

異なる土の力学特性に与える段階ひずみ速度の影響

地盤工学研究室 森田 大貴
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計算となる。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は考慮されていない。

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。

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により、供試体全体にせん断変形を与えることができる。さらに、ねじる速度を精度よく最大 10000 倍の差をつけてせん断することが可能で、せん断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。これらのことより、三軸圧縮試験機と比較して原地盤での応力・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、主応力の大きさおよび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、ニュージーランドカオリン(以下、NZカオリン)、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、ベントナイト配合試料)を対象として試験を行った。各試料の粒形加積曲線を図-1 に示す。

2.2.1 NZ カオリン

本試料は、乾燥後 750 μ m 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。

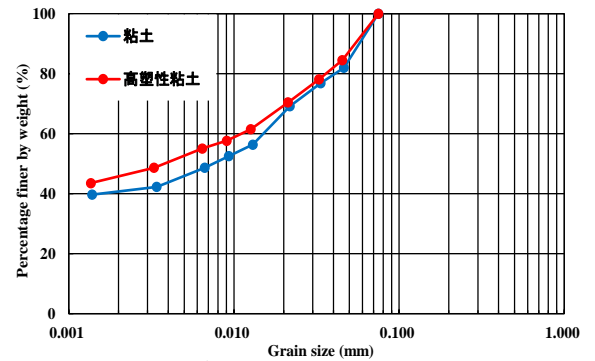


図-1 各試料の粒形加積曲線

表-1 NZ カオリン粘土の物性値

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 ベントナイト配合試料

本試料は、乾燥後 750 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-2 に示す。

表-2 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。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。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。STEP 荷荷では、せん断ひずみが 0.1%増加するごとにせん断速度を 10 倍(以下, STEP5), 100 倍(以下, STEP3), 10000 倍(以下, STEP2)速度変化させる 3 パターンのせん断を実施した。各 STEP 荷荷における、速度変化とせん断ひずみの関係を 図-2, 図-3, 図-4 に示す。

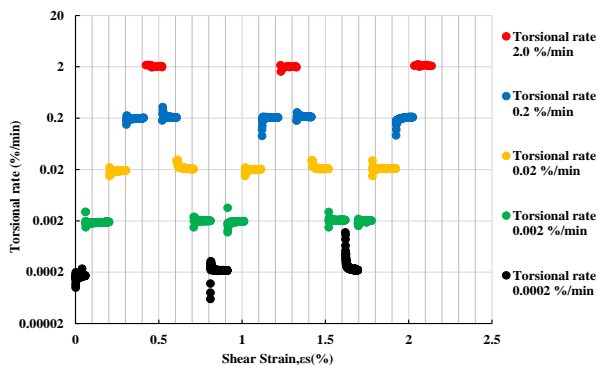


図-2 せん断ひずみとせん断速度の関係 (STEP5)

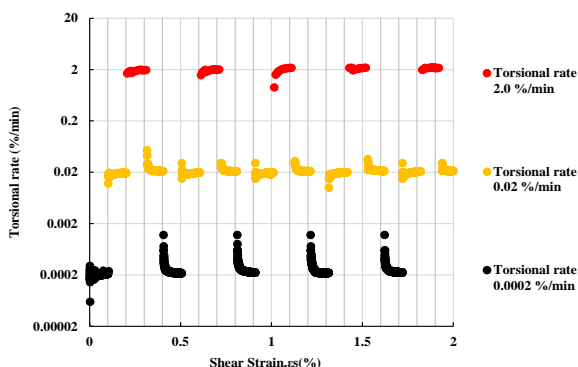


図-3 せん断ひずみとせん断速度の関係 (STEP3)

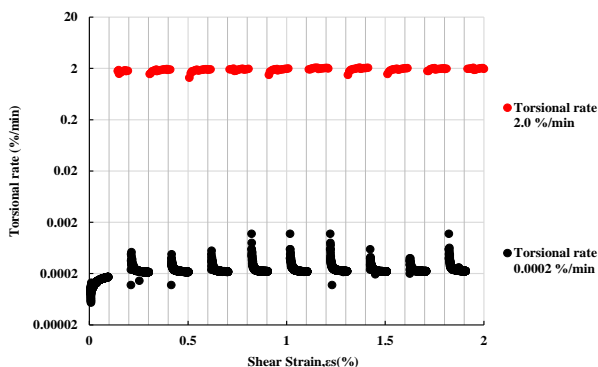


図-4 せん断ひずみとせん断速度の関係 (STEP2)

3. 試験結果

3.1 NZ カオリンの単調荷荷試験

NZ カオリンの平均有効主応力-偏差応力関係を 図-5, せん断ひずみ-偏差応力関係を 図-6 に示す。応力経路図より、どのせん断速度のケースでも平均有効主応力 p' の減少が見られるが、せん断速度が速いほど p' の減少は q が大きくなってから進んでいる。間隙水圧の

発生するひずみは、速度によって違うようである。応力-ひずみ関係よりせん断ひずみが小さい部分では、せん断速度が速いケースほど偏差応力が大きくなっており、アイソタック則に基づく傾向が見られる。また、米山粘性土と比較すると¹⁾、各速度の偏差応力が一致するせん断ひずみが大きくなっており、アイソタック則が消失するまで時間を要していることが分かった。

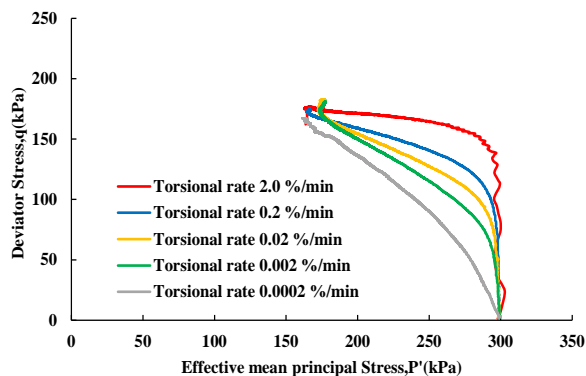


図-5 NZ カオリンの応力経路図

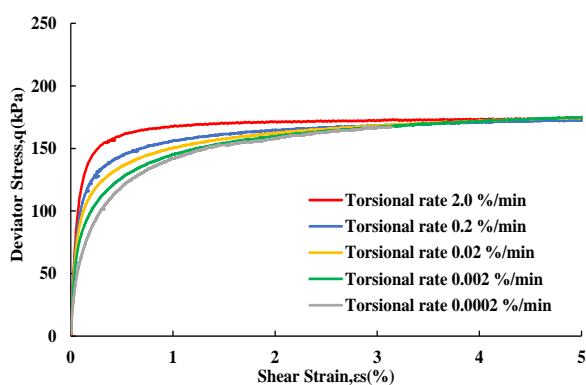


図-6 NZ カオリンの応力-ひずみ関係

3.2 ベントナイト配合試料の単調荷荷試験

ベントナイト配合試料の平均有効主応力-偏差応力関係を 図-7, せん断ひずみ-偏差応力関係を 図-8 に示す。応力経路図, 応力-ひずみ関係とも、NZ カオリンと同様のアイソタック則の傾向が見られるが、せん断ひずみ 9%を超えても各速度の偏差応力は一致しな

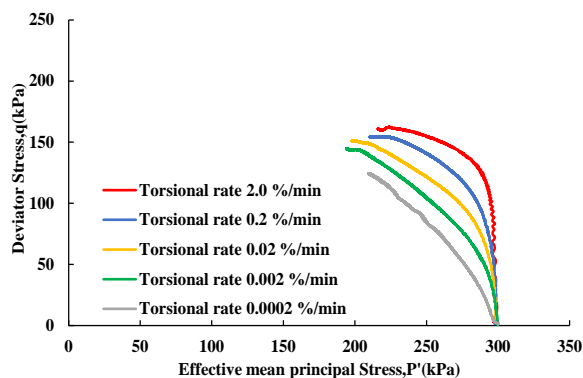


図-7 ベントナイト配合試料の応力経路図

った。

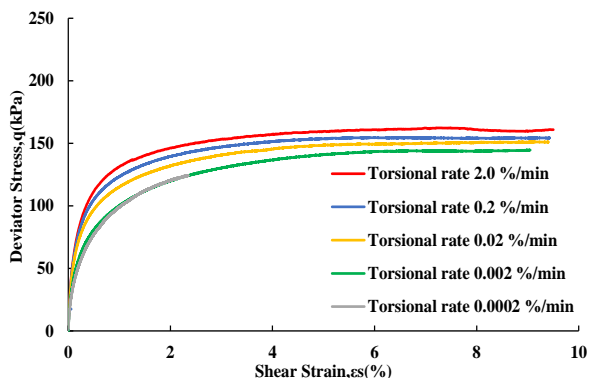


図-8 ベントナイト配合試料の応力-ひずみ関係

3.3 NZ カオリンの STEP 荷重試験 (STEP5・STEP3・STEP2)

NZ カオリンにおける、異なる STEP 荷重試験のケースを合わせた平均有効主応力-偏差応力関係を図-9、せん断ひずみ-偏差応力関係を図-10 に示す。各 STEP 荷重時の速度が変化するせん断ひずみは 0.1%に統一している。また、無彩色の線形は同試料の単調荷重 2%/min~0.0002%/min の結果であり、各 STEP 荷重と比較するために表示している。

図-9 より、単調荷重と同程度で p' の減少が進むが、豊浦砂のように一意の関係とはならず、せん断初期は、各速度の単調荷重の関係に従っているようである。

図-10 より、せん断初期は単調荷重と同程度の偏差応力であるが、せん断が進むと単調荷重の場合よりも大きく偏差応力が変動している。また、せん断速度が変化した際に、偏差応力が大きく変化しており、STEP 数が少ないほど偏差応力の変化量は大きくなっていることが分かる。全ての STEP 荷重において、単調荷重で確認できたアイソタック則が発現していることが確認された。

3.2 ベントナイト配合試料の STEP 荷重 (STEP5・STEP3・STEP2)

ベントナイト配合試料における、異なる STEP 荷重試験のケースを合わせた平均有効主応力-偏差応力関係を図-11、せん断ひずみ-偏差応力関係を図-12 に示す。各 STEP 荷重の STEP ひずみは 0.1%に統一している。また、無彩色の線形は同試料の単調荷重 2%/min~0.0002%/min の結果であり、各 STEP 荷重と比較するために表示している。

図-11 より、どの STEP 荷重のケースにおいても、有効応力の減少がみられる。また、STEP3 荷重、STEP2 荷重においても砂の結果のように一意の関係とはな

らず、せん断初期は各速度の単調荷重の関係に従っているようである。

図-12 よりせん断速度が変化した際に、偏差応力が大きく変化しており、せん断速度の段階変化数が少ないと、偏差応力の変化量はわずかに小さくなっていることが分かる。これは高塑性粘土試料では塑性指数 I_p が他の試料と比べて高く、偏差応力の変動が遅れて起こることが原因と考えられる。全ての STEP 荷重において、単調荷重で確認できたアイソタック則が発現していることが確認された。

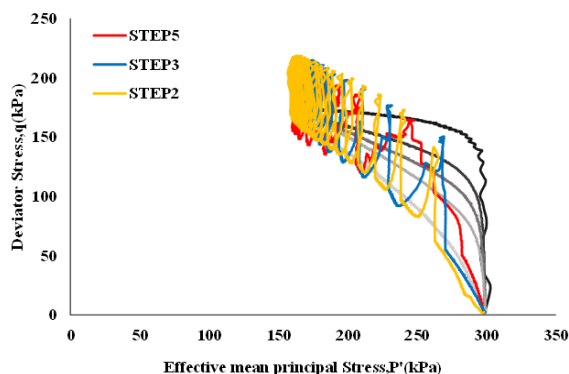


図-9 NZ カオリンの応力経路図 (STEP 荷重)

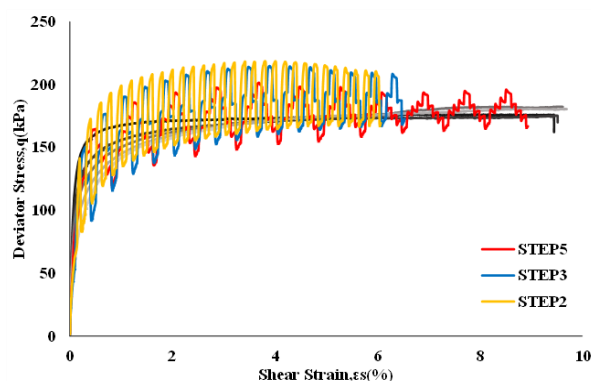


図-10 NZ カオリンの応力-ひずみ関係 (STEP 荷重)

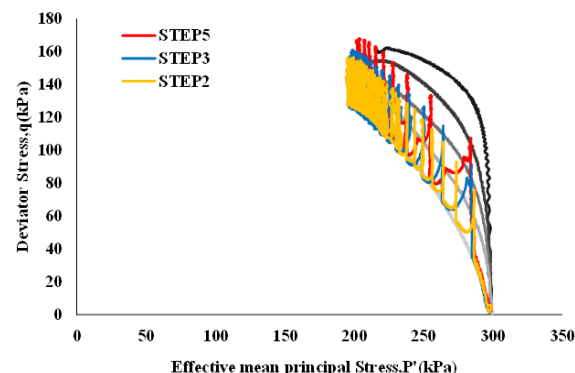


図-11 ベントナイト配合試料の応力-ひずみ関係 (STEP 荷重)

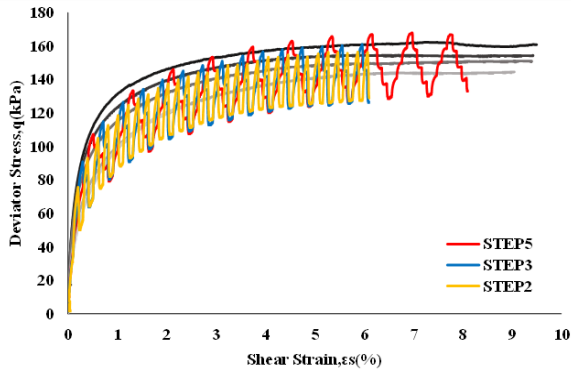


図-12 ベントナイト配合試料の応力-ひずみ関係 (STEP 載荷)

ベントナイト配合試料では、STEP 数による偏差応力増減量の違いはほとんど見られないことが分かった。

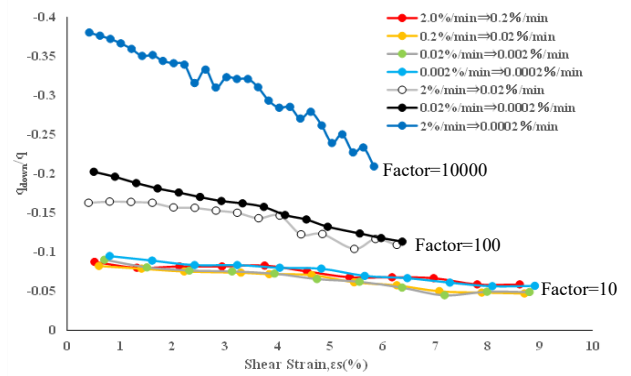


図-13 せん断ひずみ-偏差応力減少量関係 (NZ カオリン)

4. 試験結果の検討

4.1 せん断ひずみと偏差応力増減量の関係

STEP 数の異なるせん断試験の偏差応力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た。ここで、STEP 載荷のせん断速度低下に伴う偏差応力の減少量を q_{down} 、せん断速度上昇に伴う偏差応力の増加量を q_{up} とした。

NZ カオリンの各 STEP 載荷における、速度変化時偏差応力減少量とせん断ひずみの関係を図-13、せん断ひずみと偏差応力増加量の関係を図-14 に示す。ベントナイト配合試料の各 STEP 載荷における、速度変化時偏差応力減少量とせん断ひずみの関係を図-15、せん断ひずみと偏差応力増加量の関係を図-16 に示す。

2 つの試料に共通して、せん断速度倍率が大きくなると、偏差応力増加量も大きくなる傾向であることが分かった。また、せん断速度倍率が同じ場合、偏差応力増減増加量も近い値にあることが分かる。これらのことから、せん断速度の変化倍率によって、偏差応力増加量は変化することが分かった。

ニュージーランドカオリン粘土では、せん断初期は各 STEP 載荷の速度変化倍率に伴った偏差応力増減の挙動になっている。せん断ひずみが大きくなると q_{up} 、 q_{down} が減少していくことが分かった。ニュージーランドカオリン粘土では、せん断ひずみの増加に伴いアイソタック則が損失していくため、このような挙動であることが考えられる。また、せん断を継続していけば、STEP 数が異なっても、一定の偏差応力増減量に落ち着くことが示唆される。

ベントナイト配合試料では、せん断ひずみの増加に伴い偏差応力増減量が小さくなっていくことは無く、一定の減少量であることが分かった。このことから、

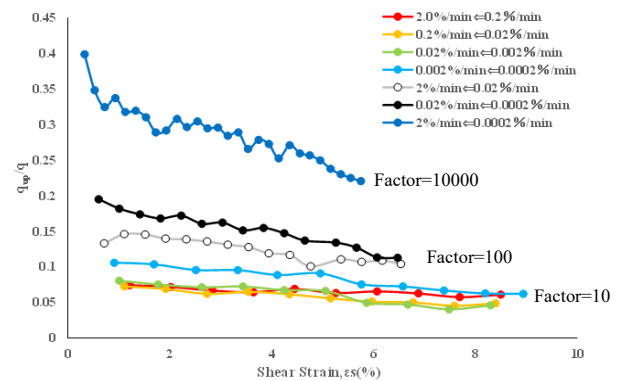


図-14 せん断ひずみ-偏差応力増加量関係 (NZ カオリン)

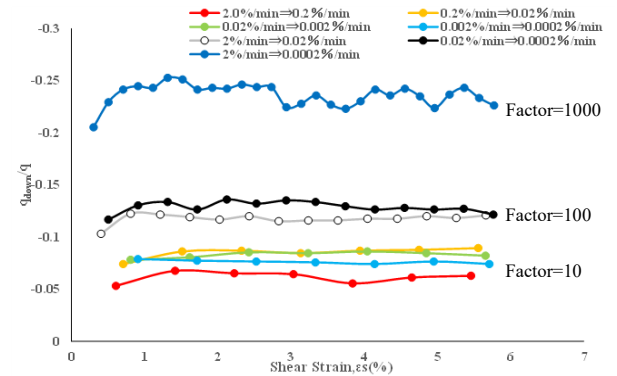


図-15 せん断ひずみ-偏差応力減少量関係 (ベントナイト配合試料)

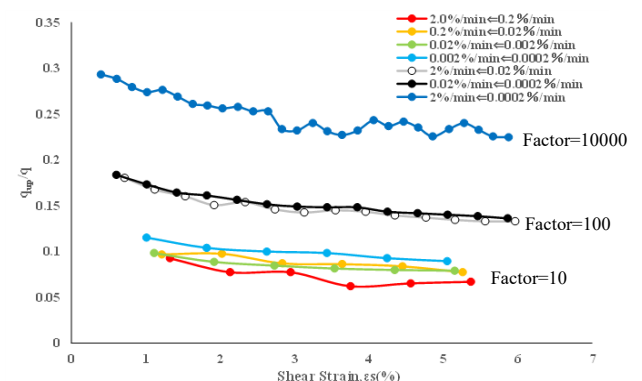


図-16 せん断ひずみ-偏差応力増加量関係 (ベントナイト配合試料)

4.2 速度倍率と偏差応力増減量の関係

2つの試料の各STEP 荷重におけるせん断速度倍率- q_{up}/q の関係を比較する. せん断初期($\epsilon_s=1.0\%$)のせん断速度倍率- q_{up}/q 関係を図-17, せん断終了時($\epsilon_s=6.0\%$)のせん断速度倍率- q_{up}/q 関係を図-18 に示す. 赤色の点線はNZ カオリンの偏差応力増加量近似曲線, 青色の一点鎖線はベントナイト配合試料の偏差応力増加量近似曲線を示している.

2つの試料における偏差応力増加量近似曲線は直線関係になっている. このことから, STEP 荷重による偏差応力増減量と速度変化倍率の関係は, せん断ひずみ速度の倍数で決定され, 倍数の対数に比例することが分かった.

また, せん断ひずみの増加に伴い, NZ カオリンの線形の傾きが小さくなっている. 一方, ベントナイト配合試料では, せん断初期からせん断終了まで線形の傾きに変化が無い. これは, NZ カオリンではせん断ひずみの増加に伴い, アイソタック則が損失していくため, 偏差応力減少量の傾きが小さくなっていく. ベントナイト配合試料は, せん断ひずみの増加に伴い偏差応力減少量は変化しないため, このような結果になっている. また, 同じことが偏差応力増加量 q_{down} でもいえる.

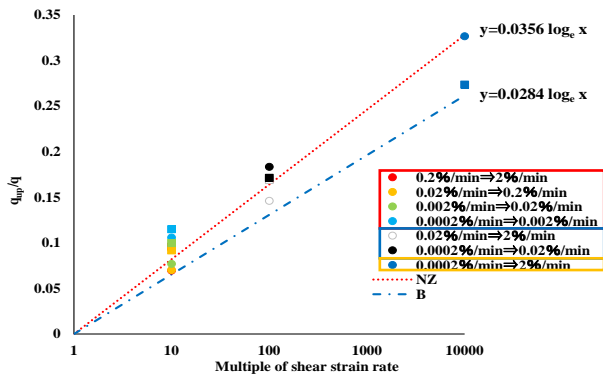


図-17 せん断速度倍率-偏差応力増加量 関係
せん断初期 ($\epsilon_s=1.0\%$)

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す.

1. 両試料とも, STEP 荷重試験において, せん断ひずみ速度が大きくなると偏差応力が上がり, せん断ひずみ速度が小さくなると偏差応力が下がった.
2. STEP 荷重を行うせん断ひずみが大きくなると, NZ カオリンでは, この偏差応力の増減量が減少したが, ベントナイト配合試料では変化しなかった.
3. STEP 間の速度一定区間が長くなると, NZ カオリンでは, STEP 荷重で増減したせん断応力の消失が見られたが, ベントナイト配合試料では明確な消失は見られなかった.
4. 両試料とも, STEP 荷重による偏差応力の増減量は, 現在のせん断速度に関係なく, そのSTEP の前のせん断ひずみ速度の倍数で決まり, 倍数の対数に比例する.

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.

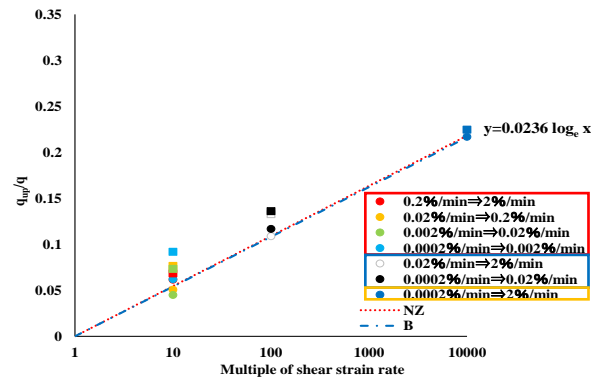


図-18 せん断速度倍率-偏差応力増加量 関係
せん断終了時 ($\epsilon_s=6.0\%$)