

# 緩衝材の再冠水に伴う密度変化に関する検討

山下 亮<sup>\*1</sup>・雨宮 清<sup>\*1</sup>・塚田泰博<sup>\*2</sup>・長屋淳一<sup>\*2</sup>・中島 均<sup>\*3</sup>・朝野英一<sup>\*3</sup>

高レベル放射性廃棄物の定置後の飽和過程（再冠水過程）においては、地下水の浸透に伴い、緩衝材が膨潤することにより密度分布が変化する。このため、長期的な人工バリアの性能を評価するためには、緩衝材や埋戻し材の密度分布の変化を予測した上で、施工終了時点で確保すべき緩衝材の密度を適切に設定することが必要となる。本研究では、実際の処分において想定される密度の不均質な状況を抽出し、代表的な状況を模擬した室内試験により定量的に密度の変化を調べ、それを数値解析により予測評価が可能であるかについて検討した。実験の結果では、緩衝材等が飽和して膨潤圧が最大限に発揮された時点で密度均質化はほぼ終了するものの、ケースによってはその後の緩慢な変化傾向が持続することが確認された。ただし、飽和後の変化量は小さく、長期間経てもその緩衝材性能に与える影響は小さいと推定された。数値解析においては圧縮指数などの物性を適切に設定すれば、密度均質化の程度を良好な精度で予測可能であることがわかったが、飽和後の緩慢な変化については、現状の解析モデルでは再現できておらず、今後の課題と考えられた。

キーワード：放射性廃棄物，緩衝材，ベントナイト，埋戻し材，密度，均質化，膨潤

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分において構築される人工バリアの材料は時間の経過とともにその状態ならびに品質が変化する。特に、廃棄体を収納したオーバーパックの外側に配置され、ベントナイトを高い配合率で混合して製作される緩衝材は、地下水の浸潤により膨潤するため、定置直後から地下水により飽和（再冠水）するまでに比較的大きな変化が生じると考えられている。例えば、ブロック型の緩衝材を用いた場合、ブロックと岩盤の間は完全に隙間をなくすることはできないため、粒状のベントナイト等により充填することが想定されるが、充填材は緩衝材ブロックに比較して乾燥密度が低く、膨潤能力も低いいため、地下水浸潤により緩衝材が充填材側へと膨張すると予想される。このことにより、緩衝材の密度は低下し、逆に充填材の密度は上昇すると考えられる。一方、廃棄物処分システムの性能を評価する際には、人工バリアシステムがある程度安定化した段階を初期として評価がなされるため、飽和膨潤が終了してある程度安定化した段階の状態（以下、初期品質と言う）を明らかにしておくことが必要である。あるいは、性能評価において必要な初期品質が指定された場合、再冠水期間における緩衝材の変化を見込んだ上で、定置直後の品質（施工時品質）を設定することが必要と言える。初期品質と施工時品質の関係を模式的に図-1に示す。

緩衝材の配合にもよるが、70cm程度の厚みの緩衝材の再冠水期間として最低数年はかかると予想され、また

大規模な実験設備が必要となることから実規模での再冠水までの状況を実験的に確認された例は見られない。本研究では、「施工時品質」と「初期品質」の関係を明らかにすることを目的として、小規模な室内試験と数値解析により検討を実施した。

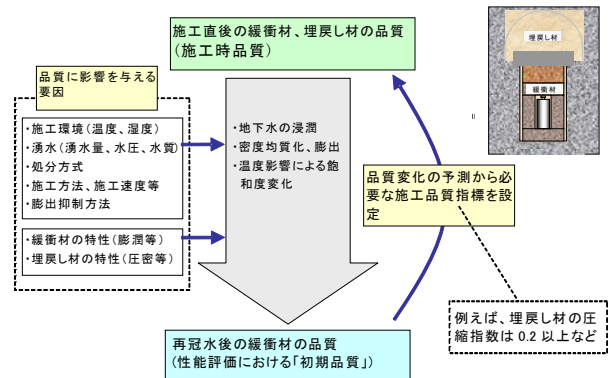


図-1 初期品質と施工時品質の関係

## 2. 密度均質化試験

検討に際して、まず、人工バリアに用いられる土質系材料について、埋戻し材も含めて異なる密度の材料（あるいは隙間）が接する状況を抽出した（図-2）。これらの部位の状況を分類すると次のようになる。

- ①緩衝材自体の不均質性
- ②連続体と粒状ベントナイト（ペレット）が接している
- ③連続体と隙間が接している

\*1 原子力部 \*2 地域地盤環境研究所 \*3 原子力環境整備促進・資金管理センター

④異なる配合の材料が接している

上記の内、①の緩衝材自体の不均質性としては、締め施工時の1層の中での不均質性(締め表面付近の方が密度が高くなる傾向がある)や粒状ベントナイトにおける空隙の存在などがあげられる。④については、緩衝材と埋戻し材が接する状況に相当する。

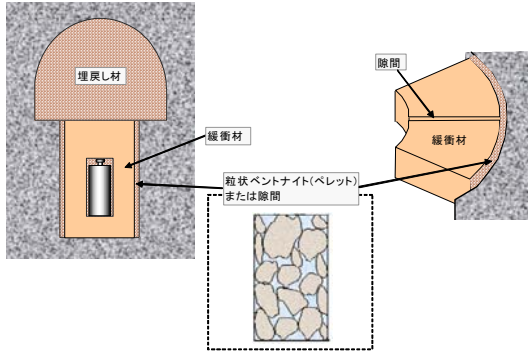


図-2 密度不均質性が存在する部位

図-2に示すような密度の不均質な状況のそれぞれを取り上げ、飽和膨潤後に密度がどのように変化するかについて要素試験を実施した。一般にベントナイト密度の高い材料は膨潤圧が大きいので、膨潤して密度が低下する方向に変化し、ベントナイト密度の低い材料は圧縮されて密度が大きくなる方向に変化すると考えられる。すなわち、密度が均質化する方向に変化すること予想されることから、ここではこの要素試験を密度均質化試験と呼ぶこととする。

2.1 試験方法

密度均質化試験は、図-3に示すように、アクリル製の容器に試験ケースに応じて所定のサイズと密度の緩衝材試料をセットし注水することにより、緩衝材を飽和させ、膨潤による密度の均質化の経時的な変化を調べるものである。図-3の左側の図は、緩衝材の周辺にすきまが存在する場合を模擬し、緩衝材がすきまの側へ膨潤した場合の密度分布を調べるための試験概念である。図-3の右側の図は異なる密度の緩衝材が接する状況を再現したものである。飽和後、所定の期間経過後に試料を取り出して、一定の厚さでスライスし、それぞれのスライスの密度を調べて、密度分布が時間とともにどのように変化するかを定量的に調査した。

密度均質化試験の試験ケースの一覧を表-1に示す。また、図-4には、ケース2とケース4について緩衝材を試験容器にセットした状況の写真を示す。それぞれの試験ケースについて、6つの試験体を準備し、1ヶ月後、

3ヶ月後、6ヶ月後、12ヶ月後、18ヶ月後、38ヶ月後に解体して、密度分布を調査した。

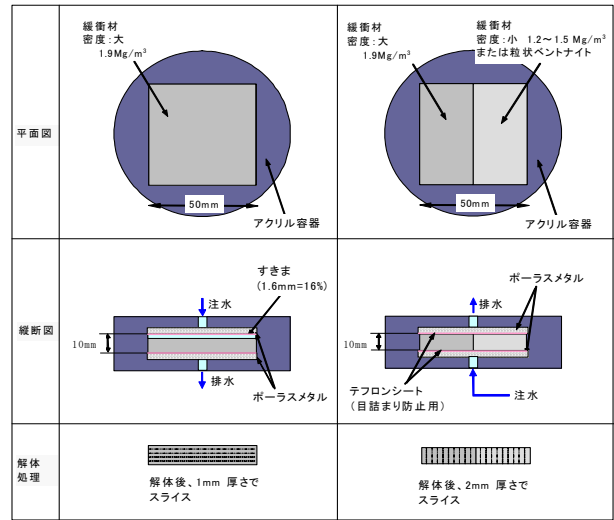
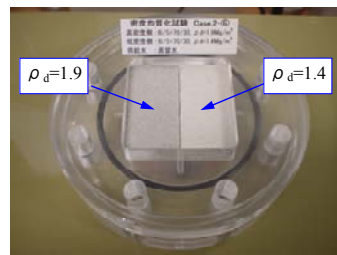


図-3 密度均質化試験の概念図

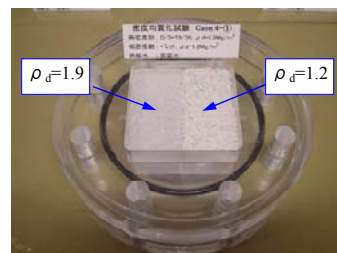
表-1 試験ケース一覧

	緩衝材密度 (高密度側)	緩衝材密度 (低密度側)	供給水	ケースの説明
ケース1	1.9 (B70% S30%)	隙間	蒸留水	ブロックと岩盤(あるいは廃棄体)との隙間を対象とし、膨潤後に最終的な平均密度が1.6となるように約16%を空間(隙間)とする。
ケース2		1.4 (B70% S30%)		原位置施工で生じた密度不均一性を想定
ケース3		1.5 (B30% S70%)		埋戻し材を想定
ケース4		1.2 (ペレット B100%)		容器の大きさを考慮し、粒状ベントナイト(Granulate)をふるいにかけて、粒径2mm以下としたペレットを充填し、ペレット間の隙間も考慮した平均的な乾燥密度が1.2となるように試料を製作する。
ケース5			人工海水	

注) B70%, S30%とはそれぞれ、ベントナイト70%, 砂30%を意味する。ベントナイトとしてはクニゲルV1を、混合する砂は、珪砂7号を用いる。



ケース2



ケース4

図-4 試験開始前の試験体(ケース2とケース4)

## 2.2 密度均質化試験結果

試験により得られた各ケースの密度分布を図-5に示す。また、全体的変化傾向を把握する目的で、それぞれの試験について高密度側および低密度側の平均的な乾燥密度を算出して、経時変化をプロットした結果を図-6に示す。図-6には対数式  $\rho = D \ln(t) + E$  ( $\rho$  は乾燥密度,  $t$  は経過時間,  $D$  と  $E$  は係数) による近似線も併せて示している。なお、平均的な密度については、次のように処理した。

ケース 1: 高密度側は中央付近の 6 スライス の平均値とし、低密度側は最下層の 1 スライス の値を採用。

ケース 2~5: 中央の 1 スライス は除外し、それ以外のスライス について高密度側と低密度側の平均値を算出。

図-5 の分布から、全体的傾向として 1 ヶ月後と 38 ヶ月後では大きな違いがないことがわかる。つまり、この程度の室内試験レベルの小さな供試体では、膨潤による変化は、注水開始から 1 ヶ月以内でその大部分が生じ、その後は大きな変化が生じていない。また、いずれのケースも密度は均質化する方向に変化するが、高密度側と低密度側が均しくなるには至っていない。それぞれのケースの試験結果をまとめると次のようになる。

### ・ケース 1

隙間の存在を模擬したケースであり、高密度緩衝材の下側に隙間を設け、そこに水分を供給することで、緩衝材の隙間への膨潤を生じさせる試験である。しかしながら、試験中において、下方の隙間に供給した水の一部が試料側面を伝わって高密度緩衝材の上部へと浸潤してしまう結果となった。この影響もあり、均質化傾向は明確に把握することはできなかった。ただし、最も低い密度部では  $1.0\text{Mg/m}^3 \sim 1.3\text{Mg/m}^3$  となっており、淡水系であれば拡散場の条件 (ペクレ数  $Pe < 0.01$ ) を満たすことが期待できることがわかった。ただし、塩水系の地下水に対しては、過去の検討<sup>1)</sup>では、有効粘土密度 (ケイ砂を除いた空間でのベントナイトの乾燥密度) で  $1.38\text{Mg/m}^3$  以上が必要とされている。海水系では、膨潤能力も低下するために隙間部に限ればペクレ数の条件を確実に満たすことは難しい可能性がある。

### ・ケース 2

配合が同じ (ケイ砂 30%) ケースであるが、傾向はそれほどはっきりしないものの、高密度側と低密度側の平均的な密度の経時変化グラフから判断して均質化傾向はわずかにあるように見える。

### ・ケース 3

低密度側はベントナイトが 30%、ケイ砂が 70% の材料で高密度側との有効粘土密度の差が最も大きいケースであり、均質化の傾向が比較的明瞭に認められる。ただし、時間経過とともに密度の変化速度は低下している。

### ・ケース 4

高密度側と低密度側の平均的な密度の経時変化グラフから判断して、全体として均質化傾向が明瞭ではない。

### ・ケース 5

唯一の海水系での試験ケースであるが、高密度側と低密度側の平均的な密度の経時変化グラフから均質化の傾向が認められる。また密度変化は対数式で良好に近似できている。

バラツキが大きかったケース 1 を除いたケースについて、図-6 に示す対数近似直線を用いて予測した 100 年後および 1000 年後の乾燥密度を次の表に示す。あくまでも現状の変化傾向が継続した場合にどの程度の密度となるかを示す目安であることを踏まえて評価する必要があるが、いずれのケースでも予測結果は、100 年後と 1000 年後で  $0.01\text{Mg/m}^3$  程度の違いであり、その差はわずかであり、大きな変化がないと思われる。

表-2 対数式による予測密度 ( $\text{Mg/m}^3$ )

		100 年後	1000 年後
ケース 2	高密度側	1.78	1.77
	低密度側	1.51	1.51
ケース 3	高密度側	1.76	1.75
	低密度側	1.64	1.65
ケース 4	高密度側	1.74	1.74
	低密度側	1.35	1.36
ケース 5	高密度側	1.74	1.73
	低密度側	1.36	1.37

また、参考のため図-7 に 38 ヶ月経過後の試験体のうち、ケース 2 とケース 4 の解体直前の写真を示している。ケース 2 では、かすかに材料の境界が認められる程度であるが、ケース 4 では色や粒子構造の違いとして不均質な状況が残っていることがはっきり認められる。

以上から、密度均質化試験の結果をまとめると次のようになる。

- ・密度変化は、そのかなりの部分が飽和による膨潤圧の発現とともに比較的早期に生じている。
- ・有効粘土密度差の大きいケースで変化傾向が明瞭である。
- ・隙間への膨潤においても隙間の乾燥密度は  $1.0\text{Mg/m}^3$  程度まで増加する。
- ・対数近似した場合、100 年後と 1000 年後の密度の差はわずかであると推察された。

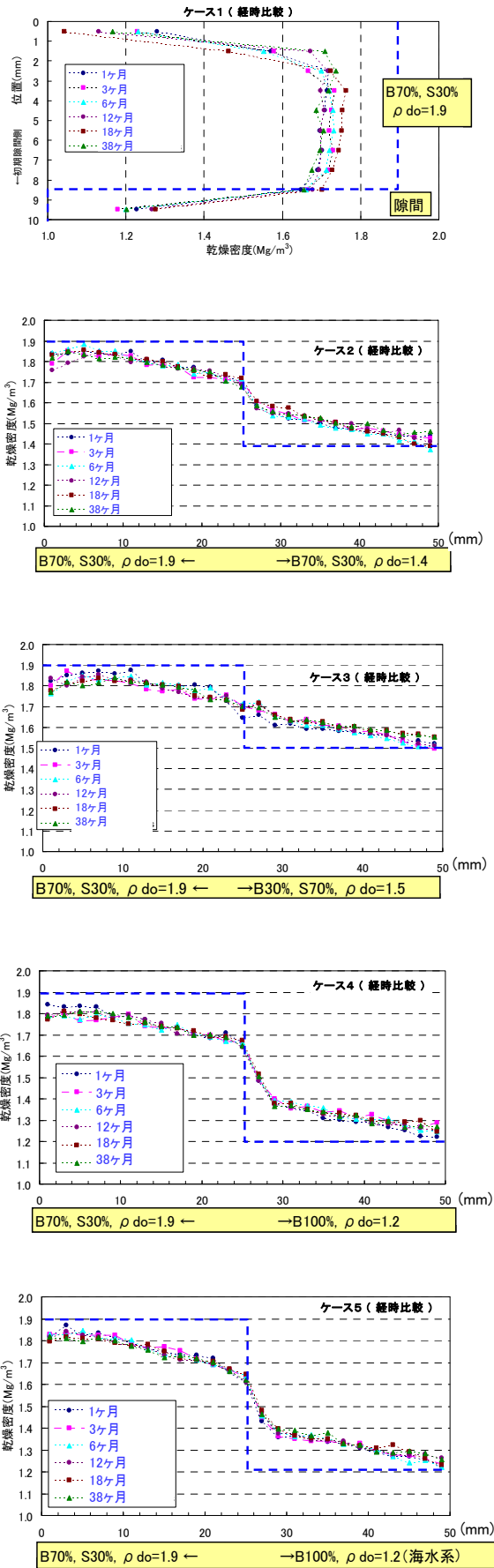


図-5 試験により得られた密度分布

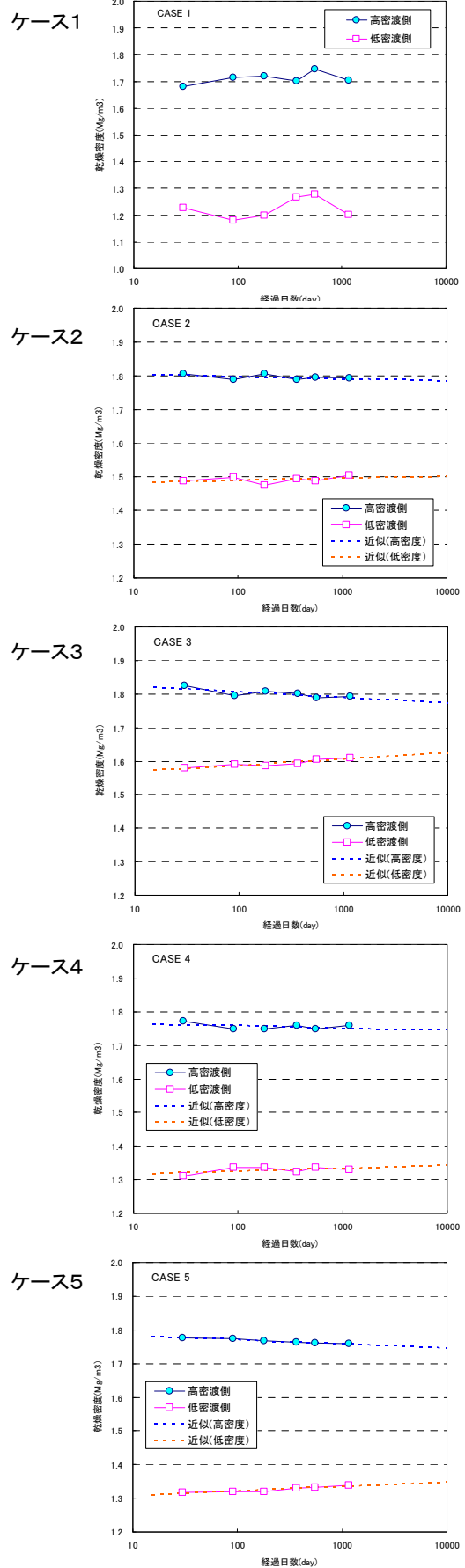


図-6 密度の経時変化

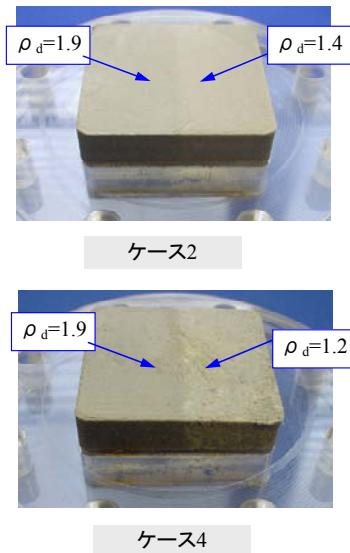


図-7 スライス直前の38ヶ月経過後の供試体の状況

### 3. 密度均質化に関する解析検討

人工バリアに用いられる土質系材料（緩衝材や埋戻し材）の密度均質化を定量的に評価するためには、実規模の長期的な試験を実施するか数値解析を用いた検討が必要となる。ここでは水分移動と力学挙動の連成現象を考慮した数値モデルを用いて、密度均質化試験の再現解析を実施した。

#### 3.1 解析手法

密度均質化現象や膨出現象を解析するための力学モデルに必要な条件は、以下のような項目となる。

- ① 載荷応力と間隙比の変化の関係を考慮できること。
- ② 膨潤特性を考慮できること。
- ③ 不飽和における水の浸潤過程と緩衝材特有の大きなサクション（負圧）を考慮できること。

ここでは、飽和領域のサクションや膨潤圧、熱との連成、を考慮することのできる熱-水-応力連成解析コード（THAMES）を用いた<sup>2)</sup>。THAMESは、不飽和領域に拡張したCamClayモデル<sup>3)</sup>が組み込まれており、実際の処分後の現象を予測する上で適用性が高いと考えられる解析コードである。以下に、不飽和領域での負圧の影響を考慮したCamClayモデルの概念を示す。飽和領域でのCamClayモデルの降伏条件は次のように表現される。

$$f(\sigma'_{ij}, p'_0) = MD \ln \left( \frac{p'}{p'_0} \right) + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (1)$$

ここに、 $D$ はダイレイタンシー係数、 $\varepsilon_v^p$ は塑性体積ひずみ、 $p'$ は平均有効応力、 $p'_0$ は間隙比 $e_0$ まで等方圧密された時の平均有効応力、 $q$ はせん断応力である。また、 $M$ は限界状態パラメータと呼ばれるパラメータで次式で表される。

$$M = \frac{\lambda - \kappa}{D(1 + e_0)} \quad (2)$$

ここで、パラメータ $\lambda$ 、 $\kappa$ はそれぞれ圧縮指数と膨潤指数を0.434倍したものである。

不飽和領域では、飽和度が低いほど剛性が高くなることが知られており、これを表現するために、不飽和状態における降伏関数を次のように修正している。

$$f(\sigma'_{ij}, C, \varepsilon_v^p) = MD \ln \left( \frac{p'}{\xi p'_{sat}} \right) + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (3)$$

ここで $\xi$ は飽和度と材料固有の定数により決まるパラメータであり、飽和状態においては1となる。

#### 3.2 解析条件および解析モデル

解析に用いた物性は、核燃料サイクル開発機構（現：日本原子力研究開発機構）の第2次取りまとめ<sup>4)</sup>等の既往の文献データを参考として設定した。

圧縮指数、膨潤指数については、高治ら<sup>5)</sup>や並河ら<sup>6)</sup>の既往の研究ならびに変位制御膨潤圧試験<sup>7)</sup>のデータを参考に設定した（表-2参照）。

限界状態パラメータ $M$ は、破壊時の平均有効応力と軸差応力を原点を通る直線で結んだ際の傾きであり、高治ら<sup>5)</sup>や並河ら<sup>6)</sup>により実施された圧密非排水三軸圧縮試験結果を基に海水系・淡水系に関わらずベントナイト100%材料については $M=0.58$ とし、それ以外については $M=0.63$ を用いることとした。

膨潤圧は、変位制御膨潤圧試験の結果をもとに設定することとした<sup>7)</sup>。透水係数については、既往のデータにもとづいて有効粘土密度に関する近似関数式から算定した。

$$\text{淡水系: } k = \exp(-26.5 + 2.52\rho_e - 2.78\rho_e^2) \quad (4)$$

$$\text{海水系: } k = \exp(-17.4 - 2.64\rho_e - 2.13\rho_e^2) \quad (5)$$

ここで、 $k$ は透水係数(m/s)、 $\rho_e$ は有効粘土密度(Mg/m<sup>3</sup>)である。

不飽和特性の内、水分特性曲線（サクション $\psi$ と体積含水率と飽和度の関係）は、次式で表されるVan Genuchtenモデル（VGモデル）を用いる。

$$S_r = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[ \frac{1}{1 + (\alpha\psi)^n} \right]^{1-\frac{1}{n}} \quad (6)$$



ここで、 $\theta_s$  は飽和体積含水率、 $\theta_r$  は最小含水量、 $S_r$  は飽和度、 $\alpha$  および  $n$  は VG モデルのパラメータである。また、比透水係数としては次式の Corey モデルを用いた。

$$k_r = S_r^m, \quad m = 2 \quad (7)$$

緩衝材の不飽和浸透特性を示す水分特性曲線と比透水係数のパラメータ値に関しては、第2次取りまとめ<sup>4)</sup>に取り上げられているデータや操上<sup>8)</sup>によって示されているデータ等を参考にして、以下の設定とした。

$$\alpha = 0.008 \text{ (1/m)} \quad n = 1.6 \text{ (-)} \quad (8)$$

解析に用いたメッシュと境界条件を次に示す。注水を表現するために、下方境界に供試体高さ相当の水圧を与えている。

表-2 解析物性一覧

乾燥密度 (Mg/m <sup>3</sup> )	配合	水質	圧縮指数 Cc (-)	膨潤指数 Cs (-)	膨潤圧 (MPa)	限界状態パラメータ M	透水係数 (m/s)
1.9 (高密度側)	B70% S30%	淡水系	0.27	0.16	3.64	0.63	7.12x10 <sup>-14</sup>
1.4 (低密度側)				0.16	0.22		1.28x10 <sup>-12</sup>
1.9 (高密度側)	B30% S70%	淡水系	0.29	0.14	3.01	0.58	6.62x10 <sup>-13</sup>
1.5 (低密度側)				0.02~0.22	0.15		4.16x10 <sup>-12</sup>
1.2 (低密度側)	B100% (粒状)	海水系	0.49	0.14~0.60	0.17	0.58	1.13x10 <sup>-12</sup>
1.2 (低密度側)				0.04~0.06	0.02		5.44x10 <sup>-11</sup>

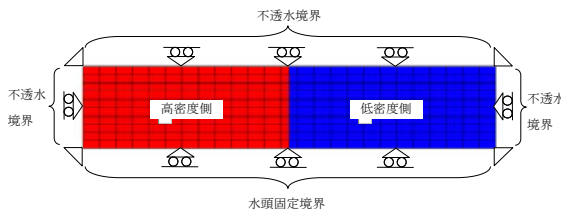


図-8 解析モデル

### 3.3 試験結果との比較

試験ケースのうちケース 1 については、解析において隙間部分のモデル化が難しいため、ケース 2~ケース 5 について解析を行った。

解析結果の例として、図-9 にケース 2 における乾燥密度のコンター図を示す。解析では、2 週間程度で飽和が終了しており、それ以後はほとんど変化のない結果であったため 15 日後までの結果を示している。飽和の終了は透水係数の大きな低密度側の方が早い、低密度側の飽和膨潤による密度変化はほとんど認められない。低密度側の膨潤圧は比較的小さいこと、低密度側が飽和し始めても高密度側は不飽和状態にあるため剛性が大きな状態であるため変形がほとんど生じず、密度変化が発生しないと考えられる。密度の変化は高密度側(各図の左側)の注水側から生じ始めており、水の浸潤とともに

飽和度が增大した領域から膨潤と密度低下が始まっている様子がわかる。また、ほぼ飽和が終了した 15 日後の段階において高密度側の中でも密度の違いが残っている。これは、弾塑性解析における応力履歴の違いによるものと考えられる。すなわち、高密度側において最初に膨潤する部分は、低密度側へ膨潤することで密度が低下するが、高密度側で最後に膨潤する部分については、その時点では低密度側も圧密されることで密度がやや上昇し、応力レベルも高まっているため、膨潤変形が抑制されることが原因として考えられる。

各ケースの試験結果と解析結果の乾燥密度分布の比較を図-10に示す。1ヶ月の段階ですでに飽和が終了していることもあり、その後の密度分布の変化はほとんど認められない。試験結果では、比較的なめらかに密度が分布しているが、平均的に見れば解析により高密度側、低密度側の双方とも各ケースで試験結果を良好に再現できていると考えられる。試験結果において密度がなめらかに分布している状況に関しては、高密度材料と低密度材料の境界において、材料粒子が混合するような現象の発生(特に粒状ベントナイトを用いたケース)や試験容器と緩衝材との摩擦の影響が考えられる。また、解析では図-6で認められるような緩慢な密度変化は得られていない。このような緩慢な密度変化の原因はクリープ等として捉えるか、あるいは別のメカニズム(例えば石英の圧力溶解)によると考えるかは専門家の間でもコンセンサスが得られている状況にはなく、今後の研究課題であると言える。

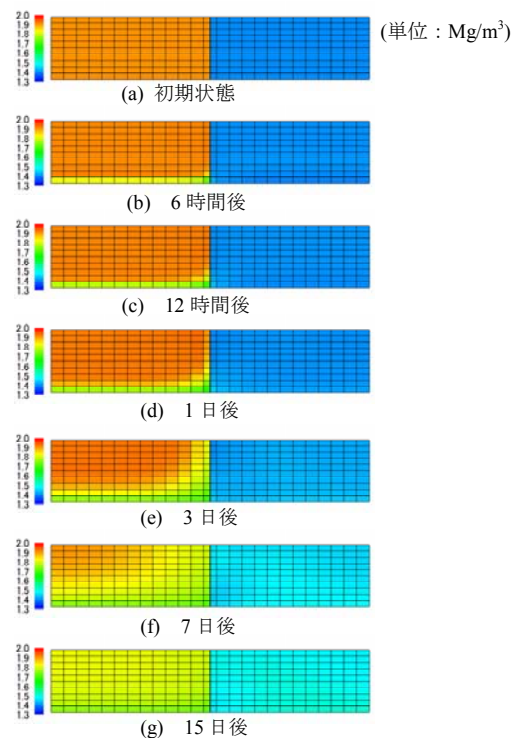
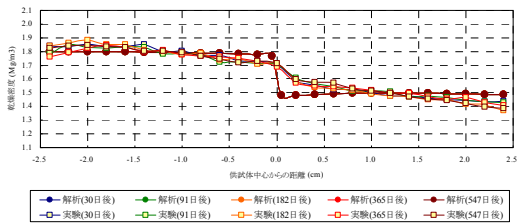
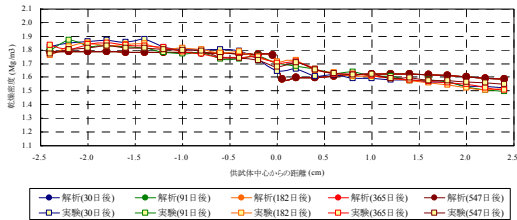


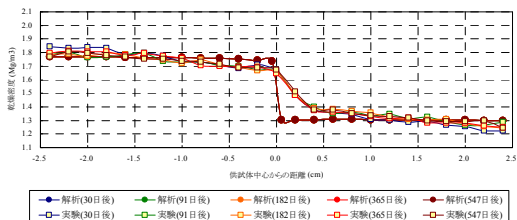
図-9 ケース 2 の乾燥密度分布のコンター図



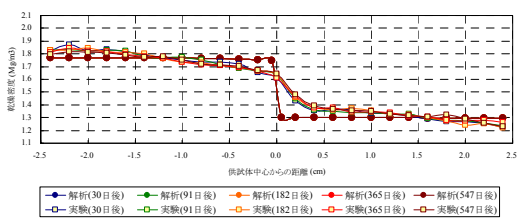
ケース 2



ケース 3



ケース 4



ケース 5

図-10 試験結果と解析結果の比較

#### 4. 考察とまとめ

高レベル放射性廃棄物処分施設の人工バリアに用いられる土質材料には低透水性が求められるため、ベントナイトと砂や礫を混合した材料を緩衝材や埋戻し材として用いることが検討されている。ベントナイトの性質として、廃棄体定置後に地下水の浸透とともに膨潤するため、緩衝材等の状態(特に密度)は時間とともに変化し、密度の高い部位は密度が低下し、密度の低い部位は密度が高くなることで、全体としては密度が均質化する方向に変化すると予想される。緩衝材の密度は、その品質を規定する極めて重要なパラメータであり、所定の品質を確保するためには、このような再冠水に伴う変化を予測しておくことが重要である。このような観点から、密度均質化に関する実験的、解析的検討を実施した。

試験の結果をまとめると次のようになる。

- 異なる乾燥密度の緩衝材（あるいは埋戻し材）が接している場合、密度は均質化する方向に変化することが確認された。
- 密度変化は、材料が飽和した時点でほぼ終了していると考えられた。
- 飽和後も、試験ケースによっては緩慢な変化傾向が認められた。対数関数により近似し、長期的な変化を予測した場合、100年後あるいは1000年後でも密度の変化はわずかであることが示唆された。

同様の研究としては、中島らによる緩衝材ブロック間に隙間が存在する場合の検討<sup>9)</sup>があり、実験の結果として1年程度では密度が均質化しないこと、一定期間を過ぎるとすきま部分の密度の変化傾向は緩慢となり、60日後と約1年後の密度はほとんど変わっていないことが示されている。また、杉田ら<sup>10)</sup>は、横置き定置方式で緩衝材と岩盤との間に隙間が存在する場合を模擬した室内試験を実施し、650日間の密度分布の変化を調べている。その結果、密度のパラツキは時間とともに小さくなってゆくものの650日後も均質化はしていないこと、初期の変化に比べて400日後と650日後の変化はかなり小さくなっていることが示されている。中島らや杉田らによる研究結果は、本研究での実験結果と整合的であり、本検討での実験データの妥当性を裏付けるものと言える。

以上から、密度変化は飽和により膨潤圧が最大限発揮され、材料に弾塑性的な変形が生じた後に生じる変形はわずかであり、配合が同じ(例えばベントナイト70%、ケイ砂30%)であっても密度が完全に均質化する可能性は小さいと考えられる。一方、飽和後の非常に緩慢な変化が持続する可能性も否定できないが、その変化の割合は数百年オーダー以上の長期間を考えても、非常に小さいと思われる。すなわち、1000年オーダーの時間スケールでは、緩衝材が飽和するまでの比較的早期の段階で緩衝材の密度分布は安定し、その後の長期に渡って極端な品質の変化の懸念は小さいものと考えられる。

実験で検討した密度均質化現象は室内試験スケールのものであり実際の処分のスケールで長期の現象を予測評価するには、数値解析的な手法が必要となる。ここでは、まず解析手法の妥当性検証として、実験結果の再現解析を試みた。解析手法としては不飽和領域における水理的、力学的な特性を考慮した弾塑性解析手法を用いており、既往の文献データや別途実施された膨潤圧試験などのデータを入力データをして解析したところ、密度均質化試験における高密度側と低密度側の平均的な密度に関してはかなり精度良く予測可能であることが明らかとなった。これは、圧縮指数と膨潤指数といった弾塑性解析パラメータが得られたならば、飽和完了時点までの膨

潤変形と弾塑性変形を精度良く予測できるということであるが、一方で飽和後の緩慢な変形については、現状のコードでは十分に再現ができていない。上述したように、実験データから飽和後の密度変化の程度は処分システムの影響に対してそれほど影響を及ぼすものではないことが予想されるが、現象のメカニズムの解明と予測の信頼性向上はパブリック・アクセプタンス (PA) の観点からも重要であり、今後の検討を続けるべき課題であると考えている。

## 5. おわりに

本論文では、緩衝材の定置後の密度変化の挙動の検討として、室内試験スケールでの密度均質化試験と数値解析を比較した結果について報告した。今後、実際の処分規模を対象とした予測解析により、緩衝材、埋戻し材の密度分布を含めた再冠水後の状況について検討した結果について報告する予定である。

なお、本論文は、公益財団法人原子力環境整備促進・資金管理センターが経済産業省からの委託を受けて実施した「高レベル放射性廃棄物処分関連：処分システム工学要素技術高度化開発」の成果の一部である。

## 参 考 文 献

- 1) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 17 年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査 遠隔操作技術高度化調査報告書 (2005)。
- 2) Ohnishi, Y., Shibata, H. and Kobayashi, A.: Development of finite element code for the analysis of coupled Thermo-Hydro-Mechanical behaviors of a saturated-unsaturated medium. Proc. of Int. Symp. on Coupled Process Affecting the Performance of a Nuclear Waste Repository, Berkeley, 263-268 (1985).
- 3) 大野進太郎、河井克之、橘伸也：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 C Vol163 No.4, pp.1132-1141 (2007)。
- 4) 核燃料サイクル開発機構：わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第 2 次取りまとめ—分冊 2 地層処分の工学技術、JNC-TN1400 99-022 (1999)。
- 5) 高治一彦、鈴木英明：緩衝材の静的力学特性、JNC TN8400 99-041 (1999)。
- 6) 並河努、菅野毅：緩衝材の圧密特性、動燃技術資料、PNC TN8410 97-051 (1997)。
- 7) 原子力環境整備促進・資金管理センター：平成 19 年度高レベル放射性廃棄物処分事業推進調査 遠隔操作技術高度化開発報告書 (2007)。
- 8) 操上広志、千々松正和、小林晃、杉田裕、大西有三：グリムゼル試験場における熱—水—応力連成現位置試験の解析。土木学会論文集、757/III—66、127-137 (2004)。
- 9) 中島均、石井卓、庭瀬一仁、谷智之：ベントナイトブロックの隙間の密度均一化に関する検討 (その 1) —隙間密度の時間変化の検討—、土木学会年次学術講演会講演概要集、CS5-007 (2007)。
- 10) 杉田裕、菊池広人、棚井憲治：人工バリアにおける緩衝材の隙間膨潤挙動に関する基礎試験 (II)、JNC TN8430 2003-007 (2003)。

---

## Study on Density Homogenization of Buffer Material through Saturation Process

Ryou Yamashita, Kiyoshi Amemiya, Junnichi Nagaya, Yasuhiro Tsukada,  
Hitoshi Nakashima and Eiichi Asano

Bentonite-sand mixture material is going to be used as an artificial barrier for geological disposal of high level radioactive waste. The dry density of bentonite-sand mixture is considered to be homogenized due to swelling of bentonite with groundwater infiltration after disposal, and this change may affect the performance of the buffer material. This homogenization process was studied by laboratory experiment and also the accuracy of the prediction by numerical simulation was examined. As the experiment, different buffer materials in contact with each other were supplied with water and the dry density changes with time were examined. It was observed that homogenization was almost achieved when the buffer materials were saturated. And also, very slow homogenization processes were observed to continue after saturation. The numerical code THAMES using Cam-Clay model was capable of predicting the average dry density of those buffer materials after saturation, while the slow homogenization processes after saturation were difficult to be simulated. The change of this slow homogenization process is so small that the effect on the performance of the buffer material is considered to be negligible.