

土の力学特性に与える段階ひずみ速度依存性の解明

地盤工学研究室 久司 智貴
指導教員 豊田 浩史

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、大きな変形が発生することになり、その速度は短時間で変化する。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、ひずみ速度変化が土の力学特性に与える影響を調べることを目的とする。

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、載荷速度が速いほど、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、各試料の偏差応力の変化量と速度倍率の対数には比例関係が適用できる(対数則と称する)という知見を得た。この適用に関して、拘束圧が変化して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ため、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の検討ができる。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、他の直接せん断試験と比較しても、平均的な応力計算により、主応力の大きさや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)を対象として試験を行った。各試料の粒径加積曲線を 図-1 に示す。

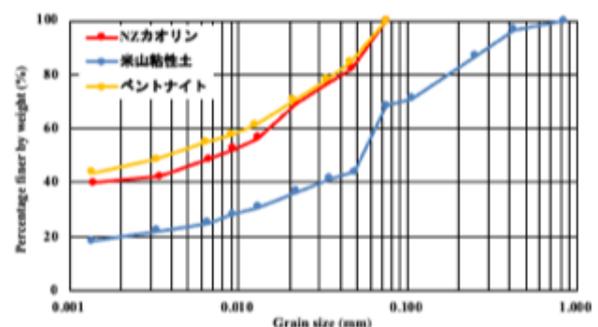


図-1 各試料の粒径加積曲線

2.2.1 NZ カオリン

本試料は、乾燥後 75 μm ふるいを通過した試料のみを試験に用いた。NZ カオリン粘土の物性値を表-1 に示す。

表-1 NZ カオリンの物性値

密度 ρ_s (g/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
------------	------

2.2.2 米山粘性土

本試料は乾燥後、850 μ m ふるいを通過した試料のみを試験に用いた。米山粘性土の物性値を表-2に示す。

表-2 米山粘性土の物性値

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
Clay (%)	23.6
Silt (%)	57.0
Sand (%)	19.4

2.2.3 ベントナイト配合試料

本試料は、乾燥後 75 μ m ふるいを通過した試料のみを試験に用いた。ベントナイト配合試料の物性値を表-3に示す。

表-3 ベントナイト配合試料の物性値

密度 ρ_s (g/cm ³)	2.730
液性限界 W_L (%)	97.1
塑性限界 W_p (%)	22.3
塑性指数 I_p	74.8

2.3 試験方法

本研究は飽和条件でせん断試験を行った。作製し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。二重負圧とは供試体内部から空気を追い出すことを目的として供試体内部に真空を供給する方法である。空気を吸い出した状態で通水することで、水が通りやすくなり飽和度を高めることが出来る。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。この等方予備圧密は供試体上下から排水させ、排水量が落ち着くまで行った。その後、二重セルを組み立

て、二重セル内にも給水した。この二重セル内の水位を用いて供試体の体積変化を計測する。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。単調荷荷の場合はせん断速度 2(%/min)、0.2(%/min)、0.02(%/min)、0.002(%/min)、0.0002(%/min)の5ケースで行った。ステップ荷荷の場合は単調荷荷と同様の速度を段階的に変化させてせん断した。

3. 試験結果

3.1 NZ カオリンの単調荷荷試験

新野(2022)¹⁾らによる NZ カオリンの等方圧密時の拘束圧 300kPa の単調荷荷のせん断ひずみ-偏差応力関係を図-2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 の単調荷荷のせん断ひずみ-偏差応力関係を図-3に示す。

図-2より、せん断初期において、せん断速度が速いほど偏差応力が高くなっていることから、荷荷速度が速くなるほど、偏差応力が上昇する、速度依存性を確認できた。また、また、せん断ひずみ 4%ほどで各速度の偏差応力が一致していることから、せん断が進行すると、速度依存性が消失することが考えられる。図-4においても、図-3と同様の傾向が確認でき、NZ カオリンの単調荷荷において、拘束圧 300kPa と拘束圧 150kPa で基本的な力学特性の違いはないとわかった。

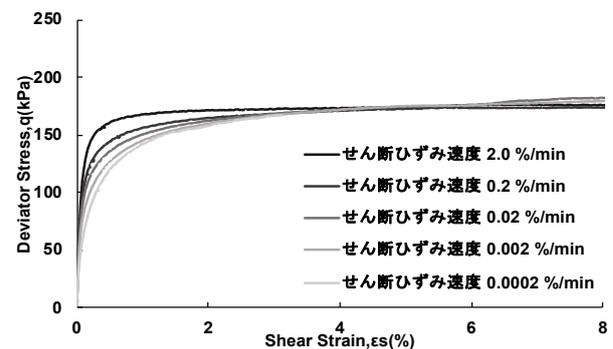


図-2 NZ カオリンの応力-ひずみ関係($P=300$ kPa)

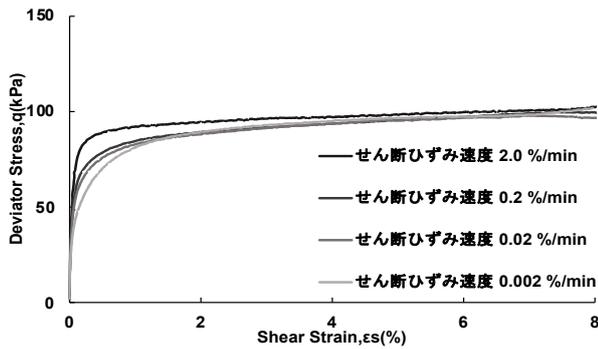


図-3 NZ カオリンの応力-ひずみ関係($P'=150\text{kPa}$)

3.2 米山粘性土の単調載荷試験

新野(2022)¹⁾らによる米山粘性土の等方圧密時の拘束圧 300kPa の単調載荷のせん断ひずみ-偏差応力関係を図-4 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 の単調載荷のせん断ひずみ-偏差応力関係を図-5 に示す。

図-4, 図-5 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、米山粘性土においても、拘束圧が変化しても、基本的な力学特性への影響はないとわかった。

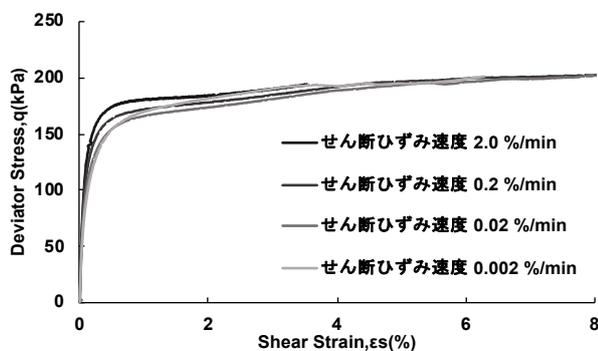


図-4 米山粘性土の応力-ひずみ関係($P'=300\text{kPa}$)

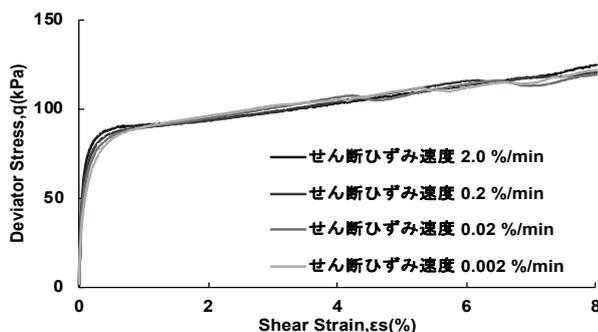


図-5 米山粘性土の応力-ひずみ関係($P'=150\text{kPa}$)

3.3 ベントナイトの単調載荷試験

新野(2022)¹⁾らによるベントナイトの等方圧密時の拘束圧 300kPa の単調載荷のせん断ひずみ-偏差応力関係を図-6 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 の単調載荷のせん断ひずみ-偏差応力関係を図-7 に示す。

図-6, 図-7 どちらでも、他試料と同様に、速度依存性を確認できた。しかし、他試料と異なり、せん断が進行しても、各速度の偏差応力が一致しないことから、高塑性粘土では、せん断ひずみが 8%ほど進行しても、速度依存性が消失しないことが考えられ、更に大きいひずみレベルでの、試験をする必要がある。

図-6, 図-7 の比較から、ベントナイトも他の試料同様、拘束圧が変化しても、基本的な力学特性への影響はないとわかった。

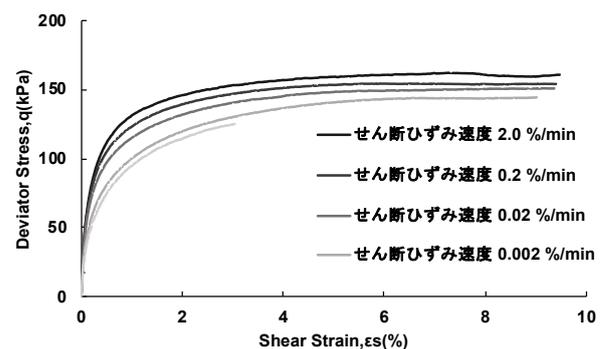


図-6 ベントナイトの応力-ひずみ関係($P'=300\text{kPa}$)

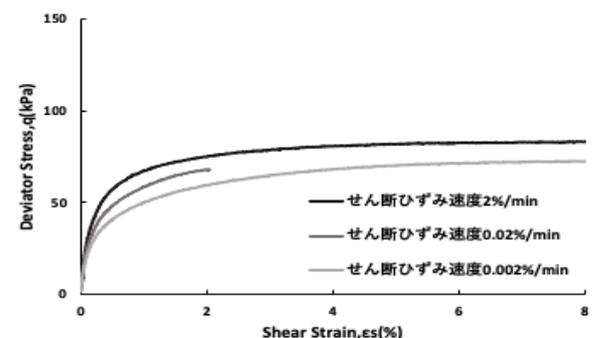


図-7 ベントナイトの応力-ひずみ関係($P'=150\text{kPa}$)

3.4 NZ カオリンの STEP 載荷試験

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 荷重のせん断ひずみ-偏差応力関係を **図-8** 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 荷重のせん断ひずみ-偏差応力関係を **図-9** に示す。

図-8 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-9** においても、**図-8** と同様の傾向が確認でき、NZ カオリンの STEP 荷重においても、拘束圧 300kPa と拘束圧 150kPa で基本的な力学特性の違いはないとわかった。

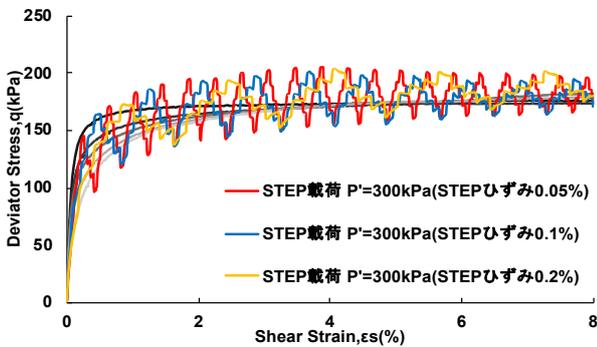


図-8 NZ カオリンの応力-ひずみ関係($P=300\text{kPa}$)

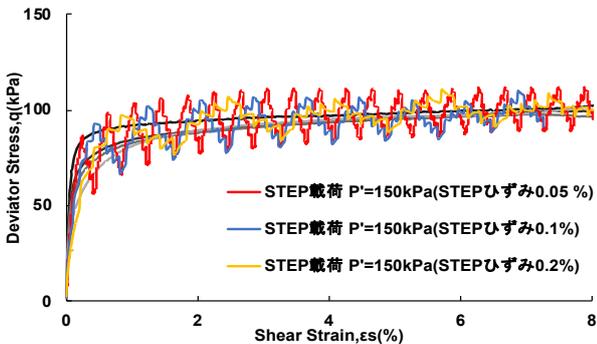


図-9 NZ カオリンの応力-ひずみ関係($P=150\text{kPa}$)

3.5 米山粘性土の STEP 荷重試験

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 荷重のせん断ひずみ-偏差応力関係を **図-10** 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 荷重のせん断ひずみ-偏差応力関係を **図-11** に示す。

図-10、**図-11** 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 荷重でも、拘束圧が変化しても、基本的な力学特性への影響はないとわかった。

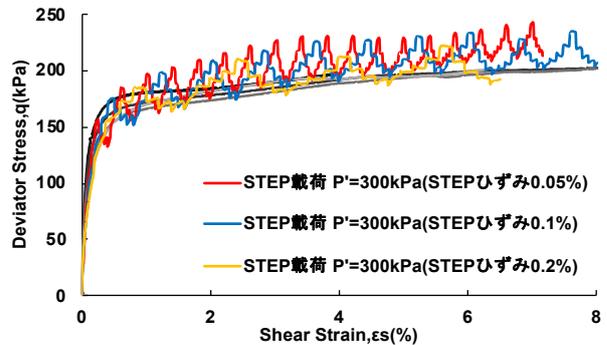


図-10 米山粘性土の応力-ひずみ関係($P=300\text{kPa}$)

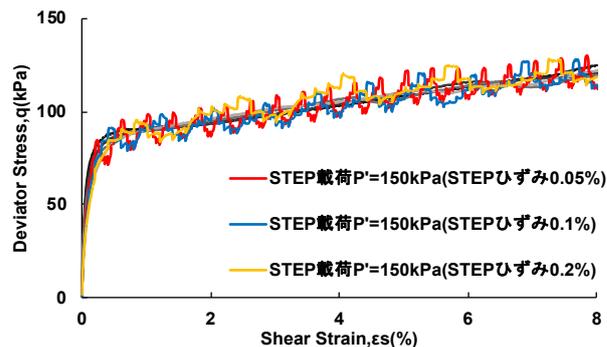


図-11 米山粘性土の応力-ひずみ関係($P=150\text{kPa}$)

3.6 ベントナイトの STEP 荷重試験

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 荷重のせん断ひずみ-偏差応力関係を **図-12** 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 荷重のせん断ひずみ-偏差応力関係を **図-13** に示す。

図-12、**図-13** 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ことから、ベントナイトの STEP 荷重でも、拘束圧による基本的な力学特性への影響はないとわかった。

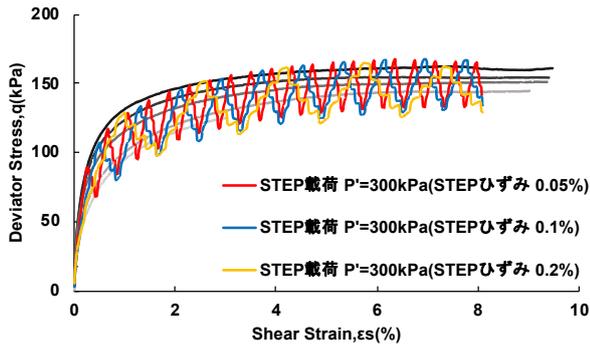


図-12 ベントナイトの応力-ひずみ関係($P'=300\text{kPa}$)

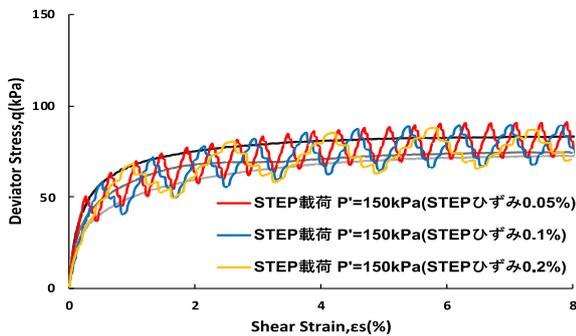


図-13 ベントナイトの応力-ひずみ関係($P'=150\text{kPa}$)

3.7 NZ カオリンの STEP 載荷の直接比較

NZ カオリンの拘束圧 $300 \cdot 150\text{kPa}$ の STEP 載荷(STEP ひずみ 0.1%)の応力-ひずみ関係の比較を図-14 に示す。

図-14 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。

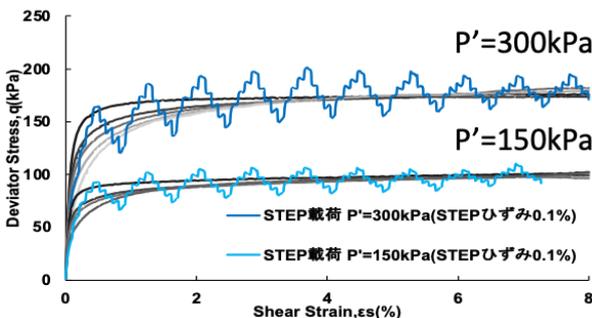


図-14 NZ カオリンの応力-ひずみ関係比較

3.8 米山粘性土の STEP 載荷の直接比較

米山粘性土の拘束圧 $300 \cdot 150\text{kPa}$ の STEP 載荷(STEP ひずみ 0.1%)の応力-ひずみ関係の比較を図-15 に示す。

図-15 から、米山粘性土でも NZ カオリン同様、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。

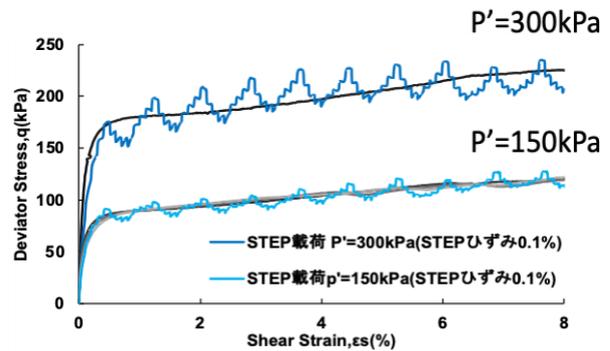


図-15 米山粘性土の応力-ひずみ関係比較

3.9 ベントナイトの STEP 載荷の直接比較

ベントナイトの拘束圧 $300 \cdot 150\text{kPa}$ の STEP 載荷(STEP ひずみ 0.1%)の応力-ひずみ関係の比較を図-16 に示す。

図-16 から、ベントナイトでも他試料同様、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。

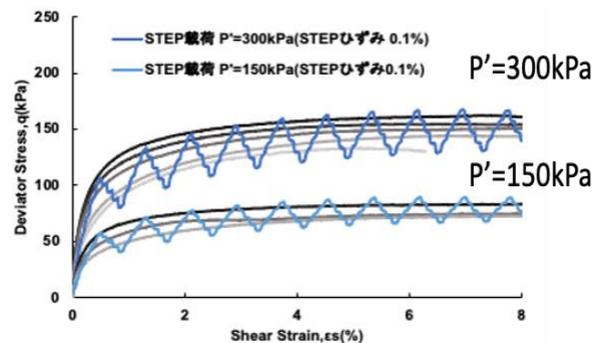


図-16 ベントナイトの応力-ひずみ関係比較

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-17** に示す。 **図-17** 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(1 ステップ)に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-17** 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-17** 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)。

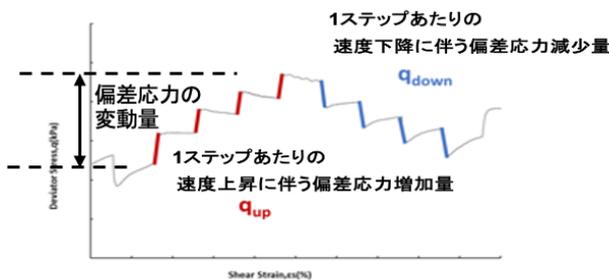


図-17 拡大した STEP 载荷の応力-ひずみ関係

そうして, 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, 3.7 節~3.9 節で述べた通り, すべての粘性土試料で, 速度依存性は拘束圧による影響を受けているため, 速度変化倍率のみで参照できる指標を作成するため, 速度依存量が拘束圧によらない変数を見つける必要があった。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-18** の左側, q_{down}/p' - ϵ_s 関係を **図-18** 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。

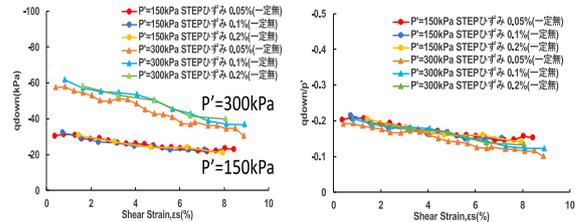


図-18 NZ カオリンの速度依存量

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-19** の左側, q_{down}/p' - ϵ_s 関係を **図-19** の右側に示す。 **図-19** より, 米山粘性土でも NZ カオリンと同じ傾向が得られた。

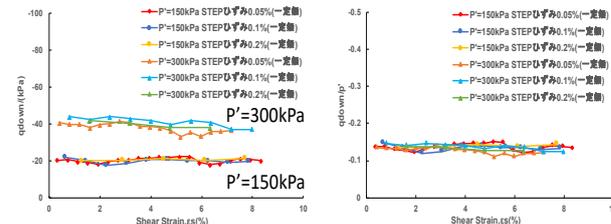


図-19 米山粘性土の速度依存量

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-20** の左側, q_{down}/p' - ϵ_s 関係を **図-20** の右側に示す。 **図-20** より, 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。

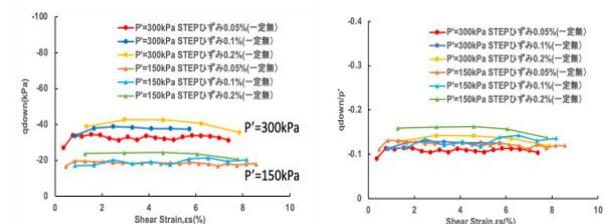


図-20 ベントナイトの速度依存量

4.2 速度の変化倍率と速度依存量の関係

せん断速度の変化倍率のみで決定できる速度依存量の指標があれば、設計・解析時に用いやすいことから、速度の変化倍率と速度の依存量の関係を以下のように整理した。

各試料のSTEPひずみ0.1%のケースのSTEP载荷について、せん断終了時(せん断ひずみ6.0%時)の1ステップ($q_{up} \cdot q_{down}$ で1ステップずつ)に着目し、速度の変化倍率と速度依存量を読み取った。

速度の変化倍率と速度依存量の算出方法について、**図-21**で10000倍速度変化した時の速度依存量、**図-22**で100倍速度変化した時の速度依存量、**図-23**で10倍速度変化した時の速度依存量の算出方法を示す。

図-21では、4.1節で紹介したデータ整理と同様、ステップ载荷の1ステップ合計の速度依存量を読み取っており、 $q_{up} \cdot q_{down}$ それぞれ、1つの速度依存量が得られた。**図-22**では、ステップ载荷の1番遅い速度から真ん中の速度、真ん中の速度から1番速い速度の速度依存量を読み取っており、 $q_{up} \cdot q_{down}$ それぞれ、2つの速度依存量が得られた。**図-23**では、ステップ载荷で速度変化するたびに速度依存量を読み取っており、 $q_{up} \cdot q_{down}$ それぞれ、4つの速度依存量が得られた。

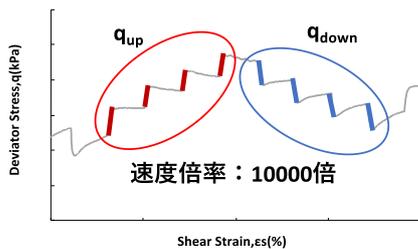


図-21 10000倍速度変化したときの速度依存量

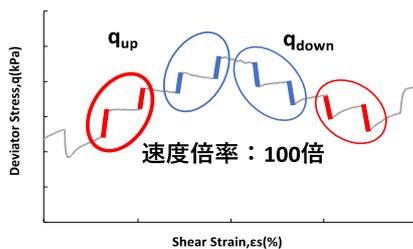


図-22 100倍速度変化したときの速度依存量

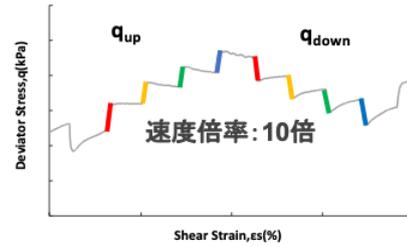


図-23 10倍速度変化したときの速度依存量

その後、読み取った値を横軸：速度変化倍率、縦軸：速度依存量(拘束圧で正規化後)の対数グラフにプロットした。

4.2.1 NZ カオリンの速度変化倍率と速度依存量

図-24にNZカオリンの速度上昇時の速度変化倍率と速度依存量の関係、**図-25**に速度下降時の速度変化倍率と速度依存量の関係を示す。どちらの図も拘束圧300kPaと拘束圧150kPaのプロットと、それより引いた近似線を示している(赤線：拘束圧300kPaのプロットからの近似線、青線：拘束圧150kPaのプロットからの近似線)。

図-24、**図-25**より、NZカオリンの拘束圧300kPaと拘束圧150kPaで近似線に大きな差は見られず、速度上昇時・下降時を比較しても、近似線の傾きに大きな差が見られないことがわかった。

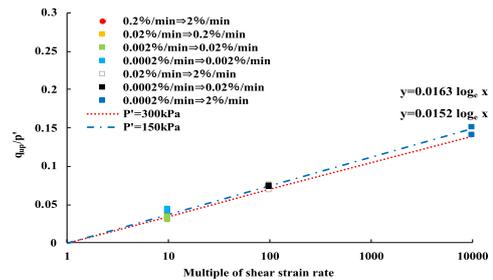


図-24 NZカオリンの速度変化倍率と速度依存量(q_{up})

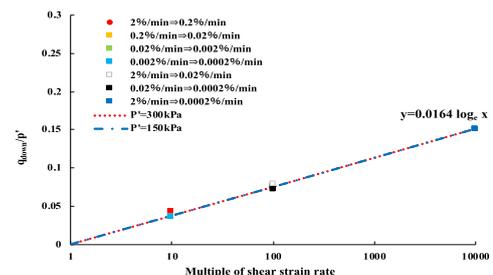


図-25 NZカオリンの速度変化倍率と速度依存量(q_{down})

4.2.2 米山粘性土の速度変化倍率と速度依存量

図-26 に米山粘性土の速度上昇時の速度変化倍率と速度依存量の関係、図-27 に速度下降時の速度変化倍率と速度依存量の関係を示す。どちらの図も拘束圧 300kPa と拘束圧 150kPa のプロットと、それより引いた近似線とその傾きを示している(赤線:拘束圧 300kPa のプロットからの近似線, 青線:拘束圧 150kPa のプロットからの近似線)。

図-26, 図-27 より、米山粘性土でも拘束圧 300kPa と拘束圧 150kPa で近似線に大きな差は見られず、速度上昇時・下降時を比較しても、近似線の傾きに大きな差が見られないことがわかった。

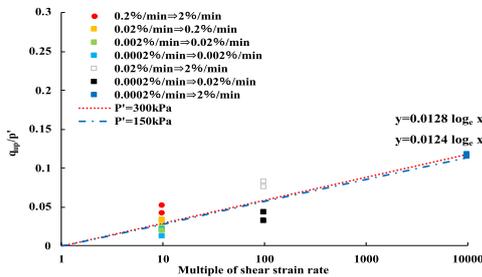


図-26 米山粘性土の速度変化倍率と速度依存量(qup)

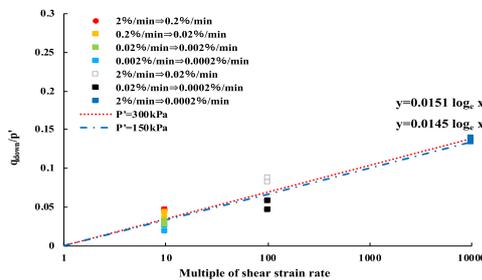


図-27 米山粘性土の速度変化倍率と速度依存量(qdown)

4.2.3 ベントナイトの速度変化倍率と速度依存量

図-28 にベントナイトの速度上昇時の速度変化倍率と速度依存量の関係、図-29 に速度下降時の速度変化倍率と速度依存量の関係を示す。どちらの図も拘束圧 300kPa と拘束圧 150kPa のプロットと、それより引いた近似線とその傾きを示している(赤線:拘束圧 300kPa のプロットからの近似線, 青線:拘束圧 150kPa のプロットからの近似線)。

図-28, 図-29 より、ベントナイトでも拘束圧 300kPa と拘束圧 150kPa で近似線に大きな差は見られず、速度上昇時・下降時を比較しても、近似線

の傾きに大きな差が見られないことがわかった。

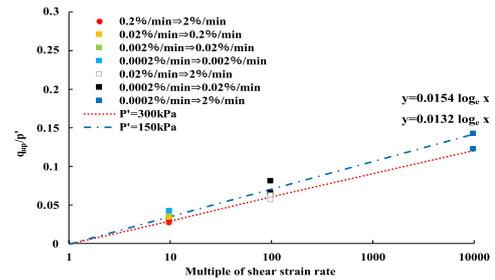


図-28 ベントナイトの速度変化倍率と速度依存量(qup)

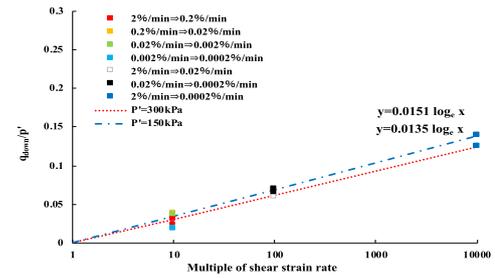


図-29 ベントナイトの速度変化倍率と速度依存量(qdown)

4.2.4 各試料の速度変化倍率と速度依存量

4.2.1 節~4.2.3 節で述べた通り、各試料で速度上昇時・下降時、拘束圧による速度変化倍率と速度依存量の違いがほとんど見られなかったため、試料同士の比較を行うこととした。図-30 に NZ カオリンの速度上昇時・下降時の拘束圧 300kPa と拘束圧 150kPa の速度変化倍率と速度依存量の近似線をまとめたもの、図-31 に米山粘性土の速度上昇時・下降時の拘束圧 300kPa と拘束圧 150kPa の速度変化倍率と速度依存量の近似線をまとめたもの、図-32 にベントナイトの速度上昇時・下降時の拘束圧 300kPa と拘束圧 150kPa の速度変化倍率と速度依存量の近似線をまとめたものを示す。また、すべての図で、それらより引いた近似線の平均を示している。

図-30, 図-31, 図-32 より、試料同士の速度変化倍率と速度依存量を比較しても、近似線の傾きが同程度の値となっていることがわかった。

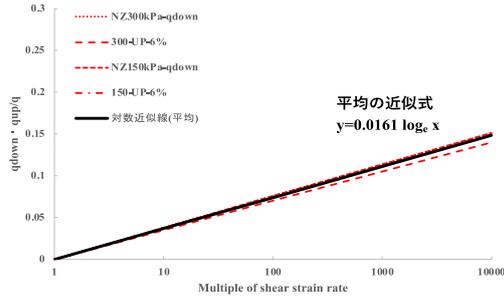


図-30 NZ カオリンの速度変化倍率と速度依存量

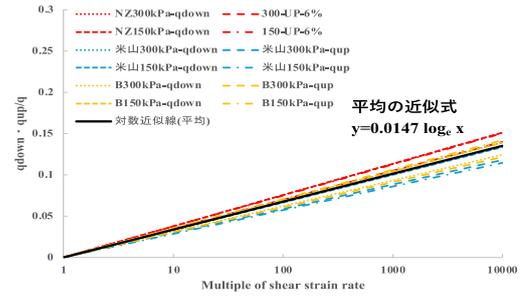


図-33 全試料の速度変化倍率と速度依存量

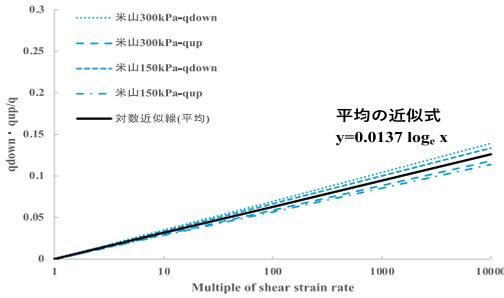


図-31 米山粘性土の速度変化倍率と速度依存量

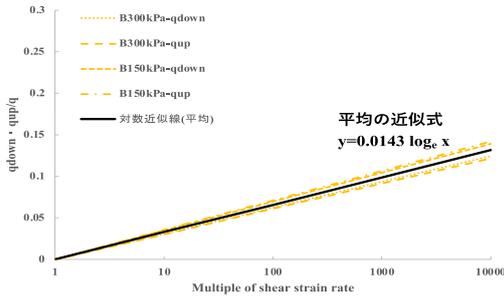


図-32 ベントナイトの速度変化倍率と速度依存量

4.2.4 全試料の速度変化倍率と速度依存量

図-33 に、全試料の近似線をまとめ、その平均を取った近似線を示す。

図-33 より、各試料で近似線が同程度の値で分布していることから、広い範囲の粘性土において、载荷速度の変化に伴う応力変動は、同等の対数則で一義的に決定することが可能であると考え、これを応力変動の対数則と定義した。

5. まとめ

- 1). 拘束圧が大きいほど速度依存量も大きく、拘束圧が依存性に影響を与えることがわかった。
- 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はほぼ同じ値となり、正規化が可能であることがわかった。
- 3). すべての粘性土で、速度依存量と速度変化倍率の対数の間に、一義的な線形関係が得られた。これを段階载荷による「応力変動の対数則」と呼ぶことにした。

6. 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。