

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

長岡技術科学大学大学院
長岡技術科学大学大学院
長岡技術科学大学大学院
長岡技術科学大学大学院
○森田 大貴
正会員 豊田 浩史
高田 晋
新野 祥平

1. はじめに

地盤が変形する時間には様々のものが存在する。例として地盤の破壊においては急激に破壊した事例もあれば、数日で数センチの変形が継続してから破壊した事例も存在する。室内試験においては現実での速度を考慮した載荷速度を再現することは困難であるが、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。本研究では地盤を砂、粘土（低塑性と高塑性）に分けて考え、それぞれの試料でせん断速度を変化させて力学特性を検討する。実験では、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及び平均主応力が一定の条件のもとで、せん断ねじり速度をケースごとに变化させた非排水せん断試験を行った。その結果を用いて、ねじりせん断速度が土の応力-ひずみ速度関係に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

本研究で用いた中空ねじり試験装置を図-1 に示す。土のせん断強度を求めるには、その土が置かれていた時の応力状態に極力近づける必要がある。この試験装置は中空円筒供試体に回転力（以下、トルク）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。回転力の他に軸力、外圧、内圧を変化させ、3主応力を制御することができる。これらのことから、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、平均的な応力を計算することで、主応力の大きさおよび方向を容易に制御することができる。

このように三軸試験や他の試験に比べ、その土が置かれていた応力状態をより正確に再現することが可能であるが、試験方法や供試体作製方法、

載荷方法は複雑である。



図-1 中空ねじりせん断試験機

2.2 試験試料

本研究では、豊浦砂、ニュージーランド粘土、高塑性試料としてベントナイトを配合したニュージーランド粘土(以下、ベントナイトと称する)の三種類を用いた。各試料の物性値を以下に示す。

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 μ m 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 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	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 ニュージーランド粘土

本研究で使用したニュージーランド粘土の物性値を表-2 に示す。

表-2 ニュージーランド粘土の物性値

密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.710
液性限界 $W_L(\%)$	65.6
塑性限界 $W_p(\%)$	38.6
塑性指数 $I_p(\%)$	27.0

2.2.3 ベントナイト

本研究では高塑性試料としてベントナイトを配合したニュージーランド粘土を用いた。配合割合はニュージーランド粘土 80%，ベントナイト 20%とした。ベントナイトの物性値を表-3に示す。

表-3 ベントナイトの物性値

密度 $\rho_s(\text{g/cm}^3)$	2.729
液性限界 $W_L(\%)$	97.3
塑性限界 $W_p(\%)$	22.3
塑性指数 $I_p(\%)$	75.0

2.3 供試体の作製方法

2.3.1 ニュージーランド粘土及びベントナイト

ニュージーランド粘土とベントナイトの場合の供試体作製方法について述べる。まず初めに、各試料に蒸留水を加えた後にかき混ぜ、一晚置くことで試料をスラリー状にする。次に、この試料を試料圧密機にいれ、真空脱気を行う。その後ピストンで圧縮(ニュージーランド粘土は 100kPa、ベントナイトは 150kPa)することで圧密した。この手順で作製した供試体を図-2に示す。圧密が完了した後、これを高さ 16cm、外径 8cm、内径 5cm に成形して、試験装置に設置した。

2.3.2 豊浦砂

豊浦砂の供試体については、空中落下法で作製した。空中落下法とは、乾燥した試料を、漏斗を用いて供試体上面から一定の距離を保ちながらモールド内に降らしていき、所定の密度になるように作製する方法である。豊浦砂は自立しないため負圧法を用いて中空ねじりせん断試験装置上で作製した。また、今回の実験

では、間隙比 $e=0.755$ ，相対密度 $Dr=60\%$ を目標とした。粘土系供試体及び砂供試体作製の様子を図-2に示す。



図-2 供試体作製

((左)ニュージーランド粘土，
(中，右)豊浦砂

2.4 試験方法

試験全体の基本的な流れを述べる。初めに 2.3 の方法で作製した供試体を試験機にセットした。セルを設置して、セル水を満たした後、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給水することで、水が通りやすくなり飽和度を高めることが出来る。この二重負圧を開始して 2 時間後を目安に、二重負圧の状態を保ちながら脱気水を供試体に供給する通水を行った。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。二重負圧や通水、等方予備圧密により供試体の寸法が変化しているため、等方予備圧密後にセルの水を抜き、供試体の寸法を測定した。その後、二重セルを組み立て、二重セル内にも給水した。その後、200kPa の背圧を作用させた。そして圧密を行った後、せん断試験を行った。

3. 試験結果

3.1 砂の非排水せん断試験

せん断試験はせん断ひずみ速度 2(%/min), 0.2(%/min), 0.02(%/min), 0.002(%/min)の4ケースで行った. この試験で得られた応力経路を図-3, 応力ひずみ関係を図-4に示す. 図-3よりせん断ひずみ速度の影響はほとんど見られない. また, 図-4においてもせん断ひずみ速度の変化による違いはほとんど無く, 偏差応力はせん断速度に影響しないことを示している.

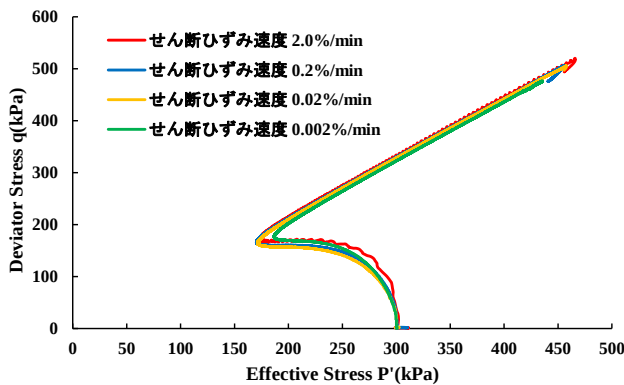


図-3 砂の応力経路

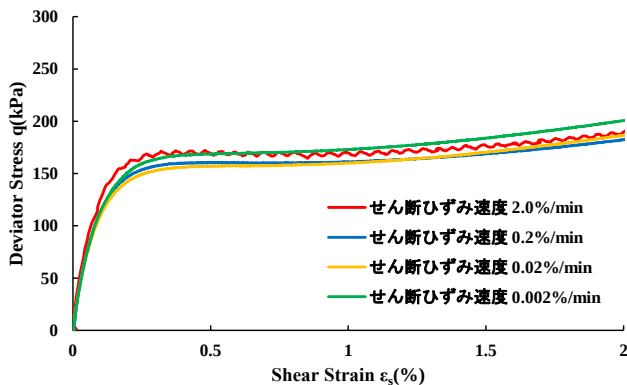


図-4 砂の応力-ひずみ曲線

3.2 高塑性粘土試料(ベントナイト配合試料)の非排水せん断試験

せん断試験はせん断ひずみ速度 2(%/min), 0.02(%/min)の2ケースで行った. この試験で得られた応力経路を図-5, 応力ひずみ関係を図-6に示す. 図-5より, 両方のケースで平均有効応力の減少が確認できる. また, せん断ひずみ速度が速いと偏差応力が大きくなるまで平均有効応力の減少は見られない. 図-6より, 偏差応力はせん断ひずみが初期の時ほど大きく上昇する傾向がみられ, せん断が進むにつれて緩やかな上昇に変化している. ベントナイト配合試料では, せん

断ひずみが2%に達しても偏差応力が収束する傾向が確認できないことから, 液性限界が大きくなると速度依存性を示すせん断ひずみは大きくなることが予測できる.

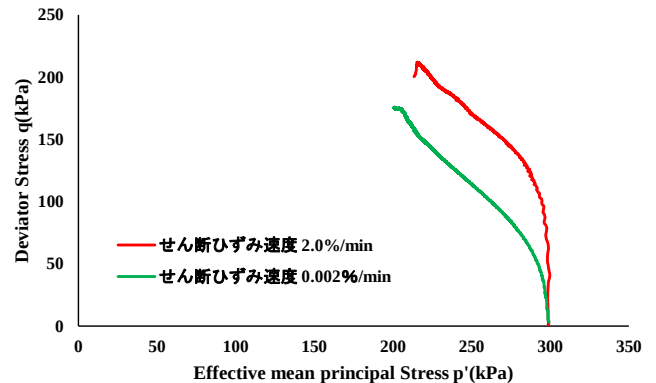


図-5 高塑性粘土試料の応力経路

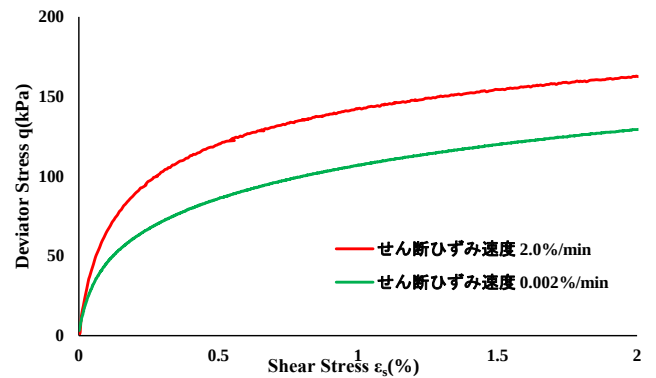


図-6 高塑性粘土試料の応力-ひずみ曲線

3.3 粘土の非排水せん断試験

せん断試験はせん断ひずみ速度 2(%/min), 0.2(%/min), 0.02(%/min)の3ケースで行った. この試験で得られた応力経路を図-7, 応力ひずみ関係を図-8に示す. 図-7より, すべてのケースで平均有効応力の減少が確認できる. また, 平均有効応力の減少は, 偏差応力が大きくなるまで平均有効応力の減少は見られない. 図-8より, 偏差応力はせん断ひずみが初期の時ほど大きく上昇する傾向がみられ, せん断ひずみが大きくなる一定に収束している. また, せん断速度が速いほど偏差応力の上昇は速いが, 偏差応力の最大点は, どのせん断ひずみ速度のケースでもほぼ同じとなる. 高塑性粘土試料の結果と比較すると, 偏差応力が収束するせん断ひずみは小さいことが分かる.

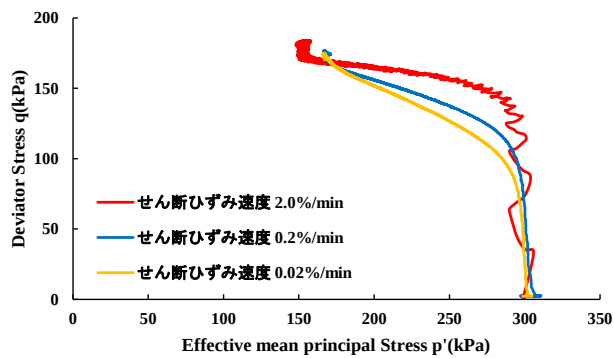


図-7 粘土の応力経路

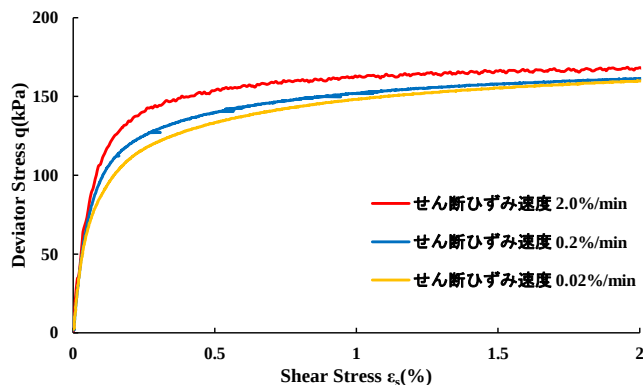


図-8 粘土の応力-ひずみ曲線

3.4 割線せん断剛性率

算出には、以下に記す正八面体せん断剛性率式を用いた。

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

この式に、せん断ひずみ 1%時の偏差応力の半分 q_{50} における時せん断ひずみの値を代入して割線せん断剛性率 G_{50} を求めた。

割線せん断弾性係数とねじり速度の関係を図-9に示す。図より、砂の割線せん断剛性率はせん断速度による影響をほとんど受けていないが、高塑性粘土及び粘土はせん断ひずみ速度が速くなるとともに割線せん断剛性率も大きくなっている傾向が確認できた。

3.5 液性限界とせん断ひずみの関係

図-10に各試料がせん断速度に関わらず強度が一致するときのせん断ひずみと液性限界の関係を示す。液性限界が大きな試料ほど、強度が一致するせん断ひずみが大きくなることが分かる。

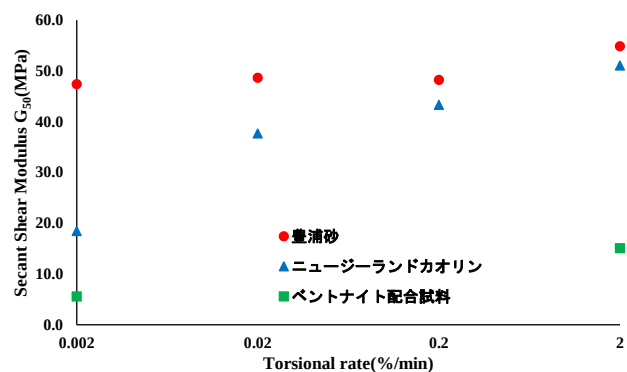


図-9 せん断ひずみ速度-割線せん断剛性率関係

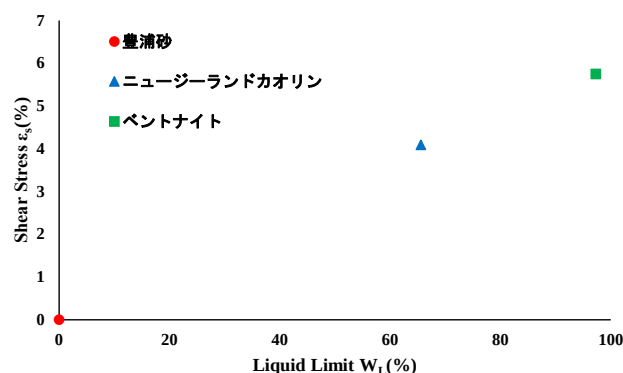


図-10 せん断ひずみ-液性限界関係

4. 結論

本研究では、各試料における変形するまでの時間が土の応力-ひずみ関係に与える影響を解明することを目的に、中空ねじり試験でせん断ひずみ速度を変化させて非排水試験を行った。砂においては、ほとんどせん断ひずみ速度の影響を示さなかった。高塑性粘土試料と粘土試料の応力-ひずみ関係の比較においては、せん断速度が大きくなるほど最大偏差応力に達する時のせん断ひずみは小さくなることが分かった。また、液性限界と速度依存性は比例していることが分かった。

割線せん断剛性率は、粘土および高塑性粘土試料では、せん断ひずみ速度とともに大きくなる傾向を示した。

5. 参考文献

- 1) 高橋宏希(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, 令和3年度長技術科学大学修士論文。