

地質状況を考慮したダムグラウチング 調査・計画・施工システムの構築

宇津木 慎司^{1*}・中谷 匡志¹・藤田 司¹

¹正会員 安藤ハザマ土木事業本部 (〒105-8479 東京都港区赤坂6-1-20)

E-mail: utsuki.shinji@ad-hzm.co.jp*

ダム基礎岩盤におけるグラウチングについては、平成15年に技術指針が改訂され、必要最小限の数量で所要の品質を確保する設計手法が採用されている。これに対して筆者は、(1)割れ目密度ダイアグラムを用いて最も割れ目と交差しやすい削孔方向を評価するための検討、(2)地球統計学的解析を用いて水みちの分布性状を評価するための検討を実施することにより、地質状況を考慮した効率的かつ効果的な注入方法で対策を講じることを目的とした調査・計画・施工システム(特開2013-221298)を構築した。本論文においては、本システムの具体的な内容とともに、既往の調査・計画・施工に適用するための手法について詳述する。

Key Words : grouting, dam, foundations, rock masses, quality control system

1. 緒言

土木・岩盤構造物において実施されるグラウチングは、地中にセメントミルクを圧入する工法であり、岩盤内の割れ目などの空隙にセメントを充填することにより、岩盤の力学的特性および遮水性を改良することを目的としている。本工法については、従来からダム基礎岩盤や地下空洞周辺岩盤などの改良を目的として広く適用されており、近年、良好な地質状況における土木構造物の建設サイトが少なくなるとともに、高レベル放射性廃棄物地層処分空洞の遮水性改良工事などにおいて品質に対する要求が厳しくなる中、その重要性はより高まっている。

ダム基礎におけるグラウチングに関する技術指針である「グラウチング技術指針・同解説」¹⁾は、平成15年に改訂された。これは、(1)グラウチング本来の施工目的・施工範囲の明確化、(2)基礎地盤の状況に適したグラウチングの実施、(3)施工状況に応じたグラウチング仕様の継続的な見直しを基本的な柱として、効率的かつ効果的なグラウチング施工の実現を目的としている。具体的には、ダム基礎全面にグラウチング孔が設定されるなど安全側に設計されていた既往の方法に対して、遮水性改良目的のグラウチングを基礎上流側に集中して設定するとともに、力学的な改良を目的とした施工を断層・破碎帯などの弱部に限定することにより、必要最小限の施工数量で所要の品質を確保する方法が採用されている。このため、実施工時には、ダム基礎岩盤において

水みちを構成する岩盤の割れ目の卓越傾向などを考慮し、その状況に応じた最適なセメントミルク注入を実施することの重要性がより高くなってきている。

これに対して、筆者らは、基礎岩盤において主要な水みちを形成する岩盤の割れ目について、一般に複数存在する卓越した割れ目系に対して最も交差しやすい注入孔削孔方向を算定する(1)割れ目密度ダイアグラムを用いた評価方法を開発した。また、従来、熟練した地質技術者が作成していたルジオンマップについて、(2)施工時に地球統計学的解析を用いてより短時間かつ簡易に透水性性状を推定コンター図化することにより、水みちや改良の進みづらいつ箇所などを速やかに評価し、その状況に応じて確実に対策を講じる方法について検討を行った。

本論文においては、上述した2つの検討方法を用いて構築したグラウチングの効率的かつ効果的な施工を目的とした調査・計画・施工システムについて、その具体的な内容と実施に適用するための具体策について詳述する。

2. 既往のグラウチング調査・計画・施工の概要

本章においては、既往のダム建設におけるグラウチングに関する調査・設計・施工方法に関する概要について、「グラウチング技術指針・同解説」¹⁾の記載に基づき述べる。

(1) グ라우チング調査・計画・施工の流れ

グラウチング調査・計画・施工の流れについては、図-1に示すように、調査段階において、地質調査と同時に当該地質における施工実績より、グラウチング工法採用の可否が検討される。そして具体的な計画立案と試験施工が実施された後に、実際の施工が行われる。この中で、技術指針改定版においては、継続的な計画の検証・見直しが重視されており、注入実績や改良効果などを逐次分析し、その状況によっては、より効率的かつ効果的な施工を目指して、注入仕様の変更などの検討を実施することが求められている。以下に、調査・計画・施工段階におけるそれぞれの具体的な実施事項について述べる。

(2) グ라우チング調査の概要

グラウチング調査は、グラウチング計画を合理的に行うことを目的としており、水理地質構造やグラウチングによる基礎岩盤の改良特性を把握するため、ダムサイト周辺で実施される諸調査と組み合わせて行くとされている。具体的には、地形・地質調査、透水性調査、地下水調査結果をもとに当該地点の水理地質構造が評価され、それをもとに類似ダムの実績を鑑み、グラウチング工法の可否が検討される。この際、遮水工法としてグラウチングを採用するか否かが判断できない場合には、グラウチングテストを行い、地盤の改良特性を直接、把握する。

(3) グ라우チング計画の概要

グラウチング計画は、上述した調査結果をもとに、グラウチングの種類ごとに施工範囲、改良目標値、孔の配置などの基本計画および施工時期、注入圧力・配合などの計画を定めるとされている。この中で留意すべき地質状況として、(1)断層破碎帯、(2)冷却節理、(3)均質多孔体の間隙が挙げられており、具体的な対策として、(1)・(3)については注入仕様の変更や孔配置の複列化、(2)については施工範囲の詳細検討、そして高角度亀裂が卓越

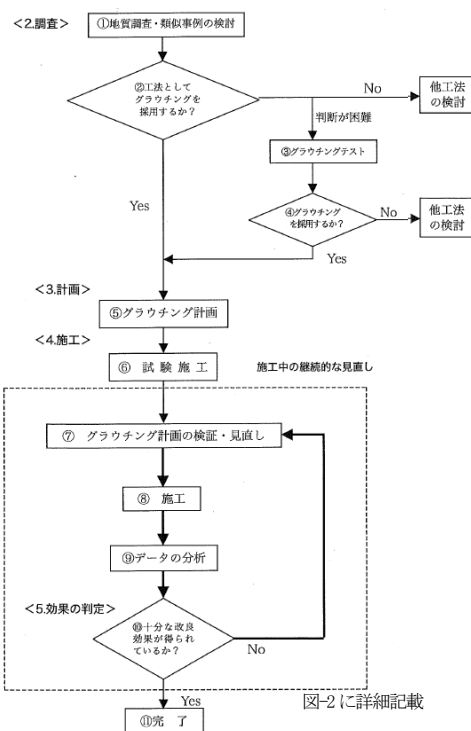


図-1 グ라우チングの調査・計画・施工の流れ¹⁾

する場合には注入孔を斜交させることなどが検討される。

(4) グ라우チング施工の概要

施工段階においては、まず、ダム本体工程との整合を図りながら詳細な施工計画が作成される。その後、施工の初期段階において試験施工を実施し、計画の妥当性を検証した後に、実際の施工が実施される。

このうち試験施工については、図-2示すように、改良効果確認、それに基づく注入仕様の妥当性検証などが実施され、その状況によっては計画の見直しが検討される。そして、この技術指針の改定版においては、施工時においてもこのようなデータ分析を継続するとともに、所要の改良効果が得られているかを確認し注入仕様の見直しなどを検討する、継続的な見直しが求められている。

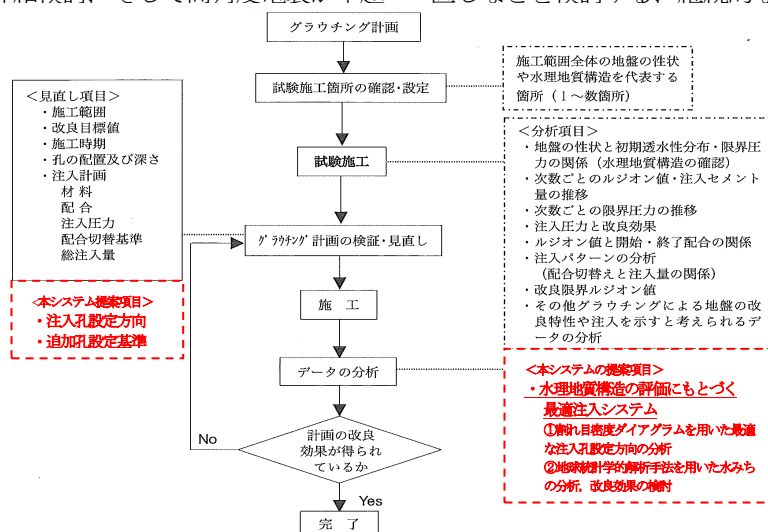


図-2 試験施工の概要と本システムで提案する実施内容¹⁾

3. グ라우チング調査・計画・施工に関する課題

本章においては、2章で述べたダムにおけるグラウチングの調査・計画・施工の概要を踏まえながら、既往の施工実績などで確認された課題について、(1)グラウチング注入孔設定方向、(2)水みちの評価方法、(3)遮水性の改良効果に関する判定方法に分けて詳述する。

(1) グ라우チング注入孔設定方向

ダム基礎においてセメントミルク孔の設定方向については、遮水性改良を目的として堤体上流側に設定されるカーテングラウチング、堤体基礎岩盤表層における遮水性改良目的および弱部補強を目的としたコンソリデーショングラウチングとも、鉛直下方に設定される事例がほとんどである。これは、鉛直に設定した方がボーリングマシンのセットなどの施工性が良好であるとともに、孔曲りなどの影響を受けにくいことため所定の位置に注入孔を設定できるなど、品質の面でも優位であるためであると考えられる。そして、鉛直方向に所要の間隔で孔を配置することにより、それらの孔と岩盤中に分布する割れ目が交差し、そこからセメントミルクが割れ目へ充填され、岩盤の遮水性および力学的特性が改良される。

これに対して図-3に示すように、基礎岩盤に分布する割れ目が上下流方向の走向を有して傾斜角が高角度である場合においては、ボーリング孔が鉛直に設定されると両者が交差しにくいことにより、高透水を呈する割れ目にセメントミルクが注入されないことが懸念される。これについては、花崗岩中に高角度を呈し連続性の良い割れ目が卓越するダムサイトにおいて、上述したような残存する水みちがダム基礎を貫き、湛水時に基礎排水量が想定量を超え、追加対策を余儀なくされた事例がある。

このように、水みちが岩盤中の割れ目の卓越傾向に左右される異方性を有していることにより、ボーリングの削孔方向によって大きく透水試験結果が異なるとともに、孔間隔と割れ目の分布位置および走向・傾斜との関係によっては、グラウチング孔と割れ目が交差しにくい可能性もある。上述した検討結果より、グラウチング孔の削孔

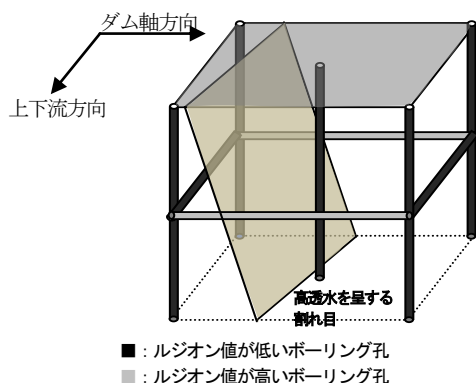


図-3 透水異方性に関する模式図

方向については、技術指針が改訂され必要最小限の施工数量で所要の品質を確保する必要がある中、施工性や経済性との兼ね合いを考慮しつつ、地質状況に応じた最適な方向に設定する必要があると考えられる。

(2) 水みちの評価方法

グラウチング施工時における透水試験結果およびセメントミルク注入実績については、図-4に示すようなカーテングラウチングを例にとると、数m間隔で設定された各孔において深度5mごとに実施された透水試験結果を左半円に、単位セメント注入量を右半円に示し、整理するのが一般的である。しかしながら、この図については、高透水部や低透水部の分布状況を大まかに捉えることはできるが、詳細な水みちや未改良区間の分布性状を評価することは難しい。また、当該箇所透水特性と割れ目などの地質状況との関連がわかりにくいことため、水みちの原因を特定して最適な対策を講じることが困難である。

なお、ダム計画段階における地質調査時には、当該地点の調査ボーリングにおける地質調査結果とルジオン試験結果をもとに、熟練した地質技術者がルジオンマップを作成しており、設計時および施工時の評価に利用される。ただしこのルジオンマップは、数十m間隔で分布する調査ボーリング孔におけるルジオン試験結果をもとに地質状況を参考にしながら作成されたものであり、施工時における詳細評価を実施する際には留意が必要となる。

また、グラウチング施工時において、地質技術者が施工段階ごとにルジオンマップを作成する場合もある。ただし、図面作成に時間がかかるため即時性のある判定ができないこと、熟練した技術者による評価となるため費用の問題があることなどから、高透水が問題となる箇所など限定した利用に留まっている。

(3) 遮水性の改良効果に関する判定方法

岩盤の遮水性に関する改良効果の判定については、規定孔と呼ばれる設計最終次数孔の注入が完了した時点で、図-4に示すような最終次数孔における透水試験結果およびセメント注入量を整理することにより、所要の基準値に照らして残存する水みち、つまり未改良範囲の特定および追加対策の必要性が検討される。具体的な評価方法については、図-4に示すような最終次数孔のデータについて、基準値を超え高透水を呈する注入ステージの有無を確認しその状況に応じて追加孔が検討されるが、追加注入ステージ施工位置の設定方法についてはその左右に新たな注入ステージを設定する事例が多い。しかしながら、図中の赤線に示されるような高角度の割れ目が水みちを形成している場合などにおいては、左右に設定された追加ステージが割れ目と交差しにくいことが懸念される。

このように、施工段階において水みちやそれを形成す

る地質状況との関係を詳細に評価できないことにより、最適な位置に追加対策孔が設定されずに水みちが残存する可能性があると考えられる。

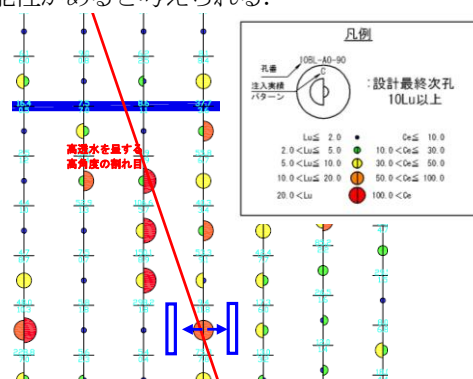


図-4 グラウチング結果表示例および追加孔設定例

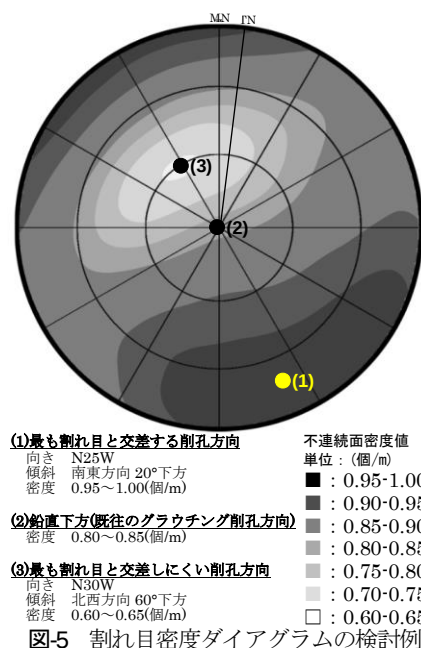


図-5 割れ目密度ダイアグラムの検討例

4. グラウチング調査・計画・施工システムの構築

本章においては、上記したグラウチングの課題に対して、施工時に地質状況を考慮して水みちを推定しながら確実に対策を講じる施工方法を実現することを目的とした、調査・計画・施工システムについて種々の検討を行った。以下に、(1) 割れ目密度ダイアグラムを用いた最も割れ目と交差しやすいグラウチング設定方向の検討、(2)地球統計学的解析を用いた水みち評価の検討について、その具体的な内容と実際のグラウチング施工現場に適用した事例について詳述する。

(1) 割れ目密度ダイアグラムを用いた最適なグラウチング設定方向の検討

a) 割れ目密度ダイアグラムの概要

土木・岩盤構造物の調査においては、地質構造の解明や岩盤性状の評価を目的として、掘削面および切羽などの地質観察やボアホールカメラ観察などにより、割れ目などの地質学的不連続面の方向性が検討される。測定された割れ目は、シュミットネットなどの球面投影法を用いて整理されるが、この方法は割れ目の卓越傾向を評価する目的で利用されるに留まっており、3.(1)で述べた課題に対して、より多くの割れ目と交差する削孔方向を定量的かつ具体的に評価することはできない。これに対して筆者²³⁾は、球面投影法を用いて割れ目分布密度を評価し、定量的に設計・施工に反映できる新しい図的解法を考案した。この方法は、任意の削孔方向における割れ目交差密度(単位:個/m)を算出し、図-5のようなシュミットネット上にコンター図として整理するものである。

b) 割れ目密度ダイアグラムの適用事例

本項においては、上記した割れ目密度ダイアグラムを実際のダム施工現場に適用した事例について詳述する。検討を実施したダムの地質は中生代白亜紀の花崗閃緑岩

であり、NE-SW走向高角度系であるN48E56NWの割れ目が最も卓越しており、それと斜交するE-W走向高角度系および概ねNE-SW走向と直交するNW-SE走向高角度系のものも比較的多く分布していた。ここで、当該ダムの調査横坑調査により得られた2,337個の割れ目データを用いて、任意の方向に削孔した際に交差する割れ目の密度を算出した結果を図-5に示す。これをみると、(1)最も割れ目と交差しやすい方向はN25W方向で南東に20°傾斜させる方向であり、(3)最も交差しにくい向きはN30W方向で北西に60°傾斜させる方向であることがわかる。なお、実際の割れ目密度値については、(1)方向が約1.0個/mに対して、通常のグラウチング施工で採用される(2)鉛直下方が約0.8個/m、そして最も交差しにくい(3)方向では約0.6個/mと、削孔方向により最大4割程度、割れ目との交差しやすさが異なることが判明した。

当ダムにおいては、上述した検討結果を検証する目的で、地質状況や割れ目の卓越傾向が同一の地点において、(1)既往の鉛直下方に設定した孔と(2)鉛直下方から東側に60°傾斜させた孔で透水試験を実施することにより、試験結果の差異を確認した。ここで、図-6に削孔方向ごとのルジオン値の対数頻度分布を示す。この図は当ダム河床部で実施された透水試験について、(1)風化の影響は弱く全体的に低透水であるものの疎らに分布する高角度の割れ目に沿ってのみ高透水を呈するC₄級岩盤における結果、(2)割れ目が卓越するとともに風化の影響を受け全体的に透水性が高いC_M~C_L級岩盤における結果、そして(3)その両者を足し合わせた河床部全体の結果を示したものである。この図をみると、いずれの図においても、(2)60°傾斜孔の方で対数ルジオン値の最小値、平均値、そして平均値-標準偏差値が大きくなっており、より多くの割れ目と交差することにより高透水を呈して

いることを示唆している。特にC_H級については、最小値が(1)方向で0.1Luに対し(2)方向で0.9Lu、平均値－標準偏差値が(1)方向で0.8Luに対し(2)方向で2.2Lu、平均値が(1)方向で2.3Luに対して4.6Luと、明瞭な差が確認できる。

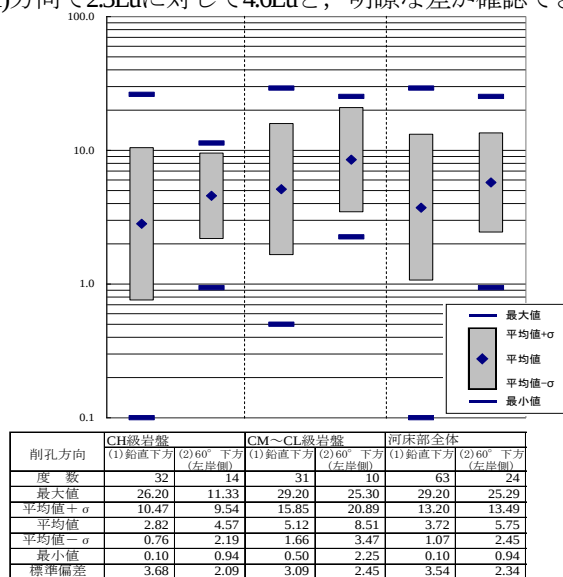


図-6 ダム基礎おける削孔方向ごとのルジオン値対数頻度分布

(2) 地球統計学的解析を用いた水みちの評価

地球統計学は、1950年代に鉱物資源埋蔵量の算出法を改善する目的で開発され、地球科学の様々な分野に応用されるようになり、今日では空間的あるいは時間的に相関があるデータの定量的評価に広く適用されている⁴⁾。地球統計学の代表的方法であるクリギング法は、規則的あるいはランダムに分布する測定点の物理量を用いて測定点周りの任意点における値を統計学的に推定し、物理量の確率的な空間分布を算出しようという方法である⁵⁾。

本論文においては、3.(2)水みちの評価方法および(3)遮水性の改良効果に関する判定方法などの課題について、この地球統計学的解析を用いた評価方法を提案する。3.で述べたように、既往の施工時においては、熟練した地質技術者によるルジオンマップの作成に頼るため、施工時に求められる即時性のある評価の実施が困難となる課題があったのに対し、本論文で提案する地球統計学的解析を用いた評価手法については、ルジオン試験実施位置の座標とルジオン値を入力すれば推定コンター図を即時に作成できる利点を有する。ここで、割れ目密度ダイアグラムを適用したダムサイトにおけるカーテングラウチング施工結果について、図-7に地球統計学的解析によるルジオン値の推定コンター図を示す。この図は、12m間隔で設定されているパイロット孔と6m間隔で設定されている1次孔のデータをもとに、これらの孔間における透水性状の推定値を算出したものであり、図中の赤線は透水性状が高いと想定されている連続性の良い弱層である。これらの図をみると、既往の実績図では透水試験結

果が点のデータとして整理されるのに対して、推定コンター図では高透水部と低透水部の分布状況を分かりやすく表示できており、図中の赤線で示した高角度の弱層に沿って赤色で示された高透水部が分布していること、青点線で示した低透水ゾーンの右岸側境界が弱層と同様に高角度を呈していること、大まかに右岸側で高透水、左岸側で低透水を呈する状況などが確認できる。

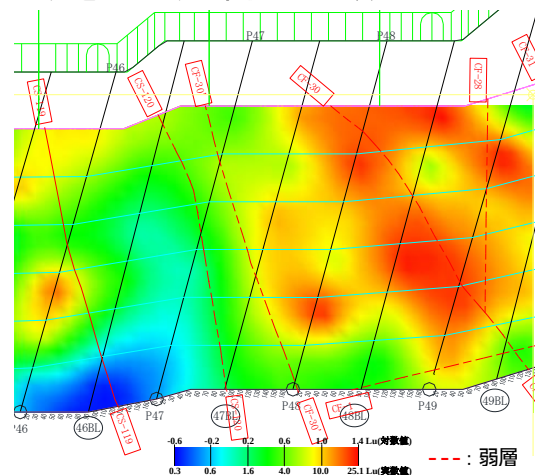


図-7 パイロット孔と1次孔データを用いた解析結果

5. 本システムの具体的な適用案

本章においては、本論文で提案するグラウチング調査・計画・施工システムについて、既往のダム建設において適用する方法を、(1)調査・計画から試験施工における適用案、(2)施工時における適用案に分けて詳述する。

(1) 調査・計画から試験施工における適用案

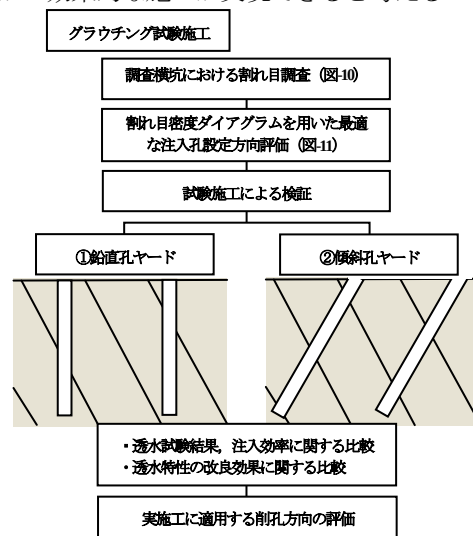
既往のグラウチング試験施工では、本施工の初期段階において、リムカーテングラウチング実施箇所などで施工計画に準じた注入仕様で施工を実施し、所要の注入効率、改良効果が得られているかを確認していた。ただし、注入孔の削孔方向については、上述したように、割れ目の卓越傾向などの地質状況によらず鉛直下方に設定される事例がほとんどであった。

これに対して、図-8に示すように、試験施工を実施する際、割れ目節理密度ダイアグラムを用いて最適な注入孔設定方向を評価する方法を提案する。具体的には、まず、最終調査段階における横坑調査で得られる割れ目調査結果を用いて、割れ目密度ダイアグラムによる最適な削孔方向を評価する。そして、地質状況が同様な試験施工ヤードを2ヶ所設け、既往の施工実績に準じて鉛直孔より注入した場合と検討結果をもとに傾斜させた孔より注入した場合について、透水性状、注入効率、改良効果などを比較する。これにより、より多くの割れ目にグラウトを充填することができる削孔方向を評価できるため、

透水特性はもちろんのこと、力学的特性に関しても改良効果を高めることが可能になると考えられる。

(2) 本施工時における本システムの適用案

本施工時においては、既往の手法に準じて施工実績を図-4のように点の情報として整理するとともに、4.(2)で述べた地球統計的解析を用いた評価手法を提案する。これによって、現場で簡便かつリアルタイムに推定レジオンマップを作成でき、図-7に示すような初期段階における透水性状分布評価、施工段階ごとの改良効果確認、最終施工段階における未改良箇所の摘出、そして最適な追加孔位置の選定などに適用することにより、効率的かつ効果的な施工が実現できると考える。



6. 結論および今後の課題・展開

本論文においては、グラウチング施工時に地質状況を考慮して最適な注入孔削孔方向を評価するとともに、水

みちや改良の進みづらき箇所などを特定することにより、効率的かつ効果的な施工の実現を目的とした、グラウチング調査・計画・施工システムに関する検討を実施した。

今後の展開については、多種の岩盤におけるダム施工現場において本システムによる検討を実施することにより、その適用性をより高めていく必要があると考えられる。これにより、それぞれのダムサイトの地質状況に応じて最適な検討方法を確立していく所存である。

また、今回検討したダムのグラウチング注入孔は2次元的に配置されているが、高レベル放射性廃棄物地層処分空洞などにおける遮水性改良工事においては注入孔が3次元的に設定される⁹⁾。これに対しては、3次元地球統計学的解析が必要となるため、今後、複雑な水みちを分かりやすく描画する方法についても検討する予定である。

これにより、ダムや地下空洞など土木・岩盤構造物におけるグラウチングにおいて、地質状況に応じた効率的かつ効果的な施工を実現するための支援システムを構築していく所存である。

参考文献

- 1) 財団法人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，2003.
- 2) 水戸義忠：節理分布性状の確率モデルを用いた節理性岩盤の解析に関する基礎研究，早稲田大学博士論文，1993.
- 3) Mito, Y., Kito, T. and Kikuchi, K.: Joint Linear Density Diagram for the Description of Jointed Rock Masses, ISRM International Symposium - EUROCK 93 Lisbon, Portugal, June 21 - 24, 1993.
- 4) 地球統計学研究会訳編：地球統計学，pp.1, 2003.
- 5) 稲垣大介，常盤哲也，村上裕晃：幌延深地層研究計画；平成23年度地下施設計測データ集，JAEA-Data/Code 2012-029，2012.

DEVELOPMENT OF GROUTING MANAGEMENT SUPPORT SYSTEM AND ITS APPLICATION TO ACTUAL DAM GROUTING

Shinji UTSUKI, Masashi Nakaya and Tukasa Fujita

According to the technical guide for grouting method for dam construction in Japan modified in the year 2003, one of the key issues for grouting is quality assurance and effectiveness by minimizing the amount of injected grout. Hence, the grouting management support system was newly developed by combining joint density diagram and geostatistical simulations. In this system, the joint density diagram was used to determine most effective direction for the grout injection boreholes and the hydraulic conductivity fields before/after grout injection were estimated by geostatistical simulations. In this paper, the newly developed system was introduced and applied to the actual dam construction site.