

連続加圧式保水性試験を活かした不飽和土のせん断強度算定のための応力分担補正とそのシステム

COMBINED SHEARING BOX AND CONTINUOUS PRESSURIZATION SYSTEM TO DETERMINE
THE UNSATURATED SOILS STRENGTH USING NORMAL STRESS SUPERPOSITION

相良 知輝¹・アロワイシー アデル²・安福 規之³・石蔵 良平⁴・

畠山 正則⁵・京野 修⁵

Tomoki SAGARA, Adel ALOWAISY, Noriyuki YASUFUKU, Ryohei ISHIKURA,
Masanori HATAKEYAMA and Shuu KYONO

¹九州大学大学院工学府土木工学専攻 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: sagara.tomoki.945@s.kyushu-u.ac.jp

²九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: a.adel@civil.kyushu-u.ac.jp

³九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: yasufuku@civil.kyushu-u.ac.jp

⁴九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: ishikura@civil.kyushu-u.ac.jp

⁵応用地質株式会社 (〒101-8486 東京都千代田区神田美土代町 7 番地)

Key Words: *unsaturated soil, SWCC hysteresis, shear strength, stress superposition*

1. はじめに

近年、日本では気候変動により豪雨の発生回数が増加している¹⁾。特に、令和 2 年 7 月九州豪雨等の大雨による河川堤防の決壊や斜面崩壊の二次災害は甚大な被害を及ぼしている²⁾。ここで、豪雨による斜面崩壊の主な原因は、雨が降って水が浸透したり蒸発したりして、土のせん断強度が変化することである。実際の土中では、水の浸透や蒸発によって飽和状態と不飽和状態を繰り返している。それに伴って飽和度や含水比が変化することで、サクシオンとそれに起因する粘着力が変化し、せん断強度も変化する。サクシオンとは空気圧と水圧の差で水を吸い上げる力で、これと含水比(飽和度)の関係を水分特性曲線という。水分特性曲線では一般に、サクシオンの値が同じでも、水が蒸発する排水過程より水が浸透する吸水過程の方が含水比は小さくなる。こ

れを水分特性曲線のヒステリシスという。それに関連して、不飽和土に対して一面せん断試験を行うと、圧密応力やサクシオンを横軸としたせん断強度、そのパラメータである粘着力と内部摩擦角は、排水過程と吸水過程で異なる可能性がある。このことは、降雨による斜面安定性を評価するには、水分特性曲線と不飽和せん断強度を関連付けて評価することが重要であることを示唆する。

不飽和土のせん断強度に関しては、過去に様々な研究が行われてきた。その中でも Bishop らは、不飽和土に対応したせん断強度式を提案し、それらは飽和度やサクシオンなどの水分特性を必要とすることを示した³⁾。しかし、この式は基本的に排水過程と吸水過程を分けて考えておらず、水分特性曲線のヒステリシスの影響を反映できない可能性がある。一般的に、不飽和土の力学的挙動を把握するためには不飽和三軸圧縮試験が行われる。しかし、この試験

は複雑で長時間かかる。一方で、一面せん断試験は試験方法が比較的簡便であり、供試体排水距離が短いため試験時間が短いことが知られている。これを踏まえて、水分特性曲線とせん断強度の簡易計測システムの開発が行われた^{4),5)}。ここでは、保水性試験によって求めた水分特性曲線の飽和度を基準として、簡易的な定圧一面せん断試験を行ってせん断強度を求めた。その結果、水分特性曲線の排水過程と吸水過程、飽和度で粘着力が異なり、内部摩擦角は飽和度に依らずほぼ一定であることが示された。しかし、定圧一面せん断試験ではせん断時に体積が変化することから、それに伴って水分特性が変化する可能性がある。また、保水性試験と一面せん断試験の装置間で供試体のサイズの違いを調整する際に、供試体と同じ条件の試料を敷き詰めていたことから、試験が困難で再現性が低いと考えられる。

そこで本研究では、火山灰質粘性土である阿蘇黒ぼくを対象に、保水性試験で目標のサクシオンを予め設定して水分特性曲線を求め、その後定体積一面せん断試験を行うことで、せん断過程で含水比が変化しないせん断強度を算出した。ここで、保水性試験後から一面せん断試験装置へ供試体を設置する間にサクシオンと含水比が保持されるかを確認した。また、試験装置間のサイズの調整は試験が容易なバルサ材を使用し、せん断応力や圧密過程における応力分担の影響を評価した。これを活用して、初期サクシオンや排水過程と吸水過程の違いがせん断強度に与える影響を、水分特性と関連付けて評価した。

2. 試験システムの概要

(1) 1ステップシステムの概要

本研究では、連続加圧式保水性試験^{6),7)}と定体積一面せん断試験を連続して行うことが新規性の一つであり、この一連の試験のシステムを1ステップシステムと称する。1ステップシステムでは、水分特性

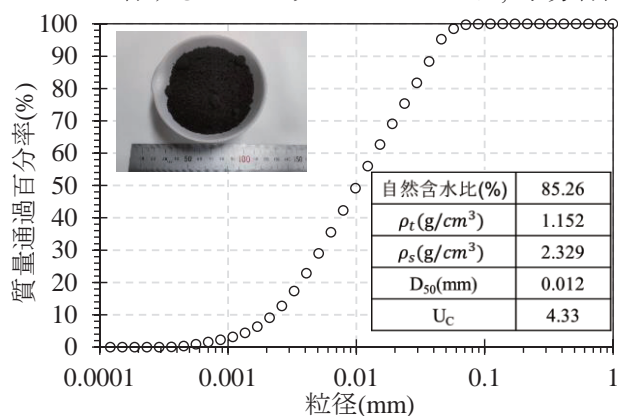


図-1 阿蘇黒ぼくの粒径加積曲線

曲線を求めるために連続加圧式保水性試験を行って、せん断強度を算定するためのパラメータである粘着力と内部摩擦角を求めるために定体積一面せん断試験を保水性試験とは別の装置で実施する。

本研究では、土粒子密度が2.329g/cm³で図-1の粒度を示す阿蘇黒ぼくを使用した。供試体は自然状態の湿潤密度で直径5cm、高さ5cmの円柱型に締め固めた後、100kPaの真空圧で24時間以上脱気飽和させた。

連続加圧式保水性試験では、図-2に示す試験装置に空気圧を注入して試料を加圧し、サンプル内に設置したマイクロテンシオメーターで水圧を測定することで、サクシオンを経時的に求めることができる^{6),7)}。連続加圧式の利点としては、水圧を精度良く測定することで高精度なサクシオンを求められること、試験時間が短く手順が比較的簡単であること、連続した水分特性曲線が得られることが挙げられる。サクシオンが排水過程で30, 80kPa、吸水過程で80kPaに達するまでそれぞれ別途試験を行った。

保水性試験でサクシオンを制御した不飽和土に対して、標準的で排水可能な一面せん断試験装置を用いて定体積一面せん断試験を行った。定体積試験の利点としては、保水性試験でサクシオンを制御して、定体積条件で含水比が変化しない状態で試験を行うと、サクシオンと含水比の関係を表す水分特性曲線と関連したせん断強度を評価できることが挙げられる。それぞれ圧密が完了する1時間の間200, 100kPaの圧密応力を載荷し、定体積条件でせん断速度0.2mm/minのもと、せん断変位が7mmに達するまで試験を行った。

ここで、保水性試験後と一面せん断試験装置への設置時のサクシオンと含水比が同等であるかを確認

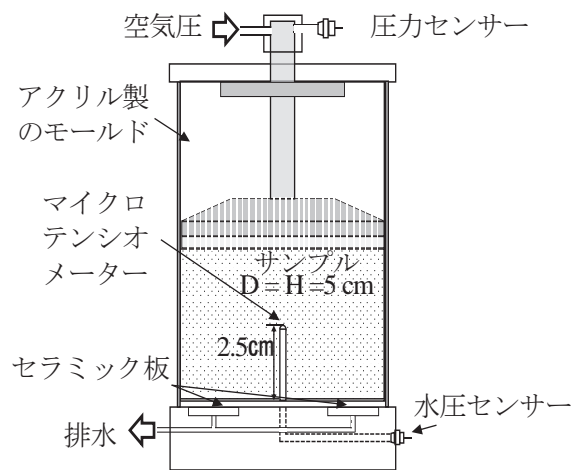


図-2 連続加圧式保水性試験装置

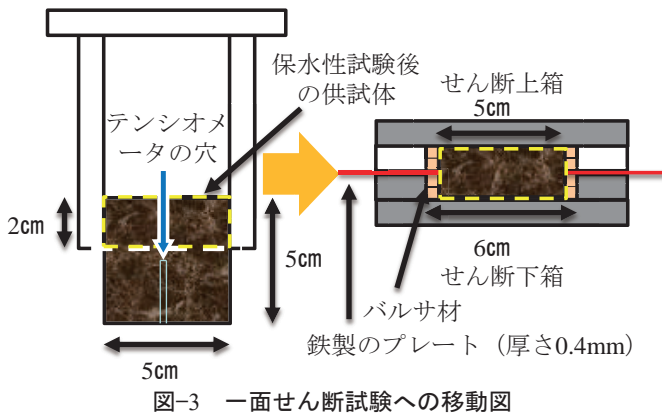


図-3 一面せん断試験への移動図

するために、25℃前後の室温の下で本試験とは別に保水性試験から一面せん断試験への移動に必要な約1時間のサクシヨンの変化を確認し、保水性試験直後とその1時間後の含水比の変化も確認した。

また、供試体のサイズが保水性試験では直径5cmに対して、一面せん断試験では直径6cmと違いがある。そこで図-3のように、保水性試験後の供試体の高さを2cmにカットして、乾燥したバルサ材を一面せん断試験のせん断箱に設置して直径6cm相当に調整し、一面せん断試験を行った。ここで、テンシオメータの穴の部分は供試体のカットの際に切り取られ、それ以外の部分を一面せん断試験に使用するため、一面せん断試験において穴の影響は受けない。また、バルサ材は最も含水比が高い飽和土においても全体の約2%しか水分を吸収しない。厚さ0.4mmの鉄製のプレートを入れてバルサ材同士の摩擦を防ぐことで、せん断応力への影響を小さくするようにした。一面せん断試験ではサクシヨンを計測することができないが、保水性試験終了後の初期サクシヨンが同一であれば、条件を統一してせん断強度を比較することができる。ここで、圧密過程におけるバルサ材の影響を考慮するために、バルサ材の弾性領域内でバルサ材と試料の応力の重ね合わせが有効であると仮定する。それぞれの圧密応力-垂直変位関係から図-4のフローチャートのように、圧密過程による応力分担を考慮したせん断強度を算定した。具体的には、設定した圧密応力をバルサ材にかけてキャリブレーションを行う。その後、バルサ材で調整した保水性試験後の試料に対して同じ圧密応力で一面せん断試験を行う。次に、キャリブレーションの結果からバルサ材で調整した試料の最終圧密変位におけるバルサ材のみの圧密応力 σ_B を算出する。これにより、バルサ材で調整した試料にかかる圧密応力 σ_T を求めると、未知の値である試料のみの圧密応力 σ_S を求めることができる。そこから得られる変化率をピークせん断応力における圧密応力に

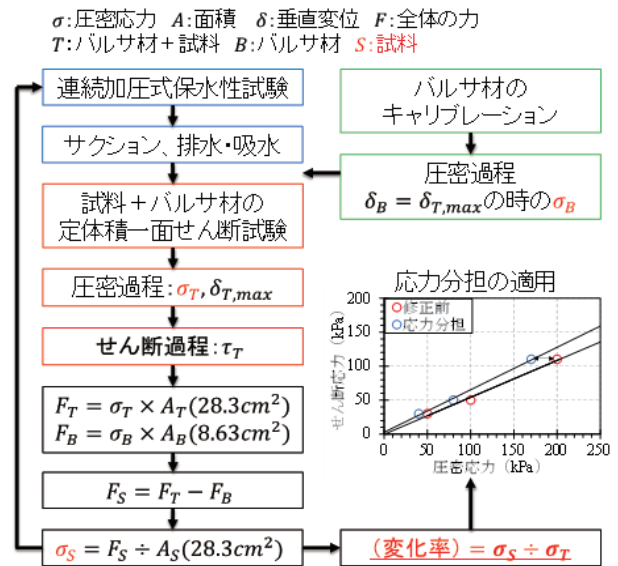


図-4 応力分担のフローチャート

乗じて、応力分担を適用した圧密応力を算出した。応力分担の有効性を確認するために、既往の研究⁸⁾におけるサクシヨン30kPa相当の含水比82.06%の状態、連続加圧式保水性試験と同様の直径5cm、通常的一面せん断試験と同様の直径6cm、高さ2cmの円柱型にそれぞれ締め固めて定体積一面せん断試験を行った。

(2) 1ステップシステムにおける水分特性の保持

連続加圧式保水性試験終了から空気圧の载荷を中止して供試体を室温、大気圧の下に曝し、保水性試験のテンシオメータや電子天秤によるデータを用いて約1時間後のサクシヨンと含水比を計測し、時間とサクシヨン、含水比の関係として整理したものを図-5に示す。図-5より、約1時間でサクシヨンは0.3kPa、含水比は1.3%とほとんど変化しないため、初期のサクシヨン、含水比を概ね保持した状態で一面せん断試験を行うことができると確認できた。

(3) バルサ材による圧密応力・せん断応力への影響

自然状態の試料に対してバルサ材の有無で定体積一面せん断試験を行った結果を図-6に示す。図-6より、バルサ材なしの試料のみのピークせん断応力は34.3kPa、バルサ材で調整した試料のピークせん断応力は36.4kPaとなった。よって、せん断過程においてはバルサ材の有無でせん断変位-せん断応力関係の挙動やピークせん断応力に大きな違いがないため、バルサ材で供試体のサイズの違いを調整した時の影響が無視できると確認できた。一方で、圧密過程においては垂直変位による影響が無視できないと考えられる。そこで、バルサ材のみとバルサ材で調整し

た試料に対してそれぞれ圧密応力 200, 100, 50kPa で圧密し、バルサ材で調整した試料の最終垂直変位におけるバルサ材のみの圧密応力から、試料のみにかかる圧密応力を算出した。その後、実際の試料のみ (①), バルサ材で調整した試料 (②), ②においてバルサ材のキャリブレーションをそれぞれの圧密応力に対応した応力分担による修正結果 (③) を比較して整理したものを図-7 に示す。①では粘着力が 25.8kPa, 内部摩擦角が 26.8° であるのに対し, ②では粘着力が 25.6kPa, 内部摩擦角が 22.1° で, ③では粘着力が 19.3kPa, 内部摩擦角が 28.4° である。①と②を比較すると, 誤差は粘着力が-0.8%, 内部摩擦角が-17.5%である。一方, ①と③を比較すると, 誤差は粘着力が-25.2%, 内部摩擦角が 6.0%であり, ②と比較して粘着力の誤差は大きくなったものの, 内部摩擦角の誤差が小さくなった。このことから, 応力分担の補正を行うことで, 実際の試料で得られるモール・クーロンの破壊包絡線により近づく傾向が読み取れ, ここで示す応力分担の補正を行うことの重要性が確認される。

3. 試験結果

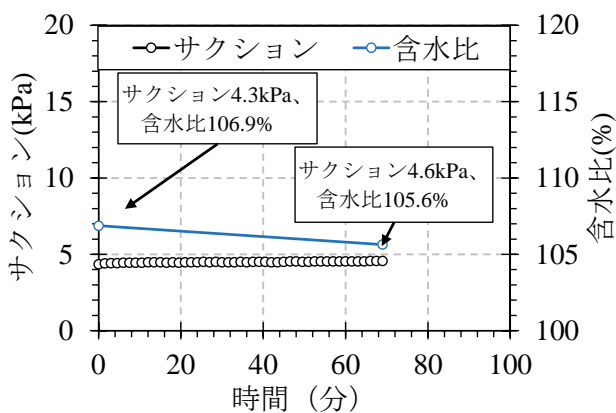


図-5 サクシオンと含水比の時間変化

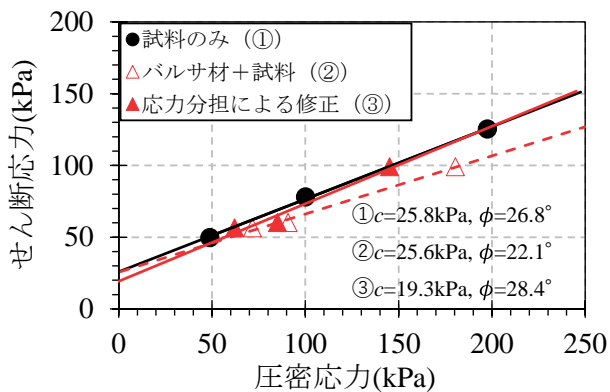


図-7 圧密応力に対応した応力分担

(1) 水分特性曲線

目標サクシオンが排水過程 30, 80kPa, 吸水過程 80kPa に達するまで連続加圧式保水性試験を行った結果から得られた水分特性曲線を図-8 に示す。凡例はサクシオンの状態と保水性試験後に行った定体積一面せん断試験の圧密応力を表している。

これらはすべて飽和状態を初期状態として試験を行った。その結果, 連続加圧式を繰り返し行っても水分特性曲線はほとんど一致した。また吸水過程 80kPa の最終状態に着目すると, サクシオンの大きさがほぼ同じでも, 排水過程と吸水過程で体積含水率の値が異なるという水分特性曲線のヒステリシスを確認することができた。

(2) 定体積一面せん断試験の結果

連続加圧式保水性試験で目標のサクシオンに達した後に定体積一面せん断試験を行った。それぞれ圧密応力ごとにバルサ材のキャリブレーションを行い, そこから連続してバルサ材で調整した試料の一面せん断試験を行うことで, 応力分担を考慮した結果から粘着力と内部摩擦角を算出した。また, これらを排水過程におけるサクシオンの値, 排水過程と吸水過程の違いで比較した。

初期サクシオンが排水過程 30, 80kPa のせん断変

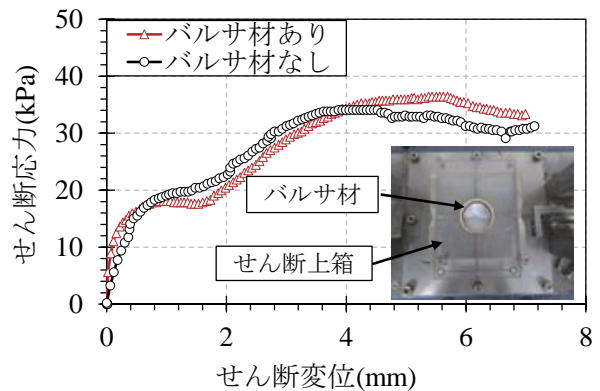


図-6 バルサ材の有無によるせん断応力の比較

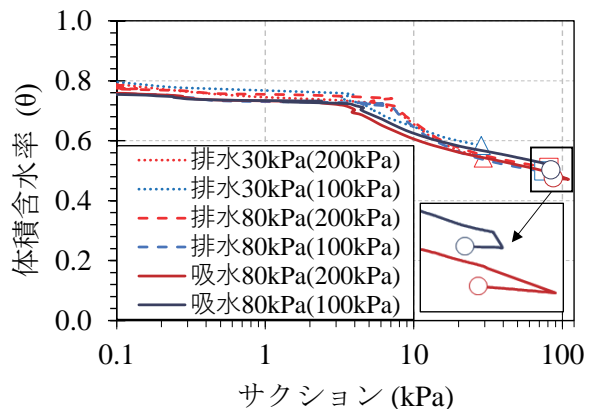


図-8 阿蘇黒ぼくの水分特性曲線

位-せん断応力関係を圧密応力 200, 100kPa の条件で整理したものを図-9, 圧密応力-せん断応力関係を図-10に示す。排水過程 30kPa と 80kPa において, 各圧密応力でのピークせん断応力とそのせん断変位は図-9 の値となる。よって, 粘着力と内部摩擦角はそれぞれ図-10 の①, ②のようになる。排水過程 30kPa と 80kPa の結果を比較すると, 図-9 より, 同じ圧密応力においてサクシオンが大きいほど, 所定のせん断変位に対するせん断応力は大きくなる傾向にあることが示されている。また図-10 より, サクシオンが大きいほど粘着力は増加し, 内部摩擦角は大きく変化しない。

初期サクシオンが排水過程 80kPa, 吸水過程 80kPa のせん断変位-せん断応力関係を圧密応力 200, 100kPa の条件で整理したものを図-11, 圧密応力-せん断応力関係を図-12 に示す。吸水過程 80kPa において, 各圧密応力でのピークせん断応力とそのせん断変位は図-11 の値となる。よって, 粘着力と内部摩擦角は図-12 の③のようになる。排水過程 80kPa と吸水過程 80kPa の結果を比較すると, 図-11 より, 同じ圧密応力においてサクシオンの値が同じでも, 排水過程よりも吸水過程のほうが所定のせん断変位に対するせん断応力は小さくなる傾向にあることが

示されている。また図-12 より, 粘着力は吸水過程のほうが小さく, 内部摩擦角は大きく変化しない。

以上より, 連続加圧式保水性試験と定体積一面せん断試験を組み合わせた 1 ステップシステムを適用することで, 水分特性曲線と関連付けたせん断強度やそのパラメータである粘着力と内部摩擦角を算出した。これに関して応力分担を考慮し, 排水過程におけるサクシオンの値, 排水過程と吸水過程の違いで比較することで, せん断強度は図-9, 10 よりサクシオンの影響を受け, 図-11, 12 より水分特性曲線と同様にヒステリシスが存在することを示した。ここで, サクシオンの状態毎に粘着力と内部摩擦角を既往の研究⁸⁾の飽和土の結果と比較したものを, それぞれ図-13, 14 に示す。図-13 より, サクシオンと粘着力の関係に着目すると, どのサクシオンにおいても粘着力は飽和土より大きい。また図-14 では, それぞれの内部摩擦角を図示し, 飽和土を含めた内部摩擦角の平均値を全体, 排水過程のみで算出した。飽和土と全体の平均の誤差は 2.6%であるのに対し, 飽和土と排水過程のみの平均の誤差は-0.2%とほとんど存在せず, 内部摩擦角は概ね整合した。よって, 応力分担を考慮した内部摩擦角は, 排水過程と吸水過程を分けるとより正確に評価することができる

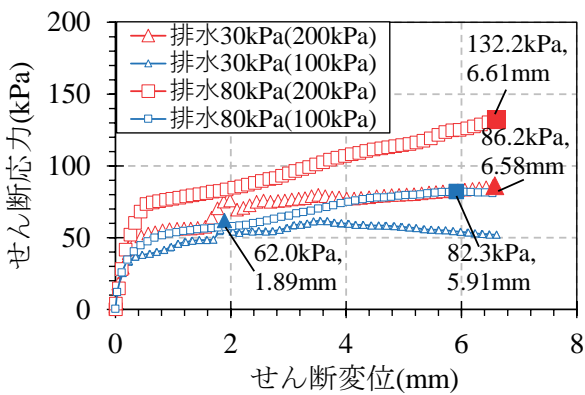


図-9 排水 30, 80kPa のせん断変位-せん断応力

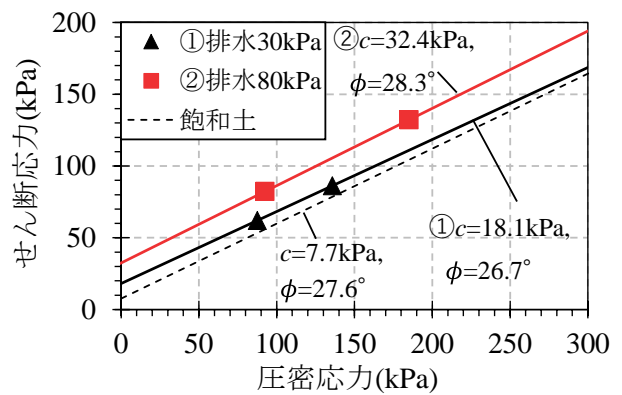


図-10 排水 30, 80kPa の圧密応力-せん断応力

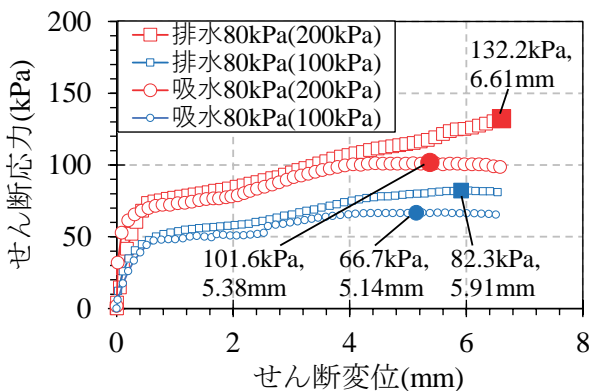


図-11 排水・吸水 80kPa のせん断変位-せん断応力

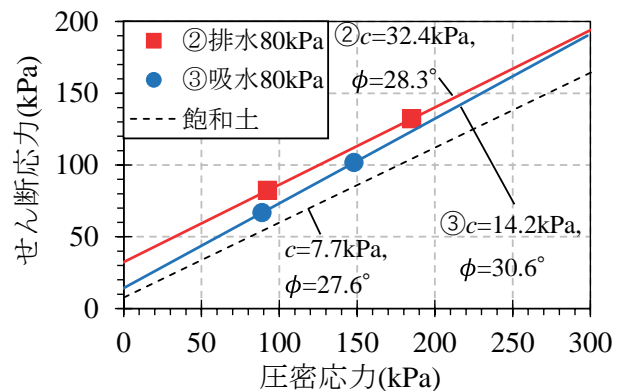


図-12 排水・吸水 80kPa の圧密応力-せん断応力

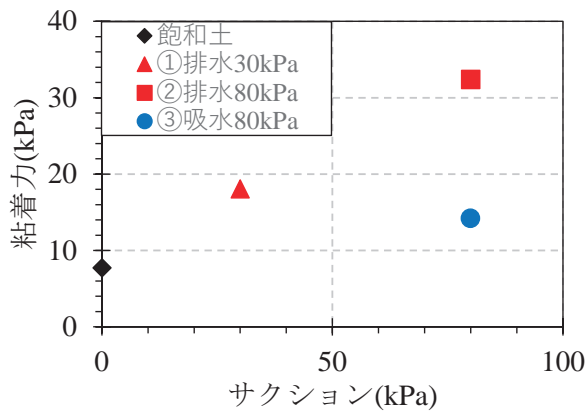


図-13 サクシオンと粘着力の関係

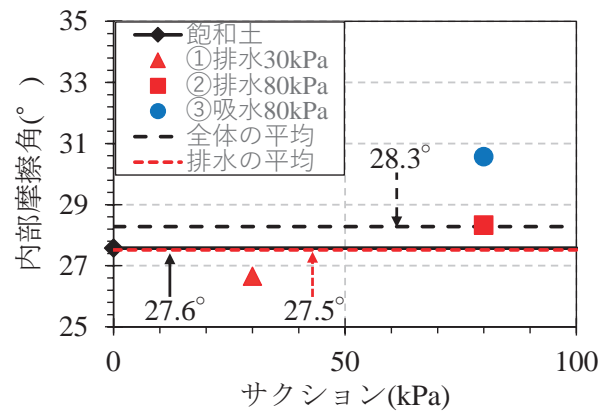


図-14 サクシオンと内部摩擦角の関係

考えられる。

4. 結論

本研究では、火山灰質粘性土である阿蘇黒ぼくを対象に、保水性試験で目標のサクシオンを予め設定して水分特性曲線を求め、その後定体積一面せん断試験を行うことで、せん断強度を1ステップで算出した。ここでは、圧密過程における応力分担を考慮し、初期サクシオンや排水過程と吸水過程の違いがせん断強度に与える影響を、水分特性と関連付けて評価した。その結果、下記のような結論が得られた。

- (1) 室温の下で、連続加圧式保水性試験終了から定体積一面せん断試験へ移動するのに十分な約1時間の間、サクシオンと含水比が概ね保持される。
- (2) せん断過程においてはバルサ材で供試体のサイズの違いを調整した時の影響が無視できると確認できた。また、圧密過程における応力分担を考慮することで、破壊包絡線を大きく支配する内部摩擦角を適正に決定することができた。
- (3) サクシオンの違いでせん断強度を比較すると、同じ圧密応力においてサクシオンが大きいほど、所定のせん断変位に対するせん断応力は大きい。また、サクシオンが大きいほど粘着力は増加し、内部摩擦角は大きく変化しない。
- (4) 排水過程と吸水過程の違いでせん断強度を比較すると、同じ圧密応力においてサクシオンの値が同じでも、排水過程よりも吸水過程のほうが所定のせん断変位に対するせん断応力は小さい。また、応力分担を考慮した場合には粘着力は吸水過程のほうが小さく、内部摩擦角は大きく変化しない。
- (5) サクシオンと内部摩擦角の関係に着目すると、飽和土の内部摩擦角と応力分担を考慮した排水過程での内部摩擦角は概ね整合した。

今後は、排水過程と吸水過程両方においてサクシ

オン条件を追加する必要がある。また、他の試料にも活用することができれば、1ステップシステムや応力分担の考えを実用化できると考える。

参考文献

- 1) 気象庁, 全国(アメダス)の1時間降水量50mm以上の年間発生回数, 2022年5月20日閲覧
https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/extreme/extreme_p.html
- 2) (公社)地盤工学会 令和2年7月九州豪雨地盤災害調査団, 令和2年7月九州豪雨による地盤災害調査報告書, pp. 30-148, pp. 195-230, 2021.
- 3) D. G. Fredlund, H. Rahardjo, Soil Mechanics for Unsaturated Soils, pp. 207-248, 1993.
- 4) 安福規之, アロウイシー アデル, 石蔵良平, 畠山正則, 京野修, 連続加圧型の保水性試験とそれを活かした排・吸水過程での不飽和火山灰質土の強度定数の評価, 地盤工学会誌: Geotechnical Engineering Magazine Journal, Vol. 69, No. 1, pp. 17-22
- 5) 山本凌雅, 不飽和火山灰質土の排水・吸水過程における水分特性とせん断強度の簡易同時計測システムの開発とその適用, 九州大学大学院修士論文, 2020.
- 6) Alowaisy, A., Yasufuku, N., Ishikura, R., Hatakeyama, M., & Kyono, S., Novel rapid measurement system of undisturbed soils water characteristics curve utilizing the continuous pressurization method. In E3S Web of Conferences (Vol. 92, p. 07008). EDP Sciences, 2019.
- 7) Alowaisy, A., Yasufuku, N., Ishikura, R., Hatakeyama, M., Kyono, S., Continuous pressurization method for a rapid determination of the soil water characteristics curve for remolded and undisturbed cohesionless soils. Soils and Foundations, 66(3): 634-647, 2020.
- 8) 相良知輝, 排水・吸水過程における不飽和土の水分特性と強度特性の1ステップ評価に関する研究, 九州大学卒業論文, 2021.

(2022. 5. 30 受付)