サクション制御膨潤試験に基づく圧縮ベントナイトの膨潤変形モデル

大林組	正会員	山本	修一
足利工業大学	正会員	西村	友良

1.はじめに

国内外の多くの放射性廃棄物処分概念において,低透水性と自己シール性を有する圧縮ベントナイトが人工 バリア材の1つとして考えられている¹⁾.ベントナイトは吸水膨潤する特性があり,処分場閉鎖後,地下水の 侵入によりベントナイト系バリアは飽和度の上昇とサクションの低下に伴い,膨潤変形と膨潤圧の発達が起こ る.その後,廃棄体などからガスが発生する場合には,逆に,飽和度の低下とサクションの増加に伴う体積収 縮や膨潤圧の低下が予想される.このような現象も考慮した上で閉鎖後の処分場の過渡的な挙動を予測評価す ることが施設の性能評価や安全評価の状態設定に求められる.再冠水時やガス発生時の熱・水・応力・ガス連 成挙動を数値解析により予測評価するためには,ベントナイト系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構成則として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,載荷重とサクションを独立に制御できるオエドメータ型試験装置を用い,圧縮ベントナイトの サクションを制御した膨潤変形試験を行い, Alonso et al. (1990)²⁾が提案する膨潤変形モデルの適用性につい て検討を行った.

2.サクション制御膨潤変形試験

図-1 は本研究で用いた,鉛直荷重と サクションを独立に制御可能な圧密 試験装置であり,図-2 にはこの試験装 置により供試体に作用する鉛直方向 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.サクションの 制御は加圧板法³⁾であり,定常状態に おいては供試体には一様な鉛直全応 力 σ ,間隙水圧 p_w ,間隙空気圧 p_a が 作用することになり,基底応力(σ_{net}) として, $\sigma_{net}=\sigma_p_a$,サクション(s) として, $s=p_a-p_w$ が作用する.

試料には Na 型ベントナイト(クニゲル V1)を自然 含水比で静的に締め固めたもの(乾燥密度 1.0Mg/m³) を用いた.供試体寸法は直径 6cm,高さ 1cm である. 試験は,一定の鉛直基底応力(σ_{net} =20kPa)が維持さ れるように載荷すると同時に,加圧板法で所定のサク ションを作用させ,吸排水と変形が停止し定常釣合状 態に達したら次段階のサクションを作用させること を繰り返して,サクションと膨潤変形の関係を計測し た.今回作用させたサクションは 450 → 400 → 300 → 200 → 100 → 0(kPa)であり,一定拘束応力下 における完全飽和(サクションゼロ)までの湿潤過 程での膨潤変形挙動を試験対象とした.





図-1 サクション制御膨潤試験装置



図-2 試験の載荷条件と供試体に作用する鉛直基底応 カ*_{Gnet}*, サクション *s*

キーワード ベントナイト, 膨潤変形, サクション, 構成則, 放射性廃棄物処分, 人工バリア 連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 ㈱大林組 低レベル放射性廃棄物処分プロジェクト TEL 03-5769-1141

3.膨潤変形モデル

Alonso et al. (1990)²⁾は,ベントナイトのような膨潤性 粘土の飽和・不飽和での弾塑性挙動を表現するために修正カ ムクレイモデルを拡張した構成則(Barcelona Basic Model: BBモデル)を提案した.その後,このモデルは欧 州を中心に放射性廃棄物処分の地下研究所でのベントナイ ト系人工バリア挙動試験のモデリングに多数使用されてき た^{4),5)}.この BBモデルではサクションの変化に伴う間隙比 の変化を次式で表している.これは,飽和過程(サクション 減少過程)においてはいわゆる水和による膨潤変形を表す.

$$de = -\kappa_s \frac{ds}{s + p_{atm}} \tag{1}$$

$$\kappa_{s} = \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p}{p_{ref}} \right) \exp(\alpha_{ss} \cdot s)$$
(2)

ここに, e は間隙比, s はサクション, p は平均基底応力, p_{atm} は大気圧, κ_{s0} , α_{sp} , α_{ss} , p_{ref} は材料定数である.

4.試験結果と膨潤変形モデルの考察

式(2)では κ_s は平均基底応力とサクションに依存すると しているが,もしサクション依存性が無視できる(α_{ss} =0) とすれば,上記の試験のようなp一定下では κ_s は定数とな るので間隙比とサクションの関係は($s + p_{atm}$)を対数軸にと ればeとの関係が線形となる(図-3).

そこで,今回のサクション制御膨潤試験結果を $e \sim \ln(s+p_{atm})$ 関係で整理したのが図-4 である.図には最小二乗近似直線とその傾き(κ_s)も示した.若干バラツキは見られるが, $e \sim \ln(s+p_{atm})$ 関係は直線で近似されることがわかる. 今後 様々な密度のベントナイトや様々な拘束応力下での試



図-3 BB モデルにおける膨潤変形概念 ($\alpha_{ss} = 0 と単純化した場合)$



図-4 試験結果:サクションと間隙比の関係

験を行って確認していく必要はあるが, $e \sim \ln(s+p_{atm})$ 関係は直線近似できる可能性があり,その場合には,サ クションを制御しない通常の膨潤変形試験や,あるいは実験を実施しなくても Komine & Ogata (2003) 60 の膨 潤評価式からでもモデルパラメータ κ_{s0} , α_{sp} , p_{ref} を同定できる 70 ので,モデルの実用性は格段に高くなる.

なお, 飽和後の乾燥過程では湿潤過程とは異なる経路で収縮変形する可能性が高く, 飽和後にサクションを 制御する実験を行って乾燥過程での特性を把握しモデルを検証することも今後の課題である.

参考文献

- 1) 経済産業省資源エネルギー庁(2010):諸外国における高レベル放射性廃棄物の処分について.
- 2) Alonso, E. et al. (1990): A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, 40, No.3, pp.405-430.
- 3) 地盤工学会編(2004): 第7章土の保水性試験(JGS0151-2000), 土質試験の方法と解説, pp.118-135.
- 4) Alonso, E. et al. (2006): Mechanisms of gas transport in clay barriers, *Journal of Iberian Geology* 32 (2), 175-196.
- 5) Gens, A. et al. (2009): A full-scale in situ heating test for high-level nuclear waste disposal: observations, analysis and interpretation, *Géotechnique*, 59, No. 4, 377–399.
- 6) Komine, H. & Ogata, N. (2003): New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, No. 2, pp.460-475.
- 7) 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 63 回年次学術講演会, CS05-19.