

リングせん断試験による地震地すべりの静的および動的せん断挙動・強度特性

山口大学大学院 学生会員 ○宮前 知弘
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 時松 那留

1. はじめに 地震地すべりは、降雨や融雪に起因する地すべりとは異なり、地震動が誘因となって発生するものである。中越地震の事例のように、降雨や融雪による地すべりに比べて、急速に滑動する特徴があり、一旦発生すれば甚大な被害となる斜面災害である。また、熊本地震における地すべり発生事例のように、地震地すべりは勾配の緩い斜面で発生することもある。しかしながら、地震地すべりに関する既往の研究では、過圧密粘土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解明がなされていない。そこで、本研究では、単調載荷および繰返し載荷の 2 タイプのリングせん断試験機を用いて、過圧密状態でのカオリン粘土の繰返しせん断特性を明らかにすることを目的とした。本文では、過圧密カオリン粘土に対する圧密・定圧・定速リングせん断試験から得られたピークおよび残留強度線を基準に繰返しせん断挙動を考察する。

2. 圧密・定圧・定速リングせん断試験¹⁾ 本研究で用いた圧密・定圧・定速リングせん断試験装置は、ハーモニックドライブ方式の載荷システムを採用しており、高減速比・高回転精度を実現している。これより、本装置は設定したせん断変位速度にて供試体を回転せん断することが可能である。測定項目はせん断荷重、垂直荷重、垂直変位（2ヶ所）および周面摩擦力である。次に、本研究で用いた試料はカオリンである。カオリンの物理的性質は土粒子の密度 2.627g/cm^3 、液性限界 78.9%、塑性指数 37.5、粘土含有率 90.2% である。供試体は、試料の含水比が液性限界の 2 倍になるように純水を加えて十分に練り返し、予圧密法により試料を作製した。予圧密圧力はせん断試験における圧密圧力 σ_c の 85 % の圧力とし、圧密時間は 3t 法によって決定した。その後、予圧密試料からトリミング法を用いて高さ 2cm、内径 6cm、外径 10cm の環状供試体に成形した。

所定の σ_c で 60 分間圧密した。圧密の打ち切り時間は 3t 法によって確認した。圧密終了後、過圧密比 $\text{OCR}=1$ の場合、 $\sigma_c=588\text{kPa}$ で 60 分間圧密した後、直ちに定圧条件でせん断を開始した。 $\text{OCR}=1.5$ および 6 の場合、 588kPa で 60 分間圧密した後、垂直応力 $\sigma_N=392$ もしくは 98kPa に除荷し 1 日間膨張させてから、せん断を開始した。

3. 圧密・定体積繰返しリングせん断試験²⁾ 圧密・定体積繰返し載荷リングせん断試験装置は、地震時の繰返し載荷を再現するため、Bishop 型のリングせん断試験装置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 σ_N において、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、定体積条件で繰返しせん断を行うことができる。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 6 項目である。供試体の作製は上述と同様であるが、供試体サイズがより小さい高さ 2cm、内径 4.2cm、外径 7cm の環状供試体である。供試体をリングせん断容器に設置した後、所定の σ_c で 60 分間圧密した。圧密時間は 3t 法によって確認した。圧密終了後、上下部リングの隙間を設定し、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、空圧サーボ制御器により繰返し載荷を開始した。

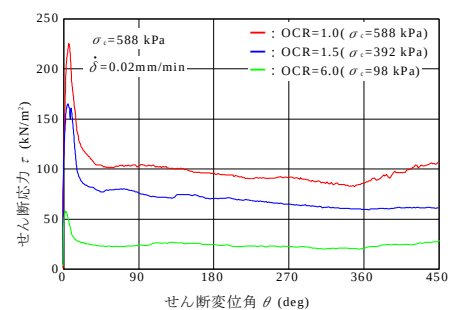


図-1 過圧密比 OCR が異なる場合のせん断応力 τ とせん断変位角 θ の関係¹⁾

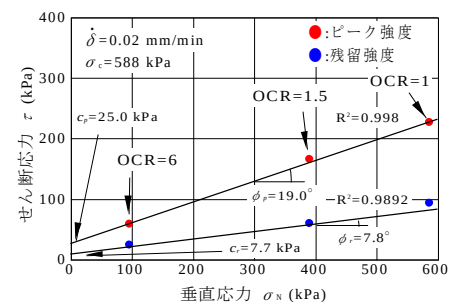


図-2 過圧密状態 ($\sigma_c=588\text{kPa}$) におけるピークおよび残留状態強度線¹⁾

キーワード リングせん断試験, 残留強度, 地震地すべり

連絡先 〒755-8611 宇部市常盤台 2 丁目 16 番 1 号 山口大学大学院創成科学研究科 鈴木素之 Tel : 0836-85-9303

4. 試験結果と考察 図-1 に著者が既に報告¹⁾した OCR が異なる場合 ($\delta=0.02$ mm/min) のせん断応力 τ とせん断変位角 θ の関係を示す。前述のように、この実験では $\sigma_c=588$ kPa の下で、 σ_N を低下させることにより、OCR ($=\sigma_c/\sigma_N$) を 1, 1.5, 6 に変化させた。 τ はせん断開始直後にピーク値を示した後、急速に低下し、残留状態となっていることがわかる。また、 $\tau \sim \theta$ の関係は OCR が高くなるほど、すなわち σ_N が小さくなるほど、下位にくることがわかる。

図-2 にこの実験で得られた過圧密状態のピーク時および残留状態強度線¹⁾を示す。赤丸はピーク強度、青丸は残留強度である。ピーク時内部摩擦角 $\phi_p=19.0^\circ$ 、粘着力 $c_p=25.0$ kPa、残留状態内部摩擦角 $\phi_r=7.8^\circ$ 、粘着力 $c_r=7.7$ kPa の強度定数が得られた。

一方、図-3 に鈴木ら²⁾が実験したせん断初期の垂直応力 σ_{N0} を 300 kPa、せん断応力振幅 τ_A を 60 kPa とした条件での繰返しせん断挙動を示す。 τ はせん断開始直後に負の領域（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を正とした）でピークを示し、その後一定の振幅となっている。また、垂直変位 v はせん断中常にほぼゼロであり、定体積条件を保っている。それに対応して σ_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。これより、供試体は繰返しせん断時に過圧密状態に入っているとみられる。せん断変位 δ はせん断開始後徐々に大きくなり、その後、変動しつつも、ほぼ収束している。また、 δ の累積が進んでいる。

図-4 に鈴木ら²⁾が実施した異なる σ_{N0} での応力比 τ/σ_N と破壊時の繰返し回数 N_f の関係を示す。ただし、 $\delta=-1$ mm に到達した点を破壊基準とした²⁾。 τ/σ_N が大きいほど、 N_f は小さくなる傾向がみられる。また、 τ/σ_N-N_f 曲線は σ_{N0} の大きなものほど低い位置にきている。

図-5(a), (b) にそれぞれ $\sigma_{N0}=200$ kPa, 300

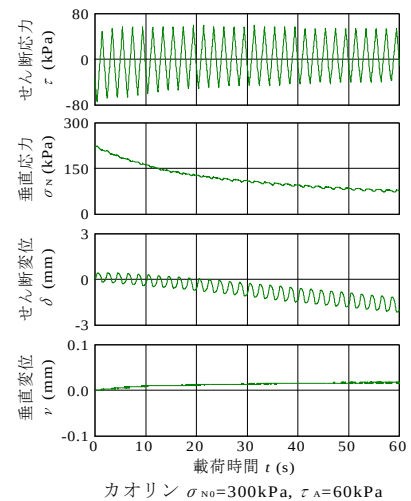


図-3 繰返しせん断挙動 ($\sigma_{N0}=300$ kPa)²⁾

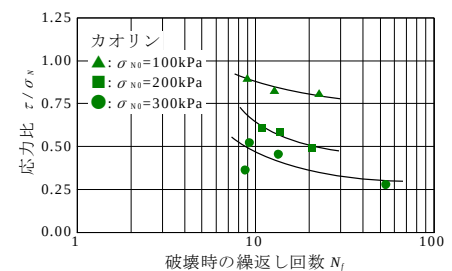


図-4 せん断応力比と破壊時の繰返し回数の関係²⁾

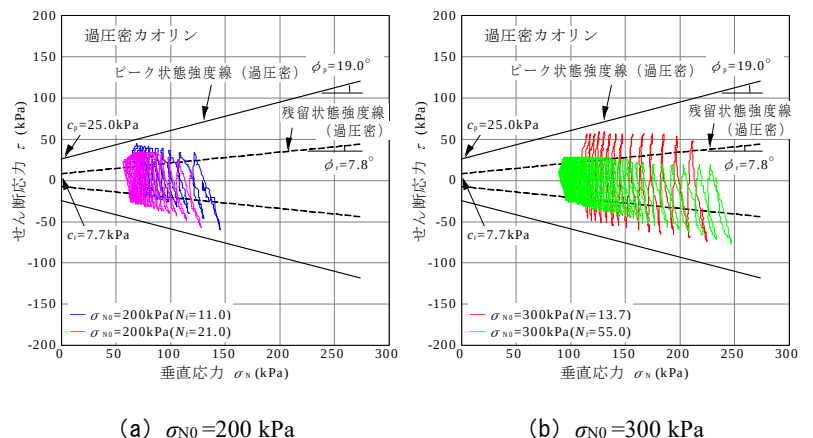


図-5 繰返しせん断応力経路と過圧密状態の強度線の関係

場合の繰返し載荷リングせん断試験から得られた有効応力経路と過圧密粘土のピーク時および残留状態強度線を併せて示す。いずれのケースにおいても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、 σ_{N0} および N_f の大きいケースでは、 τ と σ_N はピーク時強度線に達することなく、残留状態強度線に到達あるいはそれを越えた近傍で収束している。これより、比較的小さい τ_A の場合、長時間繰返し載荷されることによりせん断変位が累積し、また、その間、垂直応力が大きく減少、すなわち供試体の過圧密化が進行しているので、このような条件では過圧密土の残留強度線によって破壊が規定されるものと考えられる。

5. まとめ 本研究から得られた結果を以下にまとめる。

地震地すべりを再現した繰返しせん断時の応力経路は、せん断変位の累積と垂直応力の低下によって過圧密粘土の残留強度線に達して、繰返しせん断破壊が生じたと考えられる。

参考文献 1) 宮前知弘, 鈴木素之, 井上優朋, Nguyen Thanh Duong: せん断速度が過圧密粘土の残留強度に与える影響, 第 52 回地盤工学研究発表会, pp.289-290, 2017. 2) 鈴木素之, 井上優朋, Nguyen Van Hai: 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, 地盤と建設, Vol.34, No.1, pp.99-108, 2016.