

圧縮ベントナイト中の温度勾配による水分移動

核燃料サイクル開発機構 正会員 ○鈴木 英明, 藤田 朝雄 (現在, 原子力発電環境整備機構)
非会員 杉野弘幸

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は、ガラス固化体、オーバーバック、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、緩衝材には、低透水性、自己シール性、核種収着遅延性、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（以下、圧縮ベントナイト）は最も有力な候補材料であると考えられている。廃棄体とともに施工された圧縮ベントナイト中では、周辺岩盤からの地下水の浸潤とともに、ガラス固化体の発熱により形成される温度勾配によって水分移動が生じるものと考えられる。このような水分の移動は、圧縮ベントナイトの膨潤性や伝熱性に大きく影響を与えると考えられるため、圧縮ベントナイト中の水分移動を評価することは重要な課題の一つである。本研究では、温度勾配による圧縮ベントナイト中の水分移動について検討を行った。

2. 試験条件

2.1 要素試験 温度勾配による水分拡散係数を求めるために、密閉容器内の圧縮成型体（ベントナイト KunigelV1, 乾燥密度 1.8g/cm^3 , 直径 5cm ×高さ 10cm ）の上面を 25°C , 下面を 45°C の異なる温度で加熱し、供試体に 2°C/cm の温度勾配を形成させた。供試体の初期含水比は約 6.0% ~ 15% の 4 種類とした。計 6 本の熱電対により供試体内部の温度分布を測定した。96 時間後に供試体を 10 分割し水分分布を求めた。

2.2 検証試験 要素試験で得られた温度勾配による水分拡散係数の妥当性を評価するために、図 1 に示す試験装置を用いて、直径 5cm ×高さ 10cm の圧縮成型体を対象に、(1) 等温条件にある供試体への水の浸潤試験, (2) 1°C/cm の温度勾配を形成させた供試体への水の浸潤試験を実施した。1000 時間後に供試体を 10 分割し水分分布を求めた。試験条件を表 1 に示す。

表 1 試験条件

	等温浸潤試験	温度勾配浸潤試験
乾燥密度 [g/cm^3]	1.80	1.76
初期含水比 [%]	約 10	
温度勾配 [$^\circ\text{C/cm}$]	-	1 (上面 50°C , 下面 60°C)
雰囲気温度 [$^\circ\text{C}$]	50	

3. 試験結果

3.1 要素試験の結果 96 時間後の水分分布を図 2 に示す。これより、高温側では水分の減少が、低温側では水分が上昇し、温度勾配により供試体中の水分が移動したことが分かる。温度勾配による水分の移動は、水理学的境界条件を与えなくても温度勾配によって水分分布が不均一となるため水分勾配の影響が生じ、水分勾配と温度勾配が同時に存在することになる。したがってトータルフラックス $q(\theta, T)$ は次のようになる。

$$q(\theta, T) = q_\theta(\theta, T) + q_T(\theta, T) \quad (1)$$

ここで、 q_θ は水分勾配によるフラックス、 q_T は温度勾配によるフラックス、 θ は体積含水率、 T は温度であり、水分勾配による水分拡散係数 D_θ お

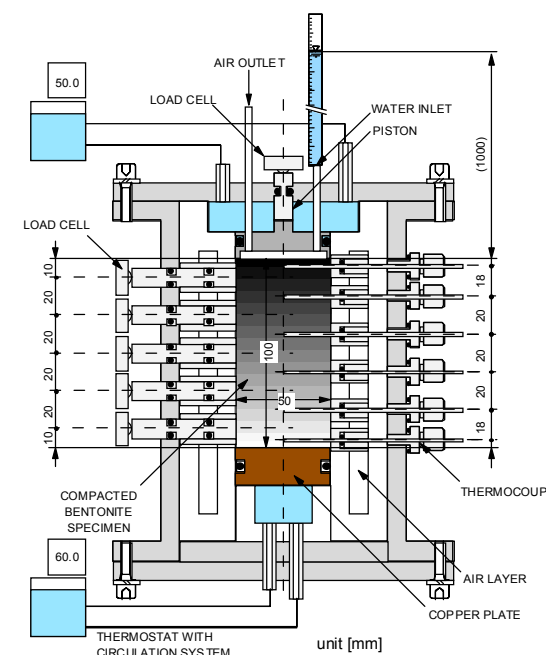


図 1 検証試験装置

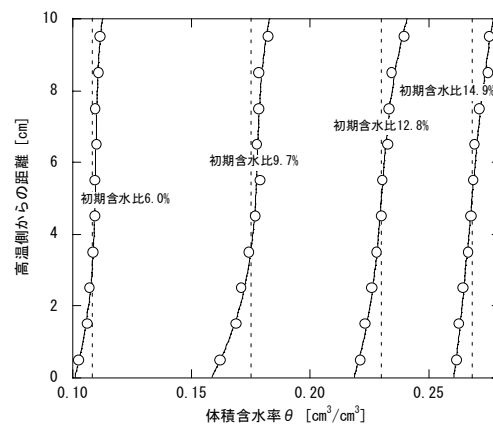


図 2 温度勾配による水分分布測定結果

よび温度勾配による水分拡散係数 D_T を用いて次のように表せる¹⁾。

$$q_o(\theta, T) = -D_o \frac{\partial \theta}{\partial x} \tag{2}$$

$$q_T(\theta, T) = -D_T \frac{\partial T}{\partial x} \tag{3}$$

したがって、温度勾配による水分拡散係数 D_T は次式のようになる。

$$D_T = \frac{q(\theta, T) - \left(-D_o \frac{\partial \theta}{\partial x}\right)}{\frac{\partial T}{\partial x}} \tag{4}$$

このうち、水分勾配による水分拡散係数 D_o は、別途実施した水の浸潤試験結果および Philip & de Vries モデル²⁾ と Darcy 型の式を用いた検討により図3に示すような結果が得られている³⁾。したがって、上式から温度勾配による水分拡散係数 D_T は図4のプロットのようになる。図中の曲線は次式に示す Philip & de Vries モデル²⁾ により求めた温度勾配による水蒸気の拡散係数である。

$$D_{Tv} = (a + \theta) D_a v h_r \frac{d\rho^*}{dT} \left(\frac{dT}{dz}\right)_a \tag{5}$$

ここで、 a は気相率[-]、 D_a は空気中の水蒸気拡散率 [cm^2/s]、 v はマスフローファクター[-]、 ρ^* は飽和水蒸気濃度[-]、 h_r は相対湿度[-]である。土の場合、上式中の $(dT/dz)_a / (dT/dz)$ は、Philip & de Vries によって、 θ と a との関係から 1.3~3.0 の範囲と見積もられているが、ここでは、図4に示すように実験値と合わせる形で設定した。

3.2 検証試験の結果 1000 時間後の水分分布を図5に示す。温度勾配浸潤試験では、 $1^\circ\text{C}/\text{cm}$ の温度勾配が水の浸潤を妨げる方向に供試体内部の水分を移動させるため、等温浸潤試験に比べて水分の増加は小さいことが分かる。また、図中には各試験条件に合わせた解析結果を曲線で示す。解析には汎用有限要素解析システム ABAQUS を使用し、一次元の非定常質量拡散解析を実施した。解析に用いた水分勾配による水分拡散係数 D_o は図3の通りである。一方、温度勾配による水分拡散係数 D_T は図4の曲線で示したように、体積含水率が $0.05\text{cm}^3/\text{cm}^3$ 以上では体積含水率依存性が小さいことから温度依存性のみを考慮し、 $25\sim 60^\circ\text{C}$ の範囲で $2 \times 10^{-9} \sim 2 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s}/^\circ\text{C}$ に設定した。その結果、解析結果は各試験で得られた水分分布を良く再現した。

4. まとめ 要素試験および Philip & de Vries モデルを用いた検討により、圧縮ベントナイトの温度勾配による水分拡散係数を定量的に把握できた。また、検証試験からは、等温状態に比べて温度勾配を形成させた場合の方が水分の増加が小さいことから、温度勾配による水分移動の影響があることが明らかとなった。さらに、解析結果は検証試験の水分分布を良く再現しており、水分勾配および温度勾配による水分拡散係数の妥当性を示すことができた。

参考文献

- 1) 中野政詩 (1991) : 土の物質移動学, 東京大学出版会.
- 2) 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.
- 3) 鈴木英明他 (2000) : 圧縮ベントナイトの不飽和水理特性, 土木学会第 55 回年次学術講演会, III-A229.

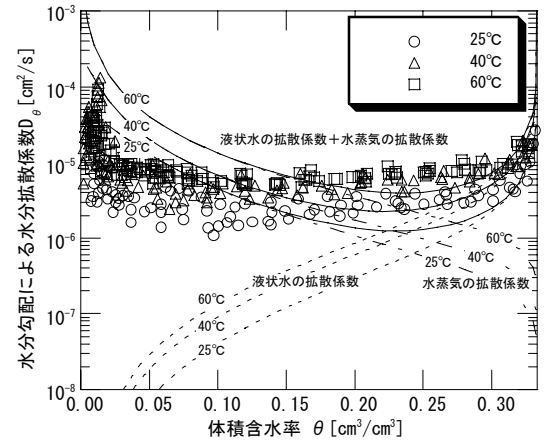


図3 水分勾配による水分拡散係数

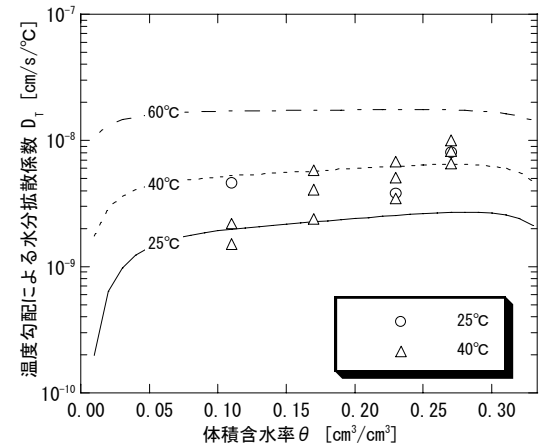


図4 温度勾配による水分拡散係数

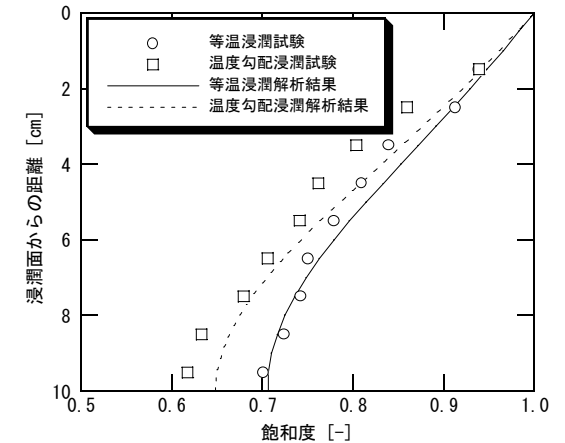


図5 検証試験結果と解析結果の比較