



ベントナイトの膨潤圧試験における壁面摩擦の影響に関する数値解析的検討

小山, 円香
伊藤, 真司
橘, 伸也
飯塚, 敦

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 24:66-76

(Issue Date)

2020-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCOI)

<https://doi.org/10.24546/81013257>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81013257>



ベントナイトの膨潤圧試験における壁面摩擦の影響に関する数値解析的検討

Numerical study on the effect of wall friction
on swelling pressure test of bentonite

小山 円香¹⁾

Madoka Koyama

伊藤 真司²⁾

Shinji Ito

橘 伸也³⁾

Shinya Tachibana

飯塚 敦⁴⁾

Atsushi Iizuka

概要: ベントナイトは放射性廃棄物の地層処分において、緩衝材として使用される。ベントナイトの水を取り込み膨張するという膨潤性によって、緩衝材とオーバーパック、あるいは岩盤との間に生じた施工上の隙間を充填する。しかし、ベントナイトの膨潤性の発揮において、緩衝材であるベントナイトと接している岩盤の間にはベントナイトの膨潤の際に摩擦力が発生していることが考えられる。この摩擦力はベントナイトの膨潤圧や乾燥密度など膨潤性に関して影響を及ぼしている可能性がある。本研究では、初期条件や境界条件が明確なベントナイト膨潤圧試験を数値シミュレーションの対象としてとりあげ、摩擦係数の大きさや、供試体の縦横比を変えることで、膨潤するベントナイトとその周辺の壁面との間に発生する摩擦力の有無やその大小が、ベントナイト供試体の膨潤圧や乾燥密度の分布等に与える影響を数値解析的に検討した。

キーワード: ベントナイト, 膨潤圧試験, 壁面摩擦力, 数値解析

1. 研究背景

近年、放射線廃棄物の最も好ましい処分方法として地層処分が国際的に共通の考え方となっている。日本では、高レベル放射線廃棄物処分施設の地下 300(m)より深い地下施設において、廃棄物をガラス固化したものを金属製の容器に納め(オーバーパック)、その周りを緩衝材として粘土で覆うという人工バリアに、岩盤の天然バリアで囲む多重バリア構造が地層処分では基本としている。人工バリアにおける緩衝材として、吸水性、吸着性に優れ、透水性の非常に低い粘土の一種であるベントナイトが有益な材料として考えられている。ベントナイトの主成分であるモンモリロナイトが層間に水を取り込み膨張するという膨潤性によって、緩衝材とオーバーパック、あるいは岩盤との間に生じた施工上の隙間を充填するだけでなく、岩盤内の地下水の流入量の低下や、放射線物質の移行を遅らせる等の機能が期待されている。一方で、この膨潤性の発揮によって、膨潤後のベントナイトの乾燥密度の低下、緩衝材内での密度分布の変化が発生することが考えられる。また、施設深度に相当する岩盤内を流れる高い水圧の地下水による水みちの形成や緩衝材の流出・浸食現象を評価するためには、緩衝材が発揮する膨潤圧を把握する

必要がある。緩衝材としてその性能を満足させるために、ベントナイトの膨潤特性を把握することは必要不可欠であり、初期条件や境界条件が明確な室内試験としてベントナイトの膨潤圧試験が実施されている。

2. 研究目的

ベントナイトの膨潤性の発揮において、緩衝材であるベントナイトと接している岩盤の間には、ベントナイトの膨潤の際に摩擦力が発生していると考えられる。この摩擦力はベントナイトの膨潤圧や乾燥密度など膨潤性に関して影響を及ぼしている可能性があるが、摩擦影響について検討を行っている研究は少ない。

本研究では、初期条件や境界条件が明確なベントナイト膨潤圧試験をとりあげ、膨潤するベントナイトとその周辺の壁面との間に発生する摩擦力の有無やその大小が、ベントナイトの膨潤圧や乾燥密度の分布等に与える影響を数値解析的に検討することを目的とする。

3. 不飽和ベントナイト弾塑性構成モデル

本研究では、不飽和状態におけるベントナイトを想定する。伊藤(2017)が提案した修正 Cam-clay モデルに「塑性膨潤の概念」を導入したモデル⁵⁾に大野ら(2008)による「有効飽和度変化に伴う剛性変化」の概念⁶⁾を取り入れ、飽和ベントナイト弾塑性構成モデルを拡張し、不飽和ベントナイトの力学挙動を表現する。降伏曲面の拡大・縮小(硬化・軟化)を制御する硬化則パラメータとして、塑性体積ひずみだけでなく、有効飽和度が採用される。図1にモデルの概念図を示す。降伏曲面は楕円形の形状を持ち、降伏関数は次式で表される。

$$f(p', q, p'_c, p'_s) = \frac{q^2}{\tilde{M}^2} + (p' - p'_c)(p' - p'_s) = 0 \quad (1)$$

ただし、 \tilde{M} は材料定数であり、降伏曲面の楕円率を規定する。また、 p' : 平均有効応力、 q : 偏差応力であり、それぞれ以下のように定義される。

$$p' = \text{tr} \boldsymbol{\sigma}' / 3, q = \sqrt{3/2} \|\mathbf{s}\|; \mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma}' - p' \mathbf{1} \quad (2)$$

ただし、 $\boldsymbol{\sigma}'$: 有効応力テンソル、 \mathbf{s} : 偏差応力テンソル、 $\mathbf{1}$: 2階の単位テンソルである。 p'_c, p'_s はそれぞれ圧密降伏、除荷降伏を規定する降伏応力であり、それぞれ式(3)、式(4)で表される。

$$p'_c = \bar{p}'_c \exp \left[(\beta - 1) \ln \frac{1 + \zeta}{\theta + \zeta} \right] \quad (3)$$

$$p'_s = \bar{p}'_s \exp \left[(\beta - 1) \ln \frac{\zeta}{\theta + \zeta} \right] \quad (4)$$

ただし、 \bar{p}'_c, \bar{p}'_s : 塑性体積ひずみの関数、 β : 膨潤指数の有効飽和度依存を表現する関数であり、それぞれ式(5)、式(6)で表される。

$$\beta = \alpha(1 - S_e^l) + 1 \quad (5)$$

$$\frac{\bar{p}'_c}{\bar{p}'_{c0}} = \frac{\bar{p}'_s}{\bar{p}'_{s0}} = \exp \left(\frac{1 + e_{c0}}{\lambda - \kappa} \varepsilon_v^p \right) \quad (6)$$

ただし、 α, θ, l : 不飽和ベントナイトモデルパラメータ、 ζ : 塑性膨潤パラメータ、 λ : 圧縮指数、 κ : 膨潤指数、 $\bar{p}'_{c0}, \bar{p}'_{s0}, e_{c0}$: 塑性ひずみが発生し始めたときの \bar{p}'_c, \bar{p}'_s , 基準間隙比である。

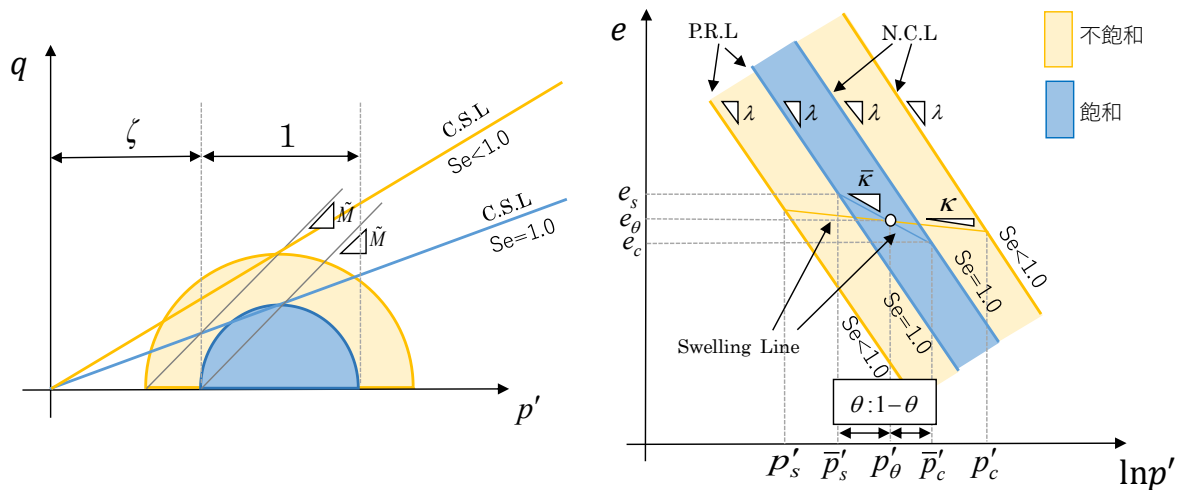


図1 不飽和ベントナイト弾塑性構成モデル

4. ジョイント要素

本研究は、ベントナイト膨潤圧試験において、供試体が壁面摩擦力の影響を受けているとした数値実験を行う。そこで、壁面摩擦力を供試体に作用させるため、有限要素法の平面ひずみ要素、あるいはソリッド要素の節点間に軸方向、およびせん断方向にばねやスライダを用いることにより、不連続な挙動を表現するジョイント要素を用いる。

本研究では、供試体と膨潤圧試験容器間にばねを用いたジョイント要素を設け、壁面と供試体間に働く壁面摩擦力を表現する。

(1) ばね定数の決定

ジョイント要素では、フックの法則に従い、式(7)のようにせん断応力が表され、これが摩擦力として作用する。

$$\tau = k \cdot y \tag{7}$$

ただし、 τ :せん断応力、 k :ばね定数、 y :接線方向の相対変位である。

発生するせん断応力が小さな状態ではせん断応力の増大に比例してせん断ひずみが発生するが、このせん断応力がクーロンの摩擦式(式(8)右辺)を超え、式(8)の状態となると、塑性状態として、応力が増加せずともせん断ひずみは増加していく。

$$\tau \geq \tan \phi \cdot \sigma_n \tag{8}$$

ただし、 $\tan \phi$:摩擦係数、 σ_n :垂直応力である。

せん断応力がクーロンの摩擦式から求められるせん断強度を超えるまでは、静止摩擦力が発生しており、超えてからは、動摩擦力が働くと考えられる。つまり、式(8)の前後で、境界面の剛性であるばね定数の大きさを変える必要がある。静止摩擦力が発生している場合は、剛性の高いばね定数を用い、動摩擦力が発生している場合は、剛性の低いばね定数を用いる。本研究のジョイント要素に用いたばね定数を表1に示す。

表1 ジョイント要素に用いたばね定数

k_s (kPa/m)	k_n (kPa/m)	$k_{s,y}$ (kPa/m)
1.0×10^8	1.0×10^{12}	1.0

ただし、 k_s : 静止摩擦力が働く時の供試体接線方向のばね定数、 k_n : 静止摩擦力が働く時の供試体法線方向のばね定数、 $k_{s,y}$: 動摩擦力が働く時の供試体接線方向のばね定数とする。

(2) 摩擦係数の決定

ベントナイト供試体と膨潤圧試験容器内壁間に発生する壁面摩擦力の計算には、式(8)右辺で表されるクーロンの摩擦式が使用されるため、摩擦係数を決定する必要がある。

ベントナイト膨潤圧試験において、試験装置の材質の違いによる摩擦角を求めるという実験⁸⁾を基に本研究で用いる摩擦係数を決定する。この実験では、スチール、プラスチック、アクリルプラスチック等の材質の異なる膨潤圧試験装置を用いて、高さ 20(mm)、直径 50(mm)のベントナイト供試体を体積一定に保ち、供試体垂直方向にロードセル 2 つ、半径方向に 1 つセットし、蒸留水による飽和段階とせん断段階で膨潤圧試験が行われた。せん断段階では、試験装置のリングを固定し、試験片だけを 0.1(mm/min)で押し上げ、ピーク値と変形速度 0.1(mm/min)での変形後の残留値での摩擦角を式(9)より求めた。

$$F = A_s \cdot P_r \cdot \tan(\delta) \quad (9)$$

ただし、 F : 上部のロードセルから測定された力、 A_s : 試験片の半径方向の表面積、 P_r : リングに垂直な半径方向の応力である。

以上の実験結果を図 2 に示す。ただし、黒の枠線付きのプロットは、ピーク値の摩擦角、枠線なしのプロットは、残留値の摩擦角を示す。青の実線は、Åkesson による摩擦角と膨潤圧関係の推定モデル(2010)であり、実験値は推定モデルより小さな値をとることがわかっている。

実験結果より、どの材料でも摩擦角はおおよそ 5~20°の間に入っており、これは、摩擦係数 $\tan \phi$ に直すと 0.09~0.36 となる。よって、本研究で用いる摩擦係数 $\tan \phi$ は、摩擦のない状態である $\tan \phi = 0.0$ 、摩擦のある状態として $\tan \phi = 0.1$ 、 $\tan \phi = 0.3$ の 3 種類とする。

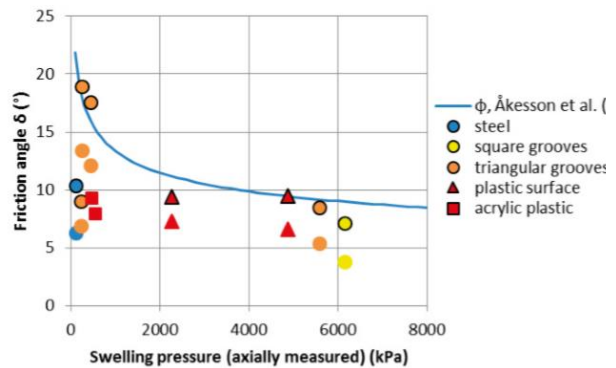


図 2 摩擦角と膨潤圧の関係⁸⁾

5. 解析条件

解析対象となる供試体は、①直径 60(mm)高さ 20(mm) (縦横比 0.33)、②直径 30(mm)高さ 20(mm) (縦横比 0.67) の 2 種類の円柱形であり、図 3 に示すように 2 次元軸対称条件を用いて計算を行う。よって、解析領域は、それぞれ①縦 20mm 横 30mm の長方形、②縦 20mm 横 15mm の長方形である。それらを、縦 30 個、横 15 個の要素に分け、1 要素ごとに要素の角に 4 個、要素を構成する辺すべての中点に 4 個、要素の中央 1 個の計 9 個の節点を設定する。本研究では、2 次元の要素分割を行っているため、式(10)、図 4 に示すように平均化された膨潤圧を出力する。

さらに、壁面摩擦力を受ける上面、下面、右側面にはジョイント要素を設ける。また、供試体内部の要素と直接的に壁面摩擦力を受ける外側の要素では、膨潤圧の大きさなど供試体の受ける影響度合いが異なるため、右側面の要素が細くなるように設定する。加えて、排水境界である下面の要素も細くなるように設定する。また、全ての解析ケースにおいて、供試体底面からの給水を想定し、下端面を水頭境界条件に設定し、下端面を構成する節点の水頭を初期水頭から 0(m)まで上昇させる。その他の面はすべて非排水境界とする。変位境界条件は、試験装置側のジョイント要素は x 方向 y 方向ともに固定、左側面は x 方向固定 y 方向自由とした。

また、透水係数モデルは小林ら⁹⁾¹⁰⁾の透水モデルを適用し、飽和度とサクシジョンの関係には、杉井・宇野¹¹⁾の水分特性曲線モデルを適用する。

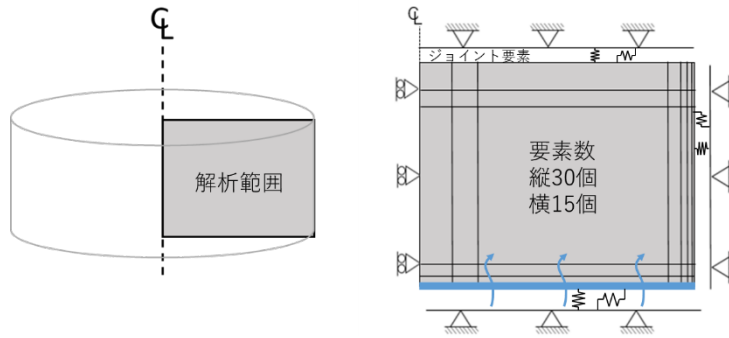


図3 解析モデルと境界条件

$$P_{swell} = \frac{\int_s \sigma_{swell} ds}{A} \quad (10)$$

ただし、 P_{swell} : 平均化された膨潤圧、 σ_{swell} : 各地点での膨潤圧、 A : 供試体の断面積

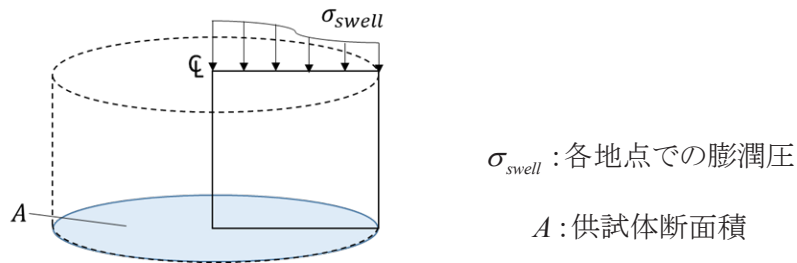


図4 二次元要素の膨潤圧

(1) 解析ケース

シミュレーションで想定する材料は、Na型ベントナイトのクニゲルV1とした。初期乾燥密度と初期含水比の組み合わせは渡邊・田中¹²⁾によって実施されたベントナイトの膨潤圧試験を参考にし、A: 1.599(Mg/m³)/9.53%, B: 1.582(Mg/m³)/19.81%を用意する。それぞれの組み合わせで、摩擦係数を変え、壁面摩擦力の有無やその大きさの違いが膨潤圧試験結果に与える影響を検討する。

また、Aの初期乾燥密度と含水比の組み合わせのみ、供試体の直径を30(mm)とし、②の供試体大きさをシミュレーションを行う。ここでは、縦横比の大きさの違いが膨潤圧試験結果に与える影響を検討する。

各解析ケースは表2の通りである。ただし、土粒子比重 $G_s = 2.744$ 、水の密度 $\rho_w = 1.00(\text{Mg}/\text{m}^3)$ とする。

表2 解析ケース

供試体大きさ	初期乾燥密度 ρ_{di} (Mg/m ³) 含水比 w_i (%)		解析ケース	摩擦係数
	A	B		
① 直径 60(mm) 高さ 20(mm) (縦横比 0.33)	A	1.599(Mg/m ³) 9.53%	Case1	$\tan \phi = 0.0$
			Case2	$\tan \phi = 0.1$
			Case3	$\tan \phi = 0.3$
	B	1.582(Mg/m ³) 19.81%	Case4	$\tan \phi = 0.0$
			Case5	$\tan \phi = 0.1$
			Case6	$\tan \phi = 0.3$
② 直径 30(mm) 高さ 20(mm) (縦横比 0.67)	A	1.599(Mg/m ³) 9.53%	Case7	$\tan \phi = 0.0$
			Case8	$\tan \phi = 0.1$
			Case9	$\tan \phi = 0.3$

(2) 初期条件および解析パラメータ

Case1~Case3, Case7~Case9 における初期飽和度 S_{ri} は 0.366, 初期間隙比 e_i は 0.715, 初期水頭 h_i は -5.41×10^3 (m) である。さらに, Case4~Case6 における初期飽和度 S_{ri} は 0.74, 初期間隙比 e_i は 0.735, 初期水頭 h_i は -9.20×10^2 (m) である。また, 解析に用いたパラメータは, 表 3 の通りである。

表 3 解析パラメータ

パラメータ	記号	Case1~Case9
形状係数	C	5
水の粘性係数(Pa·s)	μ	0.001
モンモリロナイト含有率(%)	α_{mon}	55
重力加速度(m/s ²)	g	9.80
限界応力比	\bar{M}	0.491
圧縮指数	λ	0.115
膨潤指数(飽和状態)	\bar{k}	0.03
有効ポアソン比	ν'	0.40
基準間隙比	e_{ref}	0.7
基準先行圧(MPa)	p'_{ref}	2.4
塑性膨潤パラメータ	ζ	0.95
不飽和ベントナイトモデルパラメータ	α	11.68
不飽和ベントナイトモデルパラメータ	θ	0.66
不飽和ベントナイトモデルパラメータ	l	3.786
水分特性パラメータ	A	-3.1
水分特性パラメータ	B	1.0
残留飽和度	S_{r0}	0.1

6. 解析結果

本研究の解析結果を以下に示す。

(1) 摩擦力の大きさの違いによる違い

表 2 に示す解析ケースの①の供試体の大きさで, 初期乾燥密度と含水比の組み合わせごとに, 壁面摩擦力の有無やその大きさの違いで膨潤圧試験結果に与える影響を比較検討する。

a) 膨潤圧の経時変化

Case1~Case6の膨潤圧の経時変化を図 5 に示す。Case1~Case3の結果では, 摩擦係数 $\tan \phi = 0.0$ の Case1 と摩擦係数 $\tan \phi = 0.1$ の Case2, $\tan \phi = 0.3$ の Case3 で, 壁面摩擦力が働く場合には壁面摩擦力が働かない場合と比べて, 最終の膨潤圧が大きくなる。また, 経過時間 1~2 日間の膨潤圧のピーク値や経過時間全体についても壁面摩擦力が働く場合 (Case2, Case3) は壁面摩擦力が働かない場合 (Case1) と比べて大きな値をとることが分かる。Case4~Case6の結果では, 最終の膨潤圧の大きさは 3 つのケースで変わらないが, 経過時間 0~10 日間において, 摩擦係数 $\tan \phi = 0.0$ の Case4 と摩擦係数 $\tan \phi = 0.1$ の Case5, $\tan \phi = 0.3$ の Case6 で, 壁面 $\tan \phi$ 摩擦力が働く場合は, 壁面摩擦力が働かない場合と比べて小さな膨潤圧の値をとる挙動を描く。また, 全ての結果において, 壁面摩擦力が働く場合に, 摩擦係数 $\tan \phi = 0.1$ と $\tan \phi = 0.3$ では膨潤圧の値にほぼ変化は見られなかった。つまり, 壁面摩擦力が働く場合, その摩擦係数の大きさの違いで膨潤圧の経時変化に違いが見られないことが分かる。

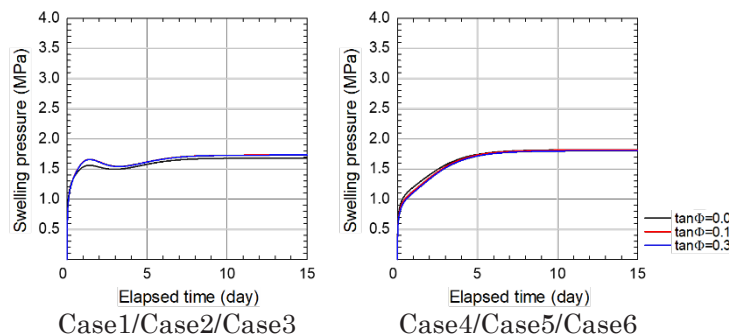


図 5 膨潤圧の経時変化

b) 飽和度の経時変化

供試体の中心部 ($r=0(\text{mm})$) と壁面摩擦力の影響を強く受ける試験容器との接触部 ($r=30(\text{mm})$) において、供試体高さ方向の 4 点で飽和度の経時変化を出力した (図 6 参照)。

また、図 7 に Case1, Case3, Case4, Case6 の飽和度の経時変化を示す。

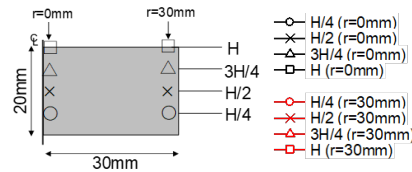


図 6 飽和度の経時変化の出力箇所

全ての結果において、排水境界である供試体下部から上部に向かって順に水が浸透し、飽和が進行していることが分かる。また、最も含水比の大きな Case4, Case6 では、経過時間 0 日の時点で、飽和度が他の結果と比べて大きな値となっており、飽和の進行が速いことが分かる。

それぞれの乾燥密度と含水比の組み合わせで、 $r=0(\text{mm})$ と $r=30(\text{mm})$ での飽和度の経時変化に違いは見られなかった。また、壁面摩擦力の有無やその大きさの違いでも飽和度の経時変化に違いは見られず、飽和度の経時変化に摩擦力の影響は無いものと考えられる。

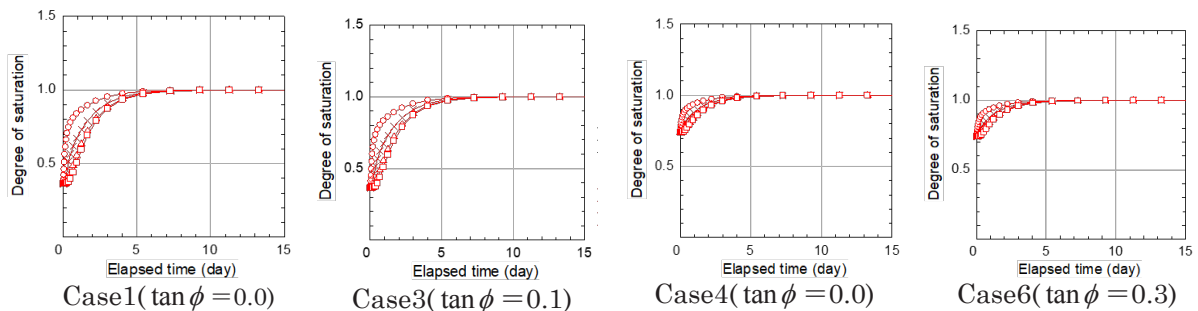


図 7 飽和度の経時変化

c) 最終乾燥密度と各側面での膨潤圧分布

Case1, Case3, Case4, Case6 の経過時間 15 日の最終乾燥密度の分布と、経過時間 0.05 日, 1 日, 2 日, 15 日の摩擦の影響を受ける各側面での膨潤圧の分布を図 8 に示す。全ての結果で、経過時間と共に、膨潤圧が大きくなることが分かる。Case1, Case4 では、供試体下部, 上部共に、壁面摩擦力を受けないため、半径方向に対して一定の膨潤圧の値をとる。一方、Case3 の供試体上部では、経過時間 0.05 日で、半径方向に対して膨潤圧が小さくなる傾向が見られ、経過時間 1 日, 2 日, 15 日では、半径方向に対して膨潤圧が大きくなる傾向が見られる。反対に、供試体下部では経過時間 0.05 日で、半径方向に対して膨潤圧が大きくなる傾向が見られ、経過時間 1 日, 2 日, 15 日では、半径方向に対して膨潤圧が小さくなる傾向が見られた。また、Case6 の供試体上部では、経過時間 0.05 日, 1 日, 2 日では、半径方向に対して膨潤圧が小さくなる傾向が見られ、経過時間 15 日で、半径方向に対して膨潤圧が大きくなる傾向が見られる。反対に、供試体下部では、供試体上部と同じ経過時間で反対方向の膨潤圧の増減が見られる。

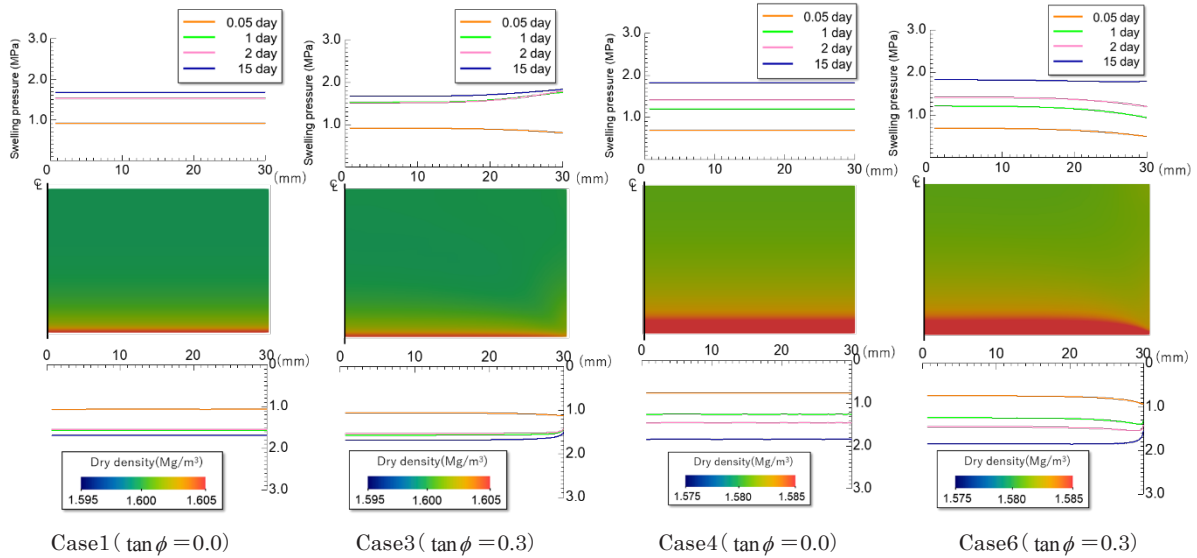


図 8 最終乾燥密度と側面の膨潤圧分布

Case3 の供試体変位の経時変化とせん断応力の経時変化を図 9 に示す。供試体変位の経時変化から分かるように、経過時間 0.05 日で、供試体変位は供試体上向きである正の方向に変位している。この時、せん断応力の経時変化では、せん断応力は下向きの摩擦力が働いており、全体としても供試体壁面に下側の摩擦力が作用する。よって、供試体上部では、半径方向に対して膨潤圧が小さくなる傾向が見られ、供試体下部では、半径方向に対して膨潤圧が大きくなる傾向が見られる(図 8 参照)。また、経過時間 1 日、2 日、15 日では、供試体の変位の経時変化から、供試体変位は下向きである負の方向に変位している。この時、せん断応力の経時変化では、せん断応力は上向きの摩擦力が働いているため、全体としても供試体壁面に上側の摩擦力が作用する。よって、供試体上部では、半径方向に対して膨潤圧が大きくなる傾向が見られ、供試体下部では、半径方向に対して膨潤圧が小さくなる傾向が見られる(図 8 参照)。さらに、上側に作用する摩擦力が殆どの時間で発生しており、これが膨潤圧の経時変化でも述べた、壁面摩擦力が働く場合に壁面摩擦力が働かない場合と比べて、膨潤圧が大きな値をとる要因であると考えられる。

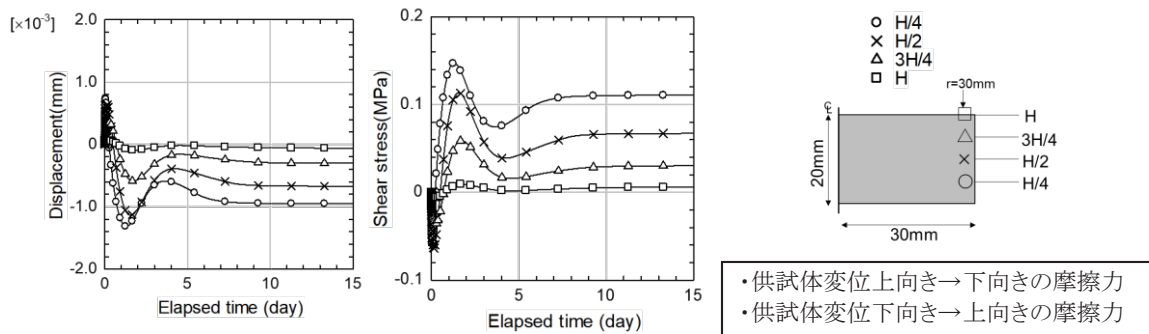


図 9 供試体変位の経時変化(左)、せん断応力の経時変化(右)

Case6 の供試体変位の経時変化とせん断応力の経時変化を図 10 に示す。供試体変位の経時変化から分かるように、経過時間 0.05 日、1 日、2 日では、供試体変位は供試体上向きである正の方向に変位している。この時、せん断応力の経時変化では、せん断応力は下向きの摩擦力が働いているため、全体としても供試体壁面に下側の摩擦力が作用する。よって、供試体上部では、半径方向に対して膨潤圧が小さくなる傾向が見られ、供試体下部では、半径方向に対して膨潤圧が大きくなる傾向が見られる(図 8 参照)。また、経過時間 15 日で、供試体の変位の経時変化から、供試体変位は下向きである負の方向に変位している。この時、せん断応力の経時変化では、せん断応力は上向きの摩擦力が働いているため、全体としても供試体壁面に上側の摩擦力が作用する。よって、供試体上部では、半径方向に対して膨潤圧が大きくなる傾向が見られ、供試体下部では、半径方向に対して膨潤圧が小さくなる傾向が見られる(図 8 参照)。さらに、下側に作用する摩擦力が長期間で発生しており、これが膨潤圧の経時変化でも述べた、壁面摩擦力が働く場合に、壁面摩擦力が働かない場合と比べて膨潤圧が小さくなる要因であると考えられる。

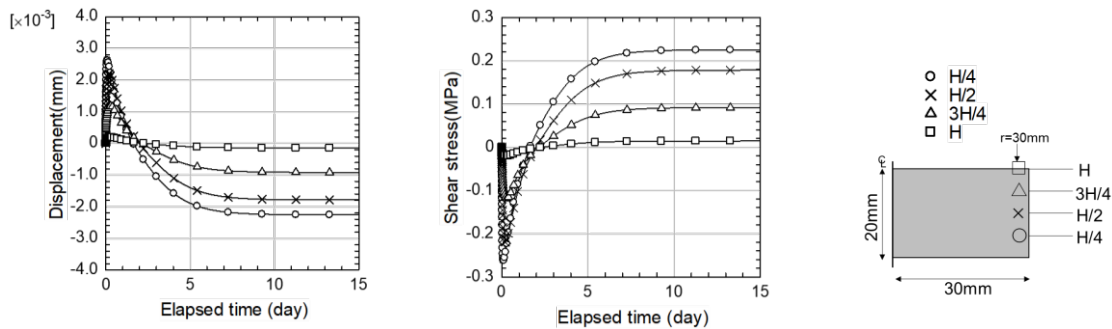


図 10 供試体変位の経時変化(左),せん断応力の経時変化(右)

(2) 縦横比の大きさの違いによる比較

Case7~Case9 の膨潤圧の経時変化と Case1~Case3 の膨潤圧の経時変化を図 11 に示す. 壁面摩擦力が働かない場合の Case7 と Case1 では, 膨潤圧の経時変化に違いは見られない. しかし, 壁面摩擦力が働く場合, Case8, Case9 のピーク値や最終膨潤圧の値は, Case2 や Case3 より大きくなっていることが分かる. 清水ら¹³⁾による DEM を用いた膨潤圧試験シミュレーションにおいても同様のことが報告されている.

縦横比の大きさの違いで膨潤圧が大きくなる原因について検討する. 図 12 に供試体上部の膨潤圧分布を示す. 縦横比の大きさの違いによって, 供試体上面, 下面で摩擦力を受けた膨潤圧分布の反り方は変わらない. しかし, 縦横比が大きくなると, 供試体上面では, 供試体幅の中で膨潤圧が大きくなっている割合が大きくなる. そのため, 膨潤圧の経時変化で縦横比が大きいと膨潤圧が大きくなると考えられる.

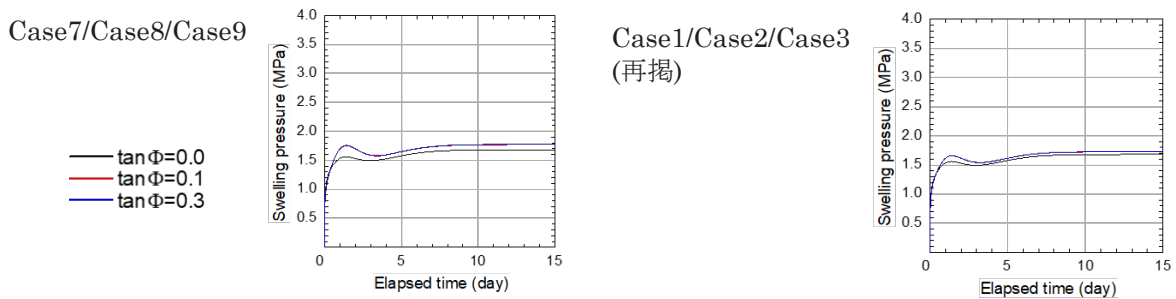


図 11 膨潤圧の経時変化

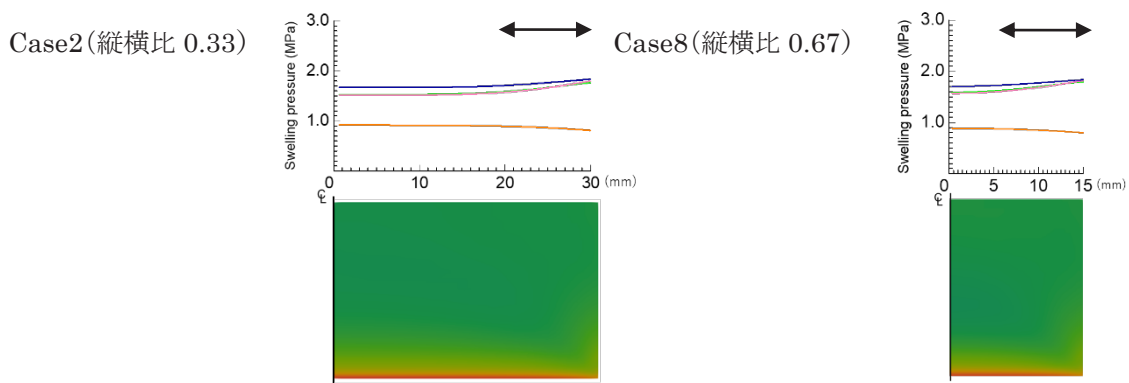


図 12 供試体上部の膨潤圧分布

7. 結論

- (1) 壁面摩擦力の大きさの違いによる明らかな膨潤圧の大きさの違いはないが, 壁面摩擦力の有無が膨潤圧の大きさに違いを与える.
- (2) 働く摩擦力の向きが供試体内の膨潤圧分布や膨潤圧の経時変化の大きさの違いの原因となる.
- (3) 供試体の縦横比が大きいと膨潤圧は大きくなる.

- (4) 壁面摩擦力の有無や大小, また, 供試体が摩擦を強く受けるか受けないかに関わらず飽和度の経時変化は変わらない.

参考文献

- 5) 伊藤真司: 除荷過程における地盤材料の塑性軟化特性を考慮した弾塑性構成モデル, 修士論文, 神戸大学大学院自然科学研究科博士課程前期課程市民工学専攻, 2017.
- 6) 大野進太郎, 河井克之, 橋伸也: 有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル, 土木学会論文集, 63, No. 4, pp.1132-1141, 2007.
- 7) 地層科学研究所: 有限差分法コード FLAC 第9回 ~不連続面のモデル化 インターフェース要素~, <https://www.geolab.jp/column/2006/10/flac-009.php> (2020.1.19 取得)
- 8) Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company : Buffer homogenization status report 2, TR-14-25, pp.18-20, pp.37-40, Dec., 2014.
- 9) Kobayashi, I., Owada, H. & Ishii, T. : Hydraulic / Mechanical modeling of smectitic materials for HMC analytical evaluation of the longterm performance of TRU geological repository. Proceedings of the 14th International Conference on Environmental Remediation and Radioactive Waste Management, ICEM2011-59090, France, 2011.
- 10) 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 開発報告書, 人工バリアの長期挙動の評価, 平成24年度.
- 11) 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年次学術講演会, 1995
- 12) 渡邊保貴, 田中幸久: 微小変位制御によるベントナイトの膨潤圧試験, 土木学会第69回年次学術講演会講演概要集, CS9-018, pp.35-36, 2014.
- 13) 清水浩之, 菊池広人, 棚井憲治, 藤田朝雄: 粒状体個別要素法によるベントナイト膨潤圧試験のシミュレーション - 壁面摩擦力および供試体寸法の影響に関する考察 -, JAEA-Research 2011-024, Oct., 2011.

筆者: 1) 小山円香, 工学部市民工学科, 学生, 2) 伊藤真司, 大学院工学研究科, 学生, 3) 橋伸也, 都市安全センター, 講師, 4) 飯塚敦, 都市安全センター, 教授

Numerical study on the effect of wall friction on swelling pressure test of bentonite

Madoka Koyama
Shinji Ito
Shinya Tachibana
Atsushi Iizuka

Abstract

Bentonite is used as a buffer in geological disposal of radioactive waste. The swelling property of montmorillonite, the main component of bentonite, takes in water between layers and expands, filling the gap created between the buffer and the overpack or rock mass. However, when the bentonite swells, it is considered that a frictional force is generated between the rock in contact with the bentonite, which is the buffer material, when the bentonite swells. This frictional force may have an effect on the swelling properties of bentonite such as swelling pressure and dry density, but few studies have studied the frictional effect. In this study, a series of finite element simulations of the bentonite swelling pressure test with clear initial and boundary conditions are conducted by changing the friction coefficient between the swollen bentonite and the surrounding wall and the aspect ratio of the specimen. The effects of the presence and absence of force on the swelling pressure and dry density distribution of bentonite were investigated numerically.

©2020 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.