

飽和過程における緩衝材の水分特性曲線推定の試み

(独) 日本原子力研究開発機構 正会員 ○今井 久
 同上 九石正美
 同上 正会員 鈴木英明, 藤田朝雄
 ハザマ 正会員 山下 亮

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の処分初期における緩衝材は, 周辺岩盤からの地下水供給により緩衝材の外周より廃棄体に向かい飽和する. この飽和挙動はオーバーパックの耐腐食性能の評価に必要となる. 緩衝材の飽和挙動予測の精度向上には緩衝材の透水係数とともに緩衝材が水分を保持・吸収する特性を示す水分特性曲線の把握が必要となる. 緩衝材の水分特性曲線の測定事例は少なく, クニゲル V1 を用いた緩衝材 (ベントナイト・砂混合体) の解析では多くが鈴木ら¹⁾の測定結果を参考に設定されている. この測定はサイクロメータ (psychrometer) により気液平衡状態の相対湿度測定からサクシオンを推定するもので, 含まれる粘土鉱物の影響を受け大きなサクシオン値をとり, 固結試料と未固結な粉末状試料でほぼ同じサクシオン値を示す. 本来, 固結試料ほどサクシオンが大きく吸水性が高く, 高飽和度においては比較的大きな間隙の影響を評価する必要がある. さらに, 対象とする現象や時間スケールによっても適用すべき水分特性曲線は異なる²⁾と考えられている. そこで, 水銀圧入による緩衝材間隙の細孔径分布測定により間隙の水分特性曲線への影響を把握するとともに, 1次元浸潤試験により浸潤過程の水分特性曲線の推定方法を提示した.

2. 水銀圧入による間隙径分布からの水分特性曲線の推定

緩衝材への地下水浸潤時の緩衝材内水分の全ポテンシャル ϕ_T は(1)式となる. サイクロメータでの測定は, 主に浸透ポテンシャルを測定し, 間隙形状は反映しない. そこで 2種類の緩衝材試料 (クニゲル V1 70wt%, ケイ砂 30wt%, 試料 No.5:

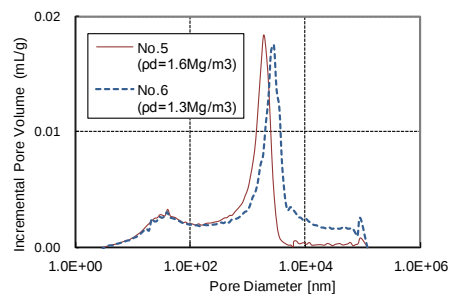


図-1 細孔径分布

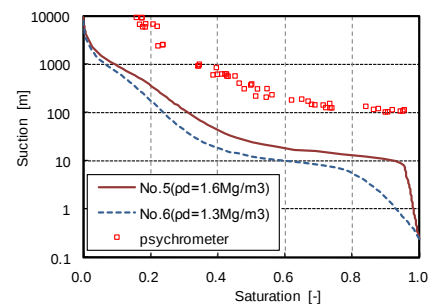


図-2 推定された水分特性曲線

乾燥密度 $\rho_d = 1.6 \text{ Mg/m}^3$, 試料 No.6:1.3

$\rho_d = 1.3 \text{ Mg/m}^3$) に対し水銀圧入³⁾により細孔径を測定, (2)式よりマトリックポテンシャル (水の表面張力 $\sigma = 72 \text{ mN/m}^2$, 水の接触角 $\theta = 8^\circ$) による水分特性曲線を推定⁴⁾した.

$$\phi_T = \phi_g + \phi_o + \phi_m + \phi_a \quad (1)$$

$$P = \frac{2\sigma \cos \theta}{R} \quad (2)$$

ここで, ϕ_g : 重力ポテンシャル, ϕ_o : 浸透ポテンシャル, ϕ_m : マトリックポテンシャル, ϕ_a : 空気圧ポテンシャル, R : 細孔半径, σ : 水銀の表面張力 (480 mN/m^2), θ : 水銀の接触角 (140°), P : 圧入圧力

測定結果として, 細孔径分布 (図-1), 水分特性曲線 (図-2) を示す. 水分特性曲線にはサイクロメータによる測定値も合わせてプロットしている. 飽和度 0.8 以上ではサイクロメータでの測定値は推定されたマトリックポテンシャル値の約 10 倍の値となっている. 試料 No.5 のサクシオンは試料 No.6 に対して大きなサクシオン値をとり, これは密度が高いと間隙が小さくサクシオンも大きくなるという一般に想定される傾向と整合し, 細孔径分布からのマトリックポテンシャルによる水分特性曲線を推定する方法の適用性が確認される.

キーワード 緩衝材, ベントナイト, 不飽和, 水分特性曲線, サクシオン

連絡先 〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 33 (独) 日本原子力研究開発機構 TEL029-282-1111

3. 1次元浸潤試験

1次元浸潤試験(図-3)は、円柱形の緩衝材(クニゲル V1 70wt%, ケイ砂 30wt%, $\rho_d=1.6 \text{ Mg/m}^3$)の下方より塩水を浸潤させ、吸水量と上端部気相間隙圧を測定し吸水挙動を評価し、得られた間隙圧と吸水量の経時変化から2相流解析コード TOUGH2⁵⁾を用いた逆解析の方法で水分特性曲線を同定する。試験は3試料(表-1)を対象とした。

吸水量の経時変化(図-4)で、 ρ_d が最大の case3 の吸水量が多く、次いで乾燥密度最小の case1 となっている。これは ρ_d が小さいとサクシオンは小さく透水係数が大きくなる傾向において、サクシオンよりも透水係数の影響が大きくなったことによる。case3 の試料条件に対しては比透水係数が提示⁵⁾されており、case3 に関し水分特性曲線を同定した。水分特性曲線は山本ら⁶⁾に倣い Narasimhan の(3)式を適用、ガス侵入圧 P_e を未知数とした。

$$P_c = -P_e - P_0 \left(\frac{1 - S_l}{S_l - S_{lr}} \right)^{\frac{1}{\eta}} \quad (3)$$

ここで、 P_c : 毛管圧力(固定), P_e : ガス侵入圧 (Pa), P_0 : 係数 ($2.5 \times 10^6 \text{ Pa}$ 固定), η : 間隙径分布係数 (0.45 固定), S_l : 液相飽和度, S_{lr} : 液相残留飽和度 (0.0 固定)

吸水量、気相間隙圧の解析によるフィッティング結果をそれぞれ図-5、図-6 に示す。図中 Psychrometer($P_e=1.2 \times 10^6$) (図-7) による測定を反映した水分特性曲線を適用した結果も掲載している。フィッティング結果 (Best_fit) は $P_e=2.5 \times 10^5 \text{ Pa}$ となり、この水分特性曲線は低飽和部で Psychrometer 測定値に近く、高飽和部でマトリックスポテンシャルの影響を反映したサクシオン値となり、当初想定した傾向の曲線である。

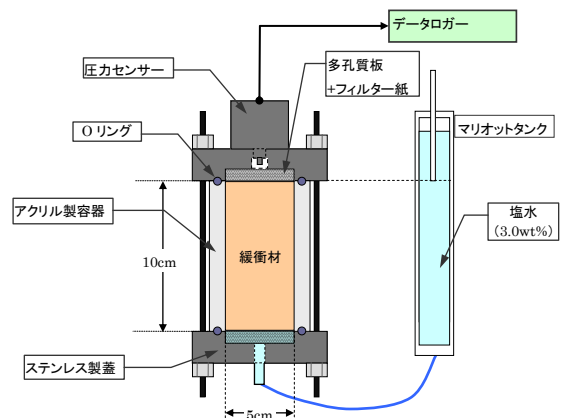


図-3 1次元塩水浸潤試験装置の概要

表-1 1次元塩水浸潤試験試料条件

	dry density	prosimy	gravimetric water content	volumetric water content	saturation
	[Mg/m ³]	[-]	[%]	[%]	[%]
case1	1.0	0.63	15.3	15.3	24.4
case2	1.3	0.51	15.3	19.9	38.6
case3	1.6	0.40	15.3	24.5	60.7

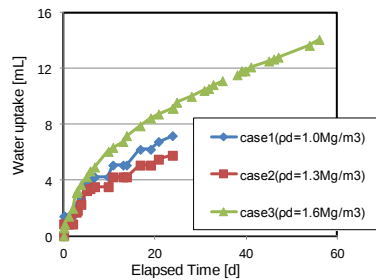


図-4 吸水量の経時変化

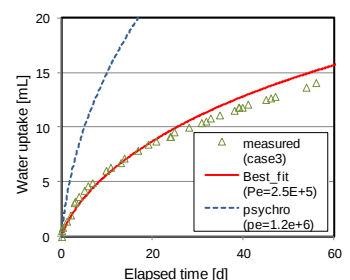


図-5 吸水量のフィッティング

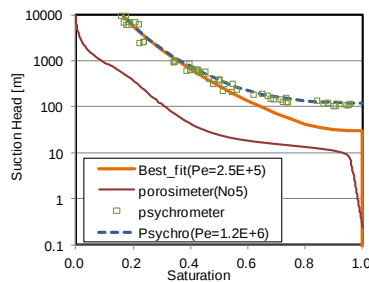


図-7 同定された水分特性曲線

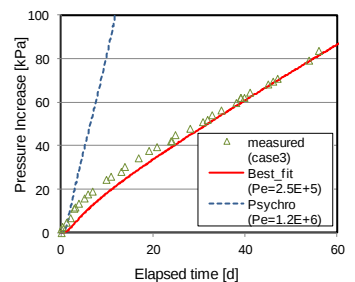


図-6 間隙圧のフィッティング

4. おわりに

緩衝材の水分特性曲線について、水銀圧入による間隙径分布の影響を把握し、1次元浸潤試験により浸潤過程における水分特性曲線の推定を試みた。粘土を含む混合材料では、粘土による浸透ポテンシャルの影響が大きく、浸潤挙動を適切に表現する水分特性曲線の推定が課題であったが、今回のその方法を提示した。

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁の「平成23年度地層処分技術調査等委託費（高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム化学影響評価高度化開発）」の一部として実施したものである。

参考文献 1) 鈴木英明ほか(1996)；緩衝材の水分ポテンシャルと水分拡散係数，動燃技術資料，PNC TN8410 96-117. 2) 西垣誠 (1987)：揚水試験の基礎方程式と貯留係数の解釈，地下水と井戸とポンプ，Vol29, No.3, pp.1-14. 3) 林為人ほか(1999)：透水挙動に関する等価管路モデルおよび堆積岩への適用例，応用地質，第39巻，第6号，pp.533-539. 4) R. Příkryl, Z. Weishauptová (2010)：Hierarchical porosity of bentonite-based buffer and its modification due to increased temperature and hydration, Applied Clay Science 47, pp.163-170. 5) Pruess, K. (1991)：TOUGH2 - A General-purpose numerical simulator for multiphase fluid and heat flow, LBL20700 Lawrence Berkeley National Laboratory. 6) 山本幹彦，三原守弘，大井貴夫(2004)：地層処分におけるガス移行影響評価—人工バリア内のガス移行解析手法とデータ取得—，原子力バックエンド研究，Vol.10 No.1-2, pp.31-45.