

大深度立坑とその湧水抑制対策

－ 瑞浪超深地層研究所の事例 －

久慈 雅栄*1・浅井 秀明*2・見掛 信一郎*3・原 雅人*3

Countermeasures Planned for Reducing Water Inflow into Deep Shaft

－ Contact Research at the Mizunami Underground Research Laboratory －

Masayoshi KUJI, Hideaki ASAI, Sinichiro MIKAKE, Masato HARA

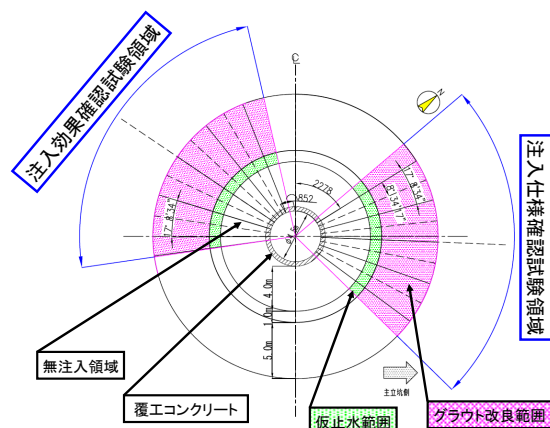


図-1 ポストグラウチング試験施工水平断面図

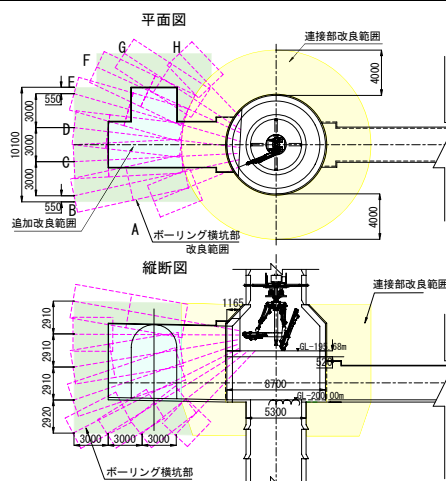


図-2 プレグラウチング横坑部注入範囲

研究の目的

(独)日本原子力研究開発機構では、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の一環として、岐阜県瑞浪市において深度約 1,000m に及び 2 本の立坑と水平坑道群からなる瑞浪超深地層研究所を建設中である。

この立坑掘削に伴い発生する湧水をできるだけ抑制するための対策として、既に掘削が終了した範囲についてはポストグラウチング工法を、これから掘削する範囲についてはプレグラウチング工法を実施している。

本報告では、各グラウチング工法の考え方と一部の施工結果について報告する。

技術の説明

立坑におけるポストグラウチング工法は、覆工コンクリートの裏面排水材の機能を損なわないことが重要と考え、坑壁から厚さ 4.0m の無注入領域、その外側に厚さ 1.0m の仮止水範囲を設けた上で、厚さ 5.0m のグラウト改良範囲を設けることとした。その効果の確認のため、1/2 周の範囲で 2 箇所の試験施工(図-1)を実施した。

またプレグラウト工法は、対象岩盤の亀裂状況から、注入厚さ 3.0m、注入孔先端間隔 3.0m、注入圧は湧水圧 +1.0[MPa]とし、普通セメントを配合切り替えを行いながらステージ工法にて注入して注入圧を 6 時間程度の保持を行う基本仕様を設定した。これに基づいて、立坑と横坑の接続部、および横坑部の注入を実施した。

主な結論

ポストグラウチング工法の試験施工の結果、地山の透水性はルジオン値、透水係数、湧水量ともに注入前に比べて 1/5 程度に低下し、さらに注入回数に応じた注入量の低下傾向が認められ、注入効果が認められたと考える。

また、プレグラウチング工法の施工結果では、ルジオン値、単位注入セメント量ともに注入回数に応じて低減する傾向が認められ、さらに注入領域を掘削した時にも亀裂への注入材の浸透が確認されるとともに、亀裂からの顕著な湧水は認められなかったことより、注入効果が認められたと評価される。

今回の成果は、他の同様な立坑工事で遭遇する可能性の高い立坑湧水に対して、その湧水量を抑制するための解決策の一つとしての選択肢を与えるものと考えられる。

*1 本店土木部設計グループ *2 フジミコンサルタント(日本原子力研究開発機構出向中) *3 日本原子力研究開発機構

大深度立坑とその湧水抑制対策 —瑞浪超深地層研究所の事例—

久 慈 雅 栄*¹ 浅 井 秀 明*²
見 掛 信 一 郎*³ 原 雅 人*³

要 旨

(独)日本原子力研究開発機構では、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の基盤となる深地層の科学的研究の一環として、瑞浪超深地層研究所を建設中である。研究所建設に当たっては、研究坑道の掘削に伴って発生する湧水の処理（水質調整）及び湧水抑制に関わるコストを最小限に抑えることが施工上の課題となっている。さらに、今後掘削する領域の地質構造や地下水状況を調査した結果、特定の深度で大量湧水が発生する可能性が高いことがわかった。

そこで研究所においては、湧水抑制対策としてグラウチング工法を採用し、既に掘削している領域を対象としたポストグラウチング試験施工と、坑道掘削に先行して注入するプレグラウチングを実施した。その結果、ポストグラウチングについては注入領域での大幅な透水性の低下(止水性の向上)、プレグラウチングでは湧水発生抑制を図ることができた。

本報告では、瑞浪超深地層研究所および湧水抑制対策としてのプレグラウチング、ポストグラウチングの概要について紹介する。

キーワード 高レベル放射性廃棄物／地層処分／大深度立坑／湧水抑制対策／グラウチング

目 次

- | | |
|--------------|----------------|
| 1. はじめに | 5. ポストグラウチング工法 |
| 2. 瑞浪超深地層研究所 | 6. プレグラウチング工法 |
| 3. 立坑湧水の状況 | 7. 終わりに |
| 4. 湧水抑制対策 | |

COUNTERMEASURES PLANNED FOR REDUCING WATER INFLOW INTO DEEP SHAFT - CASE STUDY AT THE MIZUNAMI UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY -

Masayoshi KUJI Hideaki ASAI
Shinichiro MIKAKE Masato HARA

Synopsis:

The Mizunami Underground Research Laboratory is currently being constructed by Japan Atomic Energy Agency. During its excavation, large amount of water inflow into the shafts has been increasing and affecting the project progress. As countermeasures for reducing water inflow, grouting methods are being planned, one is post-excavation grouting for the area already excavated, and another is pre-excavation grouting for the area excavated in future.

Therefore, a field experiment for post-excavation grouting was carried out, and it resulted in a significant drop of permeability. Pre-excavation grouting was able to attempt the control of ground water inflow.

This report describes the overview of the Mizunami Underground Research Laboratory and field experiments of post- and pre-excavation grouting method.

* 1 本店土木部設計グループ * 2 フジミコンサルタント（日本原子力研究開発機構出向中） * 3 日本原子力研究開発機構

1. はじめに

(独)日本原子力研究開発機構では、高レベル放射性廃棄物の地層処分研究開発の基盤となる深地層の科学的研究の一環として、超深地層研究所計画を岐阜県瑞浪市において実施しており、このための研究施設として深度約1,000m に及ぶ 2 本の立坑(主立坑、換気立坑)と複数の水平坑道群からなる瑞浪超深地層研究所¹⁾を建設中である。両立坑の掘削は平成 15 年 7 月より開始され、平成 20 年 6 月現在、主立坑深度約 280m、換気立坑深度約 230m までの掘削が進行している。

この立坑掘削に伴い発生する湧水については、自治体との協定に基づき、水質を環境基準に適合させて周辺河川へ排出することとしているが、これに伴うコストを削減することが施工上の課題のひとつとなっている。

解決策のひとつとして、立坑掘削により発生する湧水量をできるだけ抑制することがあげられる。湧水抑制対策としていくつかの方法が考えられるが、ここでは実績の多いグラウチング工法を基本に検討を進めた。

このうち、既に掘削が終了した範囲については、覆工コンクリート背面地山にグラウチングを行うポストグラウチング工法を採用することとし、検討方針の立案、基本設計、試験施工を行った。

一方、これから掘削する範囲については、水平トンネルでも多く採用されている、掘削領域周辺を掘削に先立ってグラウチングを行うプレグラウチング工法を実施している。

本報告では、ポストグラウチング工法の試験施工、プレグラウチング工法の一部施工結果について報告する。

なお、本報告はこれまでの発表論文等^{2)~7)}を取りまとめたものであり、詳細については各論文等を参考にされたい。

2. 瑞浪超深地層研究所

瑞浪超深地層研究所は、亀裂性岩盤である結晶質岩(土岐花崗岩)を主な研究対象として、深度約 1,000m に及ぶ 2 本の立坑(主立坑：直径 6.5m, および換気立坑：直径 4.5m), 深度約 500m の中間ステージ, 深度約 1,000m の最深ステージ, および 100m 毎の予備ステージなどの水平坑道群からなる、世界的にも例を見ない大深度の地下研究施設である。図-1 に研究坑道のレイアウトを示す。

研究所地点では、深度約 168m 以深にこの地域の主な基盤岩である白亜紀後期の土岐花崗岩が広く分布しており、それより浅部には新第三紀中新世の堆積岩(瑞浪層群)が不整合で覆っている。瑞浪層群は淡水性～浅海性の堆積層であり、研究所用地では明世累層と土岐夾炭累層に分類され、泥岩類、砂岩類を主体に、一部では固結が進んだ凝灰質を呈している。また、結晶質岩との境界付近には土岐夾炭累層の基底礫岩層が分布しており、花崗岩を主体とする巨礫(長径 2.0m 程度)と固結度の低い砂質のマ

トリックスで構成されている。図-2 に瑞浪超深地層研究所周辺の地質断面図を示す。

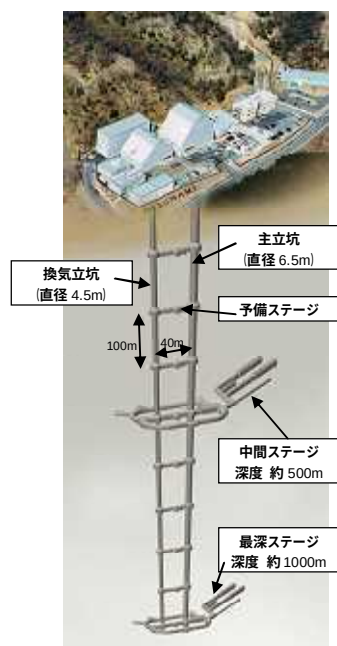


図-1 瑞浪超深地層研究所基本レイアウト
(レイアウトは今後変更されることがある)

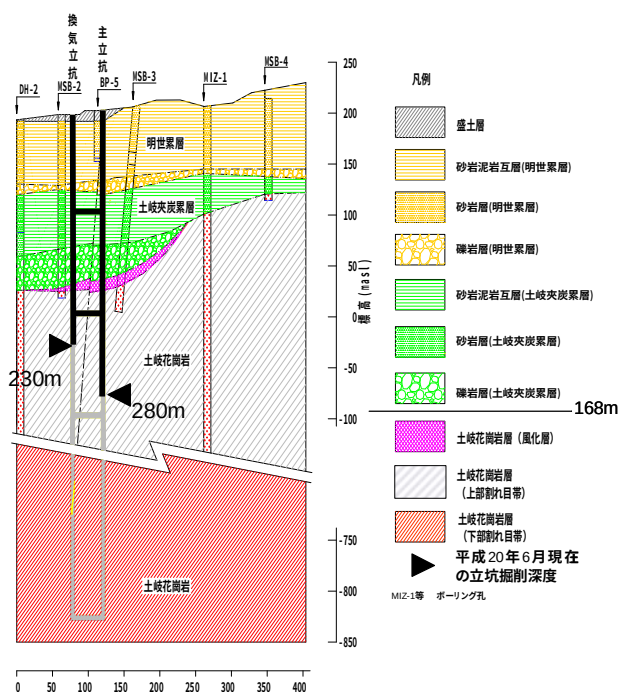


圖-2 瑞浪超深地層研究所模式地質断面圖

3. 立坑湧水の状況

立坑掘削に伴う湧水は、主立坑よりも掘削が先行していた換気立坑において、平成 17 年 6 月に深度 110m 付近に位置する炭質泥岩～泥質砂岩互層から砂質泥岩～泥質砂岩互層（砂岩泥岩互層）に地層が変化した地点に掘削が到達した時点から急増し、基底礫岩層に入ってから湧水量はほ

ば一定の値を示した。図-3 に平成 17 年 10 月時点(主立坑掘削深度 172.6m, 換気立坑掘削深度 191.0m)における、深度 100m 以深での両立坑の掘削の進行に伴う坑内湧水量の増加傾向と湧水ポイントを示す。これより、湧水は主に深度 115m～135m 付近の砂質泥岩互層で発生しているように見える。しかしながら、数ヶ所で計測している立坑区間湧水量の経時変化、および周辺観測孔での水圧測定の結果から、当初砂質泥岩層で発生した湧水は掘削進行および時間経過とともに減少し、代わって大～巨礫岩(基底礫岩層)でその減少分を補う以上の湧水が発生し、その結果図-3 に示すような湧水量の深度方向分布になったものと考えられる。したがって、この時点での湧水発生の主体は深度 135m～170m 付近の基底礫岩層と想定され、立坑の坑底付近ではなく、中段に位置することが特徴である。この領域の透水係数は、事前調査により $1\text{E-}06/\text{sec}$ オーダー(30Lu 程度)と推定されている。

また、この坑内湧水量の増大を受け、今後掘削する領域における湧水量と地下水の水質をできるだけ高い精度で予測し、今後の施工計画に役立てることを目的として、立坑坑底(主立坑深度 180m, 換気立坑深度 191m)より深度 530m 程度までのパイロットボーリングを実施した。このボーリング孔を利用したフローメータ検層の結果、換気立坑では深度 205～215m 付近と深度 390～450m 付近で顕著な水みちが存在することが想定された。また、換気立坑ではパイロットボーリング削孔時に深度 205m 付近より大量湧水(最大約 600L/min)が発生し、湧水を抑制しながらの掘削を余儀なくされた。この湧水に対しては、セメンチング(セメントミルクの圧入)を実施することにより湧水量を大幅に抑制(最終的に 20L/min, 概ね 1/30 に減少)

することができ、後述するようにプレグラウチング計画に対して非常に有益な情報となった。

4. 湧水抑制対策

立坑を含む研究坑道に流入する湧水への対応方法としては、「完全止水(Water Tight 構造)」「湧水抑制」「完全排水」の方策が考えられる。しかしながら、研究所の計画深度(1,000m)を考慮すると「完全止水」は全水圧が覆工に作用するため、覆工の安全を保つことが困難である。また「完全排水」は排水処理に要する費用が多額となる。これより方策として「湧水抑制」を選定し、その方法としてトンネル等でも実績の多いグラウチング工法を基本的な対策と位置づけた。グラウチング実施後に坑道内に流入する湧水については、坑外へ排水することにより対応することとした。

研究坑道のような地下空間における湧水抑制としてのグラウチング工法は、掘削予定箇所を事前に注入するプレグラウチング工法と、既に掘削した部分を事後に注入するポストグラウチング工法に大別される。

道路や鉄道等の水平トンネルで採用されるのは湧水抑制効果が高いとされるプレグラウチング工法が一般的であり、青函トンネル⁸⁾や志賀原放水路⁹⁾を始め多くの施工事例¹⁰⁾がある。研究所では、これから掘削する領域についてプレグラウチング工法を基本的な対策工法と位置づけた。

一方、地下空間でのポストグラウチング工法に関する公表事例は非常に少なく、水平トンネルとしては野岩鉄道・葛老山トンネルの施工事例^{11), 12)}がある程度である。しかしながら、この事例はダム湛水池の近傍で在来工法

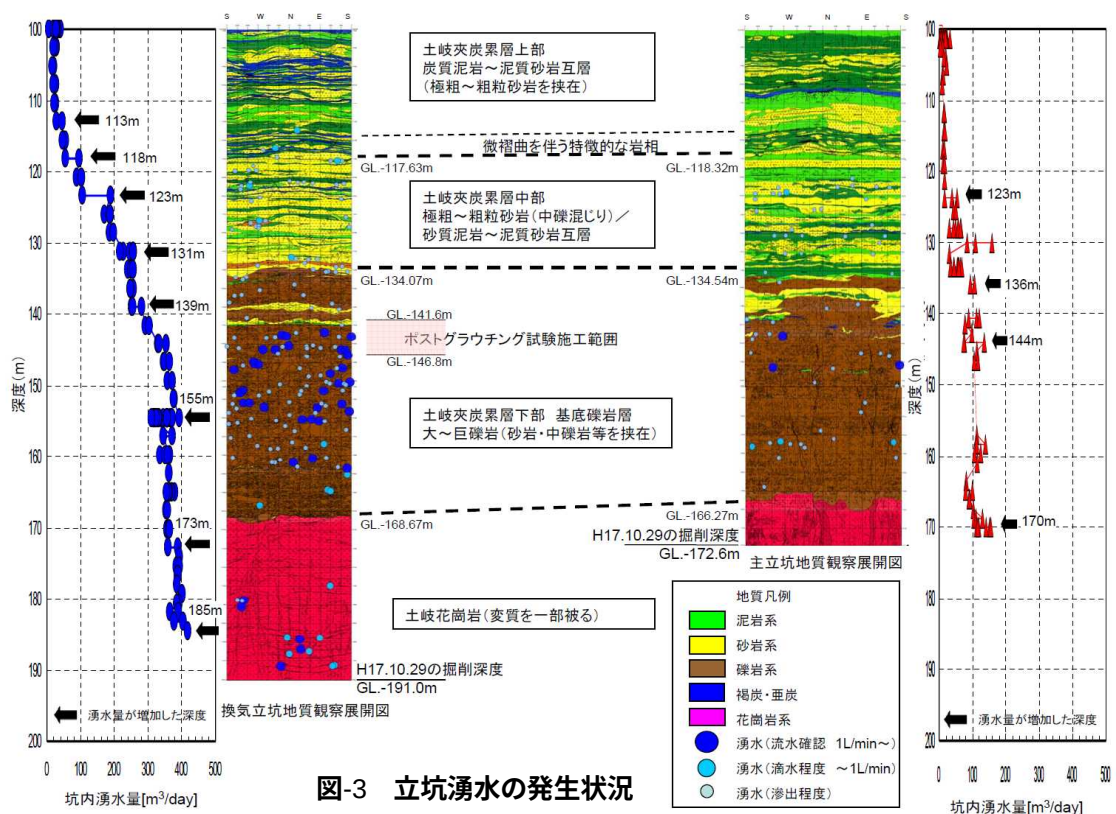


図-3 立坑湧水の発生状況

により構築された水平トンネルで、覆工背面の大量流水に対して注入を実施した極めて特殊な事例である。

立坑については炭坑等の鉱山系アクセス立坑での注入事例はあるものの、ほとんど公表文献等が存在しないことがわかった。

したがって、ポストグラウチング工法に関する計画等については、独自に検討を行った。

5. ポストグラウチング工法

5.1 ポストグラウチング基本コンセプト

今回の立坑でのポストグラウチングを検討するにあたり、最初に設計・施工条件を整理した。立坑はショートステップ工法¹³⁾により施工を行っており、深さ 1.3m ずつ 2 回の掘削を行った後に高さ 2.6m の覆工コンクリート打設を繰り返して施工を進めている。掘削壁面に生じる湧水については、覆工コンクリート打設前に裏面排水材を掘削壁面に設置することにより、壁面湧水を覆工コンクリート内空側に排水している。すなわち、覆工コンクリートには水压を作用させないこととしている。

したがって、ポストグラウチングの注入材により裏面排水材が閉塞し、湧水排除機能が損なわれることにより、既に打設されている覆工コンクリートに水压が作用することが最も懸念される事象であると判断され、これを防ぐことを基本コンセプトとした。

5.2 ポストグラウチング基本レイアウト

前節で述べたように、覆工コンクリートの裏面排水材の機能を損なわないためには、注入材が覆工コンクリート背面まで到達しないようにすることが重要と考えられる。そのため、注入領域と覆工背面の間に干渉帯を設けるとともに、短時間でゲル化して止水性能を発揮する浸透性の良い水ガラス等の材料により仮止水範囲を形成し、その外側に本格的なグラウト改良範囲を設定する二重の対策を施すこととした。グラウト改良範囲の厚さは浸透流支配方程式等による検討結果に基づき 5.0m と設定した。これは、立坑直径(主立坑 6.5m, 換気立坑 4.5m)に対して概ね 1D となり、他地点の実績でもよく用いられている比率である。また、内側の無注入領域と仮止水範囲を合わせた厚さについても、他地点の実績^{10), 12)}を参考にグラウト改良範囲と同じ厚さ 5.0m(1D)を確保することとした。図-4 にポストグラウチングの基本レイアウト案を示す。坑壁から厚さ 4.0m の無注入領域、その外側に厚さ 1.0m の仮止水範囲を設けた上で、厚さ 5.0m のグラウト改良範囲を設ける。なお、無注入領域は注入圧を保持するためのバルクヘッドの役割も兼ねている。注入材については、仮止水範囲については水ガラスを、グラウト改良範囲についてはゲル化により限定注入が可能であり、ある程度の強度も確保できる、カルシウムシリカ系に分類される恒久グラウト系材料「シラクソル(商品名)」を用いることとした。

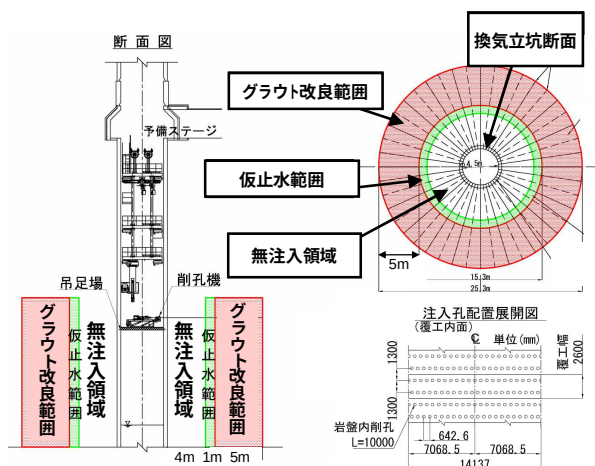


図-4 ポストグラウチング基本レイアウト案

5.3 ポストグラウチング試験施工

(1) 試験計画

基本的な設計・施工条件の検討結果に基づいたポストグラウチングが所定の効果が得られるかどうかを確認するために、実際に換気立坑において試験施工を実施することとした。試験施工は、3 章の考察に基づき、主要な湧水発生範囲である換気立坑深度 134m~168m 付近の基底礫岩層より、比較的湧水が集中的に発生している深度 141.6m~146.8m を対象として実施することとした。

しかしながら、試験施工に当てることのできる工期とコストが限られていたため、今回は 1/4 周の範囲で 2 ヶ所の限定的な領域を設定し試験施工を実施した。このうち、1 ヶ所は「注入仕様確認試験領域」とし、限界注入圧の確認、および注入圧力をパラメータとする注入圧と注入量の関係から注入仕様(規定注入圧, 規定注入量)を決定するための領域とした。もう一方は「注入効果確認試験領域」とし、注入仕様確認試験で設定した注入仕様に基づいて注入を行った場合に、どの程度の注入改良効果が得られるのかを確認する領域と位置付けた。図-5 に試験施工範囲の水平断面図を示す。

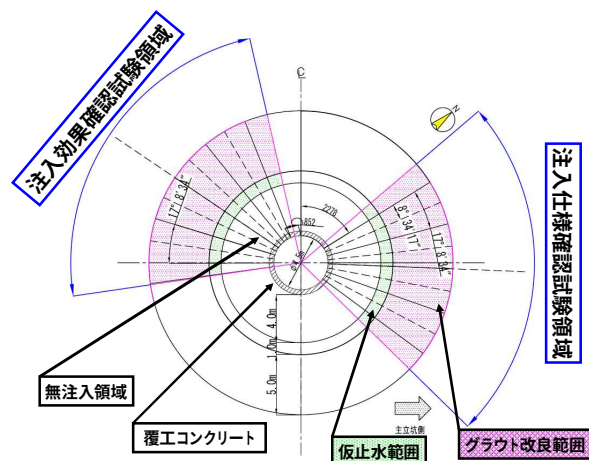


図-5 ポストグラウチング試験施工範囲水平断面図

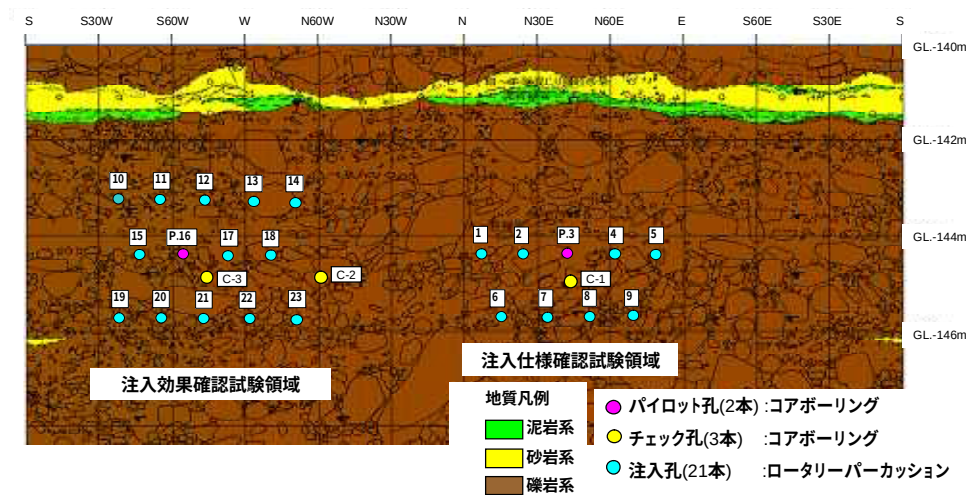


図-6 ポストグラウチング試験施工孔配置 (換気立坑坑壁展開図)

(2) 試験結果

試験注入の地山状態を調査するために、注入仕様確認試験領域と注入効果確認試験領域にそれぞれ 1 本ずつパイロット孔 (P 孔) を削孔し、注入予定深度付近でルジオン試験、湧水圧試験、湧水量測定を実施した。注入は立坑壁面側より 1.0m ずつ 5 ステップに分けて実施した。注入効果の発現とリーク防止を狙い、立坑側 2 ステップ (Zone-A) を先行して注入後、残り 3 ステップ (Zone-B) を注入した。2 つの領域におけるポストグラウチングの注入効果を確認するために、注入後には 3 本のチェック孔 (C 孔) を削孔してルジオン試験、湧水圧試験、湧水量測定を実施し、注入前後の地山の透水性変化を評価した。P 孔、C 孔、注入孔の配置を図-6 に示す。

試験結果を代表して注入効果確認試験領域での C-3 孔試験結果を P16 孔の結果と合わせて表-1 に示す。また C-3 孔では試験区間内のグラウト改良範囲 2 ヶ所 (壁面より 5.6~7.0m, 6.7~9.5m) 及びグラウト改良範囲外 (壁面より 12.0~14.5m) にてルジオン試験等を行っているため、それぞれを区別するために C-3 孔-1~3 と番号を振り分けた。C-3 孔におけるグラウト改良範囲内での試験結果 (C-3 孔-1 & C-3 孔-2) は Lu 値、透水係数、湧水量ともに P16 孔に比べて 1/5 程度まで低減している。しかし、注入領域の外側 (C-3 孔-3) の試験結果は P16 孔と大差がない。この結果より、ポストグラウチングによる透水性の低減効果が認められる。

また、C-3 孔-1~3 の湧水圧が P16 孔より上昇している主たる要因は不明であるものの、グラウト改良範囲の透水性が低減したことが原因となっている可能性がある。

次に注入効果確認試験結果を用いて、注入回数毎の注入量の比較を行った。このような評価方法は、岩盤におけるグラウチングにおいて、注入効果を検討する際によ

く用いられている方法である¹⁴⁾。低次の注入によって地山の空隙が注入材で充填されているほど、高次の注入では注入量は少なくなり、空隙は注入材でより充填されたと判断される。したがって、注入回数に応じた注入量の減少傾向が認められれば、注入は効果を發揮していると評価できる。Zone-A では、注入量が規定値の 2 倍まで注入して終了した注入孔がほとんどであり、かつ複数の孔でリークが発生しているために注入量評価が難しい。そこで、殆どの孔が規定注入圧を超えたために完了している Zone-B の注入量において注入量評価を行った。

図-7 に注入回数毎の注入量変化を示す。なお、注入量については、各注入孔における各ステップの注入量の平均値で示している。同図から、I 次孔の平均注入量 46.6L/m に比べて、II 次孔は平均 25.3L/m であり、54%に減少していることがわかる。III 次孔は平均 24.9L/m であり、II 次孔との明瞭な差は見られない。しかし、III 次孔の最大値 (47.7L/m) が突出して平均を押し上げていることから、これを除いた平均値では 17.3L/m となり、II 次孔の注入量の 68% (I 次孔の 37%) に減少している。以上の結果から、注入回数の増加に伴う注入量の減少傾向が認められると判断される。この結果からも、今回の注入では注入効果が認められたと評価することができる。

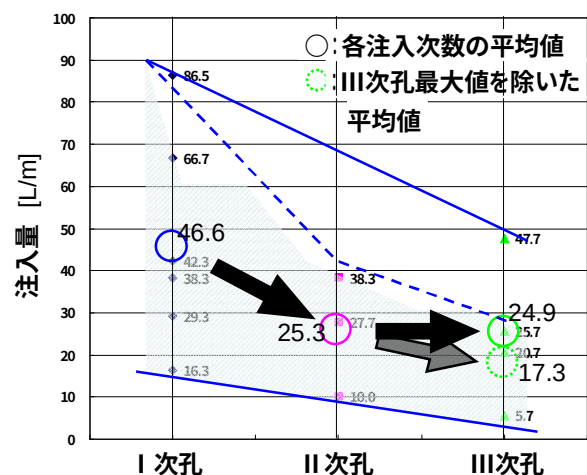


図-7 注入回数ごとの注入量評価

表-1 注入効果確認試験領域における試験結果

名称	試験区間 (立坑壁面より)	区間長 (m)	湧水圧 (MPa)	透水係数 (m/s)	ルジオン 値 (Lu)	湧水量 (L/min)	備考
P16孔	4.6~7.7m	3.1	0.169	2.78E-06	20.11	6.5	試験前
C-3孔-1	5.6~7.0m	1.4	0.219	7.79E-07	4.18	0	試験後
C-3孔-2	6.7~9.5m	2.8	0.228	4.25E-07	3.1	1.1	
C-3孔-3	12.0~14.5m	2.5	0.254	1.76E-06	11.39	18	改良範囲外

6. プレグラウチング工法

6.1 プレグラウチング基本計画

パイロットボーリング掘削時に深度 205～215m 付近で 600L/min の大量湧水に遭遇した際、排水処理設備への負担軽減とパイロットボーリングの施工性向上を目的として湧水箇所のセメンチングを実施した。その結果、湧水量は最終的に 20L/min まで低減させることができた。

この時の注入状況(注入材料、配合、養生等)、およびダム基礎岩盤の注入実績等を参考にして、プレグラウチングの基本計画、基本仕様を設定した。主なものを以下に示す。なお、プレグラウチングの目標値と注入範囲に関しては浸透流解析等を参考に設定した。

- ・ プレグラウチング目標値: 注入により $2L_u$ 以下を確保
- ・ 注入工法: 約 5m 毎に「削孔→水押し試験→注入」を繰り返すステージ工法
- ・ 注入範囲: プレグラウチングの有効改良範囲を 2.0m 確保することを目標に、掘削損傷領域(最大 1.0m 程度)を考慮し、注入範囲は掘削面から地山内 3.0m を設定
- ・ 注入孔配置: 注入孔先端で 3.0m 以内の離隔
- ・ 注入順序: 注入孔配置において 1 次孔と 2 次孔を交互に配置し、中央内挿法により注入
- ・ 注入圧: 湧水圧 + 1.0MPa(本地点の深度 200m 付近の湧水圧は約 1.0MPa のため、2.0MPa に相当)
- ・ 注入材: 普通ポルトランドセメント + 分散剤(商品名: レオビルト UC150)
- ・ 注入材配合: 注入範囲のルジオン値に応じてセメント水比の注入開始配合と切替基準を設定(表-2)
- ・ 注入速度: 10L/min を標準とし、最大は 20 L/min
- ・ 注入完了基準: 注入速度が 0.2L/min/m を下回り、設定注入圧に達した時点から 30 分経過後に終了。注入圧が上昇せずに規定注入量に達した場合には、注入を一時中断し、養生後に再削孔・再注入を実施
- ・ 養生時間: 1ヶ所当たりの養生時間は 4～6 時間、硬化確認の上で次施工に移行
- ・ チェック孔: 全注入終了後チェック孔を削孔し、5m/区間を

表-2 注入材配合切替基準と注入量 (L)

C:W	1:8	1:6	1:4	1:2	1:1.5	1:1	合計
$Lu < 5$	400	400	400	400	600	800	3000
$5 < Lu < 10$	—	400	400	400	800	1000	3000
$10 < Lu < 20$	—	—	400	800	800	1000	3000
$20 < Lu$	—	—	—	800	1000	1200	3000

標準試験区間とする水押し試験を実施し、透水性を確認

6.2 プレグラウチング施工計画

(1) 接続部(深度 200m)

前節のプレグラウチング注入仕様に基づいて、換気立坑と水平坑道の接続部である接続部(深度 200m)の施工計画を図-8 のように立案した。計画注入範囲は、接続部の形状に合

わせて掘削面より 3.0m 程度の範囲とする。削孔は深度 191.6m に施工盤を形成し、そこからシャフトジャンボを使って実施することとし、接続部形状に合わせて外側より A 段から E 段までの注入孔を配置し、A 段より順番(外側→内側)に施工を行った。

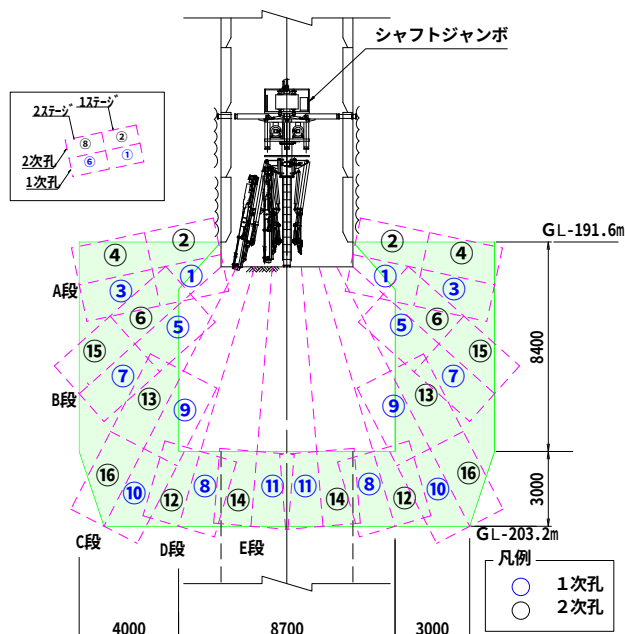


図-8 換気立坑接続部プレグラウチング計画

(2) ボーリング横坑部(深度 200m)

深度 200m では主立坑と換気立坑を結ぶ予備ステージとは別に、各種調査の目的でボーリング横坑を計画したが、掘削時における大量湧水が予測された。そのため、ボーリング横坑でのプレグラウチング施工計画を図-9 のように立案した。

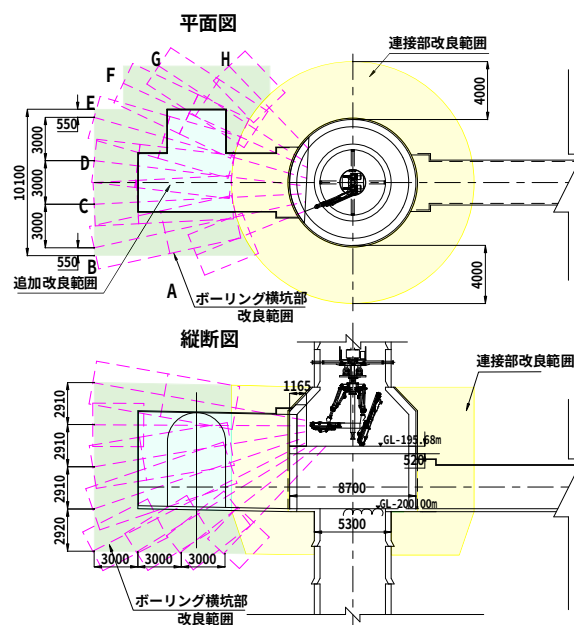


図-9 換気立坑ボーリング横坑プレグラウチング計画

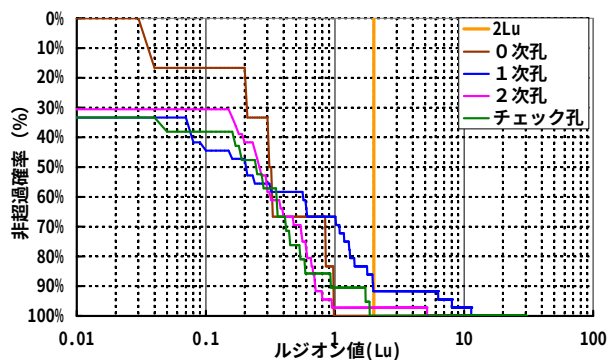
ボーリング横坑部改良範囲は、接続部の形状に合わせて掘削面より 3.0m 程度の範囲とする。削孔は深度 196.4m の底盤と側壁にコンクリートで施工盤を形成し、そこからシャフトジャンボを使って実施することとした。接続部形状に合わせて左側より A 段から H 段までの注入孔を配置した。また接続部の施工実績を踏まえ、規定孔 (1, 2 次孔) における注入材リーク防止のため、追加改良範囲へ 0 次孔を先に実施することとした。

6.3 プレグラウチング施工結果

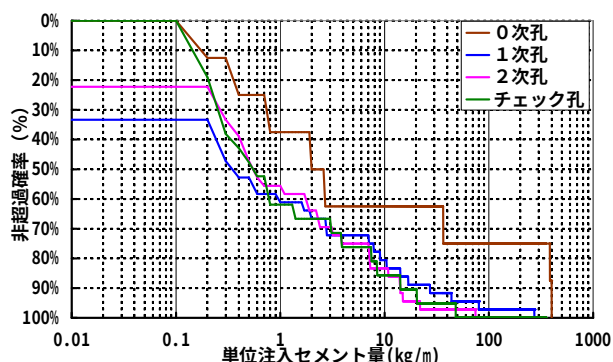
(1) ルジオン値と単位注入セメント量

試験結果を代表して、ボーリング横坑プレグラウチング施工結果を示す。ルジオン値と単位注入セメント量に関して 0 次孔、1 次孔、2 次孔、チェック孔に分けて非超過確率を検討したのが図-10 である。次数が進むにつれて、ルジオン値及び単位注入セメント量は低減する傾向が認められ、チェック孔ではさらに低減が確認された。

注入状況に関しては、概ね水セメント比 1:1 の注入材配合に切り換える前に注入圧の上昇を確認して注入を完了することができた。



(a) ルジオン値



(b) 単位注入セメント量

図-10 注入次数による非超過確率グラフ

(2) 掘削による注入状況の確認

掘削による注入状況の確認として、ボーリング横坑の掘削に伴う坑内湧水量の増加と壁面地質観察の結果を検討する。

グラウト改良範囲の掘削時の壁面地質観察では、注入領域において、掘削壁面からしみ出し程度の湧水はあるものの、亀裂に沿った顕著な湧水は認められなかった。

また、研究坑道全体からの湧水量についてもプレグラウチングの前後で比較してほとんど増加傾向は認められなかった。

壁面地質観察においては、特に多くの注入量が必要とされた注入区間付近で、注入材が高角度亀裂を中心とする亀裂内部に浸透・固化している状況が確認された。図-11 に注入材の亀裂への浸透・固化状況を示す。注入材の浸透が確認された亀裂は限定的であることに加え、同じ亀裂でも部分的に注入材が浸透・固化することで大部分の湧水が抑制されているものと推測される。



(a) 高角度亀裂

(b) 低角度亀裂

図-11 グラウト材の浸透・固化状況 (矢印部分)

(3) 考察と評価

今回のプレグラウチング施工では、注入孔削孔時に透水性が高く湧水量が多い、または注入量が多い区間の分布は局所的であった。また、壁面地質観察でも限定的な亀裂にのみ注入材の浸透が確認された。その位置は注入孔において透水性が高く湧水量が多い、あるいは注入量が多い区間付近であることから、湧水が生じる特定の亀裂に注入孔が交差した箇所付近と考えることができる。したがって、注入材が浸透・固化している亀裂は、透水亀裂として機能していた可能性が高いものと判断される。このことから、注入材はもともと水を通しての透水亀裂へ選択的に浸透する、言い換えれば水が通る経路にしか注入材は浸透していない可能性が高いと考えられる。すなわち、今回のプレグラウチングの結果より、注入材は透水 (湧水) 経路となっている亀裂へ選択的に浸透・固化して水みちを塞ぎ、湧水量低減に寄与しているものと判断される。

以上の結果から、研究坑道掘削に伴う湧水量を低減させるためには、結晶質岩の現在の深度と亀裂状況 (開口性亀裂が卓越) においては、今回適用した注入仕様で目標を達成できると評価できる。

また、今回のグラウチングでは湧水圧の上昇を確認後に約 4~6 時間の圧力保持 (ブロッキング) を実施した。これにより、注入材と地下水をバランスさせ、結果として両者の移動を抑制することになり、地下水による注入材の流出、希釈の防止に寄与している可能性がある。

7. 終わりに

瑞浪超深地層研究所では、研究坑道掘削に伴い発生する湧水を抑制するために、ポストグラウチング工法とプレグラウチング工法の採用を検討・実施した。本報告で

は、ポストグラウチング工法については、その基本計画から試験施工の立案、試験施工結果の評価までを、プレグラウチングに関しては、その基本計画から深度 200m 付近の施工結果の評価までをまとめた。

ポストグラウチング及びプレグラウチングともに、立坑及び被圧湧水下の条件であり、特にポストグラウチングについては施工事例が乏しい中での施工となったが、概ね所期の目的を果たす成果を得られたと評価できる。

ただし、ポストグラウチングの注入効果の確認については、限定された試験施工範囲での限定された地山透水性の低減を各種試験により評価した結果といえる。本来の注入効果の評価は立坑への湧水量低減を指標として行うべきであるが、坑道全周でかつ深度方向にも連続的に注入するような本格的なポストグラウチングの実施をしない限り、要求される立坑湧水量減少という観点での評価は難しい。

ただし、今回のポストグラウチング試験施工の対象となった地質は堆積岩であったため、基本的には岩石マトリックスへのグラウト材の浸透注入を期待している。これに対し、結晶質岩へのポストグラウチングに関しては亀裂への注入となることから、今回の計画とは異なった方法を採用する必要があるものと考えられる。

またポストグラウチング、プレグラウチングとも、注入方法等の注入仕様については、まだ改善の余地が残されているが、得られた成果は工事における今後のグラウチングの設計及び施工に反映できると考えている。

結晶質岩へのプレグラウチングに関しては、今回のような開口性の亀裂に対してはほぼ現状の注入仕様で対処可能と考えられる。しかしながら、開口幅の小さいネットワーク状の亀裂帯(研究坑道換気立坑深度 400m 以深が該当)については、注入材を含めて注入仕様を再検討する必要がある可能性が出てくる可能性がある。

今回の成果は、他の同様な立坑工事でも遭遇する可能性が高い立坑湧水に対し、その湧水量を抑制するための解決策の一つとしての選択肢を与えるものと考ええる。

謝辞：本報告は、第一筆者が(独)日本原子力研究開発機構で検討・計画し、また施工結果を評価して外部発表した論文等を取りまとめたものである。本報告の発表に快く許可を頂いた(独)日本原子力研究開発機構の関係者に深く感謝する次第である。また、グラウチング等の実際の施工は、瑞浪研究坑道換気立坑 JV 工事事務所(清水・鹿島・前田特定建設工事共同企業体)に多大な協力を頂いた。ここに記して感謝する次第である。

参考文献

- 1) 今津雅紀, 佐藤稔紀, 坂巻昌工: 地下 1,000m の立坑工事に着手ー瑞浪超深地層研究所研究坑道掘削工事ー, トンネルと地下, Vol.35, No.6, pp.1-12, 2004.

- 2) 久慈雅栄, 佐藤稔紀, 原雅人, 見掛信一郎, 南出賢司: 大深度立坑における湧水抑制対策としてのポストグラウト試験施工, 土木学会, トンネル工学報告集第 16 巻, pp.469-476, (2006)
- 3) Masayoshi KUJI, Toshinori SATO, Shinichiro MIKAKE, Masato HARA, Masashi MINAMIDE, and Kozo SUGIHARA: Countermeasures Planned for Reducing Water Inflow into Deep Shafts at Mizunami Underground Research Laboratory, 15th International Conference on Nuclear Engineering, No.10413, (2007)
- 4) 原雅人, 久慈雅栄, 南出賢司, 見掛信一郎, 佐藤稔紀: 瑞浪超深地層研究所における研究と建設の現状と課題(その 4)ー湧水抑制対策としてのプレグラウチング施工ー, 土木学会, 平成 19 年度全国大会第 62 回年次学術講演会, CS5-068, 2007
- 5) 久慈雅栄, 原雅人, 南出賢司, 見掛信一郎, 佐藤稔紀, 池田幸喜: 瑞浪超深地層研究所における研究と建設の現状と課題(その 5)ーポストグラウチング試験施工の注入回数による注入量評価ー, 土木学会, 平成 19 年度全国大会第 62 回年次学術講演会, CS5-069, (2007)
- 6) Masayoshi KUJI, Toshinori SATO, Shinichiro MIKAKE, Masato HARA, Masashi MINAMIDE, and Kozo SUGIHARA: Countermeasures Planned for Reducing Water Inflow into Deep Shafts at The Mizunami Underground Research Laboratory, JSME, Journal of Power and Energy Systems, Vol.2, No.1, pp.153-163, 2008
- 7) 久慈雅栄, 原雅人, 南出賢司, 竹内真司, 見掛信一郎, 佐藤稔紀: 大深度立坑における湧水抑制対策のためのプレグラウチング, 第 37 回岩盤力学シンポジウム, No.44, 2008
- 8) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会編: 最新地盤注入工法技術総覧, (株)産業技術サービスセンター, pp.614-624, 1997.
- 9) 穴田文浩, 宮本武志, 大坂和弘: 亀裂性岩盤を対象とした海底トンネル工事における止水注入実績, 電力土木, No.315, pp.71-75, (2005)
- 10) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会編: 最新地盤注入工法技術総覧, (株)産業技術サービスセンター, pp.625-633, (1997).
- 11) 最新地盤注入工法技術総覧編集委員会編: 最新地盤注入工法技術総覧, (株)産業技術サービスセンター, pp.634-641, (1997).
- 12) 土志田枝朗: 変位量管理により完成したトンネルの止水注入, 基礎工, Vol.8, No.10, pp.77-84, (1980)
- 13) 土木学会編: 土木用語大辞典, 持報堂出版, p.596, (1999)
- 14) 例えば, (財)国土技術研究センター, グ라우チング技術指針・同解説, 大成出版社, p.54, 2003