

段階ひずみ速度変化中空ねじり試験の不飽和土への適用

長岡技術科学大学大学院 ○樺澤 悠太
長岡技術科学大学大学院 正会員 豊田 浩史
長岡技術科学大学大学院 高田 晋

がある。また、飽和状態から脱水して不飽和化を行う際には、排水量が非常に小さく、安定した排水量に達するまでに時間を要する。加えて、本研究室では不飽和土の試験が約 10 年間実施されていないため、使用する器具や操作手順が引き継がれておらず、試験の実施には、過去の文献整理が必要となる。これらの点から、STEP 載荷試験を不飽和土へ適用するためには、まず不飽和化の方法を整え、試験条件を確認することが重要となる。

1. 4. 本研究の目的

本研究では、飽和土で実施されてきた STEP 載荷試験を不飽和土へ適用することを目指し、不飽和状態を適切に作り出すための手順の整理と、試験条件の確認を行う。飽和土で得られている既往の試験結果を比較の基準とし、不飽和土において速度依存性がどのように現れるかを明らかにする。

2. 試験内容

2. 1. 中空ねじり試験装置

この試験装置は中空円筒供試体に回転力を加えて円周方向にねじることで、供試体全体にせん断変形を与える。ねじる速度は精度がよく、最大 10000 倍の差でせん断することが可能なため、せん断ひずみ速度変化による力学特性を検討することができる。さらに、回転力の他に軸力、外圧、内圧の 3 主応力を制御することが可能である。これらより、原地盤での応力・変形条件を忠実に再現することが可能である。また、平均的な応力を計算することにより、主応力の大きさおよび方向を制御することが可能である。

1. はじめに

1. 1. 簡易ニューマーク法

地震時の残留変位を算定する方法として簡易ニューマーク法がある。これは入力した地震動から、設定した降伏震度より大きな波のみを抽出し、その波からの変換によって残留変位を算出しているが、この手法では土の変形速度が変わることによる力学特性への影響が考慮されていない。

しかし、実際の地盤では、大きな地震動が発生すると、大きな変形が生じることとなり、その速度は短時間で変化している。そこで、ひずみ速度変化が土の力学特性に与える影響を調べることにした。

1. 2. 既往研究（飽和土の STEP 試験）

既往研究では、物性の異なる複数の粘性土を対象として STEP 載荷試験が行われ、せん断速度が速いほど偏差応力が増加する速度依存性が確認されている¹⁾²⁾。また、速度変化前後の偏差応力差を正規化することで、速度倍率と応力変化量の間に対数則が成立することが示されている²⁾。さらに、拘束圧の違いが速度依存性に与える影響を調べるため、等方圧密時の拘束圧を 300 kPa から 150kPa に変更した試験が行われた。その結果、拘束圧の違いによって速度依存量は変化するものの、速度依存量を拘束圧で正規化することで、異なる拘束圧条件でも同一の傾向が得られることが示されている³⁾。

1. 3. 不飽和土の力学特性と試験の課題

不飽和土の試験では、飽和土と比べて準備段階でいくつかの課題が生じる。特に、空気侵入値 (AEV) の管理が難しく、空気が供試体内部へ入り始めるタイミングを適切に把握する必要

2.2. 試験試料

本研究では、既往研究で用いられている試料のうち、砂・シルト・粘土をまんべんなく含む米山粘性土を対象とした。表-1 に、試料の物性値を表に示す。

表-1 米山粘性土の物性値

試料名	米山粘性土
密度 ρ_s (g/cm ³)	2.746
液性限界 W_L (%)	52.4
塑性限界 W_P (%)	29.9
塑性指数 I_P (%)	22.5

2.3. 試験方法

本研究では、不飽和非排水排気条件下でせん断試験を行う。飽和土試験では、供試体を飽和させた状態を維持したまま試験を行うのに対し、不飽和土試験では一度飽和させた後に脱水を行い、不飽和化してから試験を実施する点が大きく異なる。そのため、不飽和化の過程を適切に管理し、安定したサクション状態を再現することが重要となる。

まず、供試体を試験機に設置し、二重負圧および通水によって供試体を飽和させる。二重負圧は供試体内部の空気を効率的に排出し、通水によって間隙水を循環させることで飽和度を高める役割を持つ。通水終了後、供試体を安定させるためにセル圧 30kPa にて圧密を行い、この過程では供試体上下から排水を行う。圧密によって供試体内部の応力状態を整え、その後の不飽和化操作に対して安定した初期条件を与える。

次に、二重セルを設置し内部に給水する。不飽和土では、間隙に水と空気が共存するため、排水量と体積変化が一致しない。このため、供試体の体積変化は二重セル内の水位変化によって計測する。二重セル方式は、不飽和状態に特有の体積変化を精度よく測定できる点で有効である。続いて、 $p' = 50\text{kPa}$ の条件で圧密を行う。

圧密後、供試体上部から 400kPa の空気圧を載荷し、供試体下部から排水させることで不飽和化を進める（図-1）。このとき、試験機にはセラミック付きペデスタルを設置している。セラミックは空気を通さず水のみを通過させる特性を持つため、上部から空気圧を作用させても下部に空気が侵入することなく、供試体内部の水分のみを排出することが可能となる。この仕組みにより、供試体内部にサクションを発生させ、不飽和状態を形成する。

脱水過程は、セラミックからの排水量が 0.4cc/day 程度以下になるまで継続し、約 5 日間実施する。排水量が十分に低下することで、供試体内部の水分状態が安定し、不飽和状態が形成されたと判断できる。供試体を不飽和化した後、既往研究と同一条件とするために $p' = 150\text{kPa}$ で再圧密を行い、STEP 載荷試験を実施する応力状態とする。

圧密後、せん断ひずみが 0.1% 増加するごとに、せん断ひずみ速度を 10 倍ずつ 5 段階に変化させる STEP 載荷を実施する。速度範囲は 0.002%/min から 2.0%/min とし、既往研究と同一の条件で速度依存性を評価できるように設定した。STEP 載荷試験では、速度変化前後の偏差応力の差を測定することで、速度依存性の有無やその大きさを評価することが可能である。

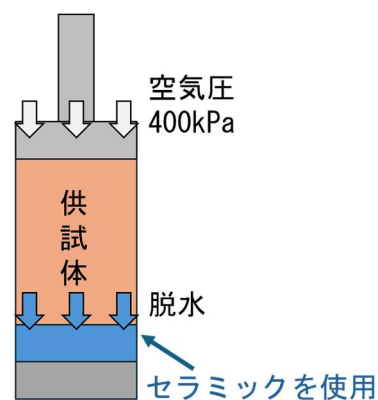


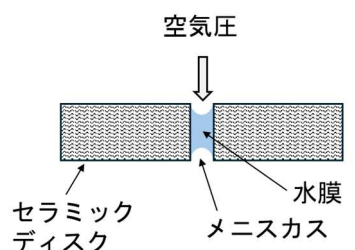
図-1 セラミックによる脱水方法

3. 試験結果

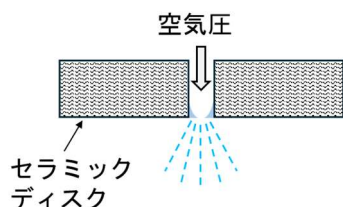
3.1. セラミックの空気侵入値（AEV）試験

セラミックディスクの性能を確認するために、空気侵入値（Air Entry Value : AEV）の測定を行った。セラミックディスクは、細孔内に形成される水のメニスカスによって空気の侵入が抑制される構造を持ち、AEV 以下の圧力では空気を通さず水のみを透過する。一方、メニスカスが破壊される圧力(=AEV)を超えると空気がディスク内部を通過する。したがって、脱水操作で 400kPa の空気圧を载荷するため、AEV が 400kPa 以上であることが要求性能となる。

空気侵入値試験では、空気圧を 50kPa ずつ段階的に増加させながら排水量を測定し、ディスクを通過する空気の発生を確認した。試験結果として、550kPa までは空気の通過は認められず（図-3）、600kPa において排水量が漸増しており、空気の通過が認められる（図-4）。このことから当該セラミックディスクの AEV は約 600kPa と判断され、要求性能である 400kPa を十分に上回っていることが明らかとなった。



(a) 空気圧がAEV以下の場合



(b) 空気圧がAEV以上の場合

図-2 セラミックディスクの原理

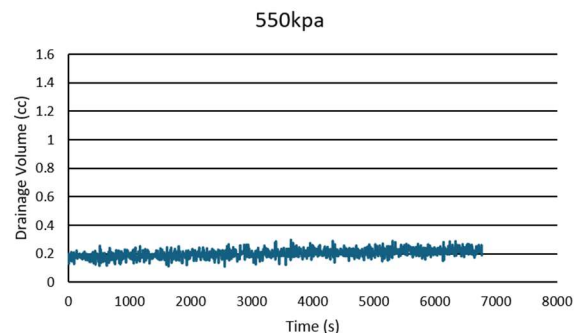


図-3 空気侵入値試験結果（550kPa）

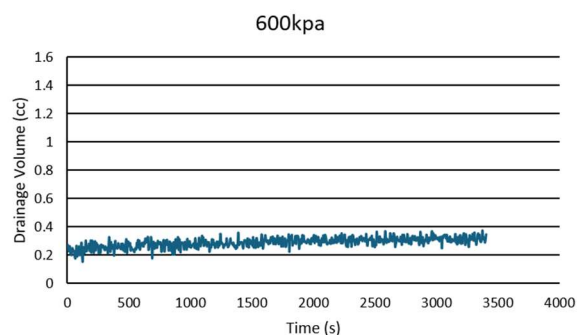


図-4 空気侵入値試験結果（600kPa）

3.2. 不飽和化（脱水）の終了判定

図-1 に示す方法で脱水を行った。排水量が 0.4cc/day を下回るまでに約 8 日を要した。直近 1 時間の排水量を 24 倍して 1 日分に換算した結果、0.38cc/day となったため、脱水を終了と判断した。

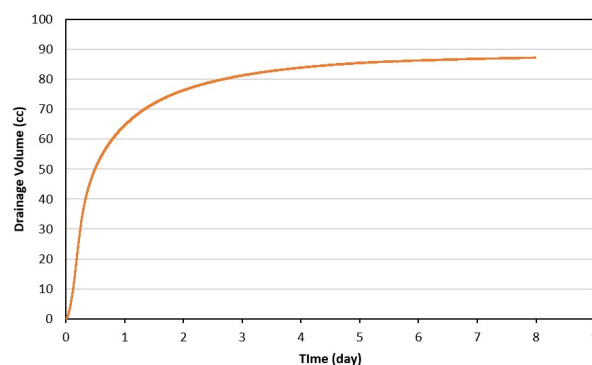


図-5 脱水時の排水量

3.3. 不飽和土の単調載荷試験結果

上記のように作製した供試体に対して、不飽和土の排気非排水単調載荷試験（ひずみ速度 0.02%/min）を実施した。せん断応力-せん断ひずみ関係を図-6 に示す。本試験は不飽和土の基本的なせん断挙動を確認するために行ったものであり、今後既往の結果と比較する。

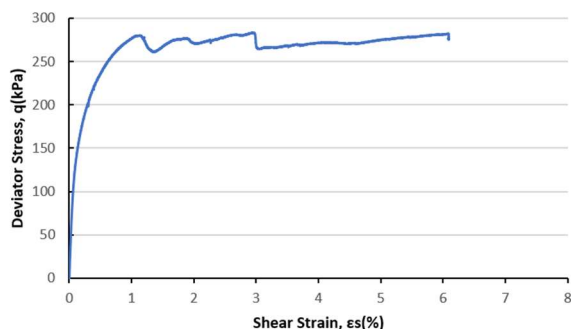


図-6 不飽和土の単調載荷試験

3.4. 飽和土に関する既往研究の再現性について

既往研究¹⁾における飽和土試験の条件を参考にして再現試験を実施した。図-7 に示すとおり、せん断応力-せん断ひずみ関係の傾向およびピーク強度が一致しており、飽和状態の試験条件を適切に再現できたことが確認された。これにより、本研究で用いた試験装置および操作手順が妥当であることが示された。

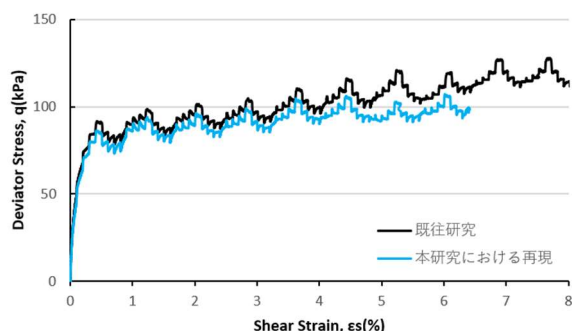


図-7 飽和土における STEP 載荷試験の再現性

4. 今後の展望

本研究では、以下のことを示した。

不飽和土試験：不飽和土供試体を作製して、排気非排水単調載荷試験を実施した。今後この試験液化の信頼性（既往研究との比較）や再現性について検討していく。

飽和土試験：既往の研究にある STEP 載荷を実施し、同等の成果が得られることを確認した。

今後は、不飽和土供試体に関して、飽和土試験と同様に拘束圧 150kPa および 300kPa の条件下で STEP 載荷試験を実施し、不飽和土における速度依存性の有無およびその特徴を明らかにする予定である。また、飽和土で得られている速度依存量との比較を通じて、不飽和化による力学特性の変化を整理し、速度依存性の評価方法について検討を進める。

5. 参考文献

- 1) 新野祥平（2022）：ひずみ速度段階変化が土の応力-ひずみ関係に及ぼす影響，令和 3 年度長岡技術科学大学修士論文。
- 2) 森田大貴（2023）：ひずみ速度段階変化が土の応力-ひずみ関係に及ぼす影響，令和 4 年度長岡技術科学大学修士論文。
- 3) 久司智貴（2024）：土の力学特性に与える段階ひずみ速度依存性の解明，令和 5 年度長岡技術科学大学修士論文。