

# 側方応力を制御した飽和砂の非排水繰返しせん断 およびその後の排水による体積収縮特性

東北大学 学 ○ 吉田 純也 正 風間 基樹・渦岡 良介・森 友宏

## 1. 研究の背景と目的

これまで砂地盤の液状化および液状化後の残留変形により、構造物やライフラインに多くの被害が発生している。これら液状化後の残留変形挙動や残留変形量の予測法を確立することはポスト液状化挙動研究に関する重要な課題と位置づけられている。本研究では中空ねじりせん断試験機を使用し、飽和砂においてひずみ制御非排水繰返しせん断試験を行った。試験では、圧密-非排水繰返しせん断-再圧密の過程において  $K_0$  状態を保持し、水平成層地盤のような側方変位が拘束された境界条件の地盤を再現した。再圧密後の排水による体積収縮が、せん断履歴、過圧密比および初期状態にどのように影響されるか考察を行った。

## 2. 試験概要

### 2.1 試料

試料は相馬珪砂 5 号を使用した。この試料の基礎物性を調べるために土粒子密度試験、最大・最小密度試験、圧密非排水三軸試験 (CU) を行った。表-1 にその結果を示す。

表-1 相馬珪砂 5 号の物性試験結果

|                  |       |
|------------------|-------|
| 土粒子密度 $\rho_s$   | 2.614 |
| 最大間隙比 $e_{\max}$ | 1.121 |
| 最小間隙比 $e_{\min}$ | 0.712 |
| 内部摩擦角 $\phi$ (°) | 31.4  |

### 2.2 供試体作成

供試体は地盤工学会基準 JGS 0550-1998 土のねじりせん断試験用中空円筒供試体の作製・設置方法に基づき作製した。供試体は外径 7 cm、内径 3 cm、高さ 10 cm の中空円筒である。メンブレンの材質はラテックスとし、厚さは 0.3 mm である。供試体は空中落下法により作成し、20 kPa の負圧で自立させた後、供試体下部から二酸化炭素および脱気水を流し入れ、98 kPa の背圧をかけ飽和させた。

### 2.3 $K_0$ 圧密過程

圧密過程において、供試体の体積変化は全て鉛直方向にのみ発生していると仮定し、理想的な一次元圧密状態で圧密を行うことにより側方変位が拘束された水平成層地盤を再現している。 $K_0$  圧密過程は一般に圧密過程において水平方向の変形が発生しないように側圧を制御して  $K_0$  状態を達成する。しかし本研究では圧密排水によって生じる体積変化は全て鉛直方向の変形によって生じていると仮定して排水を流量制御装置によって高精度に計測し  $K_0$  状態を達成した。

### 2.4 非排水繰返しせん断過程

試験ケースを表-2 に示す。ここに、OCR：過圧密比、 $\sigma'_{v0}$ ：圧密後の初期鉛直有効応力 (kPa)、 $D_r$ ：圧密後の相対密度 (%) である。せん断履歴の入力条件は表-3 に示す。

表-2 試験条件

| Case | OCR | $\sigma'_{v0}$ | $D_r$ | ひずみ履歴 |
|------|-----|----------------|-------|-------|
| 1    | 1   | 50             | 52.1  | 入力波 1 |
| 2    | 2   |                | 50.6  |       |
| 3    | 3   |                | 50.8  |       |
| 4    | 1   |                | 52.4  | 入力波 2 |
| 5    | 2   | 50             | 49.2  |       |
| 6    | 3   |                | 50.9  | 入力波 3 |
| 7    | 1   |                | 52.6  |       |

表-3 入力波のせん断ひずみ履歴

| 入力波 | せん断ひずみ履歴                                         |
|-----|--------------------------------------------------|
| 1   | 0.05 %, 0.1 %, 0.2 %, 0.4 % (各 10 波)             |
| 2   | 0.05 %, 0.1 %, 0.2 %, 0.4 % 0.8 % (各 10 波)       |
| 3   | 0.05 %, 0.1 %, 0.2 %, 0.4 % 0.8 % 1.2 % (各 10 波) |

### 2.5 $K_0$ 再圧密過程

非排水繰返しせん断によって生じた過剰間隙水圧を消散させるために再圧密排水を行った。この過程は圧密過程同様に排水によって生じる体積変化も鉛直方向の圧縮によってのみ発生すると仮定し、排水を流量制御装置によって高精度に計測し  $K_0$  状態下で行った。

## 3. 試験結果および考察

各ケースにおける試験結果を表-4 に示す。ここに  $K_{0c}$ ：圧密後の土圧係数、 $e_{0c}$ ：圧密後の間隙比、 $K_{0d}$ ：再圧密後の土圧係数、 $e_{0d}$ ：再圧密後の間隙比、 $\varepsilon_v$ ：体積ひずみ (%) である。

表-4 試験結果

| Case | $K_{0c}$ | $e_{0c}$ | $K_{0d}$ | $e_{0d}$ | $\varepsilon_v$ |
|------|----------|----------|----------|----------|-----------------|
| 1    | 0.63     | 0.915    | 0.25     | 0.903    | 0.66            |
| 2    | 0.67     | 0.922    | 0.23     | 0.912    | 0.51            |
| 3    | 0.78     | 0.921    | 0.24     | 0.914    | 0.38            |
| 4    | 0.56     | 0.915    | 0.22     | 0.901    | 0.73            |
| 5    | 0.64     | 0.928    | 0.20     | 0.911    | 0.87            |
| 6    | 0.82     | 0.913    | 0.28     | 0.878    | 2.20            |
| 7    | 0.54     | 0.921    | 0.22     | 0.887    | 1.40            |

### 3.1 $K_0$ 圧密過程における過圧密の影響

図-1 は、 $K_0$  圧密過程における有効鉛直応力と  $K_0$  値との関係を示している。この図から、 $K_0$  値は OCR の上昇に伴い増加し等方応力状態に近づくことがわかる。また、平均有効応力も増加することから液状化抵抗も増加すると考えられる。

### 3.2 せん断履歴が体積収縮に及ぼす影響

図-2はせん断履歴ごとの比体積 $(1+e)$ - $\log P$ 曲線である。この図から、せん断履歴の違いにより再圧密による体積収縮量に差が現れることがわかる。図-4に示したCase7(OCR=1, 入力波3)の有効応力経路を参照すると、せん断応力比が小さく等方応力に近い状態にあるとき、体積圧縮が急激に進行すると考えられる。また、体積収縮量は圧密後の間隙比および繰返しせん断後の平均有効応力に大きく影響されることも見て取れる。本試験のように体積ひずみレベルが小さい場合、これらの影響が顕著に現れることがわかる。

### 3.3 過圧密が体積収縮に及ぼす影響

図-3は入力波1における過圧密比ごとの比体積 $\log P$ 曲線である。この図からOCRの上昇に伴い体積収縮は小さくなることがわかる。このことから液状化後の再圧密による残留変形への過圧密効果が確認された。OCRの上昇に伴い再圧密時の比体積 $\log P$ 曲線の傾きが小さくなることが、体積収縮量に影響したと考えられる。また、有効応力が回復するのに伴い比体積 $\log P$ 曲線の傾きはOCRの値に抛らず同程度に収束した。これは、供試体の間隙比が過圧密領域から正規圧密領域に達したためと考えられる。

## 4. 結論

側方応力を制御し $K_0$ 状態を保持した一連の圧密-繰返し載荷-再圧密の過程から以下の知見が得られた。

- $K_0$ 圧密過程において、OCRの上昇に伴い $K_0$ 値および平均有効応力は増加し、等方応力状態に近づく。
- 大きなせん断履歴を与えた供試体ほど再圧密による体積収縮量が大きくなる。
- 液状化後の再圧密による残留変形への過圧密効果が確認された。
- 再圧密時の応力状態が等方に近いほど体積圧縮は進行する。

## 5. 今後の課題

今後の課題として以下のことが挙げられる。

- 有効応力0近傍の $K_0$ 制御が技術的に難しく、軸ひずみを許容誤差内に収める条件を十分に満足できなかった点も実験結果に影響したと考えられる。
- 体積圧縮には有効応力の低下量が重要な要素となるので、有効応力0付近の精度よい計測が必要である。
- せん断履歴としてせん断応力やひずみの履歴の与え方を工夫する必要がある。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会：土質試験の方法と解説（第一回改訂版），第6刷，pp.601 - 702．2001．
- 2) 風間基樹，仙頭紀明，森 友宏，大村洋史，福島英晃，篠崎友利：過圧密履歴を受けた砂地盤の液状化抵抗，第11回日本地震工学シンポジウム，pp.711-712．2002．

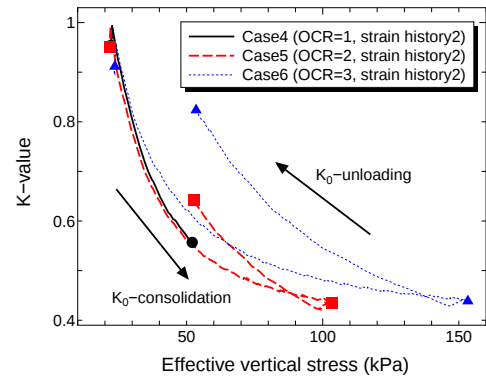


図- 1  $K_0$  圧密過程の有効鉛直応力と  $K_0$  値との関係

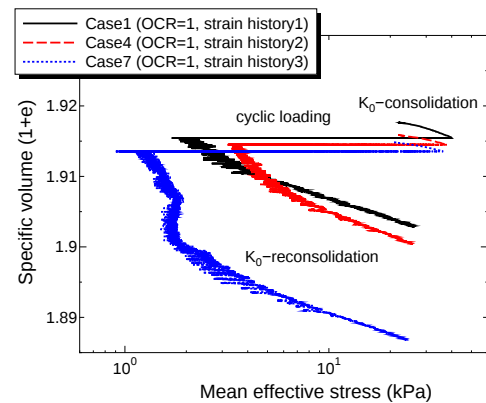


図- 2 せん断履歴ごとの比体積 $\log P$  曲線 (OCR=1)

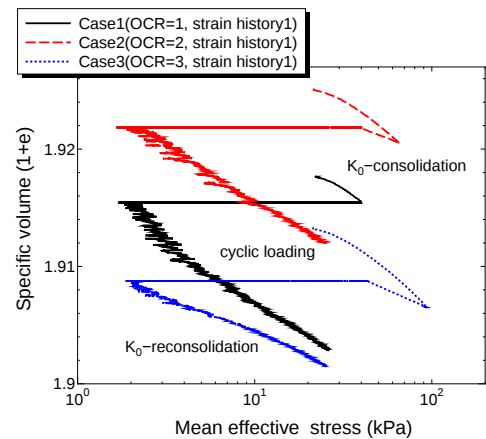


図- 3 過圧密ごとの比体積 $\log P$  曲線 (入力波 1)

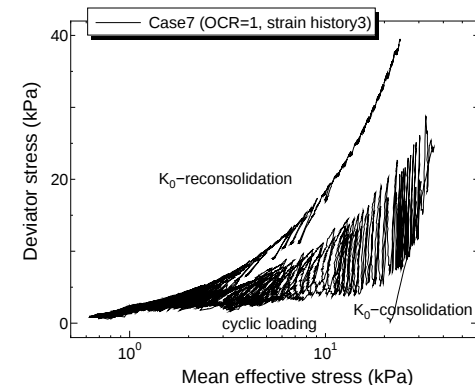


図- 4 Case7 の有効応力経路