

(22) 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

建設省 土木研究所 正会員 ○庄司俊介
建設省 土木研究所 正会員 永山 功
建設省 土木研究所 正会員 則松秀晴

An Experimental Study on Injection Properties of Grout in Open Joints

Shunsuke SHOJI, Isao NAGAYAMA and Hideharu NORIMATSU
(Public Works Research Institute, Ministry of Construction)

ABSTRACT

Grouting is a principal method to improve watertightness of foundation rock of dams. Injection properties of grout are studied using simplified joint models in a laboratory. Flyash and bentonite is used as grout. The following are obtained from the tests.

- 1) Flyash grout behaves as Bingham fluid while bentonite as pseudoplastic fluid.
- 2) Thin grout with high injection pressure is required to prevent the closure of grout in a narrow joint.
- 3) Reynolds number defining the boundary between laminar flow and turbulent flow is almost independent to the types of grout.
- 4) The higher rate of grout is injected in an uniform joint than in a joint with a bottleneck, when the opening of joints is larger, the grout is thinner or the injection pressure is higher.

1. はじめに

ダム基礎岩盤のグラウチングは岩盤内の亀裂等の間隙をセメントミルクで充填し、岩盤の遮水性を改良する工事である。しかし、グラウチングの施工技術は多くの施工実績に基づいて経験的に得られたものであり、各種岩盤に対するグラウチングの手法は、それぞれの現場において試行錯誤的に決定されている。このような現状から、対象とする岩盤に最も適したグラウチングの注入仕様を合理的に決定する手法の確立が強く望まれている。そのためには、まず、岩盤内に注入されたグラウトがどのような特性をもって流動しているのかを知ることが必要である。

本報文は、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模型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結果を報告するものである。

2. 実験の概要

実験は、図-1に示すように金属製のスペーサを挟んで2枚の亚克力板を重ねることにより開口亀裂模型を作製し、それに対してグラウトを注入し、圧力勾配と流速の関係を調べるものである。実験装置全体の外観を図-2に示す。

次に実験ケースを表-1に示す。流路形状については、流路の一部に閉塞部がある場合の影響を調べるために、図-3の (a)に示すように流路内に閉塞部がない無閉塞モデルと (b)に示すように流路の中央に突起状の閉塞部がある閉塞モデルの2つを設定した。なお、閉塞モデルの閉塞部の流路幅は一般部(閉塞部以外の部分)の流路幅の1/5である。また、注入材料については、ダム基礎岩盤の

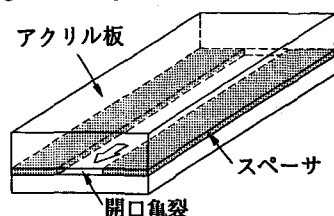


図-1 亀裂模型模式図

グラウチングではセメント液（C液）を用いるのが一般的であるが、本実験においてはフライアッシュ液（F液）とベントナイト液（B液）を使用した。これは、F液がC液と同様な懸濁液であり、C液と比較した場合に、①水硬性がないため、粘性の時間依存性がなく、取扱いが容易であること②フライアッシュの比重がセメントの比重の2/3程度であるため、ブリージング速度が遅いことなどの特長を有しているからである。また、B液は、ベントナイトの粒子がフライアッシュの粒子と比べてかなり小さいことから、懸濁粒子の大きさによる流動特性の差異を調べるために用いたものである。なお、F液については、材料の分離を防ぐため、フライアッシュ重量の5%のベントナイトを添加した。

表-1 実験ケース

項目	ケース
流路形状	無閉塞モデル、閉塞モデル（図-3 参照）
亀裂幅	0.3(0.31), 0.5(0.50), 0.7(0.69) mm
注入材料	水、フライアッシュ液（W/F=6, 1.5）、ベントナイト液（W/B=25, 9）

（注）1. 亀裂幅の（ ）外は呼び幅、（ ）内は実際の幅
2. 注入材料のW/F, W/Bは、水とフライアッシュあるいはベントナイトとの重量比

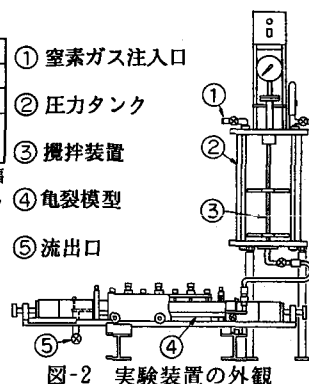


図-2 実験装置の外観

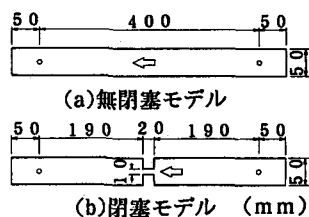


図-3 流路形状平面図

実験時の注入圧力は、亀裂内の平均圧力勾配が10～50 gf/cm²/cm程度となるように設定した。この圧力勾配は、理想的な水平面亀裂に対して66mm径のボーリング孔から圧力10kgf/cm²で注水した場合に、孔中心から概ね0.4～1.8mの間で得られる圧力勾配に相当している（影響半径を10mとした場合）。なお、流量測定は、各ケースとも上記の圧力範囲で4つ以上の圧力レベルに対して行った。

3. 実験結果

3.1 実験結果の概要

実験から得られた亀裂内の圧力勾配と流速の関係を図-4に示す。ここで、亀裂幅0.3mmの実験結果にF液

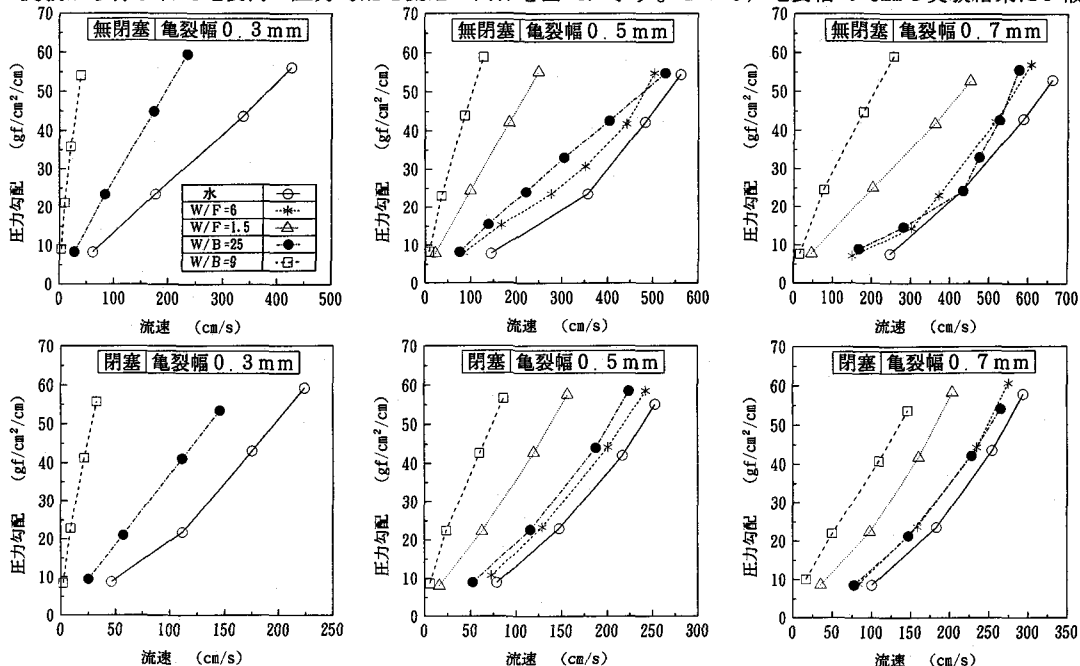


図-4 圧力勾配と流速の関係

のデータがないのは、注入開始後まもなく亀裂流入部が懸濁粒子により閉塞してしまったためである。その状況を図-5に示す。図は W/F=6の実験結果であり、縦軸は亀裂流入部の前後の圧力を表わしている。亀裂幅0.3mm の場合、亀裂流入前の圧力がほぼ一定であるのに対し、亀裂流入後の圧力は時間経過とともに急激に減少し、約10秒後に流入部が閉塞されたことを示している。この閉塞までの時間は注入圧力が小さいほど短い。なお、図には示していないが、注入圧力がさらに小さい1kgf/cm²以下の場合には、注入開始直後に流入部が閉塞した。また、W/F=1.5 の場合には、注入圧力が2.5kgf/cm²でも注入開始直後に流入部が閉塞した。

次に、流出したグラウトの濃度の測定結果を表-2に示す。流出したグラウトの濃度は多少変動しているが、概ね一定であると見なすことができる。また、実験中の注入材料の温度は約14～17℃の範囲であり、各注入材料については最大 2℃程度の変動であった。この程度の温度差による注入材料の粘性の変化はわずかであると考えられるため、実験値の温度補正は行わなかった。

3. 2 グラウトの流動特性

グラウトの流動特性を明らかにするため、無閉塞モデルにおける圧力勾配と流速の関係について検討を行った。まず、ニュートン流体が亀裂内を流動する場合の流速は式(1)で表される (Poiseuilleの式)。

$$v = \frac{t^3}{12\mu} i_p \quad \dots\dots(1)$$

ここに、v : 平均流速、t : 亀裂幅、μ : 粘性係数、i_p : 圧力勾配
この式を粘性係数を求める式に変形し、各注入材料の圧力勾配と流速の測定値を用いて見かけの粘性係数を求め、流量との関係を示したのが図-6である。これより、水については、流量が小さいところでは流量が変

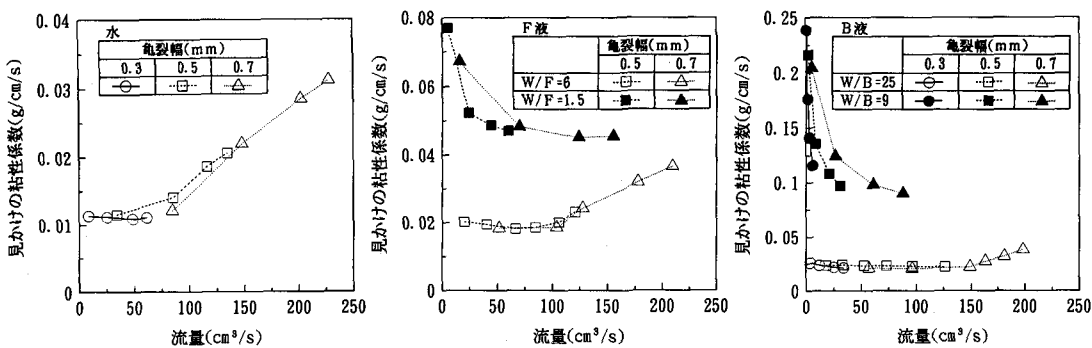


図-6 流量と見かけの粘性係数の関係

化しても見かけの粘性係数は変化せず、ニュートン流体とみなすことができる。また、流量が大きくなると、ある点から見かけの粘性係数が増加し始め、流れが層流から乱流に移行したことを示している (レイノルズ数については式 (4)参照)。一方、F液およびB液については、流量の増加とともに見かけの粘性係数が減少しており、濃度が濃いほどその傾向は顕著である。なお、濃度が薄い場合には、水の場合と同様に流れが層流から乱流に移行している。F液およびB液についてはニュートン流体とは見なせないため、ビンガム流

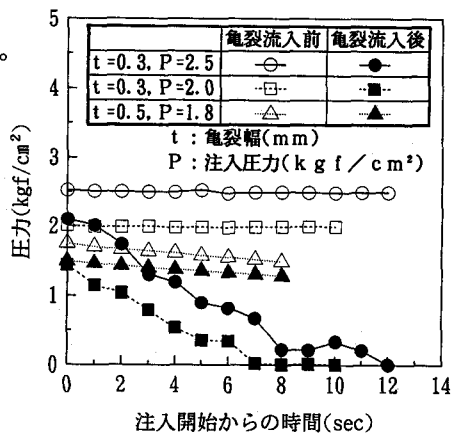


図-5 圧力の経時変化(F液, W/F=6)

表-2 流出グラウトの濃度

注入材料	濃度の変動範囲
F液, W/F=6	5.81~6.60
F液, W/F=1.5	1.49~1.52
B液, W/B=25	26.8~31.3
B液, W/B=9	9.05~10.0

体あるいは擬塑性流体を仮定して、その流動特性の近似を試みた。ビンガム流体あるいは擬塑性流体が亀裂内を流動する場合の流速は、それぞれ式(2)および式(3)で表わされる。

$$v = \frac{t^2}{12\mu_B} \left\{ 1 - 3 \frac{f_y}{t i_p} + 4 \left(\frac{f_y}{t i_p} \right)^3 \right\} i_p \quad \dots\dots(2)$$

ここに、 μ_B : 塑性粘度、 f_y : 降伏値

$$v = \frac{t^{n+1}}{2^{n+1}(n+2)\mu_P} i_p^n \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 μ_P : 擬塑性粘度、 n : 塑性状態を表わす定数

これらの式を用いて、F液およびB液の圧力勾配と流速の関係について回帰曲線を求めた結果の一例を図-7に示す。これより、F液はビンガム流体、B液は擬塑性流体として近似できるといえる。なお、図には示していないが、他の亀裂幅および濃度の液についても同様の結果となった。

次に、図-6に示した各注入材料の層流から乱流への移行点に着目し、次式により定義されるレイノルズ数により限界レイノルズ数を計算してみると、

$$Re = \frac{2t\rho v}{\mu_A} = \frac{2\rho Q}{\mu_A B} \quad \dots\dots(4)$$

ここに、 ρ : 流体の密度、 μ_A : 見かけの粘性係数、 Q : 流量、 B : 流路幅

水では2600程度、 $W/F=6$ のF液では2300程度、 $W/B=25$ のB液では2700程度である。これより、限界レイノルズ数は材料によらずほぼ一定の値となることが分かる。

次に、乱流域における流動特性について検討する。乱流域における圧力勾配と流速の関係は一般に次式で表わされる。

$$v = a i_p^b \quad \dots\dots(5)$$

ここに、 a, b : 流路、流体により定まる定数

水の場合、 b は0.5である。式(5)を用いて、亀裂幅が0.7mmのときの水、 $W/F=6$ のF液および $W/B=25$ のB液について、圧力勾配と流速の関係の回帰曲線を求めた結果を図-8に示す。 b の値は水および $W/F=6$ のF液では、約0.5となっているが、 $W/B=25$ のB液では約0.35であり、非線形性が大きくなっている。

3.3 流路の部分的な閉塞による影響

流路の断面急変部における損失圧力は、一般に次式で表わされる。

$$P_s = f_s \rho \frac{v^2}{2} \quad \dots\dots(6)$$

ここに、 P_s : 損失圧力、 f_s : 損失係数

そこで、この式の両辺を密度 ρ で除し、損失係数が注入材料の種類および亀裂幅によってどのように変化するかを見たものが図-9である。なお、この際、損失圧力は次式より求めた。

$$P_s = P_1 - i_{p1}L_1 - i_{p2}L_2 \quad \dots\dots(7)$$

ここに、 P_1 : 閉塞モデルにおいて、一般部流速が v のときの全流路長に対する圧力差

i_{p1} : 無閉塞モデルにおける、流速 v に対する圧力勾配

i_{p2} : 無閉塞モデルにおける、流速 $5v$ に対する圧力勾配

L_1 : 一般部の長さ、 L_2 : 閉塞部の長さ

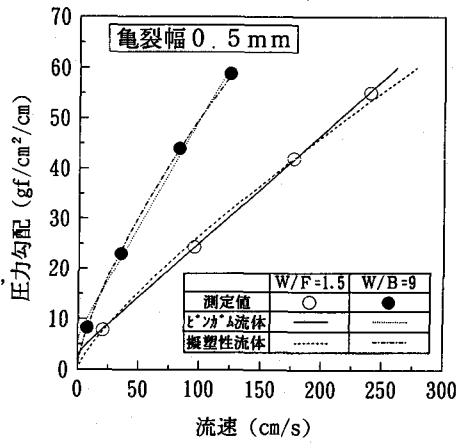


図-7 圧力勾配-流速の回帰曲線

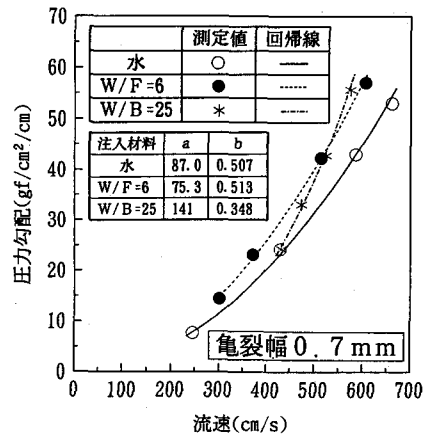


図-8 圧力勾配-流速の回帰曲線

この図より、損失係数は、注入材料あるいは亀裂幅によらずほぼ一定の値であることが分かる。回帰曲線より求めた損失係数の値は約35である。なお、図-9において、 $W/B=9$ のB液の流速が小さい範囲で損失圧力が大きくなっているデータが見受けられるが、これが材料の特性であるかどうかは明確でない。

次に、閉塞モデルと無閉塞モデルで亀裂内の平均圧力勾配が等しいときの流速比と圧力勾配の関係を、水およびF液について図-10に示す。

図によると、圧力勾配の増加に伴って流速比が減少する部分がある。これは、無閉塞モデルおよび閉塞モデルの一般部における流れがいずれも層流の場合であり、圧力勾配の増加に伴って断面急変部の損失圧力の増加率が摩擦損失圧力の増加率よりも大きくなることを示している。一方、圧力勾配が大きくなると、圧力勾配が増加しても流速比はほとんど変化しなくなる。これは、無閉塞モデルおよび閉塞モデルにおける流れがいずれも乱流の場合であり、圧力勾配にかかわらず断面急変部の損失圧力と摩擦損失圧力の割合がほぼ等しいことを示している。

次に、亀裂幅あるいは注入材料による流速比の違いをみると、無閉塞モデルおよび閉塞モデルの一般部における流れがいずれも層流の場合には、流速比は亀裂幅が小さいほど、また、注入材料の濃度が濃いほど大きくなる傾向にある。これは、亀裂幅が小さいほど、あるいは粘性が大きいほど、閉塞による影響が相対的に小さくなることによる。また、無閉塞モデルおよび閉塞モデルにおける流れがいずれも乱流の場合には、亀裂幅あるいは注入材料の違いが流速比に及ぼす影響は小さくなっている。

4. まとめ

以上の実験結果をまとめると以下ようになる。

- ① 幅 0.3mmの亀裂にF液を注入した場合、注入開始後まもなく流入部が閉塞する。この場合、注入量を増やすためには、低濃度のグラウトを高圧で注入しなければならない。粒子の大きさの小さいB液については、幅 0.3mmの亀裂に対しても十分注入が可能である。
- ② F液はビンガム流体、B液は擬塑性流体に近い流動特性を示す。
- ③ 式(4)による限界レイノルズ数は、注入材料によらずほぼ一定である。
- ④ 乱流域における圧力勾配と流速の間の非線形性は、グラウトの種類により異なる可能性がある。
- ⑤ 流路の部分的な閉塞による損失圧力は、流速のほぼ2乗に比例し、その損失係数は、注入材料や亀裂幅によらずほぼ一定の値である。ただし、流速の小さい範囲の損失圧力については、さらに検討が必要である。
- ⑥ 同程度の連続性をもち、亀裂内の閉塞度が異なる2種類の亀裂に対して、一定の圧力でグラウト注入を行う場合、流れが層流のときには、亀裂幅が大きいほど、グラウトの濃度が薄いほど、また注入圧力が大きいほど、グラウトは閉塞部の少ない亀裂により多く流れる傾向にある。一方、流れが乱流のときには、亀裂幅、注入材料および注入圧力の違いが2種類の亀裂の流量比に及ぼす影響は小さい。

<参考文献>

- 1) 川田裕郎：改訂 粘度，計量管理協会編，コロナ社，1969

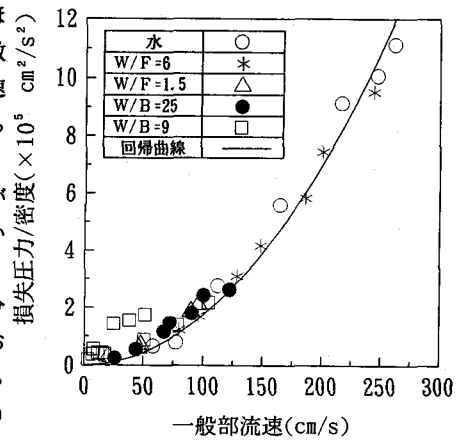


図-9 損失圧力と流速の関係

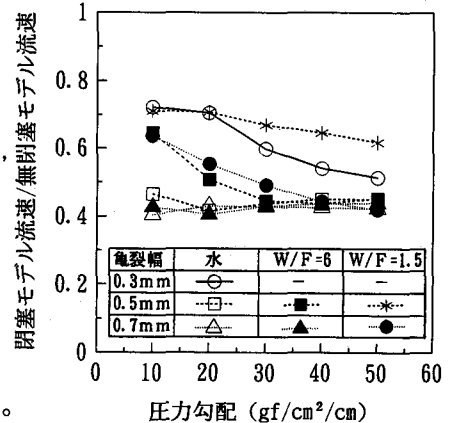


図-10 圧力勾配と閉塞モデル流速／無閉塞モデル流速の関係