

# 地層処分におけるグラウト技術の高度化研究 (その3) —多孔質媒体モデルを用いた 溶液型グラウト注入解析—

小山 倫史<sup>1\*</sup>・片山辰雄<sup>2</sup>・蓮井昭則<sup>2</sup>・田中達也<sup>3</sup>・岸裕和<sup>4</sup>・大西 有三<sup>5</sup>

<sup>1</sup>京都大学大学院 工学研究科都市環境工学専攻 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂4)

<sup>2</sup>株式会社 環境総合テクノス 土木部 (〒541-0052 大阪市中央区安土町1-3-5)

<sup>3</sup>株式会社 大林組 原子力環境技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

<sup>4</sup>日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

<sup>5</sup>京都大学 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

\*E-mail: koyama@geotech.kuciv.kyoto-u.ac.jp

本研究では、亀裂性岩盤における溶液型グラウトの注入・浸透過程のメカニズム解明、およびグラウト注入効果の検証を目的として、スイス・グリムゼル岩盤試験場における溶液型グラウト注入試験の事前解析を実施した。本解析では、原位置より得られた不連続面幾何学情報をもとに作成した亀裂ネットワークモデルを等価多孔質媒体に置き換える。また、溶液型グラウトはニュートン流体であると仮定し、粘性試験の結果より算出した粘性の経時変化を時間と濃度の関数で表し、透水係数低減関数を算出する。この透水係数低減関数を用い、浸透流解析と移流・分散解析を組み合わせることでグラウト注入過程の3次元シミュレーションを実施した。

**Key Words :** *grouting, silica sol, fractured rock mass, numerical simulations, time-dependent material properties, finite element method(FEM)*

## 1. はじめに

グラウチングとは一般に、亀裂などの不連続面が存在する岩盤や土砂地盤に薬液やセメント系材料を加圧注入することにより、力学的強度、遮水性の改良を行うものである。この工法はダム、トンネルなど岩盤構造物の建設において古くから最も一般的な工法として用いられてきた。しかしながら、グラウチングは地中で注入孔から複雑な岩盤の割れ目に注入するため、グラウトの注入・浸透・閉塞の過程は未だ十分に解明されていない。さらに、注入圧力などの施工パラメータに関しても、論理的な裏付けがなく、現場技術者の経験に依存しているのが現状である。

高レベル放射性廃棄物の地層処分などの大深度地下(地下300m以深)の岩盤空洞利用においては、亀裂性岩盤の透水性(気密性)の改良を目的としている。大深度地下における岩盤内の水理学的特性は岩盤基質部のみならず亀裂の幾何学形状(亀裂開口幅、亀裂の方向・連続性など)に大きく支配される。

グラウチングに利用されるグラウト材は、大別すると溶液型、粒子を含む懸濁型があり、その目的や対象地盤・岩盤の透水係数、亀裂開口幅などによって異なる材料が使用される。現在、懸濁型であるセメント系、溶液型である水ガラス系および水ガラスを改良した特殊シリカ系を使用し岩盤の透水性の改良を行うことが一般的である。セメント系の中の、普通ポルトランド、早強セメント、高炉セメントなどの汎用セメントは安価であり、耐久性に優れ長期的な恒久性も期待できるが、粒径が大きいため、開口幅の小さな亀裂や小さな間隙が存在する岩盤では注入が困難である。一方、溶液型は比較的容易に注入できるため、適用可能な岩盤の範囲は広いが、注入による改良後の強度はあまり期待できない。特に、水ガラス系はアルカリ分が溶脱するため長期的な耐久性に劣るとされている。また、超微粒子セメントなど新材料の開発、実用化検討も進んでいるが、汎用セメントに比べ高価であることや、品質管理が難しいなどの問題点が存在する。

建設サイトの地質条件の多様化に加え、政府の公共

事業費削減に伴う建設コスト削減、環境負荷の低減が必要とされている。そのため、効率的かつ効果的なグラウチングの設計・施工方法が求められており、以下の条件を満たす必要がある。すなわち、①所定のグラウト材を短時間で注入できること、②改良が必要な範囲により多くのグラウトまたはセメントを注入できること、③注入の結果、透水性（遮水性）および力学特性の改良ができること、④注入予測・注入効果の確認ができること。このためには、グラウトの注入過程のメカニズムの解明が必要不可欠であるが、現場における岩盤の亀裂の分布や性状は複雑で浸透挙動を直接把握するのは困難である。そのため、室内試験などにより、浸透特性の解明、注入過程の解析モデルの開発・構築などを目的とした研究が行われている<sup>14)</sup>。グラウトの浸透過程においては、岩盤の流路形態、グラウトの流動性質、経時変化などの物理・化学的要因が複雑に結びついているため、浸透過程のモデル化を行うことは容易でない。しかし、対象岩盤の地質特性に応じた合理的なモデルの構築を行うことにより、グラウチングによる改良範囲や改良効果を予測できると考えられる。

本研究ではスイス・Nagraの地下研究施設グリムゼル岩盤試験場（以下、GTS）での地質調査に基づき作成した亀裂モデルに対するグラウト材の浸透状況を評価するため、グラウト浸透モデルとして等価多孔質媒体モデルを用い、解析理論の構築および解析コードの開発を行うとともに、室内試験で得られたグラウト材料の特性を使用して、GTSで予定されているグラウト注入試験の事前解析を実施した。

## 2. 溶液型グラウト注入過程のシミュレーション

### (1) 支配方程式

グラウトはニュートン流体を仮定し、有限要素法(FEM)により、2次元の非定常の浸透流解析および移流・分散解析を行う。浸透流の支配方程式は、質量保存則（連続式）およびDarcy則により、以下のように導かれる。

$$\partial_t(\rho\theta) = (K_{ij}h_{,j})_{,i} - q \quad (2)$$

ここに、 $K_{ij}$ は透水係数テンソル、 $h$ は全水頭、 $q$ は流出入量、 $\rho$ は流体の密度、 $\theta$ は体積含水率（ $\theta = n \cdot S_w$ 、 $n$ : 間隙率、 $S_w$ : 飽和度）である。

また、移流・分散の支配方程式は次式で表される。

$$\partial_t(\rho\theta C) = (\rho\theta D_{ij}C_{,j})_{,i} - (\rho\theta V_i C)_{,i} + Q_c \quad (3)$$

ここに、 $C$ は濃度、 $D$ は分散テンソル、 $V_i$ は実流速、 $Q_c$ は流出入量である。

なお、本解析は以下に示すプロセスを経ることで、岩盤が経時的に改良されていく状態を順次追跡し、計算（順解析）を行う。

Step 1: 時間 $t=0$ で注入を開始

Step 2: 時間差 $dt$ 後の注入モデルを作成する。まず、グラウト濃度、粘性の変化（物性の変化）および目詰まりによる透水係数の低減（算出方法は後述）、グラウト注入圧の変化（境界条件の変化）を考慮して、式(2)を解き、得られた流速を式(3)の右辺第2項に用いる。

Step 3: Step 2で作成したモデルを用いて、式(3)を解き、得られたグラウトの濃度分布から透水係数分布を再構築し、次の時間ステップのモデルを作成する。

Step 4: 以下Step 2, 3を所定の時間まで繰り返す。

### (2) グラウト材の粘性の経時変化を考慮したモデル<sup>5)</sup>

亀裂性岩盤を等価な連続体に置き換えると、その透水係数 $K$ は固有透水係数 $k^m$ （透水媒体固有の値）、流体（グラウト）の単位体積重量 $\gamma_f$ 、および粘性係数 $\mu$ を用いて次式で定義される。

$$k = k_0^{\text{int}} \gamma_f / \mu \quad (4)$$

ここで、式(1)で表される粘性係数の経時変化および考慮すると、式(4)より、ある時間 $t$ における透水係数 $k(t)$ は次式で表される。

$$k(t) = \frac{k^{\text{int}}(t) \cdot \gamma_f(t)}{\mu(t)} = C_f \cdot C_s \frac{k_0^{\text{int}} \gamma_{f0}}{\mu_0} = C_f \cdot C_s \cdot k_0 \quad (5)$$

ここに、 $k^m$ は透水媒体の固有透水係数であり、 $\gamma_f$ とともに時間 $t$ の関数である。なお、添え字の0は初期の値であることを意味する。また、 $C_f$ および $C_s$ はそれぞれ粘性係数の経時変化および透水媒体の目詰まりに伴う透水係数の低減率であり、それぞれ次式で表される。

$$C_f = \frac{\mu_0}{\mu(t)} \cdot \frac{\gamma_f(t)}{\gamma_{f0}} \quad (6a), \quad C_s = \frac{k^{\text{int}}(t)}{k_0^{\text{int}}} \quad (6b)$$

ここに、 $\mu$ は時間の関数とし、添え字の0はそれぞれの初期値であることを意味する。

粘性係数の経時変化による低減率は、次項で述べるようにレオメータにより計測し、計測結果を指数関数により近似して求める。また、目詰まりによる透水係数は間隙率の経時変化を測定し、Kozeny-Carmanの式<sup>6)</sup>を用いることで評価が可能である。

### (3) 溶液型グラウトの粘性性状の計測

GTSにおける現場グラウト注入試験で使用する溶液型グラウトの粘性の性状を高精度のレオメーター（Anton-

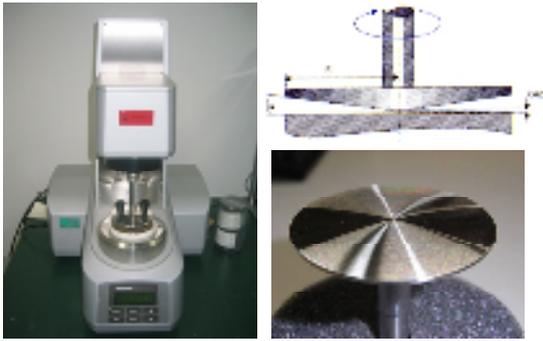


図-1 レオメータ (左: 全体, 右: コーンプレート)

Paar社, Physica MCR301, 図-1) を用いて測定した. この測定部にはコーン型プレートが使われており, 表面の測定対象との接触部に一様なせん断速度の载荷できるため精度が高い測定を行うことが可能となる. 溶液型グラウトの配合, 物性については「地層処分を対象としたグラウト材料の開発 (日本原子力研究開発機構)」<sup>7)</sup> で得られた方法および成果を参考とし, 強度・耐久性に優れており, ゲルタイム120分のものを用いた. 溶液型グラウトの構成材料はコロイダルシリカ (製品名: Hiシリカー30, 粒径: 10–20nm), 硬化促進剤 (製品名: アクターα) および蒸留水である. また, 溶液型グラウトの作製方法は以下のとおりである. まず, 水に硬化促進剤 (粉末) を加え, ミキサーで透明になるまで十分に攪拌し溶解させ, 次に, コロイダルシリカを攪拌しながら, 前記の溶解液を少量ずつ加え, 1分間 (中速約400rpm) 練り混ぜた.

溶液型グラウトの粘性性状に関する測定結果を図-2に示す. せん断速度とせん断応力の関係 (図-2上) に関し, 作成からの経過時間が90分までは原点を通る直線状でありニュートン流体的であるが, それ以降ではせん断応力が高まりわずかに曲線状の特徴が現れ始めニュートン流体としての近似度がやや低くなる. この測定値による時間経過と粘性係数の関係 (図-2下) については, 経過時間120分付近以降で粘性が急上昇しており, 予定したゲルタイムが確保されていることを確認した.

#### (4) 溶液型グラウトにおける透水係数低減関数

グラウトの粘性の経時変化による低減係数は濃度の関数でもある. ここでは, ある所定の濃度 (1種類) の溶液型グラウトのみで試験を行っているため, 純水の粘性係数との間を線形補完することで濃度Cにおけるグラウトの粘性係数を式(7)により算出した. なお, グラウト濃度の分布は移流・拡散方程式を解くことにより求める.

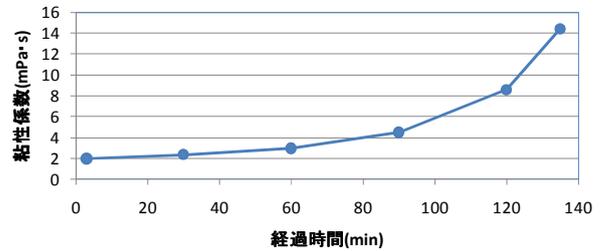
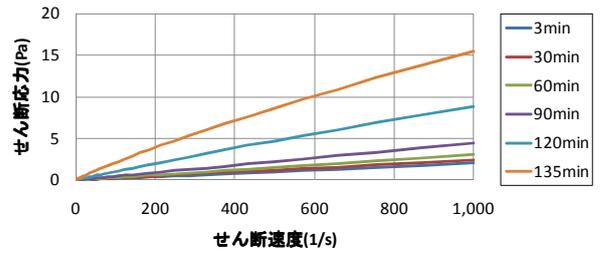


図-2 溶液型グラウトの粘性性状

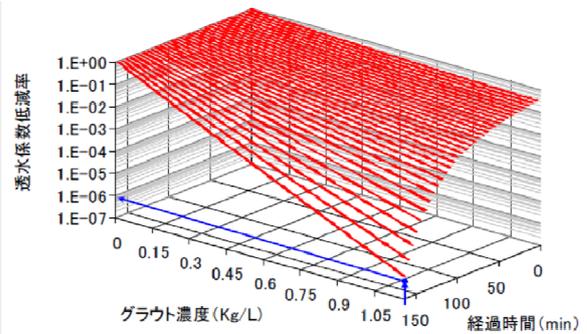


図-3 溶液型グラウトの透水係数低減関数

$$\mu(C) = 0.00533C + \mu_0, \quad \mu_0 = 0.003 \quad (7)$$

また, 粘性の経時変化を表す式を, 式(7)の濃度による違い, また, 既往のグラウト粘性の経時変化の測定試験の結果を参考<sup>8)</sup>にし, 次式のような指数関数で表現した.

$$\mu(C, t) = \mu(C, 0) \cdot \text{EXP}(\beta \cdot t) \cdot \text{EXP}(\gamma \cdot t) \quad (8a)$$

$$\beta = 0.000203 \times C \quad (8b)$$

$$\gamma = \beta \times 0.10 \times \text{EXP}(0.0004 \cdot t) \quad (8c)$$

式(8)から求められた粘性の経時変化とグラウトの濃度を考慮した透水係数低減関数を3次的に図-3に示す.

### 3. グリムゼル岩盤試験場における溶液型グラウト注入試験の事前解析

#### (1) 等価多孔質媒体モデルの作成

グリムゼル岩盤試験場において, 現場グラウト注入試験を実施する領域の岩盤は亀裂が多数存在する花崗

岩であり、亀裂ネットワークモデルにより個々の亀裂を評価することは困難であると考えられる。そのため、等価な多孔質媒体に置き換えることで巨視的に岩盤の透水性を評価する。なお、グラウト注入現場の地質学的特性の詳細は、「地層処分におけるグラウト技術の高度化研究（その1）」を参照されたい。解析モデルの作成範囲は注入孔と事前の調査ボーリング孔を含む幅20m、高さ20m、奥行き36mの直方体の領域である。試験サイトにおける亀裂性岩盤の地質学的特性を知るため、まず、調査ボーリング孔で実施されたボーリングコア・BTV観察により、亀裂の密度、長さ、走向、傾斜、亀裂開口幅などの亀裂の幾何学的情報を得る。これらの情報に基づき、解析対象領域の3次元空間に亀裂を統計・確率的に発生させ、亀裂ネットワークモデル(DFN: Discrete Fracture Network)を作成する。等価多孔質媒体モデルは、亀裂ネットワークモデルの領域を50cmの立方体で要素分割し、個々の亀裂を含む要素に対し規定された $x$ 、 $y$ 、 $z$ 軸方向より動水勾配を作用させ、要素の各面から得られる透水量より透水テンソルの成分を求めることで等価多孔質媒体モデルを作成した。透水異方性は各要素の透水係数テンソルの成分が異なること、および要素の連結が方向によって異なることによって表現することが可能である。DFNの作成および等価多孔質媒体への変換についての詳細は「地層処分におけるグラウト技術の高度化研究（その2）」を参照されたい。

なお、モデル化した試験エリアの外部は亀裂がほとんどなく、透水係数の非常に小さい岩盤（ランプロファイア）であるので、モデル側面の境界は不透水境界とした。上記の方法により作成された試験エリアにおける多孔質媒体モデルの透水テンソルの $xx$ -成分( $k_{xx}$ )、 $yy$ -成分( $k_{yy}$ )、 $zz$ -成分( $k_{zz}$ )を図-4に示す。

## (2) グラウト注入事前解析

注入孔はボーリング孔の間4分の1の場所とし、坑道（図-4の手前方向）から25~30mの区間の比較的亀裂密度が大きな高透水ゾーンを注入区間とした（図-5参照）。最大注入圧力は2MPaとし、開始後それぞれ、20分後に最大圧力になるように線形的に上昇させた後、160分後まで一定に保った（図-6参照）。また、注入グラウトの濃度は経過時間によらず一定とした。なお、移流・分散解析（式(3)）で用いる実流速を算出する際、ダルシー流速を有効空隙率で除する必要があるが、本解析では、花崗岩の値として文献より1%とした。

注入開始から10分後、160分後のグラウト濃度分布および透水係数低減率を図-7および図-8にそれぞれ示す。図-7より、グラウト濃度1ppmの領域が観測ボーリング孔に到達しており、現場においても1ppmの精度でグラ

ウト濃度がセンサーなどで感知できれば、グラウトの到達を確認することが出来ると考えられる。また、図-8より、最終的に注入孔から約2mの範囲で透水係数が改良されていることがわかる。また、解析のモデル化に

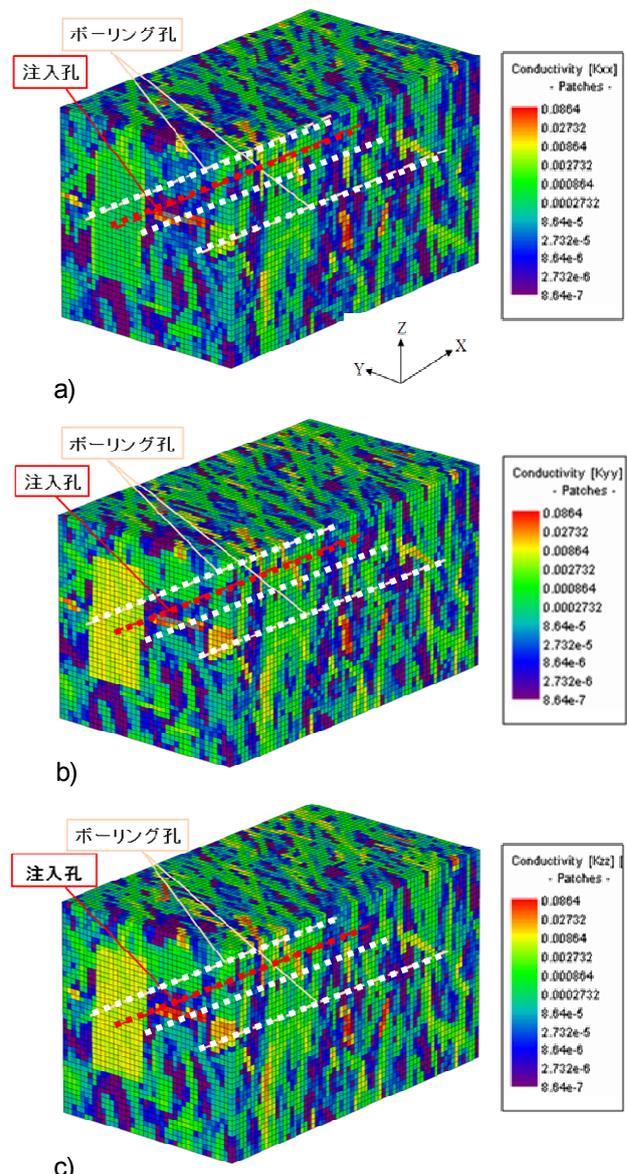


図-4 等価多孔質媒体モデルの透水係数テンソルの各成分、a)  $xx$ -、b)  $yy$ -およびc)  $zz$ -成分。

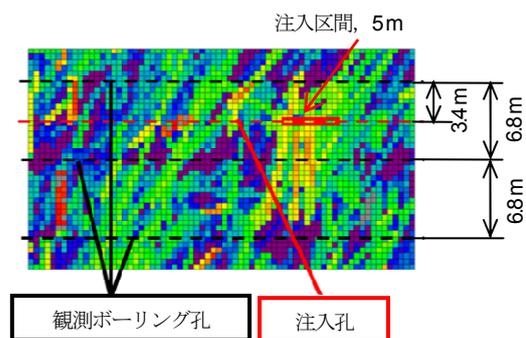


図-5 注入孔および観測ボーリング孔の位置（鳥瞰図）。

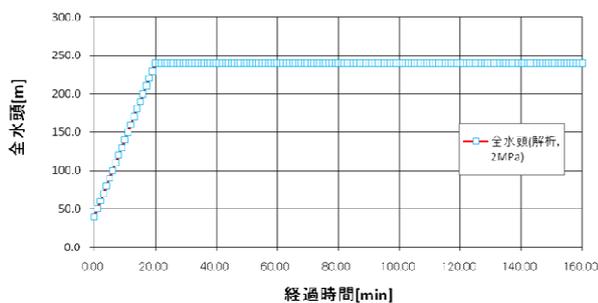


図-6 グラウト注入圧力の経時変化 (最大注入圧 2MPa)

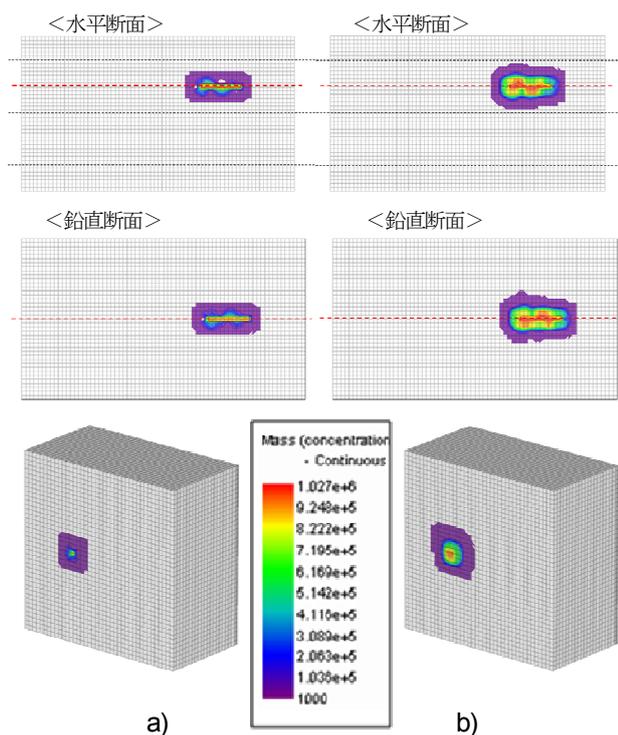


図-7 グラウト濃度分布, a) 10分後, b) 160分後.

において、透水異方性を考慮したことから、溶液型グラウトの広がりには、場所によりばらつきが見られ、透水係数が比較的高い領域を選択的に浸透する現象が見られた。また、本研究で得られた知見をもとに、注入計画を策定し、原位置グラウト注入試験実施した後に、本解析結果との比較および再現解析に向けた詳細な検討を行う予定である。

#### 4. まとめ

本研究では、亀裂を多数含む花崗岩のグラウト注入試験サイトを対象に、溶液型グラウトを用いた注入・浸透過程のメカニズム解明、注入過程のシミュレーションおよびグラウト注入効果の検証を目的として、多孔質媒体モデルの構築、室内試験による溶液型グラウトの物性の経時変化の把握およびグラウト注入事前解

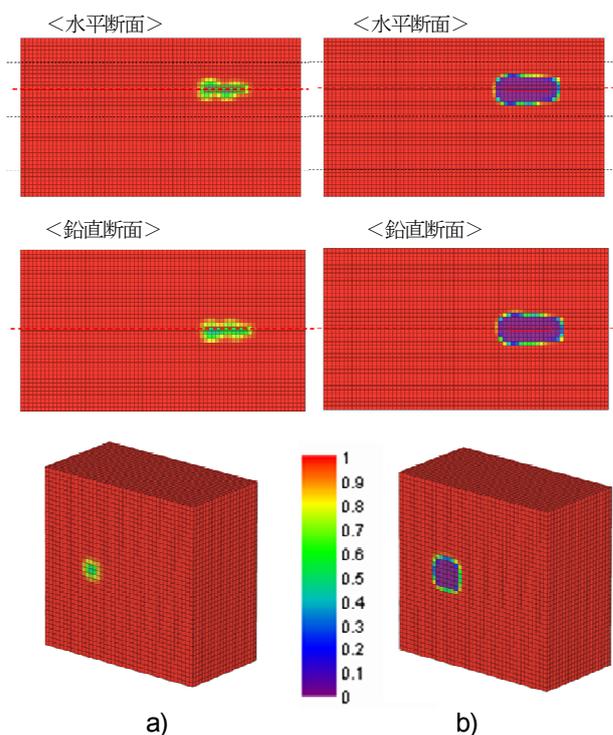


図-8 透水係数低減率の分布, a) 10分後, b) 160分後.

析を実施した。これらにより得られた知見を以下にまとめる。

- 溶液型グラウトの粘性の経時変化の測定実験を行った。結果として、グラウトの粘性係数は時間とともに上昇していくが、ゲルタイム付近で急激な上昇が見られた。硬化剤によるゲルタイムの調整を行うことで、所定の時間で粘性の上昇をコントロールすることができ、注入圧・注入時間を設定することで、比較的容易にグラウト注入計画を立てることが可能であると考えられる。
  - 最大注入圧2MPaの場合、注入開始より160分後には1 ppmの濃度の溶液型グラウトが観測ボーリングに到達し、透水係数は注入孔から約2mの範囲で改良されることが分かった。
- また、今後の課題としては、以下の点が挙げられる。
- 本研究では、粘性性状をニュートン流体と見なせる溶液型グラウトを対象としたが、一般的なグラウトには、ビンガム流体のような挙動(特に、セメント系)を示すものがあることが知られている。このビンガム流体に見られる、せん断応力がある大きさに達するまでは流動が起こらないという特性を定量的に把握し、解析モデルに反映させる必要がある。
  - 統計学的手法により亀裂を発生させた場合、同じ統計量を持つ場合であっても幾何学形状が異なるものが多数存在する。通常、統計学的手法を用いる場合、いくつかのリアリゼーションについて解析モデルを

作成し、モンテカルロシミュレーションにより、解析結果についても統計学的に評価する方法が一般的である。これは、解析モデルの不確実性を考慮するという点で重要であると考えられる。

- 移流・分散解析においては通常、実流速を用いるが、実流速の算出には有効間隙率が必要である。解析の結果、この有効間隙率が移流・拡散現象に大きな影響を及ぼすことがわかった。本検討では、文献などにより、有効間隙率を1%としたが、今後、有効間隙率の測定方法を含め議論が必要である。
- 解析モデルには、透水特性の異方性は考慮されているが、物質移行特性についても異方性があると考えられ、今後検討が必要である。
- 統計学的手法を用いたモンテカルロシミュレーションにより、解析モデルの不確実性を考慮したうえで、グラウト到達距離についても統計学的に評価する必要がある。

**謝辞：**本研究は経済産業省資源エネルギー庁「平成22年度地層処分技術調査等委託費（高レベル放射性廃棄物関連：地下坑道施工技術高度化開発）」の一部として実施したものである。

#### 参考文献

- 1) Gustafson, G. and Stille, H.: Prediction of groutability from

- grout properties and hydrogeological data. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 11(3), 325-332, 1996.
- 2) Hässler, L.: Grouting of rock – Simulation and classification. *Ph. D thesis, Div. of Soil and Rock Mech, Royal Institute of Technology (KTH), Sweden*, 1991
- 2) Eklund, D and Stille, H.: Penetrability due to filtration tendency of cement-based grouts. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 23, 389-398, 2008.
- 3) Butron, C., Axelsson, M. and Gustafson, G.: Silica sol for rock grouting: Laboratory testing of strength, fracture behaviour and hydraulic conductivity. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24, 603-607, 2009.
- 4) Draganovic, A. and Stille, H.: Filtration and penetrability of cement-based grout: Study performed with a short slot. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 26, 548-559, 2011.
- 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. 149-154, 2009
- 6) Dagan, G: 1989. Flow and transport in porous media. Springer, 465 p.
- 7) 日本原子力研究開発機構: 地層処分を対象としたグラウト材料の開発, 2010
- 8) Kobayashi, S and Stille, H.: Design for rock grouting based on analysis of grout penetration – Verification using Äspö HRL data and parameter analysis. *SKB report R-07-13*, 2007

## DEVELOPMENT OF GROUTING TECHNOLOGIES FOR GEOLOGICAL DISPOSAL OF HIGH LEVEL WASTE IN JAPAN. III: NUMERICAL SIMULATION FOR GORUT INJECTION USING EQUIVALENT CONTINUUM MODEL

Tomofumi KOYAMA, Tatsuo KATAYAMA, Akinori HASUI, Tatsuya TANAKA, Hirokazu KISHI and Yuzo OHNISHI

In this study, to simulate the grout injection process, the 3-D numerical model based on equivalent continuum approach was developed. The viscosity measurements for silica sol was performed to measure the time-dependent viscosity. The developed numerical model was applied to the planned in-situ grout injection tests at Grimsel test site (GTS), Switzerland. The rock type is fractured granite and the equivalent porous media was created from the DFN (Discrete Fracture Network) based on the fracture data obtained from the observation boreholes. The preliminary simulation was carried out to determine the suitable grout injection pressure and investigate the arrival distance of grout from injection boreholes.