

大分川ダムにおけるグラウチング試験

石戸 善明^{1*}・長谷川 清史²・山口 嘉一³・永松 和彦⁴

¹国土交通省 大分川ダム工事事務所 調査・品質確保課 (〒870-0044 大分市舞鶴町1-3-30)

²株式会社 建設技術研究所 九州支社 地圏環境室 (〒810-0041 福岡市中央区大名2-4-12)

³独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ (〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

⁴九州グラウト部会 座長 (〒849-0922 佐賀市高木瀬東2-16-35)

*E-mail: ishito-y8910@qsr.mlit.go.jp

大分川ダム工事事務所において、ダムサイトの基礎岩盤の水利特性及びグラウチングによる改良特性の把握および、合理的なグラウチング手法の検討を目的としたグラウチング試験を実施した。

その結果、地下水位以下で実施したルジオンテストにおいて特異な形状を示すP-Q曲線が得られたこと、また、グラウチング施工においても、試験区間は全体的に透水性は低く、単位セメント注入量は少ないものの、グラウト注入に時間を要するなどの課題が得られた。

これらの課題は、当ダムサイト基礎岩盤の複雑な透水特性に起因するものであると考え、基礎岩盤の詳細な透水特性の把握、および合理的なグラウチング手法の策定を目的として、各種の追加試験を実施した。

Key Words : lugeon test, grouting, P-Q curve, hydrothermal alteration

1. はじめに

大分川ダムは、一級河川大分川水系大分川の支川七瀬川に国土交通省九州地方整備局が建設中の洪水調節、流水の正常な機能の維持、水道用水の確保を目的とした多目的ダムで、堤高 91.6m、堤頂長 496.1m、総貯水容量 24,000千m³の中央コア型のロックフィルダムである。

当サイトの基礎岩盤は、中生代白亜紀の花崗岩、および閃緑岩からなり、圧砕作用と弱い熱水変質作用を被っている。圧砕作用に伴う破断面は再固結しており、破断面沿いの剥離性はほとんど認められないが、熱水変質作用により局所的に軟質化している箇所が存在する。

今回、①基礎岩盤の水利特性及びグラウチングによる改良特性の把握、②本施工段階でのグラウチング施工に関する課題の抽出、③合理的なグラウチング手法の検討を目的として、ダムサイト河床部にてグラウチング試

験を実施した。大分川ダムサイトのルジオンマップとグラウチング試験位置を図-1に示す。

本研究では、ルジオンテストにおいて、「逐次流量減少型－昇降圧段階異路型¹⁾ (以下「流量減少・異路型」と称する。)」を示すP-Q曲線が得られた試験区間において、その成因を解明することを目的として、ボーリングコア等から得た地質条件を踏まえたうえで、繰返しルジオンテストや長時間ルジオンテストなどの種々の追加試験を実施した。また、グラウチング施工において、ルジオン値、単位セメント注入量が小さいものの、注入完了までに時間を要する非効率なステージが多数確認されたことから、その改善策として試験的にグラウチング注入完了基準速度を緩和した施工を行い、その効果の検証を試みた。本論文では、それら試験の結果について報告する。

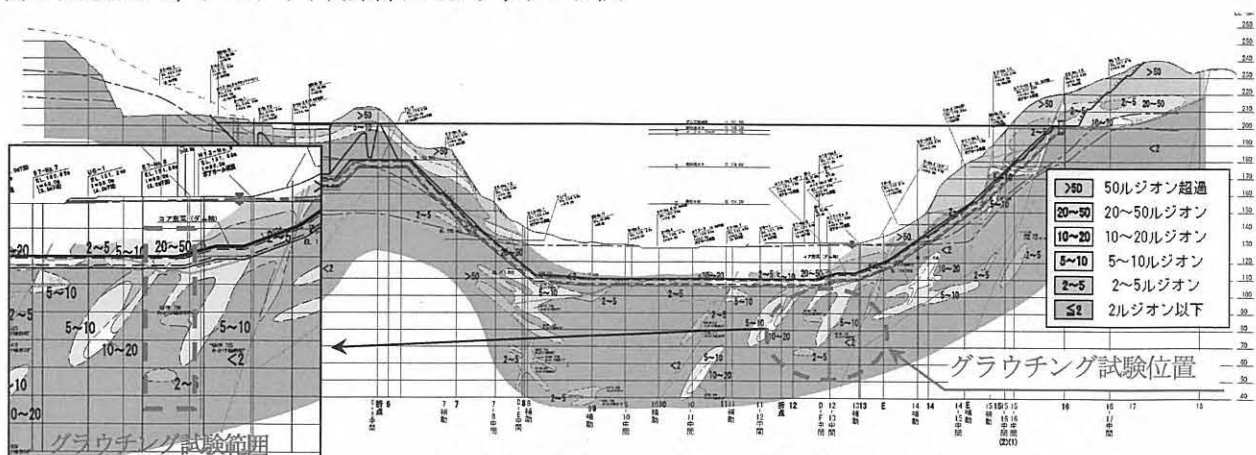


図-1 大分川ダムのルジオンマップ及びグラウチング試験位置

2. グラウチング試験の概要

(1) 孔配置

図-2 に示すように、パイロット孔の間隔を 6m、規定孔を 2 次孔とし、孔間隔 1.5m にて実施した。

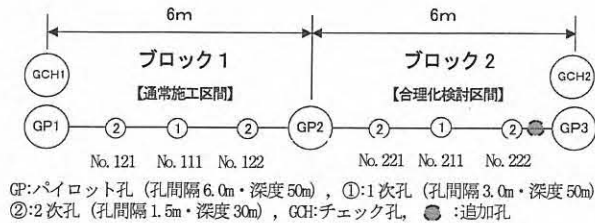


図-2 孔配置の概要図

(2) ルジオンテストの条件

ルジオンテストは、圧力センサー付パッカーにて注入圧力管理を行い、チェック孔も含め、計 97 ステージ（パイロット孔 30 ステージ；1 次孔 20 ステージ；2 次孔 28 ステージ；追加孔 5 ステージ；チェック孔 14 ステージ）で実施した。

表-1 ルジオンテストの仕様

(パイロット孔、1次孔)	
過程	圧力段階(MPa)
昇圧	0.00 → 0.05 → 0.10 → 0.15 → 0.20 → 0.40 → 0.60 → 0.8 → 1.00
降圧	→ 0.8 → 0.60 → 0.40 → 0.20 → 0.15 → 0.10 → 0.05 → 0.00
注水時間	1圧力段階あたり 5分間
(2次孔、チェック孔)	
過程	圧力段階(MPa)
昇圧	0.00 → 0.20 → 0.40 → 0.60 → 0.8 → 1.00
降圧	→ 0.8 → 0.60 → 0.40 → 0.20 → 0.00
注水時間	1圧力段階あたり 5分間
(追加孔: 水押試験)	
過程	圧力段階(MPa)
昇圧	0.00 → 0.25 → 0.50 → 1.00
降圧	→ 0.50
注水時間	1圧力段階あたり 5分間
(繰返しルジオンテスト)	
過程	圧力段階(MPa)
昇圧	0.00 → 0.20 → 0.40 → 0.60 → 0.8 → 1.00
降圧	→ 0.8 → 0.60 → 0.40 → 0.20 → 0.00
注水時間	1圧力段階あたり 5分間保持
その他	初期ルジオンテスト終了後、同日に実施
(長時間ルジオンテスト)	
過程	圧力段階(MPa)
昇圧	0.00 → 0.20 → 0.40 → 0.60 → 0.8 → 1.00
降圧	→ 0.8 → 0.60 → 0.40 → 0.20 → 0.00
注水時間	1圧力段階あたり 60分間(1時間)
その他	初期ルジオンテスト終了後、翌日に実施

3. 「流量減少・異路型」P-Q曲線の成因の考察

(1) 「流量減少・異路型」のP-Q曲線の特徴

「流量減少・異路型」P-Q 曲線とは、山口(1993)¹⁾により分類・定義された P-Q 曲線のうち、「逐次流量減少型」に属する形状の一つで、図-3 に示す特徴を有する。

- ・昇圧過程にて、圧力の増加に伴い注水量が減少。
- ・昇圧過程と降圧過程で異なる経路をたどる。

また、当サイトで確認された「流量減少・異路型」P-Q 曲線は、以下の特徴を有する。

- ・今回の試験区間は全て地下水位以下の条件（飽和状態）で確認されている。
- ・降圧過程において、ほぼ直線で原点に回帰する。

- ・本試験では、昇圧経路と降圧経路の軌跡で包括される面積（ $\angle PQ$ ）が 0.3 (MPa・ℓ/min/m) 以上である場合を「流量減少・異路型」P-Q 曲線と定義した。

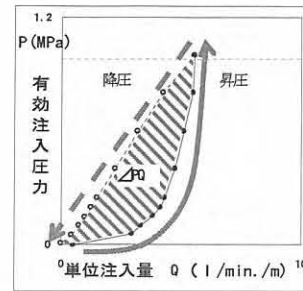


図-3 「流量減少・異路型P-Q曲線」の特徴

山口(1993)は、「流量減少・異路型」P-Q 曲線の成因として、①目詰まり現象、②非定常浸透（不飽和領域）の2点を挙げている。

本試験では、各調査孔でボアホールスキャナ観察を実施する目的で、孔内水の懸濁物が消失するまで念入りに孔内洗浄を実施しているため、①の目詰まり現象が成因とは考えにくい。

また、今回のルジオンテストは全て地下水位以下で実施しているため、②の非定常浸透（不飽和領域）についても、地下水位以下の飽和領域において、地盤の変形に伴う非定常浸透が発生するが、これにより本試験における顕著な「流量減少・異路」P-Q 曲線の発生を説明することは難しいと考えている。

(2) 岩盤状況

本サイトの基礎岩盤は、先に述べたように、圧砕作用や熱水変質作用を被っているものの、岩片は基本的に硬質～極硬質で、割れ目間隔 10cm 以上の CM 級岩盤、CH 級岩盤が主体をなす。

熱水変質作用により、カオリナイト・ス멕タイト等の粘土鉱物が生成され、基礎岩盤の種々の層準には、局所的に軟質化する箇所が存在する。

変質部の分布は複雑で、その消長や連続性には、本試験での狭い孔間隔の調査であっても不明瞭な点が多いが、ボーリングコア及びボアホールスキャナ画像（図-4）から、変質部において割れ目が不明瞭である状況が

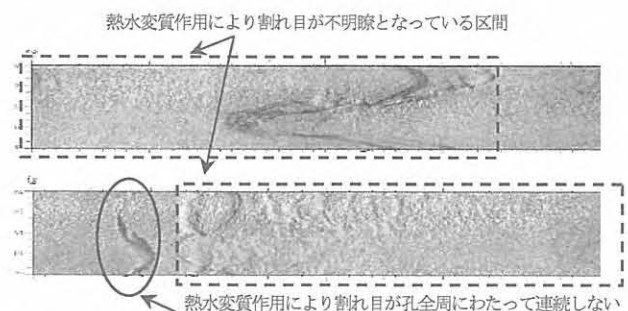


図-4 「流量減少・異路」P-Q曲線を描く試験区間のボアホールスキャナ画像（No.222孔、1st）

確認されることから、「流量減少・異路型」P-Q 曲線を呈する試験区間周辺の岩盤は、透水性を示す割れ目の連続性が乏しいことが示唆される。

(3) 追加試験による検証

「流量減少・異路型」P-Q 曲線を呈する試験区間の注入チャートの例を図-5 に示す。

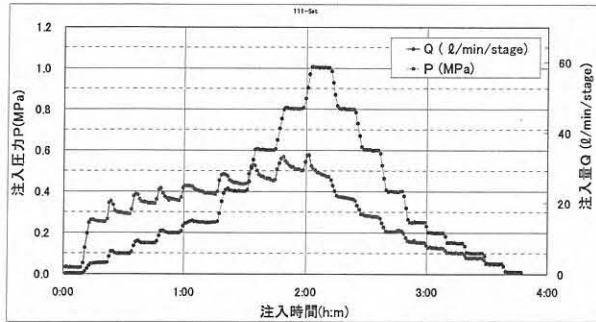


図-5 「流量減少・異路型」注入チャートの例 (No.111 孔, 5st)

各圧力段階での注入量が時間の経過に伴い減少している。これは、不飽和領域で実施したルジオンテストと同様の軌跡を描くが、本論文でのルジオンテストは地下水位以下で実施している。

そのため、「流量減少・異路型」P-Q 曲線を呈した試験区間について、以下の仕様でルジオンテストを追加実施することにより、定常状態が形成されるかどうかの検証を行った。

なお、今回の追加試験は、1 次孔以降を対象とし、初期ルジオンテストの結果が 5Lu 以上の場合のみ実施した。

- ・繰返しルジオンテスト：初期ルジオンテスト終了後、再度、初期ルジオンテストと同様の仕様でルジオンテスト（昇降圧力段階全 10 段階・注入時間 5 分）を実施。
- ・長時間ルジオンテスト：繰返しルジオンテスト終了後、翌日に再度長時間ルジオンテストを実施。昇降圧力段階を全 10 段階とし、1 圧力段階当たりの注水時間を 5 分から 1 時間に延長した試験。

図-6 に、追加試験で得られた P-Q 曲線を、初期ルジオンテストで得られたものと併せて示す。

初期ルジオンテストでは、昇圧開始時に注水量は増大するが、昇圧時間の経過とともに注水量は徐々に減じ、このステージでのルジオンテストでは、0.8MPa から 1.00MPa への昇圧時には、1.00MPa 段階の方が注入量は減少する結果が得られている。その一方で降圧過程では、1.00MPa から 0MPa まで、ほぼ原点に向けて直線回帰している。

しかし、当該ステージ実施した、繰返しルジオンテストならびに長時間ルジオンテストの P-Q 曲線は、直線状（昇降圧同経路）を示し、初期ルジオンテストの降圧過程経路をほぼトレースした。

(4) 成因の考察

ボーリングコアおよびボアホールスキャナ画像で把握した岩盤性状から、「流量減少・異路型」P-Q 曲線の成因について、下記のとおり考案した。

- ・当サイトの基礎岩盤は、割れ目の発達する非変質部と割れ目が発達せず、一部砂～粘土化した変質部の、透水性の異なる 2 種の岩盤から構成される。
- ・変質部は、一部砂～粘土化しているため、水は鉱物粒子間を浸透し、流速は小さく、大きな貯留性を有するものと考えられる。
- ・ルジオンテストの初期昇圧時に注入量が大きくなるのは、非変質部の割れ目を流れる流量を示していると考えられる。この区間の流速は大きい。
- ・注入水は昇圧終了時、および降圧時には、貯留係数の大きい変質部を、流速を減じて浸透する。

以上の考察を踏まえて、透水に関する岩盤モデルについて想定してみる。

試験区間には、図-7 に示すとおり、熱水変質作用により、透水性の高い非変質部（割れ目間）と、透水性の低い変質部（鉱物粒子間）の 2 種の異なった透水特性を持つ岩盤が分布する。

ルジオンテストの初期の昇圧過程において、透水性の高い（貯留性の低い）非変質部に注水され、その後、透水性の低い（貯留性の高い）変質部に注入されることにより、見かけ上、非定常浸透が発生していることによるものと考えられる。

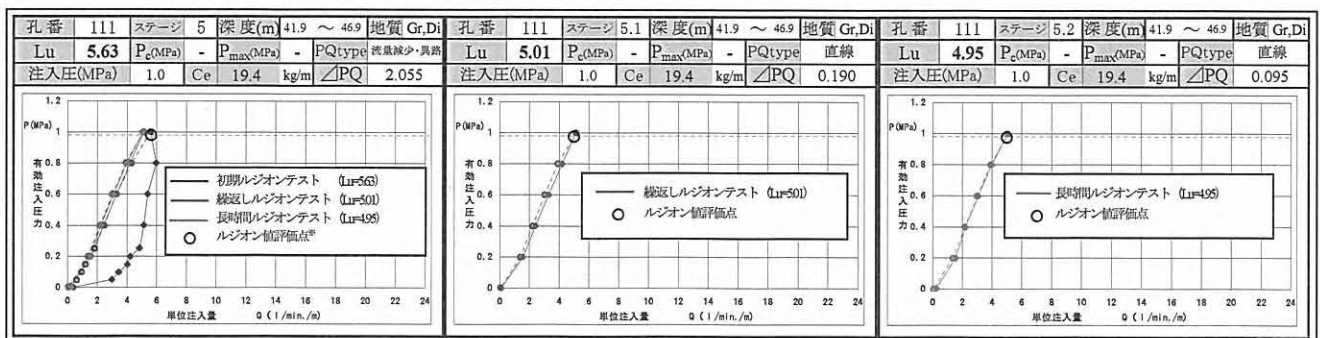


図-6 「流量減少・異路型」P-Q 曲線を呈する試験区間での追加試験による透水性検証 (No.111 孔, 5st)

※ルジオン値は安全側の立場から、有効注入圧力 0.98MPa 時点における昇圧時の単位注入量 (Q) にて評価した。

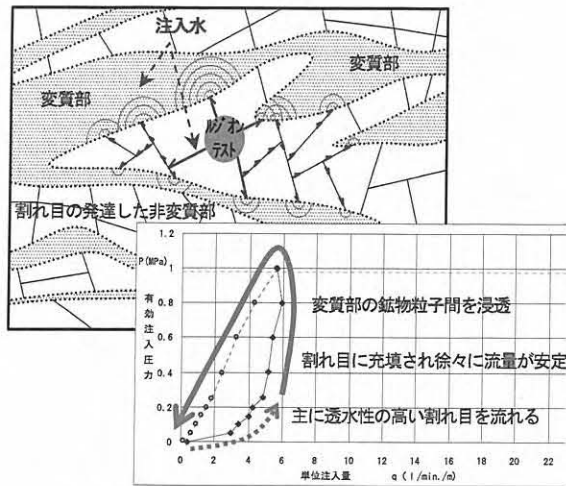


図-7 「流量減少・異路型」P-Q 曲線の成因概念図

その結果、地下水位以下のルジオンテストにかかわらず「流量減少・異路」P-Q 曲線を描くものと推察される。

なお、熱水変質作用の影響による、非定常浸透のメカニズムについては考察段階であり、実証へ向け、今後も検討を進める。

3. 「注入完了基準速度の緩和」検討

(1) 合理化検討項目の選定

グラウチング試験の結果から、当サイトのグラウチング特性として、以下の2項目が上げられる。

a) ルジオン値と単位セメント注入量との関係

図-8に、未処理岩盤の特性を反映していると考えられる、1次孔施工完了（50ステージ）までのルジオン値と単位セメント注入量との関係を示す。

1次孔までの50ステージ中42ステージが5Lu以下であり、また、ルジオン値と単位セメント注入量との関係も2Lu以下のステージは単位セメント注入量は10kg/mと小さい。

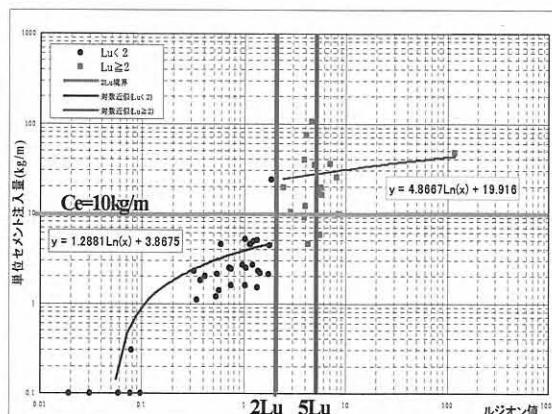


図-8 ルジオン値と単位セメント注入量の関係（1次孔までのデータ）

b) 注入時間の長期化

図-9に注入チャートの一例を示す。当該ステージのルジオン値は5.83Luで、注入完了に至るまで4.5時間程度を要するが、単位セメント注入量は16.2kg/mと小さいため、

注入効率が低いと考えられる。

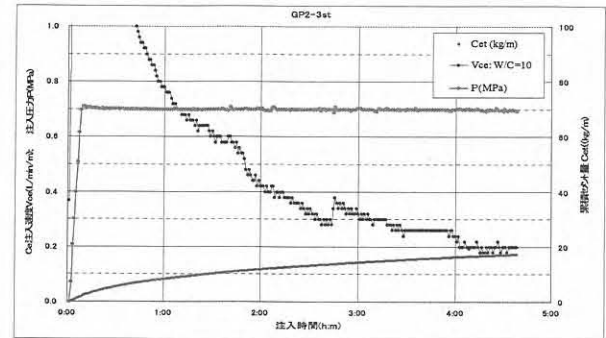


図-9 グラウト注入チャート（GP2，3st）

以上の結果、および前述で述べたように、試験区間周辺の岩盤は熱水変質作用の影響により、割れ目の連続性が乏しい岩盤が形成されていることから、合理化検討項目として、注入完了の基準速度を0.2L/min/mを0.4L/min/mに変更設定することの妥当性について検討を行った。

(2) 合理化（注入完了基準速度の緩和）の検討手法

合理化検討として、試験区間を2ブロックに分け、それぞれのブロックで注入完了基準を、表-2に示すように2種類設定し、規定孔2次孔（孔間隔1.5m）を対象として実施した。

表-2 注入完了基準速度の緩和

通常施工区間（ブロック1）	合理化検討区間（ブロック2）
単位区間長当たりの注入速度が、0.2 L/min/m 以下に達した後、同一配合で更に30分間のダメ押しを行い、注入量の増加が認められない場合に注入を完了する。	単位区間長当たりの注入速度が、0.4 L/min/m 以下に達した後、同一配合で更に30分間のダメ押しを行い、注入量の増加が認められない場合に注入を完了する。

しかし、「注入完了基準速度の緩和」の適用を検討する場合には、グラウチングによる改良効果が確実に得られることを確認する必要がある。

そのため、合理化（注入完了基準速度の緩和）基準と従来の基準との改良効果の相違を把握することを目的として、改良効果の検証試験を実施した。

(3) 改良効果の検証

同種の検討を行う際、中央内挿法による、改良の次数進展を検討することが多い。しかし、この方法ではブロックごとの場の違いについての課題がつかまとう。そこで本試験での改良効果の検証は、グラウチングが完了したステージで、リボーリングを実施し、再度ルジオンテストを行う方法にて行うこととした。

グラウチング後に再度ルジオンテストを実施するためには、試験前に孔内の固化したグラウトをリボーリングにより除去する必要がある。しかし、図-11 で示すよう

に、ボアホールスキャナ画像から、従来の $\phi 66\text{mm}$ リボーリングでは、固化したグラウトが孔壁に膜状に付着・残存する部分が観察されたため、グラウティング後のルジオンテストによるルジオン値が適切に評価できない懸念があったため、グラウティング完了後のリボーリングを、 $\phi 66\text{mm}$ から $\phi 86\text{mm}$ に拡孔し、改良効果の検証を行うこととした。

$\phi 86\text{mm}$ 拡孔リボーリングは、孔曲がり及び孔壁の崩壊等を抑制することで、改良効果の検証精度を向上させるため、図-10 のように先端にガイドを付けた拡孔専用の特殊ビットを使用した。

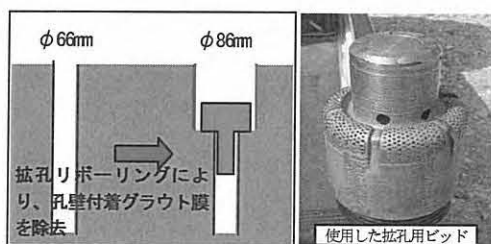


図-10 検証再ルジオンテストにおける拡孔方法

改良効果の検証は、「通常施工区間」及び「合理化検討区間」の2区間で、2次孔28ステージ中5ステージ（通常施工区間 1ステージ、合理化検討区間 4ステージ）で実施した。

拡孔前後に実施したボアホールスキャナ画像を図-11に示す。

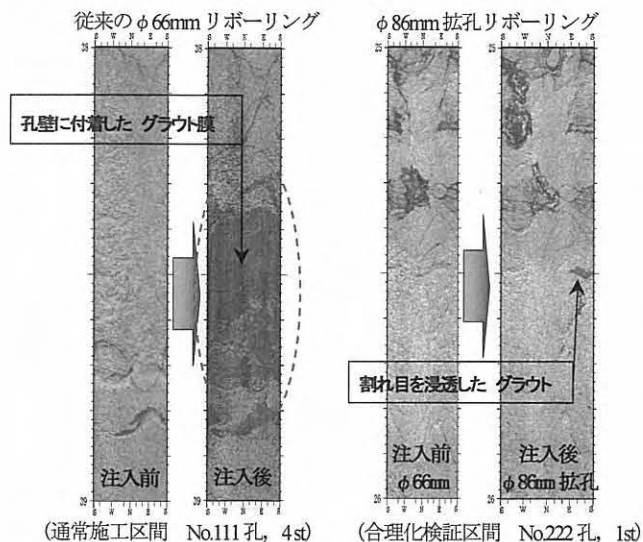


図-11 検証再ルジオンテストにおける拡孔方法

通常施工区間 No.111 孔、4st で実施した従来の $\phi 66\text{mm}$ リボーリング後のボアホールスキャナ画像では、孔壁にグラウトの膜が完全に除去されていない状況を確認できる。しかし、合理化検討区間 222 孔、1st で実施した $\phi 86\text{mm}$ 拡孔リボーリング後のボアホールスキャナ画像では、孔壁のグラウトが確実に除去され、割れ目沿いにグ

ラウトが充填されている状況を確認できる。

また、合理化検証区間 No.222 孔、1st で、 $\phi 86\text{mm}$ 拡孔リボーリング後に実施した再ルジオンテストの結果（図-12）では、ルジオン値がグラウティング施工前の 8.40Lu から拡孔後は 2.00Lu まで低減している。

これは孔壁に付着したグラウト等が影響してルジオン値が低減したわけではなく、割れ目沿いにグラウトが確実に充填されたことにより、ルジオン値が低減したと判断できる。

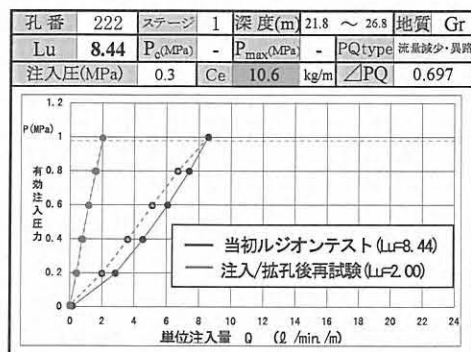


図-12 当初ルジオンテスト及び再ルジオンテストでのP-Q曲線 (No.222 孔、1st)

このことから、注入完了基準速度を 0.4L/min/m と緩和して実施した場合でも、確実に割れ目沿いにグラウトが充填されることにより、透水性の低減が期待できると判断した。

(4) グラウトミルクの注入到達状況の確認

本グラウティング試験では、No.222 孔でカーテングラウティング浅部での改良目標値である 5Lu を超過するステージが確認されたため、GP3 孔と No.222 孔の間に追加孔 (No.234 孔：孔間隔 75cm) を 1 孔実施した（図-13）。

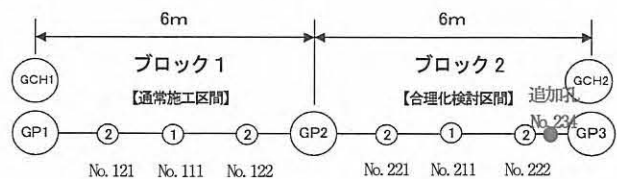


図-13 追加孔施工箇所

追加孔は、注入完了基準速度を 0.4L/min/m で施工した No.222 孔からのグラウトの注入到達状況を確認することを目的として、コア採取を実施した。

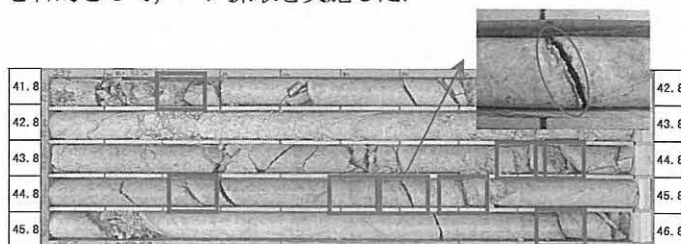


図-14 追加孔 No.234 孔 コア写真 深度 41.8m~46.8m

その結果、図-14 に示すとおり、隣接する GP3 孔及び No.222 孔から追加孔へのグラウトの注入到達するとともに、確実に割れ目中に充填されていることが確認された。

規定孔 2 次孔については、グラウトミルクに色粉（青色）を添加しており、追加孔で 2 次孔からのグラウトの注入到達状況が確認できる。

また追加孔にて、ルジオンテストを 5 ステージ実施したが、いずれのステージにおいても当ダムのカーテングラウチングの浅部での改良目標値である 5Lu を下回るルジオン値が得られている。

以上の結果から、注入完了基準を 0.4 L/min/m と緩和して施工した場合でも、0.2 L/min/m と同程度の改良効果が得られるものと考えられる。

(5) 合理化検討区間の次数効果

注入完了基準速度（0.4 L/min/m）での、次数効果を非超過率図として評価した結果を、図-15 に示す。この図より、2 次孔（1.5m 間隔）での非超過率 85% のルジオン値は、当ダムのカーテングラウチング浅部での改良目標値である 5Lu を満足したことがわかる。

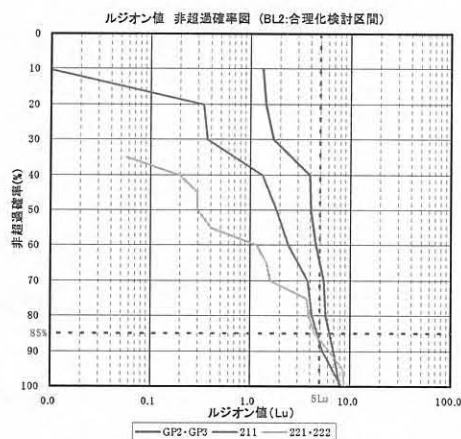


図-15 合理化検討区間での非超過率図

(6) 合理化検討の結果

これまでの調査及び検証結果から、合理化施工として注入完了基準速度を 0.2 L/min/m から 0.4 L/min/m へ緩和し

ても、ほぼ同程度の改良効果が得られることが確認できた。この緩和策を適用すると、注入作業に関する作業時間が 1 ステージ当たり約 30 分程度短縮することが可能となり、一定の成果が得られることも確認できた。

しかし「注入完了基準速度の緩和」の検証のための再ルジオンテストを実施したのは、5 ステージと少なく、十分なデータ数をもって実証したとは言い難い。

そのため「注入完了基準速度の緩和」の採用へ向けて、今後既往データを含めたデータ解析、精査を実施し、また、合理化対策の適用範囲等も含め検討を進めていくこととしている。

4. まとめ

今回の検討において、当サイトでの「流量減少・異路」P-Q曲線の成因は、熱水変質作用の影響により、変質部と非変質部の透水性状の異なる 2 種の岩盤が形成されることによる、非定常浸透が成因であると考察する。

また、合理的なグラウチング対策として、注入完了基準速度を、0.2 L/min/m から 0.4 L/min/m に緩和しても、同程度の改良効果が期待できることが確認された。

これは、試験施工段階で、客観的なルジオン値の算出が困難な場合に、繰返しルジオンテストなどの追加試験を適宜実施し、透水特性と併せて適切な透水性の評価を行ったことにより得られた結果であり、そのためには、調査計画段階においてダムサイトの地質状況を詳細に把握した水理地質構造の検討が不可欠である。

今後、今回実施したグラウチング試験結果と合わせ、水理地質構造の再検証を行うとともに、「注入完了基準速度の緩和」の採用へ向けて、今後既往データを含めたデータ解析、精査を実施し、合理的なグラウチング計画について検討を進める計画である。

参考文献

- 1) 山口嘉一：ダム基礎の浸透機構の解明に関する研究、大阪大学大学院工学研究科博士論文、1993。

(2010.11.16 受付)

STUDY OF TEST GROUTING FOR THE DAM FOUNDATION OF OOITAGAWA DAM

Yoshiaki ISHITO, Kiyofumi HASEGAWA, Yoshikazu YAMAGUCHI, and Kazuhiko NAGAMATSU

Test grouting has been carried out in order to evaluate the hydro-geological problems, and to grasp an improvement effect of the permeability by the grouting, at the damsite of Ooitagawa dam, Kyushu, South-West Japan. This test grouting has also aimed for the examination of a rational grouting policy for the dam foundation.

We confirmed some of the examination stages that were bad efficiency to waste much time for grouting, and some specific P-Q curves. The causes may seemed to be related to some hydrothermal alteration zones formed in the dam foundation.