

施工事例を用いた亀裂性岩盤のグラウチング施工の分析と効率化に関する研究

建設工学専攻 環境防災研究室 宮坂 裕

1. はじめに

ダム基礎処理工法として一般的に用いられるグラウチングは、岩盤内に存在する不連続面を主とする亀裂や空隙にグラウトを充填することにより基礎岩盤の透水性や変形性を改良することを目的とする。

しかし、グラウチングは目視が不可能な岩盤内で施工されることもあり、改良状況を詳細に把握することが困難で、注入条件となる注入圧力やグラウト配合等の施工パラメータの決定においては理論的裏付けが十分になされず、既往の実施事例や経験則等に頼らざるを得ないのが現状である。

その結果、過大な圧力による不必要な範囲までの注入、低濃度注入による注入時間の増加等の問題が生じている。さらに、ダム工学分野を取り巻く社会情勢は、公共事業費削減という厳しい状況にあることから、コスト削減は不可欠となっている。

このような技術的背景、及び社会情勢を踏まえ、本研究ではグラウチングの予測制御を可能とし、効率的かつ合理的なグラウチングを実施するため、施工パラメータの適正值、あるいは限界的数値の存在を既往の注入事例から見出し、注入時間を短縮し、グラウト到達距離を適正化する、効率的な注入圧力、注入配合を求めることを目的とした。

2. 研究方針

本研究は、国土交通省 北陸地方整備局所管の横川ダムのリム部カーテングラウチングで得られた透水、注入データ、および地質情報を用いて注入状況、及び改良傾向の分析を行い、グラウチングの効率化に関する研究を行う。

また、グラウチング分析に当たっては、既往の室内注入実験で得られた粘性、損失圧力算定式等の知見を用いグラウトの到達距離を試算し、実際の施工での注入状況と比較し、効率的と考えられるグラウチングの実施方法を導く。

3. 基本事項の整理

(1) 地質特性

1) 地 質

本研究は、新生代新第三紀中新世の高熔結の熔結凝灰岩を研究対象とした。

研究対象の熔結凝灰岩は基本的には緻密で堅硬な塊状岩盤であるが、地形構造や地層形成時の変動、熱水脈等に起因する断層や亀裂といった連続した分離面が局所的に分布し、断層や亀裂内には熱水通過に伴う変質粘土や流入粘土が挟在し、それらの亀裂面の多くは暗褐色に変色している。

また、断層、亀裂の走行傾斜をシュミットネットにプロットすると、傾斜角 $20\sim 30^\circ$ の低角度亀裂と、傾斜角 $60\sim 70^\circ$ の高角度亀裂の2系統の亀裂が卓越する。

低角度亀裂の走向は左岸上流から右岸下流に向かう走向で、右岸上流側に傾斜するものが卓越するのに対して、高角度亀裂はほぼダム軸に直交する走向で、左岸側に傾斜するものが卓越する。

したがって、これらの亀裂に対し何らかの止水対策を施さない場合、ダム湛水時に亀裂沿いに貯留水の漏水が懸念された。

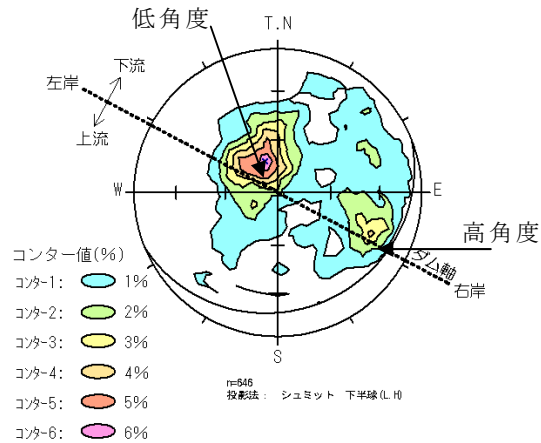


図- 1 亀裂の走行、傾斜

2) 水理地質特性

基礎岩盤の透水性は、基本的には2ルジオン未満の難透水部が主体を成すが、低角度亀裂、および高角度亀裂沿いに10ルジオン以上の高透水部が集中する。

また、亀裂内の粘土流出が原因と考えられる透水試験降圧時の流量が昇圧時に比較し急増する限界圧力発生データが低角度亀裂、および高角度亀裂周辺で設計圧力の約50%で発生する。

4. 注入状況、及び改良傾向

(1) 注入状況

リム部カーテングラウチングの注入状況を以下に示す。

- ① パイロット孔では亀裂沿いに 10 ルジオンを上回る高透水データが多発した。
- ② パイロット孔では限界圧力発生に伴い多注入となるデータが亀裂沿いに多く発生した。
- ③ 注入効果が発現しにくい高角度亀裂が多く分布する右岸リム部では、2 次孔でも単位注入セメント量が 100Kg/m を上回るデータが発生した。
- ④ 亀裂部以外のルジオン値、単位注入セメント量はパイロット孔から極めて低い。

(2) 改良傾向

リム部カーテングラウチングの改良傾向を以下に示す。

- ① 左右岸リム部ともルジオン値は次数進展に伴い低減傾向にある。
- ② 左岸リム部の単位注入セメント量は 1 次孔で大きく低減した。
- ③ 注入効果が発現しにくい高角度亀裂が分布する右岸リム部は、1 次孔まで単位注入セメント量の低減は認められない。
- ④ 左右岸リム部ともに限界圧力の発生率は、次数進展に伴い低減する。

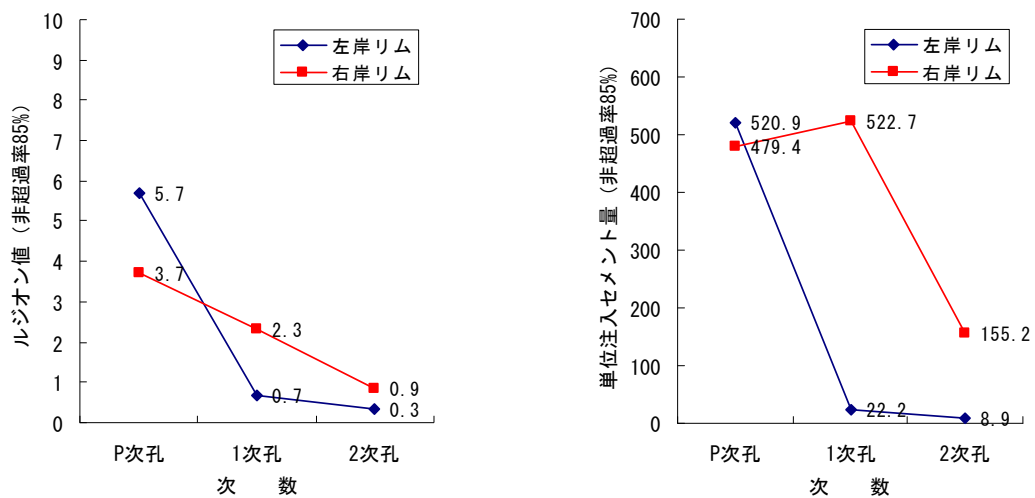


図- 2 ルジオン値、単位注入セメント量低減図

表- 1 次数別限界圧力発生率

	P次孔	1次孔	2次孔
左岸リム	47%	16%	7%
右岸リム	51%	25%	10%

5. 既往の室内注入試験結果

(1) グラウトの粘性

従来の研究では、グラウトの流動特性については、回転式粘度計等を用いた比較的低せん断速度領域での試験結果から粘性特性を推定するに留まっていた。

そこで、谷等は新たな知見として平行平板試験装置を用い、広範囲でのせん断速度に対応したグラウトの粘性を注入圧力、流量、グラウト比重、亀裂幅をパラメータとした次式を提案した。

$$\text{グラウト粘性} : \mu = \alpha \cdot e^{\beta \cdot \gamma}$$

$$(\alpha = 2.912 \times 10^{-8} \cdot D^{0.865}, \beta = -0.803 \times \ln(D) + 9.849)$$

(2) グラウト到達距離の算定

谷等は平行平板試験においてグラウトの粘性特性を求めると共に、平行平板内におけるグラウト粒子の流速に着目し、グラウトの閉塞現象を実験結果から導いた。

グラウト到達距離は亀裂内のグラウトの流速が限界流速に達し、損失圧力が規定圧力に達した段階で流量が低下し閉塞するとして、以下の損失圧力算定式からグラウト到達距離を算定した。

$$\text{損失圧力} : \Delta P = 12\mu/t^2 v \Delta r$$

(μ : 見掛け粘性、 v : 限界流速(5cm/sec)、 t : 亀裂幅、 r : グラウト到達距離)

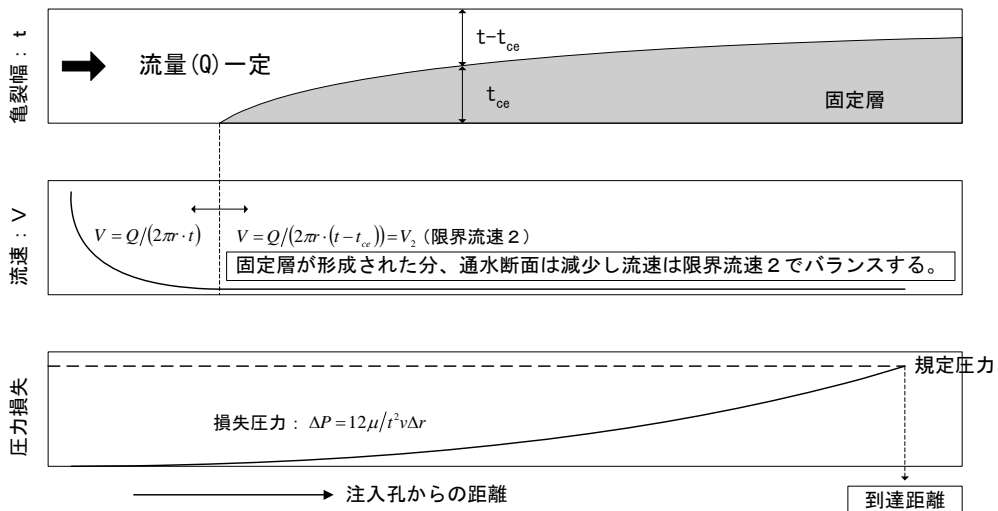


図- 3 グラウト閉塞過程概念図

6. 実施要領の検討

前項までで述べてきた熔結凝灰岩の地質性状、注入特性を踏まえ効率的にグラウチングを実施する方法を検討した。

(1) ルジオン値の評価

従来、基礎岩盤の透水性は、加圧による破壊前の基礎岩盤固有の透水性で評価することを原則としているため、透水試験開始時の圧力、流量と限界圧力発生時の圧力、流量を結んだ初期勾配の算出したルジオン値で評価する。

同様に、注入時の開始配合等の実施要領の決定も、上記の初期勾配ルジオン値を決定基準としているのが現状である。

しかし、本研究の対象とした亀裂が連続し、亀裂内に流入粘土が局所的に堆積した火山岩類の熔結凝灰岩では、透水試験時に限界圧力が発生した場合、降圧時の流量が昇圧時の流量に比較して大きく増加し、注入時の流量経路は、透水試験降圧時の流量経路と一致する状況が確認された。

また、初期勾配ルジオン値と単位注入セメント量の相関性は極めて低い。

しかし、最大圧力と原点を結んだ破壊後ルジオン値を採用した場合、破壊後ルジオン値と単位注入セメント量の間で高い相関関係が得られた。

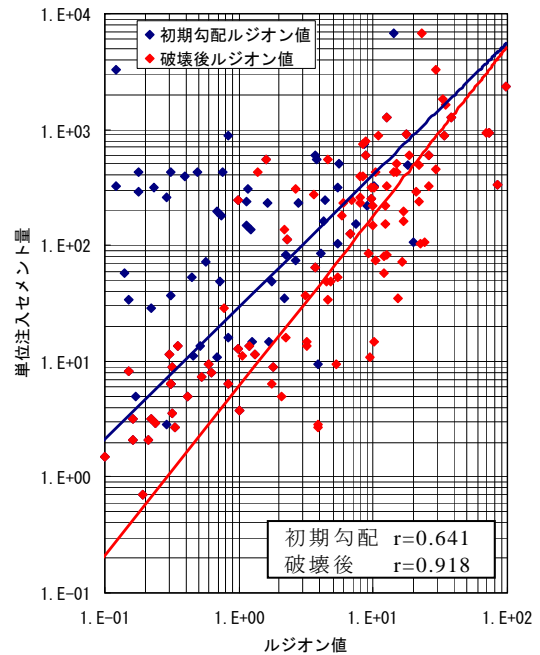


図- 4 ルジオン値－注入セメント量

したがって、基礎岩盤の透水性の評価は、従来通り、初期勾配ルジオン値で判定するが、連続性が高い亀裂が分布する火山岩類での注入仕様の決定は原点と最大圧力を結んだ破壊後ルジオン値を採用することで、より基礎岩盤の透水状況に応じた開始配合を決定でき、注入時間の短縮等グラウチングの効率化に貢献できる。

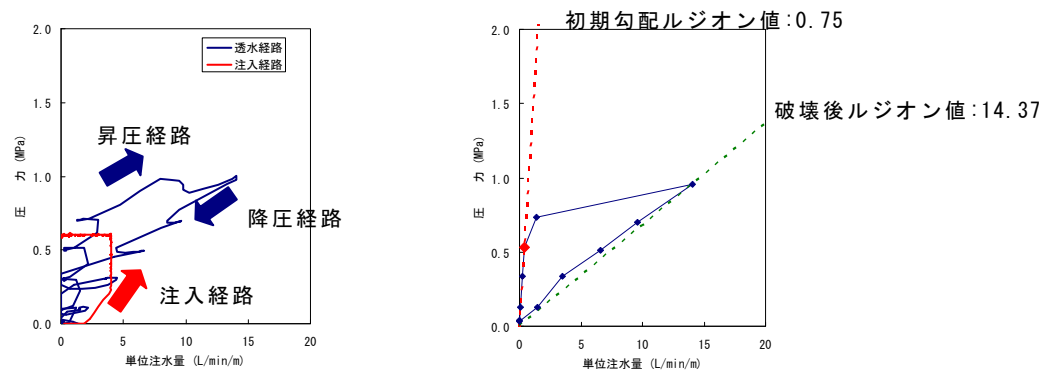


図- 5 限界圧力発生データ

(2) 最大亀裂幅

注入時のグラウトの粘性や亀裂内におけるグラウトの損失圧力を算出するためには、注入区間内の亀裂幅を決定が不可欠である。

また、基礎岩盤の透水性、注入量を決定する亀裂の因子（例えば、亀裂幅、亀裂条数、傾斜角等）を決定しておく必要がある。

そこで、本研究では孔内観察を実施したパイロット孔の0.5 mm以上の亀裂数、1 mm以上の亀裂数、最大亀裂幅、亀裂の傾斜角を読み取り、これらの対数を説明変数、破壊後ルジオン値の対数を目的変数とした重回帰分析を行った。

この結果、破壊後ルジオン値は、1 mm以上の亀裂数、最大亀裂幅と高い相関関係にあるという知見を得たが、既往の研究では岩盤の透水性は卓越した亀裂に支配されるという報告、重相関係数は最大亀裂幅に大きく依存している状況から、開口亀裂幅は破壊ルジオン値に切片と係数を乗算した下式から導かれるという知見を得た。

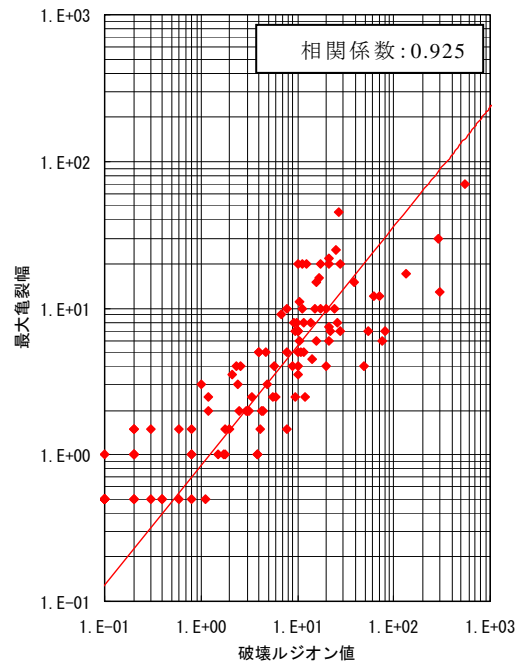


図- 6 破壊後ルジオン値と亀裂幅

$$\text{開口亀裂幅} : \text{Log}_{10}(\text{CrWidth}) = -0.078 + 0.816 \times \text{Log}_{10}(\text{bLu})$$

(Crwidth : 最大亀裂幅、bLu : 破壊ルジオン値)

表- 2 重回帰分析結果 (説明変数選択基準 : Ru=0.864)

	係数	標準誤差	t 値	P-値	単相関	チェック
切片	0.202	0.048	4.210	4.552E-05		
最大亀裂幅	0.849	0.064	13.248	2.037E-26	0.926	
1.0 mm 亀裂数	0.240	0.064	3.739	2.688E-04	0.840	

重相関係数 R	0.933
重決定 R2 (決定係数)	0.870
補正 R2 (自由度修正済決定係数)	0.868
標準誤差	0.464
観測数	142

(3) グラウト配合

注入時、亀裂幅に対し適切なグラウト配合が選択されない場合、注入孔周辺でのグラウトの閉塞や注入時間の増大などの問題が生じる。

そこで、注入データから注入時の粘性変換ルジオン値、注入収束開始配合を求めるとともに、平行平板モデルにおけるグラウト到達距離を算出し効率的グラウチングを実施するための配合を検討した。

1) 粘性変換ルジオン値

時々刻々に記録されたグラウトの単位注入量(L/min/m)と、これに対応する圧力(MPa)から換算ルジオン値を算出し、その値にグラウトの粘性を乗じた値を時々刻々の粘性変換ルジオン値： μLu による解析を行った。

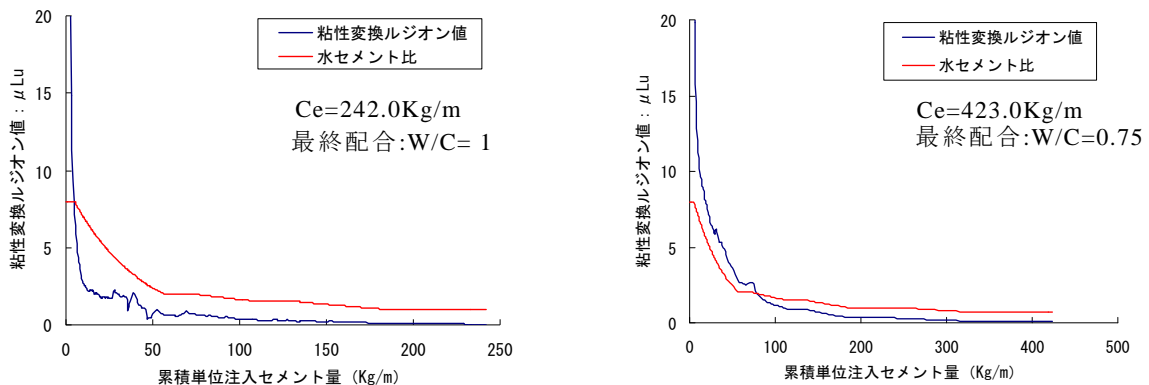


図- 7 粘性変換ルジオン値の推移

これらの状況からは、低濃度グラウトを使用した少注入ステージ、高濃度グラウトを使用した多注入ステージの両者ともに、配合切替に伴う急激な粘性変換ルジオン値の低下（急閉塞現象）は認められない。

2) 平行平板モデルにおけるグラウト到達距離

平行平板モデルにおけるグラウト損失圧力式から、注入圧力が 0.5MPa における配合別のグラウト到達距離を算出しに示した。

- ① 低透水区間では、 $W/C > 2$ の貧配合を使用すれば、注入圧力が 0.5MPa でグラウトは目標到達距離（12m）に達する。
- ② 亀裂幅が 10 mm 以上の高透水地帯で高濃度配合を使用した場合、注入圧力が 0.5MPa 以下ならばグラウトは目標到達距離に達しない。
- ③ 逆に注入圧力が 1.0MPa ならば、水セメント比が 0.8 の高濃度グラウトは目標到達距離に達する。

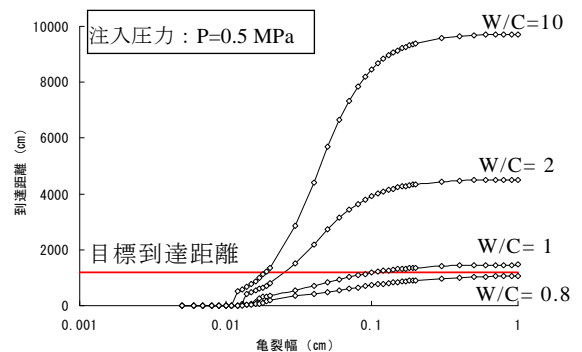


図- 8 グラウト配合別到達距離

3) 注入収束配合

時々刻々の圧力、流量データから単位時間当たりの単位注入セメント量を算出し、その値が低減を開始し完了に至る時の収束配合を計算し、破壊ルジオン値に対する収束配合の特性を検討した。

- ① 破壊後ルジオン値が 5 以上のデータの 90% 以上は、グラウト配合が $W/C=2$ 以下の高濃度配合で収束を開始する。
- ② 破壊後ルジオン値が 5 未満のデータの (限界圧力が発生しない) の 90% 以上は、グラウト配合が $W/C=6$ 以上の初期配合で注入を完了する。
- ③ 破壊後ルジオン値が 20 以上の場合、その 90% が注入中断孔である。

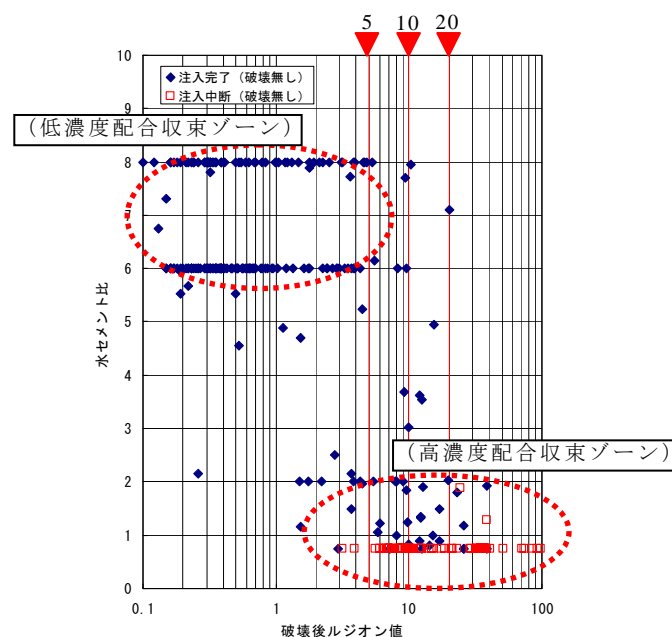


図- 9 注入収束配合

これらの検討結果を踏まえ、連続する開口亀裂が分布する熔結凝灰岩等の火山岩類での注入配合は、破壊ルジオン値を配合決定基準に用い、従来の基準より低透水域から高濃度配合を使用する以下の提案を行った。

表- 3 提案配合切替基準

W/C	$bLu \leq 5$	$5 < bLu \leq 20$	$20 < bLu$
6	400		
4	400		
2	600	600	
1.5	600	600	
1	800	1000	1200
0.75	1200	1800	2800
計	4000	4000	4000

(4) 注入圧力

パイロット孔での注入実績、及び損失圧力式から導かれるグラウト到達距離を基に、注入圧力の検討を行った。

1) 平行平板モデルにおけるグラウト到達距離

平行平板モデルにおけるグラウト損失圧力式を基に、 $W/C=0.8$ における注入圧力別のグラウト到達距離を試算した。

- ① 亀裂幅が 1mm 以上の高透水地帯で $W/C=0.8$ 以上の高濃度グラウトを 0.5MPa 以下で注入した場合、グラウトは目標到達距離に達しない。
- ② 1.0MPa で注入すれば、高透水地帯でも $W/C=0.8$ 以上の高濃度グラウトは目標到達距離に達する。

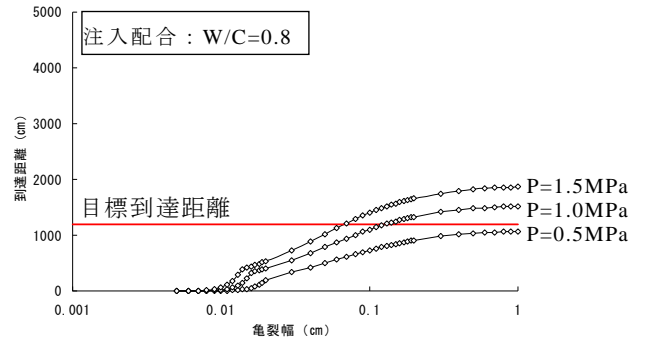


図- 10 注入圧力別到達距離

2) 注入実績

パイロット孔のステージ別の最終注入圧力を記録し、その状況を以下に示した。

- ① 左右岸リム部とも 1.0MPa 程度の圧力で完了しているデータが多い。
- ② 低圧力施工でも 1 次孔で明確な透水性が低減し改良効果を得た。
- ③ 左岸リム部では、1MPa で注入したグラウトが 24m 離れた地点のボーリングコアで確認された。

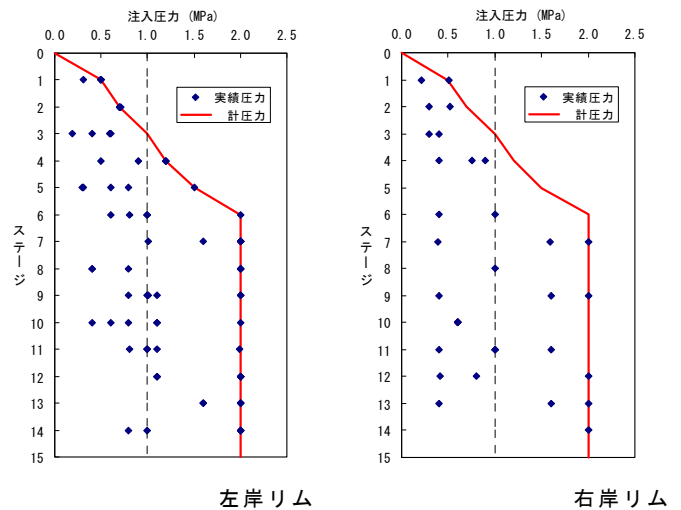


図- 11 ステージ別実績注入圧力

これらの状況から、高濃度グラウトを目標範囲まで到達させるためには 0.5MPa 以上の圧力が必要だが、1.0MPa の注入で十分な改良効果を得ることが出来た。

したがって、連続した開口亀裂が分布する火山岩類の岩盤では、不要な範囲へのグラウトの到達を抑制するため、従来の注入圧力より制限した以下の圧力で施工することを提案した。

表- 4 提案注入圧力

ステージ	1	2	3～
注入圧力(MPa)	0.5	0.7	1.0

7. 後の

本研究は卓越した亀裂が岩盤内に連続する火山岩、噴出岩を対象に注入時間を短縮し、適切な改良効果を得るための注入仕様の提案と、注入状況に応じたルジオン値の評価方法について提案を行った。

研究を始めるに当たり羽越河川国道工事事務所、飛島・戸田・福田組企業体から膨大な地質データと注入データの借用を受けたが、本研究ではグラウチングの改良効果の判定が容易なリム部のカーテングラウチングを対象を絞り研究を進めた。

しかし、今後はダム全域を視野に入れた研究を進めるとともに、同質異種の岩盤に対する適用性を確認するため、データや知見を蓄積していく必要がある。

さらに、今回は連続した亀裂が広範囲に分布する火山岩類にテーマを絞り注入仕様の提案を行ったが、今後は冷却節理等の微細な亀裂が発達した火成岩類や低固結の砂岩、マサ土等のようなグラウトが浸透注入するような岩盤に対する合理的な注入方法を研究していく必要があると考える。

ダム事業に関しては、今後は少子高齢化が一層、顕在化し、社会資本整備に投資できる費用は年々縮小していくことが予想され、今までのように潤沢な費用を得て、良好な地質での建設は一層難しくなっていくことが予想される。

これらも状況を踏まえ、今後、増えていくと考えられる改良が難しい岩盤に対しても適切で合理的と考えられる注入仕様の研究を進めていくことが重要と考える。

また、ダム基礎グラウチングの計画、設計は長年の経験、既往の実績等に依存する事が多く、斬新な提案等を積極的に許容しがたい工種であった。

これからは、官民学が一体となり注入メカニズムの解明に取り組み、各種岩盤に対応した適切な注入仕様を検討していく必要があると考える。