

土 木 研 究 所 資 料

亀裂性岩盤模型を用いたグラウト の流動特性試験

平成7年8月

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室

Copyright © (1995) by P.W.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted, nor translated into a machine language without the written permission of the Director General of P.W.R.I.

この報告書は、土木研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部又は一部の転載、複製は、土木研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。

亀裂性岩盤模型を用いたグラウト の流動特性試験

ダム構造研究室 室 長 永 山 功

主任研究員 新 高 庸 介

研 究 員 佐々木 隆

研 究 員 斎 藤 正 明*

*現 中国地方建設局温井ダム工事事務所工務課工務第一係長

要 旨

ダムの建設にあたっては、基礎岩盤の遮水性の改良を目的としてグラウチングが実施される。しかし、グラウチングの仕様は過去の施工実績に基づいて経験的に定めているのが現状であり、その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。本論文は、グラウチングの仕様の合理的決定手法を確立するための基礎的研究として、開口亀裂内を流れるグラウトの流動特性について実験的検討を加えたものである。

キーワード：グラウト，亀裂性岩盤，流動特性，高粘性流体

は じ め に

建設省では、治水、利水を目的として現在までに補助ダムを含めて約350のダムを完成させているが、今後も400を超えるダムの建設が必要となっている。しかし、近年、複雑な地質条件を有するダムサイトの増加とともに、基礎岩盤の止水処理工であるグラウチングの工事量が増大し、合理的なグラウチングの設計、施工手法の確立が強く望まれている。

本論文は、グラウチングの設計の合理化を目指して、岩盤内の開口亀裂をモデル化した模型を作製し、グラウト材料として水中コンクリートに増粘剤として用いられるメチルセルローズ系増粘剤を使用して、岩盤内の亀裂を流れるグラウトの流動特性について検討した結果をとりまとめたものである。

目 次

はじめに

1. 研究の目的	1
2. 実験の方法	2
2. 1 実験装置の概要	2
2. 2 実験の手順	7
3. 予 備 実 験	8
3. 1 概 要	8
3. 2 開口亀裂網モデルの再現性の確認	8
3. 3 注入材料	10
4. 実 験 方 法	15
4. 1 実験ケース	15
4. 2 計測方法	15
5. 開口亀裂網モデルの流動特性	17
5. 1 注入圧力と総流量の関係	17
5. 2 濃度と総流量の関係	19
5. 3 亀裂内の圧力分布	21
5. 4 個々の亀裂毎の流量特性	23
5. 5 亀裂出口閉塞による流量の変化	27
6. まとめと今後の課題	30
参考文献	30

1. 研究の目的

ダム基礎岩盤のグラウチングは、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により、ダムの機能と安全性を確保することを目的として実施される。したがって、ダムの建設において、グラウチングは堤体の築造と同様な重要性をもつ工事である。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、基礎岩盤グラウチングは自然に存在する岩盤内の亀裂を閉塞する工事であり、各ダムサイトにおいて、過去の施工実績を参考にして試行錯誤的にその仕様を決定しながら施工を実施しているのが現状である。

本研究の目的は、亀裂性岩盤におけるグラウトの注入特性を検討し、合理的なグラウチングの手法を確立することの一助とするものである。すなわち、岩盤内の亀裂をモデル化した開口亀裂網模型を作製し、その模型にメチルセルローズ系増粘剤の水溶液（以下、高粘性流体という）を材料としたグラウトを注入し、粘性および注入圧力の違いによるグラウト流動特性の差を明らかにしようとするものである。主な検討項目は以下のとおりである。

- グラウトの濃度の違いによるグラウトの流動特性の差
- 注入圧力の違いによるグラウトの流動特性の差
- 亀裂閉塞に伴うグラウト流動特性の変化

2. 実験の方法

2. 1 実験装置の概要

今回実施した実験では、図-2.1に示すような開口亀裂網模型を使用した。この模型は一辺が1003mm、厚さ20mmの2枚の亚克力板の間に一辺100mm、厚さ5mmの亚克力板100枚を並べ、粘性に伴う流動特性の差を明確にできるよう平成3年度の実験を参考に幅約0.3mmの亀裂を格子状に配置したものである。

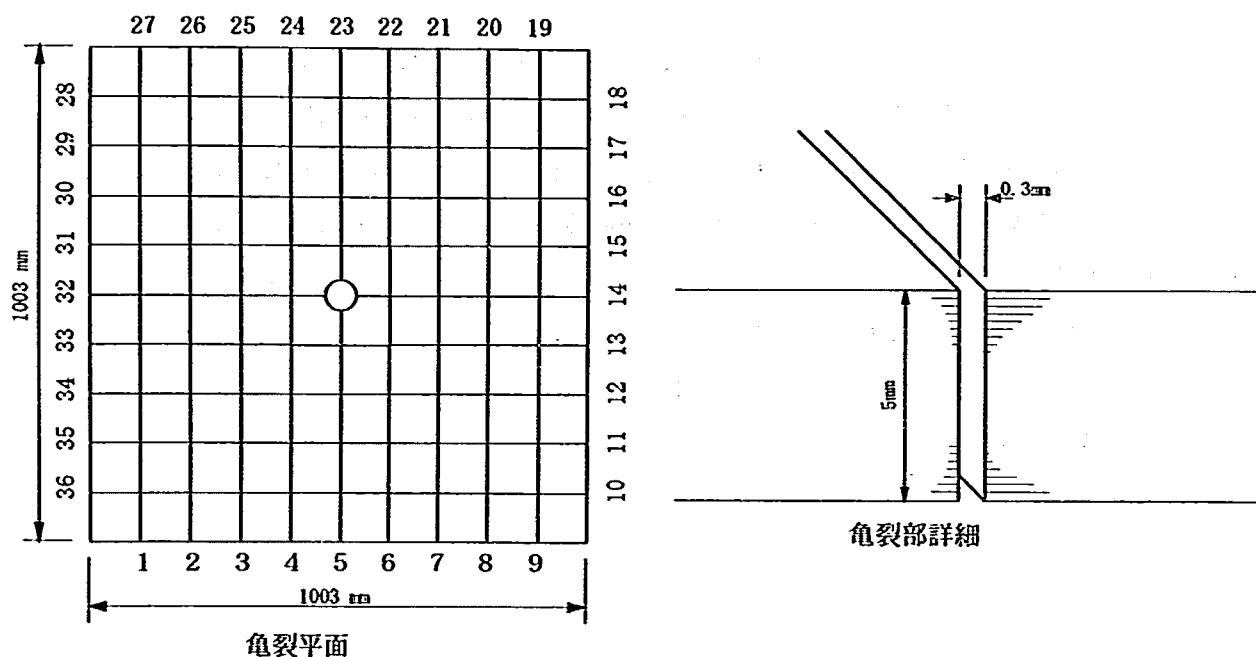


図-2.1 開口亀裂網模型

写真-2.1, 2.2に開口亀裂網模型およびその亀裂の状況を示す。写真に示すように、100枚の亚克力板は、2箇所の小ボルトによって下板に固定し、中央ボルトを用いて上板に固定することとした。この際、板の表面に亀裂に影響を与えない程度に薄くグリスを塗布し、上下板とのすき間が流路とならないように工夫した。

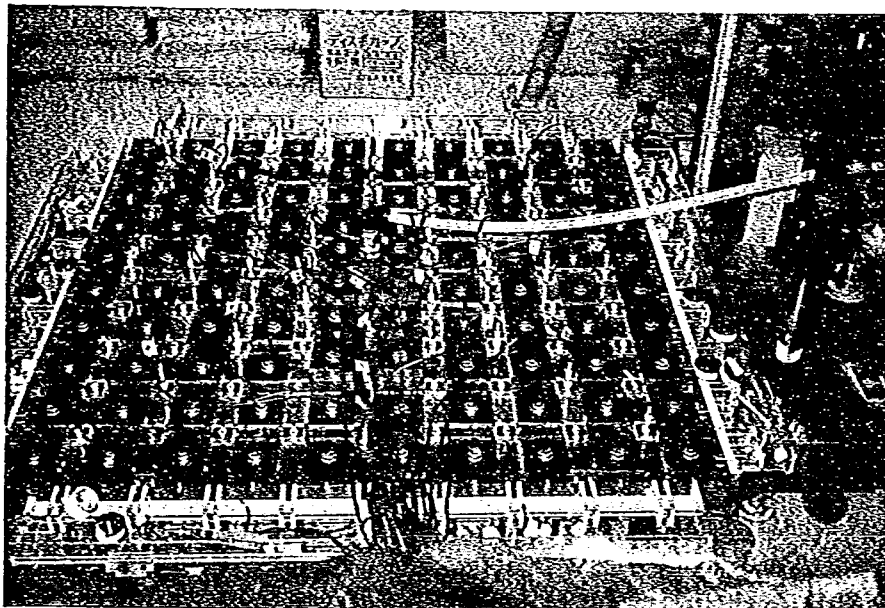


写真-2.1 開口亀裂網模型

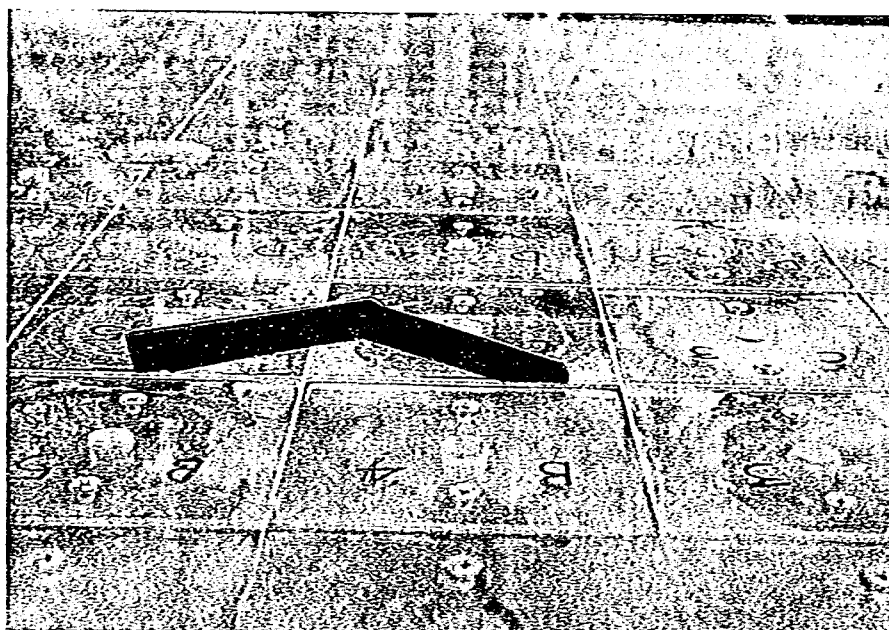


写真-2.2 亀裂間隔の調整状況

実験装置は、図-2.2および写真-2.3に示すように、流入部、開口亀裂網模型部より構成される。流入部は、材料タンク内のグラウトを窒素ガスで加圧し、図-2.1に示した亀裂網模型の中央に設けた注入口から亀裂内にグラウトを注入するものである。窒素ガスは、ポンペより供給され、調圧弁、調圧タンクを経て一定圧力で安定した加圧ができるようになっている。

一方、模型の外周の各亀裂出口から出てくるグラウトの流量はそれぞれの流量計測用容器に貯ったグラウトの量を計測時間で除して求めるものとした。なお、亀裂出口には流路の切替え装置がついており、グラウトの流量が安定した段階で流量計測用容器にグラウトを流入させる構造となっている。

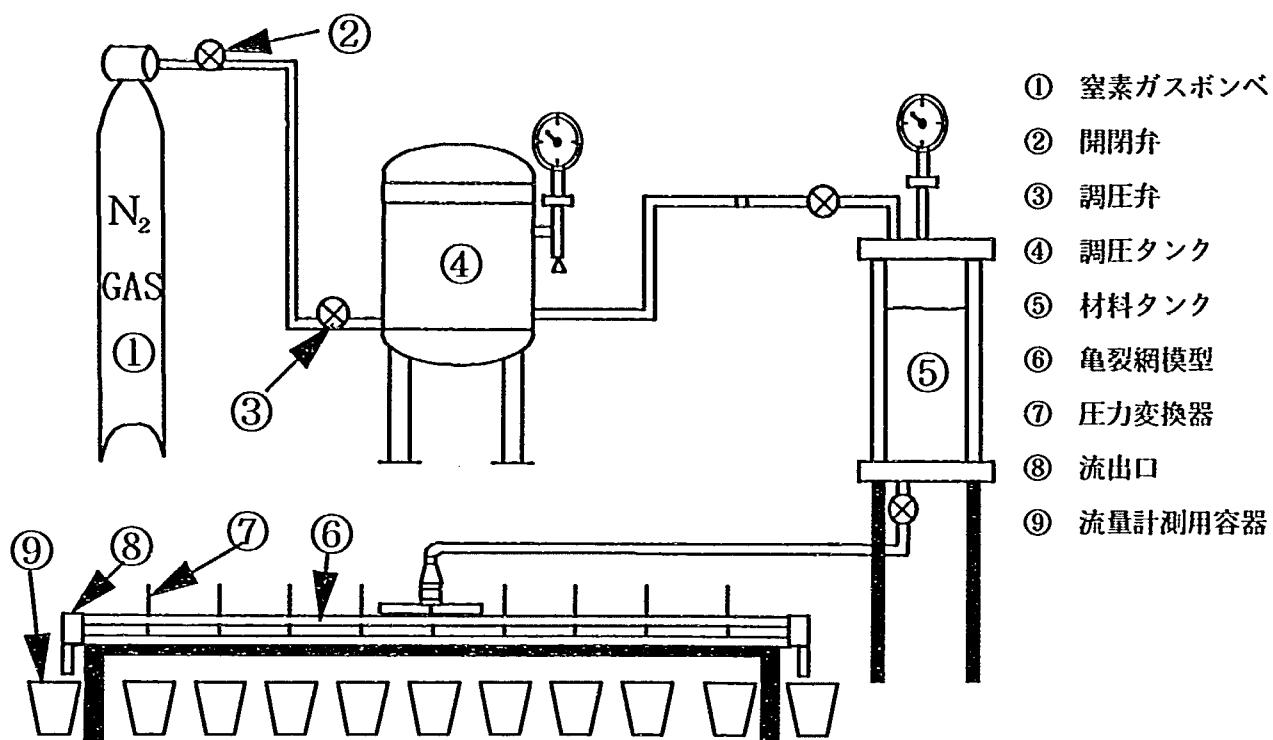


図-2.2 実験装置概要図

また、開口亀裂網模型部には写真-2.4のように流入口を除く各亀裂の交点80箇所に圧力変換器が設置できている。今回行った実験では、開口亀裂網模型内の圧力は、図-2.3に示す組合せで計測し、データロガーに記録した。実験に使用した圧力変換器の諸元を表-2.1に示す。また、データロガーの外観を写真-2.5に、スイッチボックスの外観を写真-2.6に示す。

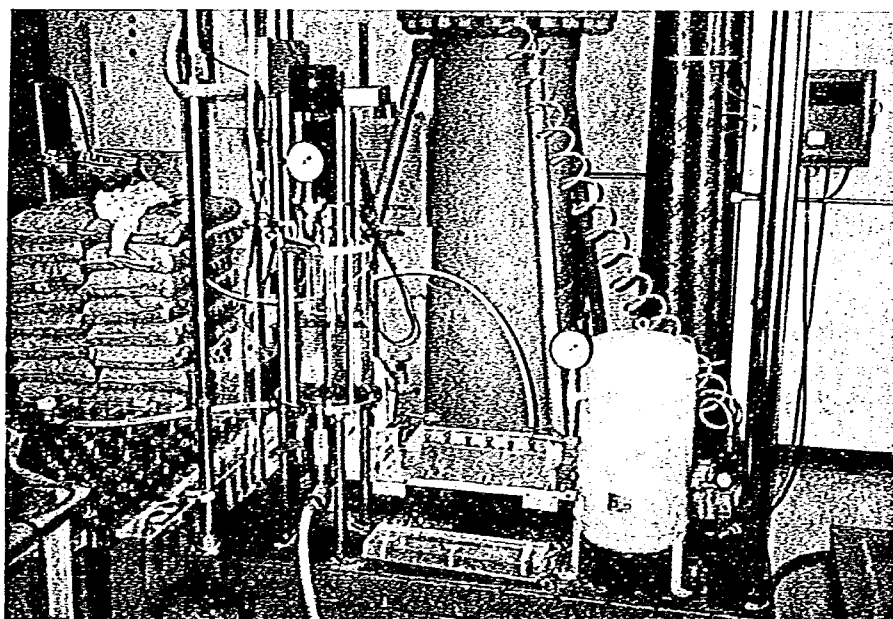
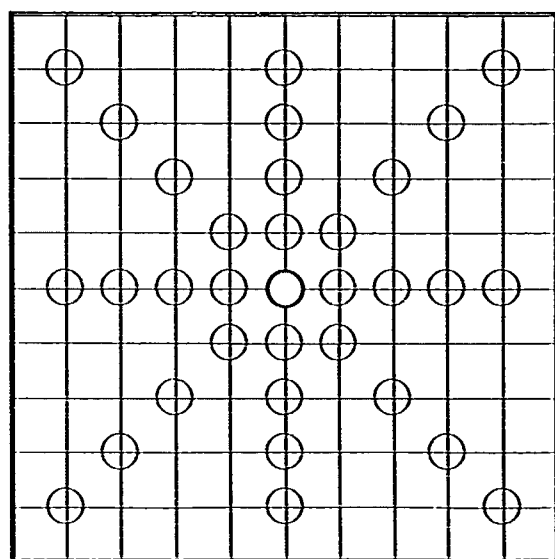
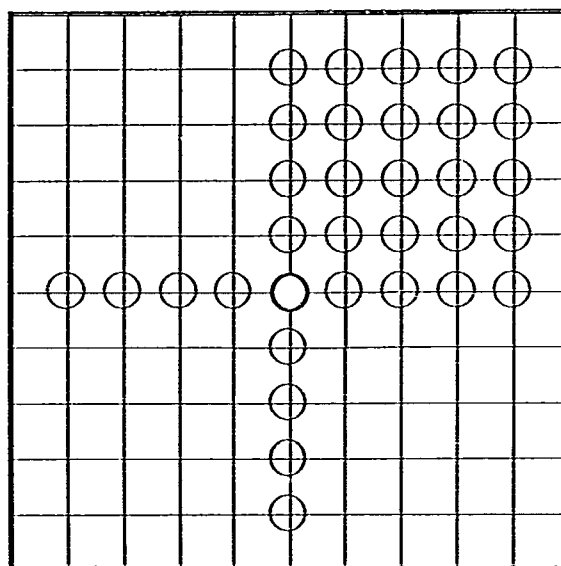


写真-2.3 実験装置外観



放射配置



象限配置

図-2.3 圧力計測位置

表-2.1 圧力変換器の諸元

形 式	ひずみゲージ式
容 量	5kgf/cm ²
受圧面直径	5.5mm
機 種 名	PGM-5KC

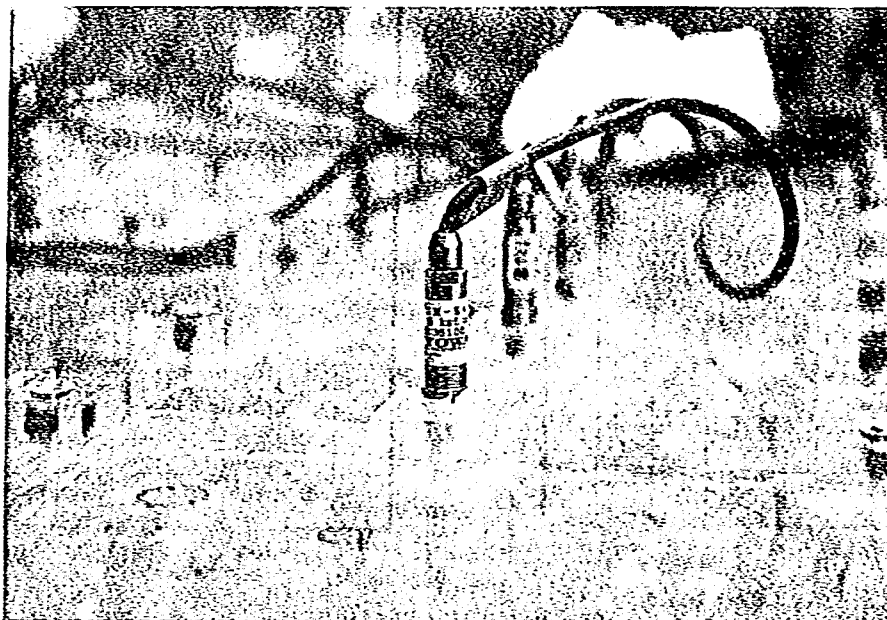


写真-2.4 圧力変換器取付け状況

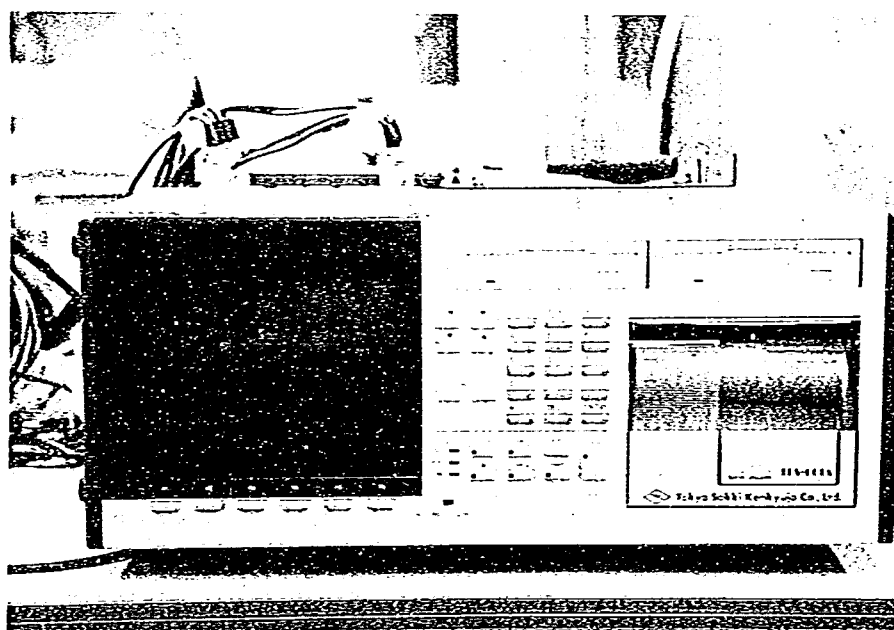


写真-2.5 データロガー

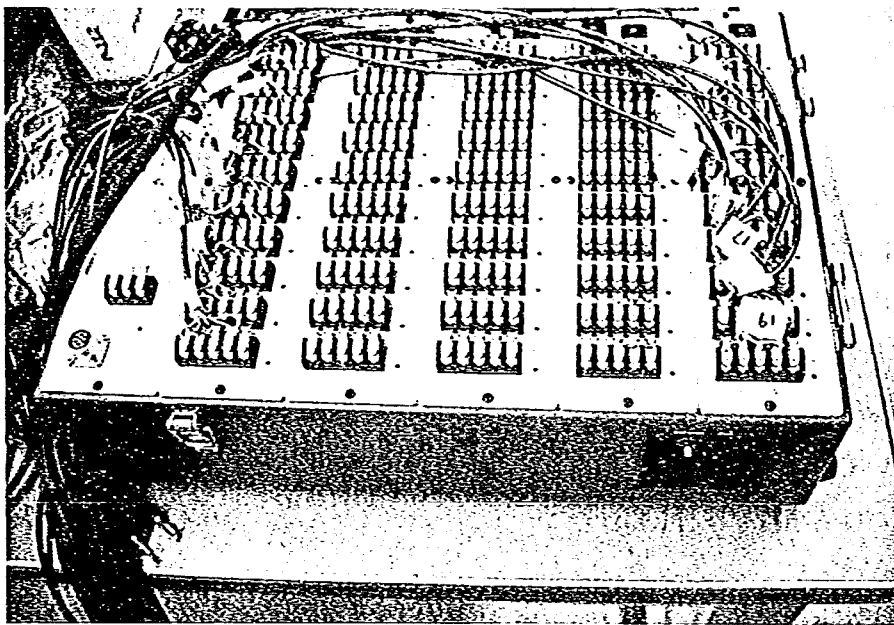


写真-2.6 スイッチボックス

2. 2 実験の手順

実験にあたっては、亀裂網模型および使用材料の基本的特性を把握するための予備実験を重ね、その結果に基づいて、注入圧力、グラウト濃度の違いによる亀裂網内のグラウトの流動特性の検討を行った。実験の流れを図-2.4に示す。

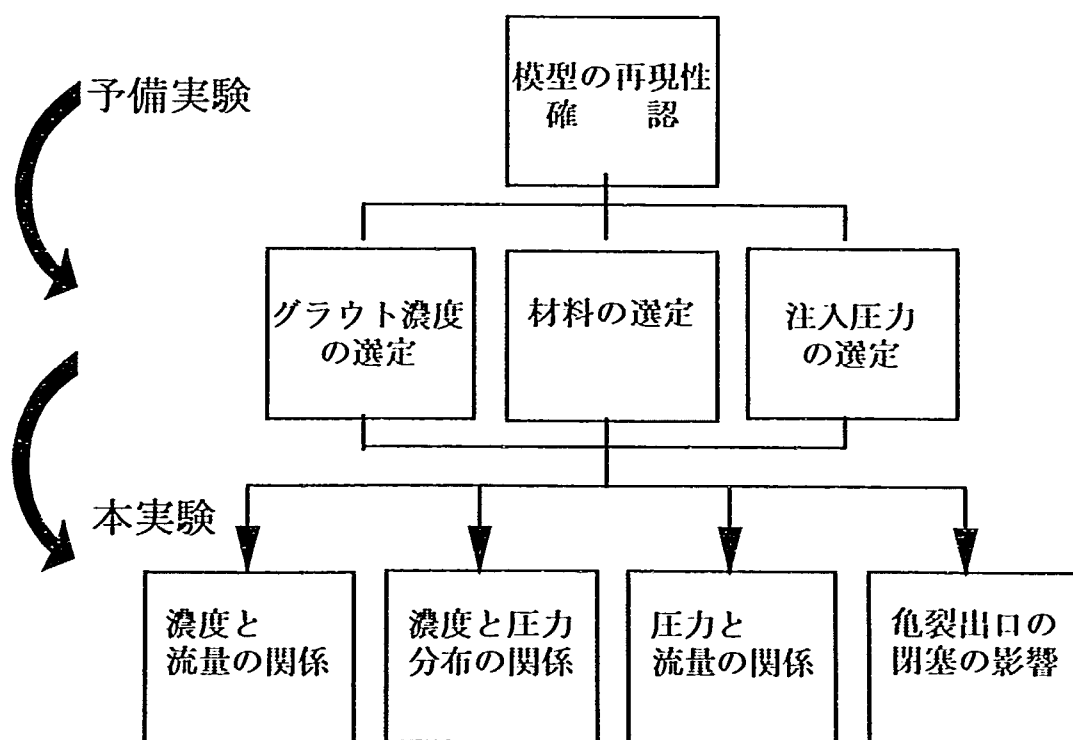


図-2.4 実験の流れ

3. 予備実験

3. 1 概要

本実験に先だって、亀裂網模型および高粘性流体の基本的な特性を把握するとともに、本模型の再現性を確認し、本実験に使用する材料の選定、実験の所要時間の確認、実験に用いるグラウトの濃度および注入圧力の範囲を選定するための予備実験を実施した。以下にその内容を述べる。

3. 2 開口亀裂網模型の再現性の確認

今回の実験において、最も重要となるのは亀裂網模型を用いた実験の再現性である。ここでは再現性の確認として、以下にあげる項目を検討した。

- ① 注入圧力の変化の繰り返しに対する再現性
- ② 模型の分解・洗浄に対する再現性

3. 2. 1 注入圧力履歴に対する再現性

注入圧力を最高注入圧力まで徐々に上げ、その後圧力を弱めていった場合に、同一圧力で同じ流動特性を示さなければ、注入圧力の変化に対する流動特性の変化を考察することが難しい。したがって、本亀裂網模型に図-3.1に示す注入圧力履歴で水を注入し、各亀裂出口での流出量の変化を測定した。その結果は、図-3.2に示すとおりであり、各亀裂出口とも、昇圧段階と降圧段階との流出量に差がないことから、注入圧力履歴に対する再現性があることが確認できた。

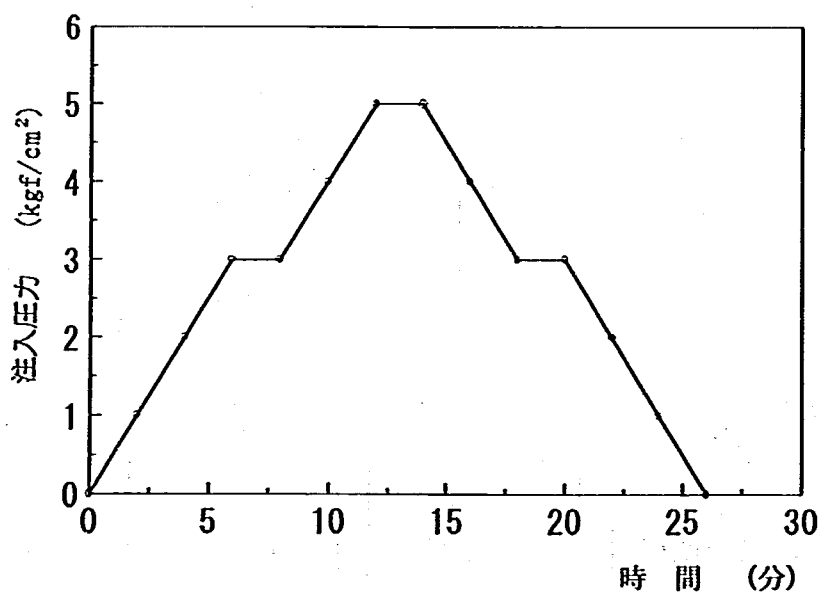


図-3.1 注入圧力履歴

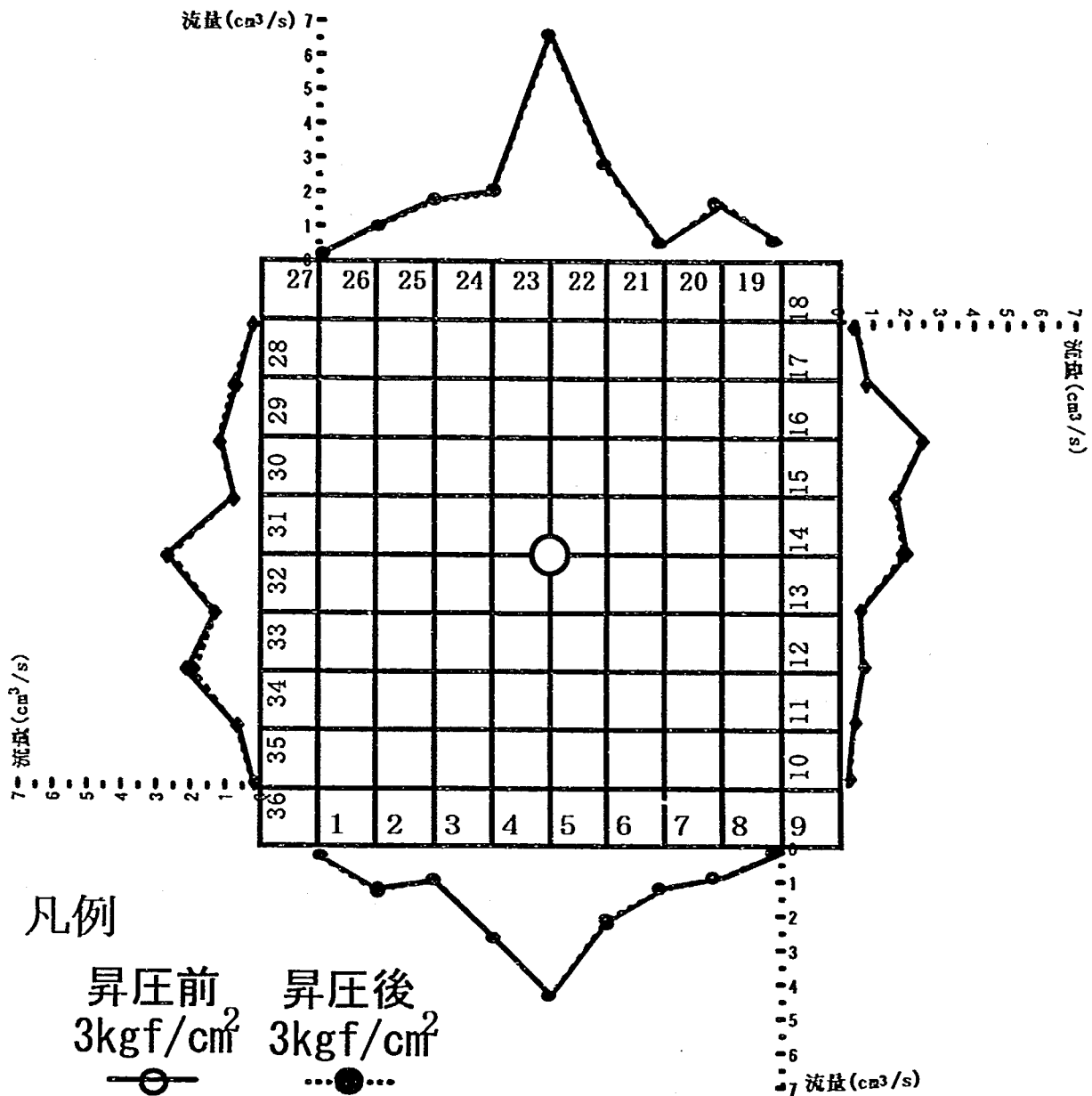


図-3.2 昇降圧に対する再現性の確認

3. 2. 2 模型の分解・洗浄に対する再現性

本亀裂網模型は、亀裂幅が0.3mmと狭いため、どのようなグラウト材料を用いるにしても繰り返し実験を行う場合には、亀裂部の洗浄が不可欠である。しかし、図-3.3に示すとおり模型を一度分解すると同じ注入圧力、注入材料に対しても総流量が変化し、模型の分解・組立てに対する再現性はないことが判明した。しかし、同じく図-3.3に示すとおり分解を行わず洗浄水による洗浄を行う場合には、同一注入圧力、注入材料に対しての総流量は変化せず、模型の再現性は存在することが確認できた。

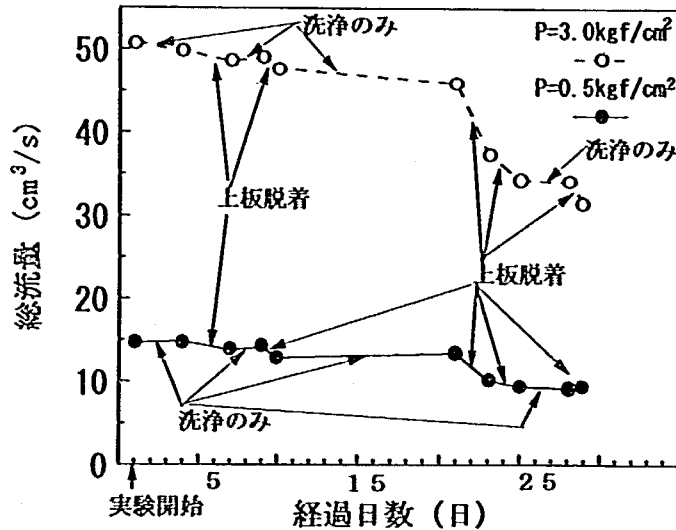


図-3.3 模型の上板脱着による再現性の確認

3. 3 注入材料

3. 3. 1 注入材料の選定

前述した再現性の検討から、本実験においては、模型の分解を行わないで、亀裂の洗浄のみとする必要があることが判明した。実際の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が、本実験では、同一模型に対してグラウトの粘性や注入圧力を変えて繰り返し実験を行う必要があるため、使用するグラウト材料は、流水のみで洗浄が可能であり、かつグラウトの粘度がセメント水溶液の粘度を模擬でき、さらには、セメント水溶液のような水硬性を伴わないものとする必要がある。使用材料として備えるべき条件を整理すると次のとおりとなる。

- ① グラウト濃度が任意に変えられるもの。
- ② 模型を分解すると再現性がなくなるので、洗浄に当たっては分解を要しないもの。
- ③ 実験回数が多くことから、長期間保存しても材料として安定した性質があるもの。
- ④ 実験材料として危険性のないもの。
- ⑤ 流通に特殊性がなく、安定してメーカーもしくは販売店より供給が受けられるもの。

前述の条件に対して様々なものを検討したが、まず油脂類、特にオイルは洗浄性に難があり、温度変化による影響も大きいので除外した。また、粒子性のあるフライアッシュも検討したが、平成3年度の実験で、亀裂幅0.5 mm以下では粒子径の関係から閉塞するという報告が得られており、対象からはずした。このほかに、砂糖水、洗剤（シャンプーなど）、入浴剤なども検討したが、水に飽和濃度まで溶かしても、表-3.1に示すとおり、見かけの粘度が水の3倍程度までしか増加せず、セメント水溶液の代用品として難がある。このことは、実際に亀裂網模型に同じ注入圧力で注入しても図-3.4に示すとおり水とほとんど差がなかったことから裏付けられる。このような試行錯誤の末に、水中コンクリートの粘度調整に用いるメチルセル

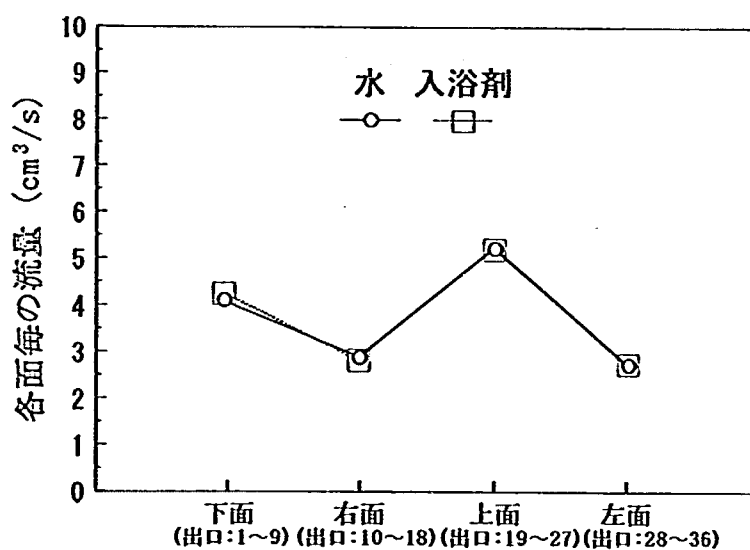
ローズ系増粘剤（信越化学工業製，製品名：SC600）が条件を満たす材料であることが判明したため，その材料特性をさらに試験によって確認することとした。

表－3.1 混合水溶液の粘度

	水	砂糖水	入浴剤
1	1.5 mPa・s	6.5 mPa・s	5.5 mPa・s
2	2.4	7.0	4.5
3	2.1	6.0	4.5
4	1.5	6.5	4.5
5	2.5	7.5	5.4
平均	2.0	6.7	4.9

気温；22° C

水温；20° C



図－3.4 水と入浴剤の流動特性

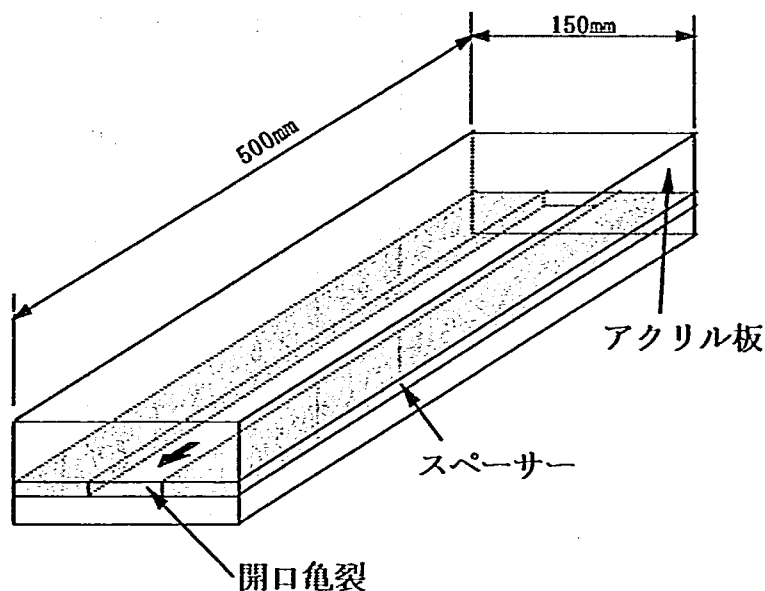
3. 3. 2 注入材料の性質

ここでは、メチルセルローズ系増粘剤（SC600）を用いた水溶液（以下高粘性流体と呼ぶ）について、洗浄性、粘度（時間依存性）、流動特性の確認を行った。この増粘剤は、粉末状の製品をコンクリートに混和することでコンクリートの粘度を増すものであるが、今回は水に粉末を混合する形で使用した。

粘度および流動特性の確認は、本亀裂模型のほかに、写真－3.1に示す平B型粘度計、図－3.5に示す平行平板水路を用いて行った。



写真－3.1 平B型粘度計



図－3.5 平行平板水路

高粘性流体の実験後の洗浄性については、本亀裂網模型の亀裂幅（0.3 mm）程度でも加圧水による水洗いのみで良好な洗浄性が得られた。

B型粘度計を用いた見かけの粘度の測定では、図－3.6に示すとおり、やや粘度の時間依存性はあるが、2.5%までの濃度では、高粘性流体作成後の時間経過による粘度の増加は8時間程度までは無視できることがわかる。

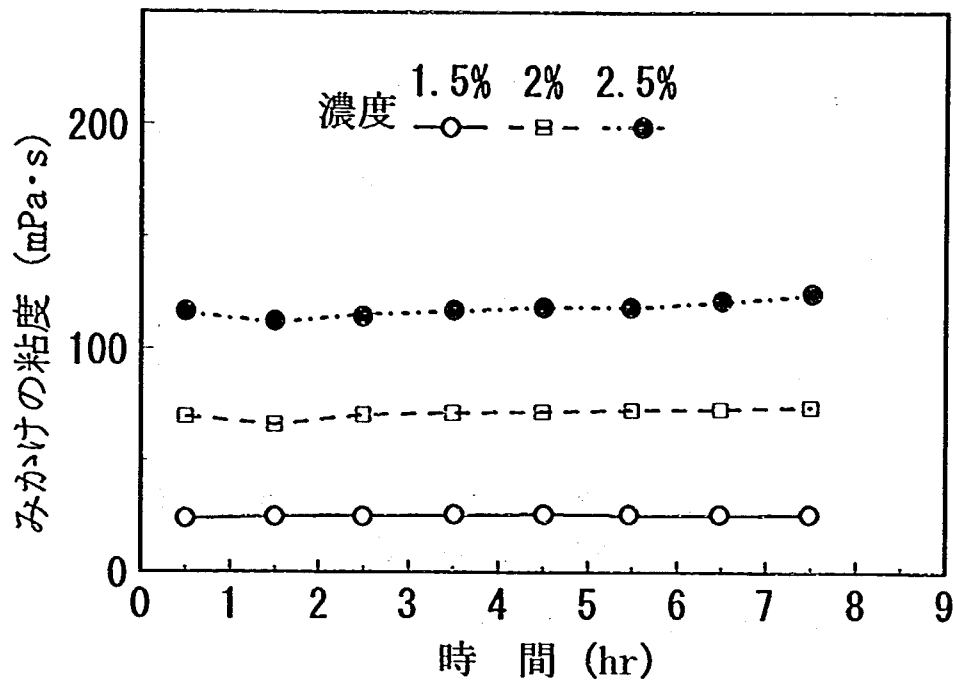


図-3.6 高粘性流体のみかけの粘度の経時変化

また、平行平板流路を用いた高粘性流体の流動形態の試験結果によれば、図-3.7に示すとおり、この流体は非ニュートン性があり、ビンガム流体もしくは擬塑性流体として近似できることもわかった。

このほか、増粘剤に炭酸水素ナトリウム (NaHCO_3) を添加すると増粘剤の攪拌速度が増し、粘度がすぐに立ち上がることがわかった。そこで、本実験では、高粘性流体 1 ℓ に対して炭酸水素ナトリウム (NaHCO_3) を 7 g 添加して高粘性流体を作成した。

また、この高粘性流体の粘度をセメント水溶液と比較したものが表-3.2である。表によると、見かけの粘度に限っていえば、重量濃度 0.3 % の高粘性流体の粘度は、水セメント比 $W/C=4$ のセメント水溶液の粘度とほぼ等しく、また、重量濃度 1 % の高粘性流体の粘度は、水セメント比 $W/C=2$ のセメント水溶液の粘度とほぼ等しいことがわかる。そこで、本実験で使用する高粘性流体の濃度は、模型内の流動性、加圧装置の能力等を考慮して、重量濃度 2.5 % までとした。

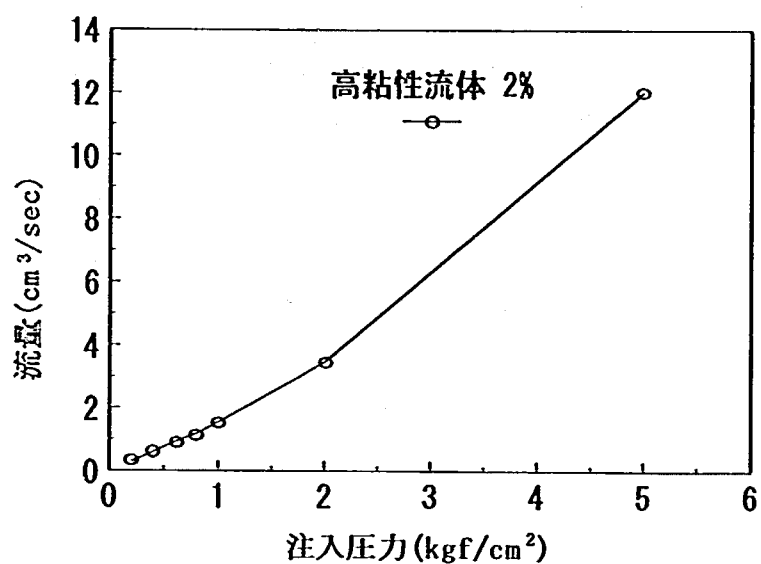


図-3.7 平行平板水路における高粘性流体の流動特性

表-3.2 実験に用いた高粘性流体とセメント水溶液の粘度

高粘性流体		セメント水溶液	
濃度	粘度(mPa・s)	配合	粘度(mPa・s)
0% (水)	2	W/C=∞	2
0.3%	5	W/C=4	5
1%	14	W/C=2	13

4. 実験方法

4. 1 実験ケース

予備実験の結果を踏まえて、以下に示す方法によって開口亀裂網模型のグラウト流動特性を把握する実験を実施した。

検討を行った実験ケースを表-4.1に示す。注入材料の濃度は、前述したとおり0～2.5%の間で変化させた（最終的には、0, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 2.0, 2.5%の7濃度）。また、実験時の注入圧力は0.2～5 kgf/cm²とした。これは、亀裂内の平均圧力勾配に換算すると4～100gf/cm²/cm程度となる。

表-4.1 実験ケース

注入材料	水 および 高粘性流体
濃 度	0, 0.3, 0.4, 0.5, 1.0, 2.0, 2.5 %
注入圧力	0.2 ～ 5.0 kgf/cm ²

4. 2 計測方法

2章で述べたように、グラウトの流量は亀裂網模型の外周で各亀裂から出てくるグラウトの流出量から計測した。また、亀裂内の圧力分布は格子状の亀裂の交差部に圧力変換器を取り付けて測定した。注入圧力は、グラウトの材料タンクの圧力によって管理した。

流量の計測時間は、材料タンクの容量による制約のため、注入材料を水とした場合、最大300秒までとなる。また、計測時間と測定精度の関係は図-4.1に示すとおりであり、各計測時間において、総流量の計測値は30秒の計測でも120秒の計測と大差ないが、各亀裂出口の計測流量は、流出量の少ないところで計測誤差によると考えられるバラツキが出ており、そのバラツキを分散で見ると、最低でも45秒以上が必要であると判断される。今回の実験では、その時間にやや安全性を付加して、注入材料が水の場合、その計測時間は60秒とした。また、高粘性流体では、注入圧力を小さくすると流出量が少なくなり、計測精度が落ちることを考慮して、最長で1200秒（20分）の計測時間とした。各材料の計測時間を表-4.2にとりまとめて示す。なお、流量の計測は、水または高粘性流体が亀裂網に完全充填されてから開始することとした。また、実験時の気温、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性の補正は特に行わなかった。

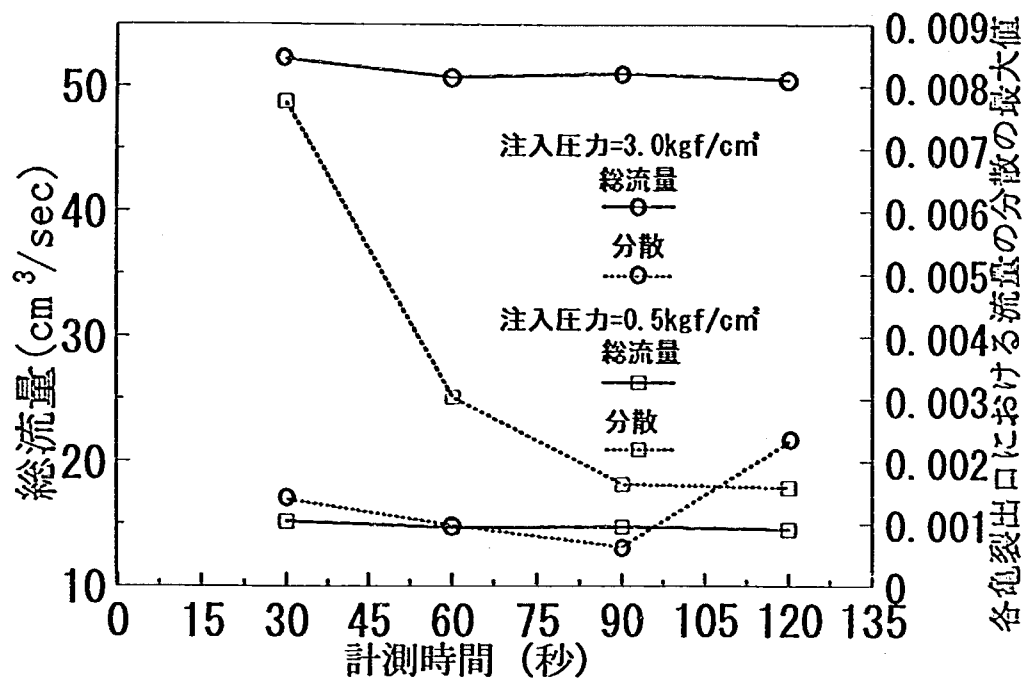


図-4.1 流量計測時間と計測精度

表-4.2 各試験ケース毎の流量計測時間一覧

	注入圧力 (kgf/cm ²)										
濃 度	0.2	0.5	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5
0 % (水)	秒 60	秒 60	秒 60	秒 60	秒 60	秒 60	秒 60	秒 60	秒 60	秒 60	秒 60
0.3 %		120	120	120	60	60	60	60	60	60	60
0.4 %		120	120	120	60	60	60	60	60	60	60
0.5 %		120	120	120	60	60	60	60	60	60	60
1 %			480	420	360	300	180	180	120	60	60
2 %					1200	900	660	540	420	360	300
2.5 %							1200	900	660	540	420

5. 開口亀裂網モデルの流動特性

5. 1 注入圧力と総流量の関係

図-5.1に、種々の濃度のグラウト（図中ではMCと略す）に対して、注入圧力と総流量の関係を示す。グラウトの濃度を0%の水から順次増加させていった場合、グラウトの濃度が高くなるほど粘性が増すので、総流量が小さくなるのは当然であるが、図に示すように、グラウトの濃度が低くなると注入圧力と総流量の関係を表すグラフの勾配が緩くなり、逆にグラウトの濃度が高くなるとグラフの勾配が急になることがわかる。そこで、水および種々の濃度のグラウトについて、図-5.1から求めたグラフの勾配（この勾配は注入圧力の対数の増加に対する総流量の対数の増加率を表し、これを流量増加指数と定義する）を整理した。その結果が図-5.2である。図によれば、水（グラウト濃度0%）の流量増加指数は0.5程度であり、グラウトの濃度が0.5%程度になるまではグラウトの濃度の増加とともに流量増加指数は急激に増加するが、それ以降はグラウトの濃度が増加しても流量増加指数は穏やかに変化し、その値は概ね1程度となっている。

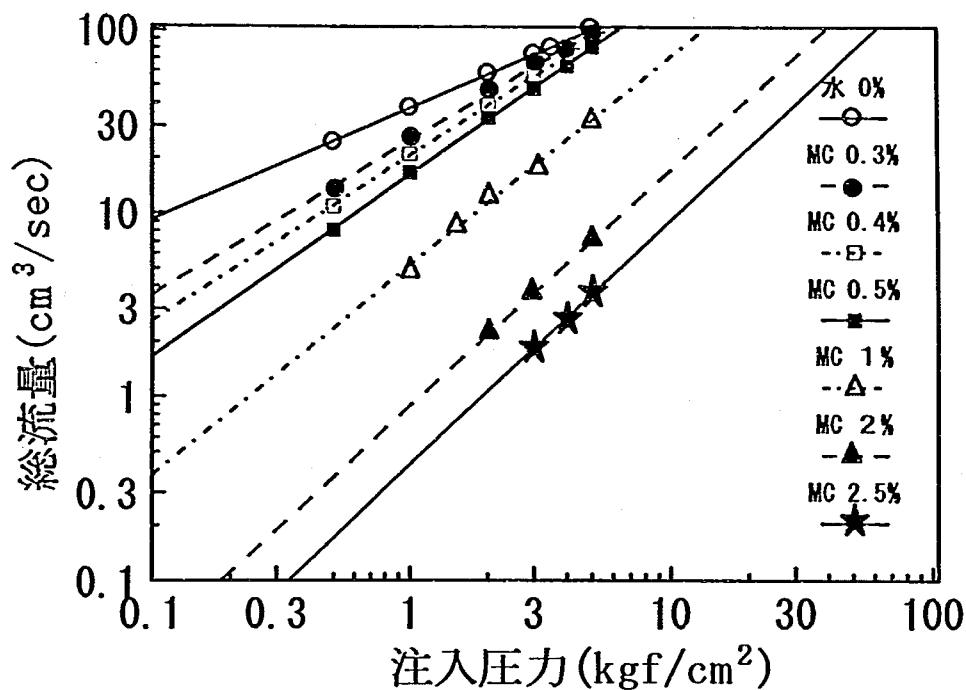


図-5.1 注入圧力と総流量の関係

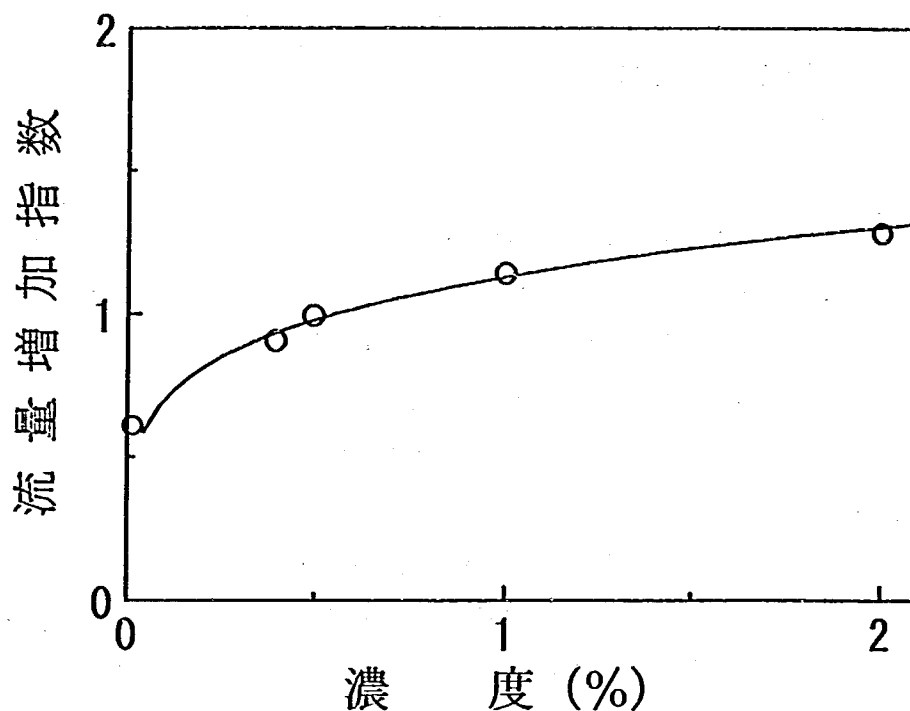


図-5.2 グラウトの濃度と流量増加指数の関係

いま、ニュートン流体を考えると、圧力勾配 i と平均流速 v の関係は層流状態では $v = k \cdot i$ 、乱流状態では $v = f \cdot i^{0.5}$ で表される (k, f は流体および亀裂の状態によって定まる係数)。これから、水および濃度の低いグラウトではその流れが乱流状態にあること、また濃度の高いグラウトではその流れが層流状態にあることがいえる。なお、水の場合に流量増加指数が、0.5 よりも若干大きくなっているのは、各亀裂の末端部で圧力が低下し、流れが層流になっていることに起因していると考えられる。また、濃度の高いグラウトの場合に流量増加指数が1.0 よりも若干大きくなるのは、予備実験でも見たように高粘性流体が非ニュートン流体であるためと考えられ、これは、図-5.1 を普通目盛りで書き改めた図-5.3 において注入圧力と総流量の関係が曲線（擬塑性流体）または原点を通らない直線（ビンガム流体）で近似できることから推察できる。

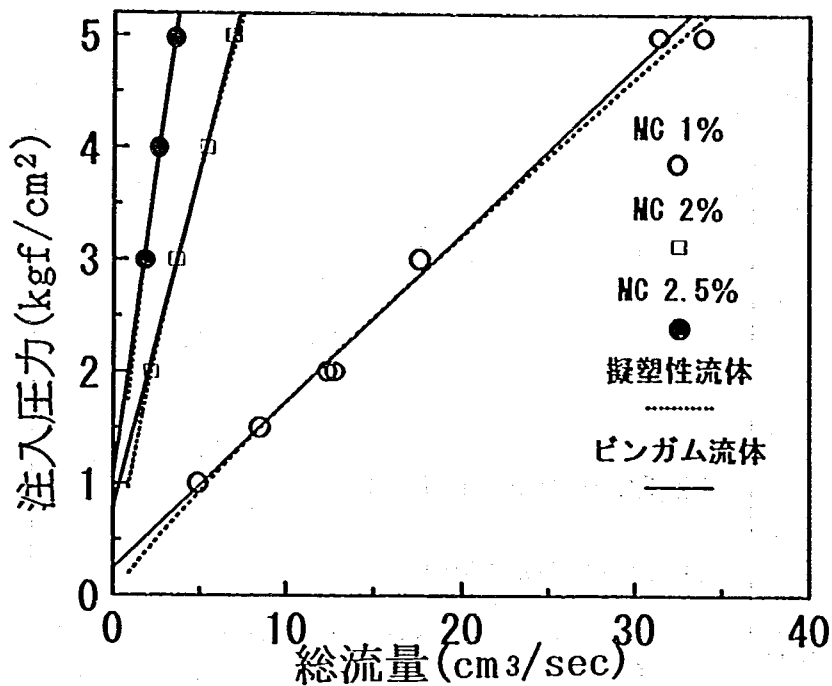


図-5.3 高粘性流体の注入圧力と総流量の関係

5. 2 濃度と総流量の関係

図-5.1によれば、グラウトの流量（注入量）はその濃度が低いほど大きくなるが、グラウチングの目的はグラウトの流量（注入量）を最大にすることではなく、セメントの注入量を最大にすることである。このため、薄すぎるグラウトではグラウトの流量（注入量）が大きくてもセメントの注入量が小さくなり、また濃すぎるグラウトではグラウトの流量（注入量）が小さくなってセメントの注入量も小さくなる。そこで、実際のグラウチングでは、セメントの注入量を最大にする適切な濃度を選定することが重要となる。

本亀裂網模型におけるグラウトの濃度と総流量の関係を図-5.4に示す。図によれば、注入圧力が小さい場合には、グラウトの濃度が増加するにしたがってグラウトの総流量は減少するが、注入圧力が大きい場合には、グラウトの濃度がある程度大きくなるまでは、グラウトの濃度の増加に対するグラウトの総流量の変化は小さいことがわかる。したがって、高い注入圧力でグラウトを注入する場合には、ある程度濃いグラウトを用いることが有利であるといえる。今回の実験では、高粘性流体が粉末を混合して造ることから、混合粉末量を疑似のセメント量であると仮定してグラウトの濃度と注入粉末量の関係を整理した結果が図-5.5である。図によれば、粉末量がピークとなるグラウトの濃度が存在し、注入圧力が高いほど、粉末量がピークとなるグラウトの濃度が濃くなる傾向にあることがわかる。

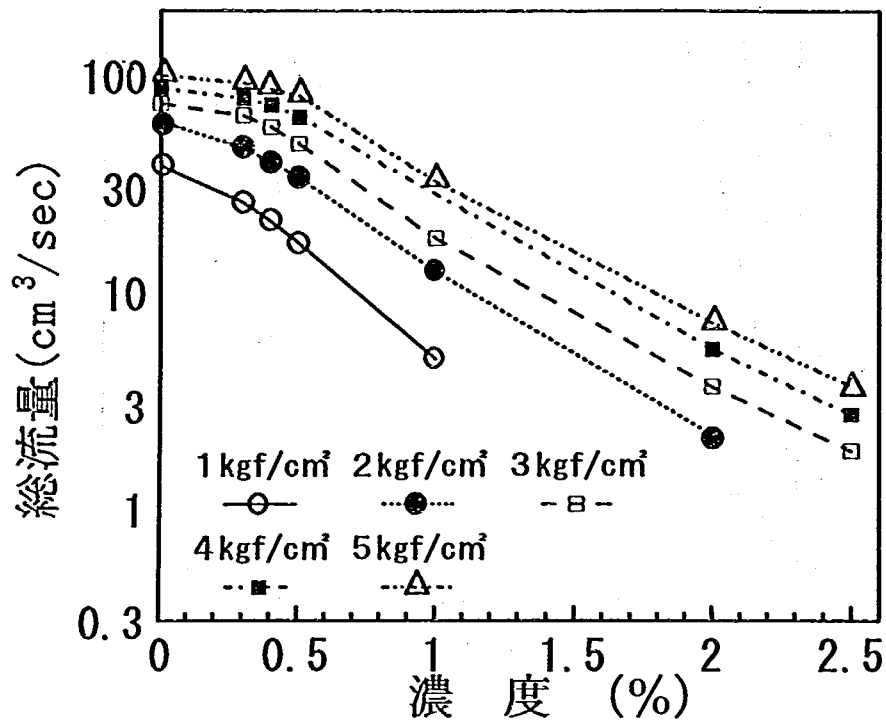


図-5.4 グラウト濃度と総流量の関係

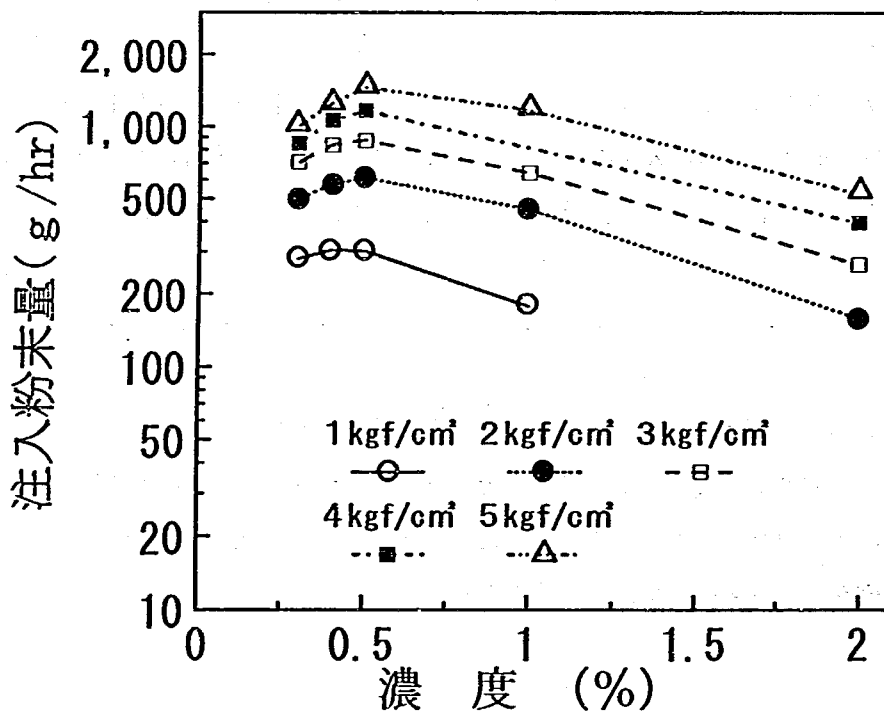
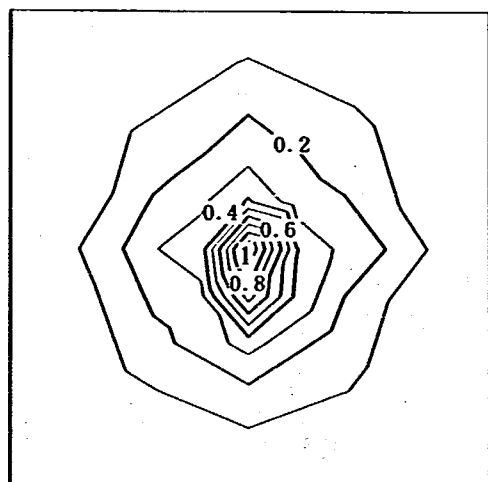


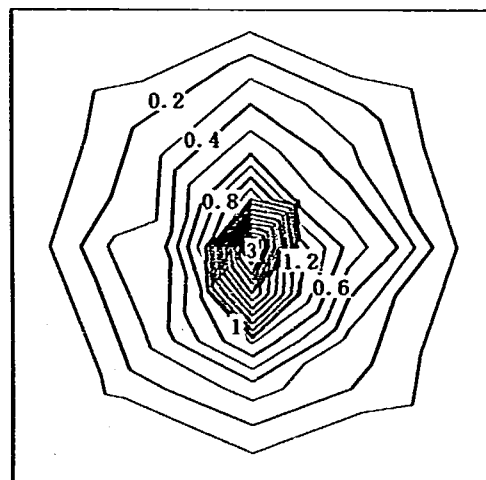
図-5.5 グラウト濃度と粉体注入量の関係

5. 3 亀裂内の圧力分布

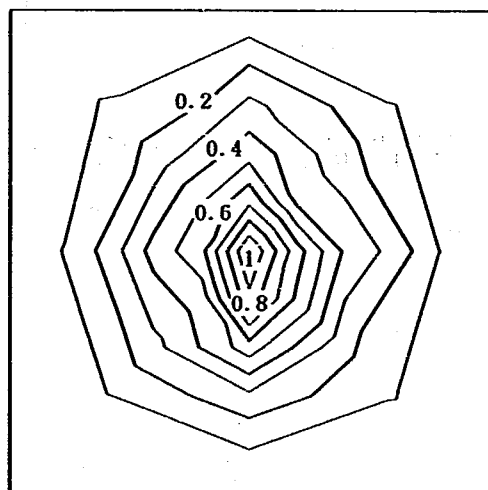
岩盤亀裂網の交点に設置した圧力変換器による各注入圧力別、各グラウト濃度別の圧力測定値を図-5.6に示す。これを注入口での注入圧力を基準として正規化した圧力分布として表示し直すと図-5.7になる。図によれば、水の場合、注入口である中央付近での圧力変化が大きい。これは、5.1で考察したように、本模型亀裂内の流れが材料や注入圧力によって乱流または層流となることから説明できる。乱流状態では圧力勾配が流速の2乗に比例するため、水の注入のように流速が大きい場合には注入口付近での圧力勾配が著しく大きくなる。また、注入圧力が高い場合ほど注入口近傍での圧力変化が顕著になっているが、これは、注入圧力が高くなるにしたがって乱流域が徐々に拡大していくためと考えられる。一方、グラウトの濃度が高い場合には、注入口の圧力が遠くまで伝達しているが、これは、濃いグラウトの流れが層流状態となって圧力勾配が流速の1乗に比例するため、乱流状態の場合ほど中央付近での圧力低下が生じないことによっている。したがって、濃いグラウトを用いて層流状態で注入を行えば、グラウトの圧力を遠くまで伝播させることができる。



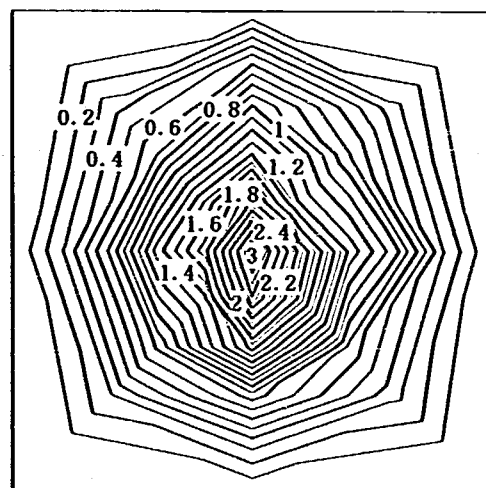
(a) 水 (0%) 1 kgf/cm²



(b) 水 (0%) 3 kgf/cm²

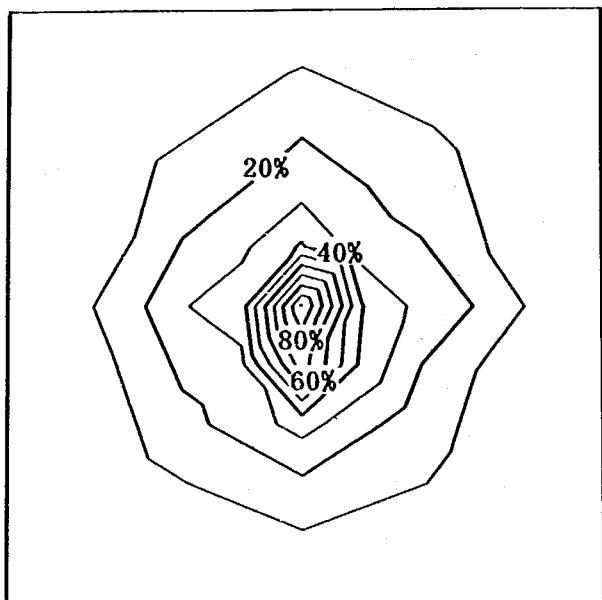


(c) 高粘性流体 (1%) 1 kgf/cm²

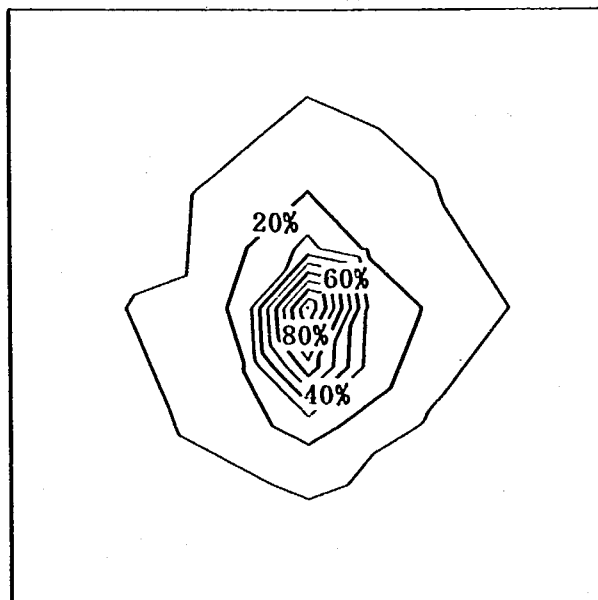


(d) 高粘性流体 (1%) 3 kgf/cm²

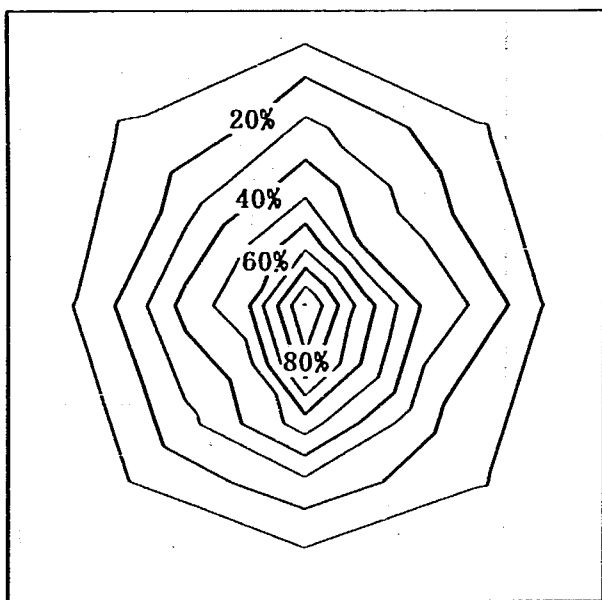
図-5.6 亀裂網模型内の圧力分布



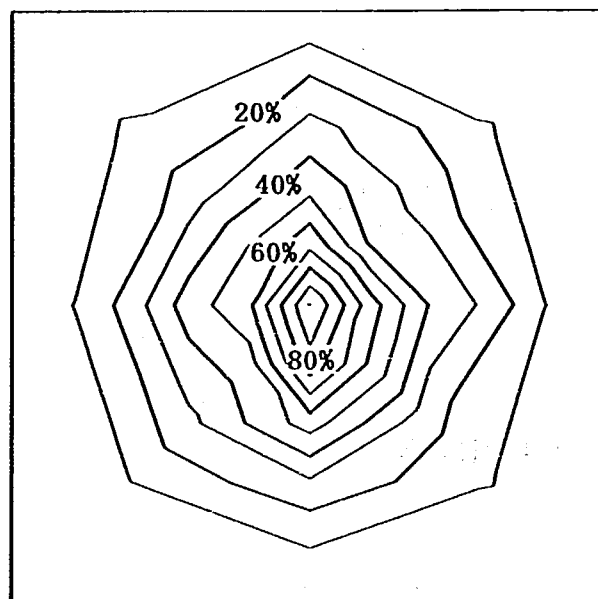
(a) 水 (0%) 1 kgf/cm²



(b) 水 (0%) 3 kgf/cm²



(c) 高粘性流体 (1%) 1 kgf/cm²

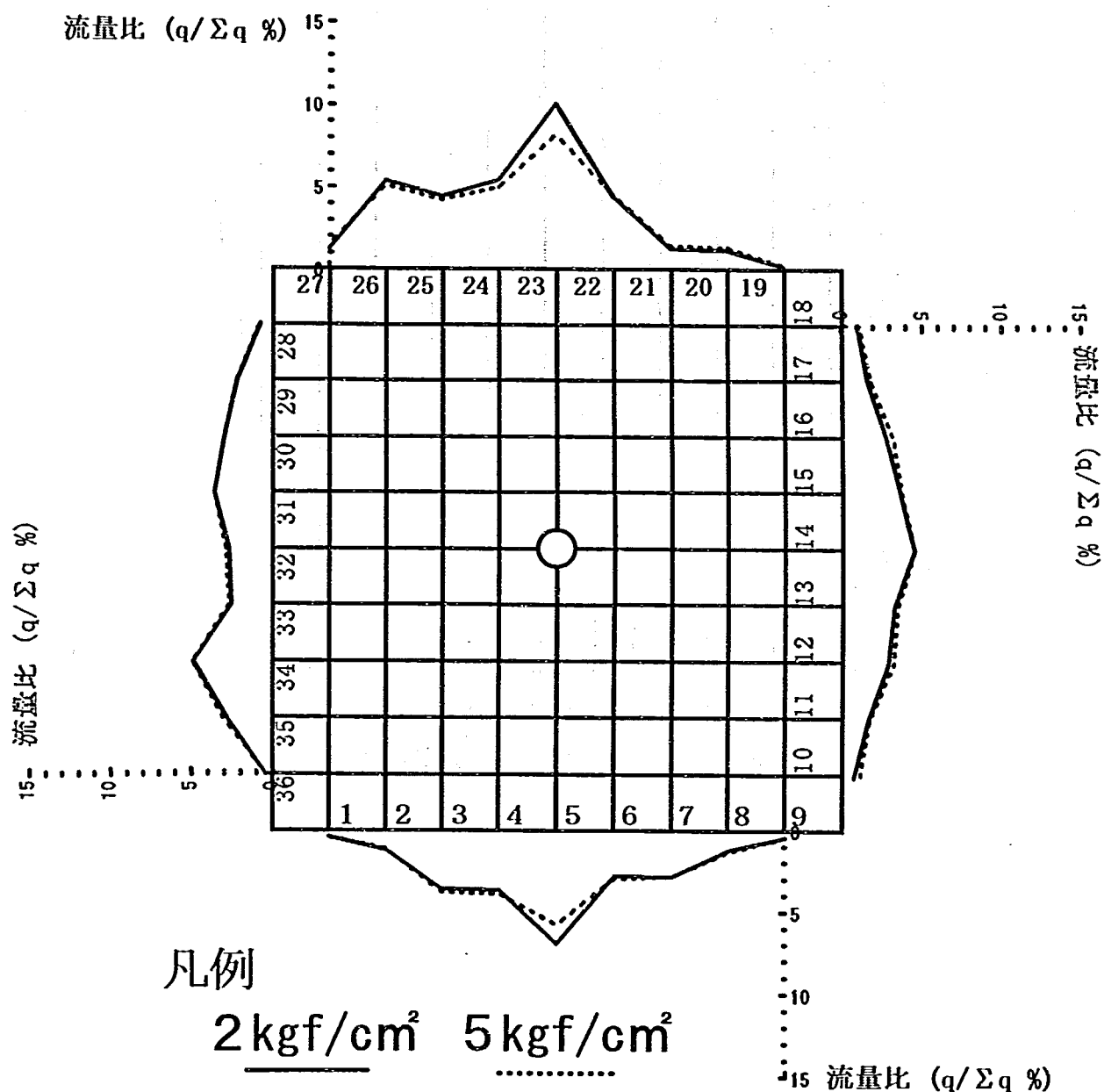


(d) 高粘性流体 (1%) 3 kgf/cm²

図-5.7 亀裂網内の圧力分布比

5. 4 個々の亀裂毎の流量特性

各亀裂の出口における流量を総流量で除した値をその亀裂の流量比と定義し、その分布を図-5.8に示す。5. 1で述べたように、水を高い圧力で注入した場合、流れが層流から乱流に変化するが、その影響は、流量比の大きい亀裂つまり流れやすい亀裂に顕著となることが図から読みとれる。一方、濃度の高いグラウトでは、圧力による差はあまり見られない。また、図-5.9には注入圧力5kgf/cm²時における濃度0%と1%の亀裂ごとの流量比の比較を示した。亀裂模型の外周の各辺の中央部ほど流量比が大きく、グラウトは流れやすいところを流れていることがわかる。また、水の流量比と濃度の高いグラウトの流量比を比較すると、濃度の高いグラウトほど流れやすい亀裂により多く流れることがわかる。



(a) 水 (0%) の場合

図-5.8 各亀裂出口での流量比の分布

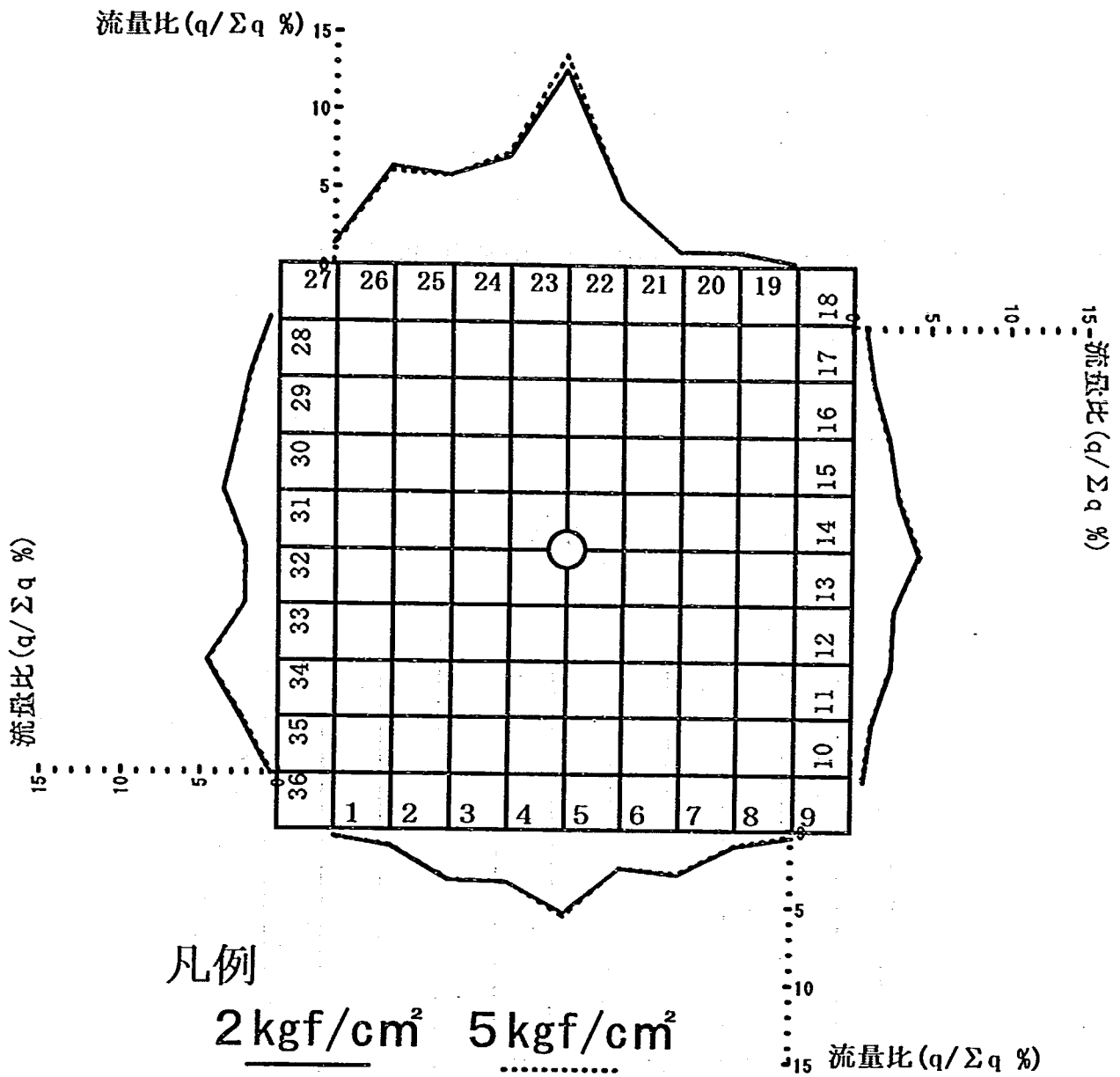


図-5.8 各亀裂出口での流量比の分布

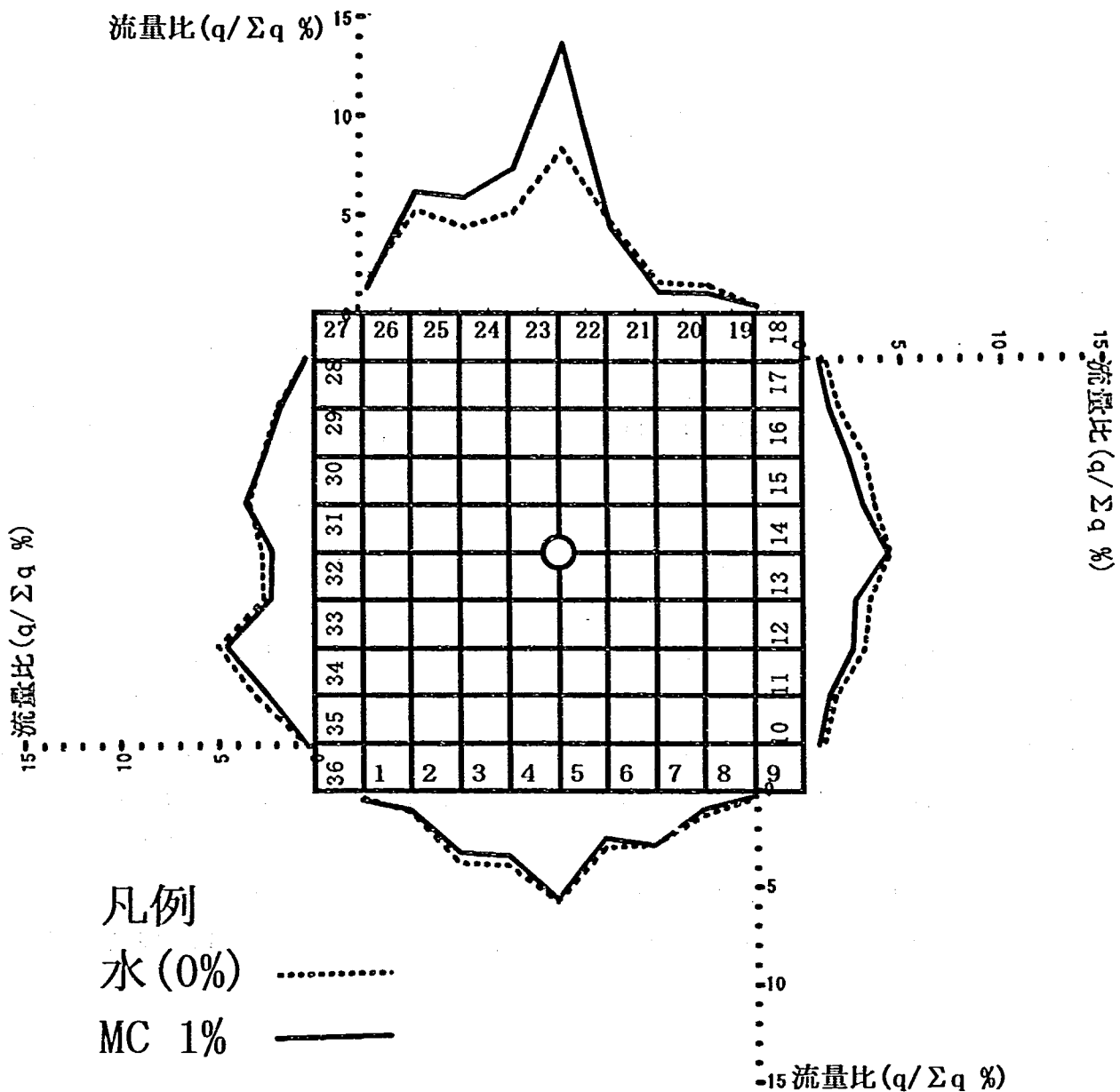
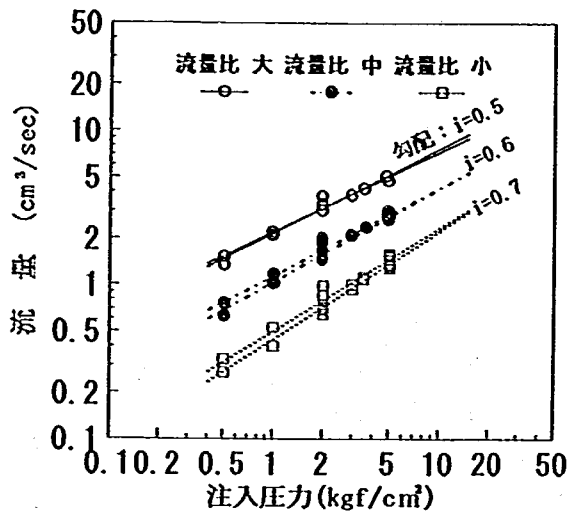
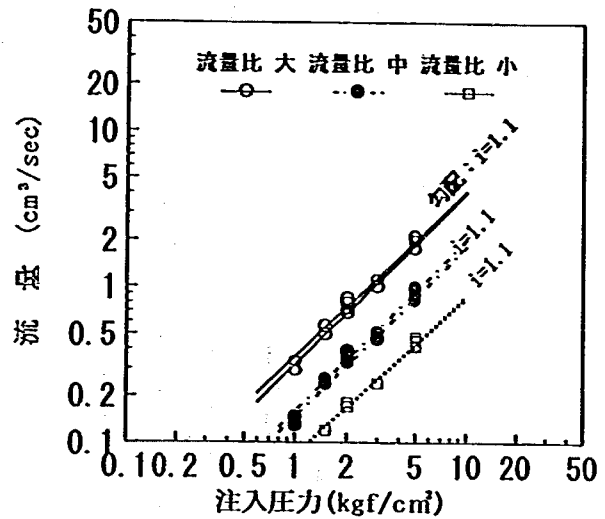


図-5.9 水と高粘性流体の流量比 (注入圧力 = 5 kgf/cm²時)

次に、この結果を詳細に検討するため、水と濃いグラウトのそれぞれに対して、流量比の大きい亀裂、流量比が中程度の亀裂、流量比が小さい亀裂について注入圧力と亀裂出口の流量の関係を求めると図-5.10のようになる。図によれば、水の場合、流量比の大きな亀裂ほどグラフの勾配が緩くなっていることがわかる。これは、流量比の大きな亀裂ほど乱流で流れる区間が長いためである。一方、濃いグラウトの場合、どの亀裂においてもグラフの勾配は同一であり、流れの状態に差がない。これは全て層流で流れているためと考えられる。



(a) 水 (0%) の場合

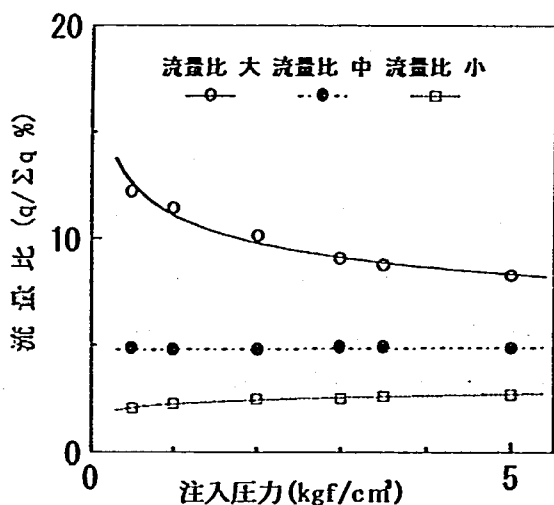


(b) 高粘性流体 (1%) の場合

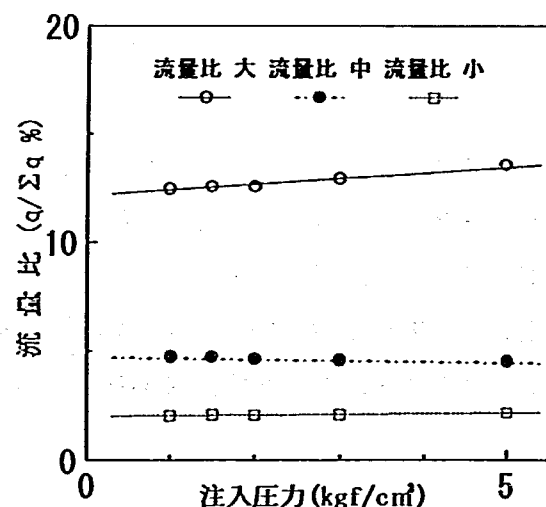
図-5.10 注入圧力と各亀裂出口の流量の関係

この結果を注入圧力と流量比の関係で再整理したものが、図-5.11である。図によれば、水の場合、流量比の大きな亀裂では注入圧力の増加とともに流量比が徐々に小さくなり、これに対応して流量比の小さな亀裂の流量比は少しずつ増加することになる。一方、濃いグラウトの場合、注入圧力の大小によらず流量比はほぼ一定となっており、各亀裂に対するグラウトの入り方は注入圧力に依存しないことがわかる。

さらに、この結果をグラウトの濃度と各亀裂の流量比の関係として整理したものが図-5.12である。図によれば、濃度0.3%程度を境として、これより薄いグラウトでは注入圧力が高いほど流量比の大きな亀裂の流量比は減少していくが、これより濃いグラウトでは各亀裂の流量比は注入圧力の大小にほとんど影響されないことがわかる。



(a) 水 (0%) の場合



(b) 高粘性流体 (1%) の場合

図-5.11 注入圧力と各亀裂出口の流量比

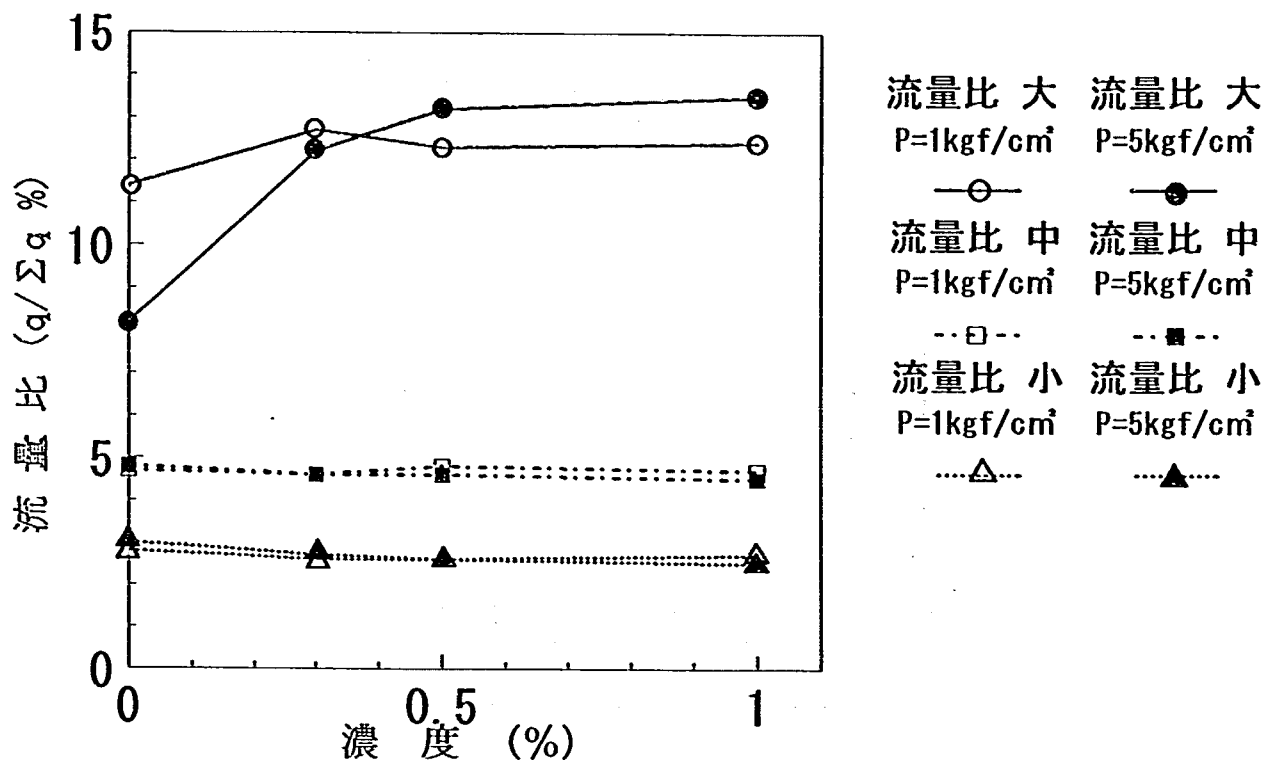


図-5.12 濃度と各亀裂出口の流量比

5. 5 亀裂出口閉塞による流量の変化

模型中の36個の亀裂出口を流量の多いものから順に閉塞していった場合のグラウト総流量の変化を図-5.13に示す。(ただし、異なる面の亀裂出口を閉塞することを避け、無閉塞時に最も流量の多い亀裂と同一面内の流量が多い亀裂を順次閉塞し、その後、面単位で流量の多い面から閉塞した。)。図中、縦軸は閉塞後の総流量の測定値、横軸は閉塞前の個々の亀裂出口の流量から単純和として求めた総流量、すなわち、亀裂出口の閉塞が他の亀裂出口の流量に影響を及ぼさないと仮定した場合の計算流量である。図によれば、亀裂出口を閉塞してもその流量の大部分は他の亀裂出口に再配分され、当初の総流量の約50%相当の亀裂を閉塞するまでは総流量に大きな変化は生じていない。なお、薄いグラウトを高圧で注入した場合と濃いグラウトを低圧で注入した場合では、総流量の変化率が異なっているが、これは流れが層流か乱流かの違いによるものと考えられる。

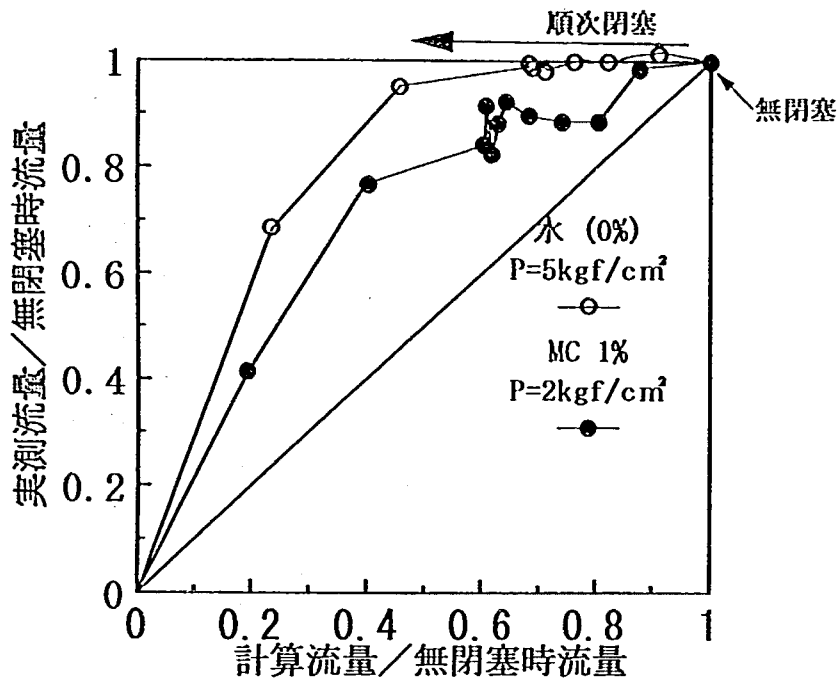


図-5.13 出口閉塞による総流量の変化

ここで、出口を閉塞したモデルにおける注入圧力と総流量の関係を図-5.14に示す。図によれば、図-5.13でも見たように、2面閉塞では薄いグラウトも濃いグラウトも無閉塞の状態とほとんど総流量が変わっていない。一方、3面閉塞した場合には、総流量の減少が認められる。ただし、5.1で定義した流量増加指数は各濃度のグラウトとも変化が認められなかった。なお、亀裂出口を順次閉塞した時の圧力分布の一例として上方4箇所を閉塞した場合の圧力分布を図-5.15に示す。図によれば、閉塞時の圧力分布は、閉塞部周辺で圧力が高まる傾向にあり、また、層流状態で流れるグラウトでより高まるようである。

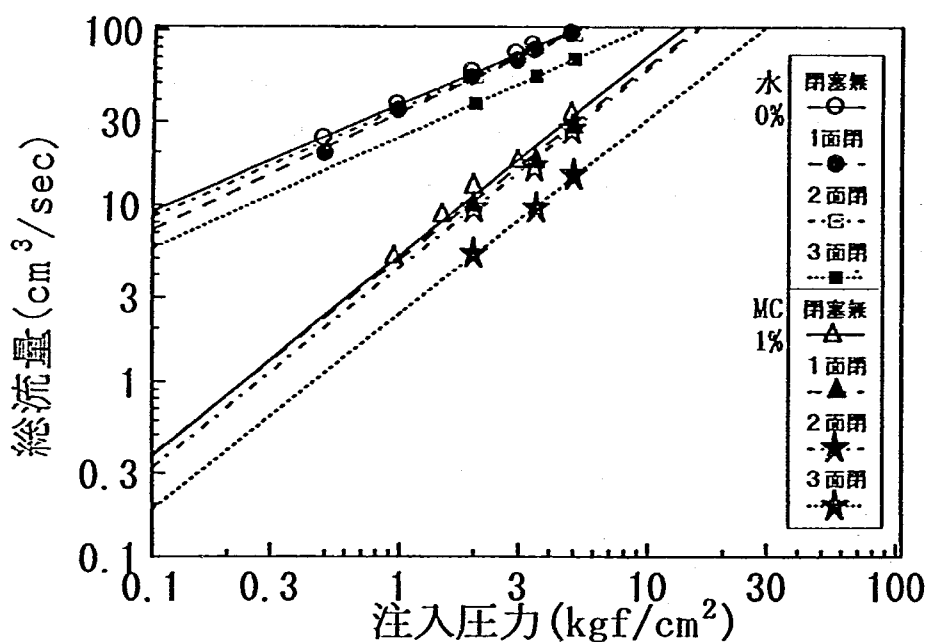


図-5.14 閉塞時の注入圧力と総流量の関係

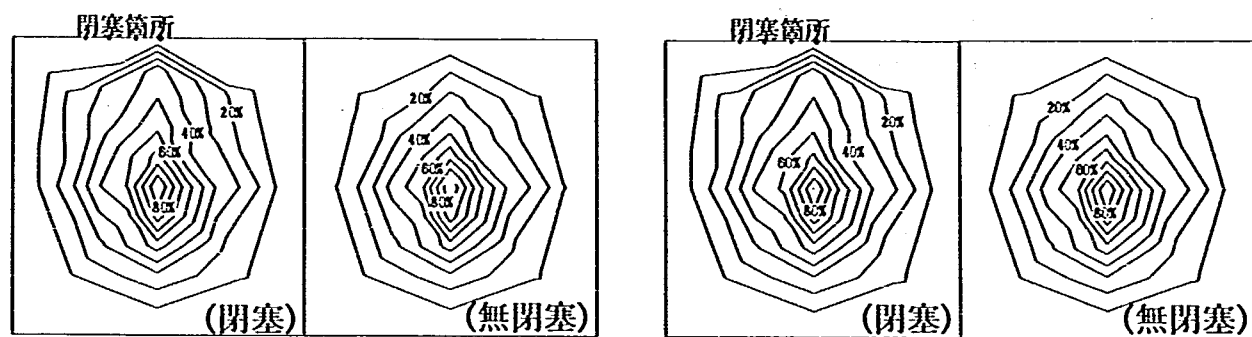
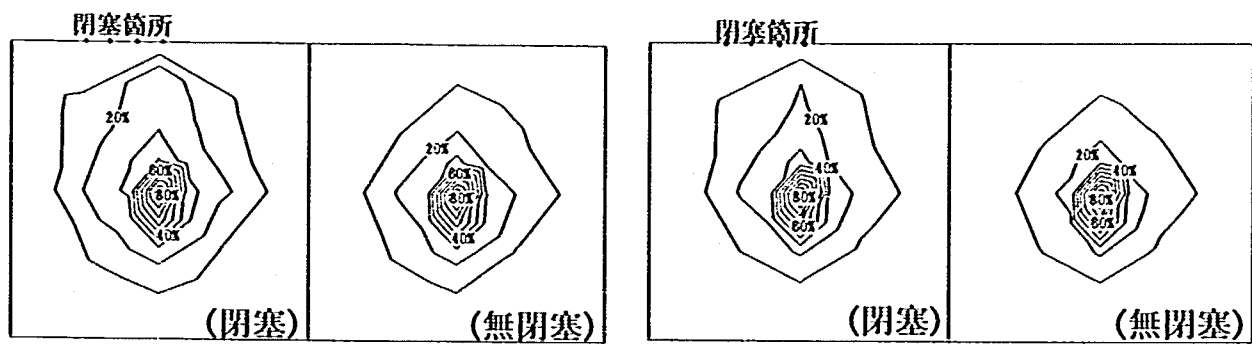


図-5.15 閉塞時と無閉塞時の圧力分布の比較

6. まとめと今後の課題

以上の実験結果から明らかとなったグラウトの注入特性をとりまとめると次のようになる。

- ① 岩盤内の亀裂を流れるグラウトはその濃度によって層流または乱流状態で流れる。
- ② 層流状態でグラウトが流れる場合、注入圧力の変化による流量（注入量）の変化は大きく、乱流状態でグラウトが流れる場合、注入圧力の変化による流量（注入量）の変化は小さい。
- ③ この結果、高い注入圧力においてはグラウトが乱流状態で流れるため、濃度の違いによるグラウトの流量（注入量）の差は小さくなる。
- ④ 乱流状態に比べて、層流状態では注入箇所から離れた地点まで圧力が伝播する。
- ⑤ 濃いグラウトほど流れやすい亀裂内を選択的に流れる傾向がある。
- ⑥ 薄いグラウトの場合、注入圧力を高めることによって、流れにくい亀裂により多くのグラウトを注入することができる。
- ⑦ グラウトの進行に伴い閉塞が生じて、上記の特性に大きな変化が生ずるにはかなりの部分の閉塞が必要となる。

なお、今回の実験はグラウトの粘性に着目したものであって、グラウトの粒子径の影響については考慮しなかった。したがって、グラウトの粒子径が注入状況に及ぼす影響については今後の課題として検討を進めていきたいと考えている。

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
- 2) 土木学会：水理公式集，1985
- 3) 永山 功，則松秀晴，庄司俊介：岩盤内亀裂におけるグラウトの流動特性に関する実験的検討
土木研究所資料第3113号，1992

亀裂性岩盤模型を用いたグラウト
の流動特性試験

I S S N 0386-5878
土 研 資 料 第3367号
平成7年8月 (1995)

永山 功, 新高 庸介
佐々木 隆, 斎藤 正明

要 旨 ダムの建設にあたっては、基礎岩盤の透水性の改良を目的としてグラウチングが実施される。しかし、グラウチングの仕様は過去の施工実績に基づいて経験的に定めているのが現状であり、その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。本論文は、グラウチングの仕様の合理的決定手法を確立するための基礎的研究として、開口亀裂内を流れるグラウトの流動特性について実験的検討を加えたものである。

キーワード：グラウト、亀裂性岩盤、流動特性、高粘性流体

郵便はがき

郵便切手
は
い
は
っ
て
下
さ

3 0 5 - □ □

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室
行

茨城県つくば市大字旭一番地

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所

土木研究所資料第3367号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印