

# 割れ目情報に基づくダム基礎処理工の三次元品質管理システムの開発

## Development of a 3D Quality Management System for Dam Foundation Grouting Based on Fracture Information

栗原 啓 丞      福 島 大 介  
三 好 貴 子      升 元 一 彦

### 要 約

ダム基礎処理工における品質管理を行うにあたっては、岩盤内部の三次元的な透水性状を把握することが重要となる。特に、岩盤内部の水の流れは割れ目を經由するため、透水性を有する割れ目の分布状況やその連続性を評価することが求められる。そこで、筆者らは施工過程で得られる情報から、岩盤透水性に関する情報を定量的に迅速かつ自動で抽出し、それらを施工情報とともに一元管理するための三次元施工品質管理システムを開発し、現在稼働中の現場において適用性を確認した。

### 目 次

- I. はじめに
- II. ダム基礎処理工の三次元品質管理システム
- III. 現場適用事例
- IV. おわりに

#### I. はじめに

ダム基礎処理工の品質を確保する上では、岩盤の透水性に関わる情報として、地下水の流動経路となる割れ目の分布、性状、さらにはその連続性を立体的に把握することの重要性が指摘されている<sup>1)</sup>。ただし、これらの情報を得るためには、地質技術者による詳細な調査、分析が必要であり、多大な時間と労力が掛かることから、これらをタイムリーに施工にフィードバックすることが困難であった。また、基礎処理の施工過程では、施工計画図や地質縦断面図、グラウト施工記録、そのほかにも、コア写真や孔壁展開画像、基礎掘削面の割れ目スケッチなど、多様な情報が存在する。施工計画や追加孔の必要性検討および改良効果を評価するためには、これらの膨大な情報から必要な情報を選定した上で総合的に評価する必要があるが、多量の情報を一元的に整理することは容易ではなく、簡易かつ迅速なデータ処理システムの開発が望まれていた<sup>2)</sup>。これらの課題を踏まえ、筆者らは施工過程で得られる情報から、岩盤の透水性に関する定量的な情報を自動かつ迅速に抽出し、それらを施工情報とともに一元管理する三次元品質管理システムを開発した。

#### II. ダム基礎処理工の三次元品質管理システム

ダムの基礎処理工では、基礎岩盤内部の地質状況を把握するために、ボーリングコアの採取やボーリング孔の孔壁撮影が行われることが多い。Table 1 にボーリングコアと孔壁展開画像それぞれの評価により得られる割れ目情報を示す。孔壁展開画像からは、コア観察ではしばしば評価が困難な原位置での割れ目に関する情報（走向・傾斜、開口量など）について、より高精度に取得できる。これらより、孔壁展開画像は、原位置における割れ目情報をより正確に取得できる利点があるといえる。そこで、三次元品質管理システムにおいては、孔壁展開画像から透水割れ目の判別、判別した透水割れ目の抽出・連続性の判定、透水要素である風化度・割れ目密度の算定を行い、それらを地質情報やルジオン試験結果などの調査・施工データと統合することで施工品質に関わる情報を一元管理できるようにするシステムを開発した。Fig.1 は三次元品質管理システムの適用フローである。

Table 1 コアと孔壁展開画像から得られる割れ目情報  
(Fracture Information Obtained from Core and Borehole Image)

割れ目の要素	ボーリングコア	孔壁展開画像
風化の程度	◎	○
割れ目性状（挟在物の有無）	◎	○
割れ目間隔（密度）	○	◎
開口量	×	◎
走向・傾斜	△	◎

**キーワード** : ダム基礎処理工, 割れ目, 透水性, 品質管理システム

**Keywords** : dam foundation grouting, rock fracture, permeability, quality management system

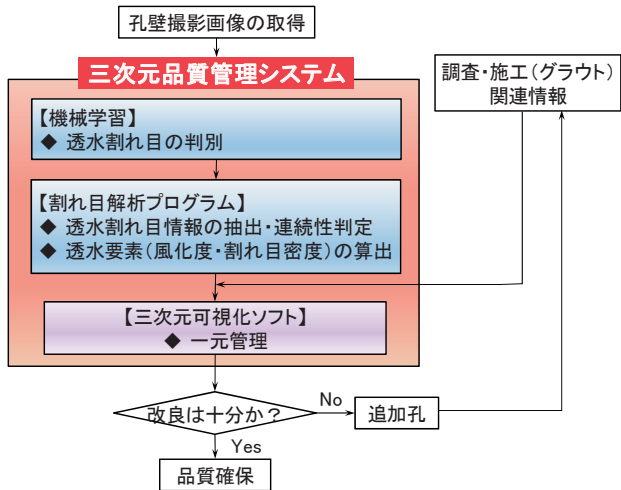


Fig.1 三次元品質管理システムの適用フロー  
(Flowchart Describing the Application Process of 3D Quality Management System)

### 1. 機械学習による透水割れ目の判別

ボーリング孔に割れ目が交差する場合、孔壁展開画像上では正弦曲線状の線で確認されるが、それらの中には非透水割れ目や有色鉱物の脈など透水性には関与しないものも含まれる場合もある。そこで、本システムでは、機械学習による透水割れ目の判別作業を行うこととした<sup>3)</sup>。まずは、教師データ用の割れ目画像を 50 枚程度選別し、画像の中の代表的な画素に対して、透水割れ目であるのか非透水割れ目であるのかをラベル付けするアノテーション作業を行った。アノテーションされた代表点をもとに、透水割れ目画素と非透水割れ目画素の特徴の違いを学習させ、モデルを作成する。撮影された全ての孔壁展開画像中の画素に対して、学習モデルを用いて透水割れ目であるのか非透水割れ目であるのかを判別させた後、透水割れ目に該当する画素を黒、それ以外を白で表示させた画像データとして出力する。Fig.2 はアノテーションに利用する割れ目候補画像、Fig.3 は割れ目判別後の出力結果の例である。地質技術者が 23 本の透水割れ目を確認した全長 82m の孔壁展開画像に対して、機械学習を行う前の画像と機械学習による透水割れ目の判別画像（二値画像）とを用いて、後述する透水割れ目の自動抽出を行った結果、抽出率が 52% から 74%（抽出数は 12 本から 17 本）まで向上することがわかった。

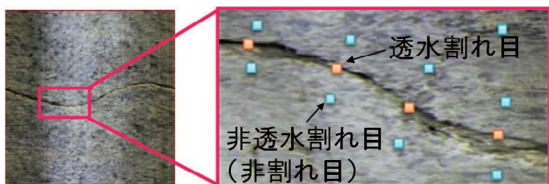


Fig.2 割れ目候補画像  
(Image of Permeable Fractures)

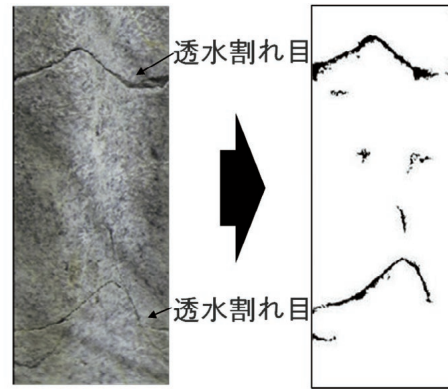


Fig.3 透水割れ目判別後の出力結果  
(Results Obtained from Identification Analysis of Permeable Fractures)

### 2. 透水割れ目情報の抽出および連続性の判定

#### (1) 割れ目情報の自動抽出技術

孔壁展開画像から正弦曲線として得られる割れ目から深度、走向、傾斜、開口量など情報を自動的に抽出する解析プログラムを開発した。機械学習により透水割れ目か否かを判別した後に出力される画像は、白と黒の二値画像であるが、割れ目情報の自動抽出プログラムに関しては、オリジナルのカラー画像でも割れ目の抽出が可能仕様とした。解析方法の基本的な考え方は、走向・傾斜・深度を示す正弦曲線について、その正弦曲線上の画素の輝度値を求め、周辺の母岩の平均輝度値との乖離が大きい（設定した輝度値差閾値より大きい）深度で割れ目が交差していると仮定して抽出を行うものである。当然ながら、白と黒の二値画像である場合には、この乖離が最も大きくなり解析が容易となる。Fig.4 にボーリング孔に交差する割れ目の深度決定方法の概念図を示す。

一方で、実際には割れ目が綺麗な平面として存在するとは限らないため、展開画像上では割れ目が一部不明瞭であったり、正弦曲線からずれが生じたりする場合がある。そのため、裕度を持たせて抽出を行うために以下のことを実施した (Fig.5)。まず、設定した正弦曲線の上下領域に探索範囲を設定し、周辺領域との輝度値差の判定領域を拡大した。すなわち、正弦曲線上の画素が閾値を超えていなくても、探索範囲内で一つでも閾値を超えていれば抽出対象となる。これにより、割れ目が正弦曲線と一部ずれている場合にも抽出が可能となる。また、上記で閾値を超えたと判断された画素数（適合画素数）の、割れ目に沿った周方向の全画素数（ $1^\circ = 1 \text{ pixel}$  の場合 360 pixel）に対する比率（適合比率）が、設定した閾値を超えていれば抽出できるように裕度を設けた。そのため、割れ目に不明瞭な部分があった場合にも抽出が可能となる。

ボーリング孔に対する割れ目の交差深度を特定した後、各割れ目について、走向・傾斜、開口量、色情報を算定する。

なお、開口量は周方向の平均的な値であり、探索範囲内の全画素中の適合画素数を正弦曲線の周方向の画素数で除して算出する。また、色情報は、光の三原色である RGB (赤・緑・青) の値を化学的風化程度の評価において適用実績のある  $L^*a^*b^*$  の表色系 (明度  $L^*$ , 赤度  $a^*$ , 黄度  $b^*$ ) に変換することにより取得した。

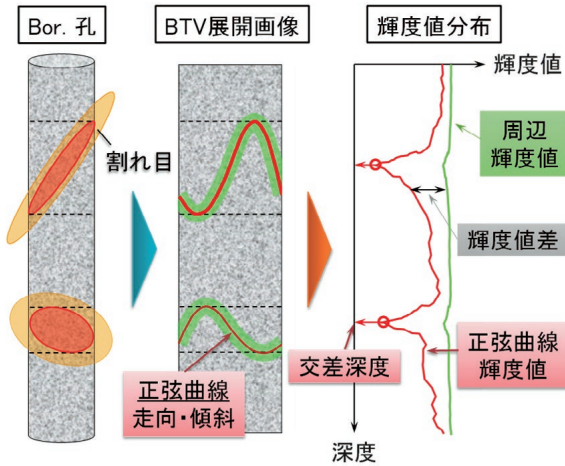


Fig.4 ボーリング孔に交差する割れ目の深度決定方法の概念図

(Diagram describing the Identification Process of the Depth of Fractures Intersecting the Borehole)

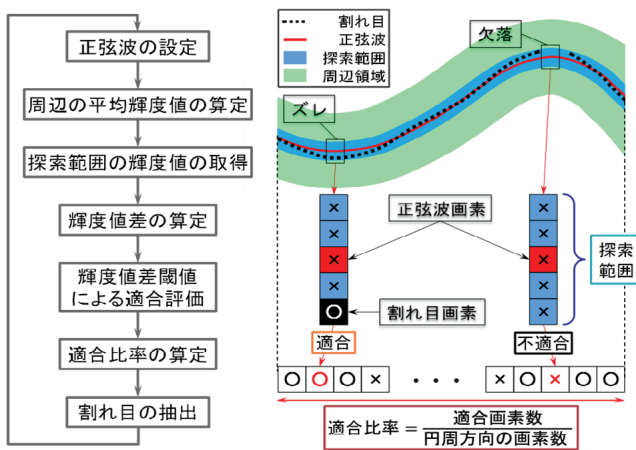


Fig.5 割れ目抽出の解析フロー

(Flowchart of Fracture Extraction Analysis)

### (2) 割れ目の連続性判定技術

岩盤の透水性に寄与する重要な要素として、割れ目の連続性が挙げられる。ダムの基礎岩盤において、大きな割れ目が分布していた場合にはそれが主要な水みちとなる可能性がある。そのため、ボーリング孔間の割れ目の連続性を考慮した上で、改良不十分となりうる要注意箇所を評価し、配合や注水量を変更するなどの状況に応じた適切な処理を行う必要がある。一方で、岩盤内部の割れ目に関する情報は基礎処

理孔の位置に依存して離散的にしか取得できないため、限られた情報から割れ目の連続性を推定しなければならない。また、それぞれのボーリング孔で得られる割れ目は膨大かつ多様である。そのため、個々の割れ目性状を把握しつつ、隣接する割れ目との膨大な組合せについて相互関係を評価するには、多大な労力を必要とする。これらの課題を踏まえ、割れ目の自動抽出解析で得られる割れ目の属性情報を用いて、簡易かつ定量的に連続性を評価するプログラムを開発した。

通常、割れ目の連続性は割れ目の位置や角度、透水性、挟在物などを総合的に考慮して評価される。先述した割れ目情報の自動抽出解析により得られる割れ目の交差深度、走向・傾斜、開口量、色情報に加えて、グラウト施工記録から交差深度におけるルジオン値 ( $Lu$ ) を取得できるため、これらを用いて割れ目の連続性の判断材料となる指標を自動で算定し、その指標に基づき連続性の評価を行うこととした。

異なる2本のボーリングに交差する割れ目が同一の割れ目であるかを判定するための指標は、それぞれの割れ目を延長した際の相互の割れ目の乖離量を示す面間距離と交差角度が任意の閾値以下であること、および当該区間の  $Lu$  値が任意の値以上であることとした。これらの連続性判定指標を隣接孔の全割れ目との組合せに対して計算し、連続性を評価する。Fig.6 に連続性判定指標の概念図を示す。

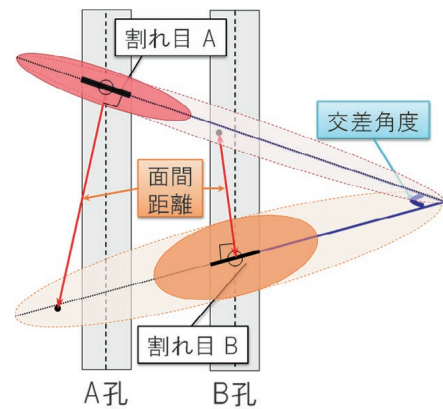


Fig.6 連続性判定指標の概念図

(Diagram Describing the Concept of Continuity Judgment Index)

### 3. 透水要素である風化度・割れ目密度の算定

岩盤内部の透水性状を評価するための要素の一つとして岩盤内部の風化度および割れ目密度に着目し、それらを孔壁展開画像から定量的に算定するプログラムを開発した。

風化度については、孔壁展開画像を任意の区間に区切り、各区間に含まれる全画素から色情報 (色空間色度図から得られる  $a^*$ ,  $b^*$ ) の平均値を求める。そして、適用サイト毎に新鮮部 (風化度=0) と風化部 (風化度=1) の  $a^*$ ,  $b^*$  値を設定する。各区間の  $a^*$ ,  $b^*$  値から風化度 0 と 1 の点を結ぶ線分に



垂線を下ろし、その交点座標から比例配分で計算される値を風化度とした。Fig.7に風化度の計算例を示す。

割れ目密度については、風化度と同様に孔壁展開画像を任意の区間毎に区切り、割れ目情報の自動抽出解析で得られた区間内の割れ目本数を区間長で除した値とした。

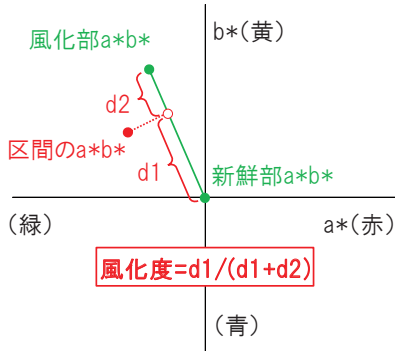


Fig.7 風化度の計算例  
(Example of Weathering Index Calculation)

### Ⅲ. 現場適用事例

本システムを建設中のダムサイトにおいて適用した。本サイトにおいては、透水割れ目の判別・自動抽出・連続性判定および透水要素（風化度・割れ目密度）の算定を行い、そのほかにも得られた調査・施工情報（三次元の地形・構造物図面、ボーリング柱状図、グラウト施工記録、ほか基礎処理関連資料）との統合を三次元品質管理システム上で行った。以下にその結果を述べる。

#### 1. 透水割れ目の判別・自動抽出・連続性判定結果

まず、カーテングラウトのパイロット孔 28 本（総延長 L=4,085m）で撮影した孔壁展開画像に対して割れ目自動抽出技術を適用した。本事例では、孔壁展開画像に対して、機械学習による透水割れ目の判別作業を行ったうえで、自動抽出解析を実行した。Fig.8 は地質技術者による割れ目評価が記載された孔壁展開画像と解析結果例の比較である。孔壁展開画像をみると、開口割れ目と鉱物脈が混在しているが、機械学習により開口割れ目のみを透水割れ目として判別し、出力できていることがわかる。また、その後の割れ目自動抽出についても、先に述べたアルゴリズムに従って、透水割れ目を抽出できていた。ここでは一部の結果しか示していないが、正弦波から外れていたり、一部不明瞭であったりする開口割れ目についても、走向・傾斜、開口量などの属性情報とともに抽出できることを確認した。

次に、自動抽出割れ目情報を用いて、連続性判定を実施した。ここでは、透水性の高い区間で交差する割れ目を対象とするため、Lu が 5Lu 以上の区間に交差する割れ目を抽出し、

連続性判定の閾値を面間距離 5m 以下、交差角度 10° 以下と設定して評価を行った。その結果、各パイロット孔から自動抽出された全 4914 の割れ目のうち、108 の割れ目が連続性を有すると判定された。左岸部における自動抽出割れ目および連続性割れ目を三次元品質管理システムの可視化ソフトに表示した結果を Fig.9 に示す。

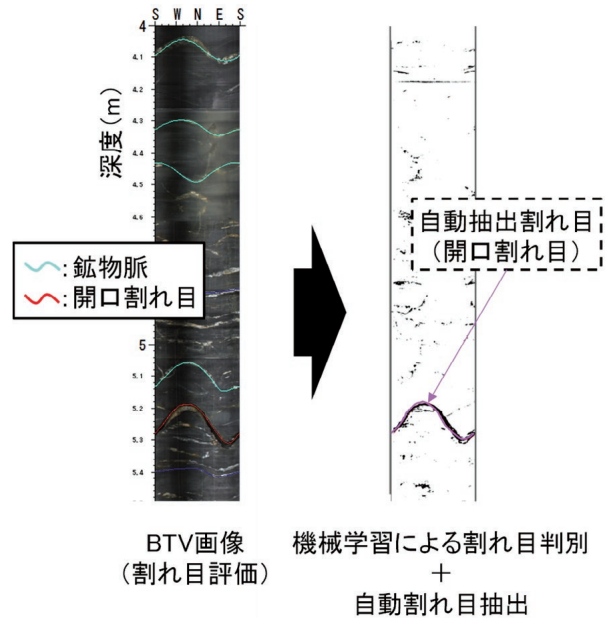


Fig.8 割れ目判別および割れ目自動抽出結果  
(Results of Fracture Identification Analysis and Automatic Fracture Extraction)

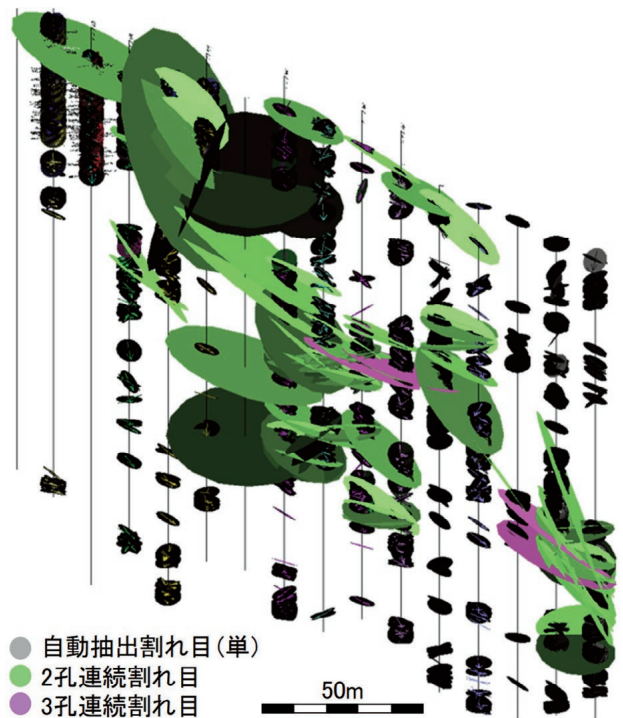


Fig.9 左岸部における自動抽出割れ目と連続性割れ目の可視化状況  
(Visualization of Automatically-extracted Fractures, and Continuous Fractures at the Left Abutment)

## 2. 風化度・割れ目密度の算定結果

まず、各パイロット孔の孔壁展開画像を 10cm ごとに区切り、各区間における風化度を算定した。次に、割れ目密度については、1m あたりの割れ目本数の平均値を 5m 区間ごとに算出し、可視化ソフトに表示した。左岸部の風化度および割れ目密度の算定結果を Fig.10 示す。

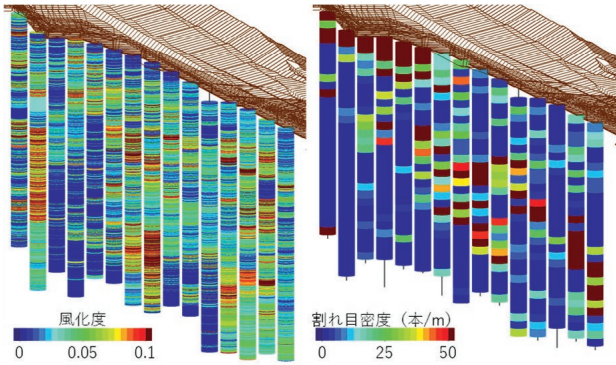


Fig.10 左岸部における風化度 (左) と割れ目密度 (右) の分布  
(Distribution of Weathering Index and Fracture Intensity at the Left Abutment)

## 3. 調査・施工データとの統合

従来の施工管理では、各種の調査記録やグラウト施工記録は二次元の情報として整理されてきた。しかしながら、現場経験が浅い技術者にとって、二次元の図面から実際の立体的な状況を正確に把握することは容易ではない。特に、関連する情報が多い場合にはそれらすべての関係を的確に把握し、活用することは極めて困難となる。そこで、本システムにより、複数の調査・施工情報を三次元で可視化し、関連する情報とともに一元管理した。

まず、ダム本体の構造物図面と地形・地質図面を三次元モデルとして可視化ソフトに読み込み、統合した (Fig.11)。次に、カーテングラウトの施工記録であるグラウチング日報からルジオン試験結果を抽出し、三次元のルジオンマップを作成した (Fig.12)。グラウト施工が進むたびにルジオンマップが更新されるため、日常の品質管理において、視覚的にグラウト改良状況を把握することが可能となった。また、モデル上で連続性割れ目と重ね合わせて表示することで、地下水の流動経路と改良出来形の評価することが可能となった。例として、あるブロックでの連続性割れ目とカーテングラウトP孔におけるルジオンマップを統合表示した図をみると (Fig.13)、高ルジオン領域と透水割れ目の密集部とが一致する傾向が確認できる。これらの情報に加え、ボーリング調査によって得られた柱状図やコア写真などの調査・施工関連資料をルジオンマップへリンク付けすることで、注入の過不足の評価や追加孔の検討を多面的にできるようになった。

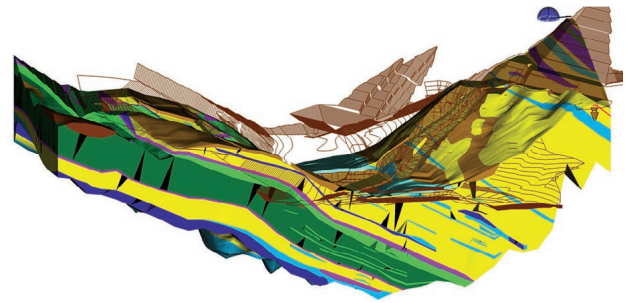


Fig.11 三次元地質モデルの統合状況  
(Integrated Illustration of 3D Geological Model)

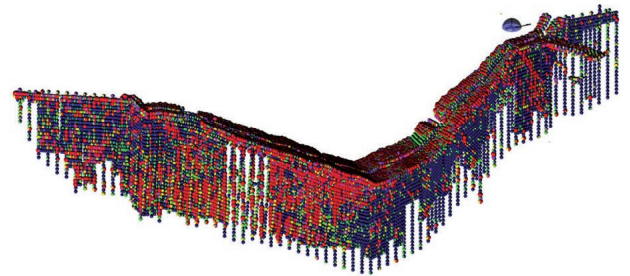


Fig.12 グラウト施工記録によるルジオンマップ  
(Lugeon Map According to Foundation Grouting)

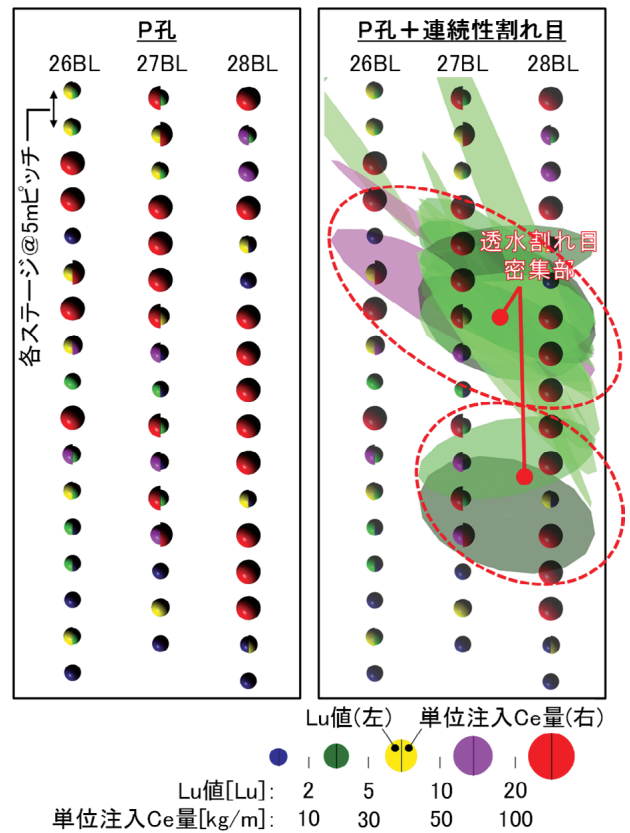


Fig.13 連続性割れ目とカーテングラウトP孔におけるルジオンマップとの統合表示  
(Combined Illustration of Continuous Fractures and Lugeon Map at Pilot Holes)

#### IV. おわりに

本開発では、孔壁撮影画像に着目し、基礎岩盤の透水性に関わる割れ目の抽出および割れ目の連続性の判定を行う技術を開発した。割れ目の自動抽出にあたっては、事前に機械学習による学習モデルを作成し、透水割れ目の判別を行うことで、鉱脈などの非透水割れ目の誤抽出を防止した。また、透水要素である風化度および割れ目密度についても算定プログラムを開発した。

これらにより得られた割れ目情報を調査・施工データと重ね合わせることで、施工品質に関わる情報を自動的に一元管理できる三次元品質管理システムを開発し、現在稼働中の現場において適用性を確認した。今後は、割れ目情報の抽出精度の向上のほか、現場での利便性を考慮した入出力システムの改良、グラウト改良効果の定量評価解析技術の開発を行い、より迅速かつ定量的な品質管理・評価が可能なシステムの開発を進めていく。

#### 参考文献

- 1) ダム基礎岩盤透水性研究会；ダム基礎における立体的岩盤透水性分布の把握手法，一般財団法人ダム技術センター，2013.
- 2) 野中隼人ほか；ダム基礎処理工の透水性に関わる三次元施工品質管理システムの開発，第46回岩盤力学に関するシンポジウム，2019.
- 3) 岡田ほか；ダム基礎岩盤における機械学習を用いた割れ目判定技術の開発，土木学会第74回年次学術講演会，2019.
- 4) 戸邊勇人ほか；山岳トンネル切羽の風化変質判定システムの開発—切羽観察での適用例—，土木学会年次学術講演会講演概要集，VI-043，2014.

### **Development of a 3D Quality Management System for Dam Foundation Grouting Based on Fracture Information**

*Keisuke Kurihara, Daisuke Fukushima, Takako Miyoshi and Kazuhiko Masumoto*

For quality control in dam foundation grouting, it is important to understand the 3D distribution of hydraulic characteristics of the rock mass. Especially, understanding the distribution and continuity of permeable fractures is necessary as the water flows through such fractures within the rock mass. However, detailed geological survey and analysis need to be performed by geologists to obtain this information, requiring time and manpower. As a result, real-time feedback of survey data to construction management has been difficult. We have therefore developed a 3D quality control system for dam foundation grouting which allows rapid and automatic extraction of quantitative information related to the hydraulic characteristics of the rock mass, and have combined them with the construction data to centralize the management system at the site. This system has been applied at an ongoing construction site.