

# ベントナイト緩衝材の流出特性の評価（I）

1997年9月

動力炉・核燃料開発事業団  
東海事業所

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせ下さい。

〒319-11 茨城県那珂郡東海村大字村松 4 - 33

動力炉・核燃料開発事業団

東海事業所 (Tokai Works)

技術開発推進部 技術管理室

(Technology Management Section)

Inquiries about copyright and reproduction should be addressed to:  
Technology Management Section, Tokai Works, Power Reactor and Nuclear Fuel  
Development Corporation 4-33, Muramatu Ooaza, Tokai, Naka-gun, Ibaraki,  
319-11, Japan )

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development  
Corporation) 1997

## ベントナイト緩衝材の流出特性の評価 (I)

実施責任者：石川 博久\*

報告者：菅野 毅\*, 松本 一浩\*\*

## 要 旨

高レベル放射性廃棄物地層処分における人工バリアの長期物理的安定性を評価するために、処分坑道（又は処分孔）から周辺岩盤亀裂への緩衝材の流出挙動を定量的に把握する必要がある。緩衝材の流出が大規模に起こる場合は、処分坑道（又は処分孔）内のベントナイト量が減り、緩衝材に期待される諸機能が低下することが考えられる。また、緩衝材の浸食によりベントナイトコロイドが発生し、これが放射性核種を搬送する可能性も指摘されている。

緩衝材の流出は、

- ・ベントナイトが膨潤することによる亀裂への侵入現象（extrusion）
- ・亀裂へ侵入したベントナイト粒子が地下水の流れにより浸食される現象（erosion）

の二つの現象によるものと考えられている。本研究では、緩衝材流出挙動試験設備（BENTFLOW）を用い、これらの現象を模擬した試験を行い、extrusion現象の速度及び浸食現象が起こる最小臨界流速に関する定量的な測定を行った。試験により得られた知見は以下のとおり。

- ・extrusion現象による流出変位（距離） $y$ は、次式に示すように時間 $t$ の平方根に比例し、比例係数 $A$ は、亀裂幅 $d$ が大きい程、また、ベントナイト含有比 $Bc$ が大きい程大きくなる。

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

クニゲルV1-100%ベントナイトの場合、亀裂幅0.5mmでは、 $A$ の値として、0.34 [mm · h<sup>-1/2</sup>]が得られた。

- ・ベントナイトの浸食が起こる最小臨界流速は $2 \times 10^{-5}$  [m/s]（630 [m/y]）程度と判断される。

これらの知見を用い、坑道横置方式と処分孔縦置方式の仕様例に基づいて、処分環境における緩衝材の流出量の評価を実施した。処分環境における岩盤亀裂の開口幅は0.5mmとした。その結果、extrusion現象による緩衝材の質量流出率として、1万年間で0.04~0.2%、100万年後で2~12%という値が得られた。この流出による影響が最大となったのは、処分孔縦置方式における100万年後の評価結果で、緩衝材の乾燥密度は初

期の $1.8\text{g/cm}^3$ から $1.5\text{g/cm}^3$ まで低下し、その透水係数は初期の $3.9\times 10^{-14}$  [m/s] から $1.6\times 10^{-13}$  [m/s]まで増加すると予測される。この程度の透水係数の上昇であれば、緩衝材の止水性に及ぼす流出の影響はあまり大きくないと考えられる。緩衝材の浸食現象に関しては、亀裂開口幅が $0.5\text{mm}$ の場合、地下水流速は $2\sim 4\times 10^{-4}$  [m/s]となり、地下水流速が上記臨界流速よりも大きいため、浸食が起こる可能性がある。ただし、一般に水理学的開口幅は幾何学的な開口幅と異なることが指摘されており、浸食の可能性を判定するためには、処分環境の亀裂内における地下水の実流速に関してさらに詳細な検討を行う必要がある。

## 目 次

1. 緒言	1
1. 1 はじめに	1
1. 2 緩衝材流出現象に関する既往の研究	2
1. 2. 1 Puschの研究	2
1. 2. 2 ストリーパプロジェクトにおける研究	3
1. 2. 3 Boissonの研究	3
1. 2. 4 Kannoらの研究	4
1. 2. 5 Börgessonの研究	5
2. 試験方法	6
2. 1 供試体	6
2. 2 装置・方法	6
3. 試験結果及び考察	11
3. 1 静水試験	11
3. 2 流水試験	14
3. 3 比例係数A	22
3. 3. 1 亀裂開口幅の影響	23
3. 3. 2 スケールの影響	23
3. 3. 3 ベントナイト含有比の影響	23
3. 3. 4 流水条件の影響	23
4. 処分場における緩衝材流出現象の評価	24
4. 1 岩盤亀裂の設定	24
4. 2 比例係数Aと浸食臨界流速	24
4. 3 緩衝材浸食の可能性	24
4. 4 緩衝材流出量の評価	26
4. 4. 1 坑道横置方式	26
4. 4. 2 処分孔縦置方式	28
4. 4. 3 まとめ	28
5. 結語	30
参考文献	32

## 1. 緒言

### 1. 1 はじめに

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各要素は、処分システムとしての性能を発揮するための諸機能を有しているが、これらの機能は人工バリアの構造が力学的に安定であることを前提としている。このため、人工バリアの構造力学的安定性に影響を及ぼす可能性のある事象及びプロセスとして、以下に示す項目について検討する必要がある（動燃事業団，1992）。

- (1) 緩衝材の膨潤圧の発生
- (2) 緩衝材中のオーバーパックスの変位
- (3) オーバーパックス腐食生成物による応力の発生
- (4) オーバーパックス腐食に伴う水素ガスの移行
- (5) ニアフィールドの水理場における緩衝材の物理的安定性

本報では、この内（5）ニアフィールドの水理場における緩衝材の物理的安定性に関して、模擬室内試験に基づいて検討を行った。

緩衝材の候補材としては、低透水性・核種吸着性等の特性を有する圧縮ベントナイトが考えられている。圧縮ベントナイトには吸水により膨張（膨潤）する性質があり、緩衝材には、この膨潤により周辺岩盤の亀裂を充填する自己シール性が期待されている。ただし、亀裂の開口幅が大きい場合には、ベントナイトの亀裂への侵入が止まらずに、緩衝材が周辺岩盤中へと移行することが想定される。また、亀裂中の地下水の流れによって、亀裂中へ侵入したベントナイトのゲルが浸食されることも想定される。このように、ニアフィールド水理場における緩衝材の物理的安定性に影響を及ぼすものとしては、

- ・ベントナイトが膨潤することによる亀裂への侵入現象（extrusion）
- ・亀裂へ侵入したベントナイト粒子が地下水の流れにより浸食される現象（erosion）

の二つの現象による処分孔から岩盤への緩衝材の流出挙動が考えられており、この現象を実験により定量的に把握する必要がある。

緩衝材の流出が大規模に起こる場合は、処分孔（処分孔縦置方式の場合）又は処分坑道（坑道横置方式の場合）内のベントナイト量が減り、緩衝材に期待される諸機能が低下することが考えられる。また、浸食されるベントナイトの前線は、コロイドの発生源となる可能性がある。コロイドは必ずしも溶質と同じ遅延プロセス（マトリックス拡散）をとることはないので、浸食により発生したコロイドが放射性核種を収着する場合は、放射性核種が比較的速く地質媒体中を輸送されることになる（NAGRA, 1994）。

本研究では、これらの現象を模擬した試験を行い、侵入現象の速度と浸食現象の臨界流速に関する定量的な測定を行った。試験は、動力炉・核燃料開発事業団東海事業所の地層処分基盤研究施設（ENTRY）内にある緩衝材流出挙動試験設備（BENTFLOW）を用いた。また、試験で得られたデータを用い、処分坑道横置方式と処分孔縦置方式の仕様例（動燃事業団，1992）に基づいて、処分環境における緩衝材流出現象の評価を行った。

## 1. 2 緩衝材流出現象に関する既往の研究

圧縮ベントナイトの亀裂への侵入現象に関する実験的研究は、Pusch (1983), Boisson (1989), Kannoら (1991) により報告されている。ベントナイトの浸食現象については、Pusch (1983) によって、実験的かつ理論的な研究が行なわれており、これで得られた知見はストリーパプロジェクトで実施された原位置試験における浸食量の評価 (Pusch, 1985) に用いられている。計算コードによる緩衝材流出現象の評価としては、岩盤亀裂ではなく、オーバーパック開口部への緩衝材の侵入現象の解析例が報告されている (Börgesson, 1990)。

### 1. 2. 1 Puschの研究

Pusch (1983) は、ストリーパ鉱山における花崗岩の情報を基に、extrusionとerosionの双方について、実験的、理論的な検討を行っている。ベントナイトはMX-80を用いている。初めに、緩衝材の流出が起こる場の条件を明確にするために、ストリーパ鉱山の花崗岩の亀裂特性に基づき、処分孔近傍の状態を以下のように設定している。

- ・亀裂開口幅の最大値は0.5mmで、動水勾配を $10^{-3}$ と仮定すると、亀裂内の地下水の実流速は $2\sim 4 \times 10^{-4}$  [m/s]と推定される。
- ・KBS概念における処分場仕様では、処分孔は $\phi 1.5$  [m]  $\times$  H8 [m] (体積 $14.13\text{m}^3$ , 緩衝材体積約 $10\text{m}^3$ ) で、処分孔壁面からの距離と亀裂の体積の関係は、処分孔から3mまでで $0.19\text{m}^3$  (緩衝材体積の2%以下), 5mまででは $0.44\text{m}^3$  (緩衝材体積の4.4%) である。

extrusionについては、緩衝材の密度とサクシオン、透水係数、粘性係数の関係より物理的なモデル化を行い、自由な膨潤と粘性抵抗のある膨潤として検討を行っている。結論として、流出ゲルの先端の変位  $x$  [m] を、亀裂開口幅  $d$  [m] と時間  $t$  [y] の関数として次式で表現している。

$$x = A \cdot d^2 \log(t+1) \quad (1.1)$$

ここで、 $A$ は比例定数で、 $5 \times 10^4 \sim 10^5$  という値である。また、この式の妥当性を検証するために、2種類の室内試験を実施している。一つは岩盤をステンレス製の円盤で模擬した試験 (パイロット試験) で他方は花崗岩のブロックを用いた試験 (本試験) である。各々の試験の概要を以下に記す。

#### ・パイロット試験:

(緩衝材初期状態)  $\phi 50\text{mm}$ , 嵩密度 $2.1\text{g/cm}^3$ , 含水比約10%

(亀裂開口幅) 0.05, 0.1, 0.15, 0.3, 0.5mm

(試験水)  $3 \times 10^{-2}\text{MNaCl}$ ,  $0.6\text{MNaCl}$ , 蒸留水

(試験期間) 40日, 約2ヶ月

(結果) extrusion速度の測定値は、上記の粘性抵抗による遅延効果を考慮したモデルでの評価値よりもかなり大きいことが分かった。また、水の塩分濃度はあまり影響しない。

- ・本試験：

(緩衝材初期状態) 約  $\phi$  39mm, 嵩密度 $1.8\text{g/cm}^3$ , 含水比約6%

(亀裂開口幅) 0.1~1.0 mm

(試験水) 蒸留水, 人工地下水

(試験期間) 2~3ヶ月

(結果) 亀裂幅1.0mmでは, 60日間で0.03m流出していた。流出部の硬い部分の平均密度は $1.5\sim 1.7\text{g/cm}^3$ 程度である。

なお, これらの試験では, 流出変位を測定するために, 隙間ゲージ式の接触式のセンサーを用いている。これらの試験の結論としては, extrusion速度は遅延効果を考慮したモデルによる評価よりもかなり大きいこと, 鋼製容器と花崗岩ブロックでは試験結果に差がなくベントナイトと岩の相互作用は無視できる程小さいこと等が挙げられている。

erosionについては, 粘土の粒子間結合力と流体抗力(掃流力)を考慮した理論的な検討とピンホール試験が行われている。理論的な検討の概要を以下に記す。

- ・粒子間力は回転粘度計により粘土ゲルのビンガム降伏応力 $t_b$ から評価する(パラメータ: 含水比500-5000%, 試験水: 蒸留水・人工地下水・NaCl溶液・CaCl<sub>2</sub>溶液, 温度20-40℃)。粒子の結合力は $t_b$ 値を全結合数で割って評価する。全結合数は, 粒子がすべて粒径 $0.15\mu\text{m}$ の球で, 各粒子は近傍の3粒子と結合していると仮定して算出する。結合力の評価結果は $4\times 10^{-13}$  [N]である。地下水の掃流力は, 地下水流速と粒径から計算され,  $0.5\mu\text{m}$ 以下の粒子では処分場で想定される地下水流速 $10^{-4}$  [m/s]での掃流力は $4\times 10^{-13}$  [N]以下であり, 地下水の掃流力と粒子結合力がほぼ釣り合っており, erosionの影響は無視できると考えられる。

この検討を検証するために, ピンホール試験を実施しているが, erosionに関するデータは得られていない。

### 1. 2. 2 ストリーパプロジェクトにおける研究

ストリーパプロジェクトにおける緩衝材の浸食現象の検討が同じくPuschにより行われている(Pusch, 1985)。ストリーパ原位置試験場のヒーター孔内から湧水亀裂中へ流出したベントナイトの浸食量は, 上記研究(1. 2. 1)の結果に基づいて予測したものより小さかった。この理由として, 天然水等の塩分を含む水中において, 流水に曝された軟らかいゲル先端部が, 離散的な壊れ易い粒子群ではなく粘着性の凝集体で構成されていたためであろうと考察している。

### 1. 2. 3 Boissonの研究

Boisson (1989) は, Na型(MX-80)とCa型(FoCa, フランス産)のベントナイトを対象に, 透明アクリル製の容器を用いて処分孔を模擬した流出試験を行っている。試験は静水, 流水の両方の条件で実施している。試験条件は以下のとおり。

(緩衝材初期状態)  $\phi$  57[mm]×H100[mm], 含水比約10% (成型圧1000bars)

(亀裂開口幅) 2.2 mm (MX-80), 2.01mm (FoCa)



(試験水) 脱塩水

(流量) 0, 10[ml/min] (亀裂内流速約  $10^{-4} \sim 10^{-3}$  [m/s])

(試験期間) 約5ヶ月

FoCaとMX-80では、流出変位については顕著な差は認められていない。静水・流水条件の違いによる影響としては、FoCaではこの条件の影響が小さいが、MX-80では流水条件の流出変位が静水条件のものよりも小さいことが報告されている。これより、Naベントナイトの方が浸食性が高いことが示唆されている。

亀裂からの流出液中のベントナイト量を評価する目的で濁度計による測定が試みられている。この測定によると、MX-80の方がFoCaよりも流出液の濁度が高く、浸食性が高いことが示唆されている。

試験終了後に、ベントナイトのサンプリングが行われており、模擬処分孔部分から亀裂侵入先端部までの含水比の分布が測定されている。先端部の含水比は、MX-80では約550%、FoCaでは約100%、と報告されている。流出部の平均的な含水比は300%程度である。

先端部における含水比の値は以下に示す各々の粘土の液性限界値と同程度の値となっており、両者に何らかの相関があるものと考えられる。

- ・MX-80：450% (Ishikawa et al., 1989) 又は400% (Lajudie et al., 1994)
- ・FoCa：112% (Lajudie et al., 1994)

#### 1. 2. 4 Kannoらの研究

Kannoら (1991) は、透明アクリル製容器を用い、クニゲルV1及びクニゲルV1とケイ砂の混合物を対象に静水条件でextrusionに関する試験を実施している。試験条件は以下のとおり。

(ベントナイト/砂混合比) 10/0, 6/4

(緩衝材初期状態)  $\phi 10$ [mm]×H10[mm], 乾燥密度1.8g/cm<sup>3</sup>, 含水比11.1%

(亀裂開口幅) 0.3, 0.5, 1.0, 1.5 mm

(試験水) 脱塩水

(試験期間) 約1ヶ月

この試験では、透明アクリル容器の上部からの写真撮影により流出距離(変位)が測定されている。また、緩衝材供試体の下部にロードセルが設置されており、模擬処分孔部分の膨潤圧の流出にともなう経時変化が計測されている。この研究では、extrusion現象が直接観察されており、流出ゲルの先端が二つの相に分離することが報告されている。また、流出距離(変位)  $y$  の時間依存性については、測定結果は、Puschが提案した対数則にはのらず、時間  $t$  の平方根に比例することが指摘されている。

$$y = A\sqrt{t} \quad (1.2)$$

ここで、 $A$ は亀裂開口幅と材料に依存する比例定数である。また、模擬処分孔部分の膨

潤圧は、流出にともない減少することが確認されている。extrusion現象をモデル化するために、粘性流れモデルと拡散モデルの適用が試みられている。粘性流れモデルでは、緩衝材流出部の平均速度  $v$  が次式で与えられている。

$$v = \frac{d^2}{12\mu} \frac{dp}{dx} \quad (1.3)$$

ここで、 $d$ は亀裂開口幅、 $dp/dx$ は流出部の膨潤圧の勾配、 $\mu$ はベントナイトゲルの粘性係数である。この式に実験結果を適用して、約200MPa・sという粘性係数の値を得ている。

また、拡散モデルでは、extrusion現象を粘土固体粒子の拡散現象とみなし、次式により拡散係数 $D$ を算出している。

$$M_t = 2C_0 \sqrt{\frac{Dt}{\pi}} \quad (1.4)$$

ここで、 $M_t$ は亀裂へ流出した緩衝材総量、 $C_0$ は処分孔部分のベントナイトの体積濃度である。試験結果より約 $3 \times 10^{-11}$  [m<sup>2</sup>/s]という拡散係数が得られている。

### 1. 2. 5 Börjessonの研究

Börjesson (1990) は、汎用有限要素法コードABAQUSを用い、オーバーパック開口部への緩衝材の侵入現象を解析している。解析で採用した材料モデルとしては、有効応力原理に基づき、多孔質弾性 (Porous Elasticity) モデルとDrucker-Plager塑性モデルを組み合わせたものとしている。この現象の解析における困難な点として次の3点が挙げられている。

- ・密度が非常に高いところから低いところまで変化するが、材料モデルはこの広範囲な密度領域に適用できる程一般化されていない
- ・開口部先端の角の部分では、理論上応力とひずみが無限大となってしまう
- ・要素メッシュの変形が大きく、通常の有限要素法の手法が適さない

このうち、最初の二つは、材料物性を平均化すること、角に丸みをつけることによる近似で処理している。要素の大変形については、リメッシュ法 (メッシュをきり直す方法) を採用することで処理している。解析結果として、緩衝材の侵入量 (8, 12cm) や間隙比分布の経時変化が示されている。ただし、計算は途中で停止しているようであり、リメッシュ法についてさらに改良が必要であることが指摘されている。また、角の部分では、間隙比が非常に大きな値となることが報告されており、この理由は材料モデルにおいてダイラタンシー特性を過大に与えているためだとしている。

## 2. 試験方法

### 2. 1 供試体

ベントナイト試料には、クニゲルV1（山形県月布産Na型ベントナイト，クニミネ工業社製）を使用した。試料は基本的にベントナイト100%としたが，一部ベントナイトにケイ砂（3号と5号を重量比1：1で混合）を混合したのもでも試験を実施した。ケイ砂の粒度分布を図2.1に示す。試料を成型治具内で静的に1軸状態で圧縮成型し緩衝材供試体とした。供試体寸法は，以下に示す静水試験で $\phi 50 \times H50\text{mm}$ ，流水試験で $\phi 10 \times H10\text{mm}$ である。また，初期乾燥密度は $1.8\text{g/cm}^3$ ，初期含水比は10%である。

### 2. 2 装置・方法

亀裂への侵入と浸食の二つの現象に対応して，静水試験及び流水試験の二種類の試験を実施した。図2.2に静水試験装置，図2.3に流水試験装置を示す。両試験とも緩衝材を含む周辺岩盤を模擬する部分の構造は同じである。周辺岩盤は上下2枚の透明アクリル製の厚板で模擬し，その中心部に処分孔を模擬する孔を設け，圧縮ベントナイト緩衝材供試体を設置する。上下の厚板の間にスペーサー（ステンレス鋼製薄板）を入れ岩盤亀裂を模擬する円環状の溝（模擬亀裂）を設置する。この溝の中に試験水を供給し，溝を水で満たす。水がベントナイト供試体に接すると，供試体は吸水を始め膨潤する。この膨潤にともないベントナイトのゲルが溝の中へ侵入する。これを上方から観察し，写真撮影等により流出距離（模擬処分孔壁面から流出ゲル先端部までの距離，図2.4）を測定する。模擬亀裂幅は，スペーサーの厚さを変えることにより， $0.3\sim 1.5\text{mm}$ の範囲で設定した。供試体の上部には金属（ステンレス鋼）焼結フィルタを設置する。供試体下部にはピストン（ステンレス鋼製丸棒）を介してロードセル（共和電業社製，歪ゲージ式）を設置し，模擬処分孔部分の膨潤圧を測定する。試験水には蒸留水を用いた。

静水試験では，模擬亀裂内への水の供給は水頭差のみで行い，流出開始後の水の移動は供試体の吸水によるものだけとなる。流水試験では，上部アクリル板に開けた二つの注水孔の一方からポンプ（エムエス機器社製，ペリスタルティック型ミニパルスポンプ）で水を供給し他方から排水する。このため，模擬亀裂内には2次元的な流れ場ができる。すなわち，流水試験では，流れ場のある条件で亀裂へのベントナイトの侵入挙動を調べ，侵入挙動への流速の影響という形で浸食量を定量化するものである。流水試験においては，亀裂内に2次元的な流れがあるため，流出パターンはこの影響を受け，流出ゲルの先端が水流により浸食される場合は，ゲルが上流側から下流側に移動し，排水側で流出距離が大きくなることが予想される。このため，流水試験では，図2.5に示すように， $45^\circ$ ごとに8方向で流出距離を測定した。流水試験では，流量を $0.08\text{ [ml/min]}$ とし，流量の経時変化を電子天秤（エー・アンド・デイ社製）で計測した。また，亀裂内の水の実流速を把握するため，着色トレーサー（東京化成工業社製エオシンエローイッシュ， $\text{C}_{20}\text{H}_6\text{Br}_4\text{Na}_2\text{O}_5$ ）のタンクを設け，試験途中で試験水と切替えられるようにした。

試験条件を表2.1に示す。

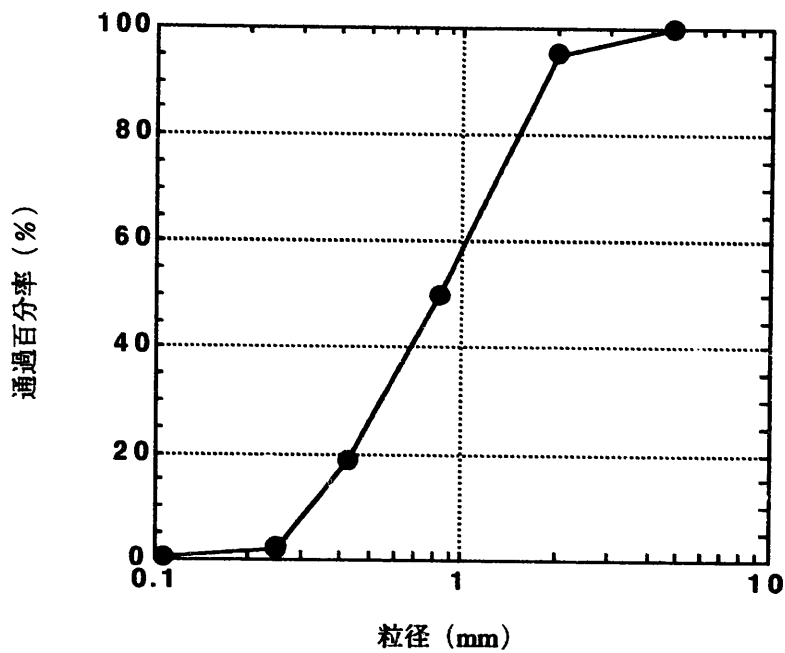


図2.1 ケイ砂の粒度分布

表2.1 試験条件

	静水試験	流水試験
試料 (ベントナイト)	クニゲルV1	クニゲルV1
ケイ砂混合率 [%]	0, 30	0
供試体寸法 [mm]	φ 50×H50	φ 10×H10
初期乾燥密度 [g/cm <sup>3</sup> ]	1.8	1.8
初期含水比 [%]	10	10
模擬亀裂幅 [mm]	0.5, 1.5	0.3, 0.5, 1.0, 1.5
試験温度 [°C]	室温約20°C	室温約20°C
試験水	蒸留水	蒸留水
流量 [ml/min]	-	約0.08

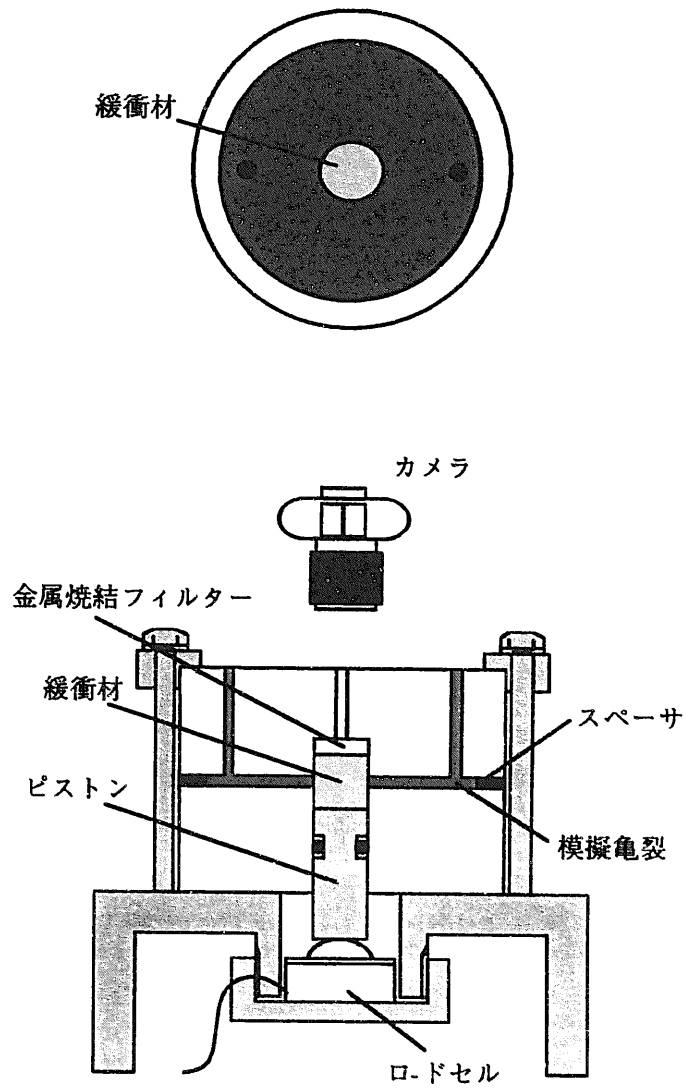


図2.2 静水試験装置概略図

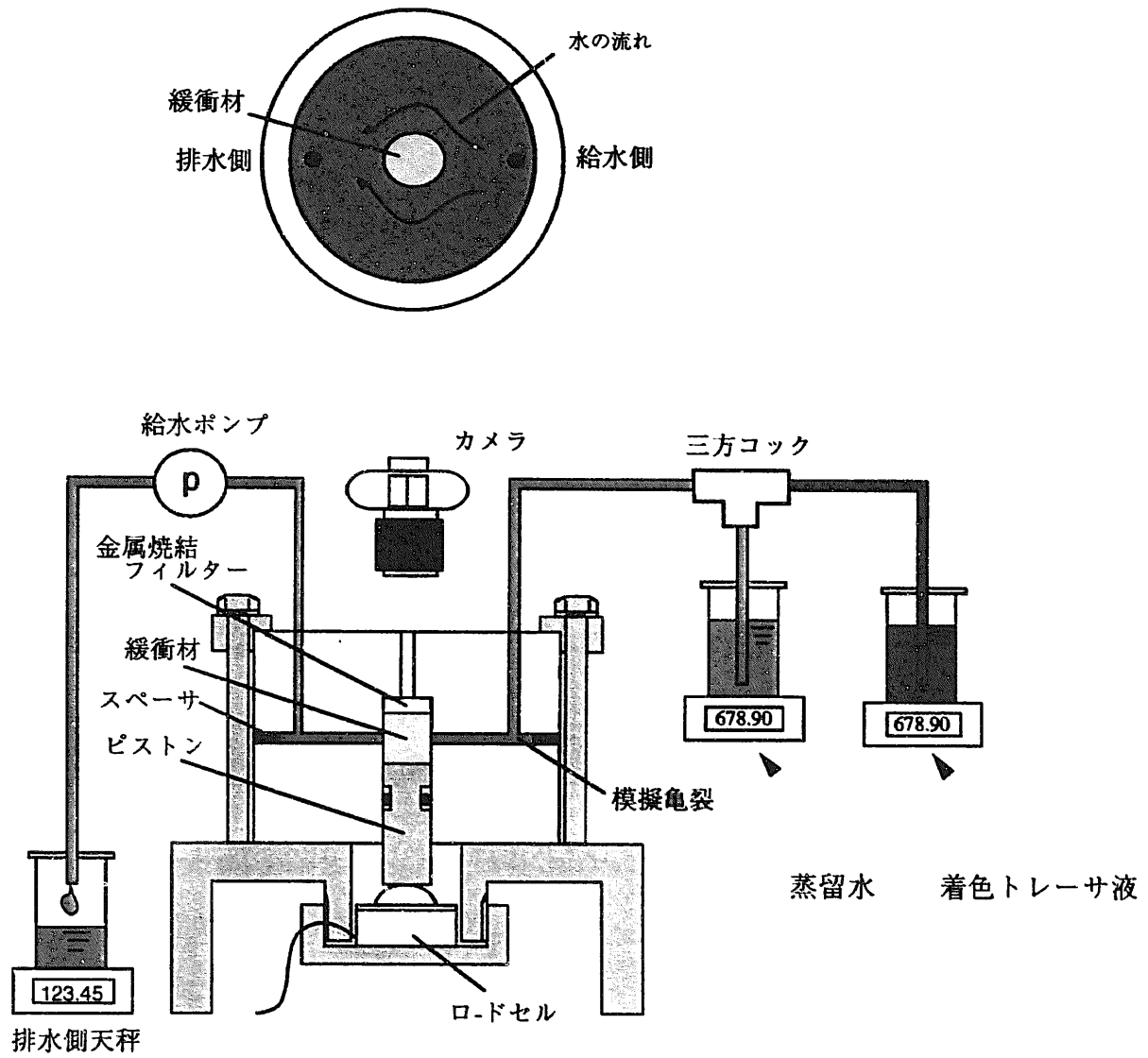


図2.3 流水試験装置概略図

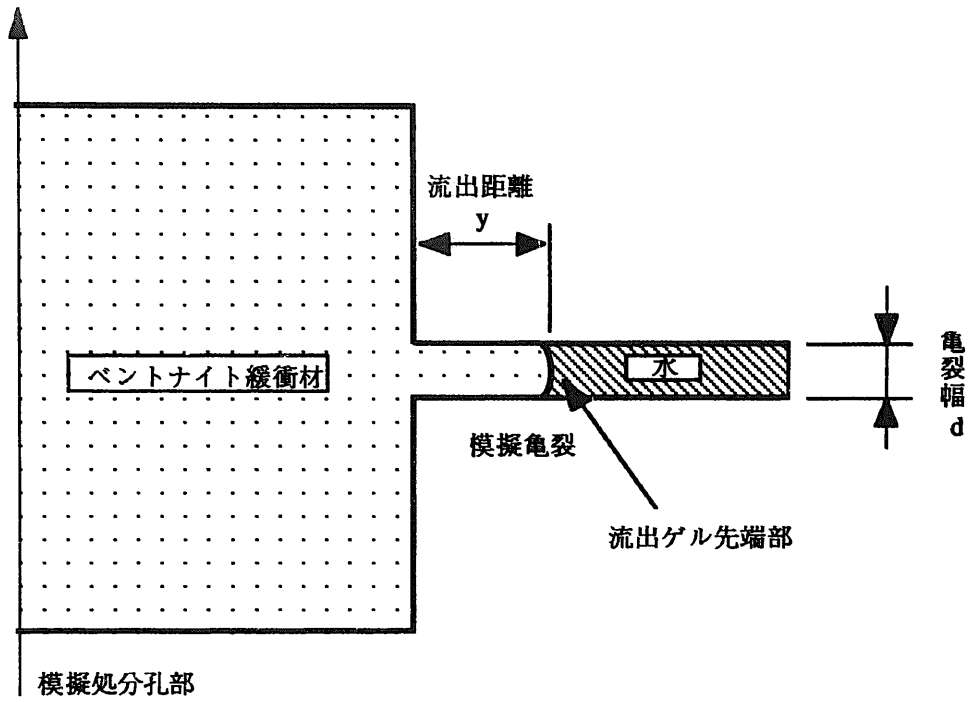


図2.4 流出距離の定義

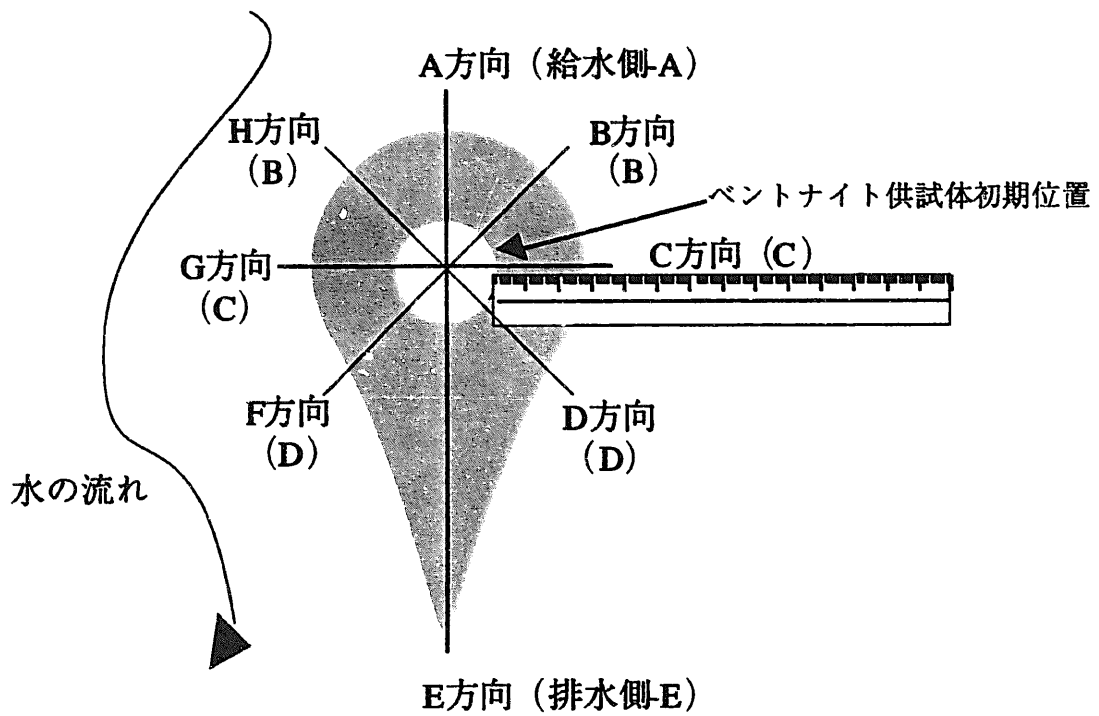


図2.5 流出距離測定方向

### 3. 試験結果及び考察

#### 3. 1 静水試験

静水試験では、ベントナイト供試体の中心軸に対して対称な形で試験が行なわれる。したがって、ベントナイトゲルの流出パターンも軸対称であり、流出距離の方向依存性は認められなかった。写真3.1に静水試験の典型的な流出パターンを示す。流出距離の経時変化を図3.1に示す。流出距離は、既往の研究 (Kanno and Wakamatsu, 1991) と同様に、次式に示すように時間の平方根に比例しており、亀裂幅が大きい程、またベントナイト含有量が多い程大きくなる傾向を示している。

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

ここで、 $y$  は流出距離、 $t$  は時間、 $A$  は亀裂幅  $d$  とベントナイト含有比  $Bc$  に依存する比例係数である。本試験で得られた比例係数  $A$  の値を表3.1に示す。

表3.1 比例係数Aの測定結果(静水試験)

No.	供試体	亀裂幅 [mm]	A [mm · h <sup>-1/2</sup> ]
1	クニゲルV1:100%	1.5	1.30
2	クニゲルV1:100%	0.5	0.34
3	クニゲルV1:70% ケイ砂 :30%	1.5	0.46

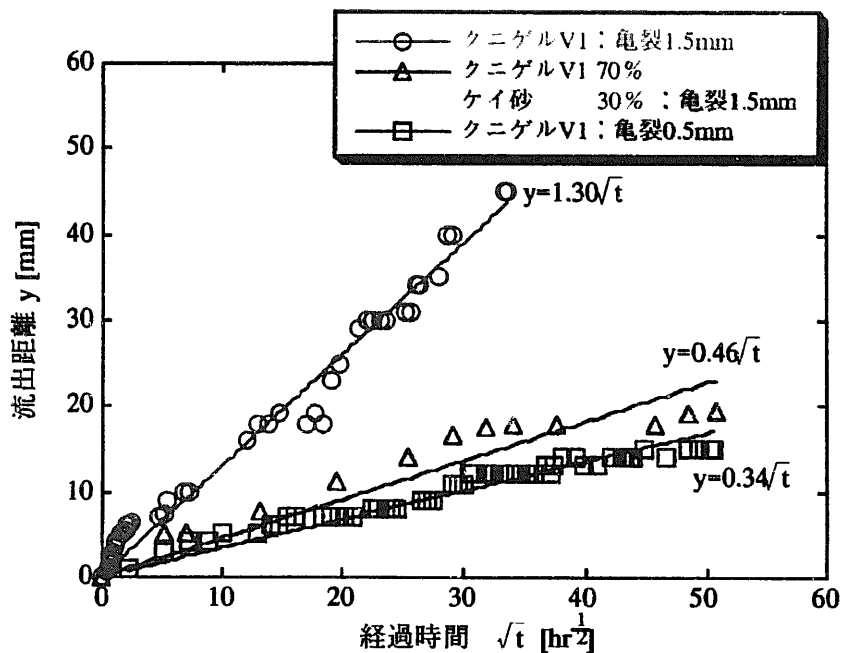


図3.1 流出距離の経時変化 (静水試験)



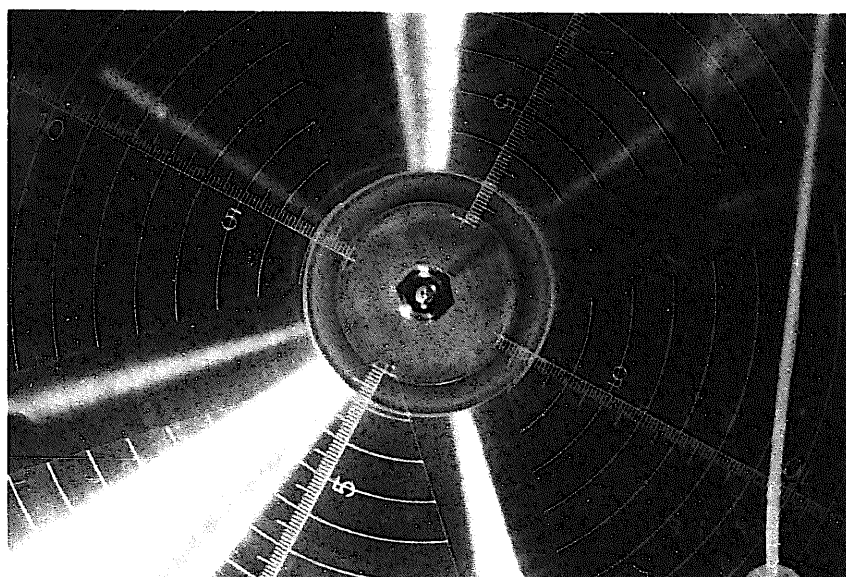


写真3.1 静水試験における緩衝材流出パターンの一例  
(クニゲルV1-100%, 乾燥密度 $1.8\text{g/cm}^3$ , 亀裂幅 $0.5\text{mm}$ , 16日後)

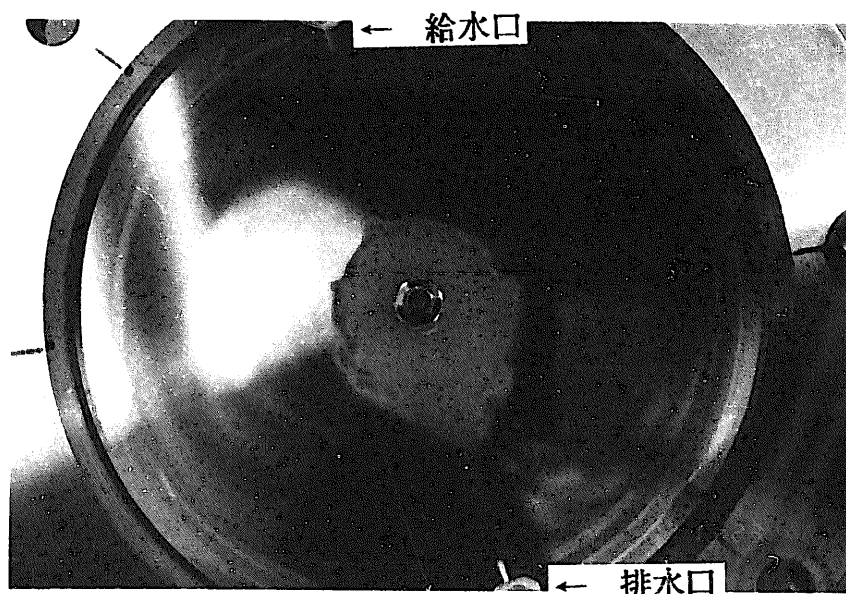


写真3.2 流水試験における緩衝材流出パターンの一例  
(クニゲルV1-100%, 乾燥密度 $1.8\text{g/cm}^3$ , 亀裂幅 $0.3\text{mm}$ , 流量約 $0.08\text{ ml/min}$ , 32日後)

図3.2に膨潤圧の経時変化を示す。クニゲルV1（100%）供試体，亀裂幅1.5mmの場合，膨潤圧は約1.6 [MPa]でピークに達してから徐々に低下している。これは，亀裂への流出により，模擬処分孔内のベントナイト量が減少したためと考えられる。その他の場合は，膨潤圧の時間の経過にともなう極端な低下は認められない。静水試験の場合，後述する流水試験に比べ，供試体の寸法が大きく，模擬亀裂の供試体に対する体積比が小さいため，流出による膨潤圧の低下は顕著になっていないものと考えられる。

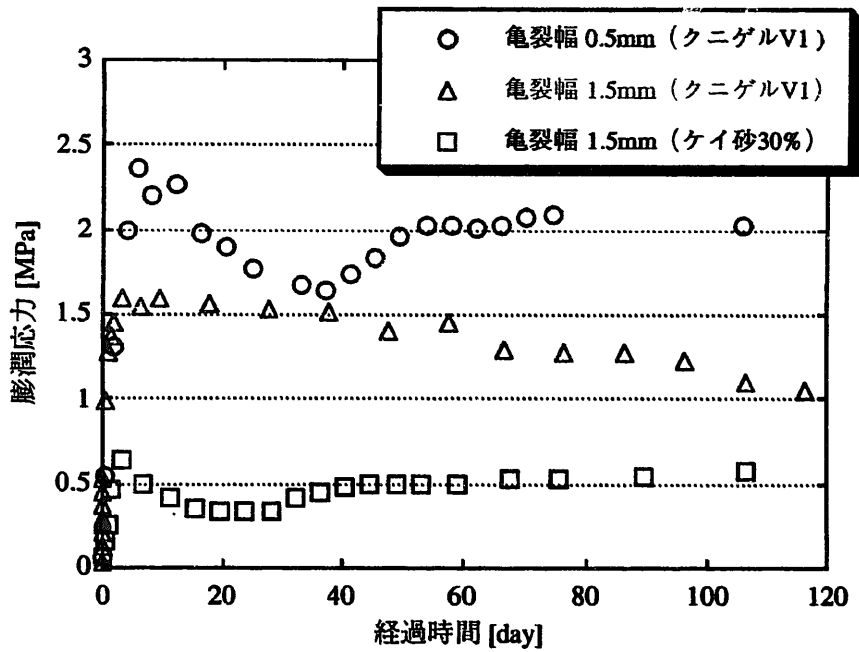


図3.2 膨潤応力の経時変化（静水試験）

### 3. 2 流水試験

本研究では、すべての試験において模擬亀裂へ供給する水の流量を一定とした。図3.3に電子天秤で測定した流量の経時変化を示す。試験の初期段階で、流量の調節による変動があるが、試験期間を通じて、各亀裂条件においてほぼ一定の流量であったことが確認できる。このため、亀裂内の水の流速は、亀裂幅が大きい程小さくなっている。

亀裂内の水の流速に関しては、本試験では、流量と流路断面積から算出して推定する方法と、着色トレーサーを用いた流れの可視化により実測する方法の二つの評価を行った。前者では、図3.4に示す方法で亀裂内流路断面積を計算し、流量0.08 [ml/min]から亀裂内の平均流速を推定した。この方法による流速の推定値を図3.5に示す。亀裂内流速は、 $6 \times 10^{-6} \sim 3 \times 10^{-5}$  [m/s]の範囲となる。後者では、亀裂幅0.3mmの条件での試験を繰り返し、一定期間経過後に試験水をトレーサー水溶液に切替えて流速を測定した。亀裂内におけるトレーサー液の移動パターンの一例を図3.6に示す。亀裂内の流速は一様でなく、亀裂に侵入したベントナイトの近傍（脇）では流速が大きく、亀裂の外周部付近では小さいことが観測された。この移動パターンから算出したベントナイト近傍と亀裂外周部における流速の測定値を、推定値（図3.5）とともに図3.7に示す。実測値は推定値よりも大きく、特にベントナイト近傍では推定値の3倍程度となっている。この差が生じた原因としては、流量からの推定では、ベントナイトが亀裂に侵入することによって流路断面積が減少することを考慮していないことが考えられる。したがって、実測の方が推定値よりも正確であるといえる。ただし、着色トレーサーを使用する場合は、ベントナイトの膨潤性に及ぼす影響等を十分にチェックする必要がある。また、亀裂内の流速分布を正確に評価するためには、可視化による実測と数値解析を併用し、流路断面積の経時変化を考慮して慎重に対応する必要がある。図3.7に示すように推定値は実測値よりも小さいため、処分環境におけるベントナイトの浸食を評価するための尺度としては、より保守的であるといえる。このため、以下では推定値の方に基づいて検討を進める。

写真3.2に流水試験の典型的な流出パターンを示す。写真には、給水口と排水口の位置を示しているが、流出パターンが給水口側から排水口側への水の流れの影響を受けていることがわかる。図3.8に種々の方向における流出距離の経時変化を示す。給水側（A方向）と排水側（E方向）以外のB,H方向（B方向）、C,G方向（C方向）、D,F方向（D方向）は、水の流れ方向に対称な位置にあるので平均した値をプロットした。亀裂幅が0.3mmの場合は、排水側の流出距離が他の方向よりも2倍以上も大きく、浸食が起こり、上流側のベントナイトのゲルが下流側へと流されたものと判断される。それ以外の亀裂幅でも排出側で流出距離が最大となっているが、その他の方向との差は小さく、浸食は起こっていないと判断される。この結果を水の流速推定値と合わせて表3.2にまとめる。したがって、No.1とNo.2の流速値の間、 $2 \times 10^{-5}$  [m/s]（630 [m/y]）のあたりに浸食現象が起こる最小臨界流速値があるものと考えられる。この値は、Pusch（1983）が示唆した値 $10^{-4}$  [m/s]よりもやや小さいものとなっている。ただし、表3.2は、流速の推定値に基づいている。可視化による実測値は推定値の3倍程度であることを考慮すると、本試験で得られた臨界流速値はPuschの値とかなり近いといえる。

図3.9は、各方向の流出距離の平均値を、静水試験と同様に、時間の平方根との関係で表したものである。流水試験では、静水試験の結果とは異なり、一定時間経過後に、流出距離と時間の平方根の直線関係が成り立たなくなる傾向が認められる。この傾向は、亀裂幅が大きくなる程強くなっている。これは、Kannoら（1991）が指摘しているように、静水試験の場合、供試体の寸法が小さいため、後述するように、流出による膨潤圧の低下が大きく、流出の駆動力が減少するためと考えられる。このため、図3.9では、Kannoらと同様に、初期の直線部分の測定値にそって比例係数Aを求めている。

膨潤圧の経時変化を図3.10に示す。膨潤圧は、供試体が水と接触した直後に最大となり、その後は時間とともに低下している。この低下は、亀裂幅が大きい程速く、これは流出により模擬処分孔部のベントナイトの損失速度が大きいためと考えられる。図3.9と図3.10を比較すると、図3.9において流出距離が直線から大きく離れる亀裂幅1.0, 1.5mmの場合、膨潤応力はほとんど0に近い値まで低下していることがわかる。

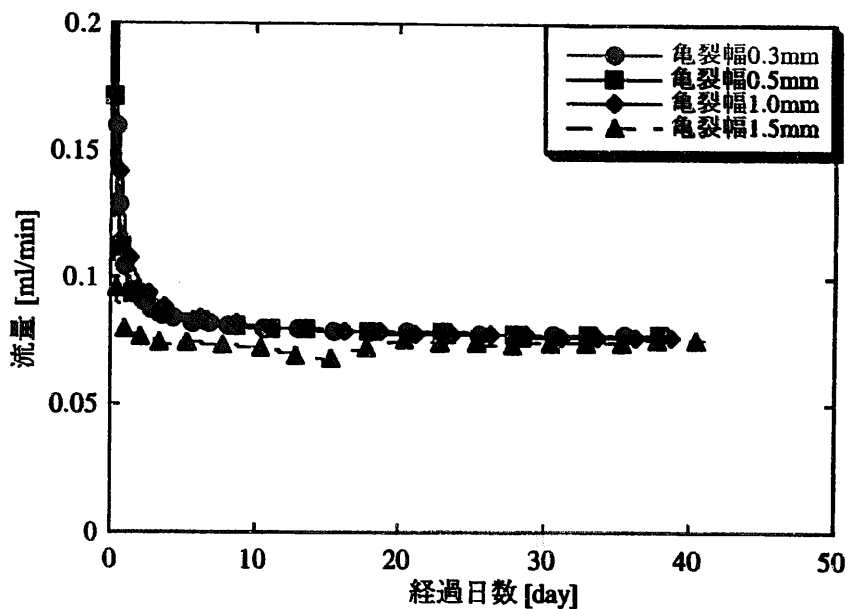
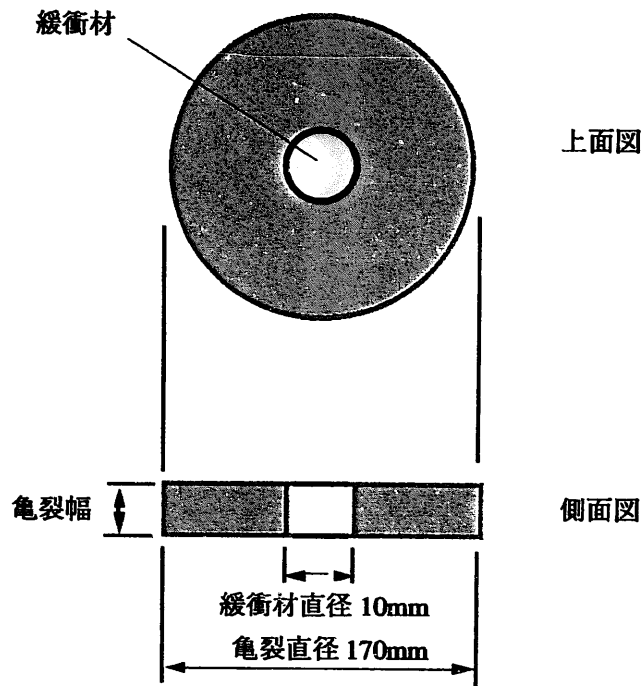


図3.3 流量測定結果

表3.2 流水試験結果

No.	亀裂幅 [mm]	水流速 [m/s]	浸食の有無
1	0.3	$2.77 \times 10^{-5}$	有
2	0.5	$1.66 \times 10^{-5}$	無
3	1.0	$8.31 \times 10^{-6}$	無
4	1.5	$5.54 \times 10^{-6}$	無



流路断面積  $A = (\text{亀裂直径} - \text{緩衝材直径}) \times \text{亀裂幅}$

$$0.48 \text{ [cm}^2\text{]} = (17 \text{ [cm]} - 1 \text{ [cm]}) \times 0.03 \text{ [cm]}$$

$$0.80 \text{ [cm}^2\text{]} = (17 \text{ [cm]} - 1 \text{ [cm]}) \times 0.05 \text{ [cm]}$$

$$1.60 \text{ [cm}^2\text{]} = (17 \text{ [cm]} - 1 \text{ [cm]}) \times 0.10 \text{ [cm]}$$

$$2.40 \text{ [cm}^2\text{]} = (17 \text{ [cm]} - 1 \text{ [cm]}) \times 0.15 \text{ [cm]}$$

図3.4 亀裂内流路断面積

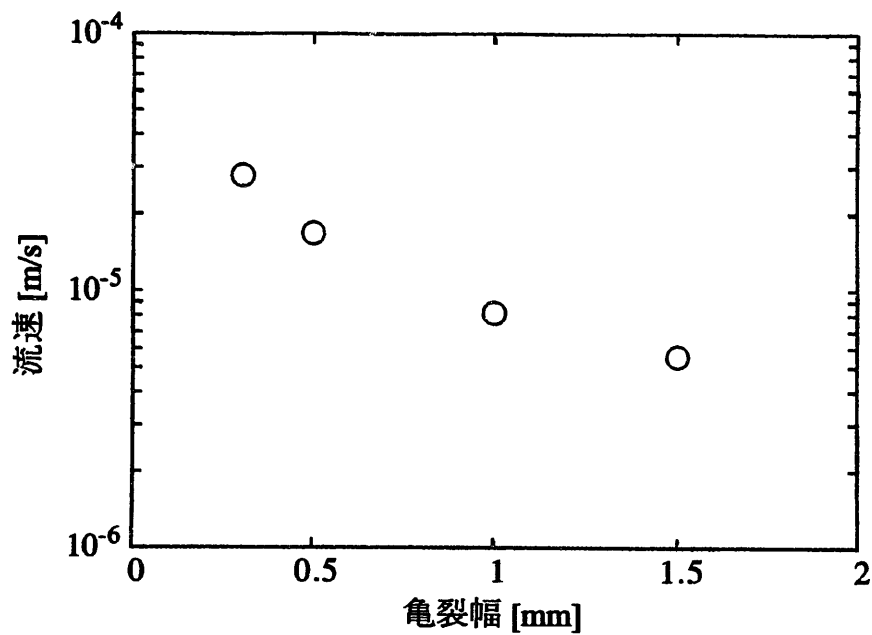


図3.5 亀裂内流速の推定値

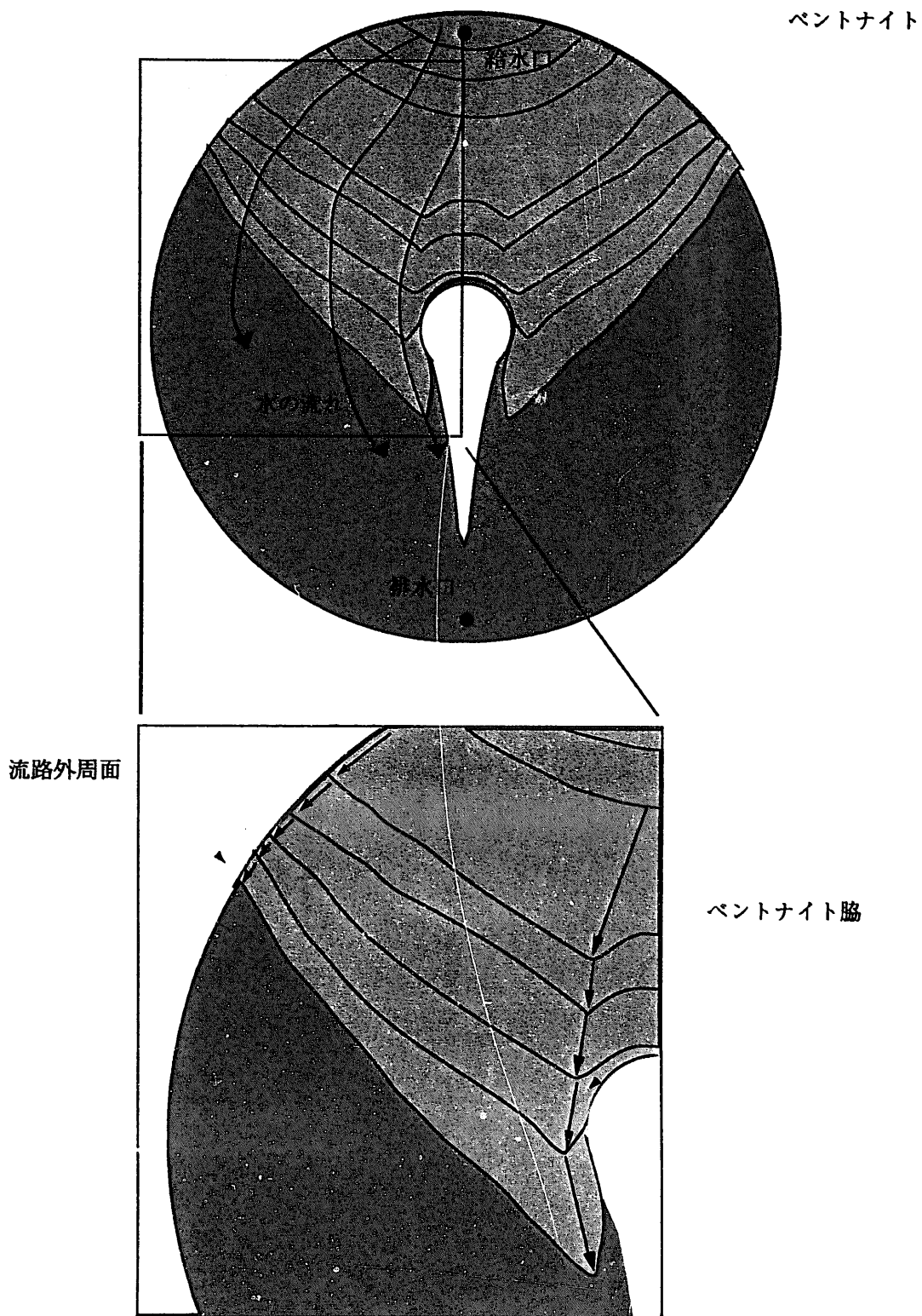


図3.6 着色トレーサーの移動パターン

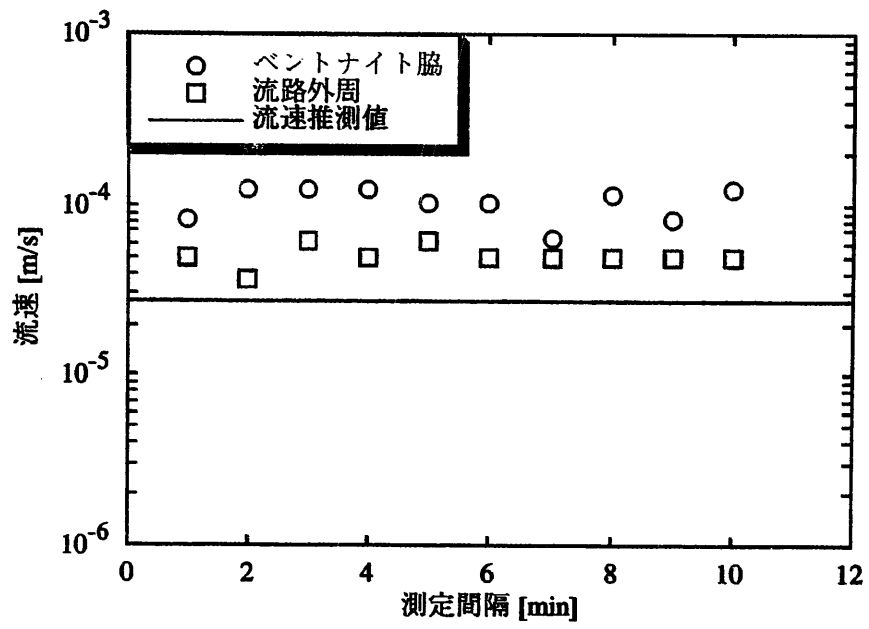
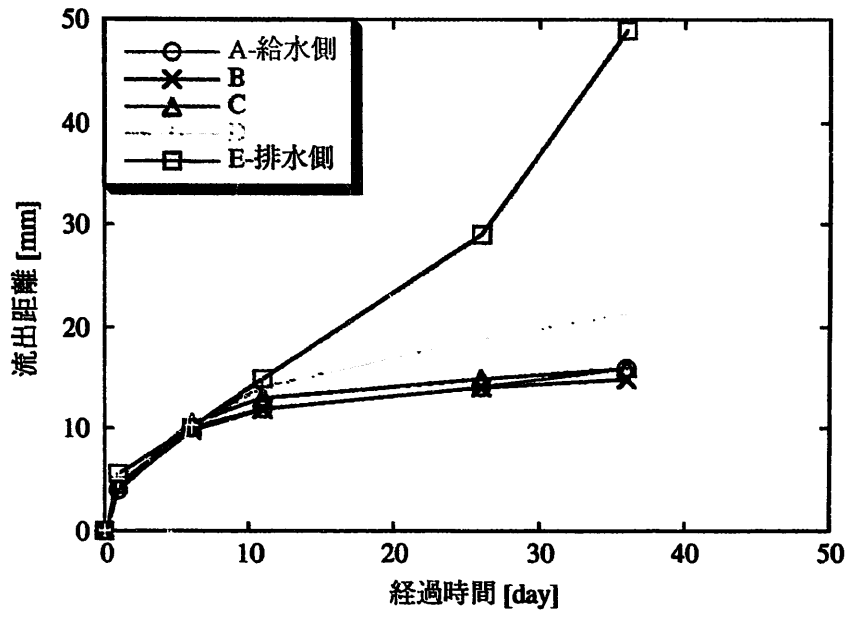
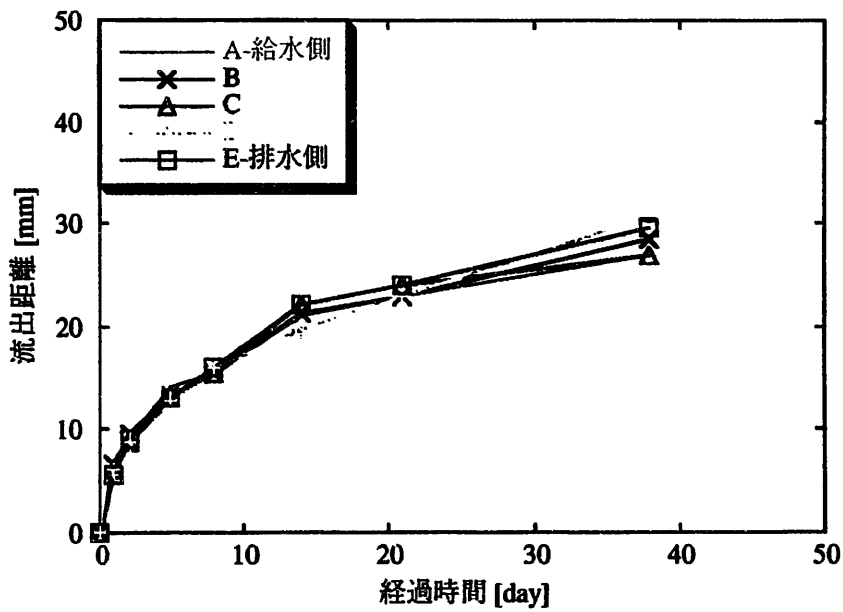


図3.7 亀裂内流速測定値（32日後）



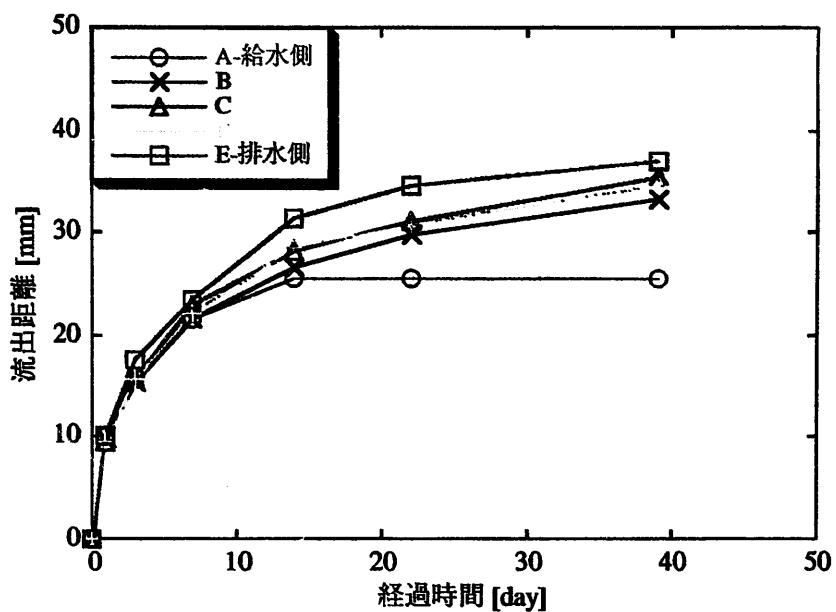
(a) 亀裂幅 0.3mm



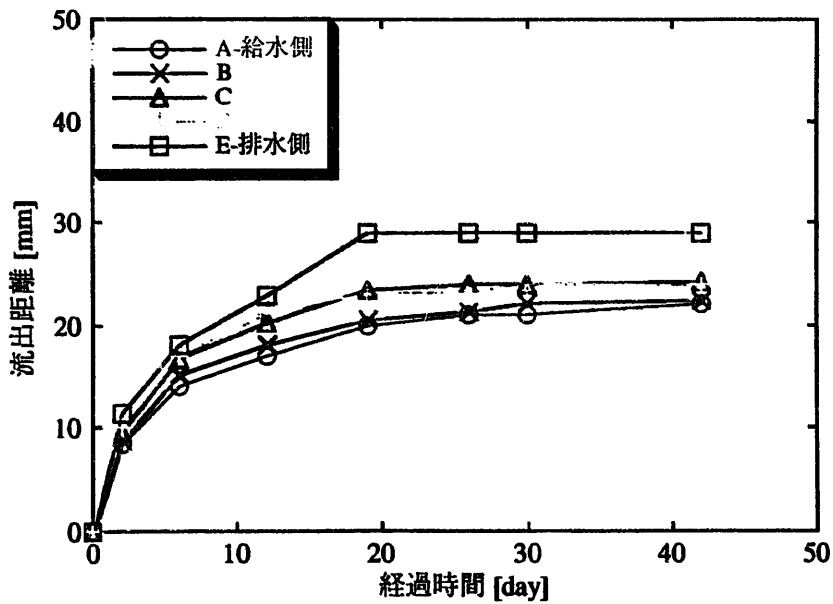
(b) 亀裂幅 0.5mm

図3.8 流出距離の経時変化 (流水試験) (1 / 2)





(c) 亀裂幅 1.0mm



(d) 亀裂幅 1.5mm

図3.8 流出距離の経時変化 (流水試験) (2 / 2)

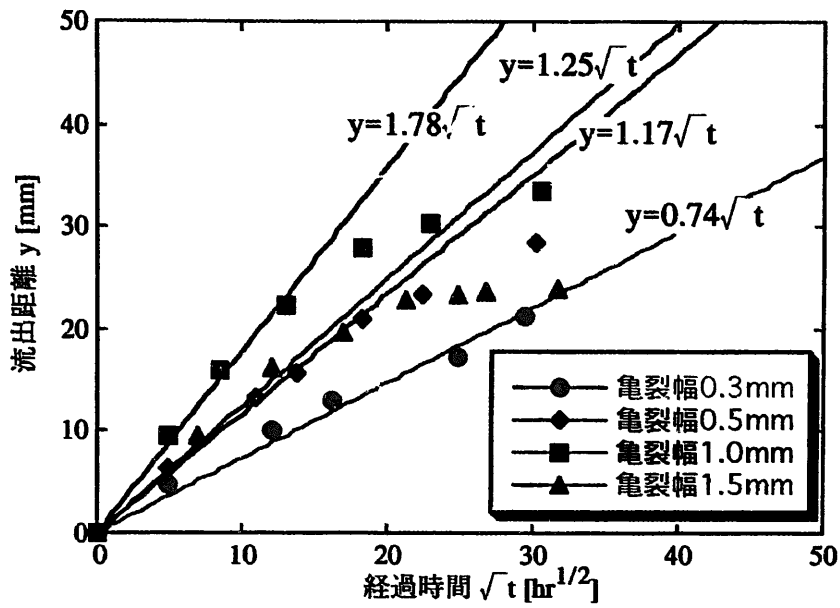


図3.9 平均流出距離の経時変化（流水試験）

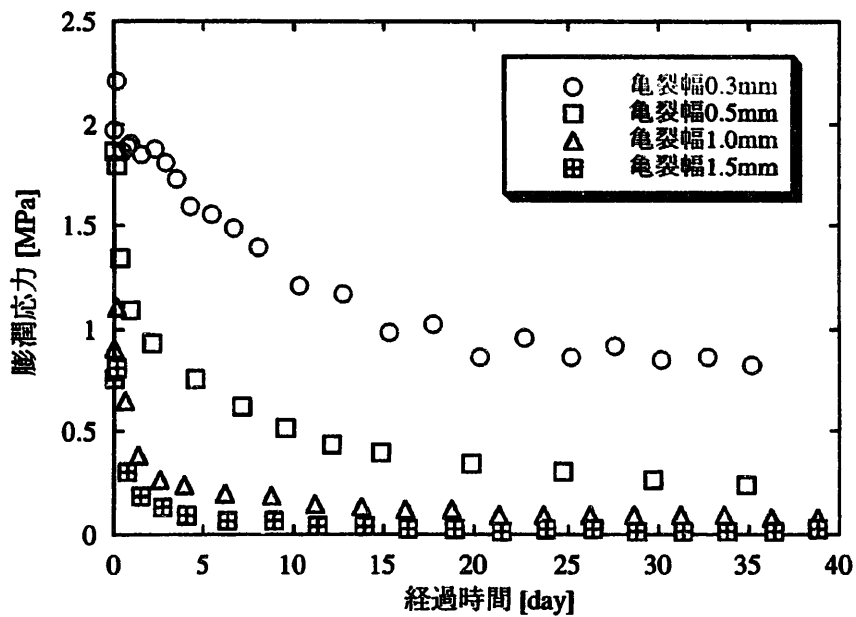


図3.10 膨潤応力の経時変化（流水試験）

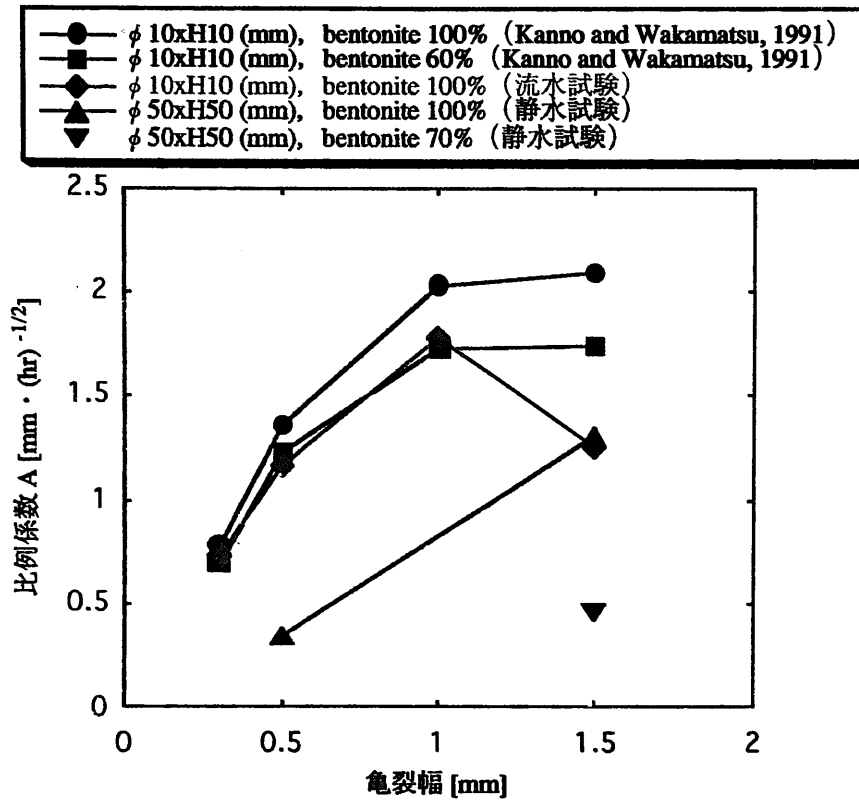


図3.11 比例係数Aの比較

### 3. 3 比例係数A

図3.11に、静水試験と流水試験で得られた比例係数Aを亀裂幅の関数として、Kannoら(1991)のデータとともにまとめて示す。これら3種類のデータは以下に示すように、試験条件が異なるため、直接全部を比較することはできない。

・ Kanno and Wakamatsu (1991) :

試料；クニゲルV1-100%及びクニゲルV1-60%/ケイ砂40%混合物

供試体寸法；φ 10×H10 [mm]

亀裂開口幅；0.3, 0.5, 1.0, 1.5 [mm]

流水条件；静水

・ 流水試験（本研究）：

試料；クニゲルV1-100%

供試体寸法；φ 10×H10 [mm]

亀裂開口幅；0.3, 0.5, 1.0, 1.5 [mm]

流水条件；流水

・ 静水試験（本研究）：

試料；クニゲルV1-100%及びクニゲルV1-70%/ケイ砂30%混合物

供試体寸法；φ 50×H50 [mm]

亀裂開口幅；0.5, 1.5 [mm]

### 流水条件；静水

そこで、ここでは、条件が比較的近いものを選び、比例係数Aに及ぼす種々の因子の影響を検討する。

#### 3. 3. 1 亀裂開口幅の影響

図3.11では、流水試験の亀裂幅1.5mmのデータを除くと、全ての場合で、亀裂開口幅が大きくなるに従って係数Aが増加しており、亀裂幅とA値の間には正の相関があるものと考えられる。ただし、1mm以上の亀裂幅の場合、Kannoらのデータでも、A値の増加率は小さくなっており、ある一定の亀裂幅以上になるとA値が亀裂幅によらず一定となることも予想される。

#### 3. 3. 2 スケールの影響

静水試験とKannoらの試験は、いずれも静水条件であり、供試体寸法が異なるため、両者を比較することでスケール効果を検討することができる。ただし、両者のケイ砂混合試料の配合比がやや異なることに注意する必要がある。クニゲルV1-100%供試体の場合、静水試験で得られた係数Aの値は、Kannoらの値の1/2~1/3程であり、スケールが大きい程係数Aが小さくなる傾向にある。また、ケイ砂混合試料でも静水試験の結果は、Kannoらの値の約1/3となっている。このように、図3.11に示した範囲では、スケールが大きくなると係数Aが小さくなる傾向にあるが、スケールの効果については、メカニズムの検討も含め、さらにデータを蓄積して判断する必要がある。

#### 3. 3. 3 ベントナイト含有比の影響

静水試験及びKannoらのデータでは、ケイ砂混合物はクニゲルV1-100%の試料よりも係数Aの値が小さくなっている。これは、ベントナイト含有比が低い場合、膨潤応力が低下し、流出の駆動力が低下するためと考えられる。

#### 3. 3. 4 流水条件の影響

流水試験とKannoらのデータを比較すると、流水試験の方が係数Aがやや小さくなっている。ただし、亀裂1.5mmの場合以外は、その差はあまり大きくなく、試験の誤差やクニゲルV1の製造ロットごとのバラツキを考慮するとこの差が有意なものであるとは断定できない。これとは逆に、一般に、地下水流速が大きい場合、浸食の効果により流出量が増大するのではないかと懸念されるが、これらの試験の結果では、流水条件によって、流出が加速するような現象は認められなかった。

## 4. 処分場における緩衝材流出現象の評価

ここでは、上述の緩衝材流出試験によって得られた現状の知見に基づいて処分環境における緩衝材の流出現象の評価を試みる。緩衝材の材料としては、クニゲルV1-100%を前提とする。人工バリアの仕様については、坑道横置方式と処分孔縦置方式の二つの方式が提案されている（動燃事業団，1992）。図4.1にこの仕様例を示す。静水試験，流水試験とも処分孔縦置方式を模擬したものであるが，ここでは，二つの方式について，図4.1の仕様に基づいて流出量の評価を行う。なお，図4.1に示す仕様では，緩衝材の乾燥密度は $1.8 \text{ g/cm}^3$ となっている。

### 4. 1 岩盤亀裂の設定

処分坑道あるいは処分孔を横切り緩衝材と接する亀裂に関する情報については，処分場の建設段階もしくはこれに先だてて実施されるサイト特性調査の段階において精度良く把握されるものであり，現状においては，何らかの仮定を設定する必要がある。ここでは，処分場のレイアウトにおいて大規模な亀裂は避けることを前提に，既存の文献（Pusch，1983；菊地，1991）を参考として，考慮すべき亀裂の開口幅を $0.5\text{mm}$ に設定する。また，簡単のため，廃棄体（オーバーパックに封入されたガラス固化体）1本当りの緩衝材と接する亀裂を1本と仮定する。これらの設定の妥当性については，日本国内で実施されている原位置試験の成果に基づいて，今後さらに検討する必要がある。

### 4. 2 比例係数Aと浸食臨界流速

亀裂への侵入現象（extrusion）の速度を規定する比例係数については，図3.11に示したように，種々の試験条件によって異なった値が得られている。特に，前述のようにスケール効果がある可能性がある。したがって，ここでは，クニゲルV1-100%で，設定した亀裂幅 $0.5\text{mm}$ の条件で，最も大きな供試体で得られた値  $A=0.34 \text{ [mm} \cdot \text{h}^{-1/2}]$  を採用する。

浸食現象が起こる臨界流速値としては，3. 2に記した $2 \times 10^{-5} \text{ [m/s]}$ を採用する。

### 4. 3 緩衝材浸食の可能性

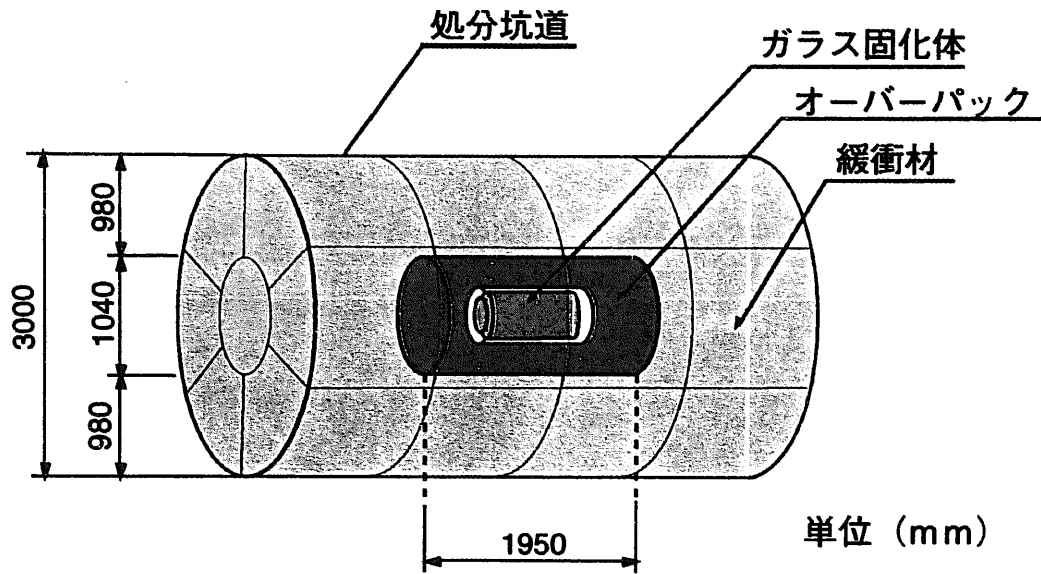
緩衝材が地下水の流れにより浸食される可能性を検討するためには，設定した亀裂開口幅 $0.5\text{mm}$ の場合における亀裂内地下水の実流速を評価しなければならない。Puschは，次のPoiseuille式を用い，動水勾配を $10^{-3}$ と仮定して幅 $0.5\text{mm}$ の亀裂内の地下水流速を $2 \sim 4 \times 10^{-4} \text{ [m/s]}$ と評価している。

$$v = \frac{d^2 g \rho_w i}{12 \mu} \quad (4.1)$$

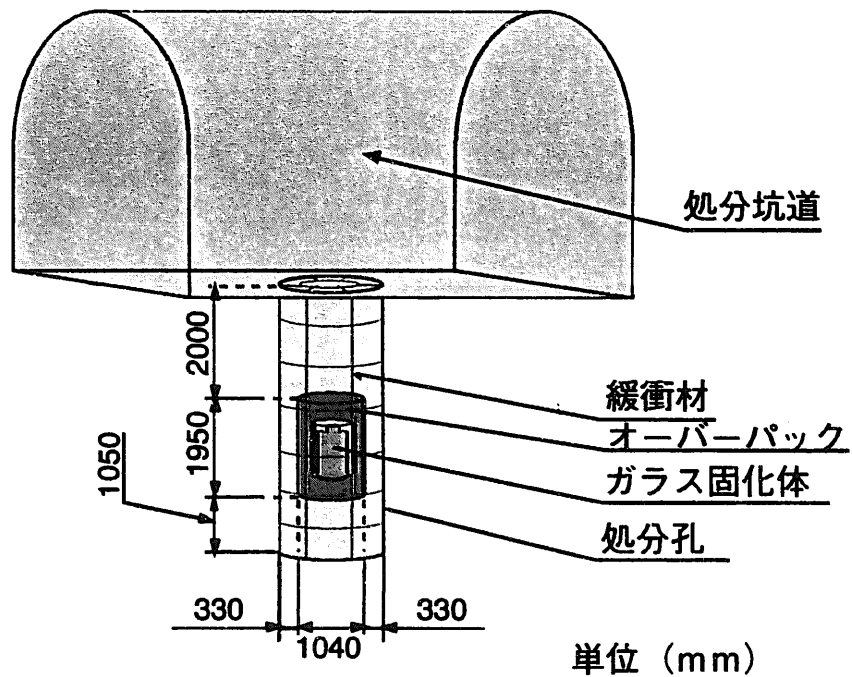
ここで，

v：流速 [m/s]

d：亀裂開口幅 [m]



(a) 坑道横置方式



(b) 処分孔縦置方式

図4.1 人工バリアの仕様例 (動燃事業団, 1992)

$g$ : 重力加速度	$[m/s^2]$
$\rho_w$ : 水の密度	$[kg/m^3]$
$\mu$ : 水の粘性係数	$[kgf/m^2 \cdot s]$
$i$ : 動水勾配	$[-]$

この値は、臨界流速値 $2 \times 10^{-5} [m/s]$ よりも大きいため、この値を用いる限り、浸食が起こることになる。しかし、一般に亀裂内の幾何学的な開口幅と水理学的な開口幅は異なり、(4.1)式のように幾何学的な開口幅を用いて地下水流速を計算すると、流速を過大に評価してしまうことが指摘されている(動燃事業団, 1996)。このため、実際の地下水流れでは、実岩盤亀裂の表面粗さやチャンネルの影響を考慮する必要があり、Puschの評価は過度に保守的なものとなっていると考えられる。また、逆に、3.2で述べたように上記臨界流速値は流速を過小に評価している可能性もある。いずれにしろ、現状の知見では、緩衝材の浸食臨界流速値と亀裂内地下水流速は同程度のオーダーとなる可能性があり、両者ともさらに詳細な検討が必要である。また、3.3.3で述べたように、たとえ浸食が起こる場合でも、それが必ずしも処分坑道又は処分孔内のベントナイト量の減少速度に直接結びつかないことに留意すべきである。

#### 4.4 緩衝材流出量の評価

前述のように、現状では、浸食臨界流速値と亀裂内地下水流速の大小、すなわち浸食が起こるか否かの判定は困難である。そこで、ここでは、緩衝材の亀裂への侵入現象(extrusion)に絞って、(3.1)式に基づいて処分場における緩衝材の流出量を評価する。

##### 4.4.1 坑道横置方式

図4.1(a)に示した坑道横置方式については、坑道内の廃棄体の定置間隔が7mと設定されており(動燃事業団, 1992)、ここでは図4.2に示す形態を想定する。すなわち、廃

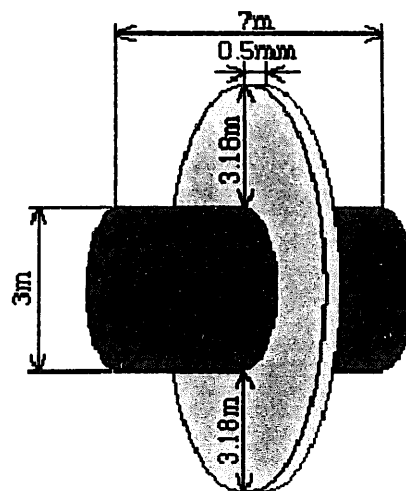


図4.2 坑道横置方式における緩衝材流出評価概念図(1万年後)

棄体 1 本当りの緩衝材 (7m) の中心を開口幅0.5mmの亀裂が垂直に横切る場合である。図4.1(a)と図4.2に示す廃棄体 1 本当りの緩衝材の乾燥質量 $W$ は、

$$\begin{aligned} W &= \frac{\pi}{4}(3^2 \times 7 - 1.04^2 \times 1.95) \times 1800 \\ &= 86082[\text{kg}] \\ &\approx 86.0[\text{t}] \end{aligned} \quad (4.2)$$

である。上記 4. 2 で設定した比例定数 $A$ の値を3.1式に代入すると、流出距離 $y$ は、

$$y = 0.34\sqrt{t}; y[\text{mm}], t[\text{h}] \quad (4.3)$$

となる。例えば 1 万年後では、

$$y = 0.34\sqrt{1 \times 10^4 \times 365 \times 24} = 3182[\text{mm}] \approx 3.18[\text{m}] \quad (4.4)$$

である。

緩衝材の流出部の密度については、クニゲルV1を対象とした測定が行われていないため、ここではPusch (1983) と Boisson (1989) のMX-80ベントナイトを対象とした測定に基づいて評価する (1. 2 緩衝材流出現象に関する既往の研究参照)。Puschの測定では、流出部の硬い部分の平均嵩密度は $1.5 \sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ であり、これを乾燥密度に換算すると $0.79 \sim 1.1 \text{ g/cm}^3$ となる。また、Boissonの測定では、流出部の平均含水比は200~300%程であり、乾燥密度に換算すると $0.3 \sim 0.4 \text{ g/cm}^3$ となる。両者の値の差は大きく、この平均密度については今後さらに正確な測定を行う必要がある。ここでは、保守的 (処分孔のベントナイト損失量が多くなる方) に考え、平均密度を $1.2 \text{ g/cm}^3$ と仮定する。

緩衝材流出部の乾燥密度を $1200 \text{ [kg/m}^3]$ とすると、1万年後の流出乾燥質量 $W'$ は、

$$W' = \frac{\pi}{4} \left\{ (2 \times 3.18 + 3)^2 - 3^2 \right\} \times 0.5 \times 10^{-3} \times 1200 = 37.04[\text{kg}] \approx 0.0370[\text{t}] \quad (4.5)$$

となる。従って、緩衝材の質量流出率は、

$$\frac{W'}{W} \times 100 = \frac{0.0370}{86.0} \times 100 = 0.0430[\%] \approx 0.04[\%] \quad (4.6)$$

となる。

この流出による緩衝材の乾燥密度の低下量を計算すると、流出後の坑道内の緩衝材の平均的な乾燥密度 $\rho_d'$ は、初期値 $\rho_d$   $1.8 \text{ g/cm}^3$  から、

$$\rho_d' = \rho_d \left( 1 - \frac{W'}{W} \right) = 1.8 \times \left( 1 - \frac{0.0370}{86.0} \right) = 1.799[\text{g/cm}^3] \approx 1.80[\text{g/cm}^3] \quad (4.7)$$

となり、ほとんど変化がない。

同様に、亀裂幅0.5mmにおける100万年後の緩衝材の質量流出率を求める。

$$y = 0.34\sqrt{10^6 \times 365 \times 24} = 31822[\text{mm}] \approx 31.8[\text{m}] \quad (4.8)$$

$$W' = \frac{\pi}{4} \left\{ (2 \times 31.8 + 3)^2 - 3^2 \right\} \times 0.5 \times 10^{-3} \times 1200 = 2086[\text{kg}] \approx 2.09[\text{t}] \quad (4.9)$$

$$\frac{W'}{W} \times 100 = \frac{2.09}{86.0} \times 100 = 2.43[\%] \approx 2.4[\%] \quad (4.10)$$

流出後の緩衝材の平均乾燥密度は



$$\rho_d' = 1.8 \times \left(1 - \frac{2.09}{86.0}\right) = 1.756 [g/cm^3] \cong 1.76 [g/cm^3] \quad (4.11)$$

#### 4. 4. 2 処分孔縦置方式

横置方式と同様な手法で、図4.1(a)の坑道縦置方式の仕様に基づいて質量流出率を算出する。ここでは、処分孔1本当たり、開口幅0.5mmの亀裂が1本水平に処分孔を横切る場合を想定する。

図4.1(b)に示す処分孔1本当たりの緩衝材の乾燥質量 $W$ は、

$$\begin{aligned} W &= \frac{\pi}{4} \left\{ (1.04 + 2 \times 0.33)^2 \times (2 + 1.95 + 1.05) - 1.04^2 \times 1.95 \right\} \times 1800 \\ &= 17447 [kg] \\ &\cong 17.4 [t] \end{aligned} \quad (4.12)$$

1万年後では、4.4式より、流出距離 $y$ は3.18mであり、流出質量 $W'$ は

$$W' = \frac{\pi}{4} \left\{ (2 \times 3.18 + 1.7)^2 - 1.7^2 \right\} \times 0.5 \times 10^{-3} \times 1200 = 29.25 [kg] \cong 0.0293 [t] \quad (4.13)$$

となる。従って、緩衝材の質量流出率は、

$$\frac{W'}{W} \times 100 = \frac{0.0293}{17.4} \times 100 = 0.168 [\%] = 0.2 [\%] \quad (4.14)$$

となる。この流出により、処分孔内の緩衝材の平均的な密度は

$$\rho_d' = 1.8 \times \left(1 - \frac{0.0293}{17.4}\right) = 1.797 [g/cm^3] \cong 1.80 [g/cm^3] \quad (4.15)$$

100万年後では、4.8式より、流出距離 $y$ は31.8mであり、流出質量 $W'$ は、

$$W' = \frac{\pi}{4} \left\{ (2 \times 31.8 + 1.7)^2 - 1.7^2 \right\} \times 0.5 \times 10^{-3} \times 1200 = 2008 [kg] \cong 2.01 [t] \quad (4.16)$$

となり、緩衝材の質量流出率は、

$$\frac{W'}{W} \times 100 = \frac{2.01}{17.4} \times 100 = 11.6 [\%] \quad (4.17)$$

となる。流出後の平均乾燥密度は

$$\rho_d' = 1.8 \times \left(1 - \frac{2.01}{17.4}\right) = 1.592 [g/cm^3] \cong 1.59 [g/cm^3] \quad (4.18)$$

#### 4. 4. 3 まとめ

以上、坑道横置方式と処分孔縦置方式における緩衝材の質量流出率と流出後の平均乾燥密度を算出した。さらに、ここでは、平均乾燥密度の算出結果から、緩衝材の透水係数の低下量を評価する。

クニゲルV1ベントナイトの透水係数については、動燃事業団(1996)において詳細な検討が行われており、透水係数の温度依存性を評価するために、次式に示す固有透過度の概念を用いてデータが整理されている。

$$k = \kappa \frac{\rho g}{\mu} \quad (4.19)$$

ここで、

$k$ : 透水係数	[m/s]
$\kappa$ : 固有透過度	[m <sup>2</sup> ]
$\rho$ : 水の密度	[kg/m <sup>3</sup> ]
$g$ : 重力加速度	[m/s <sup>2</sup> ]
$\mu$ : 水の粘性係数	[kgf/m <sup>2</sup> ·s]

この固有透過度[m<sup>2</sup>]については、乾燥密度  $\rho_d$  [g/cm<sup>3</sup>]とベントナイト含有比Bc[-] (クニゲルV1-100%の場合はBc=1) の関数として実験式が得られている。

$$\log \kappa = -19.6124 + 1.082\rho_d - 0.4294\rho_d^2 - 0.7356Bc\rho_d^2 \quad (4.20)$$

4.19, 4.20式により、上記で算出した緩衝材の各密度での透水係数を算出する。なお、温度は25℃とし、水の物性は、以下に示すこの温度での値 (理科年表による) を用いる。

- ・  $\rho$  : 997.04 [kg/m<sup>3</sup>]
- ・  $\mu$  :  $8.90 \times 10^{-4}$  [Pa·s]

透水係数の算出結果を緩衝材の流出率、乾燥密度とともにまとめて表4.1に示す。この検討では、緩衝材の流出率は、処分孔縦置方式の100万年後が最大で、11.6%である。その場合、流出後の平均乾燥密度は、初期値1.8[g/cm<sup>3</sup>]から1.59[g/cm<sup>3</sup>]まで低下し、透水係数は初期値 $3.9 \times 10^{-14}$  [m/s]から $1.6 \times 10^{-13}$  [m/s]まで約4倍に増加する。この程度の透水係数の増加であれば、緩衝材の止水性能に及ぼす流出の影響はあまり大きくないといえる。

表4.1 緩衝材質量流出量の推定値

	処分方式	坑道横置方式	処分孔縦置方式
初期	緩衝材質量[t]	86.0	17.4
	乾燥密度[g/cm <sup>3</sup> ]	1.8	1.8
	透水係数[m/s]	$3.9 \times 10^{-14}$	$3.9 \times 10^{-14}$
1万年後	流出質量[t]	0.0370	0.0293
	質量流出率[%]	0.04	0.2
	流出後平均乾燥密度[g/cm <sup>3</sup> ]	1.80	1.80
	流出後平均透水係数[m/s]	$3.9 \times 10^{-14}$	$3.9 \times 10^{-14}$
100万年後	流出質量[t]	2.09	2.01
	質量流出率[%]	2.4	11.6
	流出後平均乾燥密度[g/cm <sup>3</sup> ]	1.76	1.59
	流出後平均透水係数[m/s]	$5.2 \times 10^{-14}$	$1.6 \times 10^{-13}$

## 5. 結語

緩衝材流出挙動試験設備（BENTFLOW）を用い、緩衝材の流出現象に関する試験を実施し、膨潤による亀裂への侵入（extrusion）現象及び地下水の流れによる浸食現象について定量的な評価を行うための基礎データを取得した。extrusion現象と浸食現象に対応して、静水試験と流水試験を実施した。これらの試験により得られた主な知見は以下のとおり。

### （1）静水試験

- ・ 流出距離は時間の平方根に比例するという既往の研究結果が確認された
- ・ 流出速度は、亀裂幅が大きい程、また、ベントナイト含有量が多い程大きくなる傾向があることが分かった
- ・  $\phi 50 \times H50$ [mm]という比較的大きな緩衝材供試体を用いた静水試験では、模擬処分孔部分の緩衝材膨潤圧の流出にともなう極端な低下は認められなかった

### （2）流水試験

- ・ extrusion現象への水の流速の影響という形で、ベントナイトの浸食を定量的に評価することができた
- ・ 浸食が起こる最小臨界流速として $2 \times 10^{-5}$  [m/s]（630[m/y]）という値が得られた
- ・  $\phi 10 \times H10$ [mm]という小さな緩衝材供試体を用いた流水試験では、流出にともない模擬処分孔部分の緩衝材膨潤圧の極端な低下が認められた

また、静水試験と流水試験で得られた知見を用い、坑道横置方式と処分孔縦置方式の人工バリア仕様例に基づいて、処分環境における緩衝材の流出挙動の評価を行った。その結果、extrusion現象による緩衝材の質量流出率として、1万年後で0.04～0.2%、100万年後で2～12%という値が得られた。これによる緩衝材透水係数の増加は、最大でも4倍程であり、流出が緩衝材の止水性に及ぼす影響は小さい。

本研究では、緩衝材の流出現象に関して、基礎的なデータを取得することができたが、データの信頼性向上を含め、特に以下の項目について今後検討する必要がある。

### （1）データの信頼性の向上

extrusion速度に関する比例係数A値及び浸食の臨界流速値については、さらに種々の条件で試験を継続し、データの精度を向上させる必要がある。A値についてはスケール効果の把握が、臨界流速についてはケイ砂混合供試体のデータ取得が課題である。

### （2）地下水化学と岩盤亀裂性状の影響の把握

extrusion現象、浸食現象とも地下水化学の影響が大きいことが予測される。本研究での試験水は蒸留水であるが、今後は実際の地下水組成を模擬した試験水による試験を行

う必要がある。また、岩盤亀裂の物理的・化学的影響についても検討が必要である。物理的な要因では、亀裂の表面粗さの影響が考えられる。理想的には、実岩盤亀裂を用いた試験が望ましいが、その前に、アクリルの表面を粗くして試験することも可能である。

### (3) 流出現象のモデル化

1. 2で述べたように、現在までのところ、緩衝材のextrusion現象については、粘性流体モデル、拡散モデル、多孔質弾性モデル、Drucker-Plagerモデルが適用されている。粘性流体モデルで得られたベントナイトゲルの粘性係数は、流体としてはあまりに大きな値であり、ゲルを固体と考えるほうが適切である。拡散モデルは流出速度を現象論的にとらえたものであり、よりmechanisticな手法が望まれる。Börgessonが用いた多孔質弾性・Drucker-Plagerモデルでは、材料物性が取得されていない、弾塑性体としてモデル化されており粘性挙動を考慮していない、膨潤の駆動力が明確でない等の問題点がある。理想的には、extrusion現象は、浸潤と連成した形の飽和—不飽和粘・弾塑性固体の大変形問題としてのモデル化が適切と考えられる。しかし、このようなモデル化は、緩衝材に関する様々な物理・機械的な現象のモデル化の中で最も困難なものである。したがって、緩衝材についてのより簡単なモデル（例えば、不飽和状態における弾塑性モデルや飽和状態における粘・弾塑性モデル）開発の進捗を参考にして、よりmechanisticなモデル化を模索する必要があるだろう。

浸食現象については、Puschが提案した粘土粒子の結合力と掃流力を比較する形のモデル化が最も適切であると考えられる。

## 参考文献

Boisson, J.Y. (1989) : 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.

Börgesson, L. (1990) : Interim report on the laboratory and theoretical work in modeling the drained and undrained behavior of buffer materials, SKB Technical Report 93-22.

動力炉・核燃料開発事業団 (1992) : 高レベル放射性廃棄物地層処分研究開発の技術報告書 (平成3年度), PNC TN 1410 92-081.

動力炉・核燃料開発事業団 (1996) : 地層処分研究開発の現状 (平成8年度), PNC TN 1410 96-071.

Ishikawa, H., Amemiya, K., Yusa, Y. and Sasaki, N. (1989) : Comparison of fundamental properties of Japanese bentonite as buffer materials for waste disposal, Proc. Int. Clay Conf., Strasbourg.

Kanno, T. and Wakamatsu, H., (1991) : Experimental Study on Bentonite Gel Migration from a Deposition Hole, Proc. 3rd Int. Conf. Nuclear Fuel Reprocessing and Waste Management (RECOD '91), Sendai.

国立天文台編 (1990) : 理科年表, 丸善.

菊地宏吉 (1991) : 岩盤内の水の流れ —岩盤不連続面と浸透流—, 地質工学セミナー『地質工学の基礎と応用』, 社団法人システム総合研究所.

Lajudie, A., Raynal, J., Petit, J. and Toulhoat, P. (1994) : Clay-based Materials for Engineered Barriers: A Review, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. Vol. 353.

NAGRA (1994) : Kristallin-I Safety Assessment Report, Nagra Technical Report NTB93-22.

Pusch, R. (1983) : Stability of Bentonite Gels in Crystalline Rock-Physical Aspects, KBS TR 83-04.

Pusch, R. (1985) : Final report on the Buffer Mass Test - Volume III: Chemical and physical stability of the buffer materials, Stripa Project TR 85-14.