

複数亀裂モデルにおけるグラウトの流動特性のメカニズムに関する研究

西垣 誠¹・見掛信一郎²

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)

本研究では、亀裂性岩盤を対象としたグラウチ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流動特性を把握するための基本的な事象についての研究成果を論述する。すなわち、グラウト注入孔と交差する複数の亀裂に注入されるグラウトの浸潤メカニズムについて理論を構築し、その理論の妥当性を検証するためにグラウトの浸潤実験を実施した。その結果、複数の亀裂におけるグラウトの浸潤挙動について、ベルヌーイの式を適用することにより、実験での現象を理論にもとづき説明することができた。さらに、従来より経験的に行われているグラウチングの手順についての理論的な評価を行った。

Key Words: grouting, seepage flow, fractured rock masses
hydraulic fractured aperture, multiple fractured model

1. はじめに

石油・ガス等のエネルギー地下備蓄、高レベル放射性廃棄物の地層処分など、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、グラウチング技術はきわめて重要である。岩盤の亀裂中を流動する地下水を止水する方法として、ダムサイトにおいてダム基礎岩盤の改良を目的としてグラウチング技術が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チングの仕様を決定する方法は確立されていない。特に、亀裂性岩盤への注入形態は、グラウト注入孔と交差するある程度幅をもった複数の開口亀裂にグラウトを浸潤させ、その開口亀裂を通じてさらに周辺の亀裂へ浸潤される形態をとるものである。グラウチングの際には、最も効果的・経済的な施工となるような、グラウトの材料、注入圧力、注入孔の間隔、注入量を設定することが重要であり、そのためには、グラウチ

ングの目的、岩盤の特性、グラウトの物理特性を明らかにしておく必要がある。しかし、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試行錯誤的に決定され、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チ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。

本研究は、亀裂性岩盤を対象としたグラウチ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流動特性を把握するために行った研究成果及び配合に関する考察について論述する。

2. グラウトの注入・流動特性に関する従来の研究

グラウチングの対象となる岩盤は、亀裂や断層等が分布し、主要な透水経路を形成している。このことから、効果的なグラウチングを行うためには、亀裂性岩盤を対象とする場合には、①それぞれの亀裂を単一流路としてグラウトの浸潤挙動を把握すること、②それぞれの亀裂が3次元的に岩盤全体に分布している場合のグラウトの浸潤挙動を把握すること、③対象となる岩盤の亀裂や断層等の水理学的特性を把握すること、などが重要である。

単一流路におけるグラウトの浸潤挙動に関する研究の多くは、平行平板やパイプなどの細管のモデルを用いて、注入圧力、配合、注入量、亀裂開口幅などの関係を明らかにしようとするものである。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、その流動特性について検討した。実験は2枚のアクリル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²⁾。柴田は、現場のグラウチングにおいて、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ペ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、流動特性、低流速時の沈殿、粘度、降伏値を示した³⁾、⁴⁾。

岩盤全体を対象としたグラウトの浸潤挙動に関する研究は、従来から論理的、解析的研究が多数実施された結果を米田らは整理している⁵⁾。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⁶⁾。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⁷⁾、⁸⁾。堀らは、ルジオン値を用い、卓越亀裂の走行傾斜を入力パラメータとして、基礎岩盤の亀裂ネットワークモデルによって透水性状を推定する方法を提案されており⁹⁾、永山らによって、岩盤浸透流における層流・乱流の基本的な特性について、非線形数値解析により検討されている¹⁰⁾。これらの検討の結果、層流・乱流の状態、また乱流の程度によって浸透流速の分布やグラウチングによる浸透流の抑制効果に大きな差が生じることが

わかった¹¹⁾。この層流および乱流に関しては、山口らは、高透水性の節理性岩盤における流水抵抗則を原位置で測定する方法を提案し、室内および現場実証実験によりその精度が高いことを示した¹²⁾。

岩盤の亀裂や断層等の水理学的特性については、亀裂の性状(亀裂の幅、長さ、方位、介在物、分布、連続性)と透水性との関係に関する研究が多く実施されている。特に最近では、亀裂の性状は、ボーリング孔にポアホールテレビを挿入して岩盤内の亀裂情報を得ることができる。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¹³⁾、亀裂長さや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っているのが現状である¹⁴⁾。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¹⁵⁾、¹⁶⁾。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¹⁷⁾。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¹⁸⁾、¹⁹⁾、²⁰⁾、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、これらの透水係数で求められる水理学的開口幅²¹⁾、²²⁾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²³⁾。

グラウトが浸潤する亀裂の性状を把握することを目的として、原位置でのはぎ取り調査した例がある²⁴⁾。調査の結果、①グラウトの浸潤が確認された亀裂の方向は、卓越する亀裂の方向分布とほぼ一致すること、②亀裂方向別のグラウトの浸潤頻度は卓越する亀裂で大きいこと、③高角度の亀裂では浸潤頻度が高いこと、④風化が進んだ亀裂性岩盤や破砕部を伴う岩盤では岩盤等級と透水性は必ずしも一致しないこと、などの知見が得られている。また、花崗岩の割れ目にセメントミルクを注入し、注入終了後はぎ取り調査した例では²⁵⁾、セメントミルクは節理内を網目状に流れていることが確認されている¹¹⁾。また、近年、効果的なグラウチ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・流動しているのかを把握することが必要であることが明確にされ²⁶⁾、グラウチングは、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ことが論じられている²⁷⁾。

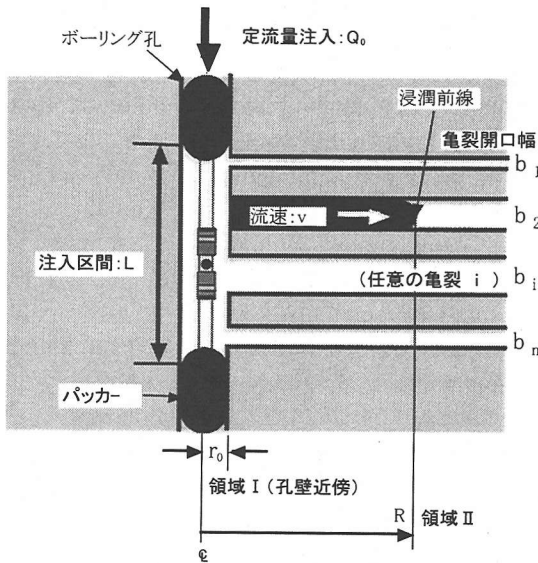


図-1 複数亀裂へのグラウトの浸潤概念図

しかし、効果的なグラウチングの設計を目的とした研究として、特に亀裂性岩盤を対象として、グラウトの注入・流動特性について実験的に研究を行い、そのグラウトの浸潤挙動に対して理論的に解明した研究はまだなされていない。このことから、グラウトの亀裂中での浸潤特性を把握することを目的とし、複数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、注入流量等の条件を変化させることにより、グラウトの注入・流動特性がどのような理論に従うのか、複数の亀裂に対してどのような浸潤挙動をとるのかを解明し、その理論を確立することが必要である。

3. 複数亀裂モデルへのグラウトの注入における流動

(1) 複数亀裂モデルにおけるグラウトの浸透理論

グラウトが、複数亀裂のうち亀裂 i (複数存在する亀裂のうち、任意の亀裂を i とする) の中を浸潤する際の概念図を図-1 に示す。図-1 のような n 本の開口幅の異なる亀裂が存在する区間で、それぞれの亀裂は平行かつ開口幅が b_i ($i=1, 2, \dots, n$) で一定の場合を基本モデルとすると、一本の亀裂中の透水係数は次式で表される。

$$k_i = \frac{\rho g b_i^2}{12\mu} \quad (1)$$

ここで、 k_i : 亀裂 i の透水係数、 b_i : 亀裂 i の亀裂

開口幅、 ρ : 流体の密度、 g : 重力加速度、 μ : 流体の粘性係数とする (以下、下付き添字 i は亀裂 i における変数、定数等を示すものとする)。

この区間を対象として定流量注入を行う場合、単位時間毎に一定流量のグラウトが注入される。そのときの時間的な流量の増加に伴う亀裂 i における浸潤半径 R_i の経時変化の関係を以下に示す。

$$Q_0 = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (2)$$

$$\int_0^t Q_i dt = \pi (R_i^2 - r_0^2) \cdot b_i \quad (3)$$

ここで、 Q_0 : 総注入流量、 Q_i : 亀裂 i への注入流量、 R_i : グラウトの浸潤半径、 t : 経過時間、 r_0 : 注入孔半径、 b_i : 亀裂 i の亀裂開口幅とする。

式(3)を微分すると、次式のように表される。

$$Q_i = 2\pi R_i b_i \cdot \frac{\partial R_i}{\partial t} \quad (4)$$

式(4)より、

$$Q_i t = \pi R_i^2 b_i + C \quad (5)$$

ここで、

$$t = t_0 : R_i = r_0 \quad t = t_0 + \Delta t : R_i = R_i \quad (6)$$

Δt : グラウトの亀裂中での浸潤経過時間
この条件から式(5)を解くと次式となる。

$$Q_i = \frac{\pi b_i \cdot (R_i^2 - r_0^2)}{\Delta t} \quad (7)$$

注入孔半径は浸潤半径より極小さいと近似すると次式となる。

$$Q_i = \frac{\pi b_i R_i^2}{\Delta t} \quad (8)$$

ボーリング孔より R_i だけ離れたところでの運動の式より、

$$Q_i = -2\pi R_i b_i k_i \cdot \frac{\partial h_i}{\partial R_i} \quad (9)$$

式(9)に式(8)を代入し、式(10)の境界条件で解くと、式(11)が得られる。

$$R_i = r_0 : h_i = h_0 \quad R_i = R_i : h_i = h \quad (10)$$

$$\frac{1}{4k_i} \cdot (R_i^2 - r_0^2) = (h_0 - h)_i \cdot \Delta t \quad (11)$$

以下、亀裂 i における水頭差 $(h_0 - h)_i$ を Δh_i とする。

ここで、複数亀裂モデルにおけるグラウトの流動特性について、以下の2通りの考え方にもとづき理

論を構築し、グラウトの浸潤半径を予測し、グラウト効果の範囲について評価する。

①複数亀裂モデルを多孔質媒体とみなし、従来の考え方にもとづき、亀裂モデル内の圧力水頭はグラウト注入孔からそれぞれの亀裂中まで多孔質媒体として連続しており、すべて伝播するという理論を構築し、浸潤半径を予測する。

②それぞれの亀裂に浸潤したグラウトの流動特性に対して、より厳密な考え方として亀裂中におけるグラウトの粘性抵抗によって生じるエネルギー損失を考える。このエネルギー損失に影響を与える要素としては、流れの運動エネルギーが最も主要なものであることから²⁸⁾、エネルギー損失を考慮したベルヌーイの式を適用した理論にもとづき、浸潤半径を予測する。

a) 多孔質媒体として理論構築する場合

式(11)において、複数亀裂モデルを多孔質媒体として流動特性について理論構築すると、水頭変化 Δh_i はグラウト注入孔からそれぞれの亀裂中まで多孔質媒体として連続しており、すべて伝播するという理論にもとづくと、それぞれの亀裂中で等しいと考えられる。亀裂 $i=1,2$ を対象とした場合、 Δh_i が等しいとすると次式の関係が得られる。

$$R_2^2 = \frac{k_2}{k_1} \cdot (R_1^2 - r_0^2) + r_0^2 \quad (12)$$

式(12)に式(1)を代入すると次式となる。

$$R_2^2 = \left(\frac{b_2}{b_1}\right)^2 \cdot (R_1^2 - r_0^2) + r_0^2 \quad (13)$$

また、式(2)、(3)より次式が得られる。

$$Q_0 \Delta t = \pi \cdot (R_1^2 - r_0^2) \cdot b_1 + \pi \cdot (R_2^2 - r_0^2) \cdot b_2 \quad (14)$$

式(14)に式(13)を代入すると R_1 が求まる。

$$R_1^2 = \frac{Q_0 \Delta t}{\pi \left(b_1 + \frac{b_2^3}{b_1^2}\right)} + r_0^2 \quad (15)$$

式(13)の関係において、 $b_2 > b_1$ の場合、 R_1 と R_2 の関係は $R_2 > R_1$ となる。これは、亀裂開口幅が大きいほうが広い範囲で浸潤することを示している。

b) ベルヌーイの式を適用し理論構築する場合

ここでは、粘性抵抗によって生じるエネルギー損失について、ベルヌーイの式を用いて求める。

ここで、亀裂 i における水頭差 Δh_i は、次式となる。

$$\Delta h_i = \frac{P_I - P_{II}}{\rho g} \quad (16)$$

式(16)の P_I, P_{II} は図-1における亀裂 i の領域I(注入孔近傍の領域)、IIでの圧力とする。ここで、亀裂中における流速項を考慮し、ベルヌーイの式を用いて P_I を表すと次式となる。

$$P_0 = P_I + \frac{\rho v_I^2}{2} \quad (17)$$

ここで、 P_0 : 注入孔の圧力、 v_I : 領域Iにおける流速とする。

式(17)から P_I を求めると次式となる。

$$P_I = P_0 - \frac{\rho v_I^2}{2} \quad (18)$$

ここで、

$$v_I = \frac{Q_i}{2\pi r_0 b_i} \quad (19)$$

同様に、領域IIについて求めると次式となる。

$$P_{II} = P_0 - \frac{\rho v_{II}^2}{2} \quad (20)$$

$$v_{II} = \frac{3}{2} \cdot \frac{Q_i}{2\pi r b_i} \quad (21)$$

ここで、注入孔近傍の領域Iにおける流速は一様な流速分布であるのに対して、領域IIにおける中心の流速は平均流速の3/2とする²⁸⁾。

式(16)に式(17)~(21)を代入すると次式となる。

$$\Delta h_i = \frac{5}{8g} \left(\frac{Q_i}{2\pi r_0 b_i} \right)^2 \quad (22)$$

ここで、水頭差は粘性抵抗によって生じるエネルギー損失によることから、粘性抵抗について考える。平行板亀裂中の微小区間における力のつり合いを考えれば次式が誘導できる²⁹⁾。

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho g h_i)}{\partial R_i} &= -\frac{2\tau}{b_i} \\ &= -\frac{12\mu}{b_i^2} \cdot \left(\frac{Q_i}{2\pi R_i b_i} \right) \end{aligned} \quad (23)$$

ここで、 τ : 壁面摩擦力とする。

式(23)を式(24)の境界条件で解くと、式(25)が得られる。

$$R_i = r_0 : h_i = h_0 \quad R_i = R_i : h_i = h \quad (24)$$

$$\Delta h_i = \frac{3\mu}{\rho g b_i \Delta t} \cdot (R_i^2 - r_0^2) \quad (25)$$

式(22)と式(25)から次式の関係が得られる。

$$\frac{R_i^2 - r_0^2}{r_0^2} = \frac{96\mu\Delta t}{5\rho b_i^2} \quad (26)$$

亀裂*i*=1,2について考えると、式(26)よりそれぞれの亀裂における浸潤距離 R_1 , R_2 は次式の関係となる。

$$R_2^2 = \left(\frac{b_1}{b_2}\right)^2 \cdot (R_1^2 - r_0^2) + r_0^2 \quad (27)$$

式(14)に式(27)を代入すると R_1 が求まる。

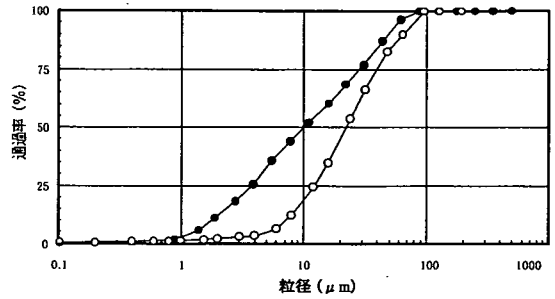
$$R_1^2 = \frac{Q_0 \Delta t}{\pi \left(b_1 + \frac{b_1^2}{b_2}\right)} + r_0^2 \quad (28)$$

式(27)の関係において、 $b_2 > b_1$ の場合、 R_1 と R_2 の関係は $R_1 > R_2$ となる。これは、亀裂開口幅が小さいほうが広い範囲で浸潤することを示している。

①の従来の考え方にもとづく場合と、②のより厳密な考え方にもとづく場合において、グラウトの浸潤半径の予測に対してなぜ差が生じるのか、その理論の妥当性を検証するために、実際に複数亀裂モデルを用いたグラウトの注入実験を実施した。

(2) 複数亀裂モデルを用いたグラウト注入実験

グラウト注入実験は、複数亀裂モデルとして、アクリル板を数枚重ね、注入孔に交差する複数の開口幅の異なる亀裂モデルを用いて行った。このモデルを用いて、グラウトの注入・流動特性がどのような理論に従い、複数の亀裂に対してどのような浸潤挙動をとるのかを解明し、その理論の妥当性を検証した。実験は亀裂中を絶乾状態で行った。グラウトの実施条件は亀裂中が飽和の場合も考えられるが、飽和状態については、単一亀裂モデルを用いたグラウトの注入実験において、浸潤前線でグラウトが水と混ざり粘性が低下することにより、透水性は絶乾状態と同程度かやや大きい傾向になることが確かめられている^{30), 31)}。本研究は、グラウトの流動特性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、グラウトが水と混ざることのない絶乾状態で実験を行い、理論構築における設定条件の信頼性の向上を図った。



普通ポルトランドセメント(● 乾式、○ 湿式0.05g)

図-2 グラウトのためのセメントの粒径加積曲線

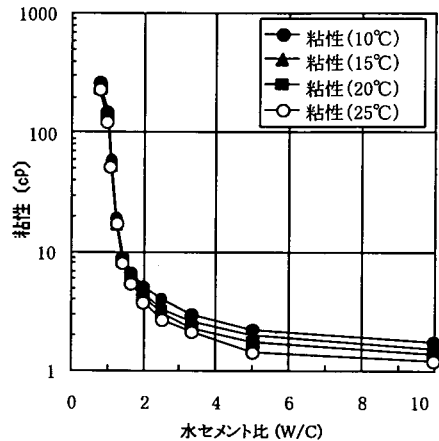
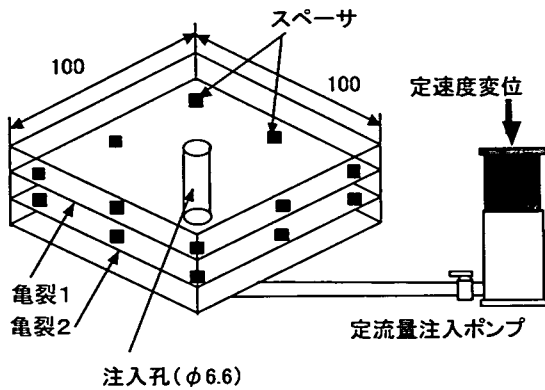


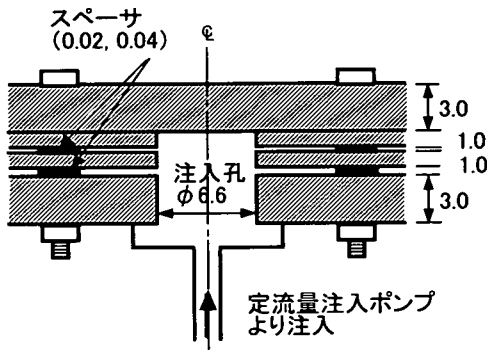
図-3 普通ポルトランドセメントの水セメント比と粘性の関係と温度依存

a) グラウトの物理特性

実験において、グラウトの材料は普通ポルトランドセメントを用いた。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 に粒径加積曲線を示す。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 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水セメント比 (W/C) が 1~2 前後を対象とし、W/C=1.4, 1.0, 0.8 の 3 種類のグラウトを中心に実験に用い



(a) 複数亀裂モデル実験装置図 (単位: cm)



(b) 注入孔詳細図 (単位: cm)

図-4 注入実験装置の全体図

た。温度が高くなると粘性は小さくなるが、温度の影響は1℃につき粘性の変化は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ことがわかった。

b) グラウト注入実験装置及び実験方法

グラウト注入実験装置の全体図を図-4に示す。図中の定流量ポンプより注入孔へグラウトが注入された後、亀裂中に浸潤していく仕組みになっている。複数亀裂モデルは、一辺1mの亚克力板を3枚重ね、その間に厚さの異なるステンレス製のスペーサを挟むことにより2種類の開口幅の亀裂を作成する。

グラウトは定流量注入ポンプより亀裂中(亀裂開口幅: b)へ定流量(Q_0)注入される。また、注入口の水頭(h_0)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、開口幅の異なる2本の亀裂を作成した。

② グラウトの作成

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 μ m)のふるいでふるい分けを行った。水セメント比は、 $W/C=1.4, 1.0, 0.8$ とした。攪拌後、粘性、温度、密度を計測した。

③ グラウトの注入

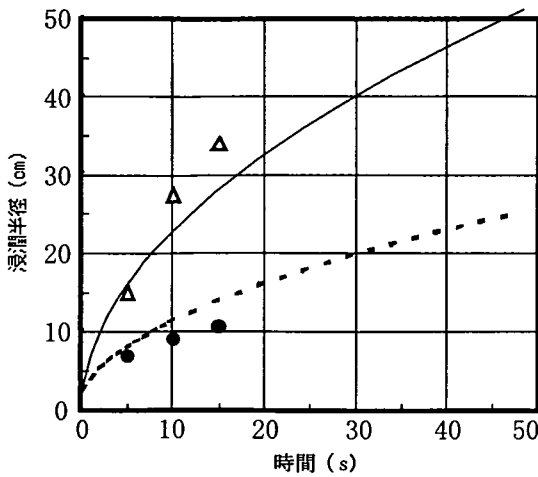
定流量ポンプでグラウトを注入した。この時に、間隙水圧計で亀裂中の水頭の経時変化を計測した。また、装置上部よりCCDカメラでグラウトの浸潤状況を計測した。実験では、グラウトの浸潤が50cmに達するか、注入孔内の圧力水頭が1,000cmを超えた時に実験を終了とした。

(3) グラウト注入実験結果と理論との比較

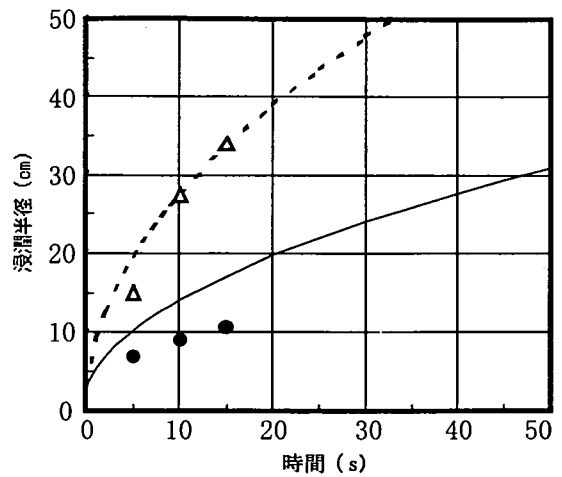
図-5に多孔質媒体として理論構築した場合の浸潤前線の経時変化を、図-6にベルヌーイの式を適用し理論構築した場合の浸潤前線の経時変化を示す。図-6のベルヌーイの式を適用し理論構築した場合の浸潤挙動を参照すると、 $b=0.04$ cmの透水係数は $b=0.02$ cmの透水係数と比較すると4倍の大きさであるにもかかわらず、実験値と理論解(式(27),(28))とも浸潤半径は $b=0.04$ cmよりも $b=0.02$ cmの方が大きくなっており、浸潤半径の経時変化はよく一致している。

図-7は $W/C=0.8$ の場合の実験値とベルヌーイの式を適用した場合の理論解であるが、この場合、浸潤半径は $b=0.02$ cmよりも $b=0.04$ cmの方が大きくなっている。この結果は、普通ポルトランドセメント $W/C=0.8$ に対して $b=0.02$ cmの亀裂開口幅は注入可能な限界の亀裂開口幅であり、 $b=0.02$ cmの亀裂において目詰まりが生じていると考えられる。このことは、グラウトの水セメント比と注入可能な亀裂開口幅との関係を把握するために行った、単一亀裂モデルを用いたグラウト注入実験により確かめることができた^{30), 31)}。図-8に、グラウト注入実験で得られた結果を示す。この実験結果から、 $W/C=0.8$ のグラウトは亀裂開口幅0.02cmの亀裂中では目詰まりが生じることが確認できた。また、図-7の理論解について、 $b=0.02$ cmの亀裂において目詰まりした注入流量を考慮して $b=0.04$ cmの亀裂における浸潤半径を導くと、実験値とよく一致することが図-7で示すことができる。これらの理論解と実験結果から、複数亀裂モデルにおけるグラウトの浸潤挙動は、ベルヌーイの式を適用した理論に従って浸潤していることがわかる。

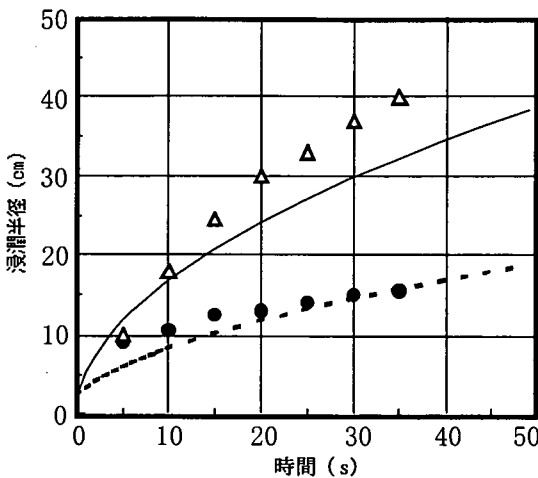
ここで、ベルヌーイの式にもとづいたグラウトの浸潤挙動の理論的な解釈を示す。グラウトが注入孔からそれぞれの亀裂へ浸潤する場合、流れのエネルギーの場地的変化を考えると、注入孔における流れ



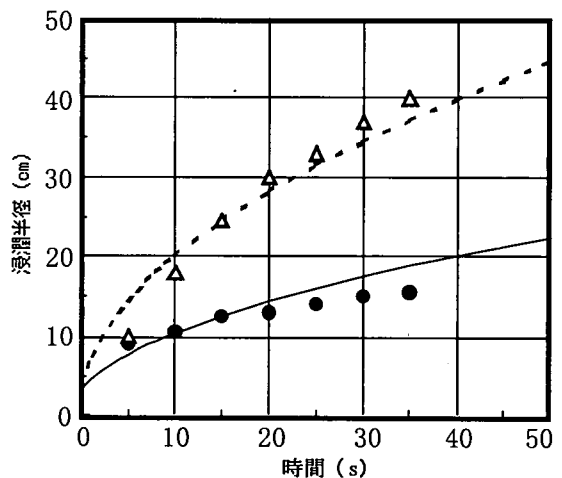
(a) $W/C=1.4$ の浸潤半径の経時変化
($Q_0=7.10\text{cm}^3/\text{s}$)



(a) $W/C=1.4$ の浸潤半径の経時変化
($Q_0=7.10\text{cm}^3/\text{s}$)



(b) $W/C=1.0$ の浸潤半径の経時変化
($Q_0=3.71\text{cm}^3/\text{s}$)



(b) $W/C=1.0$ の浸潤半径の経時変化
($Q_0=3.71\text{cm}^3/\text{s}$)

● $b=0.04\text{cm}$ (実験値) ▲ $b=0.02\text{cm}$ (実験値)
— $b=0.04\text{cm}$ (理論解) - - - $b=0.02\text{cm}$ (理論解)

● $b=0.04\text{cm}$ (実験値) ▲ $b=0.02\text{cm}$ (実験値)
— $b=0.04\text{cm}$ (理論解) - - - $b=0.02\text{cm}$ (理論解)

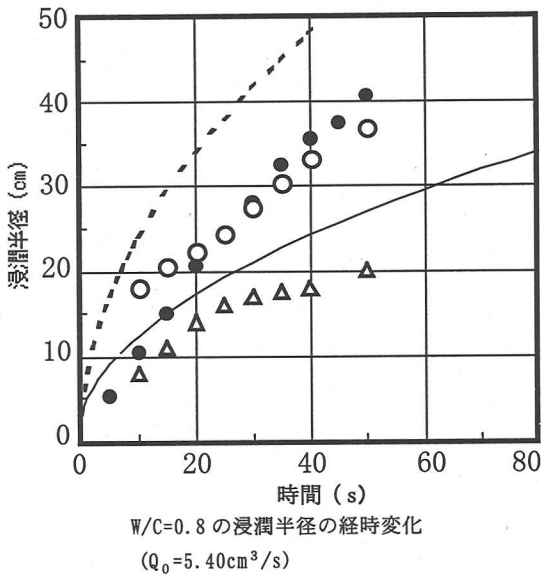
図-5 多孔質媒体として理論構築した場合の
グラウト浸潤半径の経時変化
(理論解は式(13), (15)による)

図-6 ベルヌーイの式を適用し理論構築した場合の
グラウト浸潤半径の経時変化
(理論解は式(27), (28)による)

のエネルギーは圧力エネルギーだけであるが、亀裂中における流れのエネルギーは圧力エネルギーと運動エネルギーの和に変化している。このとき、グラウトの粘性抵抗によってエネルギー損失が生じるため、このエネルギー損失に影響を与える最も主要な要素である流れの運動エネルギーを用いたベルヌーイの式を適用することによりグラウトの

浸潤メカニズムを理論にもとづき説明できる。

一方、多孔質媒体として理論構築した場合には、圧力エネルギーは、グラウト注入孔からそれぞれの亀裂中まで多孔質媒体として連続しており、すべて伝播するという理論にもとづいているため、亀裂中におけるエネルギーの損失を考慮していない。このことが、多孔質媒体として理論構築した場合のグラ



- b=0.04cm (実験値) ▲ b=0.02cm (実験値)
- b=0.04cm (理論解) - - - b=0.02cm (理論解)
- b=0.04cm (目詰まり後の流量を考慮した理論解)

図-7 ベルヌーイの式を適用し理論構築した場合のグラウト浸潤半径の経時変化 (理論解は式(27), (28)による)

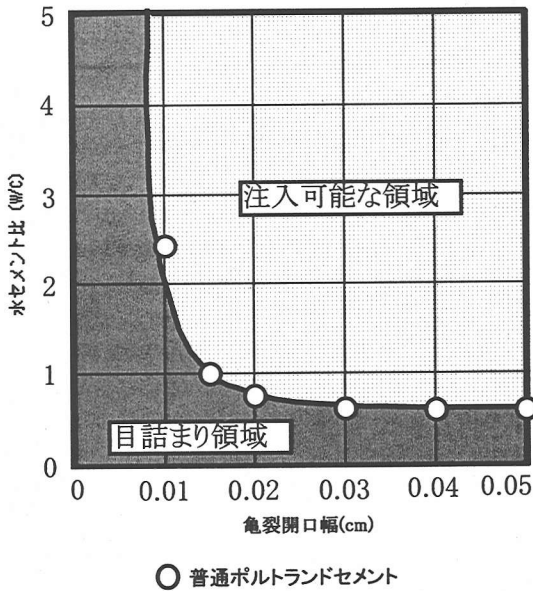


図-8 注入可能な亀裂開口幅と水セメント比の関係

○ 普通ポルトランドセメント

ウトの浸潤挙動について理論解と実験値が一致しない原因であると考えられる。

(4) グラウト設計への適用

複数亀裂に対するグラウト注入についての従来の考え方は、注入可能な複数の亀裂に対しては、亀裂開口幅に応じた透水係数に依存して注入され、比較的小さい亀裂開口幅の亀裂には注入されず、大きい亀裂開口幅の亀裂に偏って注入される、というものであった。しかし、本研究において行った理論構築と実験結果により、複数亀裂におけるグラウトの浸潤挙動を明確に示すことができた。現場においては、複雑な地質条件に対してボーリングデータ等を十分検討し、グラウトの設計、施工方法について判断しなければならないが、ここで得られた知見に基づきグラウト設計への適用について整理しておく。

まず、今回の実験で得られた結果から、複数亀裂に対する注入においては亀裂開口幅の小さい亀裂の方が浸潤半径が大きくなる挙動を示すことが明らかになった。一方、注入可能な亀裂開口幅とグラウトの水セメント比の関係から、注入可能な限界の幅よりも小さい亀裂開口幅の亀裂に対してはグラウトの粒子により目詰まりが生じ、大きい亀裂開口幅の亀裂にグラウトが注入される。

以上のことから、実際の岩盤においてグラウチングを行うときには、まず濃度の薄いグラウトにより小さい亀裂開口幅の亀裂を対象として広い範囲にわたり止水し、その後、濃度の濃いグラウトにより大きい亀裂開口幅の亀裂を止水することが効果的であると考えられる。これは従来より経験的に実施されているグラウチングの手順であり、この手順が理論的な根拠にもとづいていることを明確に示している。さらに、それぞれの亀裂開口幅に対する止水範囲の評価については、式(27), (28)の理論式にもとづきグラウトの浸潤半径を算定することにより、評価が可能となる。

4. 結論

本研究では、複数の亀裂に注入されるグラウトの浸潤メカニズムについて理論を構築し、グラウトの浸潤挙動を実験より把握することにより、効果的なグラウチングについて理論的な評価を行った。

本研究により得られた結論を以下に示す。

- (1) 複数亀裂モデルにおけるグラウトの浸潤挙動に対して、どのような理論に従うかについて、次の2通りの考え方にもとづき理論を構築した。

- ①複数亀裂モデルを多孔質媒体とみなし、従来の考え方にもとづき、亀裂モデル内の圧力水頭は、グラウト注入孔からそれぞれの亀裂中まで多孔質媒体として連続しており、すべて伝播するという理論を構築し浸潤半径を予測する。
- ②それぞれの亀裂に浸潤したグラウトの流動特性に対してより厳密な考え方として、ベルヌーイの式を適用した理論にもとづき浸潤半径を予測する。
- (2)複数亀裂モデルに対して、実際にグラウトがどのような浸潤挙動を示すかを把握するため、グラウト注入実験を行った。その結果、グラウトの浸潤挙動は、上記の(1)②のベルヌーイの式を適用し理論構築した場合の浸潤挙動と同様の傾向を示すことがわかった。さらに、この場合の実験値とベルヌーイの式を適用した理論解を比較すると、浸潤半径の経時変化はよく一致している。
- (3)グラウトが注入孔からそれぞれの亀裂へ浸潤する場合、流れのエネルギーの場所的変化を考えると、注入孔における流れのエネルギーは圧力エネルギーだけであるが、亀裂中における流れのエネルギーは圧力エネルギーと運動エネルギーの和に変化している。このときグラウトの粘性抵抗によってエネルギー損失が生じるため、ベルヌーイの式を適用した方が予測の精度がより向上する。
- (4)複数亀裂モデルにおけるグラウト注入実験結果において、普通ポルトランドセメント $W/C=0.8$ に対して $b=0.02\text{cm}$ の亀裂は目詰まりが生じていると考えられ、この結果は注入可能な限界の亀裂開口幅であることを示している。この注入可能な亀裂開口幅とグラウトの水セメント比の関係は、単一亀裂モデルを用いたグラウト注入実験により明確に示されており、複数亀裂モデルにおいても同様の関係が成り立つことが把握できた。
- (5)従来より経験的に実施されているグラウチングの手順は効果的であることを、理論的に妥当であると評価することができた。
- (6)複数の亀裂に対する止水範囲の評価については、理論式にもとづきグラウトの浸潤半径を算定することにより、評価が可能となる。

これらの結果に加えて、今後、亀裂性岩盤を対象に現場におけるデータとして、グラウト注入孔からポアホールテレビにより岩盤中の亀裂性状を把握し、それにもとづきグラウトの浸潤半径の算定や止水範囲の評価を行い、本研究において得られた成果やその妥当性を検討することにより、効果的なグラウチングの設計方法の確立に寄与できるものと考

えている。

謝辞:本研究を行うにあたり、グラウト注入実験においては、岡山大学大学院修士の吉岡進氏(現山口県萩工事事務所)、山本浩志氏(現東京電力株式会社神流川水力建設所)には多大な労を頂きました。また、岡山大学環境理工学部小松満助手には有益なご助言とご指導、ご協力をいただきました。ここに記して関係各位に深謝の意を表します。

参考文献

- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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。
- 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論文集，p.232，1987。
- 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論文集，pp.135-138，1988。
- 堀 宗朗，小山高寛：フラクチャーネットワークを用いたグラウト解析手法の基礎的研究，地盤工学シンポジウム発表論文集，Vol.42，pp.37-42，1997。
- 永山 功，西村 義，太田弘文：層流・乱流を考慮したダム基礎岩盤の浸透流の挙動に関する一考察，ダム工学，No.36，pp.253-261，1999。
- 地盤工学会：亀裂性岩盤における浸透問題に関するシンポジウム発表論文集，亀裂性岩盤における浸透問題に関する研究委員会報告，pp.132-137，2001。
- 山口嘉一，安仁屋 勉，渋谷秀雄，松本徳久：高透水性岩盤の層流および乱流抵抗則の原位置測定，土木学会論文集，No.454/III-20，pp.27-36，1992。
- 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.
- 14) 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.
 - 15) 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.
 - 16) Oda, M.: Permeability tensor of discontinuous rock masses, *Geotechnique*, 35, No. 4, pp. 483-495, 1985.
 - 17) 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.
 - 18) 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.
 - 19) 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.
 - 20) 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・トレーサー試験, 第26回岩盤力学に関するシンポジウム, pp. 156-160, 1995.
 - 21) 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.
 - 22) 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.
 - 23) 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.
 - 24) 寺戸康隆, 中川誠司, 米田俊一, 塩崎 功, 大西有三, 中川浩二: 亀裂性岩盤におけるグラウト侵入状況のはぎ取り調査, 土木学会論文集, No. 589, pp. 55-66, 1998.
 - 25) 武藤 光, 平野 勇, 水戸義忠, 菊池宏吉: 節理内流路を模擬した透明管供試体によるグラウト充填メカニズムの実験的研究, *ダム工学*, No. 33, pp. 29-38, 1999.
 - 26) 米田俊一, 向上拡美, 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.
 - 27) 武藤 光, 菊池宏吉, 水戸義忠, 鈴木哲也, 平野 勇: 高濃度-低圧型グラウチング工法 (HTLP 工法) の提案と検証, *ダム工学*, Vol. 9, No. 3, pp. 201-214, 1999.
 - 28) 岩佐義明, 金丸昭治: 水理学 I, 朝倉書店, pp. 48-88, 1987.
 - 29) 松本徳久, 山口嘉一: ルジオンテストの各種境界条件下での精度と結果の解釈, 建設省土木研究所報告第2518号, pp. 221-224, 1987.
 - 30) 山本浩志, 西垣 誠, 吉岡 進, 岸 祐和: 開口亀裂におけるグラウトの浸入・流動特性に関する研究, 土木学会第51回年次学術講演会, pp. 642-643, 1996.
 - 31) 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挙動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.

(2001. 11. 28 受付)

STUDY ON THE MECHANISM OF SEEPAGE FLOW IN THE GROUTING FOR MULTIPLE FRACTURED MODEL

Makoto NISHIGAKI and Shin-ichiro MIKAKE

The purpose of study is to improve the grouting method for fractured rock masses. In this paper, the result on the fundamental phenomenon for grasping the properties of grouting injection and seepage flow are discussed. The case of grouting stage is studied about the multiple hydraulic fractured apertures in the injected borehole. So the theory on the mechanism is constructed, and experiment is executed in order to verify the availability of the theory. From the result, it is shown that Bernoulli's law is able to prove the behavior of the grouting. And the theoretical evaluation is executed on the experiential procedure of the grouting.