

エタノールを用いたベントナイトスラリーの 亀裂性岩盤へのグラウト効果

西垣 誠¹・小松 満²・見掛信一郎³・田岡 洋⁴・中島朋宏⁵

¹正会員 工博 岡山大学教授 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

²正会員 工博 岡山大学助手 環境理工学部環境デザイン工学科 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

³正会員 工博 岡山大学大学院自然科学研究科 (現 核燃料サイクル開発機構東濃地科学センター
〒509-5102 岐阜県土岐市泉町定林寺 959-31)

⁴正会員 工修 岡山大学大学院自然科学研究科 (現 中国電力株式会社
〒730-8701 広島市中区小町 4-33)

⁵学生会員 学士 岡山大学大学院自然科学研究科 (〒700-8530 岡山市津島中 3-1-1)

本研究では、恒久的なグラウト材料の提案を目的とし、ベントナイトの膨潤を抑制する溶液を用いて作成したベントナイトスラリーの浸透特性及び亀裂への注入特性を把握するために行った研究結果について論述する。各種溶液を用いたベントナイトスラリーの浸透特性を明らかにし、エタノール/ベントナイトスラリーからのエタノール拡散係数を求め、ベントナイトの粒径と注入可能亀裂開口幅及び動的注入工法の充填密度増加を確認した。これらの結果から、ベントナイトをエタノールによってスラリー化することで高濃度のベントナイトを注入でき、動的注入によって施工することでより高い止水効果が発揮されるという結論を得た。

Key Words: bentonite, grouting, intrinsic permeability, swelling, dynamic injection

1. はじめに

岩盤内に坑道を掘削することにより、坑道周辺には掘削の影響を受けた領域が発生する。掘削に伴い周辺岩盤には、掘削の衝撃による岩盤の損傷、水理学的不飽和領域、岩盤応力の再配分などが発生し、岩盤の性状が変化する。この掘削影響を受けた領域(掘削損傷領域: Excavation Disturbed Zone)は、高レベル放射性廃棄物の地層処分において人工バリアに直接接する領域であり、地層処分技術の基盤研究において重要な研究対象であり、これまで世界各国において研究されている^{1), 2), 3)}。この掘削損傷領域をいかに修復するかが国際的な課題となっている。すなわち、地層処分終了後、掘削した坑道に関してはベントナイト等の天然材料により埋め戻すことにより、掘削前の低い透水係数の場に戻すことが可能である。しかし、掘削損傷領域に対しては、従来のダム基礎部の高透水ゾーンに対するグラウト材料として用いられているセメントミルクでは、

高レベル放射性廃棄物の半減期を問題にするような1万年~10万年という長期間の止水性が期待できないため、新しい天然材料をグラウト材料として探す必要がある。従って本研究では、数万年の長期にわたる止水性と掘削損傷領域に対する修復技術の観点から、それ自身が天然材料の粘土鉱物であることから長期安定性が期待され、坑道の埋め戻し材や緩衝材に用いることが検討されているベントナイトをスラリー化したベントナイトスラリーに注目した。

しかしながら、ベントナイトを水によって亀裂へ注入可能なスラリー化する場合、ベントナイトの膨潤、粘性の増加、低い充填密度などの問題点が生じる。すなわち、水を溶液として用いた水/ベントナイトスラリー(以下、W/Beスラリーとする)では掘削損傷領域への注入も困難であり、仮に注入できたとしても充填密度が低いため難透水性を得られる可能性は低く、亀裂内に留まらず流れ出す恐れもある^{4), 5), 6)}。そこで、低粘性でベントナイト濃度の

高いスラリーを作成可能であるエタノール、塩水を溶液として用いてスラリー化した、エタノール/ベントナイトスラリー(以下、E/Be スラリーとする)、塩水/ベントナイトスラリー(以下、S/Be スラリーとする)の物理特性について実験的に研究を行った。またそれを平行平板を用いて亀裂を模擬したモデルに注入して、恒久的なグラウト材料として、掘削損傷領域に対する修復技術としての可能性を探求した。

2. 従来の研究

グラウト材料は、ダム基礎部のグラウトに用いられているセメント系材料と粘土系材料の2種類、さらにセメントスラリーにセメント粒子の沈降を防ぐ目的として1~4%(重量)のベントナイトを加える方法などがある⁷⁾。スウェーデンにおける高レベル放射性廃棄物の地層処分のためのSTRIPA Projectの研究では、長期安定性が要求される地層処分施設の止水工法として、グラウト材料にベントナイトスラリーを取り上げている⁸⁾。ここでベントナイトスラリーが選ばれた理由として、材料が凡用的かつ永久的であること、核物質を吸着しやすいこと、また、吸水性があるため核物質の拡散の媒体となる地下水との隔絶を図る上で混合用を使う水ができるだけ少なく出来ることなどを挙げている。STRIPA Projectの最終報告書では、ベントナイトスラリーなどの高粘性グラウトを注入する際、グラウトに40Hz程度の振動を与えた動的注入は、効果的であるという報告がされている⁸⁾。ベントナイトの長期安定性に関して、花崗岩を対象とした粘土グラウト試験にて透水係数の低下が2年間維持されるという報告もされている⁹⁾。また平らは、動的注入によるベントナイトスラリーの模擬岩盤亀裂へのグラウト注入試験を行っている。グラウト材料は、W/Be=6.5/1で作成したベントナイトスラリーに対して、分散剤として固体分の2%(重量比)のヘキサメタリン酸ソーダを添加している。模擬亀裂への注入試験より得られた浸潤距離の経時的変化から、周波数5Hzまたは10Hzでの注入が最も効果的と結論付けている¹⁰⁾。これは、STRIPA Projectで報告されている40Hzよりも小さい周波数である。さらに著者らは、セメントミルクを動的にダム基礎に注入する研究を行っており、従来の静的な注入工法に対して、動的にセメントミルクを注入することにより効果的に注入できることを室内及び原位試験より確認している。室内試験より亀裂注入部や亀裂幅

の変化部における目詰まりがほとんど発生せず、さらに充填密度の高いグラウト注入が可能であることが判明した。この室内試験における研究成果のもとに、現場において施工可能な動的グラウチングシステムを開発した。このシステムは、一定圧力でグラウトを供給する従来の注入システムに所定の周波数の振動を付加する装置を設置した簡便なもので、注入時の動的圧力が容易に制御、管理可能なものである。このシステムを用いて、ロックフィルダムのブランクートグラウチングエリアを対象とした原位置注入試験を実施し、動的注入の有効性と現場への適用性を評価した。その結果、ルジオン値の次数減では静的注入が5次孔で改良目標値に達しているのに対し、動的注入では4次孔で改良目標値に達している。動的注入は静的注入と比較して約2倍の流量が注入可能であり、最適な振動は5~7Hz程度という結果が得られた¹¹⁾。セメントミルクを用いた研究では、普通ポルトランドセメント、超微粒子セメントのみと超微粒子セメントに分散剤を添加したセメントミルクの目詰まりの生じる亀裂開口幅と水セメント比の関係を実験により明確にした¹²⁾。

グラウト材料として着目したベントナイトを水で分散すると高い表面電位を持つことが知られているが、高い表面電位はベントナイトを構成するモンモリロナイトの吸着水の厚さを大きくしており、ベントナイトを水でスラリー化する場合には大量の水が必要となる。一方エタノールはエタノールモンモリロナイトの電化の発現を抑えている可能性があり、ベントナイト濃度の高いベントナイトスラリーの作成が可能である。堀内らは、水槽内に亀裂モデル(長さ1600×幅400×高さ100:単位cm)を設置し、その中にE/Beスラリーを注入している^{13),14)}。1ヶ月放置することで、エタノール濃度が周囲の水によって薄められて低下するに伴って止水壁の強度が増加する。さらに、E/Beスラリーと標準砂を用いたE/Beスラリー混合土に対する各種試験より、拡散係数、透水係数の把握に関しての一連の研究が行われている^{15),16),17),18)}。

一方、田中らはNa型ベントナイトの塩水処理(イオン交換)をバッチ式で行い、塩水化ベントナイトに対して透水試験、膨潤圧試験、膨潤量試験を行い、Na型ベントナイトと塩水化ベントナイトとの比較を行っている。結論としてNa型ベントナイトが人工海水と接触することで膨潤量は低下することを確認している¹⁹⁾。このことから、塩水によりベントナイトの膨潤が抑制されることがわかる。藤田らは地層処分における緩衝材の候補材料であ

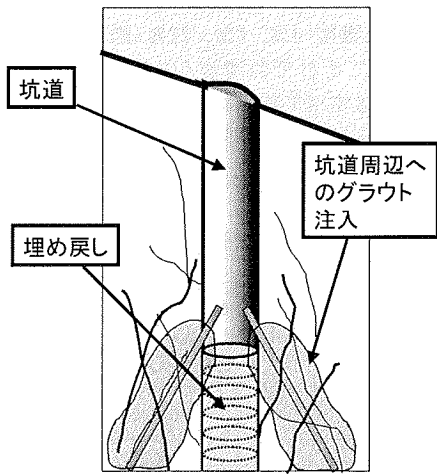
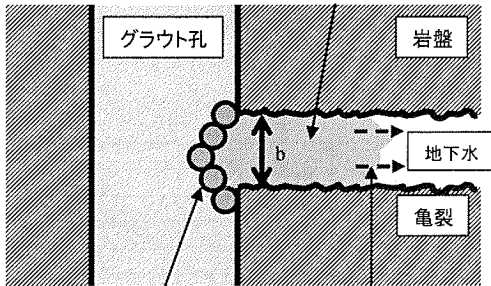


図-1 グラウト注入による坑道周辺への修復技術

- (1) ベントナイトスラリーの
充填密度と浸透特性の関係



- (2) E/Bcスラリーからの
エタノール拡散現象
(3) ベントナイト粒径と
亀裂開口部での目詰まりの関係

b: 亀裂開口幅

図-2 エタノール/ベントナイトスラリーを
グラウト材として用いたときの検討項目

るベントナイトを対処とした水理試験を実施している。乾燥密度 $\rho_d = 1.0 \sim 1.8$ (g/cm³) で締め固められたベントナイトの固有透過度は、 $1.0 \times 10^{-17} \sim 10^{-15}$ (cm²) のオーダーであるとしている²⁰⁾。

これらのベントナイトに関する一連の研究のなかで、堀内らの研究はエタノールを用いるとベントナイトの膨潤を抑制してスラリー化でき、それを掘削したトレンチに流入することによってベントナイトの充填密度の高い止水壁を形成できるとともに、時間の経過に伴ってベントナイト中のエタノール濃度がうすくなりベントナイトが膨潤することによって、一層、止水壁の透水性が低くなることを示している^{14), 15), 16), 17), 18)}。

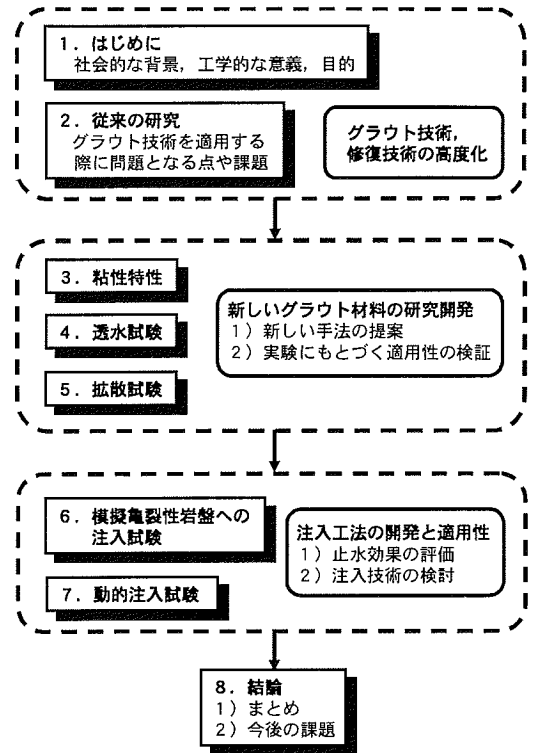


図-3 本論文における研究の構成

上述した従来の研究から、膨潤が抑制され低粘性でベントナイト濃度の高いスラリーを作成するためには、エタノール、塩水が効果的であることがわかる。そこで、本研究ではエタノール、塩水を溶液としたベントナイトスラリーについて、グラウト材料としての適用性について研究を行う。この方法を用いれば、ベントナイトスラリーを高レベル放射性廃棄物の地層処分後の埋め戻しの際に掘削損傷領域に対する修復技術として図-1のように注入し、注入されたベントナイトスラリーが周囲の水によって膨潤することによってきわめて低透水性の領域を形成することが可能になると考えられる。さらに本研究では、グラウト材料の注入工法としては、動的な注入工法を用いると、より一層充填密度の高い注入が可能であると考えられるため、その効果についても実験的に検討した。なお、亀裂の中にエタノール/ベントナイトスラリー等を注入する際に検討する項目を整理すると、図-2に示す3つの項目になる。これらの項目を踏まえて本論文で行った研究の全体の流れ、構成を図-3にまとめた。

3. ベントナイトスラリーの粘性特性

(1) ベントナイトの粒径加積曲線

本研究で使用したベントナイトは、タイプ1 ($D_{85}=35\mu\text{m}$)、タイプ2 ベントナイト ($D_{85}=13\mu\text{m}$) の2種類である。図-4に、分散媒に60%エタノールを用いたレーザー回折法(湿式)で測定を行ったベントナイトの粒径加積曲線を示す。分散媒の重量に対して0.5%のベントナイトを混ぜ合わせ、攪拌し、超音波を当てることによって分散を促したのに対して、測定を行っている。エタノール濃度は60%(質量)を超えるると消防法上の「危険物」となるため、本研究では、60%エタノールを用いてスラリー化した時のベントナイトの粒径を把握することを目的としている。エタノールは、一般95度1級発酵無変性アルコールを用いた。物性としてエタノール濃度と密度、粘度の関係を表-1に示す²¹⁾。

(2) ファンネル粘度計による測定

ファンネル粘度計とは、土木現場において安定液の管理に用いられる簡易粘度計で、装置を500mlの試料がすべて流れ出るまでの時間(s)を測定する粘度計であり、ファンネル粘度(s)で表される。

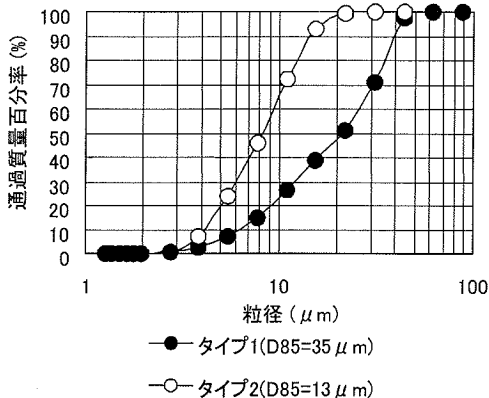


図-4 ベントナイトの粒径加積曲線分散媒：60%エタノール、湿式

表-1 エタノール濃度と密度、粘度²¹⁾

エタノール (%)	密度 (g/m^3) (25°C)	粘度 ($\text{mPa}\cdot\text{s}$) (20°C)
0	0.997	1.002
20	0.966	2.183
40	0.932	2.910
60	0.887	2.670

供試体は、エタノール濃度=30%、60%、95%の3種類、塩水濃度=4%、8%、22%(飽和水溶液)の3種類に対してそれぞれ溶液/ベントナイト=2/1、5/1(配合比はすべて重量比で表す)でスラリーを作成し、ファンネル粘度の測定を行った。用いた配合比に関しては、濃度変化で影響が顕著である配合比にて試験を行っているが、水を用いた場合、これらの配合比にてスラリー化することは不可能である。

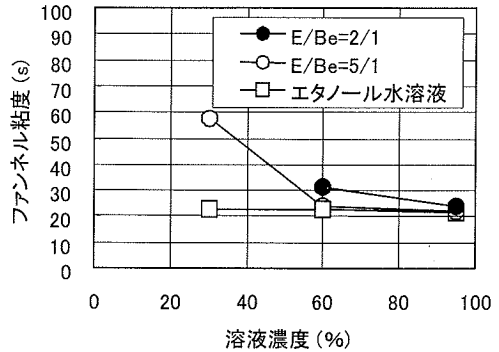


図-5 E/Beスラリーの所定濃度におけるファンネル粘度

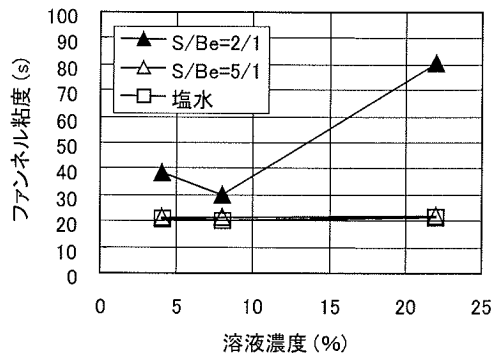


図-6 S/Beスラリーの所定濃度におけるファンネル粘度

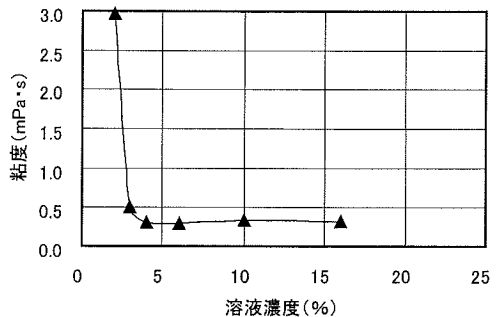


図-7 S/Beスラリーの所定濃度における粘度

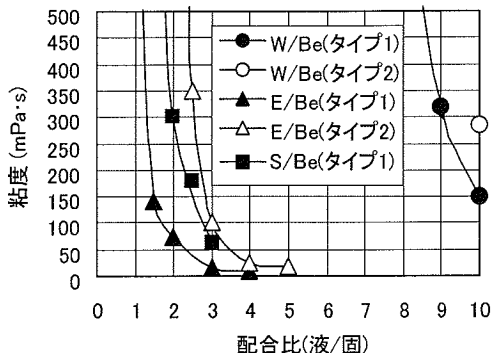


図-8 配合比と回転粘度計で測定した粘度の関係

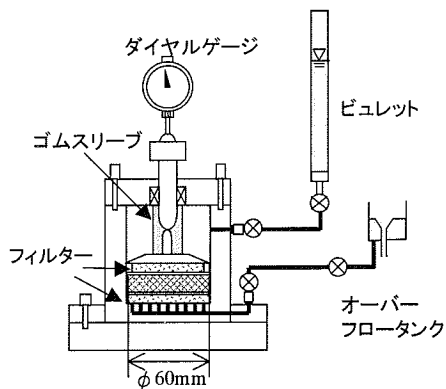


図-9 変水位透水試験装置

エタノールを用いた場合の試験結果を図-5に、塩水を用いた場合の結果を図-6に示す。

結果より、エタノール濃度がスラリーに与える影響は大きく、濃度が上昇するに従って、粘性が低く、エタノール水溶液の粘性と同程度の粘性になる。さらに、エタノール濃度が30%、E/Be=2/1でのスラリーに関しては、粘性が高く、ファンネル粘度を計測することが出来なかった。このことから、エタノール濃度の上昇に従って、ベントナイトの膨潤を抑制する作用が強くなり、粘性を低くすることが出来る。逆に、濃度が薄くなり30%になると、ベントナイトスラリーの粘性が急激に上昇する。一方塩水に関しては、ベントナイトスラリーの薄い配合からS/Be=5/1程度までは低い粘性が保たれている。さらに配合をS/Be=2/1まで濃くすると、塩水濃度に対して粘性がばらついた値となっているため、次項(3)の回転粘度計による測定も行った。その結果を図-7に示す。この結果からは、塩水濃度が薄くなり4%以下になると、ベントナイトスラリーの粘性が急激に上昇する傾向がみられた。

(3) 回転粘度計による測定

次にB型回転粘度計を用い、供試体の温度を20℃に調節し、恒温室にて粘性の測定を行った。測定は、ずり速度、ずり応力の測定をそれぞれの回転数で1分間行い、すべてのケースにおいて流動曲線を描き、粘性を得た。

流動曲線は、高ずり速度領域において、ずり応力が低下するチクソトロピー流体のような挙動を示した。ここでは、比較的直線であった高ずり速度領域での傾きをそれぞれに対して求め、粘度としたがE/BeとW/Beの違いや、ベントナイトの違いによる変化を示す参考値として扱う。配合比と粘度の関係を図-8に示す。この結果より、エタノールを用い

ることで、ベントナイト濃度の高いスラリーを作成することが可能であることがわかる。またその値は、同じ粘度(たとえば、150mPa·s)では、液体とベントナイトの混合比がエタノールによるスラリーは1.5で、水によるスラリーは10となり、水とベントナイトの混合ではきわめてうすいグラウト材料しか取り扱えないのに対して、エタノールによるベントナイトスラリーはきわめて濃いグラウト材料として扱えることがわかる。

4. ベントナイトスラリーに対する透水試験

(1) 透水試験装置

グラウトによりベントナイトスラリーが亀裂に注入された状態を想定し、その透水性を評価するために透水試験を行う。本論文ではベントナイトスラリーを水、塩水、エタノール溶液で作成した場合について研究を行っている。このため、W/Beスラリー、S/Beスラリー、E/Beスラリーそれぞれに対する透水試験を行った。すべての透水試験は、圧密試験器を改良した変水位透水試験装置で行った。またここでは、ベントナイトは、タイプ1のベントナイト($D_{85}=35\mu\text{m}$)を用いた。試験条件の一つである、エタノール/ベントナイトスラリー供試体のエタノールが水に置換することによる供試体の膨潤を許した状態(ここでは、非拘束条件と呼ぶ)での試験装置を図-9に示す。供試体上部は可動するが、反力を得ることで拘束条件での試験も可能である。試験に用いたフィルターは厚さ5mmで、フィルター上部にろ紙を設置している。本試験に先立って、供試体を設置しない状態で試験装置($\phi 60\text{mm}$, 高さ5mmのフィルター2枚、ろ紙2枚)の変水位透水試験を

行った。得られた固有透過度は 8.0×10^{-9} (cm²) であり、ベントナイトスラリーに対する試験結果ではこの値を考慮して供試体の固有透過度を求めた。本論文では、W/Be スラリー、S/Be スラリー、E/Be スラリーに対する試験から溶液の違いによる浸透特性への影響把握を目的としており、それぞれの試験に用いた溶液の違いを考慮し、固有透過度を用いて評価を行っている。式(1)に固有透過度の定義式を示す。

$$K = k \cdot \frac{\mu}{\rho g} \quad (1)$$

ここで、 K : 固有透過度、 k : 透水係数、 μ : 粘度、 ρ : 流体密度、 g : 重力加速度とする。

(2) W/Be スラリーに対する透水試験

ベントナイトがスラリー作成段階で完全に膨潤していると考え、非拘束条件での試験を行った。供試体は、W/Be=7/1, 6.5/1, 6/1 の3ケースで、サイズは、 ϕ 6cm, 高さ2cmである。粘性土に対する透水試験においては、低水頭差においてダルシー領域からの逸脱が見られる。このため、水頭値 $\ln(h)$ の経時変化をプロットしたグラフより、線形であることからダルシー領域を確認し、固有透過度の算出を行った。固有透過度の経時変化を図-10に示す。固有透過度は、 1.0×10^{-12} (cm²) 程度であり、経時的に低下している傾向にあるが著しい変化はみられない。

(3) S/Be, E/Be スラリーに対する透水試験

S/Be スラリー (塩水濃度 22%, S/Be=1.2/1) 及び E/Be スラリー (エタノール濃度=60%, E/Be=1.2/1) に対して、鉛直方向の膨潤等による変位を拘束条件として透水試験を行った。これは、亀裂注入後のグラウト材料は拘束されている状態で、通水によって

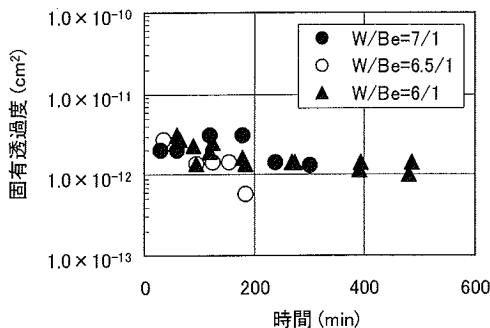


図-10 W/Be スラリーに対する非拘束条件での透水試験結果

ベントナイトの膨潤が生じると考えたためである。供試体は S/Be スラリーが、 $e=1.31$, 高さ 1.21cm, E/Be スラリーは、 $e=1.31$, 高さ 0.94cm 及び $e=2.25$, 高さ 1.35cm の 2 種類であり、間隙比は圧密試験によって荷重をかけて調節した。試験用水として、それぞれのスラリー化に用いた溶液による通水を行い、 $t=0$ での固有透過度を算出し、その後水を通水させ、経時的な固有透過度の変化を測定した。

図-11 に固有透過度の経時変化を示す。さらに、E/Be スラリー、 $e=2.25$ における膨潤圧及び供試体からの排出液のエタノール濃度の経時変化を図-12 に示す。E/Be スラリー及び S/Be スラリーの双方とも、固有透過度の経時的な低下が見られる。これは、拘束条件であるため間隙比は同じであるが、水を通水させることによってベントナイトが膨潤し、供試体中の間隙の分布が変化したためと考えられる。図-12 より経時的に膨潤圧が上昇していることから、グラウトされた後、膨潤することで、亀裂内が隙間なく充填される効果が期待できる。よって、亀裂注入時では、低粘性であるが、地下水面下の亀裂内で、経時的な膨潤が生じ、難透水性を發揮すると考えられる。

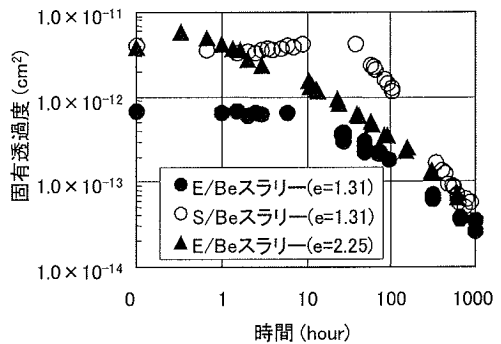


図-11 E/Be スラリー及び S/Be スラリーに対する所定間隙比における透水試験結果

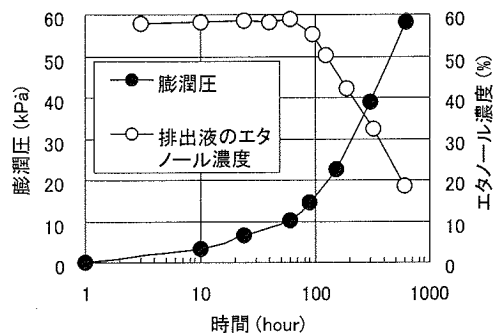


図-12 E/Be スラリー ($e=2.25$) の通水時の膨潤圧及び排出液のエタノール濃度の経時変化

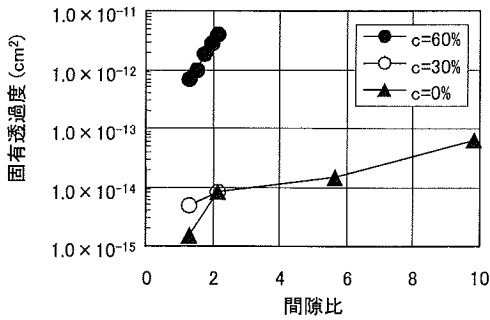


図-13 E/Be スラリーの間隙比と所定エタノール濃度における固有透過度の関係

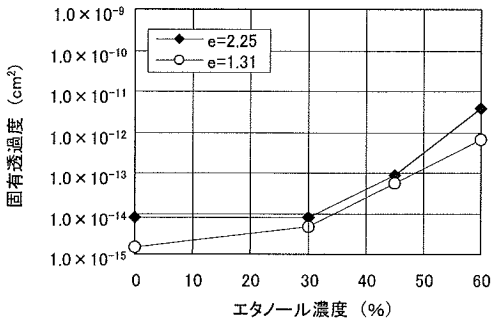


図-14 エタノール濃度と固有透過度の関係

溶液の違いが透水性に及ぼす影響に関しては、用いた溶液の濃度に影響することが考えられる。しかし、図-11の結果では、エタノールと塩水の優劣の判断は難しい。よって、溶液の選定については、周辺環境への影響評価などを含めて行う必要がある。すなわち、地下水が淡水であるならエタノールスラリーを用い、地下水が塩水であるなら塩水を用いる等が考えられる。本研究では主に淡水下の環境条件を考え、エタノールによるベントナイトスラリーに対して様々な検討を行う。

(4) 間隙比と固有透過度の関係

エタノールの濃度が固有透過度に及ぼす影響を把握するため、所定エタノール濃度で作成したE/Beスラリーに対して、間隙比を調節し、スラリー化に用いた溶液を通水させることで、固有透過度を算出した。試験はすべて拘束条件で行い、エタノール濃度を0%、30%、60%にて作成したE/Beスラリーの間隙比を圧密試験より調節し、通水を行った。間隙比と固有透過度の関係を図-13に、エタノール濃度と固有透過度の関係を図-14に示す。この結果より、エタノール濃度が30%と0%での固有透過度の

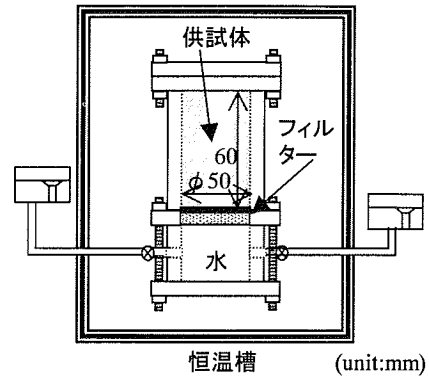


図-15 E/Be スラリーの拡散試験装置

値に大きな差がない。これは、エタノール濃度が30%まで低下すると、ベントナイトが膨潤するためである。さらに、1.3~2.3程度の間隙比で亀裂にベントナイトが充填されれば、固有透過度は $1.0 \times 10^{-15} \sim 10^{-14}$ オーダー (cm^2) まで低下させることができる。

このことより、粘性が低くベントナイト濃度の高いエタノール/ベントナイトスラリーを亀裂中に1.3~2.3程度の間隙比で注入した場合、その後、このグラウト材料が周囲の水と接してベントナイトが膨潤すると、きわめて低い固有透過度になることがわかる。

5. E/Be スラリーの水による拡散試験

E/Beスラリーが通水によって経時的な固有透過度の低下が得られることを明確にしたが、大深度の地下水面に注入された場合、地下水の流れは非常に緩やかであることからエタノールと水の置換現象は、主に拡散現象によって生じると考えられる。そこで、E/Beスラリーからのエタノール拡散現象の把握を目的として、鉛直次元拡散実験を行った。試験装置を図-15に示す。エタノール濃度の測定は、誘電率計測法の一つであるFDR-V計測装置を用い、誘電率とエタノール濃度の関係より、底部の拡散境界面からの各高さ z (cm) でのエタノール濃度 c (%) を得た²²⁾。図-16、図-17に拡散境界面からの所定高さにおけるエタノール濃度の経時変化を示す。両図より、供試体下部から経時的にエタノールの拡散によって濃度が低下していることがわかる。拡散係数は図-16、図-17の結果から Boltzman 変換法により算出した。ここで拡散係数の求め方を示す²³⁾。

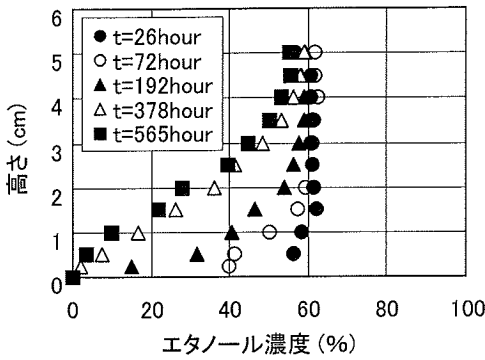


図-16 拡散境界面からの所定高さにおけるエタノール濃度の経時的変化 ($E/Be=1/1$)

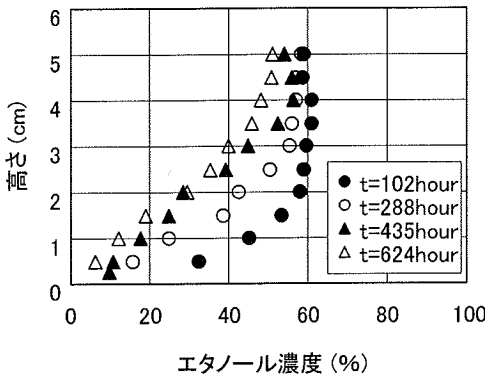


図-17 拡散境界面からの所定高さにおけるエタノール濃度の経時的変化 ($E/Be=1.5/1$)

拡散係数は、一次元の拡散実験によって、以下の Boltzman 変換による方法を用いて一般的に求められる。

浸透がない状態で濃度の異なる液体が多孔質体の中にあるとき、その移動量 (J) は Fick の法則に従って次式で表される。

$$J = -D \frac{\partial C}{\partial z} \quad (2)$$

ここで、 J : 拡散物質の単位領域あたりの移動量、 C : 拡散物質の濃度、 D : 拡散係数、 z : 座標とする。鉛直一次元の多孔質体中の拡散現象を対象にすると、質量保存則は次式で表される。

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial J}{\partial z} = 0 \quad (3)$$

ここで、 t : 時間とする。

式(2)を式(3)に代入すると D が濃度の関数である非線形の拡散方程式を得る。

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ D \cdot \frac{\partial C}{\partial z} \right\} \quad (4)$$

次に式(4)を次の変数を用いて常微分方程式に変換する。

$$\lambda = \frac{z}{\sqrt{t}} \quad (5)$$

すなわち、

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial C}{\partial \lambda} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial t} = -\frac{1}{2} \cdot \frac{z}{t^{3/2}} \cdot \frac{dC}{d\lambda} \quad (6)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} = \frac{\partial C}{\partial \lambda} \cdot \frac{\partial \lambda}{\partial z} = t^{-1/2} \cdot \frac{dC}{d\lambda} \quad (7)$$

式(6)、式(7)より式(4)は、

$$\begin{aligned} -\frac{1}{2} \cdot \frac{z}{t^{3/2}} \cdot \frac{dC}{d\lambda} &= \frac{1}{t^{1/2}} \cdot \frac{\partial}{\partial z} \left\{ D \cdot \frac{\partial C}{\partial \lambda} \right\} \\ &= \frac{1}{t} \cdot \frac{d}{d\lambda} \left\{ D \cdot \frac{dC}{d\lambda} \right\} \end{aligned} \quad (8)$$

したがって、式(4)は次の常微分方程式になる。

$$-\frac{\lambda}{2} \cdot \frac{dC}{d\lambda} = \frac{d}{d\lambda} \left\{ D \cdot \frac{dC}{d\lambda} \right\} \quad (9)$$

このように、式(5)の λ を用いて式(4)を式(9)に変換する方法を Boltzman 変換と称している。

式(9)から拡散係数を求めると次式となる。

$$D = \frac{-1}{2 \left(\frac{dC}{d\lambda} \right)} \cdot \int_0^\lambda \lambda dC \quad (10)$$

ここで求められた拡散係数 (D) は、溶液の中での分子拡散係数 (D_m) の値とは異なる。 D_m の値は、温度に依存する値で、それぞれの溶媒に対して溶質の分子拡散係数 (D_m) として理化学辞典²⁴⁾に記載されている。

多孔質体中の拡散係数 (D) は、多孔質体の間隙構成の影響を受け、一般に、

$$D = \tau D_m \quad (11)$$

と言われ、 D は D_m より小さい値で求められる。これは、溶質の分子がブラウン運動によって拡散している際に多孔質体が障害になるためであると考えられている。

τ の値は屈曲率と称され、同じ試料であっても間隙率によって変化し、物理的には多孔質体の中の

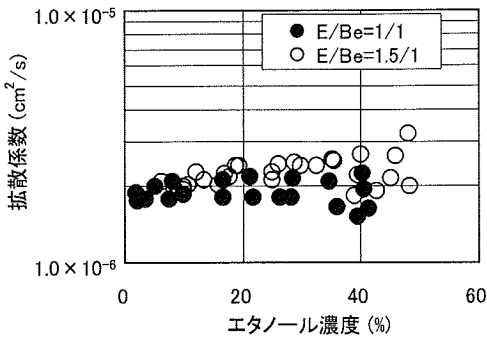
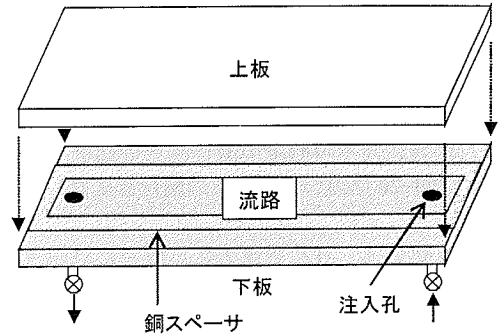


図-18 エタノール濃度とE/Beスラリーの
エタノール拡散係数の関係



小型亀裂モデル:流路幅=1cm, 流路長6cm
長尺亀裂モデル:流路幅=2cm, 流路長150cm

図-19 平行平板亀裂モデル

表-2 E/Beスラリーからのエタノール拡散係数及び
屈曲率

配合比 E/Be	間隙比 e	拡散係数 (cm ² /s)	屈曲率 τ
1/1	3.09	1.90×10^{-6}	0.17
1.5/1	4.64	2.27×10^{-6}	0.20

表-3 ベントナイトの D_{85} と注入不可能亀裂開口幅
の関係

ベントナイト	D_{85} (μm)	注入不可亀裂 開口幅b (μm)	D_{85}/b
タイプ1	35	50	1.43
タイプ2	13	20	1.54

実際に拡散する経路の長さ(ℓ)に対して、多孔質体の長さ(L)の比で定義されている。

$$\tau = \frac{L}{\ell} < 1 \quad (12)$$

エタノール濃度と拡散係数の関係を図-18 に示し、エタノール/水 2 成分でのエタノールの 20℃における分子拡散係数(D_m)を $1.15 \times 10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ として屈曲率(τ)を求めた。表-2 に拡散係数、屈曲率の平均値を示す。表-2 の値より、拡散係数の値は $10^{-6} \text{cm}^2/\text{s}$ のオーダーである。

6. E/Be スラリーを用いた模擬亀裂性岩盤への注入試験

(1) 注入試験装置

E/Be スラリーを実際に掘削損傷領域に注入する際にどの程度の亀裂にまで注入できるか、また、十分な充填密度で注入が可能であることを把握するために、図-19 に示す平行平板亀裂モデルを用いて注入試験を行った。試験に用いた装置は、小型モデル(流路長=6cm, 流路幅=1cm)と、長尺モデル(流路長=150cm, 流路幅=2cm)の 2 種類である。双方、2 枚の板で、所定厚さのスペーサを挟むことで、亀裂開

口幅を得ている。平行平板亀裂モデルの作成には、表面の凹凸が少ない材料として、下板をスチール、上板をアクリルとした。実際の岩盤における亀裂表面の粗度は大きいと考えられるが、本研究ではグラウトの浸透挙動のメカニズムを理論的に解明することを目的としており、より明確な実験条件を設定するため、亀裂表面の粗度が最小限で様な浸潤が可能となる材料を選定した。この装置によりグラウトの浸透状況がアクリルを通して装置上部より計測できる。

(2) ベントナイトの粒径と注入可能亀裂幅

小型モデルを用い、ベントナイトの種類と注入可能な亀裂開口幅との関係の把握を行った。予備試験として、0.1MPa, 0.3MPa の 2 種類の一定注入圧で注入する方法(以後、静的注入と呼ぶ)と、最大圧力が 0.3MPa で周波数が 7Hz で振動を与えて注入する方法(以下、動的注入とする)で、所定亀裂開口幅及び所定配合比での注入試験を行った。しかし、この 2 種類の注入方法でも注入状況に大きな変化が見られなかったため、すべて定圧条件(0.1MPa)で静的に注入試験を行い、亀裂開口幅と目詰まりと E/Be 配合比との関係を求めた。目詰まりをしているかどうかの判断は、注入孔口において視覚で目詰まりが生じているかを調べ、ベントナイトが亀裂内に注入できていないものを注入不可とした。E/Be

スラリーの配合比と注入可能亀裂開口幅及び回転粘度計で計測した粘性の関係を図-20に示す。回転粘度計での計測値は、図-8に示した値である。さらに、ベントナイトの D_{85} と低粘性での注入試験より得られた注入不可能亀裂開口幅との関係を表-3に示す。図-20において、種々の配合比に対して実験で目詰まりが生じた亀裂開口幅の関係から、ある亀裂開口幅にスラリーを注入する場合には図中に示す曲線より薄い濃度の配合比のスラリーを使用する必要がある。曲線より濃い濃度の配合比のスラリーでは目詰まりが生じ、この範囲を図-20において目詰まり領域とした。

図-20の比較として、普通ポルトランドセメント、超微粒子セメントがどのような亀裂へ注入可能かを求めた著者らの実験結果¹²⁾を図-21に示す。この実験では、超微粒子セメントに分散剤を添加した場合でも $50\mu\text{m}$ 以下の亀裂には注入できなかったが、図-20ではより微細な $20\mu\text{m}$ の亀裂に対してもエタノールによるベントナイトスラリーでは注入可能であることがわかる。さらに、 D_{85} と亀裂開口幅との関係から、用いるグラウト材料の D_{85} の2倍以下の亀裂開口幅には、まったく注入が出来ないことがわかった。

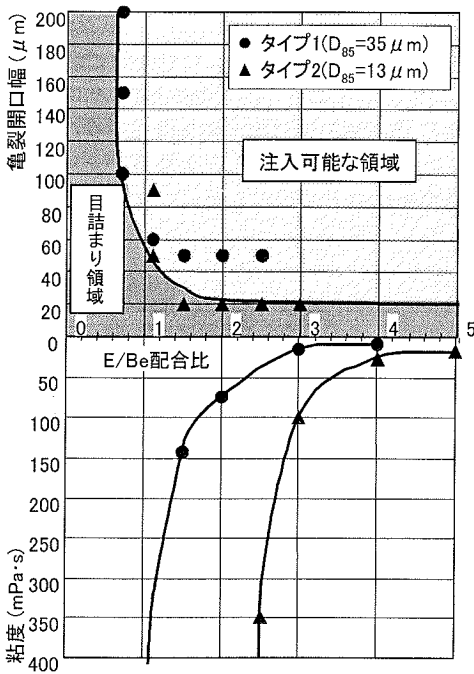


図-20 E/Be スラリーの配合比と注入可能亀裂開口幅及び回転粘度計での粘性の関係

7. E/Be スラリーの動的注入試験

E/Be スラリーが微細な岩盤の亀裂に注入が可能であることが判明した。注入した亀裂の透水性をより低くするためには、十分な充填密度で注入する必要がある。その方法として、セメントミルクを振動を与えながら注入する動的注入¹⁰⁾がE/Be スラリーに対しても可能であり、静的注入に対してどの程度効果があるかを実験によって確認した。

(1) 加振下における E/Be スラリーの粘性特性

セメントミルクに対する試験で有効であった動的注入と同様の最適な周波数を E/Be スラリーに対しても得るため、E/Be スラリーに対して加振下における粘度の測定を行い、周波数を変化させたときの見掛けの粘性の把握を行った。動的注入においてベントナイトスラリーの亀裂への注入に影響を与える因子として、主に振幅と周波数がある。従来の研究において、寺戸らはベントナイトスラリーの場合、振幅が大きいほど流動性がよくなり注入されやすいことを示した。一方、周波数と流動性の関係にはゆるやかなピークが見られ、周波数には注入に

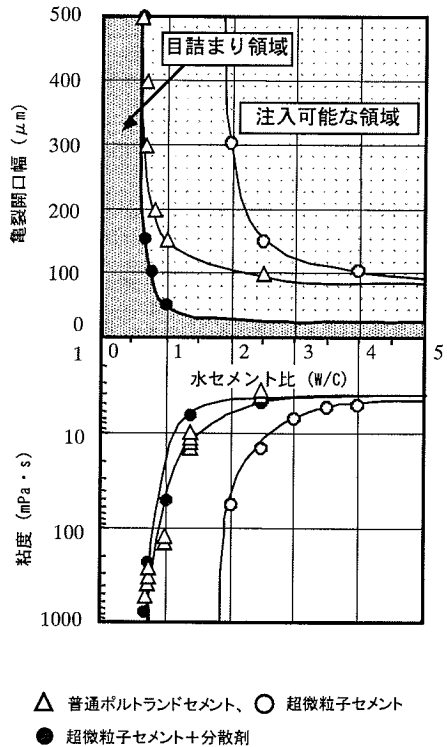


図-21 セメントミルクの配合比と注入可能亀裂開口幅及び回転粘度計での粘性の関係¹²⁾

最も効果的な範囲があることを示した²⁵⁾。この傾向は STRIPA Project でも報告されている⁸⁾。本項では、注入に最も効果的な周波数を把握するため、周波数を 0Hz から 5Hz, 7Hz, 10Hz, 20Hz の順に増加させ、それぞれにおいて回転粘度計での測定を行った。振動の設定は、発信機にて周波数を設定し、振動計を見ながら加速カップの速度を一定に調節して行った。試験装置図を 図-22 に示す。

試験は、タイプ 1 の E/Be=1.5/1、タイプ 2 の E/Be=2/1 の 2 ケースで行った。周波数と粘度の関係を 図-23 に示す。この結果、2 種類のスラリーとも 7Hz での粘性が最も低くなることがわかった。

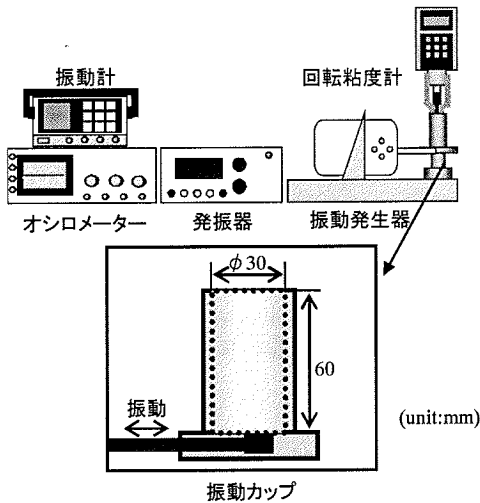


図-22 加振下粘性試験装置

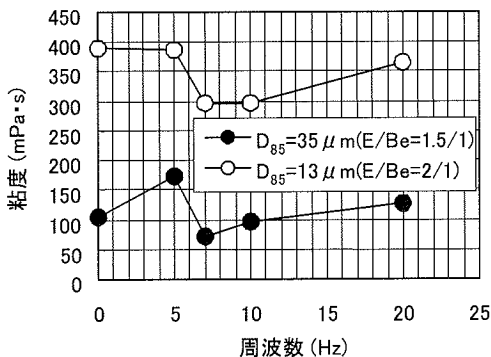


図-23 E/Be スラリーの周波数と粘度の関係

表-4 亀裂内での注入後 E/Be スラリー間隙比

e_d (動的)	e_s (静的)	e_d/e_s
3.48	6.07	0.57

(2) 動的注入工法における充填密度の増加効果

図-19 に示す長尺の亀裂モデル(流路幅 2cm, 流路長 150cm)に対しては、図-20 の条件を満足すると、静的でも動的でも E/Be スラリーの注入は可能であり、両注入方法ではそれほど差がなかった。しかし、連続的な注入は出来ず、開口部で目詰まりが生じるケース(ベントナイト:タイプ 1, E/Be=1.5/1, 亀裂開口幅 100 μm)において、静的注入とグラウト材料に 7Hz の振動を与えながら注入を行う動的注入との比較の試験を行った。注入試験装置は、油圧サーボ制御式注入ポンプを用い、注入圧力、周波数、振幅を一定に保持する圧力制御方式とした。静的注入試験においては、注入圧力を設定し、定圧で注入を行った。一方、動的注入試験では、注入圧力、周波数、振幅を注入タンクのピストンを振動させることで試験を行った。試験中の注入流量は注入タンクのピストンの変位を記録し、注入圧は注入タンクに設置した間隙水圧計で計測した。

ピストン変位より算出した、注入流量と累積注入量の経時変化を 図-24 に示す。さらに、注入後の亀裂内よりベントナイトをサンプリングし、その重量を浸潤長さで除した、単位浸潤長さ当りのベントナイト重量を測定し、さらにベントナイトの充填密度を用いて間隙比を算出した。表-4 に亀裂内への注入後の E/Be スラリーの間隙比を示す。静的注入と比較して動的注入は、目詰まりすることなく累積流量が経時的に増加している。さらに、動的注入では、より高密度で充填されていることがわかる。

ここで、図-14 に示したエタノール濃度 0% で作成したベントナイトスラリーの間隙比と固有透過度の関係を用いると、E/Be=1.5/1 で亀裂開口幅 100 μm、動的注入で得られた間隙比 3.48 では、エタノールが水に置換されて膨潤しなくても、注入層は

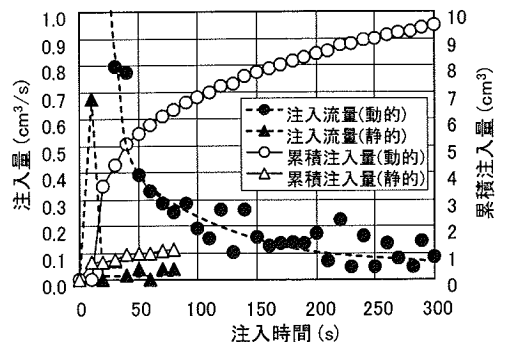


図-24 注入流量と累積注入量の経時変化

1.0×10^{-14} (cm²) 程度の固有透過度になると考えられる。この結果は、E/Be スラリーを動的に亀裂のなかに十分な充填密度で注入が可能であることを示している。ここで、掘削によって損傷を受けた領域の透水係数について考察すると、高レベル放射性廃棄物を地層処分できるに耐えうる品質に修復が可能であり、亀裂内に注入された E/Be スラリーが周囲からの水の浸入によって膨潤することを期待する必要がないと考えることができる。このことは、将来、塩水環境に地層処分しても E/Be スラリーが塩水によって膨潤しない場合においても、十分に低透水性が得られることになる。当然、淡水環境へのグラウトでは、E/Be スラリーが膨潤して一層透水性は低くなるため、十分な止水性及び修復技術としてのグラウト効果が期待できる。

8. 結論

本研究では、高レベル放射性廃棄物の地層処分課題となっている掘削損傷領域の恒久的な低透水性化及び修復技術として、ベントナイトのエタノールスラリーのグラウト材料としての可能性について検討した。その結果、粘性が低く、きわめて微細な亀裂まで十分な充填密度で注入が可能であることが判明したことから、修復技術として十分なグラウト効果が期待できる。本研究で得た知見をまとめると以下ようになる。

- (1) E/Be スラリーを地下水面にグラウト注入した場合、エタノールの拡散によって水/エタノール置換が生じることを把握した。また、得られた固有透過度は $1.0 \times 10^{-15} \sim 10^{-14}$ オーダー (cm²) と、きわめて低透水性であった。
- (2) 注入試験においては、超微粒子セメントに分散剤を添加することにより注入が可能となった亀裂開口幅 (50 μm) よりもさらに微細な亀裂開口幅 (20 μm) の範囲までベントナイトスラリーを注入することが可能であることを示した。この結果は、セメント系材料を用いた場合よりも微細な亀裂開口幅の範囲までグラウト材料の注入による透水性の改良が可能であり、十分なグラウト効果が期待できることを示している。
- (3) 動的注入により E/Be スラリーを高密度に充填することが可能であることを示した。

上述の本研究で得られた知見から、グラウト材料としてベントナイトスラリーが適用可能であり、その際の溶液にはエタノールを用い、注入工法に動的

注入を採用することでより大きな効果が得られると考えられる。

なお、ベントナイトによるグラウトは、天然材料であるため、恒久的な止水性が可能と考えられる。ここで対象としている高レベル放射性廃棄物の地層処分における埋め戻し時の止水では、坑道全体の動水勾配がきわめて小さくなるため、グラウト後のベントナイトの亀裂からの流亡現象や分散現象を検討する必要はない。しかし、一般の建設工事ではベントナイトは固結するものではないため、止水対象領域に高い動水勾配が作用する時には、亀裂の中から水流や浸透圧により流亡現象や分散現象が生じる可能性がある。したがって、今後はこの種の現象に対して耐久性も検討する必要がある。また、坑道においてベントナイトとエタノールを混合しスラリーを製造し施工に用いることを想定した場合、坑道の換気とともに設備、装置などの選定、施工計画、管理方法についての検討も今後の課題としてあげられる。

謝辞:本研究を行うにあたり、株式会社鴻池組土木本部平治氏には、動的注入試験に関してご指導を頂きました。日機装株式会社鈴木雅裕氏には、ベントナイトの粒度分布の測定に関してご協力を頂きました。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) Excavation Disturbed Zone Workshop : Designing the Excavation Disturbed Zone for a Nuclear Repository in Hard Rock, *International Conference on Deep Geological Disposal of Radioactive Waste*, Canada, 1996.
- 2) OECD/NEA Workshop : Excavation Response in Deep Radioactive Waste Repositories; *Implications for Engineering Design and Safety Performance*, OECD, 1989.
- 3) Sugihara, K., Matsui, H. and Sato, T. : In-situ Experiments on Rock Stress Condition and Excavation Disturbance in JNC's Geoscientific Research Program in Japan, *Proceedings of the International Workshop on the Rock Mechanics of Nuclear Waste Repositories*, U.S.A., pp.159-183, 1999.
- 4) Kanno, T. and Wakamatsu, H. : Experimental study on bentonite gel migration from a deposition hole, *Proc. 3rd International Conference Nuclear Fuel Reprocessing and Waste Management*, Sendai, pp.1005-1010, 1991.
- 5) 菅野 毅, 松本一浩 : ベントナイト緩衝材の流出特性評価 (I), 動力炉・核燃料開発事業団技術資料, PNC TN8410 97-313, 1997.

- 6) 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—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, pp. IV137-142, 1999.
- 7) Henn,R.W. : Practical Guide to Grouting of Underground Structures, *ASCE Press*, p.128, 1996.
- 8) Borgesson,L., Pusch,R., Fredrikson,A., Hokmark,H., Karnland,O. and Sanden,T. : Final Report of the Rock Sealing Project, *STRIPA Project Technical Report 91-34*, SKB, Stockholm, 1991.
- 9) 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—地層処分研究開発第2次取りまとめ—分冊2 地層処分の工学技術, JNC TN1400 99-022, p. V-68, 1999.
- 10) 平 治, 大橋 昭, 西浜讓二, 寺戸康隆, 高田 徹 : 動的グラウチングシステムの開発, 土木学会第 52 回年次学術講演会, III-A295, pp.590-591, 1997.
- 11) 内田善久, 蓮本清二, 平 治, 大橋 昭, 西垣 誠, 高田 徹 : ダム基礎グラウチングにおける動的注入工法の開発, 大ダム No.177, pp.108-115, 2001.
- 12) 西垣 誠, 小松 満, 山本浩志, 見掛信一郎 : 亀裂性岩盤におけるグラウトの浸透特性と目詰まり特性に関する研究, 土木学会論文集 No.715/III-60, pp.311-321, 2002.
- 13) 浅田素之, 石川 明, 川口正人, 堀内澄夫 : エタノール/ベントナイトスラリー混合土の透水試験, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp.1557-1558, 2000.
- 14) 堀内澄夫, 浅田素之 : エタノール/ベントナイトスラリーの性質と界面電気現象, 第 36 回地盤工学学会研究発表会, pp.1269-1270, 2001.
- 15) 浅田素之, 石川 明, 堀内澄夫 : エタノール/ベントナイトスラリー止水壁モデル実験(その1), 第 36 回地盤工学学会研究発表会, pp.1265-1266, 2001.
- 16) 石川 明, 浅田素之, 堀内澄夫 : エタノール/ベントナイトスラリー止水壁モデル実験(その2), 第 36 回地盤工学学会研究発表会, pp.1267-1268, 2001.
- 17) 浅田素之, 堀内澄夫 : 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, 土木学会第 56 回年次学術講演会, CS1-015, 2001.
- 18) 石川 明, 浅田素之, 川口正人, 堀内澄夫 : エタノール/ベントナイトスラリー止水壁のエタノール濃度拡散の評価, 第 35 回地盤工学学会研究発表会, pp.1521-1522, 2000.
- 19) 田中益弘, 笹倉 剛, 藤沢 理, 岡本道孝 : Na 型ベントナイトの塩水化による透水及び膨潤特性の変化, 土木学会第 55 回年次学術講演会, CS-198, 2000.
- 20) 藤田朝雄, 千々松正和, 鈴木英明, 松本一浩 : 緩衝材の水理特性, 核燃料サイクル開発機構技術報告書, TW8438 99-001, No.5, pp.51-58, 1999.
- 21) 日本化学会編 : 化学便覧 基礎編 II, 1993.
- 22) Nishigaki,M., Komatsu.M. and Man-il,KIM : Experimental study on the measurement of the effective porosity of a porous media, 日本地下水学会 2002 年秋季講演会講演要旨, pp.130-133, 2002.
- 23) 西垣 誠, 小松 満 : 講座「移流分散解析入門 5. 物質移動解析に必要な物性」, 土と基礎, 地盤工学学会誌, Vol.50, No.12 Ser.No.539, pp.80-85, 2002.
- 24) 長倉三郎, 井口洋夫, 江沢 洋, 岩村 秀, 佐藤文隆, 久保亮五編集:理化学辞典第5版, 岩波書店, 1998.
- 25) 寺戸康隆, 劉 維徳, 平 治, 西浜讓二 : 微小模擬亀裂の静的・動的注入条件とグラウタピリティの関係, 第 29 回土質工学研究発表会, pp.2125-2128, 1994.

(2003. 6. 16 受付)

THE STUDY ON BENTONITE SLURRY GROUT WITH ETHANOL FOR FRACTURED ROCK MASSES

Makoto NISHIGAKI, Mitsuru KOMATSU, Shin-ichiro MIKAKE,
Hiroshi TAOKA and Tomohiro NAKASHIMA

The purpose of this paper is to propose the grouting material and method for fractured rock masses. So experimental study is executed in order to grasp that the properties of grouting material is stable and impermeable. In this study, experiments of hydraulic test and grouting injection test are performed on bentonite slurry mixes in the laboratory. From the results of the tests, a mixer of ethanol and bentonite is found to be very suitable for a grouting material. Also, dynamic grouting method is able to inject the concentrated bentonite slurry in the fractured aperture.