

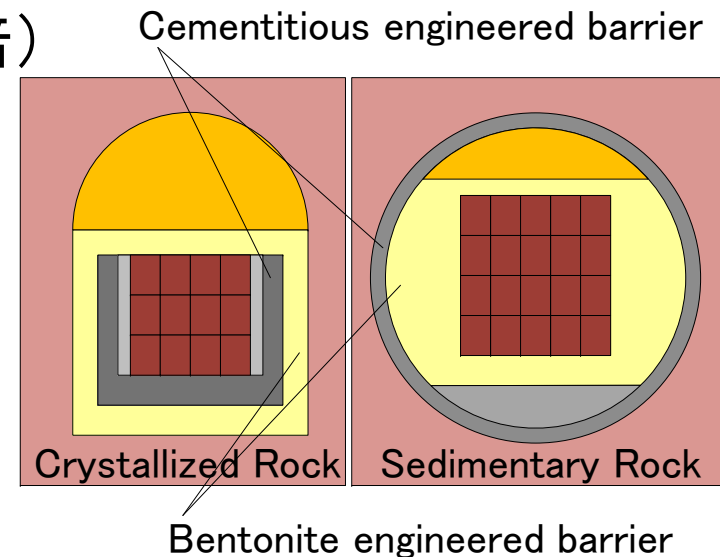
■ 処分の信頼性、安全、技術連携・統合 その1

ミ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-

鹿島建設株式会社 小林一三

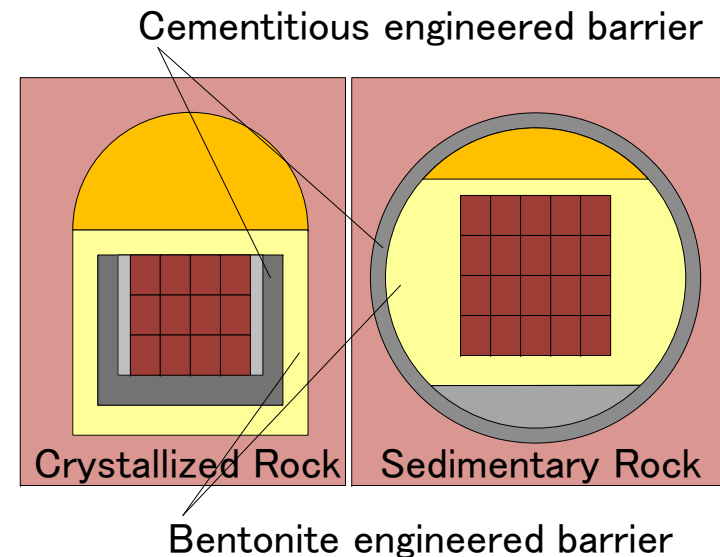
研究の背景

- 対象はTRU廃棄物処分事業
- ベントナイト系人工バリアに要求される性能は 低透水性(例えば、透水係数 $k < 10^{-12} \text{m/s}$)など
- セメント系人工バリアを多用する処分概念のため、セメント浸出液がベントナイト系人工バリアの止水性能に及ぼす影響評価が重要
- Na型ベントナイトを母材とするベントナイト系人工バリアが陽イオン交換反応によってCa型になると、その透水係数は、密度一定でも著しく増加する(密度に依るが10倍~100倍)



研究の目的

- 人工バリアの長期性能評価のための水理モデルの構築
- 考慮する変質は、層間陽イオンの交換反応、モンモリロナイトの溶解など
- このような陽イオン交換反応による透水係数の増加を従来の“地盤工学”の水理モデルで表現することは困難



従来の“地盤工学”の水理モデル(砂を対象)

- Taylorの式 $k = \frac{C_k}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} D_w^2$
- Zunkerの式 $k = \frac{C_z}{\mu} \left(\frac{n}{1-n} \right)^2 D_w^2$
- Terzaghiの式 $k = \frac{C_t}{\mu} \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 D_{10}^2$

$$n = \frac{V_v}{V} = \frac{e}{1+e}$$

イオン強度が高
くなくても層間
陽イオンがCa型
化しても変化し
ない

μ : 粘性係数

土質力学 石原研而著

従来の“地盤工学”の水理モデル(砂を対象)

- Kozeny
-Donatの式
$$k = \frac{C_k}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} D_w^2$$
 - Zunkerの式
$$k = \frac{C_z}{\mu} \left(\frac{n}{1-n} \right)^2 D_w^2$$
 - Terzaghiの式
$$k = \frac{C_t}{\mu} \left(\frac{n-0.13}{\sqrt[3]{1-n}} \right)^2 D_{10}^2$$
- 粒径：イオン強度が高くなったり層間陽イオンがCa型化すると見かけの粒度分布は変化するが微視的には変化しない

従来の“地盤工学”の水理モデル(粘土を対象)

- 粘土の透水係数 $e - e_0 = 0.5e_0 \log \left(\frac{k}{k_0} \right)$
 e_0 : 初期間隙比
 k_0 : 初期透水係数

イオン強度が高くなっても層間陽イオンがCa型化しても変化しない

Kozeny-Carman則

Kozeny-Carman則による透水係数の式

水みちを円筒管、水の流れをHagen-Poiseuille流を仮定した理論式

$$k = \frac{1}{C} \frac{\rho g}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{1}{S_v^2}$$

巨視的な量

イオン強度が高くなっても層間陽イオンがCa型化しても変化しない

Kozeny-Carman則

Kozeny-Carman則による透水係数の式

水みちを円筒管、水の流れをHagen-Poiseuille流を仮定した理論式

$$k = \frac{1}{C} \frac{\rho g}{\mu} \frac{n^3}{(1-n)^2} \frac{1}{S_v^2}$$

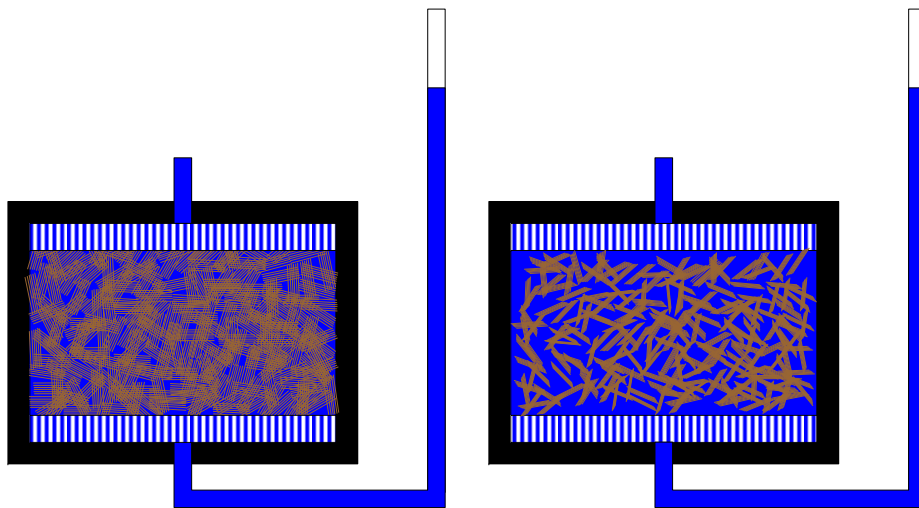
微視的な量(比表面積: S_v (m^2/m^3))

水を流した時の単位体積当たりの水と鉱物の接触面積
イオン強度が高くなったり、層間陽イオンがCa型化して
土の微視的構造が変化すると変化し得る

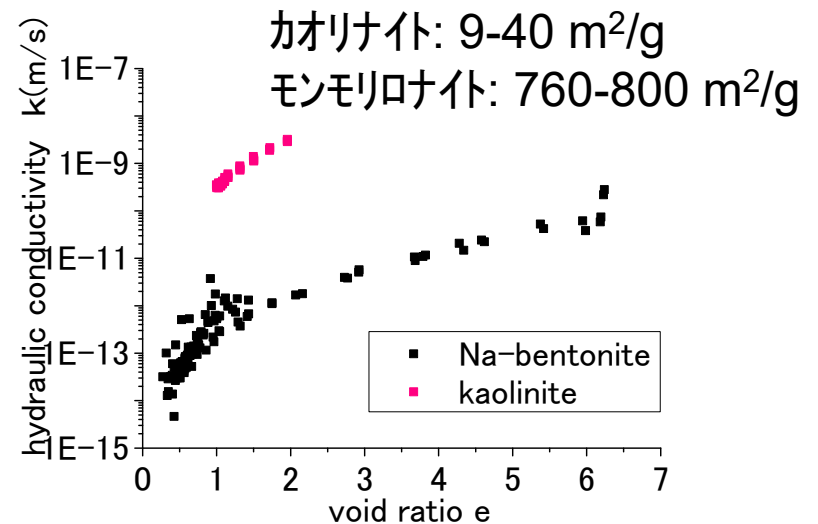
Kozeny-Carman則

多孔質体の透水係数: 比表面積に依存する

間隙比が同じでも比表面積が大きい方が水を通しにくい



左右の  は同じになるように描いた



膨潤性鉱物を含む土は透水係数が非常に小さい
モンモリロナイトを水に分散させたときの比表面積800m²/g程度
乾燥密度1.6Mg/m³のモンモリロナイト1m³場合1280km²/m³(琵琶湖の2倍)

Kozeny-Carman則

$$k = \frac{1}{C} \frac{\rho g}{\mu} \frac{1}{S_r^2} \frac{e^3}{1+e}$$

化学変質で変化する項
(膨潤の程度で変化する項)

体積変化がなければ変化しない項

締固めた膨潤性鉱物の飽和状態の比表面積(水が流れるときの水との接触面積)を密度一定条件でどうやって求めるか？

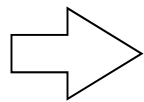
Key word: 締固めた状態、飽和状態、密度一定条件

粘土科学と地盤工学の連携

比表面積を計測する既存の方法

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 ₂ -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 ₂ 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
マイクロフォーカスX線CT	×	モンモリロナイトに対して現状の分解能では役に立たない

東工大の河村教授のその場X線回折技術と出会う



XRDを用いた2層膨潤含水比による比表面積の算出方法

XRDを用いた2層膨潤含水比による比表面積

比表面積の算出手順

水分子の鉱物表面での専有面積 $S_g = 10.8 \text{ \AA}^2 (\text{m}^2)$ (須藤、1967)

水の単位質量当たりの専有面積に換算

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

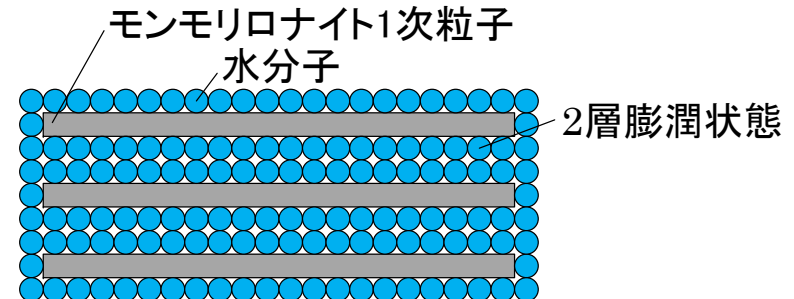
モンモリロナイトの単位質量当たりの専有面積に換算

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

モンモリロナイトの単位体積当たりの専有面積に換算

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

w^* : 2層膨潤含水比 (鉱物表面に水分子が過不足なく吸着しているときの含水比)

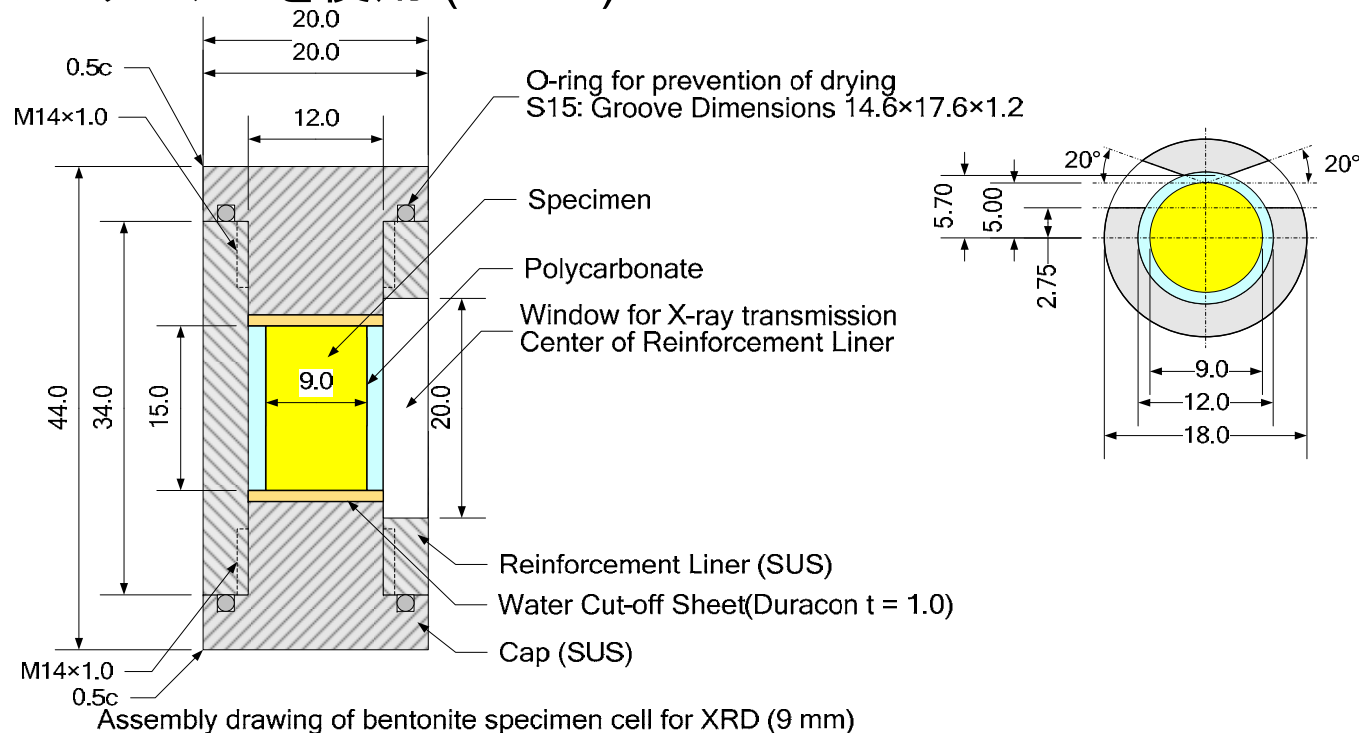


2層膨潤含水比の計測方法

試験装置

その場X線回折技術を援用

- ✓ 含水比調整したベントナイトを準備
- ✓ 内径9mmのポリカーボネート管の中に材料を所定の乾燥密度になるように封入
- ✓ スリットを有するSUS製の鞘管にセットしてXRDにかける
- ✓ X線管球はモリブデンを使用 (MoK α).



2層膨潤含水比の計測方法

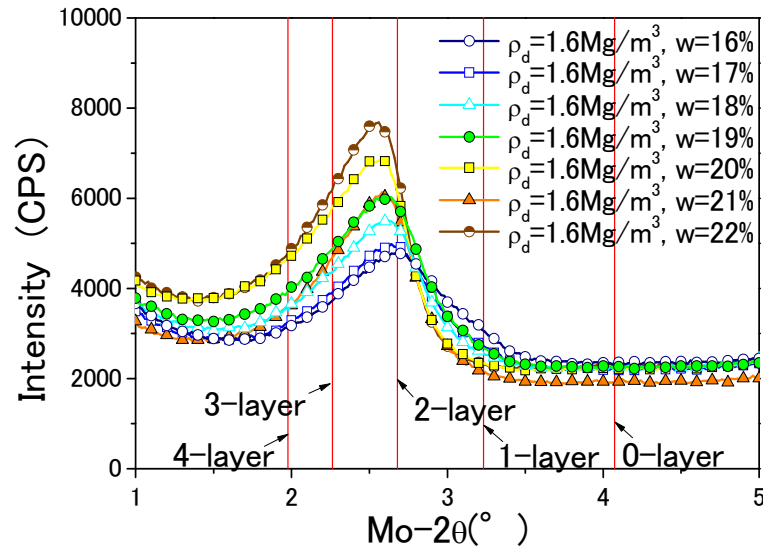
試験条件

各材料で含水比をパラメータとして試験を実施

材料	モンモリロナイト含有率 (wt%)	モンモリロナイト部分の含水比 (%)
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 ($0.59 \times 15 \sim 22, 44$)
人工KuniGel V1	59	$0.59 \times 16 \sim 21$
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

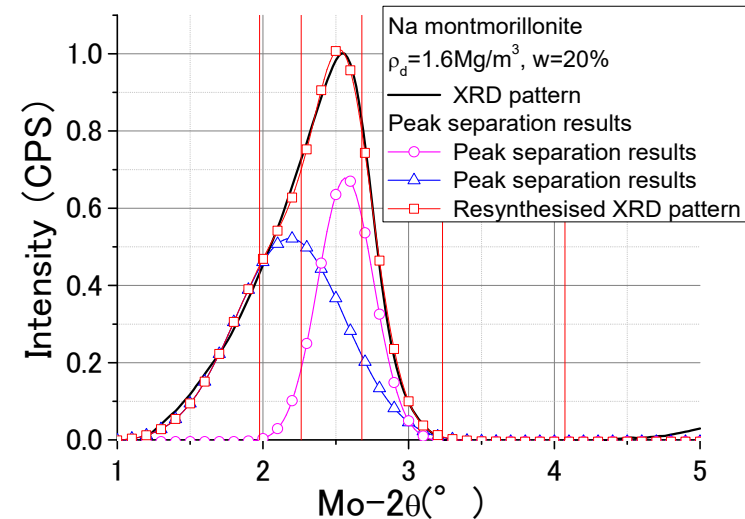
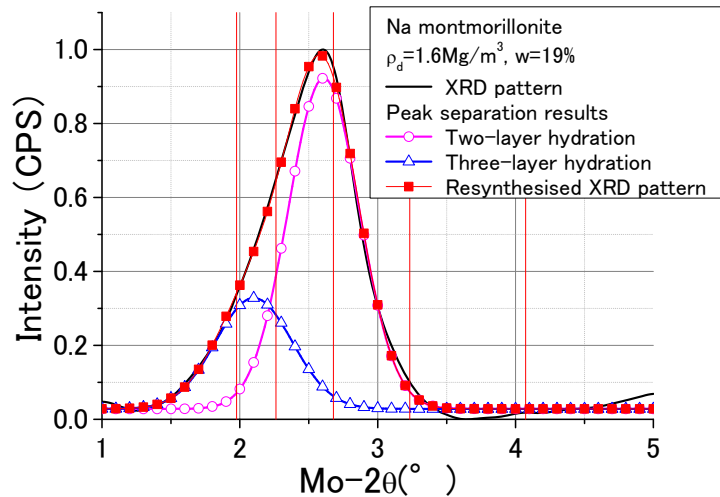
2層膨潤含水比の計測結果

Naモンモリロナイトの例



含水比が増加すると回折パターンのピーク位置が左にシフトする

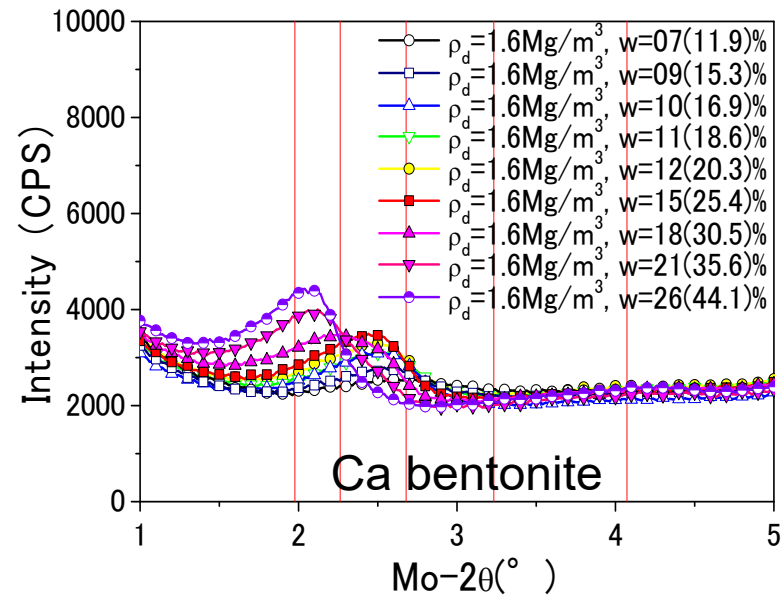
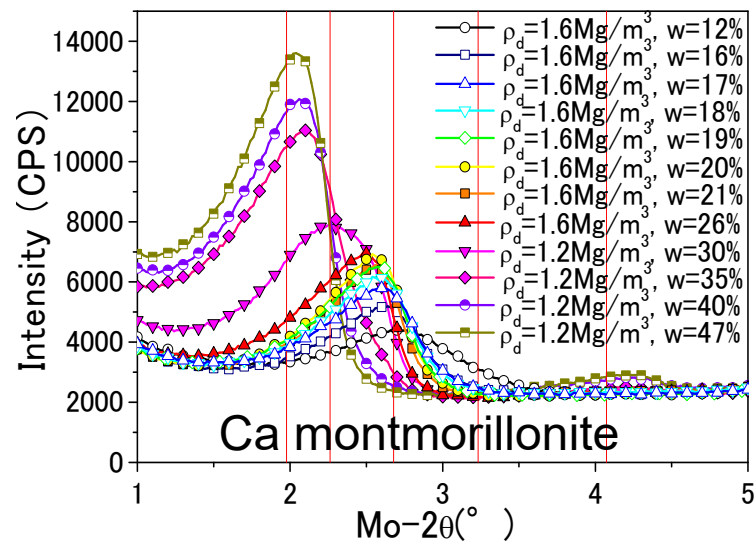
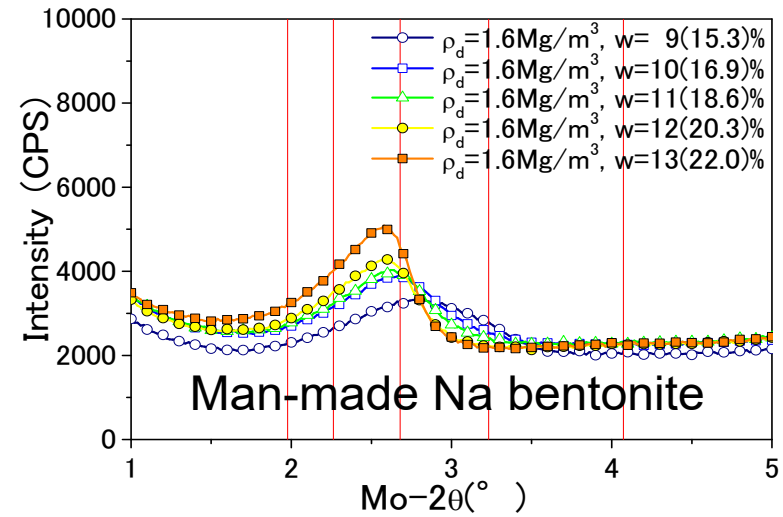
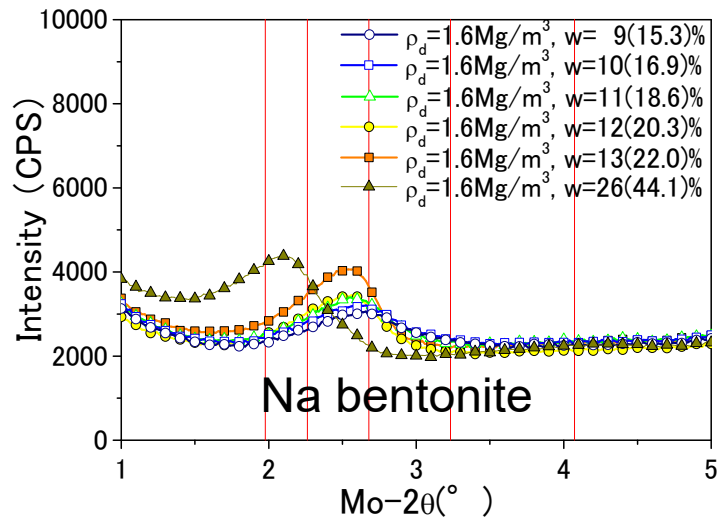
ピーク的位置で層間にある水分子の数が分かる



含水比19%までは2層膨潤状態が主体的であるが、20%になると3層膨潤と2層膨潤が同程度混在する⇒2層膨潤含水比を19%とした

2層膨潤含水比の計測結果

Naモンモリロナイト以外の結果



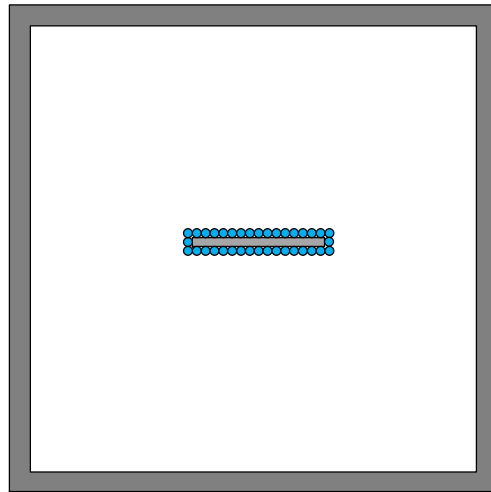
2層膨潤含水比の計測結果

試験結果のまとめ

材料	w^*	乾燥密度と2層膨潤含水比の関係
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%	$w^* = 0.01 / (0.11 + 3.9E - 11\rho_d^{24.5})$ $\approx 0.01\chi_{mnt} / (0.066 + 2.6\chi_{mnt}E - 7\rho_d^{15.16}\chi_{mnt})$

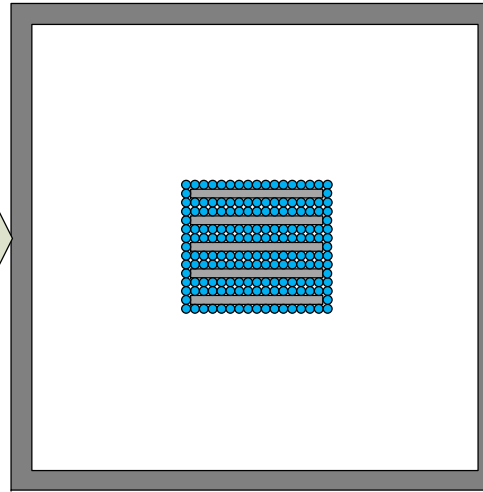
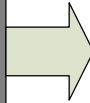
χ_{mnt} : モンモリロナイト含有率

2層膨潤含水比の考え方



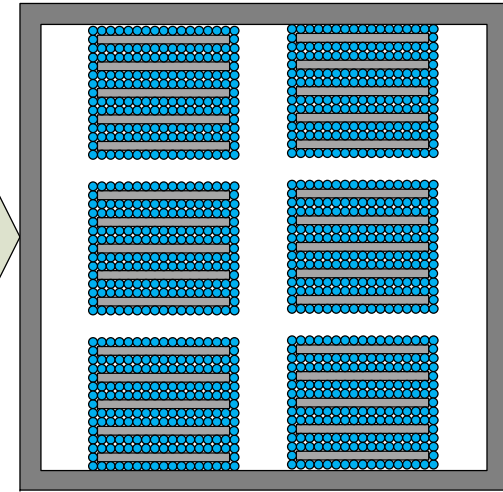
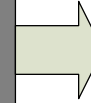
$S_r < 100\%$

$$\text{乾燥密度} = \frac{M_s}{V} \quad \text{含水比} = \frac{M_s}{M_w}$$



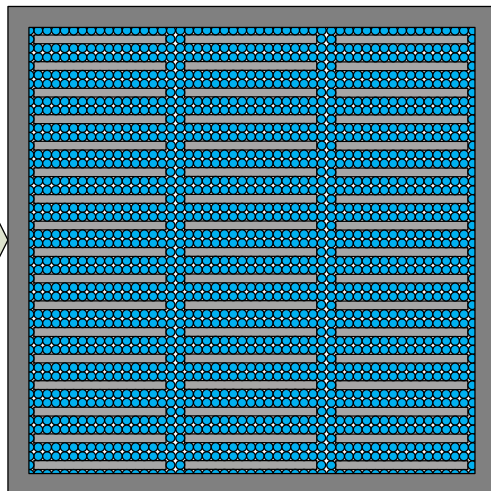
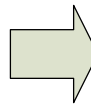
$S_r < 100\%$

乾燥密度: 増加 含水比: 一定



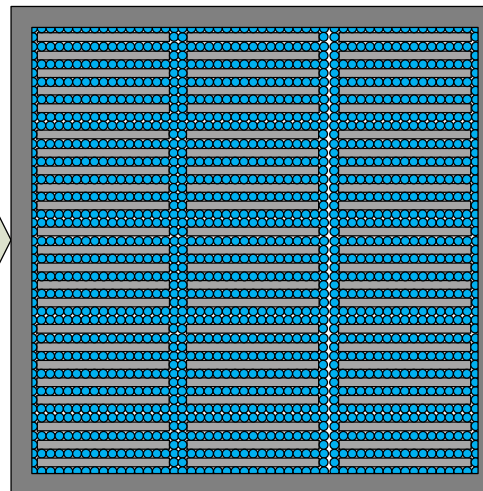
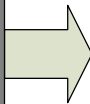
$S_r < 100\%$

乾燥密度: 増加 含水比: 一定



$S_r = 100\%$

乾燥密度: 増加 含水比: 一定



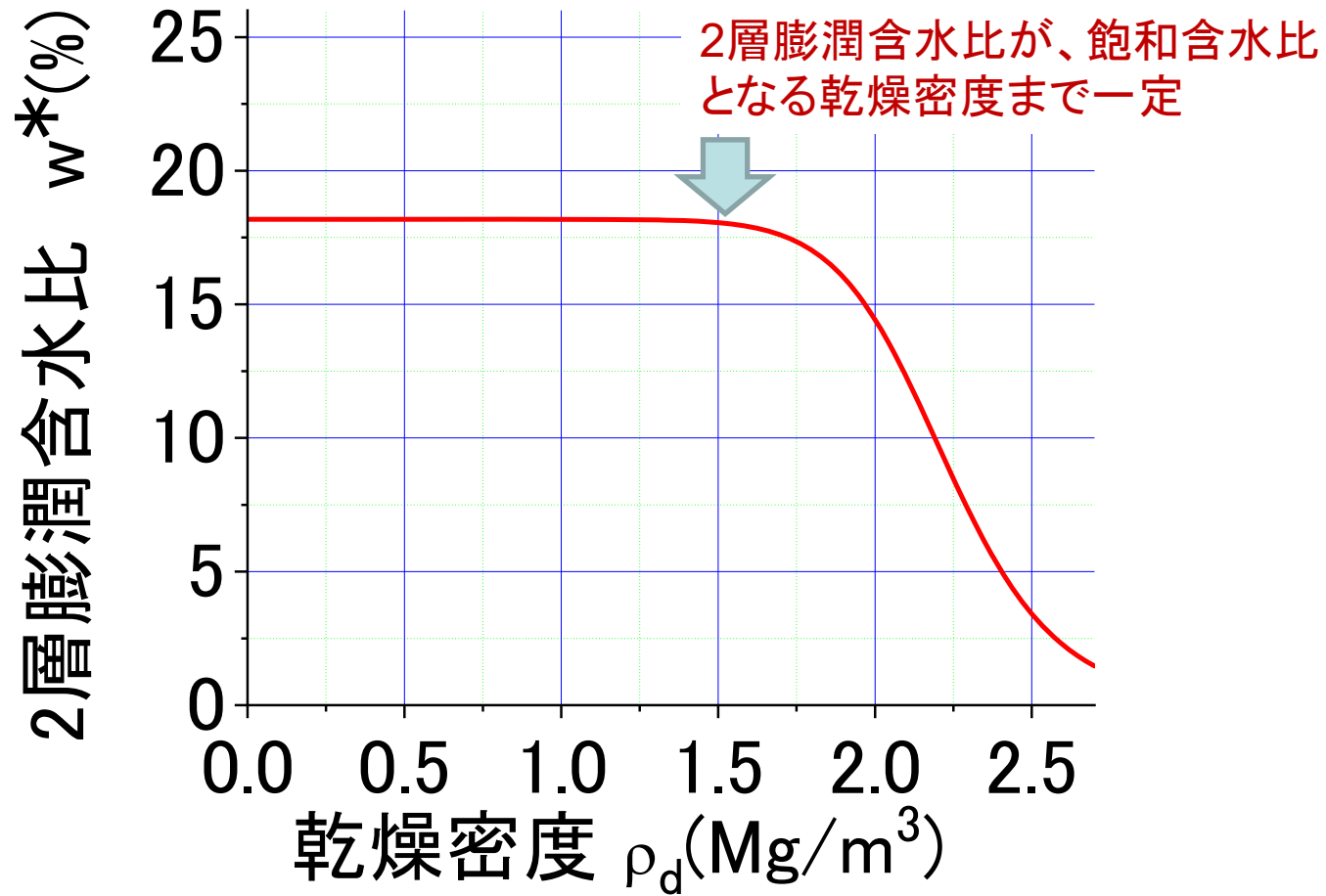
$S_r = 100\%$

乾燥密度: 増加 含水比: 減少

体積: V (一定)
 総乾燥質量: M_s
 総間隙水質量: M_w

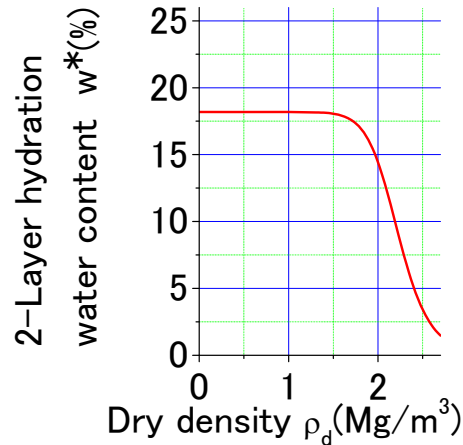
2層膨潤含水比の計測結果

Na型モンモリロナイト



Kozeny-Carman 則への適用

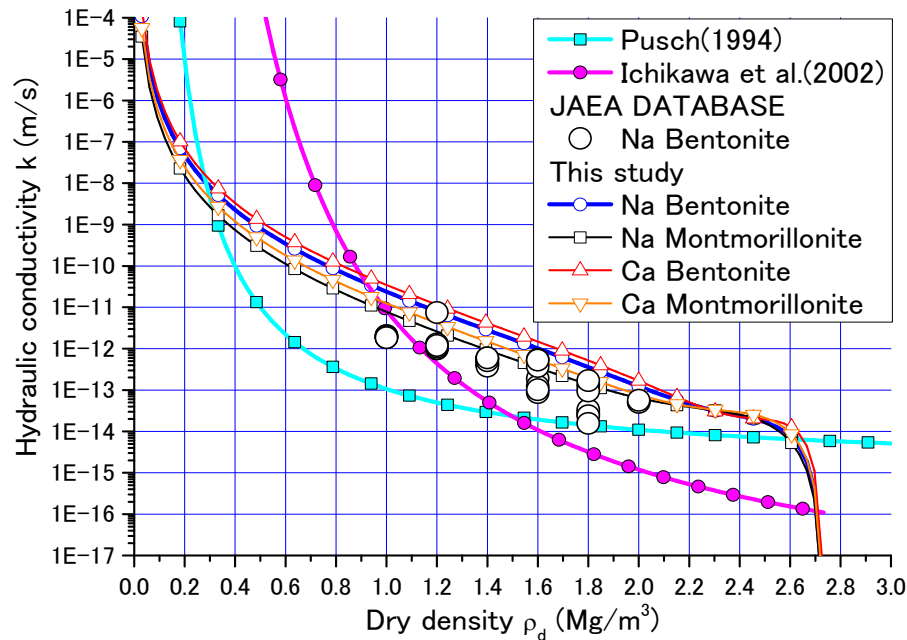
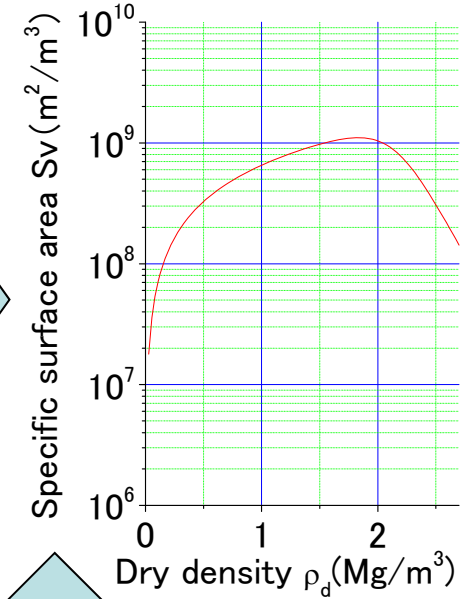
2層膨潤含水比から求めた比表面積の導入



$$sv = 36w^* (m^2 / g)$$

$$Sv = 36w^* \rho_d (m^2 / m^3)$$

$$w^* = 1 / (0.052 + 3.8E - 6\rho_d^{12.1})$$



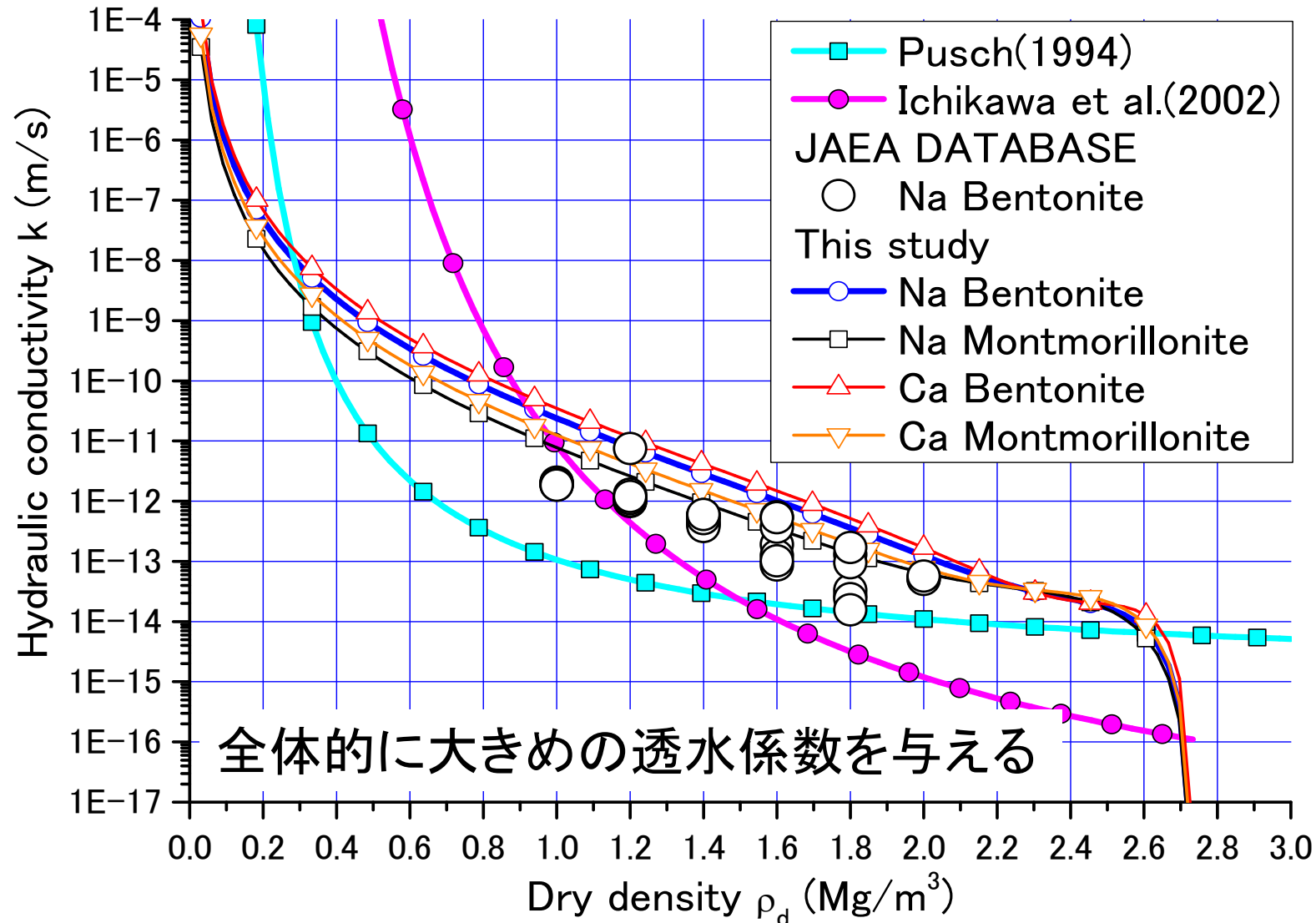
Kozeny-Carman law

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

S_v : Specific Surface Area (m²/m³)

Kozeny-Carman 則への適用

2層膨潤含水比から求めた比表面積の導入

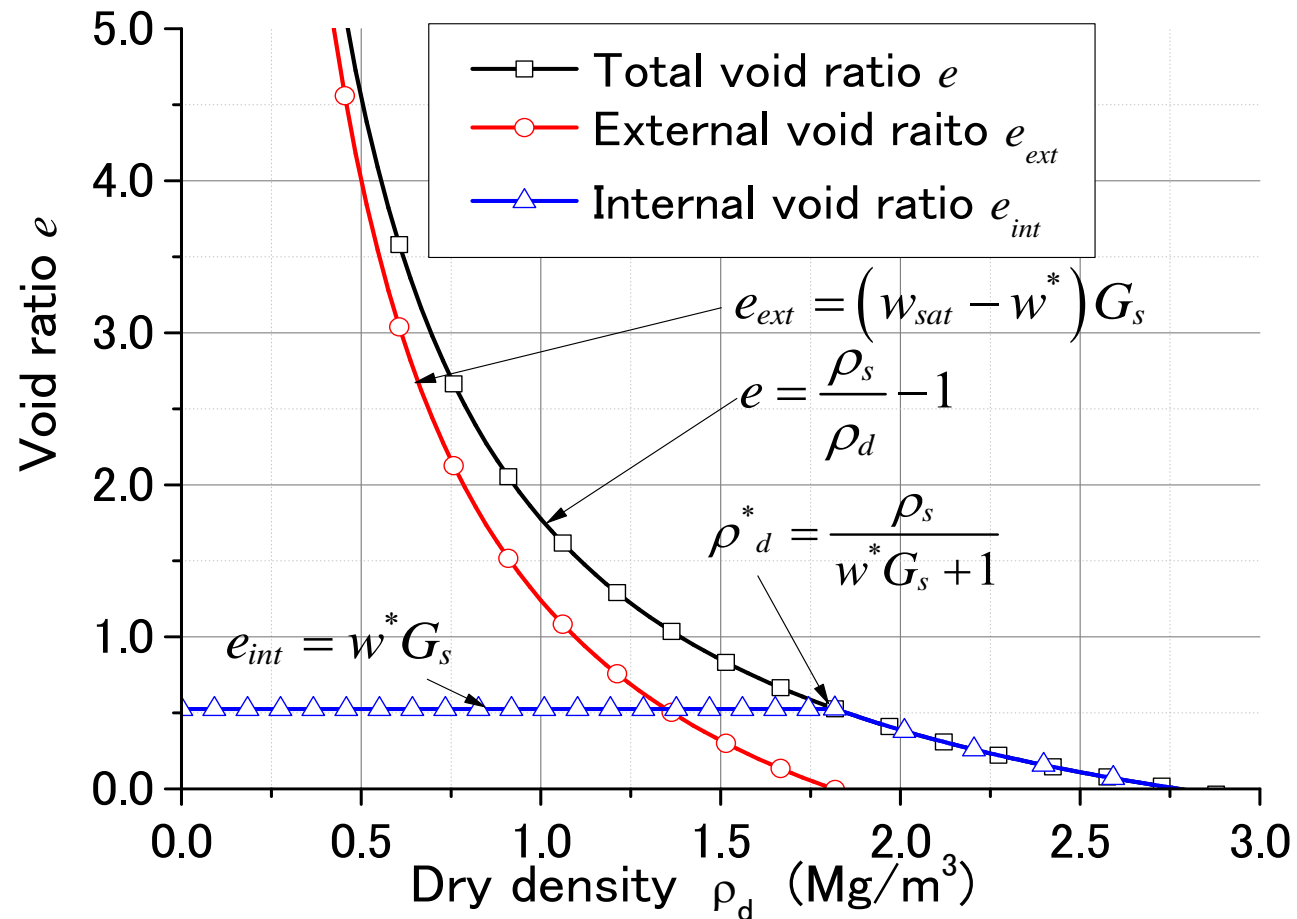


副次的な結果

2層膨潤含水比による内間隙比(2層膨潤まで)と外間隙比の分離

$$e_{int} = w^* G_s$$

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



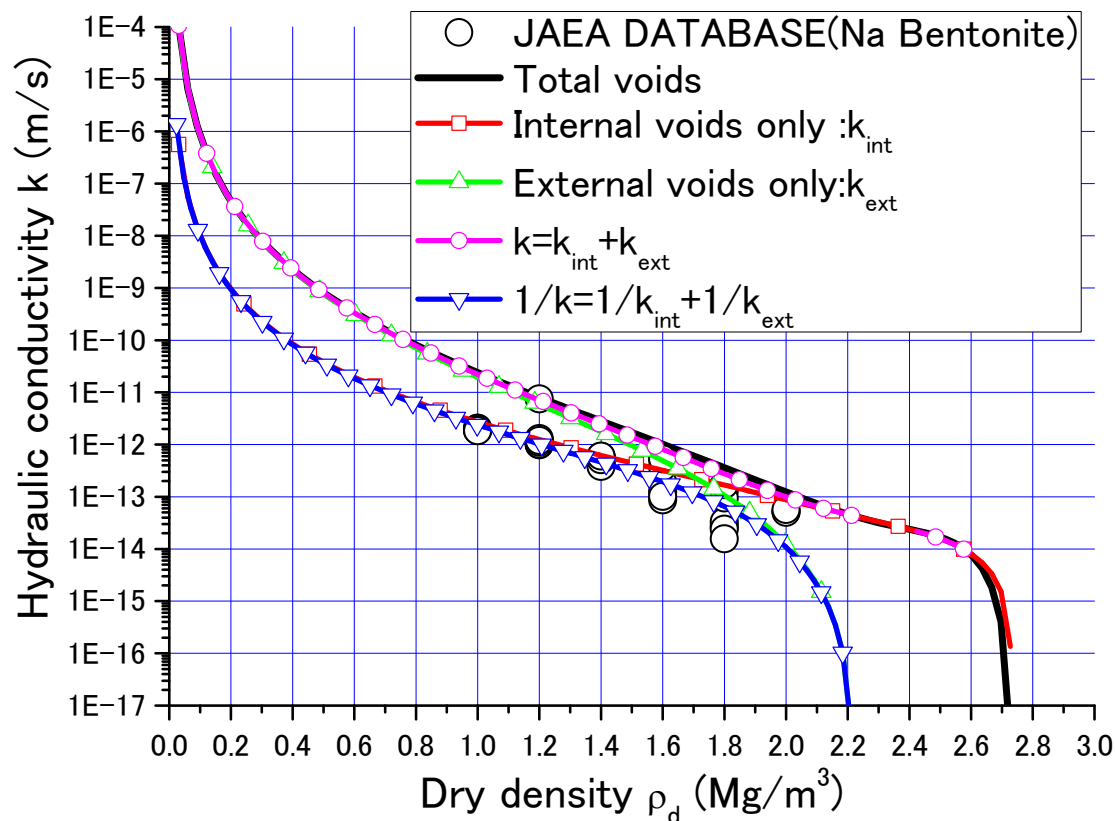
外間隙比と内間隙比を使ったKozeny-Carman則

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

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

- ✓ 内間隙と外間隙に同じ動水勾配が作用していると仮定

$$k = k_{int} + k_{ext}$$



- ✓ 内間隙と外間隙の流量が同じと仮定

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{k_{int}} + \frac{1}{k_{ext}}$$

まとめ

- 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。
- 地盤工学だけではなく、粘土科学との連携がブレイクスルーとなった。
- Kozeny-Carman則は屈曲度などを考慮したモデルまで発展しており、必要に応じて高度化を進めていく予定である。

参考文献

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.