

不飽和圧縮ベントナイト中の水分移動 パラメータに関する考察

鈴木英明¹・千々松正和²・藤田朝雄³・中野政詩⁴

¹正会員 工学 核燃料サイクル開発機構 環境保全・研究開発センター 処分研究部
(〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33, 派遣元: 検査開発(株))

²正会員 工博 ハザマ 技術・環境本部 原子力部 (〒107-8658 東京都港区北青山 2-5-8)

³正会員 工修 核燃料サイクル開発機構 経営企画本部 バックエンド推進部
(〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33, 現在, 原子力発電環境整備機構)

⁴農博 東京大学名誉教授 (〒520-0223 滋賀県大津市美空町 1-27-201)

高レベル放射性廃棄物の地層処分における緩衝材内の水分移動の評価に資するため、圧縮ベントナイトを対象に、不飽和水理パラメータの取得を行い、既存の水分移動構成モデルにより水分勾配および温度勾配下における液状水と水蒸気のそれぞれの拡散係数を理論的に算出した。さらに、不飽和水分移動に関する室内試験結果との比較を行なった結果、水分勾配による液状水の拡散係数は高水分領域を、水蒸気の拡散係数は低水分領域を再現し、両者を足しあわせることで水分勾配による水分拡散係数が表せることが分かった。また、温度勾配による水分移動が主に水蒸気での移動であることが分かった。以上のことから、既存の水分移動構成モデルの圧縮ベントナイトへの適応性を確認した。

Key Words : compacted bentonite, hydraulic conductivity, water retention curve, water diffusivity, thermal diffusivity, van Genuchten model, Darcy's law, Philip & de Vries model

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¹⁾。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、応力緩衝性、核種吸着遅延性等の多くの機能が要求される。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。

緩衝材は、適切な水分量のベントナイトを用いて施工されるため、設置直後は不飽和な状態であるが、周辺岩盤からの地下水の浸潤や、ガラス固化体の放熱により形成される温度勾配の影響により水分移動が生じると考えられる。このような水分の移動は、緩衝材の膨潤圧や伝熱性を変化させるとともに、鉱物との化学反応および物質の移行により間隙水の化学にも影響を及ぼすことが考えられる。

一般に、不飽和な土中の水分は、液状水と水蒸気

の二相の形態で移動することが知られているが^{2), 3)}、圧縮ベントナイトに対して、それぞれの移動を定量的に求めた研究例は少なく、両者を切り離さずに水分の移動を評価していることが多い。しかしながら、このようなモデルでは、物質の移行や間隙水の化学が及ぼす影響など詳細な評価ができないため、人工バリア環境の明確化の観点から、液状水と水蒸気のそれぞれの移動を把握することは重要な課題である。

本研究では、不飽和圧縮ベントナイト中の水分移動形態を明確にするために、不飽和水理パラメータの測定を行い、水分勾配および温度勾配下での液状水および水蒸気の拡散係数を既存の構成モデルから理論的に算出した。また、水分勾配および温度勾配下での不飽和水分移動に関する室内試験結果との比較を行い、既存構成モデルの圧縮ベントナイトへの適用性について検討した。

2.試験条件

本研究に用いたベントナイトは、核燃料サイクル

表-1 鉱物組成 [%]

モンモリロナイト	石英・玉髄	長石類	方解石	苦灰石	方沸石	黄鉄鉱	有機物
46~49	29~38	2.7~5.5	2.1~2.6	2.0~2.8	3.0~3.5	0.5~0.7	0.31~0.34

表-2 物理特性

土粒子密度 [kg/m ³]	液性限界 [%]	塑性限界 [%]	塑性指数 [-]	陽イオン交換量 [meq/100g]	浸出陽イオン [meq/100g]
2700	416	21	395	52	Na ⁺ :54.6, K ⁺ :1.3 Ca ²⁺ :41.9, Mg ²⁺ :6.6 Na ⁺ /Ca ²⁺ ratio:1.3

表-3 透水試験条件

供試体乾燥密度 [kg/m ³]	1800
供試体寸法 [mm]	直径 50×高さ 10
初期含水比 [%]	10
動水勾配 [-]	8000
試験水	蒸留水
試験温度 [°C]	25, 40, 60, 80, 90

表-4 保水性試験条件

供試体密度 [kg/m ³]	サイクロメータ法		蒸気圧法
	約 900 (粉末状)	1800	1800
初期含水比 [%]	0~30 (浸潤過程)	0~18 (浸潤過程) 0~10 (乾燥過程)	10
供試体寸法 [mm]	-	直径 13×高さ 7	直径 20×高さ 20
試験温度 [°C]	25, 40, 60	25	20

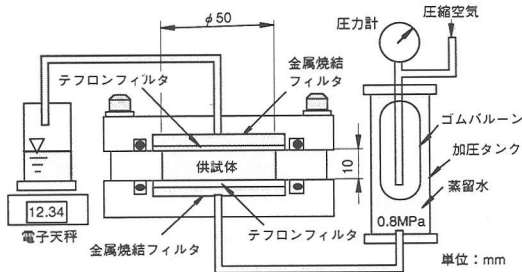


図-1 透水試験装置

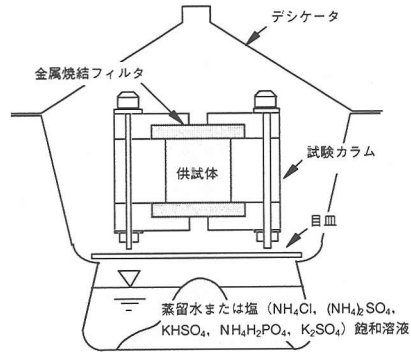


図-2 蒸気圧法試験装置

開発機構の第二次取りまとめ¹⁾で対象とした山形県月布産のNa型ペントナイト(クニゲルV1)である。鉱物組成を表-1に、物理特性を表-2に示す¹⁾。

(1) 飽和透水係数測定試験

飽和状態における圧縮ペントナイトの透水係数を求めるため、土の透水試験法(日本工業規格 JIS A 1218:1998)に準じ⁴⁾、図-1に示すようなコンプレッサーの圧縮空気を利用した定水位型の試験装置を用いた。供試体は、ペントナイト材料を直径50mm×高さ10mmの拘束セル内に圧縮充填する方法で作製した。供試体の乾燥密度は、人工バリアにおける緩衝材の初期密度程度として1800kg/m³に設定した。試験温度は、供試体を充填した拘束セルを恒温槽内に設置することにより制御した。試験条件を表-3に示す。

(2) 保水性試験

本研究では、土の保水性試験方法(地盤工学会基準 JGS 0151-2000)にしたがい⁴⁾、サイクロメータ法、

蒸気圧法の二通りの方法によりペントナイトの化学ポテンシャルを測定した。サイクロメータ法は、試料と平衡状態にある密閉空間内の相対湿度を熱電対を用いて測定する方法である。土中水との水分が平衡に達するようチャンバー内空気の相対湿度が変化するため短時間で測定できる利点がある。さらに、体積を拘束した条件での圧縮ペントナイトの化学ポテンシャルを知るために、図-2に示す蒸気圧法により測定を行った。デシケータ内の相対湿度は、塩飽和溶液および蒸留水を用いて0.75~1に制御した。供試体内の水分は供試体下部の金属焼結フィルタを介して出入りすることができる。平衡時間は、供試体が充填された試験カラムの質量が一定となるまでとした。試験条件を表-4に示す。

(3) 水分移動試験

不飽和な土中の水分は、水分勾配および温度勾配によって移動する。ここでは、図-3に示す試験カラ

表-5 水分移動試験条件

	浸潤試験			温度勾配試験
	乾燥密度 [kg/m ³]	1800		
初期体積含水率	0			0.108, 0.175 0.230, 0.268
供試体寸法 [mm]	直径20×高さ20			直径50 ×高さ100
試験温度 [°C]	25	40	60	25(上端), 45(下端) 温度勾配=2°C/cm
試験時間 [h]	8, 16, 24, 48, 72, 96	2, 4, 6, 8, 16, 24, 48, 72	2, 4, 6, 8, 16, 24, 48	96
備考	浸潤水には蒸留水を用いた			-

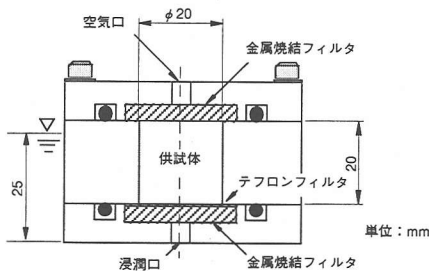


図-3 浸潤試験装置

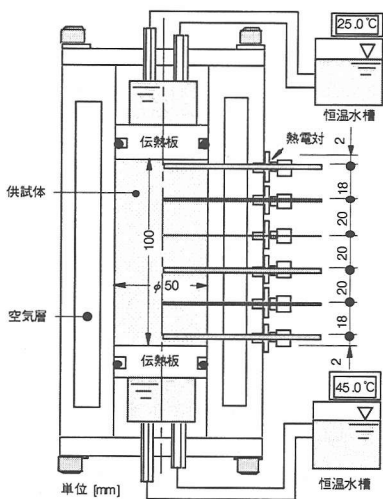


図-4 温度勾配試験装置

ムを用いて水の浸潤試験を実施し水分勾配による水分の移動を、また、図-4に示す温度勾配試験装置を用いて温度勾配による水分の移動を把握するための試験を実施した。

水の浸潤試験では、図-3に示すステンレス製の試験カラムを用い、カラム内に乾燥密度が1800kg/m³になるようにベントナイトを圧縮充填した。供試体の寸法は直径20mm×高さ20mmである。供試体下部より、孔径5μmの金属焼結フィルタおよび孔径1

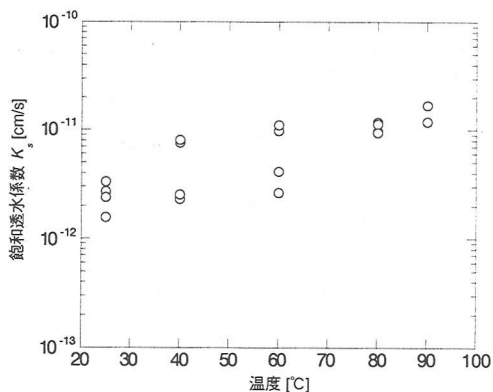


図-5 飽和透水係数の測定結果

μmのテフロン製のフィルタを介して蒸留水を浸潤させた。所定の時間経過後、供試体内の水分分布を調べるために、供試体を厚さ2mmの薄片に10分割し、土の含水量試験方法⁴⁾にしたがい、110°Cの乾燥炉を用いて各薄片の含水比を測定して水分分布を求めた。

一方、温度勾配試験では、図-4に示すような循環式の恒温水槽を有する温度勾配試験装置を用いた。本装置により、直径50mm×高さ100mmの供試体の上端を25°C、下端を45°Cに固定し、供試体に2°C/cmの温度勾配を形成させた。所定の時間経過後、供試体を厚さ10mmに10分割し、上記と同様に含水比を測定し水分分布を求めた。また、供試体の温度は、供試体内に挿入した計6本の熱電対により測定した。試験条件をまとめて表-5に示す。

3. 試験結果

(1) 飽和透水係数測定試験

一般に、土中の水の動きは次式に示すDarcyの法則で表される。

$$v = -k_s i \quad (1)$$

ここで、 v はDarcy流速、 k_s は飽和透水係数、 i は動水勾配である。透水試験で得られた単位時間当たりの透過量より、重力勾配は無視して飽和透水係数を求めると図-5のようになる。これより、飽和透水係数は温度の上昇とともに大きくなること分かる。飽和透水係数の温度依存性については、固有透過度を用いた整理により、圧縮ベントナイトの構造特性の変化ではなく、透過する水の粘性係数および水の密度の温度変化によるものと考えられている⁵⁾。

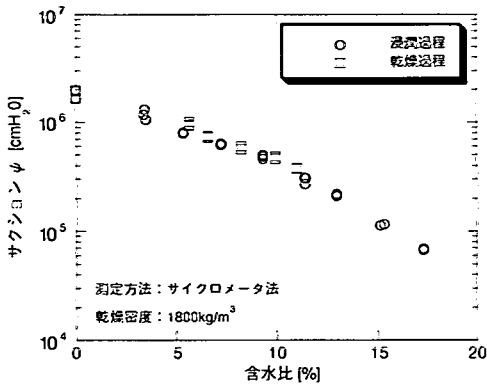


図-6 乾燥過程と湿潤過程の測定結果の比較

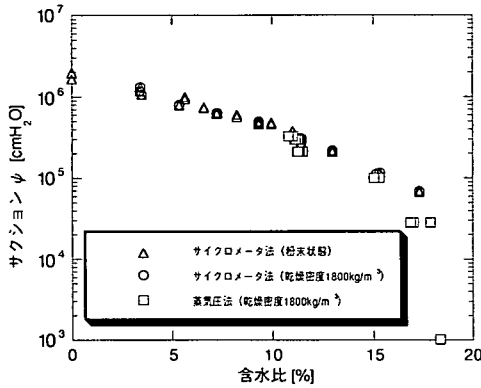


図-7 サイクロメータ法と蒸気圧法の測定結果の比較

(2) 保水性試験

土中水は、土粒子間隙に発生する表面張力などの影響により吸引され束縛されている。このような土中水のエネルギー状態を表す化学ポテンシャルは、同一温度で大気圧下にある純水の化学ポテンシャルにくらべ低下している。土中水の化学ポテンシャルは主に、土の吸着力や表面張力で決まるマトリックポテンシャル Ψ_m と、土中水が溶質を含むことによる浸透ポテンシャル Ψ_o に分けられ、両者を足しあわせたものを全ポテンシャル Ψ という⁶⁾。サイクロメータ法および蒸気圧法により得られる土中水の化学ポテンシャルは全ポテンシャルであり⁴⁾、相対湿度 (P_v/P_s) との間には以下の関係がある⁷⁾。

$$\Psi = \frac{RT}{M} \ln \frac{P_v}{P_s} \quad (2)$$

ここで、 P_v は水蒸気圧、 P_s は飽和水蒸気圧、 M は水の分子量、 R は一般気体定数、 T は絶対温度である。

通常、土の含水比とマトリックポテンシャル Ψ_m の関係を表すものを水分特性曲線というが、全ポテンシャル Ψ に占める浸透ポテンシャル Ψ_o の値は十分

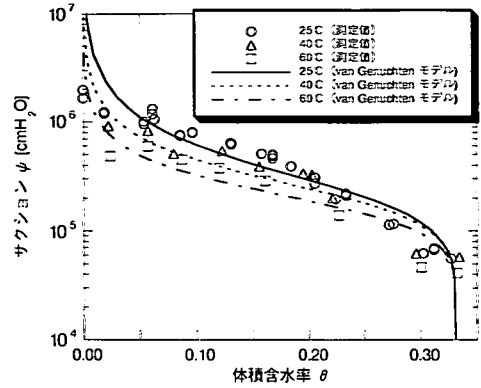


図-8 van Genuchten モデルによる
圧縮ベントナイトの水分特性曲線

に小さいため³⁾、全ポテンシャル Ψ とマトリックポテンシャル Ψ_m は近似的に等しいと考え、測定された全ポテンシャル Ψ をマトリックポテンシャル Ψ_m として扱うこととした。マトリックポテンシャル Ψ_m は負の値を持つが、この絶対値をサクシオン ψ といい、ここでは、重力場における水の位置エネルギーに換算し cmH_2O で表した。全ポテンシャル Ψ とサクシオン ψ の関係は次のようになる。

$$\Psi = -g\psi / 10000 \quad (3)$$

ここで、 g は重力加速度である。

図-6は、サイクロメータ法で測定した乾燥過程と湿潤過程の圧縮ベントナイト (乾燥密度 1800kg/m^3) のサクシオンである。湿潤過程の供試体は、初期状態 (含水比 0%) から水分を増加させたものである。また、乾燥過程の供試体は、湿潤過程で得られた含水比 15% 程度の供試体を 100°C 程度の恒温槽を使用し蒸発によって水分を減少させたものである。その結果、乾燥過程と湿潤過程でのサクシオンは、含水比に対してほぼ同じ経路たどる傾向を示した。一般に、水分特性曲線は、土が乾燥過程にあるか湿潤過程にあるかで異なり、粗粒子ほどヒステリシス現象が顕著に生じるといわれている⁸⁾。しかしながら、高密度に圧縮したベントナイトでは、粒子間空隙が極めて小さく、ヒステリシス現象の主要原因と解釈されているインクビン効果や接触角の効果など空隙に起因する効果が小さくなるため、乾燥過程と湿潤過程でのヒステリシス現象が顕著には現れないものと推測される。

図-7は、サイクロメータ法と蒸気圧法の測定結果を比較したものである。これより、サイクロメータ法によって得られた粉末状態のベントナイトと圧縮状態のベントナイトのサクシオンが同等の値を示し

表-6 van Genuchten 式中の係数

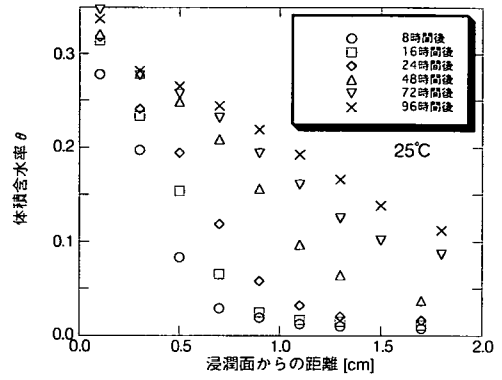
θ_{sat}	0.333
θ_r	0
α [1/cm]	$4.52 \times 10^{-8} T - 9.40 \times 10^{-6}$
β	$1.64 \times 10^{-2} T - 2.62$

ていることから、対象とする含水比の範囲において、水分特性曲線の密度依存性は小さいものと考えられる。さらに、蒸気圧法により供試体の体積を拘束した条件で測定した場合には、供試体が飽和する近傍でサクシオンが極端に低下することが分かった⁹⁾。

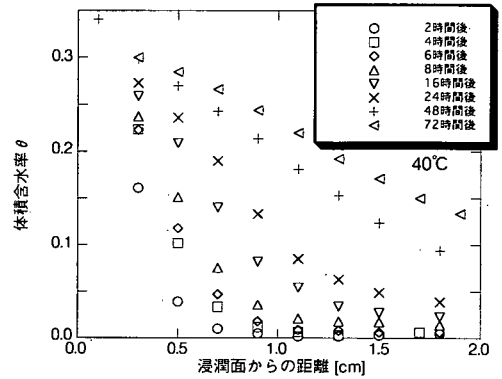
図-8は、サイクロメータ法により、粉末状態のペントナイトのサクシオンを温度をパラメータとして測定した結果である。これより、温度の上昇にともないサクシオンは低下し、温度依存性は含水比が低いほど強くなること分かる。サクシオンの温度依存性については、温度の上昇にともなう空気と水との境界面の表面張力の低下が主な原因と考えられている¹⁰⁾。図中の曲線は、前述したように、水分特性曲線のヒステリシスが顕著ではないこと、また、粉末状態と圧縮状態のペントナイトは同等の値を示し、水分特性曲線の密度依存性が小さいこと、さらに、体積拘束条件では、飽和近傍でサクシオンが小さくなることから、サイクロメータ法によって得られた粉末状態でのペントナイトのサクシオンをもとに、次式に示す van Genuchten モデル¹¹⁾により、乾燥密度が 1800kg/m^3 の圧縮ペントナイトの水分特性曲線を表したものである。

$$\psi = \frac{1}{\alpha} \left[\left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \right)^{\frac{\beta}{1-\beta}} - 1 \right]^{\frac{1}{\beta}} \quad (4)$$

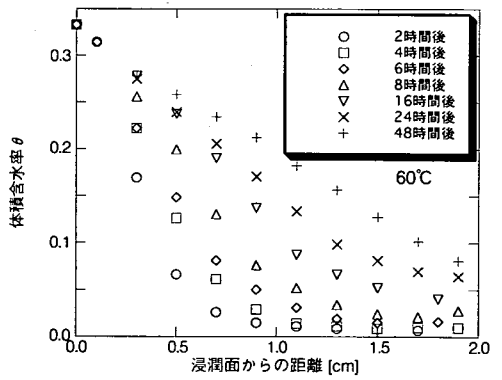
ここで、 θ は体積含水率、 θ_{sat} は飽和時の体積含水率、 θ_r は最小含水量である。飽和体積含水率は、ペントナイトの真密度を 2700kg/m^3 とし $\theta_{sat} = 0.333$ とした。また、最小含水量は、ある温度での乾燥過程において最終的に残留する水分量であるが、ここでは、含水比0%から飽和までの範囲の水分特性曲線を取得するため、強制的に乾燥させた含水比0%のペントナイトを浸潤させていく過程で測定を行なっていることから $\theta_r = 0$ に設定した。 α および β は最小自乗法により実験値との誤差の二乗の総和が最小となる値として求めた。その結果、van Genuchten モデル中の各係数は、表-6 のようになる。ここで、 T は絶対温度である。



(a) 試験温度 25°C



(b) 試験温度 40°C



(c) 試験温度 60°C

図-9 浸潤試験による水分分布測定結果

(3) 水分移動試験

a) 水分勾配による水分の移動

浸潤試験によって得られた供試体内の水分分布を図-9に示す。グラフ横軸は浸潤面に設定した供試体下部からの距離、縦軸は体積含水率 θ である。これらの水分分布図より、時間の経過にともない供試体内の水分が増加していく様子が読み取れる。また、同一浸潤時間を比較すると、温度が高いほど水分の増加が顕著であることが分かる。

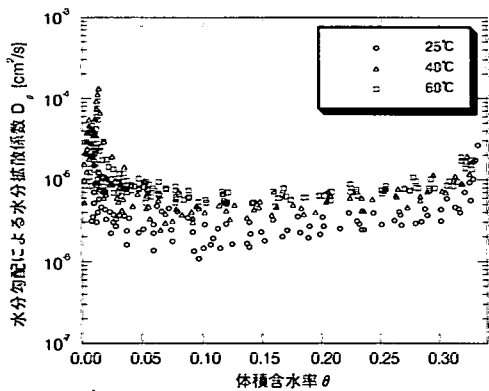


図-10 水分勾配による水分拡散係数の測定結果

一定温度のもとでの不飽和な土中の水分移動は、重力勾配が微小であるので次式で表わされる²⁾。

$$q = -D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial Z} \quad (5)$$

ここで、 q は水移動のフラックス、 D_θ は水分勾配による水分拡散係数、 θ は体積含水率、 Z は浸潤面に設定した供試体下部からの距離を表す。したがって、供試体中のある距離 Z に着目した場合、時刻 t_1 から t_2 における水分拡散係数 D_θ は、図-9の水分分布図を用いて、次式により求めることができる^{2)・12)}。

$$D_\theta = \frac{\int_{Z_i}^l (\theta_{t=t_2} - \theta_{t=t_1}) dz}{\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z} \right)_{t=t_2, Z=Z_i} + \left(\frac{\partial \theta}{\partial Z} \right)_{t=t_1, Z=Z_i} \right\}} \times \frac{1}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

ここで、 t は浸潤時間、 l は供試体長さ、 Z_i ($0 \leq Z_i \leq l$)は浸潤面とした供試体下部からの位置である。上式により求めた水分勾配による水分拡散係数 D_θ を、体積含水率 θ に対してプロットすれば図-10のようになる。これより、水分勾配による水分拡散係数 D_θ は、体積含水率の低領域と高領域で値が大きくなるU字型の分布を示す。また、このU字型の分布は、温度とともに上昇する結果となった。

b) 温度勾配による水分の移動

図-11に96時間後の水分分布を示す。図中の点線は、初期状態において供試体内の水分が均一であると仮定した初期体積含水率である。これより、45°Cに設定した供試体の下端では水分の減少が、25°Cに設定した供試体の上端では水分の増加が認められ、温度勾配によって供試体内の水分が移動したことが分かる。図-12は、供試体内の温度分布である。

温度勾配による水分移動においては、水理学的境

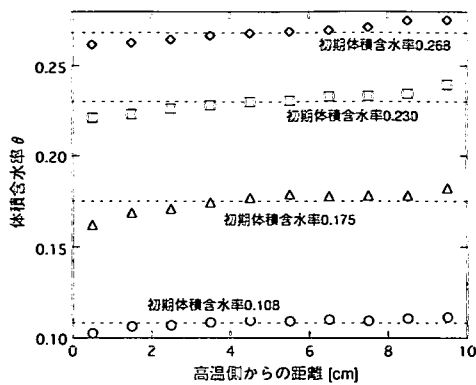


図-11 温度勾配試験による水分分布測定結果

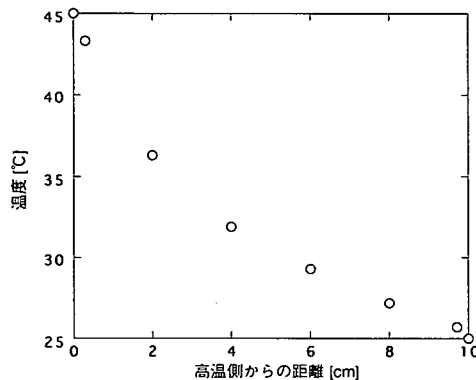


図-12 温度分布測定結果

界条件を与えなくても、温度勾配を与えることによって供試体内に水分分布が発生するため、同時に水分勾配による水分移動が生じることになる。したがって、水分勾配と温度勾配が同時に存在することになり、トータルフラックス $q(\theta, T)$ は次式のように表せる。

$$q(\theta, T) = q_\theta(\theta, T) + q_T(\theta, T) \quad (7)$$

ここで、 $q_\theta(\theta, T)$ は水分勾配によるフラックス、 $q_T(\theta, T)$ は温度勾配によるフラックスである。これらは、水分勾配による水分拡散係数 D_θ および温度勾配による水分拡散係数 D_T により、次のように表すことができる⁶⁾。

$$q_\theta(\theta, T) = -D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial Z} \quad (8)$$

$$q_T(\theta, T) = -D_T \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (9)$$

ここで、 Z は、高温側に設定した供試体下部からの距離である。これより、温度勾配による水分拡散係数 D_T は次式のようになる。

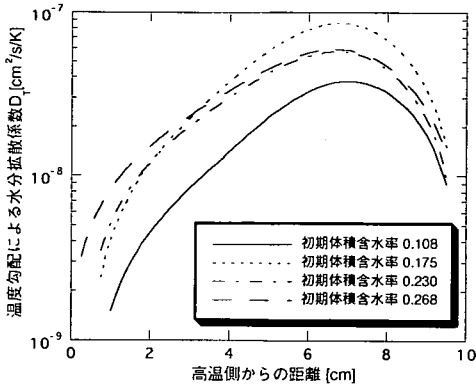


図-13 温度勾配による水分拡散係数の測定結果

$$D_T = - \frac{q(\theta, T) - \left(-D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} \right)}{\frac{\partial T}{\partial z}} \quad (10)$$

ここで、 $\partial \theta / \partial z$ は水分勾配、 $\partial T / \partial z$ は温度勾配を表し、図-11, 12の測定結果より求めることができる。また、水分勾配による水分拡散係数 D_θ は図-10に示すように浸潤試験により得られている。これらの関係より、温度勾配による水分拡散係数 D_T は図-13のように $10^9 \sim 10^8 \text{ cm}^2/\text{s/K}$ の範囲となった。

4. 考察

不飽和土中における一定温度のもとでの水分移動の評価は、サクシオン勾配を駆動力とする不飽和浸透流解析が有効な手法として多くの分野で応用されている。しかしながら、水分勾配と温度勾配が同時に存在する場合には、水分勾配による流れと温度勾配による流れが重ね合った状態で生じ、温度勾配による流れが卓越する場合には、水分勾配の減少方向とは逆方向に流れが生じることがある。このように、水分勾配と流れの関係の記述だけでは水分移動の実態を適切に評価することができないため、水分勾配による流れと、温度勾配による流れをそれぞれ個別に表す必要がある⁶⁾。このようなことから、温度勾配が存在する場合の評価に不飽和浸透流解析を用いる際には、温度勾配による水分の移動を追加した拡張モデルが用いられている^{13), 14)}。

土中水の液体としての運動は、質量流のプロセスであるが、不飽和流れの方程式を拡散方程式と類似の形に変換することにより、数学的取り扱いを容易にすることができる。このため、不飽和土中の水分移動を拡散型の表記でモデル化することも多い^{6), 15)}。

本研究においても、水分勾配および温度勾配による水分移動を拡散型の表記で整理することとし、Philip & de Vries のモデル¹⁵⁾を基本として水分拡散係数の算定を行なった。不飽和粘土中の水分は、液状水と水蒸気の二相の状態で移動するといわれており、液状水と水蒸気のフラックスを足しあわせたものが水分移動の全フラックスと考えられている^{6), 15)}。そこで、次式に示すように、水分勾配による水分拡散係数 D_θ は、液状水の拡散係数 D_{θ_l} と水蒸気の拡散係数 D_{θ_v} の和とし、また、温度勾配による水分拡散係数 D_T も、液状水の拡散係数 D_{T_l} と水蒸気の拡散係数 D_{T_v} の和とし、それぞれを個別に算定した。水蒸気の拡散係数については、不飽和粘土中の水蒸気量をマトリックスポテンシャルおよび温度から算定することにより水分の相変化を考慮し、液状水の拡散係数については、相変化による液状水量の変化は微小であり無視し得るため相変化を考慮していない。

$$D_\theta = D_{\theta_l} + D_{\theta_v} \quad (11)$$

$$D_T = D_{T_l} + D_{T_v} \quad (12)$$

(1) 水分勾配による水分拡散係数

a) 液状水の拡散係数

等温条件下において、土中の水分移動は重力項が微小であれば水分勾配のみ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⁶⁾。

$$q = -k \frac{\partial \psi}{\partial z} = -D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad (13)$$

$$D_{\theta_l} = k / \frac{\partial \theta}{\partial \psi} \quad (14)$$

ここで、 k は不飽和透水係数、 ψ はサクシオンであり、 $\partial \theta / \partial \psi$ は比水分容量を表す。不飽和透水係数は、次式に示すvan Genuchtenのモデル¹¹⁾により求められる比透水係数 k_r と、図-5に得られた飽和透水係数 k_s の積により求められる。図-14のようになる。

$$k_r = \sqrt{\frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r}} \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{\theta - \theta_r}{\theta_{sat} - \theta_r} \right)^{\frac{1}{1-\beta}} \right]^{-1-\beta} \right\}^2 \quad (15)$$

一方、図-8に示した水分特性曲線を用いれば、比水分容量は図-15のようになる。

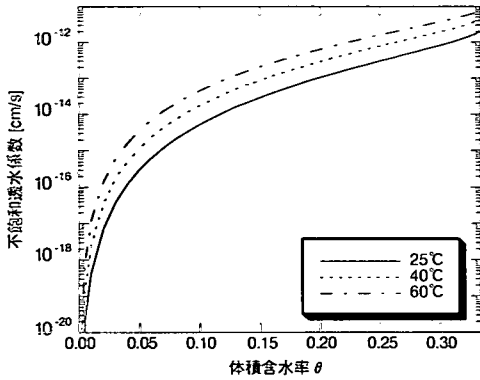


図-14 不飽和透水係数

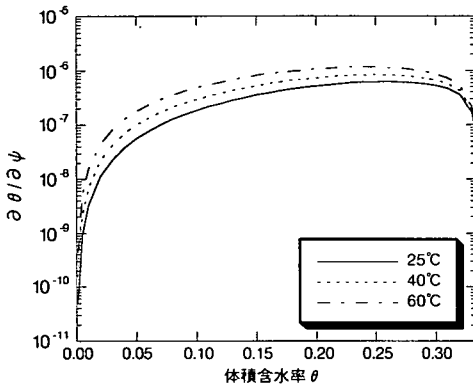


図-15 比水分容量

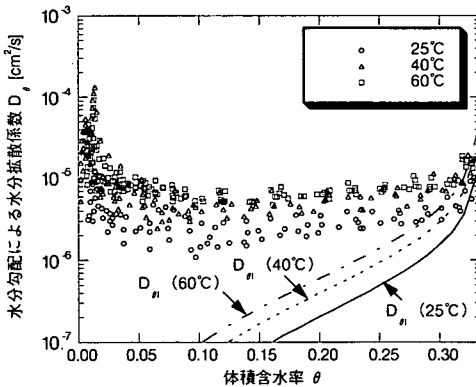


図-16 水分勾配による液状水の拡散係数

上述の関係より、水分勾配による液状水の拡散係数 D_{l1} は図-16 中の三本の曲線のようになる。

b) 水蒸気の拡散係数

土中の水蒸気移動は、Fick の法則による気体の拡散と同様に水蒸気の密度勾配によって生じる。水分勾配が存在する場合、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。

土中の水蒸気移動の場合の拡散係数 $D_{\theta v}$ は、大気

中のガスの拡散を多孔質体に拡張した次式の Philip & de Vries の式で表される^{6), 15)}。

$$D_{\theta v} = a \tau D_a v \frac{\rho'' P_v M}{\rho P_s RT} \frac{\partial \Psi_m}{\partial \theta} \quad (16)$$

ここで、 ρ は水の密度、 ρ'' は飽和水蒸気密度である。 Ψ_m はマトリックポテンシャルであるが、前述したように、全ポテンシャル Ψ に占める浸透ポテンシャル Ψ_o が十分に小さいため、全ポテンシャルの値を用いた。 a は気相率であり、体積含水率 θ を用いて次式で表される。

$$a = \theta_{sat} - \theta \quad (17)$$

ここで、 $\theta_{sat} = 0.333$ とした。

τ はガス拡散が行われる空隙の屈曲性を表す屈曲度因子である。この値を正確に測定するのは困難であるため、気相率や空隙比の関数として様々な経験値や理論式が提案されている。このうち、ガスに対しては、次式に示す屈曲度 ζ_g の逆数として求められる¹⁶⁾。屈曲度は、常に1よりも大きく2を越えることもありうるといわれている⁸⁾。

$$\tau = \frac{1}{\zeta_g} = 0.66^a \quad (18)$$

D_a は、空気中での水蒸気の拡散係数であり、絶対温度 T の関数として以下のように定義されている¹⁷⁾。

$$D_a = 5.82 \times 10^{-7} T^{2.3} \quad (19)$$

v は、マスフローファクターといわれ、空気中の水蒸気の拡散率が、空気と水蒸気との相互拡散の条件で定義され、

$$v = P / (P - P_v) \quad (20)$$

で表される。ここで、 P は全圧、 P_v は水蒸気分圧である。水蒸気分圧 P_v については、図-8 に示す水分特性曲線を用いて、式 (2)、(3) から求めることができる。水蒸気分圧 P_v は、全圧 P に比十分に小さいため、マスフローファクター v は、25°C から 60°C の範囲でおおよそ1となる。

相対湿度 (P_v / P_s) も、図-8 に示す水分特性曲線を用いて求めることができる。

上述の関係より、水分勾配による水蒸気の拡散係数 $D_{\theta v}$ は図-17 中の三本の曲線のようになる。

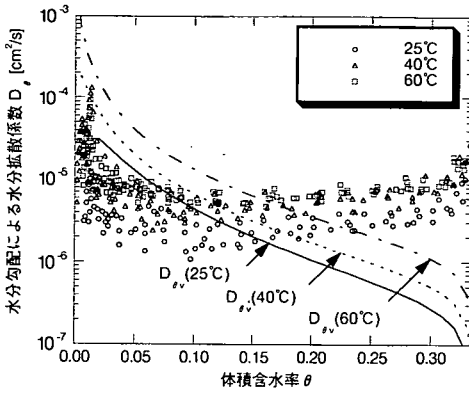


図-17 水分勾配による水蒸気の拡散係数

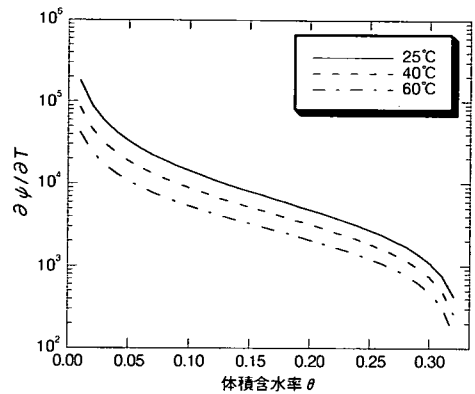


図-19 水分特性曲線の温度による微分値

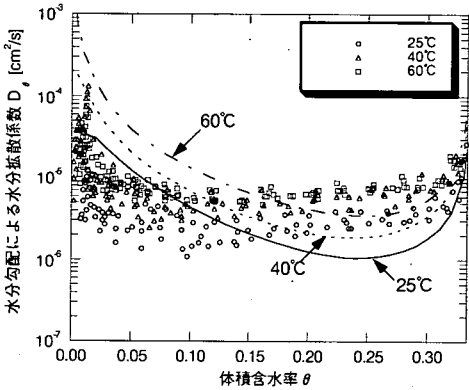


図-18 水分勾配による水分拡散係数

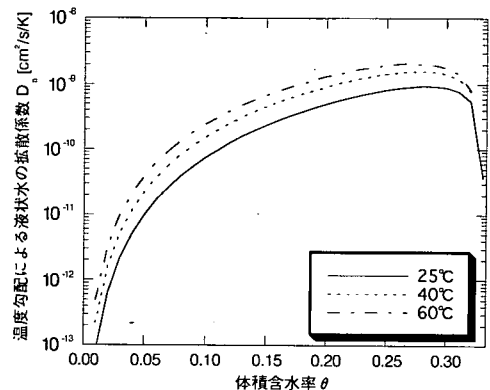


図-20 温度勾配による液状水の拡散係数

したがって、Darcy式で求めた液状水の拡散係数 $D_{\theta l}$ と、Philip & de Vriesの式で求めた水蒸気の拡散係数 $D_{\theta v}$ を足しあわせると、水分勾配による水分拡散係数 D_{θ} は図-18のようになる。これより、水分勾配による水分拡散係数 D_{θ} は体積含水率の低領域と高領域で値が大きくなるU字型の分布を示した実験値を再現する結果となる¹⁸⁾。これは、低水分領域では水蒸気の移動が、高水分領域では液状水の移動が卓越するというこれまでの研究結果と一致している³⁾。

(2) 温度勾配による水分拡散係数

a) 液状水の拡散係数

土中に温度勾配が形成されると、温度によりマトリックポテンシャルが変化するため水分は移動する。温度勾配による液状水の拡散係数 D_{Tl} は、次式によって表される^{6)・15)}。

$$D_{Tl} = k \frac{\partial \psi}{\partial T} \quad (21)$$

ここで、 k は不飽和透水係数であり、図-14に示した

通りである。 ψ はサクションであり、水分特性曲線の温度による微分値は図-19のようになる。

上述の関係より、温度勾配による液状水の拡散係数 D_{Tl} は図-20のようになる。

b) 水蒸気の拡散係数

温度勾配による水蒸気の拡散係数 D_{Tv} は次式により表せる^{6)・15)}。

$$D_{Tv} = \eta \alpha \tau D_a v \frac{P_v}{P_s} \frac{d(\rho''/\rho')}{dT} \quad (22)$$

ここで、 η は補正係数 (enhancement factor) であり、実際の水蒸気拡散移動量と単純拡散モデルによる移動量との比を表し次式で定義される^{6)・15)}。

$$\eta = \frac{a + \theta \left(\frac{dT}{dz} \right)_a}{\alpha \tau \left(\frac{dT}{dz} \right)} \quad (23)$$

土中の温度勾配は、固相、液相、気相、それぞれで異なると考えられ、通常に測定される温度勾配は

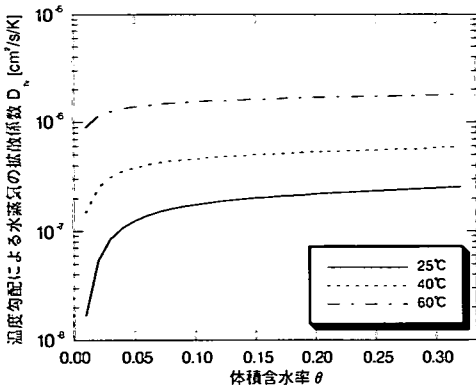


図-21 温度勾配による水蒸気の拡散係数

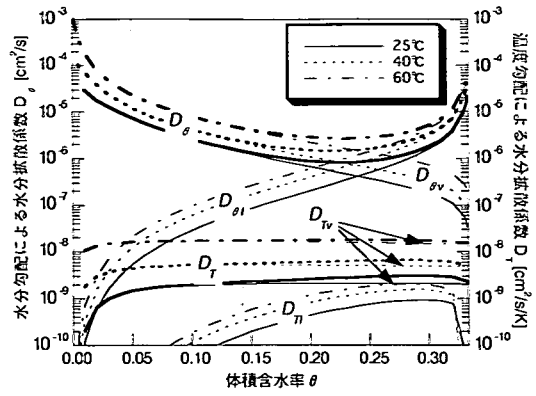


図-24 水分拡散係数の概念的な大きさの比較

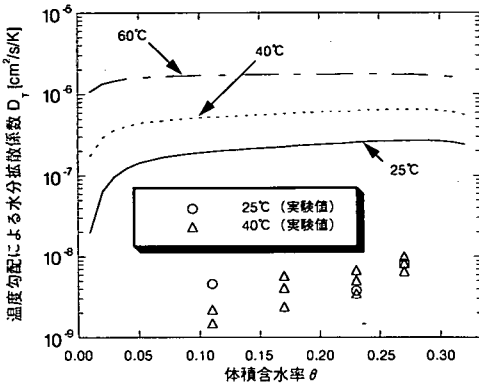


図-22 温度勾配による水分拡散係数

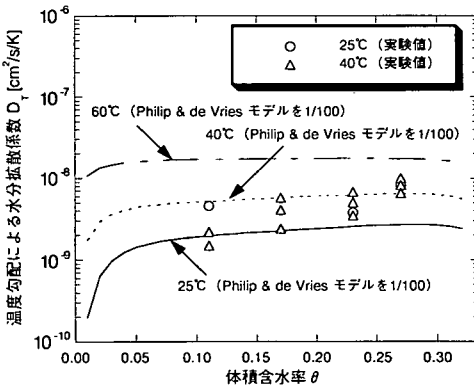


図-23 温度勾配による水分拡散係数 (Philip & de Vries モデルで求めた水蒸気の拡散係数を 1/100 にした)

三相の平均と考えられる。土中の水分が比較的多くなったときは、土粒子空隙に孤立して存在する液状水を伸介して蒸発と凝縮を繰り返すことにより水蒸気が移動するため、空気間隙中の温度勾配は、土の三相の平均温度勾配に等しくならない。式 (23) 中の $(dT/dz)_a / (dT/dz)$ は、気相中の平均温度勾配と土全体の温度勾配の比であり、式 (23) を式 (22) に代入すると次式のような形になる。

$$D_{T_v} = (a + \theta) D_a v \frac{P_v}{P_s} \frac{d(\rho''/\rho')}{dT} \left(\frac{dT}{dz} \right)_a \left(\frac{dT}{dz} \right) \quad (24)$$

ここで、土の場合の $(dT/dz)_a / (dT/dz)$ は、Philip & de Vries によって θ と $a + \theta$ との関係から 1.3~3.0 の範囲とされている^{6), 15)}。また、 $(dT/dz)_a / (dT/dz)$ の温度依存性に関しては、22.5~32.5°C の範囲では小さいという研究例がある¹⁹⁾。今回対象とする範囲では、Philip & de Vries によると、 $\theta=0$ のとき 3.0、 $\theta=0.2$ のとき 2.0、 $\theta=0.3$ のときに 2.1 とされており、ここでは、この関係を用いた。また、マスフローファクター v は、前述したように 25°C から 60°C の範囲においておよそ 1 となるため $v=1$ とする。これらの関係より、温度勾配による水蒸気の拡散係数 D_{T_v} は図-21 のようになる。

したがって、Darcy 式で求めた液状水の拡散係数 D_T と、Philip & de Vries の式で求めた水蒸気の拡散係数 D_{T_v} を足しあわせると、温度勾配による水分拡散係数 D_T は図-22 の曲線のようにになる。液状水の拡散係数に比べて水蒸気の拡散係数は、3 オーダー以上大きいことから、温度勾配による水分移動は、主に水蒸気での移動であることが分かる。図中には、図-13 で得られた温度勾配試験の結果から、25°C と 40°C の値を取りだしたものを示している。これより、理論的に求めた値は、実験値に比べ 2 オーダー程度大きくなる結果となった。図-23 は、実験値に合わせるため、Philip & de Vries の式で求めた水蒸気の拡散係数 D_{T_v} を 1/100 にして求めたものである。土に対して適用された温度勾配による水蒸気拡散に関する構成モデルが圧縮ベントナイトに直接適用できない理由としては、ベントナイト特有のモンモリロナイト層間による高い水の保水能力が、水蒸気の発生と移

動を抑制するためと考えられる。

図-24は、Darcy型の式により求めた液状水の拡散係数と、Philip & de Vriesのモデルによって求めた水蒸気の拡散係数を足しあわせて求めた水分勾配および温度勾配による水分拡散係数の概念的な大きさを示したものである。水分勾配による水分拡散係数 D_{θ} は、低水分領域では水蒸気の移動が、高水分領域では液状水の移動が卓越する形となる。また、温度勾配による水分拡散係数 D_T については、Philip & de Vriesのモデルによって求めた水蒸気の拡散係数を1/100にした場合でも、液状水の拡散係数に比べて1オーダー程度大きく、温度勾配による水分移動が、主に水蒸気での移動であることが分かる。水分勾配による水分拡散係数 D_{θ} の最小値に対応する体積含水率は、0.25程度であり、これは、図-8に示すように、サクシジョンの勾配が最も小さくなる体積含水率に相当する。また、温度の上昇にともない各々の水分拡散係数は大きくなっている。これは、水分勾配による水分拡散係数 D_{θ} については、温度の上昇にともなう透水係数および水蒸気密度の増大に起因する。一方、温度勾配による水分拡散係数 D_T については、温度の上昇による水蒸気密度の増大に起因するものである。水蒸気密度の増大については、図-8に示したように、温度の上昇にともないサクシジョンが減少するため、ペントナイトの保水能力が低下し、したがって水蒸気密度が大きくなる。このように、圧縮ペントナイトの水分移動はサクシジョンに大きく依存する形となる。

(3) 水分拡散係数の妥当性の評価

ここでは、Darcy型の式により求めた液状水の拡散係数とPhilip & de Vriesモデルにより求めた水蒸気の拡散係数の和として表した水分勾配および温度勾配の水分拡散係数の妥当性を評価するため、数値解析を実施し、図-9に示す浸潤試験で得られた水分分布および図-11に示す温度勾配試験で得られた水分分布との比較を行った。解析には、濃度勾配はもとより温度勾配も考慮した質量拡散解析が可能である汎用有限要素法解析システムのABAQUS²⁰⁾を用いた。

a) 水分勾配による水分拡散係数

浸潤試験は一次元であるので、次のような支配方程式となる。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(D_{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial Z} \right) \quad (25)$$

ここで、 D_{θ} は水分勾配による水分拡散係数であり、

表-7 浸潤試験結果検証解析条件

乾燥密度 [kg/m ³]	1800
初期体積含水率	0
飽和体積含水率	0.333
水分拡散係数 [cm ² /s]	図-18の計算値
境界条件	$\theta = 0.333 \text{ at } Z = 0.0$ $\partial \theta / \partial Z = 0 \text{ at } Z = 2.0$

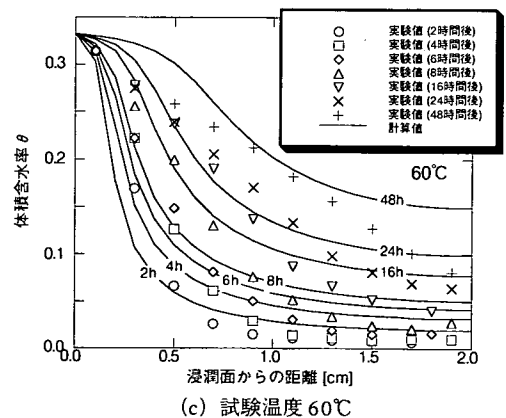
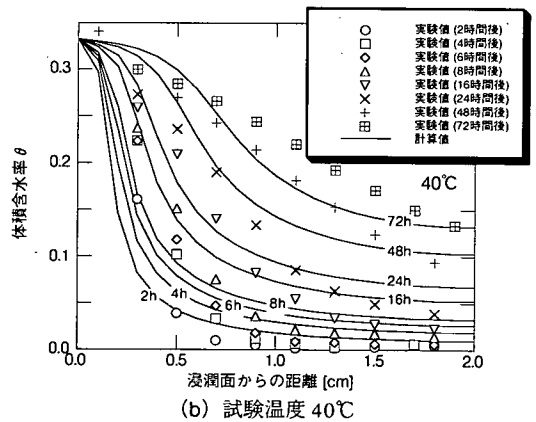
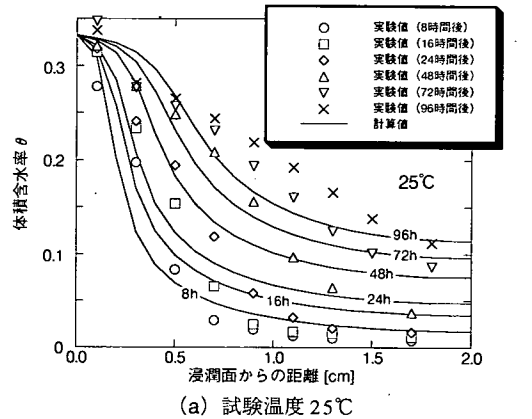


図-25 浸潤による水分移動の解析結果

表-8 温度勾配試験検証解析条件

乾燥密度 [kg/m ³]	1800
初期体積含水率	0.108, 0.175, 0.230, 0.268
飽和体積含水率	0.333
水分拡散係数 [cm ² /s/K]	25℃ : 2.0×10 ⁻⁹ 40℃ : 5.0×10 ⁻⁹ 60℃ : 2.0×10 ⁻⁸
境界条件	$\partial\theta / \partial Z = 0$

図-18中の曲線を使っている。解析の諸条件を表-7に示す。

解析結果を、図-9で示した浸潤試験によって得られた水分分布の測定結果と比較して図-25に示す。その結果、浸潤時間が長くなると、図中曲線で示した解析結果の再現性が低下する傾向にある。これは、図-3に示すように装置に設けた空気口からの水分の吸収や蒸発などの試験誤差とともに、浸潤にともなうペントナイトの体積膨張と固相移動^{2), 3)}を考慮した評価になっていないこともその原因のひとつと考えられる。しかしながら、土に対して設定させたパラメータおよび構成モデル使用していることを考慮すれば、計算結果は試験結果をおおむね再現できているといえる。

b) 温度勾配による水分拡散係数

温度勾配試験も一次元であるので、支配方程式は次のようになる。

$$\frac{\partial\theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial Z} \left(D_{\theta} \frac{\partial\theta}{\partial Z} \right) + \frac{\partial}{\partial Z} \left(D_T \frac{\partial T}{\partial Z} \right) \quad (26)$$

ここで、 D_{θ} は水分勾配による水分拡散係数であり、図-18で示した曲線が使われる。 D_T は温度勾配による水分拡散係数であり、ここでは、図-23で示したように実験値と合わせるために Philip & de Vries モデルにより得られる水蒸気の拡散係数を 1/100 に設定した値を用いた。そして、図-23に示すように温度勾配による水分拡散係数 D_T は、体積含水率が 0.05 以下で小さくなるが、それ以上ではほぼ一定であることから、体積含水率依存性は無視し、温度依存性のみを考慮することとし、25℃で $2.0 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s/K}$ 、40℃で $5.0 \times 10^{-9} \text{cm}^2/\text{s/K}$ 、60℃で $2.0 \times 10^{-8} \text{cm}^2/\text{s/K}$ に設定した。解析の諸条件を表-8に示す。解析結果を、図-11で示した温度勾配試験によって得られた水分分布の測定結果と比較して図-26に示す。その結果、曲線で示した計算値はプロットで示した実験値をほぼ再現している。したがって、Philip & de Vries モデルにより得られる水蒸気の拡散係数 D_{θ_v} をもとに設

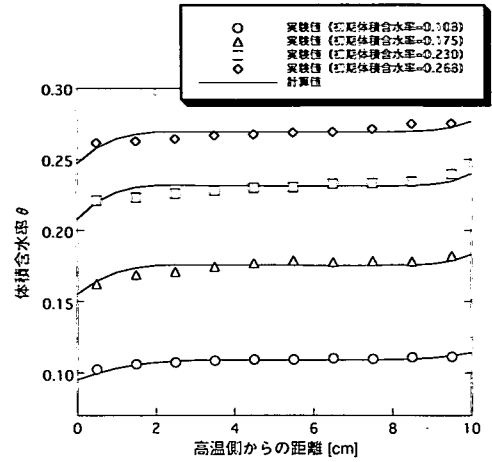


図-26 温度勾配による水分移動の解析結果

定した温度勾配による水分拡散係数 D_T はおおむね妥当であるといえる。

5.まとめ

- (1) 試験により得られた水分勾配による水分拡散係数は、体積含水率の低・高領域で値が大きくなるU字型の分布を示した。また、Darcy式により液状水の拡散係数 D_{θ_l} を、Philip & de Vries モデルにより水蒸気の拡散係数 D_{θ_v} を求めた。その結果、両者を足しあわせた水分拡散係数は、U字型の分布を示した実験値をおおむね再現した。さらに、理論的に求めた値を用いて数値解析を実施したところ、試験により得られた水分分布をおおむね再現する結果となった。このことから、水分勾配による水分拡散係数 D_{θ} は、液状水の拡散係数 D_{θ_l} と、水蒸気の拡散係数 D_{θ_v} を足しあわせた形で表現できる可能性が示された。
- (2) 温度勾配による水分移動を把握するための試験を実施し、温度勾配による水分拡散係数を定量的に把握した。また、Darcy式により液状水の拡散係数 D_{T_l} を、Philip & de Vries モデルにより水蒸気の拡散係数 D_{T_v} を求めた。その結果、温度勾配による水分の移動が主に水蒸気での移動であることが分かった。また、Philip & de Vries モデルによる水蒸気の拡散係数 D_{θ_v} は、実験値よりも2オーダー程度大きくなる結果となり、本モデルが圧縮ペントナイトに直接適用できないことが分かった。しかしながら、試験により求めた温度勾配による拡散係数に合わせるように係数 1/100 を乗じて設定した値を用いて数値解析を行なったところ、水分分

布をほぼ再現することから、温度勾配による水分拡散係数の体積含水率依存性や温度依存性の傾向を知るための指標とすることができた。

6. おわりに

不飽和状態における土中の水分移動を解析評価するためには、水分特性曲線、不飽和透水係数、あるいは、非定常状態における水分の拡散性の程度を表す拡散係数などの物性値が必要となる。しかしながら、これらの物性を計測によって乾燥状態から飽和状態までの全領域について取得することは非常に困難である。このため、これらの物性値を推測する多くの経験式や理論式が提案されている。

本研究では、高密度に圧縮したベントナイトに対して、従来より提案されている不飽和水理モデルおよび水分移動の構成モデルの適用性を示したとともに、液状水と水蒸気の移動を定量的に把握することができた。一方、多くの仮定や、土に対して設定されたパラメータを用いていることなどから、その妥当性や適応範囲についてさらに検討していく必要がある。

付録

k_s	: 飽和透水係数 [cm/s]
i	: 動水勾配 [-]
v	: Darcy 流速 [cm/s]
Ψ	: 全ポテンシャル [J/kg]
Ψ_m	: マトリックポテンシャル [J/kg]
Ψ_o	: 浸透ポテンシャル [J/kg]
M	: 水の分子量 [kg/mol]
R	: 一般気体定数 [J/mol K]
T	: 絶対温度 [K]
P_v	: 水蒸気分圧 [Pa]
P_s	: 飽和水蒸気圧 [Pa]
Ψ	: サクション [cmH ₂ O]
g	: 重力加速度 [cm/s ²]
θ	: 体積含水率 [-]
θ_{sat}	: 飽和体積含水率 [-]
θ_r	: 最小含水量 [-]
q	: 水移動のフラックス [cm/s]
q_θ	: 水分勾配による水移動フラックス [cm/s]
q_T	: 温度勾配による水移動フラックス [cm/s]
Z	: 供試体下部からの距離 [cm]
t	: 時間 [s]
l	: 供試体長さ [cm]
D_θ	: 水分勾配による水分拡散係数 [cm ² /s]

D_{θ_l}	: 水分勾配による液状水の拡散係数 [cm ² /s]
D_{θ_v}	: 水分勾配による水蒸気の拡散係数 [cm ² /s]
D_T	: 温度勾配による水分拡散係数 [cm ² /s/K]
D_{T_l}	: 温度勾配による液状水の拡散係数 [cm ² /s/K]
D_{T_v}	: 温度勾配による水蒸気の拡散係数 [cm ² /s/K]
k	: 不飽和透水係数 [cm/s]
k_r	: 比透水係数 [-]
a	: 気相率 [-]
ζ_g	: 屈曲度 [-]
τ	: 屈曲度因子 [-]
D_a	: 空気中の水蒸気の拡散係数 [cm ² /s]
v	: マスフローファクター [-]
P	: 全圧 [Pa]
ρ'	: 水の密度 [kg/m ³]
ρ''	: 飽和水蒸気密度 [kg/m ³]
η	: 補正係数 [-]

参考文献

- 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技術的信頼性、一、地層処分研究開発第二次取りまとめ総論レポート、JNC TN1400 99-020, 1999.
- 中野政詩, 雨宮悠, 藤井克己, 石田朋靖, 石井祐二：不飽和粘土の浸潤と膨潤, 農業土木学会論文集, 第100号, pp.8-16, 1982.
- 中野政詩, 雨宮悠, 藤井克己, 石田朋靖, 石井明俊：拘束された不飽和粘土の浸潤と膨潤圧, 農業土木学会論文集, 第112号, pp.55-66, 1984.
- 社団法人地盤工学会：土質試験の方法と解説（第一回改訂版）, 2000.
- 鈴木英明, 竹内真司, 菅野毅：圧縮ベントナイトの透水係数の温度依存性, 日本原子力学会「1994春の年会」, 要旨集, p.80, 1994.
- 中野政詩：土の物質移動学, 東京大学出版会, 1991.
- 塩沢晶：サイクロメータによる土壌水のポテンシャル測定, 土壌の物理性, Vol.62, pp.53-61, 1991.
- 岩田進午：土壌物理学概論 土と水の化学, (株)養賢堂, 1993.
- 鈴木英明, 藤田朝雄, 中野政詩：ベントナイトの水分特性曲線, 土木学会第54回年次学術講演会, 講演概要集 III-A294, 1999.
- Mohamed, A., Young, R. and Cheung, S. : Temperature Dependence of Soil Water Potential, *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol.15, No.4, pp.330-339, December 1992.
- van Genuchten, R. : Calculating the unsaturated hydraulic conductivity with a new closed - form analytical model, Research Report, No.78 -WR- 08, Princeton University, 1978.
- 竹内真司, 原啓二, 中野政詩：圧縮ベントナイトの水分特性曲線および水分拡散係数と水の移動形態, 地盤

- 工学会論文報告集, Vol.35, No.3, pp. 129-137, 1995.
- 13) 千々松正和, 杉田裕, 藤田朝雄, 雨宮清, 小林晃, 大西有三: 原位置試験場における熱-水-応力連成試験結果および解析評価, 土木学会論文集, No.652/III-51, pp.125-139, 2000.
- 14) Borgesson, L. and Hermelind, J. : Preliminary modelling of the water-saturation phase of the buffer and backfill materials, Aspo Hard Rock Laboratory, International Progress report IPR- 00-11, 1999.
- 15) Philip, J.R. and de Vries, D.A. : Moisture movement in porous materials under temperature gradient, *Transactions, American Geophysical Union*, Vol.38, No.2, 1957.
- 16) Jury, W., Gardner, W., and Gardner, W. : Soil Physics, Fifth Edition, JOHN WILEY & SONS, INC, 1991.
- 17) 田中靖治, 玉井信行, 浅枝隆: 温度勾配の存在する土壌内の水蒸気移動量の間隙モデルによる評価, 土木学会論文集, 第405号/II-11, pp.53-62, 1989.
- 18) 鈴木英明, 千々松正和, 藤田朝雄, 中野政詩: 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, 講演概要集 III-A229, 2000.
- 19) Cass, A., Campbell, G.S. and Jones, T.L. : Enhancement of thermal water vapor diffusion in soil, *Soil Science Society. America*, Vol. 48, pp.25-32, 1984.
- 20) Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. : ABAQUS/Standard User's Manual, 1995.

(2000.11.16 受付)

EVALUATION OF WATER MOVEMENT IN UNSATURATED COMPACTED BENTONITE

Hideaki SUZUKI, Masakazu CHIJIMATSU, Tomoo FUJITA and Masashi NAKANO

After the emplacement of engineered barrier system (EBS), it is expected that the near-field environment will be impacted by phenomena such as heat dissipation by conduction and other heat transfer mechanism, infiltration of groundwater from the surrounding rock into the EBS. This report describes the results on measurement of isothermal water diffusivity and thermal water diffusivity in compacted bentonite and the results on comparison between measured and theoretical calculated properties. The results indicate that the Darcy's law and Philip & de Vries model are applicable to estimating the isothermal water diffusivity and the thermal water diffusivity in compacted bentonite.