

土の応力-ひずみ関係に与える段階ひずみ速度依存性の解明

長岡技術科学大学大学院 ○湯守 泰良
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

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。つまり、大きな地震動が発生すると、変形が生じるが、その速度は短時間で変化する。しかしながら、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は考慮されていない。

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

既往の研究で、物性値の異なる粘性土を対象に、速度を段階的に変化させるせん断(以下、STEP 載荷)を行い、せん断速度を上昇させると、せん断時の偏差応力が上昇すること(以下、速度依存性)を発見した。さらに、偏差応力の増減量を評価するため、速度変化前後の偏差応力の差分をとり、所定の偏差応力で除した値を算出し、「せん断が進行すると、各試料の速度倍率と偏差応力の変化量には同等の対数則が適用できる」という知見を得た。ここで、異なる拘束圧のもとでも同様の速度依存性が得られるかを確認する必要性が提起された。既往研究では等方圧密時に拘束圧(以下、 p') 300kPa として行った STEP 載荷を、本研究では $p' = 150\text{kPa}$ に変更して実施することで、応力状態の違いが与える影響を調べることを目的とした。

2. 試験内容

2.1 中空試験装置について

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、最大 10000 倍の差で変化させることが可能であり、これを用いてせん断ひずみ速度変化による力学特性を検討する。

さらに、回転力の他に軸力、外圧、内圧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最大主応力の方向を制御することが可能である。

2.2 試験試料

本研究では、既往研究で用いられている、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)、砂分を含む米山粘性土、NZ カオリンとベントナイトを 8:2 の割合で配合した高塑性粘土試料(以下、ベントナイト)を対象とした。

試料の物性値を表-1 に示す。

表-1 試験試料の物性値

試料名	NZ カオリン	米山粘性土	ベントナイト
密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.710	2.746	2.730
液性限界 $W_L(\%)$	65.6	52.4	97.1
塑性限界 $W_P(\%)$	29.3	29.9	22.3
塑性指数 $I_P(\%)$	36.3	22.5	74.8

2.3 試験方法

本研究は飽和非排水条件でせん断を行った。供試体を試験機にセットした後、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、供試体を安定させるためにセル圧を 50kPa にして等方予備圧密を行った。等方予備圧密は供試体上下から排水させた。その後、二重セルを設置して内部に給水した。供試体の体積変化は二重セル内の水位を用いて計測した。その後、背圧を作用させ等方圧密を行い、せん断を行った。本研究では、せん断速度を 10 倍ずつ 5 段階変化させる STEP 載荷を、せん断ひずみが 0.05%、0.1%、0.2% 増加ごとに速度変化する 3 ケースで実施した。

3. 試験結果

3.1 NZ カオリンの試験結果

新野(2022)¹⁾らによる NZ カオリンの等方圧密時

の拘束圧 300kPa の STEP 荷のせん断ひずみ-偏差応力関係を図-1 に示す。また、本研究で得られた NZ カオリンの等方圧密時の拘束圧 150kPa の STEP 荷のせん断ひずみ-偏差応力関係を図-2 に示す。図-1 より、せん断速度が上昇・下降するたびに、速度依存性により偏差応力も増加・減少するため、ステップ状の偏差応力の変化が連続的に起こっていることがわかった。図-2 においても、図-1 と同様の傾向が確認できた。それぞれのケースで、偏差応力の増加・減少値については、詳細に調べていく。

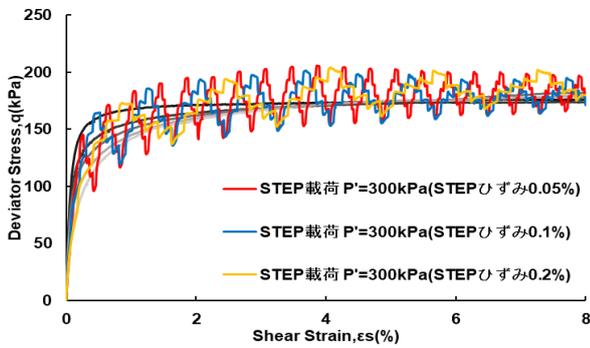


図-1 NZ カオリンの応力-ひずみ関係 ($P' = 300\text{kPa}$)

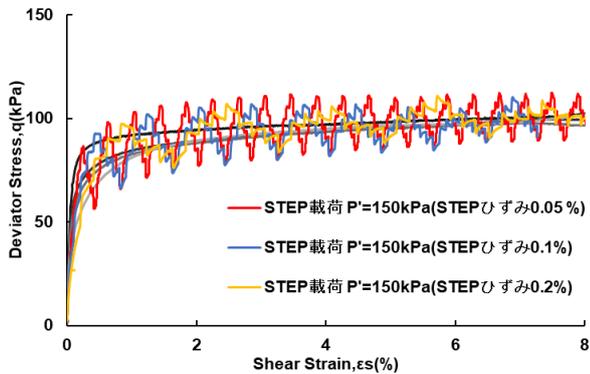


図-2 NZ カオリンの応力-ひずみ関係 ($P' = 150\text{kPa}$)

3.2 米山粘性土の試験結果

新野(2022)¹⁾らによる米山粘性土の等方圧密時の拘束圧 300kPa の STEP 荷のせん断ひずみ-偏差応力関係を図-3 に示す。また、本研究で得られた米山粘性土の等方圧密時の拘束圧 150kPa の STEP 荷のせん断ひずみ-偏差応力関係を図-4 に示す。図-3, 図-4 どちらでも、NZ カオリンと同様の速度依存性を確認できた。また、拘束圧 300kPa と拘束圧 150kPa で同様の傾向が確認できたことから、米山粘性土の STEP 荷でも、拘束圧が変

化しても、基本的な力学特性への影響は同様である。

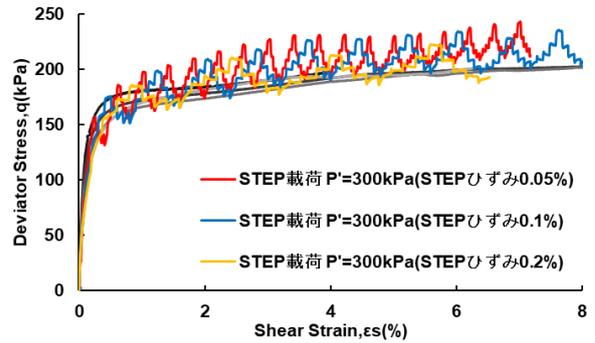


図-3 米山粘性土の応力-ひずみ関係 ($P' = 300\text{kPa}$)

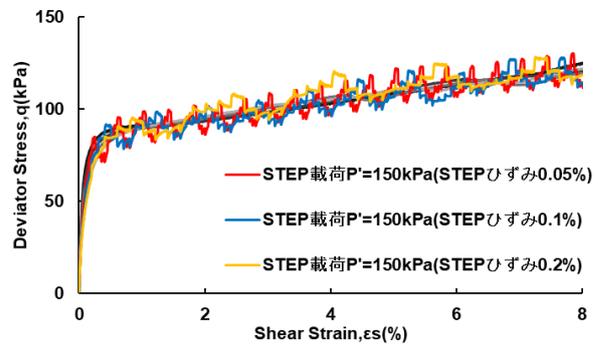


図-4 米山粘性土の応力-ひずみ関係 ($P' = 150\text{kPa}$)

3.3 ベントナイトの試験結果

森田(2023)²⁾らによるベントナイトの等方圧密時の拘束圧 300kPa の STEP 荷のせん断ひずみ-偏差応力関係を図-5 に示す。また、本研究で得られたベントナイトの等方圧密時の拘束圧 150kPa の STEP 荷のせん断ひずみ-偏差応力関係を図-6 に示す。図-5, 図-6 どちらでも、他試料と同様に速度依存性を確認できた。また、拘束圧 300kPa と拘束圧 150kPa で同様の傾向が確認できた。

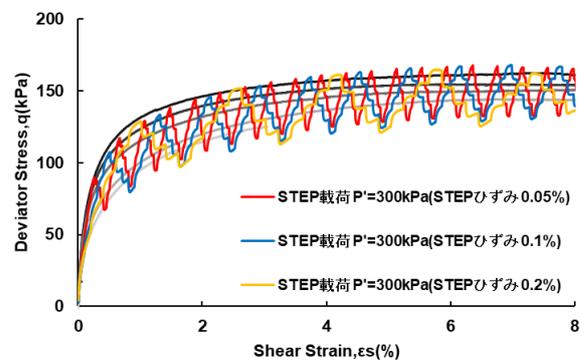


図-5 ベントナイトの応力-ひずみ関係 ($P' = 300\text{kPa}$)

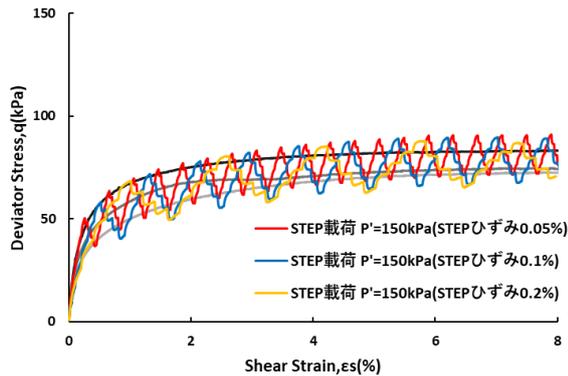


図-6 ベントナイトの応力-ひずみ関係 ($P' = 150\text{kPa}$)

3.4 NZ カオリンの STEP 载荷の直接比較

NZ カオリンの拘束圧 $300 \cdot 150\text{kPa}$ の STEP 载荷 (STEP ひずみ 0.1%) の応力-ひずみ関係の比較を図-7 に示す。図-7 から、拘束圧 300kPa の方が拘束圧 150kPa より、せん断速度の変化に伴う偏差応力の変動が大きくなっており、速度依存性に関して、拘束圧が影響を与えていることがわかった。また、STEP ひずみ 0.1% の比較のみ示したが、他の STEP ひずみのケースについても、同様の傾向となった。

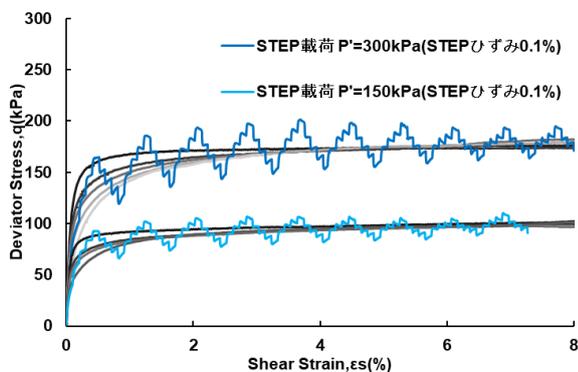


図-7 NZ カオリンの応力-ひずみ関係比較

3.5 米山粘性土の STEP 载荷の直接比較

米山粘性土の拘束圧 $300 \cdot 150\text{kPa}$ の STEP 载荷 (STEP ひずみ 0.1%) の応力-ひずみ関係の比較を図-8 に示す。図-8 から、米山粘性土でも NZ カオリン同様、拘束圧 300kPa の方で、せん断速度の変化に伴う偏差応力の変動が大きくなっており、速度依存性に関して、拘束圧が影響を与えていることがわかった。また、STEP ひずみ 0.1% の比較のみ示したが、他の STEP ひずみのケースについても、同様の傾向となった。

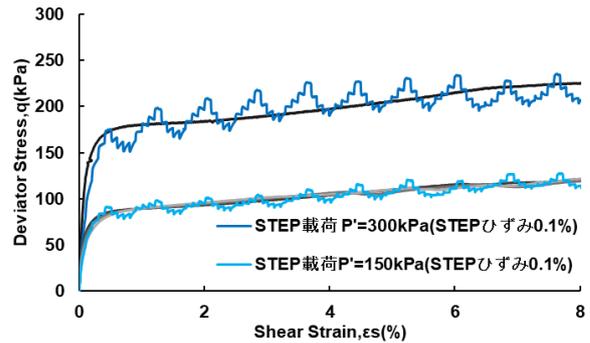


図-8 米山粘性土の応力-ひずみ関係比較

3.6 ベントナイトの STEP 载荷の直接比較

ベントナイトの拘束圧 $300 \cdot 150\text{kPa}$ の STEP 载荷 (STEP ひずみ 0.1%) の応力-ひずみ関係の比較を図-9 に示す。図-9 から、ベントナイトでも他試料同様、拘束圧 300kPa の方で、せん断速度の変化に伴う偏差応力の変動が大きくなっており、速度依存性に関して、拘束圧が影響を与えていることがわかった。また、STEP ひずみ 0.1% の比較のみ示したが、他の STEP ひずみのケースについても、同様の傾向となった。

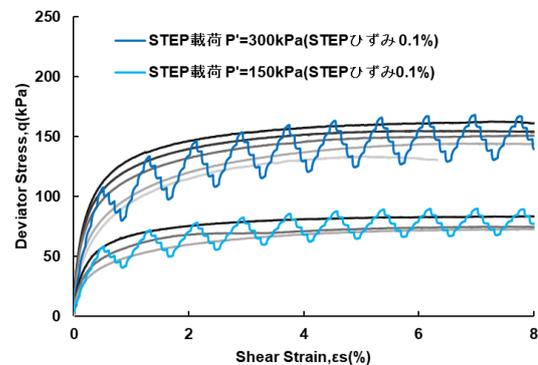


図-9 ベントナイトの応力-ひずみ関係比較

4 試験結果の検討

4.1 速度依存量の算出

STEP 载荷試験での偏差応力の変動量(以下、速度依存量)を評価するため、STEP 载荷の応力-ひずみ関係図から、1 ステップあたりの速度上昇域・下降域での速度依存量を算出した。

以下、速度依存量の具体的な算出方法である。

ステップ载荷の応力-ひずみ関係図を局所的に拡大したグラフを図-10 に示す。図-10 から、1 番遅いせん断速度から 1 番速いせん断速度に到達

するまで、4 ステップ速度を変化させているが、偏差応力が点線区間の分だけ変動しているため、この変動量を速度依存量として、せん断中のすべてのステップで速度依存量を読み取った。また、図-10 中にあるように、STEP 载荷は速度が上昇していく段階と下降していく段階が交互に続くので、それらの各段階で速度上昇に伴う速度依存量を q_{up} 、速度下降に伴う速度依存量を q_{down} と定義し、速度の変化によって急激に変化した速度依存量として、 $q_{up} \cdot q_{down}$ で図-10 の着色部分のみを読み取った(本要旨では q_{down} の整理のみ示す)。

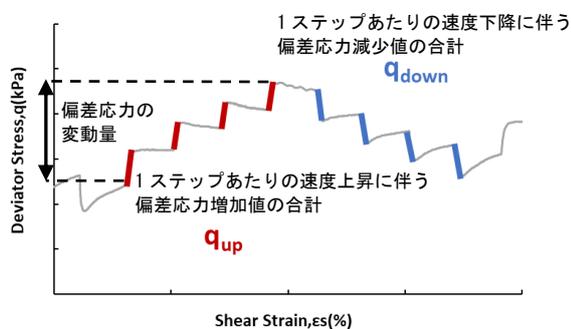


図-10 拡大した STEP 载荷の応力-ひずみ関係

そのように読み取った値を横軸：せん断ひずみ 縦軸：速度依存量のグラフにプロットした。さらに、3.4 節~3.6 節で結果を示した通り、すべての粘性土試料において、速度依存量が拘束圧によらない変数が見つかれば、実務での利用が簡単になる。そこで本研究では、読み取った速度依存量を等方圧密時の拘束圧で正規化した。

4.1.1 NZ カオリンの速度依存量

NZ カオリンの q_{down} - ϵ_s 関係を図-11 の左側、 q_{down}/p' - ϵ_s 関係を図-11 の右側に示す。左図より、 $p'=300kPa$ の方が $p'=150kPa$ より速度依存量が大きいことがわかった。また、各拘束圧で正規化すると、速度依存量が一致することがわかった。

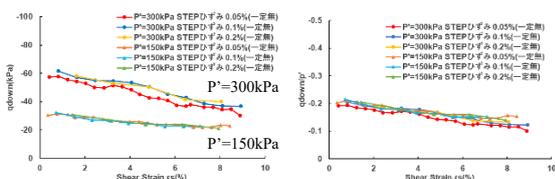


図-11 NZ カオリンの速度依存量

4.1.2 米山粘性土の速度依存量

米山粘性土の q_{down} - ϵ_s 関係を図-12 の左側、 q_{down}/p' - ϵ_s 関係を図-12 の右側に示す。図-12 より、米山粘性土でも NZ カオリンと同じ傾向が得られた。

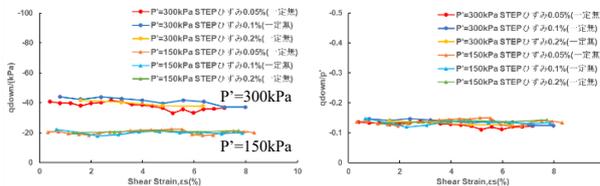


図-12 米山粘性土の速度依存量

4.1.3 ベントナイトの速度依存量

ベントナイトの q_{down} - ϵ_s 関係を図-13 の左側、 q_{down}/p' - ϵ_s 関係を図-13 の右側に示す。図-13 より、ばらつきは残るものの、ベントナイトでも他試料と同じ傾向が得られた。よって、全ての粘性土試料で、拘束圧によって、速度依存量の正規化が可能であることがわかった。

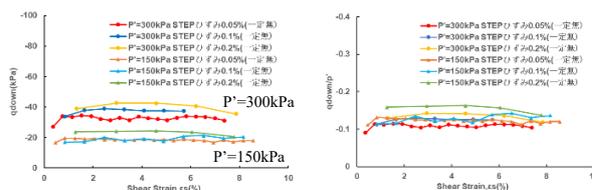


図-13 ベントナイトの速度依存量

5. まとめ

- 1) 拘束圧が大きいほど速度依存量も大きく、拘束圧が速度依存性に影響を与える。
- 2) 各試料において得られた速度依存量を拘束圧で割ることでほぼ同じ値となり、正規化が可能である。
- 3) 载荷速度の変化による応力変動は、粘性土であれば、一義的に決定することができる。

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) : 異なる土の力学特性に与える段階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。