

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

(財)電力中央研究所 正会員 小峯秀雄

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物処分に係わる研究の一つに、処分孔や坑道をそれぞれ埋め戻す緩衝材や埋戻し材の材料設計・開発がある。緩衝材や埋戻し材は、止水機能を有することが期待されており、ベントナイトもしくは砂とベントナイトを混合した材料が有望と考えられている。このような背景から、適切なバリア性能を有する緩衝材・埋戻し材を設計するためには、透水係数と締固め密度および砂とベントナイトの配合割合との関係を実験的に調査することが必要とされている。一方、実験的な調査には非常に長い時間を必要とするため、世界各国に埋蔵されているベントナイトすべての種類に対し、多くの材料条件(乾燥密度や砂とベントナイトの配合割合など)での透水係数のデータを取得することが困難なことから、材料条件を考慮できる透水特性の評価法の構築も必要と考えられる。そこで、本研究では、モンモリロナイト結晶層間の水の流れを平行平板間の流れで表すとともに、著者の提案する新しいパラメータ「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ ϵ_{sv}^* 」の算出式を用いて、緩衝材・埋戻し材の透水係数の評価を試みる。

2. ベントナイトを含有する緩衝材・埋戻し材の透水特性の評価方法

図1に本研究における透水特性評価方法を概念的に示した。

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「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、既往の著者の研究1), 2)で分かった。上記パラメータは後述の式(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である(図1左上参照)。本パラメータの詳細は参考文献3)を参照されたい。式(3)は、図1左下に示すモンモリロナイトの結晶レベルでの膨潤挙動を考え、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、図1右上に模式的に示すように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 $k_{mineral}$ 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。

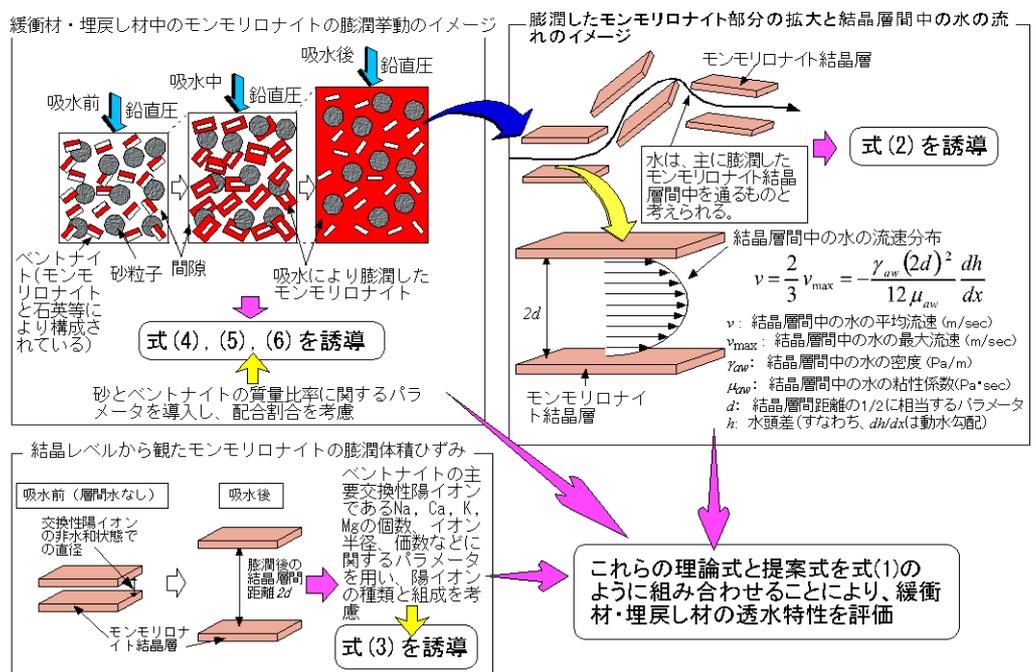


図1 本研究における緩衝材・埋戻し材の透水特性評価の概念

式(1)は、
$$k = \frac{1}{CEC} \sum_{i=Na^+, Ca^{2+}, K^+, Mg^{2+}} [EXC_i k_i] \quad (m/sec) \quad (1)$$
 式(2)は、
$$k_i = \frac{\gamma_{aw}}{12 \mu_{aw}} (2d_i)^2 \quad (m/sec) \quad (2)$$
 式(3)は、
$$d_i = \frac{\epsilon_{sv}^*}{100} \{t + (R_{ion})_i\} + (R_{ion})_i \quad (m) \quad (3)$$

キーワード：ベントナイト、透水係数、原子力、廃棄物、膨潤

連絡先：〒270-1194 千葉県我孫子市我孫子 1646、TEL 0471-82-1181、FAX 0471-84-2941

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

$$e_o = \frac{\rho_{solid}}{\rho_{d0}} - 1 \quad (5)$$

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

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_o ：緩衝材・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/m³)、 α ：ベントナイト配合率 (%)、 ρ_m ：モンモリロナイトの土粒子密度 (Mg/m³)、 ρ_{nm} ：モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度 (Mg/m³)、 ρ_{sand} ：砂粒子密度 (Mg/m³)

3. 透水特性評価と実験結果との比較

本章では、参考文献 1) で報告したベントナイト系遮水材の透水係数の実験結果に対して、前述の式(1)～(6)による計算を行い比較・検討を行う。入力データは以下の通りである。すなわち、 $\rho_m=2.77 \text{ Mg/m}^3$ 、 $\rho_{nm}=2.81 \text{ Mg/m}^3$ 、 $\rho_{sand}=2.66 \text{ Mg/m}^3$ 、 $C_m=48\%$ 、 $CEC=0.732 \text{ meq./g}$ 、 $EXC_{\text{Na}^+}=0.405 \text{ meq./g}$ 、 $EXC_{\text{Ca}^{2+}}=0.287 \text{ meq./g}$ 、 $EXC_{\text{K}^+}=0.009 \text{ meq./g}$ 、 $EXC_{\text{Mg}^{2+}}=0.030 \text{ meq./g}$ であり、これらは実験で用いたベントナイト (クニミネ工業製クニゲル V1) と三河珪砂 6 号の各測定値である。 $(R_{ion})_{\text{Na}}=0.098 \text{ nm}$ 、 $(R_{ion})_{\text{Ca}}=0.1115 \text{ nm}$ 、 $(R_{ion})_{\text{K}}=0.133 \text{ nm}$ 、 $(R_{ion})_{\text{Mg}}=0.0835 \text{ nm}$ は参考文献 4) を、 $t=9.60 \times 10^{-10} \text{ m}$ は参考文献 5) を参考に設定した。

水の密度 $\gamma_{fw}=9783.8 \text{ Pa/m}$ 、水の粘性係数 $\mu_{fw}=0.000963 \text{ Pa}\cdot\text{sec}$ は、実験室内温度 $T=275 \text{ K}$ に対応する値を参考文献 6) を参考に設定した。一方、モンモリロナイトの結晶層間の水には非常に多くの陽イオンが含まれ、この陽イオンが水分子と結合して水和イオンとなり結晶表面に吸着される。また、水分子は双極性を有するので、負に帯電しているモンモリロナイト結晶層に電気的に吸着されるものもある。さらに結晶層表面の酸素原子と水分子は水素結合によっても結ばれる。このように、モンモリロナイト結晶層間の水は結晶表面から吸着効果を受けるため、吸着効果を受けない水の密度 γ_{fw} や粘性係数 μ_{fw} とは異なると考えられる。そこで、結晶層間中の水の密度 γ_{aw} と粘性係数 μ_{aw} については、式(7)により、結晶層間水と自由水との各物理量の比 R をパラメータとして求めることとした。

$$\frac{\gamma_{aw}}{\mu_{aw}} = R \frac{\gamma_{fw}}{\mu_{fw}} \quad (7)$$

参考文献 7) では、シルト質粘土に対し $R=14$ とされており、本研究ではこれを参考に式(7)より求められる γ_{aw}/μ_{aw} を式(2)の計算に用いた。図 2 は、透水係数と乾燥密度およびベントナイト配合率の関係において、計算結果と実験結果を比較したものであり、両者はよく一致していることが分かる。特に、乾燥密度およびベントナイト配合率の増加に伴う透水係数の低下傾向を良好に予測していると考えられる。

参考文献

- 1) 小峯秀雄 2001. ベントナイト系遮水材の透水特性と内部構造観察結果に基づく評価の試み、土と基礎、Vol. 49, No. 2, pp.17-20.
- 2) 小峯秀雄 2001. 「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ」によるベントナイト系緩衝材・遮水材の透水特性評価、第 36 回地盤工学研究発表会平成 13 年度発表講演集 (投稿中)。
- 3) Komine, H. and Ogata, N. 1999. Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal. Soils and Foundations, Vol. 39, No.2, pp.83-97.
- 4) Mitchell, J.K. 1993. Fundamentals of soil behavior (Second Edition). John Wiley & Sons, Inc., pp.38-40.
- 5) Grim, R.E. 1968. Clay Mineralogy (Second Edition). McGraw-Hill Book Co., New York., pp. 77-92.
- 6) 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。
- 7) 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、1971.

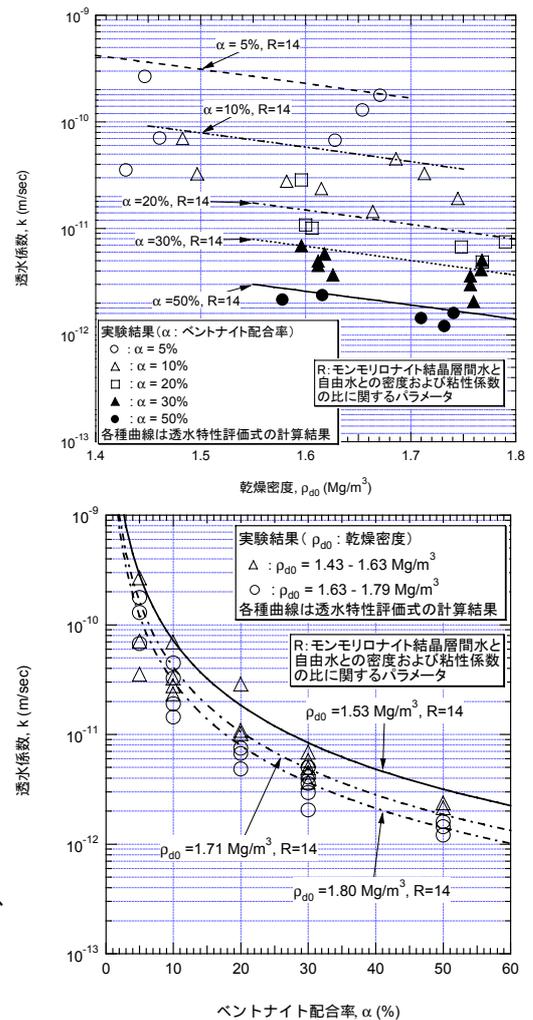


図 2 計算結果と実験結果の比較