

サクシオン制御変形試験に基づく圧縮ベントナイトの膨潤・収縮モデル

大 林 組 正会員 ○山本 修一
大 林 組 正会員 佐藤 伸
足利工業大学 正会員 西村 友良

1. はじめに

放射性廃棄物処分におけるベントナイト系人工バリアは、処分場閉鎖後、地下水の侵入により飽和度の上昇とサクシオンの低下に伴い、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オンの増加に伴う体積収縮や膨潤圧の低下が予想される。処分場閉鎖後のベントナイト系人工バリアの挙動評価には、このような飽和度（あるいはサクシオン）の変化に伴う変形特性を土の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、載荷重とサクシオ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オン制御により吸水膨潤・排水収縮変形試験を行い、Alonso et al. (1990)¹⁾が提案する膨潤・収縮モデルの適用性について検討を行った。

2. サクシオン制御膨潤・収縮変形試験

本研究では、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 を独立に制御できる圧密試験装置²⁾を用いて、一定鉛直基底応力（ $\sigma_{net}=\sigma-p_a$ ）下でサクシオン（ $s=p_a-p_w$ ）を載荷、除荷する試験を行った。

試料にはNa型ベントナイト（クニゲルV1）を自然含水比で圧縮成形したもの（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。試験ケースとして鉛直基底応力とサクシオンの組み合わせを表-1に示す。試験は、吸排水と変形が停止し釣合状態に達したら次段階のサクシオンを作用させることを繰り返して、供試体の体積変化とサクシオンとの関係を計測した。

3. 膨潤変形モデル

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。BBモデルではサクシオ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（サクシオン減少過程）においてはいわゆる膨潤変形を表す。

$$de = -\kappa_s \frac{ds}{s + p_{atm}}, \quad \kappa_s = \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p}{p_{ref}} \right) \exp(\alpha_{ss} \cdot s) \quad (1)$$

ここに、 e は間隙比、 s はサクシオン、 p は平均基底応力、 p_{atm} は大気圧(100kPa)、 κ_{s0} 、 α_{sp} 、 α_{ss} 、 p_{ref} は材料定数である。なお、圧縮ベントナイトの膨潤過程では κ_s のサクシオン依存性が無視できる（ $\alpha_{ss}=0$ ）可能性が既に示されており²⁾、その場合には、膨潤体積ひずみ増分 $d\epsilon_s$ （膨張が正）は次式で表される（ e_0 は初期間隙比）。

$$d\epsilon_s = -\frac{\kappa_{s0}}{1+e_0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p}{p_{ref}} \right) \frac{ds}{s + p_{atm}} \quad (2)$$

従って、本試験のような p 一定下では次式が得られる（ s_0 は初期サクシオン）。

$$\epsilon_s = \frac{\kappa_{s0}}{1+e_0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{p}{p_{ref}} \right) \cdot \ln \frac{s + p_{atm}}{s_0 + p_{atm}} \quad (3)$$

また、 $\alpha_{ss}=0$ 、 p 一定条件では式(1)において κ_s は定数となるので、間隙比 e とサクシオン s の関係は（ $s+p_{atm}$ ）を対数軸にとれば直線となる。

表-1 実験条件

試料	鉛直基底応力 (kPa)	サクシオン(kPa)
A	20	初期→450→400→300→200→100→0 (吸水膨潤過程) → 0→100→200→300→400(排水収縮過程)
B	20	初期→0(飽和過程) → 0→100→200→300→400(排水収縮過程)
C	30	初期→450→400→300→200→100→0 (吸水膨潤過程)

キーワード ベントナイト, 膨潤変形, サクシオン, 不飽和土, 構成則, 放射性廃棄物処分

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 (株)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

κ_s のサクシオン依存性が無視できる ($\alpha_{ss}=0$) 場合, 式(3)から明らかなように, 拘束応力一定下での通常の膨潤変形試験により拘束応力 p と飽和時 ($s=0$) の膨潤体積ひずみ $\varepsilon_s (= \varepsilon_{smax})$ との関係を 3 水準以上取得すればモデルパラメータ (κ_{s0} , α_{sp} , p_{ref}) を算定可能である. あるいは, Komine et al.(2003)の膨潤評価式³⁾に基づいて算定される拘束応力 p と飽和時の膨潤体積ひずみ ε_{smax} との関係をを用いれば, 実験を行うことなくモデルパラメータを決定することも可能であるため, モデルの実用性は格段に高くなる.

4. 試験結果と考察

図-1 は鉛直基底応力 20kPa 一定で行った試験について, 吸水膨潤過程と排水収縮過程の全結果データを $e \sim \ln(s+p_{atm})$ 関係で整理したものである. 排水収縮過程において $s=200 \sim 300$ kPa 付近で間隙比が膨潤過程に比べやや小さくなる傾向が見られるものの, 時ステップの $s=400$ kPa では膨潤過程とほぼ同じ間隙比に戻っており, 吸水膨潤過程, 排水収縮過程ともに図中の回帰直線でおおむね近似できることがわかる. 図より, 第一近似として, 以下が言える.

- ・ 平均基底応力一定下では吸水膨潤過程も飽和後の排水収縮過程も $e \sim \ln(s+p_{atm})$ 関係は直線となる
- ・ $e \sim \ln(s+p_{atm})$ 関係は, 吸水膨潤過程と飽和後の排水収縮過程で同一経路を辿る.

図-2 は鉛直基底応力 30kPa の吸水膨潤過程の結果を 20kPa の場合と比較したものである. 鉛直基底応力 30kPa の場合も $e \sim \ln(s+p_{atm})$ 関係が直線近似できること, また, その傾き (κ_s) は拘束応力の大きい鉛直基底応力 30kPa の場合の方が小さくなること (κ_s の p 依存性) がわかる.

図-3 は, 実験で用いた圧縮ベントナイトに Komine et al. (2003)の膨潤評価式³⁾を適用して得られた, 飽和時の膨潤体積ひずみ ε_{smax} と拘束基底応力 p との関係を実験結果と比較してプロットしたものである. ここに, 膨潤評価式においてベントナイト中のモンモリロナイト含有率を 52%と仮定した. 図中の実線は式(3)で示される BB モデル (飽和時 ($s=0$)) を示しているが, 実験結果, Komine らの膨潤評価式とよく一致するのがわかる.

5. まとめ

サクシオン制御変形試験に基づき, 圧縮ベントナイトの膨潤変形と飽和後の排水収縮変形はともに簡略化した BB モデル (式(2)) により表現可能であること, 従って, そのモデルパラメータは通常の膨潤変形試験あるいは Komine et al.(2003)の膨潤評価式³⁾から比較的容易に算定可能であることを示した.

参考文献

- 1) Alonso, E. et al. (1990): A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, 40, No.3, pp.405-430.
- 2) 山本, 西村(2013): サクシオ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, 土木学会第 68 回年次学術講演会, CS11-13.
- 3) Komine, H. & Ogata, N. (2003): New equations for swelling characteristics of bentonite-based buffer materials. *Canadian Geotechnical Journal*, 40, No. 2, pp.460-475.

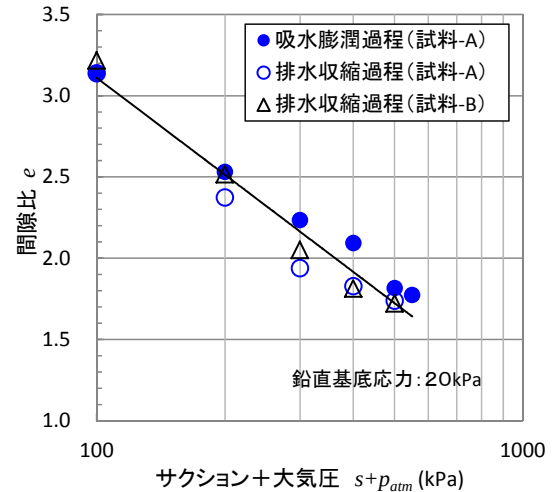


図-1 サクシオン変化に伴う間隙比の変化

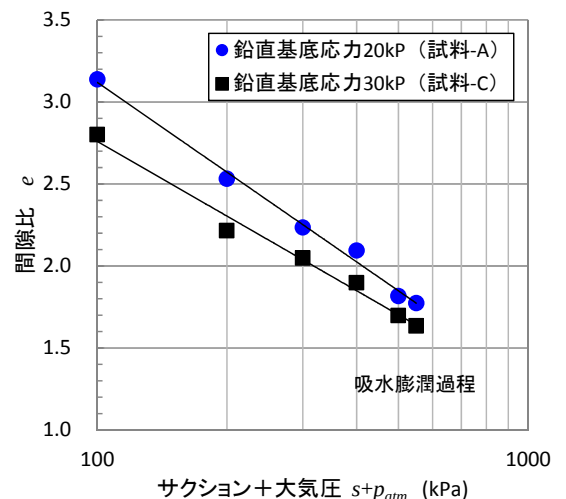


図-2 膨潤変形への鉛直基底応力の影響

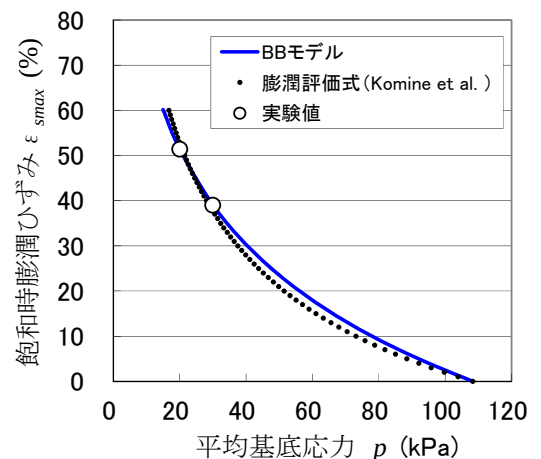


図-3 飽和時の膨潤体積ひずみ ε_{smax} と拘束基底応力 p との関係 (2つのモデルおよび実験値の比較)