

結晶質岩中の地下坑道掘削を対象とした グラウト効果に関する研究

松井裕哉¹⁾, 田中達也²⁾, 藤井治彦²⁾, 竹内真司¹⁾, 弥富洋介¹⁾, 杉原弘造¹⁾

¹⁾日本原子力研究開発機構 地層処分研究開発部門 (〒509-6132 岐阜県瑞浪市明世町山野内1-64)

²⁾(株)大林組 東京本社 原子力本部 原子力環境技術部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

*E-mail: matsui.hiroya@jaea.go.jp

地下空洞掘削時には、必要に応じ空洞内への湧水抑制のためにグラウチングが実施される。一方、高レベル放射性廃棄物の地層処分では、通常グラウチングに用いるセメントが人工バリアに与える影響の評価が重要視されている。本研究はグラウト材の浸透範囲やその効果を把握・評価する手法の構築を主目的とし、(独)日本原子力研究開発機構瑞浪超深地層研究所の深度200mにおける坑道掘削時のプレグラウチングを対象とし、ボーリング孔掘削、地質学的調査、地球物理学的調査、水理試験などを行うと共に、調査結果に基づく水理地質構造モデルの構築および地下水流動解析により湧水抑制効果を評価した。この結果、グラウト浸透範囲は設計改良範囲にほぼ収まっており、かつ十分な湧水抑制効果があること等を確認した。

Key Words :grouting, underground structure, engineered barrier system, field investigation

1. はじめに

トンネルなどの岩盤での地下構造物の建設においては、工事の円滑な実施および安全確保といった観点からグラウチングによる空洞内への湧水を抑制する対策がしばしば行われる。一方、高レベル放射性廃棄物の地層処分において現在想定されている人工バリアシステムの中で、緩衝材と呼ばれる粘土材料（ベントナイト）は、グラウチングで一般的に用いられる普通ポルトランドセメントからの高pH浸出水により、その諸特性が変化し得る可能性があるため、地層処分を進める国内外の研究機関において、研究が精力的に進められている^{1), 2)}。このような観点から、経済産業省資源エネルギー庁は、地層処分における湧水抑制対策技術やその影響評価技術の開発を目的とした研究（地下坑道施工技術高度化開発）を平成19年度より開始している。

本報告は、同研究受託の一部として、既往のグラウチング技術の適用性評価とグラウト材の浸透範囲（以下、グラウト浸透範囲と称す）やその効果を把握・評価する技術の整備を主たる目的として、(独)日本原子力研究開発機構が岐阜県瑞浪市において建設中の瑞浪超深地層研究所（以下、研究所と称す）の一部を利用し実施した原位調査を伴う試験研究の概要を報告するものである。

2. 調査実施地点の地質環境およびプレグラウチングの概要

図-1に調査実施地点を示す。調査は、研究所の深度200mレベルに掘削した予備ステージ中央に位置する避難所（幅4m×高さ3m×長さ6m）とその周辺で実施した。研究所掘削地点の地質は、地表から深度170m程度までは新第三紀の堆積岩が分布し、それ以深は基盤となる花崗岩（白亜紀後期の土岐花崗岩）が分布する。実施地点周辺は、地上からの調査および換気立坑と主立坑の深度176m付近より掘削したパイロットボーリング調査結果³⁾から、花崗岩の上部に存在するUHF（Upper Highly Fractured Domain: 上部割れ目帯）内であり、その中でも水平に近い低角度割れ目が密集する領域（LAFZ: Low Angle Fractured Zone）に位置すると予測された。このため、両立坑および水平坑道掘削時に多量の湧水が生じる懸念があり、これらの坑道掘削前に探りボーリングを実施し、湧水箇所および湧水量の特定を試みると同時に、多量の湧水発生が見込まれた避難所を含む数箇所でのプレグラウチングが実施された（詳細は文献4）を参照）。本プレグラウチングでは、着色したグラウト材を注入した（一次注入：黒色、二次注入：黄色）。図-2はその結果の一部である。同図から、避難所の主立坑側と換気立坑側では岩盤の透水性やグラウト注入量に大きな差が認められる。注入孔

掘削時に観測した最大湧水量は約140 l/minであり主立坑側で生じた。また、プレグラウチング時に設計で設定したグラウト改良領域範囲外のロックボルト孔からグラウト材（黄色）の漏出が確認された（図-3）。

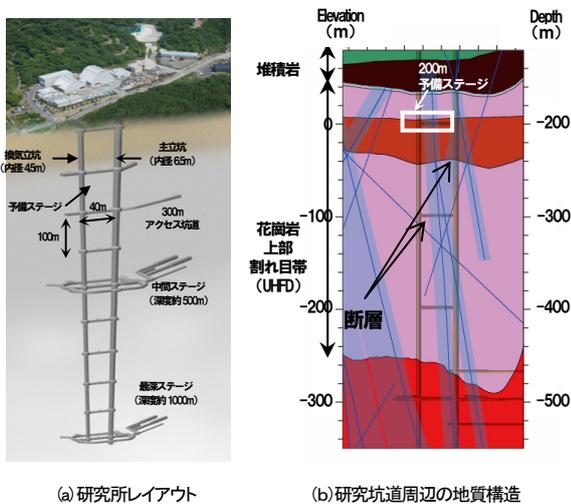


図-1 調査実施場所

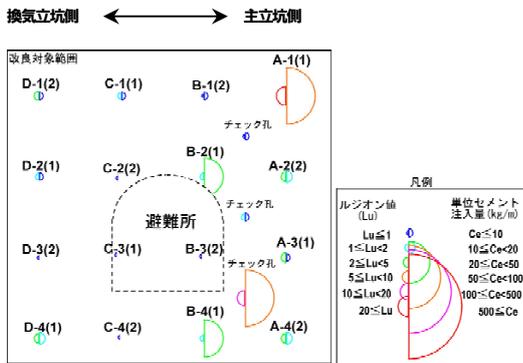


図-2 プレグラウト時に測定したルジオン値と注入セメント量の分布

a-2孔注入時のロックボルト孔からの漏出

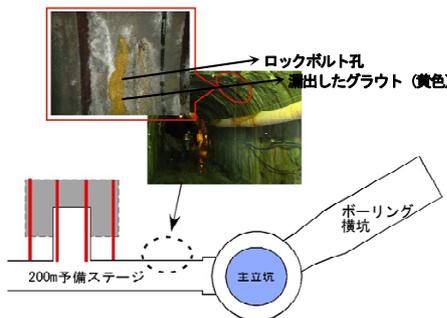


図-3 プレグラウチング時に観察された注入グラウト材のリーク

3. 本研究の概要

(1) 原位置調査計画策定およびボーリング孔レイアウト

既往の研究事例では、グラウチングの効果を把握・評価する場合には、グラウチング前後で同種の調査を行い、その結果を比較する方法がとられることが多い。しかし本調査は、プレグラウチング実施後にのみ行ったこと

から、プレグラウチング後の現状の場が、どのようになっているかを地質学的調査によって確認しつつ、その結果に基づき、地球物理学的調査や水理学的調査を実施することによって、グラウト浸透範囲を空間的に評価することとした。また、それらの結果に基づき、水理地質構造モデルの構築およびグラウチング効果を考慮した地下水流動解析を行うことで、現状の場を再現できるモデルを構築し、グラウチングが実施されない場合の状況を推定して、その効果を間接的に評価することとした。

図-4は、調査用ボーリング孔の最終的なレイアウトを示しているが、前述のように避難所〜主立坑側の領域は高い透水性を有するとともにグラウト材が改良範囲を超えて浸透している可能性があったため、主立坑までの全域をほぼカバーする形でボーリング孔を配置した。また、3次元的なデータ取得のため、水平方向のボーリング孔と同一鉛直断面内に下向き30°のボーリング孔を配置した。一方、換気立坑側については当初主立坑側とほぼ同等の長さのボーリング孔を配置する予定であったが、グラウト材が岩盤にほとんど浸透していない状況であったことから、グラウト改良範囲内外のパラメータが測定可能な最低限の孔長とした。

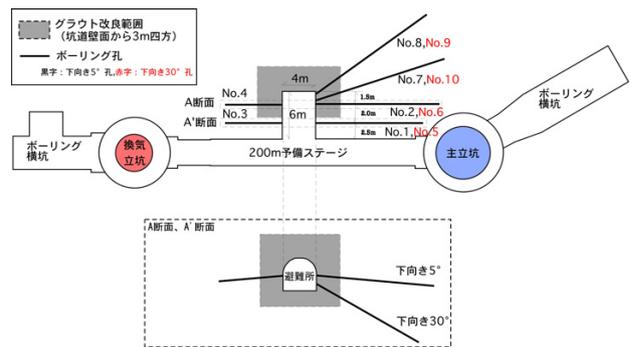


図-4 調査用ボーリング孔配置

(2) 調査項目

避難所周辺のグラウト改良範囲(避難所壁面から3m程度の範囲)という小スケールを対象に、グラウトの浸透範囲とその効果を把握・評価し、かつモデル化・解析に必要な情報を限られた調査期間・費用で取得するため、以下の調査を実施した。

a) ボーリング掘削中の調査

湧水箇所の特定期間および孔間の水みちの連結性を概略的に把握することを目的として、掘削中の湧水量測定（1 m毎）および掘削中の孔口圧力観測を実施した。

b) 地質学的調査

本研究において基盤となるグラウトが充填している割れ目の位置・充填状況およびその幾何学的情報（走向・傾斜、開口幅）と調査対象領域内に分布する岩盤の地質学的特徴（岩相、割れ目の位置、幾何学的情報とその性状など）を把握するため、コア観察・BTV観察を実施し

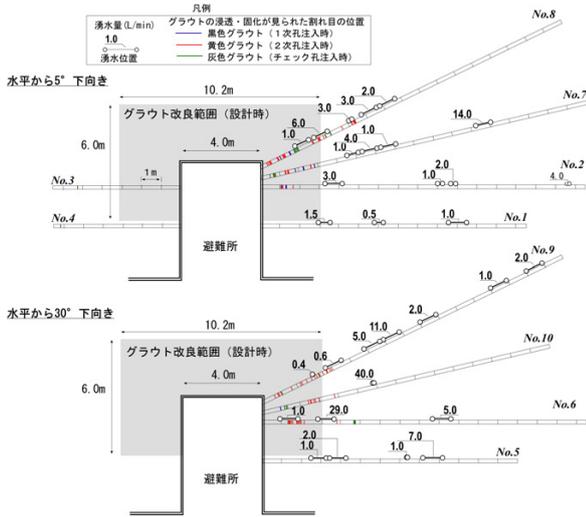


図-7 グラウトの浸透・固化が見られた割れ目の位置とボーリング孔掘削時の湧水状況

b) 地球物理学的調査

異なる検層方法で得られたボーリング孔沿いの見かけ比抵抗値は、健全な土岐花崗岩と考えられる換気立坑側で最大6000 Ω・m程度、主立坑側で最大2000 Ω・m程度であった。比抵抗トモグラフィー時のインライン測定によって得られた見かけ比抵抗分布と電極間隔の広い比抵抗検層結果は整合しており、避難所壁面近くと孔奥の数mの領域で比抵抗値が低くなった。図-8に比抵抗トモグラフィーの解析結果とグラウト充填割れ目の分布状況および岩盤の変質領域の分布を比較した結果を示す。グラウト充填割れ目が認められない換気立坑側では数千Ωmの比抵抗値を示すのに対し、主立坑側は検層結果などと同様、避難所壁面付近と主立坑壁面に近い領域に相対的に低い比抵抗部が現れている。グラウト充填割れ目の分布範囲は、水平面内・鉛直面内とも低比抵抗部に対応しており、他方、主立坑に近い低比抵抗帯はコア観察などで把握された変質領域の分布と一致する。なお、レーダートモグラフィーで得られた電磁波速度・減衰定数の分布は必ずしも比抵抗トモグラフィーの低比抵抗分布域と対応していない。

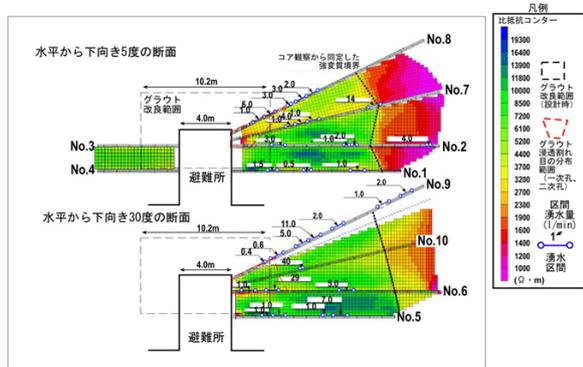


図-8 比抵抗トモグラフィー解析結果の一例

c) 水理調査結果

図-9は、回復法と簡易ルジオン試験である注入法の結果から算定した透水係数の比較である。本試験では、回復法の初期勾配から求められる透水係数は簡易ルジオン試験の値に近く、透水試験時の影響半径が小さい透水係数に相当するものと考えられる。ただし、回復法の試験は、周辺岩盤中の水圧変動による影響を大きく受けるのに対し、注入法の試験はその影響が小さいことがわかった。

回復法の初期勾配から求められる透水係数は簡易ルジオン試験の値に近く、透水試験時の影響半径が小さい透水係数に相当するものと考えられる。ただし、回復法の試験は、周辺岩盤中の水圧変動による影響を大きく受けるのに対し、注入法の試験はその影響が小さいことがわかった。図-10は、回復法の初期勾配から求めた避難所周辺岩盤中の透水係数分布である。同図より、主立坑側の透水係数は 10^{-5} ~ 10^{-9} m/secの広い範囲に分布していること、グラウト改良範囲内の透水係数は、その外側に比べ低いこと、変質領域での透水性は相対的に低いことなど読み取れる。なお、本調査結果に基づく試験手法の提案を別報⁹⁾に報告する。

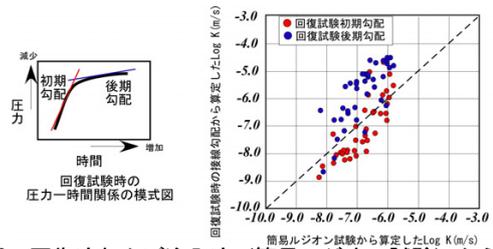


図-9 回復法および注入法（簡易ルジオン試験）から算定した透水係数の比較

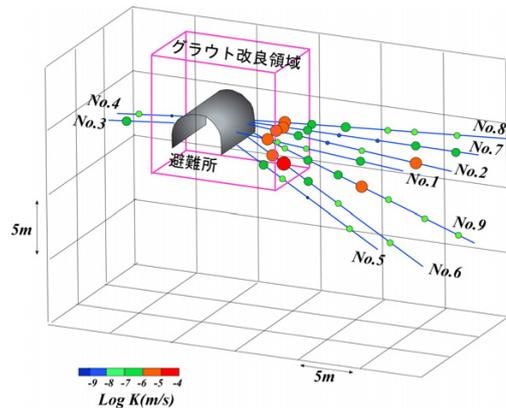


図-10 避難所周辺岩盤の透水係数分布（回復法初期勾配）

また、注入試験時に実施した孔口圧力観測結果とレーダートモグラフィー結果を比較した例を図-11に示す。

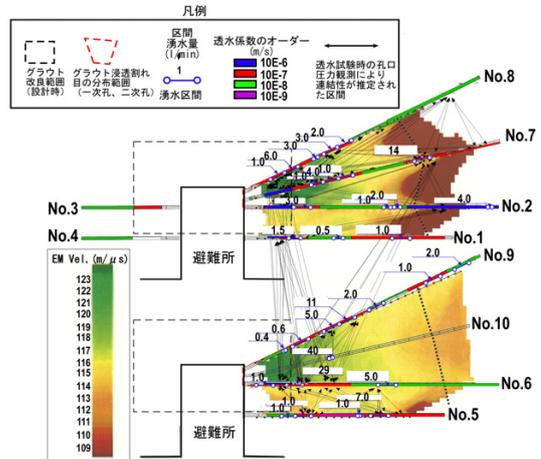


図-11 注入試験時の孔口圧力変化から推定した水みちの連結性と電磁波速度分布との比較例

孔口圧力観測結果から定性的に推定される水みちの分布は、電磁波速度の低い箇所と良く対応している。このことから、電磁波速度は比抵抗よりも水分の移動経路に対し感度良く反応しているものと思われる。

4. モデル化・解析

(1) 水理地質構造モデルの構築

図-12は地質学的調査から得られた岩盤中の割れ目の分布と透水係数を比較した例を示している。BTV観察で把握された開口部を有する割れ目の有無による岩盤の透水性に有意な違いは認められなかったため、本研究の水理地質構造モデルの構築では、透水係数の設定において開口割れ目の有無は特に考慮しないこととした。一方、地質学的調査結果から主立坑側は主立坑壁面に近い変質領域とそうでない領域に区分できること、換気立坑側はグラウトが浸透しない程度の透水性の岩盤であること、および主立坑が断層と交差していることを考慮し、図-13に示すように200mレベルの避難所を中心とする50m程度の範囲を4つの領域に区分した。この4つの領域それぞれに岩盤の透水性を既往の知見^{10), 11)}およびパイロットボーリング調査結果に基づき表-1のように設定した。

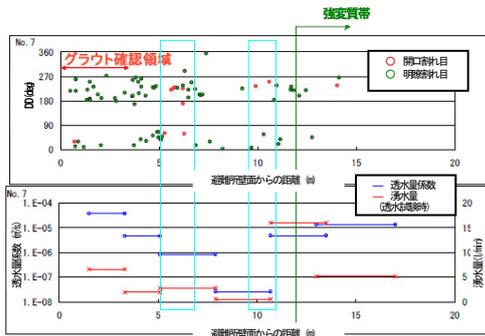


図-12 地質学的調査結果と水理調査結果の比較例

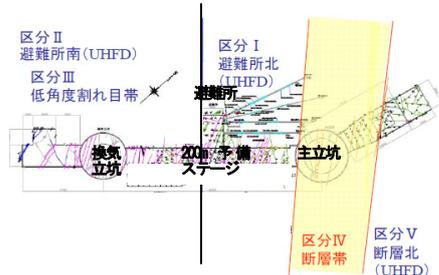


図-13 本調査結果および既存情報に基づく水理地質区分

表-1 各水理地質区分毎の透水係数の設定

水理地質構造区分	透水係数 (m/s)	データソース
区分 I: 避難所北・主立坑側の母岩領域		
①主立坑 避難所壁面から3m区間	8.32E-07	水理試験結果 (No. 1, No. 2, No. 5~No. 9平均)
②主立坑 避難所壁面から3~6m区間	2.70E-07	水理試験結果 (No. 1, No. 2, No. 5~No. 9平均)
③主立坑 (上記①、②以外)	5.22E-08	水理試験結果 (No. 1, No. 2, No. 5~No. 9平均)
区分 II: 避難所南・換気立坑側の母岩領域		
①換気立坑 避難所壁面から3m区間	2.29E-09	水理試験結果 (No. 3, No. 4平均)
②換気立坑 避難所壁面から3~6m区間	5.89E-08	水理試験結果 (No. 3, No. 4平均)
③換気立坑 (上記①、②以外)	2.20E-07	文献⑨ (土岐花崗岩組⑨)
区分 III: 200m予備ステージの鉛直下側に分布する低角度割れ目帯 (LAFZ)	2.54E-06	換気立坑パイロットボーリング孔 水理試験結果
区分 IV: 主立坑に沿う断層帯	1.00E-11	文献⑩ (IF_SB03_02 (花崗岩部))
区分 V: 主立坑に沿う断層帯の北側の母岩領域	2.20E-07	文献⑨ (土岐花崗岩組UHFD)
区分 VI: 土岐花崗岩を覆う準層岩領域	8.38E-07	文献⑩ (土岐花崗岩層 (本体ノ基礎層) 平均値)

*圧力回復試験時の回復初期のデータを使用した Agarwal 法¹²⁾によるデータ解析結果

(2) 地下水流動解析

本解析は、別報¹³⁾で報告する不連続体モデルによる解析の条件設定の確認および境界条件の設定を主目的として実施した。解析領域は、境界条件の影響が及ばずかつ境界上に水圧観測ボーリングが存在するように、避難所を中心とする180m×180m×100mの領域とした(図-14)。立坑および水平坑道は可能なかぎりモデル上に忠実に表現した。境界条件は、ボーリング孔における水圧観測結果に基づき、地球統計手法により2種類設定した(図-15, 図-16)。グラウチングの効果は透水係数を2オーダー低下させて表現した。解析ケースは、境界条件とグラウトの効果の有無で計6ケース設定した(表-2)。結果の一例として、図-17に湧水量に関する実測値と解析結果の比較を示す。グラウチング効果を考慮して現状を最も良く再現したのは、Case4であり、本ケースでグラウチングを実施しないとした場合(Case6)の避難所への湧水量は、Case4の約10倍となった。

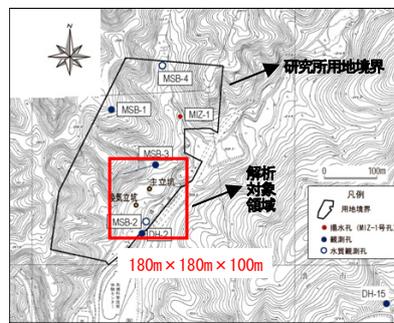
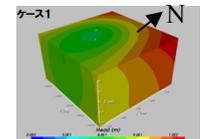
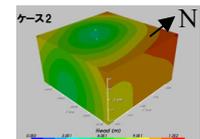


図-14 解析対象領域の設定



(1) 両立坑壁面の水圧0とした場合



(2) 両立坑壁面の水圧を-60mとした場合

図-15 境界条件の設定

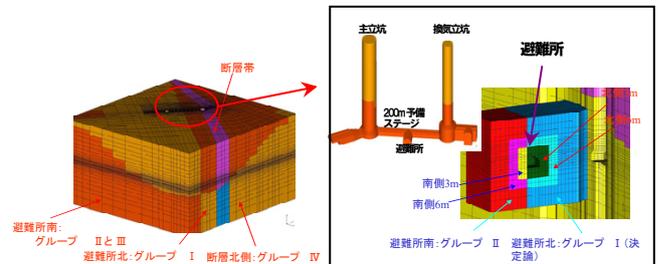


図-16 解析モデルの設定

表-2 解析ケース

ケース番号	透水係数	境界条件
CASE 01 (基本ケース)	グラウト改良範囲の透水係数を本調査における水理試験結果に基づき設定	境界条件ケース1による全水頭推定結果
CASE 02	基本ケースのグラウト改良範囲の透水係数を2オーダー小さく設定	
CASE 03	基本ケースのグラウト改良範囲の透水係数を2オーダー大きく設定	
CASE 04	グラウト改良範囲の透水係数を本調査における水理試験結果に基づき設定	境界条件ケース2による全水頭推定結果
CASE 05	基本ケースのグラウト改良範囲の透水係数を2オーダー小さく設定	
CASE 06	基本ケースのグラウト改良範囲の透水係数を2オーダー大きく設定	

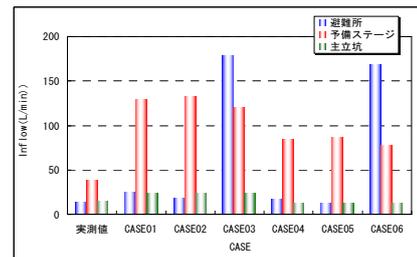


図-17 実測および解析で得られた湧水量の比較

5. まとめ

グラウト材の浸透・固化範囲については、地質学的調査などの結果から、主立坑側は概ね3mの範囲に収まっており、既存のグラウト設計・施工法がほぼ妥当であったことを示している。グラウチングの効果については、主立坑側でグラウト改良範囲内外での透水性に有意な差は認められないものの、プレグラウチング時の注入孔の水押し試験時の最大透水係数(約 7×10^{-6} m/s)との比較および地下水流動解析結果から最大で2オーダー程度透水性が改善された可能性がある。これらの結果に基づき構築した現在の避難所周辺の湧水状況の概念を図-18に示す。

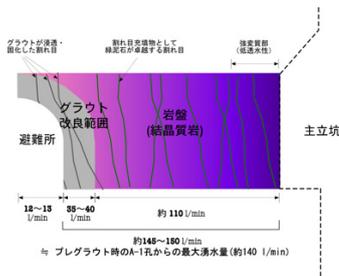


図-18 現在の避難所およびその周辺の湧水状況の概念図
(グラデーションは変質の程度の変化を表現)

6. 今後の予定

注入したグラウト材が地下水の化学的性質に及ぼす影響について、既にNo. 9, 10孔に設置した地下水の水質連続モニタリングによりグラウト材からの浸出液が地下水の水質に及ぼす影響を数カ年観測するとともに、定期的な地下水の採水・分析を行い、水質変化に関するデータを取得することとしている。

謝辞：本研究は、経済産業省資源エネルギー庁からの受託研究の一環として実施したものである。また実際の調査については、研究坑道掘削工事JVの多大なご協力を頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1)原子力発電環境整備機構：Proceedings of the international

workshop on Bentonite-Cement Interaction in Repository Environments, NUMO-TR-04-05, 2004.

2)Emmelin, A. et. al.:Rock Grouting Current competence and development for final repository, SKB Report R-07-30, 2007.

3) 竹内真司, 原雅人, 見掛信一郎, 鶴田忠彦, 池田幸喜, 山本勝:超深地層研究所計画における研究坑道掘削の湧水抑制対策について, 第12回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp. 189~196, 2008.

4) 松井裕哉, 竹内真司, 見掛信一郎, 野田正利:瑞浪超深地層研究所の深度200mレベルにおけるプレグラウトの概要, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, pp. 783-784, 2008.

5) 高橋浩, 井上博之, 神藤健一, 水上雅之:比抵抗トモグラフィによるダム基礎岩盤でのグラウト判定の試み, 前田建設研究所報 Vol. 35, pp. 153-164, 1994.

6) 井上博之, 高橋浩, 神藤健一, 水上雅之:比抵抗トモグラフィによるダム基礎岩盤でのグラウト判定の試み(その2), 前田建設研究所報 Vol. 36, pp. 211-220, 1995.

7) 日本原子力研究開発機構:超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)研究成果報告書, JAEA Research 2007-043, pp. 190-192, 2007.

8) 寺戸康隆, 中川誠司, 米田俊一, 塩崎功, 大西有三, 中川浩二:亀裂性岩盤におけるグラウト侵入状況のはざとり調査, 土木学会論文報告集 No. 589III-42, pp. 56-66, 1998.

9) 安藤賢一, 竹内真司, 松井裕哉, 田中達也, 橋本秀爾, 藤井治彦:結晶質岩中の地下坑道掘削を対象としたグラウト効果に関する研究(その2)グラウトシステムを利用した透水試験手法の提案, 第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2009(投稿中).

10) 早野明, 中俣公德, 鶴田忠彦, 竹内真司:瑞浪超深地層研究所の研究坑道に分布する割れ目の特徴, 土木学会第63回年次学術講演会講演概要集, pp. 247-248, 2008.

11) 日本原子力研究開発機構:超深地層研究所計画における地表からの調査予測研究段階(第1段階)研究成果報告書, JAEA Research 2007-043, pp. 146-148, 2007.

12) Agarwal, R.G.: A New Method to Account for Producing Time Effects When Drawdown Type Curves are Used to Analyze Pressure Buildup and Other Test Data, paper SPE9289, 55th SPE Annual Technical Conference and Exhibition, Dallas, TX, Sep.21-24, 1980.

13) 田中達也, 松井裕哉, 橋本秀爾, 安藤賢一, 竹内真司, 三枝博光:結晶質岩中の地下坑道掘削を対象としたグラウト効果に関する研究(その3)プレグラウトによる湧水抑制効果の数値解析的検討, 第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2009(投稿中).

STUDIES ON GROUTING PERFORMANCE FOR UNDERGROUND CONSTRUCTION IN CRYSTALLINE ROCK

Hiroya MATSUI, Tatsuya TANAKA, Haruhiko FUJII, Shinji TAKEUCHI,
Yosuke IYATOMI and Kozo SUGIHARA

Grouting is practically important to reduce groundwater inflow into a cavern for construction of underground facilities. Studies on the grouting performance have been carried out in Mizunami URL excavated in crystalline rock. The aims of these studies are to evaluate the applicability of existing grouting technology and to develop the methodology for the estimation of grouting performance, e.g., the extension of grout, hydraulic property change. The results suggest that the existing grouting technology is effective to reduce groundwater inflow into drifts and the hydraulic conductivity in the surrounding rock may decrease by two orders of magnitude before grouting.