

せん断中の速度変化が土の応力-ひずみ関係に及ぼす影響

長岡技術科学大学大学院 ○久司 智貴
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
長岡技術科学大学大学院 森田 大貴

1. はじめに

地盤が変形する時間は様々である。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と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するとは限らず、途中で速度が変化することも考えられる。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。

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で、一定のせん断ひずみ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、その結果から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。

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って、供試体全体にせん断変形を与える。本装置は、ねじり速度を最大 1000 0 倍変化させて精度良く実験を実施することが可能である。さらに、回転力の他に軸力、外圧、内圧を変化させることで、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。供試体内で応力とひずみは一定値とならず分布するが、平均的な値を計算することにより、主応力の大きさおよび方向を求めることもできる。

2.2 試験試料

本研究では、豊浦砂、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)を対象とした。

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。空中落下法により相対密度 60%になるように供試体を作製した。

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 NZ カオリン、ベントナイト配合試料

NZ カオリン、ベントナイト配合試料は、乾燥後 75 μm ふるいを通過した試料のみを試験に用いた。これらの試料の物性値を表-2 に示す。スラリー状の試料を圧密して、トリミングにより供試体を作製した。

表-2 粘土試料の物性値

試料名	NZ カオリン	ベントナイト配合試料
密度 ρ_s (g/cm ³)	2.710	2.730
液性限界 W_L (%)	65.6	97.1
塑性限界 W_p (%)	29.3	22.3
塑性指数 I_p	36.3	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。単調荷荷はせん断ひずみ速度 2(%/min), 0.2(%/min), 0.02(%/min), 0.002(%/min), 0.0002(%/min)の 5 ケースで行った。ステップ荷荷のは単調荷荷と同様の速度を段階的に荷荷させてせん断した (豊浦砂と NZ カオリンのみ実施)。

3. 試験結果

3.1 豊浦砂の試験結果

豊浦砂の応力経路を図-1、応力-ひずみ関係を図-2 に示す。図-1 より、どのせん断ひずみ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。また、ステップ荷荷と単調荷荷に大きな差は確認できない。

図-2 より、せん断ひずみ速度による偏差応力上昇の差は小さく、せん断ひずみ速度依存性はほとんど見られない。ステップ荷荷では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。

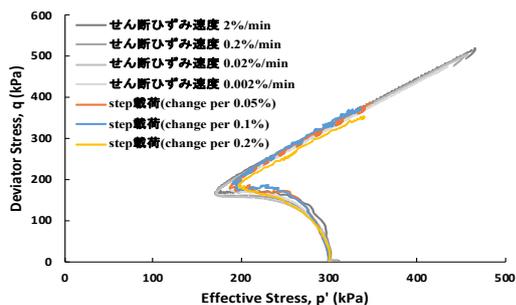


図-1 豊浦砂の応力経路図

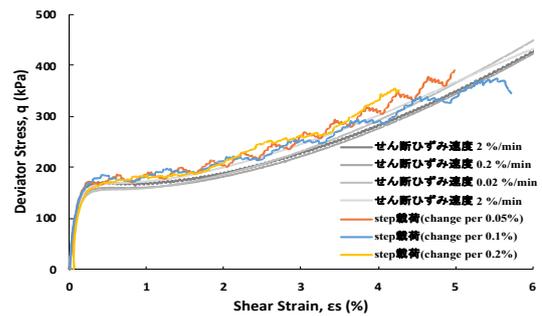


図-2 豊浦砂の応力-ひずみ関係

3.2 NZ カオリンの試験結果

NZ カオリンの応力経路を図-3、応力-ひずみ関係(εs 1%以下)を図-4、応力-ひずみ関係を図-5 に示す。図-3 より、単調荷荷はどのせん断ひずみ速度でも平均有効主応力 p' の減少が見られ、せん断ひずみ速度が速いと q が大きくなってから p' の減少が起こっている。間隙水圧の発生するひずみが速度によって異なると考えられる。ステップ荷荷では、豊浦砂のように一意の関係とはならず、せん断初期においては、速度に応じた応力経路にジャンプしているようである。

図-4、図-5 より、単調荷荷ではせん断ひずみが小さい部分では、せん断ひずみ速度が速いケースほど偏差応力が大きく、アイソタック則に基づく傾向が見られる。ステップ荷荷では、せん断初期は速度に応じた応力-ひずみ関係にジャンプしているが、せん断が進むと単調荷荷よりも大きく偏差応力が変動している。

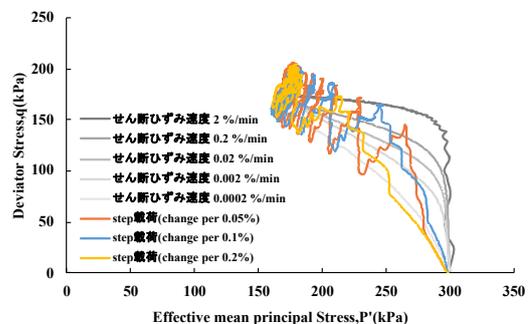


図-3 NZ カオリンの応力経路図

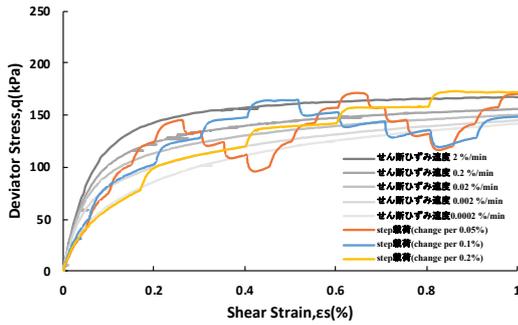


図-4 NZ カオリンの応力-ひずみ関係
(せん断ひずみ ε_s 1%以下)

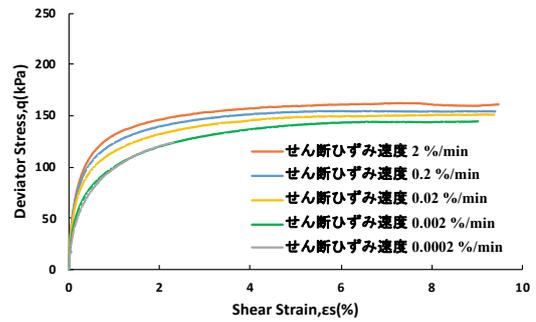


図-7 ベントナイト配合試料の応力-ひずみ関係

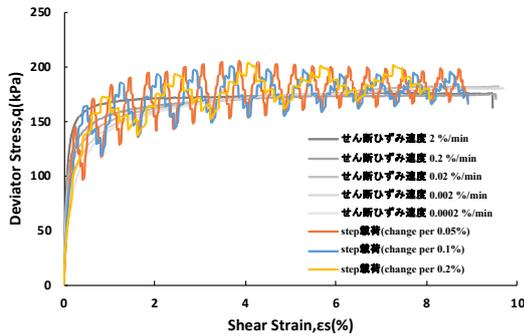


図-5 NZ カオリンの応力-ひずみ関係

3.3 ベントナイト配合試料の試験結果

ベントナイト配合試料の応力経路図を図-6 を
応力-ひずみ関係を図-7 に示す。図-6, 図-7 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かった。

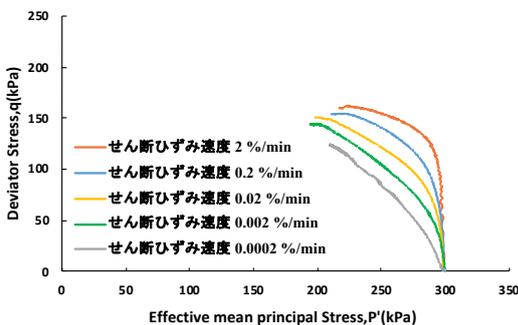


図-6 ベントナイト配合試料の応力経路図

4. 試験結果の検討

4.1 せん断ひずみと塑性指数の関係

単調載荷試験において, 各試料がせん断ひずみ
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-8
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ため, 便宜上,
10%としてプロットした。図-8 より, 塑性指数が
高いほど, 大きなひずみまで偏差応力が一致しな
い傾向が確認できる。これより, 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。

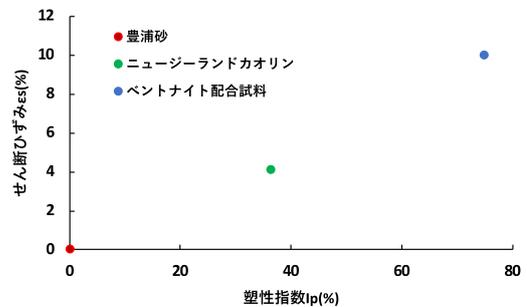


図-8 塑性指数-せん断ひずみ関係

4.2 せん断ひずみと偏差応力増減量の関係

ステップ載荷試験の偏差応力増減量を評価す
るため, ステップ載荷の偏差応力の最高点と最低
点の差分をとり, それを単調載荷試験で各速度が
一致する偏差応力で除した値を算出した(速度一
定区間考慮)。また, 速度が変化した際の速度一
定区間を除き, 単調載荷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(速度一定区間無視)。

NZ カオリンの偏差応力増減量とせん断ひずみの関係を図-9, 図-10 に示す(速度一定区間無視). ここで, ステップ载荷 1 サイクルあたり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.

図-9, 図-10 より, せん断ひずみ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で決定されることが確認された. また, せん断ひずみが大きくなると応力増減量が小さくなることが確認された.

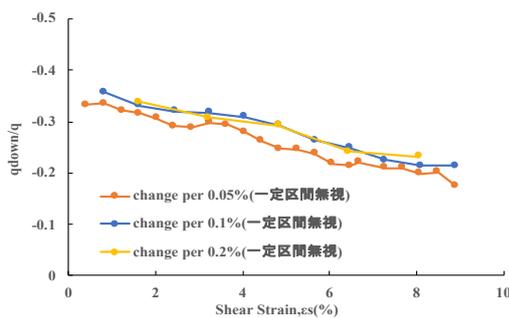


図-9 NZ カオリンの q 減少-ひずみ関係

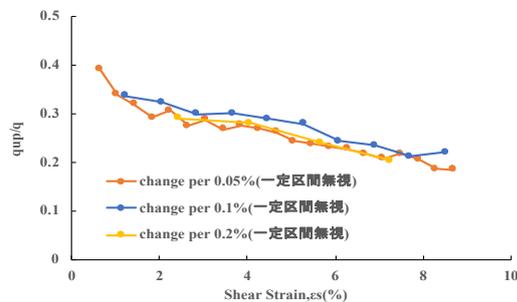


図-10 NZ カオリンの q 増加-ひずみ関係

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. NZ カオリンでの比較を図-11, 図-12 に示す. 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一定値に戻ってきており, アイソタック則の消失が起こっていると考えられる.

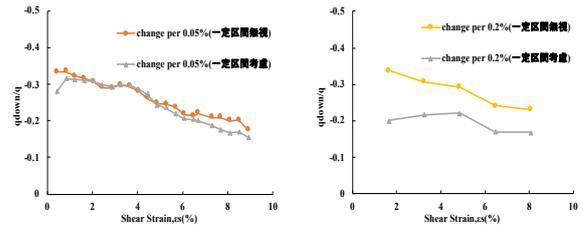


図-11 NZ カオリンひずみ-偏差応力減少量
(左: ε_s 0.05% 変化, 右: ε_s 0.2% 変化)

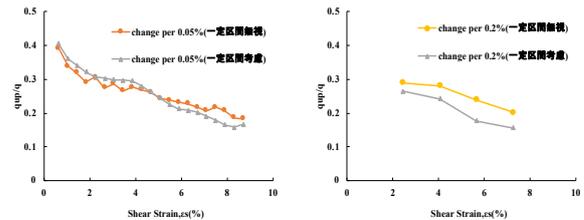


図-12 NZ カオリンひずみ-偏差応力増加量
(左: ε_s 0.05% 変化, 右: ε_s 0.2% 変化)

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す.

1. 砂では, せん断ひずみ速度が変化したとき偏差応力 q の増減が小さく, 有効応力に支配されると考えられる.
2. 粘土の単調载荷において, せん断ひずみが大きくなると速度の影響が小さくなる. このアイソタック則の消失ひずみ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, 速度一定区間においては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試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) 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.