第6章 緩衝材表面近傍の止水性評価

6.1 小型セルによるパイピング・エロージョン・破過試験

6.1.1 試験の目的及び概要(既往試験のレビューも含む)

廃棄物地層処分施設は多重バリア構造を基本としており、ベントナイト系人工バリア、オーバ ーパックやセメント系人工バリア、天然バリアなどで囲まれた構造になっている。この異種材料 界面は地層処分においては地下水の水みちとなることが懸念されているが、評価が難しいため、 現状であっても性能評価上は他の部位と同等に扱われており、界面の影響は考慮されていない。 界面近傍から選択的に地下水が浸潤した場合と、地下水流入位置から緩衝材深部に地下水が浸潤 する場合とでは、その後に緩衝材に発生する事象や事象の順番などが異なってくるため、様々な 影響が考えられる。例えば、SKB社では、ベントナイトブロックと天然バリアの間を充填するペ レットのバルク密度をパラメータとした浸潤解析を実施して、界面付近のモデル化を行っている [1]。SKB社の処分概念では、緩衝材と天然バリアの間はペレットで充填されるため、ペレットの 物性をパラメータとした界面のモデル化と浸潤位置などが重要となるため、界面自体の水理モデ ルに関してはあまり検討がなされておらず、ある厚さを持った界面近傍のペレットのモデル化や 浸潤位置をパラメータとした浸潤解析がなされている。さらに、ベントナイトブロック間の界面 の物性に関しては、力学的な特性のみを摩擦性材料として解析に考慮している。また、緩衝材と 天然バリアの間にはSURFACE ELEMENTと呼ばれる解析モデルを導入した検討も実施してい るが、力学的な特性の表現はしているが、水理的な観点でのモデル化はなされていない。

さらに、SKB 社はこの界面の透水性評価に関して、緩衝材と天然バリアの隙間に充填するペレ ットにおけるパイピング現象を検討している。このパイピング現象はペレットのような低密度緩 衝材がエロージョンによって自己シール出来ない状態で水みちとして残るものであり、一旦、パ イピング現象が生じると、緩衝材がその性能を損ねる程の量が流出することも懸念されている。

SKB 社では、SKB 社 Report R-06-80[2]や SKB 社 Report R-06-72 [3]において、パイピング に関して実験的な検討を行っている。まず、SKB 社 Report R-06-80 [2]では、事前に直径 2~4mm の水みち、供試体とセルの隙間に強制通水を行っている(図 6.1.1-1、図 6.1.1-2 参照)。この際の パラメータは、水みちの直径(2,4mm)、塩分濃度(0,1%)、供試体長、流量、通水圧である。 密度は 2Mg/m³以下、含水率は 17%以下である。この試験では、あらかじめ供試体にパイピング が形成される水みちを設けて、不飽和状態で通水している。

6-1



図 6.1.1-1 SKB 社による水みちのパイピング試験 (SKB 社 Report R-06-80[2])



図 6.1.1-2 SKB 社による隙間のパイピング試験 (SKB 社 Report R-06-80[2])

SKB 社の Report R-06-72[3]では、アクリルパイプ内にペレットを充填させ、パイピングの形成条件を調べている。パラメータは流量 0.001~1L/min、塩分濃度が水道水、1%、3.5%、供試体長が 0.2、1,3m である(図 6.1.1-3 参照)。この試験も、ペレット充填部の大間隙が連なってあらかじめ水みちが形成される場所が用意された供試体に不飽和状態で流量を与える試験である。

一方、図 6.1.1-4 には、SKB 社 Report R-06-72[3]で実施したベントナイトブロックに対するパ イピング試験の様子を示している。このブロックはベントナイト含有率が 30%である。この試験 では、事前にパイピングが形成される場所を設けていないため、明確なパイピングが目視観察さ れていない。また、注水部分が浸透圧密され、隙間ができているなどの現象が報告されている。

以上の既往の検討を踏まえ、本検討では、放射性廃棄物地層処分施設が再冠水する際に、地下 水が緩衝材に浸潤して行く過程で発生する事象、表 2.2.2-2 の(a)~(j)のうち、(e): 緩衝材表面近 傍の止水性能評価に着目する。HLW 処分施設や TRU 廃棄物地層処分施設は多重バリアになって おり、ベントナイト系人工バリア、オーバーパックやセメント系人工バリア、天然バリアなどで 囲まれた構造になっている。さらに処分施設は、建設操業時の力学的安全性の確保の観点から、 天然バリアの地質によってはグラウト、ロックボルト、鋼製支保工などが施されることが予想さ れる。このような緩衝材表面近傍は、再冠水時の水みちとなる可能性が指摘されている。

一方、ベントナイト系人工バリアの施工に着目すると、ベントナイト系人工バリアと異種材料 の界面近傍の止水性能は、その施工方法によって大きく異なる。例えば、原位置施工では界面は 異種材料と密着しているが、ブロック定置では隙間が存在する。その隙間にペレット充填をして も大間隙が存在するため、再冠水の初期段階では高い止水性は期待できない。

そこで本検討では、この緩衝材の施工方法を考慮して、緩衝材表面近傍の止水性に関して小型 セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験による検討を行った。



図 6.1.1-3 SKB 社によるペレット充填部のパイピング試験(SKB 社 Report R-06-72[3])



図 6.1.1-4 SKB 社による B 30/S70 ベントナイトブロックのパイピング試験 (SKB 社 Report R-06-72[3])

6.1.2 原位置施工を模擬した小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験

(1) 試験概要

緩衝材の施工方法を考慮した小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験として、先ず原位置締固め工法を模擬して、緩衝材と異種材料が密着し、界面に隙間や大間隙がない試験条件での通水を行った。

(2) 試験条件

図 6.1.2・1 には試験セルのイメージ図を示している。図に示すようにセルは高さが異なる 3 種類を準備した。これは破過後に供試体長が短すぎて水みちの観察が困難な場合には、供試体 長の大きな供試体で試験を行うために作製したものである。なお、これらの供試体の寸法は高 さ2cmのものから実施することとした。仮に水みちの確認が困難な場合には、高さ6cm、12cm のセルを使用することとする。また、供試体とセルの界面に水みちが生じることの無いよう、 上下のポーラスメタルの直径は供試体より小さくし、ベントナイトがセルと接しないケースの 場合には、セルと供試体の接触部分には樹脂を塗布する。本試験で使用する試験装置の概略図 は図 6.1.2・2 に、試験状況写真は図 6.1.2・3 に示している。通水は下面から行い、上面から排水 する機構となっている。排水はシリンジポンプに接合することも可能であるが、今回は採水瓶 で排水を採水することとした。流量は別途実施している不飽和ベントナイトの浸潤速度試験条 件(0.0001cc/min)を参考にして、その十倍の0.001cc/min、0.01cc/minの2通りとした。



図 6.1.2-1 破過圧計測試験のイメージ



図 6.1.2-2 破過圧測定試験装置概略図



図 6.1.2-3 破過圧測定試験装置

緩衝材表面近傍の止水性能評価として、異種材料との界面の止水性について図 6.1.2-4 に示す ような材料の組み合わせで検討を行った。パラメータは、供試体の界面の有無、材料の組み合 わせである。ベントナイト同士の界面はブロック施工時のブロック間の隙間の模擬、セメント とベントナイトの界面は覆工とベントナイト系人工バリアの界面の模擬、花崗岩とベントナイ トの界面は天然バリアとベントナイト系人工バリアの界面の模擬に相当する。



図 6.1.2-4 破過試験の試験ケース

以上をまとめて、試験ケースを表 6.1.2-1 に示す。なお、本試験では、供試体の界面の有無と 材料の組み合わせに加え、溶液の種類やベントナイトの初期飽和度もパラメータとなるが、本 年度は溶液を蒸留水、初期飽和度を 100%として試験を実施した。

ケース	材料 1	材料 2	ベントナイトの乾燥 密度 Mg/m ³	溶液	ベントナイトの 初期含水比(%) (飽和度%)	流量 (cc/min)	備考
1	ベントナイト系 人工バリア	_					実施済み 界面なし
2	ベントナイト系 人工バリア	ベントナイト系 人工バリア	1.6			0.001	実施済み 界面あり (ブロック施工を 模擬)
3	ベントナイト系 人工バリア	セメント系 人工バリア	(砂 30 wt% 混 合 Na ベント ナイト)	蒸留水	10 (27.4)	と 0.01	実施済み 界面あり (覆工との界面を 模擬)
4	ベントナイト系 人工バリア	花崗岩					実施済み 界面あり (天然バリアとの 界面を模擬)

表 6.1.2-1 原位置施工の試験ケース

図 6.1.2-5 に試験結果のイメージを示す。パイピングが生じると通水圧が急激に減少すること から、通水圧が急激に減少するまで通水を行うことで破過圧を求めることが可能となる。試験 の結果、界面を有する供試体の破過圧が界面を有しない供試体の破過圧より小さければ、継ぎ 目や密度分布の生じない緩衝材の施工方法の適用、地下水浸潤の制御などが必要となる可能性 がある。また、平成 22 年度の試験では供試体の乾燥密度を全て同じ値にしているため、膨潤圧 も全て同じ値になることから、破過圧と膨潤圧の関係も取得可能である。



(3) 試験結果

通水圧と流量の関係を図 6.1.2-6 に、図 6.1.2-6 の低通水圧領域の拡大図を図 6.1.2-7 に示す。 まず、ベントナイト同士の界面を有する供試体に着目すると、通水圧の急激な低下は生じてお らず、その通水圧は界面を有しない供試体と比較して大きい。このことから、本試験の通水条 件ではベントナイト同士の界面に破過は生じないと判断できる。さらに、ベントナイト同士の 界面が、供試体の深部まで全体的に飽和することを促進する役割を果たしているため、不飽和 供試体の吸水が早い段階で鈍る事に起因すると考えられる。

次に、セメントとの界面を有する供試体に着目すると、破過が生じて通水圧が減少している ことが分かる。ただし、流量が少ないために、すぐにシールされ、通水圧は再上昇している。

一方、花崗岩との界面を有する供試体に関しても、セメントとの界面を有する供試体と同様 に、破過が生じて通水圧が減少しているが、直後に通水圧は再上昇している。



図 6.1.2-6 破過圧計測試験結果(流量 0.001cc/min)



図 6.1.2-7 破過圧計測試験結果(拡大図)

次に、図 6.1.2-8 には流量 0.01cc/min に増加した場合の破過圧計測試験結果を示す。図に示 すように、ベントナイト単体、ベントナイト同士の界面を有する場合、どちらも本試験機の水 圧計の上限値である 10MPa 付近まで破過現象は見られなかったため通水を中止した。また、 この場合も、ベントナイト同士の界面が供試体の深部まで全体的に飽和することを促進する役 割を果たしているためベントナイト単体よりはベントナイト同士の界面を有する場合の方が通 水圧が大きい。

さらに、ベントナイトとセメントのケースでは、通水速度を0.01cc/min に上昇させているの にも関わらず、破過現象は見られなかった。同様に、ベントナイトと花崗岩のケースでも破過 現象は見られなかった。そこでこの両ケースについては、図 6.1.2-9 に示すように通水速度を 0.1cc/min まで増加させて試験を継続した。しかしながら、両者とも破過現象には至らなった。 これは、ベントナイトの難透水性によって、通水圧自体が全応力としてベントナイトに作用 する。そのため通水圧がベントナイトを異種材料の界面に密着させるように作用し、この影響 で界面の密着度が高まるためであると考えられる。流量を増加させるほど通水圧が増加し、ベ

ントナイトを圧縮させるため、界面での通水が生じにくくなると考えられる(図 6.1.2-10 参照)。



図 6.1.2-8 破過圧計測試験結果(流量 0.01cc/min)



図 6.1.2-9 破過圧計測試験結果



図 6.1.2-10 破過試験中の全応力の作用

以上の結果から、この原位置締固めを模擬した試験条件では破過現象は生じ難いことが分かった。実際の処分場に置き換えて考えれば、HLW 地層処分施設は深度 300m 以深に建設されるため、地下水場は、本試験条件と同様に高水圧、低流量であると考えられる。このような条件で破過現象が生じても、低流量であるため破過後の水圧を維持するほどの地下水が供給されないため、水圧は瞬時に低下し、緩衝材の膨潤挙動によって修復されると考えられる。

- (4) 水みち観察
 - 1) セメント/ベントナイトの界面

図 6.1.2-8 に示した結果のうち、破過現象が発生したと考えられるセメント/ベントナイト のケースに対して水みちの形成を確認するために、染料であるローダミンを通水した。ロー ダミン注入後の供試体の写真を図 6.1.2-11 に示す。

セメント内部、ベントナイト内部には全くローダミンは流れておらず、着色されていない のに対して、セメントとベントナイトの界面だけがローダミンによって着色されていること が分かる。このことから、セメントとベントナイトとの界面を選択的にローダミンが流れた ことが分かる。このセメントとベントナイトの界面が水みちとなった理由として、界面にお ける Ca 型化などの化学変質による膨潤性能、止水性能の低下の影響が考えられる。



(a) 通水側



(b) 排水側



(c) セメントとセルの界面



(d)ベントナイトとセメントの界面図 6.1.2-11 ローダミン注入後のベントナイト/セメント供試体

2) 花崗岩/ベントナイトの界面

図 6.1.2-8 に示した結果のうち、他のケースと挙動が異なった花崗岩のケースに対して水みちの形成を確認するために、染料であるローダミンを通水した。ローダミン注入後の供試体の写真を図 6.1.2-12 に示す。

花崗岩部分は強く着色されているのに対し、ベントナイト部分はほとんど着色されておら ず、水のほとんどがベントナイト部分ではなく透水係数の高い花崗岩部分を通過していると 判断できる。このことが、花崗岩との界面を有する供試体の通水圧が小さい原因と考えられ る。 花崗岩は取りたてて透水性の高い岩ではなく、実際の処分場の母岩となる可能性は十分に ありえる材料である。ベントナイトよりも止水性が高い岩盤をサイトに選ぶことは難しく、 この花崗岩のケースのような現象は実際の処分場であっても生じる可能性があると考えられ る。







(b) 排水側



(c) 花崗岩(樹脂塗布)とセルの界面



(d)ベントナイトと花崗岩の界面 図 6.1.2-12 ローダミン注入後のベントナイト/花崗岩供試体

6.1.3 ブロック定置・ペレット充填方式を模擬した小型セルによるパイピング、エロージョン、 破過試験

(1) 概要

ベントナイト系人工バリアがベントナイト系人工バリアや異種材料と界面を有する場合であ っても、ベントナイト系人工バリアが界面と十分に密着するように設置された場合、通水圧が ベントナイトを圧縮変形させて界面を密着させるように作用するため、破過現象が生じないと いう場合があるという結果となった。しかしながら、通常、ベントナイト系人工バリアの表面 近傍は難施工箇所であり、施工方法によっては隙間が生じ易いと考えられる。そこで、異種材 料との界面に隙間の存在が想定されるブロック定置・ペレット充填方式を模擬した試験系でベ ントナイト系人工バリア表面近傍のパイピング、エロージョン、破過の各現象の発生の有無を 検討する。

(2) 試験ケース、および試験装置

図 6.1.3-1 に試験イメージを示す。ベントナイト系人工バリアの施工方法として図に示すよう に、ブロック定置工法とペレット充填工法に関して検討した。ブロック定置工法では緩衝材と 天然バリアの間には隙間が存在することが想定される為、試験セルと供試体間には隙間を設けた。ペレット充填工法では、初期に大きな間隙が存在するため、試験でもセル内にペレットを 充填した。

試験ケースを表 6.1.3・1 に示す。ケース名の最初のアルファベット Bot、Top は注水箇所を示 し、続くアルファベットは通水液の種類を表す(H:H₂O、N:NaCl 水溶液)。さらに、ハイフン の後のアルファベットはブロック定置の場合 B、ペレット充填の場合には P としている。"●● -B"のケースブロック定置工を模擬して初期状態でセルと供試体間に隙間があるケース、"●● -P"はペレット充填工法を模擬して初期状態で大きな間隙があるケースである(例、H-B:蒸 留水をブロックに通水したケース)。表中の見かけの乾燥密度は、供試体の乾燥重量をセルの容 積で除したものであり、膨潤後の乾燥密度である。



図 6.1.3-1 ブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験条件の検討 (左:ブロック定置工法、右:ペレット充填工法)

さらに、表 6.1.3-1 には上面から給水する上蓋と供試体の間に隙間があるブロック定置工法の ケース(Top●-B)、同様に上面から給水するペレット充填工法のケース(Top●-P)も示している。 両ケースとも、供給口の位置以外はそれぞれ同じ条件である。この"Top●-B"と"Top●-P"は、 膨潤を妨げる方向に通水圧が作用するように設定したケースである。これは、図 6.1.3-2 に示す ように、実際の HLW 縦置き概念において、緩衝材と天然バリアの隙間、若しくはペレット充 填部に水平に湧水があった場合に相当する。

さらに、各ケースで蒸留水とイオン強度 0.5M の NaCl 水溶液の 2 ケースを実施した。ペレ ット充填工法のケースで使用したペレットは、既往の研究で検討されたペレット[4]であり、粒 径 10~20mm 程度のものを使用した。ただし、BotH-2-P に関しては、蒸留水のケースで、ペ レットの見かけの乾燥密度を変化させるために大きなペレット(粒径 10~20mm)だけでなく、小 さなペレット(粒径 1~3mm 程度)を組み合わせたケースも実施した。

近年の研究[5]で、ペレット自体の乾燥密度を高めてペレット充填工法で乾燥密度 1.6Mg/m³ を達成する検討も為されており、ペレット充填工法で様々な乾燥密度で試験を実施できるよう に、この大小の高密度ペレットについても検討を行った(BotH-3-P)。

全てのケースで、初期の流量は 0.1L/min.として、一部の試験で適宜流量を低下させた。この 流量は SKB 社や POSIVA 社などの処分坑の要求性能として設定されている湧水量の上限値を 参考にした[6]。

ケース	初期 状態	見かけの 隙間/間隙 割合	見かけの 乾燥密度 (Mg/m³)	液種 (イオン強度)	最大 通水圧 (MPa)	流量	給水口	備考
BotH-B	隙間	10%	1.6(**1.936) (ケイ砂 30%混合 クニゲル V1)	蒸留水/		0.1L/min		実施済み
BotN-B	あり			NaCl 水溶液 0.5M		0.1L/min		実施済み
BotH-1-P			約 1.1 (クニゲル V1)		3	0.1L/min	底面	実施済み
BotH-2-P	大間隙	10~40%	約 1.5 (クニゲル V1)	約1.5 蒸留水 ニゲル V1) 蒸留水 約1.6 二ゲル V1) 約1.1 NaCl 水溶液 0.5M	-	0.1L/min	-	実施済み
BotH-3-P			約 1.6 (クニゲル V1)			0.1→0.01→0.001 L/min		実施済み
BotN-P			約 1.1 (クニゲル V1)			0.1L/min		実施済み
ТорН-В	附問		1.6 (**1.778)	蒸留水/		0.1L/min		実施済み
TopN-B	あり	10%	(ケイ砂 30%混合 クニゲル V1)	NaCl 水溶液 0.5M	3	0.1L/min	上面	実施済み
TopH-P				蒸留水/		0.1L/min		実施済み
TopN-P	大間隙	10~40%	約 1.1 (クニゲル V1)	NaCl 水溶液 0.5M		0.1L/min	-	実施済み

表 6.1.3-1 膨潤供試体のブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験ケース

*(膨潤前乾燥密度)



図 6.1.3-2 HLW 縦置き概念イメージ図

図 6.1.3-3 に試験セルの概略図を示す。試験セルの容積は φ 110mm×h50mm である。供給 口は上面と下面の二箇所あり、どちらか一方、若しくは両方から通水可能である。さらに、排 水は、セルの上蓋と側部リングの間に設けた幅 5mm のスリットから上蓋の上に設けられたエ ロージョンで排出されたベントナイトを貯留するセルを介して排水される。



図 6.1.3-3 ブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験セルの概略図

図 6.1.3・4 には、長時間一定流量を制御できる 2 連シリンジポンプによる定流量制御装置を示 している。この定流量制御装置は、一方のシリンジポンプが供試体へ通水液を注入中に、他方 のシリンジポンプに通水液を充填するという自動の盛換えを繰り返すものである。図 6.1.3・5 に実際の 2 連シリンジポンプによる定流量制御装置による自動盛り換え状況を示す。シリンジ ポンプ 1 とシリンジポンプ 2 の勾配が異なるのは、両シリンジポンプの断面積が異なるためで ある。図から、供試体への注入とシリンジポンプへの充填が交互に切れ間なく行われているこ とが分かる。



図 6.1.3-4 2 連シリンジポンプによる定流量制御装置



図 6.1.3-5 2 連シリンジポンプによる定流量制御装状況

- (3) 試験結果
 - 1) BotH-B (注入口:底面/蒸留水/ブロックのパイピングとエロージョンの発生状況) 図 6.1.3-6 に蒸留水を底面から通水量 0.1L/min で注入した場合のブロック定置工法(側部 に隙間)のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。ここでパイピングとは、 不飽和状態の緩衝材に地下水が流入した場合、膨潤圧に対して流水圧が大きくなるため水み ちが形成され、さ緩衝材微粒子が排出されることをエロージョンという。通水開始後 3 時間 で水みちが形成されていることが分かる。さらに、膨潤前の乾燥密度は 1.963Mg/m³ と高密 度であるのにも拘らず、6 時間後には水みちが形成されエロージョンが卓越している。試験 後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度(単位時間当た りのエロージョン率)は 0.66%/hr であった。



図 6.1.3-6 注入口:底面/蒸留水/ブロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況

2) BotN-B(注入口:底面/NaCl水溶液/ブロックのパイピングとエロージョンの発生状況)

図 6.1.3-7 に NaCl 水溶液を底面から通水量 0.1 L /min で注入した場合のブロック定置工法(側部に隙間)のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。図から、沈殿物が非常に多く、2 時間後に沈殿物内に水みちが形成されていることが分かる。6 時間後には沈殿物は膨潤した供試体と一体化し区別がつかなくなるが、9 時間後には沈殿物内に形成された水みちは、沈殿物と供試体が一体化した後でも存在している。特筆すべきは、水みちに緩衝材のケイ砂が堆積している点である。12 時間後ではこの砂が水みちのシールを阻害してい

るように観察された。この水みちに堆積した砂の影響もあって、膨潤前の乾燥密度は 1.963Mg/m³と高密度であるのにも拘らず、水みちはシールされずにエロージョンが卓越して いる。試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.39%/hrであった。



図 6.1.3-7 注入口:底面/NaCl水溶液/ブロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況

3) BotH-1-P(注入口:底面/蒸留水/大粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況) 図 6.1.3-8 に蒸留水を底面から通水量 0.1 L/min で注入した場合の大粒径ペレット充填工 法(大間隙)のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。本試験では、粒径 10~20mm 程度のペレットのみを使用している。見かけの乾燥密度は 1.1Mg/m³程度である。

図から、給水直後に供試体の大間隙を水が満たしていることが分かる。なお、14)通水圧の 発生状況で詳述するが、この間に通水圧の上昇は生じていない。試験開始から1時間後には ペレット表面が膨潤し、間隙が網目状の水みちを形成していく過程が得られた。この水みち には、6時間後には沈殿物が堆積し、沈殿した堆積物が水の流れを阻害するような場合には、 その水みちは膨潤によってシールされる。さらに、蛇行している水みちは絶えず形状を変化 させ、河川と同様に、なるべく真っすぐな水みちに変化しているように観察された。

試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.38%/hr であった。



図 6.1.3-8 注入口:底面/蒸留水/大粒径へ。レットケースのパイピングとエロージョンの発生状況

4) BotH-2-P(注入口:底面/蒸留水/大小粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況) 図 6.1.3-9に蒸留水を通水量 0.1L/min で底面から注入した場合の大小粒径ペレット充填工 法(大間隙)のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。本試験では、粒径 10~20mm 程度のペレットの大間隙を 1~3mm 程度の小粒径ペレットで充填している。見か けの乾燥密度は 1.5Mg/m³程度である。 図から、給水直後に供試体の間隙を水が満たしていることが分かる。なお、この間に通水 圧の上昇は生じておらず、この傾向は前述の大粒径のみのケースと大差はない。また、試験 開始15分後に小粒径部分に多数の小さな水みちが形成された。この多数の水みちは、通水を 継続する過程で収斂し、3時間後には大きな1つの水みちを形成した。6時間後に1つに収 斂した水みち周辺はエロージョンによって流出し、水みちの太さは増加傾向であった。

試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.42%/hr であった。



図 6.1.3-9 蒸留水/注入口底面/大小粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況

5) BotH-3-P(注入口:底面/蒸留水/高密度大小粒径ペレットケースのパイピンケ とエロージョンの発生状況) 図 6.1.3-10 に蒸留水を底面から 0.1→0.01→0.001L/min で注入した場合の高密度大小粒径 ペレット(PPペレット)充填工法(大間隙)のケースのパイピングとエロージョンの発生状況 を示す。本試験では、粒径 10~20mm 程度のペレットの大間隙を 1~3mm 程度の小粒径ペレ ットで充填している。見かけの乾燥密度は 1.6Mg/m³程度である。

図から、0.1L/min で給水した直後に供試体の間隙を水が満たしていることが分かる。なお、 この間に通水圧の上昇は生じておらず、この傾向は前述の大粒径のみのケースと大差ない。 また、試験開始後15分で小粒径部分に多数の小さな水みちが形成された。この多数の水みち は、通水を継続する過程で収斂し、3時間後には大きな1つの水みちを形成した。9時間後に は1つに収斂した水みち周辺はエロージョンによって流出し、水みちの太さは増加傾向であ った。この傾向は、前述の大小粒径ペレット充填工法と同様であった。

ある程度水みち形成が落ち着いてから、12 時間後に流量を 1/10 倍に低下させた (0.01L/min)。およそ、3 時間程度で水みちの太さが膨潤によって細くなった。さらに 18 時 間後に流量を 1/10 倍に低下させた(0.001L/min)場合、水みちはさらに細くなった。これは、 水みちの大きさが、膨潤とエロージョンの定常状態(膨潤とエロージョンの鬩ぎ合い)で決 まるためであると考えられる。

試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.3%/hr であった。



図 6.1.3-10 注入口:底面/蒸留水/大小粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況

の発生状況)

図 6.1.3-11に NaCl 水溶液を底面から 0.1L/min で注入した場合の大粒径ペレット充填工法 (大間隙)のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。本試験では、粒径 10~20mm 程度のペレットのみを使用している。見かけの乾燥密度は 1.1Mg/m³程度である。

図から、0.1L/min で給水した直後に供試体の大間隙を NaCl 水溶液が満たしていることが 分かる。なお、この間に通水圧の上昇は生じていない。試験開始直後からペレット表面が逆 立ち、沈殿が始まった。1 時間後には堆積した沈殿物に水みちが形成された。この水みちに は、3 時間後には沈殿物が堆積し、沈殿した堆積物が水の流れを阻害するような場合には、 その水みちは膨潤によってシールされる。12 時間後には多数の小さな水みちは徐々に大きな 数本の水みちに収斂し、最終的には 1 本の水みちとなった。この水みちの収斂には、上述の 沈殿した堆積物による水みちの閉塞が寄与している。

試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.21%/hr であった。



図 6.1.3-11 注入口:底面/蒸留水/大粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況

7) TopH-B(注入口:上面/蒸留水/ロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況) 図 6.1.3-12 に蒸留水を上面から通水量 0.1L/min で注入した場合のブロック定置工法(側 部に隙間)のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。セルの上蓋と供試体上 面の間に 5mm の隙間を設けている。

図から、供試体側面からは浸潤面に進展は観察されるが、大きな変化は見られなかった。 但し、解体時の上面はエロージョンによってベントナイトが流出し、砂っぽい状態になって いた。また、上面には浅い水みちが観察された。

膨潤前の乾燥密度は 1.778Mg/m³と高密度であるのにも拘らず、隙間はシールされずにエ ロージョンが卓越している。ただし、セルと供試体側面の界面の浸潤は大きく進展しておら ず、底面も乾燥したままであった。

試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.15%/hr であった。



図 6.1.3-12 注入口:上面/蒸留水/ブロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況

8) TopN-B(注入口:上面/NaCl水溶液/ロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況) 図 6.1.3-13 に NaCl水溶液を上面から通水量 0.1L/min で注入した場合のブロック定置工 法(側部に隙間)のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。セルの上蓋と供 試体上面の間に 5mm の隙間を設けている。

図から、供試体側面からは浸潤面に進展は観察されるが、大きな変化は見られなかった。 浸潤速度は蒸留水のケース(UpH-B)に比べ速いことが分かる。但し、解体時の上面は、特に 上面の淵のエロージョンが激しかった。

膨潤前の乾燥密度は 1.778Mg/m³と高密度であるのにも拘らず、隙間はシールされずにエ ロージョンが卓越している。ただし、セルと供試体側面の界面の浸潤は大きく進展しておら ず、底面も乾燥したままであった。

試験後の供試体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.04%/hr であった。



図 6.1.3-13 注入口:上面/蒸留水ブロックケースのパイピングとエロージョンの発生状況

9) TopH-P(注入口:上面/蒸留水/大粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況) 図 6.1.3-14 に蒸留水を上面から通水量 0.1L/min で注入した場合の大粒径ペレット充填工 法(大間隙)のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。本試験では、粒径 10~20mm 程度のペレットのみを使用している。見かけの乾燥密度は 1.1Mg/m³程度である。

図から、給水直後に供試体の大間隙を水が満たしていることが分かる。なお、この間に通 水圧の上昇は生じていない。試験開始から1時間後にはペレット表面が膨潤し、間隙が網目 状の水みちを形成していく過程が得られた。この水みちには、給水を底部から行った場合と 比較して小さい。これは、上部から給水された水は、膨潤後、供試体上面を流れ、供試体内、 下部では拡散場となるため、膨潤が卓越するためだと考えられる。そのため、試験後の供試 体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.03%/hr と他のケー スに比べて小さかった。



図 6.1.3-14 蒸留水/注入口底面/大粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況

10) TopN-P (注入口:上面/NaCl 水溶液/大粒径 ペレットケースのパイピングと

エロージョンの発生状況)

図 6.1.3-15 に NaCl 水溶液を底面から通水量 0.1L/min で注入した場合の大粒径ペレット 充填工法(大間隙)のケースのパイピングとエロージョンの発生状況を示す。本試験では、 粒径 10~20mm 程度のペレットのみを使用している。見かけの乾燥密度は 1.1Mg/m³程度で ある。

図から、給水直後に供試体の大間隙を水が満たしていることが分かる。なお、この間に通 水圧の上昇は生じていない。試験開始から1時間後にはペレット表面から沈殿物が底部、間 隙に堆積し、3時間後にはそれらとペレットの膨潤が一体化し水みちを塞いだ。この水みち には、沈殿物が堆積し、沈殿した堆積物が水の流れを阻害するような場合には、その水みち は膨潤によってシールされる。さらに、6時間には沈殿と膨潤が進み明確な水みちは観察さ れなくなった。これは、上部から給水された水は、膨潤後、供試体上面を流れ、供試体内、 下部では拡散場となるため、膨潤が卓越するためだと考えられる。そのため、試験後の供試 体重量と試験時間から算出されるベントナイトのエロージョン速度は 0.03%/hr と他のケー スに比べて小さかった。



図 6.1.3-15 注入口:上面/NaCl 水溶液/大粒径ペレットケースのパイピングとエロージョンの発生状況

11) 各ケースのエロージョン状況

各試験のエロージョン状況を表 6.1.3・2 に示す。各試験のエロージョンによって流出した物 質はエロージョン物質の貯留セルに溜め置かれるが、水に分散している細粒分については貯 留セルに溜まらずに排水されてしまう。そこで、排水をポリバケツに溜めて濾過を試みたが、 排水量が 100L 程度と多く、濾過に膨大な時間を要するため、試験後の供試体乾燥質量を計 測することによってエロージョン質量を算出した。さらにエロージョン質量を試験前供試体 乾燥質量で除してエロージョン率、さらにエロージョン率を試験時間で除してエロージョン 速度を算出した。

表から、ペレットよりもブロックの方がエロージョン質量、エロージョン率が大きいこと から、エロージョンし易い傾向にある。これは、ペレットでの見かけの初期乾燥密度は 1.1Mg/m³であり、ブロックの見かけの乾燥密度は 1.6Mg/m³であるため、ブロックの方が間 隙の体積は小さい。そのため、給水速度が 0.1L/min.で同じ条件であっても間隙を流れる水の 速さはブロックの方が速いためであると考えられる。また、ペレットの方が、流れが複雑と なるためにエロージョンを抑制する作用があるものと考えられる。さらに、ペレットの見か けの乾燥密度を高くしても間隙の体積が小さくなるため、間隙における流量が速くなりエロ ージョンを防ぐことは出来なかった。

同じ条件で、給水液が蒸留水の場合と NaCl 水溶液の場合を比較すると、NaCl 水溶液の方がエロージョンし難いという結果となった。これは、NaCl 水溶液の場合、沈殿の方がエロージョンよりも卓越しているためであると考えられる。

ケース	試験前 乾燥質量(g)	試験後 乾燥質量(g)	試験前 乾燥密度(Mg/m ³)	エロージョン 質量(g)	エロージョン率 (%)	エロージョン速度 (%/hr)
BotH-B	756.8	684.4	1.593	72.310	9.555	0.66
BotN-B	758.1	721.2	1.595	36.940	4.873	0.39
BotH-1-P	524.9	496.8	1.105	28.050	5.344	0.38
BotH-2-P	712.7	644.3	1.500	68.449	9.603	0.42
BotH-3-P	746.0	703.1	1.570	42.910	5.752	0.30
BotN-P	525.6	521.5	1.106	4.060	0.773	0.21
TopH-B	759.2	727.9	1.598	31.360	4.131	0.15
TopN-B	759.1	740.6	1.598	18.480	2.435	0.04
TopH-P	525.3	518.2	1.106	7.120	1.355	0.03
TopN-P	526.2	524.8	1.107	1.440	0.274	0.03

表 6.1.3-2 エロージョン状況一覧

12) パイピングとエロージョン試験中の通水圧の発生状況

図 6.1.3-16 にパイピングとエロージョン試験中の通水圧の発生状況を示す。図から、通水 速度が 0.1L/min.一定であるため、ブロック、ペレットに関わらず、初期の見かけの乾燥密度 が大きいもの程(間隙体積が小さいもの程)通水圧が大きいことが分かる。

また、どのケースも通水開始から通水圧が大きく変化していないため、一貫して水みちがシ ールされていないことが分かる。BotH-3-Pのケースにおいて、流量を0.001L/min.まで低下 させたが、通水圧が低下しておらず、ほぼ一定であった。これは、流量を低下させた分だけ エロージョンよりも膨潤が卓越し、水みちが細くなったため、通水圧が低下せず、一定とな ったものと考えられる。



図 6.1.3-16 パイピングとエロージョン試験中の通水圧の発生状況

6.1.4 パイピング、エロージョン、破過現象の詳細検討

(1) 概要

緩衝材表面近傍の止水性能評価のために、ブロック定置工法とペレット充填工法を取り挙げ てブレイクスルー、パイピング、エロージョンなどの現象について実験により検討した。その 結果、全てのケースでパイピングとエロージョン現象を観察できた。この試験では、原則とし て流量を 0.1L/min.一定条件で行ったため、図 6.1.4-1 に示すように膨潤が生じて間隙体積が小 さくなると、間隙における流量は速くなる。間隙における流量が速くなると、ブロックやペレ ットの表面の膨潤したベントナイトは流出(エロージョン)する。エロージョンが発生すると 間隙は拡大するため流量が遅くなり、ベントナイトのエロージョンが収まる。このことから、 パイピングが発生するかどうかは、パイピング内の水圧と緩衝材の膨潤圧との大きさで決定さ れるものと考えられる。



図 6.1.4-1 膨潤による間隙体積の減少

さらに、パイピング現象によって生じた水みちは、発生当初は多数存在しても、時間が経過 すると共に数本に収斂し、最終的には1つの大きな水みちになる傾向が観察された。これは、 ランダムに存在する初期間隙やベントナイトの不均一な膨潤により、水みちごとに流れ易さが 異なるものと考えられる。通水液は流れ易い方に多く流れるため、流れ易い水みちはエロージ ョンが卓越し、ますます流れ易くなり、流れ難い水みちは流量が低下するため膨潤が卓越し、 ますます流れ難くなる。このようなメカニズムにより水みちが数本に収斂していくものと考え られる。



図 6.1.4-2 水みちの収斂のイメージ図

仮に、この水みちの収斂現象が実際の処分孔でも生じるとすると、SKB 社や POSIVA 社で 設定している処分孔の仕様である処分孔当たりの湧水が 0.1L/min.以下とう規定は、最終的には 1 つの水みちの流量となる。すなわち、緩衝材に 0.1L/min.の流量の水みちが生じてもシール出 来なければならなくなる。

この水みちが数本に収斂する現象は、緩衝材の仕様に大きく影響するため、確認する必要が ある。その試験方法として、図 6.1.4-3 に示すように、ブロック状の緩衝材に人為的に水みちを 作り、水みちが最終的に1つに収斂するかどうかを確認するという方法が考えられる。

また、本試験では、原則として流量を 0.1L/min.一定条件で行ったが、BH-3-P で流量を 0.001L/min.まで低下させると水みちが非常に小さくなった。ただし、通水圧が大きくなってい ないことから、シールされていないことが確認できた。ただし、試験初期から 0.001L/min.の 流量で試験を行った場合にも同様に水みちが生成されるのかどうかは不明である。そこで、試験初期から 0.001L/min.など、流量をパラメータとした試験を行い、エロージョンよりも膨潤 が卓越する流量を取得することも重要である。



図 6.1.4-3 水みちの収斂現象の確認試験イメージ

(2) 試験ケースと供試体作成方法

図 6.1.4-4 に水みちの収斂現象の確認試験全ケースのイメージを示す。また、表 6.1.4-1 には 各試験の試験条件をまとめて示している。

使用する液種は、蒸留水と NaCl 水溶液、さらに CaCl2水溶液の 3 種類である。NaCl 水溶 液と CaCl2水溶液のイオン強度は 0.5 であり、水みちの形成にイオン強度や Ca 型化が及ぼす 影響を検討できる。

先ず、Case1、Case2 では、事前に人為的に供試体に作製した水みちが通水過程で1本に収 斂していく状況を調べるものである。Case1 と Case2 では人為的な水みちの配置が異なり、水 みちが収斂する場所が人為的な水みちの配置に関係なく、膨潤性材料と非膨潤性材料(本試験 の場合はアクリルセル)の界面に収斂することを確認することが目的である。

Case3~Case6 では、大小のペレットを充填したケースで流量一定で通水試験を行った場合 にどの流量で水みちがシールされるかを調べるものである。平成 23 年度の試験では、初期流量 は全て 100cc/min であり、蒸留水を使用して水みち形成を確認してから流量を低下させた。こ の場合、1cc/min でも水みちがシールされることがなかったため、この結果を基にして次年度 以降の試験ケースを決定した。

平成 24 年度の蒸留水のケースでは、試験計画段階では 100cc/min~0.1cc/min でも通水試験を 実施する計画であったが、流量が 1cc/min の場合に水みちのシールが確認されたため、5cc/min に変更した。Case7,Case8 はブロックとペレット充填部の界面が水みちとならず、膨潤性材料 と非膨潤性材料(本試験の場合はアクリルセル)の界面に水みちが収斂することを確認する目 的で 100cc/min の流量で試験を実施した。

平成 25 年度の NaCl 水溶液のケースでは、100cc/min~1cc/min で通水試験を実施するした が、流量が 1cc/min の場合でも水みちがシールがされなかったために 0.1cc/min でも試験を実 施した。Case7,Case8 はブロックとペレット充填部の界面が水みちとならず、膨潤性材料と非 膨潤性材料(本試験の場合はアクリルセル)の界面に水みちが収斂することを確認する目的で 1cc/min の流量で試験を実施した。

今年度の CaCl₂ 水溶液のケースでは、NaCl 水溶液の結果に基づいて 100cc/min~0.1cc/min で通水試験を実施した。Case7,Case8 はブロックとペレット充填部の界面が水みちとならず、 膨潤性材料と非膨潤性材料(本試験の場合はアクリルセル)の界面に水みちが収斂することを 確認する目的で 1cc/min の流量で試験を実施した。

全てのケースで吸水方法は平成 23 年度と同様にフローポンプをリレーさせて常に一定流量 が供試体底面から上面に向かって流れるようにした。また、試験時間は1日とした。ただし、 Case3 では 0.1L/min でエロージョン質量と時間の関係を取得するため、長時間通水を行った。



Case	試験イメージ	流速 (cc/min.)	液種	初期乾燥密度 (Mg/m ³)	最大通水圧 (MPa)
1		100		1.6	
2		100		1.6	
3		100	H₂O		1
4		10			
5		1	NaCI水溶液	1 6 田 庄	
6		H ₂ O: 5 NaCl: 5, 0.1 CaCl ₂ : 0.1	(0.5) CaCl₂水溶液 (0.5)	1.3性皮	3
7		H ₂ O: 100		ペレット部:1 ブロック部:1.6 平均:1.3	
8		CaCl ₂ : 1		ペレット部 : 1.5 ブロック部 : 1.6 平均 : 1.55	

表 6.1.4-1 水みちの収斂現象の確認試験全ケースの試験条件

図 6.1.4-5 に人為的な水みちを有する供試体作製状況を示す。写真に示すように予め水みちを 配置する場所にピンを配置して圧縮成型すれば水みちが出来るように圧縮供試体を作製した。 表 6.1.4-2 には各試験ケースの供試体の乾燥密度を示す。



図 6.1.4-5 人為的な水みちを有する供試体作製状況

Case	H24	H25	H26	
	H_2O	NaCl	CaCl_2	
	(Mg/m ³)	(Mg/m^3)	(Mg/m ³)	
1	1.594	1.600	1.600	
2	1.595	1.596	1.598	
3	1.571	1.532	1.531	
4	1.471	1.525	1.537	
5	1.490	1.543	1.553	
6	1.465	1.510	1.538	
		1.520		
7	B1.601	B1.596	B1.600	
	P1.074	P1.103	P1.106	
	平均 1.348	平均 1.356	平均 1.358	
8	B1.595	B1.595	B1.599	
	P1.531	P1.554	P1.548	
	平均 1.563	平均 1.575	平均 1.574	

表 6.1.4-2 水みちの収斂現象の確認試験供試体の乾燥密度

(3) 試験結果 (蒸留水のケース)

1) Case1

図 6.1.4-6 に水みちの形成状況を示す。内部を含めて複数をあった人工的な水みちは通水初 期段階でセルとの界面に設置した1本の水みちが大きくなり、最終的に1本に収斂した。図 6.1.4-7 には供試体の解体状況を示している。写真から、大きな水みちが側面に大きく形成さ れ、内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。また、大きな水みちには ケイ砂が沈殿しており、仮にベントナイトが膨潤してもシールを妨げる可能性がある。

図 6.1.4-8 に Case1 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、 0.1L/min で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。



図 6.1.4-6 水みちの形成状況 (Case1)

底面	上面	側面1
側面 2	断面	

図 6.1.4-7 解体状況 (Case1)



図 6.1.4-8 Case1 の通水圧と流量の関係

2) Case2

Case2の供試体の作製方法も Case1 と同様である。すなわち、ピンの配置を Case1 から変 えて、全ての人為的な水みちが供試体内部にあるように配置して圧縮成型することによって 圧縮供試体を作製した。

図 6.1.4-9 に水みちの形成状況を示す。供試体内部にしか人工的な水みちを配置しなかった が通水初期段階でセルとの界面に1本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に1本に収 斂した。図 6.1.4-10 には供試体の解体状況を示している。写真から、大きな水みちが側面に 大きく形成され、内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。また、大き な水みちにはケイ砂が沈殿しており、仮にベントナイトが膨潤してもシールを妨げる可能性 がある。Case1 と Case2 からパイピングは緩衝材内部には形成されずに、緩衝材と非膨潤性
材料の界面に形成されることが分かった。

図 6.1.4-11 に Case2 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、 0.1L/min で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。



図 6.1.4-9 水みちの形成状況 (Case2)



図 6.1.4-10 解体状況 (Case2)



図 6.1.4-11 Case2 の通水圧と流量の関係

Case3の供試体の作製方法は昨年度の大小ペレット充填ケースと同様であるが、通水速度は一定であり、全ての材料が流出するまで試験を実施した。

図 6.1.4-9 に水みちの形成状況を示す。通水初期段階で供試体の大間隙を連ねた水みちが、 供試体とセルとの界面に複数形成され、そのうちの1本の水みち形成に収斂し、次第に成長 した。写真から、大きな水みちが周囲のベントナイトを削りながら、その流路を変化させて いる状況が分かる。これまでの観察から、供試体表面に水みちが形成されていても内部は乾 燥状態のままであるため、水みちが形成された後に、水が供試体内部に浸潤していく過程で 生じる膨潤によって、水みちの形状が変化するものと推察された。定点観察から、本試験条 件の場合、全てのベントナイトが流出するのには27日程度を要することが分かった。



図 6.1.4-12 水みちの形成状況 (Case3)

図 6.1.4-13 には、通水圧と流量の関係を示す。図から、100cc/min の一定流量で給水されても通水圧が増加することなく、最大でも 6kPa 程度であることが分かる。

図 6.1.4-14 には、総流量とエロージョン質量の関係の関係を示している。図には、SKB 社が MX80 のペレットを筒状のセルに充填して取得した、総流量とエロージョン質量の関係も併せて示している。図から、MX80 とクニゲル V1 の総流量とエロージョン質量の関係は、 どちらもほぼ同じ勾配であるが、クニゲル V1 に比べ、MX80 の方がエロージョンし易い材料であることが分かる。これはクニゲル V1 に比べ MX80 の方がモンモリロナイト含有率が 多いためであると考えられる。



図 6.1.4-13 Case3 の通水圧と流量の関係



図 6.1.4-14 総流量とエロージョン質量の関係

Case4 の供試体の作製方法は昨年度の大小ペレット充填ケースと同様である。流量は 0.01L/min で一定である。

図 6.1.4-15 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.01L/min 一定で通水を行ったが、 通水初期段階でセルとの界面に 1 本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に 1 本に収斂 した。図 6.1.4-16 には供試体の解体状況を示している。写真から、側面に水みちが形成され、 内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。そのため、側部には水みちが 形成されているが、供試体内部には乾燥領域が存在している。

図 6.1.4-17 に Case4 の通水圧と流量の関係を示す。側面に水みちが形成されたため、 0.01L/min で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。



図 6.1.4-15 水みちの形成状況 (Case4)

底面	底面	上面	
上面	上面	側面	
側面			

図 6.1.4-16 解体状況 (Case4)



図 6.1.4-17 Case4 の通水圧と流量の関係

Case5 の供試体の作製方法は昨年度の大小ペレット充填ケースと同様である。流量は 0.001L/min で一定である。

図 6.1.4-18 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.001L/min 一定で通水を行った結 果、セルとの界面に水みち形成は観察されず、次第に給水側で均一に膨潤が生じ、最終的に 止水された。図 6.1.4-19 には供試体の解体状況を示している。写真から、供試体内部にはま だ乾燥領域があるものの、給水側である底部領域はしっかりと膨潤して、ペレットの大間隙 をシールしていることが分かる。

図 6.1.4-20 に Case5 の通水圧と流量の関係を示す。水みちが形成されなかったため、 0.001L/min で給水した場合の通水圧は最大で 3MPa 弱まで上昇した。

通水開始 15 分後	通水開始 90 分後	通水開始 120 分後
通水開始 210 分後		

図 6.1.4-18 水みちの形成状況 (Case5)

底面	上面	上面	
上面	内部	側面	
断面			

図 6.1.4-19 解体状況 (Case5)



Case6 の供試体の作製方法は昨年度の大小ペレット充填ケースと同様である。流量は 5cc/min で一定である。当初計画では 0.1cc/min で試験を実施する予定であったが、1cc/min で水みちが形成されなかったことから、計画を変更して 5cc/min の流量で試験を実施するこ ととした。

図 6.1.4-21 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 5cc/min 一定で通水を行ったが、通 水初期段階でセルとの界面に1本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に1本に収斂し た。図 6.1.4-22 には供試体の解体状況を示している。写真から、側面に水みちが形成され、 内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。そのため、側部には水みちが 形成されているが、供試体内部には乾燥領域が存在している。

図 6.1.4-23 に Case6 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、 5cc/min で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。



図 6.1.4-21 水みちの形成状況 (Case6)



図 6.1.4-22 解体状況 (Case6)



図 6.1.4-23 Case6 の通水圧と流量の関係

Case7 の供試体の作製方法はブロック供試体を作製し、半分に切り、残りの部分を大粒径 ペレットで充填して作製した。流量は0.1L/min で一定である。

図 6.1.4-24 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.1L/min 一定で通水を行ったが、 通水初期段階でペレット側のセルとの界面に 1 本の水みち形成され、次第に成長し、最終的 に 1 本に収斂した。図 6.1.4-25 には供試体の解体状況を示している。写真から、側面に水み ちが形成され、ブロックとペレットの界面には水みちが形成されていないことが分かる。

図 6.1.4-26 に Case7 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、 0.1L/min で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。



図 6.1.4-24 水みちの形成状況 (Case7)



図 6.1.4-25 解体状況 (Case7)



図 6.1.4-26 Case7 の通水圧と流量の関係

Case8 の供試体の作製方法はブロック供試体を作製し、半分に切り、残りの部分を大小粒 径ペレットで充填して作製した。流量は 0.1L/min で一定である。

図 6.1.4-27 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.1L/min 一定で通水を行ったが、 通水初期段階でペレット側のセルとの界面に 1 本の水みち形成され、次第に成長し、最終的 に 1 本に収斂した。図 6.1.4-28 には供試体の解体状況を示している。写真から、側面に水み ちが形成され、ブロックとペレットの界面には水みちが形成されていないことが分かる。

図 6.1.4-26 に Case8 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、 0.1L/min で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。



図 6.1.4-27 水みちの形成状況 (Case8)

底面	上面	側面	
側面	上面	断面	

図 6.1.4-28 解体状況 (Case8)



図 6.1.4-29 Case8 の通水圧と流量の関係

- (4) 試験結果(NaCl水溶液:イオン強度 0.5 のケース)
 - 1) Case1

図 6.1.4-30 に水みちの形成状況を示す。内部を含めて複数をあった人工的な水みちは通水 初期段階でセルとの界面に設置した 1 本の水みちが大きくなり、最終的に 1 本に収斂した。 図 6.1.4-31 には供試体の解体状況を示している。写真から、比較的大きな水みちが側面に大 きく形成され、内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。また、大きな 水みちにはケイ砂が沈殿しており、仮にベントナイトが膨潤してもシールを妨げる可能性が ある。図 6.1.4-32 に Case1 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、 0.1L/min で給水しても通水圧は 10kPa 程度しかない。これらの傾向は、前述の蒸留水の場 合と同等であった。



図 6.1.4-30 水みちの形成状況 (Case1)



図 6.1.4-31 解体状況 (Case1)



図 6.1.4-32 Case1 の通水圧と流量の関係

2) Case2

Case2の供試体の作製方法も Case1 と同様である。すなわち、ピンの配置を Case1 から変 えて、全ての人為的な水みちが供試体内部にあるように配置して圧縮成型することによって 圧縮供試体を作製した。

図 6.1.4-33 に水みちの形成状況を示す。供試体内部にしか人工的な水みちを配置しなかったが通水初期段階でセルとの界面近傍に1本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に1本に収斂した。図 6.1.4-34 には供試体の解体状況を示している。写真から、セルとの界面近

傍に比較的大きな水みちが側面に大きく形成され、内部の水みちは供試体底面でシールされ ていることが分かる。また、大きな水みちにはケイ砂が沈殿しており、仮にベントナイトが 膨潤してもシールを妨げる可能性がある。Case1 と Case2 からパイピングは緩衝材内部には 形成されずに、緩衝材と非膨潤性材料の界面に形成されることが分かった。図 6.1.4-35 に Case2 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、0.1L/min で給水して も通水圧は 60kPa 程度しかない。これらの傾向は、前述の蒸留水の場合と同等であった。



図 6.1.4-33 水みちの形成状況 (Case2)



図 6.1.4-34 解体状況 (Case2)



図 6.1.4-35 Case2 の通水圧と流量の関係

Case3の供試体の作製方法は前述の大小ペレット充填ケースと同様であるが、通水速度は 一定であり、全ての材料が流出するまで試験を実施した。

図 6.1.4-36 に水みちの形成状況を示す。通水初期段階で供試体の大間隙を連ねた水みちが、 供試体とセルとの界面に複数形成され、そのうちの1本の水みち形成に収斂し、次第に成長 した。写真から、通水開始から2時間で大きな水みちが形成され、そのままの形で16日目ま で至っている。最終的に残った水みち以外は次第に閉塞されているのが分かる。NaCl水溶液 の場合、蒸留水の場合と比較して、排水が透明であり、水みちの形状もあまり変化しないこ とが分かる。これは、イオン強度の影響でベントナイトが膨潤しないためであると考えられ る。蒸留水の場合、全てのベントナイトが流出するのには27日程度を要したが、NaCl水溶 液の場合、27日を超えても、ベントナイトはほとんど変化していない。



図 6.1.4-36 水みちの形成状況 (Case3)

図 6.1.4-37 には、通水圧と流量の関係を示す。図から、0.1L/min の一定流量で給水されて も通水圧が増加することなく、最大でも 30kPa 程度であることが分かる。

図 6.1.4-38 には、総流量とエロージョン質量の関係を示している。図には、蒸留水のケースと SKB 社が MX80 のペレットを筒状のセルに充填して取得した、総流量とエロージョン 質量の関係も併せて示している。図から、MX80 と蒸留水を用いた場合のクニゲル V1 の総 流量とエロージョン質量の関係は、どちらもほぼ同じ勾配であったが、NaCl 水溶液の場合、 蒸留水のクニゲル V1 場合に比べ、総流量とエロージョン質量の関係の勾配が急であること が分かる。しかしながら、全体的に蒸留水の場合の総流量とエロージョン質量の関係よりも 下側に位置しており、エロージョンによって流出する傾向は小さいと言える。これは、NaCl 水溶液のイオン強度の影響でモンモリロナイトの膨潤が抑制されるため、水みち内の流水に 分散せず、沈殿するためであると考えられる。また、水みちが収斂した後では、エロージョ ン材料は沈殿し、セル外に流出されないため、総流量とエロージョン質量の関係の勾配は水 平である。これらの傾向は、底面から上面に向かって通水させているためであり、通水方向 と排水箇所の位置関係に依存するものと考えられる。

なお、MX80 の場合、塩水の方が、水道水よりもエロージョンし易いという結果になって いるが、境界条件に依存するため、更なるデータの蓄積を行い、同じ条件同士で比較する必 要である。



図 6.1.4-37 Case3 の通水圧と流量の関係



図 6.1.4-38 総流量とエロージョン質量の関係

4) Case4

Case4 の供試体の作製方法は前述の大小ペレット充填ケースと同様である。流量は 0.01L/min で一定である。図 6.1.4-39 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.01L/min 一定で通水を行ったが、通水初期段階でセルとの界面に 1 本の水みち形成され、次第に成長 し、最終的に 1 本に収斂した。図 6.1.4-40 には供試体の解体状況を示している。写真から、

側面に水みちが形成され、内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。そのため、側部には水みちが形成されているが、供試体内部には乾燥領域が存在している。

図 6.1.4-41 に Case4 の通水圧と流量の関係を示す。側面に水みちが形成されたため、 0.01L/min で給水しても通水圧は 25kPa 程度しかない。これらの傾向は、蒸留水のケースと 同等である。



図 6.1.4-39 水みちの形成状況 (Case4)



図 6.1.4-40 解体状況 (Case4)



図 6.1.4-41 Case4 の通水圧と流量の関係

5) Case5

Case5 の供試体の作製方法は前述の大小ペレット充填ケースと同様である。流量は 0.001L/min で一定である。

図 6.1.4-42 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.001L/min 一定で通水を行った結 果、セルとの界面に水みちが形成されたものの、破過とシールを繰り返した。図 6.1.4-43 に は供試体の解体状況を示している。写真から、供試体内部にはまだ乾燥領域があるものの、 給水側である底部領域はしっかりと膨潤して、ペレットの大間隙をシールしていることが分 かる。

図 6.1.4-44 に Case5 の通水圧と流量の関係を示す。水みちの形成と破過を繰り返している ため、通水圧は増減を繰り返している。0.001L/min で給水した場合の通水圧は、最大で 0.8MPa 程度であった。



図 6.1.4-42 水みちの形成状況 (Case5)



図 6.1.4-43 解体状況 (Case5)



図 6.1.4-44 Case5 の通水圧と流量の関係

Case6の供試体の作製方法は前述の大小ペレット充填ケースと同様である。流量は5cc/min で一定である。これは蒸留水のケースで、当初計画では 0.1cc/min で試験を実施する予定で あったが、1cc/min で水みちが形成されなかったために、計画変更して実施された流量 5cc/min のケースの比較のために実施したものである。ただし、NaCl 水溶液のケースの場合、 1cc/min でもシールと破過を繰り返していることから、追加で 0.1cc/min のケースも実施した。

図 6.1.4・45 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 5cc/min 一定で通水を行ったが、通 水初期段階でセルとの界面に1本の水みち形成され、次第に成長し、最終的に1本に収斂し た。図 6.1.4・46 には供試体の解体状況を示している。写真から、5cc/min の場合では、側面 に水みちが形成され、内部の水みちは供試体底面でシールされていることが分かる。そのた め、側部には水みちが形成されているが、供試体内部には乾燥領域が存在している。一方、 0.1cc/min の場合、水みちが形成されるものの、部分的に閉塞していることが分かる。通水圧 に達すると、この部分的な閉塞箇所が破過するものと考えられる。試験後の供試体内部の状 況は、5cc/min のケースに比べ、内部までしっかりと膨潤していることが分かる。全体を通 じて、流量が速い場合、内部が乾燥状態のままで表面に水みちが形成され、流量が遅い場合 内部まで浸潤し、しっかりと膨潤している。水みちの生成に、供試体内部への浸潤速度と流 量の大きさのバランスが重要であることが示唆された。



図 6.1.4-45 水みちの形成状況 (Case6)



図 6.1.4-46 解体状況 (Case6)

図 6.1.4-47 に Case6 の通水圧と流量の関係を示す。水みちが形成されたため、5cc/min で 給水しても通水圧は 100kPa 弱しかない。一方、0.1cc/min の場合、通水圧が増減を繰り返し ているため、破過とシールを繰り返していることが分かる。0.1cc/min の場合の最大通水圧が は 0.9MPa 程度であった。



図 6.1.4-47 Case6 の通水圧と流量の関係

Case7 の供試体の作製方法はブロック供試体を作製し、半分に切り、残りの部分を大粒径 ペレットで充填して作製した。流量は0.1L/min で一定である。

図 6.1.4-48 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.1L/min 一定で通水を行ったが、 通水初期段階でペレット側のセルとの界面に 1 本の水みち形成され、次第に成長し、最終的 に 1 本に収斂した。図 6.1.4-49 には供試体の解体状況を示している。写真から、側面に水み ちが形成され、ブロックとペレットの界面には水みちが形成されていないことが分かる。

図 6.1.4-50 に Case7 の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みちが形成されたため、 0.1L/min で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。これらの傾向は、蒸 留水のケースと同等であった。



図 6.1.4-48 水みちの形成状況 (Case7)



図 6.1.4-49 解体状況 (Case7)



6-58

図 6.1.4-50 Case7 の通水圧と流量の関係

8) Case8

Case8 の供試体の作製方法はブロック供試体を作製し、半分に切り、残りの部分を大小粒 径ペレットで充填して作製した。流量は 0.1L/min で一定である。

図 6.1.4-51 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.1L/min 一定で通水を行ったが、 通水初期段階でペレット側のセルとの界面に 1 本の水みち形成され、次第に成長し、最終的 に 1 本に収斂した。図 6.1.4-52 には供試体の解体状況を示している。写真から、側面に水み ちが形成され、ブロックとペレットの界面には水みちが形成されていないことが分かる。

図 6.1.4-53 に Case8 の通水圧と流量の関係を示す。通水開始直後、通水圧が一時的に 600kPa 弱まで増加したが、破過が発生した後には、大きな水みちが形成されたため、 0.1L/min で給水しても通水圧は注入口と排水口の水位差程度しかない。



図 6.1.4-51 水みちの形成状況 (Case8)



図 6.1.4-52 解体状況 (Case8)



図 6.1.4-53 Case8 の通水圧と流量の関係

- (5) 試験結果(CaCl₂水溶液:イオン強度 0.5 のケース)
 - 1) Case1

図 6.1.4-54 に水みちの形成状況を示す。内部を含めて複数をあった人工的な水みちは通水 初期段階でセルとの界面に設置した1本の水みちが大きくなり、最終的に1本に収斂した。 しかしながら、Ca型化の影響により、膨潤性能が低下しているため、シールされた人工的な 水みちであっても、密実にシールされているようには見えない。

図 6.1.4-55 には供試体の解体状況を示している。写真から、比較的水みちが側面に形成さ れ、内部の水みちはシールされているが、水みちがあった場所が目視観察で分かる程度の密 実さであることが分かる。図 6.1.4-56 に Casel の通水圧と流量の関係を示す。大きな水みち が形成されたため、0.1L/min で給水しても通水圧は 30kPa 程度しかない。これらの傾向は、 前述の NaCl 水溶液の場合と同等であった。このため、エロージョンのような浸潤と同時に 発生するような現象に対しては Ca 型化の影響は小さいと考えられる。



図 6.1.4-54 水みちの形成状況 (Case1)



図 6.1.4-55 解体状況 (Case1)



図 6.1.4-56 Case1 の通水圧と流量の関係

Case2の供試体の作製方法も Case1 と同様である。すなわち、ピンの配置を Case1 から変 えて、全ての人為的な水みちが供試体内部にあるように配置して圧縮成型することによって 圧縮供試体を作製した。

図 6.1.4-57 に水みちの形成状況を示す。供試体内部にしか人工的な水みちを配置しなかったが、通水初期段階でセルとの界面近傍に水みちが形成され、次第に成長した。この水みちは、蒸留水や NaCl 水溶液の場合には最終的に 1 本に収斂したが、CaCl2水溶液の場合ではCa型化の影響により緩衝材の膨潤性能が低下しているために 1 本に収斂せず、複数形成された水みちは、そのまま残っていることが分かる。

図 6.1.4-58 には供試体の解体状況を示している。写真から、セルとの界面近傍に比較的大 きな水みちが側面に大きく形成され、内部の水みちは供試体底面でシールされていることが 分かる。また、大きな水みちにはケイ砂が沈殿しており、仮にベントナイトが膨潤してもシ ールを妨げる可能性がある。Case1 と Case2 からパイピングは緩衝材内部には形成されずに、 緩衝材と非膨潤性材料の界面に形成されることが分かった。図 6.1.4-59 に Case2 の通水圧と 流量の関係を示す。通水圧は通水直後に 330kPa 程度まで上昇したが、その後に大きな水み ちが形成されたため、0.1L/min で給水しても通水圧は漸減して最終的には 100kPa 程度であ った。これらの最終的な通水圧は、前述の NaCl 水溶液の場合と概ね同等であった。



図 6.1.4-57 水みちの形成状況 (Case2)



図 6.1.4-58 解体状況 (Case2)



図 6.1.4-59 Case2 の通水圧と流量の関係

Case3 の供試体の作製方法は前述の大小ペレット充填ケースと同様であるが、通水速度は 一定であり、全ての材料が流出するまで試験を実施した。

図 6.1.4・60 に水みちの形成状況を示す。通水初期段階で供試体の大間隙を連ねた水みちが、 供試体とセルとの界面に複数形成され、そのうちの 1 本の水みち形成に収斂し、次第に成長 した。写真から、通水開始から 4 時間で大きな水みちが形成された。エロージョン物質は塊 状であり、水みちの中で流れによって舞い上がったり沈殿したりした。この堆積物の沈殿状 況で水みちの形状が変化して、10 日以降は水みちの範囲が拡大し、破砕帯のような領域を形 成している。これは、蒸留水や NaCl 水溶液の場合とは異なり、CaCl2 水溶液の場合、イオ ン強度の影響に加えて Ca 型化の影響により、緩衝材の膨潤性能が大幅に低下して水みちを シールすることができないためであると考えられる。さらに、エロージョン物質が凝集して 塊状になったこともイオン強度と Ca 型化によるものと考えられる。エロージョン物質が塊 状になることによって、水みちに沈殿し易くなり、その沈殿物によって水みちの形状を変化 させるために、洗掘される範囲が広くなったものと推察された。

また、水みちとなる領域が拡大すると、流量が低下するためエロージョン物質の沈殿が促進され、その沈殿物によって水みちの位置が変化して水みちとなる領域が拡大するという現象が繰り返された。このために、破砕帯のような水みち領域は通水時間の経過に伴って拡大したが、破砕帯のような水みちが形成されて流量が下がってからは、排水は NaCl 水溶液の場合と同様に透明となった。ただし、Ca型化によって沈殿したエロージョン物質は、給排水の位置関係によっては全て流出することもあり得ることに注意が必要である。

以上のことから、Ca型化がエロージョンに及ぼす影響は大きいと言える。



図 6.1.4-60 水みちの形成状況 (Case3)

図 6.1.4-61 には、通水圧と流量の関係を示す。図から、0.1L/min の一定流量で給水されて も通水圧が増加することなく、概ね 100kPa 程度であることが分かる。

図 6.1.4-62 には、図 6.1.4-38 に示した総流量とエロージョン質量の関係に本試験結果を併 せて示している。図から、CaCl₂水溶液を用いた場合のクニゲル V1 の総流量とエロージョン 質量の関係は、NaCl 水溶液の場合の勾配とほぼ同じであることが分かる。ただし、クニゲル V1 の蒸留水のケースや NaCl 水溶液のケースに比べ、CaCl₂水溶液のケースの方がエロージ ョン量が多い。これは、Ca型化によってエロージョン物質が塊状であり、沈殿した塊状のエ ロージョン物質が目詰まりした後に破過する際に一気に流出するためである。また、破砕帯 のような水みち形成されて流量が低下した後では、エロージョン材料は沈殿し、セル外に流 出されないため、総流量とエロージョン質量の関係の勾配はほぼ水平である。これらの傾向 は、底面から上面に向かって通水させているためであり、通水方向と排水箇所の位置関係に 依存するものと考えられる。



図 6.1.4-61 Case3 の通水圧と流量の関係



図 6.1.4-62 総流量とエロージョン質量の関係

Case4 の供試体の作製方法は前述の大小ペレット充填ケースと同様である。流量は 0.01L/min で一定である。図 6.1.4-63 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.01L/min 一定で通水を行ったが、通水初期段階で供試体内に複数の水みちが形成され、蒸留水や NaCl 水溶液とは異なり、1 本に収斂することはなかった。図 6.1.4-64 には供試体の解体状況を示している。写真では内部が密実になっているように見えるが、試験中には供試体内部に形成 された複数の水みちはシールされることなくそのまま残留していた。

図 6.1.4-65 に Case4 の通水圧と流量の関係を示す。側面に水みちが形成されたため、 0.01L/min で給水しても通水圧は 300kPa 程度しかない。ただし、断続的に通水圧の増減が 繰り返されており、水みち内で沈殿物の閉塞と破過が繰り返されているものと思われる。こ の傾向は、蒸留水や NaCl 水溶液の場合よりも激しい。これは、沈殿物の量が他のケースに 比べ多いためであると思われる。

試験前	試験後	側面

図 6.1.4-63 水みちの形成状況 (Case4)



図 6.1.4-64 解体状況 (Case4)



図 6.1.4-65 Case4 の通水圧と流量の関係

Case5 の供試体の作製方法は前述の大小ペレット充填ケースと同様である。流量は 0.001L/min で一定である。図 6.1.4-66 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.001L/min 一定で通水を行った結果、セルとの界面に水みちが形成されたものの、破過とシールを繰り 返した。図 6.1.4-67 には供試体の解体状況を示している。写真から、供試体内部にはまだ第 空隙が残っていることが分かる。これは、Ca 型化により膨潤性能が低下したペレットが空隙 をシール出来なかったためであると考えられる。特に、大粒径ペレットの隙間を充填する小 粒径ペレット部分に空隙として残っている。

図 6.1.4-68 に Case5 の通水圧と流量の関係を示す。水みちの形成と破過を繰り返している ため、通水圧は増減を繰り返している。0.001L/min で給水した場合の通水圧は、最大で 700kPa 弱であった。これは、NaCl 水溶液の場合の 800kPa 程度よりも小さかった。流量が 遅くなるとCa型化する時間的な余裕が発生するため、給水圧が低下したものと考えられる。



図 6.1.4-66 水みちの形成状況 (Case5)



図 6.1.4-67 解体状況 (Case5)



図 6.1.4-68 Case5 の通水圧と流量の関係

6) Case6

Case6 の供試体の作製方法は前述の大小ペレット充填ケースと同様である。流量は 0.1cc/min で一定である。

図 6.1.4-69 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.1cc/min 一定で通水を行ったが、 供試体内部に小さな水みちが複数形成されて、試験の最後まで水みちが収斂することなく残 った。小さな水みちは、大粒径ペレットの周りの大間隙を埋める小粒径ペレット部分に発生 しているものと考えられる。これは、Ca型化によって膨潤性能が低下したペレットが、大間 隙をシールすることができなかったためであると考えられる。

図 6.1.4-70 には供試体の解体状況を示している。写真から、概ね供試体内部は密実に見え

るが、一部に空隙が残っていることが分かる。これも Ca 型化による膨潤性能の低下による ものと考えられる。



図 6.1.4-69 水みちの形成状況 (Case6)



図 6.1.4-70 解体状況 (Case6)

図 6.1.4-71 に Case6 の通水圧と流量の関係を示す。通水圧が増減を繰り返しているため、 破過とシールを繰り返していることが分かる。NaCl 水溶液の場合、0.1cc/min の場合の最大 通水圧がは 0.9MPa 程度であったのに対して、CaCl2 水溶液の場合、最大の通水圧が 0.5MPa 程度であった。Case5 の場合と同様に、ゆっくりとした流量の場合、Ca型化の影響が顕著に なり、NaCl 水溶液の場合に比べ、CaCl2 水溶液の方が通水圧が小さくなるものと考えられる。



図 6.1.4-71 Case6 の通水圧と流量の関係

Case7 の供試体の作製方法はブロック供試体を作製し、半分に切り、半分を大粒径ペレットで充填して作製した。流量は 1cc/min で一定である。

図 6.1.4-72 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 1cc/min 一定で通水を行ったが、ペレット側の大間隙が完全にシールされることなく複数の水みちとして残留した。図 6.1.4-73 には供試体の解体状況を示している。写真から、一見、密実に見えるが、大粒径ペレットの界面付近に小さな水みちが複数形成され残留している。また、供試体とセルの界面に形成された水みちも沈殿したベントナイト塊が堆積したような状態であり、その塊状のベントナイトの隙間が水みちのようになっている。

図 6.1.4-74に Case7 の通水圧と流量の関係を示す。複数の小さな水みちが形成されたため、 1cc/min で給水しても通水圧は 150 k Pa 程度しかない。CaCl2 水溶液の場合、NaCl 水溶液に 比べ、若干、通水圧の最大値が大さいが、これは本ケースでは Ca 型化により発生した塊状 のエロージョン物質が目詰まりしたためであると考えられる。



図 6.1.4-72 水みちの形成状況 (Case7)



図 6.1.4-73 解体状況 (Case7)



図 6.1.4-74 Case7 の通水圧と流量の関係

Case8 の供試体の作製方法はブロック供試体を作製し、半分に切り、半分を大小粒径ペレットで充填して作製した。流量は 1cc/min で一定である。

図 6.1.4-75 に水みちの形成状況を示す。試験開始から 0.1L/min 一定で通水を行ったが、 供試体内部に水みちが複数形成され、1本に収斂することなく残留した。図 6.1.4-76 には供 試体の解体状況を示している。写真から、ペレット部の側面に大きな水みちが形成されたが、 ペレット部分の内部では、小粒径ペレットが膨潤せずに粒状体のままで残っており、その間 隙も水みちとして機能している可能性がある。

図 6.1.4-77 に Case8 の通水圧と流量の関係を示す。給水直後に給水圧が 0.8MPa 程度まで 急上昇したが、その後、破過とシールを繰り返した。CaCl2水溶液の場合、NaCl水溶液に比 べ、若干、通水圧の最大値が大きいが、これは本ケースでは Ca型化により発生した塊状の エロージョン物質が目詰まりしたためであると考えられる。



図 6.1.4-75 水みちの形成状況 (Case8)



図 6.1.4-76 解体状況 (Case8)



図 6.1.4-77 Case8 の通水圧と流量の関係

6.1.5 ブレイクスルー、パイピング、エロージョンに対する人工給水効果の評価

(1) 試験概要

前述の小規模試験でのブレイクスルー、パイピング、エロージョン現象の検討において、パ イピングによって生成された水みちにおいて、膨潤による流量の増加に伴うエロージョンの発 生とエロージョンによる水みち断面の増加に伴う流量の低下という相反する2つの現象が発生 しており、再冠水の初期状態で、一旦、水みちが形成されると、緩衝材の膨潤によってその水 みちをシールすることは難しいことが明らかとなった。

このような現象に対して、例えば SKB 社では、横置き処分概念である KBS-3H において、 人工給水によって水みちが形成されないように緩衝材を膨潤させる方法を検討している。緩衝 材に水みちが形成されないように制御しながら給水して、緩衝材が十分に膨潤すれば、界面に は隙間や大間隙がなくなり、その後に地下水が浸潤しようとしても緩衝材内には拡散でしか浸 潤できず、水みちが形成され難いものと考えられる。

そこで本検討では、図 6.1.5-1 に示すように、ブレイクスルー、パイピング、エロージョン現 象に関する小規模試験で検討したケースの内、ブロックと大小ペレットを併用したケースに対 して、人工給水の効果について検討を行った。なお、人工給水の方法は、①作成後供試体に 100cc/min で蒸留水を通水、②供試体上面まで水が到達したら通水停止、③供試体下部通水口 にビューレットを接続して 1 週間程度自然給水 (図 6.1.5-2)、という手順で実施した。①の給 水は、NaCl 水溶液や CaCl₂ 水溶液であっても、実際の人工給水を模擬するために、蒸留水を 使用した。





図 6.1.5-2 水位差による人工給水状況

(2) 試験ケース

試験は、図 6.1.5-1 に示したブロックと大小ペレットを併用した供試体に対して、液種と流量 をパラメータとして実施した。すべてのケースで、先ず給水して十分に膨潤させ、その後に設 定した流量でブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験に移行した。給水膨潤中はセル の排水孔にピンを差し込んで人為的に閉鎖した。これによりセル内は拡散場となるため、水み ちを形成することなく膨潤させることが可能となる。また、ブレイクスルー、パイピング、エ ロージョン試験に移行する場合は、排水孔に差し込んだピンを抜いて、前述のブレイクスルー、 パイピング、エロージョン試験と同じ条件となるようにした。

表 6.1.5-1 に試験ケースを示す。今年度実施したのは試験ケース 9~11 と 12~14 である。試験 ケース 9~11 は通水液に CaCl2 水溶液を使用し、底面から上面に通水したケースである。一方、 試験ケース 12~14 は蒸留水を用いたケースで、上面から給水し上面から排水するケースである。 これは、後述の図 6.1.5-5 に示すように、H25 年度の試験の考察によって見出された給水位置 と排水位置の関係によってはプレハイドレーションを行っても水みちが形成されるという推察 を検証するためのケースである。

ケース	液種	通水方向	供試体乾燥密度 (Mg/m ³)	流量 (L/min)	備考
1		B:1.614 P:1.458 AV:1.537	0.5		
2	表面よ		B:1.600 P:1.456 AV:1.527	0.1	
3	烝留水		B:1.608 P:1.446 AV:1.503	0.01	
4			B:1.610 P:1.485 AV:1.537	0.001	
5			B:1.617 P:1.488 AV:1.523	0.5	
6	底面から NaCl 水溶液 イオン強度 0.5	B:1.601 P:1.457 AV:1.524	0.1		
7		B:1.606 P:1.514 AV:1.533	0.01	B:ブロック部乾燥密度	
8			B:1.606 P:1.517 AV:1.548	0.001	AV:平均乾燥密度
9			B:1.599 P:1.526 AV:1.563	0.1	
10	CaCl₂水溶液 イオン強度 0.5	B:1.598 P:1.541 AV:1.570	0.01		
11		B:1.599 P:1.531 AV:1.566	0.001		
12		B:1.599 P:1.546 AV:1.573	0.1		
13	蒸留水	上面から 上面	B:1.597 P:1.502 AV:1.550	0.01	
14			B:1.600 P:1.535 AV:1.569	0.001	

表 6.1.5-1 人工給水・エロージョン試験の検討ケース

(3) 試験結果(底面から上面へ給水)

図 6.1.5-3 と図 6.1.5-4 に通水圧と総流量の経時変化を示す。試験は流量制御で実施したため、 総流量が所定の流量に合せて一定勾配で増加している。また、全てのケースで通水圧がアクリ ルセルの上限圧である 3MPa に達していることから、人工給水による膨潤によって、パイピン グやエロージョンが抑制できることが分かった。NaCl 水溶液や CaCl₂の場合、流量の早いの ケースで、一時的に送水圧が低下しているため、破過現象が発生したことが分かる。しかしな
がら、その後、再び送水圧が増加に転じており、パイピングやエロージョンの発生には至って いない。また、前述のエロージョンにおける Ca 型化の影響のように、ゆっくりとした給水で あっても明確な Ca 型化の影響は見られない。これは、人工給水することによって Ca イオンが 拡散でしか供試体内部に浸透できないためであると考えられる。そのため、人工給水は Ca 型 化やイオン強度の影響を緩慢にする作用があると言える。

さらに、前述の CaCl₂ 水溶液を用いた小規模パイピング試験では、ペレット部分に複数の小 さな水みちが形成され、試験の終わりまで収斂することなく残留することが明らかとなったが、 本検討から、蒸留水で人工給水を行うことによって、ペレット部の大間隙が Ca 型化により水 みちとして残留することを防ぐことが可能であることが示唆された。ただし、本試験では人工 給水による膨潤後に供試体全体が Ca 型化するまで CaCl₂ 水溶液を供給できていないため、長 期的にも Ca 型化による水みち形成を抑制することができるかどうかは更なる検討が必要であ る。





図 6.1.5-4 通水圧と総流量の経時変化(Case9~11)

表 6.1.5-2 と表 6.1.5-3 には、各ケースの試験前、給水中、試験後の供試体上面の様子と給水 中の側面の様子を示している。全てのケースで排水側用の溝にベントナイトが膨潤して止水し、 水みちが形成されていないことが分かる。ただし、試験中の側面図の観察から、ペレット側の 底面では、通水圧が全応力として作用し、供試体を押し上げて圧縮し、隙間が発生しているこ とが分かる。同様の結果は図 6.1.1-4 に示したように SKB 社の検討(SKB 社 Report R-06-72[3]) でもみられており、人工給水を行っても、湧水の圧力によって発生する隙間が流出箇所と連通 するような場合には破過現象が断続的に生じるものと考えられる。

Case	試験前	給水後	試験後	試験中側面	
1 H ₂ O 0.5L/min					
2 H ₂ O 0.1L/min					
3 H ₂ O 0.01L/min					
4 H ₂ 0 0.001L/min					
5 NaCl 0.5M 0.5L/min					
6 NaCl 0.5M 0.1L/min					
7 NaCl 0.5M 0.01L/min					
8 NaCl 0.5M 0.001L/min					

表 6.1.5-2 人工給水・エロージョン試験の状況一覧 (Case1~8)

Case	試験前	給水後	試験後	試験中側面	
9 CaCl2 0.5/3M					
0.1L/min					
10			10		
CaCl2					
0.5/3M	the state				
0.1L/min			13		
11	· / / / /				
CaCl2					
0.5/3M		ALLA PSU//			
0.1L/min					

表 6.1.5-3 人工給水・エロージョン試験の状況一覧(Case9~11)

(4) 試験結果(上面から上面へ給水)

前述のように、供試体の密度と通水圧の大きさによっては、通水圧が全応力として作用し、 供試体を圧縮して隙間が発生する。仮に、そのような隙間が排水側と連通すれば、断続的に破 過が発生するものと考えられる。そこで、図 6.1.5-5 に示すような試験ケースを考えた。図に示 すように、人工給水を行って膨潤した供試体に上側から給水すると、給水圧が全応力となって 供試体に作用する。そのために、供試体を押し下げて、供試体上面に隙間を形成する。この隙 間が、上面にある排水口に連通すると、瞬時に水が流れるのと同時に水圧が下がり、隙間が塞 がるという現象(破過)が繰り返されるものと考えられる。



人工給水過程(膨潤) 通水・破過図 6.1.5-5 湧水圧により発生する隙間が流出箇所と連通するような場合を模擬した実験例

図 6.1.5-3 に通水圧と総流量の経時変化を示す。試験は流量制御で実施したため、総流量が所 定の流量に合せて一定勾配で増加している。底面から給水した場合では、全てのケースで通水 圧がアクリルセルの上限圧である 3MPa に達していたが、上面から給水した場合では、断続的 に破過が発生しており、人工給水によって必ずしもエロージョンを抑止できるとは限らないこ とが明らかとなった。湧水箇所(地下水圧が作用する方向)と流出箇所の位置関係などを考慮 して、適切な対策を講じなければならない。



図 6.1.5-6 通水圧と総流量の経時変化 (Case12~14)

表 6.1.5-4 には、各ケースの試験前、給水中、試験後の供試体上面の様子と給水中の側面の様 子を示している。試験中の側面図の観察から、ペレット側の底面では、通水圧が全応力として 作用し、供試体を押し下げて圧縮し、隙間が発生していることが分かる。この隙間は、排水側 と連通するため、破過現象が断続的に生じたものと考えられる。



表 6.1.5-4 人工給水・エロージョン試験の状況一覧(Case12~14)

図 6.1.5-7、表 6.1.5-4 には、各ケースの水みちの形成状況を示す。Case12、Case13 では、 ブロックとペレットの界面付近に水みちが形成されているが、Case14 ではブロック側に水みち が形成されている。本試験の場合、人工給水期間が 1 週間程度と短く、給水方法も下面から上 面に向かって給水しているため、ブロック上面が十分に膨潤していなかった可能性がある。



図 6.1.5-7 水みちの形成状況 (Case12~14)

6.2 流路長がブレイクスルー、パイピング、エロージョンに及ぼす影響

6.2.1 試験概要

SKB 社の放射性廃棄物横置き処分概念である KBS・3H では、緩衝材だけでなく、Distance ブ ロックや Filling ブロック、さらにはコンパートメントプラグなどにより、エロージョンに対する 性能の担保を目指している。

Distance ブロックは、湧水や滴水による緩衝材のエロージョンの防止、破砕帯からスーパーキ ャニスタを隔離する、処分孔の密閉、定置作業の一時的な中断、スーパーコンテナの水理学的観 点と廃棄体熱的な観点から必要な間隔の確保、処分に不適切な区間を密閉、密度の低下に対する 膨潤材料の補充、スーパーコンテナの固定、閉鎖された区間からの流出防止、などを目的とした ベントナイトブロックである。その使用は、処分孔との隙間によるが、乾燥密度で 1.6Mg/m³ 程 度とされている。Filling ブロックは、処分孔の上限湧水量である 0.1L/min よりも大きく、コン パートメントプラグの設置基準の下限である 1.0L/min よりも小さい箇所に設置されるもので、2 つの重要な仕様がある。一つは緩衝材に接し続けることで、もう一つは緩衝材の流失や再配置を 防ぐことである。

すなわち、このDistanceブロックやFillingブロックはベントナイト系材料が想定されており、 ベントナイト系材料の流路距離を長くして耐エロージョン性を高めるものと考えられる。 前述の小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験では、一次元的に注水可 能なセルに直径 100mm、高さ 50mm の長尺ベントナイト(1.6Mg/m³、Na 型ケイ砂 30wt%混合) を設置し、パイピングの形成状況及び膨潤に伴うパイピングの収束状況を観察した。既に実施し たブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験ではパイピング現象やエロージョン現象が得 られた。また水みちの収斂という現象の発生も推測された。これらの現象に対して、流路距離が 及ぼす影響に関して調べるために、1000mm の高さ(通水距離)のセルを用いてブレイクスルー、 パイピング、エロージョン試験を実施する。

6.2.2 試験ケース

ブレイクスルー、パイピング、エロージョン現象に対して、流路距離が及ぼす影響に関して調 べるために、高さ1000mm、直径50mm(膨潤後の直径)の供試体を作製した。供試体の作製に 当たっては、初期乾燥密度分布、間隙径、隙間の有無などによって施工法を模擬した。さらに、 試験のパラメータは液種、乾燥密度、水圧、流量などが考えられるが、前述の一次元浸潤速度取 得試験と条件を参考にして試験条件を決定した。原位置締固め工法、ブロック定置工法のケース では、供試体はケイ砂 30wt%混合 Na型ベントナイトであり、ペレット充填工法のケースでは供 試体は Na型ベントナイト単体である。

図 6.2.2-1 にパイピング試験機の全景、図 6.2.2-2 に試験のイメージ図を示す。試験ケースは前述の一次元浸潤速度取得試験機とほぼ同等であるが、破過現象などの際に高通水圧が作用することも考慮して、電極の設置のための孔などは設けていない。また、給水口は底面であり、排水は上面とした。試験ケースを表 6.2.2-1 に示す。



図 6.2.2-1 パイピング生成試験機全景



図 6.2.2-2 パイピング生成試験セル

ケース	施工法	乾燥密度	溶液	試験条件
		Mg/m^3		
1	原位置締固め	1.6		水圧制御
		(ケイ砂 30 wt% 混合		$0.2 \rightarrow 0.5 \rightarrow 1.0 \rightarrow 2.0 \rightarrow 2.5 \rightarrow 3.0$ MPa
		Na 型ベントナイト)		
2	ブロック定置	1.6 (*1.936)		流量制御
		(ケイ砂 30 wt% 混合		100cc/min
	* • • • • •	Na 型ベントナイト)		
2-2	ブロック定置	1.6 (*1.966)	蒸留水	流量制御
		(ゲイ砂 30 wt% 混合		100cc/min
-		Na 型ペントナイト)		
3	大粒径ペレット	1.1~1.2		流量制御
	充填	Na 型ベントナイト		100cc/min
4	大小混合ペレッ	1.511		流量制御
	ト充填	Na 型ベントナイト		100cc/min
5	ブロック定置	1.6 (*1.936)	NaC1	法导制御
		(ケイ砂 30 wt% 混合	(0.5M)	
		Na 型ベントナイト)		IUUCC/min
6	ブロック定置	1.6 (**1.936)	志の水	流量制御
		(Na 型モンモリロナイト)	<u> ※留</u> 小	100cc/min

表 6.2.2-1 流路長がブレイクスルー、パイピング、エロージョンに及ぼす影響試験ケース

*膨潤前乾燥密度

試験中は供試体をカメラで定点観測し、パイピングによる水みちの形成状況、膨潤による自 己シール状況などを観察した(写真 6.2.2-1)。さらに、写真 6.2.2-2 に示すように、試験中の通 水圧や膨潤圧、さらには排水に含まれるエロージョン物質を採水して吸光度(濁度)を計測し た。計測した吸光度は、図 6.2.2-3 に示すように、事前にモンモリロナイト含有量をパラメータ として吸光度を計測して得られたキャリブレーションラインによって、排水中に含まれるモン モリロナイト量に換算できる。



写真 6.2.2-1 定点観測状況(左)と計測機器(右)



写真 6.2.2-2 濁度(吸光度)計測用の分散状況(左)と濁度(吸光度)計測状況(右)



図 6.2.2-3 吸光度とモンモリロナイト含有量の関係

6.2.3 試験結果

(1) 原位置締固め・蒸留水ケース(Case1)

本ケースでは、供試体はアクリルセル内で仕上がり高さ 5mm を 200 層締め固めて作成した ものであり、セルと供試体間には隙間は存在しない。すなわち、前述の小型セルによるブレイ クスルー、パイピング、エロージョン試験における施工方法では、原位置締固め工法や吹付け 工法に相当する。本試験では、流量制御では通水圧が直ぐに上限値に達してしまうため、水圧 を制御して徐々に水圧を増加させ、破過状況を観察した。一旦破過したら注水を止め、自己シ ールさせた後に再度水圧を上昇させて破過状況を観察した。

図 6.2.3-1 に試験結果を示す。図に示すように、試験では実際の処分場の深度である地下 300m 以深に相当する圧力として 3.0MPa を与えた。注水圧制御で 0.2、0.5、1.0、2.0、2.5、3.0MPa に段階的に水圧を作用させた。その間、破過現象と思われる微細な水圧の現象は見られるもの の、大局的には安定して水圧が保持されている。また、図 6.2.3-2 には、試験中の供試体注水側 の状況を示している。図から、別途実施中である一次元浸潤速度試験の供試体の注水側と比較 しても、本試験の供試体の注水側は、注水によって水が浸潤している箇所と浸潤していない箇 所のコントラストが非常に明確に観察できることが分かる。

浸潤速度は時間の対数に対してほぼ線形に増加しており、

$$q(cc) = t^{0.35548}(\min.)$$

で表わされる。この場合の流量は、

$$\frac{dq}{dt} = 0.33548t^{-0.66452}$$

となり、初期に非常に早く、時間が経つに従って遅くなる傾向にある。よって、試験開始直後 は、注水速度が緩衝材内部の間隙水の拡散速度よりも圧倒的に早く、供試体近傍のみに浸潤し、 注水側の過剰間隙水圧が上昇している状況であると考えられる。



図 6.2.3-1 パイピング試験結果



(a)浸潤速度試験

図 6.2.3-2 パイピング試験中の状況

図 6.2.3-3 には、図 6.2.3-1 の拡大図を示している。図に示すように、僅かながら注水圧は増 減を繰り返しながら増加している。シリンジポンプ内の水を入れ替える際の減圧(盛り換え箇 所)以外にも、数十~100kPa程度の突発的な減圧が観測されていることが分かる。注水圧は シリンジポンプを一定速度で押し込むことで作用させており、基本的に、盛り換え以外に計測 される注水圧の増減は供試体の応答であると考えられる。

この注水中の供試体の浸潤フロント近傍の目視観察を行ったが、注水圧の増減によって浸潤 フロントに差は見られず、減圧現象が破過によるものであるかどうかは目視観察からは不明で あった(図 6.2.3-4 参照)。



図 6.2.3-3 パイピング試験結果(拡大図)



図 6.2.3-4 試験中の状況

図 6.2.3-5 には、パイピング試験中の軸応力の経時変化を示している。経過時間がゼロ日の点 が通水開始であり、それ以前は圧縮成型後の内部応力を示している。供試体作成時の静的締固 め圧力として約 3.0MPa が作用している状態で通水を開始した。本来ならばこの軸応力には、 通水圧、および浸潤に伴う膨潤圧などが加算されるはずであるが、軸応力はむしろ、時間が経 過するに従って僅かではあるが減少傾向にあることが分かる。これは、通水圧の増加分 3.0MPa や膨潤圧はアクリルセルと供試体との摩擦により相殺され、クリープ変形による内部応力の減 少分、サクション開放によるコラプスに伴う内部応力の減少分のみが計測されているものと考 えられる。特に、注水開始で軸応力の減少傾向に変化がないことから、破過に伴う内部応力変 化分も極僅かであるか、摩擦により相殺されロードセルに作用していない可能性かある。よっ て、軸応力の変化からも急激に圧力が減少したなどの現象は見られず、供試体とアクリル製セ ルの界面の縁が切れるようなパイピング現象が発生したかどうかは不明であった。



図 6.2.3-5 パイピング試験中の軸応力の経時変化

(2) ブロック定置·蒸留水ケース (Case2)

本試験ケースでは、供試体は高さ 100mm×直径 45mm の円筒形ブロックを 10 段重ねるこ とで作製した。よって、試験初期には、供試体とセルの間には 2.5mm の隙間が存在している。 図 6.2.3・6 にブロック定置工法を模擬した供試体の 1000mm セルによるブレイクスルー、パ イピング、エロージョンの発生状況を示す。図には、注入圧と流量の経時変化を示している。 図から、試験開始当初、流量が 0.1L/min.~0.001L/min.までは、注入圧は小さい状態であった。 前述の小型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験においても流量が 0.001L/min.では注入圧が大きく変動することはなかった。しかしながら、流量を 0.0001L/min. まで低下させると注入圧が大きく変動した。注入圧が大きな値を示した直後に、注入圧が非常 に小さくなるなどランダムに振動している様子が分かる。これば、一時的に水みちがシールさ れた後に注入圧によってシールが破過した(ブレイクスルー)したものと考えられる。



図 6.2.3-6 1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況

図 6.2.3-7 にはロードセルで計測した試験中の荷重値と注入圧に断面積を掛けた値の経時変 化を示している。図から、流量を 0.0001L/min.まで低下させると注入圧が大きく変動するため、 注入圧に断面積を掛けた値も大きく変動している。さらに、両者は最終的にほぼ同じ値を示し ていることが分かる。ロードセルで計測されている荷重値と注入圧に断面積を掛けた値が同じ であるということは、ロードセルで計測されている荷重値が全て注入圧によるものであること を意味しており、このことから、0.0001L/min.まで低下させると水みちはシールされて、注入 圧によって供試体が全体的に上方に押し上げられているものと考えられる。



図 6.2.3-7 1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況

図 6.2.3-8 には、ローダミンによる試験終了時の水みちを示す。図から、水みちが1つに収斂 していることが分かる。さらに、0.0001L/min.まで流量を低下させたために、水みちが目視で は所々でシールされているように見えた。



図 6.2.3-8 ローダミンによる水みちの発生状況の確認

(3) ブロック定置・蒸留水ケース(Case2-2)

本試験ケースは、前述の Case2 の再現性確認と流量とエロージョン量の関係の取得のために 実施するものである。供試体は密度がなるべく均一になるようにすべく、高さ 50mm×直径 45mm の円筒形ブロックを 20 段重ねて作製した。アクリルセルの内径は 50 mmであるため、試 験の初期状態では、供試体とセルの間には 2.5mm の隙間が存在している。

図 6.2.3・6 にブロック定置工法を模擬した供試体の 1000mm セルによるブレイクスルー、パ イピング、エロージョンの発生状況を示す。図には、Case2 と Case2・2 の注入圧と流量の経時 変化を示している。図から、試験開始当初から 6 時間程度は、Case2 に比べ Case2・2 の方が注 水圧が大きめに推移しているが、パイピング現象が発生したと思われる 6 時間以降の注水圧の 経時変化は、概ね同様である。その後、流量を 0.001L/min.まで低下させてが、注水圧の傾向 は Case2 と概ね同様であった。図 6.2.3・10 には、パイピング発生時の供試体の状況を示す。水 みちの形成状況も概ね同等と言える。

パイピング試験の総流量とエロージョン質量の関係は本項の最後にまとめて示す。



図 6.2.3-9 1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況



図 6.2.3-10 写真による水みちの発生状況の確認

(4) ペレット充填・蒸留水ケース (Case3)

本試験ケースでは、供試体は大粒径のペレットを充填することで作製した。このため、初期 状態では、大きな間隙が存在する。また、乾燥密度も1.1Mg/m³程度であった。

図 6.2.3-11 にペレットを充填した供試体の 1000mm セルによるブレイクスルー、パイピング、 エロージョンの発生状況を示す。図には、注入圧と流量の経時変化を示している。図から、試 験開始当初、流量が 0.1L/min.~0.001L/min.までは、注入圧は小さい状態であった。前述の小 型セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験においても流量が 0.001L/min. では注入圧が大きく変動することはなかった。しかしながら、流量を 0.0001L/min.まで低下さ せると注入圧が大きく変動した。注入圧が大きな値を示した直後に、注入圧が非常に小さくな るなどランダムに振動している様子が分かる。これば、一時的に水みちがシールされた後に注 入圧によってシールが破過(ブレイクスルー)したものと考えられる。



図 6.2.3-11 1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況

図 6.2.3・12 にはロードセルで計測した試験中の荷重値と注入圧に断面積を掛けた値の経時変 化を示している。図から、ロードセルで計測した試験中の荷重値は、一旦ゼロになった後に、 流量を 0.01L/min.に低下させた頃から増加に転じた。さらに、流量を 0.0001L/min.まで低下さ せると注入圧が大きく変動するため、注入圧に断面積も大きく変動している。さらに、両者は ほぼ同じ値を示した後に、最終的には、注入圧の方が大きな値を示している。同時期にブレイ クスルーと見られる注入圧の上下変動がみられることから、シールされていない水みちが存在 し、注入圧が全て荷重として計測されていないためであると考えられる。

図 6.2.3-13 には、写真のパッチワークによる試験終了時の水みちを示す。図から、水みちが 1 つに収斂していることが分かる。さらに、0.0001L/min.まで流量を低下させたが、水みちが 目視で観察できた。



図 6.2.3-12 1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況



(5) ペレット充填・蒸留水ケース (Case4)

本試験ケースでは、Case3 と試験条件はほぼ同じであるが、供試体は大粒径と小粒径のペレットの混合物を充填することで作製した。このため、初期状態では、Case3 よりも比較的小さな間隙が存在する。また、乾燥密度も 1.511Mg/m³程度であった。

図 6.2.3-11 にペレットを充填した供試体の 1000mm セルによるブレイクスルー、パイピング、 エロージョンの発生状況を示す。図には、注入圧と流量の経時変化を示している。図から、試 験開始直後に通水圧が 230kPa 程度まで急上昇したが、その後、流量が 0.1L/min.~0.001L/min. までの間、注入圧は小さい状態であった。

パイピング試験の総流量とエロージョン質量の関係は本項の最後にまとめて示す。



図 6.2.3-14 1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況



図 6.2.3-15 写真による水みちの発生状況の確認

(6) ブロック定置・NaCl水溶液ケース (Case5)

本試験ケースでは、前述の Case2 とほぼ同じ条件で試験を行ったが、使用する液種が蒸留水 ではなく、0.5M の NaCl 水溶液である。これにより、レイクスルー、パイピング、エロージョ ンの発生にイオン強度が及ぼす影響を取得できる。

図 6.2.3-16 にブロック定置工法を模擬した供試体の 1000mm セルによるブレイクスルー、パ

イピング、エロージョンの発生状況を示す。写真から、平成23年度のブロック定置工法のケースと同様に大きな水みちがセルとの界面に発生し、水みちには緩衝材から分離して沈殿したケイ砂が沈殿している。図 6.2.3-17にはブロック定置工法を模擬した供試体の1000mm セルによるブレイクスルー、パイピング、エロージョンの発生状況の拡大写真を示す。写真から、NaCl 水溶液であっても、蒸留水の場合と同様に、大きな水みちの底部には3号ケイ砂、中部には5 号ケイ砂、上部には舞いあがったベントナイトが堆積している。舞いあがったベントナイトは 徐々にエロージョンによってセル外に流出するものと考えられる。

図 6.2.3-18 には、1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況をグラフで示している。先ず、給水量と排水量の経時変化では、給水量よりも排水量の方が小さいため、まだ供試体は飽和しておらず、パイピング・エロージョンしながら少しずつ供試体内部に水が浸潤していることが分かった。給水圧力の経時変化からは、水みちが形成されているため、大きな給水圧は発生していないことが分かる。膨潤圧の経時変化から、本試験に供した乾燥密度 1.6Mg/m³のケイ砂 30wt%混じりのクニゲル V1 の膨潤圧に比べ、非常に小さい値となっていることが分かる。さらに、膨潤圧は減少傾向を示している。このことから、エロージョン中には供試体内部への水の浸潤よりも表面が膨潤して、同時に洗堀されていくという状況で、十分な膨潤圧が発生させられない可能性があることが分かった。図 6.2.3-19 には試験後に供試体に染料であるローダミン B を流して水みちを観察した時の写真を示している。写真から水みちが1本に収斂していることが分かる。

パイピング試験の総流量とエロージョン質量の関係は本項の最後にまとめて示す。



図 6.2.3-16 水みちの形成状況 (H24)

上部 白濁部の上部ではモンモリロ ナイト成分が凝結し、塊の状 態で攪拌されている状況
中部 ケイ砂が分離堆積した位置か ら通水液が噴出し、白濁部が 攪拌されている状況
下部 複数の水みちが1本に収斂

図 6.2.3-17 水みちの形成状況(拡大)(H24)



図 6.2.3-18 1000mm セルによるパイピング、エロージョン、ブレイクスルーの発生状況(H24)



図 6.2.3-19 1000mm セルによるパイピング試験の水みち観察(H24)

(7) モンモリロナイトブロック定置・蒸留水ケース (Case6)

本ケースでは、モンモリロナイト含有率がパイピング・エロージョン現象に及ぼす影響を調 べるために、山形県産の Na 型ベントナイトであるクニゲル V1 のモンモリロナイトを水簸して モンモリロナイト含有率が 99%以上になるまで精製したクニピア F で作製した供試体長 1000mm のブロック供試体を用いて試験を実施した。モンモリロナイト含有率が高くなると圧 縮性が悪くなることや除荷時のリバウンドが大きいことなどから、 ϕ 45mm×50mm のブロッ クを 20 段積み上げて供試体を作製した(写真 6.2.3-1 参照)。試験で使用する液体は蒸留水で ある。



写真 6.2.3-1 モンモリロナイトブロック(左)を積み上げた 1000mm ブロック供試体(右)

図 6.2.3-20 には、試験中の水みちの形成状況を示している。図から、試験開始直後には複数 あった水みちが1本の水みちに収斂しているのが分かる。また、試験開始22日目までは水みち の大きさが徐々に大きくなっているが、その23日目以降、急激に小さくなった。

図 6.2.3・21 には膨潤圧と通水圧の経時変化を示す。図から、通水開始直後には 1MPa 程度あ った膨潤圧が、試験開始から 22 日程度で 0.05MPa 程度まで減少している。水みちが拡大傾向 であった 22 日目までは通水圧も減少傾向であり、通水圧と膨潤圧の経時変化は連動しているよ うに見える。さらに、23 日目以降、水みちが小さくなるに従って、通水圧は激しく振動しなが ら増加傾向に転じている。この通水圧の経時変化は、水みちの観察結果は整合していると言え る。一方、膨潤圧は、23 日目以降も減少傾向状態のままである。水みちを膨潤によってシール するためには、反力をとる必要があると考えられるため、現状の観察結果からは、半径方向に 供試体が膨潤することによって発生するセルと供試体の摩擦を反力にしながら水みちをシール しているなどの可能性が考えられる。





図 6.2.3-21 1000mm セルによるパイピング試験中の膨潤圧と送水圧の経時変化

(8) 1000mm セルによるパイピング試験の総流量とエロージョン質量の関係

1000mm セルによるパイピング試験の総流量とエロージョン質量の関係は、Case2・2、Case4、 Case5、Case6 で取得した。図 6.2.3・22 に、これらのケースの総流量とエロージョン質量の関 係をまとめて示す。図には SKB 社が MX80 のペレットを円筒形のセルに充填して取得した総 流量とエロージョン質量の関係も併せて示している。さらに、前述の小型セルによるエロージ ョン試験の結果も併せて示す。

試験条件が異なるため、一概に比較できないが、今年度新たに実施したクニゲル V1 と 30wt% ケイ砂が混合されたベントナイト混合土からなるベントナイトブロックのケース (Case2-2) や クニゲル V1 単体からなる大小ペレットを充填したケース(Case4)は、クニゲル V1 を精製した モンモリロナイト 100%のブロックのケース(Case6)や SKB が取得した MX80 とおぼ同じ勾配 で流量が増加するのに従ってエロージョン量も単調に増加している。ただし、大小ペレットを 充填したケース(Case4)は、これまでよりもエロージョンが激しく、モンモリロナイト単体より もエロージョンしやすい傾向を示している。一方、ベントナイトブロックのケース (Case2-2) は、試験初期段階では、エロージョン量はモンモリロナイト単体のケースと同等であったが、 大小ペレットを充填したケース(Case4)と同様のエロージョン量に漸近する傾向を示している。

一方、NaCl 水溶液を使用した Case5 は、他のケースに比べ明らかに総流量とエロージョン 質量の関係の勾配が急であることが分かる。さらに、通水量が 20L を過ぎた辺りから、総流量 とエロージョン質量の関係の勾配が緩くなっている。これは、ブロックとセルの界面に形成さ れた水みちに堆積したケイ砂がエロージョンを抑制しているためだと考えられる。

図 6.2.3-23 には、1000mm セルによるパイピング試験におけるケイ砂の堆積状況と総流量と ロージョン質量の関係を併せて示す。図から、水みちに堆積したケイ砂が 40cm 程度の高さに なった頃から、総流量とエロージョン質量の関係の勾配が緩くなっていることが分かった。こ の傾向は、小型セルにおいても同様であった。このため、海水系地下水におけるエロージョン 対策には、このケイ砂が水みちに沈殿することを抑制する必要がある。

この流量とエロージョン量の関係は、材料のみならず給排水口の位置関係や境界条件に大き

く依存するものと考えられる。実際の処分孔でのエロージョン量は、境界条件を考慮した試験 によって推定すべきである。



図 6.2.3-22 1000mm セルによるパイピング試験の総流量とエロージョン質量の関係



図 6.2.3-23 1000mm セルによるパイピング試験におけるケイ砂の堆積状況とロージョン質量

6.3.1 試験概要

SKB 社では、実験から取得した流量とエロージョン量の関係をモデルとして処分場におけるエ ロージョンの評価に用いている。しかしながら、流量とエロージョン量の関係をモデルとして汎 用的に用いることの妥当性を検証するためには、この関係が、系の大きさに依存しないのか、通 水方向や膨潤方向に依存しないのか、材料に対して一意に決まるものなのかなど、確かめなけれ ばならないことが多い。

仮に、この流量とエロージョン量の関係が材料特性だとすると、材料特性としての限界流量 q_i が存在することになる。この限界流速 q_i の取得を目的として、図 6.3.1-1 に示すような限界流速計 測試験装置を用いた試験を実施した。なお、写真 6.3.1-1 に示すように、限界流速計測試験装置内 の流れが層流であることを、事前に染料を流して確認した。

試験手順は次のとおりである。



図 6.3.1-1 限界流量計測試験



写真 6.3.1-1 限界流速計測試験の層流確認状況

- ① ある乾燥密度 ρ_aに締固めた緩衝材を人工的に作った流路の河床部に設置し、様々な流速 q で通水する。流速が小さい場合、緩衝材が膨潤し、流路を狭くするため流速が増加し、エ ロージョンと膨潤が平衡するところまで膨潤する。逆に、流速が大きいと、緩衝材の表面 が膨潤と同時に洗掘され、緩衝材の表面位置が一定値を示す。
- ② 通水中の緩衝材の膨潤挙動を計測し、膨潤量と流速 qの関係を取得する(図 6.3.1-2 参照)。
- ③ 膨潤量と流速qの関係において、膨潤量がゼロとなる流速を、ある乾燥密度 ρ_{a} の限界流速 q_{i} とする。
- ④ ①~③を様々な乾燥密度について取得し、まとめると乾燥密度ρ_dと限界流速q_iの関係が図
 6.3.1-3のように得られる。

乾燥密度 ρ_{a} と限界流速 q_{i} の関係が図 6.3.1-3 上図のようになれば、限界流速は乾燥密度に依ら ず一定であり、材料物性として取り扱うことが可能であると思われる。一方、乾燥密度 ρ_{a} と限界 流速 q_{i} の関係が図 6.3.1-3 下図のようになれば、限界流速 q_{i} が乾燥密度 ρ_{a} の関数となるため、エ ロージョンの評価に対して、施工に起因する乾燥密度分布や境界条件などを考慮しなければなら ない。さらに、設計においてはこの乾燥密度 ρ_{a} と限界流速 q_{i} の関係の非線形性を考慮してエロー ジョン量の評価をしなければならない。



図 6.3.1-2 限界流速計測試験結果のイメージ



6.3.2 試験ケース

本検討では、図 6.3.1-1 に示すような、パイピングによって発生した水みちの内部の地下水流れ を模擬したセルを作製し、流速をパラメータにして通水試験を実施する。試験では、水みちの一 部が緩衝材となっており、緩衝材が膨潤するかエロージョンするかを流速ごとに観察し、エロー ジョンと膨潤が発生する流速の閾値を取得する。表 6.3.2-1 に試験ケースをまとめる。

この試験結果をまとめることによって物性値としての限界流速の存在について調べる。設定した流量は、これまでの検討の結果から 1.0~0.005L/min とした。

					•		
目的	状態	液種	通水方向	供試体	試験条件 流量(L/min)	試験数	備考
		蒸留水	 一次元 膨潤方向に 対して垂直 方向 	乾燥密度:1.6Mg/m ³	1.0	各1	新規
	継続				0.50		新規
					0.25		新規
田子之还上以王伝					0.10		新規
界面の透水性評価					0.0005		新規
自己シール限界流速	流速 縦続 蒸留水		. VA =	乾燥密度:1.8Mg/m ³	1.0	各1	新規
			一次元時週七向に		0.50		新規
		蒸留水	膨個万円に 対して垂直		0.25		新規
		方して垂直		0.10	. Γ	新規	
	Л		22101		0.0005		新規

表 6.3.2-1 自己シール限界流速取得試験ケース

6.3.3 試験結果

(1) 乾燥密度 1.6Mg/m³の場合

図 6.3.3-1 には各流量における供試体の上流、中央部、下流部の膨潤量と供試体中央部の流速 を示す。膨潤量は、定点撮影した写真から読み取ったものである。膨潤量は、流速が遅いほど 膨潤量が大きく、膨潤量の経時変化も滑らかである。逆に、流速が速いと膨潤量の経時変化の 変動が激しい。これは、図 6.3.3-2 に示すように、流速が速い場合、緩衝材が土塊状に削られて いるためである。

なお、図 6.3.3-1 に示すように、本試験では、全てのケースで膨潤が発生しており、膨潤せず に初期からエロージョンによって削られるというケースは見られなかった。



図 6.3.3-1 膨潤量と流速の経時変化(乾燥密度 1.6Mg/m³の場合)



図 6.3.3-2 流量毎の膨潤・エロージョン状況(乾燥密度 1.6Mg/m³の場合)

(2) 乾燥密度 1.8Mg/m³の場合

図 6.3.3-1 には各流量における供試体の上流、中央部、下流部の膨潤量と供試体中央部の流速 を示す。膨潤量は、定点撮影した写真から読み取ったものである。膨潤量は、流速が遅いほど 膨潤量が大きく、膨潤量の経時変化も滑らかである。逆に、流速が速いと膨潤量の経時変化の 変動が激しい。これは、図 6.3.3-2 に示すように、流速が速い場合、緩衝材が土塊状に削られて いるためである。

なお、図 6.3.3-1 に示すように、本試験では、全てのケースで膨潤が発生しており、膨潤せず に初期からエロージョンによって削られるというケースは見られなかった。



図 6.3.3-3 膨潤量と流速の経時変化(乾燥密度 1.8Mg/m³の場合)



0.05cc/min

100cc/min

250cc/min

500cc/min 1000cc/min 図 6.3.3・4 流量毎の膨潤・エロージョン状況(乾燥密度 1.8Mg/m³の場合)

(3) 流速と膨潤量の関係

図 6.3.3-5 には初期乾燥密度 1.6 Mg/m³ と 1.8 Mg/m³の場合の平衡状態の膨潤量と流速の関係 を併せて示す。ただし、緩衝材の膨潤が平衡状態であることを確認するための十分な時間を確 保することが困難であったため、6 日程度の通水時間における膨潤量を平衡状態と見なして結 果を取りまとめている。

平衡状態の膨潤量と流速の関係は、概ね1本の関数で近似できるように見える。しかしなが ら、流速が速くなるほど平衡状態の膨潤量が小さくなる傾向を示していることから、流速に対 して平衡膨潤量に相当する乾燥密度が存在するものと考えたほうが妥当と考えられる。このた め、初期乾燥密度 1.6 Mg/m³ と 1.8Mg/m³のケース毎に近似関数を取得した。全体的な傾向と して、流速が遅いほど、両ケースの膨潤量の差が小さい。これは、流速が遅いほど、十分に膨 潤した状態でエロージョンが発生するため、初期乾燥密度が膨潤量に及ぼす影響が小さくなる ためである。

この近似関数で外挿すれば、初期乾燥密度 1.6 Mg/m³の限界流速が 0.22m/s、1.8Mg/m³の場 合が 0.40m/s であった。この結果をまとめると図 6.3.3-6 のようになる。今年度の試験からは 2 点しか限界流速が得られないが、今後、様々な乾燥密度に対する限界流速を取得することによ って、パイピング・エロージョンに対する対策に資する情報として取りまとめたい。緩衝材の 膨潤が平衡状態であることを機械的に決定できる方法に関しても、今後、検討が必要である。 これらに関しては、今後の課題としたい。



図 6.3.3-5 膨潤量と流速の関係(乾燥密度 1.6 Mg/m³ と 1.8 Mg/m³の場合)



6-104

6.4 工学規模パイピング・エロージョン試験

6.4.1 試験概要

高レベル放射性廃棄物地層処分施設において、緩衝材の定置後再冠水期間に、処分孔への地下 水の浸入による水みち形成(パイピング)、浸食(エロージョン)が発生し、ベントナイトの自己修復 作用を妨げる場合には、長期性能に影響を与える可能性がある。そこで、本研究では、前述のよ うに小規模試験でパイピングやエロージョン現象について検討を行った。

小規模試験で明らかになった現象は、主に緩衝材と異種材料の界面に発生した水みち内で発生 しており、小規模試験といえども供試体寸法は水みちよりも十分に大きいために、これらの現象 が試験規模に及ぼす影響は小さいものと考えられるが、確認が必要である。さらに、前述の小規 模試験では、複雑な境界条件を考慮することが困難であったため、給水位置と数(鉛直方向と水 平方向)、処分孔の不陸、ペレットの粒径、エロージョン対策の効果などの検討には適さないと考 えられる。

そこで、本年度は、小規模試験よりスケールアップした工学規模試験において、試験規模の影響評価、実際の処分孔を模擬した境界条件下でのパイピング・エロージョン現象の発生状況観察や発生条件の検討、さらにエロージョンのモデル化を行う。図 6.4.1-1 に工学規模パイピング・エロージョン試験セルのイメージを、写真 6.4.1-1 には工学規模パイピング・エロージョン試験セルの の写真を示す。写真 6.4.1-2 には供試体作成状況を示す。供試体の作製では、SUS 製の半割れモールド内で、仕上がり層厚 1cm となるように静的締固めを 60 層実施した。完成後は、供試体の高さ 調整の後に半割れモールドから脱型して、写真 6.4.1-1 に示したアクリルセル、及び上蓋などを被 せて供試体を完成させた。なお、底盤は供試体の静的締固め時から後述するパイピング・エロージョン試験まで、同じ底盤を使用することで、不要な供試体の移動を排除した。



図 6.4.1-1 工学規模パイピング・エロージョン試験セルのイメージ



写真 6.4.1-1 工学規模パイピング・エロージョン試験セル



SUS 製半割れモールド

撒き出し状況

静的圧縮



供試体完成

脱型

アクリルセル設置状況



アクリルセル設置 アクリル製上蓋設置 反力盤設置(完成)写真 6.4.1-2 工学規模パイピング・エロージョン試験供試体作成状況

6.4.2 試験ケース

表 6.4.2-1 に今年度実施する試験ケースを示す。今年度は、前述の小規模試験との比較のために、 セルとの間に隙間がある条件で蒸留水を下面から上面に向かって一次元的に通水させた。供試体 とセルの間の隙間は 30mm のリング状であり、水はこの隙間を下面から上面の排水孔に向かって 流れる。この際の流量は、シリンジポンプで 0.1L/min となるように制御した。

排水孔は5mmのパイプ状であり、90°毎に1カ所、合計4カ所設けた。

ケース	対策	液種	通水 方向	供試体	流量 (L/min)	試験 数	試験項目	備考
1	無対 策	蒸留水	底面から上 面	 膨潤後の平均乾燥 密度 1.6Mg/m³程度 のブロック 寸法: 	0.1	1	通水圧 ェー-ジョン量 (濁度) パイピング・エロージョ ン挙動の観察	新規 セル内径: 560 mm 高さ: 600 mm
2	人工 不陸	蒸留水	底面から上 面	膨潤後の平均乾燥 密度 1.6Mg/m ³ 程度 のブロック 寸法:	0.1	1	通水圧 エロージョン量(濁度) パイピング・エロージ゙ョ ン挙動の観察	新規 セル内径: 560 mm 高さ: 600 mm

表 6.4.2-1 工学規模パイピング・エロージョン試験ケース

6.4.3 無対策ケースの試験結果

(1) 試験状況

図 6.4.3-1 に送水圧と送水量の経時変化を示す。図から、給流量は試験開始から 3 ヶ月程度の 間 0.1L/min で一定であり、その後、1cc/min に流量を低減させた。通水圧は増減を繰り返しな がら、大局的には漸増傾向を示している。特に、給水量を 1cc/min に低減させてからは増減が 激しく、給水圧は最大で 500kPa 弱まで増加した。



図 6.4.3-1 送水圧と送水量の経時変化

写真 6.4.3-1 には、供試体上面の定点撮影による浸潤状況を示している。写真から、通水開始 直後にアクリル製の上蓋と供試体との隙間に水が浸潤しているが、それ以降、湿潤領域の形は ほとんど変化していない。これは、供試体の上面の縁が膨潤することにより、隙間がなくなっ たため、水の供給が途絶えたためであると思われる。また、供試体の周囲は時間経過に伴って 膨潤し、17 日目にはほとんどの隙間がシールされた。その後の試験においても上面の浸潤状況 は大きな変化はなかった。



5.5 か月目7.5 か月目8.5 か月目写真 6.4.3-1工学規模パイピング・エロージョン試験上面の浸潤状況
写真 6.4.3-2 には、試験初期段階の水みちの形成状況を示す。試験開始直後、0.1L/min で給水を開始したところ、供試体下段に発生した水みちが徐々に上段に向かって進展し、最終的には排水孔とつながった。このため、図 6.4.3-1 に示した通水圧の経時変化も低い値のままである。 中段の水みちは、一見、シールされたように見えるが、緩いベントナイトがセルの表面に付着しているだけで、シールされてはいない。



写真 6.4.3-2 工学規模パイピング・エロージョン試験における水みち形成状況(初期:0.1L/min)

さらに試験は、0.1L/min の流量で3ヶ月間の試験を行い総流量とエロージョン量の関係を取 得した後に、染料であるローダミンBの飽和水溶液を流して水みちの位置を確認した。その後、 1cc/min に流量を低下させて試験を継続した。写真 6.4.3-3 には、試験開始から1か月目から3 か月目までの上下段側面の状況を示す。階段状の水みちが染料によって浮き彫りとなっている ことが分かる。また染料の染み込んでいる領域が水みちの周辺にまで広がっていることから、 エロージョンに伴う膨潤で水みち周辺の乾燥密度が低下していることが予想される。

流量を1cc/minに低下させてからは、写真6.4.3-4に示すように、水みちの大きさが細くなり、 約1週間後には供試体底面に大きな隙間が発生した。これは、流量の低下に伴う緩衝材の膨潤 により水みちの閉塞したため、給水圧が、一時的に供試体底面に全て外力として作用したため である。この期間では図6.4.3-1に示したように、流量と給水圧の関係において給水圧が急激に 上昇しているのが分かる。しかしながら、閉塞期間は一時的であり、閉塞と破過が繰り返され、 断続的に給水圧の増減が見られた。



写真 6.4.3-3 工学規模パイピング・エロージョン試験における水みち形成状況 (中期:0.1L/min)



写真 6.4.3・4 工学規模パイピング・エロージョン試験における水みち形成状況(後期:1cc/min)

図 6.4.3・2 には、水みち形成観察結果のイメージを示す。試験を観察すると、細心の注意を払って篩を使用しながら材料を撒き出して仕上がり層厚 1 cm作製した供試体であっても、その膨 潤は決して一様ではなく、上下方向、円周方向に、膨潤が早期に発生する場所と遅れて膨潤す る場所が存在する。早期に膨潤する場所と遅れて膨潤する場所が上下に発生すると、遅れて膨 潤する場所が横向きの水みちとして残り、早期に膨潤する場所と遅れて膨潤する場所が円周方 向に存在すると、遅れて膨潤する場所が縦方向の水みちとして残る。このような水みちの形成 メカニズムから、写真 6.4.3・2 にしめすように、水みちは階段状をとなっている。



図 6.4.3-2 水みち形成観察結果のイメージ

(2) 無対策ケースの解体

無対策ケースの工学規模エロージョン試験は、試験後、図 6.4.3-3 に示すような位置でサンプ リングを行いながら解体した。解体時の写真を写真 6.4.3-5 に示す。写真に示すように、試験当 初、隙間であった場所までベントナイトが膨潤してセルにしっかりと密着していることが分か る。さらに、解体時の所感としては、水みちが形成されている付近の供試体は柔らかくサンプ リングが容易で、水みちが形成されている場所の反対側の領域や供試体の中央は固いという傾 向があった。水みちが形成されている場所の反対側の領域では、通水中であっても乾燥ひび割 れが発生しているのが観察された。



図 6.4.3-3 工学規模エロージョン試験のサンプリング位置



写真 6.4.3-5 工学規模パイピング・エロージョン試験の解体状況

図 6.4.3・4 には、図 6.4.3・3 に示す位置でサンプリングした試料から得られた乾燥密度を用い て作製した乾燥密度の初期からの変化率分布を示す。変化率は初期の乾燥密度に対する解体時 の乾燥密度の割合で定義している。このため、膨潤した場所はその値が1よりも小さく、逆に 圧縮された場合は1よりも大きくなる。

図に示すように、水みちが形成された A 点側の乾燥密度が低く、反対側の E 点側の密度が高い傾向がある。また、供試体中央部は乾燥密度が初期値から 5%程度しか低下していないことが

分かった。さらに、供試体底面では、エロージョンによって供試体の密度が全体的に減少して いることが分かった。この傾向は、解体時の所感とも合致しており、さらに図 6.4.3-5 に示す解 体結果から取得した飽和度のコンター図とも整合する。乾燥密度が低下している部分は、エロ ージョンと膨潤が同時に生じており、飽和度が高く、乾燥密度が低下していることが分かる。



図 6.4.3-4 工学規模エロージョン試験の解体結果(乾燥密度コンター)



図 6.4.3-5 工学規模エロージョン試験の解体結果(飽和度コンター)

(3) 無対策ケースの総流量とエロージョンの関係

図 6.4.3・6 には、図 6.2.3・22 に工学規模エロージョン試験の無対策ケースから得られた総流 量とエロージョン量の関係を示す。図から総流量とエロージョン量の関係は、前述の 1000mm セルを用いて実施したエロージョン試験よりも同じ流量におけるエロージョン量は少ないが、 近似関数の勾配はほぼ同等である。エロージョン量が少ないのは、1000mm セルの場合に比べ て、本試験ケースの排水口の径が小さいためであると考えられる。



図 6.4.3-6 工学規模エロージョン試験から得られる総流量とエロージョン質量の関係

図 6.4.3-7 には、本試験から得られたエロージョン物質のモンモリロナイト含有率の経時変化 を示す。図には、本試験で使用したケイ砂 30wt%含有クニゲル V1 のモンモリロナイト含有率 41.3%も示している。図から、エロージョン物質は供試体よりもモンモリロナイト含有率が高 いことが分かる。この主な理由は、前述のように、ケイ砂が水みち内に沈殿するためであると 考えられるが、クニゲル V1 単体のモンモリロナイト含有率 59%よりもエロージョン物質のモ ンモリロナイトの方が高いため、クニゲル V1 の随伴鉱物も沈殿し、モンモリロナイトが選択 的に流出しているためであると考えられる。このことは、前述の 1000mmセルのエロージョン 試験において、同じ総流量におけるクニピア F のブロック供試体のエロージョン量の方が、ク ニゲル V1 ブロック供試体のエロージョン量よりも大きいことと整合する。このため、モンモ リロナイト含有率を高めることが必ずしもエロージョンの対策にはならないと言える。



図 6.4.3-7 エロージョン物質のモンモリロナイト含有率の経時変化

6.4.4 人工不陸ケースの試験結果

(1) 試験状況

エロージョンによる緩衝材の流出は、回収可能性を担保する期間や廃棄体の処分場の成立性 などにも影響を及ぼす重要な課題である。そのため、何らかの工学的な対策が必要である。

前述の無対策ケースの水みち形成状況を観察した結果、図 6.4.3-2 に示したような膨潤の遅延 領域が水みちとして残ることが明らかとなった。このため、図 6.4.4-1 に示すように、系が閉じ た膨潤遅延領域となるように人為的な不陸が設置できれば、有効なエロージョン対策になる可 能性がある。



図 6.4.4-1 エロージョン対策としての人工不陸の意味①

さらに、前述の人工給水の効果に関する検討において述べたように、給水圧が供試体を排水 ロに押し付ける(下面給水 - 上面排水)場合、いずれのケースでも破過やパイピング・エロー ジョンは発生しなかったが、給水圧が供試体を押し下げる(上面給水 - 上面排水)場合、給水 圧によって押し下げられた供試体とセルの間の隙間が排水口と連通することによって破過が発 生し、パイピングやエロージョンが発生した。この実験事実は、給水圧がエロージョンを抑制 する方向に作用すれば緩衝材の膨潤によってパイピングやエロージョンを抑制できる可能性を 示している。この実験事実に対して、人工不陸は図 6.4.4-2 に示すような効果も期待できる。

図 6.4.4-2 には、人工不陸と膨潤領域の拡大図を示している。図に示すように、人工不陸の下 面には緩衝材を押し付ける方向に給水圧が作用するため、仮に緩衝材とセルの界面に沿ってパ イピングが発生したとしても、人工不陸の下面に発生した水みちは給水圧によって押し潰され ることになる。この効果は給水圧が増すほど高くなるため、一旦閉塞すると、破過などの現象 も発生し難いと考えられる。

尚、本試験では、人工不陸と供試体の間隔は1mm程度であり、人工不陸がない箇所では30mm 程度である。



図 6.4.4-2 エロージョン対策としての人工不陸の意味②

図 6.4.4-3 に給水量と給水圧の経時変化を示す。試験は流量制御(0.1L/min)で実施しているため、総流量は一定勾配で増加している。これに対して給水圧は、試験の給水段階(2 時間 40 分)の間で供試体の給水口と排水口の水位差(70cm 程度)に相当する圧力である 7kPa 程度まで増加し、その後、供試体の膨潤に伴って漸増している。



図 6.4.4-3 給水量と給水圧の経時変化

写真 6.4.4-1 に試験状況を示す。試験は供試体側面上部と側面下部、さらに上面の三カ所を定 点カメラで撮影した。写真 6.4.4-2 から写真 6.4.4-4 に各点の定点撮影結果を示す。



写真 6.4.4-1 工学規模パイピング・エロージョン試験状況(人工不陸ケース)

上面では、給水後2時間40分で供試体とセルの間の隙間が水で満たされ、その後、時間経過 に伴って供試体が膨潤しながら隙間をシールしている状況が分かる。供試体内部への浸潤も時 間経過に伴って進行している。



写真 6.4.4-2 工学規模パイピング・エロージョン試験状況(人工不陸ケース、上面)

側面上部では、人工不陸を設置していない箇所から膨潤が進行している。また、人工不陸箇 所では、供試体が一旦給水によって濡れたが、その後は、人工不陸箇所の上下の緩衝材の膨潤 によって給水が遮断され、ひび割れが発生している。図 6.4.4-3 に示したように、給水圧は最大 でも 25kPa 程度であり、閉塞していないため、水は人工不陸とセルの間を流れているものと考 えられる。



写真 6.4.4-3 工学規模パイピング・エロージョン試験状況(人工不陸ケース、側面上部)

側面最下部では、人工不陸を設置していない箇所の膨潤が進行して、セルと接触している。 また、人工不陸箇所では、供試体が一旦給水によって濡れたが、その後は、人工不陸箇所の上 下の緩衝材の膨潤によって給水が遮断され、ひび割れが発生している。



写真 6.4.4-4 工学規模パイピング・エロージョン試験状況(人工不陸ケース、側面下部)

写真 6.4.4-5 には、側面最下部に発生したパイピングと人工不陸箇所の乾燥状況を示す。供試体最下面は、底面と側面の 2 面から水が浸潤するため、他の場所よりも浸潤状況が進行しており、他の箇所よりも早く緩衝材とセルが密着している。そのため、側面最下部にある人工不陸未設置箇所では、パイピングが発生している。しかしながら、この水みちは、人工不陸箇所で 消滅しており、人工不陸とセルの界面を水が流れているものと考えられる。ただし、人工不陸 とセルの界面の一部でモンモリロナイトの膨潤によるシールが見られるため、今後、膨潤が進 むと、人工不陸とセルの界面がシールされ、給水圧が急激に増加する可能性がある。



写真 6.4.4-5 側面最下部に発生したパイピングと人工不陸箇所の乾燥状況

写真 6.4.4-6 には、人工不陸箇所と人工不陸未設置箇所の状況を示している。人工不陸未設置 箇所が膨潤して供試体表面が白っぽくなっているのに対して、人工不陸箇所は、一旦濡れた後 に人工不陸未設置箇所の膨潤によって水の供給が絶たれたために亀甲状にひび割れている。今 後、人工不陸とセルの界面がシールされれば、再び水が浸潤し、膨潤するものと考えられる。



写真 6.4.4-6 人工不陸箇所と人工不陸未設置箇所の状況

写真 6.4.4-7 には、エロージョン材料の採取状況を示す。本試験では、0.1L/min の流量制御 で試験を実施している。そのため、一日当たり 144L の排水が得られる。この排水を蒸発させ てエロージョン材料の質量を計測することは現実的ではないため、写真に示す 500L タンクに 溜めた二日分の排水を十分に撹拌した後に 200mL 採取し、その採水の濁度(吸光度)を計測 することによって排水に含まれるエロージョン物質(写真 6.4.4-8 参照)の濃度を算出するもの とした。

このようなエロージョン物質の質量を計測した後、図 6.4.4-4 に示すようなエロージョン質量 と総流量の関係にまとめることにより、工学的対策の効果の評価が可能となる。既に実施した 前述の無対策のケースに比べ、エロージョン質量と総流量の関係が下側にプロットされれば、 同じ流量に対してエロージョン物質の量が少ないことになり、対策が有効ということになる。 今後、試験を継続し、人工不陸の有効性を確認する計画である。



写真 6.4.4-7 エロージョン材料の採取状況



写真 6.4.4-8 排水に含まれるエロージョン材料



図 6.4.4-4 工学的対策の効果の評価イメージ

6.5 工学技術への反映

6.5.1 緩衝材や埋め戻し材等の材料特性としての許容流量の整理

SKB社では、実験から取得した流量とエロージョン量の関係を用いて処分孔の許容される流量 とエロージョン量に対して基準を設けるべく検討を行っている[7]。その検討手順は、以下のよう なやり方である。先ず、①流量とエロージョン量の関係の取得しておく。次に、②処分場の地下 水流動解析から、各処分孔からの湧水量を算出する。③①の流量とエロージョン量の関係の関係 を地下水流動解析結果に適用し、湧水量と同時にエロージョン量を算出する。④許容される流量 とエロージョン量の基準に照らして処分孔としての適性を評価する。また、検討では、エロージ ョンを防ぐために、なるべく早く処分孔を閉鎖する必要性を示しており、処分孔を閉鎖する順番 による地下水挙動の変化なども考慮して処分孔を閉鎖する順番などについても検討している。

この方法にならって、処分孔として許容される流量を決定するフローを考える。処分孔における緩衝材の性能は、力学・水理・化学・熱的な緩衝性である。この性能を満足しているかどうかを評価するための代替パラメータとして乾燥密度 *ρ_a* に基準値 *ρ_a* が与えられている。

いま、施工した処分孔の緩衝材の体積V、乾燥質量Mとすると、施工した緩衝材は、

$$\overline{\rho}_d < \frac{M}{V}$$

を満足しなければならない。また、基準乾燥密度 \bar{P}_a となる緩衝材の体積と乾燥質量がV、 \bar{N} で与えられるとすると、

$$\overline{\rho}_d = \frac{\overline{M}}{V}$$

で表される。この時、処分孔当たりの許容されるエロージョン量(乾燥質量) Eは、

$$E = M - \overline{M}$$

で与えられる。ここで、エロージョン量(乾燥質量)Eとなる総湧水量Qは、前述の室内試験から、

$$E = \beta Q^{\alpha}$$

で与えられるため、許容される総湧水量Qが、

$$Q = \sqrt[\alpha]{\frac{E}{\beta}}$$

で与えられる。いま、ある処分孔において、緩衝材を施工してから(仮)閉鎖するまでの時間をT とすれば、許容される流量qが、

$$q = \frac{Q}{T} = \frac{1}{T} \frac{\sqrt{E}}{\beta} = \frac{1}{T} \sqrt[\alpha]{\frac{M-M'}{\beta}}$$

で与えられる。ここで、許容される流量qをなるべく大きくして処分可能な孔を多く確保するためには、止水工法や地下水低下工法などで流量qを小さくさせる以外には、閉鎖するまでの時間Tを短くするか、施工する緩衝材の密度を高める(処分孔当たりの緩衝材の乾燥質量Mを大きくする)以外に工学技術としての対策はない。また、許容される流量qと緩衝材が施工可能な流量の大小関係に関しても検討が必要である(図 6.5.1-1 参照)。



図 6.5.1-1 流量とエロージョン量の関係における湧水対策の意味

(1) 閉鎖を早める対策

前述のように、緩衝材の流出現象の対策の一つとして、閉鎖時期を早めるというものが考え られる。その一方で、近年の地層処分事業に対しては、社会的な要請から廃棄体の再取り出し 可能性に関する検討が開始されている。なお、本検討では、再取出し可能な状態とは、連絡坑 道の埋戻しがなされない状態とする。

処分孔の掘削後から閉鎖までの想定される工程は、①緩衝材の施工、廃棄体定置、②処分孔 の端部プラグ設置、③閉鎖(連絡坑道埋戻し)、である。処分施設を閉鎖する前の段階では、連 絡坑道は水位が下がっており、地下水は処分坑道から連絡坑道に向かって流れるものと考えら れる。このような状態で、再取出し可能性を維持するためには、ある程度の緩衝材の流出を許 容する必要があり、再取出し可能性とエロージョン現象はトレードオフの関係にある。

よって、エロージョン抑制の観点からは、再取り出し可能な期間を全く設けずに、閉鎖した 処分坑道は、随時、埋め戻し、水位を回復させるという対策が考えられる。竪置き処分方式の 場合は、処分孔毎に端部プラグと埋め戻し材を施工し、人工給水させ、膨潤圧の反力は埋め戻 し材から取るという方法が考えられる。横置き処分方式の場合は、廃棄体定置後、その都度、 コンパートメントプラグを施工して人工給水し、所定量の廃棄体を定置した後に処分坑道の端 部プラグを施工する。処分済みの処分坑道までの連絡坑道を埋め戻し、地下水を回復させるこ とが最も合理的であると考えられる。閉鎖時期を早める対策の場合、連絡坑道の埋め戻しだけ でなく、地下水位を回復させる必要があるため、水位回復用のプラグを段階的に設置する必要 がある。

(2) 流量を減らす対策

廃棄体の再取り出し可能な期間を長期間維持したい場合、埋め戻したり、水位を回復させた りすることは難しいため、処分孔の湧水量を極力小さくする必要がある。そのためには、揚水 による地下水位の低下や裏面排水シートや一次・二次覆工などの水密構造を採用するなどの対 策が考えられる。しかしながら、この再取出し可能性を維持しなければならない間、揚水し続 けることや、有機物の防水シートで水密構造を維持し続けることは実績がなく、無機の防水シ ートも存在しないことから実現性が不確実である。そこで、一次覆工と二次覆工の間にベント ナイト遮水層を介在させる水密構造が考えられる。このベントナイト遮水層の構築は、吹付け 工法か二次覆工の背面にプレキャストでベントナイトブロック設置する施工も可能であると考 えられる。この水密構造の処分孔を構築するためには、土圧と水圧に耐える力学構造にする必 要があり、施工費が大幅に増加するが、その一方で、湧水による緩衝材の流出に対する対策を 施工時から維持管理時まで実施する必要がなくなること、処分孔からの排水処理をする必要が なくなるなどのコスト低減効果も見込める。

揚水による対策も実現性は高いが、排水に環境基準を上回る溶解物が存在する場合、再取り 出し可能な期間、ずっと排水処理費用が掛かるリスクを孕んでいる。



図 6.5.1-2 削孔→1次覆工→ベントナイト吹付け→2次覆工

(3) 緩衝材の乾燥密度(乾燥質量)を高める対策

前述のような、許容されるエロージョン量が、総流量とエロージョン量の関係から規定され る場合、乾燥密度が一定であれば、緩衝材の体積が大きい方が、許容されるエロージョン量が 大きくなり、再取り出し期間を長く設定できる。逆に、処分坑道の体積が一定であれば、乾燥 密度を高くすれば、再取り出し期間を長く設定できる。

乾燥密度の値は、施工方法によって達成可能な値が異なるため、このような対策は施工方法 選択条件となり得る可能性がある。一方、処分坑道の体積を大きくすることは、処分施設の施 エコストの増大を招くが、幅広く施工方法を選択できるという長所がある。緩衝材の乾燥密度 は、施工性やエロージョンの観点からだけでは決定できないため、処分施設の施工コストの増 大を齎すが、処分坑道の体積を大きくする対策の方が現実的であると考えられる。

6.5.2 試験結果に基づく対策フロー

本検討では、処分孔の緩衝材表面近傍で発生する、ブレイクスルー、パイピング、エロージョ ンの各現象の発生状況を小規模試験によって観察した。その中で、湧水量が0.1L/minの場合、通 水初期には多くの水みちが発生していても、最終的には1つの大きな水みちに収斂する可能性が あることを示した。このことは、蒸留水でも海水相当の NaCl 水溶液でも同様であった。収斂し た1本の水みちの大きさに対して試験系は十分に大きいため、実際の処分孔や処分坑道の孔壁と 緩衝材の間に多数の水みちが発生しても、最終的には1つの大きな水みちに収斂する可能性を示 唆している。このことは、仮に処分孔としての使用可否を処分孔当たりの湧水量によって決定し ても、処分孔当たりの湧水量が最終的には収斂した水みちを流れる湧水の流量となることを意味 している。このため、収斂した水みちの流量とエロージョンが発生する流量の関係も考慮したう えで処分孔としての使用可否を決定する必要がある。

さらに、実際の処分孔であっても最終的に1つの大きな水みちに収斂するのであれば、小規模 試験であっても、実際の処分孔で生じていることと同じ現象を観察できていることになる。よっ て本検討をパラメトリックスタディーとして実施して、地下水イオン強度ごとのエロージョンが 発生する流量を取得し、別途、施工可能な湧水量を施工試験によって取得できれば、本検討結果 によって処分孔としての使用可否、および湧水を有する処分孔の緩衝材の最適な施工法などを決 定する基準値を与えることができる。

図 6.5.2-1 に、処分孔としての使用可否、および湧水を有する処分孔の緩衝材の最適な施工法な どを決定するチャートにおける本検討結果反映先を示す。なお、図 6.5.2-1 に示すフローは、ある 一定期間、廃棄体を再取り出し可能な状態にするという前提の下で記述されており、再取り出し 期間を変化させるという対策は対象外としていることに注意が必要である。よって、下記のフロ ーにおいて記述される限界流量は、実際には閉鎖を早めることで、変化させることが出来る。



図 6.5.2-1 処分孔としての使用可否、および湧水を有する処分孔の緩衝材の最適な施工法の 決定チャートにおける本検討結果反映先

平成 24 年度のパイピング・エロージョン試験の Case9 の結果から、液種が蒸留水であり、 ①湧水量 Le が 0.001L/min 以下の場合

処分孔においてパイピング・エロージョンは発生しないという結果になった(図 6.5.2-1①)。 つまり湧水量が 0.001L/min 以下であれば、緩衝材の施工法として原位置施工のうち吹付け 工法、原位置閉め固め工法、ブロック定着工法、ブロック定着工法+ペレット充填工法の併 用のすべてが採用可能である。

② 湧水量 Le>0.001L/min の場合(再取り出し可能期間は一定)

【対策1】:緩衝材ブロックのパイピング・エロージョンを防ぐために、ペレットを岩盤と緩 衝材ブロックの間に充填する対策が考えられる。これは、前述の緩衝材の乾燥質量を増加さ せる対策に類する。さらに、水みちが収斂する時間を遅らせて、水みちの流量が急激に増加 することを抑制する効果も期待できる。さらに、供試体内への地下水浸潤量を増やし、界面 の水流れを減少させる効果や膨潤により岩盤から処分孔内への湧水量を減らすという効果も 期待できる。これらは、前述の流量を減らす対策に類するものと考えられる。

【不確実性】:現段階では、許容される上限の湧水量が明確になっていないが、本検討結果に 基づいて決定すれば、0.001L/min ではエロージョンは発生せず、0.005 L/min ではエロ ージョンが発生したことから、Le=0.005L/min と考えることができる。ただし、これは、 緩衝材のみに止水効果を期待する場合の値であり、処分孔や処分坑道の仮端部プラグの設置 などの対策があればその値を更に大きくできる。また、再取出し可能な期間によってもその 値が変わることを付記する。

【対策2】: 吹付け工法、現場締め固め工法によって、緩衝材の隙間をなくし均質な乾燥密度 を施工する対策が考えられる。これは、前述の緩衝材の乾燥質量を増加させる対策に類する。 さらに、供試体内への地下水浸潤量を増やし、界面の水の流れを減少させる効果や膨潤によ り岩盤から処分孔内への湧水量を減らすという効果も期待できる。これらは、前述の流量を 減らす対策に類するものと考えられる。

【不確実性】: 吹付け工法の場合、平成24年度の施工技術高度化試験において、総湧水量は 0.1 L/minの条件で施工を行った。この場合の1つの孔当たり0.0037L/min(Case1)の場合と 0.03L/min(Case2)および0.003L/min(Case3)である。施工は順次、湧水箇所を模擬した ノズルを吹付けで閉塞させながら施工するものであり、最終的に残ったノズルからの湧水は 0.1 L/min 程度と考えられる。それでも、施工自体は問題なく実施できたため、この本検討結 果に基づいて施工可能な湧水量を決定すれば、0.1L/minとなる。他の施工法に関しては、同 様の検討が未実施であるため、取得する必要がある。

さらに、湧水環境下でも施工することは可能であったが、止水することはできなかったため、 施工中の湧水処理や施工後の仮止水による膨潤期間の設定など、施工以外の対策を検討する 必要がある。膨潤期間の設定に関しては、後述する。

③ 湧水量 Le>0.001L/min の場合(再取り出し可能期間は一定)

【緩衝材の施工法以外の対策1】:室内試験の結果から、水みちは緩衝材と非膨潤性材料の界 面に収斂するということが明らかとなった。実際の処分施設では、処分孔や処分坑道の孔壁 と緩衝材の界面に水みちが形成されるものと考えられる。このため、孔壁に人工的な不陸を 設置するという対策が考えられる。これにより、膨潤後の緩衝材の表面に凹凸が形成される ため、緩衝材と地下水の接触面積が増加して緩衝材内部に浸潤する湧水が増加する効果が期 待できる。さらに、地下水圧が作用しても緩衝材の連続的な水みちが形成され難くなり、緩 衝材近傍に拡散場を作り易くなるなどの効果も期待できる。 【不確実性】:人工的な不陸の効果に関しては、前述の工学規模パイピング・エロージョン試験において検証する必要がある。また、不陸の形状や施工手順などに関しても今後、検討する必要がある。

【緩衝材の施工法以外の対策2】:室内試験結果から、人工給水によって緩衝材を事前に膨潤 させる対策が考えられる。給水量を制御した状態で膨潤(プレハイドレーション)させ、湧 水箇所や流出箇所をシールできれば、処分孔や処分坑道を拡散場とすることができる。この 場合、人工給水に伴う膨潤変形を拘束するためのコンパートメントプラグや端部プラグなど の緩衝材以外の対策も不可欠となる。

【不確実性】:緩衝材をプレハイドレーションさせると、地下水圧がほぼ全応力として緩衝材 に作用し、その圧力によって発生する隙間によって破過現象が発生する可能性がある。さら に、その隙間が流出箇所と連通するような場合、湧水圧によって発生した隙間が亀裂などの 流出孔と連通したら瞬時に水が流れるのと同時に水圧が下がり、隙間が塞がるという現象が 繰り返されるものと考えられる。このため、前述の人工的な不陸の設置を併用するなど、複 合的な対策を取る必要があると考えられる。

④ 塩水環境における仕様検討

【対策】:海水相当の NaCl 水溶液での室内試験の結果から、緩衝材の流出現象は、蒸留水の 場合と概ね同様であったが、0.0001L/min(0.1cc/min)でも破過現象とシールが繰り返されて おり、塩水環境における許容される湧水量は不明である。ただし、0.0001L/min(0.1cc/min) 以下の流量を許容される湧水量とすることは現実的には厳しすぎるものと考えられるため、 緩衝材だけで止水させるのではなく、閉鎖時期や許容流出量の考えなどから妥当な限界流量 を決定する必要がある。

また、エロージョンによるケイ砂とベントナイトの分離傾向が著しく、水みちにケイ砂が沈 殿する傾向がみられるため、緩衝材と孔壁の界面近傍はベントナイト単体とするなどの対策 が考えられる。

【不確実性】:塩水環境下では、エロージョン材料が沈殿し易いため、流入位置と流出位置の 関係が重要となってくる。竪置き処分方式で、底面から方面に向かって湧水が流れるような 場合では、エロージョン材料は沈殿して、処分孔から流出しない可能性が実験から示唆され た。一方、横置き処分方式では、エロージョン材料が沈殿しても、流出位置によってはその まま排出される可能性もある。今後、塩水環境下においては、流入位置と流出位置に関して 考慮しながら検討を進める必要がある。さらに、地下水組成として、Na/Ca イオン比もパラ メータとすべきである。 前述のように、緩衝材だけで止水性を担保する場合、許容される湧水量が非常に厳しくなり、 処分サイトの選択肢を著しく制限することになる。そこで、許容されるエロージョン量を総流量 とエロージョン量の関係から規定すると、その対策は、閉鎖までの時間の削減、流量の低減、緩 衝材の乾燥質量の増加、に大別される。これらの対策の実施可能な時期は、施工段階ごとに異な り、その施工段階は掘削前、掘削中~緩衝材施工中、さらに緩衝材施工後に大別できる。掘削前 の湧水対策に関しては、湧水量の少ないサイトの選定やグラウトや揚水による止水対策などが考 えられる。

掘削中~緩衝材施工中における具体的な湧水対策は処分概念毎に異なるが、基本的には、湧水 量を減らす対策と湧水によるパイピング・エロージョン現象による緩衝材の流出を防ぐ対策、さ らに許容される流出量を増やす対策に分けられる。

施工後の湧水対策に関しては、パイピング・エロージョン現象による緩衝材の流出を防ぐため の対策として、処分孔の中を早期に拡散場にする対策が考えられる。

以上をまとめると表 6.5.3-1 のようになる。表 6.5.3-1 に挙げた各対策に関しては SKB 社によ る先駆的な検討がなされている[8]。

施工法		掘削前	掘削中~緩衝材施工中	緩衝材施工後
			その対策	その対策
Mの増加		—	Q 、q の低減	q、Tの低減
密度分布の低下				
堅置き	原位置		防水シート	早期埋戻し
	施工方式		凍結	処分孔の水封
			ポストグラウト	処分孔仮プラグ
			隙間充填	処分孔への人工給水
			ウォータータイト	
			揚水	
横置き	吹付け/ ヴィト選足 ペレット グラウト		プレグラウト	早期埋戻し
			ポストグラウト	処分孔の水封
	充填方式		区間閉鎖	処分孔仮プラグ
			ウォータータイト	処分孔への人工給水
			自然流下	
	PEM方式		覆工	早期埋戻し
			区間閉鎖	処分孔の水封
			ペレット充填	処分孔仮プラグ
			ウォータータイト	処分孔への人工給水
			自然流下	

表 6.5.3-1 処分施設の湧水対策一覧

6.6 緩衝材の流出に関する課題の抽出

6.6.1 処分概念に対する湧水環境のモデル化の実験的評価方法

(1) 処分孔周りの地下水流動による吸出しによるエロージョン検討

実際の処分場では、緩衝材よりも周辺の岩盤の方が透水係数は大きく、さらに処分孔の削孔 時に EDZ が形成されれば、処分孔内よりも天然バリア内を地下水が流れる可能性が高い。この 場合、緩衝材と天然バリアの界面では吸出し現象が発生し、緩衝材が天然バリア内に吸い出さ れ、結果として水みちが緩衝材内にも形成される可能性もある。そこで、花崗岩などの多孔質 体と界面を有する緩衝材に長期間通水を行い、多孔質エロージョンに対する評価を行う必要が ある。試験系としては、前述の花崗岩との界面を有する緩衝材の通水試験や緩衝材と接する多 孔質内に一定の流量で水を流した場合の緩衝材の挙動観察などが考えられる。



図 6.6.1-1 試験ケース

(2) Ca型化がエロージョンに及ぼす影響検討

セメント系人工バリアと界面を有する緩衝材に通水した場合、水はその界面を選択的に流れ ていることが明らかとなった。長期的に通水を行った場合、セメント系人工バリアから Ca イ オンが溶出し、界面近傍の緩衝材が Ca 型化する可能性がある。Ca 型化が発生すると、セメン ト系人工バリアは緻密さが失われ、緩衝材は止水性が低下し界面周辺に水みちを形成する可能 性がある。そのため、Ca 型化がエロージョンに及ぼす影響を評価する必要がある。



横置き処分方式でのエロージョン試験を実施し、湧水量とエロージョン量と関係を取得する。 特に、竪置き処分方式を模擬した場合、塩水ではエロージョン材料が沈殿して、エロージョン が抑制されるという結果となったが、横置き処分方式を模擬した場合でも同様の傾向が得られ るかどうかを検証する。

また、原位置施工方式を模擬した界面に隙間がない供試体に対して通水した場合に、エロー ジョン材料が目詰まりしない状況でもエロージョン現象が抑制されるかどうかを確認する。初 期飽和度をパラメータとして試験を実施し、自己シールされる流量に対する初期飽和度の影響 に関する知見を取得する。



図 6.6.1-3 ブレイクスルー、パイピング、エロージョン試験セルの概略図

(4) 流路長の影響調査 (Distance ブロック、Filling ブロックの効果)

SKB 社の横置き処分孔では、緩衝材だけでなく、Distance ブロックや Filling ブロック、さらにはコンパートメントプラグなどにより、エロージョンに対する性能の担保を目指している。 この Distance ブロックや Filling ブロックはベントナイト系材料が想定されており、流路長を 大きくして耐エロージョン性を高めるものである。

そこで、横置き処分方式でのエロージョン試験を実施し、流路長がエロージョンに及ぼす影響を評価する。

初期飽和度をパラメータとして試験を実施し、自己シールされる流量に対する初期飽和度の 影響に関する知見を取得する。



図 6.6.1-4 パイピング生成試験セル(流路長を変化)

(5) 人工給水とコンパートメントプラグの有効性の実証

SKB 社の横置き処分孔では、緩衝材だけでなく、Distance ブロックや Filling ブロック、さらにはコンパートメントプラグなどにより、エロージョンに対する性能の担保を目指している。 コンパートメントプラグは鋼製であり、ベントナイト系材料を併用することでコンパートメン トプラグで区切られた空間を拡散場にすることを実現するものである。SKB-3H では、人工注 水するために用いられるが、処分孔を部分的に拡散場にできれば、エロージョンを抑制するこ とにも効果が期待される。

このコンパートメントプラグのプラグ形式による止水性効果、及び人工給水の評価を行う。



図 6.6.1-5 コンパートメントプラグの止水性効果の検討



図 6.6.1-6 人工給水効果の検討

(6) 水封の効果の検証

実際の処分場では、緩衝材よりも周辺の岩盤の方が透水係数は大きく、さらに処分孔の削孔 時に EDZ が形成されれば、処分孔内よりも天然バリア内を地下水が流れる可能性が高い。再取 出し可能性の観点から、作業トンネルが埋め戻されない場合、地下水は天然バリアからこの作 業トンネルに向かって流れることが予想されるが、この際に処分孔の端部プラグ付近の緩衝材 を流出させることが懸念される。この対策として作業坑道を早期に埋め戻すことが挙げられる が、再取出し可能性とのトレードオフの関係となる。

そこで、作業トンネルを水没させ、周囲の地下水圧と同等の圧力を付与する水封化が折衷案 として挙げられる。この水封化については検討されたことがなく、その効果を検証する必要が ある。



図 6.6.1-7 水封効果の検討

(7) 水密構造の検証

再取出し可能性を担保するためには、長期に亘り、作業坑道を埋め戻せない可能性がある。 この場合、再取出し可能期間中、ずっと、処分施設を水没させることなく、地下水を処理しな ければならないため非常に維持管理にコストがかかる可能性がある。

そこで、高度な水密構造を検討し、揚水しなくても坑道内に地下水を流入させない水密構造 について検討することは、再取出し可能性、緩衝材の品質確保、コスト低減の観点からも有効 である。そこで、一次・二次覆工とベントナイトを併用した水密構造の効果を評価する。



図 6.6.1-8 水密構造評価試験セル

- (8) 実規模
 - 1) 湧水環境下における様々な施工オプションでの施工確認試験の実施

これまで、竪置き処分方式の緩衝材について、湧水環境下での吹付け工法による緩衝材の 施工可能性、および止水性について検討してきた。横置き処分・吹付け方式が湧水環境下で 実施可能かどうかについても検討する必要がある。さらに、他の施工方式でも同様の試験を 実施する必要がある。



6.6.2 影響低減対策の検討

時期	竪置き・ブロック方式	横置き・原位置施工方	横置き・PEM方式		
		式			
掘削前	プレグラウト				
掘削中	揚水	揚水			
掘削後	ポストグラウト				
緩衝材施工中	遮水シート	裏面排水	- (地上施工)		
廃棄体定置		段階的閉鎖	裏面排水		
		(ディスタンスブロ	段階的閉鎖		
		ック・フィリングブロ	(ディスタンスブロ		
		ック・コンパートメン	ック・フィリングブロ		
		トプラグ)	ック・コンパートメン		
			トプラグ)		
処分孔閉鎖					
	早期埋戻し/連絡抗の水没				
	処分坑への人工給水				
管理期間中					
(再取り出し)					

<<現時点で考えられる影響低減対策の検討>>

6.6.3 解析技術への反映

本検討結果から、再冠水中に発生するブレイクスルー、パイピング、エロージョンの各現象の 発生によって、再冠水後(長期性能評価の初期状態)では、必ずしも緩衝材は膨潤して均質な状 態ではない可能性が示唆できた。特にパイピングの発生やエロージョンのような現象は、緩衝材 自体の機能を損なう可能性があり、流速が速いと内部に地下水が浸潤する前にエロージョンによ って表面の膨潤した緩衝材が洗い流されていく状況も観察できた。

このブレイクスルー、パイピング、エロージョンの各現象を連続体力学の枠組みの中で取り扱 うには、非常に高度な解析技術が要求される。例えば、ブレイクスルー現象は、水みちを膨潤に よって塞いだ緩衝材が水圧によって押し抜きせん断される現象であり、緩衝材の膨潤に伴う強度 や剛性の低下とせん断による破壊現象を取り扱えなければならない。パイピング現象では、複数 の水みちが1つの大きな水みちに収斂しながら、水みちの流量が増していくという現象を表現で きなければならない。この水みちの収斂には、緩衝材の膨潤や沈殿物の堆積による不整によって 生じる分岐現象が表現できる解析手法が必要となる。さらに、エロージョン現象では、連続体と して場に存在していた固体が解析領域から流出するという現象を表現できる必要がある。

このような現象が緩衝材の性能を損ねる可能性があるとすれば、例え高度な解析技術が必要で あってもこれらの事象を考慮して解析的に長期性能への影響を調べる必要がある。すなわち本検 討結果は、再冠水から長期性能までを統一的に表現できる解析技術に必要なスペックを与えてい るとも言える。

6.6.4 まとめと今後の試験計画

本検討では、供試体高さが 100mm のセルと供試体高さが 1000mm あるセルを用いてブレイク スルー、パイピング、エロージョンの各現象の発生状況について、流量制御で調べた。その結果、 供試体高さに拠らず、概ね同様の挙動を取得することができた。すなわち、

- ▶ 0.1L/min.の流量で通水した場合、ブロック定置工法とペレット充填工法ではパイピング 現象が発生する可能性がある。
- パイピング現象は、当初は複数の水みちを形成するが、次第に少数に収斂し、ついには1 つの大きな水みちになる。
- 一旦、パイピング現象が発生し、大きな水みちに収斂すると、流量を下げない限り、その水みちはエロージョンし続ける。
- ▶ 蒸留水を通水した場合は、ペレットやブロックが膨潤して、ペレットの間隙やブロック とセルの隙間が水みちとして形成されていったが、NaCl水溶液の場合、ペレットやブロ ックが崩れながら沈殿し、堆積した沈殿物の中に水みちが形成されていった。さらにこ の沈殿物の堆積が水みちの収斂の契機となっている。
- 大粒径ペレットと小粒径ペレットを混合したケースでは、小粒径ペレット内に小さな水みちが多数発生し、収斂して、結局大きな1つの水みちとなった。

さらに、本検討では、流量を 0.1L/min.から 0.0001L/min.まで低下させると、通水圧は上昇し

たが、それよりも大きな値の場合、通水圧は低いままであった。ただし、試験開始時から流量を 0.0001L/min.にした場合と結果が同じであるかどうかは、調べる必要がある。また、水みちの収 斂現象についても、人為的な水みちを配置した供試体で検証を行う必要がある。これは、水みち が必ず収斂するのであれば、処分孔当たりに定められた処分坑の採用基準としての湧水量は、収 斂後の水みちの流量となるためである。 6.7 排水の分析

6.7.1 試験の目的及び概要

本検討で実施している小規模試験は全て、排水を採取し化学的な観点からの考察も行う計画で ある。図 6.7.1-1 に示すように、平成 23 年度までで 180 本程度の排水が採取されている。



6.7.2 これまでの排水分析結果

通常、排水中に含まれるイオンを分析する場合、イオンを特定して検査しなければならない。 ただし、本検討で得られた排水にはどのようなイオンが含まれているかが不明である。そこで、 試験方法として、分解能は 1mg/L 程度であるが数多くのイオンを調べることが出来る ICP-AES (Inductively Coupled Plasma- Atomic Emission Spectrometry)を使用することとした。表 6.7.2-1 に排水の状況を示す。表から、蒸留水を通水したケースでは、色の濃淡はあるものの、総 じて黄色を呈している。またこの色は試験を継続するにしたがって徐々に薄くなっていることが

分かる。一方、通水液に CaCl2 水溶液を用いた場合、排水は無色であった。

初期 ベントナイトの 排水の色 試験情報 乾燥密度 注入水 (左から右に時間経過) 種類 (Mg/m^3) 均質供試体の 蒸留水 Na 1.6膨潤圧試験 半径方向に密度分 2.0/1.2布を有する供試体 Na 蒸留水 (平均 1.6) の膨潤圧試験 2.0/1.2(平均 1.6) Na 蒸留水 ※1回目 上下方向に密度分 布を有する供試体 の膨潤圧試験 2.0/1.2(平均 1.6) Na ※2回目 1.PI 1.8. 1 . . Na 蒸留水 و و ورو و ورو ※上部供試体 און אות איד עד בעור אוני אות 高密度供試体の 直列膨潤試験 (1.8/1.4、平均 1.6) 1.4蒸留水 Na ※下部供試体 2.0Na 蒸留水 ※上部供試体 高密度供試体の 直列膨潤試験 (2.0/1.2、平均 1.6) 1.2蒸留水 Na ※下部供試体 過圧密供試体の 1.8→1.6(OC) 蒸留水 直列膨潤試験 Na ※上部供試体 (1.6(OC)/1.6(NC))

表 6.7.2-1 排水の状況

	Na	1.6(NC) ※下部供試体	蒸留水	
Na 型を飽和させた 後に CaCl2水溶液を 通水したケース(後述)	Na	1.6	蒸留水 → CaCl ₂ 1M	
Na 型に CaCl2水溶 液を通水したケース (後述)	Na	1.6	CaCl₂ 1M → 蒸留水	
Ca型にCaCl2水溶 液を通水したケース (後述)	Ca	1.6	CaCl₂ 1M → 蒸留水	
界面の影響を考慮 した破過圧測定試 験(後述)	Na(界面無し) Na/Na Na/セメント Na/花崗岩 ※全 4 ケース	1.6	蒸留水	CHEM C

※1 左から Na (界面無し)、Na/Na、Na/セメント、Na/花崗岩の順

平成 22 年度の試験対象は、排水が比較的多量(23cc)に得られている密度差を有する供試体 の直列膨潤量試験(Case2)の、低密度部からの排水を分析することとした。分析結果を表 6.7.2-2 示す。表から、Na イオンとSイオンが多量に検出されていることが分かる。既往の研究[9]に よれば、図 6.7.2-1 に示すようにベントナイト中にあるSイオンの供給源としてはパイライト (FeS2)が挙げられる。仮にSイオンがパイライト由来だとすると、陽イオンであるFeイオ ンも間隙水中に存在することになる。ただし、ベントナイト中のパイライトFeS2の内、Feイ オンはベントナイト中を通過する過程でNaイオンと陽イオン交換反応すると考えられるため、 交換された Na イオンがFe イオンの代わりに間隙水に放出され、Sイオンはそのまま間隙水に 存在するため、Na イオンとSイオンが排水に多量に存在するものと考えられる。

また、別の研究に拠れば[10]、非結晶のギプシウム(Gypsium、CaSO₄)の影響や、有識者によりミラビライト(Na₂SO₄)の影響も指摘されているが推定的な議論を脱し得ない状況であるため、排水の分析を進めて原因を究明する計画である。

				(単位:mg/L)
	分析・試験結果			
定性元素	Blank	12/28 7-2 上	検出下限値	分析・試験方法
	イオン交換水	mc 29.13		
銅	< 1	< 1	-	
鉄	< 1	< 1		
マンガン	< 1	< 1		
鉛	< 1	< 1		
亜鉛	< 1	< 1		
カドミウム	< 1	< 1		
クロム	< 1	< 1		
ニッケル	< 1	< 1		
アルミニウム	< 1	< 1		ICP 発光分光分析法
ほう素	< 1	1~10 (1)		
バリウム	< 1	< 1		
カルシウム	< 1	1~10 (2)		
コバルト	< 1	< 1		
カリウム	< 1	1~10 (3)		
リチウム	< 1	< 1		
マグネシウム	< 1	< 1		
モリブデン	< 1	1~10 (1)		
ナトリウム	< 1	100~1000 (580)		
リン	< 1	< 1		
アンチモン	< 1	< 1		
ケイ素	< 1	1~10 (5)		
チタン	< 1	< 1		
バナジウム	< 1	< 1	1	
硫黄	< 1	100~1000 (400)		

表 6.7.2-2 排水の ICP-AES 結果

備考: カッコ内の数値は参考値とする。



図 6.7.2-1 クニゲル V1 の鉱物組成[9]

6.7.3 平成 23 年度以降の排水の分析結果

平成 22 年度の排水の化学分析結果から、平成 23 年度の化学分析は陽イオンとして、Na、Ca、 Mg、K、Siイオン、陰イオンとして、Cl、SO4イオンをイオンクロマトグラフィーで調べること とした。分析対象は、直列膨潤量試験の Case2(初期乾燥密度 2.0Mg/m³と 1.2Mg/m³)の両供試体 からの排水と、Ca 型化が膨潤に及ぼす影響を調べている試験 Case1~3の各試験である。Case1 は、Na 型ベントナイトに蒸留水を通水した後に CaCl2 水溶液を通水したケースである。Case2 は、Na 型ベントナイトに CaCl2 水溶液を通水した後に蒸留水を通水したケースである。Case3 は、Ca 型化ベントナイトに CaCl2 水溶液を通水した後に蒸留水を通水したケースである。case3 は、Ca 型化ベントナイトに CaCl2 水溶液を通水した後に蒸留水を通水したケースである。さらに、 今年度は、平成 23 年度の試験結果の継続結果と、排水がある程度採取できた応力履歴が緩衝材の 膨潤に及ぼす影響試験の Case3 の排水も化学分析に供した。これは、一旦、乾燥密度 1.8Mg/m³ まで圧縮したのちに乾燥密度 1.6Mg/m³ まで膨潤させてから通常の膨潤圧試験を実施したケース である。

陽イオンとして、図 6.7.3・1 にナトリウムイオン、図 6.7.3・2 にカルシウムイオン、図 6.7.3・3 にカリウムイオン、図 6.7.3・4 にマグネシウムイオンの mol 濃度の経時変化を示す。さらに、陰 イオンとしては図 6.7.3・5 に硫酸イオン、図 6.7.3・6 に塩化物イオン、図 6.7.3・7 にケイ酸イオン の mol 濃度の経時変化を示す。

図から、蒸留水を用いたケースである直列膨潤量試験の上下供試体と応力履歴が緩衝材の膨潤 に及ぼす影響試験の Case3 では、ナトリウムイオンと硫酸イオンが多いことが分かる。これは、 平成 22 年度の IPC-AES の結果と整合している。

また、Ca型化が膨潤に及ぼす影響を調べている試験 Case1 と Case2 を比較すると、不飽和状態から CaCl2 水溶液を通水した方(Case2)が、一旦蒸留水で飽和させてから CaCl2 水溶液を通水したケース(Case1)に比べ、排水に含まれるナトリウムイオン量が多い。このことから、事前に蒸留水で飽和させることは、陽イオン交換反応を遅延させる働きがあると言える。

陰イオンで硫酸イオンが多いのは、クニゲルV1中に含まれるパイライトや非結晶のジプサム、 ミラビライトなどに起因するものと考えられる。また、塩化物イオンが多いのは、CaCl2 水溶液 に起因するものと、事前に人工的にCa型化させた際のCaCl2 水溶液が残留していたものと考え られる。また、有意な量のケイ酸イオンが計測されていることも特徴的である。特に、応力履歴 が緩衝材の膨潤に及ぼす影響試験のCase3 はケイ酸イオンが多く排水中に含まれている。この理 由としては、このケースは、一旦、乾燥密度 1.8Mg/m³まで圧縮したのちに乾燥密度 1.6Mg/m³ まで膨潤させており、高密度に締め固めたことによる影響が考えられる。図 3.5.2-5 に示した各種 の応力履歴の異なる緩衝材の膨潤圧の経時変化においては、応力履歴によって間隙水に電離して いる各種イオンの濃度が異なる可能性があり、単純に力学的な応力履歴の影響だけでなく、間隙 水の組成に対する影響も今後は調べる必要がある。



図 6.7.3-1 ナトリウムイオン濃度の経時変化



図 6.7.3-2 カルシウムイオン濃度の経時変化



図 6.7.3-3 カリウムイオン濃度の経時変化



図 6.7.3-4 マグネシウムイオン濃度の経時変化



図 6.7.3-5 硫酸イオン濃度の経時変化



図 6.7.3-6 塩化物イオン濃度の経時変化



図 6.7.3-7 ケイ酸イオン濃度の経時変化
- Mattias Åkesson, Ola Kristensson, Lennart Börgesson, Ann Dueck: THM modelling of buffer, backfill and other system components, Critical processes and scenarios, SKB Technical Report TR-10-11(2010).
- [2] Lennart Börgesson, Torbjörn Sandén : Piping and erosion in buffer and backfill materials Current knowledge, SKB Report R-06-80 (2006).
- [3] Torbjorn Sanden, Lennart Borgesson: Deep repository-engineered barrier system. Piping and erosion in tunnel backfill Laboratory tests to understand processes during early water uptake, SKB Report R-06-72 (2008).
- [4] (財)原子力環境整備促進・資金管理センター:平成19年度地層処分調査技術委託費高レベル放射性廃棄物処分関連処分システム工学要素技術高度化開発報告書,第一分冊,一遠隔操作技術高度化開発-(2/2)(2008).
- [5] 山本卓也,矢田勤,藤原斉郁,西村務,竹内靖典:粒状ベントナイト充填による狭隘部人工 バリア施工の検討その3-施工・品質管理方法の検討-,土木学会年次学術講演会(平成21 年9月)CS5-036 (2009).
- [6] Åberg A., Effects of water inflow on the buffer an experimental study, SKB Report R-09-29 (2009)
- [7] RWMC と SKB 社の Sorkshop (2013).
- [8] SKB社: KBS-3H Complementary studies 2008–2010, Technical Report TR-12-01 (2012).
- [9] 伊藤雅和,岡本真由美,鈴木啓三,他:ベントナイトの鉱物組成分析,原子力誌,36[11], 1055 (1994).
- [10] 藤田朝雄, 油井三和, 鈴木英明, 藤崎淳, 九石正美: 塩濃縮シミュレーションに関する研究, JAEA-Research 2007-017 (2007)