

上総層群泥岩の圧密および三軸試験の再現解析

株式会社大林組 正会員 ○中道 洋平
フェロー会員 杉江 茂彦

1. はじめに

大深度地下を利用した道路や鉄道などのインフラ整備が首都圏を中心に増加傾向にあり、首都圏深部の上総層群泥岩(いわゆる土丹層, 以下泥岩)の挙動を予測することは重要である. 泥岩にはセメンテーション効果があり, その力学特性として, ①負圧に対して強度を有していること, ②骨格構造を有しており等方圧縮時に疑似過圧密の挙動を示すことが挙げられる. そこで, 本研究では, これらの力学的特性を考慮出来る泥岩の構成モデルとして, Hashiguchi ら¹⁾による負圧にも適用可能な下負荷面モデルに, Asaoka ら²⁾による骨格構造を表現する上負荷面を導入したモデルを構築し, 要素試験の再現解析によって, 泥岩への適用性について検討した.

2. 上総層群泥岩の構成モデル

Hashiguchi らによる耐負圧下負荷面モデルの正規降伏曲面は, 修正カムクレイモデルを負圧側に拡張したモデルであり, 下記の式(1)で表される.

$$\text{降伏関数: } \left\{ \frac{p' - \{(1/2) - \xi\}F}{F/2} \right\}^2 + \frac{\|\sigma^*\|^2}{(MF/2)^2} = 1 \quad \dots(1)$$

ここに, p' は平均有効主応力, σ^* は偏差応力に関するパラメータ, F は等方硬化変数 H の関数で硬化関数, M は限界応力比, ξ は負圧側への降伏曲面の拡張を表す値である. 式(1)を硬化関数 F について展開すると, 正規降伏曲面の降伏関数を式(2)のように表すことができる.

$$\text{降伏関数: } f(p', \hat{\lambda}) = F(H), \quad f(p', \hat{\lambda}) = \begin{cases} p'\{1 + (\hat{\lambda}/p')^2\} & \text{for } \xi = 0 \\ \frac{1}{\bar{\xi}}(p'_x - \bar{\xi}p') & \text{for } \xi \neq 0 \end{cases} \quad \dots(2)$$

式(2)中の $\hat{\lambda}$, ξ , $\bar{\xi}$, p'_x は下記の式で与えられる.

$$\hat{\lambda} \equiv \frac{\|\sigma^*\|}{M}, \quad \xi \equiv 2(1 - \xi)\xi, \quad \bar{\xi} \equiv (1 - 2\xi), \quad p'_x \equiv \sqrt{p'^2 + 2\xi\hat{\lambda}^2} \quad \dots(3)$$

本研究では, 図-1に示す様に, 正規降伏曲面に対して相似な下負荷面および上負荷面を導入する. 下・上負荷面の各相似比を R および R^* とすると, 下負荷面の降伏関数は式(4)で与えられ, 各相似比の発展則は, 式(5), 式(6)により与えることとする.

$$\text{下負荷面の降伏関数: } f_{sub}(p', \hat{\lambda}) = \frac{R}{R^*} F(H), \quad (0 < R < 1, 0 < R^* < 1) \quad \dots(4)$$

$$\text{下負荷面の相似比} R \text{の発展則: } \dot{R} = U \|\dot{\epsilon}^P\|, \quad U = -\frac{m}{D} \ln R \quad \dots(5)$$

$$\text{上負荷面の相似比} R^* \text{の発展則: } \dot{R}^* = U^* \|\dot{\epsilon}^P\|, \quad U^* = -\frac{a}{D} R^{*b} (1 - R^*)^c \quad \dots(6)$$

ここに, ϵ^P は塑性ひずみ, D はダイレイタンス係数, m は正規圧密土化指数, a , b , c は構造低位化指数である.

また, 本モデルでは, Hashiguchi らに従い塑性体積ひずみを等方硬化変数 H とし, 次式で与えることとする.

$$H \equiv -\epsilon_v^P = MD \ln \frac{(1 - \xi)F + P_e}{(1 - \xi)F_0 + P_e} \quad \dots(7)$$

ただし, F_0 は F の初期値, P_e は負圧の限界値である. 式(7)より硬化関数 $F(H)$ は具体的に次式で与えられる.

$$F(H) = \left(F_0 + \frac{p_e}{1 - \xi} \right) \exp\left(\frac{H}{MD} \right) - \frac{P_e}{1 - \xi} \quad \dots(8)$$

なお, 本研究では, 異方性については考慮していない.

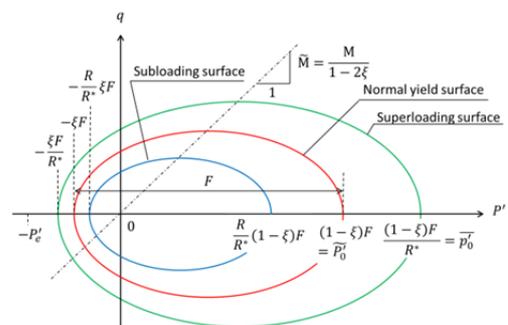


図-1 下・上負荷面の概念図

キーワード 上総層群泥岩, 大深度地盤, 弾塑性構成式, 三軸試験

連絡先 〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640 (株)大林組 技術研究所 TEL.042-495-9636 FAX.042-495-0909

表-1 解析に用いた材料定数

＜弾塑性パラメータ＞		
限界状態応力比	M	1.2
ダイレイタンス係数	D	0.0765
圧縮指数	λ	0.17
膨潤指数	κ	0.02
せん断弾性係数	G (MPa)	500
＜発展則パラメータ＞		
正規圧密土化指数	m	5
構造低位化指数	a (b=c=1.0)	1.5
＜負圧パラメータ＞		
負圧限界値	P_e (MPa)	1.5
負圧への拡張指数	ξ	0.08
＜初期値＞		
正規降伏曲面の先行圧密圧力	\bar{P}_0 (MPa)	3.00
上負荷面の先行圧密圧力	P_0^* (MPa)	8.16
初期間隙比	e_i	0.671
三軸試験における 等方圧密圧力		
σ_c (kgf/cm ²)		①:5.0 (過圧密比16.6) ②:10.0 (過圧密比8.3) ③:40.0 (過圧密比2.1) ④:80.0 (過圧密比1.0)

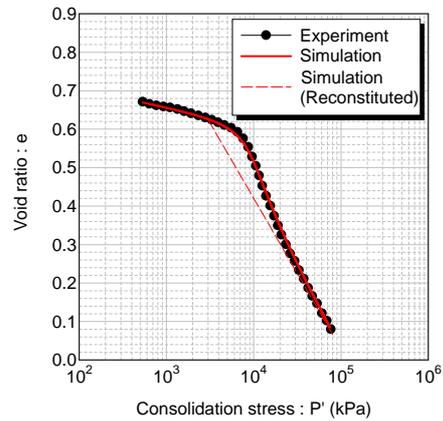


図-2 e - log p' 関係 (高压定ひずみ圧密試験)

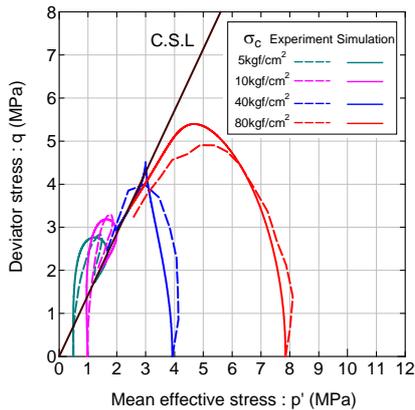


図-3(a) ストレスパス (CU試験)

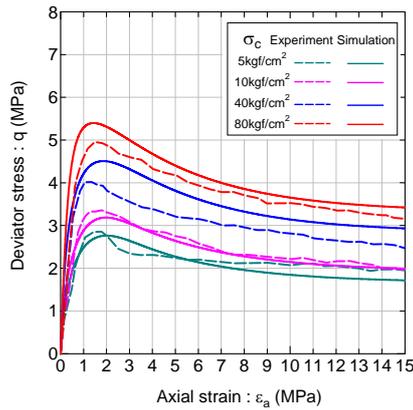


図-3(b) 荷重-変位関係 (CU試験)

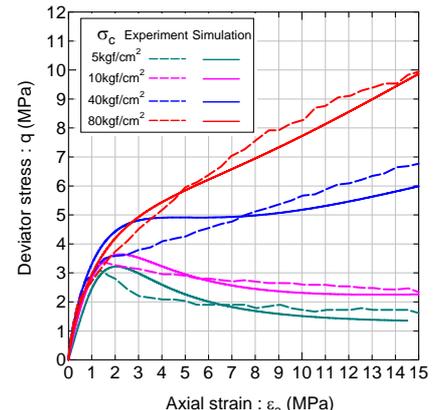


図-4 荷重-変位関係 (CD試験)

3. 上総層群泥岩の力学挙動の再現

上記の弾塑性構成モデルの適用性を検討するために、細野ら³⁾による上総層群泥岩(柿ノ木台層)の高压定ひずみ圧密試験、CU試験およびCD試験の再現解析を行った。解析に用いた材料定数を表-1に示す。本解析では、セメンテーション効果を考慮し、せん断弾性係数は圧密圧力に依存しないものとして一定値を与えることとした。

図-2に高压定ひずみ圧密試験の実験値と解析値を示す。図-2には、練返した場合(上負荷面を導入しない場合)の正規圧密曲線(赤点線)についても同時に示す。上負荷面を導入したモデルによる解析値は、実験値と良く一致している。このように、上負荷面を導入することで、泥岩の疑似過圧密的挙動を再現できていることが分かる。

図-3(a)、図-3(b)に、CU試験におけるストレスパスおよび荷重-変位関係を示す。図-3(a)のストレスパスより、拘束圧が低い場合に見られる巻き返すような挙動と、拘束圧が高い場合に見られる巻き返さずに軟化していく挙動を、概ね再現できていることが分かる。図-3(b)に示す荷重-変位関係についても、良く再現できていると言える。

図-4に、CD試験による荷重-変位関係を示す。拘束圧が低い場合に見られる軟化挙動と、拘束圧が高い場合に見られる硬化挙動が、良く再現できていることが確認できる。

4. まとめ

本研究では、負圧にも適用可能な下負荷面モデルに上負荷面を導入したモデルを用いて、泥岩の要素試験結果の再現解析を行った。その結果、いずれの試験においても、泥岩の挙動を精度良く再現できていること、本モデルの泥岩への適用性が確認できた。今後は、負圧が生じた場合の再現性や、実施スケールでの再現性について検討を行いたい。

参考文献 1) Hashiguchi, K. and Mase, T. : Extended yield condition of soils with tensile yield strength and rotational hardening, INTERNAL JOURNAL OF Plasticity, vol. 23, pp.1939-1956, 2007 2) Asaoka, A., Nakano, M. and Noda, T. : Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, Soils and Foundations, Vol.40, No.2, pp.99-110, 2000.4 3) 細野高康, 中島雅之, 小泉和広, 杉田信隆, 小川正二 : 上総層群中部層シルト岩の強度・変形特性, 応用地質, 34巻, 5号, pp.25-36, 1993