

動的載荷リングせん断試験における
粘土の繰返しせん断特性に及ぼす垂直応力の影響

山口大学大学院 学生会員 ○藤井朗汰
山口大学大学院 正会員 鈴木素之

1. はじめに 近年発生した熊本地震や北海道胆振東部地震においては地すべりが多発し、山麓で深刻な被害をもたらした。地震時に発生する地すべりでは、土が地震動によって繰返しせん断されることで、強度低下を引き起こしてせん断破壊に至ると考えられる¹⁾。地震時の土のせん断破壊を解明するためには、動的載荷条件でのせん断強度の低下を把握することが重要である。一方、地すべりの斜面安定性を評価する際に有用なリングせん断試験による動的載荷条件でのせん断特性は十分に解明されておらず、特に垂直応力の影響は全く検討されていない。これより、本研究では動的載荷リングせん断試験を行い、垂直応力が繰返しせん断特性に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。

2. 土試料 本研究で用いた土試料はカオリンであり、その物理的性質は土粒子の密度 2.607 g/cm^3 、液性限界 60.7% 、塑性指数 36.1 、粘土分含有率 54% である。供試体は、試料の含水比が液性限界の 2.0 倍となるように純水を加えて練り返し、予圧密法により

作製した。予圧密圧力はせん断試験における圧密応力の 85% とし、予圧密の打ち切り時間は $3t$ 法により決定した。供試体は予圧密試料から切り出し、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。供試体のサイズは世界最小クラスで、不攪乱試料に対応しやすい大きさとした。

3. 定体積繰返し載荷リングせん断試験

3.1 試験装置 図-1 に定体積繰返し載荷リングせん断試験装置を示している。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装置に定体積制御装置と繰返し載荷装置を搭載したものである。本試験では、所定の垂直応力 σ_N の下、定体積条件でせん断応力 τ を円周方向に所定の周波数とせん断荷重振幅で反復させながら作用させた。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。

3.2 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 $\sigma_c = 98, 196, 294 \text{ kPa}$ のいずれかで供試体を圧密し、圧密の打ち切り時間は $3t$ 法により確認した。圧密終了後、上・下部リングの隙間を 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 $f = 1.0 \text{ Hz}$ 、せん断荷重振幅 (GAIN 値) T_A を設定し、トルク制御による繰返し載荷を開始した。表-1 に試験ケースと結果を示す。せん断過程の σ_N は σ_c と同じにした正規圧密状態で T_A を3通りに変化させた。表中の $(\Sigma\delta)_{max}$



図-1 定体積繰返し載荷リングせん断試験装置

表-1 定体積繰返しリングせん断試験ケースと結果

Test.No.	σ_c (kPa)	σ_N (kPa)	f (Hz)	T_A (GAIN)	τ_p (kPa)	N_f	τ/σ_N	$(\Sigma\delta)_{max}$ (mm)
1-1	98	98	1.0	100	31.2	24.6	0.470	38.9
1-2				500	62.5	8.7	1.05	186
1-3				800	96.6	6.7	0.860	295
1-4				100	42.6	23.1	0.253	142
1-5	196	196		500	73.9	7.4	0.750	186
1-6				800	102	8.3	0.763	450
1-7				100	65.3	22.3	0.320	37.7
1-8	294	294		500	93.7	6.9	0.540	182
1-9				800	139	5.6	0.550	270

キーワード 地すべり, 定体積せん断, リングせん断試験

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

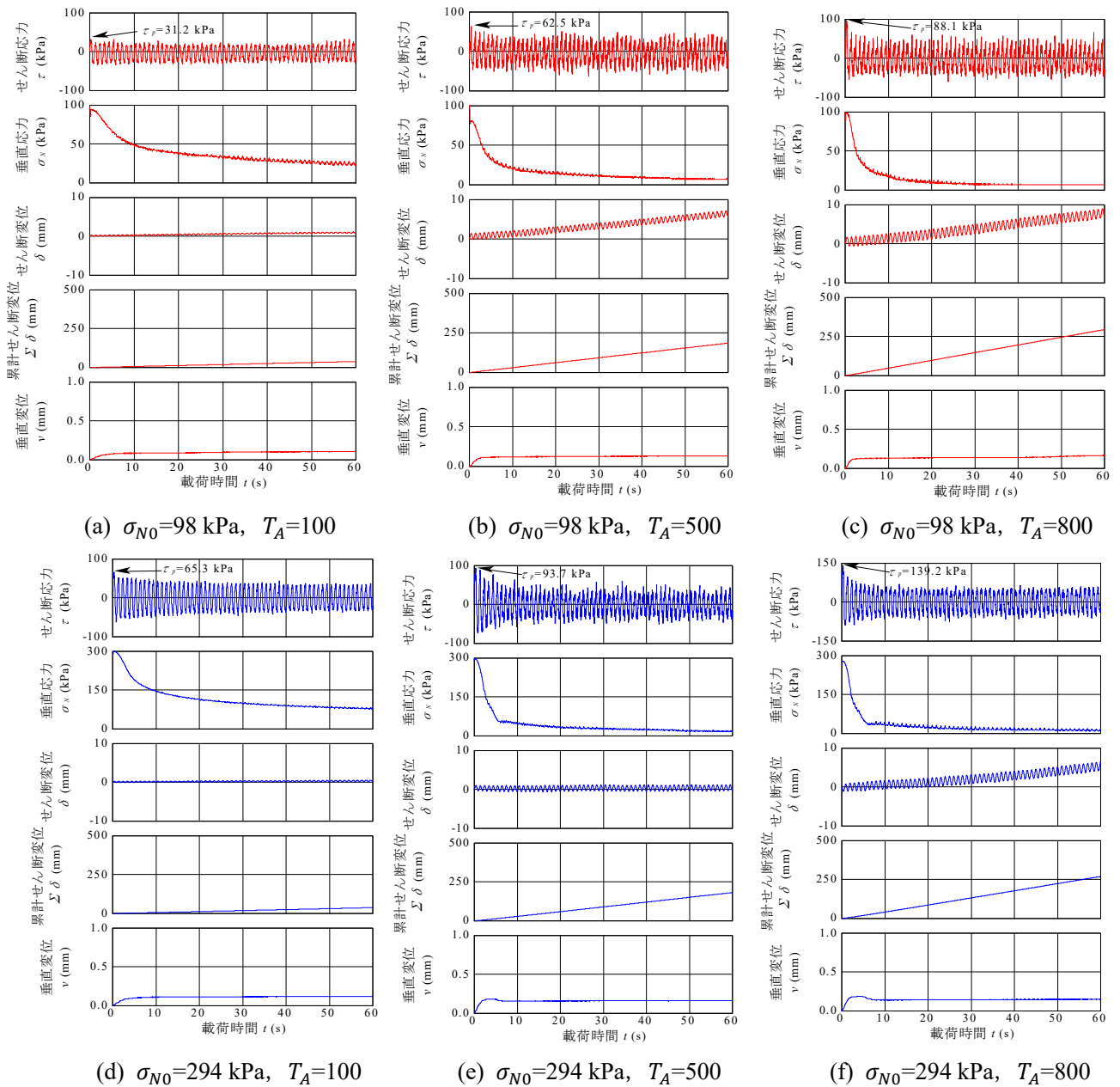


図-2 $\sigma_{N0}=98, 294$ kPaにおいて T_A を変化させたケースのせん断挙動

はせん断変位 δ を累積した $\Sigma\delta$ の最大値である。

4. 粘土の繰返しせん断特性

図-2 (a)~(f)にせん断初期垂直応力 $\sigma_{N0}=98, 294$ kPa において $T_A=100, 500, 800$ と変化させたケースでのカオリンのせん断応力 τ , σ_N , δ , $\Sigma\delta$ および垂直変位 v の時刻歴を示す。なお、 $\sigma_{N0}=196$ kPaの結果²⁾は割愛した。各ケースにおいて、 τ はせん断開始時にピーク値 τ_p を取った後、大幅に低減し、その後一定になっている。 σ_{N0} が大きいほど、また、 T_A が大きいほど、 τ_p は大きくなる。 v はせん断開始直後にわずかに生じているが、これはせん断開始前に上・下リング隙間を設定した際に生じた供試体との隙間を埋めるように垂直変位が生じたものと考察する。その後 v は一定で推移しているの、定体積条件を保っているといえる。 σ_N はせん断開始直後から急激に減少し、 σ_{N0} もしくは T_A が

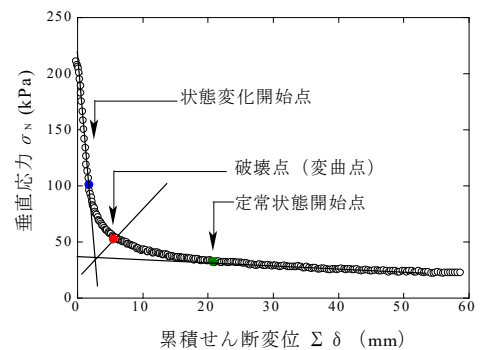


図-3 破壊基準の決定 (模式図)

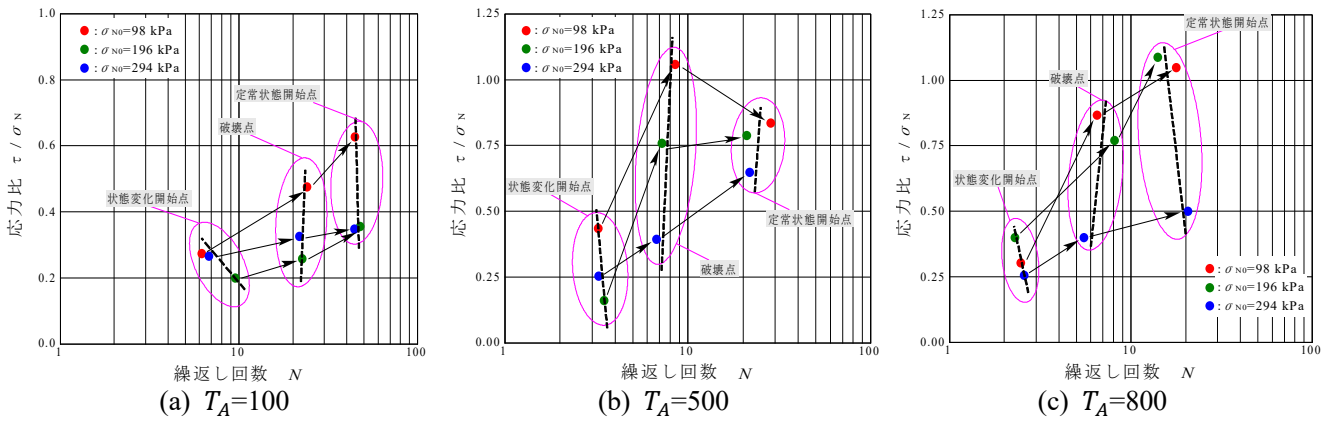


図-4 せん断荷重振幅が同じ条件での応力比と繰返し回数の関係

大きいほど、その減少幅は大きくなり、最終的にはどのケースも一定となっている。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に σ_N が減少したことに他ならない。 δ は、振幅がほぼ一定のまま、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。 $\Sigma\delta$ は前述のように δ の増分を加算したものであり、荷重時間60秒のときの $\Sigma\delta$ に σ_{N0} の違いはみられないが、 T_A の大きさにより、その勾配すなわちせん断変位速度は大きくなる傾向がみられた。

次に、 σ_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した。図-3に破壊点、破壊前後の状態変化開始点および定常状態開始点を模式的に示す。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した。また、定常状態開始点は、 $\sigma_N-\Sigma\delta$ 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 σ_N の定常状態値と決定し、せん断開始から定常状態に達するまでの σ_N の減少分の95%となる点と決定した。破壊点は上述のように $\sigma_N-\Sigma\delta$ 関係における変曲点であり、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 $\sigma_N-\Sigma\delta$ 曲線の交点に決定した。

図-4(a)~(c)に T_A が同じ条件の応力比 τ/σ_N と繰返し回数 N の関係を示す。また、図中の矢印は状態点の移行過程を示している。いずれのケースにおいても、 N が増えるとともに τ/σ_N は増加して、状態変化開始点から破壊点を経て、 τ/σ_N が増加（一部は減少）して、定常状態へ移行する挙動がみられた。また、どの状態点においても τ/σ_N の値は σ_{N0} によって異なるが、 N は各状態点で同じ値を取っていることが分かる。すなわち、3つの状態点は σ_{N0} によらず、 T_A の違いに依存するといえる。図-4(a)~(c)を比較すると、 $\sigma_{N0}=98\text{ kPa}$ のときは τ/σ_N が高い値で推移し、逆に $\sigma_{N0}=294\text{ kPa}$ のときは τ/σ_N は低い値で推移していることが分かる。なお、状態点が移行する繰返し回数の間隔は変わらないことも分かる。

図-5に対数表示のせん断変位速度 δ と破壊時の応力比 $(\tau/\sigma_N)_f$ の関係を示す。 δ は $\Sigma\delta$ を荷重時間で除したものである。 $(\tau/\sigma_N)_f$ と $\log \delta$ において直線関係が認められ、 $(\tau/\sigma_N)_f$ が高いほど、せん断変位速度が大きくなる傾向がみられ、その変化率は σ_{N0} に依存しないことが分かった。

5. 結論 本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- 1) 初期垂直応力が高いケースほど、繰返しせん断応力のピーク値 τ_p が大きくなることから、繰返しせん断特性に垂直応力の依存性が認められた。
- 2) 応力比と繰返し回数の関係より、各状態点に達する応力比は初期垂直応力によって異なるが、繰返し回数はほぼ同じになった。

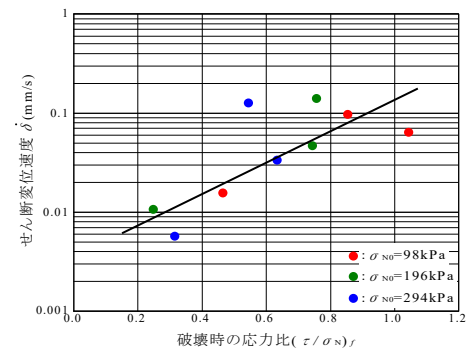


図-5 せん断変位速度と応力比の関係

- 3) 各状態点の応力比は初期垂直応力が大きくなると、全体的に小さくなる。
- 4) 破壊時の応力比とせん断変位速度の常用対数の間には初期垂直応力によらず直線関係があり、破壊時の応力比が高いほど、せん断変位速度が大きくなる傾向がみられた。

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）として実施した。
ここに記して関係各位に謝意を表明する。

参考文献

- 1) 藤井朗汰, 鈴木素之, 上鶴瀬一真：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, 第 11 回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp.31-36, 2022.
- 2) 藤井朗汰, 鈴木素之：動的載荷リングせん断試験における繰返しせん断特性に及ぼす垂直応力の影響, 第 58 回地盤工学研究発表会, 2023 (投稿中).