

瑞浪超深地層研究所における大深度下での グラウト設計と施工実績および改良効果の評価

辻 正邦^{1*}・小林 伸司¹・佐藤稔紀²・見掛 信一郎²

¹清水建設株式会社 土木技術本部 バックエンド技術部（〒104-8370 東京都中央京橋二丁目16-1）

²日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64）

*E-mail: tsujimas@shimz.co.jp

瑞浪超深地層研究所では、研究坑道の掘削工事にあたり、湧出する地下水とその排水処理費の低減および安全な施工の観点から坑道周辺のプレグラウチングを実施している。特に大深度地下では、高水圧と低透水性岩盤といった既往の実績がほとんどない条件下であることから、グラウチング技術の開発を行いながら坑道掘削を進めている。深度500mの研究アクセス南坑道の掘削にあたっては、事前に実施した先行ボーリングの調査結果に基づいて湧水量を予測してプレグラウト設計を行った。探り削孔、材料選定、追加孔の設定、チェック孔による確認などを適切に実施し、適宜仕様を見直しながら施工した結果、3.5MPa以上の高水圧下において十分なグラウト改良効果が得られ、設定した許容湧水量を下回った。

Key Words : rock grouting, water inflow, deep underground, high pressure, Mizunami Underground Research Laboratory

1. はじめに

日本原子力研究開発機構は、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研究を目的として、岐阜県瑞浪市において瑞浪超深地層研究所を建設している¹⁾（図-1参照）。同研究坑道を構成する2本の立坑（主立坑および換気立坑）は深度500mまで到達しており、平成26年2月には、深度500mステージの掘削が完了している。

本研究所は、深度200m以深では電研式岩盤分類で主にB級やCH級の良好な花崗岩が分布するが、透水性割れ目が存在する区間において坑道掘削に伴う湧水が発生している。さらに、この地下水には自然由来のふっ素とほう素が環境基準を上回る濃度で含まれているため、湧水の適切な排水処理を実施して近傍の河川に放流している。この処理費用の軽減と安全な施工の観点から、坑道掘削にあたり、坑道周辺の湧水抑制対策としてプレグラウチングが実施されている。また、大深度地下では高水圧と低透水性岩盤といった既往の実績がほとんどない条件下でのグラウチング技術が必要となるため、注入材料や注入範囲等に関する技術の開発が合わせて行われている²³⁾。

深度500m研究アクセス南坑道の掘削にあたっては、坑道掘削に先立ち実施した先行ボーリング調査をもとに湧水抑制対策を必要と判断し、プレグラウチングの設計

を実施して注入を行った。

本坑道におけるグラウト設計と施工実績および評価の概要については中間報告⁴⁵⁾が実施されており、本稿はそれらの詳細およびその後の結果をとりまとめて評価を加えた最終報告である。

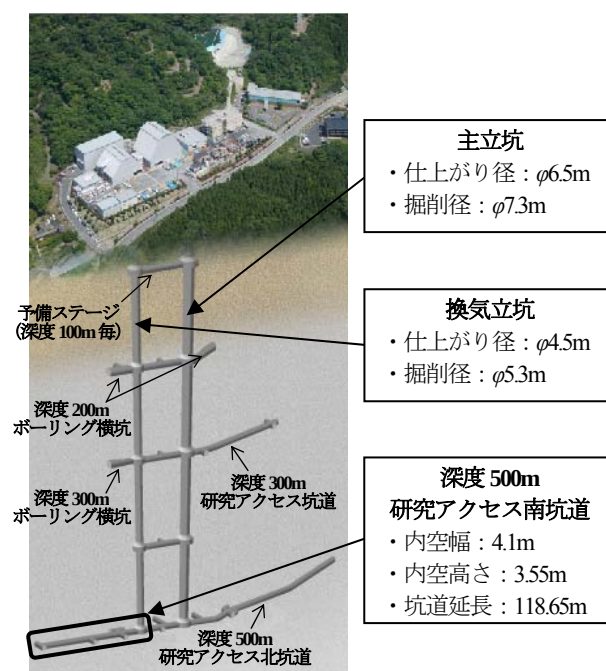


図-1 瑞浪超深地層研究所のレイアウト

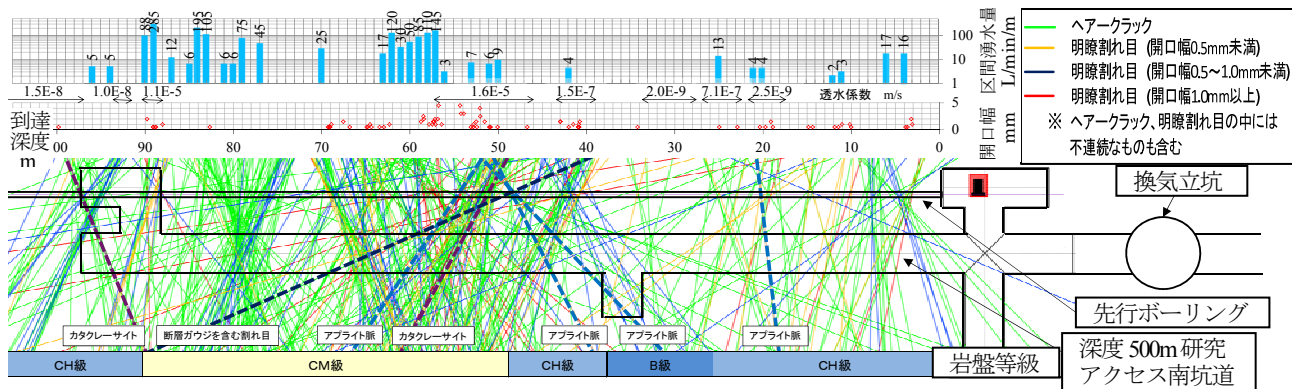


図-2 先行ボーリングの調査結果

表-1 透水係数推定のための設定値と推定結果

	単位	CM級 区間	CH級 区間	備考
延長 L	m	41	54	図-2 参照
湧水量 Q_0	L/分	1366	163	図-2 参照
水頭低下量 $-h_0(t) + h_c$	m	350		湧水圧
影響圏半径 R_l	m	500		深度相当
ボーリング孔半径 $r(0)$	m	0.055		平均値
地山透水係数 k_w	m/sec	2.3×10^{-6}	2.1×10^{-7}	式(1)

2. 先行ボーリング調査による湧水量予測

(1) 先行ボーリング調査結果

深度500m研究アクセス南坑道の掘削に先立ち実施した先行ボーリングの割れ目情報（岩盤等級）・湧水量・水理試験結果（透水係数）を整理して図-2に示す。

岩質は電研式岩盤分類でB級，CH級，CM級であり，堅硬な比較的割れ目の少ない花崗岩である。ただし，先行ボーリング孔口からの深度50～62mの明瞭な開口割れ目密集部と深度77～90mのヘアークラック密集部は，割れ目密度（1mあたりの割れ目本数）が10程度以上の区間となり，多量の湧水が発生した。

同図では，先行ボーリングで観測された割れ目を坑道の計画位置まで延長して割れ目分布を予測した。これにより，先行ボーリング時に多量に湧水を伴うCM級区間および相対的に湧水量が少ないCH級区間において，坑道掘削にあたりグラウチングの必要性が示唆された。

(2) 調査結果に基づく湧水量予測

プレグラウチングの必要性を判断するため，既往の研究³⁾で構築された理論式を使用して先行ボーリング調査結果をもとに深度500m研究アクセス南坑道掘削後の湧水量を予測した。

湧水量予測に必要な地山透水係数 k_w については，先行ボーリングの水理試験結果では限られた範囲の結果しかないため，図-2の上部に示す削孔時の各区間湧水量の合計から下式³⁾を用いて算定した（記号は表-1参照）。

$$Q_0 = \frac{2\pi L(-h_0(t) + h_c)}{\ln\left(\frac{R_l}{r(0)}\right) k_w} \quad (1)$$

各設定値と透水係数の推定結果を表-1に示す。CM級区間が 2.3×10^{-6} m/sec，CH級区間が 2.1×10^{-7} m/secとなり，CM級区間はCH級区間の10倍程度透水係数が高い結果となった。

表-2 湧水量算定のための設定値

	単位	CM級・CH級区間とも
坑道掘削半径 $r(0)$	m	2.1 等価半径
緩み領域（EDZ）の半径 r_l	m	3.1 緩み領域 1m
改良範囲の半径 $R(t)$	m	5.1 掘削面から 3m
改良範囲の透水係数 k_g	m/sec	グラウト材料の改良限界から算出（表-3）
緩み領域の透水係数 k_0	m/sec	k_g の10倍と設定

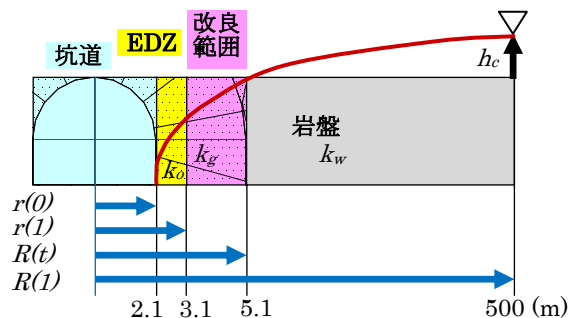


図-3 グ라우チングに伴う湧水量予測（理論解析）の考え方

次に，推定した透水係数をもとに坑道掘削時の坑道延長1mあたりの湧水量 Q_l を下式³⁾を用いて算定した（記号は表-2参照）。

$$Q_l = \frac{2\pi L(-h_0(t) + h_c)}{\ln\left(\frac{r_l}{r_0}\right) + \frac{\ln\left(\frac{R(t)}{r_l}\right)}{k_g} + \frac{\ln\left(\frac{R_l}{R(t)}\right)}{k_w}} \quad (2)$$

理論式に基づく湧水量予測の考え方を図-3に，湧水量算定のための設定値を表-2に示す。グラウト改良範囲は過去の換気立坑の実績から坑道外側3mとし，その透水係数 k_g は同様に過去の換気立坑での注入実績²⁾⁶⁾からグラ

表-3 換気立坑での注入実績（材料別の改良限界）

グラウト材	適用箇所	改良限界値*
普通ポルトランドセメント	深度 200～220m 換気立坑	0.7～1.0Lu ⇒ 0.91～1.30×10 ⁷ m/s
超微粒子セメント	深度 400～450m 換気立坑	0.2～0.5Lu ⇒ 2.6～6.5×10 ⁸ m/s
溶液型グラウト	深度 300m 水平坑道	0.1～0.2Lu ⇒ 1.3～2.6×10 ⁸ m/s

* 1Lu=1.3×10⁷m/s として算出

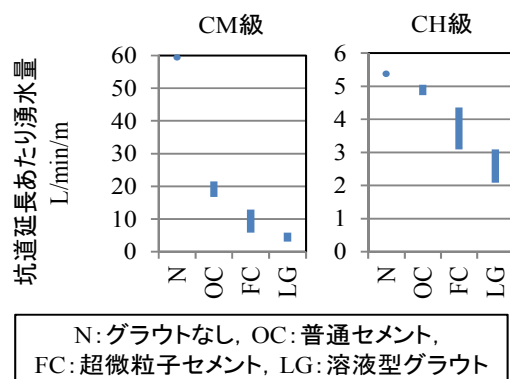


図-4 グラウト材料別の掘削後の予測湧水量

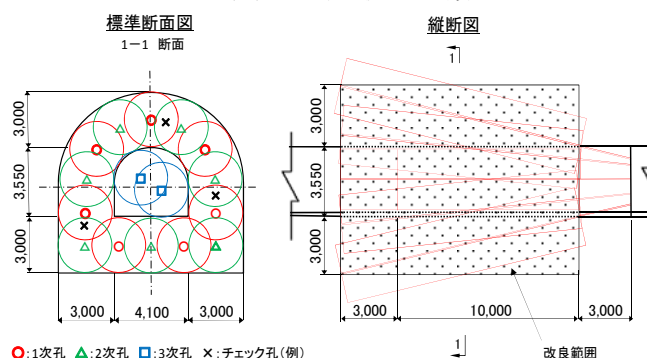


図-5 標準的なプレグラウティング孔の配置例

ウト材料の改良限界を整理することで（表-3参照）材料別のパラメータとして設定した。また、グラウティングを実施しない場合の湧水量は、改良範囲の透水係数を地山と同等（ $k_g=k_0$ ）と設定して求めた。

グラウト材料別の坑道延長1mあたりの予測湧水量（算定結果）を図-4に示す。CM級区間については、グラウティングを実施しない場合に約60L/分/mと非常に多いが、グラウティング実施により約20L/分/m（1/3相当）以下に減少し、湧水量低減効果が高い。一方、CH級区間については、初期湧水量が約5.5L/分/mと少なく、普通セメントでは湧水量低減効果が比較的低いが、浸透性の高い超微粒子セメントや溶液型グラウトの使用により十分低減できるといえる。なお、B級区間については、予測湧水量が0L/分/mとなった。

(3) グ라우ティングの必要性検討

深度500m研究アクセス南坑道全体の許容湧水量は、本研究所の排水処理設備の能力および深度500mに設置した排水ポンプ能力から「300L/分」と設定した。

表-4 標準的なグラウティング仕様と主な施工機械

項目	仕様
注入管理	湧水圧+1MPa（実績：4.4～4.9MPa）
注入仕様	注入速度 基本 10L/分（最大 20L/分） 注入終了基準 注入管理圧力到達+注入速度 1L/分に低下後 30 分間ダメ押し、最大注入量 3000L（表-5 参照） 注入材料 開口幅≥4mm：普通ポルトランドセメント 開口幅<4mm：超微粒子セメント+分散剤 配合 配合切替方式（表-5 参照）
使用機械	注入ポンプ 三連単動プランジヤーポンプ（吐出量：最大 120L/分，吐出圧力：最大 80kg/cm ² ） ミキサー タンク容量：250L×2，攪拌容量：200L×2，攪拌軸回転数：180rpm パッカー 水圧式パッカー（最大膨張圧：9MPa）

表-5 ルジオン値に応じた配合切替表

Lu	各 W/C（水セメント比）の注入量				
	6	4	2	1	0.75
Lu<1	400L	400L	1000L	1000L	800L
1≤Lu<5		400L	800L	1000L	800L
5≤Lu<10			800L	1200L	1000L
10≤Lu				2000L	1000L

前節の予測結果から、プレグラウティングを実施しない場合、CM級区間の湧水量は合計で約2,500L/分、CH級区間は合計で約300L/分となることから、これら両区間についてプレグラウティングが必要と判断した。B級区間は、先行ボーリングで確認できない透水割れ目が出現する可能性があるため、探り削孔による湧水の有無を確認してグラウティング要否を判定することとした。

3. プレグラウティング設計

グラウティング孔は、湧水量予測で想定した坑道外側3mの範囲を改良できるよう配置し、削孔区間長は16m、3mのカバーロック（または注入ラップ）を確保して注入区間長は13mとした（図-5参照）。注入仕様および使用機械は、換気立坑の深度400m以深でのグラウティング実績に準拠して設計した（表-4参照）。

グラウト材料については、図-4から湧水量低減効果の高い超微粒子セメントを標準とした。ただし、先行ボーリング結果では開口幅4mm以上の割れ目が数本存在し、それらが交差すると想定される区間については、材料の粒径と浸透性能を考慮して普通ポルトランドセメントとした。配合については、各注入孔の水押し試験結果（ルジオン値）に応じて異なる配合から開始し、規定量到達毎に高濃度配合に切り替える配合切替方式とした（表-5参照）。注入管理圧については湧水圧+1MPaとし、高湧水圧（先行ボーリングにおいて3.2～3.6MPa）を考慮して使用機械は高压に耐える仕様とした。

4. 施工実績

(1) 実績概要

深度500m研究アクセス南坑道における各グラウチングの施工位置と地質概要を図-6に、注入結果の概要を表-6に示す。なお、区間(1)と区間(2)は先行ボーリング調査実施前の横坑近傍の注入区間のため、区間(3)以降の結果を示す。また、区間(9)は、探り削孔で湧水が確認された2孔のみの注入であったため、注入結果を割愛した。

区間毎のセメント注入量は、ヘアークラックと明瞭な開口割れ目が密集・混在する区間(6)が最も多く（約9.3t）、その後施工した区間(7)（約4.2t）、横坑交差部近傍の区間(3)（約3.6t）の順に多い結果となった。

(2) 合理的な施工

プレグラウチングの施工に際し、効率的に坑道掘削を進めながら前述の許容湧水量300L/分を満足する必要があったため、合理的な施工を目指して「探り削孔によるプレグラウチング要否の判定」「地質状況に応じた注入材料の選定」「内挿法による追加孔の設定」「チェック孔による改良効果の確認」を実施した。以下、それぞれの概要について示す。

a) 探り削孔によるプレグラウチングの要否判定

区間(4)の透水性が低く総注入量が少ないことから、区間(5)以降は掘削前に必ず探り削孔を実施し、湧水割れ目が存在しない場合はCH級またはCM級区間であってもプレグラウチングを実施しないこととした。その要否判定は、3～5本の探り削孔のうち、30～50L/分（区間に

より変更）の湧水が1本でも発生する場合にプレグラウチング要と判断した。その結果、当初設計のB級区間以外に、一部のCH級区間の注入を省略することができた。

b) 地質状況に応じた注入材料の選定

区間(5)は、図-6中の点線で示す開口幅4mm以上の割れ目が多く交差すると予測されたため、仕様通りに普通ポルトランドセメントを注入したが、改良効果が比較的低い結果となった（0.7Lu、次章の表-7参照）。この要因として、粒径の大きい普通ポルトランドセメントではヘアークラックに十分浸透しないことが挙げられる。このことから、4mm以上の割れ目とヘアークラックが同様に混在する次の区間(6)については、微細な割れ目へのグラウト浸透を目的として超微粒子セメントを適用した。また、その他の区間も全て超微粒子セメントを用いた。

c) 中央内挿法による追加孔の設定

追加孔（注入次数の追加）の位置は、湧水量が多い孔またはルジオン値が高い孔同士の中央を内挿する手法にて設定した。また、1孔の湧水量が多い場合はその両脇に設定した。追加孔は、ルジオン値が0.4Lu以下となるまで、または追加孔による低減効果がなくなるまで（改良限界）設定した。この結果、最大で4次孔までの注入を実施した。

d) チェック孔による改良効果の確認

最終注入次数までの注入完了後、チェック孔により最終的な改良効果を確認した。その際、図-7に示すようなルジオン値の超過確率図を用いた。また、チェック孔についてもグラウチングを実施したうえで当該区間の施工を完了し、次の掘削のステップに移行した。

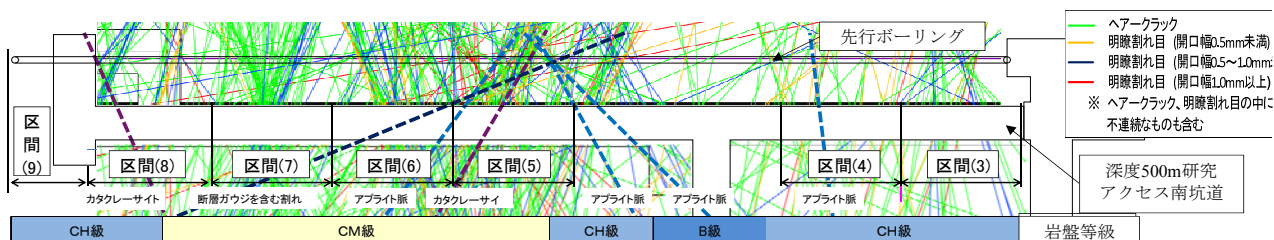


図-6 各グラウト区間の施工位置および先行ボーリングに基づく地質概要

表-6 各グラウト区間の注入結果の概要

注入区間	区間(8)	区間(7)	区間(6)	区間(5)	区間(4)	区間(3)
割れ目の概要	明瞭割れ目あり	ヘアークラック密集	明瞭割れ目密集 ヘアークラックも密集	明瞭割れ目密集 ヘアークラックあり	明瞭割れ目あり	明瞭割れ目あり
岩盤等級	CH級～CM級	CM級	CM級	CM級～CH級	CH級	CH級
探り削孔時の湧水量	最大 31L/分	最大 95L/分	最大 60L/分	最大 80L/分	(探り削孔なし)	(探り削孔なし)
注入セメント種類 (チェック孔前の) 最終次数孔	超微粒子	超微粒子	超微粒子	普通ポルトランド	超微粒子	超微粒子
注入孔数	21 孔	19 孔	25 孔	24 孔	19 孔	23 孔
注入量	4,474L	11,998L	22,843L	9,437L	1,637L	12,390L
セメント量	600kg	4,157kg	9,330kg	2,012kg	377kg	3,617kg

5. グラウト改良効果の評価

(1) 掘削後の地質・湧水状況

区間(7)までの壁面観察による底盤の地質スライス図を図-8に示す。先行ボーリング調査をもとに割れ目が密集すると予測した区間(5)～(7)に、予測通りに割れ目の密集が確認できる。また、換気立坑側の横坑との交差部近傍の区間(3)についても割れ目が密集している。ただし、こちらの割れ目群は、先行ボーリングでは把握できない位置にある。グラウチングを行った全区間を通じて、開口幅1mm以下の割れ目にグラウト充填が認められた。

平成25年12月、区間(7)の掘削終了時にアーチ部の湧水調査を実施したところ、ほとんどの湧水が割れ目密集範囲に認められた。一方、注入を実施しなかった区間の湧水は少なく、探り削孔による注入実施の要否判定は効率的な施工に有効であったといえる。湧水発生箇所（壁面での調査結果を底盤に投影）を図-8に合わせて示す。

この時点で、研究アクセス南坑道全体の実測湧水量（換気立坑の排水量を基に算定）は161L/分であり、掘削完了後の平成26年3月以降では、200～220L/分となった。許容湧水量（300L/分）を十分満足したことから、実測湧水量を確認しながらの施工が有効であったといえる。

(2) 注入孔の止水効果による評価

表-3に示した材料別の改良限界と区間毎の各注入次数孔の最大ルジオン値を表-7に示す。区間(5)～(8)では、既

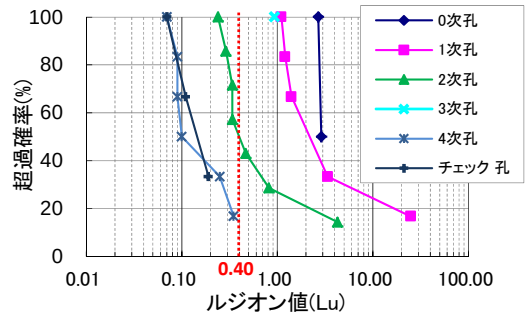


図-7 各注入次数におけるルジオン値の超過確率図（区間(6)）

往の改良限界値以下に到達したことから、十分な改良ができたといえる。ただし、区間(6)と(7)は図-8に示すように少量の湧水や滴水の発生する箇所が多く、これらの湧水は超微粒子セメントで止水できないへアークラックに起因すると考えられる。

一方、区間(3)は、注入次数を増やしても改良限界値に到達していない。この原因として、グラウト注入時に隣接する横坑の坑道壁面からリークが発生したことや、掘削による緩み（亀裂開口）などが構造上発生しやすく、難しい施工条件であったと推察できる。

(3) 予測湧水量に対する評価

各区間が超微粒子セメントの改良限界の下限值（0.2Lu）まで改良されたと仮定し、グラウチング設計時の湧水量予測手法を用いて湧水量を事後予測した結果を合わせて表-7に示す。その結果、掘削後の実測湧水量（161L/分または最終で200～220L/分）は、予測湧水量（292L/分または最終で398L/分）の半分程度となった。

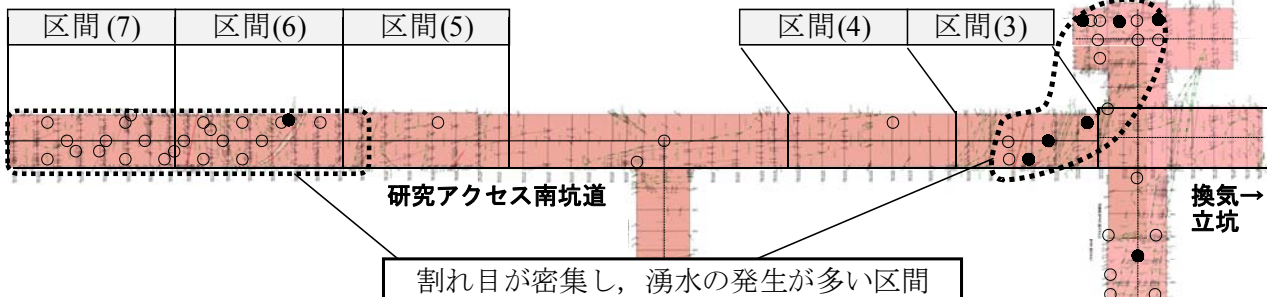


図-8 坑道底盤の地質スライス図と湧水の発生箇所（湧水箇所：○、1.5L/分以上の湧水箇所：●）

表-7 各区間における注入次数孔の最大ルジオン値および予測湧水量の比較（区間(7)終了時）

注入区間	区間(9)	区間(8)	区間(7)	区間(6)	区間(5)	区間(4)	区間(3)
既往の改良限界の下限値	0.2Lu (超微粒子セメント)				0.7Lu (普通セメント)	0.2Lu (超微粒子セメント)	
各注入次数孔の最大ルジオン値* (Lu)	0次:1.8	0次:1.9 1次:0.1 2次:0.7 3次:0.0 チェック:0.0	0次:2.9 1次:5.0 2次:0.2 3次:0.2 チェック:0.1	0次:2.9 1次:25.0 2次:4.3 3次:0.9 4次:0.4 チェック:0.2	0次:0.3 1次:3.8 2次:1.9 3次:1.0 4次:1.7 チェック:0.7	1次:0.1 2次:0.1 3次:0.0 チェック:0.0	0次:3.4 1次:1.0 2次:1.0 3次:0.5 4次:0.5 チェック:0.8
予測湧水量	51 L/分	55 L/分	76 L/分	76 L/分	51 L/分	49 L/分	40 L/分
合計 (H25.12) (H26.3～)			292 L/分				
			398 L/分				
実測湧水量** (H25.12) (H26.3～)			161 L/分				
			200～220 L/分				
許容湧水量	300 L/分						

* 太字は既往の改良限界値の下限值（超微粒子セメント：0.2Lu、普通セメント：0.7Lu、表-3参照）と一致する。

** 実測湧水量は、当該区間以外に換気立坑側の横坑などの湧水量を含む。すなわち、換気立坑より南側の全湧水量である。

なお、実測湧水量には予測区間以外の湧水（換気立坑側の横坑の湧水など）が含まれることから、研究アクセス南坑道に限定した実湧水量は予測湧水量をさらに下回るといえる。このように実測値が予測を下回る理由として、予測湧水量の算定にグラウト範囲の透水係数を「一様な改良値0.2Lu」と設定（仮定）したことが考えられる。すなわち、実際の透水係数は岩盤割れ目がない部分など低透水性部と改良部の平均値である。よって、今回のような低透水性で不均質な亀裂性岩盤の条件下では、理論式による予測湧水量が過大に、または安全側に算定される可能性がある。

6. おわりに

今回の報告結果を以下にまとめる。

- ・ 深度500m研究アクセス南坑道の掘削にあたり、先行ボーリング調査による湧水量予測およびグラウチングの必要性検討をもとにグラウト設計を行った。
- ・ 設計を踏まえた合理的な施工により、効率的に坑道掘削を進めるとともに、許容湧水量を満足した。
- ・ 注入孔の止水効果について評価し、概ね既往実績と同等以上の高い改良効果があることが判明した。
- ・ 実測湧水量を予測湧水量から評価し、実測値は予測値を大きく下回ることが判明した。

以上のことから、今回適用したグラウチング技術は、既往実績がほとんどない条件下（3.5MPa以上の高水圧と低透水性岩盤）において有効であったと評価できる。

また、今後の課題として以下を挙げる。

- ・ 横坑との交差部近傍のような条件下では、改良が難しいことが想定される。追加孔の設定基準や注入材料を変更するなど、注入仕様に改善の余地がある。
- ・ ヘアークラック密集部（CM級区間）に一定量の湧水が発生したことから、高水圧下ではセメント系の

注入材による止水効果に限界があると考えられる。

- ・ このため、許容湧水量に応じてセメント系より浸透性が高く改良限界値が低い溶液型グラウト²⁾などを使用材料として検討することが望ましい。

掘削終了後の坑道の様子を図-9に示す。平成26年9月現在、本坑道のCM級区間において溶液型グラウトを用いたポストグラウチングを施工中である。



図-9 掘削終了後の深度 500m 研究アクセス南坑道

謝辞：湧水量調査およびデータ取りまとめについて、清水・鹿島・前田特定建設工事共同企業体に多大の協力を得た。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 東濃地科学研究ユニット：超深地層研究所地層科学研究基本計画，日本原子力研究開発機構，JAEA-Review 2010-016，2010。
- 2) 延藤遵ほか：瑞浪超深地層研究所深度 300m における耐久性に優れた溶液型グラウトの試験施工，第 40 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，179-184，2011。
- 3) 見掛信一郎ほか：グラウチングの注入範囲設定に関する浸透力を考慮した評価理論の構築，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.70，No.1，33-43，2014。
- 4) 小林伸司ほか：瑞浪超深地層研究所の深度 500m におけるグラウト技術（その1），土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，IV-163，2014。
- 5) 辻正邦ほか：瑞浪超深地層研究所深度 500m におけるグラウチング技術（その2），土木学会第 69 回年次学術講演会講演概要集，IV-164，2014。
- 6) 石井洋司ほか：深度 400m 以深の換気立坑掘削において実施したプレグラウチングの施工結果と考察，JAEA-Technology 2010-044，2011。

PRE-EXCAVATION GROUTING DESIGN, RESULTS AND EVALUATION OF A GALLERY AT GREAT DEPTH IN MIZUNAMI UNDERGROUND RESEARCH LABORATORY

Masakuni TSUJI, Shinji KOBAYASHI, Toshinori SATO, and Shin-ichiro MIKAKE

Pre-excavation grouting of shafts and galleries has been conducted during the construction of Mizunami Underground Research Laboratory in the aspect of safe works and reducing the discharge treatment of the water inflow. The grouting methodology has been simultaneously studied and developed as there is less experience of grouting in low conductive rock with high water pressure, especially in Japan.

Ahead of excavating GL.-500m gallery on the ventilation shaft side, grouting design was performed based on the estimation of water inflow by the pilot-boring investigations and the design was properly revised during the campaign. The gallery satisfied the inflow requirement with good sealing effect.