

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・砂混合材料のヒステリシス水分特性とサクシオン変化に伴う膨潤・収縮変形特性

(株)大林組 正会員 ○山本 修一
(公財)原環センター 正会員 古賀 和正
同 上 正会員 大和田 仁

1. はじめに

TRU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圧の発達と膨潤変形が起こる。その後、廃棄体などからガスが発生する場合には、逆に、飽和度の低下に伴う体積収縮や膨潤圧の低下が予想される。従って、処分場閉鎖後の処分システムの挙動や状態を評価するにはベントナイト系人工バリア材の力学的・水理学的な不飽和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、載荷重とサクシオンを独立に制御できる圧密試験装置を用い、TRU廃棄物処分の人工バリアにおける底部緩衝材候補材料であるベントナイト・ケイ砂混合材料に対して吸水飽和過程および飽和後の脱水過程における水分特性並びに変形特性を取得し、既往モデルの適用性を考察するとともにモデルパラメータを評価した。

2. サクシオン制御試験 (水分特性, 変形特性試験)

本研究では、供試体に作用する鉛直方向全応力 σ_v 、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¹⁾を用いて、一定鉛直基底応力($\sigma_{vnet}=\sigma_v-p_a$)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) とケイ砂 (3 号および 5 号) を乾燥重量比で 7:3、含水比 17.0%で混合したものを乾燥密度 1.6Mg/m^3 に圧縮成形したもの (TRU 廃棄物処分の人工バリアにおける底部緩衝材候補材料) 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。水分特性試験ではなるべく供試体に変形しないよう平衡膨潤圧に近い鉛直基底応力 ($\sigma_{vnet}=0.4\text{MPa}$) 下で行った。また、飽和度の評価精度を高めるために作用サクシオンごとに別の供試体で試験を行い、吸排水が停止して釣合状態に達した後に供試体を解体し試料全体の含水比から飽和度を算定した。一方、変形特性試験では、吸排水および変形が停止し釣合状態に達した後に次段階のサクシオンを作用させることを繰り返して、サクシオンと供試体の体積変化との関係を計測した。

表-1 実験条件

試験	鉛直基底応力 (MPa)	サクシオン (MPa)
水分特性 (未飽和吸水過程)	0.4	初期→1.3, 0.8, 0.5, 0.3, 0.1, 0.01
水分特性 (飽和後脱水過程)	0.4	初期→飽和(0.01)→0.1, 0.3, 0.5, 0.8, 1.3
膨潤変形 (未飽和吸水過程)	0.2 0.4	初期→1.3→0.8→0.5→0.3→0.1→0.01
収縮変形 (飽和後脱水過程)	0.2 0.4	初期→飽和(0.01)→0.1→0.3→0.5→0.8→1.3

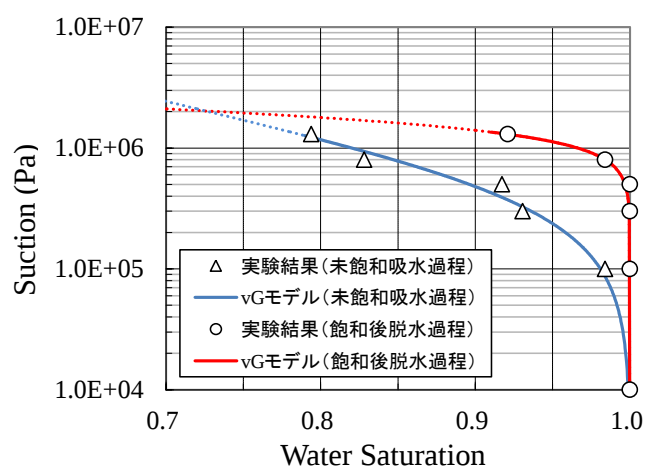


図-1 水分特性試験結果

3. ヒステリシス水分特性

図-1 に未飽和吸水過程および飽和後脱水過程の水分特性試験結果を示す。飽和後の脱水過程のサクシオンは吸水過程に比して相当高くなっており水分特性のヒステリシスが明瞭である。図には van Genuchten (vG) モデル¹⁾でのフィッティング結果を実線で示しているが、vG モデルで実験結果をよく表すことができることが

キーワード ベントナイト, 膨潤変形, 水分特性, 不飽和土, 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 03-5769-1307

わかる (vG モデルパラメータを表-2 に示す). 処分場閉鎖後の再冠水時のような未飽和吸水過程と飽和後のガス発生・移行過程のような飽和後脱水過程とでは水分特性 (パラメータ) を使い分けて挙動評価する必要があること, また, このパラメータは今回の実験の範囲 (サクシオン 0~1.3MPa) でのみ適用可能であることに注意を要する.

表-2 水分特性モデルパラメータ

近似モデル	パラメータ	パラメータ値	
		未飽和吸水過程	飽和後脱水過程
van Genuchten	適用範囲	飽和度 > 0.79	飽和度 > 0.92
	P_0 (MPa)	0.613	2.39
	n	1.24	3.45
	S_{lr}	0.00	0.00
	S_{ls}	1.00	1.00

4. サクシオン変化に伴う変形特性

吸水膨潤過程および脱水収縮過程の試験結果をサクシオン ($s + p_{atm}$) と間隙比 (e) の関係でプロットして図-2 に示す (p_{atm} は大気圧). 全てのケースについて $e \sim \ln(s + p_{atm})$ 関係が直線近似できることがわかる. このことは次式で示される Alonso et al. (1990)³⁾ の膨潤変形モデル (サクシオン変化 ds による間隙比変化 de) において $\alpha_{ss} = 0$ とした場合 ($e \sim \ln(s + p_{atm})$ の傾き κ_s がサクシオンには依存しない) と整合する.

$$de = -\kappa_s \frac{ds}{s + p_{atm}} \quad (1), \quad \kappa_s = \kappa_{s0} \left(1 + \alpha_{sp} \ln \frac{\sigma_{net}}{p_{ref}} \right) \exp(\alpha_{ss} \cdot s) \quad (2)$$

ここに, e は間隙比, s はサクシオン, σ_{net} 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.

そこで, 吸水膨潤過程および脱水収縮過程それぞれに対し, 下記の方法で上記膨潤変形モデルパラメータを求めた. 結果を表-3 に示す.

- ・前提条件として, $\alpha_{ss} = 0$, $p_{ref} = p_{atm}$
- ・側方応力に Jaky 式⁴⁾を適用して,
 $\sigma_{net} = \{\sigma_{vnet} + 2(1 - \sin \phi')\sigma_{vnet}\} / 3$, ここに, $\phi' = 16.6^\circ$ ⁵⁾
- ・以上より, 鉛直基底応力 σ_{vnet} の異なる 2 組の実験データ (κ_s , σ_{net}) を用いて式(2)の連立方程式を解いて未知パラメータ (κ_{s0} , α_{sp}) を求める.

5. まとめ

底部緩衝材候補材料であるベントナイト混合土の水分特性

は吸水飽和過程と飽和後の脱水過程で大きく異なること, 両過程ともに van Genuchten モデル¹⁾でよく近似できることを示した. また, サクシオン (飽和度) 変化に起因する変形特性も吸水膨潤過程と飽和後の脱水収縮過程とでは異なるが, 両過程ともに Alonso et al. (1990)³⁾ の膨潤変形モデルでよく近似できることを示した.

本報告は経済産業省資源エネルギー庁からの委託により行った平成 25~26 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, 西村: 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(2013).
- 2) van Genuchten M.Th: A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil, Soil Sci. Sm. J., vol.44, No.5, pp.892-898(1980).
- 3) Alonso, E. et al.: A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique*, 40, No.3, pp.405-430 (1990).
- 4) Jaky, J.: *Talajmechanika* (Soil mechanics in Hungarian), J.Hungarian Arch. & Eng., Budapest, pp. 355-358 (1944).
- 5) 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性; 地層処分研究開発第 2 次取りまとめ, 分冊 2, 地層処分の工学技術 pp.IV-98(1999).

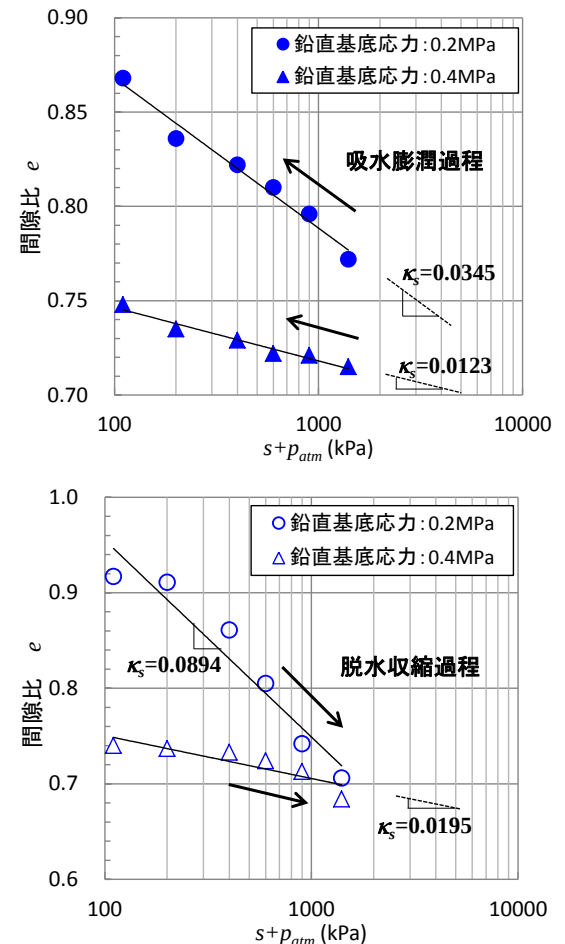


図-2 サクシオン変化に伴う変形特性

表-3 膨潤変形モデルパラメータ

過程	α_{ss}	p_{ref} (kPa)	α_{sp}	κ_{s0}
吸水膨潤	0	100	-0.689	0.052
脱水収縮	0	100	-0.714	0.136