

Kozeny-Carman 則を用いたベントナイト系人工バリアの止水性能評価

鹿島建設(株) 正会員 ○小林 一三

(公財)原子力環境整備促進・資金管理センター 正会員 大和田 仁 林 大介

1. はじめに

放射性廃棄物の内、半減期が長い TRU 廃棄物の処分概念は、図 1 に示すようにセメント系人工バリアとベントナイト系人工バリアを併用することを基本としており、その長期的な性能に関する信頼性を向上させるべく、両者の化学的な相互作用を考慮した長期性能評価に関する検討が進められている²⁾。本報告では、長期性能評価に対して重要と考えられるベントナイト系人工バリアの化学的な変質を考慮した止水性能評価モデル、及びそのモデルで必要となるパラメータの取得方法について報告する。

2. ベントナイト系人工バリアの止水性能

ベントナイト系人工バリアの高い止水性能は、モンモリロナイトの非常に大きな比表面積に因るものと考えられる。乾燥状態のモンモリロナイトは、図 2 に示すようにシート状の 1 次粒子が積層した状態(2 次粒子)で骨格構造を形成していると考えられるが、地下水などが浸潤すると 1 次粒子の間に水が浸透して 1 次粒子の間隔(内間隙)が増加する。この微視的な骨格構造の変化は浸透膨潤と呼ばれるが、止水性能の観点からは比表面積の増大ともいえる。また、セメント浸出液のような Ca イオンリッチでイオン強度が高い液体が浸潤すると、陽イオン交換反応や、内間隙から外間隙へ水が移動するために 1 次粒子間は小さくなり 2 次粒子同士の間隔である外間隙が相対的に大きくなる。さらに、モンモリロナイトが溶解して 2 次鉱物として沈殿すれば、その鉱物の大きさによって比表面積は変化する。すなわち、ベントナイト系人工バリアの化学変質による止水性能を評価するためには、このようなモンモリロナイトの微視的構造の変化を考慮できることが重要である。

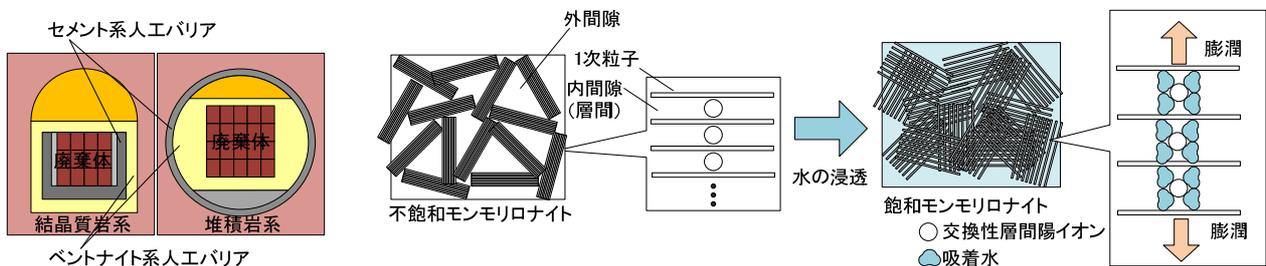


図 1 TRU 廃棄物処分施設のイメージ 図 2 ベントナイト系人工バリアの浸潤による微視的構造の変化のイメージ

3. Kozeny-Carman 則とベントナイト系人工バリアの比表面積取得方法

多孔質媒体の透水係数を表すモデルのうち、比表面積を用いたものとして Kozeny-Carman 則(以下、KC

則)が挙げられる。KC 則では、透水係数が、 $k = \frac{1}{C} \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{S_v^2} \frac{e^3}{1+e}$ で表される。ここで、 C は形状係数(通常は 5)、

e は間隙比、 S_v は比表面積(m^2/m^3)である。KC 則では、透水係数が比表面積の関数であるため、仮に間隙比一定のままで微視的構造が変化するような化学変質が発生しても、透水係数の変化を表すことが可能である。

ベントナイト系人工バリアのように、その浸潤状況に応じて微視的構造が変化する材料の、ある密度における止水性能を KC 則で評価するためには、その比表面積を飽和、かつ密度一定条件で取得する必要がある。しかしながら、既存の方法では、そのような条件で比表面積を取得する方法が存在しなかったため、ベントナイト系人工バリアの止水性能評価に対して KC 則が適用された事例はほとんどないのが現状である。そこで、本検討では Kawamura et al³⁾の「その場 X 線回折 (XRD)」の手法を援用した比表面積の取得方法を提案した。

まず、図 3 に示すようなセルに含水比調整したベントナイトをセットして、体積拘束した状態で XRD を実

キーワード 放射性廃棄物, 地層処分, ベントナイト系人工バリア, 止水性能, 比表面積, 透水係数

連絡先

〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1 鹿島建設(株)技術研究所 TEL 042-489-6493

施する。得られた回折パターンをピーク分離してピーク位置から図 4 に示すような 1 次粒子間隔が水分子 2 個分の状態 (2 層膨潤状態) になる含水比を取得する。この 2 層膨潤状態では、鉱物表面に水分子が過不足なく吸着している状態であるため、2 層膨潤状態の含水比 w^* が分かれば、鉱物表面に水分子を正射影した時の占有面積 $10.8\text{\AA}^2(\text{m}^2)$ ⁴⁾と乾燥密度 ρ_d から、比表面積が、 $S_v = 3.6 \times 10^9 w^* \rho_d (\text{m}^2/\text{m}^3)$ として与えられる。なお、山形産の Na 型モンモリロナイトの場合、図 5 に示すように 2 層膨潤含水比が 19%であったため、乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ に圧縮した場合の比表面積は $1.094 \times 10^9 (\text{m}^2/\text{m}^3)$ となった。

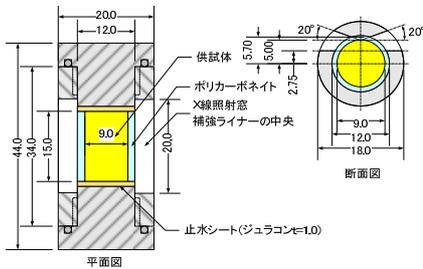


図 3 その場 XRD セル

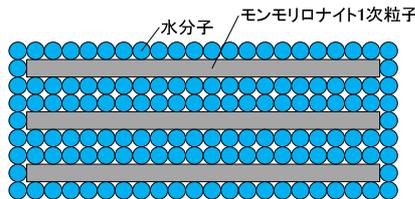


図 4 2 層膨潤状態のイメージ

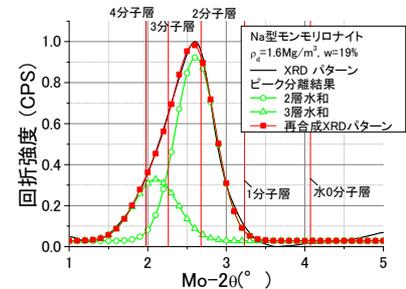


図 5 XRD パターンのピーク分離例

4. Kozeny-Carman 則の適用例

前述の方法で比表面積を決定して KC 則から求めた Na 型ベントナイトの透水係数と乾燥密度の関係を図 6 に示す。なお、単位質量当たりの比表面積 (m^2/g) は乾燥密度に依らず一定であるが、高密度領域では、飽和含水比が 2 層膨潤含水比よりも小さくなるために 2 層膨潤状態になることはできない (2 層膨潤状態になるだけの空隙がない)。そのような高密度の場合には、図 7 に示すように飽和含水比を用いて比表面積を算出した。

図 6 に示すように、KC 則 (図中黒線) は既往の研究⁵⁾で取得された実験結果と傾向は整合しているが若干大き目の値を示している。そこで、前述の 2 層膨潤状態の 1 次粒子間を内間隙、それ以外を外間隙と定義することによって、全間隙を内間隙と外間隙に分離し、それぞれの間隙で透水係数を評価する方法も実施した。評価に際しては、全体の透水係数を、両間隙に同じ動水勾配が作用していると仮定した場合 (Case1) と両間隙に同じ流量が流れていると仮定した場合 (Case2) の結果も図 6 に示している。図から、内間隙だけで透水係数を定義した場合、若しくは Case2 の結果が試験結果と最も良く整合した。この結果から、外間隙が水みちとして連続して存在していない可能性がある。

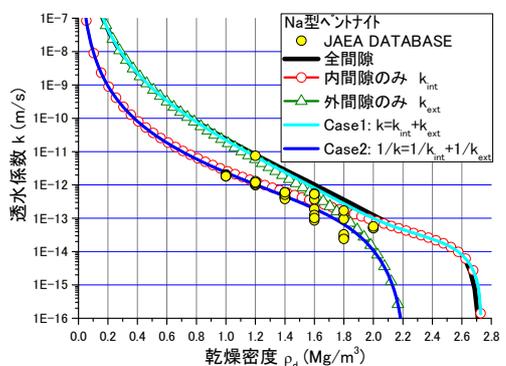


図 6 乾燥密度と透水係数の関係

5. おわりに

ベントナイト系人工バリアの止水性能評価モデルとしての KC 則の適用性、およびベントナイト系人工バリアの比表面積の取得方法について示した。このモデルを HMC 連成解析に導入して処分施設の信頼性向上に関する検討を実施中である。今後、成果がまとまれば報告する予定である。

謝辞: 本研究は、経済産業省資源エネルギー庁からの委託により行った平成 26 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発の成果の一部である。

参考文献 1)JNC:TRU 廃棄物処分技術検討書, 2002. 2)RWMC:平成 25 年度地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処理・処分技術高度化開発 報告書(第 4 分冊), 2014. 3)Kawamura et al.: Engineering Geology, 54, pp.75-59. 1999. 4)須藤清次: 土壌の物理性, 総説, 土壌物理学会, 1967. 5) JAEA, Buffer Material Database, <http://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/>.

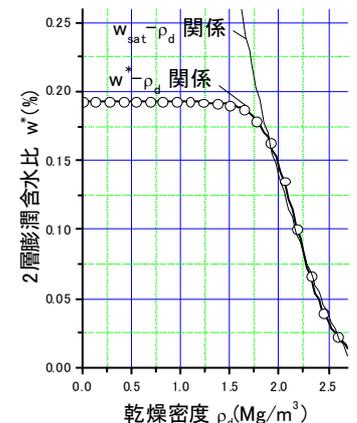


図 7 乾燥密度と 2 層膨潤含水比の関係