

ISSN 0386 - 5878
土木研究所資料 第 4210 号

土木研究所資料

ダム基礎グラウチングに関するシンポジウム 発表論文集

平成 23 年 11 月

独立行政法人土木研究所
水工研究グループ水工構造物チーム

Copyright © (2011) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Chief Executive of P.W.R.I.

この報告書は、独立行政法人土木研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、独立行政法人土木研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

ダム基礎グラウチングに関するシンポジウム 発表論文集

水工研究グループ 水工構造物チーム 上席研究員 山口 嘉一
研究員 坂本 博紀

要 旨：

「ダム基礎グラウチングに関するシンポジウム」を、一般社団法人ダム工学会、独立行政法人土木研究所の共催、財団法人ダム技術センターの協賛で、2011年10月7日（金）に、東京都千代田区において開催した。本シンポジウムでは、グラウチング技術指針改訂以降のダム基礎グラウチングの事例、新たな技術開発やその適用事例などのダム基礎グラウチングに関する論文のほか、基礎地盤の水理地質特性評価、既設ダムの基礎の補強・補修グラウチング、グラウチング以外の特殊基礎処理工法など、ダム基礎地盤の浸透に関する論文広く募集し、論文発表、討議等を通して、ダム基礎グラウチング等に関する最新の技術情報をダム技術者、研究者の間で共有するとともに、今後の検討課題を明確にすることを趣旨とした。本資料は、シンポジウムでの発表論文等を取りまとめたものである。

キーワード：基礎処理、グラウチング、技術指針、透水性評価、新技術

はじめに

グラウチングとは地盤や構造物の間隙、割れ目、空洞等に止水や強度増加の目的で硬化材料を注入する工法で、1920年代以降、ダム工事における基礎処理工法として大々的かつ体系的に用いられるようになった。我が国でも多くのダムにおいてグラウチングが適用され、施工事例が蓄積されるとともに、1983年には建設省河川局開発課の監修により『グラウチング技術指針・同解説』が発刊され、我が国のダム基礎グラウチングの標準化がなされている。

その後、ダムサイトにおける地質の多様化や社会資本整備に対するコスト縮減への社会的要請を背景に、2003年に『グラウチング技術指針・同解説』が改訂された。改訂主旨は、安全性を損なわないことを前提に、①各種グラウチングの施工目的、施工範囲の明確化、②基礎地盤の多様性の考慮した（基礎地盤性状に応じた）グラウチングの実施、③施工中の逐次評価による計画合理化の妥当性の検証および必要に応じた見直し、の3点を主要ポイントとし、グラウチングの合理化を図ることにある。

2003年の指針改訂後、各ダムにおいて、改訂の主旨に則ったグラウチングの合理化の検討および実施がなされるとともに、各ダムサイトの水理地質特性を踏まえた、新材料、新工法などの新技術の導入検討も併せて進められてきている。一方で、改訂の主旨を十分に踏まえていない合理化対応による課題も明らかになってきており、改めて指針改訂の主旨の徹底と指針改定により発生する技術的課題解決に向けたさらなる検討が求められてきている。

このような背景から、独立行政法人 土木研究所と一般社団法人 ダム工学会は、産官学のダム関係の技術者、研究者が一同に会し、ダム基礎グラウチングの技術指針改訂以降の施工事例、新たな技術開発やその適用事例などについて技術共有を図るとともに、討議を通して今後の検討課題を明確にする目的から、「ダム基礎グラウチングに関するシンポジウム」（以下、「グラウチングシンポジウム」と称す）を、財団法人 ダム技術センターの協賛も得て、2011年10月7日（金）に、東京都千代田区内神田において共同開催した。なお、本シンポジウムは、昨年「ダムの安全管理・点検のための最新計測技術に関するシンポジウム」に引き続き、独立行政法人 土木研究所と一般社団法人 ダム工学会の共同開催シンポジウムとなった。シンポジウムは当初予想を上回る78名の参加者を得て開催することができた。これも、本シンポジウムの企画・準備に参加いただいた方々のご支援の賜物である。

シンポジウムでは、3つのキーノートレクチャーと11編の一般論文発表が行われた。キーノートレクチャーの具体的表題は、「グラウチングの現状と今後の課題（岡山大学大学院 西垣 誠（敬称略、以下同様）」、「ダム基礎グラウチングにおける最近の技術的課題（土木研究所 山口 嘉一）」、「今後の水理地質構造調査に必要と考えられること（土木研究所 佐々木 靖人）」であった。また、一般論文発表では、グラウチングに関する他分野における最

新の知見、新技術、個別ダムにおける合理化検討など、ダム基礎のみに限定されない幅広い範囲のグラウチング技術に関するものとなり、活発な質疑応答、議論がなされた。この結果、所期の目的どおり、多くの参加者にグラウチング技術に関する最新の情報を提供するとともに、今後の検討課題を示すことができた。

本資料においては、本シンポジウムにおける、3編のキーノートレクチャー原稿と11編の一般論文原稿とともに、発表に用いられたスライドの出力を収録した。本資料については、シンポジウムの参加者のみならず、幅広く頒布することにより、多くのダム関係の技術者、研究者に有用な技術資料になるものと確信している。加えて、今後も定期的にダム技術に関するシンポジウムを開催し、ダム技術に関する幅広い技術開発、研究、事例などに関する情報交換、議論の場を設けたいと考えている。是非期待していただきたい。

平成 23 年 11 月 吉日

独立行政法人土木研究所
水工研究グループ 水工構造物チーム 上席研究員

ダム基礎グラウチングに関するシンポジウム
技術委員会 委員長

山口 嘉一

目 次

1. シンポジウム開催のための組織	1
2. 開催案内・プログラム	3
3. キーノートレクチャー	
[KN-1] グラウチングの現状と今後の課題	7
国立大学法人 岡山大学	西垣 誠
[KN-2] ダム基礎グラウチングにおける最近の技術的課題	25
独立行政法人 土木研究所	山口 嘉一
[KN-3] 今後の水理地質構造調査に必要と考えられること	39
独立行政法人 土木研究所	佐々木 靖人
4. テクニカルセッション	
TS-1 設計・計画と合理化	
[TS-1-1] 高濃度グラウトの岩盤亀裂内への浸透挙動予測モデルと注入管理手法	59
小林 伸司 (株式会社清水建設)、延藤 遵、辻 正邦	
[TS-1-2] 難改良性地盤や被圧水下における合理的なグラウチング技術	75
中島 雅和 (日特建設株式会社)、阿部 義宏、金沢 智彦、山本 拓治、 西垣 誠	
[TS-1-3] グラウチングにおける合理化検討	85
遠山 修平 (国土交通省九州地方整備局)、永松 和彦、尾後 大輔、 山口 嘉一、佐々木 靖人	
TS-2 材料と効果の評価	
[TS-2-1] セメント粒子の形状に着目したセメントグラウトの室内注入試験	103
佐藤弘行 (独立行政法人土木研究所)、山口嘉一	
[TS-2-2] ダム基礎地盤における水ガラス系グラウトの長期止水性に関する検討	113
田頭秀和 (独立行政法人農業・食品産業技術総合研究機構)、林田洋一、 増川 晋	
[TS-2-3] 不飽和地盤における原位置透水試験の安定流量評価法	123
下山 顕治 (株式会社ニュージェック)、坂本 博紀、山口 嘉一、佐藤 弘 行、西垣 誠	
[TS-2-4] グラウチングによる岩盤の力学的改良効果に関する実験的研究 －変形特性と強度特性に関する定量的評価とダム基礎設計・施工への展開－	137
宇津木 慎司 (ハザマ)、猪狩 哲夫、菊地 宏吉	

TS-3 事例研究

- TS-3-1** 留萌ダムにおけるグラウチングの合理化施策 153
吉田 博志（国土交通省 北海道開発局）、長原 寛、森 貴信
- TS-3-2** 森吉山ダムカーテングラウチング合理化施工の取り組み 169
阿部 光秀（国土交通省 東北地方整備局）、川村 健弘
- TS-3-3** 重力式コンクリートダムの基礎グラウチングにおける合理化施工について 183
武田 悦男（九州電力株式会社）、新屋 裕生、古庄 龍悟、高力 雅人
- TS-3-4** 大山ダムの地質と止水処理（カーテングラウチング）について 195
前田 俊郎（独立行政法人水資源機構）、松尾 達也、對馬 和孝

5. 開催報告 209

1. シンポジウム開催のための組織

1. シンポジウム開催のための組織

ダム基礎グラウチングシンポジウムでは、開催にあたり、実行委員会と技術委員会を組織した。実行委員会は、ダム基礎グラウチングシンポジウムの運営に当たった。実行委員会委員名簿を表-1に示す。

表-1 実行委員会の委員名簿

役職	名前	所属
共同実行委員長	田中忠次	一般社団法人 ダム工学会副会長 社団法人 地域環境資源センター 理事長
共同実行委員長	安部友則	独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ長
実行委員	山口嘉一	独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ 上席研究員
実行委員	佐々木靖人	独立行政法人 土木研究所 地質・地盤研究グループ 上席研究員
実行委員	池田 隆	一般社団法人 ダム工学会 企画運営委員会副委員長 財団法人 ダム技術センター企画部長

*)敬称略。

また、技術委員会は、グラウチングシンポジウムの論文募集、論文収集、書式チェック、論文集印刷を担当した。技術委員会の委員名簿を表-2に示す。

表-2 技術委員会の委員名簿

役職	名前	所属
技術委員長	山口嘉一	独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ 上席研究員
顧問	西垣 誠	国立大学法人 岡山大学大学院 教授
技術委員	宮内茂行	一般社団法人 ダム工学会学 術研究発表会小委員会委員長 独立行政法人 水資源機構 総合技術センター マネージャー
技術委員	森 芳夫	一般社団法人 ダム工学会 学術研究発表会小委員会副委員長 日本工営株式会社
技術委員	坂本博紀	独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ 研究員
技術委員	大館 渉	独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ 交流研究員
技術委員	吉田諭司	独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ 交流研究員

*)敬称略。

なお、シンポジウムの総務関係の運営にあたり、目黒信晴氏（(財)ダム工学会 学術研究発表会小委員会委員、飛島建設(株)）、浅井直人氏（(財)ダム工学会 学術研究発表会小委員会委員、(社)ダム水源地環境整備センター）、小堀俊秀氏（(独)土木研究所）の協力を得た。

2. 開催案内・プログラム

ダム基礎グラウチングに関するシンポジウム

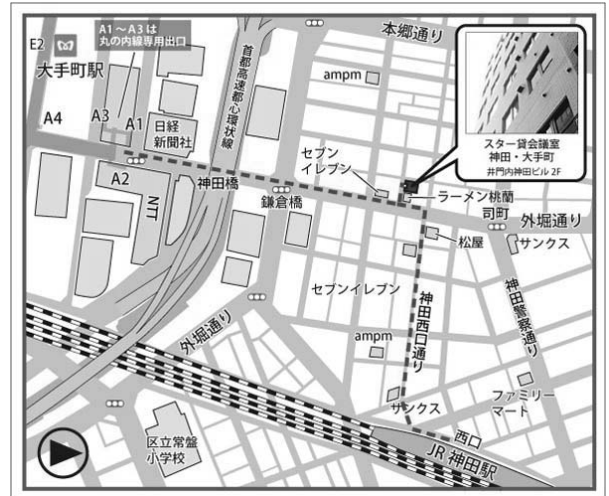
平成 23 年 10 月 7 日（金）9:30～16:30



土木学会認定
CPD プログラム

主 催：一般社団法人 ダム工学会
独立行政法人 土木研究所
協 賛：財団法人 ダム技術センター
場 所：スター貸会議室 神田・大手町
アクセス：
JR 山手線・中央線・京浜東北線「神田駅」西口 徒歩 5 分
東京メトロ銀座線「神田駅」1 番出口 徒歩 5 分
東京メトロ千代田線・半蔵門線・丸の内線・東西線、
都営三田線「大手町駅」徒歩 6 分

定 員：定員 50 名
参加費：ダム工学会会員 2000 円 非会員 3000 円
(当日会場にてお支払い下さい。)
C P D：土木学会認定 CPD プログラム 5.5 単位



ご参加には
事前申し込みが必要です。
お問い合わせ・申し込み先 →

ダム工学会 HP 内の参加申込フォームに、必要事項を入力しお申込下さい。
ダム工学会 HP URL : <http://www.jsde.jp/>
FAX にてお申込される場合は、別紙申込用紙をご利用下さい。
一般社団法人ダム工学会 学術研究発表会小委員会 事務局 福地、佐久間
TEL : 03-5815-4161 FAX : 03-5815-4162

(9:00～9:30 受付)

プログラム

9:30～9:45 開会 主催者挨拶

9:45～12:00 キーノートレクチャー

- ・グラウチングの現状と今後の課題 西垣 誠 (国立大学法人 岡山大学)
- ・ダム基礎グラウチングにおける最近の技術的課題と研究・開発 (仮題) 山口 嘉一 (独立行政法人 土木研究所)
- ・ダム基礎岩盤の透水性評価に関する事例と課題 (仮題) 佐々木 靖人 (独立行政法人 土木研究所)

(12:00～13:00 休憩)

13:00～13:45 テクニカルセッション1 セッション名：設計・計画と合理化
発表論文数 3 (予定)

(13:45～14:00 休憩)

14:00～15:00 テクニカルセッション2 セッション名：材料と効果の評価
発表論文数 4 (予定)

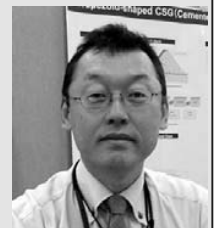
(15:00～15:15 休憩)

15:15～16:15 テクニカルセッション3 セッション名：事例研究
発表論文数 4 (予定)

16:15～16:30 閉会 主催者挨拶



西垣 誠



山口 嘉一



佐々木 靖人

シンポジウムの内容に関するお問い合わせ先

独立行政法人土木研究所 水工研究グループ 水工構造物チーム
研究員 坂本 博紀

〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6
TEL : 029-879-6781、FAX : 029-879-6737、E-mail : h-saka@pwri.go.jp





ダム基礎グラウチングに関するシンポジウム

平成22年10月7日(金) 9:30～16:30



土木学会認定
CPD プログラム

主 催: 一般社団法人 ダム工学会
独立行政法人 土木研究所
協 賛: 財団法人 ダム技術センター

プログラム

受 付 09:00 - 09:30

開 会 式

09:30 - 09:45

共同実行委員長挨拶

田中忠次 ダム工学会副会長、(社)地域環境資源センター 理事長

キーノートレクチャー

09:45 - 10:25

グラウチングの現状と今後の課題

西垣 誠

国立大学法人 岡山大学

10:25 - 11:05

ダム基礎グラウチングにおける最近の技術的課題

山口 嘉一

(独)土木研究所

11:05 - 11:45

今後の水理地質構造調査に必要と考えられること

佐々木 靖人

(独)土木研究所

11:45 - 12:00

質疑応答

昼 食 12:00 - 13:00

テクニカルセッション①

13:00 - 13:45

設計・計画と合理化

座長：山口 嘉一 (独)土木研究所

TS-1-1

高濃度グラウトの岩盤亀裂内への浸透挙動予測モデルと注入管理手法

小林 伸司

清水建設(株)

TS-1-2

難改良性地盤や被圧水下における合理的なグラウチング技術

中島 雅和

日特建設株式会社

TS-1-3

グラウチングにおける合理化検討

尾後 大輔

九州地方整備局 嘉瀬川ダム工事事務所

テクニカルセッション②

14:00 - 15:00

材料と効果の評価

座長：西垣 誠 岡山大学

TS-2-1

セメント粒子の形状に着目したセメントグラウトの室内注入試験

佐藤弘行 (独)土木研究所

TS-2-2

ダム基礎地盤における水ガラス系グラウトの長期止水性に関する検討

田頭秀和 (独)農業・食品産業技術総合研究機構

TS-2-3

不飽和地盤における原位置透水試験の安定流量評価法

坂本博紀 (独)土木研究所

TS-2-4

グラウチングによる岩盤の力学的改良効果に関する実験的研究

—変形特性と強度特性に関する定量的評価とダム基礎設計・施工への展開—

宇津木 慎司 ハザマ

休 憩 15:30 - 15:45

テクニカルセッション③

15:15 - 16:15

事 例 研 究

座長：佐々木 靖人 (独)土木研究所

TS-3-1

留萌ダムにおけるグラウチングの合理化施策

長原 寛 国土交通省 北海道開発局

(代理:森 貴信 日本工営(株))

TS-3-2

森吉山ダムカーテングラウチング合理化施工の取り組み

川村健弘 国土交通省 東北地方整備局

TS-3-3

重力式コンクリートダムの基礎グラウチングにおける合理化施工について

新屋 裕生 九州電力(株)

TS-3-4

大山ダムの地質と止水処理(カーテングラウチング)について

前田 俊郎 (独)水資源機構

閉 会 式

16:15 - 16:30

閉会の挨拶 安部 友則 (独)土木研究所

メ モ



3. キーノートレクチャー

グラウチングの現状と今後の課題

西垣 誠¹

本報告は地盤の止水性の向上と力学強度の改善のために実施される地盤注入工法（グラウチング）の現状について論述し、今後の課題を整理したものである。まず、現状の注入工法と注入の目的について示した。また注入材の中でのセメント系材料に重点を置いて説明した。中でも極超微粒子セメントの可能性についても示した。グラウト材料として粘土系材料について説明した注入工法の説明の中でこれからは動的注入工法が有効であることを示した。最後に注入工法の課題を列挙して、それらについての解決策について論述した。

キーワード：亀裂、止水、岩盤の強度

1. はじめに

日本は世界でもまれな複雑な地盤構成をしており、国土を多目的で利用しようとする様々な限界に遭遇する。また、年間平均 1400mm 程度の降雨もあり、地下水位も高い。したがって、地下空間を利用する際には、この地下水圧をどのように処理するかが大きな課題であった。過去形で表現するのではなく「今なお大きな課題である」とした方が良いのかもしれない。このような現状に対して、亀裂の多い日本の岩盤に対して、先人達は多くの止水対策技術を開発して来た。本報告では、亀裂性岩盤を主として対象として来たグラウチングの現象と今後の課題について論述する。

2. 注入工法とグラウト材

2.1 注入工法

地盤内に様々な材料を注入して、漏水して来る地下水を止水する手法、あるいは、流入している地下水の流れを変える工法は、古くより実施されている工法である。この注入する材料に関しても薬液とセメント系の懸濁液に大きく分類できる。注入工法は注入する材料や手法によって以下のように分類できる。

- ① 地盤の土粒子の間隙や岩盤の亀裂へ低圧力で注入材を浸透する薬液注入工法
- ② 流動性の低い注入材を地盤に注入して割裂注入により地盤を隆起させたりして、不動沈下をしている構造物を修復する復元注入工法
- ③ 砂質地盤に流動性の低い注入材を高圧力で圧入して、地盤を圧縮するコンパクショングラウト工法

④ 注入材を地盤内に高圧で注入・攪拌し、粒状改良体を形成するジェットグラウト工法

これらの中で、ここでは薬液注入工法でセメント系注入材と粘土系注入材について論述する。

2.2 注入工法の目的

注入工法を岩盤を対象として分類すると表-1 のようになる。

また、土砂地盤を対象として分類すると表-2 のようになる。

2.3 注入材の種類

注入材の種類を分類すると図-1 のようになる。注入材は粒子を含まない溶液型と粒子を含む懸濁型に大別される。現在、地盤改良工事に使用されている注入材は、懸濁型であるセメント系、粘土系および溶液型の水ガラス系と水ガラスを改良した特殊シリカ系である。高分子系については、1974 年に福岡県でアクリルアミド系を使用した注入工事において、注入材が飲用の井戸水に混入する環境汚染が発生したのを契機に、薬液注入工法に関する暫定指針が通達され、事実上使用禁止になっている。

溶液型とセメント系注入材のそれぞれの特徴として、溶液系は注入性に優れ、地盤改良可能な適用地盤は幅広いが、注入による改良後の地盤強度は小さい上に、特に水ガラス系はアルカリ分が溶脱するため長期的な耐久性に劣り、仮設工事に使用される場合が多い。近年では耐久性能を改良した製品も市販され 10 年程度の耐久性が確認されている。

¹ 岡山大学大学院環境学研究科、教授

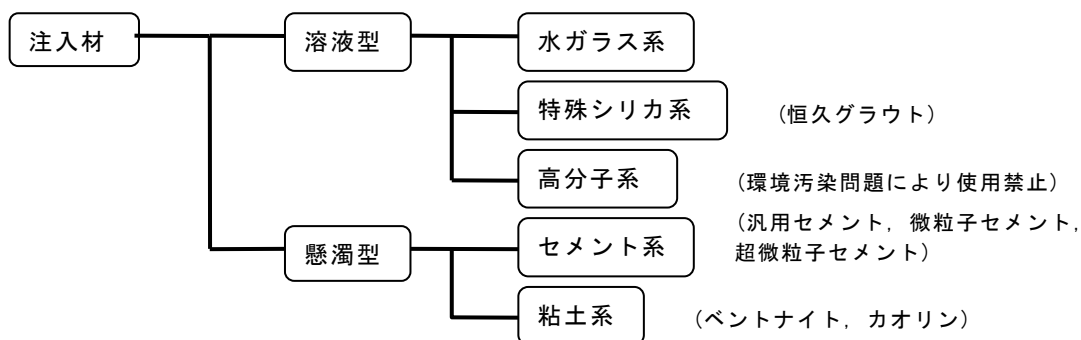


図-1 地盤注入材の分類

(溶液系：粒子を含まないもの、懸濁系：粒子を含むもの)

表-1 岩盤を対象とした注入工法の目的の分類

(h) ダム本体の基礎地盤の止水
(i) ダム貯水池の漏水対策
(j) トンネル掘削時の湧水対策
(k) 石油地下備蓄における漏ガス対策
(l) LPG 地下備蓄における漏ガス対策
(m) 圧縮空気の地下貯蔵における漏気対策
(n) 放射性廃棄物の地層処分における岩盤改良
(o) 廃棄物最終処分場の漏洩防止対策
(p) 地下ダムの止水

表-2 土砂地盤を対象とした地盤注入工法の目的の分類

(a) レキ層の湧水防止対策
(b) 地中貯水の漏水防止対策
(c) 豪雨時による斜面崩壊防止対策
(d) 砂質地盤の液状化防止対策
(e) 廃棄物最終処分場の地盤改良
(f) 河川堤防の補強対策
(g) ため池の補強対策

一方、セメント系である普通ポルトランドセメント、早強セメント、高炉セメントなどの汎用セメントは、溶液系に比べ、安価かつ安全であり、さらに改良後の地盤強度、長期的な耐久性に優れているものの、粒子であるが故に粒径の大きさで、自ずと注入可能な地盤が限定される。注入性を改良するために汎用セメントの粒径を小さくした微粒子セメント（コロイドセメントともいう）や超微粒子セメントなどが開発・実用化されている。超微粒子セメントは汎用セメントに比べ材料価格が 10 倍以上することから、汎用セメントで改良不可能な地盤に適用されることが多い。

これらの注入材は、実際の注入による地盤改良において、改良対象地盤の透水性や改良後の設計強度、目標とする透水係数などの要求性能に応じて、材料の種類や水ガラスとセメントを混合するなど使い分けされている。

3. 各種セメントの粒度

各種セメントの粒度分布の測定例を表-3 に示す。一般的に汎用ポルトランドセメントの最大粒径は $100\mu\text{m}$ (50%粒径 $20\mu\text{m}$) であり、注入材用の微粒子セメントと超微粒子セメントの最大粒径は、それぞれ $40\mu\text{m}$ (50%粒径 $8\mu\text{m}$)、 $10\mu\text{m}$ (50%粒径 $4\mu\text{m}$) 程度である。国内では、粒径によるセメントの分類は特に定められていないが、50%粒径が $8\mu\text{m}$ 程度のセメントを微粒子セメント、 $4\mu\text{m}$ 程度あるいはそれ以下のセメントを超微粒子セメントとする場合が多い。

この中で特筆すべきは極超微粒子セメントの開発である¹⁾。岩盤や地盤へのグラウト材の注入に関しては、その亀裂や間隙の幅の 5 分の 1 以下の材料でなければ注入が困難である。したがって、岡山県の水島 LPG の地下備蓄工事では、亀裂幅が $50\mu\text{m}$ 程度で超微粒子セメントでも注入が困難であった²⁾。亀裂幅が $20\mu\text{m}$ (ボアホールテレビでの観測限界以下の亀裂であるが) 程度のヘヤークラックに対しての止水材料として極超微粒子セメントが開発されてきた。

セメント粒子は、粒子が小さくなればなるほどその水和反応速度も速くなり、空気中の水分との反応等が起こりやすくなる。そのため反応速度を遅くする必要

表-3 セメント系グラウト材料

(1) 普通ポルトランドセメント	($\sim 100 \mu\text{m}$)
(2) 高炉セメント	($\sim 100 \mu\text{m}$)
(3) 超微粒子セメント	($\sim 20 \mu\text{m}$)
(4) 極超微粒子セメント	($\sim 2 \mu\text{m}$)

がある。また、粒子が小さくなればなるほど団粒化しやすくなり、団粒化しないように材料に適した分散材が必要となる。また、セメントを練り混ぜる際にも団粒化した材料をほぐして、材料本来の粒径まで分散させる技術が必要である。そのために高速回転で練り混ぜる技術開発を行った。

このような極超微粒子セメントを用いた注入技術開発は、これまでも開発されてはいるが問題は材料のコストである。また、施工する側としては対象としている地盤をどこまでの透水係数までグラウトによって透水係数を低下させるかの「目標透水係数」を決定する必要がある。

一般的には、現在のグラウトの技術であれば $5.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ が改良目標になると考えられる。地山の岩盤の透水係数となると、 $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 程度が目標かもしれないが、一般的なセメントではやはり 10^{-7} m/s 程度が目標値となる。場の止水性はグラウトによって改良される範囲によっても変わる。したがって、単純に考えると $1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ の改良層を 1m にするのか 10m にするのかによってその止水性は異なる。ちなみに一般廃棄物の処分場の基礎では、 $1.0 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ の地層が 5m 以上あれば人工的な遮水シート等を必要としていない。止水をすると止水した外側の水圧がどんどん高くなって、止水層の上流と下流に大きな水頭差が生じ、この水頭差によって止水層に大きな浸透水圧が作用する。改良した地山が十分な強度を持っていないと、この浸透圧によって改良された地山が変形してくる。このような力学的な考察も地下に坑道を掘る場合は検討する必要がある。セメント系材料では、地山に注入することによって地山の強度は大きくなるがそこに期待される透水係数の改良範囲は先に述べた程度である。また、岩盤の亀裂が小さい場合にはその止水すら困難な場合がある。

坑道の止水で強度を期待しない場合には、天然素材で

表-4 粘土系グラウト材料

(1) ベントナイトと水
(2) ベントナイトと砂と水
(3) ベントナイトと溶液
(4) カオリンと水

ある粘土系材料の亀裂への注入も考えられる。表-4 に粘土系のグラウト材料の例を示す。

ここでベントナイトの水による懸濁液は、ベントナイトが膨潤してしまって一般には高圧で注入してベントナイトを変形させて亀裂内に注入する手法が用いられている。亀裂が大きい場合には、ベントナイトに砂を混ぜて注入することもある。これらはダムの下地盤の止水工法として用いられてきた。

ベントナイトと溶液については、ベントナイトのエタノール溶液による懸濁液を作成して亀裂の中に注入する工法も考えられている。ベントナイトのエタノール溶液では、ベントナイトは膨潤しないし凝集して団粒化もしないので亀裂内に簡単に注入される。その後、周囲の地下水によってエタノールの濃度が薄くなると、ベントナイトは膨潤して亀裂の透水係数が経時的に低下してくる^{3),4)}。

ベントナイトのこのような性質は、エタノール溶液を用いなくても濃度が 4% の塩水でも生じる。また、米国のワイオミング産のベントナイトでは、粒径が $1 \sim 2 \mu\text{m}$ ときわめて微細でありこの海水懸濁液を亀裂内に注入すると、注入された後海水はベントナイトから分離するため密度の高い注入層が形成される。そのベントナイト層だけでも透水係数は $1.0 \times 10^{-8} \text{ m/s}$ 程度になる。このベントナイト注入層に周囲の地下水が拡散的に浸透してくると海水の濃度が低下してそれによってベントナイトが膨潤してその透水係数は $1.0 \times 10^{-10} \text{ m/s}$ 程度になる⁵⁾。

4. セメント注入工法

注入用のセメントミルクは、セメントミルクと多量の水を混合した懸濁液で、水セメント比(W/C)が数十%のモルタル・コンクリートに比べ、200～1000%程度の高水セメント比で注入される。セメント注入工法は、このセメントミルクをミキサーで混

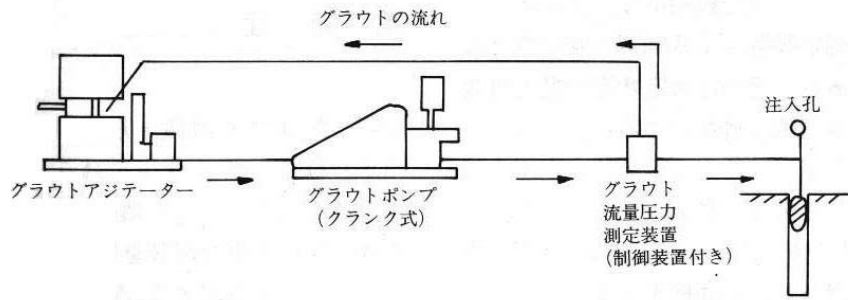


図-2 注入工法概念図

合攪拌してつくり、グラウトポンプで圧送し、注入管を通じて地盤の土粒子間隙や岩盤亀裂に浸透させる工法（図-2 参照）である。

セメントミルクの注入による改良機構は、セメントミルク中の水がセメント粒子のキャリアーとして機能し、土粒子間隙や岩盤亀裂にセメント粒子を徐々に充填した後、セメント粒子は沈降あるいは目詰まりし、ろ過脱水された水は奥へ浸透していく。続いて、ろ過脱水されたセメントミルク中のセメントは水との反応によりカルシウムシリケート水和物などが生成して硬化するとともに、未充填部の土粒子間隙や岩盤亀裂を埋めていくことで、地盤強度や止水性を改善する。

このセメント注入工法で用いられるセメントミルクは、地盤条件や必要とされる性能によって、配合を定めたり、混和材（剤）を混合したりする。セメントミルクの配合は、地盤の透水係数あるいはルジオン値や過去の実績などから注入開始時の水セメント比が決定される。例えば、ダム基礎地盤の改良における配合は、10 あるいは 6 という高水セメント比から注入を開始する 경우가多く、順次、水セメント比を小さい配合に切り替える。このような高水セメント比からの注入は、時間あたりの注入セメント量が少なくなるため、注入対象地盤によってはいたずらに注入に要する時間が長くなり、非効率となる場合がある。一方、混和材（剤）に関しては、セメント粒子の分散や粘性の低減を目的に、日常的に分散剤が用いられる。また、注入材で止水しながらトンネルを掘削する工事、セメントミルクの逸失防止や注入範囲を限定する場合は、急硬材や水ガラスを使用して瞬時にゲル化もしくは硬化させる。

5. セメント系注入材の地盤への浸透性

セメント系注入材は粒子であるため、粒径の大きさから注入可能な地盤が定まる。すなわち、セメント粒子の大きさは土粒子間隙や岩盤亀裂をスムーズに通過できる大きさ以下でなければならない。また、セメント粒子を完全な一次粒子まで分散することは困難で、数個の集合体からなる凝集粒子も存在することから、セメント粒子がスムーズに通過できる大きさは粒子数個分になる。この注入対象地盤の土粒子径から浸透可否を評価する指標としてグラウタビリティー比(GR)があり、以下の実験式が知られている。

$$GR = \frac{D_{15}}{D_{85}} \quad (1)$$

ここに、 D_{15} ：土の粒径加積曲線の 15% 径

G_{85} ：注入材の粒径加積曲線の 85% 径

この式で求めた GR の値が 15~25 以上であれば、セメント粒子は土粒子間隙に浸透可能とされている。

一方、亀裂性岩盤への浸透可否に関しては割れ目幅と注入材の粒径の比で評価する以下の実験式が提案されている。

$$\frac{w}{G_{85}} > 3 \sim 10, \frac{w}{G_{95}} > 5 \quad (2)$$

ここに、 w ：割れ目幅

G_{85} ：注入材の粒径加積曲線の 85% 径

G_{95} ：注入材の粒径加積曲線の 95% 径

実際には、岩盤の割れ目幅は一樣ではなく、事前に注入対象の割れ目幅を測定することは困難であるが、注入材の最大粒径の 3~10 倍程度の割れ目幅であれば浸透可能とされている。

ここで、普通ポルトランドセメントおよび超微粒

表-5 注入可能な土粒子の粒径と割れ目幅

セメントの種類	土粒子の粒径 (D_{15})	割れ目幅(w)
普通ポルトランドセメント	0.6~1mm	0.12~0.4mm
超微粒子セメント	0.12~0.2mm	0.0024~0.08mm

子セメントの 85%径をそれぞれ $40\mu\text{m}$, $8\mu\text{m}$ として、浸透可能な土粒子の粒径と割れ目幅を求めると表-5 のようになる。

現実の問題として、0.1 mm 程度の岩盤の亀裂幅をどのように計測するかが大きな課題である。現状のボアホールテレビでの分解能は 0.5 mm 程度であり、現場での孔内の調査だけからでは、どのような材料を用いて注入するかは判定がしにくい。

6. 注入工法

表-6 に種々の注入工法を示した。

この中で静的注入工法では、グラウト材の注入圧を静的に徐々に上昇させて注入する工法で、最も一般的な注入工法として実施されている。一方、動的注入工法は、セメントにしてもベントナイトにしても周波数が 7Hz 近傍で粘度が図-3 に示すように低下することを利用したものである。また、動的に注入することによって一度注入時に目詰まりが生じても注入側の圧力が高くなって、目詰まりが解消されて再び注入量が増加する現象が生じることが多い⁶⁾。このような現象より、一般に動的注入工法は静的注入工法の 1.5 倍程度多く注入されることが室内試験で確認されている。

注入の際に静的に注入するのではなく動的に注入することは、特別で複雑な装置が必要と考えられるが、注入の際に注入ホースを一定の周波数で打撃するだけでも簡単に一定の注入圧が形成されることもわかっている。また、そのように形成された注入圧のパルスは、注入管の先端まで伝達されることも現場で注入管の先端の間隙水圧を計測して確認している^{6),7),8)}。

連続配合切替工法は、グラウトにおいて、その水セメント比を段階的に変化させて行くが、この濃度を連続的に変えて行くことによって、注入材の廃材を生じることなく注入する工法であり、経済的にも

表-6 種々の注入工法

静的注入工法
動的注入工法
連続配合切替工法
高圧注入工法

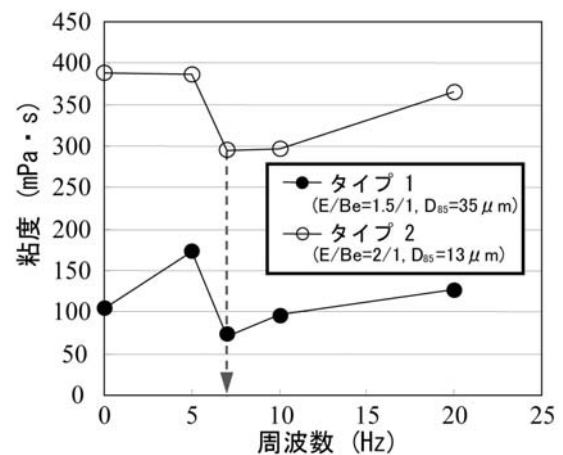


図-3 周波数と粘度の関係

環境的にも合理的な工法である⁹⁾。

高圧注入工法は、大深度の地下室内利用における止水対策として、比較的硬い亀裂性岩盤を対象として、高注入圧でセメントミルクを注入すると、注入孔口の亀裂面でのフィルターケーキの目詰まりが回避できる^{10),11)}。この工法も今後実際のフィールドでの適用が蓄積されて行く事によってその有効性が証明されていくと考えられるので、多くの場で適用してほしい。

7. 注入工法における課題

地盤内にセメント系材料等を注入する場合に色々と分からないことがある。この課題を整理すると表-7 のようになる。

7.1 亀裂性岩盤への注入によってどれだけの範囲の改良ができたのか

ダム基礎の岩盤内にグラウトをする際には、最初に 15m 離れたパイロット孔のそれぞれにグラウト

表-7 注入工法における課題

- (a) 亀裂性岩盤への注入によってどれだけの範囲が改良できたか
- (b) 注入によって、地盤内に理想的に注入されているのか
- (c) 地盤の水押しによる透水試験の結果と注入セメント量の関係
- (d) 複数の亀裂への注入メカニズム
- (e) 高透水性地盤へのグラウト材の注入

を注入して、その中間での透水係数を計測し、その値が目標値になっているかを調査する。目標値以下であってもなくてもその注入孔に注入をする。注入孔（1次孔）の透水係数が目標値以下であれば、その注入孔とパイロット孔の中間の注入孔（2次孔）の透水係数を計測してその孔に注入する。1次孔の透水係数が目標値に達しているならば、このパイロット区間での注入は終了する。このように2次孔また1次孔と2次孔の中間に注入孔を掘削し、その透水係数を調査して再び注入する。このような作業を繰り返して全体が目標値の透水係数以下になるまで注入する。これが一般的なダムでのグラウトの手法である。

これに対して坑道のグラウトに対しては、掘削する坑道の周囲の上下左右にグラウトし、そのそれぞれの孔の中間の透水係数を計測してはグラウトを行なう作業を繰り返す手法になる。

ここでもし注入する地盤の有効間隙率(n_e)がわかれば、ある程度の注入孔の本数の予測ができる。地盤をセメント注入によってどれだけ改良されたかを知るためには、地盤内の間隙率があればその改良範囲は指定できる。

仮に注入によって形成される範囲を図-4のように円柱型と仮定すると、注入流量(Q_0)に対して改良半径($R(t)$)は次式より求められる。

$$R(t) = \sqrt{\frac{Q_0 t}{\pi L n_e}} \quad (3)$$

ここで、 t : 注入時間

n_e : 地盤内の有効間隙率

L : 注入区間長

従って、改良半径を求めるためには、地盤内の有効間隙率(n_e)の値が必要となる。この有効間隙率の値を原位置で求める手法として、グラウトにおいて定流量(Q_0)で注入し、図-5に示す。注入孔内の注入

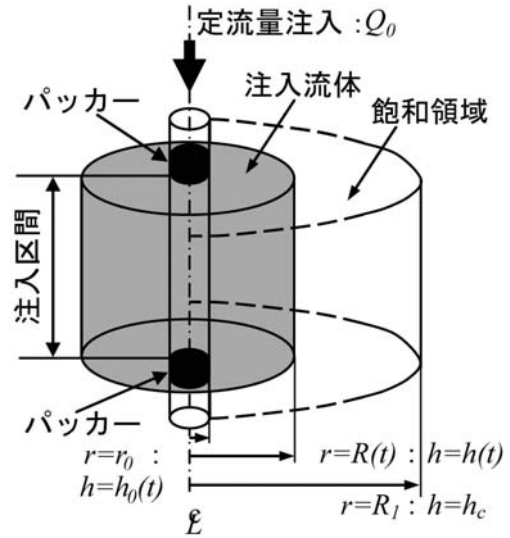


図-4 飽和領域への注入の概念

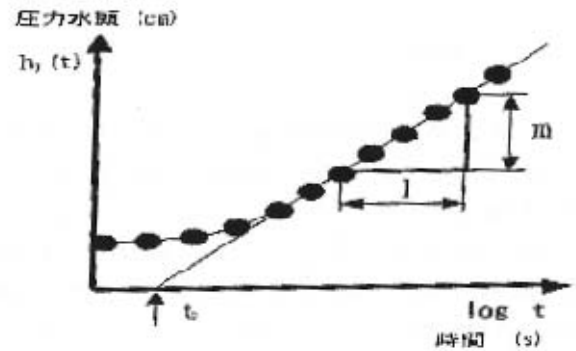


図-5 定流量注入時の注入孔の圧力水頭変化

圧の増加のデータより、 $h_0(t)=0$ になる t_0 を求めると、有効間隙率の値は下記の式より求められる¹²⁾。

$$n_e = \frac{Q_0 t_0}{\pi r_0^2 L} \quad (4)$$

ここで、 r_0 : 注入孔の半径

この有効間隙率(n_e)の求め方は、亀裂性岩盤を多孔質体として仮定したものである。しかしながらその提案した手法の妥当性を検証するために室内での3次元での亀裂モデルへの注入試験結果と比較した。その結果、簡単な手法であるが亀裂性岩盤に対しての有効間隙率を求める手法として有効であることがわかった。

このようにグラウチングを実施しようとする場合の有効間隙率(n_e)の値が求められると、図-6に示す坑道周囲のプレグラウトにおける注入孔のピッチが推定できることになる。

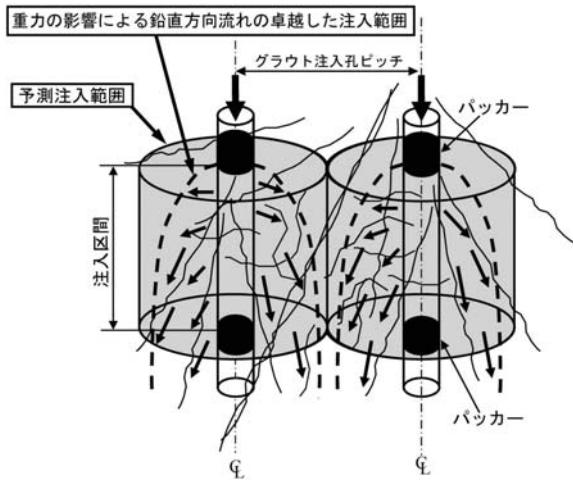


図-6 グラウトにおけるピッチ

7.2 注入によって地盤内に理想的に注入されているか

グラウトが止水として十分に機能するかについては、ダムグラウトでは、グラウトした領域に対して、透水試験を実施して、その透水に対する機能の検定を行っている。

(1) 上流下流に観測井を設置する方法

このような検定方法と同時に、その止水ゾーンの機能の調査法として、止水ゾーンの上下に間隙水圧の観測孔を設置して、上流側では止水による地下水位の上昇を計測し、下流側では、止水による地下水位の低下を経時的に計測する新しい手法が考えられる。

(2) 物理探査法

グラウトゾーンの止水機能が十分でなければ、下流側の水位はあまり低下しない。この調査は試験湛水前にも実施できるので、極めて有効なモニタリング手法と考えられる。グラウトがどの範囲まで、有効に広がっているかを定量的に調査する手法については、まだ、研究段階で調査手法の確立を待っている。

グラウト材料に含まれるアルカリ性のイオンより、電気的な亀裂性岩盤のマス比抵抗値の変化より、その注入領域の評価も可能と考えられるが、3次元の比抵抗トモグラフィー的な評価が必要であり、まだ一般的にはあまり適用されていない。電磁波によるトモグラフィーも同じような状況である。

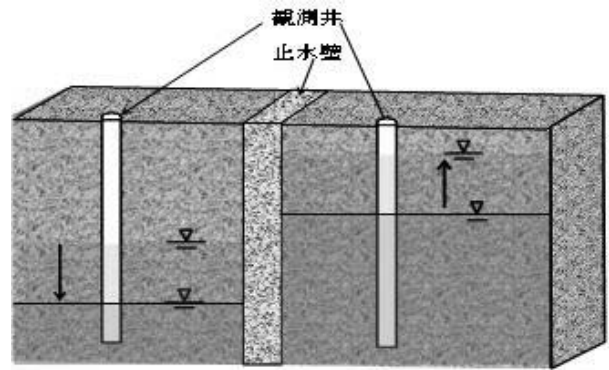


図-7 止水壁上下流の観測井

グラウトを注入することによって、場の強度が強くなる特性を弾性波トモグラフィー等でモニタリングをする手法も考えられるが、これに関しても、本来強度を持っている岩盤では、注入範囲の特定は困難である。

地下水位面下のグラウトでは、グラウトの上下流にモニタリング孔を設置して、孔間での音波 (Sonic logging) や音響トモグラフィー的な調査手法も提案できる。

7.3 地盤の水押しによる透水試験結果と注入セメント量の関係

ダム基礎地盤でのカーテングラウト施工においては、地盤のルジオン値と注入セメント量の関係がしばしば議論される。セメント注入量が大きければ、そこには大きな間隙があり、その区間の透水量係数の値が大きくなると考えるのが一般的である。しかし、亀裂幅の異なる亀裂では、全体の亀裂の中で亀裂幅の小さい値がその透水性に大きく関係するため、一概に透水量係数が小さい所では注入量が小さくなるとは断定はできない。

注入時の注入圧力の変動等やボアホールテレビ観察による亀裂の分布等から結合して、グラウトの効果の判断が必要であり、これには多くの経験が必要である。

7.4 複数の亀裂への注入メカニズム

実際の岩盤では、図-8(a), (b)に示すようにグラウティング区間内に複数の亀裂があり、その幅も勾配も異なる亀裂に同時に注入を実施する。このような複数の亀裂内への注入では、幅の狭い亀裂と幅の広い亀裂では、その注入圧が一定であると考え、

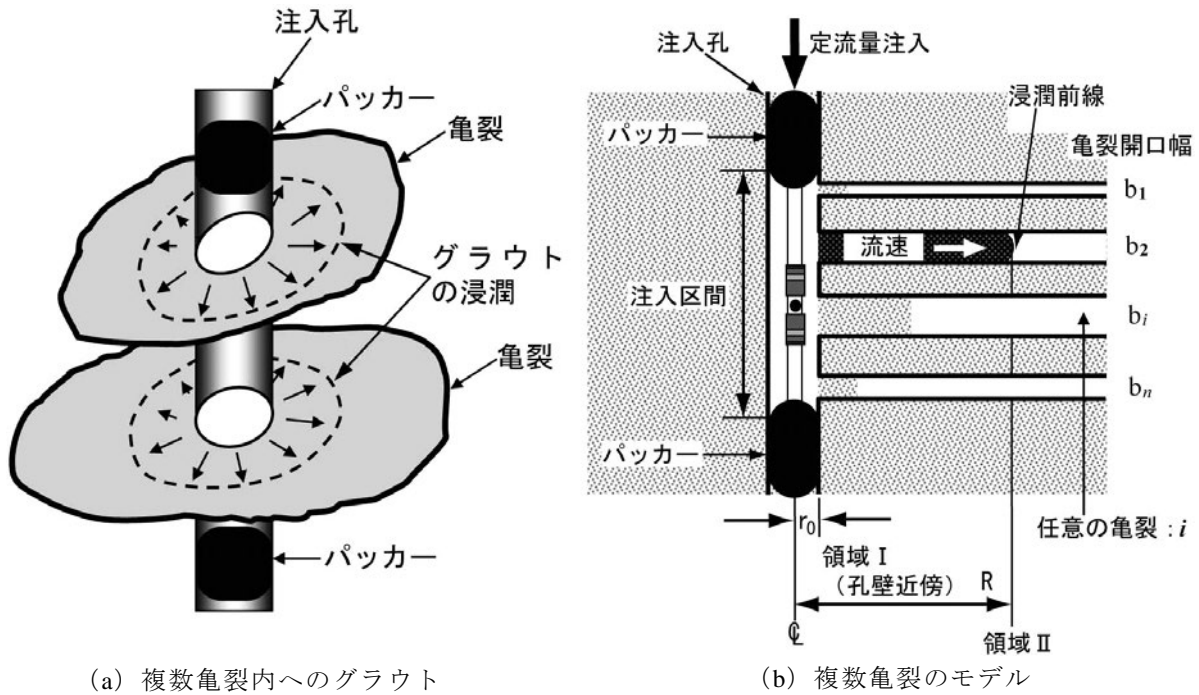


図-8 複数亀裂内へのグラウト

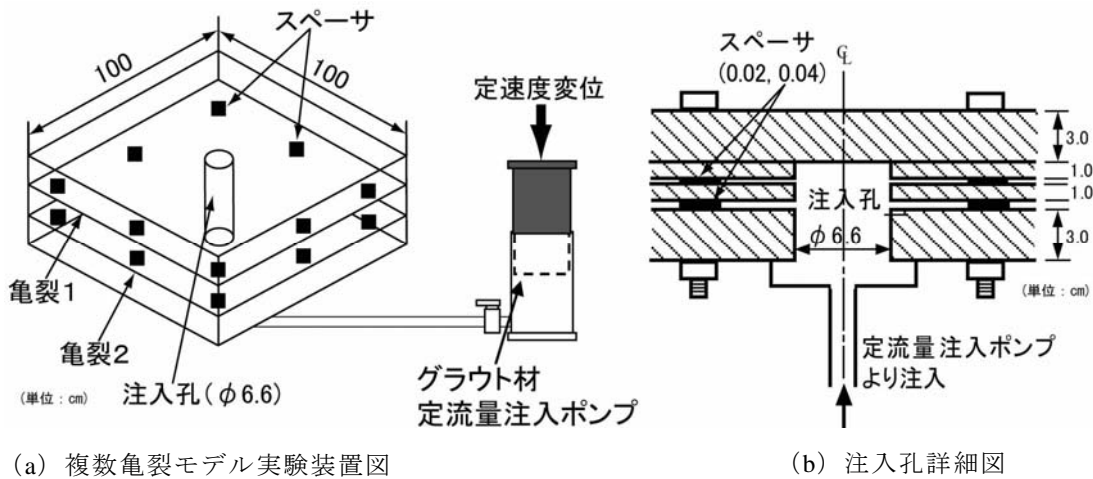


図-9 注入装置の全体図

幅の狭い亀裂の方が幅の広い亀裂より抵抗が大きく、透水量係数が小さいため改良範囲は狭いと考えられる。しかし、実際に図-9 に示す大型の亀裂モデルによる実験では、亀裂の幅が狭い方が広い範囲で改良されることがわかった¹³⁾。

この現象に対応するために、ベルヌーイの法則を基に、幅の異なる亀裂内の注入材の挙動を説明する新しい理論式を用いて、実験値と理論値の比較を行なったものを図-10 に示す。このことにより幅の狭い亀裂の中の広い範囲に渡って改良がされることが説明できた。

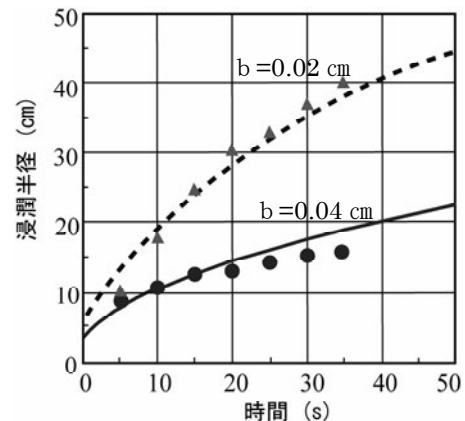


図-10 ベルヌーイの法則を適用し理論構築した場合のグラウト浸潤半径の経時変化

この研究は、一見実験の現象を理論的に説明したに過ぎないだけのようであるが、現状のグラウト工法の本来の妥当性の検証をしていることになる。

一般に亀裂内へグラウト材を注入する際には、セメント／水比が 1:10 という薄い状態から段階的にグラウト材の濃度を濃くして、最終的には 1:0.8 という濃い状態で注入する。このように濃度を段階的に濃くすることは、経験的な手法として実施されている。しかし、亀裂内へのグラウト材の目詰まりの研究では、グラウト材の濃度が薄いほど狭い亀裂内に注入されやすく濃度が濃くなると、狭い亀裂では目詰まりが生じてしまう¹⁴⁾。しかし、亀裂の幅が広い場合には、濃いグラウト材も注入されていくので、狭い亀裂が目詰まりした後もグラウト材が注入されることになる。

最初から濃いグラウト材を注入すると、幅の狭い亀裂は目詰まりしてしまっていて改良されないことになる。このように考えると、現在実施されているグラウトの手法は、経験から編み出された手法であるが、複数の幅の異なる亀裂に対してのグラウト手法としてはきわめて有効な手法と判断できる。

また、薄いグラウト材で狭い亀裂が広い範囲まで改良した後、この狭い亀裂は濃いグラウト材で目詰まりするが広い亀裂に関しては、その後も濃いグラウト材が高い圧力で充填されるので、複数グラウトの全体が平均的な範囲まで改良されることになる。

7.5 高透水性地盤へのグラウト材の注入

ダム基礎のカーテングラウトにおいて、高透水性地盤ではグラウトをしても、注入材が軸対称に広がるのではなく、注入孔から注入されてもその注入圧力が低下すると、注入材が図-6 に示すように鉛直方向に流動してしまっていて全体の透水係数の改良が困難となる。このような高透水性の幅の広い亀裂の存在する岩盤に対しては、従来よりセメントミルクに種々の材料を混入して粘性を高くした注入材に改良して注入する工法が取られてきた。坑道を対象とした場合には、注入工法は水平方向になるため、注入材が鉛直に流動してしまうと注入孔間での透水性の改良も困難になる。

高透水性の亀裂に対しては、注入区間をあらかじめ

め薬液か早強性のセメント材料の注入によって一部充填し、注入材が流出しない枠を作成して、その枠の中に粘性の低いセメントミルクかセメントモルタルを動的に注入して、高透水性岩盤内に十分に充填する工法が取られている。

深部の坑道では、それほど大きな高透水ゾーンに遭遇することはないが、掘削によって断層等に遭遇することが予測される場合には、一般的なグラウトの手法ではなく高透水ゾーンに対応したグラウトと薬液注入を混合した注入工法を用いるべきである。また、注入時の注入圧に対しても薬液注入によって注入範囲が限定されている時には、それに対応した注入圧で注入し、注入範囲が限定されていない時には、粘性の高いグラウト材を十分な圧力でゆっくり注入し、十分な「後押し」をおこなって軸対称に注入した材料が重力方向に流動するのを防ぐ必要がある。

8. 今後の課題

地盤内への注入工法について本報では論じたが、注入によって力学的にどのように変化するかについてももっと検討する必要がある¹⁵⁾。

今後の課題を以下に示す。

(1) 介在物のある亀裂への注入

我が国の亀裂性岩盤では亀裂内に粘土鉱物が存在することが多い。このような亀裂に対して、高圧水で亀裂内の粘土鉱物を洗浄してしまった後に、セメント系の材料を注入する工法を提案する。

(2) グラウト工法におけるコスト削減

グラウト工法は、地山の材料の改良工法であるが、ボーリング掘削費等が高価であるため、一般的には、グラウト工法による止水工法は適用されてはいない。このような現状を打破するためにはどのように安価にグラウト孔を掘削し、できるだけ少ない孔で広い範囲の地盤を改良するかが、今後の課題である。

グラウト工法の孔はパーカッションによる削孔でも十分なグラウトが可能な事は分かっているので、短時間でジャンボ機やスカフォード機によって、グラウト孔を削孔する工法を用い、どうすればコスト削減になるかを検討してほしい。

(3) 新しい注入材料の開発

地盤への注入材料として、現在は水ガラス系材料とセメント系材料だけが許可されているが、環境に安全で、どんな地盤にでも注入可能で止水性もよく、さらに力学的にも改良できる nm 程度の粒径の安価な材料の開発を国をあげて行う必要がある。

参考文献

- 1) 西垣 誠・Chegbeleh Larry Pax・金沢智彦：セメント系極超微粒子注入材による地盤改良，未来材料 Vol.8, No.9, pp.46-51,2008.
- 2) 城代邦宏・植出和雄・本多眞・長谷川誠・小島圭二・小川輝繁：地下石油岩盤タンクにおける水封機能の健全性評価手法に関する研究，土木学会論文集 C, Vol.63, No.2, pp.624-634,2007.
- 3) 西垣 誠・小松 満・見掛信一郎・中島朋宏・金谷賢生・龍田圭亮：坑道の掘削影響に対する修復技術としてのベントナイトグラウトの適用性に関する評価，土木学会論文集，No.806/III-73, pp.56-66,2005.
- 4) 西垣 誠・小松 満・見掛信一郎・田岡 洋・中島朋宏：エタノールを用いたベントナイトスラリーの亀裂性岩盤へのグラウト効果，土木学会論文集，No.764/III-67, pp.221-233,2004.
- 5) 西垣 誠・小松 満・見掛信一郎・田岡 洋・中島朋宏：エタノールを用いたベントナイトスラリーの亀裂性岩盤へのグラウト効果，土木学会論文集，No.764/III-67, pp.221-233,2004.
- 6) 西垣 誠・平 治・松生隆司・小橋創一・大橋昭・高田 徹：動的グラウチング工法のダム基礎グラウチングへの適用，鴻池組技術研究報告，Vol.12, pp.33-40,2002.
- 7) 西垣 誠・内田善久・蓮本清二・平 治・大橋昭・高田 徹：ダム基礎グラウチングにおける動的注入工法の開発，大ダム No.177, (社)日本大ダム会議，pp.108-115,2001.
- 8) 西垣 誠・平 治・大橋 昭・寺戸康隆・高田 徹：動的グラウチング工法の開発，ダム工学 Vol.9, No.3, pp.164-174,1999.
- 9) Kobayashi, A, T.Katayama, M.Kageyama, T.Maeda, A.Suzuki, M.Nishigaki : Automatic Grouting Control System on mix proportion , EIT-JSCE Joint International Symposium on Geotechnical Infrastructure Asset Management , pp.8, 2011.
- 10) 延藤遵，西垣誠，見掛信一郎，小林伸司，佐藤稔紀：注入圧力によるグラウトの目詰まり減少抑制効果，土木学会論文集 C, Vol.64, No.4, pp.813-832, 2008.
- 11) 延藤遵，見掛信一郎，西垣誠：大深度岩盤掘削工事を対象とした効率的なプレグラウチング概念に関する提案，土木学会論文集，C, vol.4, pp806～321, 2009.
- 12) 西垣 誠・見掛信一郎・小松 満・Kwabena KANKAM-YEBOAH：亀裂性岩盤におけるグラウトの注入範囲と有効間隙率の評価，土木学会論文集，No.743/III-64, pp.199-212,2003.
- 13) 西垣 誠・見掛信一郎：複数亀裂モデルにおけるグラウトの流動特性のメカニズムに関する研究，土木学会論文集，No.715/III-60, pp.323-332,2002.
- 14) 西垣 誠・小松 満・山本浩志・見掛信一郎：亀裂性岩盤におけるグラウトの浸透特性と目詰まり特性に関する研究，土木学会論文集，No.715/III-60, pp.311-321,2002/
- 15) 宇津木慎司，宮本健也，吉田間眞教，朝倉俊弘，菊池宏吉:グラウチングによる岩盤の力学的改良効果に関する実験的研究—節理性岩盤の変形特性に関する現場実験による検討—，ダム工学，21(3),pp.162-177,2011.

グラウチングの現状と 今後の課題

岡山大学大学院 環境学研究科
西垣 誠

注入工法

- (a)地盤の土粒子の間隙や岩盤の亀裂へ低圧力で注入材を浸透する薬液注入工法
- (b)流動性の低い注入材を地盤に注入して割裂注入により地盤を隆起させたりして、不動沈下をしている構造物を修復する復元注入工法
- (c)砂質地盤に流動性の低い注入材を高圧力で圧入して、地盤を圧縮するコンパクショングラウト工法
- (d)注入材を地盤内に高圧で注入・攪拌し、粒状改良体を形成するジェットグラウト工法

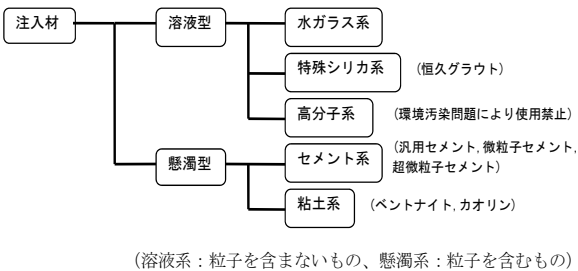
岩盤を対象とした注入工法の目的

- (a)ダム本体の基礎地盤の止水
- (b)トンネル掘削時の湧水対策
- (c)石油地下備蓄における漏ガス対策
- (d)LPG地下備蓄における漏ガス対策
- (e)圧縮空気の地下貯蔵における漏気対策
- (f)放射性廃棄物の地層処分における岩盤改良
- (g)廃棄物最終処分場の漏洩防止対策
- (h)ダム貯水池の漏水対策
- (i)地下ダムの止水

土砂地盤を対象とした地盤注入工法の目的

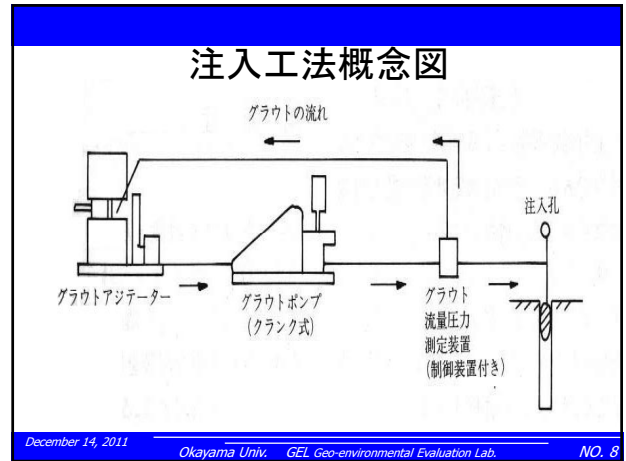
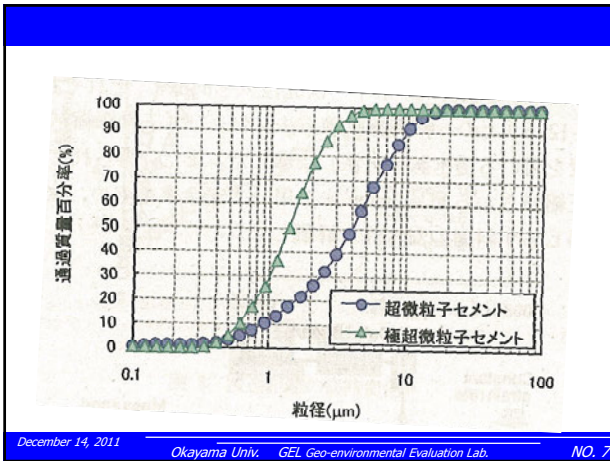
- (a)砂レキ層の湧水防止対策
- (b)地中貯水の漏水防止対策
- (c)豪雨時による斜面崩壊防止対策
- (d)砂質地盤の液状化防止対策
- (e)廃棄物最終処分場の地盤改良
- (f)河川堤防の補強対策
- (g)ため池の補強対策

地盤注入材の分類



セメント系グラウト材料

- (1) 普通ポルトランドセメント (~100 μm)
- (2) 高炉セメント (~100 μm)
- (3) 超微粒子セメント (~20 μm)
- (4) 極超微粒子セメント (~ 2 μm)



グラウトバリエー比(GR)

$$GR = \frac{D_{15}}{G_{85}} \quad (1)$$

ここに、 D_{15} :土の粒径加積曲線の15%径、 G_{85} :注入材の粒径加積曲線の85%径
 この式で求めたGRの値が15~25以上であれば、セメント粒子は土粒子間隙に浸透可能とされている。
 一方、亀裂性岩盤への浸透可否に関しては割れ目幅と注入材の粒径の比で評価する以下の実験式が提案されている。

$$\frac{w}{G_{85}} > 3 \sim 10, \frac{w}{G_{95}} > 5 \quad (2)$$

ここに、 w :割れ目幅、 G_{85} :注入材の粒径加積曲線の85%径、 G_{95} :注入材の粒径加積曲線の95%径

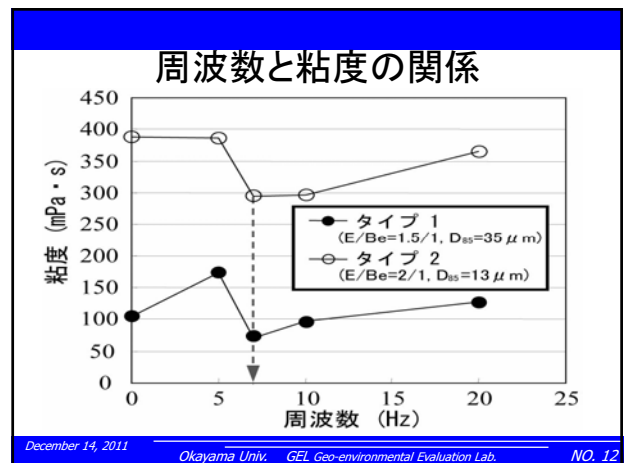
December 14, 2011
Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 9

注入可能な土粒子の粒径と割れ目幅

セメントの種類	土粒子の粒径(D_{15})	割れ幅(w)
普通ポルトランドセメント	0.6~1mm	0.12~0.4mm
超微粒子セメント	0.12~0.2mm	0.0024~0.08mm

December 14, 2011
Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 10

- ### 種々の注入工法
- 静的注入工法
 - 動的注入工法
 - 連続配合切替工法
 - 高圧注入工法
- December 14, 2011
Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 11



注入工法における課題

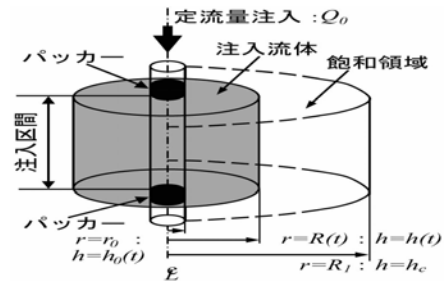
- (a) 亀裂性岩盤への注入によってどれだけの範囲が改良できたか
- (b) 注入によって、地盤内に理想的に注入されているのか
- (c) 地盤の水押しによる透水試験の結果と注入セメント量の関係
- (d) 複数の亀裂への注入メカニズム
- (e) 高透水性地盤へのグラウト材の注入

December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 13

亀裂性岩盤への注入によってどれだけの範囲の改良ができたのか



December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 14

$$R(t) = \sqrt{\frac{Q_0 t}{\pi L n_e}} \quad (3)$$

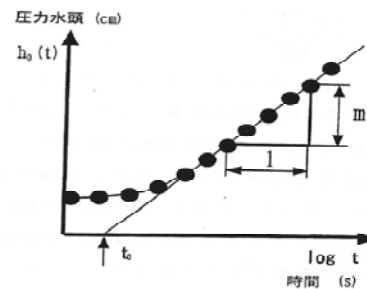
ここで、t: 注入時間、 n_e : 地盤内の有効間隙率
L: 注入区間長。

December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 15

定流量注入時の注入孔の圧力水頭



December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 16

$$n_e = \frac{Q_0 t_0}{\pi r_0^2 L} \quad (4)$$

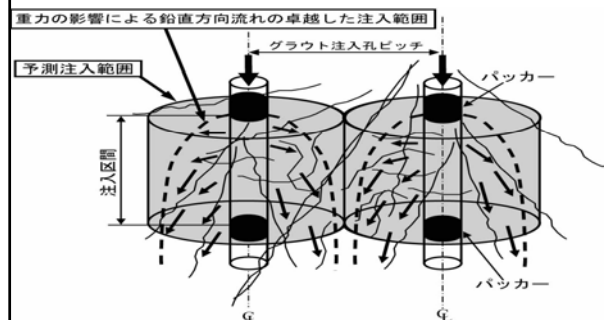
ここで r_0 : 注入孔の半径である。

December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 17

グラウトにおけるピッチ

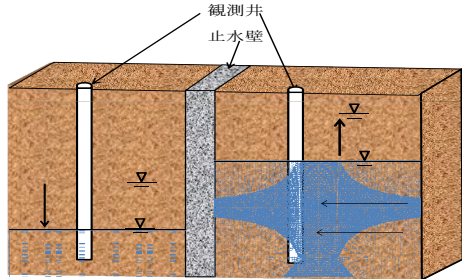


December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 18

注入によって地盤内に理想的に注入されているか



December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 19

物理探査

- 比抵抗トモグラフィ
- 電磁波トモグラフィ
- 音波トモグラフィ(Sonic logging)
- 音響トモグラフィ

December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 20

地盤の水押しによる透水試験結果

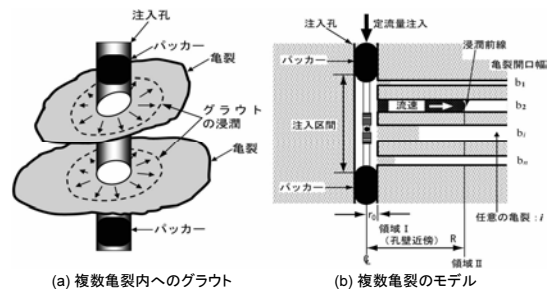
ルジオン値と注入セメント量、
注入時の挙動から有効間隙率を求
める。

December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 21

複数の亀裂への注入メカニズム

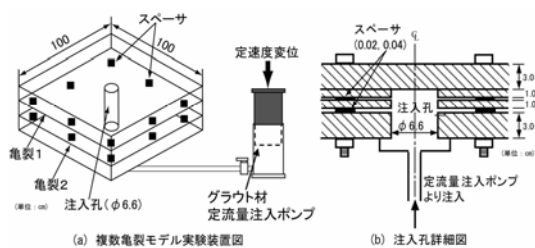


December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 22

注入装置の全体図

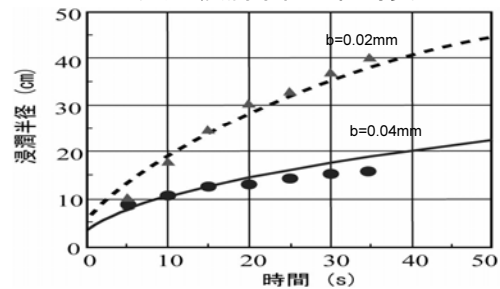


December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

NO. 23

ベルヌーイの法則を適用し理論構築した場合の グラウト浸潤半径の経時変化



December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab.

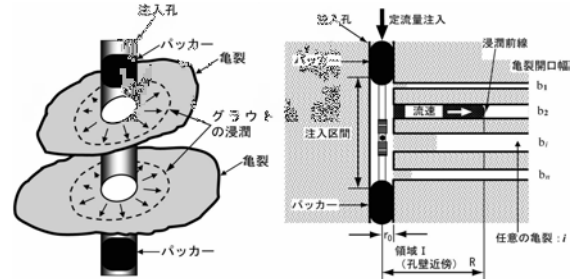
NO. 24

グラウトの濃度変化

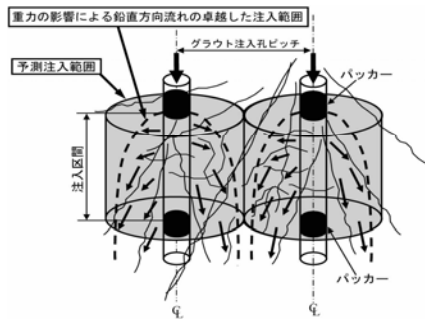
セメント/水 比 1:10 淡

セメント/水 比 1:1 濃

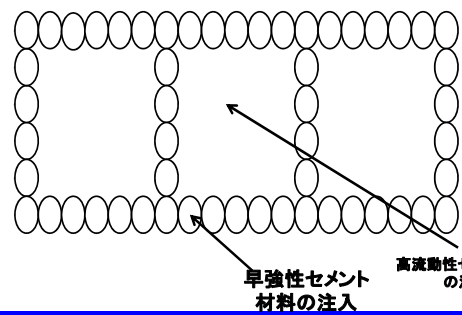
複数亀裂内へのグラウト



高透水性地盤へのグラウト



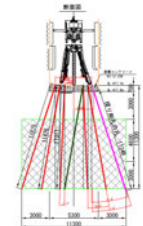
高透水性地盤へのグラウトの注入



今後の課題

(1) 介在物のある亀裂への注入
粘土性成介在物の洗浄後のグラウチング

(2) グラウト工法におけるコスト削減
スcafford, ジャンボ掘削マシン



ノルウェーのグラウト注入方法(比較的良好な岩盤の場合)

▶ 注入孔配置: 高密度配置




トンネル周辺に加えて、切羽にも数本射孔する

Jong-Asker トンネルの場合

- ・注入孔数: 48孔
- ・(トンネル断面: 114m²)
- ・許容湧水量: 4~16L/分/100m (区間ごとに設定)

切羽における注入孔ピッチは1.0m程度が多い

青函トンネルの一般的な注入孔配置



✓ 注入ステージ: ステージ分割しない
 ✓ 注入長: 15~30mと短い
 ✓ 注入範囲: 緩み領域とロックボルト長をカバーする範囲

底層はやや広げる

狭い改良範囲に高密度にグラウト孔を配置し、高濃度グラウトを注入

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 31

(3)新しい注入材料の開発

nmのグラウチング材料

2011/12/14

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 32

飯ノ山ダム



December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 33

飯ノ山ダムの概要

■ 飯ノ山ダムの概要

<ul style="list-style-type: none"> ・型式: アースダム (鉄筋コンクリート芯壁あり) ・竣工年月: 昭和7年9月 (1932年9月) ・高さ: 18.50m ・堤頂長: 78.50m 	<ul style="list-style-type: none"> ・設計洪水量: 15.7m³/s ・集水面積: 2.90km² ・常時湧水量: E.L. 733.49m ・総貯水量: 1,750,000m³
---	---




ダム上流から堤体を望む

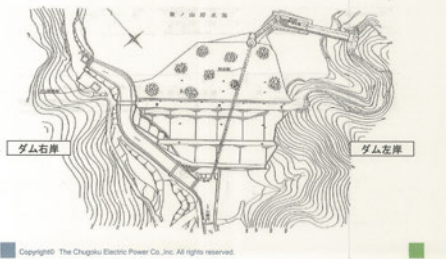
ダム下流から堤体を望む

Copyright © The Chugoku Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 34

飯ノ山ダムの概要(平面図)

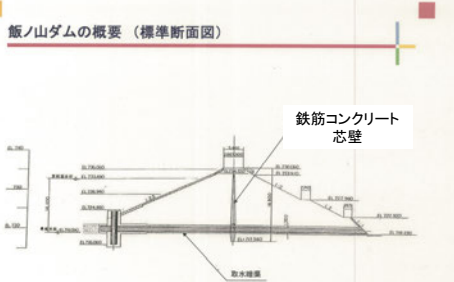


Copyright © The Chugoku Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 35

飯ノ山ダムの概要(標準断面図)



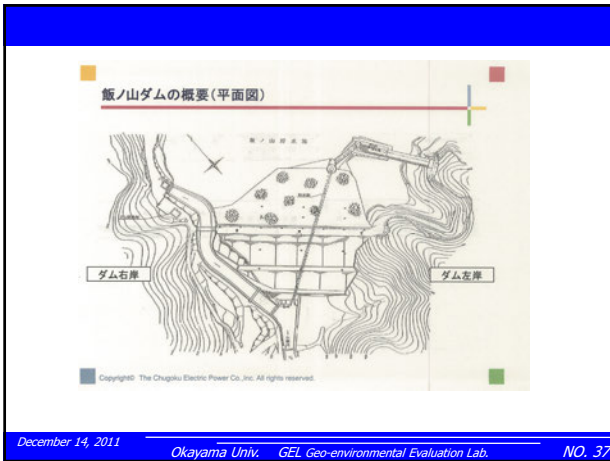
鉄筋コンクリート芯壁

取水構築

Copyright © The Chugoku Electric Power Co., Inc. All rights reserved.

December 14, 2011

Okayama Univ. GEL Geo-environmental Evaluation Lab. NO. 36



ダム基礎グラウチングにおける最近の技術的課題

山口 嘉一¹

2003年に、安全性を損なわないという前提でのダム基礎グラウチングの合理化を目指してグラウチング技術指針が改訂された。本稿では、指針の適用に当たっての一般的な留意点について述べるとともに、改訂指針発刊後の具体事例として遭遇した、改訂指針適用に当たっての課題を列挙した上で、適切な対応方針を示した。また、現時点で具体的な対応策を示せない課題については、今後のダム基礎グラウチングのより適切な合理化に向けた技術的検討課題として整理した。

キーワード: ダム基礎グラウチング, 技術指針, 合理化, コスト縮減

1. はじめに

地盤や構造物の間隙、割れ目、空洞等に止水や強度増加の目的で硬化材料を注入するグラウチング¹⁾は、土木工事において最も一般的な工法の一つである。この技術は、今から200年以上前の1802年にフランスの技術者であるCharles Berignyにより発明された。彼は、この工法を“Injection Process”と称して、粘土と石灰の懸濁液を注入することにより石積擁壁の補修を行った²⁾。その後、注入材料としてのポルトランドセメントの登場(1824年)や着実な工法の改善等によりグラウチング技術は着実に進歩した。さらに、ダム工事にグラウチングが大々的かつ系統的に用いられるようになったのとほぼ時を同じくして、近代的グラウチング工法が1920年代に開花している²⁾⁴⁾。ダム工事における体系的なグラウチング、特にセメントグラウチングは、1932年から1935年にかけて米国のColorado川に建設されたHooverダムにおいて結実した⁴⁾⁵⁾。その後現在に至るまでの3/4世紀の間に、グラウチング技術は着実に進歩してきたが、この技術が直接目で見えない地中における工法であるため、その技術進歩は他の土木分野の技術とは異なり科学的な調査・研究よりも、現場技術者の経験と勘に負うところが大きかった。

筆者は、第3千年紀(ミレニアム: Millennium)を翌年に控えた1999年、ダムサイトにおける地質条件の複雑化に伴うグラウチングにおける課題の発生や公共工

事におけるコスト縮減の要請の高まりを受けて、グラウチング技術の高度化・合理化の重要性を認識し、当時のダム基礎グラウチングに関する技術的課題をとりまとめている⁶⁾。その後10年以上が経過したが、その間にもグラウチング技術は継続的に進歩、発展してきている。そうした中で、2003年のグラウチング技術指針の改訂⁷⁾は、ダム基礎グラウチング技術の進歩・発展の方向性に大きな影響を与えたと考えられる。

本稿では、1999年にとりまとめた当時のダム基礎グラウチングに関する技術的課題について概説した後、グラウチング技術指針の改訂の主旨およびその適用にあたっての課題をとりまとめ、今後の進むべき方向性を議論するための基礎資料としたい。

2. 1999年時点におけるダム基礎グラウチングの技術的課題

筆者は、1999年10月1日に、(社)システム総合研究所グラウチング技術委員会が主催したワークショップ「グラウチング注入技術の課題」において、ダム基礎グラウチングの①注入材料、②注入工法、③注入の細部仕様(グラウトの配合設計)、④効果判定、といった4項目について、当時の技術的課題をとりまとめている⁶⁾。この際、各種技術的課題を解決するための技術として紹介した技術は、図-1に示すように分類される。

¹ 独立行政法人土木研究所 水工研究グループ 水工構造物チーム, 上席研究員, 博(工)

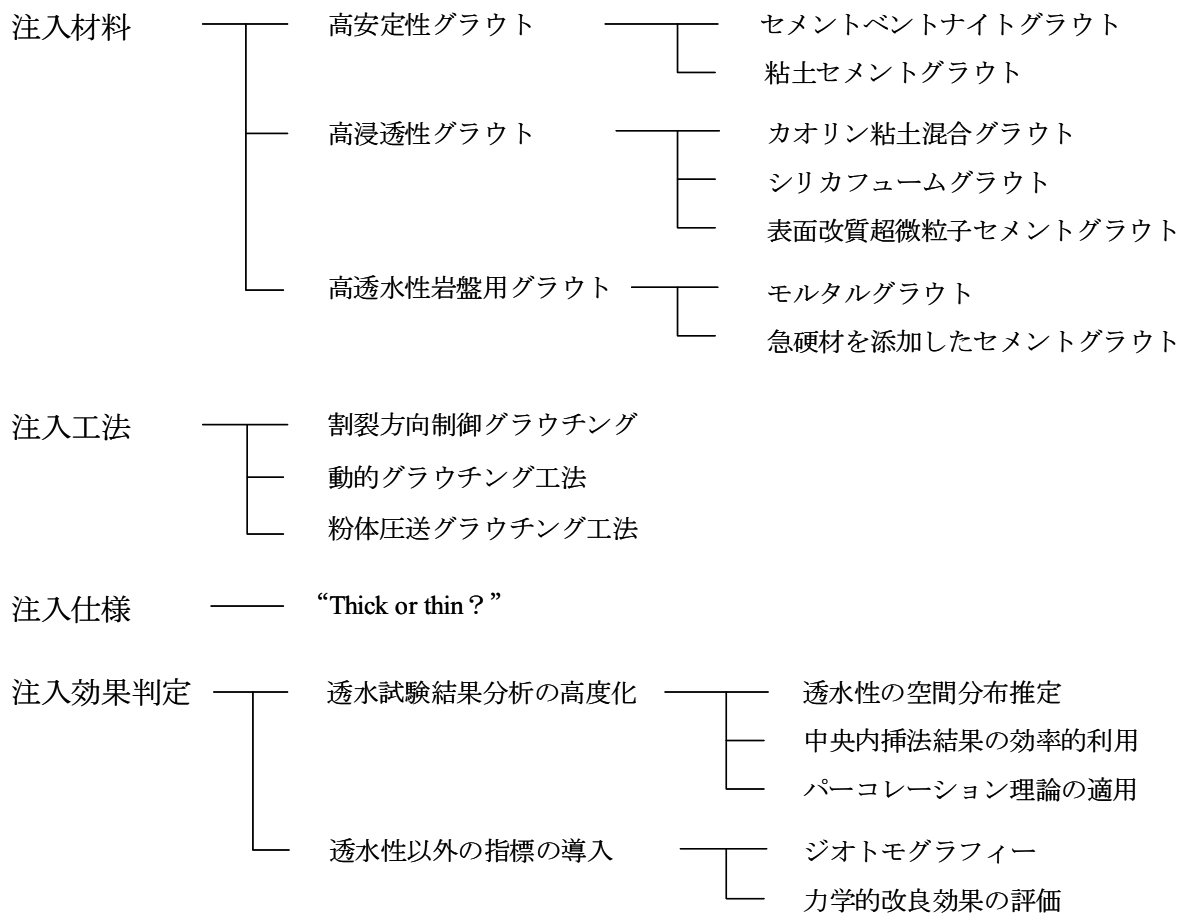


図-1 1999年当時のダム基礎グラウチングの技術的課題の分類（文献6）に基づき作成）

当時の技術開発における方針として、特筆すべき点が「注入工法」に見られる。つまり、岩盤内の微細な亀裂や地盤の構成粒子間隙にセメントを注入する（高浸透性グラウト、動的グラウチング工法、粉体圧送グラウチング工法）、あるいは強制的に割裂注入を発生させて薄膜のグラウト脈のネットワークを形成する（割裂方向制御グラウチング工法）といった、徹底的に遮水性を改良するための工法の研究・開発が進められてきていたことがわかる。

3. グ라우チング技術指針改訂の経緯と主旨

ダム基礎グラウチングの基準として1983年に制定された「グラウチング技術指針・同解説」⁸⁾（以下、「旧指針」という）は、近年のダム基礎地盤の多様化に適切に対応するために、20年ぶりとなる2003年に抜本的な改訂⁷⁾（以下、「改訂指針」という：（注）技術指針名は同じ）がなされた。指針改訂の主旨と改訂の主なポイントは以下に示すとおりである。

（指針改訂主旨）

『安全性を損なわないという前提でのグラウチングの合理化』

（改訂の主なポイント）

- ・各種グラウチングの施工目的、施工範囲の明確化
- ・基礎地盤の多様性の考慮（基礎地盤性状に適したグラウチング）
- ・施工中の逐次評価による計画合理化の妥当性の検証および必要に応じた見直し

旧指針が当時の施工実績を標準化したものであるのに対して、改訂指針はグラウチングの目的から根本的に見直し、そのあるべき姿を追求したものである。

4. 改訂指針適用に当たっての留意点⁹⁾に一部加筆

ダム基礎グラウチングは、ダムの安全性確保上きわめて重要な工事の一つである。地上のダム堤体工事は、他ダムと同様の材料と施工法を用いて行い施工状況も

直接目視で確認しながらの工事であるが、地下のグラウチング工事は、地質がダムごとに異なるうえに施工状況も目視では確認できない工事である。そこに、グラウチング特有の難しさがあり、そのため、個々のダムごとに異なった対応と創意工夫が必要となる。

実績によれば、改訂指針の適用により、グラウチングの施工数量が減少し、結果として大きなコスト削減効果をあげているが、改訂指針は決して安易な“手抜き”を奨励しているものではない。指針改訂の目的は、あくまでもダムの安全性を損なわないことを前提としてグラウチングの合理化を図ることにあり、必要以上の施工を排除することにある。よって、単なる割り切りで合理化を図ったり、他ダムで実施された合理化対策であるという理由だけから当該サイトへの適用性を検討せずに適用したりすることは厳に慎まなければならない。

改訂指針は旧指針に比べて、たとえば脆弱部の改良目的のためのコンソリデーショングラウチングの施工範囲は基礎岩盤の状況を入念に観察して決定すること、施工段階でも常にデータを分析・評価して施工計画の妥当性を検証することなど、現場技術者の適切な技術的判断を必要としている。コスト削減は、そのような確かな技術的判断の結果として生まれてくるものである。ただし一方で、このような技術的課題に挑まずに、旧来の保守的な手法を用いることで合理化、コスト削減を目指さなければ、技術指針を改訂した意味がなくなる。よって、ダム基礎グラウチングの合理化は、ダム技術者が誇りをもって取り組むべき重要な課題である。

5. 改訂指針適用に当たっての具体的課題

4章では改訂指針適用に当たっての一般的な留意点について述べた。5章では、改訂指針発刊後の具体事例として遭遇した、改訂指針適用に当たっての課題を列挙するとともに、適切な対応方針を示す。しかし、これらの課題のなかには、現時点で具体的な対応策を示せず、今後の現場における実績の積み重ねや研究開発により解決していかなければならない課題もあるため注意されたい。

5.1 カーテングラウチングに関する課題

(1) 規定孔次数の設定（低減）

規定2次孔（3m間隔）を、試験施工による妥当性検証が十分になされずに採用されている事例が見られる。これまでに規定2次孔で施工され、遮水機能上なんら問題なく安全に挙動しているダムもあり、規定2次孔とすること自体に問題があるわけではない。しかし、上下流走向の高角度亀裂に起因した透水経路を処理し残す可能性があるような場合などには、3次孔までを規定孔とした試験施工の結果に基づいて規定2次孔の妥当性を検証する必要がある。

改訂指針でも強調しているように、「対象地盤の水理地質特性に応じたグラウチング計画の立案」が重要である。

また、規定孔次数を検討する場合、浸透路長が短く堤体近傍の浸透流を制御する浅部と浸透路長が長く堤体からの距離の離隔がある深部によって、カーテングラウチングによる遮水膜に要求される程度が異なるため、規定2次孔の設定に関する検討のレベルについて差をつけることは妥当だと考えられる。

(2) 改良目標値の緩和

対象地盤の遮水性改良限界に達した以降のカーテングラウチングの施工は効果がないとの判断から、当初設定の改良目標値を緩和してグラウチングの施工の終了を検討する場合がある。改訂指針においても、遮水性の改良限界が認められた場合には、複列のグラウチングなど幅を持たせた遮水膜で対応することが記されている。しかし、幅を持たすことで確実な遮水効果を得るためには、対象箇所卓越した水みちが残存せず、概ねダルシー則に従うような浸透状況にあることが前提となる。よって、幅を持たせた場合も含めて改良目標値を緩和する場合、緩和した改良目標値程度のルジオン値であれば卓越した水みちが残されている可能性が低いことを、ボーリングコアやボアホールテレビ画像などを用いて地質的に説明できなければならない。また、5m区間の注入区間を複数に分割し、それぞれの区間の透水性に大きな差がないことから卓越した水みちが存在しない地盤であることを証明した事例もある。

(3) チェック孔において改良目標値の超過率が大きい事例の出現

(1)の規定孔次数の低減や(2)の改良目標値の緩和を

安易に実施してしまうと、チェック孔の段階で、改良目標値を満足しないレジオン値と示すステージが多く出現することが考えられる。このような場合、チェック孔の追加孔を施工することが議論されるが、重要なことは、チェック孔に対する追加孔施工の検討ではなく、グラウチング計画（仕様）自体に問題があったことについて見直す必要があるということである。カーテングラウチングは、施工の確実性を考慮してある程度以上のコンクリート打設あるいは材料盛立の後に段階的に施工するため、チェック孔の結果を逐次評価し、改良目標値を満たさない箇所が比較的多く見られた場合は、その原因について分析するとともに、必要に応じて仕様の変更を検討しなければならない。まさにこれが改訂指針の主要なポイントの一つである。

一方で、チェック孔が最終次数孔とのダブルチェックの意味合いがある。つまりチェック孔施工前に既に完了基準を満たしていることから、土木研究所¹⁰⁾においては、旧指針適用の既往実績を分析することによりチェック孔省略の可能性についての検討を研究的に実施している。しかし、改訂指針を適用した事例を用いた分析は未検討の状況である。チェック孔が本来ダブルチェックの意味合いで実施されていること、施工の確実性を考慮してある程度以上のコンクリート打設あるいは材料盛立の後に段階的に施工することから、アバットメントの高標高部のカーテングラウチングはコンクリート打設あるいは堤体盛立完了後に施工しなければならないことになり、施工上のクリティカルパスになることがある。そのため、今後は各ダムにおいて、既往の研究で実施したのと同様な方法を用いて注入実績を分析することにより、チェック孔の必要性の検討がなされることが期待される。

(4) ダム高（H）以深に分布する高透水性ゾーンの処理

深部に高透水性ゾーンを発見した場合、旧指針適用時とは異なり、ダム高（H）程度で改良深度を打ち切る検討をする事例が見られるようになった。このような場合に、単なる割り切りで改良深度を設定することは改訂指針の主旨に反することになる。

改訂指針では、「基礎地盤性状に適したグラウチング」を重要なポイントとしている。よって、深部に高

透水性ゾーンが存在するような場合には、高透水性部の三次元的分布、特に上下流方向分布を明らかにする調査を実施する必要がある。まさに、水理地質特性に応じた対応が望まれている。

高透水性ゾーンの上下流方向分布が局所的である場合や、連続性はあっても下流側の地表面へは連続していない場合などは、漏水という観点からは、高透水性ゾーンの下限深度を調査して高透水性ゾーンをカーテンライン上で全て処理する必要性はないといえる。しかし、コンクリートダムの堤体下流端付近の地表面には難透水層が分布しているが、カーテングラウチング下流の堤敷内の地表面に高透水性ゾーンが分布するような場合には、カーテンラインで高透水性ゾーン下限深度まで施工しない場合の揚圧力には設計上注意を要す。このように、対象地盤の水理地質特性を十分把握し、漏水以外にも対象ダム型式の設計荷重に与える影響を十分考慮したうえで総合的な評価を行う必要があるということが重要である。

また、高透水性ゾーンの下限深度が非常に深い場合、あるいは地質調査からはその下限深度を把握できない場合には、カーテングラウチングを土質ブランケットなどの他の工法に切り替えたり、他の工法との複合的な対応を図ったりするなど、幅広い観点から対応を検討する必要がある。

一方、深部に未処理の高透水性ゾーンを残す場合には、試験湛水中の下流浸透流や地下水位（圧）分布などのモニタリングを適切に計画して実施する必要がある。

(5) 施工すべき最低深度

未処理状態の基礎地盤の遮水性が良好である場合に最低施工深度の設定について議論になることがある。

まず、調査・設計段階における地質調査のグリッド間隔はカーテングラウチングの規定孔間隔はもちろんのこと、12m のパイロット孔間隔に比べるとかなり広いことが一般的である。そのため、調査・設計段階における地質調査における評価のみをもってカーテングラウチングを施工しないという判断をすることは難しいといえる。特に浸透流制御上最も重要な浅部における遮水性を確保するために、ある程度の深度までは、カーテングラウチングを施工すべき最低深度を規定しておく必要がある。

しかし、この最低深度をダム高 (H) に応じて設定 (α H) すべきなのか、具体的な施工ステージ数を規定 (n ステージ) すべきなのかを一概に述べることは困難である。各ダムの水理地質特性に応じて適切な対応を検討すべき事項である。

(6) (常時満水位+ α)を基準とした改良目標値の緩和およびリム部の施工範囲の設定

改訂指針によると、図-2 に示すような(常時満水位(以下、NWL という)+ α)を基準とした改良目標値の緩和およびリム部の施工範囲の設定に関する図面が掲載されるとともに、後者のリム部の施工範囲については解説文も記されている。改訂指針の解説文には明示されていないが、 α はゼロから(サーチャージ水位(以下、SWL という)-NWL)の間の値と考えられる。

いま、SWL-NWL が小さい場合は大きな問題にならない。一方で、(NWL+ α)とSWLとの区間の改良目標値を緩和することや、(NWL+ α)を基準にリム部の施工範囲を設定することによるコスト削減効果もあま

り大きくない。しかし、全貯水容量に占める治水容量の割合の大きいダムや、近年注目を浴びている流水型(洪水調節専用)ダムにおいては、NWL-SWLの標高差が大きく、上記のコスト削減効果はかなり高い。実際に、NWL以上に貯水位が上昇するのは洪水時のみでその継続時間は短い場合も多く、さらにSWLまで貯水位が達するような洪水が発生する確率は非常に低いといえる。そのため、これらのことだけを考えて、(NWL+ α)とSWLとの区間の改良目標値を緩和したり、(NWL+ α)を基準にリム部の施工範囲を設定したりすることは、定性的には妥当な判断だといえる。しかし一方で、どのような判断基準を持って改良目標値を緩和する区間やリム部の施工範囲を設定する基準水位を設定するのか、つまり α をどのように設定するのか、またその区間の改良目標値をどの程度の値に設定するのか、などについては個々のダムの水理地質特性、ダム型式、対象洪水の波形(継続時間など)などを総合的に検討する必要がある。

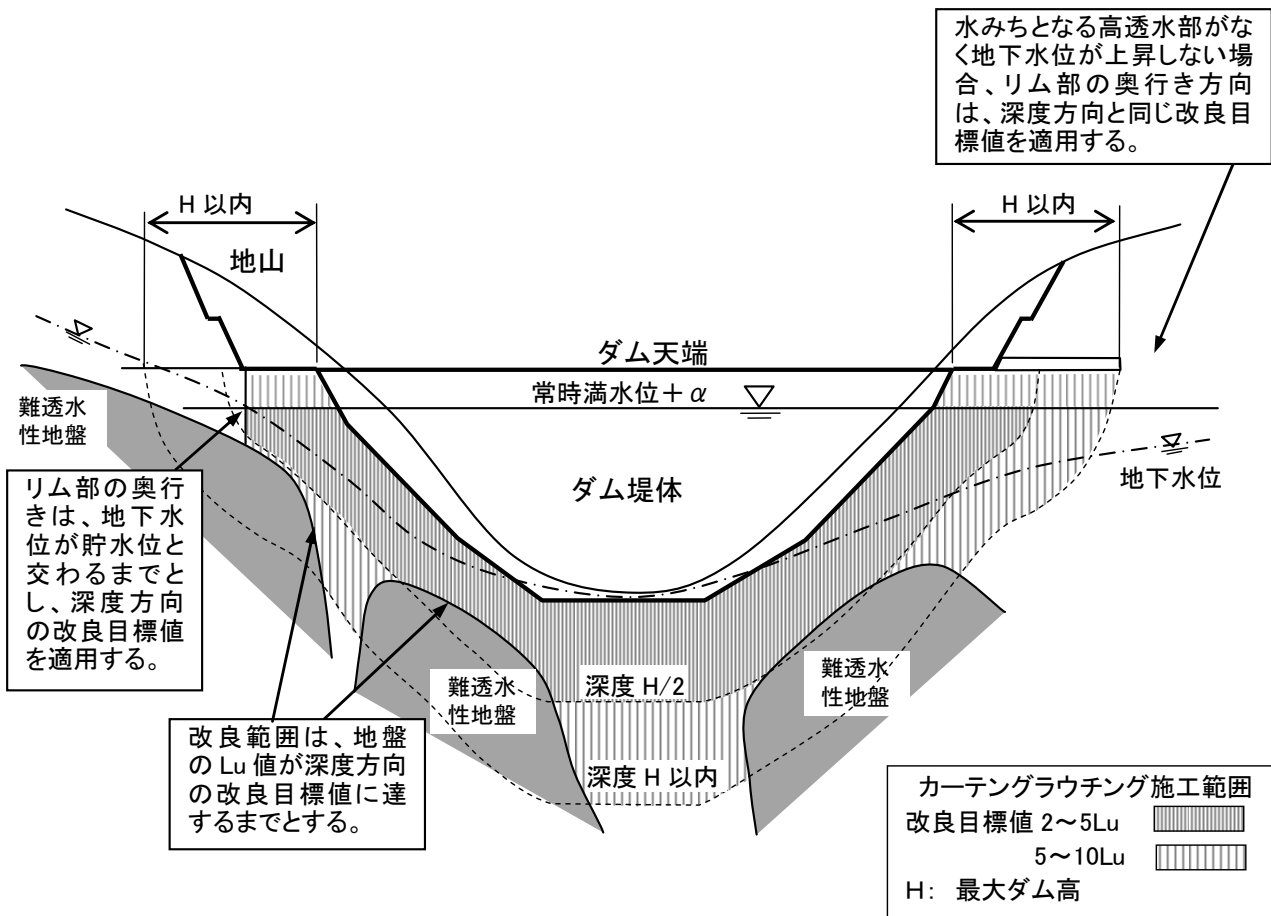


図-2 カーテングラウチングの施工範囲と改良目標値⁷⁾

また、実際の運用前に実施する試験湛水においては、比較的長期にわたって NWL 以上の貯水位状態が継続するため、実運用時に比べて浸透流という観点で厳しい状況におかれていると考えられる。そのため、流水型（洪水調節専用）ダム試験湛水のあり方も議論、検討すべき重要な課題となっている。

(7) 2ステージ一括注入

効率的な注入を図る目的から、5m 区間 1 ステージの基本的な注入を 2 ステージ（10m 区間）一括注入することを検討したり、厳しい適用条件を設定した上で実際に適用したりしているダムがある¹¹⁾。2 ステージ一括注入を実施する場合でも、本来 5m 区間 1 ステージの注入を基本としていることから、透水試験（ルジオンテストあるいは水押し試験）は 5m 区間 1 ステージごとに実施することが基本となる⁷⁾。

2 ステージ一括注入については、2 ステージ一括注入における課題をもれなく抽出したうえでの課題解決に向けた検討、あるいは課題を考慮した適用条件（制約条件）を明確にしたうえでの適用が必要となる。

5.2 コンソリデーショングラウチングに関する課題

5.2.1 「遮水性の改良」目的のコンソリデーショングラウチング

(1) 基礎掘削線上昇に伴う施工量の増加

改訂指針においては、従来のコンソリデーショングラウチングを「遮水性の改良」目的と「弱部補強」目的のコンソリデーショングラウチングに分けたうえで、それぞれの目的に応じて適切な箇所に施工することとした（図-3 参照）ため、従来コンクリートダムの堤敷全面にコンソリデーショングラウチングを施工していた場合に比べて、その施工量を大幅に減少することが可能となった。

しかし近年では、このようなコンソリデーショングラウチングの合理化とともに、基礎掘削量の減少を検討するようになった。そのため、基礎掘削の目標岩級ではあるものの、岩級区分時の細区分の組み合わせからすると当初想定との組み合わせよりも相対的にランクの低い組み合わせの岩級の岩盤まで基礎掘削を切り上げたり、当初から高透水の岩盤を浅部に残すことを前提に基礎掘削線を設定したりすることも想定される。このような場合、特に「遮水性の改良」目的のコンソ

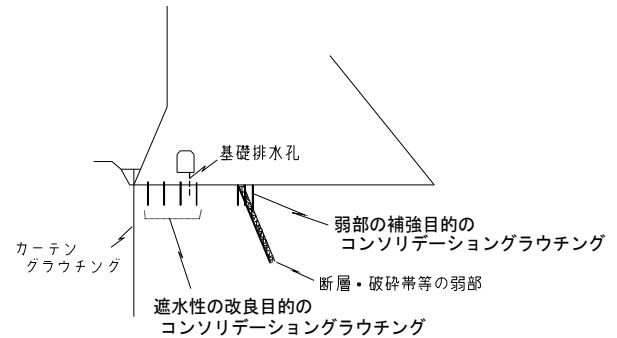


図-3 コンソリデーショングラウチングの種類と施工範囲（文献7）を一部修正

リデーショングラウチングの場合、基礎浅部の改良度が悪く、結果的に施工量が増加したり、堤体コンクリート打設工程への影響を及ぼしたりする場合も考えられるので、注意が必要である。

ダムにおける施工の合理化を検討する場合、常に注意しなければならないことであるが、「ある工種において検討する合理化案については、それが他の工種に与える影響についても十分検討した上で総合的な評価を行う」必要がある。

(2) 基礎排水孔より下流側の施工

「遮水性の改良」目的のコンソリデーショングラウチングの施工範囲内に基礎排水孔を取り込む事例と取り込まない事例が見られるが、施工範囲を検討する際には以下の点に留意する必要がある¹²⁾。

1) 基礎排水孔を取り囲むように「遮水性の改良」目的のコンソリデーショングラウチングを施工すれば、旧指針時の堤敷全面にコンソリデーショングラウチングを施工していた場合とほぼ同様な浸透状況下で基礎排水孔からの排水量の安全管理が行えると考えられる。

2) 当初計画として、基礎排水孔を取り囲むように「遮水性の改良」目的のコンソリデーショングラウチングを施工することを計画していない場合でも、基礎排水孔周辺地盤の未改良時の透水性が大きく、かつダム高が高い場合には、「遮水性の改良」目的のコンソリデーショングラウチングの施工範囲内に基礎排水孔を取り込むことを検討する必要がある。

5.2.2 「弱部補強」目的のコンソリデーショングラウチング

(1) 施工範囲の設定

改訂指針によると、「弱部補強」目的のコンソリデー

ショングラウチングの施工範囲は、重力式コンクリートダムについて、「基礎地盤に作用する応力を考慮して、断層・破碎帯、変質帯、強風化部等の弱部を施工範囲とする。」とされている。しかし、規定されている施工範囲である弱部の設定が各ダムで必ずしも統一されたものになっていないように見受けられる。そもそも、改訂指針の主旨が、各ダムの基礎地盤条件に応じて適切なグラウチングを行うことにあるため、個々のダムで異なる対応がなされること自体に問題はないが、基本的な考え方にずれが生じてくることは大きな問題といえる。たとえば、単に、CL級岩盤に対しては無条件に「弱部補強」目的のコンソリデーショングラウチングを施工するという対応は改訂指針の主旨に反することになる。仮に計画段階でこのような計画を立案したとしても、実施工にあたっては、掘削面の地質状況を入念に観察するとともに、施工の初期段階の結果を分析し、その必要施工範囲を見直すという対応をとらなければならない。これがまさに指針改訂の主要ポイントの一つである。

5.3 その他

グラウチングに関する直接的な課題ではないが、グラウチングに関連した技術として、透水試験（ルジオンテスト、水押し試験）の合理化があげられる。なお、透水試験の合理化としては、試験方法自体の合理化だけでなく、丁寧な試験方法を実施することによりグラウチングの合理化を図る場合も含む。現在適用されている透水試験の合理化の具体的な事例としては、無段階水押し試験の適用による透水試験時間の短縮¹³⁾、¹⁴⁾や不飽和の軟岩地盤への適用を主目的として長時間透水試験¹⁵⁾、¹⁶⁾を適用することで、より真に近い飽和透水性（従来の透水試験方法による評価よりも小さくなる）を評価することによるグラウチングの施工量の縮減などがある。具体的な実施事例やその適用に当たっての留意点などの詳細については、参考文献13)-16)を参照されたい。

また、静水圧透水試験の適用などにより比較的透水性であることが判明した軟岩地盤において非常に小さい限界圧力が課題となることがある。このような場合には、透水試験とは別に浸透破壊抵抗性評価を行う必要が発生してくる場合がある。このような場合には、

土木研究所の研究成果をとりまとめた、「ダム基礎地盤の浸透破壊抵抗性評価マニュアル（案）」¹⁷⁾などを参考に対象地盤の浸透破壊抵抗性を評価しておくことが必要である。

6. おわりに

安全性を損なわないという前提でのグラウチングの合理化を目指して2003年に改訂されたグラウチング指針は、ダム基礎グラウチングの合理化、コスト縮減に大きく貢献している。しかし、適切な合理化を達成するためには、個別ダムごとの基礎地盤の水利地質特性を十分把握した上での技術的検討・判断が必要である。

本稿では、上記のような、改訂指針適用に当たっての一般的な留意点について述べるとともに、改訂指針発刊後の具体事例として遭遇した、改訂指針適用に当たっての課題を列挙するとともに、適切な対応方針を示した。しかし、これらの課題のなかには、必ずしも現時点で具体的な対応策を示せず、今後の現場における実績の積み重ねや研究開発により解決していかなければならない課題もあり、これらを明確に示すことで、今後のダム基礎グラウチングのより適切な合理化に向けた技術検討課題とした。

参考文献

- 1) 土質工学会：土質工学用語辞典，初版，第4刷，p.161，1989
- 2) Karol, R. H.: Chemical Grouting, 2nd Edition, Revised and Expanded, Marcel Dekker Inc., pp.12-16, 1990
- 3) Nonveiller, E.: Grouting, Theory and Practice, Elsevier, pp. V-VI, 1989
- 4) Verfel, I. J.: Rock Grouting and Diaphragm Wall Construction, Elsevier, pp.19-29, 1989
- 5) Weaver, K.: Dam Foundation Grouting, ASCE, pp.2-4, 1991
- 6) 山口嘉一：ダム基礎グラウチングにおける技術的課題，グラウチング注入技術に関するワークショップ講演集，（社）システム総合研究所グラウチング技術委員会，1999.
- 7) （財）国土技術研究センター編集：グラウチング技術指針・同解説，（株）大成出版社発行，2003

- 8) 建設省河川局開発課監修：グラウチング技術指針・同解説，（財）国土開発技術研究センター発行，1983
- 9) 独立行政法人土木研究所水工研究グループ：グラウチング技術指針の改訂によるコスト削減効果，ダム技術，No.241，pp.90-92，2006
- 10) 山口嘉一，佐藤弘行，阿部智彦，西岡正浩：最終次数孔とチェック孔によるカーテングラウチングの改良効果判定の比較，ダム技術，No.241，pp.24-30，2006
- 11) 山口嘉一，塚越雅之，下山顕治：カーテングラウチングにおける2ステージ一括注入に関する一考察，ダム技術，No.280，pp.13-21，2010
- 12) 独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム：重力式コンクリートダムにおける遮水性の改良目的のコンソリデーショングラウチングの施工範囲と基礎排水孔の位置関係，ダム技術，No.263，pp.113-115，2008
- 13) 永山 功，吉田 等，宮内茂行，名波義昭，井川貴史：基礎岩盤グラウチングにおける水押し試験の合理化の試み，ダム技術，No.176，pp.3-12，2001
- 14) 山口嘉一，新家拓史：無段階水押し試験による不飽和透水性評価，ダム工学，Vol.16，No.2，pp.94-108，2006
- 15) 山口嘉一，安仁屋勉，池澤市郎，赤松利之：風化軟岩地盤の不飽和帯における長時間透水試験，地盤工学ジャーナル，（社）地盤工学会，pp.229-242，2008
- 16) 山口嘉一，池澤市郎，下山顕治：不飽和風化軟岩地盤の長時間透水試験による飽和透水性評価，ダム技術，No.270，pp.17-28，2009
- 17) 山口嘉一：ダム基礎地盤の浸透破壊抵抗性評価マニュアル（案），土木研究所資料，No.3839，2001

FIRI
 <キーノートレクチャー>
**ダム基礎グラウチングにおける
 最近の技術的課題**

ダム基礎グラウチングに関するシンポジウム
 平成23年 10月 7日
 スター貸会議室 神田・大手町

独立行政法人 土木研究所
 水工研究グループ 水工構造物チーム
 上席研究員 山口嘉一

FIRI **グラウチング技術の変遷**

1802年 Charles Berigny (仏) による発明
 ⇒ 「Injection Process」(粘土と石灰の懸濁液注入)

1920年代 近代的グラウチング工法の開花
 ⇒ ダム工事への大々的適用
 ↳ 1824年 ポルトランドセメントの発明

1930年代 体系的なグラウチング(セメントグラウチング)の体系化
 ⇒ Hooverダム(米)(内務省開拓局)の建設

←
 課題
 地中の目に見えない工事
 ||
 現場技術者の経験と勘に負うところの多い技術

FIRI **我が国のダム基礎グラウチング関係の指針類**

1972年 『ダム基礎グラウチングの施工指針』
 (土木学会)

1983年 『グラウチング技術指針・同解説』
 (建設省河川局開発課監修)
 ⇒ 建設省河川局開発課長通達

2003年 『グラウチング技術指針・同解説(改訂版)』
 ((財)国土技術研究センター編集)
 ⇒ 国土交通省河川局治水課長通達

FIRI **1999年時点におけるダム基礎グラウチングの技術的課題**

ワークショップ「グラウチング注入技術の課題」
 (社)システム総合研究所グラウチング技術委員会
 (1999年 10月 1日 開催)

発表題目と発表者

題目	発表者
ダム基礎グラウチングにおける技術的課題	山口 嘉一 建設省土木研究所
不連続面内の水みち	水戸 義忠 京都大学
岩盤内グラウト充填状況の評価	猪狩 哲夫 株式会社間組
セメントミルクの濃度と注入特性の関係	谷 智之 東京電力株式会社
グラウチングの仕様と充填状況の違い—亀裂性岩盤における実験的研究—	神藤 健一 前田建設工業株式会社
高濃度低圧型グラウト注入工法(HTLPE工法)の提案と検証	武藤 光 青山機工株式会社
動的グラウチング工法の開発	平 治 株式会社 鴻池組

FIRI **1999年時点におけるダム基礎グラウチングの技術的課題**

ダム基礎グラウチングの技術的課題を4項目に分けて整理 (山口嘉一)

ワークショップ「グラウチング注入技術の課題」
 (社)システム総合研究所グラウチング技術委員会主催 (1999年 10月1日)

① 注入材料
 ② 注入工法
 ③ 注入仕様(グラウトの配合設計)
 ④ 注入効果判定

FIRI **1999年時点におけるダム基礎グラウチングの技術的課題**

注入材料

- 高安定性グラウト
 - セメントベントナイトグラウト
 - 粘土セメントグラウト
- 高浸透性グラウト
 - カオリン粘土混合グラウト
 - シリカフュームグラウト
 - 表面改質超微粒子セメントグラウト
- 高透水性岩盤用グラウト
 - モルタルグラウト
 - 急硬材を添加したセメントグラウト

注入工法

- 割裂方向制御グラウチング
- 動的グラウチング工法
- 粉体圧送グラウチング工法

注入仕様

- "Thick or thin?"

注入効果判定

- 透水試験結果分析の高度化
 - 透水性の空間分布推定
 - 中央内挿法結果の効率的利用
 - パーコレーション理論の適用
- 透水性以外の指標の導入
 - ジオトモグラフィ
 - 力学的改良効果の評価

グラウチング技術指針改訂(2003年)の概要

改訂のねらい

安全性を損なわないことを前提とした
グラウチングの合理化

- I 本来の施工目的・施工範囲の明確化
- II 基礎地盤に適したグラウチング
- III グ라우チング計画の継続的見直し

I 本来の施工目的・施工範囲の明確化

(1) コンソリデーショングラウチング

旧指針 基礎岩盤の変形性の改良、堤体接触部付近の遮水性の改良を目的とし、基礎岩盤全面に施工

改訂案 以下の2つの目的に区分

①遮水性の改良目的

動水勾配が大きい基礎排水孔から堤敷上流端までの浸透路長が短い部分の遮水性の改良

②弱部の補強目的

不均一な変形を生じるおそれのある、断層・破碎帯、強風化岩、変質帯等の弱部を補強

(2) ブランケットグラウチング

旧指針 コアゾーンと基礎岩盤の接触部の遮水性の改良を目的とし、コア敷全域に施工

改訂案 動水勾配が大きいコア着岩部付近の割れ目を閉塞するとともに、遮水性を改良することを目的とし、コア着岩部全域に施工

(3) カーテングラウチング

旧指針 貯留水の浸透の抑制、揚圧力の軽減を目的とし、所定の改良目標値に達しない範囲及びサーチャージ水位と地下水位が交わる範囲に施工

改訂案 浸透路長の短い部分と貯水池外への水みちを形成するおそれのある高透水路部の遮水性の改良を目的とし、地盤に応じた範囲に施工

(4) その他のグラウチング

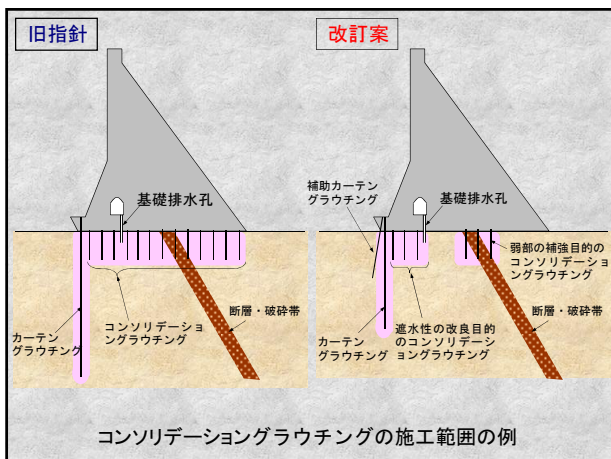
①コンタクトグラウチング

コンクリートの硬化収縮等により堤体と基礎地盤の境界付近に生ずる隙隙に対し、コンクリートの水和熱がある程度取まった段階で実施するグラウチング

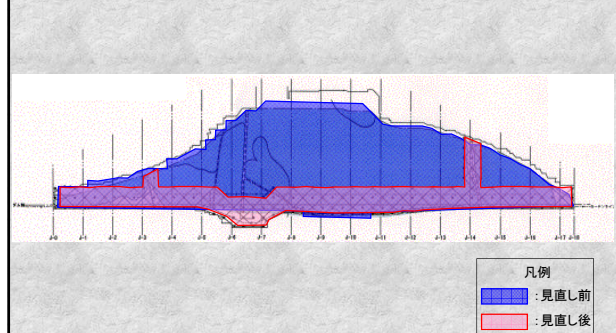
重力式コンクリートダムのアバット部における急勾配法面や、ロックフィルダムの監査廊周りなどで実施。

②補助カーテングラウチング

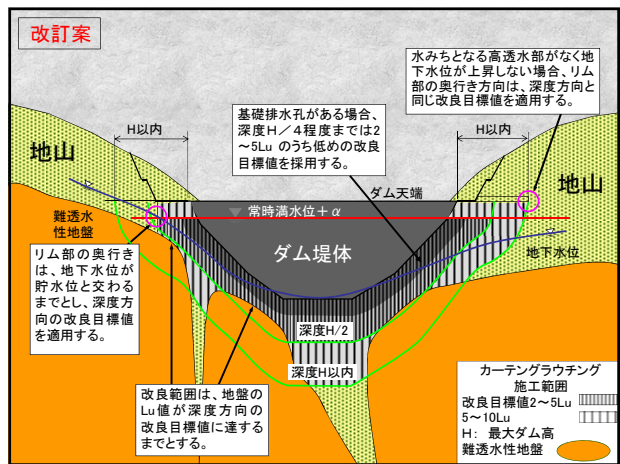
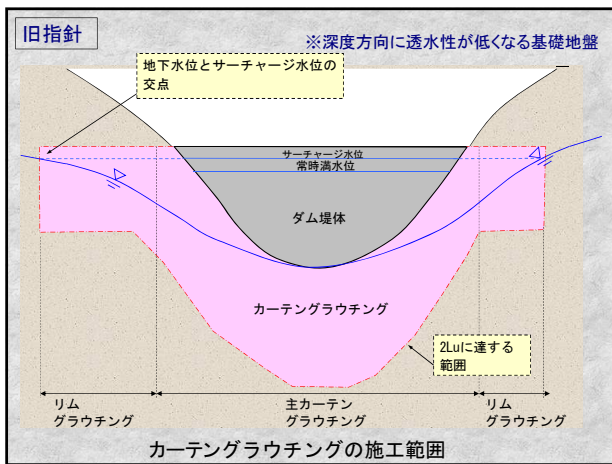
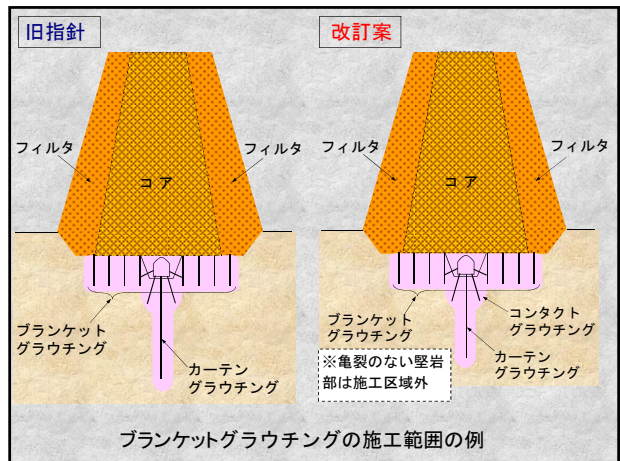
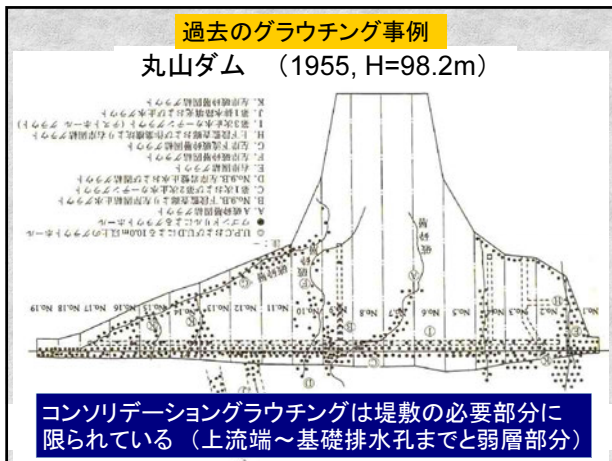
カーテングラウチング施工時のセメントミルクのリークを防止するために、先行して実施されるグラウチング。



3.2 コンソリデーショングラウチング



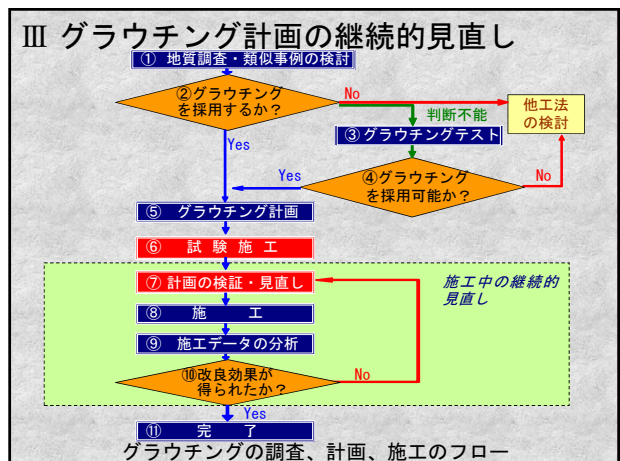
琴川ダム(H=64.0m)における見直し前後比較

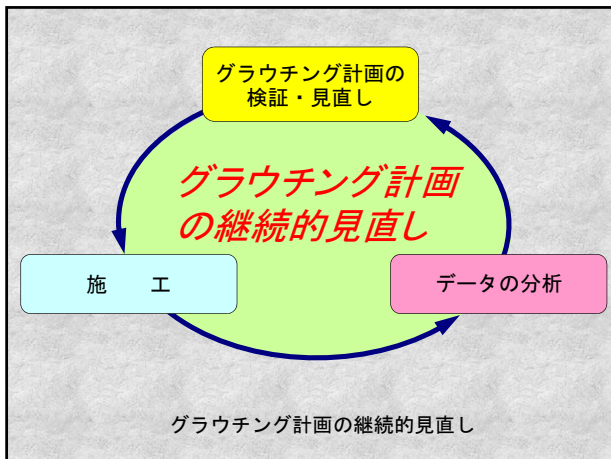


II 基礎地盤に適したグラウチング

(1) ダム基礎地盤の分類

応力解放・クリーブ	応力解放・クリーブ以外の地盤	粒子間の間隙
花崗岩などの深成岩、片麻岩などの変成岩、古第三紀以前に生成された堆積岩など	断層・破砕帯 冷却節理など 溶岩や高溶結の火砕岩、褶曲軸部の割れ目、貫入岩周辺の割れ目など	新第三紀新新世後期以降の堆積物、溶岩の自砕粒、低溶結の火砕流堆積物、風化岩など





改訂指針適用に当たっての留意点

- ▶ 単なる割り切りで合理化を図ったり、他ダムで実施された合理化対策であるという理由だけから、当該サイトへの適用性を検討せずに適用したりすることは厳に慎まなければならない。
- ▶ 現場技術者の適切な技術的判断が必要
- ▶ ダム基礎グラウチングの合理化は、ダム技術者が誇りをもって取り組むべき重要な課題

改訂指針適用に当たっての具体的な課題

- カーテングラウチングに関する課題
- コンソリデーショングラウチングに関する課題
 - 「遮水性の改良」目的のコンソリデーショングラウチング
 - 「弱部補強」目的のコンソリデーショングラウチング
- その他

改訂指針適用に当たっての具体的な課題

- カーテングラウチングに関する課題
 - 規定孔次数の設定(低減)
 - 改良目標値の緩和
 - チェック孔において改良目標値の超過率が大きい事例の出現
 - ダム高(H)以深に分布する高透水性ゾーンの処理
 - 施工すべき最低深度
 - (常時満水位+ α)を基準とした改良目標値の緩和およびリム部の施工範囲の設定
 - 2ステージ一括注入

カーテングラウチングに関する課題

(1) 規定孔次数の設定(低減)

- 規定2次孔(3m間隔)を、試験施工による妥当性検証をせずに採用している事例がある。
- ▶ 対象地盤の水理地質特性に応じたグラウチング計画の立案が重要
- ▶ 上下流走向の高角度亀裂に起因した透水経路を処理し残す可能性がある場合などは、3次孔までを規定孔とした試験施工結果から規定2次孔の妥当性を検証
- ▶ 浸透路長が短い浅部と浸透路長が長い深部とではカーテングラウチングによる遮水膜に要求される程度が異なるため、規定2次孔の設定に関する検討のレベルに差をつけることは妥当

カーテングラウチングに関する課題

(2) 改良目標値の緩和

- 対象地盤の遮水性改良限界に達したと判断し、当初設定の改良目標値を緩和してグラウチングの終了を検討する場合がある。
- ▶ 複列化など幅を持たせた遮水膜で対応
- ▶ 卓越した水みちが残存せず、概ねダルシー則に従うような浸透状況にあることが前提
(ボーリングコアやポアホールテレビ画像などをを用いた評価)

カーテングラウチングに関する課題

(3) チェック孔において改良目標値の超過率が大きい事例の出現

- チェック孔の段階で、改良目標値を満足しないレジオン値を示すステージが多く出現する場合がある。
- ▶ チェック孔に対する追加孔施工の検討ではなく、**グラウチング計画(仕様)自体についての分析**が必要
- ▶ 一方、チェック孔は最終次数孔とのダブルチェックの意味合い
 - ↓
- ▶ 土木研究所では、旧指針適用の既往実績を分析することによりチェック孔省略の可能性についての検討を**研究的**に実施

カーテングラウチングに関する課題

(4) ダム高(H)以深に分布する高透水性ゾーンの処理

- 深部(リム部水平深度を含む)の高透水性ゾーンについて、ダム高(H)程度で改良深度を打ち切る検討をする事例が見られる。
- ▶ 深部の高透水部の**三次元的分布**、特に上下流方向分布を明らかにする調査が必要
 - ↓
 - 水理地質特性に応じた対応**
- ▶ 深部に未処理の高透水性ゾーンを残す場合には、試験湛水中の下流浸透流や地下水位(圧)分布などの**モニタリング**を適切に計画して実施することが必要

カーテングラウチングに関する課題

(5) 施工すべき最低深度

- ▶ 調査・設計段階における地質調査のグリッド間隔はカーテングラウチングの規定孔間隔はもちろんのこと、12mのパイロット孔間隔に比べるとかなり広い。
- ▶ 調査・設計段階における地質調査における評価のみをもってカーテングラウチングを施工しないという判断をすることは難しい。
- ▶ 浸透流制御上で最も重要な浅部における遮水性を確保するために、ある程度の深度までは、カーテングラウチングを施工すべき最低深度を規定しておく必要がある。

カーテングラウチングに関する課題

(6) (常時満水位+ α)を基準とした改良目標値の緩和およびリム部の施工範囲の設定

カーテングラウチングの施工範囲と改良目標値

カーテングラウチングに関する課題

(7) 2ステージ一括注入

- ▶ 2ステージ一括注入を実施する場合でも、本来5m区間1ステージの注入を基本としていることから、透水試験(レジオンテストあるいは水押し試験)は5m区間1ステージ毎の実施が基本

<本シンポジウム投稿論文>

- ・嘉瀬川ダム(検討のみ、未実施)
- ・森吉山ダム(実施)
- ・石河内ダム(実施)

改訂指針適用に当たっての具体的な課題

2. コンソリデーショングラウチングに関する課題

2.1 「遮水性の改良」目的のコンソリデーショングラウチング

- (1) 基礎掘削線上昇に伴う施工量の増加
- (2) 基礎排水孔より下流側の施工

2.2 「弱部補強」目的のコンソリデーショングラウチング

- (1) 施工範囲の設定

FMRI コンソリデーショングラウチングに関する課題

「遮水性の改良」目的のコンソリデーショングラウチング

(1) 基礎掘削線上昇に伴う施工量の増加

➤ コンソリデーショングラウチングを「遮水性の改良」と「弱部補強」とに目的を分けた上で、それぞれの目的に応じて適切な箇所施工することにより施工量を大幅に減少させることが可能となった。

➤ 基礎掘削量の減少を検討するようになったため、**高透水の岩盤を浅部に残す**ことを前提とした基礎掘削線に設定することがある。

➤ **基礎浅部の改良度が悪く**、結果的に施工量が増加したり、堤体コンクリート打設工程に影響を及ぼす場合がある。

➤ ある工種において検討する合理化案については、それが**他の工種に与える影響**についても十分検討した上で総合的な評価を行う。

FMRI コンソリデーショングラウチングに関する課題

「遮水性の改良」目的のコンソリデーショングラウチング

(2) 基礎排水孔より下流側の施工

コンソリデーショングラウチングの種類と施工範囲

FMRI コンソリデーショングラウチングに関する課題

「遮水性の改良」目的のコンソリデーショングラウチング

(2) 基礎排水孔より下流側の施工

➤ 基礎排水孔を取り囲むように「遮水性の改良」目的のコンソリデーショングラウチングを施工すれば、旧指針時の堤敷全面にコンソリデーショングラウチングを施工していた場合とほぼ同様な浸透状況下で基礎排水孔からの排水量の安全管理が行えると考えられる。

➤ 当初計画として基礎排水孔を取り囲むように「遮水性の改良」目的のコンソリデーショングラウチングを施工することを計画していない場合でも、基礎排水孔周辺地盤の未改良時の透水性が大きく、かつダム高が高い場合には、「遮水性の改良」目的のコンソリデーショングラウチングの施工範囲内に基礎排水孔を取り込むことを検討する必要がある。

FMRI コンソリデーショングラウチングに関する課題

「弱部補強」目的のコンソリデーショングラウチング

(1) 施工範囲の設定

➤ 基礎地盤に作用する応力を考慮して、断層・破砕帯・変質帯・強化部等の弱部を施工範囲とする。

➤ 弱部の設定が各ダムで必ずしも統一されたものになっていない

FMRI その他

1. 透水試験の合理化・高度化

① 無段階水押し試験

② 不飽和軟岩地盤における長時間透水試験

2. 浸透破壊抵抗性の評価

FMRI 結論に代えて

汗もかかず
知恵も絞らない
合理化はあり得ない！

それは単なる手抜きである！

一方、合理化検討から逃げてはダメ！

今後の水理地質構造調査に必要と考えられること

佐々木 靖人¹

グラウチング技術指針が改定され、止水範囲や改良目標が合理化されたが、これは水理地質構造の的確な把握を前提としている。しかし近年も基礎漏水などの事例が散見され、その原因の多くは地質調査の未熟さに起因する。今後必要な調査技術として、①水理地質構造に応じたボーリング配置などの地質調査計画技術、②水理特性に基づく地質分類・岩盤分類技術、③ルジオンマップの品質向上技術、④岩盤中の空隙の分布・ネットワークの詳細調査技術、⑤岩盤の被注入特性の事前確認技術、⑥浸透経路・漏水経路の調査技術、⑦止水層（難透水層）の連続性確認技術、⑧上記を含めた水理地質構造調査の体系化・標準化、などがあげられる。

キーワード: グ라우チング, 水理地質構造, 岩盤分類, 地質調査,

1. はじめに

グラウチング技術指針¹⁾の改定により、止水範囲や改良目標の考え方が合理的となった。一方で、これまで仕様規定的に、いわば愚直に行われていたグラウチングが性能規定的に緩和された部分もあるため、調査や設計のほころびから、まさに「水が漏れ出す事例」が散見されている。

自然地盤は人工構造物と異なり不均質性が極めて高く、水はどこか一箇所のほころびであっても見逃してくれない。チェック孔で確認すれば「性能」を満たしていると判断する人間の過信を、自然はあざ笑っているかのようである。しかしそれでも自然と折り合いをつける余地はあるはずである。そのためここでは謙虚に問題発生事例を観察し、今後何が必要か考えてみたい。なお、止水上の問題は水理地質構造調査の課題と止水設計上の課題があるが、著者の専門から、本稿では主として水理地質構造調査の課題について考察する。

2. 止水上問題となる地質の分類と「止水性岩盤分類」の必要性

2.1 止水上問題となる地質の分類

軽微な問題も含め、ダム基礎が止水上問題となった事例としては、「漏水」、「所定の改良がなかなかで

きない」、「重力式コンクリートダムにおいて基礎の揚圧力が設計より高い」といったものが多い。そこで、このような事例を生じた地盤について経験的に整理すると、問題となる地質は以下のように分けられる（ただし他にもあるかも知れない）。

- ① 大空隙タイプ（超高透水性地盤）
- ② パイピングタイプ（低浸透破壊抵抗性地盤）
- ③ 微細空隙タイプ（改良限界性地盤）
- ④ 袋小路空隙タイプ（狭改良範囲性地盤）
- ⑤ 遮水層タイプ（水理地質構造規制地盤）
- ⑥ 複合地盤タイプ（上記の複合地盤）

工事が始まってから問題が生じないように、地質調査の早い段階で①～⑥の地質分類を実施するとともに、これらの大まかな地質分布等に応じたボーリング配置などの地質調査計画を立案して各地質タイプの分布や性状を把握しておく必要がある。

2.2 止水性に着目した岩盤分類の必要性

工事が始まってから問題が生じないように、地質調査の早い段階で、2.1節で述べた①～⑥の地質の分布や地質工学的な性状を把握しておく必要がある。ところが従来の土木地質調査は、力学的な側面を重視した調査体系となっているので、やや不十分である。とくに岩盤分類についてみると、力学性を把握するための分類方法になっており、止水性に着目した岩盤分類はあまり見あたらない。上記①～⑥のタ

¹ 独立行政法人土木研究所 地質・地盤研究グループ 地質チーム, 上席研究員

イプと、その問題の程度を組み合わせ、「止水性岩盤分類」を考案していく必要がある。また、「止水性岩盤分類」において、岩盤等級が劣っている場合には、より詳細な調査・試験を実施していくような水理地質構造調査の調査体系も必要である。

ところで、止水性岩盤分類という、「現場では既に水理地質構造を考慮した地質分類を行って断面図等を書いている」といわれる人もいるだろう。

「ダム建設における水理地質構造の調査と止水設計」（土木学会,2001）³⁾の4.3節「水理地質構造図の作成方法」では、そのような手法の例を示している。この中では、通常地質図やルジオンマップのほか、割れ目頻度図、割れ目の酸化・褐色化汚染分布図などの要素区分図の例も示している。また、実際の現場では、ルジオン値と岩種との関係・深度との関係・風化度との関係等をグラフ化した上で、

「深度〇〇mまでは風化高透水ゾーン」、「それ以深は新鮮・難透水ゾーン」、といった水理地質構造分類を行って止水範囲決定の参考にしているものもある。たしかにこれらは止水範囲を決めるために参考になる図ではあるが、いわゆる岩級区分図のように総合評価図ではなく、また、止水設計に直接結びつけるには不確定要素が大きい。たとえば上述した後者の方法などでは、深部で高透水ゾーンが局所的に存在するにもかかわらず「グラフによると〇〇mより深部は大半が難透水」などと楽観的に考え、「新鮮・難透水ゾーン」と命名したりしている。このような方法で分類された断面図が信頼できるはずはない。なぜなら冒頭述べたように、「水はどこか一箇所ほころびであっても見逃してくれない」からである。現在、止水設計に直接結びついているのはルジオンマップであるが、できればルジオン値に加えて、止水性の要素を付加した総合評価断面図ができれば、止水設計の合理化に結びつくのではないだろうか。

2.3 ルジオンマップの品質向上

ルジオンマップ自体の描き方にも相当の問題がある。それは主として等ルジオン値線の描き方・つなげ方である。たとえば、上下流方向の断面図に、ボーリングが2孔あったとすると、ダム軸上で高いル

ジオン値が得られていても、下流側のボーリングデータに高いルジオン値がないと、「高透水部の上下流への連続性はない」などと平気で書いたりしている。亀裂の方向がやや斜め方向なだけで、見かけ上、高透水が連続しないことは良くあることであり、水理地質構造の成因や三次元的な検討を通じて適切な構造評価を行うことが望まれる。

以上、少し横道にそれたが、以下では、上記①～⑤の地質分類の各タイプの概要と対処方法（水理地質構造調査等で必要と考えられること）について思いつくものを述べる。

3. 各地質タイプの概要と対処方法（水理地質構造調査に必要と考えられること）

3.1 大空隙タイプ（超高透水性地盤）

(1) 概要

大開口亀裂や空洞などにより、透水性が極めて高い地盤である。大開口亀裂の定義は特にないが、通常のグラウチングで対応できる開口亀裂はせいぜい1～2cm程度と思われるので、概ねこれ以上の開口亀裂、2～3cm程度以上の開口亀裂が存在するようなものがそれにあたる。もちろん開口量だけでなくその広がりも重要であり、大きな開口亀裂があってもその範囲がきわめて狭ければ通常のグラウチングで対応できることも多い。ただし問題は、このような大開口亀裂がなぜ発生しているのかという点である。この解明なしに止水設計はあり得ない。大規模な重力性のゆるみ岩盤や初生的な岩すべりなどであれば、止水以前に、ダム基礎としての適否が問われる。ちなみにゆるみ岩盤について佐々木・片山・倉橋(2005)³⁾では、亀裂の開口幅が1～3cm程度のものを「中ゆるみ」、3cm以上のものを「強ゆるみ」や「極大ゆるみ」としており、「中ゆるみ」以上の岩盤は、たとえダム基礎となっても超高透水性地盤として止水上大きな問題になると覚悟しなければならない。

開口亀裂の成因は様々であり、例を挙げると以下のようなものなどがある。

- ① 冷却節理
- ② 自破碎溶岩（溶岩の流動・破碎）に伴う開口

亀裂

- ③ 溶結凝灰岩の二次流動（溶結凝灰岩が半固結時に重力により流動）による開口亀裂
- ④ 引張応力場での断層や構造的節理
- ⑤ シーティングジョイントなど除荷による開口
- ⑥ 方解石脈の溶脱
- ⑦ 風化等による断層部や変質粘土部などの脆弱部の開口や流出
- ⑧ 重力性変形（ゆるみ）
- ⑨ これらの複合

このほかに、空洞による高透水もある。空洞の成因は火山岩類については火山岩に含まれる火山性ガスや、溶岩が河川等の水を持った部分に流れ込んだ際の水蒸気的作用によるものなどがある。堆積岩については後述する低浸透破壊抵抗性地盤のパイピングなどがある。

(2) 対処方法（水理地質構造調査に必要と考えられること）

以上のように、大空隙タイプは、ダム基礎の力学的な面からも注意が必要なものであるため、対処方法としては避けることが賢明であるが、ボーリングコアによる調査では開口量や亀裂の伸びの方向などが把握できない場合が多いため、ボアホールカメラ等を用いた亀裂調査や空洞調査が重要になってくる。

また、成因によって開口亀裂等の分布や性状は異なるので、成因を明らかにすることが必須の作業である。このためには、やや専門的な地質学的調査を行う必要がある。たとえば「方解石脈の溶脱」が原因である場合、方解石脈等の鉱物脈・変質脈等が地層のどのような部位・方向・連続性・厚さで分布するか把握する必要がある。また、方解石脈は、岩種により脈の形成パターンが異なるので、岩種毎に整理することも重要となるし、脈は過去の応力場に関係して一定の方向性を持って分布することが多いので、過去の応力場に関係する岩脈・断層等も調査することが望ましい。さらに、溶脱は大半が風化や地下水の影響によるので、風化の深さ・程度や地下水位分布等を把握することで、溶脱エリアを絞り込むことにつながる。このような地質調査は、ややもすれば一見「ダムとは無関係な調査ではないか」と思

われることもあるが、地質技術者と議論し納得した上で、きちんとした調査を行う必要がある。

3.2 パイピングタイプ（低浸透破壊抵抗性地盤）

(1) 概要

パイピングしやすい地盤である。砂層や火山灰層などの未固結細粒地盤だけでなく、水浸により軟質化しやすい低固結細粒地盤もこれに含まれる。これらの地盤はパイピングしやすいだけでなく細粒かつ軟らかいため、注入圧により変形・水圧破碎しやすい。このため、セメントミルクは割裂注入（脈状注入）となりやすい。これにより、注入・固化できない領域が発生し、その部分が止水改良されない（この点までは次節の微細空隙タイプと同様）だけでなく、層理面やグラウト脈沿いに水の流れを生じ、そこからパイピングを生じるため、結果的に改良が困難となる。

(2) 対処方法（水理地質構造調査に必要と考えられること）

パイピングタイプはグラウチングによる改良が困難なため、避けることが賢明である。そのためにはこのような地層の分布を抑えておく必要がある。パイピングタイプは、比較的新しい時代の地層が多いので、断層等で途切れておらず連続性が高いことがある。その一方で、陸成堆積物の場合は、過去の地形に規制されて分布するので連続性が乏しかったり、側方に層相・地質性状が大きく変化することもある。したがって、地質のタイプ・成因に応じて踏査・調査坑・ボーリング等の調査範囲や調査密度を考える必要がある。

また、パイピングタイプは新しい地層が多いため比較的的水平～低角度に分布しやすいので、ダム基礎に分布する場合は調査坑よりもボーリングにより把握することが多くなるが、地質が極めて軟質のため、ボーリングでは乱してしまったり、流失させることもあるので、ボーリングコアにより性状を知るためには高品質ボーリングが必要である。

パイピングタイプの地層であっても、比較的パイピング抵抗性が高い場合はダム基礎になることもあるが、その場合はパイピング抵抗性や止水可能性を適切に評価することが必要になる。この際は、地質

性状や各地層の硬さなどを適切に分類したうえで、代表的な試料で所定の詳細調査を行うことになる。詳細は山口(2001)⁴⁾などを参考にされたい。

3.3 微細空隙タイプ（改良限界性地盤）

(1) 概要

地盤の基質の空隙が微細でグラウトミルクが入りにくい地盤である。風化花崗岩（マサ）や未固結砂（礫）層や低固結砂（礫）岩層等がこれにあたる。地盤としてはパイピングタイプと重複する場合も多々あるが、止水困難となるメカニズムが異なること、パイピングするほど脆弱でない締まった風化花崗岩（マサ）等でもグラウチングによる改良が困難な場合もあることなどから、分けて分類した。

このタイプの典型的な地盤であるマサは、単なる砂層等とは異なり、もともとは密実な花崗岩である。花崗岩の鉱物粒子間の空隙はほとんど無く密着している。風化により鉱物粒子が分離すると空隙が生じるが、元々密着していたものが離れるので空隙もフィルムのように薄く平べったい幾何形状をしている。「空隙の連続性は高いが、どの空隙も平べったく薄い」ため、「水は通すがセメントミルクは入りにくい」状況が生じると推定される。

未固結の砂礫層でもこのタイプに属するものがあるが、基質は粘土混じり土砂ないし細粒砂のものが多く。これも同様に、「空隙量や空隙の連続性は高くても空隙径が小さい」ため、マサと同様な状況が生じると推定される。

これらの地盤は、ある程度のルジオン値までは容易に改良されるか、あるいは、もとある程度難透水であることさえある。しかし改良目標値（2Lu、あるいは5Lu）までなかなか届かない。

(2) 対処方法（水理地質構造調査に必要と考えられること）

このような地質は、超微粒子セメントを用いると止水できることがある。しかし、事前の地質調査では通常のセメントミルクで注入できるのかが不明なことが多い。このため従来は、現場でのグラウチングテストが行われていたが、テスト費用が高額であることなどから、必ずしも事前のグラウチングテストを実施しないことが多くなってきた。そこ

で今後必要な技術として、事前にボーリングコアなどを使った「サンプルサイズでのグラウチングテスト」ができればよいのではないだろうか。実用化においてはサンプルサイズでの試験による改良特性と現場サイズでの改良特性との比較検証などを行っていく必要があるが、ある程度の止水可能性の目途を簡易に判定できる方法ができれば良いと思われる。

3.4 袋小路空隙タイプ（狭改良範囲性地盤）

(1) 概要

あるダム現場の花崗岩で、「ピンコロ」、つまり石畳用の石のように正形状のテクトニックなクラックが密に入った岩盤があった。亀裂面は総じて狭いため極端に大きな透水性ではなかったが、亀裂面に凹凸が多く亀裂の空隙幅の膨縮が著しいようであった。このダムサイトでは、このような岩盤である上に小断層の発達やマサ化も生じて透水経路がさらに複雑になっており、結果的に十分な改良が難しく、試験湛水時に漏水が見られた。

このように、①複雑な亀裂面、②複雑な亀裂ネットワーク、の両方を兼ね備えた岩盤では、空隙はまるで「袋小路」のような構造になっている。このため上記①の原因によりセメントミルクは板状でなくチャネル状になるとともに、上記②の原因によりセメントミルクは分岐しやすくなる。このためセメントミルクは細かな樹枝状に分岐しつつ流れるので、末端では注入圧力が低減しやすくセメントミルクが遠くまで到達しない。このため、一見注入量が低減し注入圧力も上がり改良が進んだように見えても、改良範囲は狭く不規則で、未改良範囲を残しやすくなると考えられる。

このような複雑な亀裂を持つ岩盤としては、テクトニックに破碎された岩盤や変質岩の一部、あるいは冷却節理の一部などで、同様の状況が発生し得ると考えられる。

(2) 対処方法（水理地質構造調査に必要と考えられること）

まず必要なのは、岩相や亀裂性状の観察により、「袋小路空隙タイプ」ではないかと気づくことであるが、これまで、この種の岩盤がどのような肉眼的な性質を持っているか明確にしたものは見あたらない

いので、まずは（水理地質構造調査法の研究として）経験事例を踏まえて「袋小路空隙タイプ」の特徴を明確化する必要がある。

地質調査においては、微細な亀裂が多い岩盤は地質分類や岩盤分類時に区別しておき、亀裂の密度・性状・分布を地質調査で明確化しておくことが必要である。また上の事例で述べたように、単に亀裂質の岩盤であるだけでなく、小断層の存在や風化（マサ化など）と相まって未改良区間が発生しやすいと考えられることから、これらの地質性状との分布関係もよく調査しておく必要がある。

止水設計上は、グラウチングテストなども行ってみることを望ましい。

3.5 遮水層タイプ（水理地質構造規制地盤）

(1) 概要

これまで、高透水層や難止水層について説明してきたが、「遮水層タイプ」は、基本的に難透水層を含む岩盤である。何故これが問題となるのか。それは、このような難透水層が「遮水層」ならぬ「遮グラウトミルク層」となって注入範囲を制限してしまうためである。このような遮水層が5～10mなど、一定以上に厚く連続性が高い場合は、むしろこの遮水層を活用して止水範囲を縮減できるというメリットもあり、実際にそのような止水設計が多く行われている。しかし遮水層が薄い場合や、連続性が乏しい場合には、遮水層が邪魔者になることもある。このような地層としては、粘土質の小断層や変質脈、側方変化の著しい泥岩層や細粒凝灰岩層などがある。薄い遮水層を含む岩盤は大変多く、通常は特に問題なく止水されていると思われるが、特に高透水の岩盤や3.4節で示したような岩盤の場合、また、遮水層が上下流方向に特定の方向性を持っている場合など、通常の注入孔間隔では未注入区間を残す可能性がある。また、遮水層でなく、開口亀裂などが上下流に伸びる場合も、この開口亀裂がグラウトミルクの左右岸への広がりを抑制してしまうので、結果的に遮水層と同様の効果をもってしまうこともある。

また、厚い遮水層でも、設計上問題になる場合がある。それは重力式コンクリートダム基礎に分布する場合、地下水の流をせき止めて、ダム基礎の揚

圧力を上昇させる場合である。

(2)対処方法（水理地質構造調査に必要と考えられること）

遮水層を利用する場合と、問題として対応を考える場合の2つの場合があるが、いずれにおいても遮水層となる地層の分布・性状をよく調査することが基本である。

まず遮水層を利用する場合は、どのボーリング孔でも確実に一定以上の厚さが把握でき、しかも低レンジオンを2ステージ程度示す層があれば、遮水層として利用できる可能性がある。設計上はさらに、遮水層としての連続性・確実性を確認する地質方法があれば申し分ないが、現況ではなかなか良い調査方法がない。事例としては遮水層を隔てて一方で揚水試験や水圧パルス等により地下水水頭の変化を生じさせ、他方でその応答を観測する方法が行われた例もある。今後、遮水層の連続性・確実性をきちんと調査できる調査方法の開発・確立が必要である。

遮水層が止水上の問題となることが予想される場合は、遮水層の分布やその分布頻度等を正確に捉えるために、ボアホールカメラ等を用いて方向性や分布・連続性を確認することが必要である。止水設計上は、遮水層の分布幅よりも密に注入孔を配置したり、遮水層の方向性によっては注入孔の方向性も検討する必要がある。

ダム基礎の遮水層が揚圧力を上昇させる可能性のある場合は、ダム基礎掘削面のスケッチを綿密に行い、特に湧水個所の水量や湧水圧、水質などの情報を綿密に把握しておくことが必要である。

4. 地盤の不均質性、階層構造（複合地盤タイプの説明に替えて）

4.1 地盤の不均質性

注意しておきたいのは、2章の①～⑤のどれかのタイプのみにあてはまるものはむしろ少なく、複数のタイプの要素を持つ地盤（すなわち⑥複合地盤タイプ）が多いことである。この理由は、地盤の不均質性と階層構造による。これは自然地盤の基本的な性質のひとつである。グラウチングを行う上では、このことをまず認識しておく必要があるため、ここ

でタイプ⑥の説明を兼ねてやや詳しく述べておく。

まず地盤の不均質性について、花崗岩で考えてみよう。花崗岩は、基本的には比較的均質な岩のひとつである。しかし、地表付近では、節理沿いの風化等の影響により、未風化～弱風化の硬岩・亀裂性岩盤の様相を呈する部分と、節理沿いではマサ化し土質地盤の様相を呈する部分が極めて近接して分布することになる。

このような場でグラウチングを行うと、最初は未風化・弱風化部の連続性の高い亀裂に注入され、次に物性境界である弱風化部とマサ部の境界付近に注入され、さらに行き場がなくなるとマサの中に注入される。このため、注入初期は極めて良好に改良が進むが、途中から急に改良が進まなくなる。つまり注入初期と後期では、「違う岩」に注入しているに等しい。ここで、「注入初期と後期」とは、一回の注入の際の初期と後期、また、注入次数の進行における初期（一次孔等）と後期（三次孔、四次孔等）の、両場面において生じると考えられる。

したがってグラウチングを計画する上では、いくら「未風化・弱風化の岩が大半」であっても、わずかに（しかし上下流に連続して）分布する「マサ状部」の方を確実に改良できるように計画しなければならない。力学的な設計であれば、岩盤分類でCH級が大半であれば、多少CL級やD級が存在しても（それが力学的に問題となる方向に連続しない限り）CH級が主体として設計すればよいが、止水設計ではそうではないのである。このことは、ボーリング調査で地山評価している際に、見誤りやすい点である。すなわち、ボーリングコアでは、良質な部分は採取されやすいが不良なマサ部は採取されにくい。最近では採取率は向上しているが、乱されて採取することが多く、マサ状部の状況がわかりにくいので楽観視しないことが肝要である。

4.2 地盤の階層構造

自然地盤、特に岩盤の構造には階層構造がある。まず、細かく見れば鉱物粒子とその間の空隙で構成されている。もう少し広い目で見ると岩片と亀裂（空隙）からなっている。もっと広い目で見ると岩盤（岩体）と岩盤（岩体）の間には、断層等が存在

する。これらの結果、空隙はまるで血管のような構造となっている。

血管は、大動脈から毛細血管まで、樹枝状、フラクタル様の「広く見ても微細に見ても同じような構造」を持っているが、岩盤も、テクトニックな応力場において岩盤が破砕される際には、破砕構造はフラクタルな構造になることが知られている。すなわち、破砕による断層や亀裂の「長さ」と「数」の関係、あるいは、破砕により生じた岩片の「大きさ」と「数」の関係はべき状分布になり、広く見ても微細に見ても同じような破砕構造に見えるという。調べていないので何とも言えないが、このような岩盤では、空隙構造もフラクタル様の階層構造を持っている可能性がある。

さて、このような場でグラウチングを行うと、大まかには大空隙から微細な空隙へと順次セメントミルクが回ることになる。つまり注入初期と後期では、「違う階層（規模）の空隙」に注入していることになる。ここで、「注入初期と後期」とは、地盤の不均質性の際と同様に、一回の注入の際の初期と後期、また注入次数の進行における初期と後期の両場面で生じると考えられる。

ただし岩盤の空隙が血管と異なるのは、岩盤中の空隙は、大動脈からいきなり毛細血管につながっていたり、どこにもつながっていない血管があったり、至るところで閉塞され行き止まりになったりしていることである。駄洒落で申し訳ないが「欠陥のある血管」である。このため、ところどころで、脳梗塞や心筋梗塞のように、大空隙であってもセメントミルク（血液）が行き渡らない「未充填エリア」が生じることになる。しかし未充填エリアはどこにもつながっていないわけではなく、注入箇所Aから注入されにくいだけである。このため、別な注入箇所Bからは注入できる。このため、「改良できた」と判断したにもかかわらず、漏水などの問題が発生するものと考えられる。

ここで注入箇所Nからの充填エリアを「N充填エリア」、未充填エリアを「N未充填エリア」、同様に、注入箇所N+1からの充填エリアを「N+1充填エリア」、未充填エリアを「N+1未充填エリ

ア」と名付けよう。グラウチングでは、毛細血管までまんべんなく改良するというよりも、このような「未充填エリア」を確実に改良すること、少なくとも「未充填エリアが連続しないようにすること」が重要である。

水理地質構造調査に立ち返って考えると、調査においても、「N未充填エリア」、がどのようなものになるのかを推定できるような地質調査が必要になるだろう。それは、これまでのような力学的性を重視した調査ではなく、亀裂の方向性や連続性など、空隙分布・空隙ネットワークを詳細にキャラクタライズするような地質調査である必要がある。たとえば、柱状節理岩盤では亀裂の連続性が高くネットワークも発達しているので、「未充填エリア」は注入点よりかなり遠方になるだろう。したがって注入孔の配置もかなり合理化できる余地があるはずである。

また、これに関連して、いくつかのダムではグラウチングテストや試験施工の際に、色つきのセメントミルクや蛍光材料入りのセメントミルクを注入して、どの段階で・どのような亀裂に注入されていたかをボーリングコアやボアホールカメラで詳細に観察し、断面図に図化することで、注入過程が詳細に判明した事例もある。このような試みは非常に貴重なものであり、このような試みと事前の水理地質構造調査を併せて実施することで、地盤の注入特性が明確になってくる。このような試みが増えてくれば、どのような地質特性に留意すれば良いかも明らかとなり水理地質構造調査の技術が高度化するとともに、止水設計の技術全体も向上すると思われる。

5. おわりに

水理地質構造調査に関して今後必要と考えること、最近感じていることを、未整理のまま列挙してみた。これらの多くは、自分自身が研究していかなければならないものであるが、いくつかの現場では、先進的な調査や詳細な調査を試みておられる。そのおかげでそのサイトの水理地質構造の理解が進むだけでなく、今後の水理地質構造調査のあり方が見えてくる場合さえある。このような工夫がなされるのは、止水上の課題が発現した場合などに多い。良い工夫

をした調査を見ると、ピンチをチャンスに変えて、技術向上を図っていくことが重要だと再認識させられる。現場技術者の方におかれても、難しい地質であればこそ、技術向上のチャンスと考えて、上記のような点に配慮しつつ工夫のある調査・設計を行って頂ければ大変幸いである。

参考文献

- 1) (財)国土技術研究センター(編)(2003):グラウチング技術指針・同解説, (株)大成出版社, 87p.
- 2) 土木学会岩盤力学委員会(2001):ダム建設における水理地質構造の調査と止水設計, (社)土木学会, 丸善(株), 141p.
- 3) 佐々木靖人・片山弘憲・倉橋稔幸(2005):ダムにおけるゆるみ岩盤の実態と分類試案, ダム技術, No.228, pp.9-21.
- 4) 山口嘉一(2001):ダム基礎地盤の浸透破壊抵抗性調査マニュアル(案) 土木研究所資料, 第3839号, 85p.

(参考) ダム技術Q & A , No. 208, pp. 80-82, 2004.

グラウチングにおける水理地質構造の調査について

Q : グ라우チング技術指針が改訂されましたが、その中で謳われている「水理地質構造」の調査について具体的に御教示ください。

A :

1. 新指針と水理地質構造

今回改訂されたグラウチング技術指針は、性能規定化による合理的なグラウチングを目指すもので、改訂の柱として、地質状況に応じたグラウチングの重要性を強調しています。今回の改訂によると、ダムの機能や安全性を損なわないことを前提として、地質条件に応じた適切な規模のグラウチングが可能な内容となっています。

ここで、ダムの機能や安全性を損なう現象とは次のようなものです。

- ① ダム基礎ないし貯水池から下流ないし他流域への許容範囲を超える漏水
- ② ダム基礎や周辺地山の浸透破壊
- ③ ダム本体の浸透破壊（フィルダムの場合）

このような現象を防ぐためには、透水性の分布、地下水位の状態とその分布状況、浸透破壊抵抗性などの水理地質特性に着目した地質構造（水理地質構造）を十分に把握し、これに応じた止水対策を行う必要があります。

2. 水理地質構造調査の基本

水理地質構造の調査は、ダム基礎の地質調査をかねて行うのが効率的です。しかし、水理地質的な観点から見たダム基礎の範囲は構造力学的な観点から見たダム基礎の範囲よりも広く、また、貯水池からの漏水はダムの下流だけでなく隣接流域に及ぶこともあります。このため、水理地質構造の調査では広域的な視点を持つことが重要です。すなわち、構造力学的な観点から見たダム基礎の調査ではダムサイト周辺のボーリング調査や横坑調査が主体となりますが、水理地質的な観点から見た地質調査では、地形調査や広域地表面地質踏査も重要な調査となります。これらの調査が不正確では水理地質構造について大きな見逃しを生じかねません。貯水池周辺の地形判読図や地質図を作成し、広域の水理地質構造を推定しておくことは水理地質構造の

調査の基本です。

次に、水理地質構造の調査においては、ダム軸方向に加え、地下水流路方向に対する縦横断面図を作成して、問題となる地質の構造を3次的に把握することが肝要です。また、止水上利用できる可能性のある難透水層の連続性についても同様の観点で調査すべきです。

さらに、水理地質構造の調査は、一つの調査法に頼らず、総合的な観点で行うことが基本です。これは、水理地質構造が、開口亀裂や薄い難透水層などの見逃しやすい微細な地質性状に左右されやすく、また、やせ尾根やその年の降水量といった地質以外の要素にも影響を受けるためです。また、ボーリングやルジオンテストなどの地質調査によって推定された水理地質構造と地下水位分布やその変動などを対比することで、推定の妥当性を検証・評価することが必要です。

3. 地質分類と水理地質構造調査

3.1 地質分類

新指針では、水理地質特性に基づき、地質を大きく次の5種類に分類しています。

- a. 応力解放・クリープ
- b. 断層・破砕帯
- c. 冷却節理
- d. 粒子間の間隙
- e. その他（石灰岩など）

以降は上記の分類毎に調査の主な留意点を示します。

3.2 応力解放・クリープ（風化を含む）

このタイプは、もともとは止水上問題の少ない地質が、広い意味での風化に起因して高透水性や浸透破壊抵抗性の低い地質となったものです。このような現象は地表付近で生じますので、地質性状は深部ほど良好になり、水理地質構造が問題となる範囲も比較的浅い部分に限られます。このタイプは一般的な岩盤で普遍的に認められるため、新指針ではこれを標準タイプとして記載を行っています。また、風化が浅ければグラウチングの範囲も浅くできる可能性が大きいのもこのタイプの特徴です。調査の主なポイントは次のとおりです。

- ・空中写真判読や地形判読による応力解放、クリープ、強風化部などの範囲の推定

- ・弾性波探査などによる深さ方向の地質状況の推定
- ・ボーリングなどによる地質状況の確認
- ・横坑（必要に応じボアホールカメラ）などによる風化やゆるみの状況（開口亀裂の分布や連続性、累積開口量、開口亀裂内の挟在物、風化度、ゆるみの程度）などの確認と成因の推定、および地山の評価

3.3 断層・破碎帯

このタイプは、風化とあいまって断層沿いにやや深部まで高透水部や脆弱部が分布するものです。特に断層部が脆弱化している場合は浸透破壊の可能性もあります。そこでダム安全性や機能を損なう可能性のある方向性・性状を持つ断層については、詳細な水理地質構造の調査が必要となります。なお、断層は、粘土化して逆に難透水の場合もありますので、止水上、これを利用できる場合もあります。このほかにも、断層部分は難透水でその周辺は高透水である場合や、断層の上盤と下盤で水理性状が全く異なる場合など、さまざまなケースがあります。また、断層破碎帯は、膨縮、分岐、せん減など構造が複雑な場合が多いことにも注意する必要があります。調査の主なポイントは以下のとおりです。

- ・調査坑や質の高いボーリングによる断層の3次元的な分布と性状の把握
- ・ルジオンテストによる断層周辺の透水特性の把握
- ・断層を境とする地下水位や、ルジオンテスト時の周辺の水位変化の観測などによる断層付近の水理地質特性の確認

3.4 冷却節理

このタイプは、比較的新しい時代の火山岩や溶結凝灰岩などに生じている冷却節理により、高透水部などが深部まで分布する場合です。貫入岩の貫入に伴い周辺に形成された亀裂や、褶曲の軸部などにみられる造構節理なども同様に深部まで高透水を示すことがあります。

冷却節理は初生的に生じるため、岩体の地質学的な分類と地質構造の調査が基本です。なお、冷却節理には柱状節理や板状節理などいろいろなタイプがあり、総じて高角の柱状節理が発達する岩盤で透水性が高いことが多いようです。また、柱状節理などはお互いの節理がネットワーク状に連結していますので、1つの

冷却節理面が連続する場合だけでなく、節理の卓越するゾーンがマスとして連続するかどうか重要です。なお、鉛直ボーリングだけでは、ボーリング孔が高角度節理と交差せず、亀裂密度やルジオン値を過小評価する場合がありますので、必要に応じて斜めボーリングで確認することが有効です。調査の主なポイントは以下のとおりです。

- ・火山岩の地質的な分類、特にフローユニットやクーリングユニットの識別
- ・調査坑やコアによる冷却節理の分布や性状（節理密度、傾斜角など）の確認
- ・ボアホールテレビカメラなどによる亀裂の方向性や開口幅の確認（特に高透水の場合）
- ・各火山岩体の境界部などでの難透水ゾーンやこれに伴う多重地下水などの有無の確認
- ・冷却節理に隣接する自破碎部や非溶結部などの浸透破壊抵抗性の小さい部分の分布や性状の確認

3.5 粒子間の間隙

このタイプは、地質を構成する粒子どうしの接着が小さいものであり、主に新第三紀鮮新世以降の堆積岩（堆積物）にみられます。また、風化したマサなども、新しい堆積物と類似した性状を示すことがあります。

これらの時代の堆積岩（堆積物）は、浅い海や湖沼、あるいは陸域を埋積したものが大半です。このため、当時の地形や海水準変動などの影響で複雑に浸食や堆積を繰り返しており、同じ岩相が広く連続しません。このため水理地質構造の調査は、まず地層の分布と層相変化を把握することが基本です。また、このような地質は崩れやすく、また風化しやすいので、地山の状態を正確に把握できるように調査を工夫する必要があります。調査の主なポイントは以下のとおりです。

- ・踏査、調査坑、高品質ボーリング（必要に応じ大孔径、気泡、増粘剤などの特殊なボーリング）などによる地層の堆積環境、堆積関係、層相変化、地質性状の把握
- ・問題となる地層の成因と3次元分布の推定
- ・地下水位観測などによる帯水層、不透水層などの把握
- ・必要に応じて不攪乱試料による浸透破壊抵抗性の試験

3.6 その他の地質

このほかにも石灰岩や方解石脈の溶解による空隙・空洞化など、問題となる様々な地質があります。いずれの場合も、地質性状を詳細に観察し、高透水や低固結といった性状の成因を把握することが、水理地質構造の把握においては基本となります。

4. おわりに

水理地質構造とダム関わりの詳細については、本誌に連載された講座「地質現象とダム」（中村、2002-2003）にも多くの事例が紹介されていますのでご覧ください。

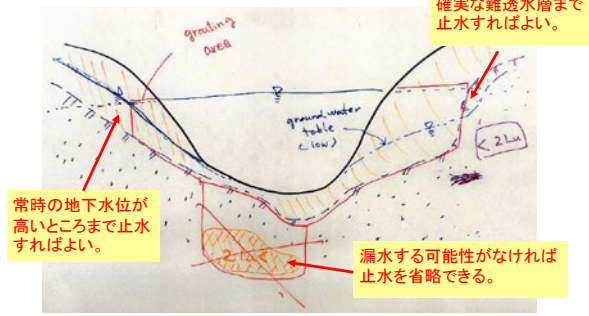
2011.10.07

ダム基礎グラウチングに関するシンポジウム

今後の水理地質構造調査に必要と考えられること

(独)土木研究所
地質チーム
佐々木靖人

グラウチング技術指針



止水範囲・仕様は水理地質構造次第で合理化可能。
→でも、きちんと調べられていることが前提。

ダム基礎に起因する止水上の問題例

1. 高透水、低地下水など止水範囲が広域
2. 低固結
3. 改良困難(施工時)
4. 基礎漏水(試験湛水時)
5. 揚圧力の上昇(試験湛水時)

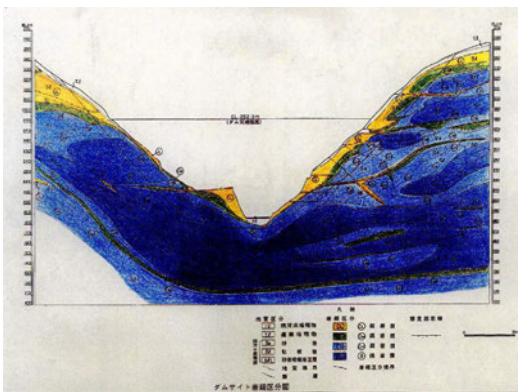
多くは、水理地質構造や被注入特性の事前調査不足に起因する。さらに調査の高度化・体系化が必要。

水理地質構造とは

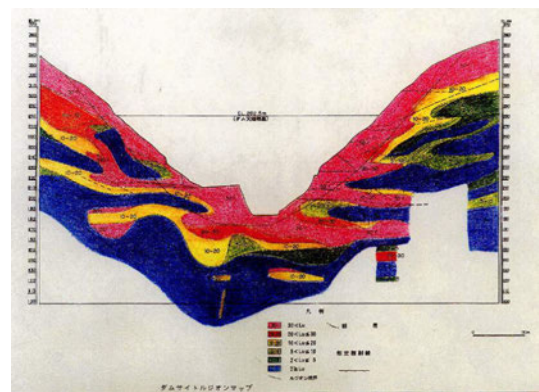
透水性、地下水位の状態、浸透破壊抵抗性等の水理地質特性に着目した地質構造。

(グラウチング技術指針・同解説,P.8)

岩級は良好でも . . .



高透水のことが多い.



岩は良くても亀裂1つで高透水に



低角節理の例

水理地質構造調査は、力学性に関する地質調査とは何が違うか

- 貯水池周辺の広域調査や、上下流方向の連続性に関する調査が重要
→異なる調査配置
 - 力学性に加え、空隙、地下水、止水性に関する調査が必要
→異なる観察・調査・整理項目
 - 岩級区分では、局所的にD級があっても平均値がCHなら良いが、止水では、局所的でも連続する大開口亀裂が残されていればダメである。
→極めて慎重な観察調査体系、地質学的推定に比重
- 「水理構造調査体系」を明確化する必要

今後必要と考えられること(結論)

- 止水上問題となる地質の分類・止水性岩盤分類技術
- ルジオンマップ、水理地質構造図の品質向上技術
- 岩盤空隙分布・ネットワークの詳細調査技術
- 岩盤の被注入特性の事前確認技術
- 浸透経路・漏水経路の調査技術
- 遮水層の連続性確認技術
- 上記を含めた水理地質構造調査技術の体系化 など

まずは水理地質構造分類(なぜ分類が必要?)

- ルジオンマップを描き止水範囲を決めるため: 同じ水理特性を持つ地質グループがどう分布するか推定する必要。
- 調査孔配置・注入仕様を決めるため: 被注入特性を推定する必要。(同じルジオン値でも改良が容易な場合とそうでない場合があるなど、ルジオンマップのみでは十分でない。)

どんな分類が必要?

- 岩質の分類(透水性、止水性ほか)
 - 水理地質分類 (どんな問題が想定される地質か)
 - 止水性岩盤分類 (透水性+改良しやすさ)
- 構造の分類
 - 水理地質構造の分類(流れの幾何学的分類)

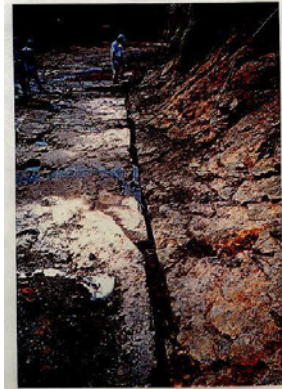
などが考えられる

グラウチング指針におけるダム基礎地盤の分類(これだけでは不十分)

応力解放・クリープ	応力解放・クリープ以外の地盤		粒子間の空隙
花崗岩などの深成岩、片麻岩などの変成岩、古第三紀以前に生成された堆積岩など	断層・破砕帯	冷却節理など 溶岩や高溶結の火砕岩、褶曲軸部の割れ目、貫入岩周辺の割れ目部など	新第三紀鮮新世後期降の堆積物、溶岩の自砕砕、低溶結の火砕流堆積物、風化岩など
			

止水上問題となる地質の分類(私案)

- ① 大空隙タイプ(超高透水性地盤)
- ② パイピングタイプ(低浸透破壊抵抗性地盤)
- ③ 微細空隙タイプ(改良限界性地盤)
- ④ 袋小路空隙タイプ(狭改良範囲性地盤)
- ⑤ 遮水層タイプ(水理地質構造規制地盤)
- ⑥ 複合地盤タイプ(上記の複合地盤)

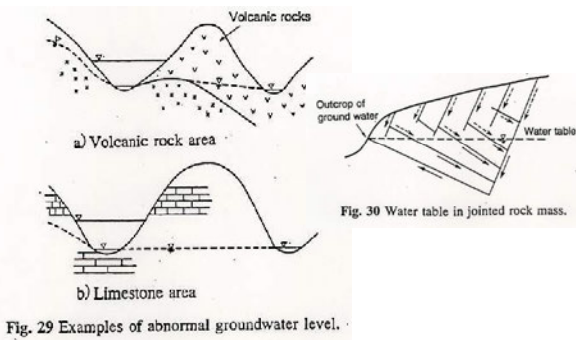


大空隙タイプの例

開口亀裂

Open crack

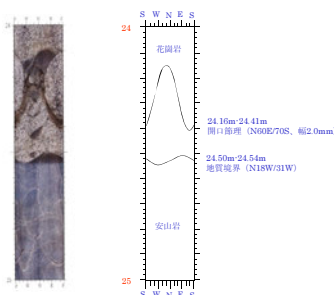
大空隙タイプに属する地質



(今後)クラックネットワークの詳細調査体系が必要

- ・大空隙タイプでは、ボアホールカメラ観察等による三次元ネットワークモデル化が必須
- ・透水層の連続性の連続性を確認する技術体系が必要
- 透水層の一部で水圧変化を生じさせ、他方で水位変化を計測するなど。
- ルジオンテストの際に、できるだけ他の既往孔で多段で水位変化を計測するなど、工夫できないか。

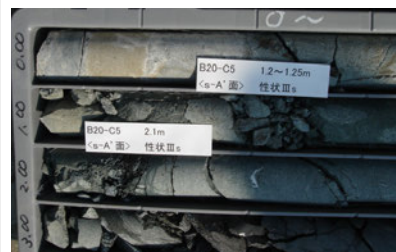
ボアホールカメラ



ボアホールカメラのデータとコアの亀裂等が一致しないことが多い。必ず対比作業が必要。また、ボアホールカメラ観察技術の向上・標準化が必要。

詳細なコア観察・記載も重要

→ クラック1つ1つの記載、1/5~10のコアスケッチなど



このダムでは薄い小断層が水理地質構造を左右するため、1つ1つの性状を詳しく分類して、連続性を明確にした。

試験施工時のクラック観察

施工時に、注入回数により異なる色のセメントミルクを入れて、どの亀裂にどの順番で注入されるかをコア観察・ボアホールカメラ観察するなど、工夫によりグラウチング過程も明瞭化。

(関連して今後)浸透経路・漏水経路の調査体系が必要

・試験湛水において漏水事例が散見されるが、浸透経路・漏水経路のよい調査方法がない・

→トレーサー試験、水質測定、水温測定、水圧変化応答試験等々を行っている現状。

→物理探査、原位置計測等々も含めて良い方法がないか。今後、調査の体系化も必要。

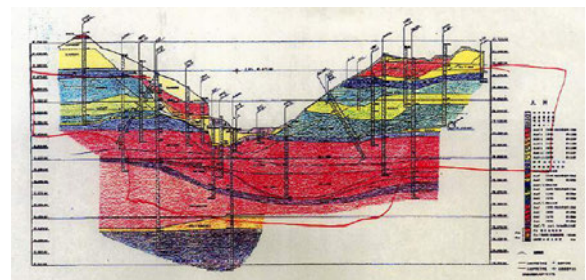
パイピングタイプの例

(大空隙タイプを兼ねる場合も)

火山灰層と空洞
Macro pore
(volcanic ash, erosive soil)



火山灰層を含むダムサイトの例



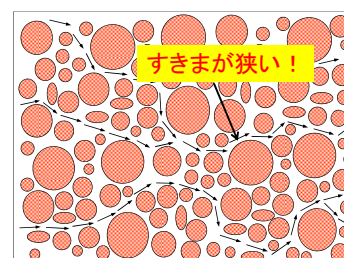
(今後)浸透破壊抵抗性の詳細調査体系が重要

・山口(2001):ダム基礎地盤の浸透破壊抵抗性調査マニュアル(土木研究所資料第3839号)

をさらに発展させてほしい。

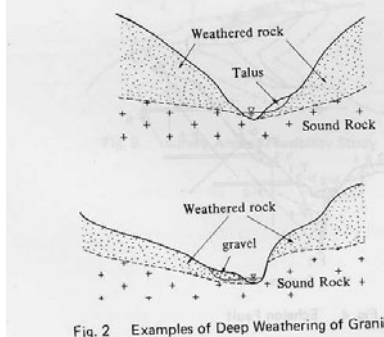
たとえば、孔内浸透破壊抵抗性試験などを土研で検討中

微細空隙タイプ



微細空隙タイプの例(風化岩)

マサなど風化岩は微細空隙・難止水



風化岩はなぜ微細空隙タイプになりやすいか。

マサなどの風化岩は、元々は鉱物粒子間が密着していたものが風化により離れたものであるため、隙間がそれほど離れていない空隙が相当程度存在する。
→「水は通すが、セメントミルクは通さない」状況に



新鮮岩の鉱物粒子配列

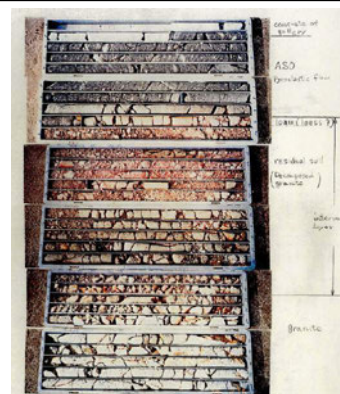
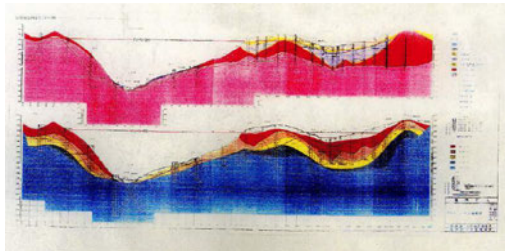


風化岩の鉱物粒子配列

微細空隙タイプの実事例

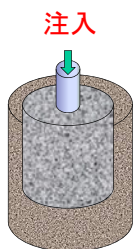
竜門ダムのマサ(九州)

Weathered granite



plateau type interval layer (decomposed granite and loess?, Ryumon Dam)

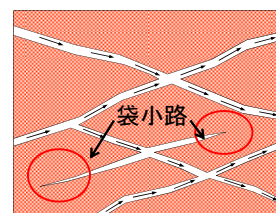
(今後)改良性確認のための新しい試験が必要?



- たとえば「室内改良性試験」:
マサなど、ボーリングコア等を用いて、どこまで改良できそうか簡易に試験できないか?

袋小路空隙タイプ

(左図のような袋小路が非常に多い岩盤がある)



袋小路空隙タイプの例

(細かなテクトニッククラックをもつ花崗岩)

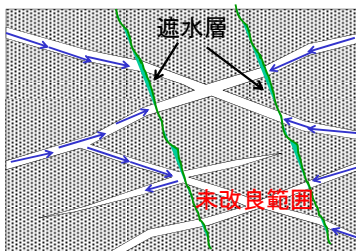


(今後)改良性確認のための新しい試験が必要?

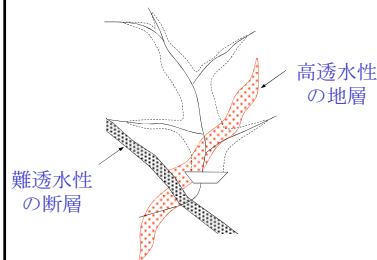
・たとえば「原位置改良性試験」:

調査横坑などで、模擬注入して「袋小路度」??を把握する。

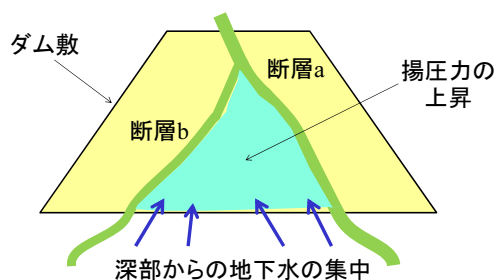
遮水層タイプ



大規模な遮水層により止水範囲が小さくなる場合もあるが



遮水層により重力式コンクリートダム基礎の揚圧力が上昇することも



(今後)遮水層の連続性の詳細調査体系が必要

- ・遮水層タイプでは、ボアホールカメラ観察等による三次元ネットワークモデル化が必須
- ・遮水層の連続性を確認する技術体系が必要
 - 遮水層を隔てて一方で水圧変化を生じさせ、他方で水位変化を計測した例が多い。
 - ルジオンテストの際に、できるだけ他の既往孔で多段で水位変化を計測するなど、工夫できないか。

複合地盤タイプ

岩盤は、石、亀裂、及びその充填物からなり、不均質性、階層構造(フラクタル性)を有する。



複合地盤タイプの例(風化花崗岩)



花崗岩中の新鮮な節理

マサ化した節理

複合地盤タイプ

- 空隙も不均質性、階層性を持つ

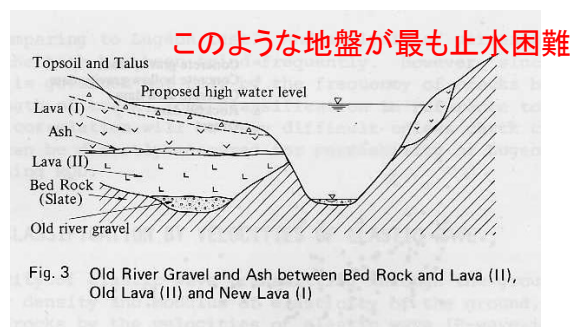
・風化花崗岩では、最初に新鮮岩・開口亀裂(赤線部)に入り、これが充填された後、風化したマサ部(オレンジ線部)に注入される。



→注入初期と後期は違う地盤に注入しているのと同じ!

新鮮岩が大半でも、改良目標を実現するには、わずかに分布するマサ部を対象に注入仕様を検討する必要

マクロな複合地盤の例 (開口亀裂、浸食性地盤などが混在)



水理地質構造図について

水理地質構造図とは

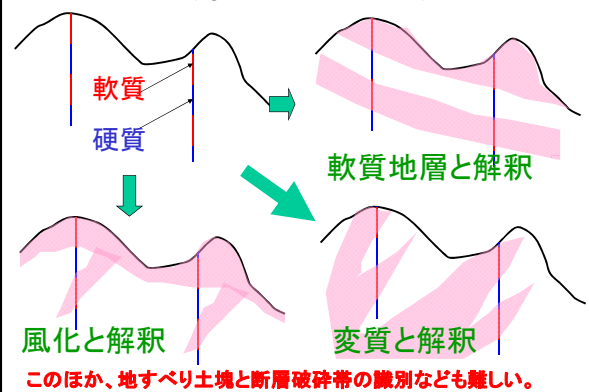
止水設計を行うための地質調査結果をとりまとめた図
(土木学会「ダム建設における水理地質構造の調査と止水設計」)

- ・ルジオンマップ
- ・地質図、水理地質分類図
- ・割れ目頻度、亀裂の酸化などの分布図
- ・地下水等高線図 など

ルジオンマップについて

- ルジオンマップがいい加減なものが多い
- 等ルジオン値線のつなげ方(つなげるか つなげないか、どうつなげるか)

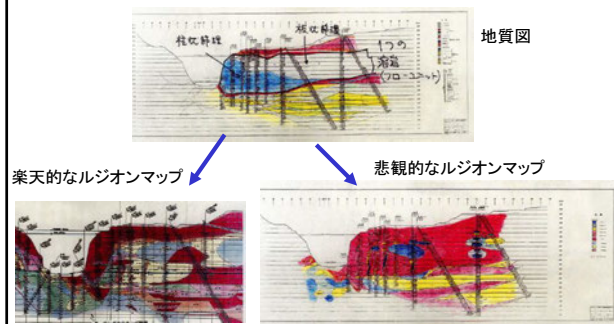
コアの地質解釈による地質図の相違



ルジオンマップは、地質解釈図

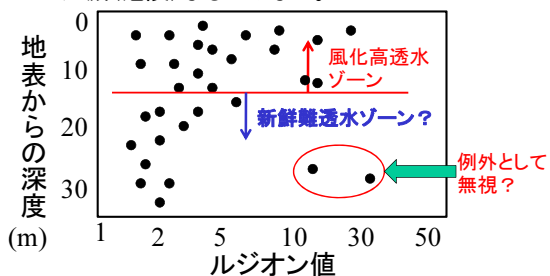
- ルジオンマップは、単にルジオン試験結果を図化するものではない。なぜ高ルジオンか(低ルジオンか)、水理地質的原因を調査・分析・評価(解釈)した上で、高ルジオン部・低ルジオン部のそれぞれが、その地質解釈に沿って分布するように図化する。
- ボーリング情報は「読み取れるように」表示する。

地質屋が違えば図も違う



信頼できる水理地質構造図を

- 深度とルジオン値の関係をグラフ化して、**風化部(高透水ゾーン)**と**新鮮部(概ね難透水ゾーン)**に分けて、「水理地質構造断面図」とする例が多いが、これほどいい加減(危険)なものはない。



(今後) 止水性岩盤分類図が必要?

→ルジオンマップだけでは、止水性を分類できない

- ① 大空隙度? 開口幅(空隙径) × 連続性
- ② パイピング度? 浸透破壊しやすさ
- ③ 微細空隙度? 改良しにくさ
- ④ 袋小路空隙度? 改良範囲の狭さ
- ⑤ 遮水層度? 遮水性 × 遮水層の厚さ × 連続性

上記の組み合わせで岩盤を分類?

今後必要と考えられること(結論)

- 1.止水上問題となる地質の分類・止水性岩盤分類技術
- 2.ルジオンマップ、水理地質構造図の品質向上技術
- 3.岩盤空隙分布・ネットワークの詳細調査技術
- 4.岩盤の被注入特性の事前確認技術
- 5.浸透経路・漏水経路の調査技術
- 6.遮水層の連続性確認技術
- 7.上記を含めた水理地質構造調査技術の体系化 など

4. テクニカルセッション

高濃度グラウトの岩盤亀裂内への 浸透挙動予測モデルと注入管理手法

小林 伸司¹ 延藤 遵² 辻 正邦³

北欧では、1) 許容湧水量が厳しい環境配慮型トンネルを高濃度グラウトにより効率的に施工すること、2) 高レベル放射性廃棄物地層処分施設のグラウティングでは浸透範囲を管理する必要があることから、硬質な亀裂性岩盤を対象とした高濃度グラウトの浸透挙動に関する研究が実施されている。本研究では、北欧のグラウト浸透理論のエスポ硬岩研究所における原位置試験結果への適用例とグラウト浸透理論に基づいて構築した注入管理手法の適用方法を示し、日本のダム基礎グラウティングへの適用性を検討する。

キーワード: グラウト浸透モデル, 亀裂性岩盤, ビンガム流体, 浸透距離, 注入終了基準

1. はじめに

これまで我が国においては、主としてダム基礎を対象としたグラウティング技術が発達してきたが、近年では、高レベル放射性廃棄物地層処分施設、石油・ガス地下貯槽、環境配慮型トンネル等の大深度地下の岩盤掘削工事に対しても高度なグラウティングの必要性が高まっている。特に地層処分においては、セメント系材料がバリア性能に影響を及ぼす可能性があるためグラウト浸透範囲の管理が必要とされており、北欧のグラウト浸透理論の適用性が検討されている¹⁾。北欧では、1) 許容湧水量が厳しい環境配慮型トンネルを高濃度グラウトにより効率的に施工すること、2) 高レベル放射性廃棄物地層処分施設のグラウティングでは浸透範囲を管理する必要があることから、硬質な亀裂性岩盤を対象とした高濃度グラウトの浸透挙動に関する研究が実施されている。一方、国内のダム基礎グラウティングにおいても、平成15年に「グラウティング技術指針・同解説」²⁾が改訂され、基礎地盤の状況に即した合理的なグラウティングの施工が求められており、新たなダム基礎グラウティング技術の研究開発において、北欧のグラウティング技術が参考になると考えられる。

本研究では、はじめに、北欧におけるグラウト浸透挙動研究理解の参考として、施工実績調査に基づき、北欧のグラウティング施工方法の特徴をまとめた。次に、

グラウト浸透理論を整理し、スウェーデンの高レベル放射性廃棄物処分研究であるエスポ硬岩研究所における原位置グラウト注入試験結果への適用例を示すとともに、グラウト浸透理論に基づいて構築したグラウト注入管理手法の適用方法を例示した。さらに、日本のダム基礎グラウティングへの適用性を検討した。

2. 北欧におけるグラウティング施工事例

2.1 トンネルグラウティングの概要³⁾

北欧諸国では、地下浅部に岩盤が出現しているため、都市部のトンネル掘削工事においても NATM が一般的である。これらの岩盤の上には薄い堆積層が存在しているため、トンネル掘削に伴う地下水の低下が堆積層の圧密現象を引き起こし、地表の建物の不等沈下につながる場合がある⁴⁾。また、地下水位低下に伴う地上の植生や湖沼等の周辺地下水環境への影響が懸念されている。このため、施工中においても地下水位の低下を防止するために厳しい許容湧水量が設定されている。許容湧水量は、地質条件、地表の土地利用状況、涵養量等を考慮して設定されるが、場所によっては 0.5～5L/分/100m 程度という厳しい値が採用されている⁵⁾。

日本においては、NATM によるウオータータイトトンネルの恒久的な止水は、一般的にコンクリート覆工と止水シートにより担保しているが、北欧のトンネル

¹ 清水建設株式会社 土木技術本部, 課長

² 清水建設株式会社 土木技術本部, グループ長

³ シャルマーシュ工科大学, 客員研究員

では、良好な岩盤条件を利用してセメント系材料を使用したプレグラウチングを実施することにより、施工中及び供用中の湧水を抑制したウオータータイトトンネルが建設されている。ここでは、施工事例として、グラウチングにより高い湧水抑制効果のあったスウェーデンの道路トンネルとノルウェーの鉄道トンネルの概要を以下に示す。

2.2 トンネルグラウチングの施工事例

(1) Lundby 道路トンネル^{6), 7)}

Lundby トンネルは、スウェーデンのヨーテボリに建設された、延長 2060m、断面積 86~92m²の道路トンネルである。地質は、塊状の緑色岩、ペグマタイト、アプライトが貫入する片麻岩と花崗岩からなる。非常に厳しい許容湧水量に応じるため、プレグラウチングは表-1 に示す 3 クラスの注入パターンで実施されている。注入材料は、水押し試験結果により、高分子材料、セメントミルク、ポリウレタンフォームが使い分けられている(表-2)。注入圧力は 2MPa (土破りが小さい区間では 0.5MPa) であり、水押し試験結果の大きい孔から注入を開始している。セメントミルクの注入方法を以下に示す。

- 1) W/C=3 配合を 20 分間注入
 - 2) 規定圧に達しない場合、W/C=2 配合を 20 分間注入
 - 3) 圧力が増加しない場合、W/C=1 配合に低減
- トンネル掘削後の最終的な湧水量は、施工区間毎に 0.5~1.5L/min/100m であり、一部の破砕帯と風化帯を含

表-1 Lundbyトンネルの注入パターン

C	許容湧水量 (L/min/100m)	削孔パターン (規定孔数, 孔間隔, 削孔長, 進行)
1	0.5~1.0	66 孔, @1m, 10~13m, 4m*2
2	2.0	44 孔, @1~2m, 13m, 4m*2
3	2.5	30 孔, @2m, 17m, 5m*2

(注) C: クラス

表-2 Lundbyトンネルの注入材料

水押し試験注水量 (L/min/m/MPa)	注入材料
10 以上	ポリウレタンフォーム
1~10	普通セメント (2~5%ベントナイト添加) 一部、グラウト用セメント
1 以下	高分子系グラウト (アクリルアミド)

む弱層部を除き、トンネルの全施工区間で許容湧水量を満足している。

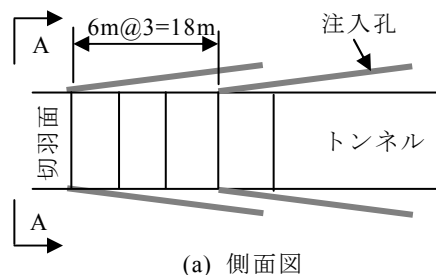
(2) Sandvika-Asker 鉄道トンネル^{7), 8)}

Sandvika-Asker トンネルは、ノルウェーのオスロ南西部 Sandvika と Asker 間の人口密集地において既存の鉄道路線を地下化する目的で建設されたものであり、Skaugum トンネル (延長 3600m, 断面積 114m²)、Tanum トンネル (延長 2600m, 断面積 114m²) という 2 組のトンネルからなる。地質は、頁岩、片岩、石灰岩や砂岩を含むシルト岩といったカンブリア~シルル紀の堆積物を主体とし、それらの堆積物はペルム紀の玄武岩と斑岩に覆われ、粗粒玄武岩 (輝緑岩) の貫入がある。許容湧水量は、環境に与える影響と地盤沈下を考慮して、当初はクラス 1~3 (16~4L/min/100m) に分けられたが、Skaugum トンネルでは、最も厳しいクラス 3 の注入パターンをトンネル全延長で採用している。この理由は、探り削孔と水押し試験を省略することで施工を効率化し、システムチックなプレグラウチングにより改良効果を高めたほうが、品質・経済性で優れていると判断されたからである。表-3、図-1 にクラス 3

表-3 Sandvika-Askerトンネルの注入パターン

C	許容湧水量 (L/min/100m)	削孔パターン (規定孔数, 孔間隔, 削孔長, 進行)
1	16	—
2	8	—
3	4	48 孔, @1m, 24m, 6m*3

(注) C: クラス



(a) 側面図



(b) A-A 正面

図-1 Sandvika-Askerトンネルの注入孔配置例³⁾

の注入・削孔パターンを示す。注入材料は、シリカフュームを添加した超微粒子セメント、注入圧力は通常は 6~9MPa (最大 10MPa) , 注入は中央下側の孔から上側の孔へという順序で行われている。注入方法を以下に示す。

- 1) W/C=1.1~1.5 配合で注入開始
- 2) 6~8MPa までゆっくり注入圧力を増加
- 3) リークの場合には注入圧力を減少

トンネル掘削後の最終的な湧水量は、トンネル全延長で平均すると 5L/min/100m であり、一部の地質不良部以外では目標とする許容湧水量が達成されている。

2.3 北欧のトンネルグラウチングのまとめ

施工実績調査に基づいて、北欧のトンネルグラウチングの特徴をまとめると以下ようになる。

- ・ 厳しい許容湧水量
- ・ 高密度の注入孔配置
- ・ 初期配合から高濃度セメントグラウトを使用
- ・ 高圧注入 (スウェーデンでは 3~4MPa, ノルウェーでは最大 10MPa の例もある。)
- ・ だめ押し注入の簡素化 (最大注入圧力到達後、グラウト流量 0~3L/min で 2~5 分間注入で注入終了としていることが多い⁵⁾。)

3. 高濃度グラウトの岩盤亀裂内への浸透理論

3.1 スウェーデンにおけるグラウト浸透理論研究

北欧では、1980 年代前半よりスウェーデンの王立工科大学及びビヤルマーシュ工科大学を中心としてグラウチングに関する研究が行われてきた。研究は、グラウチングのための地質環境評価とグラウト浸透挙動予測に大きく区分できるが、ここではセメント系グラウトの浸透挙動研究についてレビューを行う。

Hässler ら⁹⁾ は、グラウトの流れを非ニュートン流体の一つであり、降伏強度を有するビンガム流体として定式化し、亀裂への浸透理論を構築している。グラウトの粘性 (降伏強度, 粘度) の時間依存性を考慮し、2次元格子ネットワークモデルを使用して、浸透範囲の検討を行っている。

Eriksson ら¹⁰⁾ は、微小亀裂に対しグラウトを注入する場合には亀裂入口や亀裂幅の減少部においてフィルターケーキが形成され目詰まりが生じることに着目し、

グラウトが全く浸透しない最小亀裂開口幅 b_{min} , グラウトがすべて浸透する限界亀裂開口幅 $b_{critical}$ を定義し、グラウトの目詰まり特性を評価している。次に、Eriksson ら¹¹⁾ は、単一の亀裂を、開口幅の算術平均・標準偏差、コンタクトエリア (開口幅が 0 の部分) の割合を設定してランダムに作成する 2 次元の格子ネットワークでモデル化を行い、繰り返し計算による中央値を解析値とする手法を用い、浸透理論の検討を行っている。さらに、スウェーデン核燃料・廃棄物管理会社が高レベル放射性廃棄物処分研究のために建設した地下 450m の研究施設であるエスポ硬岩研究所において原位置試験を実施し、大深度におけるグラウチング技術の現状レベルの把握とグラウト浸透理論の適用性の確認を行っている。

本研究で検討対象とする Gustafson & Stille^{12), 13)} は、平行平板内を流れるビンガム流体の最大浸透距離を、グラウト注入圧力とグラウトの降伏強度との力の釣り合い式から求めている。さらに、相対浸透距離という概念を導入して、高濃度グラウトの岩盤亀裂内への浸透距離を理論的に算出している (以下、Gustafson & Stille モデルという)。そして、グラウト浸透距離を考慮した注入終了基準に基づく合理的なグラウチング方法を提案している

著者ら^{14), 15)} は、Gustafson & Stille モデルを実際のグラウチング施工に適用するために理論の拡張を行ったうえで、前述のエスポ硬岩研究所における原位置試験結果に適用している。さらに、リアルタイムにグラウチングを管理する手法を提案し、エスポ硬岩研究所における原位置試験結果を使用して管理手法の適用方法を例示している。

3.2 Gustafson & Stille のグラウト浸透モデル

(1) グラウト浸透の基礎理論^{9), 12)}

Gustafson & Stille モデルでは、グラウトの流れを非ニュートン流体の一つであり、降伏強度を有するビンガム流体として定式化している。ビンガム流体のせん断応力 τ は、せん断速度を dv/dz , 降伏強度を τ_0 , 粘度を μ_B とすると以下のように表される。

$$\tau = -\mu_B \frac{dv}{dz} + \tau_0 \quad (1)$$

平行平板内のビンガム流体の 1 次元流れを仮定す

ると、せん断速度の分布（図-2）は以下のように求められる。

$$\frac{d\tau(z)}{dz} = -\frac{dP}{dx} \quad (2)$$

式(1), (2)から、平板間隔を b として平均流速 $V(x)=dI/dt$ は以下のように算出される。

$$\frac{dI}{dt} = -\frac{dp}{dx} \cdot \frac{b^2}{12\mu_B} \left[1 - 3 \cdot \frac{Z}{b} + 4 \cdot \left(\frac{Z}{b} \right)^3 \right]$$

ただし、

$$Z = \tau_0 \cdot \left| \frac{dp}{dx} \right|^{-1}, \quad Z < \frac{b}{2} \quad (3)$$

次に、グラウトの最大浸透距離 I_{\max} は、図-3に示すようにグラウトが静止状態にあるときの釣り合い式より、グラウト注入圧力 P_g と地下水圧 P_w との差圧を Δp として、

$$I_{\max} = \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \cdot b \quad (4)$$

と表される。

(2) 岩盤亀裂内へのグラウト浸透モデル¹³⁾

Gustafson & Stille モデルは、図-4に示すような亀裂性岩盤を対象としたグラウト注入時の注入圧力・流量をもとに、開口幅の異なる複数亀裂内のグラウトの浸透距離 I を理論的に算出するものである。

モデル化にあたっては、グラウトの相対浸透距離、相対注入時間という概念を導入している。相対浸透距離 I_D とはグラウトの浸透距離を I 、最大浸透距離を I_{\max} とすると以下の式で定義されるものである。

$$I_D = \frac{I}{I_{\max}} \quad (5)$$

また、相対注入時間 t_D は、グラウト注入差圧を Δp 、グラウトの粘度を μ_g として、

$$t_D = \frac{t}{t_0} \quad (6)$$

$$t_0 = \frac{6\Delta p \cdot \mu_g}{\tau_0^2} \quad (7)$$

t_D と I_D の関係については、式(3)~(7)をもとに、

テイラー展開による近似解が求められている。

$$I_D = \sqrt{\theta^2 + 4\theta} - \theta \quad (8)$$

$$[1 \text{次元流れ}] \quad \theta = \frac{t_D}{2(0.6 + t_D)} \quad (9)$$

$$[2 \text{次元流れ}] \quad \theta = \frac{t_D}{2(3 + t_D)} \quad (10)$$

開口幅 b の亀裂内を流れる流れ幅 w の1次元流れの場合、グラウト注入量 V は、

$$\begin{aligned} V &= I \cdot w \cdot b = I_D \cdot I_{\max} \cdot w \cdot b \\ &= I_D \cdot \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \cdot w \cdot b^2 \end{aligned} \quad (11)$$

グラウト注入孔全体では、

$$V_{tot} = I_D \cdot \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \cdot \sum w b^2 \quad (12)$$

グラウト流量は、

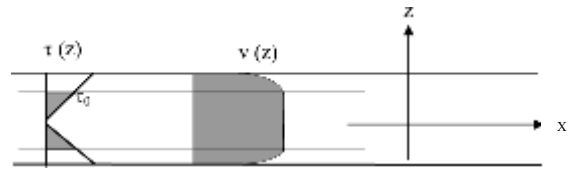


図-2 平行平板内ビンガム流体のせん断速度分布

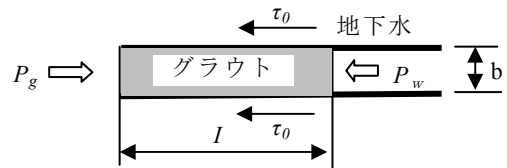


図-3 平行平板内ビンガム流体の最大浸透距離

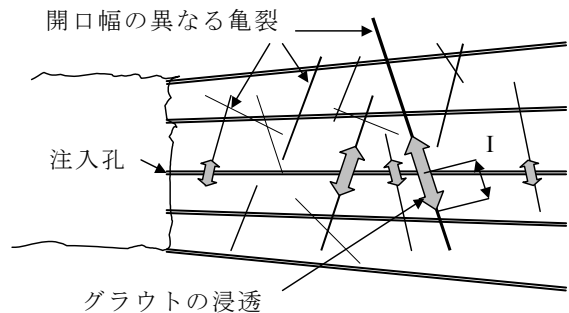


図-4 亀裂性岩盤におけるグラウトの浸透状況

$$Q = \frac{dV_{tot}}{dt} = \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right) \cdot \sum wb^2 \quad (13)$$

と計算できる。次に、開口幅 b の亀裂内を流れる 2次元流れの場合は、

$$\begin{aligned} V &= \pi \cdot I_D^2 \cdot b = \pi \cdot (I_D \cdot I_{max})^2 \cdot b \\ &= \pi \cdot I_D^2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right)^2 \cdot b^3 \end{aligned} \quad (14)$$

グラウト注入孔全体では、

$$V_{tot} = \pi \cdot I_D^2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right)^2 \cdot \sum b^3 \quad (15)$$

グラウト流量は、

$$\begin{aligned} Q &= \frac{dV_{tot}}{dt} \\ &= 2\pi \cdot I_D \cdot \frac{dI_D}{dt_D} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left(\frac{\Delta p}{2\tau_0} \right)^2 \cdot \sum b^3 \end{aligned} \quad (16)$$

となる。ここで、1次元流れ、2次元流れともに、以下の式の値をグラフにプロットすると図-5のようになる。

$$\frac{d \log V}{d \log t} = \frac{Q \cdot t}{V} \quad (17)$$

この値はほぼ一定値を示すことから、この値を計算することで実際に注入されたグラウトの流れの次元を判定することが可能である。

3.3 グラウト浸透モデルの適用例¹⁴⁾

(1) 浸透モデルの拡張と適用

Gustafson & Stille モデルを実際のグラウト注入に適用するために、著者らは以下の観点からモデルの

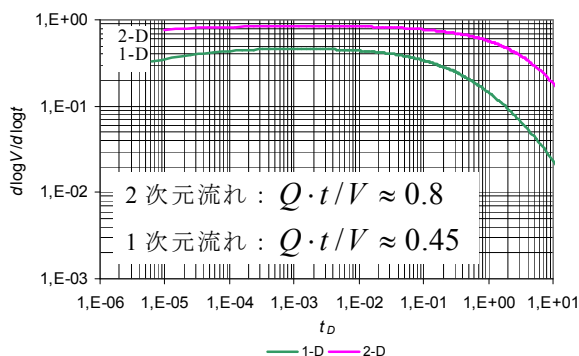


図-5 グラウトの流れの次元

拡張を実施している。

- ・注入圧力の変化を考慮
- ・注入材料の粘性の時間依存性を考慮
- ・配合切替を考慮
- ・流れの次元の変化を考慮
- ・注入設備の能力を考慮

さらに、拡張されたモデルを適用することで、エスポ硬岩研究所の注入試験結果が再現できるかどうか検討を行っている。表-4 にエスポ硬岩研究所深度 450m で実施された注入試験の概要を、図-6 に注

表-4 エスポ硬岩研究所深度450mの注入試験

	Fan1:1次	Fan1:2次	Fan2
孔数	11	20	21
注入圧力	Pw+1MPa	Pw+2MPa	Pw+2MPa
注入終了基準	流量 1L/min	流量 1L/min	流量 0.2L/min or 注入量 200L
配合切替	B: 150L →C: 50L	A: 100L →B: 50L →C: 50L	A: 100L →B: 50L →C: 50L
(注) 配合 A: W/C=2, B: W/C=1, C: W/C=0.8			

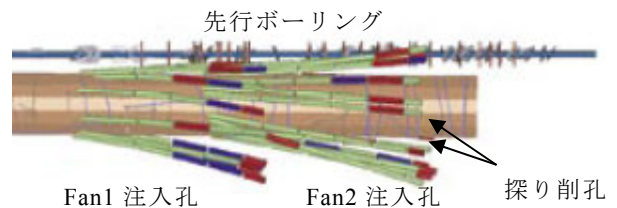


図-6 注入試験孔配置図¹⁶⁾

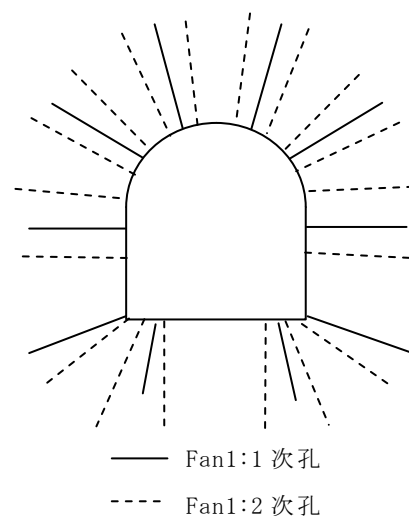


図-7 Fan1の注入孔配置例¹⁶⁾

入孔配置を示す。なお、Fan1 には 100 μm を超える亀裂が存在したことから、より大きな亀裂を改良する 1 次注入と小さな亀裂を改良する 2 次注入に分けられている (図-7)。

(2) 検討条件

亀裂開口幅については、各グラウト注入孔で 3~5m 区間毎に実施された孔内湧水量測定結果に基づき、Fransson & Gustafson¹⁷⁾ の方法により算定された水理学的亀裂開口幅を使用した。さらに Fan 1:1 では水押し試験が実施されていることから、Gustafson & Stille¹²⁾ の方法により水押し試験から求めた水理学的亀裂開口幅についての計算も行った。なお水押し試験の実施されていない Fan 1:2, Fan 2 については、Fan 1:1 における両者の関係を用いて設定した (図-8)。

グラウト材料特性については、粘性の時間依存性は考慮していないが、グラウト材料の浸透可能最小亀裂開口幅を設定した。

配合切替については、その影響を直接モデルに取り込むとモデルが複雑になり取り扱いが困難なることから、影響の下限値 (配合切替以前に注入したグラウトの物性を配合切替後に注入したグラウト物性と同一とする) と上限値 (配合切替以前に注入したグラウトの物性を地下水と同一とする) を設定した。

地質情報からグラウトの流れが 2 次元と考えられることから、計算は、2 次元流れの場合についてすべてのグラウト孔で実施した。図-9 に Fan 1:1 でのある注入孔 (孔内に 5 本の亀裂: 開口幅は、0, 0, 70, 160, 342 μm と算出) での計算例を示す。この例

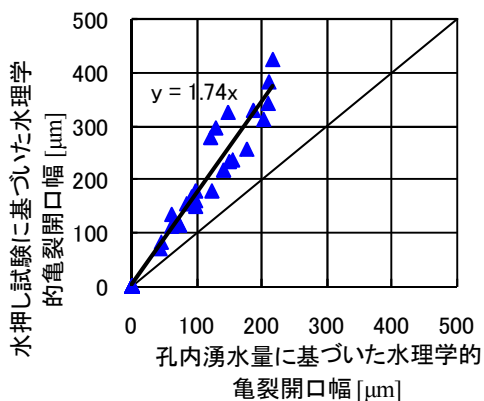


図-8 Fan1:1における水理学的亀裂開口幅の関係

では、配合 B が約 80L (グラウト孔の容量を含めると 150L) 注入された後に配合 C に配合切替が行われ、グラウト流量が毎分 1L に減少した時点で計算が終了している。

(3) 検討結果

図-10, 11 に水押し試験結果に基づく水理学的亀裂開口幅を使用した場合の注入結果の計算値と実測値を、図-12, 13 に孔内湧水量に基づく水理学的亀裂開口幅を使用した場合の注入結果の計算値と実測値を示す。全体的な傾向として、グラウト注入量と注入時間の計算値は、水押し試験結果に基づく水理学的亀裂開口幅を使用した場合のほうが孔内湧水量に基づく水理学的亀裂開口幅を使用した場合よりも実測値により近い値であった。特に、グラウト注入量は、孔内湧水量に基づく水理学的亀裂開口幅を使用した場合には実測値を大きく下回る結果であった。これらの理由として、低圧とはいえ圧力注入を行う水押し試験のほうが、よりグラウチング時の亀裂状態を表しているからと考えられる (図-8 より、水押し試験に基づく水理学的亀裂開口幅の平均値のほうが、孔内湧水量に基づく水理学的亀裂開口幅の平均値の 1.74 倍であった)。配合切替の影響の上限値と下限値については、水押し試験結果に基づく水理学的亀裂開口幅を使用した予測値の上限と下限には非常に大きい差が見られるが、下限値のほうが実測値と近い値を示していることが分かる。配合切替以前に注入したグラウトの物性を地下水と同一とする上限値には問題があると言える。

以上のように、Gustafson & Stille モデルを使用して実際に施工されたグラウチングの注入結果の予測を行ったところ、水押し試験結果に基づく水理学的亀裂開口幅を使用した場合の計算下限値は、グラウ

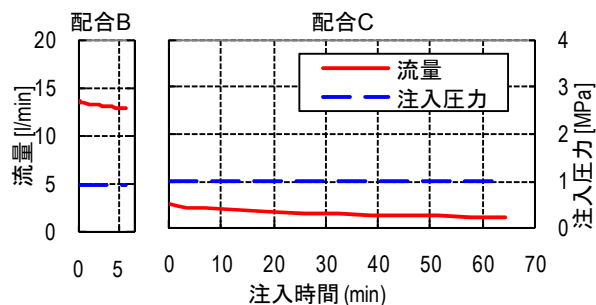


図-9 注入結果の計算例

ト注入量，注入時間ともにほぼ実測値と整合性があることが分かった。次節では，Gustafson & Stille モデルを使用したグラウチング時の注入管理手法について述べる。

4. グラウト浸透距離推定による注入管理手法¹⁵⁾

4.1 グラウト注入管理手法

従来，グラウチングは以下のような基準で注入停止とされてきた。

- ・グラウト流量が一定値以下（+だめ押し）
- ・グラウト注入量が一定値以上
- ・GIN 理論の設定値到達

しかしながら，これらの基準では必要な改良範囲に対して過不足となる可能性があることから（図-14），著者らは，Gustafson & Stille モデルによりリアルタ

イムに算出したグラウト浸透距離に基づいてグラウチングを管理する手法を提案している。その概要を図-15 に示す。

4.2 注入管理手法の例示

次に著者らは，エスポ硬岩研究所の注入試験時の実際の注入データに，グラウト注入管理手法を適用している。図-16 に使用した注入データを示す。ここでは，例として注入開始から 15 分経過した時点での管理状況を示す。注入開始後 8 分間のグラウト注入孔の孔埋部分（70L）を除くと，図-17 において， $Q \cdot t / V$ の値は，グラウトが 2 次元流れの理論値に近いことから，2 次元流れの理論を適用すると，亀裂開口幅，グラウト流量，グラウト浸透距離（最小亀裂開口幅 $b_{\min}=0.1\text{mm}$ ，最大亀裂開口幅 $b_{\max}=0.2\text{mm}$ と設定する）は，それぞれ，図-18～20

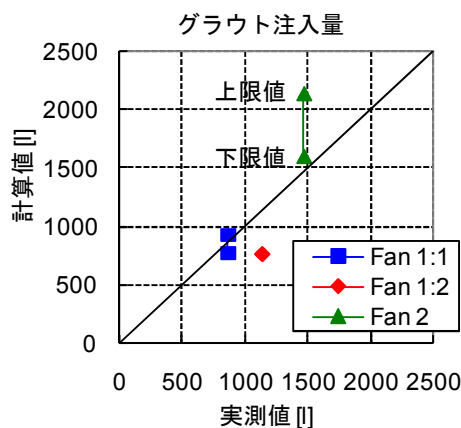


図-10 水押し試験に基づく水理的亀裂開口幅を使用した場合の注入量の予測値と実測値

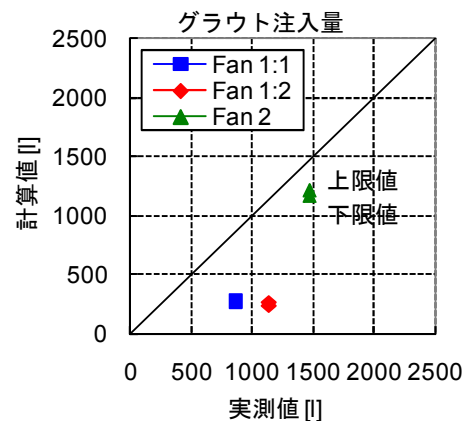


図-12 孔内湧水量に基づく水理的亀裂開口幅を使用した場合の注入量の予測値と実測値

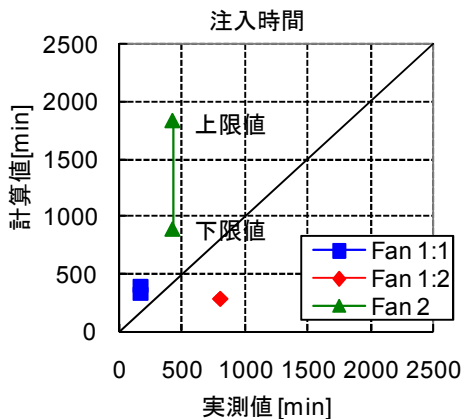


図-11 水押し試験に基づく水理的亀裂開口幅を使用した場合の注入時間の予測値と実測値

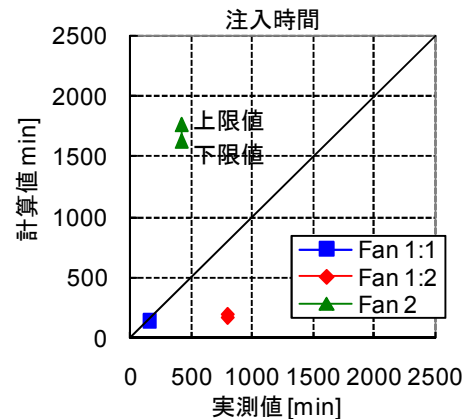


図-13 孔内湧水量に基づく水理的亀裂開口幅を使用した場合の注入時間の予測値と実測値

のように推定される。次に、ここまでのデータを使用して、注入開始 60 分後まで同じ注入圧力で注入した場合のグラウト流量と浸透距離の予測値を図-21, 22 に示す。ここで仮に、改良が必要な最小グラウト浸透距離を 20m とすると、このグラウチングでは、最小亀裂開口幅 b_{min} を有する亀裂に対しては必要浸透距離を満足しないことが見てとれる。このような場合に、例えば注入圧力を 7MPa まで増加させると、グラウト流量と浸透距離の予測値は図-

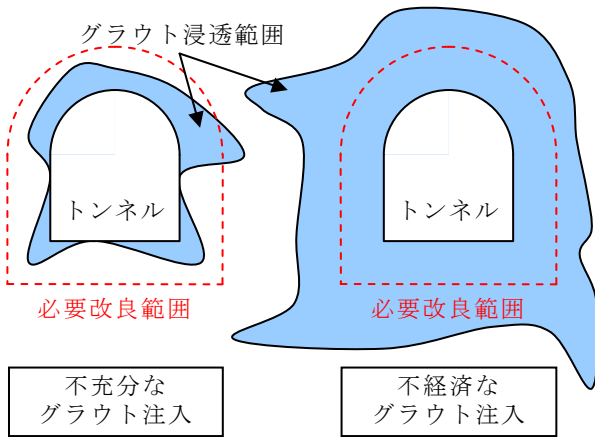


図-14 不十分・不経済なグラウチング例

23, 24 のようになり、注入開始 35 分後に、 b_{min} を有する亀裂においても必要浸透距離に達すると予想することができる。

4.3 岩盤安定性評価への応用

グラウト浸透距離推定による注入管理手法では、リアルタイムにグラウト浸透距離を算出することから、浸透距離に基づいたグラウト注入時の岩盤安定性評価にも適用可能であると考えられる。グラウチングにおいて岩盤が変位しないためには、注入されたグラウトによる揚圧力が岩盤抵抗力を上回らないことが必要となる。例えば Brantberger ら¹⁸⁾ は、岩盤抵抗力として

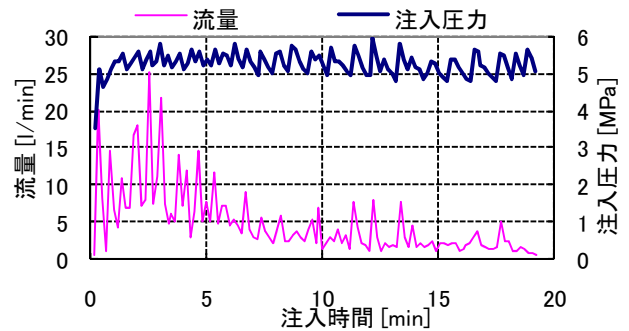


図-16 注入管理手法の試行に使用したデータ

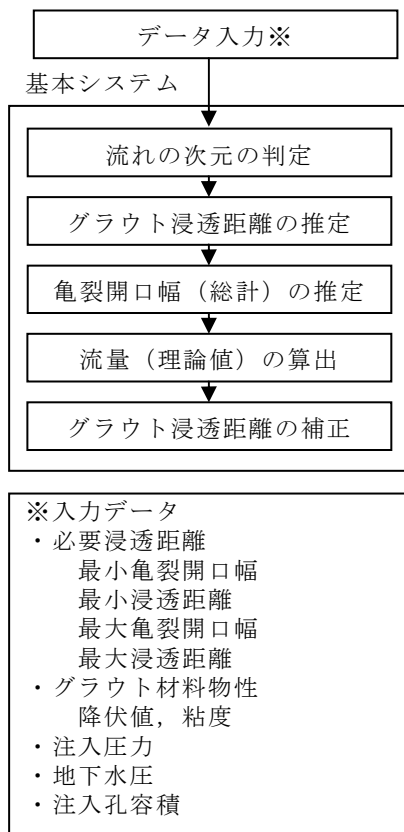


図-15 グラウト浸透距離推定による注入管理手法

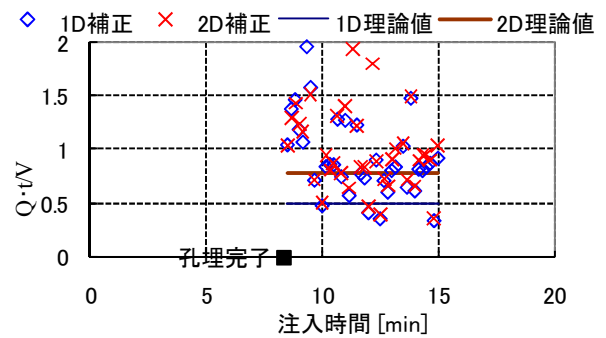


図-17 グラウトの流れの次元判定

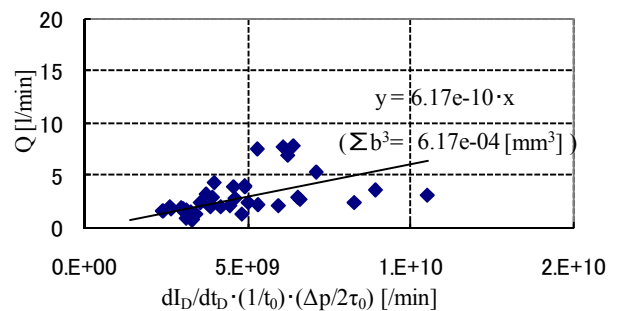


図-18 亀裂開口幅（総計）の推定

円錐台の上載岩盤荷重を考え（図-25），岩盤変位が生

じないグラウト注入圧力 p の条件式を， $\beta=45^\circ$ の場合について以下の式で設定している。

$$p < \frac{3 \cdot \rho \cdot g \cdot h}{k_2} \cdot \left(1 + \frac{h}{I} + \frac{1}{3} \left(\frac{h}{I} \right)^2 \right) \quad (18)$$

ここで，

ρ ：上載岩盤の密度

h ：対象亀裂の地表面からの深さ

I ：対象亀裂内のグラウト浸透距離

k_2 ：対象亀裂のグラウトに対する開口率

例として，上記のエスポ硬岩研究所の注入試験時

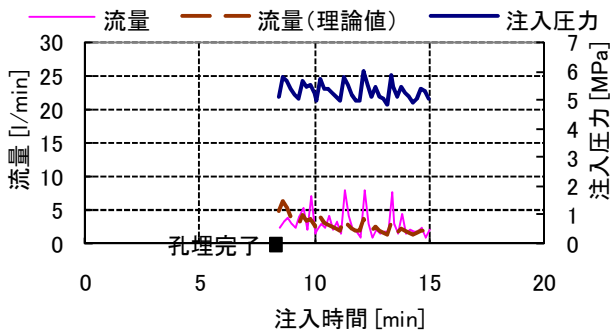


図-19 グラウト流量（理論値）の算出

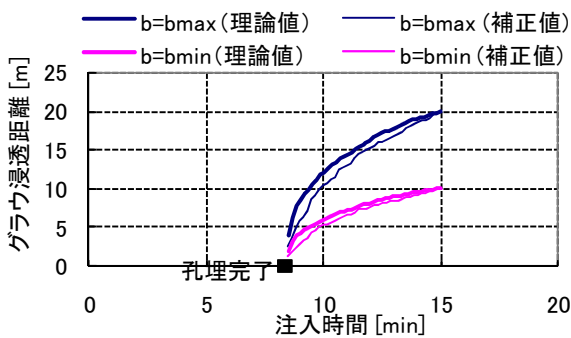


図-20 グラウト浸透距離の理論値と補正值の算出

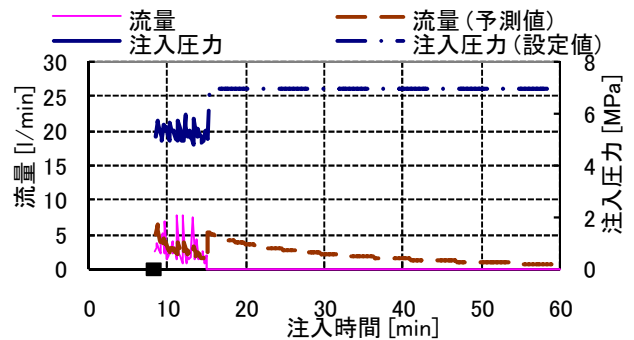


図-23 注入圧力増加後のグラウト流量の予測値

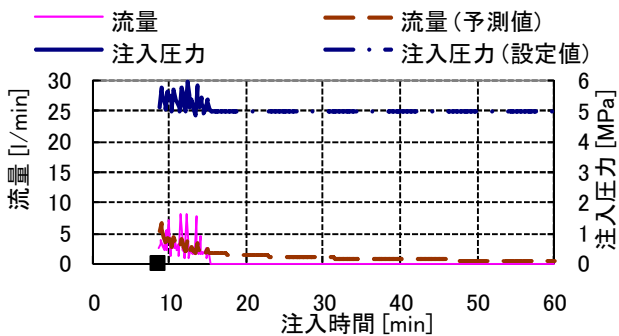


図-21 グラウト流量の予測値

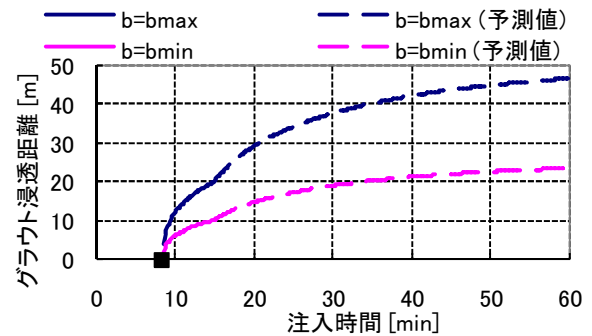


図-24 注入圧力増加後のグラウト浸透距離の予測値

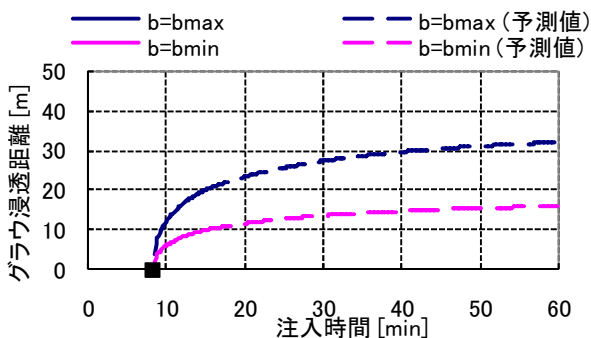


図-22 グラウト浸透距離の予測値

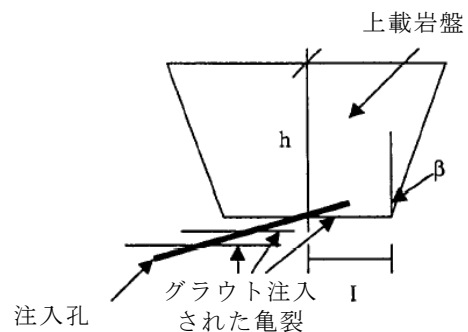


図-25 想定した上載荷重

の実際の注入データに適用する。仮に、 $\rho=3t/m^3$ 、 $h=40m$ と設定すると、 $k_2=0.5$ および1の場合における、最大亀裂開口幅 b_{max} の亀裂に対する注入開始15分後までの岩盤安定性と注入開始60分後までの予測（注入圧力一定の場合と7MPaに増加した場合）は図-26のようになる。7MPaに増加した場合には、注入開始60分後には岩盤変位の危険性があることが予想できる。

5. ダム基礎グラウチングへの適用性と今後の課題

5.1 ダム基礎グラウチングへの適用性

Gustafson & Stille モデルによりリアルタイムに算出したグラウト浸透距離に基づいてグラウチングを管理する手法は、スウェーデンにおいても現在は開発段階であり、実際のグラウチング管理における使用例はまだない。また、モデルや管理手法自体にも解決すべき課題が残されており、今後の研究が必要とされる段階である。しかしながら、グラウト浸透距離に基づくグラウチング管理は、経済性の観点から我が国のダム基礎グラウチングにとっても有効であると考えられることから、ここでは同手法のダム基礎グラウチングへの適用性を検討する。

我が国のダム基礎グラウチングでは、一般的に、水押し試験により得られるルジオン値に応じて初期配合を設定し、水セメント比の高い低濃度なグラウトで注入を開始し、所定量を注入した後に順次高濃度なグラウトへと切り替える配合切替を行っている²⁾。低濃度のグラウトはニュートン流体に近い挙動をすると考えられるため、Gustafson & Stille モデルで扱っているビンガム流体の浸透理論とは異なっている。また、

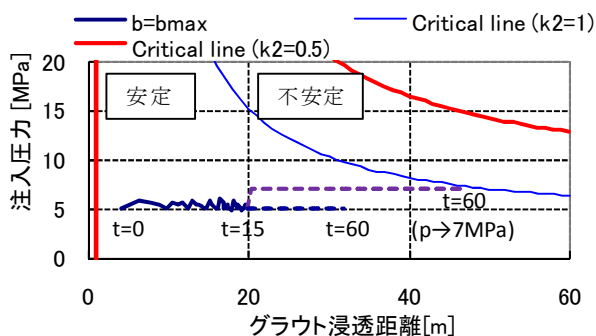


図-26 岩盤安定性の予測

低濃度のグラウトはブリーディングが大きいため、セメント粒子の沈降等が浸透挙動に影響すると考えられるが、Gustafson & Stille モデルでは考慮されていない。さらに、低濃度グラウトを亀裂中において加圧脱水するための、だめ押し注入が一般的に行われているが、グラウト浸透距離推定による注入管理手法では、だめ押しを行うことなく注入が終了してしまい、亀裂内を完全に閉塞できない可能性がある。

その一方で、国内においても、低濃度グラウト注入とだめ押し注入が実際に有効であるかどうかについての研究が続けられている。グラウチングにおける最適配合については、例えば著者のうち延藤ら¹⁹⁾は、大深度岩盤掘削工事を対象としているが、中高濃度配合を用いた効率的なプレグラウチングを提案している。また、だめ押し注入についても、例えば内田ら²⁰⁾は、注入効率の向上を図るため室内実験を実施した結果、だめ押し注入の省略が可能であるとしている。このように、Gustafson & Stille モデルでは考慮されていない低濃度グラウト注入とだめ押し注入については、今後の国内外の研究の進展により、考え方が変わる可能性もあるが、現時点での一般的なダム基礎グラウチングに対しては、次の対応が考えられる。

- 1) 低濃度配合で注入が終了する孔に対しては、従来通りの注入終了基準を適用し、だめ押しまで確実に実施する。
- 2) 透水性が高く初期配合から高濃度配合を使用する場合や、高濃度配合に配合切替が行われた場合には、グラウト浸透距離推定による注入管理手法を適用する。

5.2 今後の研究課題

ダム基礎グラウチングへの適用性に限らず Gustafson & Stille モデルに関して今後検討すべき課題について述べる。まず、一つ目の課題は、複雑な地質構造への対応性にある。Gustafson & Stille モデルにおいては、複数亀裂が存在する場合は、亀裂開口幅が異なる亀裂においても相対浸透距離は等しい、すなわち、グラウト浸透距離は亀裂開口幅の大きさに比例するという仮定をおくことで独立した複数亀裂を考慮することが可能である。しかしながら、北欧の良好な岩盤と異なる、亀裂のネットワーク構造や断層

破砕帯構造への適用には限界がある。したがって、Gustafson & Stille モデルの適用にあたっては、地質構造を十分に把握する必要があると考えられる。

二つ目の課題は、浸透距離と浸透範囲の違いである。Gustafson & Stille モデルでは、図-27、28 に示すように、グラウトの流れが2次元から1次元に変化する場合、あるいは1次元から2次元に変化する場合については、注入孔内の複数亀裂すべて同じ挙動をとるとして考慮することが可能である。しかしながら、グラウトが亀裂内部のうちの浸透しやすい経路を選択的に浸透すると仮定すると、その改良後に初めて他の経路にグラウトが浸透する場合が考えられる(図-29)。その場合、浸透距離と浸透範囲は明らかに異なるため、浸透距離が増えても、平面的な広がりである浸透範囲はそれほど増加しないことが考えられる。

また、亀裂内に浸透したグラウトは、地下水により希釈されていることに加え、ブリーディングを考慮すると、グラウト浸透範囲内の亀裂が必ずしも完全に閉塞されているとは言えない(図-30)。したがって、仮にグラウト浸透範囲の経時変化が把握できたとしても、グラウトの浸透範囲が必要改良範囲を超過した段階で注入を終了してしまうと、不十分な注入に終わる危険性がある。このため、地下水により希釈しにくい、ブリーディングの少ない高濃度グラウトを使用する場合以外は、浸透範囲と改良範

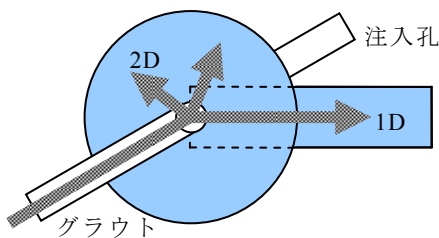


図-27 グラウトの流れの変化(2次元→1次元)

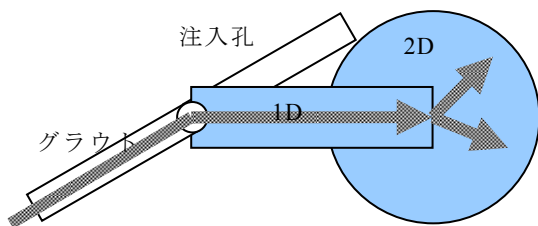


図-28 グラウトの流れの変化(1次元→2次元)

囲について注意が必要である。現在のところ、このような課題に対しては、理論上の浸透距離と実際の浸透範囲との比較検証などにより、浸透距離に対して適切な安全率を設定して対応する必要があると考えている。

最後に、注入管理手法への取り込み方法を例示した、Gustafson & Stille モデルを使用した岩盤安定性評価について、本研究では、グラウチングにおいて岩盤が変位しない条件として、亀裂内に2次元流れて注入されたグラウトによる揚圧力が円錐台の上載岩盤荷重を上回らないという単純な考え方を使用しているが、グラウチング時の岩盤挙動理解のためには、更なる研究が必要である。

6. おわりに

Gustafson & Stille モデルにより実際のグラウチン

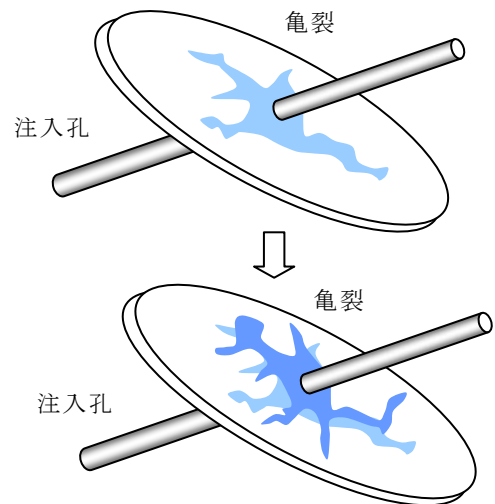


図-29 グラウトの浸透挙動の変化

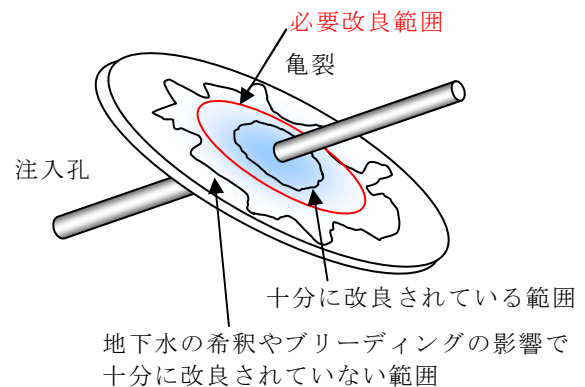


図-30 グラウトの改良範囲のイメージ

グ管理を行うためには、モデルの高度化と適用条件の検討並びに実施工においての実証が課題として残されており、更なる研究が必要とされる段階である。しかしながら、Gustafson & Stille モデルは、1) グラウチング前の注入結果の予測、2) グラウチング時の注入管理、3) 注入結果を使用したグラウチング後の浸透距離の算定という3段階で使用可能であり、ダム基礎グラウチングにおいても、その適用性は広いと考えられる。もちろん、Gustafson & Stille モデルは、日本と地質・施工条件の異なる北欧のトンネルグラウチングを対象として構築されており、そのまま日本のダム基礎グラウチングへ適用することは難しいと考えられるが、この研究成果が、ダム基礎グラウチングの合理化に対し、有用な知見を与えることができれば幸いである。

本研究は、著者の一人がスウェーデン留学中に行った研究の成果がもとになっている。スウェーデン王立工科大学の Håkan Stille 教授、シャルマーシュ工科大学の Gunnar Gustafson 教授には深いご指導を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献


- 1) 延藤 遵, 杉山 博一, 沖原 光信, 辻 正邦: 複数亀裂におけるグラウト浸透挙動に関する基礎的研究, 第 65 回土木学会年次学術講演会, 2010
- 2) (財) 国土技術研究センター編集: グラウチング技術指針・同解説, 大成出版社, 2003
- 3) 延藤 遵, 西垣 誠, 見掛 信一郎, 小林 伸司, 佐藤 稔紀: 注入圧力によるグラウトの目詰まり現象抑制効果, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.4, pp.813-832, 2008
- 4) Karlsrud, K.: Control of Water Leakage when Tunnelling under Urban Areas in the Oslo Region, Water Control in Norwegian Tunnelling, Norwegian Tunnelling Society, Publication No.12, pp.27-33, 2002
- 5) Tolppanen, P., Syrjänen, P.: Hard Rock Tunnel Grouting Practice in Finland, Sweden, and Norway - Literature Study, Finnish Tunnelling Association, 2003
- 6) Bäckblom, G.: Experience on grouting to limit inflow to tunnels, POSIVA Working Report 2002-18, 2002
- 7) Johansen, P.: Inflow criteria for a railway tunnel in the greater Oslo area, Norwegian tunneling society Publication No. 12, 2001
- 8) Moen, P.: The greener side to grouting in Norway, Tunnels & Tunnelling International, June, 2004
- 9) Hässler, L., Stille, H., Håkansson, U.: Simulation of grouting in jointed rock, Proc. 6th International Congress on Rock Mechanics, Vol. 2, pp.943-946, 1988
- 10) Eriksson, M., Stille, H., Andersson, J.: Numerical calculations for prediction of grout spread with account for filtration and varying aperture, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 15, No. 4, pp.353-364, 2000
- 11) Eriksson, M., Fransson, Å., Emmelin, A.: Grouting trials in hard jointed rock-investigation, design and execution, 16th ICSMGE, pp.2247-2251, 2005
- 12) Gustafson, G., Stille, H.: Prediction of groutability from grout properties and hydro geological data, Tunnelling and Underground Space Technology 11(3), pp.325-332, 1996
- 13) Gustafson, G., Stille, H.: Stop criteria for cement grouting, Felsbau 23(3), pp.62-68, 2005
- 14) Kobayashi, S., Stille, H.: Design for rock grouting based on analysis of grout penetration - Verification using Äspö HRL data and parameter analysis, SKB R-07-13, 2007
- 15) Kobayashi S., Stille H., Gustafson G., and Stille B.: Real time grouting method, Development and application using Äspö HRL data, SKB R-08-133, 2008
- 16) Emmelin, A., Eriksson, M., Fransson, Å.: Characterisation, design and execution of two grouting fans at 450m level, Äspö HRL, SKB R-04-58, 2004
- 17) Fransson, Å., Gustafson, G.: The Use of Transmissivity Data from Probe Holes for Predicting Tunnel Grouting Analysis of Data from the Access Tunnel to the Äspö Hard Rock Laboratory, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol 15, No. 4, pp.365-368, 2000
- 18) Brantberger M., Stille, H., Eriksson, M.: Controlling the grout spread in tunnel grouting - Analyses and developments of the GIN-method, Tunneling and Underground Space Technology, Vol 15, No. 4, pp 343-352, 2000
- 19) 延藤 遵, 見掛 信一郎, 西垣 誠: 大深度岩盤掘削工事を対象とした効率的なプレグラウチング概念に関する提案, 土木学会論文集 C, Vol.65, No.4, pp.806-821, 2009
- 20) 内田 善久, 蓮本 清二, 小熊 昇, 神藤 健一: ダム基礎グラウチングの完了基準に関する実験的研究, 土木学会論文集 F, Vol.62, No.3, pp.531-545, 2006

ダム基礎グラウチングに関するシンポジウム
TS-1-1

高濃度グラウトの岩盤亀裂内への 浸透挙動予測モデルと注入管理手法

平成23年10月7日(金)

清水建設株式会社
○小林 伸司
延藤 遵
シャルマーシュエ科大学
辻 正邦




子どもたちに贈られるしごき。

研究の背景と目的

研究の背景

高レベル放射性廃棄物地層処分施設



300m深

①止水性能
高水圧下の環境において、厳しい漏水抑制が必要である。

②岩盤・補強材への影響
セメント系材料は、高アルカリ影響により岩盤や補強材の性能に影響を及ぼす可能性があり、グラウト浸透範囲を管理する必要がある。

③施工の経済性
プレグラウチングの工程短縮。

坑道近傍の必要最小範囲にグラウトを限定注入

研究の目的

硬質な亀裂性岩盤を対象とした高濃度グラウトの浸透挙動予測モデル・グラウト注入管理手法

北欧における、硬質な亀裂性岩盤を対象とした高濃度グラウトの浸透挙動研究


ダム基礎グラウチングへの適用性？

北欧のトンネルグラウチングの特徴 (1)

①厳しい許容湧水量

環境配慮型トンネルでは、厳しい湧水基準をグラウチングにより達成している。

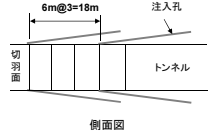


トンネル名	許容湧水量
Lundbyトンネル (Sweden)	0.5~2.5 L分/100m
Sandvika-Askerトンネル (Norway)	4~16 L分/100m
青函トンネル (日本)	150 L分/100m



②高密度の注入孔配置

Sandvika-Askerトンネル (Norway) の場合

クラス	許容湧水量	孔数	孔間隔	副孔長	グラウチング実施
3	4 L分/100m	48	@1m	24m	一発破進行長6m×3=18m毎

北欧のトンネルグラウチングの特徴 (2)

③高濃度グラウト ④高圧注入

トンネル名	注入順序	配合切替	注入圧力
Sandvika-Askerトンネル (Norway)	中央下側→上側 (水押し試験未実施)	W/C=1.1~1.5 (シリカフューム添加)	6~8MPa (最大10Ma)
Lundbyトンネル (Sweden)	水押し試験結果の大きい孔から	W/C=3 (20分) → W/C=2 (20分) → W/C=1	2MPa

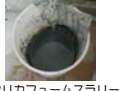

⑤高濃度配合を採用する理由

- ①注入時間の短縮
単位時間当たりのセメント注入量増大、配合切替回数の低減
- ②注入後の養生時間の短縮
初期強度を高めることで養生時間を短縮

トンネルの場合、グラウト注入作業により切羽を占有し、掘削作業が遅延するため、注入時間の短縮が重要

⑥その他 (グラウト材料)

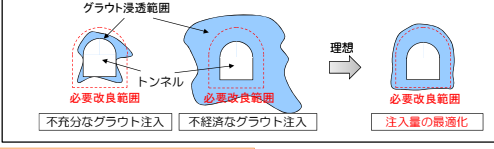
- シリカフュームスラリーの使用 (Norway)
- 溶液型グラウト材料 (コロイダルシリカ) の研究 (Sweden)

Gustafson & Stilleのグラウト浸透モデル (1)

Gustafson & Stilleのグラウト浸透モデル研究の目的

グラウト浸透距離をリアルタイムに算出して、必要な範囲にのみグラウトを注入するグラウト注入管理手法 (グラウト浸透距離に基づいた注入停止基準) の構築



Gustafson & Stilleのグラウト浸透モデルの対象

ピンガム流体 $r = -\mu_b \frac{dv}{dz} + r_0$

ニュートン流体 $\frac{dI}{dt} = \frac{dp}{dx} \frac{b^2}{12\mu_b} \left[1 - 3 \frac{Z}{b} + 4 \left(\frac{Z}{b} \right)^3 \right]$

$Z = r_0 \left| \frac{dp}{dx} \right|^{-1}$

$Z < \frac{b}{2}$

Gustafson & Stilleのグラウト浸透モデル (2)

Gustafson & Stilleのグラウト浸透理論

異なる開口幅、長さをもつ亀裂

注入孔

トンネル

浸透しているグラウト

グラウトの浸透状況

最大浸透距離 I_{max}

$$I_{max} = \left(\frac{\Delta p}{2r_0} \right) b \quad (\Delta p = p_g - p_w)$$

相対浸透距離 I_D

$$I_D = \frac{I}{I_{max}}$$

相対注入時間 t_D

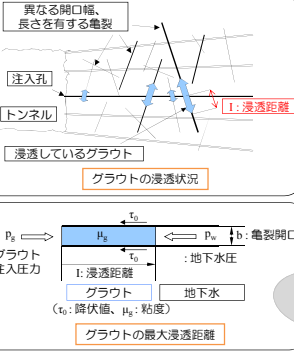
$$t_D = \frac{t}{t_0} \quad t_0 = \frac{6\Delta p \cdot \mu_g}{r_0^2}$$

I_D と t_D の関係の近似式

$$I_D = \sqrt{\theta^2 + 4t_D} - \theta$$

1次元流れ $\theta = \frac{t_D}{2(0.6 + t_D)}$

2次元流れ $\theta = \frac{t_D}{2(3 + t_D)}$



Gustafson & Stilleのグラウト浸透モデル (3)

Gustafson & Stilleのグラウト浸透理論

グラウト注入量とグラウト流量

※w: 1次元流れの幅

次元	グラウト注入量 V	グラウト流量 Q
1次元流れ	$V = I_D \cdot \left(\frac{\Delta p}{2r_0}\right) \cdot \sum w b^2$	$Q = \frac{dI_D}{dt} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left(\frac{\Delta p}{2r_0}\right) \cdot \sum w b^2$
2次元流れ	$V = \pi \cdot I_D^2 \cdot \left(\frac{\Delta p}{2r_0}\right) \cdot \sum b^3$	$Q = 2\pi \cdot I_D \cdot \frac{dI_D}{dt} \cdot \frac{1}{t_0} \cdot \left(\frac{\Delta p}{2r_0}\right) \cdot \sum b^3$

グラウト注入量 V、グラウト流量 Q、注入時間 t の関係

2次元流れ $\frac{Q \cdot t}{V} \approx 0.8$

1次元流れ $\frac{Q \cdot t}{V} \approx 0.45$

原位置での注入データ (グラウト注入量 V、グラウト流量 Q、注入時間 t) を使用してリアルタイムに次元を判定することが可能

⇒ 次元に応じたグラウト浸透距離の算出が可能

グラウト浸透モデルを適用した注入結果の予測 (1)

エスボ硬岩研究所

高レベル放射性廃棄物処分のための地下研究施設 (スウェーデン) 深度450mにおいてグラウト注入試験が実施されている。

試験箇所 (深度450m)

グラウト注入試験孔

先行ボーリング 試験坑道 探り削孔

Fan 1 注入孔 Fan 2 注入孔

試験の概要

- 3つのグラウトファン (Fan 1: 1次, Fan 1.2次, Fan 2)
- 配合切替あり (2~3配合)
- 従来の注入停止基準 (最小流量+最大注入量) を使用

注入仕様例 (Fan 1:1次)

- 注入孔: 孔数11、長さ16 m、半径32 mm
- 注入圧力: 地下水圧 + 1 MPa
- 注入終了基準: 流量 1 L/min
- 配合切替: 配合 B 150 L → 配合 C 50 L

配合	W/C	t ₀ (Pa)	μ ₀ (Pas)	h _{groutable} (μm)
B	1	1.5	0.017	41
C	0.8	10.3	0.093	44

亀裂開口幅の算出

- ケース1: 孔内湧水量から算出
- ケース2: 水押し試験結果から算出

グラウト浸透モデルを適用した注入結果の予測 (2)

注入結果の計算例

• Fan 1:1次-A2孔 (注入孔内に5本の亀裂: 水押し試験結果より0, 0, 70μm, 160μm, 342μm、2次元流れ)

配合Bで約80L (グラウト孔の容量を含めると150L) 注入

配合Cに配合切替後グラウト流量が1L/minで注入終了

※計算値の上限と下限は配合切替のモデル化の影響

実測値と計算値の全体比較

水押し試験に基づく亀裂開口幅を使用

孔内湧水量に基づく亀裂開口幅を使用

グラウト浸透モデルを適用した注入管理手法

注入管理手法のフロー

```

データ入力※
↓
注入開始
↓
基本システム
↓
流れの次元の判定
↓
グラウト浸透距離の推定
↓
亀裂開口幅 (総計) の推定
↓
流量 (理論値) の算出
↓
グラウト浸透距離の補正
↓
最小・最大浸透距離との比較
↓
注入終了
                    
```

注入管理のイメージ

※入力データ

- 必要浸透距離
- 最小亀裂開口幅
- 最小浸透距離
- 最大亀裂開口幅
- 最大浸透距離
- グラウト材料物性
 - 降伏値、粘度
 - 注入圧力
 - 地下水圧
 - 注入孔直径

グラウト浸透モデルを適用した注入管理手法の例示 (1)

適用データ

• エスボ硬岩研究所グラウト注入試験Fan 1.2次-A13孔の注入結果を利用

注入チャート (注入開始後20分まで)

グラウト注入孔の孔理め

注入開始後15分経過時の状況

1D補正 × 2D補正

入力データ

実測値

- グラウト材料物性
 - 降伏値: 0.296 e^{0.0004t} Pa
 - 粘度: 0.0056 e^{0.00004t} Pas
- 地下水圧: 3.36 MPa
- 注入孔容積: 70 L

設定値

- 最小亀裂開口幅: 0.1 mm
- 最小浸透距離: 20 m
- 最大亀裂開口幅: 0.2 mm
- 最大浸透距離: 40 m

2次元流れ

グラウト浸透モデルを適用した注入管理手法の例示 (2)

注入開始後15分経過時の状況

流量 (l/min) 注入圧力 (MPa)

流量 (理論値) 注入圧力 (設定値)

流量 (予測値) 注入圧力 (予測値)

流量 (理論値) 注入圧力 (理論値)

流量 (予測値) 注入圧力 (予測値)

流量 (理論値) 注入圧力 (理論値)

流量 (予測値) 注入圧力 (予測値)

注入開始後60分経過までの予測

流量 (l/min) 注入圧力 (MPa)

流量 (予測値) 注入圧力 (予測値)

流量 (理論値) 注入圧力 (理論値)

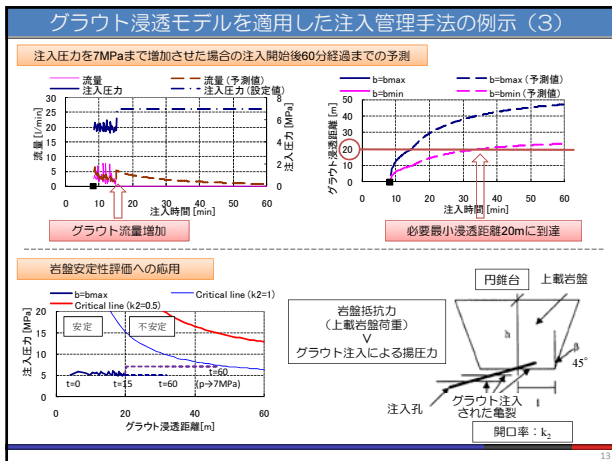
流量 (予測値) 注入圧力 (予測値)

流量 (理論値) 注入圧力 (理論値)

流量 (予測値) 注入圧力 (予測値)

グラウト流量: 0.2L/min

必要最小浸透距離20mに到達しない



ダム基礎グラウチングへの適用性と今後の研究課題

ダム基礎グラウチングへの適用性

- ダム基礎グラウチングでの初期配合として一般的に使用される低濃度のグラウトはニュートン流体に近い挙動を考えると考えられるため、Gustafson & Stilleモデルで扱っているビンガム流体の浸透理論とは異なる。
- 低濃度のグラウトはフリーディングが大きいため、セメント粒子の沈降等が浸透挙動に影響すると考えられるが、Gustafson & Stilleモデルでは考慮されていない。
- 低濃度グラウトを亀裂中において加圧脱水のため、**ため押し注入**が一般的に行われているが、グラウト浸透距離推定による注入管理手法では、ため押しを行うことなく注入が終了してしまい、亀裂内を完全に閉塞できない可能性がある。

例え

- 低濃度配合で注入が終了する孔に対しては、従来通りの注入終了基準を適用し、ため押しまで確実に実施する。
- 透水性が高く初期配合から高濃度配合を使用する場合や、高濃度配合に配合切替が行われた場合には、グラウト浸透距離推定による注入管理手法を適用する。

今後の研究課題

- 複雑な地質構造 (亀裂のネットワーク構造や断層破碎帯構造) への対応。
- 浸透距離と異なる浸透範囲 (①) の把握。
- 浸透範囲と異なる改良範囲 (②) の把握。

①浸透範囲 / ②十分に改良されていない浸透範囲

ご静聴ありがとうございました。

建設中の「Stockholm City Station」

出典: Swedish Transport Administration/ムベロ

子どもたちに買れるしごとを。

難改良性地盤や被圧水下における合理的なグラウチング技術

中島 雅和¹ 阿部 義宏² 金沢 智彦³ 山本 拓治⁴ 西垣 誠⁵

ダム基礎を対象に発展してきたグラウチング技術が近年、他の分野に応用される事例が増えつつあり、早期硬化型超微粒子注入材、極超微粒子注入材、動的注入システム、地下水位低下防止システム等の新しい技術が実用化されている。これらは難改良性地盤や被圧水下におけるグラウチング技術として有効である。本報告では、それらの技術を紹介すると共に、ダム分野への適用性を考察する。

キーワード: グ라우チング, 補修補強, 超微粒子, 極超微粒子, 動的注入

1. はじめに

地盤や構造物の間隙、割れ目、空洞を硬化材料で充填するグラウチング技術は 1802 年、フランスの Chales Berigry により発明された。それを源流とする技術がダムの基礎処理に応用され、1930 年代に米国内務省開拓局が Colorado 川に建設した Hoover ダム等で近代的なダム基礎グラウチングの技術として体系化された。

我が国では戦後の経済復興期に大型ダムが相次いで建設された。当時、最先端の欧米の技術が導入されるとともにダム基礎グラウチングの重要性が認識され、その施工例が増大した。それらを踏まえて 1972 年、土木学会岩盤力学委員会の手で『ダム基礎岩盤のグラウチング施工指針』がとりまとめられた。

さらに 1983 年、建設省河川局開発課監修『グラウチング技術指針・同解説』が刊行された。同指針により、岩盤の透水性評価および中央内挿法による改良効果の確認、セメント系懸濁型グラウトの使用、配合切り替え、注入圧力および注入速度の規制、だめ押しによる注入完了等の特徴とする、我が国のダム基礎グラウチングの標準が示された。その後、安全性と経済性を両立させながら計画面、設計面、施工面の合理化が追求され、同指針は 2003 年に全面的に改訂されて現在に至る。

そのダム基礎グラウチングの技術が近年、他の分野に応用される事例が増えつつある。それに伴いダム基礎グラウチングの技術を基本として開発され、実用化された新しい技術も登場している。それらの中には難

改良性地盤や被圧水下におけるグラウチング技術として有効性が認められるものも少なくない。

本報告では、それらの技術を紹介するとともに、それらのダム分野への適用性について考察する。

2. ダム以外の分野のグラウチング

ダム基礎グラウチングの技術が応用されている分野は、地下空洞やトンネルのプレグラウチング、ポストグラウチング、廃棄物最終処分場の鉛直遮水工等、多岐にわたる。それらの代表例を以下に示す。

2.1 地下空洞¹⁾

石油やガスの地下備蓄基地は、水封トンネルと水封ボーリングから岩盤へ給水することで石油やガスを封じ込める「水封式」を採用している。

地下水圧を一定に保ち、水封機能を適切に確保する目的と湧水量を低減する目的で、岩盤貯槽および水封トンネル周辺の岩盤にプレグラウチングおよびポストグラウチングが実施されている。

その改良目標は透水係数で 10^{-6}cm/s オーダー（1ルジオン未満）である。注入材料として主に超微粒子注入材が用いられ、注入圧力は最大で湧水圧力+2~3MPa 程度である。

当分野のグラウチングで実用化された新しい技術は、被圧水下におけるグラウトの逆流抑制に効果がある早期硬化型超微粒子注入材（3.1 項参照）と、岩盤中の微細な割れ目の注入効率を高める動的注入システム（4.1 項参照）である。

¹ 日特建設株式会社 技術本部, 次長

² 日特建設株式会社 経営企画室, 室長

³ 日鐵セメント株式会社 技術部 研究所, 副主幹研究員

⁴ 鹿島建設株式会社 技術研究所 岩盤・地下水グループ, グループ長

⁵ 岡山大学大学院 環境学研究科, 教授

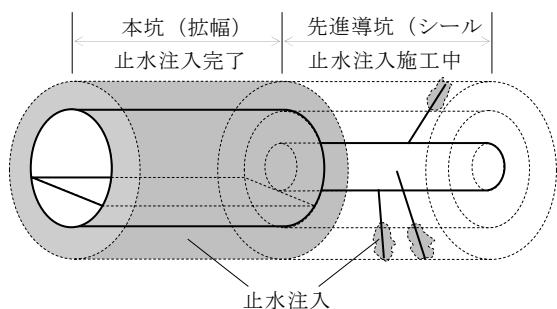


図-1 ウォータタイトトンネルの止水注入例

2.2 トンネル²⁾

一般の山岳トンネルでは、構造体に作用する水圧を軽減するため、地下水をトンネル内に引き込む排水型構造をとる例が多いが、地山の地下水位を維持する目的で止水型構造をとる場合もある。後者をウォータタイトトンネルと言い、排水型構造のトンネルに比べ、トンネル周辺地山はより高い止水性、強度が求められる。そのためウォータタイトトンネルでは、掘削前にトンネル全周に対して止水注入（ブレグラウチング）が施工される（図-1 参照）。

止水注入の改良目標は透水係数で 10^{-6}cm/s オーダー（1 ルジオン未満）であり、難改良性地盤に対して極超微粒子注入材（3.2 項参照）を使用する事例もある。またボーリング・注入の作業中においても地山の地下水を低下させないため、地下水位低下防止システム（4.2 項参照）を採用した事例もある。

3. ダム以外の分野で実用化された注入材料

セメント系懸濁型グラウトは溶液型グラウトに比べて長期耐久性に優れるが、浸透性に劣る。そのため粒子を微粉碎化し、最大粒径を $10\mu\text{m}$ 程度（普通ポルトランドセメントで $100\mu\text{m}$ 程度）、平均粒径を $4\mu\text{m}$ 程度（同 $10\sim 20\mu\text{m}$ 程度）に調整して浸透性を高めたセメント系注入材が 30 年以上前に実用化された。その注入材料を超微粒子注入材と言い、これまでにダム基礎グラウチングで多くの使用実績がある。

一方、他分野のグラウチングでも、超微粒子注入材を採用する事例が近年、増えつつある。それらの中で従来の超微粒子注入材の性質を改善し、高度化した新しい注入材料が実用化されている。それらについて以下に述べる。

表-1 早期硬化型超微粒子注入材の諸物性

平均粒径 (μm)	密度 (g/cm^3)	化学成分(%)			凝結時間 始発(h-m)
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	
3.9	2.99	30	12	50	4-30

3.1 早期硬化型超微粒子注入材³⁾

地下深部の空洞やトンネルのグラウチングは、地下数十～数百メートルの被圧水下で微細な割れ目幅を有する硬岩を対象とし、改良目標値 10^{-6}cm/s オーダーの高い止水性を確保することが求められる。

微細な割れ目が発達した岩盤に対しては、粒径の小さい超微粒子注入材が効果的である。しかし従来の超微粒子注入材には、以下の課題がある。

① 微細なセメント粒子を分散させるため高性能分散剤を使用していることから、凝結時間が遅延するという欠点がある。これによりグラウトの逆流防止のための硬化待ち時間が長くなり、掘削工程に影響を及ぼす。

② 浸透性が良いことから、必要範囲外にグラウトが逸脱しやすい。

上記の課題を解決するため、凝結時間を早めた超微粒子注入材が早期硬化型超微粒子注入材である。以下にその性質を示す。

(1) 特徴

- ① 早強セメント並みの凝結時間が得られる。
- ② 限定注入が可能で必要範囲外への逸脱を低減できる。
- ③ 分散剤がプレミックスされており、安定した品質・性能が得られる。
- ④ 長期耐久性に優れる。
- ⑤ 粒子が細かいので、微細な割れ目や間隙に注入できる。
- ⑥ 超微粒子注入材に比べてやや高価である。

(2) 物性

諸物性を表-1 に示す。

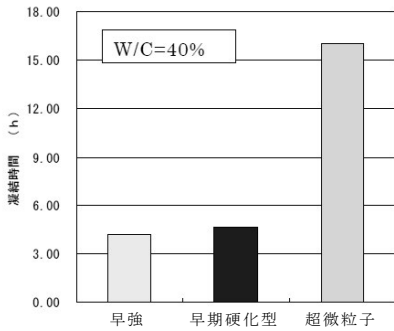


図-2 凝結時

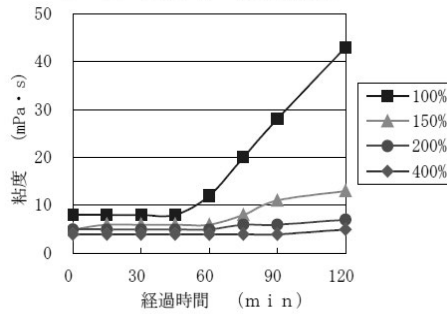


図-3 粘度測定

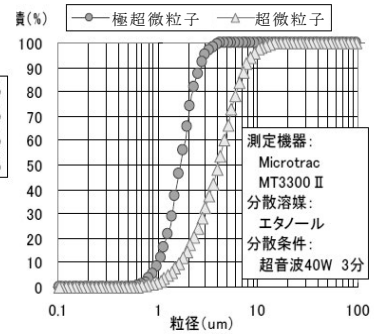


図-4 粒度分布

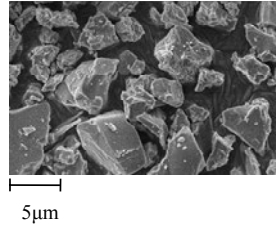
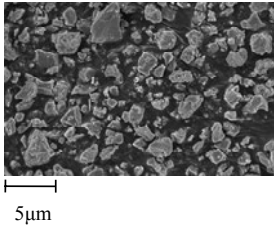


図-5 極超微粒子注入材

図-6 超微粒子注入材

(3) 凝結時間

早強セメント，従来の超微粒子注入材（高性能分散剤 1%）および早期硬化型超微粒子注入材の凝結時間を測定した結果を図-2 に示す。

早期硬化型超微粒子注入材が早強セメントとほぼ同程度の凝結時間を示すことがわかる。

(4) 粘性

粘度測定結果を図-3 に示す。

早期硬化型超微粒子注入材によるグラウトは，水セメント比 200%以上の貧配合領域では従来の超微粒子注入材と同様に長時間にわたり低粘性を示す。また水セメント比 150%以下の富配合領域では，1時間程度まで低粘性を示すが，その後は緩やかに粘性が上昇する。

3.2 極超微粒子注入材^{4) 5) 6) 7)}

長期耐久性が要求されるウォータタイトトンネルの止水注入では，微細な割れ目や構成粒子の間隙が透水性を有する軟岩や未固結堆積層の地山に浸透し，かつ高い強度を発現する注入材料が求められる場合がある。

しかし一般に超微粒子注入材の浸透限界は，岩盤の割れ目に対しては幅 50μm 程度まで，砂質土地盤に対しては透水係数で 10⁻²cm/s 程度までと言われており，これらの地山を十分に改良することは困難である。

表-2 極超微粒子注入材の諸物性

平均粒径 (μm)	密度 (g/cm ³)	化学成分 (%)			凝結時間 始発 (h-m)
		SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	
1.5	2.94	29	13	45	16-00

一方，注入材料の粒子を超微粒子注入材の粒径より単純に細かく粉砕すると，粒子間に作用する付着力が増大してグラウト中で凝集体を形成しやすくなり，逆に浸透性が低下する。

こうした課題を解決したのが極超微粒子注入材である。以下にその性質を示す。

(1) 特徴

- ① 平均粒径が 1.5μm と極めて小さい。
- ② 特殊分散剤の効果により，粒子の凝集が抑制され，そのグラウトは著しく高い浸透性を有する。
- ③ 長期耐久性にすぐれる。
- ④ 超微粒子注入材に比べて高価である。

(2) 粒度分布

極超微粒子注入材と超微粒子注入材の粒度分布を図-4 に，電子顕微鏡写真を図-5，6 示す。

(3) 物性

極超微粒子注入材の密度，化学成分および凝結時間を表-2 に示す。

(4) スリット通過試験

極超微粒子注入材と超微粒子注入材のスリット通過試験（図-7，8 参照，矢印は注入方向を示す）の結果を図-9 に示す（注入圧力 0.3MPa）。極超微粒子注入材は，幅 20μm のスリットで目詰まりすることなく通過した。一方，超微粒子注入材は，幅 20μm のスリットで注入開始 10 分後に目詰まりを生じ，試験装置内にろ過体を形成した。

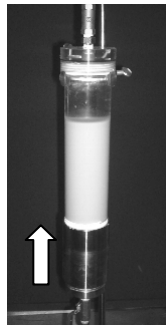


図-7 試験状況
(20μm, 極超微粒子)

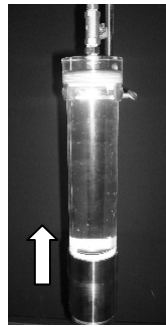


図-8 試験状況
(20μm, 超微粒子)

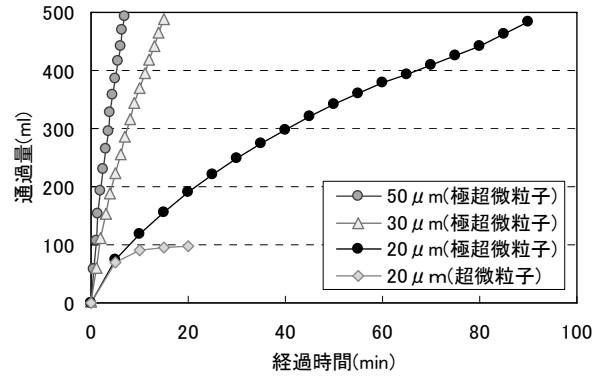


図-9 スリット通過試験結果

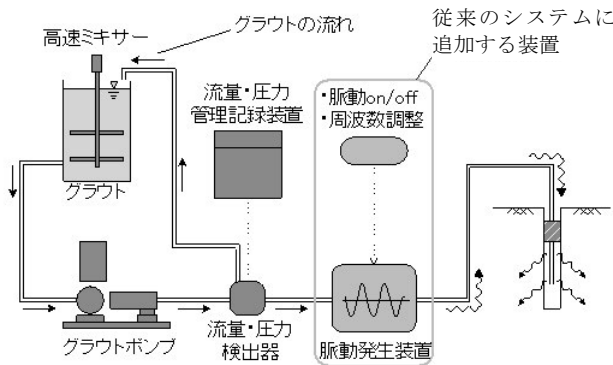


図-10 動的注入システム

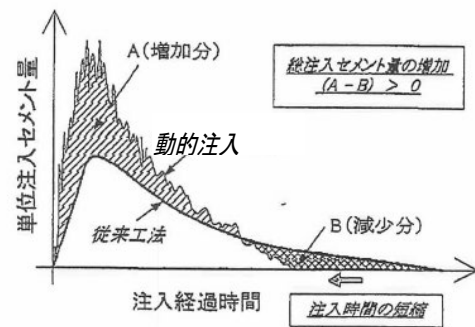


図-11 動的注入と従来工法による注入の比較

4. ダム以外の分野で実用化された施工システム

ダム以外の分野で実用化されたグラウチングの施工システムについて以下に述べる。

4.1 動的注入システム⁸⁾⁹⁾

c 動的注入システムは、一定の注入圧力に制御された脈動を加え、注入を行なうものである(図-10参照)。同システムは、石油地下備蓄基地のグラウチングに採用され、試験的にダムで使われた例もある。

セメント系懸濁型グラウトの浸透性を阻害する要因として、グラウト中のセメント粒子が凝集し、粗大粒子を形成する現象が挙げられる。一般には分散剤を用いてその状態を改善するが、動的注入によりセメント粒子の分散性を向上させることも可能である。さらにグラウトの見掛けの粘性を低下させ、岩盤の割れ目内の充填物を除去し、セメント粒子の目詰まりを防止する、といった働きもある。

動的注入に期待できる効果を以下に示す。

- ① 注入作業の効率化(同配合で、より短い時間で、より多くのセメントが注入可能、図-11参照)。
- ② より微細な割れ目への注入。

- ③ 初期富配合による注入の可能性。
- ④ 止水性(品質)の向上。
- ⑤ 高次数の追加孔の削減。
- ⑥ コスト、工期の縮減。

4.2 地下水位低下防止システム

ウォータタイトトンネルの建設において、ボーリング、注入の作業中も地山の地下水位を維持する目的で、地下水低下防止システムが採用された事例がある(図-12参照)。同システムは、注入口元に取り付けたプリベンタで排出される水を集め、その水量を計測し、同量の水を孔内に送水することで水収支の極小化を図る機構を有している。

5. ダム分野における他分野の技術の適用性

新設ダムの基礎処理はもちろん、既設ダムの補修補強グラウチングにおいても、難改良性地盤や被圧水に対する効果的、効率的な注入方法の提案が求められている。

ここでは前述の技術をそれらのグラウチングに適用することが可能もしくは有効と考えられる事例とその留意点について述べる。

5.1 難改良性地盤を対象とするグラウチング

5.1.1 極超微粒注入材の適用

(1) 考えられる適用例

- ・軟岩や未固結堆積層に潜在する微細な割れ目や粒子間の間隙を注入の対象とする場合。
- ・超微粒注入材を用いても改良効果が顕著でない場合。
- ・限界圧力が低く、浸透注入が有効であると判断できる場合。

(2) 留意点

- ・極超微粒注入材が、超微粒注入材より高価であることを考慮して費用対効果を十分に検討する必要がある。
- ・上記のため、極超微粒注入材を含む複数の注入材料で試験施工を行なうのが望ましい。
- ・それらのデータを元に、例えば注入孔の間隔とルジオン値の関係から推測した改良限界ルジオン値等を参考にして注入材料を選定する。

5.1.2 動的注入システムの適用

(1) 考えられる適用例

- ・セメント粒子の目詰まりにより、十分な改良効果が得られない場合。
- ・貧配合で注入が完了する例が多く、十分な改良効果が得られない場合。
- ・注入時間が長すぎる場合（富配合との併用）。

(2) 留意点

- ・岩盤や構造物に有害な影響を与えない範囲で注入圧力の脈動幅を設定する。
- ・岩盤や構造物の変位が懸念されるコンクリートダムのコンソリデーショングラウチングやロックフィルダムのブランケットグラウチングでの採用については慎重に検討する。
- ・開始配合を富配合に変更する場合、事前に試験施工を実施する。

5.2 湛水後のダムの補修補強グラウチング

5.2.1 早期硬化型超微粒注入材の適用

(1) 考えられる適用例

- ・被圧水下にある岩盤の割れ目や堤体コンクリートの微細な割れ目、継ぎ目等が水みちとなっている場合。
- ・上記の条件でグラウトの逆流が懸念され、長い硬化待ち時間が必要な場合。
- ・工期が短い場合。

(2) 留意点

- ・グラウトの逆流を防止するのに必要な硬化待ち時間を試験施工等で確認する。

5.2.2 地下水低下防止システムの適用

(1) 考えられる適用例

- ・ボーリング、注入作業での湧水がダムの安全に有害な影響を与える懸念がある場合。

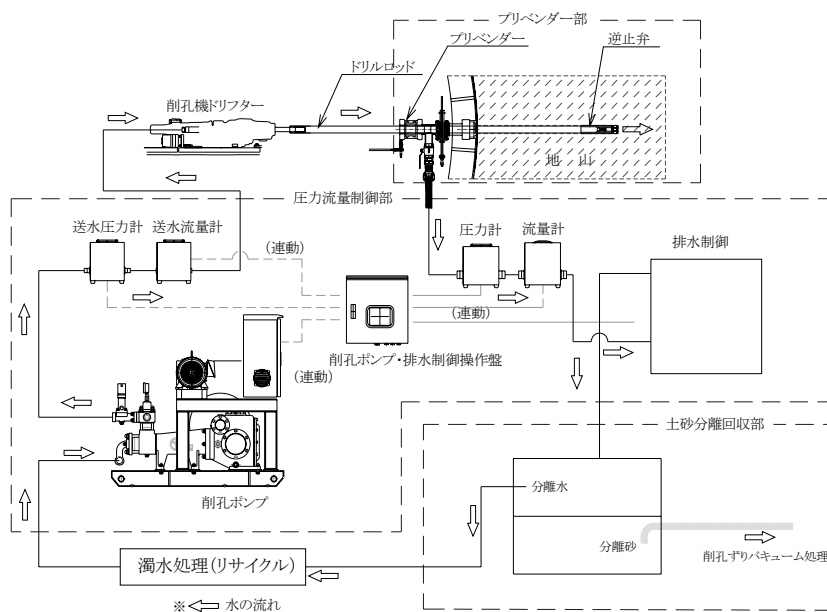


図-12 地下水位低下防止システム

- ・突発的な大量湧水が懸念される場合。

(2) 留意点

- ・システムの設置や操作手順の教育と遵守が必要となる。

6. 将来におけるダム基礎グラウチング技術の他分野への展開

ダム基礎グラウチングの特筆すべき事項の一つに「常にデータを収集分析し、グラウチング計画の妥当性の検証を行い、必要に応じて計画の見直しを行なう」¹⁰⁾という管理方法がある。

こうした管理を迅速かつ確実にこなすため、グラウチングに関する情報をデジタル化して、データベースにとりまとめ、インターネットを介して共有するシステムが実用化されている。

こうした注入システムの適用範囲をダム以外の分野へ広げる構想がある。

図-13 にその新しい注入システム の概念を示す。

この注入システムは、従来の施工仕様登録機能、作業指示機能、日報作成機能に加えて、ルジオン値、注入セメント量等のデータを用いた一般的な解析機能を備える。

さらにデータの一元管理を行うとともに、データ送信機能を使って日報、集計表、データ解析図表等を公開用サーバに登録し、インターネットを経由し

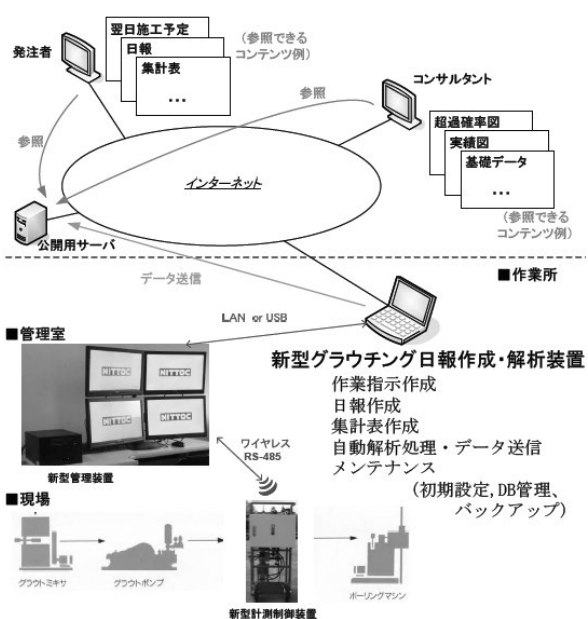


図-13 新しい注入システム の概念

た関係者の閲覧を可能とする。

また注入制御装置は、幅広い用途に適応できるように動的注入機能を備え、さらに大深度グラウチング等で求められる 10MPa 超の高圧注入を安全に行なえるよう高度の流量圧力制御機構を有する。

現在、こうした構想の実現に向けて新しい注入システムの開発が進められている。

7. おわりに

以上、本報告では、ダム分野で培われた後に他の分野で応用され、実用化された新しいグラウト技術を紹介した。近年これらの技術は逆にダム分野で活用されようとしている。

筆者らは、こうした分野を超えた技術交流を継続することにより、ダム基礎グラウチングの技術がますます発展し、安全・安心な国土造りに貢献できると考えている。

参考文献

- 1) 前島俊雄：波方基地 LPG 地下岩盤貯槽建設の概要、岩の力学 News No.082, 2007
- 2) 千場洋：超高水圧、硬岩地山を克服した八王子城跡トンネルの止水構造について、国土交通省国土技術研究会報告, 2007
- 3) 日鐵セメント：早期硬化型超微粒子セメント, SF-X3, 製品カタログ。
- 4) 日鐵セメント：極超微粒子セメント, HNP-1500, 製品カタログ。
- 5) 西垣誠, Chegbeleh Larry Pax, 金沢智彦：セメント系極超微粒子注入材による地盤改良, 未来材料, Vol.8 No.9, 2008
- 6) 金沢智彦, 西垣誠, Chegbeleh Larry Pax：高浸透性セメント注入材による地盤改良, 第 54 回地盤工学シンポジウム, 2009
- 7) 小泉悠, 田中俊行, 竹内仁哉, 金沢智彦, 西垣誠：極超微粒子注入材による地盤改良工法の開発, 第 9 回地盤改良シンポジウム論文集, 2010
- 8) 脇田慎吾, 伊達健介, 山本拓治, 吉迫和生, 加藤節郎, 青木謙治：動的圧力を利用した岩盤注入工法—ダイナプレス工法—, 鹿島技研研究所年報 51 号, 2003
- 9) 日比谷啓介, 山本拓治, 伊達健介：動的注入(ダイナプレス)工法の開発, 電力土木, No.304, 2003
- 10) 国土技術研究センター編集：グラウチング技術指針・同解説, 2003

難改良性地盤や被圧水下における合理的なグラウチング技術

日特建設株式会社

技術本部 中島 雅和

はじめに

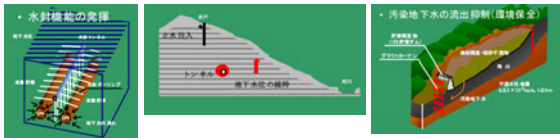
ダム基礎を対象に発展してきたグラウチング技術が、他の分野に応用され、新しい技術が実用化されている。

発表内容

- 1) 応用分野と実用化された技術の紹介
- 2) ダム分野への適用性
- 4) 他分野への展開

応用されている分野

- (1) 地下空洞
石油やLPGを貯留する空洞
- (2) トンネル湧水の低減
- (3) 廃棄物処分場 鉛直遮水工 等



地下空洞への応用

1. 概要:
水封式地下備蓄基地建設におけるグラウチング
2. 目的:
水封機能の確保、湧水量の低減
3. 性能:
改良目標値 10^{-6} cm/s以下(1Lu未満)
4. 実用化された新技術:
・早期硬化型超微粒子注入材
・動的注入システム

トンネルへの適用

1. 概要:
掘削前にトンネル全周に対して止水注入を施工する。
2. 目的:
地山の地下水位の維持
3. 性能:
改良目標値 10^{-6} cm/s以下(1Lu未満)
4. 実用化された新技術:
・極超微粒子注入材
・地下水位低下防止システム

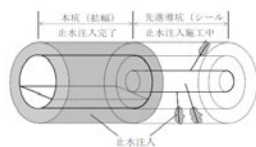
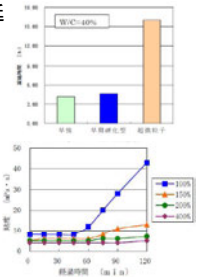


図-1 ウォータタイトトンネルの止水注入例

早期硬化型超微粒子注入材

- 1) 従来の超微粒子注入材
高性能分散剤により凝結時間が遅延
- 2) 課題
・硬化待ち時間が掘削工程に影響
・必要範囲外にグラウトが逸脱
- 3) 特徴
・早強セメント並みの凝結時間
・富配合領域で1時間後、粘性が上昇



極超微粒子注入材

- 従来の超微粒子注入材の浸透限界
岩盤割れ目50 μm 程度、砂質土地盤10⁻²cm/s程度
- 課題
単純に細かく粉碎すると、
粒子間の付着力により粗大粒子形成
- 特徴
 - 平均粒径1.5 μm
 - 特殊分散剤による
粒子の凝集を抑制
 - 幅20 μm のスリット
で目詰まりなく通過

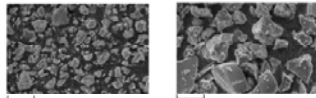


図-5 極超微粒子注入材 図-6 超微粒子注入材

動的注入システム

- 課題
セメント系懸濁型グラウト材の浸透性を阻害する要因
↓
セメント粒子が凝集、粗大粒子
- 特徴:
注入圧力に制御された
脈動を加える
↓
グラウトの見掛けの粘性を低下
セメント粒子の目詰まりを防止

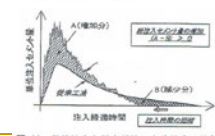
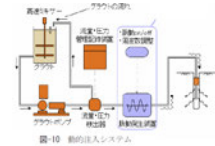


図-11 動的注入と従来工法による注入の比較

地下水位低下防止システム

- 課題
ウォータタイトトンネルの建設において、ボーリング、注入作業中も
地山の地下水位を維持する必要がある。
- 特徴
排水量と送水量を
計測・同量制御
↓
水収支の極小化
↓
地下水位維持

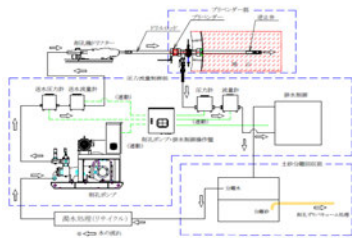


図-12 地下水位低下防止システム

難改良性地盤対象とするグラウチング

- 極超微粒子注入材の適用
- 適用例
 - 軟岩、未固結堆積層の微細な割れ目、粒子間隙対象
 - 改良効果が顕著で無い
 - 限界圧力が低い(浸透注入が有効)
 - 留意点
 - 費用対効果の検討
 - 試験施工
 - 既往データ分析(改良限界ルジオン値等)

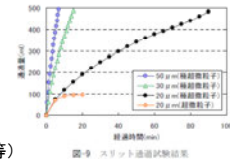


図-9 スリット透過試験結果

難改良性地盤を対象とするグラウチング

- 動的注入システムの適用
- 適用例
 - セメント粒子の目詰まりが原因
 - 貧配合で注入完了
 - 注入時間が長い
 - 留意点
 - 岩盤、構造物に有害な影響を与えない脈動幅の設定
 - 試験施工により効果検証

湛水後のダムの補修補強グラウチング

- 早期硬化型超微粒子注入材の適用
- 適用例
 - 被圧水下にある岩盤割れ目、堤体コンクリートの微細な割れ目、継ぎ目が水みちとなっている場合
 - グラウトの逆流が懸念される
 - 工期が短い場合
 - 留意点
 - 試験施工により確認

湛水後のダムの補修補強グラウチング

地下水低下防止システムの適用

(1)適用例

- ・ボーリング、注入作業での湧水がダムの安全に影響
- ・突発的な大量湧水が懸念される場合

(2)留意点

- ・設置や操作手順の教育と遵守

将来の他分野への応用

新しい注入システム

1. 概要

- ・グラウト情報をデータベース化、インターネットを介して共有

2. 特徴

- ・日報処理機能、一般的な解析機能
- ・インターネットを経由して関係者が閲覧可能
- ・10MPa超の高圧注入を行える流量圧力制御機能

将来の他分野への応用

新しい注入システム

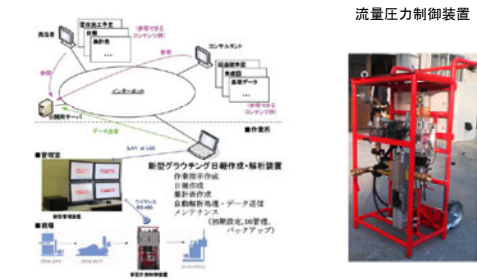


図-13 新しい注入システムの概念

おわりに

分野を超えた技術交流が継続
↓
ダム基礎グラウチングの技術発展
↓
安全・安心な国土造りに貢献

グラウチングにおける合理化検討

遠山 修平¹ 永松 和彦² 尾後 大輔³ 山口 嘉一⁴ 佐々木 靖人⁵

ダムにおける効果的なグラウチングを行うためには、グラウチング対象となる岩盤の性状、透水特性及びセメント注入量など総合的に判断する必要がある。九州地方整備局ではグラウチング指針改訂後、各ダムにおいて効果的なグラウチング計画を検討しているところである。そこで基礎岩盤が花崗岩であり、概ね類似した水理特性を持つ、嘉瀬川ダム（重力式コンクリートダム）及び大分川ダム（ロックフィルダム）でのグラウチングの実施工や試験施工結果より、グラウチングの合理化に関する検討内容について取りまとめたものである。

キーワード：ダム、グラウチング、合理化検討

1. はじめに

近年、日本の社会資本整備を取り巻く環境は大きく変化しており、国・地方ともに財政事情が極めて厳しいことから、ここ数年、公共事業予算は削減傾向が続いている。今後もこの傾向は継続すると予想され、ダム事業においても調査、計画、施工、管理における一連のサイクルの中で費用を極力抑えることが求められている。

ダムの重要な工種の一つであるグラウチングについても平成15年7月に改訂となった「グラウチング技術指針・同解説」では、①各種グラウチングの本来の施工目的・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安全性を損なわないことを前提としたグラウチングの合理化（コストの縮減）を図ることを求められており、基礎掘削面の観察や施工時のデータ収集と分析など、現場技術者の適切な技術的判断が従来以上に必要となった。

そこで、今回はグラウチング技術指針改定後に九州地方整備局で初めてグラウチングを実施した嘉瀬川ダムの施工事例及び現在グラウチング計画を検討している大分川ダムでのグラウチング試験施工など踏まえ、九州グラウト部会にて合理化に関する議論を行った内容について報告する。

1.1 嘉瀬川ダム及び大分川ダムの概要

嘉瀬川ダムは、一級河川嘉瀬川水系嘉瀬川の上流部、佐賀県佐賀市富士町に建設中の洪水調節、流水の正常な機能の維持、かんがい用水、都市用水の供給、並びに発電を目的とした多目的ダムであり、現在試験湛水を実施している。

大分川ダムは、一級河川大分川水系大分川の支川七瀬川の県大分市に建設中の洪水調節、流水の正常な機能の維持、水道水の確保を目的とした多目的ダムである。

2. 合理化検討項目

今回、報告する合理化検討項目は、嘉瀬川ダムの施工事例として、改良目標値、改良基準の緩和、2ステージ一括注入、チェック孔改良目標値超過箇所の対応の4項目と大分川ダムでの試験施工として、注入完了基準速度の緩和の1項目計5項目について報告する。

3. 改良目標値の検討

嘉瀬川ダムでは未風化透水帯でのカーテングラウチング本施工に先立ち、図-1のブロック（BL-17,18,19,20,21,22）で試験施工を実施した結果をもとに、未風化帯のグラウチング（本施工）を行った。

その試験施工結果及び本施工結果を以下に示す。

¹九州グラウト部会 委員 国土交通省九州地方整備局河川部地域河川課 係長

²九州グラウト部会 座長 国土交通省九州地方整備局嘉瀬川ダム工事事務所 調査設計課 課長

³九州グラウト部会 委員 国土交通省九州地方整備局嘉瀬川ダム工事事務所 調査設計課 係長

⁴九州グラウト部会 アソシアート 独立行政法人土木研究所 水工研究グループ 上席研究員

⁵九州グラウト部会 アソシアート 独立行政法人土木研究所 地質・地盤研究グループ 上席研究員

3.1 岩盤性状

改良目標値 2Lu を僅かに超過する (3.2Lu) ステージのボーリングコアでは、概ね 10~30cm 間隔で割れ目が確認される。しかし、孔壁展開画像では割れ目として認識されても概ね密着しているものが殆どであり、概ね割れ目としての認識が困難である (写真-1)。

このステージでの透水要因は深度 24.5m のマサを挟在する傾斜 70° の割れ目と、深度 25.5m の割れ目沿いの一部が酸化褐色化した割れ目と考えられる。これらの割れ目は地山で大きく開口しておらず、割れ目周辺の岩盤で強い褐色酸化や流入粘土等の挟在物は認められない (写真-2)。

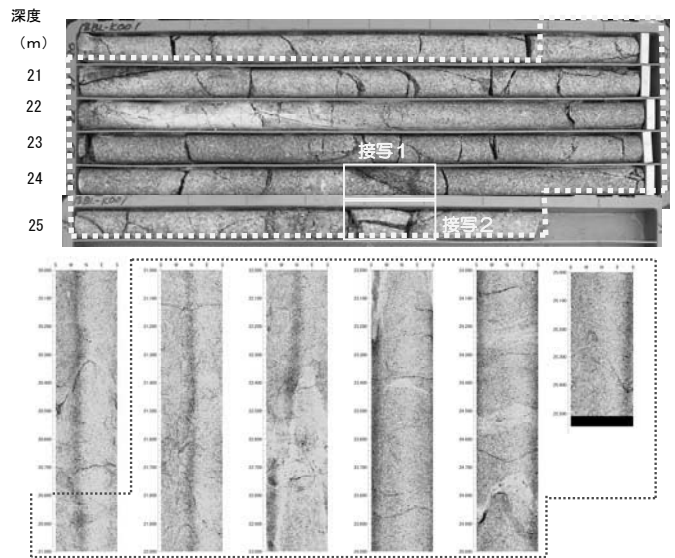


写真-1 2Luを僅かに超えるステージ (3.2Lu)
(BL14 4st 深度20.8m~25.8m)
(上：ボーリングコア写真,下：孔壁展開画像)

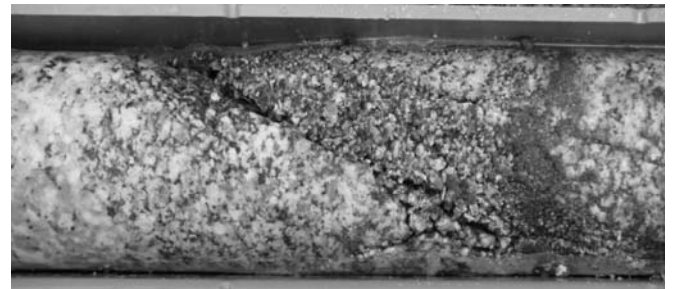
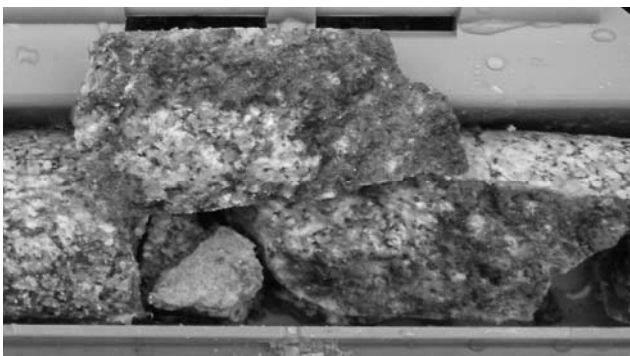


写真-2 ボーリング2コア接写 (左：接写2 (25.5m),右：接写1 (24.5m))

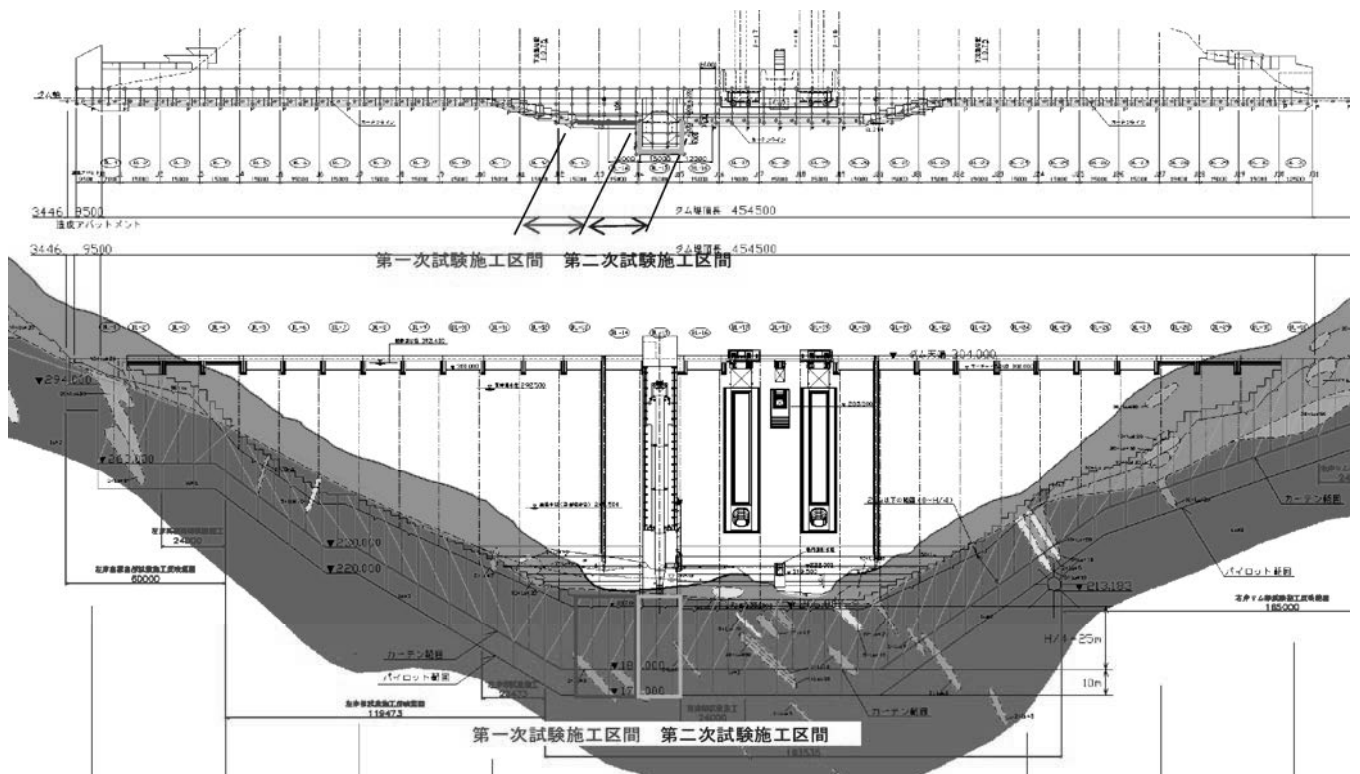


図-1 嘉瀬川ダム試験施工箇所

3.2 透水特性

2Lu 以上の透水性を示すステージの P-Q 曲線は、同じ圧力でも昇圧時の流量より降圧時の流量が少ない逐次流量減少型²⁾を示す。注入チャートを見ると圧力段階を上げた直後に流量が大きくなるが、漸次流量が減少し、流量が安定するまでに時間を要する(図-2)。

逐次流量減少型の P-Q 曲線を示すこのステージでは、長時間水押試験を実施すると P-Q 曲線もほぼ直線となり、ルジオン値も初期ルジオンテストでの 3.2Lu から 1.9Lu になることが確認されている(図-3)。

逐次流量減少型の P-Q 曲線を示すステージにおいて、未風化帯での試験施工及び本施工のデータ蓄積を行い、標準の水押・透水試験でのルジオン値、長時間の水押・透水試験及び逐次流量減少型などの関係を整理した結果、長時間水押・透水試験から得られるルジオン値は標準のルジオン値に対して、1Lu 程度小さくなっている(図-4)。

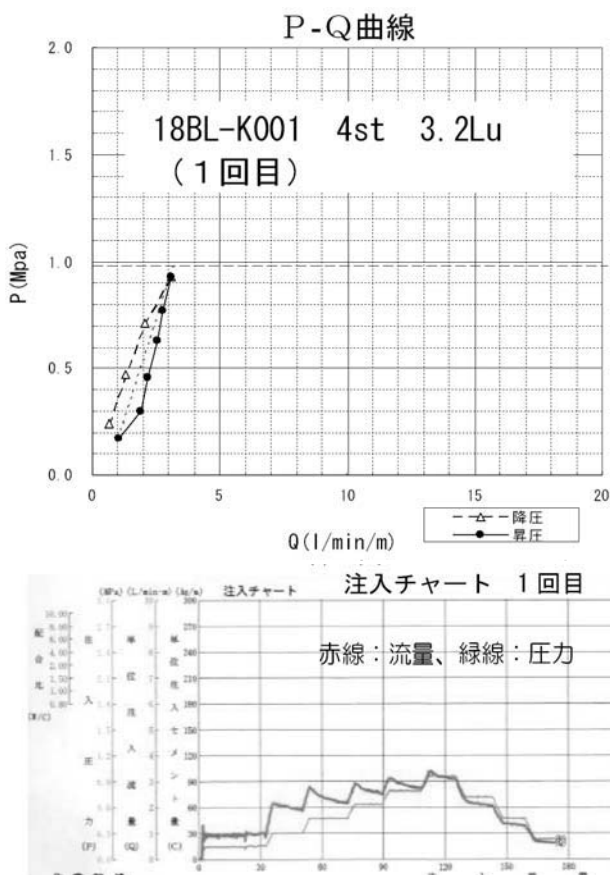


図-2 逐次流量減少型P-Q曲線と注入チャート

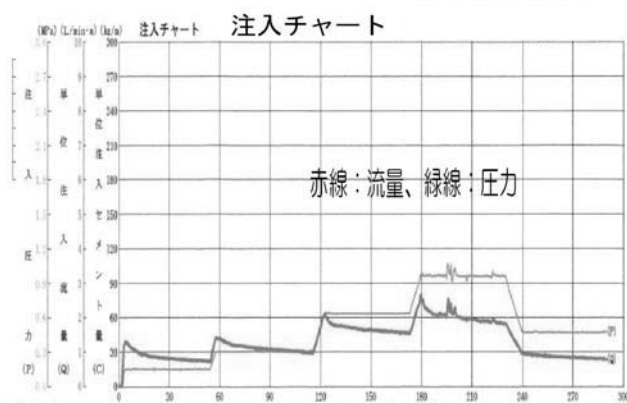
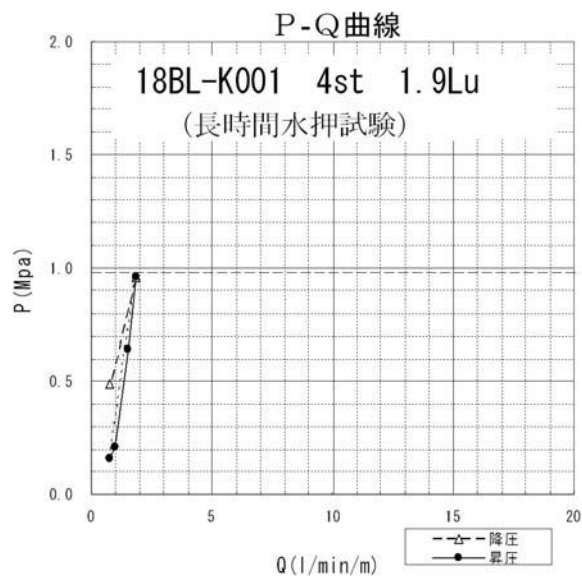


図-3 長時間水押試験のP-Q曲線と注入チャート

BL	孔名	st	ルジオン値		標準から長時間の時間間隔	逐次流量減少型
			標準の水押し・透水試験	長時間水押し・透水試験		
18	4002	2	3.9	2.1	9min	○
18	4007	7	1.7	1.4	41h	
18	K001	4	3.2	1.9	99h	○
19	4001	1	6.3	5.0	2h	○
19	4008	5	3.5	0.7	17h	
24	2002	3	3.6	3.0	26h	○
24	3002	4	7.1	5.9	25h	○
25	3003	5	5.4	4.2	33h	○
27	P001	2	9.2	6.7	15min	○
27	P001	5	3.6	2.8	24min	
27	P001	6	3.4	2.6	24h	○
28	P001	5	12.0	3.7	28h	○
28	3004	5	6.6	3.8	6h	○
29	3003	3	6.0	5.0	3h	

※24-2002-3st : 1回目0.03MPa/min 3.6Lu 2回目0.05MPa/min 3.3Lu 3回目長時間 3.0Lu

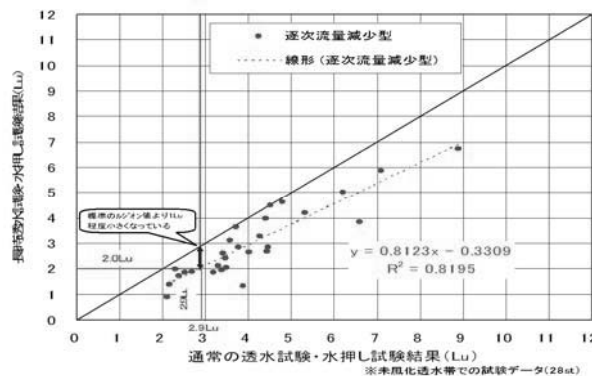


図-4 標準のルジオン値と長時間ルジオン値の関係

3.2 単位セメント注入量

ルジオン値と単位セメント注入量（図-5）の関係から、ルジオン値が 2Lu 以下の場合、単位セメント注入量は概ね 10kg/m 以下となっている。また、ルジオン値が 2.1~2.9Lu でも単位セメント注入量は概ね 10kg/m 以下となっている。

3.3 対応方針結果

嘉瀬川ダムの改良目標値については、ダム高100m級のコンクリートダム、水理地質構造、全体的に難透水性地盤であること等からグラウチング技術指針・同解説(H15.7)を参考にH/4までの浅部については2Luと計画していた。しかし、グラウチング試験施工及び本施工結果等を基に、基礎岩盤の性状、P-Q曲線、セメント注入量等から以下のことが明らかとなった。

- ① 逐次流量減少型のP-Q曲線を示す標準のルジオン値が2.1~2.9Luの場合、長時間透水試験のルジオン値は1Lu程度小さくなっている。
- ② 2.1~2.9Luの単位セメント注入量は、2Lu以下の単位セメント注入量とほぼ同じ10kg/m以下となっている。

以上のことから、逐次流量減少型のP-Q曲線を示す 2.1~2.9Lu について、単位注入セメント量が10kg/m 以下となる場合は追加孔を必要とする孔ではないと判断し、2Lu程度と評価することとした。

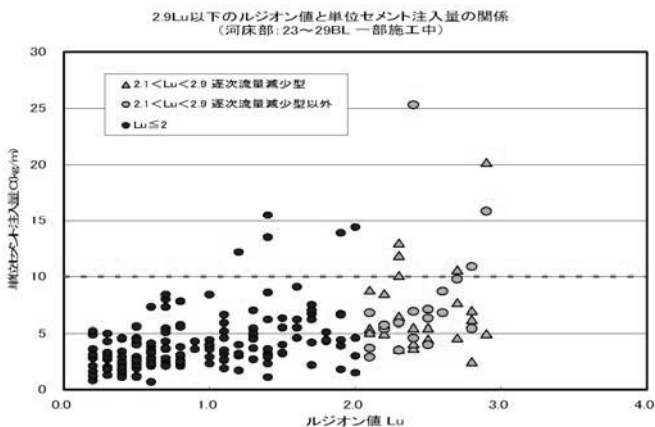


図-5 ルジオン値と単位セメント注入量

4. 完了基準の緩和

嘉瀬川ダムではグラウト注入完了の際のだめ押しを開始してから注入量が増加するような傾向が無く、だめ押し時のセメント注入が総じて少ないことから、十分な改良効果が図れていることが想定できる。そのため、だめ押し時間を現在の 30 分から 15 分へ短縮し、コスト縮減が可能であるか検討を行った。

4.1 注入完了基準

グラウチング技術指針・同解説(H15.7)では、一般的に単位時間あたりの注入量が0~0.2L/min/mに達した後に30分程度のだめ押しにより完了としているが、個々のダムごとに条件が異なるため、透水性状等の地盤性状を考慮して適切に注入完了基準を設定する必要がある。

4.2 対応方針

グラウチング技術指針・同解説(H15.7)で定められている注入完了基準は経験的に設定された基準であり、だめ押し時間30分を15分に変更したことによる良否の判定・評価が現時点では困難であることから、嘉瀬川ダムでの試行適用は見送ることとした。

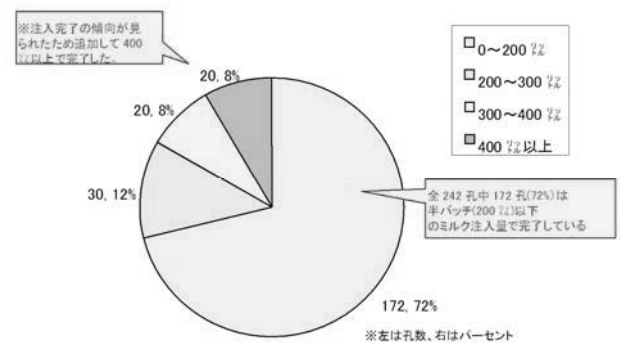


図-6 注入開始から完了までW/C=10配合のミルク注入量

5. 2ステージ一括の注入

嘉瀬川ダムのカーテングラウチングの試験施工の結果、注入開始配合W/C=10で開始した注入の殆どが配合切り替えなしで完了している。

従って、セメントミルク廃棄量を減らすとともに、注入回数の削減を目的に 2st 一括注入にてコスト縮減が可能であるか検討を行った。

5.1 試験施工での注入実績

嘉瀬川ダムのカートングラウチングの試験施工（全242孔）では、注入開始配合W/C=10で開始したステージのうち、大半（222孔）が400L（1バッチ）のセメント練混ぜ量以下で注入完了しており、更に172孔は200L（半バッチ）以下で注入完了している（図-6）。

5.2 2ステージ一括注入の施工フロー

2ステージ目以降でルジオン値が連続して5Lu未満の場合、2ステージ一括注入する場合の施工フローを示す（図-7）。

2ステージ目に5Lu未満、3ステージ目に5Lu未満の場合、2ステージ目と3ステージ目を同時に一括注入。4ステージ目以降も連続した5Lu未満が確認される場合、2ステージ一括注入とする。但し、1ステージ目は堤体と着岩部を確実にグラウト施工するため、一括注入は行わない。

5.3 課題

ここで注意したい点は、2ステージ連続して5Lu未満でない場合である。2ステージのうち、①上部(n)ステージが5Lu以上である場合は、nステージを確実に単独施工した後、下部(n+1)ステージと更に下部

(n+2)ステージを一括注入にて施工する。②上部(n)ステージが5Lu未満、下部(n+1)ステージが5Lu以上である場合、上部(n)ステージを確実に施工するためにパッカー方式にて施工し、その後、下部(n+1)ステージを単独施工する。

上記のように、パッカー方式にて対応しなくてはならない等の非効率なケースも生じ、注入サイクルに影響を与える可能性がある。

5.4 対応方針結果

嘉瀬川ダムのカートングラウチング計画では深度0~25mが2Lu、深度25~50mが5Luの改良目標値と設定しており、概ね難透水性地盤を反映した計画となっている。

しかし、今回試験施工の結果より深部に局所的な高透水部が確認されており、確実な注入が必要である。

従って、各ケースに応じて注入方式をステージ方式やパッカー方式に変更することで注入サイクルの非効率化及び注入の確実性への影響が懸念されることから、嘉瀬川ダムでは2ステージ一括注入を見送り、当初計画通り確実な施工が可能であるステージ方式にて実施するものとした。

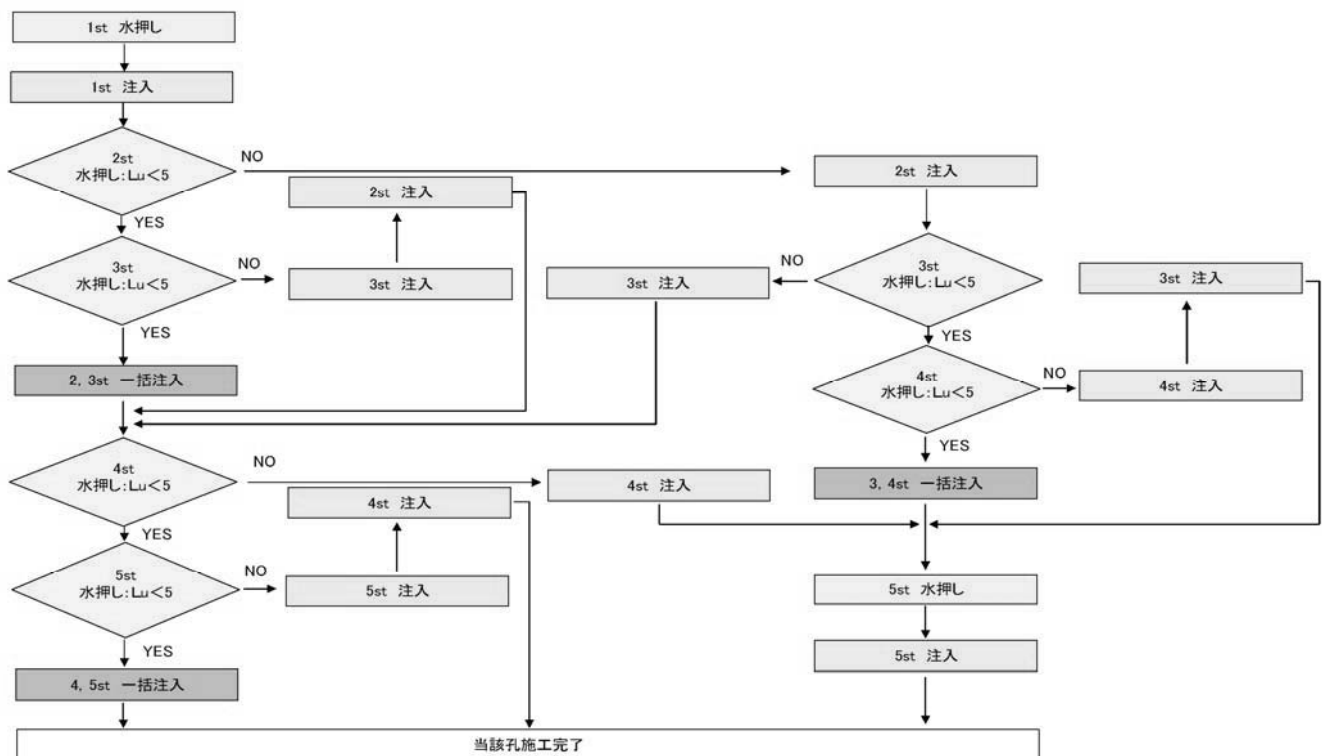


図-7 2ステージ一括注入の施工フロー

6. チェック孔改良目標値超過箇所の対応

カーテングラウチングの試験施工及び本施工箇所において、チェック孔のルジオン値が改良目標値2Lu程度を僅かに上回るステージが確認された。

そのため、チェック孔での改良効果を確認し、今後チェック孔で同程度のルジオン値が確認された場合の対応を明確にする目的で確認孔を実施した（表-2）。

6.1 確認孔の施工状況

表-2の施工結果で最もLu値が大きい18BLの4ステージ及び単位セメント注入量が多い22BLの4ステージについて、P-Q曲線とボーリングコアより考察を行った。

表-2 確認孔の施工結果

BL	チェック孔		確認孔施工結果		
	ステージ	Lu値	単位セメント注入量(kg/m)	Lu値	単位セメント注入量(kg/m)
18	3	3.1	8.1	0.7	-
18	4	3.2	8.6	1.8	11.6
22	4	3.1	28.7	1.0	2.1
26	2	2.4	6.5	0.8	5.9

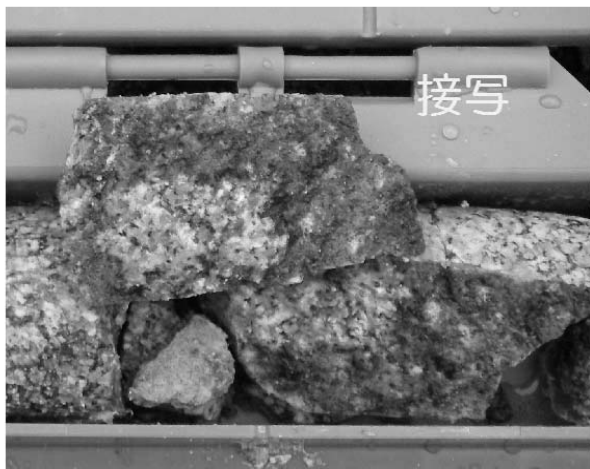
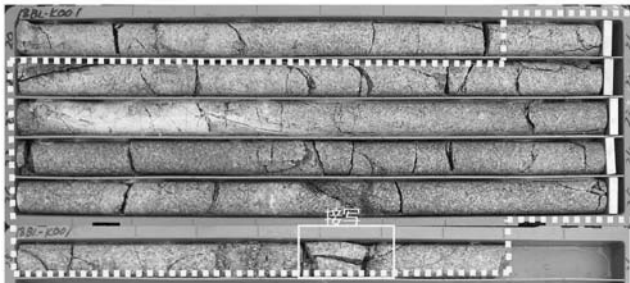


写真-3 18BLの4stボーリングコア
(上：全景,下：接写 (25.5m))

(1) 18BLの4ステージ

ボーリングコア状況を写真-3に示す。また、ルジオンテストの結果得られたP-Q曲線を図-8に示す。

全体に傾斜60~80°の割れ目が発達し、割れ目沿いに弱く褐色酸化している。特に深度25.5mの傾斜80°の割れ目の一部が褐色酸化している。

本ステージは1回目のルジオンテストでは3.2Lu（逐次流量減少）であり、透水要因は褐色酸化した高角度割れ目と考えられる（写真-3）。

本ステージは逐次流量減少型のP-Q曲線を示しているため、長時間水押し試験を実施した結果、ルジオン値は1.8Lu（図-8）となったことから、より定常状態（湛水した状態）に近い長時間水押し試験のルジオン値を採用した。

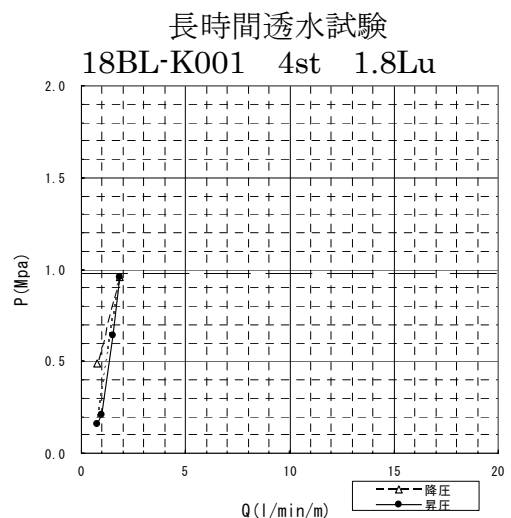
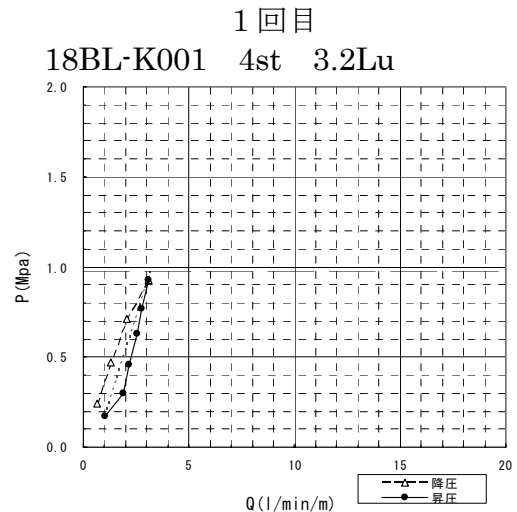


図-8 確認孔18BL (4st) P-Q曲線
(上：ルジオンテスト,右：長時間水押し試験)

(2) 22BLの4ステージ

割れ目の発達に乏しい。単位セメント注入量は28.7kg/m と他のステージに比べ多く、深度 23.6m付近では傾斜 20°と傾斜 80°の割れ目沿いにセメントミルクが充填されている。また、岩片は硬質で割れ目間隔が 10~30cm 以上の CH 級岩盤が主体である。本ステージの 1 回目のルジオンテストは 3.1Lu (逐次流量減少) であったことから、長時間水押し試験を実施した結果、1.0Lu(図-9)となった。

6.2 長時間透水試験の評価

逐次流量減少型のP-Q曲線を示すステージにおいて実施した標準の水押し・透水試験と長時間水押し・透水試験を整理した結果、全てのステージで長時間水押し・透水試験が標準の水押し・透水試験と同じか小さくなる。特に標準の水押し・透水試験で2.9Lu以下を示したステージにおいては全て2.0Lu以下となることが確認できる(図-4)。

6.3 対応方針結果

以上のことから、チェック孔で改良目標値を僅かに上回るステージに対し確認孔を施工し、逐次流量減少型のP-Q曲線を示すステージにおいて長時間透水試験結果から改良目標値2Lu以下であることが確認できた。従って、最終次数孔において逐次流量減少型の2.1~2.9Lu は改良目標値 2Lu に達したものと評価し、追加孔を実施しないものとした。

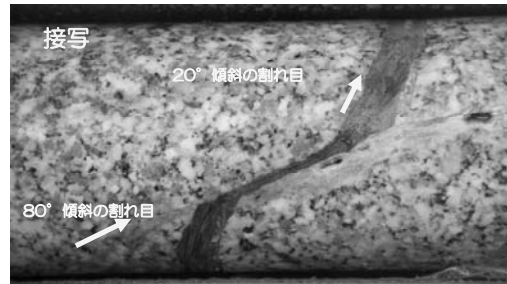
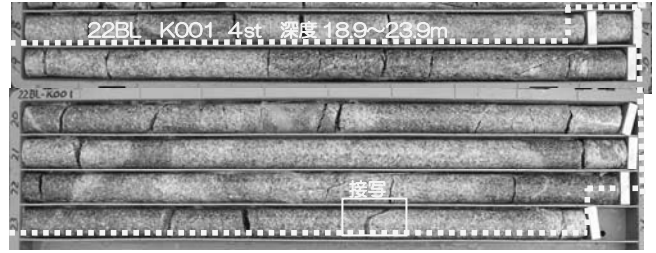


写真-4 22BLの4stボーリングコア (上：全景,下：接写 (23.6m))

7. 注入完了基準の緩和

大分川ダムグラウチング試験において、1次孔までの全50ステージの内、約80%に当たる43ステージのルジオン値は、カーテングラウチング浅部での改良目標値である5Lu以下であり、ルジオン値が2Lu以下を示すステージのほとんどが単位セメント注入量10kg/m以下であった。

また、1次孔までの全50ステージのルジオンテストの内、約40%に当たる22ステージでのP-Q曲線が「昇降圧異路型」を示す結果となった(図-10)。

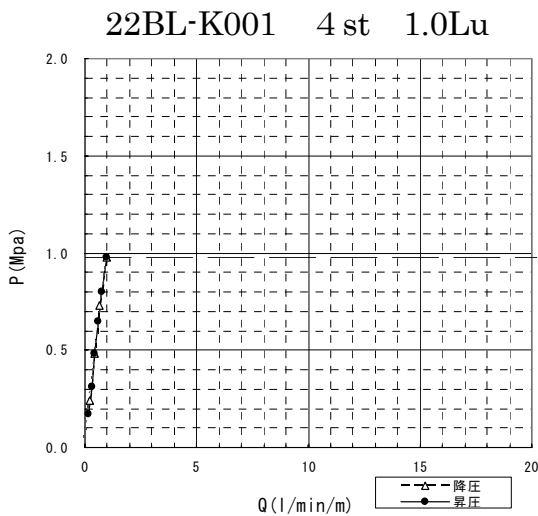


図-9 確認孔18BL (4st) P-Q曲線

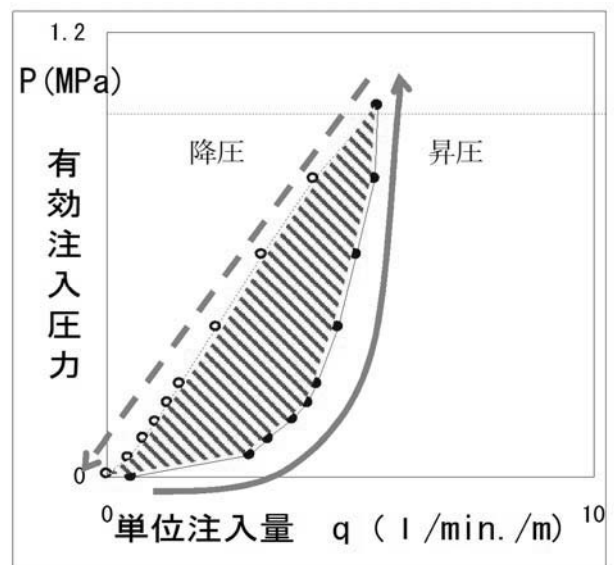


図-10 「昇降圧異路型」P-Q曲線

この、昇圧段階での流量増加率が、徐々に低減していく現象から推察すると、割れ目の連続性に乏しい領域が、試験孔周辺の岩盤に存在すると考えられる。

更に、当該ステージの注入時間は、注入完了基準速度（0.2L/min/m）以下で30分間のため押し注入を実施し、注入完了に至るまで約4時間を要するが、セメント注入量はCet=約15kg/mと少なく、注入効率が低いと考えられる。

以上の結果から、合理化検討項目として、注入完了の基準となる注入速度を0.2L/min/mから0.4L/min/mに大きく設定（注入完了基準速度の緩和）することとした。

7.1 課題

「注入完了基準速度の緩和：0.2L/min/m→0.4L/min/m」を適用した合理化試験施工に関し以下の課題が考えられた。①0.4L/min/mを採用した場合の各施工ステージにおける改良効果の確認、②0.4L/min/mを採用した場合の次数孔におけるセメント量、ルジオン値の低減傾向に基づく評価における注入ゾーン特性のばらつきによる不確実性の検証。

7.2 対応方針

「注入完了基準速度の緩和：0.2L/min/m→0.4L/min/m」を適用した場合の課題について、グラウチングが完了したステージで、φ66mm からφ86mm に拡孔リボーリングを実施し、再度透水試験を行う方法にて改良効果の検証を行うこととした

φ86mm 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、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-12）。

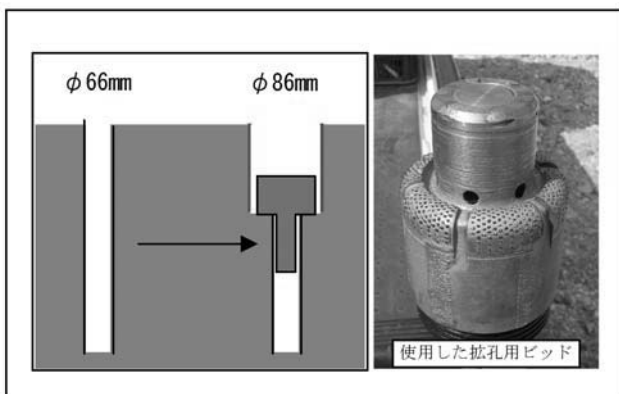


図-11 検証再試験実施における拡孔方法

7.3 対応方針結果

改良効果の検証は、2次孔28ステージ中5ステージで実施した。拡孔前後に実施した孔壁展開画像を以下に示す（写真-5）。

合理化検証区間 No.222 孔，1st で実施したφ86mm 拡孔リボーリング後の孔壁展開画像では、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が確認でき、φ86mm 拡孔リボーリング後に実施した再透水試験の結果では、ルジオン値がグラウチング施工前の 8.40Lu から、拡孔後は 2.00Lu まで低減している（図-12）。

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。

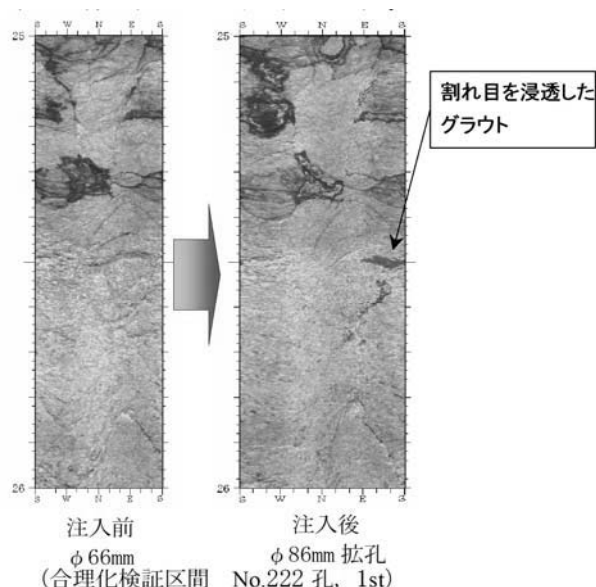


写真-5 検証再試験実施に関わる拡孔の効果

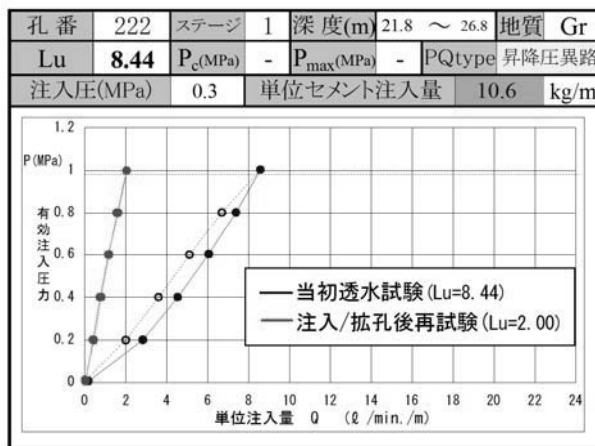


図-12 当初透水試験及び再透水試験でのP-Q曲線

次に、本グラウチング試験では、No.222 孔でカーテングラウチング浅部での改良目標値（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）。

追加孔は、注入完了基準速度を0.4 L/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。

その結果、写真-6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た。

また追加孔にて、透水試験を5ステージ実施したが、いずれのステージにおいてもカーテングラウチング

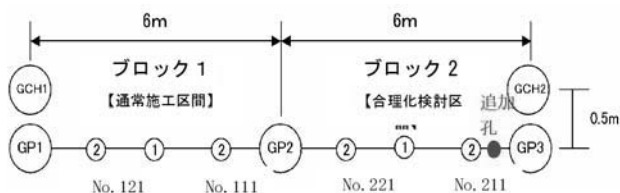


図-13 追加孔施工地点

の浅部での改良目標値5Luを下回るルジオン値が得られている。

更に、注入完了基準速度の相違（0.2 L/min/m, 0.4 L/min/m）に着目し、次数効果を非超過率図として評価した結果を、図-14に示す。

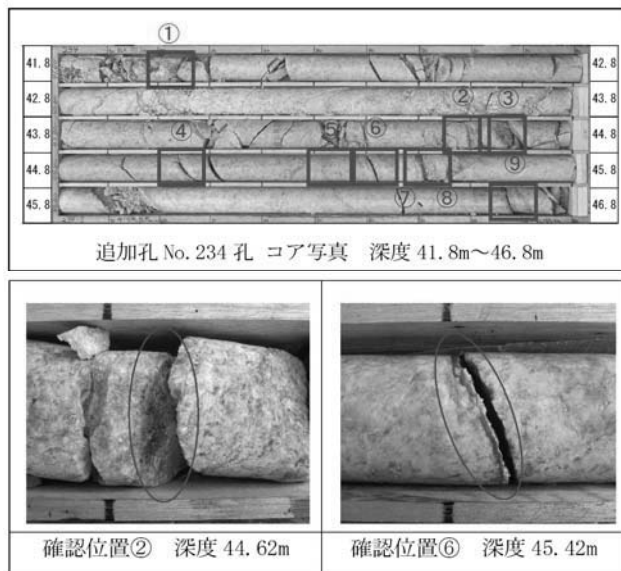


写真-6 追加孔でのグラウトの注入到達状況写真
（上：全景,下：接写（②,⑥））

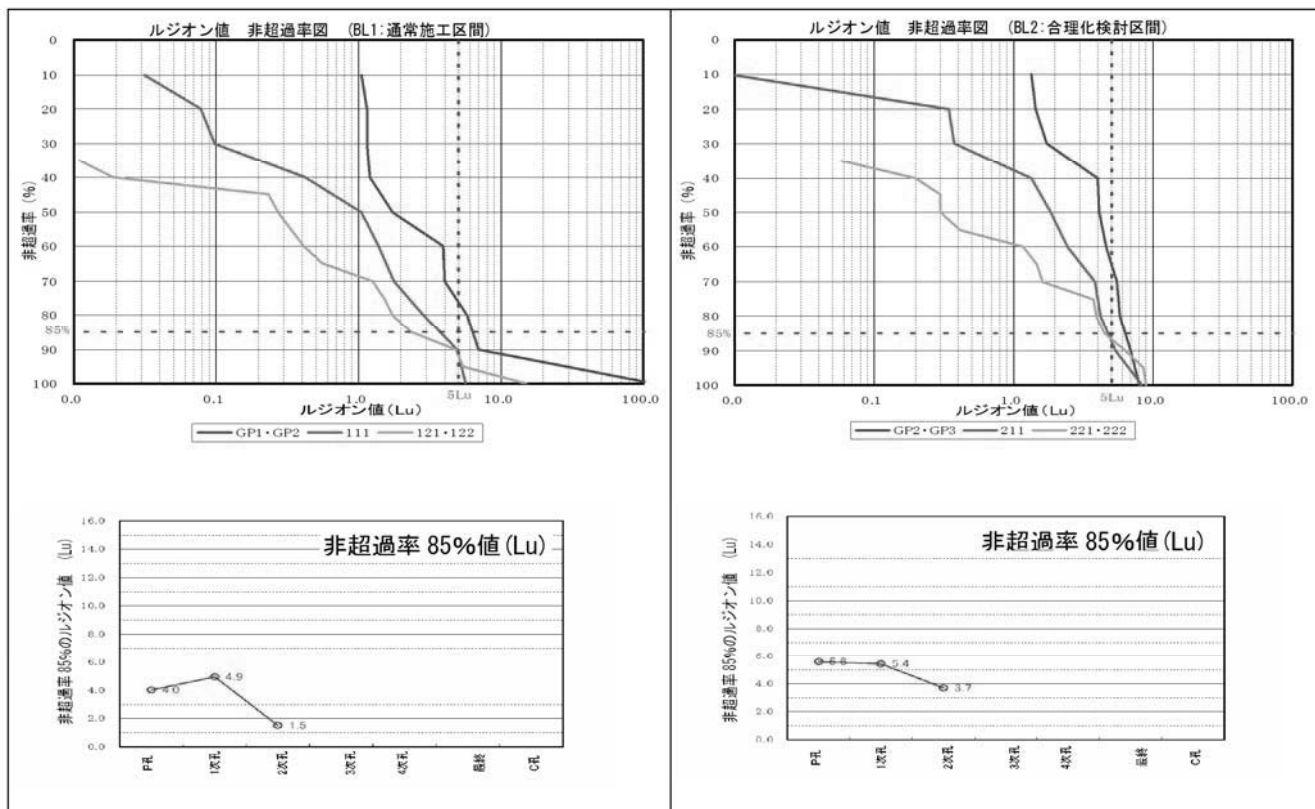


図-14 追非超過確率図

この図より、注入完了基準速度の違いによらず、2次孔（1.5m間隔）での非超過率85%のルジオン値は、大分川ダムのカートングラウチング浅部での改良目標値5Luを満足することがわかる。

以上の結果から、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、改良効果の検証のため再透水試験を実施したのは、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、検証を進めていくこととしている。

また、これらの追加検証の結果、この合理化方法を実際のカーテングラウチングに適用する場合でも、ロックフィルダムの堤体遮水機能を受け持つコア近傍の基礎岩盤浅部には適用しないなどの対応を講ずることも併せて検討していく必要がある。

8. おわりに

グラウチング計画を立てるにあたっては、地形・地質、岩盤特性、水理特性、構造設計など様々な検討が必要である。今回報告した嘉瀬川ダムの施工事例及び大分川ダムでのグラウチング試験施工結果より、合理的なグラウチング計画を立てるためには、施工範囲、改良目標値、注入仕様など施工コストに大きく影響する「水理地質構造」の把握が必要不可欠であると考えられる。水理地質構造は各ダムサイトで異なるため、総合的な技術判断力が求められる。そのためにも九州グラウト部会では、今後もグラウトに関する様々な分野に関し検討を重ね、更なる技術力の向上に努めることとする。

参考文献

- 1) 財団法人 国土技術研究センター編：グラウチング技術指針・同解説，大成出版社，2003
- 2) 安部宏紀，小石真也，山口嘉一，佐々木靖人：第3回九州グラウト部会の開催報告，ダム技術，No. 283，13-22，2010
- 3) 松本徳久，山口嘉一，弘末文紀：ルジオンテストの各種境界条件下での精度と結果の解釈，建設省土木研究所資料，第2518号，1987

グラウチングにおける合理化検討

遠山 修平 (九州グラウト部会 委員、九州地方整備局河川部地域河川課)
 永松 和彦 (九州グラウト部会 座長、嘉瀬川ダム工事事務所 調査設計課)
 尾後 大輔 (九州グラウト部会 委員、嘉瀬川ダム工事事務所 調査設計課)
 山口 嘉一 (九州グラウト部会 アドバイザー、(独)土木研究所 水工研究グループ)
 佐々木 靖人 (九州グラウト部会 アドバイザー、(独)土木研究所 地質・地盤研究グループ)

●グラウチング合理化検討の背景

ここ数年、公共事業予算は、削減傾向が続いており、ダム事業における調査、計画、施工、管理における一連のサイクルにおいても、コストを極力抑えることが求められている。

ダム建設の重要な工種の一つであるグラウチングについても平成15年7月に改訂となった「グラウチング技術指針・同解説」は、安全性を損なわないことを大前提として、

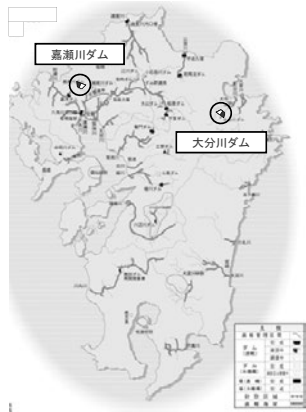
- ①各種グラウチングの本来の施工目的・施工範囲の明確化
- ②基礎地盤の状況に適したグラウチングの実施
- ③施工状況に応じたグラウチング仕様の継続的な見直し

を基本的な柱として、グラウチングの合理化（コスト削減）を図ることとしている。

今回、このグラウチング技術指針改訂後に九州地方整備局で初めてグラウチングを実施した嘉瀬川ダムの施工事例と大分川ダムでの試験施工等を踏まえ、九州グラウト部会にて合理化に関する議論を行った内容について報告する。

●嘉瀬川ダムの概要

形式：重力式コンクリートダム
 堤高：約97m
 堤頂長：約460m
 総貯水容量：71,000千 m^3
 基礎岩盤 中生代白亜紀花崗岩類



●大分川ダムの概要

形式：中央コア型ロックフィルダム
 堤高：約92m
 堤頂長：約496m
 総貯水容量：約24,000千 m^3
 基礎岩盤 中生代白亜紀花崗岩類

●合理化検討項目

検討項目	検討背景
① 注入完了基準の緩和 (注入完了基準速度)	一次孔までの全50ステージのうち、約80%にあたる43ステージのルジオン値は、カーテングラウチング浅部での改良目標値である5Lu以下であり、ルジオン値が2Lu以下を示すステージのほとんどが単位セメント注入量10kg/m以下であった。更に、当該ステージの注入時間は、注入完了基準速度 (0.2L/min/m) 以下で30分間のため押し注入を実施し、注入完了に至るまで約4時間を要すが、セメント注入量は約15kg/mと少なく、注入効率が低いと考えられたため、合理化検討を行った。
② 注入完了基準の緩和 (だめ押し)	・嘉瀬川ダムの注入状況から、だめ押しを開始してから注入量が増加するような傾向がない。 ・セメントミルク注入が総じて少ないことに加え、逆流現象は確認されていない。
③ 2ステージ一括の注入	・開始配合濃度1:10 (5Lu以下) で開始した注入のほとんどが配合切り替えなしで、完了している。 ・大半が1バッチのセメント総重量400kg以下で注入完了しており、172孔 (172孔/248孔：72%) は半バッチで注入完了している。
④ 透水性の評価	・2Luから3Luのステージでは、マスを挟み、割れ目沿いに一部褐色化した割れ目が1、2本確認されるが、これらの割れ目を孔壁展開画像確認しても大きな開口は確認されない。 ・3Lu未満のステージにおける単位セメント注入量は10kg/m以下である。 ・2Luから3LuステージのP-Q曲線は逐次流量減少を示す。
⑤ チェック孔改良目標値超過箇所の対応	・チェック孔でルジオン値が改良目標値を上回るステージが確認された。 ・今後チェック孔で同程度のルジオン値が確認された場合の対応方針を検討する必要がある。

- ①：大分川ダム試験施工
 ②～⑤：嘉瀬川ダム施工事例

①注入完了基準の緩和

①-1 大分川ダムのグラウチング試験結果

- ・1次孔までの全50ステージの内、約80%にあたる43ステージが5Lu以下。
- ・ルジオン値が2Lu以下を示すステージのほとんどが単位セメント注入量10kg/m以下。
- ・全50ステージのルジオンテストの内、約40%にあたる22ステージでのP-Q曲線が「昇降圧異路型」を示す。

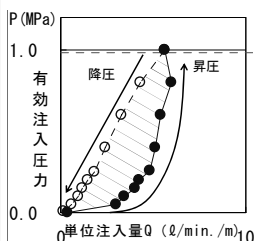


図-1「昇降圧異路型」P-Q曲線概要図

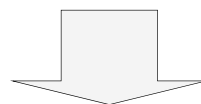
「昇降圧異路型」P-Q曲線の特徴

- ・昇圧過程で、圧力増加に伴い注水量減少
- ・昇圧過程と降圧過程で異なる経路をたどる
- 地下水位以下の条件 (飽和状態) で確認され、降圧過程において、ほぼ直線で原点に回帰する特徴を有する。

①注入完了基準の緩和

①-2 透水要因となる割れ目の連続性

- ・昇圧段階での流量増加率が、徐々に低減していく現象から推察



- ・割れ目の連続性に乏しい領域が、周辺岩盤に存在すると考えられる。

- ・裏付けとして、周辺岩盤は、割れ目の一部が熱水変質作用の影響で不明瞭となり、その状況をボーリングコア・ポアホールスキャナ画像で確認している。

また、数mm程度開口した割れ目を確認したが、当該区間のルジオン値は低い。

①注入完了基準の緩和

①-3 注入時間の長期化

注入時間は、注入完了に至るまで約4時間を要するが、セメント注入量は約10kg/mと少なく、注入効率が低い。

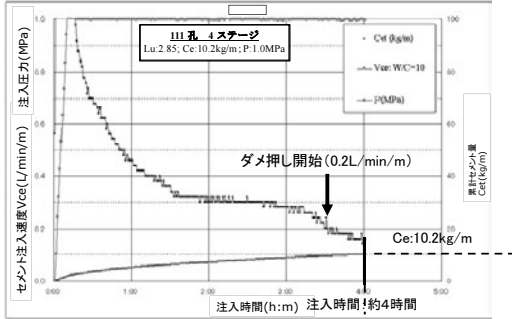


図-2 注入時間-セメント注入速度・注入圧力相関図

①注入完了基準の緩和

①-4 合理化検討項目の選定

- i) 累積セメント量が少ない。
- ii) 割れ目の一部が熱水変質作用の影響により不明瞭となり、連続性に乏しい低透水性の岩盤が形成されている。
- iii) 注入時間の長期化。



以上の結果から合理化を検討

◎合理化検討項目

注入完了の基準となる速度 (ダム押し開始基準)

0.2 L/min/m → 0.4 L/min/m

①注入完了基準の緩和

①-5 注入完了基準緩和における課題

- ・各施工ステージにおける改良効果の確認
- ・次数孔におけるセメント量、ルジオン値の低減傾向に基づく評価における注入ゾーン特性のばらつきによる不確実性の検証

改良効果の確認としてφ66mmからφ86mmに拡孔リボーリングを実施し、再度透水試験を行う方法にて検証を実施。

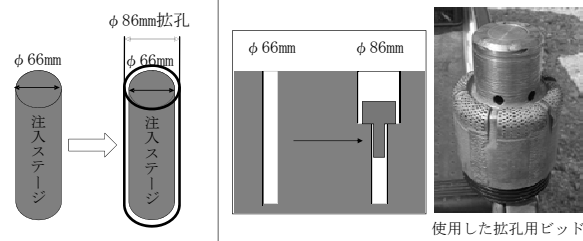


図-3 検証再透水試験における拡孔方法

①注入完了基準の緩和

①-6 改良効果の確認

各施工ステージにおける改良効果の確認

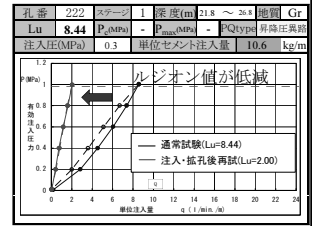


図-4 当初透水試験及び再透水試験でのP-Q曲線

割れ目を浸透したグラウト材

- ・割れ目扱いのグラウト充填状況を確認
- ・ルジオン値は、8.4Luから2.0Luまで低減

注入前 φ66mm
注入後 φ86mm拡孔

割れ目扱いにグラウトが確実に充填されたことによるルジオン値の低減と判断。

写真-1 検証再試験実施に際する拡孔の効果

①注入完了基準の緩和

①-7 注入到達の確認

注入完了基準速度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にGP3孔とNo. 222孔の間に追加孔 (コア採取) を実施。

その結果、隣接する項から追加孔へのグラウトの注入到達が確認された。

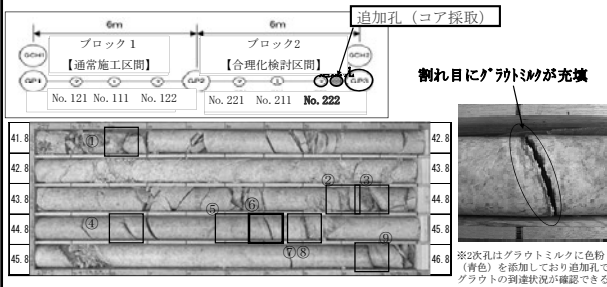


写真-2 追加孔でのグラウトの注入到達状況写真(上:全景、右:接写(⑥))

①注入完了基準の緩和

①-8 非超過率図による分析

非超過率85%のルジオン値は注入完了基準速度0.2L/min/m、0.4L/min/m共に改良目標値5Luを満足し、ほぼ同程度の改良効果が得られることが確認された。

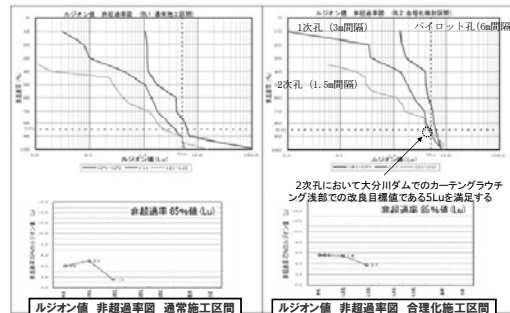


図-5 非超過率図

④注入完了基準の緩和

①-9 検討結果

- ・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る。
- ・この緩和策を適用することにより注入作業に関する作業時間が1ステージ当り約30分程度短縮することが可能である。
- ・しかし、再透水試験を実施したのは、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。



「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、検証を進めていくこととする。

④透水性の評価

④-1 未風化透水帯

未風化透水帯

岩芯は未風化で硬質、割れ目沿いの一部に熱水変質粘土やマサを挟在する。
2Lu以下が主体で高角度割れ目や低角度節理が透水要因と考えられ、高角度断層周辺では鉛直施工による改良効果が得られ難い。

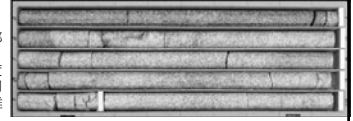


写真-3 未風化透水帯コア状況 (23BL-P001深度5~10m)

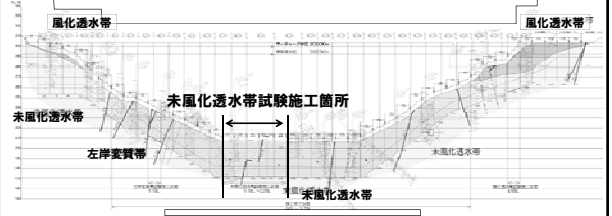
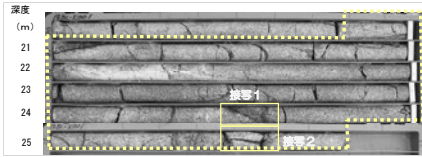


図-6 葛瀬川ダム試験施工箇所

④透水性の評価

④-2 未風化透水帯の岩盤性状



マサを挟在する傾斜70°の割れ目

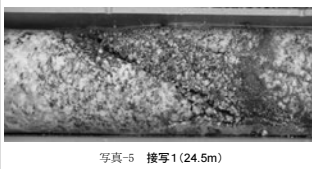


写真-5 接写1 (24.5m)

酸化褐色化した割れ目

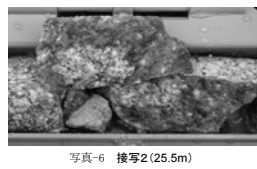


写真-6 接写2 (25.5m)

(上：ボーリングコア写真、下：孔壁展開画像)

④透水性の評価

④-3 未風化透水帯の透水特性及び課題

P-Q曲線は、同じ圧力でも昇圧時の流量より降圧時の流量が少ない逐次流量減少型を示している。

注入チャートは、圧力段階を上げた直後に流量が大きくなるが、漸次流量が減少していることを示している。

このことから、各圧力段階での流量が大きく評価され、透水性の評価が過大となっている可能性があるという課題が生じた。

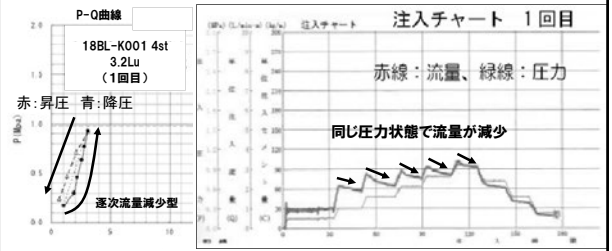


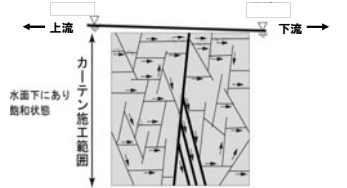
図-7 逐次流量減少型のP-Q曲線と注入チャート

④透水性の評価

④-4 未風化透水帯の課題に対する分析①

逐次流量減少傾向を示すP-Q曲線は、不飽和領域での高透水路（透水部が閉じた場合が多い）で見られるが、本施工区間は地下水位以下の飽和領域であり、このような解釈は適用できない。また、乱流の発生による管内損失水頭の誤差と解釈される場合もあるがルジオン値はシングルルジオンであるため乱流の発生も考え難い。

この他に、通水路の目詰まりによる現象と解釈されることもあるが、本施工箇所は、未風化の岩盤で削孔終了後の洗浄は十分に留意し、濁りが取れたことを確認したうえで透水試験を実施しており、目詰まりが頻繁に起こることも考え難い。



- 透水性の主要因となる割れ目 (数ルジオン)
- 上記以外の割れ目 (1ルジオン未満)
- 地山の地下水の流れ

④透水性の評価

④-4 未風化透水帯の課題に対する分析②

P-Q曲線において上に凸型の2次曲線的になる現象は、通水する割れ目沿いの摩擦力が流速の2乗に比例して大きくなることから、流速の増加に伴う摩擦力が極端に大きくなり、圧力の増加分に対する流量の増加が小さくなったものと解釈した。また、昇圧時に比べて降圧時の流量が減少する現象は、最高圧力から降圧すると、試験孔周辺の水頭に比べて孔内の水頭が小さくなり、地山から孔内に向かう動水勾配ができて地山内の水が試験区間に戻ってくる為、昇圧時の同一圧力より流量が小さくなっていると解釈した。

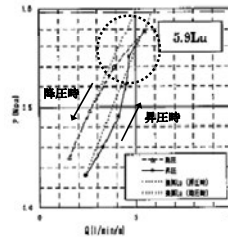


図-8 逐次流量減少傾向を示すP-Q曲線

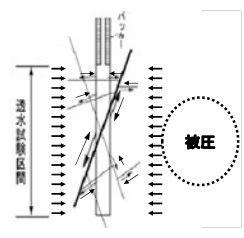


図-9 降圧時の透水試験区間

④透水性の評価

④-5 未風化透水帯の課題に対する対応（長時間水押試験）

各圧力段階で通水時間を延長して定常流量を得て計測することにより、ダム満水後の安定した加圧状態に近く適切な透水性評価が可能になると考え、長時間水押試験を実施した。

各圧力段階で10分間の流量計測を1時間に延長して試験を実施。

この結果、P-Q曲線は、「逐次流量減少型」から「直線型」へ、ルジオン値は同一ステージで「3.2Lu」から「1.9Lu」と通常試験より小さくなることを確認した。

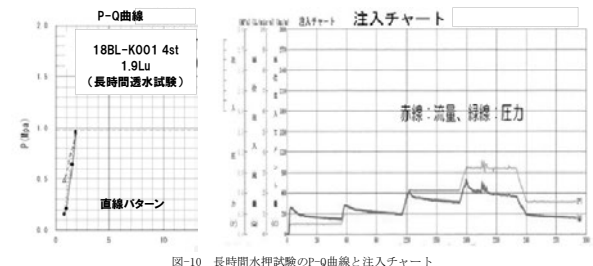


図-10 長時間水押試験のP-Q曲線と注入チャート

④透水性の評価

④-6 長時間水押試験による分析

長時間水押試験を逐次流量減少型のP-Q曲線を示す28stにて実施した。

その結果、通常試験でルジオン値が2.9Lu以下であれば、長時間水押試験で改良目標値のルジオン値である2.0Lu以下が得られていることを確認した。

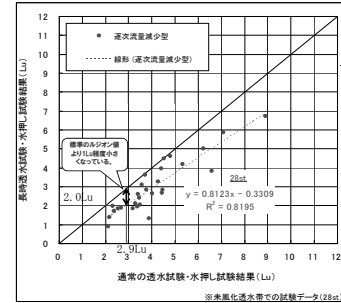


図-11 標準のルジオン値と長時間ルジオン値の関係

④透水性の評価

④-7 単位セメント注入量

ルジオン値と単位セメント注入量の関係から、ルジオン値が2.0Lu以下の場合、単位セメント注入量は、概ね10kg/m以下となっている。また、ルジオン値が2.1~2.9Luでも単位セメント量は概ね10kg/m以下となっている。

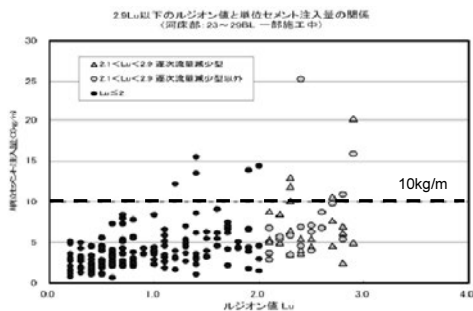


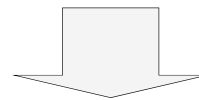
図-12 ルジオン値と単位セメント注入量

④透水性の評価

④-8 検討結果

基礎岩盤の性状、透水特性、セメント注入量等の関係から

- ① 逐次流量減少型のP-Q曲線を示す標準のルジオン値が2.1~2.9Luの場合、長時間水押試験のルジオン値は1Lu程度小さくなっている。
- ② 2.1~2.9Luの単位セメント注入量は、2.0Lu以下の単位セメント注入量とほぼ同じ10kg/m以下となっている。



逐次流量減少型のP-Q曲線を示す2.1~2.9Luのステージで、単位注入セメント量が10kg/m以下となる場合は追加孔を必要とする孔ではないと判断し、2.0Lu程度と評価する。

■おわりに

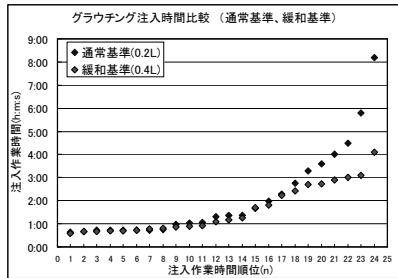
グラウチング計画の策定にあたり

- 地形・地質、岩盤特性、水理特性、構造設計など様々な検討が必要
- 施工範囲、改良目標値、注入仕様など施工コストに大きく影響する「水理地質構造」の把握が必要不可欠
- 水理地質構造は各ダムサイトで異なるため、総合的な技術判断力が必要

九州グラウト部会では、今後もグラウトに関する様々な分野に関し検討を重ね、更なる技術力の向上に努めていきます。

参考資料：注入完了基準の緩和

注入完了基準速度0.2L/min/mから0.4L/min/mへの緩和適用による作業時間の比較

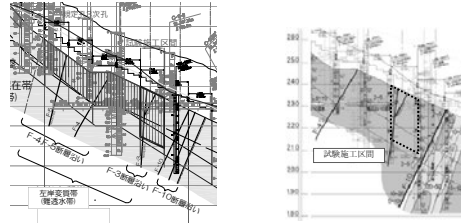


施工位置	総注入施工時間 (h:m:s)			1st平均
	一次孔	二次孔	合計(24st)	
[BL1] 通常施工区間	22:10:10	28:39:31	50:49:41	2:07:04
[BL2] 合理化検討区間	16:41:57	21:48:18	38:30:15	1:36:16

参考資料：嘉瀬川ダムにおけるその他の合理化検討

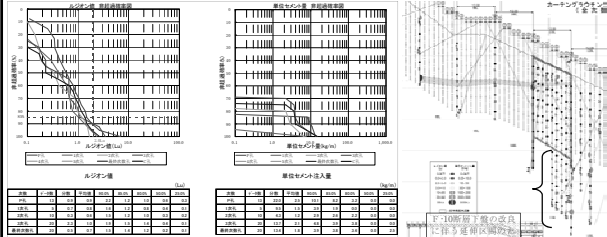
●左岸変質帯

試験施工より左岸変質帯の大部分がカーテンググラウティングの改良目標値以下の透水性を有した岩盤。一般孔は規定孔1次孔(浅部：2ステージ)の施工のみとし、チェック孔を省略する方針とした。



参考資料：嘉瀬川ダムにおけるその他の合理化検討

●左岸変質帯



- ・改良目標値を大きく上回るステージ、改良目標値を上回るステージが連続して存在しないことを確認。
- ・改良目標値2Luに対する非超過率：95% (19st/20st)
- ・超過ステージのルジオン値：2.7Lu
- ・各次数孔の非超過率85%ルジオン値
- ・P孔：1.2Lu、1次孔：1.2Lu、2次孔：1.5Lu、最終次数孔：1.4Lu
- ・70%程度のステージで1Lu未満となり、セメント注入を省略

参考資料：嘉瀬川ダムにおけるその他の合理化検討

●規定孔3次孔から2次孔への変更

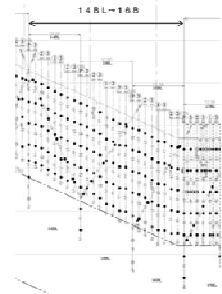
目的：適切に岩盤状況及び透水性状を把握し、難透水の岩盤が分布する箇所については、2次孔を規定孔として過大施工を抑制する。

①検討経緯

左岸低位標高部 (14BL~16BL) において、難透水の岩盤に対し当初計画どおり規定孔3次孔を施工

3次孔の施工結果は、すべて改良目標値 (2Lu) 以下であった。

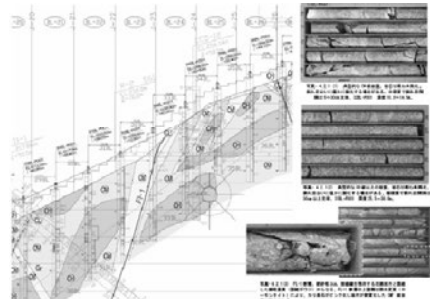
左岸低位標高部と同様な難透水の岩盤が分布する箇所について、2次孔を規定孔とした施工が可能か検討



参考資料：嘉瀬川ダムにおけるその他の合理化検討

●規定孔3次孔から2次孔への変更

②右岸アバット部における地質概要



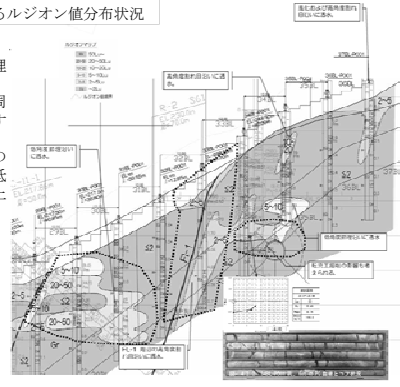
- ・岩深は未風化で、僅かに酸化した割れ目を伴う場合がある
- ・岩片は中硬質で、割れ目間隔が30cm以下のCM級岩盤が主体

参考資料：嘉瀬川ダムにおけるその他の合理化検討

●規定孔3次孔から2次孔への変更

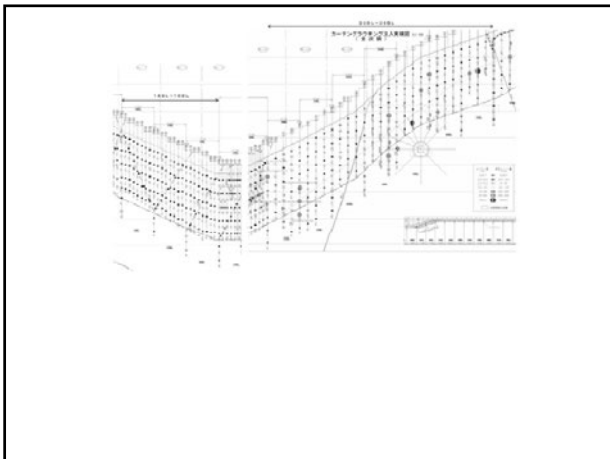
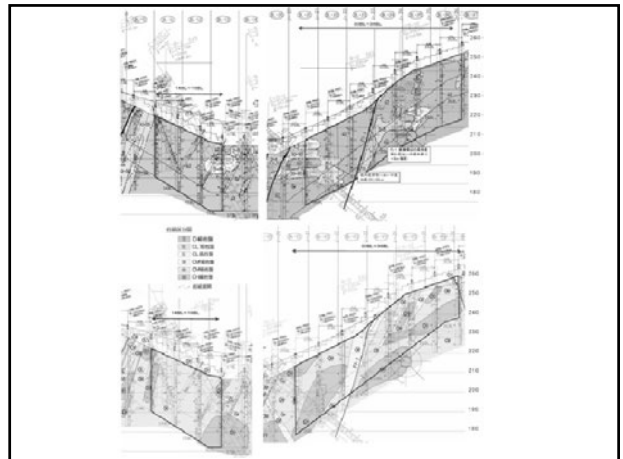
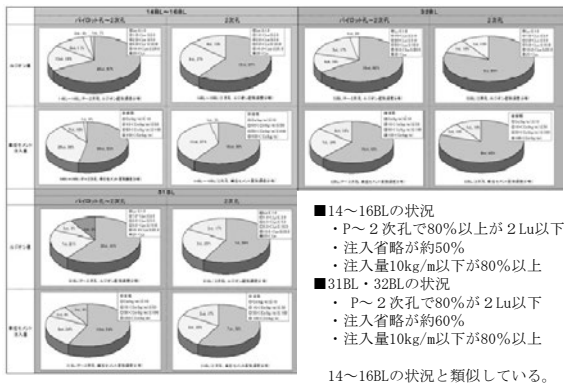
②右岸アバット部におけるルジオン値分布状況

- ・2Luが主体
- ・29BL~31BLは低角度節理沿いに透水
- ・32BL~33BLはFL-1断層周辺の高角度割れ目が卓越する区間は2~5Luを確認
- ・20~30BLでは、割れ目の少ないCH級以上の岩盤に低角度節理が発達し20Lu以上の高透水を示す。



参考資料：嘉瀬川ダムにおけるその他の合理化検討

●規定孔3次孔から2次孔への変更



「九州グラウト部会」の目的

■目的

技術系担当者が技術者としてのスキルアップを図るため、各現場での実績事例や課題等に関する意見交換や議論を深め、また最新技術等に関する情報共有を図り、担当職員の技術向上及び円滑な事業進捗を図ることを目的とする。

「九州グラウト部会」は、「九州ダム技術検討会」の下部組織として位置付ける。

「グラウト部会規約」より抜粋

これまでの討議内容

これまでに5回の「九州グラウト部会」を開催

■討議内容

- 1) 本部会で取り組む検討項目の選定
- 2) 嘉瀬川ダムでのカーテングラウチング合理化施工
- 3) 嘉瀬川ダムでのグラウチング現場の試験施工結果
- 4) 大分川ダムでのグラウチング試験施工（合理化検討）
- 5) 本明川ダムでのグラウチング試験施工

これまでの討議状況



グラウト部会実施状況(会議)



グラウト部会実施状況(コア観察)

「九州グラウト部会」検討事項

九州グラウト部会では、

- ①高度な技術取得、
- ②基準（案）の策定、
- ③指導者の育成等を念頭に置き、

ダム技術の伝承とダム事業の効率的推進を図りつつ以下の課題に対して検討を行う。

- 一 未固結層へのグラウチングについて
- 二 冷却節理へのグラウチングについて
- 三 弱層部でのグラウチング試験方法について
- 四 高角断層の止水対策について
- 五 その他グラウチングに関連する事項について

セメント粒子の形状に着目したセメントグラウトの室内注入試験

佐藤弘行¹ 山口嘉一²

近年、超微粒子セメントでも遮水性改良が困難なダム基礎地盤がある。ダム基礎地盤のグラウト材料にはセメント使用が基本であり、微細亀裂やマサへの注入性向上を図ったセメントの検討を行う必要がある。セメント粒子は非球形不規則形状をしており、それを球形化することにより、微細亀裂への注入性向上が期待される。そこで本研究では、高速気流中衝撃法で球形化処理をした超微粒子セメントのグラウトを用いて、幅50 μ mの亀裂への室内注入試験を行った。その結果、球形化処理をした超微粒子セメントの亀裂への浸透性は低圧時にかなり向上することがわかった。

キーワード: グラウチング, セメント, 室内注入試験

1. はじめに

近年、超微粒子セメントでも遮水性改良が困難なダム基礎地盤があり、ダム基礎グラウチングの調査・設計・施工等により対応を図っているが、限界がある。ダムのグラウト材料にはセメント使用が基本¹⁾であり、超微粒子セメントによっても遮水性改良が困難な微細亀裂やマサへの注入性向上が期待できるセメントの検討を行う必要がある。

セメント粒子は角張ったり凹凸のある非球形不規則形状をしている。非球形不規則形状の粒子を球形化することにより、微細亀裂への注入性が向上することが粉体工学等の知見により明らかになっている²⁾。そこで本研究では、グラウト材料としてのセメント粒子の球形化の基礎的検討として、高速気流中衝撃法で球形化処理した超微粒子セメントのグラウトの室内注入試験を行った。

2. セメントの粒子形状について

2.1 セメントの粒子形状

セメントは、石灰石、粘土、けい石などの原料を焼成することによりできる大きさ数 mm～数十 mmのクリンカを粉砕することにより得られる。クリンカを粉砕する工程においては、円筒状のドラムの中で、鋼鉄のボールとクリンカがドラムの回転によ

て互いに衝突しながら、クリンカが粉砕されてセメントとなる³⁾。このような粉砕過程のため、セメント粒子は、角張ったり凹凸のある不規則な形状をした粒子形状をしている。図-1に、普通ポルトランドセメントの電子顕微鏡写真の一例を示す。

2.2 セメントの粒子形状に着目した既往の研究

セメント粒子は非球形不規則形状をしていることから、フレッシュコンクリートの流動性を向上させるなどの目的のために、球形粒子のフライアッシュを混合することなどがよく行われている。しかし、ダム基礎グラウチングのグラウト材料としてはセメントの使用が基本¹⁾であるため、本論文ではセメント粒子自体の粒子形状に着目した。

セメントの粒度に着目した研究は多いが、セメントの粒子形状に着目した研究は非常に少ない。田中ら⁵⁾は、高速気流中衝撃法により普通ポルトランドセメントを球形化し、球形化によりフレッシュコンクリートの流動性が向上すること、球形化したセメントを使用したコンクリートでは強度などが向上することを報告している。図-2は、普通ポルトランドセメントと、それを球形化したセメントを使用したフレッシュコンクリートの流動性を示している⁵⁾が、後者の流動性がかなり高いことがわかる。

このように、セメント粒子を球形化することによ

¹ 独立行政法人土木研究所 水工研究グループ 水工構造物チーム, 主任研究員

² 同上, 上席研究員

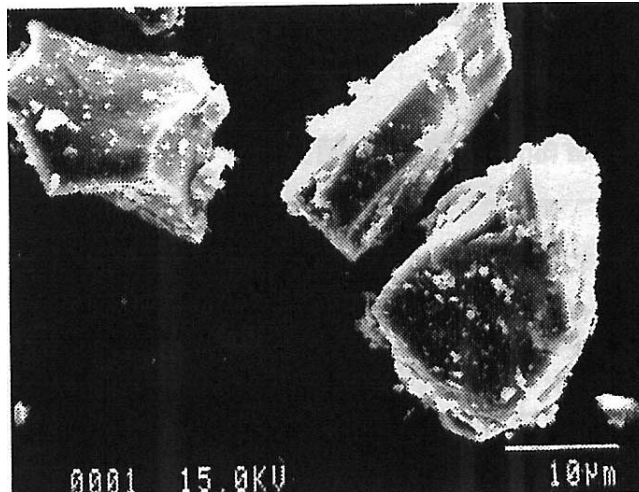


図-1 普通ポルトランドセメントの電子顕微鏡写真⁴⁾

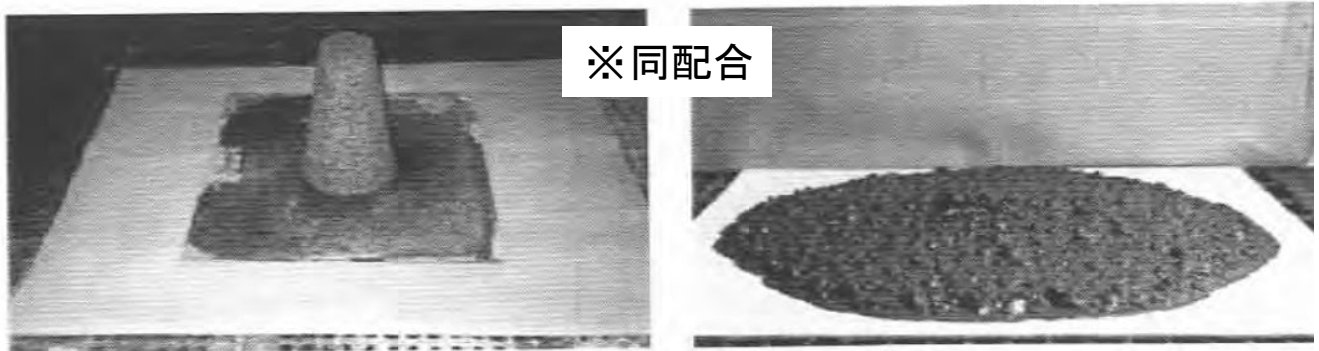


図-2 セメント粒子の球形化によるフレッシュコンクリートの流動性の違い⁵⁾
 (左：普通ポルトランドセメント，右：球形化した普通ポルトランドセメント)



図-3 高速気流中衝撃法の装置⁶⁾

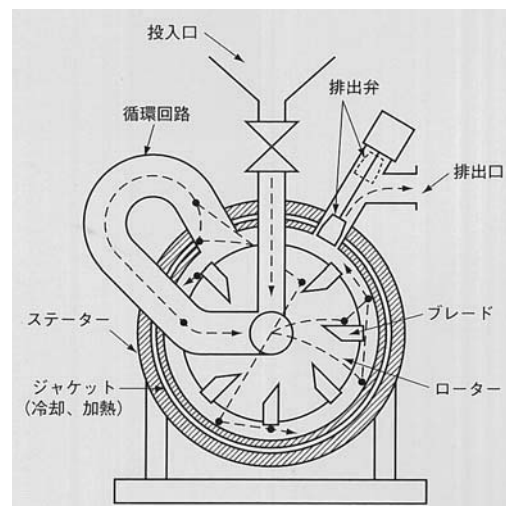


図-4 高速気流中衝撃法の模式図⁴⁾

りコンクリートなどの品質が向上することが期待されるが、高速気流中衝撃法は1バッチ数百グラム単位でしかセメントを球形化处理することができないなどの課題のため、高速気流中衝撃法によるセメント粒子の球形化は実用化されていない。

本論文では、高速気流中衝撃法により球形化したセメント粒子を、これまで検討が行われていないダム基礎グラウチングのグラウト材料として使用することに着目した。

3. 高速気流中衝撃法によるセメント粒子の球形化

3.1 高速気流中衝撃法^{5)・6)}

高速気流中衝撃法の装置は、田中ら⁴⁾により開発された、(株)奈良機械製作所製のハイブリダイゼーションシステム NHS を使用した。装置の写真を図-3、模式図を図-4 に示す。

高速気流中衝撃法の概要は以下のとおりである。

装置内には数枚のブレードが設置されており、高速回転するローターによりブレードの最大外周速度は約 100m/s になる。この高速で回転するブレードにより約 100m/s の高速の気流が発生するが、その中にセメントなど球形化処理したい微粒子を投入し、高速の気流中で粒子同士が衝突する際の衝撃力により、粒子が破砕したり球形化されたりする。装置には循環回路があるため、所要の時間、装置を稼働させることが可能である。

3.2 高速気流中衝撃法による超微粒子セメントの球形化

本論文では、後述するように 50 μm の微細亀裂へ

の室内注入試験を実施するため、最大粒径が 50 μm よりも小さい 10 μm 程度の日鐵セメント(株)製の超微粒子セメント・スーパーファインを使用した。

前述のとおり、超微粒子セメントの球形化には、(株)奈良機械製作所製のハイブリダイゼーションシステム NHS-3 を使用した。事前の検討から、1バッチの球形化处理時間は 60 分とした。同様に事前の検討から、1バッチの処理量は 800g とした。

レーザー回折式粒度分布測定装置による、超微粒子セメントと球形化处理後の超微粒子セメントの粒度分布を図-5 と図-6 に示す。球形化处理前後の粒度分布には有意な差は見られない。

球形化处理前後の超微粒子セメントの電子顕微鏡写真を図-7 と図-8 に示す。図-8 を見ると、高速気流中衝撃法による球形化处理により、超微粒子セメントの角が取れたり、粒子の凹凸が少なくなり、超微粒子セメントの粒子形状がやや球形化されていることが分かる。

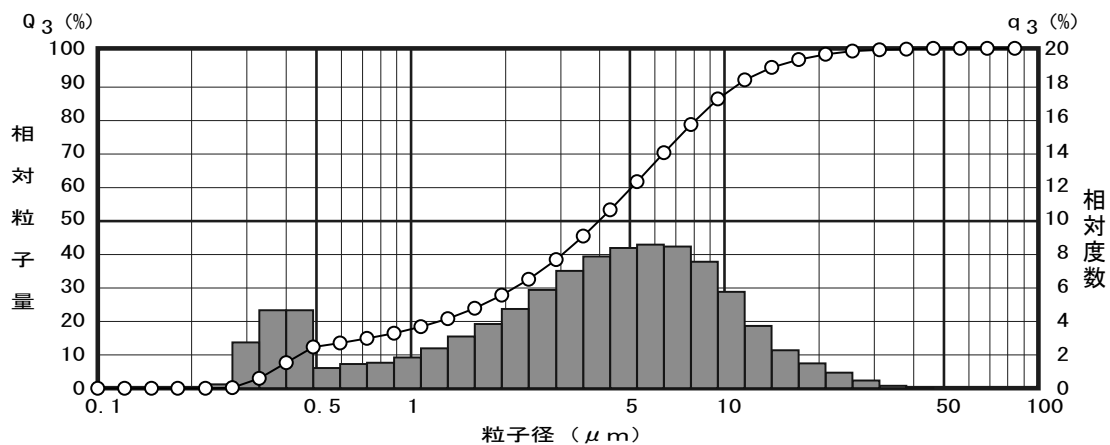


図-5 超微粒子セメントの粒度分布

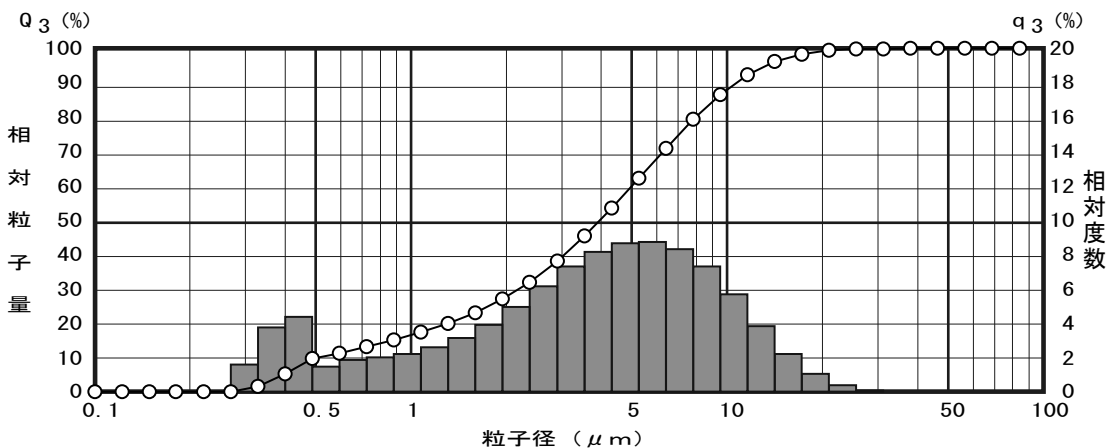


図-6 球形化处理後の超微粒子セメントの粒度分布

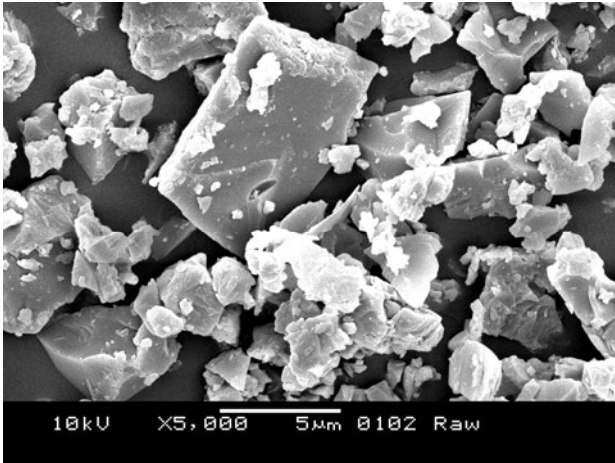


図-7 超微粒子セメントの電子顕微鏡写真

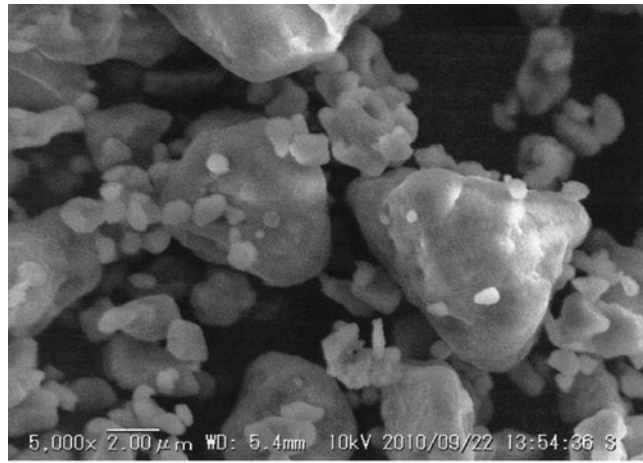


図-8 球形化処理後の超微粒子セメントの電子顕微鏡写真

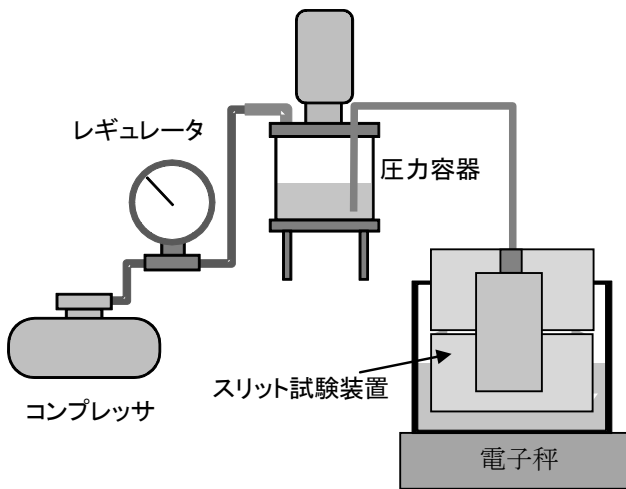


図-9 試験装置概要



図-10 スリット注入試験装置

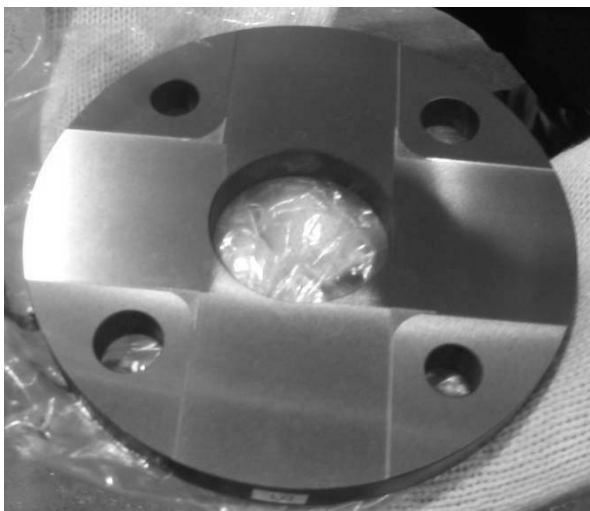


図-11 スリット

4. 球形化処理前後の超微粒子セメントのグラウトを用いた室内注入試験

4.1 試験概要

試験装置の概要を図-9に示す。スリット注入試験装置は図-10に示すとおりであり、外径138mm、高さ125mm、スリットでの注水孔径は46mm、注水孔から外面への浸透路長は46mmである。スリット注入装置の中央部に図-11のスリットを設けた。スリットは中央の注水孔から四方向に切削されており、開口幅は50µmである。試験においては、所定の圧力でグラウトを注入し、スリット外側に透過して落下したグラウトを集めて電子秤で計測した。

試験に用いたグラウトは、水セメント比は 2:1、分散剤は B 型粘度計による事前検討から花王(株)マイティ 150 を 2wt%添加して、3 リットルとなるように練り混ぜて作製した。注入圧力は 0.1, 0.3, 0.5MPa の 3 ケースとし、試験開始から終了まで一定圧とした。試験中は攪拌子により圧力容器内のグラウトを攪拌した。

4.2 試験結果

図-12 から図-14 に、各注入圧力での累積透過量を示す。

図-12 の注入圧力が 0.1MPa のケースでは、球形化した超微粒子セメントの累積透過量が多く、試験終了までスリット外側から灰色のグラウトが流出していることを確認した。一方、超微粒子セメントの透過量は徐々に少なくなり、試験途中の透過量が少なくなった後はスリット外部からの透過物は目視ではほぼ透明であった。図-15 に試験終了後のスリット入口に残っていたフィルターケーキ⁷⁾を示す。

超微粒子セメントではスリット入口の全周にフィルターケーキが厚くできていたが、球形化した超微粒子セメントではスリット入口の一部だけに薄く密実なフィルターケーキが点々と発生していた。

図-13 の注入圧力が 0.3MPa のケースでは、試験初期では球形化した超微粒子セメントの累積透過量が超微粒子セメントの累積透過量よりも大きい。これは、球形化により粒子の角が滑らかになったことによる影響と考える。しかし、球形化した超微粒子セメントは注入開始後約 120 秒で急激に透過量が少なくなった。これは、球形化した超微粒子セメントは粒子の角が滑らかになったためにフィルターケーキが密実になり、さらに注入圧力が高いと透過するセメント粒子数が多くなるためフィルターケーキが生成されやすくなることから、球形化した超微粒子セメントがスリット入口で密実なフィルターケーキを生成したために、透過量が急激に少なくなったものと考えている。なお、超微粒子セメントと球形化した超微粒子セメントともに、試験途中から透過量が少なくなった後はスリット外部からの透過物は目視ではほぼ透明であった。

図-14 の注入圧力が 0.5MPa のケースでは、球形

化した超微粒子セメントは約 40 秒で急激に透過量が少なくなった。これは前述と同様に球形化した超微粒子セメントでは密実なフィルターケーキが急速に生成されたことが原因と考えている。超微粒子セメントの累積透過量は時間とともに徐々に増加しているが、試験後半での透過物は目視ではほぼ透明であった。

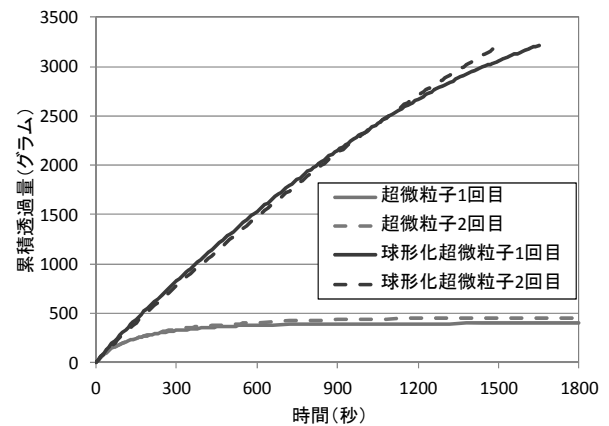


図-12 注入圧力 0.1MPa の時の累積透過量

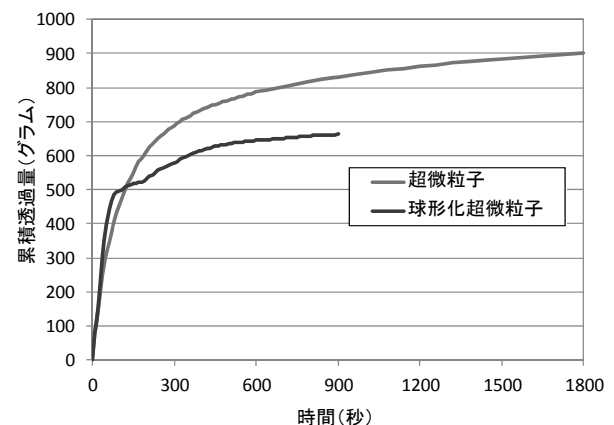


図-13 注入圧力 0.3MPa の時の累積透過量

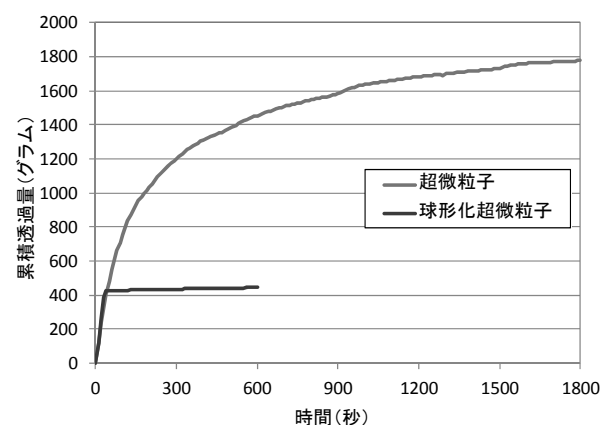


図-14 注入圧力 0.5MPa の時の累積透過量

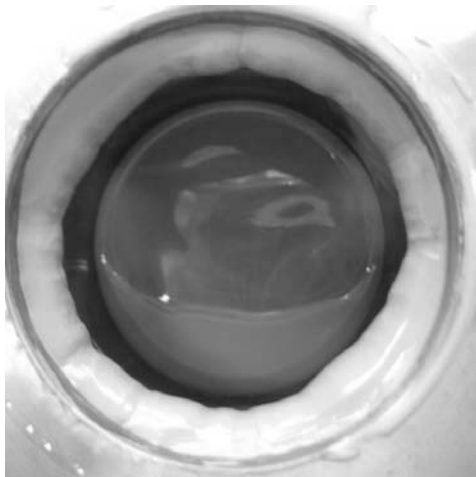


図-15 試験終了後のスリット内側のフィルターケーキ（注入圧力 0.1MPa, 上：超微粒子セメント, 下：球形化した超微粒子セメント）

5. おわりに

本論文では、グラウト材料としてのセメント粒子

の球形化の基礎的な検討として、高速気流中衝撃法により球形化処理をした超微粒子セメントの室内浸透試験を行った。本論文における試験結果では、比較的高濃度・低注入圧力の水セメント比 2:1, 注入圧力 0.1MPa の試験条件において、角落とし程度のわずかな球形化処理をした超微粒子セメントを使用したグラウトの注入性が非常によいことがわかった。一方、注入圧力が高くなると、球形化した超微粒子セメントではスリット入口で密実なフィルターケーキが生成されることにより試験途中で注入性が急速に悪くなることがわかった。

今後も引き続きセメント粒子の球形化方法とその物性に関する研究を進めていきたい。

参考文献

- 1) (財)国土技術研究センター編集：グラウチング技術基準・同解説，87p.，2003.
- 2) 三輪茂雄：粉体工学通論，245p.，1981
- 3) (社)セメント協会：セメントができるまで，<http://www.jcassoc.or.jp/cement/1jpn/jd3.html#2>.
- 4) 田中 勲：高速気流中衝撃法を利用したセメントの濡れやすさの向上，ナノテクノロジー時代の含浸技術の基礎と応用（応用編），pp.581～595，2007
- 5) 田中 勲，北村昌彦，小石真純：球状化セメントの基本物性とコンクリートの基礎性状に関する研究，1992
- 6) (株)奈良機械製作所ホームページ，<http://www.nara-m.co.jp/product/particle/nhs.html>.
- 7) 延藤 遵，西垣 誠，見掛信一郎，小林伸司，佐藤稔紀：注入圧力によるグラウトの目詰まり現象抑制効果，土木学会論文集 C，Vol.64，No.4，pp.813-832，2008



セメント粒子の形状に着目したセメントグラウトの 室内注入試験

独立行政法人土木研究所

佐藤 弘行、山口 嘉一

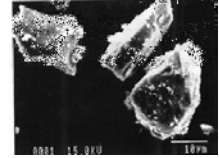
研究の背景・目的



グラウチング技術指針 — セメントの使用を基本

セメントの粒子形状 — 非球形不規則形状(角張り、凹凸、など)

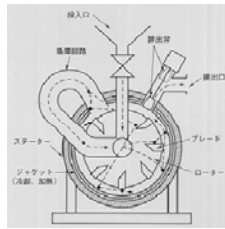
→ 粒子形状が球に近いほど、亀裂への浸透性が向上する、
亀裂入口が目詰まりしにくい



セメントの粒子形状に着目したグラウトの基礎的研究

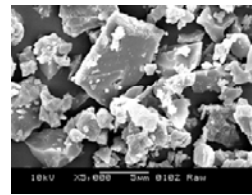
- ①セメントの球形化(高速気流中衝撃法)
- ②室内注入試験
- セメントの粒子形状が亀裂への浸透性に与える影響

高速気流中衝撃法による 超微粒子セメントの球形化

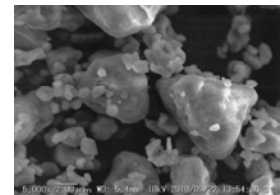


装置の中にある回転翼を高速で回転させることにより装置内部に約100m/sの高速気流を発生させ、装置内に投入した粒子同士の衝突により、粒子の表面改質を行う

高速気流中衝撃法による 超微粒子セメントの球形化

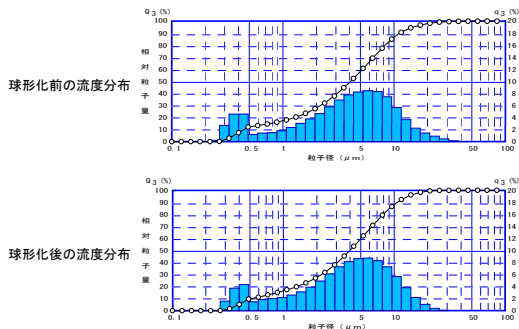


球形化前の電子顕微鏡写真

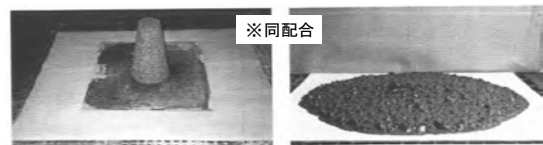


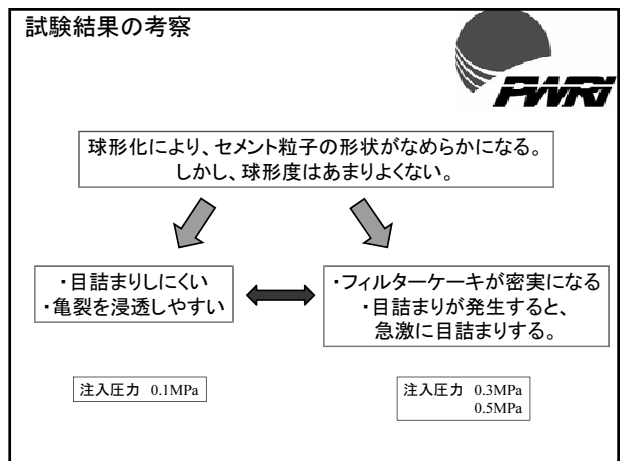
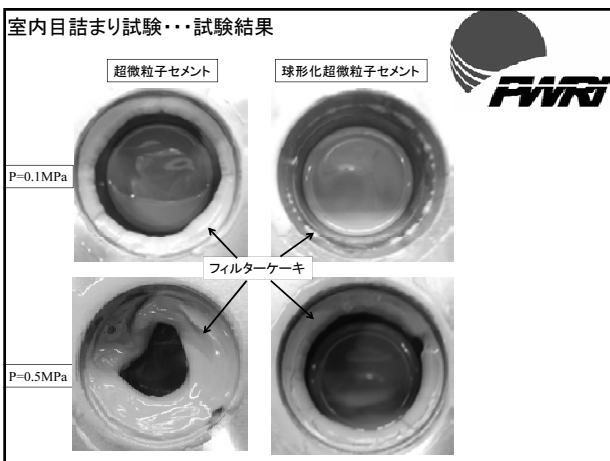
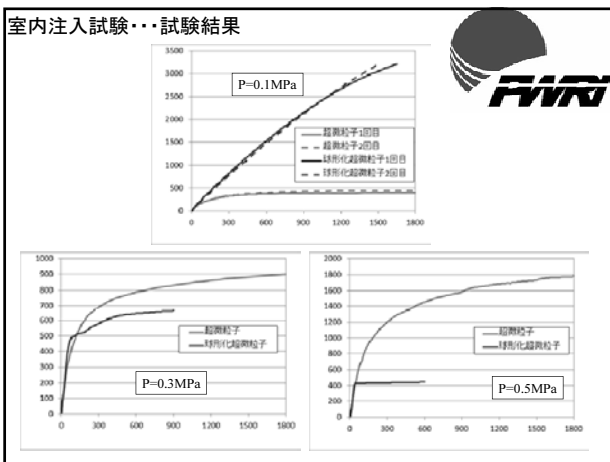
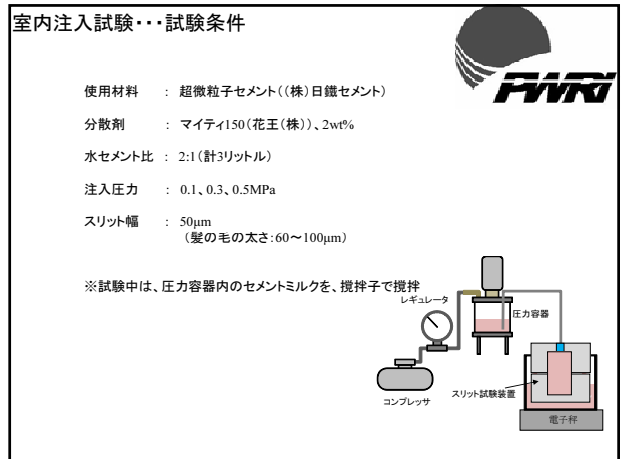
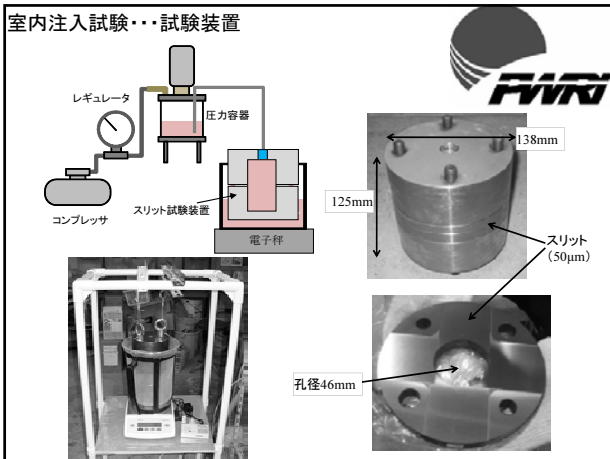
球形化後の電子顕微鏡写真

高速気流中衝撃法による 超微粒子セメントの球形化



【参考】高速気流中衝撃法による セメントの球形化のメリット





まとめ



・グラウト材料としてのセメント粒子の球形化の基礎的な検討として、高速気流中衝撃法により球形化した超微粒子セメントの室内注入試験を行った。

・高速気流中衝撃法により、超微粒子セメントの粒子形状がなめらかになった。

・W/C=2の試験条件では、低圧(0.1MPa)では球形化した超微粒子セメントの浸透性は非常に良好であったが、高圧(0.3、0.5MPa)では急激に目詰まりが発生した。

ダム基礎地盤における水ガラス系グラウトの長期止水性に関する検討

田頭秀和¹ 林田洋一¹ 増川 晋²

ダム基礎地盤に注入された水ガラス系グラウトの長期止水性を室内試験によって検討した。使用した薬液は、懸濁型、無機溶液型、有機溶液型の3種類の水ガラスである。相対密度60%で充填した豊浦砂に薬液を浸潤させて供試体を作製し、長期透水試験等を実施するとともに、貯水池の繰返し水位変動が水ガラス系固結砂の耐久性に与える影響も検討した。その結果、積算透水量によって長期止水性を評価し得ること、水ガラスのタイプによって長期止水性の発現傾向が異なること、などが判った。

キーワード: グラウト, 水ガラス, ダム基礎地盤, 長期止水性

1. はじめに

1983年の「グラウティング技術指針・同解説（以後、「指針・解説」と記す）」でダム基礎地盤における薬液グラウトの使用が禁止された後は、注入材料はセメントと水を基本とすることになり、今日に至っている。この「指針・解説」の策定前に基礎処理が行われたダムの中には、薬液を注入した事例がある¹⁻⁴⁾。近年、恒久的な材料として使用可能な薬液グラウトが構造物基礎の液状化対策等の分野で普及し始めている⁵⁾が、1983年以前に使用された薬液はこれとは異なる従前タイプのものである。当時の仕様を対象にした薬液グラウトの長期耐久性に関する研究事例は少なく、未解明な部分が多い。さらに、フィルダム基礎深部での止水性の低下を漏水量の増大として観測することが難しい場合があるうえに、グラウト部での削孔調査は実施困難であるため、現状および将来的な止水性能を把握することができない状況にある。

本研究では、ダム貯水池の水位変動に着目して各種の室内試験を実施し、ダム基礎地盤に施工された薬液グラウトの長期止水性の評価手法についての検討を行った。

2. 試験方法

図-1に試験の手順を示す。

2.1 使用薬液の選定と配合

1983年以前に使用された薬液には、水ガラス系、リグニン系、尿素樹脂系、アクリルアミド系、ウレタン樹脂系などがあるが、1974年の建設省事務次官通達「薬液注入工法による建設工事施工に関する暫定指針」によって水ガラス系以外の薬液の使用が禁止されたことに伴って生産が中止され、現在は入手不可能である。

一方、水ガラス系薬液は、「指針・解説」でダム基礎地盤における使用は禁止されたが、その他の土木工事では使用が続けられ、現在でも当時の仕様と同等の材料を入手することが可能である。

水ガラス系薬液は大きく懸濁型と溶液型に分類される。懸濁型は粒子を含む材料を使用しているものの呼称であり、日本ではLWが代表的である。もともとは水ガラスにセメントを硬化材として混ぜ合わせて上澄み液を注入する方式として海外で開発されたもの⁶⁾であるが、国内では懸濁液を分離せずにそのまま注入する独自の方式として普及した⁷⁾。この方式は大空隙をセメントで充填して小空隙を薬液で充填するという2つの工程を同時に達成できるとともに、セメント固化による地盤強度の増加を見込むことができるという長所がある。その反面、セメント粒子の存在のために、粒径の小さい（一般には細砂以下）の地盤には浸透注入させるのが難しいとい

¹農研機構農村工学研究所 施設工学研究領域構造担当, 主任研究員

²農研機構農村工学研究所 施設工学研究領域構造担当, 上席研究員

う短所がある。

溶液型は粒子を含まない材料を使用しているものの呼称であり、浸透能力が非常に高く、粒径の小さい地盤でも適用できるのが特徴である。硬化材として無機系化学薬品のみを使用しているものを無機系、有機系化学薬品を硬化材の補助材として添加して使用しているものを有機系として分類している。有機系は無機系に比べてゲル化時間の調整が容易であること等の長所があるが、反応過程で生じる有機生成物が周辺の水環境に影響を与える場合がある。

以上から、本研究では当時使用された代表的な薬液である水ガラス系薬液の懸濁型（LW）、無機溶

液型、有機溶液型の3種類を使用薬液として採用し、表-1に示す配合を設定した。なお、LWは日本方式を採用し、セメントは超微粒子セメントを使用した。

2.2 供試体の作製（①～③）

底面に金属メッシュを敷いたモールド（⑥-1 一軸圧縮試験用および⑥-3 三軸圧縮試験装置を用いた透水試験用は径5×高さ10cm、⑥-2 変水位透水試験用は径5×高さ5cm）に豊浦砂を相対密度60%になるように充填し、A液とB液の混合液を底面から浸潤させ、固結確認後に速やかに脱型した。なお、両液はゲルタイムを長くするために低温（5℃）にした。脱型した供試体の外観を写真-1に示す。

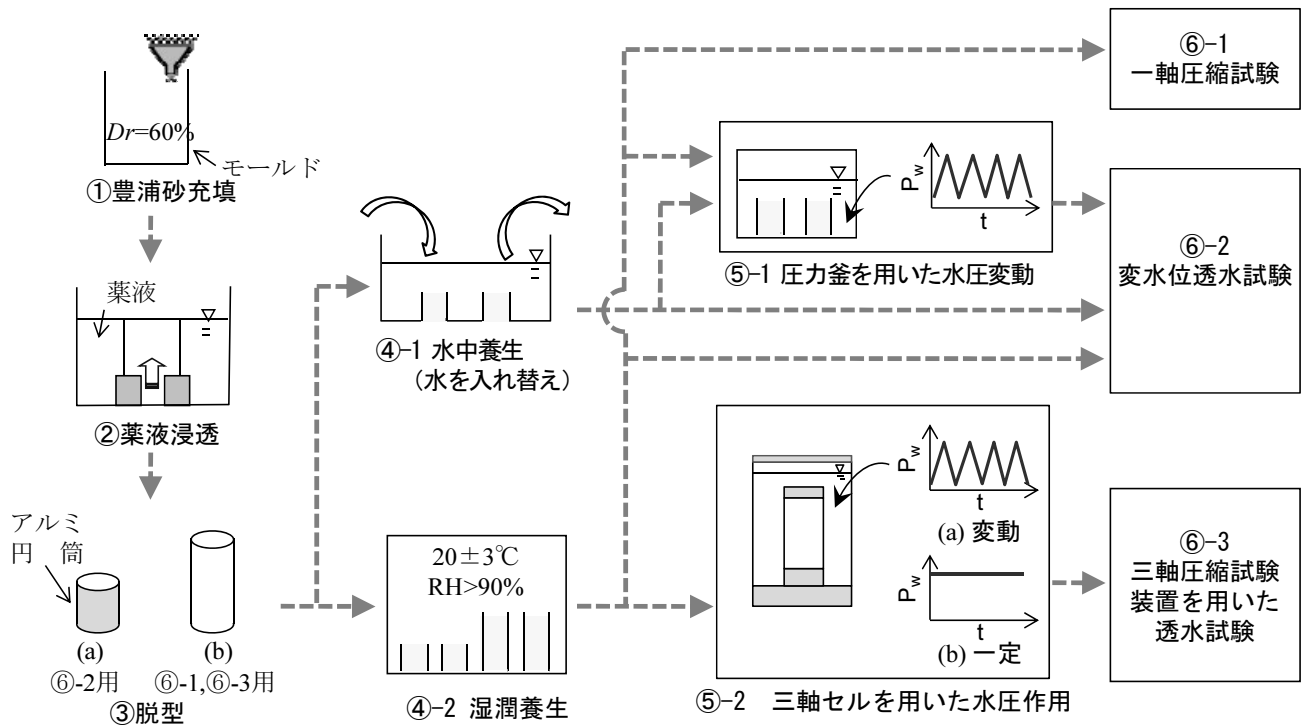


図-1 試験の手順

表-1 薬液の配合

タイプ		懸濁型	無機溶液型	有機溶液型
A液 (100g)	3号水ガラス (kg)	70.000	70.000	70.000
	水 (ℓ)	50.000	50.000	50.000
B液 (100g)	セメント (kg)	20.000	-	-
	分散剤 (kg)	0.300	-	-
	硬化剤 (kg)	-	6.000	4.374
	添加剤 (kg)	-	-	4.445
	水 (ℓ)	93.600	97.450	93.800
W/C (%)		469.5	-	-

(*) 200gあたり

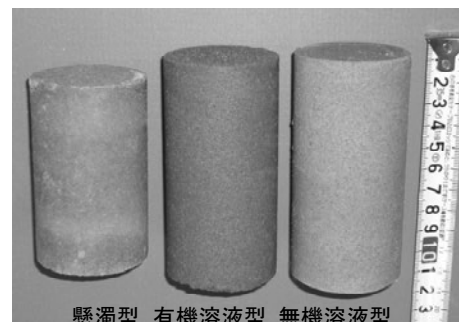


写真-1 供試体の外観（一軸圧縮試験および三軸圧縮試験装置を用いた透水試験用）

2.3 養生 (④)

脱型した供試体は、所定の材令に達するまで、2種類の方法で養生した。ひとつは、養生水の入れ替えを伴う水中養生 (④-1) であり、地盤改良部内の水の流れを伴わない水浸状態が止水性に与える影響を調べることを目的としている。養生水槽に約 22 リットルの水を満たして約 20°C で水中養生を行い、1 日 1 回程度の水替えを行った。もうひとつは温度 20±3°C、湿度 90% 以上での湿潤養生である (④-2)。

2.4 貯水位変動の再現 (⑤)

供試体に接する水の水圧や拘束圧を変動させることで貯水位変動を便宜的に再現した。以下の 2 種類の方法を設定した。

(1) 圧力釜を用いた水圧変動 (⑤-1)

変水位透水試験に供する懸濁型と有機溶液型の 28 日材令の供試体を対象に、写真-2 に示すように圧力釜内部で水面下に静置して水圧を繰返し変動させた。供試体の側面は変水位透水試験の治具となるアルミ円筒に覆われているので、水に接するのは供試体上下両面のみである。また、水圧によって発生するひずみは実質的に上下面に垂直な方向のみとなるが、本作業終了後に側面がアルミ円筒から剥離した供試体は認められなかったので、側部から中央部



写真-2 圧力釜の外観と内部の状況

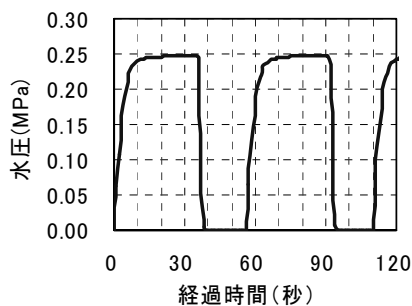


図-3 圧力釜を用いた水圧変動履歴

に向けて増大するような分布であったと推測できる。

図-2 のようなモデルケースを想定し、水圧変化の速度および一定水圧保持時間は、コア上流側法尻から想定個所 (コア中央部直下) までおよび供試体端部から中央部までの各浸透水到達時間が相似になるように設定した。ダムにおける低水位-満水位間の水位上昇・下降期間を 25 日間、満水位保持期間を半年間と仮定した場合、二面排水条件下での供試体中央から排水面までの距離 (2.5cm) に対応する時間は各々 4 秒、25 秒程度となるが、使用した試験器の制約により、図-3 に示す制御結果となった。水圧の上昇・下降回数は 20 回とした。なお、水圧変動作用は変水位透水試験の直前に実施した。

(2) 三軸セルを用いた水圧作用 (⑤-2)

三軸圧縮試験装置を用いた透水試験に供する懸濁型と無機溶液型の 14 日材令の供試体を対象に、三軸セルを用いて水圧変動を作用させた (⑤-2(a))。想定したモデルケースを図-4 に示す。拘束圧変動作業の前に、三軸セル内で圧密圧力 0.5MPa (背圧 0.1MPa) で供試体の圧密を行った。圧密終了時間の判定は 3t 法に基づいて行った。なお、圧密終了後に引き続いて透水試験に移行するため、供試体側面には圧密促進用の濾紙を配置せず、メンブレンを直接密着させた。

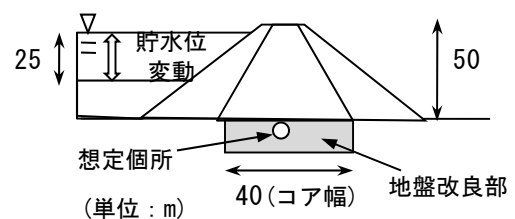


図-2 モデルケース 1

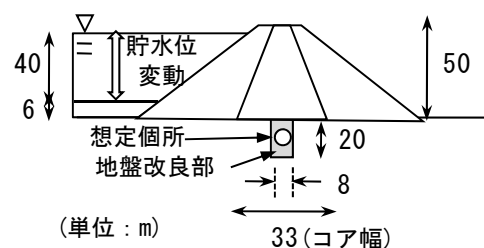


図-4 モデルケース 2

次に、拘束圧を繰返し変動させた。作業中は圧密時と同様に、供試体上下両面で排水状態とした。拘束圧の変化速度および保持時間は、地盤改良部上流側端から想定箇所（地盤改良部の中央箇所）までおよび供試体端部から中央部までの各浸透水到達時間が相似になるように設定した。ダムにおける最低水位-満水位間の水位上昇・下降期間を40日間、低水位および満水位保持期間を142.5日間と仮定した場合、二面排水条件下での供試体中央から排水面までの距離（5cm）に相応する時間は各々9分、32分となる。これらをそれぞれ拘束圧の上昇・下降時間と最低値（0.06MPa）・最高値（0.46MPa）保持時間とし、最低値保持～拘束圧上昇～最高値保持～拘束圧下降のサイクルを30回繰返した。対照試料はこの作業期間中、拘束圧を0.46MPaで保持した（⑤-2(b)）。背圧はいずれの作業中も0.1MPaとした。

2.5 一軸圧縮試験と透水試験（⑥-1、⑥-2）

JIS A1216(2005)「土の一軸圧縮試験」、JIS A1218(2005)「土の透水試験方法 b) 変水位透水試験」に準拠して実施した。試験対象とした供試体の材令は、3日、7日、14日、28日および91日（有機溶液型は28日材令まで）である。

2.6 三軸圧縮試験装置を用いた透水試験（⑥-3）

2.4(2)に引き続き、セル圧を0.56MPaに保持しながら0.5MPaの水圧で供試体下部から通水を行い、浸透量と浸出水中のシリカ濃度を計測した。これにより、地盤改良部内に一定方向の水の流れがある場合の止水性の変化を調べた。試験期間内の透水量をできるだけ多くするため、供試体内の動水勾配を実際のダムにおけるものよりも過大に設定した。

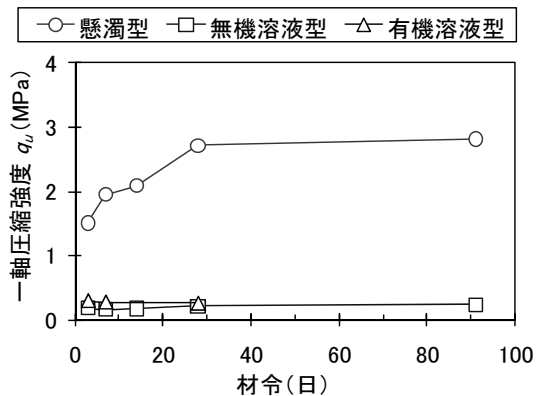


図-5 材令による一軸圧縮強度の変化

3. 試験結果と考察

図-5 に材令による一軸圧縮強度の変化を示す。懸濁型は28日材令まで増加した後におおむね一定となるのに対し、無機溶液型と有機溶液型は材令によらずおおむね一定値を示している。28日材令では、無機溶液型と有機溶液型（約0.2MPa）に比べて懸濁型は非常に大きな強度（約2.8MPa）を有している。

図-6 に材令による透水係数の変化を示す。懸濁型、無機溶液型ともに、14日～28日材令までは漸増するが、その後はほぼ一定値を示す。また、懸濁型は無機溶液型と有機溶液型よりも2オーダー程度小さな透水係数を有している。

図-7 は、圧力釜による水圧変動や水替えを行った供試体の変水位透水試験結果である。水圧変動の影響については、懸濁型は一定の傾向が認められないのに対して、有機溶液型は水圧変動によって若干の透水係数の減少が認められる。

水替えの影響については、懸濁型は一定の傾向が認められないのに対して、有機溶液型では1オーダー程度の透水係数の減少が認められる。木次ら⁸⁾は、普通ポルトランドを用いたLW供試体を水替えを行いながら養生し、一軸圧縮強度が80～120日材令を境にして強度低下を示すことを報告している。強度と止水性の違いはあるが、水替えの長期的な影響を把握するには試験期間が不足している可能性がある。

図-8 に三軸圧縮試験装置を用いた透水試験結果を示す。懸濁型は、積算透水量（透水開始からの総透水量）の増大に伴って透水係数は僅かながら減少傾向を示している。透水期間が長期間（55日間。なお、無機溶液型は約20時間である。）であること、材令による

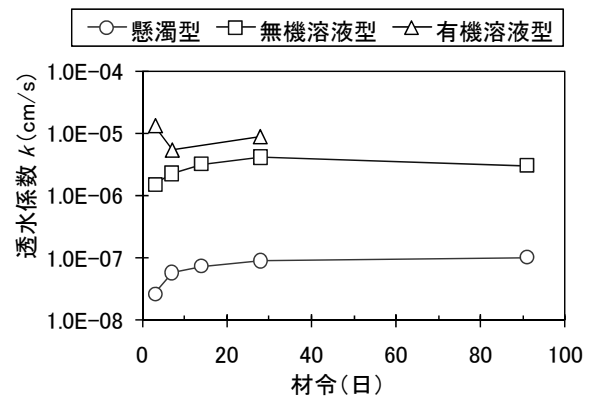


図-6 材令による透水係数の変化

透水係数の減少が認められない(図-6)ことから、透水期間中に僅かながら圧密が進行して透水係数が減少した可能性が考えられる。また、シリカ総溶出量と透水係数の相関性は認められない。今回の試験では混合液のうちの懸濁液を使用したこともあり、セメントが止水性の支配因子となっていると考えられる。上澄み液を使用した場合やさらに積算透水量が増えた場合の変化については今後の検討が必要である。また、圧密応力を変動させた供試体は圧密応力一定の供試体よりも僅かに大きな透水係数を示している。

無機溶液型の場合、積算透水量が増えるに従って透水係数も増大している。シリカ総溶出量も同様に増大しており、止水性の低下と大きな相関性を示している。拘束圧を変動させた供試体と拘束圧一定の供試体は、透水開始後しばらくの間はほぼ同じ透水係数増大履歴を示すが、前者は積算透水量が 500~700ml/cm² に達すると急激な透水係数の増大を示している。

以上から、止水性の長期的変化や水圧変動の止水性への影響の現れ方は薬液の種類によって異なることが判る。また、上記で得た透水係数と積算透水量の関係を浸透流解析に組み込むことで、薬液を注入した地盤の長期止水性を評価することが可能になると考えられる。

なお、圧力釜を用いた水圧変動と三軸セルを用いた水圧変動の相関性については、拘束条件や水圧条件等に差異はあるが、前者を経て実施した透水試験は後者を経て実施した透水試験の初期に概ね相応すると考えられる。無機溶液型では積算透水量が一定値に達してから止水性の急激な変化が発現していることから、水圧変動が有機溶液型の止水性に与える長期的な影響を評価するためには後者の追試験が必要である。

4. おわりに

本研究で得られた透水係数と積算透水量との関係

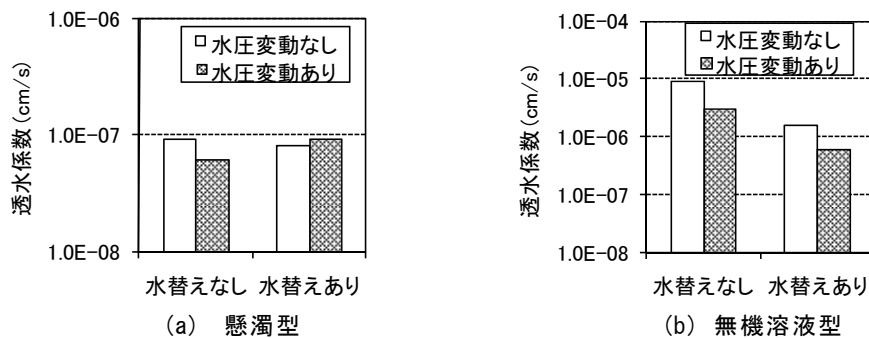


図-7 水圧変動と水替えが止水性に与える影響

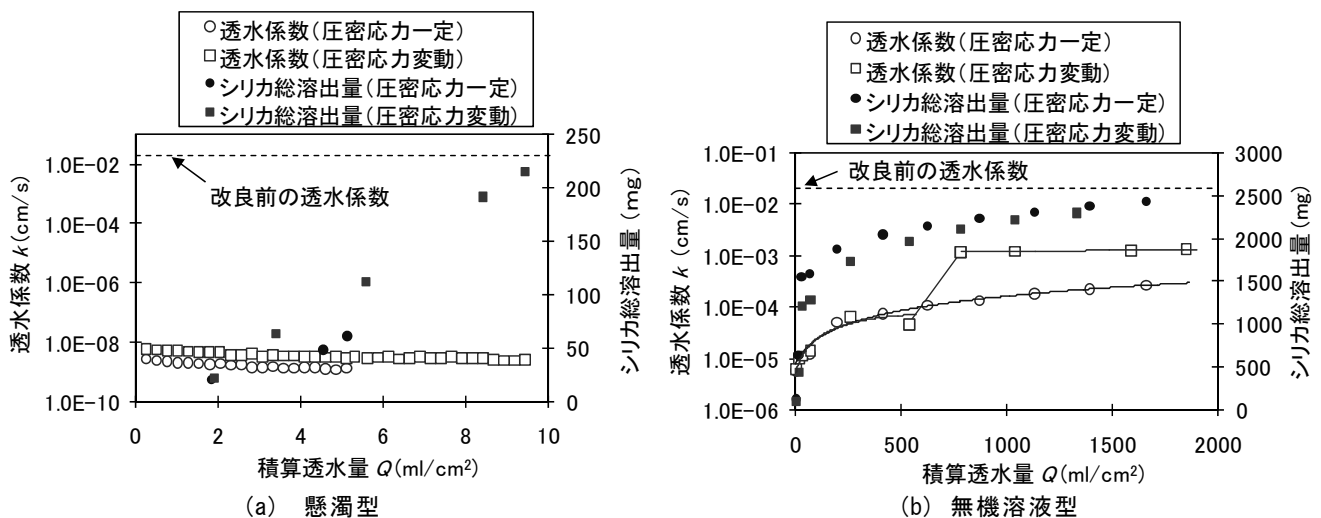


図-8 透水係数と積算透水量の関係

を活用することで、ダム基礎地盤の水ガラス系グラウト部の長期止水性の予測が可能となることを期待できる。ただし、水ガラス系グラウト材の種類による特性の差異と、地盤材料の種類や物性のばらつきの影響を検討する必要がある。また、ダム基礎地盤全体の止水性は、断面設計に大きく影響されることに留意する必要がある。

参考文献

- 1) 石川幸平，高橋信治，倉田初男，佐藤正史：小田川ダム築堤工事基礎処理について，農業土木学会東北支部第22回研究発表会講演要旨，90-94，1972
- 2) 村橋進：鶴田ダムにおけるケミカルグラウトについて，ダム日本，242，14-23，1964
- 3) 児玉元：青蓮寺ダムの工事，土木施工，10（6），11-23，1969
- 4) 吉田正：カッサダムの基礎処理－主として湛水後のグラウチングについて－，大ダム，91，18-30，1980
- 5) 米倉亮三，島田俊介，大野康年：恒久グラウト・本設注入工法－薬液注入の耐久性と耐震補強の設計施工－，山海堂，2007
- 6) イエーデ，H.（著）：セメント薬液注入工法，樋口芳朗，吉田迪雄共訳，技報堂出版，pp. 121-123，1960（原著は1953）
- 7) 新技術委員会：F・MならびにL・M工法（薬液注入ならびにセメント，薬液同時注入工法），土木施工，5（10），1-5，1964
- 8) 木次恭一，久保田清三，花田行和（1987）：水ガラス・セメント系ホモゲルの水中養生における1年間の強度・安定性，土木学会第42回年次学術講演会，760-761，1987
- 9) 社団法人日本グラウト協会編：新訂正しい薬液注入工法，日刊建設工業新聞社，264-268，2007
- 10) 塚田幸広：“暫定指針”以後の薬液注入工法について，基礎工，（2），32-38，1983
- 11) 田頭秀和，増川晋，林田洋一：ダム基礎地盤に施工された水ガラス系グラウトの長期止水性の評価について，第45回地盤工学研究発表会発表講演集，1099-1100，2011
- 12) 田頭秀和，増川晋，浅野勇，林田洋一：貯水位変動が水ガラス系固結砂の耐久性に与える影響について，第45回地盤工学研究発表会発表講演集，657-658，2010

ダム基礎地盤における水ガラス系グラウトの長期止水性に関する検討



I. 研究の背景と目的



1950's | 薬液注入技術の普及
数多くの高分子系材料の開発

1974年 | 高分子系注入材による地下水汚染事故
建設省通達「薬液注入工法による建設工事の施工に関する暫定指針」(建設省官技発160号)
地盤改良に使用できる溶液系のグラウトを「水ガラス系の薬液で劇物又は弗素化合物を含まないものに限る」と規定

1983年 | 「グラウティング技術指針・同解説」
薬液不使用を規定
1983年以前に基礎処理を行ったダムでは、薬液が使用された事例あり。
【薬液注入の歴史】

ダムの長期安全性評価の観点から、当時の薬液グラウトの長期耐久性の確認が必要

止水性

研究事例が少なく、未解明の部分が多い。
削孔調査は実施困難。

室内試験により検討

ダムに特徴的な大きな貯水位変動に着目

II. 試験方法

(1) 薬液の選定

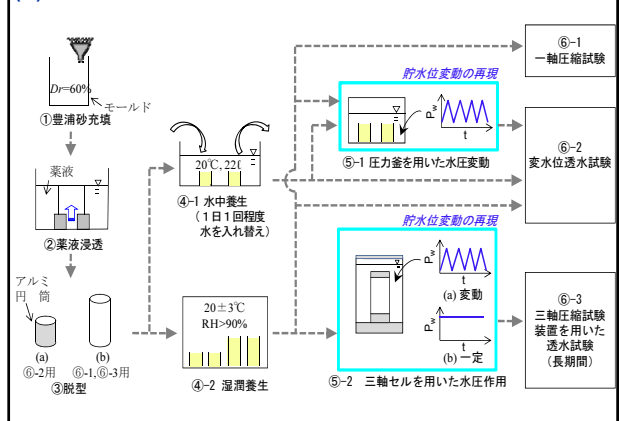
代表的な薬液、現在でも入手可能 →

水ガラス系薬液 { 懸濁型(LW)
無機溶液型 各1種 (計3種)
有機溶液型

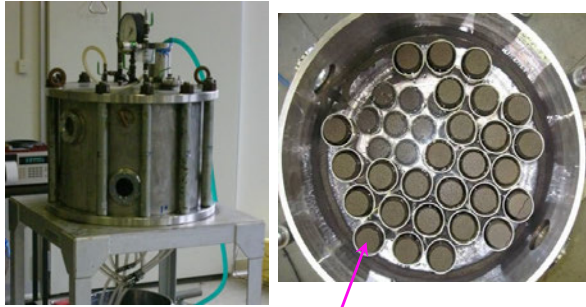
【薬液の配合】

タイプ	200gあたり							W/C (%)
	A液 (100g)		B液 (100g)					
	3号水ガラス (kg)	水 (g)	セメント (kg)	分散剤 (kg)	硬化剤 (kg)	添加剤 (kg)	水 (g)	
懸濁型	70.000	50.000	20.000	0.300	-	-	93.600	469.5
無機溶液型	70.000	50.000	-	-	6.000	-	97.450	-
有機溶液型	70.000	50.000	-	-	4.374	4.445	93.800	-

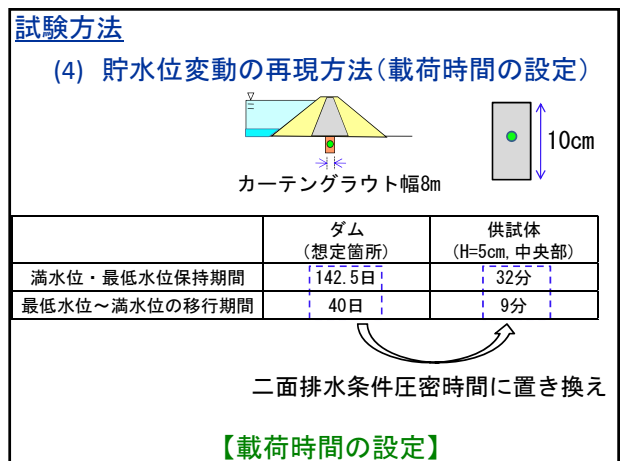
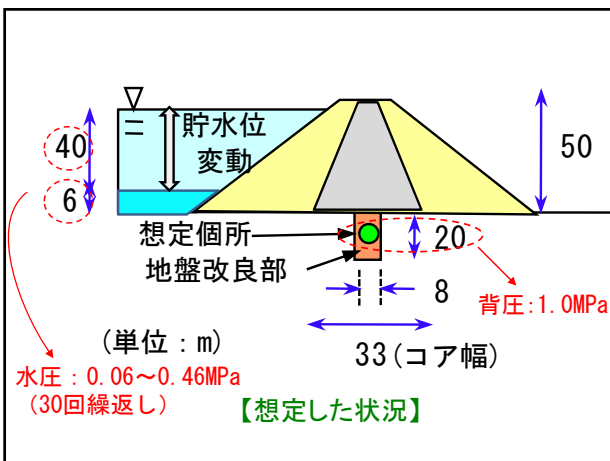
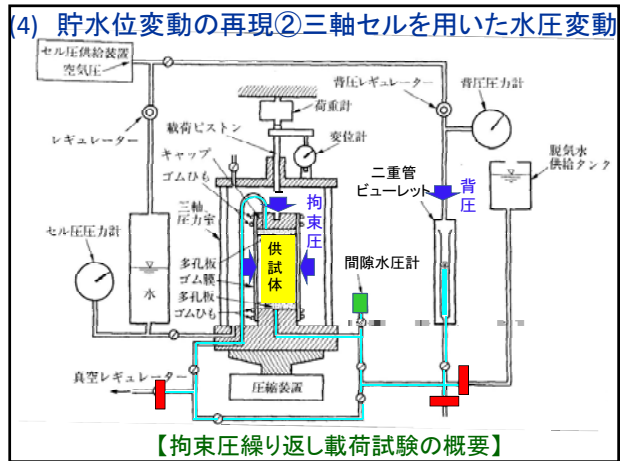
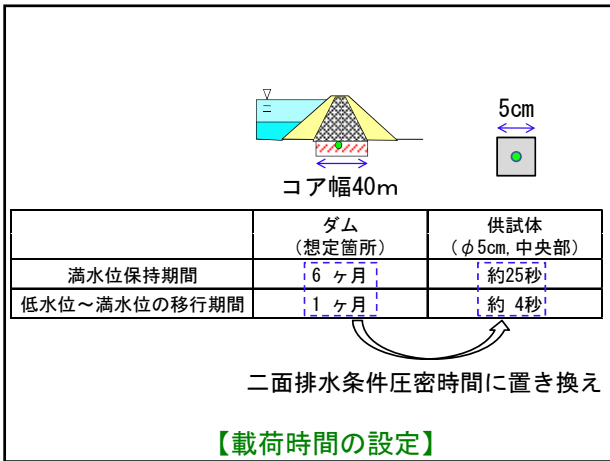
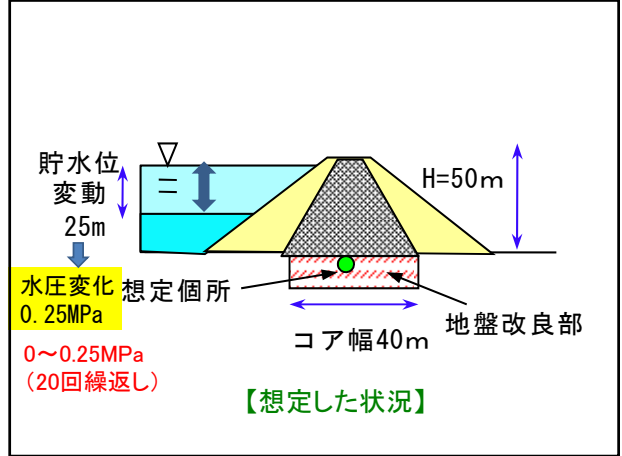
(2) 試験の手順



(3) 貯水位変動の再現①圧力釜を用いた水圧変動

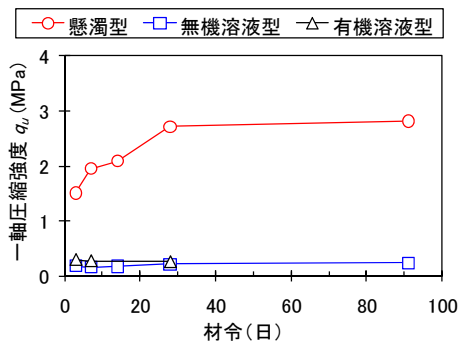


供試体
【使用した圧力釜】



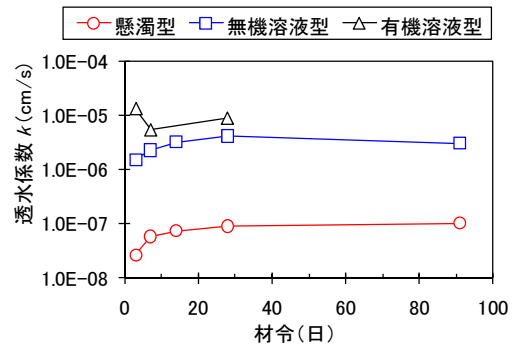
III. 試験結果

(1) 一軸圧縮強度

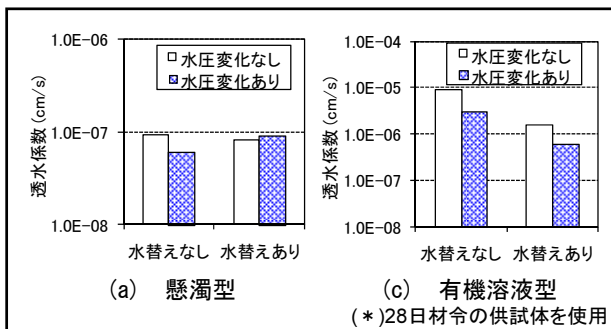


【材令による一軸圧縮強度の変化】

(2) 止水性 (透水係数)

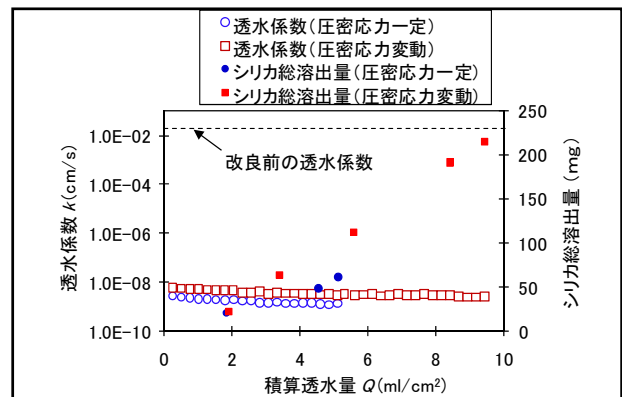


【材令による透水係数の変化】

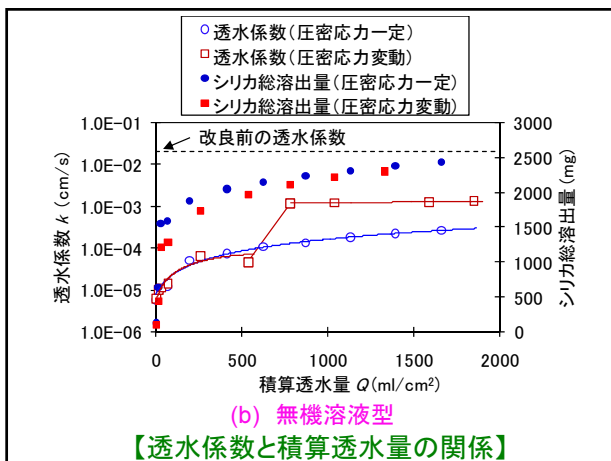


【水圧変動と水替えが止水性に与える影響】

懸濁型 → 一定の傾向なし
 有機溶液型 → 水圧変動、水替えで透水係数減(?)



【透水係数と積算透水量の関係】



【透水係数と積算透水量の関係】

IV. まとめ

- 止水性の長期的変化
水圧変動の止水性への影響 } 薬液の種類で異なる。
- 長期止水性 → 積算透水量を指標とした評価が可能。
(浸透流解析に組み込むと地盤全体の止水性評価も可能)

V. 今後の課題

- ◇ 種々の薬液を対象とした検討
- ◇ 地盤材料の種類やばらつきの影響の検討
- ◇ 断面設計を考慮したダム基礎地盤全体の止水性の検討

不飽和地盤における原位置透水試験の安定流量評価法

下山 顕治¹ 坂本 博紀² 山口 嘉一³ 佐藤 弘行⁴ 西垣 誠⁵

近年、ダム建設において、堤高の低い範囲では不飽和軟岩地盤を基礎とする事例が増えてきている。これらの地盤の透水性を適切に評価するためには長時間透水試験を実施することが望ましいが、工期やコストの制約からこの試験を数多く実施することは難しい。本研究では、原位置透水試験を想定した飽和－不飽和浸透流解析における解析条件が注入流量の非定常性と安定流量に与える影響を明らかにし、その結果を活用して実務的な実施時間の試験結果を用いた最終安定流量の推定方法を提案するとともに、その再現性を実際の原位置透水試験結果を用いて検証した。

キーワード: 不飽和地盤, 透水性評価, 飽和－不飽和浸透流解析, 長時間透水試験

1. はじめに

ダム基礎地盤の透水性は、一般に、多段階の定圧注水試験であるルジオンテストによって評価される。この試験方法については、「ルジオンテスト技術指針・同解説」¹⁾²⁾が定められており、全国のダムにおいて統一された方法により実施され、ダム基礎地盤の透水性が評価されている。同指針は、硬岩地盤のみならず、軟岩地盤に対する試験実施上の留意点も考慮されており、かなり幅広いダム基礎地盤に適用できるものである。しかし、不飽和の地盤における各圧力段階の安定流量の評価方法については、サイトごとの地盤特性の違いが大きく影響するため、飽和地盤とは区別して具体的な課題とそれに対する対策を表記するには至っていない。

近年、我が国では、ダム建設事業を含む公共事業においてコスト縮減と環境保全の達成が強く求められている。そのため、従来は掘削除去していたような地盤上においても、適切な調査、検討の結果を踏まえて安全性を確認した上でダムを建設しなければならない状況にあり、ダム堤体からの荷重が相対的に小さくなる堤高の低い部分から袖部にかけては、風化度の高い岩盤（風化軟岩盤）や未・低固結の堆積軟岩盤を基礎とする事例も多くなってきている。

このような風化軟岩地盤において、特に地下水位が低

く、不飽和帯となっている場合は、透水試験における注入水の浸透形態は非定常浸透となる。実務的な注入時間程度では各注入圧力段階における定常流量が得られず、結果的に透水性を過大に評価してしまうおそれがある。対策としては、通水時間を長くして定常流量を得る長時間透水試験³⁾を実施することが考えられるが、工期やコストの観点から、この試験方法を数多く実施することは難しい。これらのことから、実務的な実施時間の注入流量データから飽和透水性を合理的かつ適切に評価できれば、基礎処理の施工数量縮減および工期短縮を図ることが可能となりコスト縮減につながると思われる。

本研究では、非定常の飽和－不飽和浸透流解析により、有効注入圧力を1段階とした透水試験について、有効注入圧力、飽和透水係数および地下水位を変化させた解析を実施し、それらの条件が注入流量の非定常特性や安定流量に与える影響を評価した。この結果に基づき、実務的な実施時間の原位置透水試験の結果から、飽和透水係数の評価に必要な安定流量を推定する方法を提案した。さらに、本手法の適用性を評価するために、不飽和軟岩地盤において実施された長時間透水試験を対象に、実務的な実施時間の注入流量データを用いて安定流量の推定を行い、安定流量の実測値に対する再現精度を検証した。

¹株式会社ニュージェック 河川グループ構造第一チーム、リーダー（前 独立行政法人土木研究所、交流研究員）

²独立行政法人土木研究所 水工研究グループ水工構造物チーム、研究員

³独立行政法人土木研究所 水工研究グループ水工構造物チーム、上席研究員

⁴独立行政法人土木研究所 水工研究グループ水工構造物チーム、主任研究員

⁵国立大学法人岡山大学大学院、教授

2. 解析条件と結果の関係整理

2.1 解析モデルおよび物性値

本研究の対象とする地盤は割れ目の発達していない軟岩地盤であることから、多孔質媒体モデルを用いた浸透流解析を行う。

図-1 に解析モデル概要を、表-1 に解析モデル諸元を示す。解析モデルは半径 30m、高さ 25m の軸対象モデルであり、試験孔半径を 0.033m、試験区間は地表から-10m~-15m の 5m 区間に設けた。境界条件は、軸対称モデルの外周側の側面の地下水位以下を水頭固定境界、地下水位以上を浸出点境界、その他を不透水境界に設定した。

表-2 に解析物性値を、図-2 に不飽和浸透特性を示す。解析物性値は、10Lu 程度の等方の透水性を有する多孔質媒体とみなせる地盤を想定して、松本ら⁴⁾の研究を参考に設定した。表-2 および図-2 で与えた物性値を以後「基本モデル」という。なお、これらの物性値は、著者らの一人が行った同様の研究⁵⁾でも使用している。

解析における注水時間は、流量が十分に定常状態に達すると考えられる長時間を想定して 1×10^9 秒 (約 31

年) とした。

2.2 検討ケース

検討ケース一覧を表 3 に示す。解析は、地下水位や有効注入圧力を種々に変化させ、注入流量の非定常性や安定流量に与える影響を検討した。

地盤の飽和透水係数は、10Lu 程度に相当する $k_s = 1.3 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ を基本とし、さらに、代表的な地下水位 (G.L.-0m, -15m および G.L.-22.5m) および有効注入圧力 (0.098, 0.49MPa) については、飽和透水係数の影響を調べるために、1Lu 相当 ($k_s = 1.3 \times 10^{-5} \text{cm/s}$) ~ 100Lu 相当 ($k_s = 1.3 \times 10^{-3} \text{cm/s}$) の範囲で 4 種の k_s を設定した。

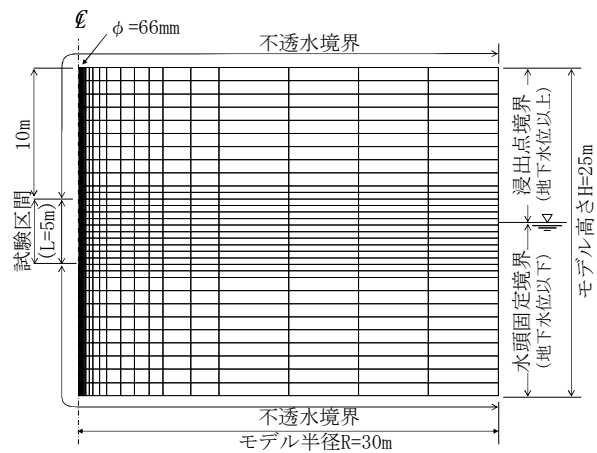


図-1 モデル概要図

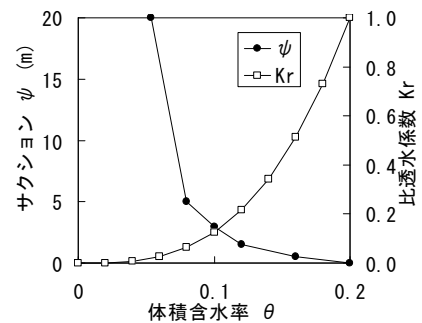


図-2 不飽和浸透特性

表-1 モデル諸元

項目	値
モデル半径 R (m)	30
モデル高さ H (m)	25
孔径 ϕ (mm)	66
試験区間上端深さ (m)	10
試験区間長 L (m)	5

表-2 解析物性値

項目	値
飽和透水係数 k_s (cm/s)	1.3×10^{-4}
比貯留係数 S_s (cm ⁻¹)	1.0×10^{-7}
間隙率 n	0.2
不飽和浸透特性	図-2

表-3 検討ケース一覧

飽和透水係数 k_s (cm/s)	有効注入圧力		0.049MPa	0.098MPa	0.196MPa	0.294MPa	0.49MPa	0.98MPa	備考
	地下水位								
1.3×10^{-4}	G.L.-0m		●	●	●	●	●	●	地下水位が試験区間よりも上
	G.L.-5m		●	●	●	●	●	●	地下水位が試験区間上端
	G.L.-10m		●	●	●	●	●	●	地下水位が試験区間内
	G.L.-11.25m		●	●	●	●	●	●	地下水位が試験区間内
	G.L.-12.5m		●	●	●	●	●	●	地下水位が試験区間内
	G.L.-13.75m		●	●	●	●	●	●	地下水位が試験区間内
1.3×10^{-5} 6.7×10^{-5} 2.7×10^{-4} 1.3×10^{-3}	G.L.-15m		●	●	●	●	●	●	地下水位が試験区間下端
	G.L.-20m		●	●	●	●	●	●	地下水位が試験区間よりも下
	G.L.-22.5m		●	●	●	●	●	●	地下水位が試験区間よりも下
	G.L.-0m		-	●	-	-	●	-	飽和透水係数の影響
	G.L.-15m		-	●	-	-	●	-	
	G.L.-22.5m		-	●	-	-	●	-	
G.L.-22.5m		-	●	-	-	●	-		

2.3 検討結果

2.3.1 地下水位、注入圧力の影響

(1) 非定常浸透状況におよぼす影響

図-3 に流入流量の経時変化を示す。注入流量は非定常の傾向を示しており、試験開始直後は注入流量が多く、時間の経過とともに低減しながら徐々に安定する。非定常の傾向は、同一有効注入圧力においては、地下水位が低くなるほど強くなる。注入流量は、時刻 $t=10^7 \sim 10^9$ 秒で概ね安定する。

(2) 安定流量に及ぼす影響

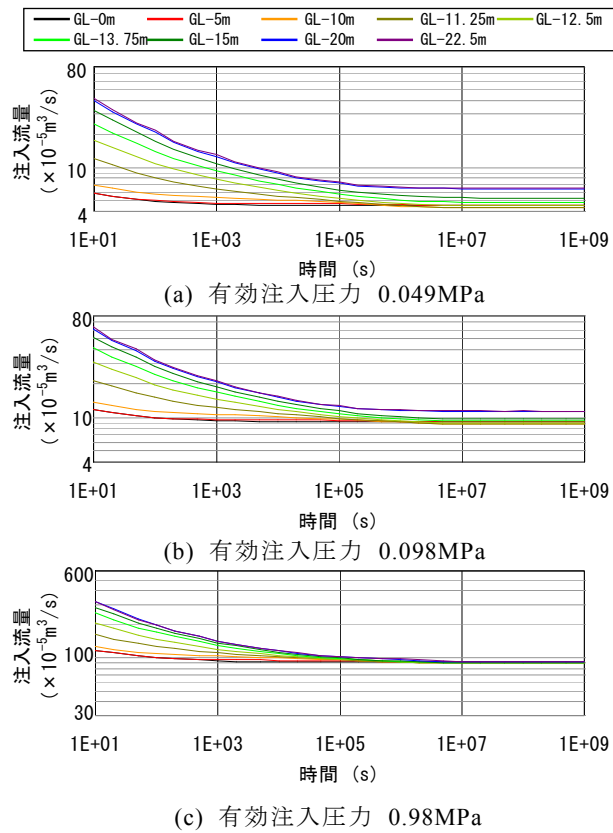


図-3 注入流量の経時変化の例

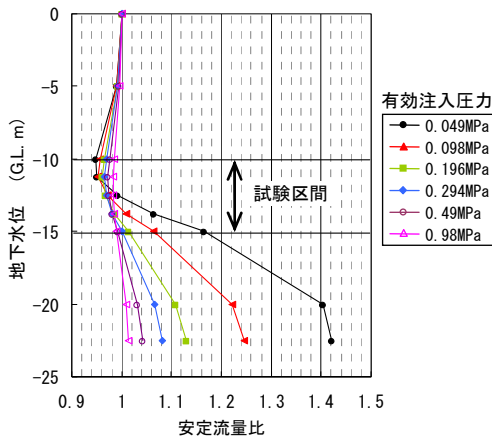


図-4 地下水位と安定流量比の関係

地下水位や有効注入圧力と注入流量の安定流量の関係には以下の傾向が見られた。

1) 完全飽和状態に対する各地下水位における安定流量の増減

図-4 に、地下水位を G.L.-0m に設定することでモデル全体を完全に飽和させた状態（以下、完全飽和状態と呼ぶ）の安定流量を 1 とした場合の各地下水位での相対的な安定流量（以下、安定流量比と呼ぶ）を示す。この図は、安定流量比と地下水位の関係を有効注入圧力別に整理したものである。

- 地下水位が試験区間よりも上に位置する場合、有効注入圧力が小さくなるにつれて安定流量比は小さくなる。これは、地下水位が飽和時よりも低い場合、注入に伴って試験区間周辺の地下水位が上昇し、有効注入圧力が相対的に小さくなることが要因と考えられる。
- 地下水位が試験区間上端よりも下に位置する場合、地下水位が下がるにつれて安定流量比は大きくなる。
- 地下水位が安定流量比に与える影響は、有効注入圧力が小さいほど大きい。地下水位の影響が最

k_s (cm/s)	1.3×10^{-5}	6.7×10^{-5}	1.3×10^{-4}	2.7×10^{-4}	1.3×10^{-3}
地下水位					
G.L. -15.0m	○	△	□	◇	✕
G.L. -22.5m	●	▲	■	◆	◇

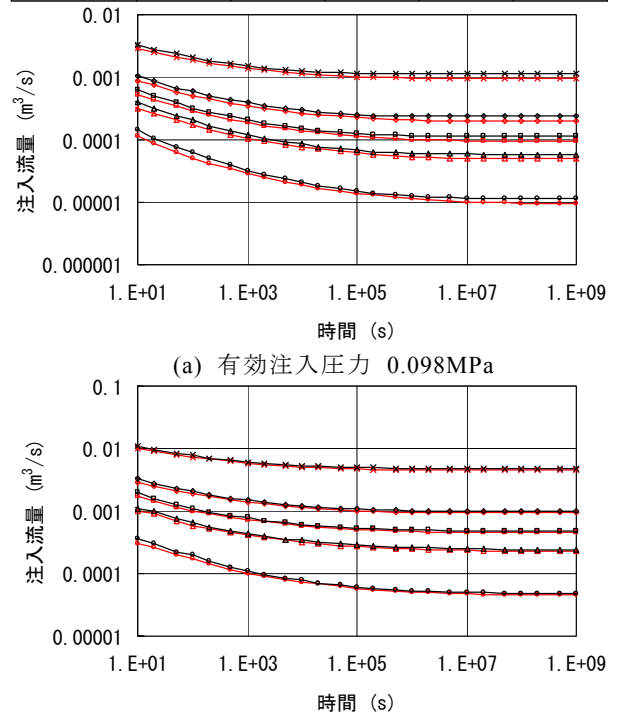


図-5 注入流量の経時変化の比較

も大きいのは、有効注入圧力が 0.049MPa のケースであり、地下水位 G.L.-10m（試験区間上端）での注入流量は完全飽和状態の約 95%，地下水位 G.L.-22.5m（試験区間下端より 7.5m 下方）での注入流量は完全飽和状態の約 142%となる。

2.3.2 地盤の飽和透水係数の影響

(1) 注入量の経時変化

図-5 に注入流量の経時変化を示す。注入流量は、飽和透水係数が大きいほど多くなり（曲線が上方に移動し）、飽和透水係数が大きいほど、注入流量が安定するまでの時間が短くなる（曲線が左側に移動する）。このことを詳細に検討するため、注入流量の経時変化について、流量および時刻を無次元化し、その合致の度合いを確認した。

注入流量および時刻の無次元化は、以下のように行った。

- a) 注入流量の無次元化は、飽和透水係数 k_s 、有効注入圧力に相当する圧力水頭 H 、試験区間長 L で行った($Q/k_s LH$)。
- b) 時刻の無次元化は、飽和透水係数 k_s の逆数、有効注入圧力に相当する圧力水頭 H で行った($t \cdot k_s / H$)。

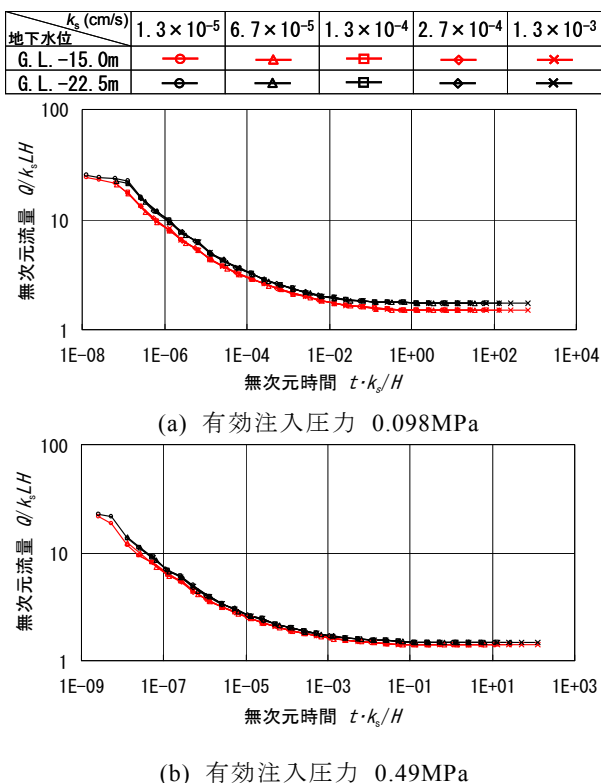


図-6 注入流量の経時変化の比較

(流量および時刻を無次元化した結果)

k_s/H)。

図-6 に、注入流量、時刻を無次元化した注入流量の経時変化を示す。無次元化した注入流量は、地下水位および有効注入圧力が同じであればほぼ一致し、1本の曲線となった。

- (2) 完全飽和状態に対する各地下水位における安定流量の増減

表-4 に各条件における安定流量を示す。完全飽和状態 (G.L.-0m) を基準とした各地下水位での安定流量比は、飽和透水係数に関わらずほぼ一致した。

2.3.3 不飽和地盤に対する安定流量から完全飽和状態の安定流量への換算係数

これまでの検討結果より、安定流量は、地下水位および有効注入圧力に影響を受けることがわかった。また、各地下水位での安定流量を完全飽和状態での安定流量で除した安定流量比は、飽和透水係数に影響を受けなかったことがわかった。

このことは、地下水位、有効注入圧力が既知であれば、飽和透水係数に関わらず図-4 に示す安定流量比の逆数を用いて完全飽和状態の安定流量に次式(1)のように換算できることを示している。

$$Q'_s = \beta Q_s \quad (1)$$

ここに、 β ：完全飽和状態の安定流量への換算係数、 Q'_s ：完全飽和状態における安定流量、 Q_s ：各地下水位での安定流量である。式(1)により得られ

表-4 安定流量 ($\times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$)

(a) 有効注入圧力 0.098MPa

k_s	$1.3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$	$6.7 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$	$2.7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$	$1.3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$
地下水位				
G.L.-0m	9.12×10^{-6} (1.00)	4.70×10^{-5} (1.00)	1.89×10^{-4} (1.00)	9.12×10^{-4} (1.00)
G.L.-15m	9.71×10^{-6} (1.06)	5.00×10^{-5} (1.06)	2.02×10^{-4} (1.06)	9.71×10^{-4} (1.06)
G.L.-22.5m	1.14×10^{-5} (1.25)	5.86×10^{-5} (1.25)	2.36×10^{-4} (1.25)	1.14×10^{-3} (1.25)

(b) 有効注入圧力 0.49MPa

k_s	$1.3 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$	$6.7 \times 10^{-5} \text{ cm/s}$	$2.7 \times 10^{-4} \text{ cm/s}$	$1.3 \times 10^{-3} \text{ cm/s}$
地下水位				
G.L.-0m	4.56×10^{-5} (1.00)	2.35×10^{-4} (1.00)	9.47×10^{-4} (1.00)	4.56×10^{-3} (1.00)
G.L.-15m	4.52×10^{-5} (0.99)	2.33×10^{-4} (0.99)	9.39×10^{-4} (0.99)	4.52×10^{-3} (0.99)
G.L.-22.5m	4.75×10^{-5} (1.04)	2.45×10^{-4} (1.04)	9.87×10^{-4} (1.04)	4.75×10^{-3} (1.04)

注) 括弧内の数字は完全飽和状態との比

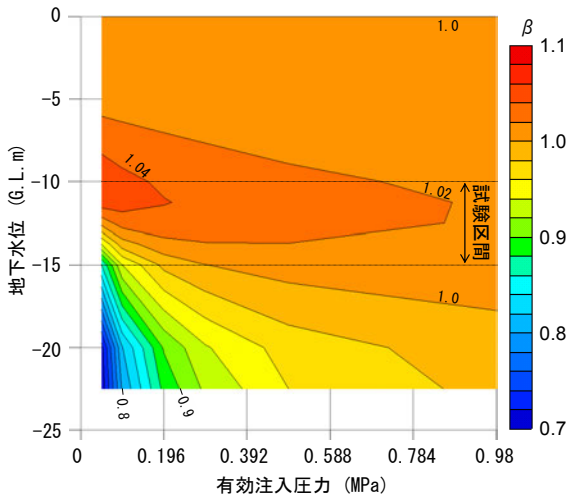


図-7 地下水位－有効注入圧力平面における換算係数 β の分布

た Q'_s を用いて完全飽和状態におけるルジオン値や透水係数を求めることが可能となる。

図-7 に、地下水位と有効注入圧力の組み合わせに対応する換算係数 β の分布を示す。

3. 安定流量の推定方法と適用事例

3.1 浸透流解析を用いた実測注入流量推定方法の提案

3.1.1 実測注入流量推定方法の流れ

前章までの検討結果より、浸透流解析による注入流量の時刻歴は、有効注入圧力、地下水位等の試験条件が同一であるとき、注入流量および時刻を飽和透水係数について無次元化すれば、得られる曲線は一致することがわかった。

このことに着目し、試験条件を考慮して実施した浸透流解析の結果として得られる解析流量により実測注入流量を補正係数を用いて再現するフィッティング手法を提案する。

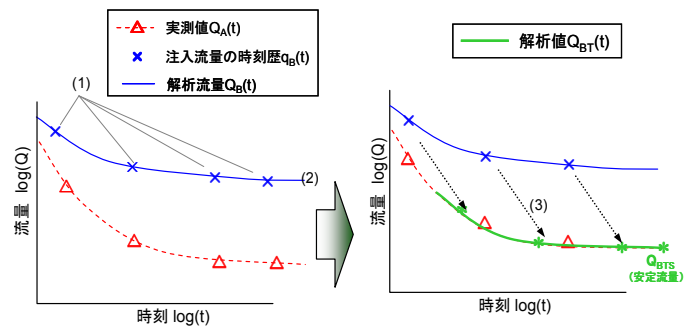
3.1.2 実測注入流量推定方法手順

(1) 浸透流解析の実施

有効注入圧力、地下水位、試験孔の大きさ等の試験条件を再現した解析モデルを作成し、任意の飽和透水係数 k_f を設定して浸透流解析を実施する。

ここで得られた注入流量の時刻歴を $q_B(t)$ とする。

(2) 解析による注入流量時刻歴の近似式を作成
フィッティングの際には、後述するように解析結果による注入流量の出力時刻に補正係数 α を乗じた



- (1) 浸透流解析による注入流量の時刻歴 $q_B(t)$ を得る
- (2) $Q_B(t) = a \cdot t^b + c$ として $q_B(t)$ に良く一致する $Q_B(t)$ の a, b を決定
- (3) $Q_{BT}(t) = \alpha Q_B(\alpha t) = Q_A(t)$ となるような α を最小二乗法などで求め $Q_{BT}(t)$ を決定 (フィッティング)

図-8 フィッティング手順のイメージ

め、フィッティング後の注入流量の出力時刻は α の値によって変化し、必ずしも補正前のデータと同時刻の流量値が得られない。このため、フィッティングに使用する解析流量 $Q_B(t)$ には $q_B(t)$ の近似式を使用する。近似式の形式は、注入流量時刻歴の形状から次式(2)のとおりとした。

$$Q_B(t) = a \cdot t^b + c \quad (2)$$

ここに、 a, b, c : 定数である。定数 a, b, c は、 $q_B(t)$ と $Q_B(t)$ がよく一致するように最小二乗法などにより決定する。

(3) フィッティングの実行

解析結果の流量 $Q_B(t)$ を、実測値の流量データ $Q_A(t)$ に一致するように式(3)を用いてフィッティングを行う。

$$Q_{BT}(t) = \alpha Q_B(\alpha t) \quad (\alpha: \text{補正係数}) \quad (3)$$

ここで、補正係数 α は最小二乗法などを用いて決定する。フィッティングにより得られた $Q_{BT}(t)$ の安定流量を $Q_{BT'S}$ とする。

参考として(1)~(3)のフィッティング手順のイメージを図-8 に示す。このフィッティング作業に加えて 2.3.3 に示した以下の変換作業を行うことで、完全飽和状態の安定流量を求めることができる。

(4) 完全飽和状態の安定流量への換算

フィッティングにより得られた $Q_{BT}(t)$ の安定流量 $Q_{BT'S}$ と 2.3.3 で示した換算係数 β を用いて完全飽和状態の安定流量 $Q_{BT'S}$ を次式(4)を用いて算出する。

$$Q_{BT'S} = \beta Q_{BT'S} \quad (4)$$

ここで、換算係数 β は、試験孔の孔径や試験区間の位置を再現したモデルを用いて浸透流解析を行い、図-7 に相当するものを作成することで得られる。

3.2 大保脇ダム長時間透水試験結果への適用

大保脇ダム左岸リム部において実施された長時間透水試験結果³⁾に対して本フィッティング手法を適用し、安定流量の再現精度の検証を行った。

3.2.1 長時間透水試験および対象とする試験データの概要

表-5 に大保脇ダムで実施した長時間透水試験の仕様を、図-9 に長時間透水試験の概念図を示す。また、図-10 に左岸リム部の岩級区分と試験孔の位置図を示す。長時間透水試験の対象である千枚岩 D_H 級岩盤は全体的に風化が進んだ状態であり、均質多孔体的な性状である。また、片理面や亀裂は見られる部分もあるが、連続性が乏しいため、卓越した水みちはないものと考えられる。なお、試験および地質条件の詳細については参考文献³⁾を参照されたい。

試験データのうち、注入流量が相対的に強い非定常の傾向を示すステージの注入流量の経時変化を図-11 に

表-5 長時間透水試験の仕様

項目	仕様
削孔径 φ	66mm
ステージ長	2.5m
一定水位 ^{*)}	EL.78.2m
計測時間間隔	1分間
継続時間	4時間以上

*) 孔口付近に定水位水槽を設けて一定水位を保つ。

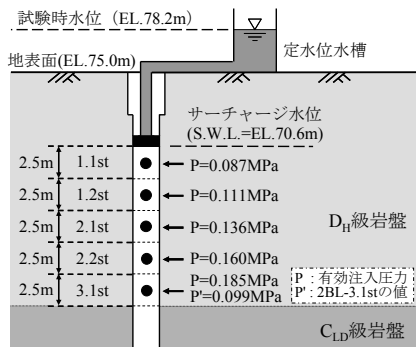


図-9 長時間透水試験の概念

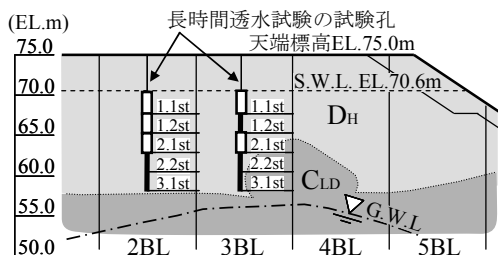


図-10 長時間透水試験の試験孔位置
(□：再現解析の対象とするステージ)

示す。図中には、現場計測（1分間隔の注入流量）データ、および現場計測データのばらつきをある程度平滑化するために行った10分移動平均データを表示した。なお、2BLの第2.1ステージの現場計測データのように、初期段階で大きな注入流量の変動がみられる孔があるが、これは試験開始時にボーリング孔内が満水になるまでに注水した量が加算されたと考えられる。

3.2.2 浸透流解析による大保脇ダム長時間透水試験結果の再現解析

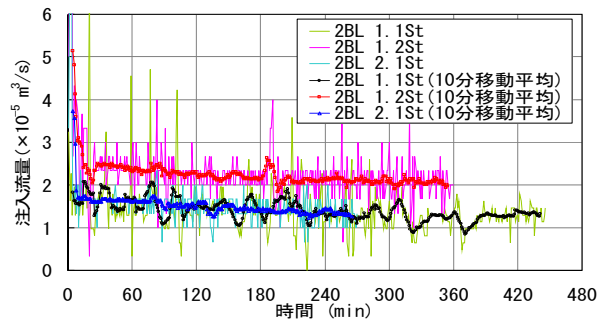
長時間透水試験において非定常浸透の傾向を示したデータ（図-11参照）を対象に、飽和-不飽和の非定常浸透流解析による再現解析を実施し、得られた解析結果を用いて実測データへのフィッティングを行った。再現解析の対象とするステージは、図-10に示す5ステージである。

なお、解析結果と比較を行う試験データ（1分間隔計測）はばらつきが大きいため、今回は10分移動平均による注入流量を用いることとした。

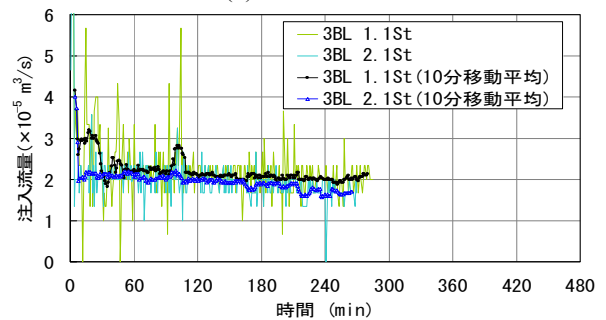
(1) 不飽和浸透特性

1) 試料および試験の概要

飽和-不飽和浸透流解析を実施するために必要な不飽和浸透特性を求めるため、実際のダムサイトで採取した試料を用いた室内試験を実施した。試料と



(a) 2ブロック



(b) 3ブロック

図-11 注入流量の経時変化

しては、長時間透水試験が実施された左岸リム部より D_H 級岩盤の不攪乱試料を採取した。

不攪乱試料の採取は、図-12 に示す位置に採取ヤードを設け、ブロックサンプリングにより行った。

D_H 級岩盤は全体的に風化が進んだ状態であり、均質多孔体的な性状である。また、一部で片理面および他の割れ目が比較的残存した状態の箇所もあるが、連続性が乏しいため、卓越した水みちはないと考えられる。ただし、室内試験の供試体寸法を考慮して、サンプリングの位置は、ブロックサンプルに極力割れ目が入らないように選定した。

供試体の作製は、切り出し時に試料が乱れないように、採取したブロックサンプルを凍結させた状態で行った。

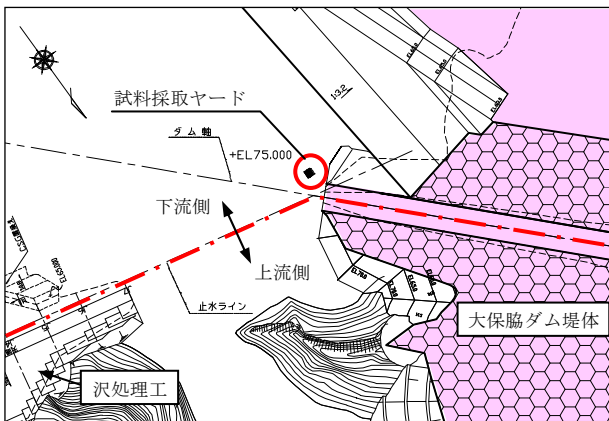


図-12 D_H 級不攪乱試料採取箇所

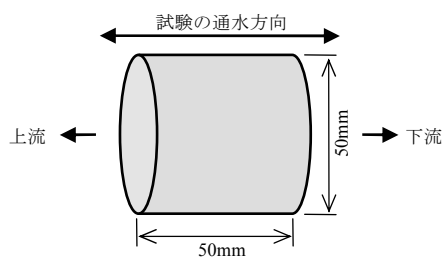


図-13 供試体の形状

表-6 各供試体の物理特性 (初期状態)

供試体番号	供試体 1	供試体 2	供試体 3
湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.78	1.76	1.85
乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.42	1.43	1.49
含水比 w (%)	25.7	23.2	24.2
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.74	2.74	2.74
飽和度 S_r (%)	76	69	79
間隙率 n	0.48	0.48	0.45
飽和透水係数 k_s (cm/s)	5.5×10^{-5}	5.5×10^{-5}	7.0×10^{-7}

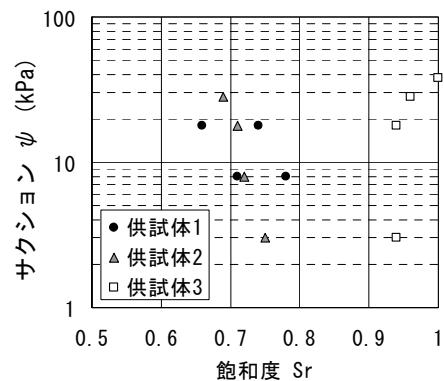
供試体の大きさは、直径 50mm、高さ 50mm の円柱型とし、透水試験における通水方向が、ダム湛水時の主な浸透方向である上下流方向となるように作製した。図-13 に供試体の形状を示す。不飽和浸透特性試験は、西垣ら^{6),7)}の提案する試験方法により行った。

作製した供試体の初期状態での諸元を表-6 に示す。供試体 1, 2 は間隙率が 0.48, 飽和透水係数が 10^{-5} cm/s オーダーであった。供試体 3 は間隙率が 0.45, 飽和透水係数が 10^{-7} cm/s オーダーであった。飽和透水係数の算出方法については後述する。

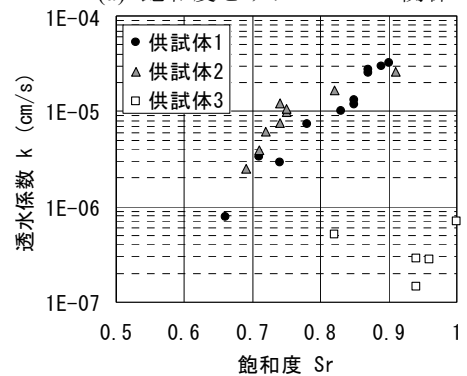
2) 試験結果

不飽和浸透特性試験結果を図-14 に示す。

飽和度とサクシヨンの関係については、供試体 1, 2 はサクシヨンが 10kPa より大きくなると飽和度 (体積含水率) の低下傾向が確認できた。しかし、供試体 3 は、今回実施した試験の範囲では、サクシヨンを大きくしても飽和度 (体積含水率) は低下しなかった。



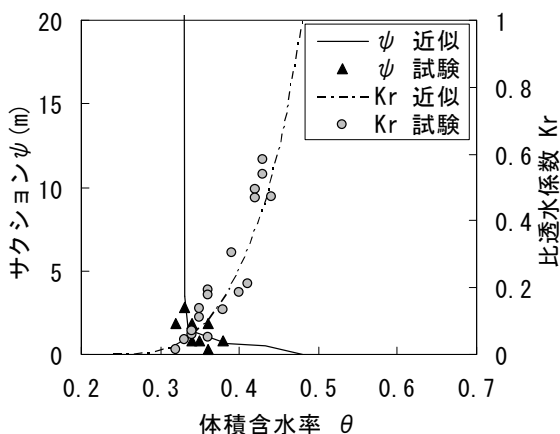
(a) 飽和度とサクシヨンの関係



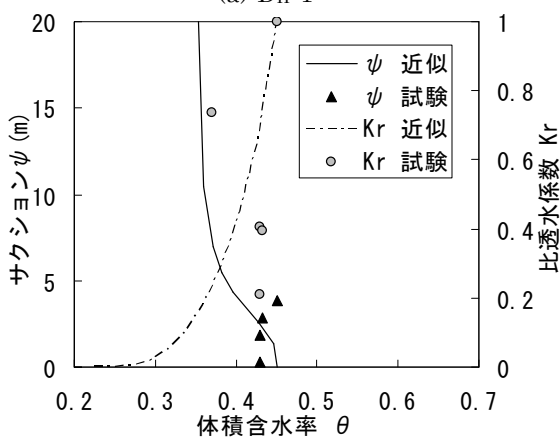
飽和度と不飽和透水係数の関係については、供試体 1, 2 は飽和度が低くなるにしたがい透水係数も小さくなり、飽和度 0.9 と 0.65 の間には、1 オーダー以上の透水係数の差が生じた。供試体 3 は 10^{-7} cm/s オーダーの透水性の非常に低い供試体であり、飽和度と透水性に明瞭な関係は見られなかった。

不飽和浸透特性は、物理特性および不飽和浸透特性試験結果の類似した供試体 1, 2 から得られたものを千枚岩 D_H-1 として整理し、供試体 3 から得られたものを千枚岩 D_H-2 として整理した。なお、供試体 3 の飽和度と比透水係数には明瞭な関係性が見られなかったため、D_H-1 に対する飽和度と比透水係数の関係を D_H-2 でもそのまま用いることとした。

図-15 に千枚岩 D_H-1, D_H-2 の不飽和浸透特性を示す。不飽和浸透特性は、試験結果をもとに van Genuchten モデル⁸⁾により近似した。飽和透水係数 k_s は、加圧型透水試験結果の飽和度 100% 付近の透水係数より、千枚岩 D_H-1 は $k_s=5.5 \times 10^{-5}$ cm/s、千枚



(a) D_H-1



(b) D_H-2

図-15 不飽和浸透特性

岩 D_H-2 は $k_s=7.0 \times 10^{-7}$ cm/s とした。

(2) 解析モデルおよび解析物性値

解析モデルの一例を図-16 に示す。解析モデルは半径 30m×高さ 25m の軸対称モデルとした。境界条件は、軸対称モデルの外周側面の地下水位以下を水位固定境界、地下水位以上を浸出点境界とし、その他の部分は不透水境界とした。解析モデルにおける試験孔は、各ステージの長時間透水試験の条件を極力再現するために、試験区間の深度を実際の深度とほぼ同一になるように設けるとともに、試験区間長を 2.5m、試験孔半径を 0.033m とした。

解析物性値を表-7 に示す。ここでは、解析物性値として原位置試験の再現モデルの他に、不飽和浸透特性の影響を確認するため、表-2 および図-2 に示した基本モデルを用いた。再現モデルの解析物性値のうち、飽和透水係数 k_s および比貯留係数 S_s については、10Lu 程度の多孔質媒体とみなせる軟岩地盤を想定して、基本モデルと同値とした。また、再現モデルの間隙率および不飽和浸透特性については供試体の飽和透水係数が原位置の長時間透水試験結果より得られた透水性に近い D_H-1 の室内試験結果を用いて算出した。間隙率は D_H-1 の初期状態の間隙率である 0.48 に設定し、不飽和浸透特性は図-

表-7 解析物性値

モデル	再現モデル(D _H -1)	基本モデル
飽和透水係数 k_s (cm/s)	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}
比貯留係数 S_s (cm ³)	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}
間隙率 n	0.48	0.20

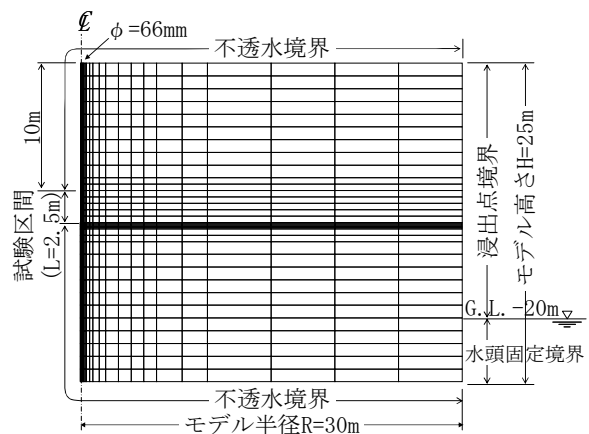
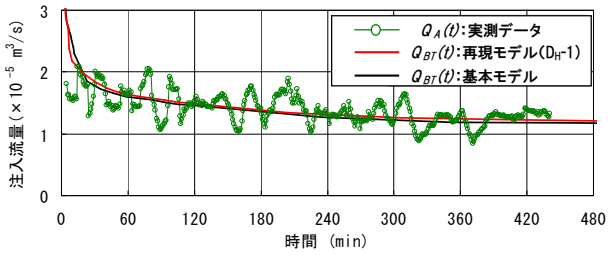
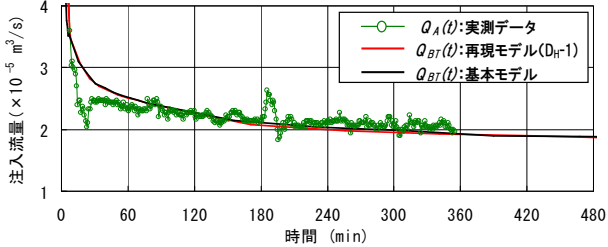


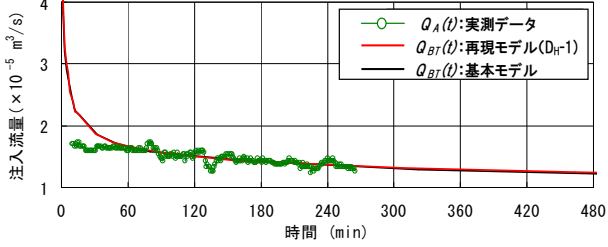
図-16 解析モデル例 (2.1 ステージ)



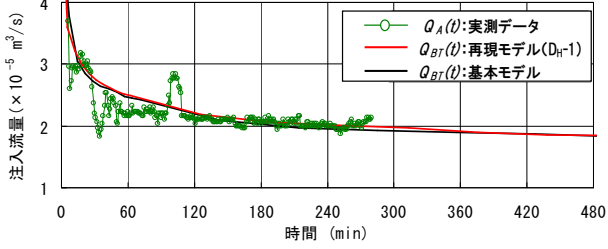
(a) 2ブロック, 1.1ステージ



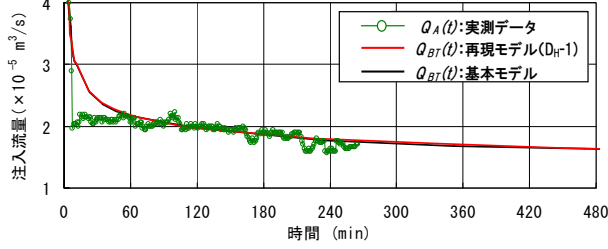
(b) 2ブロック, 1.2ステージ



(c) 2ブロック, 2.1ステージ



(d) 3ブロック, 1.1ステージ



(e) 3ブロック, 2.1ステージ

図-17 注入流量の経時変化

13(a)を用いて設定した。

(3) フィッティングおよび再現性検証方法の概要
大保脇ダム長時間透水試験の実測データと浸透流解析結果のフィッティングを行い、本フィッティング手法による実測データの再現性を検証した。

フィッティング結果の評価に用いる長時間透水試験結果における最終安定流量 Q_{AS} およびフィッティング

表-8 安定流量の再現精度

(a) 2ブロック

ブロック		2	2	2
ステージ		1.1	1.2	2.1
試験継続時間 (h)		7.35	5.92	4.42
有効注入圧力 (MPa)		0.087	0.111	0.136
再現モデル (D _{H-1})	フィッティングによる飽和透水係数 k_s (cm/s)	2.12×10^{-5}	2.78×10^{-5}	1.40×10^{-5}
	安定流量 Q_{AS} (m ³ /s)	1.31×10^{-5}	2.06×10^{-5}	1.36×10^{-5}
	安定流量 Q_{BTS} (m ³ /s)	1.22×10^{-5}	1.97×10^{-5}	1.35×10^{-5}
	Q_{BTS}/Q_{AS}	0.94	0.96	0.99
基本モデル	フィッティングによる飽和透水係数 k_s (cm/s)	1.85×10^{-5}	2.54×10^{-5}	1.35×10^{-5}
	安定流量 Q_{AS} (m ³ /s)	1.31×10^{-5}	2.06×10^{-5}	1.36×10^{-5}
	安定流量 Q_{BTS} (m ³ /s)	1.20×10^{-5}	1.94×10^{-5}	1.35×10^{-5}
	Q_{BTS}/Q_{AS}	0.92	0.94	0.99

(b) 3ブロック

ブロック		3	3
ステージ		1.1	2.1
試験継続時間 (h)		4.67	4.42
有効注入圧力 (MPa)		0.087	0.136
再現モデル (D _{H-1})	フィッティングによる飽和透水係数 k_s (cm/s)	1.93×10^{-5}	3.46×10^{-5}
	安定流量 Q_{AS} (m ³ /s)	1.70×10^{-5}	2.02×10^{-5}
	安定流量 Q_{BTS} (m ³ /s)	1.78×10^{-5}	2.00×10^{-5}
	Q_{BTS}/Q_{AS}	1.04	0.99
基本モデル	フィッティングによる飽和透水係数 k_s (cm/s)	1.85×10^{-5}	3.04×10^{-5}
	安定流量 Q_{AS} (m ³ /s)	1.70×10^{-5}	2.02×10^{-5}
	安定流量 Q_{BTS} (m ³ /s)	1.78×10^{-5}	1.97×10^{-5}
	Q_{BTS}/Q_{AS}	1.04	0.98

結果に基づく最終安定流量 Q_{BTS} には、注入流量の実測データにばらつきがあることを考慮して、試験終了直前 1 時間の注入流量の平均値を用いることとした。なお、実測データにおける試験開始 1 時間の注入流量については、注入初期の流量の乱れの影響が懸念されたため、フィッティングに使用する時間の範囲は試験開始 60~120 分とした。

(4) 検討結果

図-17 に各ステージにおける実測データ $Q_A(t)$ およびフィッティング結果 $Q_{BT}(t)$ の経時変化を示す。使用した不飽和浸透特性に関わらず、 $Q_A(t)$ と $Q_{BT}(t)$ はよく一致しており、注入流量の実測データを比較的よく再現できていることがわかる。

表-8 に、各ステージにおけるフィッティング後の安定流量 Q_{BTS} による実測データの安定流量 Q_{AS} の再現精度を示す。原位置より採取した供試体の不飽和浸透特性 D_{H-1} を使用した場合、 Q_{AS} の再現精度は 0.94~1.04 であり、高い精度で実測データを再現

できていることがわかる。また、不飽和浸透特性を基本モデルとした場合についても再現精度にあまり差は見られず、 Q_{AS} の再現精度は0.92~1.04となった。

4. まとめ

本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) 長時間透水試験を再現した飽和-不飽和浸透流解析により、種々の有効注入圧力、地下水位を設定した数値解析による検討を行った。その結果、注入流量の非定常性は、注入圧力が小さいほど、地下水位が低いほど強くなることがわかった。また、地下水位が試験区間よりも下部に位置するとき、注入流量の安定流量は、地下水位が低いほど大きくなることがわかった。地下水位が安定流量におよぼす影響は、有効注入圧力が小さいほど大きいことがわかった。
- (2) 地盤の飽和透水係数のみが異なる条件による解析結果を比較した。その結果、注入流量が十分に安定していれば、完全飽和状態 (G.L.-0m) に対する各地下水位での相対的な安定流量は、飽和透水係数に関わらずほぼ一致することがわかった。このことから、地下水位、有効注入圧力が既知の地盤に対しては、飽和透水係数に関わらず得られた安定流量から換算係数 β を用いて完全飽和状態の安定流量に換算できることを示した。
- (3) 飽和透水係数が注入流量の非定常性に与える影響を検討した。その結果、時間および注入流量を飽和透水係数を用いて無次元化すれば、飽和透水係数に関わらず注入流量はほぼ一致し、1本の曲線となることがわかった。このことを利用して、浸透流解析を用いて実務的な注水時間の透水試験データから安定流量を推定する方法を提案した。
- (4) 大保脇ダム左岸リム部で実施された長時間透水試

験に対して本手法を適用した。その結果、安定流量の再現精度は0.92~1.04で高い精度で再現できた。

本研究を進めるにあたり、内閣府沖縄総合事務局北部ダム事務所の関係各位に多大なるご協力をいただいた。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 建設省河川局開発課監修：ルジオンテスト技術指針・同解説，(財)国土開発技術研究センター，1984
- 2) (財)国土技術研究センター：ルジオンテスト技術指針・同解説，大成出版，2006
- 3) 山口嘉一，安仁屋勉，池澤市郎，赤松利之：風化軟岩地盤の不飽和帯における長時間透水試験，地盤工学ジャーナル，Vol.3，No.3，pp.229-242，2008
- 4) 松本徳久，山口嘉一，弘末文紀：ルジオンテストの各種境界条件下での精度と結果の解釈，建設省土木研究所資料，No.2518，1987
- 5) 山口嘉一，池澤市郎：不飽和地盤の定常浸透状態における飽和透水性の評価，土木学会第63回年次学術講演会，pp.731-732，2008
- 6) M. Nishigaki, M. Haruna and C. Hartwig: A New Method to Measure the Unsaturated Properties of Soils, XXXVIII IAH Congress, pp.2343-2345, 2010
- 7) 西垣 誠，竹下祐二：室内及び原位置における不飽和浸透特性の試験及び調査法に関する研究，岡山大学工学部土木工学科，1993
- 8) M. Th. van Genuchten: A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils, Soil Science Society of America Journal, Vol.44, No.5, pp.892-898, 1980

不飽和地盤における原位置透水試験の安定流量評価法



独立行政法人 土木研究所
 下山 顕治
 ○坂本 博紀
 山口 嘉一
 佐藤 弘行

国立大学法人 岡山大学
 西垣 誠

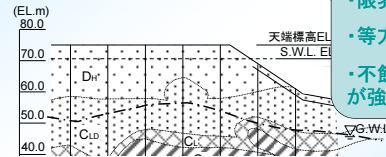
PWRI

背景

コスト削減

環境保全

リム部や堤高の低い範囲で風化軟岩地盤を基礎とするダムの増加

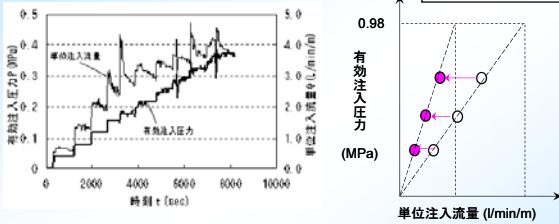


- ・限界圧力が小さい
- ・等方多孔体質に近い
- ・不飽和条件では非定常性が強い

(大保脇ダム 左岸リム部地質状況)

PWRI

不飽和軟岩地盤の透水性評価



各圧力段階で経時的に注入流量が低下している

一定圧力で注入時間を長くすることでルジオン値の過大評価を防げる可能性がある⇒長時間透水試験

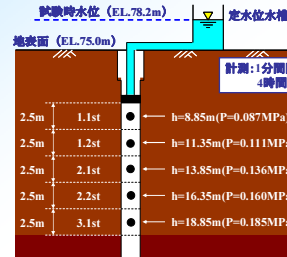
PWRI

長時間透水試験の概要(大保脇ダム)

低圧かつ定水位で実施する透水試験

<終了条件>

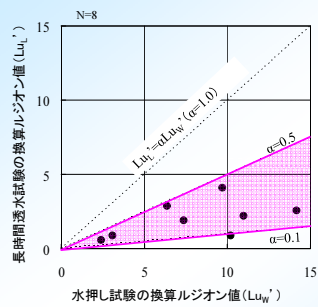
- ・5分間の移動平均注入流量の変化が±10%以内
- ・5分間の注入流量の変動幅が平均で±0.2l/min/st以内



項目	仕様
削孔径 φ	66mm
ステージ長	2.5m
定水位	EL. 78.2m
計測時間間隔	1分間
継続時間	4時間以上

PWRI

長時間透水試験の適用例(大保脇ダム)

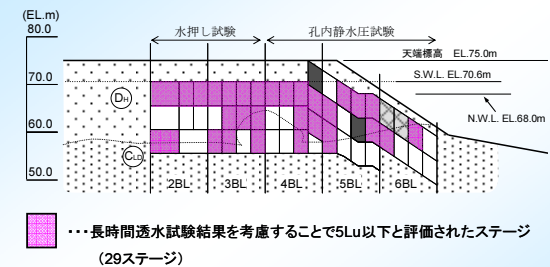


$$Lu_L' / Lu_W' = 0.1 \sim 0.5$$

水押し試験の換算ルジオン値が5~10Luのステージを5Lu以下として評価

PWRI

長時間透水試験の適用例(大保脇ダム)



長時間透水試験により追加孔数量を大幅に低減できた

課題・・・長時間透水試験は試験時間が長く、コストも高い

PWRI

背景と目的

- 近年、ダム建設において、堤高の低い範囲では不飽和軟岩地盤を基礎とする事例の増
- 長時間透水試験による評価が望ましい
…時間とコストが必要！！

試験の初期データと数値解析を併用して最終的な長時間透水試験の安定流量を予測する手法を提案
(少ない時間とコストで最終安定流量を予測)

PWRI

検討の流れ

飽和-不飽和浸透流解析

解析条件が解析結果に及ぼす影響の検討

- 地盤の飽和透水係数
- 注入圧力および地下水位(飽和度)

解析結果と実測値のフィッティングによる最終安定流量の推定方法の提案

実ダムの長時間浸透試験に適用し、再現性を確認

PWRI

解析モデル

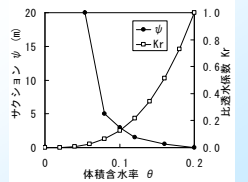
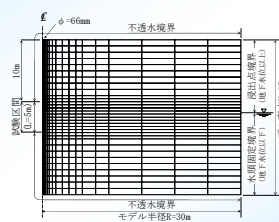
解析モデル: 軸対象モデル

項目	値
モデル半径 R (m)	30
モデル高さ H (m)	25
孔径 ϕ (mm)	66
試験区間上端深さ (m)	10
試験区間長 L (m)	5

不飽和浸透特性 (基本モデル)

⇒ 10Lu程度の等方多孔質地盤を想定

項目	値
飽和透水係数 k_s (cm/s)	$1.3 \times 10^{-3} \sim 1.3 \times 10^{-5}$
比貯留係数 S_0 (cm ⁻¹)	1.0×10^{-7}
間隙率 n	0.2



PWRI

変化させる解析条件

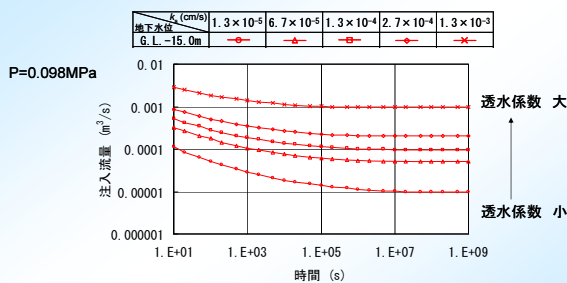
- 地盤の飽和透水係数 k_s
- 注入圧力
- 地下水位(飽和度)

条件を変えて解析

PWRI

解析結果

~飽和透水係数 k_s と安定流量の関係~

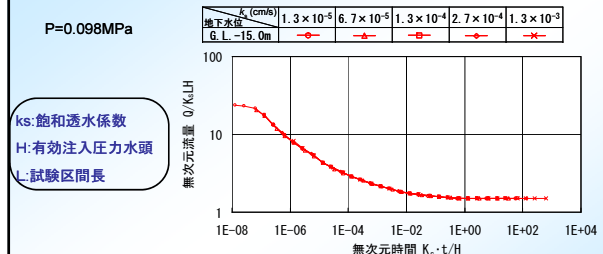


透水係数が大きいほど、流量は大きく、安定するまでの時間が短い

PWRI

解析結果

~無次元化した注入流量-注入時間~



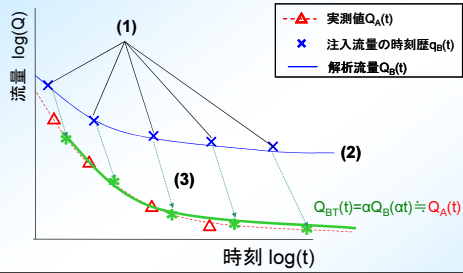
k_s : 飽和透水係数
 H : 有効注入圧力水頭
 L : 試験区間長

無次元化 ⇒ 注入流量と注入時間の関係は一本の曲線となる

k_s 以外の条件を固定すれば、 k_s のフィッティングが可能!!

PWRI

実測注入流量推定方法



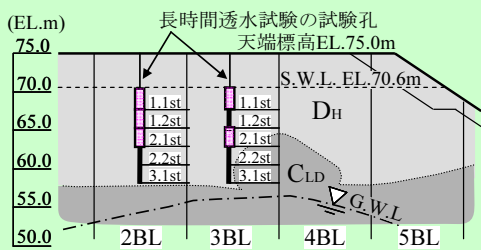
- (1) 適当なksを設定した浸透流解析による注入流量の時刻歴 $q_B(t)$ を得る
- (2) $q_B(t)$ に良く一致する近似曲線 $Q_B(t) = a \cdot t^b + c$ で定める
- (3) $Q_{BT}(t) = \alpha Q_B(t) = Q_A(t)$ となるような α を求める
- (4) $Q_{BT}(t)$ の安定流量を推定安定流量として設定する

推定法による実験結果の再現性

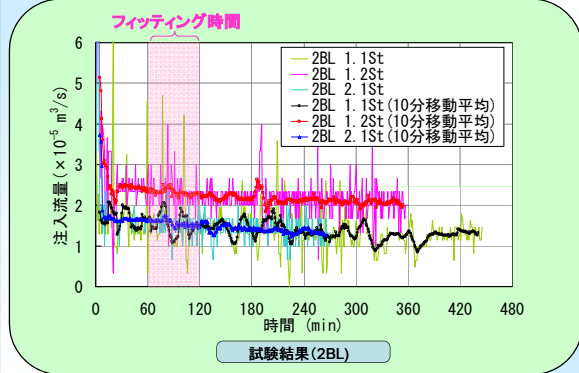
大保脇ダムで実施した長時間透水試験に提案した推定法を適用し、再現性を検証



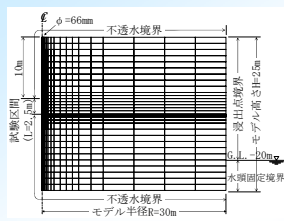
推定法の適用ステージ



フィッティング範囲

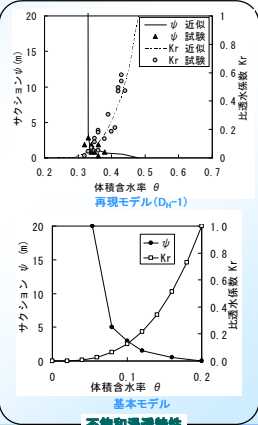


解析モデル及び解析物性値

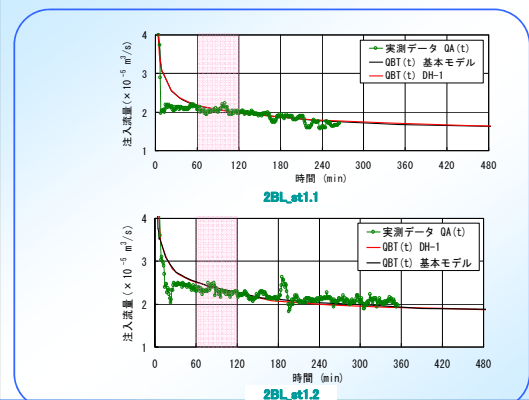


解析モデル例(2.1st)

解析物性値		
モデル	再現モデル(D _r -1)	基本モデル
飽和透水係数 k_s (cm/s)	1.3×10^{-4}	1.3×10^{-4}
比貯留係数 S_v (cm ⁻¹)	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}
間隙率 n	0.48	0.2



解析結果



解析結果

～解析値と実測値の最終安定流量の比較～

ブロック	2	2	2	3	3	
ステージ	1.1	1.2	2.1	1.1	2.1	
Q_{BTS}/Q_{AS}	再現モデル (DH-1)	0.94	0.96	0.99	1.04	0.99
	基本モデル	0.92	0.94	0.99	1.04	0.98

- ・再現モデルと実測値の最終安定流量比 Q_{BTS}/Q_{AS} は0.94～1.04で高い精度で最終安定流量を再現できた。
- ・不飽和浸透特性の差は解析結果にはほとんど現れなかった

PWRI

まとめ

1. 長時間透水試験についての飽和～不飽和浸透流解析において各計算条件が解析結果に与える影響を分析した。
2. 分析結果から得られた知見を利用して浸透流解析と長時間透水試験の初期データから最終安定流量を推定する方法を提案した。
3. 上記の推定法を用いて実ダムの長時間透水試験結果の再現計算を行い、高い精度で最終安定流量を推定できることを示した。

PWRI



ご静聴ありがとうございました



PWRI

グラウチングによる岩盤の力学的改良効果 に関する実験的研究

—変形特性と強度特性に関する定量的評価とダム基礎設計・施工への展開—

宇津木慎司¹ 猪狩 哲夫¹ 菊地 宏吉²

グラウチングによる岩盤の力学的な改良効果については、定量的な検討事例が少ないこともあり、その改良効果がダム基礎設計に見込まれていない。これに対して、筆者らは、岩盤の変形特性および強度特性に関する改良効果を定量的に確認することを目的として、グラウチング前後に、多種の岩盤で原位置岩盤試験を実施するとともに、割れ目を模した供試体を用いて室内せん断試験を行った。また、上記した検討結果をもとに、グラウチングによる岩盤の改良効果を見込んだダム基礎設計への展開について、具体的に検討した。

キーワード：グラウチング，ダム基礎，岩盤，力学的特性

1. 緒言

グラウチング工は、地中にボーリング孔を削孔し当該孔から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するものである。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、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で、その重要性はより高まっている。

グラウチングによる岩盤の力学的な改良は、岩盤の割れ目にセメントを充填することにより、変形特性および強度特性を向上させることであり、これにより改良対象の基礎岩盤全体の一体化、均質化を図ることを目的としている。しかしながら現状の実施工時における改良効果の確認については、ダム基礎で実施されるコンソリデーショングラウチングを例にとると、力学的改良と浸透流抑制を目的として実施されるのに対し、施工の進捗に伴う力学的な改良効果の評価が困難であるため、透水性状の効果のみより検討が行われている。

このダム基礎におけるグラウチング工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、ダムの安定性を損なわな

いことを大前提に、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、仕様規定から性能規定への流れを反映する中で、グラウチングの施工コスト縮減を目的としている。このように、必要最小限の施工数量で所要の品質を確保する手法が採用されているのに対して、もし仮に、グラウチングによる岩盤の力学的な改良効果を定量的に評価し、堤体基礎設計に反映させることができれば、既往の掘削線より上部に基礎を設定できることによる掘削体積の低減、そしてこれに伴う堤体打設体積の低減、原石山掘削体積の低減など、改訂指針の趣旨に沿ったより効率的かつ効果的なダム建設に寄与できると考える。

既往の力学的な改良効果に関する検討事例については、1959年に発生したフランスのマルパッセダムの決壊事故後、1960年代の一時期行われた^{2), 3), 4), 5)}が、岩盤の性質が複雑かつ多様であること、原位置における簡易な岩盤試験法がまだ開発されていなかったことなど、種々の原因が妨げになり、研究が思うように進まなかったものと推察される。その後も各種岩盤試験法の進歩は図られたものの、試験規模が大掛りになることや、目視不可能な地中での事象であるため、詳細な検討が実施された事例は少なく、特にダム基礎設計で用いら

¹ ㈱間組土木事業本部土木設計部 土木事業本部，課長

² 国立大学法人京都大学，名誉教授

れる強度特性に関する検討事例はほとんど無かった。

このため、コンソリデーショングラウチング工など、力学的な改良を目的とした多数の施工実績があるのにも係わらず、その改良効果については、現在においてもダム基礎の設計などに見込まれていない。

これに対して、筆者らは、5箇所目のダムサイトの原位置岩盤において、グラウチング前後で孔内載荷試験を実施することにより、岩盤の変形特性および強度特性に関する改良効果を定量的に確認する^{6),7)}とともに、割れ目を模した供試体を用いた室内せん断試験を実施し、種々の検討を行った⁸⁾。本論文においては、その後実施された計14箇所のダムサイトにおける孔内載荷試験結果のうち、より明瞭な改良効果が確認できた6種類の節理性岩盤における孔内載荷試験結果について、岩盤等級区分や岩種ごとの変形特性に関する改良効果の差異などをより詳細に検討した。また、上記した変形特性に関する検討結果と強度特性に関する検討結果⁸⁾を併せて評価することにより、グラウチングによる岩盤の力学的な改良効果について総括した。そして、これらの検討結果をもとに、ダム基礎設計において、グラウチングによる岩盤の力学的改良効果を見込んだ評価手法を示すことにより、ダム基礎掘削量の低減、そしてそれに伴う堤体コンクリート打設量の低減などを実現するための方策を具体的に検討した。

2. 原位置岩盤試験および室内せん断試験の内容

ここでは、筆者らが実施した原位置岩盤における現場実験および室内せん断試験の概要について述べる。

2.1 原位置岩盤試験の概要

(1) 孔内載荷試験による変形特性に関する検討

グラウチングによる変形特性に関する改良効果を定量的に確認することを目的として実施する原位置岩盤試験については、載荷試験としては比較的簡易で、グラウチング注入を実施するボーリング孔において直接的に変形特性を評価できる孔内載荷試験機(等圧分布載荷方式)を採用した。なお、適用した試験機は応用地質社製のエアラストメータ²⁾であり、試験方法は土木学会の指針⁹⁾に準拠して実施した。

原位置試験を実施した箇所は、ダム建設サイトにおけるグラウチング施工ヤードや試験用に設定したヤード

であり、実施に準じたグラウチング施工前後で孔内の同一地点において試験を実施し、その試験結果を比較することにより、変形特性に関する物性値の変化を定量的に確認した。実際の試験は、図-1の孔内における原位置試験実施位置および試験実施フローに示すように、まず、66mmのボーリング孔をカバーロック部1~2mと通常のグラウチング施工長である5m、計6~7m程度削孔し、コア鑑定を実施した後に、60cmの載荷区間の中心が注入区間深度1.5m、2.5m、3.5mとなる位置で孔内載荷試験を行った。そして、各ダムにおける実施時の注入仕様に準じて、5mの施工区間において岩盤の透水性状を確認する目的でルジオン試験を実施し、グラウチング工を行った。その後、当該孔においてリボーリングを実施し、グラウチング前と同一地点において孔内載荷試験を同様の方法で行い、その結果をもとにグラウチング後の物性値の変化を確認した。なお、このリボーリングの削孔径は注入孔削孔時と同様に66mmとしたが、岩盤と固化したセメントの強度が異なるため孔曲りしなかったこととともに、丁寧に高圧水で洗浄しながら数mm程度拡孔したため、数箇所で行ったボアホールテレビ観察では孔壁でのセメントの付着は認められなかった。

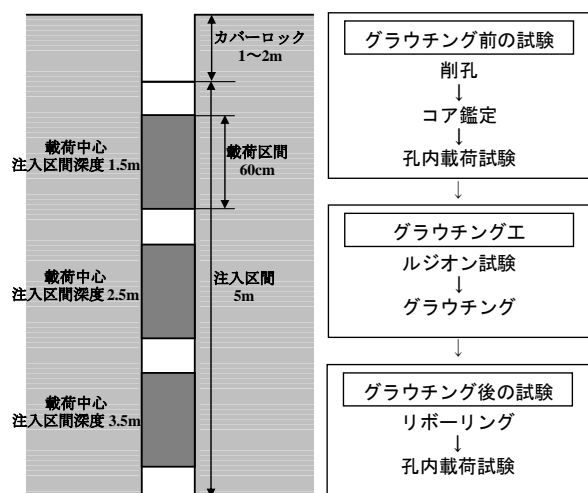


図-1 孔内試験実施フロー

なお、原位置試験を実施したのは、14箇所のダムサイトの実施箇所および試験施工ヤードである。このうち、今回データ整理を実施したのは、表-1に示す、グラウチングによる変形特性の改良効果が高いと想定される、割れ目の卓越した節理性岩盤が分布する11箇所のサイト、6種類の岩種を選定し、計825箇所にお

る孔内試験結果をもとに検討を実施した。

表-1 原位置試験実施箇所

地質	ダム名	岩盤等級区分	測定箇所	
火成岩	花崗岩	Hダム	CH~D	
		Yダム	CM~D	
		Nダム1回目	CH~D	
		Nダム2回目	CH~CL	
	流紋岩	K1ダム	CH~CL	
		K2ダム	CH~CL	
安山岩	O1ダム	CH~CL		
堆積岩	塊状砂岩	Sダム1回目	CH~CL	
		Sダム2回目	CH~CL	
	凝灰角礫岩	Mダム	CH~D	
	砂岩頁岩互層	Tダム	CH~CL	
		Uダム		孔内試験 103箇所
				孔内試験 62箇所
			孔内試験 87箇所	
			孔内試験 66箇所	
			孔内試験 136箇所	
			孔内試験 58箇所	

2.2 室内せん断試験の概要

(1) 割れ目の接合部を考慮しないせん断試験方法

今回実施した室内せん断試験は、岩盤の実際の割れ目を型どったモルタルの供試体を用いて割れ目にグラウチングを実施し、その前後で行ったせん断試験結果を比較するものであり、その結果からグラウチングによる岩盤の強度特性に関する改良効果を検証した。

供試体の作製に際しては、火山岩分布地域において、天然の節理面を含む岩盤ブロックを計5個（No.1~No.5）採取し、上下の節理面を流動性に富むシリコンで型どり、型にモルタルを流し込むことによって、各節理につき8個の模型供試体を作製した。供試体の寸法は、図-2に示すように、幅30cm、奥行き30cm、高さ20cmとし、節理面を供試体のほぼ中央に位置させた。なお、モルタルの配合は、砂：セメント（普通ポルトランド）：水=4:2:1の重量比とし、打設後、水中で2ヶ月間養生させ、試験に供するものとした。

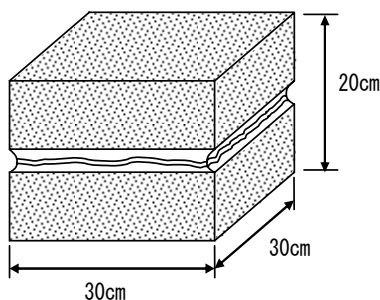


図-2 室内せん断試験で用いた供試体の模式図

このように、模型供試体は節理の種類ごとに8個作製したが、そのうち半数の4個について、図-3に示す

ような注入装置を作製し、節理面沿いにグラウチングを実施した。本注入装置は、注入管を装置内の水室へ直結させ、水室から節理面内へグラウトを注入することによって、節理面内で一方向流れを生じさせるような構造になっており、試験の制約上、水頭差を1m設けて注入を実施した。グラウト材としては、既往の実施工で適用事例の多い高炉セメントB種を使用し、ミルクの配合については、実施工時にこのような開口割れ目で想定される高透水部の最終配合として適用される事例が多い、水：セメント比1:1とした。そして、5種類の模型供試体について6~8リットル程度のミルクを注入し、節理内で十分に目詰まりが生じた後に、注入を終了した。

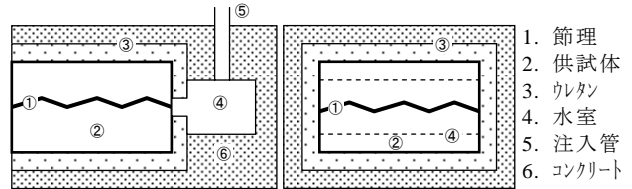


図-3 グ라우チング注入装置の模式図

実際のグラウチングによる岩盤のせん断強度に関する改良効果の検討に際しては、グラウチングを実施していない供試体（グラウチング前）とグラウチングを実施した供試体（グラウチング後）のせん断強度の違いから評価した。グラウチング前後を1組とする5組の割れ目を模した供試体に異なる垂直応力（それぞれ0.5, 1.0, 1.5, 2.0MPa）を作用させ、変位速度1mm/minの条件のもとでせん断荷重を作用させ、一面せん断試験を行った。せん断方向はグラウチング前後で同一の方向とし、せん断変位が供試体長さの10%程度に達した段階で試験を終了した。なお、試験に用いたのは丸東製作所製の岩石せん断試験装置SG-1041であり、実際の試験方法は地盤工学会の基準に従って実施した。

(2) 割れ目の接合部を考慮したせん断試験方法

実岩盤内の節理の連続性は有限であり、必ずしも完全に分離しているとは限らず、接合部によって初期的な粘着力を有していると考えられる。そこで、模型供試体中に人工的な接合部を作製し、初期的に粘着力が存在する場合について検討した。

(1)項の試験において用いた型枠にモルタルを流し込み、節理No.1について24個、節理No.2~4について8個の模型供試体をそれぞれ作製した。次に節理の種類

ごとに 8 個の供試体に対して図-4 に示すような配置で直径 40mm のボーリングを削孔し、模型供試体と同一配合のモルタルを孔内に充填することにより接合部を作製した。また、節理 No.1 については図-4(a)の配置に加えて図-4(b),(c)の配置でそれぞれ 8 個の模型供試体を作製した。これらの供試体を用いて(1)項と同様の方法で一面せん断試験を実施した。

(3) 挟在物を考慮したせん断試験方法

上記の型枠にモルタルを流し込み節理 No.1 について試験数量分の模型供試体を作製し、油性粘土を狭在物と想定して各供試体の節理面に挿入した。粘土の厚さを 1mm に固定し、節理面全体に存在させた場合を 100%として、図-5 に示すように粘土を節理面の面積に対する面積率が 75%・50%・25%となるように設定した。以降、この面積率を狭在物の占有面積率と呼ぶ。これらの供試体を用いて(1)・(2)項と同様の方法で一面せん断試験を実施した。

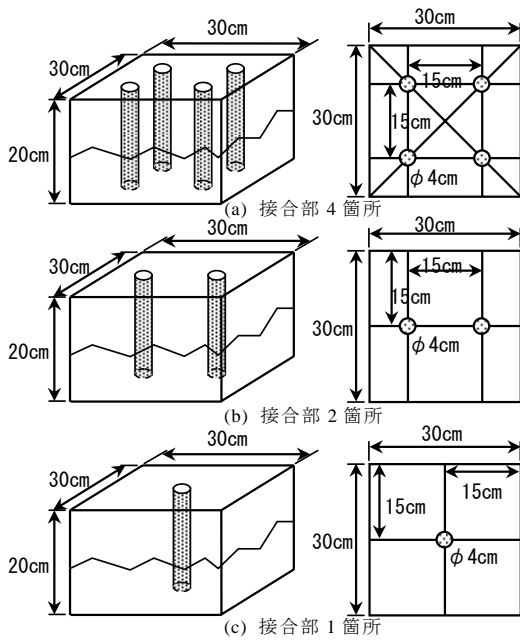


図-4 割れ目の接合部を考慮した供試体の模式図

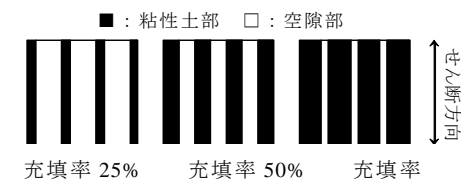


図-5 割れ目に充填した粘性土の状況

3. 岩盤の変形特性に関する改良効果の検討

グラウチングによる岩盤の変形特性に関する改良効果を定量的に評価するにあたり、孔内載荷試験結果を

用いて、(1)岩盤の「一体化」に関する検討、(2)岩盤の「均質化」に関する検討を実施した。

3.1 岩盤の一体化に関する検討

岩盤が一体化するということは、岩盤中の割れ目に充填したセメントミルクが硬化することにより、変形特性などの力学的特性が向上すること、つまり岩盤の物性値がグラウチング後に上昇することである。ここでは岩盤の変形係数に論を絞って、a)岩盤の変形係数ごと、b)岩種ごとの改良効果の差異について検討した。

なお、下記に示す検討は、あくまでも変形係数に論を絞ってどの程度物性値が変化するか確認することを目的としており、その評価に際しては、岩盤の変形係数により表-2 に示すような I ~ IV ランクに区分して実施した。この区分方法については、表-3 に示した既往の岩盤等級区分と物性値との対応関係¹⁰⁾や実際に試験ヤードで得られたボーリングコア鑑定結果などを勘案し、I ランクを CH 級相当、II ランクを CM 級相当、III ランクを CL 級相当、IV ランクを D 級相当となるよう設定した。

表-2 検討に用いた変形係数による区分

変形係数による区分	変形係数(N/mm ²)
I	2,000 以上
II	2,000~500
III	500~200
IV	200 以下

表-3 岩盤等級区分から想定される物性値の範囲¹⁰⁾

岩盤等級区分	変形特性		強度特性		弾性波速度(km/s)
	変形係数(N/mm ²)	静弾性係数(N/mm ²)	粘着力(N/mm ²)	内部摩擦角(°)	
B 級~CH 級	2,000 以上	4,000 以上	2.0 以上	40 以上	3.0 以上
CM 級	2,000~500	4,000~1,500	2.0~1.0	30~45	3.0~1.5
CL 級~D 級	500 以下	1,500 以下	1.0 以下	15~38	1.5 以下

(1) 変形係数ごとの改良効果の検討

ここで、図-6 にグラウチング前後における同一地点で得られた変形係数の対応関係について、変形係数のランクによる区分ごとに整理した結果を示す。この図は、横軸にグラウチング前に実施した試験結果、縦軸に同一地点でグラウチング後に得られた試験結果を示したものである。これをみると、I ランクの一部の測点を除いてほとんど全ての試験実施箇所において変形係数の上昇が認められており、グラウチングにより岩盤の一体化が図られていることが判明した。

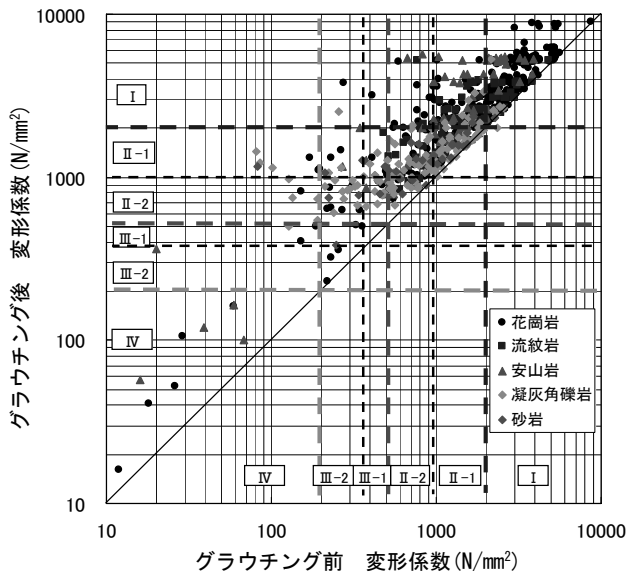


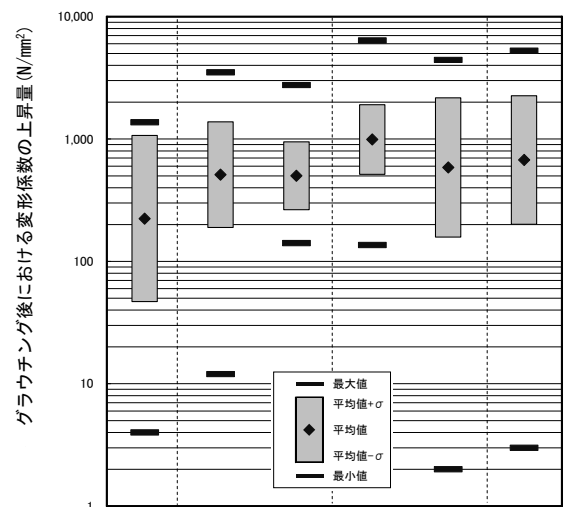
図-6 グラウチング前後における岩盤等級区分ごとの変形係数の関係

ここで、上記した事項をより詳細に検討する目的で、図-7 に変形係数による区分ごとのグラウチング後における物性値の上昇量に関する対数頻度分布を示す。なお、この図では、IIランクとIIIランクについてより詳細な検討を実施する目的で、同一ランクの内で上昇量の傾向が異なる、IIランクの1,000N/mm²、IIIランクの350N/mm²でそれぞれ2つに細区分している。

これをみると、概ね、グラウチング前の変形係数が大きいほど上昇量の平均値が大きく、変形係数が小さいほど上昇量の平均値が小さい傾向が認められ、I・IIランクで平均値（対数平均値を実数に換算）600~1,000N/mm²程度、IIIランクで平均値500N/mm²程度、IVランクで平均値200N/mm²程度であることがわかる。また、上昇量の最小値については、IランクとIIランクの上位ランクであるII-1ランク（1,000~2,000N/mm²）、IIIランクの下位ランクであるIII-2ランク（200~350N/mm²）およびIVランクについては0に近いのに対して、II-2ランク（500~1,000N/mm²）、およびIII-1ランク（350~500N/mm²）においては140N/mm²程度確認できる。上記した傾向をより詳細に検討することを目的に、図-8 にグラウチング前後における変形係数による区分ごとの対数頻度分布を示す。

これをみると、IランクおよびII-1ランクにおいては、平均値の上昇量がそれ以下のランクと比較して大きくなるものの、最小値の上昇がほとんど認められな

いことが確認できる。これに対して、II-2ランクおよびIII-1ランクにおいては、上昇量の平均値が比較的大きいととも、最小値も上位ランクと比較して上昇量が大きいことから全体的に変形係数が上昇しており、特にIII-1ランクでは全ての測定点がIIランクの下限值500N/mm²より上部に分布していることが認められる。ただし、III-2およびIVランクにおいては、平均値および平均値±標準偏差の帯は大きく上昇しており、特にIII-2ランクでは平均値±標準偏差の帯がIIランクの下限值500N/mm²より上部に分布しているものの、ほとんど上昇しないものも混在していることがわかる。



変形係数による区分 (細区分)	IV	III-2	III-1	II-2	II-1	I
グラウチング前物性値	0~200	200~350	350~500	500~1000	1000~2000	2000~
度数	25	33	29	179	124	244
最大値	3,136 (1,369)	3,544 (3,502)	3,441 (2,759)	3,804 (6,374)	3,645 (4,419)	3,720 (5,251)
平均値+σ	3,029 (1,069)	3,141 (1,382)	2,977 (948)	3,280 (1,907)	3,337 (2,173)	3,353 (2,256)
平均値	2,348 (223)	2,708 (511)	2,700 (501)	2,996 (991)	2,767 (585)	2,828 (673)
平均値-σ	1,668 (47)	2,276 (189)	2,422 (264)	2,712 (515)	2,197 (158)	2,302 (201)
最小値	0.602 (4)	1,079 (12)	2,149 (141)	2,134 (136)	0.301 (2)	0.477 (3)
標準偏差	0.681	0.433	0.277	0.284	0.570	0.526
変動係数	0.162	0.160	0.103	0.163	0.206	0.186

表中の()内は実数

図-7 グラウチング後における変形係数の上昇量に関する対数頻度分布

上記した確認事項については、飯田¹¹⁾などが指摘している既往のダムにおけるグラウチング注入実績と地質状況との関係や今回実施したコア観察結果などを参照すると、割れ目の分布密度や性状などによって変形係数の上昇に関する傾向が変化しているためであると考える。具体的には、IランクおよびII-1ランクにおいては、岩質は新鮮・堅硬であるとともに、割れ目の分布密度が低く割れ目沿いも比較的新鮮であることから、割れ目にセメントミルクが充填され変形係数が上昇する場合と割れ目が少ないため上昇がほとんどみられない場合とが混在しているものとする。また、II-2ラ

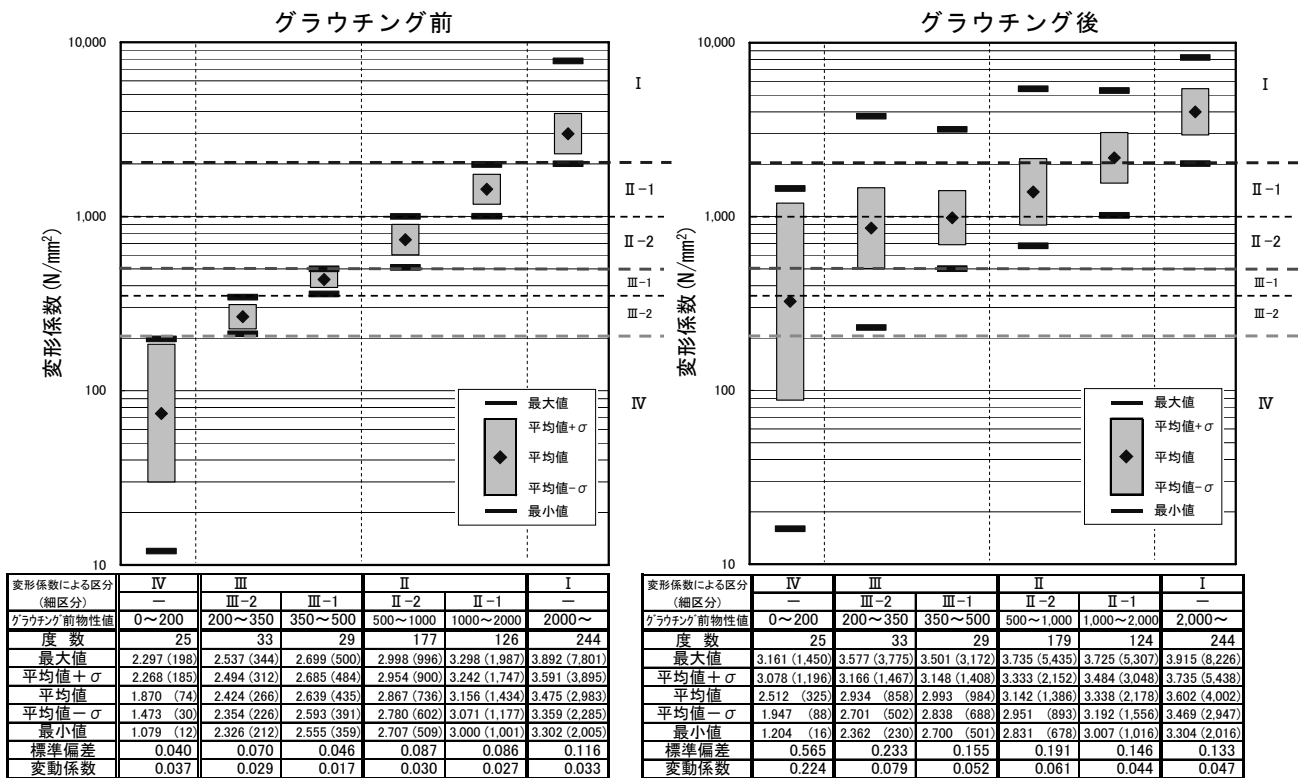


図-8 グラウチング前後における変形係数に関する対数頻度分布 (表中の()内は実数)

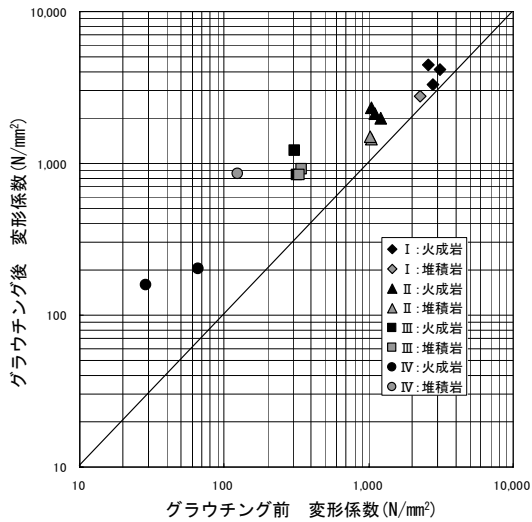
ンクおよびIII-1 ランクにおいては、岩質部の風化が進行するとともに、割れ目の分布密度が大きくなり、割れ目表面の風化が確認できるが、この場合、セメントミルクがより多くの割れ目に充填されることにより確実に改良がなされているものと推察される。これに対して、III-2 ランクおよびIVランクについては、割れ目密度は大きくなるとともに、岩質部が強風化を受け、割れ目沿いにも粘性土などを挟在しているものもあることから、セメントミルクが割れ目に充填されやすい場合とされにくい場合とがあり、上昇量もばらつきが大きくなると推定される。このように、今回検討を実施した地点におけるグラウチングによる変形係数に関する物性値の変化は、岩盤の地質状況に応じて大きく異なることが明らかになった。

これを実際の設計・施工に反映する際には、ダム基礎として設定される CH~CL 級の岩盤について、検討実施地点の地質においてどのような傾向が認められるのか事前に原位置試験などで直接評価する必要がある。これにより、岩盤の物性値ごとに上昇値の平均値、平均値±標準偏差、そして最低値がどの程度であるのか、そしてその傾向が地質状況とどのような関連があるのか、慎重に検討を進めることが重要であると考えられる。

(2) 岩種ごとの改良効果の検討

図-6 に示した、グラウチング前後における同一地点で得られた変形係数の対応関係について、岩種ごとの変化の差異を確認する目的で、以下の検討を実施した。ここで、図-9 に変形係数の同一ランク内における岩種ごとのグラウチング前後における対数平均値の関係を示す。これをみると、I~IIIランク、特にI・IIランクにおいて、堆積岩と比較して火成岩で同一ランク内における平均値の上昇が大きいことが確認できる。これは、試験ヤードやダムサイトにおける地質観察結果、コア観察結果などより、堆積岩と比較して火成岩、特に火山岩の方が連続性の良い割れ目が卓越していることから、セメントミルクが注入されやすいため、物性値の上昇が大きくなるものと推察される。

ただし、火成岩でも、深層風化などにより岩質部および割れ目沿いにマサ化しやすいことが知られている花崗岩などについては、(1)項で示した飯田¹¹⁾などが指摘している既往のダムにおけるグラウチング注入実績と地質状況との関係などを参照すると、割れ目沿いに土砂状や粘性土状を呈することによりセメントミルクが浸透しづらい状況も確認されているため、留意が必要となる。



岩種	変形係数の対数平均値 (○内は実数)								
	I		II		III		IV		
	グラウチング前	グラウチング後	グラウチング前	グラウチング後	グラウチング前	グラウチング後	グラウチング前	グラウチング後	
火成岩	花崗岩	3.492 (3.107)	3.616 (4.133)	3.054 (1.113)	3.326 (2.121)	2.502 (318)	2.921 (833)	1.820 (66)	2.307 (203)
	安山岩	3.415 (2.599)	3.649 (4.457)	3.032 (1.039)	3.369 (2.337)	2.491 (310)	3.086 (1,219)	1.463 (29)	2.201 (159)
堆積岩	流紋岩	3.434 (2.776)	3.522 (3.324)	3.061 (1.219)	3.301 (1.998)	—	—	—	—
	凝灰角礫岩	3.357 (2.273)	3.439 (2.751)	3.017 (1.039)	3.157 (1.436)	2.532 (341)	2.964 (920)	2.093 (124)	2.935 (860)
	砂岩	—	—	3.014 (1.032)	3.172 (1.487)	2.501 (333)	2.920 (832)	—	—
全体	3.475 (2.983)	3.602 (4.002)	3.038 (1.091)	3.258 (1.810)	2.525 (335)	2.961 (915)	1.870 (74)	2.512 (325)	

図-9 グラウチング前後における岩種ごとの変形係数に関する対数平均値の関係

3.2 岩盤の均質化に関する検討

岩盤が均質化するという事は、変形特性や強度特性のばらつきが全体的に減少することである。ここでは、変形係数に論を絞って検討する。

図-8 に示した岩盤の変形係数ごとのグラウチング前後における変動係数については、全てのランクでグラウチング後の変動係数が大きくなるとともに、概ねランクが下がるごとに変動係数が大きくなる傾向が認められる。また、図-7 では、I～III-1 ランクにおいて、ランクが下がるごとに変形係数の上昇量の最小値が大きくなる事が確認された。

上記した事項を勘案すると、グラウチング後に変形係数が上昇することにより同一ランク内では測定点が物性値の大きい側に変動するものの、上位ランクほど最小値の上昇が小さいとともに上部へのばらつきが小さく、下位ランクほど最小値の上昇が大きいとともに上部へのばらつきが大きくなるため、全データで算出した場合にグラウチング後の変動係数が小さくなる、つまり均質化が進むと考える。

これらの検討結果を詳細に確認することを目的として、図-10 にグラウチング前の変形係数とグラウチング

前後における変形係数を除して算出した上昇比の関係を示す。これをみると、概ね、グラウチング前の変形係数が小さいほど上昇比が大きく、グラウチング前の変形係数が大きいほど上昇比が小さいという傾向が確認でき、これからも、グラウチングによって岩盤が均質化していることが確認できる。

具体的には、I ランクの岩盤では上昇比が小さく平均 1.34 倍程度であるのに対し、II-1 ランクで 1.52 倍、II-2 ランクで 1.88 倍、そして III-1 ランクで 2.26 倍、III-2 ランクで 3.23 倍、IV ランクで 4.39 倍と、グラウチング前の変形係数が低くなるに従って上昇比が大きくなる傾向が認められる。ただし、図-10 をみると、I～III-1 ランクにおいてまでは、グラウチング前の変形係数が低いほど各点が上方に遷移していることが確認できるものの、III-2 ランクおよびIV ランクにおいては上昇比の大きなものとほとんど認められないものとが混在していることがわかる。これは、上述したように、強風化した III-2～IV ランクについては、割れ目沿いに土砂化もしくは粘性土化しているものもあり、セメントミルクが浸透しづらい場合に改良が進まなかったためであると推察される。

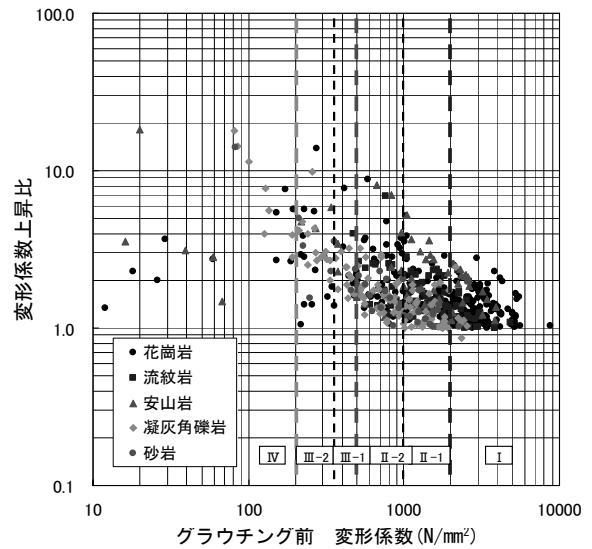


図-10 グラウチング前後における変形係数の上昇比の関係

4. 岩盤の強度特性に関する改良効果の検討

グラウチングによる岩盤の強度特性に関する改良効果について、2章で示した割れ目を模した供試体を用いた室内せん断試験による検討を実施した。

4.1 室内せん断試験結果による検討

(1) 割れ目の接合部を考慮しないせん断試験結果

図-2 に示した接合部を考慮しない模型供試体を用いたグラウチング前後の一面せん断試験結果として、節理面に作用させた垂直応力と最大せん断応力(ピーク対応)との関係を節理面の種類別に図-11 に示す。

本図には、岩盤の破壊基準として最も標準的に用いられているクーロンの破壊基準に従う近似直線を併せて示した。いずれの割れ目ブロックにおいても、グラウチング後の最大せん断応力値がグラウチング前の値を上回っており、せん断強度が改良されていることがわかる。また、前後で直線の傾きがほぼ一致しており、内部摩擦角には顕著な変化が認められない。すなわち、グラウチングによる強度特性の改良効果は、粘着力の発現値 0.1~0.3MPa 程度の範囲である。三軸圧縮試験の結果から、グラウト材自体の粘着力は 7MPa 程度であることが判明しているが、実際の粘着力の発現値はそれに比して著しく小さい。ここでせん断試験終了後の実際の節理面を観察すると、グラウト材自体の破壊はほとんど観察されず、グラウト材が節理面より剥離

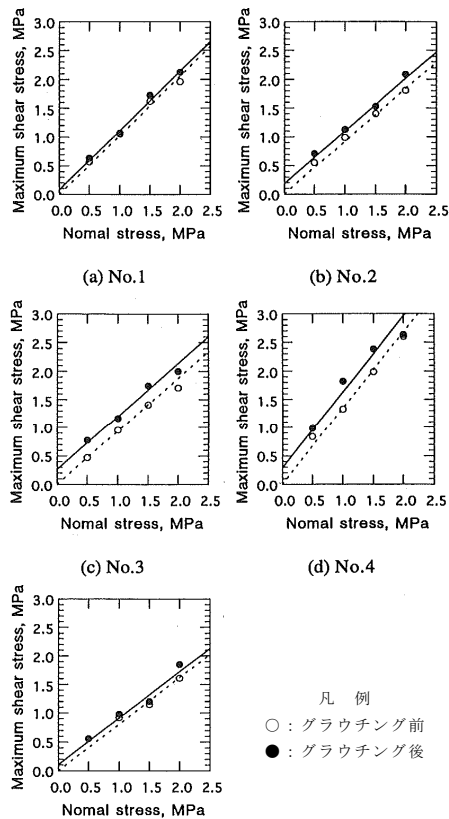


図-11 5つの割れ目供試体を用いたグラウチング前後におけるせん断試験結果

した痕跡が多く認められた。このことから、グラウチング後の節理のせん断破壊はグラウト材内部で生じるのではなくグラウト材と節理面の付着面において生じるというメカニズムを考察できる。

また、グラウチング前後で内部摩擦角にほとんど変化が認められなかったが、これはせん断面のラフネスがグラウチング前後でほとんど変化していないためと考えられる。節理のせん断破壊がグラウト材と節理面との付着面において生じる場合、せん断面のラフネスは節理面のラフネスと一致することからも、上記メカニズムを推察することができる。

(2) 割れ目の接合部を考慮したせん断試験結果

ここで、接合部が4個の場合におけるグラウチング前後の一面せん断試験結果を図-12 に示す。また、割れ目の接合部が2個、1個の場合における節理 No.1 のグラウチング前後の一面せん断試験結果を図-13 に示す。

いずれの図においても、グラウチング後の最大せん断応力値がグラウチング前の値を上回っており、せん断強度が改良されていることがわかる。また前後で直線の傾きがほぼ一致しており、摩擦角に顕著な変化がない、すなわち、粘着力が上昇することによってせん断強度が改良されていることがわかる。このことから接合部が存在する場合にも、完全分離面の場合と同様のメカニズムで改良がなされているものと考えられる。さて、接合部が4個の場合では、グラウチングによる粘着力の増分は 0.4~0.6MPa 程度の範囲である。完全分離面の場合に粘着力の増分が 0.1~0.3MPa であったことから比較すると、接合部の存在によって改良効果が高まっていることが推察される。

また、図-14 は節理 No.1 における初期粘着力と粘着力の上昇値の関係を示したものであり、完全分離面、接合部が1個、2個、4個の場合の値がプロットされている。本図より、初期粘着力と粘着力の上昇値の間には正の相関関係が認められ、このことから、初期粘着力の増加に伴い粘着力の改良効果が高まっていることがわかる。

(3) 挟在物を考慮したせん断試験結果

図-5 に示したように、粘土を挟在させた試料によるグラウチング前後の一面せん断試験結果を図-15 に示す。いずれの狭在物占有面積率についても、グラウチング

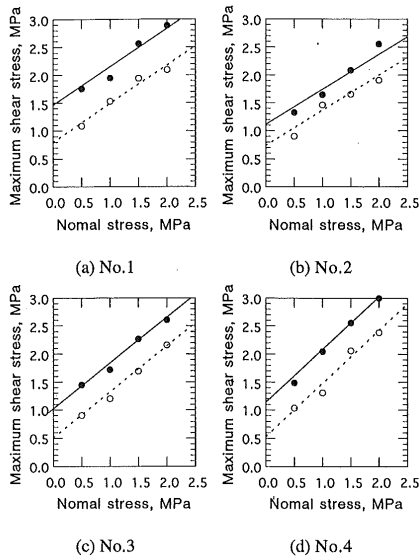


図-12 割れ目の接合部を4箇所設定した際のグラウチング前後におけるせん断試験結果

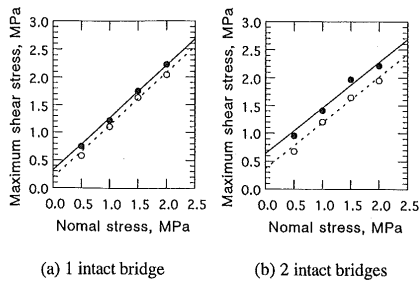


図-13 割れ目の接合部を1箇所および2箇所設定した際のせん断試験結果

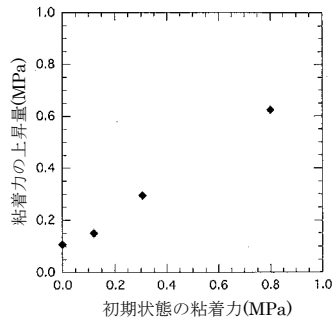


図-14 初期粘着力とグラウチングによる上昇値との関係

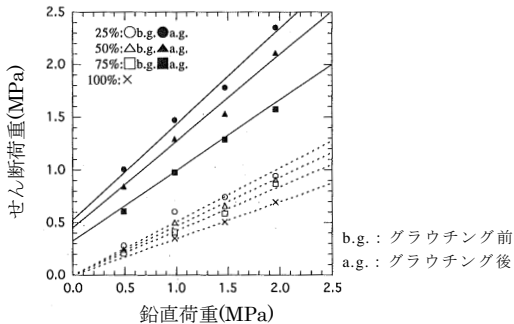


図-15 粘性土を挟在した供試体を用いたグラウチング前後におけるせん断試験結果

後の最大せん断応力値が、グラウチング前の最大せん断応力値を顕著に上回っており、せん断強度が改良されていることがわかる。なお、狭在物占有面積率100%の供試体についてはグラウチング後の試験を実施していない。これは、節理面全体に狭在物が存在している場合には、グラウトミルクが内部に浸透しなかったことによる。確認のため垂直応力2.0MPaの条件のもと狭在物占有面積率100%状態でグラウチングを実施してせん断試験を行ったところ、グラウチング前後で最大せん断応力にほとんど変化が認められなかった。

まず、粘着力については、図-15に示すように狭在物占有面積率が小さいものほどグラウチング後で大きな発現値を示している。これは、狭在物占有面積率が小さいものほど節理面内においてセメントミルクが進入する面積が大きくなり、節理面とグラウトの付着面積が大きくなるためと推察される。次に内部摩擦角についてであるが、グラウチング後の内部摩擦角はグラウチング前の内部摩擦角と比較して上昇している。これは、上記(1)、(2)項の結果とは一致しない。この理由としては、本試験においてはある程度の厚みを有する狭在物を充填したためグラウチング前に顕著な空隙部が生じてかみ合わせが不完全であったのに対し、グラウチング後にはこの顕著な空隙部にグラウトが充填されたため新たなかみ合わせが生じたためと推察する。以上の検討から、狭在物占有面積率が小さい節理ほど、グラウチングによるせん断強度の改良効果が高いものと推察される

5. グ라우チングによる岩盤の力学的改良効果を見込んだダム基礎設計の検討

本章では、3章における岩盤の変形特性に関する改良効果の検討結果、4章における強度特性に関する改良効果の検討結果を勘案し、既往のダム基礎設計事例においてグラウチングによる物性値の向上を見込んだ場合の具体的な設計法について検討を実施した。

5.1 既往のダム基礎設計の考え方

既往のダム基礎の設計に際しては、下記に示すヘニーの式により、基礎岩盤に関する安定計算を実施し、必要安全率4.0を確保する必要があるとされている。

$$\text{ヘニーの式: } \frac{\tau_0 \cdot L + f \cdot V}{H} \geq 4.0$$

ただし τ_0 : 基礎岩盤の純せん断強度
 L : ダム底面の長さ
 F : 基礎岩盤内の内部摩擦係数($\tan \phi$)
 V : ダム底面に作用する鉛直力
 (主に堤体荷重)
 H : ダム底面に作用するせん断力
 (主に水圧)

このうち、計算に用いる基礎岩盤のせん断強度については、表-3に示した岩盤等級区分ごとの値が既往の施工実績より整理されているとともに、ダムサイトごとに調査横坑内で実施される原位置せん断試験結果などをもとに表-5に示すような設計値が設定されている。

実際のAダムにおけるせん断試験結果を示した図-16をみると、調査横坑内で岩盤等級区分ごとに3~4点で試験が実施されており、その結果をもとに設計に用いるせん断強度が設定されている。一般に、この設計値については、安全側をみて測定値の下限を結んだ線をもとに設定されており、この図をみても同様の検討結果であることがわかる。

表-5 ダムサイトにおけるせん断強度設計値の例

岩級	A ダム 高さ 120m 重力式 地質 花崗岩	B ダム 高さ 100m 重力式 地質 玄武岩, 安山岩, 凝灰岩
	B	C=3.00, $\phi=55^\circ$
C _H	C=2.30, $\phi=48^\circ$	C=2.50, $\phi=50^\circ$
C _M	C=1.90, $\phi=43^\circ$	CM1: C=1.90, $\phi=45^\circ$ CM2: C=1.59, $\phi=45^\circ$ CM3: C=1.20, $\phi=45^\circ$
C _L	C=1.10, $\phi=39^\circ$	C=0.79, $\phi=35^\circ$

c: 粘着力(MPa)、 ϕ : 内部摩擦角

実際のダム基礎設計検討時には、基礎部をダム軸方向に 15m で区切ったブロックごとに、ダム基礎岩盤に作用する鉛直力およびせん断力とその箇所分布する基礎岩盤の物性値をもとにヘニーの式を用いて安定計算を実施する。これにより、例えば図-17 に示す堤高 100m 程度のダムのように、左右岸高標高部については、堤高が 40m 程度以下であれば基礎に作用する水圧などの力が比較的小さいため CL 級岩盤で安全率 4.0 を確保できるが、それより河床側の堤高が 40m 程度以上になる箇所においては作用する力が大きくなるので CM 級岩盤を基礎とする必要があるといった結果が得られる。そして、全てのブロックにおいて必要安全率 4.0 が確保できるような堤体基礎掘削形状が設定される。

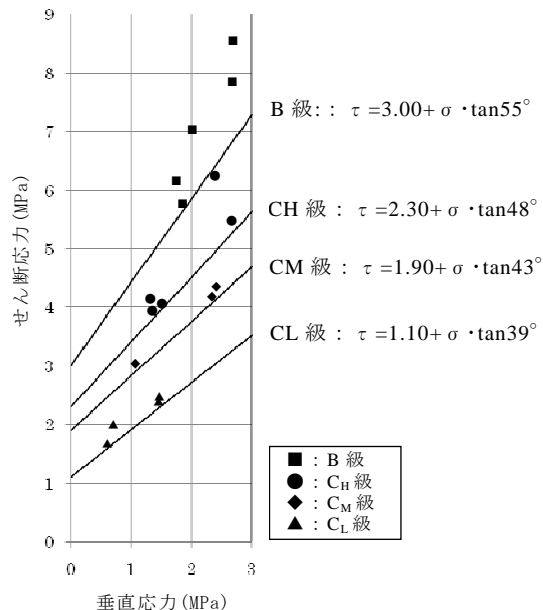


図-16 原位置せん断試験結果の一例(Aダム)

5.2 グラウチングによる岩盤の力学的改良効果を見込んだダム基礎設計の検討

本論文においては、グラウチングによる岩盤の力学的改良効果について、3章で変形特性に関する改良効果、4章で強度特性に関する改良効果をそれぞれ定量的に評価し、下記に示すような結果を得た。

岩盤等級区分ごとに詳細な検討を実施した変形特性に関する評価を参照すると、いずれの等級においても改良効果は認められるものの、特に CL 級相当の岩盤の中で上位半分に相当する変形係数 350~500(MPa)の III-1 ランクについて改良効果が明瞭で、全ての測定点が CM 級相当の物性値まで改良されていることが判明した。また、原位置岩盤における孔内載荷試験の降伏点応力より求めたせん断強度に関する検討結果によると、CL~D 級岩盤において粘着力が 0.5MPa 程度上昇することが確認できるとともに、割れ目を模した室内せん断試験結果においても、割れ目の接合部を考慮した場合で 0.4~0.6MPa 程度の粘着力の改良効果が確認できた。

上記した検討結果をもとに、3章の検討内容と同様、せん断強度についても仮に CL 級を 2 分割することにより 2 つの設定値を定めるとすれば、図-16 に示した A ダムを例にとると、図-18 に示すように、既往の CL 級のせん断強度を CL2 級の値とし、CL1 級については粘着力を既往の CM 級 1.90MPa と CL 級 1.10MPa の中間

値 1.50MPa 程度に設定できると考える。そして、グラウチングによる改良効果については、例えば CL2 級については3章の検討結果より物性値の上昇量のバラツキが大きいことを勘案して見込まないとともに、4章の検討結果より CL1 級について内部摩擦角は変化させず粘着力のみ 0.40MPa 程度見込むとすると、図中に示すようにグラウチングにより CL1 級の粘着力が 1.90MPa 程度と、既往の CM 級相当の値まで改良すると評価できる可能性がある。

この結果をもとに図-17 に示したダム基礎掘削形状の事例を用いて検討すると、図-19 に示すように、CM 級以上の着岩が必要とされる堤高 40m 以深の箇所において、CL1 級の箇所をグラウチングによる改良効果を見込むことにより CM 級相当と評価できれば、掘削線を図-16 よりも上部に設定することができる。この様にして、仮に CL~CM 級掘削箇所の掘削線を 10m 程度上部に設定できれば、高さ 100m 級、堤体積 70 万 m³ 程度のダムにおいて、左右岸それぞれで 1.5 万 m³ 程度、合計 3 万 m³ 程度と、約 5% 程度の堤体掘削体積とともに、堤体コンクリート打設量を同時に低減できる可能性がある。さらに、上記した事項が可能になれば、それに付随して、堤体上部のり面など周辺箇所における掘削体積の低減、骨材製造量削減に伴う原石山掘削体積の低減、そしてこれらの掘削のり面の高さを低くすることによるのり面の安定性確保、自然改変の最小化、のり面面積削減に伴うのり面保護工施工数量の低減など、ダム建設に関わる Q (品質)・C (経済性)・D (工程)・S (安全性)・E (環境への配慮)、あらゆる側面に寄与できると考える。

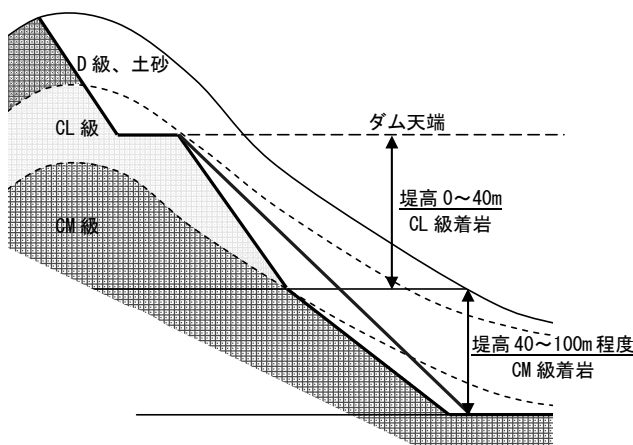
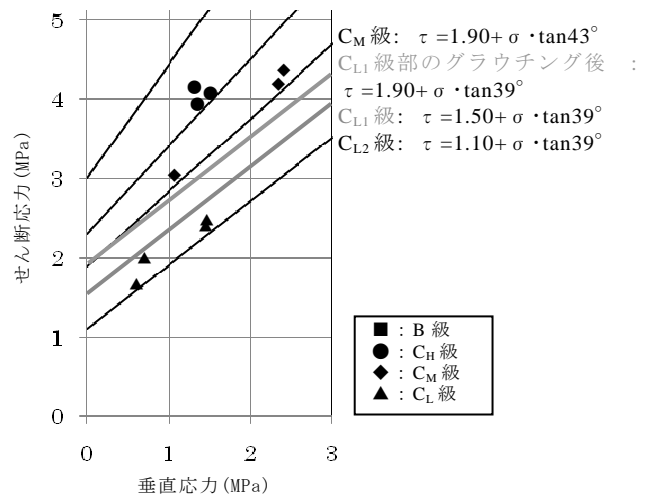


図-17 既往のダム基礎設計事例模式図

6. 結論および今後の課題・展開

6.1 結論

本研究においては、グラウチングによる岩盤の力学的改良効果を定量的に評価することを目的として、原位置岩盤試験および実内せん断試験を実施し、その結果をもとに種々の検討を行った。その結果、グラウチングに関する力学的な改良効果を定量的に評価するとともに、改良効果の明瞭な CL1 級を CM 級相当の物性値を見込むことによる具体的な設計手法の例を示



岩盤等級	グラウチング前	グラウチング後
C_H	$C=2.30, \phi=48^\circ$	$C=2.30, \phi=48^\circ$
C_M	$C=1.90, \phi=43^\circ$	$C=1.90, \phi=43^\circ$
C_L	C_L1	$C=1.50, \phi=39^\circ$ (粘着力のみ CM と CL の中間値)
	C_L2	$C=1.10, \phi=39^\circ$ (もとの CL 級)

c: 粘着力(MPa)、 ϕ : 内部摩擦角

図-18 グラウチングの改良効果を見込んだ岩盤のせん断強度の設定例

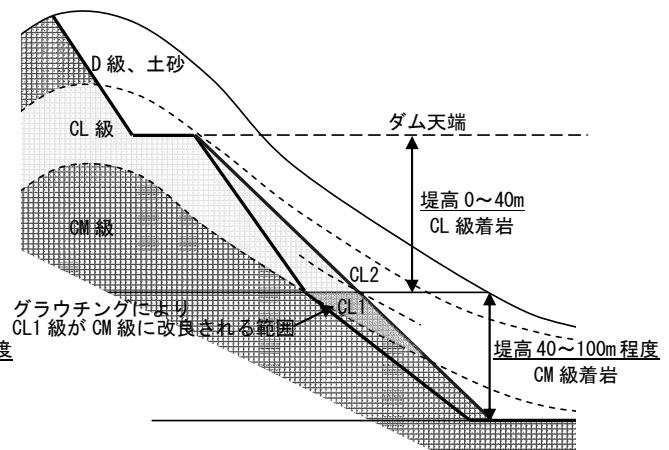


図-19 グラウチングの改良効果を見込んだ設計事例

した。このように、グラウチングによる岩盤の力学的改良効果を定量的に評価することができれば、堤体基礎掘削体積の低減、そしてそれに伴う堤体コンクリート打設体積の低減などを実現できる可能性がある。

6.2 今後の課題・展開

上述した検討を実設計に展開する際には、各ダムサイトにおいて、施工前の試験施工で当該箇所地質における改良効果を事前に直接確認するとともに、実施時にその改良効果を確認しながら施工を進捗させる品質管理システムを構築する必要があると考える。これについては、岩盤の工学的特性を簡易に推定する試験機として広く適用されているシュミットハンマーをボーリング孔に適用した孔内打撃応答試験機¹²⁾による評価手法を平行して検討している。

また、今回得られた検討結果は、直接注入を実施したグラウチング孔における試験結果や割れ目にセメントミルクを充填した室内試験結果によるものである。実際の評価に際しては、既往の変形特性に関する検討⁹⁾で実施しているように、注入孔周辺部の改良状況について、より詳細に検討する必要があると考える。

なお、上述したように、ダム基礎におけるグラウチングの技術指針は平成15年に改訂され、従来、基礎岩盤の力学的な改良を目的としていたコンソリデーショングラウチングについて、基礎全面に注入孔を設定する既往の設計手法から、上流側ではダム軸方向全面に遮水目的とした孔を設定し、下流側では断層・破碎帯部などの弱部補強箇所のみ設定する設計手法に変更されている。これに対しては、これらの注入箇所において、グラウチングによる力学的な改良効果を見込むことができれば、部分的ではあるものの、当該箇所における基礎岩盤のせん断力に関する安全率の上昇を評価することにより、堤体基礎掘削体積および堤体コンクリート打設体積を低減できる可能性があると考ええる。

特に、既往の施工実績などより、割れ目が卓越し透水性が高いと想定される火成岩のCL級岩盤などが、ダム基礎において上下流方向に連続して広範囲に分布する場合などにおいては、力学的特性と透水性の改良、両方を目的としたグラウチング工を部分的にでも上下流方向全面に設定することにより、ダム堤体の安定性確保と基礎岩盤の遮水性確保をともに実現できる

と考える。その際には、①既往の設計手法により掘削形状を設定し、上流側のみ遮水目的のコンソリデーショングラウチングを計画する場合と、②下流側まで注入孔を設定する代わりに、例えば、今回の検討で力学的な改良効果が比較的明瞭であったCL級岩盤相当のIII-1ランクのみ物性値の上昇を見込んで堤体基礎掘削体積および堤体コンクリート打設体積の低減を実現する場合など、複数の案を想定する必要がある。そして、それぞれの案について、ダム建設全体を勘案した項目ごとにQCDSEに関する検討を行い、その結果をもとに総合的な評価を実施することなどにより、所要の品質を確保した上で、最適かつ効率的なダム建設に寄与できると考える。

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) 飯田隆一：土木工学における岩盤力学概説，彰国社，1978
- 3) 土質工学会編：岩盤挙動の予測と実績，土質基礎工学ライブラリー，1989
- 4) 金沢紀一：ロックフィルダムの軟質基礎の盛立て中の挙動予測と監視，大ダム No.114，pp.3-10，1985
- 5) 増田秀夫：わが国におけるコンクリートダムの基礎岩盤の弾性波速度に関する応用地球物理学的研究，北海道大学学位論文，1962
- 6) 菊地宏吉：グラウチングによるダム基礎岩盤の力学的改良効果に関する評価技術の現状と課題，ダム技術 No.117，1996
- 7) Tetsuo IGARI, Shinji UTSUKI, Yoshitada MITO, Kohkichi KIKUCHI：In-situ experimental studies on Improvement of rock masses by grout treatment，NYROCK97，1997
- 8) 水戸義忠，若林成樹，平野勇，菊地宏吉：グラウチングによる節理のせん断強度の改良効果に及ぼす節理特性の影響に関する基礎実験，材料別冊第48巻第4号，pp.357-364，1999
- 9) 土木学会：孔内載荷試験法の現状と課題，1988.
- 10) 土木学会：ダムの地質調査，p.112，2003
- 11) 飯田隆一：ダムの基礎グラウチング，技報堂出版，pp.329-330，2002
- 12) 菊地宏吉，水戸義忠，宇津木慎司：孔内打撃応答試験機の適用性に関する検討，応用地質 36 巻 1 号，1995



1. グ라우チング工の概要

- 地中にボーリング孔を削孔し、セメントミルクを圧入する工法。
- 岩盤内の割れ目などの空隙にセメントを充填。

↓

- 力学的特性、透水性状を改良。グラウチング工模式図

1. グ라우チング工の課題

力学的改良効果に関する評価

- 透水性状の変化やセメント注入量の確認から力学的改良効果を定性的に判断。

その理由

- 室内岩石試験では評価できない。
- 原位置岩盤試験は大規模。

数cm大の供試体では割れ目を含めた性状は評価できない。

60cm大の岩盤を切出してせん断試験を実施。

室内岩石試験供試体 原位置岩盤せん断試験模式図

1. グ라우チング工の課題

力学的改良効果に関する評価

- 力学的な改良効果に関する検討事例が少ない。
- 施工サイクルに確認試験を組み込めない。

↓

- ダム基礎設計に改良効果が考慮されていない。

図 天ヶ瀬ダムにおけるグラウチング前後の変形係数の関係

図 有峰ダムにおけるグラウチング前後の弾性波速度の関係

1. 研究の目的

ダム基礎岩盤・空洞周辺岩盤の改良などを目的とした「グラウチング工」

- 岩盤の変形特性に関する改良効果の定量的評価
- 岩盤の強度特性に関する改良効果の定量的評価

↓

- 改良効果を考慮した設計・施工への具体的な展開

2. 変形特性に関する検討

原位置岩盤試験内容

写真 試験箇所掃掃状況

写真 カーコンクリート打設状況

写真 ホーリング削孔状況

写真 グ라우チング注入状況

2. 変形特性に関する検討

①ボーリング孔における試験



図 孔内における試験実施位置 写真 孔内載荷試験実施状況 写真 孔内打撃応答試験実施状況

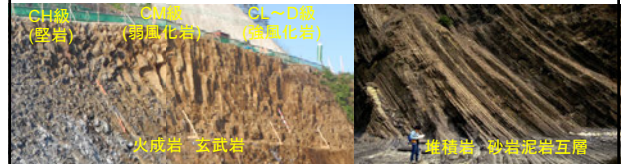
- 本施工の仕様に準じてグラウチング注入実施。
- ↓
- グ라우チング前後に同一地点で孔内試験を実施。

2. 変形特性に関する検討

表 試験実施数量一覧

地質	ゲム名	測定箇所
火成岩	Hゲム	孔内試験 513箇所
	Yゲム	孔間弾性変位観測
	Nゲム 1回目	4断面、800測線 (K1ゲム)
	K1ゲム	
凝灰岩	K2ゲム	孔内試験 87箇所
	O1ゲム	
	Gゲム	孔内試験 62箇所
堆積岩	Sゲム 1回目	孔内試験 66箇所
	Sゲム 2回目	
角礫岩	Mゲム 1回目	孔内試験 136箇所
	Mゲム 2回目	
粘板岩	O2ゲム	孔間弾性変位観測 4断面、800測線

- 3種類の火成岩、3種類の堆積岩において計664測点で試験実施。
- CH~D級岩盤において試験実施。
- ↓
- 岩種ごと、岩盤等級区分ごとに改良効果を詳細検討。



2. 強度特性に関する検討

- 実岩盤の割れ目を模した試験体の割れ目に沿ってグラウチング注入を実施。

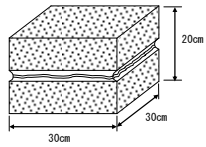


図 室内せん断試験の供試体

- グ라우チング前後で室内せん断試験を実施



写真 室内せん断試験装置

- 強度特性の改良効果を確認。

3. 変形特性に関する検討結果

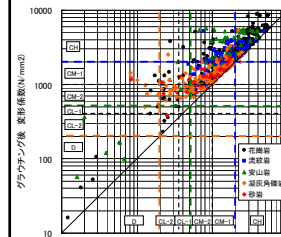


図 グ라우チング前後の変形係数の関係

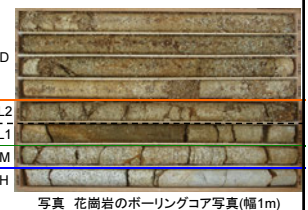
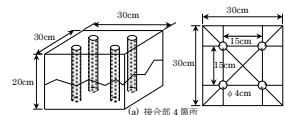
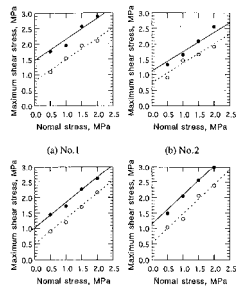


写真 花崗岩のボーリングコア写真(幅1m)

- ・CH・CM・CL1級 地質状況が不良な程、改良効果大。
- ・CL2・D級 改良効果の差異が大き (CL1: 350~500(N/mm²), CL2: 200~350(N/mm²))

割れ目沿いに土砂化、粘性土化が進み、セメントミルクが浸透しづらい。

3. 強度特性に関する検討結果

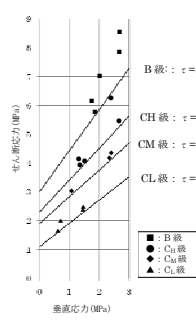


グラウチング前後の試験結果

- 粘着力C 0.4~0.6MPa程度向上
- 内部摩擦角φ 変化なし

●: グ라우チング後
○: グ라우チング前

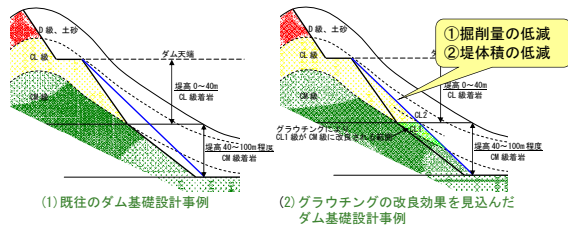
4. 力学的改良効果を考慮した設計案



- 改良効果を考慮したせん断強度設定例
- ・変形特性 - 半ランク程度向上
- ・強度特性 - 粘着力のみ半ランク程度向上
- ↓
- ・粘着力のみ0.5MPa程度の向上を考慮

既往のせん断強度設定例

4. 力学的改良効果を考慮した設計案



- 堤体基礎掘削量低減。
- +
- これに伴うダム堤体積の低減を実現。

13

4. 力学的改良効果を考慮した設計案

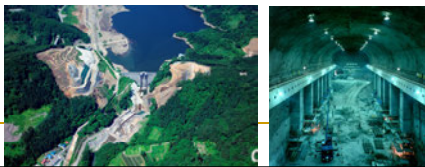


- 堤体基礎掘削量低減、ダム堤体積の低減を実現できれば、
- ↓
- 骨材製造量低減に伴う原石山掘削体積の低減。
- 堤体上部、周辺部における掘削体積低減。
- のり面保護工数量低減、自然改変の最小化実現など。
- ↓
- ダム建設に関わるQ(品質)・C(工費)・D(工程)・S(安全)・E(環境への配慮)、あらゆる側面に寄与。

14

まとめ

- 岩盤の変形特性に関する改良効果の定量的評価
 - ・CH・CM・CL1級 地質状況が不良な程、改良効果大
 - ・CL2～D級 改良効果の差異が大きい
- ↓
- 特にCL1級(強風化)→CM級(弱風化)相当に改良
- 強度の変形特性に関する改良効果の定量的評価
 - ・粘着力のみ0.4～0.6MPa程度改良



15

今後の課題

- 注入孔周辺岩盤を含めた総合的な評価。
- 試験施工による当該ダムにおける改良効果確認。
- 施工時、改良効果を簡易に評価する手法確立。

↓

透水性状と力学的特性の改良効果を考慮するための
グラウチング情報化設計・施工の実現



16

留萌ダムにおけるグラウチングの合理化施策

吉田 博志¹ 長原 寛² 森 貴信³

留萌ダムでは、「グラウチング技術指針・同解説」の改訂を踏まえて、施工中の透水試験結果や注入結果を分析して岩盤特性を把握した上で、施工仕様の適宜改良を行い、グラウチングを実施した。

本報告は、留萌ダムのカーテングラウチングとブランケットグラウチングにおいて、合理化を図った施工仕様の検討、ならびに施工結果の検証について報告する。

キーワード：堆積軟岩，グラウチング合理化，注入仕様，限界圧力

1. はじめに

近年、良好なダムサイトが減少する一方で、社会資本整備に対するコスト縮減への社会的要請から、個々のダムに適した合理的なグラウチングが望まれている。

留萌ダムでは、グラウチング施工中の注入状況を分析して基礎岩盤の透水性状を把握し、適宜基礎岩盤の透水性に適合する注入仕様でグラウチングを実施した。

本報告は、留萌ダムにおいてグラウチングの合理化を図るための施工仕様の改良、ならびに効果の検証を中心にグラウチングの概要を紹介する。

2. ダムの概要

留萌ダムは、北海道開発局が一級河川留萌川水系チバベリ川に建設した多目的ダムであり、堤高41.2m、堤頂長440m、総貯水量23,300千m³の中央コア型ロックフィルダムである（表-1、図-2～4）。

ダム本体工事は平成13年度に着手し、平成21年3月から試験湛水を開始した。試験湛水では浸透や変形に対する安全性を確認し、平成22年4月から供用を開始した。

3. ダムサイトの地質概要

3.1 地質

ダムサイトを構成する基盤岩盤は、下位より新第三紀中新世の増毛層、新第三紀鮮新世の幌加尾白利加層であり、微細粒砂岩(Ss-V)～細粒砂岩(Ss-f)を主体とし、海緑石砂岩(Gs)、軽石凝灰岩(Tf)を挟在する。地層の走向はN-S方向（概ねダム上下流方向）、地層の傾斜は全体的

に東傾斜（右岸傾斜）を呈す。左岸アバット～河床部左岸では約70～80°の高角度傾斜を示し、河床部右岸～右岸アバット部では10～20°の低角度傾斜を示す（図-5）。

3.2 岩級

ダム基礎は、固結度の低い堆積軟岩でCL級岩盤が主体となる（図-6）。CL級岩盤は、岩片の硬さ・割れ目間隔・風化の状態からCLh級とCLl級に区分され、コア敷で実施した針貫入試験による推定一軸圧縮強度¹⁾では、下記のとおり全般的に軟質な岩盤である。

・CLh：0.6～5.0N/mm²

・CLl：0.2～4.0N/mm²（海緑石砂岩、軽石凝灰岩以外）

・CLl：0.1～1.7N/mm²（海緑石砂岩～軽石凝灰岩）

3.3 透水性

基礎岩盤は、全般的に割れ目が少なく、概ね5Lu以下の難透水性を示し、深部ほど透水性が低くなる傾向を示す。

表層部については、風化の影響により割れ目が褐色化した透水部（10～20Lu以上）が分布する。また、新鮮岩の一部において、応力開放等の影響により、地層の分布に調和的な上下流方向の透水部が形成されている（図-7）。

調査時には、コア基礎の数箇所でも20Lu以上の高透水部が確認された。しかし、監査廊から実施したパイロット孔の結果では概ね20Lu以下であった。この原因として、グラウチング施工時は調査時と異なり試験区間上位ステージが注入されてリーク防止が図られる他、基礎岩盤が軟質であるため河床堆積物に対して、監査廊コンクリートと堤体盛土による上載荷重（増分）が割れ目を閉塞し透水性が低下した²⁾ものと推定される。

¹国土交通省 北海道開発局 留萌開発建設部 留萌開発事務所 留萌ダム管理支所，支所長

²国土交通省 北海道開発局 留萌開発建設部 留萌開発事務所 留萌ダム管理支所，管理係長

³日本工営(株) 札幌支店 技術第一部，課長

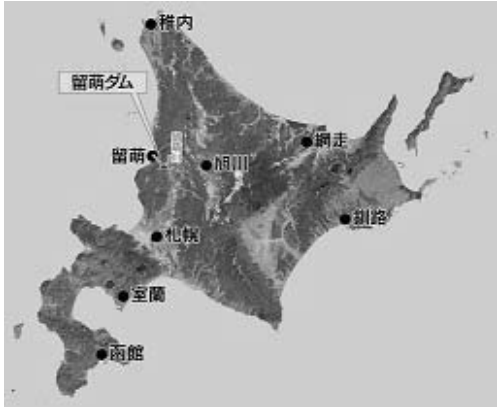


図-1 留萌ダムの位置図

表-1 ダム及び貯水池諸元

ダ	位置	北海道留萌市幌糠町字チバへリ
	形式	中央コア型ロックフィルダム
	堤高	41.2m
ム	堤頂長	440.0m
	勾配	上流 1:2.4 下流 1:1.8
	堤体積	1,224,800m ³
	基礎部標高	EL 11.0m
	非越流部標高	EL 51.8m
貯	集水面積	42.0km ²
	湛水面積	2.2km ²
	総(有効)貯水量	23,300,000m ³ (21,800,000m ³)
	内治水容量	11,000,000m ³
	利水容量(特定)	500,000m ³
水	利水容量(不特定)	10,300,000m ³
	堆砂容量	1,500,000m ³ (350m ³ /km ² /年)
	常時満水位	EL 40.9m
	サーチャージ水位	EL 46.8m
	最低水位	EL 30.1m
放	取水範囲	EL39.9~EL25.0(14.9m)
	常用洪水吐き	自由越流堤 高さ5.9m×幅3.0m×1門
	非常用洪水吐き	自由越流堤 高さ3.0m×幅12.0m×4門 高さ3.0m×幅3.0m×1門 (常用洪水吐き上部)
設	選取取水設備	地山設置型多段式
	放流設備	導水管 φ1.7m 主ゲート ジェットフローゲート 副ゲート 高圧スライドゲート 放流管 φ1.2m * 2

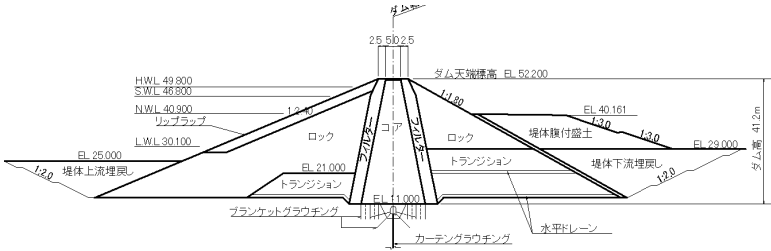


図-2 留萌ダム標準断面図

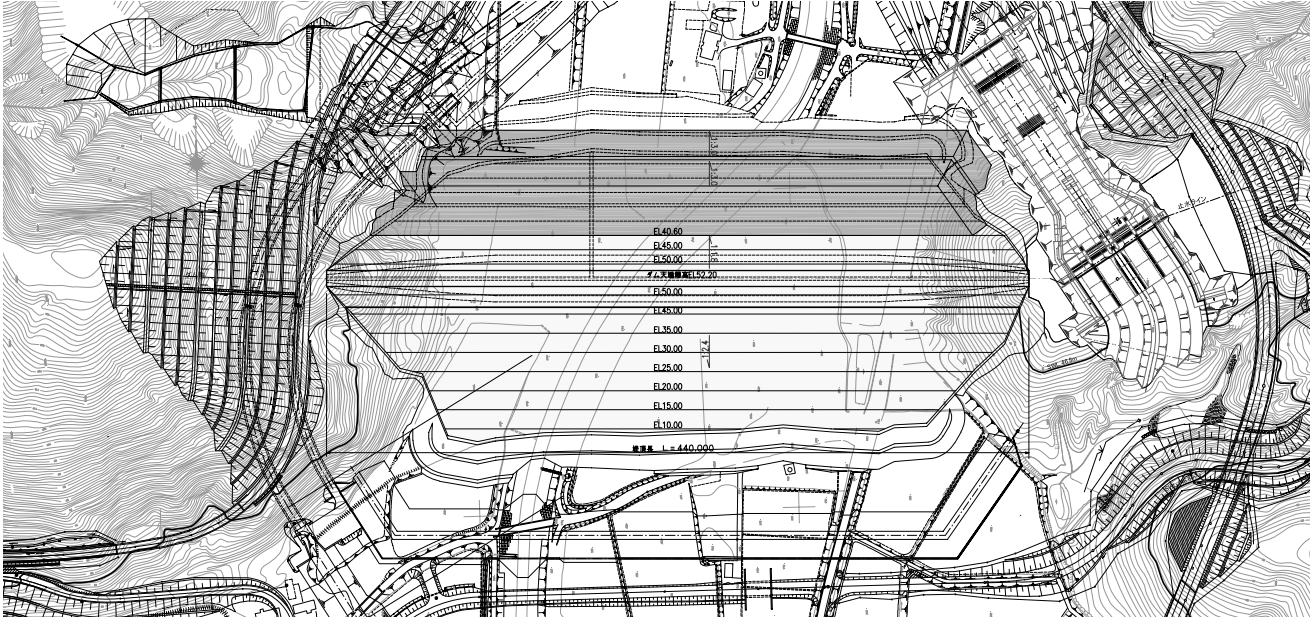


図-3 ダム平面図

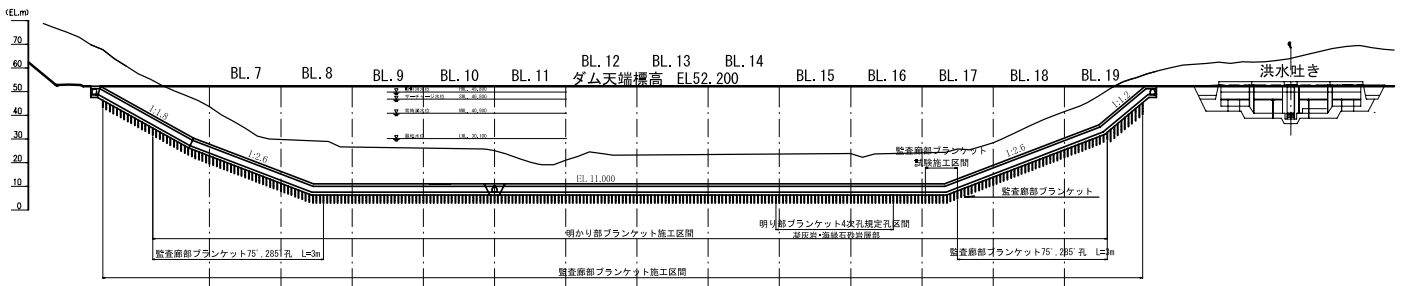


図-4 ダム縦断面図(監査廊部ブランケットグラウチング縦断面図)

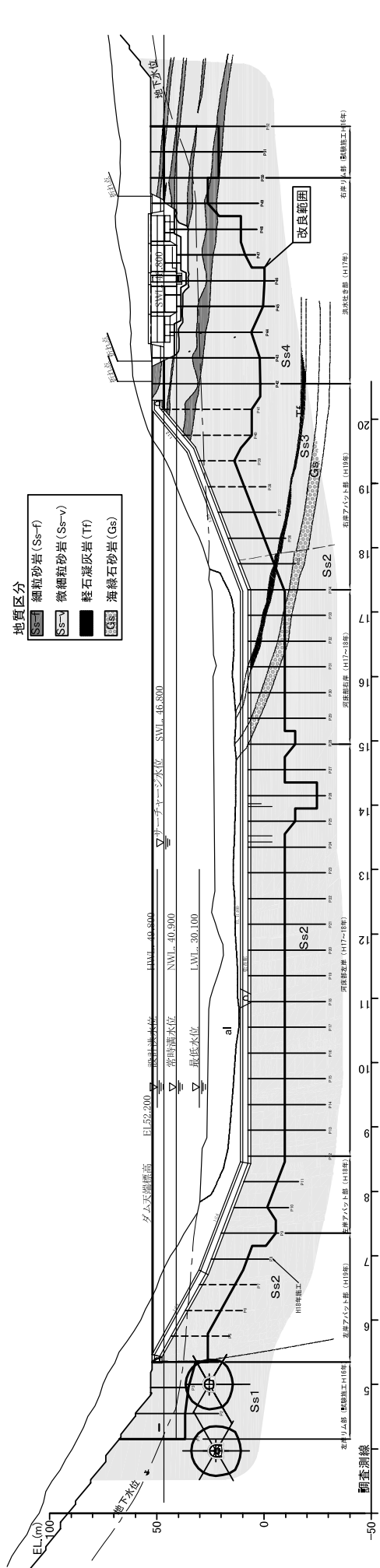


図-5 止水ライン地質図 (パイロット孔施工後)

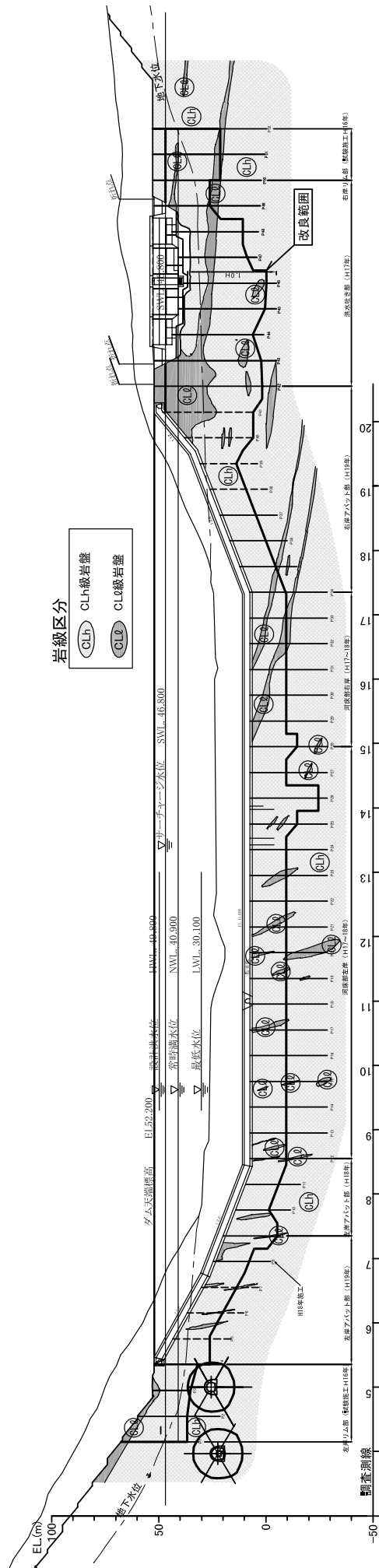
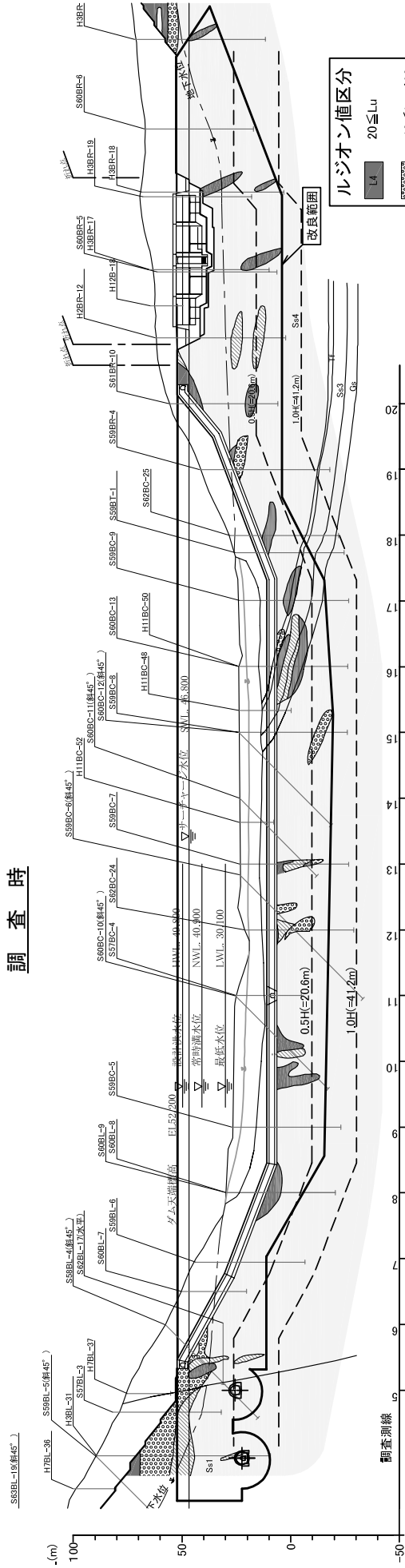


図-6 止水ライン岩級区分図 (パイロット孔施工後)

調査時



改良範囲

ルゾン値区分	記号
$20 \leq Lu$	■
$10 \leq Lu < 20$	▨
$5 \leq Lu < 10$	▧
$Lu < 5$	□

パイロット孔施工後

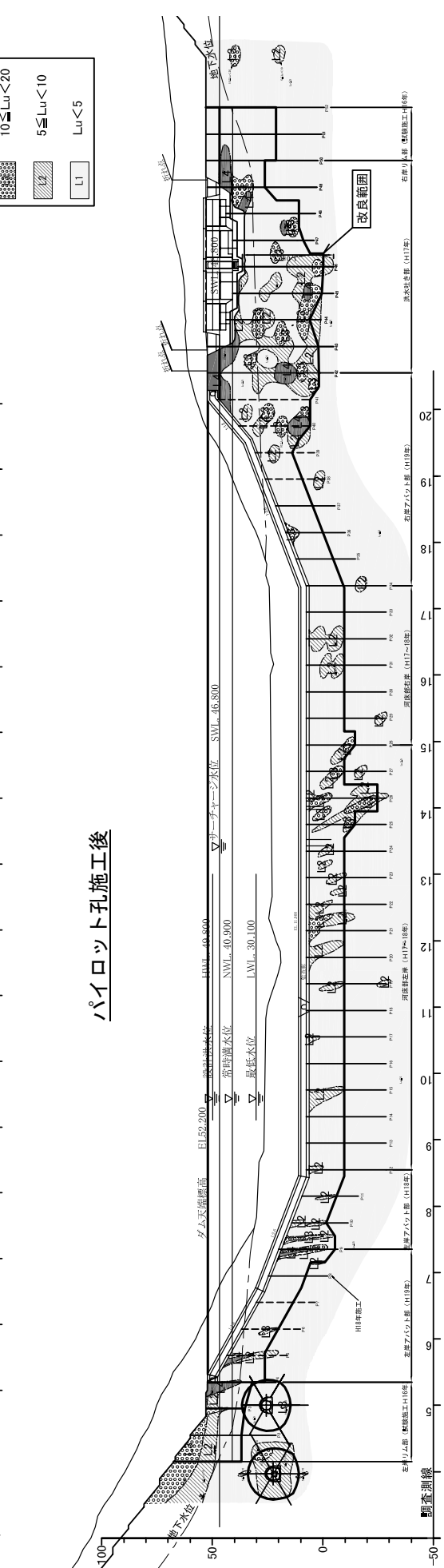


図-7 止水ラインルゾンマンマップ図

4. 留萌ダムのグラウチング概要

留萌ダムの基礎グラウチングは、コンソリデーショングラウチング、ブランケットグラウチング、カーテングラウチングの3種があり、ブランケットグラウチングは施工場所により明り部と監査廊部に分けられる(表-3)。

グラウチング施工仕様の当初計画と見直し後の施工仕様及び施工結果概要を表-3及び表-4に示す。

5. グラウチング合理化に向けた取組み

5.1 概要

留萌ダムの基礎岩盤は、透水性が全般的に低いもの、限界圧力が0.15~0.5MPaと小さい軟岩であり、高角度傾斜の割れ目が一部に発達し10Lu以上の透水部が形成されている。このため、注入圧を高めすぎると割れ目が破壊して過大注入が生じる恐れがある。また、難透水であるとして孔配置を広げると、高角度傾斜の透水性割れ目への遭遇率が低下し、グラウチング改良が十分に得られない恐れがある。

岩盤特性を踏まえて合理化を図ったグラウチング施工の内、以下について詳述する。

- ①効果的な孔配置及び施工深度
- ②岩盤特性に対応した注入仕様と結果の検証

5.2 効果的な孔配置及び施工深度

(1) 明り部ブランケットグラウチング

当初計画の孔配置6mに対し、透水性が相対的に高い河床部9BLにおいて3次孔を規定最終次数とした3√2m格子(最小規定孔間隔3m)で試験施工を行った。

その結果、5次孔(最小孔間隔1.5m相当)において改良目標10Lu(非超過率85%)に到達した(図-8)。

追加孔が比較的多くなった原因は次のように考えた。

- ・試験施工部9BLの基礎岩盤は、細粒砂岩~微細粒砂岩層において相対的に軟質でグラウタビリティーが悪い。施工後に判明した事であるが、コア敷の針貫入試験結果において9BLは細粒砂岩~微細粒砂岩層内で最も強度が小さい結果であった(図-9)。
- ・ブランケットグラウチングは監査廊コンクリート施工後に実施したが、試験施工地点(9BL)は監査廊コンクリート施工前に実施したため、開放側面が形成され、注入範囲が広く注入効率が悪くなった。したがって、本施工地点ではグラウタビリティーが向

上すると考え、試験施工と同様に3√2m格子として施工を行った。

一方、河床右岸側に分布する軽石凝灰岩・海緑石砂岩(Tf・Gs部)は極めて軟質であり、グラウタビリティーが悪いことが予想された。そこで、孔配置は一般部の追加孔(4次孔)を規定孔とした3.0m格子(最小規定孔間隔1.5√2m)に変更した。

グラウチングの結果、表-4に示すとおり3次孔規定孔区間では全て3~4次孔段階で改良目標10Lu・非超過85%に到達した。また、各ゾーンの規定孔数に対する追加孔の発生割合は表-2のとおりであり、追加孔は河床部(一般部)で約27%生じたが、全体的には約17%の発生である。追加孔が多く発生しなかったことから、規定孔間隔は妥当であると評価できる。

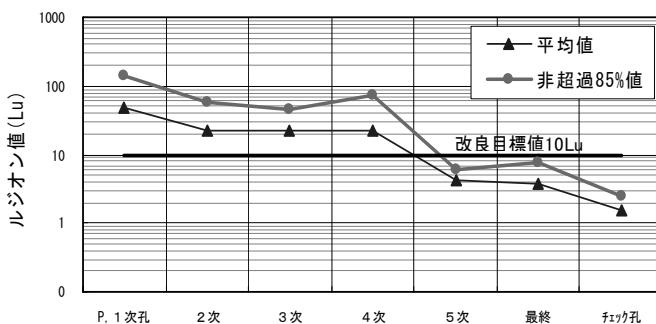


図-8 ルジオン値通減特性(ブランケット試験施工部)

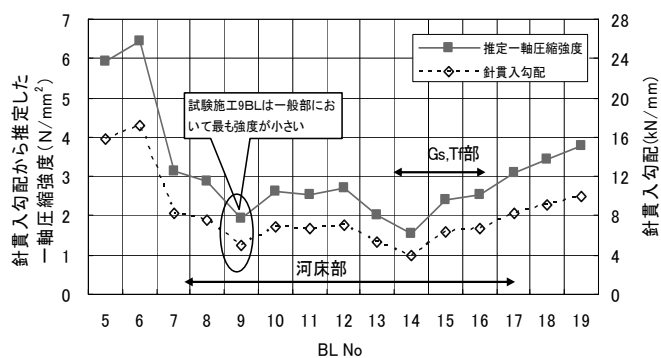


図-9 コア敷のブロック別推定一軸圧縮強度(針貫入試験からの推定)

表-2 明り部ブランケットグラウチング追加孔発生率

ゾーン	規定孔数	追加孔発生率
左岸部	96	6%
河床(一般部)	405	27%
河床(Gs・Tf部)	176	9%
右岸部	96	4%
全体	773	17%

表-3 留萌ダムのグラウチング概要 (1/2)

項目	コンソリデーショングラウチング		プランケットグラウチング (明り部)		プランケットグラウチング (監査廊部)																																																									
	当初計画	見直し後	当初計画	見直し後	当初計画	見直し後 (現時点)																																																								
概要図																																																														
施工目的	<ul style="list-style-type: none"> ・洪水吐きの基礎掘削によって緩んだ岩盤の引締め、及び弱部 (CL1 級) を補強する。 ・上載荷重が大きな越流部と導流部の CL0 部のみ対象。 		<ul style="list-style-type: none"> ・コア基礎浅部の透水性改良し、カーテンンググラウチングと併せて幅広い難透水ゾーンを形成 		<ul style="list-style-type: none"> ・掘削による監査廊周辺岩盤のゆるみの補強 ・監査廊コンクリートと基礎岩盤の接軸部の空隙を充填 (コウトグラウト) を兼ねる) 																																																									
改良目標	<ul style="list-style-type: none"> ・ 10Lu (非超過率 85%) 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 10Lu (非超過率 85%) 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 10Lu (非超過率 85%) 																																																									
施工範囲	<ul style="list-style-type: none"> ・ 越流部+導流部の全面 		<ul style="list-style-type: none"> ・ コア敷全面 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 監査廊周辺 																																																									
施工方法	<ul style="list-style-type: none"> ・ カバーロック (2m) 方式 		<ul style="list-style-type: none"> ・ カバーロック (2m) 方式 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 同左 																																																									
配孔パターン	<ul style="list-style-type: none"> ・ 6m 格子, 規定最終孔 3 次 (最小孔間隔 3m) 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 3.0m 格子, 規定最終孔 3 次 (最小孔間隔 1.5√2m) 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 監査廊断面上・下流それぞれ 2 列配置 ・ 縦断方向に 3m 間隔, 規定最終孔 2 次 (千鳥配置) 																																																									
施工深度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 5m 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 5m 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 5m 																																																									
注入圧	<ul style="list-style-type: none"> ・ 0.15MPa 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 0.15MPa (リーク時 : 0.1MPa) 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 0.15MPa 																																																									
注入速度	<ul style="list-style-type: none"> ・ 2 1/2 l/min/m 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 同左 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 2 1/2 l/min/m 																																																									
注入配合	<table border="1"> <tr><td>配合C:W</td><td>Lu<10</td><td>10≦Lu<20</td><td>20≦Lu</td></tr> <tr><td>1:8</td><td>600</td><td>600</td><td>-</td></tr> <tr><td>1:6</td><td>600</td><td>600</td><td>-</td></tr> <tr><td>1:4</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td></tr> <tr><td>1:2</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td></tr> <tr><td>1:1</td><td>3,000</td><td>3,000</td><td>3,000</td></tr> <tr><td>合計</td><td>5,800</td><td>5,200</td><td>4,600</td></tr> </table>		配合C:W	Lu<10	10≦Lu<20	20≦Lu	1:8	600	600	-	1:6	600	600	-	1:4	800	800	800	1:2	800	800	800	1:1	3,000	3,000	3,000	合計	5,800	5,200	4,600	<table border="1"> <tr><td>配合C:W</td><td>Lu<5</td><td>5≦Lu<15</td><td>15≦Lu</td></tr> <tr><td>1:8</td><td>600</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>1:6</td><td>600</td><td>600</td><td>-</td></tr> <tr><td>1:4</td><td>600</td><td>600</td><td>600</td></tr> <tr><td>1:2</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td></tr> <tr><td>1:1</td><td>2,400</td><td>2,400</td><td>2,400</td></tr> <tr><td>合計</td><td>5,000</td><td>4,400</td><td>3,800</td></tr> </table>		配合C:W	Lu<5	5≦Lu<15	15≦Lu	1:8	600	-	-	1:6	600	600	-	1:4	600	600	600	1:2	800	800	800	1:1	2,400	2,400	2,400	合計	5,000	4,400	3,800	<ul style="list-style-type: none"> ・ 標準 5m, 左右岸アバウト部の 75° 列と 285° 列は 3m 	
配合C:W	Lu<10	10≦Lu<20	20≦Lu																																																											
1:8	600	600	-																																																											
1:6	600	600	-																																																											
1:4	800	800	800																																																											
1:2	800	800	800																																																											
1:1	3,000	3,000	3,000																																																											
合計	5,800	5,200	4,600																																																											
配合C:W	Lu<5	5≦Lu<15	15≦Lu																																																											
1:8	600	-	-																																																											
1:6	600	600	-																																																											
1:4	600	600	600																																																											
1:2	800	800	800																																																											
1:1	2,400	2,400	2,400																																																											
合計	5,000	4,400	3,800																																																											
追加基準	<ul style="list-style-type: none"> ・ 最終次数孔の 10Lu 非超過率が 85% に達しない場合 ・ ルジオン値が単独孔での追加基準値 15Lu 以上の場合 ・ 改良目標値 10Lu に達しないステージが連続する場合 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 同左 		<ul style="list-style-type: none"> ・ 同左 																																																									
施工結果 (非超過率 85% 確率ルジオン値低減図)																																																														

表-4 留萌ダムのグラウチング概要 (2/2)

項目	カーテングラウチング																																																				
	当初計画	見直し後 (現時点)																																																			
概要図																																																					
施工目的	遮水性の改良 (浸透流の抑制)																																																				
改良目標	5Lu (非超過率 85%)	<ul style="list-style-type: none"> 0~H2 : 5Lu (非超過率 85%) H/2 以深 : 10Lu (非超過率 100%) 																																																			
施工時期	監査廊内ブランケットグラウチング施工後	同左																																																			
孔配置	単列 1.5m (規定最終孔 3次) * 堤体と洪水吐き間 (CL1 級部) については補助カーテン併用	<ul style="list-style-type: none"> H/2 以浅 : 単列 1.5m (規定最終孔 3次) H/2 以深 : 単列 3.0m (規定最終孔 2次) (* 補助カーテングラウチングは原則廃止) 																																																			
施工深度	【基本深度】 ・ 所定の改良目標値に到達する深度まで ・ $d=H/3+8.0m$ 以上 (H : ダム高) 【左右岸リム部】 ・ 所定の改良目標値に到達する範囲まで ・ サーチャージ水位と地下水位の交点をカバーする範囲まで	【基本深度】 ・ 所定の改良目標値に到達する深度まで ・ 最低 H/2 (H : ダム高) 以上 【3次孔短縮基準】 ・ 左右 P~2次孔の第3ステージ, 3次孔の第2ステージが 10Lu 未満の場合⇒3次孔は2ステージに短縮 ・ ただし, P~2次孔の第2ステージが 10Lu 以上の場合, 斜め下方の3次孔 (3ステージ) は省略しない。 【左右岸リム部】 ・ 常時満水位と地下水位の交かつサーチャージ水位と 5Lu 以下の難透水ゾーンの交点をカバーする範囲まで																																																			
注入圧	1st : 0.3 (MPa) 2st : 0.45 3st : 0.6 4st : 0.7 5st 以降 : 0.95	1st : 0.25 (MPa) 2st : 0.35 3st 以降 : 0.45 * 限界圧力と規定圧力の差が 0.1MPa 以上の場合は, 注入圧力 = 限界圧力 + 0.1MPa																																																			
注入速度	2 $\frac{L}{min/m}$	同左																																																			
注入配合	<table border="1"> <thead> <tr> <th>配合C:W</th> <th>標準規定量(%)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1:10</td><td>600</td></tr> <tr><td>1:8</td><td>600</td></tr> <tr><td>1:6</td><td>600</td></tr> <tr><td>1:4</td><td>400</td></tr> <tr><td>1:2</td><td>400</td></tr> <tr><td>1:1</td><td>1,000</td></tr> <tr><td>計</td><td>3,600</td></tr> </tbody> </table>	配合C:W	標準規定量(%)	1:10	600	1:8	600	1:6	600	1:4	400	1:2	400	1:1	1,000	計	3,600	<table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">配合C:W</th> <th colspan="3">標準規定量(%)</th> </tr> <tr> <th>Lu<10</th> <th>10≤Lu<20</th> <th>20≤Lu</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1:10</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>1:8</td><td>600</td><td>-</td><td>-</td></tr> <tr><td>1:6</td><td>600</td><td>600</td><td>-</td></tr> <tr><td>1:4</td><td>600</td><td>600</td><td>800</td></tr> <tr><td>1:2</td><td>800</td><td>800</td><td>800</td></tr> <tr><td>1:1</td><td>800</td><td>1,400</td><td>1,800</td></tr> <tr><td>計</td><td>3,400</td><td>3,400</td><td>3,400</td></tr> </tbody> </table>	配合C:W	標準規定量(%)			Lu<10	10≤Lu<20	20≤Lu	1:10	-	-	-	1:8	600	-	-	1:6	600	600	-	1:4	600	600	800	1:2	800	800	800	1:1	800	1,400	1,800	計	3,400	3,400	3,400
配合C:W	標準規定量(%)																																																				
1:10	600																																																				
1:8	600																																																				
1:6	600																																																				
1:4	400																																																				
1:2	400																																																				
1:1	1,000																																																				
計	3,600																																																				
配合C:W	標準規定量(%)																																																				
	Lu<10	10≤Lu<20	20≤Lu																																																		
1:10	-	-	-																																																		
1:8	600	-	-																																																		
1:6	600	600	-																																																		
1:4	600	600	800																																																		
1:2	800	800	800																																																		
1:1	800	1,400	1,800																																																		
計	3,400	3,400	3,400																																																		
追加基準	<ul style="list-style-type: none"> 最終次数孔の 5Lu 非超過率が 85%に達しない場合 ルジオン値が単独孔での追加基準値 10Lu より大きい場合 改良目標値 5Lu に達しないステージが連続する場合 	【H/2 以浅】 同左 【H/2 以深】 ルジオン値が 10Lu より大きい場合																																																			
施工結果 (非超過 85% 確率ルジオン値低減図)																																																					

河床部で追加孔の発生が相対的に多い原因は、アバット部に比べて基礎岩盤が軟質で透水性の高い箇所が多かったためと推定される。

(2) 監査廊部ブランケットグラウチング

当初計画の孔長 5m で河床部を施工し、ゾーン別に改良効果を分析した結果、次のことが確認された。

- ・規定最終孔（2次孔）において、45°列と 315°列（表-2）は、改良目標値 10Lu を上回る孔が合計 4 孔発生した（追加孔としては 2 孔）。しかし、明り部ブランケットと重複する 75°列と 285°列の 2 次孔は全て改良目標値以下となっている。

次に、明り部との重複区間（75°列と 285°列）において試験的に 3m 区間と 5m 区間の水押し試験を行い、以下の結果を得た。

- ・3m 区間の水押し試験は、5m 区間に比べてルジオン値は平均約 1.6 倍大きくなる傾向にある。

これは、着岩部付近に透水を規制する割れ目が存在しているためと推定した。

- ・試験地点において、1 次孔は最大 8Lu、2 次孔は最大 5.3Lu であり、全て改良目標値 10Lu 以下である（追加孔は発生しない）。

以上より、左右岸アバット部での監査廊部グラウチングは、コンタクトグラウチングとしての目的を重視し、明り部との重複区間（75°と 285°列）の孔深度を L=5m から 3m に短縮した（図-10）。孔長 3m に縮減した左右岸部施工の結果、以下の理由から孔長の縮減は妥当であったと評価される。

- ・規定最終孔（2次孔）68 孔に対し、追加孔（3次孔）は左岸部 1 孔、右岸部 2 孔と少ない。
- ・L=3m に変更した区間（7～8BL、17～18BL）のブロックの総注入セメント量は、L=5m の 9～16BL とほぼ同様である（図-11）。したがって、透水部は主に明り部ブランケットと重複しない監査廊周辺と評価した。

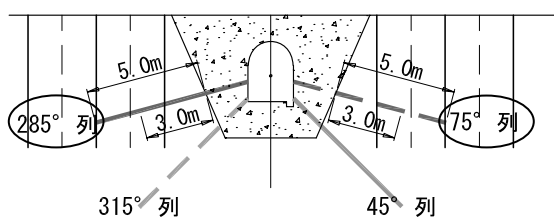


図-10 監査廊部ブランケット施工深度の短縮概要

(3) カーテングラウチング

「グラウチング技術指針・同解説」³⁾の改訂に伴い水理地質特性を踏まえ、改良目標値を以下のように定めた。

- H/2 以浅：5Lu（変更なし）
- H/2 以深：10Lu（見直し）

（非超過率は H/2 以浅は一般的な 85% を目標とし、H/2 以深は改良目標値を緩和していることから安全側を考慮して 100%）単列 1.5m ピッチ（3 次孔規定孔）を基本とし、試験施工を兼ねて左岸リム部（P1～P4）と右岸リム部（P50～P52）、及び洪水吐き部（P42～P50）の施工を行った。その結果を分析し次の事項が判明した。

- ・左岸部に分布する 20Lu 以上の高透水部は 3 次孔（孔間隔 1.5m）にて 5Lu・非超過率 85% を満足する。

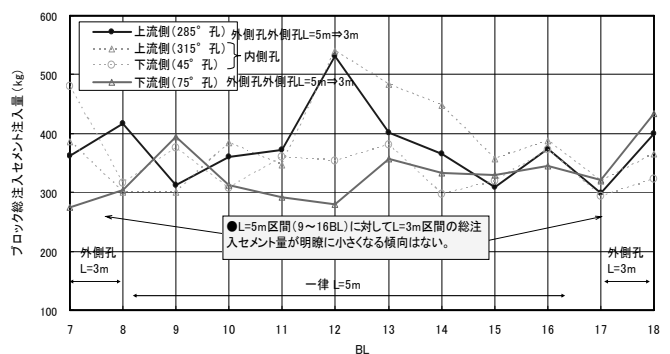


図-11 監査廊部ブランケット各ブロックの総注入セメント量

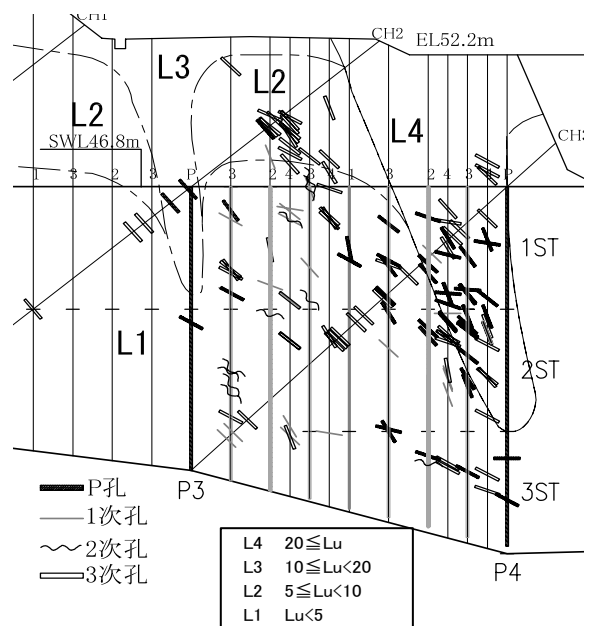


図-12 グラウトミルク確認位置図（左岸リム）

- ・ 次数別のグラウチング影響範囲を確認するため、左右岸リム部において、着色したグラウトミルクを注入すると、パイロット孔では平均3m、最大6m（1次孔地点）で確認された（図-12）。また、1次孔のグラウトミルクは左岸部で最大4.5m（3次孔地点）、右岸部で最大6mまで到達していることを確認した。このことは、高角度傾斜の透水部が存在した場合でも規定孔間隔1.5mとすれば、多量の追加孔が発生せずに改良目標を満足することを示している。
- ・ 洪水吐き基礎深部（H/2以深）では、2次孔のルジオン値を上回る隣接3次孔は約41%であり、3次孔において改良目標値（10Lu）を上回るステージは発生しない（図-13）。この結果によれば、2次孔が改良目標値10Lu以下であれば3次孔は10Lu以下になると判断できる。

以上より本体基礎部のカーテングラウチングは、次の孔配置・孔深度とした。

【孔配置】：H/2以浅は1.5m間隔（3次孔規定）、H/2以深は3.0m間隔（2次孔規定）

【孔深度】：改良深度は、所定の改良目標値を満足しない範囲を基本とし、最低H/2以上施工する。

【短縮基準】：改良目標値5Luの区間（0～H/2）においてP孔～2次孔の第3ステージ、3次孔の第2ステージが10Lu未満の場合は、3次孔は2ステージに短縮する。ただし、P孔～2次孔の第2ステージが10Lu以上の場合、下方の3次孔第3ステージは省略しない（図-14）。

施工の結果、追加孔発生率はH/2以浅で約0.9%、H/2以深で約0.5%と少なく、孔配置・孔深度の縮減は妥当であったと評価される。

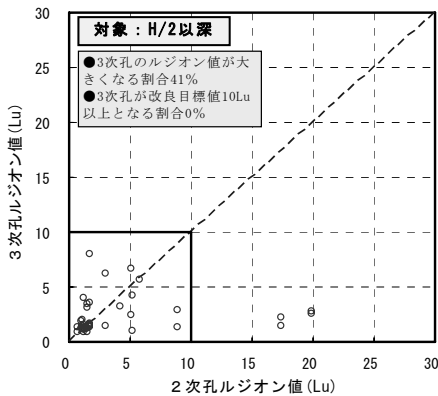


図-13 2次孔と3次孔ルジオン値の相関（H/2以深）

5.3 岩盤特性に対応した注入仕様と結果の検証

(1) 監査廊部ブランケットグラウチング

監査廊部ブランケットグラウチングの注入仕様検討に際して、明かり部のブランケットグラウチングの施工データを分析した結果、以下の傾向が認められた。

- ・ ルジオン値は10Lu以下と20Lu以上の割合が多く、中間の10～20Luが少ない。透水性が明瞭に低高に区分される特徴がある（図-15）。
- ・ 終了配合W/C=8となるルジオン値は約70%が5Lu以下であり、5～10Luは30%以下と少ない（図-16）。

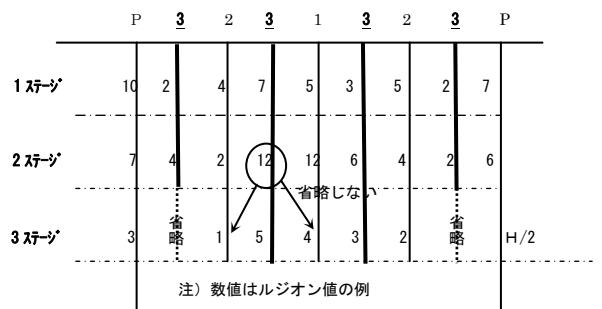


図-14 カーテングラウチング3次孔の省略概念図

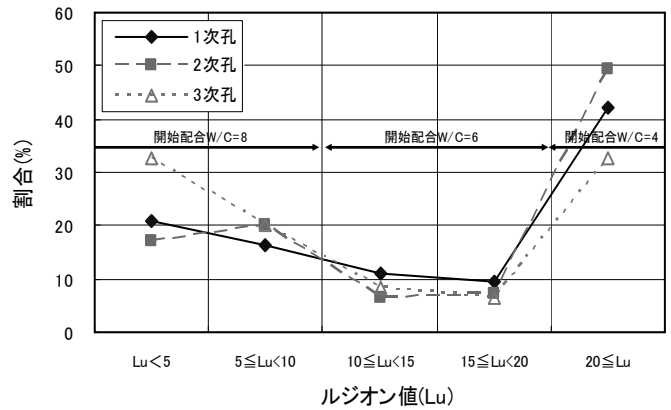


図-15 明り部ブランケットのルジオン値の構成割合

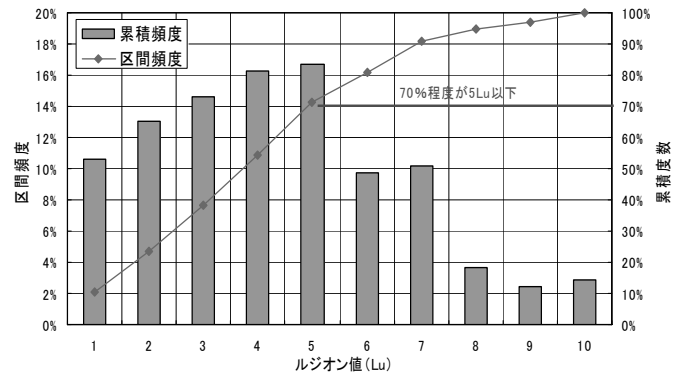


図-16 明り部ブランケット終了配合W/C=8のルジオン値分布

- ・ルジオン値が 5~10Lu では、約 60%以上が W/C=8 より濃い配合で終了する (図-17)。
- ・ルジオン値が 15~20Lu では、約 90%以上が W/C=4 以上、約 60%以上が W/C=2 以上の配合で終了する (図-17)。

監査廊部ブランケットグラウチングの注入配合基準は、前述の分析結果を踏まえて下のとおりとした(表-5)。

- ・5~10Luの透水部は、濃い配合の早期注入により注入時間の短縮が可能性である。
- ⇒ルジオン値 $5 \leq Lu < 10$ の開始配合は W/C=8 から W/C=6 に変更。
- ・15~20Lu の比較的大きな割れ目は、W/C=6 程度の薄い配合の注入より W/C=4 以上の濃い配合からの注入が効率的である。
- ⇒ルジオン値 $15 \leq Lu < 20$ の開始配合は W/C=6 から W/C=4 に変更。
- ・中間的な透水性のステージが少ないため中間濃度 W/C=4 の規定量は少なくし、早期に W/C=2 以上の濃い配合への切り替えが効率的である。

⇒W/C=4 の規定配合量を 800 ㊦から 600 ㊦に変更。

変更した注入仕様で施工した結果、監査廊ブランケットグラウチングの平均注入時間については、明り部よりも短く、かつルジオン値に関係なく概ね一定である (図-18)。また、開始配合を変えた 5~10Lu、及び 15~20Lu のステージにおいて注入流量の急減現象は認められなかった。

以上より、監査廊部ブランケットは、所定のグラウトミルクの注入に対して注入時間を短縮した効果的な注入であったと評価される。

表-5 監査廊部ブランケット注入配合基準の変更

開始配合基準	配合 C:W		
	1:8	1:6	1:4
明りブランケット	Lu < 10	10 ≤ Lu < 20	20 ≤ Lu
監査廊 ブランケット	Lu < 5	5 ≤ Lu < 15	15 ≤ Lu

配合 C:W	明りブランケット	監査廊ブランケット
1:8	600	600
1:6	600	600
1:4	800	600
1:2	800	800
1:1	3,000	2,400
合計	5,800	5,000

(2) 上載荷重の差異による基礎の透水性の検証
 監査廊部ブランケットは、明り部ブランケットに比べてルジオン値、単位注入セメント量が全般的に小さくなる傾向を示した。明り部ブランケットの最終次数孔と同列の監査廊部ブランケット 1,2 次孔 (明り部とラップしない孔 315° 列及び 45° 列が対象、監査廊部ブランケットは次数低減が明瞭でないため、母集団を多くする観点から 1,2 次孔を対象) のルジオン値を対比した相関図から、以下の傾向が認められる。

- ・明り部最終ルジオン値が大きいほど明り部に對する監査廊部ルジオン値比は小さくなる傾向を示す (図-19)。

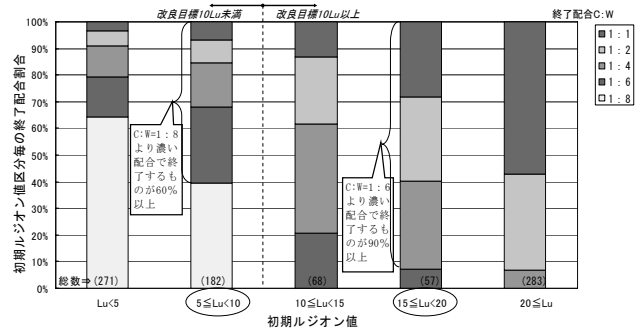


図-17 明り部ブランケットのルジオン値区分毎の終了配合

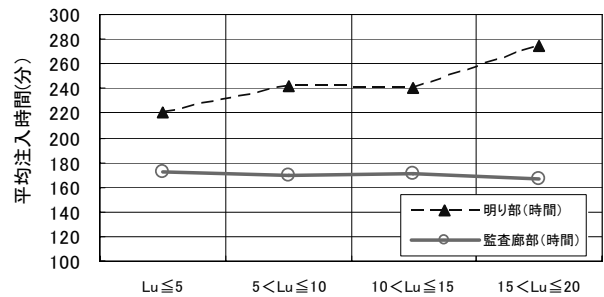


図-18 ルジオン値毎の平均注入時間

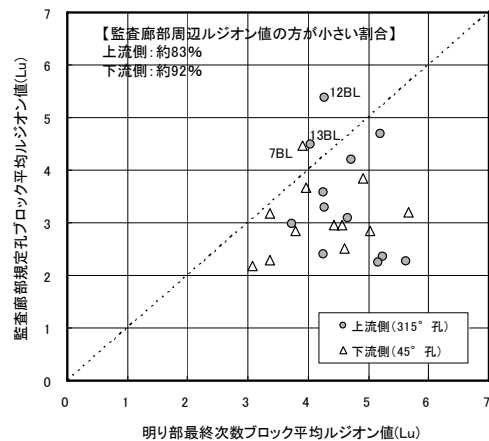


図-19 明り部最終次数のLu値と監査廊部Lu比の相関 (上流側)

- ・30mの施工ブロック毎に明かり部（最終次数）と監査廊部でのルジオン値を対比すると、約80%以上の割合で監査廊部ルジオン値が小さい（図-20）。

監査廊部のルジオン値が小さくなる現象は、明かり部に比べて監査廊部は施工深度が若干深いためルジオン値は小さくなりやすい他、監査廊周辺の透水性が低下し、透水性が高かった箇所ほどその傾向が大きいことを示している。したがって、監査廊コンクリートや堤体盛土荷重により透水性の要因である割れ目が縮小したものと推察した。

(3) カーテングラウチング

カーテングラウチングの注入仕様は、当初仕様に対して改良目標値の変更に伴い見直しを行い、注入圧を表-6のタイプⅡのように設定し、左右岸リム部～洪水吐き部の施工を行った。また、洪水吐き部施工途中段階では改良を行いタイプⅢの注入圧に変更した。

施工結果を分析し、次の事項が判明した。

- ・左岸リム部は、限界圧力を大きく上回るステージが発生し、単位セメント注入量が300kg/m以上となる大量注入が生じた。
- ・右岸リム部では、注入圧力が初期に規定圧力に到達した後に直ちに減少し、しばらく規定圧に達しない状態が続いた後に規定圧に到達し、注入流量（流速）が減少する注入パターンが多く認められた（図-21）。これは注入により長時間加圧を続けると圧力に耐えず、割れ目が開口し減圧したものと考えられる。
- ・洪水吐き部では、右岸リム部に比べ、5～8ステージにおける“単位注入セメント量”が明瞭に増大する傾向が認められた（図-22）。この原因は5ステージ以下に規定注入圧に比べて限界圧力の小さいゾーンが分布していたため（図-23）、割れ目を開口させた過大な注入が生じたと推定される。

表-6 カーテングラウチング注入圧の変更

ステージ	当初仕様	左右岸リム部 洪水吐き部	洪水吐き部 (H17.7/23以降) 本体基礎部
タイプ	I	II	III
1	0.30	0.25	0.25
2	0.45	0.35	0.35
3	0.60	0.45	0.45
4	0.70	0.50	0.45
5以降	0.95	0.55	0.45

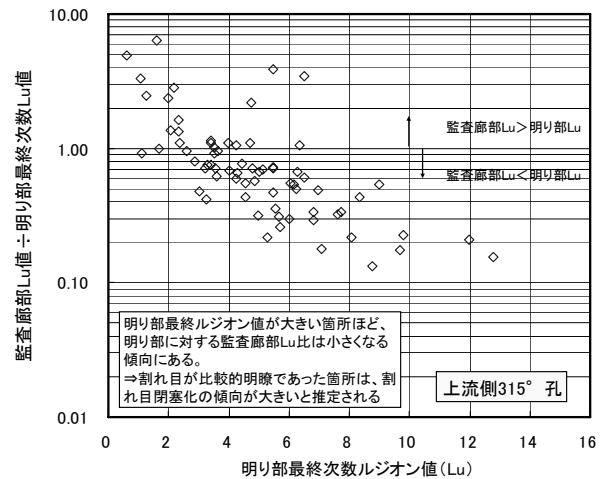


図-20 明かり部最終次数Lu値と監査廊部Luの相関（ブロック平均値）

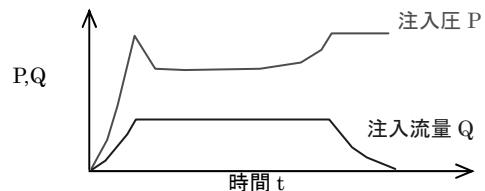


図-21 特異な注入パターン

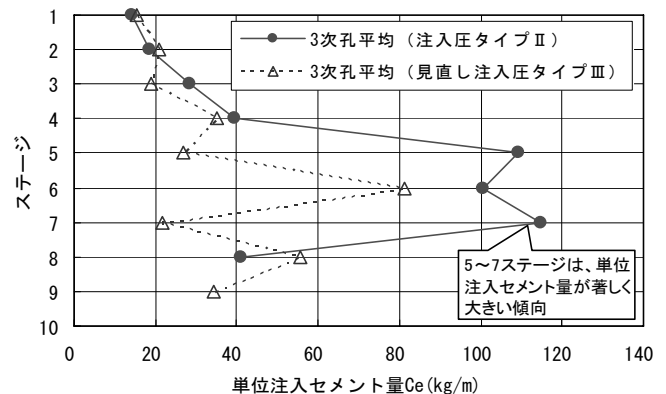


図-22 洪水吐き部3次孔平均単位注入セメント量

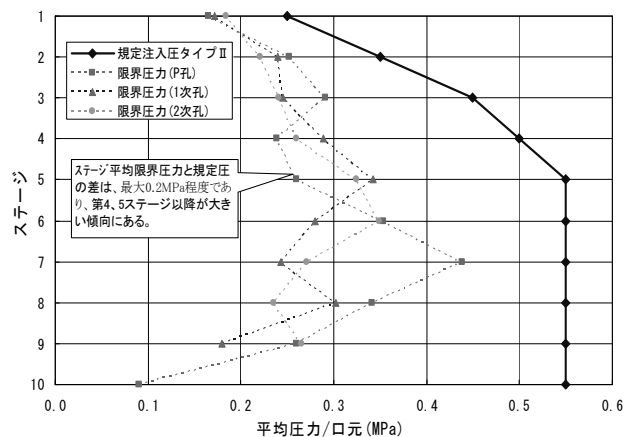


図-23 洪水吐き部ステージ別平均限界圧力

以上より,洪水吐き部施工途中段階から 3 ステージ以深の規定注入圧の見直しを行い $P=0.45\text{MPa}$ 一定とした(タイプⅢ)。また,限界圧力が発生した場合の注入圧力は,規定圧力変更を考慮して限界圧力+ 0.1MPa (\leq 規定注入圧)とした。

見直した注入圧(表-6 のタイプⅢ)に基づき,残りの洪水吐き部及び本体基礎部の施工を行った結果,追加孔が多発する傾向は特に認められず,かつ注入圧力を抑制した 4 ステージ以深において,過大な注入を抑制することができた。

6. まとめ

留萌ダムにおけるグラウチング工の合理化項目は以下のとおりである(前述の項目以外も含む)。

- (1) コンソリデーショングラウチング
 - ・孔配置の合理化(最小規定孔間隔の拡大)
- (2) 明り部ブランケットグラウチング
 - ・孔配置の合理化(最小規定孔間隔の拡大)
- (3) 監査廊部ブランケットグラウチング
 - ・注入配合の高濃度化
 - ・施工深度の短縮
- (4) カーテンググラウチング
 - ・地盤特性を踏まえた水押し試験仕様及び評価

方法の設定

- ・改良目標値の見直し,及び透水性評価の精度向上に伴う改良深度の短縮
- ・H/2 以深の規定孔間隔の拡大(2次孔規定孔)
- ・3次孔深度の短縮

留萌ダムでは,グラウチングの合理化施策により,当初計画に対して事業費ベースで約 3 億円のコスト縮減(縮減率約 29%)を図ることができた。

留萌ダム建設工事に多大なるご指導,ご支援をいただきました関係各位にこの場を借りて深く謝意を表すとともに,今後も留萌ダムの管理において,引き続きご高配を賜りましますよう,お願い申し上げます。

土木研究所の関係者にはグラウチング施工に関わる種々の技術指導を頂いた。重ねて感謝を申し上げたい。

参考文献

- 1) 山口 嘉一, ほか: 針貫入試験によるダムの軟岩基礎の設計強度検証, 応用地質, Vol.46, No.1, PP.20-27, 2005
- 2) 松本徳久・山口嘉一: フィル堤体の盛土に伴う基礎岩盤の変形と透水性の変化, 土木学会論文集,, No.370, PP.281-290, 1986
- 3) 財団法人 国土技術研究センター編: グ라우チング技術指針・同解説, 大成出版社, 2003

留萌ダムにおけるグラウチングの合理化施策 ～堆積軟岩に適した施工仕様とその検証

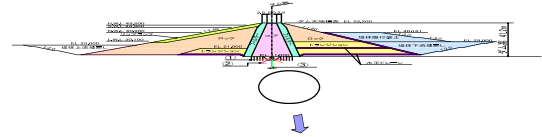


北海道開発局 留萌開発建設部留萌開発事務所 吉田 博志
北海道開発局 留萌開発建設部留萌開発事務所 長原 寛
日本工営株式会社 札幌支店 森 貴信 ※

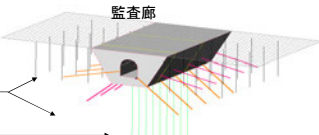
1. 留萌ダムの概要

形式	中央コア型ロックフィルダム
堤高	41.2m
堤頂長	440m
堤体積	1,224,800m ³

ダム標準断面図



- ① 明り部ブランクグラウチング
- ② 監査廊部ブランクグラウチング
- ③ カーチンググラウチング

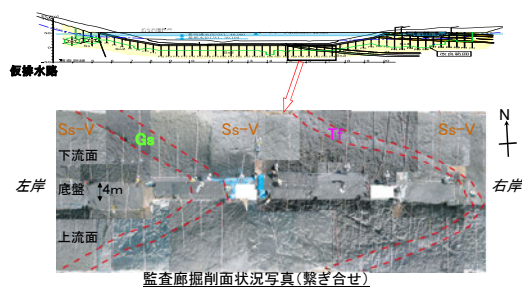


2. 留萌ダムの地質概要【地質】

■ 基盤: 新第三紀鮮新世の幌加尾白利加層

地質区分	
軟弱粘土層 (Ss-V)	
粘土層 (Ss)	
粘質砂層 (Ss-f)	
砂質粘土層 (Ss-V)	

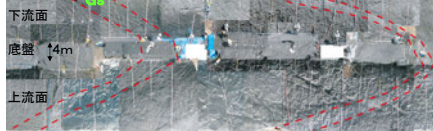
P孔施工後の地質図



左岸

右岸

監査廊掘削面状況写真(繋ぎ合せ)

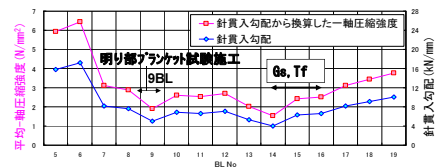
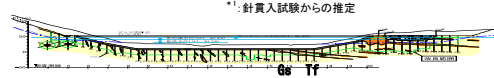


2. 留萌ダムの地質概要【強度特性】

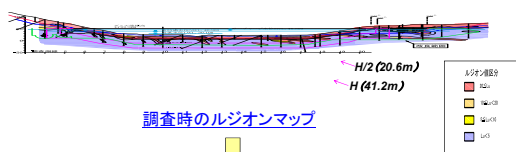
岩級区分	換算一軸圧縮強度 ^{**}
CLh	0.6~5.0N/mm ²
CLt	0.2~4.0N/mm ²
CLs, Tf	0.1~1.7N/mm ²

** 針貫入試験からの推定

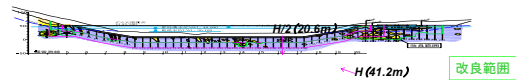
P孔施工後の岩級区分図



2. 留萌ダムの地質概要【透水特性】



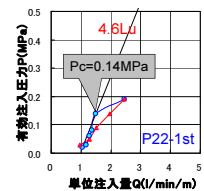
調査時のルジオンマップ



P孔施工後のルジオンマップ

3. グ라우チングの課題

- 限界圧力が0.1~0.5MPa (平均約0.2MPa)と小さい
- 高角度傾斜の割れ目が一部に発達し10Lu以上の透水部を形成
- ① 注入圧を高め過ぎると
 - ・・・割れ目が破壊し過大注入
- ② 低透水性のため孔配置を広げると
 - ・・・高角度割れ目への遭遇率が低下
 - ⇒ 軟岩に適した施工仕様が必要



河床部P222孔1stコア写真(Ss-V)

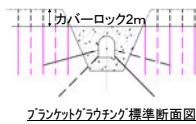


左岸アバット部監査廊下流壁

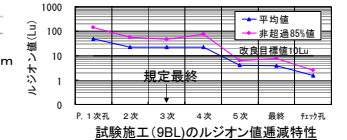
4. 効果的な孔配置及び施工深度 【明り部ブランケットグラウチング(1/3)】

■9BLにて試験施工を実施。

■5次孔において改良目標10Lu(非超過率85%)に到達。



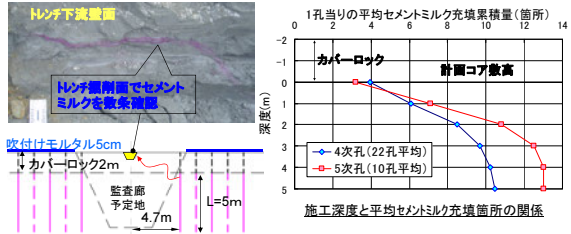
項目	最初計画	見直し
改良目標値	・10Lu (非超過率85%)	同左
孔配座	・3.0m格子, 規定最終孔3次 (最小孔間隔1.5/2m)	3/2m格子, 規定最終孔3次 (最小孔間隔3.0m)
施工深度	・5m	同左
注入圧	・0.15MPa	同左
注入速度	・2ℓ/min/m	同左



【明り部ブランケットグラウチング(2/3)】

<試験施工結果を踏まえた評価>

- ① 監査廊施工前のため注入範囲が広く注入効率が悪い
- ② 注入孔から約4.7m離れたトレンチ面にてセメントミルクを確認
- ③ 4次孔、5次孔のセメントミルクは、深度3m以下に全体の約94%が



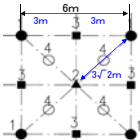
【明り部ブランケットグラウチング(3/3)】

<施工仕様の決定>

- 本施工は、試験施工と同様の孔配置とした。
- 軽石凝灰岩・海緑石砂岩(Tf・Gs部)は軟質であり、グラウタビリティが悪いと予想。
- ⇒孔配置は3m格子・規定4次孔

<施工の検証>: 3~4次孔にて所定改良目標に到達。各ゾーンの追加孔発生率は約3割以下

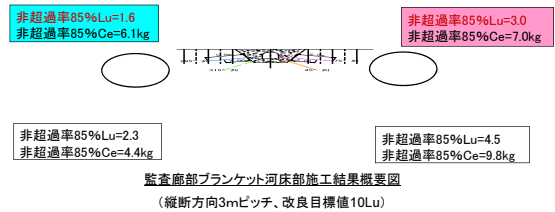
ゾーン	規定孔数	追加孔発生率
3次孔規定		
左岸部	96	8%
河床部	405	27%
右岸部	96	4%
4次孔規定		
河床(Gs・Tf部)	176	9%
全体	773	17%



4. 効果的な孔配置及び施工深度

【監査廊部ブランケットグラウチング(1/2)】

- 明り部ブランケットと重複する孔は施工深度を3mに短縮できないか? <見直し案>
- ⇒同一孔にて施工深度を変えて水押し試験(試験施工8孔)

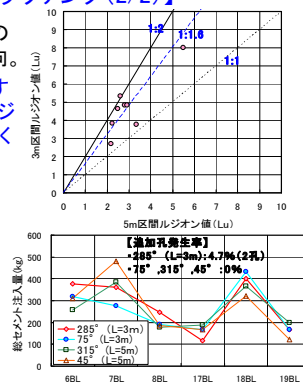


【監査廊部ブランケットグラウチング(2/2)】

- 3m区間Luは、5m区間Luの平均約1.6倍大きくなる傾向。
- ⇒着岩部付近に透水を規制する割目が存在し、ステージ長分(5m÷3m≒1.6)大きくなると推定

<施工の検証>

3mに変更した左右岸アバットのブロック総セメント注入量は5m区間と同程度、追加孔発生率は4.7%



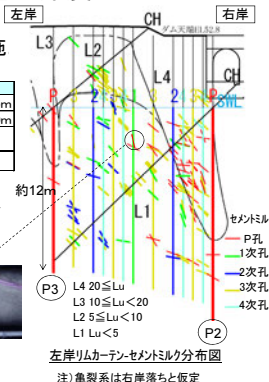
4. 効果的な孔配置及び施工深度

【カーテングラウチング(1/2)】

- 左右岸リム部で試験施工を実施
- <試験施工仕様>

区間	改良目標値	規定最終次数	孔間隔
0~H/2	5Lu	3次	1.5m
H/2以深	10Lu	2次	3.0m
注入圧	1st:0.25MPa, 2st:0.35MPa, 3st:0.45MPa		
流速	2ℓ/min/m		

- 次数別に着色したセメントミルクを注入しコア観察

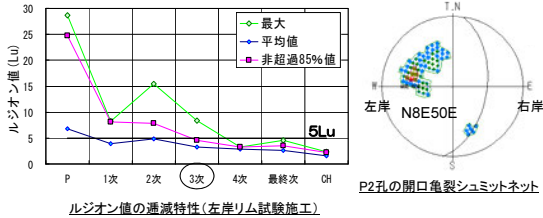


【カーテングラウチング(2/2)】

■試験施工の結果、3次孔にて改良目標値(5Lu,非超過率85%)に到達。

■P孔セメントミルク到達：平均3m,最大6m(1次孔地点)

⇒高角度傾斜の透水性亀裂に対して孔間隔1.5mで改良可能、施工仕様は妥当

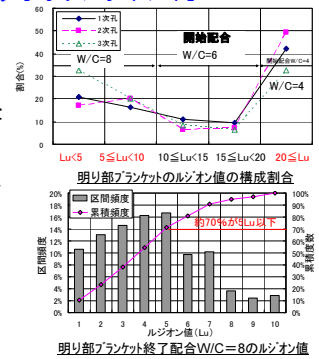


5.岩盤特性に応じた注入仕様と施工の検証
【監査廊部ブランケットグラウチング(1/3)】

■明り部ブランケットグラウチングの施工結果から、

①ルジオン値は10Lu以下と20Lu以上の割合が多い。

②終了配合W/C=8となるルジオン値は約70%(大部分)が5Lu以下



【監査廊部ブランケットグラウチング(2/3)】

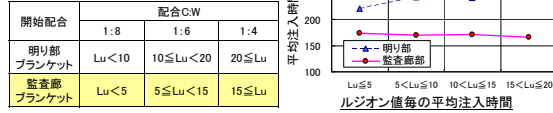
③15~20Lu は約90%以上がW/C=4以上の配合で終了。

⇒開始配合基準を高濃度化する変更

<施工の検証>

■追加孔が多発する現象は認めれない。

■平均注入時間は、明り部よりも短くなる傾向。



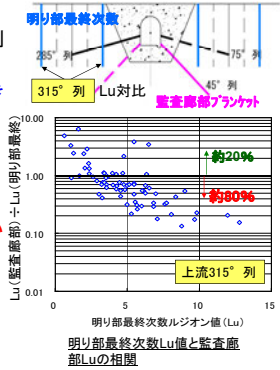
【監査廊部ブランケットグラウチング(3/3)】

■明かり部の最終次数孔と同列の監査廊部315°列及び45°列(1,2次孔)のルジオン値を対比

⇒明かり部最終ルジオン値が大きいほど、Lu(監査廊部)÷Lu(明り部最終)が小さい。

<原因>

- 監査廊部のグラウト深度が深い
- 監査廊部コンクリートや堤体盛土荷重により割れ目が閉塞した可能性



6.基礎処理工のコスト削減

項目	合理化施策	設計時	施工後		縮減率 (%)
		事業費 (百万円)	事業費 (百万円)	事業費 (百万円)	
コンソリ	改良範囲、規定孔配置の見直し	57	17	40	70.2
明り部ブランケット	規定孔配置の見直し	277	209	68	24.5
監査廊部ブランケット	孔深度の見直し	143	128	15	10.5
カーテングラウチング	改良範囲、規定孔配置の見直し	558	383	175	31.4
合計		1,035	737	298	28.8

END

ご清聴有難うございました。

森吉山ダムカーテングラウチング合理化施工 の取り組み

阿部 光秀¹ 川村 健弘²

森吉山ダムのカーテングラウチングは、平成15年2月から施工が開始され平成17年度までに完了させている。その間、止水ラインの大部分が低透水でありセメント注入量が少ないこと、当初、高透水が想定されていた左岸および河床部も低透水帯であることなどが判明した。これらの状況を踏まえ、カーテングラウチングの合理化施工として、①無段階水押し試験、②ロングステージ注入、③施工深度の見直しなどに取り組んできた。その概要について報告するものである。

キーワード：カーテングラウチング、無段階水押し、ロングステージ注入、施工深度の見直し

1. はじめに

森吉山ダムは、秋田県北部の米代川水系阿仁川の右支川、小又川に建設された中央コア型ロックフィルダムである。ダムは、洪水調節、既得用水の安定供給と河川環境保全のための流量確保、かんがい用水及び水道用水の補給並びに発電と5つの役割を果たす多目的ダムである。ダム事業は、昭和48年に実施計画調査を開始し、昭和61年に建設に着手している。平成22年度には試験湛水を終了させおり平成24年度からは管理に移行する予定である。

本報告は、森吉山ダム建設において基礎処理(カーテングラウチング)の合理化施工に取り組んできたその概要を紹介するものである。

2. ダムの概要

ダムの規模は、表-1に、ダム平面図及び堤体標準断面図は図-1～2に示すとおりである。

3. 地質概要

ダムサイトの地質(図-2)は、火山礫凝灰岩成層部(Tb2)、同塊状部(Tb1)及び泥岩(SMs)の互層を主体とし、下部に安山溶岩(An)が分布し、一部貫入岩である粗粒玄武岩(Do)が介在する。全体的には難透水性であるが、左右岸リム部や河床部においては、断層等が狭在し、高角度亀裂箇所では一部に高透水性を示す箇所もみられる。

4. カーテングラウチングの仕様

森吉山ダムにおけるカーテングラウチングの仕様は、下記に示すとおりである。

- 改良目標値：0～40m 迄 5ルジオン(H^{*}/2相当まで)
40～85m 7ルジオン(H相当まで) *Hは堤高
- 孔配置：3m間隔 単列配孔
- 規定孔：2次孔
- 施工時期：コア盛立高さ15m以上完了後
- 注入規定：圧力0.3～1.0MPa

5. 合理化施工の試み

カーテングラウチングは、H15年2月から施工を開始しており、高透水性が懸念されていたリム部並びに河床部については、H17年度までに完了させている。また、カーテングラウチング施工過程において、止水ラインの大部分が低透水性を示し、セメント注入量も少ない結果が得られた。特に左右岸アバットは、火山礫凝灰岩(Tb1)及び凝灰岩(Tb2)が広範囲に分布し、低透水であることが確認されたため、基礎処理において懸念される問題が少ないと判断した。

それを踏まえて、以下の項目によるカーテングラウチング施工の合理化を図ることとした(図-3)。

- ①無段階水押し試験
- ②ロングステージ注入(2ステージ一括施工)
- ③施工深度の見直し(H/4深度以深の省略)

¹国土交通省 東北地方整備局 河川部 河川工事課、ダム係長

²国土交通省 東北地方整備局 森吉山ダム工事事務所調査・品質確保課 調査係長

表-1 ダムの規模

ダム諸元	堤頂標高	EL 183.9m
	ダム高	89.9m
	堤頂長	786.0m
	堤体積	5,850千m ³
貯水池諸元	流域面積	248.0km ²
	湛水面積	3.2km ²
	総貯水容量	78,100千m ³
	有効貯水容量	68,100千m ³
	堆砂容量	10,000千m ³

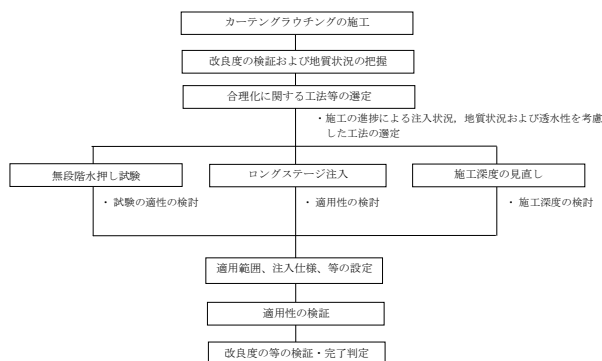


図-3 合理化施工の取り組みの経緯

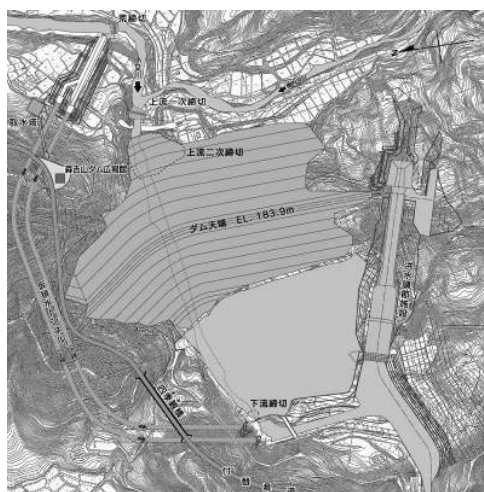


図-1 ダム平面図

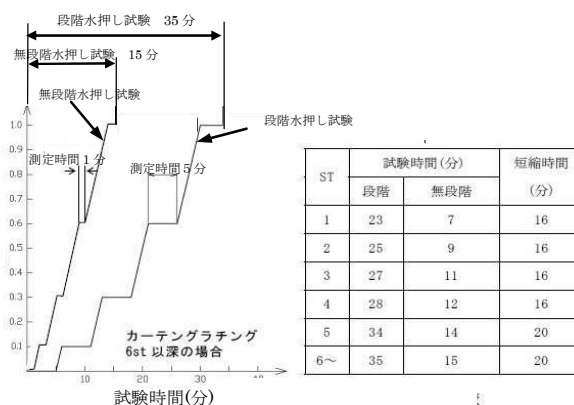


図-4 水押し試験時間の比較

表-2 無段階水押し試験の仕様

ステージ	最大注入圧力 (MPa)	無段階水押し (計測時間 1分)
1	0.3	0→0.1→0.2→0.3
2	0.5	0→0.1→0.3→0.5
3	0.7	0→0.1→0.3→0.7
4	0.8	0→0.1→0.3→0.8
5	0.9	0→0.1→0.3→0.5→0.9
6~	1.0	0→0.1→0.3→0.6→1.0

*昇圧速度：0.1MPa/min,ただし、限界圧力が発生した場合は昇圧を中止

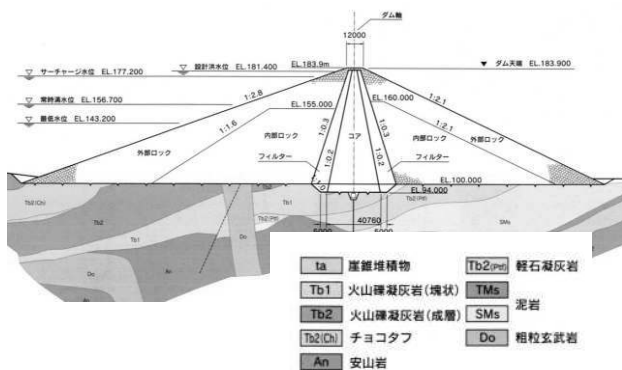


図-2 堤体標準断面図

5.1 『無段階水押し試験』

(1) 試験概要

無段階水押し試験は、注入圧力を連続的に昇圧させながら、その注入圧力に応じた注入量を連続的に測定することで時間短縮を図る試験法である。

森吉山ダムでは、カーテングラウチングで稼働中のグラウト管理システムを変更せず、既存の設備による測定時間の短縮を図るため、測定時間 5 分間を 1 分間に

短縮する手法で水押し試験を行った(図-4)。

この方法で水押し試験を行った場合、試験時間を 16~20 分程度短縮できると見込まれた。

(2) 適用範囲

無段階水押し試験の適用は、基礎岩盤の透水性を念入りに把握する必要があるパイロット孔、チェック孔を除く一般孔(1次,2次,追加孔)の全ステージを対象とした。但し、先行するパイロット孔において 20Lu を超える高透水域がブロック全体に分布することが確認された場合は適用外とした。

なお、無段階水押し試験の仕様のうち注入圧力段階は、通常の水押し試験と同じとし、表-2 に示すとおりとした。

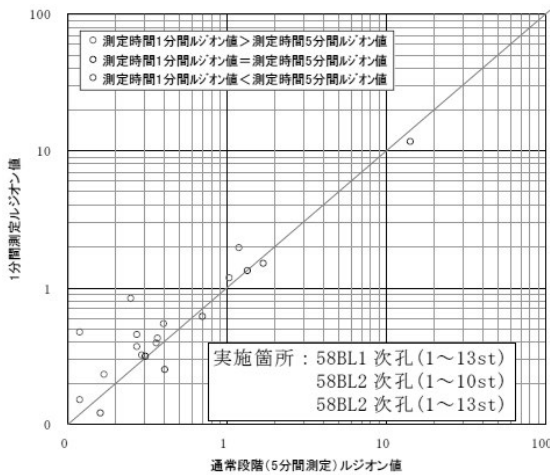


図-5 計測 5 分間と 1 分間とのルジオン値の関係

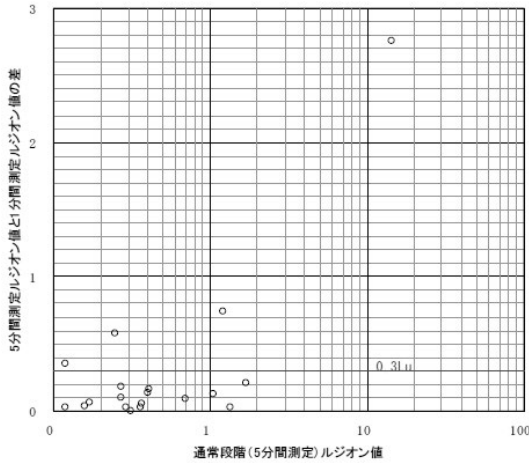


図-6 計測 5 分間と 1 分間とのルジオン値の差

(3) 適用性の検証

無段階水押し試験を実施した場合、既往の他ダムの実績からは、通常の水押しの結果に比べてルジオン値がわずかに大きくなる傾向にあることが示唆されている。¹⁾

無段階水押し試験の採用にあたっては、通常の水押し試験の結果を用いて、圧力測定初期の 1 分間のデータによるルジオン値と通常段階(圧力安定後 5 分間の測定)によって求められるルジオン値を比較し、適用性を検証した。

比較の結果、測定 1 分間のルジオン値は、通常の段階水押し試験のルジオン値に比べてやや大きくなる傾向にあることが(図-5)わかった。低透水データでは、大半が誤差 0.3Lu 以下と差が非常に小さい(図-6)。よって、測定時間を 1 分間としても透水性の過大評価の問題はないと判断している。

(4) 無段階水押し試験の妥当性評価

無段階水押し試験の妥当性評価は、図-7 に示すフロー

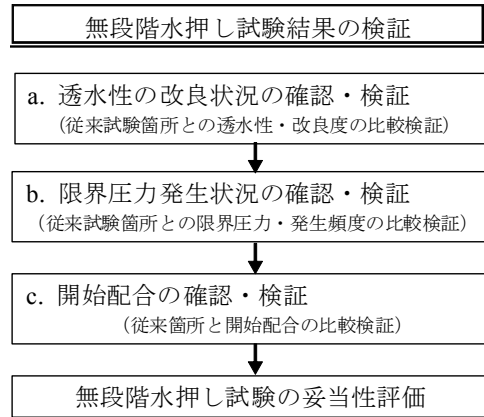


図-7 無段階水押し試験の検討フロー

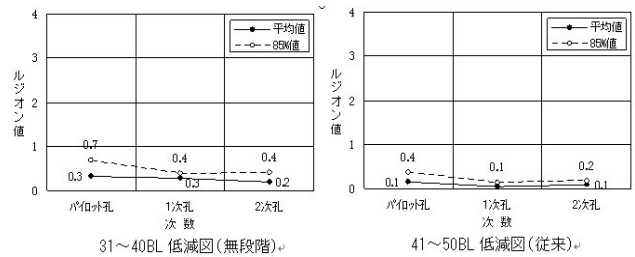


図-8 ルジオン値低減図

表-3 限界圧力発生率

		1次孔	2次孔	合計
31-40BL (無段階)	全データ数	99	199	298
	限界圧力のみ発生	9 (9%)	19 (10%)	28 (9%)
	降伏圧力発生	3 (3%)	4 (2%)	7 (2%)
計		12 (12%)	23 (12%)	35 (12%)
41-50BL (従来)	全データ数	84	167	251
	限界圧力のみ発生	2 (2%)	10 (6%)	12 (5%)
	降伏圧力発生	0 (0%)	3 (2%)	3 (1%)
計		2 (2%)	13 (8%)	15 (6%)

に従って行った。

比較検証の対象範囲は、以下のとおりである。

【無段階水押し試験】
31~40BL(適用を開始した 40BL より左岸側)

【従来の段階水押し試験】
41~50BL(適用範囲に近接し同一地質条件)

a.透水性(ルジオン値)の改良状況の確認・検証

無段階水押し試験は、従来の試験に比べ各次数のルジオン値はわずかに大きい、非超過確率 85%ルジオン値はどちらも 1Lu を下回っている。また、最終次数孔である 2 次孔で改良目標値 5Lu を超過したデータは無く、追加孔は発生していない(図-8)。

b.限界圧力発生状況の確認・検証

限界圧力発生は、31~40BL の透水性が従来の段階水押し試験に比べてやや多い(表-3)。しかし、2 次孔のルジ

ン値は全て改良目標値以下で、回数によって低減する傾向がみられるため、1次孔の施工が2次孔に悪影響を及ぼしていないと判断している(図-8)。

c.開始配合の確認・検証

無段階水押し試験の開始配合は全て 1:8 であり、従来の施工と同じであることから、問題ないと判断した(表-4)。

5.2 『ロングステージ注入(2ステージ一括施工)』

(1) 施工概要

ロングステージ注入は、通常の1ステージ5mの注入に対し、2ステージを一括として10mのステージ注入によりコスト削減を図るものである。森吉山ダムでは、2ステージ一括注入の方法として水押し試験を5m毎の2回に分けて実施した後、10m一括注入する方法をとっている。

適用箇所については、既往、他ダムにおける適用事例から以下の条件を満足する箇所とした。

- ①比較的低透水であること。
- ②注入圧力が比較的高圧にできること。
- ③改良範囲を設定するパイロット孔、追加孔を判定する設計最終次数孔には適用しないこと。

表-4 開始配合実績

	開始配合	1:8	1:6	1:4	備考
	(Lu値)	<10	10~20	20≦	
31~40BL	1次孔	80	0	0	無段階水押し施工範囲
	2次孔	199	0	0	
41~50BL	1次孔	84	0	0	従来(段階)施工範囲
	2次孔	167	0	0	

(2) 適用基準

森吉山ダムのロングステージ注入は、前記の条件を踏まえて下記の適用基準により実施した。

a.適用深度

基礎岩盤浅部は、応力解放によるゆるみ等を考慮して注入圧力を低めに設定する必要があること。堤体コアに接するためより丁寧な施工が求められること。また、基礎浅部で浸透流速が深部に比べて大きくなることなどから、孔深度 H/4 ≒ 20m(4st)までを標準の5mステージとし、ロングステージ注入は、5ステージ以深で適用することとした。

b.適用回数

改良範囲を設定するパイロット孔、追加孔を判定する2次孔及び追加孔では、注入状況を念入りに把握する必要があるためロングステージは適用しない。よって、ロングステージ注入は、1次孔及びチェック孔で適用した。

c.適用方法

高透水(改良目標値以上)もしくは降伏圧力(P-Q 折れ角 ≧ 45°)が発生した場合、注入量が増加する傾向があることから、水押し試験、透水試験(5mステージ標準)を実施し、対象とする上下ステージともに改良目標 5Lu 以下で降伏圧力が発生しない場合にロングステージ注入を適用することとした。

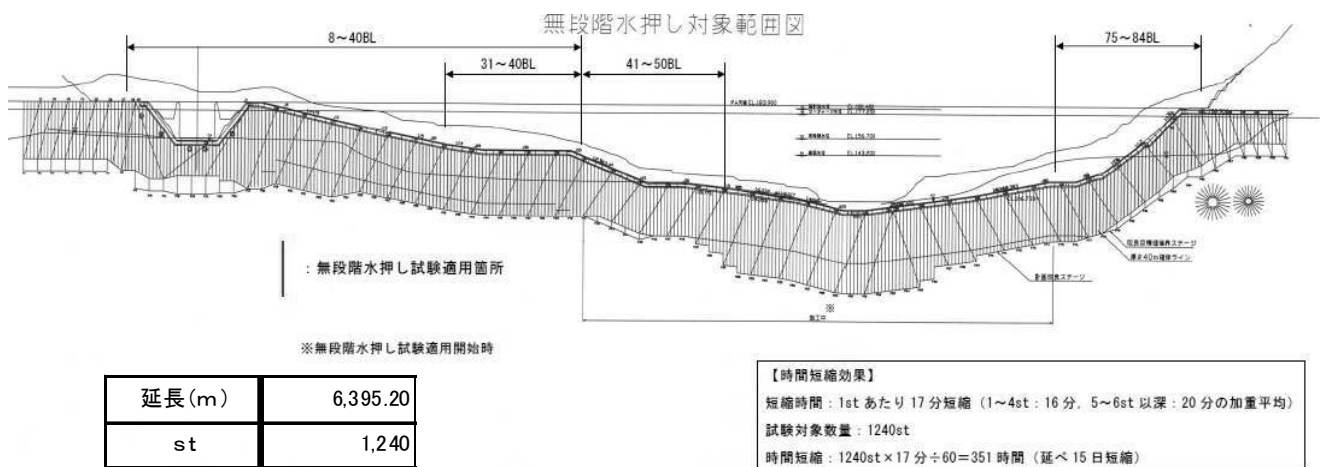


図-9 無段階水押し対象範囲及び数量

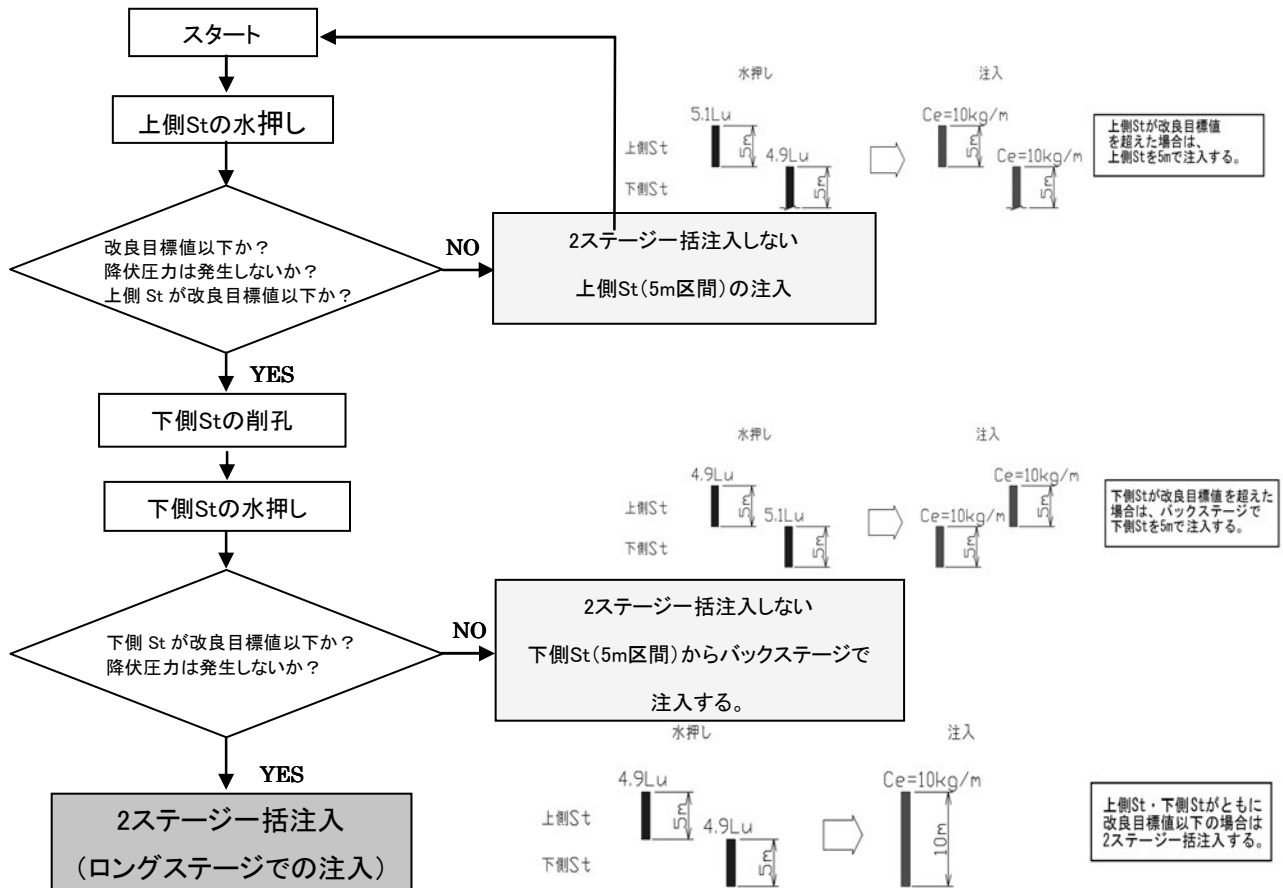


図-10 ロングステージ注入適用フロー

表-5 ロングステージ注入仕様

項目	ロングステージ注入仕様	
対象孔	適用深度：5ステージ以深 適用次数：1次孔、チェック孔	
対象工種	水押し：ステージ長 5m (標準ステージ) 注 入：ステージ長 10m (ロングステージ)	
ステージ長	ロングステージのステージ長は 10m を標準とする。 端部調整は、1ステージ 12.5m を最大として端部調整する。	
適用ステージ	5st～最終 st	
注入速度	4ℓ/分/m 以下	
注入圧力	注入圧力は標準ステージにおける上側のステージに合わせる。 注入圧力	
	標準ステージ	1 2 3 4 5 6 7 8 以降
	注入圧力 (MPa)	0.3 0.5 0.7 0.8 0.9 1.0 1.0 1.0 1.0
	ロングステージ	5st 7st 以降
	注入圧力 (MPa)	適用しない 0.9MPa 1.0MPa
	水押し試験時に降伏圧力(P0曲線の折角 45°以上)が確認された場合は、注入圧力を降伏圧力+0.1MPaとする。ただし、降伏圧力+0.1MPa≦0.3MPaの場合は、最低注入圧 0.3 MPaとする。	
配合切替基準	ステージ長を 2 倍の 10m にすることに伴い、規定注入量を標準ステージの 1.5 倍とする。開始配合は、上部、下部ステージのうち高いシルジョン値の方で設定する。 配合切替基準 (ロングステージ部：標準ステージの1.5倍)	
	配合	ℓu<10 10≦ℓu<20 20≦ℓu リーク発生時
	1:10	600ℓ -- -- --
	1:6	600ℓ 600ℓ -- --
	1:4	600ℓ 600ℓ 600ℓ --
	1:2	900ℓ 900ℓ 600ℓ --
	1:1.5	900ℓ 900ℓ 900ℓ 600ℓ
	1:1	2,400ℓ 3,000ℓ 3,900ℓ 1,200ℓ
	1:0.8	-- -- -- 4,200ℓ
	計	6,000ℓ 6,000ℓ 6,000ℓ 6,000ℓ
完了基準	注入圧力が規定圧力を保持し、注入速度が 0.1ℓ/min/m(1ℓ/分/m)に達した時点で注入完了とする。	

なお、ロングステージ注入適用フローを図-10 に、注入仕様を表-5 に示す。

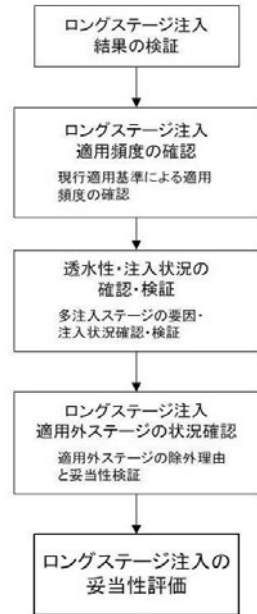


図-11 ロングステージ注入妥当性検討フロー

(3) 適用結果の検証

適用結果の検証は、左岸側の 28～40BL の施工状況をもとに行った。妥当性検討フローは、図-11 に示すとおりである。

a. ロングステージ注入適用頻度の確認

ロングステージ注入を採用した施工数量を表-6に示す。適用基準により、1次孔で96%、チェック孔で77%と大半のステージで採用された。

b. 透水性、注入状況の確認・検証

ロングステージ注入を採用した全データの透水性及び注入量の結果は表-7に示すとおりであり、1次孔は、1Lu以下の極めて低透水を示し、単位注入セメント量は10kg/m以下が80%と注入量も少ない。また、チェック孔においては、全データとも1Lu以下、単位注入セメント量は10kg/m以下であった。

表-6 ロングステージ注入適用ステージ数

	1次孔	チェック孔
施工範囲	28~40BL	32~40BL
孔数	13	5
適用対象ステージ数	52	31
ロングステージ注入実施数	50	24
適用率	96%	77%

表-7 ロングステージ注入の透水性と注入量

	ルジオン値			計
	0~1Lu	1~2Lu	2~5Lu	
1次孔	48 (96%)	0 (0%)	2 (4%)	50
チェック孔	24 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	24

	単位注入セメント量 (kg/m)					計
	0~10	10~30	30~50	50~100	100~	
1次孔	20 (80%)	0 (0%)	1 (4%)	2 (8%)	2 (8%)	25
チェック孔	12 (100%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	0 (0%)	12

c. ロングステージ注入適用外ステージの状況確認

適用基準を満足せずにロングステージ注入を適用しなかった箇所を表-8に示す。適用外の理由は全て降伏圧力が発生したため、透水性は全データとも1Lu以下であった。また、適用除外した5箇所中3箇所単位注入セメント量が185~610kg/mと多かったが規定量中断等はなく通常の5mステージで適正に注入完了できた。

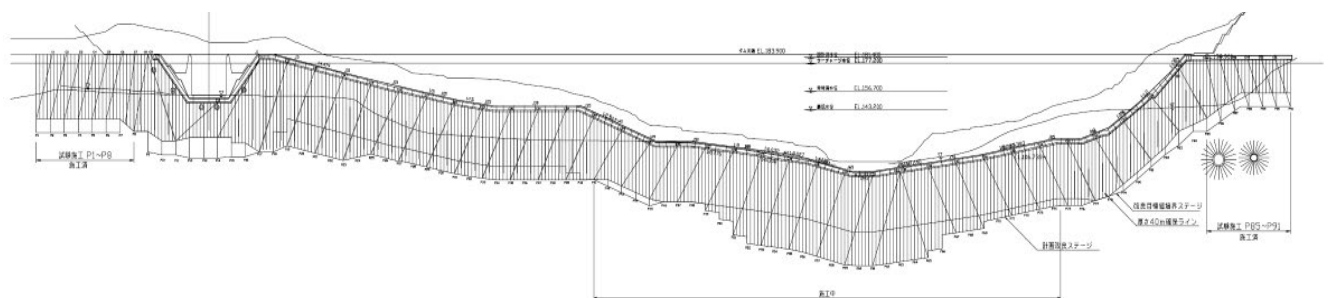
(4) 妥当性の評価

以上の検証結果から、施工対象範囲の1次孔の96%、チェック孔で77%の高い頻度でロングステージ注入の適用基準を満足していること、1次孔でロングステージ注入を実施した後の2次孔及びチェック孔において改良目標値を全て満足していることなどから、当該対象範囲での施工の妥当性が確認されたと言える。

ロングステージ注入の対象範囲は図-12に示すとおり、284stで実施しており、延べ約15日程度の施工時間が短縮された試算となる。

表-8 適用外ステージ注入状況

孔番	次数	ステージ	ルジオン値 Lu	降伏圧力 MPa	単位注入セメント量 kg/m	適用基準
1	33 K31090	1	7	1.06	480.3	降伏圧力発生
			8	0.69	8.9	-
2	32 K3C010	C	7	0.00	2.8	-
			8	0.00	609.6	降伏圧力発生
3	32 K3C010	C	9	0.33	185.1	-
			10	0.01	61.1	降伏圧力発生
4	36 K3C010	C	9	0.23	16.5	降伏圧力発生
			9	0.11	23.6	降伏圧力発生
5	40 K3C010	C	9	0.11	23.6	降伏圧力発生
			10	0.00	0.0	-



	次数	延長	ステージ
左岸	1次孔	791m	131st
	C孔	496m	92st
右岸	1次孔	199m	46st
	C孔	102m	15st
合計	1次孔	990m	177st
	C孔	598m	107st
	計	1588m	284st

	次数	延長	ステージ
左岸	1次孔	791m	131st
	C孔	496m	92st
右岸	1次孔	199m	46st
	C孔	102m	15st
合計	1次孔	990m	177st
	C孔	598m	107st
	計	1588m	284st

図-12 ロングステージ対象範囲

5.3 『施工深度の見直し (H/4 深度以深の省略)』

(1) 計画概要

作用水頭は高標高になるに従い小さくなること、また、当ダムの左右岩高標高部では低透水を示す範囲が連続することなどから透水性に応じて施工深度を浅く設定し合理化を図ることとした。

森吉山ダムのグラウチング計画では、最低改良深度を H/2 (40m) 程度としていたが、パイロット孔のルジオン値が改良目標値以下でかつ、1次孔の H/4 以浅のルジオン値も改良目標値 5Lu 以下であれば、1次孔以降は最低深度 H/4 に短くして打ち止めることとした。

(2) 施工深度見直し基準

施工深度見直し基準の適用は、表-9 に、施工深度の見直しフローは図-13 に示すとおりである。

なお、改良深度の見直しは、ハーフブロック(6m)毎に行い、基礎浅部の動水勾配が高い範囲については、確実に

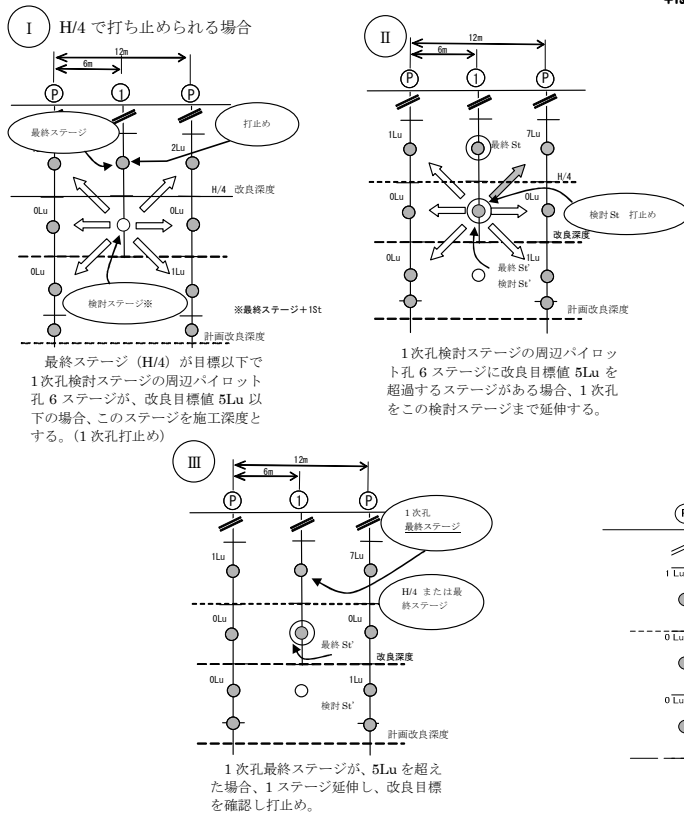


図-14 改良深度設定の模式図

浸透流速を抑制する必要があるため、深度見直し基準の適用は、H/4 深度以深とした。改良深度設定の模式図は、図-14 に示すとおりである。

(3) 適用実績

対象箇所は、左岸 8~12BL, 17~21BL, 右岸 80~84BL の全体で 15BL に適用した。施工深度見直し基準による適用実績は、表-10 に、適用範囲は図-15 に示すとおりである。

対象となる縮減ステージ数 231st に対し、縮減されたステージ数は 180st であり、全体で 78% の合理化を図ることができた。

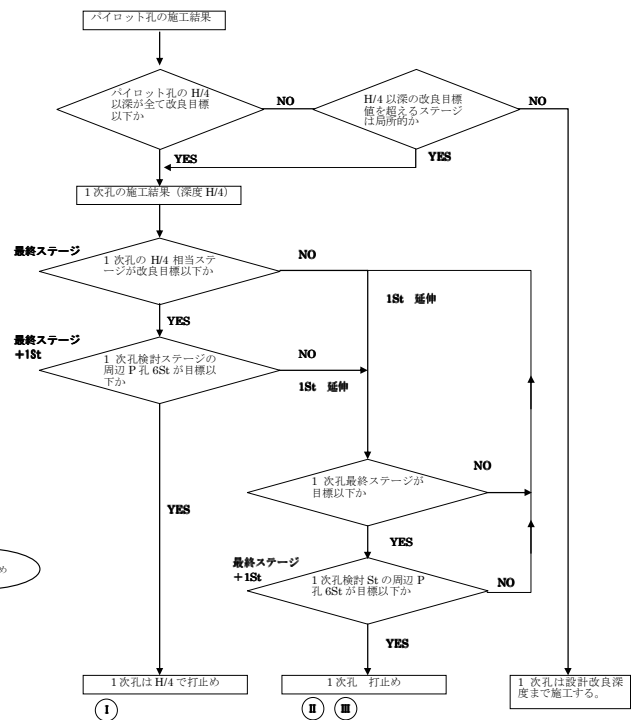
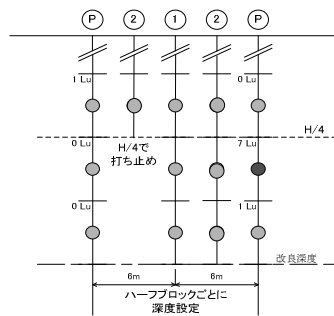


図-13 施工深度見直しフロー



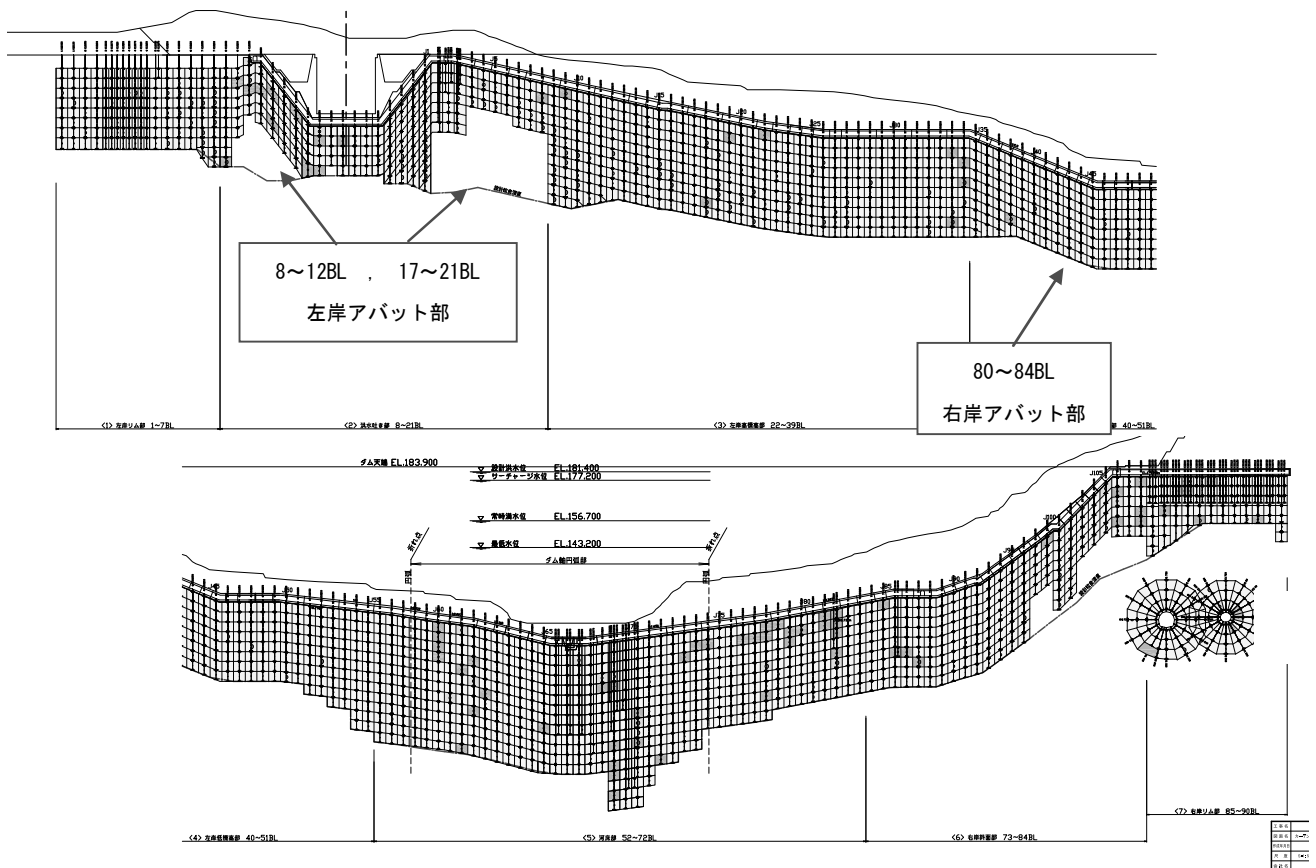


図-15 カーテングラウチング施工深度見直し範囲

	8BL	9BL	10BL	11BL	12BL	17BL	18BL	19BL	20BL	21BL	80BL	81BL	82BL	83BL	84BL	計
設計ステージ数 (一般孔)	30	33	30	18	15	39	38	36	36	36	27	27	27	27	27	446
施工ステージ数 (追加孔除く)	27	18	18	17	14	21	18	12	14	15	15	24	15	17	21	266
縮減ステージ数	3	15	12	1	1	18	20	24	22	21	12	3	12	10	6	180
縮減対象 ステージ数	18	15	12	4	3	21	26	24	24	24	12	12	12	12	12	231
縮減率	17%	100%	100%	25%	33%	86%	77%	100%	92%	88%	100%	25%	100%	83%	50%	78%

6. おわりに

森吉山ダムは、平成22年1月20日に試験湛水を開始して、同年12月6日にはサーチャージ水位に達し、平成23年1月20日に最低水位まで水位低下させ試験湛水を終了している。

試験湛水中における浸透流量については、サーチャージ水位において11.6 l/minと少ない状況であることから、適正な基礎処理がなされたと考えている。

参考文献

- 1) 無段階水押し試験実施に当たっての留意点 (ダム技術 Q&A), ダム技術, NO.234, pp84, 2006
- 2) 森吉山ダム基本設計会議資料, 基礎処理工, 東北地方整備局 森吉山ダム基本設計会議資料, 試験湛水, pp4-67~4-87, 2009

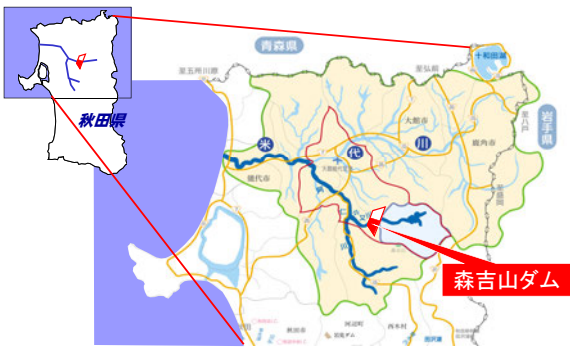
森吉山ダムカーテングラウチング合理化施工の取り組み



森吉山ダムカーテングラウチング合理化施工の取り組み

- 無段階水押し試験の実施
- 2ステージ一括注入（ロングステージ）の実施
- 施工深度の見直し（H/4深度以深の省略）

森吉山ダムの位置



森吉山ダム完成予想図

目的 5つの目的を持つ多目的ダム



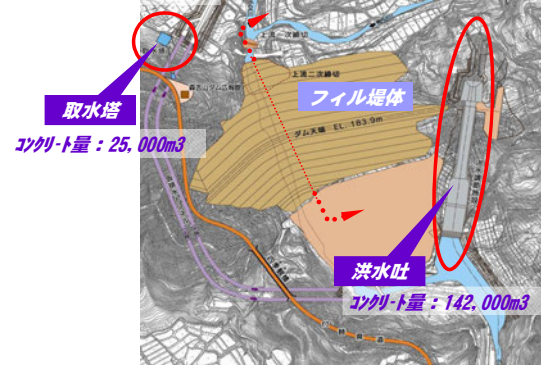
森吉山ダム完成予想図

規模 堤体積 585万m³
総貯水容量 7,810万m³

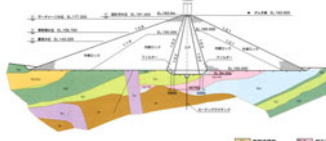
堤頂長: 786m

堤高: 89.9m

ダム堤体平面図



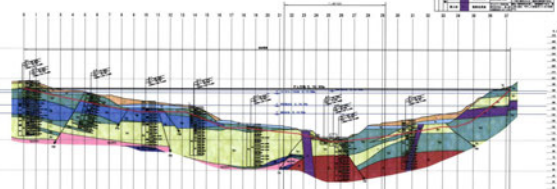
ダムサイト地質横断面図



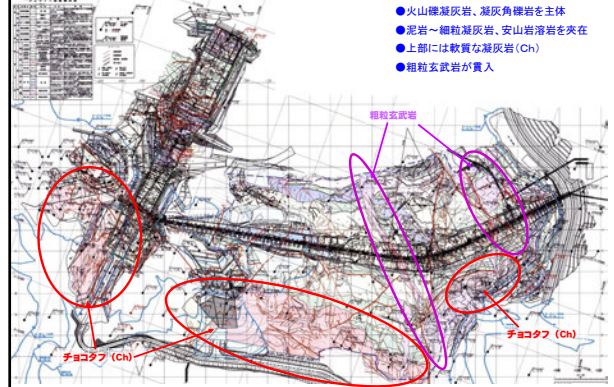
- 新第三紀中新世
- 火山礫凝灰岩、凝灰角礫岩を主体
- 泥岩～細粒凝灰岩、安山岩溶岩を夾在
- 上部には軟質な凝灰岩(Ch)
- 粗粒玄武岩が貫入

ダムサイト地質横断面図	
1	新第三紀中新世 火山礫凝灰岩、凝灰角礫岩
2	新第三紀中新世 泥岩～細粒凝灰岩、安山岩溶岩
3	新第三紀中新世 軟質な凝灰岩(Ch)
4	粗粒玄武岩
5	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
6	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
7	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
8	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
9	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
10	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
11	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
12	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
13	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
14	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
15	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
16	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
17	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
18	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
19	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
20	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
21	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
22	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
23	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
24	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
25	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
26	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
27	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
28	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
29	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
30	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
31	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
32	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
33	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
34	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
35	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
36	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
37	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
38	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
39	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
40	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
41	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
42	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
43	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
44	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
45	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
46	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
47	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
48	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
49	新第三紀中新世 凝灰質砂岩
50	新第三紀中新世 凝灰質砂岩

ダムサイト地質縦断面図

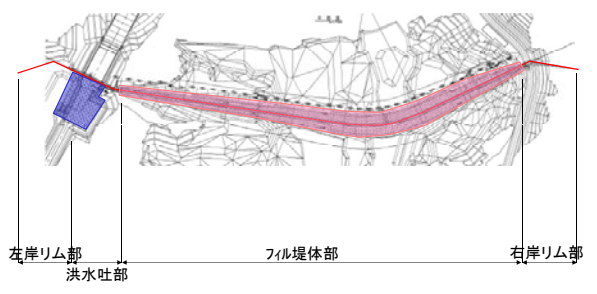


ダムサイト地質平面図

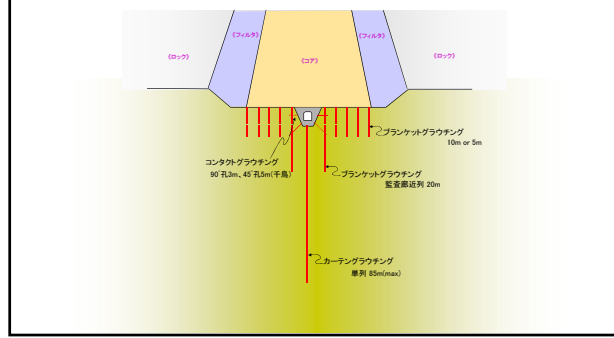


- 新第三紀中新世
- 火山礫凝灰岩、凝灰角礫岩を主体
- 泥岩～細粒凝灰岩、安山岩溶岩を夾在
- 上部には軟質な凝灰岩(Ch)
- 粗粒玄武岩が貫入

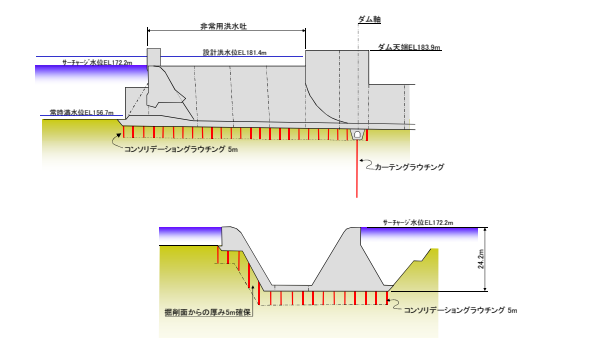
基礎処理の範囲



フィル堤体の基礎処理



洪水吐の基礎処理

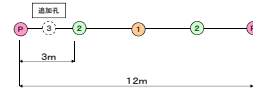


基礎処理の数量

工種	延長(m)	数量(st)	備考
コンソリデーション	1,322	24	
ブランケット	17,862	3,559	
コンタクト	1,754	430	
カーテン	21,469	4,222	リム部含む
補助カーテン	1,452	244	リム部のみ実施
全体	43,859	8,479	

カーテングラウチングの仕様

- 改良目標値：0～40m 5ルジオン
40～85m 7ルジオン
- 孔配置：3m間隔 単列配孔
- 規定孔：2次孔
- 施工時期：コア盛立高さ15m以上完了後
- 水押し規定：圧力0.3～1.0Mpa
速度4L/min/m以下
- 注入規定：圧力0.3～1.0Mpa
速度4L/min/m
但し、水押し時に降伏圧力が確認された場合は、
降伏圧力+ 0.1Mpaとする。



カーテングラウチングの合理化施工の試み

平成15年から平成17年度において施工したリム部と河床部について、

- 高透水と想定されていた左右岸リム部については、試験施工ヤードとして施工したが、Tb1及びTb2が広範囲に分布し、低透水であることが確認された。
- 河床部における粗粒玄武岩周辺の高透水については、確実な施工を実施済み。



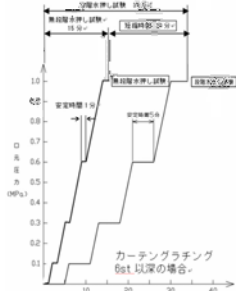
今後、施工する左右岸部は、大きな高透水ゾーンが無く、基礎処理の問題がないと考えられたので、合理化施工を実施。

【合理化の試み】

- ①無段階水押し試験の実施
- ②2ステージ一括注入（ロングステージ）の実施
- ③施工深度の見直し（H/4深度で深の省略）

無段階水押し試験（試験概要）

森吉山ダムにおいては、種差中のグラウチング管理システムを変更せず、既存の設備による測定時間の短縮、測定時間5分間を1分に短縮する簡易な手法での無段階水押し試験を採用。



ST	試験時間(分)		短縮時間(分)
	段階	無段階	
1	23	7	16
2	25	9	16
3	27	11	16
4	28	12	16
5	34	14	20
6~	35	15	20

【適用範囲】

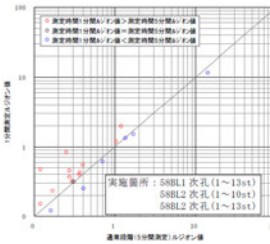
対象：1、2次孔、3次孔以降（追加孔）
P孔、C孔は通常の透水試験実施

【試験仕様】

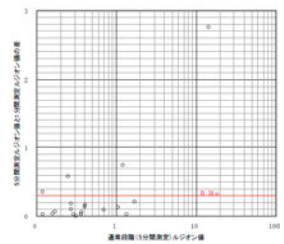
次序	圧力(MPa)	速度(L/min/m)	試験時間(分)
1	0.3	0-0.5	1-0.3-0.3
2	0.5	0-0.5	1-0.3-0.3
3	0.7	0-0.5	1-0.3-0.3
4	0.8	0-0.5	1-0.3-0.3
5	0.9	0-0.5	1-0.3-0.3
6~	1.0	0-0.5	1-0.3-0.3

無段階水押し試験（適用性の検証）

1分間と5分間のルジオン値を比較 → 測定1分間のルジオン値がやや大きくなる傾向。
5Lu以下の低透水の誤差 → 大半が0.3Lu以下と差が非常に小さい。



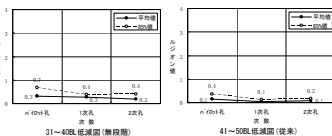
【測定5分間・1分間ルジオン値の関係】



【測定5分間・1分間ルジオン値の差】

無段階水押し試験（妥当性の検証）

- 無段階水押し試験結果の検証
- 透水性の改良状況の確認・検証
(従来試験箇所との透水性・改良度の比較検証)
- 限界圧力発生状況の確認・検証
(従来試験箇所との限界圧力・発生頻度の比較検証)
- 開始配合の確認・検証
(従来箇所と開始配合の比較検証)
- 無段階水押し試験の妥当性評価



【ルジオン値低減図】

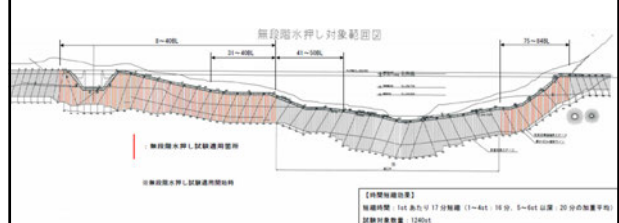
ST	圧力(MPa)	31~40Lu (低減部)		41~50Lu (従来)	
		初期	最終	初期	最終
31~40Lu	0.3	0	10 (10%)	0	20 (20%)
(準備)	0.5	3 (3%)	4 (4%)	3 (3%)	7 (7%)
	0.7	10 (10%)	12 (12%)	10 (10%)	18 (18%)
41~50Lu	0.3	0	10 (10%)	0	10 (10%)
(準備)	0.5	0 (0%)	3 (3%)	0 (0%)	3 (3%)
	0.7	0 (0%)	10 (10%)	0 (0%)	10 (10%)

【限界圧力発生率】

ST	圧力(MPa)	発生率 (%)			備考
		<1.0	1.0~2.0	2.0以上	
31~40Lu	0.3	0	0	0	無段階水押し施工範囲
(準備)	0.5	0	0	0	
	0.7	0	0	0	
41~50Lu	0.3	0	0	0	従来(準備)施工範囲
(準備)	0.5	0	0	0	
	0.7	0	0	0	

【開始配合実績】

無段階水押し試験（評価）



【試験実施概要】
試験時間：1stあたり17分間（1~4st：18分、5~6st以降：20分の計画平均）
試験回数：124回
試験箇所：1240st×17分×0.69=1211時間（約15日相当）

ST	圧力(MPa)	速度(L/min/m)	試験時間(分)	試験回数	試験箇所	試験結果
31~40Lu	0.3	0-0.5	1-0.3-0.3	124	1240st	0.3Lu以下
(準備)	0.5	0-0.5	1-0.3-0.3	124	1240st	0.3Lu以下
	0.7	0-0.5	1-0.3-0.3	124	1240st	0.3Lu以下
41~50Lu	0.3	0-0.5	1-0.3-0.3	124	1240st	0.3Lu以下
(準備)	0.5	0-0.5	1-0.3-0.3	124	1240st	0.3Lu以下
	0.7	0-0.5	1-0.3-0.3	124	1240st	0.3Lu以下

ロングステージ注入(施工概要)

【採用】

【適用範囲】
 対象: 1次孔(5st~最終st)
 C次孔(5st以降)
 但し、改良目標値以上、降伏圧力発生の場合は、標準ステージ施工
 改良範囲拡大のためのP孔、追加孔を判定する規定は標準ステージによる注入

【試験仕様】
 ●配合代替基準

標準ステージ	標準ステージ				ロングステージ			
	Lu<10	10≦Lu<20	20≦Lu	0=割	配合	Lu<10		
400L	400L				1.8	600L		
400L	400L				1.8	600L		
400L	400L	400L			1.4	600L		
400L	400L	400L			1.2	600L		
400L	400L	400L	400L		1.1	600L		
1600L	2000L	2000L	3000L		0.7	2400L		
-	-	-	2800L		1.6	-		
4000L	4000L	4000L	4000L		-	6000L		
						計		

●注入圧力(Mpa)

標準ステージ	1st	2st	3st	4st	5st	6st	7st	8st以降
注入圧力	0.3	0.5	0.7	0.8	0.9	1.0	1.0	1.0
ロングステージ	1st	適用しない						
注入圧力	-	適用しない						
					0.9			1.0

ロングステージ注入(施工概要)

ロングステージ注入(適用結果の検証)

ロングステージ注入結果の検証

ロングステージ注入適用標準による適用結果の検証

透水性・注入状況の確認・検証

多注入ステージの範囲・注入状況確認・検証

ロングステージ注入適用外ステージの状況確認

適用外ステージの除外理由と妥当性検証

ロングステージ注入の妥当性評価

施工区間	1次孔	チェック孔
29~44m	13	5
適用対象ステージ数	52	31
ロングステージ注入実施数	50	24
適用率	96%	77%

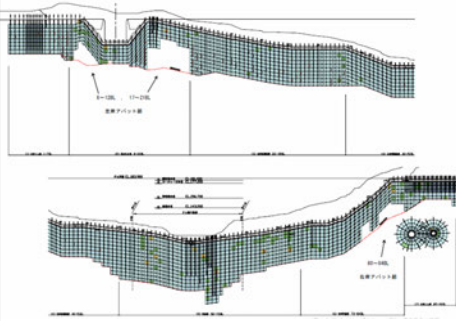
【ロングステージ注入適用ステージ数】

区間	適用ステージ数	計
29~44m	50	50
44~49m	2	2
49~54m	0	0
54~59m	0	0
59~64m	0	0
64~69m	0	0
69~74m	0	0
74~79m	0	0
79~84m	0	0
84~89m	0	0
89~94m	0	0
94~99m	0	0
99~104m	0	0
104~109m	0	0
109~114m	0	0
114~119m	0	0
119~124m	0	0
124~129m	0	0
129~134m	0	0
134~139m	0	0
139~144m	0	0
144~149m	0	0
149~154m	0	0
154~159m	0	0
159~164m	0	0
164~169m	0	0
169~174m	0	0
174~179m	0	0
179~184m	0	0
184~189m	0	0
189~194m	0	0
194~199m	0	0
199~204m	0	0
204~209m	0	0
209~214m	0	0
214~219m	0	0
219~224m	0	0
224~229m	0	0
229~234m	0	0
234~239m	0	0
239~244m	0	0
244~249m	0	0
249~254m	0	0
254~259m	0	0
259~264m	0	0
264~269m	0	0
269~274m	0	0
274~279m	0	0
279~284m	0	0
284~289m	0	0
289~294m	0	0
294~299m	0	0
299~304m	0	0
304~309m	0	0
309~314m	0	0
314~319m	0	0
319~324m	0	0
324~329m	0	0
329~334m	0	0
334~339m	0	0
339~344m	0	0
344~349m	0	0
349~354m	0	0
354~359m	0	0
359~364m	0	0
364~369m	0	0
369~374m	0	0
374~379m	0	0
379~384m	0	0
384~389m	0	0
389~394m	0	0
394~399m	0	0
399~404m	0	0
404~409m	0	0
409~414m	0	0
414~419m	0	0
419~424m	0	0
424~429m	0	0
429~434m	0	0
434~439m	0	0
439~444m	0	0
444~449m	0	0
449~454m	0	0
454~459m	0	0
459~464m	0	0
464~469m	0	0
469~474m	0	0
474~479m	0	0
479~484m	0	0
484~489m	0	0
489~494m	0	0
494~499m	0	0
499~504m	0	0
504~509m	0	0
509~514m	0	0
514~519m	0	0
519~524m	0	0
524~529m	0	0
529~534m	0	0
534~539m	0	0
539~544m	0	0
544~549m	0	0
549~554m	0	0
554~559m	0	0
559~564m	0	0
564~569m	0	0
569~574m	0	0
574~579m	0	0
579~584m	0	0
584~589m	0	0
589~594m	0	0
594~599m	0	0
599~604m	0	0
604~609m	0	0
609~614m	0	0
614~619m	0	0
619~624m	0	0
624~629m	0	0
629~634m	0	0
634~639m	0	0
639~644m	0	0
644~649m	0	0
649~654m	0	0
654~659m	0	0
659~664m	0	0
664~669m	0	0
669~674m	0	0
674~679m	0	0
679~684m	0	0
684~689m	0	0
689~694m	0	0
694~699m	0	0
699~704m	0	0
704~709m	0	0
709~714m	0	0
714~719m	0	0
719~724m	0	0
724~729m	0	0
729~734m	0	0
734~739m	0	0
739~744m	0	0
744~749m	0	0
749~754m	0	0
754~759m	0	0
759~764m	0	0
764~769m	0	0
769~774m	0	0
774~779m	0	0
779~784m	0	0
784~789m	0	0
789~794m	0	0
794~799m	0	0
799~804m	0	0
804~809m	0	0
809~814m	0	0
814~819m	0	0
819~824m	0	0
824~829m	0	0
829~834m	0	0
834~839m	0	0
839~844m	0	0
844~849m	0	0
849~854m	0	0
854~859m	0	0
859~864m	0	0
864~869m	0	0
869~874m	0	0
874~879m	0	0
879~884m	0	0
884~889m	0	0
889~894m	0	0
894~899m	0	0
899~904m	0	0
904~909m	0	0
909~914m	0	0
914~919m	0	0
919~924m	0	0
924~929m	0	0
929~934m	0	0
934~939m	0	0
939~944m	0	0
944~949m	0	0
949~954m	0	0
954~959m	0	0
959~964m	0	0
964~969m	0	0
969~974m	0	0
974~979m	0	0
979~984m	0	0
984~989m	0	0
989~994m	0	0
994~999m	0	0

【ロングステージ注入の透水性と注入量】

区間	適用ステージ数	計
29~44m	50	50
44~49m	2	2
49~54m	0	0
54~59m	0	0
59~64m	0	0
64~69m	0	0
69~74m	0	0
74~79m	0	0
79~84m	0	0
84~89m	0	0
89~94m	0	0
94~99m	0	0
99~104m	0	0
104~109m	0	0
109~114m	0	0
114~119m	0	0
119~124m	0	0
124~129m	0	0
129~134m	0	0
134~139m	0	0
139~144m	0	0
144~149m	0	0
149~154m	0	0
154~159m	0	0
159~164m	0	0
164~169m	0	0
169~174m	0	0
174~179m	0	0
179~184m	0	0
184~189m	0	0
189~194m	0	0
194~199m	0	0
199~204m	0	0
204~209m	0	0
209~214m	0	0
214~219m	0	0
219~224m	0	0
224~229m	0	0
229~234m	0	0
234~239m	0	0
239~244m	0	0
244~249m	0	0
249~254m	0	0
254~259m	0	0
259~264m	0	0
264~269m	0	0
269~274m	0	0
274~279m	0	0
279~284m	0	0
284~289m	0	0
289~294m	0	0
294~299m	0	0
299~304m	0	0
304~309m	0	0
309~314m	0	0
314~319m	0	0
319~324m	0	0
324~329m	0	0
329~334m	0	0
334~339m	0	0
339~344m	0	0
344~349m	0	0
349~354m	0	0
354~359m	0	0
359~364m	0	0
364~369m	0	0
369~374m	0	0
374~379m	0	0
379~384m	0	0
384~389m	0	0
389~394m	0	0
394~399m	0	0
399~404m	0	0
404~409m	0	0
409~414m	0	0
414~419m	0	0
419~424m	0	0
424~429m	0	0
429~434m	0	0
434~439m	0	0
439~444m	0	0
444~449m	0	0
449~454m	0	0
454~459m	0	0
459~464m	0	0
464~469m	0	0
469~474m	0	0
474~479m	0	0
479~484m	0	0
484~489m	0	0
489~494m	0	0
494~499m	0	0
499~504m	0	0
504~509m	0	0
509~514m	0	0
514~519m	0	0
519~524m	0	0
524~529m	0	0
529~534m	0	0
534~539m	0	0
539~544m	0	0
544~549m	0	0
549~554m	0	0
554~559m	0	0
559~564m	0	0
564~569m	0	0
569~574m	0	0
574~579m		

施工深度の見直し(H/4深度以深の省略)



	計
設計ステージ数 (一般孔)	446
施工ステージ数 (追加孔を除く)	266
縮減ステージ数	180
縮減対象 ステージ数	231
縮減率	78%

おわりに

1月20日に無事試験湛水を完了しました。



最高水位を迎え非常用洪水吐きからの
越流状況



最高水位時の管理庁舎と取水塔

重力式コンクリートダムの基礎グラウチングにおける合理化施工について

武田 悦男¹ 新屋 裕生² 古庄 龍悟³ 高力 雅人⁴

九州電力小丸川発電所は、宮崎県児湯郡木城町に位置する最大出力 120 万 kW の揚水発電所であり、発電所の下部調整池として建設した石河内ダムは、高さ約 50m の重力式コンクリートダムである。本ダムの基礎グラウチングは、より効果的・効率的な施工を行うために平成 15 年 7 月に改定されたグラウチング技術指針を反映した設計仕様で施工を実施するとともに、本ダムサイトの透水性状や改良特性を踏まえ、最適な施工とするため試験施工を行い、設計仕様の見直しを行った。ダム完成後の試験湛水における漏水量についても特に問題ない結果であり、今回行った基礎グラウチングにおける合理化施工の効果が検証された。

キーワード：基礎グラウチング、重力式コンクリートダム、カーテングラウチング、コンソリデーショングラウチング

1. 石河内ダムの概要

小丸川発電所は九州電力が宮崎県に建設した最大出力 120 万 kW(30 万 kW×4 台)の純揚水発電所であり、平成 11 年 2 月に工事着工し、平成 19 年 7 月に初号機、平成 23 年 7 月に最終号機が営業運転を開始した。小丸川中域に位置する石河内ダムは、ダム高 47.5m、堤頂長 185 m、堤体積 13 万 m³の重力式コンクリートダムであり、純揚水式発電所の下部ダムとしては流域面積が 329km²、設計洪水流量が 4,400 m³/s(200 年確率流量)と比較的大きく、堤体規模に対して大規模な洪水吐ゲートや減勢工を有している。ダム及び調整池の主要諸元を表-1、標準断面図を図-1 に示す。

2. 地質及び水理地質構造

石河内ダム調整池周辺は新生代古第三紀始新世～漸新世の四万十累層群日向層群の砂岩、頁岩が分布する。それらは砂岩を主体とする砂岩・頁岩互層の同斜構造となっており、厚さ 5～15cm の頁岩を挟む厚さ数 10cm～5m の砂岩が、河川横断方向（ダム軸方向）の走向で上流へ約 35° 傾斜して分布している。また、特に厚い頁岩として、層厚 15m 程度のものが右岸側ではダム天端標高付近に、左岸側ではダム高の中段付近に分布する（図-2）。

ダムサイトの岩盤は、比較的浅い深度から C_M級以上の良好な岩盤で、設計上考慮すべき断層も認められない。

ダムサイトの基礎岩盤の高透水性の成因は応力解放

によるもののみであり、深度方向に向かう程、透水性が小さくなっている（図-3）。

当ダムの水理地質上の特徴は次のとおりである。

①砂岩・頁岩が整然とした同斜構造をなしており、頁岩は割れ目が微細で難透水性を示すため、主要な透水経路は 2 系統の節理（ダム軸方向と上下流方向に発達する高角度節理）に限定される。

②砂岩の節理は頁岩を貫かないため、頁岩の層理面方向に沿った透水経路となり、表層付近を除き、ダム上下流方向に連続する透水経路は存在しない（図-4）。

3. 基礎グラウチング計画

石河内ダムの基礎グラウチングは、カーテングラウチングとコンソリデーショングラウチングの 2 種である。

3.1 カーテングラウチング

改良目標値は当初一律 2Lu で計画していたが、平成 15 年 7 月にグラウチング技術指針が改定されたことを受け、改良目標値を深度方向に緩和する設計とした¹⁾。深度ごとの改良目標値は図-5 に示すように、ダム高 1/2 相当以浅は 2Lu（以下、2Lu ゾーン）、ダム高 1/2 からダム高までを 5Lu（以下、5Lu ゾーン）、ダム高以深を 10Lu（以下、10Lu ゾーン）とし、各々について非超過確率を 85%以上とした。

カーテングラウチングの中心線は、ダム基礎排水孔の中心線までの動水勾配がより小さくなるように、基礎排水孔から 5.0m（ダム軸上流 1.0m の地点）とした。孔配

¹九州電力株式会社 技術本部 火力建設グループ、グループ長

²九州電力株式会社 小丸川発電所建設所 土木建築課、副長

³九州電力株式会社 技術本部 土木運営グループ

⁴清水建設株式会社 九州支店 土木部、工事長

表-1 石河内ダムの主要諸元

ダム形式	重力式コンクリートダム
ダム高×堤頂長	47.5m×185.0m
堤体積	134,200m ³
利用水深	18.5m
総貯水容量	6,900×10 ³ m ³
放流設備	クレストゲート(高16m×幅10m)×4門 放流能力 4,400m ³ /s (ダム設計洪水流量) コンジットゲート:放流管(高2.1m×幅1.7m)×2門 放流能力 100m ³ /s (最低水位時)
減勢工	跳水式水平水叩き型, 高さ21m, 幅50~56m, こう長55m, 副ダム高さ8m

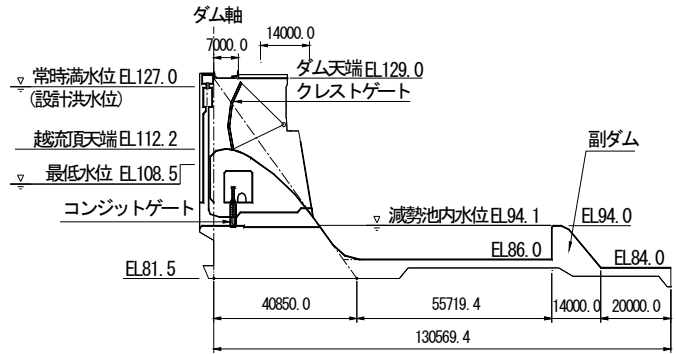


図-1 ダム標準断面図

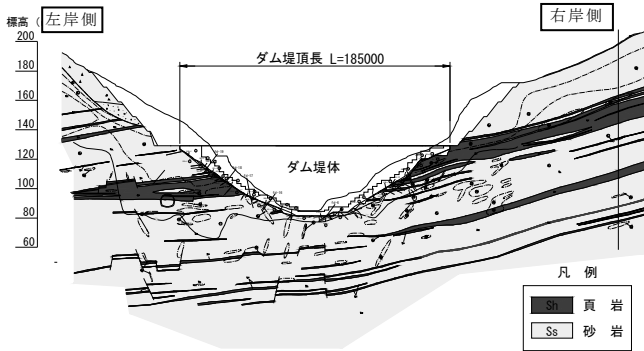


図-2 地質図

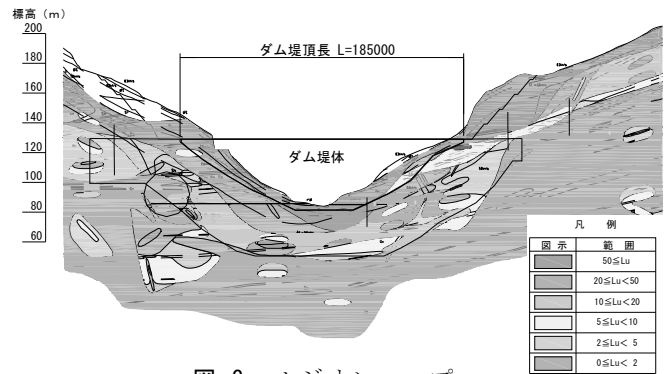


図-3 ルジオンマップ

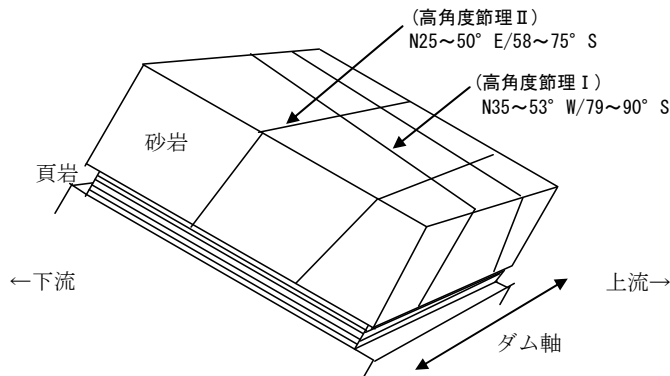


図-4 水理地質構造

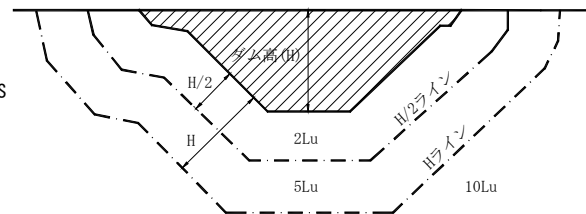


図-5 改良目標値設定模式図

置は1ブロック12m(パイロット孔の間隔)の単列配置, 深度方向については1ステージ5mとし, 中央内挿法により順次施工を進めた(図-6)。深度及び左右岸方向の改良範囲は, 以下のとおりとした。

- ・ダム基礎部の深さ方向: 地盤の透水性がその深度に対応する改良目標値に達する範囲またはダム高さまで
- ・左岸リム部: 地下水位と常時満水位との交点まで
- ・右岸リム部: 2Luの岩盤に達するまで

注入仕様は表-2に示すとおりとした。この仕様は, 事前に行ったグラウチング試験から改良効果が得られることを確認し, 決定したものである。なお, 配合や配合

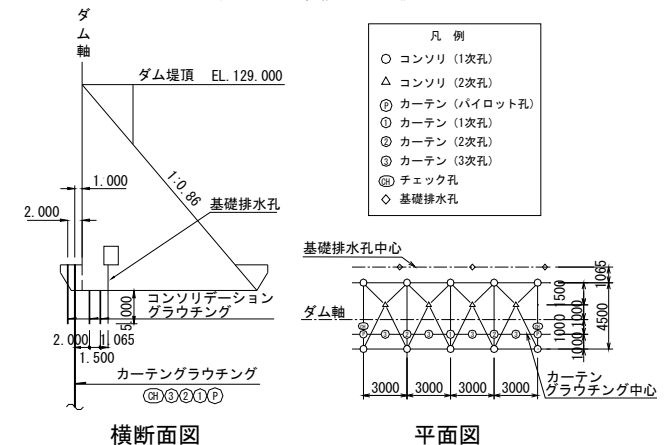


図-6 孔配置図

切替基準については次項で述べる。

本ダムにおけるカーテングラウチングは, 全範囲において2次孔(孔間隔3m)までを規定孔として施工した。追加孔基準は以下のとおりとした。

表-2 注入仕様

ボーリング	削孔機械	ロータリー式ボーリングマシン			
	ステージ長	5m			
水押し 透水試験	ルジオンテスト (MPa)	1st	: 0.1↔0.2↔0.3		
		2st	: 0.1↔0.2↔0.45		
		3, 4st	: 0.1↔0.2↔0.4↔0.6		
		5, 6st	: 0.1↔0.2↔0.4↔0.6↔0.9		
		7st以降	: 0.1↔0.2↔0.4↔0.6↔0.8↔1.0		
		水押しテスト (MPa)	1st	: 0.1↔0.2↔0.3	
			2st	: 0.1↔0.2↔0.45	
3, 4st	: 0.2↔0.4↔0.6				
5, 6st	: 0.2↔0.5↔0.9				
7st以降	: 0.2↔0.5↔1.0				
グラウチング	注入材料	高炉セメントB種, ベントナイト, 分散剤			
	配合(C:W)	1:10→1:8→1:6→1:4→1:2→1:1			
	注入圧力	1st	: 0.3MPa	7, 8st	: 1.2MPa
		2st	: 0.45MPa	9, 10st	: 1.5MPa
3, 4st		: 0.6MPa	11st以降	: 1.8MPa	
5, 6st		: 0.9MPa			

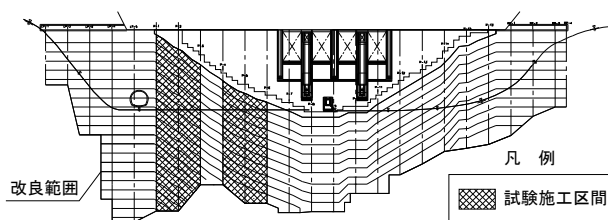


図-7 試験施工位置図 (縦断面図)

①改良目標値の2倍以上のルジオン値を示すステージが存在したとき

②改良目標値以上のルジオン値を示すステージが縦・横・斜めに連続したとき

なお、②改良目標値以上が縦・横・斜めのすべての方向に連続した場合については、縦連続の追加孔を優先して施工することで、横・斜方向の連続性が断たれると考えた。

3.2 コンソリデーショングラウチング

コンソリデーショングラウチングはカーテングラウチングと併せて動水勾配が大きい部分の遮水性を改良することを目的に行うもので、改良目標値は全範囲にわたって5Luとした(非超過確率は85%以上)。

施工範囲は、基礎排水孔から上流側をカーテンラインを挟みこむように施工した(図-6)。また、深度方向については1ステージ5mとした。

注入仕様は、表-2に示すカーテングラウチングの仕様と同様である。

表-3 設計配合と変更配合の比較

【設計配合】		【単位: ℓ/st】						
		1:10	1:08	1:06	1:04	1:02	1:01	Σℓ
Lu < 10		400	400	800	800	800	800	4000
10 ≤ Lu < 20			400	800	800	800	1200	4000
20 ≤ Lu < 50				800	800	800	1600	4000
50 ≤ Lu					800	800	2400	4000
【変更配合】		【単位: ℓ/st】						
		1:08	1:06	1:04	1:02	1:1.5	1:01	Σℓ
Lu < 20		400	400	400	400	400	1200	3200
20 ≤ Lu < 50			400	400	400	400	1600	3200
50 ≤ Lu				400	400	400	2000	3200

4. 試験施工

カーテングラウチングの本格施工に先行して、ダムサイトの水理地質構造や、グラウチングによる地盤の改良特性を反映したより効果的、効率的な施工を行うため試験施工を行い、設計仕様を見直した。

試験施工の範囲は左岸アバットの4ブロックとし、緩衝区間として中央1ブロックを間に設けている(図-7)。

試験の目的は以下の①と②である。

①施工の効率化(注入区間長の延長)

改良目標値以下のステージを下部ステージと結合注入することで注入時間の短縮を図るもので、一般孔で2Lu以下のステージについてはステージを結合し同時に注入する。ただし、ルジオンテストは5m毎に行い、最大注入区間長は15mとする。

②初期配合及び配合切替の最適化

左岸リム部等の施工においては、ルジオン値の低いステージで初期配合C:W=1:10のセメントミルクの注入のみで施工が完了しているステージが多く発生した。これは、配合切替の400ℓ/stに達する前に注入速度が低下し、規定注入圧力下で完了基準である0.2ℓ/min/mに達してしまうことによるものである。そこで、表-3に示すように初期配合を高濃度化し、出来る限り多くのセメントを注入する。

試験施工の結果を表-4に示す。注入区間長については、ステージの結合を採用することで、単位注入時間は減少した。また、変更配合でも単位注入時間に変化はないものの、注入セメント量は増加したので、より効果的な注入ができた。

また、変更仕様での次数別単位注入時間を図-8に示す。パイロット孔~2次孔までは違いはほとんど見られないが、ステージの結合を実施した3次孔以降では単位注入時間が短縮されていることが確認できた。一方で、全孔

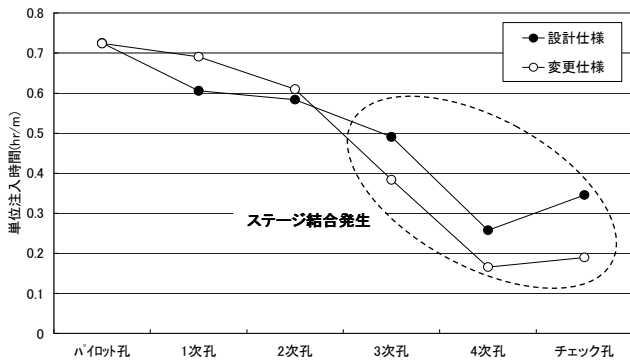


図-8 設計・変更仕様の比較

表-4 試験施工結果

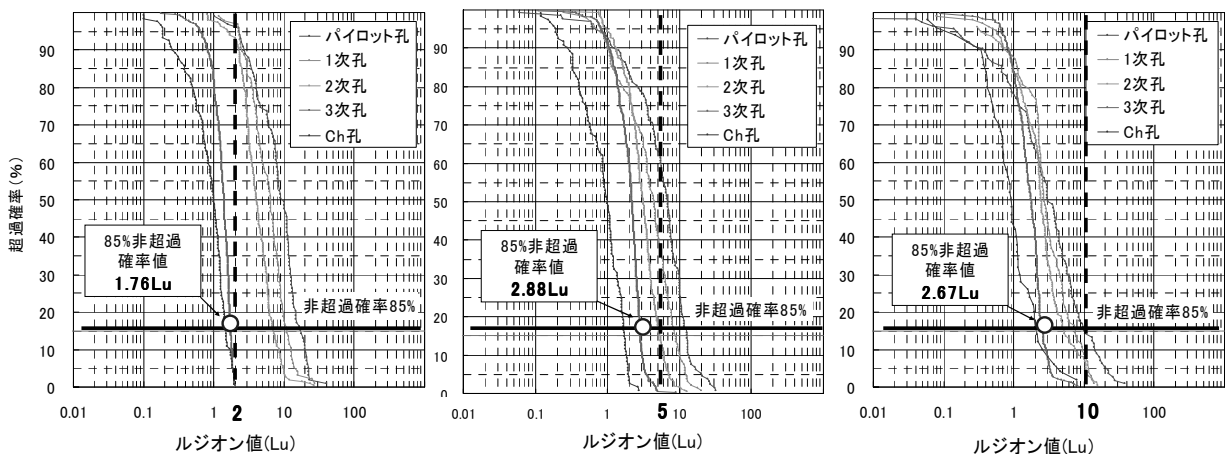
試験項目		単位注入時間 (h/m)	単位注入セメント量 (kg/m)
①注入区間長	設計仕様	0.53	—
	変更仕様	0.41	—
②配合変更	設計仕様	0.50	24.49
	変更仕様	0.49	30.24

における単位注入セメント量の実績は23.43kg/mであった。(チェック孔は除く)これは、表-4の設計仕様よりも小さい値であるが、試験施工後に実施した右岸アバット部、左右岸リム部の透水性が試験施工をした左岸アバット部より相対的に低い傾向にあり、セメントミルクが入りにくかったことが要因と考えられる。

5. 施工結果

5.1 カーテングラウチング

本ダムにおけるカーテングラウチングは全範囲において2次孔までを規定孔としたが、追加孔である3次孔は、当地点の砂岩高角度節理が卓越する地質構造を踏まえ、1.5m 間隔で水押しテストによる確認が必要と判断し、全範囲に施工した。4次孔は改良目標値を満足しない2Luゾーンに対して、追加孔基準に基づき施工した。



2Luゾーン (ダム高 1/2 以浅) 5Luゾーン (ダム高 1/2~ダム高) 10Luゾーン (ダム高以深)

図-9 次数別超過確率図

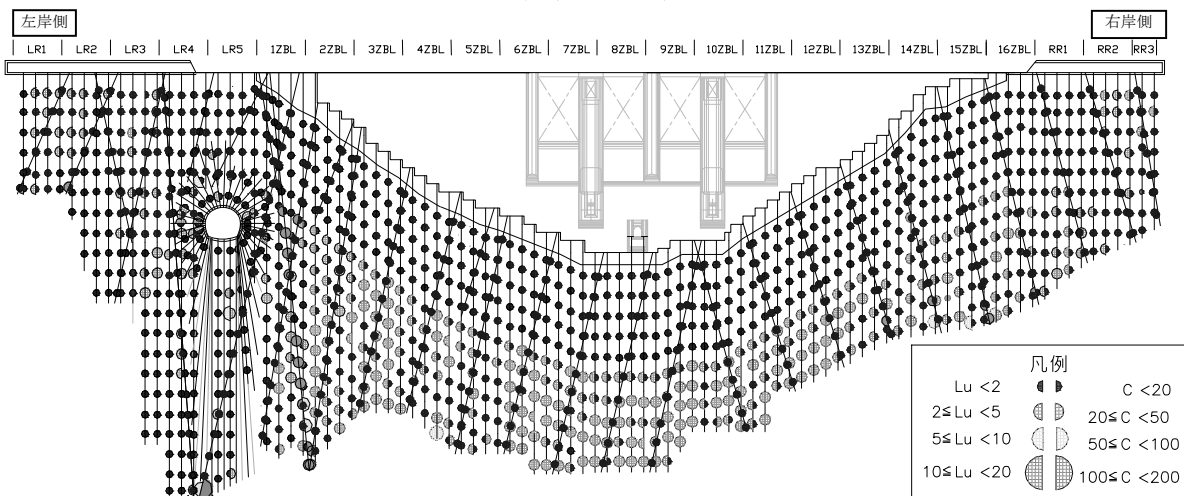


図-10 カーテングラウチングの改良効果図 (最終次数孔・チェック孔)

(1) 基礎地盤の改良結果

カーテングラウチングの改良結果について、次数別超過確率図を用いて整理した(図-9)。図から次数を追ってルジオン値が低減する傾向は明らかであり、最終次数孔でのルジオン値の85%非超過確率値は2Luゾーンで1.76Lu, 5Luゾーンで2.88Lu, 10Luゾーンで2.67Luである。また、基礎地盤の改良実績を図-10に示すが、最後に改良効果の確認のために実施したチェック孔においては、全範囲に渡って2Lu以下(非超過確率95%)まで改良されていることが確認された。

また、上下流方向の改良範囲を確認するために、カーテンラインの右岸上流1mと左岸上流2mの位置に斜掘りでルジオンテストを実施した(図-11)。その結果を表-5に示す。2Luゾーンは上流2mまで2Lu以下, 5, 10Luゾーンは上流2mまで5Lu以下にそれぞれ改良さ

れていることが確認された。

すなわち、下流側へも同様に改良されていると仮定すると、図-12の概念図で示すようにカーテンライン上に少なくとも4m以上の難透水ゾーンが形成されていると考えられる。

それは同時に、ボーリング孔の孔曲がり管理値の上限である1.0%生じた場合でも、カーテンライン全面に渡って改良されていることを意味する(図-13)。

(2) コンソリデーショングラウチング

コンソリデーショングラウチングは2次孔までを規定孔として施工した。追加孔は左岸アバット部と河床部の一部で実施した。改良目標値の最終的な非超過確率は100%であり、十分に改良されていると評価した。

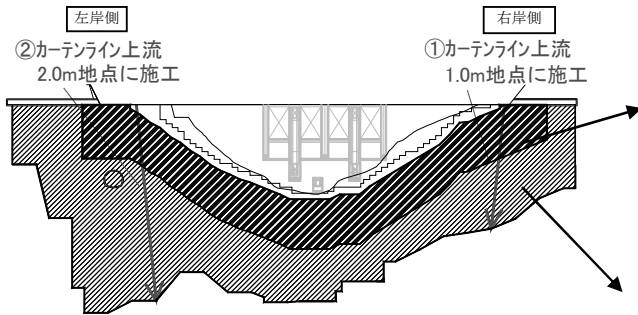


図-11 確認試験施工位置図(縦断面図)

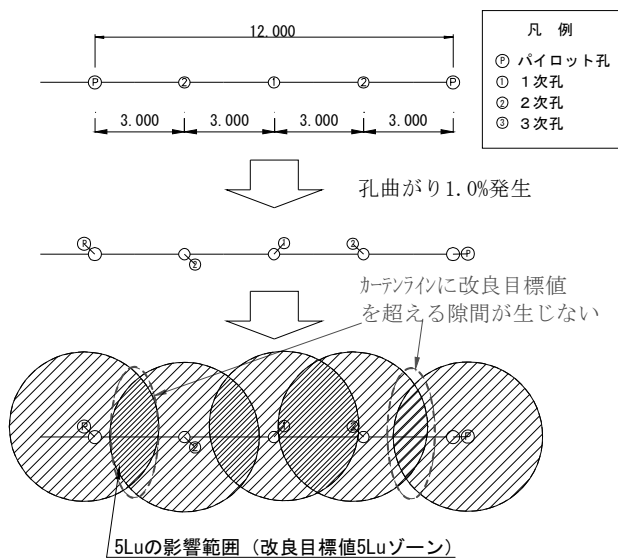


図-13 孔曲発生時の改良範囲の考え方(平面図)

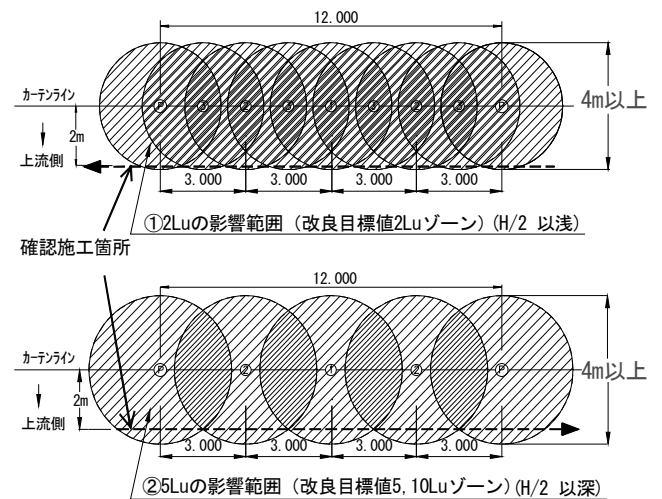


図-12 改良範囲の概念図(平面図)

表-5 カーテンライン上流1, 2mのルジオン値一覧

		①カーテンライン上流1m (右岸側)		②カーテンライン上流2m (左岸側)	
		区間長	ルジオン値	区間長	ルジオン値
2Luゾーン	1st	5.00	1.13	7.00	1.52
	2st	5.00	0.95	5.30	1.53
	3st	5.10	1.87	5.40	1.64
	4st	5.30	0.74	5.50	1.33
	5st	5.30	0.93	5.40	0.81
5Luゾーン	6st	5.30	1.03	5.50	2.70
	7st	5.30	3.65	5.40	3.38
	8st	5.30	2.71	5.50	2.18
	9st	5.30	2.96	5.50	1.91
	10st	5.30	0.79	5.40	0.13
10Luゾーン	11st	5.30	0.74	5.50	0.34
	12st	3.60	1.53	5.40	4.78
	13st			5.30	2.22
	14st			5.30	3.11

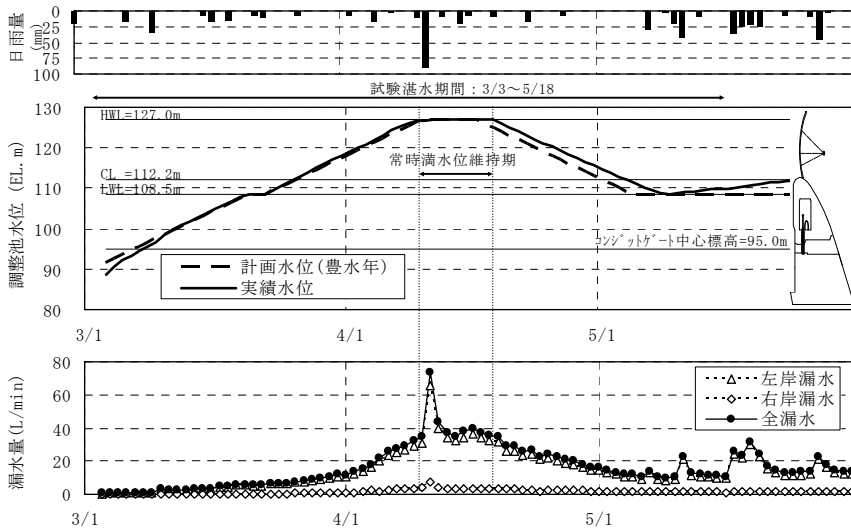


図-14 漏水量の経時変化

6. 試験湛水

石河内ダム完成後の平成18年3月から5月にかけて、試験湛水を行った。

試験湛水開始後の漏水量の経時変化を図-14に、貯水位との関係図を図-15に示す。

漏水量については、概ね貯水位との相関が認められたほか、基礎岩盤のルジオンマップから想定した計算値（管理基準値）を大幅に下回った。特に右岸漏水量は小さく、最大で7.5L/min程度であった（全漏水量の10%程度）。漏水の目視点検の結果についても、濁りの発生はなく、問題ない結果であった。

また、降雨による増加傾向がみられた。特に、左岸の基礎排水孔の4箇所からのものが60%程度を占めており、20mm/日以上降雨時に漏水量の一時的な増加傾向がみられた。これは、ダム下流側の地下水位の上昇により、基礎岩盤内の水圧が高められたためと推定される。

なお、この漏水増加地点の漏水量は最大でも13L/minと、注意が必要といわれる20L/min以下であり²⁾、ダムの安定上、特に問題ない結果であった。

石河内ダムの計測結果、巡視結果から、ダムの安定上は問題がないと判断し、平成18年5月18日に試験湛水を完了した。

7. おわりに

小丸川発電所は平成23年7月に最終号機が運転を開始した。今回、石河内ダムの基礎グラウチング計画を、技術指針の改定を踏まえ改良目標値を緩和す

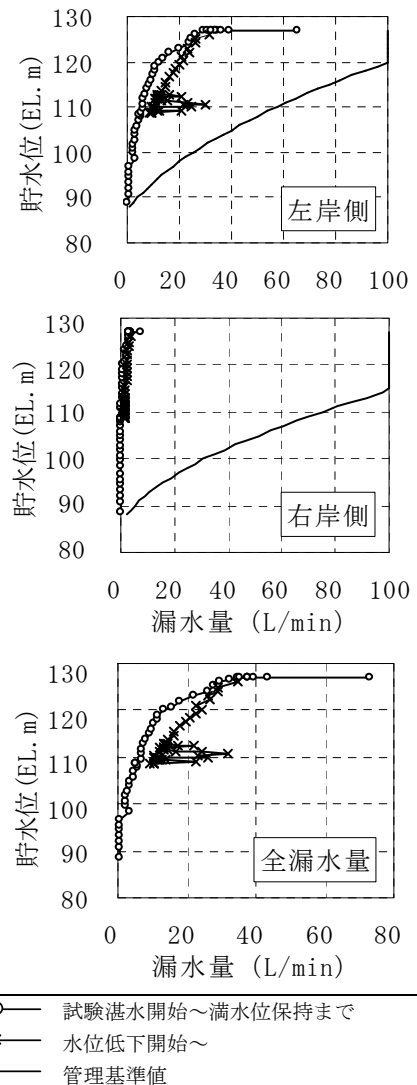


図-15 貯水位と漏水量の関係

るとともに、試験施工結果を基に、効果的かつ効率的な注入仕様に見直しを行い、改良目標値を大幅にクリアする改良効果が得られた。

ダム湛水後の漏水量も問題なく、今回実施した基礎グラウチングにおける合理化施工の妥当性が確認されたものと考えている。

今後も継続してダムの計測管理を行い、ダムの安定性を評価していく所存である。

参考文献

- 1) (財)国土技術センター：グラウチング技術指針・同解説、2003
- 2) (財)ダム水源地環境整備センター：ダム管理の実務、2004

重力式コンクリートダムの 基礎グラウチングにおける 合理化施工について

九州電力
小丸川発電所建設所
新屋 裕生

発表の概要

- 1 石河内ダムの概要
- 2 地質及び水理地質構造
- 3 基礎グラウチング計画
- 4 試験施工
- 5 施工結果
- 6 試験湛水
- 7 まとめ

発表の概要

- 1 石河内ダムの概要
- 2 地質及び水理地質構造
- 3 基礎グラウチング計画
- 4 試験施工
- 5 施工結果
- 6 試験湛水
- 7 まとめ

石河内ダム諸元

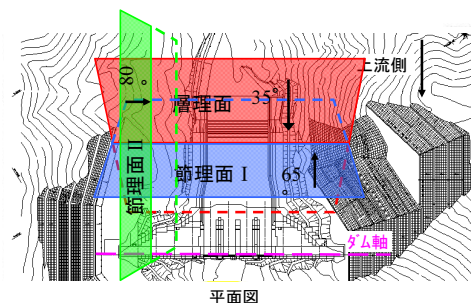
ダム型式	重力式コンクリート
高さ×頂長	47.5m×185.0m
利用水深	18.5m
総貯水容量	6,900×10 ³ m ³
流域面積	329km ²



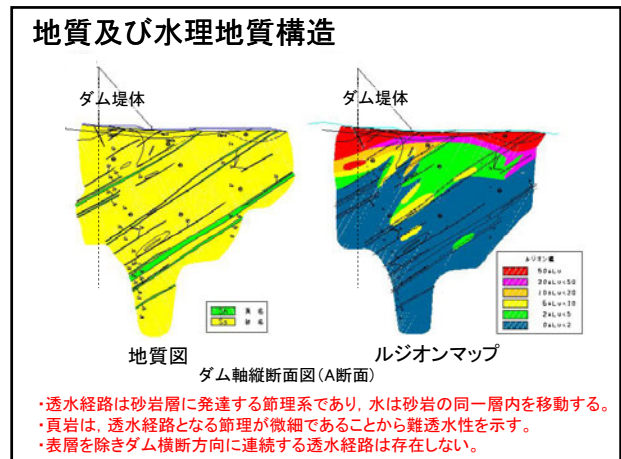
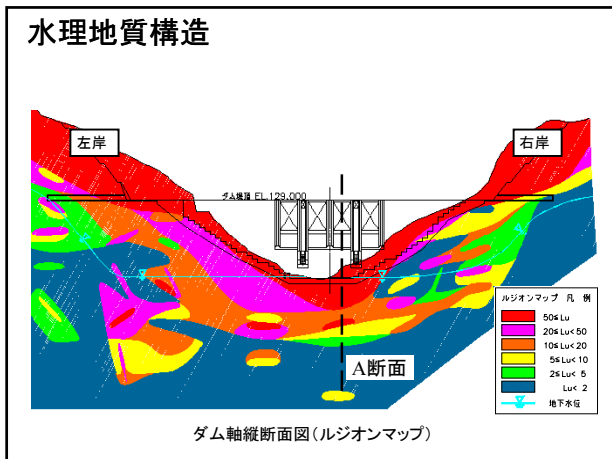
発表の概要

- 1 石河内ダムの概要
- 2 地質及び水理地質構造
- 3 基礎グラウチング計画
- 4 試験施工
- 5 施工結果
- 6 試験湛水
- 7 まとめ

地質構造

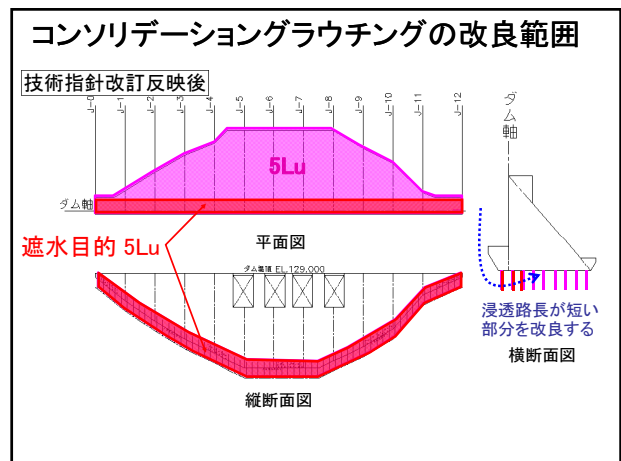
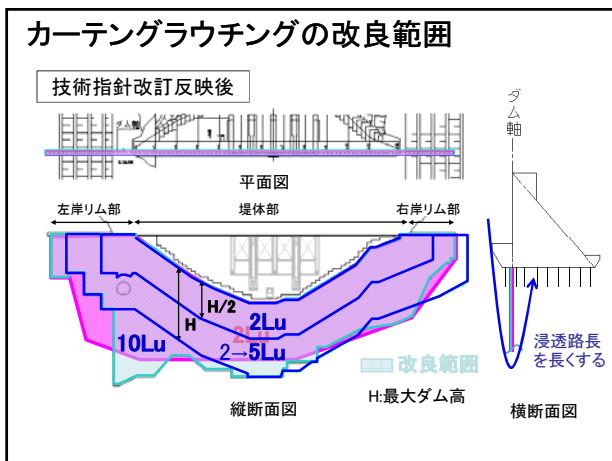


- ・分布する主な岩種は砂岩と頁岩
- ・地層はダム軸にほぼ平行する走向をもって、上流側へ約35° 傾斜
- ・層理面と直交する高角度節理が2系統発達

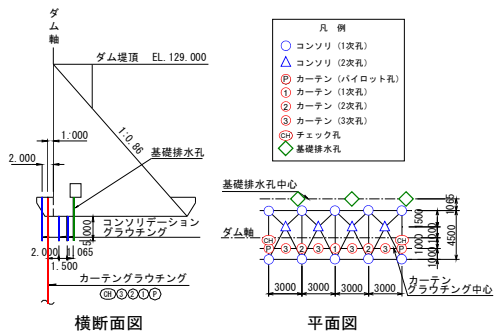


- ### 発表の概要
- 1 石河内ダムの概要
 - 2 地質及び水理地質構造
 - 3 基礎グラウチング計画
 - 4 試験施工
 - 5 施工結果
 - 6 試験湛水
 - 7 まとめ

- ### グラウチングの種類
- カーテングラウチング**
- ・ダム基礎地盤及びリム部における遮水性を改良する。
- コンソリデーショングラウチング**
- ・着岩部付近において、動水勾配が大きい部分の遮水性を改良する。(遮水性目的)



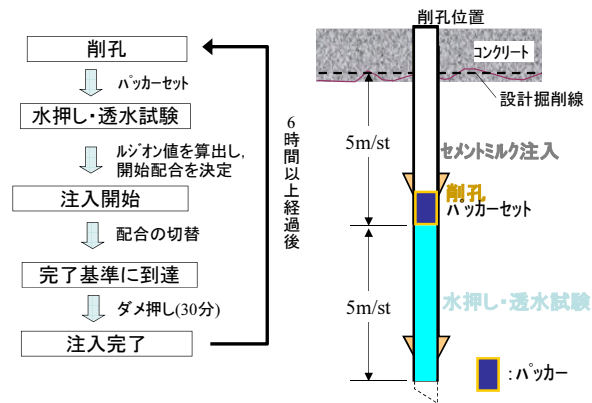
孔配置図



注入及び施工仕様の概要

項目	注入及び施工仕様
使用材料	高炉セメント, ベントナイト, 分散剤
ステージ長	5.0m
注入圧力	カーテングラウチング : 0.3~1.8MPa コンソリデーショングラウチング : 0.3MPa
昇圧速度	0.1MPa/min以下
注入速度	4.0ℓ/min/m以下
注入完了基準	規定圧力に達し, 0.2ℓ/min/mとなつてから, 30分だめ押しを行つて終了

施工手順



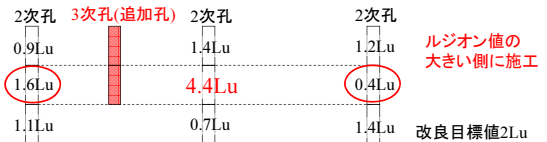
改良効果の判定

改良効果の判定基準

- ①改良目標値の非超過確率が85%以上であること
- ②改良目標値の2倍以上のステージが存在しないこと
- ③改良目標値に達していないステージが連続して存在しないこと

規定孔の施工後, 基準を満足しない場合 ➡ 追加孔を施工

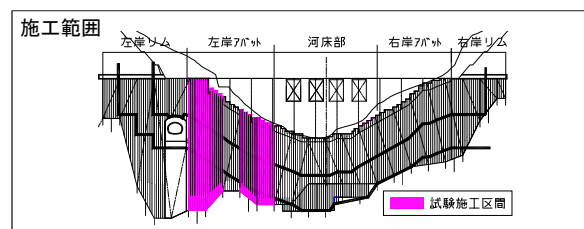
(例)改良目標値の2倍以上のステージが存在した時



発表の概要

- 1 石河内ダムの概要
- 2 地質及び水理地質構造
- 3 基礎グラウチング計画
- 4 試験施工
- 5 施工結果
- 6 試験湛水
- 7 まとめ

試験施工(カーテングラウチング)



項目	当初仕様	変更仕様
注入区間の延長	1ステージ5m	一般孔2Lu以下⇒注入区間を最大3ステージまで延長
初期配合及び配合切替の最適化	初期配合C:W=1:10 総注入セメント 4000ℓ	初期配合 C:W=1:8 総注入セメント量 3200ℓ

試験施工結果

①注入区間の延長(ステージの結合)

ステージ結合は3次孔と4次孔, CH孔にて発生

⇒ 単位長さ当りの注入時間にて比較

【単位:hr/m】

	試験施工結果	
	当初仕様	変更仕様
単位注入時間	0.53	0.41

全2156ステージ中, 480ステージが連結(注入193回)

⇒ 注入回数▲287回

試験施工結果

②初期配合及び配合切替の最適化

⇒ 単位長さ当りのセメント注入量にて比較

【単位:kg/m】

	試験施工結果	
	当初仕様	変更仕様
セメント注入量	24.49	30.24

発表の概要

- 1 石河内ダムの概要
- 2 地質及び水理地質構造
- 3 基礎グラウチング計画
- 4 試験施工
- 5 施工結果
- 6 試験湛水
- 7 まとめ

施工結果

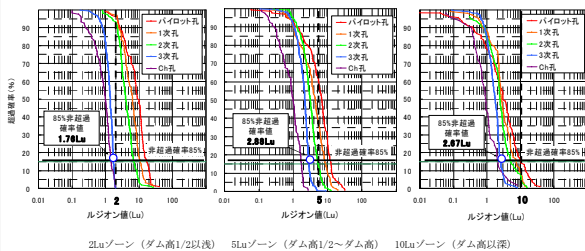
カーテングラウチング

・規定孔は2次孔まで

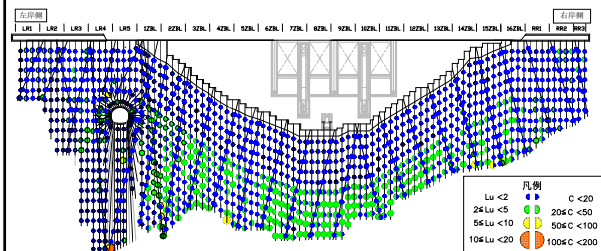
・追加孔である3次孔は、当地点の高角度節理が卓越する地質構造を踏まえ、1.5m間隔で水押しテストによる確認が必要と判断し、全範囲に施工

・4次孔は改良目標値を満足しない2Luゾーンに対して、追加孔基準に基づき施工

次数別超過確率図



カーテングラウチングの改良効果図 (最終次数孔・チェック孔)



施工結果

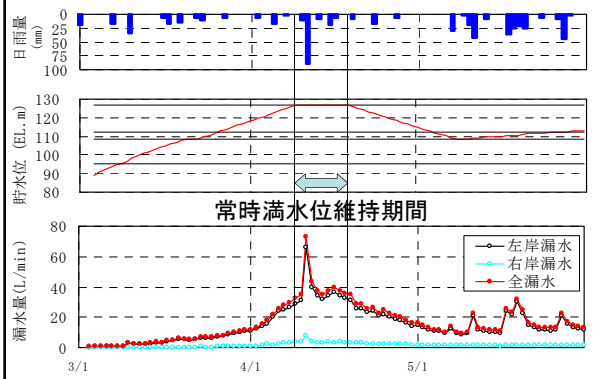
コンソリデーショングラウチング

- ・規定孔は2次孔まで
- ・追加孔は左岸アバット部と河床部の一部で施工
- ・改良目標値(5Lu)の最終的な非超過確率は100%

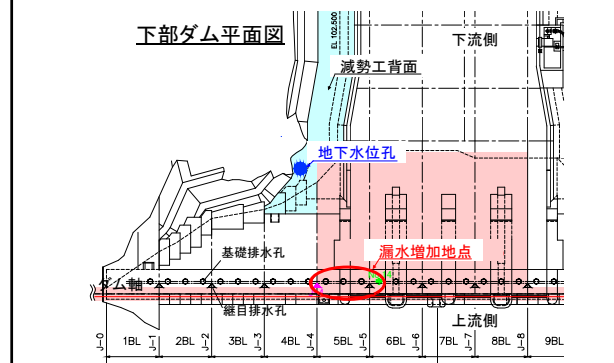
発表の概要

- 1 石河内ダムの概要
- 2 地質及び水理地質構造
- 3 基礎グラウチング計画
- 4 試験施工
- 5 施工結果
- 6 試験湛水
- 7 まとめ

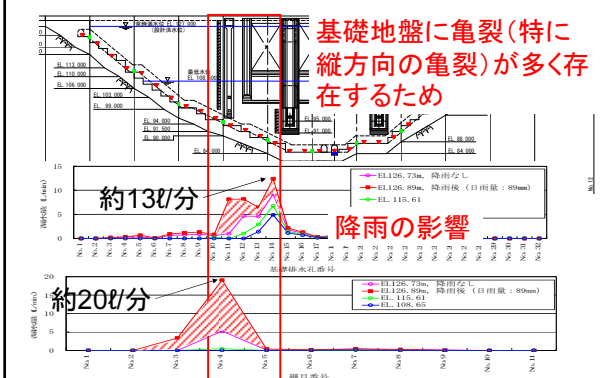
漏水量計測結果



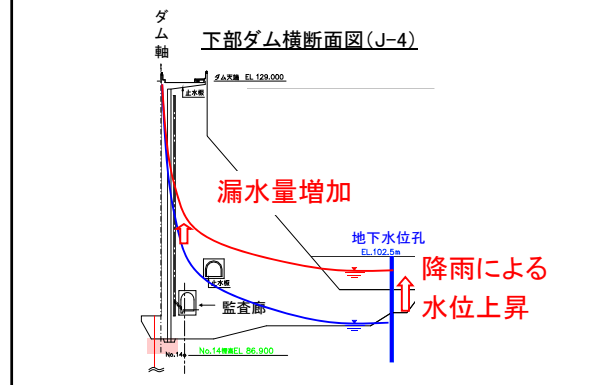
降雨による漏水量増加の要因



漏水量計測結果



降雨による漏水量増加の要因



発表の概要

- 1 石河内ダムの概要
- 2 地質及び水理地質構造
- 3 基礎グラウチング計画
- 4 試験施工
- 5 施工結果
- 6 試験湛水
- 7 まとめ

まとめ

ダム基礎グラウチングの合理化施工として以下2点の取組みを実施

①当初設計では旧指針に基づき、改良目標値を一律2 Luとしていたが、平成15年7月に改定された指針を反映し、深度方向に改良目標値を緩和した。

②カーテンググラウチングでは、本格施工実施前に試験施工を行い、より合理的な注入仕様に見直しを行った。

湛水後の評価

・湛水後の漏水量は問題なく、今回実施した合理化施工の妥当性が確認された。

大山ダムの地質と止水処理（カーテングラウチング）について

前田 俊郎¹ 松尾 達也² 對馬 和孝³

大山ダムは、九州北部の筑後川上流の支川赤石川に建設中の高さ 94m の重力式コンクリートダムである。大山ダムにおいては、複雑な地質性状と類似地質ダムの事例を踏まえて、慎重に止水処理を計画していた。しかし、実際に施工を進めると、当初想定になかった複数の断層の分布や部分的にグラウチングによる改良が困難な地質性状等が明らかになり、施工範囲や施工方法を大きく変更して対応することとなった。

本文は、止水処理に係るグラウチングの考え方についてとりまとめたものである。

キーワード：ダム、止水処理、グラウチング

1. はじめに

大山ダムが位置する赤石川流域は、大分県の西南に位置し、福岡県・熊本県境付近に広がる筑肥山地の東側に連なる津江山地からなる。津江山地を構成する地質は、主に新生代新第三紀鮮新世～第四紀更新世に活動した火山噴出物からなる。大山ダムは、大分県日田市大山町を流れる筑後川水系の赤石川に建設される堤高 94m、堤頂長 370m、堤体積 58 万 m³、総貯水容量 1,960 万 m³ の重力式コンクリートダムであり、洪水調節、既得取水の安定化・河川環境の保全、新規利水を目的とした多目的ダムである。

大山ダムの地質は、主に釈迦岳火山岩類からなり、約 310 万年前から 410 万年前に活動した火山から噴出した安山岩溶岩が主体となっている。地質年代においても比較的新しく、深部まで高透水の箇所が分布しているのが特徴である。また、地下水位も低く、特に、右岸側はリム部でも地下水位は現河床程度と非常に低く、高透水箇所も見られており、その止水処理が課題であった。

そのため、当初よりダムサイトの水理地質構造を考慮し、大山ダムのカーテングラウチングは、最大でダム高の約 2 倍と通常のダムよりも非常に深く施工する計画とし、また、リム部方向についても広範囲に施工する計画としていた。

しかし、実際に施工を進めるとすると当初想定になかった複数の断層の分布や部分的にグラウチングによ

る改良が困難な地質性状等が明らかになり、施工範囲や施工方法を大きく変更して対応することとなった。

本報文は、大山ダムにおいて止水処理に係るグラウチングの考え方についてとりまとめたものである。

2. 大山ダムの地質

2.1 広域の地形・地質

大山ダムが位置する赤石川流域は、大分県の西端に位置し、福岡県・熊本県境付近に広がる筑肥山地の東側に連なる標高 300～1200m の山地（津江山地）からなる。津江山地を構成する地質は、主に新生代新第三紀鮮新世～第四紀更新世に活動した火山噴出物（火山岩・火山砕屑岩類）からなり、標高 500～1100m の急峻な山地や標高 400～600m に平坦面を形成する火砕流台地などを形成している。貯水池の山腹斜面の勾配は概ね 30～45° と急峻であり、しばしば安山岩や耶馬溪火砕流堆積物（溶結凝灰岩）が急崖を形成している。

赤石川は、ダムサイトの南方約 8 km に位置する渡神岳（標高 1150m）に源を発し、急峻な河谷を形成しながら北～北北東方向に流下する。途中、大野川（梅木川）や竹の迫川、吾々路川などの支川を集め、ダムサイト下流約 2 km（大山町中川原）で筑後川（大山川）に合流する。ダムの集水面積は 33.6km² である。

¹ 独立行政法人水資源機構 ダム事業部設計課、主幹（前独立行政法人水資源機構大山ダム建設所工事課、主幹）

² 独立行政法人水資源機構 総合技術センター（前独立行政法人水資源機構 大山ダム建設所 調査設計課）

³ 独立行政法人水資源機構 大山ダム建設所 工事課

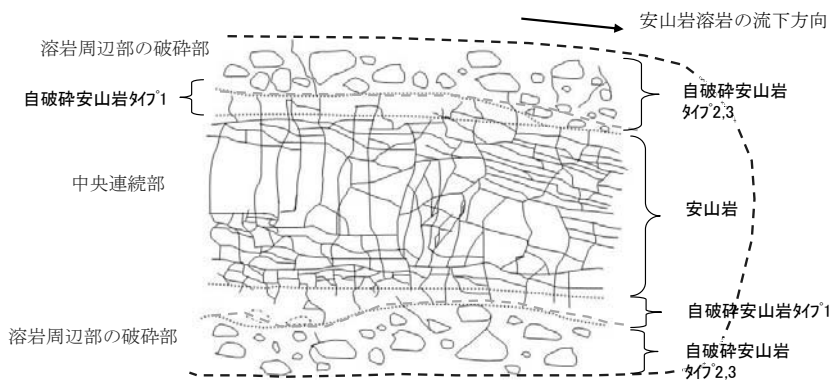


図-1 安山岩溶岩模式図



写真-1 安山岩と自破碎安山岩

2.2 ダムサイトの地形・地質

ダムサイトは、赤石川と大山川の合流点より上流約 2km の赤石川に位置している。ダムサイト付近における河床標高は約 174m、河床勾配は約 1/30～1/33 である。斜面の勾配は約 30°～40° であり急峻である。

ダムサイトの基盤岩は、概ね釈迦岳火山岩類に属する安山岩と自破碎安山岩であり、高標高部（サーチャージ水位よりはるか上）にはそれを覆って耶馬溪火砕流堆積物が分布する。また、斜面中腹部には阿蘇火砕流堆積物が釈迦岳火山岩類を直接被覆する形で点在している。

ダムの基礎岩盤となる釈迦岳火山岩類は、安山岩と自破碎安山岩がほぼ右岸下流傾斜で互層状に累重する構造で特徴づけられる。この構造は、繰り返し流下した安山岩質のブロック溶岩（図-1、写真-1を参照）が起源と考えられる。すなわち安山岩は溶岩の中央連続部、自破碎安山岩は溶岩流下時における溶岩周辺部の破碎部と想定される。

安山岩は、左岸深部の下位のユニットから順番に An0～VII, KAn I～VI と分類している。（図-2）基本的には、左岸上流から右岸下流傾斜であるが、右岸河床付近に分布する AnVI 層のみ、ほぼ上下流方向に分布する。自破碎安山岩は、溶岩ユニット内での位置、および溶岩噴出の形態、流下時の状況によると想定される様々な岩相があるが、概ね 3 つに区分される（自破碎安山岩タイプ 1 (Au1)、タイプ 2 (Au2)、タイプ 3 (Au3)）。

表-1 基礎岩盤の分類表

グループ	地質区分	特徴
安山岩 (An) グループ	安山岩 (An)	安山岩溶岩の中央連続部。上下および側端部は急冷されるため特に板状節理が、中央部は冷却速度が遅いため特に柱状節理が発達する。
	自破碎安山岩タイプ1 (Au1)	安山岩溶岩における周辺部の破碎部。安山岩礫と基質部からなるが境界は不明瞭である。
自破碎安山岩 (Au) グループ	自破碎安山岩タイプ2 (Au2)	安山岩溶岩における周辺部の破碎部。安山岩礫と基質部からなる。同質・同組織の安山岩礫と基質部よりなる。割れ目は少ない。
	自破碎安山岩タイプ3 (Au3)	安山岩溶岩における周辺部の破碎部。安山岩礫と基質部からなる。様々な色相の礫部と基質部よりなる。割れ目は少ない。

基礎岩盤を構成する安山岩および自破碎安山岩は、硬さや割れ目の発達度合いなどから、岩盤の工学的性状および透水性状を鑑み、安山岩グループと自破碎安山岩グループに大別できる（表-1）。自破碎安山岩タイプ 1 は成因から、地質分類は自破碎安山岩としているが、安山岩の周辺に位置し、工学的性状、透水性状は安山岩に近く、安山岩グループに分類している。

火山礫凝灰岩と凝灰角礫岩は、溶岩とは異なり、火山岩の礫と凝灰質の基質から構成される堆積岩と想定される。火山礫凝灰岩は左岸深部に分布しており、凝灰角礫岩は右岸中標部に 10～15m の層厚で分布しているほか、しばしば溶岩ユニット内に数 m の層厚で分布する。

H I - H I 地質断面図

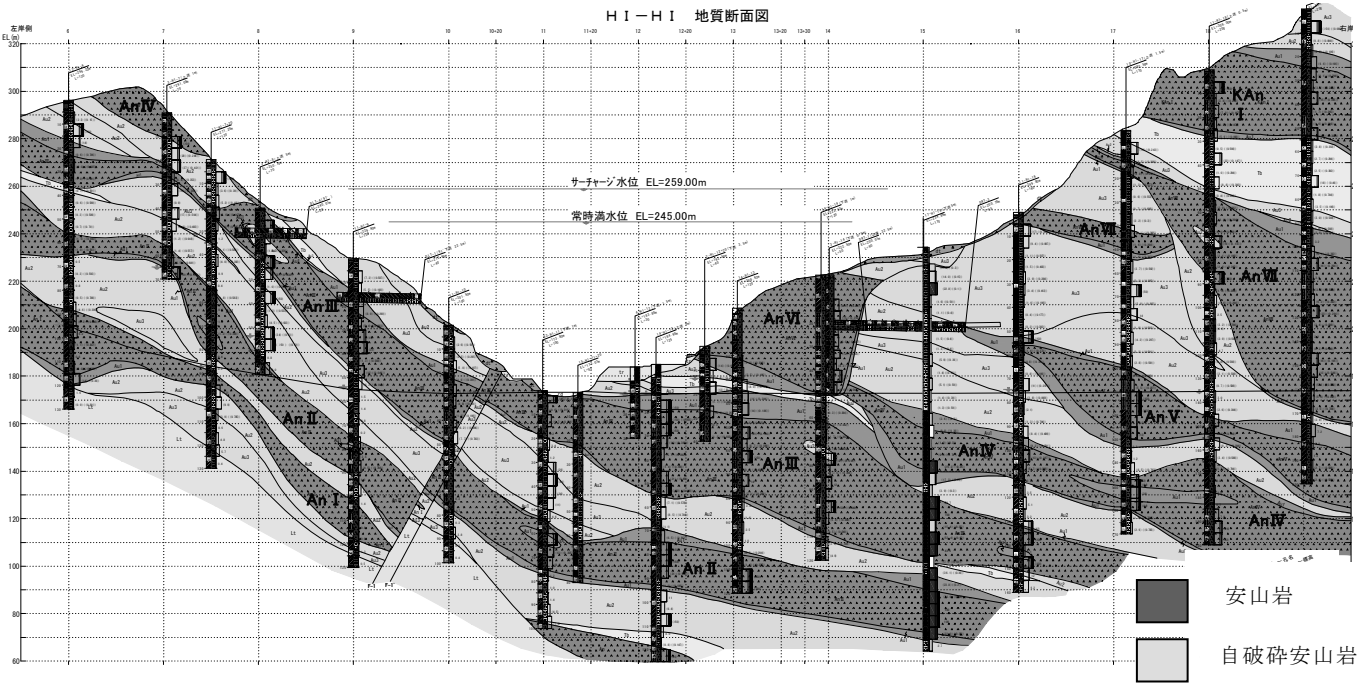


図-2 ダム軸地質断面図 (当初)

3. 基礎岩の透水性状等について

3.1 基礎岩盤の透水性状

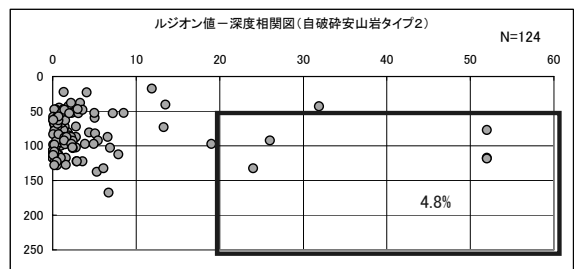
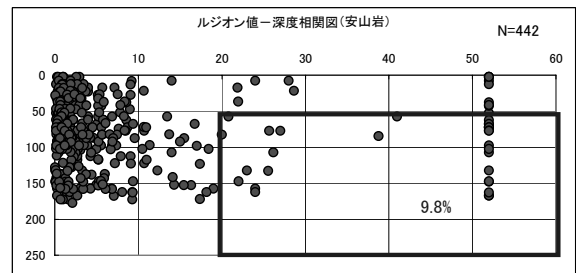
ダムサイトの地質状況からダム基礎岩盤の透水性状は、以下の2つのグループに分類した。

- ・ 割れ目が多く透水性が高い安山岩(An)グループ (安山岩 (An), 自破砕安山岩タイプ 1 (Au1))
- ・ 割れ目が少なく透水性が低い自破砕安山岩(Au)グループ (自破砕安山岩タイプ 2 (Au2), 自破砕安山岩タイプ 3 (Au3))

安山岩と自破砕安山岩タイプ 2 のルジオン値と深度との関係を図-3 に示す。

各地質とも基本的には深度が増すにつれてルジオン値が小さくなる傾向はあるものの、An グループについては深部でもルジオン値が 20 を超える地点が存在する。一方で Au グループについては 50m (H/2, H:ダム高) 以深ではルジオン値が 20 を超える地点が An グループに比較して半減する。また、ユニット別にみても顕著な違いは見られなかった。

そのため、ダムサイト基礎岩の透水性状は以下のようなものであると推定した。



(注：グラフ内の青数字は、各岩種毎の 50m (H/2) 以深のルジオン値の中で、20Lu 以上を示すものの割合である)

図-3 安山岩と自破砕安山岩タイプ 2 の深度と透水性の関係 (パイロット孔データ)

- 1) An グループと Au グループでは、地表から深度 50m 以深での高透水箇所 (20 ルジオン以上) の分布に違いが見られる。An グループでは高透水箇所が点在するが、Au グループでほとんど確認されない。ただし、F-2 断層より右岸側では Au グループにも高透水箇所が点在する。

2) An グループでは、割れ目の頻度が高く、Au グループでは、相対的に割れ目の頻度が低い。An グループから Au グループに一連として連続するような割れ目は露頭、横坑壁、ボアホールスキャナ画像等でほとんど確認されない。

これらの透水性状を満足するダムサイト基盤岩のモデルとして、図-4 のようなモデルが想定される。すなわち、典型的な An グループ内では割れ目が多く、地下水が層内を流動する可能性がある。一方、Au グループ内では、線状の割れ目が点在しているが、それぞれが独立しており、Au グループ内において地下水の流動の可能性は低いと考えられる。Au グループ内の地下水は割れ目が An グループに連結している場合のみ流動する可能性があると考えられる。

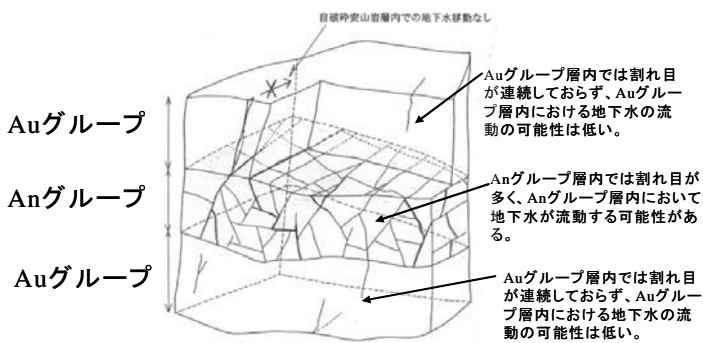


図-4 ダムサイト基盤岩における割れ目系モデル

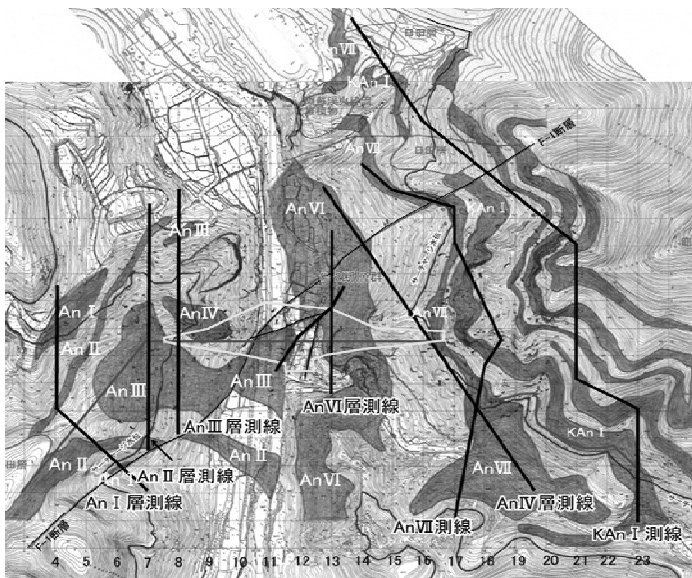


図-5 上下流方向に連続する安山岩層平面図（表土、崖錐堆積物を取り除いた状態）

3.2 水みちの連続性

ダムサイト下流側への水みちについて検討するため、上下流方向に連続する安山岩グループの地表付近における平面分布を図-5 に示す。

上下流方向に連続している安山岩ユニットで、貯水池側およびダム下流側のサーチャージ水位以下に直接出現するものについては、水みちとなる可能性が高いことから、各安山岩ユニットの分布状況と水みちの可能性について検討を行った。その結果、表-2 に示すように、An I, II, III, IV, VI, VII層及び KAn I層の計 7 ユニットについては、安山岩層が貯水池から堤体下流側へと上下流方向に連続し、かつ自破砕安山岩(Au)グループ層に遮断されないため、水みちとなる可能性がある。

安山岩(An)ユニットにおいて想定した浸透経路の一つの An II 層を図-6 に示す。

これらの検討を、施工中も随時地質情報を確認しながら、施工を行った。

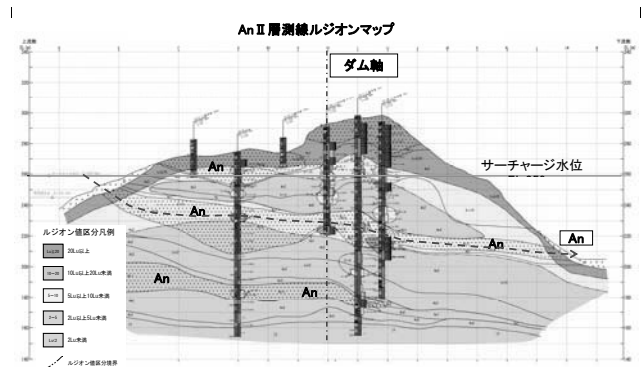


図-6 安山岩層浸透経路ルジオンマップ（An II層）

表-2 ダムサイト付近における安山岩ユニットの水みちの可能性について

Anユニット	貯水池側	下流側	水みちの可能性
An0層	出現せず	出現せず	50m以深のAuグループ層により水みちは遮断されるので、水みちの可能性は低い。
An I層	出現	出現	左岸側においては、上下流に連続しAuグループ層に遮断されないで水みちとなる可能性がある。
An II層	出現	出現	左岸側において、上下流に連続しAuグループ層に遮断されないで水みちとなる可能性がある。
An III層	出現	出現	左岸側においては、上下流に連続しAuグループ層に遮断されないで水みちとなる可能性がある。
An IV層	出現せず	出現	貯水池内には現れないが、他のAn層を経る水みちの可能性はある。
An V層	出現せず	出現せず	Auグループ層に遮断されるので水みちの可能性は低い。
An VI層	出現	出現	Auグループ層に遮断されないで水みちの可能性はある。
An VII層	出現	出現	Auグループ層に遮断されないで水みちの可能性はある。
KAn I層	出現	出現	Auグループ層に遮断されないで水みちの可能性はある。

4. 止水処理（カーテングラウチング）

4.1 止水処理（カーテングラウチング）の方針

グラウチングは施工状況等に応じて、仕様等を見直しながら施工を行い、岩盤の透水性状を踏まえて、以下の方針で行った。

(1) 地山深部の処理について

・ An グループは高透水部を含む地層として、ダム
の上下流の地表部に連続する An 層は止水対策（カ
ーテングラウチング）を実施する。

(2) 地山浅部の処理について

・ 地表付近（概ね 50m 以浅）は、An グループ、Au
グループをともにルジオン値が高い。これは地表か
らの風化や変質の影響によるものと想定される。そ
のため地表付近は止水処理を確実に実施する。

・ 自破碎安山岩部において改良が困難な場合は、カ
ーテングラウチングを複列に施工し、改良目標値を
緩和する代わりに厚みを持たせた遮水ゾーンを形成
する。

4.2 止水処理（カーテングラウチング）の範囲

(1) 止水ライン

左岸部においては、左岸上流尾根部にて地下水位
が上昇するため、ダム軸方向より上流尾根方向に止
水ラインを設定する。

右岸側においては、地山深部においても地下水位
が上昇しないため、地山の透水性状を考慮して止水
ラインを設定する。

右岸側の止水ラインは、以下の理由により竹の迫
川沿いに設定し、明かりにてカーテングラウチング

を施工する。

- ・ 基礎岩盤が右岸下流傾斜しており、止水対象岩
盤が竹の迫川沿いにおいて最も浅く出現する。
そのため、カーテングラウチング施工数量が少
なくなる。
- ・ カーテングラウチングの施工深度が深いことか
ら、長尺ロッドが使用できる明かりのほうが施
工性がよい。
- ・ 試験湛水中における対応は、明かりの方が良い。

(2) グラウチングの施工範囲

グラウチングの施工範囲と孔配置パターンを、
図-8、図-9 に示す。

左岸リム部は、深度 50m 以浅の箇所及び 50m 以
深に分布する An I ユニット箇所を止水処理範囲と
した。

堤体部左岸部はサーチャージ水位以深の地表から
深度 50m 以浅の箇所、及び深度 50m 以深に分布す
る An I ユニットの止水対象範囲とした。

堤体部右岸はサーチャージ水位以深の地表から深
度 50m 以浅の箇所、及び深度 50m 以深に分布する
An II, An III, An IV ユニット箇所を止水対象範囲と
した。この場合止水対象範囲が地山深部にまで及ぶ
ため、深部については、ダム高 H 以内の高透水部
と連続する可能性のある箇所を止水対象とした。

右岸リム部は、貯水池沿いに明かりでの止水処理
を行う。深度は地下水位までをパイロット孔で確認
し、カーテングラウチングの施工範囲は An VII 層、
KAn I 層が分布する範囲までを対象範囲とした。

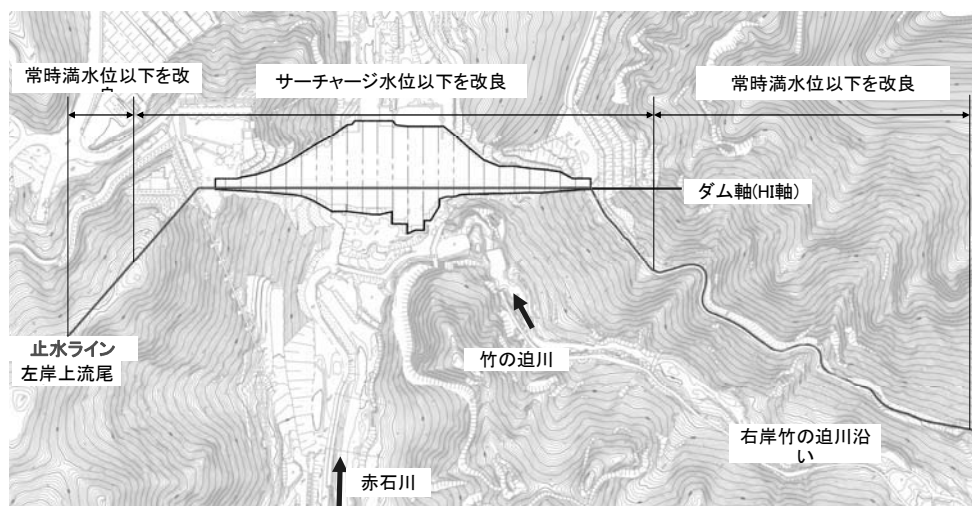


図-7 止水ライン平面図

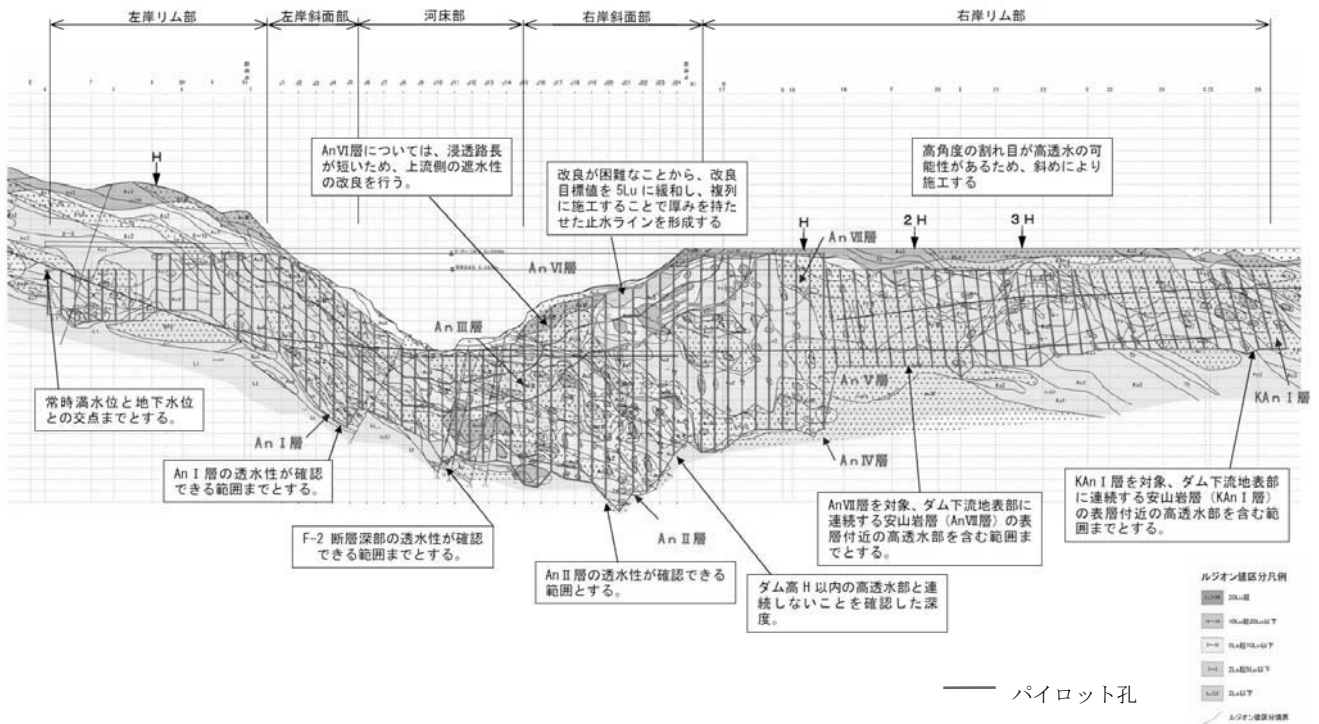


図-8 止水処理（カーテングラウチング）の施工範囲（止水ラインルジオンマップ）

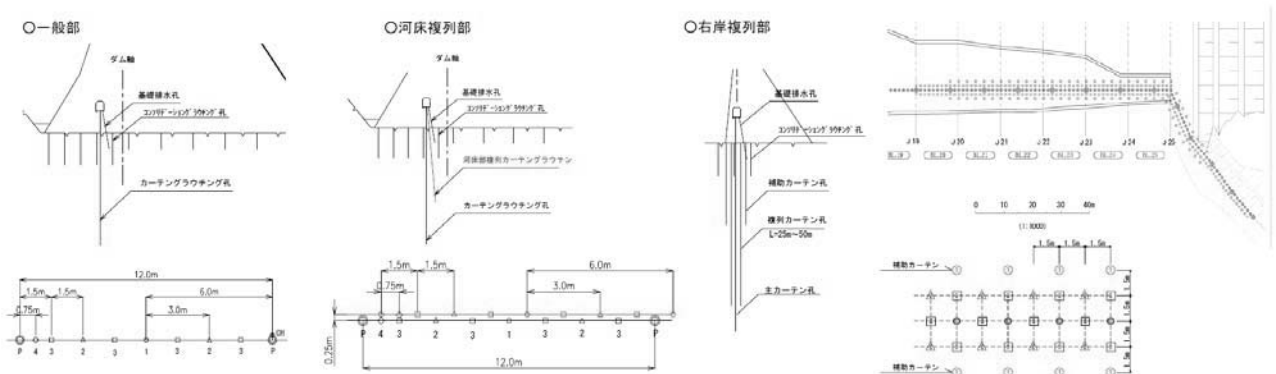


図-9 止水処理（カーテングラウチング）の孔配置パターン

表-3 カーテングラウチングの改良目標値

深度	改良目標値	非超過確率
0~H/4	2Lu程度 ※一部5Lu	85%
H/4~H/2	5Lu	
H/2~	10Lu	

(H:ダム高)

※改良が困難な範囲は改良目標値を緩和し、遮水ゾーンに厚みを持たせる施工とする。

(3) 改良目標値

地山深部においては浸透路長が長くなり、動水勾配が小さくなることから、改良目標値を深度方向に緩和する計画とし、表-3のとおりとした。

また、リム奥行き方向については、基礎深度方向と同様に奥行き方向に緩和するものとする。

(4) 施工時期

堤体部のカーテングラウチングは、原則として監査廊より施工した。ただし、左右岸のアバット部深部及び右岸浅部の複列部については、工程に配慮して、堤体コンクリートより先行して明かりより施工した。

4.3 施工段階での主な変更点

(1) 規定注入圧力の変更

左岸リム部と右岸アバット部深部を先行して施工を開始したが、限界圧力の発生頻度が高く、注入セメント量が多い傾向が見られたため、最高圧力を2.5MPaから1.5MPaに見直しを行った。

表-4 左岸リム部の注入圧力変更前後の限界圧力発生頻度

【変更前】						【変更後】					
圧	0.5MPa	0.7MPa	1.0MPa	1.5MPa	2.0MPa	圧	0.5MPa	0.6MPa	0.8MPa	1.0MPa	1.5MPa
1st	0%	-	-	-	-	1st	2%	-	-	-	-
2nd	-	0%	-	-	-	2nd	-	3%	-	-	-
3rd	-	-	31%	-	-	3rd	-	-	10%	-	-
4th	-	-	0%	0%	-	4th	-	-	4%	0%	-
5th	-	-	-	71%	-	5th	-	-	-	20%	-
6th	-	-	-	0%	-	6th	-	-	-	0%	-
7th	-	-	-	-	30%	7th	-	-	-	2%	-
8th	-	-	-	-	0%	8th	-	-	-	-	4%
9th	-	-	-	-	0%	9th	-	-	-	-	2%
10th	-	-	-	-	0%	10th	-	-	-	-	0%
11th	-	-	-	-	1%	11th	-	-	-	-	0%
12th	-	-	-	-	0%	12th	-	-	-	-	0%
13th	-	-	-	-	2%	13th	-	-	-	-	0%
14th	-	-	-	-	0%	14th	-	-	-	-	0%
15th	-	-	-	-	100%	15th	-	-	-	-	100%
16th	-	-	-	-	100%	16th	-	-	-	-	100%
17th	-	-	-	-	0%	17th	-	-	-	-	0%
18th	-	-	-	-	0%	18th	-	-	-	-	0%

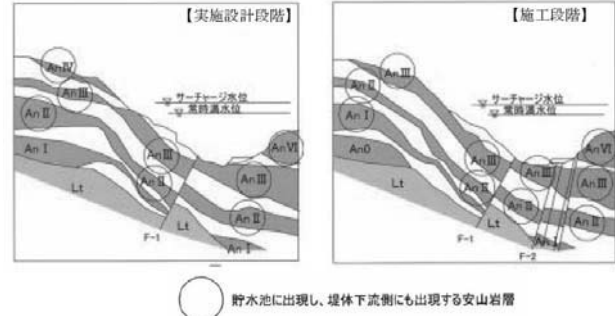


図-10 ダムサイト左岸の地質構造変更内容

(2) 左岸施工深度の変更

左岸掘削及び左岸グラウチングリムトンネルの地質状況から、図-10 に示すように、ダムサイト左岸リム～左岸にかけての安山岩層の見直しを行った。この結果、堤体掘削完了時のダムサイト左岸地質構造に示す An I 層が止水対象に含まれることになり、パイロット孔の施工範囲を変更した。

(3) 右岸アバット部浅部のカーテングラウチングの複列化²⁾

右岸アバット部浅部のやや軟質な自破砕安山岩タイプ3については、2Lu までの改良が困難なことから、改良目標値を緩和し、複列カーテングラウチングにより施工するものとした。図-11 に複列化検討フローを示す。

右岸アバット部の先行施工の結果、浅部を 2Lu 程度まで改良することは困難であることが分かったため、複列化を検討するための試験施工を実施し、また、地質を詳細に見直し、5Lu 程度が改良限界であること。また、複列で5Lu まで改良することで、卓越した水みちが存在しないことを確認し、当該部については、複列カーテングラウチングによる施工に変更した。

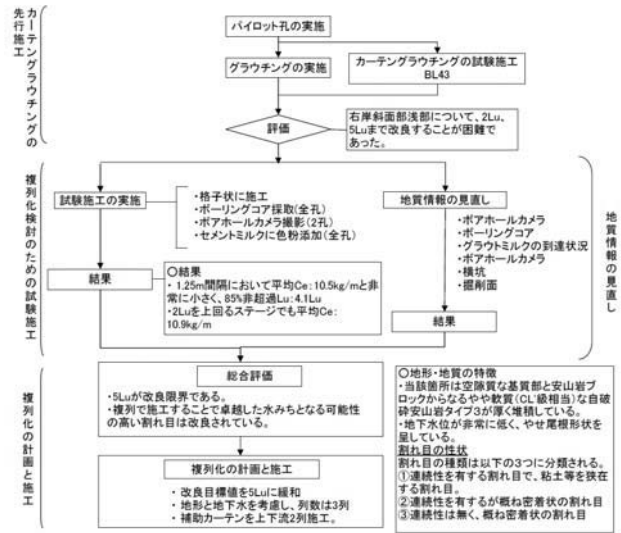
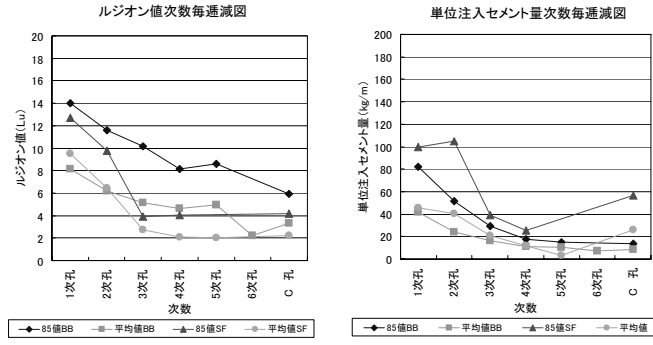


図-11 複列化検討フロー



BB:高炉 B 種セメント, SF:超微粒子セメント ※2 次孔より超微粒子セメントを使用した

図-12 超微粒子セメントと高炉セメントのルジオン値と注入セメント量の低減状況

(4) 右岸複列カーテングラウチング部への超微粒子セメントの適用

右岸アバット部の複列カーテングラウチング施工箇所は、高炉 B 種セメントにより当初注入を行っていたが、追加孔が非常に多く発生する状況であった。

当該箇所は、やや軟質で多孔質である自破砕安山岩であり、その地質性状も起因して、単位注入セメント量も少なく、改良効果が上がらない状況と考えられた。

そのため、効果的に改良することを目的に、超微粒子セメントによる試験施工を実施し、その効果を確認し、注入材料を変更して施工を行った。

施工の結果、超微粒子セメントを用いることで、追加孔数を大きく減じ、改良目標値 5Lu に改良することができた。図-12 に超微粒子セメントと高炉セメントのルジオン値と注入セメント量の低減状況を示す。

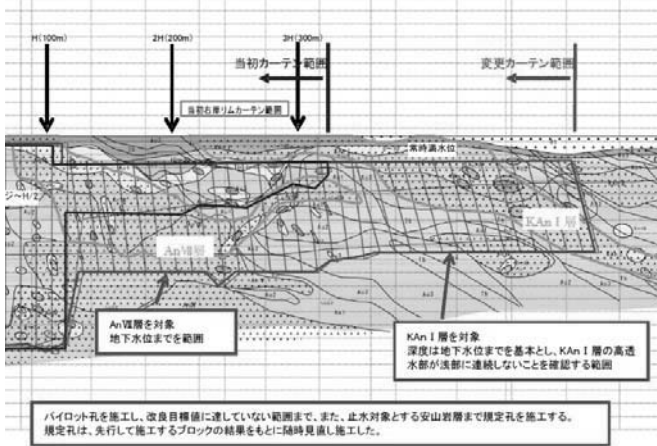


図-13 右岸リムカーテングラウチングの施工範囲

注入セメント量は、超微粒子セメントを用いることで、1ステージ当り平均 17kg/m 程度多くなっている（規定孔の平均）。平均注入時間は超微粒子セメントの方が約 1.5 h/st 長くなった。一方、規定孔数に対する追加孔の発生する割合は高炉セメント施工範囲では 488st/1240st=39.4%，超微粒子セメント施工範囲では 24st/549st=4.4%と大幅に減少した。

(5) 右岸リムの施工範囲の変更

右岸リム部に分布する KAn I 層については、当初、貯水池上流側からダム下流へ連続して分布しており、下流側の赤石川右岸斜面において、サーチャージ水位以下には直接出現せず（難透水である Au 層および Hi 層（日田層）により覆われており、サーチャージ水位以下に直接出現しない）、水みちとなる可能性が低いと判断し、止水対象外としていた。しかし、施工段階において、新たにダムサイト下流側の調査ボーリングなどの地質情報が加わり、サーチャージ水位以下にも出現することが明らかとなった。そのため、KAn I 層についても水みちとなる可能性があるとして判断し、施工範囲を見直した（図-13 参照）。

あわせて、リム部奥行き方向へダム高 H 以遠のパイロット孔の施工深度は、実施設計段階においては、施工深度を H/2 程度としていたが、高透水路が深部においても部分的に見られることから、地下水位までをパイロット孔により透水性を確認することに変更した。

また、図-14 に、KAn I 層の 1mm 以上の開口割れ目と 20Lu 以上を示したステージの割れ目データを示す。これによると、透水性に影響を与えやすい開口している

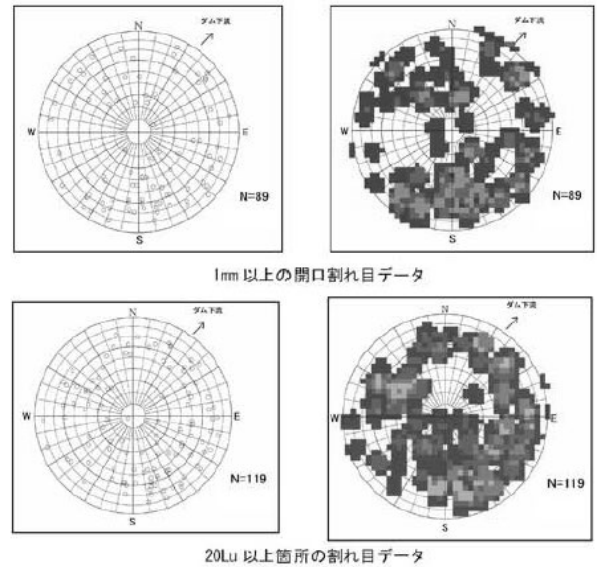


図-14 KAn I 層の割れ目データ(シュミットネット下半球投影)

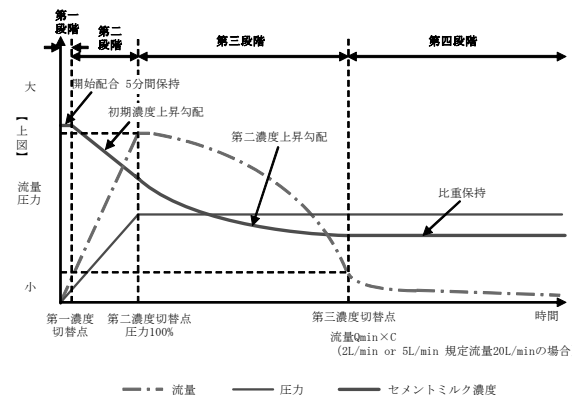


図-15 連続配合切替による濃度切替基準(イメージ)

割れ目、また、実際に 20Lu 以上を示しているステージの割れ目においても、高角度の割れ目が卓越している状況が確認された。そのため、効果的に高角度割れ目を改良するように、グラウチングを斜めに施工する方法に見直した。

(6) 連続配合切替工法の適用³⁾

連続配合切替工法は、グラウチングにおいて注入するセメントミルクの濃度を連続的に自在に変化させることができる技術である。大山ダムにおいては、本工法を試験施工でその効果を確認し、右岸リム部に適用して、効率的なグラウチングを行った。

図-15 に示す濃度切替基準を設定し、以下の点を確認し、適用した。

○ルジオン値低減の次数効果（改良効果）においても、段階配合切替と比べ大きな違いは見られない。

○段階配合切替より注入時間が約 40% 短縮できる。

○連続配合切替による施工で単位注入セメント量、追加孔数を比較しても段階配合切替と同程度以上である。

以上から、右岸リム部のカーテングラウチングにおいて、本施工の注入工法として適用することとした。

(7) 改良が困難な箇所への対応

①河床部左岸浅部の自破砕安山岩部の複列化

河床部左岸浅部の自破砕安山岩部においては、改良目標値 2Lu 程度に対して、5 次孔まで追加孔を実施し、改良目標値に達したことから施工を終了したが、チェック孔を施工した結果、改良目標値を超過するステージが連続して確認された。

この範囲は比較的割れ目の少ない多孔質な自破砕安山岩を主体としており、注入効果が小さくセメントミルクが充填しにくい岩盤性状を呈していることなどから、5 Lu 以下程度が改良限界と判断し、改良目標値を緩和し、複列カーテンを追加して施工とすることとした。(図-16, 写真-2 参照)

また、追加して施工する箇所は、超微粒子セメントを注入材料とした。

②断層部の追加孔

河床部の F2 断層の改良目標値 5Lu の範囲においては、4 次孔まで追加孔を実施し、改良目標値に達したことから施工を終了したが、チェック孔を施工した結果、改良目標値 5Lu の範囲において、改良目標値を超過する箇所が連続して確認された。

この場合、F-2 断層付近においては、改良目標値 5Lu とするためには、規定孔が不足していたと考えられるため、規定孔を 2 次孔から 3 次孔に見直し、必要な箇所を追加孔を施工した。また、追加孔の注入セメント量は非常に少なく、改良効果が上がっていなかったことから、注入材料は超微粒子セメントを用いた。

追加孔施工後は、チェック孔を再度施工し、改良目標値を満足していることを確認した。

これらチェック孔後に不合格と判定して、追加施工を行った箇所の完了判定表を表-5 に示す。

(8) 右岸リム部の規定孔の見直し

右岸リム部において先行して実施した試験施工の結果、パイロット孔においても大部分が改良目標値 (10Lu) を満足しており、ルジオン値の低減傾向も確認されていることから、ダムからダム高 H 相当離れた

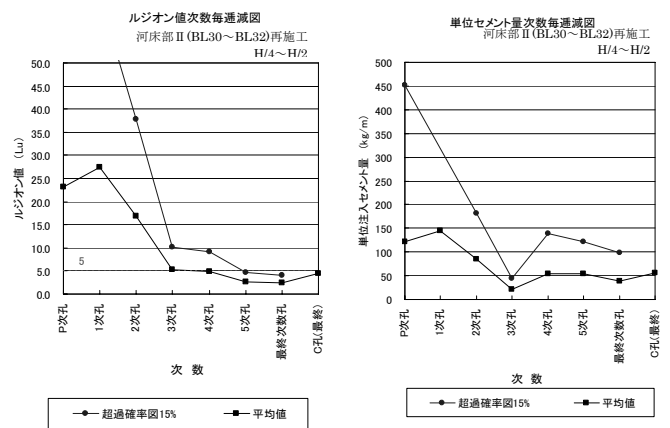


図-17 追加施工した F-2 断層部の低減図

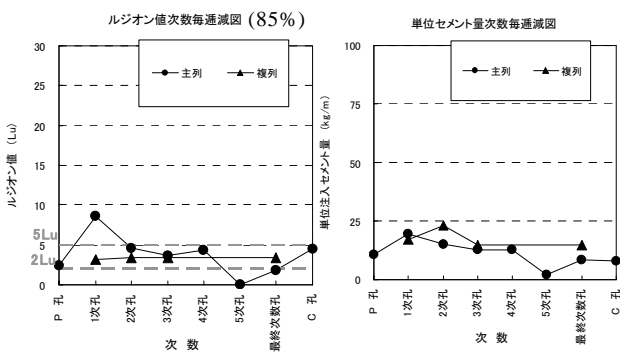


図-16 河床部左岸浅部の自破砕安山岩部の低減

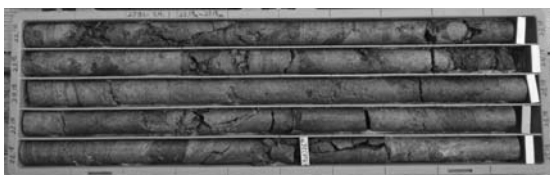


写真-2 河床部左岸浅部のチェック孔
(Lu : 3.7 Ce : 2.6kg/m)

表-5 チェック孔後に追加施工した箇所の完了判定

場所等	ゾーン	河床部 I	河床部 II
	場所・深度		BL26・27 2~5st
地質等		自破砕安山岩	F-2 断層破砕部
改良目標値		2Lu 程度	5Lu
チェック孔施工前の完了判定	85%Lu 値	1.9	4.0
	平均単位セメント量	8.4	14.1
	目標値超過ｽﾀｰｼﾞ数	2	1
	合格判定	○	○
チェック孔の完了判定	85%Lu 値	4.5	全st 超過
	平均単位セメント量	8.0	24.4
	目標値超過ｽﾀｰｼﾞ数	11	4
	合格判定	×	×
対策		改良目標値 5Lu の複列の追加孔を実施。	規定孔間隔を 3 次孔としてカーテンラインに追加孔を実施
対策の結果	改良目標値	5Lu	5Lu
	85%Lu 値	3.4	4.2
	平均単位セメント量	14.7	39.1
	目標値超過ｽﾀｰｼﾞ数	0	1
	合格判定	○	○
再チェック孔		-	○
判定		追加孔の最終次数孔で 5Lu を超過するステージはなく、完了	チェック孔の結果も改良目標値を超過するステージはなく、完了

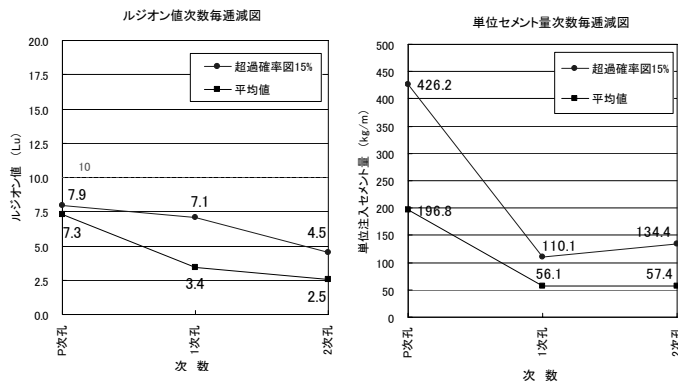


図-18 右岸リム部試験施工結果

箇所については、規定孔を1次孔として施工した。

その結果、チェック孔で改良目標値を超過する確率は2%程度であり、規定孔間隔は適切であることを確認した。

右岸リム部試験施工結果についての特徴をまとめると以下のとおりである。

- ルジオン値は大部分が10Lu以下であるが、局所的に20Luを超過するようなステージが存在する。
- 1,2次孔でも10Luを超過する値が見られるが、その値は比較的小さい(13Lu程度以下)、また、連続して10Luを超過するステージは見られていない。
- 単位注入セメント量は1次孔を境に大きく低減する。
- ダムからダム高(H)相当以上離れており、浸透路長は長い。
- 2次孔のステージだけで10Luの超過確率は3.5%であり、1次孔で十分な改良効果が得られている。

以上のことからパイロット孔の注入により大きな水みちの恐れとなる高透水箇所にはある程度注入できているものと考えられる。ただし、施工においては、1次孔は6mと孔間隔も広いことから、10Luを超過するステージがある場合には追加孔を実施し、改良目標値を超過するステージが連続しないことを確認した。

5. まとめ

大山ダムでは、止水処理を計画するため、その地質の透水性状を分析し、割れ目の発達した安山岩が水みちになりうるものと考え、上下流に安山岩ユニットが連続するものを対象としてカーテングラウチングの施工範囲とする計画とした。

施工を進める中では、新たに得られる地質情報や限界圧力の発生状況、改良が困難な状況等がみられ、注入圧力や施工範囲、遮水ゾーンの厚み、注入材料、規定孔間隔等を逐次見直ししながら、適切なカーテングラウチングとなるように施工した。

カーテングラウチングは、総注入区間 52,566m、総注入セメント量 4,474t、総注入時間は 30,607 時間であった。

6. おわりに

現在(平成23年9月)、大山ダムは試験湛水を実施しているところである。止水処理の効果は、実際に貯水してはじめて明らかとなる部分も多く、その状況は注視していく必要がある。

平成15年にグラウチング指針が改訂され、ダムのグラウチングは、更に合理的に施工するため、各ダムの特性を踏まえ、施工状況に応じて、施工仕様を継続的に見直すこととなっている。そのため、グラウチングが過大となっていないかという視点も重要だが、地質的な課題を抱えたダムにおいては、施工の不足という視点で施工結果を分析することが特に重要となっている。本事例が、地質的に同様の課題を持つ他ダムの建設に当たり、参考になれば幸いである。

最後に本報告の検討を行うにあたって、ご指導、ご協力を頂いている大山ダムグラウチング委員会、(独)土木研究所の方々及び施工業者の(株)熊谷組とその協力会社の方々に謝意を表します。

参考文献

- 1) グ라우チング技術指針・同解説、財団法人国土技術研究センター、2003
- 2) 前田俊郎、松尾誠、松尾達也：大山ダム右岸斜面部のカーテングラウチングの複列化、大ダム、No. 215, 11-21, 2011
- 3) 對馬和孝、前田俊郎、松岡義幸：大山ダムのグラウチング工における連続配合切替の適用、ダム技術、No. 292, 64-74, 2011

大山ダムの地質と止水処理 (カーテングラウチング)について

独立行政法人水資源機構 前田俊郎

大山ダム建設事業の概要

事業の概要

- 場所 大分県日田市(筑後川水系赤石川)
- 目的
 - ・洪水調節(筑後川の洪水防衛)
 - ・安定的な水利と河川環境の保全
 - ・水道用水の供給
- 諸元
 - 形式: 重力式コンクリートダム
 - 高さ: 94m
 - 堤体積: 約55万m³
 - 総貯水容量: 1,960万m³
- 事業費 約1,400億円
- 工期 昭和58年度~平成24年度



事業の現況

- 経緯
 - 昭和58年度 実施計画調査着手
 - 平成4年度 事業実施計画の認可
 - 平成19年度 ダム本体工事に着手
 - 平成23年度 試験湛水開始
- 事業の進捗状況
 - ・全ての水没家屋(41戸)の移転完了。
 - ・平成23年度は、ダム本体工事、管理設備工事等を実施。



大山ダム建設事業の概要

進捗状況: 平成23年5月10日から試験湛水を開始。
貯水位を洪水時最高貯水位(サーチャージ水位)に向けてあげる操作を実施中。



ダム本体の状況(平成23年10月3日)(上流面)

大山ダムのカーテングラウチングの特徴

複雑な水理地質構造

地質的に比較的新しい溶岩が基礎岩盤を形成。
透水性状の異なる安山岩と自破砕安山岩が互層状に累重する構造のため、水理地質構造は複雑。

深く範囲の広いカーテングラウチング

カーテングラウチングの施工深度が最大でダム高の約2倍(約180m)と非常に深い。(通常は最大でもダム高程度)
リム方向も範囲は広く、特に右岸リム方向はダム高の約5倍程度までを施工範囲とした。

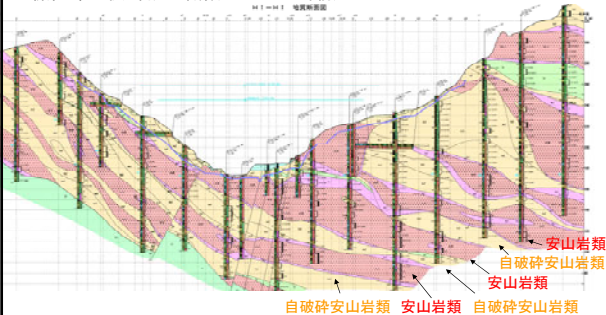
施工結果に応じた見直し

- ・地質を随時見直しながら、施工に反映。
- ・改良が困難な箇所等については、施工途中で一部を複数カーテンに変更したり、注入材料を変更するなど、随時計画の見直しを実施。

大山ダムの地質

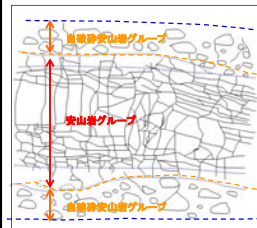
地質断面図(ダム軸)

・新第三紀の釈迦岳火山岩類(310~410万年前)



ダムサイトは安山岩類と自破砕安山岩類が互層に分布

大山ダムの地質

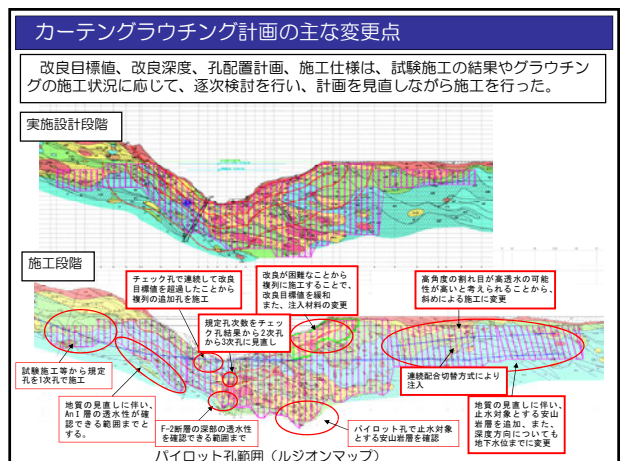
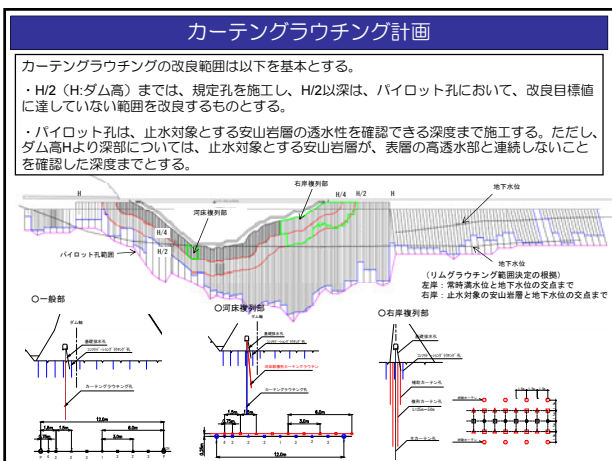
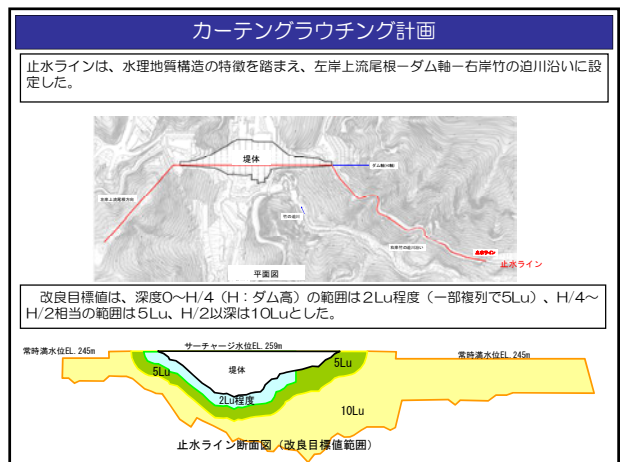
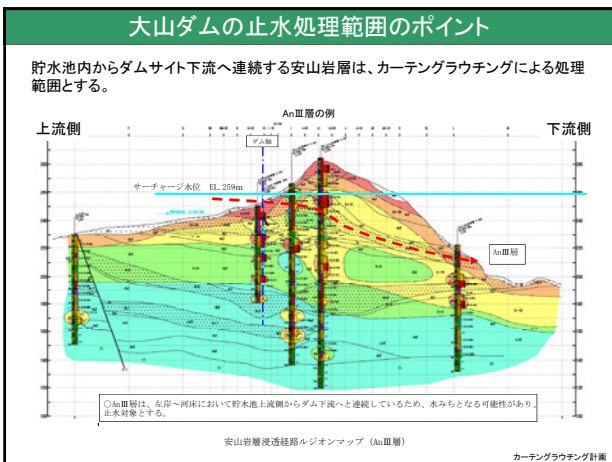
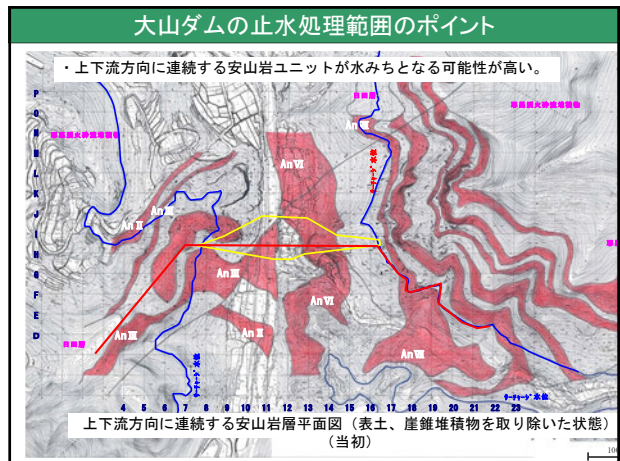
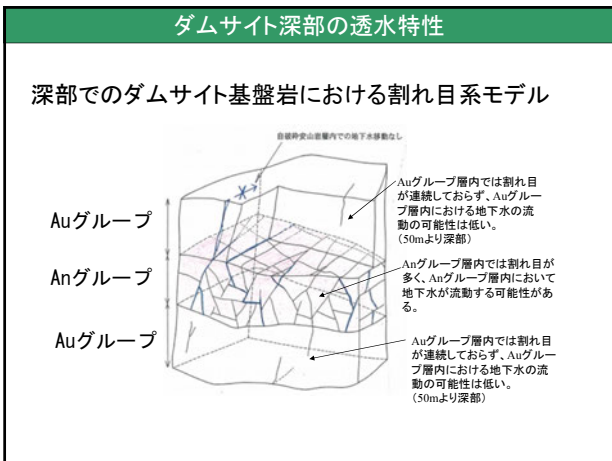


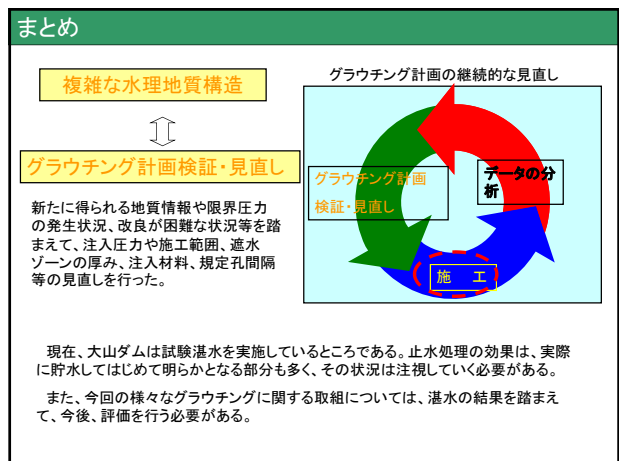
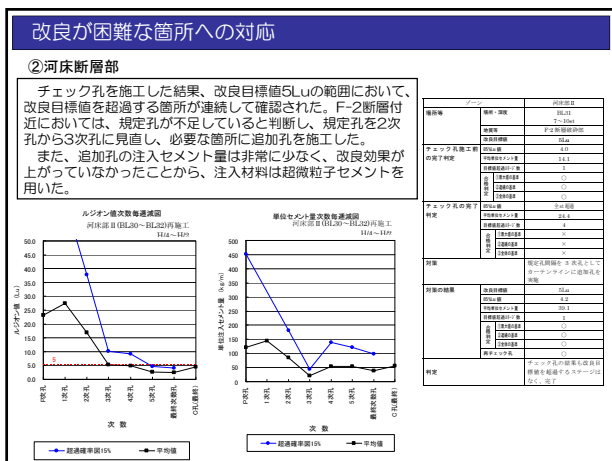
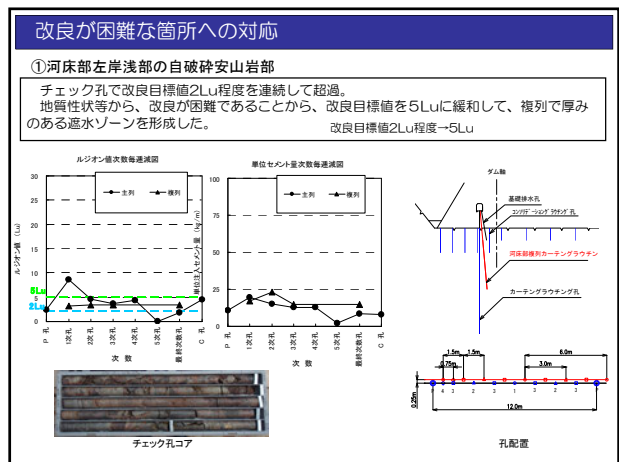
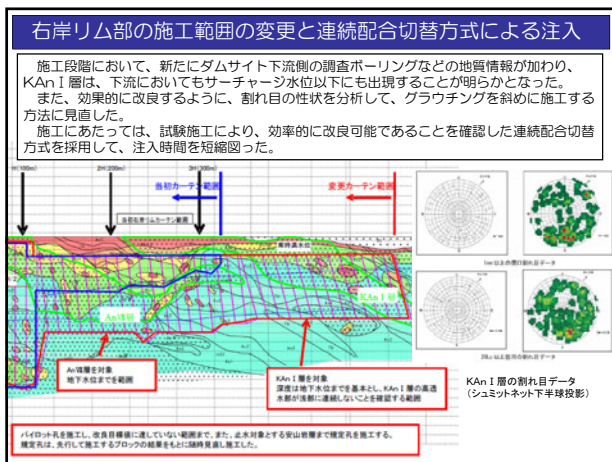
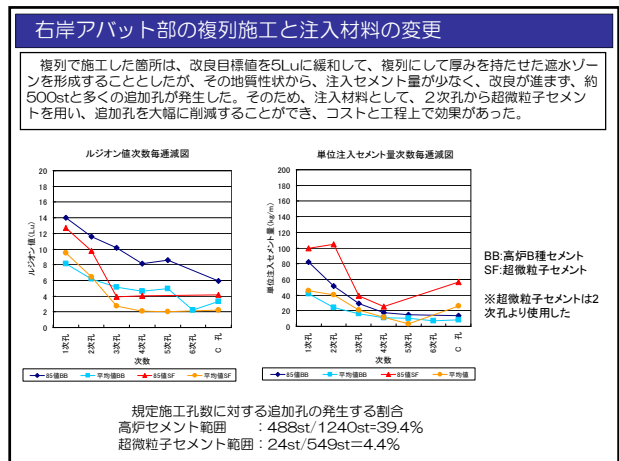
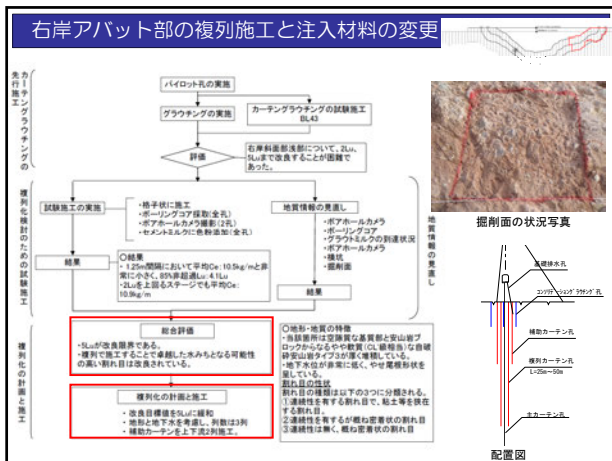
溶岩流模式図



露頭地質境界部(例)

安山岩 : 堅硬、割れ目が発達
自破砕安山岩: やや軟質、割れ目が少ない





5. 開催報告

5. 「ダム基礎グラウチングに関するシンポジウム」 開催報告

(ダム技術 No.302 2011年11月掲載原稿に加筆)

山口嘉一

独立行政法人土木研究所水工研究グループ水工構造物チーム上席研究員、博（工）
ダム基礎グラウチングに関するシンポジウム実行委員、技術委員長

坂本博紀

独立行政法人土木研究所水工研究グループ水工構造物チーム研究員
ダム基礎グラウチングに関するシンポジウム技術委員

キーワード：基礎処理、グラウチング、技術指針、透水性評価、新技術

1. はじめに

地盤や構造物の間隙、割れ目、空洞等に止水や強度増加の目的で硬化材料を注入するグラウチングは、土木工事において最も一般的な工法の一つである。この工法は、今から200年以上前の1802年にフランスの技術者である Charles Berigny により発明された。彼は、この工法を“Injection Process”と称して、粘土と石灰の懸濁液を注入することにより石積擁壁の補修を行った。その後、注入材料としてのポルトランドセメントの発明（1824年）や工法の改善等によりグラウチング技術は着実に進歩した。さらに、ダム工事にグラウチング（セメントグラウチング）が大々的かつ系統的に用いられるようになったのとはほぼ時を同じくして、近代的グラウチング工法が1920年代に開花した。ダム工事における体系的なグラウチング、特にセメントグラウチングは、1932年から1935年にかけて米国のColorado川に米国内務省開拓局により建設された Hoover ダムにおいて結実した。その後もグラウチング技術は着実に進歩してきたが、この技術が直接目で見えない地中における工法を対象にしているため、その技術進歩は他の土木分野の技術とは異なり科学的な調査・研究よりも、現場技術者の経験と勘に負うところが大きかった。

我が国では戦後の経済復興期に大型ダムが相次いで建設された。当時、最先端の欧米の技術が導入されるとともにダム基礎グラウチングの重要性が認識され、多くの施工事例が蓄積された。それらを踏まえて1972年には、土木学会岩盤力学委員会が『ダム基礎岩盤グラウチングの施工指針』をとりまとめた。

また1983年には、全てのダムで安全で確実なグラウチングが実施されるように、当時の施工実績を踏まえて、建設省河川局開発課の監修により『グラウチング技術指針・同解説』が刊行されるとともに建設省河川局開発課長通達がなされ、我が国のダム基礎グラウチングの標準化がなされた。

さらにその後、個々のダムサイトにおける地質の多様化や社会資本整備に対するコスト縮減への社会的要請を受け、個々のダムサイトの地質状況に応じたグラウチングの計画、設計、施工を達成すべく、2003年に（財）国土技術研究センターの編集で『グラウチング技術指針・同解説』が刊行されるとともに国土交通省河川局治水課長通達がなされた。2003年の改訂の主旨は、安全性を損なわないことを

前提として、①各種グラウチングの施工目的、施工範囲の明確化、②基礎地盤の多様性を考慮した（基礎地盤性状に応じた）グラウチングの実施、③施工中の逐次評価による計画合理化の妥当性の検証および必要に応じた見直し、の3点を主要ポイントとし、グラウチングの合理化を図ることにある。

2003年の指針改訂後、各ダムにおいて、改訂の主旨に則ったグラウチングの合理化の検討および実施がなされるとともに、各ダムサイトの水理地質特性を踏まえた、新材料、新工法などの新技術の導入検討も併せて進められてきている。一方で、改訂の主旨を十分に踏まえていない合理化対応による課題も明らかになってきており、改めて指針改訂の主旨の徹底とそこから発生する技術的課題解決に向けたさらなる検討が求められてきている。

このような背景から、独立行政法人 土木研究所と一般社団法人 ダム工学会は、産官学の技術者、研究者が一同に会し、ダム基礎グラウチングの技術指針改訂以降の施工事例、新たな技術開発やその適用事例などについて技術共有を図るとともに、討議を通して今後の検討課題を明確にする目的から、「ダム基礎グラウチングに関するシンポジウム」（以下、「グラウチングシンポジウム」と称す）を、財団法人 ダム技術センターの協賛も得て、2011年10月7日（金）に、東京都千代田区内神田において共同開催した。なお、本シンポジウムは、昨年の「ダムの安全管理・点検のための最新計測技術に関するシンポジウム」に引き続く、独立行政法人 土木研究所と一般社団法人 ダム工学会の共同開催シンポジウムとなった。

本シンポジウムは、予想を上回る78名の参加者を得る盛況であったが、ここではシンポジウムの概要について報告する。

2. シンポジウムの準備

グラウチングシンポジウムの開催にあたり、実行委員会と技術委員会を組織した。

実行委員会は、グラウチングシンポジウムの運営に当たった。実行委員会の委員名簿を表-1に示す。

表-1 実行委員会の委員名簿

役職	名前	所属
共同実行委員長	田中忠次	一般社団法人 ダム工学会副会長 社団法人 地域環境資源センター 理事長
共同実行委員長	安部友則	独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ長
実行委員	山口嘉一	独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ 上席研究員
実行委員	佐々木靖人	独立行政法人 土木研究所 地質・地盤研究グループ 上席研究員
実行委員	池田 隆	一般社団法人 ダム工学会 企画運営委員会副委員長 財団法人 ダム技術センター企画部長

*)敬称略。

また、技術委員会は、グラウチングシンポジウムの論文募集、論文収集、書式チェック、論文集印刷を担当した。技術委員会の委員名簿を表-2に示す。

表-2 技術委員会の委員名簿

役職	名前	所属
技術委員長	山口嘉一	独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ 上席研究員
顧問	西垣 誠	国立大学法人 岡山大学大学院 教授
技術委員	宮内茂行	一般社団法人 ダム工学会学術研究発表会小委員会委員長 独立行政法人 水資源機構 総合技術センター マネージャー

技術委員	森 芳夫	一般社団法人 ダム工学会 学術研究発表会小委員会副委員長 日本工営株式会社
技術委員	坂本博紀	独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ 研究員
技術委員	大舘 渉	独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ 交流研究員
技術委員	吉田諭司	独立行政法人 土木研究所 水工研究グループ 交流研究員

*)敬称略。

なお、シンポジウムの総務関係の運営にあたり、目黒信晴氏（(財)ダム工学会 学術研究発表会小委員会委員、飛島建設（株））、浅井直人氏（(財)ダム工学会 学術研究発表会小委員会委員、(社)ダム水源地環境整備センター）、小堀俊秀氏（(独)土木研究所）の協力を得た。

3. プログラム

グラウチングシンポジウムのプログラムを表-3に示す。午前中は、開会式に引き続き、3つのキーノートレクチャーが行われた。午後は、一般投稿の11編の論文の発表が、3つテクニカルセッションに分けて実施されたあと、閉会式によりシンポジウムが締めくくられた。

表-3 グラウチングシンポジウムのプログラム

09:30 - 09:45	共同実行委員長挨拶 田中 忠次 ダム工学会副会長、(社) 地域環境資源センター 理事長
09:45 - 10:25	キーノートレクチャー1 グラウチングの現状と今後の課題 西垣 誠 国立大学法人 岡山大学大学院
10:25 - 11:05	キーノートレクチャー2 ダム基礎グラウチングにおける最近の技術的課題 山口 嘉一 (独) 土木研究所
11:05 - 11:45	キーノートレクチャー3 今後の水理地質構造調査に必要と考えられること 佐々木 靖人 (独) 土木研究所
11:45 - 12:00	質疑応答
12:00 - 13:00	休憩
13:00 - 13:45	テクニカルセッション① 設計・計画と合理化 座長：山口 嘉一 (独) 土木研究所
TS-1-1	高濃度グラウトの岩盤亀裂内への浸透挙動予測モデルと注入管理手法 小林 伸司 清水建設(株)
TS-1-2	難改良性地盤や被圧水下における合理的なグラウチング技術 中島 雅和 日特建設(株)
TS-1-3	グラウチングにおける合理化検討 尾後 大輔 国土交通省 九州地方整備局 (代理：沖永 泰知 国土交通省 九州地方整備局)
13:45 - 14:00	休憩
14:00 - 15:00	テクニカルセッション② 材料と効果の評価 座長：西垣 誠 国立大学法人 岡山大学大学院
TS-2-1	セメント粒子の形状に着目したセメントグラウトの室内注入試験 佐藤 弘行 (独) 土木研究所
TS-2-2	ダム基礎地盤における水ガラス系グラウトの長期止水性に関する検討 田頭 秀和 (独) 農業・食品産業技術総合研究機構
TS-2-3	不飽和地盤における原位置透水試験の安定流量評価法 坂本 博紀 (独) 土木研究所
TS-2-4	グラウチングによる岩盤の力学的改良効果に関する実験的研究 —変形特性と強度特性に関する定量的評価とダム基礎設計・施工への展開— 宇津木 慎司 ハザマ
15:00 - 15:15	休憩
15:15 - 16:15	テクニカルセッション③ 事例研究 座長：佐々木 靖人 (独) 土木研究所
TS-3-1	留萌ダムにおけるグラウチングの合理化施策 長原 寛 国土交通省 北海道開発局 (代理：森 貴信 日本工営(株))
TS-3-2	森吉山ダムカーテングラウチング合理化施工の取り組み 川村 健弘 国土交通省 東北地方整備局
TS-3-3	重力式コンクリートダムの基礎グラウチングにおける合理化施工について 新屋 裕生 九州電力(株)
TS-3-4	大山ダムの地質と止水処理(カーテングラウチング)について 前田 俊郎 (独) 水資源機構
16:45 - 17:00	閉会の挨拶 安部 友則 (独) 土木研究所

*)敬称略。

4. 開会式

開会式では、共同実行委員長の田中忠次氏（ダム工学会副会長、（社）地域環境資源センター 理事長）が挨拶を行った。田中共同実行委員長（写真-1 参照）からは、グラウチング技術指針の改訂以降のグラウチング技術に関する現状を概説していただくとともに、グラウチングシンポジウムの開催の意義について紹介いただいた。



写真-1 田中共同実行委員長の開会の挨拶



写真-2 会場状況

5. キーノートレクチャー

岡山大学大学院の西垣教授には、「グラウチングの現状と今後の課題」と題してご講演をいただいた（写真-3 参照）。ダム基礎のグラウチングに留まらず、ダム技術者が普段は接することの少ない他分野におけるグラウチング技術の最新の動向や課題などについての幅広い情報や極超微粒子セメント等のグラウチング技術に関する最新の知見を提供して頂くとともに、地下水位に基づく止水性改良効果の評価等の建設的なご提案を頂いた。



写真-3 岡山大学大学院 西垣教授の講演

土木研究所の山口は、「ダム基礎グラウチングにおける最近の技術的課題」と題して講演を行った（写真-4 参照）。山口は、グラウチング技術の変遷と 2003 年（平成 15 年）に実施されたグラウチング技術指針（以下「技術指針」という）の改訂経緯について説明を行うとともに、現時点におけるグラウチング技術の課題および改訂技術指針に基づく合理化のあり方についての課題を説明した。



写真-4 土木研究所 山口の講演

最後に、土木研究所の佐々木上席研究員より、「今後の水理地質構造調査に必要と考えられること」と題したご講演をいただいた（写真-5 参照）。ダム基礎の水理地質構造調査に基づく透水性評価のあり

方について、止水上の問題となり得る地盤特性に基づいて6種類の地質分類に区分した上で、各地質分類の概要についてご説明を頂くとともに、今後の水理地質構造の評価にあたり従来の調査手法に加えて考慮すべき事項についてのご提案を頂いた。

これらのキーノートレクチャーでは、現在のグラウチング技術に関する様々な課題が提示され、今後のグラウチングおよび地盤透水性評価に関する技術の検討の方向性を絞り込む一助になったものと思われる。



写真-5 土木研究所 佐々木上席研究員の講演

6. テクニカルセッション（一般論文発表）

6.1 概説

一般発表では、11編の論文が発表された。検討項目に基づく発表論文の分類を表-4に示す。11編のうち5編の論文（*TS-1-3*、*TS-3-1*～*4*）において、2003年の指針改訂の主旨を踏まえた各種の合理化検討の結果の報告がなされた。合理化の検討項目は、適切な規定孔間隔や施工深度、改良目標値の見直し（緩和）やカーテングラウチングの複列化、注入圧力や注入配合などといった検討に加えて、複数ステージの一括注入、連続配合切替工法などの導入や、透水試験に関する検討として無段階水押試験や長時間透水試験など、その検討範囲はきわめて多岐にわたっている。

その他の論文では、難改良地盤に対する注入材料からの検討として、超微粒子セメントのさらなる細粒化（極超微粒子セメント）（*TS-1-2*）や球形化（*TS-2-1*）に関する検討のほか、既設ダムに使用された水ガラス系グラウトの長期止水性（*TS-2-2*）に関する検討も紹介された。また、注入効率を高めることを目的とした工法に関する検討として、高濃度グラウト工法（*TS-1-1*）や動的注入工法（*TS-1-2*）が紹介された。さらに、高標高部における不飽和軟岩地盤の飽和透水係数を実務的な時間内評価する方法（*TS-2-3*）やグラウチングによる力学的特性の改良を積極的に評価する研究（*TS-2-4*）といった注入効果評価に関する研究も紹介された。

表-4 検討項目に基づく発表論文の分類（全11編）

検討項目	発表論文番号
合理化検討の事例	<i>TS-1-3</i> 、 <i>TS-3-1</i> 、 <i>TS-3-2</i> 、 <i>TS-3-3</i> 、 <i>TS-3-4</i>
材料	<i>TS-1-2</i> 、 <i>TS-2-1</i> 、 <i>TS-2-2</i>
新工法	<i>TS-1-1</i> 、 <i>TS-1-2</i>
注入効果評価	<i>TS-2-3</i> 、 <i>TS-2-4</i>

*)*TS-1-2*では、2項目の内容が含まれている。

なお、テクニカルセッションは、主に設計・計画段階における合理化検討に適用が望まれる技術に関する発表であるテクニカルセッション①「設計・計画と合理化」（3編）、グラウト材料や改良効果の評価に関する発表を行ったテクニカルセッション②「材料と効果の評価」（4編）、技術指針改訂後に施工された実ダムにおける合理化事例について発表を行ったテクニカルセッション③「事例研究」（4編）と3つに分けて実施した。以下にそれぞれのセッションにおいて発表された論文の概要をまとめる。

6.1 テクニカルセッション①「設計・計画と合理化」

テクニカルセッション①では、他分野におけるグラウチングの活用事例や技術指針改訂後に検討された合理化事例など今後の基礎処理に関する設計・計画への適用検討が期待される3つの論文発表が行われた。座長は（独）土木研究所 山口嘉一、進行補助は（独）土木研究所 吉田諭司氏であった（写真-6参照）。以下にそれぞれの発表論文の概要を示す。なお、概要を示すにあたり、その主語は論文著者としている。



写真-6 座長 山口、進行補助 吉田氏

TS-1-1 高濃度グラウトの岩盤亀裂内への浸透挙動予測モデルと注入管理手法

発表者：小林伸司氏、清水建設（株）（写真-7 参照）

概要：

北欧では、許容湧水量が厳しい環境配慮型トンネルを高濃度グラウトにより効率的に施工するために、グラウト浸透挙動に関する研究が盛んに実施されてきている。清水建設（株）では、スウェーデンのエスポ硬岩研究所との共同研究として、北欧で構築されたグラウト浸透理論に基づき、大深度地下利用に有利である硬質な亀裂性岩盤を対象とした高濃度グラウトの浸透挙動予測モデルを構築し、浸透挙動予測モデルを利用した合理的な注入管理手法を提案した。さらに、エスポ硬岩研究所における試験結果にモデルを適用し検証を行った。本発表では、上記に示す研究成果について報告した。



写真-7 小林氏の発表

TS-1-2 難改良性地盤や被圧水下における合理的なグラウチング技術

発表者：中島雅和氏、日特建設（株）（写真-8 参照）

概要：

ダム基礎を対象として発展してきたグラウチング技術が近年、他の分野に応用され、早期固化型超微粒子注入材、極超微粒子注入材等のグラウトや、動的注入、超高压注入等の注入システムが実用化されて、新たな展開を見せつつある。一方、新設ダムのグラウチングはもちろん、既設ダムの補強・補修グラウチングにおいても、難改良性地盤や被圧水に対する効果的、効率的なグラウチング方法の提案が求められている。本発表では、前者の新しい技術を紹介するとともに、それらを後者の課題に適用する場合の方法および適用有効範囲等について報告した。



写真-8 中島氏の発表

TS-1-3 グ라우チングにおける合理化検討

発表者：尾後大輔氏、国土交通省九州地方整備局（代理：沖永泰知氏、国土交通量九州地方整備局）（写真-9 参照）

概要：

2003年（平成15年）7月に改訂された「グラウチング技術指針」では、①各種グラウチングの本来の施工目的・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安全性を損なわないことを前提としたグラウチングの合理化を図ることを求められており、基礎掘削面の観察や施工時のデータ収集と分析など、現場技術者の適切な技術的判断が従来以上に必要となった。本発表では、技術指針改訂後に九州で初めてグラウチングを実施した嘉瀬川ダム（重力式コンクリートダム）の施工事例及び現在グラウチング計画を検討している大分川ダム（中央コア型ロックフィルダム）でのグラウチング試験施工などを踏まえ、九州グラウト部会にて合理化に関する議論を行った内容について報告した。



写真-9 沖永氏の発表

6.2 テクニカルセッション②「材料と効果の評価」

テクニカルセッション②では、グラウト材料やグラウチングによる改良効果の評価に関する研究として4つの論文発表が行われた。座長は岡山大学大学院 西垣誠教授、進行補助は(独) 土木研究所 小堀俊秀氏であった(写真-10 参照)。以下にそれぞれの発表論文の概要を示す。



写真-10 座長 西垣教授、進行補助 小堀氏

TS-2-1 セメント粒子の形状に着目したセメントグラウトの室内注入試験

発表者：佐藤弘行氏、(独) 土木研究所 (写真-11 参照)

概要：

近年、超微粒子セメントでも遮水性改良が困難なダム基礎地盤がある。ダム基礎地盤のグラウト材料にはセメント使用が基本であり、微細亀裂やマサへの注入性向上を図ったセメントの検討を行う必要がある。セメント粒子は非球形不規則形状をしており、それを球形化することにより、微細亀裂への注入性向上が期待される。そこで、(独) 土木研究所では高速気流中衝撃法で球形化処理をした超微粒子セメントのグラウトを用いて、幅 $50\mu\text{m}$ の亀裂への室内注入試験を行った。本発表では、これらの試験結果から得られた球形化処理をした超微粒子セメントの注入時における特性について報告した。



写真-11 佐藤氏の発表

TS-2-2 ダム基礎地盤における水ガラス系グラウトの長期止水性に関する検討
 発表者：田頭秀和氏、(独) 農業・食品産業技術総合研究機構 (写真-12 参照)
 概要：

近年、恒久的な材料として使用可能な薬液グラウトが構造物基礎の液状化対策等の分野で普及し始めているが、1983 年以前に使用された薬液はこれとは異なる従前タイプのものである。その一方で、当時の仕様を対象にした薬液グラウトの長期耐久性に関する研究事例は少なく、未解明な部分が多い。さらに、フィルダム基礎深部における止水性についての観測が困難な場合があることに加え、グラウト施工箇所における削孔調査は実施困難であるため、現状および将来的な止水性能を把握することができない状況にある。そこで、(独) 農業・食品産業技術総合研究機構農村工学研究所ではダム基礎地盤に注入された水ガラス系グラウトの長期止水性について室内試験によって検討した。この際、供試体を用いた長期透水試験を実施するとともに、貯水池の繰返し水位変動が水ガラス系固結砂の耐久性に与える影響も検討した。本発表ではこれらの研究成果について報告した。



写真-12 田頭氏の発表

TS-2-3 不飽和地盤における原位置透水試験の安定流量評価法

発表者：坂本博紀、(独) 土木研究所 (写真-13 参照)

概要：

近年、コスト縮減と環境保全の観点から、堤高の低い範囲では風化軟岩盤や未・低固結の堆積軟岩盤を基礎とする事例が増えてきている。これらの地盤では、地下水位が低く不飽和帯となっている場合、浸透形態が非定常浸透となるため、地盤の透水性を適切に評価するためには長時間透水試験を実施することが望ましいが、工期やコストの制約からこの試験方法を数多く実施することは難しい。そこで、土木研究所では、原位置透水試験と飽和-不飽和浸透流解析を併用することで、実務的な試験時間内における試験結果から長時間透水試験による最終的な安定流量の推定方法について提案し、本手法によって得られた安定流量の再現性を検証した。本発表では長時間透水試験の有用性を示すとともに土木研究所で提案した推定方法とその適用性について報告した。



写真-13 坂本の発表

TS-2-4 グラウチングによる岩盤の力学的改良効果に関する実験的研究

— 変形特性と強度特性に関する定量的評価とダム基礎設計・施工への展開 —

発表者：宇津木慎司氏、ハザマ (写真-14 参照)

概要：

グラウチングによる岩盤の力学的な改良効果については、定量的な検討事例が少ないこともあり、その改良効果がダム基礎設計に見込まれていない。これに対して、京都大学、ハザマなどでは岩盤の変形特性および強度特性に関する改良効果を定量的に確認することを目的として、原位置において多種の岩盤でグラウチング前後に原位置岩盤試験を実施するとともに、割れ目を模した供試体を用いた室内せん断試験を行った。これらの試験結果の分析に基づき、グラウチングによる岩盤の改良効果を見込んだダム基礎設計への展開について具体的な検討を行った。本発表ではこれらの研究成果について報告した。



写真-14 宇津木氏の発表

6.3 テクニカルセッション③「事例研究」

テクニカルセッション③では、技術指針改訂後にグラウチングが実施されたダムにおける合理化の事例として、4つの論文発表が行われた。座長は(独) 土木研究所 佐々木靖人上席研究員、進行補助は(独) 土木研究所 大館渉氏であった(写真-15 参照)。以下にそれぞれの発表論文の概要を示す。



写真-15 座長 佐々木上席研究員、進行補助 大館氏

TS-3-1 留萌ダムにおけるグラウチングの合理化施策

発表者：長原寛氏、国土交通省北海道開発局（代理：森貴信氏、日本工営（株））（写真-16 参照）

概要：

近年、良好なダムサイトが減少する一方で、社会資本整備に対するコスト縮減への社会的要請から、個々のダムに適した合理的なグラウチングが望まれている。留萌ダム（中央コア型ロックフィルダム）では、グラウチング施工中の注入状況を分析して基礎岩盤の透水性状を把握し、適宜基礎岩盤の透水性に適合する注入仕様でグラウチングを実施した。その結果、概ね合理的な孔配置、改良範囲、注入仕様が設定され、所要の機能を得る効果とコスト縮減が図られた。本発表では、グラウチング合理化のため

の施工仕様の改良、ならびに効果の検証を中心に留萌ダムにおけるグラウチングの概要を報告した。



写真-16 森氏の発表

TS-3-2 森吉山ダムカーテングラウチング合理化施工の取り組み

発表者：川村健弘氏、国土交通省 東北地方整備局（写真-17 参照）

概要：

森吉山ダムは、米代川水系阿仁川の右支川小又川に建設された中央コア型ロックフィルダムである。森吉山ダムのカーテングラウチングは、2003年（平成15年）2月から施工が開始され2005年度（平成17年度）までに完了させている。その間、止水ラインの大部分が低透水を示しセメント注入量なども少ないことや、当初、高透水が想定されていた左岸及び河床部は凝灰岩類が分布する低透水帯であることが確認されていた。これらの状況を踏まえ、森吉山ダムでは、カーテングラウチングの合理化施工として、①無段階水押し試験、②ロングステージ注入（2ステージ一括注入）、③施工深度の見直し（H/4深度以深の省略：Hは堤高）などに取り組んできた。本発表では上記の合理化に関する概要と施工結果について報告した。

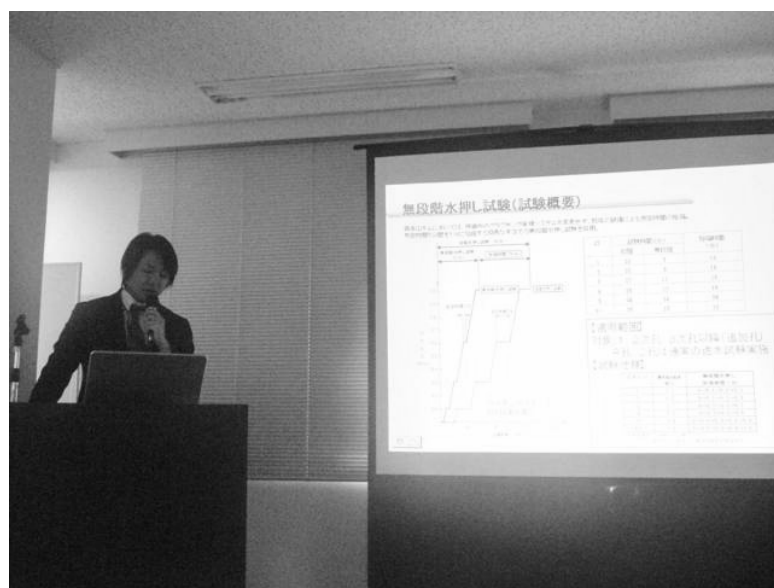


写真-17 川村氏の発表

TS-3-3 重力式コンクリートダムの基礎グラウチングにおける合理化施工について

発表者：新屋裕生氏、九州電力（株）（写真-18 参照）

概要：

九州電力小丸川発電所は、宮崎県児湯郡木城町に位置する最大出力 120 万 kW の揚水発電所であり、発電所の下部調整池として建設した石河内ダムは、高さ約 50m の重力式コンクリートダムである。本ダムの基礎グラウチングは、より効果的・効率的な施工を行うために 2003 年（平成 15 年）7 月に改訂されたグラウチング技術指針を反映した設計仕様で施工を実施するとともに、本ダムサイトの透水性状や改良特性を踏まえ、最適な施工とするため試験施工を行い、設計仕様の見直しを行った。ダム完成後の試験湛水における漏水量についても特に問題ない結果が得られており、今回行った基礎グラウチングにおける合理化施工の効果が検証された。本発表では石河内ダムのグラウチングに関する合理化の概要と試験湛水における観測結果について報告した。



写真-18 新屋氏の発表

TS-3-4 大山ダムの地質と止水処理（カーテングラウチング）について

発表者：前田俊郎氏、（独）水資源機構（写真-19 参照）

概要：

大山ダムは、九州北部の筑後川上流の支川赤石川に建設中の高さ 94m の重力式コンクリートダムである。大山ダムでは、複雑な地質性状と類似地質ダムの事例を踏まえて、慎重に止水処理を計画していた。しかし、実際に施工を進めると、当初想定になかった複数の断層の分布や部分的にグラウチングによる改良が困難な地質性状等が明らかになり、施工範囲や施工方法を大きく変更して対応することとなった。本発表では、これらの止水グラウチングの変更概要とその決定に至る過程について報告した。



写真-19 前田氏の発表

7. 閉会式

閉会式では、共同実行委員長の安部友則氏（独立行政法人土木研究所水工研究グループ長）が閉会の挨拶を行った（写真-20 参照）。安部共同実行委員長からは、近年のダム工事におけるコスト縮減要請の高まりに応じるためのグラウチング技術向上の必要性について述べられ、キーノートレクチャーやテクニカルセッションを踏まえて、ダム基礎のグラウチングにおいては、多くの検討課題、つまり今後のやるべき仕事が残されていること、本日発表された研究に代表されるような新技術や合理化事例を基にグラウチング技術のさらなる発展が期待されること、また、ダムに限らず他分野との交流や技術的連携の推進等、今後も、本シンポジウムのような集まりを定期的で開催することによって、ダムに携わる技術者・研究者の意識の向上につながることを期待されることなどが述べられた。

最後に、発表者、質問者、聴講者の方々の拍手をもって、本シンポジウムを閉会した。



写真-20 安部共同実行委員長の閉会の挨拶

8. おわりに

近年、良好なダムサイトが減少する一方で、国の財政状況の悪化により合理的なダム基礎グラウチングの実施が望まれている。このような状況を踏まえて、個別のダム現場における合理化検討事例や産官学により開発された新技術が蓄積される中、それらの検討成果について産官学の技術者、研究者が一同に会して情報共有する場を作ることが、本シンポジウムの目的の一つであった。今回、開催したグラウチングシンポジウムには当初の予定定員 50 名を大幅に上回る聴講の申し込みがあった。これは、本シンポジウムで発信する情報が非常に多くのダム技術者が求めていた情報であるということの証だといえる。聴講者の募集を開始した 8 月 30 日から 2 週間弱で募集人員に達してしまい、募集期間の締切を待たずに募集を打ち切るという事態になってしまった。ホームページ上での募集を終了した以降も、電話連絡等により多くの申し込みを頂いたが、論文の共著者や共同研究者といった一部の発表関係者以外の方の参加はお断りさせて頂き、大変申し訳ない思いであった。最終的な登録者は発表者・事務局を含めて 84 名であり、開催当日には 78 名の参加者を得た。予算の都合上、若干小さめの会場を利用していたため、追加の椅子を増やすなどの対応を行ったが、手狭な会場の容量を超えた配席となり、ご参加頂いた皆様には大変窮屈な思いをさせてしまい、主催者として大変心苦しく感じた。

シンポジウム当日、土木研究所の山口より「汗もかかない、知恵も絞らない合理化はあり得ない！それは単なる手抜きである！一方で合理化検討から逃げてはならない！」という言葉を送らせて頂いたが、グラウチング技術指針の改訂に伴う合理化は、単純に他ダムの事例に従ってグラウチングの簡素化が図れるというものではなく、個別のダムごとに適切な調査・検討を行う必要があることを再認識して頂きたい。

キーノートレクチャーおよびテクニカルセッションでは、グラウチングに関する他分野における最新の知見、新技術、地質調査のあり方、個別ダムにおける合理化検討など非常に有益な発表を多数実施して頂いた。これらの情報について聴講者の方々から所属組織の方々への情報伝達をして頂き、より多くの技術者にこれらの情報が行き渡ることを望むとともに、これらの知見が新たなダム基礎グラウチングの合理化検討の一助になれば幸いである。

また、今回のシンポジウムを経て新たな課題も提起され、今後はこれらの課題について継続的な検討を重ねていくとともに、本シンポジウムのような技術情報の発信・共有の場を継続的に設けていく必要性を強く感じた次第である。

最後に、本シンポジウムの論文集は、後日、土木研究所資料として印刷する予定である。また、本シンポジウム開催にご尽力頂いた方々に、ここに記して感謝の意を表し、本報告の結びとする。

土木研究所資料
TECHNICAL NOTE of PWRI
No.4210 November 2011

編集・発行 ©独立行政法人土木研究所

本資料の転載・複写の問い合わせは

独立行政法人土木研究所 企画部 業務課
〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6 電話029-879-6754