

## 面積ひずみを用いた塑性ひずみ増分比による等方過圧密粘土の変形挙動の評価

北海道大学 正会員 ○福田 文彦  
同 学生員 増島 賢児  
同 学生員 土田 智聡  
同 フェロー 三田地利之

1. はじめに 粘土のストレス - ダイレイタンスー関係(応力比と塑性ひずみ増分比の関係)は载荷履歴の影響を受けないその粘土にとってユニークなものであると仮定されることが多い。筆者らは等方的に正規および過圧密された粘土について平均有効主応力( $p'$ )一定の排水三軸圧縮(C試験)および伸張試験(E試験)を行い、仮定の妥当性について検討を行った。

2. 実験 試料は再構成粘土のNSF-Clayであり、その物性値は $r_s=2.75\text{g/cm}^3$ 、 $w_L=55\%$ 、および $I_p=23$

である。供試体寸法は高さ12cm、直径5cmであり、三軸試験装置はコンピュータ制御によって任意の応力経路に沿った载荷が可能である。実験の概要を表-1および図-1にまとめる。実験C-1.00およびE-1.00はそれぞれ等方正規圧密粘土の $p'$ 一定排水三軸圧縮と伸張試験であり、等方圧密( , 図-1)とせん断(-C, -E)の2つの過程からなる。実験C-1.25~2.00およびE-1.25~2.00は等方過圧密粘土の $p'$ 一定排水三軸圧縮・伸張試験であり、等方圧密、等方応力载荷・除荷( ), およびせん断の3つの過程からなる。等方圧密過程の圧密応力は実験にかかわらず300kPaである。载荷速度は $dp/dt=1.0\text{kPa/min}$ であり、 $p'=40\text{kPa}$ の初期状態から $p'=300\text{kPa}$ に至るまで载荷を行い、3 $\sigma$ 法によって圧密を打ち切った。等方応力载荷・除荷過程では、排水条件の下、等方応力の载荷と除荷を行う。各試験の最大载荷応力(B点, 図-1)は表-1の通りであり、载荷・除荷速度は $dp'/dt=\pm 0.087\text{kPa/min}$ で、除荷が完了すると300kPaの等方応力状態(A点)に復帰する。せん断過程では、排水条件の下、 $p'$ を300kPaに保ちつつ、軸差応力 $q(=\sigma'_a-\sigma'_r, \sigma'_a, \sigma'_r$ : 供試体鉛直軸および半径軸方向の直応力)を増加ないしは減少させる。軸差応力载荷速度は $dq/dt=\pm 0.087\text{kPa/min}$ である。なお全ての実験において200kPaのバックプレッシャーを载荷している。また予備実験により、等方応力载荷・除荷過程およびせん断過程で発生する過剰間隙水圧の最大値が1kPa程度であることを確認した。

3. 面積ひずみと過圧密粘土の降伏挙動 筆者らは一連の中空ねじり試験、三軸圧縮および三軸伸張試験の結果から、 $s_3$ 面の面積ひずみ $\tilde{w}_3$ を用いて応力~ひずみ関係を整理することにより、せん断履歴を受けた粘土の

表-1 実験条件

| Test No. | 等方圧密応力<br>(A, 図-1) | 圧密過程完了<br>点の間隙比<br>( $e_0$ ) | 等方圧縮応力<br>(B, 図-1)<br>(kPa) | 過圧密比 | 排水せん断過程<br>の降伏応力<br>(kPa) |
|----------|--------------------|------------------------------|-----------------------------|------|---------------------------|
| C-1.00   | 300 kPa            | 1.107                        | -----                       | 1    | -----                     |
| C-1.25   |                    | 1.110                        | 375                         | 1.25 | 88                        |
| C-1.50   |                    | 1.106                        | 450                         | 1.5  | 148                       |
| C-1.75   |                    | 1.109                        | 525                         | 1.75 | 188                       |
| C-2.00   |                    | 1.102                        | 600                         | 2    | 211                       |
| E-1.00   | 300 kPa            | 1.093                        | -----                       | 1    | -----                     |
| E-1.25   |                    | 1.092                        | 375                         | 1.25 | -49                       |
| E-1.50   |                    | 1.110                        | 450                         | 1.5  | -86                       |
| E-1.75   |                    | 1.087                        | 525                         | 1.75 | -109                      |
| E-2.00   |                    | 1.111                        | 600                         | 2    | -130                      |

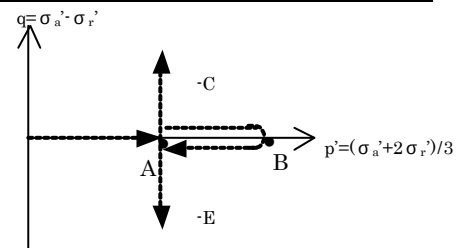


図-1 応力経路図

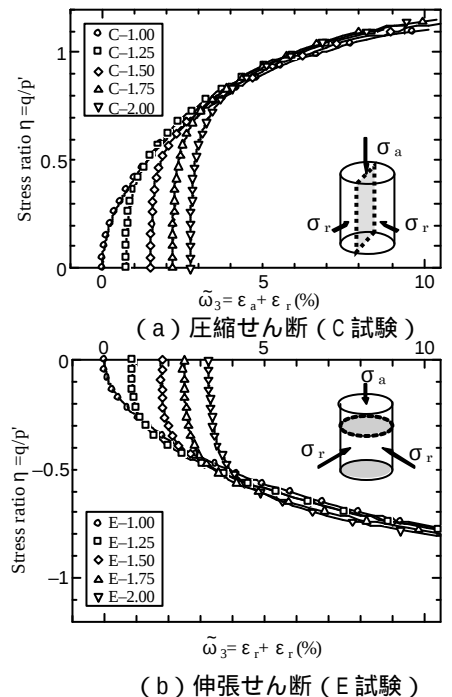


図-2 せん断過程の面積ひずみ挙動

キーワード ストレス - ダイレイタンスー, 過圧密比, 三軸試験, 面積ひずみ

連絡先 〒060-8628 札幌市北区北13条西8丁目 北海道大学大学院工学研究科 Tel.011-706-6194

異方降伏挙動と等方過圧密粘土の降伏挙動が統一的に説明できることを示した<sup>1)</sup>。図-2は C・E 試験のせん断過程における  $h(=q/p')$   $\sim \tilde{w}_3$  関係である。圧縮試験においては  $\tilde{w}_3 = e_a + e_r$  ( $e_a, e_r$ : 供試体鉛直軸および半径軸方向の直ひずみ) であり、伸張試験においては  $\tilde{w}_3 = 2e_r$  である。等方圧密過程の終了点を規準 ( $\tilde{w}_3 = 0\%$ ) としているため、過圧密粘土のせん断試験である実験 C・E-1.25~2.00 についてはせん断開始点において塑性ひずみ ( $\tilde{w}_3^p$ ) が生じており、表-1に示した降伏応力以降の  $h \sim \tilde{w}_3$  曲線は正規圧密粘土のそれにはほぼ完全に重なっている。

**4. ストレス - ダイレイタンスー関係** C・E試験のせん断過程における応力比  $h$  と塑性ひずみ増分比 ( $dv^p/d\gamma^p$ ) の関係を図-3に示す。 $v^p$  は塑性体積ひずみであり、 $\gamma^p (=2(\epsilon_a^p - \epsilon_r^p)/3)$  は塑性せん断ひずみである。ストレス - ダイレイタンスー関係は明らかに過圧密比に依存している。また塑性ひずみ増分比を求めるにあたり、過圧密粘土の等方線形弾性理論および間隙比  $e$  と  $p'$  の関係 ( $e = e_0 - k \ln(p'/p_0')$ ) を用いて弾性ひずみの評価を行った。ヤング係数は  $E = 3(1 - 2n)(1 + e_0)p'/k$  によって評価を行っており、 $k$  は等方膨張指数、 $n$  は弾性ポアソン比、また  $e_0$  は等方圧密過程終了点の間隙比である。 $k$  については等方応力載荷・除荷過程の除荷時における  $e \sim \ln p'$  関係から得られた  $k$  の平均値 0.015 を、 $n$  については別途実施した実験結果<sup>2)</sup> から 0.17 を、また  $e_0$  については C・E 試験の等方圧密過程終了点の間隙比の平均値 1.103 を用いた。

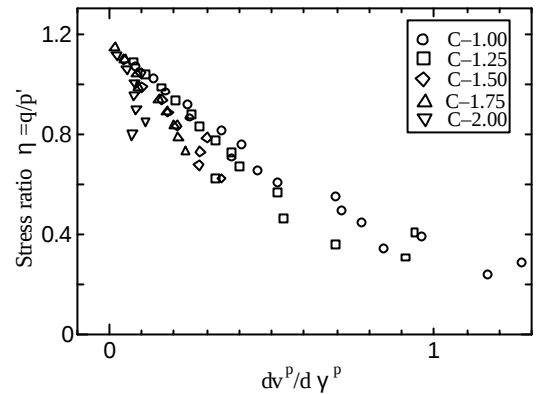
**5. 塑性面積ひずみを用いた塑性ひずみ増分比の挙動** 実験結果を様々な角度から検討した結果、粘土の  $dv^p/d\tilde{w}_3^p \sim v^p$  関係には過圧密履歴の影響が現れない可能性が強いことが明らかになった。図-4は C・E 試験のせん断過程における  $dv^p/d\tilde{w}_3^p \sim v^p$  関係である。実験 C-1.25~2.00 の関係は実験 C-1.00 の関係とほぼ一致しており、同時にこれらの関係は線形性を示している。また伸張側の試験についても同様の挙動が認められる。以上、図-2と4に示した実験結果から粘土の簡易な構成モデルの誘導を試みている<sup>3)</sup>。

## 6. 結論

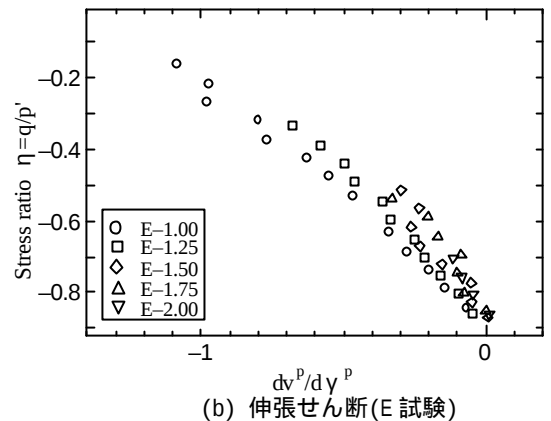
- 1) ストレス - ダイレイタンスー関係は過圧密履歴に依存する。
- 2) 粘土の  $dv^p/d\tilde{w}_3^p \sim v^p$  関係には過圧密履歴の影響が現れない。

## 参考文献

- 1) Fukuda et al. (2003) : Anisotropic and isotropic yielding behavior of clay., *Proc. 12<sup>th</sup> Pan. Am. Conf. SMGE* (under publication).
- 2) 佐藤・他 (2003) : 等方弾性仮定下における粘性土の弾性係数の解釈, 平成 14 年度土木学会北海道支部論文報告集 (第 59 号), 札幌, pp496-499
- 3) 土田・他 (2003) : 等方過圧密粘土の平均有効応力一定排水せん断時における応力ひずみ関係, 第 58 回土木学会年次学術講演会講演概要集, 徳島

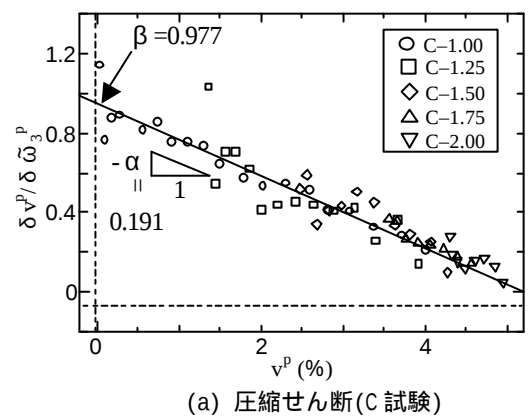


(a) 圧縮せん断 (C 試験)

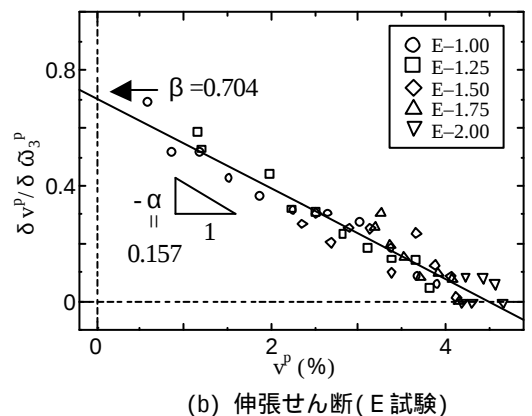


(b) 伸張せん断 (E 試験)

図-3 ストレス - ダイレイタンスー関係



(a) 圧縮せん断 (C 試験)



(b) 伸張せん断 (E 試験)

図-4 面積ひずみと体積ひずみ関係