

# 土の強度・変形特性に与えるせん断ひずみ速度の影響

長岡技術科学大学大学院 ○新野 祥平  
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 高橋 宏希

## 1. はじめに

土は大小さまざまな寸法と形状をもった土粒子の集合体であり、時には有機物などを含むことがある。これらの土粒子の密度や粒径区別の違いで土は分類される。土はその種類ごとに力学的特性が大きく異なるため、特定の試料のみを試験しても全ての土で同じ挙動を示すとは限らない。このことから、本試験では地盤を砂、粘性土、粘土に分けて考え、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。試験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もとで、せん断速度を変化させた非排水圧密せん断試験(CU試験)を行った。その結果を用いて砂、粘性土、粘土それぞれの強度・変形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した。

## 2. 試験内容

### 2.1 中空ねじり試験装置について

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ためにはその土が存在していた時の応力状態を再現する必要がある。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。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。

このことから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、新潟県柏崎市米山付近で採集した粘土(以下米山粘性土と称する)、豊浦砂と、ニュージーランドカオリンの三種類を用いた。各試料の物性値を以下に示す。

#### 2.2.1 米山粘性土

本試料は乾燥後、840 $\mu$ mふるいを通じた試料のみを試験に用いた。米山粘性土の物性値を表-1に示す。

表-1 米山粘性土の物性値

密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	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

#### 2.2.2 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 $\mu$ mを通じた試料のみを利用した。豊浦砂の物性値を表-2に示す。

表-2 豊浦砂の物性値

密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	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

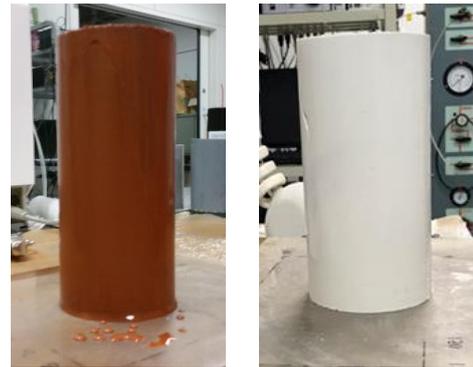


図-2 完成した供試体  
((左)米山粘性土, (右)NZ カオリン)

### 2.2.3 ニュージーランドカオリン

本試料は、乾燥後 750 $\mu$ m ふるいを通過した試料のみを試験に用いた。ニュージーランド(NZ)カオリンの物性値を表-3 に示す。

表-3 NZ カオリンの物性値

密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.710
液性限界 $w_L$ (%)	65.6
塑性限界 $w_p$ (%)	41.1
塑性指数 $I_p$	24.5



図-3 砂の供試体作製

## 2.3 供試体の作製方法

### 2.3.1 米山粘性土及び NZ カオリン

米山粘性土と NZ カオリン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、一晩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落とした試料から一定の距離を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  $D_r=60\%$  を目標とした。供試体作製の様子を図-3 に示す。

## 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。セルを被せ、給水を行った後、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を真空にして供試体内部から空気を取り除く方法である。この状態で通水することで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通水した。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。その後、圧密、せん断試験を行った。

### 3. 試験結果

#### 3.1 豊浦砂の非排水せん断試験

せん断試験はねじり速度 10(deg/min), 1(deg/min), 0.1(deg/min), 0.01(deg/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-4, 応力-ひずみ関係を図-5に示す。図-4より, 有効応力減少後, 増加する典型的な砂の挙動を示している。これらの結果に, ねじり速度依存は見られない。図-5においても, ねじり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。

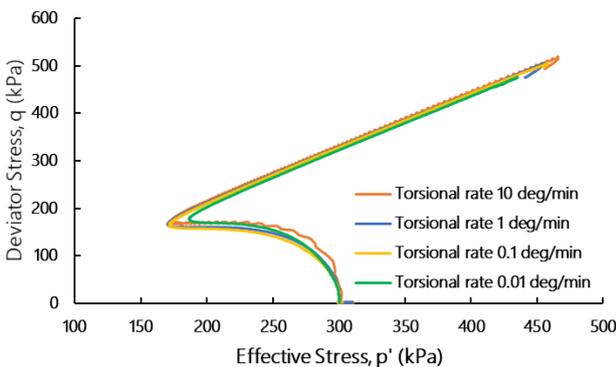


図-4 砂の応力経路

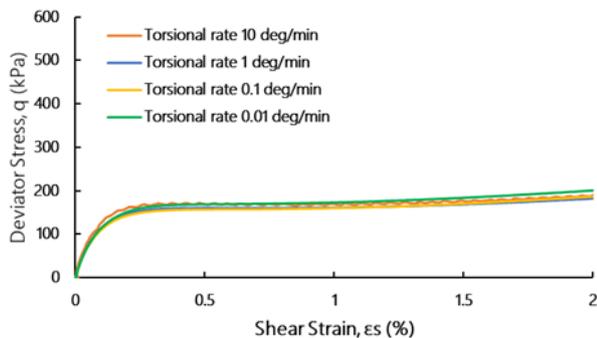


図-5 砂の応力-ひずみ曲線

#### 3.2 米山粘性土の非排水せん断試験

せん断試験はねじり速度 10(deg/min), 1(deg/min), 0.1(deg/min), 0.01(deg/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-6, 応力-ひずみ関係を図-7に示す。図-6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ねじり速度が速いと, あまり進んでおらず, 10(deg/min)の場合と他のねじり速度を比較すると大きな差があることが確認できる。最終的には, ほぼ同じ値に落ち着いている。図-7より, 偏差応力はせん断ひ

ずみが初期には大きく上昇し, その後折れ曲がり, 緩やかに上昇する傾向がみられる。せん断ひずみ 1%以下の部分では, せん断ひずみ速度が速いケースほど偏差応力が大きくなるアイソタック則に基づく傾向を確認できる。

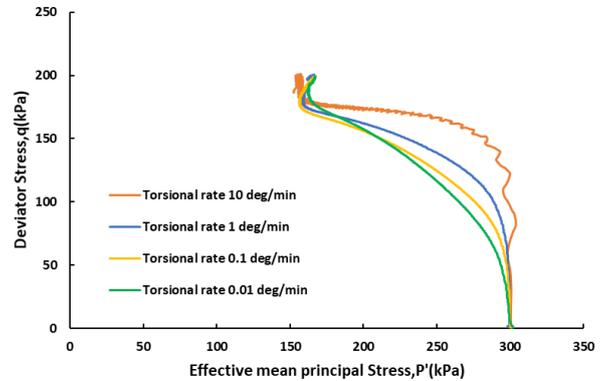


図-6 粘性土の応力経路

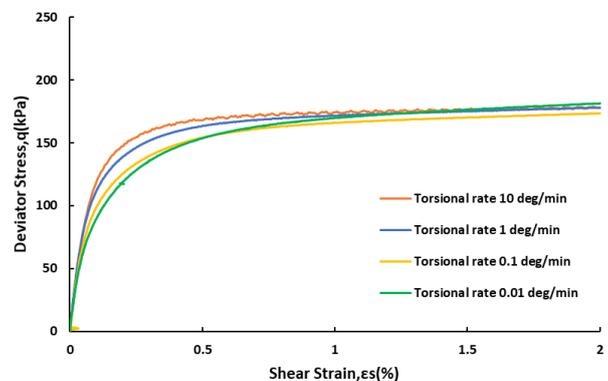


図-7 粘性土の応力-ひずみ曲線

#### 3.3 NZ カオリンの非排水せん断試験

せん断試験はねじり速度 10(deg/min), 1(deg/min), 0.1(deg/min), 0.01(deg/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-8, 応力-ひずみ関係を図-9に示す。図-8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ねじり速度が速いと, あまり進んでおらず, 10(deg/min)の場合と他のねじり速度を比較すると大きな差があることが確認できる。最終的には, ほぼ同じ値に落ち着いている。これは米山粘性土と同様の挙動である。図-9より, 偏差応力はせん断ひずみが初期には大きく上昇し, その後折れ曲がり, 緩やかに上昇する傾向がみられる。せん断ひずみ 1%以下の部分では, せん断ひずみ速度が速いケースほど偏差応力が大きくなるアイソタック則に基づ

く傾向を確認できる。これは、米山粘性土と同様の挙動である。

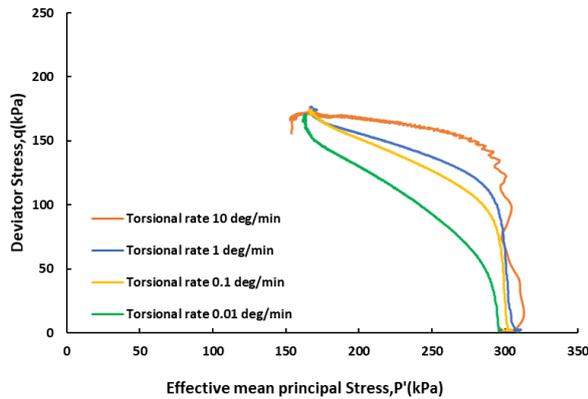


図-8 粘土の応力経路

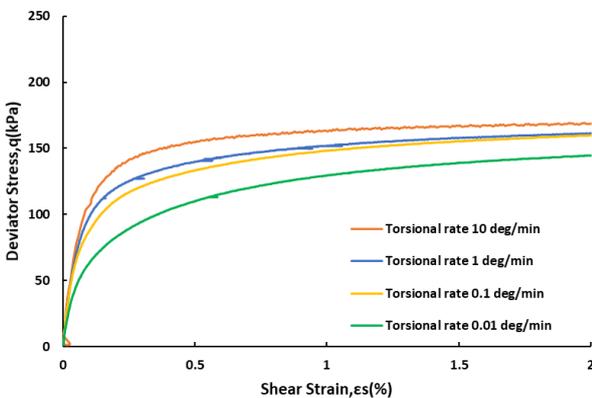


図-9 粘土の応力-ひずみ曲線

### 3.4 割線せん断剛性率

これまでの試験結果で、強度に対するひずみ速度の影響は小さいことがわかったので、各試料の1%以下の部分に注目して最大偏差応力の半分  $q_{50}$ (kPa)の時のせん断ひずみの値を用いてせん断剛性率  $G_{50}$ を求めた。算出には、以下に記す正八面体面でのせん断剛性率を用いた。

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

割線せん断剛性率とねじり速度の関係を図-10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が小さいが、粘性土及び粘土はせん断速度が速くなるとともにせん断剛性係数も大きくなっている傾向が確認できた。

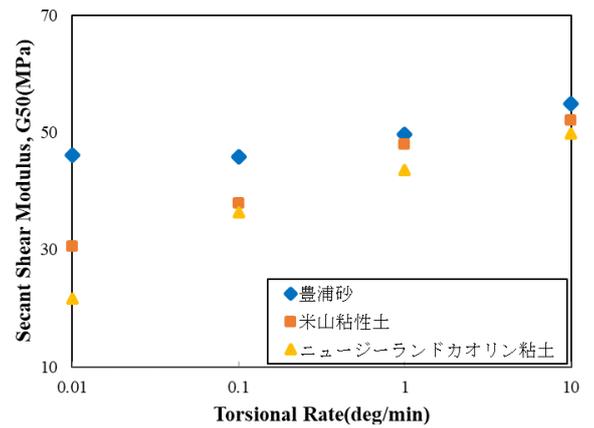


図-10 ねじり速度-割線せん断剛性率の関係

## 4. 結論

本研究では、飽和土のせん断速度が変形特性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速度を変化させて非排水試験を行った。砂のせん断試験では、応力経路と応力ひずみ曲線、ともにせん断速度にはほとんど依存しておらず、どのケースも同じような結果になった。粘性土及び粘土のせん断試験では、ともに応力経路はせん断速度が大きくなるほど平均有効圧力が小さくなりやすい傾向が見られた。また、応力ひずみ関係は1%以下のせん断ひずみにおいては、ひずみ速度が大きいほど偏差応力が大きい傾向が見られた。つまり、アイソタック則が確認できた。応力ひずみが1%以上になると粘性土はアイソタック則の傾向が見えなくなるが、粘土は引き続き大きなひずみまでアイソタック則に従っている傾向が見られた。

また、粘性土と粘土でアイソタック則が確認できた、せん断ひずみ1%以下の割線せん断剛性率で、砂はねじり速度が速くなるとせん断剛性率は少し大きくなるが、影響は小さいと言える。一方、粘性土と粘土は、せん断速度とともに割線せん断剛性率が大きくなっており、ねじり速度による影響が大きいことが確認できた。

## 5. 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, 令和元年度長岡技術科学大学修士論文.