



プラグ周辺部の掘削影響領域への粘土グラウト注入の適用性(TSXプロジェクト)

杉田 裕

東海事業所 環境保全・研究開発センター 処分研究部

Study on Applicability of Clay - Based Grout Injection in the Excavated Damaged Zone around the Plug (TSX project)

Yutaka SUGITA

Waste Isolation Research Division, Waste Management and Fuel Cycle Research Center, Tokai Works

カナダの地下研究施設においてカナダ原子力公社との共同研究として実施しているTSXプロジェクトでは、実規模の処分坑道を模擬した試験坑道内に、処分概念で検討されている埋め戻し技術（埋め戻し、プラグ、グラウト）のうち、プラグを中心にその性能を研究している。ここで、粘土プラグの機能を補完する粘土グラウトに関して、粘土プラグ設置部の周辺岩盤を対象として注入試験を実施し、その適用性を確認した。予備注入試験では、粘土グラウトの注入方法について確認し、本注入試験では、坑道周辺に発現する掘削影響領域の透水性の改善について確認した。両試験結果を総合して、本試験の注入圧力及びベントナイト濃度の範囲では、圧力500kPa、ベントナイト濃度が4.0から6.0wt%が多くのベントナイトを岩盤内に注入できることがわかった。また、その注入効果は透水性の低下により確認できた。

JNC has joined the international joint project, the TSX project, with AECL at the Underground Research Laboratory (URL) in Canada. Full-scale sealing technologies are applied to an underground tunnel in the TSX project. Regarding clay grouting, which supports the performance of the clay plug, a grouting experiment in the Excavated Damaged Zone around the tunnel was performed in the TSX project. A pre-injection test was the trial for the development of the grouting procedure, and the injection test was to evaluate the grouting effectiveness of the grouting in the EDZ around the tunnel. The results of the experiments showed the efficiency injection concentration of the grout slurry was between 4.0 and 6.0wt%. Grouted EDZ had lower hydraulic conductivity than that before grouting.

キーワード

粘土グラウト、ベントナイト、原位置試験、掘削影響領域、粘土プラグ、TSXプロジェクト、透水試験、透水係数

Clay Grout, Bentonite, In Situ Experiment, EDZ, Clay Plug, TSX Project, Hydraulic Test, Hydraulic Conductivity

1. はじめに

高レベル放射性廃棄物地層処分場における廃棄体（高レベル放射性廃棄物をガラス原料で溶融固化したガラス固化体をオーバーパックに封入したもの）定置後の埋め戻し段階においては、廃棄体

及び緩衝材を地下深部の処分場に運び込む時に利用した坑道や立坑が放射性廃棄物の人間の生活圏への通路とならないように適切に埋め戻しておく必要がある。現在の埋め戻し概念としては、適切な埋め戻し材（坑道内に充てんされる充てん材）を坑道内に充てんし、坑道周辺の岩盤や割れ目の状況に応じてプラグ（坑道をふさぐ栓のような機能を持たせたもの）やグラウト（岩盤中に注入するペースト状のもので、注入した領域の透水性等を改良する）を組み合わせることが考えられている¹⁾。核燃料サイクル開発機構（以下、サイクル機構）は、このような埋め戻し技術にかかわる技術的課題を明らかにするため、カナダの地下研究施設



杉田 裕

処分バリア性能研究グループ
長期挙動研究チーム所属
副主任研究員
地層処分における閉鎖性
能、人工バリアにおける連
成挙動解析に関する研究開
発に従事

設 (Underground Research Laboratory, 以下, URL) においてカナダ原子力公社 (Atomic Energy of Canada Limited, 以下, AECL) との共同研究としてトンネルシーリング性能試験 (Tunnel Sealing Experiment, 以下, TSXプロジェクト) を実施している²⁾³⁾。

TSXプロジェクトでは、実規模の処分坑道を模擬した試験坑道内に、処分概念で検討されている埋め戻し技術を適用している。埋め戻し技術の要素は、埋め戻し、プラグ、グラウトなどであるが、TSXプロジェクトではプラグの機能の検証を中心に、プラグの機能を補完するグラウトに関しても効果の確認を行っている。

ここでは、TSXプロジェクトにおいてプラグ設置部の周辺岩盤を対象とした粘土グラウト単独の注入試験 (予備注入試験⁴⁾⁵⁾ 及び本注入試験⁵⁾⁶⁾) 結果について報告する。

2. 粘土グラウト試験の概要

2.1 背景

TSXプロジェクトは、カナダ、マニトバ州の州都ウィニペグの北東約100kmに位置するURLの420mレベル (地下420m) で実施している。URLはカナダにおける放射性廃棄物地層処分の安全評価研究を目的として、処分地の候補岩体の一つで

あるカナダ盾状地中に建設された地下研究施設であり、花崗閃緑岩を母岩とする (図1)。TSXプロジェクトは、国際共同プロジェクトとしてサイクル機構、AECLに加えて、フランスから放射性廃棄物管理機関 (ANDRA)、アメリカからサンディア国立研究所 (Sandia National Laboratory) が参加している。

TSXプロジェクトでは、図1、2に示すように試験坑道Room425に粘土プラグとコンクリートプラグの2種類のプラグを実スケールで施工した。粘土プラグは、圧縮機械により高圧縮した乾燥密度 $1,900\text{kg/m}^3$ のベントナイトブロック【配合比: ベントナイト (膨潤性の粘土材料で、低透水性、核種の収着といった機能を有している) 70%, ケイ砂30%】を積上げて作成し、コンクリートプラグは、型枠内に低発熱高流動コンクリートを打設して作製した。両プラグ間には注水システムを組込んだ注水区間11mの圧力チャンバーが設置されており、そこから高圧水を注入し、粘土プラグ、コンクリートプラグそれぞれのプラグのシーリング性能を把握する (図3)。シーリング性能の評価のため、各プラグの両側でプラグや周辺岩盤を通過してきた湧水量の計測と共に、プラグ内や周辺岩盤内に設置した700個を超えるセンサーにより水分量、間隙水圧、膨潤圧、温度、変位、ひずみ

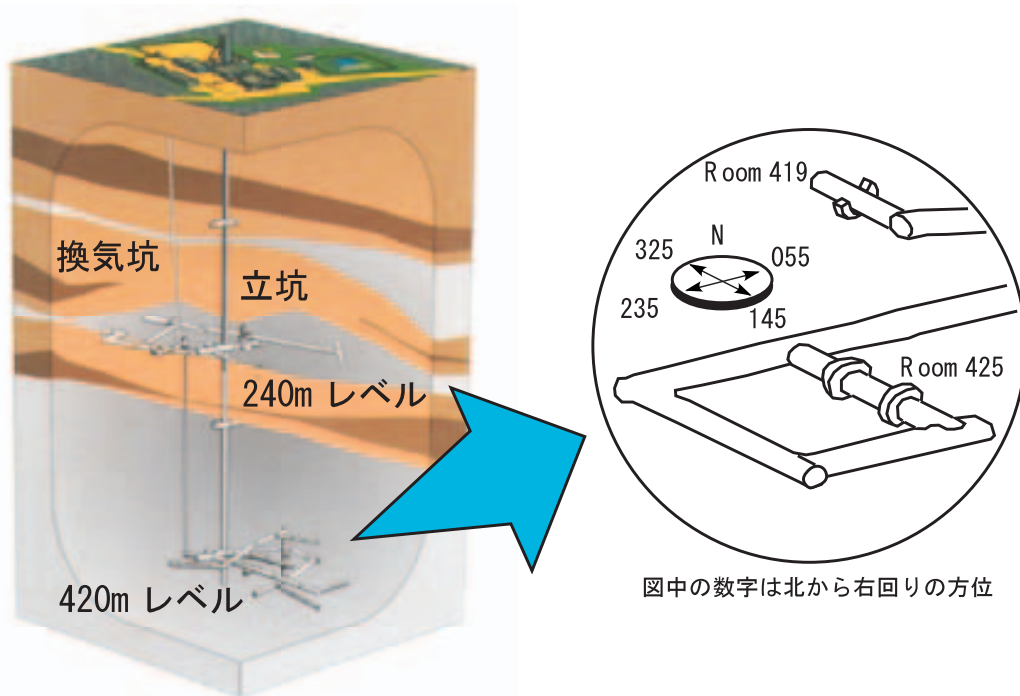
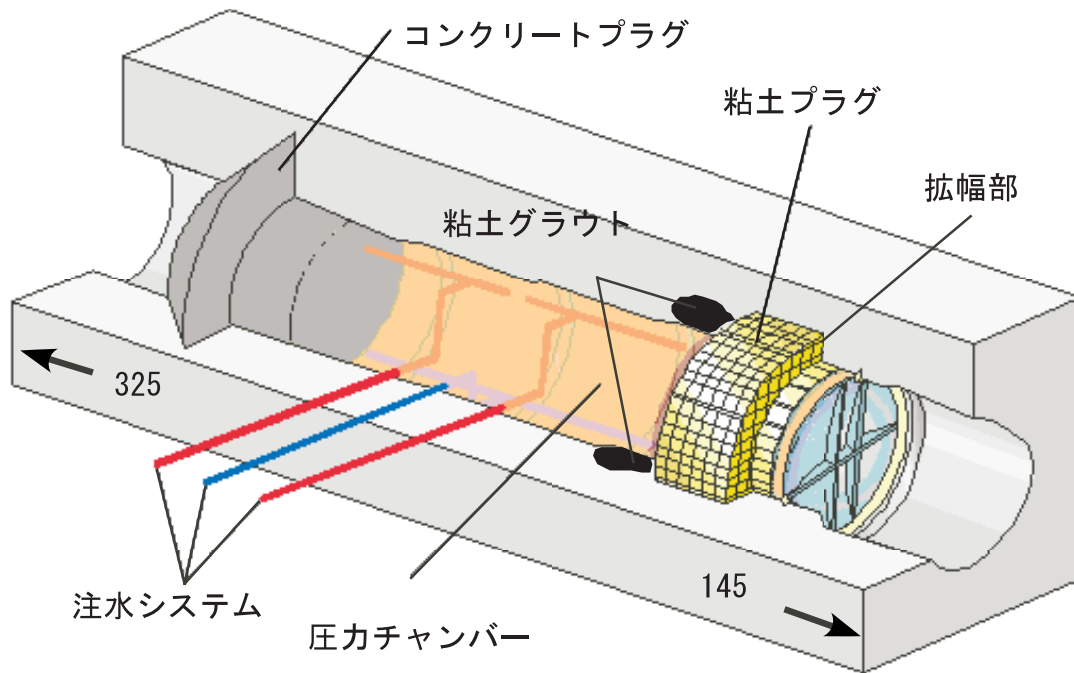


図1 カナダURLのレイアウト



図中矢印に添えた数字は北から右回りの方位を示す

図2 TSXプロジェクトのレイアウト

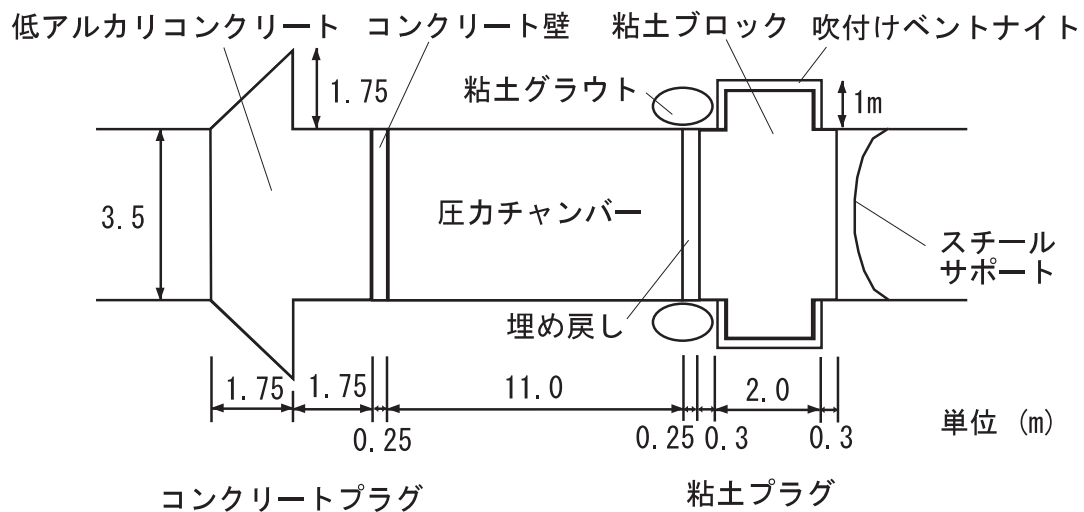


図3 TSXプロジェクトの断面図

を計測している。

TSXプロジェクトを実施するURLの420mレベル（地下420m）における地圧は、最大主応力（60MPa）が試験トンネルにほぼ平行で、最小主応力（11MPa）である鉛直方向の約6倍と計測されている⁷⁾。地下にトンネルを掘削すると、トンネル周辺には掘削影響領域（Excavated Damaged Zone; EDZ）と呼ばれる岩盤のゆるみが発生する。

TSXプロジェクトの実施場所のような偏圧下でトンネルを掘削すると、トンネル周辺岩盤内の応力再配分により主応力方向で岩盤のゆるみが顕著に発生することがわかっている⁸⁾。この掘削影響領域は、健岩部に比べ透水係数が増大し、地下水に溶出した放射性核種の移行経路になる可能性がある。このため、掘削影響領域の発生を極力小さくするため、高さ3.5m、幅4.375mの楕円形の形状

としている。この場合、坑道周辺には数10cmの掘削影響領域が発生することが確認されているが、圧縮の応力集中の起こる坑道の上下端部や引張り破壊の発生する坑道の左右端部ではより大きなものになると考えられる。

2.2 目的

掘削影響領域に対して、プラグのシーリング性能を補完するために、プラグ周辺部の掘削影響領域への粘土グラウト（ベントナイトを溶かした水溶液）注入試験を実施した。この試験の目的は以下の2項目である。

- ① プラグ周辺の掘削影響領域に粘土グラウトを注入し、その止水性能を確認する。
- ② 釜石原位置試験場で実施した、粘土グラウト注入方式のURLでの適用性を確認する。

2.3 試験構成

試験は、予備注入試験と本注入試験で構成した。粘土グラウトの個別のシーリング性能を把握するためには前もって粘土グラウト単独の試験を実施し、注入方法や評価手法を選定する必要がある。予備注入試験では、釜石原位置試験¹⁹⁾と同じ濃度設定による粘土グラウトの注入試験を行った。これは、亀裂の発生頻度、強度等の物性が異なるものの、日本で適用できた粘土グラウトの注入方法が、同じ花崗閃緑岩であるURLの岩盤において適用できるかを確認するものである。釜石原位置試験場の試験結果では、ベントナイト濃度4 wt%の粘土グラウトがもっとも注入効率がいいことが確

認されている。この予備注入試験結果に基づき、本注入試験での注入方法を確認した。

本注入試験は、予備注入試験で確認した注入方法によって本試験坑道においてプラグ周辺部の掘削影響領域を対象として粘土グラウト注入試験を行った。本注入試験結果からプラグ周辺の掘削影響領域に対する粘土グラウトの適用性および止水性能を確認した。

3. 予備注入試験

予備注入試験は、TSXプロジェクト試験坑道であるRoom425の25mほぼ直上に掘削されたRoom419において実施した(図1参照)。Room419は、TSXプロジェクトにおけるさまざまな技術的課題の検証を行うために掘削された坑道である。Room419は試験坑道であるRoom425よりも一回り小さい坑道(坑道断面の長軸で3.5m)であるが、坑道の掘削方向はRoom425と同じである。Room419は図4に示すようにプラグ設置のための拡幅部の掘削(Room425と同じ深さ1.0m、幅2.0m)がラインドリリングとRock-Splittingの併用により行われており、プラグ設置前の状態が再現されている。Room419の方向がRoom425と同じであることから、坑道の上下端部には掘削影響領域が発生していると考えられるため、坑道下端部周辺で予備注入試験を行った。

3.1 予備注入試験レイアウト

最小主応力の方向は、図4に示すように坑道鉛直から8度傾斜している。これより、坑道下端部

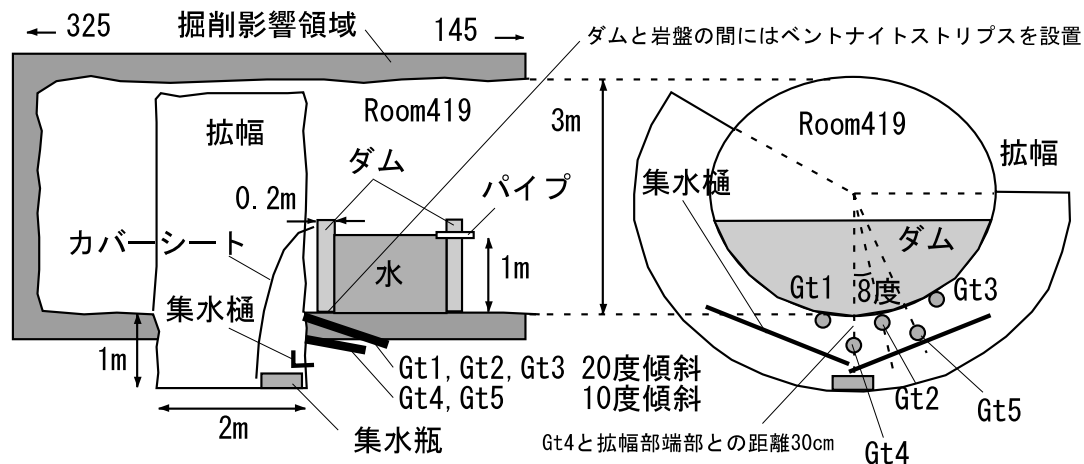


図4 予備注入試験のレイアウト

における掘削影響領域の発生も8度傾斜した最小主応力方向を中心に分布していると考えられる。グラウト注入孔は、坑道拡幅部に露呈した切欠部表面に配置した。グラウト注入孔（試験孔）は5本で、坑道床盤近傍にGt1, Gt2, Gt3を配し、その下側にGt4, Gt5を配した。試験孔Gt1, Gt2, Gt3は20度の下向き傾斜ボーリング孔で、長さ1.0m、試験孔Gt4, Gt5は10度の下向き傾斜ボーリング孔で長さ0.7mである。Gt4, Gt5の孔口と岩盤拡幅部端部との距離は30cmである。試験孔の直径は76mmである。最小主応力方向に中心孔である注入孔Gt2を配置した。傾斜試験孔を適用したのは、掘削影響領域との接触面を長くし、グラウトの注入効果を増大させるためである。グラウトの注入効果を判断するため、拡幅部近傍の坑道床盤に貯水槽を設け、貯水槽から拡幅部への湧水量の変化をその効果の判断材料とした。

貯水槽はコンクリートを打設して作製した。貯水槽壁面は20cmの厚みで貯水槽の奥行きは1.0mとした。貯水槽の水位は1.0mの一定水位とした。拡幅部側のコンクリート壁の底部と岩盤の間には、コンクリートと岩盤の隙間を直接流れてくる湧水を遮断するため、棒状に延ばしたベントナイトストリップス（膨潤性のベントナイトを含有したシール用粘土）を境界部に2列敷設した。これにより、コンクリートと岩盤の隙間からの直接の湧水は、ベントナイトストリップスの膨潤により隙間が充てんされ遮断することができる。

貯水槽から切欠き部表面への湧水を集積して計測するため、L字の集水樋を岩盤に切り込みを入れて設置した。集水樋の下には集水瓶を置き、集水樋を流れた湧水はそれに集めた。透水係数の概算から湧水量は微量と考えられたことから、集められた湧水の蒸発による測定精度への影響を抑制するため、測定対象となる切欠き部表面を覆うようにビニルシートカバーを設置した。

3.2 予備注入試験手順

予備注入試験は、釜石原位置試験で適用した粘土グラウト注入手法が割れ目頻度、強度等の物性は異なるものの同じ花崗閃緑岩において適用できるかどうかを確認するため、以下の手順で行った。

(1) 湧水量試験1（透水試験）

貯水槽に水を供給し、切欠き部表面への湧水量を計測する。

(2) 試験孔の削孔

試験孔5本を削孔する。

(3) 透水試験（パルス試験）

試験孔における透水係数を各孔ずつパッカーを用い計測する。

(4) 湧水量試験2（透水試験）

試験孔削孔後の湧水量の変化を計測する。

(5) グラウト注入試験

釜石原位置試験結果に基づき、ベントナイト濃度0.2wt%から8.0wt%まで（0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0wt%）の粘土グラウトを段階的に注入する。

(6) 湧水量試験3（透水試験）

粘土グラウト注入後の湧水量の変化を計測する。

(7) 注入孔埋め戻し

ベントナイトブロックを試験孔に充てんする。

(8) 湧水量試験4（透水試験）

注入孔閉鎖後の湧水量の変化を計測する。

湧水量試験は、貯水槽に規定の水位で水を注入し、集水瓶に集められる湧水を1日（24時間）ごとに計測した。湧水量試験2, 3, 4は同様の手法を用いた。パルス試験は、15cm長のメカニカルパッカーを孔口にセットし、それ以深を試験区間として100kPaのパルス圧を作用させ、Ramey式¹⁰⁾にフィッティングさせることにより透水係数を算出した。試験孔Gt3では、透水試験区間を2段階に設定した。一つは全孔を試験区間とし、もう一つは試験孔中間にパッカーを移設し、試験孔奥部を試験区間とした。前者からは掘削影響領域から健岩部にかけての平均値、後者からは健岩部により近い領域のみを対象とした透水係数が算出できると考えた。

粘土グラウトの注入は図5に示す低振動型のグラウト注入装置を用い、注入圧一定で注入した。粘土グラウトの注入は5本の試験孔で同時に行い、注入圧は最大500kPaとした。釜石原位置試験で設定した注入圧である1.0MPaよりも小さくした理由は、試験孔が底盤に近い配置となっていることから、高圧で注入することによる床盤表面への直接のリークを避けるためである。粘土グラウトの注入は、低濃度である0.2wt%から開始した。注入量は注入装置のホップの目盛りで読み取り、湧水量は集水瓶にたまった量で測定した。注入システム内（試験孔内、注入パイプ等）の粘土グラウトの切り替えは、パッカーに取り付けられた排

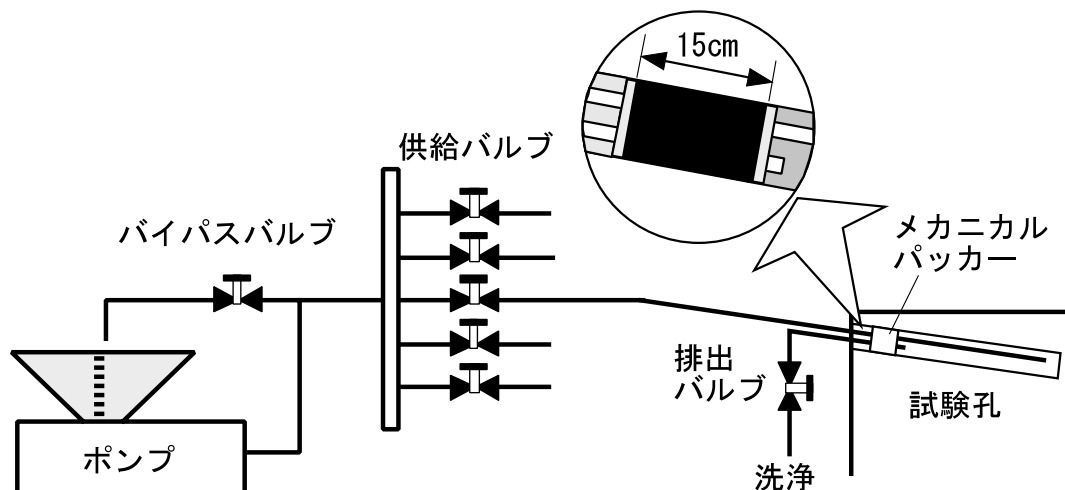


図5 グラウト注入装置

出バルブを開放して、次の濃度の粘土グラウトを100kPaで注入し、排出バルブからの排出溶液の電気伝導度が注入のものとはほぼ同じ値になった時点で切り替えが十分行われたと判断した。グラウト溶液が準備できた時点で、注入を再開した。

3.3 予備注入試験結果

1) 試験工程

予備注入試験は、1997年7月（日時はすべて現地時間）から開始した。各項目の工程は以下の通りである。

(1) 湧水量試験1（透水試験）

－7月29日

(2) 試験孔の削孔

7月30日－7月31日

(3) 湧水量試験2（透水試験）

8月1日－8月5日

(4) 透水試験（パルス試験）

8月6日－8月11日

(5) グラウト注入試験

0.2wt% 8月13日

0.5wt% 8月14日

1.0wt% 8月14日

2.0wt% 8月15日

4.0wt% 8月15日

6.0wt% 8月18日

8.0wt% 8月18日

(6) 湧水量試験3（透水試験）

8月18日－8月22日（8月25日）

(7) 湧水量試験4（透水試験）

8月25日－8月29日（9月1日）

*湧水量はグラウト注入試験中も連続計測した。

2) パルス試験結果

パルス試験の結果を表1に示す。割れ目の少ない均質な岩盤であるため、いずれの透水係数も低い値となっている。坑道壁面近傍となるGt1からGt3にかけては透水係数は 10^{-13} m/sオーダーまでであるが、岩盤の健岩部まで達すると考えられる部分ではGt4、Gt5では 10^{-14} m/sオーダーと特に低いものとなっている。このことは、坑道掘削に伴う掘削影響領域が坑道近傍に限られていることを示している。試験区間を変えたGt3でもその傾向は示されており、岩盤内部のみの場合(0.69m)よりも坑道壁面近傍までも含めた場合(0.78m)の方が、透水係数は1オーダー程度大きくなっている。

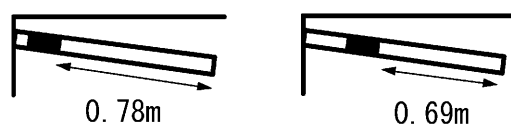
3) 粘土グラウト注入結果

粘土グラウト溶液は、所定の注入濃度に調整し

表1 パルス試験結果

試験孔	試験区間 (m)	透水係数 (m/s)
Gt1	0.85	6.63E-13
Gt2	0.64	2.06E-12
Gt3	0.78 0.69	2.40E-11 1.95E-12
Gt4	0.50	4.56E-14
Gt5	0.57	3.86E-14

注入孔 Gt3



た後、電気伝導度によって濃度の確認を行い、注入ポンプに供給した。圧力は20分ほどかけて徐々に500kPaまで上昇させた。500kPaまで圧力を上昇させた後、最大4時間注入した。各濃度における注入時間、総注入量の一覧を表2に示す。

図6に濃度ごとの注入量と時間の関係を示す。図6から、注入濃度0.2wt %での注入速度と比較すると0.5wt%では注入速度は増加し、2.0wt%まではほぼ同じ傾向となっている。注入濃度がそれ以上となると、濃度の増加にともない、注入速度は小さくなっている。高濃度の粘土グラウトの注入では前段階の濃度の注入速度を下回っており、これは、割れ目内の目詰まりの進展を示すものと考えられる。

図7に注入速度及び粘土グラウト注入時に集水瓶に集められる水の速度（湧水速度）と注入濃度との関係を示す。図から、グラウト溶液の注入速度と湧水速度はほぼ同じであり、見掛け上、注入した粘土グラウトがそのまま流出したように捉えられる。

しかしながら、この水が掘削影響領域を通過してきたものか、岩盤と貯水槽の間を通過してきたものかこのままでは判断できなかった。そこで、貯水槽のダムと岩盤の間に取り付けた変位計（LVDTs :Linear Variable Displacement Transformers）の変位によって境界部の挙動を確認した。図8は、変位計の変位の経時変化を示したものである。変位計はベントナイト濃度0.5wt %の粘土グラウト注入後に設置した。マイナス表示がダムと岩盤間の隙間が大きくなることを示している。図から、粘土グラウトの注入中はダムと岩盤の間隔が増加の傾向であり、集水瓶には貯水槽と岩盤との隙間を通過して直接流れ込んだ貯水槽の水が含まれていることを示唆している。この変位は、グラ

ウト注入後、パッカーを除去した時点で回復した。

4) グラウト注入効率の確認

グラウトの注入効率は、ベントナイト単体が掘削影響領域にどれだけ充てんされたかにより判断されると考えられる。ベントナイトの注入速度は、グラウト溶液の注入速度にベントナイトの濃度を

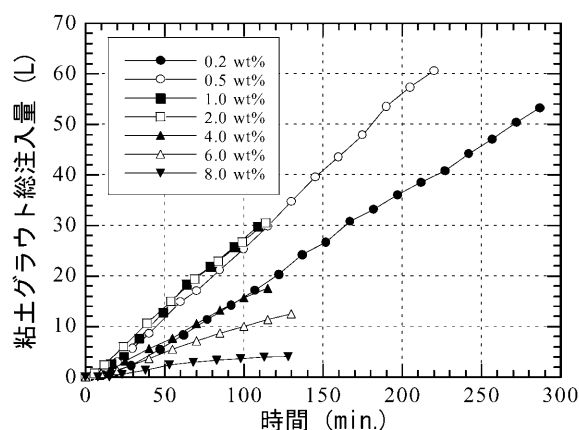


図6 濃度ごとの粘土グラウト注入量と時間の関係

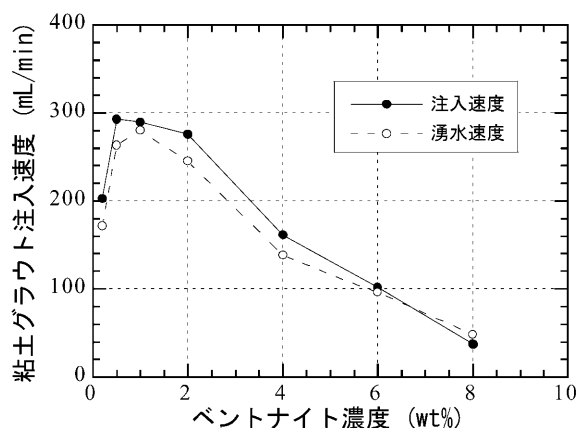


図7 注入速度及び湧水速度と注入濃度との関係

表2 グラウト注入濃度の関係

濃度 (wt%)	粘土グラウトの注入			電気伝導度 (mS/cm)	
	500kPaまでの時間 (min.)	500kPaでの注入時間 (min.)	総注入量 (L)	注 入	湧 出
0.2	47	240	53.2	0.823	0.800
0.5	20	200	60.5	0.836	0.807
1.0	16	93	29.8	0.886	0.848
2.0	12	102	30.4	1.002	0.966
4.0	16	99	17.6	1.206	1.142
6.0	20	110	12.5	1.388	—
8.0	16	112	4.1	1.587	0.977

貯水槽の水 電気伝導度0.235(mS/cm)

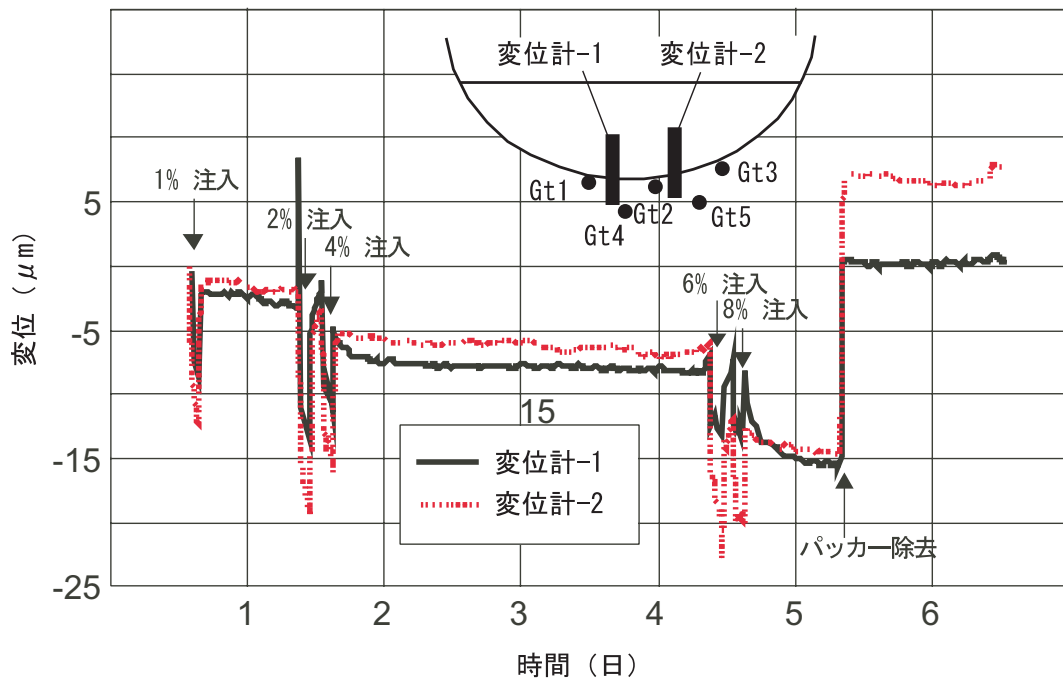


図8 変位計の経時変化

掛け合わせることで求められ、これをグラウト注入の効果の指標に用いることができる。しかし、この方法はすべてのグラウト溶液が岩盤内に注入される場合に有効な手段である。この予備注入試験では注入したグラウト溶液の量に相当するほどの湧水が計測用集水瓶に集められており、グラウト溶液の注入速度からグラウト注入の効果を直接評価することが出来なかった。

そこで、別の評価方法を試みた。注入したグラウト溶液と湧水の電気伝導度を比較すると、湧水の方が電気伝導度が低くなっている。これは、電気伝導度の高いグラウト溶液と電気伝導度の低い貯水槽に供給している地下水が混入して計測用集水瓶に湧水しているためと考えられる（図9参照）。注入した粘土グラウト量、岩盤への浸透量、貯水槽からの浸透量、集水瓶への湧水量の関係は、

$$\begin{aligned} \text{「集水瓶への湧水量」} \\ &= \text{「注入した粘土グラウト量」} \\ &\quad - \text{「岩盤への浸透量」} \\ &\quad + \text{「貯水槽からの浸透量」} \end{aligned}$$

となる。ここで、岩盤への浸透量にベントナイトの濃度を掛け合わせることで粘土グラウトの注入効果を評価することができる。

はじめに、貯水槽からの湧水量を評価する。貯水槽に供給している地下水の電気伝導度は、粘土

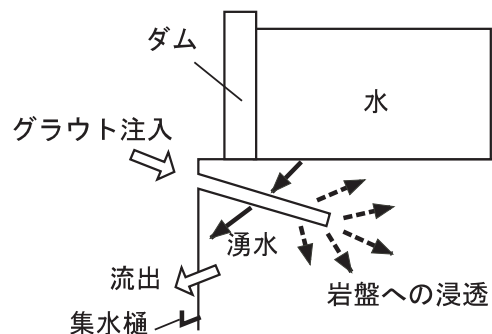


図9 湧水の模式図

グラウトや湧水と比較すると非常に小さいものである（表2参照）。そして、ベントナイトの濃度と電気伝導度の間には図10に示すように線形関係がある。これより、どれくらいの割合で貯留槽からの湧水が混入しているか電気伝導度の低下比率から求められる。

これで、「集水瓶への湧水量」、「注入した粘土グラウト量」、「貯水槽からの浸透量」が求められることから、「岩盤への浸透量」を導き出せる。岩盤への浸透にベントナイト濃度を考慮したベントナイトの注入効率を図11に示す。

粘土グラウトの注入効率は、ベントナイトの濃度の増加にともなって大きくなり、濃度を上げる

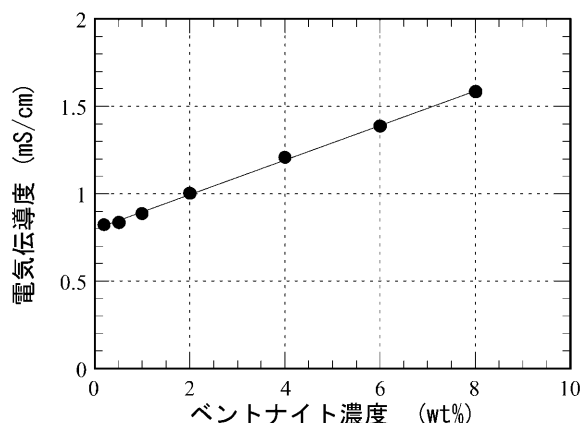


図10 ベントナイト濃度と電気伝導度の関係

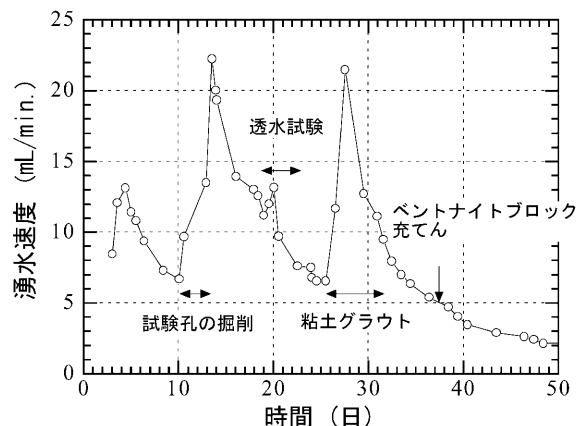


図12 試験期間中の湧水量（速度）変化

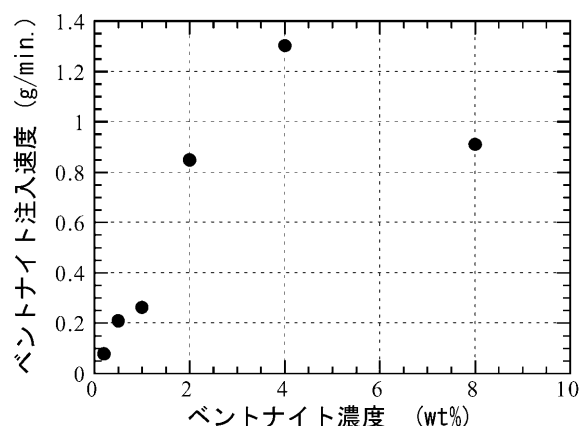


図11 粘土グラウト注入効率

ことで注入効率を上げられることがわかった。一方、濃度が4.0wt %のところでピーク値をとり、それ以上濃度が増加すると、注入効率は低下した。これは、濃度を適切に保つことにより、より効率よく粘土グラウト溶液を注入できることを示している。予備注入試験の設定濃度範囲でもっとも注入効率の良かった濃度は4.0wt %であり、この結果は、釜石原位置試験でのグラウト試験結果⁹⁾と一致する。これは、本試験で用いた注入濃度の範囲では、亀裂性岩盤である花崗岩を対象とした場合、岩種によらず注入効率における最適濃度があることを示していると考えられる。なお、濃度6.0wt %に関しては、電気伝導度の計測に不備があったことから本検討でははずした。

5) グラウト効果の確認

粘土グラウトの注入が坑道周辺の掘削影響領域を対象として可能であることがグラウト注入試験で明らかになったが、これらの透水性の改善に対

する効果について湧水量の変化によって確認を行った。図12は、予備注入試験期間にわたる湧水量の速度の経時変化を示したものである。図には、各作業をあわせて示した。

貯水槽用のダム設置後、湧水速度は上昇しているが、測定開始から4日目から湧水速度は減少に転じている。これは、ダムの打設だけでは岩盤との密着が不十分であり、ダムと岩盤との間に隙間が残存していると考えられることから、ダムへの貯水直後はそこからの湧水が多いためと考えられる。しかしながら、岩盤とダムの間に設置したベントナイトストリップスが時間の経過とともに水を含んで膨張することにより、その隙間を埋めるため、本来の掘削影響領域を通過してくる湧水量(6.7 [mL/min.])に近づくと考えられる。

粘土グラウト注入用の試験孔を掘削すると、掘削に伴う擾乱の影響により湧水速度は上昇に転ずる。このとき、Gt2およびGt3の試験孔の掘削時に手前側のベントナイトストリップスを切ってしまったために予想以上に湧水速度が増加している(20 [mL/min.] 以上)。その後、ベントナイトストリップスの効果の回復とともに掘削による擾乱が収まるに連れて、湧水速度は減少する(6.5 [mL/min.])。

透水試験の実施時には一時的に湧水速度は上昇するが、さらに湧水速度は低下し、試験孔掘削前の状態まで回復している。グラウト注入時には再び岩盤状態が乱されるため、湧水速度は増加する。しかしながら、高濃度のグラウトの注入へと移行するとともに、湧水速度も減少に転じ、グラウト注入終了時には試験孔掘削前の状態まで湧水速度は低下している(5.3 [mL/min.])。さらに、試験

孔にベントナイトブロックを充てんしてグラウト注入用の試験孔そのものを閉塞することによりさらに湧水速度は減少する (1.0 [mL/min.])。

本予備注入試験の結果から、グラウトの注入にベントナイトブロックの充てんまで加味すると、坑道周辺に発生する掘削影響領域の透水性を効果的に低下させることが可能であると考えられる。

4. 本注入試験

本注入試験は、TSXプロジェクトを実施するRoom425の粘土プラグ設置箇所に拡幅された拡幅部において実施した(図2, 3参照)。拡幅部は深さ1.0m, 幅2.0mで、ラインドリリングとRock-Splittingで拡幅した。予備注入試験で確認した粘土グラウトの注入濃度, 注入圧を考慮して注入した。

4.1 本注入試験レイアウト

本試験のレイアウトを図13に示す。坑道周囲に発生する掘削影響領域は、図に示すように、周辺岩盤の応力状態から坑道の天端部, 下端部, 左右端部に発生すると考えられる。最小主応力軸が鉛直方向から8度傾斜していることから、掘削影響領域もそれに応じて傾斜すると考えられる。各掘削影響領域に1本ずつグラウトの注入孔を配置し(Gd1, Gd2, Gd3, Gd4), 下端部であるGd3孔には30cm離れた地点に観測孔1本OBを配置した。各試験孔は、直径が76mmで、注入孔の長さは1.0m, 観測孔の長さは0.7mとした。各試験孔は、

拡幅部先端部から15cmの地点が孔の中心となるように孔口を設定し、半径軸に平行に坑道壁面から岩盤内へ傾斜角10度で削孔した。

4.2 本注入試験手順

本注入試験は、予備注入試験で適用した粘土グラウト注入手法をプラグ設置前の拡幅部に適用した。本注入試験は、以下の手順で行った。

(1) 試験孔の削孔

注入孔4本, 観測孔1本を削孔する。

(2) 透水試験 (パルス試験1)

注入孔における透水係数を各孔ずつパッカーを用い計測する。

(3) グラウト注入試験

予備注入試験結果に基づき、濃度0.2wt%から8.0wt%まで(0.2, 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0wt%)の粘土グラウトを段階的に注入する。

(4) 透水試験 (パルス試験2)

粘土グラウト注入後の湧水量の変化を計測する。

パルス試験は、予備注入試験と同様に15cm長のメカニカルパッカーを孔口にセットし、それ以深を試験区間として100kPaのパルス圧を作用させた。

グラウト溶液の注入は、予備注入試験で使用したグラウト注入装置(図5参照)を用い、注入圧一定の静的注入方法を採用した。グラウトの注入は4本の注入孔で同時に行い、注入圧は最大500kPaとした。注入圧の設定は、予備注入試験結果を考慮して、低濃度の注入では低圧力、濃度が高くなるに連れて注入圧も上げることとした。つ

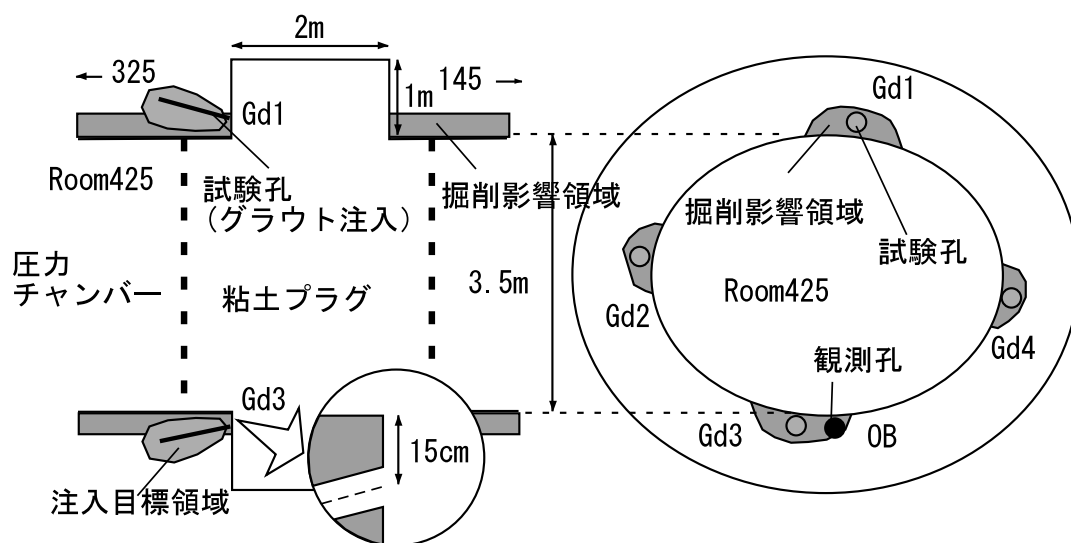


図13 本注入試験のレイアウト

まり、予備注入試験よりは岩盤側へ孔口が設定されてはいるものの（予備注入試験では坑道拡幅部端部直近であったが、本注入試験では試験孔中心までの距離が15cm）、掘削影響領域に集中した試験配置となっていることから、岩盤内部への確実なグラウト液の注入を行うことと、高压で注入することによる床盤表面への直接のリークを避けるためである。設定した注入圧は、濃度が0.2, 0.5wt %の時200kPa, 1.0, 2.0wt %の時300kPa, 4.0, 6.0, 8.0wt %の時500kPaである。

粘土グラウトの注入は、予備注入試験と同様に低濃度である0.2wt %から開始した。注入濃度は一日一濃度あるいは二濃度とした。

4.3 本注入試験結果

1) 試験工程

本注入試験の各項目の工程は以下の通りである。

(1) パルス試験

(2) グラウト注入

0.2wt% 10月20-21日

0.5wt% 10月21-22日

1.0wt% 10月22日

2.0wt% 10月23日

4.0wt% 10月23日

6.0wt% 10月24日

8.0wt% 10月24日

(3) パルス試験

2) 粘土グラウト注入結果

表3に各濃度における試験孔全体での粘土グラウト注入圧、注入時間、注入量の一覧を示す。また、各ベントナイト濃度ごとの注入量と時間の関係を図14に示す。200kPaでの予備注入時間とは、試験期間の効率化のために、200kPaで粘土グラウトを供給した状態で図5の注入システムのパルプを閉鎖し、試験孔内の残圧でグラウトを注入し続けるというものである。このため、時間の経過とともに圧力は減少している。図14ではこの部分は帯状の塗りつぶしで示している。同日に濃度の交換を行った注入濃度のグラフには予備注入時間の記述はない。注入量の計算に関しては、予備注入

表3 本注入試験粘土グラウト注入結果

ベントナイト濃度 (wt%)	注入 (kPa)	200kPaでの予備注入時間 (min.)	設定注入圧での注入時間 (min.)	注入量 (mL)
0.2	200	1,025	240	3,377
0.5	200	1,107	65	2,599
1.0	300	—	120	2,480
2.0	300	1,092	115	1,763
4.0	500	—	120	2,941
6.0	500	1,047	110	7,392
8.0	500	—	130	2,724

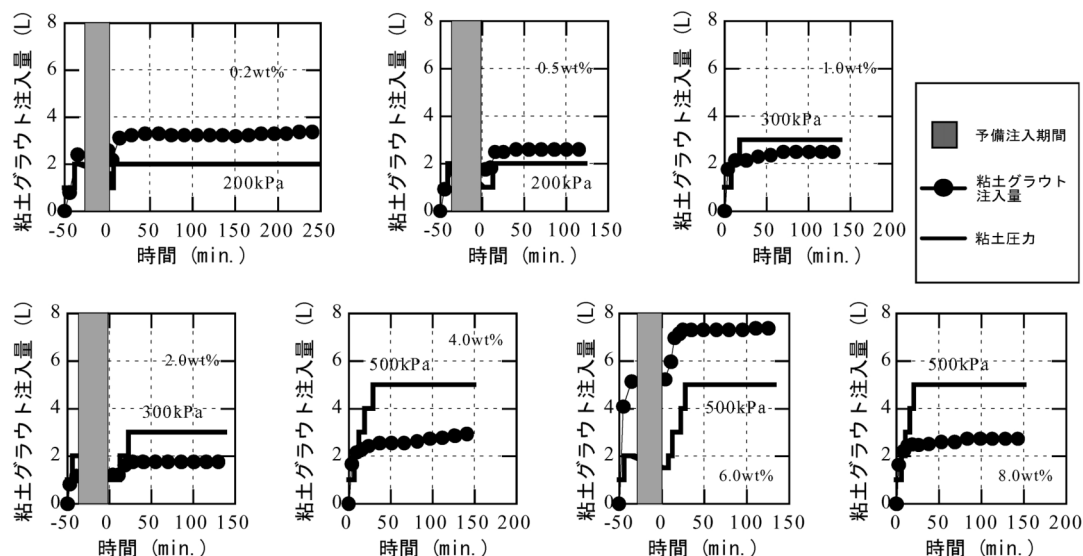


図14 各ベントナイト濃度における注入圧力、注入量の経時変化

時間のある濃度の場合、設定濃度以外での注入ということになるが、ここでは総注入量として合計量を表中に示した。

図14から、設定した注入圧力においてそれぞれの濃度における粘土グラウトの注入が可能であったことがわかる。予備注入試験の結果と同様に、圧力設定のためにグラウト注入圧力を増加させると、注入量は圧力とともに増加する。圧力が設定値に達した後は、いずれの濃度の場合でもほぼ同じ注入量で推移している。注入開始直後に注入速度が最大値を示す理由として、注入孔のGd1、Gd2が上向きであることが考えられる。つまり、配合の切り替えごとに圧力を低下させるため、一度岩盤内に押し込まれた粘土グラウトの一部が逆流して流出したものと考えられる。本注入試験では岩盤側へのリークは観察されず、注入したベントナイト全量が岩盤内に注入されたと考えられる。

図15に注入濃度と注入量及びベントナイト注入量の関係を示す。ベントナイト注入量は、粘土グラウトの注入量 (mL) にベントナイト濃度 (wt% の1/100) を掛け合わせたもので、岩盤内に注入したベントナイトそのものの量 (g) を表すものである。図15から0.2wt%から2.0wt%まで注入量は減少しており、亀裂の目詰まりが進行していると考えられる。この時、同じ注入圧である0.2wt%, 0.5wt% (注入圧200kPa) 及び1.0wt%, 2.0wt% (注入圧300kPa) では注入流量の低下がほぼ同じように低下しているが、圧力の変化する0.5wt%—1.0wt%間では注入量の低下は余り見られず、圧力の上昇による注入量の増大効果が現れていると考えられる。

しかしながら、注入圧力が500kPaに上昇する

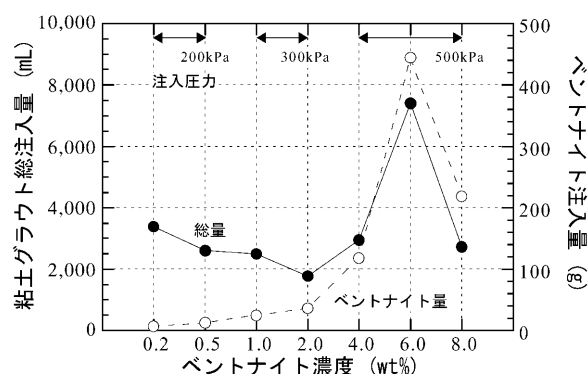


図15 注入濃度と注入量及びベントナイト注入量の関係

と、4.0wt%のグラウトの注入量は増加に転じ、ベントナイト注入量も上昇する。これは、圧力が増加したことによりこれまでに注入した低濃度のグラウトを押し流したためと考えられる。この傾向は濃度6.0wt%でもっとも顕著であり、これまでの濃度の上昇に伴うグラウト注入速度の低下がここでは見られていない。予備注入試験で明らかになったように粘土グラウトの最適な注入圧力があるとするならば、同じ岩種である本注入試験の岩盤条件では、同じく4.0wt%にピークが現れると予想される。しかしながら、図14の4.0wt%の図からもわかるように、この濃度では注入速度が上昇傾向にあったが、注入を中断してしまった。このため、十分に4.0wt%濃度のグラウトが入りきっていなかったものと考えられる。図14の濃度6.0wt%ではグラウトの注入速度は一定であり、同じく8.0wt%においてグラウトの注入流量が大きく減少していることから濃度の増加による目詰まり効果が進行したのと考えられる。これらの結果、注入が完全に行われなかったことを考慮しても、4.0wt%から6.0wt%にグラウト注入の最適濃度があると考えられる。

本注入試験では、グラウト注入時に岩盤表面への湧水は見られなかったが、注入孔周辺の半径10-20cmの領域で岩盤の表面が濡れているのが観察できた。この濡れはGd1孔において顕著であり、トンネル天盤に沿っても観察された。また、グラウト注入中、Gd3孔の孔口付近で小さな水泡が観察された。この水泡は、4.0wt%, 6.0wt%のグラウトを500kPaで注入しているときに観察されたが、6.0wt%の注入中に無くなっている。このことは、6.0wt%において目詰まりが進行したことを示すものと考えられる。

一方、Gd3孔から30cm離れたところに掘削した観測孔OBへのグラウトの浸透は確認されなかった。これより、坑道下端部ではグラウトの浸透範囲は30cm以内であると考えられる。

3) 粘土グラウトの注入効果確認

粘土グラウトによる透水性の改良効果確認のため、試験孔Gd1-Gd4を用いてグラウトの前後で透水試験を実施した。試験はパルス試験で、パッカーにはグラウト注入に用いたものと同じメカニカルパッカーのものを使用した。試験結果を表4に示す。パルス圧は最大で100kPaで実施した。透水試験中の岩盤表面へのグラウトの流出は観察されな

表4 透水試験結果

試験孔	透 水 係 数 (m/s)	
	グラウト前	グラウト後
Gd1	7.36E-13	3.34E-13
Gd2	1.75E-13	3.50E-13
Gd3	1.54E-11	1.31E-11
Gd4	3.22E-11	7.53E-12

かった。10⁻¹¹m/sオーダーであったGd4孔では透水計数が1オーダー小さくなった。しかしながら、ほぼ同じ透水係数であったGd3孔は顕著な改良効果は見られなかった。一方、10⁻¹³m/sオーダーと非常に小さい透水係数であったGd1、Gd2孔の結果は、Gd1孔では透水係数がわずかではあるが小さくなったが、Gd2孔では反対に透水係数は大きくなった。しかし、いずれも10⁻¹³m/sオーダーと非常に小さい値のままであった。

透水係数の改良の観点からは、試験孔で測定されたもとの透水係数が小さく、透水係数の改良は確認されたものの、顕著な効果は得られなかった。これは、母岩の透水性が極端に低い岩盤でありEDZの幅も小さかったことから試験孔の配置が健岩部に近かったためと考えられる。しかしながら、口元に設置するパッカーの固定性等を考慮すると、これ以上のEDZ側への配置は難しいと判断した結果である。

ここで、注入濃度0.2、0.5、2.0、6.0wt%の予備注入保持におけるグラウト材注入時の200kPaからの圧力低下量を透水係数を反映する指標として整理した。つまり、予備注入保持の供給弁閉鎖状態はいずれも17時間以上であることから、この時の圧力低下量は、相対的な各注入孔の透水性に依存すると考えられる。各予備注入保持時の注入孔内の圧力低下を図16に示す。Gd1、Gd2孔はGd3、Gd4孔と比べて透水係数が小さく、これに対応するように予備注入保持における圧力の低下が小さい。また、図からGd1、Gd2、Gd4孔では2.0wt%までは予備注入保持における圧力低下度が徐々に大きくなっているが、6.0wt%の時にはもとの圧力低下量程度に圧力の維持能力が回復している。一方、Gd3孔では全体において圧力の低下が著しい。その中でも0.5wt%で圧力の低下量が小さいが、他の濃度では圧力の低下量が大きく測定限界値まで下がっており、他の孔では保持圧力が回復している6.0wt%においても測定限界値以下のま

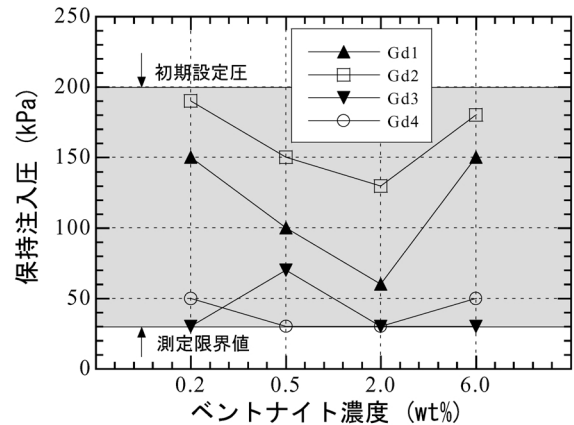


図16 各予備注入保持時の注入孔内の圧力低下

までである。透水係数の大小と圧力低下量の大小を比較すると、グラウト注入前は、透水係数Gd4≥Gd3>Gd1>Gd2、圧力低下量Gd3>Gd4>Gd1>Gd2、グラウト注入後は、透水係数Gd3>Gd4>Gd2≥Gd1、圧力低下量Gd3>Gd4>Gd1>Gd2、であり、ほぼ相関がある結果となっている。とくに、Gd3孔では圧力低下量が大きく、グラウト注入前と同様に保持圧力が測定限界値まで下がっており、透水係数がほとんど変化していない結果とも一致する。

5. まとめ

カナダのAECLとの共同研究として実施しているトンネルシーリング性能試験においてプラグ周辺部に発生すると考えられる掘削影響領域を対象にした粘土グラウトの注入試験を実施した。実施した試験は本注入試験を行う坑道と同スケールの試験区域において実施した予備注入試験、及び本注入試験である。予備注入試験では、釜石原位置試験で確認された粘土グラウトの注入手法がカナダの岩盤において適用できることを確認し、本注入試験において粘土グラウトの注入効果及びそれによる透水係数の改善状況を把握した。

試験の結果、グラウトの注入性に関しては、予備注入試験及び本注入試験の結果を総合して、本試験の圧力及びベントナイト濃度の範囲では、圧力500kPa、ベントナイト濃度が4.0から6.0wt%が多くベントナイトを岩盤内に注入できることがわかった。また、透水係数の改良としては、岩盤が健全であったことから効果は小さかったもののグラウトの注入により透水係数が低下することを

確認できた。

今後、抽出された課題を改良して、国内の地下研究施設等における適用性を確認し、高レベル放射性廃棄物処分場における粘土グラウト技術の確立に資していく予定である。

謝 辞

本試験を実施するに当たって、カナダ AECL の Neil Chandler 氏には試験実施のための人員確保、試験工程の調整等ご協力いただいた。同じく Paul Thompson 氏にはカナダの岩盤におけるグラウト注入の実績等についてご指導いただいた。また、Edo Kozak 氏にはパルス試験を実施していただき透水係数のデータを取得していただいた。鹿島建設株式会社の升元一彦氏には試験の実施をサポートしていただき、戸井田克氏には試験結果の解釈について助言をいただいた。藤田朝雄氏（現在、原子力発電環境整備機構に外向中）には、試験の実施に当たり助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 核燃料サイクル開発機構：“わが国における高レベル放射性廃棄物地層処分の技術的信頼性 分冊 2”；JNC TN1400 99-022(1999)
- 2) 藤田朝雄, 杉田裕：“JNC/AECL 共同研究 トンネ

ルシーリング性能試験の現況について”；サイクル機構技報, No.1, p.79-84(1998)

- 3) N.Chandler, D.Dixon et al.：“An in situ Demonstration of Technologies for Vault Sealing”；Proc. 19th Annual Conference of Canadian Nuclear Society (1998)
- 4) K.Masumoto, Y.Sugita, et al.：“Trial of Bentonite Grouting into the EDZ at AECL's Underground Research Laboratory”；Proceedings of 29th Symposium on Rock Mechanics, pp.36-42(1999)
- 5) Y.Sugita, T.Fujita, et al.：“Clay-based grouting into the EDZ for the vault sealing”；MRS 1999 fall meeting, pp.331-336(1999)
- 6) 升元一彦, 藤田朝雄, 他：“埋め戻し技術におけるプラグ周辺への粘土グラウトの適用試験”；平成11年度日本応用地質学会研究発表会, pp.231-234(1999)
- 7) N.Chandler, R.Read et al.：“In situ Stress Measurement for Nuclear Fuel Waste Repository Design”；in Aubertin, M., Hassani, F. and Mitri, H.(eds.), Rock Mechanics Tools and Techniques, pp.929-936, Balkema(1996)
- 8) R.Read：“Characterization Excavation Damage in Highly-Stressed Granite at AECL's Underground Research Laboratory”；Proc. EDZ Workshop, Int. Conf. Deep Geological Disposal of Radioactive Waste, Canadian Nuclear Society, pp.35-46(1996)
- 9) 杉田裕, 藤田朝雄：“原位置における粘土グラウト試験”；第27回岩盤力学に関するシンポジウム, pp.276-280(1996)
- 10) H.Ramey, R.Agarwal, et al.：“Analysis of 'Slug Test' or DTS Flow Period Data”；Jour. Can. Petroleum Technology, vol. 14, pp. 37-45(1975)