

様々な土の変形特性に与えるせん断ひずみ速度の影響

環境社会基盤工学専攻 地盤工学研究室 VO NGOC BAU
指導教員 豊田 浩史

1. はじめに

地盤の破壊にも、長雨、豪雨、地震などにより急速に破壊する場合や、地すべりにおいて数日で数センチ地盤が移動するような緩速破壊もある。このように、破壊時の速度は様々である。土の種類により土質材料の力学的性質は大きく異なるため、地盤を大きく、砂質土、粘性土、粘土に分けて考える。

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応力が一定の条件のもとで、せん断速度を変化させた非排水せん断試験を行い、その結果をもとに、様々な土の力学特性に与えるせん断ひずみ速度の影響を調べることを目的とする。

2. 試験概要

2.1 試験装置

本試験機は中空円筒供試体にトルクを加えてねじることにより、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。三主応力を制御するため、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、異なった側圧を載荷することが可能である。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力学挙動を明らかにすることが可能である。

2.2 試験材料

本研究で用いた試料は豊浦砂、米山粘性土とニュージーランドカオリン粘土である。

2.2.1 豊浦砂

豊浦砂は、土粒子密度が $2.65(\text{g}/\text{cm}^3)$ となっており、ほぼ中砂で構成された、純粋な砂である。供試体は空中落下法で作製した。空中落下法とは、乾燥した砂を、漏斗を用いて一定の落下高さ保ちながらモールド内に充填していき、所定の密度になるように作製する方法のことをいう。豊浦砂の物性値を **Table. 1** に示す。

Table. 1 豊浦砂の物性値

ρ (g/cm^3)	最大間隙比 e_{max}	最小間隙比 e_{min}	均等係数 U_c	曲率係数 U_c'	細粒分含有率 F_c
2.65	0.99	0.597	1.55	1.05	0

目標とする間隙比に調整するため、体積一定のモールドに詰める試料の質量を調整した。あらかじめ物理試験として行った砂の最小、最大密度試験結果から、計算により相対密度を計算し、モールドに詰める試料の質量を決定した。

中密な試料を作製するため、間隙比 $e=0.755$ (相対密度 $D_r=60\%$) になるようにモールドに試料を投入する。供試体の上端にキャップを置いてモールドを取り外す際、供試体を自立させるために 20kPa の負圧をかけ、その後、供試体の初期寸法を測定する。

2.2.2 米山粘性土

新潟県柏崎市米山付近で採取した粘土（以下では、米山粘性土と称する）であり、本試料は気乾状態で $840\mu\text{m}$ のふるいを通した試料のみを使用した。以下に米山粘性土の物理特性を示す。

Table 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

この試料をスラリー状にしたものを試料圧密器に入れ脱気して圧密したものを成形し、高さ 16cm 、外形 8cm 、内径 5cm の供試体を作製した。

2.2.3 ニュージーランド(NZ)カオリン粘土

本試料は乾燥後、 $750\mu\text{m}$ ふるいを通した試

料のみを用いた。NZ カオリン粘土は、土粒子密度が $2.71(\text{g}/\text{cm}^3)$ となっており、粘土分とシルト分で構成されている。NZ カオリン粘土の物性値を **Table. 3** に示す。

Table 3 NZ カオリン粘土の物性値

密度 $\rho_s(\text{g}/\text{cm}^3)$	2.71
液性限界 $W_L(\%)$	65.6
塑性限界 $W_p(\%)$	41.1
塑性指数 I_p	22.5

2.2.3 試料の粒径

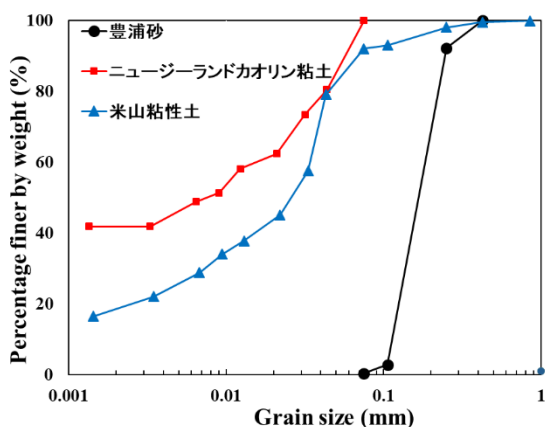


Figure 1 試料の粒径加積曲線

Figure 1 に使用した試料の粒径加積曲線を示す。NZ カオリン粘土が最も細粒分の割合が多いことがわかる。

2.3 試験方法

作製した供試体を試験機にセットし二重負圧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追い出し、側圧を負圧にして脱気水を通すことにより、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。飽和度の確認をした後、自動制御により拘束圧を上げて等方圧密を行なう。本試験では、等方圧密で

は $p=50\text{kPa}$ から $p=300\text{kPa}$ まで圧密を実施する。圧密終了後、ねじりせん断試験を行う。

Figure 2 に試験の応力経路を示す。

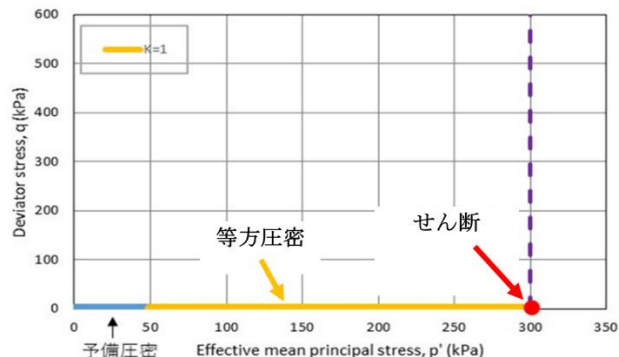


Figure 2 試験経路

3. 試験結果

試験条件としてせん断速度を $0.002(\%/min)$ とし、試験を2回行った。

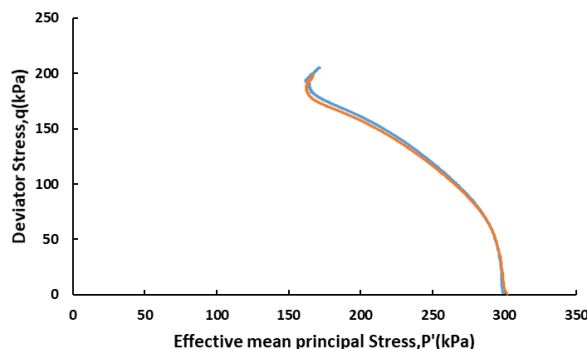


Figure 3 $q-p'$ 関係

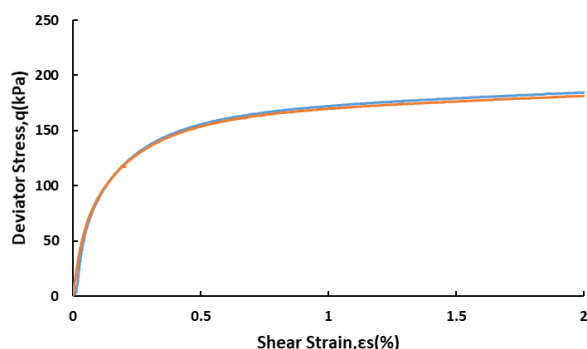


Figure 4 $q-\epsilon_s$ 関係

Figures 3 および 4 より、同条件の非排水せん断試験において再現性を確認することができたためこの手法を用いて試験を進めた。

本研究では、せん断速度を 2(%/min), 0.2(%/min), 0.02(%/min), 0.002(%/min) と変化させ飽和土非排水せん断試験を行った。

以下の Figures 5~10 にせん断速度 2(%/min), 0.2(%/min), 0.02(%/min), 0.002(%/min) の偏差応力 q -せん断ひずみ ϵ_s 関係と偏差応力 q -有効応力 p' 関係を示す。

Figures 5, 7, 9 より、せん断過程において粘土と粘性土はねじり速度が速いほど間隙水圧の発生が遅く、 p' の減少も遅い傾向が見られるが、砂の場合はこの傾向が見られない。

Figures 6, 8, 10 より、豊浦砂の非排水せん断試験においては、偏差応力はせん断速度にほとんど影響がない。

米山粘性土の非排水せん断試験において、1%以下のせん断ひずみ部分においては、ひずみ速度が速いほど偏差応力が大きくなることわかる。しかし、せん断ひずみが進行し 1%を超えると、その傾向は見られなくなり最大偏差応力はほぼ同じ値に収束する。

NZ カオリン粘土の非排水せん断試験において、5%以下のせん断ひずみ部分においては、ひずみ速度が速いほど偏差応力が大きくなることわかる。せん断ひずみが 5%になると、せん断速度によらずほぼ同じ偏差応力を示す。

4. 考察

単調載荷試験の結果より、大変形後のせん断強度は、せん断速度にほとんど依存しないことが明らかとなった。そこで、せん断速度依存の大きい、応力ひずみ関係の初期の傾き（割線せん断剛性）について、考察を行う。

試験結果より 1%以下のせん断ひずみ部分において、最大偏差応力の半分の値 q_{50} (kPa) の時のせん断ひずみ ϵ_s の値を用いてせん断剛性

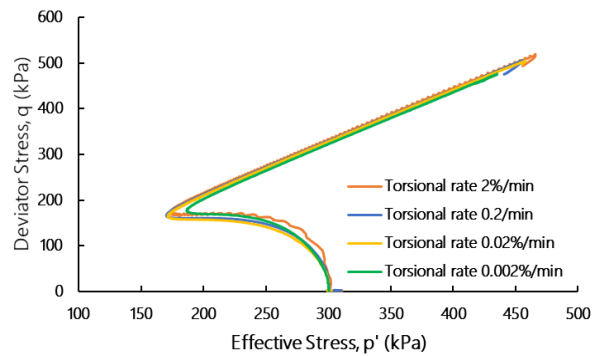


Figure 5 応力経路 (豊浦砂)

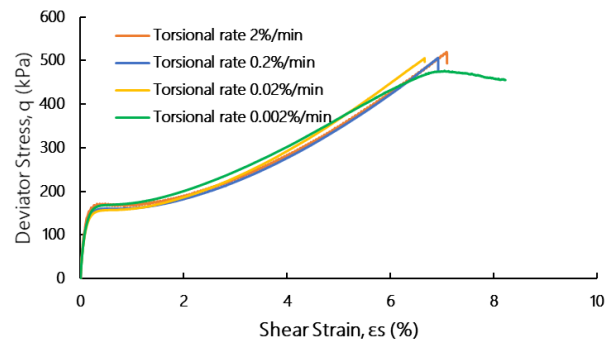


Figure 6 応力ひずみ曲線 (豊浦砂)

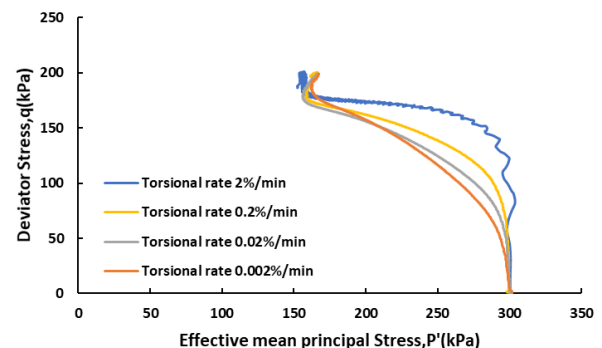


Figure 7 応力経路 (米山粘性土)

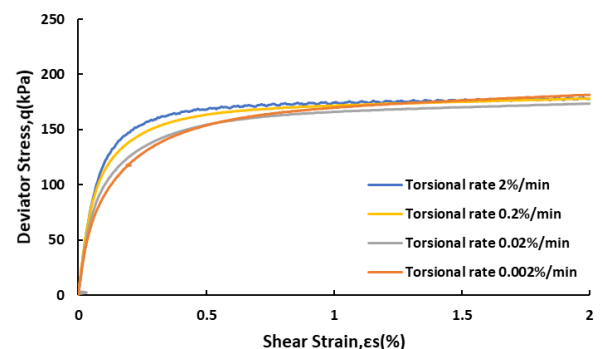


Figure 8 応力ひずみ曲線 (米山粘性土)

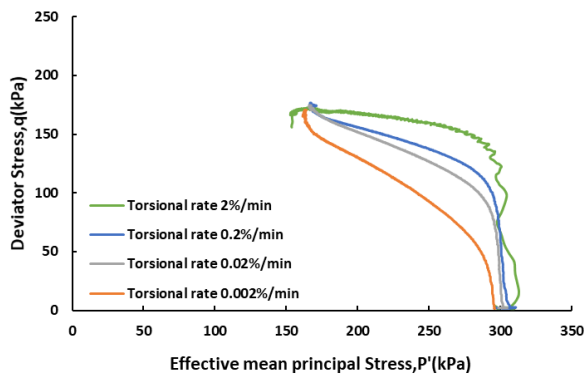


Figure 9 応力経路 (NZ カオリン粘土)

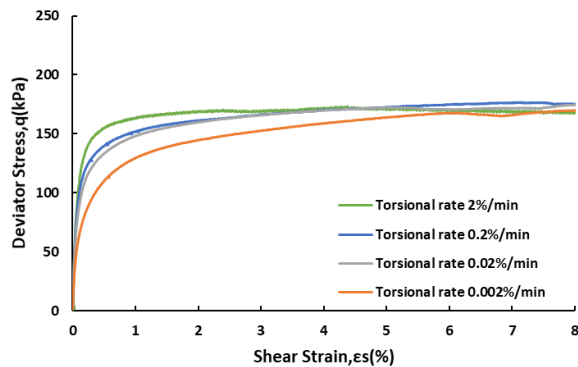


Figure 10 応力ひずみ曲線 (NZ カオリン粘土)

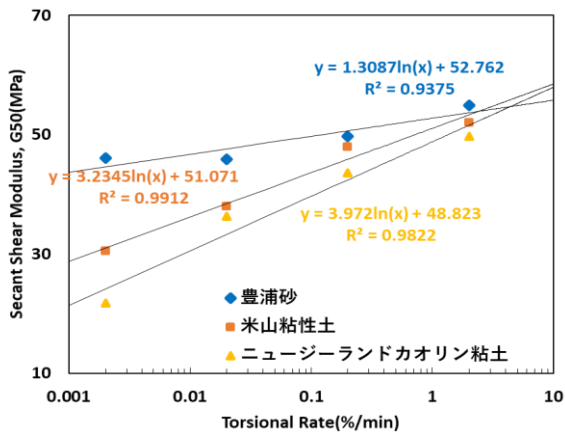


Figure 11 割線せん断剛性 G50—せん断ひずみ速度関係

G₅₀ を求めた。せん断剛性の算出には、以下の正八面体せん断剛性式を用いた。

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

Figure 11 に求めたせん断剛性とせん断ひずみ速度の関係について示す。Figure 11 より、以下のことがわかる。

1. 豊浦砂の割線せん断剛性は、せん断速度の影響が小さい。
2. 米山粘性土の割線せん断剛性は、せん断速度とともに大きくなり、砂より速度依存性が大きい。
3. NZ カオリン粘土の割線せん断剛性は、せん断速度とともに大きくなり、米山粘性土より速度依存性が大きい。

割線せん断剛性結果の利用方法であるが、実際の変形問題のせん断速度を測定・予測することは大変難しい。試験基準においては、0.1%/min のせん断速度が目安とされている。そこで、地震による繰返しせん断波高速なので、粘性土や粘土では、試験基準より得られたせん断剛性を割増して使用すべきであろう。ただし、今回は非排水条件で試験を行ったが、長期変形予測問題では、排水条件に変更するのが望ましい。

5. 結論

1. 豊浦砂において、応力ひずみ関係はせん断速度にほとんど影響しない。砂の割線せん断剛性に関しても、せん断速度の影響は小さい。
2. 米山粘性土において、1%以下のせん断ひずみ部分においてはひずみ速度が速いほど偏差応力が大きくなる。しかし、せん断ひずみが進行し1%を超えるとその傾向は見られなくなる。したがって、割線せん断剛性は、せん断ひずみ速度とともに大きくなる。
3. NZ カオリンにおいて、1%以下のせん断ひずみ部分においては米山粘性土と同じ傾向が見られるが、せん断ひずみが5%に達するまでその傾向は続く。割線せん断剛性は、せん断速

度とともに大きくなる。

4. 土による割線せん断剛性のせん断ひずみ速度依存性は、NZ カオリン，米山粘性土，豊浦砂の順に小さくなる。

5. 変形問題への適用：

土の種類によるせん断速度依存性がある程度わかったので，現象に応じてせん断剛性を変化させることが可能である。これにより，急速載荷・即時変形問題や緩速載荷・長期変形問題を考慮することができる。

6. 参考文献

篠原雅幸(2019)，粘性土の変形特性に与えるせん断ひずみ速度の影響，2019年度長岡技術科学大学修士論文。