

岩盤割れ目系における粘土懸濁液グラウトの 充填性及び止水性に関する実験的研究

伊藤 洋¹・坂口雄彦²・西山勝栄³・藤原 愛⁴

¹正会員 工博 榑熊谷組技術研究所 土木系研究開発部 課長 (〒300-22 茨城県つくば市鬼ヶ窪 1043)

²正会員 榑熊谷組技術研究所 土木系研究開発部 係長 (同上)

³正会員 榑熊谷組技術研究所 土木系研究開発部 (同上)

⁴理修 (財)原子力環境整備センター 研究第二部 次長 (〒105 東京都港区虎ノ門 2-8-10)

岩盤地下空間の有効利用に係わる技術的課題の中で、岩盤サイトの止水性の改善に関する問題は、本邦の岩盤に割れ目が多く透水性が大きいことも相まって最重要課題の一つとなっており、有効な対策工法の確立が強く望まれている。本論では、低濃度の粘土懸濁液を、岩盤割れ目系に長時間浸透させることにより、徐々に流路を目詰まりさせて閉塞・止水させる方法を提示し、2種類の大型の岩石供試体を用いたグラウト実験及びトレーサ注入試験によりその充填性及び止水効果を確認した。また、濁質拘留モデルを用いた数値シミュレーションにより割れ目の目詰まり・閉塞過程の評価を行なった。

Key Words : rock mass, permeability, grouting, laboratory test, groundwater, open-crack

1. はじめに

岩盤地下空間の利用形態は多岐にわたり、本邦でも石油地下備蓄¹⁾を始めとして、LPG貯蔵²⁾、放射性廃棄物処分³⁾、圧縮空気貯蔵⁴⁾等の主としてエネルギー関連施設としての有効利用が推進されつつある。このような地下空間における技術的課題の中でも、地下水制御は施工時の漏水、地下水位低下といった従来の地下水問題のみならず、石油・ガス等の貯蔵物質の水封機能や漏洩防止機能、放射性核種の移行抑制機能など空間機能に係わるような様々な観点からも重要視されている。特に、本邦の岩盤は割れ目が多く、透水性が大きいため、岩盤の止水性を改善してより安全性の大きいものとするのが不可欠となることも多いと考えられる。しかしながら、通常実施されている既存のグラウト注入技術は、概して施工時の湧水対策を目的とし、破砕帯のような大きな水みちを短時間に止水することには優れているが、広範囲にわたる岩盤地山の割れ目系における止水性改善には不向きである⁵⁾。本論で述べる工法の原理は、割れ目系に低濃度の粘土粒子懸濁液を比較的低注入圧力で長時間浸透させることにより、徐々に流路を目詰まりさせて閉塞・止水しようとするものである。つまり、通常(従来)のグラウト材とは異なり、濃度が極端に小さく、自硬性の無い材料を長期間注入することにより、ある種の目詰まり効果で広範囲の割れ目系岩盤の止水性改善を実現しようとするものである。

これは、宮永らによって提示され実際の岩盤空洞にも適用されている⁶⁾。この種の基礎的研究は、岩盤の目詰まりに関する理論に関しては、佐藤・伊藤らの研究⁷⁾が見られるほか、工法に関しては前述の宮永らの研究、小島らの研究⁸⁾、伊藤らの研究^{9),10)}がある。しかし、これらの研究は小型の円柱供試体あるいは疑似岩盤モデルを用いていることから、前者の場合は本工法で対象とするスケールとは大きく異なる。後者の場合は粘土粒子による閉塞過程が忠実に再現できないといった問題がある。一方、現場実験では空洞内漏水量の経時変化のみでの評価となっている¹¹⁾。したがって、ここで対象とする広範囲の割れ目系に対する本工法の充填効果及びその閉塞メカニズムの解明には至っていない。

本論では、このような背景にあつて、まず岩盤の主流路となる割れ目系空隙を広範囲に渡って閉塞・止水するための新しいグラウト工法の概念を示し、これまでに行つた小型供試体を用いた基礎試験の概要を述べる。つぎに、本工法の理論的なモデルの検討を行った上で、本工法の有効性を評価・検討することを目的として鉛直及び水平の割れ目を有する大型の実岩石供試体を用いたグラウト試験及びトレーサ試験を実施した。その結果、いずれの浸透方向においても全断面においてほぼ均一な充填がなされ、漏水量は長期的に1/1000以下に低減し、トレーサの移行抑制効果も確認されたのでここに報告する。

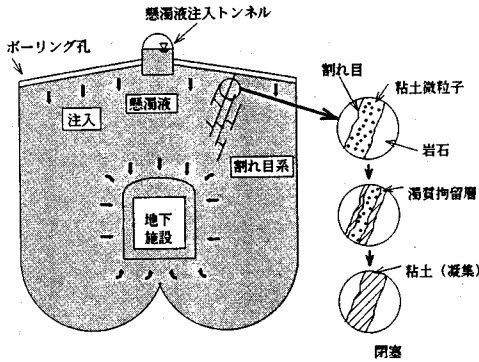


図-1 懸濁液グラウト工法の概念

2. 粘土懸濁液グラウト工法の概念¹²⁾

図-1は、亀裂性岩盤の開口割れ目における本グラウト方法の概念を示したものである。まず、地下空洞の上部に注入トンネルを設け、注入トンネル内に粘土粒子を浮遊させた数千ppm程度の低濃度の懸濁液(水の粘性と同程度)を湛水し、ボーリング孔等を通して岩盤地山中に長時間(数ヶ月~数十ヶ月)低注入圧力で浸透させる。浸透した懸濁液は地下空洞に向かう浸透流により輸送されることになる。こういった懸濁液の浸透過程において、粘土粒子は割れ目壁面に付着し、拘留層を形成する。拘留層は徐々に拡大し、最終的には同図に示したように割れ目空隙を閉塞することになる。また、グラウト範囲は上部注入トンネルから空洞までの図中に示したような浸透範囲に対応するものと考えられる。

3. 基礎実験の経緯^{9), 10), 13)}

ここでは、本工法の基本的機能を確認することを目的に実施した基礎実験の経緯及び成果の概要について述べる。実験に用いた供試体は、直径10cm、長さ15cm~20cmのコンクリート円柱であり、中央部に単一割れ目を有している(平均割れ目幅:0.002mm~1.02mm)。これに、初期濃度5000ppmの粘土懸濁液を動水勾配 $i=6.5\sim 47$ で約12~56日間浸透させ、その間の流量の経時変化を測定した。図-2に結果の一例を示すが、実験の結果、浸透流量はおおよそ $1/5000\sim 1/2$ に減少し、基本的には割れ目壁面への粘土粒子の付着・拘留による閉塞・止水グラウトが可能であることが確認できた。ただ、これらの実験における割れ目長さは15cm~20cm程度と短く、本工法が広域にわたるグラウト改良を目的とするものであることを考えると、実スケールを対象とした少なくとも数m~数十

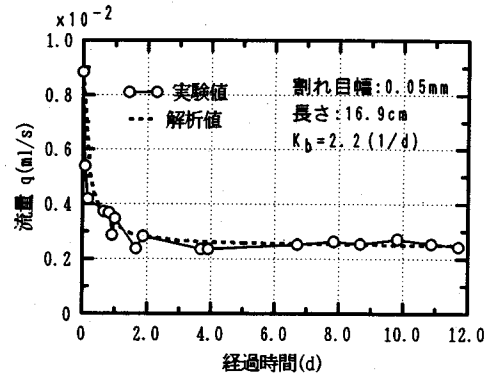


図-2 基礎実験結果の一例

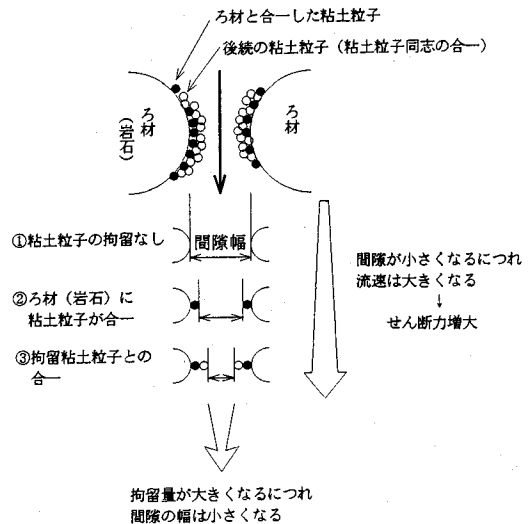


図-3 ろ材間隙内への固形微粒子拘留過程の概念

mでの効果を確認する必要がある。そこで、ここでは実スケールに近い規模での実験及び解析により本工法の効果の検討を行うこととする。

4. 理論モデルの検討

割れ目系への懸濁液注入による閉塞・止水過程を理論的に評価することを目的に、粘土粒子が割れ目壁面に拘留され、空隙が閉塞されるメカニズムをろ過理論を基に明らかにし、数学モデルを構築して実験値との比較検討を行った上で、数値シミュレーションによるケーススタディを実施する。

(1) 拘留メカニズムと評価モデル

岩盤割れ目内への粘土粒子の拘留は、ろ材(岩石)間隙内への懸濁物質の捕捉・拘留を狙った深層ろ過(清澄ろ

過)のメカニズムを基本として検討できる。図-3は、深層ろ過のろ材間隙内への固形微粒子滞留過程を概念的に示したものである。一般に、数〜数十 μm の微粒子がそれより十分大きい間隙空間に流入して拘留されるためには、1)固形微粒子のろ材表面への輸送(輸送過程)と2)ろ材表面への付着(付着過程)の2段階を経る必要がある。1)の輸送過程は、ブラウン運動、水流による接触、慣性衝突、沈殿等、2)の付着過程では、接着(化学的付着、物理的付着)、凝集等の種々の支配因子による影響を受けることになる。こういった深層ろ過の拘留モデルは、現在一般に岩崎(1937)により導かれた基礎式(1),(2)で表されている^{14),15)}。

$$\frac{\partial C}{\partial z} = -\lambda C \quad (1)$$

$$\frac{\partial C}{\partial z} + 1/V_s \cdot \partial q / \partial t = 0 \quad (2)$$

ここに、 C ：懸濁液の濃度、 λ ：ろ過係数、 z ：座標、 q ：ろ層の単位体積中に拘留された懸濁粒子量、 V_s ：ろ過速度、である。式(1)は、ろ材間隙における懸濁粒子の拘留が、間隙内の懸濁物質の局所濃度 C の1次反応であるという速度式で、その反応速度係数が λ となる。また、式(2)は、間隙内の流体濃度の減少が間隙内に拘留された粒子の量に等しいという連続方程式である。

岩盤割れ目内への粘土粒子の拘留にこのろ過モデルを応用するに当たって、評価対象を岩盤地山の開口割れ目系とし、平行平板モデルを適用して、図-4に示すような単一割れ目系モデルについて以下に基礎式を誘導する。

まず、懸濁物質の割れ目内における輸送は、溶質におけるそれと同様に考えられるので、その物質保存式は以下のように書ける¹⁶⁾。

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{\partial (nC)}{\partial t} = \frac{\partial \{D_h \frac{\partial (nC)}{\partial z}\}}{\partial z} - \frac{\partial (v_n C)}{\partial z} \quad (3)$$

ここに、 S ：割れ目壁面に拘留された懸濁物質層の体積濃度(流路閉塞固相体積濃度)、 $S = V_b / V_0$ (V_b ：拘留された懸濁物質層の体積、 V_0 ：初期の総間隙率)、 n ：間隙率 ($n = V_1 / V_0$ 、 V_1 ：液相体積)、 C ：懸濁液濃度 ($C = V_m / V_1$ 、 V_m ：懸濁物質体積)、 D_h ：分散係数、 v ：浸透移流速度(実流速)、 t ：時間、 z ：座標、である。

ここで、前述の式(1)及び(2)で示した深層(清澄)ろ過モデルの基礎式を導入すると、式(3)の第一項は、

$$\frac{\partial S}{\partial t} = K_b' v_n C, \quad S \approx q, \quad V_s = v_n \quad (4)$$

となる¹⁷⁾。ここで、ろ過の場合と定義は異なるが、 S と

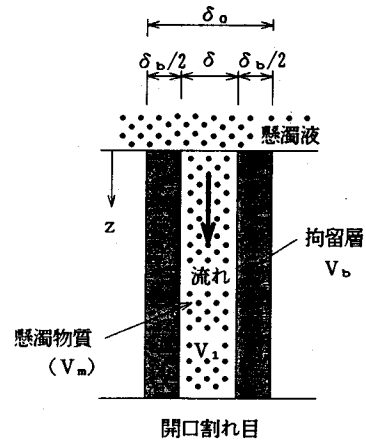


図-4 単一割れ目系モデル

q は同じ意味である。また、 K_b' は拘留係数であり、ろ過におけるろ過係数 λ と同義である。拘留係数には、前述の粘土粒子の割れ目内への拘留要因となる沈殿、接着、凝集等が包含されていることになる。

さらに、同式において、懸濁液濃度の変化が主に割れ目壁面への拘留によって生じると仮定すれば、式(3)の右辺第一項の分散項は無視され、次式のようになる。

$$K_b' v_n C + \frac{\partial (nC)}{\partial t} = -\frac{\partial (v_n C)}{\partial z} \quad (5)$$

つぎに、この時の流れの場合、すなわち浸透流の基礎式は、その非定常性が式(5)の間隙率の変化に伴う透水性の時間依存性により支配されるものとする、次式のように書ける。

$$\frac{\partial (k \cdot \partial h / \partial z)}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

$$k = \beta f(n) \delta_0'^2 \quad (7)$$

ここに、 k ：透水係数、 h ：ピエゾ水頭、 δ_0' ：代表間隙寸法、 β ：定数、 $f(n)$ ：間隙率 n の関数、である。

したがって、岩盤の単一割れ目系を対象とした懸濁液注入に伴う閉塞・止水過程は式(5)～(7)をカップリングさせて、 C 、 n 、 h を設定された境界条件下で解けばよいこととなる。

つぎに、今回の試験結果の評価に対応させるために、割れ目を単一の平行平板モデルと仮定した場合の基礎式を示す¹⁸⁾。まず、 S 、 n 及び有効割れ目幅 δ は、以下のように表せる。ここで、 δ は式(4)を積分して $t=0$ ； $\delta = \delta_0$ より求める。

$$S = V_b / V_0 \approx \delta_b / \delta_0,$$

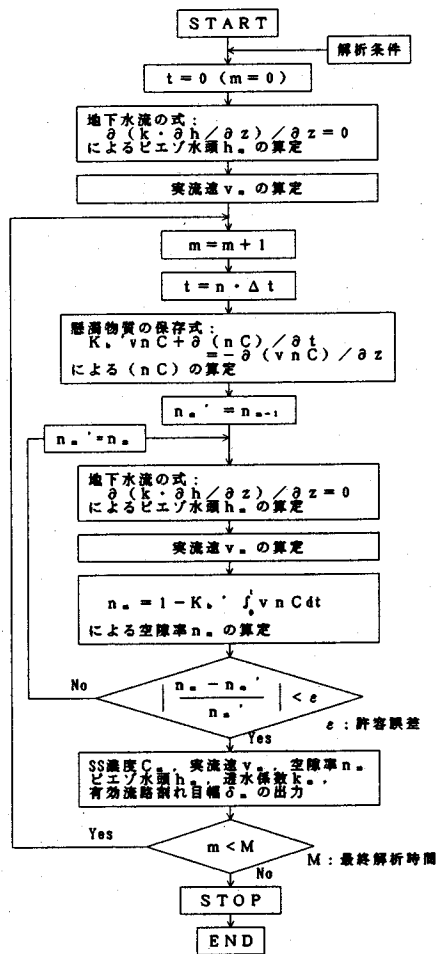


図-5 解析フロー

$$n = V_1 / V_0 \approx \delta / \delta_0,$$

$$\delta = \delta_0 (1 - K_b' \int_0^t v n C dt) \quad (8)$$

ここに、 δ_b : 壁面に拘留された懸濁物質層の厚さ (流路閉塞固相厚さ)、 δ_0 : 初期の割れ目幅、である。

また、透水係数は、平行平板の粘性流の式より、

$$k = g \delta^2 / 12 \nu = g / 12 \nu (\delta / \delta_0)^2 \delta_0^2 = \beta n^2 \delta_0^2, \quad \beta = g / 12 \nu \quad (9)$$

となり、流路空隙の閉塞過程に伴う変化が間隙率 n の関数として表されている。ここで、 ν : 懸濁液の動粘性係数である。

また、拘留係数 K_b' は、前述の3基礎実験の供試体の

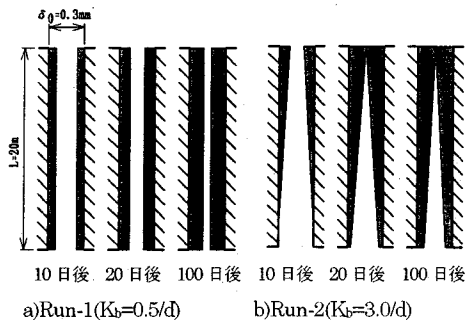


図-6 濁質拘留層の形成過程

ように流路長 (座標) が短い場合に、その間の閉塞が平均的に同一であると仮定して導いた理論解で用いた閉塞係数 K_b により表すと、以下のように同定される。

$$K_b' = K_b \{ \delta_0 / (C q t) \} = \text{const.} \quad (10)$$

ここに、 q_t : $t=0$ の時の流量、である。

結局、割れ目の閉塞過程は、図-5に示すフローに従って、式(5),(6),(8),(9)を連成させて、差分法により数値シミュレーションされる。

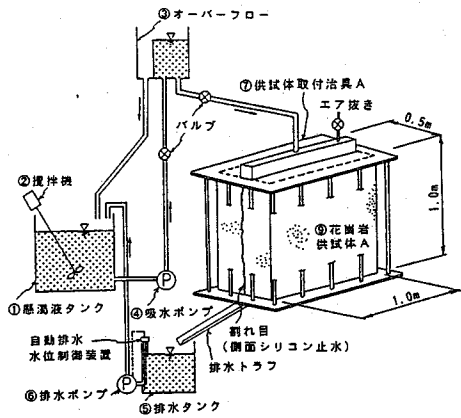
(2) ケーススタディ

まず、本シミュレーションの妥当性を検証するために基礎実験結果と本解析を比較した。前述の図-2には、実験における浸透流量の結果と併せて解析結果を示しているが、両者は良く一致している。ここでは一例を示したにすぎないが、全てのケースにおいて、適当な閉塞係数を同定すれば良い一致をみた^{10,19)}。その結果、基礎実験で得られた閉塞係数は、 $K_b = 0.03 \sim 6.3/d$ となった。

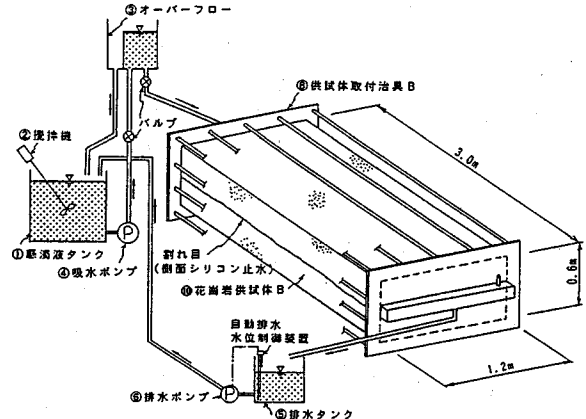
つぎに、上記解析手法を用いて実大スケールへの適用性を解析的に検討するためのケーススタディを行う。解析条件は、割れ目幅 0.3mm、長さ 20mm、平均動水勾配を $i = 1/100$ とし、閉塞係数を $K_b = 0.5, 3.0$ と変えた2ケースを実施する。図-6は、解析により得られた濁質拘留層の形成過程を示したものである。 K_b の違いにより浸透方向の拘留層の形成形態に変化が認められる。つまり、 K_b が小さいと割れ目内に平均して拘留層が形成されるが、それが大きいと注入口付近で閉塞する傾向をもつことが窺える。以上、本解析手法により閉塞過程の定性的・定量的な表現が可能であると考えられる。

5. 大型岩石供試体を用いた実験

ここでは、実際の岩盤割れ目に対する本工法の有用性を確認することを目的に、数 m 規模の花崗岩供試体を用



a) 試験装置A (鉛直浸透)



b) 試験装置B (水平浸透)

図-7 グラウト試験装置

いたグラウト試験を実施した。また、グラウト試験終了後、約半年間放置した供試体に対して、グラウト充填状況を検討するためのトレーサ注入試験を実施した。

(1) 試験装置と方法

a) グラウト試験

試験装置の概略を、図-7に示す。装置は、a)鉛直浸透試験装置Aと、b)水平浸透試験装置Bの2つに分かれている。供試体は花崗岩(茨城県稲田産)を用い、中央部には人工的に割れ目を発生させ、側面をシリコン樹脂にて止水した。各供試体の寸法は、装置Aでは1.0m×1.0m×0.5m(供試体A)、装置Bでは、3.0m×1.2m×0.6m(供試体B)である。

試験の手順を以下に示す。まず、オーバーフローを所定の高さ(A:水頭差 $\Delta H=2.0m$, B: $\Delta H=1.0m$)に設定した後、割れ目部周辺を十分飽和させること、及び割れ目面の化学的活性を緩和することを目的に43日間水道水を通水した。つぎに、水道水の通水終了後、一旦流入側・

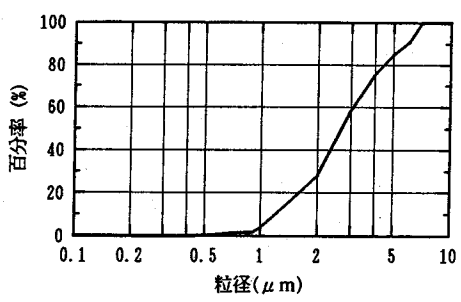
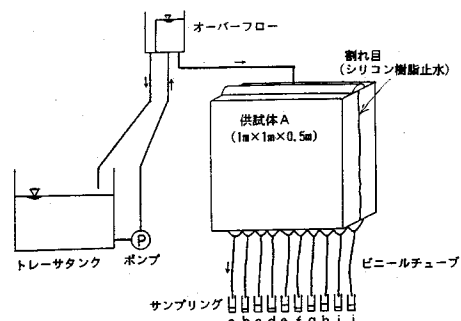
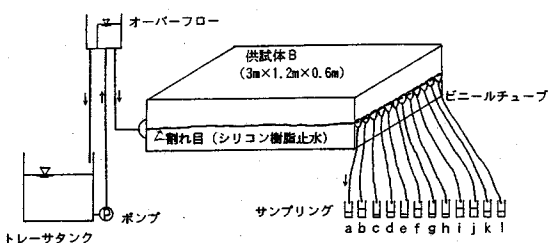


図-8 グラウト材の粒径分布



a) 試験装置A (鉛直浸透)



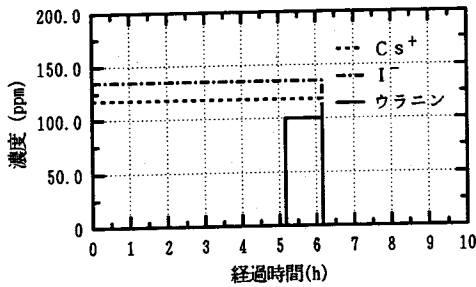
b) 試験装置B (水平浸透)

図-9 トレーサ注入試験装置

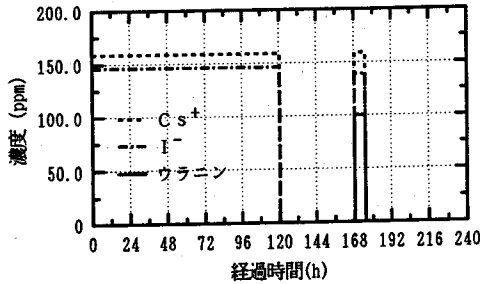
流出側を閉鎖し、割れ目内を満水に保った状態で、所定の濃度(5000ppm)の懸濁液を作製し注入を開始した。注入期間は111日間としたが、A、B共に漏水量が1/1000以下に低減したことが確認された時点(76日経過後)で、圧力変化に対するグラウトの安定性を検討するため、水頭差 ΔH をAは2.0mから2.5mに、Bは1.0mから2.0mに増大させた。また、注入期間中は流量、SS濃度、粒径分布、pH、水温、溶存酸素濃度について計測を行なった。

使用した懸濁液の材料は、小型供試体を用いた予備実験(懸濁液材料3種の比較実験)の結果¹⁸⁾から分散性、充填性、安定性の面で適当と認められた火山灰土(武蔵野ローム:埼玉県大宮市産)とし、採取した試料を乾燥し、所定の粒度(最大粒径10 μm 、平均粒径2 μm)に粉砕・調整した。図-8は粉砕・調整後の試料の粒度分布である。

懸濁液の初期濃度は、前述3.の基礎実験の結果から約5000ppmとした。この程度の濃度では、ほぼ水と同程度



a) 鉛直浸透 (供試体A)



b) 水平浸透 (供試体B)

図-10 注入トレーサ濃度の経時変化

の粘性である。また、本試験装置では長期間にわたる注入のため、タンク内の濃度が減少した10日経過以降は、注入懸濁液濃度が1000ppm程度以下に低下したことが確認された時点でタンクの半分から全量近くを5000ppmの懸濁液と置換することとした。

b) トレーサ注入試験

まず、試験を実施するに当たってトレーサ液の流出位置を明確にするために、図-9に示すように流出液を10cmごとに分別サンプリングできるようにした。注入したトレーサは、①ヨウ素イオン(非吸着性)、②セシウムイオン(吸着性)、③ウラン(非吸着性)の3種である。ここで、①は、流出液濃度の破過曲線から流路ごとの平均流速を求めること、②は、①との比較により流路ごとの到達時間比を算定すること、割れ目面開放後の拘留粘土の濃度分布を測定することにより流路・流域を明確にすることを目的に注入する。また、③は、割れ目面開放時の流路・流域の目視観察・撮影のために注入終了直前に添加する。注入は、所定の水頭差 ΔH (A:1.5m, B:0.3m)に設定されたオーバーフロー装置により、Aは6時間、Bは173時間にわたって実施した。図-10は、A、Bの各注入トレーサ濃度の経時変化を示したものである。ここで、Bの場合は、ヨウ素イオン濃度の立ち上がりによる実流速の測定に重点を置くこととし、トレーサ注入開始後5日間(120時間)経過した時点で一旦水道水に換え、2日後に再度約5時間注入し、2回の経時変化から実流速を算定することとした。

表-1 グラウト試験条件及び結果

試験体		供試体 A (鉛直浸透)	供試体 B (水平浸透)
試験条件	試験体長さ L(m)	1.0	3.0
	試験体厚さ h(m)	0.5	0.6
	試験体幅 B(m)	1.0	1.2
	平均表面割れ目幅 δ (mm)	0.606	0.619
	設定水頭差 ΔH (m)	2.0 → 2.5 *	1.0 → 2.0 *
	動水勾配 i	2.0 → 2.5 *	1/3 → 2/3 *
漏水量	初期 q_0 (ml/s)	23.09	23.48
	70日経過時 q_{70} (ml/s)	1.41×10^{-2}	8.33×10^{-3}
	80日経過時 q_{80} (ml/s)	1.98×10^{-2}	1.92×10^{-1}
	110日経過時 q_{110} (ml/s)	1.87×10^{-2}	4.13×10^{-2}
	流量低減比		
70日経過時 q_{70}/q_0	6.10×10^{-4}	3.55×10^{-4}	
80日経過時 q_{80}/q_0	8.58×10^{-4}	8.18×10^{-3}	
110日経過時 q_{110}/q_0	8.10×10^{-4}	1.76×10^{-3}	
付帯条件	水温 (°C)	10.2 ~ 29.7	11.4 ~ 29.3
	pH	6.86 ~ 8.08	6.81 ~ 8.10
	溶存酸素濃度 DO(mg/l)	5.75 ~ 12.01	5.53 ~ 12.03
	SS濃度 流入側 (ppm)	52 ~ 9600	20 ~ 6250
	SS濃度 流出側 (ppm)	8 ~ 6000	14 ~ 2330

*: 76日経過時に水頭差変更

いずれのケースも、注入期間中には、各ビニールチューブごとの流出量に対応した時間間隔で個別にサンプリングし、水温、流量とヨウ素イオン濃度及びセシウムイオン濃度をイオンクロマト及び原子吸光で測定した。

また、トレーサ注入後、直ちに割れ目面を開放して粘土粒子の付着・拘留状況を目視観察・写真撮影し、続いて供試体全体を暗幕で覆い、表面に付着したウランに紫外線を照射することによりトレーサ液の流域・浸透範囲を観察・写真撮影した。さらに、割れ目面全面を供試体Aは10cm×10cmに100分割、供試体Bは10cm×20cmに180分割して各区画の付着物質をサンプリングし、純水に浸漬して強制攪拌による脱着を行った後ろ過水のセシウムイオン濃度を測定した。

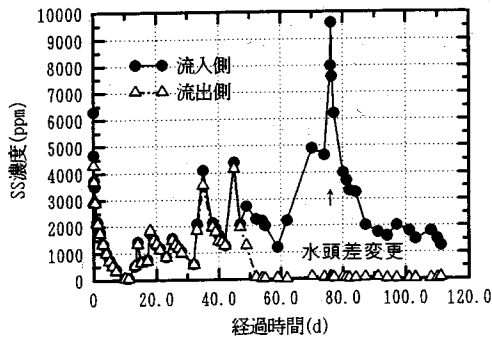
(2) 試験結果と考察

代表的な試験結果を示し検討を加える。また、数学モデルを用いた数値シミュレーションを実施し、試験結果と比較・検討する。

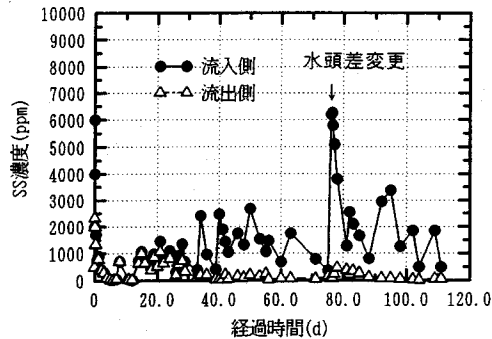
a) 付帯条件

まず、表-1は供試体A、B 2 ケースのグラウト試験条件及び結果をまとめて示したものである。水温の変動範囲は、Aでは10.2°C~29.7°C、Bでは11.4°C~29.3°Cの範囲にあった。水温は、我が国の地下水温と大差ないものとなっている。pHの変動範囲は、Aでは6.86~8.08、Bでは6.81~8.10とほぼ中性の範囲であり、日本の地下水のpH(中性~弱アルカリ性)と大差なかった。

また、懸濁液の溶存酸素濃度は、Aでは6.03~10.78mg/l、Bでは5.53~10.34mg/lの範囲にあった。本試験における水温の範囲10°C~30°Cにおける飽和溶存酸素量は7.5~10.9mg/l程度であるので¹⁹⁾、ほぼ飽和に近いと考えられる。水温の急激な上昇に伴い過飽和の溶存

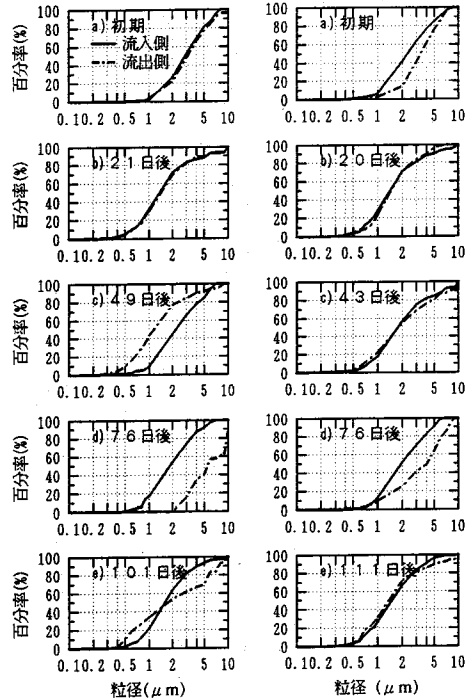


a) 鉛直浸透 (供試体A)



b) 水平浸透 (供試体B)

図-11 SS濃度の経時変化



1)鉛直浸透 (供試体A)

2)水平浸透 (供試体B)

図-12 流入・流出懸濁液粒径分布の経時変化

酸素が析出して気泡が発生することによる目詰まりが起る可能性もあるが、今回の試験期間中には急激な温度変化や溶存酸素濃度の急減は認められなかった。

つぎに、図-11は、a)供試体A(鉛直浸透)、b)供試体B(水平浸透)各々の注入懸濁液(図中●印)及び流出液(△印)のSS濃度の経時変化を示したものである。

まず、流入側の懸濁液濃度の変化について見てみると、A、Bいずれも注入時間の経過とともに濃度は低下し、懸濁液を置換することにより一時的に濃度は上昇するものの、やがてまた低下するといった傾向にある。これは、懸濁液材料が装置の各部で沈殿したことと、割れ目内に拘留されたことなどによるものと考えられる。

一方、流出側のSS濃度は、初期にはいずれも流入側に追従した値を示しているが、鉛直浸透のAでは47日を過ぎたあたりから急激に、水平浸透のBでは29日頃から徐々に注入懸濁液濃度の変化に関わりなく低下している。これは、粒子の割れ目壁面への付着・拘留により流路幅が狭くなり、懸濁物質の機械的な拘留が生じて、ある種の過現象が起こったものと考えられる。

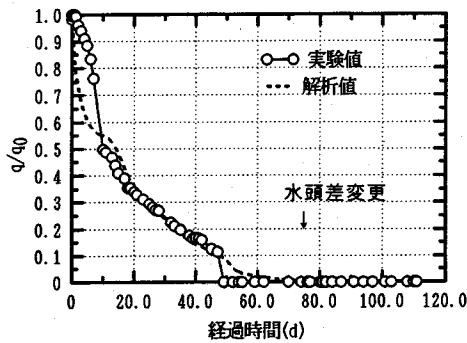
また、水頭差を上昇させた76日経過直後に、流入側の懸濁液濃度が急増しているが、これは、水頭差を増大させたために、オーバーフロータンクや配管内に付着していた粘土粒子がタンク内に流れ出したためと考えられる。

一方、流出懸濁液の濃度上昇は比較的小さくなっているが、これは、割れ目壁面に付着・拘留した粘土層が、流速の増加に伴うせん断力の増大に対する安定性に優れていることを裏付けているものと考えられる。

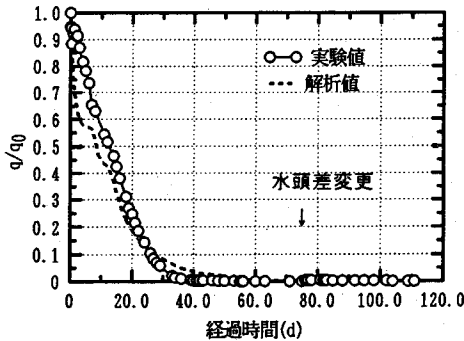
図-12は、1)鉛直浸透(供試体A)と2)水平浸透(供試体B)の場合の代表的な流入・流出懸濁液の粒度分布測定結果を示したものである。

まず、Aの場合を見てみると、a)初期からb)21日後まではまだ流路閉塞がさほど進行しておらず、流量も多かったため、流入、流出両者の粒度分布に差はなく、流入した懸濁液がほぼそのままの状態流出している様子が窺える。c)49日後になると比較的大きい粒子が拘留され、相対的に流出側の平均粒径が小さくなっていることがわかる。この時点で漏水量は急減している(後述図-14参照)。つぎに、水頭差を変化させたd)76日後では、逆に流出側の粒子の平均粒径が増大している様子が窺える。e)101日後には再び流入側と流出側の粒度分布に差がなくなっている。

一方、Bの場合には、水頭差を変化させたd)76日後以降にはAの場合と同様の傾向を示しているが、それ以外には注入期間中大きな変化はなく、流入側、流出側に顕著な差は認められなかった。

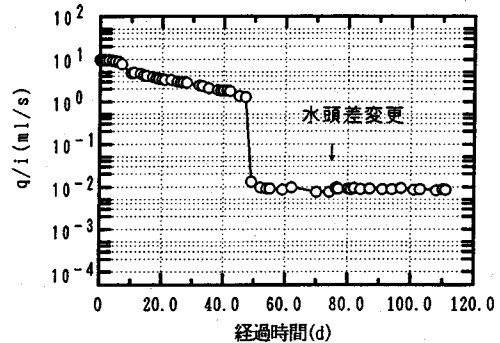


a) 鉛直浸透 (供試体A)

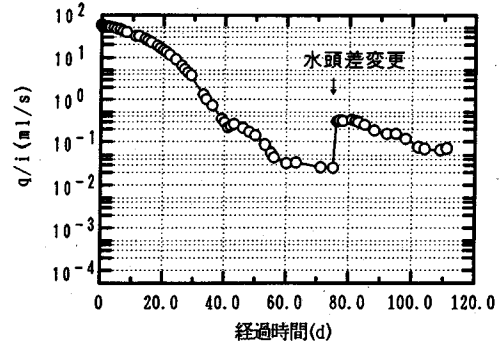


b) 水平浸透 (供試体B)

図-13 流量低減比 q/q_0 の経時変化



a) 鉛直浸透 (供試体A)



b) 水平浸透 (供試体B)

図-14 q/i の経時変化

b) 漏水量

図-13に、A(鉛直浸透)及びB(水平浸透)における流量低減比 q/q_0 (ml/s) の経時変化を示す。同図には、後述する解析値も併せて示した。

流量は、A、B共に注入開始後より徐々に減少し、前述の表-1にも示したように60日経過時点ではいずれも1000分の1以下に低減しているが、それまでのA、Bの流量低減過程に若干異なる傾向が認められる。そこで、流量低減率を詳細に検討するために、A、B両者の漏水量と動水勾配の比 q/i (ml/s) の経時変化を対数軸で表したものが、図-14である。

これより、まず、設定水頭差を変更した76日までの流量低減傾向を見てみると、水平浸透のBの場合には注入期間を通じてほぼ一様に流量が減少しているのに対し、鉛直浸透のAではBに比較して初期の流量低減傾向がなだらかであり、49日経過時に急減していることがわかる。この原因としては、流路閉塞が進行している段階においては、水平浸透の場合は、少なくとも粘土粒子の割れ目下面への付着・沈殿・凝集が徐々に進行すると考えられるのに対し、鉛直浸透の場合には、局所的な流速の増大によりせん断力が増大するため、粒子の付着力よりせん断力が大きくなると途中で剥離を生じる可能性があることなどが考えられる。また、49日経過時に流量が急減したのは、

これまでに割れ目壁面に拘留・蓄積された粘土層に加え、懸濁液材料を追加投入したことにより高濃度の懸濁液が注入されたこと(前述:図-11参照)によって、ある種の機械的な濁質閉塞が瞬時に生じたものと考えられる。このことは、前述の流入・流出懸濁物質の粒度分布傾向において(図-12参照)、水平の場合には鉛直の場合の49日経過時点でみられたような、ある粒径以上の粒子が急激にトラップされたような形跡がみられないことから窺える。

つぎに、流路閉塞がほぼ完了した段階と考えられる76日経過時で設定水頭差を上昇させた時の q/i の状況に目を転じると、その直前の q/i に対しAが約1.3倍と若干増加しているが、Bでは約12.8倍と、急増している。これは、動水勾配の増大に伴う割れ目内のせん断力の増大により拘留粘土層が一部剥離したためと考えられる。ここで、Bの上昇率がAのそれに比べて10倍近く大きいのは、Aの動水勾配の増大率が1.25倍であるのに対し、Bのそれは2倍とやや大きいこともあるが、Bの場合は流路が水平であるため沈殿による流路閉塞が主体であり、Aのように鉛直流路での付着力を主体とした拘留層に比べて急激なせん断力の増大に対する抵抗性に劣ることに起因するものと考え得る。

76日以降は、両者とも水頭上昇直前の値に再び戻る傾

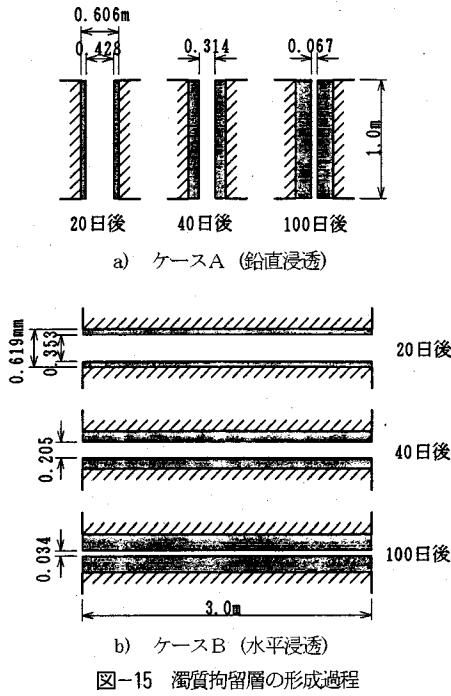


図-15 濁質拘留層の形成過程

向が認められる。

c) 数値シミュレーション

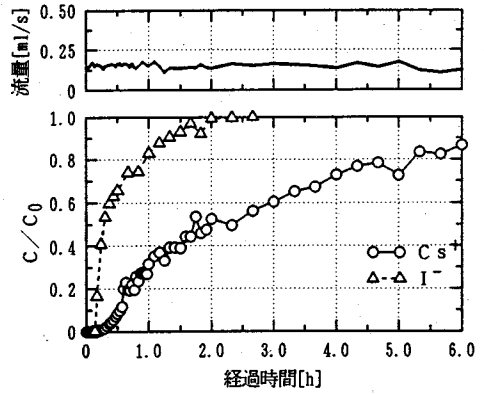
前述の数学モデルを用い、数値シミュレーションを行う。解析における初期・境界条件は、初期の割れ目幅 δ_0 (実測平均値) = 0.606mm (ケースA), 0.619mm (ケースB)、設定動水勾配 $i = 2.0 \rightarrow 2.5$ (ケースA), $1/3 \rightarrow 2/3$ (ケースB)、及び流入懸濁液SS濃度 C は、前述の図-11に示したものをとった。解析は、初期の流量低減過程が実測値と一致するような閉塞係数 K_b を同定し、ケースA, B 2ケースについて、111日間にわたって行った。

閉塞係数 K_b は、パラメータ解析を行った結果、Aでは $K_b = 0.11 d^{-1}$ 、Bでは $K_b = 0.17 d^{-1}$ となった。これより、まず比流量 q/q_0 の経時変化を、前述の図-13に実測値と併せて示した (図中破線)。実測値と解析値は比較的良く一致していることがわかる。

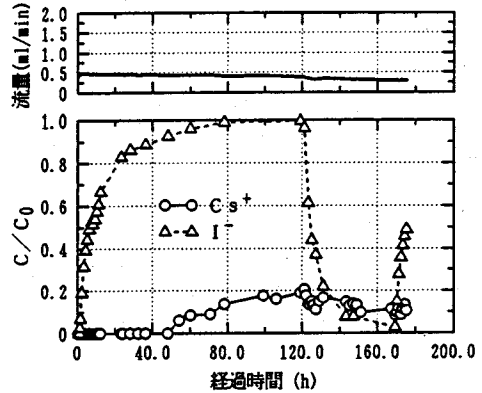
つぎに、図-15は、濁質拘留層 (粘土グラウト層) の形成過程を示したものである。両ケース共、流路全体に均一にグラウト層が形成されていることがわかる。このことは、前述の4.(1)の解析例 (図-6) で示唆したように閉塞係数 K_b が小さいと割れ目全体にわたって拘留層が形成される傾向となり、本実験スケールにおいても確認できた。

d) トレーサ注入試験

図-16は、トレーサ注入期間中の供試体Aの測点f、供試体Bの測点gでの流量と流出液の比濃度 C/C_0 の経時変化を示したものである。a)鉛直浸透の場合には、非取



a) 鉛直浸透の場合 (測点 f)



b) 水平浸透の場合 (測点 g)

図-16 トレーサ濃度と流量の経時変化

着性のヨウ素イオン濃度 (図中 Δ) は注入開始直後より急激に上昇し、2時間から2時間半の間にほぼ1になっているのに対し、吸着性のセシウムイオン (○) は拘留粘土層にトラップされつつ徐々に上昇している様子が窺える。一方、b)水平浸透の場合、鉛直浸透の場合と同様にヨウ素イオン濃度は注入開始直後より急増し、70時間程度経過した時点でほぼ1になっているが、セシウムイオン濃度の上昇は大きく遅れる傾向にあることが認められる。また、期間中総流量には大きな変動はなかったが、個々の分別点には、徐々に減少する点 (測点a)、途中から急増する点 (b, d) や急減する点 (c)、常に0の点 (e) などが見られ、割れ目内の流路幅は様でなく、3次元的に不均一になっていることが示唆される結果となった。

つぎに、各測点ごとの平均流量 q 、ヨウ素イオンの $C/C_0 = 0.5$ の到達時間 T_I より算定した平均流速 $v = L/T_I$ 及びヨウ素とセシウムの $C/C_0 = 0.5$ (水平の場合は0.1)の到達時間比 $R_I = T_I/T_{Cs}$ (T_{Cs} :セシウムの $C/C_0 = 0.1$ (水平) 0.5 (鉛直) の到達時間) を図-17に示した。これより、a)鉛直浸透の場合には、平均流量は $10^2 \sim 10^3 ml/s$ とやや差がみられるが、平均流速は比較的ばらつきが少ない。また、到達時間比は $R_{Ia} = 2.55 \sim 6.73$ の範囲にあっ

た。一方、b)水平浸透の場合には、各測点ごとの平均流量は 10^{-4} ~ 10^{-2} ml/sと開きがあるが、平均流速は漏水の全く無かった測点eを除いて比較的ばらつきが小さいことがわかる。一方、到達時間比は $R_{fa}=35\sim 51$ と鉛直の場合に比べて大きな値となっている。しかし、これらの R_{fa} はパッチ試験のそれ($R_{fa}=195$)より小さい。一般的に、カラム試験ではパッチ試験に比べてトレーサ(セシウムイオン)が吸着サイトに接触する時間が短かく²⁰⁾、吸着平衡状態に達していないことによると考えられる。

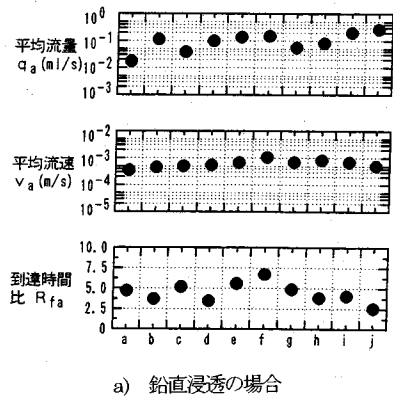
一方、図-18、19は、トレーサ注入後の供試体A、Bのa)割れ目面粘土付着状況、b)ウラン蛍光状況を示したものである。A、Bとも割れ目面全域にわたって粘土が付着している様子が窺えるが、ウランの発光状況を見ると部分的に濃淡に差があることがわかる。トレーサ液はこの輝きが際立つ部分を主な流路として浸透したものと考えられる。

つぎに、図-20は、供試体A、Bの各区画のセシウムイオン濃度の分布を示したものである。まず、Aでは、濃度の高い領域(図中赤い所)が上流側より測点j側の端部を流れて下流側に広がっている様子が認められる。つまり、トレーサ液は全面に均一に流れたのではなく、流れやすい部分を選択的に通ったものと考えられる。また、部分的に濃度の低い部分(図中濃緑色)が見受けられるが、これは、この部分の岩が非常に接近しており、流路幅が狭くなっているものと考えられる。一方、Bの場合もほぼ同様の傾向が見られるが、高濃度の部分は上流部に限られていることがわかる。この傾向は、前述の図-17に示したように、Aに比べて流速が小さく、到達時間比が大きな値となったことから納得できる。また、いずれのケースも濃度の大小、特に濃度の小さい部分が前述の図-18、19に示したウランの輝度の小さい部分に対応している様子が窺え、妥当な結果であったと考えられる。

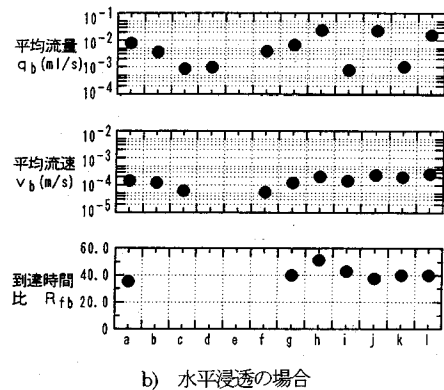
結局、水平浸透の場合には、鉛直浸透の場合に比べて流況にややばらつきが大きい傾向がみられたが、流量の低減やトレーサ移行の抑止効果からみた止水性の絶対値といった観点からすると問題なく、比較的均一にグラウト材が充填されていることが確認できる結果となった。

6. 結論

本論では、低濃度粘土懸濁液グラウト工法の有効性を検討することを目的として、濁質滞留モデルによる理論的検討を行った上で、人工的に割れ目を発生させた大型の実岩石(花崗岩)供試体による長時間の懸濁液グラウト試験を実施した。また、グラウト試験終了後トレーサ注入によるグラウトの充填均一性に関する検討を行なった。ここで得られた成果をまとめると、以下ようになる。



a) 鉛直浸透の場合



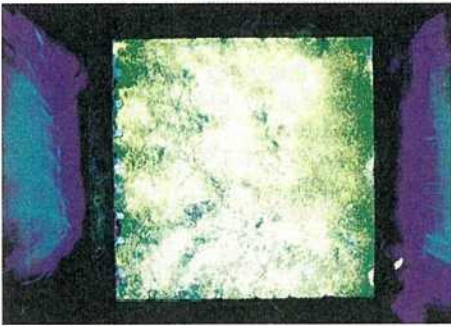
b) 水平浸透の場合

図-17 流量、流速、到達時間比の分布

- (1) ろ過理論を基に濁質滞留メカニズムを示し、数学モデルを構築した。実験結果との比較検討により適用性の検証を行った結果、流量の経時変化に対し、比較的良く実測値を再現できることが確認できた。
- (2) 大型の岩石供試体を用いて鉛直浸透、水平浸透の2ケースのグラウト試験を行った結果、いずれも数十日間で漏水量は大きく低減した。また、漏水量の低減傾向は、水平浸透の場合には注入期間中はほぼ一様に低減しているが、鉛直浸透の場合には初期はなだらかで、ある時点で急激な閉塞が生じ大きく低減することが認められた。
- (3) グラウト過程における水圧変化に対する流量の増大は、沈殿・凝集を主体として滞留層を形成したと考えられる水平浸透より、付着・凝集を主体とした鉛直浸透の方が小さいことが認められた。
- (4) トレーサ注入試験を行った結果、水平浸透の流量に多少バラツキが認められたものの、鉛直、水平いずれの場合も平均流速の位置的な変化は比較的小さく、実用上は流路全体にほぼ均一に充填されていることが確認された。
- (5) トレーサ試験において、ウランの輝度と滞留粘土のセシウムイオン濃度分布を比較した結果、両者の移行流路傾向が一致しており、また、核種移行における粘土の

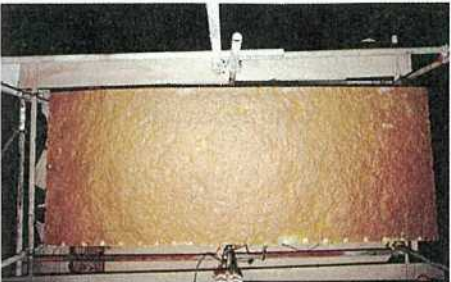


a) 割れ目面粘土付着状況

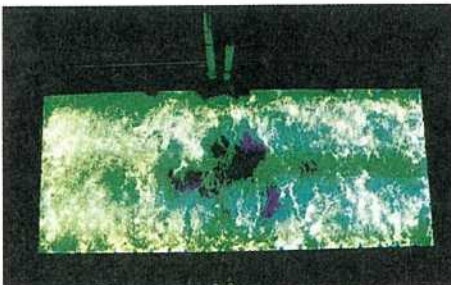


b) ウラニウム蛍光状況

図-18 割れ目面の状況 (供試体A)

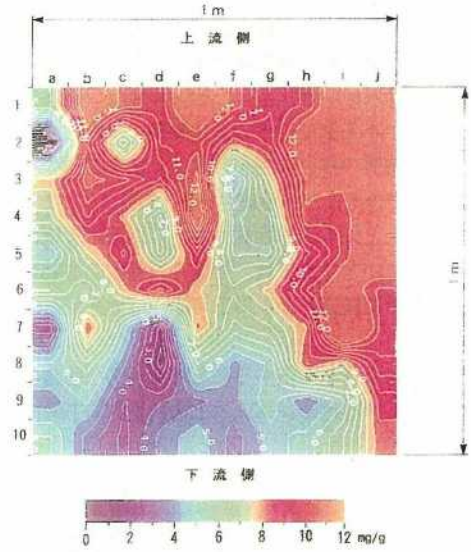


a) 割れ目面粘土付着状況

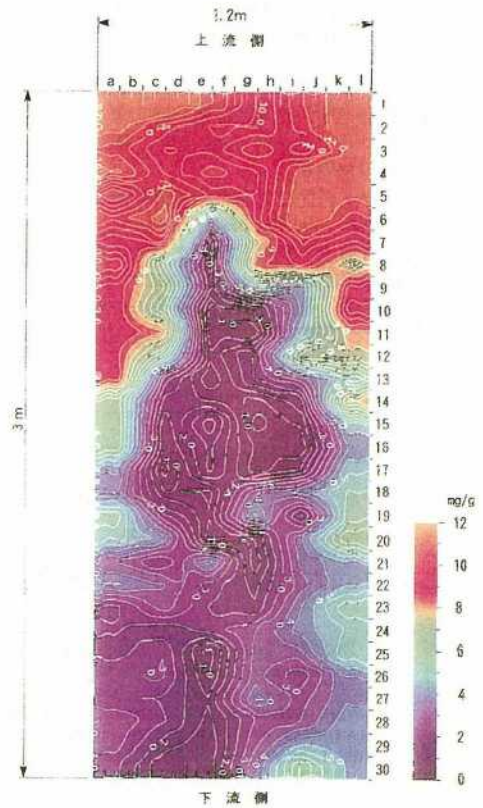


b) ウラニウム蛍光状況

図-19 割れ目面の状況 (供試体B)



a) 鉛直浸透 (供試体A)



b) 水平浸透 (供試体B)

図-20 セシウムイオン濃度の分布

収着効果も認められた。

以上、本工法により実際の岩石割れ目の均一な粘土充填が可能であり、漏水量低減効果のみならず物質の移行抑制・遅延効果が期待できることが基本的に確認された。したがって、本工法は従来の湧水制御のみならずガスの漏洩防止や物質の移行抑制を目的としたある種のバリア効果も期待できることが示唆された。加えて、ここで用いた材料は粘土という天然物質であり、地下水環境に及ぼす影響も小さいと考えられ、岩盤地下施設の有効利用を図る上で有用な技術となり得る可能性は大きいと考えられる。

最後に、本実験を実施するにあたり適切な助言を頂いた東京大学工学部地球システム工学科小島圭二教授に感謝致します。

参考文献

- 1) たとえば、時政宏、蒔田敏昭：完成間近な地下石油備蓄プロジェクトーわが国で最初の地下岩盤タンクー、土木学会誌、Vol.78, No.7, pp.449-452, 1993.7.
- 2) たとえば、日本LPガス協会技術保安委員会タンク部会：LPガス岩盤地下貯蔵に関する基礎技術調査報告書、日本LPガス協会、1986.6.
- 3) たとえば、IAEA: Underground disposal of radioactive wastes. Basic guidance, Safety Series No.54, Vienna, IAEA, 1981.
- 4) たとえば、林 正夫：水没工法による深部軟岩でのドーム空間建造に関する構想研究ー都市型CAESの実現を目指してー、土木学会論文集、第418号/Ⅲ-13, pp.17-44, 1990.6.
- 5) 工藤 浩ほか：グラウチングの基礎知識（その2）、農業土木学会誌、Vol.52, No.1, 1984.
- 6) 宮永佳晴：石油地下備蓄と粘土グラウトによる地下水の制御、電発調査資料、No.92, 1993.3.
- 7) 佐藤邦明、伊藤 洋：岩盤内浸透流の時間依存と目詰まり機構、土と基礎、Vol.36, No.4, pp.21-25, 1988.
- 8) 小島圭二ほか：粘土微粒子懸濁液による割れ目の広域止水に関する基礎的研究、第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.16-20, 1989.
- 9) 伊藤 洋ほか：開口割れ目における懸濁液浸透流の目詰まりに関する基礎実験、第43回年次学術講演会講演概要Ⅲ、土木学会、pp.648-649, 1988.
- 10) 伊藤 洋ほか：懸濁液注入による岩盤割れ目の閉塞・止水効果に関する基礎的研究、第21回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集、土木学会、pp.411-415, 1989.
- 11) 宮永佳晴：地下水制御のための粘土グラウトについてー石油地下備蓄、久慈基地ー、平成7年度秋季講習会テキスト、地下水技術協会、pp.35-52, 1995.11.
- 12) Ito, Y. et al. : On grouting using a suspension of ultrafine clay on artificially cracked rock samples, Int. Conf. on Nuclear Waste Management and Environmental Remediation, ASME, Prague, Czech Republic, 1993.9.
- 13) 坂口雄彦ほか：広域グラウトにおける懸濁液材料比較実験、土木学会第47回年次学術講演会講演概要Ⅲ, pp.664-665, 1992.
- 14) 丹保憲仁：新体系土木工学 88 上水道、土木学会、pp.203-222, 1980.
- 15) 丹保憲仁、小笠原絏一：浄水の技術、技報堂、pp.77-81, 1987.
- 16) Ogata, A.: Theory of dispersion in Granular Medium, Geological Survey Professional Paper, 411-I, US, pp.11-134, 1970.
- 17) 近藤次郎：数学モデル、丸善、pp.15-17, 1987.
- 18) 伊藤 洋ほか：懸濁液浸透による開口割れ目の閉塞過程に関する一考察、土木学会第44回年次学術講演会講演概要Ⅲ, pp.1078-1079, 1989.
- 19) 安全工学協会編：安全工学講座8水質汚濁・土壌汚染、海文堂、pp.107-108, 1982.
- 20) 西山勝栄ほか：岩石間隙水中のイオン拡散と間隙の性質、鉱山地質、Vol.40, No.4, pp.323-336, 1990.

(1996. 1. 23 受付)

ON GROUTING TEST USING A SUSPENSION OF ULTRAFINE CLAY ON ARTIFICIALLY CRACKED ROCK SAMPLES

Yo ITO, Takehiko SAKAGUCHI, Katsue NISHIYAMA and Ai FUJIWARA

Recently there has been increasing public interest in the disposal of low-level radioactive nuclide waste and energy storage. Underground rock caverns have been considered as possible repository sites. This paper presents a new grouting method which uses a suspension of liquefied ultrafine clay in fractured rock masses. In order to demonstrate the effect to block open cracks, two experiments were carried out on large-sized granite samples with open cracks. The experiments proved the method to be highly effective. Furthermore, experimental results were compared with those from a mathematical model based on successive blocking in parallel walls.