

圧縮ベントナイトの不飽和水理特性

核燃料サイクル開発機構 正会員 鈴木 英明, 千々松正和, 藤田 朝雄
神戸大学 農学部 中野 政詩

1.はじめに 高レベル放射性廃棄物の地層処分システムにおける人工バリアとしては、ガラス固化体、オーバーパック、緩衝材を基本とする構成について検討が行われている。このうち、オーバーパックと周辺岩盤の間に設置される緩衝材には、低透水性、自己シール性、核種吸着遅延性、熱伝導性等の多くの機能が求められる。このような条件を比較的満足し得る材料として、天然に産するベントナイトが注目され、中でも高密度に圧縮したベントナイトは最も有力な候補材料であると考えられている。設置初期における緩衝材は不飽和な状態であるが、地下水の浸潤によりやがて飽和するものと考えられる。緩衝材の水分変化は、緩衝材の膨潤圧や伝熱性を大きく変化させるため緩衝材内の水分移動を評価することは重要な課題である。本研究では、緩衝材の候補材料である圧縮ベントナイトの水分拡散係数を水分特性曲線から求めた。

2.試験条件 図1に示すステンレス製の試験カラム内にベントナイト KunigelV1 を乾燥密度 1.8g/cm^3 に圧縮充填して供試体を作製し、蒸留水を供試体下部より浸潤させた。蒸留水の温度は 25, 40, 60°C に設定した。供試体の寸法は直径 20mm, 高さ 20mm である。所定の時間経過後、供試体を厚さ 2mm の円盤状に 10 分割し含水比を測定し水分分布を求めた。

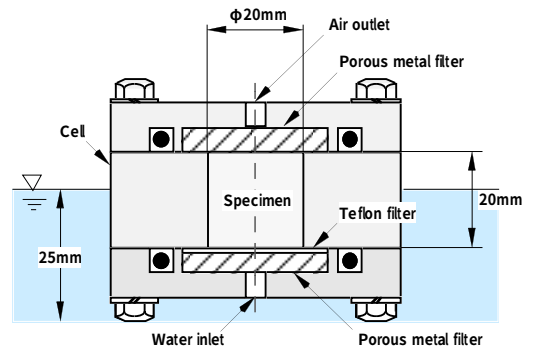


図1 試験装置

3.試験結果 実験によって得られた供試体内の水分分布を図2に示す。時間の経過にともない供試体中の水分が増加していく様子が読み取れる。次に、次式を用いて水分拡散係数 $D_\theta[\text{cm}^2/\text{s}]$ を求め、体積含水率との関係で表したものを図3に示す。これより、水分拡散係数は、体積含水率の低領域と高領域で大きく異なるU字型の分布を示した。

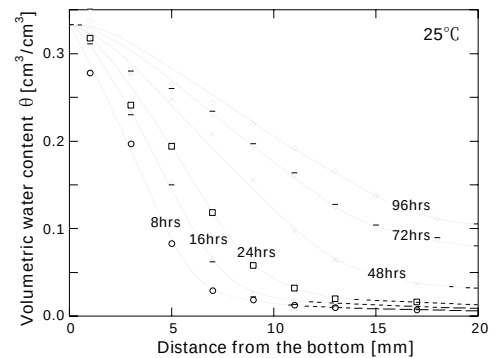


図2 水分分布測定結果

4.考察 不飽和粘土中の水分は、水蒸気と液状水の二相の形態で移動すると考えられている(Philip,J.R and de Vries,D.A.,1957, 中野, 1991)。ここでは、次式に示すように水分拡散係数 D_θ が、液状水の拡散係数 $D_{\theta l}$ と水蒸気の拡散係数 $D_{\theta v}$ との和であるとし、それぞれを分離して検討を行った。

$$D_\theta = D_{\theta l} + D_{\theta v} \quad (2)$$

1) 液状水の水分拡散係数

等温条件下においては、液状水の移動はポテンシャル勾配によって生じるものと考えられ、次式に示す Darcy 式によって表される。ここで、 k は不飽和透水係数 $[\text{cm/s}]$ 、 θ は体積含水率 $[\text{cm}^3/\text{cm}^3]$ 、 ψ_m はマトリックポテンシャル $[\text{cm}]$ である。

$$q = -k \frac{\partial \psi_m}{\partial Z} = -D_{\theta l} \frac{\partial \theta}{\partial \psi_m} \frac{\partial \psi_m}{\partial Z} \quad (3)$$

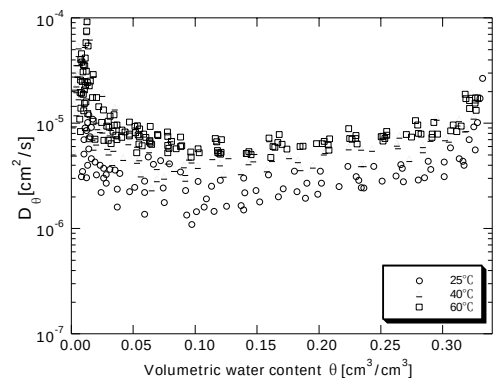


図3 体積含水率と水分拡散係数の関係

ベントナイト KunigelV1（乾燥密度 1.8g/cm³）のポテンシャルの測定結果を図 4 に示す。図中の実線は van Genuchten モデルを適用して表した水分特性曲線であり、温度 T [K] の関数として(4)式のようになる。また、図中の破線は(5)式に示す経験式(van Genuchten,1978)から得られる比透水係数 k_r [-] と、図 5 に示す透水試験によって得られた飽和透水係数との積から求めたベントナイトの不飽和透水係数である。

$$\psi = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \right)^{\frac{\beta}{1-\beta}} - 1 \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad \begin{aligned} \alpha &= 4.52 \times 10^{-8} T - 9.40 \times 10^{-6} \\ \beta &= 1.64 \times 10^{-2} T - 2.62 \\ \theta_{sat} &= 0.333 \\ \theta_r &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

$$k_r = \sqrt{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r}} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \right)^{\frac{1}{\lambda}} \right]^{\lambda} \right\}^2 \quad \lambda = 1 - \frac{1}{\beta} \quad (5)$$

2) 水蒸気の水分拡散係数

土中の水蒸気移動は、気体の拡散と同様に水蒸気の密度勾配によって生じ気相の相対湿度は土中水の化学ポテンシャルの関数であるため水蒸気は移動する。水蒸気移動の場合の水分拡散係数 D_{θ_v} は、次式に示す Philip & de Vries 式によって表すことができる。式中の各係数は右表のようになる。また、 h_r は相対湿度[-]、 ψ_m はマトリックスポテンシャル [J/kg] であり、これらは(4)式で示した van Genuchten モデルを適用した水分特性曲線より求めることができる。Darcy 式および Philip & de Vries 式により求めた液状水の水分拡散係数と水蒸気の水分拡散係数を実験値と比較し図 6 に示す。

$$D_{\theta_v} = a \tau D_a \nu \rho^* h_r \frac{M}{RT} \frac{\partial \psi_m}{\partial \theta} \quad (6)$$

5.まとめ Darcy 式によって求められる液状水の水分拡散係数は高水分領域を、Philip & de Vries 式によって求められる水蒸気の水分拡散係数は低水分領域を良く再現し、両者を足し合わせた水分拡散係数は U 字型の分布を示した実験値と一致する結果となった。これより、不飽和な圧縮ベントナイト内の水分が液状水と水蒸気の二相の形態で移動するモデルを水分特性曲線を用いて表せることが分かった。

参考文献

- 中野政詩（1991）：土の物質移動学，東京大学出版会。
Philip, J.R. and de Vries, D.A. （1957）：Moisture movement in porous materials under temperature gradient, Transactions, American Geophysical Union, Vol.38, No.2, pp. 229- 237.
van Genuchten, R. (1978) : Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed-form analytical model, Research Report, No.78-WR-08, Princeton Univ.

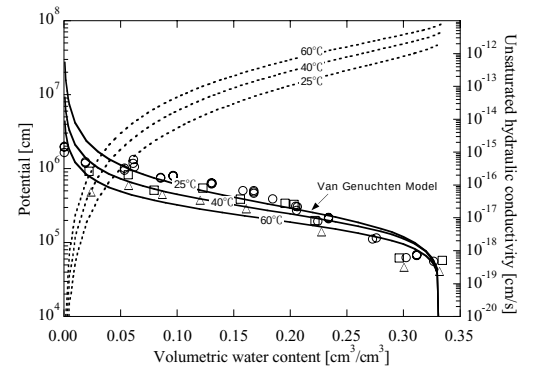


図4 水分特性曲線と不飽和透水係数

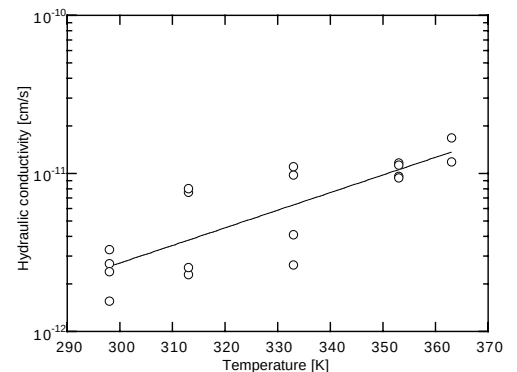


図5 温度と飽和透水係数の関係

a	気相率 [-]	$a = \theta_{sat} - \theta$
τ	屈曲度 [-]	$\xi_g = \frac{1}{\tau} = 0.66^a$ ξ_g : 屈曲度因子 [-]
ν	マスコフファクタ [-]	$\nu = P / (P - P_v)$ P : 全圧 P_v : 水蒸気の分圧 ($P_v = P_s \exp \frac{g\psi}{R_G T}$) P_s : 飽和水蒸気圧力 R_G : 気体定数 ($R_G = R / M$) M : 水の分子量 (0.018 kg/mol) R : 一般気体定数 (8.31 J/mol K)
D_a	空気中の水蒸気の拡散係数 [cm ² /s]	$D_a = 5.89 \times 10^{-2} \frac{T^{2.3}}{P}$ T : 絶対温度, P : 大気圧 [Pa]
ρ^*	飽和水蒸気濃度 [-]	$\rho^* = \rho'' / \rho'$ ρ'' : 飽和水蒸気密度 ρ' : 水の密度

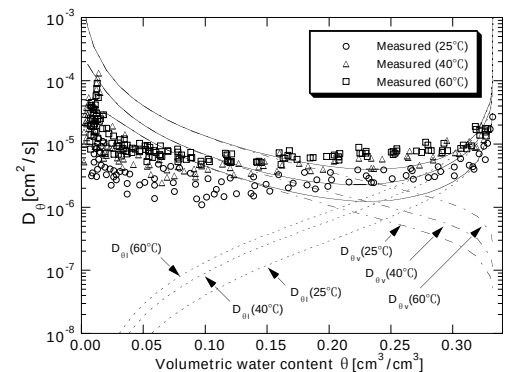


図6 液状水と水蒸気の水分拡散係数