

堅置き・ブロック方式における緩衝材の流出量評価手法の検討

菊池広人*1 宇田俊秋*1 林大介*1 江守稔*1 木村駿*2

高レベル放射性廃棄物の地層処分において検討されている緩衝材ブロックを用いた処分孔堅置き方式では、緩衝材定置後から処分坑道の埋戻し材の施工完了までの間に、処分孔内へ流入する地下水の排水に伴い緩衝材の一部が流出し、人工バリアとしての機能に影響を及ぼす可能性が懸念されている。本研究は、SKBが提案するErosion modelを基に、わが国の地質環境への適用性を確認するとともに、工学的な判断（処分孔の利用可否や適切な対策の選択）を支援するための、緩衝材の流出量をより適切に評価できるモデルの開発手法の枠組みの構築を試みた。幌延 URL の試験孔を利用した原位置流出試験により、Erosion modelの基となる定流量条件による要素試験とは異なる、時間経過に伴う地下水の流量の低下や、緩衝材の流出が停止する現象を確認した。これらの現象から湧水量、周辺岩盤と処分孔の水頭差、水質、材料の特性、処分孔内の状態などの影響因子を把握した。これらの知見を踏まえて、原位置で把握が可能な情報である孔内外水頭差および孔内湧水量、緩衝材の流出が懸念される期間を主な引数とした流出量評価モデルを、水頭差を制御した定水位での要素試験に基づき整備した。本検討において構築した流出量評価モデルは、Erosion modelに比べてより現実的な評価に近づけることができた。また、一連の取組を通して流出量評価モデルの開発手法を構築するとともに今後の課題について整理した。

Keywords: 堅置き方式, 幌延 URL, 緩衝材, ベントナイト, 流出量評価モデル

In the vertical in-hole emplacement, using compacted bentonite blocks which is being considered for the geological disposal of high-level radioactive waste, there is concern that groundwater inflow into the disposal hole may result in the outflow of some of the buffer material. This phenomenon is anticipated to occur from emplacement of buffer material to completion of backfill material construction in the disposal tunnel. There are concern that the phenomenon may affect the function of the engineered barrier. This study attempted to construct a model for evaluating the erosion of buffer material that can be assessed from an engineering perspective in Japan's geological environments, using the erosion model proposed by SKB (Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Company) as a reference. In the in-situ erosion tests using the test holes of the Horonobe URL (Underground Research Laboratory), we confirmed phenomena such as a decrease in groundwater flow over time and the cessation of buffer material erosion, which differ from the element tests based on constant flow conditions that form the basis of the erosion model. We gained an understanding of influencing factors from these phenomena, such as spring water quantity, water level differences between surrounding rock formations and disposal holes, water property, material properties, and conditions inside the disposal hole from these phenomena. From these findings, the erosion evaluation model of buffer material was presented based on the results of element tests at a control to constant water level. The main parameters of the erosion evaluation model were the water head difference inside and outside the disposal hole and the spring water quantity inside the disposal hole, which can be obtained in-situ, and also took into account the period of concerns about the erosion of the buffer material. The erosion evaluation model developed in this study was able to approach a more realistic evaluation compared to the erosion model. In additionally, the study showed the development methodology and challenges of the erosion evaluation model.

Keywords: Vertical in-hole emplacement, Horonobe URL, Buffer material, Bentonite, Erosion evaluation model

1 はじめに

高レベル放射性廃棄物の地層処分では、数万年以上の長期間にわたり安全機能が維持されることを期待する人工バリアの1つとして、天然のベントナイトを主成分とする緩衝材が設置される[1,2]。緩衝材には、低透水性、コロイド過飽和、自己シール性、自己修復性ならびに放射性物質の収着といった機能が期待されている[1]。原子力発電環境整備機構（以下、「NUMO」という）が取りまとめた包括的技術報告書（以下、「NUMO-SC」という）[1]では、人工バリアの定置方法として堅置き方式と横置き方式が検討されており、前者にはブロック成形した緩衝材を処分孔内に積み上げる方法（以下、「堅置き・ブロック方式」という）、後者には横置き・PEM方式の設計オプションが示されている。

堅置き・ブロック方式は、地上施設で予め緩衝材ブロックを製作できるため、製造上の品質管理の容易性や原位置

作業負荷の低減が期待できる。一方、本方式では原位置での緩衝材ブロックの定置のためにブロック外周部と孔壁の間に隙間が設けられる。緩衝材の定置後から上部の処分坑道の埋戻し完了までの間に、処分孔内への湧水（地下水）を底盤から排水する場合の影響として、隙間を流れる湧水によって緩衝材の一部が浸食され処分孔から処分坑道に流出し、緩衝材の密度の低下ひいては人工バリアとしての機能が低下する可能性が懸念されている[1]。

緩衝材の施工直後の過渡期に着目した緩衝材の流出現象については、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社（以下、「SKB」という）が先行して検討を進めており、同社の検討条件では流出挙動に緩衝材部分の水みちの形成が関係することから、この現象を「*piping and erosion*」と称している[3]。

SKBは処分孔に設置した緩衝材の健全性を評価するために、緩衝材の流出量と処分孔への地下水の排水量の相関関係をべき関数によりモデル化（以下、「Erosion model」という）し、評価期間における緩衝材の総流出量を予測する方法を提案している[4-7]。

国内では、原子力環境整備促進・資金管理センターが、緩衝材ブロック外周部と孔壁の間の隙間を残置した条件や隙間にペレットを充填した条件でのカラム試験を実施し、パイピング現象とそれに伴う緩衝材の流出挙動に関する検討を進めている[8,9]。

A study of evaluation method for buffer material erosion in vertical in-hole emplacement by Hirohito KIKUCHI (kikuchi.hirohito@rwmc.or.jp), Toshiaki UDA, Daisuke HAYASHI, Minoru EMORI, Shun KIMURA

*1 原子力環境整備促進・資金管理センター
Radioactive Waste Management Funding and Research Center
〒104-0044 東京都中央区明石町 6-4

*2 日本原子力研究開発機構
Japan Atomic Energy Agency
〒098-3224 北海道天塩郡幌延町北進 432-2

(Received 29 January 2024; accepted 28 May 2024)

これまでに提案されているモデル[4-7]は、北欧の地質環境を踏まえて SKB が導入した定流量条件による要素試験（流量を一定にした強制注水条件による試験）をベースとしているため、わが国の地質環境への適用性を確認し、必要に応じて適切なモデルを開発する必要がある。

本研究では、実際の地下環境における緩衝材の流出挙動をより現実的に評価でき、かつ、将来の処分事業において処分孔の利用可否や適切な対策（施工技術オプション[10]）の選択といった工学的な判断を支援するための、緩衝材の流出量を評価するモデルの開発や開発手法の枠組みの構築を目的とした。そのため、Fig.1 に示す幌延深地層研究センターの地下施設（以下、「幌延 URL」という）の 350 m 試験坑道 5 に設けられた試験孔 2（以下、「試験孔」という）を利用した原位置での試験を実施し、実環境における緩衝材の流出挙動の把握および試験結果と Erosion model との比較を通して課題を抽出し、緩衝材の流出量の評価モデルの開発手法について検討を進めた。なお、緩衝材の流出抑制を兼ねた緩衝材の施工方法として湧水抑制のための防水シートやケーシングの設置或いは反力を伴う上蓋の設置といった代替オプションを想定し得るが、ここでは放射線環境下での原位置作業手数の合理化の観点から、原位置での追加作業を要しない方法を基本として検討を進めた。

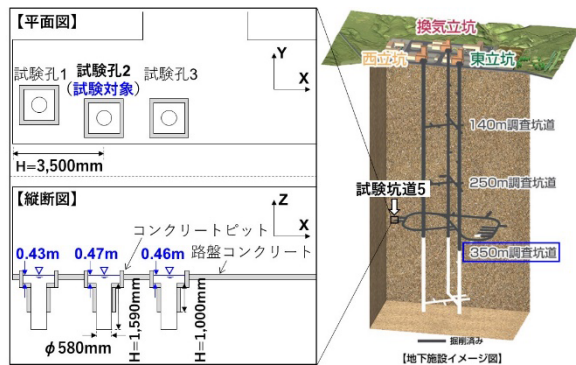


Fig.1 The layout of Test hole No.2 and Test tunnel No.5 in the Horonobe URL (Adapted from the Horonobe URL website[11], Some additions)

2 原位置流出試験を通じた Erosion model の適用性の確認と課題

上述した幌延 URL の試験孔を利用した実規模（例えば、[1,2]）の 1/4 スケールの原位置での流出試験（以下、「原位置流出試験」という）を通して、自然湧水環境下における緩衝材の流出挙動の把握および Erosion model の適用性を確認するとともに、示唆された課題について整理した。

2.1 試験孔の特徴

本試験を実施した幌延 URL 深度 350 m の地質環境は、新第三紀の多孔質な堆積岩（珪質泥岩を主体とする稚内層）が分布しており、地下水流動の経路となり得る程度の連続性・連結性を有する亀裂も存在する場である[12]。Fig.2 に原位置流出試験に用いた試験孔の寸法および試験孔の水位を示す。試験孔は、路盤に設置された深さ 500 mm 弱のコン

クリートピット底盤から掘削しており、直径 580 mm、深さは 1,590 mm である。深さ約 1,000 mm までモルタルで補修しているため、緩衝材を設置する 500 mm 以浅の壁面は凹凸が少なく、地下水の流入は確認されていない[13]。500 mm 以深では、6 か所の割れ目から地下水の流入が観察されており、亀裂帯の一部から地下水が染み出ている。試験孔付近の地下水の塩分濃度は 0.87%，塩化物イオン濃度は 9.8×10^{-2} mol/L の塩水系地下水であり、地下水に含まれるカルシウムはナトリウムの 1/50 以下である[14]。

2.2 原位置流出試験装置および試験方法

Fig.2 に原位置流出試験装置の概略図を示す。緩衝材が設置されているモルタル補修部より以深にはケイ砂を敷き詰めているため、試験孔へ流入する地下水は、孔底から一様に上昇する。試験孔の水位は、時期によって変動するものの、コンクリートピット底盤から上に 0.43~0.47 m の位置で推移する。試験孔からの排水量（孔口からの溢水量）は、0.4 L/min である。緩衝材の形状は中空円柱状のドーナツ型とし、緩衝材と試験孔の隙間が 20 mm になるように外径を 540 mm、内径を 210 mm とし、高さは 500 mm とした。また、緩衝材ブロックは、周方向を扇形に 8 分割、高さ方向を 5 分割したものであり、金型モールドを用いて静的な圧力をかけて締め固める方法で製作した。

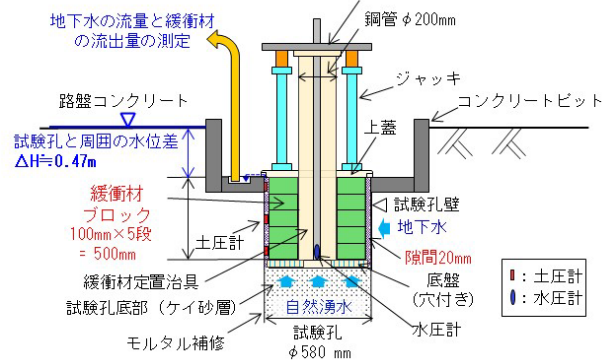


Fig.2 Schematic of in-situ erosion test

緩衝材の材料には、Na 型ベントナイトであるクニゲル V1®（クニミネ工業（株））を用い、混合材にケイ砂 3 号（日陶連原料（株））とケイ砂 5 号（日陶連原料（株））を 7 : 1.5 : 1.5 の乾燥質量比で混合したケイ砂 30 wt% 混合ベントナイトを使用した。乾燥密度は、地下水の浸潤に伴い緩衝材が膨潤変形し、緩衝材ブロックと試験孔との間に設けた隙間を充填した後に乾燥密度が 1.6 Mg/m^3 になるように初期乾燥密度を 1.92 Mg/m^3 に設定した。試験装置として準備した緩衝材定置治具は、緩衝材ブロックを載せる底盤、緩衝材ブロックの膨出を抑制する上蓋、およびオーバーパックを模擬した円柱状の鋼管で構成し、上蓋をフランジとジャッキで抑える構造となっている。試験装置底盤には、孔底から地下水が供給されるように $\phi 10 \text{ mm}$ の水抜き穴が 15 mm 間隔に千鳥配置されている。底盤の上に圧縮成形した緩衝材ブロックを 5 段に積み重ねた後に膨出抑制の上蓋を取り付け、試験装置を定置治具に組み立てた。試験孔への

設置に際しては、試験孔の深さが 551 mm になるようにケイ砂 3 号を敷き詰め、緩衝材ブロックが冠水しないように排水処理ポンプを用いて試験孔の地下水を排水し、組み立てた試験装置を試験孔内へ設置した。試験は排水を停止することにより試験開始とした。

試験開始後、コンクリートピットの底面に設けた試験孔を囲う円周状の溝とそれに繋がる集水桝からポンプアップして回収した地下水の総流量（排水量）を測定するとともに、その一部を吸光度計の測定値を用いて地下水に含まれる緩衝材からの流出物の濃度（以下、「流出物濃度」という）を求めた[15]。また、試験装置の水平方向中心の円柱内底盤に設置した水圧計（オサシ・テクノス製：DS-1）により緩衝材底面の水圧を測定した。さらに、緩衝材ブロック上面から 50 mm、250 mm、450 mm の試験孔壁面に土圧計（東京測器研究所製：KDE-2MPa）を設置して試験期間中の地下水の浸潤に伴い緩衝材ブロックが孔壁との隙間へ膨潤し孔壁側に接触することによって生じた圧力（以下、「膨潤圧」という）を測定した。

2.3 原位置流出試験の結果

2.3.1 試験孔からの排水量と水圧および緩衝材の流出量

Fig.3 に試験孔からの排水量と緩衝材ブロック底部の圧力水頭の経時変化を示す。試験開始直後の圧力水頭は、緩衝材ブロック上面の位置から排水されるため、緩衝材ブ

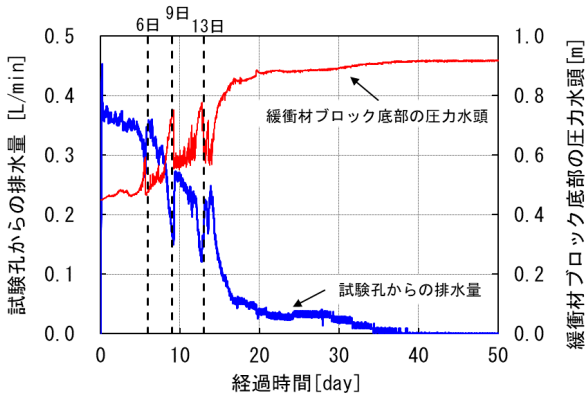


Fig.3 Drainage amount from the test hole and pressure hydraulic head at the bottom of the buffer block

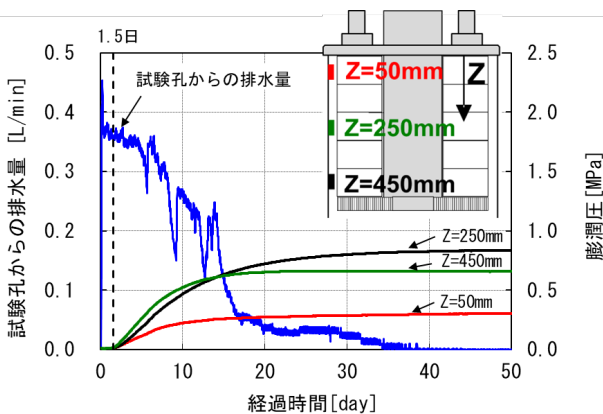


Fig.4 Drainage amount from the test hole and swelling pressure

ック底面の圧力水頭は緩衝材の高さ (500 mm) と等しい (水圧計設置位置 500 mm の差を考慮)。また、試験開始直後 (3 ~ 6 時間後) の排水量は 0.39 L/min であり、試験開始前に測定した 0.40 L/min と同程度であった。その後、Fig.4 に示す試験孔からの排水量と膨潤圧から、膨潤圧の発生した時点で孔壁に緩衝材ブロックが接触し、その後は膨潤圧が増加していることから隙間が徐々に閉塞 (自己シール) し、それに伴い排水量が低減するとともに圧力水頭は増加 (Fig.3) する傾向を示した。

また、Fig.3 から試験開始から約 6 日、9 日、13 日後に、圧力水頭および排水量にスパイク状の変化が確認できる。同挙動は、緩衝材の膨潤による隙間の縮小に伴い排水量が減少するが、水圧が上昇して膨潤圧以上の水圧が発生することにより隙間が拡大する現象が繰り返されたものと推測される。排水量は時間の経過に伴い徐々に低下し、44 日後にはゼロとなった。この時の圧力水頭は、初期の 0.47 m から 0.45 m 程度増加した 0.9 m であり、試験孔の通常の水位と一致する。この間の孔内の緩衝材の状態変化として、以下が推察された。

- ・ 緩衝材の膨潤が進行し、緩衝材ブロックの外周部が孔壁面に接触するまでの間、徐々に地下水の流路断面が減少して流路抵抗の増加とともに圧力水頭が上昇する。
- ・ その後、緩衝材が孔壁に接触するタイミング (Fig.4 に示す深度別の 3 か所に設置した土圧計 (Z=50, 250, 450 mm) が水の浸潤に伴い約 1.5 日程度経過した後、膨潤圧を感知したタイミング) 以降に、残存する隙間が水みちとして収斂しつつ、その水みちが縮小と拡大を繰り返す。
- ・ 最終的には緩衝材の膨潤の進行に伴い残存する水みちが閉塞する。

Fig.5 に緩衝材の総流出量と流出物濃度の経時変化を示す。ここで緩衝材の総流出量とは、試験孔からの排水に含まれる流出物の濃度と排水量から次式(1)により求めた。

$$M_s = \sum_{i=1}^n C_i Q_i \Delta t_i \quad (1)$$

M_s は緩衝材の総流出量 (mg)、 Δt_i は地下水の採水間隔 (min) であり、 C_i は排水中の流出物濃度 (mg/L)、 Q_i は採水間隔における排水量 (L/min) である。 i は採水回数であり採水間隔

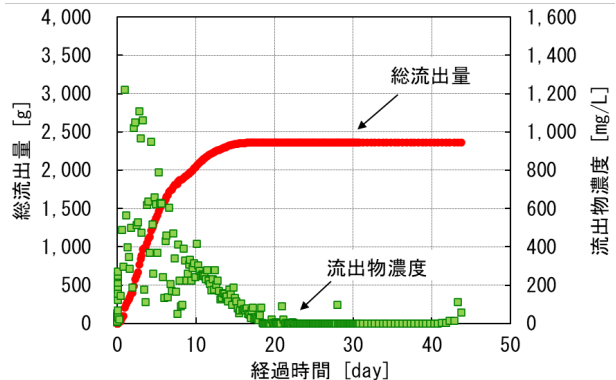


Fig.5 Total outflow of buffer material and effluent concentration from buffer material

は、試験開始から3時間は10分ごと、その後30日間は240分ごととし、それ以降は480分ごととした。

試験開始後、緩衝材の流出物濃度は、緩衝材表面への不均質な浸潤や膨潤に伴う微細粒分の水中への分散や水流による移送の影響により、ばらつきが生じるも経時的に増加する。その後、徐々に減少する傾向を示し、44日目以降は排水量がゼロ (Fig.3) となったため採水を終了した。なお、21, 28, 44 日目にポンプや集水桝に付着した流出物を採取して流出物濃度に加えたため、若干高い値を示した。

緩衝材の総流出量は、試験開始から15日以降はほぼ一定となっている。これは、緩衝材ブロックと試験孔の隙間が縮小することで、流出物濃度、排水量がともに低下したためである。排水量の経時変化を見ると試験開始から約15日頃までは試験孔壁と緩衝材の隙間で水みちの縮小と拡大を繰り返しながら徐々に流量は低下しており (Fig.3), その間の緩衝材の総流出量は最終的な総流出量の約97%を占める。

このような実環境 (自然湧水環境) における試験結果から、緩衝材の総流出量の評価では、初期 (排水量が多い期間) の評価が重要であることが示唆されるとともに、これまでに Erosion model のベースとしていた定流量条件による要素試験とは異なる、次のような事項を確認した。

- ・ 緩衝材と孔壁の隙間の縮小やその後に残存する水みちの縮小に伴い、初期の隙間や水みちを介した地下水の排水量は経時的に変化する。
- ・ 緩衝材の流出に影響する孔内への湧水の駆動力となる地下水の水圧は試験孔の水位が上限となり、隙間の縮小により水圧が上昇し、上限に達すると湧水は止まる。

2.3.2 原位置流出試験結果と Erosion model との比較

緩衝材の総流出量を予測する方法として前述した SKB が提案する Erosion model (式(2)) を以下に示す。

$$M_s = \alpha \times (M_w)^\beta \quad (2)$$

ここで、 M_s は緩衝材の総流出量(g), M_w は地下水の総流入量(L)である (総流入量は原位置流出試験の総排水量に相当)。 α (g/L), β (-)は、総流入量に対する総流出量の変化率を表すパラメータであり、これらは定流量条件による要素試験に基づき設定している。

SKB が提案する Erosion model は、念頭に置いている地下環境 (出現頻度は少ないものの亀裂が支配的な花崗岩) における許容孔内湧水量の基準値を安全側に設定することが目的である。式(2)の入力となる地下水の総流入量は、1つの処分孔における孔内湧水量が埋め戻した処分坑道の空隙を満たす量であり、その間は一定の湧水量が継続することを仮定したものである[4,5]。

国内におけるこれまでの研究では、国内産のベントナイト (クニゲル V1) を対象として、SKB のモデル化手法を踏襲した定流量条件によるさまざまな要素試験に基づき、緩衝材の流出量を定量評価するモデルが提示されている[15]。また、NUMO-SC[1]では、 $\alpha = 9.0$ g/L, $\beta = 0.85$ を設定した Erosion model に基づく緩衝材の許容流出量を処分孔の利用可否の判断指標としている (総流出量を保守的に評価でき

るように、 α , β が設定されている)。併せて、緩衝材の定置後、上部の処分坑道を埋め戻すまでの期間 (有限期間) において一定量の緩衝材の流出を許容 (許容流出量) することや処分孔環境に応じて適切な施工対策を導入して処分孔の利用率を高めるといった考え方も示されている。

Fig.6 に原位置流出試験の結果と Erosion model ($\alpha = 9.0$, $\beta = 0.85$) との比較を示す。Fig.3 の原位置流出試験結果を踏まえて、排水量がゼロとなる44日後 (地下水の総排水量 7,079 L) における総流出量を Erosion model で求めた結果、原位置流出試験の実測値 2.37 kg に対して、式(2)から求めた評価値は 16.9 kg となり、実測値の7倍以上となる。

このような比較結果から、Erosion model をわが国の地質環境或いは処分事業へ適用する際の課題として、次のようなことが示唆された。

- 1) 定流量条件による要素試験をベースとした Erosion model は、条件や仕様 (緩衝材の材料および形状、隙間幅など) の異なる試験装置を用いた結果に基づくものであり、今後、評価したい対象 (原位置流出試験や将来の実環境) や条件等が必ずしも一致しない点において、モデルの適用性が不透明である。
- 2) SKB が提案する Erosion model は、処分孔の利用可否判断のために、許容孔内湧水量の基準値を安全側に設定することを目的としており、原位置における湧水量を正確に評価することを目的としていない。
- 3) Fig.3 に示されるように、原位置環境下では時間経過に伴い孔内からの流量が低下することから、わが国の地質環境を考慮した場合、定流量条件による要素試験の結果に基づく Erosion model は、緩衝材の総流出量を過大に評価する可能性がある。

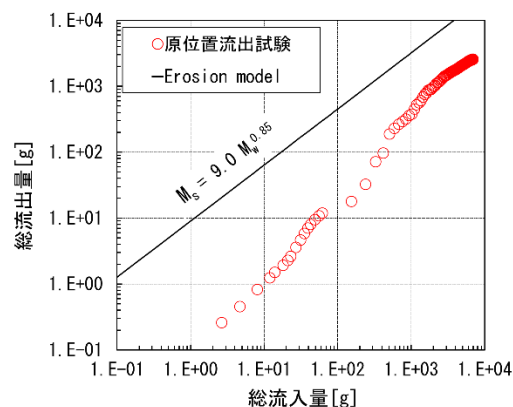


Fig.6 Comparison of in-situ erosion test results and erosion

一般的に地下の湧水量が多いことが想定されるわが国の地下環境において処分孔の利用率を高めるためには、条件や仕様ならびに処分孔の環境条件に応じて、緩衝材の流出を抑制できる適切な対策を施すことが望まれる。そのためには、処分孔内への湧水量、周辺岩盤と処分孔の水頭差、その他に緩衝材の膨潤特性に影響を及ぼす水質、材料の特性、処分孔内の緩衝材や隙間の寸法、処分孔によって異なる湧水亀裂の分布や孔壁の凹凸など、これらの影響因子を踏まえた、より精緻な流出量の評価方法の開発が重要である。

3 原位置流出試験結果を踏まえた研究課題の設定と研究方針

前述した課題を踏まえ、以下の方針のもとで緩衝材の流出量評価モデルの検討を進めた。

- 1) 緩衝材の総流出量を過大に評価する Erosion model (定流量条件による要素試験に基づき開発)とは異なり、実環境における緩衝材の流出挙動をより現実的に評価できるモデルを開発する。
- 2) 第1章で述べたように、検討対象とする緩衝材施工方法は、原位置での追加作業を要しない方法を基本とする。但し、緩衝材ブロックの施工時に設ける隙間の処理方法については、①未充填のままとする、②ケイ砂を充填する、③ペレットを充填するという3つの隙間処理オプションを念頭に置く[10,16]。本稿では、①の未充填オプションに関する検討結果について報告する。
- 3) 緩衝材の流出挙動に影響を及ぼす多様で複雑な影響要因のすべてを考慮したモデルではなく、将来の処分事業において処分孔の利用可否や適切な対策(施工技術オプション)の選択といった工学的な判断を支援できるモデルを開発する。
- 4) モデル開発のための実環境や実規模での多数の試験実施は現実的ではないことから、より現実的なモデル開発手法の構築を指向する。

以上を踏まえて本研究では、原位置で把握が可能な情報である、孔内外水頭差 H 、孔内湧水量 Q 、緩衝材の流出が懸念される期間 t を主な引数とした関数 $M_{BENT}(t, H, Q)$ として総流出量を評価できるモデル(以下、「流出量評価モデル」という)を念頭に置き、要素試験で基本モデル(以下、「ベースモデル」という)を開発し、実環境や実規模へと拡張することとした。このような流出量評価モデルの開発手法を構築することが本研究の主たる研究課題であり、実環境における緩衝材の流出挙動をより現実的に表現できる要素試験方法を開発することも重要な課題の一つである。

第2章に整理した実環境における原位置流出試験の挙動から、緩衝材の流出に影響する孔内湧水の駆動力である孔内外水頭差は(対象期間中の岩盤側の水頭は概ね一定)、緩

衝材の浸潤に伴う膨潤(および膨潤圧の発現)による流路抵抗の増大とともに、徐々にその駆動力が相殺され流量が減少していくことが窺える。このような挙動を表現するために、ベースモデルの開発に必要な要素試験を以下に留意して、Fig.7のように設計した。

- ・要素試験は、実規模の一部を切り出した緩衝材ブロック界面と孔壁の間の微小領域を対象とする。
 - ・要素試験では、緩衝材表面に作用する水圧や重力を一律に分布させ、緩衝材の浸潤過程における流出挙動を単純化して把握・表現するため、隙間(岩盤と緩衝材の隙間を想定)を縦方向ではなく横方向に装置を設置する(浸潤とともに緩衝材表面から崩壊し、隙間に沈降する挙動[17]の排除も意図)。
 - ・水質の影響に関しては、幌延 URL の場合、塩水系の地下水(イオン種、イオン濃度、pHなど)の影響により細粒分が凝集し、団粒化する可能性があるが、本ベースモデル開発では、一旦、その影響を除外する。
- なお、実環境との差(上記の要素試験で除外した影響や効果)については、別途、それらの効果を考慮した要素試験を実施してベースモデルの拡張パラメータとして加味することとした。

Fig.7に示す要素試験は定水位条件により実施し、緩衝材ブロックの界面が孔壁に到達するタイミング(変曲点 T_a)を境に、変曲点 T_a までの期間を T_1 、変曲点以降の期間を T_2 と区分してデータの整理と分析を行った。

4 緩衝材の流出量評価モデルの検討

4.1 要素試験装置および試験方法

Fig.8に要素試験装置の概略を示す。既述の原位置流出試験の緩衝材ブロックと同様に、供試体にはケイ砂を30wt%混合したバントナイトを使用した。供試体の寸法は高さ200mm、幅200mm、奥行20mmとした。乾燥密度は供試体が膨潤変形により試験セルに設けた20mmの隙間を充填した後に乾燥密度が 1.6 Mg/m^3 になるように初期乾燥密度を 1.92 Mg/m^3 に圧縮成形した。また、含水比は約10%に

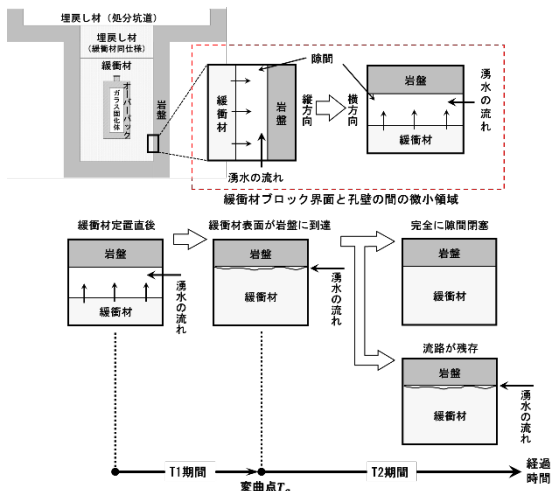


Fig.7 Concept of element test

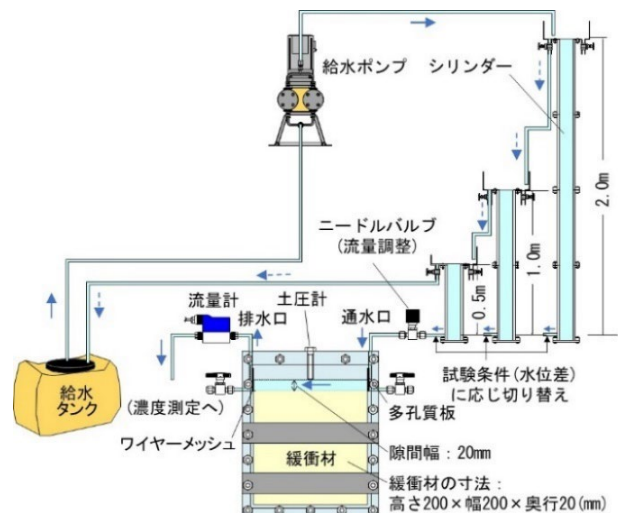


Fig.8 Schematic of element test equipment

調整し、通水液にはイオン交換水を使用した。通水口側に多孔質板、排水口側にワイヤメッシュを設置した。

初期流量の設定は、原位置流出試験と要素試験の流路(隙間)断面積比 ($3.5 \times 10^{-2} \text{ m}^2 / 4.0 \times 10^{-4} \text{ m}^2$) により流量を換算し、1, 10, 20 mL/min とした。流量調整は、通水口手前に設置したニードルバルブで行った。初期流量の違いは原位置における試験孔周辺の水力条件の違いに伴う孔内湧水量の違いを表現している。また、水頭差は、給水ポンプでシリンダーへ常時給水し、オーバーフロー分は給水タンクへ戻る経路によって、定水位を維持した。水頭差の設定は、上述する原位置流出試験の圧力水頭で設定した 0.5 m を下限値として、坑道高さを踏まえて現実的に想定される幅として、0.5, 1.0, 2.0 m とした。試験装置から排水される流量は、排水口の直後に設置した流量計で測定した。緩衝材が膨潤し、孔壁(試験装置上部)へ到達するまでの時間は、試験装置上部に設置した土圧計により管理した。

試験ケースは初期流量と水頭差を組合せた合計 9 ケースとし、緩衝材の総流出量(g)、流出物濃度(mg/L)、排水流量(mL/min)、膨潤圧(kPa)の経時変化を取得した。試験期間は、総流出量の収束を以て、試験終了とした。

4.2 要素試験の結果

ここでは水頭差 1.0 m、初期流量 10 mL/min の試験結果を一例として、試験開始直後から緩衝材の膨潤圧発生までの期間 (T₁) および膨潤圧発生以降の期間 (T₂) に区分して試験結果 (Fig.9) を説明する。

T₁ 期間は、膨潤圧の結果より試験開始から約 13 日後までと判断できる (Fig.9 下図)。その間、排水流量は右肩下りに減少し (Fig.9 下図)、流出物濃度は期中半ばにピーク

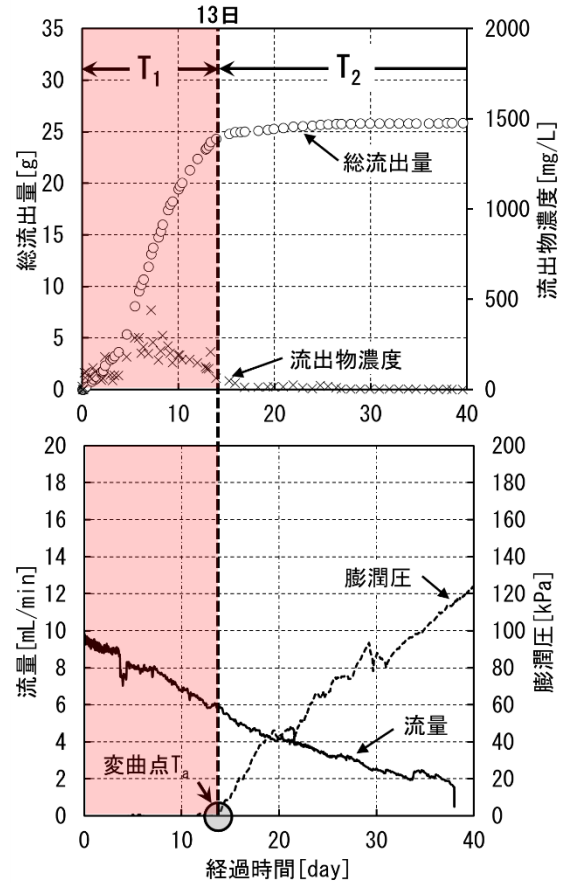
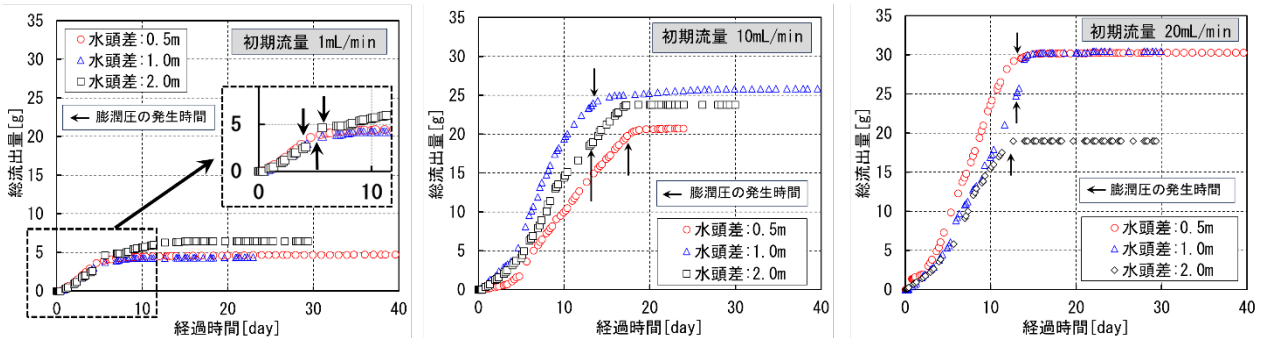
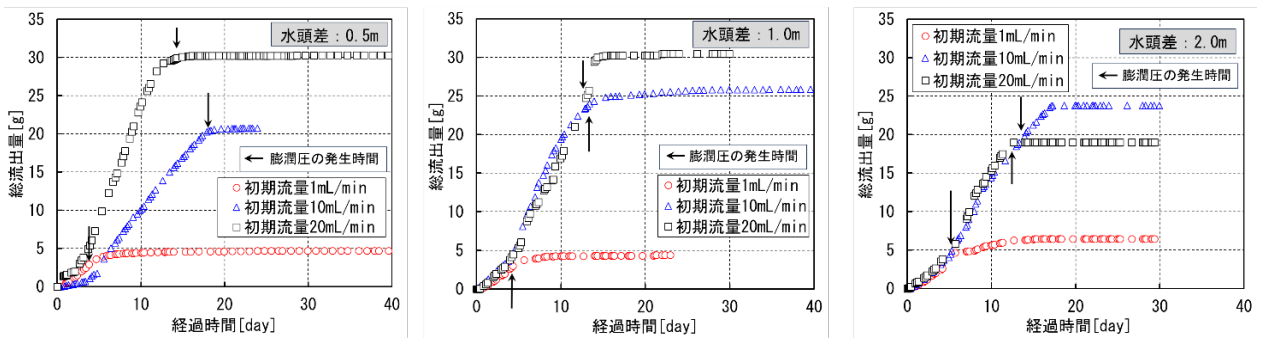


Fig.9 Results of element test with controlled water head (Water head:1.0 m, Initial flow rate:10 mL/min)



(a) Initial flow rate



(b) Water head

Fig.10 (a) Initial flow rate and (b) water head relative to total outflow

クアウトした後、期中後半でゼロに近づく (Fig.9 上図)。したがって、 T_1 期間の緩衝材の総流出量 (排水流量, 流出物濃度, および時間の積) は, 期中前半で増分が著しく, 期中後半で緩やかな傾向を示す。 T_1 期間の総流出量は, 最終的な総流出量 (全体量) の 93% を占めており, T_1 期間に集中していることがわかる。 T_2 期間は (約 13 日以降), T_1 期間と同様に排水流量は時間の経過と共に減少し (Fig.9 下図), 流出物濃度はゼロ付近で推移した。したがって, T_2 期間の緩衝材の総流出量は, 経時的に微増に留まり, 最終的な総流出量 (全体量) の 7% 程度となった。最終的な総流出量のうち, T_1 期間が大部分を占める傾向は, 全試験ケースで確認され (Fig.10), 原位置流出試験 (Fig.5) の傾向とも整合する。

各試験結果について, Fig.10 に示すように制御パラメータ (初期流量, 水頭差) ごとに整理した結果, 初期流量 20 mL/min, 水頭差 2.0 m に関しては, 他の初期流量 20 mL/min に比べ, 早期に膨潤し隙間を閉塞したため [16], 総流出量が低い値を示すものの総流出量との相関性を確認したところ, 膨潤に伴う閉塞速度に留意が必要だが水頭差と比べて初期流量との相関が比較的強いことが窺える。

このような傾向を踏まえ, 流出量評価モデルの開発では, 緩衝材の流出量に対して相対的に影響が大きい初期流量の影響を考慮して, 孔内湧水量 Q , 緩衝材の流出が懸念される期間 t を指数とした関数 $M_{BENT}(t, Q)$ で一般化を試みることにした。

4.3 緩衝材の流出量評価モデルの開発

4.3.1 要素試験に基づくベースモデルの整備

要素試験で条件ごとに得られた緩衝材の総流出量をデータセットとして, 緩衝材の総流出量を予測評価するためのベースモデルを整備した。 Fig.9 や Fig.10 に示されるような非線形グラフのパターンであれば, 例えば, シグモイド関数やロジスティック曲線などの適用が考えられるが, こ

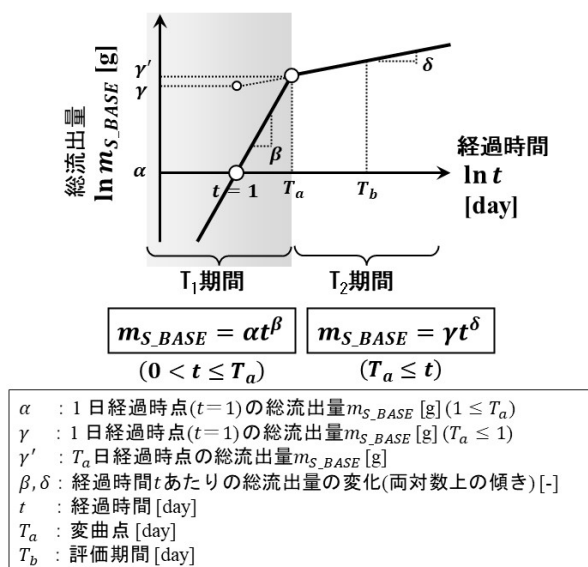
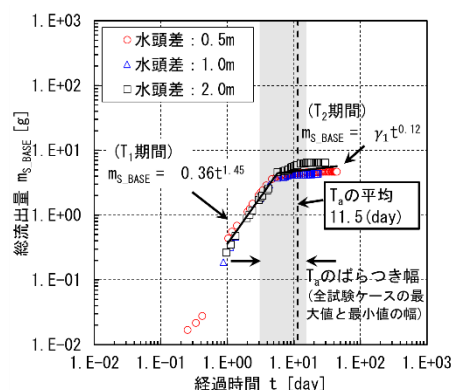


Fig.11 Conceptual diagram of the base model with power function

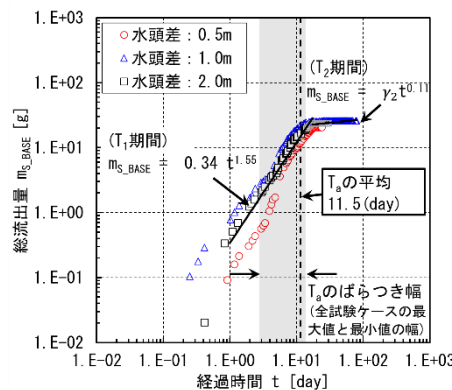
れらは未知数である収束値 (最終的な総流出量) を入力情報として与える必要がある。そのため, これらのモデルを用いて 1 つの式で定式化するのではなく, Fig.11 に示すように T_1 期間と T_2 期間に区分して, べき関数 (累乗近似) により定式化した。

(1) T_1 期間

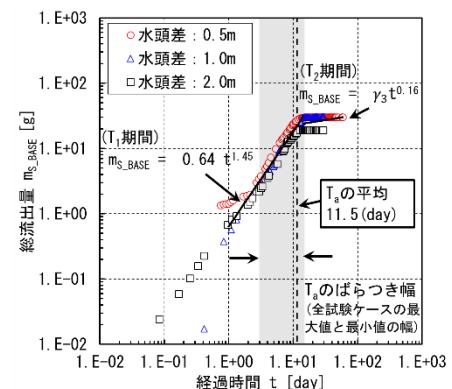
Fig.12 に T_1 期間における初期流量ごとの総流出量の経時変化を示す。試験開始から 1 日までのデータに関しては, 全体の傾向に対して測定点のばらつきが大きい。その原因として緩衝材ブロックの界面からベントナイトの微粉末が先行的に流出することが考えられる, 微粉末の量や分布は供試体ごとに異なる可能性があるため, T_1 期間の総流出量を定式化する際は, 試験開始 1 日経過後からのデータを用いて累乗近似 ($m_{S, BASE} = \alpha t^\beta$) する。



(a) Initial flow rate 1 mL/min



(b) Initial flow rate 10 mL/min



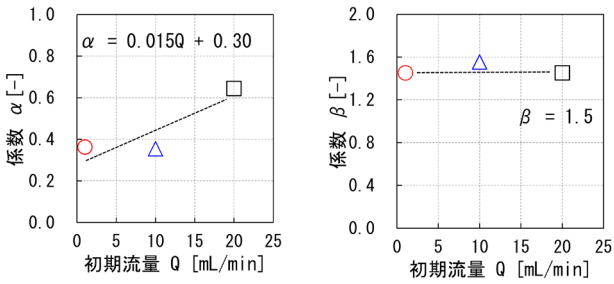
(c) Initial flow rate 20 mL/min

Fig.12 Coefficient setting for base model

係数 α は試験開始から1日経過した時点の総流出量を表しており、初期流量との相関性が確認できる (Fig.13 (a)). 同図から、初期流量の差が界面でのせん断効果や移送効果に影響することが示唆される. 係数 β は経過時間 t あたりの総流出量の変化を示しており、初期流量に関わらず一定の値を示す (Fig.13 (b)). したがって、係数 α には初期流量を引数とした関数 ($\alpha=0.015Q+0.30$, Q は初期流量[mL/min]) を、係数 β には平均値 ($\beta=1.5$) を設定した.

以上から、 T_1 期間の総流出量を式(3)で表現する.

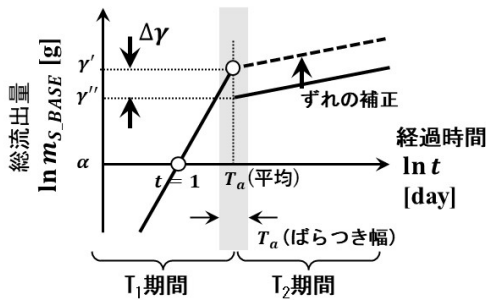
$$m_{S_BASE} = (0.015Q + 0.30)t^{1.5} \quad (3)$$



(a) Coefficient α (b) Coefficient β
Fig.13 Coefficient setting for α and β

(2) T_2 期間

Fig.14に T_2 期間における初期流量ごとの総流出量の経時変化を模式的に示す. T_2 期間の総流出量の定式化についても、累乗近似 ($m_{S_BASE} = \gamma t^\delta$) での表現を試みるが、Fig.14に示すような T_1 期間と T_2 期間の不連続部 ($\Delta\gamma$) のずれを解消する必要がある. すなわち、変曲点 T_a (日)における総流出量 (係数 γ') の値について、 T_1 期間と T_2 期間における各式で得られる値を連続的に整合させる必要がある.



$\Delta\gamma$: T_1 期間と T_2 期間の不連続部
 γ' : 変曲点 T_a (日)における総流出量 m_{S_BASE} [g]
 γ'' : 変曲点 T_a (日)における不連続部のずれの位置
 T_a (ばらつき幅) : 全試験ケース T_a の最小値と最大値の幅

Fig.14 Setting the discontinuity between the T_1 and T_2 periods (Coefficient γ')

係数 γ' の値を式(4)で $t = T_a$ とした時の値とすれば、試験開始から1日経過した時点の総流出量 γ と係数 γ' の間には、 $\gamma' = \gamma T_a^\delta$ の関係が成り立つことから (Fig.11), 定式化に必要なとなる γ は式(5)を用いて決定することができる.

$$\gamma' = (0.015Q + 0.30)T_a^{1.5} \quad (4)$$

$$\gamma = \gamma' / T_a^\delta \quad (5)$$

T_2 期間における係数 δ は、総流出量と経過時間の傾きを表しており、Fig.12に示す T_2 期間のデータを用いて累乗近似で取得した. 係数 δ と初期流量との関係は、初期流量に関わらず一定の傾きを示す (Fig.15).

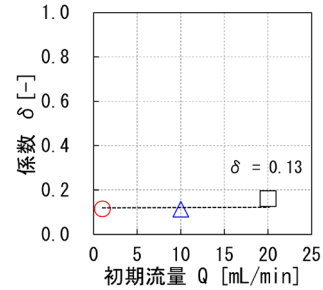


Fig.15 Coefficient setting for δ

したがって、係数 γ は式(5)で求めることとし、係数 δ には平均値 ($\delta=0.13$) を設定した.

以上から、 T_2 期間の総流出量を式(6)で表現する.

$$m_{S_BASE} = (0.015Q + 0.30)T_a^{1.37}t^{0.13} \quad (6)$$

なお、全試験ケースで取得された変曲点 T_a の発現タイミングは、Fig.12に示すようにばらついており、緩衝材表面の不均一な膨潤挙動などが要因と考えられる.

今回の試験ケース数では、流量との関係性が明瞭化できていないため、ここでは全試験ケースで取得された T_a の平均値 ($T_a=11.5$) を設定した.

4.3.2 ベースモデルの拡張

ベースモデルから原位置流出試験スケールへの拡張を試みた. スケールについては、Fig.16に示すように緩衝材と孔壁が接触する面積 (以下、「接触面積」という) の比率でアップスケーリングさせる. すなわち、ベースモデルにおける接触面積 $4.0 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ に対する原位置流出試験スケールにおける接触面積 $9.1 \times 10^{-1} \text{ m}^2$ の面積比 228 倍を、ベースモデルで推定した総流出量 m_{S_BASE} に乗ずることで表現する.

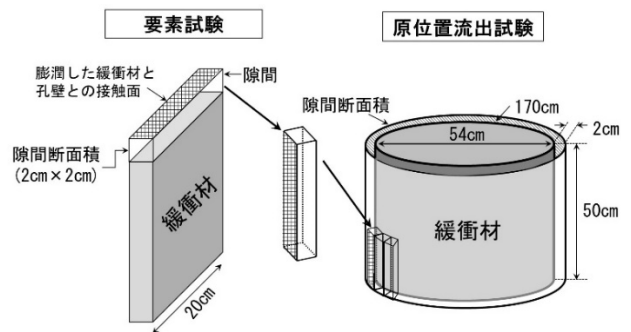


Fig.16 Extension to in-situ erosion test scale (Schematic diagram)

また、水質および縦横の違いによる影響（要素試験はイオン交換水、横向き）については、それぞれの効果を加味した要素試験結果との差分から補正値を取得して拡張パラメータとしてモデルに反映するため、塩水系の幌延地下水を模擬した地下水を用いた試験と Fig.8 に示す試験セルを縦置きにした試験（イオン交換水を使用）が実施されている[15]。これらの試験では、要素試験のサイズや装置との関係から、

- ・塩水系の地下水（イオン種、イオン濃度、pH など）の影響による細粒分が凝集・団粒化する可能性（その結果、試験装置が目詰まりする可能性）
- ・縦置き：微細粒分の重力沈降に伴う隙間の目詰まりや流路断面における流速分布の変化の可能性

といった事項が試験結果から示唆された[15]。しかし、これらの補正値を検討するために必要となる試験の再現性や信頼性を得るための試験点数が確保されていないため、水質や縦横の違いに関する拡張モデルを構築するには課題が残っていると考えられる。そのため本研究では、水質および縦横の違いによる効果（影響）は、ベースモデルの拡張に反映しないこととした。

5 緩衝材の流出量評価モデルの適用性確認

前章で整備した流出量評価モデルについて、既出の原位置流出試験結果と比較し、モデルの適用性を確認した。

評価期間 t （緩衝材の定置後、上部の処分坑道を埋め戻すまでの期間）は、NUMO-SC に示される新第三紀堆積岩類において想定されている 284 日と設定した[1]。なお、原位置流出試験は、試験期間が 125 日であるが、40 日以降、排水（流出）が停止し続けているため、125 日以降もこの状態が持続するものと仮定した。Fig.17 に原位置流出試験結果ならびに開発した流出量評価モデルと Erosion model による評価結果を示す。流出量評価モデルによる総流出量は、試験開始から 4 日までは、原位置流出試験と同じ軌跡を示すが、4 日から 10 日程度まで立ちあがりが増加し、その後、漸増する挙動を維持する。Erosion model の総流出量も同様に試験開始から 10 日程度までは、原位置流出試験と同じ軌跡を示すが、それ以降も上昇傾向を示す。評価期間 284 日後における総流出量は、原位置流出試験が 2,453 g であるのに対して、流出量評価モデルは 5,054 g、Erosion model は 263,697 g となった。このことから、定水位条件による要素試験に基づいて緩衝材の流出量評価モデルを開発したことで、定流量条件による要素試験に基づく Erosion model と比較して原位置流出試験による総流出量の経時変化の傾向がより再現できる様になった。また、Erosion model は原位置流出試験の結果に対して 2 オーダー程度の違いがあるが、流出量評価モデルは同一オーダーとなり原位置流出試験の結果に近づくことができた。これらのことから、より現実的な評価を行える見通しが得られた。

他方、今回の検討では研究期間の制約等の理由から、要素試験の装置サイズならびに試験点数などに制約があり、また適用性の確認に用いた原位置流出試験の試験点数も限定的であった。今後、これらの試験点数を拡充して試験デ

ータとしての信頼性を高め、水質や重力（縦方向）の影響などを適切に反映していくなど、流出量評価モデルをさらに現実的なモデルへと更新していくことが望まれる。

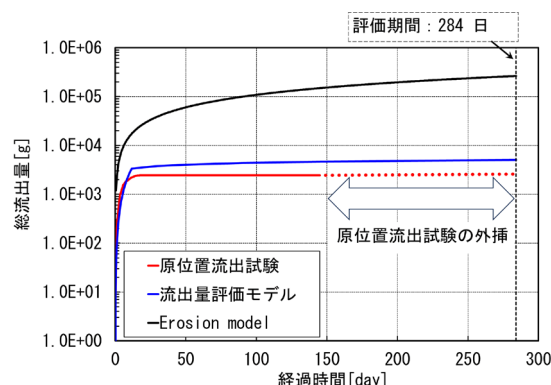


Fig.17 Confirmation of applicability of erosion evaluation model

6 おわりに

本研究では、高レベル放射性廃棄物の地層処分における処分坑縦置き・ブロック方式を対象とした緩衝材の流出量評価手法に関して、わが国の地質環境への適用性の観点から、これまでの研究成果である Erosion model と原位置流出試験結果との比較を通して課題を抽出し、緩衝材の流出量をより適切に評価できるモデルの開発手法を検討した。得られた成果を以下に要約整理する。

- ・地下の実環境で実施した原位置流出試験において、Erosion model がベースとする定流量条件による室内試験ではみられなかった地下水の流量の減少や緩衝材の流出が停止する現象を確認した。その違いについて、孔内外水頭差による湧水の駆動力が緩衝材の浸潤・膨潤に伴う隙間の縮小・閉塞による流路抵抗の増加であることを確認し、緩衝材の流出量を適切に評価できるモデル開発のため、定水位条件での要素試験を実施した。
- ・原位置流出試験と定流量条件による要素試験に基づく Erosion model の比較により、一般的に湧水量が多いことが想定されるわが国の地下環境において処分孔の利用率を高めるためにも、湧水量、周辺岩盤と処分孔の水頭差、その他に緩衝材の膨潤特性に影響を及ぼす水質、材料の特性、処分孔内の状態などの影響因子を踏まえた、より精緻な流出量の評価方法の開発が必要であると考えられた。
- ・実環境における緩衝材の流出挙動をより現実的に評価でき、かつ、将来の処分事業において処分孔の利用可否や適切な対策（施工技術オプション）の選択といった工学的な判断を支援するモデルの開発に向けて、定水位条件による要素試験でベースモデルを開発し、実環境や実規模へと拡張する評価モデルの開発手法の枠組みを構築した。
- ・緩衝材の一部を切り出した要素試験に水頭差や初期流量（湧水量）などの要因を考慮した要素試験装置を開発し、原位置試験と同様な傾向の緩衝材の流出挙動の試験結果を得ることが出来た。この試験結果に基づき緩

衝材の流出量評価モデルを整備した。実環境・実スケールへの拡張では、試験点数の制約等から考慮できていないパラメータが課題として残された。

整備した流出量評価モデルは、緩衝材の材料としてクニゲル V1, 模擬地下水にイオン交換水を用いて評価した限定的なモデルであるものの原位置流出試験結果を再現(評価)したところ、Erosion model と比較して原位置流出試験による総流出量の経時変化の傾向をより再現でき、また、予測値は実測値と同一オーダーまで近づき、これまでより現実的な評価が行える見通しが得られた。要素試験からモデル構築までの一連の取り組みにより、緩衝材の流出の評価に関する開発手法を示すことができた。今後、要素試験の試験点数の拡充や水質などの影響を適切に反映してベースモデルの拡張手順の具体化や他のベントナイトを用いた適用性を確認することが望まれる。

謝辞

本研究は、経済産業省資源エネルギー庁からの受託事業「高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 ニアフィールドシステム評価確証技術開発(令和2年度, 3年度および4年度)」(JPJ007597)の成果の一部によるものである。

参考文献

- [1] 原子力発電環境整備機構: 包括的技術報告: わが国における安全な地層処分の実現. NUMO TR-20-03, 原子力発電環境整備機構 (2021).
- [2] 核燃料サイクル開発機構: わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性—地層処分研究開発第2次とりまとめ—分冊2 地層処分の工学的技術. JNC TN1400 99-022, 核燃料サイクル開発機構 (1999).
- [3] Börgesson, L., Sandén, T.: Piping and erosion in buffer and backfill materials. SKB R-06-80, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2006).
- [4] Sandén, T., Börgesson, L., Dueck, A., Goudarzi, R. and Lönnqvist, M.: Deep repository - Engineered barrier system. Erosion and sealing processes in tunnel backfill materials investigated in laboratory. SKB R-08-135, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2008).
- [5] Sandén, T. and Börgesson, L.: Early effects of water inflow into a deposition hole. Laboratory tests results. SKB R-10-70, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2010).
- [6] Börgesson, L., Sandén, T., Dueck, A., Andersson, L., Jensen, V., Nilsson, U., Olsson, S., Åkesson, M., Kristensson, O. and Svensson, U.: Consequences of water inflow and early water uptake in deposition holes EVA project. SKB TR-14-22, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2015).
- [7] Åkesson M., Kristensson O., Börgesson L., Dueck A., and Hernelind, J.: THM Modelling of buffer, backfill and other system components, Critical processes and scenarios. SKB TR-10-11, Swedish Nuclear Fuel and Waste Management Co. (2010).
- [8] 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成29年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 処分工学システム工学確証技術開発 平成25年度~平成29年度の取りまとめ報告書. 原子力環境整備促進・資金管理センター (2018).
- [9] Suzuki, K., Asano, H., Yahagi R., Kobayashi, I., Sellin, P., Svemar, C. and Holmqvist, M.: Experimental investigations of piping phenomena in bentonite-based buffer materials for an HLW repository. *Clay Minerals* **48**, 2, pp.363-382 (2013).
- [10] 林大介: 緩衝材の流出現象と工学的対策 処分場の設計や施工の技術オプションの整備に向けて. 日本原子力学会誌, Vol.64, No.11 (2022).
- [11] 日本原子力研究開発機構 幌延深地層研究センター: 地下施設設備の状況. https://www.jaea.go.jp/04/horonobe/status/kouji/shisetsusuibiki_kouji.html (accessed 2023-11-22).
- [12] 舟木泰智, 石井英一, 常盤哲也: 新第三紀堆積岩中の割れ目は主要な水みちとなり得るか?. 応用地質, 第50巻, 第4号, pp.238-247 (2009).
- [13] 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター: 令和3年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書. 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター (2022).
- [14] 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成31年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書. 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター (2020).
- [15] 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成26年度地層処分技術調査等事業処分システム工学確証技術開発報告書(第2分冊) —人工バリア品質/健全性評価手法の構築—緩衝材. 原子力環境整備促進・資金管理センター (2015).
- [16] 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター: 令和4年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書. 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター (2023).
- [17] 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター: 平成30年度高レベル放射性廃棄物等の地層処分に関する技術開発事業 ニアフィールドシステム評価確証技術開発報告書. 日本原子力研究開発機構, 原子力環境整備促進・資金管理センター (2019).