

ダム基礎処理における割れ目ネットワークモデルを用いたグラウト浸透シミュレーション

Grouting Simulation for Dam Foundation Rock Mass Using Three-Dimensional Discrete Fracture Network Models

三好貴子 石橋正祐紀 升元一彦

要 約

ダム工事における基礎処理工のグラウチング注入孔には、規定孔と追加孔の二種類がある。基礎処理工では規定孔の施工は必須となっているが、追加孔については、その要否ならびに施工はルジオン試験の結果に基づいて経験的に判断されているのが現状である。そこで、筆者らは追加孔の要否ならびに施工位置の判断に資することを目的とした、亀裂性岩盤における三次元割れ目ネットワークモデルを用いたグラウト浸透シミュレーションプログラムの開発に取り組んでいる。本稿では国内のロックフィルダムの基礎岩盤を対象にシミュレーションを適用し、規定孔へのグラウチング完了時における基礎岩盤の透水性分布を求めた。その結果を実測値と比較した結果、ルジオン値を予測できていることを確認した。

目 次

- I. はじめに
- II. グラウト浸透シミュレーション
- III. ロックフィルダム基礎岩盤での検証
- IV. まとめ

I. はじめに

ダムの基礎処理工では、貯水池からの浸透水を遮水する目的で、ダム基礎にボーリング孔を削孔し、そこからグラウト材を注入し岩盤を改良するグラウチングが行われる。グラウチング注入孔には、設計上最低限必要な孔として施工が定められている規定孔と、規定孔の数量を超えて実施される追加孔がある。注入孔の配置には一般的に中央内挿法¹⁾が用いられる(単列状の中央内挿法による施工における注入孔の配置例を Fig.1 に示す)。中央内挿法による施工は、規定孔をパイロット孔(P孔)、1次孔、2次孔というように施工順序に従って次数を設けて行われ、追加孔はさらに3次孔、4次孔というように次数を増して施工される。

設計で施工が定められている規定孔とは異なり、追加孔の要否ならびに施工位置・深度は透水試験(ルジオン試験または水押し試験;以降、ルジオン試験で統一)の結果に基づいて経験的に判断されている。そこで、筆者らは追加孔の要否ならびに施工位置の判断に資することを目的とした、亀裂性岩盤におけるグラウト浸透シミュレーションプログラムの

開発に取り組んでいる。

規定孔までのグラウチングの効果の定量的評価のためには、岩盤内の透水性を把握する必要がある。亀裂性岩盤における地下水の流れは主に割れ目を經由するため、グラウチングの効果の定量的評価のためには、割れ目の性状と透水性の関係や、割れ目の分布および連続性についての評価が不可欠となる。そこで、筆者らは、岩盤内の割れ目を幾何学的パラメータに基づいて確率論的に直接モデル化する手法である三次元割れ目ネットワークモデル(Discrete Fracture Network Model)を用いてグラウト浸透シミュレーションプログラムを開発している。ここでは、本シミュレーションの概要と国内のロックフィルダムの基礎岩盤における適用事例について報告する。

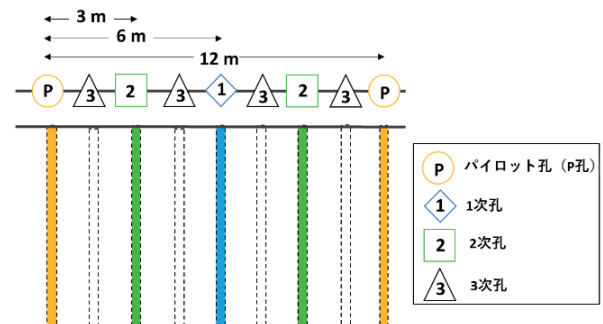


Fig.1 グラウチング注入孔の配置例
(Example Arrangement of Grouting Boreholes)

キーワード: 割れ目ネットワークモデル, グラウチング, ダム基礎, ルジオン試験

Keywords: Discrete Fracture Network model, grouting, dam foundation, Lugeon test

II. グラウト浸透シミュレーション

1. 概要

割れ目ネットワークモデルを用いたグラウト浸透シミュレーションには Mohajerani et al.(2017)²⁾や Zou et al.(2019)³⁾ によるものがある。Mohajerani et al. は、流体の種類、単体割れ目の形状、注入環境の3つのパラメータから、割れ目を平行平板としてモデル化し、グラウト浸透距離を求めるアルゴリズム (Explicit Grout Forehead Pressure アルゴリズム) を開発した。この EGFP アルゴリズムを、二次元の割れ目ネットワークモデルに適用することでグラウト浸透解析を実施している。Zou et al. は地下水で飽和された状態の岩盤におけるグラウトの浸透領域を二次元の割れ目ネットワークモデルを用いて算出している。いずれも、グラウト材の性質や注入環境をインプットとし、二次元割れ目ネットワークモデルにおけるグラウト材の挙動を忠実に再現しているが、これらの手法を解析範囲が広範囲にわたるダム基礎岩盤において三次元解析に適用することは難しい。そこで、本研究では、地下水の浸透流解析の理論を応用することで、既存の現場データを最大限に活用し、グラウト浸透を模擬する解析フローを構築した。

2. 解析フロー

本シミュレーションのフローを Fig.2 に示す。まず、対象範囲の割れ目ネットワークモデルを構築する。その後、規定孔までのグラウチング注入実績に基づき、各孔におけるグラウト材の注入量ならびにルジオン試験結果をインプットパラメータとし、規定孔へのグラウチング完了時における基礎岩盤の透水性分布を算定する。なお、本シミュレーションはダム基礎処理工における、パイロット孔で区切られる範囲 (注入ブロック) を対象としている。

(1) 割れ目ネットワークモデルの構築

割れ目ネットワークモデル構築の最初のステップとして、実測割れ目の情報を整理する。具体的には、岩盤スケッチやボアホールカメラ (BTV) 観察、コア観察等のデータから、割れ目の走向傾斜、密度、半径等の幾何学的パラメータ (統計分布) を推定する。推定した統計分布を基に、モデル領域に確率論的に割れ目を発生させる。また、モデルの不確実性低減に向け、断層や、グラウチング注入孔に交差する高透水割れ目については、実測に応じて決定論的に割れ目を挿入する。

割れ目モデルの透水性は、実測のルジオン値分布から地球統計学による手法 (クリギング) を用いて連続的な三次元分布に変換し、各割れ目の透水量係数として設定する。これらのプロセスを経て構築した割れ目ネットワークモデルを LT-FLOW⁴⁾プログラムを用いてパイプモデルに変換する (Fig.3)。この変換によって、単一の割れ目を格子状に組まれたパイプで置き換え、(1)式および(2)式を用いて、割れ目の特性値 (半

径、透水量係数、割れ目の開口幅) からパイプの初期透水性 (透水係数および断面積) を決定する。また、割れ目の交線についてもパイプを設定することで、隣り合う割れ目を介した地下水流動をモデル化する。

$$k = T/b \quad \dots (1)$$

$$A = d \times b \quad \dots (2)$$

ここで、 k : パイプの透水係数 (m/s)

T : 割れ目の透水量係数 (m²/s)

b : 割れ目の開口幅 (m)

A : パイプの断面積 (m²)

d : 割れ目半径から算定されるパイプの間隔 (m)

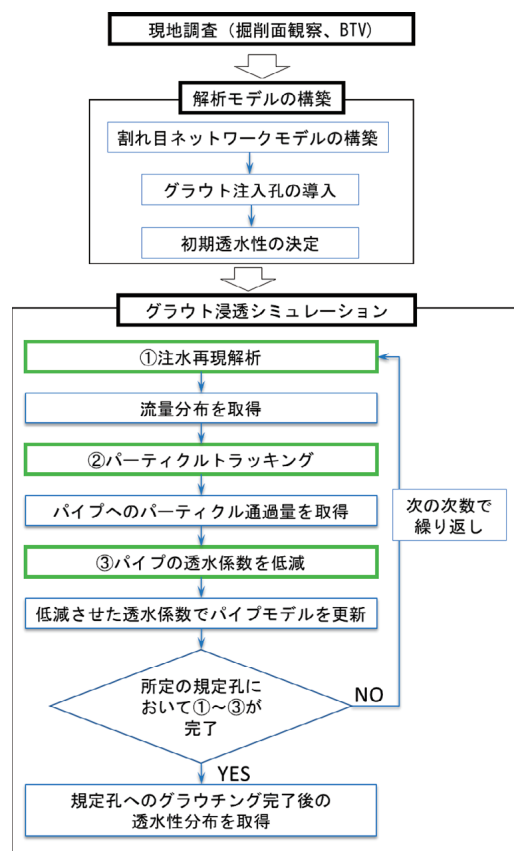


Fig.2 グラウト浸透シミュレーションのフロー (Flowchart of Grouting Simulation)

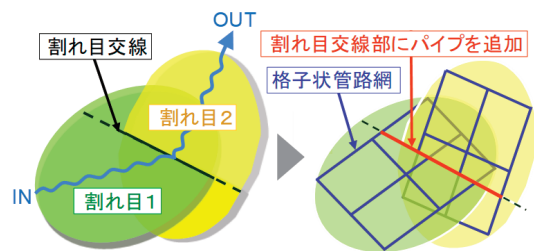


Fig.3 パイプモデル化手法の概念図 (Generation of Pipe Network Model)

(2) グラウト浸透シミュレーション

作成したパイプモデルを用いてグラウト浸透シミュレーションを実施する。グラウト浸透シミュレーションは Fig.2 に示すとおり、①注水再現解析による流量の取得、②その流量に応じたパーティクルトラッキング、③パーティクルの通過量に応じたパイプの透水係数の低減、といった①～③のステップを P 孔→1 次孔→2 次孔・・・と所定の規定孔において施工順序に従って実施し、対象とする注入ブロックに対してグラウト材の浸透範囲が広がる事象を模擬し、規定孔へのグラウチング完了後の基礎岩盤の透水性分布を算定する。この3ステップの詳細説明を以下に示す。

①では、対象とするボーリング孔に一定の水頭を設定し、注水再現解析を実行することで各パイプを通過する流量を取得する。

②では、パーティクルトラッキングを実行する。パーティクルはセメント粒子を模擬しており、対象とするボーリング孔とパイプが交差する箇所から放出される。パーティクルの移行経路は①で取得した流量に応じて決定される。よって、流量が大きいパイプほど、パーティクルが多く通過することとなる。この際、各パイプを通過したパーティクル数を取得する。

③では、通過したパーティクル数に応じてパイプの透水係数を低減させ、パイプモデルを更新する (Fig.4)。このとき、パーティクル数とパイプの透水係数の低減率を、「低減関数」で関連付ける。低減関数は実施工のグラウチング実績から推定する。国内のロックフィルダムにおいて適用した低減関数の関数式の例を3章に記述する。

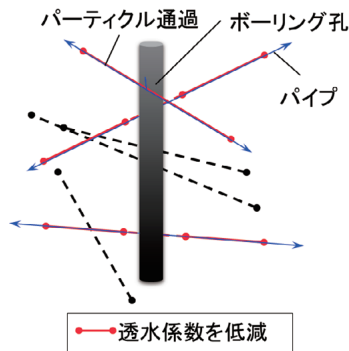


Fig.4 パーティクルトラッキングによるパイプ透水係数低減の概念図

(Reduction of Hydraulic Conductivity of Pipes according to the Result of Particle Tracking)

(3) 最適化プロセス

前述した基本フローに加えて、実施工のグラウチング実績の再現性を向上させるため、規定孔施工時の実測値を用いたモデルの更新(最適化プロセス)を実施する。今回の解析で、

実測値に整合するように解析で使用するパラメータを再設定するプロセスをコンディショニングと呼ぶ。最適化プロセスは二段階で構成されており、一段階目は、グラウチング前の岩盤の初期透水性のコンディショニング、二段階目はグラウチングによる岩盤の透水性の低減率のコンディショニングである。これらのコンディショニングで使用する実測値としては、各孔におけるルジオン値を流量に変換した値を使用する。ルジオン値は有効圧力が 0.98 MPa の時の流量を直接的に測定、または換算式から推定することで求められ、その単位は L/min/m である。ルジオン試験は、一般的に 5 m を 1 ステージとして行われる。この場合、各ステージにおける有効圧力が 0.98 MPa の時の流量は、ルジオン値にステージ長 5 m を掛けることで求められる。最適化プロセスでは、各孔において、全ステージの流量を合計した値を、その孔の流量として使用する。

最適化プロセスの各々のフローを Fig.5 に示す。初期透水性のコンディショニングは、パイプモデルを構成するパイプの断面積の更新である。前述した通り、グラウト材の通り道となるパイプは透水係数と断面積の情報を持ち、これらにより、パイプ毎のパーティクル通過量が決まる。そこで、本コンディショニングでは、グラウチング前の P 孔における流量に対し実測値と解析値を比較し、その比率を用いてモデル内のパイプの断面積を更新し実測値と整合するモデルとする。

透水性低減率のコンディショニングは、実測値に即した透水性の低減関数のパラメータの推定である。低減関数は、ルジオン値とグラウト材の注入量の既存データを用いて推定されるが、ここでは、この関数のパラメータについて各ブロックの規定孔における流量の解析結果と実測値の誤差が最小となるように更新する。

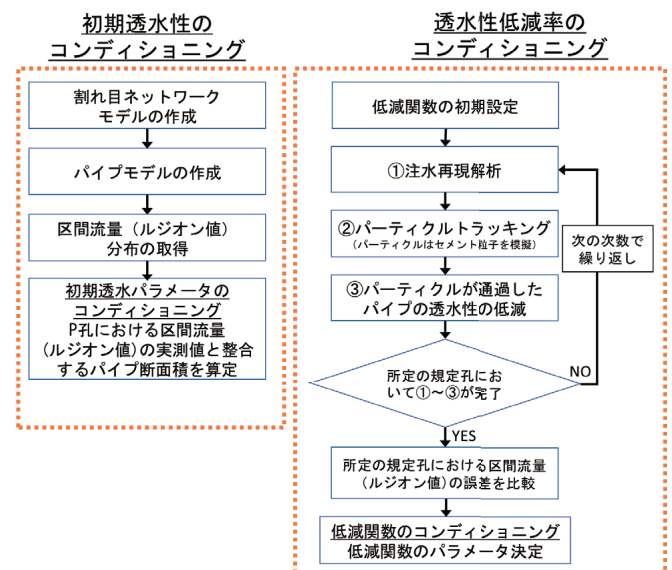


Fig.5 2つの最適化プロセスのフロー (Flowchart of Optimization Process of Grouting Simulation)

Ⅲ. ロックフィルダム基礎岩盤での検証

ロックフィルダム基礎岩盤河床部のカーテングラウチングのうち、一注入ブロックを対象に、最適化プロセスを組み込んだグラウト浸透シミュレーションを適用した。基礎岩盤の地質は花崗岩であり、主に5ルジオン以下の難透水岩盤である。グラウチングは列状の中央内挿法およびステージ式で行われた。グラウチングの改良目標値は5ルジオン(深度50mまで)である。

1. 割れ目ネットワークモデルの構築

本基礎岩盤における決定論的割れ目として、ボーリング孔と交差する高透水割れ目および基礎掘削面で観察された断層をモデル化した。ボーリング孔と交差する高透水割れ目は、同一ボーリング孔におけるBTVデータとルジオン試験データを比較することで特定した。断層のデータは基礎掘削面の岩盤スケッチから取得した。これらの割れ目を決定論的にモデルに反映させることで、観察された高透水割れ目をモデル上で再現した。

確率論的割れ目としては、ボーリング孔と交差していない高透水割れ目および高透水割れ目以外の透水割れ目をモデル化した。確率論的割れ目の透水性について、P孔および事前調査孔のルジオン値データを基に、クリギングを用いて領域全体のルジオン値の三次元分布を推定し、10mブロックごとに透水量係数を設定した(Fig.6)。本基礎岩盤においては、実測のルジオン値が対数正規分布を呈することが確認されていたため、各ブロック内の割れ目の透水量係数も対数正規分布に従うと仮定し、各ブロックの割れ目一枚当たりの平均透水量係数(ブロックの透水量係数/割れ目数)を平均とする対数正規分布を設定した。この対数正規分布から乱数で透水量係数を発生させ、各ブロックにおいて割れ目の半径が大きい順に高い透水量係数を付与することで、半径が大きい割れ目ほど透水量係数が高くなるよう設定した。

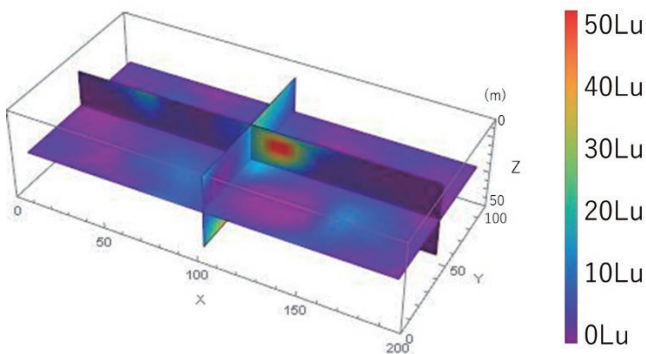


Fig.6 クリギングから推定されたルジオン値分布
(Spatial distribution of Lugeon Value Estimated from Kriging)

同一の統計パラメータから生成された幾何学的に異なるモデルをリアライゼーションという。確率論的なモデル化手法である割れ目ネットワークモデルでは、複数のリアライゼ

ーションから得られた解析結果を統計的に評価する必要がある。本基礎岩盤においては、試行的に5リアライゼーションの割れ目ネットワークモデルを構築し、統計的に評価することとした。

2. グラウト浸透シミュレーション

構築した割れ目ネットワークモデルおよびグラウト浸透シミュレーションの適用範囲をFig.7に示す。また、グラウト浸透シミュレーションの解析条件をTable 1に示す。本解析では、カーテングラウチングのうち、P孔-1の孔口座標が(x,y) = (65.78,41.11)の注入ブロックの2次孔までを対象とすることとした。P孔間の距離は12mであるため、3m間隔で5本のグラウチング注入孔(P孔-1, P孔-2, 1次孔, 2次孔-1, 2次孔-2)をモデルに挿入し、またグラウチング注入孔の深度方向の長さは50mとした。2次孔-1までを規定孔と仮定し、これらのグラウチング注入孔のデータはコンディショニングに使用した。2次孔-2は追加孔と仮定し、検証用データとして使用した。グラウト浸透シミュレーションの適用範囲については、中心にこれらのグラウチング注入孔が位置するように設定した。割れ目ネットワークモデルの領域(200m×100m×50m)に対して、グラウト浸透シミュレーションの適用範囲は80m×80m×50mとしているが、この適用範囲は、事前の注水再現解析にてモデル領域が解析結果に及ぼす影響を確認したうえで決定した。

グラウト浸透シミュレーションのうち、注水再現解析で使用する境界条件は、上下面不透水、側面は水頭0とした。各孔における注水再現解析で使用する水頭は、ルジオン試験の有効圧力と整合させるために100mとした。グラウト浸透シミュレーションは作成した5リアライゼーションの割れ目ネットワークモデルのすべてについて実施した。

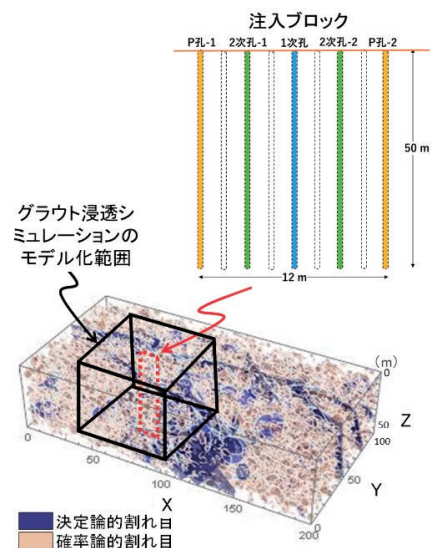


Fig.7 グラウト浸透シミュレーションの適用範囲
(Generated DFN Model and the Extent of Grouting Simulation)

Table 1 グラウト浸透シミュレーションの解析条件
(Conditions of Grouting Simulation)

モデル領域	割れ目ネットワークモデル	$0 \leq x \leq 200$ $0 \leq y \leq 100$ $0 \leq z \leq 50$
	グラウト浸透シミュレーション	$37.75 \leq x \leq 117.75$ $0.38 \leq y \leq 80.38$ $0 \leq z \leq 50$
注入孔	次数	P孔-1, P孔-2, 1次孔, 2次孔-1, 2次孔-2
	孔口座標 (P孔-1)	x, y = 65.78, 41.11
	孔長, 方向	50m, 鉛直
注水再現解析	境界条件	上下面不透水 側面水頭0
	水頭	100 m

最適化プロセスにおいて、初期透水性のコンディショニングには、P孔-1のデータを使用した。解析から求まるP孔-1に交差しているパイプの流量の合計と、実測値のP孔-1における流量を比較し、これらの値が整合するように解析モデルを構成するパイプの断面積を実測値と解析値の比から算出した値で乗算した。

透水性低減率のコンディショニングとして、まず低減関数を設定した。本基礎岩盤において使用する低減関数は、グラウト材の注入量と各ブロックにおけるパイロット孔に対しての各グラウチング注入孔のルジオン値比の関係性から決定した。決定した低減関数を以下(3)式に示す。

$$r = 10^{-\sqrt{p \times g}} \quad \dots (3)$$

ここで、 r : パイプ透水係数の低減率

g : パーティクル通過量

p : コンディショニングで決定するパラメータ

式(3)では、パーティクル通過量の増加に従って、パイプの透水係数が低減されるが、この低減の度合いを表すパラメータである p を透水性低減率のコンディショニングで決定した。

透水性低減率のコンディショニングには 2次孔-1 までのデータを使用した。各リアライゼーションにおいて、低減関数のパラメータとして一定の範囲の値を仮定し、2次孔-1までのグラウト浸透解析を実施した。規定孔と仮定した P孔-2, 1次孔, 2次孔-1における流量を比較し、その合計の誤差が実測値と解析値で最小となるパラメータを使用することとした。追加孔と仮定した 2次孔-2 のデータはいずれのコンディショニングにも使用せず、検証用とすることとした。指定した範囲で極小値が存在しない場合は、範囲を再設定して再度比較を行うこととした。

各注入孔におけるグラウチング前のルジオン値の比較を Fig.8 に示す。ここでは、比較のために流量をルジオン値に換算している。解析値 (5 リアライゼーション) の結果を箱ひげ図で、実測値を赤点で示している。なお、P孔-1 においては、初期透水性のコンディショニングを行ったため、実測値と解析値のルジオン値が一致している。解析値におけるルジオン値の傾向をみると、次数が増加するにつれてルジオン値が低下していることが分かる。これは、グラウチングによって岩盤の透水性が低減される様子がシミュレーションで再現できているためと考えられ、同様の傾向は実測値でも確認できる。また、すべての孔において、実測値が解析値の最大値—最小値間に位置している。検証用として、コンディショニングに使用しなかった 2次孔-2 においても、解析値が実測値を概ね予測できていることが分かる。

Fig.9 に 1 リアライゼーションにおけるグラウチングによる透水係数低減率の三次元分布を示す。ここでは、パーティクルが通過したパイプが三次元的にプロットされており、その色がパイプの透水係数の低減率を示している。低減率が 0 に近づくほど、パイプの透水係数が低減されていることを表す。次数が増すごとに、グラウト材が注入されたボーリング孔付近の岩盤の透水性が低減されていく事象が三次元的に確認できる。

これによって、割れ目の連続性・透水性を考慮したグラウチングの影響範囲を把握することが可能となる。例えば、本基礎岩盤においては、P孔-1 にグラウト材が注入されたとき、そのグラウチングの影響範囲は P孔-2 までは届いていないことが分かる。また、全体的にパイプの透水係数が低減されている領域が、深度 35m 以深に集中しているが、これは対象としているブロックの深度 45m 付近で高いルジオン値が計測されたことに起因していると考えられる。

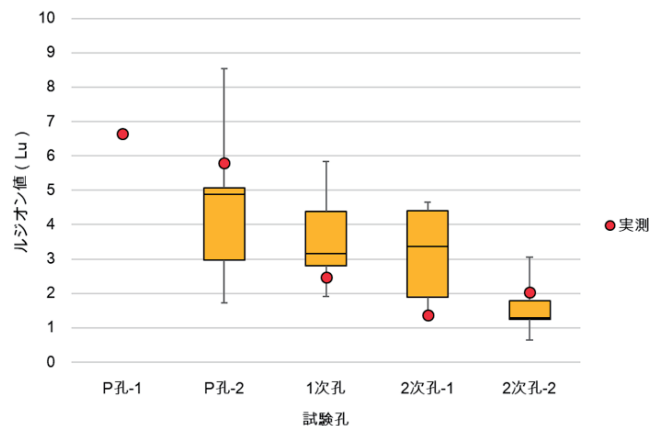


Fig. 8 注入孔におけるルジオン値の比較
(Comparison of Lugeon Value by Grouting Boreholes)

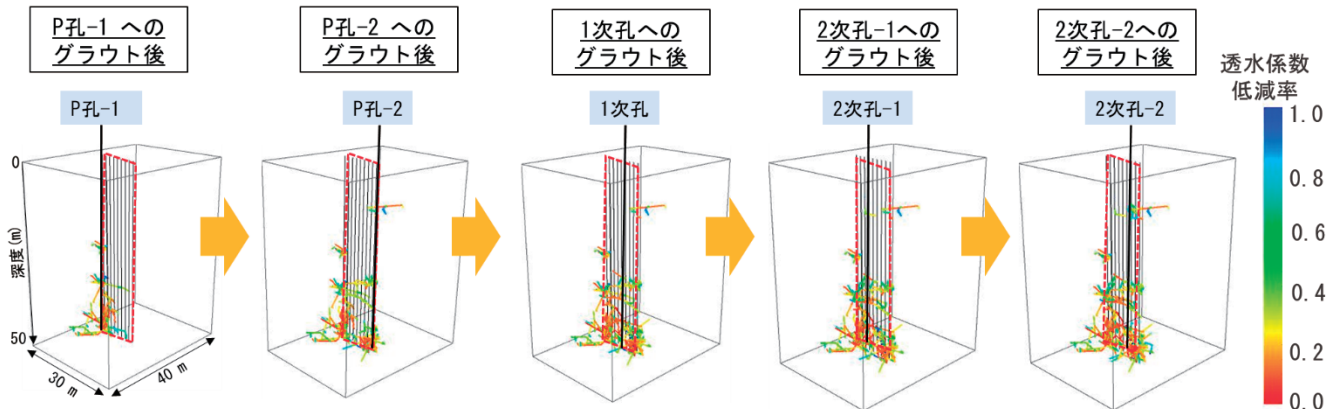


Fig.9 グラウチングによる透水係数低減率の三次元分布
(Three-dimensional Distribution of Reduction Percentage of Hydraulic Conductivity)

IV. まとめ

追加孔の要否ならびに、その施工位置の判断に資することを目的とし、三次元割れ目ネットワークモデルを用いたグラウト浸透シミュレーションプログラムを開発した。本シミュレーションは、地下水の浸透流解析の理論を応用することで現場データを最大限に活用し、三次元かつ解析範囲が広範囲にわたるダム基礎岩盤へと応用できるものとなっている。また、今回開発したグラウト浸透シミュレーションプログラムを、国内のロックフィルダム基礎岩盤に適用した。その結果、各孔におけるグラウチング後のルジオン値を予測できることを確認した。さらに、グラウチングによる透水係数低減率の分布を三次元的に可視化することで、割れ目の連続性・透水性を考慮したグラウチングの影響範囲を把握することができた。今後、ダム現場における適用実績を増やし、さらにプログラムの改良、高度化に取り組む予定である。具体的には、本論で構築したシステムを使って、ステージごとにグラウチングの効果を定量評価できる手法を検討していきたい。

参考文献

- 1) (財)国土技術研究センター：グラウチング技術指針・同解説，大成出版社，2003.
- 2) Mohajerani S., Baghbanan A., Wang G. and Forouhandeh S.F. : An efficient algorithm for simulating grout propagation in 2D discrete fracture networks. *Int J Rock Mech Min Sci*, 98, 2017, pp. 67-77.
- 3) Zou L., Hakansson U. and Cvetkovic V. : Cement grout propagation in two-dimensional fracture networks: impact of structure and hydraulic variability. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 115, 2019, pp. 1-10.
- 4) Masumoto, K., Nonaka, H., Nakajima, M., Atsumi, H., and Kawabata, J. : Application of discrete fracture network model to evaluation of groundwater inflow control around disposal tunnels. *2nd International Discrete Fracture Network Engineering Conference*, 2018, 18-842.

Grouting Simulation for Dam Foundation Rock Mass Using Three-Dimensional Discrete Fracture Network Models

Takako Miyoshi, Masayuki Ishibashi and Kazuhiko Masumoto

Grouting boreholes for dam foundation grouting are classified into two types: regular and supplementary. In Japan, grouting into regular boreholes is mandatory, while grouting into supplementary boreholes is optional. Typically, the locations of supplementary boreholes and their necessity are decided empirically on the basis of the Lugeon test. To quantitatively evaluate the locations and necessity of supplementary boreholes, the authors developed a grouting simulation program that uses three-dimensional discrete fracture network models. In this paper, the authors applied the simulation to the foundation rock mass of a rock-fill dam and estimated the hydraulic conductivity.