

地層処分におけるグラウト技術の高度化研究 (その2) 一結晶質岩サイトにおける 水理地質構造評価事例一

田中 達也^{1*}・Patrick Bruines¹・鑑 顕正¹・橋本 秀爾²・葛葉 有史³・大西 有三⁴

¹(株)大林組 本社原子力本部原子力環境技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2 品川インターシティB)

²(株)シーエフシー (〒104-0032 東京都中央区八丁堀3-13-1)

³独立行政法人日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 ニアフィールド研究グループ (〒319-1194 茨城県那珂郡東海村村松4-33)

⁴京都大学 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

*E-mail: tanaka.tatsuya@obyashi.co.jp

日本原子力研究開発機構は、スイスのグリムゼル岩盤研究所において、グラウトの浸透範囲を管理しつつ、グラウト施工を行う実証試験を予定している。本報告では、グラウト注入の対象範囲および注入仕様の設定を目的とした、水理地質構造の調査と評価の結果をとりまとめる。同試験場は花崗岩体中に位置し、グラウトは割れ目を主な経路として移動することから、調査・評価結果を3次元的な割れ目ネットワークモデルを用いて統合・記述した。また、着目する岩体の割れ目帯の方位や深度および水理特性を可能な限り決定論的にモデル内に記載する方針を採用したことで、同モデルを施工計画の基盤情報として活用することが可能となった。さらに、同モデルを用いた地下水流動解析を実施し、現時点の不確かさを整理するとともに、次年度の試験計画の立案に向けた今後の対策について整理した。

Key Words : grouting, fractured rock mass, geological disposal, underground research laboratory

1. はじめに

日本原子力研究開発機構（以下、原子力機構）は、わが国の深部地質環境の特徴を考慮し、高レベル放射性廃棄物などの地層処分に求められる性能を満足するグラウト技術の高度化開発プロジェクトに平成 19 年度より取り組んでいる¹⁾²⁾。

地層処分事業では、地下施設の建設時にグラウチング等の工学的な対策を実施した場合には、実施した工学的な対策が地層処分の安全確保において重要な要素となる天然の岩盤（天然バリア）や工学的なバリア（人工バリア）の要求性能に長期的に悪影響を及ぼさないことを確認することが重要な要素となる。グラウチングによる止水効果を設計段階に評価するためには、グラウトの浸透範囲を把握することが重要な要素となるが、特に岩盤内の地下水が水みちとなる割れ目を主体的に流れる割れ目系岩盤では、水みちとなる割れ目の特性やそれに伴う水理的な不均質性の評価も難しく、グラウトの設計・施工は実績や経験に基づき行われてきた。

上記の背景から、原子力機構は平成 21 年度より、スイスのグリムゼル岩盤研究所において、グラウト注入の実証試験の実施に向けて、試験対象岩盤の水理地質特性の調査・評価を実施してきた。同実証試験においては、グラウト注入の計画段階において、グラウトの浸透範囲

の評価・予測結果を考慮し、グラウト注入試験を実施することで、グラウトの浸透範囲を考慮したグラウトの設計・施工の方法論の構築に資する情報を取得することを目標としている³⁾。

本報告では、上記のグリムゼル岩盤研究所における原位置試験において、調査・試験により得られた地質学的、水理学的なデータを解釈、統合することで、試験対象岩盤の水理地質構造を 3 次元の割れ目ネットワークモデルを用いてモデル化した事例と同モデルの不確かさの低減に向けた今後の対策について紹介する。

2. 試験エリアの地質概要

グリムゼル岩盤試験場は海拔約 1730m、土被り約 450m の結晶質岩地塊中に位置する。本地域の花崗岩類は約 290-300Ma のバリスカン造山運動期に固結したものであり、ところどころで主にランプロファイアによる貫入を受けている。またこれらの花崗岩類は、強いアルプス造山運動による変形・変成作用を受けており、片麻状構造や断層ガウジを伴うせん断割れ目帯とした構造組織や不連続構造が確認できる。

グラウト注入実証試験を実施する試験エリア（以下、試験エリア）周辺の地質構造の平面図を図-1 に示す。試験エリアはランプロファイア（図-1 中の緑）に囲ま

れた領域で、その周辺には NE 系の走向の割れ目（図-1 中の赤）が卓越することが既存の調査等により確認されている⁴⁾。

図-1 中の青線・JGP09-01 孔、JGP09-02 孔および JGP10-01 孔はそれぞれ、予備調査（平成 21 年度実施）および事前調査（平成 22 年度実施）において既存坑道より新たに掘削したボーリング孔の平面配置を示している。これらのボーリング孔を利用した調査・試験に基づき、試験エリア内の割れ目が実際にどのような地質性状を有し、試験エリア内の地下水の流動にどのように寄与しているのかを把握することで、水理地質構造の理解を進めて、グラウト注入試験の計画・実施に適切に反映する。

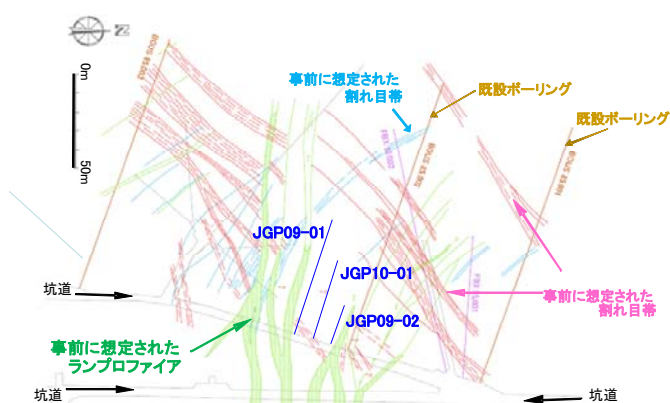


図-1 試験エリア周辺の地質構造とボーリング孔配置

3. 割れ目ネットワークモデルの構築方針

本報告で示す割れ目ネットワークモデルとは、試験エリア内に分布する複数の割れ目を平行平板を仮定した正方形と仮定し 3 次元的に可視化するネットワークモデルである。個々の割れ目は幾何特性として、割れ目の中心座標、方位（走向・傾斜）、割れ目の長さの 3 つの特性値を、透水特性として透水量係数を有する⁵⁾。

割れ目ネットワークモデルの構築には、その幾何学特性、透水特性を確率密度関数で定義することで統計的に割れ目を再現する統計的アプローチと、割れ目のパラメータを特定して再現する決定論的なアプローチがある。

予備調査および事前調査では、試験エリアに新たに掘削したボーリング孔を利用した調査・試験に基づき、グラウト注入試験を実施する岩体の対象深度や位置を同定していくことが研究の成果目標となる。また、事前調査後には、別途開発したグラウト浸透モデルを用いたグラウト注入の数値解析結果に基づき、グラウトの浸透範囲を考慮して、グラウト注入試験の計画立案を行う⁶⁾。グラウト浸透モデルを用いた数値解析では、個々の割れ目の効果を考慮した等価多孔質媒体を仮定しており、割れ目ネットワークモデルを用いて、不均質性を考慮した透水係数の場のモデルを提供することを計画している。

割れ目ネットワークモデルの構築は、上記の目的を反映し、モデル化に利用する情報（ボーリング孔を利用し

た調査データの数量・種別等）の増加に対応し、決定論的に再現する割れ目を可能な限り増やしていく方針を採用した。なお、割れ目ネットワークモデルの構築には、同モデルを用いて地下水流動解析も実施可能なモデル化・数値解析コード、NAPSAC を用いた⁷⁾。

4. 割れ目の水理地質構造の整理

(1) 試験エリアの地質学的特性

試験エリアの両端（JGP09-01 孔と 09-02 孔）および試験エリアの中央（JGP10-01 孔）のボーリング孔における岩芯観察と BTV 観察結果より、試験エリア内の主要な割れ目は、その周辺と同様に NE 系走向の高傾斜の方位で卓越することを確認した（図-2）。それらの割れ目は、花崗岩の片麻状構造と同様の走向傾斜を持つことから、試験エリアに卓越する主要割れ目は、主に片麻状構造に沿って形成されたものと考えられる。また、主要割れ目は、岩芯による割れ目性状の観察結果、BTV 画像から算出される割れ目密度などから、剪断割れ目卓越区間と断層岩（断層ガウジを含む区間）、およびランプロファイアが貫入した付近にも集中して分布することが確認された（図-3）。

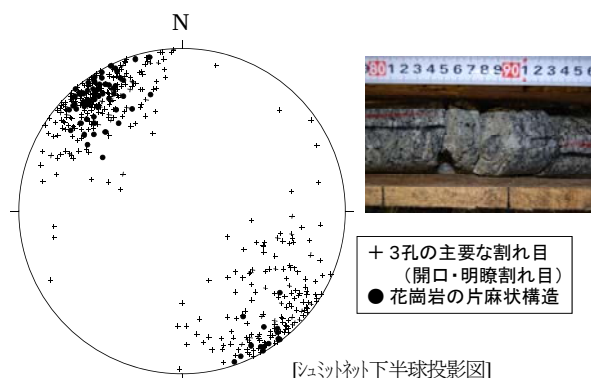


図-2 ボーリング孔で確認した割れ目の方位分布
(写真は岩芯観察により確認した断層ガウジ)

図-3 中の灰色のハッチは、各孔で確認された剪断割れ目卓越部および断層岩が NE 走向にて連続すると推定し記載した断層破碎帯の分布推定範囲である。

(2) 割れ目ネットワークモデルの幾何特性

JGP09-01 孔、09-02 孔、および 10-01 孔の 3 孔で確認した割れ目については、BTV 観察で特定した深度と方位にて試験エリアのモデル内に決定論的に再現した。また、同ボーリング孔に交差しない割れ目については統計的に再現した。これにより、試験エリアの割れ目を決定論的および統計的に再現した割れ目の統合によりモデル化する。割れ目の統合手順は、①統計的に全割れ目ネットワークモデルを構築、②ボーリング孔に交差する割れ目を除去、③決定論で割れ目ネットワークモデルを構築、④②のモデルと③のモデルの統合である（図-4）。

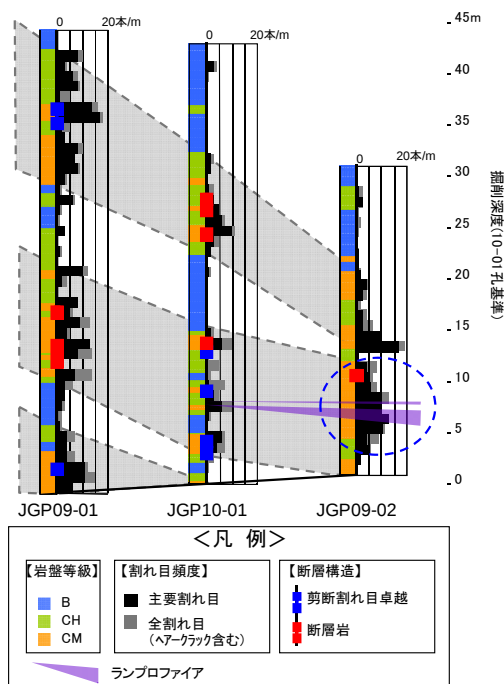


図-3 地質構造の評価結果

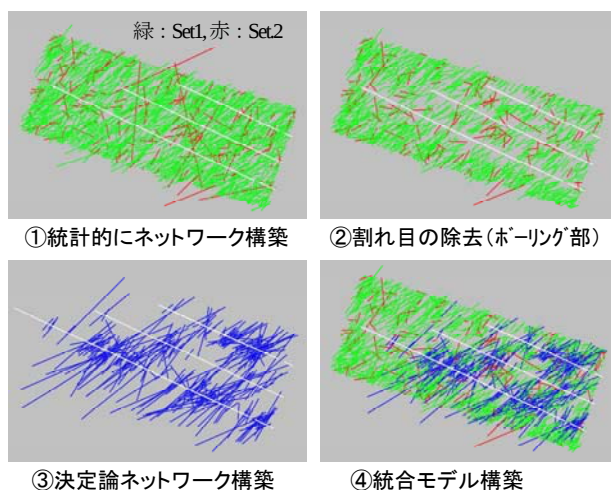


図-4 統計的な割れ目と決定論的な割れ目の統合手順

ここで統計的に再現する割れ目のモデル化に用いた確率密度関数とそのパラメータを表-1 に示す。割れ目の卓越方位セットの抽出には Mahtab と Yegulap のクラスター解析を適用し、ボーリング方位の測定方位による偏りは Terzaghi の手法で補正した⁸⁾。割れ目の3次元密度(P32)はボーリング方位と Fisher 係数により求まる係数(C13)を1次元割れ目密度(P10)に乘じることで算定した⁹⁾。割れ目の長さ分布については、グリムゼル岩盤試験場の地表部の露頭観察に基づく、トレース長の観察結果に基づき設定した。

決定論的な割れ目の孔-孔間の連続性と長さについては、調査による直接的な情報の取得が困難であるため、①割れ目の連続性を方位の数学的解釈と割れ目の地質学的解釈に基づき設定すること、および②割れ目の長さを確率密度関数に基づき設定すること、の2つのアプロー

チで決定した。

表-1 割れ目の幾何特性のパラメータ

方位セット	方位分布 [傾斜/傾斜方位] [Fisher係数]		長さ分布 [Lo, Exp.]	密度 [P10 (n/m)]	密度 [P32(m ² /m ³)]
	86 / 144	16.0	2.5, 4.0	3.09	3.86
2	60 / 307	2.7		0.33	0.56
確率密度関数	Fisher分布		べき乗分布	—	—

*Lo: 長さの最小値, Exp.: 傾斜のパラメータ

孔-孔間の割れ目の連続性は、両孔で確認した割れ目をその深度、方位（走向・傾斜）で互いに延長し、その交差角度が5度および10度以内になる場合に、当該割れ目が両孔間を連続して分布する割れ目の候補（以下、割れ目ペアという）とした。

また、試験エリアの両端に位置する JGP09-01 孔と 09-02 孔についても同様の方法論で割れ目ペアを選定し、JGP10-01 孔においても、JGP09-01 孔と 09-02 孔のそれぞれの孔間にて連続する割れ目ペアが存在する場合に限り、3孔間を連続性を有して分布する割れ目とした。

上記の手順により抽出した割れ目ペアと地質構造の評価結果と併せて図-5 示す。図では交差角度を10度以内とした選定した割れ目ペアを赤線にて記載しているが、推定した断層破碎帯区の分布領域（灰色ゾーン）に連続性の高い割れ目が多く分布する結果となり、割れ目の幾何特性から解釈した結果と地質学的な解釈結果が整合的であることが確認された。

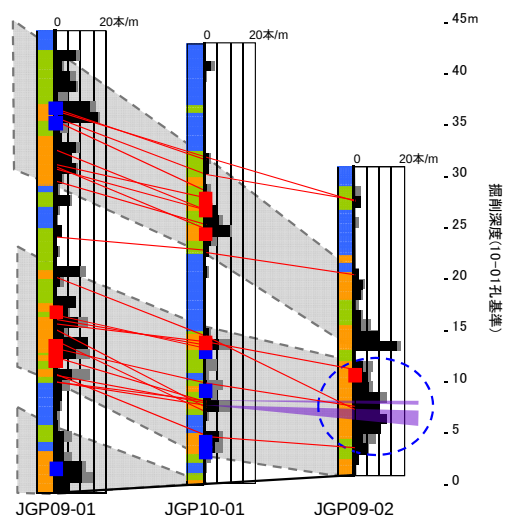


図-5 地質構造の評価結果と孔間で連続性を有する割れ目の分布の推定結果（図中赤線）

(3) 割れ目ネットワークモデルの透水特性

割れ目の透水特性の設定には、水理的開口幅、或いは透水量係数を規定する方法がある。3孔では試験区間長を2.5mとした単孔式透水試験結果（全30区間）が得られている。各試験区間で確認された割れ目の幾何学的開口幅（BTV 観察、0.5mm～2.0mm）の総和と当該試験区

間の透水量係数（透水係数×2.5m）を比較した結果、両者に明瞭な相関が確認できない結果となった。そのため、決定論的な割れ目の透水量係数は、当該区間に分布する複数の割れ目の透水量係数分布を対数正規分布の確率密度関数に近似することで、当該試験区間の透水量係数を維持するように配分した。また、統計的な割れ目の透水量係数は全 30 区間の単孔式透水試験結果を利用し、上記の方法で設定した決定論的な割れ目の透水量係数の集約結果（図-6）に基づき、統計的に再現した。図-6 中に示す「Sigma」の 2~4 は適用した自然対数の正規分布の標準偏差（図中カッコは常用対数の正規分布の標準偏差）を示しており、3 つの標準偏差をパラメータとした 3 つの透水量係数分布を設定した。

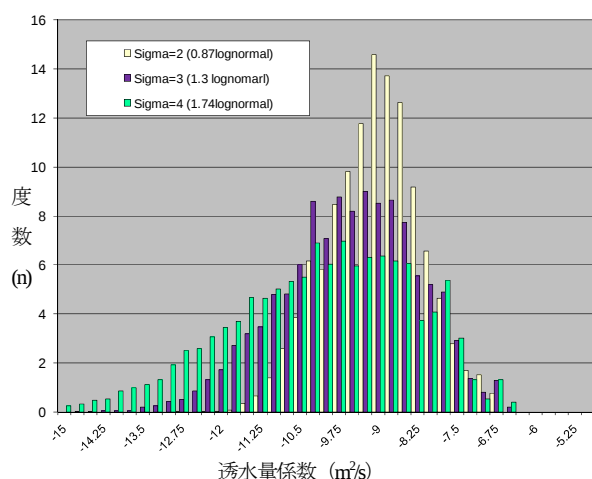


図-6 試験エリアの割れ目の透水量係数分布

5. 割れ目ネットワークモデルの構築と反映

(1) 割れ目ネットワークモデルの構築

上述の割れ目の幾何特性および透水特性、および統計的な割れ目と決定論的な割れ目の統合手法を適用し、割れ目ネットワークモデルを構築した（図-7）。モデル化対象領域は JGP10-01 孔をモデル中心に水平に配置して、20m×20 m×35m（縦・横・坑道からの奥行き）である。また、全割れ目の 10%程度の割れ目が、それらの位置、方位、孔間の連続性および透水量係数を決定論的にモデル化している。

構築した割れ目ネットワークモデルの不確実性の程度を確認するため、以下に示す 2 つの取り組みを実施した。

a) 試験エリアの岩盤の透水係数の不均質性

新たに掘削した全 3 孔のボーリング孔を利用して全 30 区間の透水試験結果（区間長 2.5m）が取得されている。構築した割れ目ネットワークを用いて 2.5m 立方の岩体に対する等価透水係数を算定し、透水試験結果と比較した。図-8 は 3 孔のボーリング孔を配置した周辺領域（2.5m×15 m×35m）を対象領域として等価透水係数（全 78 ブロック）と透水試験結果を比較したものである。ここでは決定論的な割れ目の孔-孔間の連続性を交差角度 10 度としたモデルで、標準偏差をパラメータとした 3 つの透水量係数分布を適用した結果を示している。

次に、モデル化対象領域とした全領域（20m×20 m×35m）を評価対象領域として割れ目ネットワークモデルに基づく等価透水係数（全 896 ブロック）と透水試験結果の分布を整理・比較したものを図-9 に示す。図では透水量係数分布の標準偏差を 3 とし、決定論的な割れ目の孔-孔間の連続性を交差角度 10 度および 5 度とした 2 つのモデルの算定結果に加えて、交差角度 10 度の代替モデルの結果を整理している。交差角度 10 度の代替モデルは、決定論的な割れ目の透水量係数分布の標準偏差を 3 に、統計的に再現する割れ目の透水量係数分布の標準偏差を 4 に設定したモデルである。

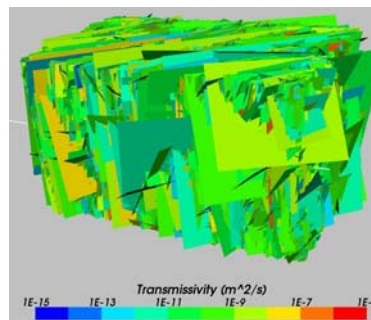


図-7 構築した割れ目ネットワークモデルの一例

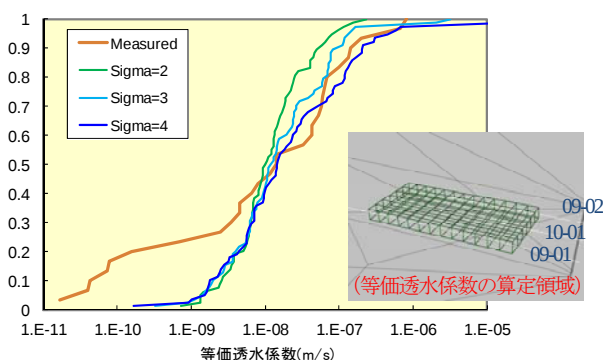


図-8 透水試験結果と等価透水係数の分布の比較

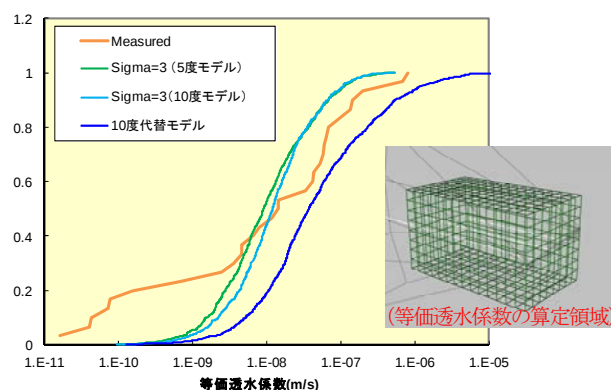


図-9 透水試験結果と等価透水係数の分布の比較

図-8 および図-9 の結果より、透水量係数分布の標準偏差は、等価透水係数として特に 1E-8m/s 以上の範囲の不均質性に影響が大きいことから、その不確かさを低減することが、3 孔のボーリング孔を配置した周辺領域やモデル化対象領域全体の水理的な不均質性を表現するために重要であることがわかる。一方、孔-孔間の割れ目

の連続性を示す交差角度の差異は、試験エリア全体の等価透水係数の不均質性には大きな影響がないことが確認できる。

b) 透水確認試験のシミュレーション

事前調査では、JGP10-01 孔に沿って相対的に高い透水性が確認された深度 22.34～29.82m を注水区間として、高透水性の割れ目の連結性が想定される JGP09-01 孔の深度 20.52～35.22m の区間を対象に透水確認試験を実施している。本試験では JGP09-01 孔の当該区間を圧力開放状態として、JGP10-01 孔よりの注水に伴い JGP09-01 孔における湧水の増加流量を計測した。湧水の増加流量は、10-01 孔への 600mL/min の注水時に 37mL/min (総湧水量で 306mL/min) であった。

構築した割れ目ネットワークモデルを用いた地下水流動解析を行い、上記の透水確認試験時の JGP10-01 孔よりの注水量、JGP09-01 孔よりの湧水量を算定した (図-10)。水理的な境界条件は左右側面をノーフロー境界、上下面および孔底側面を定水頭境界、坑道面を 0 水頭境界とした。図では交差角度を 10 度としたモデルによる 5 つのリアライゼーション結果と、交差角度を 5 度としたモデルおよび 10 度代替モデルの各 1 つのリアライゼーション結果を実測値と併せて示している。

解析結果と実測結果の比較により、数値解析結果では注水量と増加流量がほぼ同等になるのに対して、実測値ではその比率が 6%程度と小さい。この差異の要因を特定することは難しいが、水理的な境界条件の設定、あるいは孔-孔間を超える領域の外側 (水理的な境界近傍) の割れ目ネットワークが不確かであることが考えられる。

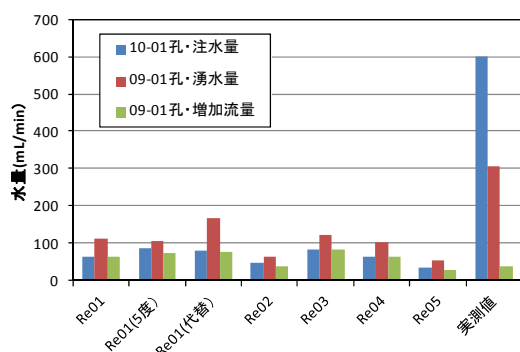


図-10 透水確認試験の数値解析結果 (5リアライゼーション)

(2) 割れ目ネットワークモデルの利用

a) グラウト浸透モデルへの情報提供

上述の検討により、事前調査終了段階の割れ目ネットワークモデルとして、種々の不確かさがあるものの交差角度を 10 度、透水量係数の標準偏差を 3 としたケースを基本モデルとして設定した。

このモデルを用いて、グラウト浸透モデルにて使用する透水係数場のモデルを構築した (図-11)。透水係数の算定はブロックの寸法を 0.5m 立方として、アップスケーリング手法による透水テンソルの算定を実施した。

適用するアップスケーリング手法は、透水テンソルを算定する立方体側面に動水勾配を主軸 3 軸方向に与え、立方体 6 側面の流入出量と動水勾配から、当該評価ブロックの透水テンソルと等価透水係数 (K_{xx} , K_{yy} , K_{zz} の幾何平均値) を算定するものである⁷⁾。

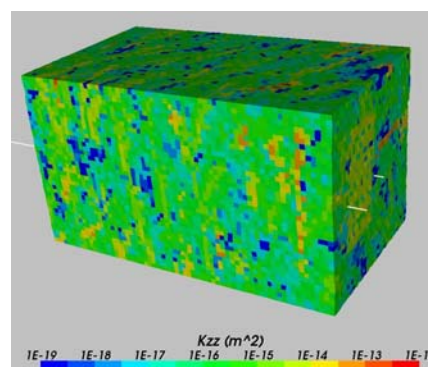


図-11 試験エリアの等価透水係数のモデル

b) グラウト注入試験計画への情報提供

構築した割れ目ネットワークモデルおよび等価透水係数モデルに基づき、JGP09-01 孔、JGP09-02 孔および JGP10-01 孔の 3 孔が位置する水平断面上の透水特性を整理して図-12 に示す。

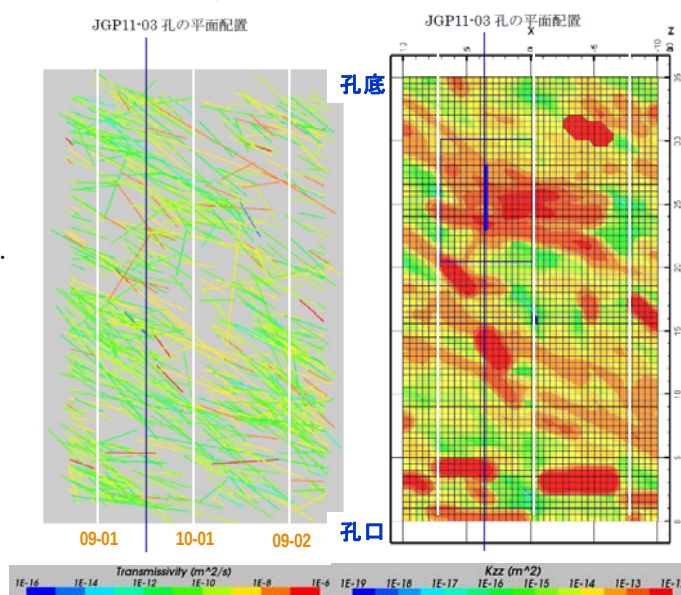


図-12 水平断面の割れ目分布と等価透水係数

透水確認試験にて増加流量が確認された、JGP10-01 孔の深度 22.34～29.82m から JGP09-01 孔の深度 20.52～35.22m の領域において、NE 方向に沿って割れ目および高透水領域が分布することが確認できる。

事前調査後のグラウト注入計画立案では、この JGP10-01 孔と JGP09-01 孔を結ぶこれらの高透水領域をグラウト対象領域として選定し、両孔間に注入孔 (図中の JGP11-03 孔) を新たに掘削すること、また、その注入深度を高透水領域が分布する深度 25.0～28.0m の領域として設定した。この領域は図-5 に整理した断層破碎帯区間の一つに位置しており、地質構造からも割れ目の

密度が高い領域となる。

6. おわりに

スイスのグリムゼル岩盤試験場において、グラウト実証試験を計画・実施するため、事前調査までのデータを用いた水理地質構造の評価を進め、それらの結果を割れ目ネットワークモデルとして整理、統合した事例を紹介した。同モデルはグラウト浸透モデルで用いる不均質な透水係数場の情報となるだけでなく、その不確かさを段階的に確認することで、次段階の調査・試験やグラウト注入試験の計画立案のための基盤情報となった。

現時点の割れ目ネットワークモデルの不確かさとそれを低減するための今後の方策について表-2 にとりまとめる。

表-2 割れ目ネットワークの不確かさと対策

分類	不確かさ	対策
決定論的な割れ目	○ グラウト注入区間周辺領域においても、その位置・方位を決定論的に再現できている割れ目の割合は小さい。	新規ボーリング調査に基づき、決定論的に再現する割れ目を増やす。
	○ 透水試験区間(2.5m)内に複数の割れ目が分布する場合の割れ目の透水係数の設定値。	現状は統計的に配分している。リアライゼーション等による対策が必要。
	○ 異なるボーリングで確認された割れ目の連続性の判断。	新規ボーリング調査結果による検証と精度向上
統計的な割れ目	○ 決定論割れ目を考慮できるボーリング孔周辺とその他の領域では、モデルの精度が異なる。	リアライゼーション等による対策が必要。
統合モデル	○ 物質移行を評価するための割れ目開口幅(割れ目ネットワークモデル)或いは有効空隙率(等価多孔質媒体)の同定。	トレーサー試験による物質移行挙動を示す情報の追加。
地下水流動解析	○ 水理的な境界条件の設定。	ボーリング調査による情報の追加取得は困難であり、感度解析等による影響の検討を実施。

平成 23 年度に実施するグラウト実証試験では、注入の事前に注入孔および観測孔として合計 3 本のボーリング孔を新たに掘削する。これらのボーリング孔を利用した調査・試験を実施することにより、現状のモデルの不確かさを低減し、試験エリア、特にグラウト対象領域の水理地質構造の理解を進める計画である。

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) 藤田朝雄, 笹本広, 畑中耕一郎, 油井三和：地層処分におけるグラウト技術の高度開発（その1），平成 23 年度土木学会全国大会講演概要集, CS3-033, 2011 年 9 月
- 2) 田中達也, 松井裕哉, 橋本秀爾, 安藤賢一, 竹内真司, 三枝博光：結晶質岩中の地下坑道掘削を対象としたグラウト効果に関する研究(3)ープレグラウトによる湧水抑制効果の数値解析的検討ー, 第 38 回岩盤力学に関するシンポジウム, 2009
- 3) 中西達郎, 畑中耕一郎, 津田秀典, 田中達也, 鶴山雅夫, 大西有三：地層処分におけるグラウト技術の高度化研究（その1）ー結晶質岩サイトにおけるグラウト実証試験, 第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム, 投稿中
- 4) H. R. Keusen, J. Ganguin, P. Schuler, M. Buletti：GRIMSEL TEST SITE-GEOLOGY. *Nagra Technical Report 87-14E*, 120p.,1989.
- 5) 田中達也, 安藤賢一, 橋本秀爾, 三枝博光, 竹内真司, 天野健治：岩盤中の透水構造分布に着目した水理地質構造モデルの構築手法の検討, 第 36 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 267-272, 2007
- 6) 小山倫史, 片山辰雄, 蓮井昭則, 田中達也, 岸裕和, 大西有三：地層処分におけるグラウト技術の高度化研究（その3）ー多孔質媒体モデルを用いた溶液グラウト注入解析, 第 41 回岩盤力学に関するシンポジウム, 投稿中
- 7) Hartley L J, Holton D：CONNECTFLOW(release 2.0), *Technical summary document*, SERCO/ERRA-C/TSD02V1, 2003
- 8) Mahtab M A, Yegulalp T M：1984. A similarity test for grouping orientation data in rock mechanics, in *Rock mechanics in productivity and protection*, Dowding Charles, H. and Singh Madan, M, Editors., A.A. Balkema: [location varies], p 495-502., 1984
- 9) Wang, Xiaohai：Stereological Interpretation of Rock Fracture Traces on Borehole Walls and Other Cylindrical Surfaces, *PhD thesis Virginia Polytechnic Institute and State University*, 2005

DEVELOPMENT OF GROUT INJECTION MODEL FOR GEOLOGICAL DESPOSAL OF HIGH LEVEL NUCLEAR WASTE (2) - HYDROGEOLOGICAL DESCRIPTIVE MODELING BY DISCRETE FRACTURE NETWORK IN CLISTALINE ROCK TEST SITE -

Tatsuya TANAKA, Patrick BRUINES, Kensho ABUMI, Shuji HASHIMOTO, Yuji KUZUHA and Yuzo OHNISHI

This study aims to establish grouting techniques and evaluation of the effects of grouting in the geological environment of crystalline rock. A hydrogeological model has been generated using discrete fracture networks (DFN) based on the data obtained by the short-borehole investigation campaign performed at Grimsel test site in Switzerland to support the design of planned in-situ grouting test. The equivalent porous media with the consideration of hydraulic heterogeneity has been created from the DFN in order to be provided for the simulation of the grout injection process. Uncertainties and remaining issues associated with the assumption in interpreting the data and its modeling were addressed in a systematic way.