

(55) 亀裂性岩盤模型を用いたグラウトの流動特性試験

A STUDY ON INJECTION FLOW PROPERTIES OF GROUT USING JOINT NET MODELS OF ROCK MASS

新高 庸介*・永山 功**・谷口 正基***

Yosuke NIITAKA, Isao NAGAYAMA and Masaki TANIGUCHI

Grouting is a principal technique to improve watertightness of foundation rock of dams. Injection flow properties of grout were studied using joint net models of rock mass in a laboratory. Methylcellulose was used as a substitute of cement grout since a series of tests were conducted using the same model. The following conclusions were obtained from the test.

- 1) Grout flows in a manner of laminar flow or turbulent flow according to grout concentration or the joint width.
- 2) The injection rate of grout by pressure is changed largely in laminar flow than turbulent flow.
- 3) There exists the most suitable concentration of grout which makes the injection rate of cement become maximum.

1 はじめに

ダム基礎岩盤のグラウチングは、基礎岩盤内の亀裂にセメントミルクを注入することによって基礎岩盤の遮水性を改良し、あわせて堤体底面に作用する揚圧力を軽減することを目的として実施される。しかしながら、堤体の築造がコンクリートなどの人工材料を用いる工事であるのに対し、グラウチングは自然界に存在する多種多様な岩盤内の亀裂を対象とする工事であるため、その注入仕様は、過去の施工実績を参考にして試行錯誤的に決定されているのが現状である。このため、グラウチングの合理的な設計、施工手法の確立が強く望まれている。本論文は、岩盤内の亀裂をモデル化した亀裂網模型にグラウトを注入し、亀裂幅、グラウトの濃度および注入圧力がグラウトの注入特性に及ぼす影響を明らかにしようとするものである。

2 実験装置

今回の実験に用いた亀裂網模型は、図-1に示すように、一辺の長さ約1000mm、厚さ20mmの2枚の亚克力板の間に厚さ5mmの亚克力板100枚を並べ、格子状の亀裂網を表現したものである。なお、模型は3基作製し、各模型の亀裂幅はそれぞれ0.3mm、0.6mm、1.2mmとした。また、模型の中央にはグラウトの注入口を設けた。

* 正会員 建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室 主任研究員

** 正会員 建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室 室長

*** 正会員 建設省土木研究所ダム部ダム構造研究室 部外研究員

一方、グラウトの注入装置は、図- 2に示すように、圧力ポンベ、調圧タンク、材料タンクから構成される。材料タンク内のグラウトは圧力ポンベ内の窒素ガスで加圧され、図- 1に示した亀裂模型に注入される。この際、調圧タンクによって窒素ガスの圧力を調整し、一定圧力で安定した加圧ができるようになっている。

3 注入材料

3.1 注入材料の選定

ダム基礎岩盤のグラウチングでは、グラウトとしてセメントの水溶液を用いるのが一般的である。しかし、本実験では、同一模型に対してグラウトの濃度や注入圧力を変えて繰り返し実験を行うため、実験の再現性を考慮して、注入材料として水硬性がなく、また広範囲に粘度調整が行えるメチルセルロース系増粘剤（水中コンクリートの粘度調整用に使用されている）の水溶液（以後、疑似グラウトという）を用いることにした。

3.2 注入材料の性質

メチルセルロース系増粘剤を用いた疑似グラウトのみかけの粘度をセメント水溶液の粘度と比較した結果を表- 1に示す。なお、粘度は B 型粘度計を用いて測定した。表によれば、濃度 0.3%（質量比）の疑似グラウトの粘度は水セメント比 W/C=4 のセメント水溶液とほぼ等しく、また、濃度 1% の疑似グラウトの粘度は水セメント比 W/C=2 のセメント水溶液にほぼ等しいことがわかる。なお、メチルセルロース系増粘剤を用いた疑似グラウトの粘度変化は混合後 8 時間経過までほとんど認められなかった。

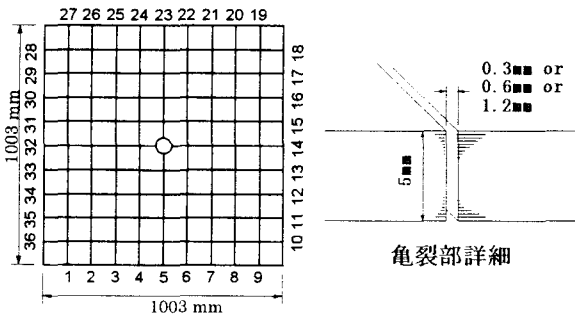
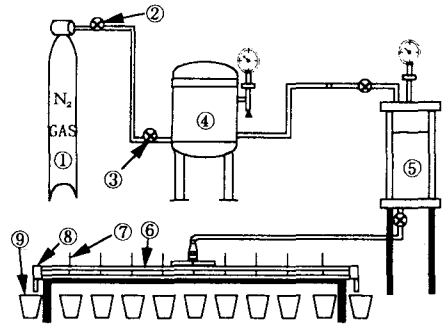


図- 1 亀裂網模型



①圧力ポンベ、②開閉弁、③調圧弁、④調圧タンク、⑤材料タンク、⑥亀裂網模型、⑦圧力変換器、⑧流出口、⑨流量計測用容器

図- 2 実験装置の概要

表- 1 粘度の比較

メチルセルロース系増粘剤水溶液		セメント水溶液	
濃度	粘度(MPa/s)	配合	粘度(MPa/s)
0%	2	W/C=∞	2
0.3%	5	W/C=4	5
1%	14	W/C=2	13

表- 2 実験ケース

注入材料	疑似グラウト(メチルセルロース系増粘剤水溶液)
濃度	0~2.5%
注入圧力	0.2~5.0kgf/cm ²
亀裂幅	0.3, 0.6, 1.2mm

4 実験方法

4.1 実験ケース

検討を行った実験ケースを表- 2に示す。疑似グラウトの濃度は0.0~2.5%の間で変化させ、疑似グラウトの注入圧力（調圧タンクの圧力）は0.2~5.0kgf/cm²とした。

4.2 計測方法

疑似グラウトの注入圧力は材料タンクの圧力によって管理した。また、疑似グラウトの（時間あたり）総流量は亀裂網模型の外周の各亀裂出口から出てくる疑似グラウトの流出量を測定時間で除して求めた。なお、総流量の計測は、疑似グラウトが亀裂網を完全に充填して全ての亀裂出口から疑似グラウトが流出し始めてから開始した。また、実験中の気温、水温の変化はほとんどなかったため、実験時の温度による粘度の補正は特に行わなかった。

5 実験結果

5.1 注入圧力と疑似グラウトの総流量の関係

図- 3は、種々の亀裂幅の模型に対し、疑似グラウトの濃度をパラメータとして注入圧力と総流量の関係を示したものである。図によれば、注入圧力と総流量を対数で表示した場合、両者の関係は高い直線性を示すことがわかる。しかし、グラフの勾配は、疑似グラウトの濃度によって変化し、さらに疑似グラウトの濃度が同じであっても亀裂幅によって変化している。これは、疑似グラウトの濃度や亀裂幅によって疑似グラウトの流れの形態が変化するためと考えられる¹⁾。すなわち、疑似グラウトが濃い場合や亀裂幅が狭い場合には、流れが層流になってグラフの勾配は1に近づき、疑似グラウトが薄い場合や亀裂幅が広い場合には、流れが乱流になってグラフの勾配は0.5に近づいている（層流の場合、総流量は動水勾配に比例し、乱流の場合、総流量は動水勾配の平方根に比例する）。なお、疑似グラウトの流れの形態（層流、乱流）は注入圧力によっても変化すると考えられるが、今回の実験の範囲では注入圧力の影響は見られなかった。

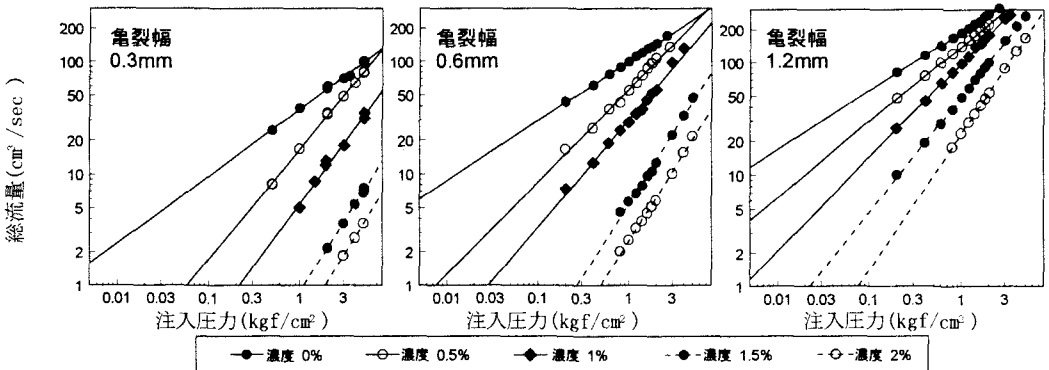


図- 3 注入圧力と疑似グラウトの総流量の関係

5.2 亀裂幅と疑似グラウトの総流量の関係

図- 4は、1.0kgf/cm²、2.0kgf/cm²、3.0kgf/cm²の3種類の注入圧力に対し、疑似グラウトの濃度をパラメータとして亀裂幅とグラウトの総流量の関係を示したものである。図によれば、亀裂幅と疑似グラウトの総流量を対数で表示した場合、両者の関係は比較的高い直線性を示すことがわかる。また、グラフの勾配は疑似グラウトの濃度によって変化し、疑似グラウトが薄い場合にはグラフの勾配は緩やかになり、疑似グラウトが濃い場合にはグラフの勾配は急になっている。すなわち、薄い疑似グラウトの場合には、グラフの勾配は1.0程度で疑似グラウトの総流量は亀裂幅に概ね比例し、濃い疑似グラウトの場合には、グラフの勾配

は 2.0~2.5 程度で亀裂幅の増加とともに疑似グラウトの総流量が大きく増加している。これも、疑似グラウトの流れが乱流（前者）であるか層流（後者）であるかによるものと考えられる（乱流の場合、総流量は亀裂幅に比例し、流れが層流の場合、総流量は亀裂幅の 3 乗に比例する）。

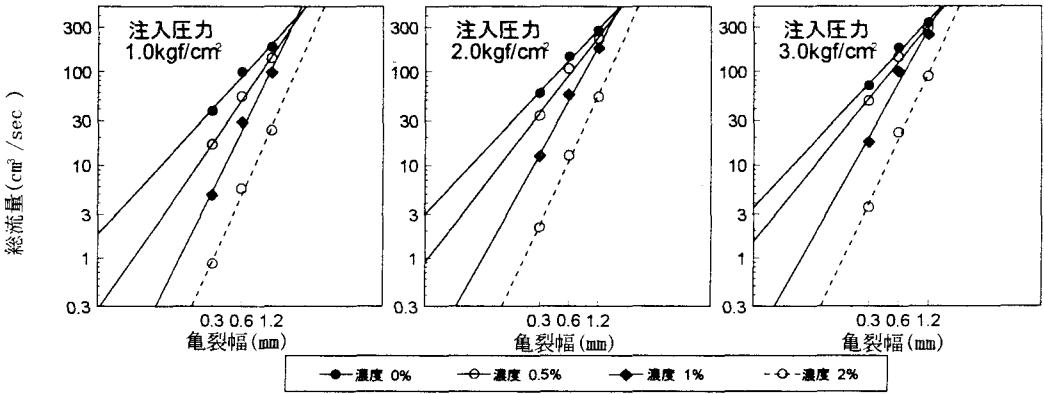


図-4 亀裂幅と疑似グラウトの総流量の関係

5.3 疑似グラウトの濃度と総流量の関係

図-5は、1.0kgf/cm²、2.0kgf/cm²、3.0kgf/cm²の3種類の注入圧力に対し、亀裂幅をパラメータとしてグラウトの濃度と総流量の関係を示したものである。図によれば、いずれの注入圧力とも、疑似グラウトの濃度が低い場合には濃度の差による総流量の差は少ないが、濃度がある程度大きくなると、濃度の増加によって総流量が大きく低下する傾向を示している。これは、疑似グラウトの流れが乱流の場合には濃度の影響が比較的小さいが、疑似グラウトの流れが層流になると濃度の影響が大きくなるためである。なお、図によれば、亀裂幅が広い場合ほど、または注入圧力が高い場合ほど疑似グラウトの総流量が低下し始める濃度が高くなるが、これは、亀裂幅が広いほど、または注入圧力が高いほど疑似グラウトの流れが乱流になりやすいためである。

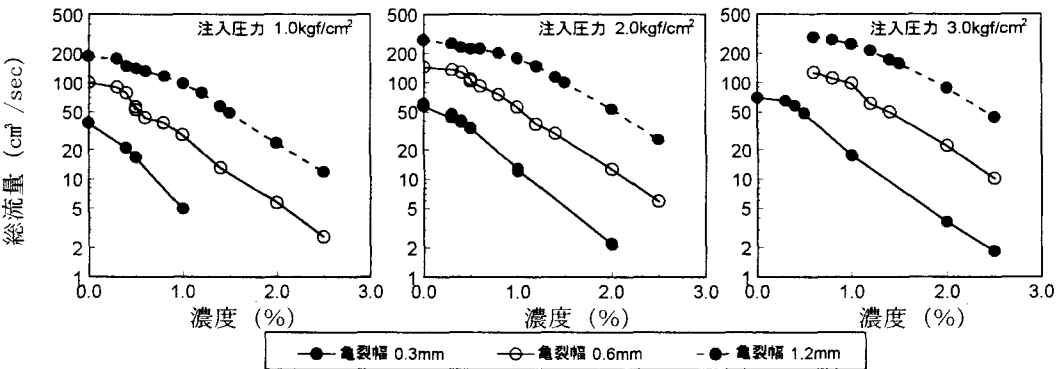


図-5 疑似グラウトの濃度と総流量の関係

5.4 グラウトの注入効率

グラウトの注入効率を高めるには、グラウトの（時間当たり）流量を大きくするよりも、セメントの（時間当たり）注入量を大きくすることが重要となる。すなわち、薄すぎるグラウトではグラウトの流量は大きくなるがセメントの注入量は小さくなり、また、濃すぎるグラウトではグラウトの流量が小さくなってセメントの注入量も小さくなる。したがって、グラウチングではセメントの注入量を最大にする濃度が存在する。そこで、メチルセルローズ系増粘剤の粉体を疑似のセメントと仮定して、疑似グラウトの濃度と粉体注入量の関係を計算した結果が図-6である。図によれば、いずれの注入圧力に対しても、粉末注入量を最大にす

る疑似グラウトの濃度（最適濃度）が存在することがわかる。なお、この最適濃度は亀裂幅が大きくなるにしたがって徐々に高くなっている。また、注入圧力が高くなると最適濃度は若干高くなるようであるが、その程度はわずかである。

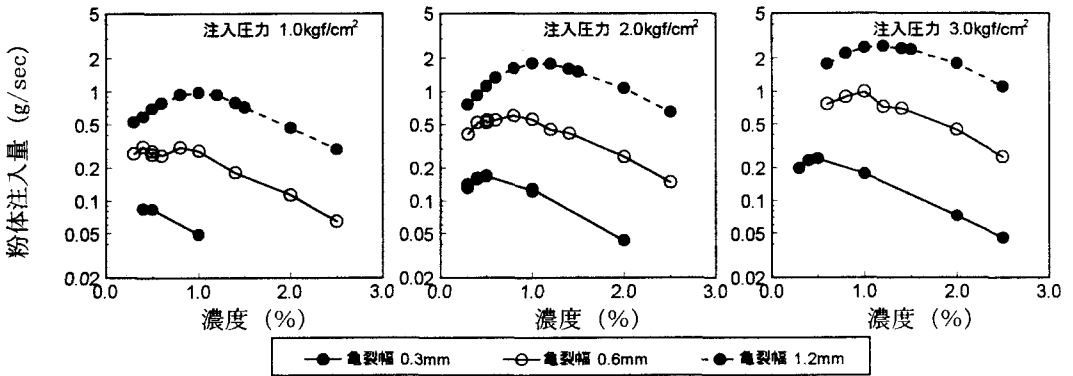


図-6 疑似グラウトの濃度と粉体注入量の関係

6 まとめ

今回の実験では、メチルセルロース系増粘剤の水溶液を疑似のグラウトと仮定して、岩盤内の亀裂をモデル化した亀裂網模型に対するグラウトの流動特性について検討した。今回の実験結果から明らかになった事項をとりまとめると次のとおりである。

- ① 岩盤内の亀裂を流れるグラウトは注入圧力、濃度、亀裂幅の大小によって層流状態または乱流状態で流れると考えられる。今回の実験では、注入圧力の設定範囲の関係もあって、注入圧力の変化によるグラウトの流動特性の差は明確でなかったが、濃度および亀裂幅の変化によってグラウトの流動特性に明瞭な差が認められた。
- ② 今回の実験結果によれば、濃いグラウトまたは幅の狭い亀裂の場合、注入圧力の変化に対するグラウトの流量の変化は相対的に大きく、薄いグラウトまたは幅の広い亀裂の場合、注入圧力の変化に対するグラウトの流量の変化は相対的に小さかった。これは、前者の場合、グラウトの流れが層流になり、後者の場合、グラウトの流れが乱流になるためである。
- ③ 今回の実験結果によれば、濃いグラウトの場合、亀裂幅の変化によるグラウトの流量の変化は相対的に大きく、薄いグラウトの場合、亀裂幅の変化によるグラウトの流量の変化は相対的に小さかった。これは、前者の場合、グラウトの流れが層流になり、後者の場合、グラウトの流れが乱流になるためである。
- ④ グラウトの濃度が低い場合には濃度の差による総流量の差は少ないが、濃度がある程度大きくなると、濃度の増加によって総流量が大きく低下する。これは、流れが乱流の場合には濃度の影響は比較的小さいが、流れが層流になると濃度の影響が大きくなるためである。
- ⑤ 特定の亀裂に対しては、時間あたりのセメント注入量を最大にするグラウト濃度（最適濃度）が存在する。この最適濃度は亀裂幅が大きくなるにしたがって高くなる。注入圧力が高くなっても最適濃度は若干高くなるが、その程度はわずかである。

参考文献

- 1) 永山 功・新高 庸介・佐々木 隆・斉藤 正明：亀裂性岩盤モデルを用いたグラウトの流動特性に関する検討，第26回岩盤力学に関するシボゾウム講演論文集，pp6～10,1995.1.