

各種ベントナイトの透水係数に対するモンモリロナイト結晶層間層流モデルに基づく透水係数理論評価式の適用性

茨城大学 正会員 ○小峯秀雄

1. 目的

著者は、モンモリロナイト結晶層間の水の流れを平行平板間の層流と仮定したベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式¹⁾を提案している。これは、緩衝材・埋戻し材の低透水性の観点から、適切なベントナイトを選定し、乾燥密度等を設計するために開発したものである。本研究では、新たに取得した各種ベントナイトの透水係数データ²⁾と先の透水係数理論評価式の計算結果を比較し、その適用性を調査する。

2. ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式

著者の提案している「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式」は、下記の式(1)～(7)で構成される¹⁾。緩衝材・埋戻し材の透水係数と著者の提案するパラメーター「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ ε_{sv}^* 」は、ほぼ良好な相関関係にあることが、既往の研究^{3),4)}で明らかにされている。このパラメーターは後述の式(4)～(6)により算出されるものであり、ベントナイトに含まれるモンモリロナイトの膨潤変形前後の体積比率を意味し、モンモリロナイトの結晶レベルでの膨潤挙動と緩衝材・埋戻し材の膨潤挙動を結ぶパラメーターである。式(3)は、モンモリロナイトの結晶レベルの膨潤挙動を考え、モンモリロナイトの膨潤体積ひずみと平行配列した2枚のモンモリロナイト結晶層間の距離を関係づける式である。式(2)は、緩衝材や埋戻し材の透水係数がモンモリロナイトの結晶層間を主に流れる水の速度に支配されるものと考え、モンモリロナイト結晶層間の水の流れを二次元的な平行平板間を流れる定常で非圧縮性流体の層流と仮定した条件の下でNavier-Stokesの方程式を解くことにより導かれる。式(1)は、ベントナイトの主要な交換性陽イオンの影響を考慮して緩衝材・埋戻し材の透水係数を求めるための式であり、式(2)から計算される k_i の値を各イオンの交換容量を用いて加重平均することにより導かれる。なお本研究では、ベントナイトの主要交換性陽イオンは Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 Mg^{2+} の4種類とした。

$$k = \frac{1}{CEC} \sum_{i=\text{Na}^+, \text{Ca}^{2+}, \text{K}^+, \text{Mg}^{2+}} [EXC_i k_i] \quad (\text{m/sec}) \quad (1) \quad k_i = \frac{\gamma_{aw}}{12 \mu_{aw}} (2d_i)^2 \quad (\text{m/sec}) \quad (2)$$

$$d_i = \frac{\varepsilon_{sv}^*}{100} \{t + (R_{ion})_i\} + (R_{ion})_i \quad (\text{m}) \quad (3)$$

$$\varepsilon_{sv}^* = \left\{ e_0 + \frac{\varepsilon_{smax}}{100} (e_0 + 1) \right\} \times \left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left(\frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\} \times 100 \quad (\%) \quad (4) \quad e_0 = \frac{\rho_{solid}}{\rho_{d0}} - 1 \quad (5)$$

$$\rho_{solid} = \frac{\frac{100}{C_m} \frac{100}{\alpha} \rho_m}{\left\{ 1 + \left(\frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left(\frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\}} \quad (\text{Mg/m}^3) \quad (6)$$

ここに、 k : 緩衝材・埋戻し材の透水係数 (m/sec), EXC_i : 交換性陽イオン i の交換容量 (meq./g) (i は Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} のいずれかの交換性陽イオンを示す。以下に記述される i はこれと同様の意味である。), CEC : 陽イオン交換容量 (meq./g), d_i : 交換性陽イオン i のときのモンモリロナイト結晶層間距離の1/2 (m), γ_{aw} : モンモリロナイト結晶層間中の水の密度 (Pa/m), μ_{aw} : モンモリロナイト結晶層間中の水の粘性係数 (Pa·sec), $(R_{ion})_i$: モンモリロナイト結晶層間中の交換性陽イオン i の非水和イオン半径 (m), t : モンモリロナイトの結晶層厚 (m), ε_{sv}^* : モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ (%), ε_{smax} : 緩衝材・埋戻し材の最大膨潤率 (%), e_0 : 緩

キーワード ベントナイト, 放射性廃棄物地層処分, 透水係数, モンモリロナイト, 粘土鉱物

連絡先 〒316-8511 茨城県日立市中成沢町4-12-1 茨城大学工学部都市システム工学科 TEL 0294-38-5163

衝材・埋戻し材の間隙比, C_m : ベントナイトのモンモリロナイト含有率(%), ρ_{d0} : 緩衝材・埋戻し材の乾燥密度 (Mg/m^3), α : ベントナイト配合率 (%) (本研究では $\alpha=100\%$), ρ_m : モンモリロナイトの土粒子密度 (Mg/m^3), ρ_{nm} : モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度 (Mg/m^3), ρ_{sand} : 砂粒子密度(Mg/m^3)

式(2)においてモンモリロナイト結晶層間中の水の密度 γ_{aw} と粘性係数 μ_{aw} が必要になるが、著者は参考文献 1)において、次の式(7)により、結晶層間水と自由水との各物理量の比 R をパラメーターとして、自由水の密度 γ_{fw} と粘性係数 μ_{fw} から算出する方法を提案している。

$$\frac{\gamma_{aw}}{\mu_{aw}} = R \frac{\gamma_{fw}}{\mu_{fw}} \tag{7}$$

式(1)~(7)を組み合わせることにより、ベントナイトの種類や乾燥密度に応じた透水係数を算出することができる。

3. 各種ベントナイトの透水係数データに対する適用性

表 1 は、ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式による計算において用いたパラメータの値を示したものである。水の密度 $\gamma_w=9783.8 \text{ Pa/m}$, 水の粘性係数 $\mu_w=0.000963 \text{ Pa}\cdot\text{sec}$ は、実験室内温度 $T=275 \text{ K}$ に対応する値を参考文献 5)を参考に設定した。 R は参考文献 6)を参考に、粘土に対する値の $R=79$ とシルト質粘土に対する値 $R=14$ を設定し計算した。図 1 は、参考文献 2)に述べた各種ベントナイトの透水係数の実測データと理論評価式による計算結果を比較したものである。この図より、比較的良好的な精度をもって、著者の提案する理論評価式は各種ベントナイトの透水係数を予測・評価できると考えられる。なお、今回の検討からベントナイト内部の水の密度や粘性係数が自由水とは著しく異なることが予想される。今後は、各種ベントナイトの表 1 に示す物理定数と式(7)中の R の関係を調査していく必要がある。

参考文献

1) 小峯秀雄 2001. 高レベル放射性廃棄物処分のための緩衝材・埋戻し材の透水係数に関する理論的考察, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM), 共通セッション CS1-009.

2) 佛田理恵・小峯秀雄・安原一哉・村上哲 2004. 高圧圧密試験装置を用いたベントナイト系緩衝材の透水係数算出における試験方法の高度化, 第 39 回地盤工学研究発表会平成 16 年度発表講演集(CD-ROM).

3) Komine, H. 2004. Simplified evaluation on hydraulic conductivities of sand-bentonite mixture backfill, Applied Clay Science, Elsevier (in printing)

4) Komine, H. 2003. Simplified evaluation on hydraulic conductivities of bentonite buffer and backfill, Proceedings of the 12th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (CD-ROM).

5) 水熱科学ハンドブック編集委員会 1997. 水熱科学ハンドブック, 技報堂出版.

6) 佐藤邦明・室田明 1971. 吸着効果を受ける微速浸透流に関する実験的研究, 土木学会論文報告集第 195 号.

表 1 使用した各パラメータの値

Bentonite	A, Kunigel-V1	B, Volclay	C, Kunibond	D, MX-80
$\rho_m \text{ (Mg/m}^3\text{)}$	2.77			
$\rho_{nm} \text{ (Mg/m}^3\text{)}$	2.82	3.03	2.44	3.42
$S_m \text{ (m}^2\text{/g)}$	810			
$S_{nm} \text{ (m}^2\text{/g)}$	0			
$C_m \text{ (%)}$	57	71	84	80
$CEC \text{ (meq/g)}$	1.092	1.007	0.796	1.104
$EXC_{Na}^+ \text{ (meq/g)}$	0.588	0.566	0.119	0.624
$EXC_{Ca}^{2+} \text{ (meq/g)}$	0.456	0.293	0.585	0.429
$EXC_K^+ \text{ (meq/g)}$	0.029	0.016	0.019	0.024
$EXC_{Mg}^{2+} \text{ (meq/g)}$	0.019	0.132	0.072	0.027
$(Rion)_{Na} \text{ (nm)}$	0.098			
$(Rion)_{Ca} \text{ (nm)}$	0.1115			
$(Rion)_K \text{ (nm)}$	0.133			
$(Rion)_{Mg} \text{ (nm)}$	0.0835			
v_{Na}	1			
v_{Ca}	2			
v_K	1			
v_{Mg}	2			
$t \text{ (m)}$	9.60×10^{-10}			

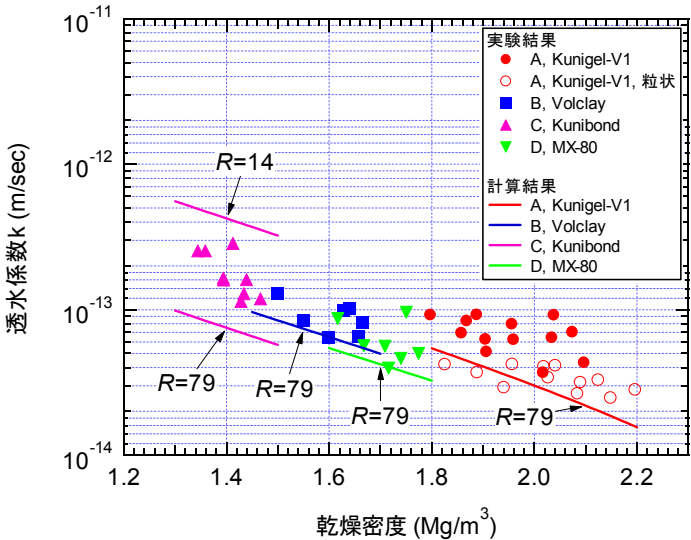


図 1 透水係数理論評価式の計算結果と実験結果の比較