

飽和・不飽和ベントナイトの圧密特性とそのモデル化

大林組 正会員 山本 修一, 正会員 志村 友行
 神戸大学大学院 正会員 加藤 正司, 学生会員 金 秉洙
 原環センター 正会員 林 秀郎, 正会員 朝野 英一

1. はじめに

放射性廃棄物地層処分における人工バリアの再冠水時やガス発生時の熱・水・応力・ガス (THMG) 連成挙動を数値解析により予測評価するためには, 人工バリア材料の飽和状態のみならず, 不飽和状態での特性を把握し適切に数値モデルに組み入れることが必要となる. 本研究では, 人工バリア材料の1つであるベントナイトの不飽和力学特性のモデル化を目的に, 圧密荷重とサクシオンを独立に制御できるオエドメータ型試験装置により, サクシオンの異なる不飽和ベントナイトの圧密試験を行い, 圧縮指数や膨潤指数のサクシオン依存性を検討し, Alonso et al. (1990)¹⁾が提案する不飽和土の圧密モデルの適用性を確認した.

2. 既往の不飽和ベントナイトの圧密モデル

Alonso et al. (1990)¹⁾はベントナイトのような膨潤性粘土の不飽和状態を包含する力学構成則 (BB モデル) を提案している. その中で, 不飽和圧密特性のモデルとして圧縮指数 (λ), 膨潤指数 (κ) のサクシオン (s) 依存性を以下の式で表現している.

$$\lambda(s) = \lambda_0 \{ (1-r) \exp(-\beta \cdot s) + r \} \quad (1)$$

$$\kappa(s) = \kappa_0 (1 + \alpha \cdot s) \quad (2)$$

ここに, λ_0 , κ_0 はそれぞれ飽和時の圧縮指数, 膨潤指数で, α , β , r は材料定数である.

このモデルは, 筆者らがその適用・高度化研究²⁾として進めている THMG 連成解析コード Code_Bright に導入されており, モデルの検証, 改善は研究課題の1つとなっている.

3. 不飽和ベントナイトの圧密試験

図-1 は本研究で用いた圧密荷重とサクシオンを独立に制御可能な圧密試験装置であり, 図-2 にはこの圧密試験装置により供試体に作用する全応力 σ , 間隙水圧 p_w , 間隙空気圧 p_a を模式的に示している. 供試体には一様な, 全応力 σ , 間隙水圧 p_w , 間隙空気圧 p_a が作用することになるので, 基底応力 σ_{net} (全応力から間隙空気圧を引いたもの) として, $\sigma_{net} = \sigma - p_a$, サクシオンとして, $s = p_a - p_w$ が作用する.

試験手順としては, まず, 所定のサクシオンが供試体に作用するよう, 供試体セット後, 下部から間隙水圧 (20 kPa 一定) を与えると同時に, 上部から

所定の間隙ガス圧 (一定) を与え, 吸排水条件および体積拘束条件で膨潤圧が一定となるまで吸水させた. 膨潤圧が一定となった後に, サクシオン一定のままで圧密荷重, 除荷試験を実施した (図-3 参照).

試験条件は以下の通りである.



図-1 サクシオン制御型圧密試験装置

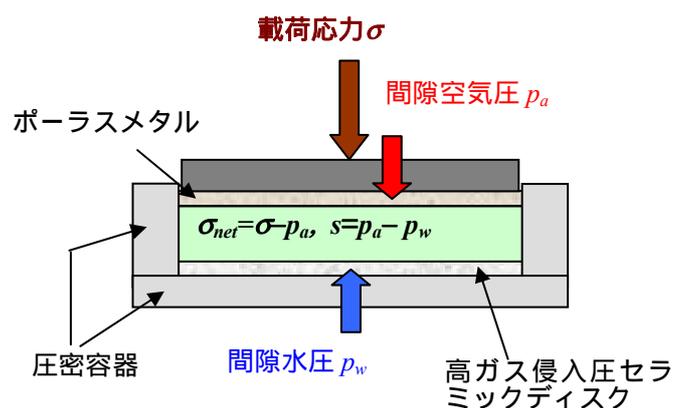


図-2 载荷条件と供試体に作用する鉛直基底応力 σ_{net} , サクシオン s

供試体：ベントナイト（クニゲル V1），直径 60mm，厚さ 5mm，初期乾燥密度 1.0g/cm³，初期含水比 5-8%

サクシオン（一定）：80kPa, 280kPa, 480kPa の 3 水準（図-3 参照）

荷重応力：初期膨潤応力 最大 690kPa まで 4 ~ 5 段階で荷重 初期膨潤応力相当まで 2 ~ 3 段階で除荷

4. 試験結果

サクシオン一定下での間隙比 e ~ 荷重応力 σ_{net} の関係を図-4 に示す．サクシオンの異なる 3 ケースとも通常の飽和ベントナイトと同様に次の特徴が見られる．

- ・ 所定のサクシオンとなるよう体積一定で湿潤させた初期状態（不飽和）では，やや過圧密状態にある
- ・ $e \sim \log(\sigma_{net})$ 関係は，荷重過程において圧密降伏後はやや下に凸ではあるがほぼ直線勾配となる
- ・ 除荷勾配もやや下に凸な直線となる

図-4の実験結果において直線近似できると考えられる区間を採用して最小二乗近似により圧縮指数と膨潤指数を求めた（図-5）．図-6 は図-5 により算定された圧縮指数，膨潤指数をサクシオンとの関係で示したもので，圧縮指数も膨潤指数もサクシオンが大きくなる飽和度の低いものほど小さくなる傾向が認められる．圧縮指数，膨潤指数の減少は体積弾性係数の増加を意味しており，圧縮ベントナイトも一般の粘土と同様に飽和度が低いほど体積弾性係数が大きくなることわかる．図中の実線は，実験値（プロット）を式(1)，(2)でフィッティングしたものであるが，実験結果をよくフィットできることから，不飽和ベントナイトの圧縮指数，膨潤指数は，Alonso et al.(1990)¹⁾の提案モデルを適用できることがわかる．

5. 今後の課題

今回のデータは材料および試験点数が限定的であり，モデルの適用性，信頼性の向上には試験データの拡充が必要である．また，もう一つの重要な特性である，膨潤変形特性に代表される水分量の変化による体積変化特性のモデル化については，小峯の膨潤評価式との対比に基づく BB モデルの妥当性検討が試みられている³⁾が，サクシオンを制御した湿潤，乾燥プロセスの試験データに基づく検証が課題である．

本報告は経済産業省からの委託による「地層処分技術調査等 人工バリア長期性能評価技術開発」の成果の一部である．

参考文献

- 1) E. Alonso, A. Gens, A. Josa(1990) : A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, 40, No.3.
- 2) 山本・中岡・納多・E.Alonso (2007) : 人工バリアシステムの熱・水・応力・ガス連成解析, 土木学会第 6 2 回年次学術講演会
- 3) 山本・小峯 (2008) : THM 連成解析におけるベントナイトの膨潤特性の構成モデルに関する一考察, 土木学会第 6 3 回年次学術講演会

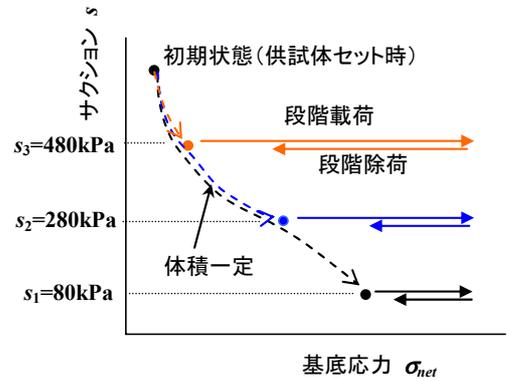


図-3 サクシオン一定圧密試験の荷重経路

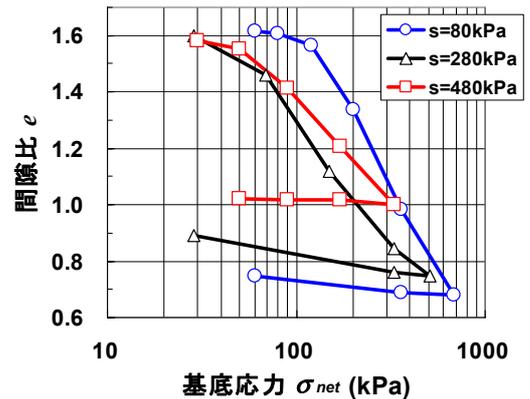


図-4 サクシオン一定下での $e \sim \log \sigma_{net}$ 関係

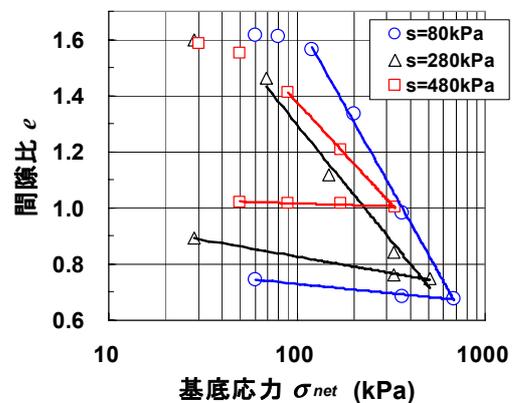


図-5 圧縮指数，膨潤指数の算定

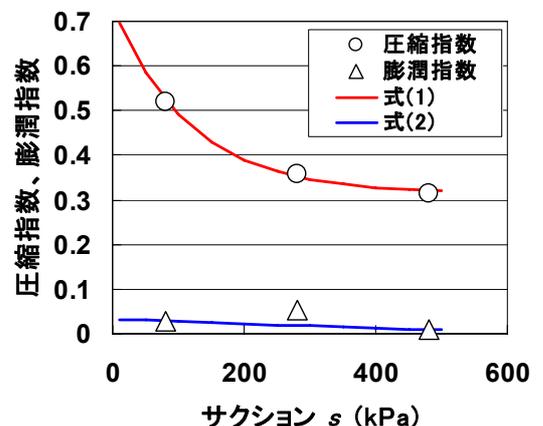


図-6 圧縮指数，膨潤指数のサクシオン依存性