



緩衝材の流出／侵入特性(III)

Extrusion and Erosion of Bentonite Buffer (III)

松本 一浩 藤田 朝雄

Kazuhiro MATSUMOTO and Tomoo FUJITA

地層処分研究開発部門

地層処分基盤研究開発ユニット

Geological Isolation Research Unit

Geological Isolation Research and Development Directorate

June 2011

本レポートは独立行政法人日本原子力研究開発機構が不定期に発行する成果報告書です。
本レポートの入手並びに著作権利用に関するお問い合わせは、下記あてにお問い合わせ下さい。
なお、本レポートの全文は日本原子力研究開発機構ホームページ (<http://www.jaea.go.jp>)
より発信されています。

独立行政法人日本原子力研究開発機構 研究技術情報部 研究技術情報課
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根 2 番地 4
電話 029-282-6387, Fax 029-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

This report is issued irregularly by Japan Atomic Energy Agency
Inquiries about availability and/or copyright of this report should be addressed to
Intellectual Resources Section, Intellectual Resources Department,
Japan Atomic Energy Agency
2-4 Shirakata Shirane, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken 319-1195 Japan
Tel +81-29-282-6387, Fax +81-29-282-5920, E-mail:ird-support@jaea.go.jp

© Japan Atomic Energy Agency, 2011

緩衝材の流出/侵入特性(Ⅲ)

日本原子力研究開発機構
地層処分研究開発部門 地層処分基盤研究開発ユニット

松本 一浩[※], 藤田 朝雄

(2011年4月14日受理)

高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア埋設後においては、緩衝材の物理的安定性に影響を及ぼす事象の一つとして、緩衝材の流出/侵入現象が考えられている。

本報では、既往の研究において経験則に基づく侵入速さの指標として取扱ってきた \sqrt{t} 則の時間依存性について、長期間の侵入試験を行いその挙動を確認した。また、処分場の閉鎖性能の評価にあげられている課題を考慮し、埋め戻し材料仕様の侵入現象データについても一部取得した。

試験により得られた知見は、以下のとおりである。

- 1) ベントナイトの亀裂内への侵入は、試験条件によらず時間経過にともなって進展が収束した。
- 2) 亀裂内に侵入したベントナイトの平均的な乾燥密度は、試験条件によらず 0.4Mg/m^3 以下の乾燥密度となった。
- 3) 埋め戻し材料仕様の侵入試験において、Na型ベントナイトについては、亀裂開口幅の条件によっては顕著に侵入挙動が認められた。一方、Ca型ベントナイトについては侵入挙動が認められない結果となった。

以上の実験結果より、拡散現象として取扱ってきた侵入現象の長期予測評価結果は、保守的な評価手法であるものと推測される。今後は、侵入現象の収束挙動を評価手法に反映させた改良を行い、現象に即したモデル開発により侵入現象の長期予測評価の不確実性を低減させていく予定である。

また、埋め戻し材料を想定した試験結果に基づけば、侵入現象の対象となる地質環境条件下で、かつNa型ベントナイトを用いた材料仕様の場合には、閉鎖性能評価において埋め戻し材の性能低下を考慮する必要があることが示唆された。

核燃料サイクル工学研究所（駐在）：〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松 4-33

※ 技術開発協力員

Extrusion and Erosion of Bentonite Buffer (III)

Kazuhiro MATSUMOTO[※] and Tomoo FUJITA

Geological Isolation Research Unit
Geological Isolation Research and Development Directorate
Japan Atomic Energy Agency
Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki-ken

(Received April 14, 2011)

The extrusion of bentonite buffer is one of the important issues on the physical stability in the geological disposal of the high level radioactive waste. In this report, the long-term extrusion experiment of the bentonite buffer material to an imitation crack was carried out, and the behavior was observed. Moreover, in consideration of the evaluation subject of the closing performance of a disposal site, the extrusion experiment with material with a large sand combination rate was carried out.

Results are as follows;

- 1) Extrusion of the bentonite buffer material has completed by passage of time regardless of the experimental conditions.
- 2) Average dry density of bentonite extruded into a fracture was approximately below 0.4Mg/m^3 regardless of the experiment conditions.
- 3) Extrusion of Ca type bentonite was not observed in the extrusion experiments using backfill material. However regarding Na type bentonite, extrusion was notably observed depending on the conditions of crack openings.

From the above experimental result, the existing extrusion phenomenon model currently dealt with as a diffusion phenomenon is conjectured to be a conservative evaluation technique. The uncertainty of evaluation would be reduced by the model development in consideration of the realistic extrusion behavior observed in this study.

It was suggested that Na type bentonite can be the subject of evaluation of physical stability according to the environmental condition on which backfill is put.

Keywords : Bentonite, Buffer Material, Extrusion

※ Collaborating Engineer

目 次

1. はじめに	1
2. 緩衝材を対象とした長期侵入試験	2
2.1 目的	2
2.2 試験装置概要および方法	2
2.3 試験条件	3
2.4 材料物性	3
2.5 試験ケース	4
2.6 試験結果	5
2.6.1 侵入距離	5
2.6.2 侵入速さ	6
2.6.3 膨潤応力	7
2.6.4 試験後の試料状態	8
2.7 考察	12
3. 埋め戻し材料を対象とした侵入試験	13
3.1 目的	13
3.2 試験装置概要および方法	13
3.3 試験条件	13
3.4 材料物性	14
3.5 試験ケース	16
3.6 試験結果	17
3.6.1 侵入距離	17
3.6.2 侵入速さ	18
3.6.3 試験後の試料状態	19
3.7 考察	23
4. おわりに	24
参考文献	25

Contents

1. Introduction	1
2. Long-term extrusion test	2
2.1 Objective	2
2.2 Test equipment and method	2
2.3 Test condition	3
2.4 Material properties	3
2.5 Test case	4
2.6 Test result	5
2.6.1 Extrusion distance	5
2.6.2 Extrusion speed	6
2.6.3 Swelling pressure	7
2.6.4 Sample state	8
2.7 Consideration	12
3. Extrusion test of backfill	13
3.1 Objective	13
3.2 Test equipment and method	13
3.3 Test condition	13
3.4 Material properties	14
3.5 Test case	16
3.6 Test result	17
3.6.1 Extrusion distance	17
3.6.2 Extrusion speed	18
3.6.3 Sample state	19
3.7 Consideration	23
4. Conclusions	24
Reference	25

目 次

図 2.1	侵入試験装置概略図	2
図 2.2	ベントナイトの粒度分布	4
図 2.3	試験実施状況（左より，亀裂開口幅 1.5mm，1.0mm，0.5mm のケース）	5
図 2.4	試験実施状況の一例（亀裂開口幅 1.5mm）	5
図 2.5	時間と侵入距離の関係	6
図 2.6	経過時間 \sqrt{t} と侵入距離の関係	7
図 2.7	膨潤応力経時変化	8
図 2.8	試験終了時点における侵入状態	8
図 2.9	亀裂開口幅と解体時における供試体の乾燥密度との関係	9
図 2.10	亀裂開口幅と供試体密度の低減率の関係	10
図 2.11	亀裂開口幅と侵入域における平均乾燥密度との関係	11
図 3.1	侵入試験装置概略図	13
図 3.2	ベントナイトの粒度分布	15
図 3.3	混合砂の粒度分布	15
図 3.4	時間と侵入距離の関係	17
図 3.5	経過時間 \sqrt{t} と侵入距離の関係	18
図 3.6	Ca 型ベントナイト（クニボンド）	19
図 3.7	Na 型ベントナイト（クニゲル V1）	19
図 3.8	亀裂開口幅と解体時における供試体の乾燥密度との関係	20
図 3.9	亀裂開口幅と供試体密度の低減率の関係	21
図 3.10	亀裂開口幅と侵入域における平均乾燥密度との関係	22

表 目 次

表 2.1	長期侵入試験条件	3
表 2.2	ベントナイトの材料物性	3
表 2.3	緩衝材の侵入試験における試験ケースの取得状況	4
表 2.4	比例係数	7
表 2.5	試験後における供試体密度	9
表 2.6	試験後における供試体密度の低減率	10
表 2.7	侵入域における平均乾燥密度	11
表 3.1	埋め戻し材を想定した侵入試験条件	14
表 3.2	ベントナイトの材料物性	14
表 3.3	混合砂の材料物性	14
表 3.4	埋め戻し材料仕様の侵入試験における試験ケースの取得状況	16
表 3.5	比例係数	18
表 3.6	試験後における供試体密度	20
表 3.7	試験後における供試体密度の低減率	21
表 3.8	侵入域における平均乾燥密度	22

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分研究では、人工バリア設置後において、緩衝材の物理的安定性に影響を及ぼす事象の一つとして、緩衝材の流出／侵入現象が考えられている¹⁾。緩衝材の候補材料であるベントナイトは、吸水により膨潤する性質を有し、この膨潤性によって緩衝材と周辺岩盤との隙間や周辺岩盤亀裂等を充填する自己シール性が期待されている。一方で、周辺岩盤亀裂の頻度が高い場合や開口幅が大きい場合には、この膨潤性によって緩衝材の亀裂への侵入が持続し、その結果、緩衝材の密度が低下し、緩衝材として期待している諸機能が発揮できなくなることが懸念される。また、亀裂へ侵入したベントナイトがゲル化するとともに地下水によって浸食され、生成したベントナイトコロイドが核種を収着する場合には、核種の移行を助長してしまうことも考えられる。緩衝材の流出／侵入現象は、これらベントナイトの岩盤亀裂中への侵入と、亀裂へ侵入したベントナイトゲルの浸食による二つの現象によるものと考えられ、人工バリア設置後における緩衝材の物理的安定性や核種移行評価を行ううえで、これらの現象を定量的に把握する必要がある。また、緩衝材の流出／侵入現象は人工バリア設置後において、地下水の再冠水により発生する現象であり、長期にわたり継続するものと考えられる。したがって、本挙動評価においては、長期間にわたる時間スケールを対象とした評価が必要であり、地層処分システムの安全性を評価するうえで、緩衝材の流出／侵入現象における人工バリア性能への影響を評価するために現象に即したモデルを構築することが必要である。

本研究では、緩衝材の流出／侵入現象の現象理解ならびにモデル構築へ向けた基礎研究とし、降水系・海水系地下水を想定したデータの取得を実施してきた^{2),3),4),5)}。また、侵入現象のモデル化に関しては、Kanno et al⁶⁾が提案している固相拡散理論⁷⁾と粘性流体モデルを組み合わせた粘土粒子の固相拡散モデルの適用性について検討を試みている^{8),9),10),11),12),13)}。

本報では、既往の研究において経験則に基づく侵入速さの指標として取扱ってきた \sqrt{t} 則の時間依存性について、長期間の侵入試験を行いその適用性を確認した。また、これまでの研究では、人工バリア緩衝材を主なターゲットとして侵入現象の把握を進めてきた。しかしながら、近年の処分場の閉鎖性能に関する検討¹⁴⁾においては、「緩衝材の長期挙動に関するデータおよび評価手法を止水プラグおよび埋め戻し材の評価にも取り込んでいく必要がある」といった閉鎖性能の評価に関する課題があげられている。したがって、これらの課題も考慮し、埋め戻し材を想定した材料仕様での侵入試験を一部実施したので合わせて報告する。

2. 緩衝材を対象とした長期侵入試験

2.1 目的

既往の侵入試験においては、比較的に短期間における基礎的な侵入挙動の把握を実施してきた。これらの試験結果からは、ベントナイトの侵入挙動には、亀裂開口幅の依存性があること、侵入の起源となる供試体部の乾燥密度に依存して侵入速さに違いがあること、また、侵入距離が時間の平方根 \sqrt{t} に比例して大きくなるなどの知見が得られている^{2),3)}。しかしながら、これらの知見のうち、一部の試験においては、侵入距離が時間経過につれて、 \sqrt{t} 則から外れる傾向が認められている³⁾。侵入挙動の長期間における \sqrt{t} 則の時間依存性に関しては、これまでに得られていないため、実験により確認するとともに、それら最新の知見を適宜評価手法に反映し、実際の現象に即したモデル開発を行う必要がある。

ここでは、緩衝材の侵入挙動の長期間にわたる時間スケールでのベントナイトの模擬亀裂内への侵入進展の収束を確認することを目的として、試験を行った。

2.2 試験装置概要および方法

試験は、図 2.1 に示す装置を用いて行った。試験装置の概略構造は、上部および下部の透明アクリル板、亀裂開口幅を制御するための応力補強治具、ピストンなどから構成されている。上部および下部のアクリル板を重ね合わせることで、単一平板の模擬亀裂を設ける構造である。供試体は、アクリル板の中心部の孔に設置し、供試体の上部には金属焼結フィルタを介して空気孔を設けている。また、供試体の下部には、ピストンを介してロードセルを備え、ベントナイトの亀裂への侵入過程における膨潤応力を計測することができる。亀裂内への給水は給水口より行い、亀裂内を満水にして試験を開始する。ベントナイトの亀裂への侵入距離については、専用のアクリル製定規により適宜測定し、膨潤応力の測定は供試体への水の接触直後から開始する。

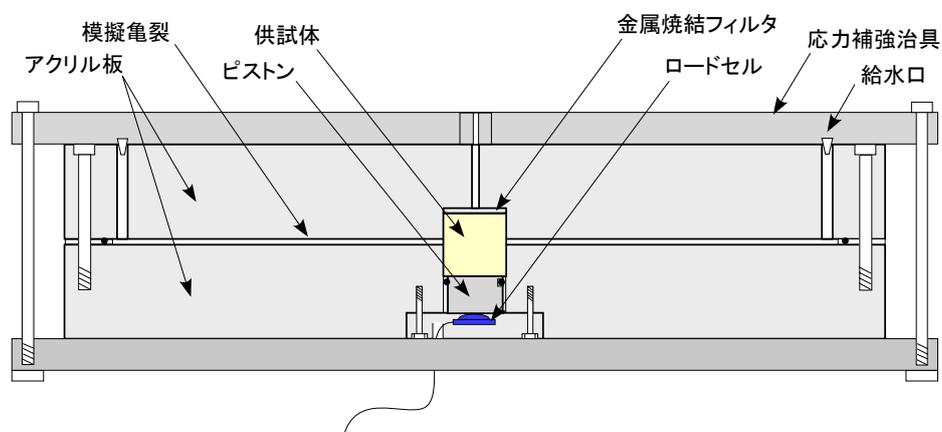


図 2.1 侵入試験装置概略図

2.3 試験条件

試験条件を表 2.1 に示す。本試験では、Na 型ベントナイト（クニゲル V1）を用い、亀裂開口幅をパラメータに侵入試験を実施した。試験水には、降水系地下水（蒸留水）を用い、給水口より亀裂内を満水とした後、静水条件下にて試験を行った。供試体寸法は $\phi 30 \times H30$ [mm]とし、引張万能試験機（オートグラフ AG-I）により、圧縮成型治具内において一軸圧縮成型したものをを用いた。

表 2.1 長期侵入試験条件

試料（ベントナイト）	Na 型ベントナイト（クニゲル V1）
供試体寸法 [mm]	$\phi 30 \times H30$
砂混合率 [%]	0
乾燥密度 [Mg/m ³]	1.6
初期含水比 [%]	10
亀裂幅 [mm]	0.5, 1.0, 1.5
試験温度 [°C]	室温（20）
試験水	蒸留水

2.4 材料物性

ベントナイトの材料物性を表 2.2 に、粒度分布を図 2.2 に示す。

表 2.2 ベントナイトの材料物性

物性項目	材料物性 Na 型ベントナイト (クニゲル V1)	備考
メチレンブルー吸着量 [mmol/100g]	87	ベントナイト(粉状)のメチレンブルー吸着量測定方法(JBAS-107-91)
モンモリロナイト 含有量 [%]	58	ベントナイト(粉状)のメチレンブルー吸着量測定方法(JBAS-107-91)
膨潤力 [ml/2g]	20	ベントナイト(粉状)の膨潤力測定方法(JBAS-104-77)
土粒子密度 [Mg/m ³]	2.633	土粒子の密度試験方法(JIS A 1202)

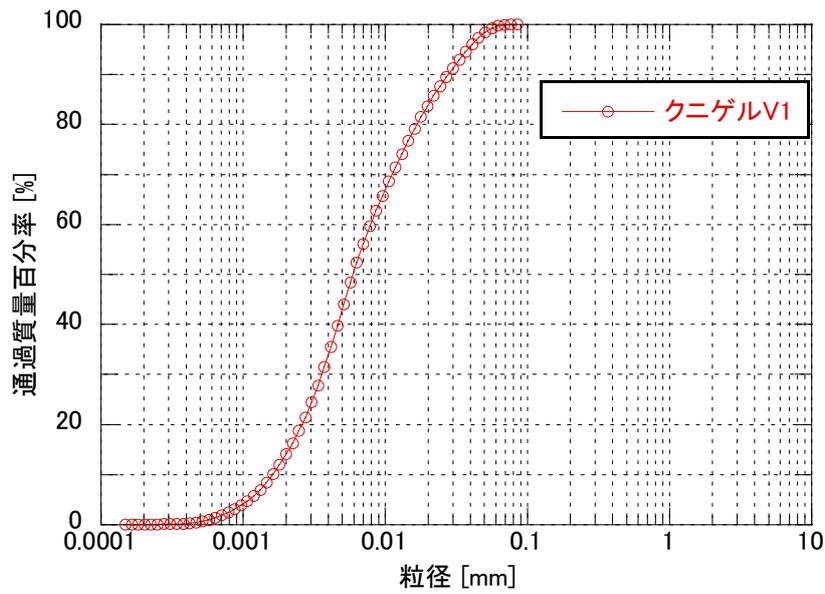


図 2.2 ベントナイトの粒度分布

2.5 試験ケース

本試験により取得した試験ケースならびに、既存の試験ケースの取得状況を表 2.3 に示す。

表 2.3 緩衝材の侵入試験における試験ケースの取得状況

		既存の侵入試験				長期侵入試験	
		降水系地下水 (蒸留水)		海水系地下水 (人工海水)		降水系地下水 (蒸留水)	
乾燥密度 [Mg/m ³]	亀裂開口幅 [mm]	砂混合率[%]		砂混合率[%]		砂混合率[%]	
		0	30	0	30	0	30
1.6	0.5		●			○	
	1.0		●			○	
	1.5		●		●	○	
1.8	0.5	●	●				
	1.0	●	●				
	1.5	●	●	●	●		

● : データ取得済み¹⁵⁾, ○ : 本報告

2.6 試験結果

試験の実施状況写真を図 2.3 に、試験実施中の一例を図 2.4 に示す。

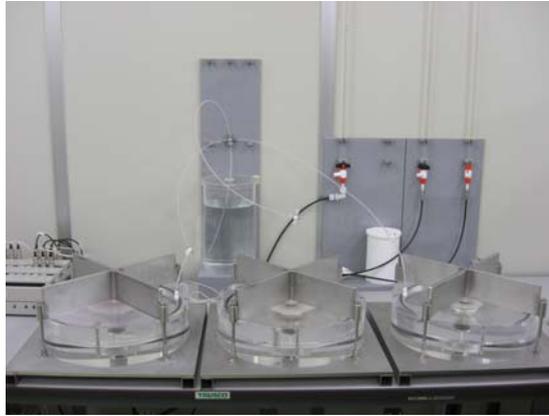


図 2.3 試験実施状況（左より，亀裂開口幅 1.5mm, 1.0mm, 0.5mm のケース）

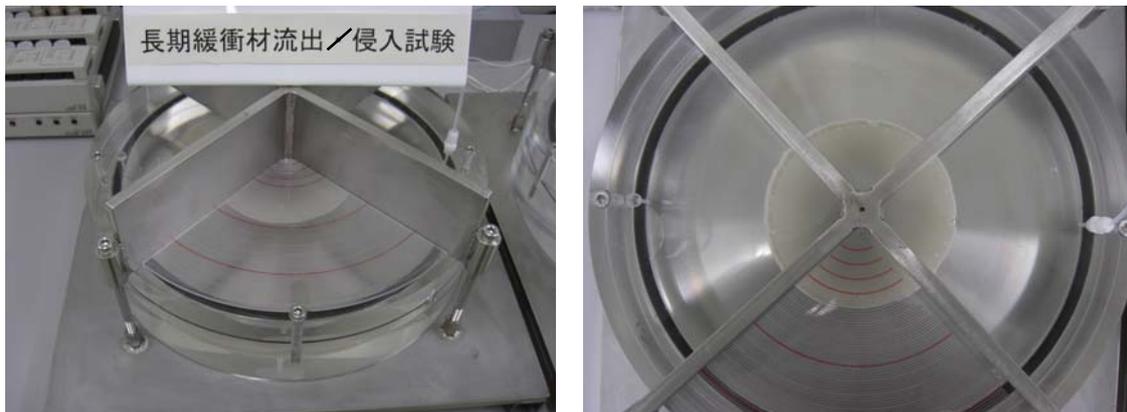


図 2.4 試験実施状況の一例(亀裂開口幅 1.5mm)

2.6.1 侵入距離

侵入距離の経時変化を図 2.5 に示す。図より，亀裂開口幅 0.5mm では試験開始から 50 日程度，亀裂開口幅 1.0mm では 200 日程度，亀裂開口幅 1.5mm は 300 日程度経過後にほぼ侵入距離の進展が収束した。また，侵入の収束後においても，微少な流動が継続する可能性も考えられたため，その後 1 年間にわたり侵入変位の計測を行ったが，顕著な変位は認められなかった。

これらの長期的な侵入試験の観察結果より，亀裂内へのベントナイトの侵入は，時間経過によって収束することが試験により確認された。

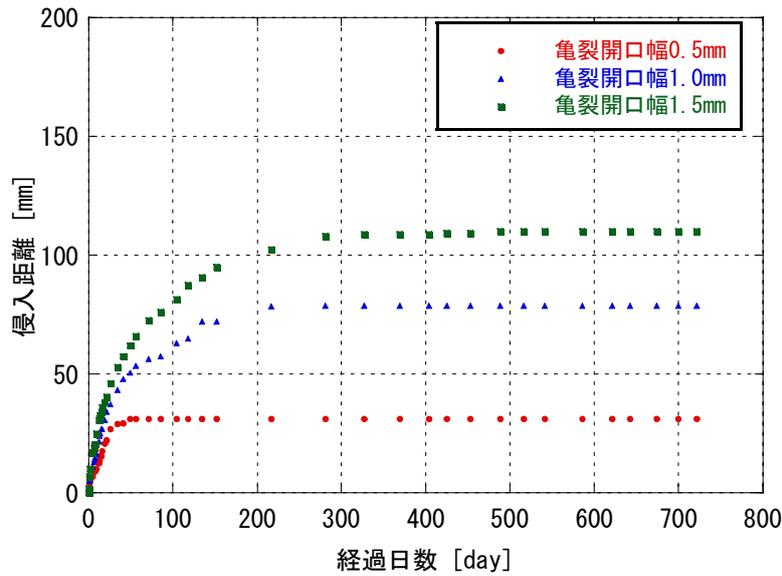


図 2.5 時間と侵入距離の関係

2.6.2 侵入速度

ベントナイトの亀裂への侵入は、これまでの試験結果より時間の平方根に比例し、(2.1) 式で表すことができる。

$$y = A(d, Bc)\sqrt{t} \quad (2.1)$$

ここで、 y は侵入距離[mm]、 t は時間[hr]、 A は亀裂幅 d [mm] とベントナイト含有比 Bc [-] に依存する比例係数[mm/hr^{1/2}]である。

既往の試験では²⁾、上記の式によって侵入速度の指標である比例係数を求めることにより、侵入速度の概略評価を行った。しかしながら、本試験結果のように長期的に侵入挙動を観察した場合には、時間経過によって侵入が収束することが確認されたことから、侵入挙動が \sqrt{t} 則に比例するのはベントナイトの初期の動きとして位置付けられる。経過時間 \sqrt{t} と侵入距離との関係を図 2.6 に示す。図からも明らかなように、侵入距離が \sqrt{t} 則から外れ収束しているが、従来と同様に \sqrt{t} 則に比例している区間のみで比例係数 A を求め、表 2.4 に参考値として示した。

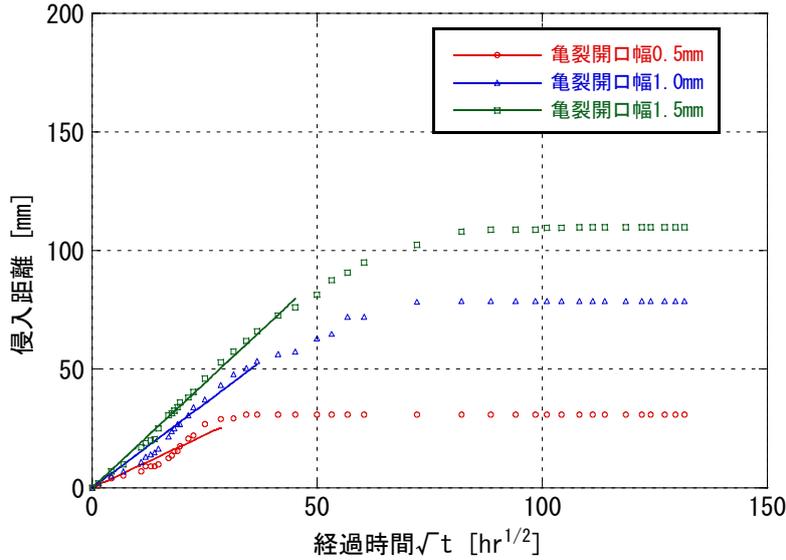


図 2.6 経過時間 \sqrt{t} と侵入距離の関係

表 2.4 比例係数

供試体仕様	亀裂幅 d [mm]	比例係数 A [mm/hr ^{1/2}]
Na 型ベントナイト-100% 乾燥密度 1.6Mg/m ³	0.5	0.89
Na 型ベントナイト-100% 乾燥密度 1.6Mg/m ³	1.0	1.42
Na 型ベントナイト-100% 乾燥密度 1.6Mg/m ³	1.5	1.76

2.6.3 膨潤応力

本試験では、ベントナイトの模擬亀裂内への侵入にともなう供試体の密度低下による応力状態を把握するために、供試体の下部よりピストンロッドを介し、ロードセルによって試験中の膨潤応力の測定を行った。測定は、供試体へ浸潤水が接触した直後より開始した。膨潤応力の経時変化を図 2.7 に示す。図より、本試験で亀裂開口幅が最も大きい条件である 1.5mm では、試験開始後 50 日程度には、膨潤応力が 0MPa になっていることが分かる。一方、亀裂開口幅 0.5mm では 1MPa 程度、亀裂開口幅 1.0mm では 0.5MPa 程度の膨潤応力を保持している。これら膨潤応力の経時変化からも分かるように、本試験条件で最も大きい亀裂開口幅 1.5mm では膨潤応力の低下が大きく、侵入にともなう供試体の密度低下が顕著に表れていると言える。また、亀裂開口幅が小さい程、残留膨潤応力が大きい。これはすなわち供試体部からのベントナイトの侵入量が小さいことを意味しており、残留膨潤応力からも侵入現象に亀裂開口幅の依存性があることが分かる。なお、亀裂開口幅 0.5mm と 1.0mm で、平衡膨潤応力に若干バラツキが認められるが、これは、外気温変化による室温の変化が主に影響しているものと推察される。

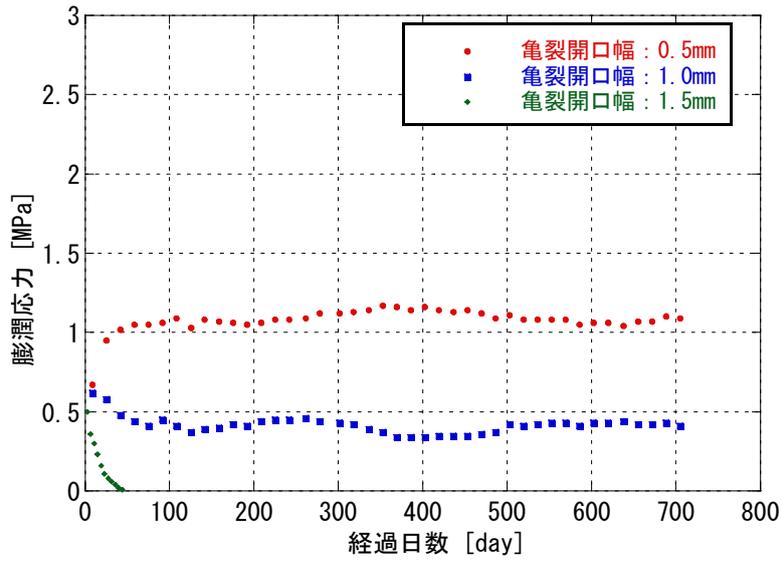
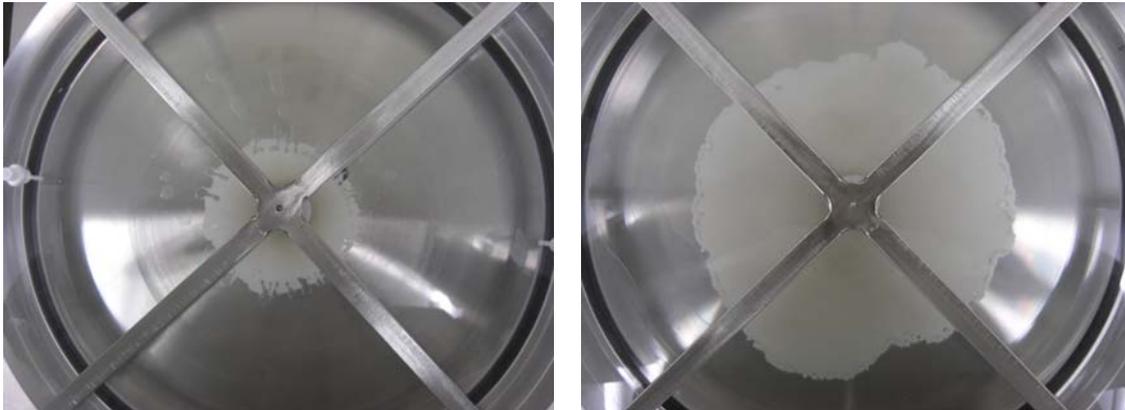


図 2.7 膨潤応力経時変化

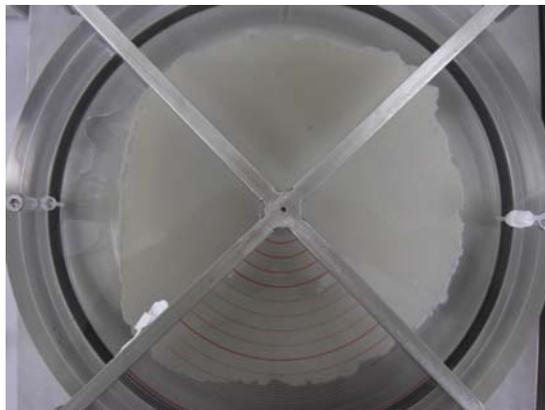
2.6.4 試験後の試料状態

試験は、侵入距離と膨潤応力が平衡であることを確認し、全てのケースにおいておおよそ 700 日で終了した。試験終了時点の最終的な侵入画像を図 2.8 にまとめて示す。



a. 亀裂開口幅 : 0.5mm

b. 亀裂開口幅 : 1.0mm



c. 亀裂開口幅 : 1.5mm

図 2.8 試験終了時点における侵入状態

(1)試験後の供試体密度

試験装置の解体時には、試験容器の構造上、上下の亚克力板を剥離する際に模擬亀裂内の侵入ベントナイト部では形状が破壊される。そのため、サンプリングの容易さの観点から、ここでは解体後における供試体の残留乾燥密度の測定を行い、乾燥密度の低減率を算出した。サンプリングした供試体の乾燥密度の測定結果を表 2.5 に示す。なお、表中の飽和度は 100%を上回っているが、これはベントナイト中の間隙水のほか、解体時に外部付着水がベントナイトに加わったことによるものと推測される。

次に、亀裂開口幅と解体時における供試体の乾燥密度との関係を図 2.9 に示す。図中には、初期乾燥密度（実線）と供試体の残留乾燥密度（プロット）を合わせて示している。図より、亀裂開口幅が大きいほど、供試体の乾燥密度の低下が顕著であることが分かる。次に、それぞれの亀裂開口幅条件ごとの乾燥密度の低減率を表 2.6 に示すとともに、亀裂開口幅と乾燥密度の低減率の関係より近似式を求め図 2.10 に示す。なお、近似式は亀裂開口幅が 0mm の時、乾燥密度の低減率 0%となる近似とした。

表 2.5 試験後における供試体密度

供試体仕様	亀裂開口幅 [mm]	試験後の乾燥密度 [Mg/m ³]	含水比 [%]	飽和度 [%]
Na 型ベントナイト-100% 乾燥密度 1.6Mg/m ³	0.5	1.55	29.87	108.77
Na 型ベントナイト-100% 乾燥密度 1.6Mg/m ³	1.0	1.40	37.99	110.34
Na 型ベントナイト-100% 乾燥密度 1.6Mg/m ³	1.5	0.93	72.28	102.18

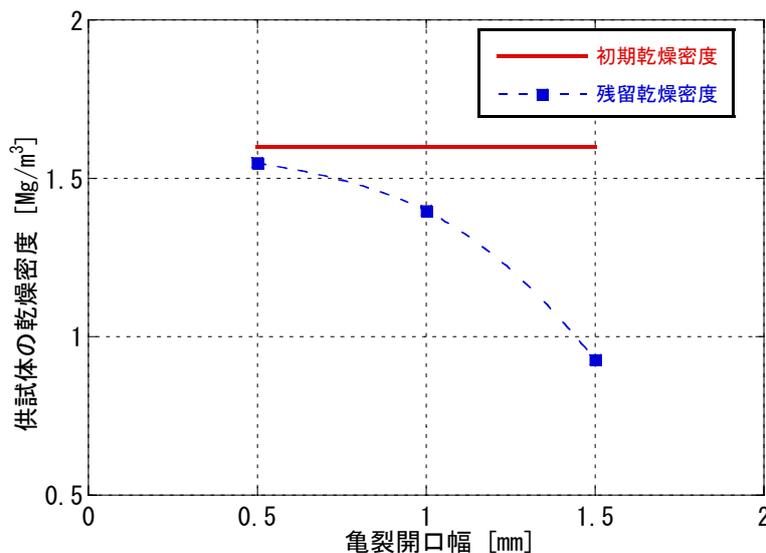


図 2.9 亀裂開口幅と解体時における供試体の乾燥密度との関係

表 2.6 試験後における供試体密度の低減率

供試体仕様	亀裂開口幅 [mm]	初期乾燥密度 [Mg/m ³]	試験後の乾燥密度 [Mg/m ³]	乾燥密度の低減率 [%]
Na 型ベントナイト-100% 乾燥密度 1.6Mg/m ³	0.5	1.6	1.55	3.1
Na 型ベントナイト-100% 乾燥密度 1.6Mg/m ³	1.0	1.6	1.40	12.5
Na 型ベントナイト-100% 乾燥密度 1.6Mg/m ³	1.5	1.6	0.93	41.9

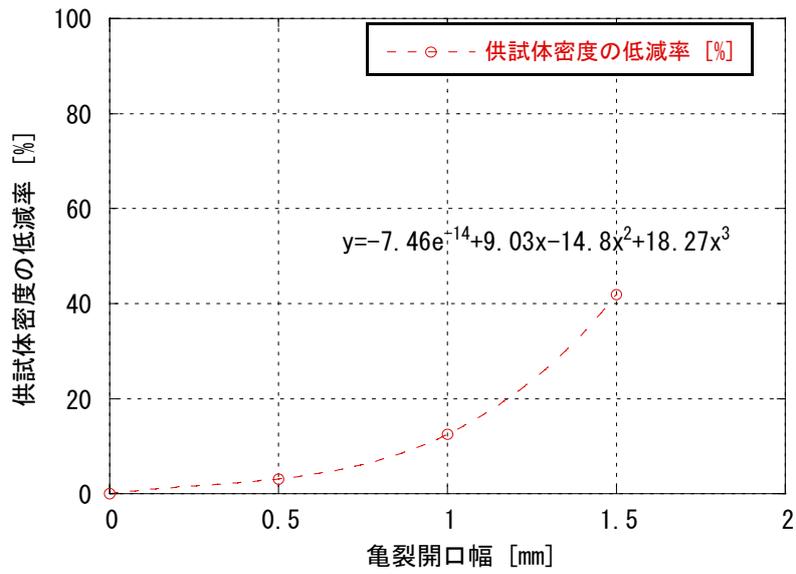


図 2.10 亀裂開口幅と供試体密度の低減率の関係

(2)侵入域における平均乾燥密度

表 2.5 の試験後の供試体密度と初期密度ならびに、図 2.5 の最終的な侵入距離から求められる侵入域の体積より、侵入域における平均乾燥密度を求め表 2.7 に示す。ここで、侵入域の体積算出において侵入形状は円形、侵入ベントナイト先端部における界面は垂直形状であるものと仮定した。図 2.11 に本結果と既存の測定結果も合わせた侵入域の平均乾燥密度を示す。図より、侵入域における平均乾燥密度は、試験条件の違いなどによりバラツキがあるものの、 $0.4\text{Mg/m}^3 \sim 0.1\text{Mg/m}^3$ 程度に分布する傾向を示した。亀裂内における侵入ベントナイトは、供試体と亀裂との界面から侵入先端部に向かい密度が小さくなるとともに、時間経過にともない過渡的に密度勾配が形成されることから、侵入距離の変位収束時の亀裂内平均密度を求める。平均乾燥密度の算出には、侵入形状や侵入先端部界面の形状を仮定していることにより誤差を含んでいることが考えられるが、定性的には亀裂内の侵入ベントナイトの平均密度は 0.4Mg/m^3 程度以下に形成されるものと推測される。以上、ベントナイトの亀裂侵入域における平均乾燥密度に関して整理したが、本結果は、限られたケースでの試験結果の一知見に過ぎないことに留意しておく必要がある。

表 2.7 侵入域における平均乾燥密度

供試体仕様	亀裂開口幅 [mm]	侵入域の体積 [cm ³]	侵入域の乾燥密度 [Mg/m ³]	侵入質量 [g]
Na 型ベントナイト-100% 乾燥密度 1.6Mg/m^3	0.5	2.97	0.37	1.09
Na 型ベントナイト-100% 乾燥密度 1.6Mg/m^3	1.0	26.90	0.16	4.29
Na 型ベントナイト-100% 乾燥密度 1.6Mg/m^3	1.5	72.57	0.20	14.27

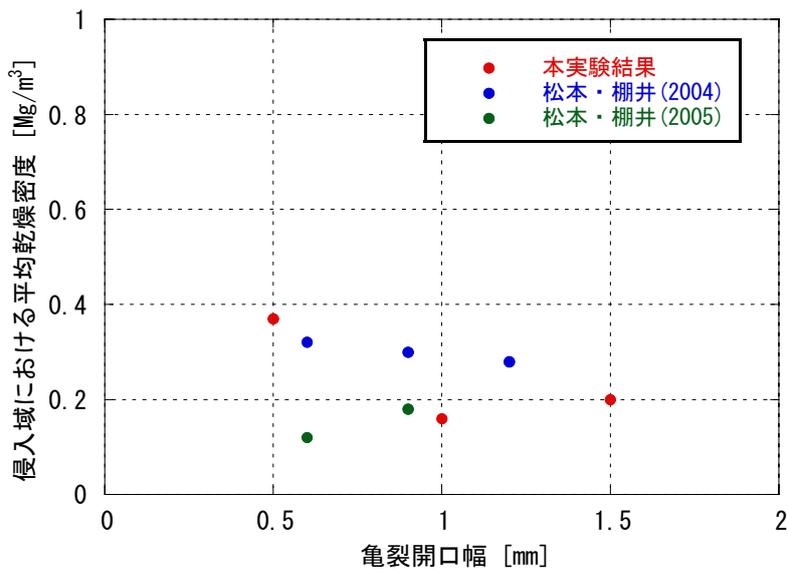


図 2.11 亀裂開口幅と侵入域における平均乾燥密度との関係

2.7 考察

本試験によって把握された侵入現象の収束メカニズムに関して考察する。

緩衝材の亀裂内への侵入現象はベントナイトへの水の浸潤にともなう体積膨張（膨潤）が駆動力として考えられる。侵入現象のドライビングフォースが膨潤であれば、供試体部と亀裂部（侵入部）におけるベントナイトの応力バランスによる力学的な観点により、侵入現象が時間経過によって抑制される要因は以下のように考察される。

- 1) 侵入現象のソースである供試体の密度低下による膨潤圧（押し出し圧）の低下
- 2) 亀裂内にベントナイトが充填されることにより、それらが抵抗となり供試体からの侵入を抑制する効果

これら 1) , 2) は、亀裂内のベントナイトの「目詰まりによる抵抗」 \geq 「供試体部の膨潤圧」と解釈でき、これにより侵入を収束させているものと考えられる。

今後、供試体部と亀裂部における力学的な相関性の検討を行うなどして、侵入現象の収束メカニズムを解明する必要がある。例えば、供試体部や亀裂部の密度分布のデータを取得し、両者の膨潤応力の相関を得ることや、亀裂内におけるベントナイトゲルのせん断抵抗を評価することなどが考えられる。

実際の処分環境下において、本試験結果と同様に岩盤亀裂内への侵入が時間経過にともなって収束していく場合には、既存の拡散モデルによる侵入現象の長期予測評価は保守的であるものと考えられる。ただし、室内試験と実際の場合に置かれる緩衝材にはスケール差があること、また、実際の処分環境では地下水流れがあるのに対し、室内試験では静水場の条件であることに留意しておく必要がある。処分環境下において、地下水流れによる浸食現象が顕著に生じる場合には、侵入部のベントナイト粒子が持ち去られることにより、例えば侵入部と緩衝材における力学的な平衡バランスが崩れ、侵入現象の再発と浸食現象が繰り返し起こる可能性もある。したがって、より詳細な評価を行う場合には、浸食現象が侵入現象に及ぼす影響程度について確認しておく必要がある。

以上、人工バリアの合理的な設計の観点、また、前述したように浸食現象が侵入現象に及ぼす影響も加味しつつ、これらの挙動を考慮したモデルの改良を今後進めることが課題として挙げられる。

3. 埋め戻し材料を対象とした侵入試験

3.1 目的

閉鎖設計においては、埋め戻し材によって処分場閉鎖後の坑道空間を充填することにより、坑道が卓越した水みちにならないよう低透水性を担保することや、埋め戻し材にある程度の空間に対する自己シール性を備えることで、閉鎖後の坑道が核種移行の支配的な経路になることを回避することなどが要件とされている¹⁴⁾。

これまでに、埋め戻し材と接する坑道壁面における岩盤亀裂、または支保の劣化などによる割れ目などへの埋め戻し材の侵入現象に関するデータは得られていない。したがって、埋め戻し材料の仕様を想定し、ベントナイトに対する砂の配合割合を大きいものとした条件での侵入試験を実施し、閉鎖性能低下に資する一知見としてデータを取得した。

3.2 試験装置概要および方法

試験は、図 3.1 に示す容器を用いて行った。試験容器の概略構造は、上部および下部の透明アクリル板から構成されている。上部および下部のアクリル板を重ね合わせることで、単一平板の模擬亀裂を設ける構造である。供試体は、アクリル板の中心部の孔に設置し、供試体の上部にはプラスチックフィルタを介して空気孔を設けている。亀裂内への給水は給水口より行い、亀裂内を満水にして試験を開始する。ベントナイトの亀裂内への侵入距離については、定規により適宜測定する。

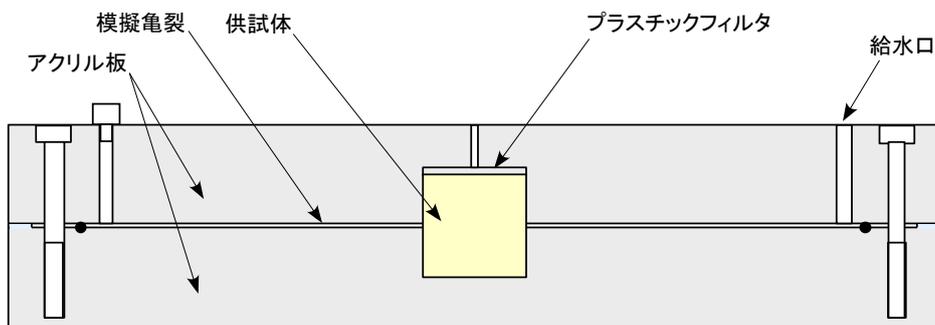


図 3.1 侵入試験装置概略図

3.3 試験条件

試験条件を表 3.1 に示す。本試験では、Na 型ベントナイト（クニゲル V1）と Ca 型ベントナイト（クニボンド）を用いた。また、埋め戻し材の仕様を想定し、ここでは任意にベントナイトに砂を 75%混合した供試体（以下、ケイ砂混合体という）を用いた。試験水には、降水系地下水（蒸留水）を用い、給水口より亀裂内を満水とした後、静水条件下にて試験を行った。供試体寸法は $\phi 20 \times H20$, $\phi 30 \times H30$, $\phi 40 \times H40$ [mm] とし、引張万能試験機（オートグラフ AG-I）によ

り、圧縮成型治具内において一軸圧縮成型したものをを用いた。また、乾燥密度はベントナイトと砂との締固め密度の関係¹⁶⁾を参考とし、最大乾燥密度を設定した。

表 3.1 埋め戻し材を想定した侵入試験条件

試料	Na 型ベントナイト(クニゲル V1)	Ca 型ベントナイト(クニボンド)
供試体寸法 [mm]	φ 20×H20, φ 30×H30	φ 40×H40
砂混合率 [%]	75%	75%
乾燥密度 [Mg/m ³]	2.0	1.9
初期含水比 [%]	10.05	13.59
亀裂幅 [mm]	0.9, 1.0, 1.5	1.2
試験温度 [°C]	室温 (20)	室温 (20)
試験水	蒸留水	蒸留水

3.4 材料物性

ベントナイトの材料物性を表 3.2 に、混合砂の材料物性を表 3.3 に示す。また、ベントナイトの粒度分布を図 3.2 に、混合砂の粒度分布を図 3.3 に示す。

表 3.2 ベントナイトの材料物性

物性項目	材料物性 Na 型ベントナイト (クニゲル V1)	材料物性 Ca 型ベントナイト (クニボンド)	備考
メチレンブルー吸着量 [mmol/100g]	87	120	ベントナイト(粉状)のメチレンブルー吸着量測定方法(JBAS-107-91)
モンモリロナイト 含有量 [%]	58	80	ベントナイト(粉状)のメチレンブルー吸着量測定方法(JBAS-107-91)
膨潤力 [ml/2g]	20	7.0	ベントナイト(粉状)の膨潤力測定方法(JBAS-104-77)
土粒子密度 [Mg/m ³]	2.633	2.624	土粒子の密度試験方法(JIS A 1202)

表 3.3 混合砂の材料物性

物性項目	材料物性	備考
土粒子密度 [Mg/m ³]	2.785	土粒子の密度試験方法(JIS A 1202)
粒度 [mm]	最大粒径：4.750 60%粒径：0.494 50%粒径：0.363 30%粒径：0.211 10%粒径：0.128	土の粒度試験方法(JIS A 1204)

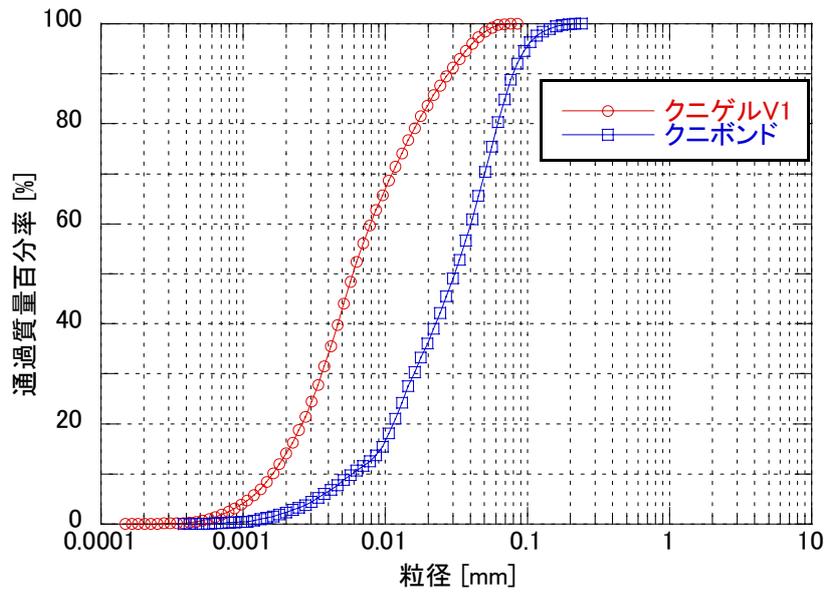


図 3.2 ベントナイトの粒度分布

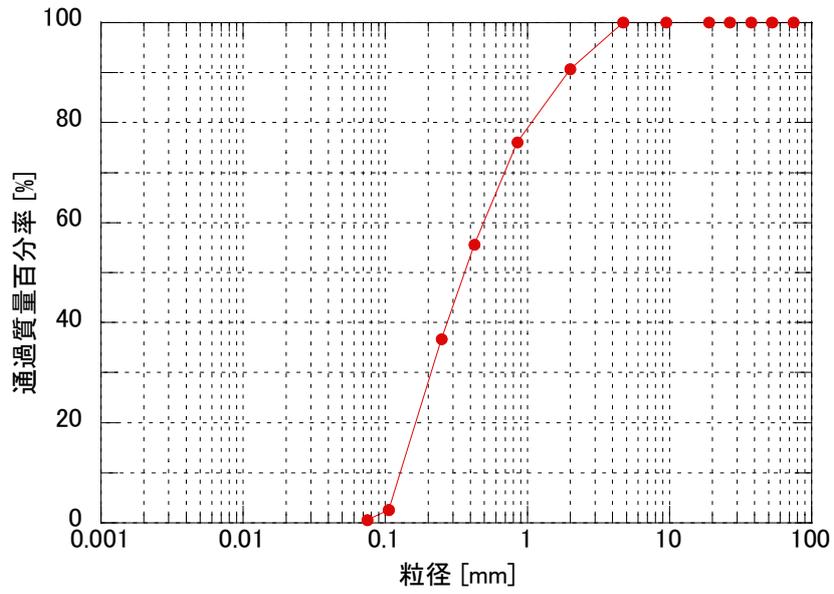


図 3.3 混合砂の粒度分布

3.5 試験ケース

本試験により取得した試験ケースを表 3.4 に示す。

表 3.4 埋め戻し材料仕様の侵入試験における試験ケースの取得状況

		埋め戻し材料仕様における侵入試験		
		降水系地下水（蒸留水）		
ベントナイト	亀裂開口幅 [mm]	ケイ砂混合率[%]		
		65	75	85
Na 型ベントナイト	0.9		○	
	1.0		○	
	1.2			
	1.5		○	
Ca 型ベントナイト	0.9			
	1.0			
	1.2		○	
	1.5			

○：本報告

3.6 試験結果

3.6.1 侵入距離

侵入距離の経時変化を図 3.4 に示す。図より、Na 型ベントナイトは、水の浸潤直後より侵入距離が大きくなっている。一方、Ca 型ベントナイトは、長期間の観察においても殆ど侵入が認められないことから、侵入にともなう密度低下への影響は極めて小さいものと考えられる。また、Na 型ベントナイトにおける侵入は、既往の試験結果と同様に、亀裂開口幅が大きいほど侵入距離も大きくなった。亀裂開口幅 0.9mm と 1.0mm は、亀裂開口幅の条件に近いことから、最終的に侵入距離は同程度となった。なお、亀裂開口幅 0.9mm の侵入距離が試験開始後 10~40 日間で一旦平衡になっているが、その後、さらに侵入距離が大きくなるという特異的な傾向がみられた。これまでに、このような傾向は認められておらず、混合砂の配合量が多いことを考慮すれば、一時的に亀裂開口部への混合砂の詰まりが生じ、それらが時間経過にともなうベントナイトの流動により徐々に外れるなどし、再侵入が発生したものと推測される。

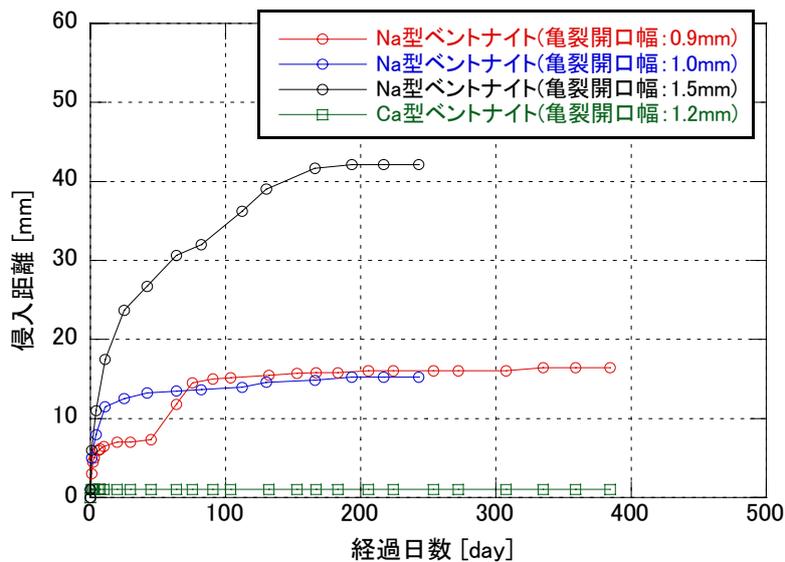


図 3.4 時間と侵入距離の関係

3.6.2 侵入速さ

侵入速さに関しては、2.6.2 項と同様な手法により算出した。経過時間 \sqrt{t} と侵入距離の関係を図 3.5 に示す。長期侵入試験の結果と同様に、侵入距離が \sqrt{t} 則から外れ収束しているが、従来と同様に \sqrt{t} 則に比例している区間のみで比例係数 A を求め、表 3.5 に参考値として示した。

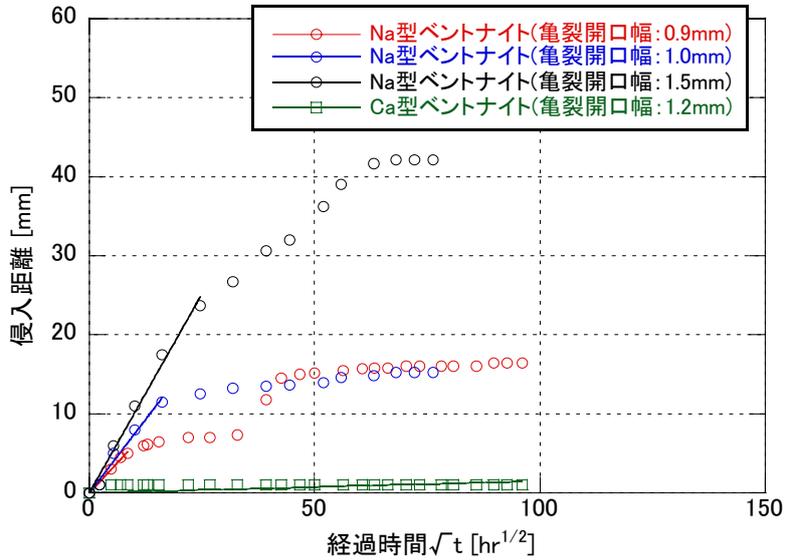


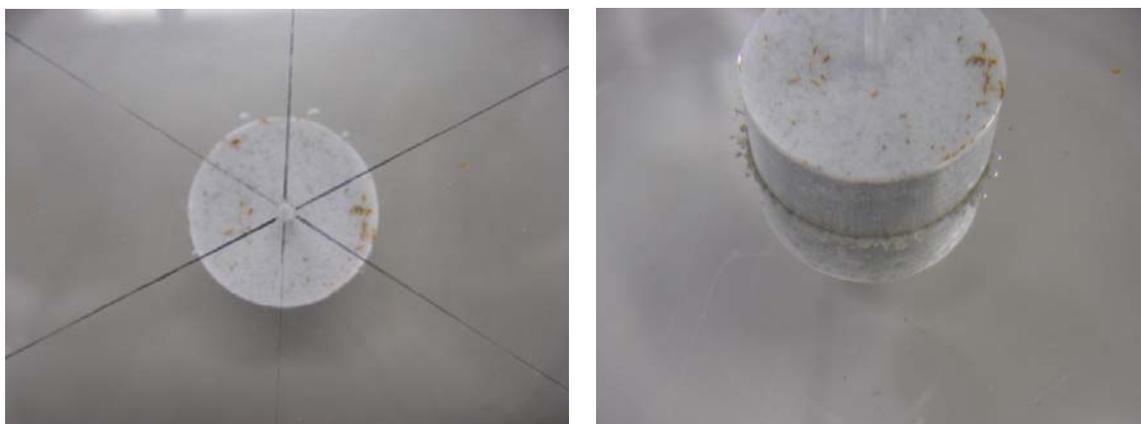
図 3.5 経過時間 \sqrt{t} と侵入距離の関係

表 3.5 比例係数

供試体仕様	亀裂幅 d [mm]	比例係数 A [mm/hr ^{1/2}]
Na 型ベントナイト・25% 混合砂・75% 乾燥密度 2.0Mg/m ³	0.9	0.61
Na 型ベントナイト・25% 混合砂・75% 乾燥密度 2.0Mg/m ³	1.0	0.74
Na 型ベントナイト・25% 混合砂・75% 乾燥密度 2.0Mg/m ³	1.5	1.00
Ca 型ベントナイト・25% 混合砂・75% 乾燥密度 1.9Mg/m ³	1.2	0.01

3.6.3 試験後の試料状態

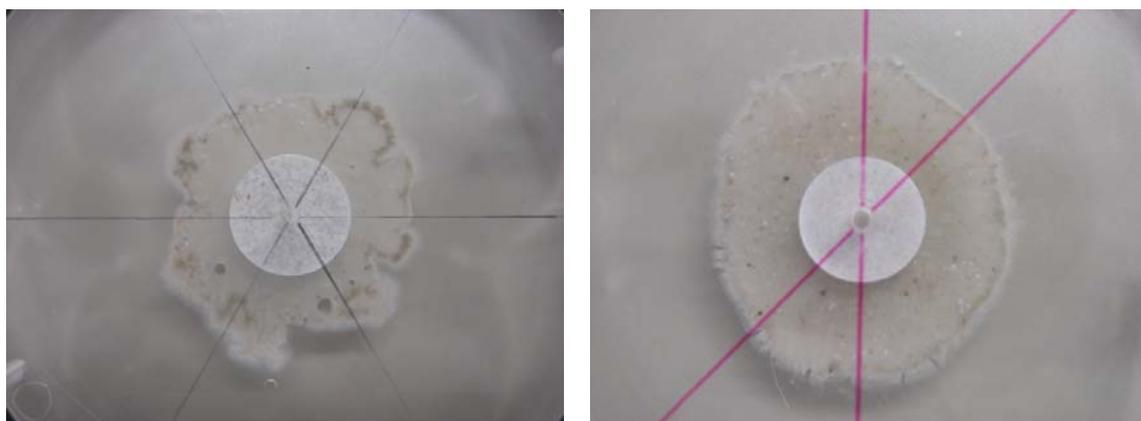
試験は、侵入距離が平衡となったことを確認し終了した。試験終了時点の最終的な侵入画像を図 3.6 (Ca 型ベントナイト) および図 3.7 (Na 型ベントナイト) にまとめて示す。



上面図

斜面図

図 3.6 Ca 型ベントナイト (クニボンド)



a. 亀裂開口幅 0.9mm

b. 亀裂開口幅 1.0mm



c. 亀裂開口幅 1.5mm

図 3.7 Na 型ベントナイト (クニゲル V1)

(1) 試験後の供試体密度

2.6.4 項と同様に解体後における供試体の残留密度の測定を行い、乾燥密度の低減率を算出した。サンプリングした供試体の乾燥密度の測定結果を表 3.6 に示す。また、亀裂開口幅と解体時における供試体の乾燥密度との関係を図 3.8 に示す。図中には、初期乾燥密度（実線）と供試体の残留乾燥密度（プロット）を合わせて示している。図より、亀裂開口幅が大きいほど、供試体の乾燥密度の低下が顕著であることが分かる。次に、それぞれの亀裂開口幅条件ごとの乾燥密度の低減率を表 3.7 に示すとともに、Na 型ベントナイトのデータを対象に亀裂開口幅と乾燥密度の低減率の関係から近似式を求め図 3.9 に示す。

表 3.6 試験後における供試体密度

供試体仕様	亀裂開口幅 [mm]	試験後の乾燥密度 [Mg/m ³]	含水比 [%]	飽和度 [%]
Na 型ベントナイト・25% 混合砂・75% 乾燥密度 2.0Mg/m ³	0.9	1.97	15.05	105.84
Na 型ベントナイト・25% 混合砂・75% 乾燥密度 2.0Mg/m ³	1.0	1.93	16.79	109.00
Na 型ベントナイト・25% 混合砂・75% 乾燥密度 2.0Mg/m ³	1.5	1.25	50.32	115.51
Ca 型ベントナイト・25% 混合砂・75% 乾燥密度 1.9Mg/m ³	1.2	1.90	15.45	95.25

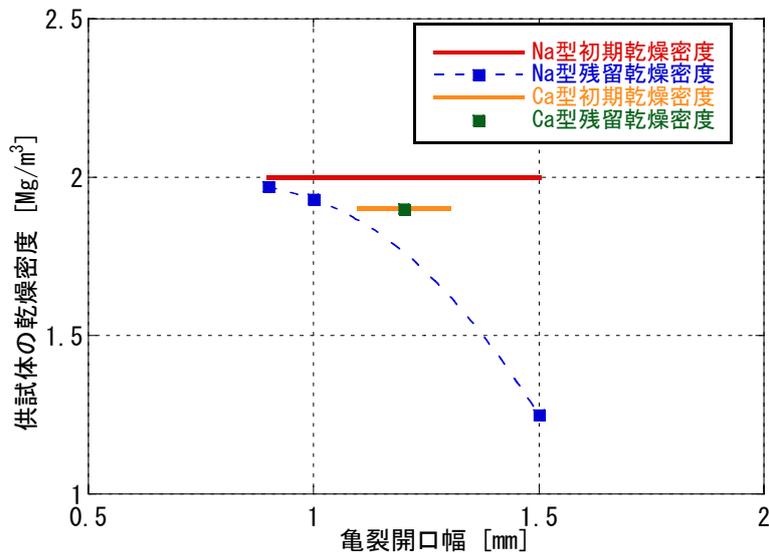


図 3.8 亀裂開口幅と解体時における供試体の乾燥密度との関係

表 3.7 試験後における供試体密度の低減率

供試体仕様	亀裂開口幅 [mm]	初期乾燥密度 [Mg/m ³]	試験後の乾燥密度 [Mg/m ³]	乾燥密度の低減率 [%]
Na型ベントナイト-25% 混合砂-75% 乾燥密度 2.0Mg/m ³	0.9	2.0	1.97	1.5
Na型ベントナイト-25% 混合砂-75% 乾燥密度 2.0Mg/m ³	1.0	2.0	1.93	3.5
Na型ベントナイト-25% 混合砂-75% 乾燥密度 2.0Mg/m ³	1.5	2.0	1.25	37.5
Ca型ベントナイト-25% 混合砂-75% 乾燥密度 1.9Mg/m ³	1.2	1.9	1.90	0

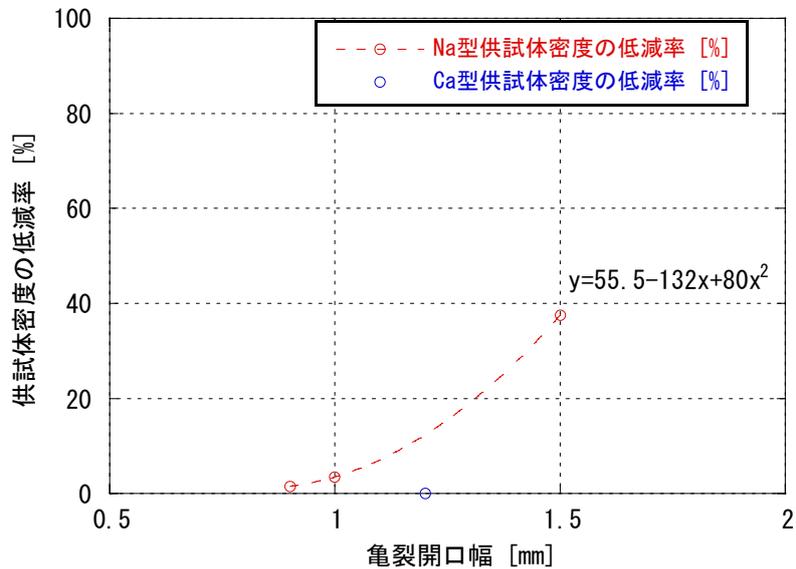


図 3.9 亀裂開口幅と供試体密度の低減率の関係

(2)侵入域における平均乾燥密度

表 3.6 の試験後の供試体密度と初期密度ならびに、図 3.4 の最終的な侵入距離から求められる侵入域の体積より、侵入域における平均乾燥密度を求め表 3.8 に示す。ここで、侵入域の体積算出において侵入形状は円形、侵入ベントナイト先端部における界面は垂直形状であるものと仮定した。なお、表中における Ca 型ベントナイトの侵入域の乾燥密度と侵入質量については、計算上負となるが、表 3.7 の試験後における供試体の乾燥密度に低下が認められないため、ゼロとして扱った。図 3.10 に侵入域の平均乾燥密度を示す。図より、侵入域における平均乾燥密度は、0.4Mg/m³~0.2Mg/m³程度に分布する傾向を示しており、2.6.4 項の長期侵入試験での結果と同様、定性的には 0.4Mg/m³程度以下に分布した。これらのことから、侵入域における平均的な乾燥密度は、緩衝材の材料仕様および埋め戻し材の材料仕様といった試料条件に係わらず、同程度の密

度を形成する可能性がある。ここでは、簡略的な方法によって侵入域の密度について概略把握したが、非破壊検査技術を適用することにより、侵入形状を破壊することなく、より詳細なデータを得ることが可能である。

表 3.8 侵入域における平均乾燥密度

供試体仕様	亀裂開口幅 [mm]	侵入域の体積 [cm ³]	侵入域の乾燥密度 [Mg/m ³]	侵入質量 [g]
Na 型ベントナイト-25% 混合砂-75% 乾燥密度 2.0Mg/m ³	0.9	2.15	0.26	0.55
Na 型ベントナイト-25% 混合砂-75% 乾燥密度 2.0Mg/m ³	1.0	1.69	0.25	0.42
Na 型ベントナイト-25% 混合砂-75% 乾燥密度 2.0Mg/m ³	1.5	12.34	0.38	4.72
Ca 型ベントナイト-25% 混合砂-75% 乾燥密度 1.9Mg/m ³	1.2	0.15	0 (-0.23)	0 (-0.04)

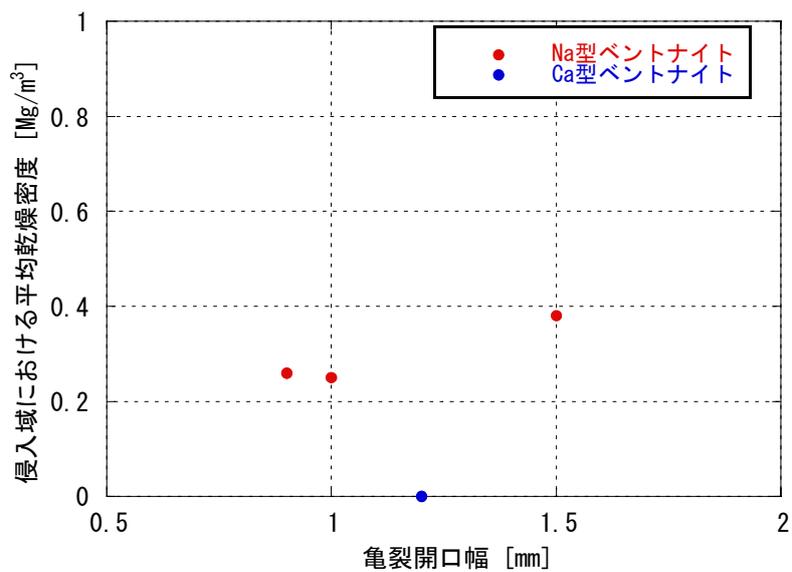


図 3.10 亀裂開口幅と侵入域における平均乾燥密度との関係

3.7 考察

本試験によって把握された埋め戻し材料仕様の侵入挙動について考察する。

Ca型ベントナイトでは、若干の侵入が観察されたものの、侵入現象とは言い難く、亀裂開口部に接している供試体の壁面より、ベントナイトまたは混合砂が水と接触したことにより剥離したような状態であった。一方、Na型ベントナイトは既往の試験結果と同様に亀裂開口幅に依存する侵入挙動を示した。Ca型とNa型ベントナイトを用いた一次元の膨潤変形量を測定した報告¹⁷⁾によれば、Ca型ベントナイトはNa型ベントナイトよりも膨潤率が小さい。したがって、本試験結果でも観察されたようにCa型ベントナイトがNa型ベントナイトと比較して、顕著に侵入が発生していないのは傾向として妥当である。また、Na型ベントナイトの試験では、亀裂内における全体形状または侵入先端部に歪な形状が認められた。本試験は砂配合率が多いため、供試体中のベントナイトと砂との配合のバラツキによって、このような形状が形成されたものと推測される。

次に、混合砂の粒径分布より、本試験において亀裂開口幅を通過できない粒子の割合を試算した。その結果、Ca型ベントナイトの亀裂開口幅1.2mmの試験でおよそ20%、Na型ベントナイトの亀裂開口幅1.5mmで15%、1.0mmで22%、0.9mmで23%と計算される。これら全ての条件でも、供試体中に占める混合砂の15～23%程度が亀裂内に侵入できない割合であり、個別に比較しても大差はない。これらを考慮した場合、本試験における侵入距離の違いは、亀裂開口幅の条件における影響が大きいものと推測される。また、本試験では、砂配合率を同一条件により行ったが、供試体への砂配合率の違いにおける侵入挙動への影響に関しては、次のようなことが考えられる。

- 1) 100%ベントナイト材料の場合には、亀裂開口幅に対して、ベントナイト粒子径が十分に小さいことから、侵入の妨げがなく顕著に侵入が発生する。
- 2) 70%ベントナイト材料：30%混合砂材料の場合には、混合砂が若干混合されるものの、ベントナイトの流動を大きく妨げるほどではない。
- 3) 25%ベントナイト材料：75%混合砂材料の場合には、ベントナイト量に対して混合砂量が多く、流動性があるのは主としてベントナイトであることから、不動（ここで不動とは、砂自体はベントナイトが流動することにより移動をともなうが、砂自体は不動であることをいう）である混合砂がベントナイトの侵入を妨げる。

これらは、砂混合率のみに着目した侵入現象への影響であるが、これに加え、亀裂開口幅や試料密度、水質などが現象に起因する。

以上、Na型ベントナイトの実験は、有効粘土密度とすると 1.1Mg/m^3 程度であったが、亀裂開口幅の条件によっては顕著に侵入挙動が認められることから、埋め戻し材料が置かれる環境条件によっては、物理的安定性の評価対象になりえることが示唆された。

4. おわりに

高レベル放射性廃棄物の地層処分における人工バリア埋設後においては、緩衝材の物理的安定性に影響を及ぼす事象の一つとして、緩衝材の流出／侵入現象が考えられている。

本報では、既往の研究において経験則に基づく侵入速さの指標として取扱ってきた \sqrt{t} 則の時間依存性について、長期間の侵入試験を行いその挙動を確認した。また、処分場の閉鎖性能の評価にあげられている課題を考慮し、埋め戻し材料仕様の侵入現象データについても一部取得した。

試験により得られた知見は、以下のとおりである。

緩衝材を対象とした長期侵入試験

- 1) ベントナイトの亀裂内への侵入現象は、時間経過にともなって進展が収束する事を確認した。また、侵入が収束に至る時間は亀裂開口幅や試料条件に依存するものの、試験ケースによらず侵入挙動が最終的に収束することから、侵入現象は永久には継続しないことが示唆された。
- 2) 亀裂内に侵入したベントナイトの平均的な乾燥密度は、試験条件によっても違いがあるものの、 0.4Mg/m^3 以下の乾燥密度となることを把握した。

埋め戻し材料を対象とした侵入試験

- 3) 埋め戻し材料仕様の侵入試験において、Na型ベントナイトは、亀裂開口幅の条件によっては顕著に侵入挙動が認められることから、埋め戻し材料が置かれる環境条件によっては、物理的安定性の評価対象になりえることが示唆された。一方、本試験条件下ではCa型ベントナイトの侵入現象は認められない結果となった。

以上の試験結果より、拡散現象として取扱っている既存の侵入現象モデルは、保守的な評価手法であるものと推測された。しかしながら、地下水による浸食現象の影響を含めた検討はできておらず、今後その影響について確認する予定である。

また、埋め戻し材料を想定した試験結果に基づけば、坑道に支保を用いず、坑道壁面に岩盤割れ目が存在する場合には、閉鎖性能の評価において埋め戻し材の性能低下を考慮しておく必要があることが示唆された。したがって、今後データの拡充を適宜図っていく予定である。

これらの結果は、緩衝材の流出／侵入現象の基礎データとして位置付けられるものであり、本来複雑である岩盤亀裂内への緩衝材の侵入現象をより詳細に把握していくためには、処分環境を考慮したデータの取得が必要である。今後は、より実際の場に即した挙動の把握と、それらを反映したより実際の挙動を表現可能な侵入現象モデルの改良を行っていく必要がある。

参考文献

- 1) 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”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 99-022(1999).
- 2) 菅野毅，松本一浩：“ベントナイト緩衝材の流出特性の評価(I)”，動力炉・核燃料開発事業団，PNC TN8410 97-313 (1997).
- 3) 松本一浩，棚井憲治：“ベントナイト緩衝材の流出特性の評価(II)”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN8400 2003-006(2003).
- 4) 松本一浩，棚井憲治：“緩衝材の流出／侵入特性”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN8400 2003-035(2004).
- 5) 松本一浩，棚井憲治：“緩衝材の流出／侵入特性(II)－幌延地下水(HDB-6号孔)を用いた緩衝材の侵入特性評価－”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN8400 2004-026(2005).
- 6) Kanno, T. and Wakamatsu, H：“Experimental Study on Bentonite Gel Migration from a Deposition Hole”，Proc. 3rd Int. Conf. Nuclear Fuel Reprocessing and Waste Management (RECOD '91), Sendai (1991).
- 7) 中野政詩，雨宮悠，藤井克己，石田朋靖，石井祐二：“不飽和粘土の浸潤と膨潤”，農業土木学会論文集，100，pp.8-16(1982).
- 8) 杉野弘幸，菅野毅：“拡散モデルを用いた緩衝材の流出挙動の解析的予測”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN8400 99-040(1999).
- 9) 菅野毅，岩田裕美子：“緩衝材侵入現象モデルの検討”，核燃料サイクル開発機構，JNC TJ8400 2003-026(2003).
- 10) 菅野毅，岩田裕美子：“緩衝材侵入現象モデルの検討(II)”，核燃料サイクル開発機構，JNC TJ8400 2003-083(2004).
- 11) 松本一浩，棚井憲治，菅野毅，岩田裕美子：“拡散モデルを用いた侵入現象による緩衝材密度変化の事例解析”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN8400 2005-009(2005).
- 12) 松本一浩，棚井憲治：“緩衝材の侵入現象モデルの適用性に関する検討”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2009-070(2010).
- 13) 松本一浩，藤田朝雄：“緩衝材の侵入現象モデルの適用性に関する検討(II)”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2010-058(2011).
- 14) 杉田裕，川上進，油井三和，牧野仁史，澤田淳，三原守弘，栗原雄二：“断層に至るまでの核種移行に着目した処分場の閉鎖性能についての検討”，日本原子力学会バックエンド部会，原子力バックエンド研究 Vol.10 No.1-2，pp.103-112(2004).

- 15) 核燃料サイクル開発機構：“高レベル放射性廃棄物の地層処分技術に関する知識基盤の構築－平成 17 年度取りまとめ－ 分冊 2 工学技術の開発”，核燃料サイクル開発機構，JNC TN1400 2005-015(2005).
- 16) 伊藤裕紀，庭瀬一仁，千々松正和，金子岳夫，中越章雄：“低配合ベントナイト混合土の長期状態変化を踏まえた設計手法に関する一考察”，土木学会第 65 回年次学術講演会講演概要集，共通セッション，CS7-017，pp.33-34(2010).
- 17) 田中幸久，中村邦彦，小峯秀雄，川西光弘：“ベントナイトの膨潤特性に及ぼす海水濃度の影響”，土木学会第 57 回年次講演会概要集，共通セッション，pp.455-456(2002).

国際単位系 (SI)

表1. SI基本単位

基本量	SI基本単位	
	名称	記号
長さ	メートル	m
質量	キログラム	kg
時間	秒	s
電流	アンペア	A
熱力学温度	ケルビン	K
物質の量	モル	mol
光度	カンデラ	cd

表2. 基本単位を用いて表されるSI組立単位の例

組立量	SI基本単位	
	名称	記号
面積	平方メートル	m ²
体積	立法メートル	m ³
速度	メートル毎秒	m/s
加速度	メートル毎秒毎秒	m/s ²
波数	毎メートル	m ⁻¹
密度, 質量密度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
面積密度	キログラム毎平方メートル	kg/m ²
比体積	立方メートル毎キログラム	m ³ /kg
電流密度	アンペア毎平方メートル	A/m ²
磁界の強さ	アンペア毎メートル	A/m
量濃度 ^(a) , 濃度	モル毎立方メートル	mol/m ³
質量濃度	キログラム毎立方メートル	kg/m ³
輝度	カンデラ毎平方メートル	cd/m ²
屈折率 ^(b)	(数字の)	1
比透磁率 ^(b)	(数字の)	1

(a) 量濃度 (amount concentration) は臨床化学の分野では物質濃度 (substance concentration) ともよばれる。
 (b) これらは無次元量あるいは次元1をもつ量であるが、そのことを表す単位記号である数字の1は通常は表記しない。

表3. 固有の名称と記号で表されるSI組立単位

組立量	SI組立単位			
	名称	記号	他のSI単位による表し方	SI基本単位による表し方
平面角	ラジアン ^(b)	rad	1 ^(b)	m/m
立体角	ステラジアン ^(b)	sr ^(e)	1 ^(b)	m ² /m ²
周波数	ヘルツ ^(d)	Hz		s ⁻¹
力	ニュートン	N		m kg s ⁻²
圧力, 応力	パスカル	Pa	N/m ²	m ⁻¹ kg s ⁻²
エネルギー, 仕事, 熱量	ジュール	J	N m	m ² kg s ⁻²
仕事率, 工率, 放射束	ワット	W	J/s	m ² kg s ⁻³
電荷, 電気量	クーロン	C		s A
電位差 (電圧), 起電力	ボルト	V	W/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻¹
静電容量	ファラド	F	C/V	m ² kg ⁻¹ s ⁴ A ²
電気抵抗	オーム	Ω	V/A	m ² kg s ⁻³ A ⁻²
コンダクタンス	ジーメン	S	A/V	m ² kg ⁻¹ s ³ A ²
磁束	ウェーバ	Wb	Vs	m ² kg s ⁻² A ⁻¹
磁束密度	テスラ	T	Wb/m ²	kg s ⁻² A ⁻¹
インダクタンス	ヘンリー	H	Wb/A	m ² kg s ⁻² A ⁻²
セルシウス温度	セルシウス度 ^(e)	°C		K
光照射度	ルーメン	lm	cd sr ^(e)	cd
放射線量	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
放射性核種の放射能 ^(f)	ベクレル ^(d)	Bq		s ⁻¹
吸収線量, 比エネルギー分与, カーマ	グレイ	Gy	J/kg	m ² s ⁻²
線量当量, 周辺線量当量, 方向性線量当量, 個人線量当量	シーベルト ^(g)	Sv	J/kg	m ² s ⁻²
酸素活性化	カタール	kat		s ⁻¹ mol

(a) SI接頭語は固有の名称と記号を持つ組立単位と組み合わせても使用できる。しかし接頭語を付した単位はもはやコヒーレントではない。
 (b) ラジアンとステラジアンは数字の1に対する単位の特別な名称で、量についての情報をつたえるために使われる。実際には、使用する時には記号rad及びsrが用いられるが、習慣として組立単位としての記号である数字の1は明示されない。
 (c) 測光学ではステラジアンという名称と記号srを単位の表し方の中に、そのまま維持している。
 (d) ヘルツは周期現象についてのみ、ベクレルは放射性核種の統計的過程についてのみ使用される。
 (e) セルシウス度はケルビンの特別な名称で、セルシウス温度を表すために使用される。セルシウス度とケルビンの単位の大きさは同一である。したがって、温度差や温度間隔を表す数値はどちらの単位で表しても同じである。
 (f) 放射性核種の放射能 (activity referred to a radionuclide) は、しばしば誤った用語で"radioactivity"と記される。
 (g) 単位シーベルト (PV.2002.70,205) についてはCIPM勧告2 (CI-2002) を参照。

表4. 単位の中に固有の名称と記号を含むSI組立単位の例

組立量	SI組立単位		
	名称	記号	SI基本単位による表し方
粘力のモーメント	パスカル秒	Pa s	m ⁻¹ kg s ⁻¹
表面張力	ニュートンメートル	N m	m ² kg s ⁻²
角速度	ニュートン毎メートル	N/m	kg s ⁻²
角加速度	ラジアン毎秒	rad/s	m m ⁻¹ s ⁻¹ = s ⁻¹
熱流密度, 放射照度	ラジアン毎秒毎秒	rad/s ²	m m ⁻¹ s ⁻² = s ⁻²
熱容量, エントロピー	ワット毎平方メートル	W/m ²	kg s ⁻³
比熱容量, 比エントロピー	ジュール毎ケルビン	J/K	m ² kg s ⁻² K ⁻¹
比エネルギー	ジュール毎キログラム毎ケルビン	J/(kg K)	m ² s ⁻² K ⁻¹
熱伝導率	ジュール毎キログラム	J/kg	m ² s ⁻²
体積エネルギー	ワット毎メートル毎ケルビン	W/(m K)	m kg s ⁻³ K ⁻¹
電界の強さ	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m ⁻¹ kg s ⁻²
電荷密度	ジュール毎立方メートル	J/m ³	m kg s ⁻³ A ⁻¹
電表面積	クーロン毎立方メートル	C/m ³	m ⁻³ s A
電束密度, 電気変位	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
誘電率	クーロン毎平方メートル	C/m ²	m ⁻² s A
透磁率	ファラド毎メートル	F/m	m ³ kg ⁻¹ s ⁴ A ²
モルエネルギー	ヘンリー毎メートル	H/m	m kg s ⁻² A ⁻²
モルエントロピー, モル熱容量	ジュール毎モル	J/mol	m ² kg s ⁻² mol ⁻¹
照射線量 (X線及びγ線)	ジュール毎モル毎ケルビン	J/(mol K)	m ² kg s ⁻² K ⁻¹ mol ⁻¹
吸収線量率	クーロン毎キログラム	C/kg	kg ⁻¹ s A
放射線強度	グレイ毎秒	Gy/s	m ² s ⁻³
放射輝度	ワット毎ステラジアン	W/sr	m ⁴ m ⁻² kg s ⁻³ = m ² kg s ⁻³
酵素活性濃度	ワット毎平方メートル毎ステラジアン	W/(m ² sr)	m ² m ⁻² kg s ⁻³ = kg s ⁻³
	カタール毎立方メートル	kat/m ³	m ³ s ⁻¹ mol

表5. SI接頭語

乗数	接頭語	記号	乗数	接頭語	記号
10 ²⁴	ヨタ	Y	10 ¹	デシ	d
10 ²¹	ゼタ	Z	10 ⁻²	センチ	c
10 ¹⁸	エクサ	E	10 ⁻³	ミリ	m
10 ¹⁵	ペタ	P	10 ⁻⁶	マイクロ	μ
10 ¹²	テラ	T	10 ⁻⁹	ナノ	n
10 ⁹	ギガ	G	10 ⁻¹²	ピコ	p
10 ⁶	メガ	M	10 ⁻¹⁵	フェムト	f
10 ³	キロ	k	10 ⁻¹⁸	アト	a
10 ²	ヘクト	h	10 ⁻²¹	ゼプト	z
10 ¹	デカ	da	10 ⁻²⁴	ヨクト	y

表6. SIに属さないが、SIと併用される単位

名称	記号	SI単位による値
分	min	1 min=60s
時	h	1 h=60 min=3600 s
日	d	1 d=24 h=86 400 s
度	°	1°=(π/180) rad
分	'	1'=(1/60)°=(π/10800) rad
秒	"	1"=(1/60)'=(π/648000) rad
ヘクタール	ha	1 ha=1 hm ² =10 ⁴ m ²
リットル	L, l	1 L=1 dm ³ =10 ⁻³ m ³
トン	t	1 t=10 ³ kg

表7. SIに属さないが、SIと併用される単位で、SI単位で表される数値が実験的に得られるもの

名称	記号	SI単位で表される数値
電子ボルト	eV	1 eV=1.602 176 53(14)×10 ⁻¹⁹ J
ダルトン	Da	1 Da=1.660 538 86(28)×10 ⁻²⁷ kg
統一原子質量単位	u	1 u=1 Da
天文単位	ua	1 ua=1.495 978 706 91(6)×10 ¹¹ m

表8. SIに属さないが、SIと併用されるその他の単位

名称	記号	SI単位で表される数値
バール	bar	1 bar=0.1 MPa=100 kPa=10 ⁵ Pa
水銀柱ミリメートル	mmHg	1 mmHg=133.322 Pa
オングストローム	Å	1 Å=0.1 nm=100 pm=10 ⁻¹⁰ m
海里	M	1 M=1852 m
バイン	b	1 b=100 fm ² =(10 ¹² cm) ² =10 ⁻²⁸ m ²
ノット	kn	1 kn=(1852/3600) m/s
ネーパ	Np	SI単位との数値的関係は、 対数量の定義に依存。
ベレル	B	
デジベル	dB	

表9. 固有の名称をもつCGS組立単位

名称	記号	SI単位で表される数値
エル	erg	1 erg=10 ⁻⁷ J
ダイン	dyn	1 dyn=10 ⁻⁵ N
ポアズ	P	1 P=1 dyn s cm ⁻² =0.1 Pa s
ストークス	St	1 St=1 cm ² s ⁻¹ =10 ⁻⁴ m ² s ⁻¹
スチルブ	sb	1 sb=1 cd cm ⁻² =10 ⁴ cd m ⁻²
フオト	ph	1 ph=1 cd sr cm ⁻² 10 ⁴ lx
ガリ	Gal	1 Gal=1 cm s ⁻² =10 ⁻² ms ⁻²
マクスウェル	Mx	1 Mx=1 G cm ² =10 ⁻⁸ Wb
ガウス	G	1 G=1 Mx cm ⁻² =10 ⁻⁴ T
エルステッド ^(c)	Oe	1 Oe _e =(10 ³ /4π) A m ⁻¹

(c) 3元系のCGS単位系とSIでは直接比較できないため、等号「△」は対応関係を示すものである。

表10. SIに属さないその他の単位の例

名称	記号	SI単位で表される数値
キュリー	Ci	1 Ci=3.7×10 ¹⁰ Bq
レントゲン	R	1 R=2.58×10 ⁻⁴ C/kg
ラド	rad	1 rad=1 cGy=10 ⁻² Gy
レム	rem	1 rem=1 cSv=10 ⁻² Sv
ガンマ	γ	1 γ=1 nT=10 ⁻⁹ T
フェルミ	f	1 フェルミ=1 fm=10 ⁻¹⁵ m
メートル系カラット		1メートル系カラット=200 mg=2×10 ⁻⁴ kg
トル	Torr	1 Torr=(101 325/760) Pa
標準大気圧	atm	1 atm=101 325 Pa
カロリ	cal	1 cal=4.1858 J (「15°C」カロリ), 4.1868 J (「IT」カロリ), 4.184 J (「熱化学」カロリ)
マイクロン	μ	1 μ=1 μm=10 ⁻⁶ m

