

ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式の海水環境への拡張の試み

茨城大学 正会員 ○小峯秀雄

1. 背景・目的

著者の研究グループは、高レベル放射性廃棄物の地層処分施設が沿岸域に建設されることを想定して、施設周辺の地下水として陸水系および海水系を想定した各種ベントナイトの透水係数データについて報告してきた¹⁾。参考文献 1)では、各種ベントナイトの透水係数データに関して測定・考察すると共に、モンモリロナイト結晶層間による海水成分の濾過機能の可能性について考察した。本研究では、著者が提案する「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式」²⁾を利用して、参考文献 1)で報告したデータのうち、人工海水環境下におけるベントナイト A（クニミネ工業製・クニゲル V1）の透水係数の理論的評価を行くことにより、透水係数理論評価式の海水環境への拡張を試みる。

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²⁾の概要

図 1 に、著者の提案する「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式」の概念を示す²⁾。著者は、パラメータ「モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ ε_{sv}^* 」を提案した。本パラメータは、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）。また図 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を提案した。さらに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の下で Navier-Stokes の方程式を解くことにより導かれる式と上記のパラメータ群を組み合わせることにより、ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式を提案した²⁾。

3. 透水係数理論評価式の適用に当たってのモンモリロナイト結晶層間中の水の粘性係数について

本理論評価式により、人工海水環境下におけるベントナイト A（クニミネ工業製・クニゲル V1）の透水係数の理論計算を試みる。そのために必要となるパラメータ値を表 1 に示す。これらの値は実測データに基づくものであり、設定根拠などの詳細は、参考文献 2)を参照されたい。

透水係数理論評価式において、もう一つ重要となるパラメータ R がある。すなわち、モンモリロナイト結晶の表面から吸着効果を受ける層間中の水の密度 γ_{aw} と粘性係数 μ_{aw} 、および吸着効果を受けない自由水の密度 γ_{fw} と粘性係数 μ_{fw} との関係を以下のように定式化し、結晶層間水と自由水との各物理量の比となるパラメータ R を導入した²⁾。

$$\frac{\gamma_{aw}}{\mu_{aw}} = \frac{1}{R} \frac{\gamma_{fw}}{\mu_{fw}} \quad (1)$$

式

モンモリロナイト結晶層間中の水が結晶表面からうける吸着効果は、鉍物成分や水中の溶解イオンに強く影響されると推察されることから、ベントナイトに人工海水が浸潤する場合、上記の R の値が変化することが

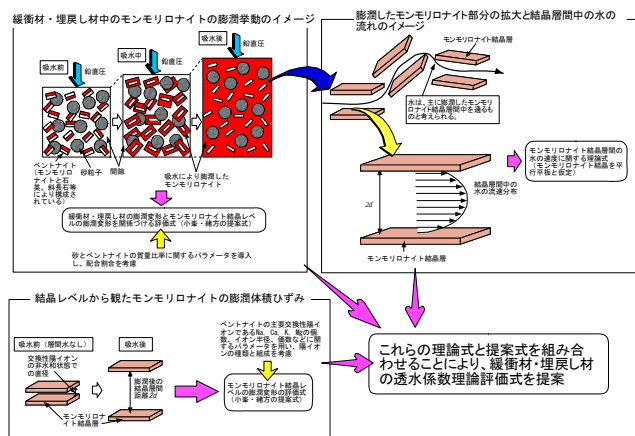


図 1 ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価

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, 海水環境, モンモリロナイト

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

予想される．そこで本研究では，蒸留水環境下および人工海水環境下のモンモリロナイト結晶層における吸着効果の変化を，ベントナイト懸濁液の粘性係数により評価を試みた．測定された粘性係数に基づき R の値を適宜設定することにより，人工海水環境下におけるベントナイト A の透水係数を理論的に評価した．

ベントナイト A 懸濁液の粘性係数の測定には，単一円筒形回転粘度計を用いた．含水比 600%, 800%および 1000%に相当する蒸留水によるベントナイト A 懸濁液と含水比 200%に相当する人工海水による懸濁液を作製し，容量 500mL のビーカーに投入し，適切なローターを懸濁液中に挿入し測定した．なお，上記の含水比はそれぞれ，蒸留水および人工海水でのベントナイト A の液性限界を参考に設定した．図 2 は測定結果をまとめたものである．蒸留水と人工海水の場合を比較すると，人工海水/含水比 200%における粘性係数が蒸留水/含水比 1000%とほぼ同様の粘性係数を示すことが分かる．参考文献 2) では，蒸留水環境における透水係数の評価において，佐藤らの研究成果³⁾を参考に $R = 79$ として予測計算し，実験データとの整合を確認している．これに基づき，結晶層間水の密度 γ_{fw} と吸着効果を受けない水の密度 γ_w が等しいと仮定すると，式(1)に $R=79$ と表 2 のパラメータ値を入力することにより算出される蒸留水環境下の結晶層間水の粘性係数 μ_{aw} は以下のように計算される．すなわち，

$$\mu_{aw} = R \mu_{fw} = 79 \times 0.000963 = 0.076 \text{ (Pa}\cdot\text{s)} \quad (2)$$

最も固相率の大きい測定条件である蒸留水/含水比 600%のベントナイト A 懸濁液において，上記の粘性係数の値を示すときの角速度は，図 2 中に併記したように，角速度 $\Omega=0.55(\text{rad/s})$ である．同じ角速度 $\Omega=0.55(\text{rad/s})$ のときの人工海水/含水比 200%のベントナイト A 懸濁液における粘性係数 $\mu=0.002(\text{Pa}\cdot\text{s})$ を人工海水環境下における μ_{aw} と考えて，式(3)により以下に求め，表 2 に示した．

$$R = \mu_{aw} / \mu_{fw} = 0.002 / 0.000963 = 2 \quad (3)$$

表 2 の値を用いて透水係数理論評価式により算出した結果と参考文献 1) で報告したベントナイト A の透水係数データの比較を図 3 に示す．参考文献 4) でも論じたように，高い乾燥密度では人工海水水中の水和した Mg や Ca イオンはモンモリロナイト結晶層間に侵入することができず濾過されるものと推察される．したがって，高い乾燥密度では，蒸留水環境に相当する $R=79$ を用いた予測結果と実験データは整合している．一方，乾燥密度が 1.6Mg/m^3 付近では，人工海水環境に相当する $R=2$ の予測結果と実験データが整合している．以上より，透水係数理論評価式においてモンモリロナイト結晶層間中の水の粘性係数などの物理量を適切に設定すれば，海水環境における透水係数を理論的に評価できると考えられる．

参考文献

- 1) 小峯秀雄，安原一哉，村上哲：人工海水環境下における各種ベントナイトの透水係数，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol. 67, No. 2, pp. 276-287, 2011.
- 2) Komine, H.: Theoretical equations on hydraulic conductivities of bentonite based buffer and backfill for underground disposal of radioactive wastes, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, American Society of Civil Engineers (ASCE), Vol. 134, No. 4, pp. 497-508, 2008.
- 3) 佐藤邦明・室田明：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，pp. 67-75, 1971.
- 4) 小峯秀雄，安原一哉，村上哲，佛田理恵：モンモリロナイト結晶層間距離の観点からの海水環境下におけるベントナイト系緩衝材の透水係数に関する一考察，土木学会第 64 回年次学術講演会，2009.

表 1 透水係数理論評価式における入力値

$\rho_m (\text{Mg/m}^3)$	2.77
$\rho_{nm} (\text{Mg/m}^3)$	2.82
$C_m (\%)$	57
$CEC (\text{meq/g})$	1.166
$EXC_{Na}^+ (\text{meq/g})$	0.631
$EXC_{Ca}^{2+} (\text{meq/g})$	0.464
$EXC_K^+ (\text{meq/g})$	0.030
$EXC_{Mg}^{2+} (\text{meq/g})$	0.041
$(R_{ion})_{Na} (\text{nm})$	0.098
$(R_{ion})_{Ca} (\text{nm})$	0.1115
$(R_{ion})_K (\text{nm})$	0.133
$(R_{ion})_{Mg} (\text{nm})$	0.0835
$t (\text{m})$	9.60×10^{-10}

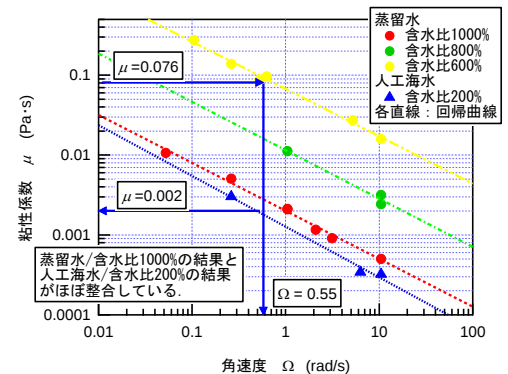


図 2 ベントナイト A 懸濁液の粘性係数測定値

表 2 各水質環境における R と γ_{fw} と μ_f の値

水質	蒸留水	人工海水
$\gamma_{fw} (\text{Pa/m})$	9783.8	
$\mu_{fw} (\text{Pa}\cdot\text{s})$	0.000963	
パラメータ R	79	2

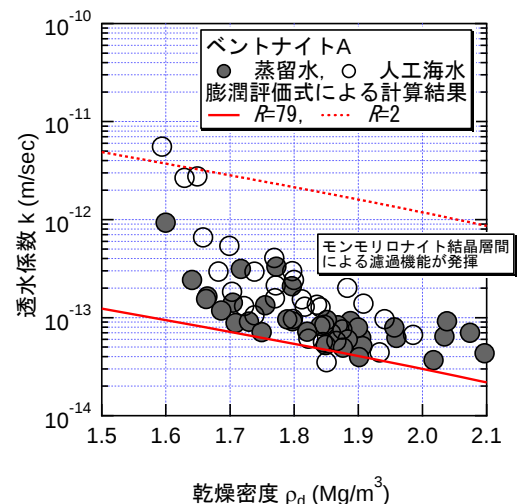


図 3 透水係数理論評価式による予測結果