

エタノール・ベントナイトスラリーの 岩盤内グラウト材料としての適用性検討

Applicability of ethanol bentonite slurry as a grout in rock mass

白石知成¹・岩佐健吾²・石井卓³・斎藤亮³

Tomonari Shiraishi, Kengo Iwasa, Takashi Ishii and Akira Saito

¹正会員 清水建設(株) 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4番17号)

E-mail: tomonari.shiraishi@shimz.co.jp

²正会員 清水建設(株) 土木事業本部技術第二部 (〒105-8007 東京都港区芝浦一丁目2番3号シーパノス館)

³正会員 清水建設(株) 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島三丁目4番17号)

Rock mass for disposing of radioactive waste are required to be durable for a long time. Grouting with clay-type materials is therefore desirable for improving the impermeability of the rock mass. Mixing ethanol solution with bentonite produces slurry that is more dense and less cohesive than the one made by mixing water with bentonite.

This paper presents the results of a laboratory test of injection into model cracks and of an in-situ test. The tests were conducted to assess the applicability of ethanol bentonite slurry as an impermeable grout to control the occurrence of seepage-causing cracking detected during tunnel excavation.

It was suggested that ethanol bentonite slurry is effective as an impermeable grout material because not only of lower cohesiveness but also of higher density of slurry provided by using ethanol instead of water.

Key Words : Ethanol, Bentonite, Slurry, Grouting

1. はじめに

放射性廃棄物処分においては、岩盤遮水性改善のためのグラウトとしてセメント系材料の適用が考えられているが、人工バリアへの化学的影響等が懸念されるため、天然材料であり長期的安定性も期待できる粘土系グラウト材料の適用が望まれている。

浅田ら¹⁾²⁾はベントナイトスラリーの作成にあたって、エタノール水溶液を用いることによりベントナイト乾燥密度 ($0.4 \sim 0.5 \text{ Mg/m}^3$) の高いスラリーの作成が可能であること、模擬地盤内へのスラリー注入が可能であることを示した。また、中島ら³⁾は花崗岩の亀裂を対象としてエタノール・ベントナイトスラリーを地表から深さ8.5mの注入孔を使って岩盤内注入試験を行い、従来の注入装置による施工が可能であること、セメントミルクと同等の遮水性改善効果があることを確認した。

一方、塩水を用いても高密度なベントナイトスラリーの作成が可能であり、泉ら⁴⁾は既存の坑道内湧水部に対する塩水ベントナイトスラリーの注入試験

を実施しており、湧水に対する岩盤の透水性改善効果があることを示した。

西垣ら⁵⁾は室内試験を用いた研究により、坑道掘削影響に対する修復技術としてのベントナイトグラウトの適用性について、膨潤後は 10^{-11} (m/s) 程度の低透水性が期待できること、地下水流動の動水勾配が2以下では材料が流亡しないことを示した。

ベントナイトに代表される粘土材料については、セメント系グラウト材料と異なり自硬性がないためせん断抵抗力に乏しいと考えられることから、坑道掘削時に発見される湧水亀裂に対するポストグラウト材料としての適用性については十分な検討が行われていないと思われる。

筆者らはエタノール・ベントナイトスラリーの岩盤内グラウト材料としての適用性を評価するため、以下の実験的検討を行った。

(a) トンネル直交亀裂モデルによる室内実験

坑道掘削後の湧水亀裂に対するポストグラウトをイメージした模擬亀裂に対するスラリーの室内注入実験を実施し、施工実験条件の検討を行った。

(b) 湧水亀裂を対象とした原位置注入実験

坑道内から湧水している亀裂を対象としてスラリーの注入実験を行い、ポストグラウト材料としての適用性、課題について検討を行った。

2. トンネル直交亀裂モデルによる室内実験

(1) 目的

室内実験により、岩盤内亀裂に対するエタノール・ベントナイトスラリーの注入特性の把握を試みた。本実験の目的を以下に示す。

- ①湧水亀裂内へエタノール・ベントナイトスラリーを注入した場合の注入現象の可視化と亀裂内でのスラリーの目詰まり現象の確認
- ②地下水とともにスラリーが流出した際のリーク処理方法の検討（トンネル壁面部でのフィルター材の効果確認）
- ③効果的な注入方法（注入孔の配置、注入場所）に関する予備的検討

(2) 実験装置

図-1に作成した実験装置を示す。トンネルおよびそれに直交する岩盤亀裂を模擬した2次元モデルである。塩化ビニル板を2枚用いて亀裂を模擬するとともに、中央部にトンネルに相当する空間を模擬した。スラリーの注入孔は模擬トンネルの周辺に十字に配置するものとした。模擬亀裂の厚さを保つためにスペーサ（ステンレス製：0.1mm～0.2mm）を設置した。固定用ボルト部はOリングにより止水処理を行った。

(3) 実験条件

図-2に実験装置の全体概要を示す。実験装置を水槽に水没させるとともに、模擬トンネル部から真空

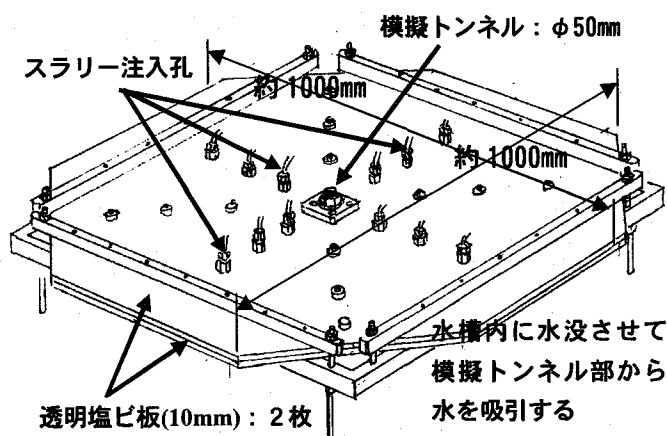


図-1 トンネル直交亀裂モデル注入実験装置

ポンプにより吸引し水の流動を生じさせ、模擬トンネルへの湧水を再現した。

ベントナイトはクニミネ工業社製クニゲルV1（国内産Naベントナイト、50%粒径 $10\mu\text{m}$ 、最大粒径約 $100\mu\text{m}$ 程度）、エタノールは、変成剤として硫酸アンモニウム0.8wt%、亜硫酸ナトリウム0.2wt%を混合した58wt%水溶液（ベントコールF：日本アルコール販売）を用いた。注入に用いるエタノール・ベントナイトスラリーに関しては、液固比（エタノールとベントナイトの重量比率）の異なる材料を用いるものとした。

(4) 実験装置の水利特性の確認

トンネル直交亀裂モデルの水利特性を図-3に示す。亀裂モデルの開口幅はスペーサにより一定となるよう工夫したが、模擬トンネルからの真空ポンプによる吸引により、模擬亀裂の開口幅が変化するため線型的な圧力-流量特性が得られなかった。

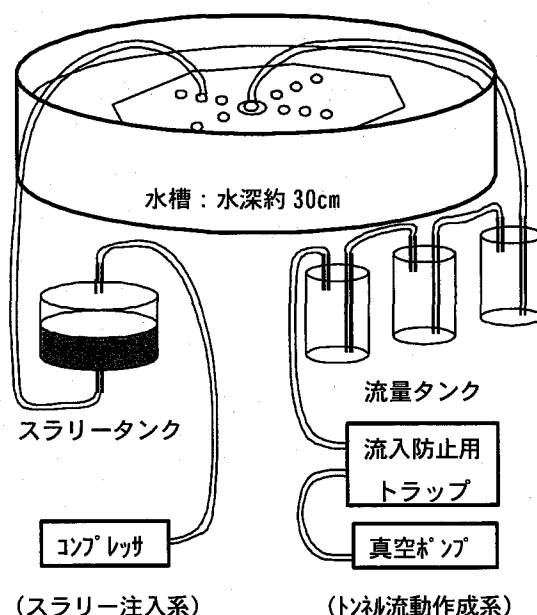


図-2 実験装置の全体図

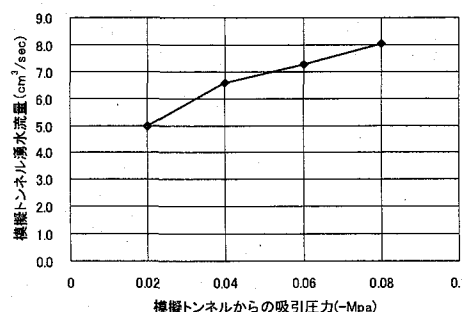


図-3 吸引圧力（不圧）と流量の関係

(5) スラリー注入実験

下記に示す項目に対する注入現象を確認するためにスラリー注入実験を実施した。

- ①ベントナイト乾燥密度の違いによる浸透特性の比較
- ②注入後のスラリー状況観察
- ③合理的な注入方法に関する予備的知見の取得
- ④トンネル部でのフィルタ材の影響検討

(6) 実験結果

a) ベントナイト乾燥密度の比較（5 ケース）

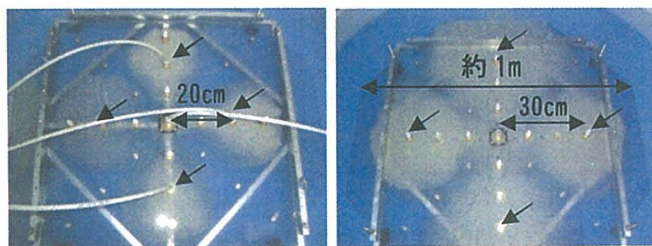
エタノール水溶液とベントナイトの液固比＝10:1, 8:1, 4:1, 2:1, 1.5:1のスラリーはいずれも容易に注入可能であった。ただし図-4に示すように模擬亀裂内のスラリーの色（ベントナイト量）の比較から、スラリーの乾燥密度が高く、グラウトとしての効果が期待できる液固比は2:1～1.5:1（ベントナイト乾燥密度：約0.4～0.5Mg/m³）と思われた。

b) 注入後のスラリー状況

注入後の時間経過とともに、グラウト材の分離現象と考えられる水みちが発生した。この現象は、スラリー中の水とエタノールの置換が、平板面間の模擬亀裂中でしか発生しないためであると考えられる。あるいは、塩ビ平板面の凹凸によるサクションの違いによる影響である可能性が考えられる。（図-5）

c) 合理的な注入方法に関する知見

図-4より、スラリーの注入点に関しては、トンネル遠方部から注入した方がトンネル周辺に行き渡りやすい広がり方を示したことから、遠方から近傍に



(a) 液固比＝4:1

(b) 液固比＝2:1

図-4 注入実験状況（矢印：注入点の位置）

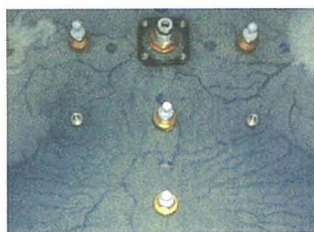


図-5 グラウト材内部に発生する水みちの進展



図-6 模擬トンネル内フィルタ材の目詰まり状況

向かって注入する方法が効果的にグラウトできることを示唆していると思われる。

d) トンネル部でのフィルタ材の影響検討

市販の透水性材料（コーケンシート：ボランスVN-130：日本コーケン（株）製を使用）を模擬トンネル内に充てんした場合には、図-6に示すようにベントナイト粒子を目詰まりさせることができたことから、ベントナイトの粒径を考慮したフィルタ材による材料の流出制御は可能と考えられる。

3. トンネル直交亀裂モデルによる室内実験（拡散場を考慮した場合）

(1) 目的

Ishiiら⁶⁾は、エタノール・ベントナイトグラウトのメカニズムを以下のように示している。

- ①水とベントナイトによるスラリーは0.1Mg/m³未満の乾燥密度でないと注入できないが、エタノール水とベントナイトによるスラリーは、より高密度（0.2～0.5Mg/m³）で注入できる。
- ②注入後にエタノールは岩盤中の間隙水に拡散して（あるいは微生物がエタノールを消費することによって）希薄になるので、グラウト材の粘性が上昇して岩盤亀裂内で疑似固結する。
- ③ベントナイト乾燥密度が0.4Mg/m³のグラウト材については、液相中のエタノール濃度が、58%から40%に低下することによってその粘度は約3E-2 (Pa/s) から約2E+0 (Pa/s) に上昇する。

このように、エタノールと水の置換による粘性の上昇がグラウト材料としての性能を発揮するメカニズムの主要な要因であることから、本実験でも岩盤へのエタノールの拡散影響を考慮する必要があると考え、実験装置の改良を行い注入実験を実施した。

(2) 改良型実験装置

改良型実験装置では、岩盤へのエタノールの拡散現象を考慮するために図-7に示すように八角形の塩

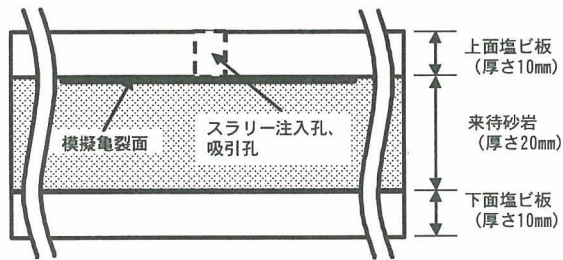


図-7 改良型実験装置断面図

ビ板の間に厚さ2cmの砂岩（来待砂岩）製の板4枚を組み合わせ接着することにより塩ビ板内に設置した。これにより、模擬亀裂は上面塩ビ板と下面岩石との隙間として設定することができるようになった。

亀裂開口幅については、0.2～0.4mm程度を想定した。岩石板表面は平滑ではないため厳密な平行平板モデルではないが、注入したスラリー中のエタノールが岩盤基質部へ拡散することによるスラリーの粘性上昇、止水性能向上を確認することを目的とした亀裂モデルとして製作した。

(3) 注入実験および結果

a) 模擬亀裂内流水状態でのスラリー注入実験

模擬トンネルでの真空ポンプによる吸引圧力を0.02～0.06MPaに維持した状態で、模擬亀裂内に流動場を形成してグラウト実験を行った。単一孔からのスラリー注入では局所的な水みちの発生により、スラリーが模擬トンネルから流出（流亡）してしまう現象が確認された。（図-8(a)）

複数孔から同時にスラリーの注入を行った場合には、局所的な水みちからの流出（流亡）が発生するものの、水みち以外の領域にはスラリーが模擬亀裂内に滞留し、流出しなかった。（図-8(b)）

このように亀裂内でスラリーの滞留が維持され、グラウト材中のエタノールが岩石中の間隙水へ拡散し、エタノール濃度が低下するとグラウト材の粘性が上昇してせん断抵抗が増すため、グラウト材自体はさらに流出（流亡）しにくくなる。

b) スラリー粘性上昇確認実験

スラリー中からのエタノールの拡散消失（水との置換）による粘性上昇、せん断抵抗性の上昇を確認するために、あらかじめ模擬亀裂内にスラリー（液固比=2:1、ベントナイト乾燥密度：約0.4Mg/m³）を注入し、水没させたまま1週間放置した後に模擬トンネルから真空ポンプによる吸引（吸引圧力：0.02～0.06MPa）を行う実験を実施した。（図-9）

本実験より以下のことがわかった。

①実験装置の改良前とは異なり、放置期間中は亀裂充てん部にスラリーの固相液相分離による水

みちの発生はなかった。岩石へのエタノールの拡散消失、膨潤によるものと考えられる。

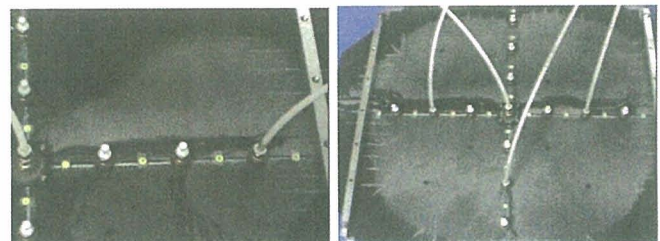
②吸引圧力が0.06MPa程度で水みちが発生し、スラリーの流出現象が確認された。流水中での注入実験との比較から、スラリーの粘性上昇によるせん断抵抗の増加を確認できたと考えられる。

実験後、模擬亀裂からスラリーを回収しエタノール濃度を計測したところ、初期濃度58wt%から約10wt%まで低下していた。また液固比は初期の2:1から約3:1程度となった。これより、エタノールが拡散により水と置換され、ベントナイトが吸水、膨潤したため乾燥密度が低下したのと考えられる。

(4) 実験結果の考察

本実験結果より、岩盤基質部へのエタノールの拡散によりエタノール濃度が低下すること、エタノール濃度低下によりスラリーの粘性が上昇し、せん断抵抗が増加すること、膨潤によりベントナイト乾燥密度は低下することがわかった。ベントナイトの膨潤は平面的に顕著でないため、面外方向に膨潤し、亀裂幅が大きくなっている可能性がある。

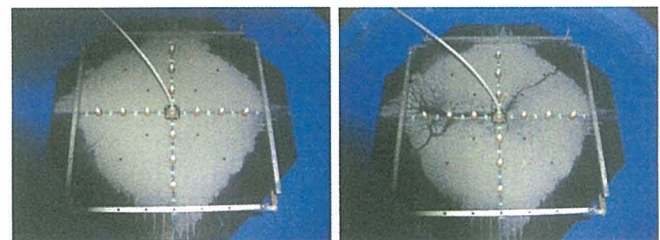
実施工においては本実験で使用したベントナイト乾燥密度のスラリーでは、流水、水圧に対するせん断抵抗性が不十分であると考えられる。ベントナイトの膨潤により乾燥密度が低下する場合も想定されることから、グラウト材としての低透水性、せん断強度を期待するにはベントナイト乾燥密度上昇を促進する注入方法が必要であることを示唆するものと考えられる。



(a) 単一孔注入

(b) 複数孔注入

図-8 流水中でのスラリーの流亡現象（液固比=2:1）



(a) 吸引前（1週間後）

(b) 吸引中水みち発生状況

図-9 粘性上昇確認実験状況（液固比=2:1）

4. 湧水亀裂を対象とした原位置注入実験

(1) 目的

実際の坑道内で発見された湧水亀裂に対してエタノール・ベントナイトスラリーの注入施工を行い、以下の観点での知見を得ることを目的とした。

- ①坑内での施工性の確認
- ②坑内環境影響の確認
- ③止水効果の確認と適用性評価

(2) 原位置特性

原位置実験については、奥多摩工業（株）の三ツ又鉱山における石灰岩中の湧水亀裂を対象とした。

地表面下40mの水平坑道（坑道内の最深レベル）内において湧水量2～4 (l/min) の亀裂湧水箇所を確認し、注入実験ヤードを設定した。

図-10に実験ヤードの概要図を示す。坑壁にて確認できる湧水量が約2 (l/min) の亀裂に対するスラリーの注入を計画した。図-10中のA点が湧水ポイントである。なお、坑内でのエタノール使用による作業環境の悪化を防ぐために換気設備を設置した。

図-11に注入孔として削孔した4本のボーリング孔配置と想定された亀裂位置を示す。地質調査の結果として単一亀裂を想定していたが、石灰岩特有の

亀裂充てん物（方解石、粘土）の影響のため、No. 1孔～No. 3孔では想定亀裂の連続性が確認されなかった。図-12にNo. 2孔のコア写真例を示す。

このため、各注入孔におけるスラリー注入の目的を以下のように設定した。

a) No. 4孔：湧水亀裂に対する止水目的

透水試験時に湧水箇所との連続性が確認された湧水亀裂近傍のNo. 4孔については、スラリー注入によるポストグラウト材料としての適用性の把握を目的とした。（ルジオン値：64～110）

b) No. 3孔：掘削影響領域への注入目的

透水試験時に表面からリークが見られたNo. 3孔については、坑壁近傍の掘削影響領域への注入適用性の把握を目的とした。（ルジオン値：約5）

表-1 ボーリング数量

孔名	孔口レベル (m)	延長 (m)	角度 (°)	水平方向長 (m)
No.1	0.33	8.00	- 15	7.73
No.2	1.53	6.00	+ 15	5.80
No.3	1.58	2.00	+ 15	1.93
No.4	2.04	2.00	+ 25	1.81

※掘削孔径：φ66(コア径：φ50)

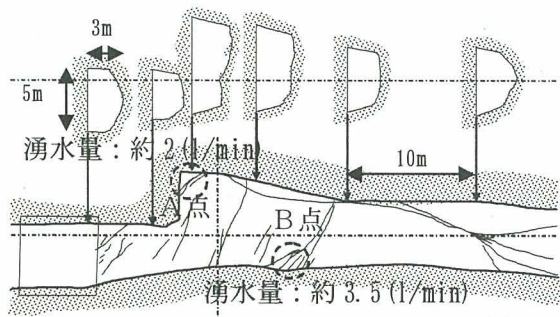


図-10 実験ヤードの概要図（平面，断面，亀裂分布）

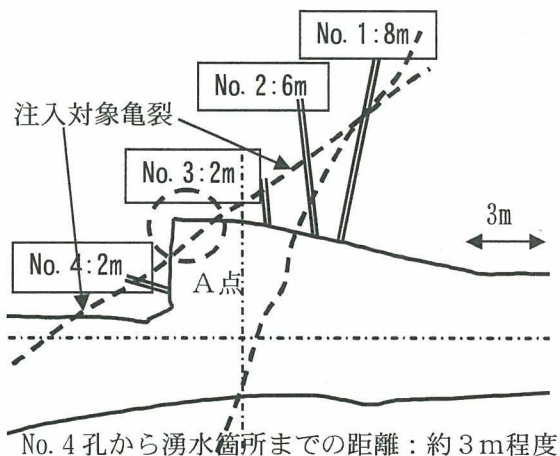


図-11 注入孔配置平面図

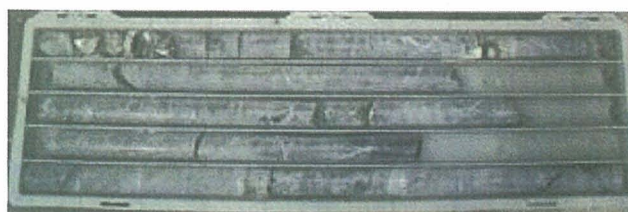


図-12 コア写真の例（No. 2孔の一部）

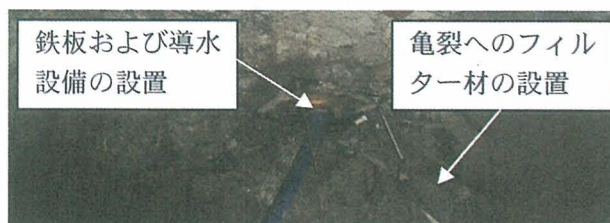


図-13 湧水点A、Bでの表面処理状況

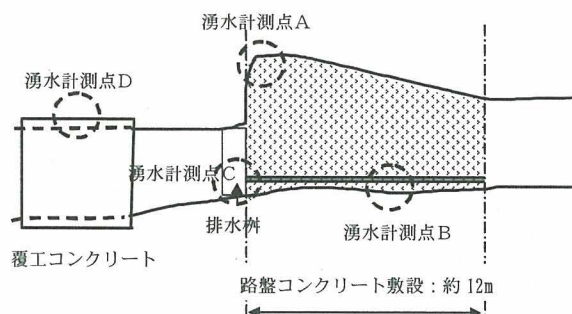


図-14 湧水量計測点平面図

c) No. 2, 1孔：注入孔内の閉塞目的

非常に透水性が小さいことが判明した（1ルジオン未満）No. 1孔，No. 2孔については，ベントナイトスラリーによるボーリング孔閉塞材料としての適用性把握を目的とした。

なお，湧水箇所については，注入スラリー材料の流出を考慮し，表面処理（導水設備，透水シートの設置）を行うとともに，全体湧水量を計測するため路盤コンクリートを敷設した。（図-13, 14）

(3) 使用材料，使用設備

2. 3. の室内実験と同様に，ベントナイトはクニミネ工業社製クニゲルV 1（国内産Naベントナイト，50%粒径 $10\mu\text{m}$ ，最大粒径約 $100\mu\text{m}$ 程度），エタノールは，変成剤として硫酸アンモニウム0.8wt%，亜硫酸ナトリウム0.2wt%を混合した58wt%水溶液（ベントコールF：日本アルコール販売）を用いた。ベントナイトは25kgパック（図-15）を，エタノール水溶液は図-16に示すような 1m^3 コンテナ容器により坑内へ搬入した。

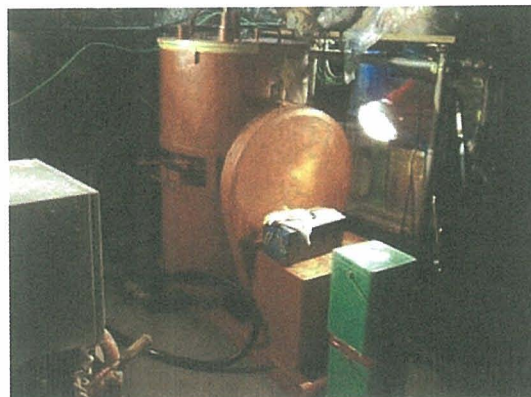
注入設備としては，図-17に示すような通常のグラウトミキサー，グラウトポンプを用いた。



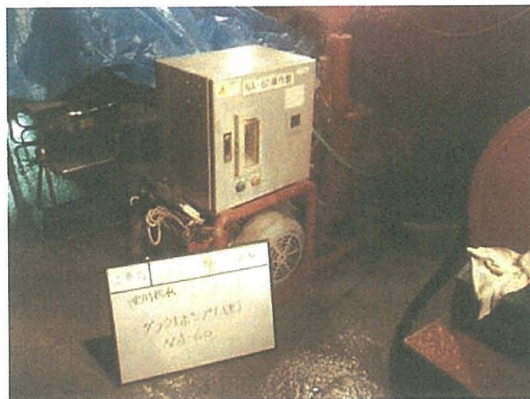
図-15 ベントナイト（25kgパック）



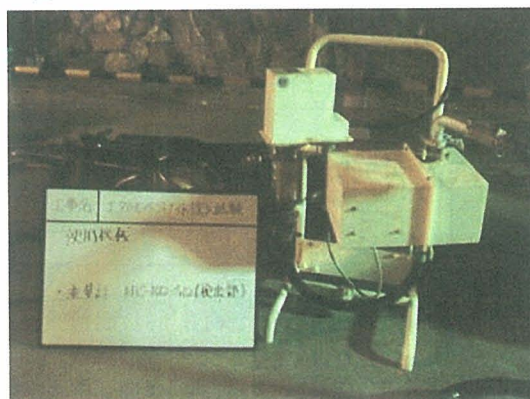
図-16 エタノールコンテナ（ 1m^3 ，重量：約970kg）



(a) グラウトミキサー（200リットル×上下2槽）



(b) グラウトポンプ（3連ピストンポンプ）



(c) 流量計



(d) データ管理装置

図-17 注入設備

スラリーの乾燥密度に関しては、室内実験結果を考慮し、液固比（エタノール：ペントナイト）＝4:1, 2:1, 1.5:1を設定した。それぞれのスラリーの比重は1.15, 1.22, 1.34, ペントナイトの乾燥密度は約0.2, 0.4, 0.5 (Mg/m³)である。

ただし図-18に示すように、液固比=1.5:1のスラリーについては、ミキサーの上部でのミキシングが不十分であったため、直接の注入材料としては用いず、液固比=2:1のスラリーと混ぜ合わせて（液固比=約1.7:1程度と考えられる）用いた。

(4) 注入実験条件および結果

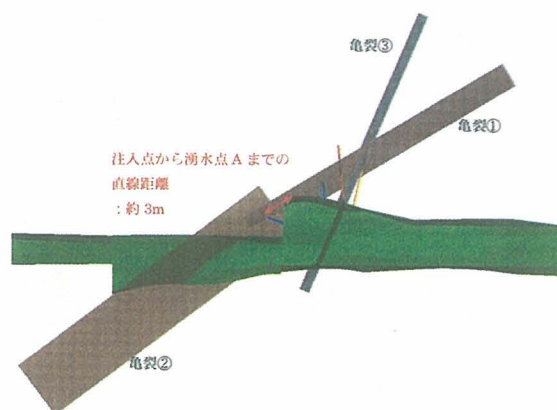
図-19に坑道、注入孔（4本）、想定される亀裂の3次元モデルを示す。前述のように想定亀裂の連続性が確認できなかったため、各注入孔の実験目的を個別に設定して注入実験を行った。

a) No. 4孔：湧水亀裂に対する止水注入実験

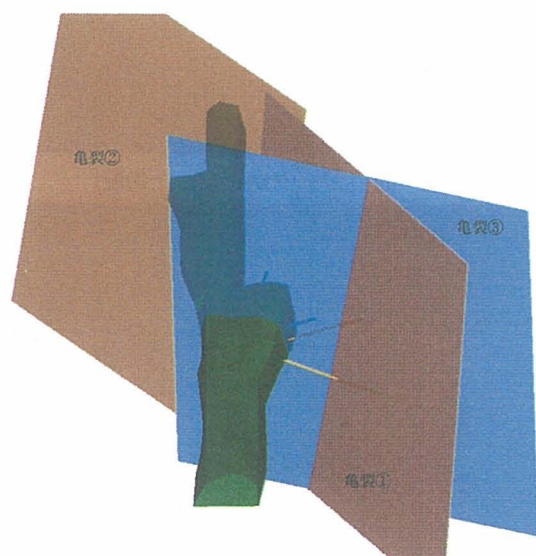
図-20に示すように、湧水箇所には流出スラリーの回収パックを用意した状態で実験を開始した。

先端部0.5m区間より最大注入圧力0.3MPaで液固比＝4:1から段階的に乾燥密度の濃いスラリーの注入を実施した。湧水箇所からスラリーが流出（図-21(a)）するものの液固比＝1.7:1程度の注入時に湧水部、坑壁からのリークが止まり、一時的に止水を

確認した（図-21(b)）。ペントナイトの注入量は全体で約340kgであるが、湧水部からの流出量を把握できなかったため、岩盤中への実質注入量は特定できていない。また、翌日の段階で湧水部設備より湧水が発生していた（図-21(c)）。



(a) 平面投影図



(b) 鳥瞰図

図-19 坑道、注入孔、想定亀裂の3次元モデル



(a) 液固比=2:1



(b) 液固比=1.5:1

図-18 液固比の違いとスラリーのミキシング状況

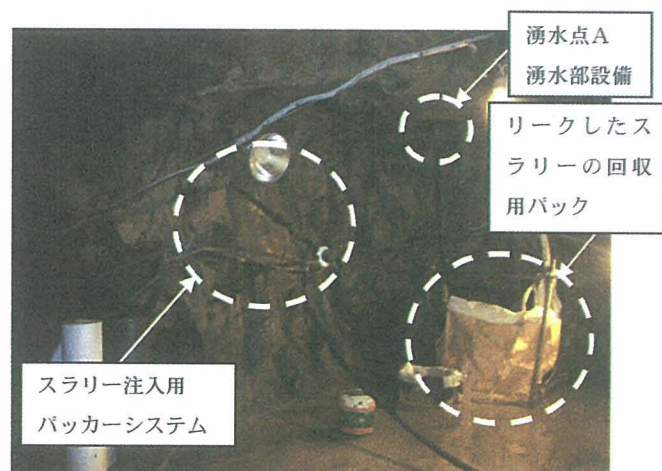


図-20 No. 4孔での注入実験状況



(a) 坑道壁面亀裂からのリーク状況



(b) リークが止まった状況



(c) 翌朝、リークが再び発生した状況

図-21 No. 4孔での注入実験状況

b) No. 3孔：掘削影響領域への注入実験

先端部1.0m区間より最大注入圧力1.0MPaで液固比=4:1および2:1を注入した。図-22に示すように表面亀裂からのリークが観察されたが、濃いスラリーの注入時にはリーク量が減少したことから、亀裂内に充てんされたと判断し、注入を終了した。

c) No. 1, 2孔：注入孔内の閉塞性確認実験

それぞれ先端部6.0m, 4.0m区間より最大注入圧力1.5MPaで液固比=4:1を注入した。ベントナイト注入量7.1kg, 4.1kgの注入でボーリング孔内にスラリーが十分充てんされたと判断し、注入を終了した。



図-22 No. 3孔での注入実験状況

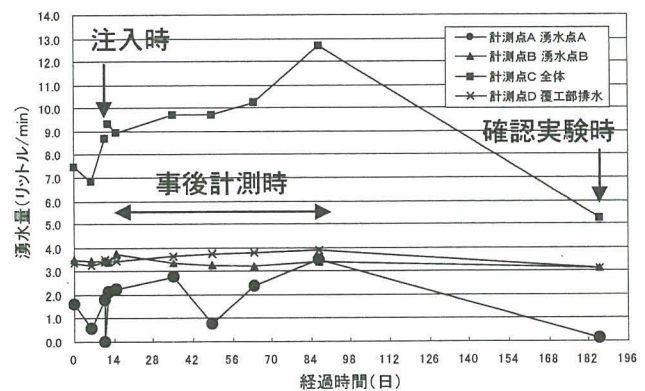


図-23 湧水量の経時変化

なお、注入時に用いたパッカーシステムに関しては、撤去の際のベントナイトスラリーの注入孔からの流出を懸念し、注入終了後についても撤去は行わず、6ヶ月間設置したままとした。

別途、現地で採取した石灰岩を用いた室内試験により、透水係数およびエタノールの拡散係数等を求めた結果、透水係数：約 $2E-10$ m/s程度、拡散係数：約 $1E-11$ (m^2/s)程度、有効間隙率：約2.7%であった。

(5) 計測項目、結果

注入実験前から注入実験後(約6ヶ月間)にかけて実施した各種計測結果について以下に示す。

a) 坑内湧水量

図-14に示した湧水量の計測点における湧水量の経時変化を図-23に示す。注入直後に湧水が一旦止まったものの、数時間後に湧水が再発生した湧水計測点Aでは、注入前よりも湧水が増加する傾向が観測された。他の湧水計測点(B, D点)ではほとんど変化がないことから、湧水計測点Aでは水圧上昇に伴うパイピングにより水みちが発生したこと、スラリー注入による効果で動水勾配が大きくなったことによることが要因として考えられる。

b) 湧水中のエタノール濃度

湧水計測点Aでは、No. 4孔の注入時、注入直後においてもリーク材料のエタノール濃度は約17wt%であった。これは湧水地下水との混合により希釈したものと考えられる。なお、湧水計測点A点は注入翌日（湧水再発後）の段階で0.1%、それ以降は0.01%未満のエタノール濃度しか観測されなかった。

No. 3孔の注入時に表面からリークしたスラリーについては50wt%以上であり、地下水による希釈はなくほぼ注入材料（58 wt %濃度）が直接リークしていたと考えることができる。

他の湧水計測点B、Dでは、注入実験中においてもエタノール濃度0.01%未満であり、その後もエタノール濃度の増加傾向は得られなかった。

c) 坑道内の気中エタノール濃度、坑内風速

注入作業中においても気中エタノール濃度は最大120ppm程度であり、作業環境基準として想定される1000ppmを大きく下回っていた。坑内風速は常に0.3～0.4m/s程度であり、自然状態でも十分換気可能な風速であったと考えられる。

d) 水質調査

注入実験前後において実験ヤード周辺地下水および地表での沢水の水質調査を実施したが、スラリー注入による水質汚染は確認できなかった。

(6) 確認調査結果

注入実験後（約6ヶ月間後）に実施した確認調査結果について以下に示す。

a) 確認ボーリング孔による観察

図-24に示すようにNo. 4近傍に3本（φ86, 2.5m）、No. 3孔近傍に2本（φ86, 1.5m）の確認ボーリングを削孔し、亀裂内のスラリーの充てん状況について観察した。

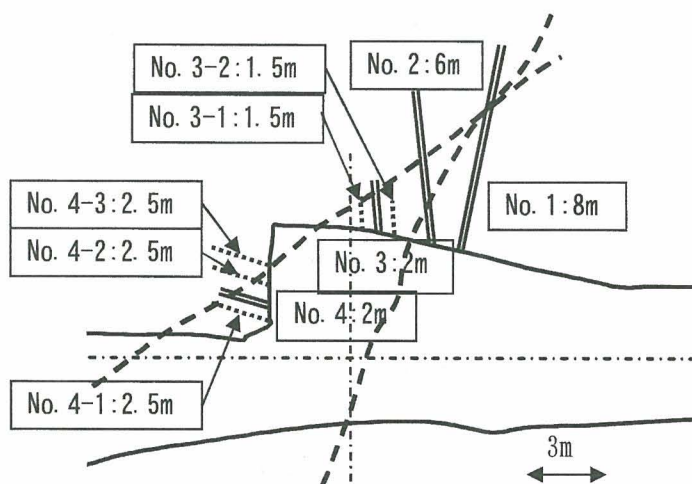


図-24 注入孔および確認孔配置平面図

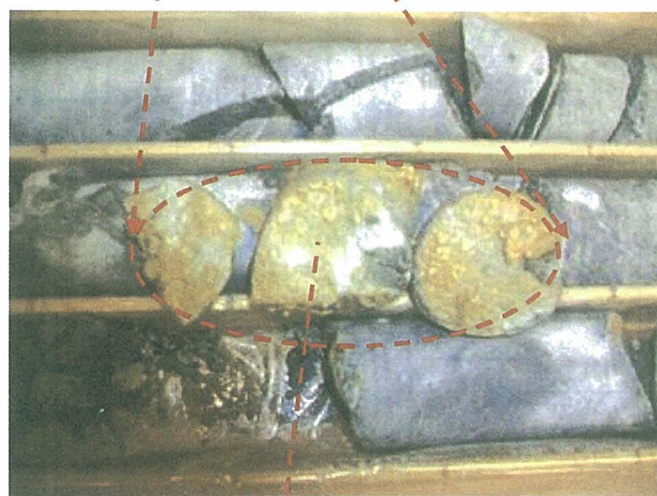
No. 4-1孔：コア、BTV、X線回折結果より断層粘土を含む亀裂内にベントナイトを確認した。充てんベントナイトの乾燥密度、エタノール濃度の分析は量が少なく不可能であった。（図-25～27）

No. 4-2, 3孔：コア、BTV、X線回折結果より明確なベントナイトスラリーを確認できなかった。（図-27：石英と方解石と判断）

No. 3-1, 2：コア、BTVともに明確なベントナイトスラリーを確認できなかった（図-26）

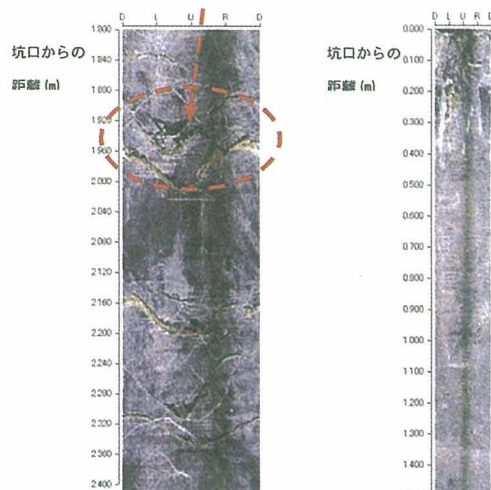


(a) コア全体（φ66, 2.5m）

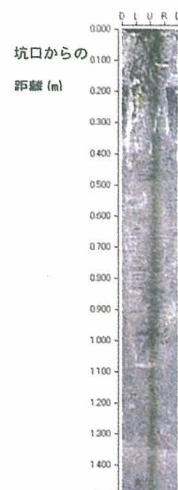


(b) 亀裂内充てん状況

図-25 確認ボーリングコア例（No. 4-1孔）



(a) No. 4-1孔



(b) No. 3-1孔

図-26 BTV画像例

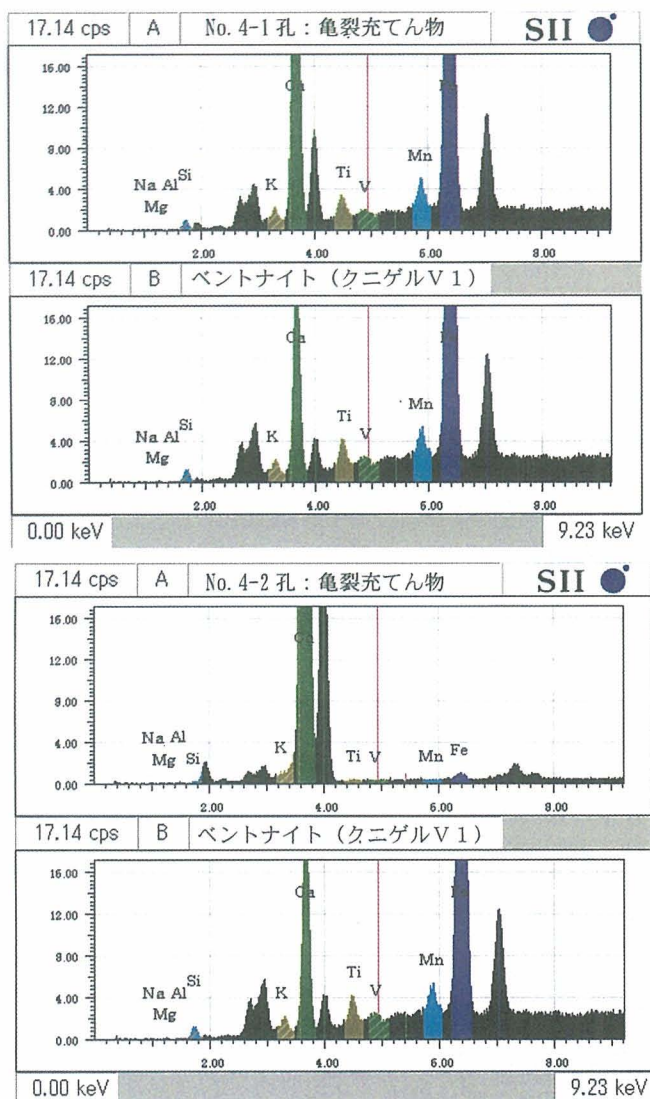


図-27 X線回折分析結果例 (No. 4-1孔とNo. 4-2孔)

b) 注入孔内のスラリーの充てん状況観察

注入実験終了後、設置したままにしておいたパッカーシステムを撤去し、注入孔内のスラリーの状況について観察するとともに、スラリーの液固比、エタノール濃度測定を実施した。

No. 4 : 孔内に粘土状 (液固比=1.89 : 1) のベントナイトを確認した。エタノール濃度は約2%であった。(図-28 (a))

No. 3 : 孔内にスラリー状 (液固比=3.92 : 1) のベントナイトを確認した。エタノール濃度は約25%であった。(図-28 (b))

No. 2 : 孔内に粘土状 (液固比=1.30 : 1) のベントナイトを確認した。エタノール濃度は約15%であった。(最も密な粘土状であった)

No. 1 : 孔内上部にはエタノール濃度52%の上澄み液の分布を確認した。ベントナイトはスラリー状で下向き孔のため回収不可能であった。



(a) No. 4孔内 (粘土状)



(b) No. 3孔内 (スラリー状)

図-28 注入孔内のベントナイト状況例



図-29 坑道内で発見されたキノコの種類

c) その他の坑道内観察結果

実験ヤード周辺の坑道内の観察を行った結果、キノコの発生や、鉄細菌の繁殖が見られた。

図-29は湧水点B付近で発見されたキノコの種類である。スラリーの注入対象であった湧水点A付近やその他の場所ではなく、この周囲のみで発見された。もともと坑道内には見られない種類のものであるが、品種を特定することはできていない。作業員の衣服等に付着し、坑外から侵入した可能性があるが、特定することは難しい。



図-30 褐色化した坑壁湧水部

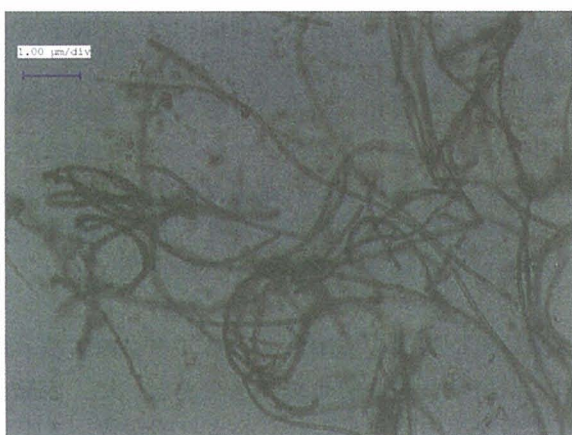


図-31 採取された鉄細菌の顕微鏡写真（1000倍）

図-30は坑道内の壁面が褐色化した状態であるが、分析の結果、図-31に示すように鉄細菌の繁殖によるものであることがわかった。明らかにベントナイトに含有される鉄成分によるものと考えられる。

これらの生物の繁殖要因としてはエタノール影響による生態系の活性化と考えられ、同時にエタノールが微生物分解等により消失していることを示していると考えられる。

(7) 原位置注入実験、確認調査結果の考察

a) 注入孔No. 4：止水目的の注入

No. 4孔からの亀裂注入に関しては、スラリーの乾燥密度の上昇に伴い、湧水量が低減するとともに、一時的ではあるが止水を確認することができた。しかし、水圧上昇とともに再び湧水が発生することになった。これは、スラリーの粘性上昇が十分ではない段階で水圧上昇が発生したため、水みちが発生したことによると考えられる。流水、水圧に対するスラリーのせん断抵抗性について今後明確にする必要がある。

また、最大注入圧力0.3MPaであったが、亀裂内および注入孔内のベントナイトスラリーの充てんが確

認された。亀裂内充てん物の物性は測定できなかったため明確ではないが、X線回折用にサンプリングした試料の粘性は比較的大きく、注入孔内のスラリーの液固比、エタノール濃度の関係から、亀裂内に関しても同程度の物性であることが予想される。

これらより、現状では性能が明確ではないものの、スラリーの亀裂充てん、止水グラウト材料としての適用可能性が確認できたと考える。

b) 注入孔No. 3：掘削影響領域への注入

No. 3孔の注入では掘削影響領域への注入が十分可能であることが確認できた。また、スラリー乾燥密度の上昇とともに、スラリーの表面リーク量が低減することから、ベントナイト乾燥密度についてもできるだけ高い材料の適用が望ましいと考えられる。ただし、注入孔内スラリーの乾燥密度増加は認められなかった。注入時に坑壁からのリークが発生しており、注入圧力1MPaの場合でも、スラリーの液相絞り出し現象（注入圧力によりスラリー中のエタノール水が絞り出されて岩盤へ移行する現象）が十分発揮される条件ではなかったためである。

掘削影響領域の透水性改善を目的とする場合、壁面からのリーク抑制が重要である。

c) 注入孔No. 1, 2：注入孔の閉塞

No. 2孔に関しては、注入ベントナイト量が4.1kg程度であるものの、注入孔内のスラリーは粘土状でかなり固化した状態であった。注入圧力1.5MPaにより、スラリーの液相絞り出し現象が発生したことによるものと考えられ、ベントナイトスラリーによるボーリング孔の閉塞材料としての適用性が確認できたと考える。

一方、No. 1孔に関しては、No. 2孔とほぼ同じ注入圧条件であるものの、ボーリング孔内のベントナイトはスラリー状であり、液相絞り出し現象は発生していなかった。No. 1孔は下向き15°、No. 2孔は上向き15°の注入孔であり、No. 1孔の場合はスラリーが分離・沈殿する条件であったことが要因として考えられるものの明確ではない。

鉛直ボーリングを含む下向き孔の閉塞材料として施工方法、適用性確認は今後の課題と考えられる。

d) 確認ボーリング孔

確認孔No. 4-1ではコアサンプルの亀裂内にベントナイト鉱物を確認することができた。湧水箇所に近いNo. 4-2, 3孔では確認できなかったことから、スラリーは注入孔から放射状に拡がらなかった可能性がある。亀裂の連続性とスラリーの充てん範囲については、注入孔の配置設計等と合わせて今後の課題と考えられる。

また、確認孔No. 3-1, 2孔では注入時に坑壁からのスラリーのリークが認められたにもかかわらず、掘削影響領域の亀裂内にスラリーを確認することができなかった。掘削影響領域の亀裂の連続性等についても複雑であり、ボーリング孔による確認が困難であることを示している。物理探査技術による注入効果の確認方法の開発等が課題として認識された。

e) 作業環境等

エタノールの利用に関して、本実験では環境悪化を示すような計測結果は得られなかった。水質等への影響も小さいことが確認された。しかし、エタノールを取り扱う以上は火気に注意を払うこと、坑内のエタノール濃度上昇を抑制するための換気設備の運転が必要である。

また、ベントナイトとエタノールの利用により、時間経過とともに周辺の生態系が活性化することが確認できた。これはエタノールが生物分解することを示すものであるが、今後、このような生態系の活性化に伴う環境影響についても検討する必要がある。

5. まとめと今後の課題

本論における室内実験および原位置実験の結果、エタノール・ベントナイトスラリーによる亀裂およびボーリング閉塞へのグラウト材料としての適用可能性が示唆された。

エタノール・ベントナイトスラリーはエタノール濃度の低下に加えて、スラリーの液相絞り出し現象による乾燥密度の上昇効果により、スラリーの粘性抵抗が増大することによって止水性を発揮する。

ただし、注入直後においてスラリーの粘性抵抗が低い場合には、粘性上昇効果を発揮する前に流水による流亡や湧水圧の上昇に伴う水みちが再発する可能性がある。スラリーを継続注入し、液相絞り出し現象を促進することができれば、グラウト材（ベントナイト）の乾燥密度の上昇に伴って粘性・止水性の向上を図ることができると考えられる。

流水、水圧への抵抗性については、スラリーの力学的な特性（せん断抵抗性）を把握する必要がある。特に流水による流亡低減のためには、亀裂内で目詰まりしやすい材料配合（例えばベントナイトと砂を混合したベントナイトモルタル等）を工夫することによって改善できる可能性がある。

グラウト材の配合条件と流動特性、力学特性の把握を行うことにより、施工時の配合設計に資することができる。

また、本検討は約40m水頭程度の水圧条件下の坑

道において実施した注入実験であり、より深部の高水圧条件が予想される坑道へ適用する場合には、注入設備を高水圧に対応させる必要がある。加えて、材料の高水圧条件下での流動特性、力学特性を把握することが必要である。

亀裂性岩盤に対する亀裂内充てんに関しては施工性の見通しが得られたが、透水性の大きい堆積岩等を対象とする岩盤基質部の間隙中へのスラリーの注入適性把握は今後の課題である。この場合はベントナイト粒子の小さい材料を用いることが効果的と考えられるが、微粉材料の分級方法を実用化し、グラウト材の流動特性、力学特性を把握するとともに、微小亀裂、間隙への充てん性能について確認する必要がある。

今後、材料開発、基本特性の把握、施工実験を継続することにより、エタノール・ベントナイトスラリーのグラウト材として適用性を明確にするとともに、対象岩盤に応じた適切な注入材料の選定、適した施工方法の具体化を行うことを目指したい。

謝辞：原位置注入実験にあたり、奥多摩工業（株）殿には実験サイトを御提供頂くとともに、実験の際に大変御協力頂きました。心より感謝致します。

参考文献

- 1) 浅田，堀内：エタノール／ベントナイトスラリーの止水充填モデル試験，第56回土木学会年次学術講演会，pp.30-31,2001.
- 2) 浅田，松岡，堀内：エタノール／ベントナイトスラリーの界面電気現象と流動特性，第57回土木学会年次学術講演会，pp.461-462,2002.
- 3) 中島，浅田：エタノール／ベントナイトスラリーの岩盤亀裂注入現場実験，第38回地盤工学研究発表会，591, G-07, 2003.
- 4) 泉，柴田，金谷，寺田，西垣：54. 掘削損傷領域（Excavation Disturbed Zoon）の修復技術としてのベントナイトグラウトの適用性，日本地下水学会2005年秋季講演会講演要旨，pp. 250-255, 2005.
- 5) 西垣，小松，見掛，中島，金谷，龍田：坑道の掘削影響に対する修復技術としてベントナイトグラウトの適用性に関する評価，土木学会論文集，No.806/III-73, pp. 55-66, 2005.
- 6) Ishi,Iwasa,Shiraishi,Saito,Nakashima,Asada,Ueda,Sakabe: Experimental Study on the Mechanism of Ethanol/Bentonite Slurry Grouting, 29th Symposium on the Scientific Basis for Nuclear Waste Management,MRS, in printing 2005.