



浸潤試験における浸潤量の時間変化に基づくベントナイトの不飽和透水係数の推定方法

四海, 伸二
高山, 裕介
橘, 伸也
竹山, 智英

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 29:60-69

(Issue Date)

2025-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100496653>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100496653>



浸潤試験における浸潤量の時間変化に基づく ベントナイトの不飽和透水係数の推定方法

A method for estimating unsaturated permeability of bentonite based on the change
in infiltration volume in infiltration tests

四海 伸二¹⁾

Shinji Yotsumi

高山 裕介²⁾

Yusuke Takayama

橘 伸也³⁾

Shinya Tachibana

竹山 智英⁴⁾

Tomohide Takeyama

概要: 高レベル放射性廃棄物の地層処分施設の緩衝材にはベントナイトと呼ばれる粘土が用いられることが検討されている。ベントナイトは不飽和状態で施工された後、地下水の再冠水によりやがて飽和状態に至ることが想定されている。この再冠水過程における不飽和状態のベントナイトの浸潤挙動を解析するためには比透水係数のパラメータ値が必要となる。しかしながら、このパラメータ値は実験結果から直接推定することができていない。そこで本研究では、ベントナイトの浸潤試験における浸潤量のデータから比透水係数のパラメータ値を推定する方法を構築した。さらに、構築した手法を用いて設定したパラメータ値を用いて浸潤試験の再現解析を行い、構築した推定方法の信頼性を評価した。

キーワード: 地層処分、ベントナイト、比透水係数

1. はじめに

日本では、1960年代から原子力発電を行ってきたが、その際に発生する放射性廃棄物の処理が大きな課題となっている。放射性廃棄物は、「低レベル放射性廃棄物」と「高レベル放射性廃棄物」に大別される。原子力発電によって生じる使用済み燃料は再処理によって、重量の95%が再利用可能であるが、残りの5%は再利用できない廃液となる。これをガラス原料と融かし合わせ、ステンレス製の容器に流し込み冷やし固めたものが高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)となる。このガラス固化体は地層処分することが検討されている。地層処分では、ガラス固化体をオーバーパックと呼ばれる厚い金属容器に封入し、さらにベントナイトと呼ばれる粘土質の緩衝材で囲い、地下深くの岩盤に一定の間隔をあけ埋設することが検討されている。

ベントナイトは不飽和状態で施工された後、地下水の再冠水によりやがて飽和状態に至ることが想定されている。この再冠水過程における不飽和状態のベントナイトの浸潤挙動を解析するためには透水係数、水分特性曲線のパラメータ値、比透水係数のパラメータ値が必要である。

現在の解析では、透水係数および水分特性曲線のパラメータ値は実験結果から直接推定されているが、比透水係数のパラメータ値は実験結果から直接推定することができていない。比透水係数のパラメータ値の

設定については、複数の浸潤試験を実施し、解析コードを用いた再現解析により試験結果を再現するパラメータ値を試行錯誤的に決定している^(例えば 1)2)。そのため現在の手法では、パラメータ値の推定に時間と手間がかかる等の課題を有する。

本研究ではベントナイトの比透水係数に関するパラメータ値を、解析コードを用いた逆解析等を行うことなく、試験結果から直接設定でき、より簡便に短時間で設定できる手法を構築することを目的とする。さらに、構築した手法を用いて推定したパラメータ値を用いて、佐藤らの浸潤試験⁴⁾を対象とした再現解析を有限要素解析コード DACSAR-i³⁾によって実施し、得られた解析結果と実験結果の比較により、構築したモデルの信頼性を評価する。

2. 比透水係数モデルの導出

不飽和状態の流速を表現する式として、不飽和状態に拡張したダルシー則と、水分拡散係数を用いた水分拡散の式がある。ここでは、まずこれら 2 式から、比透水係数を水分拡散係数、透水係数、水分特性曲線を用いて記述する。また、水分拡散の式を用いた場合のパラメータである水分拡散係数は、ベントナイトの場合は飽和度がおよそ 50% から 90% の範囲において一定値とみなせることが報告されている⁵⁾。水分拡散係数を一定値とした場合、水分拡散係数は、浸潤試験での供試体への浸潤量と経過時間の平方根の関係における直線の傾きを用いて表される⁵⁾。そのため、比透水係数は、透水係数、水分特性曲線、浸潤量の時間変化直線の傾き、という室内試験で直接取得することができる値で表すことが可能となる。

まず、不飽和状態に拡張したダルシー則は以下で表される。

$$v_i = -k_r k_w \frac{\partial h}{\partial x_i} \quad (1)$$

ここで、 v_i : 流速ベクトル、 k_r : 比透水係数、 k_w : 透水係数、 h : 全水頭である。ただし、

$$h = \frac{p_w}{\rho_w g} + z \quad (2)$$

である。ここで、 p_w : 間隙水圧、 z : 高さである。

また、間隙水圧と間隙空気圧の差であるサクションは水分特性曲線により飽和度の関数として表され、間隙空気圧変化がなく、常に大気圧と一定と仮定すると、間隙水圧は飽和度の関数となる。そのため、式(1)を飽和度の勾配を用いる形に変形すると、

$$v_i = -k_r k_w \frac{\partial h}{\partial p_w} \frac{\partial p_w}{\partial S_r} \frac{\partial S_r}{\partial x_i} \quad (3)$$

となる。なお、ベントナイトは非常に大きなサクションを有するため、位置水頭の勾配を無視している。

一方、水分拡散係数を用いて流速ベクトルを表すと、

$$v_i = -nD \frac{\partial S_r}{\partial x_i} \quad (4)$$

となる。ここで、 n : 間隙率、 D : 水分拡散係数、 S_r : 飽和度である。

一般的に、水分拡散係数は飽和度の関数であるが、ベントナイトの場合は飽和度がおよそ 50% から 90% の範囲では一定値とみなせることから水分拡散係数は一定値とする。式(3)と式(4)より、比透水係数は、

$$k_r = \frac{nD}{k_w \frac{\partial h}{\partial p_w} \frac{\partial p_w}{\partial S_r} \frac{\partial S_r}{\partial x_i}} \quad (5)$$

となる。

小峯らは、不飽和状態のベントナイト供試体の吸水による水分移動を水分の拡散現象として評価する場合、

締め固めた不飽和ベントナイト供試体への浸潤量 Q は、式(6)の表されることを示している⁵⁾。

$$Q = 2An'_e \sqrt{\frac{D}{\pi}} \sqrt{t} \quad (6)$$

ここで、 A :供試体の断面積、 n'_e :有効間隙率、 D :水分拡散係数、 t :経過時間である。ベントナイト供試体への浸潤量は経過時間の平方根 $\sqrt{t}$ の一次関数としてあらわされることがわかる。単位時間の平方根当たりの浸潤量を a とすると、

$$Q = a\sqrt{t} \quad (7)$$

となる。 a は、浸潤試験の結果から求めることができる値であるため、式(6)と式(7)より、水分拡散係数 D は、

$$D = \pi \left(\frac{a}{2An'_e} \right)^2 \quad (8)$$

と表される。

式(6)中の有効間隙率 n'_e は、飽和状態の体積含水率と初期状態の体積含水率の差に相当することから、

$$n'_e = \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \right) - \left(\frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot \frac{w_0}{100} \right) \quad (9)$$

となる。ここで、 ρ_s :土粒子の密度、 ρ_d :乾燥密度、 ρ_w :水の密度、 w_0 :初期含水比である。

よって、水分拡散係数 D は、式(8)と式(9)より、

$$D = \pi \left(\frac{a}{2A \left\{ \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \right) - \left(\frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot \frac{w_0}{100} \right) \right\}} \right)^2 \quad (10)$$

となる。

また、式(2)より、全水頭を間隙水圧について微分すると、

$$\frac{\partial h}{\partial p_w} = \frac{1}{\rho_w g} \quad (11)$$

となる。

水分特性曲線については、本研究では、ロジスティック曲線式を用いた水分特性曲線⁶⁾を用いる。

$$S_{re} = \frac{1}{1 + \exp(\alpha + \beta \log_e s)} \quad (12)$$

ここで、 S_{re} :有効飽和度、 s :サクシオン、 α 、 β :フィッティングパラメータである。有効飽和度は、

$$S_{re} = \frac{S_r - S_{rmin}}{S_{rmax} - S_{rmin}} \quad (13)$$

である。ここで、 S_{rmax} :最大飽和度、 S_{rmin} :残留飽和度である。

式(12)をサクシオンについて求めると、

$$s = \left(\frac{1 - S_{re}}{S_{re} \exp \alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (14)$$

となる。また、サクシヨンの定義より、

$$s = p_a - p_w \quad (15)$$

である。ここで、 p_a :間隙空気圧であり、本研究では常に大気圧と仮定する。
よって、式(15)より、間隙水圧は、

$$p_w = p_a - s \quad (16)$$

となる。式(14)を式(16)に代入すると、

$$p_w = p_a - \left(\frac{1 - S_{re}}{S_{re} \exp \alpha} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (17)$$

となる。

式(13)と式(17)より、

$$\frac{\partial p_w}{\partial S_r} = \frac{1}{(S_{rmax} - S_{rmin}) \beta S_{re}^2 \exp \alpha} \left(\frac{1 - S_{re}}{S_{re} \exp \alpha} \right)^{\frac{1-\beta}{\beta}} \quad (18)$$

となる。

式(5)に式(10)、式(11)、式(18)を代入すると、比透水係数は飽和度の関数として、

$$k_r = \frac{n \cdot \pi \left(\frac{a}{2A \left\{ \left(1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} \right) - \left(\frac{\rho_d}{\rho_w} \cdot \frac{w_0}{100} \right) \right\}} \right)^2}{k_w \cdot \frac{1}{\rho_w g} \cdot \frac{1}{\beta S_{re}^2 \exp \alpha} \left(\frac{1 - S_{re}}{S_{re} \exp \alpha} \right)^{\frac{1-\beta}{\beta}} \cdot \frac{1}{S_{rmax} - S_{rmin}}} \quad (19)$$

と表される。

式(19)では室内試験から直接求められる値のみが使用されている。さらに、従来であれば数日におよぶ複数の浸潤試験を実施して、各試験終了時の含水比分布を取得する等、パラメータ値の設定に必要な試験データの取得に手間と時間がかかっていたが、式(19)では浸潤量と経過時間の平方根の関係での傾き a を取得するだけでよい。一つの浸潤試験を数時間程度実施し、浸潤量を計測するだけで十分である。

ただし、式(19)は飽和状態では分母が 0 となってしまうことや、水分拡散係数が一定値とみなせる飽和度がおよそ 50%から 90%の範囲とされていることから、式(19)を数値解析で直接使用することはできない。そのため、本研究では、Muallem (1976) による比透水係数モデル (以下、Muallem model)⁷⁾ といった既存の推定モデルと式(19)で得られる値を飽和度が 50%から 90%の範囲で比較することにより、既存の推定モデルのパラメータ値を設定することとした。

3. 構築した推定方法を用いた浸潤試験の再現解析

(1) 解析パラメータ

有限要素解析コード DACSAR-i を用いて、佐藤らが行った浸潤試験⁴⁾の再現解析を行う。再現解析で対象とする浸潤試験の試験条件を表 1 に示す。表 2 に解析で使ったパラメータ値を示す。また、水分特性曲線の計測データにはばらつきがあることから、表 3、図 3 に示すように、ここでは水分特性曲線の設定の違いが比透水係数に与える影響に着目し、水分特性曲線を 4 ケース設定した。水分特性曲線の設定には、鈴木・藤田 (1999)⁸⁾ および山本ら (2019)⁹⁾ の計測データを用いた。

表1 試験条件

ベントナイト	クニゲル V1
ケイ砂混合比(%)	30
乾燥密度(Mg/m ³)	1.6
初期含水比(%)	5.72
供試体直径(mm)	50
供試体高さ(mm)	50
試験溶液	蒸留水

表2 ベントナイトの比透水係数に関するパラメータ

パラメータ	記号	単位	値
透水係数	k_w	(m/s)	4.478×10^{-13}
間隙率	n	(-)	0.403
断面積	A	(m ²)	1.960×10^{-3}
単位時間の平方根当たりの吸水量	a	(m ³ /√t)	1.241×10^{-8}
土粒子密度	ρ_s	(Mg/m ³)	2.680
乾燥密度	ρ_d	(Mg/m ³)	1.600
水の密度	ρ_w	(Mg/m ³)	1.000
初期含水比	w_0	(%)	5.720
重力加速度	g	(m/s ²)	9.800
最大飽和度	S_{rmax}	(-)	1.000
残留飽和度	S_{rmin}	(-)	0.100

表3 各ケースの水分特性曲線のパラメータ値

	α	β	備考
case1	-0.965	0.660	低飽和度での計測データにフィッティングしたケース
case2	-1.600	0.800	計測データよりサクシオンを大きく設定したケース
case3	-1.200	0.900	高飽和度での計測データにフィッティングしたケース
case4	-1.000	1.000	計測データよりサクシオンを小さく設定したケース

表2 および表3 のパラメータ値を用いて式(19)により求めた比透水係数を図4に示す。比透水係数は水分特性曲線の設定に依存して異なっていることがわかる。計測データよりサクシオンを小さく設定した case4 は比透水係数の値が大きく、計測データよりサクシオンを大きく設定した case2 では比透水係数の値が小さくなっている。水分特性曲線が case2 と case4 の間に位置する case3 では、比透水係数の値も case2 と case4 の間に位置している。高飽和度付近でサクシオンが他のケースと比較して小さくなる case1 は、高飽和度付近で比透水係数が大きく増加する形状をしている。

再現解析で用いる DACSAR-i には、比透水係数として Mualem model が適用されている。Mualem model では比透水係数は次式のように表される。

$$k_r = \sqrt{S_{re}} \left\{ 1 - \left(1 - S_{re}^{\frac{1}{m}} \right)^m \right\}^2 \quad (20)$$

ここで、 m :Mualem 定数である。図4に示した比透水係数に対して、最小二乗法を用いて Mualem model を近似した結果とその際の Mualem 定数を図5から図8に示す。なお、図中では、式(19)を this study と表記している。case2 から case4 は、式(19)と Mualem model は比較的良好な一致を確認することができる。一方、

case1 は高飽和度で比透水係数が大きく増加する形状の再現性がやや低くなっている。

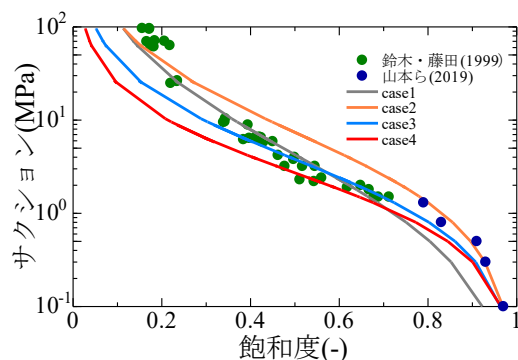


図3 各 case での水分特性曲線

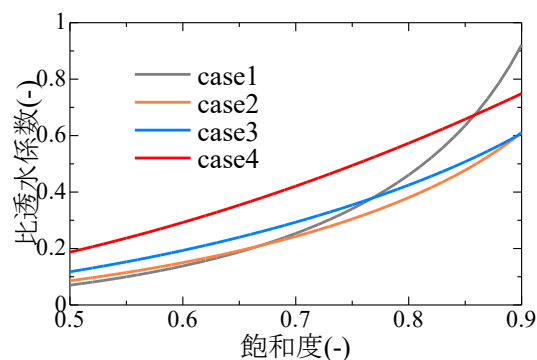


図4 各 case での比透水係数

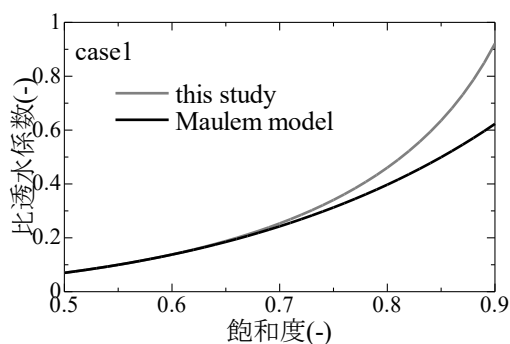


図5 case1 での比較 ($m = 0.829$)

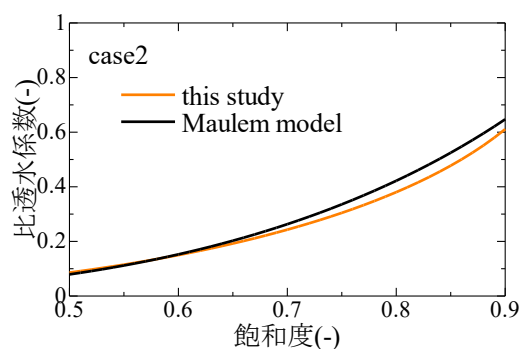


図6 case2 での比較 ($m = 0.858$)

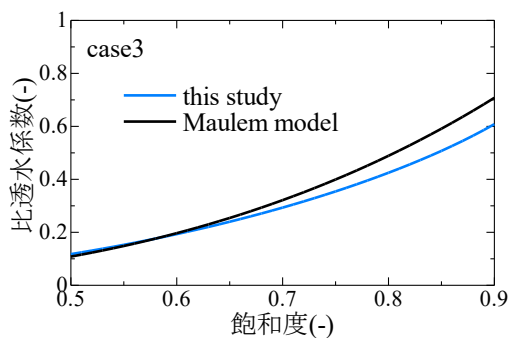


図7 case3 での比較 ($m = 0.941$)

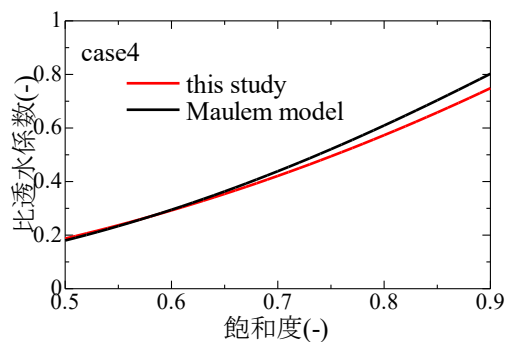


図8 case4 での比較 ($m = 1.113$)

(2) 解析条件

浸潤試験の解析条件を図9に記す。解析領域は、幅 50mm、高さ 50mm とし、一次元的に 30 要素に分割した。また、変形は発生しないものとするため、全節点に固定境界条件を与えている。下端から水が浸潤することを想定し、下端を排水条件に設定した。

供試体内部の初期の間隙水圧は負値であり、供試体下面からの吸水を表現するため、30 分かけて供試体下面の間隙水圧を線形的に初期値から 0MPa 付近まで上昇させる。それにより吸水面から供試体の内部にかけて動水勾配が生じ、水が浸潤する。ここでは、30 分を均等に 100 ステップに分割して水頭を上昇させた。その後、下端での水頭を一定に保ち、一定の放置期間を設けた。対象とする実験での放置期間が 15 日であ

るため、放置期間は 15 日とした。解析に用いたパラメータには表 2 に示した値を適用し、解析ケースとして表 3 に示した 4case を実施し、各 case での Mualem 定数は表 4 に示すものを用いた。

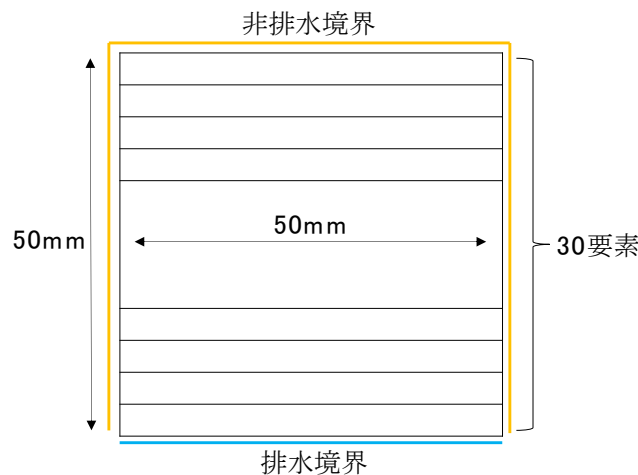


図 9 解析条件

表 4 各 case で使用した Mualem 定数

	m
case1	0.829
case2	0.858
case3	0.941
case4	1.113

(3) 解析結果

浸潤量の時間変化を図 10 に、浸潤量と時間の平方根の関係を図 11 に示す。図 11 に示す浸潤量と浸潤時間の平方根の関係において、解析では給水開始初期において浸潤量があまり増加していない。これは、給水を表現するために 30 分かけて水頭を上昇させたことによるものである。

case2 以外は浸潤量を概ね良好に再現できているが、case2 はやや浸潤量を過大に評価している。また、すべての case で時間の平方根に対して浸潤量が線形的に増加する挙動を再現できている。

本研究では飽和度 50%～90%の範囲での式(19)の値をもとに Mualem 定数を設定したが、解析で対象とした試験は初期飽和度が約 20%であるため、飽和度 50%以下での比透水係数の値が、浸潤量の再現性に影響を及ぼしているものと考えられる。case2 のようにサクシオン値を計測データより大きく設定した場合、低飽和度での浸潤量の再現性が低くなるものと推測される。

浸潤試験終了時の含水比分布を図 12 に示す。供試体高さ 0mm が浸潤面であり、解析および実験ともに、浸潤面に近いほど含水比が高くなっている。浸潤量を過大に評価した case2 のみ、やや含水比が全体的に高くなっているが、それ以外の case では実験で得られた含水比分布を概ね再現できていることが確認できる。

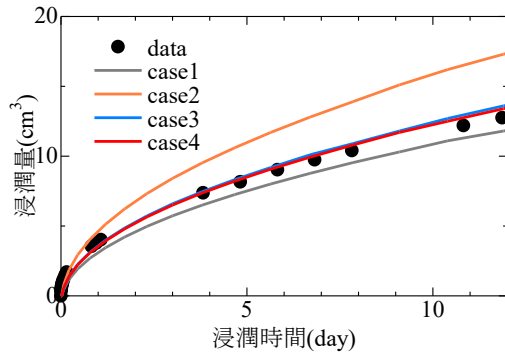


図 10 浸潤量と浸潤時間の関係

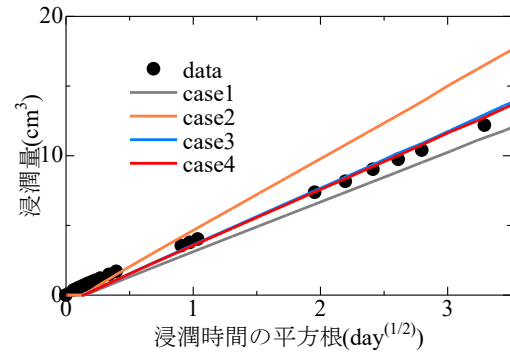


図 11 浸潤量と浸潤時間の平方根の関係

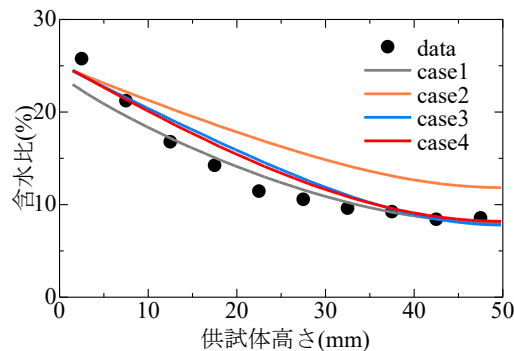


図 12 浸潤試験終了時の含水比分布

4. 結論

地層処分施設の緩衝材に利用されるベントナイトは、不飽和状態で施工された後、地下水による再冠水によりやがて飽和状態に至ることが想定されている。この再冠水過程における不飽和状態のベントナイトの浸潤挙動を解析で再現するためには比透水係数のパラメータ値が必要となる。しかしながら、このパラメータ値は実験結果から直接推定することができていない。

そこで本研究では、ベントナイトの浸潤試験における浸潤量のデータから比透水係数のパラメータ値を推定する方法を構築した。その結果、浸潤量と浸潤時間の平方根の関係における傾き等、試験で得られる値を用いて比透水係数を直接推定することが可能となった。

さらに、構築した手法により設定したパラメータ値を用いた浸潤試験の再現解析により、構築した推定方法の信頼性を評価した。その結果、水分特性曲線の設定において、低飽和度でのサクシオンを計測データより大きくなるように設定した場合には浸潤量をやや過大に評価してしまうものの、計測データで得られているサクシオンと同等、もしくは小さめに水分特性曲線を設定した場合には、概ね良好に浸潤挙動を再現できることが確認できた。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構, 平成 29 年度 高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 処分システム評価確証技術開発報告書, 2018.
- 2) 藤崎淳, 鈴木英明, 藤田朝雄, 熱-水-応力連成試験設備(COUPLE)を用いた室内試験結果に基づく熱-水連成モデルの信頼性確認, JAEA-Research 2008-020, 2008.
- 3) Takeyama, T., Tachibana, S., Furukawa, A., A finite element method to describe the cyclic behavior of saturated soil, International Journal of Material Science and Engineering, 2, 1, 20-25, 2015.
- 4) 佐藤久, 高山裕介, 鈴木英明, 佐藤大介, 不飽和圧縮ベントナイト中での塩水浸潤挙動データの取得,

JAEA-Data/Code 2023-010, 2023.

- 5) 小峯秀雄, 小山田拓郎, 尾崎匠, 磯さち恵, 締固めた粉体状ベントナイト各種の水分移動特性と膨潤挙動に関する考察, 土木学会論文集 C(地圏工学), 74, 1, 63-75, 2018.
- 6) 杉井俊夫, 宇野尚雄, 新しい水分特性曲線のモデル化について, 土木学会第 50 回 年次学術講演会 概要集, 130-131, 1995.
- 7) Mualem, Y., A New Model for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Porous Media, Water Resources Research, 12, 3, 513-522, 1976.
- 8) 鈴木英明, 藤田朝雄, 緩衝材の不飽和水理特性, JNC TN8430 99-010, 1999.
- 9) 山本修一, 佐藤伸, 志村友行, Enrique ROMERO, 西村友良, 大和田仁, サクション制御試験に基づくベントナイト系人工バリア材の不飽和力学特性と保水特性, 土木学会論文集 C(地圏工学), 75, 1, 257-272, 2019.

筆者:1) 四海 伸二、工学部市民工学科、学生;2) 高山 裕介、都市安全研究センター、准教授;3) 橘 伸也、都市安全研究センター、教授;4) 竹山 智英、工学研究科市民工学専攻、教授

A method for estimating unsaturated permeability of bentonite based on the change in infiltration volume in infiltration tests

Shinji Yotsumi
Yusuke Takayama
Shinya Tachibana
Tomohide Takeyama

Abstract

Bentonite is being considered as a buffer material for geological disposal facilities for high-level radioactive waste. It is considered that bentonite constructed in an unsaturated state will eventually reach a saturated state due to groundwater infiltration. In order to analyze the infiltration behavior of unsaturated bentonite during this re-saturation process, a parameter value for the relative hydraulic conductivity is required. However, this parameter value cannot be estimated directly from experimental results. Therefore, in this study, a method to estimate the parameter value of the relative hydraulic conductivity from infiltration volume data in infiltration tests of bentonite was developed. Furthermore, the reliability of the constructed estimation method was evaluated by a reproduction analysis of the infiltration test using parameter values set using the constructed method.

©2025 Research Center for Urban Safety and Security、Kobe University、All rights reserved.