

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

三好 貴子^{1*}・升元 一彦¹・石橋 正祐紀¹・栗原 啓丞¹

¹鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

*E-mail: miyoshta@kajima.com

ダム工事における基礎処理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、ルジオン値を高い精度で予測できていることを確認した。

Key Words : Discrete Fracture Network model, grouting, dam foundation, Lugeon test

1. はじめに

ダムの基礎処理では、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掘り、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。一般的に、グラウチングの施工においては中央内挿法が用いられる¹⁾。図-1 に一注入ブロックにおけるグラウチング注入孔の配置例を示す。パイロット孔（P 孔）間に挿入されるグラウチング注入孔はその段階に応じた次数で名付けられる。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。基礎処理では規定孔（図-1 では P 孔、1 次孔、2 次孔）の施工は必須となっているが、追加孔（図-1 では 3 次孔以降）については、その要否ならびに施工位置はルジオン試験ないしは水押し試験（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経由するため、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整理が不可欠となる。

そこで、本研究では、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。

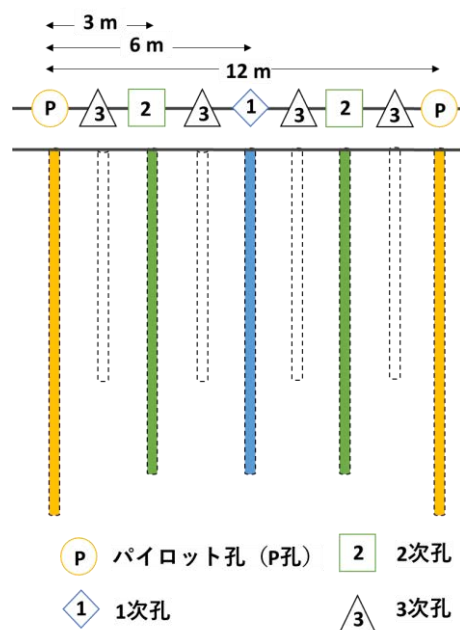


図-1 グ라우チング注入孔の配置例

2. グラウト浸透シミュレーションの概要

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、割れ目を平行平板モデルとして仮定し、グラウト浸透距離を求めるアルゴリズムを開発した。このExplicit Grout Forehead Pressure (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た。Zou et al. は流体の二相モデルを構築し、飽和状態の岩盤におけるセメン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た。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で適用することは難しい。本シミュレーション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、グラウト浸透シミュレーションを逆解析的に実行するシステムを構築した。

本シミュレーションの基本フローを図-2に示す。本シミュレーションはダム基礎処理工における一注入ブロック（幅12m）を対象としている。規定孔までの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、規定孔までのグラウチング注入実績があることを前提として、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次の手順で予測する。

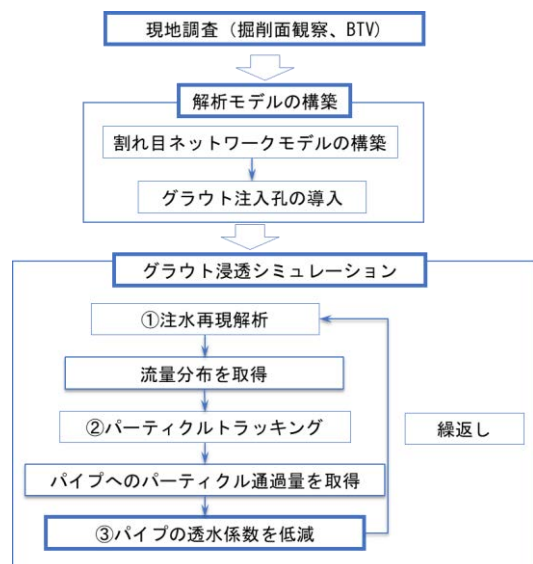


図-2 グラウト浸透シミュレーションのフロー

まず、岩盤の三次元割れ目ネットワークモデルを作成し、それをLT-FLOW⁴⁾プログラムを用いてパイプモデルに変換する（図-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、割れ目の特性値（透水量係数、割れ目幅）に応じて、

割れ目を介した地下水の流量及び流速が保存されるようにパイプの透水係数及び断面積を決定する。作成したパイプモデルを用いて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パーティクルが通過したパイプの透水係数の低減、3つのステップをP孔-1→P孔-2→1次孔・・・と繰り返すことで、対象とする注入ブロックにおいてグラウト材の浸透範囲が広がっていき、岩盤内の透水性が低減されていく現象を模擬する。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仮定し、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。これによって、対象とするボーリング孔から水を浸透させたときの、パイプの透水係数・連続性を考慮した局所的な地下水の流れやすさの情報を把握する。

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、地下水が流れやすいパイプほど、パーティクルが多く通過することとなる。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る。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。低減関数はルジオン値とグラウト材の注入量の既存データから推定する。パイプを通過するパーティクル数が多いほど、パイプの透水係数の低減率は大きくなる。図-4に概念図を示す。

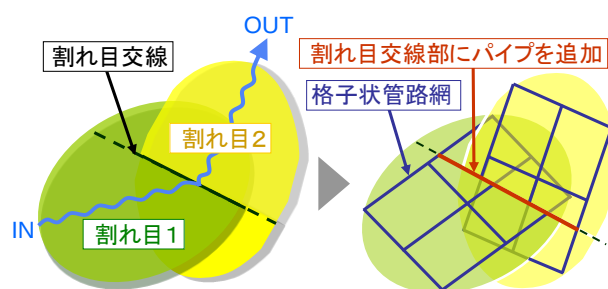


図-3 パイプモデル化手法の概念図

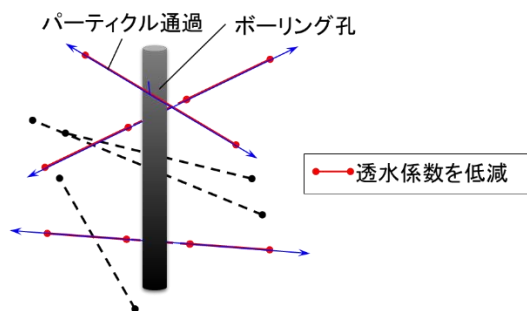


図-4 パーティクル通過量に応じたパイプの透水係数低減の模式図

規定孔のすべての孔を対象に①～③のステップを実施工と同じ順序で実行後、モデル内のパイプの透水係数の低減率を3次元空間にプロットすることで、規定孔へのグラウチングが完了した時点での基礎岩盤の透水性の分布を予測することが可能となる。

3. 最適化プロセス

前章で示した基本フローに加えて、解析が実施工におけるグラウチング実績を確実にシミュレーションできるように、規定孔施工時の実測値を用いた最適化プロセスを解析に組み込んでいる。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、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0.98MPa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5mのステージ毎に行われる。この場合、各ステージにおける有効圧力が0.98MPaの時の流量は、ルジオン値にステージ長5m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。

最適化プロセスのフローを図-5に示す。以下に、最適化プロセスの説明を示す。

(1) 初期透水性のコンディショニング

一段階目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調整である。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、これらによってパイプにおけるパーティクルの通過量が決まる。対象ブロックにおいてグラウチング前のP孔-1における流量が得られるように、モデル内のすべてのパイプの断面積の値をルジオン値に比例して調整する。このコンディショニングを各注入ブロックで実施することで、注入ブロック単位での岩盤の透水性を実測値と整合させることができる。

(2) 透水性低減率のコンディショニング

二段階目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、さらにこの関数のパラメータを調整することで、各ブロックの規定孔における流量の低減率の解析結果と実測値の誤差が最も小さくなるようにする。一段階目のコンディショニングと同じく、注入ブロックごとに低減関数のパラメータを推定することで、注入ブロック単位での岩盤の透水性の低減率を実測値と整合させることが

できる。

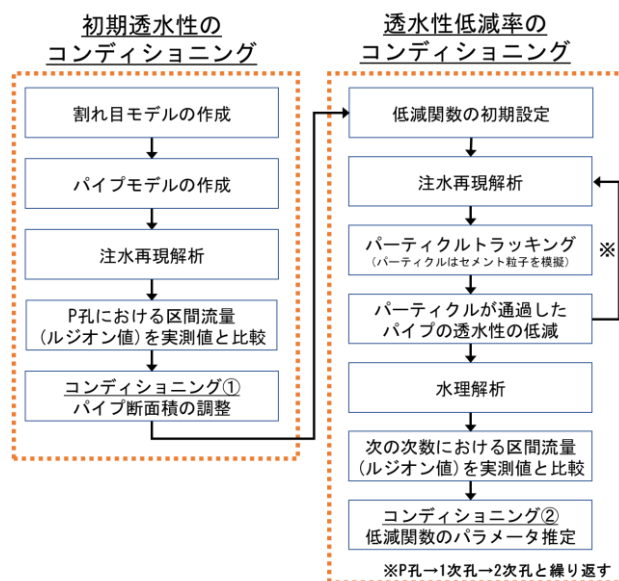


図-5 最適化プロセスのフロー

4. 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。グラウチング施工は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5Lu（深度50mまで）である。本基礎岩盤における割れ目ネットワークモデルの作成方法の概要およびグラウト浸透シミュレーションの解析条件を以下に示す。

(1) 割れ目ネットワークモデルの作成

割れ目ネットワークモデルを構成する割れ目には、実測割れ目の幾何学的パラメータから確率論的に発生させる「確率論的割れ目」と実測割れ目に応じて決定論的に挿入される「決定論的割れ目」の2種類がある。確率論的割れ目においては、既存のルジオン値情報から地球統計学による手法（クリギング）を用いてルジオン値分布を推定し、そのルジオン値分布を割れ目の分布および長さに関連付けることで、ルジオン値が高い領域で、確率論的割れ目の割れ目長が長く、および割れ目密度が高くなるよう設定した。また、決定論的割れ目においては、掘削面やボアホールテレビ（BTV）から得られた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。（本基礎岩盤における割れ目モデルの作成方法の詳細については既報⁵⁾を参照されたい。）

(2) グラウト浸透シミュレーション

作成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図-6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表-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本の注入孔をモデルに挿入し、また注入孔の深度方向の長さは50mとした。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（200 m×100 m×50 m）に対して、グラウト浸透シミュレーションの適用範囲は80 m×80 m×50 m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100 mとした。割れ目モデルは5リアライゼーション作成し、そのすべてに対してグラウト浸透シミュレーションを実施した。

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注入孔のルジオン値比の関係性から推定した。図-7に本基礎岩盤で推定した低減関数を示す。推定された低減関数は、グラウチング直後にパイプの透水係数が大きく低減され、その後、低減の度合いが弱まるという傾向を示す。なお、この関数はあくまでも基本形であり、後述する最適化プロセスでこの低減関数が実測値における透水性の低減率を再現できるようにパラメータを修正する。

表-1 グラウト浸透シミュレーションの解析条件

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
リアライゼーション数		5

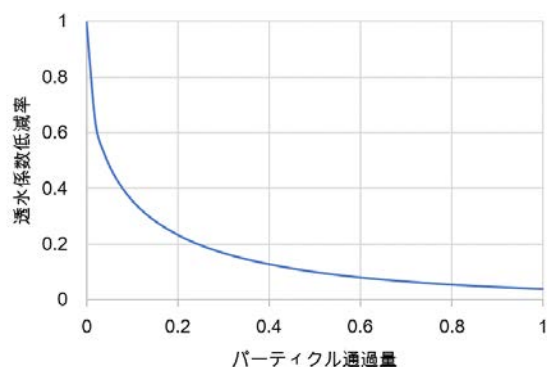


図-7 本基礎岩盤で推定した低減関数の基本形

(3) 最適化プロセス

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。解析値として求まる、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すべてのパイプの断面積の比率を一定と仮定して調整した。断面積の調整を行う前のP孔-1における流量は、いずれのリアライゼーションにおいても $10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ となっており、実測値の $5.53 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$ とおおよそ整合していた。今回は、より確実に流量を整合させるためパイプ断面積の調整を行ったが、岩盤の初期透水性は、割れ目モデルの構築段階で、すでに比較的高い精度で再現できていたと考えられる。

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ある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。P孔-1, 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も小さくなるパラメータを使用することとした。なお、本基礎岩盤で設定した低減関数では、低減関数のパラメータの値が大きくなると透水係数の初期低減率が

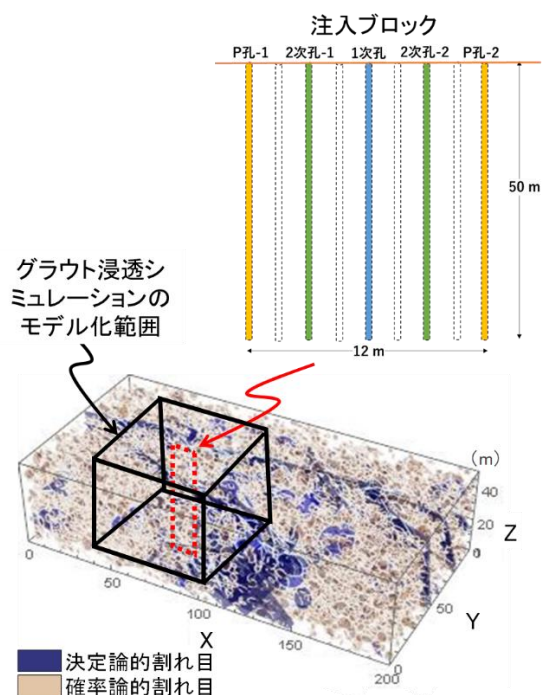


図-6 割れ目ネットワークモデルおよびグラウト浸透シミュレーションの解析範囲

大きくなる関係性があったため、設定した範囲内で極小値が見つからない場合は、極小値が見つかる方向にパラメータの設定範囲を移動させた。

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、検証用として使用した。

5. 検証結果

各孔におけるグラウチング前のルジオン値の比較を図-8および表-2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、解析値が実測値を高い精度で予測できていることが分かる。

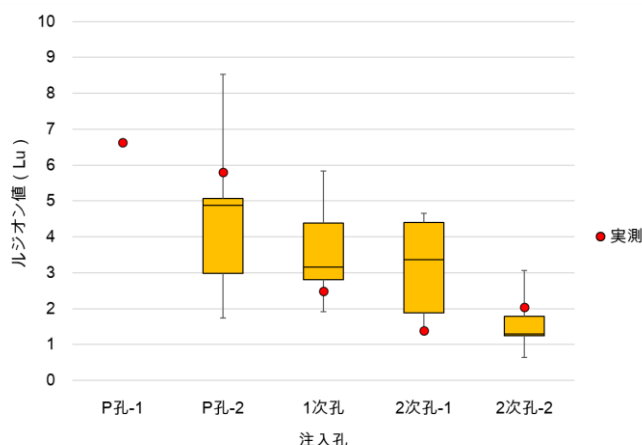


図-8 実測値と解析値のルジオン値の比較

図-9にグラウチングによる透水係数低減率の三次元分布（1リアライゼーション）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。前述した通り、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。次数が増加する毎に、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、 $z < 15\text{m}$ に集中しているが、これは対象としているブロックの $z < 5\text{m}$ 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。

6. まとめ

本研究では、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、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を進めている。本シミュレーショ

表-2 実測値と解析値のルジオン値の比較

注入孔	実測値 (L/min/m)	解析値 (L/min/m)	
		最大値	最小値
P孔-1	6.6	6.6	6.6
P孔-2	5.8	8.5	1.7
1次孔	2.5	5.8	1.9
2次孔-1	1.4	4.6	1.4
2次孔-2	2.0	3.1	0.6

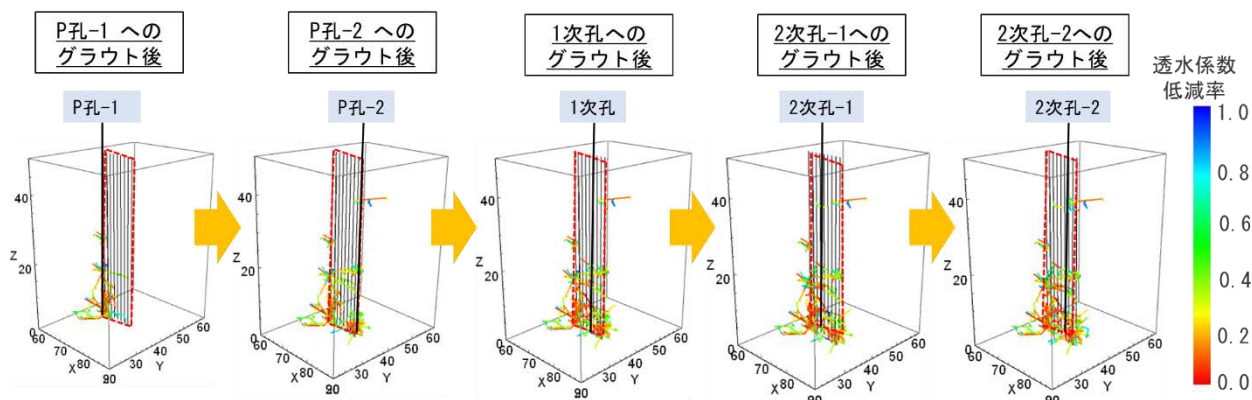


図-9 グ라우チングによる透水係数低減率の三次元分布

ンは、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、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システムとなっている。さらに、規定孔までの実測値を用いた最適化プロセスを組み込むことで、解析が実施工におけるグラウチングの実績を確実にシミュレーションできるようにしている。

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前のルジオン値を高い精度で予測できていることを確認した。また、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。

今後は、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、ステージ毎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, pp. 67-77, 2017.
- 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, pp. 1-10, 2019.
- 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*, pp.18-1842, 2018.
- 5) 渥美博行, 升元一彦, 川端淳一, 高橋勝也, 奈須野恭伸 : ダム基礎岩盤透水性の割れ目ネットワークモデルによる評価の試み, 地下水学会 2016 年春季講演会, pp.58-63, 2016

GROUTING SIMULATION FOR DAM FOUNDATION ROCKMASS USING THREE-DIMENSIONAL DISCRETE FRACTURE NETWORK MODELS

Takako MIYOSHI, Keisuke KURIHARA, Kazuhiko MASUMOTO and Masayuki ISHIBASHI

The grouting boreholes for dam foundation grouting can be classified into two types: regular boreholes and supplementary boreholes. In Japan, grouting into regular boreholes is mandatory, while grouting into supplementary boreholes is optional. Typically, the position of supplementary boreholes and their necessity are decided empirically based on the Lugeon test. In order to quantitatively evaluate the position and necessity of supplementary boreholes, the authors developed grouting simulation program using three-dimensional discrete fracture network models. In this paper, the authors applied the simulation to foundation rock mass of rock-fill dam and estimated the hydraulic conductivity of foundation rock mass.