

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(3) -プレグラウトによる湧水抑制効果の数値解析的検討-

田中達也^{1*}・松井裕哉²・橋本秀爾¹・安藤賢一¹・竹内真司²・三枝博光²

¹株式会社 大林組 土木技術本部 (〒108-8502 東京都港区港南2-15-2)

²独立行政法人 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)

*E-mail: tanaka.tatsuya@obayashi.co.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、一般的な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が重要視されている。筆者らは、経済産業省資源エネルギー庁からの研究受託の一部として、(独)日本原子力研究開発機構の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た各種の原位置試験結果および既往の研究成果を活用し、グラウチング後の結晶質岩盤の水理地質構造を割れ目ネットワークとしてモデル化し、グラウチングの湧水抑制効果を地下水流動解析により定量的に示した。さらに、本解析を通じ、グラウチング効果の評価事例と今後の適用に向けた課題をとりまとめた。

Key Words : grouting, in-situ test, discrete fracture networks, water conducting feature

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が、岩盤へのグラウトの浸透メカニズムは未だ明らかではない部分がある。また、高レベル放射性廃棄物の地層処分では、地下施設建設時の湧水抑制の他、人工バリアを構築する岩盤の地質環境の改良など、既存土木事業とは異なる場面、施工目標でのグラウチングが想定される。既存土木事業の経験や知見を基礎として、対象岩盤におけるグラウトの浸透メカニズムを理解し、その浸透範囲や効果を定量的に把握・評価する技術の確立は、既往の湧水抑制対策工の設計・施工の合理化や地層処分の安全評価の信頼性向上に寄与すると考えられる。

(独)日本原子力研究開発機構は、経済産業省資源エネルギー庁からの研究受託として、瑞浪超深地層研究所(以下、研究所と称す)内の既存技術を用いプレグラウチングした地下200mの水平坑道で、グラウト効果などを把握するための調査・評価技術の確立を目指した調査研究を実施した¹⁾。本報告は、この調査研究で実施した、結晶質岩中のグラウチングによる岩盤への湧水抑制効果を数値解析的な手法に基づき評価した事例を紹介する。

2. 検討の概要

本研究は、深度200mに掘削した水平坑道(予備ステーション)中央に位置する避難所(幅4m×高さ3m×長さ6m)にて施工したプレグラウチングを対象に実施した¹⁾²⁾。本研究では、避難所掘削前やプレグラウチング前の岩盤の地質環境特性が十分に得られていなかったため、プレグラウチング時のグラウト改良範囲を超えるようにボーリング孔を配置し調査を実施している(図-1)。

本調査研究の目的や上記の条件を踏まえ、数値解析的な湧水抑制効果の評価として、以下の検討を実施した。

- (1) プレグラウチング後の地質環境調査結果(図-1)の全10孔のボーリングを利用した調査)および既往研究成果を評価し、プレグラウチング後の避難所周辺の水理地質構造モデルを構築する。
- (2) 構築した水理地質構造モデルを用いた地下水流動解析を実施し、プレグラウチング後の水理地質構造モデルの妥当性について検討する。
- (3) プレグラウチング後の水理地質構造モデルに基づき、施工前の水理地質構造モデルを推定し、プレグラウチングの湧水抑制効果について検討する。
- (4) (1)~(3)の結果に基づき、適用したモデル化・解析手法などの適用性や課題について考察する。

なお、研究所では、研究所用地を含む周辺領域の地質環境の理解を目的とした調査研究が別途なされおり、後述するモデル化・解析に必要な既往研究成果は活用した。

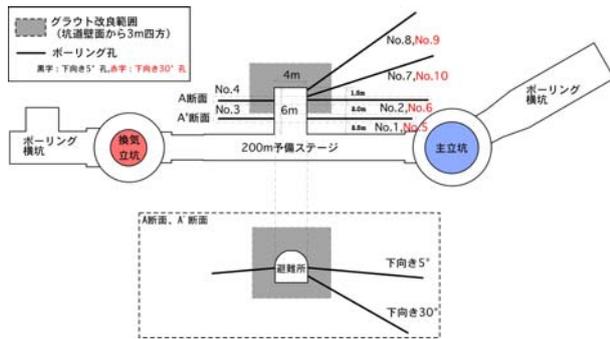


図-1 グラウト改良範囲とボーリング孔の配置

3. 水理地質構造モデルの構築

(1) モデル化対象領域

モデル化対象領域を図-2に示す。図中のMIZ-1, DH-2は地表からの深層ボーリング孔, MSB-1, MSB-2, MSB-3, MSB-4は地表からの浅層ボーリング孔の孔口位置を示している。これらのボーリング孔には、複数のパッカーが設置され間隙水圧のモニタリング計測が実施されている。また、主立坑および換気立坑では所定の深度毎で湧水量が計測されている³⁾。

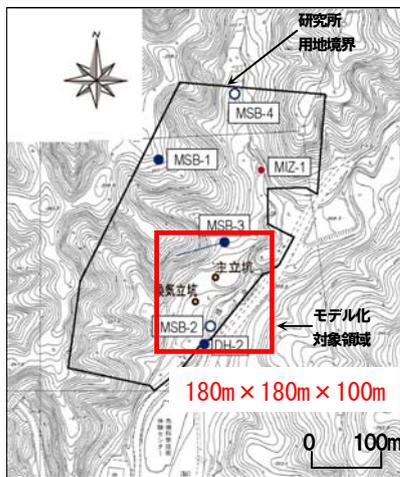


図-2 モデル化対象領域

(2) 地質構造の概念の整理

研究所用地周辺の地質構造は基盤をなす白亜紀後期の花崗岩（土岐花崗岩）を新第三紀の堆積岩（瑞浪層群・瀬戸層群）が不整合に覆う。これまでの研究により、岩盤の水理地質区分は地質構造区分と整合することが示されている。また、花崗岩部は上部割れ目帯と下部割れ目帯低密度帯の2つの岩盤領域に分類され、上部割れ目帯中には低角度の割れ目が集中する領域が存在することが明らかとなっている⁴⁾。深度200mの避難所は、上部割れ目

帯に位置している。図-1のボーリング孔におけるBTV観察結果より、避難所およびその周辺は、低角度の割れ目集中領域に位置しないものの、避難所北（主立坑側）ではNW走向の割れ目が、避難所南（換気立坑側）ではNE走向およびNW走向の割れ目が卓越していることが明らかになった。避難所北の割れ目の卓越方位は、主立坑に沿って分布する断層（NW走向）および断層に付随する割れ目と整合する⁴⁾。また、避難所南に分布する割れ目の方位分布は、既往の調査結果との比較により、上部割れ目帯内の割れ目の卓越方位と整合することが確認された。割れ目密度は、避難所北が大きく、岩芯観察では主立坑付近にて緑泥石化や絹雲母化を伴う変質領域が確認され、避難所北の割れ目分布は断層活動の影響を強く受けていることが示唆された。

(3) 地下水流動の概念の整理

a) 地下水の流動形態

一般に、結晶質岩等の硬岩中の地下水は、岩盤中に多数分布する割れ目のうち、水理的に連続する割れ目を経路（水みち）として流動すると考えられる。そのような岩盤では、グラウト材等の物質も水みちに沿って浸透すると考えられるため、対象とする母岩の地下水流動形態を把握することが湧水抑制効果の評価上も重要である。

ボーリング孔掘削時に実施した湧水量測定（1m掘削毎）結果とBTV観察で確認された割れ目の密度分布とを比較した例を図-3に示す。ボーリング孔掘削中に数L/minオーダーの湧水が生じた位置は局所的であり、かつ割れ目頻度と湧水量にはほとんど相関が認められないため、岩盤中に“水みち”が選択的に形成されていると考えられる。水理試験は、1.8~2.3mの測定区間でボーリング孔沿いに連続的に実施した。その結果、得られた岩盤の透水係数は、 $10^{-5} \sim 10^{-9}$ m/secオーダーの幅広い範囲で分布した。これは、各測定区間に分布する割れ目の透水性が幅広い範囲に分布することを示唆している（後述図-5）。なお、コア観察時には、計93本の割れ目においてグラウトの浸透・固化を確認したが、それらの割れ目は避難所北に集中しており、かつプレグラウチング時に設定したグラウト改良範囲（避難所側壁面から3mの範囲）に分布することが確認された。

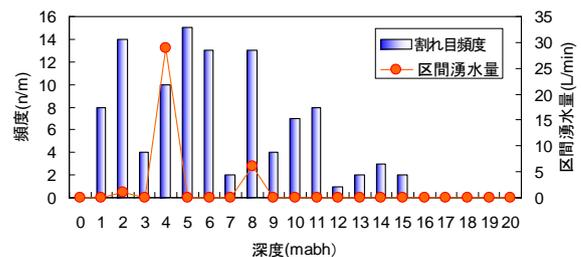


図-3 ボーリング掘削中の区間湧水量と割れ目頻度分布の比較例 (No. 6 孔)

b) 広域的な地下水の流動状況

研究所用地の地下深部を流れる地下水の主流動方向は、大局的な地形の起伏を反映し、北東から南西方向に流れていると推定されている。また、研究所用地周辺（数平方km）には月吉断層の他、数本の断層の分布が確認されており、流動方向に平行な断層や、直交する断層が深部の地下水流動に影響を与えていると考えられる³⁾。

図-4に示す浅層ボーリング孔（MSB1, MSB-2, MSB-3, MSB-4）の間隙水圧計測結果から、地表～深度200m（標高200～0m）の範囲で立坑掘削により水圧が低下しており、この水圧低下は深度200mまでの研究坑道（立坑、予備ステージ等）の建設の影響と考えられる。一方、深層ボーリング孔であるDH-2孔では、研究坑道掘削に起因する水圧の低下は確認されていない。

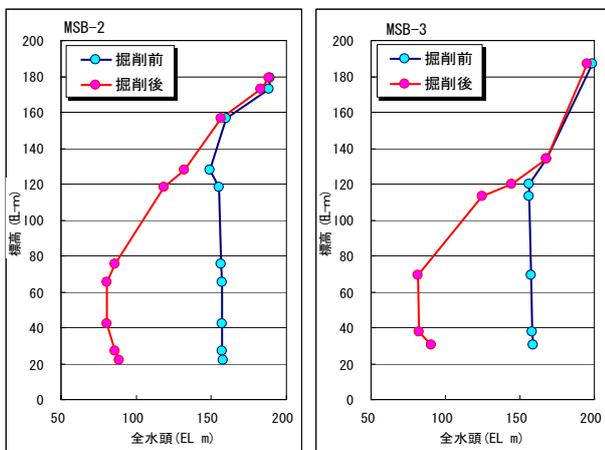


図-4 研究所用地内ボーリングの全水頭分布

c) グラウト浸透域の岩盤の透水性

前述の通り、岩芯観察結果より、避難所北ではプレグラウティング時に設定したグラウト改良範囲（避難所側壁から3m範囲）で、割れ目内へのグラウトの浸透・固化が確認された。一方、避難所北のプレグラウティング後の透水係数は、変質の程度が大きい避難所側壁から10m以遠では $10^{-6} \sim 10^{-8} \text{ m/s}$ であるものの、グラウト改良範囲内外でほとんど差がない（図-5）。

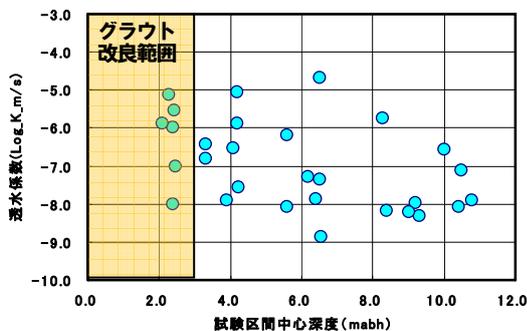


図-5 避難所北側のプレグラウティング後の透水試験結果

一方、避難所側壁より3mまでの範囲の割れ目にはグ

ラウトの浸透・固化が明瞭に認められることから、避難所壁面から3m程度の範囲のプレグラウティング前の岩盤の透水性は、プレグラウティング後に測定された透水係数より高かったと推察される。

しかし、BTV観察で得られた避難所北の割れ目密度の深度分布を確認すると、避難所壁面より4m程度までの領域で大きく、それ以深では小さくなる傾向が確認された（図-6）。

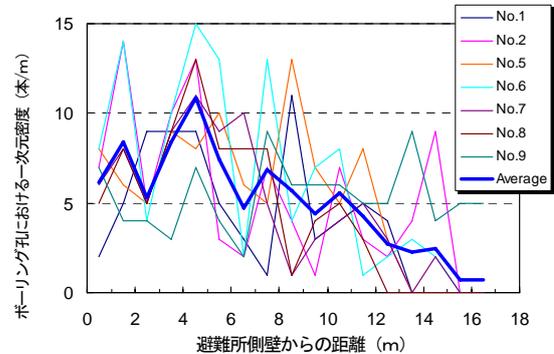


図-6 BTV 観察結果に基づく
避難所北側の割れ目の一次元密度分布

(4) 水理地質構造モデルの構築

(3)で検討した地質構造および、地下水流動の概念に基づき、水理地質構造モデルを構築した。

a) モデル化・解析の方針

避難所周辺の花崗岩中では、“水みち”がグラウトの主要な浸透経路となっていると判断されることから、対象領域の岩盤を割れ目ネットワークモデルとして表現する。モデル化では、開口割れ目と透水係数との間に相関が確認されなかったことから¹⁾、BTV観察で得られたすべての割れ目の幾何学的特性と岩盤の透水性との関係进行分析し、対象領域中の3次元的な割れ目の分布や個々の割れ目の透水性を確率的にモデル化する手法を用いた。解析コードとしては、基盤花崗岩上部を覆う堆積岩部までのモデル化も考慮し、多孔質媒体と割れ目ネットワークが混在する水理地質構造における地下水流動解析が可能なConnectFlowを用いた⁵⁾。

b) 水理地質区分

モデル化対象領域の岩盤の水理地質区分（以下、区分と称す）は、既往研究にて示された地質構造区分³⁾を基本として、本研究¹⁾により得た割れ目特性情報等により細分化した。堆積岩（区分VI）はモデル化対象領域のほぼ全域に南東方向に厚く分布する。また、主立坑に沿って鉛直に分布する断層帯（区分IV）は遮水性の構造を有する。これらの構造は多孔質媒体でモデル化した（後述図-9）。

花崗岩中の低角度割れ目集中帯（区分III）の分布は、換気立坑の深度204m以深にてその分布が確認されたこと⁶⁾から、深度200mの予備ステージの下方5mに水平に拡

がると仮定した。図-2に示した解析対象領域内の上部割れ目帯は、(2)の検討結果に基づき、避難所北側を区分Ⅰ、避難所南側を区分Ⅱ、断層北側を区分Ⅴとした(図-7)。また、立坑、予備ステージ、避難所の研究坑道をモデル化し、避難所周辺はグラウトの浸透領域として、壁面より3mの領域を割れ目高密度領域として区分した。

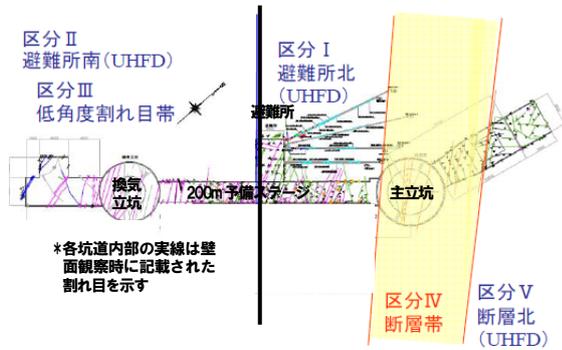


図-7 本研究および既存情報に基づく水理地質区分

c) 割れ目の幾何学特性

各領域(区分Ⅰ・区分Ⅱ・区分Ⅲ)のBTV観察で得た全割れ目の方位データを活用し、割れ目の卓越方位解析を実施した。また、区分Ⅴは既往研究成果を活用した⁹⁾。割れ目の長さに関するデータは本調査で取得されていないため、既往研究にて整理された不連続構造のトレース長分布を用いた⁹⁾。また、三次元密度は、BTV調査の割れ目の一次元密度²⁾と既往研究により得た一次元密度と三次元密度の比から算定した⁹⁾。

d) 割れ目の透水量係数分布

割れ目の透水量係数分布は、透水試験で得た透水量係数を試験区間に位置する割れ目の数で除すことにより算定した。避難所北(区分Ⅰ)の透水量係数分布を図-8に示す。

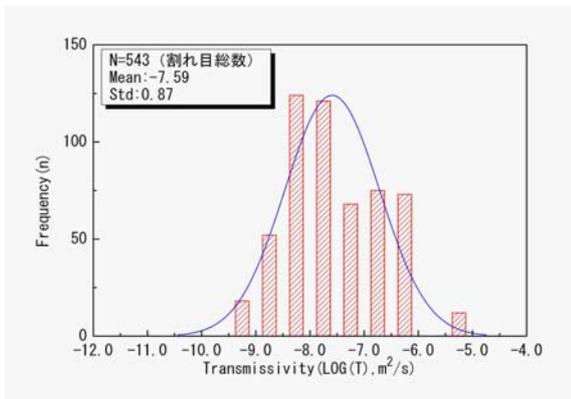


図-8 避難所北側(区分Ⅰ)の割れ目の透水量係数分布

e) 境界条件

モデル化対象領域内のボーリング孔3孔(MSB-2, MSB-3, DH-2)および領域外の4孔(MSB-1, MSB-4, MIZ-1, DH-15(DH-2孔より約1km東側に位置する))の水圧分布を用い、地球統計学的手法(クリギング)により、モデル化対象領域側面の水圧分布を設定した。水圧分布の設定にあたっては、均質多孔質媒体モデルを用いて、深度200mの予備ステージ、避難所、主立坑の湧水量をシミュレートし、現状のモニタリング結果などを最も良く再現できる境界条件を選定した⁹⁾。

f) 水理地質構造モデル

構築した水理地質構造モデルの一例を図-9に示す。また、割れ目ネットワークの幾何学特性、各水理地質区分の透水特性をとりまとめ、表-1および表-2に示す。

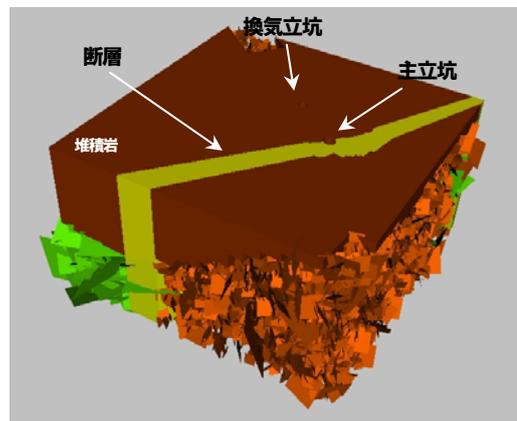


図-9 構築した水理地質構造モデルの一例

表-1 割れ目ネットワークの幾何学特性

水理地質	卓越方位セット	方位分布*1	長さ分布*2	密度*3
区分Ⅰ 避難所北・ 上部割れ目 帯	Set.1_NW(1)	79 / 226, 6.47		3.24 / 2.16
	Set.2_NW(2)	74 / 33, 6.88	2.5 / 4.0	2.06 / 1.38
	Set.3_SubH(1)	10 / 44, 16.10		4.97 / 3.31
	Set.4_SubH(2)	28 / 181, 2.14		2.85 / 1.90
区分Ⅱ 避難所南・ 上部割れ目 帯	Set.1_NEE	83 / 163, 27.45		1.03
	Set.2_NW(1)	81 / 60, 89.99	2.5 / 4.0	0.59
	Set.3_NW(2)	80 / 256, 82.83		0.52
	Set.4_SubH(1)	7 / 150, 28.91		5.43
	Set.5_SubH(2)	14 / 119, 1.80		3.84
区分Ⅲ 低角度割れ 目帯	Set.1_SubH(1)	10 / 30, 24.29		1.98
	Set.2_NW(1)	79 / 71, 80.00	2.5 / 4.0	3.69
	Set.3_NW(2)	83 / 212, 142.61		0.66
	Set.4_SubH(2)	20 / 185, 1.67		0.70

*1: 左より傾斜/傾斜方位. Fisher 係数を示す

*2: べき乗分布に基づく係数Lo/Expを示す

*3: 3次元密度 (m/m³). 区分Ⅰでは壁面から3mまでとそれ以外の2つの値を示す

表-2 各水理地質区分の透水特性

水理地質区分	モデル*1	透水特性*2
区分Ⅰ 避難所北・上部割れ目帯	DFN	Tmean=-7.59, Std=0.87
区分Ⅱ 避難所南・上部割れ目帯	DFN	Tmean=-9.98, Std=1.57
区分Ⅲ 低角度割れ目帯	DFN	Tmean=-6.72, Std=0.74
区分Ⅳ 断層帯	CPM	K=1.0E-11m/s
区分Ⅴ 断層北・上部割れ目帯	DFN	Tmean=-5.45, Std=0.72
区分Ⅵ 堆積岩	CPM	K=8.4E-07m/s

*1: CPM: 多孔質媒体モデル, DFN: 割れ目ネットワークモデル

*2: DFNでは対数正規分布に基づく透水量係数分布(m²/s)を仮定

4. 地下水流動解析とグラウトの影響評価

(1) グラウティング後の地下水流動状況の評価

構築した水理地質構造モデルを用いて地下水流動解析を実施した。割れ目ネットワークは確率論的なアプローチで再現したため、10リアライゼーションのモデル化・解析を実施した。解析で得られた全水頭分布の一例を図-10に、湧水量の算出結果を図-11に示す。解析結果は、リアライゼーション毎に異なる湧水量を示すが、8ケースで実測値と同オーダーの解析結果が得られ、かつ数ケースではその差が実測値の数倍に収まった。このことから、多孔質媒体と割れ目ネットワークが混在するモデル化が実際の地下水流動状況を概ね再現しえると判断した。

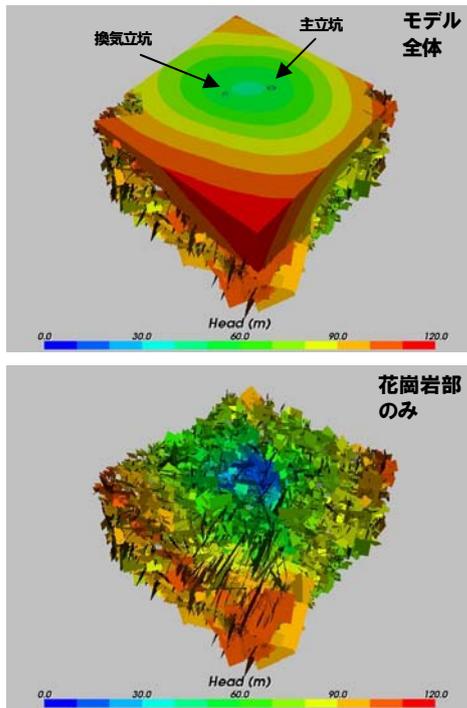


図-10 解析結果の一例 (全水頭分布)

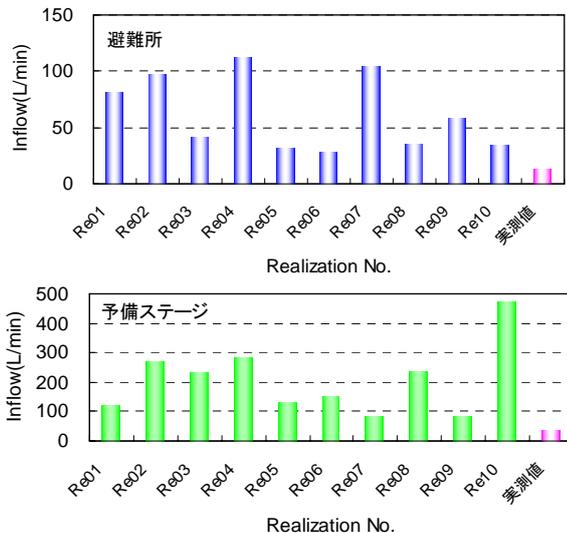


図-11 実測および解析による湧水量の比較

(2) グラウティング前の地下水流動状況の推定

グラウト改良範囲のプレグラウティング前の地質環境特性データは十分には取得されていないため、本調査研究の結果に基づき、グラウト浸透・固化が確認された避難所北の壁面より3mの範囲の割れ目に対し、グラウティング後の透水性を2オーダー大きくした水理地質構造をプレグラウティング前の状況と仮定した。プレグラウティング前後の湧水量の解析結果を図-12に示す。プレグラウティング後の湧水量は、リアライゼーションの違いによらず、プレグラウティング前の30%程度となった。

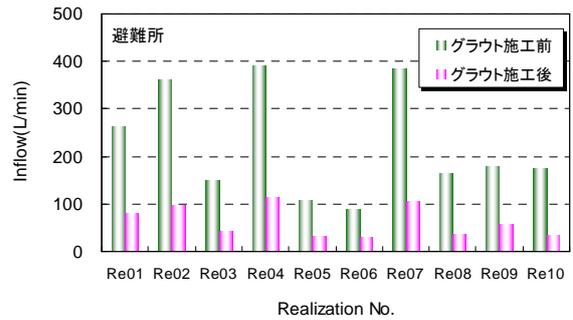


図-12 プレグラウティング前後の湧水量の比較

(3) グラウトの段階注入と湧水量の低減効果の検討

グリッド状に複数配置した注入孔より、グラウトを順次注入していく手順を想定し、段階注入による岩盤の改良過程をシミュレートした。具体的には、グラウト改良範囲内において、 $10^{-4} \text{m}^2/\text{s}$ オーダーの高透水性の割れ目(初期の“水みち”)より、グラウト充填が順次完了すると仮定し、段階注入で改良される割れ目の透水係数を1オーダーずつ下げ、避難所への湧水量変化を算定した。グラウトの止水効果は本調査研究の結果¹⁾に基づき、割れ目の初期透水係数に対して2オーダーの低下とした。解析モデルとしては、(1)の解析で避難所および予備ステージへの実測湧水量との整合性が最も良いRe05の割れ目ネットワークモデルを用いた。湧水量の算定結果を図-13に示す。今回の解析では、透水量係数で $10^{-6} \text{m}^2/\text{s}$ オーダーまでの割れ目を段階的に改良することで、湧水抑制に対し最大の効果が得られることが分かる。

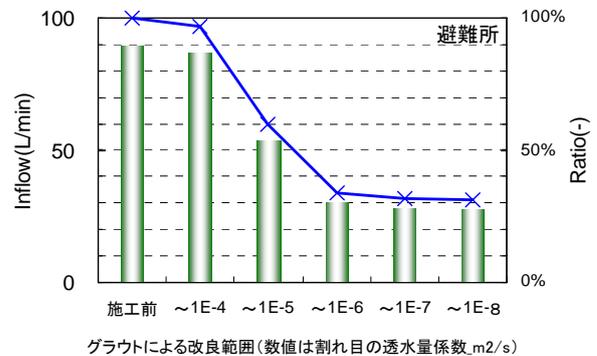


図-13 グラウティングの改良範囲と湧水量の変化
(棒グラフ:解析で得られた湧水量、実線:グラウトがない場合との湧水量比)

これは、実際の施工における段階注入並びに透水量係数を注入基準としたグラウトの施工が湧水抑制に対して合理的であることを示唆している。

(4) 高透水性割れ目へのグラウト効果

プレグラウチングの注入孔削孔時には最大で140L/minの湧水が確認された。多量湧水は高透水性の水みちとなる割れ目を経路としており、それを集中的に止水することは、避難所掘削時の湧水量抑制に効果的であると推察される。そこで、避難所北のグラウト改良範囲内に、避難所と交差しない単一の高透水性の割れ目 ($T=10^4 \text{m}^2/\text{s}$) を追加し、高透水割れ目を対象としたグラウチングの湧水抑制効果について検討した(図-14, 15)。本解析においても、Re05の割れ目ネットワークモデルを用いた。その結果、高透水性の単一割れ目のみを改良した場合でも、その湧水量は施工前の50%程度となり、高透水性の割れ目への集中的なグラウチングが湧水抑制に効果的であることがわかる。

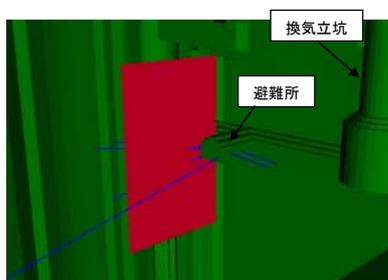


図-14 設定した単一の高透水割れ目

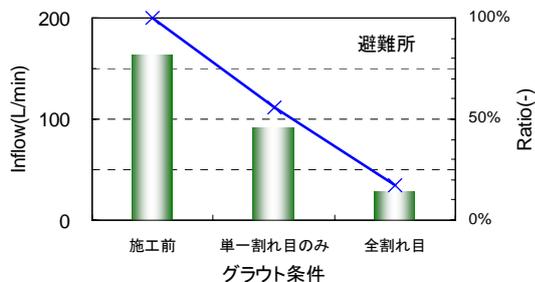


図-15 単一高透水割れ目へのグラウト効果

5. まとめと今後の課題

グラウト効果の定量的な調査・評価技術の整備を目的として、調査データに基づくモデル化手順を明確化し、プレグラウチング後の水平坑道周辺の水理地質構造を3次的にモデル化した。モデル化では、花崗岩中の地下水やグラウトの浸透状況を反映した割れ目ネットワークを適用し、地下水流動解析によりプレグラウチング後の地下水流動状況を定量的に再現した。また、その結果を踏まえ、既往の施工方法や単一高透水性割れ目へのグラウト効果なども解析的に検討した。これらのモデル化・解析の結果、結晶質岩中のグラウト効果を表現し得る見通しを得た。単一割れ目におけるグラウト材の浸透、充填、止水メカニズムの詳細な理解や、原位置のグラウトの浸透経路(透水性割れ目)の特性を調査する技術の開発が今後の課題と考えられる。

参考文献

- 1) 松井裕哉, 田中達也, 藤井治彦, 竹内真司, 弥富洋介, 杉原弘造: 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, 第38回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, 2009
- 2) 松井裕哉, 見掛信一郎, 竹内真司, 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.
- 3) 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, 2007
- 4) 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.
- 5) 田中達也, 安藤賢一, 橋本秀爾, 三枝博光, 竹内真司, 天野健治: 岩盤中の透水構造分布に着目した水理地質構造モデルの構築手法の検討, 第36回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.267-272, 2007.
- 6) 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中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

STUDY ON GROUTING PERFORMANCE FOR UNDERGROUND CONSTRUCTION IN CRYSTALLINE ROCK -NUMERICAL SIMULATION OF WATER-TIGHTNESS IMPROVEMENT-

Tatsuya TANAKA, Hiroya MATSUI, Shuuji HASHIMOTO, Kenichi ANDO,
Shinji TAKEUCHI and Hiromitsu SAEGUSA

This study aims to establish grouting techniques and evaluation of the effects of grouting in the geological environment of crystalline rock. A block-scale hydrogeological model has been generated using discrete fracture networks based on the data obtained by the short-borehole investigation campaign performed at a research tunnel around which grouting has been applied. The grouting performance in terms of reducing the water inflow rate was evaluated with groundwater flow simulation. Lessons learned applicable to future studies of in-situ testing have been addressed.