

## マイクロとマクロを繋ぐベントナイト系人工バリアの水理モデル -粘土科学と地盤工学の連携-

小林一三\*1

「第2次 TRU レポート」や「TRU 廃棄物の地層処分基盤研究開発に関する全体基本計画」などに依れば、現行の TRU 廃棄物処分の処分概念では、ベントナイト系人工バリア材料に対するセメント系人工バリア材料の割合が比較的多く、セメント系人工バリア材料からの Ca イオンリッチな高 pH 浸出液がベントナイト系人工バリアの長期性能に及ぼす影響を体系的に説明できる水理モデルの構築が課題の一つとして挙げられている。本講演では、このベントナイト系人工バリアの化学的変質に伴う物質移動特性の変化を体系的に説明できる水理モデルの構築に向けた学際的な取り組みについて説明する。

**Keywords:** TRU, ベントナイト, Kozeny-Carman 則, 比表面積

### 1 はじめに

第2次 TRU レポート[1]などに依れば、図1に示すように、現行の TRU 廃棄物処分の処分概念では、ベントナイト系人工バリア材料に対するセメント系人工バリア材料の割合が比較的多く、セメント系人工バリア材料からの Ca イオンリッチな高 pH 浸出液がベントナイト系人工バリアの長期性能に及ぼす影響を体系的に説明できるモデルの構築が課題の一つとして挙げられている。

これに対して従来のモデル化に関する取り組みでは、化学的な変質を与えた材料の力学試験や透水試験を実施して、その結果から変質材料の乾燥密度と力学特性や水理特性の関係を取得するというマクロな物理量の相関関係を取得する方法が一般的であった。

このような、現状を踏まえて、本講演では、地盤工学を専門として普段は材料の応答をマクロ的に取り扱うことが多い立場の筆者が、マイクロ的な挙動を考慮しながらベントナイト系人工バリアの化学的変質に伴う物質移動特性の変化を体系的に説明できるマクロな水理モデルの構築に向けて実施した学際的な取り組みを説明する。

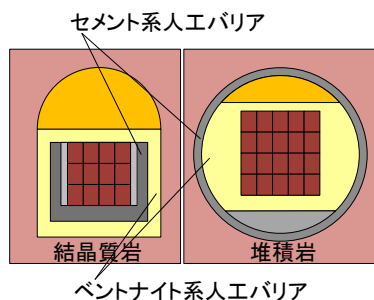


図1 TRU 廃棄物処分施設のイメージ

### 2 既存の水理モデル

地盤工学では、水理モデルとして一般的に Darcy 則が用いられており、その透水係数を粒径の関数とした幾つかのモデルが提案されている。例えば、地盤工学の教科書[2]に

依れば、砂の水理モデルとして以下のような式が例示されている。いずれも、対象としている材料の代表粒径  $D_w$  や  $D_{10}$  の二乗にその透水係数  $k$  が比例し、さらに体積間隙率  $n$  の関数となっていることが分かる。なお、 $\mu$  は粘性係数であり  $C_k$ ,  $C_z$ ,  $C_t$  はそれぞれ定数である。

$$k = \frac{C_k}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} D_w^2 \quad \text{Kozeny-Donatの式} \quad (1)$$

$$k = \frac{C_z}{\mu} \left( \frac{n}{1-n} \right)^2 D_w^2 \quad \text{Zunkerの式} \quad (2)$$

$$k = \frac{C_t}{\mu} \left( \frac{n-0.13}{\sqrt{1-n}} \right)^2 D_{10}^2 \quad \text{Terzaghiの式} \quad (3)$$

ここで、これらの式をベントナイト系人工バリアの水理モデルとして適用する場合を考えてみる。通常ベントナイト系人工バリア材料であれば、乾燥密度に依るが、その透水係数は、間隙水が蒸留水と Ca イオンリッチな水溶液の場合で著しく異なる。しかしながら、これらのモデルでは、仮に間隙水が変化してベントナイトが Ca 型化しても、一次粒子自体の粒径が変化せず、元々マクロな量である体積間隙率の項も変化しない。すなわち、これらのモデルを素直に用いると、間隙水のイオン強度の影響や陽イオン交換反応で透水係数が変化するという実験事実を表現することが難しいことが分かる。もちろん、間隙水のイオン強度によって一次粒子が凝集し、見かけの粒度分布が変化するというモデルを考えることは可能であるが、外間隙と内間隙の区別ができなくなるような乾燥密度においてはこのようなモデルも適用が難しくなる。

また、粘土の水理モデルとして、式(4)も例示されているが、圧密前の間隙比  $e_0$  と透水係数  $k_0$  が必要となることや、 $e_0$  と  $k_0$  を規定した状態から間隙水のイオン強度や層間陽イオンが変化した場合には、別の間隙比  $e_0$  と透水係数  $k_0$  の関係が存在すると考えられるため、このモデルをそのまま適用することは難しい、といった課題がある。

$$e - e_0 = 0.5e_0 \log(k/k_0) \quad (4)$$

Hydraulic modelling of bentonite engineering barriers in considering of its macro and micro behaviors by Ichizo KOBAYASHI (kob13@kajima.com),

\*1 鹿島建設株式会社 技術研究所

Kajima Corporation / Technical Research Institute

〒182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1

本稿は、日本原子力学会バックエンド部会第34回「バックエンド」夏期セミナーにおける講演内容を加筆・修正したものである。

### 3 Kozeny-Carman 則

前述の従来の地盤工学で用いられてきた水理モデルに対して、式(5)に示した Kozeny-Carman 則[3]では、透水係数  $k$  が、間隙比  $e$  に加え、比表面積  $S_v$  ( $m^2/m^3$ ) の関数で表される。 $\rho g$  は液体の単位体積重量、 $C$  は形状係数であり、理論上、屈曲度の関数であるが、慣例的に定数 ( $C=5$ ) である。

$$k = \frac{1}{C} \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{S_v^2} \frac{e^3}{e+1} \quad (5)$$

この Kozeny-Carman 則は、水みちを円筒管、水の流れを Hagen-Poiseuille 流を仮定した理論式であり、マクロ的な応答から帰納法的に定式化されたものではない。

さらに、Kozeny-Carman 則では、透水係数が間隙比  $e$  の関数であるため、ベントナイト系人工バリアが力学変形した場合に乾燥密度変化が生じると透水係数も変化することになる。なお、式(5)の間隙比の項を体積間隙率と間隙比の関係  $n = e/(1+e)$  を用いて書き直せば、式(1)の体積間隙率の項と同じになる。

また、間隙水のイオン強度や層間陽イオンの変化による透水係数の変化は、一次粒子の凝集に伴う比表面積の変化として考慮できる可能性もある。そこで、Kozeny-Carman 則を用いて化学変質を考慮したベントナイト系人工バリアの水理モデルの構築を検討することとした。

#### 3.1 透水係数と比表面積

この Kozeny-Carman 則をベントナイト系人工バリアの水理モデルとして適用する場合、透水係数は、その比表面積によって概ね決定づけられる。たとえば、ベントナイトの主要鉱物であるモンモリロナイトを水に分散させたときの単位質量当たりの比表面積  $S_v$  は  $800(m^2/g)$  程度である[4]。このモンモリロナイトが乾燥密度  $1.6(Mg/m^3)$  で  $1(m^3)$  のブロックの場合の比表面積は、 $1280(km^2/m^3)$  程度となり、琵琶湖の2倍程度という膨大な面積となる。式(5)に示したように、Kozeny-Carman 則では、透水係数がこの比表面積の二乗に反比例することになり、比表面積によって透水係数のオーダーが概ね決定されることになる。

図2には、透水係数に対する比表面積が及ぼす影響の大きさを示す。図には、単位質量当たりの比表面積が  $9 \sim 40(m^2/g)$  のカオリナイトと  $760 \sim 800(m^2/g)$  のモンモリロナイトを60wt%程度含むNa型ベントナイトの間隙比と透水係数の関係を示している。間隙比と乾燥密度  $\rho_d$  は、

$$e = \rho_s / \rho_d - 1 \quad (6)$$

で表され、間隙比と乾燥密度は一意的関係にある。ここで、 $\rho_s$  は土粒子密度である。

図から、同じ間隙比（乾燥密度）であっても、ベントナイトの透水係数がカオリナイトの透水係数の  $100 \sim 1000$  倍程度、小さいことが分かる。このことは、粉体や多孔質体の透水係数に対して比表面積が主要なパラメータとなり

得ることを示唆している。

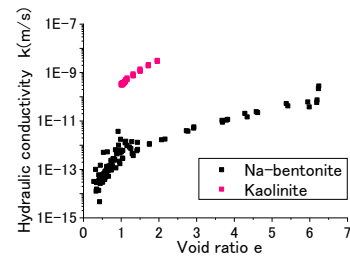


図2 透水係数に比表面積が及ぼす影響

そこで、式(5)に示した Kozeny-Carman 則の間隙比  $e$  の項を、膨潤変形や圧密変形などの力学応答による透水係数の変化を表現する項と考え、比表面積の項を化学変化に伴う透水係数の変化を表現する項と考えることでベントナイト系人工バリアの水理モデルとなり得ると考えた。

ここで問題となるのが、式(5)の比表面積の計測方法である。この比表面積は、ベントナイト系人工バリアの透水係数を評価する状態での値であり、言い換えれば、締固めて乾燥密度が一定の状態、かつ飽和した状態で取得した比表面積である。この状態での比表面積が取得できなければ、Kozeny-Carman 則において、ベントナイト系人工バリアの透水係数を決定づける主要パラメータを帰納法的に決定することになり、結局、従来の水理モデルのアプローチと同じになってしまう。表1に示すように、多孔質体や粉体材料の比表面積を計測する従来方法をベントナイト系人工バリア材料に試適用したが、どの方法も上記の要求を満足するものではなかった。

表1 比表面積計測方法と適用結果

方法	結果	理由
粒度分布	×	粒子形状を仮定、分散状態と圧縮状態の差異を説明できない
水銀圧入	×	密度一定では無理、湿潤状態ではないので膨潤していない
N <sub>2</sub> -BET	×	密度一定では無理（粉体で実施）、湿潤状態ではないので膨潤していない
H <sub>2</sub> O-BET	×	密度一定では無理（粉体で実施）、表面のみが濡れて、比表面積を過小評価
μフォーカスX線CT	×	モンモリロナイトに対して分解能が不足

#### 3.2 鉱物科学との連携

Kozeny-Carman 則によるベントナイト系人工バリアの止水モデルの構築のためには、この比表面積の計測方法が不可欠な技術であった。従来の比表面積計測方法が適用できないことから、前述の要求を満足する新しい比表面積の計測方法を開発する必要があった。

時を同じくして、筆者は、河村ら[5]が実施していた、その場XRD試験を見学する機会に恵まれた。その場XRD試験とは、締固めたモンモリロナイトの供試体に水を浸潤させ、その過程で変化する層間距離の経時変化を、乾燥密度

一定条件下で XRD 試験によって計測するものである。

地盤工学者として、浸潤に伴うベントナイト系人工バリアの膨潤挙動をマクロな視点で観察していた者にとって、その場 XRD 試験から得られる小さな供試体内の不均質な浸潤や給水側から排水側への層間距離の伝播は非常に新鮮であった。その後、河村らとのミクロな視点でのモンモリロナイトの水和などの議論を経て、その場 XRD 試験の方法を用いれば、締固めて乾燥密度が一定の状態、かつ飽和した状態でベントナイト系人工バリアの比表面積を取得できるのではないかと発想を得た。

### 3.3 その場 XRD を援用した比表面積の計測方法

その場 XRD 試験では、モンモリロナイトの層間に水分子が何個存在しているか、ということが回折パターンのピーク強度の位置によって同定できる。そこで、XRD を用いて図 3 に示すような 1 次粒子の表面に過不足なく水分子が吸着している状態が分かると、鉱物表面での水分子の専有面積から比表面積を算出できる。なお、図 3 の状態では、1 次粒子間に水分子が 2 個存在することになるために 2 層膨潤状態と呼ぶ。また、鉱物表面での水分子の専有面積  $S_g$  は、既往の研究[6]によって、 $S_g=10.8\text{\AA}^2(\text{m}^2)$ として与えられている。

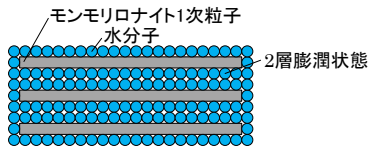


図 3 2層膨潤状態のモンモリロナイトのイメージ

ここで、単位質量当たりの水の専有面積  $S_g$  は、

$$S_g = 10.8\text{\AA}^2 \times 6.02 \times 10^{23} / 18 = 3.6 \times 10^3 (\text{m}^2 / \text{g} - \text{water}) \quad (7)$$

で表される。ここで、図 3 に示す 2 層膨潤状態の含水比を  $w^*(\times 100\%)$  とすると、モンモリロナイトの単位体積当たりの水の専有表面積  $S_v$  が、次式で表される。

$$s_v = 3.6w^* \times 10^3 (\text{m}^2 / \text{g} - \text{soil}) \quad (8)$$

さらに、乾燥密度  $\rho_d (\text{Mg}/\text{m}^3)$  の場合、モンモリロナイトの単位体積当たりの専有面積  $S_v$  は、次式となる。

$$S_v = 3.6w^* \rho_d \times 10^9 (\text{m}^2 / \text{m}^3 - \text{soil}) \quad (9)$$

以上から、XRD 試験によって図 3 の状態が判断されて、その際の含水比  $w^*$  (以下、2 層膨潤含水比) が取得できれば比表面積を取得することが可能である。

### 3.4 XRD を用いた 2 層膨潤含水比の計測

ベントナイト系人工バリアの 2 層膨潤含水比を取得するために、図 4 に示すような試験装置を用いた。まず、表 2 に示すように、様々なベントナイト系材料を事前に 1% 刻

みで含水比調整した後に、各材料を図 4 に示す容器に所定の乾燥密度になるように封入して、含水比と乾燥密度一定のもとで層間距離を計測した。なお、含水比の設定は、各層間陽イオンのモンモリロナイトのモンモリロナイト部分含水比が同じ範囲になるようにバルクの含水比 (モンモリロナイト部分含水比  $\times$  モンモリロナイト含有率) を設定した。

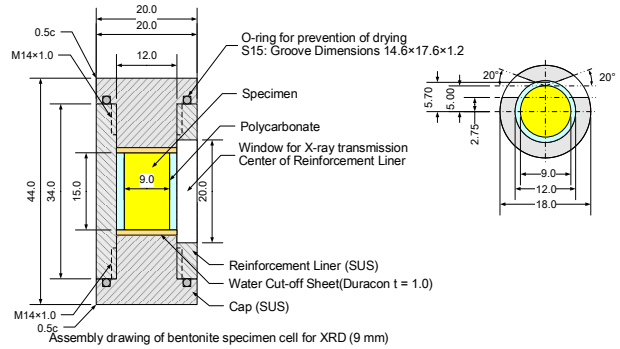


図 4 XRD を用いた 2 層膨潤含水比の計測装置

表 2 2 層膨潤含水比の取得のための XRD 試験ケース

材料	モンモリロナイト含有率 (wt%)	バルク含水比 (%)
Na モンモリロナイト (Kunipia F)	100	16~21
Na ベントナイト (KuniGel V1)	59	9~13, 26
人工 KuniGel V1	59	9~13
Ca モンモリロナイト (Ca-Kunipia F)	100	12, 16~21, 30, 35, 40, 47
Ca ベントナイト (Ca-KuniGel V1)	59	7, 9~12, 15, 18, 21, 26

図 5 には、Na 型モンモリロナイトの XRD パターンを示す。含水比が増加するに従って回折パターンのピーク位置が低角側 (左側) に移動するのが分かる。

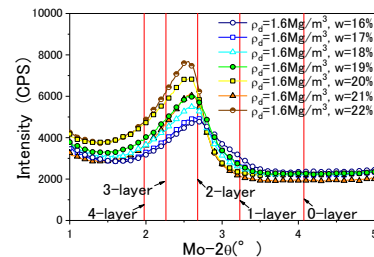


図 5 Na 型モンモリロナイトの XRD パターン

これらの回折パターンのピーク分離を行うと、図 6 のようになる。上図が含水比 19%、下図が 20% の場合である。図から、含水比 19% の場合では、2 層膨潤状態が大多数であるが、20% になると 2 層膨潤状態と 3 層膨潤状態が同じ程度となることが分かった。このことから、Na 型モンモリロナイトの 2 層膨潤含水比は 19% であると見なすこととした。図 7 には、様々なベントナイトの XRD パターンを示

す。Na 型モンモリロナイトのケースと同様に、含水比の増加に伴って回折パターンのピーク位置が低角側にシフトしている。これらの材料についても同様にして 2 層膨潤含水比を決定した。

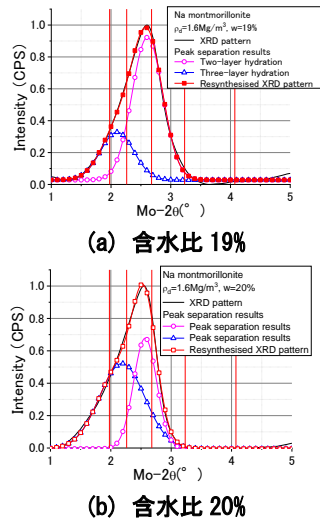
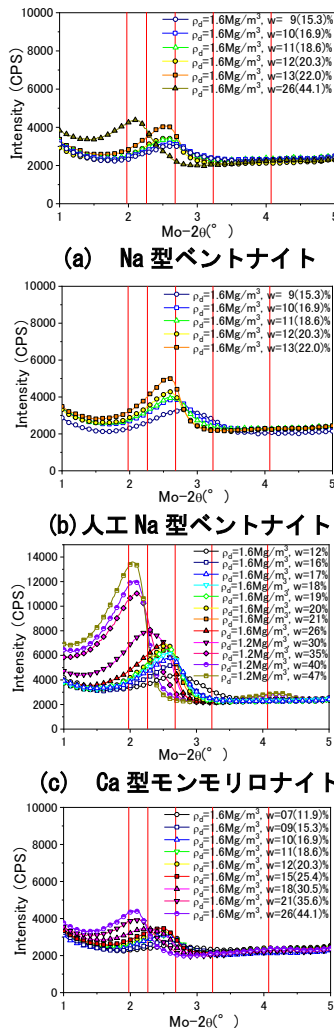


図 6 Na 型モンモリロナイトの XRD パターンのピーク分離



(d) Ca 型ベントナイト (Ca 型化クニゲル V1)

図 7 様々なベントナイトの XRD パターン

表 3 には、各材料の 2 層膨潤含水比と乾燥密度の関係を

まとめて示す。図 8 には 2 層膨潤含水比と乾燥密度の関係のイメージを示す。図に示すように、ある体積一定の空間に、2 層膨潤状態の土粒子（土粒子の表面に過不足なく水分子が吸着した状態）を増加させると、乾燥密度は増加するが、土粒子と水の質量割合である含水比は変化しない。この含水比は空間の空隙がなくなるまで一定である。さらに、土粒子を増やすためには吸着水を空間から追い出す必要があるため、含水比は低下する。このため、表 3 に示した 2 層膨潤含水比と乾燥密度の関係式では、2 層膨潤含水比で飽和する乾燥密度までは 2 層膨潤含水比が一定であるが、それ以上の乾燥密度になるとその乾燥密度における飽和含水比と一致するような関数形で近似している。

このように決定した Na 型モンモリロナイトの 2 層膨潤含水比と乾燥密度の関係を式(9)に代入して取得した比表面積と乾燥密度の関係を図 9 に示す。図には、2 層膨潤含水比と乾燥密度の関係を左図に、比表面積と乾燥密度の関係を右図に示している。図から、比表面積と乾燥密度の関係において、2 層膨潤含水比で飽和する乾燥密度において比表面積のピークが存在し、それよりも乾燥密度が大きくなると比表面積が減少に転じることが分かる。これは、2 層膨潤含水比と乾燥密度の関係式に依るものである。

表 3 2 層膨潤含水比と乾燥密度の関係

材料	2 層膨潤含水比 %	乾燥密度と 2 層膨潤含水比の関係 ※ $\chi_{mnt}$ : モンモリロナイト含有率
Na モンモリロナイト (Kunipia F)	19	$w^* = 0.01\chi_{mnt} / (0.052 + 3.8\chi_{mnt}E - 6\rho_d^{12.1\chi_{mnt}})$
Na ベントナイト (KuniGel V1)	11	$w^* = 0.01 / (0.091 + 2.2E - 8\rho_d^{17.57})$ $\approx 0.01\chi_{mnt} / (0.052 + 3.8\chi_{mnt}E - 6\rho_d^{12.1\chi_{mnt}})$
人工 KuniGel V1	11	$w^* = 0.01 / (0.091 + 2.2E - 8\rho_d^{17.57})$ $\approx 0.01\chi_{mnt} / (0.052 + 3.8\chi_{mnt}E - 6\rho_d^{12.1\chi_{mnt}})$
Ca モンモリロナイト (Ca-Kunipia F)	15	$w^* = 0.01\chi_{mnt} / (0.066 + 2.6\chi_{mnt}E - 7\rho_d^{15.16\chi_{mnt}})$
Ca ベントナイト (Ca-KuniGel V1)	9	$w^* = 0.01 / (0.11 + 3.9E - 11\rho_d^{24.5})$ $\approx 0.01\chi_{mnt} / (0.066 + 2.6\chi_{mnt}E - 7\rho_d^{15.16\chi_{mnt}})$

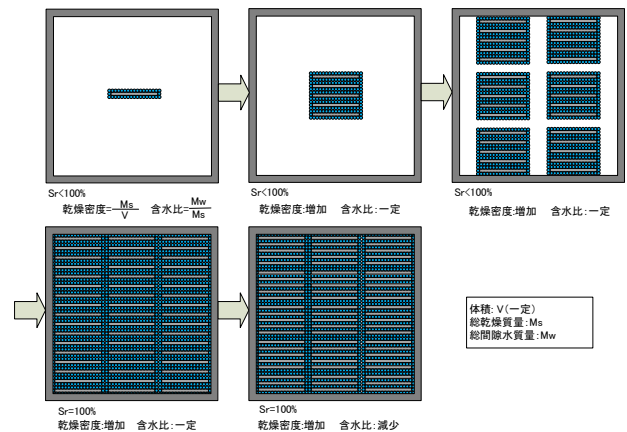


図 8 2 層膨潤含水比と乾燥密度の関係のイメージ



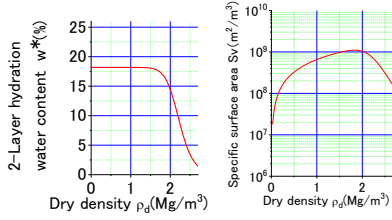


図 9 2 層膨潤含水比と乾燥密度の関係と比表面積と乾燥密度の関係

#### 4 2 層膨潤含水比を用いた Kozeny-Carman 則

##### 4.1 既往の研究との比較

図 10 に 2 層膨潤含水比から比表面積を決定した Kozeny-Carman 則と既往の研究の比較を示す。図には、JAEA データベース[7]の Na 型ベントナイトの結果と既往の研究における透水係数と乾燥密度の関係も併せて示している。

図から、2 層膨潤含水比から比表面積を決定した Kozeny-Carman 則から得られる透水係数は、JAEA データベースと比較して、大きいことが分かる。また、材料毎の 2 層膨潤含水比の違いによる透水係数の違いは僅かであり、実現象を十分に表現できるとは言い難い。

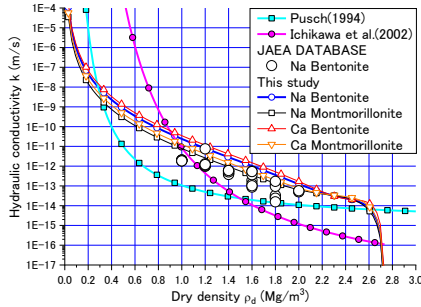


図 10 2 層膨潤含水比から比表面積を決定した Kozeny-Carman 則と既往の研究の比較

しかしながら、全てのパラメータの物理的意味が明確で、実験によって決定できる水理モデルであるという長所を有している。さらに、間隙比の項によってもたらされる透水係数と乾燥密度の関係の形状と JAEA データベースのプロットの分布形状が類似しており、ベントナイト系人工バリアの水理モデルとしての Kozeny-Carman 則の適用可能性が推察される結果となった。

##### 4.2 内間隙比と外間隙比

ここで、2 層膨潤状態までの間隙を内間隙、それ以外を外間隙と仮に定義すると、それらの土粒子体積に対する体積割合である内間隙比  $e_{int}$  と外間隙比  $e_{ext}$  が 2 層膨潤含水比を用いて下式のように与えられる。なお、ここでは、2 層膨潤状態までの間隙を内間隙と定義しているが、n 層膨潤状態の含水比で定義すれば、式(10)は n 層までの層間の内間隙比を与えることになることを付記しておく。

これらを図示すると図 11 に示す。図から、外間隙と内間隙が区別できなくなる乾燥密度  $1.8 \text{ Mg/m}^3$  付近で外間隙比がゼロとなり、それ以上の乾燥密度では内間隙比しかなくなるという状況を表現できていることが分かる。

$$e_{int} = w^* G_s \quad (10)$$

$$e_{ext} = e - e_{int} = (w_{sat} - w^*) G_s \quad (11)$$

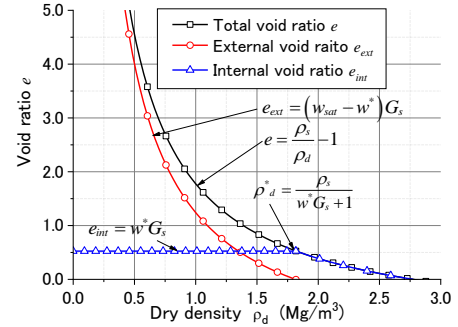


図 11 内・外・全間隙比～乾燥密度の関係

この内間隙と外間隙のそれぞれの透水係数  $k_{int}$ ,  $k_{ext}$  を式 (12), (13) のように定義して、全体の透水係数を再定義することを試みた。なお、内間隙と外間隙の比表面積  $S_{vint}$ ,  $S_{vext}$  は、式(14), (15) のように定義した。全体の透水係数は、内間隙と外間隙に同じ動水勾配が作用していると仮定した場合が式(16)、内間隙と外間隙の流量が同じであると仮定した場合が式(17)として算出した。

$$k_{int} = \frac{1}{C} \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{S_{vint}^2} \frac{e_{int}^3}{1 + e_{int}} \quad (12)$$

$$k_{ext} = \frac{1}{C} \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{S_{vext}^2} \frac{e_{ext}^3}{1 + e_{ext}} \quad (13)$$

$$S_{vint} = S_v \left( \frac{e_{int}}{e} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (14)$$

$$S_{vext} = S_v \left( \frac{e_{ext}}{e} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (15)$$

$$k = k_{int} + k_{ext} \quad (16)$$

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_{int}} + \frac{1}{k_{ext}} \quad (17)$$

内・外間隙比を用いた乾燥密度と透水係数の関係と JAEA データベースとの比較を図 12 に示す。図から、式(12)

に示した内間隙のみの透水係数，もしくは式(17)に示した合成した透水係数が JAEA データベースの試験結果と整合していることが分かる。

今後，精緻な理論に基づいた検討が必要ではあるが，この結果によって，ベントナイト系人工バリアの水理モデルとしての Kozeny-Carman 則の適用可能性を改めて確認することができた。

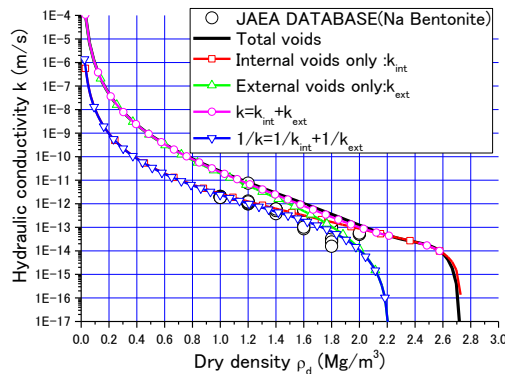


図 12 内・外間隙比を用いた乾燥密度と透水係数の関係と既往の研究の比較

## 5 おわりに

“処分の信頼性，安全，技術連携・統合”がこのセッションのテーマであった。Kozeny-Carman 則に用いる比表面積を，XRD を用いて 2 層膨潤状態を判断し，その含水比から取得するという発想は，河村らのその場 XRD の研究がなければ到底発想することが出来なかった。まさに，鉱物科学との技術連携なくして得られなかった成果である。

本稿では，Kozeny-Carman 則でベントナイト系人工バリアの止水性能評価を実施できる可能性を示した。現在では，Kozeny-Carman 則の形状係数に屈曲度を考慮するなどの高度化を進めている。今後も，様々な研究者と技術連携をしながら，信頼性の高い水理モデルの構築を目指す予定である。

なお，本稿は，(公財)原子力環境整備促進・資金管理センターが経済産業省資源エネルギー庁より受託した，地層処分技術調査等委託費 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発(平成 20～21 年度)及び地層処分技術調査等事業 TRU 廃棄物処分技術 人工バリア長期性能評価技術開発(平成 22～24 年度)の成果の一部を取りまとめた Kobayashi et al.[8]の内容を，夏期セミナーの講演のために再編集したものである。

## 参考文献

[1] JNC,FEPC: TRU 廃棄物処分技術検討書—第 2 次 TRU 廃棄物処分研究開発取りまとめ—, JNC TY1400 2005-013 (2005).  
 [2] 石原研而著: 土質力学, 丸善株式会社 (1988).  
 [3] Carman, P.C.: Flow of gases through porous media. Academic press, New York. 182pp. (1956).

[4] 日本粘土学会: 粘土ハンドブック, 第 2 版, pp.131-132. (1987).  
 [5] 例えば, Kawamura, K., Ichikawa, Y., Nakano, M., Kitayama, K. and Kawamura, H.: Swelling properties of smectite up to 90°C: In situ x-ray diffraction experimental and molecular dynamics simulation, Engineering Geology, 54, pp.75-59. (1999).  
 [6] 須藤清次: 土壌の比表面と BET 法による測定, 土壌の物理性, 総説, Vol.16, pp.39-42. (1967).  
 [7] JAEA, Buffer Material Database, <http://bufferdb.jaea.go.jp/bmdb/>  
 [8] I. Kobayashi, H. Owada, T. Ishii and A. Iizuka: Evaluation of specific surface area of bentonite-engineered barriers for Kozeny-Carman law, Soils and Foundations Vol.57, pp. 683–697. (2017).