動的載荷リングせん断試験における潜在すべり面を有する粘土の繰返しせん断挙動

CYCLIC SHEAR BEHAVIOR OF CLAY WITH PRE-SHARED SLIP SURFACE IN DYNAMIC RING SHEAR TEST

佐藤　和樹[1]・鈴木　素之[2]・高原　蒼[3]・軸屋　雄太[4]
Kazuki SATO, Motoyuki SUZUKI, Sou TAKAHARA, Yuta JIKUYA

[1]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: g029veu@yamaguchi-u.ac.jp
[2]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
[3]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: f023vew@yamaguchi-u.ac.jp
[4]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: yuta-j@yamaguchi-u.ac.jp

***Key Words**: ring shear test, clay, pre-shearing, post-rainfall earthquake*

1. はじめに

近年，豪雨や大規模地震の頻発を背景に，複合災害リスクへの関心が高まっている．複合災害とは，複数の災害が同時または連続して発生し，相互に影響を及ぼす災害形態とされる [1]．特に地震発生後に豪雨が発生する場合や，豪雨によって不安定化した斜面に地震動が作用する場合には，地すべりなどの土砂災害が発生しやすくなることが確認されている [2]．豪雨の激甚化や大規模地震の発生リスクを踏まえると [3]，複合災害への対応の重要性は今後さらに高まると考えられ，斜面災害の発生メカニズムを複合的な観点から解明することが重要となっている．

これまで，降雨を主な誘因とする地すべりを対象として，静的載荷リングせん断試験によるすべり面粘土のせん断挙動に関する研究や，地震動を想定した動的載荷リングせん断試験により，繰返しせん断時の強度低下や変形特性に着目した研究などが数多く行われてきた [4),5),6)]．これらの研究により，再活動地すべりにおける土の残留強度や，繰返しせん断強度に関する多くの知見が得られている．しかしながら，降雨や融雪によって発生した地すべりによるすべり面が形成された斜面に地震動が作用する状況を想定し，すべり面の形成履歴がその後の繰返しせん断挙動に及ぼす影響を検討した研究は皆無であり，十分に解明されていない．

そこで本研究では，すべり面が形成される程度のせん断変位を与え残留強度状態に達するまでのせん断履歴を与えた状態での繰返しせん断挙動を解明することを目的として，静的載荷リングせん断試験により粘土供試体に初期排水せん断（以下，初期せん断と記す）を与えた後，動的載荷リングせん断試験を実施した．さらに，初期せん断を与えていない供試体に対しても同一条件の動的載荷リングせん断試

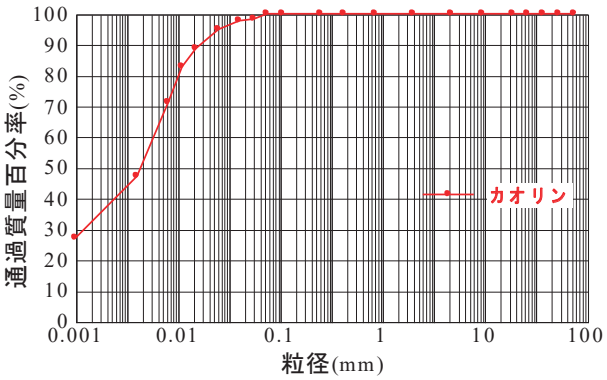


図-1　試料の粒径加積曲線



図-3　環状供試体

験を実施し両者の繰返しせん断挙動の差異を調べた．また，本研究は，すべり面形成履歴が繰返しせん断挙動に及ぼす影響を検討することを目的としており，得られた知見は地すべり粘土の力学挙動を理解するための基礎的知見として位置付けられる．

2. 粘土試料の物理・鉱物学的性質

本研究では，試料として低活性粘土のカオリン粘土を用い，静的載荷および動的載荷リングせん断試験を実施した．カオリン粘土の物理特性は，土粒子密度ρ_s = 2.607 Mg/m^3，液性限界 w_L = 60.7%，塑性指数 I_p = 36.1，粘土含有率 F_{clay} = 54.0%，活性度 A = 0.973 である．試料の粒径加積曲線を**図-1** に示す．さらに，粉末 X 線回析試験を実施した結果，本試料はパイロフィライトおよび石英を主成分とするパイロフィライト質ろう石であり，カオリナイトやセリサイト等を伴う鉱物組成であると分析された．

3. 静・動的載荷リングせん断試験装置および試験条件

(1) 試験装置

本研究では，静・動的載荷兼用定体積リングせん断試験装置(**図-2**)を用いて試験を実施した．本リング

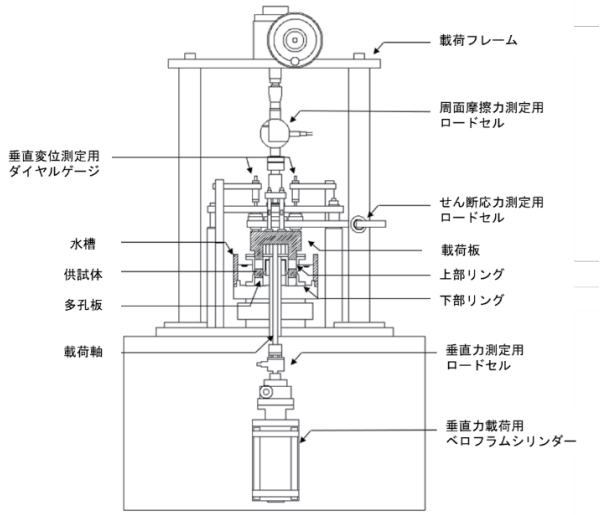


図-2　静・動的載荷兼用定体積リング
せん断試験装置（模式図）

グせん断試験装置では，静的載荷による初期せん断および動的載荷による繰返しせん断を同一装置内で再現できる．測定項目は垂直荷重，垂直変位，せん断荷重，せん断変位およびリング周面摩擦力である．

(2) 試験手順

試料は液性限界の 1.5 倍の含水比となるように純水を加えて十分に練り返した後，2 時間真空脱気した．脱気終了後，せん断試験時の圧密応力の 85 %に相当する圧密応力で一次元的に予圧密した．予圧密後の試料から，**図-3** に示す内径 42 mm，外径 70 mm，高さ 20 mm の環状供試体をトリミング法により切り出すことで，供試体を作製した．圧密過程では，供試体に所定の圧密応力 σ_c = 98 kPa を作用させ，60 分間圧密した．これに引き続くせん断過程では，初期せん断の有無の両ケースで動的載荷による繰返しせん断試験を実施した．本研究では，降雨や融雪による地すべりによってすべり面が形成され，すべり面の強度が低下した状態で，地震動が作用して発生する地すべりの複合災害を想定した．これを模擬するため，残留強度状態まで初期せん断を与えた供試体(**図-4 (a)**)，初期せん断を与えていない供試体に対して動的載荷による繰返しせん断(**図-4 (b)**)を実施した．初期せん断ありの場合には，静的載荷条件下において，せん断速度 0.1 mm/min で一方向せん断を行った．供試体が残留状態に到達するのに十分なせん断変位 572 mm までせん断を継続した後（**図-4** の点 A)，同一供試体に対して動的載荷による繰返しせん断試験を実施した．一方，初期せん断なしの場合には，静的載荷による初期せん断を行わず，圧密終了後の供試体に対して直接，動的載荷による繰返しせん断試験を実施した．

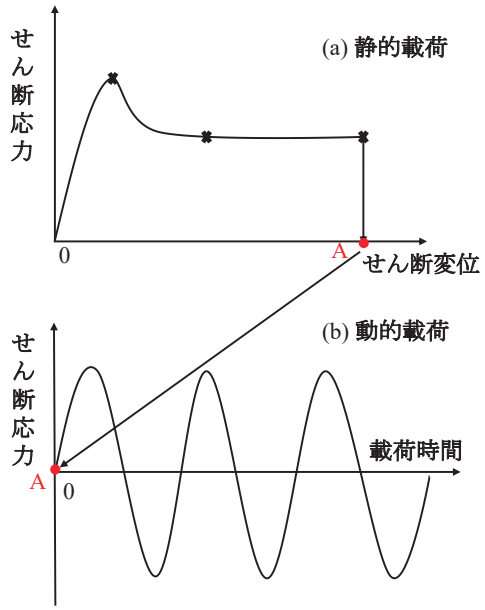


図-4　初期せん断の有無による
繰返しせん断試験条件（模式図）

(3) 試験条件

動的載荷による繰返しせん断試験では，せん断荷重振幅 T_A を 100，300，500，800 GAIN の 4 ケースに設定した．なお，GAIN は動的載荷装置におけるせん断荷重を制御するための電圧の入力値である．これによってせん断荷重が変化するため，せん断応力を直接制御するものではない．また，供試体の硬軟によっても発生するせん断荷重が異なるため，同一の GAIN を設定しても，作用するせん断応力は一定とならず，一般的な応力制御試験とは異なる．各せん断荷重振幅条件について，初期せん断の有無を組み合わせ，計 8 ケースの試験を実施した（図-5）．さらに，垂直応力条件の違いが繰返しせん断挙動に及ぼす影響を検討するため，動的載荷時のせん断荷重振幅を 500 GAIN に固定し，垂直応力 σ_{N0} = 98，149，196 kPa の 3 条件で試験を実施した．各垂直応力条件についても，初期せん断の有無を組み合わせた，計 6 ケースの試験を実施した（図-7）．

4. 試験結果および考察

(1) せん断荷重振幅が異なる条件

前述のとおり，初期せん断ありの供試体には，残留状態に到達するまで静的載荷による排水せん断を与えた．その後，初期せん断履歴の有無が繰返しせん断挙動に及ぼす影響を検討するため，垂直応力 σ_N = 98 kPa の条件下で動的載荷による繰返しせん断試験を実施した．図-5 にせん断応力 τ，垂直応力 σ_N，せん断変位 δ および垂直変位 v の時刻歴を示す．図-5 (a) ～ (d) はそれぞれせん断荷重振幅 T_A = 100，300，500，800 GAIN の結果である．また，図中の青線は初期せん断を与えていない供試体，赤線は初期せん断を与えた供試体の結果を示している．これらの比較に基づき，初期せん断履歴の有無による応力および変形挙動の違いについて考察した．なお，垂直変位 v は収縮方向を正として整理した．また，動的載荷によりせん断応力 τ は正負に変動するが，せん断変位 δ は形成されたすべり面に沿った累積変位を正の方向として整理しているため，せん断応力が負の方向に作用する場合でも δ は全体として正方向へ増加する．

まず，せん断応力 τ に着目すると，いずれの条件においてもせん断開始直後に τ は増加し，ピーク値に到達した後，増減を繰り返しながら低下し，最終的に定常値へと収束する傾向が確認された．これは，せん断の進行に伴って供試体内部にせん断面が形成され，せん断抵抗が低下し，最終的に残留強度状態へ移行したためと考えられる．図-5 (a) に示す T_A = 100 GAIN では，初期せん断ありのケースにおいて比較的大きなせん断応力 τ を示した．一方，図-5 (b) ～ (d) に示す T_A = 300，500，800 GAIN では，繰返しせん断中に発生する τ は初期せん断ありの方が小さい値を示した．これは，初期せん断によってあらかじめせん断面が形成されていたため，動的載荷時にはそのせん断面に沿ってせん断変形が進行しやすくなり，せん断抵抗が低下したためと考えられる．

垂直応力 σ_N に着目すると，初期せん断ありの T_A = 100 GAIN および T_A = 500 GAIN では，垂直応力 σ_N の低下量は比較的小さく，繰返しせん断中の変動は継続した．T_A = 800 GAIN では，初期せん断の有無によらず σ_N は類似した挙動が確認された．これは，せん断荷重振幅が大きかったためせん断面構造が早期に安定化した可能性がある．ただし，T_A = 300 GAIN においても類似した傾向が確認されており，本試験条件の範囲では，GAIN の違いによる影響は明瞭ではなかった．

せん断変位 δ については，T_A = 300，500，800 GAIN において，初期せん断なしでは一定の範囲内で周期的に変動する傾向を示した．これに対し，初期せん断ありでは変動を伴いながら単調に増大した．これは，初期せん断によって形成されたせん断面に沿って変形が進行しやすくなったためと考えられる．一方，T_A = 100 GAIN では，初期せん断の有無による顕著な差は認められなかった．これは，せん断荷重振幅が小さいため，供試体に生じる変形も小さく，初期せん断の影響が現れなかったと考える．

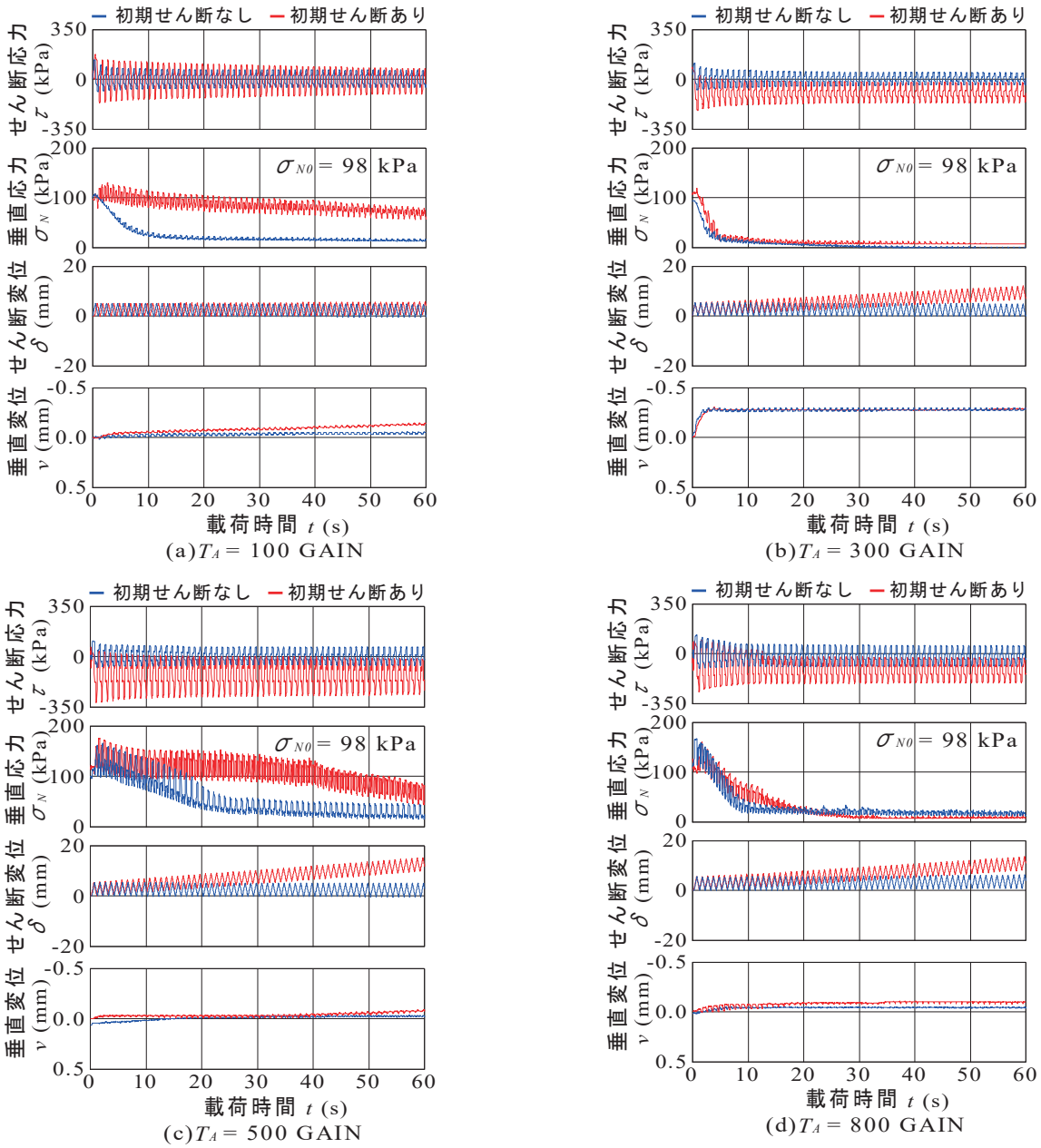


図-5　初期せん断の有無によるせん断挙動の違い

垂直変位 v については，いずれの条件においても，せん断開始直後にわずかな変位が生じた．この挙動は，初期せん断の有無にかかわらず共通して確認されており，載荷板と供試体上面との間に存在していた微小な空隙が，せん断開始時の載荷によって埋められたことに加え，載荷初期における供試体と載荷板の接触状態が影響した可能性がある．一方，T_A = 300 GAIN では比較的大きな変位が確認されたが，その詳細な要因については今後検討が必要である．

(2) 応力比と載荷回数との関係

既往研究[7]を参考に，繰返しせん断時における垂直応力と累積せん断変位の関係に着目し，状態変化開始点および定常状態開始点を決定した．状態変化開始点とは，繰返しせん断に伴いせん断面近傍で土構造の変化が生じ，力学的状態が変化し始める点である．一方，定常状態開始点とは，せん断面構造が安定化し，応力状態がほぼ一定となる定常状態へ移行する点である．**図-6** に垂直応力 σ_N = 98 kPa 条件下における状態変化開始点および定常状態開始点での応力比 τ/σ_N と，繰返しせん断時の載荷回数 N との関係を示す．図中の赤色プロットは状態変化開始点，青色プロットは定常状態開始点をそれぞれ示している．また，塗りつぶし円は初期せん断なし，白抜き円は初期せん断ありの結果を表しており，初期せん断履歴の有無による違いを比較できるよう整理した．なお，図中の実線および破線は，データの傾向を示すための参考線である．τ/σ_N～N の関係に着目すると，状態変化開始点における応力比～載荷回数の関係は，

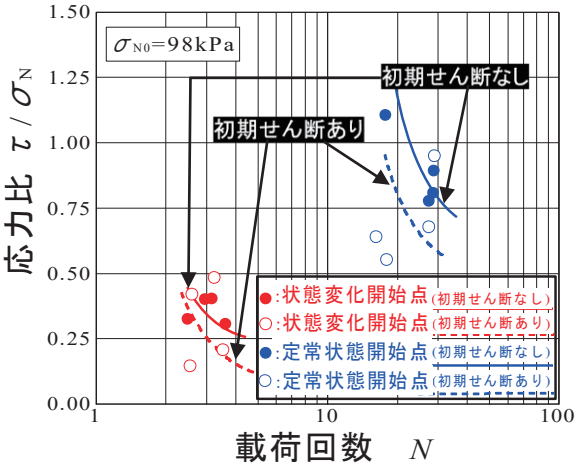


図-6　応力比と載荷回数の関係

定常状態開始点よりも低い位置に分布しており，この傾向は既往研究 [7]で報告されている結果と整合している．また，初期せん断履歴の有無に着目すると，状態変化開始点および定常状態開始点のいずれにおいても，初期せん断ありの供試体は，初期せん断なしの供試体と比較して，応力比～載荷回数の関係は低い位置に分布することが確認された．これは，初期せん断過程において供試体が残留状態に至るまでせん断され，せん断強度が低下したためと考えられる．さらに，初期せん断によって供試体内部に形成されたせん断面が，その後の繰返しせん断時における動的強度の低下に影響した可能性が示唆される．これらの傾向は，図-5 に示した δ～t 関係において，T_A＝300，500，800 GAIN の初期せん断ありの供試体で，せん断変位 δ が周期的な変動を伴いながら単調に増大した結果とも整合的である．ただし，T_A＝300 GAIN の条件では，他の条件と比較して定常状態開始点のプロット位置が大きく外れていた．この要因については現時点では明確ではないが，供試体内部におけるせん断面の形成過程や変形状態の違いが影響した可能性がある．

(3) 垂直応力が異なる条件

垂直応力の違いが繰返しせん断挙動に及ぼす影響を検討するため，せん断荷重振幅を一定条件（T_A = 500 GAIN）に設定し，σ_N＝98，149，196 kPa の条件下で繰返しせん断試験を実施した．また，初期せん断の有無を組み合わせることで，垂直応力条件および初期せん断履歴が繰返しせん断挙動に及ぼす影響について考察した．図-7 に τ，σ_N，δ および v の時刻歴を示す．図-7 (a)～(c) はそれぞれ σ_N = 98，149，196 kPa における結果を示している．また，図中の青線は初期せん断なし，赤線は初期せん断ありの結果を表している．

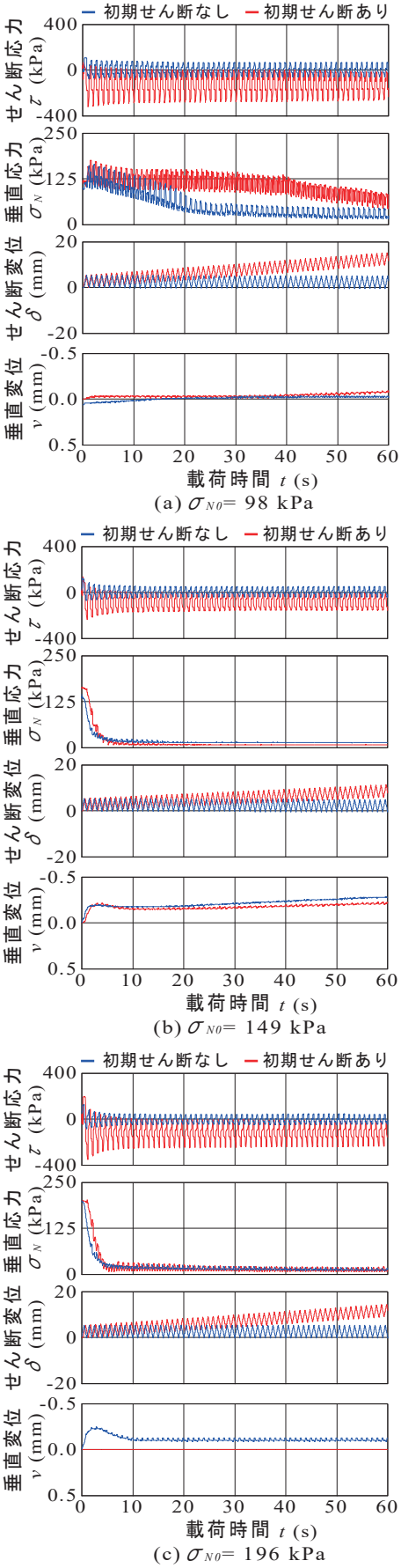


図-7　垂直応力条件によるせん断挙動の違い（T_A = 500 GAIN）

まず，τ に着目すると，**図-5** と同様に，いずれの条件においてもせん断開始直後に増加し，ピーク値に到達した後，増減を繰り返しながら低下し，最終的に定常値へ移行する傾向が確認された．垂直応力条件の違いに着目すると，特に，$\sigma_N = 196$ kPa の条件では，ピーク値に到達後の τ の低下が顕著であった．さらに，初期せん断ありでは，初期せん断なしと比較して，τ が小さい値で推移した．これは，初期せん断過程により供試体内部の構造が変化していたためと考えられる．

σ_N については，$\sigma_N = 98$ kPa の条件では繰返しせん断に伴い緩やかな低下を示したのに対し，σ_N = 149 kPa および 196 kPa では載荷初期に急激な低下が確認された．これは垂直応力が大きい条件ほど，初期せん断によって形成されたすべり面に沿って応力が集中し，変形しやすくなるため，垂直応力 σ_N が急激に低下したものと推察される．

δ については，垂直応力の大きさによらず，初期せん断なしのケースでは一定範囲内で周期的に変動する傾向を示した．これに対し，初期せん断ありのケースでは変動を伴いながら，単調に増大した．これは，初期せん断によって形成されたせん断面に沿って変形が継続的に進行したためと考えられる．一方，δ の増加傾向に対する垂直応力の影響は，本試験条件の範囲では明瞭には認められなかった．

最後に v に着目すると，初期せん断ありの垂直応力 σ_N = 196 kPa では変位は確認されなかった．これは，高い垂直応力によって供試体が強く拘束されるとともに，初期せん断によって形成されたせん断面に沿って変形が進行したため抑制されたと考えられる．また，この傾向は $\sigma_N = 98$ kPa の場合も確認された．一方，$\sigma_N = 149$ kPa では，せん断開始直後に垂直変位が増加した後，徐々に一定値へ移行する傾向が確認された．これは，載荷初期における供試体と載荷板の接触状態の変化やせん断面近傍における土粒子構造の変化が関与した可能性がある．

5．結論

本研究で得られた結果を以下にまとめる．

1) 初期せん断を与えた供試体では，繰返しせん断時のせん断応力は初期せん断を与えていない供試体と比較して小さい値で推移し，垂直応力の低下量も比較的小さい傾向を示した．また，せん断変位は増減を繰り返しながら単調に増大する挙動が確認された．一方，初期せん断なしの供試体では，せん断変位は一定の範囲内で周期的に変動する傾向を示した．
2) 応力比と載荷回数との関係に着目すると，初期せん断ありの供試体では，状態変化開始点および定常状態開始点のいずれにおいても，初期せん断なしの場合より低い応力比～載荷回数の関係を示した．また，初期せん断の有無による応力比～載荷回数の関係の違いは，状態変化開始点よりも定常状態開始点において顕著であった．
3) 垂直応力の影響をみると，高い垂直応力条件では，繰返し載荷初期におけるせん断応力および垂直応力の低下が顕著であった．一方で，せん断変位の増加傾向に対する垂直応力の影響は小さかった．
4) 降雨や融雪によって発生した地すべりによるすべり面形成履歴が繰返しせん断挙動に影響を及ぼすことが示された．この結果は複合災害時の地すべり挙動を評価する上で，すべり面形成履歴がその後の地震時の繰返しせん断挙動に及ぼす影響を考慮する必要があることを示唆する．

参考文献

1) 内閣府，防災基本計画，https://www.bousai.go.jp/taisaku/keikaku/pdf/kihon_basicplan.pdf，p.8，2025.
2) 後根裕樹，海原荘一，中谷洋明，木下篤彦，北本楽，小杉恵，鈴木素之：大規模地震がその後の降雨による土砂災害発生に及ぼす影響，砂防学会誌，Vol.77，No.6，pp.22-33，2025.
3) 陶野 郁雄：複合災害と総合的災害予測図，日本第四紀学会，Vol.32，No.5，pp.339-352，1993.
4) 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，地盤工学会中国支部論文集，Vol.34，No.1，pp.99-108，2016.
5) 金子雅博，神山惇，下野宗彦，秦二郎，鈴木素之：再活動地すべりの安定性評価におけるリングせん断試験と逆算法による強度定数の比較，地盤工学ジャーナル，Vol.16，No.1，pp.49-61，2021.
6) 眞弓孝之，山崎孝成，岩尾雄四郎：すべり面におけるせん断強度と物理的性質との関係，日本地すべり学会誌，Vol.41，No.2，pp.3-11，2004.
7) 草野恭真，鈴木素之，藤井朗汰：動的載荷リングせん断試験における正規および過圧密粘土の繰返しせん断特性，第 59 回地盤工学研究発表会，23-5-2-05，2024.

（2026. 5. 29　受付）