

飽和粘土の等方硬化と移動硬化を含む後続降伏関数 (その2)

法政大学 学生会員 ○吉野 広一郎  
 法政大学 正会員 草深 守人  
 法政大学 渡辺 隆之

1. まえがき

本文は、一般に普及している通常の三軸試験機を利用した  $CU_v$  試験,  $KoCU_v$  試験を行い, その実験データから同年次学術講演会に報告している同一論文題目 (その1) で提案した降伏関数に含まれる材料パラメータを一般的に普及している土質試験法の範囲で決定する方法を述べたものである.

2. 実験方法

試験機は普及型の軸対称応力条件下で実施される通常の三軸試験機の範囲とした. 同様に, 試験条件も一般的な  $CU_v$  試験,  $KoCU_v$  試験, 繰返しせん断試験の範囲とし, 粘土試料は海成粘土の飽和試料とした. 側圧は  $CU_v \cdot KoCU_v$  試験ともに  $\sigma_3 = 50, 100, 200 \text{ kN/m}^2$ , 繰返しせん断試験では  $\sigma_3 = 50, 100 \text{ kN/m}^2$  で試験を行った.

3. 等方・移動硬化降伏関数の採用

構造の発達した粘性土は, 図1に示すように塑性変形の進行に伴ってその構造を変えることから, 降伏曲面は等方硬化と移動硬化を同時に生じるものと仮定し, 次式で表すこととした.

$$F = f(\sigma - \alpha) - K(\kappa, p_{co}) = \sqrt{\frac{1}{2} s^* : s^*} - \frac{1}{3} \bar{\sigma}(\kappa, p_{co}) \quad (1)$$

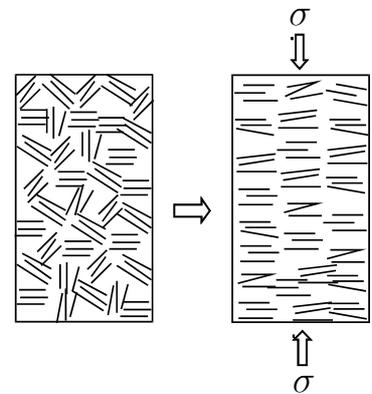


図1 粘土粒子の再配列

ここで,  $\alpha$  は背応力テンソル,  $s^*$  は  $\sigma - \alpha$  の偏差成分テンソル,  $K$  は等方硬化を表す関数,  $\kappa$  は硬化パラメータ,  $p_{co}$  は圧密降伏応力,  $\bar{\sigma}$  は相当応力である.

4. 材料パラメータの評価方法

圧密非排水三軸試験結果には圧密とそれに伴う強度増加を含まないことから, 試験から得られる応力-ひずみ応答は土の骨格構造の弾性・塑性挙動のみであると仮定してよいと考える. 圧力  $p_{co}$  で圧密された飽和粘土の三軸試験から得られる応力-ひずみ曲線  $q - \epsilon$  の弾性応答は, 载荷開始直後の極めて微小なひずみ区間において弾性挙動を示し, 初期降伏点を越えた以降は, 式(1)の降伏関数に従い等方硬化と移動硬化を同時に含む塑性変形領域に入るとする. このとき, これらの硬化が図2のように等方硬化区間  $\overline{PA}$  と移動硬化区間  $\overline{AP'}$  に分離できると仮定すると, 等方硬化関数  $K$  と背応力  $\bar{\alpha}$  を次式で与えることができる.

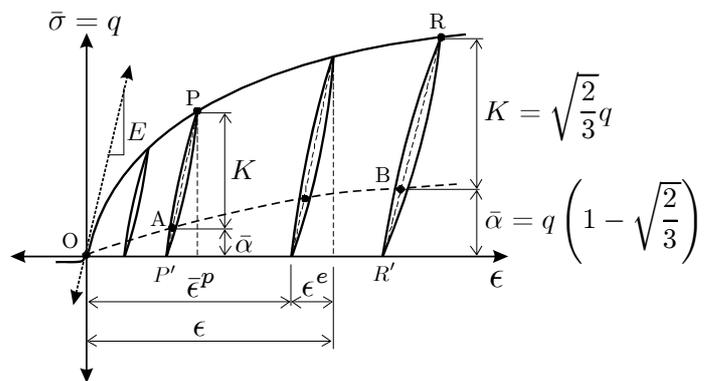


図2 応力-ひずみ曲線の等方/移動硬化成分

$$K(\bar{\epsilon}^p, p_{co}) = \sqrt{\frac{2}{3}} \bar{\sigma} \quad \bar{\alpha}(\bar{\epsilon}^p, p_{co}) = \bar{\sigma} \left( 1 - \sqrt{\frac{2}{3}} \right) \quad (2)$$

キーワード von Mises, 降伏関数, 硬化関数, 等方硬化, 移動硬化  
 連絡先 〒184-8584 東京都小金井市梶野町3丁目 法政大学 大学院 TEL 042-387-6033

ここで、 $\bar{\sigma}$ と $\bar{\epsilon}^p (= \kappa)$ は軸対称3軸応力・ひずみ状態における相当応力と相当塑性ひずみである。以下に、実際の三軸試験データから上記二つの硬化関数を評価する具体的な手順を示す。

① 三軸圧縮試験から得られた応力-ひずみ曲線から $\bar{\sigma}$ - $\bar{\epsilon}^p$ 曲線を、図2を参照して作成する。

$$\text{相当応力： } \bar{\sigma} = q = \sigma_1 - \sigma_3, \quad \text{弾性ひずみ： } \bar{\epsilon}^e = \frac{\bar{\sigma}}{E}, \quad \text{相当塑性ひずみ： } \bar{\epsilon}^p = \bar{\epsilon} - \bar{\epsilon}^e \quad (3)$$

ここで、弾性係数 $E$ は荷重初期の微小ひずみ区間における応力-ひずみ曲線の接線勾配として決定する。したがって、三軸圧縮試験では、荷重初期の微小ひずみ区間における応力-ひずみ関係の計測が重要となる。

② 図2と式(2)を参照して $\bar{\epsilon}^p - K$ 曲線と $\bar{\epsilon}^p - \bar{\alpha}$ 曲線を作成する。ここで、

③ 上記で作成した実験値としての $\bar{\epsilon}^p - K$ 曲線と $\bar{\epsilon}^p - \bar{\alpha}$ 曲線の関数形を次式で近似する。

$$K = \frac{\bar{\epsilon}^p}{b_1 + a_1 \bar{\epsilon}^p} \quad \bar{\alpha} = \frac{\bar{\epsilon}^p}{b_2 + a_2 \bar{\epsilon}^p} \quad (4)$$

④ 式(4)を用いて前記②の実験値を最小二乗法で当てはめることによって係数( $a_i, b_i$ )を決定する。

### 5. 実験値に基づく考察

以下では、応力経路の異なる軸対称三軸試験 (CUv, KoCUv) 結果に基づいて、式(1)の降伏関数による等方硬化と移動硬化の表現性について考察する。

図3は、移動硬化関数 $\bar{\alpha}(\bar{\epsilon}^p, p_{co})$ を決定する材料パラメータ( $a_2, b_2$ )を前記の手順に従って推定し、圧密圧力で整理したものである。明らかに材料パラメータ( $a_2, b_2$ )は圧密圧力 $p_{co}$ に強い影響を受けると共に、圧密によって生じる土粒子の再配列の影響を受けているものと考えられる。なお、ここでは省略するが、等方硬化関数 $K(\bar{\epsilon}^p, p_{co})$ の材料パラメータ( $a_1, b_1$ )についても同様な傾向を示している。図4と図5は、これらのパラメータに対する式(1)の降伏関数の一例を示したものであり、軸対称三軸試験のひずみ経路に対応して、主軸 $\sigma_1 (\epsilon_1)$ 方向に向かう降伏曲面の移動が表現されている。

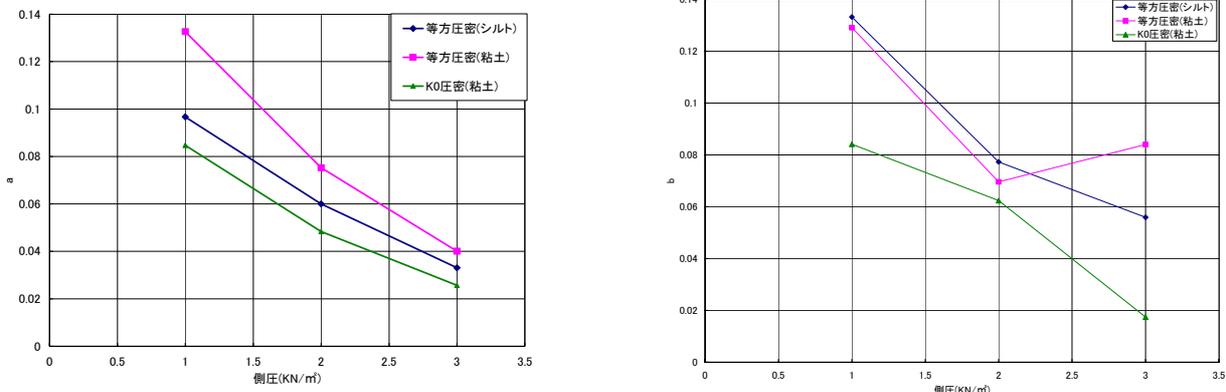


図3  $\bar{\alpha}(\bar{\epsilon}^p, p_{co})$ の材料定数 $a_2$  (左図) と $b_2$  (右図) の推定値の例

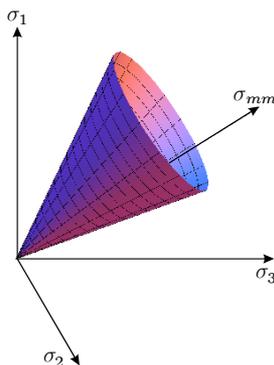


図4 等方圧密粘土(図3)の降伏曲面の3D表示

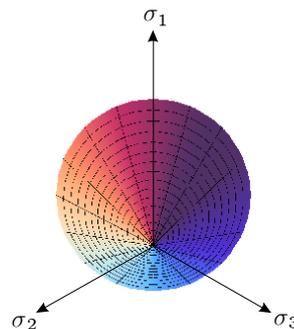


図5 等方圧密粘土(図3)の降伏曲面の $\pi$ -平面表示