



再冠水過程におけるベントナイト緩衝材の不均一分布と表面に発生する摩擦の関係

塚田, 健人
橘, 伸也
竹山, 智英
飯塚, 敦

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 27:22-31

(Issue Date)

2023-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/0100482489>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/0100482489>



再冠水過程におけるベントナイト緩衝材の不均一分布と 表面に発生する摩擦の関係

Relation between non-uniform distribution of bentonite buffer and friction on its
surface during resaturation process

塚田 健人¹⁾
Kento Tsukada
橘 伸也²⁾
Shinya Tachibana
竹山 智英³⁾
Tomohide Takeyama
飯塚 敦⁴⁾
Atsushi Iizuka

概要: 放射性廃棄物の地層処分において、ベントナイト緩衝材は有すべき性能を満足する必要がある。性能発揮には、緩衝材の乾燥密度が所定の範囲内にある必要があるが、平衡状態時に不均一が残存することが報告されているため、緩衝材の内部状態の変遷を把握する必要がある。また、不均一分布の形成に影響を与える要因の一つとして、緩衝材と周辺部位の間で生じる摩擦が考えられる。本研究では、原位置試験スケールで側方膨潤解析を実施し、再冠水過程におけるベントナイト緩衝材の膨潤挙動を解析的に検討する。加えて、緩衝材周りに作用する摩擦を考慮した解析を実施し、緩衝材の表面に発生する摩擦によって平衡状態時の不均一分布がどのように変化するかの影響を評価する。

キーワード: ベントナイト、乾燥密度、摩擦、有限要素法

1. 研究背景および目的

近年、原子力発電稼働によって発生する高レベル放射性廃棄物の処理問題がある。現在、この問題に対して地層処分が最も適した解決方法だと認識されている。地層処分とは、放射性廃棄物をガラス固化し、金属製の容器(オーバーパック)に入れ、緩衝材で覆ったものを、地下 300m 以深に埋める方法である。地下深部の地層は、酸素が極めて少ないため化学反応が抑制され、物質を変質させにくく、また人間の生活環境から離れているなどの特徴を持つことから、地層処分が最適であると考えられている。しかし、地層処分の安全性は担保されていないため、未だに実現には至っていない。そのため、地層処分に関する研究が多数行われており、早急に安全性を評価することが求められている。

本研究では地層処分の中でも、特に緩衝材に着目している。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想定されている。ベントナイトは、吸水膨潤特性や物質の移動を遅らせる性質を持つ。ここで、緩衝材に求められる性能はいくつかあるが、各性能に対して緩衝材の乾燥密度や厚さの範囲が設定されており¹⁾、その範囲を基に緩衝材の使用が検討されている。そのため、緩衝材が目標品質に達しているかの判断に乾燥密度は重要な指標となっている。目標品質に達しているか判断する際の乾燥密度は、施工後に再

冠水過程を経て、膨潤変形した状態のものである。Dueck et al²⁾は、ベントナイト供試体が隙間を充填し平衡状態に至る過程を把握するための実験を実施し、平衡状態に至った緩衝材内部の乾燥密度に不均一が残存することを確認した。緩衝材内部の不均一分布は緩衝材の変質現象に影響を及ぼすため、不均一分布の形成過程を明らかにする必要がある。実験によって緩衝材内部に不均一が残存することは明らかにされているが、解析的に検討している研究は少ない。また、平衡状態時の不均一分布に影響を与える要因はいくつか挙げられており、本研究では緩衝材とその周辺部位の間に生じる摩擦に着目している。Mitachi³⁾や Dueck et al⁴⁾は、実験によって供試体上下面に作用する膨潤圧に差があることを確認し、摩擦の影響を把握した。そのため本研究では、再冠水過程における緩衝材の不均一分布の形成を解析的に検討し、不均一分布の形成と緩衝材周辺に生じる摩擦の関係を明らかにすることを目的としている。

2. 原位置試験シミュレーション

(1) はじめに

本研究は、再冠水過程におけるベントナイト緩衝材の状態変遷の解析的検討、および不均一分布と緩衝材表面に発生する摩擦の関係を明らかにすることを目的としている。そこで、本解析は公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが実施した原位置試験⁵⁾を対象にして解析を実施した。再冠水過程におけるベントナイト緩衝材の状態変遷の解析的検討においては、原位置試験の結果と解析結果を比較することで、解析の妥当性を検討する。また、不均一分布と摩擦の関係においては、緩衝材周りにジョイント要素を設けて、摩擦の影響を考慮した解析を行い、不均一分布の形成に摩擦が関係しているのかを明らかにし、関係するのであればどの面が最も影響を及ぼすのか、また不均一分布にどのような変化があるのかを確認する。

(2) 解析概要

本解析は、原位置試験を対象にしている。原位置試験は、自然湧水下における緩衝材の浸食・流出挙動を把握することを目的としている。試験は地下350mにある試験坑道で実施されている。図1に試験概要を示す。砂層の上に設置された緩衝材定置器具の周りを囲うようにベントナイト緩衝材を積み重ねる。緩衝材施工の際、緩衝材外側面と試験孔壁の間に20mmの隙間が生じる。この隙間は、地下水をベントナイトが吸水し膨潤することで充填する。隙間閉塞後、緩衝材外側面と試験孔壁は接触し、孔壁に設置された土圧計により、膨潤圧が計測される。また、緩衝材上面は鋼製盤によって軸方向変形が生じないようにしている。緩衝材上下面にも、土圧計が設置されており、膨潤圧が計測される。この試験は、緩衝材を設置した後に、緩衝材外側面にある岩盤と底面にある砂層から地下水を自然湧水させ、緩衝材が地下水を吸水し膨潤する状況を再現して、膨潤圧や流出する地下水量を測定している。次に、解析概要について述べる。この解析ではベントナイト緩衝材、隙間、岩盤、砂層を解析対象とする。岩盤と砂層から地下水が湧き、ベントナイト緩衝材が外側面と底面から地下水を吸水し、膨潤によって隙間を充填し平衡状態に至るまでを解析対象とする。本解析は、ベントナイト緩衝材が膨潤し隙間を充填するまでの期間と、隙間充填後の期間の二つに分けられる。隙間閉塞までの期間では、ベントナイト緩衝材の外側面と底面における水頭を0mm、岩盤の外側の水頭を500mm、岩盤の内側の水頭を0mmに維持する。砂層の上面の水頭は、緩衝材底面の水頭に追従する。これらのことより、ベントナイト緩衝材の底面と外側面から地下水が流入する状況を再現している。隙間閉塞後は、岩盤と砂層から湧いた地下水の一部が緩衝材に流入するようにしている。ここでは、水位が緩衝材上面と同じ高さであるため、緩衝材と岩盤の界面の上端点の排水面を緩衝材上面と同じ位置となるような排水条件とすることで、残りの地下水が上端点から排水されるように条件を設ける。

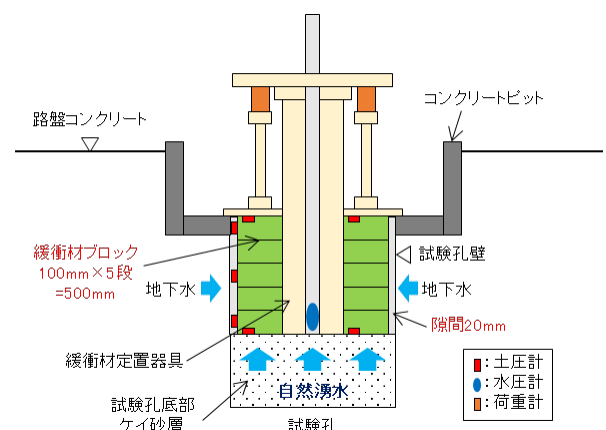


図1 原位置試験概略図

(3) ジョイント要素

ベントナイト緩衝材と岩盤、砂層、鋼製盤の蓋、定置器具に作用する摩擦の表現には、Goodman⁶⁾により開

発されたジョイント要素を用いる。ジョイント要素は接触面の法線方向および接線方向にばねを仮定し、要素間の相対変位より表面力を計算する。一般的に法線方向において、接触面に作用する垂直応力の値によって接触か剥離か判定され、その状態に応じてばね定数の値が使い分けられる。本解析では、法線方向のばねは機能しないように設定している。一方で次式に示すように、接線方向における応力増分と相対変位増分の関係式は、Mohr-Coulomb の破壊基準より算出されるせん断強度とジョイント要素に生じるせん断応力の値によって、ばね定数の値を使い分ける。

$$\Delta\tau = K_s \Delta u_s \quad (\tau < \tau_f = c + \sigma_n \tan \phi) \quad (1)$$

$$\Delta\tau = K_{sy} \Delta u_s \quad (\tau \geq \tau_f = c + \sigma_n \tan \phi) \quad (2)$$

ここに、 $\Delta\tau$ はせん断応力増分、 K_s 、 K_{sy} は接線剛性係数、 Δu_s は接線方向の相対変位増分、 c は粘着力、 σ_n は法線応力増分、 ϕ は内部摩擦角である。せん断応力 τ がせん断強度 τ_f を超え滑動が生じたとき、ばね定数 K_{sy} は小さな値のばね定数を用いる。

摩擦に関するパラメータは、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが実施したベントナイトに挟まれた炭素鋼の引抜き実験⁷⁾を参考に同定した。表1にジョイント要素のパラメータを示す。

表 1 ジョイント要素のパラメータ

名称	記号	単位	値(摩擦なし)	値(摩擦あり)
接線方向剛性	K_s	kPa/m	1.0e-5	2.5e+5
接線方向剛性	K_{sy}	kPa/m	1.0e-5	1.0e-5
粘着力	c	kPa	0	25
摩擦角	ϕ	°	0	17

(4) 解析条件

本研究にて実施する原位置試験シミュレーションでは、DACSTAR-I⁸⁾をベースとし、不飽和状態のベントナイトの力学特性を表現するために、伊藤ほか⁹⁾がアップデートを施したものを用いる。図2に解析モデルを示す。原位置試験の寸法を参考にして、緩衝材の高さを500mm、幅を170mm、緩衝材と岩盤の間の隙間を20mm、砂層の高さを500mm、幅を190mm、岩盤の高さを1000mm、幅を1000mmとした。9 節点四角形アイソパラメトリック要素を用いて、緩衝材は半径方向に30要素、軸方向に20要素の合計600要素、砂層は半径方向に31要素、軸方向に5要素の合計155要素、岩盤は半径方向に10要素、軸方向に25要素の合計250要素に分割した。それに加えて、緩衝材上下面にはそれぞれ30要素、両側面にはそれぞれ20要素の合計100要素のジョイント要素を設けている。

岩盤の右側面と左側面の緩衝材と接する面は排水境界、それ以外は非排水境界とする。ただし、隙間閉塞後は緩衝材と岩盤の界面からの排水を想定しているため、緩衝材の右上端点のみ排水境界とする。緩衝材の初期水頭は、初期サクションを水頭換算した値を用いる。岩盤と砂層の初期水頭は解析によって求める。岩盤と砂層を解析対象として、岩盤外側面の水頭を500mmに維持し、岩盤内側面と砂層上面の水頭を500mmから0mmに低下さ

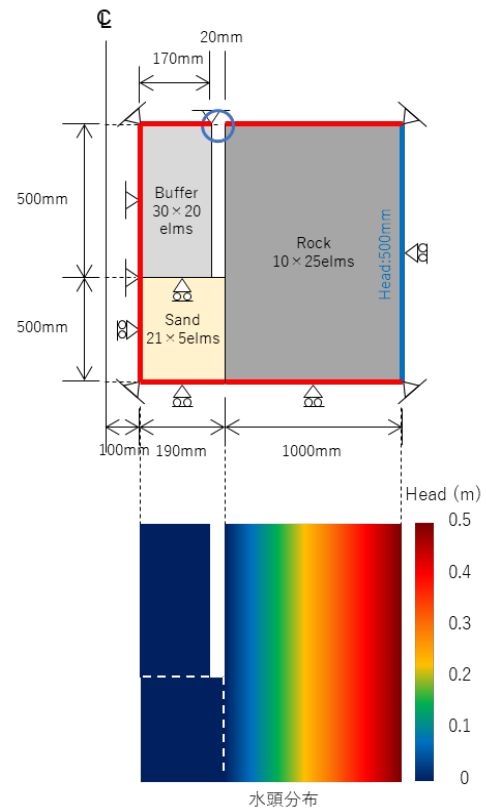


図 2 解析モデル

せて定常状態に至った時の水頭分布を初期水頭とした。本解析における湧水の開始は、緩衝材の外側面と底面の初期の負の水頭を一日かけて 0mm まで上昇させることで再現した。

変位境界は、各端点は変位固定し、岩盤の下面と砂層の下面は軸方向変位を固定、岩盤の右側面と砂層の左側面は半径方向変位を固定した。緩衝材は上面と左側面の変位を固定した。

緩衝材の初期乾燥密度は、原位置試験を参考に 1.92Mg/m^3 とした。この値は、隙間充填後の平均乾燥密度が 1.60Mg/m^3 となることを想定して設定されている。初期含水比は 11.15% であり、これに対応する初期飽和度は 72%、初期サクシオンは 1.8MPa と設定する。

ベントナイト緩衝材および岩盤に関するパラメータは、原子力環境整備促進・資金管理センター¹⁰⁾による検討を参考にして決定した。緩衝材のパラメータにおいては、より膨潤が促されるように再設定した値を用いる。砂層の構成パラメータは、川尻ほか¹¹⁾の論文を参考に決定した。表 2~4 にそれぞれのパラメータを示す。

本研究では、緩衝材内部の不均一分布形成に影響を与える要因として摩擦に着目している。そのため、緩衝材周りにジョイント要素を設けて、摩擦の影響を考慮できるようにしている。本解析では摩擦の有無で 4 つの解析を実施した。ケース 1 は摩擦が作用しない状況、ケース 2 は緩衝材両側面に摩擦が作用する状況、ケース 3 は緩衝材上下面に摩擦が作用する状況、ケース 4 は緩衝材四面に摩擦が作用する状況である。このようにケースを分けた理由は、摩擦がどの面に作用するのか、またどの面の摩擦が緩衝材の内部状態に影響を及ぼすのかを把握するためである。

表 2 ベントナイト緩衝材に関するパラメータ

名称	記号	単位	値
限界応力比	$\bar{M}$	-	0.63
圧縮指数	λ	-	0.28
飽和膨潤指数	$\bar{\kappa}$	-	0.056
有効ポアソン比	ν'	-	0.20
正規圧密曲線の基準圧	p'_{ref}	MPa	2.00
基準圧に対応する間隙比	e_{ref}	-	0.643
塑性膨潤パラメータ	ζ	-	0.45
不飽和モデルパラメータ	α	-	10.0
不飽和モデルパラメータ	θ	-	2.0
不飽和モデルパラメータ	l	-	0.40
水分特性曲線パラメータ	A	-	-3.65
水分特性曲線パラメータ	B	-	4.85
残留飽和度	S_{r0}	-	0.10
基準間隙比	e_k	-	0.368
基準間隙比に対応する透水係数	k_0	m/s	4.08e-7
透水係数の間隙比依存性の程度を表すパラメータ	λ_k	-	2.15

表 3 岩盤の材料パラメータ

名称	記号	単位	値
ヤング率	E	MPa	3.50e+3
有効ポアソン比	ν'	-	0.30
透水係数	k	m/s	3.0e-6

表 4 砂層の材料パラメータ

名称	記号	単位	値
ヤング率	E	MPa	500
有効ポアソン比	ν'	-	0.45
透水係数	k	m/s	8.64

(5) 解析結果

本研究の解析結果を記す。

a) 膨潤挙動の確認

基本となるケース 1(摩擦なし)の解析結果と原位置試験で得られた結果を比較し、ベントナイト緩衝材の膨潤挙動を解析的に表現できているかを確認する。ケース 1 の軸圧および側圧の経時変化を図 3 に示す。左上図は緩衝材上面における軸圧の経時変化、左下図は緩衝材下面における軸圧の経時変化、右上図は緩衝材内側面における側圧の経時変化、右下図は緩衝材外側面における側圧の経時変化である。軸圧は上面、下面ともに岩盤に近い計測点から順に最大値に達しており、中心から順に大きい値を示す。軸圧は最大値に達した後に減少するが、隙間閉塞によって緩衝材が再圧密されるため再び増加し、平衡膨潤圧に至っている。外側面の側圧は、隙間が完全に閉塞するまではゼロを維持しており、隙間閉塞後から増加し平衡膨潤圧に至っている。地下水流入の影響を最も受ける下端点は、先行して膨潤し 2~3 日経過後に隙間を充填しており、それ以外の計測点は 6 日程度で隙間を充填したことが確認できた。

図 4 に原位置試験によって得られた軸圧および側圧の経時変化 ⁵⁾を示す。左図が軸圧、右図が側圧の経時変化である。軸圧は岩盤に近い計測点から最大値に達しており、その後緩やかに減少し平衡膨潤圧に至っており、側圧は隙間閉塞後から増加し平衡膨潤圧に至っている。このことから、解析で得られた膨潤挙動は、試験結果と同じ傾向を示すことがわかった。また、隙間閉塞までに要した時間も試験では 2~3 日であり、おおよそ同じ結果となっていることもわかった。以上より、ベントナイトの膨潤挙動を解析によって表現できていることが確認できた。

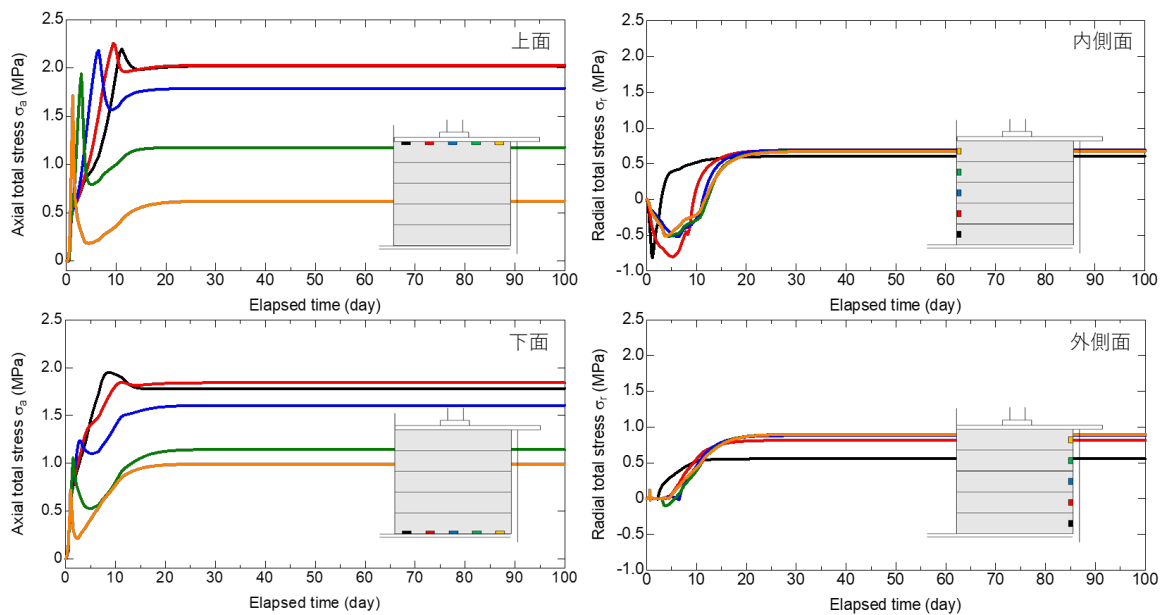


図 3 軸圧および側圧の経時変化(ケース1:摩擦なし)

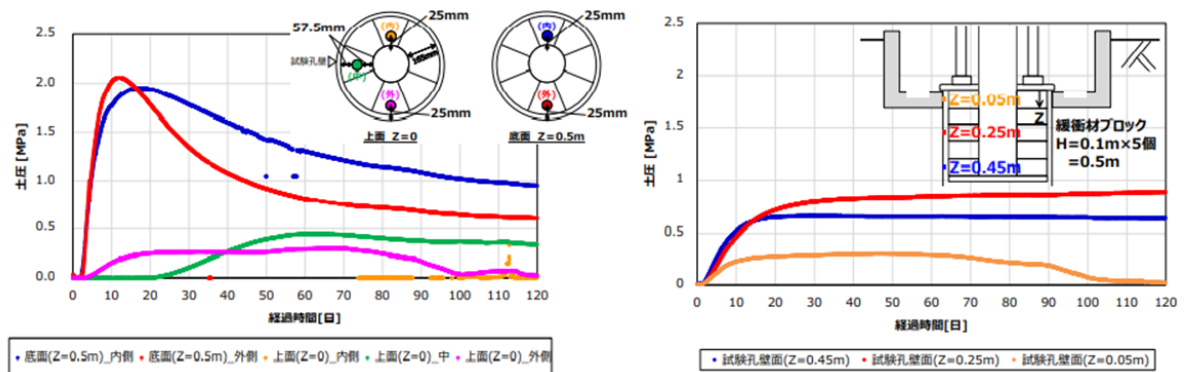


図 4 原位置試験結果(軸圧、側圧) ⁵⁾

b) 摩擦の確認

本解析では、ジョイント要素を用いることで緩衝材周りに発生する摩擦の影響を再現した。そのため、緩衝材周りの各面において摩擦が作用しているのか、また各面に摩擦がどの程度作用するのかを確認する。図 5 に緩衝材周りの各面に作用するせん断応力を示す。左図が緩衝材上下面に作用するせん断応力、右図は緩衝材両側面に作用するせん断応力である。ここで、反時計回りに作用するせん断応力を正とする。上下面のせん断応力の結果では、ケース 1(摩擦無し)とケース 2(側面摩擦)においては、どの位置でもゼロとなっており、摩擦が作用していないことがわかり、ケース 3(上下面摩擦)とケース 4(四面摩擦)においては、上下面では対応するようにせん断応力が発生していることが確認できた。これより、上下面摩擦によって緩衝材中心部でせん断応力が最大となり、中心部の半径方向変形が最も抑制されていることがわかった。一方で両側面の結果では、全てのケースでほとんどせん断応力が発生しないことを示している。側面でせん断応力が発生しないのは、衝材外側面と岩盤の間に存在する隙間を充填するために、緩衝材の膨潤変形が半径方向に集中するためだと考えられる。これらの結果から、上下面摩擦によって緩衝材中心部の半径方向の膨潤変形が抑制されることが確認できた。

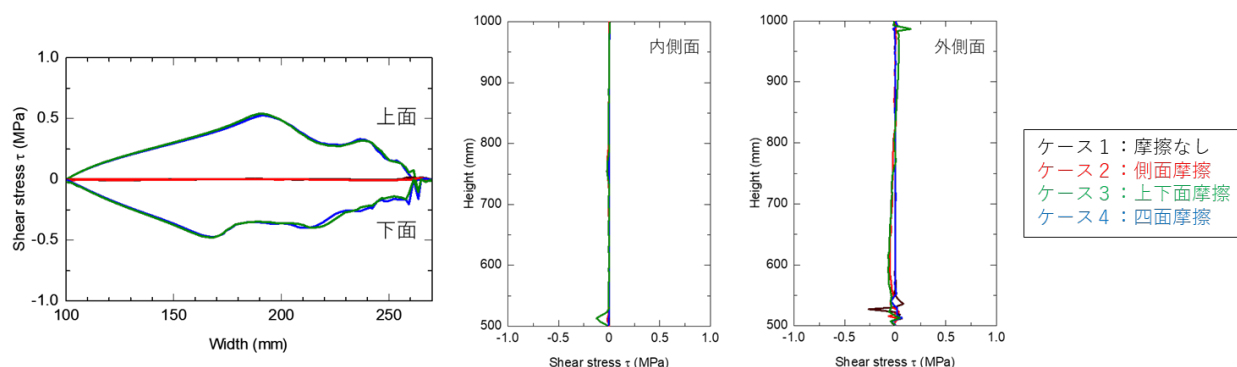


図 5 せん断応力(反時計回りが正)

c) 緩衝材周りの摩擦の有無による結果の違い

各ケースで得られた結果から、再冠水過程におけるベントナイト緩衝材の不均一分布形成と緩衝材表面に発生する摩擦の関係について述べる。図 6 に各ケースにおける平衡状態時の側圧および軸圧を示す。左図が緩衝材外側面の平衡状態時の側圧分布、右図が緩衝材底面の平衡状態時の軸圧分布である。側圧分布においては、各ケースで大きな違いは見られなかった。軸圧分布においては、ケース 1 と 2、ケース 3 と 4 の組み合わせで近い分布を示すことから、上下面摩擦の有無で違いが生じることがわかった。上下面摩擦が作用している場合、作用していない場合よりも緩衝材外側面までは近い値を示している。このことから、半径方向変形が抑制され、外側面付近で隙間幅の分だけ変形が生じていることがわかる。

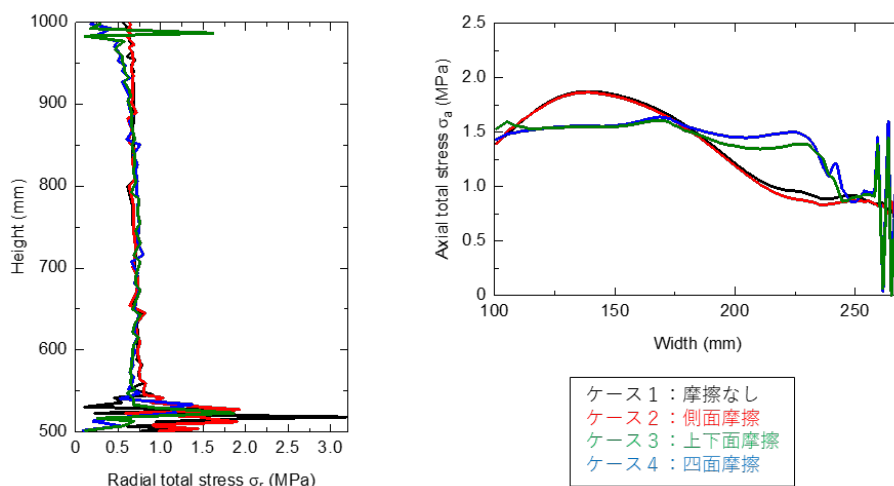


図 6 各ケースにおける側圧および軸圧の定時変化

図 7 に各ケースにおける乾燥密度分布の経時変化を示す。それぞれ吸水面である緩衝材底面と外側面から乾燥密度が低下していき、隙間閉塞後は外側面付近では増加に転じており、それ以外は減少し続けていることがわかる。それぞれのケースを比較すると、ケース 1 とケース 2、ケース 3 とケース 4 の組み合わせで異なる分布となっている。ケース 1 と 2 の平衡状態時の乾燥密度分布は、吸水面から乾燥密度が低下した分布を表しているが、ケース 3 と 4 の平衡状態時の乾燥密度分布は、半径方向に直交する断面が外側面から内側面にかけて低下している分布を表している。またケース 3 と 4 では、緩衝材外側面の上下面付近で乾燥密度が低下している。これらのことから、軸圧、側圧分布と同様に、上下面摩擦の有無で平衡状態時の分布の違いが生じることが確認できた。

次に、平衡状態時の乾燥密度分布が上下面摩擦の有無でどれほど異なるかを確認する。図 8 と図 9 に各ケースにおける平衡状態時の乾燥密度を示す。図 8 が軸方向に直交する断面の乾燥密度分布で、図 9 が半径方向に直交する断面の乾燥密度分布である。図 8 より、上下面摩擦を考慮したケースの方が、外側面付近以外の場所では高密度を維持していることがわかる。しかし、外側面付近は上下面摩擦を考慮していないケースよりも乾燥密度が急激に低下しており、密度差が大きくなることがわかった。図 9 より、半径方向に直交する断面では上下面摩擦の有無で大きな違いはないことがわかった。以上のことから、上下面摩擦の有無によって半径方向の膨潤変形に違いが生じるため、乾燥密度分布も異なる分布を形成することが確認できた。

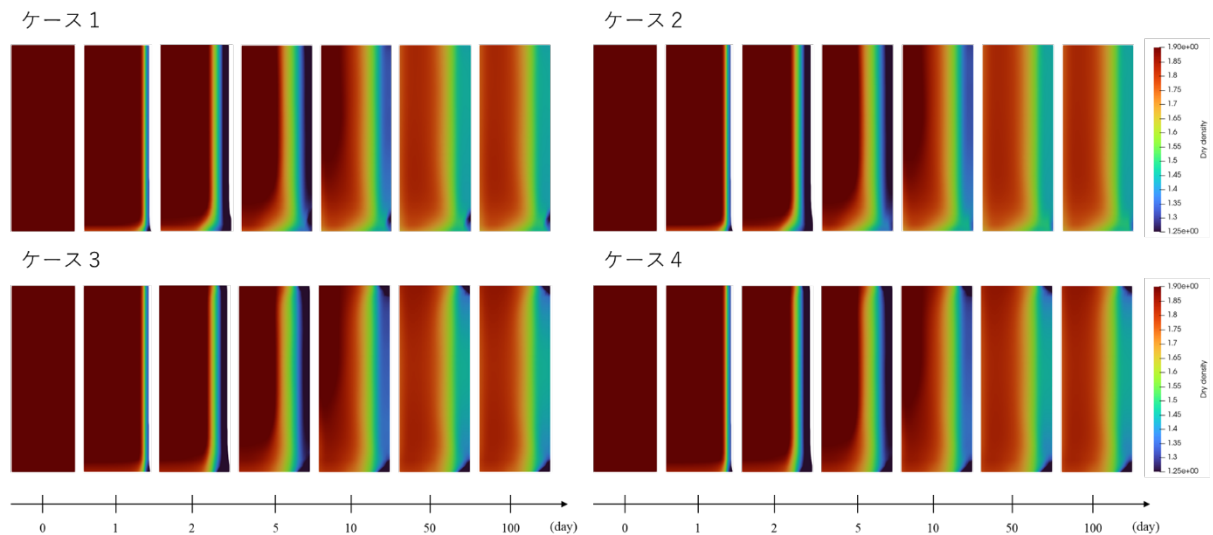


図 7 各ケースの乾燥密度分布の経時変化

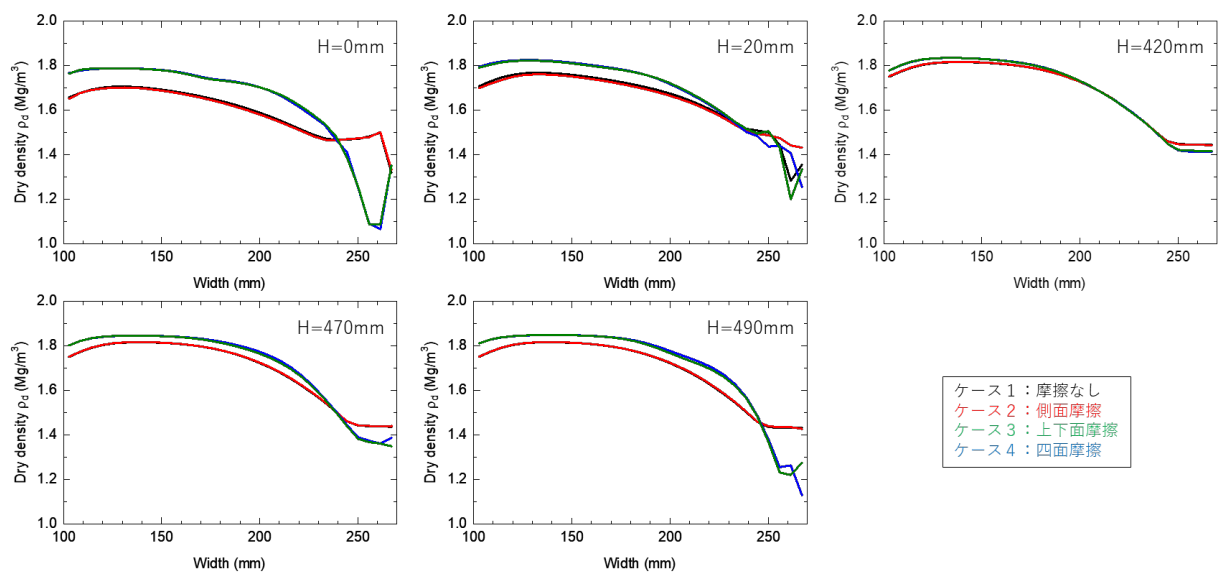


図 8 各ケースにおける乾燥密度の定時変化(軸方向に直交する断面)

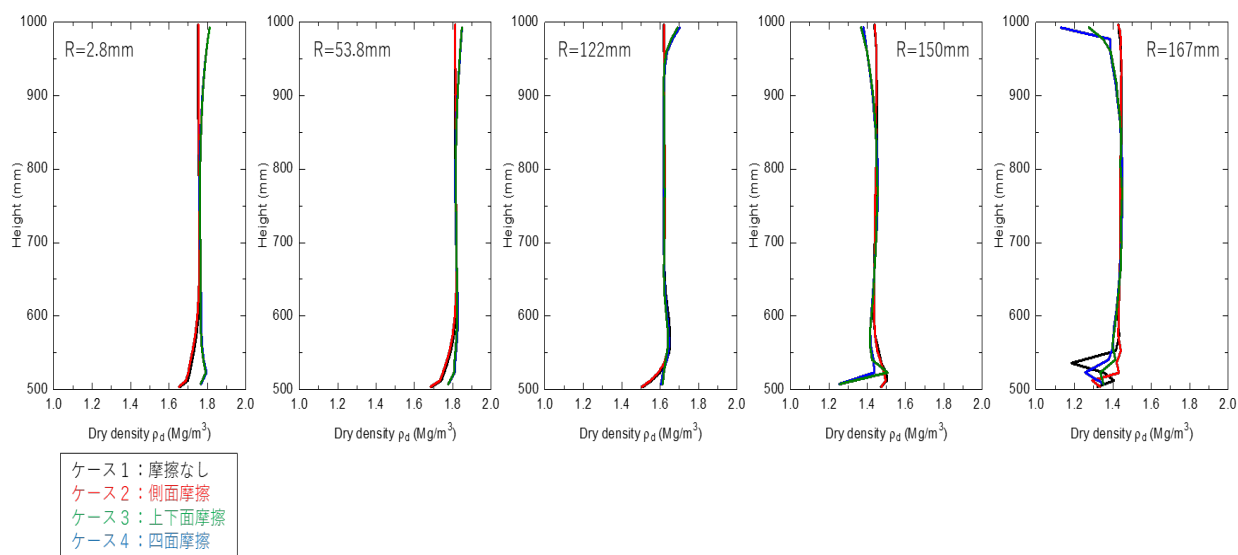


図 9 各ケースにおける乾燥密度の定時変化(半径方向に直交する断面)

3. 結論

本研究では、再冠水過程におけるベントナイト緩衝材の膨潤挙動を解析によって表現し、不均一分布に影響を与える要因を検討し、関連性について考察した。原位置試験を対象とした原位置試験シミュレーションを実施し、ベントナイトの膨潤挙動を解析的に表現できることを確認した。そして、緩衝材周りに発生する摩擦の影響と不均一分布の関係を検討した。不均一分布の形成には、緩衝材の上下面に作用する摩擦が影響を与えることがわかった。緩衝材上下面に作用する摩擦によって、半径方向の膨潤変形が抑制され、緩衝材外側面付近とそれ以外の膨潤圧および乾燥密度分布に密度差が生じることがわかった。また、側面に作用する摩擦は不均一分の形成にほとんど影響を与えないこともわかった。緩衝材両側面にはほとんど摩擦は作用していないことから、軸方向の膨潤変形はほとんど生じていないことが言える。以上より、緩衝材両側面に作用する摩擦は、不均一分に影響をほとんど与えないが、上下面に作用する摩擦は、緩衝材外側面付近とそれ以外の密度差を生み出す要因であり、不均一分布に影響を与えることがわかった。

参考文献

- 1) 加藤藤孝, 石原義尚, 牧野仁史, 石黒勝彦, 緩衝材厚さ及び乾燥密度の変化が人口バリア中核種移行へ及ぼす影響の評価, JNC TN8400 2000-002, 2000.
- 2) Dueck, A., Goudarzi, R. and Börgesson, L., Buffer homogenisation, *Status report 3*, SKB TR-16-04, 2016.
- 3) Mitachi T., Mechanical behavior of bentonite-sand mixtures as buffer material, *Soils and Foundations*, Vol. 48, No. 3, p. 363-374, 2008.
- 4) Dueck A., Goudarzi R. and Börgesson L., Buffer homogenization, *Status report 2*, SKB 14-25, 2014.
- 5) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター, 令和 2 年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に係る技術開発事業 ニアフィールドシステム評価確証 技術開発報告書, 2021.
- 6) Goodman E., Taylor L. and Brekke L., A model for mechanic of jointed rock, *Journal of soil mechanics and foundation division ASCE*, Vol. 94, No. SM3, p. 637-659, 1968.
- 7) 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター, 平成 26 年度地層処分技術調査等事業(地層処分回収技術高度化開発)報告書, p. 51-59, 2015.
- 8) Takeyama, T., Tachibana, S. and Furukawa, A., A finite element method to describe the cyclic behavior of saturated soil, *International Journal of Material Science and Engineering* 2 (1), pp. 20-25, 2015.

- 9) 伊藤真司, 膨潤性地盤材料の構成則開発とベントナイト緩衝材の品質評価への適用, 神戸大学大学院工学研究科博士論文, pp12-57, 2020.
- 10) 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構, 公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センター, 令和 3 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 ニアフィールドシステム評価確証技術開発 報告書, pp. 257, 2022.
- 11) 川尻峻三, 境芳樹, 澁谷啓, 加藤正司, 川口貴之, 不飽和土における各種弾性係数の測定と相関について, 土木学会第 64 回年次学術講演会, 2009.

筆者:1) 塚田 健人、神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻、教授;2) 橘 伸也、神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻、教授;3) 竹山 智英、神戸大学大学院工学研究科市民工学専攻、教授;4) 飯塚 敦、神戸大学都市安全研究センター

Relation between non-uniform distribution of bentonite buffer and friction on its surface during resaturation process

Kento Tsukada
Shinya Tachibana
Tomohide Takeyama
Atsushi Iizuka

Abstract

In the geological disposal of radioactive waste, bentonite buffer material must satisfy the required performance. The dry density of the buffer material must be within a specified range to achieve the desired performance, but it is necessary to understand the evolution of the internal condition of the buffer material because it has been reported that non-uniformity may remain in the buffer material at equilibrium conditions. One factor that may influence the formation of non-uniform distribution is the friction between the buffer material and the surrounding area. In this study, lateral swelling analysis is conducted at the in-situ test scale to analytically examine the swelling behavior of bentonite buffer material during the re-flooding process. In addition, the friction around the buffer material is also considered in the analysis to evaluate the effect of the friction on the buffer material surface and how it changes the non-uniform distribution at equilibrium conditions.

©2023 Research Center for Urban Safety and Security, Kobe University, All rights reserved.