

不飽和ベントナイトの吸水量と膨潤圧の同時測定可能な 新しい実験手法の提案と水分拡散係数の評価

茨城大学 学生会員 ○遠藤さち恵 正会員 小峯秀雄
フェロー会員 安原一哉 正会員 村上哲
戸田建設 正会員 関口高志 関根一郎

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材には、低透水性を有することによって地下水の移動を抑制することが期待されている¹⁾。再冠水の段階では、緩衝材と周辺岩盤には水分濃度差が生じ、拡散現象により地下水が緩衝材へ流入することが想定される(図1参照)。地下水の流入が拡散支配であれば、処分場周辺環境において動水勾配の変動などが生じても、浸潤速度に与える影響は少ないものと考えられる。そのため緩衝材の水分拡散特性は、処分場が再冠水するまでの期間を評価する際に重要である。そこで本研究では、吸水量と膨潤圧を同時に測定することが可能な実験手法を提案し、水分拡散係数の算出および評価を行った。

2. 使用した試料および供試体作製方法

本試験では、山形県月布産のベントナイト A (クニミネ工業製・クニゲル V1) を使用した。表1に使用したベントナイト A の基本的性質を示す²⁾。供試体は上下二方向からの静的締固めにより直径 60mm、高さ 10mm を目標に作製した。

3. 膨潤に伴う吸水量測定試験

ベントナイトは吸水により膨潤圧が発生するため、膨潤圧と吸水量には相関関係があると考えられる。そこで両者の関係を調べるため、膨潤圧と単位時間当たりの供試体への吸水量の測定が可能で、膨潤に伴う吸水量測定試験装置(図2参照)を提案する。この装置では、1週間程度の比較的短期間で吸水量と最大膨潤圧の測定が可能である。供試体への給水は、膨潤特性試験装置底板と本試験に用いるために開発した二重管ビュレット(容量 25ml)とシンフレックスチューブを接続し行う。吸水量の測定は、電子天秤による質量変化測定を行い、二重管ビュレットによる目視測定で体積変化を確認した。

4. 水分拡散係数の算出

図3に膨潤圧と経過時間を、図4に電子天秤による質量減少量と経過時間の関係を示す。図4では約 1000 分までそれぞれの初期乾燥密度において吸水量は同様な増加傾向を示し、約 4000 分以降、吸水量の増加量は少なくなった。図3および図4より、吸水量は膨潤圧と共に増加していくが、膨潤圧が最大膨潤圧に達し定常化した後も、吸水量には緩やかな増加が確認できた。また表2に、吸水量と供試体の間隙体積についてまとめたもの、図5に間隙と流入量の関係のイメージ図を示す。表2より、吸水量と供試体の間隙体積がほぼ一致しており、本試験では信頼性の高いデータを得ることができたと考えられる。また、水分拡散係数の算出方法は次の通りである。すなわち、既往の研究³⁾によれば、不飽和ベントナイト中の水の移動は、式(1)で表すことができる^{4), 5)}。

$$F = -D \frac{\partial \theta}{\partial x} = -n_e D \frac{\partial S_e}{\partial x} \quad \cdots (1)$$

キーワード 高レベル放射性廃棄物、不飽和ベントナイト、水分拡散係数、膨潤圧、再冠水、吸水量

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1 TEL : 0294-38-5163

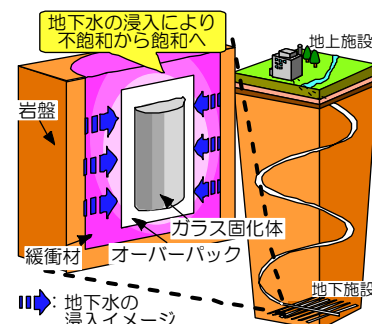


図1 緩衝材への地下水の浸入イメージ

表1 ベントナイト A の基本的性質²⁾

ベントナイト	A
タイプ	Na 型
土粒子密度(Mg/m ³)	2.79
液性限界(%)	458.1
塑性限界(%)	23.7
塑性指数	434.4
モンモリロナイト含有率(%)	57
陽イオン交換容量(meq./g)	1.166
交換性 Na イオン量(meq./g)	0.631
交換性 Ca イオン量(meq./g)	0.464
交換性 K イオン量(meq./g)	0.03
交換性 Mg イオン量(meq./g)	0.041

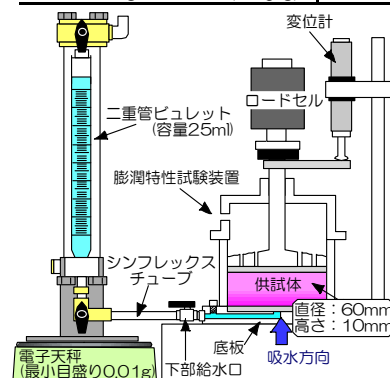


図2 膨潤に伴う吸水量測定試験装置概略図

ここで、 F はフラックス、 D は水分拡散係数、 θ は体積含水率、 x は供試体における浸漬面からの距離、 n_e は有効間隙率、 S_e は有効飽和度である。ここでの有効間隙率(n_e)は、初期体積含水率(θ_0)と飽和状態の体積含水率(θ_s)の差($\theta_s - \theta_0$)を表す。次に試験条件に合わせて、底面からの吸水を考えた場合、無限遠で有効飽和度が変化しないと仮定する。これより、底面($x=0$)からの吸水量 Q は式(2)で与えられる。

$$Q = An_e \sqrt{Dt} \quad \cdots(2)$$

ここで、 A は供試体断面積、 t は時間である。この上記式(2)より、吸水量は経過時間の平方根 $\sqrt{t}$ で与えられる。次に、図6に電子天秤による質量減少量と $\sqrt{t}$ の関係を示す。そして、吸水量測定試験で得られた吸水量と $\sqrt{t}$ の関係について回帰分析を行うと、式(3)で近似することができる。

$$Q = a\sqrt{t} + b \quad \cdots(3)$$

ここで、 a は供試体への吸水量、 b は試験開始時の初期誤差である。以上より、水分拡散係数を求める式(4)を誘導した。

$$D = \left(\frac{a}{n_e A} \right)^2 \quad \cdots(4)$$

図7に水分拡散係数と初期乾燥密度の関係を示す。既往の研究データ⁶⁾と比較すると、得られた不飽和状態の水分拡散係数は、ほぼ同程度の値を示しており、再現性のあるデータを取得することができたと言える。また初期乾燥密度が $1.2 \sim 2.0 (\text{Mg/m}^3)$ の範囲では、水分拡散係数のばらつきの範囲が、およそ $2.81 \times 10^{-10} \sim 4.85 \times 10^{-10} (\text{m}^2/\text{s})$ と非常に小さく、水分拡散係数に対する初期乾燥密度の影響は小さいものと考えられる。また本研究では新たに、不飽和ベントナイトが吸水により飽和に至る過程において、ほぼ飽和状態となった時点での水分移動について評価を行うことが可能となった。その結果、ほぼ飽和状態のベントナイトAの水分拡散係数は、不飽和状態のそれよりも1/10程度低い $2.32 \times 10^{-11} \sim 5.07 \times 10^{-11} (\text{m}^2/\text{s})$ であることが分かり、不飽和から飽和状態に至るまでの水分移動の変遷をより正確に評価することが可能となった。

5. まとめ

本研究では、ベントナイトの吸水量の測定が可能で、膨潤に伴う吸水量測定試験装置を提案し、膨潤に応じた水分拡散係数の算出ができた。その結果、初期乾燥密度が $1.2 \sim 2.0 (\text{Mg/m}^3)$ の範囲において、ベントナイトAの水分拡散係数は初期乾燥密度に依存せず、およそ $2.81 \times 10^{-10} \sim 4.85 \times 10^{-10} (\text{m}^2/\text{s})$ であることが分かった。また新たに、ほぼ飽和状態における水分移動の変遷をより正確に評価することができ、不飽和状態の水分拡散係数より1/10程度低い $2.32 \times 10^{-11} \sim 5.07 \times 10^{-11} (\text{m}^2/\text{s})$ であることが分かった。

参考文献

1) 核燃料サイクル機構：我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, JNC TN1400 99-022, 1999. 2) 直井優, 小峯秀雄, 安原一哉, 村上哲, 百瀬和夫, 坂上武晴：各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響, 土木学会論文集, No.785/III-70, pp. 39-49, 2005.3. 3) 千々松正和, 藤田朝雄, 鈴木英明, 松本一浩：緩衝材の物理特性, サイクル機構技報, No. 5, pp. 51-58, 1999. 4) 中野政詩：土の物質移動学, 東大出版会, 1991. 5) Crank, John : The Mathematics of Diffusion-2nd edition, Oxford University Press, pp.21-22, 1975. 6) 長谷川琢磨：ベントナイトの透水・浸潤特性への海水影響, 電力中央研究所報告, N04005, 2004.

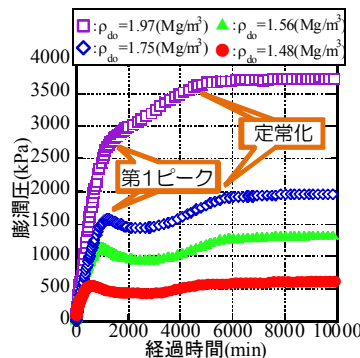


図3 膨潤圧と経過時間の関係

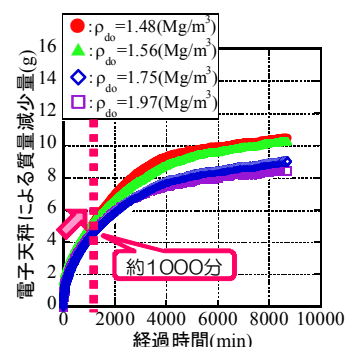


図4 電子天秤による質量減少量と経過時間の関係

表2 吸水量と供試体の間隙体積

初期乾燥密度 (Mg/m^3)	1.48	1.56	1.75	1.97
間隙体積 (ml)	12.81	12.43	9.62	7.77
ビュレット管 (ml)	11.35	11.05	9.10	7.75
電子天秤 (g)	10.77	10.25	8.98	8.61

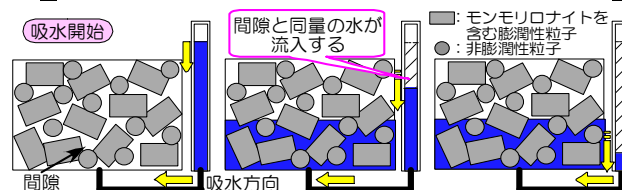


図5 間隙への流入量のイメージ

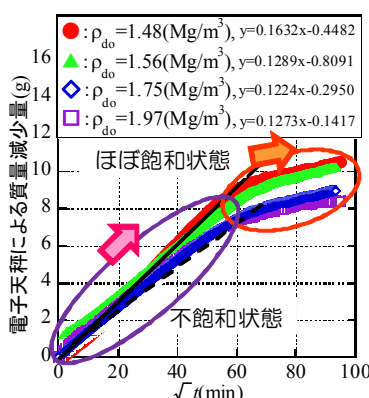


図6 電子天秤による質量減少量と $\sqrt{t}$ の関係

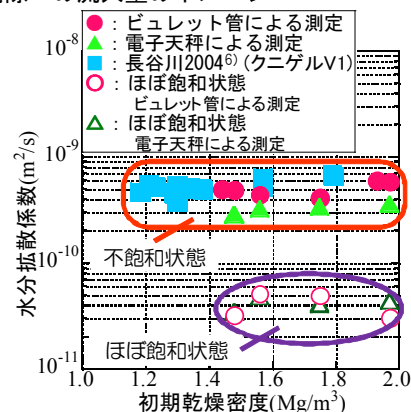


図7 水分拡散係数と初期乾燥密度の関係