高圧湧水下におけるプレグラウチングとポストグラウチングを併用した湧水抑制効果の評価

見掛 信一郎¹・池田 幸喜²・松井 裕哉³・辻 正邦⁴・西垣 誠⁵

¹正会員 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター (〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)
E-mail: mikake.shinnichiro@jaea.go.jp

²非会員 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター (〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)
E-mail: ikeda.koki@jaea.go.jp

³正会員 日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター (〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)
E-mail: matsui.hiroya@jaea.go.jp

⁴正会員 清水建設株式会社 土木技術本部技術管理部 (〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1)
E-mail: tsujimas@shimz.co.jp

⁵正会員 岡山大学大学院特任教授 環境生命科学研究科 (〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1)
E-mail: n_makoto@cc.okayama-u.ac.jp

瑞浪超深地層研究所の坑道掘削では、湧水抑制対策としてプレグラウチングを実施した。深度500m水平坑道の掘削完了後、最大4MPaの高圧湧水下でプレグラウチング実施範囲に対してポストグラウチングを併用した。ポストグラウチングの注入範囲はプレグラウチング範囲の外側とし、グラウト材料に溶液型材料を使用し複合動的注入工法を適用した。その効果はグラウチング未実施の場合に対し湧水量を約100分の1まで低減できた。また、従来の理論式を用いた湧水量算定式に対して追加検討し、グラウチングによる透水性低下割合や注入範囲などを考慮した算定式を誘導した。誘導した算定式は、グラウチングの目標設定、湧水量予測及び湧水抑制効果の評価を簡便に行うことができ、計画策定や施工結果の検証に際して有用な手法であることを提示できた。

Key Words : Mizunami Underground Research Laboratory, pre-excavation grouting, post-excavation grouting, reducing the water inflow, high water pressure condition

1. はじめに

わが国においては、「特定放射性廃棄物の最終処分に関する法律」(以下、最終処分法)が2000年6月に公布され、高レベル放射性廃棄物は地下300m以深の安定な地層中に処分されることが定められている。日本原子力研究開発機構(以下、原子力機構)は、地層処分技術に関する研究開発のうち、結晶質岩(花崗岩)を対象とした深地層の科学的研究の一環として、岐阜県瑞浪市において超深地層研究所計画(以下、研究所計画)¹⁾を進めてきた。研究所計画では深地層の研究施設である瑞浪超深地層研究所の建設を行っており、2本の立坑及び水平坑道で構成された深度500mに及ぶ研究坑道を掘削した。深度500mでは、湧水箇所の水圧は、概ね3MPaを超え最大4MPaの高水圧という希少な施工条件であった。

地下水位以下において坑道を掘削する際、高い湧水圧

の条件下では、坑道掘削において多量の湧水が発生する可能性があり、作業の遅延、排水処理費用の増大などの影響が考えられることから、湧水への対処が重要な問題となる^{2,3)}。湧水への対処としては、(i)坑道を完全に防水構造として坑道内に湧水が発生しないような設計とする工法や、(ii)坑道周辺を排水構造として水を抜き、覆工に水圧がかからないような構造として設計する工法、(iii)坑道掘削の周辺領域をセメントミルクなどの材料を水みちに注入するグラウチングにより透水性を低下させたうえで、坑道に湧出する地下水の流量(以下、湧水量)を低減して坑道掘削を行う工法などがある⁴⁾。これらのうち、(iii)のグラウチングは土木工事における坑道掘削や地下備蓄、大深度地下における岩盤空洞の利用に際して、湧水に対する止水性を確保するための方策として適用されている工法である^{5,6)}。例えばLPG貯槽建設工事では、水封式岩盤貯槽空洞(倉敷、深度160m～

184m) の掘削に際して、安定した地下水圧の確保と湧水抑制を目的として、グラウチングが実施されている⁹⁾。

地下深部における高い湧水圧の条件下において、十分な湧水抑制対策を行うことができる技術の確立は、今後の高レベル放射性廃棄物の地層処分事業の実施においても重要な技術開発課題の一つとされている。このため、原子力機構では、瑞浪超深地層研究所の研究坑道掘削時に、深度500mまでの範囲で工事の安全確保とともに坑道内への湧水を抑制するため、湧水抑制対策技術の開発を実施してきた。湧水抑制対策は、高压湧水下で坑道への湧水量をより少なくするためのウォータータイトグラウト技術として、プレグラウチングとポストグラウチングを併用し、その適用性と評価を目的として、以下のグラウチングを実施した。

- (i) あらかじめ湧水が予測される区間を対象に掘削に先立ち坑道切羽から前方に行うグラウチング
- (ii) さらなる湧水抑制を目指し掘削後の坑道側面から斜め後方に行うグラウチング
- (iii) 個別の湧水箇所を対象に(ii)と同様に行うグラウチング

本論文で扱うグラウチングは(i)～(iii)の形態で、(i)をプレグラウチング(図-1(a))、(ii)、(iii)をポストグラウチング

(a) プレグラウチングの概念図

(b) ポストグラウチングの概念図

(c) プレグラウチングとポストグラウチングを併用した概念図

図-1 プレグラウチング及びポストグラウチングの概念図

ング(図-1(b))と分類する。図-2に研究坑道レイアウトとプレグラウチング及びポストグラウチングの実施箇所を示す。

本論文では、高压湧水下におけるプレグラウチングとポストグラウチングを併用し、その結果と湧水抑制効果の評価を行った。湧水抑制効果の評価においては、従来の理論式を用いた湧水量算定式に対して検討を追加し、坑道周辺の緩み領域やプレグラウチングとポストグラウチングを併用した場合の注入範囲などの条件を考慮した湧水量算定式を誘導することにより、グラウチングの目標設定及び湧水量予測を行った。また、ポストグラウチングではグラウト材料に溶液型材料を使用し、新たな試みとして溶液型材料の注入方式として長波と短波を組み合わせた複合動的注入工法を適用し効果の確認を行った。これらの検討内容及び取りまとめた技術的知見を以下に論述する。

2. 瑞浪超深地層研究所での湧水抑制対策の実績

(1) 瑞浪超深地層研究所研究坑道の概要

研究所計画では、(i)「深部地質環境の調査・解析・評

図-2 瑞浪超深地層研究所の研究坑道レイアウト及びプレグラウチング及びポストグラウチング実施箇所

図-3 深度500m研究アクセス南坑道での先行ボーリング調査結果

備技術の整備」及び(ii)「深地層における工学技術の基盤の整備」の2つを全体目標とし調査研究を進めている。

その成果は、処分事業及び国が進める安全規制に対し技術基盤として反映されるほか、地下深部についての学術的な研究に寄与するものである¹⁾。

瑞浪超深地層研究所の研究坑道は、深度180m程度まで分布する新第三紀の堆積岩層と、それ以深は白亜紀に形成された花崗岩体（土岐花崗岩）中に位置している。研究坑道は、主立坑（内径6.5mの円形断面）及び換気立坑（内径4.5mの円形断面）と深度100m毎の両立坑を連絡する水平坑道（幅4m、高さ3mの幌型断面）、ボーリング調査等を行うための水平坑道（幅3～5m、高さ3～4.5mを標準とする幌型断面）で構成されている。坑道は発破掘削工法で掘削し、先行ボーリング調査（坑道掘削に先立ち実施するボーリング調査）などにより掘削範囲の地質や地下水状況を把握したうえで掘削した。

深度500mまでの研究坑道を掘削する間に、先行ボーリング調査により大量湧水が発生する可能性が高いことがわかった範囲を対象に、湧水抑制対策としてプレグラウチングを実施し、坑道掘削を進めた。

さらに、瑞浪超深地層研究所では、さらなる湧水抑制と、坑道の湧水箇所に対する湧水抑制対策技術として、深度500m研究アクセス南坑道でポストグラウチングを実施した。ポストグラウチングの施工事例^{9)～10)}は少ないものの、近年、坑道掘削に伴う排水処理の負担軽減や坑道周辺の地下水位低下の防止を目的として実施されており、今後、湧水抑制対策として重要性が高くなる技術といえる。例えば、過去にポストグラウチングが行われたLPG貯槽建設工事（倉敷）の水圧条件は約1.8MPa⁹⁾、北薩トンネルは約1.7MPa⁹⁾であるのに対して、本取り組みでの湧水箇所の水圧は最大4MPaであり、希少な高水圧条件であった。今後の大深度を含めた湧水抑制対策に対して、本取り組み内容は有益な知見を提供するものと考えられる。

(2) 湧水が予測される区間を対象としたプレグラウチング

図-2に示したグラウチングのうち、最も高い水圧条件（最大4MPa）である深度500m研究アクセス南坑道でのプレグラウチングの概要を以下に示す。

a) 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と岩盤等級、湧水量、水理試験結果（透水係数）を図-3に示す。同図は、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ものである。

地質状況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（開口幅4mm以上の割れ目が数本存在）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）は10以上あり、先行ボーリング時に多量の湧水が発生した。これらの結果から、多量の湧水を伴うCM級区間及び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。

一方、先行ボーリング調査で取得した湧水量、湧水圧、透水係数をもとに、後述の「3. 地下水浸透理論にもとづくグラウチング範囲及び透水性低減割合の設定」で誘導した理論式を用いて湧水量を算定した結果、プレグラウチングを実施しない場合、3,800m³/日であった。深度500m研究アクセス南坑道全体の許容湧水量は、深度500mに設置した排水ポンプ能力と、地上に設置した排水処理設備の能力から500m³/日に設定しており、プレグラウチングが必要と判断した。

b) プレグラウチングの概要

プレグラウチングの設計では、後述の「3. 地下水浸透理論にもとづくグラウチング範囲及び透水性低減割合の設定」のように、目標の湧水抑制を達成するために必要な岩盤の透水性低下割合や注入範囲の設定について検討した上で、坑道外側3mの範囲をプレグラウチング範

図-4 プレグラウチング孔の標準的な配置 (単位: mm)

図-5 プレグラウチングと坑道掘削の標準的な施工パターン

図-6 深度 500m 研究アクセス南坑道でのプレグラウチング区間と注入孔での最大 Lu 値

囲として必要な注入孔を配置した。

注入孔の削孔は坑道掘削の発破削孔機を使用し、その削孔能力から削孔長は坑道切羽から前方に坑道延長方向で16mとした。注入区間長は、注入孔のパッカー設置位置を切羽から3mの離隔距離を確保し、13mを基本とした。プレグラウチングと坑道掘削の標準的な施工パターンは、まずプレグラウチングの注入孔を坑道切羽から前方に16m削孔し注入を行い、その後、この区間のうち13m坑道を掘削した。プレグラウチング孔の標準的な配置と坑道掘削の施工パターンを、図-4、図-5に示す。この施工パターンを基本として9箇所の断面位置からプレグラウチングを実施し深度500m研究アクセス南坑道の掘削を完了した。

深度500m研究アクセス南坑道における各グラウチングの実施位置の概要を図-6に示す。プレグラウチングは区間(1)から区間(9)までを対象に、図-5の施工パターンを繰返し実施した。図-6の最大レジオン (以下, Lu) 値は、各区間のプレグラウチングにおける注入孔での水押し試験での最大値を示している。

グラウト材料は、深度200m及び300mでは、先行ボーリング結果では割れ目開口幅は最大で10mm超であったため普通ポルトランドセメントを用いてプレグラウチングを実施した⁹⁾。深度300m以深では開口幅4mm以下であり、超微粒子セメント (最大粒子径: 約10 μ m) を用いた結果、湧水抑制効果が得られたことから¹⁰⁾、深度500mでも引き続き超微粒子セメントを用いた。ただし、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、深度200m及び300mと同様に超微粒子セメントよりも材料の粒子径が大きい普通ポルトランドセメント (最大粒子径: 約100 μ m) を用いた。

セメントミルクの配合については、各注入孔の水押し試験結果 (Lu値) に応じて異なる配合から開始し、規定注入量到達毎に水セメント比 (W/C) の大きい低濃度配合から段階的に高濃度配合に切り替える方式とした。

表-1にLu値に応じた配合切り替えと注入量を示す。

注入圧は湧水圧+1MPaとし、高湧水圧 (先行ボーリングにおいて最大4MPa) を考慮して使用機械は高压に耐える仕様とした (ポンプ注入圧力: 最大8MPa, パッカー一膨張圧: 最大9MPa)。スウェーデンやフィンランド、

表-1 Lu値に応じた配合切り替えと注入量 (単位: l)

Lu 値 \ W/C	6	4	2	1	0.75
Lu<1	400	400	400	1,000	800
1 $\leq$ Lu<5	—	400	800	1,000	800
5 $\leq$ Lu<10	—	—	800	1,200	1,000
10 $\leq$ Lu	—	—	—	2,000	1,000

ノルウェーの北欧では、地下浅部から堅強な岩盤が存在することから湧水圧+2～7MPaの高圧で高濃度配合を短時間で注入しているが、わが国のグラウチングの技術指針や実績として、周辺岩盤に変形や破壊を生じない範囲で設定する考え方にもとづき、注入圧を湧水圧+1MPaとした¹¹⁾。注入速度は10l/分から開始し、1l/分に低下した後30分間継続を標準仕様とした。注入圧、注入速度及び配合の経時変化の一例を図-7に示す。

図-7 注入圧、注入速度及び配合の経時変化の一例

ここで、プレグラウチング区間の注入結果の概要を表-2に示す。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)が最も多い結果であった(セメントミルク注入量22,843l, セメント注入量9,330kg)。

深度500m研究アクセス南坑道全体の掘削完了後の湧水量の実測値は250m³/日であり、深度500mに設置した排水ポンプ能力と、地上に設置した排水処理設備の能力から設定した許容量500m³/日を十分満足した結果となった。

3. 地下水浸透理論にもとづくグラウチング範囲及び透水性低減割合の設定

(1) プレグラウチングを実施した場合の坑道への湧水量算定式

ここで、坑道への湧水量について、過去の文献で扱われた算定式^{12), 13)}を説明する。モデルの取扱いについては、水平な地表面からある深度に坑道が掘削され、掘削深度に相当する水圧が作用する水平な円形断面の坑道とした。

表-2 プレグラウチング区間の注入結果の概要

	区間(9)	区間(8)	区間(7)	区間(6)	区間(5)	区間(4)	区間(3)	区間(2)	区間(1)
割れ目あり	○	○	—	○ (密集)	○ (密集)	○	○	○	○
ヘアークラックあり	—	—	○ (密集)	○ (密集)	○	—	—	—	—
岩盤等級	CH	CH, CM	CM	CM	CM, CH	CH	CH	CH	CH
注入孔の最大Lu値	1.8	1.9	5.0	24.9	3.8	0.1	3.4	1.2	9.9
注入孔数	2	21	19	25	24	19	23	18	18
セメントミルクの全注入量 (単位: l)	3,241	4,474	11,998	22,844	9,438	1,638	12,390	12,396	10,626
配合毎の注入量 (単位: l) W/C=6	800	2,011	5,215	7,597	5,619	930	6,360	4,284	3,255
W/C=4	800	1,200	2,430	4,854	2,785	400	3,305	3,400	1,911
W/C=2	800	872	1,996	3,752	1,034	308	1,109	2,549	2,120
W/C=1	841	391	1,819	4,934	0	0	1,026	2,163	2,435
W/C=0.75	0	0	538	1,707	0	0	590	0	905
セメント注入量 (単位: kg)	1,303	1,282	4,157	9,330	2,012	377	3,617	4,205	4,364

※セメントミルク注入量：合計89,045l, セメント注入量：合計30,647kg

この断面内での地下水浸透の流れはダルシーの法則で表されるものとし、注入範囲は掘削深度に比べて小さく、注入範囲の同一半径上の水圧の差異は少ないと仮定した。

坑道周辺におけるグラウチングによる注入範囲を図-8に示す。坑道周辺の境界条件は、坑道中心から同心円状に設定した。

地下水浸透における流体の運動の式より次式を得る。

$$Q_0 = -2\pi\Delta L k_w \frac{\partial h}{\partial r} \quad (1)$$

式(1)において次の境界条件を設定する。

$$r=r_0 : h=h_0 \quad r=R : h=H \quad (2)$$

ここで、

Q_0 : 坑道への湧水量

ΔL : 坑道断面の奥行長さ

k_w : プレグラウチング注入前の地山透水係数

r_0 : 坑道掘削半径

R : 影響圏半径

h_0 : 坑道壁面における全水頭

H : 影響圏半径における全水頭

いま注入区間 L について考えると、式(1)を式(2)の境界条件で積分すると次式が求まる。

$$\ln\left(\frac{R}{r_0}\right) = \frac{2\pi L k_w}{Q_0} (-h_0 + H) \quad (3)$$

式(3)を Q_0 について整理すると次式を得る。

$$Q_0 = \frac{2\pi L (-h_0 + H)}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right) / k_w} \quad (4)$$

図-8 坑道と注入範囲の模式図

プレグラウチングの注入範囲を設定した場合には、地下水浸透における流体の運動の式より次式を得る。

$$Q_0 = -2\pi\Delta L k_{pre-g} \frac{\partial h}{\partial r} \quad (5)$$

式(5)において次の境界条件を設定する。

$$r=r_0 : h=h_0 \quad r=r_{pre-g} : h=h_{pre-g} \quad (6)$$

ここで、

k_{pre-g} : プレグラウチング注入範囲の透水係数

r_{pre-g} : プレグラウチングにおける注入範囲

h_{pre-g} : r_{pre-g} における全水頭

式(5)を式(6)の境界条件で積分すると次式が求まる。

$$\ln\left(\frac{r_{pre-g}}{r_0}\right) = \frac{2\pi L k_{pre-g}}{Q_0} (-h_0 + h_{pre-g}) \quad (7)$$

プレグラウチングの注入範囲の外側に対して、次の境界条件を設定する。

$$r=r_{pre-g} : h=h_{pre-g} \quad r=R : h=H \quad (8)$$

式(1)を式(8)の境界条件で積分すると次式が求まる。

$$\ln\left(\frac{R}{r_{pre-g}}\right) = \frac{2\pi L k_w}{Q_0} (-h_{pre-g} + H) \quad (9)$$

式(7)、式(9)から $h=h_{pre-g}$ を消去すると次式となる。

$$-h_0 + H = \frac{Q_0}{2\pi L k_{pre-g}} \cdot \ln\left(\frac{r_{pre-g}}{r_0}\right) + \frac{Q_0}{2\pi L k_w} \cdot \ln\left(\frac{R}{r_{pre-g}}\right) \quad (10)$$

式(10)を Q_0 について整理すると次式を得る。

$$Q_0 = \frac{2\pi L (H - h_0)}{\ln\left(\frac{r_{pre-g}}{r_0}\right) / k_{pre-g} + \ln\left(\frac{R}{r_{pre-g}}\right) / k_w} \quad (11)$$

ここまでの誘導により得られた式(11)は、プレグラウチングを実施した場合の湧水量算定の理論式として、福島によって提案されている¹⁴⁾。

(2) 緩み領域の考慮及びポストグラウチングを実施した場合の坑道への湧水量算定式の誘導

本論文では、式(11)までの誘導に追加して、さらに坑道周辺の緩み領域を考慮し、プレグラウチングに加えてその外側にポストグラウチングを実施した場合の湧水抑制効果を評価できる湧水量算定について検討する。

理論式を用いた坑道掘削時の湧水量について、従来の算定式では、坑道周辺の緩み領域やプレグラウチングとポストグラウチングを併用した場合の注入範囲など、坑道周辺を異なる透水性の領域に設定したモデルは取り扱われていない。ここでは、坑道周辺のプレグラウチング注入範囲内に緩み領域（水理条件として、坑道掘削の影響により坑道壁面近傍の透水性が変化する領域）を考慮

した湧水量について検討する. この場合について, 上記と同様に支配方程式と境界条件にもとづき湧水量算定式を誘導すると, 以下の通りとなる.

$$Q_0 = -2\pi\Delta Lk_{EDZ} \frac{\partial h}{\partial r} \quad (12)$$

$$\text{境界条件} \quad r=r_0 : h=h_0 \quad r=r_{EDZ} : h=h_{EDZ} \quad (13)$$

ここで,

k_{EDZ} : 緩み領域 (EDZ) の透水係数

r_{EDZ} : 緩み領域 (EDZ) の半径

h_{EDZ} : r_{EDZ} における全水頭

$$Q_0 = -2\pi\Delta Lk_{pre-g} \frac{\partial h}{\partial r} \quad (14)$$

$$\text{境界条件} \quad r=r_{EDZ} : h=h_{EDZ} \quad r=r_{pre-g} : h=h_{pre-g} \quad (15)$$

$$Q_0 = -2\pi\Delta Lk_w \frac{\partial h}{\partial r} \quad (16)$$

$$\text{境界条件} \quad r=r_{pre-g} : h=h_{pre-g} \quad r=R : h=H \quad (17)$$

式(12)~式(17)についてそれぞれの境界条件で積分すると次式が求まる.

$$\ln\left(\frac{r_{EDZ}}{r_0}\right) = \frac{2\pi Lk_{EDZ}}{Q_0} (-h_0 + h_{EDZ}) \quad (18)$$

$$\ln\left(\frac{r_{pre-g}}{r_{EDZ}}\right) = \frac{2\pi Lk_{pre-g}}{Q_0} (-h_{EDZ} + h_{pre-g}) \quad (19)$$

$$\ln\left(\frac{R}{r_{pre-g}}\right) = \frac{2\pi Lk_w}{Q_0} (-h_{pre-g} + H) \quad (20)$$

式(18)~式(20)を Q_0 について整理すると次式を得る.

$$Q_0 = \frac{2\pi L(H - h_0)}{\ln\left(\frac{r_{EDZ}}{r_0}\right)/k_{EDZ} + \ln\left(\frac{r_{pre-g}}{r_{EDZ}}\right)/k_{pre-g} + \ln\left(\frac{R}{r_{pre-g}}\right)/k_w} \quad (21)$$

さらに, プレグラウチングの外側にポストグラウチングによる注入範囲を設定した場合においても, 湧水量算定式を誘導すると次式で示すことができる.

$$Q_0 = \frac{2\pi L(H - h_0)}{\frac{\ln\left(\frac{r_{EDZ}}{r_0}\right)}{k_{EDZ}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{pre-g}}{r_{EDZ}}\right)}{k_{pre-g}} + \frac{\ln\left(\frac{r_{post-g}}{r_{pre-g}}\right)}{k_{post-g}} + \frac{\ln\left(\frac{R}{r_{post-g}}\right)}{k_w}} \quad (22)$$

ここで,

k_{post-g} : ポストグラウチング注入範囲の透水係数

r_{post-g} : ポストグラウチングにおける注入範囲

h_{post-g} : r_{post-g} における全水頭

(3) プレグラウチングの注入範囲と湧水量低減割合の関係

式(21)から得られたプレグラウチングの注入範囲と緩み領域を考慮した湧水量低減割合の関係を図-9に示す.

図-9は大深度における高圧湧水を想定し, 深度500m, 水压4MPaの条件下での坑道掘削 (坑道掘削半径 $r=2.0$ m: 幌型断面の坑道形状を等価な円形断面に換算した半径とする) を対象とした. グラフの形状から, 以下の傾向が示唆されることがわかる.

- (i) プレグラウチング実施時の湧水量は, 注入範囲の増大及び注入範囲の透水係数の低下に伴い低減することがわかる.
- (ii) 注入範囲が $r_{pre-g}/r_0 \leq 1.5$ では, 緩み領域の影響により湧水量の低減はわずかであり, $r_{pre-g}/r_0 > 1.5$ の場合に湧水抑制効果が期待できる.
- (iii) 湧水抑制効果としては, 注入範囲の透水係数の低減の方が, 注入範囲の増大よりも, より効果的である.

図-9の縦軸の湧水量低減割合は, プレグラウチングを実施しない場合の湧水量を100%とし, それに対してプレグラウチングを実施した場合の湧水量が何%であることを示した. 図-9の横軸は, プレグラウチングの注入範囲を坑道掘削半径の比で示しており, 例えば注入しない場合は $r_{pre-g}/r_0=1.0$, 注入範囲が坑道壁面から外周幅1mの場合 $r_{pre-g}/r_0=1.5$, 外周幅2mの場合 $r_{pre-g}/r_0=2.0$, 外周幅3mの場合 $r_{pre-g}/r_0=2.5$ となる. 注入範囲の透水係数 k_{pre-g} は, 地山透水係数 k_w に対して, $k_{pre-g}/k_w=1/10, 1/20, 1/50, 1/100, 1/200, 1/500, 1/1,000$ に場合分けし, それぞれについて湧水量を算定した.

緩み領域については, 坑道掘削の影響により坑道壁面近傍において透水性が変化する領域を設定し (水理条件として透水性が大きくなると仮定した範囲を緩み領域とする), その範囲と透水係数を以下の条件に設定した.

図-9 プレグラウチング注入範囲と緩み領域を考慮した湧水量低減割合

(i) 緩み領域の範囲

瑞浪超深地層研究所において実施した花崗岩を対象とした坑道掘削影響に関する調査結果では、発破による著しい損傷は坑道壁面から1m程度の範囲内であると推測されていることから¹⁵⁾、緩み領域の範囲を坑道壁面から外周幅1mの範囲とした ($r_{EDZ}/r_0=1.5$)。

(ii) 緩み領域の透水係数

緩み領域の透水係数は、プレグラウチング実施後の透水係数に対して1オーダー大きい値とした ($k_{EDZ}=k_{pre-g} \times 10$)。

これらの緩み領域の範囲と透水係数の設定においては、以下に示す花崗岩を対象とした掘削影響試験の結果を用いて検討を行った。その内容は、釜石鉱山における掘削影響試験では、坑道壁面から外周幅1mの範囲において一部割れ目の開口に伴って透水係数が増加する部分があるものの、最大で1オーダーの増加に収まっている¹⁶⁾、¹⁷⁾。その他、スウェーデンの地下研究施設における掘削影響試験では、坑道壁面から0.5mの範囲において透水係数は2オーダー増加、カナダの地下研究施設では、坑道壁面から0.3mの範囲において透水係数は1～2オーダー増加、などの報告がある¹⁸⁾。これらの内容から、緩み領域の透水係数が設定より大きな規模となった場合について検討する。緩み領域の透水係数が1オーダー大きくなる場合 ($k_{EDZ}=k_{pre-g} \times 10$) と2オーダー大きくなる場合 ($k_{EDZ}=k_{pre-g} \times 100$) とを比較した結果を図-10に示す。

図-10の結果から、プレグラウチングの注入範囲が坑道壁面から外周幅2m ($r_{pre-g}/r_0=2.0$) 以上の場合には、緩み領域の透水係数を2オーダー大きく設定した場合と1オーダー大きくした場合とでは湧水量低減割合に顕著な差異はなく、同様の湧水量低減効果が生じるグラフ形状となる。この結果から、プレグラウチングの注入範囲が坑道壁面から外周幅2m ($r_{pre-g}/r_0=2.0$) 以上であれば、緩み領域の透水係数がより大きな規模となった場合でも、その影響を受けることなく湧水量低減効果が得られることを示している。このことから、プレグラウチングの注入範囲の目安として、坑道壁面から外周幅2m ($r_{pre-g}/r_0=2.0$) を超える範囲を検討の前提に定めた。

(4) プレグラウチングにおける岩盤の透水性の低下割合及び注入範囲の設定に関する検討

ここで、プレグラウチングにおける岩盤の透水性の低下割合及び注入範囲の設定に関する検討を行う。

まず、湧水量低減の目標を仮に5%に設定した場合について検討する。式(21)から得られたプレグラウチングの注入範囲と湧水量低減割合の関係に、湧水量低減目標5%以下の領域を明示して図-11に示す。

プレグラウチングの注入範囲については、「(3) プレグラウチングの注入範囲と湧水量低減割合の関係」の

図-10 緩み領域の透水係数の設定による湧水低減割合の比較

図-11 注入範囲と湧水量低減割合との関係

緩み領域の取扱いを考慮した検討において、坑道壁面から外周幅2.0m ($r_{pre-g}/r_0=2.0$) を超える範囲を設定することとした。湧水量低減目標5%を許容する条件は、図-11から、 $[1]k_{pre-g}/k_w=1/200$ に低減した場合： $r_{pre-g}/r_0 \geq 2.5$ 、 $[2]k_{pre-g}/k_w=1/100$ に低減した場合： $r_{pre-g}/r_0 \geq 4.0$ となる。施工においては、最小限の注入範囲で湧水抑制効果を確認することを目的として、 $[1]k_{pre-g}/k_w=1/200$ に低減した場合： r_{pre-g}/r_0 が2.5の値を確保できるように注入範囲の幅を設定することとした（坑道掘削半径 r_0 が2.0mの場合では、注入範囲が坑道壁面から外周幅3.0mのとき、 $r_{pre-g}=r_0+3.0m=5.0m$ 、 $r_{pre-g}/r_0=2.5$ となる）。

4. プレグラウチングとポストグラウチングを併用した湧水抑制効果の評価

(1) プレグラウチングによる湧水抑制効果の評価

深度500m研究アクセス南坑道では、プレグラウチングを区間(1)～(9)まで実施して坑道を掘削した後、比較的湧水量が多い区間(6)（坑道延長16.2m）において、さらなる湧水抑制対策技術の試行として、その外側の範囲を対象としてポストグラウチングを実施した。プレグラウチング区間(1)～(9)毎の湧水量の予測値と実測値について、式(21)を用いて算定した結果を図-12に示す。区間毎の湧水量は、掘削進捗に伴う湧水量の増加量を区間毎の実測値とし、区間(6)は土嚢で区間の境界に堰を設置し湧水量を測定した。湧水量低減割合は、プレグラウチング未実施の予測値に対する実測値の割合を示した。

図-12では、横坑が交差する区間(1)、(2)と区間(8)、(9)は、それぞれ一つの領域として算定した。プレグラウチングを実施しない場合の予測値は区間(1)～(9)で3,800m³/日と算定された。これに対して、プレグラウチングで注入範囲 ($r_{pre-g}/r_0=2.5$) の透水係数を0.1Lu ($\cong 1.3 \times 10^{-8}m/sec$) に低減した場合の予測値は合計430m³/日であった（深度500m研究アクセス南坑道の許容湧水量は500m³/日）。

深度500m研究アクセス南坑道全体の掘削完了後の実測値は250m³/日であり、予測値を下回る湧水量で坑道掘削を進めることができ、許容湧水量を十分満足することができた。

次に、プレグラウチング未実施の場合の予測湧水量が最も大きい値であった区間(6)を対象に、湧水抑制効果について検討する。評価対象区間におけるプレグラウチングでの透水係数の改良値に応じた湧水量低減量の算定結果を図-13に、算定に用いたパラメータを表-3に示す。この評価対象区間において、プレグラウチング未実施の場合の湧水量予測値は1,380m³/日と算定された。当該区間の注入範囲の透水係数は、先行ボーリングの結果からCM区間で17.7Lu ($\cong 2.3 \times 10^{-6}m/sec$) であり、プレグラウ

図-12 プレグラウチング区間毎の湧水量の予測値及び実測値

図-13 プレグラウチング区間(6)の湧水抑制効果

表-3 区間(6)の湧水量算定に用いたパラメータと予測・実測結果

透水係数 上段：Lu 下段：m/sec		湧水量（m ³ /日）	
		予測値	実測値
プレグラウチング未実施			
k_w	17.7 2.3×10 ⁶	1,380	プレグラウチングを実施したため未実施の場合の実測値はなし
k_{EDZ}	177 2.3×10 ⁵ (= k_w ×10)		
k_{pre-g}	対象外		
プレグラウチング実施後			
k_w	17.7 2.3×10 ⁶	57	50* *未実施の予測値に対して 約 1/30
k_{EDZ}	0.9 1.1×10 ⁻⁷ (= k_{pre-g} × 10)		
k_{pre-g}	0.09 1.1×10 ⁻⁸		
坑道中心からの半径と全水頭の値： r_0 =2.0m, r_{EDZ} =3.0m, r_{pre-g} =5.0m, R =500m h_0 =0m, H =350m			

チングによる注入範囲のチェック孔のルジオン試験結果は平均0.09Lu ($\approx 1.1 \times 10^{-8} \text{m/sec}$)であった。このプレグラウチングによる注入範囲の透水係数を用いて式(21)により算定すると予測値は57m³/日であった。当該区間の湧水量を測定した結果、実測値は50m³/日であった。予測値57m³/日と実測値50m³/日は整合性が認められる結果であることから、算定式による評価は妥当と考えられる。

評価対象区間の湧水抑制効果は、グラウチングを実施しない場合の予測値に対して、プレグラウチング実施後は約30分の1となった。

従来の理論式を用いた算定式では、坑道周辺の緩み領域やプレグラウチングとポストグラウチングを併用した場合の注入範囲など、坑道周辺を異なる透水性の領域に設定したモデルは取り扱われていないことから、本論文では、これらの条件を考慮した算定式を誘導した。誘導した算定式は、瑞浪超深地層研究所におけるグラウチングの設計・施工等に実際に適用したが、グラウチングの目標設定、湧水量予測及び湧水抑制効果の評価を簡便に行うことができ、計画の策定や施工結果の検証を行うに際して有用な手法であることを提示することができた。

(2) さらなる湧水抑制を目指したポストグラウチングの概要と結果及び湧水抑制効果の評価

a) ポストグラウチングの概要

深度500m研究アクセス南坑道では、プレグラウチングを実施して坑道を掘削した後、比較的湧水量が多い区間において、さらなる湧水抑制技術の試行として、その外側の範囲を対象にポストグラウチングを実施した^{19)~22)}。

(i) 実施位置

ポストグラウチングの実施位置は、プレグラウチング時のセメント注入量が最も多く、ヘアークラックが密集して坑道壁面から滴る程度の湧水箇所が比較的多いプレグラウチング区間(6)を覆う形となる区間(換気立坑壁面から坑道延長77.6m~93.8m, 区間長16.2m)を選定した(図-14)。

(ii) グラウト材料

グラウト材料は、プレグラウチングではセメント粒子(普通ポルトランドセメント及び超微粒子セメント)が浸透できる割れ目を十分に改良できたと評価したことから、ポストグラウチングではセメント粒子が浸透できない割れ目の改良を目的として、瑞浪超深地層研究所深度300mの水平坑道での試験実績があり²³⁾、浸透性及び耐久性の高い活性シリカコロイド(図-15)を用いた溶液型材料を採用した。北欧でも日本の活性シリカコロイドに着目し、岩盤グラウチングへの適用について検討されている。活性シリカコロイドは、水ガラスの劣化要因であるNa成分を取り除くことで耐久性を向上させた材料であり、粒子径は10~20nmで超微粒子セメントの1/1,000程

度である²⁴⁾。硬化促進剤の調整により数分~数時間のゲルタイムの設定が可能であり、本施工では120分に設定した。硬化後の水圧抵抗性は、溶液型材料の注入区間に9MPaの水圧を作用させても有意な透水性の変化は見られなかった²⁵⁾。

(iii) 注入方式

注入方式は長波と短波を組み合わせた複合動的注入工法(図-16)を適用した。岩盤の割れ目を対象とした注入方式としては、LPG貯槽建設工事(倉敷)では、浸透

図-14 ポストグラウチングの実施範囲

図-15 溶液型材料 (活性シリカコロイド)

図-16 複合動的注入工法

距離の延伸効果と浸透性の向上を目的として、超微粒子セメントに複合動的注入工法を適用している（透水性の低減が進まなかった領域には、補足的に溶液型材料を用いて単動的注入工法を適用している）²⁹⁾。その実績を踏まえ、さらなる湧水抑制技術の試行として、本施工では溶液型材料に複合動的注入工法を適用した。

複合動的注入工法は、注入ポンプに設置した動的周波数設定器により、脈動による浸透距離の延伸効果のある長波（0.5Hz以下）とグラウト材料の分散による浸透性の向上効果のある短波（1～30Hz）を組み合わせた複合波を伝播させる注入手法である（図-16）。複合波の効果は、円柱カラム及び模擬地盤モデルを用いた懸濁型材料の注入試験により確認されている。その結果としては、到達範囲は短波または長波のみによる単動的注入の場合は静的注入の約1.2～1.6倍、複合動的注入の場合は静的注入の約2倍であった²⁹⁾。よって本施工では、最も効果が期待できる複合動的注入を適用した。注入試験では、注入対象の透水係数が小さいほど、長波は小さい方が効果的であるとの傾向が示されているが、本施工では注入孔1本ごとの個別に周波数を変更することはせず、同じ設定とした。複合波を発生させる機械的な原理は、まず、注入ポンプに設置した動的周波数設定器により0.5Hz以下の長波を発生させる。次に、流路遮断板を回転させることにより瞬間的に注入の流れを遮断することにより1～30Hzの短波を発生させている。長波と短波の組み合わせは、平行平板を用いた亀裂モデルにより実施された懸濁型材料の注入試験の結果をもとに設定した。その内容は、長波0.1Hz、短波6.0Hzの場合に注入量が最も多かったことから²⁷⁾、この組み合わせを適用した。

(iv) 注入孔の削孔角度と注入範囲

注入孔の削孔角度は、先行ボーリング調査結果や坑道掘削時の壁面観察結果から評価対象範囲に特定の方

卓越した割れ目がみられないことから、既往の知見²⁸⁾に基づきプレグラウチングの注入孔と逆向きに坑道から斜め後方に坑壁に対して45°に設定した。また、注入範囲はプレグラウチング範囲の外側範囲を改良することを基本とした。これは、動水勾配の小さい外側を改良することで、十分な注入圧が確保でき、グラウト材料の浸透促進と表面へのグラウト材料のリーク抑制を両立させる設計思想である。なお、先行ボーリング孔では水圧観測を実施していることから、注入の影響を回避するため、施工では先行ボーリング側はプレグラウチング範囲と重複する範囲を注入範囲に設定し、外側範囲と重複範囲のそれぞれの効果を比較評価できる仕様とした。

(v) 注入孔の配置

注入孔の配置として、同一断面の注入で形成する輪状の止水ゾーンをリングと定義し、No.[1]～[6]リングの連続6リングの設計とした。No.[1]リングは、グラウト材料の比較評価を目的として、リング上部は超微粒子セメント、リング下部は溶液型材料を静的注入工法により注入する仕様とした。No.[2]リングは、注入工法の比較評価を目的として、リング上部は複合動的注入、リング下部は静的注入を適用し溶液型材料を注入する仕様とした。残りNo.[3]～[6]リングは標準リングとして溶液型材料に複合動的注入工法を適用した。さらに、標準リングの施工順序は新リングが完了リングを内挿するよう設定した。注入孔の配置を図-17に示す。リングあたりの標準注入孔数は、1次孔と2次孔の14本をリング内に均等に交互に配置し、その後1次孔と2次孔の間を内挿する位置に3次孔14本、最後にチェック孔4本を削孔する設計とした（1リング32本、全6リングで計192本）。なお、3次孔は隣接する注入孔で湧水が発生しなかった場合は省略することとした。

図-17 ポストグラウチング注入孔の配置

b) ポストグラウチングの結果

ポストグラウチングの削孔実績は、No.[5]リング以降は2次孔の湧水量が少なく3次孔が省略できたことから、設計の192本より減少して141本となった。溶液型材料の総注入量は20,493ℓであった。

(i) 注入範囲：プレグラウチングの外側への注入の有効性

プレグラウチング範囲の外側範囲の注入時は、注入孔近傍の坑道壁面からのリークはほとんど発生せず良好な結果であったが、プレグラウチングと重複範囲の注入時は、坑道壁面と注入孔のパッカーの設置位置が外側範囲の場合よりも距離が近いので、注入前の水押し試験において坑道壁面から大量のリークが発生する孔が認められた。リーク時の対策は、パッカーの設置位置の深部への変更、複合動的注入の制御、短いゲルタイムの配合への変更とした。

各リングにおけるチェック孔の平均Lu値を注入範囲で区分して比較評価したところ、標準リングのNo.[3]リング以降に着目すれば外側範囲の方が明らかにLu値が小さく、透水性の低減効果が高いといえる（図-18）。プレグラウチングと重複範囲では、リーク対策を実施したことにより、パッカーの設置位置の深部への変更により注入区間が短くなり、複合動的注入の制御及び短いゲルタイムによりグラウト材料の浸透効果を低下させることとなった。これらのことから、透水性の低減効果が十分ではなかったと考えられる。なお、注入孔の削孔時に、削孔粉から黒色の破片が確認できる孔が多く認められた。これは、当該区間のプレグラウチングの注入範囲の確認のため、グラウト材料（超微粒子セメント）に黒色の色粉を混入しており、注入により割れ目に充填されたものである。その範囲は坑道壁面から約3mまでであり、これはプレグラウチングの注入孔を中心とした直径3mの範囲であり、設定通りに充填されていることが確認で

※No.[4]～[6]（右）はリークが発生した箇所

（この箇所を除く標準リングのチェック孔平均Lu値：0.024Lu）

図-18 各リングにおけるLu値（チェック孔の平均値）

きた。

(ii) グラウト材料：溶液型材料の有効性

グラウト材料の比較評価（No.[1]リング）では、静的注入（注入圧＝湧水圧＋1MPa）により超微粒子セメントと溶液型材料の比較を行った。チェック孔における平均値を比較すると、超微粒子セメントを適用した箇所（リング上部）では0.4Luであり、これに対して、溶液型材料を適用した箇所（リング下部）では0.19Luであった。超微粒子セメントを併用したNo.[1]リングでは、坑道壁面から滴る湧水箇所が多く、また他孔の注入時に注入完了後の注入孔からのリークも多かったのに対して、No.[2]リング以降は坑道壁面から滴る湧水箇所は比較的少なかったことから、溶液型材料が有効であった。また、湧水量が数ℓ/分程度の注入孔が多いなか1孔のみ130ℓ/分の大量湧水の孔が出現したが、溶液型材料の注入により完全に止水することができた（図-19）。この結果から、溶液型材料は大量湧水箇所に対しても有効であることが確認できた。

(iii) 注入方式：複合動的注入工法の有効性

複合動的注入工法について、No.[2]リング（図-17）では静的注入と併用して適用効果を比較評価できる仕様とした。No.[2]リングの比較評価として、注入前のLu値と注入量の関係を図-20に示す。注入前のLu値が同程度の注入孔における注入量は、複合動的注入の方が静的注入より上回る結果となった。また、チェック孔における平

図-19 大量湧水孔の湧水抑制効果

図-20 複合動的注入と静的注入による注入量の比較

均値を比較すると、静的注入を適用した箇所（リング下部）では0.15Luであり、これに対して複合動的注入を適用した箇所（リング上部）では0.04Luであった。この結果から、複合動的注入は注入範囲の透水性の低減に有効であることが確認できた。

c) プレグラウチングとポストグラウチングを併用した場合の湧水量予測と湧水抑制効果

ポスグラウチングを考慮した湧水量の予測式(22)を用い、湧水量を算定した。なお、先行ボーリング孔を回避した断面側（重複範囲）は、ポスグラウチングの注入範囲を坑道壁面から1～4mであり、重複範囲を断面全

表4 区間(6)の湧水量算定に用いたパラメータと
予測・実測結果

透水係数 上段：Lu 値 下段：m/sec		湧水量 (m³/日)	
		予測値	実測値
ポストグラウチング実施後			
k_w	17.7 2.3×10^{-6}	32	15* *プレグラ ウチング 未実施の 予測値 1,380に 対して 約 1/100
k_{EDZ}	0.71 9.2×10^{-8} ($=k_{pre-g} \times 10$)		
k_{pre-g}	0.071 9.2×10^{-9}		
k_{post-g}	0.071 9.2×10^{-9}		
坑道中心からの半径と全水頭の値 (外側範囲) $n=2.0m, r_{EDZ}=3.0m, r_{pre-g}=5.0m, r_{post-g}=8.0m$ $R=500m, h_0=0m, H=350m$ (重複範囲) $n=2.0m, r_{EDZ}=3.0m, r_{pre-g}=5.0m, r_{post-g}=6.0m$ $R=500m, h_0=0m, H=350m$

※右縦軸はプレグラウチング未実施に対する割合

図-21 ポストグラウチング区間の湧水抑制効果

周に設定した場合の湧水量の50%と、外側範囲を断面
 全周に設定した場合の湧水量の50%を合計した値を予測値
 とした。ここで、プレグラウチングの注入範囲の透水係
 数は、ポストグラウチング実施前の湧水量の実測値
 $50\text{m}^3/\text{日}$ から予測式(21)を用いて逆算すると、 $9.2 \times 10^9 \text{m/sec}$
 ($\approx 0.071\text{Lu}$)となった。ポストグラウチングの注入範
 囲が同値まで低減された場合、評価対象区間の湧水量の
 予測値は $32\text{m}^3/\text{日}$ と算定した。算定に用いたパラメータ
 を表-4に示す。これに対して、ポストグラウチング実施
 後の評価対象区間における湧水量を測定した結果、
 $15\text{m}^3/\text{日}$ となった(図-21)。この値から、プレグラウチ
 ングを実施しない場合に対して、湧水量を約100分の1ま
 で低減できたと評価できる。

当該区間のポストグラウチングにおける注入範囲の透水係数は、チェック孔の平均値0.13Luであったが、No.[3]～[6]の標準リングのうちリークが発生したNo.[4]～[6]（右）を除いたチェック孔の平均値は0.024Luであった。これに対して、当該区で測定した湧水量15m³/日からポストグラウチング範囲の透水係数を逆算すると、3.6×10⁻⁹m/sec（≒0.028Lu）であった。この値とリークが発生したNo.[4]～[6]（右）を除いたチェック孔の平均値から、リーク対策によってリークが発生していない箇所と同等の透水係数まで低減されたことにより、より高い湧水抑制効果が得られたと考えることができる。

(3) 個別の湧水箇所を対象としたポストグラウチング

上記のポストグラウチング区間で、比較的湧水箇所が多い範囲を含む区間（坑道延長4.2m）を対象に、坑道の個別の湧水箇所に対する湧水抑制を目的としたポストグラウチングを実施した（図-22）。

図-22 個別の湧水箇所を対象としたポストグラウチングの実施範囲

表-5 ポストグラウチング実施前後の
湧水箇所1箇所当りの湧水量

湧水箇所 (換気立坑壁 面からの坑道 延長位置)	湧水量 (l/分)	
	ポストラウチング 実施前	ポストグラウチング 実施後
[1] 94.7m	2.10	0.30
[2] 94.8m	2.50	0.60
[3] 93.2m	1.30	0.00
[4] 93.3m	0.30	0.20
[5] 97.7m	1.10	0.10
[6] 97.1m	0.10	0.10
[7] 89.0m	0.50	0.50
[8] 94.7m	0.45	0.13
[9] 94.7m	0.80	0.40
[10] 94.7m	0.10	0.00
[11] 94.7m	0.30	0.00
[12] 94.7m	0.10	0.10
[13] 94.7m	0.20	0.10
[14] 94.2m	0.05	0.10
[15] 93.7m	0.01	0.00
[16] 92.7m	0.15	0.20
[17] 92.8m	0.18	0.10
[18] 97.0m	0.45	0.50
[19] 97.7m	1.00	0.05
[20] 97.7m	0.40	0.10

前述のさらなる湧水抑制を目指したポストラウチングと同様の注入仕様で、グラウト材料は溶液型材料を使用し、注入方式は複合動的注入工法を適用した。

ポストラウチングの前後で、坑道の湧水箇所に対して1箇所当りの湧水量を測定した結果、それぞれの湧水箇所の湧水量を低減することができ、5箇所あった1l/分以上の湧水箇所すべてを1l/分未満に低減することができた(表-5, 図-23)。わが国において坑道の湧水箇所における湧水量に関して、基準や目安となる値はない。参考として、国外の事例でスウェーデンでは地層処分場の処分坑道における湧水箇所に対して、1箇所当りの湧水量が1l/分を超える場合には、ポストラウチングを実施することが目安とされている²⁹⁾。「(2) さらなる湧水抑制を目指したポストラウチングの概要と結果及び湧水抑制効果の評価」においては、評価対象区間における坑道湧水量の低減による湧水抑制効果を得ることができた。この結果に加えて、今回さらに実施したポストラウチングでは、1箇所当りの湧水量を低減することができ、個別の湧水箇所を対象としても、湧水抑制効果が期待できる技術であることが確認できた。

5. 結論

本論文では、大深度地下における坑道掘削を対象とし、深度500m、最大4MPaの高湧水圧という希少な施工条件下において、以下のそれぞれの位置付けと目的でプレグラウチングとポストラウチングを併用して実施した。プレグラウチング及びポストラウチングの湧水抑制効果に関する評価、考察を以下に示す。

(i) 湧水が予測される区間を対象としたプレグラウチング
瑞浪超深地層研究所では、先行ボーリング調査により大量湧水が発生する可能性が高いことがわかった範囲を対象に、湧水抑制対策としてプレグラウチングを実施し、坑道掘削を進めた。深度200m及び300mでは、先行ボーリング結果では割れ目開口幅は最大で10mm超であったため普通ポルトランドセメントを用いてプレグラウチングを実施した。深度300m以深では開口幅4mm以下であったことから、粒子径が小さい超微粒子セメントに変更した。これらのプレグラウチングを繰り返し実施した結果にもとづき、深度500mでは、深度300m以深と同様に超微粒子セメントを基本とし、開口幅4mm以上の割れ目が交差すると想定される区間については、深度200m及び300mで用いた普通ポルトランドセメントを適用することで坑道掘削を完了した。

グラウチングの計画策定及び施工結果の検証に際しては、本論文で誘導した湧水量の算定にグラウチングの効果を考慮できる理論式を用いることにより、湧水抑制を

図-23 ポストラウチング実施区間と湧水箇所の分布

達成するために必要な岩盤の透水性の低下割合や注入範囲について目標設定を行い、坑道掘削を進めた結果、許容湧水量を十分満足することができた。

従来の理論式を用いた湧水量算定式では、坑道周辺の緩み領域やプレグラウチングとポストグラウチングを併用した場合の注入範囲など、坑道周辺を異なる透水性の領域に設定したモデルは取り扱われていないことから、本論文では、これらの条件を考慮した湧水量算定式を誘導した。誘導した算定式は、瑞浪超深地層研究所におけるグラウチングの設計・施工等に実際に適用したが、グラウチングの目標設定、湧水量予測及び湧水抑制効果の評価を簡便に行うことができ、計画の策定や施工結果の検証を行うに際して有用な手法であることを提示することができた。

(ii) さらなる湧水抑制を目指したポストグラウチング

深度500m研究アクセス南坑道では、プレグラウチングを実施して坑道を掘削した後、比較的湧水量が多い区間(16.2m)において、さらなる湧水抑制技術の試行として、その外側の範囲を対象としてポストグラウチングを実施した。その結果、評価対象区間の湧水量は、グラウチングを実施しない場合の予測値(1,380m³/日)に対して、プレグラウチング実施後は約30分の1(50m³/日)となった。その後実施したポストグラウチングにより、50m³/日から15m³/日となり、グラウチングを実施しない場合に対して、湧水量を約100分の1まで低減できた。

グラウチングによる坑道周辺の地下水流動への影響に関しては、より精度の高い評価手法の検討として、グラウト材料の配合による浸透範囲、割れ目内の充填密度による透水係数の差異を考慮した複雑な水理場を正確に推定することなど、今後の課題として挙げられるが、上記の成果は、様々な地下空洞の施工への適用が可能であり、成果を広く反映できると考えられる。

(iii) 個別の湧水箇所を対象としたポストグラウチング

「(ii) さらなる湧水抑制を目指したポストグラウチング」においては、評価対象区間における坑道湧水量の低減による湧水抑制効果を得ることができた。この結果に加えて、個別の湧水箇所を対象としたポストグラウチングでは、1箇所当りの湧水量を低減することができ、個別の湧水箇所を対象としても、湧水抑制効果が期待できる技術であることが確認できた。

また、ポストグラウチングでは、溶液型材料である活性シリカコロイドと複合動的注入工法の高圧湧水下における適用について、以下の結果から注入範囲の透水性の低減に有効であることが確認できた。

- ・超微粒子セメントと溶液型材料との比較評価では、チェック孔における平均値を比較すると、超微粒子セメントを適用した箇所では0.4Luであり、これに対して、溶液型材料を適用した箇所では0.19Luであった。

- ・静的注入と複合動的注入との比較評価では、チェック孔における平均値を比較すると、静的注入を適用した箇所では0.15Luであり、複合動的注入を適用した箇所では0.04Luであった。

本論文における成果は、地層処分事業においても適用可能なものであり、湧水に伴う排水処理費の削減により維持コストの低減に寄与できる。さらに、人工バリア施工時の作業環境において、湧水箇所や湧水量を低減することにより施工精度の向上に寄与できるなど、今後事業を進める上で大きな役割を果たすことが期待できるものと考えられる。また、地層処分技術に限らず一般的な土木技術においても、坑道周辺における地下水変動の抑制や、作業環境をウォータータイトに近づける場合などにも展開できると考えられる。

謝辞：瑞浪超深地層研究所における研究坑道掘削工事施工者(大林・大成・安藤ハザマJV：奥村浩所長，小森淳平工事長，清水・鹿島・前田JV：草野隆司所長，栗田和昭工事長，江口慶多担当係員)，清水建設 小林伸司課長には多大な協力を頂いた。ここに記して謝辞いたします。

参考文献

- 1) 日本原子力研究開発機構 バックエンド研究開発部門 東濃地科学センター 地層科学研究部：超深地層研究所 地層科学研究基本計画，JAEA-Review 2015-015, 39p., 2015.
- 2) 高橋彦治：湧水と地圧，土木ライブラリー21, pp. 1-14, 山海堂，1963.
- 3) 森山守，寺田光太郎，松原利之，築地功：土かぶり1,000m, 6MPa を超える高圧湧水下で貫通—東海北陸自動車道 飛騨トンネル先進坑—，トンネルと地下，Vol. 38, No. 2, pp. 17-24, 2007.
- 4) 地下水を知る編集委員会：地下水を知る，地盤工学会 入門シリーズ 34, pp. 140-146, 2008.
- 5) 土質工学会：薬液注入工法の調査・設計から施工まで，現場技術者のための土と基礎シリーズ 9, pp. 1-12, 1985.
- 6) 小林伸司，宮嶋保幸，水道健，金戸辰彦，山本浩志，前島俊雄：倉敷基地 LPG 岩盤貯槽における高水压下のグラウト施工実績と改良効果の評価について，第42回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 125-130, 2014.
- 7) 岩本英将，岸本光弘，安井義則，吉田安利：大断面トンネルを多様な施工技術で掘削—第二東名高速道路 金谷トンネル—，トンネルと地下，Vol. 39, No. 2, pp. 15-26, 2008.
- 8) 木佐貫浄治，宮本裕二，鈴木雅文，辰巳勇司：自然由来のヒ素を含む大量湧水の減水対策試験，トンネルと地下，Vol. 46, No. 10, pp. 19-24, 2015.
- 9) 見掛信一郎，山本勝，池田幸喜，杉原弘造，竹内真司，早野明，佐藤稔紀，武田信一，石井洋司，石田英明，浅井秀明，原雅人，久慈雅榮，南出賢司，黒田英高，松井裕哉，鶴田忠彦，竹内竜史，三枝博光，

- 松岡稔幸, 水野崇, 大山卓也: 結晶質岩を対象とした坑道掘削における湧水抑制対策の計画策定と施工結果に関する考察, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Technology 2010-026, 146p., 2010.
- 10) 石井洋司, 渡辺和彦, 神谷晃, 早野明, 見掛信一郎, 竹内真司, 池田幸喜, 山本勝, 杉原弘造: 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, 日本原子力研究開発機構, JAEA-Technology 2010-044, 92p., 2011.
 - 11) 辻正邦, 小林伸司, 延藤遵, 杉山博一: 大深度の岩盤止水を目的とした活性シリカコロイドの適用, 基礎工, Vol. 43, No. 10, pp. 28-33, 2015.
 - 12) 根切り工事と地下水編集委員会: 根切り工事と地下水, 土質工学会, pp. 79-142, 1991.
 - 13) Bear, J.: *Dynamics of Fluids in Porous Media*, American Elsevier Publishing Company, pp. 122-125, 1972.
 - 14) 福島啓一: わかりやすいトンネルの力学, pp. 262-263, 土木工学社, 1994.
 - 15) 平野亨, 松井裕哉, 木下晴信: 結晶質岩における大深度立坑掘削を対象とした岩盤の変位・ひずみ計測, 土木学会第 64 回年次学術講演会講演概要集, III-210, 2009.
 - 16) Sato, T., Sugihara, K. and Matsui, H.: Geoscientific Study at the Tono Mine and the Kamaishi Mine in Japan, *Proc. of 8th ISRM Congress*, pp. 47-51, 1995.
 - 17) 核燃料サイクル開発機構: 釜石原位置試験総括報告書, JNC TN7410 99-001, 348p., 1999.
 - 18) 井尻裕二, 澤田淳, 赤堀邦晃: 我が国の岩盤の水理特性について, 核燃料サイクル開発機構, JNCTN8400 99-090, 45p., 1999.
 - 19) 見掛信一郎, 佐藤稔紀, 池田幸喜, 渡辺和彦, 小林伸司, 辻正邦, 草野隆司, 栗田和昭: 瑞浪超深地層研究所深度 500m におけるポストグラウチング技術 (その 1) - 湧水抑制対策の概要 -, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, IV-665, 2015.
 - 20) 小林伸司, 辻正邦, 見掛信一郎, 佐藤稔紀, 栗田和昭, 江口慶多: 瑞浪超深地層研究所深度 500m におけるポストグラウチング技術 (その 2) - 止水性向上を目的とした新技術を採用した設計および湧水量予測 -, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, IV-666, 2015.
 - 21) 栗田和昭, 草野隆司, 辻正邦, 小林伸司, 見掛信一郎, 佐藤稔紀: 瑞浪超深地層研究所深度 500m におけるポストグラウチング技術 (その 3) - ポストグラウチング仕様, 注入実績概要, 新しい技術の施工性 -, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, IV-667, 2015.
 - 22) 辻正邦, 小林伸司, 見掛信一郎, 佐藤稔紀, 江口慶多, 栗田和昭: 瑞浪超深地層研究所深度 500m におけるポストグラウチング技術 (その 4) - 新しい技術の有効性評価 -, 土木学会第 70 回年次学術講演会講演概要集, IV-668, 2015.
 - 23) 延藤遵, 小林伸司, 見掛信一郎, 佐藤稔紀, 江口慶多, 栗田和昭: 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, pp. 179-184, 2011.
 - 24) 米倉亮三, 島田俊介: 長期耐久性地盤注入工法の最近の動向, 基礎工, Vol. 43, No. 10, pp. 1-9, 2015.
 - 25) 清水建設土木クォータリー編集委員会: 水封トンネル・LPG 地下岩盤貯槽の施工, 貯槽の気密試験, 清水建設土木クォータリー, Vol. 180, pp. 14-56, 2013.
 - 26) 横澤圭一郎, 近藤亮: トンネル補助工法に適用する複合動的注入の研究, 建設の施工企画, No. 712, pp. 75-77, 2009.
 - 27) Kobayashi, S., Tsuji, M., Soya, M. and Haruyama, K.: Effect of Complex Dynamic Grouting with Super-fine Cement and Colloidal Silica, *Proc. of EUROCK 2015 & 64th Geomechanics Colloquium*, pp. 29-34, 2015.
 - 28) Brantbeger, M. and Janson, T.: Underground Design Formwork, Layout D2 Grouting, *SKB report, R-08-114*, 91p., 2009.

(2017. 5. 17 受付)

EVALUATION OF COMBINED PRE- AND POST-EXCAVATION GROUTING FOR REDUCING WATER INFLOW UNDER HIGH WATER PRESSURE CONDITION

Shin-ichiro MIKAKE, Koki IKEDA, Hiroya MATSUI, Masakuni TSUJI
and Makoto NISHIGAKI

Pre-excavation grouting of shafts and galleries had been conducted during the construction of Mizunami Underground Research Laboratory in the aspect of reducing water inflow into shafts and galleries. After excavating GL-500m gallery, a post-excavation grouting was performed on section of the pre-excavation grouting area under high water pressure condition (maximum water pressure: 4MPa). The post-excavation grouting experiment was performed outside of the pre-excavation grouting zone with designs, applying colloidal silica grouting material and complex dynamic grouting. It was estimated that the inflow after post-excavation grouting was reduced by 1/100 of the case that pre- and post-excavation grouting were not performed. In addition, a new theoretical formulation considering relationship between reduction of hydraulic conductivity and the grouting zone was derived. This paper states the theoretical evaluation is very convenient and useful for grouting design and estimate of water inflow on these results.