

粒子構造を考慮した塩水環境下におけるベントナイトの透水性のモデル化

(財)電力中央研究所 正会員 田中 幸久
 (財)電力中央研究所 正会員 中村 邦彦

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分において、処分地点が沿岸域地下深部の場合などを想定すると、地下水に海水が含まれている可能性がある。このため、海水がベントナイトの特性に及ぼす影響を検討する必要がある。当所では、人工海水を用いて、海水がベントナイトの特性に及ぼす影響について実験的に検討するとともに、そのモデル化を試みてきた¹⁾²⁾。ここでは、モンモリロナイトの粒子構造を考慮した塩水環境下におけるベントナイトの透水性のモデル化について述べる。

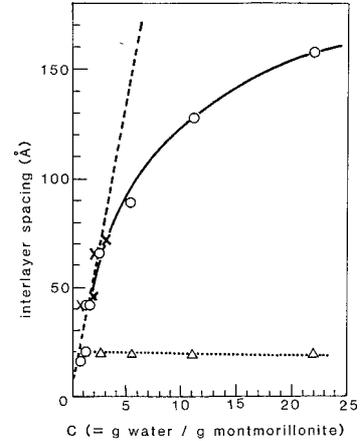


図1 水とモンモリロナイトの重量比 C と結晶間隔の関係 (Fukushima, 1984)
 実測値 (○: Na モンモリロナイトに加水, △: Na モンモリロナイトに水, CaCl₂ 又は HCl を加えた, x: Norrish による)
 計算値 (実線: zig-zag column モデル, 破線: straight column モデル)

2. 蒸留水ならびに人工海水条件下のモンモリロナイトの構造のモデル化

図1はモンモリロナイトのエマルジョンに対する X 線回折により得られたモンモリロナイト結晶間隔と水のモンモリロナイトに対する重量比 C の関係を示したものである³⁾。図1によれば、Na 型モンモリロナイトにおいては、 $1 < C < 3$ 程度(クニゲル V1 のベントナイト乾燥密度 $0.56 < d_b < 1.19 \text{ Mg/m}^3$ に相当)では straight column モデル(結晶間隔が一定の1次元積層構造モデル)で近似できるのに対して Ca 型化したモンモリロナイトでは C の値に係らずモンモリロナイト結晶間隔はほぼ一定である。Ca 型化したベントナイトの構造と人工海水100%

表1 モンモリロナイトの構造に関する知見のまとめ

ベントナイト乾燥密度 $d_b(\text{Mg/m}^3)$		~1.2	1.2~1.4	1.4~1.8	1.8~2.06	2.06~2.21
蒸留水	スタック内結晶間	結晶間隔一定の一次元積層構造	不明	一定(3水層)	一定(2水層 3水層混在)	一定(2水層 混在)
	スタック間			可変	可変	可変
人工海水 100%	スタック内結晶間	一定(3水層)		一定(3水層)	一定(2水層 3水層混在)	一定(2水層 混在)
	スタック間	可変		可変	可変	可変

溶液のベントナイトの構造は類似していると思われる⁴⁾ので、人工海水100%溶液のベントナイトにおいても図1中の Ca 型化したベントナイトと同様のモンモリロナイト結晶間隔と重量比 C の関係があると思われる。一方、締固めたモンモリロナイトに対する X 線回折も行われており、それによればモンモリロナイト乾燥密度 $d_m=1.0 \sim 1.4 \text{ Mg/m}^3$ ($d_b=1.50 \sim 1.80 \text{ Mg/m}^3$) では3水層(Three-water layer hydrate)であり、 $d_m=1.6 \sim 1.8 \text{ Mg/m}^3$ ($d_b=2.06 \sim 2.21 \text{ Mg/m}^3$) では2水層(Two-water layer hydrate)であり、 $1.3 \sim 1.6 \text{ Mg/m}^3$ では両者の状態が混在していることがわかっている⁵⁾⁶⁾。更に、 $d_m=1.2 \sim 1.8 \text{ Mg/m}^3$ では海水条件下における X 線回折結果は、蒸留水条件下における結果とほぼ同様であることが報告されている⁷⁾。以上の知見をまとめると表1のようになる。

本報告においては、モンモリロナイトの構造を図2に示すように仮定した。即ち、モンモリロナイト結晶は互いに平行であり、既往の知見⁸⁾

キーワード ベントナイト, 透水性, 塩水, モデル化

連絡先 〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646 (財)電力中央研究所 地球工学研究所 TEL 0471-82-1181

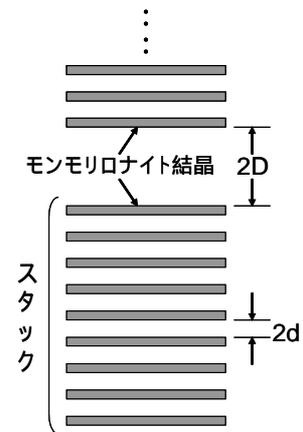


図2 本研究で想定したモンモリロナイト結晶構造

を参考にして $m=8$ と仮定した。また、スタック間にバネが存在し、そのバネの特性は人工海水の濃度に無関係であると仮定した。更に、結晶間の水の流れは結晶に平行であり、図2中の大きさ $2d$ のスタック内結晶間には拡散2重層が存在し、大きさ $2D$ のスタック間には拡散2重層が存在しないと仮定した。図3は、人工海水100%の結果から得られた D/t (t : モンモリロナイト結晶厚さ) と従来法により評価された膨潤圧又は上載圧の関係である。図3の関係が人工海水の濃度によらず成立すると仮定した。このような仮定の下で、透水係数を以下の式により計算した。ただし、このように仮定すると、 D の値は膨潤圧の大きさに応じて変化するため、表1に示した実測事実とは必ずしも一致しないことに留意する必要がある。

$$k = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{e_{m,S} \cdot u_{ave,S} + e_{m,L} \cdot u_{ave,L}}{(1 + e_m) \cdot i} \quad (1)$$

$$\frac{u_{ave,S}}{i} = \frac{1}{d} \cdot \frac{\rho g}{\mu_0} \cdot \int_0^d \int_0^y (d-y) \cdot \left\{ 1 + \beta \cdot \left(\frac{\partial \phi(y)}{\partial y} \right)^2 \right\}^{-1} dy \cdot dy \quad (2a)$$

$$\frac{u_{ave,L}}{i} = \frac{\rho g}{\mu_0} \cdot \frac{D^2}{6} \quad (2b)$$

ここで、 k : 透水係数、 (y) : スタック内のモンモリロナイト結晶間において、結晶表面から y の距離における電位、 d : スタック内のモンモリロナイト結晶間距離の $1/2(m)$ 、 D : スタック間の距離、 e_m : 有効モンモリロナイト間隙比、 ρ : 間隙水の密度、 g : 重力の加速度、 μ_0 : 拡散2重層の外の間隙水の粘性、 β : 電圧が結晶間隙水の粘性に及ぼす影響に関する定数、 $2/\beta$: 屈曲度を考慮するための補正係数。また、 β の値としては、Low (1976) による $1.02 \times 10^{-15} (m^2/V^2)$ を用いた。

3. 実測結果と計算結果の比較

図4中にクニゲル V1 の透水係数の実測値と式(1)による計算結果を示す。いずれの場合も計算結果は実測値の傾向を表すことができているが、定量的には保守側に評価していることがわかる。これは、スタック間の空隙に拡散2重層の存在を認めていないことが原因の1つであると思われる。

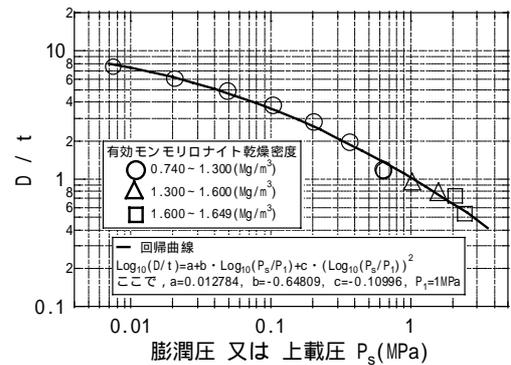


図3 人工海水 100%の結果から得られた D/t と従来法により評価された膨潤圧又は上載圧の関係

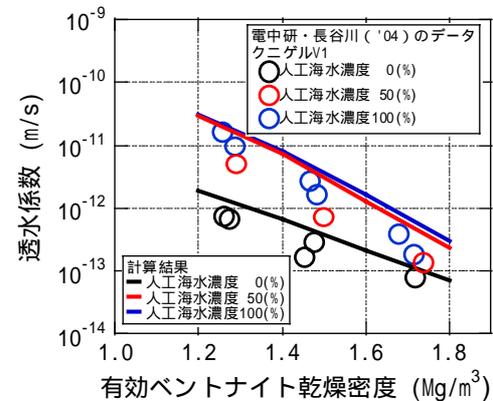


図4 クニゲルV1の透水係数と有効ベントナイト乾燥密度の関係(実測値と計算値)

参考文献 1) 田中幸久, 中村邦彦(2004): 海水の濃度と高温履歴がベントナイトの膨潤特性に及ぼす影響, 電中研研究報告 N04007. 2) 長谷川(2004): ベントナイトの透水・浸潤特性への海水の影響, 電中研研究報告 N04005. 3) Fukushima, Y.(1984): X-ray diffraction study of aqueous montmorillonite emulsions, Clays and Clay Minerals, Vol.32, No.4, pp.320-326. 4) 田中幸久, 中村邦彦(2006): 塩水環境下におけるベントナイトの特性に関する考察, 第41回地盤工学研究発表会発表講演集, 投稿中. 5) Kozaki, T. et al.(1998): Self-diffusion of sodium ions in compacted sodium montmorillonite, Nuclear Technology, Vol.121, pp.63 - 69. 6) 長谷川宏ほか(2002): ベントナイト緩衝材のミクロ構造に基づいた長期力学的挙動評価の研究(その2), 土木学会第57回年次学術講演会講演概要集, C10-041, pp.463 - 464. 7) 菊池広人ほか(2003): 海水条件下における圧縮ベントナイトの透水性, 土木学会第58回年次学術講演会講演概要集, CS7-033, pp.343 - 344. 8) 中野政詩ほか(1984): 拘束された不飽和粘土の浸潤と膨張圧, 農業土木論文集, 112号, pp.55-66. 9) Low, P.L.(1976): Viscosity of Interlayer water in montmorillonite, Soil Science Journal, Society of America, Vol.40, No.4, pp.500-504.