論 文

# 岩盤を対象としたグラウチング効果の評価手法の開発

山下 亮<sup>\*1</sup>·長澤寬和<sup>\*1</sup>·上田祥央<sup>\*2</sup>

放射性廃棄物の地層処分では処分坑道への湧水が緩衝材等の人工バリアに与える影響の低減ならびに坑 道周辺の岩盤に期待される天然バリア性能(低透水性)確保の観点から,グラウチングによる坑道周辺岩 盤の止水性(低透水性)の確保は極めて重要である。本研究では,岩盤の亀裂情報に基づき,グラウチン グをどのように実施すれば,適切な透水性の低減が可能であるかを予測評価するための数値解析手法を開 発した。また,亀裂を模擬した室内試験を実施し,開発した手法の妥当性を検討した。室内試験では,グ ラウトの沈降あるいは吸着により亀裂開ロ幅が縮小して透水性が改善される結果が得られ,こうした現象 は流路に沿った流速の変化や濃度に応じたグラウトの液相から固相への変化を考慮したモデルを用いるこ とにより比較的良好に実験結果を再現することが可能であった。ただし,沈降・吸着のモデルに用いたパ ラメータについては実験ケースによりかなりばらつきがあるため,グラウトの条件に応じたパラメータ設 定については今後の課題であり,モデルの改良を図っていく必要がある。

キーワード: 岩盤, グラウチング, 透水性, 放射性廃棄物処分, 天然バリア

## 1. はじめに

原子力発電で発生する使用済核燃料は、再処理により 再び核燃料として使用可能な成分(プルトニウム等)と それ以外の高レベル放射性廃棄物に分けられる。このう ち、高レベル放射性廃棄物は、地下 300m 以深の安定し た地層内に埋設処分することが計画されている。図-1 は、原子力発電環境整備機構(NUMO)が検討している高 レベル放射性廃棄物処分における廃棄体定置,埋戻しの 概念の例である。処分方式としては、廃棄体を縦置き、 または横置きに定置する方法、地上で緩衝材と一体化さ せた PEM (Prefabricated Engineering Module)と呼ばれ る容器に入れてから地下に運んで定置する方法などがあ る。PEM あるいは廃棄体は処分坑道内に定置された後、 その周辺をベントナイト混合土で埋め戻し、坑道の端部 にプラグを設置して閉鎖する手順が考えられている。

一方,岩盤は,廃棄体から核種が漏洩した場合に,核 種の移行を遅延させるための天然バリアとして機能が 期待されている。坑道周辺岩盤の掘削損傷領域(EDZ; Excavation Damaged Zone)は,閉鎖後に核種が漏洩した 際の移行経路となると考えられており,安全評価の観点 からはできるだけ透水性を低下させておくことが望まし い。特に,プラグ周辺では,移行経路を遮断するために 入念な対策が講じられる必要がある。また,処分に用い られる緩衝材や埋戻し材の品質確保のためには,岩盤か らの湧水をできるだけ抑制する必要がある。すなわち, 閉鎖前の段階で岩盤からの湧水によって,緩衝材や埋戻 し材が浸食されてしまう懸念がある。こうした,処分坑 道周辺岩盤の地下水理に関する課題への対策技術として, グラウチングを行って止水性を高めることが必要と考え られており,これまで様々な研究が実施されてきた<sup>3)~5)</sup>。





グラウチングによる岩盤の止水性の改良に関しては, 古くからダムにおけるカーテングラウト施工の問題とし て研究が実施されている。例えば,武藤ら<sup>2)</sup>は,管を 使ったグラウトの注入実験を実施している。その実験で は,沈殿に伴い管の断面積が次第に縮小し,注入速度が 次第に低下して行くことが確認され、こうした結果がグ ラウトの沈降を考慮した簡易なモデルを用いて説明でき ることが示されている。また、内田ら<sup>3)</sup>は、亀裂(「き裂」 とも表記されるが参考文献1)の表記に合わせて「亀裂」 を用いる)と注入ボーリング孔を模擬した系での注入実 験を実施し、圧力が低いほど、また、水セメント比W/C が小さいほど、閉塞が生じやすく、止水性の改良範囲が 狭くなることを明らかにしている。西垣ら<sup>4)</sup>は、グラウ チングに先立って平均的な亀裂開口幅を推定しておく手 順を提案し、亀裂入り口での目詰まりを避けるためのグ ラウトのW/C の範囲を明らかにしている。

一方,グラウチング効果を数値解析モデルで予測評価 する研究も行われてきた。例えば小山ら<sup>50</sup>は,岩盤を多 孔質連続体としてモデル化し,グラウチングの効果であ る透水係数の低下を,多孔質体に関する間隙率と透水係 数の関係を援用してグラウトの間隙に占める体積分率の 関数として表現するとともに,グラウトの時間経過に伴 う効果を考慮したモデルを構築している。

筆者らは、岩盤亀裂へのグラウチング注入による止水 性向上を予測評価する手法の確立を最終目的として研究 を進めている。具体的には、現場で観察された亀裂情報 をもとに、亀裂を3次元的にモデル化し、亀裂ネットワー ク全体での透水性の低減効果を評価することを目指して いる。このようなアプローチを選んだ理由としては、坑 道周辺のEDZを検討対象としていることから詳細な亀裂 情報を得ることが期待でき、それらから亀裂ネットワー クモデルを構築することが可能となるため、連続体的な アプローチよりも精度よく透水性低減効果を評価できる と考えられるからである。本論文は、上記の最終目的を 達成するための第1段階として、グラウチングによる亀 裂の透水性低下に関するモデル化手法と室内でのグラウ ト浸透試験に基づく検証について述べるものである。

## 2. グラウチング効果の予測解析方法

本研究の開発技術の実プロジェクトへの適用フローに ついて説明し,次にモデル化の詳細について述べる。

#### 2.1 予測解析のフロー

グラウト注入による止水効果の予測解析の全体の流れ を図-2に示す。最初に坑道壁面あるいはボーリング孔 による亀裂の調査(位置,走向,傾斜,亀裂開口幅)の 調査を実施し,亀裂モデルを作成する。また,材料につ いても粘度等の室内実験等のデータを入力条件として設 定する。また,現場での施工データとしてグラウトの注 入圧力や注入量のデータを入力する。これらのデータを もとにグラウチングのシミュレーションを行い, 亀裂内 部におけるグラウトの拡がり状況や透水性の改良効果を 評価する。解析結果で改良効果が十分でないと判断され れば,追加のグラウチングを実施する等,施工へのフィー ドバックを行う。



図-2 グラウチング効果の評価フロー

## 2.2 グラウトの浸透過程のモデル化

亀裂に注入されたグラウトが浸透・流動する状況の概 念を図-3に、モデル化の考え方を以下に記す。



図-3 亀裂内のグラウト浸透の概念

 ①解析では VOF 法 (Volume of Fluid) と同様の考え方に 基づき、グラウトの液相、固相と水の体積分率を考え、 これらの混合流体と考える。

②グラウトと地下水の混合流体がダルシー則に従うとと もに、それぞれの時間ステップの透水係数場において、 流体の圧縮性が無視しうるほど小さいために十分に短い 時間で定常状態に達すると仮定する。すなわち,流体の 流れに関しては定常流れで近似する。

③グラウトの移動は、混合流体の流速場を用いて、グラウト濃度 c についての移流拡散解析を行って計算する。
 ④流体の粘性は、グラウト濃度 c に応じて、グラウトの粘性と水の粘性から混合流体の粘性(粘度)を評価する。
 ⑤時間経過に伴うグラウトの硬化を粘性変化として考慮

⑥グラウトの濃度や流動状況に応じて沈殿あるいは亀裂 面への付着が発生し,流体の経路となる亀裂開口幅が小 さくなると考える。

する。

こうした概念に基づいてグラウチングの予測解析手法 を検討しており,手法の詳細について以下に記す。

亀裂内部における水、グラウト、固相(沈殿物等)の 体積分率をそれぞれ $\theta_w$ 、 $\theta_a$ 、 $\theta_s$ とすると、

$$\theta_w + \theta_g + \theta_s = 1 \tag{1}$$

の関係がある。水とグラウトからなる流体のグラウト の濃度を次式で定義する。

$$c = \frac{\rho_g \theta_g}{\left(\theta_g + \theta_w\right)} \tag{2}$$

 $<math>
 \rho_g
 は注入されたグラウトの密度である。同様に固相(沈$  $殿物)の濃度 s を固相の密度 <math>
 \rho_s
 を用いて次のように定義
 する。$ 

$$s = \frac{\rho_s \theta_s}{\theta_g + \theta_w + \theta_s} = \rho_s \theta_s \tag{3}$$

初期の亀裂開口幅をbとすると、固相を除く実質的な 有効亀裂開口幅をb'として次の関係がある。

$$b' = b(1 - \theta_s) \tag{4}$$

亀裂内のグラウトの濃度に関する支配式としては,各亀 裂平面上の局所座標系で記述される次の移流拡散式を用 いる。この支配式において右辺第3項はグラウトが沈降あ るいは吸着し,固相へと変化する現象を表現している。

$$b' \frac{\partial c}{\partial t} = b' \left( \nabla D_f \nabla c - \nabla \boldsymbol{v} c - q \right)$$
(5)

ここで, D<sub>f</sub> は分散係数, v はグラウトと地下水の体積 平均の実流速ベクトルである。亀裂の単位面積あたりの 固相の量はsに亀裂開口幅を乗じたものになる。また, ここでqは単位体積のグラウトと地下水の混合流体から 固相へと沈殿あるいは付着する速度を表している。した がって, 固相濃度の変化は次式で表現される。

$$b\frac{\partial s}{\partial t} = b' q \tag{6}$$

このグラウトの固相への変化速度は、グラウトの濃度、 亀裂開口幅、流速などの関数となることが予想される。 最も簡単なモデルとして,次式のような濃度に比例した モデルが考えられる。ここでは,濃度比例モデルと呼ぶ ことにする。

$$q = k_s c \tag{7}$$

ここで、*k<sub>s</sub>*は沈降・付着に関する比例定数である。一 方、多孔質媒体における目詰まりの問題を扱う濾過の理 論では、グラウトの沈殿、付着による固相へ移行の総量 は、グラウトの通過量に比例するとする経験的なモデル がある<sup>60</sup>。これは、固相への移行速度が濃度と流速の積 に比例するとしたモデルであるということができる。す なわち、

$$q = k_f |v|c \tag{8}$$

ここで、 $k_f$  はろ過のモデルにおける比例定数であり、 このモデルを濾過モデルと呼ぶことにする。

また,実験では亀裂開口幅が狭まるところで,固相の 体積が多かったため,流速が急激に変化するところで液 相から固相への移行が大きくなると考え,次のようなモ デルを考慮することとした。

$$q = k_a \frac{\partial |v|}{\partial r} c \tag{9}$$

ここで、 $k_a$  は係数であり、 $\partial |v| / \partial r$  は流速の流れ方向 r にそった微分を表す。これを速度勾配モデルと呼ぶこ とにする。

本研究では,実験結果を再現するために最適な固相へ の複数の移行モデルとそれらの組み合わせの中でどのよ うなモデルが最適かを検討することとした。

また、グラウトと地下水からなる流体の流速は、ダル シー則に基づいた地下水流動解析により求めるが、その 際に、実質的な亀裂開口幅 b<sup>'</sup>とグラウト混合割合に応じ た粘性係数を考慮することになる。三乗則等で透水量係 数*K*を求めるには、固相を除く見かけ亀裂開口幅 b<sup>'</sup>に基 づいて評価する。

$$K = \frac{\rho_f g b^{\prime 3}}{12\mu} \tag{10}$$

ここで、 $\mu$ は流体の粘性係数、 $\rho_f$ はグラウトと水の混 合流体の密度で、地下水の密度 $\rho_w$ を用いて次式で表され る。

$$\rho_f = \rho_g \theta_g + \rho_w \theta_w \tag{11}$$

またグラウトと水の混合流体の粘性係数  $\mu_f$  は、グラウトの濃度に依存すると考えられ、密度と同様に、グラウトの粘性係数  $\mu_g$ と地下水の粘性係数  $\mu_w$ を平均化した値を用いる。

$$\mu_f = \frac{\mu_g \theta_g + \mu_w \theta_w}{\theta_g + \theta_w} \tag{12}$$

解析は、有限要素法により上記の透水量係数を用いて 地下水とグラウトの混合流体の流動解析を定常解析とし て行って流速を求め、この流速を用いてグラウトの濃度 に関する移流拡散解析を有限要素法により行う。

亀裂のモデル化に関しては、本論文では詳細には述べ ないが、現場での亀裂調査結果から、有限要素メッシュ の形で3次元モデルを作成すれば、開発した手法はその まま適用することが可能である。その場合のモデリング ソフトウェアとしては、市販のCAE ソフトウェアやオー プンソースのメッシュジェネレータ(例えばGMSH)を 利用することで、亀裂同士の交差を考慮しての有限要素 メッシュ作成を自動的に行うことが可能である。

### 3. グラウトの注入実験

解析モデルが妥当であるかどうか,特に流体相から固 相への移行を表すモデルとして,どのようなモデル,パ ラメータを用いれば良いかを検討するために岩盤亀裂を 模擬したグラウト流動試験装置を製作して室内試験を実 施した。

## 3.1 グラウト注入実験

#### (1) グラウト流動試験装置

実際の高レベル放射性廃棄物の処分坑道の幅・高さは 5m 前後であり, EDZ の拡がりも坑道壁面から数 m のオー ダーと想定される。このようなスケールでの実験は難しい ことから 1/10 程度のスケールでの室内試験を計画した。

グラウト流動試験装置の概略図を図-4に示す。亀 裂の流路となる部分は長手方向に400mm,幅が160mmで ある。人工亀裂の開口幅は、2枚のアクリル板の間にス ペーサーを配置して調整している。実際の亀裂は、開口 幅が場所により変化するため、実験においても亀裂開口 幅が流れ方向に変化するパターンを考慮した。亀裂開口 幅が変化しないケースではスペーサー①を用い、変化す るケースではスペーサー①とスペーサー②を重ねること で、流れの下流側で開口幅が狭くなる条件を設定するこ ととした。

グラウト液は人工亀裂の中心付近の下方から注入す る。自然の動水勾配により地下水が流れている状態につ いても模擬できるようグラウト液とは別に注水が可能な 設計としている。ただし、今回取り上げる実験ケースで は、グラウト液のみを注入している。グラウト液および 水の注入量は、注入タンクの重量変化を荷重計により計 測する。グラウトの注入状況は、透明なアクリル板の上 方に設置したビデオカメラにより撮影する。 (2) 材料

グラウト液の配合は、水・セメント比を1.6とし、セ メントには超微粒子セメント(太平洋アロフィックス MC) を用い、分散剤(MC ヘルパー)を1%添加した。材料を 作製後、密度、粘度等を測定した。粘度は、ファンネル 粘度計による試験で測定し、粘度値は3.6mPa・s であった。

#### 3.2 実験ケースと結果

実験のケースの一覧を表-1に示す。亀裂開口幅を一 定とした場合をケースA, 亀裂開口幅の変化を考慮した ケースをケースBとした。亀裂開口幅に関しては, 西垣 ら<sup>4)</sup>がグラウトの浸透挙動の実験において0.5mm 程度の 人工亀裂を用いていることを参考として, 0.3mm ~ 0.8mm の間で亀裂開口幅を設定した。

実験では,最初に亀裂内部を水で満たした後に,グラ ウト注入側のバルブを開放し,所定の圧力でグラウトを注 入している。ケースAでは,水が流動した状況下でグラ ウトを注入する計画であったが,グラウト注入開始後はグ ラウトの注入圧力が水の圧力より大きいことから逆流が発 生したため,グラウト注入後に水タンクのバルブを閉じて おり実質的に水の流動がない条件での試験となった。



亀裂開口幅<br/>(mm)グラウト注入<br/>圧力水頭 (mm)ケースA0.51065ケースB0.8 (上流側)<br/>0.3 (下流側)745

表-1 実験ケースと条件

実験結果として,注入したグラウトの累積量の時間変 化を図-5に示す。ケースAでは約300秒でほぼグラウ トタンクの全量が流出し,目詰まりは生じなかった。一 方,ケースBでは,約150秒で亀裂開口幅の小さくなっ ている付近を中心に目詰まりが発生し,それ以降はグラ ウトの注入量がゼロとなっている。グラウトを注入して から4秒後の流動状況を図-6に,目詰まりが生じた状 況の拡大画像を図-7に示す。図-7に示されるように 亀裂開口幅が小さくなる部分の上流側を中心にグラウト の堆積が観察されている。また,堆積により目詰まりが 生じた後に,パイピングのような形で再度流動が生じて いる状況も見られた。



図-5 グラウト注入量の時間変化



図-6 グラウト注入後の流動状況 (ケースB撮影画像)



図-7 開口幅変化位置での目詰まりの状況

## 4. 実験結果による解析モデルの検討

実験結果との比較により、グラウトの亀裂内流動なら びに液相から固相への移行に関して、どのようなモデル が適切かについて検討した。解析では、開口幅分布を考 慮した2次元のモデルを作成し、境界条件ならびにグ ラウトの密度、粘度の物性条件を実験に合わせた上で、 あらかじめ求めることのできない液相から固相への沈 殿・付着に関するパラメータの調整を試行錯誤的に行っ た。解析によるグラウト注入量(累積量)と実験結果を 比較し、解析モデルが実験結果をどの程度再現できるか について検討した。解析に用いたメッシュと境界条件を 図-8に示す。



図-8 解析メッシュと境界条件

ここで、液相から固相への沈殿・吸着による移行速度、 *q*を表すモデルは、前節に示した3通りのモデルとその 組み合わせとしている。表-2に解析実行 ID(run\_1~ run\_4) と考慮した固相への移行速度式の対応を示す。

表-2 固相への移行速度に関するモデル

解析実行 ID	濃度比例 モデル q = k <sub>s</sub> c	速度勾配 モデル $q = k_a \frac{\partial  v }{\partial r} c$	濾過モデル $q = k_f  v  c$
run_1 (A) run_1 (B)	0	_	_
run_2(A) run_2(B)	_	0	_
run_3(A) run_3(B)	_	_	0
run_4(A) run_4(B)	0	0	_

注) 表中の(A) および(B) はケース A とケース B に対応

ケース A, ケース B について,実験結果とパラメータ 調整後の解析結果の比較をそれぞれ図-9と図-10 に示 す。また,それぞれのモデルのパラメータ値を表-3に 示す。

ケースAの実験では、観察された沈殿量(固相)も少 なく、目詰まりも生じていないため、注入量が単調増加 している。濃度比例モデル、濾過モデルでは固相量の増 加とともに傾きが緩やかになる。一方、速度勾配モデル では亀裂開口幅一定のため、速度の空間変動が小さく、 直線的に増加している。これらの単一の移行モデルでは、 実測は完全には再現できないが、速度勾配モデルと濃度 比例モデルを組み合わせた run\_4(A) ではかなり実験に 近い結果が得られている。

一方,ケースBの実験においては,時間とともに注 入速度が低下し,目詰まりが生じたことから累積注入 量は一定値に収束している。解析では,速度勾配モデ ル(RUN\_2(B))で,目詰まりの状況が再現できていない。 RUN\_1(B)やRUN\_3(B)では,100s以前の値については, やや乖離は生じているものの,累積注入量が収束する状 況をおおむね再現できており,RUN\_4(B)では全体を通 して実験結果が良好に再現されている。

また,パラメータの値では,同じモデルを用いていて も,かなり異なった値でフィッティングされており,亀 裂開口幅の変化等により影響されていると考えられる。 したがって,亀裂開口幅が不均質に分布する実際の岩盤 に対して,どのようにパラメータを設定するかは今後の 課題となる。

以上に述べたように、注入量の経時変化のみの比較では、どのモデルが適切かは判断が難しいと考えられるため、ケースBの解析結果について固相の厚みの分布を比較した。解析結果を図-11~図-14に示す。RUN\_1(B)

ではグラウトが亀裂開口幅の比較的大きい領域の側で比 較的均一に堆積している。RUN\_2(B)では,注入孔付近 では放射流であり、流速が流れ線に沿って小さくなるた め堆積せず, 亀裂開口幅が小さくなる境界付近で堆積 している。RUN\_3(B)では、注入孔の近くに集中的に堆 積しているが, 濾過モデルでは固相への移行量がグラウ トの通過量に比例すると考えるため、流速と濃度の高い 注入点付近で堆積量が最も大きくなったと考えられる。 RUN\_4(B) では流速の変化が激しいところ(正確にはそ の上流付近)で堆積が最も大きくなるモデルを組み合わ せており, 亀裂の開口幅が, 大→小へと変化する領域で 堆積が大きくなっている。実験での堆積厚みの分布につ いて定量的に測定することはできなかったが、図-7に 示すように目視観察の結果からは亀裂開口幅が変化して いるところで堆積が大きく、目詰まりしている状況が認 められており, RUN\_4(B) が実現象を比較的良好に再現 している。

このように、室内実験のような比較的小さいスケール かつ亀裂開口幅分布が単純な系に対しては、RUN\_4のよ うな濃度比例モデルと速度勾配モデルを組み合わせたモ デルが適切であったが、このモデルを実岩盤のグラウチ ング効果の評価に適用する場合、亀裂開口幅の分布の情 報が必要となるため、亀裂のモデル化が課題となる。こ の課題に対しては、地質統計学的手法である条件付きシ ミュレーション法などの利用も考えられるが、解析手順 が煩雑となることもあり、実用化は容易ではない。こう したことから、現実的な解としては、RUN-4 に次いで比 較的良好な結果が得られており、かつパラメータ数の少 ない濃度比例モデル (run\_1)を用いることが考えられ る。

すなわち,実施工で得られる注入量あるいは注入圧力 の時間変化の実測データに基づいて濃度比例モデルのパ ラメータを調整することで,注入範囲や注入後の岩盤全 体の透水性を評価する手順が,現場適用においては現実 的であると考えられる。亀裂開口幅についてはボアホー ルカメラ等の実測データを用い,実測のデータから逆解 析的にモデルパラメータを決める手順が実用的であり, その場合,逆解析には,米国地質調査所で開発された公 開コードである UCODE などを利用することで,比較的容 易にパラメータを求めることが可能である。



図-11 解析 (RUN\_1(B))の固相の厚みの分布 (t=50sec)



図-12 解析 (RUN\_2(B))の固相の厚みの分布 (t=50sec)



図-13 解析 (RUN\_3(B))の固相の厚みの分布 (t=50sec)

 
 プラウト注入点
 0
 0.5
 1 (mm)

 流出 境界



# 5. まとめ

岩盤のグラウチングによる透水性の改良(低減)を評価するための解析手法の検討を行った。実際の岩盤は多数の亀裂が交差する系であり,グラウトの浸透は複雑な 挙動を示すと考えられるが,ここでは1つの亀裂を模擬した単純な系を対象とした室内試験を実施し,実験結果



図-9 実験と解析の結果の比較(ケースA)



図-10 実験と解析の結果の比較(ケースB)

表-3 パラメータの値

解析実行 ID	濃度比例 モデル $q = k_s c$ (m/s)	速度勾配 モデル $q = k_a \frac{\partial  v }{\partial r} c$ (m)	濾過モデル q = k <sub>f</sub>  v c (-)
run_1(A)	0.018		
run_1(B)	0.08		
run_2(A)		5000	
run_2(B)		470	
run_3(A)			0.035
run_3(B)			0.4
run_4(A)	0.0075	100	
run_4(B)	0.037	120	

(上段はケース A, 下段はケース B のパラメータ)

とモデルによる解析結果とを比較した。いくつかのモデ ルで試行した結果として, 亀裂面へのグラウトの沈殿・ 付着に関して, 流速の空間的変化を考慮するとともに濃 度に応じて液相から固相へと移行するモデルで, 比較的 良好に実験結果を再現できることがわかった。すなわち, 亀裂開口幅が小さくなる領域での沈殿・付着の状況, 注 入量の時間変化を再現することが可能であった。

一方,実施工においては,亀裂開口幅の分布の情報を 得ることは困難であることから,実験で比較的再現性の 良かった流速の変動を考慮したモデル(速度勾配モデル と濃度比例モデルを組み合わせたモデル)の適用は必ず しも現実的ではないと考えられた。このため,実施工に 使うモデルとしては,濃度比例モデルを採用し,施工時 の圧力,注入量のデータをもとにモデルのパラメータを 逆解析的に推定することが考えられる。

また、本検討では単一亀裂を対象としているが、実際 の施工への適用に際しては亀裂の3次元モデル化が必要 となる。これについては、最新のメッシュ作成ソフトウェ アを利用することにより容易に作成することが可能とな りつつある。したがって、現場の観察データから亀裂モ デルを作成し、注入データからグラウト範囲を推定して、 グラウチングの効果を解析評価するまでの一連の手順と 方法は、ほぼ確立できたと考えている。ただし、その評 価精度を含め、現場試験等により解析モデルの検証を進 めることは今後の課題である。

#### 参考文献

- 原子力発電環境整備機構 包括的技術報告書:わが 国における安全な地層処分の実現-適切なサイト の選定に向けたセーフティケースの構築-概要編, p.46,2021.
- 2) 武藤光,菊地宏吉,平野勇,水戸義忠:節理内流路を模擬した透明管供試体によるグラウト充填メカニズムの実験的研究,ダム工学, Vol.9, No.1, pp. 29-38, 1999.
- 3)内田 善久, 蓮本 清二, 野田 兼司, 神藤 健一: 注入孔内での目詰まりに着目したセメントグラウ チングに関する研究, 土木学会論文集C, Vol.62, No.1, pp. 201-214, 2006.
- 西垣誠,小松満,山本浩志,見掛信一郎:亀裂性岩 盤におけるグラウトの浸透挙動と目詰まり特性に関 する研究,土木学会論文集,No.715,pp.311-321, 2002.
- 5)小山倫史,高橋健二,田村晴彦,小林翼,龍田圭亮, 大西有三:粘性の経時変化を考慮したグラウト注入 過程の数値シミュレーション,第 38 回岩盤力学に 関するシンポジウム講演集,pp.149-153, 2009.
- 6) 杉本泰治: 沪過-メカニズムと沪材・沪過助剤,地 人書館, pp. 105-127, 1992.

## Developement of numerical model to predict effect of rock grouting

#### Ryo YAMASHITA, Hirokazu NAGASAWA and Akihiro UEDA

For the geological disposal of radioactive waste, it is extremely important to reduce the permeability of rock masses around disposal tunnels using grouting from the viewpoint of reducing the influence of water inflow on the clay barrier to ensure the natural barrier performance expected of rock masses.

In this study, a numerical analysis method was developed in order to predict and evaluate the grouting effect based on the fracture information of the bedrock, in order to obtain the maximum reduction of permeability by means of grouting. Laboratory tests were also conducted simulating the grouting of a fracture, examining the validity of the developed method. Permeability was improved with the fracture aperture reduction due to sedimentation and adsorption of grout. The developed model can reproduce the experimental results, considering sedimentation from grout liquid to solid phase depending on the velocity change along the flow path and grout concentration. On the other hand, the parameters used in the model vary considerably depending on the experimental conditions, therefore systematic determination of the model parameters as well as model improvement should be addressed as future issues.