

亀裂性岩盤におけるグラウトの浸透挙動と 目詰まり特性に関する研究

西垣 誠¹・小松 満²・山本浩志³・見掛信一郎⁴

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 工修 東京電力(株)神流川水力建設所 (〒370-1613 群馬県多野郡上野村勝山 212-1)

⁴正会員 工修 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)

本論文では、亀裂性岩盤を対象としたグラウティング技術の高度化を目的とし、グラウトの亀裂への注入特性や亀裂中における浸透挙動を把握するために行った研究結果について論述する。すなわち、平行平板亀裂モデルを用いて、その亀裂開口幅、グラウトの粘性、水セメント比、注入流量等の種々の条件が、グラウトの注入特性や浸透挙動にどのような影響があるかを実験により解明した。さらにその成果をもとづき、グラウト注入孔において目詰まりを生じさせずにグラウトできる配合（水セメント比）と平均的な亀裂開口幅の算定方法を提案し、理論的根拠のもとづくグラウトの設定方法を提案した。

Key Words: *grouting, seepage flow, fractured rock masses
hydraulic fractured aperture, water cement ratio*

1. はじめに

大深度地下の岩盤空洞の利用において、岩盤の止水性を確保するためには、グラウティング技術はきわめて重要である。岩盤の亀裂中を浸透する地下水を止水する方法として、グラウティング技術は古くから用いられている。また、地下水の流動を完全に止めるのではなく、地下水流動の制御を図ったものとしては、石油地下備蓄で採用された粘土グラウト工法がある¹⁾。しかし、対象とする岩盤に最も適したグラウティングの仕様を決定する方法は確立されていない。特に、亀裂性岩盤におけるグラウトの浸透挙動と、用いる材料、注入方法、注入孔のピッチ、注入流量、グラウト濃度の切り替え等の因子は密接に関係しているが、その関係は十分に解明されていない。それが原因で、例えばダムサイトでは、岩盤の止水性を確保するための対策方法は「個々のダムサイト特有の問題」として個別に対処されているのが現状である。そして、実際の設計・施工に際しては、担当技術者の経験に負うところが大きく、グラウチ

ングの仕様は対象岩盤との適応を段階的に把握しながら決定される場合もある。その場合には、その費用、施工期間等に損失や時間を要する可能性も考えられる。したがって、これらの因果関係を解明し、対象とする岩盤に最も適したグラウティングの仕様を決定する方法を確立することが強く望まれている。

本論文では、グラウトの亀裂への注入特性や亀裂中における浸透挙動を把握するために、基本的な室内実験を行い、その結果より配合（水セメント比）に関する考察について論述する。すなわち、2枚の平行な板の間にスペーサを挟んだ平行平板亀裂モデルを用いて、その亀裂開口幅、グラウトの粘性、水セメント比等の種々の条件が、グラウトの注入特性や浸透挙動にどのような影響があるかを実験により探求した。対象となる岩盤の亀裂性状を把握することは、グラウトの設計・施工の検討においてきわめて重要である。亀裂性状として必要となる主要な情報は、ボーリング調査から得られる調査区間の亀裂本数や亀裂開口幅の分布などである。グラウト

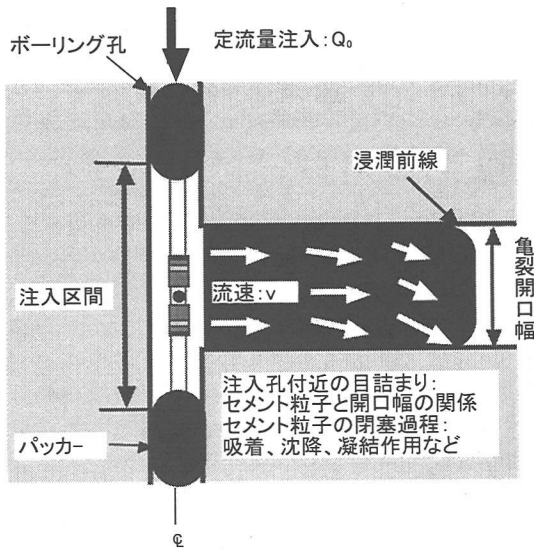


図-1 浸透挙動と目詰まり特性の概念図

の注入特性については、グラウトの注入孔から亀裂を通してグラウトを送るためには、グラウト中のセメント粒子が亀裂の壁面でひっかかって止まらないだけの亀裂開口幅を有することが必要な条件である²⁾。また、浸透挙動について、吉川はグラウト中のセメント粒子の亀裂中における閉塞過程を吸着作用、沈降作用、凝結作用に分類している³⁾。注入孔での目詰まりと亀裂中における閉塞過程の概念を図-1に示す。本研究では、グラウトの浸透挙動と亀裂開口幅との関係として、特にグラウトの注入孔での目詰まり特性と、亀裂中に浸潤し充填していく際の浸透挙動に着目し実験を行った。実験では注入孔での目詰まり特性と注入孔から浸潤していく状態や定常となった状態での浸透挙動を把握することを目的として、平行平板亀裂モデルを設定した。その結果、定流量注入実験において、グラウトの注入可能な水セメント比と亀裂開口幅との関係を把握することができた。さらにその成果にもとづき、グラウト注入孔において目詰まりを生じさせずにグラウトできる配合(水セメント比)と平均的な亀裂開口幅の算定方法を提案し、理論的根拠にもとづくグラウトの設定方法を提案した。

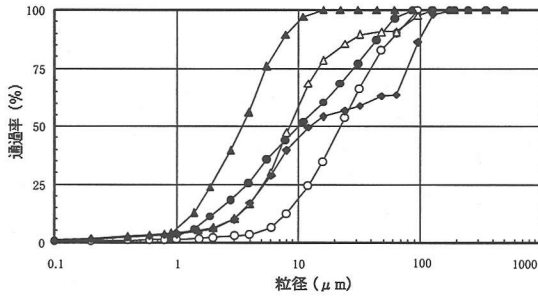
2. グラウトの注入特性及び浸透挙動に関する従来の研究

庄司らは、岩盤内の開口亀裂にグラウトが注入される場合を想定し、単純化した開口亀裂モデルに対してグラウトの注入実験を行い、その浸透挙動について検討した。実験は2枚の亚克力板を重ねるこ

とにより開口亀裂モデルを作成し、グラウトを注入し圧力勾配と流速の関係を調べた⁴⁾。柴田は、現場のグラウティングにおいて、各種セメントグラウトの水セメント比とブリージング防止のためのベントナイト添加が及ぼす影響を、内径6mm程度の硬質ビニールパイプの細管を用いて実験的に解明した。その結果、浸透挙動、低流速時の沈殿、粘度、降伏値を示した²⁾、⁵⁾。岩盤浸透流については、従来から論理的、解析的研究が多数実施されている⁶⁾。佐藤らは、主に岩石・岩盤を対象に流れによる空隙閉塞・目詰まりの数学モデル化に関する基本概念を導入し、岩石を用いた室内透水実験の結果との比較により、目詰まり機構について検討している⁷⁾。小島らは、粘土などの微粒子懸濁液による割れ目の目詰まりについて、単一割れ目を用いて微粒子懸濁液グラウトにおける最適な粒径や濃度、注入圧等の決定の基礎的実験と多成分シミュレータによる数値解析を行っている⁸⁾、⁹⁾。

開口亀裂については、一般に、亀裂の透水量係数と開口幅には相関があり、平行平板を仮定した亀裂の透水量係数は三乗則にしたがうことが知られている¹⁰⁾、¹¹⁾。Witherspoonらは、亀裂表面の凹凸の影響を考慮し、実際の亀裂に対しては抵抗係数により三乗則を低減した修正三乗則を提案している¹²⁾。しかし、花崗岩中の天然亀裂を対象とした既往の室内透水実験結果によると、抵抗係数は亀裂によって大きく異なり¹³⁾、¹⁴⁾、¹⁵⁾、亀裂表面の凹凸の影響を定量的に評価するのは難しい。さらに、これらの透水量係数で求められる水理学的開口幅¹⁶⁾、¹⁷⁾は、トレーサー実験により求められる物質移行に関わる開口幅と異なることが知られている¹⁸⁾。

理論的根拠にもとづくグラウティングの設計を行うためには、岩盤内に注入されたグラウトがどのような特性により注入・浸透しているのかを把握することが必要である¹⁹⁾。グラウティングは、直接関係する因子(用いる材料、注入方法、注入孔のピッチ、グラウト濃度の切り替え等)に応じて仕様を決定しなければならない²⁰⁾。しかし、理論的根拠にもとづくグラウティングの設計を目的とした研究事例として、特に亀裂性岩盤を対象として、グラウトの注入・浸透挙動について実験的な研究や理論的に整理した例は非常に少ない。そこで、本論文ではグラウトの亀裂中での浸透挙動を把握することを目的とし、平行平板亀裂モデルを用いて、亀裂開口幅、グラウトの水セメント比、粘性、注入流量等の条件が、グラウトの注入・浸透挙動にどのような影響を及ぼすかについて理論的に解明し実験的な検討との比較を行った。



普通ポルトランドセメント(●-乾式、○-湿式0.05g)
超微粒子セメント(▲-乾式、△-湿式0.05g、◆-湿式0.45g)

図-2 使用したグラウトの粒径加積曲線

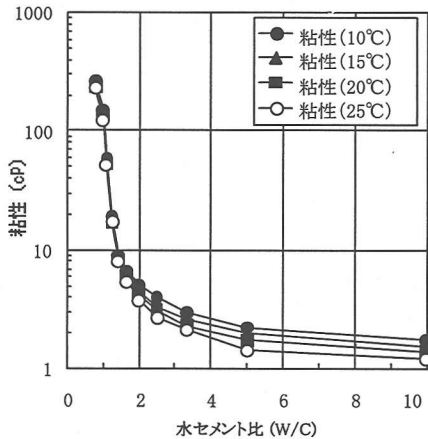
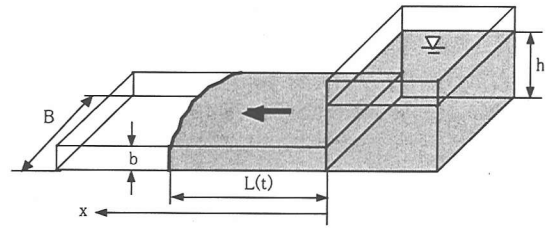


図-3 普通ポルトランドセメントの水セメント比と粘性の関係

3. グラウトの注入特性及び浸透挙動に関する実験的検討

(1) グラウトの物理特性

実験において、グラウトとして普通ポルトランドセメントと超微粒子セメントを用いた。普通ポルトランドセメントは実験に用いる前に0.074mm(74μm)のふるいでふるい分けを行った。図-2にその粒径加積曲線を示す。図中には本論文の実験に用いた超微粒子セメントの粒径加積曲線も併記した。また、普通ポルトランドセメントの水セメント比と粘性の関係を調べた。それぞれの水セメント比に対して、実験を行う環境条件に該当する温度範囲のうち10、15、20、25℃について計測を行った。同時に密度の計測も行った。粘性は、回転粘度計(測定範囲1~100,000(mPa·s))を用いて測定した。水セメント比と粘性の温度ごとの関係を図-3に示す。図-3より水セメント比が10~2の範囲では粘性は変化が小



b: 亀裂開口幅 L(t): 時間経過に伴う浸潤距離
B: 亀裂幅 h: 注入孔の圧力水頭

図-4 単一亀裂へのグラウトの浸潤概念図

さく、水セメント比が2以下になると粘性が急に大きくなる。そこでグラウトの物理特性として粘性の異なる条件において実験を行い、異なる粘性によるグラウトの亀裂中の流動特性を把握するため、粘性の変化が大きいW/C=2~1前後を対象とし、W/C=2.5, 1.4, 1.0, 0.8の4種類のグラウトを中心に実験に用いた。温度が高くなると粘性はある程度小さくなるが、温度の影響は1℃につき1~2%であり、グラウチングを対象とする条件としては問題がないと判断できる。また、グラウトは時間が経過するにつれて硬化し、それに伴い粘性が経時的に変化する。そこで実験で用いたグラウトのそれぞれの配合について粘性の経時変化を計測した結果、4時間以内では粘性の変化は小さく、4時間を超えると粘性が増大する傾向がみられた。このことから、注入実験は4時間以内で実施しているため、注入しているグラウトはほぼ一定の粘性であると判断できる。

(2) 亀裂モデルを用いた定流量注入実験

亀裂性岩盤におけるグラウトの注入・浸透挙動を解明するため亀裂モデルを用いた平行平板定流量注入実験を行い、グラウトの浸透挙動について理論との比較を行った。ここでは、図-4の概念図に示す亀裂開口幅(b)、亀裂幅(B)の亀裂中を浸透するグラウトの挙動に着目し、定流量注入実験から透水係数を算出する。

a) 亀裂モデルを用いた定流量注入による流れの基礎理論

ここで、単一亀裂における浸透挙動について、平行平板亀裂モデルにおける理論透水係数と実験結果にもとづき算定した透水係数の比較による理論的な考察を論述する。

平行平板亀裂モデルにおける浸透挙動は、圧力と粘性せん断力のつり合いから、理論透水係数は次式で表される²¹⁾。

$$k_s^T = \frac{\rho g b^2}{12\mu} \quad (1)$$

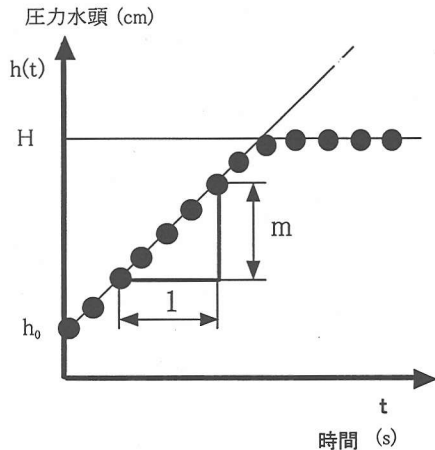


図-5 定流量注入実験時の注入孔の圧力水頭変化

ここで、 k_s^T : 理論透水係数、 ρ : 流体の密度、 g : 重力加速度、 b : 亀裂開口幅、 μ : 流体の粘性係数とする。

次に、本実験で行った亀裂開口幅、亀裂幅一定の単一亀裂にグラウトを定流量注入した場合の浸透挙動について、連続の式と運動の式にもとづき透水係数を求める。図-4 の概念図をもとに連続の式と運動の式を、式(2)、(3)に示す。

$$Q_0 t = BbL \quad (2)$$

$$Q_0 = Bbk' \frac{\partial h}{\partial L} \quad (3)$$

ここで、 Q_0 : 注入流量、 t : 時間、 B : 亀裂幅、 L : 浸潤距離、 k' : グラウトの浸潤中の算定透水係数、 h : 注入孔の圧力水頭とする。

境界条件を式(4)に設定する。

$$t=t_1(x=0): h=h_0 \quad t=t_2(x=L): h=h(t) \quad (4)$$

式(4)の境界条件で式(3)を積分すると式(5)となる。

$$\frac{h(t)}{Q_0^2} = \frac{1}{B^2 b^2 k'} t + \frac{h_0}{Q_0^2} \quad (5)$$

式(5)より、定流量で注入した時の注入孔の水頭変化 $h(t)$ は、図-5 のようになる。この定流量注入実験における注入孔の水頭上昇の傾きを m とすると、式(6)となる。

$$m = \frac{1}{B^2 b^2 k'} \quad (6)$$

式(6)より、浸潤中の算定透水係数 k' は式(7)より求められる。

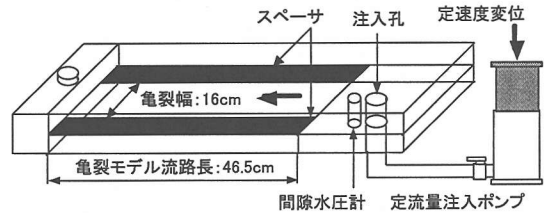


図-6 定流量注入実験装置

$$k' = \frac{1}{B^2 b^2} \cdot \frac{1}{m} \quad (7)$$

また、注入を継続し、グラウトが流出し始めると、注入孔の水頭は定常状態となる。この定常状態における透水係数 k_s を圧力水頭 H を用いて、運動の式にもとづき式(8)で求めることができる。

$$k_s = \frac{Q_0}{Bb} \cdot \frac{L}{H} \quad (8)$$

得られた k' と k_s を比較することにより、亀裂中がグラウトで飽和になったときに浸透している透水係数 k_s と、不飽和の亀裂中にグラウトが浸潤していく際の算定透水係数 k' にどの程度の差があるかを求める。

b) 定流量注入実験装置及び実験方法

定流量注入実験装置の全体図を図-6 に示す。亀裂の作成には、表面の凹凸が少なく透明でグラウトが浸潤できる材料を選定した。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、本研究はグラウトの浸透挙動のメカニズムを理論的に解明し、構築した理論の妥当性を検証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、一様な浸潤が可能となる材料を選定した。その材料として、普通のガラス板、透明アクリル板、超精密研磨パイレックスガラス板を検討した。その結果、普通のガラス板、透明アクリル板では、20~30 μm の不陸があり、浸潤にフィンガリングのような選択浸潤が生じることがわかった。これに対して、超精密研磨パイレックスガラス板は、1m 当りに 2~3 μm の不陸誤差があるだけで、作成した亀裂モデルが一様と考えられ、浸潤も一様であったため、実験では十分に厚い(厚さ 10mm)超精密研磨パイレックスガラス板を用いて注入実験を行った。この装置によりグラウトの浸透状況がガラスを通して装置上部より計測でき、亀裂表面の粗度及び注入時の変形は最小限にすることが可能になった。

グラウトは定流量注入ポンプ(定ひずみ圧縮注入機, フローポンプ)より亀裂中へ定流量注入した。また, 注入孔底の圧力水頭の変化を間隙水圧計(最大計測圧 0.1MPa, 精度 $\pm 0.02\%$)で計測した。実験手順を以下に示す。

①亀裂モデルの作成

亀裂モデルは, 2枚のバイレックスガラス板の間に種々の厚さのステンレス製スペーサを挟み, 種々の幅の亀裂モデルを作成した。流路長・亀裂幅は一樣にそれぞれ46.5cm, 16.0cmとした。

②グラウトの作成

実験に用いた普通ポルトランドセメントは, すべて注入前に0.074mm(=74 μm)のふるいでふるい分けを行った。攪拌後, 粘性, 温度, 密度を計測した。

③グラウトの注入

定流量ポンプでグラウトを注入した。その際に, 間隙水圧計で注入孔底の圧力水頭の経時変化を計測した。また, 装置上部よりCCDカメラでグラウトの浸潤状況を計測した。

実験では, 注入圧が一定になった時, あるいは目詰まりを起こして圧力が0.1MPaを超えた時に実験を終了とした。

(3) 普通ポルトランドセメントを用いた定流量注入実験結果

実験により計測された注入孔の圧力水頭を注入流量の2乗で割った値($h(t)/Q_0^2$)の経時変化を, それぞれの水セメント比に対し亀裂開口幅ごとに得た結果を図-7及び表-1に示す。ここで, 理論透水係数 k_s^T は注入前に計測した粘性 μ と密度 ρ 及び亀裂開口幅 b より, 式(1)で算定した。浸潤中の算定透水係数 k' は, 図-5から圧力水頭の経時変化の勾配(m)を求め, 式(7)より求めた。また, 算定透水係数 k_s は注入を継続し, 定常状態になった時の圧力水頭より, 式(8)を用いて計算した。

表-1より, k' と k_s とはそれほど差がないことがわかる。これは, 定流量注入実験においてグラウトの浸潤中の圧力水頭上昇をもとに算定された透水係数と, 定常状態の圧力水頭をもとに算定された透水係数の値がほぼ等しいことを示している。

また, W/C=2.5, 1.4では, 透水係数の理論値と実験にもとづく算定値とはほぼ等しい結果が得られた。しかし, W/C=1.0, 0.8の濃い濃度の普通ポルトランドセメントを注入した場合の透水係数の実験にもとづく算定値は, 理論値よりも大きな値になっている。このように, 濃いグラウトをこのような狭い亀裂に注入した場合, 浸潤中の普通ポルトランドセメントの粘性は一樣ではなく, 水と分離して

浸潤していることが原因となり, 注入直後は普通に浸潤していくが, 注入を継続するとブリージングが生じていることがビデオ及び写真による調査によりわかった。さらに, 亀裂開口幅が狭い場合には, 注入孔付近で完全に目詰まりが生じ, 亀裂中に普通ポルトランドセメントは注入されず水だけが孔口で搾り出されて浸潤した。種々のW/Cに対して実験より目詰まりが生じた亀裂開口幅の関係を図-8に示す。図中には, 超微粒子セメントにおける同様の関係も併記した。この図より, ある亀裂開口幅に普通ポルトランドセメントを注入する場合には図中に示す曲線より薄い濃度の普通ポルトランドセメントを使用する必要がある。

(4) 超微粒子セメントを用いた定流量注入実験結果

普通ポルトランドセメントを用いて定流量注入実験を行った結果, 図-8から注入可能な亀裂開口幅と水セメント比の関係が既知となった。その結果, 普通ポルトランドセメントの粒径(図-2)では, 0.01cm(100 μm)の亀裂開口幅への注入が困難であることがわかった。そこで, 普通ポルトランドセメントよりも粒径の小さい超微粒子セメントを用いて, 普通ポルトランドセメントでは注入が困難であった亀裂に注入可能かどうかを検討した。

実験に用いた超微粒子セメントの粒径加積曲線を図-2に示す。図-2より, 超微粒子セメントは最大粒径が15 μm であるので, 100 μm 以下の亀裂開口幅にも十分注入可能であると考えられる。

表-2に超微粒子セメントを用いた実験結果を示す。この結果より, 目詰まりが生じていない水セメント比の場合, 透水係数の実験にもとづく算定値は理論値とよく一致していることがわかる。しかし, 濃度が濃くなると容易に目詰まりが生じた。目視観察による結果では, セメント粒子は団粒化しており, 超微粒子セメントは普通ポルトランドセメントよりも団粒化しやすいことがわかる。次に, 表-3に分散剤(レオビルド系)を2.2%添加した超微粒子セメントを用いた実験結果を示す。透水係数の実験にもとづく算定値は理論値の2~9倍の値が算出されたが, 普通ポルトランドセメントを用いた実験を行った際には, 2~5倍の値が算出されている。このように, 普通ポルトランドセメントを用いた実験よりも大きい値が算出されたのは, 超微粒子セメントは普通ポルトランドセメントと同じ水セメント比でも, 粒子数が非常に多いため亀裂中で吸着が生じやすくなり, その結果浸潤前線の濃度は薄くなり注入孔付近の水頭の上昇が緩やかになったからで

あると考えられる。

図-8 に表-2, 3 の結果より得た注入可能な亀裂開口幅と水セメント比の関係を追加して記入した。この図より、ある亀裂開口幅をもつ亀裂に対して、それぞれの曲線上の水セメント比よりも大きい（薄い）水セメント比であれば、注入孔口で目詰まりを生じさせることなく注入することが可能である。また、超微粒子セメントは粘性が高く、粒子間での凝結があり、団粒化しやすいため、そのままでは普通ポルトランドセメントより目詰まりが生じやすいが、分散剤を添加することにより粘性が下がり、普通ポルトランドセメントでは注入できなかった亀裂開口幅に対して注入が可能となる。

4. グラウトの配合（水セメント比）に関する考察

平行平板亀裂モデルを用いた定流量注入実験では、注入可能な亀裂開口幅と水セメント比との関係を把握した。ここでは、定流量注入実験から得られた成果にもとづき、グラウト注入孔で目詰まりを生じさせないでグラウトできる配合（水セメント比）と平均的な亀裂開口幅の算定方法を提案し、理論的根拠にもとづくグラウトの設定方法を提案する。

図-8 から、注入孔で目詰まりを生じさせずにグラウトできる水セメント比の値を決定するためには、注入区間内の平均的な亀裂開口幅が推定できれば可能となる。注入区間における平均的な亀裂開口

表-1 普通ポルトランドセメントを用いた定流量注入実験結果

亀裂開口幅 b (cm)	水セメント比 W/C	理論飽和 透水係数 k_s^T (cm/s)	浸潤中の 算定透水係数 k' (cm/s)	定常状態の 算定透水係数 k_s (cm/s)	k'/k_s	k'/k_s^T	備考
0.05	0.6	0.06	—	—	—	—	目詰まり
0.04	2.5	3.44	3.90	3.96	1.0	1.1	目詰まり
	1.4	1.64	1.58	2.01	0.8	1.0	
	1.0	0.13	0.61	0.70	0.9	4.7	
	0.8	0.09	0.25	0.37	0.7	2.9	
	0.7	0.06	—	—	—	—	
0.03	2.5	2.40	2.11	2.50	0.8	0.9	目詰まり
	1.4	1.09	1.41	1.06	1.3	1.3	
	1.0	0.07	0.30	0.29	1.0	4.3	
	0.8	0.05	0.13	0.13	1.0	2.6	
	0.7	0.03	—	—	—	—	
0.02	2.5	0.98	1.02	0.94	1.1	1.0	分離
	1.4	0.45	0.69	0.43	1.6	1.5	
	1.0	0.03	0.15	0.14	1.1	5.0	
	0.8	0.02	—	—	—	—	
0.015	2.5	0.53	0.52	0.47	1.1	1.0	分離 目詰まり
	1.4	0.22	0.34	0.26	1.3	1.5	
	1.0	0.02	—	—	—	—	
	0.8	0.01	—	—	—	—	
0.01	2.5	0.26	—	—	—	—	分離 目詰まり 目詰まり
	1.4	0.10	—	—	—	—	
	1.0	0.01	—	—	—	—	

表-2 超微粒子セメントを用いた定流量注入実験結果

亀裂開口幅 b (cm)	水セメント比 W/C	理論飽和 透水係数 k_s^T (cm/s)	浸潤中の 算定透水係数 k' (cm/s)	定常状態の 算定透水係数 k_s (cm/s)	k'/k_s	k'/k_s^T	備考
0.05	2.0	0.36	0.39	0.39	1.0	1.1	
0.03	2.0	2.40	—	—	—	—	分離
0.015	3.0	0.35	0.35	0.32	1.1	1.0	
	2.5	—	—	—	—	—	分離
	1.4	—	—	—	—	—	目詰まり
0.01	4.0	—	—	—	—	—	分離
	3.5	—	—	—	—	—	目詰まり

表-3 分散剤を添加した超微粒子セメントを用いた定流量注入実験結果
(分散剤(レオビルド系)を2.2%添加)

亀裂開口幅 b (cm)	水セメント比 W/C	理論飽和 透水係数 k_s^T (cm/s)	浸潤中の 算定透水係数 k' (cm/s)	定常状態の 算定透水係数 k_s (cm/s)	k'/k_s	k'/k_s^T	備考
0.05	0.7	0.04	—	—	—	—	目詰まり
0.03	0.8	0.05	0.11	0.28	0.4	2.2	
0.015	1.4	0.40	2.11	6.49	0.3	5.3	
	0.8	0.012	0.013	0.77	0.0	1.1	
	0.7	0.004	—	—	—	—	目詰まり
0.01	1.0	0.03	0.23	0.43	0.5	7.7	
	0.8	0.006	—	—	—	—	目詰まり
0.005	2.5	0.05	0.29	0.63	0.5	5.8	
	1.4	0.04	0.37	0.49	0.8	9.3	
	1.0	0.005	—	—	—	—	目詰まり

幅 \bar{b} は、次式で表される。

$$\bar{b} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{n} \quad (9)$$

ここで、 b_i ：注入区間内の亀裂開口幅とする。式(9)の $\sum b_i$ は、注入孔にポアホールテレビを挿入して岩盤内の亀裂開口幅の分布を計測することにより求められる。しかし、亀裂方位と亀裂分布密度については比較的信頼性の高いデータがサンプリングできるが²²⁾、亀裂長さと亀裂開口幅については信頼性が低く、たいていは計測が困難であるため未知のパラメータとなる²³⁾。そこで、グラウト注入

孔において岩盤への水あるいは高粘性流体による定流量注入実験を実施し、注入孔内の圧力水頭上昇の経時変化を計測することにより注入区間の岩盤の浸透特性(透水係数、有効間隙率)を求め、それをもとに注入区間における平均的な亀裂開口幅を算定する。岩盤への定流量注入の概念を図-9に、その場合の注入孔における圧力水頭変化を図-10に示す。

ここで、注入孔付近で目詰まりを生じさせずにグラウトできる配合(水セメント比)と平均的な亀裂開口幅の算定方法を提案する。

図-9を参考にして、注入孔の中心より r 離れたところの流量は、浸潤が注入区間 L に水平方向だけ

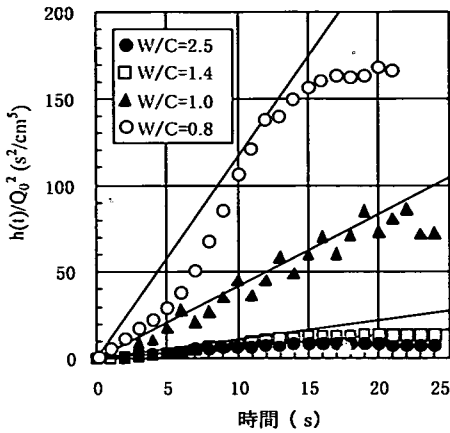


図-7(a) 定流量注入実験の経時変化
亀裂開口幅：0.04cm

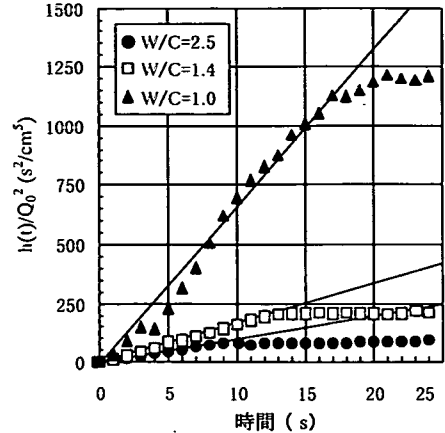


図-7(c) 定流量注入実験の経時変化
亀裂開口幅：0.02cm

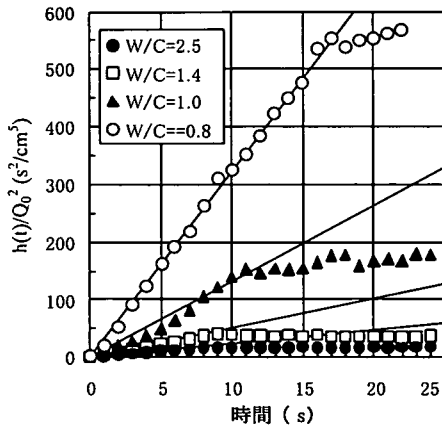


図-7(b) 定流量注入実験の経時変化
亀裂開口幅：0.03cm

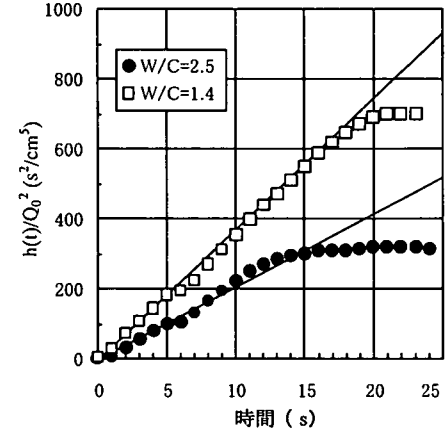


図-7(d) 定流量注入実験の経時変化
亀裂開口幅：0.015cm

に生じるものと仮定すると、次式を得る。

$$Q_0 = -2\pi Lk \frac{\partial h}{\partial r} \quad (10)$$

式(10)において、次の境界条件を設定する。

$$r=r_0 : h=h_0(t) \quad r=R(t) : h=h_c \quad (11)$$

ここで、 $h_0(t)$ ：注入区間の中間での注入水頭、 h_c ：浸潤前線における圧力水頭、 L ：注入区間長、 $R(t)$ ：浸潤前線までの距離とする。

式(10)を式(11)の条件で積分すると次式となる。

$$h_0(t) = \frac{Q_0}{2\pi Lk} (\ln R(t) - \ln r_0) + h_c \quad (12)$$

定流量注入実験のある時間 t での岩盤内への総注入量 $Q_0 t$ と浸潤前線 $R(t)$ との関係は次式となる。

$$Q_0 t = \pi (R(t)^2 - r_0^2) \cdot Ln_e \quad (13)$$

ここで、 n_e ：有効間隙率とする。

一般に、浸潤前線がある程度進むと、 $R(t) \gg r_0$ より式(13)は式(14)のように近似できる。

$$Q_0 t = \pi R(t)^2 Ln_e \quad (14)$$

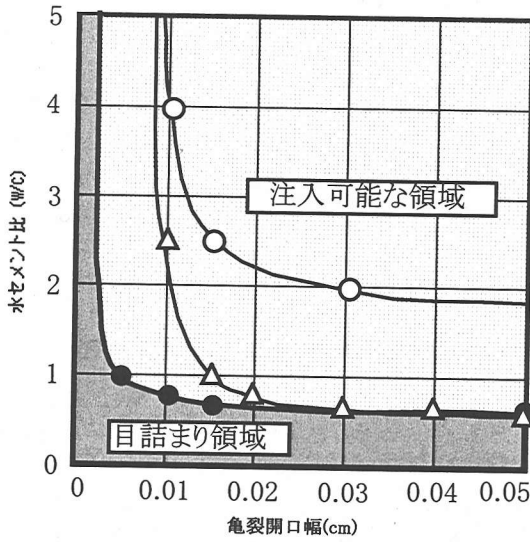
式(14)を $R(t)$ について解くと次式を得る。

$$R(t) = \sqrt{\frac{Q_0 t}{\pi Ln_e}} \quad (15)$$

式(15)を式(12)に代入すると、次式を得る。

$$h_0(t) = \frac{2.3Q_0}{4\pi Lk} \left(\log \frac{Q_0}{\pi r_0^2 Ln_e} + \log t \right) + h_c \quad (16)$$

式(16)より、定流量注入での注入孔内の水頭上昇の経時変化 $h_0(t)$ を計測し、その結果を図-10のように片対数で整理すると、直線の勾配から岩盤の透水係数が次式より算定できる。



- △ 普通ポルトランドセメント、○ 超微粒子セメント
- 超微粒子セメント+分散剤

図-8 注入可能となる限界の亀裂開口幅と水セメント比の関係

$$k = \frac{2.3Q_0}{4\pi L} \cdot \frac{1}{m} \quad (17)$$

また、 $\log t$ 軸との切片の値 t_0 より、有効間隙率 n_e と h_c の関係が得られる。

$$\frac{Q_0 t_0}{\pi r_0^2 L n_e} = \exp \left[\frac{4\pi L k}{Q_0} \{h_0(t_0) - h_c\} \right] \quad (18)$$

ここで、 $h_0(t_0)$ 、 h_c を圧力水頭と位置水頭に分割して次式のように考える。

$$h_0(t_0) = \frac{L}{2} + \psi_0(t_0) \quad (19)$$

$$h_c = \frac{L}{2} + \psi_c \quad (20)$$

ここで、 ψ_c の値が注入圧に対してきわめて小さい場合、式(18)の有効間隙率は、次式のように近似される。

$$n_e = \frac{Q_0 t_0}{\pi r_0^2 L} \exp \left\{ -\psi_0(t_0) \cdot \frac{4\pi L k}{Q_0} \right\} \quad (21)$$

ここで、 $\psi_0(t_0) = 0$ の時の t_0 を求めると、有効間隙率は次式で求まる。

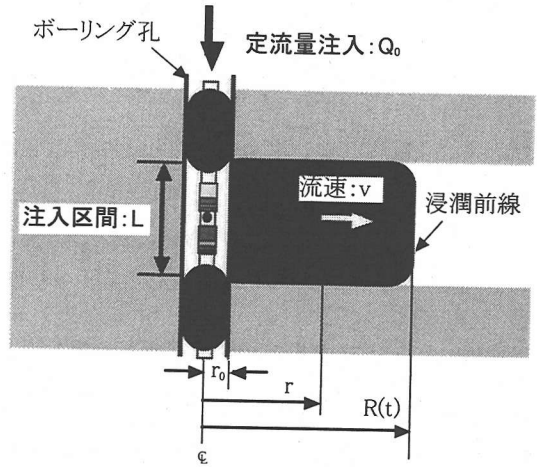


図-9 岩盤への定流量注入概念図

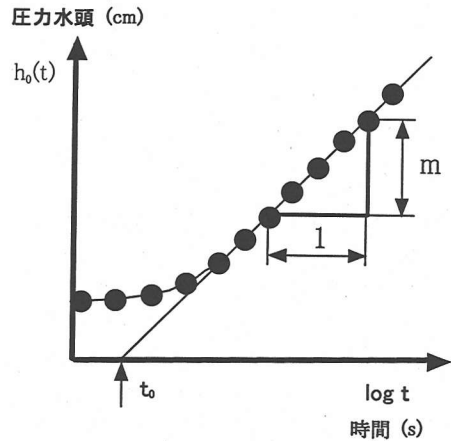


図-10 定流量注入時の注入孔の圧力水頭変化

$$n_e = \frac{Q_0 t_0}{\pi r_0^2 L} \quad (22)$$

ここで、注入孔における有効間隙率を亀裂開口幅 b_i を用いて表すと、次式のようになる。

$$n_e = \frac{\sum_{i=1}^n (b_i \cdot \pi r_0^2)}{\pi r_0^2 L} \quad (23)$$

式(23)より、次式が得られる。

$$n_e = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{L} \quad (24)$$

式(24)の n_e に、式(22)を代入すると式(25)の関係が得られる。

$$\frac{Q_0 t_0}{\pi r_0^2 L} = \frac{\sum_{i=1}^n b_i}{L} \quad (25)$$

式(25)に式(9)を代入すると、注入区間内の平均的な亀裂開口幅 \bar{b} が推定できる。

$$\bar{b} = \frac{Q_0 t_0}{n \pi r_0^2} \quad (26)$$

式(26)から、注入区間内の亀裂本数をポアホールテレビで計測することにより、注入区間内の平均的な亀裂開口幅が推定できる。この平均的な亀裂開口幅から、図-8の関係にもとづき注入孔で目詰まりを生じさせずにグラウトできる水セメント比の配合の設定が可能となる。

5. 結論

本研究において得られた成果は、以下のようにまとめられる。

注入孔において目詰まりを生じさせずに理論的根拠にもとづくグラウチングを行うためには、対象とする岩盤の亀裂密度分布と亀裂性岩盤に注入されたグラウトがどのような特性により注入・浸透しているのかを把握することが必要である。グラウト注入孔にポアホールテレビを挿入して、岩盤内の亀裂密度分布(亀裂開口幅と亀裂本数)を計測すると平均的な亀裂開口幅が推定できるが、高い精度で求めることはきわめて困難である。そこで、グラウト注入孔において岩盤への水あるいは高粘性流体による定流量注入実験を実施し、注入孔内の水頭上昇の経時変化を計測することにより注入区間の岩盤の浸透特性(透水係数、有効間隙率)を求め、その結果とポアホールテレビによる亀裂本数の計測をもとに注入区間における平均的な亀裂開口幅を推定する方法を提案した。この平均的な亀裂開口幅から、実験により得られた注入可能な亀裂開口幅と水セメント比の関係にもとづき、注入孔で目詰まりを生じさせずにグラウトできる水セメント比の配合の設定が可能となることを示した。

また、本研究において実験的な検討として行った平行平板亀裂モデルを用いた注入実験では、注入圧力0.1MPa以下の場合において、注入可能な限界の亀裂開口幅と水セメント比との関係を明確に把握することができた。

本研究によって得られた成果を以下に示す。

- (1) 定流量注入実験において、グラウトの浸潤中の圧力水頭上昇をもとに透水係数を算定した値と、定常状態において算定した値は、ほぼ等しいことがわかった。
- (2) 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示した。
- (3) 超微粒子セメントは、同じ水セメント比の普通ポルトランドよりも粘性が非常に大きく団粒化しやすいため、目詰まりを生じやすい。
- (4) 超微粒子セメントに分散剤を添加すると粘性が低下する。また、粘性を低下させるための最適な分散剤の濃度を求めることができた。
- (5) 超微粒子セメントに分散剤を添加して注入を行った結果、普通ポルトランドセメントで目詰まりが生じた亀裂開口幅でも、注入が可能であることがわかった。

今後、亀裂性岩盤を対象とした現場でのグラウト注入実験によりデータを取得し、それにもとづき本研究で得られた成果や提案した方法の妥当性を検討することにより、理論的根拠にもとづくグラウチングの設計方法の確立が可能であると考えられる。

謝辞: 本研究を行うにあたり、東京電力株式会社技術研究所角江俊昭副所長、岡山大学大学院修士生の玉井猛氏(現東京電力株式会社社会社神流川水力建設所)には有益なご助言とご指導、ご協力をいただきました。ここに記して深謝の意を表します。

参考文献

- 1) 宮永佳晴：自然浸透方式による粘土グラウトに関する研究，東京大学博士論文，1995。
- 2) 柴田 功：ダム基礎岩盤グラウチングのメカニズムについて，ダム工学，No.11，pp.4-20，1993。
- 3) 吉川浩二，水戸義忠，菊池宏吉：節理性岩盤におけるグラウチング充填メカニズムに関する基礎的研究，第26回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp.261-265，1995。
- 4) 庄司佳介，永山 功，則松秀晴：開口亀裂におけるグラウトの流動特性に関する実験的検討，岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，Vol.24，pp.106-110，1992。
- 5) 柴田 功：ダム基礎岩盤用セメントグラウトの細管における流動特性，土木学会論文集，No.453/IV-17，pp.107-116，1992。
- 6) 米田俊一，中川浩二：粒子径を変えた各種セメントグラウトの基礎的性質と浸透性比較，土木学会論文

- 集, No.462/IV-18, pp.101-110, 1993.
- 7) 佐藤邦明, 伊藤 洋: 岩盤内浸透流の時間依存と目詰り機構, 土と基礎, 35-4, pp.21-25, 1988.
 - 8) 伊藤一誠, 小島圭二: 地層処分における地下水制御に関する数値解析, 日本原子力学会, 昭和 62 年度秋の大会研究発表会講演文集, p.232, 1987.
 - 9) 小島圭二, 登坂博行, 伊藤一誠, 米山一幸: 地下空間利用に関する割れ目の広域グラウトの基礎実験-微粒子による目詰め-, 日本応用地質学会, 昭和 63 年度研究発表会講演文集, pp.135-138, 1988.
 - 10) Snow,D.T.: Rock fracture spacings, openings and porosities, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, Proc. of the American Society of Civil Engineers*, pp.73-91, 1968.
 - 11) Oda,M.: Permeability tensor of discontinuous rock masses, *Geotechnique*, 35, No.4, pp.483-495, 1985.
 - 12) Witherspoon,P.A., Wang,J.S.Y., Iwai,K. and Gale,J.E.: Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture, *Water Resources Research*, Vol.16, No.6, pp.1016-1024, 1980.
 - 13) Sundaram,P.N., Watkins,D.J. and Ralph,W.E.: Laboratory investigations of coupled stress-deformation-hydraulic flow in a natural rock fracture, *28th U.S.Symposium on Rock Mechanics*, pp.585-592, 1987.
 - 14) 多田浩幸, 木下直人, 若林成樹: 岩石割れ目の透水係数と応力の関係を用いた空洞周辺岩盤の透水特性変化の予測手法, 第 9 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集, pp.139-144, 1994.
 - 15) 内田雅大, 野田兼司, 丸山 誠, 須藤 賢: 亀裂性媒体水理試験装置による単一亀裂岩体の透水・トレ一サー試験, 第 26 回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp.156-160, 1995.
 - 16) Long,J.C.S., Remer,J.S., Wilson,C.R. and Witherspoon,C.R.: Porous media equivalents for networks of discontinuous fractures, *Water Resources Research*, Vol.18, No.3, pp.645-658, 1982.
 - 17) 中屋眞司, 金谷賢生, 長谷川明生, 平山鉄浩: 亀裂性岩盤の透水係数テンソルの測定と水理的等価亀裂開口幅, 地下水学会誌, 第 37 巻第 1 号, pp.13-29, 1995.
 - 18) Tsang,Y.W.: Usage of "equivalent apertures" for rock fractures as derived from hydraulic and tracer tests, *Water Resources Research*, Vol.28, No.5, pp.1451-1455, 1992.
 - 19) 米田俊一, 向上祐美, 寺戸康隆, 中川浩二: 岩盤注入セメント系グラウトの浸透挙動に関する検討, 土木学会論文集, No.480/IV-21, pp.63-66, 1993.
 - 20) 武藤 光, 菊池宏吉, 水戸義忠, 鈴木哲也, 平野 勇: 高濃度-低圧型グラウティング工法 (HTLP 工法) の提案と検証, ダム工学, Vol.9, No.3, pp.201-214, 1999.
 - 21) Jacob,B.: *Dynamics of fluids in porous media*, American Elsevier Publishing Company, Inc., pp.687-693, 1972.
 - 22) 大西有三, 中川誠司, 田中 誠: 岩盤節理の幾何学的分布性状の推定に関する研究, 土木学会論文集, No.499/III-28, pp.59-68, 1994.
 - 23) 中屋眞司, 西垣 誠: 異方性岩盤におけるルジオン試験の理論的解釈と透水係数テンソルの測定法, 土木学会論文集, No.511/III-30, pp.23-34, 1995.

(2001.11.28 受付)

STUDY ON THE PROPERTIES OF SEEPAGE FLOW AND INJECTION IN THE GROUTING FOR FRACTURED ROCK MASSES

Makoto NISHIGAKI, Mitsuru KOMATSU, Hiroshi YAMAMOTO
and Shin-ichiro MIKAKE

The purpose of this study is to improve the grouting method for fractured rock masses. So experimental study is executed in order to understand the properties of grouting injection and seepage flow in hydraulic fractured aperture. This paper grasps the effect of the properties of grouting stage due to the various conditions such as width of the aperture, viscosity of the grout, water cement ratio and injection flow rate using flat plate fractured model in a laboratory experiment. From the results, it is proposed to select the relationship between the most suitable grout mix (water cement ratio) and width of the aperture to be injected according to the properties of grouting stage.