

## 土の力学特性に与えるひずみ速度の影響：単調荷重と段階ひずみ速度変化の比較

長岡技術科学大学大学院 ○松本 凌太郎  
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

### 1. はじめに

地盤が変形する時間は様々で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<sup>1)</sup>。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と考えられる。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荷重する単調荷重を行った。さらに、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、ステップ荷重)も行い、その比較から単調荷重と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

中空ねじりせん断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で、供試体全体にせん断変形を与えることができる。本装置は、ねじり速度を最大 10000 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。三軸圧縮試験機と比較して、直接せん断応力を作用させることができる。

#### 2.2 試験試料

本研究では、豊浦砂とニュージーランドカオリン(以下、NZ カオリン)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 $\mu\text{m}$  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。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<sup>1)</sup>

密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.650
最大間隙比 $e_{\text{max}}$	0.99
最小間隙比 $e_{\text{min}}$	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

NZ カオリンは、乾燥後 75 $\mu\text{m}$  ふり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 使用試料の物性値<sup>1)</sup>

試料名	NZ カオリン
密度 $\rho_s$ (g/cm <sup>3</sup> )	2.710
液性限界 $W_L$ (%)	65.6
塑性限界 $W_p$ (%)	29.3
塑性指数 $I_p$	36.3

### 2.3 供試体の作製方法

#### 2.3.1 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、漏斗を用いて一定高さから試料を落下させ、モールド内に充填し、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の底盤上で作製した。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。作製の様子を図-1 に示す。

#### 2.3.2 NZ カオリン

NZ カオリンの場合の供試体作製方法は、乾燥粉末状態の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器にいれ、真空で脱気を行う。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。



図-1 砂の供試体作製



図-2 NZ カオリン供試体

## 2.4 試験方法

本研究は飽和条件で非排水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  $p'=300$  kPa 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) の5ケースで行った。ステップ荷荷は、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。

## 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-3 に、応力-ひずみ関係を図-4 に示す。図-3 より、全てのせん断ひずみ速度のケースで平均有効主応力  $p'$  の減少が見られる。これは、供試体をせん断したことで間隙水圧が増加したためである。速度の変化による間隙水圧発生の違いは見られない。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-4 より、速度変化時に、若干偏差応力が変化（速度増加時に偏差応力増加，速度減少時に偏差応力減少）しているが、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。

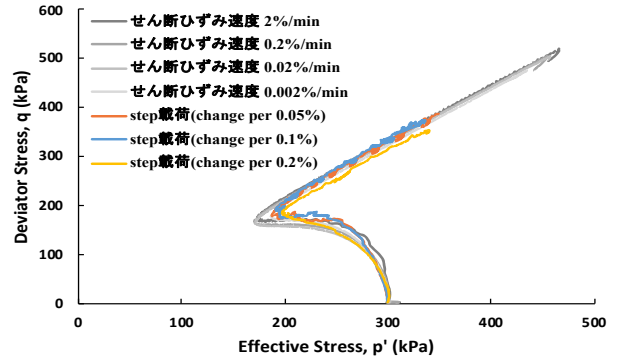


図-3 豊浦砂の応力経路図

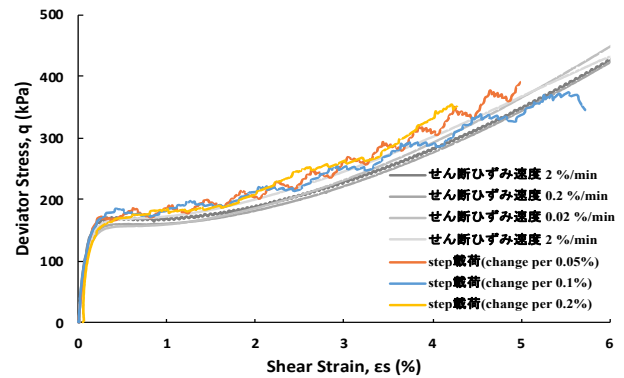


図-4 豊浦砂の応力-ひずみ関係

### 3.2 NZ カオリンの試験結果

NZ カオリンの応力経路を図-5、応力-ひずみ関係(εs 1%以下)を図-6、応力-ひずみ関係を図-7 に示す。図-5 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<sup>1)</sup>。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-6、図-7 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なっており、アイソタック則に基づく傾向が見られる。しかしながら、ひずみが大きくなると、ひずみ速度依存性は消失して、一定値に収束している。一方、ステップ载荷では、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、せん断が進んでもこの変動は残っており、単調载荷の速度依存性に従わない結果となっている。

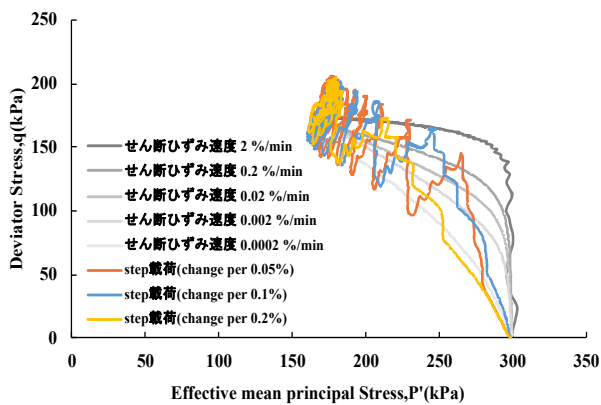


図-5 NZ カオリンの応力経路図

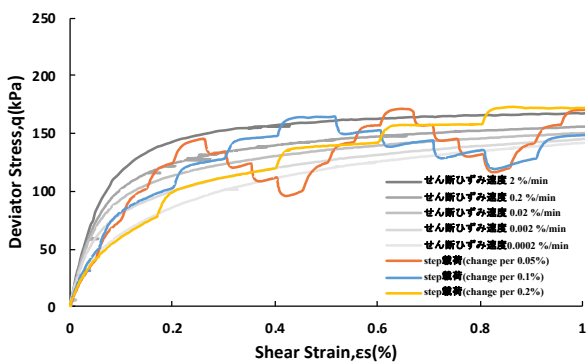


図-6 NZ カオリンの応力-ひずみ関係  
(せん断ひずみ  $\epsilon_s$  1%以下)

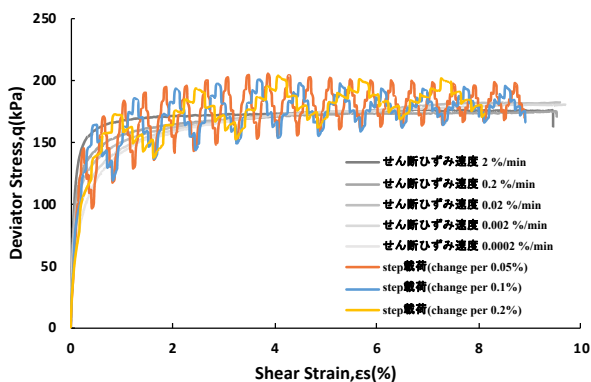


図-7 NZ カオリンの応力-ひずみ関係

## 4. 試験結果の検討

### 4.1 せん断ひずみと塑性指数の関係

単調载荷試験において、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は試料の塑性指数と大きくなる可能性がある。また、データが2点(砂とNZカオリン)しかないため、今後試料数を増やして検証していく必要があるが、アイソタック則の消失のしやすさと試料の塑性指数の関係についての検討が必要である。

### 4.2 せん断ひずみと偏差応力増減量の関係

ステップ载荷試験の偏差応力増減量を評価するため、ステップ载荷の偏差応力の最高点と最低点の差分をとり、それを単調载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偏差応力変動の瞬時値のみ取り出し、速度一定区間の変化は無視した場合も算出した(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-8(速度減少時)、図-9(速度増加時)に示す。これらは、速度一定区間無視の結果である。ここでは、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-8、図-9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、その時点のせん断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も確認された。

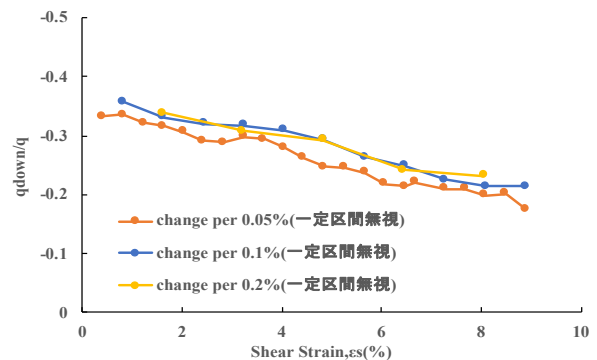


図-8 NZ カオリンの  $q$  減少-ひずみ関係

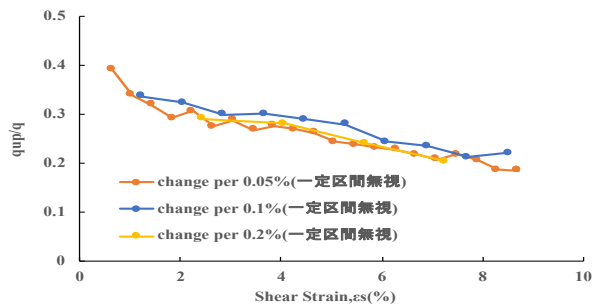


図-9 NZ カオリンの  $q$  増加-ひずみ関係

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-10, 図-11 に示す。せん断ひずみ 0.05%で速度変化させたケースでは、速度一定区間無視との差が小さいが、せん断ひずみ 0.2%で速度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ため考えられる。今後、アイソタック則消失の早さを、塑性指数の異なる試料で確認していく必要がある。

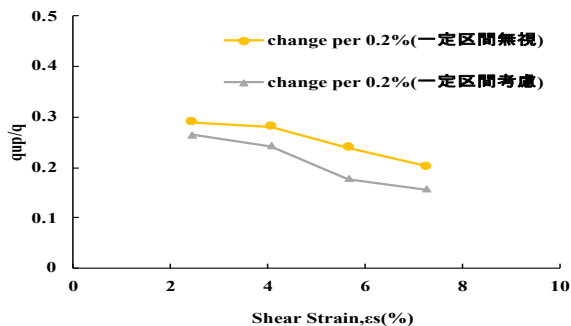
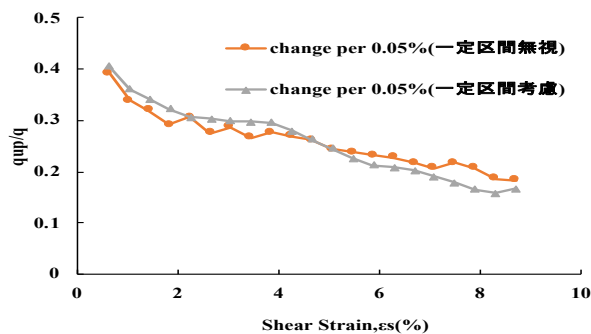


図-11 NZ カオリンひずみ-偏差応力増加量  
(上 :  $\varepsilon_s$  0.05%変化, 下 :  $\varepsilon_s$  0.2%変化)

## 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た変化と考えられる。
2. 粘土の単調載荷において、せん断ひずみが大きくなると速度の影響が小さくなる。
3. 粘性土・粘土のステップ載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アイソタック則は消失している。

今後、アイソタック則の消失ひずみと試料の塑性指数の関係を、単調載荷時、ステップ載荷時ともに調べる必要がある。

## 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.

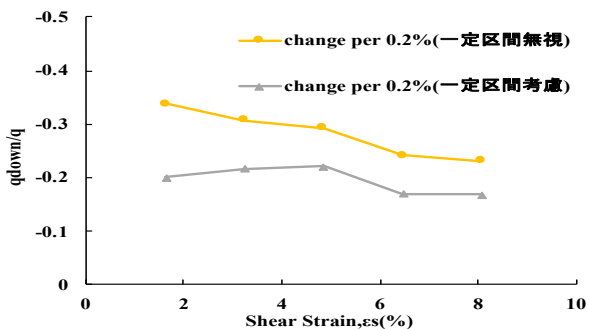
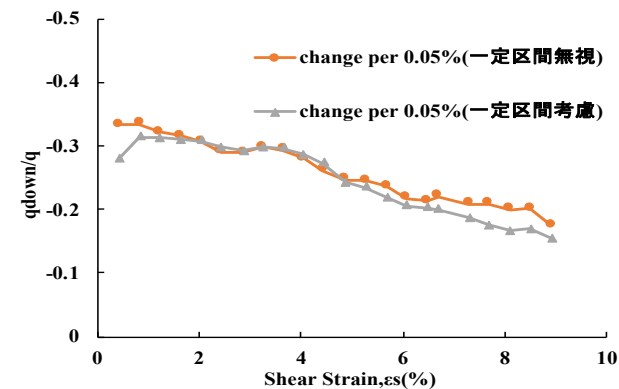


図-10 NZ カオリンひずみ-偏差応力減少量  
(上 :  $\varepsilon_s$  0.05%変化, 下 :  $\varepsilon_s$  0.2%変化)