

瑞浪超深地層研究所深度400m以深の 立坑掘削におけるプレグラウチングの施工

石井 洋司^{1*}・見掛 信一郎¹・神谷 晃¹・渡辺 和彦¹・延藤 遵²・草野 隆司³

¹日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター施設建設課（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64）

²清水建設株式会社 土木技術本部（〒105-8007 東京都港区芝浦1-2-3）

³清水・鹿島・前田特定建設工事共同企業体（〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64）

*E-mail: ishii.yoji@jaea.go.jp

岐阜県瑞浪市において建設を進めている「瑞浪超深地層研究所」は、高レベル放射性廃棄物の地層処分
の技術基盤を整備するため、主に花崗岩を対象とした深地層の科学的研究を進めている。現在実施中の研
究坑道掘削工事において掘削範囲の地質や地下水状況を把握するために坑道掘削に先立ちパイロットボー
リング調査を行ったところ、深度400m付近の換気立坑掘削領域において深度200m付近よりも透水性は低
いものの高圧の湧水が発生する可能性が高い区間が存在することがわかった。そこで坑道掘削時の湧水を
抑制することを目的として掘削範囲周辺に超微粒子セメントを用いたプレグラウチングを行った。その結
果、低透水性・高湧水圧の岩盤であっても湧水量低減効果を確認することができた。

Key Words : pre-excavation grouting, micro cement, water-inflow reduction

1. はじめに

独立行政法人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、主に花崗岩を対象として深
地層の研究施設である瑞浪超深地層研究所の建設を進め
ている。研究坑道は、資機材の搬出・搬入ルートとなる
主立坑（内径φ6.5m）、研究坑道内からの排気を行う換
気立坑（内径φ4.5m）と深度100m毎に設置される水平
坑道からなる。2010年10月現在の研究坑道は、深度約
460mまでの両立坑、深度400mまでの予備ステージ、ボ
ーリング横坑と研究アクセス坑道が掘削されている（図
-1）。

本報では、深度400m以深の瑞浪超深地層研究所にお
ける研究坑道の掘削に伴って発生する湧水を抑制する施
工技術として実施した超微粒子セメントを用いたプレグ
ラウチングにおける地質状況・地下水状況、施工方法、
施工結果と、深度200m付近で実施した普通ポルトラン
ドセメントを用いたプレグラウチングの注入実績との比
較により把握できた適用範囲やグラウトの高濃度化につ
いて報告する。

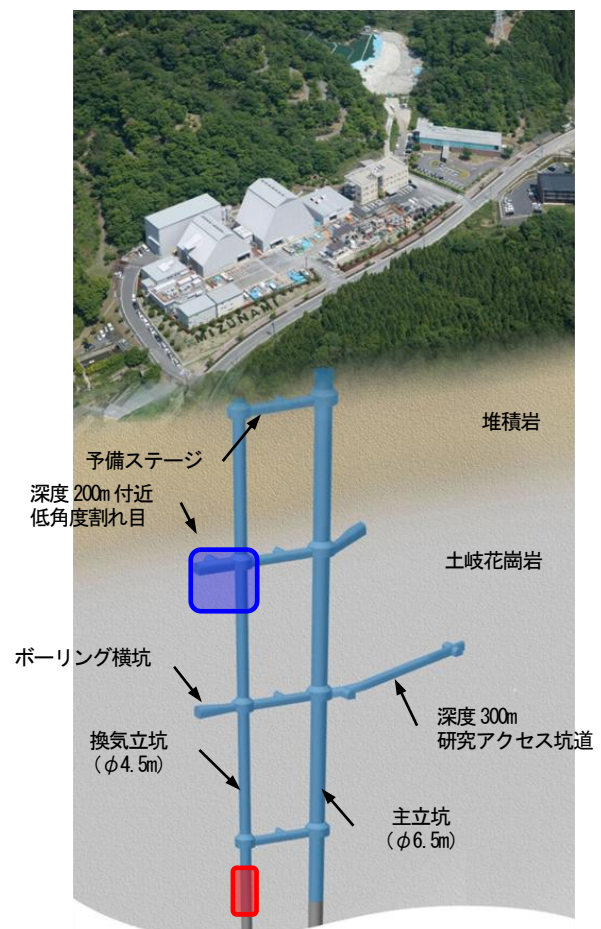


図-1 瑞浪超深地層研究所研究坑道概要図

2. 研究所周辺の地質環境

(1) 地形概要・地質概要

瑞浪超深地層研究所は標高200m程度の丘陵地にあり、用地内に普通河川の狭間川が流れている。

周辺地質は、基盤岩である中生代白亜紀後期の土岐花崗岩と、これを不整合に覆う新第三紀の堆積岩（瑞浪層群）からなり、堆積岩と花崗岩の境界は立坑位置で深度170m付近である。

土岐花崗岩の平均的な物性値は弾性波速度5.5km/sec、一軸圧縮強さ150MPa、接線弾性係数50GPaと比較的強固な岩盤である。

(2) 深度400m以深の地質と地下水の状況

研究坑道掘削前の地質と地下水に関する情報は換気立坑の深度191mより実施したパイロットボーリング（削孔長335m、孔底深度526m）がある。このパイロットボーリング調査により、以下の情報が得られている。

岩種は中～粗粒の黒雲母花崗岩からなり、ほぼ均質な岩相を示す。また、変質は弱く、割れ目中の介在物が緑泥石化及び長石の弱い絹雲母化が認められる。岩盤等級はC_M～Bに区分される。

この調査で行ったBTVにおいて壁面全周にわたり連続的に確認された割れ目の開口幅の深度分布を分析したところ、深度200m付近、300m付近及び深度400～450m付近に割れ目頻度が高い傾向を示したため、さらに傾斜角度について分類して分析した（図-2）。深度400～450m区間では割れ目本数は調査区間の中ではやや多いが、深度200m付近の低角度割れ目に比べると少ない。また、割

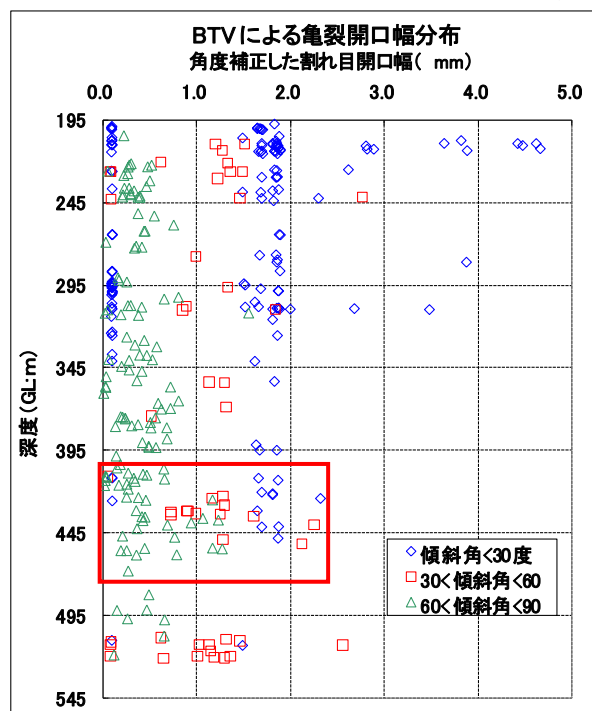


図-2 BTVによる亀裂開口幅

れ目開口幅も深度200m付近の低角度割れ目に比べると小さい。岩芯観察でも深度400～450m区間が他と比較して特に割れ目が目立つわけではないが、傾斜角が60度を超える亀裂のみを抽出すると、深度400～450m区間の割れ目頻度が相対的に大きい。

パイロットボーリングの掘削では、深度410～450m付近にかけて当初150ℓ/分（深度200m付近：約600 ℓ/分）、セメンチング後の再掘削時に99.6ℓ/分の湧水が確認された。また、電磁フローメータ検層結果でも、この区間において10ℓ/分程度の流速の増加が確認されている。水理試験では深度404.5～460.9mの透水係数は 4.1×10^{-7} m/s（深度197～228m： 6.4×10^{-6} m/s）を示した。

これらの情報から、深度400m以深では、以下の状況が想定された。

- 深度200m付近の低角度割れ目帯とは異なる透水構造、透水性分布を有し、高角度の割れ目からの湧水が支配的である
- 高角度の割れ目がパイロットボーリングで捕捉されていない可能性を考慮すると、立坑掘削時にはパイロットボーリング掘削時よりも湧水に留意する必要がある

3. プレグラウチングの施工

(1) 湧水抑制の考え方

排水ポンプで地上に揚水された湧水は、地上に設置されている排水処理設備により処理を行った上で河川に放流している。設備の処理能力や処理費用と湧水抑制対策費用との費用対効果を考慮しつつ、掘削を進めていくこととし、換気立坑の深度200m付近では低角度割れ目が集中する上部割れ目帯を対象としたプレグラウチングを実施した。

しかし、深度400～450m区間は、下記要因により深度200m付近の低角度割れ目と同様のプレグラウチングでは十分な効果が得られない可能性が考えられた。

- 割れ目の開口幅が小さく、透水性も相対的に低い
- 高角度割れ目が多く、削孔方向と割れ目の交差角が小さい
- 湧水圧が大きい
- パイロットボーリング孔において加圧したセメンチングを実施した深度200m付近の低角度割れ目においては、プレグラウチングの注入量が小さかった

そこで高い湧水圧・低透水性の岩盤に対応した工学技術開発として、グラウト材料をこれまでの普通ポルトランドセメントから浸透性のより高い超微粒子セメントに変更し、湧水抑制の目標ルジオン値も1～2Luとこれまで

より低いルジオン値を目指すグラウチングを計画した。

(2) 探り削孔

立坑深度200m以深の掘削においては、湧水状況の確認とプレグラウチング実施の是非を判断するために、掘削サイクル内で事前の探り削孔を実施しつつ掘削を行っている。

削孔は立坑掘削に用いる穿孔機（190kg級2Bシャフトジャンボ）で行った。基本的な探り削孔の配置は施工の合理化のため図-3に示すようにプレグラウチング1次孔9孔の内、外周に位置する3孔と兼用した。深度300mと深度400mでは接続部の形状を踏まえて4孔とし、深度425m以深では亀裂の走向・傾斜を考慮し4孔に変更している。

孔尻より約10mの位置に高圧エアパッカーを設置し、湧水と湧水圧を測定し、下式を用いて換算ルジオン値を算出した。プレグラウチングの実施の要否は、換算ルジ

オン値 1 Luに相当する30ℓ/minを目安とした。

$$\text{換算ルジオン値} = \frac{\text{湧水量}}{\text{湧水圧}} \times \frac{0.98}{\text{区間長}} \quad (1a)$$

換算ルジオン値1Luに達した探り孔は、深度417.1mと442.1mの2箇所で見られ、それぞれ1.92Luと1.49Luとなった。これらの換算ルジオンを示した孔でBTV観察を行ったところ（図-4）、削孔中に湧水が確認された付近に割れ目を確認することができ、深度417.1mでは49°～53°、深度442.1mでは77°～85°であったことから、高角度割れ目からの湧水が支配的であるとの今回の予測が概ね妥当であったことがわかる。

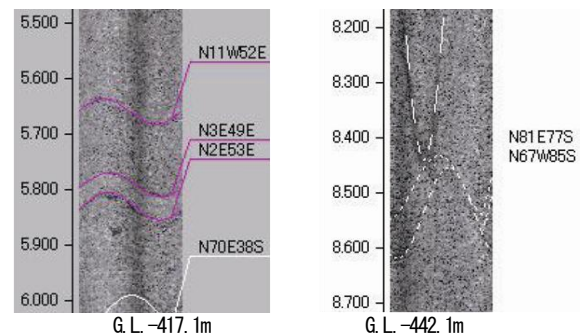


図-4 BTV映像

(3) 注入

a) 注入孔配置

これまで実施したプレグラウチングと同様に、立坑掘削方向へ掘削3スパン分（7.8m＝2.6m×3スパン）とカバーロック3.0mを加えた10.8m先に向かって立坑掘削領域よりも3m外側の位置へ孔尻を基本的に配置をしている。ただし、深度200m付近とは異なり削孔数はパイロットボーリング調査結果や掘削時の壁面観察などを踏まえて合理化し、チェック孔も亀裂やグラウトの状況を踏まえて柔軟に配置した（図-3）。

b) グラウト材料

超微粒子セメントは太平洋マテリアル（株）のアロフィクスMCを用いた。これは普通ポルトランドセメントを細かくしたもので、最大粒径（約15μm）であっても普通ポルトランドセメントの平均粒径（約20μm）よりも小さく、小さな割れ目への浸透が期待された。

なお、どの深度からのグラウト材であるか判別できるように生コンクリート着色用の色粉を添加した。実績として深度417.1mで赤、深度442.1mで青を使用した。

c) 注入

施工順序は中央内挿法を標準とし、探り削孔を一部転用する1次孔、2次孔、チェック孔の順で行った。注入方式はシングルパッカー方式による1ステップ注入とし、ステージ長さは8m程度を標準とした。

削孔後に行った水押し試験で注入流量が確認された孔はグラウト注入を実施した。同時に水押し試験の結果か

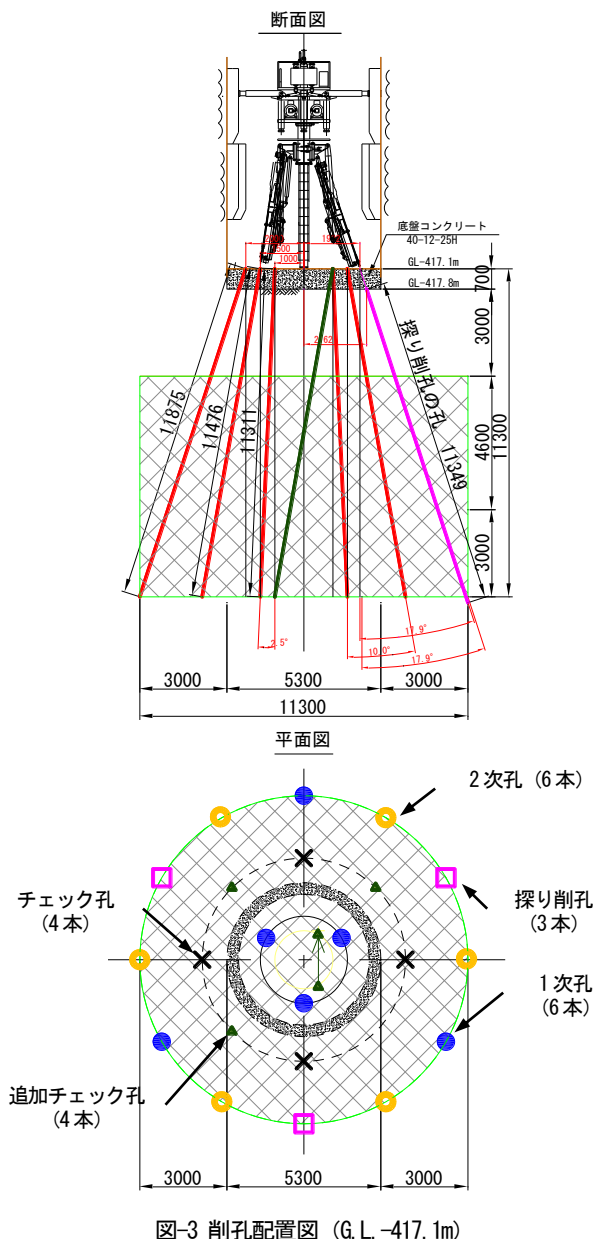


図-3 削孔配置図 (G.L. -417.1m)

ら求めた暫定ルジオン値により表-1に示す配合切替に従って開始配合を決定した。ただし、深度442.1mにおけるプレグラウチングでは、深度417.1mにおけるプレグラウチングの施工結果・施工状況を踏まえ換算ルジオン値と暫定ルジオン値がともに0.01Lu未満の場合はグラウト注入を省略し、超微粒子セメントによる浸透性の向上が確認できたことから開始配合を1:6とより高濃度へ変更し、また分散剤を硬化促進タイプに変更した。

表-1 配合切替 (G.L.-417.1m)

配合WC Lu値	配合毎の注入量(ℓ)						合計 (ℓ)
	1:8	1:6	1:4	1:2	1:1	1:0.75	
Lu<5	400 (0)	400 (400)	400 (400)	400 (400)	800 (1,000)	600 (800)	3,000 (3,000)
5≤Lu<10		400 (0)	400 (400)	400 (800)	1,000 (1,000)	800 (800)	3,000 (3,000)
10≤Lu<20			400 (0)	800 (800)	1,000 (1,200)	800 (1,000)	3,000 (3,000)
20≤Lu				800 (0)	1,200 (2,000)	1,000 (1,000)	3,000 (3,000)

注) () 内はG.L.-442.1mでの値

注入圧は、湧水圧測定結果をもとに有効差圧を1MPaに設定し、注入速度は10ℓ/minを基本とした。注入流量が1.5ℓ/min/本 (=0.2ℓ/min×7.8m/本) 程度に低下した後、30分間そのまま注入（ダム押し）を継続した。

深度417.1mと深度442.1mにおいて各23孔程度の削孔を行い、全ての孔で湧水が確認され、湧水圧の最大値は2.90MPa、湧水量の最大値54ℓ/min、暫定ルジオン値の最大値3.64Lu、グラウト注入量の最大値2,582ℓを示した。グラウト注入後の湧水は1孔でのみ確認され1.2ℓ/minを示した。暫定ルジオン値が改良目標値1Lu以上を示したものは探り削孔を除けば、2孔で確認され2Lu以下を示した。

削孔時の湧水量を深度毎に集計すると深度417.1mで約80ℓ/min、深度442.1mで約60ℓ/minを示した。この値はパイロットボーリング削孔時に確認された150ℓ/minと同程度であり、パイロットボーリング孔のセメンチング後に確認された湧水量99.6ℓ/minよりは大きい。掘削の進捗による水圧の低下や、パイロットボーリングやプレグラウチングの削孔と湧水割れ目との遭遇確率、パイロットボーリングのグラウチングの浸透範囲などを考慮すると、確認された湧水量は妥当と考えられる。すなわち、湧水が確認されたグラウト孔の多くが立坑外周に位置することから、1Lu程度の岩盤において普通ポルトランドセメントを用いたグラウトが浸透する範囲は立坑掘削領域よりかなり狭いと考えられる。

最大注入量は、両深度とも各1孔で2,500ℓ程度を示したものの、多くのものが100ℓ以下を示した。両深度とも湧水量が多い孔は、これまで同様ルジオン値と単位セメント量も大きい。

図-5に注入チャートの例を示す。図中のハッチングは1:1配合で注入した部分を示す。深度200m付近の普通ポルトランドセメントを用いたプレグラウチングではルジ

オン値が3Lu程度を示すと1:2～1:6程度の配合では注入量が少なかったが、今回の超微粒子セメントを用いたプレグラウチングではより低透水性岩盤であっても浸透している。また、今回のプレグラウチングでも注入流量の減少が生じているのは、1:1配合のセメントミルクの注入であり、薄濃度のセメントミルクでは水みちの目詰まり効果が十分期待できない可能性が高いことも確認された。

図-6に示すように深度417.1mにおいて湧水量と湧水圧から算出される換算ルジオン値が0.01Lu以下の孔では、パッカーによる閉塞区間体積に相当する30ℓにグラウト注入量が達しておらず改良効果が期待できない。そこで深度442.1mでは換算ルジオン値と安全側に水押し試験から算出される暫定ルジオン値の両方が0.01Lu以下の孔ではグラウト注入を中止し、工期を短縮させた。深度442.1mにおいては、グラウト注入量が30ℓに達しない孔のルジオン値は0.2Lu程度であった。超微粒子セメントを用いた1:6配合のグラウトの粘性とダム押し流量0.2ℓ/minから求めたルジオン値が0.26Luになることから、超微粒子セメントを用いたプレグラウトの適用限界ルジオン値は0.2Lu程度が目安であるとする。

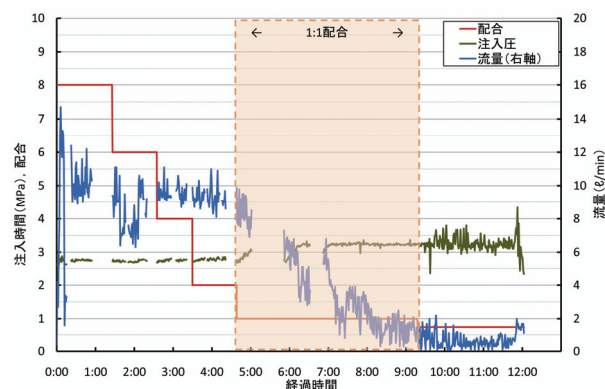


図-5 注入チャート (G.L.-417.1m 1次孔)

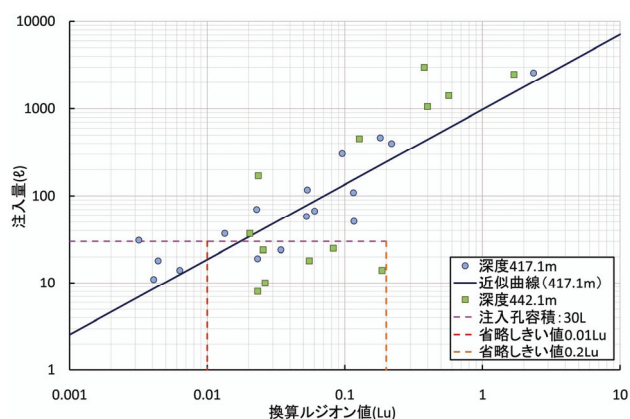


図-6 換算ルジオン値と注入量 (G.L.-417.1m, -442.1m)

深度200m付近におけるプレグラウチングでの暫定ルジオン値と単位セメント量の関係は、1Lu : 10kg/m（図-7の赤実線）程度を示していたが、赤点線で囲まれたデ

ータのように深度400m以深ではルジオン当たりの単位セメント量がやや大きい。深度200m付近では換算ルジオン値が小さくなると分布が赤実線よりも下方にシフトしていた。これらの違いは使用したセメント粒径に依存したと考えられる。

グラウチングの判定基準と結果を比較する際に基準となる換算ルジオン値と暫定ルジオン値の関係を図-8に示す。このデータは深度200m付近よりも相関性が低くなっており、低透水域での湧水量や湧水圧の測定においては、精度の限界にあることや水押し試験の水が湧水を伴わない割れ目に浸透している可能性が考えられる。

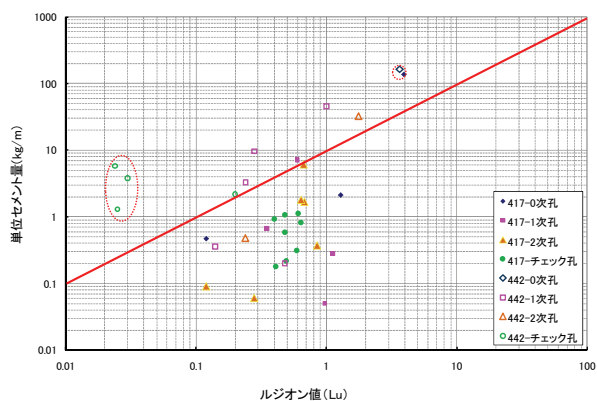


図-7 暫定ルジオン値と単位セメント量
(G. L. -417. 1m, -442. 1m)

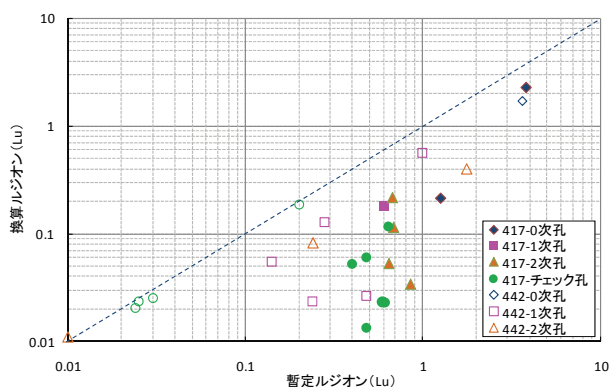


図-8 暫定ルジオン値と換算ルジオン値の比較
(G. L. -417. 1m, -442. 1m)

4. 立坑掘削状況と考察

図-9はプレグラウチングを実施した立坑掘削時の壁面スケッチをまとめたものである。図中の赤線と青線がそれぞれの深度においてグラウトに混入された色粉を示し、着色された亀裂はそこにグラウトが充填されていたことを示している。また、赤色と青色の図形は最大湧水量を確認した注入孔の位置とその湧水位置を掘削壁面に投影したものである。

両深度において亀裂へのグラウトの充填はパッカーよ

り浅い部分と孔尻から計画改良範囲3mよりも深い部分において確認されている。深度が大きくなる方向への到達範囲は、深度417.1mでは深度441.0mまでの約13mの到達が確認されているものの、深度442.1mでは掘削が中断していることもあり深度459.8mまでの6m程度までしか確認されていない。グラウト充填割れ目は、深度417.1mではNW～S側、深度442.1mではS～WSW側とNE側に集

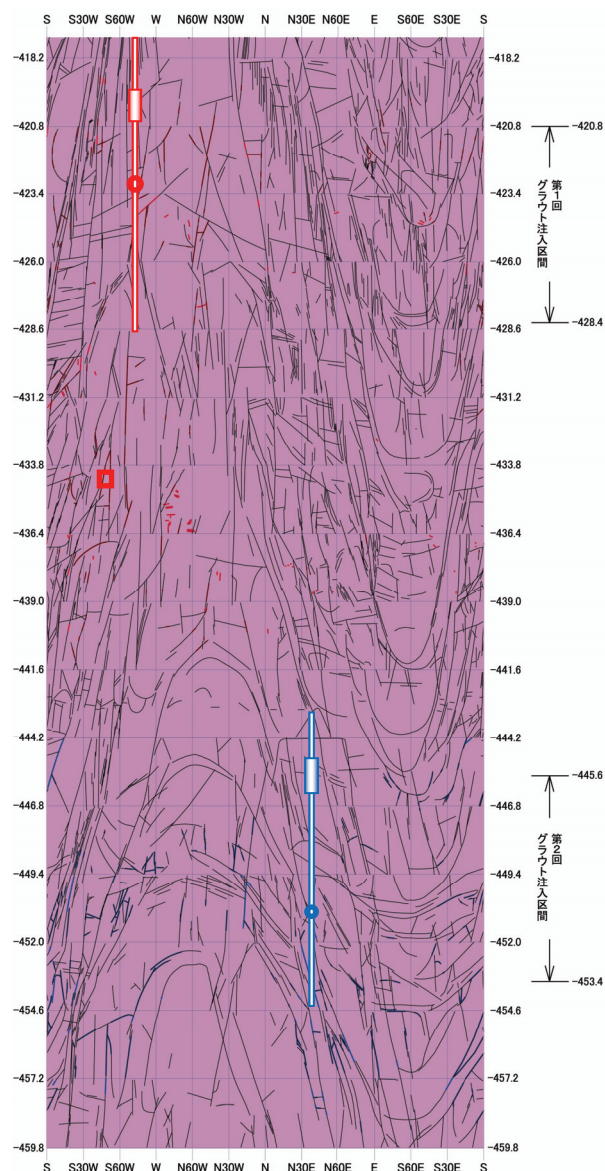


図-9 プレグラウチング実施付近の壁面スケッチ
(G. L. -418. 2m～441. 6m)

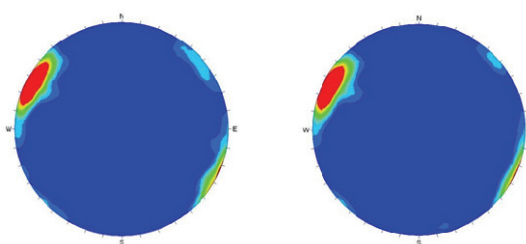


図-10 シュミットネットの例 (G. L. -418. 2m～441. 6m)

中している。グラウト充填割れ目の壁面での分布状況は、第1回目と第2回目で多少異なるものの、走向 NNE～NE の高角度傾斜の割れ目が主であり、走向NWの高角度傾斜のものもいくつか確認できる。

図-10に示すようにグラウト充填された割れ目とその区間の全体の割れ目の幾何学的傾向は変わらない。

写真-1にグラウトが充填された割れ目を示す。撮影位置は図-9の赤四角である。割れ目に1mm程度の厚さで付着しており、割れ目が直交する部分を通してグラウトが浸透しており、従来言われるように、割れ目の交差部が主要な水みちになっている可能性が示唆される。



写真-1 グラウト充填割れ目の例 (G.L. -434m付近)

5. まとめ

前章までに述べた深度420～450mにおいて実施した低透水性地盤への超微粒子セメントを用いたプレグラウチングに関して得られた知見を以下にまとめる。

- 1Lu程度の岩盤に対して岩盤中の湧水割れ目に交差する注入孔を配置することで、その湧水割れ目を含む立坑掘削断面よりも広範囲に透水性を低減できる

- 換算ルジオンと注入量の関係や、超微粒子セメントを用いたグラウトの粘性とダメ押流量から算定したルジオン値は、両者とも0.2Lu程度であることから超微粒子セメントを用いたプレグラウトの適用限界ルジオン値は0.2Lu程度が目安であると考えられる
- 深度400m付近でもすでに配合を高濃度へとシフトしたが、超微粒子セメントのグラウト適用範囲である0.2Lu～5Luにおいて、さらなる高濃度化が可能であると考えられる

今回の施工により0.2Lu程度までの岩盤の透水性を低減する技術の確認ができた。また、換気立坑の深度200m付近で実施した普通ポルトランドセメントを用いたプレグラウチングとの、適用範囲の違いについても把握できた。これらの結果から0.2Luより高透水性の岩盤に対しては、より効果的な透水性の改良が可能と考えられる。

今後はより深度が深くなるにつれ高湧水圧かつ低透水性の岩盤を対象としたグラウチングを必要とする可能性があり、さらに浸透性に優れた材料、例えば溶液型グラウトの試験施工等も検討していきたい。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター：“超深地層研究所地層科学研究基本計画”，JNC TN7410 2001-018 (2002)。
- 2) 西尾和久ほか：“超深地層研究所計画 年度報告書 (2005年度)”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Review 2008-073(2009)。
- 3) 鶴田忠彦ほか：“瑞浪超深地層研究所における立坑内からのパイロットボーリング調査報告書”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Research 2008-098 (2009)。
- 4) 見掛信一郎ほか：“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計画に関する考察”，日本原子力研究開発機構，JAEA-Technology 2010-026(2010)。

PRE-EXCAVATION GROUTING WITH MICRO-FINE CEMENT BELOW FOUR HUNDREDS METER DEPTH

Yoji ISHII, Shinichiro MIKAKE, Akira KAMIYA, Kazuhiko WATANABE,
Jun NOBUTO and Takashi KUSANO

The “Mizunami Underground Research Laboratory” has been carrying out scientific research in granite to establish the technological basis for high-level radioactive waste disposal. To get reliable information on the rock mass geology and hydrogeology and on the bedrock conditions, a pilot borehole investigation was carried out before sinking the Ventilation Shaft. During this investigation, a zone with high hydraulic head and low hydraulic conductivity was observed at around GL-400m. To reduce water inflow during excavation, pre-excavation grouting with micro-fine cement was done in this region before sinking the Ventilation Shaft. Despite the high hydraulic head and the low hydraulic conductivity, effective reduction of water-inflow was achieved.