

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

環境社会基盤工学専攻 地盤工学研究室 新野 祥平
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

地盤が変形する時間には様々なものが存在する。例として地震や豪雨等で急激に破壊した事例もあれば、数日で数センチ程度変形していき、しばらく時間が経過したころに破壊した事例も存在する。更に、破壊は一定の速度で進行しているとは限らず、途中で速度が変化する可能性も考えられる。これらの速度変化による力学的性質の変化の傾向を把握することは今後の設計や防災における観点から有意義である。その中で、粘性土の沈下であればアイソタック則で解釈する試みが注目されている。アイソタック則とは、粘性土の影響を受けて、ひずみ速度が大きいほど大きな荷重が支えられているという考え方である。しかしながら、せん断時にどの程度アイソタック則が適用できるかは、いまだ不透明である。

本研究では中空ねじりせん断試験装置を用いてせん断中の中間主応力および平均主応力が一定の条件のもとで、一定のせん断速度で載荷する単調載荷を行った。その後、一定のせん断ひずみごとに段階的に速度変化する条件(以下、ステップ載荷)を行い、その結果を用いてせん断ひずみ速度の段階変化が土の応力ひずみ関係に与える影響を考察する。

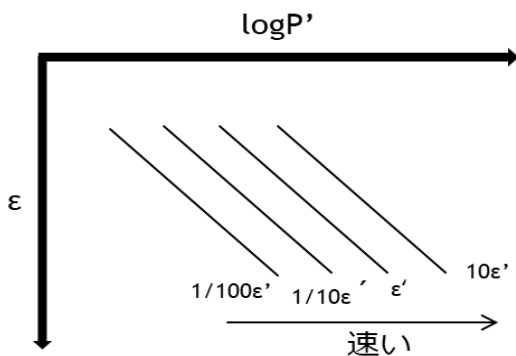


図-1 アイソタック則に基づく $\epsilon - \log P'$ 関係¹⁾

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容易に求めることができる。

2.2 試験試料

本研究では、砂試料として豊浦砂、粘土試料としてニュージーランドカオリン(以下、NZ カオリン)、高塑性粘土試料として NZ カオリンとベントナイトを 8:2 の割合で配合した試料(以下、ベントナイト配合試料)、中間土試料として米山粘性土を対象とした。各試料の粒径加積曲線を図-2 に示す。

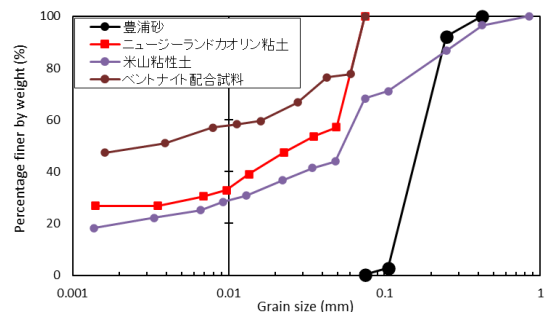


図-2 各試料の粒径加積曲線

2.2.1 豊浦砂

本研究では標準砂である豊浦砂を用いた。乾燥後、425 μm を通過した試料のみを利用した。豊浦砂の物性値を表-1 に示す。

表-1 豊浦砂の物性値

密度 ρ_s (g/cm ³)	2.650
最大間隙比 e_{max}	0.99
最小間隙比 e_{min}	0.597
均等係数 U_c	1.55
曲率係数 U_c'	1.05
細粒分含有率 F_c	0

2.2.2 米山粘性土

本試料は乾燥後、840 μm 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 NZ カオリン

本試料は、乾燥後 750 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-3 に示す。

表-3 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

2.2.4 ベントナイト配合試料

本試料は、乾燥後 750 μm 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-4 に示す。

表-4 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。単調載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。ステップ載荷の場合は単調載荷と同様の速度を段階的に載荷させてせん断した。

3. 試験結果

3.1 豊浦砂の単調載荷試験

比較のため Bau(2020)¹⁾らが得た豊浦砂の平均有効主応力-偏差応力関係を図-3、せん断ひずみ-偏差応力関係を図-4 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、これはせん断により間隙水圧

が生じて増加しているためである。速度による間隙水圧発生に違いは見られない。応力-ひずみ関係よりせん断速度による偏差応力上昇の差は小さく、せん断速度依存性はほとんど見られない。

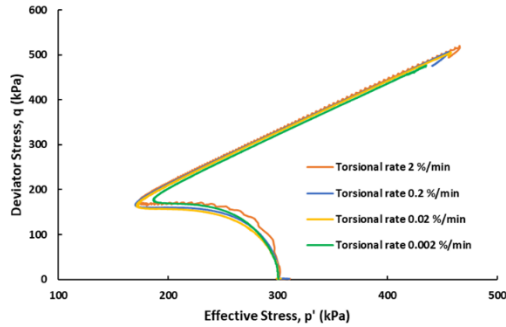


図-3 豊浦砂の応力経路図

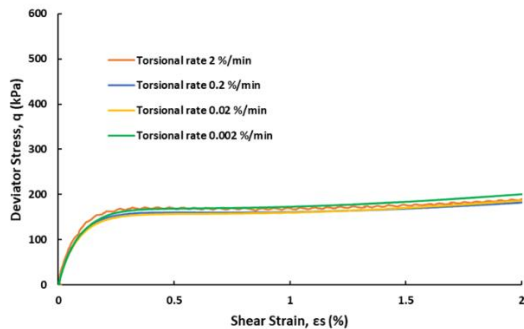


図-4 豊浦砂の応力-ひずみ曲線

3.2 米山粘性土の単調載荷試験

比較のため Bau(2020)¹⁾らによる米山粘性土の平均有効主応力-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。一方、せん断ひずみが大きくなるとせん断速度ごとの偏差応力差は小さくなり、アイソタック則が消失することが分かった。

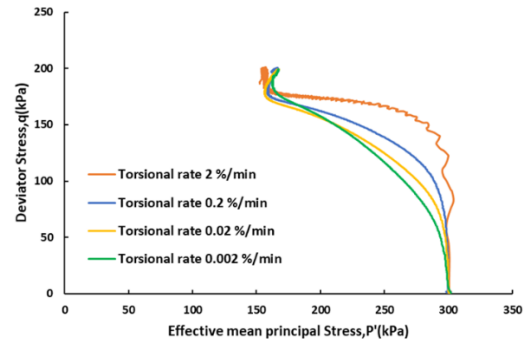


図-5 米山粘性土の応力経路図

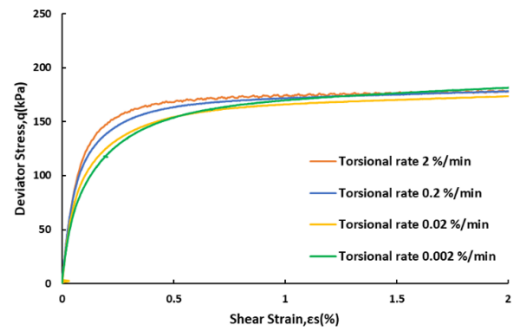


図-6 米山粘性土の応力-ひずみ曲線

3.3 NZ カオリンの単調載荷試験

NZ カオリンの平均有効主応力-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、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。

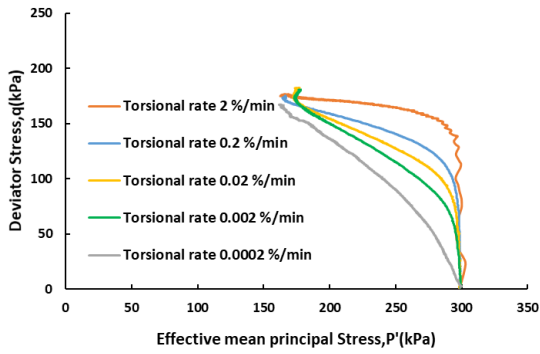


図-7 NZ カオリンの応力経路図

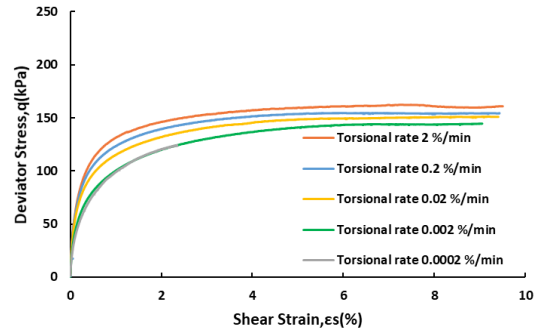


図-10 ベントナイト配合試料の応力-ひずみ曲線

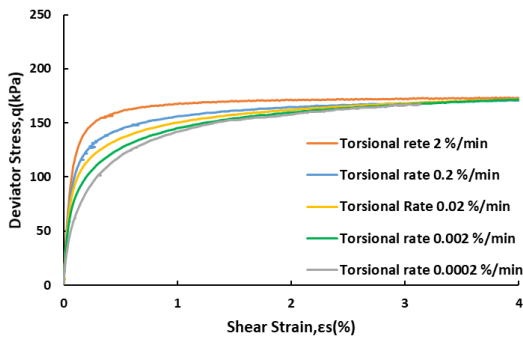


図-8 NZ カオリンの応力-ひずみ曲線

3.4 ベントナイト配合試料の単調載荷試験

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-9, せん断ひずみ-偏差応力関係を図-10に示す. 応力経路図, 応力-ひずみ関係とも, 米山粘性土, 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かった.

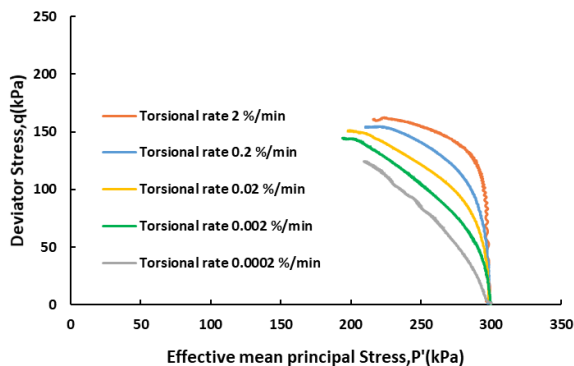


図-9 ベントナイト配合試料の応力経路図

3.5 豊浦砂のステップ載荷試験

豊浦砂の平均有効主応力-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. 応力経路図より, ステップ載荷と単調載荷には大きな差は確認できなかった. また, ステップ載荷時にも一意の応力経路となっており, p' が変化することで q も変化していることがわかる. 応力ひずみ関係から, ステップ載荷により階段状の変化が見られるが, 以降で示す粘性土ほど大きくない.

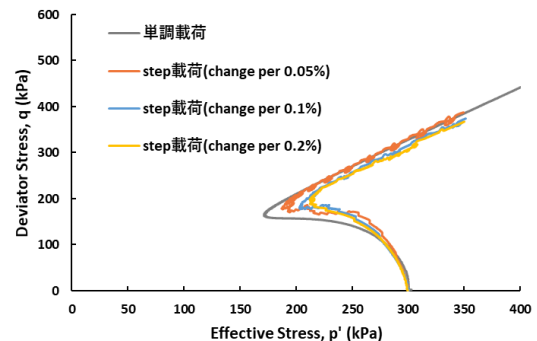


図-11 豊浦砂の応力経路図

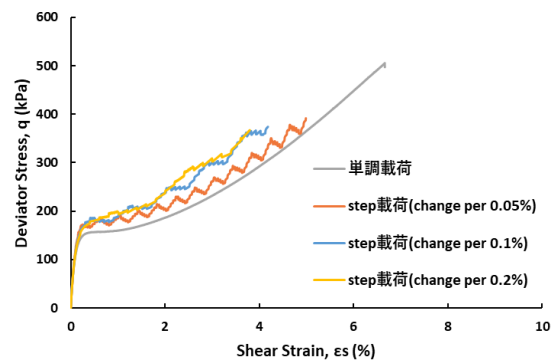


図-12 豊浦砂の応力-ひずみ曲線

3.6 米山粘性土, NZ カオリンのステップ載荷試験

米山粘性土の平均有効主応力-偏差応力関係を図-13, せん断ひずみ-偏差応力関係を図-14, 図-15に, NZ カオリンの平均有効主応力-偏差応力関係を図-16, せん断ひずみ-偏差応力関係を図-17, 図-18に示す. 灰色の線は単調載荷の結果であり, ステップ載荷と比較のため表示している. 応力経路図より, 単調載荷と同程度で 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, 各速度の単調載荷の関係にしたがっているようである. また, 応力ひずみ関係より, せん断初期は単調載荷と同程度の偏差応力であるが, せん断が進むと単調載荷の場合よりも大きく偏差応力が変動している.

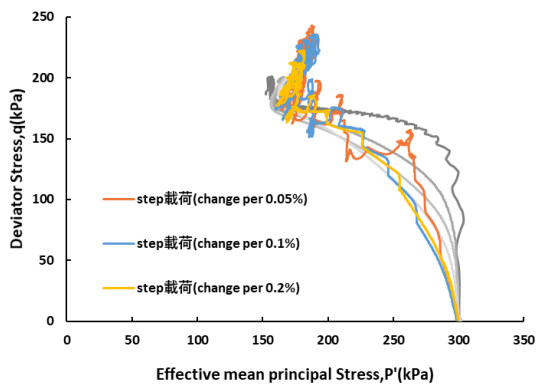


図-13 米山粘性土の応力経路図

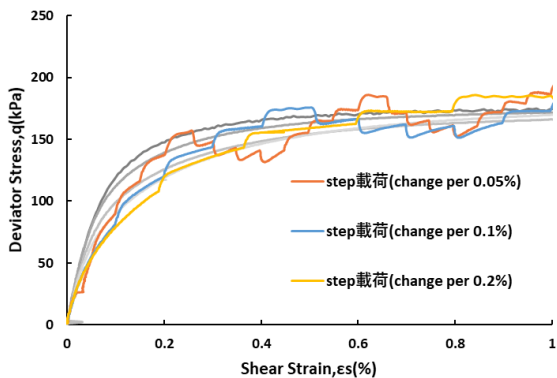


図-14 米山粘性土の応力ひずみ関係
(せん断ひずみ ϵ_s 1%以下)

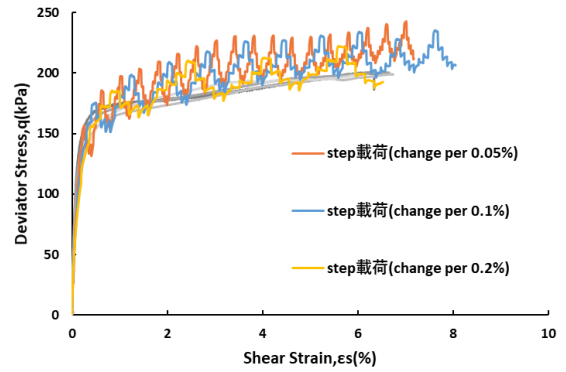


図-15 米山粘性土の応力ひずみ関係

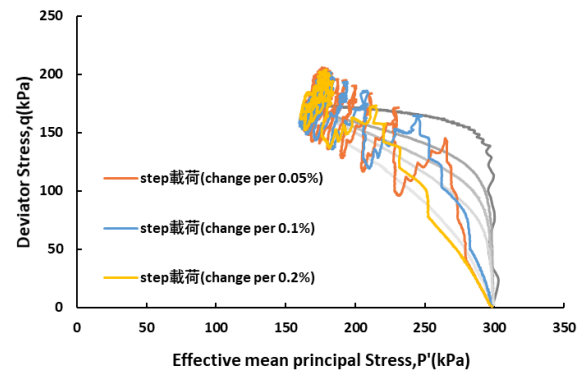


図-16 NZ カオリンの応力経路図

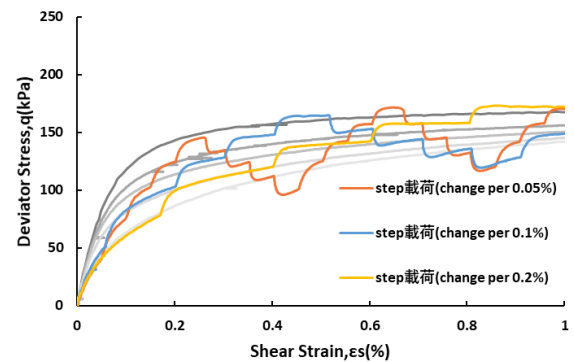


図-17 NZ カオリンの応力ひずみ関係
(せん断ひずみ ϵ_s 1%以下)

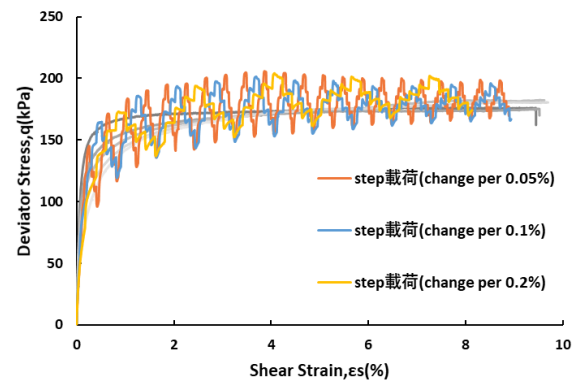


図-18 NZ カオリンの応力ひずみ関係

4. 試験結果の検討

4.1 せん断ひずみと塑性指数の関係

単調荷重試験において、各試料がせん断速度に関わらず強度が一致する時のせん断ひずみと試料の塑性指数の関係をとったグラフを図-19に示す。ベントナイト配合試料はせん断ひずみ 9%を超えても強度が一致しなかった。図より、塑性指数が高い試料ほど、大きなひずみまで各せん断速度の偏差応力が一致しない傾向が確認できた。これにより、アイソタック則の消失と試料の塑性指数には関係性があることが示唆される。

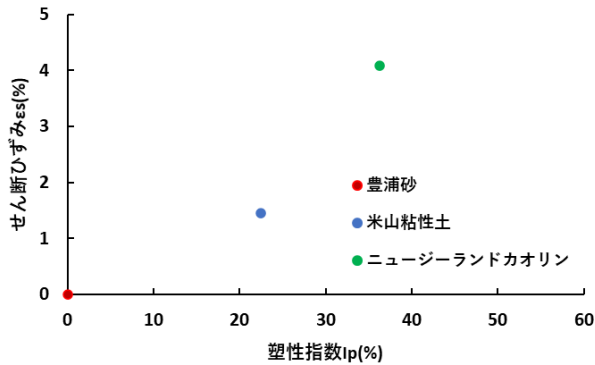


図-19 塑性指数-せん断ひずみ関係

4.2 せん断ひずみと偏差応力増減量の関係

ステップ荷重試験での偏差応力増減量を評価するため、ステップ荷重の偏差応力の最高点と最低点の差分をとり、それを単調荷重試験で各速度が一致する偏差応力で除した値を算出した(速度一定区間を考慮)。それとは別に、速度が変化した際の急速に変化した偏差応力のみカウントし、速度一定区間の変化は無視し、同じく単調荷重試験の各速度が一致する偏差応力で除した値も算出した(速度一定区間を無視)。

米山粘性土における偏差応力増減量をせん断ひずみの関係を図-20、図-21、NZカオリンにおける関係を図-22、図-23に示す(速度一定区間無視)。米山粘性土、NZカオリンともにせん断速度を変化させるひずみを変化させても差は見られず、応力増減量はひずみのみで決定されることが確認された。また、NZカオリンでは特にせん断ひずみ

が大きくなると応力増減量が小さくなっている。

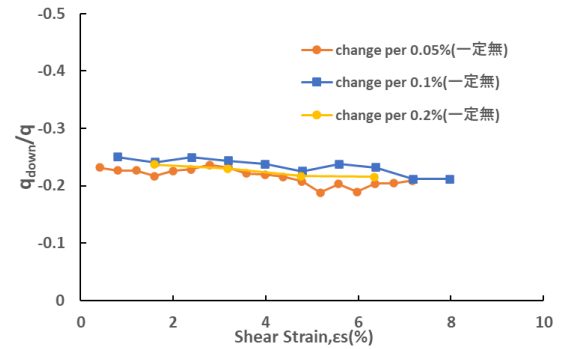


図-20 米山粘性土の q 減少-ひずみ関係

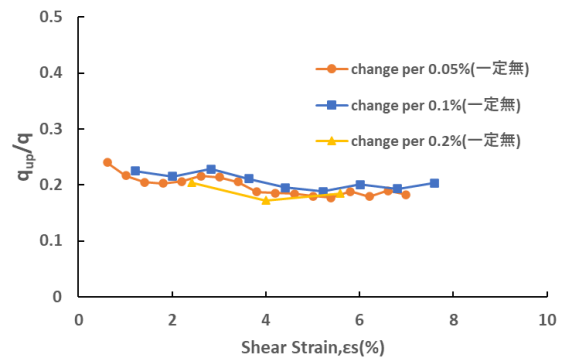


図 21 米山粘性土の q 増加-ひずみ関係

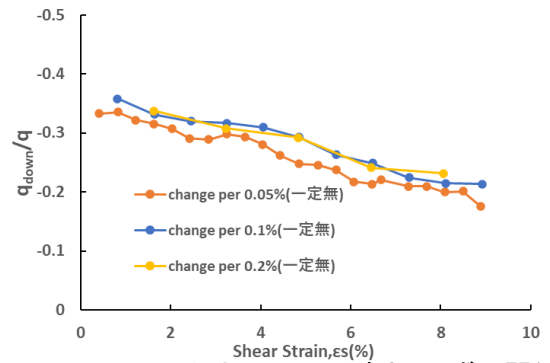


図-22 NZカオリンの q 減少-ひずみ関係

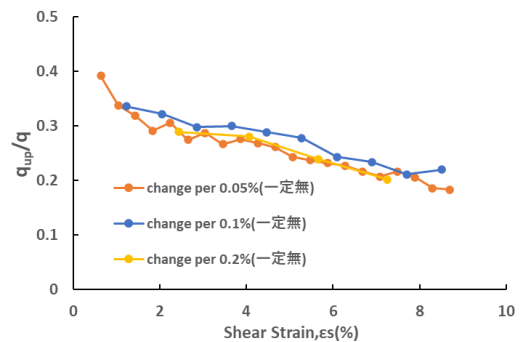


図-23 NZカオリンの q 増加-ひずみ関係

次に、速度一定区間を考慮した偏差応力増減量と無視した偏差応力増減量を比較した。米山粘性土での比較を図-24、図-25に、NZ カオリンでの比較を図-26、図-27に示す。米山粘性土、NZ カオリンともに、せん断ひずみ 0.05%で変化させたケースでは、速度一定区間無視のと差が小さいが、せん断ひずみ 0.2%で変化させたケースでは、一定区間考慮と無視の差が大きいことが分かる。これは、速度一定区間で強度が戻っており、アイソタック則の消失が起こっているためだと考えられる。

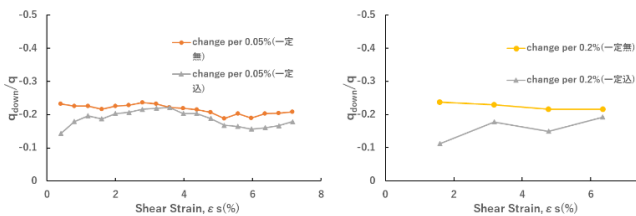


図-24 米山粘性土ひずみ-偏差応力減少量
(左 : ε_s 0.05%変化, 右 : ε_s 0.2%変化)

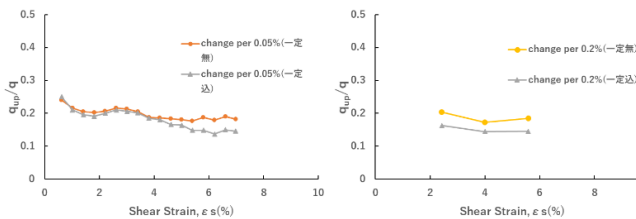


図-25 米山粘性土ひずみ-偏差応力増加量
(左 : ε_s 0.05%変化, 右 : ε_s 0.2%変化)

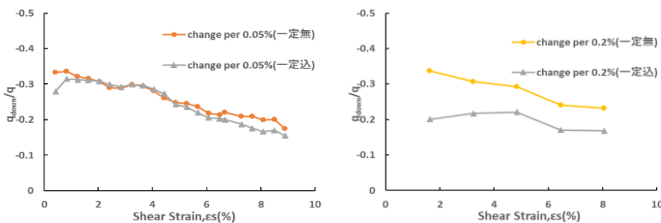


図-26 NZ カオリンひずみ-偏差減少減少量
(左 : ε_s 0.05%変化, 右 : ε_s 0.2%変化)

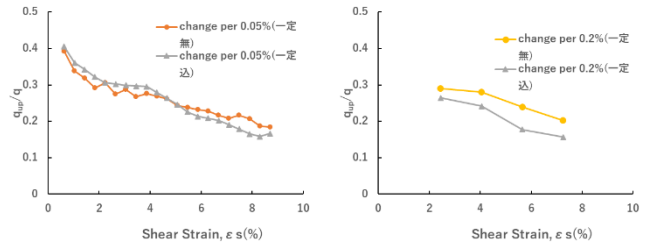


図-27 NZ カオリンひずみ-偏差応力増加量
(左 : ε_s 0.05%変化, 右 : ε_s 0.2%変化)

5. まとめ

本研究では、せん断速度段階载荷が変形特性に与える影響を解明することを目的に試験を行った。既往の研究と合わせて本研究で得られた知見を以下に示す。

1. 砂では、せん断速度が変化するとき偏差応力 q の増減が小さく、有効応力に支配されていると考えられ、アイソタック則はほとんど見られない。
2. 粘性土・粘土の単調载荷でせん断ひずみが大きくなると各速度の強度が一致してくるが、この時のアイソタック則の消失と試料の塑性指数には関係性が見られる。
3. 粘性土・粘土のステップ载荷試験ではすべてのせん断ひずみでアイソタック則が確認できた。しかし、速度一定区間でアイソタック則は消失していく。

今後は、高塑性粘土でのステップ载荷の実験やステップ载荷の途中で単調载荷に変化させ、ひずみ進展によるアイソタック則の消失に関する実験を行う予定である。

6. 参考文献

- 1) VONGOC BAU (2020) : 様々な土の変形特性に与えるせん断ひずみ速度の影響, 長岡技術科学大学修士論文。