

土のせん断強度速度依存性の喪失について

地盤工学研究室 田上 梨緒
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

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存在する。これは地震動を入力することで、設定した降伏震度より大きな波のみを抽出し、その波を2回積分することによって残留変位を算出している。つまり、大きな地震動が発生すると、大きな変形が発生することになり、その速度は、繰返し波形内の短時間で変化する。しかしながら、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。本研究では、速度を段階的に変化させる土の要素試験を行い、ひずみ速度変化による土のせん断強度速度依存性の喪失について調べることを目的とする。

2. 試験内容

2.1 中空試験装置について

本研究では、図-1 の中空ねじりせん断試験機を用いて実験を行った。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ことができる。さらに、ねじる速度を最大 10000 倍の差をつけてせん断することが可能であり、載荷速度変化による力学特性への検討ができる。さらに、回転力のほかに軸力、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、他の直接型せん断試験と比較しても、平均的な応力を計算することにより、主応力の大きさ及び方向を容易に求めることができる。

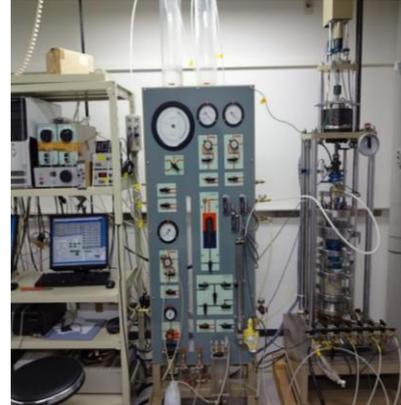


図-1 中空ねじりせん断試験機

2.2 試験試料

本研究では、新潟県柏崎市米山で採集された繰返し粘土（以下米山粘性土）、細粒分のみ含むニュージーランドカオリン（以下、NZ カオリン）を使用した。試料は蒸留水とかき混ぜ、スラリー状にしたものを1晩寝かせた後、試料圧密器に入れて脱気・圧密した後、中空円筒に切り出し（トリミング）、供試体を作製した。

乾燥後 75 μm ふるいを通過した試料を試験に用いた。試料の物性値を表-1、表-2 に示す。そして、各試料の粒径加積曲線を図-2 に示す。

表-1 粘土試料の物性値（米山粘性土）

| | |
|-----------------------------------|-------|
| 密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$ | 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 |
| Clay(%) | 23.6 |
| Silt(%) | 57.0 |
| Sand(%) | 19.4 |

表-2 粘土試料の物性値（NZ カオリン）

| | |
|-----------------------------------|-------|
| 密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$ | 2.710 |
| 液性限界 $W_L(\%)$ | 65.6 |
| 塑性限界 $W_P(\%)$ | 29.3 |
| 塑性指数 I_P | 36.3 |
| Clay(%) | 45.5 |
| Silt(%) | 54.5 |
| Sand(%) | 0 |

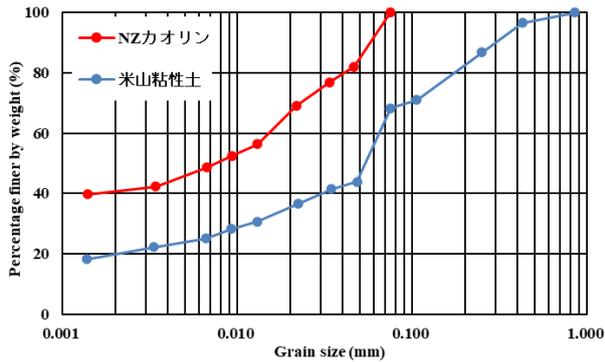


図-1 各試料の粒径加積曲線

3. 試験方法

作製した供試体を試験機に設置した後、供試体を飽和させるために二重負圧および通水を行った。通水終了後、等方予備圧密を行った。その後、背圧を作用させ圧密を行った後、非排水条件でせん断試験を行った。本研究ではせん断ひずみが0.1%増加するごとにせん断速度を変化させる（以下、STEP ひずみ）せん断を実施した。そして、せん断速度0.002(deg/min)からせん断を始め、設定したせん断ひずみ(0.1%)ごとに、せん断速度を設定した倍率ずつ増加させ、2(deg/min)まで上昇させる。その後、せん断速度を上昇時と同じ倍率ずつ減少させる。以下のような、2種類の試験を行った。

No.1 試験：このサイクルを2回繰り返す。2回目の最大速度に達した時点で、せん断速度一定の単調載荷を行う。この結果より、偏差応力の減少量を直線近似して、この時の直線の傾きを本研究では速度依存喪失度 (D_{down}) と定義した(図-3 参照)。

No.2 試験：段階載荷で2回目の最大速度から速度を落としていき、最小速度の1つ手前に到達した時点で、せん断速度一定の単調載荷を行った。こちらも同様、偏差応力の増加量を直線近似して、この傾きを速度依存喪失度 (D_{up}) と定義した。(図-4 参照)

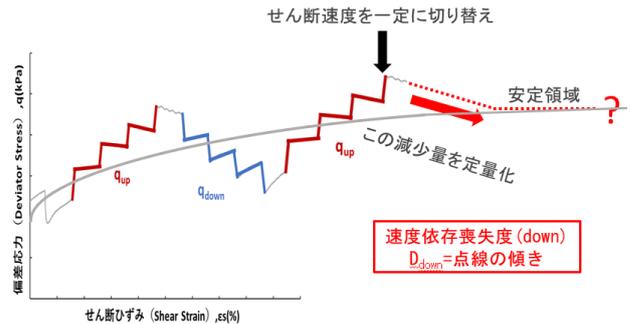


図-3 No. 1 試験の概要

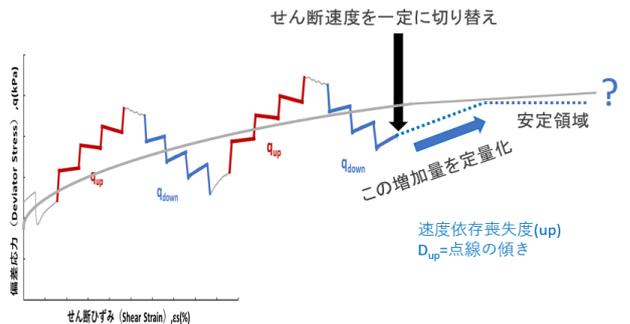


図-4 No. 2 試験の概要

4. 試験結果

4.1 米山粘性土の STEP 載荷試験 (STEP5)

図-5、図-6 に米山粘性土の STEP5 載荷のせん断速度変化0.1%の非排水せん断試験のせん断ひずみ ϵ_s -偏差応力 q 関係と平均有効主応力 p' -偏差応力 q 関係を示す。図-5 の無彩色のグラフは同一条件の単調載荷で得られた結果²⁾を比較用に示している。また、図-6 では既往研究の米山粘性土における同一条件の結果²⁾を無彩色で表している。

図-5 より、せん断ひずみが約 1.6%、偏差応力が約 160kPa の時点でせん断速度が一定に切り替わったことがわかる。その後、せん断ひずみが約 2%まで僅かながらも偏差応力は増加し続け、偏差応力が約 170kPa になると、無彩色で示している同一条件の単調載荷と同じ挙動を示し、安定領域に達した。

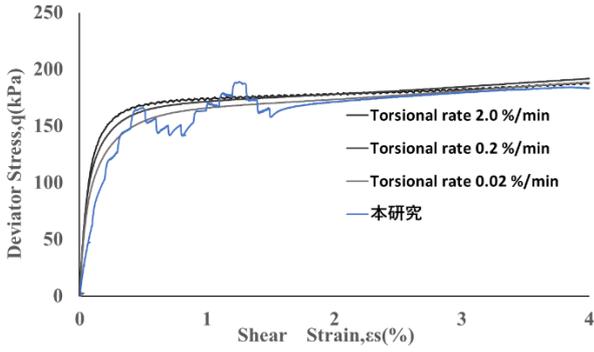


図-5 せん断ひずみ ε_s -偏差応力 q 関係 (米山粘性土)

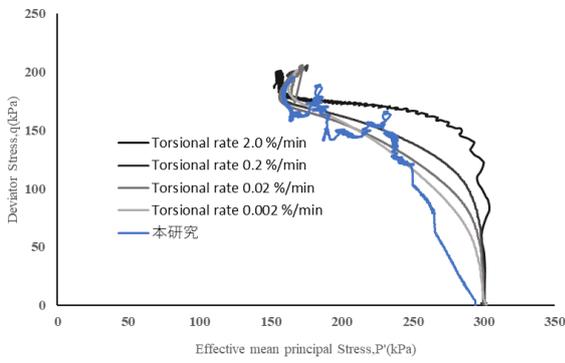


図-6 平均有効主応力 p' -偏差応力 q 関係 (米山粘性土)

4. 試験結果の検討

4.1 米山粘性土の STEP 載荷試験比較

図-7 に既往研究と本研究の米山粘性土における 5 段階の STEP 載荷を合わせた平均有効主応力 p' -偏差応力 q 関係, 図-8 に既往研究と本研究の米山粘性土のせん断ひずみ ε_s -偏差応力 q 関係を示す。

図-7 より, 青色の本研究のグラフが無彩色の既往研究のグラフ²⁾どちらも有効応力が減少し, 偏差応力が増加する挙動を示していることが確認された。しかし, 平均有効応力の初期値が既往研究では 300kPa に非常に近い値であったのに対し, 本研究では 300kPa よりも小さい値になったことがわかる。これは, 圧密後からせん断までにプログラム入力等により時間がかかりすぎてしまい, 平均有効応力が減少したことなどが

考えられる。

図-8 より, どちらのグラフも段階状になっているが, 本研究のグラフが既往研究のグラフ²⁾よりも常に低い値になっていることがわかる。

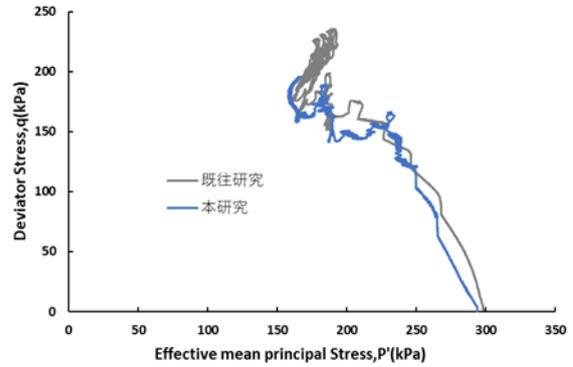


図-7 平均有効主応力 p' -偏差応力 q 関係

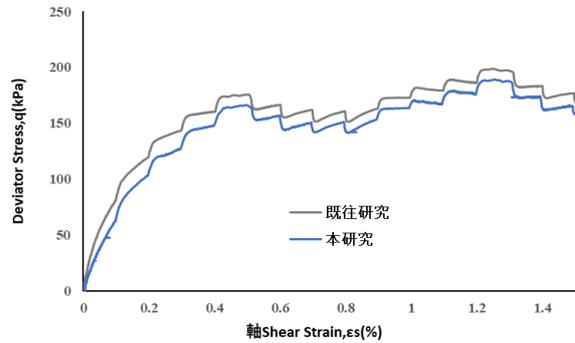


図-8 平均有効主応力 p' -偏差応力 q 関係 (初期せん断ひずみ)

4.2 STEP 載荷でせん断速度を一定に切り替えた後のせん断ひずみと偏差応力の関係

せん断速度を一定に切り替えた結果を図-9 に示す。せん断ひずみが約 1.5%, 偏差応力が約 160kPa の時点でせん断速度を一定に切り替えたことがわかる。その後, せん断ひずみが約 2%のところまで偏差応力は増加し続け, その後, 単調載荷と同じような挙動をすることが確認された。また, この時の偏差応力の増加量を定量化した直線の傾き (D_{up}) は 23.8kPa となった。

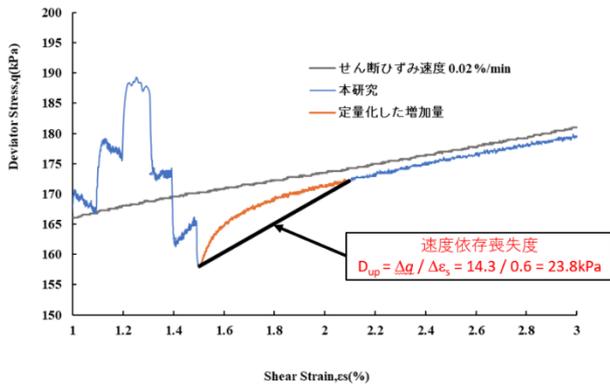


図-9 平均有効主応力 p' - 偏差応力 q 関係

5. まとめ

本研究では中空ねじりせん断試験機を用いて STEP 荷重を行い、ある段階でせん断速度一定（単調荷重）に切り替え、その後の速度依存性がどう変化するかを調べた。STEP 荷重試験でせん断速度増加と、せん断速度減少のサイクルを 2 回繰り返し、2 回目の最大速度に達した後と、その後最小速度の 1 つ手前に到達した時点でせん断速度を一定に切り替え、非排水単調せん断を行った。本研究にて得られた知見を以下に示す。

(1) 米山粘性土の STEP 荷重試験比較

本研究のグラフが既往研究のグラフよりも常に低い値になった。この理由として、せん断開始時に、有効応力が減少したことが原因と考えられる。

(2) 速度依存性の損失について

せん断ひずみが約 1.6%、偏差応力が約 160kPa の時点でせん断速度が一定に切り替わり、その後、せん断ひずみが約 2%まで僅かながらも偏差応力は増加し続け、偏差応力が約 170kPa になると、同一条件の単調荷重と同じ挙動を示し、安定領域に達した。速度依存喪失度 (D_{up}) は 23.8kPa となった。

6 今後の課題

本実験では、米山粘性土 2 ケース、ニュージールランドカオリン粘土 2 ケースを行う予定であるが、現在、米山粘性土 D_{up} の 1 ケースのみ成功

しているという状況である（表 3 参照）。まだ実施できていない米山粘性土 1 ケース、ニュージールランドカオリン粘土 2 ケースを行い、速度依存喪失の試料による比較を行い、考察する必要がある。

表-3 試験結果

| | 米山粘性土 | カオリン |
|------------|---------|------|
| D_{down} | | |
| D_{up} | 23.8kPa | |

参考文献

- 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.
- 森田大貴 (2023) : 土の応力-ひずみ関係に与えるせん断ひずみ速度変化の影響, 令和 4 年度長岡技術科学大学修士論文.