

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

北海道大学大学院 学生会員 ○土田 智 聡
 同 正 会 員 福田 文 彦
 同 学 生 会 員 増 島 賢 児
 同 フェロー会員 三田地 利 之

1. はじめに 等方過圧密粘土の平均有効応力(p')一定排水三軸圧縮・伸張せん断試験を行い、その結果をもとに粘土の簡単な構成モデルを提案する。

2. 実験 使用した試料は再構成粘土のNSF-clayであり、表1に示す条件のもと、三軸圧縮(C試験)および三軸伸張排水せん断試験(E試験)を行った。実験C-1.00・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・伸張試験であり、等方圧密過程とせん断過程の2過程からなる。実験C・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・除荷、およびせん断の3過程からなる。等方圧密過程の圧密応力 $p'=(s_a'+2s_r')/3$, s_a', s_r' : 供試体鉛直軸および半径軸方向の直応力)は300kPaである。等方応力・除荷過程では排水条件の下で等方応力の除荷を行い、最大除荷応力は表1の通りであり、除荷完了点の応力状態は300kPaの等方応力状態である。せん断過程では p' を300kPaに保ちつつ軸差応力 $q(=s_a'-s_r')$ を増加もしくは減少させて排水せん断を行う。この実験の詳細については別報¹⁾を参照されたい。

3. 過圧密粘土の降伏挙動 図1はC試験のせん断過程における $\tilde{w}_3$ (s_3 面の面積ひずみ)の挙動である。三軸圧縮試験では $\tilde{w}_3=e_a+e_r$ (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、伸張試験では $\tilde{w}_3=2e_r$ である。等方圧密過程の終了点をひずみの基準状態($\tilde{w}_3=0\%$)としているため、実験C-1.25～2.00についてはせん断開始点において非可逆ひずみ($\tilde{w}_3^p$)が生じており、これらの実験ではその $h\sim\tilde{w}_3$ 曲線に降伏点が認められ、降伏後の $h\sim\tilde{w}_3$ 曲線と正規圧密粘土の $h\sim\tilde{w}_3$ 曲線はほぼ完全に重なっている。なおE試験についても図1と同様な挙動が観察されている¹⁾。

4. モデルの概要 応力～ひずみ関係をモデル化するにあたり、まずひずみが可逆ひずみである弾性ひずみと非可逆ひずみである塑性ひずみに加算分解できるものとする。次にKondnerにならい²⁾正規圧密粘土の応力比 $h(=q/p')\sim\tilde{w}_3^p$ 関係を式(1)によって定式化する。そして図1に示した $\tilde{w}_3$ 挙動にもとづき、 $\tilde{w}_3^p>f(h)$ である状態を弾性状態とし、弾性ひずみのみが生じるものとする。また $\tilde{w}_3^p=f(h)$ である状態を弾塑性状態とし、弾性ひずみと塑性ひずみが生じるものとする。式(1)の $a\cdot b$ は定数であり、実験C-1.00～2.00から求めた三軸圧縮時の平均値はそれぞれ1.974および0.687であり、E-1.00～2.00から求めた伸張時の平均値はそれぞれ3.908および-0.889である。

4. 1 弾性ひずみの評価 等方過圧密粘土の間隙比 e と p' の関係($e=e_0-k\ln(p'/p_0')$)と等方線形弾性理論によって弾性ひずみ挙動を定式化する。ヤング係数については式(2)によって評価し、 k は膨張指数、 n は弾性ポアソン比、また e_0 は等

表1 実験条件

Test No.	等方圧縮 応力 (kPa)	過圧密比
C-1.00	-----	1
C-1.25	375	1.25
C-1.50	450	1.5
C-1.75	525	1.75
C-2.00	600	2
E-1.00	-----	1
E-1.25	375	1.25
E-1.50	450	1.5
E-1.75	525	1.75
E-2.00	600	2

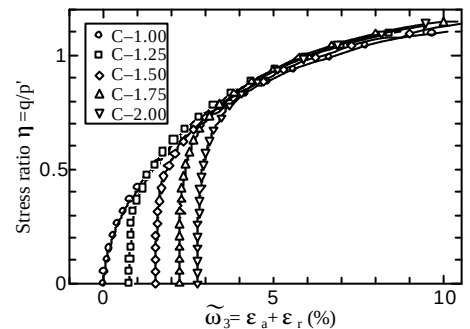


図1 せん断過程におけるのC試験の面積ひずみ挙動

$$\tilde{w}_3^p = f(h) = \frac{ah}{1-bh} \quad (1)$$

$$E = \frac{3(1-2n)(1+e_0)p'}{k} \quad (2)$$

$$d\tilde{w}_3^p = \frac{a}{(1-bh)^2} dh \quad (3)$$

$$\frac{dv^p}{dw^p} = b - av^p \quad (4)$$

$$dv^p = \frac{a(b-av)}{(1-bh)^2} dh \quad (5)$$

キーワード 三軸試験, Cam-clay model, 降伏, 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.011-706-6196

方圧密過程終了点の間隙比である。 k の値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 の値については別途行われた実験結果³⁾から0.17を、 e_0 の値についてはC・E試験の等方圧密過程終了点における間隙比の平均値1.103を使用する。

4. 2 面積ひずみと体積ひずみの関係 C試験のせん断過程における降伏後の塑性体積ひずみ増分に対する塑性面積ひずみ増分の比($dv^p/d\tilde{w}_3^p$)と塑性体積ひずみ v^p の関係を図2に示す。 $dv^p/d\tilde{w}_3^p \sim v^p$ 関係は過圧密履歴に依存しておらず、同時に線形性を示している。なお塑性ひずみを求めるにあたり等方線形弾性理論と等方過圧密粘土の間隙比 e と p' の関係($e=e_0-k\ln(p'/p_0')$)を用いて弾性成分の評価を行っており、またE試験についても図2と同様な挙動が観察されている¹⁾。

4. 3 塑性ひずみ挙動の定式化 図1の $\tilde{w}_3$ 挙動と図2の $dv^p/d\tilde{w}_3^p \sim v^p$ 関係を利用し、塑性ひずみ挙動の定式化を行う。式(3)は式(1)を微分したものであり $d\tilde{w}_3^p \sim dh$ 関係を与える。また式(4)によって図2の $dv^p/d\tilde{w}_3^p \sim v^p$ 関係を定式化する。 $\alpha \cdot \beta$ は実験定数であり、実験C-1.00から求めた値はそれぞれ0.191および0.704であり、E-1.00から求めた値はそれぞれ0.157および0.704である。式(3)(4)から dv^p と dh の関係式である式(5)を得る。

5. 提案モデルおよびカムクレイモデルと実験結果の比較 図3はC・E試験のせん断過程における $h \sim v$ 関係と提案モデルおよびオリジナルカムクレイを比較したものである。図4はC・E試験のせん断過程における $h \sim g$ ($=2(e_1-e_3)/3$)関係と提案モデルを比較したものであり、図5は同関係とカムクレイを比較したものである。カムクレイパラメータの l と k については、C・E試験の等方応力載荷・除荷過程から得られたそれぞれの値の平均値0.153と0.015を用いた。また M については圧縮側と伸張側でそれぞれ独立した値を用いており、圧縮側についてはC試験の平均値1.20を、伸張側についてはE試験の平均値0.89を用いた。実験結果による応力 $\sim$ ひずみ関係と提案モデルの関係は、過圧密比やせん断時の変形モードにかかわらず、良好な一致を示すのに対し、カムクレイモデルによる計算結果は大幅に異なっている。

6. まとめ 等方過圧密粘土の $\tilde{w}_3$ (s_3 面の面積ひずみ)挙動にもとづく実験的なモデルを提案した。実験結果と提案モデル、およびカムクレイモデルとの比較を行ったところ、実験結果と提案モデルは良好な一致を示しているのに対し、カムクレイモデルは大幅に異なっていた。以上から $\tilde{w}_3$ は粘土の挙動を定式化する上で重要な役割を果たす可能性がある。

[参考文献]

- 1) 福田・他(2003): 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, 第58会土木学会年次学術講演会講演概要集III, 徳島
- 2) Kondner(1963): Hyperbolic stress-strain response: cohesive soils, Proc. J. ASCE, 89(SM1)
- 3) 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

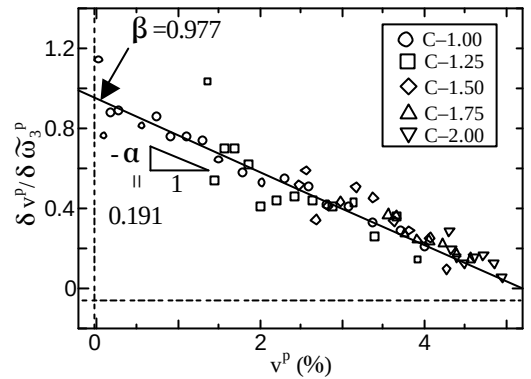


図2 面積ひずみと体積ひずみ関係

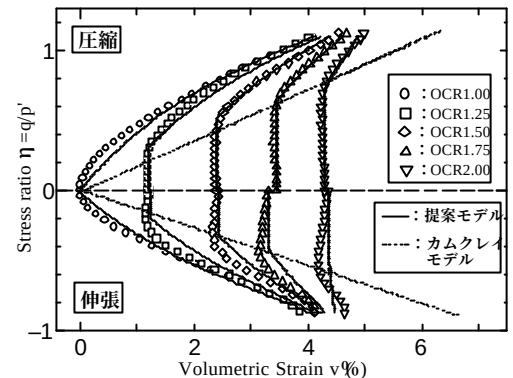


図3 $h \sim v$ 関係

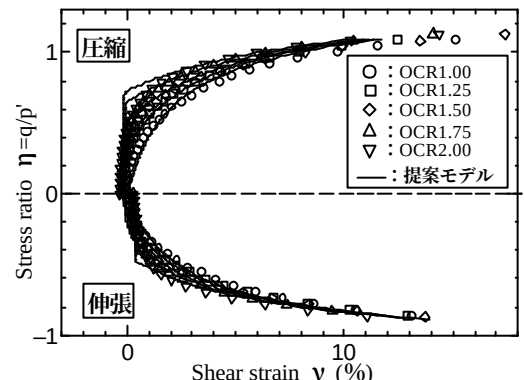


図4 $h \sim g$ 関係(提案モデル)

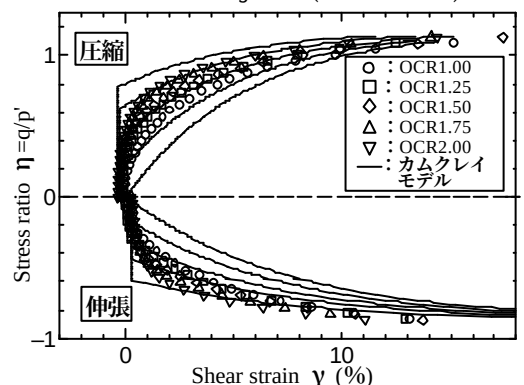


図5 $h \sim g$ 関係(カムクレイモデル)