TRU 廃棄物処分におけるガス移行連成挙動評価手法の開発(その4) -ベントナイト・砂混合材料の不飽和圧密特性とそのモデル化-

(株)大林組 正会員 〇志村 友行,山本 修一(公財)原環センター 正会員 古賀 和正,大和田 仁足利工業大学 正会員 西村 友良

1. はじめに

TRU 廃棄物処分場における施設閉鎖後の人工バリアの再冠水時やガス発生時の施設の挙動評価のためには、 ベントナイト系人工バリアの力学的・水理学的な不飽和特性を把握し、適切に評価モデルに組み込むことが必 要である.(公財)原環センターでは、ベントナイト系人工バリアに関して、各種材料特性のサクション依存 性に関する一連の研究を進めてきている^{1),2),3)}.本研究では、TRU 廃棄物処分場の人工バリアの候補材料で あるベントナイト・ケイ砂混合材料⁴⁾に対して、サクション制御式の圧密試験装置を用いた圧密試験を実施 し、圧縮指数、膨潤指数のサクション依存性について討を実施した.また、試験結果に基づき、既往の不飽和 土の圧密モデルの適用性を確認するとともにモデルパラメータの評価を実施した.

2. ベントナイト・ケイ砂混合材料のサクション制御圧密試験

本研究で用いた圧密試験装置は、図-1に試験概念を示すように、載荷応力 σ 、間隙水圧 p_w 、間隙空気圧 p_a を独立に制御することが可能であり、従って、供試体のネット応力(σ_{net})として $\sigma_{net} = \sigma - p_a$ 、サクション(s)として $s = p_a - p_w$ を制御することができる.

供試体は Na ベントナイト (クニゲル V1) とケイ砂 (3 号および 5 号を重量比 1:1 で混合)を乾燥重量で 7:3,初期含水比 17%で混合し,乾燥密度 1.6 Mg/m³に圧縮成形したもの (TRU 廃棄物処分場人工バリアの底部緩衝材候補材料⁴⁾)を用いた.なお,供試体寸法は直径 6cm,高さ 1cm である.

試験手順としては、まず、供試体をセットした後、下部から間隙水 $E(p_w = t)$ を与えると同時に、上部から所定の間隙空気 $E(p_a)$ を



図-1 載荷条件と供試体に作用する ネット応力 *o_{net}*, サクション *s*

与え(この時のサクションは $s = p_a - p_w$ となる),吸排水条件,体積拘束条件のもとで吸排水が止まり平衡状態となるまで静置した.その後,サクションを一定に維持した状態で圧密載荷,除荷試験を実施した.荷重ステップは,圧密収縮過程でのネット応力として,0.1,0.2,0.45,1.0,1.5,3.0 MPaの6段階,膨潤(除荷)過程でのネット応力として,3.0,1.5,1.0,0.5 MPaの4段階を設定した.試験条件としてのサクションは,s=400 kPaとs=900 kPaの2水準を設定した.なお、既往の飽和過程における水分特性曲線³⁾に基づけば,サクションs=400 kPa,900 kPaは,飽和度はそれぞれ92%,83%に対応する。

3. 試験結果

異なるサクション条件下でのネット応力 σ_{net} と間隙比 eの関係を図-2に示す.ネット応力を 3.0MPa まで増加させた場合の間隙比は、サクション 900 kPa の場合、初期間隙比に比べて 0.249 の減少、サクション 400 kPa の場合、初期間隙比に比べて 0.338 の減少を示し、体積剛性に対してサクションの効果が見られた. 試験結果において直線近似が可能であると考えらえる区間を用いて、不飽和状態の圧縮指数(λ)、膨潤指数(κ)を算定した結果を図-3に示す. 圧縮指数はサクション 400 kPa の場合に 0.083 であったが、サクションが 900 kPa に増大すると 0.065 となり、また、膨潤指数は、サクション 400 kPa の場合の 0.009 に対して、サクション 900 kPa では 0.007 となった. 図-4 のプロットは、図-3 より求められた圧縮指数、膨潤指数とサクションの関係を示したものである. なお、図中のサクションs = 0(飽和)における膨潤指数、圧縮指数は、寸法を除いて同一の供試体仕様で実施された既往の試験結果⁵⁾より引用した値である. 図より、サクションが大きい(飽和の程度が低い)ほど、圧縮指数、膨潤指数は小さくなる、すなわち体積弾性係数が大きくなる傾向が認められた.

キーワード ベントナイト,不飽和圧密変形,サクション制御試験,放射性廃棄物処分 連絡先〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 ㈱大林組 原子力環境技術部 TEL 03-5769-1309

4. 不飽和特性のモデル化

ベントナイト系材料の圧縮, 膨潤特性のサクション依存性を表 現可能なモデルとしては, 例えば, Alonso らが提案する膨潤性 粘土の不飽和状態を包含する力学構成則(BB モデル: Barcelona Basic model)があげられ, BB モデルにおいて, 圧縮指数(λ), 膨潤指数(κ)のサクション(s)依存性は次式で表されている⁶).

 $\lambda(s) = \lambda_0 \{ (1 - \gamma) \exp(-\beta \cdot s) + \gamma \} \qquad \cdots (1)$ $\kappa(s) = \kappa_0 (1 + \alpha \cdot s) \qquad \cdots (2)$

 λ_0, κ_0 : 飽和時の圧縮指数, 膨潤指数, α, β, γ : 材料定数 BB モデルでは, 膨潤指数のサクション依存性は線形関係で表現 されているが (式(2)), 図-4 において膨潤指数は線形性が認め られない. そこで, 膨潤指数についても, 圧縮指数と同様の指数 関数 (式(3)) により近似することを試みた.

 $\kappa(s) = \kappa_0\{(1 - \alpha_1)\exp\left(-\alpha_2 \cdot s\right) + \alpha_1\} \qquad \cdots (3)$

 κ_0 : 飽和時の膨潤指数, α_1 , α_2 : 材料定数

図-4中の実線(青線,赤線)は、圧縮指数と膨潤指数を式(1), (3)によりフィッティングした結果である(材料定数は図中に記載). 圧縮指数,膨潤指数ともに,試験結果と良好な一致を得る ことができる結果となった. 図中の赤破線は,膨潤指数を式(2) の直線関係で最小二乗フィットした結果であるが,試験結果の非 線形性に起因して,整合度は低くなっている.

5. まとめと今後の課題

ベントナイト・ケイ砂混合材料のサクション一定下での不飽和 圧密試験を実施し, 圧密特性のサクション依存性について検討し た.試験の結果, 微細なモンモリロナイト鉱物を主成分とするベ ントナイト系材料の圧密特性に関して, ネット応力と間隙比の関 係はサクション(供試体の飽和状態)により異なり, サクション が大きい(飽和の程度が低い)ほど, 圧縮指数, 膨潤指数は小さ くなる, すなわち体積弾性係数が大きくなる傾向が認められた. 材料特性の信頼性を高め, 精度の良い評価を実現するためには, 一層のデータ蓄積が課題である.また, 試験より取得したデータ やパラメータを用いた, 再冠水過程やガス移行過程のモデル化手 法の検証についても実施していく必要があると考える.

本報告は経済産業省資源エネルギー庁からの委託事業である 平成 27 年度地層処分技術調査等事業(TRU 廃棄物処理・処分 技術高度化開発)の成果の一部である.

参考文献

- 1) 山本他(2009): 飽和・不飽和ベントナイトの圧密特性とそのモデル化, 土木学会第 64 回年次学術講演会, CS5-40.
- 山本他(2012):不飽和ベントナイトのせん断強度特性と水分特性,土 木学会第67回年次学術講演会,CS13-007.
- 山本,古賀,大和田(2015):ベントナイト・砂混合材料のヒステリシ ス水分特性とサクション変化に伴う膨潤・収縮変形特性,土木学会第 70回年次学術講演会,CS12-29.
- 4) 電気事業連合会・核燃料サイクル開発機構(2005): TRU 廃棄物処分技術 検討書-第2次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ-.
- 5) 高治一彦,鈴木英明(1999):緩衝材の静的力学特性(研究報告),核燃料サイクル機構, JNC TN8400 99-041.
- 6) Alonso, E. et al. (1990): A constitutive model for partially saturated soils, Géotechnique, 40, No.3, pp.405-430.



図-2 異なるサクション条件下での $e \sim \sigma_{net}$ 関係







図-4 圧縮指数, 膨潤指数のサクション依存性 と既往モデルによるフィッティング