

土質力学から見たベントナイト材料の特異性と構成モデル化

神戸大学 学生会員 ○高山 裕介
 電源開発株式会社 正会員 前田 圭介
 神戸大学 正会員 飯塚 敦
 神戸大学 正会員 河井 克之
 鹿島建設株式会社 正会員 小林 一三

1. はじめに

放射性廃棄物地層処分施設における緩衝材にベントナイト材料の利用が検討されている。施設の安全性を検討するためには、ベントナイト材料の力学挙動を精度よく表現できる構成モデルが必要である。本研究では既往の室内試験結果を基に構成モデルを構築した。

2. 飽和ベントナイトの圧密特性¹⁾

笹倉ら²⁾はクニゲルV1 供試体に対して、 K_0 圧密試験を行っている。図-1 に過圧密比と土圧係数の関係を示す。これを見ると、正規圧密時には土圧係数はほぼ1であるが、除荷に伴いその値が上昇していることがわかる。また、図中には、過圧密比(OCR)と土圧係数(K_0)の以下の経験式を併せて示している。

$$K_{0-OC} = K_{0-NC} OCR^m \quad (1)$$

ここで、 K_{0-NC} : 正規圧密時の土圧係数、 K_{0-OC} : 除荷時の土圧係数、 OCR : 過圧密比、 m : 材料パラメータである。図-2 に石川ら³⁾が行ったクニゲルV1 の一次元圧密試験結果を示す。ここで、以下の関係式と式(1)を用いて、図-2 の鉛直有効応力を平均有効応力に変換する。

$$p' = \frac{\sigma'_v + 2K_0\sigma'_v}{3} \quad (2)$$

ここで、 p' : 平均有効応力、 σ'_v : 鉛直有効応力、 K_0 : 土圧係数である。変換には $K_{0-NC}=1$ 、 $m=0.6$ を用いた。整理結果を図-3 に示す。これを見ると、載荷と除荷の過程でほぼ同一の線上を辿っているのが分かる。

3. 飽和ベントナイトのせん断特性

三軸非排水せん断試験中の応力経路に着目する。クニゲルV1 の三軸非排水せん断試験の結果⁴⁾を図-4 に示す。クニゲルV1 の非排水せん断中の応力経路の特徴として、軸差応力の増加に対して平均有効応力の増減がほとんどないことが分かる。つまり飽和ベントナイトはダイレイタンシー特性を有していないことを示唆している。よって、飽和ベントナイトは図.3 に示したように、一次元圧縮のようなせん断も含んだ載荷・除荷を行っても、見かけ上、弾性体のような振る舞いとなったと考えられる。微視的に観ると、主成分であるモンモリロナイトは層構造を有しており、水が浸潤すると、層間に水を取り込み、微視的骨格構造が大きく変化する。ベントナイト材料に吸水すると、膨潤したモンモリロナイトが材料中の間隙を充填し始め、飽和状態になればほぼ完全に間隙を充填する。このモンモリロナイトが間隙を埋め尽くした状態では、ダイレイタンシーによる変形が起こらないことから、ベントナイトは飽和化より骨格構造を消失させ、粒状体としての性質(ダイレイタンシー特性)を消失する材料と捉えることができる。また図-4 中の軸差応力-ひずみ関係をみると、せん断途中から、軸差応力がほとんど変化せずに軸ひずみが進行していることから、通常の土質材料と同様に限界状態が存在すると思われる。

キーワード ベントナイト, 構成モデル, 不飽和

連絡先 〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 神戸大学都市安全研究センター・地盤環境リスク評価研究室 Tel:078(803)6029

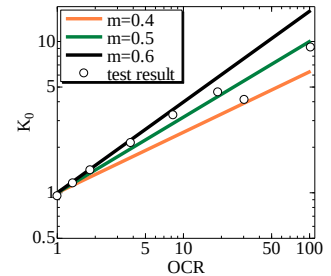


図-1 過圧密比-土圧係数

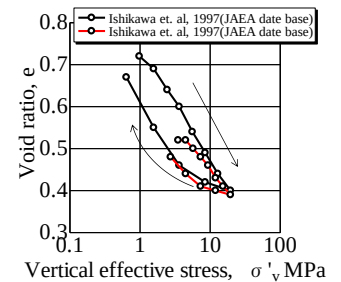


図-2 圧密試験結果

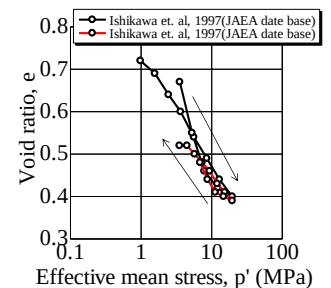


図-3 $e-\ln p'$

4. 膨潤特性

同様の見解を、雀ら⁵⁾の実験からも推測できる。雀らは三軸試験機を用いて、主応力を制御した状態で膨潤量試験と等方除荷試験を実施し、不飽和状態から吸水し、飽和状態に至ったベントナイト材料の間隙比は、初期状態や軸差応力に関係なく平均主応力のみで決まるとしている。

5. ベントナイト材料の構成モデルの構築

不飽和状態のベントナイトの力学挙動は非可逆的変形を含み、不飽和から飽和へ遷移するにつれて粒状体としての性質を消失していく。そして飽和時には見かけ上弾性的挙動を行うが、材料そのものが持つ塑性特性は保持しており、通常の土質材料と同様に限界状態が存在する。これらのことから、構成モデル化を考えた場合、弾塑性論の枠組みの中で定式化を考えるが妥当であり、飽和度上昇に伴う粒状性消失の過程をモデル化する必要がある。ここで、任意の飽和度における負のダイレイタンシーの表現式に EC モデル⁶⁾を適用すると、

$$de = -\frac{(\lambda - \kappa)}{M^{n_E}} \left(\frac{q}{p'} \right)^{(n_E - 1)} d \left(\frac{q}{p'} \right) \quad (3)$$

となる。ここで λ : 圧縮指数, κ : 膨潤指数, M : 限界応力比, n_E : 材料定数である。 $n_E = 1.0$ の時, CamClay モデルに帰着する。粒状性消失の過程をモデル化することを考えると、式(3)中の圧縮指数と膨潤指数の関係性は、

$$\kappa \approx \lambda \quad \text{when } S_r = 1.0 \quad (4) \quad , \quad \kappa < \lambda \quad \text{when } S_r < 1.0 \quad (5)$$

となる。本研究では式(4)(5)を満たした以下のような具体式を想定した。

$$\kappa = \kappa_0 - (\kappa_0 - \kappa_{sat}) Se^l \quad (6)$$

ここで、 Se : 有効飽和度, κ_0 : $Se = 0$ 時の膨張指数, κ_{sat} : 飽和時の膨張指数 ($\approx \lambda$), l : 粒状性消失を制御するパラメータである。例えば $\lambda = 0.125$, $\kappa_0 = 0.01$ を用いて式 (6)を描くと図.5 になる。不飽和降伏特性に Se -hardening モデル⁷⁾を適用し、不飽和時の正規圧密線、膨潤線、降伏関数は、

$$e = e_0 - \lambda \ln \frac{p'}{p'_c} \quad (7), \quad e = e_0 - \kappa \ln \frac{p'}{p'_c} \quad (8),$$

$$f(p, q, Se, \varepsilon_v^p) = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p'_c} + \frac{\lambda - \kappa}{(1 + e_0)M} \left(\frac{q}{p'} \right) - \varepsilon_v^p = 0 \quad (9),$$

$$p'_c = \zeta p'_{sat}, \quad \zeta = \exp \left[(1 - S_e)^n \ln a \right] \quad (10)$$

となる。ここで、 p'_c : 降伏時の平均有効主応力, p'_{sat} : 飽和時の降伏応力,

a, n : 材料パラメータである。図 6 に提案するモデルの状態曲面・膨潤壁の概念図を示す。今後は提案するモデルを有限要素プログラムに組み込み、ベントナイトの力学挙動の再現性を調べたい。

参考・引用文献 1) Y. Takayama, S. Tsurumi, A. Iizuka, K. Kawai, S. Ohno: An Interpretation of Mechanical Properties of Bentonite as a Non-linear Elastic Material, International Journal of GEOMATE, Vol.3, No.2, 357-362, 2012.12 2) 笹倉剛, 岬柳幹雄, 岡本道孝: ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得及び調査, 核燃料サイクル開発機構契約業務報告書, JNCTJ8400-2002-025, 2002 3) 石川博久, 石黒勝彦, 並河努, 菅野毅: 緩衝材の圧密特性, 動力炉・核燃料開発事業団研究開発報告書, PNC TN8410 97-051, 1997 4) 笹倉 剛, 岬柳 幹雄, 小林 一三, 岡本 道孝: ベントナイト変遷挙動のモデル化のためのデータ取得 II, 核燃料サイクル開発機構契約業務報告書, JNC TJ8400 2003-048, 2003 5) 崔紅斌, 孫徳安, 松岡元: 等方および異方応力状態でのベントナイトと砂との混合材の浸水変形特性, 土木学会論文集, Vol.62/No.3, pp.657-666, 2006 6) 大野進太郎, 飯塚敦, 太田秀樹: 非線形コントラクタンシー表現式を用いた土の弾塑性構成モデル, 応用力学論文集 vol.9, pp.407-414, 2006. 8 7) 大野進太郎, 河井克之, 橋伸也: 有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル, 土木学会論文集, vol.63/no.4, pp.1132-1141, 2007.12

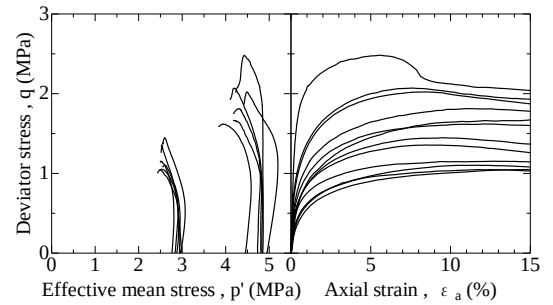


図.4 三軸非排水せん断試験

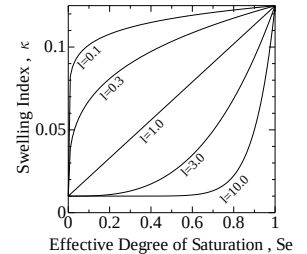


図.5 κ の飽和度変化

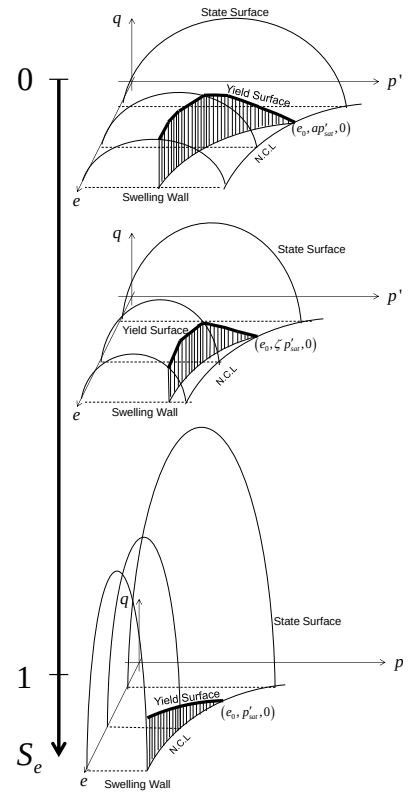


図.6 状態曲面・膨潤壁の概念図