繰返しリングせん断試験による土の強度定数の算定法と斜面安定性評価

DETERMINATION OF SOIL STRENGTH PARAMETERS
BY CYCLIC RING SHEAR TESTS AND SLOPE STABILITY EVALUATION

高原 蒼[1]・鈴木 素之[2]・軸屋 雄太[3]
Sou TAKAHARA, Motoyuki SUZUKI and Yuta JIKUYA

[1]山口大学大学院創成科学研究科（〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1）
E-mail: f023vew@yamaguchi-u.ac.jp
[2]山口大学大学院創成科学研究科（〒755-8611 山口県宇部市常盤台 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 山口県宇部市常盤台 2-16-1）
E-mail: yuta-j@yamaguchi-u.ac.jp

***Key Words**: cyclic shear test, ring shear test, strength parameters, safety factor*

1. はじめに

地震時地すべりは，地盤が地震動による繰返しせん断を受けることにより土の強度が低下することで発生し，深刻な影響を及ぼすことが懸念されている[1)]．特に，大規模地震時において，火山灰質土は繰返しせん断を受けることにより，ピーク強度から残留強度に至るまで著しい強度低下が生じる[2)]．そのため，これらの強度特性を適切に評価することは，地すべりの発生メカニズムの解明および斜面の安定性評価において重要である．

土の強度定数（粘着力，内部摩擦角）は，一般にクーロンの破壊規準[3)]に基づいて決定され，斜面の安定性評価などに広く用いられている．また，地震時の斜面安定計算では，一面せん断試験やリングせん断試験により得られた静的強度を便宜的に用いられるケースがあるが，これらは地震時の繰返しせん断条件下における強度低下を必ずしも適切に反映できていない可能性がある．一方，繰返しリングせん断試験は，地震時に地盤が受ける動的載荷条件を再現可能な試験手法であり，土の強度低下を実現象に近い形で評価できる．しかし，繰返しリングせん断試験ではせん断応力が正負と変動するため，単調載荷試験のようにピーク強度および残留強度を一義的に定義することが難しく，これまで明確な決定法は示されていない．

そこで本研究では，2016 年熊本地震において南阿蘇村高野台地区で発生した地震時地すべりの実際のすべり層とされる草千里ヶ浜火山降下軽石を対象試料として，繰返しリングせん断試験および，従来の試験方法である静的載荷条件の圧密・定圧リングせん断試験を実施した．そして，繰返しリングせん断試験により得られたせん断挙動の時刻歴に基づく，ピーク強度および残留強度の決定法を提案するとともに，複数の垂直応力条件下で試験を実施し，土の強度定数を決定した．さらに，繰返しリングせん断試験および圧密・定圧リングせん断試験のそれぞれで算定した強度定数を用いて震度法による斜面安定性評価を実施し，繰返しせん断が地震時地すべりの評価に及ぼす影響について検討した．

2. 草千里ヶ浜火山降下軽石

本研究に用いた試料は，熊本県南阿蘇村高野台地区で採取した，実際のすべり層とされる草千里ヶ浜火山降下軽石[4)]（**写真 1**）である．採取した試料に対



写真 1　草千里ヶ浜火山降下軽石

表 1　基本物性値および状態量

	含水比	土粒子密度	湿潤密度	乾燥密度
	[%]	[Mg/m^3]	[Mg/m^3]	[Mg/m^3]
対象試料	67.4	2.394	0.865	0.516

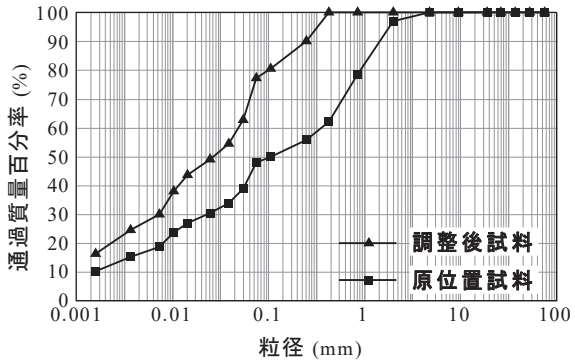


図 1　試料の粒径加積曲線

して実施した物理試験による基本物性値および状態量を**表 1** に，粒径加積曲線を**図 1** に示す．試料採取場所は京都大学火山研究センターから西南西方向におよそ 250 m の地点であり，乱した状態の試料を採取した．ここで，リングせん断試験において試料の最大粒径に関する明確な規定は設けられていないが[5]，最大粒径はせん断挙動に大きな影響を及ぼすことが予想される．そこで本研究では，圧密・定圧一面せん断試験（JGS 0561-2009）[6]において，試料の最大粒径が供試体直径の 1/70 程度と規定されていることを参考に，繰返しリングせん断試験における供試体の外径と内径の差が 28 mm であることから，そのおおよそ 1/70 である 425 μm を試料の最大粒径と設定した．繰返しリングせん断試験および圧密・定圧リングせん断試験では，425 μm ふるいを通過した試料（以下，調整後試料と記す）を用いた．

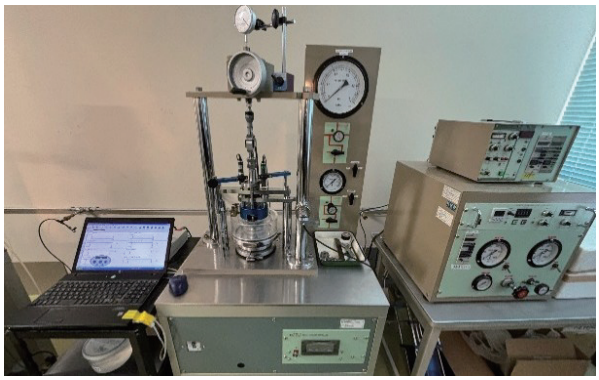


写真 2　繰返しリングせん断試験装置

3. 試験内容

(1) 繰返しリングせん断試験

本研究では，定体積繰返しリングせん断試験装置を用いた．試験装置を**写真 2** に示す．本装置は，せん断荷重振幅, 周波数, 波形を設定することにより，地震時における斜面内の応力状態を再現可能であり，左右方向に繰返し変位を与える装置である．測定項目は垂直荷重, 垂直変位, せん断荷重, せん断変位, リング周面摩擦力である．供試体は外径 70 mm，内径 42 mm，高さ 20 mm の環状であり，供試体高さ 10 mm の位置で繰返しせん断される．

以下に試験手順を示す．炉乾燥した試料を原位置と同じ含水比（w = 67.4 %）になるように蒸留水を混ぜて調整し，原位置の乾燥密度（ρ_d = 0.516 Mg/m^3）になるよう，せん断容器内で突き固めて，供試体を作製した．次に，せん断容器のアクリル水槽に注水し, 24 時間浸水して, 供試体を飽和させた. その後，所定の圧密応力 σ_c で圧密し（圧密時間は 3t 法により 60 分に決定した），σ_c と同じ初期垂直応力 σ_{N0} の下で繰返しせん断した．σ_{N0} は，98，147，196，245 kPa の 4 ケースとし，いずれのケースでも，せん断荷重振幅 T_A = 100 GAIN，周波数 f = 1.0 Hz，せん断隙間 d = 0.1 mm とした．本研究では，クーロンの破壊規準に基づいて強度定数を算定するため，複数の垂直応力条件で試験を実施した．笠間ら [4]の報告では，現場の土被り圧がおおよそ 100 kPa と算定されていることを参考に，98 kPa の垂直応力を基準として 50 kPa 間隔で増加させた 147，196 および 245 kPa の計 4 条件で試験を実施した．また，せん断隙間 d は，リングせん断時に上部リングと下部リングとの間に不要な摩擦が発生しないように設けた隙間である．

(2) 圧密・定圧リングせん断試験

本研究では，Bishop et al.[7]に準拠した圧密・定圧リングせん断試験装置を用いた [8]．本装置は，所定の

垂直応力を載荷した状態で，下側リングを一方向に連続回転させることで，大きなせん断変位を与えることが可能な装置である．供試体は内径 60 mm，外径 100 mm，高さ 20 mm の環状であり，供試体高さ 10 mm の位置でせん断される．なお，本試験では，繰返しリングせん断試験よりも大きな供試体寸法を用いており，繰返しリングせん断試験と同一の最大粒径を用いても問題はないと判断した．そのため，両試験で比較を行うために，最大粒径は繰返しリングせん断試験と同一とした．測定項目および試験手順は定体積繰返しリングせん断試験の条件と同様である．また，せん断速度は 0.1 mm/min とした．

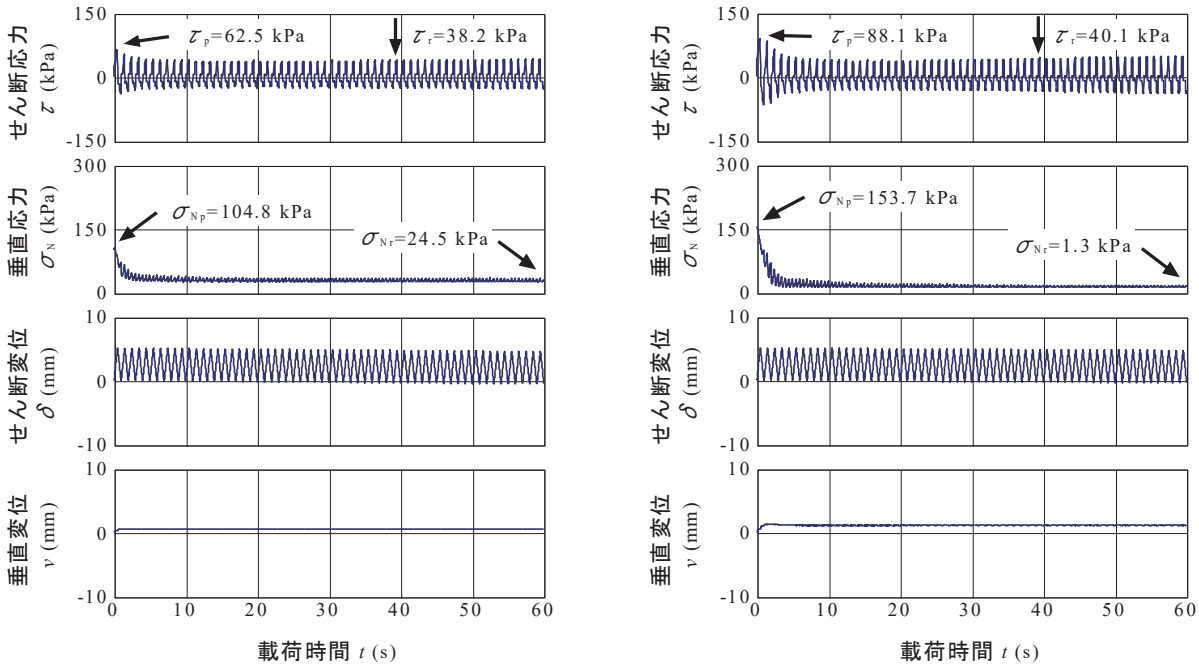
4. 試験結果

(1) 繰返しリングせん断試験の結果

図 2(a)～(d) に σ_{N0} = 98，147，196，245 kPa におけるそれぞれの試験結果を示す．それぞれ，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 と載荷時間 t の関係である．また，図中には各条件でのピーク強度 τ_p，残留強度 τ_r，ピーク時の垂直応力 σ_{Np} および，残留時の垂直応力 σ_{Nr} を示している．τ はいずれの条件下でもせん断開始直後に大きな振幅を示した後，徐々に低下し，その後は一定の振幅に収束した．また，σ_{N0} が大きいほど，全体として振幅が大きくなる傾向が確認された．σ_N はせん断開始とともに低下した．これは定体積条件を保つための挙動である．また，σ_{N0} の違いによらず，せん断に伴い σ_N はおおよそ類似した値に収束する傾向が見られた．δ は一定振幅のもとで規則的に繰返された．v はせん断開始直後にわずかに生じているが，せん断前に上・下部リング間に隙間を設けた際に生じた，載荷板と供試体上面の間との空隙を埋めるために生じたものと考えられる．

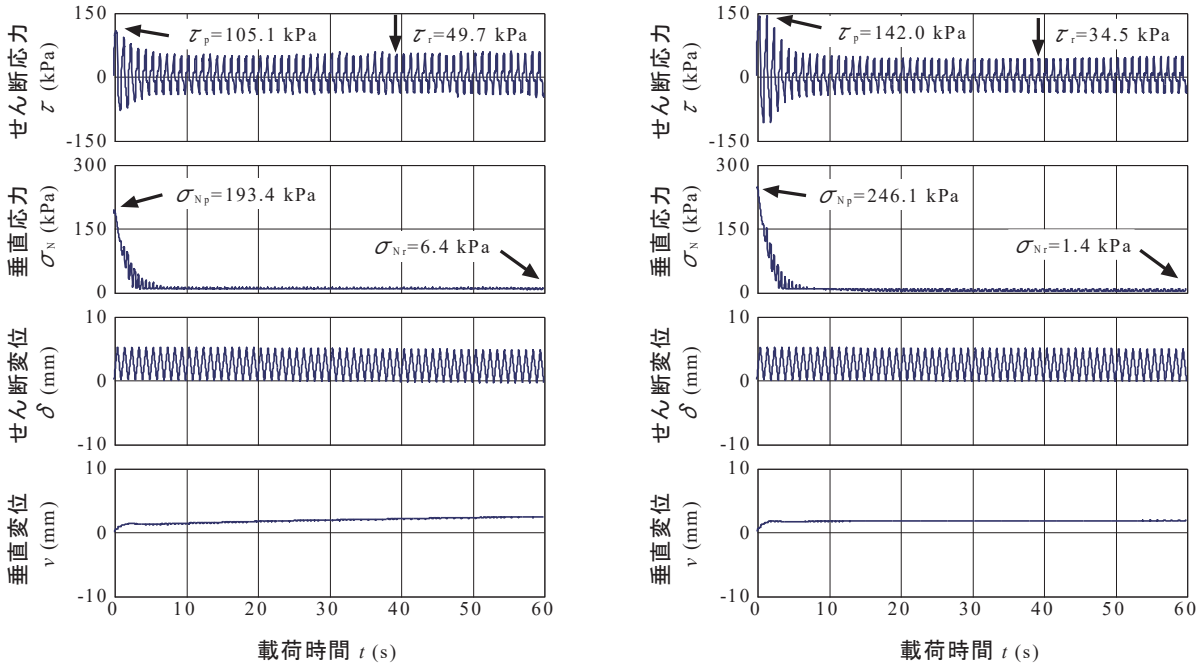
(2) 圧密・定圧リングせん断試験の結果

図 3(a), **(b)** にそれぞれ σ_N = 98，147，196，245 kPa におけるせん断変位角 θ とせん断応力 τ および，垂直変位 v の関係を示す．**図 3(a)** において，σ_N が高いほど，τ_p の値は高くなることが確認された．また，いずれの σ_N においても，せん断開始後の初期段階で，τ が急激に増加し，τ_p に達している．その後，せん断面が形成されながら τ は徐々に低下し，おおよそ一定となる τ_r の状態に移行している．**図 3(b)** においては，いずれの σ_N においても，τ_p に至るまでの初期段階で v が急激に低下しており，この体積減少は負のダイレイタンシーによるものと考えられる．**図 4** に圧密・定圧リングせん断試験から決定した強度線を示す．残留強度の決定法として，鈴木ら [2] の方法を用いた．その結果，ピーク強度における粘着力 c_p = 5.4 kPa，内部摩擦角 ϕ_p = 35.4 °，残留強度の粘着力 c_r = 4.1 kPa，内部摩擦角 ϕ_r = 33.7 °であった．



(a) σ_{N0} = 98 kPa　　(b) σ_{N0} = 147 kPa

図 2　繰返しリングせん断試験結果



(c) σ_{N0} = 196 kPa　　(d) σ_{N0} = 245 kPa

図 2　繰返しリングせん断試験結果

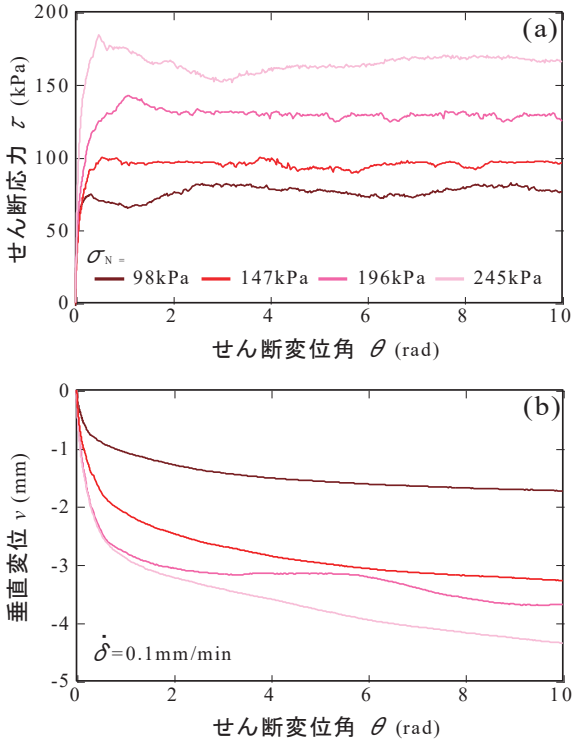


図 3　せん断変位角とせん断応力，垂直変位の関係

5. ピーク強度および残留強度の決定法

本研究では，繰返しリングせん断試験により得られるせん断挙動の時刻歴に基づき，ピーク強度および残留強度の決定法の提案を行った．その決定法を

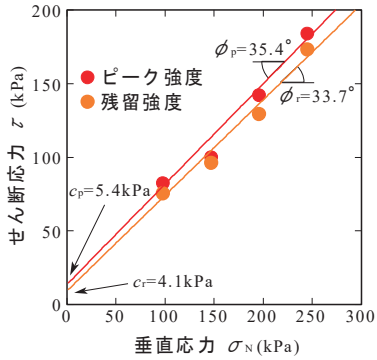


図 4　ピーク強度および残留強度発現時の強度線

図 5 に示す．繰返しせん断においてはせん断初期に大きなせん断応力が発現する [9]ため，ピーク強度は各試験におけるせん断応力の最大値とした．一方，残留強度はせん断応力の上側包絡線となる点を抽出し，これに対して双曲線関数による近似を行い，その漸近値を残留強度とした．この方法により，繰返しせん断に伴う強度低下後の残留強度を定量的かつ客観的に決定することが可能となる．

繰返しリングせん断試験における各垂直応力条件で得られたピーク強度および残留強度について，垂直応力とせん断強度の関係から強度線の決定を試みた．強度線は，縦軸をせん断応力，横軸を垂直応力としてクーロンの破壊規準式(1)に基づき決定した．このときの切片を粘着力 c，傾きを内部摩擦角ϕとした．

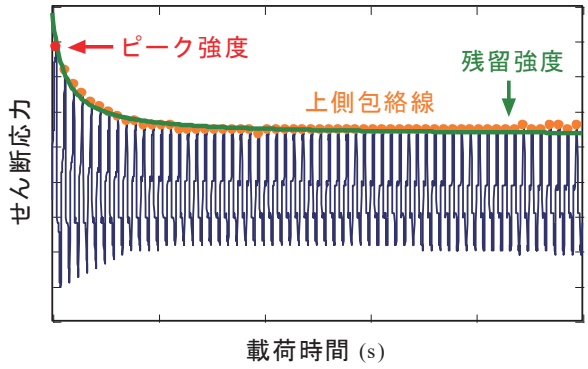


図 5　ピーク強度および残留強度の決定法

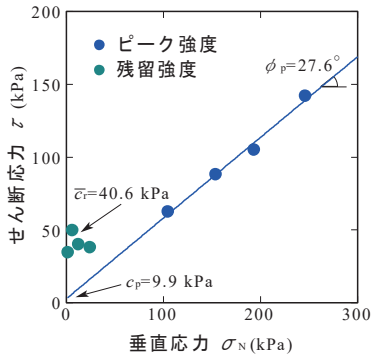


図 6　繰返しリングせん断試験での強度線

$$\tau = \tan\phi \cdot \sigma_N + c \qquad (1)$$

ここで，ピーク強度および残留強度の発現時には，いずれも垂直応力がσ_{N0}から増減していることから，ピーク強度および残留強度にそれぞれ対応する垂直応力を用いた．その結果を**図 6** に示す．この図から，ピーク強度における粘着力 $c_p = 9.9$ kPa，内部摩擦角 $\phi_p = 27.6$ °であった．一方，残留強度については，いずれの σ_{N0} 条件下においても，残留せん断応力時の垂直応力が同程度まで低下する傾向を示し，試験データが近接した範囲に収れんした．このようなデータに対して強度線を決定すると，残留強度における粘着力 $c_r = 41.1$ kPa，内部摩擦角 $\phi_r = -0.2$ °であった．そこで本研究では，非排水時のせん断強さがすべり面全体に均一に発揮されると考え，$\phi_r = 0.0$ °とし，各試験における τ_r の平均値を$\bar{c}_r$とした．その結果，$\bar{c}_r = 40.6$ kPa であった．

6. 斜面の安定性評価

本研究では，繰返しリングせん断試験および圧密・定圧リングせん断試験により得られた土の強度定数を用いて震度法による単一地層のモデルにおける安全率を算定した．南阿蘇村高野台地区での地すべり（**図 7**）を無限長斜面の平面すべりに近似し，震度法を用いた式(2)により地震時安全率 $F_{S,E}$ を算定した．なお，算定に使用した地震波形[10]を**図 8** に示す．これは，2016 年 4 月 16 日 1 時 25 分に発生した，熊本県を震央とするマグニチュード 7.3 の本震[11]時に，南阿蘇村高野台地区から約 11 km 離れた熊本県大津町の地表面付近において観測された地震波形であり，EW 方向の地震加速度を用いた．また，鉛直震度 k_v はゼロと仮定した．

$$F_{S,E} = \frac{c + \gamma_t H \cos\beta\left(\cos\beta - k_y \sin\beta\right)\tan\phi}{\gamma_t H \cos\beta\left(\sin\beta + k_y \cos\beta\right)} \qquad (2)$$

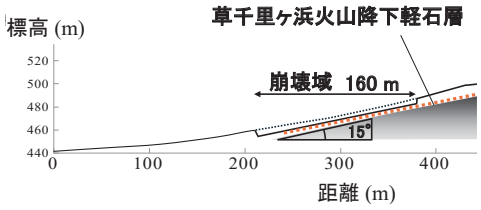


図 7　南阿蘇村高野台地区の断面図
（熊本地震土砂災害報告書[12]を基に再作成）

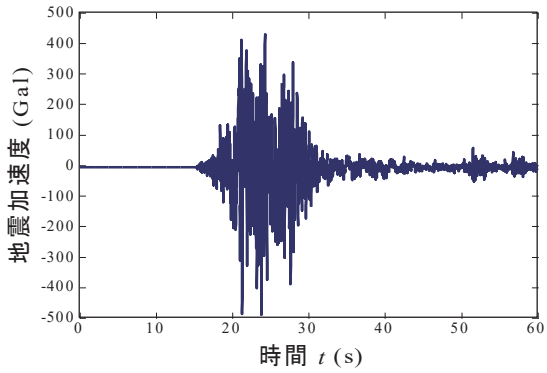


図 8　EW 方向の地震波形

表 2　安全率の算定結果

	ピーク強度	残留強度
繰返しリングせん断試験	0.791 (c = 9.9 kPa, ϕ = 27.6 °)	0.833 (c = 40.6 kPa, ϕ = 0.0 °)
圧密・定圧リングせん断試験	0.909 (c = 5.4 kPa, ϕ = 35.4 °)	0.835 (c = 4.1 kPa, ϕ = 33.7 °)

ここに，β は斜面の勾配，H は降下軽石層の上位層の厚さ，γ_t は平均の湿潤単位体積重量，c は粘着力，ϕは内部摩擦角である．本研究においては，熊本地震土砂災害報告書[12]を参考に，$\beta = 15°$，$H = 8.0$ m に設定した．

算定の結果を**表 2** にまとめる．なお，定圧条件と定体積条件では，両試験結果を直接比較することには限界があるが，従来法による評価結果と繰返しせん断を考慮した評価結果との差異を把握することを

目的に比較を行った．繰返しリングせん断試験により得たピーク強度における地震時安全率は，圧密・定圧リングせん断試験により得たピーク強度における地震時安全率と比較して小さい値を示した．このことから，繰返しリングせん断試験を用いることで，地震時に地盤が受ける強度低下を反映することが可能となり，地震時地すべりの危険側で判断できる可能性が示唆された．一方，残留強度に基づく地震時安全率はいずれの試験方法でも同程度の算定結果であり，試験方法による明確な差異は確認されなかった．このことから，繰返しせん断の影響は特にピーク強度の発現時において顕著に現れる可能性が示された．また，繰返しリングせん断試験より得たピーク強度から算定した安全率が，残留強度から算定した安全率よりも小さい値となった．これは，残留強度の決定法に影響を受ける可能性がある．今後，複数のフィッティング手法により残留強度を算定し，得られる強度定数および安全率を比較することで，本研究の妥当性を検討する必要がある．

7. まとめ

本研究では，2016 年熊本地震において南阿蘇村高野台地区で発生した地震時地すべりのすべり層とされる草千里ヶ浜火山降下軽石を対象試料として，繰返しリングせん断試験および圧密・定圧リングせん断試験を実施した．繰返しリングせん断試験により得られた試験結果に基づき，ピーク強度および残留強度の決定法を提案するとともに，土の強度定数を算定した．

その結果，①ピーク強度については，複数の垂直応力条件下で試験を実施することで，粘着力および内部摩擦角を算定可能であった．一方，②残留強度については，$\phi_r = 0.0°$と仮定し，$\tau_{r_ave} = c_r$とした．さらに，③得られた強度定数を用いて震度法による安全率を算定した結果，繰返しリングせん断試験によるピーク強度に基づく安全率は，静的載荷条件の圧密・定圧リングせん断試験よりも小さい値を示した．このことから，繰返しせん断の影響は特にピーク強度の発現時において顕著に現れる可能性が示された．

謝辞：試料採取及び現地立入では，南阿蘇村役場，京都大学火山研究センター・大倉敬宏教授，かとてコな・中濃耕司氏にお世話になった．また，試料採取方法では山口大学技術職員・山本修三氏のご協力をいただいた．また，地震波形は国立研究開発法人防災科学技術研究所が提供するデータを活用した．ここに記して関係者各位に深く感謝の意を表明する．

参考文献

1) 佐々恭二，福岡浩，汪発武，王功輝：平成 16 年新潟県中越地震により発生した再活動地すべり地における高速地すべり発生・運動機構，日本地すべり学会誌，Vol. 44, No. 2，pp. 71-78，2007.
2) 鈴木素之，梅崎健夫，川上浩：リングせん断試験における粘土の残留強度とせん断変位の関係，土木学会論文集，No. 575/Ⅲ-40，pp. 141-158，1997.
3) 日本応用地質学会中国四国支部：モールの応力円とクーロンの強度式による破壊基準，応用地質 Q&A 中国四国版，土-14，https://www.jseg.or.jp/chushikoku/wp-jseg/wp-content/uploads/2025/03/1_14.pdf，（閲覧日：2026 年 5 月 21 日）．
4) 笠間清伸，山縣史朗，田中大貴，古川全太郎，安福規之：南阿蘇村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. 171-181，2018.
5) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説（第一回改訂版），丸善出版，2020.
6) 地盤工学会：地盤材料試験の方法と解説（第一回改訂版），丸善出版，pp. 666-699，2020.
7) Bishop, A.W.: A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength， Ge´otechnique, Vol.21, No.4, pp.273-328, 1971.
8) 草野恭真，鈴木素之，藤井朗汰：リングせん断試験による異なる載荷条件での粘土のせん断特性とせん断後の含水比分布，第 58 回地盤工学研究発表会，11-5-2-04，2023.
9) 鈴木素之，山本哲郎，北村一也，中村克己，福田順二：土の残留強度を測定するための繰返し一面せん断試験の方法と結果の解釈，山口大学工学部研究報告 53 巻 2 号，pp. 143-153，2003.
10) 防災科学技術研究所：NIED K－NET，KiK－net，国立研究開発法人防災科学技術研究所，https://doi.org/10.17598/NIED.0032.
11) 国土交通省気象庁：平成 28 年（2016 年）熊本地震，地震の震源及び規模等，https://www.data.jma.go.jp/eqev/data/2016_04_14_kumamoto/index.html，（閲覧日：2026 年 5 月 21 日）．
12) 釜井俊孝，王功輝，土井一生：平成 28 年熊本地震によって発生した南阿蘇村の土砂災害（速報 1：2016. 4. 28 暫定版），京都大学防災研究所斜面未災学研究センター．

（2026.5.29　受付）