

塩水浸潤における緩衝材の不飽和特性の推定

(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
 同上 正会員 藤田朝雄

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、廃棄体からの発熱に伴う温度環境の変化、地下水の浸潤、地下水と緩衝材に含まれる鉱物類との化学反応、緩衝材の膨潤圧発生など、相互作用による影響を受ける。この相互作用の多重バリアシステムの長期性能に与える影響を把握し評価する目的で、熱-水-力学-化学 (THMC) 連成挙動に着目した試験や評価解析システムの開発¹⁾を進めている。本報では処分初期の緩衝材が不飽和から飽和へ遷移する過程の塩水浸潤解析に必要な不飽和特性の推定について報告する。

2. 塩水浸潤における飽和透水係数と不飽和特性

THMC 連成挙動を考慮した緩衝材中の水分移動の支配方程式は(1)式で示され、透水係数 k は(2)式に示す飽和透水係数 k_{sat} と比透水係数 k_r の積で与えられる。飽和透水係数と有効粘土密度 ρ_e の関係は人工海水 (塩濃度 3wt%) および蒸留水に対し得られ²⁾ (図-1)、この関係は THMC 連成解析システムにおいて関数として組み込まれている。しかし、不飽和特性 (比透水係数, 水分特性曲線) は蒸留水に関して得られているが塩水に関しては得られていないため今回これらの推定をおこなった。

$$\rho_{l0} n_v S_r \beta_T \frac{\partial T}{\partial t} - \rho_{l0} n_v S_r \rho_l g \beta_p \frac{\partial H}{\partial t} - \rho_l \frac{\partial \theta}{\partial t} - \rho_l S_r \frac{\partial u}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \rho_l k \frac{\partial H}{\partial x_i} + \rho_l D_T \frac{\partial T}{\partial x_i} \right\} = 0 \quad (1), \quad k = k_r k_{sat} \quad (2)$$

ここに、 T : 温度, H : 全水頭, θ : 体積含水率, u : 変位, ρ_{l0} : 液相の基準温度・圧力における密度, n_v : 間隙率, S_r : 飽和度, ρ_l : 液相の密度, g : 重力加速度, β_p : 液相の膨張係数, D_T : 温度勾配水分拡散係数

3. 水分特性曲線の推定

水分特性曲線は緩衝材に含まれる水分量 (ここでは体積含水率) とサクシヨンの関係で、緩衝材 (クニゲル V1 70wt%, ケイ砂 30wt%, 乾燥密度 1.6 Mg/m^3) の蒸留水に対しては測定³⁾されている。この測定値と測定値を van Genuchten 式で近似した曲線を図-2 に示す。塩水の場合、浸透 (オスモティック) ポテンシャル ϕ_o による影響を評価する必要がある。 ϕ_o は電気伝導度 χ [mS/m]により次式⁴⁾で表される。

$$\phi_o = -0.036 \chi \quad [\text{mH}_2\text{O}]$$

塩濃度 3wt% の電気伝導度 5000[mS/m]を上式に代入し $\phi_o = -180[\text{mH}_2\text{O}]$ を得る。この値は塩水の値であり、塩水を含む混合ベントナイト (体積含水率 θ) のサクシヨン ϕ は、蒸留水での値を ϕ_D とすると、次式で与えることとした。

$$\phi = \phi_D - 180\theta \cdot \phi_o \quad [\text{mH}_2\text{O}]$$

上式を蒸留水で近似曲線に適用した結果を図-2 に NaCl 3wt% として示す。塩濃度の影響は緩衝材のサクシヨンに対して小さく、無視しうると考えられる。

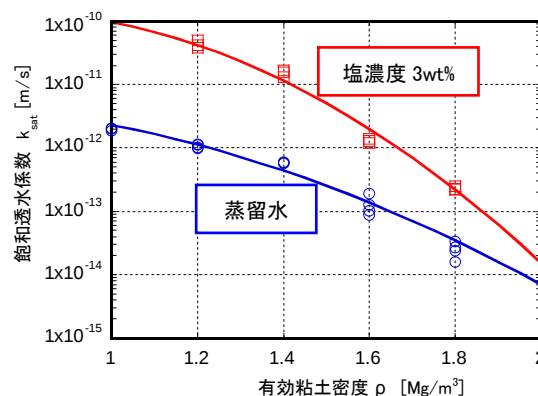


図-1 有効粘土密度と飽和透水係数

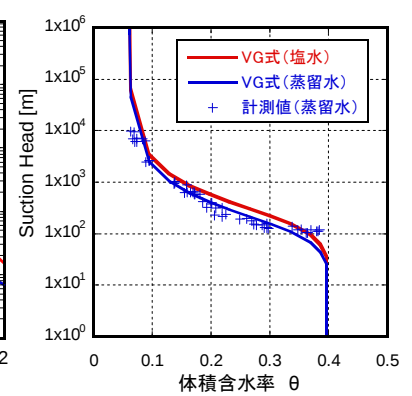


図-2 水分特性曲線

キーワード 緩衝材, 透水係数, 不飽和, 塩水, 連成解析

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

4. 比透水係数の同定

比透水係数は図-3 に示す 1 次元塩水浸潤試験を実施し、得られた体積含水率分布に対する逆解析的アプローチで同定した。試験は直径 20mm×高さ 20mm の緩衝材試料（クニゲル V1 70wt%，ケイ砂 30wt%，乾燥密度 1.6Mg/m^3 ）の下方より 3wt% 塩水を浸潤させ、2, 6, 24, 72 時間経過した時点の体積含水率分布を測定した。これに対し比透水係数を未知関数として試行錯誤的に測定された体積含水率分布を再現する関数を同定した。図-4 に再現された体積含水率分布、得られた比透水係数を図-5 に示す。図-5 には蒸留水に対する比透水係数⁵⁾と試行錯誤過程で適用した VG モデルの例も示す。同定結果は飽和部で大きく低下する折れ線となった。

5. 塩水浸潤特性の適用性

推定された不飽和特性の適用性を確認するため 3 次元塩水浸潤試験への適用を試みた。この試験は図-6 に示すように直径 34mm のヒータの周囲に緩衝材を高さ 150mm×直径 150mm で締め固めた試料の外周から塩水を浸潤させる。温度はヒータ部 90°C 、塩水は 70°C で保持し、緩衝材内部の水分、温度、析出塩や間隙水の水質の経時変化や分布を測定するものである。図-7 に試験開始後 61 日経過時点の体積含水率、温度、pH、 HCO_3^- 濃度、Cl 濃度、析出塩 CaSO_4 濃度のヒータ表面からの分布を示す。体積含水率、温度は解析と測定値がほぼ一致し、設定した不飽和特性の適切性が確認される。pH や HCO_3^- 、Cl、 CaSO_4 濃度に関しても必ずしも一致していないがその分布傾向等についても測定と解析は調和的である。

6. おわりに

塩水浸潤時の緩衝材の不飽和特性（水分特性曲線、比透水係数）を推定した。この結果、緩衝材のサクシオンが大きいために塩濃度の水分特性曲線への影響は無視しうることがわかり、別途実施した高温環境下における 3 次元塩水浸潤試験へも推定した不飽和特性が適用できることを確認した。なお本研究は、経済産業省資源エネルギー庁の「平成 22 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。

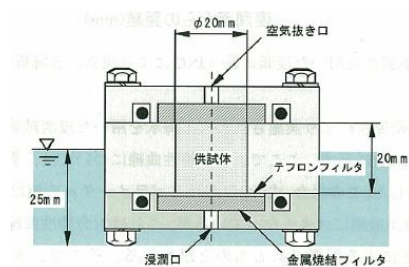


図-3 1 次元塩水浸潤試験装置の概要

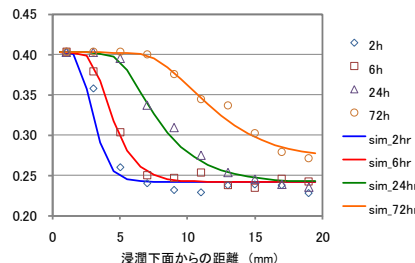


図-4 体積含水率分布の比較

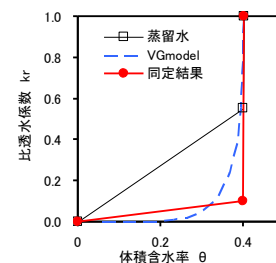


図-5 比透水係数

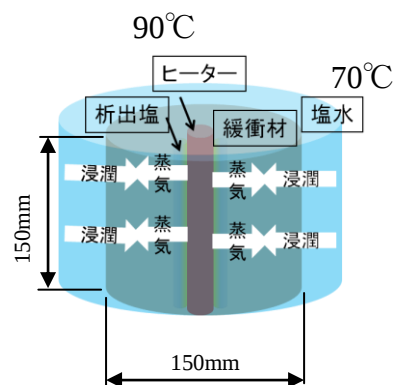


図-6 3 次元塩水浸潤試験

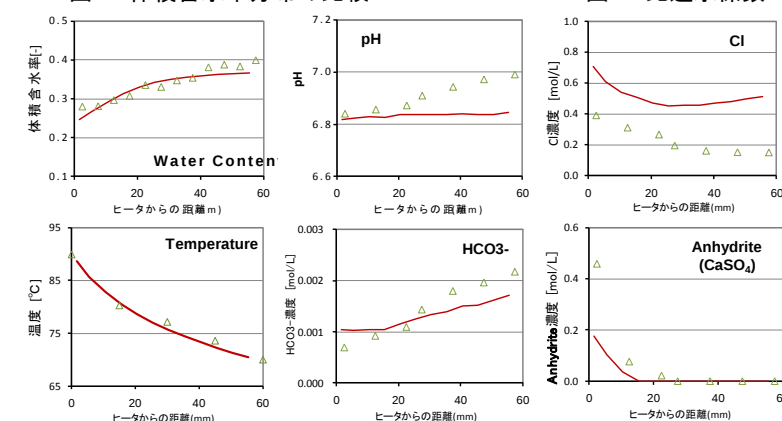


図-7 測定値と解析の比較（測定値は△，解析は曲線）

参考文献 1)木村誠ほか(2010): 緩衝材中の化学影響評価に向けた熱-水-応力-化学連成解析モデルの開発, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2010-034. 2)菊池広人, 棚井憲治(2004): 緩衝材の基本特性データベース (データ集・記録集) JNC TN8450 2003-0103 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 4)「土質試験の方法と解説」改定編集委員会編集(2001): 土質試験の方法と解説 (第一回改訂版), 社)地盤工学会, pp.118-132 5)藤崎淳ほか(2008): 熱-水-応力連成試験設備 (COUPLE) を用いた室内試験結果に基づく熱-水-連成モデルの信頼性確認, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Research 2008-020.