

土の応力-ひずみ関係に与えるせん断ひずみ速度変化の影響

環境社会基盤工学専攻 地盤工学研究室 高橋宏希
指導教員 豊田浩史

1. はじめに

地盤が変形する速度は、様々なものが存在する。例として斜面崩壊において、急激に破壊した事例もあれば、数日で数センチ変形して、長期間経過後、破壊した事例も存在する。これらの事実を考慮して、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、今後の設計や地盤改良において有意義である。

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係数および平均主応力を一定の条件のもとで、せん断ひずみ速度をケースごとに変化させた非排水せん断試験を行った。その結果を用いて、せん断ひずみ速度が土の応力-ひずみ関係に与える影響を考察する。

2. 試験概要

2.1 試験装置

本研究で用いた中空ねじり試験機は中空円筒供試体にトルクを加えることにより、円周方向にせん断力を作用させることを主な目的とした直接型せん断試験の一種である。中空円筒供試体の外側と内側はメンブレンで包まれており、三方向の主応力を制御することができる。このように制御の自由度が大きいことから、複雑な応力条件下での土の基本的力学挙動を明らかにすることが可能である。例えば、原位置の地盤に作用する応力を他の試験機と比べ、忠実に再現することができる。

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、高塑性粘土試料としてニュージーランドカオリン 80%+ベントナイト 20%の割合で混合させた試料（以下ベントナイト配合試料）を用いた。また、比較のために米山粘性土の過去のデータを用いた。各試料の物性値を **Table 1**, **Table 2**, **Table 3**, **Table 4** に示す。また、それぞれの粒径分布を比較した粒径加積曲線を **Fig. 1** に示す。

Table. 1 豊浦砂の物性値

ρ_s (g/cm ³)	最大 間隙 比 e_{max}	最小 間隙 比 e_{min}	均等 係数 Uc	曲率 係数 Uc'	細粒分 含有率 Fc
2.65	0.99	0.597	1.55	1.05	0

Table. 2 ニュージーランドカオリンの物性値

ρ_s (g/cm ³)	WL(%)	Wp(%)	Ip(%)
2.710	65.6	38.6	27.0

Table. 3 ベントナイト配合試料の物性値

ρ_s (g/cm ³)	WL(%)	Wp(%)	Ip(%)
2.729	97.3	22.3	75.0

Table. 4 米山粘性土の物性値

ρ_s (g/cm ³)	WL(%)	Wp(%)	Ip(%)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)
2.746	52.4	29.9	22.5	23.6	57.0	19.4

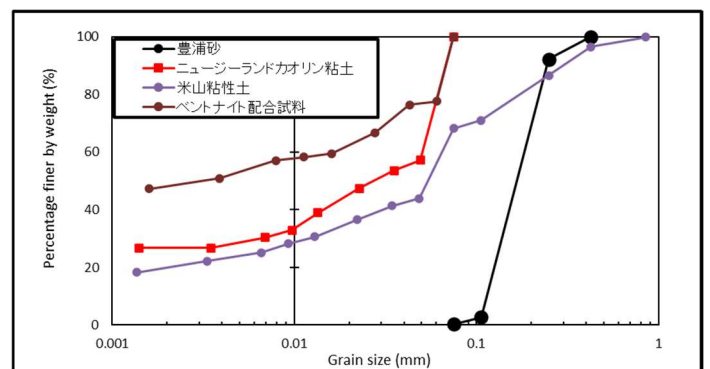


Fig. 1 粒径加積曲線

2.3 試験方法

本研究は砂，粘土ともに飽和条件のもとでねじりせん断試験を行った。

作製した供試体を試験機に設置し，二重負圧および通水を行ない供試体の飽和度を高める．この原理は供試体内部に残存している空気を放出し，側圧を負圧にして脱気水を供試体の下から通すことにより，飽和度を高める方法である．その後供試体を安定させるためにセル圧を 50kPa にして排水させ，排水量が落ち着くまで予備圧密を行う．

予備圧密終了後，セル内に二重セルを組み立て，二重セル内にも給水を行う．この二重セル内の水位変化から供試体の体積変化を計算する．

その後背圧を加えることにより，さらに飽和度を高めた後，B 値を確認する．その後自動制御により拘束圧を上げて等方圧密を行なう．等方圧密による排水量が安定した後，非排水条件下でねじりせん断試験を行う．

3. 試験結果

3.1 砂試料の試験結果

豊浦砂の平均有効主応力-偏差応力関係をFig. 2，せん断ひずみ-偏差応力関係をFig. 3に示す．これらの図から平均有効主応力-偏差応力，せん断ひずみ-偏差応力ともにせん断速度変化に関わらずほぼ同じ挙動を示している．このことから，非排水条件下においては砂試料のせん断速度による応力-ひずみ関係への影響は小さいと言える．

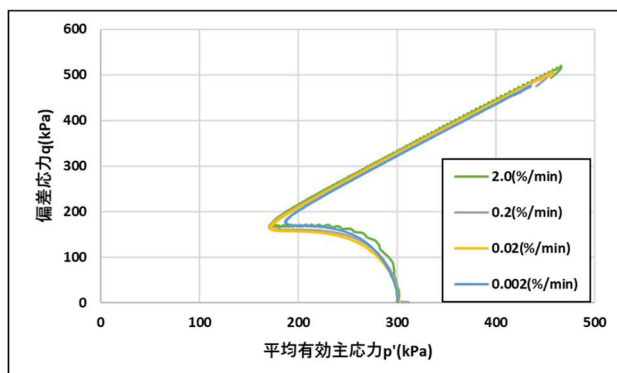


Fig. 2 応力経路(豊浦砂)

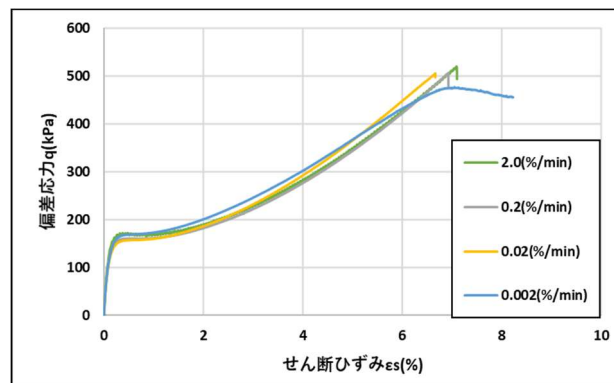


Fig. 3 応力ひずみ関係(豊浦砂)

3.2 粘性土の試験結果

比較のためにBau (2020)¹⁾らが得た米山粘性土の平均有効主応力-偏差応力関係をFig. 3，平均有効主応力-偏差応力関係をFig. 4に示す．この米山粘性土は砂から粘土まで多くの粒径を含んでいることから，本研究の比較の対象とした．Fig. 3の応力経路からはせん断速度が大きいほど平均有効主応力が減少しにくいことが分かる．一方で，せん断速度が遅いケースでは緩やかに平均有効主応力が減少することが読み取れる．Fig. 4よりせん断ひずみ1%まではせん断速度が大きいほど偏差応力が大きくなる傾向がみられる．しかし，1%を超えると強度はほぼ一定となる．このことから，せん断ひずみが小さい部分では速度依存性がみられることが分かる．

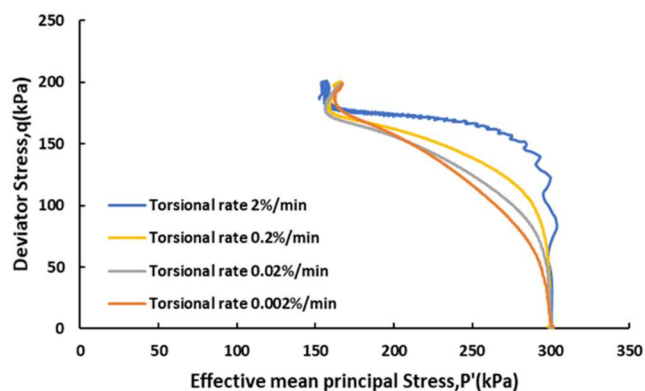


Fig. 4 応力経路(米山粘性土)

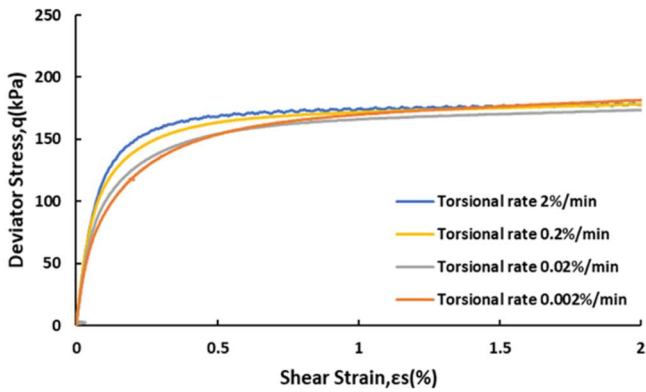


Fig. 5 応力ひずみ関係(米山粘性土)

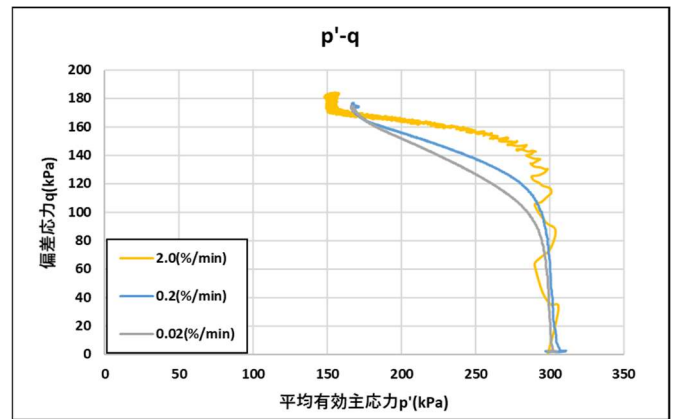


Fig. 6 応力経路(ニュージーランドカオリン)

3.3 粘土及び高塑性粘土の結果

ニュージーランドカオリン粘土の平均有効主応力-偏差応力関係をFig. 4, せん断ひずみ-偏差応力関係をFig. 5に示す。また, ベントナイト配合試料の平均有効主応力-偏差応力をFig. 6, せん断ひずみ-偏差応力関係をFig. 7に示す。Fig. 6からせん断速度が大きいほど, 小さいせん断ひずみで最大偏差応力に達することが読み取れる。この結果とFig. 3の米山粘性土の結果と比べるとより大きなひずみまで偏差応力に差がみられることが分かる。このことから, 小さいひずみ領域では速度依存性があることがわかる。

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Fig. 8, せん断ひずみ-偏差応力関係をFig. 9に示す。Fig. 8の応力経路からは米山粘性土やニュージーランドカオリンと同じようにせん断速度が大きいほど平均有効主応力は減少しにくいことがわかる。しかし, 米山粘性土やニュージーランドカオリンと比較すると, せん断の最終点でも一致していないことがわかる。これは, Fig. 9でせん断ひずみが10%までせん断速度が大きいと偏差応力が大きくなることからわかる。このことから液性限界が大きくなると, 速度依存がみられるせん断ひずみの範囲が大きくなることが分かる。これは供試体内の間隙水の移動のしづらさから起こっていると考えられる。

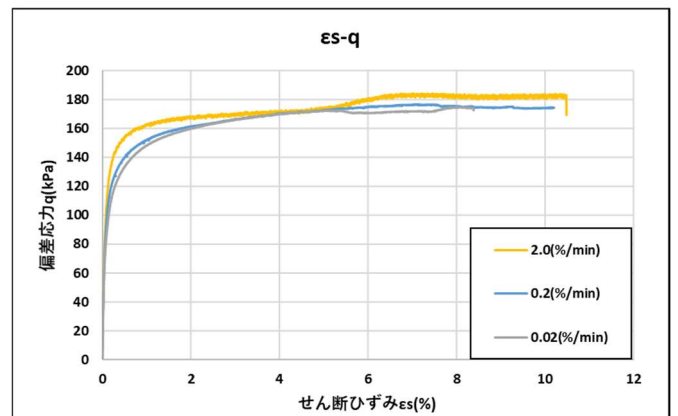


Fig. 7 応力ひずみ関係(ニュージーランドカオリン)

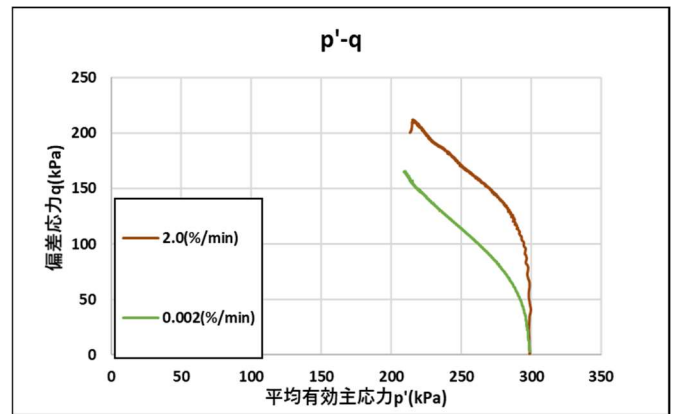


Fig. 8 応力経路(ベントナイト配合試料)

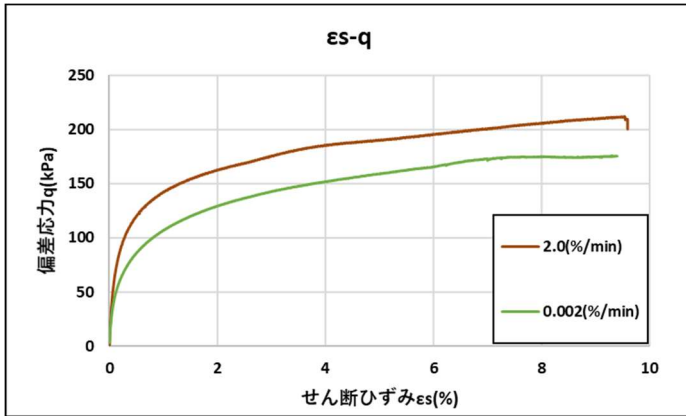


Fig. 9 応力-ひずみ曲線 (ベントナイト配合試料)

4. 試験結果の検討

4.1 せん断割線剛性率

これまで得られた結果を用いて割線せん断剛性率 G_{50} を求めた. 算出には以下の割線せん断剛性率式を用いた.

$$G_{50} = \frac{\Delta q}{3\Delta \epsilon_s}$$

この式を用いて得た結果を Fig. 10 に示す. この図において, 変化が大きいほど, 速度依存性が大きいということである. Fig. 10 より砂がほぼ割線せん断剛性率が一定であるのに対して, 粘土ではせん断速度が大きいほど割線せん断剛性率が大きくなる傾向がある. このことから砂は速度依存性が小さく, 粘土は大きいことが分かる.

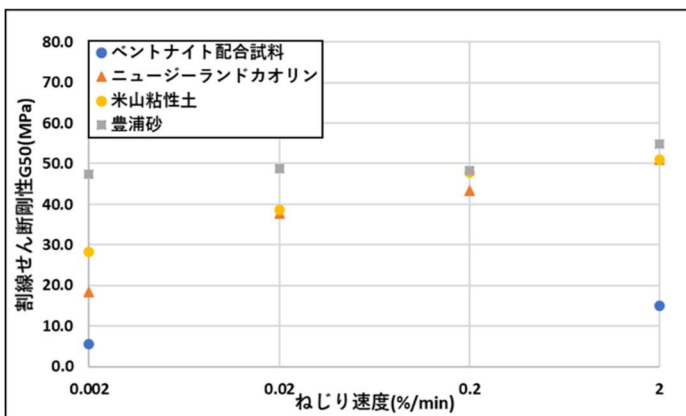


Fig. 10 割線せん断剛性による比較

4.2 液性限界とせん断ひずみの関係

Fig. 11 に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液性限界の関係をとった

グラフを示す. ベントナイト配合試料は 10%を超えても強度は一致しなかった. この図から液性限界が 50%を超えると急激に強度が一致するせん断ひずみが大きくなる事が分かる.

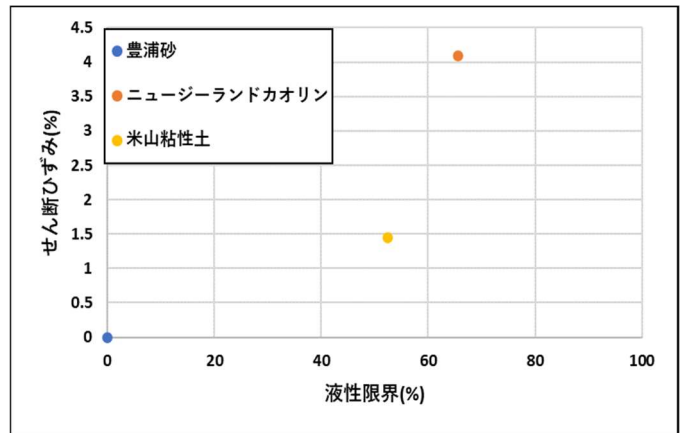


Fig. 11 液性限界とせん断ひずみの関係

5. おわりに

本研究では砂試料, 粘土試料, 高塑性粘土試料の異なる種類の土におけるせん断ひずみ速度の変化が応力-ひずみ関係に与える影響について試験を行った. 昨年度の結果と合わせて, 本研究で得られた知見を以下に示す.

1. 砂の非排水応力-ひずみ関係は, 速度依存性が小さい.
2. 粘性土の非排水応力-ひずみ関係は, ひずみの小さい領域において速度依存性が見られる.
3. この速度依存性が見られるひずみの範囲は, 液性限界とともに大きくなる.

今後は, 不飽和におけるせん断速度の影響を調べる予定である. また, 一定のせん断ひずみごとにねじりせん断速度を変化させるステップ載荷を行った場合の応力-ひずみ関係においても検討する予定である.

参考文献

- 1) VO NGOC 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, 2020 年度長岡技術科学大学修士論文.
- 2) 柳澤夏樹, 小池慶一, 杉山太宏 (2012): 正規・過圧密粘性土の非排水せん断速度に及ぼす載荷速度効果, 東海大学紀要工学部, vol. 52, No. 2, pp. 249-254.