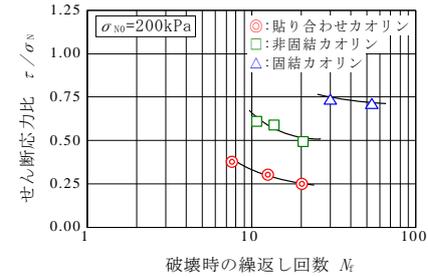


図-8 各試料のせん断応力比と破壊時の繰返し回数の関係 ( $\sigma_{N0}=200\text{kPa}$ )

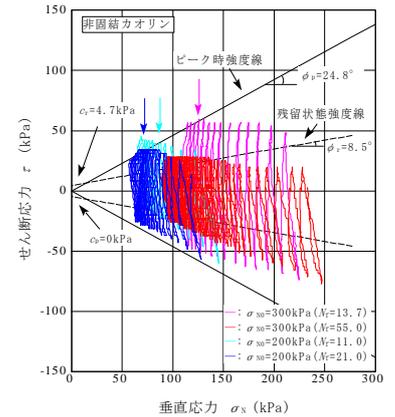


図-9 非固結カオリンの繰返しせん断応力経路と強度線の関係

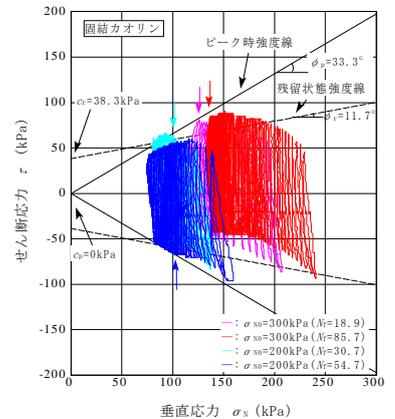


図-10 固結カオリンの繰返しせん断応力経路と強度線の関係