

## 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 ベントナイトの透水係数に関する一考察

茨城大学 学生会員 ○佛田理恵, 正会員 小峯秀雄

フェロー会員 安原一哉, 正会員 村上哲

### 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の処分施設の建設に際し、廃棄物収容容器と周辺地盤との間を充填する緩衝材には、放射性核種を長期間隔離する必要性等から、非常に高い止水性や膨潤性等が要求されている。そこで、これらの特性を有するベントナイトを主体とした材料の利用が考えられている<sup>1)</sup>。また、処分施設は沿岸部に建設されることが十分に考えられ、処分施設地点における地下水には、海水起源の塩類が多く含有されている可能性がある。このことから、緩衝材、埋戻し材の透水特性に及ぼす海水の影響を実験的に調査することが肝要であると考えられる。

既往の研究より、Na 型ベントナイトにおいては、乾燥密度が高い場合、すなわち、モンモリロナイトの含有率が大きくなるに従い人工海水の影響を受けにくくなることがわかっている<sup>2)</sup>。そこで、本研究では、ベントナイト中のモンモリロナイトの結晶層間距離に着目し、その原因に関する一考察を述べる。

### 2. モンモリロナイトの結晶層間距離

参考文献 3)におけ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によると、式(1)～(4)を用いることによって、ベントナイトの種類および緩衝材の乾燥密度に応じたモンモリロナイトの結晶層間距離を求めることができる。以下にその式を示す。

$$d_i = \frac{\varepsilon_{sv}^*}{100} \{t + (R_{ion})_i\} + (R_{ion})_i \quad (1)$$

$$\varepsilon_{sv}^* = \left\{ e_0 + \frac{\varepsilon_{smax}}{100} (e_0 + 1) \right\} \times \left\{ 1 + \left( \frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left( \frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\} \times 100 \quad (2)$$

$$e_0 = \frac{\rho_{solid}}{\rho_{d0}} - 1 \quad (3)$$

$$\rho_{solid} = \frac{\frac{100}{C_m} \frac{100}{\alpha} \rho_m}{\left\{ 1 + \left( \frac{100}{C_m} - 1 \right) \frac{\rho_m}{\rho_{nm}} + \left( \frac{100}{\alpha} - 1 \right) \frac{100}{C_m} \frac{\rho_m}{\rho_{sand}} \right\}} \quad (4)$$

ここに、 $d_i$ : 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)

( $i$  は  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  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。),  $\varepsilon_{sv}^*$ : モンモリロナイトの膨潤体積ひずみ (%),  $t$ : モンモリロナイトの結晶層厚 (m),  $(R_{ion})_i$ : 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),  $e_0$ : 緩衝材・埋戻し材の間隙比,  $\varepsilon_{smax}$ : 緩衝材・埋戻し材の最大膨潤率 (%),  $C_m$ : ベントナイトのモンモリロナイト含有率(%),  $\rho_m$ : モンモリロナイトの土粒子密度 ( $\text{Mg/m}^3$ ),  $\rho_{nm}$ : モンモリロナイト以外の鉱物の土粒子密度 ( $\text{Mg/m}^3$ ),  $\alpha$ : ベントナイト配合率 (%),  $\rho_{sand}$ : 砂粒子密度 ( $\text{Mg/m}^3$ ),  $\rho_{d0}$ : 緩衝材・埋戻し材の乾燥密度 ( $\text{Mg/m}^3$ )

今回は Na 型ベントナイトである山形県月布産のベントナイト A (クニゲル V1・クニミネ工業) を対象とした。また、供給する水溶液に関しては蒸留水お

表-1 ベントナイトの基本的性質<sup>4)</sup>

| ベントナイト                      | A     |
|-----------------------------|-------|
| タイプ                         | Na 型  |
| 土粒子密度( $\text{Mg/m}^3$ )    | 2.79  |
| 液性限界(%)                     | 458.1 |
| 塑性限界(%)                     | 23.7  |
| 塑性指数                        | 434.4 |
| モンモリロナイト含有率(%)              | 57    |
| 陽イオン交換容量( $\text{meq/g}$ )  | 1.166 |
| 交換性Naイオン量( $\text{meq/g}$ ) | 0.631 |
| 交換性Caイオン量( $\text{meq/g}$ ) | 0.464 |
| 交換性Kイオン量( $\text{meq/g}$ )  | 0.030 |
| 交換性Mgイオン量( $\text{meq/g}$ ) | 0.041 |

表-2 人工海水の主な化学成分<sup>4)</sup>  
(20L 当たり)

|                  |          |                          |          |
|------------------|----------|--------------------------|----------|
| $\text{MgCl}_2$  | 222.30 g | KBr                      | 2.01 g   |
| $\text{CaCl}_2$  | 30.70 g  | $\text{H}_3\text{BO}_3$  | 0.54 g   |
| $\text{SrCl}_2$  | 0.85 g   | NaF                      | 0.06 g   |
| KCl              | 13.89 g  | $\text{Na}_2\text{SO}_4$ | 81.88 g  |
| $\text{NaHCO}_3$ | 4.02 g   | NaCl                     | 490.90 g |

表-3 材料パラメータ  
(ベントナイト A 相当)

|                         |                                  |
|-------------------------|----------------------------------|
| $\rho_m$                | $2.77 \text{ Mg/m}^3$            |
| $\rho_{nm}$             | $2.81 \text{ Mg/m}^3$            |
| $(R_{ion})_{\text{Na}}$ | 0.098 nm                         |
| t                       | $9.60 \times 10^{-10} \text{ m}$ |

キーワード ベントナイト, 高レベル放射性廃棄物, 透水係数, 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 0294-38-5177

よび人工海水（八洲薬品（株）製・アクアマリン）を用いた。ベントナイトの基本的性質および人工海水の主な化学成分を表-1, 2に示す。また、モンモリロナイトの結晶層間距離を算出するに当たって必要となるパラメータを表-3に示す。

図-1に、ベントナイトAにおいて、その交換性陽イオンがすべてNaイオンで飽和されている状態を仮定し式(1)~(4)を用いて計算した結果を示す。また、図中には、Na, Ca, K, Mgの水和イオン半径の2倍、すなわち水和イオンの直径の値を示している<sup>5)</sup>。

この結果より、ベントナイトAを乾燥密度 $1.8\text{Mg/m}^3$ 以上に締固めた場合、そのモンモリロナイトの結晶層間距離は水和したMgイオンの直径よりも小さくなり、さらには乾燥密度が $1.9\text{Mg/m}^3$ 以上では水和Caイオン直径よりもモンモリロナイト結晶層間距離は短くなることがわかる。このことから、 $1.9\text{Mg/m}^3$ 以上においては、水和したMgやCaイオンはモンモリロナイト結晶層間内に侵入することができず、濾過されるものと推察される。

### 3. 高圧圧密試験によって算出した透水係数とモンモリロナイトの結晶層間距離の関係

供給する水溶液に蒸留水および人工海水を用いた試験結果を比較したものを図-2に示す。図-1よりベントナイトAにおいて、乾燥密度が小さくなるほど人工海水の影響が大きくなることがわかる。

直井らの研究より、Na型ベントナイトの膨潤変形特性は人工海水の影響を受けて低下すること、また、その影響割合は、初期乾燥密度の増加に伴い小さくなること、モンモリロナイト含有率の高いベントナイトほど小さいことが報告されている<sup>2)</sup>。ベントナイトAはモンモリロナイト含有率が比較的低いため、乾燥密度が低い場合、モンモリロナイトの含有率が小さくなるので人工海水の供給による透水係数の低下が見られると考えられる。ここで、海水の影響が見られるのは乾燥密度 $1.8\sim 1.9\text{Mg/m}^3$ 以下の範囲である。先に述べたように、乾燥密度が $1.9\text{Mg/m}^3$ 以上において、水和した陽イオンが濾過される場合には水分子のみが結晶層間内に侵入することになり、海水環境下においてもモンモリロナイト結晶の交換性陽イオンの種類と組成はほとんど変化しないため、乾燥密度が高い場合には、蒸留水および人工海水供給下での透水係数に差異はほとんど認められなかったものと推察される。

### 4. まとめ

本研究では、Na型ベントナイトが乾燥密度が高くなるに従い人工海水の影響を受けにくくなることの要因に関して、モンモリロナイトの結晶層に着目して考察を述べた。その結果、ベントナイトを締固めることにより、海水中のNa, Ca, K, Mgイオンが濾過されることが考えられ、乾燥密度が高い場合には、上記陽イオンが緩衝材内部に侵入しないと推察される。このような条件下においては、海水環境下であっても「ベントナイト系緩衝材・埋戻し材の透水係数理論評価式」の適用性が高いと考えられる。

**参考文献** 1)核燃料サイクル開発機構:わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊2 地層処分の工学的技術, JNC TN1400 99-22. 2)佛田理恵,小峯秀雄,安原一哉,村上哲:高圧圧密試験装置を用いて算出したNa型およびCa型ベントナイトの透水係数に及ぼす人工海水の影響, 第40回地盤工学研究発表会. 3)小峯秀雄: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,土木学会第59回年次学術講演会講演概要集(CD-ROM),2004. 4)直井優,小峯秀雄,安原一哉,村上哲, 百瀬和夫,坂上武晴:各種ベントナイト系緩衝材の膨潤特性に及ぼす人工海水の影響,土木学会論文集, No. 785/III-70,pp.39-49,2005.3. 5) Mitchell, J. K.: Fundamentals of Soil Behavior (Second Edition), John Wiley & Sons, Inc., pp.111-130, 1993.

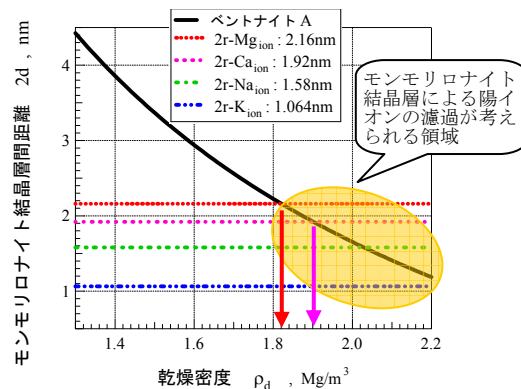


図-1 モンモリロナイトの結晶層間距離と乾燥密度の関係

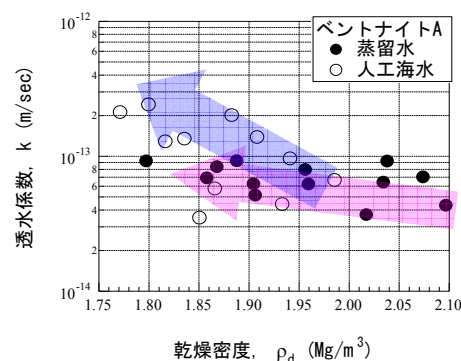


図-2 透水係数-乾燥密度関係