

緩衝材の流出/侵入特性  
(研究報告)

2004年2月

核燃料サイクル開発機構  
東海事業所

本資料の全部または一部を複写・複製・転載する場合は、下記にお問い合わせください。

〒319-1184 茨城県那珂郡東海村村松 4 番地 49  
核燃料サイクル開発機構  
技術展開部 技術協力課

電話:029-282-1122(代表)  
ファックス:029-282-7980  
電子メール:jserv@jnc.go.jp

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technical Cooperation Section,  
Technology Management Division,  
Japan Nuclear Cycle Development Institute  
4-49 Muramatsu, Tokai-mura, Naka-gun, Ibaraki 319-1184,  
Japan

© 核燃料サイクル開発機構 (Japan Nuclear Cycle Development Institute)  
2004

緩衝材の流出/侵入特性  
(研究報告)

松本 一浩\*\*，棚井 憲治\*

要旨

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、緩衝材の流出挙動が考えられる。緩衝材の流出挙動は、岩盤亀裂中への侵入現象と、亀裂へ侵入したベントナイトゲルの地下水による浸食現象の二つの現象によるものと考えられており、この現象を実験により定量的に把握する必要がある。

本報では、侵入現象モデルの妥当性の検討および構築に資するため、海水系地下水を模擬した侵入現象に関するデータの拡充ならびに、非破壊検査技術を適用した現象のより詳細な把握を試みた。また、緩衝材を起源とするベントナイトコロイドの生成量に関して、定量的な把握を行った。

試験により得られた知見は、以下のとおりである。

1) 侵入現象

- ・人工海水条件(イオン強度:0.64)では、ベントナイトの亀裂中への侵入が、蒸留水の結果と比較し、著しく小さくなる。また、時間と侵入距離の関係を見積るための比例係数  $A$  と有効粘土密度  $\rho_b$  より、次の関係式を得た。ここで、亀裂幅  $d$  は 1.5mm、有効粘土密度  $\rho_b$  は 1.37  $\rho_b$  1.80 [Mg/m<sup>3</sup>]である。

$$A = 5.4707 \times 10^{-4} \cdot \exp(3.0091 \rho_b)$$

- ・人工海水では、ベントナイトの亀裂侵入に伴う著しい膨潤応力の低下は認められず、「第2次取りまとめ」における人工海水を用いた膨潤応力の測定結果と同程度の性能を担保する。
- ・亀裂侵入部における密度分布に関するデータを取得した結果、亀裂侵入部における平均的な乾燥密度は、亀裂開口幅や侵入時間に因らず、おおよそ 0.5Mg/m<sup>3</sup> 程度となる。
- ・X線 CT による非破壊検査技術を適用し、亀裂侵入部におけるベントナイトの密度分布評価を試み、その測定技術の妥当性および適用性が確認できた。

2) 浸食現象

- ・蒸留水による時間と浸食コロイド濃度の関係を定量的に把握した結果、コロイド濃度は、時間の経過とともに減少し、緩衝材を起源とするベントナイトコロイドの生成濃度は 10<sup>-6</sup>m/s の流速条件において、おおよそ 3ppm 程度であった。
- ・浸食コロイドの経時的な粒径分布を測定した結果、コロイドの平均的な粒径は、若干増加する傾向を示し、浸食コロイドの平均粒径は 300~400nm 程度であった。

---

\* 環境保全・研究開発センター 処分研究部 処分バリア性能研究グループ

\*\* 検査開発株式会社

## Extrusion and erosion of bentonite buffer

(Research Document)

Kazuhiro Matsumoto<sup>\*\*</sup>, Kenji Tanai<sup>\*</sup>

## Abstract

The extrusion and erosion of bentonite buffer is one of the important issues on physical stability of bentonite buffer in the HLW geological disposal. This report provides the results of the measurement on the extrusion behavior of bentonite buffer with artificial sea water and of the analysis of bentonite colloid with distilled water in order to understand the erosion behavior of bentonite buffer. The applicability of X-ray CT to evaluate the extrusion behavior of bentonite buffer is presented.

Results are as follows;

## 1) Extrusion

- The spread of bentonite extrusion into a fracture with artificial sea water(ionic strength:0.64) is smaller than that with distilled water. The proportionally constant which presents to relation between outflow distance and time gives;

$$A = 5.4707 \times 10^{-4} \cdot \exp(3.0091 \rho_b)$$

where, fracture width  $d$ : 1.5mm, effective clay density  $\rho_b$ : 1.37  $\rho_b$  1.80 [Mg/m<sup>3</sup>].

- Swelling pressure with artificial sea water indicate to be similar value of swelling pressure under restraint condition.
- Average dry density of bentonite into a fracture is approximately 0.5 Mg/m<sup>3</sup> without dependence on fracture wide and time.
- X-ray CT method is available to evaluate the density distribution as a distractive measurement.

## 2) Erosion

- The concentration of bentonite colloid decrease with time and is approximately 3ppm with flow velocity of 10<sup>-6</sup> m/s.
- The average particle diameter of erosion colloid increase with time and is about 300-400nm.

---

\* Barrier performance group, West isolation research division,  
Waste management and fuel cycle research center

\*\* Inspection Development Corporation

## 目 次

1. はじめに	1
2. 試験方法	2
2.1 試験装置概要および方法	2
2.1.1 静水試験	2
2.1.2 流水試験	3
2.2 試験条件	4
2.2.1 供試体	4
2.2.2 静水試験	4
2.2.3 流水試験	5
3. 試験結果および考察	6
3.1 静水試験	6
3.1.1 侵入距離	7
3.1.2 侵入挙動の整理	9
3.1.3 膨潤応力	11
3.1.4 試験後の試料状態	12
3.1.4.1 試験後供試体の密度状態	12
3.1.4.2 ベントナイトの亀裂侵入に伴う密度低下	12
3.1.5 亀裂侵入域における密度分布評価	14
3.1.5.1 貫入型模型試験	14
3.1.5.2 X線CTを用いた亀裂侵入域における密度分布評価	19
3.2 流水試験	30
3.2.1 浸食コロイドの定量的な評価	30
3.2.1.1 侵入距離	30
3.2.1.2 亀裂内流速	31
3.2.1.3 排水液の分析	33
4. おわりに	42
参考文献	44

目 次

第 2 章

図 2.1	静水試験装置概略図	2
図 2.2	流水試験装置概略図	3

第 3 章

図 3.1	侵入距離測定位置	8
図 3.2	経過日数と侵入距離の関係 (亀裂幅 1.5mm)	8
図 3.3	経過時間と侵入距離の関係 (亀裂幅 1.5mm)	10
図 3.4	有効粘土密度と比例係数の関係 (亀裂幅 1.5mm)	10
図 3.5	膨潤応力経時変化 (亀裂幅 1.5mm)	11
図 3.6	有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係	12
図 3.7	有効粘土密度と供試体密度の低減率の関係	13
図 3.8	侵入密度測定試験容器概略図	14
図 3.9	侵入距離と乾燥密度の関係 (乾燥密度: 1.6Mg/m <sup>3</sup> ベントナイト単体)	17
図 3.10	侵入距離と含水比の関係 (乾燥密度: 1.6Mg/m <sup>3</sup> ベントナイト単体)	17
図 3.11	侵入元と侵入先端部における乾燥密度	17
図 3.12	侵入元と侵入先端部における含水比	17
図 3.13	供試体の残留乾燥密度	17
図 3.14	供試体密度の低減率	17
図 3.15	医療用 X 線 CT 装置 (東芝製:Asteion VI)	19
図 3.16	X 線 CT 測定位置	21
図 3.17	X 線 CT による断面画像 (孔径 6.0mm)	21
図 3.18	ベントナイト飽和時の湿潤密度と乾燥密度の関係	22

図 3.19	侵入距離と乾燥密度の関係 (孔径 4.2mm)	23
図 3.20	侵入距離と乾燥密度の関係 (孔径 5.0mm)	23
図 3.21	侵入距離と乾燥密度の関係 (孔径 6.0mm)	23
図 3.22	実測結果と X 線 CT による密度分布評価の比較 (孔径 4.2mm)	24
図 3.23	実測結果と X 線 CT による密度分布評価の比較 (孔径 5.0mm)	24
図 3.24	実測結果と X 線 CT による密度分布評価の比較 (孔径 6.0mm)	24
図 3.25	X 線 CT 測定用 BENTFLOW 型試験容器概略図	25
図 3.26	試験中の一例 (供試体仕様: 40 × H40mm)	26
図 3.27	X 線 CT 測定位置 (供試体仕様: 20 × H20mm)	26
図 3.28	侵入距離と乾燥密度分布の関係 (供試体仕様: 20 × H20mm)	28
図 3.29	侵入距離と乾燥密度分布の関係 (供試体仕様: 30 × H30mm)	28
図 3.30	侵入距離と乾燥密度分布の関係 (供試体仕様: 40 × H40mm)	28
図 3.31	経過日数と侵入域における平均乾燥密度の関係	29
図 3.32	侵入距離測定箇所 (実験の一例)	31
図 3.33	浸食現象試験における亀裂内流速の推定	32
図 3.34	元素分析フロー	34
図 3.35	経過時間と浸食コロイド濃度の関係	38
図 3.36	経過時間とコロイド平均粒径の関係	39
図 3.37	経過時間と pH の関係	41

## 目 次

## 第 2 章

表 2.1	静水試験条件	4
表 2.2	流水試験条件	5

## 第 3 章

表 3.1	比例係数(人工海水条件下)	10
表 3.2	試験後における孔内供試体密度	12
表 3.3	侵入領域における侵入質量の推定	13
表 3.4	侵入による乾燥密度の低減率	13
表 3.5	侵入密度測定試験条件	15
表 3.6	データ表	18
表 3.7	Asteion VI 仕様	19
表 3.8	X線 CT による測定条件	21
表 3.9	試験条件	25
表 3.10	X線 CT による測定条件	25
表 3.11	侵入距離	31
表 3.12	排水液の分析項目および分析機器	33
表 3.13	コロイド濃度分析測定条件	35
表 3.14	Si, Al, Mg 濃度の測定結果	35
表 3.15	コロイド成分としての濃度および組成比	36
表 3.16	コロイド濃度の推定結果	37
表 3.17	コロイド粒径分布およびゼータ電位測定条件	38
表 3.18	コロイド粒子の平均粒径およびゼータ電位の測定結果	39
表 3.19	pH 測定条件	40
表 3.20	排水液の pH	41

## 1. はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分研究では、人工バリア埋設後において、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/侵入挙動が考えられている。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、岩盤亀裂が大きい場合には、この膨潤性によってベントナイトの亀裂への侵入が止らずに緩衝材の密度が低下し、緩衝材自体の諸機能に影響を及ぼすことが懸念される。また、亀裂へ侵入したベントナイトゲルが地下水によって浸食され、核種の移行を促進してしまうことも考えられる。緩衝材の流出現象は、これら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、人工バリア埋設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、緩衝材の流出挙動は、定置後より発生する事象であり、長期にわたり継続する現象である。したがって、本挙動評価においては、時間的スケールに関する安全評価が必要であり、地層処分システムの安全性評価を行ううえで時間的な挙動を適切に抽出すること、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、緩衝材に流出/侵入挙動のモデル構築へ向けた基礎研究とし、降水系条件における単一平板模擬亀裂中への侵入挙動に関するデータの取得を実施してきた(菅野、松本(1997)、松本、棚井(2003))。侵入現象のモデル化に関しては、Kanno et al(1999)が提案している固相拡散理論(中野ら(1982))と粘性流体モデルを組み合わせたモデルを適用し、拡散モデルを用いた評価を試みている(杉野、菅野(1999)、菅野、岩田(2003))。本報では、侵入現象モデルの妥当性の検討および構築に資するため侵入現象に関するデータの拡充ならびに、非破壊検査技術を用いた侵入密度分布に関するデータの取得を試みた。

また、浸食現象に関しては、緩衝材よりベントナイトコロイドが生成する可能性が指摘されており(Avogadro and De Marsily,(1984))、緩衝材より発生したコロイドが放射性核種を収着する場合に、核種の移行を助長することが懸念されている(Kersting et al., (1999))。コロイドが核種の移行挙動に及ぼす影響に関しては、久野ら(1999)によって検討されており、コロイド濃度が核種の移行に影響を与える要因の一つであること、また、コロイド濃度が増加することで、核種移行速度の助長も大きくなることが示されている。一方、緩衝材からのコロイドの発生に関しては、Pusch, R.(1983)、黒澤ら(1998)によってコロイドの結合力と地下水流れの掃流力との大小関係による理論的な検討が行われており、黒澤らはコロイドが生成される流速を、おおよそ $10^{-5} \sim 10^{-4} \text{m/s}$  (300~3,000m/y)と見積っている。しかしながら、これら理論的な評価を確証するための十分な実験データは得られておらず、緩衝材を起源としたコロイドの生成/移行挙動を定量的に把握する必要がある。ここでは、理論的評価の妥当性を検討するため、水流によって浸食されるベントナイトコロイドを定量的に測定することを試みた。

## 2. 試験方法

### 2.1 試験装置概要および方法

#### 2.1.1 静水試験

侵入現象に関する試験は、図 2.1 に示す装置を用いて行った。

試験装置の構造は、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、単一平板模擬亀裂（以下、亀裂という）を設けることができ、亀裂幅はスペーサによって任意に設定（0.5, 1.0, 1.5mm）することが可能である。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ー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（共和電業社製：LC-2TN）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の経時変化を計測することができる。亀裂内への給水は、上部アクリル板の給水孔より水頭差で供給を行い、亀裂内を満水にする。ベントナイトの亀裂への侵入状態については、試験装置上部のカメラによって侵入形状の記録を行うとともに、専用のアクリル製定規により侵入距離を測定することが可能である。膨潤応力などの測定は、供試体への水の接触直後から開始し、ベントナイトの亀裂への侵入過程における経時的な挙動を観察する。

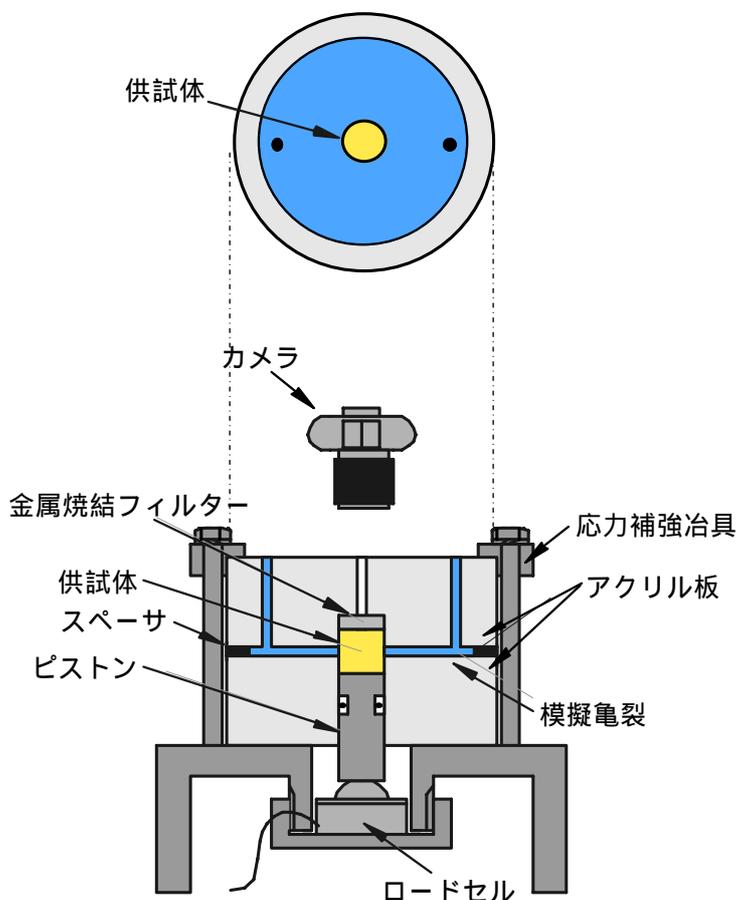


図 2.1 静水試験装置概略図

2.1.2 流水試験

浸食現象に関する試験は、図 2.2 に示す装置を用いて行った。基本的な構造は、静水試験装置と同様である。流水試験装置は、アクリル板上部における注水孔の一方より水を供給し、一方より排水させることで亀裂内に二次元的な水の流れ場をつくり、水流が亀裂内侵入ベントナイトに与える影響、すなわちベントナイトの浸食現象を定量的に把握することが可能である。亀裂内への水の供給は、定量ポンプ(エムエス機器社製：ペリスタルティック型ポンプ)を用いた。また、ベントナイトの亀裂への侵入過程における膨潤応力は、静水試験と同様にロードセル(共和電業社製：LC-200KN)を用いて計測を行った。

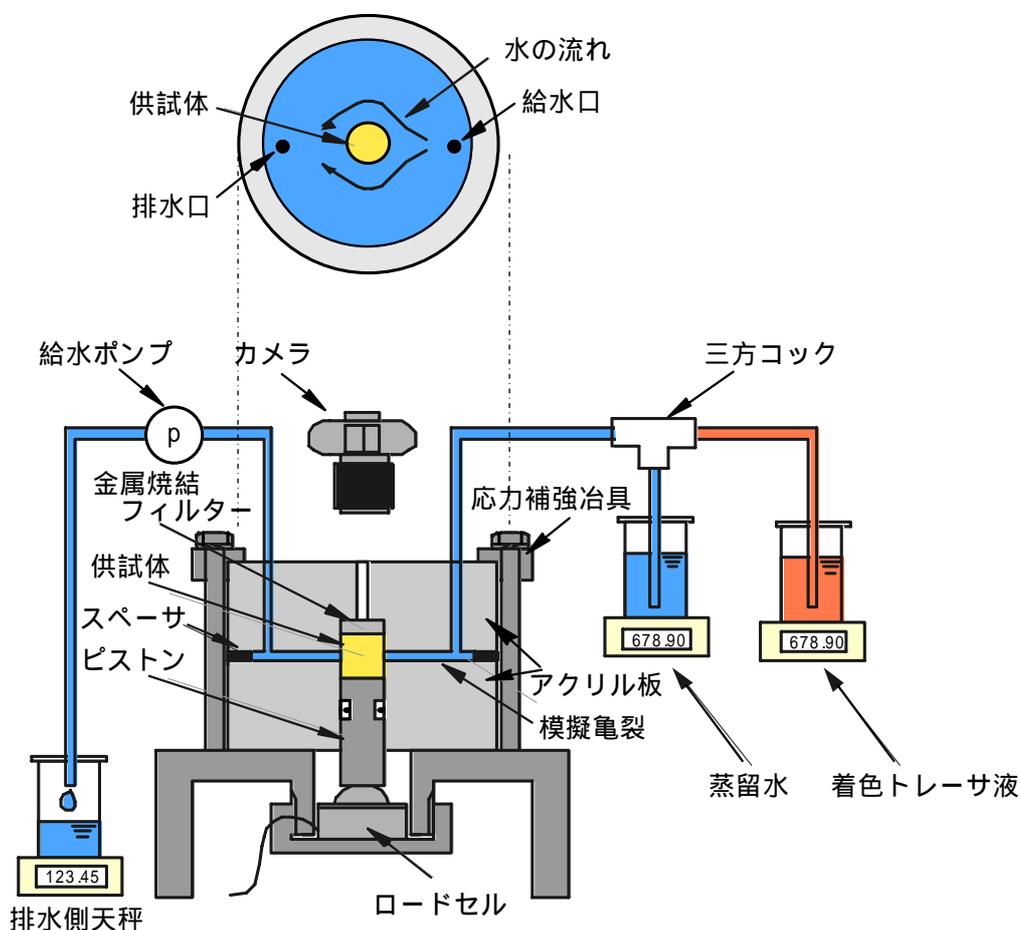


図 2.2 流水試験装置概略図

## 2.2 試験条件

### 2.2.1 供試体

ベントナイト試料には、クニゲル V1 (クニミネ工業社製：山形県月布産 Na 型ベントナイト) を用いた。供試体は、ベントナイト (以下、ベントナイト単体という) およびベントナイトにケイ砂を混合した供試体 (以下、ケイ砂混合体という) を用いた。また、ケイ砂は、3号ケイ砂と5号ケイ砂を重量比 1:1 で混合したものを使用した。

供試体寸法は、静水試験で 50×H50 [mm]、流水試験で 10×H10 [mm] とし、引張万能試験機 (島津製作所製：オートグラフ AG-1) 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。

### 2.2.2 静水試験

試験条件を表 2.1 に示す。静水試験では、供試体の仕様 (乾燥密度とケイ砂混合率) をパラメータとして模擬亀裂中へのベントナイトの侵入挙動の観察を行った。試験水には人工海水 (ASTM 法) を用い、供試体への水の浸潤直後より膨潤応力の計測および亀裂中への侵入距離の測定を行った。膨潤応力の経時的な変化や試験室温度は、パソコンにより計測し、ベントナイトの亀裂への侵入距離は専用のアクリル板定規を用いて測定した。なお、ベントナイトの侵入形状については、試験装置上部のカメラを用いて観察した。

表 2.1 静水試験条件

試料 (ベントナイト)	クニゲル V1	
供試体寸法 [mm]	50 × H50	
ケイ砂混合率 [%]	30	0、30
乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	1.6	1.8
初期含水比 [%]	10	
亀裂幅 [mm]	1.5	
試験温度 [ ]	室温 (20)	
試験水	人工海水 (ASTM 法)	

## 2.2.3 流水試験

試験条件を表 2.2 に示す。流水試験では、亀裂内における流量をパラメータとし、侵入ベントナイトの形状変形の観察、または排水液中のベントナイトコロイドの濃度分析などを行い、水流の影響によるベントナイトの浸食挙動の把握を行った。ここでは、ベントナイトコロイドの浸食挙動の把握のため、供試体にはケイ砂を混合せずに、ベントナイト単体の供試体を用いた。なお、試験水には蒸留水を使用した。

試験は、ベントナイトの亀裂への侵入距離が安定するまでの間、亀裂内を静水状態として放置した後に水流を与え、排水液の採取および侵入形状の観察を行った。ベントナイトの侵入形状は、試験装置上面のカメラにより記録を行った。

表 2.2 流水試験条件

試料 (ベントナイト)	クニゲル V1
供試体寸法 [mm]	10 × H10
ケイ砂混合率 [%]	0
乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	1.6
初期含水比 [%]	10
亀裂幅 [mm]	1.0
流量 [ml/min]	0.01
試験温度 [ ]	室温 (20)
試験水	蒸留水

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 静水試験

定置後の緩衝材には、地下水や物質の移行経路となり得る天然の岩盤亀裂や、掘削影響により発生すると考えられている岩盤のマイクロクラック等、また、ブロック定置方式の際のハンドリング上における岩盤と緩衝材間との隙間、緩衝材とオーバーパック間との隙間、緩衝材ブロック間における隙間などを膨潤性（自己シール性）により充填し、地下水の流れを抑制する機能が期待されている。一方で、周辺岩盤亀裂が卓越して大きい場合や亀裂頻度が多い場合には、緩衝材の膨潤により、岩盤亀裂中への緩衝材の侵入が止らず、緩衝材自体の質量減少によって緩衝材の密度が低下してしまうことが懸念される。緩衝材の密度の低下は、放射性核種の隔離のために期待される低透水性、核種収着性、コロイド濾過性、化学的緩衝性や、人工バリアとして長期健全性を維持するための応力緩衝性、力学的安定性、熱伝導率性など諸機能に対して影響を及ぼすことが考えられる。したがって、岩盤亀裂中への緩衝材の侵入挙動を定量的に把握し、緩衝材の密度低下が人工バリア性能へ及ぼす影響に関して評価する必要がある。

これまでに、緩衝材の侵入現象に関する実験的な研究は、Pusch, R.(1983)、Boisson, J.Y.(1989)、Kanno, T. and Wakamatsu, H.(1991)らにより報告されている。ここでは、これらの研究事例を参考にし、侵入現象の挙動把握および現象モデルの構築へ向けたデータの整備を行った。

緩衝材の侵入挙動に関する現象把握の観点から、緩衝材密度と侵入距離の関係、また亀裂開口幅と侵入距離の関係やその侵入速さなどの関係を定量的に把握しておく必要がある。また、侵入による緩衝材の諸機能低下の影響を評価する上で、侵入に伴う緩衝材の密度低下量を把握しておく必要があり、これらは緩衝材の流出挙動による人工バリア性能への影響を長期的に評価するために重要なデータである。一方、侵入メカニズムの解明やモデルの構築にあたり、亀裂侵入域におけるベントナイトの密度や侵入によるコア部の局所的な密度の状態を把握しておくことが必要である。とくに、侵入域におけるベントナイトのゲルフロントの状態的な把握は、地下水流れによるベントナイトコロイドの浸食現象にも関連しているため、亀裂中で形成される侵入域の密度分布に関するデータの取得も重要な現象把握の一つである。

本項では、地質環境条件の一つである地下水組成が及ぼす挙動への影響を把握するために、海水系地下水を想定し、人工海水を用いた侵入挙動試験を行った。また、侵入現象モデルの妥当性の検討および構築に資するために、非破壊検査技術を用いた侵入密度分布に関するデータの取得を試みた。次項より、これらの現象把握に関する個別の知見について述べる。

### 3.1.1 侵入距離

降水条件下での基礎的な特性評価において、ベントナイト供試体の模擬亀裂中に侵入する時間と侵入距離との関係は、既存の研究 ( Kanno, T. and Wakamatsu, H. (1991) ) と同様に時間の平方根に比例して大きくなる傾向を示しており、ベントナイト供試体に接する模擬亀裂への侵入に方向依存性がないという結果が得られている ( 菅野、松本 (1997), 松本、棚井 (2003) )。ベントナイトの亀裂中への侵入距離の測定に関しては、試験容器の上面より専用のアクリル製の測定定規によって、4 方向 (No.1 ~ No.4) における侵入距離を目視によって測定した。測定箇所は、図 3.1 に示すとおりであり、供試体の壁面 ( 亀裂との接触面 ) より、亀裂中へ侵入したベントナイトの先端部までの距離を経時的に測定した。

ベントナイトの亀裂への侵入距離の経時変化を、図 3.2 に示す。図は、人工海水を浸潤液として単一平板亀裂中への侵入距離を測定したものである。1.6 Mg/m<sup>3</sup> ケイ砂混合体および 1.8 Mg/m<sup>3</sup> ケイ砂混合体における侵入距離は、水の浸潤直後より、その侵入距離に変化がないことが分かる。また、1.8 Mg/m<sup>3</sup> ベントナイト単体では、約 20 日後に侵入距離が安定していることが分かる。単一平板亀裂中への蒸留水におけるこれまでの侵入距離における測定結果からは、供試体の密度が大きいほど、亀裂中への侵入距離も大きくなる傾向が得られている。人工海水を用いた本結果に関しても、同様な傾向が示されているものの、侵入距離は、それぞれ数ミリ程度であり、蒸留水を用いた試験と比較した場合には、侵入が微少であった。

亀裂内への侵入挙動は、水の浸潤によるベントナイトの膨潤性能が大きくその駆動力補っていることが考えられる。したがって、本結果のように侵入距離が小さくなっている要因を考察した場合、ベントナイトの膨潤性能が化学的相互作用によって低下していることが考えられる。人工海水がベントナイトの膨潤性へ影響を及ぼすという知見の一つに、人工海水と蒸留水との膨潤応力の測定比較結果がある ( 鈴木、藤田 (1999) )。これらの結果からは、ベントナイトが高密度である場合に両者の膨潤応力に顕著な差は生じないものの、低密度になるに従い、人工海水での膨潤応力が小さくなる傾向が得られている。侵入亀裂内におけるベントナイトは、自由膨潤状態であるため、低密度となっていることが考えられる。したがって、人工海水による膨潤特性への影響を考慮すれば、亀裂中におけるベントナイトは、膨潤応力が著しく低下していることが推察され、孔内供試体からの亀裂中への侵入を抑制していることが考えられる。

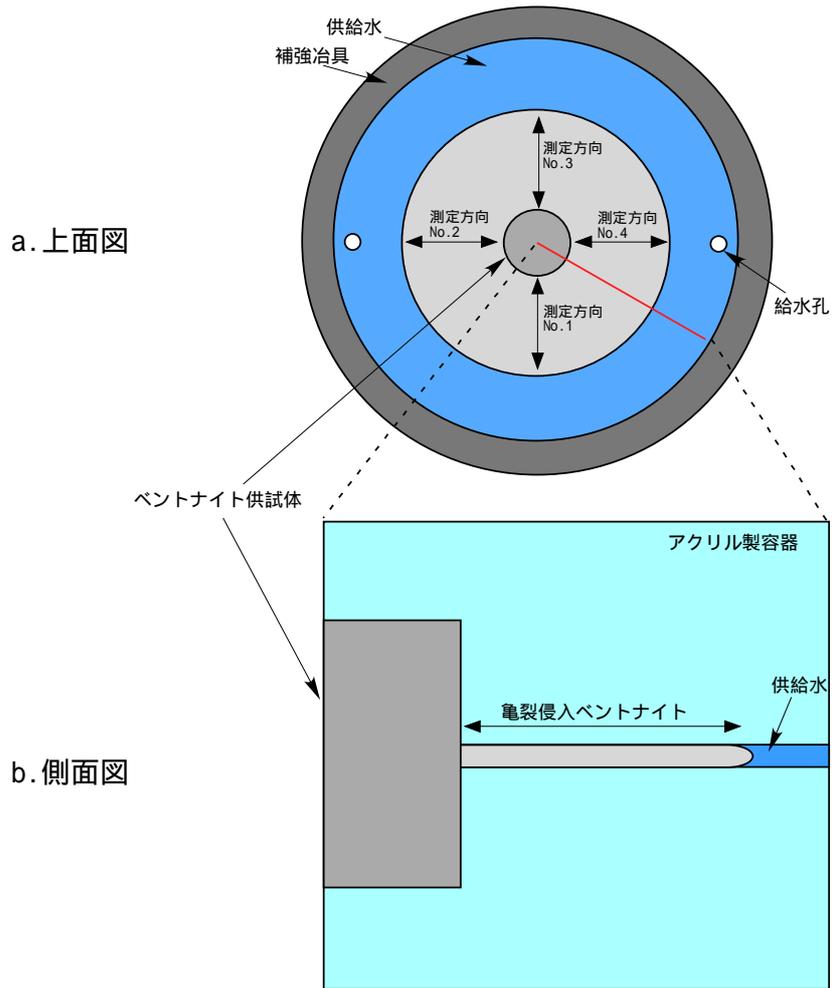


図 3.1 侵入距離測定位置

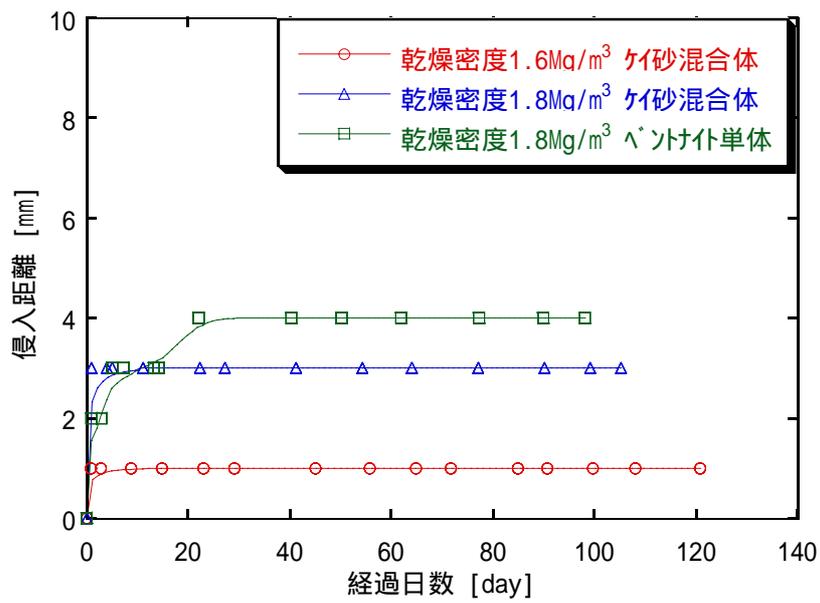


図 3.2 経過日数と侵入距離の関係 (亀裂幅 1.5mm)

## 3.1.2 侵入挙動の整理

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、(3.1)式で表すことができる。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)<sup>1/2</sup>]である。

$$y = A(d, Bc)\sqrt{t} \quad (3.1)$$

測定した侵入距離は、これまでの実験結果より侵入形状に方向依存性が認められないことから、ここではベントナイトの侵入形状を同心円状として取扱い、測定した4方向の侵入距離を平均化して整理した。

試験結果を、経過時間 $\sqrt{t}$  [(hr)<sup>1/2</sup>]と侵入距離 $y$  [mm]の関係で表し、図 3.3 に示す。また、得られた比例係数 $A$ を表 3.1 に示す。図は、蒸留水における同仕様の結果を合わせて示している。亀裂への侵入距離は、人工海水が蒸留水のものよりも小さく、比例係数で比較した場合に、1.6Mg/m<sup>3</sup>ケイ砂混合体で1/10程度、1.8Mg/m<sup>3</sup>ケイ砂混合体で1/7程度、1.8Mg/m<sup>3</sup>ベントナイト単体で1/12程度となった。

ベントナイト含有量の増加に伴い比例係数が大きくなるというこれまでの試験結果より、侵入現象は膨潤性に大きく起因するものと考えられる。したがって、膨潤性を有するベントナイトのみの乾燥密度、すなわち有効粘土密度 $\rho_b$  [Mg/m<sup>3</sup>]を用いて比例係数を整理し、図 3.4 に示す。

有効粘土密度は、(3.2)式のように定義される。ここで、 $\rho_d$ はベントナイト供試体の乾燥密度[Mg/m<sup>3</sup>]、 $R_s$ はケイ砂混合率[%]、 $\rho_s$ はケイ砂の土粒子密度[Mg/m<sup>3</sup>]である。

$$\rho_b = \frac{\rho_d(100 - R_s)}{100 - \rho_d \frac{R_s}{\rho_s}} \quad (3.2)$$

有効粘土密度 $\rho_b$ で比例係数 $A$ を整理した場合、比例係数は、(3.3)式のように表現することができる。ここで、有効粘土密度 $\rho_b$ は、1.37  $\rho_b$  1.80 [Mg/m<sup>3</sup>]である。

$$\text{亀裂幅 1.5mm (人工海水):} \quad A = 5.4707 \times 10^{-4} \cdot \exp(3.0091 \rho_b) \quad (3.3)$$

図 3.4 より、人工海水を用いた場合のベントナイトの亀裂への侵入は、蒸留水のものとは比べ、著しく小さくなることが分かった。

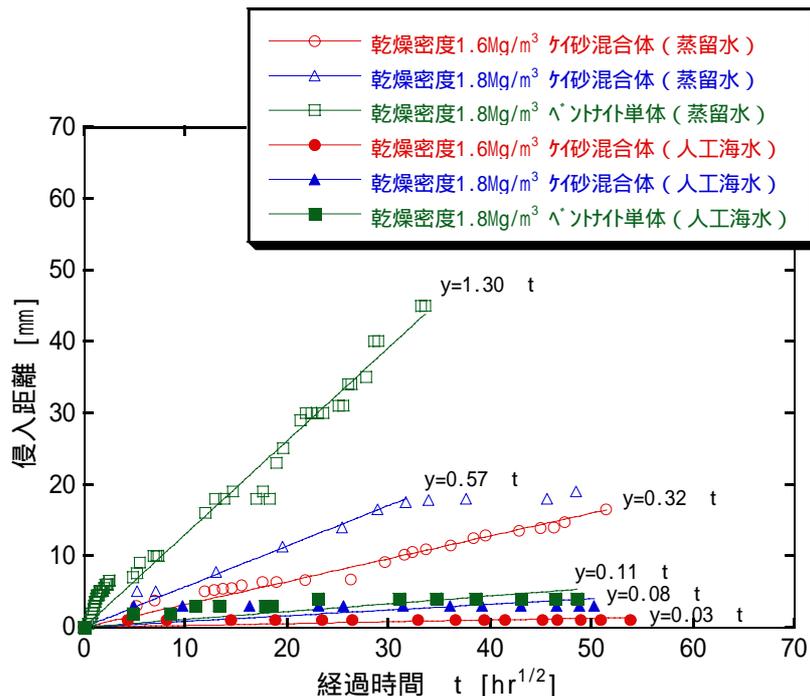


図 3.3 経過時間と侵入距離の関係（亀裂幅 1.5mm）

表 3.1 比例係数（人工海水条件下）

供試体仕様	亀裂幅 $d$ [mm]	比例係数 $A$ [ $\text{mm} \cdot (\text{hr})^{1/2}$ ]
乾燥密度 $1.6\text{Mg}/\text{m}^3$ ケイ砂混合体	1.5	0.03
乾燥密度 $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$ ケイ砂混合体	1.5	0.08
乾燥密度 $1.8\text{Mg}/\text{m}^3$ ベントナイト単体	1.5	0.11

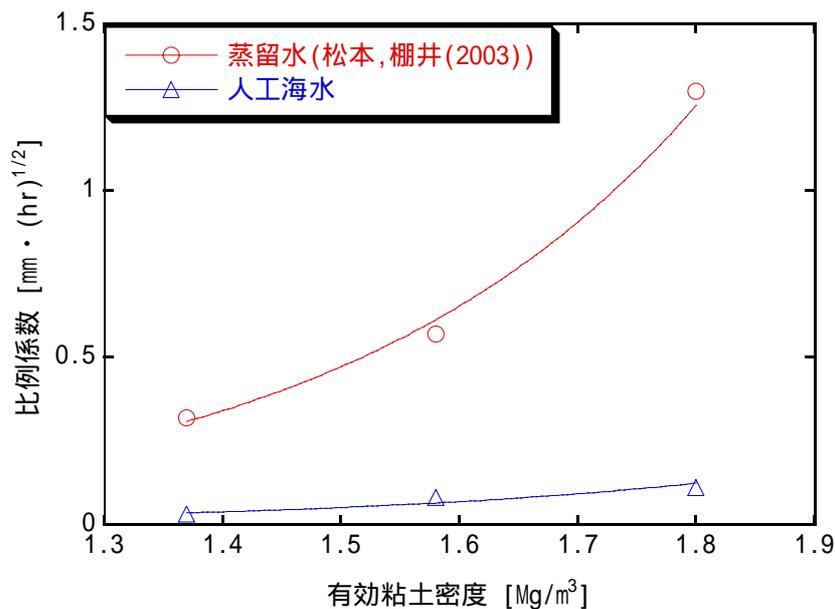


図 3.4 有効粘土密度と比例係数の関係（亀裂幅 1.5mm）

### 3.1.3 膨潤応力

本試験では、緩衝材の侵入に伴う密度低下による孔内供試体の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、供試体の周方向に設けた模擬亀裂より、供試体へ浸潤水が接触した直後に開始した。膨潤応力の経時変化を図 3.5 に示す。図より、平衡膨潤応力は、有効粘土密度が大きいものほど、大きい応力状態を保っていることが分かる。

次に、有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係を図 3.6 に示す。図は、既存のデータである人工海水を用いた膨潤特性データ(鈴木、藤田(1999))と本試験で得られた結果を比較して表している。両者の膨潤応力の傾向は、ほぼ一致しており、有効粘土密度が小さくなるにしたがい近い値を示していることが分かる。膨潤応力試験の実験手法では、ベントナイトが体積拘束された状態での測定であるのに対し、本試験は、単一平板亀裂があるため、膨潤によるベントナイトの亀裂への侵入による質量変化が生じる。これらを考慮すれば、発生する膨潤応力の傾向が、有効粘土密度が小さくなるほど、一致してくることは説明できる。なぜなら、有効粘土密度が大きいほど、亀裂への侵入が大きくなるためである。すなわち、有効粘土密度が大きいほど、侵入による供試体の密度低下への影響が生じており、これが膨潤応力試験の膨潤応力との差になっているものと解釈することができる。これら、膨潤応力からは、著しい低下が認められていないことから、孔内供試体の質量的な状態の低下は少ないことが予測された。

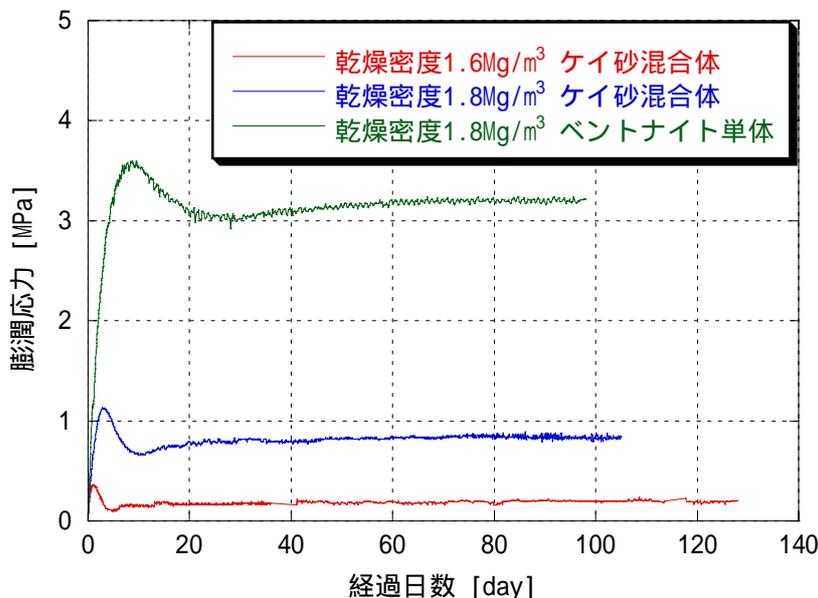


図 3.5 膨潤応力経時変化 (亀裂幅 1.5mm)

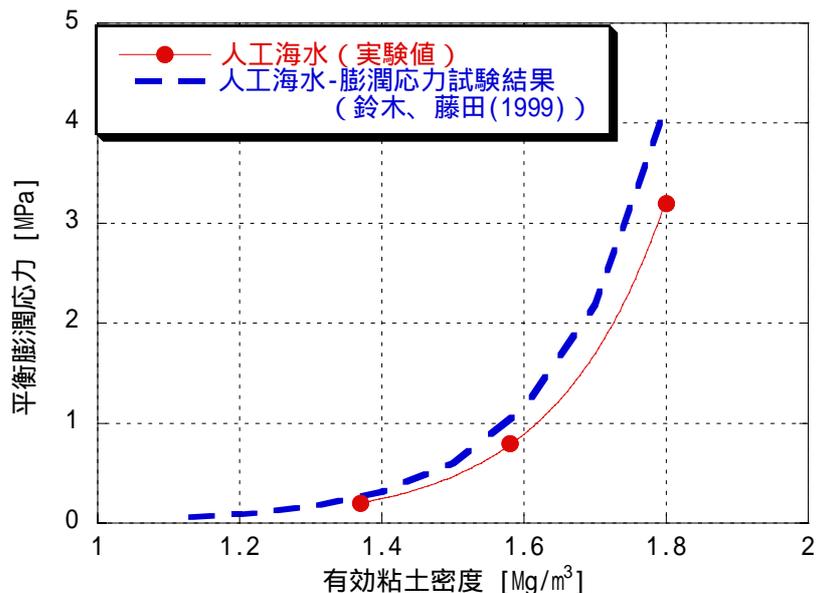


図 3.6 有効粘土密度と平衡膨潤応力の関係

### 3.1.4 試験後の試料状態

#### 3.1.4.1 試験後供試体の密度状態

試験後における孔内供試体の残留乾燥密度の測定を行った。結果を表 3.2 に示す。試験後における孔内供試体の乾燥密度は、それぞれ初期乾燥密度となっており、亀裂への侵入に伴う密度低下がない結果となった。3.1.1 項の侵入距離の測定結果では、若干ではあるが亀裂中へのベントナイトの侵入が認められている。すなわち、孔内供試体における質量は、若干減少していることが考えられる。これらを考慮すると、初期の乾燥密度が、それぞれ所定の密度よりも若干大きめに製作されていた可能性が考えられる。いずれにせよ、人工海水による亀裂へのベントナイトの侵入による密度低下への小さいことが、この結果より予想される。

表 3.2 試験後における孔内供試体密度

供試体仕様	亀裂幅 [mm]	試験後の乾燥密度 [Mg/m³]	含水比 [%]	飽和度 [%]
乾燥密度 1.6Mg/m³ ケイ砂混合体	1.5	1.605	28.04	112.45
乾燥密度 1.8Mg/m³ ケイ砂混合体	1.5	1.800	23.57	129.56
乾燥密度 1.8Mg/m³ ベントナイト単体	1.5	1.799	25.56	138.17

#### 3.1.4.2 ベントナイトの亀裂侵入に伴う密度低下

試験後の試料の密度状態の結果からは、ベントナイトの亀裂侵入に伴う孔内供試体の密度低下は、認められなかった。しかしながら、侵入距離の計測では、若干の侵入が認められていることから、亀裂侵入ベントナイト領域におけるこれまでの平均的な乾燥密度の知見（松本、棚井 (2003)）を考慮し、0.4Mg/m³ と仮定して侵入に伴う乾燥密度の低下率を推定した。侵入領域の体

積は、侵入距離の測定結果をもとに侵入形状を円と仮定し、ベントナイト侵入領域の表面積と亀裂幅から求めた。また、試験に用いた供試体の初期乾燥密度は、試験後の乾燥密度と侵入域の密度の推定値より導出を行った。表 3.3 に侵入域の密度を仮定した場合の侵入質量の算出結果をまとめる。次に、得られた侵入質量の推定値より、初期乾燥密度を見積り、試験後の乾燥密度の結果をもとに、侵入に伴う供試体の密度低減率を求めた。結果を表 3.4 に、これらの推定された侵入に伴う供試体の密度低減率を有効粘土密度との関係で整理して、図 3.7 に示す。図より、有効粘土密度が大きいほど、密度の低下も大きくなっているものの、その低下率は 1%に満たない程度であることから、人工海水による侵入挙動は、極めて小さく侵入による緩衝材の密度低下への影響は小さいことが考えられる。

表 3.3 侵入領域における侵入質量の推定

供試体仕様	亀裂幅 [mm]	侵入領域の体積 [cm <sup>3</sup> ]	侵入領域の乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	侵入質量 [g]
乾燥密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> ケイ砂混合体	1.5	0.490	0.4 (仮定値)	0.196
乾燥密度 1.8Mg/m <sup>3</sup> ケイ砂混合体	1.5	1.583	0.4 (仮定値)	0.633
乾燥密度 1.8Mg/m <sup>3</sup> ベントナイト単体	1.5	2.187	0.4 (仮定値)	0.875

表 3.4 侵入による乾燥密度の低減率

供試体仕様	亀裂幅 [mm]	初期乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	試験後の乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	乾燥密度の低減率 [%]
乾燥密度 1.6Mg/m <sup>3</sup> ケイ砂混合体	1.5	1.607 (推定値)	1.605	0.12
乾燥密度 1.8Mg/m <sup>3</sup> ケイ砂混合体	1.5	1.806 (推定値)	1.800	0.36
乾燥密度 1.8Mg/m <sup>3</sup> ベントナイト単体	1.5	1.808 (推定値)	1.799	0.49

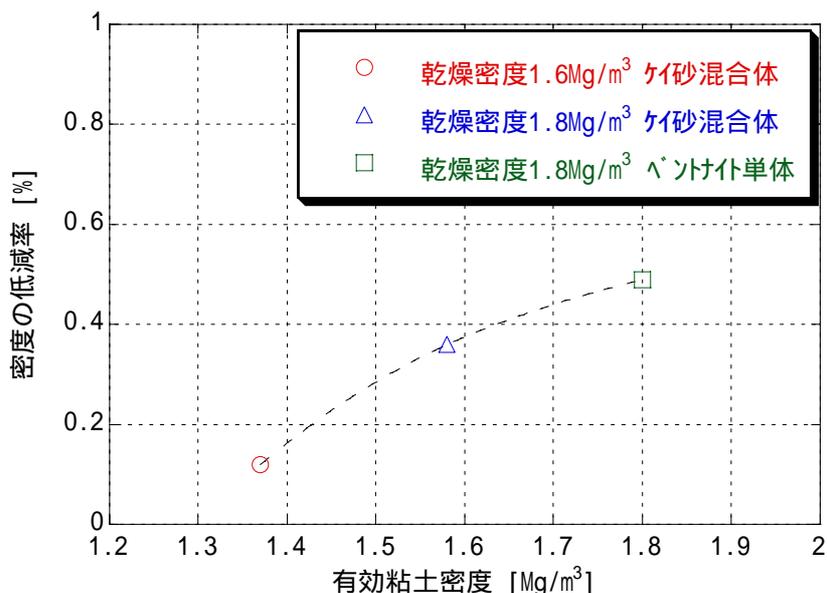


図 3.7 有効粘土密度と供試体密度の低減率の関係

### 3.1.5 亀裂侵入域における密度分布評価

緩衝材の侵入現象に関しては、単一平板模擬亀裂への基本的なベントナイトの侵入現象に関するデータを蓄積している。一方で侵入現象に関するモデル化に関しては、ベントナイトの侵入メカニズムを検討し、亀裂中へのベントナイトの移動を粘性流体による拡散移動と仮定し、拡散モデルを用いたモデル化を試みている（杉野、菅野(1999)、菅野、岩田(2003)）。

これまでに、侵入現象試験において主に取得されているデータとしては、亀裂開口部への時間と侵入距離との関係であり、侵入部におけるベントナイトゲルの密度分布等に関しては、データが整備されていない。したがって、モデルに関する十分な妥当性および適用性の検討が行われていない。このため、今後このモデルの適用性を確認するためには、低固相率における物性データの整備や侵入領域における密度分布ならびに、その密度におけるベントナイトゲルの粘性係数などのデータを取得し、モデルの妥当性評価を行う必要がある。ここでは上述した課題のうち、亀裂中のベントナイト密度に関する概略的な把握を試みた。

#### 3.1.5.1 貫入型模型試験

緩衝材流出挙動試験設備（BENTFLOW）において、単一平板亀裂内にあるベントナイト侵入領域における密度測定に関しては、上下の亚克力板を分離する際に侵入域におけるベントナイトの状態が乱されてしまうため、サンプリングによる密度の測定は装置の構造上不可能である。そのため、これまでに亀裂侵入域におけるベントナイトの実測密度の把握は行えておらず、前項 3.1.4 項での検討におけるベントナイト侵入域の体積と孔内供試体の質量の減少から導出した侵入域の平均的な密度の試算による知見のみである（松本、棚井(2003)）。ここでは、亀裂中のベントナイト侵入領域における密度分布の概略的な傾向を把握するため、侵入領域の密度測定用に模型試験を実施し、侵入領域の密度分布について測定を行った。試験容器の概略図を図 3.8 に示す。

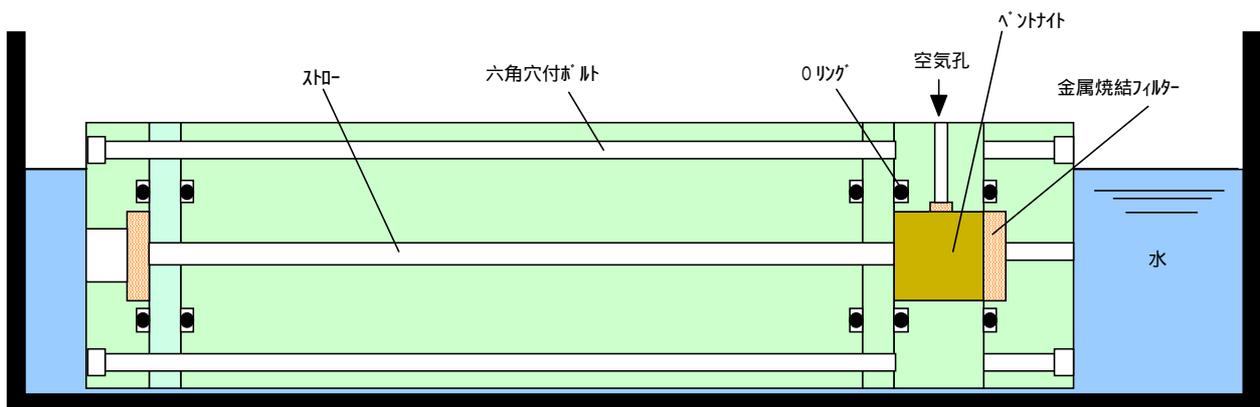


図 3.8 侵入密度測定試験容器概略図

試験は、所定の乾燥密度に成型したベントナイト供試体をアクリル製の試験容器に充填し、水を浸潤させる。供試体に接する一方には孔を設け、水の浸潤によりベントナイトが孔内へ侵入する。孔内には市販製のストローを挿入しており、孔内へ侵入するベントナイトはストロー内へ侵入し、ストローを孔内より拔出することで、侵入状態を乱すことなく侵入域を確保する二重構造とした。また、もう一方は金属焼結フィルターによってベントナイトの侵入を抑制して水の浸潤のみとし、供試体への水の浸潤をスムーズにするために供試体の上部には空気孔を設けた。なお測定は、アクリル孔とストローの二重構造である孔内へベントナイトが侵入し、その侵入距離がほぼ安定した状態で孔内にあるストローを試験容器のアクリル孔から拔出し、等間隔にストローを分割して侵入域における含水比および密度分布について測定する方法とした。なお、ストローの分割には、カッターを用いた。試験条件を表 3.5 に示す。

表 3.5 侵入密度測定試験条件

ベントナイト試料	クニゲル V1
供試体寸法 [mm]	20 × H20
乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	1.6
ケイ砂混合率 [%]	0
初期含水比 [%]	11
孔径 [mm]	4.2、5.0、6.0
浸潤水	蒸留水
試験期間 [day]	77
試験温度 [ ]	室温 約 20

試験には、乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup> ベントナイト単体の供試体を用いた。また、供試体寸法は、20 × H20 [mm]とし、ベントナイトが侵入する孔径を 3 パターンに設定した。なお、浸潤水には蒸留水を用いた。試験結果を整理し、各孔径ごとの距離と乾燥密度の関係を図 3.9 に、距離と含水比の関係を図 3.10 に示す。図の横軸は、侵入元から侵入先端部までの侵入距離を表している。図より侵入域における密度分布は、若干のバラツキはあるものの、侵入元（乾燥密度 0.8 Mg/m<sup>3</sup>）から侵入先端部にかけて、低下していく傾向にあることが分かる。密度分布のバラツキの要因としては、ストローの軟硬質の差異によって生じる分割時のベントナイトの流動による質量の変化が影響しているものと考えられる。ストロー質の硬い孔径 4.2mm では、比較的密度分布のバラツキが小さく表されている。一方、孔内における含水比の分布は、密度分布からも推測されるように、侵入元から侵入先端にかけて大きくなっており、侵入先端部においては、クニゲル V1 の液性限界 416%を大きく上回る含水比となっていることが分かる。この侵入先端部における含水比に関しては、ベントナイト充填部と水との境界部であるために、サンプリングにおいてゲル相と液相を正確に分断することができていないことに起因していることも考えられる。

次に、侵入元と侵入先端部における密度状態を孔径ごとに整理し、図 3.11 にまとめる。図よ

り、侵入元における乾燥密度は、おおよそ  $0.8\text{Mg}/\text{m}^3$  以下、また、先端部では  $0.1\text{Mg}/\text{m}^3$  以下になっており、孔径が大きくなることで侵入域の密度も若干大きくなる傾向がみられた。また、侵入域における平均的な密度は、おおよそ  $0.4\text{Mg}/\text{m}^3$  程度の密度状態となっていることが分かった。また、含水比も同様に図 3.12 にまとめて整理した結果、侵入先端部における含水比は、孔径 4.2mm で、おおよそ 1700% の高含水比を有しているのに対し、孔径 5.0mm および 6.0mm では、約 800 ~ 850% であった。上述したように、侵入先端部においては、サンプリングによる測定精度に大きく影響されることに留意しておく必要がある。なお、侵入元の含水比は、約 65 ~ 90% 程度を示し、この侵入元における含水比より乾燥密度を見積もった場合、理論的には約  $0.97 \sim 0.8\text{Mg}/\text{m}^3$  と推定することができる。これら含水比より見積った理論的な乾燥密度は、図 3.9 に示す実測の密度測定結果よりも若干大きくなった。

次に試験後供試体における最終的な乾燥密度の状態把握を行った。孔径と供試体の残留乾燥密度の関係を図 3.13 に、孔径と乾燥密度の低減率の関係を図 3.14 に示す。図に示すように、孔径が大きいほど供試体の密度が低下していること、また、孔径が大きくなることで乾燥密度の低減率も大きくなっていることが分かる。このことから、ベントナイトの侵入は、侵入部の表面積が大きいほど侵入しやすく、これによって密度低下率も増加傾向にあることが分かった。なお、本試験データは、表 3.6 に示すとおりである。

侵入域における密度状態に関して検討したこれらの結果より、ベントナイトの侵入域の密度分布の傾向として、侵入元から侵入先端部における密度分布は低下傾向を示すこと、また、侵入する孔径が大きいほど侵入域の密度も若干大きくなることが分かった。本試験における平均的な侵入域の乾燥密度は、おおよそ  $0.4\text{Mg}/\text{m}^3$  以下であること、また、サンプリングにおける実測の乾燥密度に関しても最も大きいもので  $0.8\text{Mg}/\text{m}^3$  程度であることを概略的に把握した。

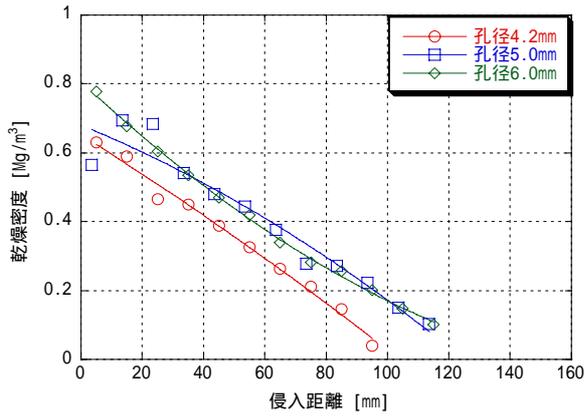


図 3.9 侵入距離と乾燥密度の関係  
(乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup> ベントナイト単体)

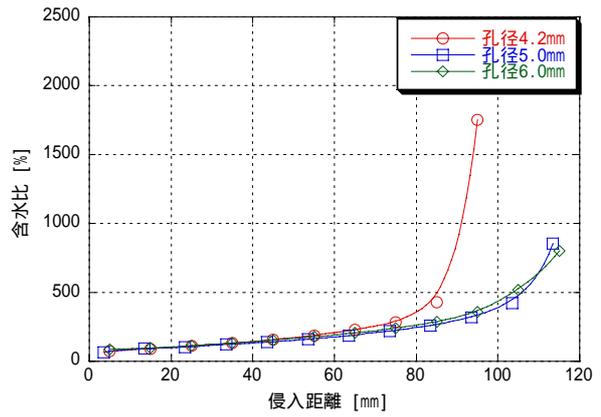


図 3.10 侵入距離と含水比の関係  
(乾燥密度 1.6Mg/m<sup>3</sup> ベントナイト単体)

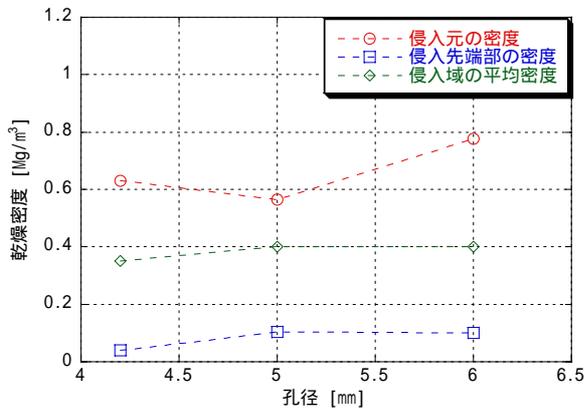


図 3.11 侵入元と侵入先端部における  
乾燥密度

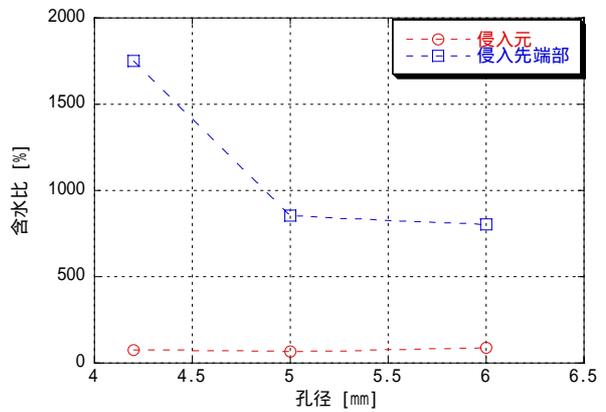


図 3.12 侵入元と侵入先端部における  
含水比

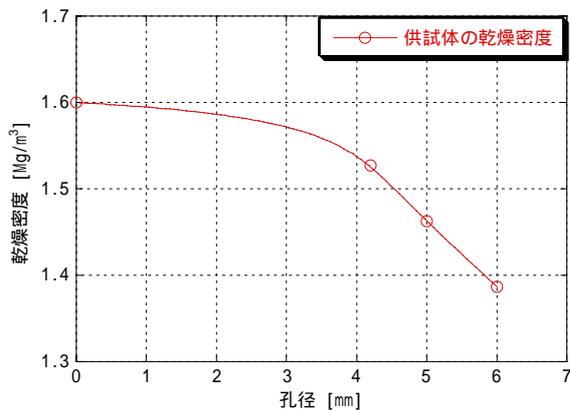


図 3.13 供試体の残留乾燥密度

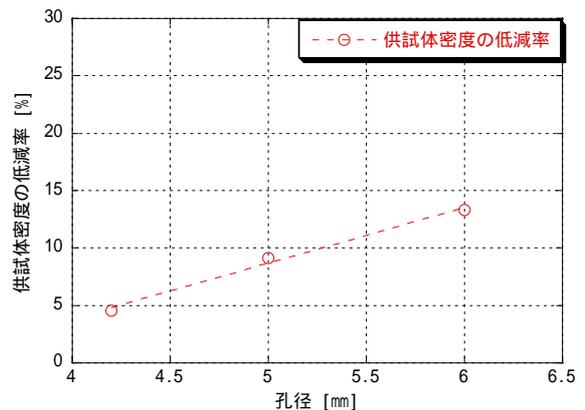


図 3.14 供試体密度の低減率

表 3.6 データ表

孔径 [mm]	測定距離 [mm]	スロ-重量 [g]	アルミ容器重量 [g]	乾燥前重量 [g]	乾燥後重量 [g]	含水比 [%]	乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]
4.2	10	0.0257	0.0793	0.2580	0.1924	75.06	0.631
	20	0.0260	0.0793	0.2618	0.1869	91.79	0.589
	30	0.0238	0.0793	0.2398	0.1676	111.94	0.466
	40	0.0256	0.0793	0.2495	0.1672	132.10	0.450
	50	0.0260	0.0793	0.2436	0.1591	157.06	0.388
	60	0.0259	0.0793	0.2348	0.1503	187.36	0.326
	70	0.0249	0.0793	0.2244	0.1406	230.22	0.263
	80	0.0236	0.0793	0.2153	0.1322	283.62	0.211
	90	0.0251	0.0793	0.2119	0.1247	429.56	0.147
	100	0.0288	0.0793	0.2099	0.1136	1750.91	0.040
	供試体	-	0.0793	12.6068	9.6767	30.53	1.527

孔径 [mm]	測定距離 [mm]	スロ-重量 [g]	アルミ容器重量 [g]	乾燥前重量 [g]	乾燥後重量 [g]	含水比 [%]	乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]
5.0	7	-	0.0793	0.2083	0.1569	66.24	0.565
	17	0.0204	0.0793	0.3620	0.2359	92.58	0.694
	27	0.0213	0.0793	0.3741	0.2349	103.65	0.684
	37	0.0209	0.0793	0.3363	0.2067	121.69	0.542
	47	0.0192	0.0793	0.3239	0.1928	139.02	0.480
	57	0.0213	0.0793	0.3280	0.1879	160.48	0.445
	67	0.0201	0.0793	0.3115	0.1734	186.62	0.377
	77	0.0209	0.0793	0.2753	0.1548	220.70	0.278
	87	0.0202	0.0793	0.2900	0.1527	258.08	0.271
	97	0.0205	0.0793	0.2830	0.1434	320.18	0.222
	107	0.0205	0.0793	0.2541	0.1294	421.28	0.151
	117	0.0216	0.0793	0.2938	0.1211	854.95	0.103
	供試体	-	0.0793	12.3729	9.2689	33.78	1.463

孔径 [mm]	測定距離 [mm]	スロ-重量 [g]	アルミ容器重量 [g]	乾燥前重量 [g]	乾燥後重量 [g]	含水比 [%]	乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]
6.0	10	0.0340	0.0793	0.5272	0.3332	88.22	0.778
	20	0.0329	0.0793	0.4880	0.3036	96.34	0.677
	30	0.0336	0.0793	0.4783	0.2838	113.81	0.604
	40	0.0323	0.0793	0.4633	0.2628	132.61	0.535
	50	0.0329	0.0793	0.4500	0.2451	154.18	0.470
	60	0.0345	0.0793	0.4448	0.2324	179.09	0.419
	70	0.0313	0.0793	0.4028	0.2064	205.01	0.339
	80	0.0327	0.0793	0.3835	0.1917	240.65	0.282
	90	0.0351	0.0793	0.3943	0.1871	285.01	0.257
	100	0.0328	0.0793	0.3728	0.1688	359.79	0.201
	110	0.0333	0.0793	0.3712	0.1544	518.66	0.148
	120	0.0361	0.0793	0.3728	0.1439	803.16	0.101
	供試体	-	0.0793	12.0757	8.7916	37.69	1.387

## 3.1.5.2 X線 CT を用いた亀裂侵入域における密度分布評価

ここでは、核燃料サイクル開発機構で所有している医療用 X 線 CT 装置( 図 3.15 参照 )を用い、前項で実施した貫入型模型試験および BENTFLOW 試験と同様な構造の試験容器を用いて、非破壊検査技術を適用した侵入ベントナイトの密度分布の測定を試みた。装置仕様を表 3.7 に示す。

医療用の CT スキャナは、産業用のものと比べ、スキャン時間が速いことや測定対象の寸法範囲が比較的大きいという利点がある。本研究では、測定対象であるベントナイト試料の測定範



図 3.15 医療用 X 線 CT 装置 ( 東芝製 : Asteion VI )

表 3.7 Asteion VI 仕様

ガントリ	スキャン方式	R/R 連続回転方式
	有効視野	180、240、320、400、500 (mm)
	スキャン時間	(0.5)、0.75、1、1.5、2、3 (秒)
	スライス厚	(op:0.8) 1、2、3、5、7、10 (mm)
	ガントリ開口部	720mm
X 線管	X 線管焦点	0.9×1.3、1.7×1.6 (スリットビーム法)
X 線ジェネレータ	X 線管電圧	80、120、135 kV
	X 線管電流	30 ~ 300mA (10mA 単位)
ヘリカルスキャン	最大スキャン時間	100 秒
	最大スキャン範囲	1390mm
寝台	上下移動	610mm
	水平移動	1820mm
	スキャン可能範囲	1400mm
イメージプロセッサ	画像再構成マトリックス数	512×512
	画像再構成時間	3 秒 (コンベ)、4 秒 (ヘリカル)
ディスプレイ	表示マトリックス	512×512、1024×1024
	画像拡大	2 倍、4 倍、任意
パフォーマンス	ハイコントラスト空間解像度	0.35mm
	ローコントラスト解像度	2.5mm/0.25%

囲を満足するとともに、密度分布を評価するために十分な解像度を有しているという観点より、医療用の X 線 CT スキャナを適用して測定を行った。

本評価に用いた X 線 CT 装置は、X 線が物体を透過した際、X 線吸収係数による物体の空間分布が求められるものであり、医療分野において式(3.4)で定義されている。ここで、 $\mu_t$  : 物体の吸収係数、 $\mu_w$  : 水の吸収係数、 $K$  : 比例定数である。本装置は、水の CT 値を 0、空気を -1000 と定義しており、X 線吸収係数は CT 値という数値に換算され、物体の空間分布が画像処理される。

$$CT = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w} K \quad (3.4)$$

測定によって得られる空間画像を構成している CT 値は、医療分野における定義上の数値であるため、ベントナイトへの直接的な適用による密度評価は行えない。したがって、ベントナイト密度と CT 値との相関関係の把握を行う必要がある。これらの相関関係については、ベントナイトの乾燥密度と飽和度をパラメータとしたデータの取得が行われており(棚井、他(2003), Tanai and Yamamoto(2003))、湿潤密度と CT 値の相関関係式が得られている(式 3.5)。本評価では、式 3.5 を用いて、侵入ベントナイトの密度分布について評価を行った。

$$\rho_t = \frac{(CT + 1465.7)}{1495.6} \quad (3.5)$$

#### (1) 貫入型模型試験

貫入型模型試験の試験容器は、3.1.5.1 項の図 3.8 に示すとおり、また、試験条件は表 3.5 に示すとおりである。X 線 CT における測定条件を表 3.8 に示す。測定位置は図 3.16 に示すとおりである。図の赤ラインは、貫入型模型試験における侵入ベントナイトの測定位置を示している。X 線 CT によるスキャナ画像および断面画像を図 3.17 に示す。これは、測定位置で得られた断面図を示している。

侵入ベントナイトの密度分布の評価は、各測定断面の画像構成データである CT 値を、式(3.5)により湿潤密度への換算を行った。地層処分研究における緩衝材の密度の種々の研究では、乾燥密度による評価が主になっている。湿潤密度は、体積中にあるベントナイト量と水分量を積とした密度であるため、絶対量としてベントナイト量を見積る場合に、含水比等を把握しておく必要がある。しかしながら、ベントナイトの含水比を把握するためには、サンプリング等による解体が必要であるため、経時的な侵入挙動による密度分布を測定している本試験では、試験中におけるベントナイト含水比の把握は行えない。したがって、ここでは、侵入ベントナイトが飽和しているものと仮定し、飽和状態にある湿潤密度と乾燥密度の相関関係(図 3.18)より得られる式(3.6)を用いて、湿潤密度から乾燥密度への導出を行い、侵入ベントナイトの密度分布の把握を行った。

表 3.8 X線 CT による測定条件

スキャン方式	コンベンショナル、ヘリカル
管電流 [mA]	150
管電圧 [kV]	135
スキャン幅 [mm]	2
スキャンスピード[sec]	1

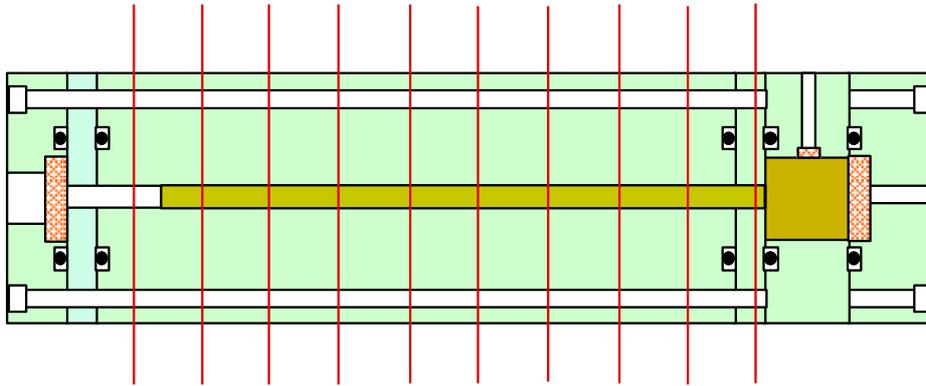
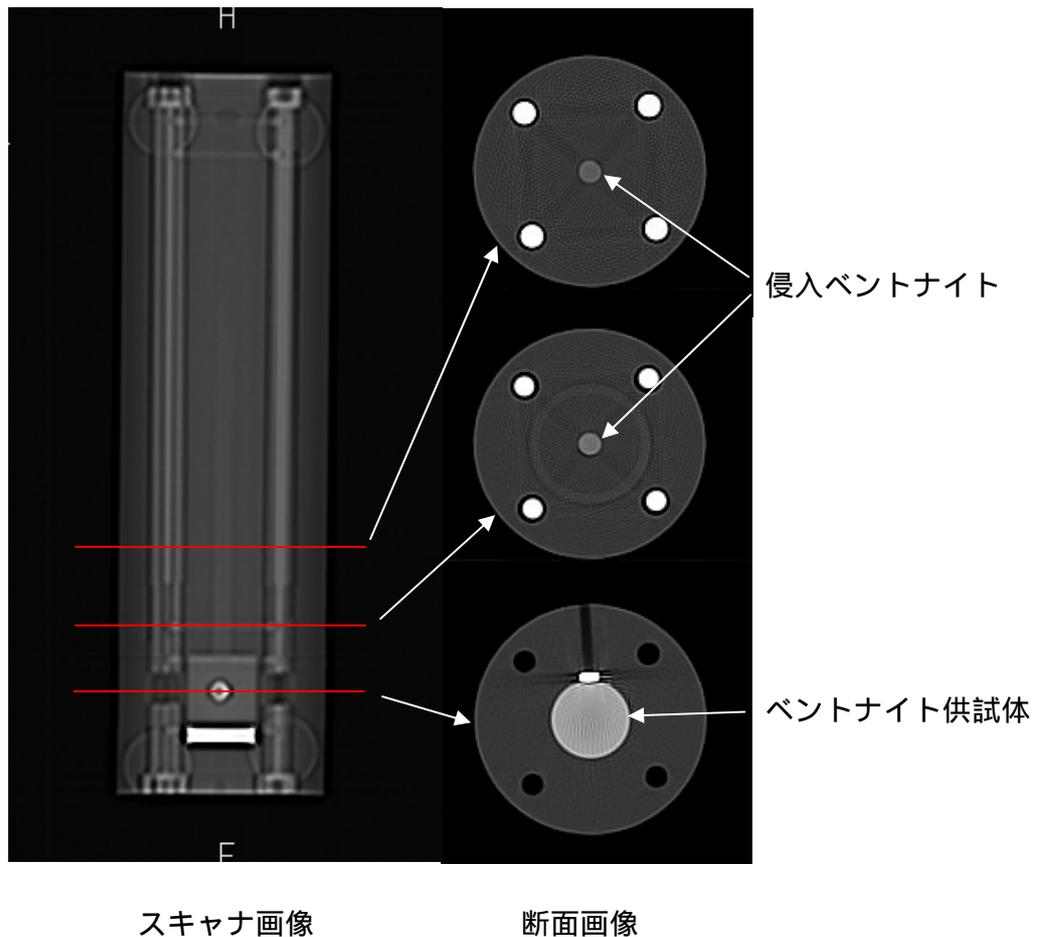


図 3.16 X線 CT 測定位置



スキャナ画像 断面画像  
 図 3.17 X線 CT による断面画像 (孔径 6.0mm)

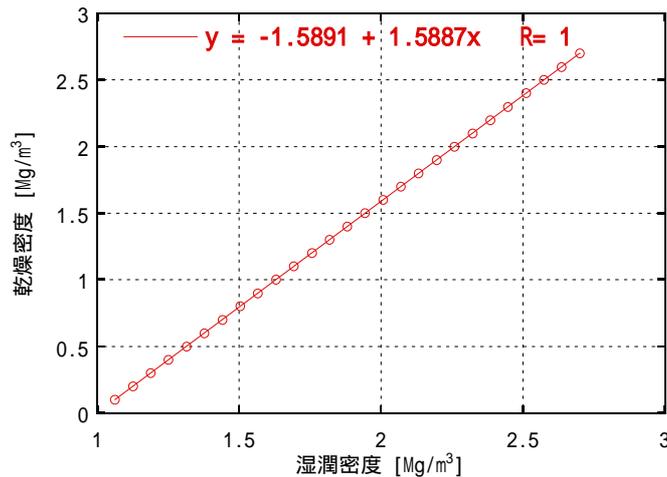


図 3.18 ベントナイト飽和時の湿潤密度と乾燥密度の関係

$$\rho_d = -1.5891 + 1.5887 \rho_t \quad (3.6)$$

式(3.6)によって、見積られる侵入ベントナイトの密度分布を図3.19～3.21に示す。図は、横軸が侵入域における侵入距離、縦軸が乾燥密度を示している。図より、それぞれの経時的な密度分布は、非線形的な分布を示していることが分かる。次に、X線CTによる密度分布評価の妥当性を確認するために、3.1.5.1項、図3.9の実測結果との比較を行った。図3.22～3.24にサンプリングによる実測の密度分布測定結果とX線CTの非破壊検査による結果を孔径ごとに比較して示す。図より、実測値とX線CTによる乾燥密度の評価は、孔径4.2mmで若干の差異があるものの、孔径5.0mmおよび6.0mmにおいては比較的によく一致していることが分かる。ここで、両者の乾燥密度の評価における測定精度について考察を行う。サンプリングによる実測は、最も信頼性が高い手法の一つである。本測定において、試料の状態(貫入状態)に影響を生じさせてしまうのは、試料分断の際のベントナイトの流動によるものと考えられる。一方、X線CTでは、サンプリングによって生じるような試料状態への影響はないものの、CT値と湿潤密度との実験式の精度や乾燥密度を導出するに至るまでの仮定などによる影響が考えられる。いずれも、測定精度に関する不確定な要因があるものの、乾燥密度分布の比較結果からは、両者ともに同程度の評価値が得られていることから、X線CTによる測定技術は、実測結果と同等に扱えるものと考えられ、妥当性を確認することができた。

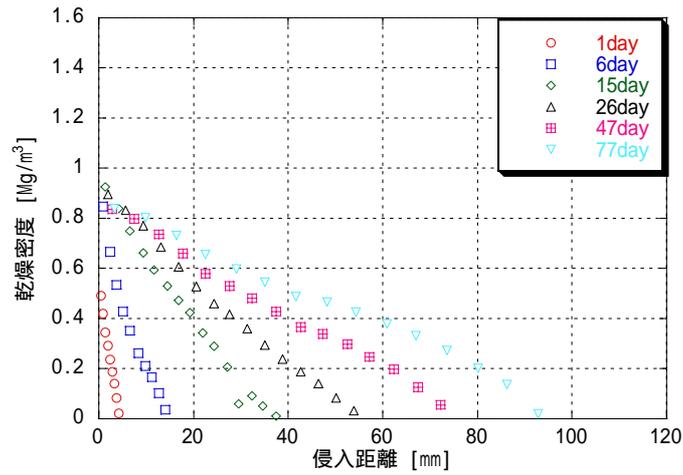


図 3.19 侵入距離と乾燥密度の関係 (孔径 4.2mm)

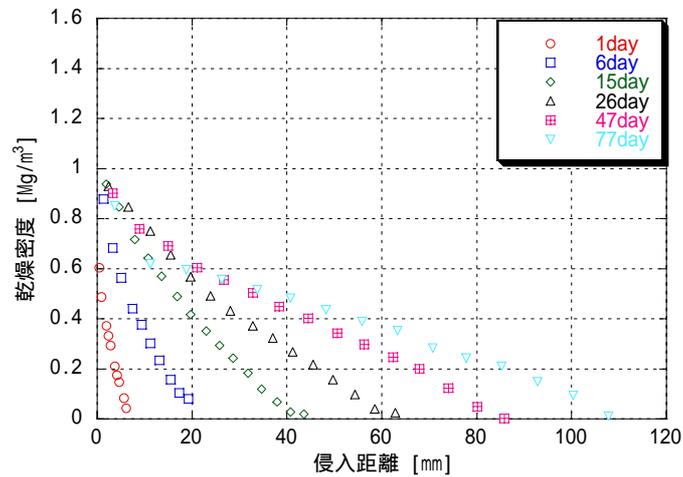


図 3.20 侵入距離と乾燥密度の関係 (孔径 5.0mm)

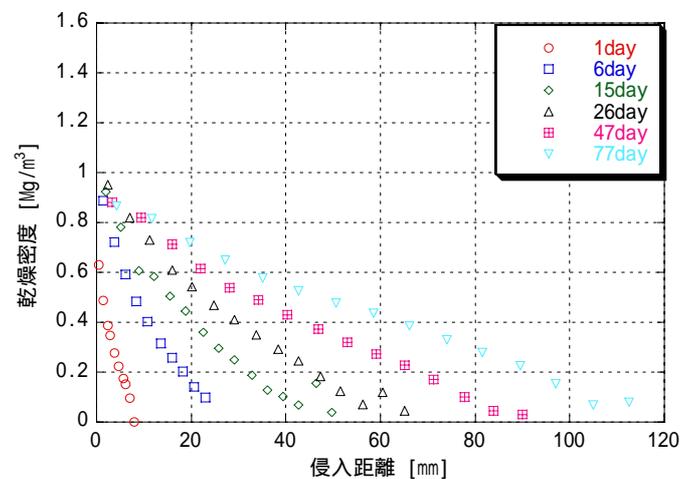


図 3.21 侵入距離と乾燥密度の関係 (孔径 6.0mm)

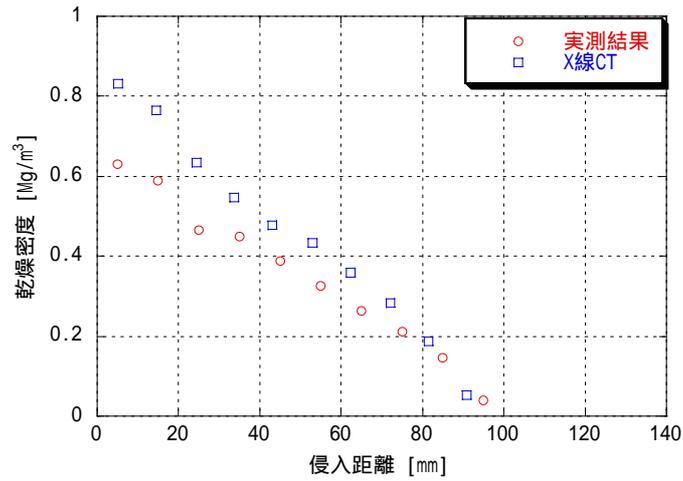


図 3.22 実測結果と X 線 CT による密度分布評価の比較 (孔径 4.2mm)

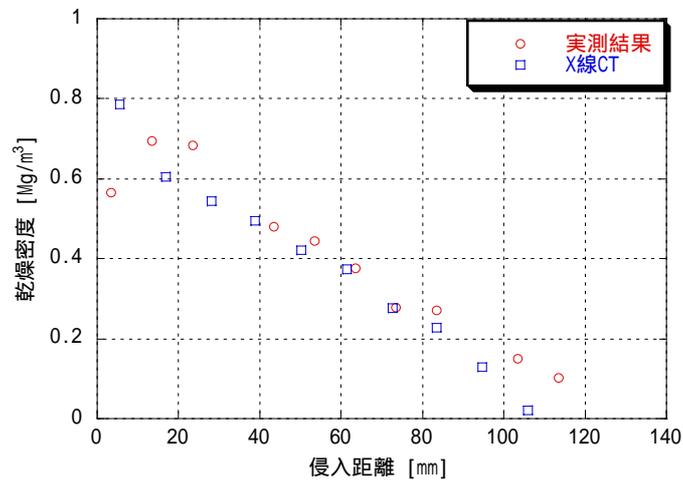


図 3.23 実測結果と X 線 CT による密度分布評価の比較 (孔径 5.0mm)

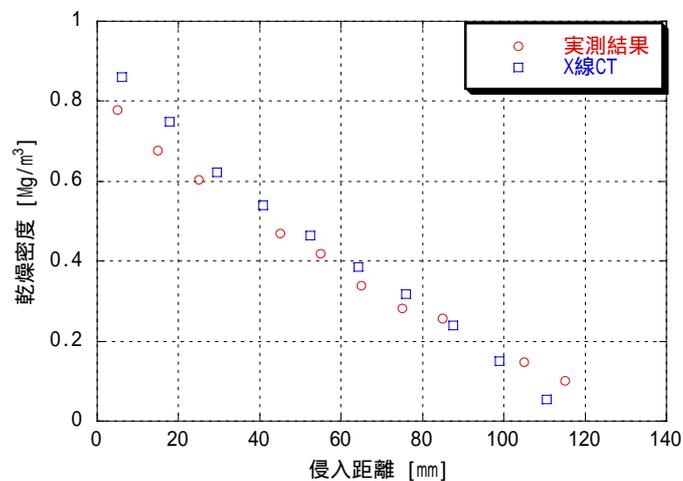


図 3.24 実測結果と X 線 CT による密度分布評価の比較 (孔径 6.0mm)

## (2) BENTFLOW 型試験

BENTFLOW 型試験の試験容器概略図を図 3.25 に示す。試験は、従来の方法と同様に、容器中央にある供試体の周方向に単一平板亀裂を設け、亀裂中へ水を供給して亀裂中への侵入ベントナイトの観察および X 線 CT による測定を行った。試験条件を表 3.9 に、X 線 CT による測定条件を表 3.10 に示す。また、参考として、試験中における亀裂侵入写真の一例を図 3.26 に示す。

X 線 CT による測定は、亀裂侵入距離の測定を行い、その経時変化の進展状況により適時実施した。X 線 CT によるスキャナ画像および断面画像を図 3.27 に示す。図の左に示しているスキャナ画像上の赤ラインは、X 線 CT の測定位置を示している。また、図の右は、測定した断面画像を示しており、赤ラインの位置（単一平板模擬亀裂面）で密度分布の評価を行った。

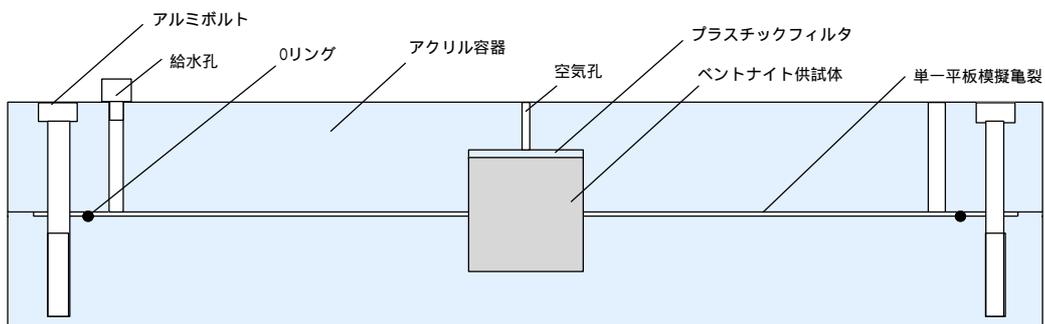


図 3.25 X 線 CT 測定用 BENTFLOW 型試験容器概略図

表 3.9 試験条件

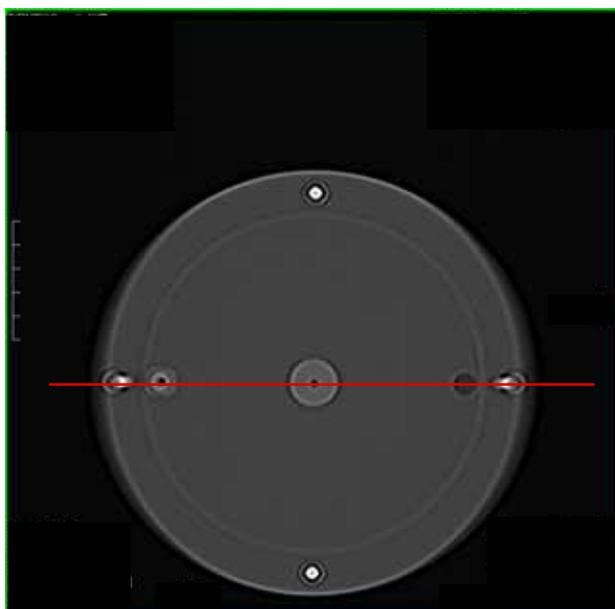
試料（ベントナイト）	クニゲル V1		
供試体寸法 [mm]	20 × H20	30 × H30	40 × H40
ケイ砂混合率 [%]	0		
乾燥密度 [Mg/m <sup>3</sup> ]	1.8		
初期含水比 [%]	10		
亀裂幅 [mm]	0.6	0.9	1.2
試験温度 [ ]	室温（20）		
試験水	蒸留水		

表 3.10 X 線 CT による測定条件

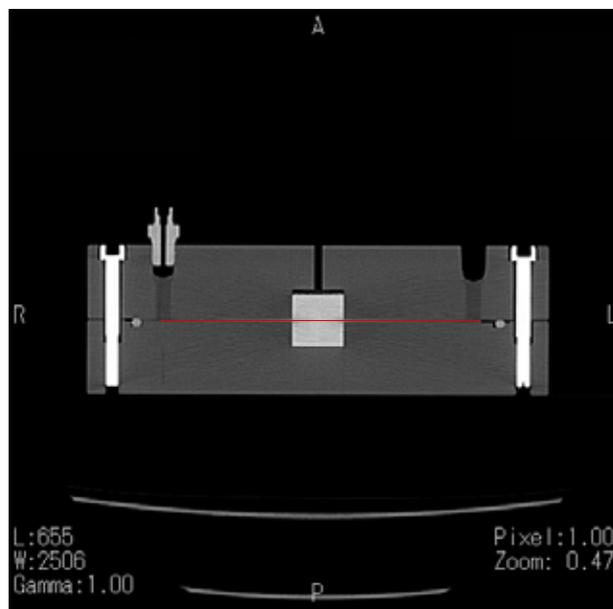
スキャン方式	コンベンショナル
管電流 [mA]	150
管電圧 [kV]	135
スキャン幅 [mm]	1
スキャンスピード[sec]	1



図 3.26 試験中の一例 ( 供試体仕様 : 40 × H40mm )



容器スキャナ画像



測定断面画像

図 3.27 X線CT測定位置(供試体仕様 : 20 × H20mm)

X線CTによって測定評価を行った亀裂中における侵入ベントナイトの乾燥密度分布図を図3.28～3.30に示す。図は、経過時間ごとの乾燥密度分布を示している。図中の2本の破線部は、供試体の部位を示しており、横軸の距離0は供試体の中心位置である。したがって、破線部が供試体と亀裂との境界を表している。図の分布傾向から分かるように、亀裂中におけるベントナイトゲルは、供試体から亀裂侵入部の先端位置にかけて、非線形的な密度分布が形成されていることが分かる。この傾向は、貫入型模型試験の結果とも同様である。また、分布図からは、供試体寸法が大きいケースほど、密度分布にバラツキがみられる。本試験では、供試体寸法ごとに試験容器であるアクリル板の肉厚がそれぞれ異なっており、供試体寸法が大きくなるほど、試験容器の肉厚も厚くなっている。したがって、これらのバラツキの要因の一つとして、X線の透過エネルギーの減弱による影響が考えられる。X線の物質を透過する度合いは、物質の種類、厚さおよび密度によって変化する。したがって、試験容器の肉厚が増すにつれ、測定の感度、すなわち測定精度への影響が表れているものと推察される。

次に侵入域の乾燥密度について整理する。図より、亀裂中におけるベントナイトの乾燥密度は、おおよそ $1.0\text{Mg}/\text{m}^3$ 以下の密度になっていることが分かる。侵入域における密度の把握については、これまでに貫入型模型試験によって概略的な把握が行われており（松本、棚井(2003)）、亀裂の侵入元の部位において、おおよそ $0.8\text{Mg}/\text{m}^3$ 以下、先端部では $0.2\text{Mg}/\text{m}^3$ 以下であり、侵入域における平均的な密度は、 $0.4\text{Mg}/\text{m}^3$ 以下の密度状態となっていることを把握しており、3.1.5.1項の試験結果とも合致する。侵入域における平均的な密度の傾向を把握することで、個別の現象データである時間と侵入距離との相互の関係から、人工バリア緩衝材の密度低下を概略的に見積ることができる。

ここで、X線CTによる乾燥密度の評価結果を用いて、BENTFLOW型試験および貫入型模型試験における侵入域の平均的な乾燥密度を整理し、図3.31に示す。図は、横軸に試験時間（経過日数）、縦軸にX線CTの評価結果より求めた侵入域の平均乾燥密度を表している。侵入域における平均乾燥密度の傾向からは、経過時間に因らず、おおよそ $0.4\text{Mg}/\text{m}^3$ 程度の密度状態を示していることが分かる。この傾向は、これまでに得られている結果とほぼ一致していることから、ベントナイトの侵入域の平均的な乾燥密度は、経過時間に影響されず、保守的に見積ってもおおよそ $0.5\text{Mg}/\text{m}^3$ 程度であることが考えられる。

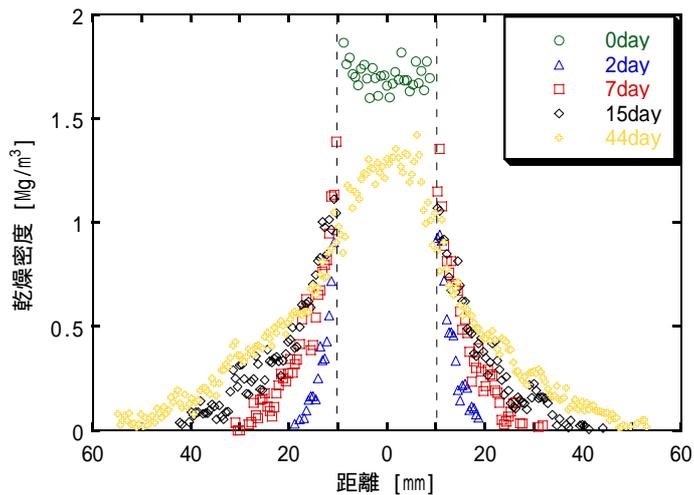


図 3.28 侵入距離と乾燥密度分布の関係 (供試体仕様: 20 × H20mm)

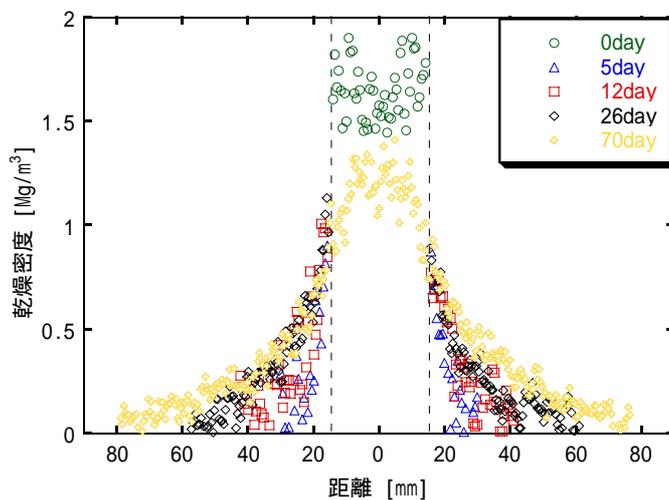


図 3.29 侵入距離と乾燥密度分布の関係 (供試体仕様: 30 × H30mm)

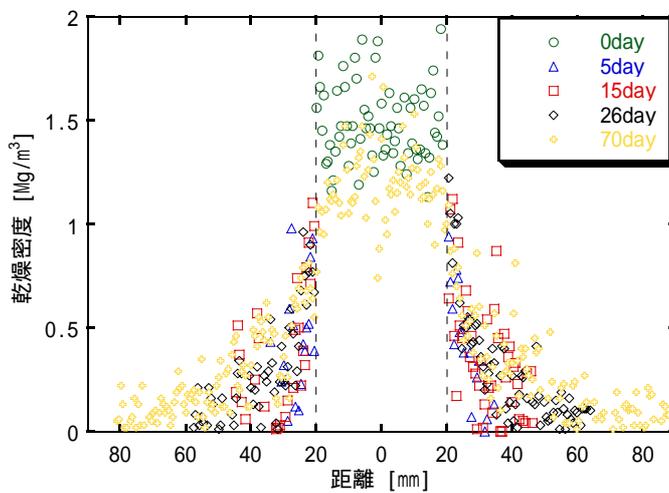


図 3.30 侵入距離と乾燥密度分布の関係 (供試体仕様: 40 × H40mm)

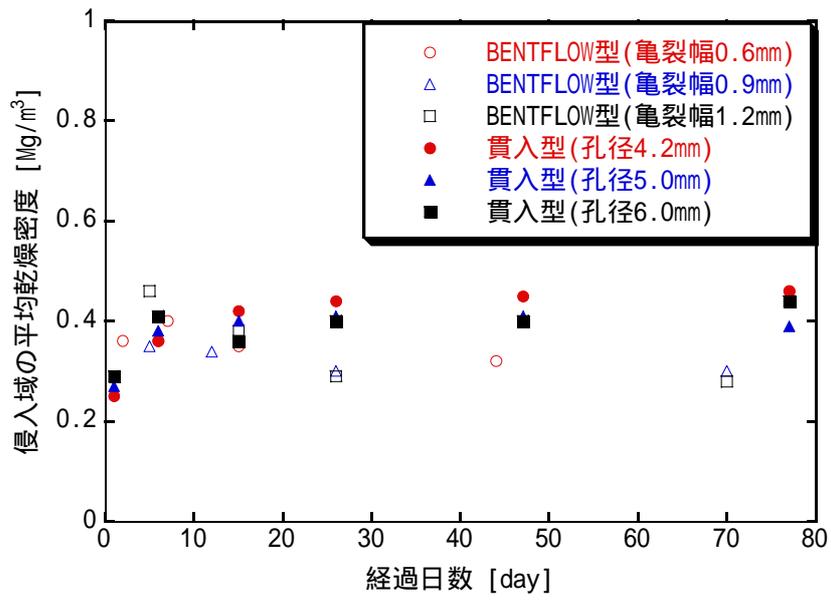


図 3.31 経過日数と侵入域における平均乾燥密度の関係

### 3.2 流水試験

人工バリアと母岩に期待される安全機能へ影響を与える可能性がある現象の一つとして、コロイド生成 / 移行が考えられている。コロイドの生成に関しては、緩衝材表面からベントナイトコロイドが生成される可能性が指摘されているものの ( A, Avogadro and G, DE Marsily.(1984) )、緩衝材を起源としたコロイドの発生量に関しては、十分に検討されていない。核種移行評価においては、地下水中におけるコロイド濃度および核種のコロイドへの分配係数が評価上とくに重要なパラメータとなるとしている ( Baek, I. and Pitt, Jr. W.W(1996), 久野、他(1999) )。このことから、緩衝材を起源とするベントナイトコロイドの移行、すなわち浸食現象について定量的に把握する必要がある。

緩衝材の浸食現象に関しては、水流による侵入ベントナイトの形状変形から、浸食現象が発生する臨界流速値について概略的な把握を行った ( 菅野、松本(1997) )。また、より詳細な把握として、ベントナイトの浸食評価を再度検討し、浸食されるコロイドを定量的に把握するための実験を試みている ( 松本、棚井(2003) )。ここでは、これまでの既存の知見を踏まえ、地下水流れによって移行するベントナイトコロイドの移行量に関して、模擬実験を行い、流速と浸食量との関係把握を試みた。

#### 3.2.1 浸食コロイドの定量的な評価

ここでは、浸食現象を直接的に把握するために、排水液を採取し、流速に伴う浸食コロイドの定量的な把握を行うための試験を試みた。試験は、試験容器の孔内に圧縮ベントナイトを置き、単一平板模擬亀裂を設定して、水を亀裂中に供給する。ベントナイトは、水の浸潤直後より亀裂中へ侵入するため、試験開始から亀裂内へ水の流れ場を与えた場合には、ベントナイトの亀裂への侵入、また、これにより亀裂内流速の変化などが複合的に作用してしまうために、浸食コロイドの定量化が捉えづらくなる。したがって、ベントナイトの亀裂中への侵入が安定するまでの間、試験容器内は静水状態として放置し、ベントナイトの亀裂侵入に伴う流路断面の減少、すなわち実験中における亀裂内流速の変化を防ぐ実験手法とした。ベントナイトの亀裂への侵入が安定 ( 侵入距離の定位置化 ) した後、液送ポンプにより一定流量で制御した供給水を亀裂内へ送水し、侵入ベントナイトに対して二次元的な流れ場を与え、流速に伴うベントナイトの形状変形の観察および排水液のサンプリングを行った。試験条件は、2.2.3 項、表 2.2 を参照のこと。

##### 3.2.1.1 侵入距離

亀裂中におけるベントナイトの侵入距離は、亀裂へのベントナイトの侵入距離がほぼ定位置化されたことを確認した後、水を送水する前に専用の定規を用いて測定を行った。測定箇所は、図 3.32 に示す A~H 方向の 8 方向とし、試験装置上方よりカメラによって侵入形状を観察した。

測定した侵入距離は、試験開始より約 34 日後に定位置化され、各測定位置で同程度の距離を示した。侵入距離を表 3.11 に示す。

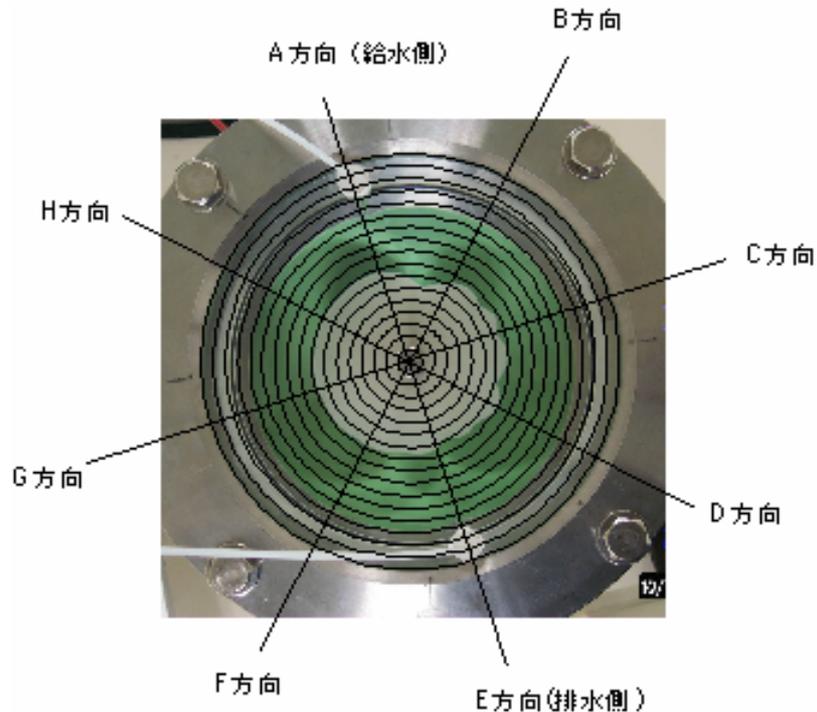


図 3.32 侵入距離測定箇所（実験の一例）

表 3.11 侵入距離

経過時間[day]	侵入距離 [mm]								
	A方向	B方向	C方向	D方向	E方向	F方向	G方向	H方向	平均
34	40	40	40	40	40	40	40	40	40

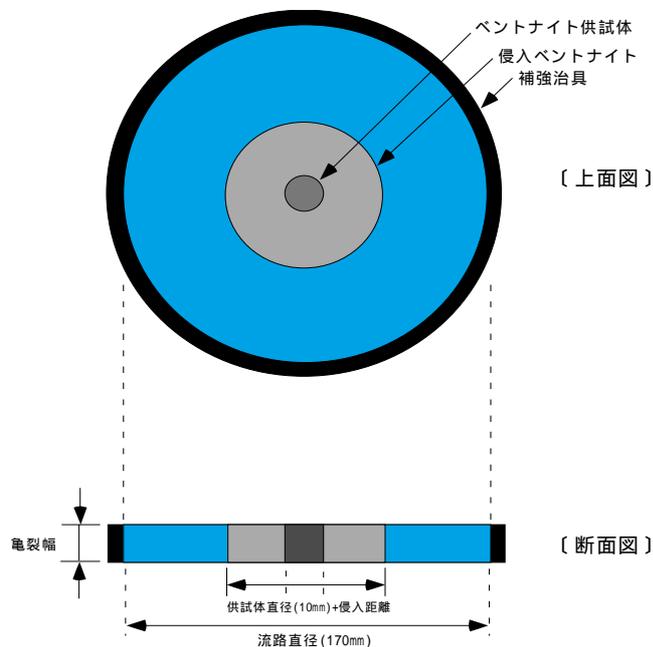
### 3.2.1.2 亀裂内流速

ベントナイトの浸食現象を評価する上で亀裂内の流速を把握することは、流速と浸食量との関係を定量的に評価するために必要不可欠である。これまでに、実験における亀裂内流速の把握は、流量と流路断面積より推定する方法（図 3.33 (a)）、亀裂内における着色トレーサ液の時間当たりの移動距離より算出する方法（図 3.33 (b)）、また、物質移動解析などの手法（図 3.33 (c)）を用いて試験中の流速を推定している（菅野、松本(1997)、松本、棚井(2003)）。このうち、着色トレーサ液を用いた評価では、ベントナイトの膨潤性に影響を及ぼすことを実験的に確認したため、本実験には、使用しないこととした。また、解析コードを用いた亀裂内流速の予測的評価に関しても、不確定な要因が認められており、評価に関する妥当性の検討が課題となっている。したがって、本実験においては、流量と流路断面積より亀裂内流速を推定し、保守的に亀裂内平均流速を用いることとした。流量に関しては、実流量である 0.01ml/min を用い、また、流路断面積は、ベントナイトの亀裂中への侵入も考慮し、亀裂開口幅 0.1cm と断面距離 17cm から推定した。ベントナイトの侵入距離 8cm、および供試体の直径 1cm を用いて算出した流路断面積は、 $0.8\text{cm}^2$  となり、流量と流路断面積より求まる平均流速は、 $2 \times 10^{-6}\text{m/s}$  となる。

(a) 平均流速

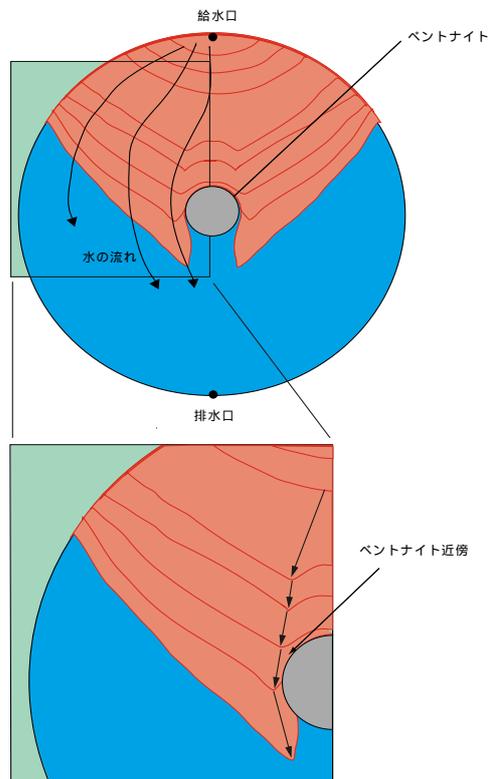
流路断面積 = (流路直径 - (供試体直径 + 侵入距離)) × 亀裂幅

流速 = 実流量 / 流路断面積



(b) トレーサ液を用いた可視化流速

・ 時間当りのトレーサの移動距離より、ベントナイト近傍の流速を推定



(c) 解析コードを用いた予測的流速

・ 三次元亀裂ネットワーク解析コード (FracMan/MAFIC) を用いたパ-ティクルトラックング法による物質移動解析

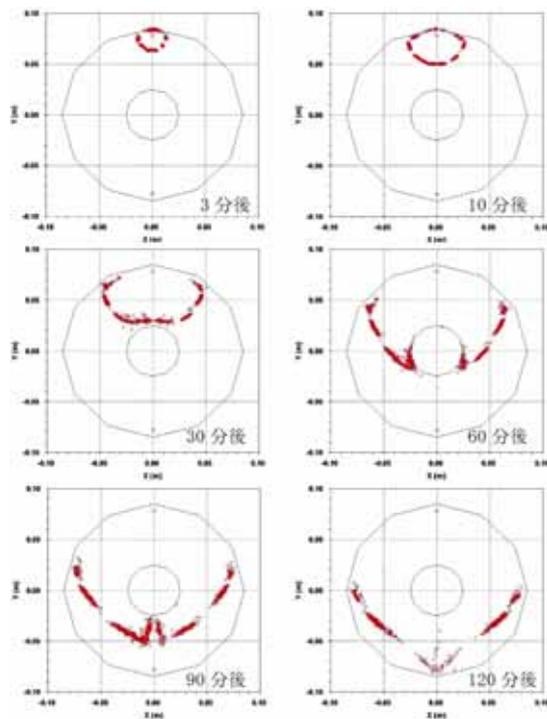
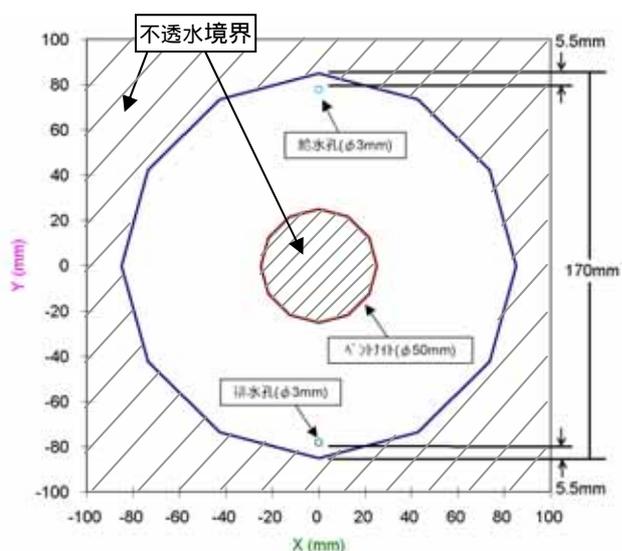


図 3.33 浸食現象試験における亀裂内流速の推定

ベントナイトの浸食に直接的に影響を与える水の流れは、侵入ベントナイトの先端部であるベントナイトゲル相と液相との境界部であることが考えられる。したがって、流速と浸食現象との関係を把握するためには、侵入ベントナイトの先端部近傍（以下、ベントナイト近傍という）における流速を把握する必要がある。トレーサ液を用いた可視化流速評価での亀裂内流速の把握による知見では、ベントナイト近傍における流速が平均流速の約3倍程度という知見が得られている。したがって、本実験において適用している平均流速は、直接的に作用している流速よりも小さいことから、保守的な評価であると言える。その一方で、浸食現象を厳密に評価するために、直接的に浸食に影響を与える流速を明確に把握することも必要である。このため、亀裂内流速の評価を勘案し、実現象を理解していくために、より詳細な検討を行っていく必要がある。

### 3.2.1.3 排水液の分析

亀裂中の侵入ベントナイトに対して流水場を設けてサンプリングを行った排水液は、一定流量の流速場において約140～160ml程度バッチ的に採取し、浸食によって生成したと考えられるベントナイトコロイドの濃度や特性（粒径分布、ゼータ電位）について測定を行った。表3.12に、これらの分析項目および分析装置をまとめる。

表 3.12 排水液の分析項目および分析機器

分析項目	分析装置	仕様	備考
コロイド濃度分析	ICP-AES (SPS-1700VRS)	高周波電源部：周波数 27.12MHz 最高出力：1.8kW 主分光器(B)：ツェルニターナ ホログラフィック 平面回折格子(3600本/mm)、波長範囲 160～500nm 副分光器(A)：ツェルニターナ ホログラフィック 平面回折格子(1800本/mm)、波長範囲 190～800nm	セイコーインスツルメンツ社製
	ICP-MS (HP4500)	高周波電源部：周波数 27.12MHz 最高出力：1.6kW 質量分析部：四重極質量分析計 質量範囲：2～280amu	ヒューレットパッカート社製
粒径分布測定 (動的光散乱法)	ゼータサイザー ナノ ZS	粒径範囲：0.6～6000nm	マルバン社製
ゼータ電位測定 (レーザードップラー+M3-PALS法)		測定範囲：-150～150mV	
pH測定 (ガラス電極法)	pH計 (F-21)	電極：9610-10D pH範囲：0～14.00	堀場製作所社製

(1) 浸食コロイド濃度

ベントナイトコロイドの濃度分析は、排水液の限外ろ過を行い、この限外ろ過前後の溶液について、ベントナイトの主要構成元素である Si, Al, Mg の濃度を ICP-AES または ICP-MS でそれぞれ測定し、ろ別されたコロイド成分の定量を行った。元素分析の測定に際しての限外ろ過および前処理は、フロー図 3.34 に示すとおりである。表 3.13 に測定条件を示す。

各バッチにおける排水液について、限外ろ過を実施する前後で Si, Al, Mg の濃度を ICP-AES および ICP-MS により測定した結果を表 3.14 に示す。限外ろ過を行うことによりベントナイトコロイドは除去される。したがって、限外ろ過前およびろ過後における両者の差がコロイド状態として存在していた各元素の濃度となる。測定の結果、Al, Mg においては限外ろ過後のイオン濃度のほとんどが流速条件下で検出下限以下であることから、ベントナイト自体の溶解反応はほとんど起きていないものと考えられる。次に、コロイド成分として存在していた各元素の濃度と、それらから算出された組成比を表 3.15 に示す。ここでモル組成比は Al(1.67)を基準にしている。

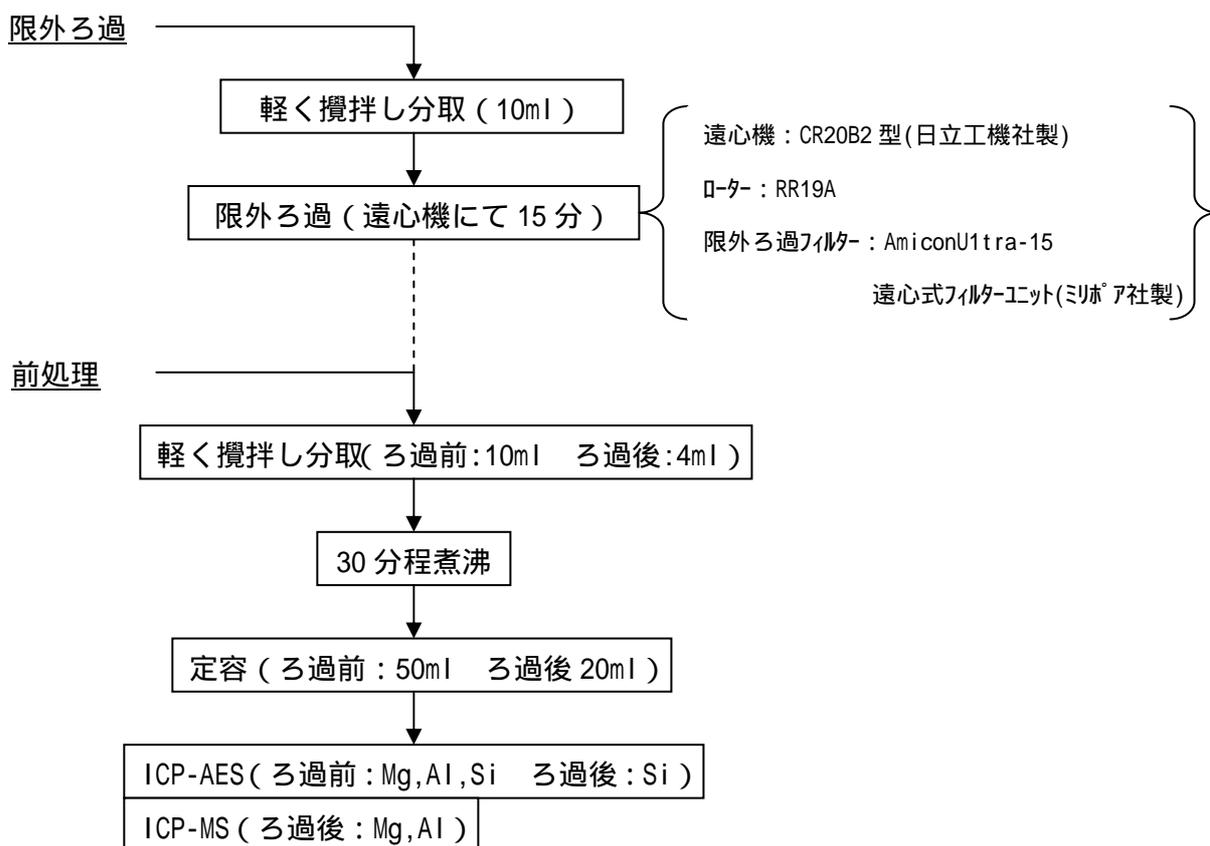


図 3.34 元素分析フロー

表 3.13 コロイド濃度分析測定条件

	ICP-AES	ICP-MS
測光高さ	12.0 mm	-
分光器	B	-
出力	1.30 kW	0.6 kW
キャリアガス	0.2 kgf/cm <sup>2</sup>	1.0L/min
ネブライザ	-	クロスフロー
プラズマガス	16L/min	16L/min
サンプルリフトアップ	-	17mm
補助ガス	0.5/min	1.0L/min
測定波長	Mg:285.213nm, Al:396.152nm, Si:251.611nm	-
測定質量数	-	Mg:24amu, Al:27amu
設定温度	23	23
測定環境	クリーンルーム クラス 1000	クリーンルーム クラス 1000

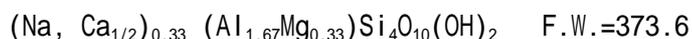
表 3.14 Si, Al, Mg 濃度の測定結果

経過時間 [day]	流量 [ml/min]	平均流速 [m/s]	Si		Al		Mg	
			ろ過前 [ppm]	ろ過後 [ppm]	ろ過前 [ppm]	ろ過後 [ppm]	ろ過前 [ppm]	ろ過後 [ppm]
10	0.01	2E-6	109	1.8	43	0.05	9.0	0.02
21	0.01	2E-6	101	0.73	40	<0.02	8.1	<0.01
31	0.01	2E-6	70	0.86	27	<0.02	5.5	<0.01
41	0.01	2E-6	49	0.61	19	<0.02	3.9	<0.01
51	0.01	2E-6	33	0.46	12	<0.02	2.6	<0.01
61	0.01	2E-6	23	0.64	8.5	<0.02	1.8	<0.01
72	0.01	2E-6	17	0.54	6.1	<0.02	1.3	0.01
83	0.01	2E-6	13	0.68	4.7	<0.02	1.0	<0.01
94	0.01	2E-6	8.2	0.74	3.1	<0.02	0.7	0.02
105	0.01	2E-6	5.5	0.48	2.1	<0.02	0.5	0.02
118	0.01	2E-6	4.3	0.67	1.5	<0.02	0.3	0.03
130	0.01	2E-6	3.8	0.62	1.4	<0.02	0.3	0.02
142	0.01	2E-6	2.9	0.16	0.9	<0.02	0.2	0.02
154	0.01	2E-6	1.3	0.13	0.5	<0.02	0.2	0.03
165	0.01	2E-6	1.1	0.19	0.4	<0.02	0.1	0.03
176	0.01	2E-6	1.3	0.18	0.4	<0.02	0.1	0.04

表 3.15 コロイド成分としての濃度および組成比

経過時間 [day]	流量 [ml/min]	流速 [m/s]	コロイド成分の濃度			コロイド成分のモル組成比		
			Si [mol/L]	Al [mol/L]	Mg [mol/L]	Si	Al	Mg
10	0.01	2E-6	3.8E-03	1.6E-03	3.7E-04	4.00	1.67	0.39
21	0.01	2E-6	3.6E-03	1.5E-03	3.3E-04	4.02	1.67	0.38
31	0.01	2E-6	2.5E-03	1.0E-03	2.3E-04	4.11	1.67	0.38
41	0.01	2E-6	1.7E-03	7.0E-04	1.6E-04	4.09	1.67	0.38
51	0.01	2E-6	1.2E-03	4.4E-04	1.1E-04	4.35	1.67	0.40
61	0.01	2E-6	8.0E-04	3.2E-04	7.4E-05	4.22	1.67	0.39
72	0.01	2E-6	5.9E-04	2.3E-04	5.3E-05	4.33	1.67	0.39
83	0.01	2E-6	4.4E-04	1.7E-04	4.1E-05	4.21	1.67	0.39
94	0.01	2E-6	2.7E-04	1.1E-04	2.8E-05	3.86	1.67	0.41
105	0.01	2E-6	1.8E-04	7.8E-05	2.0E-05	3.84	1.67	0.42
118	0.01	2E-6	1.3E-04	5.6E-05	1.1E-05	3.88	1.67	0.33
130	0.01	2E-6	1.1E-04	5.2E-05	1.2E-05	3.64	1.67	0.37
142	0.01	2E-6	9.8E-05	3.3E-05	7.4E-06	4.88	1.67	0.37
154	0.01	2E-6	4.2E-05	1.9E-05	7.4E-06	3.75	1.67	0.67
165	0.01	2E-6	3.2E-05	1.5E-05	2.9E-06	3.65	1.67	0.32
176	0.01	2E-6	4.0E-05	1.5E-05	2.5E-06	4.49	1.67	0.28

クニゲル V1 にはモンモリロナイト（スメクタイト）の他にも玉髄などが含まれ、シリカなどのコロイドを生成することが考えられる。しかし、表 3.15 で算出されたコロイド成分の Si, Al および Mg のモル組成比は、モンモリロナイトのそれと非常に近い値を示していることから、排水中には主にベントナイト（モンモリロナイト）コロイドが含まれていることが推測される。Al のモル濃度およびモンモリロナイトの理想的な組成式から算出されるベントナイトコロイドの濃度を表 3.27 に示す。なお、理想的なモンモリロナイトの組成式は以下に示されるとおりである（例えば、白水(1991)）。



コロイド濃度の測定結果より、平均流速とコロイド濃度の関係を図 3.35 に示す。図より、時間の経過に伴い、コロイド濃度が減少する傾向にあることが分かる。

ここで、時間の経過に伴いコロイド濃度が減少する傾向にあるという結果に関して考察を行う。試験の条件は、ベントナイトの形状的な変形がほとんど安定した状態であり、また、亀裂中の流速は一定である。これらの条件より、コロイドの浸食に影響を及ぼす要因の一つとして、侵入ベントナイトのゲルフロント界面における状態が大きく挙動に寄与していることが考えられる。ゲ

ルフロントの状態が流水初期と後期の段階とでは、状態変化が生じていること、すなわち、初期の段階では比較的剥離されやすい状態のコロイドが存在している、もしくは、分散したコロイドが存在していると仮定した場合、これらが移行した後には徐々に結合力(剥がれにくい)がある粒子相に近づいていることなどが推察される。また、亀裂中の侵入ベントナイトは、静水条件下で約1ヵ月の間、十分に水と反応している状態である。ベントナイトと水との反応時間と交換性陽イオンの経時変化を測定した佐々木(1994)らの結果からは、イオンの溶解反応によって経時的にNa型ベントナイトが減少し、Ca型ベントナイトが増加している傾向が得られている。これらを考慮すれば、本実験に関しても、これらと同様な溶解反応によって、Ca型ベントナイトが生成されていることが考えられ、浸食挙動に何らかの影響を及ぼすことも考えられる。現状においては、ベントナイト-水反応における溶解イオンの測定や、X線回折によるスメクタイトの底面間隔等の検討は行っていないことから、ベントナイトの状態が及ぼす浸食現象の詳細なメカニズムに関しては把握できていない。浸食挙動は、流速や水反応時間およびゲルフロントの状態などの種々の要因に影響されることが考えられるため、なお詳細な検討が必要である。

表 3.16 コロイド濃度の推定結果

経過時間 [day]	流量 [ml/min]	平均流速 [m/s]	コロイド濃度 [ppm]
10	0.01	2E-6	356
21	0.01	2E-6	332
31	0.01	2E-6	224
41	0.01	2E-6	158
51	0.01	2E-6	100
61	0.01	2E-6	70
72	0.01	2E-6	51
83	0.01	2E-6	39
94	0.01	2E-6	26
105	0.01	2E-6	17
118	0.01	2E-6	12
130	0.01	2E-6	12
142	0.01	2E-6	7
154	0.01	2E-6	4
165	0.01	2E-6	3
176	0.01	2E-6	3

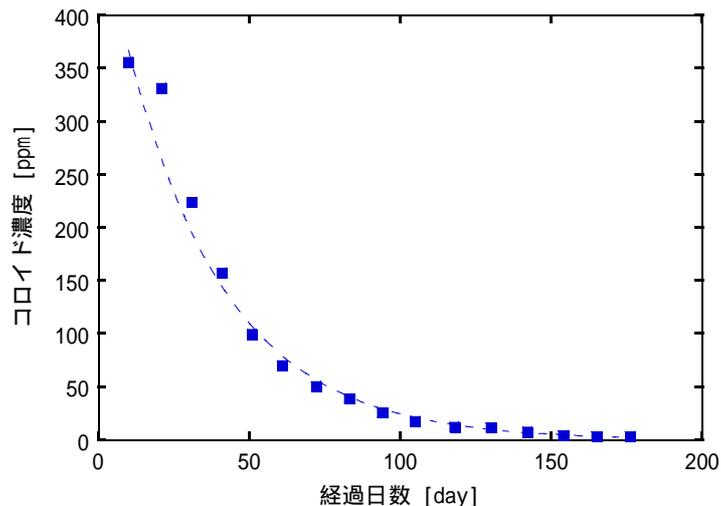


図 3.35 経過時間と浸食コロイド濃度の関係

(2) 浸食コロイドの粒径とゼータ電位

バッチごとに排水溶液の粒径分布およびゼータ電位の測定を行った。測定条件を表 3.17 に、コロイドの平均粒径およびゼータ電位の測定結果をバッチごとに表 3.18 示す。また、経過時間とコロイドの平均粒径の関係を図 3.36 に示す。時間と平均粒径図からは、時間の経過に伴い、若干ではあるがコロイドの粒子径が増加する傾向がみられた。亀裂内流速を段階的に増加させ、コロイドの粒径分布を測定した浸食現象実験(松本、棚井(2003))の結果からは、流速の増加にともない粒子径が大きい方へシフトする傾向が得られている。これらは、流速の増加、すなわち掃流力の増加に伴い粒子径の大きいものも浸食されているものと推察することができる。一方、本実験における粒径の増加は、亀裂内流速が一定であるため、掃流力に伴う粒径の増加ではないことが予想される。ベントナイト粒子のゼータ電位は、おおよそ-35~-30mVであることを考慮すれば、コロイドの凝集は起こっておらず、水溶液中において安定でいることが推察されることから、粒子径の増加はゲルフロント界面における状態的な変化が影響していることが考えられる。

表 3.17 コロイド粒径分布およびゼータ電位測定条件

	粒径分布測定	ゼータ電位測定
セル	クォーツクエアセル	ディスプレイ-ダブルキャピラリーセル
分散媒屈折率	1.33	1.33
分散媒粘度	0.8872(mPa・s)	0.8872(mPa・s)
分散媒誘電率	79	79
測定時間	20sec. x 15times	Auto
Attenuator	Auto	Auto
測定セルポジション	Auto	Auto
設定温度	25	25

表 3.18 コロイド粒子の平均粒径およびゼータ電位の測定結果

経過時間 [day]	実流量 [ml/min]	平均流速 [m/s]	平均粒径 [nm]	ゼータ電位 [mV]
10	0.01	2E-6	295	-35
21	0.01	2E-6	293	-35
31	0.01	2E-6	299	-39
41	0.01	2E-6	316	-34
51	0.01	2E-6	339	-33
61	0.01	2E-6	360	-34
72	0.01	2E-6	352	-33
83	0.01	2E-6	340	-35
94	0.01	2E-6	366	-33
105	0.01	2E-6	422	-32
118	0.01	2E-6	410	-32
130	0.01	2E-6	413	-34
142	0.01	2E-6	412	-31
154	0.01	2E-6	394	-32
165	0.01	2E-6	341	-30
176	0.01	2E-6	420	-30

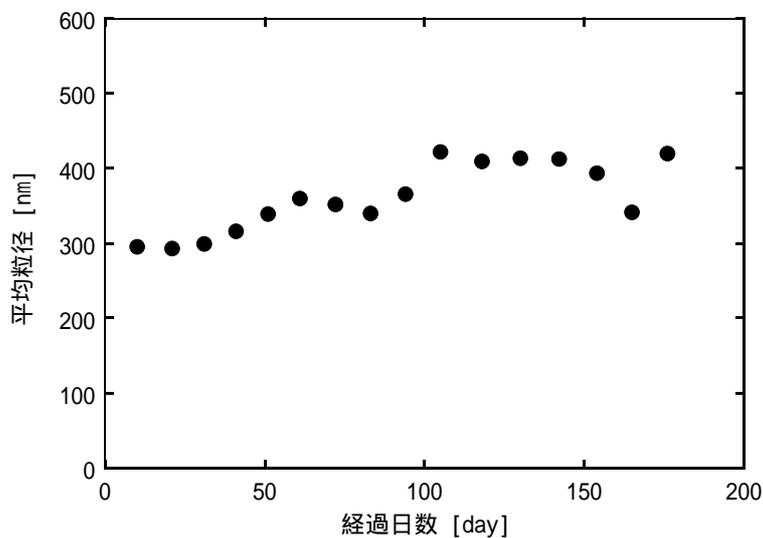


図 3.36 経過時間とコロイド平均粒径の関係

( 3 ) 排水液の pH

排水液の各バッチにおける、pH の測定を行った。測定条件を表 3.19 に、結果を表 3.20 に示す。また、経過時間と pH の変化を図 3.37 に示す。排水液の pH は、流水開始から約 10 日後において 8.1 を示し、その後、時間の経過と伴に低下する傾向がみられ 6.5 程度で安定した。ベントナイ

トと地下水反応の実験を行った佐々木(1994)らは、大気条件下におけるベントナイト(クニゲル V1 およびクニピア F) - 水反応実験によって、pH および主要な液中元素濃度に関する時間的な変化の把握を行っている。この実験における知見によれば、ベントナイトと反応した溶液は、反応開始直後の pH が 10 程度の弱アルカリ性を示し、溶液の主成分は  $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、炭酸 ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ) であり、クニゲル V1 では、時間とともに pH の低下および主要元素濃度の上昇が認められている。そして、これら大気条件下におけるクニゲル V1 - 蒸留水反応の実験による pH および液中元素濃度の経時変化を、以下のように解釈している。

- ・ Na スメクタイトのイオン交換反応と方解石の溶解反応により、pH は反応直後に急激に上昇する。
- ・ ベントナイト中の黄鉄鉱による酸化反応によって、時間とともに pH は減少し、 $\text{SO}_4^{2-}$ 濃度は上昇する。
- ・ pH の減少に伴い方解石の溶解が促進され、炭酸濃度が上昇する。また、イオン交換反応により、 $\text{Na}^+$ 濃度も上昇する。

これらの知見より、本試験においても、初期の状態では、Na スメクタイトのイオン交換反応と方解石の溶解反応によって、pH が上昇したことが考えられる。また、経時的な pH の減少に関してであるが、佐々木らの実験では、ベントナイトと溶液とを所定の割合(液固比[ml/g])で反応させているのに対し、本実験では水の供給があるため、試験容器中の水は経時的に入れ代わっている。したがって、両者には実験的な相違があるため、ベントナイト中の黄鉄鉱による酸化反応によって、時間とともに pH が減少しているという断定はできない。本実験において亀裂中の水が入れ代わるのに必要とする時間は、流路の体積から見積った水量と流量の関係より求めた場合、おおよそ 27 時間で亀裂中の水が入れ代わるという計算になる。しかしながら、その間には、化学反応と新たな水の供給が繰返されていることから、その反応時間や流量が pH の変化に起因することが考えられる。本試験においては、佐々木らの知見による反応後の溶液の主成分である  $\text{Na}^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、炭酸 ( $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ) などのイオン濃度に関しては測定していないため、今後、これらを考慮し、現象を解釈していく必要がある。

表 3.19 pH 測定条件

電極	9610-10D (硝子電極)	
校正ポイント	4.01	フタル酸塩 (関東化学製)
	6.86	中性リン酸塩 (関東化学製)
	9.18	ほう酸塩 (関東化学製)
設定温度	23	

表 3.20 排水液の pH

経過時間 [day]	実流量 [ml/min]	平均流速 [m/s]	pH
10	0.01	2E-6	8.1
21	0.01	2E-6	7.3
31	0.01	2E-6	7.3
41	0.01	2E-6	7.3
51	0.01	2E-6	7.0
61	0.01	2E-6	7.1
72	0.01	2E-6	7.0
83	0.01	2E-6	6.6
94	0.01	2E-6	6.7
105	0.01	2E-6	6.5
118	0.01	2E-6	6.7
130	0.01	2E-6	6.6
142	0.01	2E-6	6.4
154	0.01	2E-6	6.3
165	0.01	2E-6	6.4
176	0.01	2E-6	6.5

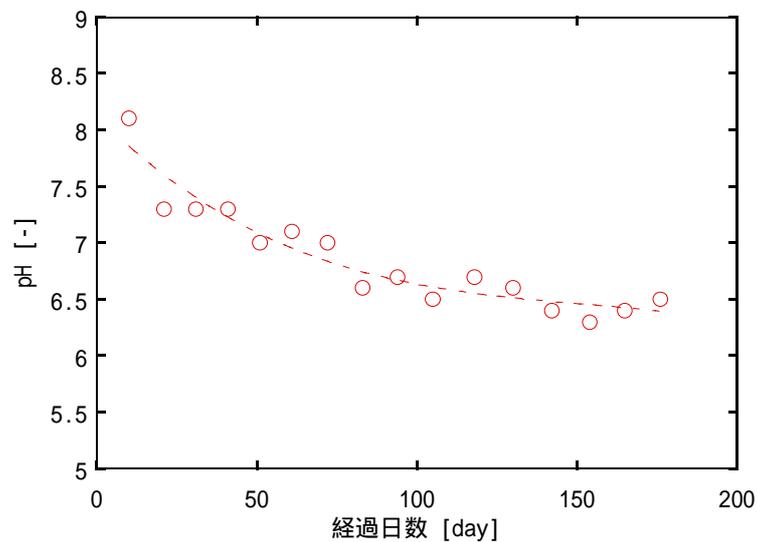


図 3.37 経過時間と pH の関係

## 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の長期健全性を評価するために、緩衝材の流出挙動に関するデータの取得を行った。

緩衝材の侵入現象に関しては、侵入現象モデルの妥当性の検討および構築に資するため、処分環境条件の一つである海水系地下水を模擬し、人工海水を用いたデータの拡充ならびに非破壊検査技術を用いた侵入密度分布に関するデータの取得を試みた。これらの結果より、以下の知見が得られた。

(1) 海水系地下水を模擬し、人工海水による亀裂中へのベントナイトの時間と侵入距離に関するデータの取得を行った結果、その侵入距離は降水系地下水（蒸留水）と比較し、著しく小さくなるという知見を得た。また、時間と侵入距離の関係を見積るための比例係数を、有効粘土密度との関係で整理し、関係式を得た（亀裂幅：1.5mm，有効粘土密度： $1.37 \rho_b - 1.80$  [Mg/m<sup>3</sup>])

$$A = 5.4707 \times 10^{-4} \cdot \exp(3.0091 \rho_b)$$

(2) 供試体の平衡膨潤応力の測定結果より、ベントナイトの亀裂侵入に伴う著しい膨潤応力の低下は認められず、侵入に伴う膨潤応力は、「第2次取りまとめ」における人工海水を用いた膨潤応力の測定結果と同程度の性能を担保することが分かった。

(3) 侵入モデルの妥当性および適用性に関する評価を行うために、亀裂侵入部における密度分布に関するデータを取得した結果、亀裂侵入部における平均的な乾燥密度は、亀裂開口幅や侵入時間に因らず、おおよそ 0.5Mg/m<sup>3</sup> 程度となることが分かった。

(4) X線CTによる非破壊検査技術を適用し、亀裂侵入部におけるベントナイトの密度分布評価を試み、その測定技術の妥当性および適用性を確認することができた。

緩衝材の浸食現象に関しては、流速と緩衝材を起源とするベントナイトコロイドの浸食量の関係を定量的に把握するための試験を実施した。これらの結果より、以下の知見が得られた。

(5) 降水系地下水（蒸留水）を用いて時間と浸食コロイド濃度の関係を定量的に把握した結果、コロイド濃度は、時間の経過とともに減少し、緩衝材を起源とするベントナイトコロイドの生成濃度は  $10^{-6}$ m/s の流速条件において、おおよそ 3ppm であることが分かった。

(6) 浸食コロイドの経時的な粒径分布を測定した結果、コロイドの平均的な粒径は、若干増加する傾向を示し、浸食コロイドの平均粒径は 300 ~ 400nm 程度であることが分かった。

これらの結果は、緩衝材の流出現象を把握する上での基礎データである。したがって、本来複雑である岩盤亀裂内への緩衝材の侵入現象および地下水による浸食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上でのデータの取得が必要不可欠である。とくに、地下水組

成、温度環境、地圧などによる流出特性への影響を今後把握していく必要がある。

緩衝材の侵入現象に関しては、廃棄体定置後より進行する挙動であり、人工バリアの長期健全性を評価する上で長期予測モデルを構築し、安全評価に反映していく必要がある。また、浸食現象に関しては、理論的な検討が行われているものの、確証できる実験データは得られていないため、モデルの妥当性の確認ができていない段階である。そのため、流速と浸食量の定量的な把握を早急に行い、モデルとの比較を行う必要がある。

参考文献

- A, Avogadro and G, DE Marsily : “ The Role of Colloids in Nuclear Disposal ”, Scientific Basis for Nuclear Waste Management VII. p.495-505 (1984)
- Baek, I. and Pitt, Jr. W.W : “ Colloid-facilitated Radionuclide Transport in Fractured Porous Rock ”, Waste Manage, Vol.16,No.4, p.313-325 (1996)
- Boisson, J.Y. : “ Study on the erosion possibilities by flowing ground waters on bentonite plugs expanded from borehole into fractures ”, Proc. NEA/CEC Workshop - Sealing of Radioactive waste repositories (1989)
- 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)
- 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 ) ”, PNC TN8410 97-313 (1997)
- 菅野毅、岩田裕美子 : “ 緩衝材侵入現象モデルの検討 ”, JNC TJ8400 2003-026 (2003)
- Kersting, A. B., et al : “ Migration of Plutonium in Groundwater at the Nevada Test Site ” Nature, 397,7 January , p.56-59. (1999)
- 久野義夫、他 : “ 亀裂岩石中におけるコロイドに助長された核種移行評価 ”, JNC TN8400 99-022 (1999)
- 黒澤進、他 : “ ベントナイトコロイドの特性に基づくベントナイトの侵食に関する検討 ”、日本原子力学会「1998年春の年会」要旨集、p.598. (1998)
- 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 ) ”, JNC TN8400 2003-006 (2003)
- 中野政詩、他 : “ 不飽和粘土の浸潤と膨潤 ”、農業土木学会論文集、No.100,pp.8-16 (1982)
- Pusch, R : “ Stability of Bentonite Gels in Crystalline Rock - Physical Aspects ”, KBS TR 83-04 (1983)

JNC TN8400 2003-035

佐々木康雄、他：“ベントナイト - 地下水反応に関する研究”，PNC TN8410 94-407. (1994)

白水晴雄：粘土鉱物学 - 粘土科学の基礎 -、朝倉書店 (1991)

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”，JNC TN8400 99-040  
(1999)

鈴木英明、藤田朝雄：“緩衝材の膨潤特性”，JNC TN8400 99-038 (1999)

棚井憲治、他：“X線CT法の適用性に関する検討”，JNC TN8430 2003-001 (2003)

Tanai, K. and Yamamoto, M：“Experimental and Modeling Studies on Gas Migration in  
KunigelV1 Bentonite”，JNC TN8400 2003-024 (2003)