

京都大学	博士（工学）	氏名	吉 津 洋 一
論文題目	ダム基礎岩盤の水理地質特性に即した効率的なグラウチング工法の選定手法に関する研究		
<p>本論文は、大規模なダム建設において要求性能である遮水性を確保するためのカーテングラウチング工法に関して、ダム基礎岩盤の水理地質特性に即した効率的で工期・経済性にも優れたグラウチング工法の選定手法を論じ、実プロジェクトに実装を行ったもので、7章からなっている。</p> <p>第1章は序論であり、研究背景と目的を述べている。大規模ダム建設プロジェクトを進める上で、要求性能のひとつである遮水性を確保することは必要不可欠であり、プロジェクト地点の水理地質特性によっては、工期およびコストの増大の要因となることを説明している。本論文では、欧米で主流のGIN工法と複雑な地盤で用いられてきたわが国の従来工法のそれぞれの長所を組み合わせ、複雑な水理地質特性を持つダム基礎岩盤に適用可能な改良型GIN工法の開発、改良型GIN工法により、不連続性岩盤がどのように浸透・充填されているのかを確認する可視化技術の開発、また、実際のダムサイトでグラウチングを実装し、在来工法、GIN工法および改良型GIN工法の長所短所を踏まえた適用性を論じながら選定方法の確立を目指すことを研究の目的として示している。</p> <p>第2章では、既往の研究、グラウチング技術の変遷や施工実績、グラウト浸透・充填のメカニズム、GIN工法の理論を示しながら本論文の方向性を示している。不連続性岩盤では、岩石実質部ではなく既存の割れ目（き裂、ジョイント）の水理特性がグラウト材の浸透・充填に決定的な要因となっているが、実際の施工での浸透距離や充填状況（時間・注入量）は、注入圧力、グラウト材の粘性および降伏強さに依存する。既往の実施事例では、技術指針に従い低濃度から高濃度にグラウト材を切り替えて注入が実施され、多くの時間が費やされている。一方、GIN工法では、単一高濃度のグラウト材を出来るだけ高い圧力で注入しており、極めてシンプルで短時間に終了する。しかしながら、岩盤の限界圧力を確認しないため、岩盤の性状によっては、注入圧で破碎を生じ、改良不足に陥る可能性があることを指摘している。ダム基礎岩盤が複雑な水理地質特性を有する場合、GIN工法の浸透・充填メカニズムに基本的な考え方を置きつつ、従来工法のノウハウを取り入れた改良型GIN工法の開発と、要求性能が担保されていることを確認する手法の構築が必要であることを述べている。</p> <p>第3章では、本論文で対象とした地点の基礎岩盤の水理地質特性を示している。対象地点の地質は、砂岩および泥岩の互層であり、プレート運動に伴う圧縮作用を受け、明瞭な褶曲構造と層面すべりによる低角度弱層を呈している。ここでは、地質構造解析を行い、対象地点の水理地質特性を“応力解放部”、“低角度弱層部”、“褶曲帯部”、“オリジナル部（風化の影響を受けない母岩）”に分類し、特に“低角度弱層部”、“褶曲帯部”について、注入圧力により岩盤を破碎しないように改良型GIN工法の仕様を検討する必要性を論じている。</p> <p>第4章では、改良型GIN工法の開発とグラウチング効果の確認を行っている。まず、GIN工法による試験施工を対象地点で実施した。この結果、グラウト材の十分な充填が確認できないままで完了するケース、上下のステージ間で限界圧力の大きな違いが見られるケース、注入がほとんど進まないにもかかわらず規定圧力に達するケースなどが確認され、GIN工法をそのまま適用することが困難であるとの結論に至った。一</p>			

京都大学	博士 (工学)	氏名	吉 津 洋 一
<p>方で、改良型 GIN 工法では、従来工法による一般的な注入に比べて 1 ステージあたり約 2 時間の短縮と配合切替えに伴うグラウト材の廃棄ロスがないことが確認された。この場合、現場試験施工やデータ分析を基にグラウト材の濃度は、粘着力が小さくブリージングも起きにくい通常の GIN 工法よりやや薄い濃度 ($W/C = 1.5$) を用い、規定圧力は注入深度に比例して設定し、GIN 値到達後も一定程度追加注入を継続できるような基準を提案した。また、注入圧力が上がらない場合は $W/C = 0.8$ または 0.6 に切り替えて再注入を行った。さらに、GIN 工法では用いない水押し試験を実施することで、岩盤の限界圧力を確認し規定圧力を限界圧力+2 bar とした。結果として、基礎岩盤全体にわたりルジオン値 2 の目標を達成した上で、従来工法よりも工期およびコスト両方の縮減に成功した。</p> <p>第 5 章では、X 線 CT を用いて割れ目へのグラウト材の充填状況の観察・分析を実施している。グラウチングの効果は、従来チェック孔を設けてルジオン試験を実施し、目標とするルジオン値に達していることにより透水性を検証するが、実際にグラウト材が割れ目に充填されているか否かは、間接的な確認となる。本研究では、パイロット孔作成時にサンプルを回収し、X 線 CT で注入状況の確認を行った。また、CT 画像から割れ目にグラウト材が充填されている事、配合切替えを行った深度では CT 値の分析から 3 種類の CT 値を有するグラウト材が存在することを確認している。これにより、視覚的にグラウト材の充填状況を確認することを可能とし、グラウト濃度とそれが浸透・充填している割れ目開口幅との関係を把握出来ることを示している。</p> <p>第 6 章は、ダム基礎岩盤の水理地質特性に即した効率的なグラウチング工法の選定手法の提案を行っている。ここでは、GIN 工法、改良型 GIN 工法 (Modified GIN 工法, Hybrid 工法) および従来工法の長所・短所を踏まえ、限界圧力と水理地質構造の複雑さとの関係から各グラウチング工法の適用範囲 (イメージ) および効率的なグラウチング工法の選定手法を提案している。本論文の対象地点の低角度弱層あるいは褶曲帯のように、水理地質構造が複雑な場合には Hybrid 工法が経済的であり、逆に単純な場合は GIN 工法や Modified GIN 工法が経済的であることを示している。</p> <p>第 7 章は結論であり、本論文で得られた成果について要約している。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、複雑な水理地質特性を有するダム基礎岩盤に適用可能な改良型 GIN 工法の開発、改良型 GIN 工法による不連続性岩盤の遮水性向上効果を確認する可視化技術の開発、また、実際のダムサイトでグラウチングを実装し、在来工法、GIN 工法および改良型 GIN 工法の長所短所を踏まえた適用性を論じながら選定方法を確立したものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 改良効果が十分に得られない可能性がある低角度弱層部および褶曲帯部では、GIN 工法の適用に限界があることを試験施工やその分析を通じて確認し、GIN 工法の限界を示している。
2. 応力開放部では限界圧力と割れ目の頻度は比例関係にあり、深部では割れ目頻度、透水性共に小さく、限界圧力も高い。一方、低角度弱層部では限界圧力と割れ目頻度は比例関係にあるものの、浅部では透水性が高く、深部では割れ目頻度および透水性ともに低下する。褶曲帯部では深度にかかわらず割れ目は多く、透水性も高く、限界圧力が低いとの関係を明らかにした。
3. 低角度弱層部や褶曲帯部のような複雑な水理地質構造を有する岩盤には、岩盤の限界圧力に応じて規定圧力を設定する Hybrid 工法（改良型 GIN 工法の一つ）が適しており、この工法を用いることにより、目標ルジオン値 2 Lu の達成が可能である。
4. 目視では確認しにくい開口幅が 3 mm 以下の割れ目を中心に CT 画像から分析を行い、開口幅 1.5 mm 以下の割れ目では、濃度の低い低 CT グラウトが注入されており、濃度の高い高 CT グラウトは密度が相対的に大きいため浸透しにくく、一方、開口幅が大きい（3 mm 以上）割れ目では、先行して注入された低 CT グラウトと中・高 CT グラウトが繰り返し注入された状況を確認することに成功した。
5. グラウチング工法の注入量や注入時間を推定し経済性を比較した上で、基礎岩盤の水理地質構造を 3 分類化し、提案する改良型 GIN 工法、GIN 工法、従来工法の選択手法（経済的推奨範囲）を限界圧力（許容される注入圧力）および水理地質構造の複雑さとの関連で提案している。

以上より、本論文は、複雑な水理地質特性を有する基礎岩盤において工期・工費の増大要因のグラウチング工法の新工法の開発と有効性の確認、実プロジェクトへ実装を行った研究であり、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 5 年 8 月 21 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。