

セメント改良土の圧密・三軸試験と弾塑性構成式による解釈

竹中工務店 技術研究所 正会員 ○金田一広・重野喜政・鬼丸貞友
 株式会社 マインド 正会員 鈴木吉夫
 元竹中土木 正会員 斎藤聡
 東京大学 生産技術研究所 正会員 古関潤一

1. はじめに

セメント地盤改良は液状化対策や地盤支持力の増加を期待して行われている。今日では、想定地震動が大きくなり、また大きな構造物を支持する必要が出てきている中で、セメント改良地盤の局所的に発生する引張を伴う破壊を予測することが急務となってきた。そこで本研究では引張側応力（以下では負圧と称する）にも耐えられる弾塑性構成モデルを構築し、セメント改良土の圧密試験・三軸圧縮試験結果との比較を行った。

2. セメント改良土の構成モデル

Hashiguchi, Mase¹⁾による耐負圧まで適用可能な下負荷面モデルに、骨格構造劣化を考慮できるようにさらに拡張した弾塑性構成式を構築する。正規降伏面は修正カムクレイモデルとし、負圧を考慮して降伏面を負側に移動し、関口・太田²⁾による異方性を表す応力パラメータ η^* とその発展を考慮した回転硬化概念を有する負圧を考慮した修正カムクレイで記述し次式で表す。

$$F = f(p', \hat{\chi}) = (p_x' - \bar{\xi} p') / \hat{\xi}, \quad \hat{\xi} = 2(1 - \xi)\xi, \quad \bar{\xi} = (1 - 2\xi), \quad p_x' = \sqrt{p'^2 + \hat{\xi} \hat{\chi}^2}, \quad \hat{\chi} = \|\hat{\sigma}^* / M\|, \quad \|\hat{\sigma}^*\|^2 = 1.5(S - p' \beta) \cdot (S - p' \beta) \quad (1)$$

ここで ξ は図1に示すように負側への移動量で、 S は応力 π (引張正) の偏差応力、 p' は平均有効応力 $p' = -1/3(\text{tr } T)$ 、 β は異方性をあらわすテンソルである。次に浅岡ら³⁾の上負荷面による構造概念 R^* 、橋口による下負荷面による過圧密概念 R を導入し、下負荷面降伏関数は次式となる。なお、上・下負荷面の相似中心は原点としている。ここで R, R^* が1に近づくほど、正規圧密状態、骨格構造が低位な繰り返し状態を示す。

$$f(p', \hat{\chi}) = \frac{R}{R^*} F, \quad 0 < R \leq 1, 0 < R^* \leq 1 \quad (2)$$

式(2)の物質時間微分をとり、関連流れ則を仮定して通常の弾塑性構成モデルを構築する。ここで異方性、構造、過圧密の発展則は下記に示す。

$$\text{過圧密: } \dot{R} = JU \|\mathbf{D}^p\| / D, U = -m \ln R, \quad \text{構造: } \dot{R}^* = JU_s \|\mathbf{D}^p\| / D, U_s = a R^{*b} (1 - R^*)^c$$

$$\text{異方性: } \dot{\beta} = -Jbr\sqrt{2/3} \|\mathbf{D}_s^p\| \|\hat{\sigma}^*\| \hat{\sigma}_b / F / D, \quad \hat{\sigma}_b = m_b \hat{\sigma}^* / \|\hat{\sigma}^*\| - \beta \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{D}^p$ は塑性ひずみストレッチングテンソル、 $D = (\lambda - \kappa) / M / (1 + e_0)$ はダイレイタンシ - 係数、 $J = (1 + e) / (1 + e_0)$ である。 m は下負荷係数、 a, b, c は構造劣化指数、 b_r は回転硬化指数、 m_b は回転硬化限界定数である。 M は正規降伏面を規定する定数で e_0 は初期間隙比である。また、硬化パラメータは塑性体積ひずみを取るが、Hashiguchi, Mase にならって、次式のようにする。詳細は参考文献1)を参照されたい。

$$\text{硬化則: } \dot{H} = -\text{tr } \mathbf{D}^p - \xi \|\mathbf{D}^p\| \langle -p' \rangle, \quad -\varepsilon_v^p = H = MD \ln \frac{(1 - \xi)F + p_e'}{(1 - \xi)F_0 + p_e'} \quad (4)$$

ここで、 F_0 は塑性体積ひずみを計測するときの値で p_e' は負圧側の限界値である。また、 $S \geq 0$ のとき、 $\langle S \rangle = S$ 、 $S < 0$ のとき $\langle S \rangle = 0$ である。最終的に弾塑性構成式は次式となる。さらに、 T は客観性のある応力速度、 $\mathbf{D}^p$ は

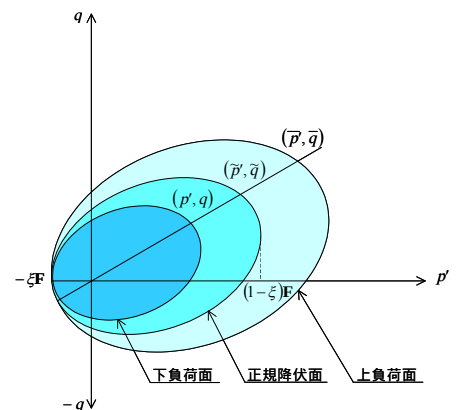


図1 三つの負荷面

弾性ストレッチングテンソル, E は弾性剛性テンソル, Λ はひずみタームの塑性定数である。

$$\dot{T} = E\dot{D}^e = E\dot{D} - \Lambda E \frac{\partial f}{\partial T} \quad (5)$$

3. 実験結果と計算結果の比較

試験で用いているセメント改良土は, 粘性土である新門司浚渫土に水セメント比 60%, セメント配合 400kg/m^3 で 28 日養生後のものである。この供試体を用いて定ひずみ圧密試験および, 拘束圧 400kPa の三軸非排水圧縮試験を行っている。表 1 に計算で用いた弾塑性パラメータ群を示す。図 2 に圧密試験を図 3 に三軸試験の実験結果 (黒丸) と計算結果 (赤線) を示す。また同時に R, R^* ~ 圧密圧力, 軸ひずみ関係も示す。どちらの試験も弾塑性パラメータは同じで初期値のみ異なっている。圧密試験の p_c' 付近の間隙比は, 計算は実験に比べて少し大きくなっているが, p_c' を超えて大きく圧縮している点では類似している。 σ_v' が大きくなるほど計算と実験の整合性がよくないが, 構造劣化の発展則の修正で表現可能と考えている。過圧密領域では, R が 1 に漸近し正規圧密状態になる。過圧密領域でも構造の劣化 ($R^* \rightarrow 1$) が生じるが p_c' 付近で構造の劣化が顕著になり, その後徐々に R^* が 1 に漸近している。一方, 三軸試験は初期圧密応力 20kPa から 400kPa まで等方圧密をした後に非排水三軸圧縮試験を模擬した。軸差応力 ~ 軸ひずみ関係は, 初期の剛性やピーク強度や, ピークを迎えた後のひずみ軟化もほぼ模擬できている。 R, R^* とも 1 に漸近しており, 非排水条件でこのようにひずみ軟化が見られることから改良体にも構造の劣化による塑性圧縮が生じていると考えられる。

表 1 材料定数群

<弾塑性パラメータ>		圧密	三軸
圧縮指数 λ		0.5	
膨潤指数 κ		0.005	
限界状態定数 M		2.50	
正規圧密線の切片 N		7.3	
$(p' = 98 \text{ kPa}$ の時の比体積)			
ポアソン比 ν		0.1	
<発展則パラメータ>			
構造劣化指数 a		5.0	
構造劣化指数 b, c		0.5, 5.0	
正規圧密粘土化指数 m		5	
回転硬化指数 b_r		0.0	
回転硬化限界指数 m_b		0	
<初期値>			
初期過圧密比 $1/R_0$		900	1050
構造の程度 $1/R^*_0$		7.00	10.00
初期応力 $\sigma_0(\text{kPa})$		20.00	20.00
異方性の程度 ζ_0		0.00	
側圧係数 K_0		1.00	
<耐圧圧関連パラメータ>			
ξ		0.08	
ζ		0.01	
$p_c'(\text{kPa})$		100	

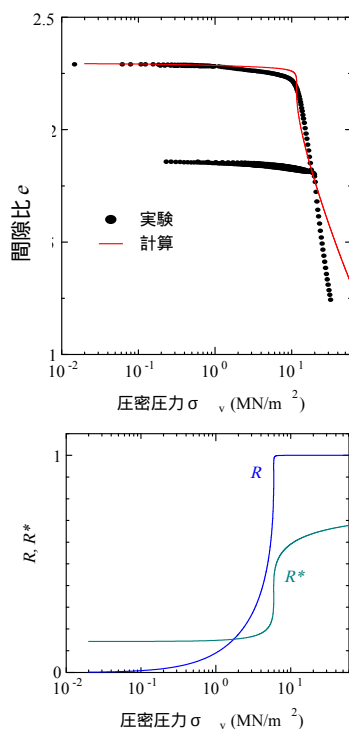


図 2 圧密試験

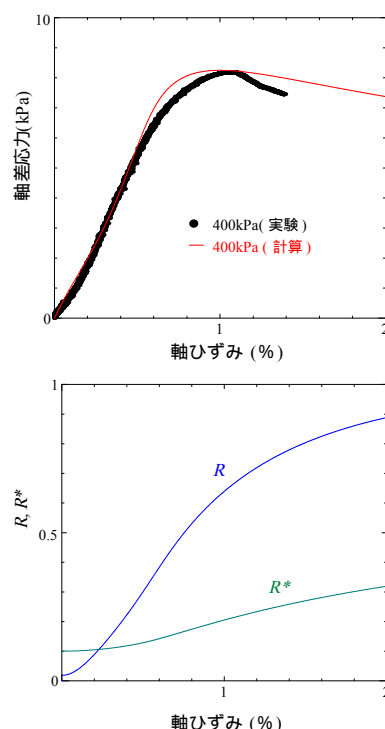


図 3 三軸非排水試験

4. 今後の課題

本報告では圧縮試験について示したが, 今後は引張試験との整合性や各種パラメータの決定方法などについて実験など検討を加えていく予定である。

参考文献

- 1) Hashiguchi, K and Mase, T. : Extended yield condition of soils with tensile yield strength and rotational hardening, Int J. of Plasticity, 1939-1956, 2007.
- 2) Sekiguchi, H. and Ohta H. : Induced anisotropy and time dependency in clays, Constitutive Equations of Soils (Proc. 9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Eng., Spec. Session 9), Tokyo, pp.229-238, 1977.
- 3) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, T., Kaneda, K. and Nakano, M. : An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, 42(5), pp.47-57, 2002.