

ベントナイトの間隙構造を考慮した透水構造モデル 及び透水係数推定式の開発

原子力規制委員会原子力規制庁長官官房技術基盤グループ
放射線・廃棄物研究部門

○木嶋達也, *笹川剛, *澤口拓磨, 山田憲和

*日本原子力研究開発機構

※本ポスターはKijima et al. (2022) (Hydrology Research, 53 (10), 1263)をまとめたものである。



背景 | ベントナイトの透水特性と先行研究

ベントナイト: 水を含むと膨らむ性質を持つ粘土材料であり、放射性廃棄物処分においては人工バリアや埋戻し材として使用が検討されている。

期待される主な性能: 膨潤性、収着性、**低透水性**

このような性能は主要構成鉱物である**モンモリロナイトによって発現**

ベントナイトの透水性に関する先行研究で不十分な点

- ベントナイト中の粒子間間隙と層間間隙を区別していない例え、[1]。
- 間隙を区別した透水係数推定モデルもあるが、高い密度条件(ベントナイト高配合)でのみしか適用ができない[2]。
- 層間陽イオンの種類によって透水性が異なるが、ベントナイト中の流路の違いを考慮した透水係数の推定手法は確立していない。

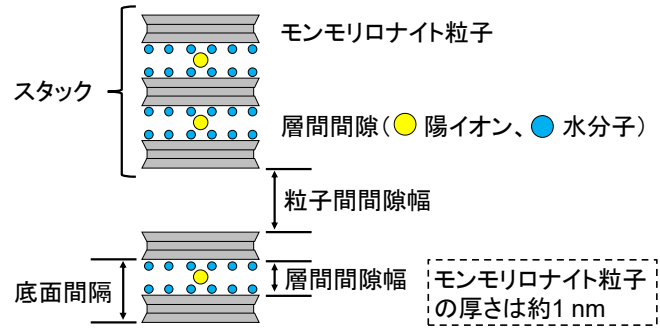


図1 モンモリロナイト粒子、スタック、層間間隙、粒子間間隙のイメージ図

目的 幅広い密度条件について層間間隙幅と粒子間間隙幅の関係を整理し、ベントナイトの透水係数推定モデルを開発する。

- 手法**
- ① 先行研究で得られている試験データを基に、密度条件に応じた間隙幅を推定
 - ② それぞれの間隙の連結性を考慮した透水構造モデルを開発
 - ③ 透水構造モデルより、透水係数を算出

層間間隙幅の推定

- Na型の場合**、ベントナイト中に含まれるモンモリロナイトの密度(有効モンモリロナイト密度: ρ_{em})と層間間隙の関係は $\rho_{em} \geq 800 \text{ kg/m}^3$ でのみ得られている[3-4]。
- $\rho_{em} < 800 \text{ kg/m}^3$ の範囲はモンモリロナイトの含水比と底面間隙の関係より推定した(指数関数(exp)の回帰曲線)。
- Ca型の場合**、約1.9 nmより大きな層間間隙幅にはならない[5-6]

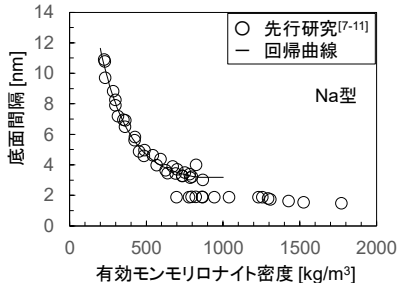


図2 推定した底面間隙と有効モンモリロナイト密度の関係

粒子間間隙幅とスタック中の粒子数の推定

スタックが互いに平行という仮定をおき、モンモリロナイト粒子の重量、スタックに含まれるモンモリロナイト粒子数(n)、スタックの比表面積、スタックの体積、モンモリロナイト粒子の平均粒径から粒子間間隙幅を計算した。

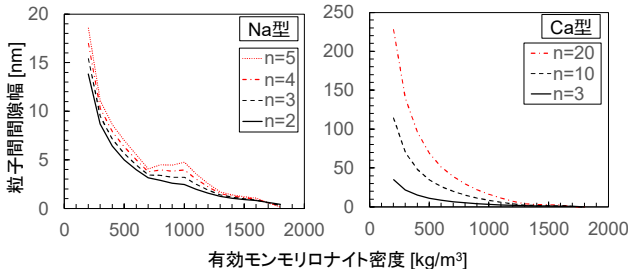


図3 推定した粒子間間隙幅と有効モンモリロナイト密度の関係

- Na型の場合、 $n \geq 4$ では有効モンモリロナイト密度が大きくなったときに粒子間間隙幅が小さくなる場合があるため不整合。
- nについて、Na型の場合**2又は3**となり、Ca型の場合**任意の数**が想定可能。

透水構造モデル及び透水係数推定式

- ベントナイト中の水はモンモリロナイトで充填された間隙中を流れる
- ベントナイト中の間隙は層間と粒子間の2種類
- 間隙同士の連結性(確率)は間隙の存在割合に応じて設定[12]
- 水の粘性係数はモンモリロナイト粒子近傍で大きくなる効果を考慮[13]

$$k = \frac{\rho_w g}{12\mu} (\varepsilon_{total})^4 \sum_j \sum_k X_{j,k}^2 f(X_j) f(X_k) \cdot \sin\theta$$

① ② ③ ④

- ① 平面Poiseuille流れの係数
- ② 間隙の連結に寄与する実質間隙率
- ③ 隣接する任意の平面に存在する間隙連結の確率
- ④ 動水勾配の補正(モンモリロナイト粒子の積層角度)

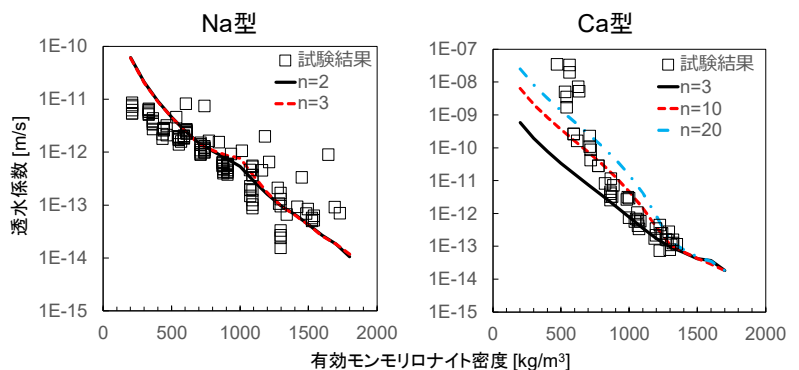


図4 透水係数と有効モンモリロナイト密度の関係(試験結果は[14-19]より)

- Na型ベントナイトでは $500 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_{em} \leq 1500 \text{ kg/m}^3$ で試験結果と整合した。
- Ca型ベントナイトでは $600 \text{ kg/m}^3 \leq \rho_{em}$ で試験結果と整合した。
- Ca型ベントナイトの $600 \text{ kg/m}^3 \geq \rho_{em}$ における試験結果とモデルの不整合は、ベントナイト中のモンモリロナイトの分布が不均一が原因であると考えられる。
- イオン強度の影響を考慮した定式化は今後の課題である。

[1] Komine et al. (2008), J. Geotech. Geoenviron. Eng. 134 (4), 497-508. [2] 田中他 (2009), 土木学会論文集C 65(1), 66-84. [3] Kozaki et al. (1998), Nuclear Technology 121(1), 63-69. [4] Suzuki et al. (2001), 粘土科学 41(2), 43-57. [5] Fukushima (1984), Clays and Clay Minerals 32(4), 320-326. [6] Matuszewicz et al. (2013), Clay Minerals 48(2), 267-276. [7] Norrish (1954), Nature 173 (4397), 256-257. [8] Foster et al. (1954), Clays Clay Miner. 3(1), 296-316. [9] Fink & Thomas (1964), Soil Science Society American Proceedings 28(6), 747-750. [10] Zhang & Low (1989), J. Colloid Interface Sci. 133(2), 461-472. [11] Holmboe et al. (2012), J. Contam. Hydrol. 128(1-4), 19-32. [12] Millington & Quirk (1961), Transactions of the Faraday Society, 57, 1200-1207. [13] Andrade & Dodd (1946), Proceedings of the Royal Society of London Series A, 187 (1010), 296-337. [14] 鈴木他 (1992), PNC TN8410 92-057. [15] 松本他 (1997), PNC TN8410 97-296. [16] 前田他 (1998), PNC TN8410 98-021. [17] 佛田他 (2006), 土木学会論文集C 62(3), 573-578. [18] 長谷川 (2004), 電力中央研究所報告 N04005. [19] 伊藤他 (2010), 土木学会第65回年次学術講演会, CS7-017.