

I S S N 0386—5878

土木研究所資料第3113号

土 木 研 究 所 資 料

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

平成4年6月

建設省土木研究所
ダム部ダム構造研究室

「Copyright © (1992) by P. W. R. I.

All right 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。」

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

ダム構造研究室 室 長 永 山 功
主任研究員 則 松 秀 晴
研 究 員 庄 司 俊 介

要 旨

通常、ダム基礎岩盤の止水処理はグラウチングによって行われているが、グラウトの配合および注入圧力等の注入仕様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。このため、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望まれている。本検討は、これに関連して、岩盤に注入されたグラウトの基礎的な流動特性を把握することを目的として、岩盤内の亀裂を単純化した模型を作製し、これに対するグラウト注入実験を行った結果について考察を加えたものである。

キーワード：グラウト，開口亀裂，流動特性，フライアッシュ，ベントナイト

は じ め に

通常、ダム基礎岩盤の止水処理はグラウチングによって行われている。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て岩盤の遮水性を改良する工事であり、その施工技術は過去における多くの施工実績に基づいて経験的に得られてきたものである。しかし、ダムサイトの岩盤は種々多様なものが存在するため、各現場におけるグラウトの配合および注入圧力等の注入仕様は、予めグラウチング試験を行うなどして試行錯誤的に決定されているのが実状である。

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の基礎的な流動特性を把握することが必要であると考えられる。

本報告は、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て、単純化した開口亀裂模型を作製し、これに対するグラウト注入実験を行い、その流動特性について検討した結果について述べるものである。

目 次

はじめに

1. 実験の目的	1
2. 実験の方法	3
2.1 実験装置の概要	3
2.2 実験の手順	7
2.3 実験ケース	7
3. 実験結果	12
3.1 実験結果の概要	12
3.2 グラウトの基本的流動特性	18
3.3 流路の断面急変部における圧力損失	30
3.4 注入仕様、亀裂形状とグラウトの流れやすさの関係	34
3.5 グラウトの濃度とグラウト材の注入量の関係	39
4. まとめと今後の課題	49
参考文献	50
参考資料（層流域における亀裂内の平均流速式）	51

1. 実験の目的

ダム基礎岩盤のグラウチングは、①岩盤の透水性を改良し、貯留水の下流への逸流を抑制すること、②ダム堤体の着岩面において堤体に作用する揚圧力を軽減すること、③岩盤の変形性を改良すること等を主な目的として実施されるものであり、ダムの建設においては、堤体の築造と同様の重要性をもつ工事である。しかしながら、堤体の築造が人工的に造られる構造物の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の特性を改良する工事であるため、グラウチングによる改良効果は、対象とする岩盤の条件、すなわち、岩種、岩級、亀裂の状態、地下水の状況等の影響を大きく受けることとなり、ここに基礎岩盤グラウチングの難しさがある。そこで、グラウチングの実施に当たっては、予め上記のような岩盤の特性を十分把握し、対象とする岩盤に最も適したグラウチングの手法を選定することが要求される。

グラウチングを行うに当たり決定されなければならない施工条件の中の重要な要素として、注入仕様、すなわち注入するグラウトの配合および注入圧力が挙げられる。そして、必要最小限のグラウチングにより十分な改良効果を得るためには、これら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、岩盤内のグラウトの流動特性を把握することが1つの重要な要素となると考えられる。

一般にコンクリートダムの基礎に見られるような岩盤、すなわち注入されたグラウトのほとんどが岩盤内の亀裂に沿って流れるような亀裂性の岩盤においては、亀裂内におけるグラウトの流動特性を把握しなければならない。これに対する検討手法としては、実際のダム現場におけるグラウチングの施工実績を分析することにより、各種の性状の亀裂における注入仕様と注入量の関係から間接的にグラウトの流動特性について検討する方法と、岩盤内の亀裂を単純化した模型を作製し、室内においてグラウチング実験を行うことによりグラウトの流動特性について検討する方法の2つが考えられる。しかし、実際のグラウチングにおいては、岩盤条件が全く等しい注入孔は2つとなく、また、注入量は注入仕様だけでなく注入孔周辺の局所的な岩盤の特性に大きく影響されるため、注入仕様と注入量の関係からグラウトの流動特性を定量的に評価することは非常に難しいと考えられる。これに対し、室内における実験では、岩盤内のあらゆる要素を模型として再現することは難しいとしても、グラウトの注入に大きく影響を与える亀裂条件に着目して、これを単純化した模型によって表現し、これに対するグラウチング実験を行うことにより、それら条件の影響を把握することが可能である。

本検討は、これらのことを考慮し、亀裂性の岩盤の開口亀裂にグラウトが注入される場合を想定し、種々の亀裂幅や流路形状を設定できる単純な開口亀裂模型を作製し、これに対してグラウトの注入実験を行うことにより、亀裂内におけるグラウトの基礎的な流動特性を明らかにしようとするものである。

なお、主な検討項目は以下のとおりである。

- ①各種グラウトの基本的な流動特性（層流域および乱流域における圧力勾配と流速の関係）
- ②断面急変部を有する流路における各種グラウトの流れ（断面急変部における圧力損失）
- ③注入仕様（グラウトの濃度、注入圧力勾配）、亀裂形状（幅、断面変化の有無）とグラウトの流れ

...and the

2. 実験の方法

2.1 実験装置の概要

今回実施した実験は、図-2.1 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って開口亀裂模型を作製し、これに対してグラウトを注入して圧力勾配と流速の関係を調べるものである。実験装置は、図-2.2 および写真-2.1 に示すように、圧力タンクと開口亀裂模型本体からなる。このうち、圧力タンク内には注入材料の分離を抑えるために攪拌装置が設けられている。また、開口亀裂模型本体は、図-2.3 および写真-2.2 に示すように、流入部、開口亀裂模型部および流出部より構成され、各部には圧力変換器が設置されている。実験中、各部流路内の圧力は、この圧力変換器によって測定され、データレコーダに記録される。なお、開口亀裂模型は、亚克力板の間に挟むスペーサの厚さを変えることにより、種々の亀裂幅が設定できるようになっている。また、圧力タンクと流入部を結ぶ注入用のチューブは3種類の径のものを用意し、開口亀裂模型における流量に応じてその径を変えることにより、チューブ内の流速を確保し、注入材料の分離を抑えることとした。実験に使用した圧力変換器の外観を写真-2.3 に、諸元を表-2.1 に示す。また、データレコーダの外観を写真-2.4 に示す。

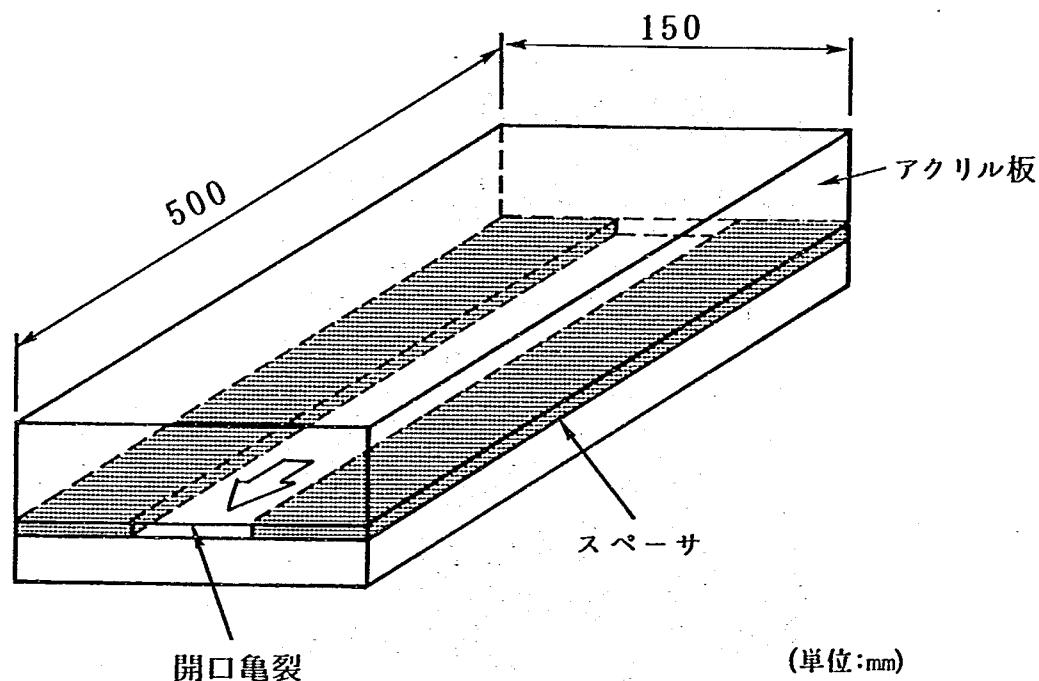


図-2.1 開口亀裂模型模式図

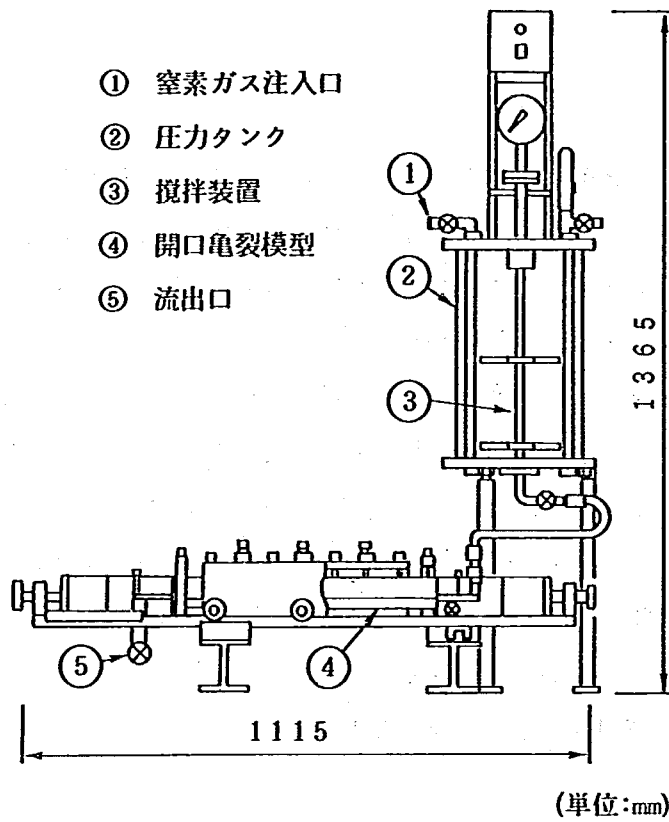


図-2.2 実験装置外観

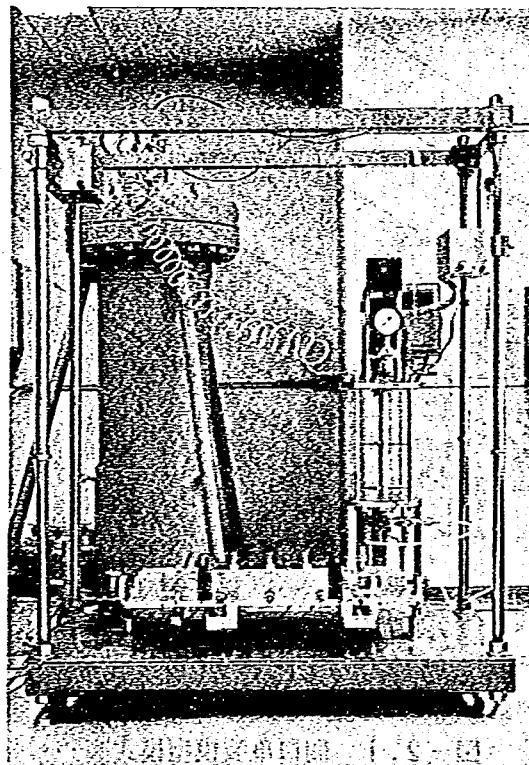
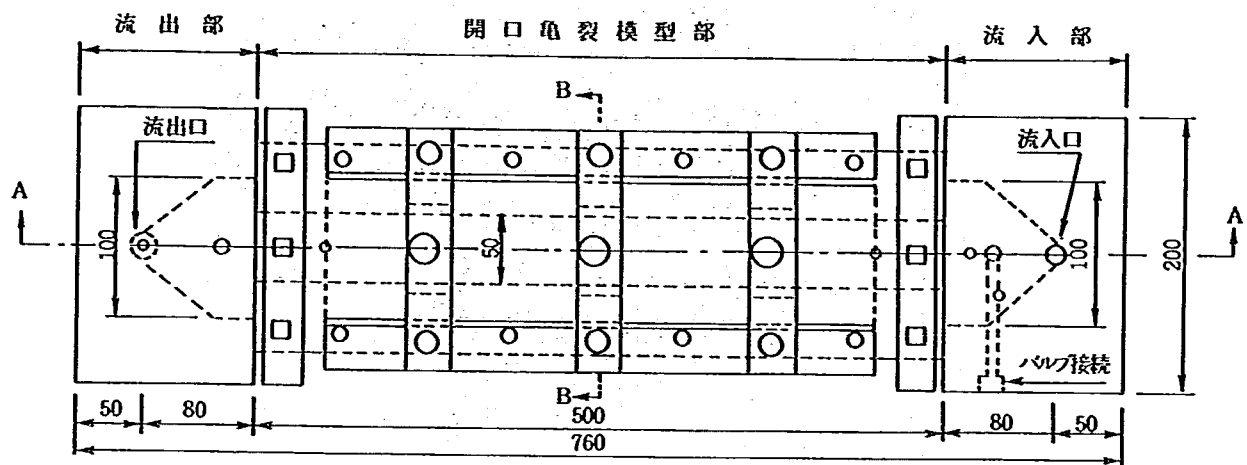
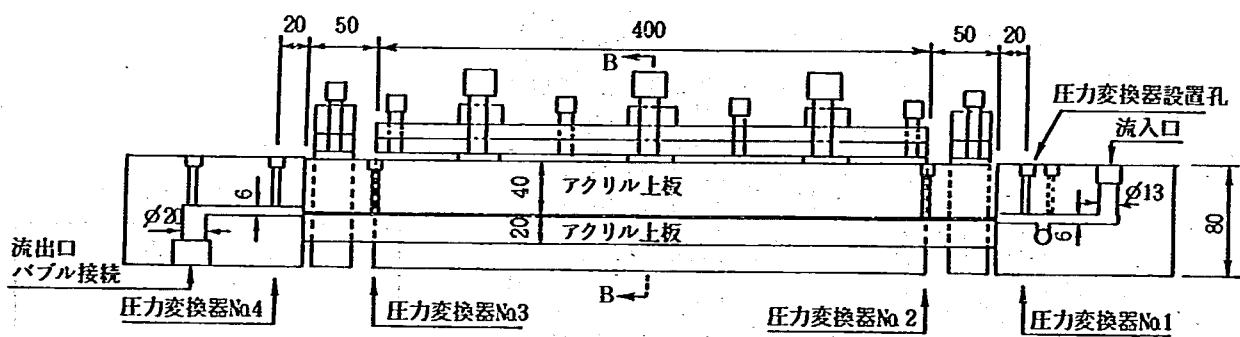


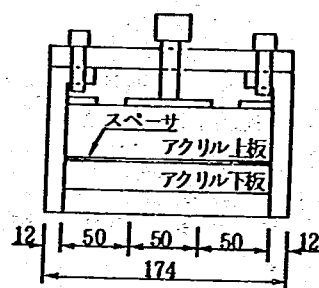
写真-2.1 実験装置



平面図



A-A 断面図



B-B 断面図

(単位:mm)

図-2.3 開口亀裂模型本体

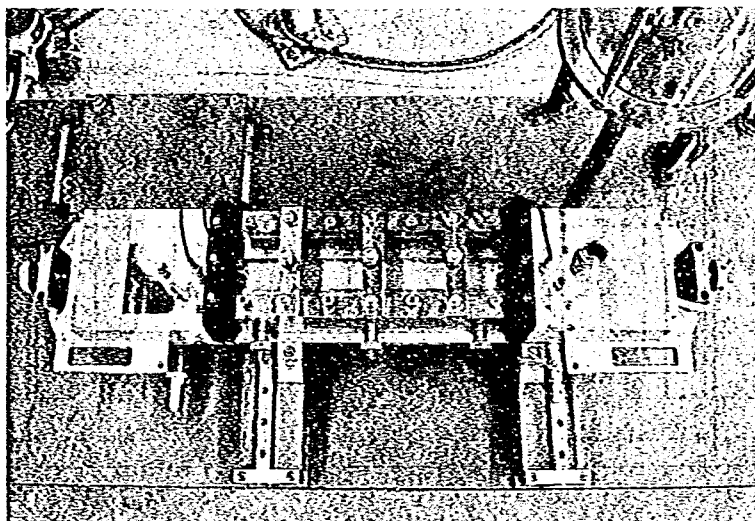


写真-2.2 開口亀裂模型本体

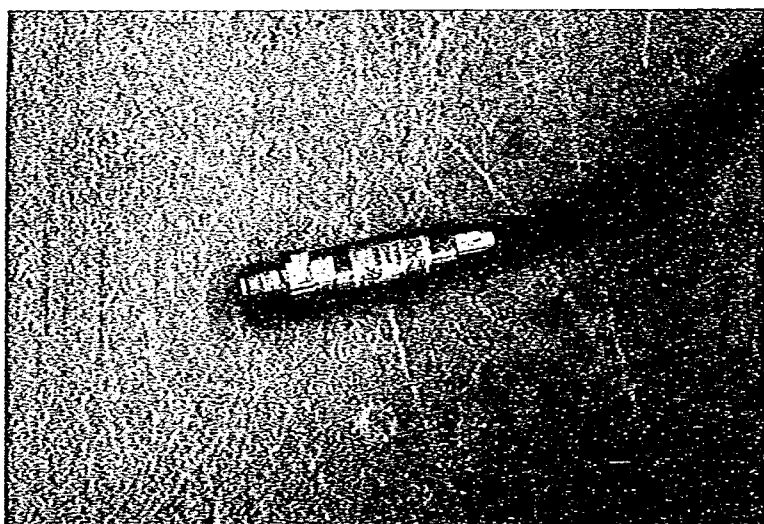


表-2.1 圧力変換器の諸元

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

写真-2.3 圧力変換器

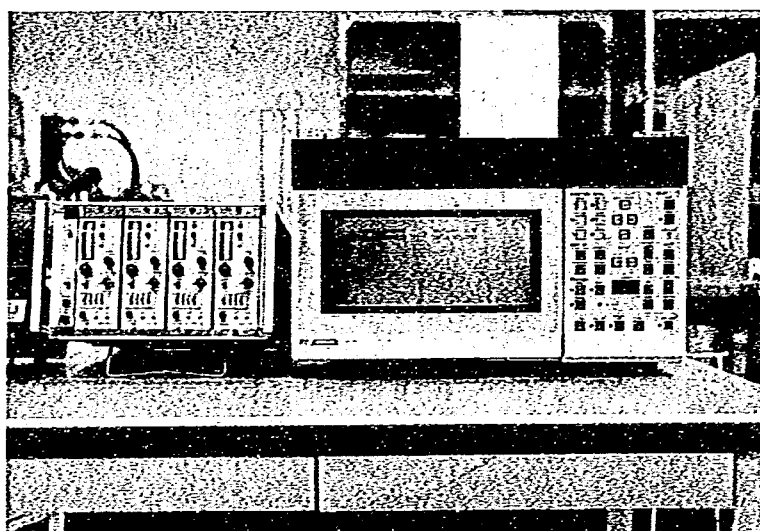


写真-2.4 データレコーダ

2.2 実験の手順

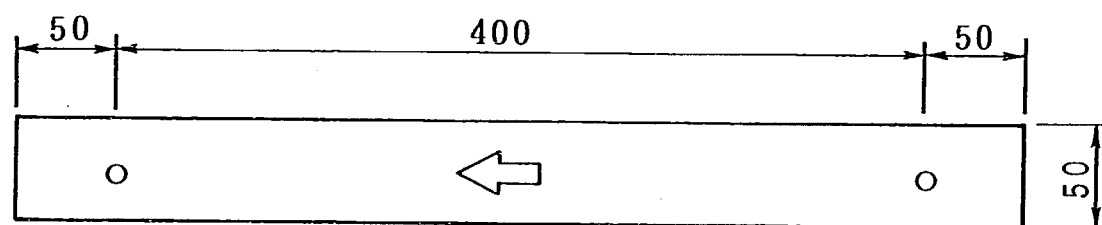
実験の手順は、予め圧力タンク内に注入材料を入れ、タンク内を窒素ガスにより所定の圧力に加圧した後、開口亀裂模型に対して注入を行い、流量がほぼ定常状態となった後に流量測定を行うというものである。また、注入中の流入部、開口亀裂模型部および流出部の圧力は、上記の圧力変換器により測定した。なお、実験において圧力タンク内を所定の圧力に加圧した後は、注入中に窒素ガスの供給を行わなかったため、本実験は注入に伴って注入圧力が徐々に減少する変圧注入試験となっている。

また、流出した注入材料については、温度および単位体積重量の測定を併せて行った。

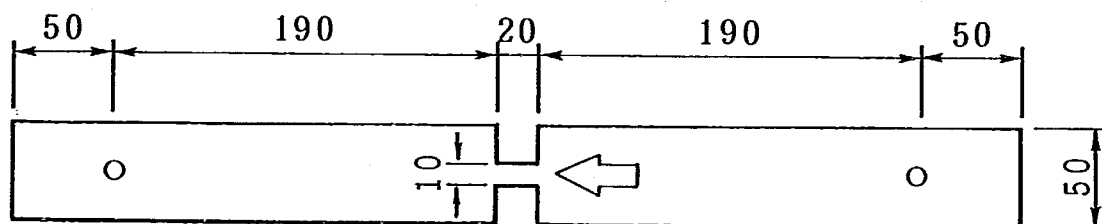
2.3 実験ケース

実験ケースを表-2.2 に示す。表中の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、2種類の形状について比較を行ったものであり、図-2.4 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を設定した。なお、閉塞モデルの閉塞部の流路幅は閉塞部以外の部分（以下、一般部という）の1/5である。

また、注入材料については、ダム基礎岩盤の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液と同程度の粒径の粒子を有する懸濁液であり、C液と比較した場合に、①水硬性がない



(a) 無閉塞モデル



(b) 閉塞モデル

(mm)

○：圧力変換器設置位置

図-2.4 流路の平面形状

表-2.2 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-2.4 参照)
亀 裂 幅	0.1(0.10), 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)
注入圧力	亀裂内の平均圧力勾配が10~60kgf/cm ² /cmの範囲で 各ケースとも4つ以上のレベルを設定

- (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

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, プ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。なお, 実験に使用したフライアッシュは, 比重2.07, 比表面積2720cm²/gであり, 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。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, B液は練混ぜ後1週間程度時間をおき, 十分安定させた後に実験に使用した。

F液およびB液の配合は, 表-2.2 に示すように, それぞれ2種類設定しているが, これは, 以下の検討を行って決定した。まず, ダム基礎岩盤のグラウチングで一般に使用されているC液の配合として, 水とセメントの重量比W/C=4, 1の2種類を考え, 液中の懸濁物質の体積がこれらのC液とほぼ等しくなるようにF液の配合を決定した。すなわち, 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, F液の配合はW/F=6, 1.5の2種類とした。なお, この場合, 対応するC液とF液の粘性がほぼ等しくなっていることが望ましいことから, 図-2.5 および写真-2.5 に示すJA ロートを用い, その流出時間 (以下, フロー値という) から粘性の確認を行った。この試験は, C液, F液およびB液について行い, C液およびF液は, ベントナイトを添加しない場合と, セメントあるいはフライアッシュ重量の5%のベントナイトを添加した場合について試験した。試験結果を図-2.6に示す。これより, 実験に用いたW/F=6 (B/F=0.05) のF液のフロー値は, W/C=4 のC液においてベントナイトを添加しない場合のフロー値と添加した場合のフロー値の中間的な値となっている。同様に, W/F=1.5 (B/F=0.05) のF液のフロー値は, W/C=1 のC液においてベントナイトを添加しない場合のフロー値と添加した場合のフロー値の中間的な値となっている。また, B液の配合については, フロー値が上記で決定したF液とほぼ等しくなることを条件としてW/B=25, 9の2種類とした。なお, 参考までに, フロー値測定と併せて実施した注入材料の単位体積重量試験の結果を図-2.7 に示す。

次に, 実験時の注入圧力は, 亀裂内の平均圧力勾配が10~60 gf/cm²/cm程度となるように設定した。この圧力勾配は実際のグラウチングでは次のような状態に相当する。すなわち, 図-2.8 に示すような

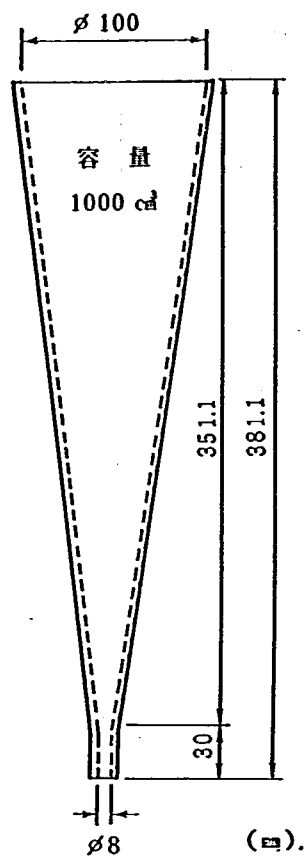


図-2.5 JA ロート

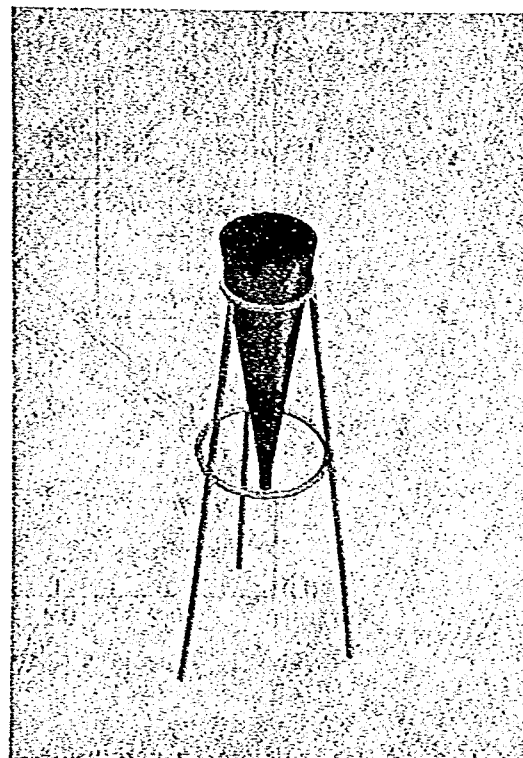


写真-2.5 JA ロート

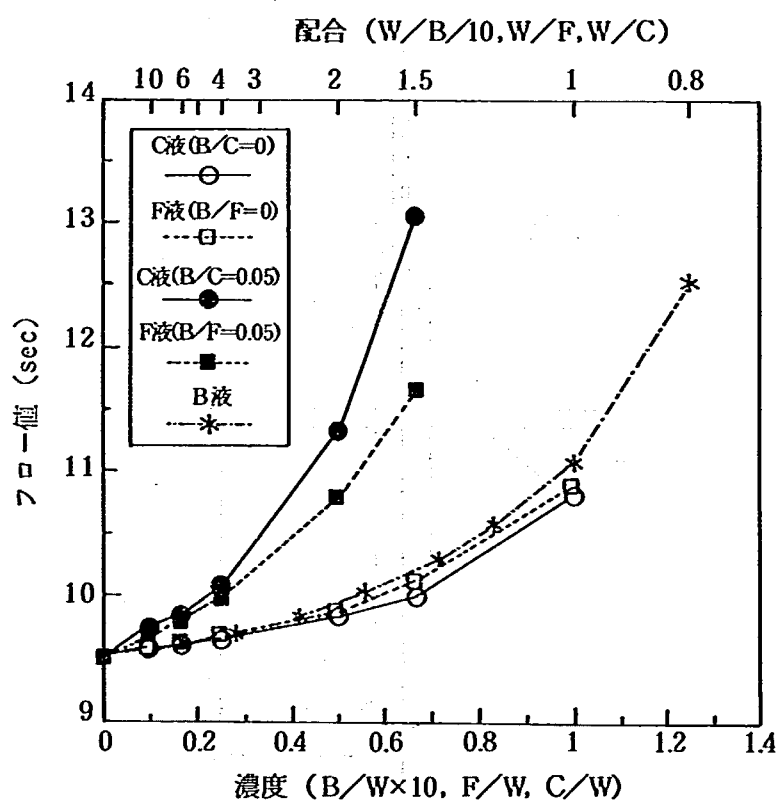


図-2.6 グラウトの濃度とフロー値の関係

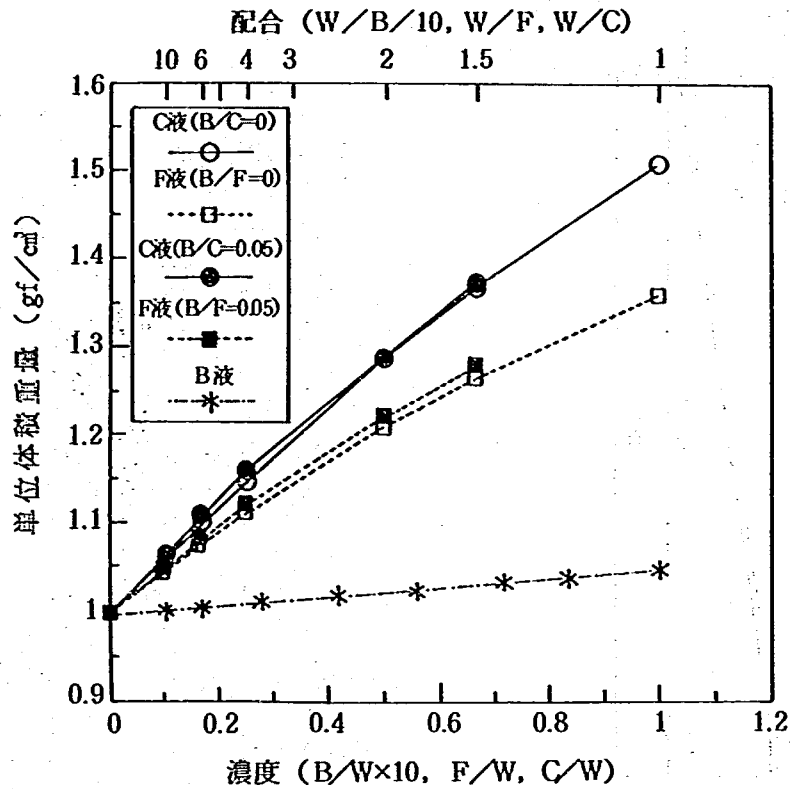


図-2.7 グラウトの濃度と単位体積重量の関係

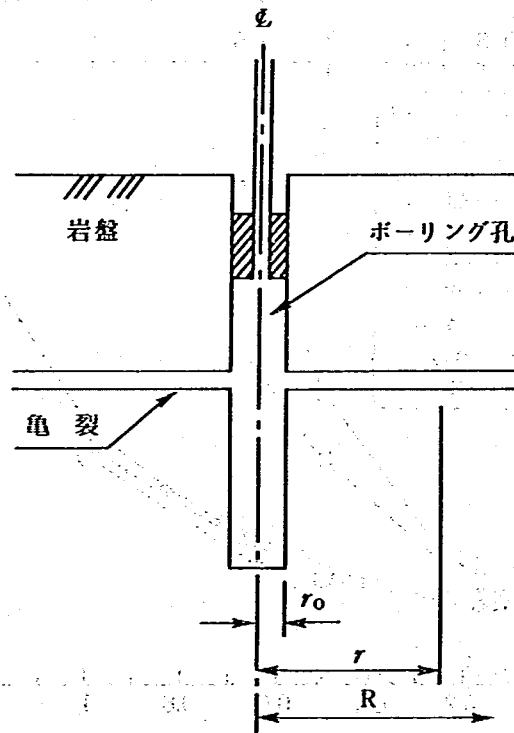


図-2.8 水平面亀裂に対する注水試験の模式図

岩盤内の水平開口亀裂に対して鉛直のボーリング孔から一定の圧力で注水する場合を考える。この場合、以下のような条件を仮定する。

- ①開口亀裂壁面は鉛直ボーリング孔と直交し、水平に同心円状に発達する。
- ②開口幅は場所によって変化しない。
- ③注入された水は開口亀裂内のみを流れる。
- ④開口亀裂内には自由水面は存在しない。
- ⑤開口亀裂内の水の流速はその圧力勾配に比例する。

このとき、亀裂内の圧力勾配は次式で表される。

$$i_p = \frac{P}{r \cdot \ln \left(\frac{R}{r_0} \right)} \quad \dots\dots\dots (2.1)$$

ここに、 i_p ：圧力勾配、 P ：注入圧力、 r ：注入孔中心からの距離、

R ：影響半径、 r_0 ：注入孔の半径

この式より、直径66mmのボーリング孔から注入圧力10kgf/cm²で注水した場合の圧力勾配を求めると図-2.9 のようになる。これより今回の実験における圧力勾配は、影響半径を10mとした場合に孔中心から概ね0.3～1.8mの間で得られる圧力勾配に相当していることになる。

なお、実験中の流量測定は、各実験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。

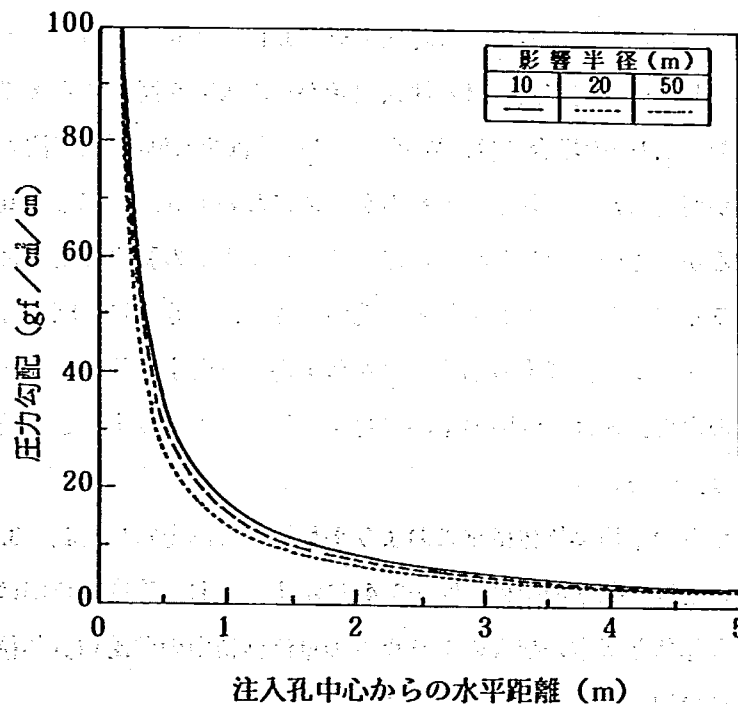


図-2.9 水平面亀裂に対する注水時の圧力勾配の分布
(注入圧力：10kgf/cm²)

3. 実験結果

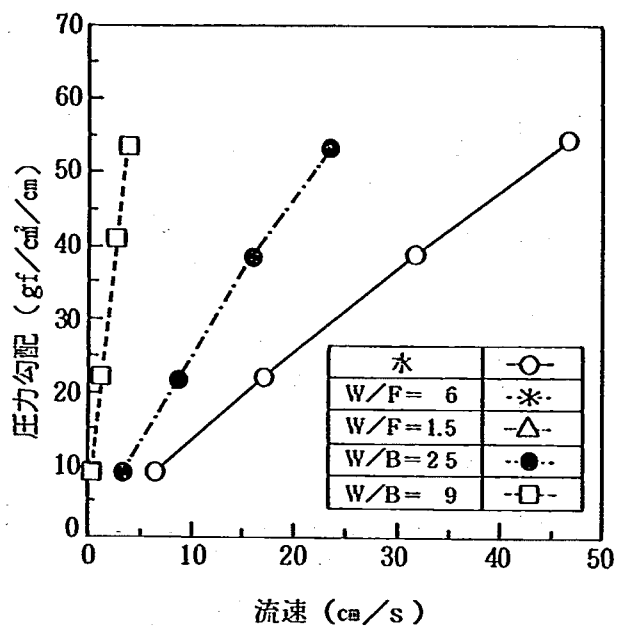
3.1 実験結果の概要

実験から得られた亀裂内の圧力勾配と流速の関係を図-3.1 に示す。ここで、図中の閉塞モデルの流速は一般部における流速を、また圧力勾配は亀裂の全流路長に対する平均圧力勾配（図-2.4 における圧力変換器の設置位置間の平均圧力勾配）を表している。なお、既述のように本実験は変圧試験であるため、図に示した圧力勾配および流速は、流出時間内の平均値としている。

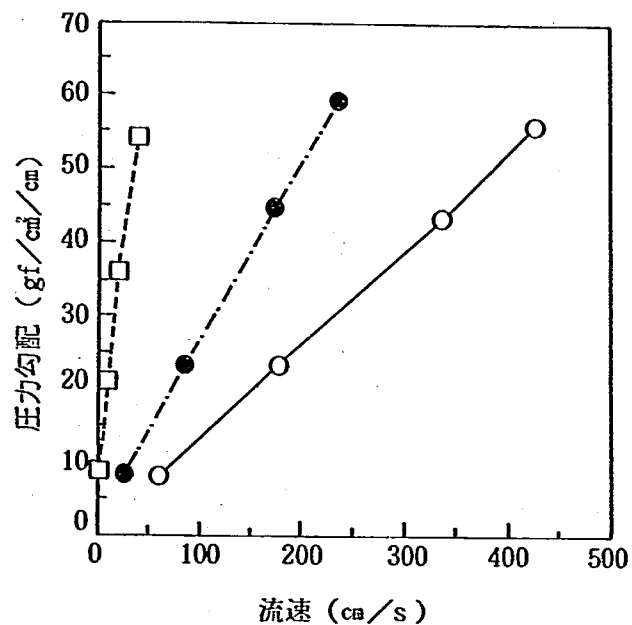
この図より、フロー値がほぼ等しい $W/F = 6$ のF液と $W/B = 25$ のB液の流速が同程度であるのに対して、同じくフロー値がほぼ等しい $W/F = 1.5$ のF液と $W/B = 9$ のB液の流速が大きく異なっていることが分かる。このことは、比較的濃度の濃いグラウトにおいては、フロー値が亀裂内のグラウトの流動特性を示す絶対的な指標とはなり得ないことを示している。

また、図-3.1 において、亀裂幅0.1mmおよび0.3mmの実験結果にF液のデータがないのは、注入開始後まもなく開口亀裂モデルの流入部が懸濁粒子による閉塞してしまったためである。その状況を図-3.2 に示す。図は無閉塞モデルの $W/F = 6$ のF液に対する実験結果であり、横軸は注入開始からの時間を、縦軸は亀裂流入部の圧力を表しており、図中に亀裂流入前と記しているのは図-2.3 における圧力変換器No1の測定値であり、同じく亀裂流入後と記しているのは圧力変換器No2の測定値である。図-3.2 より、亀裂幅0.5mmの場合には、閉塞が起こらないため亀裂流入前後の圧力差がほぼ一定となっているが、亀裂幅0.3mmの場合には、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が分かる。図によれば、この閉塞までの時間は注入圧力が小さいほど短い。ここで、亀裂幅0.3mmの無閉塞モデルに対してF液を注入した場合について、注入開始から流入部が閉塞するまでの時間を表-3.1 にとりまとめて示す。これより、注入圧力が小さいほど、また、F液の濃度が濃いほど注入開始から流入部が閉塞するまでの時間が短くなることが分かる。なお、亀裂幅0.1mmの場合には、 $W/F = 6$ のF液を2.5kgf/cm²で注入した場合でも、注入開始直後に亀裂流入部が閉塞した。これらいずれのケースにおいても、閉塞した直後は亀裂内がグラウトがほぼ充填されているが、その後の時間経過に伴って、グラウトの脱水作用によってわずかに亀裂内を流れる水によってフライアッシュ粒子が少しずつ洗い流され、数分後には図-3.3 に一例を示すように亀裂内はフライアッシュ粒子が滞留する部分と水がわずかに流動する部分に分かれ、ほぼ安定した状態となった。このときの水の流速は、流路の全幅に対する値として計算すると、閉塞後約20分間の平均でいずれも0.5cm/s程度以下であった。

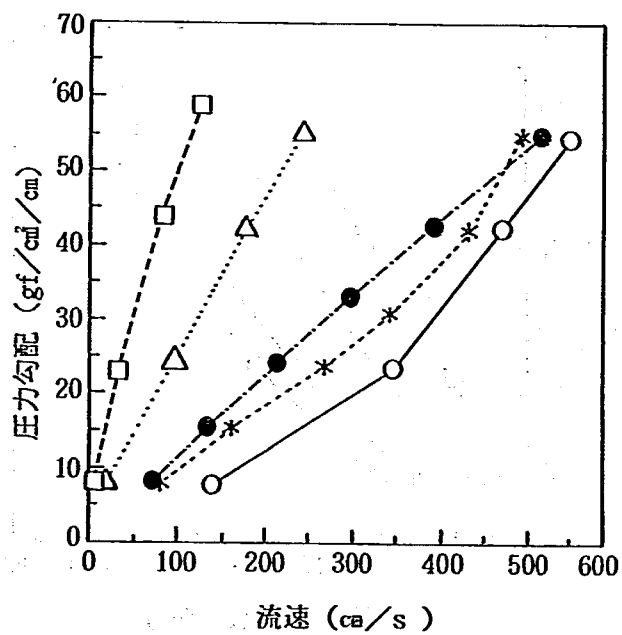
次に、流出したグラウトの平均単位体積重量および平均濃度の測定結果を表-3.2 に示す。また、流量と流出したグラウトの濃度変化率の関係を図-3.4 に示す。なお、濃度変化率は、流出したグラウトの単位体積中の懸濁物質体積と所定の配合のグラウトの単位体積中の懸濁物質体積の比を表し、F液に対しては式(3.1)、B液に対しては式(3.2)によることとした。



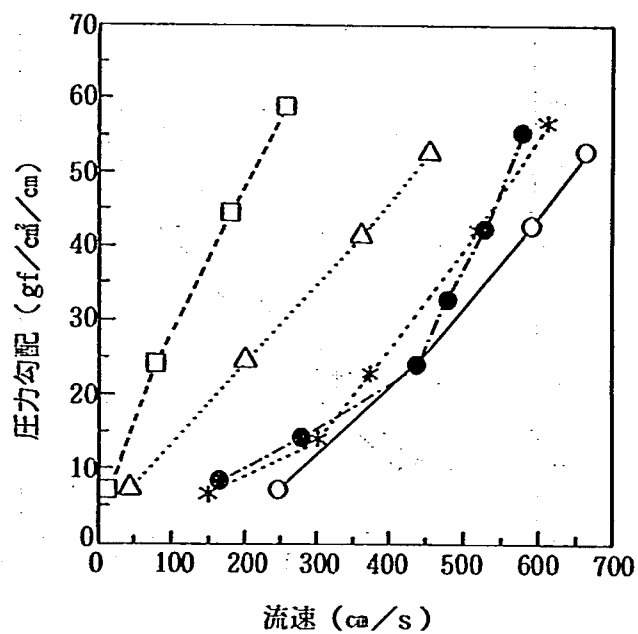
(1) 亀裂幅 0.1mm



(2) 亀裂幅 0.3mm

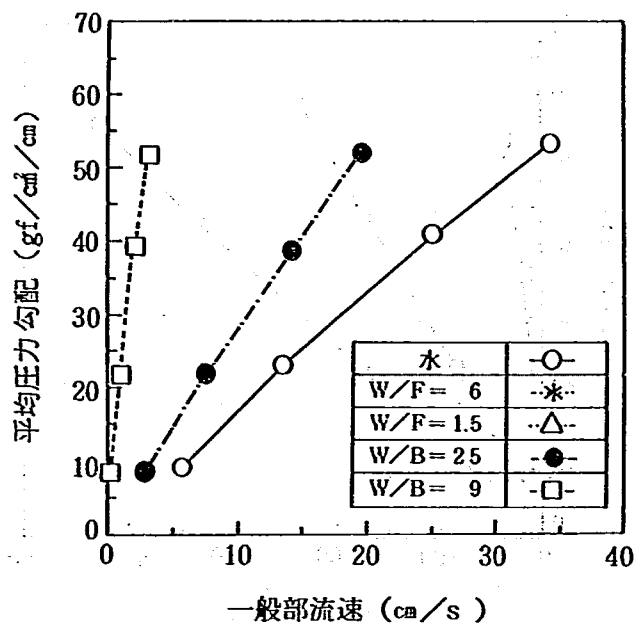


(3) 亀裂幅 0.5mm

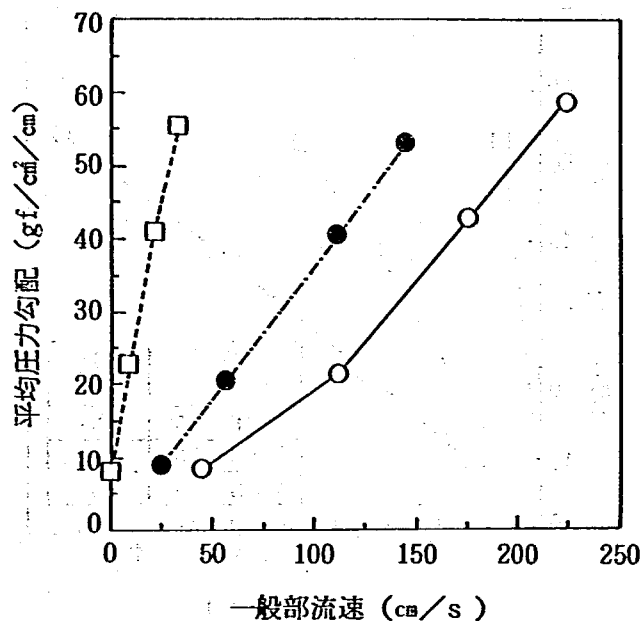


(4) 亀裂幅 0.7mm

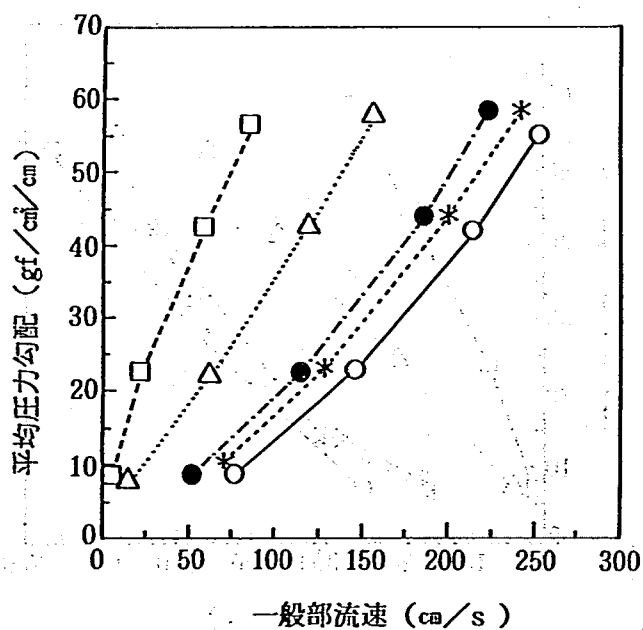
図-3.1 圧力勾配と流速の関係 (無閉塞モデル)



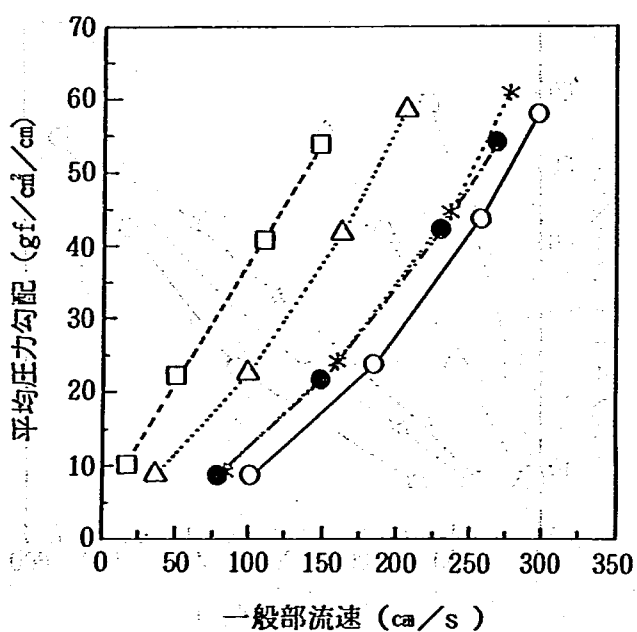
(5) 亀裂幅 0.1mm



(6) 亀裂幅 0.3mm



(7) 亀裂幅 0.5mm



(8) 亀裂幅 0.7mm

図-3.1 圧力勾配と流速の関係 (無閉塞モデル)

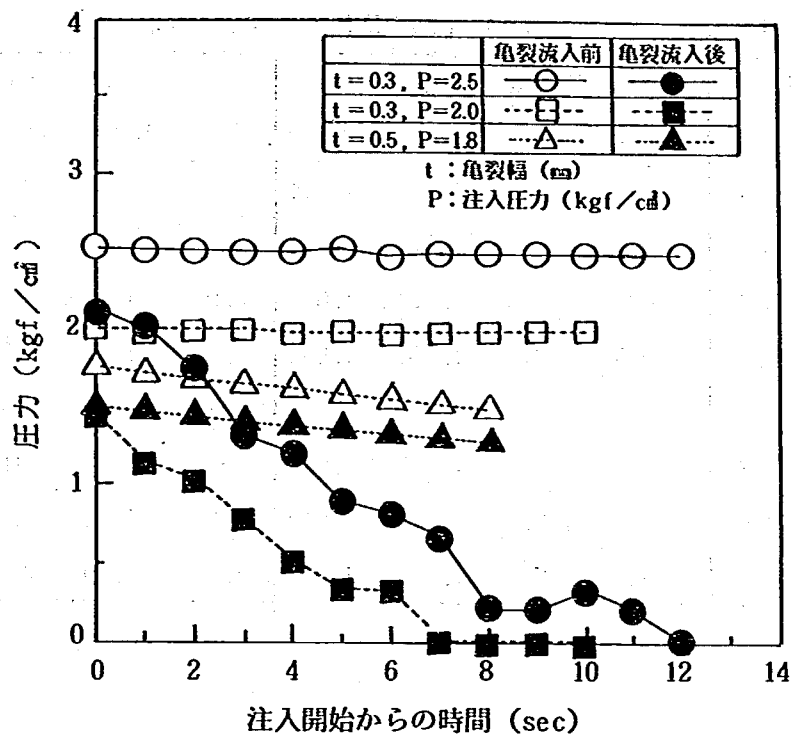


図-3.2 圧力の経時変化の一例 (F液(W/F=6), 無閉塞モデル)

表-3.1 注入開始から亀裂流入部が閉塞するまでの時間

		注入圧力 (kgf/cm²)		
		1	2	2.5
W/F	6	0 秒	7 秒	12 秒
	1.5	0 秒	0 秒	0 秒

(亀裂幅 0.3mm)

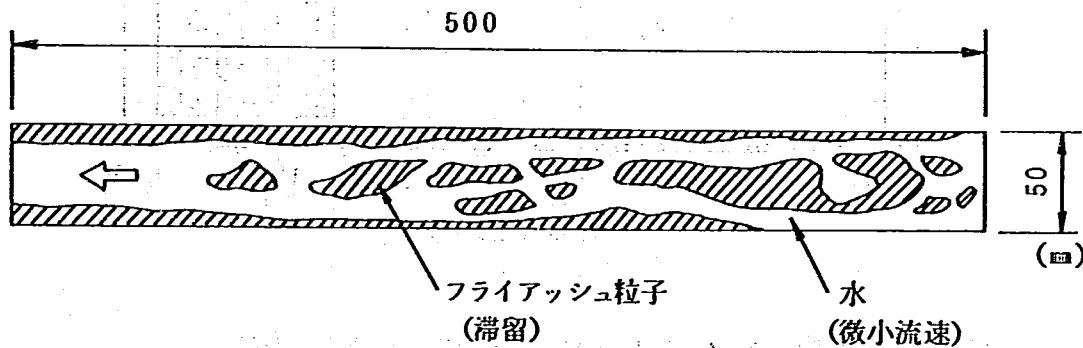


図-3.3 亀裂流入部閉塞後の亀裂内の状況 (平面図)

(無閉塞モデル, 亀裂幅0.3mm, F液(W/F=1.5), 注入圧力2.5kgf/cm²)

表-3.2 流出グラウトの平均単位体積重量および平均濃度

流路形状	亀裂幅 (mm)	単位体積重量(g/cm ³)				濃度(W/F or W/B)			
		W/F=6	W/F=1.5	W/B=25	W/B=9	W/F=6	W/F=1.5	W/B=25	W/B=9
無閉塞 モデル	0.1	—	—	1.013	1.044	—	—	32.5	10.6
	0.3	—	—	1.014	1.047	—	—	30.0	10.0
	0.5	1.083	1.278	1.013	1.049	5.93	1.52	30.8	9.65
	0.7	1.085	1.279	1.014	1.052	5.81	1.51	29.0	9.25
閉塞 モデル	0.1	—	—	1.010	1.049	—	—	39.5	9.70
	0.3	—	—	1.013	1.047	—	—	31.3	9.93
	0.5	1.075	1.279	1.014	1.049	6.60	1.51	29.0	9.70
	0.7	1.083	1.282	1.016	1.053	5.96	1.49	26.8	9.05

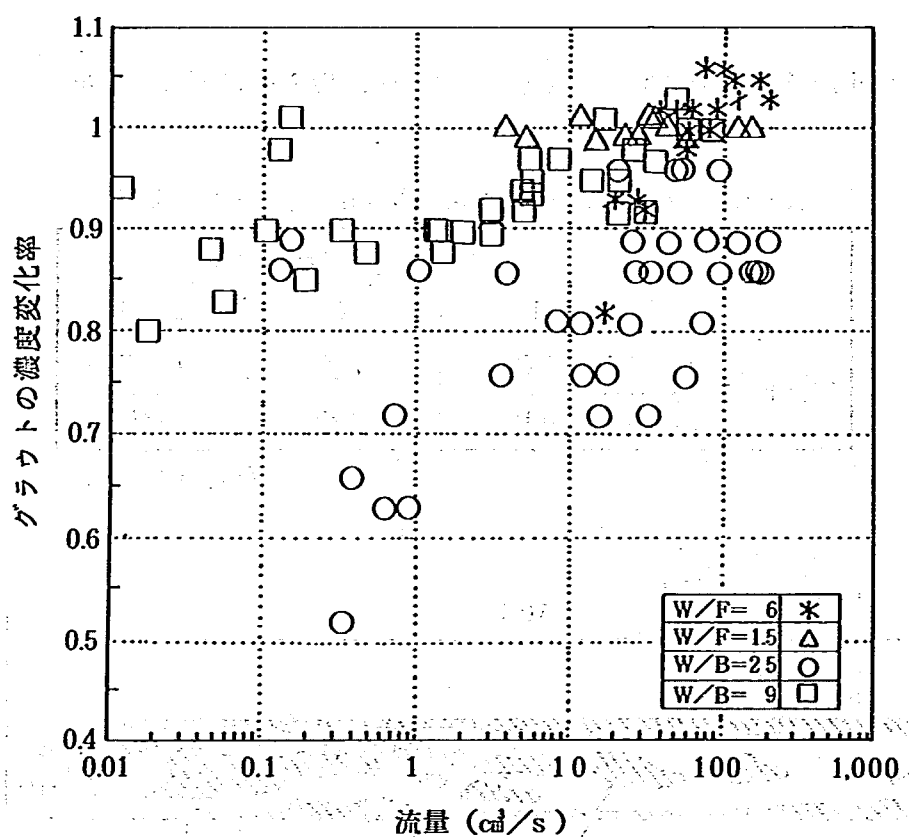


図-3.4 流量とグラウトの濃度変化率の関係

$$C_M = \left(\frac{\frac{1}{G_F}}{\frac{M_o}{G_w} + \frac{1}{G_F} + \frac{0.05}{G_B}} \right) \bigg/ \left(\frac{\frac{1}{G_F}}{\frac{M_i}{G_w} + \frac{1}{G_F} + \frac{0.05}{G_B}} \right) = \frac{G_{FB}M_i + G_w G_B + 0.05 G_w G_F}{G_F G_B M_o + G_w G_B + 0.05 G_w G_F} \dots (3.1)$$

$$C_M = \left(\frac{\frac{1}{G_B}}{\frac{M_o}{G_w} + \frac{1}{G_B}} \right) \bigg/ \left(\frac{\frac{1}{G_B}}{\frac{M_i}{G_w} + \frac{1}{G_B}} \right) = \frac{G_B M_i + G_w}{G_B M_o + G_w} \dots\dots (3.2)$$

ここに、 C_M : グラウトの濃度変化率、 M_i : 所定のグラウトの配合 (F 液 : W/F, B 液 : W/B)

M_o : 流出したグラウトの配合 (F 液 : W/F, B 液 : W/B), G_w : 水の比重 (1.00)

G_F : フライアッシュの比重 (2.07), G_B : ベントナイトの比重 (2.02)

この図から分かるように、流量が大きいほど流出濃度の低減が少ない傾向にある。これは、流量が小さい場合には、圧力タンクと流入部を結ぶチューブ内あるいは流入部において、グラウト中の懸濁物質が多少沈澱、分離したことによるものと考えられる。ただし、濃度のわずかな変動が粘性に大きく影響する高濃度のグラウトでは濃度の変動は小さく、一方、低濃度のグラウトでは濃度の変動が比較的大きいものの、この程度の濃度においては濃度の変動による粘性の変動は比較的小さいため、全体としては、この程度の濃度変化が実験結果に与える影響は小さいものと考えられる。

次に、実験中の注入材料の温度の測定結果を表-3.3 に示す。これより、注入材料の温度は約14～17°Cの範囲であり、各注入材料については最大2°C程度の変動となっている。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いものとした。

表-3.3 注入材料の平均温度

流路形状	亀裂幅 (mm)	注入材料の平均温度(°C)				
		水	W/F=6	W/F=1.5	W/B=25	W/B=9
無閉塞 モデル	0.1	15.7	—	—	15.0	14.8
	0.3	16.4	—	—	14.9	14.6
	0.5	15.8	17.2	16.4	15.4	14.1
	0.7	16.1	17.1	16.5	15.6	14.0
閉塞 モデル	0.1	16.2	—	—	16.8	15.5
	0.3	16.6	—	—	16.6	15.3
	0.5	15.9	17.3	16.4	16.7	15.1
	0.7	16.3	17.1	16.7	16.7	15.0

3.2 グラウトの基本的流動特性

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層流状態で流動する場合の平均流速は式 (3.3) で表される (Poiseuille の式、巻末参考資料参照)。

$$v = \frac{t^2}{12\mu} i_p \quad \dots\dots (3.3)$$

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すると次のようになる。

$$\mu = \frac{Bt^3}{12Q} i_p \quad \dots\dots (3.4)$$

ここに、 Q : 流量 ($=vBt$)、 B : 流路幅

そこで、上式で与えられる見かけの粘性係数を実験より求め、これと流量との関係を示したものが図-3.5 である。図-3.5 (1)より、水については、流量が小さいところでは流量が変化しても見かけの粘性係数はほとんど変化せず、ニュートン流体とみなすことができる。なお、亀裂幅0.1mmの実験結果では、

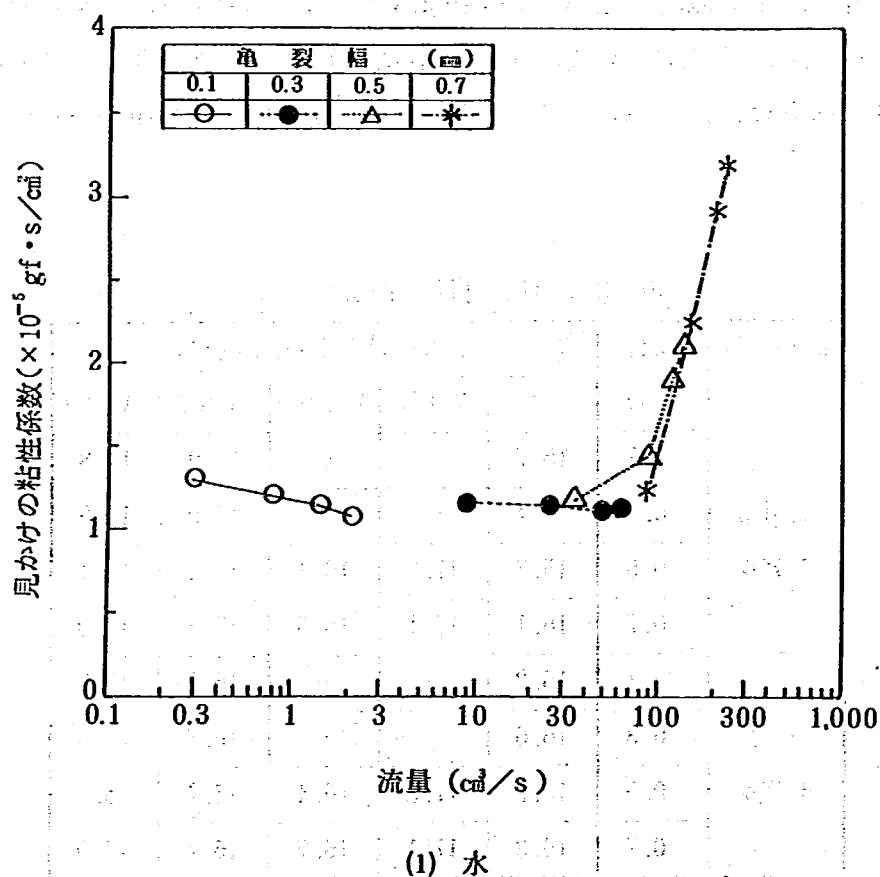
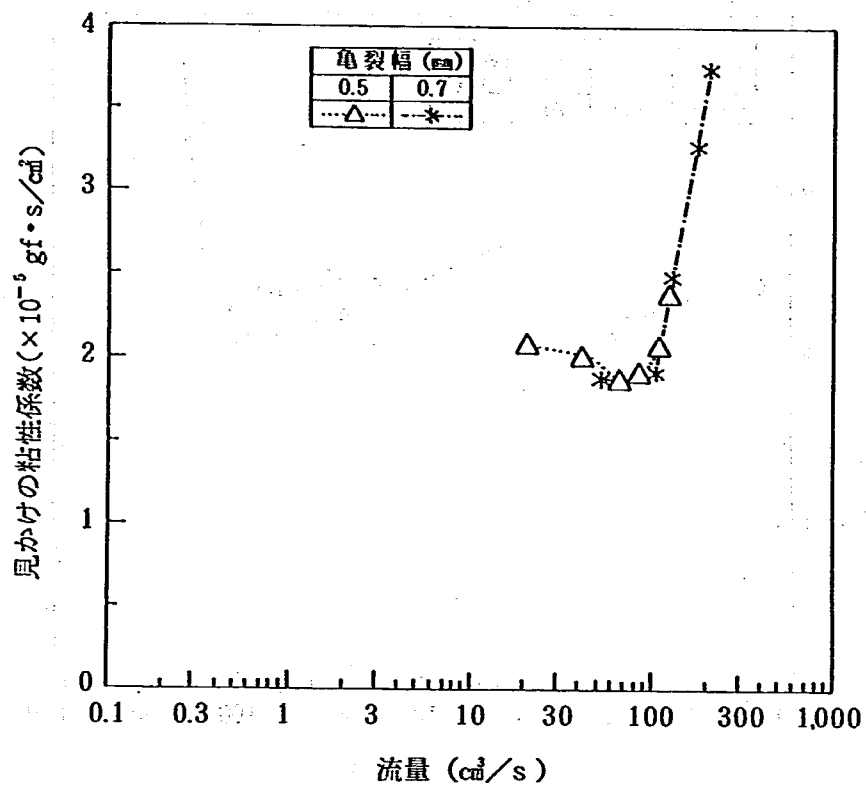
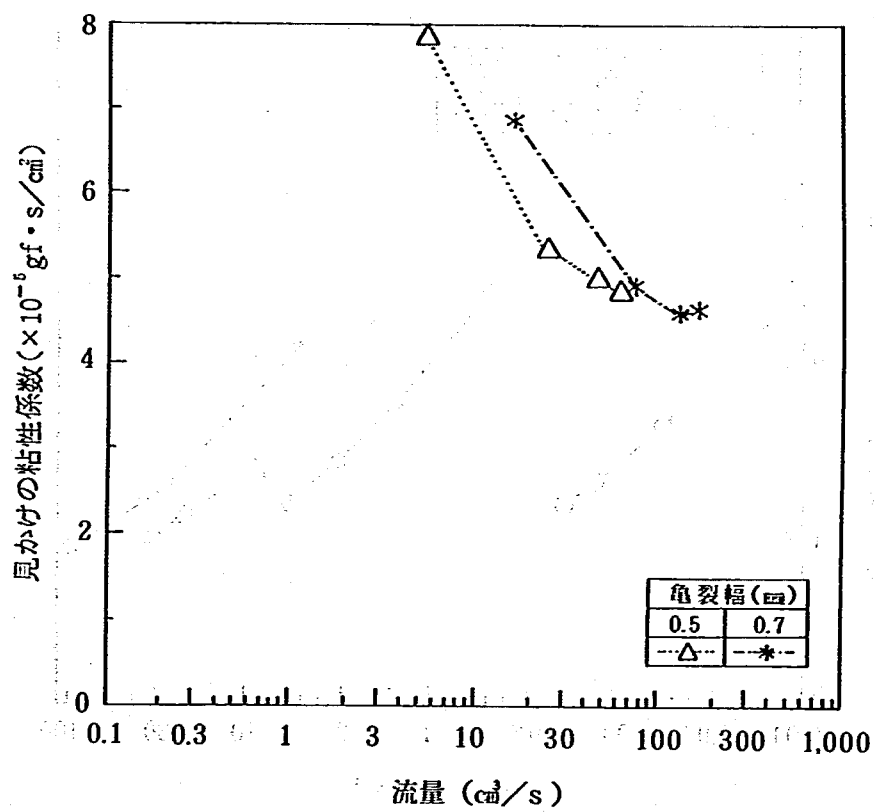


図-3.5 流量と見かけの粘性係数の関係

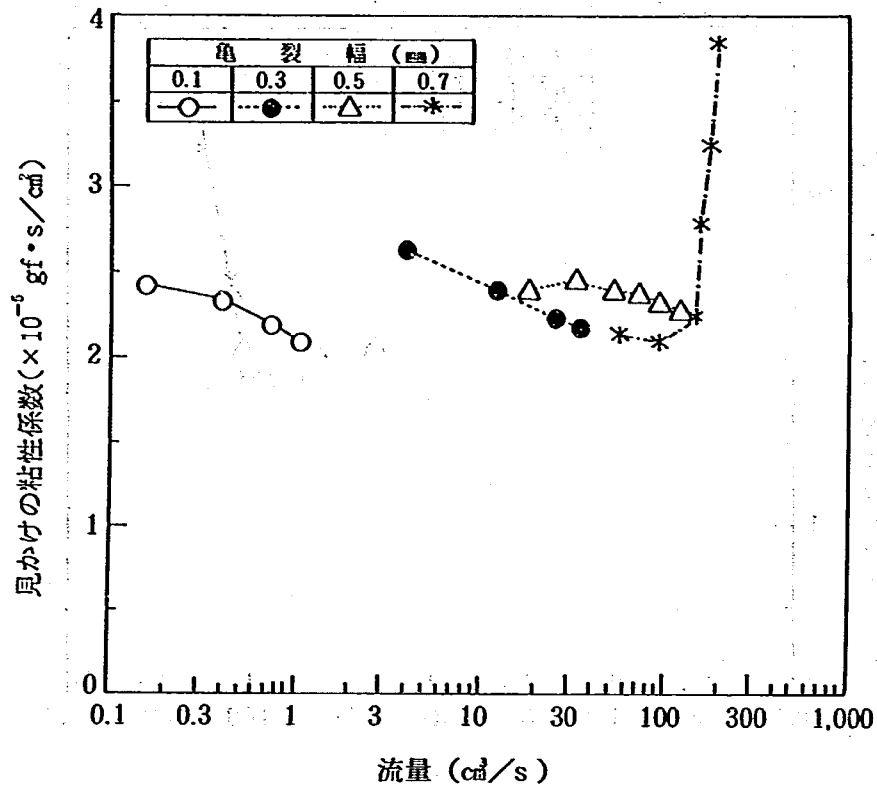


(2) F 液 (W/F=6)

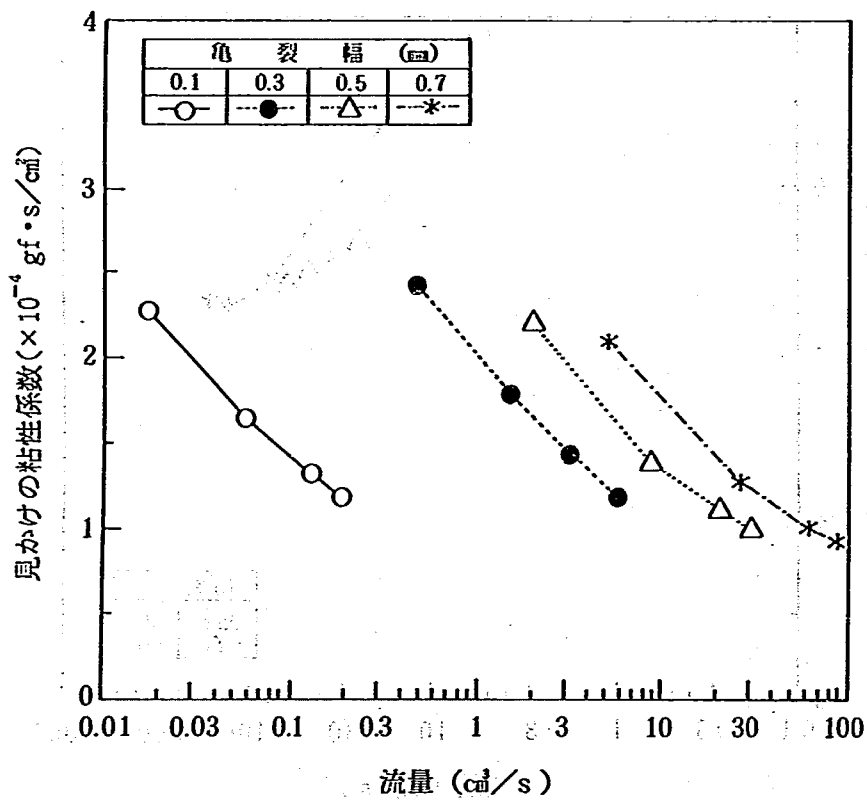


(3) F 液 (W/F=1.5)

図-3.5 流量と見かけの粘性係数の関係



(4) B液 (W/B=25)



(5) B液 (W/B=9)

図-3.5 流量と見かけの粘性係数の関係

流量の増加に伴って見かけの粘性係数がわずかに減少しているが、これは、亀裂内の圧力の増加に伴って亀裂幅がわずかに拡大したことにより、相対的に流量が増加したことに原因があると考えられる。この現象は、亀裂幅が大きい場合にも当然生じていると考えられるが、亀裂幅が大きいほどその影響を無視できることは明らかである。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。

一方、図-3.5 (2)~(5)より、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、濃度が濃いほどその傾向は顕著である。また、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。このように、流量の増加とともに見かけの粘性係数が減少するということは、F液およびB液がニュートン流体とは見なせないことを示している。そこで、ビンガム流体あるいは擬塑性流体を仮定して、層流域におけるF液およびB液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層流状態で流動する場合の平均流速は、それぞれ式(3.5) および式(3.6)で表される(巻末参考資料参照)。

$$v = \frac{t^2}{12\mu_B} \left\{ 1 - 3 \frac{f_y}{ti_p} + 4 \left(\frac{f_y}{ti_p} \right)^3 \right\} i_p \quad \left[\text{ただし, } i_p \geq \frac{2f_y}{t} \right] \quad \dots\dots (3.5)$$

ここに、 μ_B : 塑性粘度、 f_y : 降伏値

$$v = \frac{t^{n+1}}{2^{n+1}(n+2)\mu_p} i_p^n \quad \dots\dots (3.6)$$

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、圧力勾配と流速の関係から最小自乗法によりF液およびB液の μ_B 、 f_y 、 μ_p 、 n の値を求めた結果を表-3.4に示す。なお、表にはニュートン流体を仮定して同様に求めた粘性係数 μ の値も併せて示す。また、この結果から得られた回帰曲線の適合度を示す指標として、各注入材料、亀裂幅に対して次式で表される平均偏差率を求めてみると図-3.6のとおりとなる。

$$d = \frac{\sum_{i=1}^k \left\{ \frac{\sqrt{(v_{mi} - v_{ci})^2}}{v_{mi}} \right\}}{k} \quad \dots\dots (3.7)$$

ここに、 d : 平均偏差率、 v_m : 流速の測定値(層流域)、

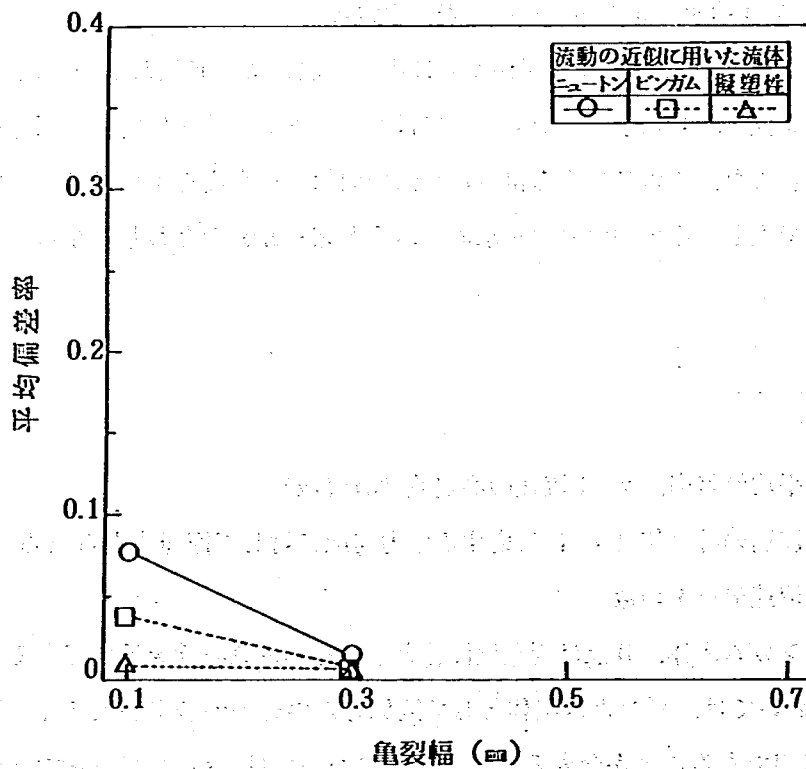
v_c : 流速の計算値(v_m に対応する圧力勾配に対して回帰式から求めた値)、

k : 流速データの数

これより、F液はビンガム流体、B液は擬塑性流体としてその流動特性を近似できることが分かる。特にW/B=9のB液においては、ビンガム流体として近似した場合の偏差率が大きく、擬塑性流体として近似した方がより適切であることが分かる。また、水については、亀裂幅0.3mmではいずれの流体を仮定しても偏差率は非常に小さくなっており、ニュートン流体とみなせることが分かる。なお、亀裂幅0.1mmにおいてはニュートン流体あるいはビンガム流体として近似した場合の平均偏差率が比較的大きい値を

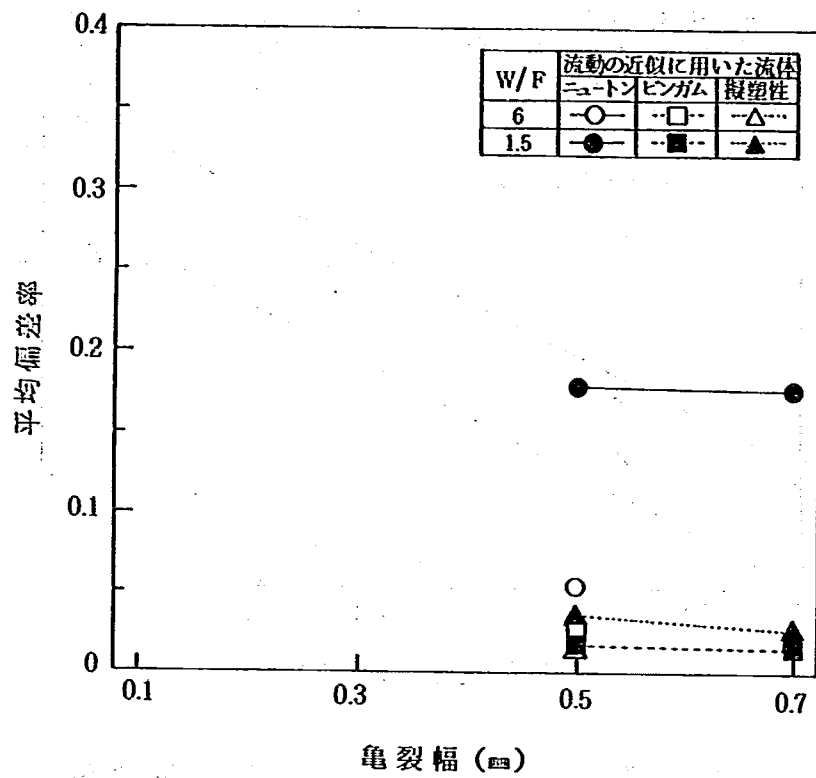
表-3.4 実験結果から求めた注入材料の粘性等の値

注入材料		亀裂幅 (mm)	流動の近似に用いた流体				
			ニュートン流体	ビンガム流体		擬塑性流体	
			μ (gf·s/cm ²)	μ_B (gf·s/cm ²)	f_y (gf/cm ²)	μ_p (gf ⁿ ·s/cm ²ⁿ)	n
水		0.1	1.107×10^{-5}	1.040×10^{-5}	8.200×10^{-3}	9.237×10^{-6}	1.101
		0.3	1.124×10^{-5}	1.117×10^{-5}	2.766×10^{-3}	1.112×10^{-5}	1.016
F 液	W/F=6	0.5	1.907×10^{-5}	1.760×10^{-5}	2.350×10^{-2}	1.728×10^{-5}	1.097
	W/F=1.5	0.5	4.931×10^{-5}	4.506×10^{-5}	6.076×10^{-2}	4.619×10^{-5}	1.257
		0.7	4.722×10^{-5}	4.274×10^{-5}	7.142×10^{-2}	4.544×10^{-5}	1.245
B 液	W/B=25	0.1	2.143×10^{-5}	2.027×10^{-5}	7.226×10^{-3}	1.848×10^{-5}	1.082
		0.3	2.206×10^{-5}	2.097×10^{-5}	2.333×10^{-2}	2.086×10^{-5}	1.099
		0.5	2.296×10^{-5}	2.224×10^{-5}	1.976×10^{-2}	2.282×10^{-5}	1.032
	W/B=9	0.1	1.280×10^{-4}	1.063×10^{-4}	2.330×10^{-2}	6.571×10^{-5}	1.367
		0.3	1.299×10^{-4}	1.023×10^{-4}	8.835×10^{-2}	9.933×10^{-5}	1.401
		0.5	1.060×10^{-4}	8.865×10^{-5}	1.240×10^{-1}	1.008×10^{-4}	1.406
		0.7	9.764×10^{-5}	8.127×10^{-5}	1.777×10^{-1}	1.059×10^{-4}	1.405

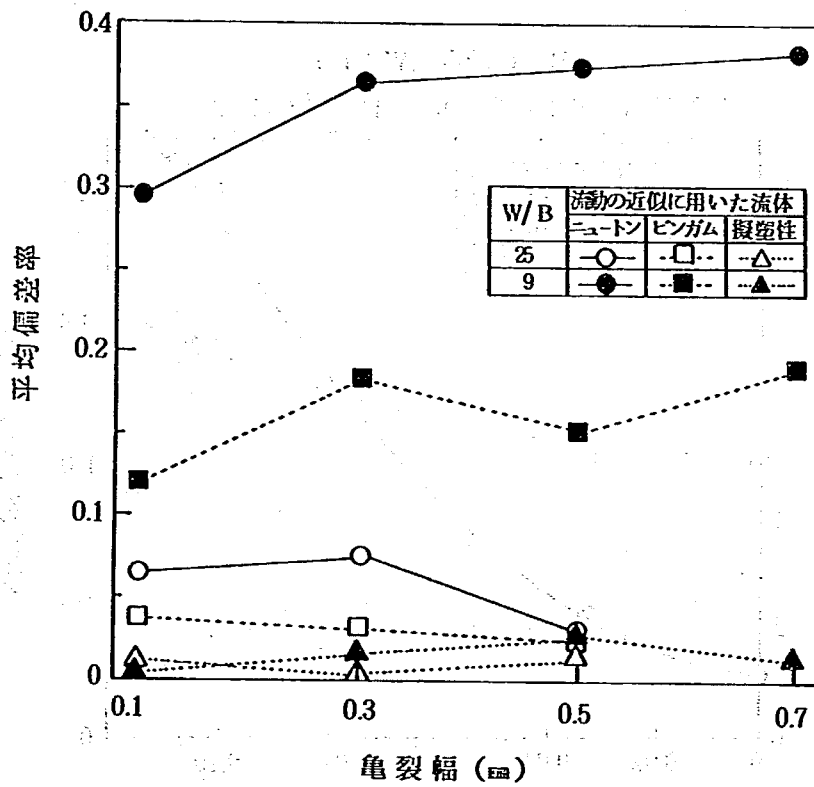


(1) 水

図-3.6 圧力勾配-流量の回帰曲線の適合度



(2)F液



(3)B液

図-3.6 圧力勾配-流量の回帰曲線の適合度

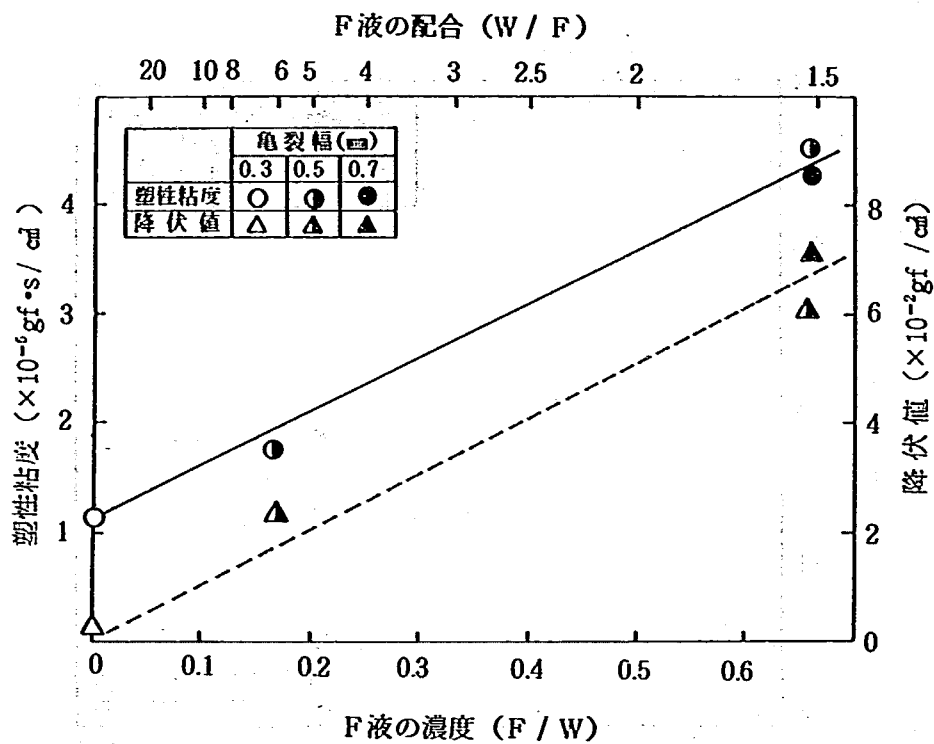


図-3.7 F液の濃度と塑性粘度および降伏値の関係

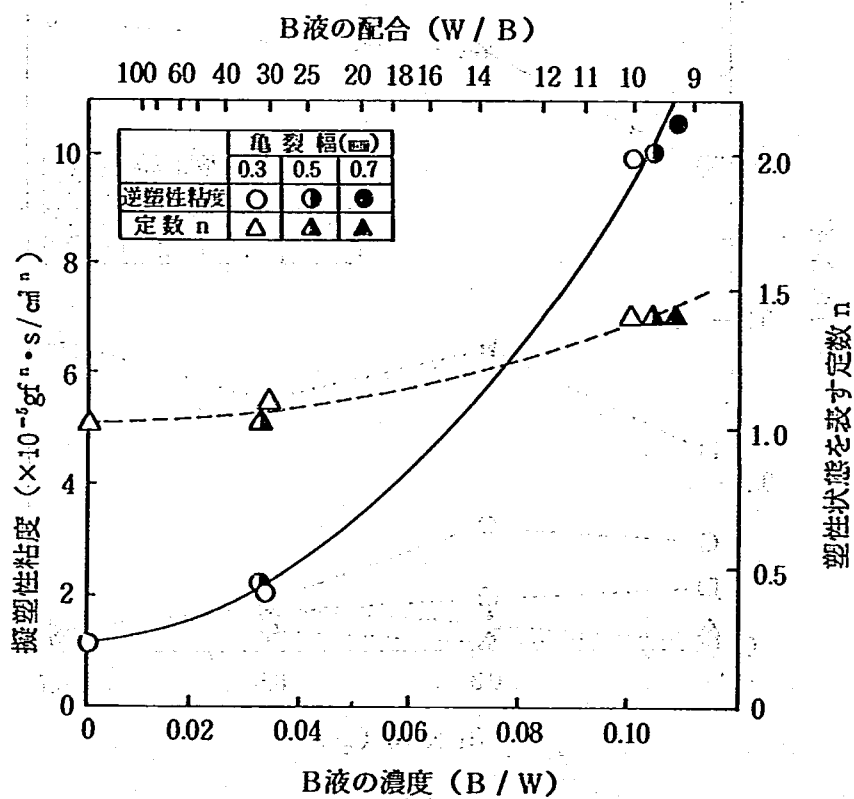


図-3.8 B液の濃度と擬塑性粘度および定数nの関係

示しているが、これは、既述のように、亀裂内の圧力の増加によって亀裂幅がわずかに拡大したことにより、圧力勾配と流速が比例せず、あたかも擬塑性流体のような流動特性を得る結果となったことによるものと考えられる。

以上の結果より、層流域においてF液をビンガム流体、B液を擬塑性流体と考え、表-3.4 に示した値を用いて、F液およびB液の粘性を示す値と濃度の関係を示したのが図-3.7 および図-3.8 である。なお、亀裂幅0.1mmの場合のデータについては、既述のように実験中の亀裂幅の拡大による誤差が比較的大きいと考えられるため、図化の対象としなかった。この図より、F液については、塑性粘度および降伏値と濃度F/Wはほぼ直線的な関係にあり、B液については、擬塑性粘度および塑性状態を表す定数nと濃度B/Wは2次曲線的な関係を示すことが分かる。

また、層流域において水をニュートン流体、F液をビンガム流体、B液を擬塑性流体と考え、表-3.4 に示したそれぞれの粘性係数等の値を用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-3.9 に示す。なお、F液については実際に流速が0となる圧力勾配が存在するのかが今回の実験では確認されていないこと、また、擬塑性流体の流速式(3.6)については圧力勾配が大きくなると見かけの粘性係数が0に漸近するという矛盾を含んでいること等を考慮すると、上記の流動特性の近似はあらゆる条件に対して成立つものではないことに注意する必要がある。

次に、各注入材料の流れが層流から乱流へ移行する点について検討する。図-3.5 において水およびW/F=6のF液についてみると、層流から乱流への移行点における流量および見かけの粘性係数は、亀裂幅によらずほぼ一定となっていることが分かる。ここで、流れのレイノルズ数は次式によって定義することができる。

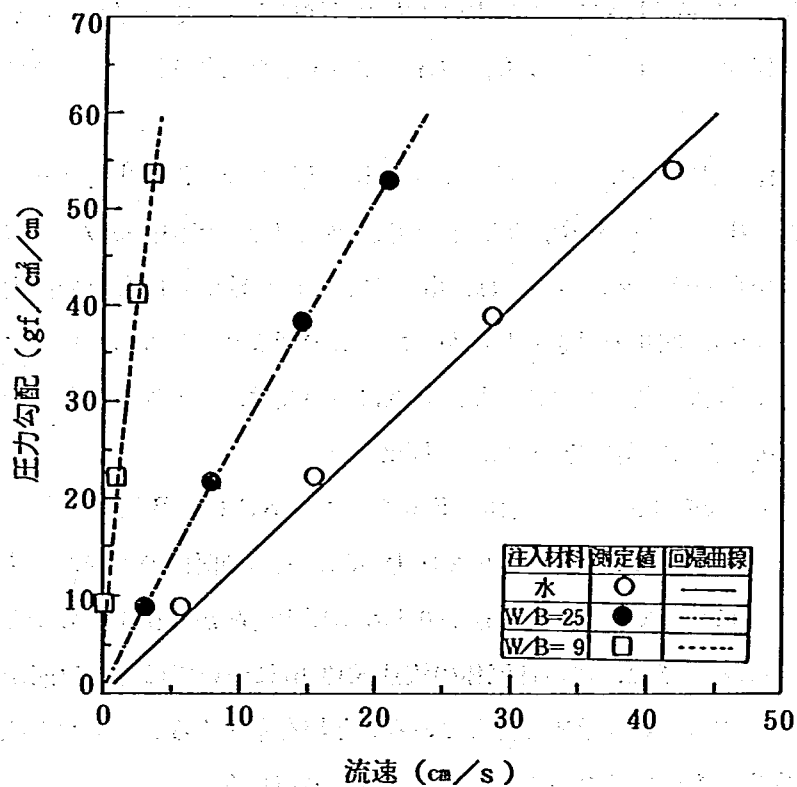
$$Re = \frac{2l\rho v}{\mu_{AG}} = \frac{2\rho Q}{\mu_{AGB}} \quad \dots\dots (3.8)$$

ここに、 ρ ：流体の単位体積重量、 μ_A ：見かけの粘性係数、 g ：重力加速度
したがって、層流から乱流への移行点におけるレイノルズ数（限界レイノルズ数）は流量と見かけの粘性係数によって定まり、亀裂幅によらないことが理解できる。なお、図-3.5 において、流量の増加に伴って見かけ粘性係数が増加し始める点を層流から乱流への移行点とみなし、各注入材料の限界レイノルズ数を求めると表-3.5 のとおりとなる。これより、限界レイノルズ数は、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程度であり、限界レイノルズ数が材料によらずほぼ一定の値となることが分かる。

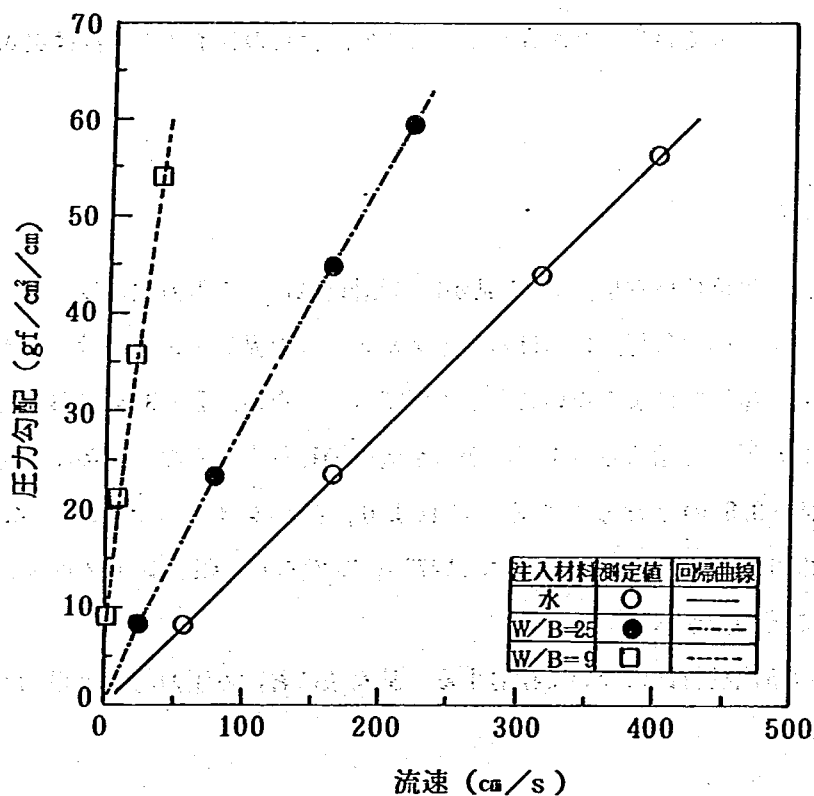
次に、乱流域における流動特性について検討する。乱流域における圧力勾配と平均流速の関係は一般に次式で表わされる。

$$v = a i_p^b \quad \dots\dots (3.9)$$

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であるとされている。式(3.9)を用いて、圧力勾配と流速の関係から最小自乗法によ

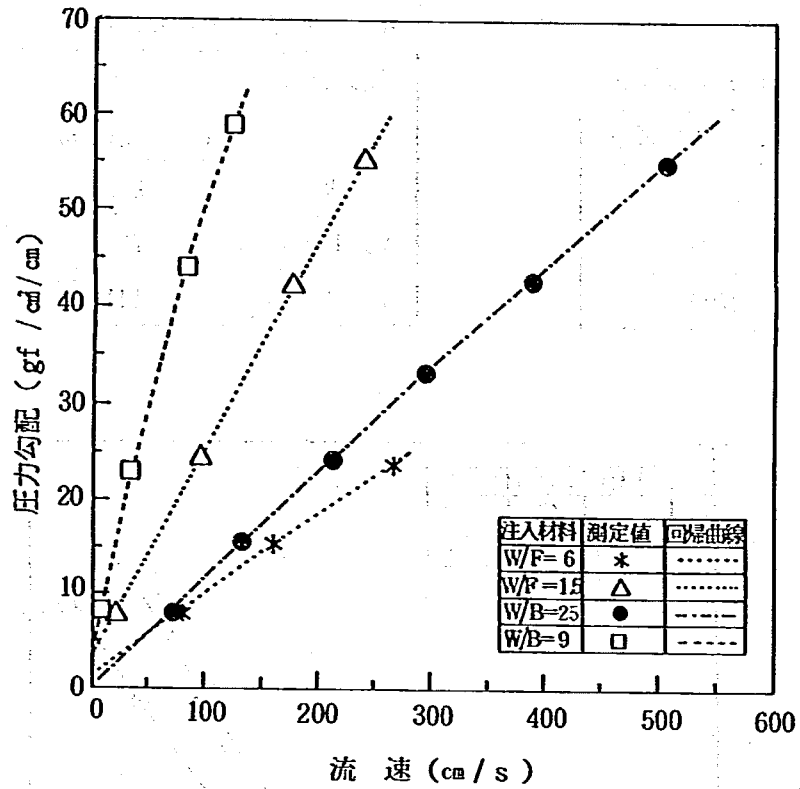


(1) 亀裂幅 0.1mm

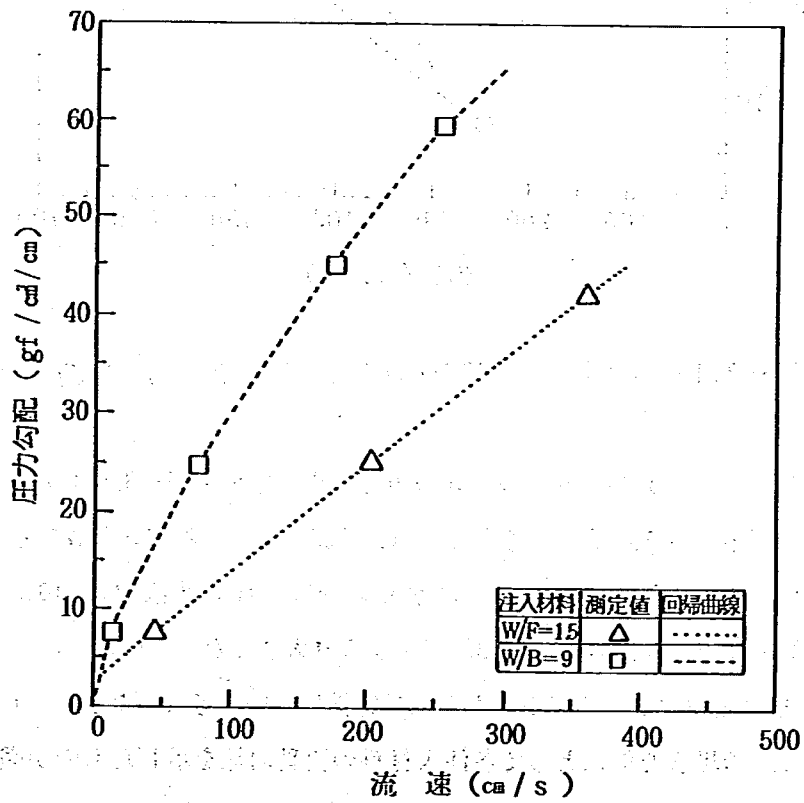


(2) 亀裂幅 0.3mm

図-3.9 压力勾配-流速の回帰曲線 (層流域)



(3) 亀裂幅 0.5mm



(4) 亀裂幅 0.7mm

図-3.9 圧力勾配-流速の回帰曲線 (層流域)

表-3.5 限界レイノルズ数

注入材料	限界レイノルズ数
水	2600
W/F=6	2300
W/B=25	2700

表-3.6 乱流域における流動特性を表す定数

注入材料	a ($\text{cm}^{b+1}/\text{gf}^b/\text{s}$)	b
水	87.0	0.507
W/F=6	75.3	0.513
W/B=25	141	0.348

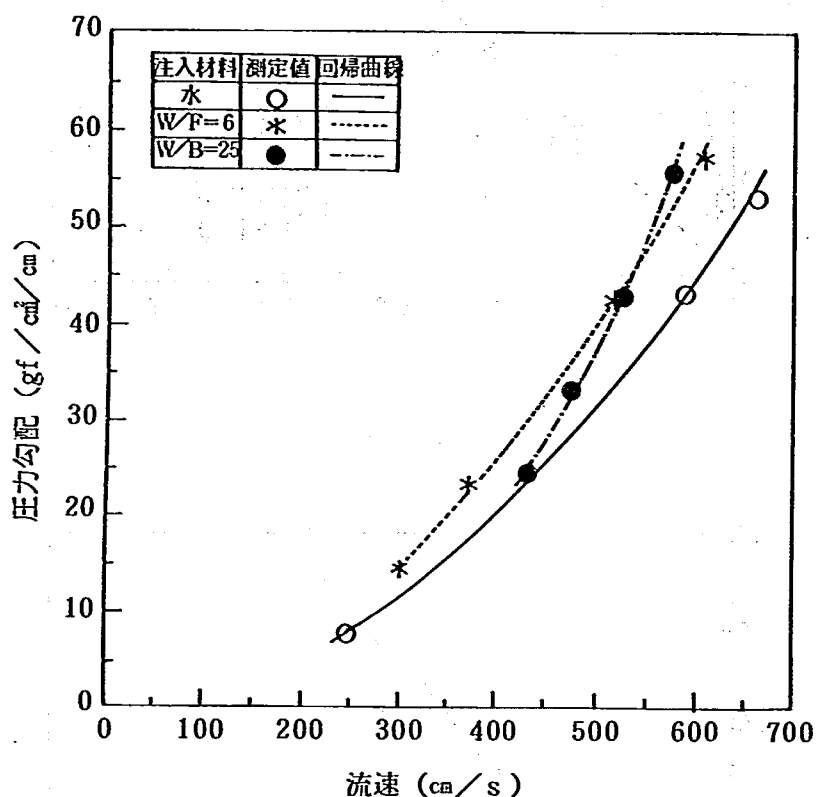


図-3.10 圧力勾配-流速の回帰曲線 (乱流域, 亀裂幅0.7mm)

て水, W/F=6のF液およびW/B=25のB液のa, bの値を求めた結果を表-3.6に示す。また, この結果から得られた回帰曲線を図-3.10に示す。なお検討は, 乱流域におけるデータ数を考慮し, 亀裂幅0.7mmについてのみ行った。表-3.6より, 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, B液では非線形性がより大きくなっている。

以上, 層流域および乱流域におけるグラウトの流動特性について考察したが, これらの結果を整理するために, 亀裂幅0.7mmの場合を例にとって各注入材料の流動曲線を示したものが図-3.11である。これより各注入材料毎に流動曲線の特徴を整理すると次のようになる。

①水はニュートン流体とみなされ, 層流域においては流速と圧力勾配は比例関係にある。流速が増加してレイノルズ数が2600程度となると, 流れは層流から乱流に移行し, 乱流域においては流速は圧力勾配

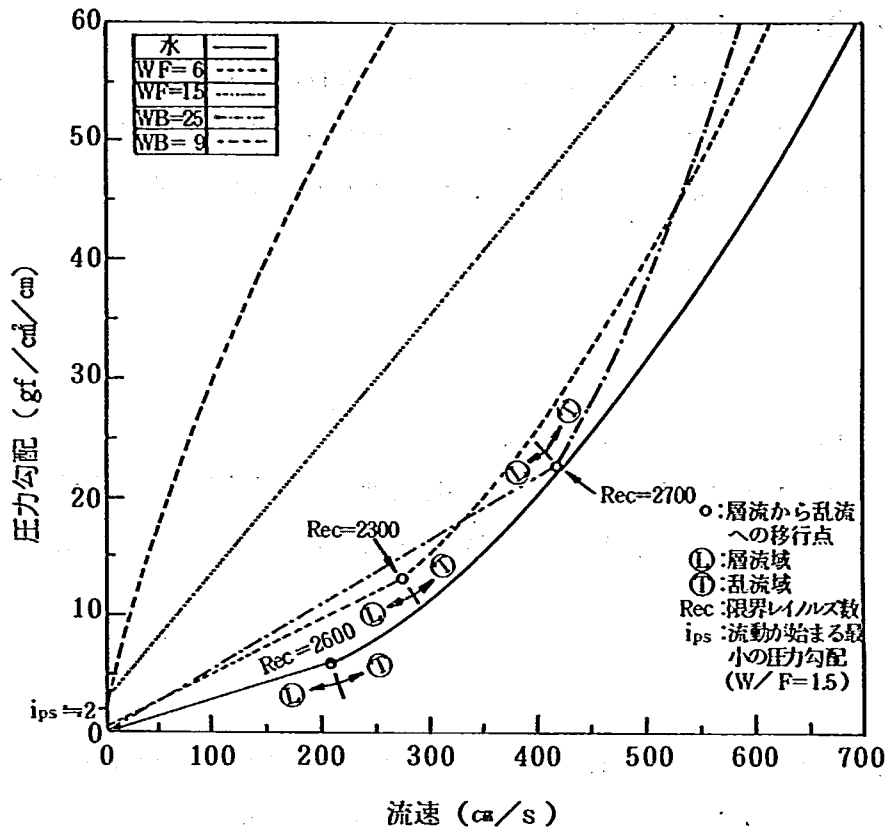


図-3.11 各注入材料の流動曲線 (亀裂幅0.7mm)

のほぼ0.5乗に比例して増加する。

②F液はビンガム流体として近似され、ある圧力勾配以下では流動が起こらない。この傾向は濃度が濃い場合に顕著であり、 $W/F=1.5$ のF液を幅0.7mmの亀裂に注入する場合、流動し始める最小の圧力勾配は約 2gf/cm^3 と計算される。圧力勾配がこの値を超えると流動が始まり、層流域においては流速と圧力勾配はほぼ直線的な関係となる。一方、濃度が薄い場合には流動が始まる最小の圧力勾配は小さくなり、その結果、流れは比較的ニュートン流体に近い特性を示すこととなる。また、流速が増加してレイノルズ数が2300程度となると、流れは層流から乱流に移行し、乱流域においては、水の場合と同様に流速は圧力勾配のほぼ0.5乗に比例して増加する（低濃度のF液による実験結果より）。

③B液は擬塑性流体として近似され、層流域においては圧力勾配の増加に伴って流速の増加率が徐々に大きくなる。この傾向は濃度が濃い場合に顕著であり、 $W/B=9$ のB液では流速は圧力勾配の約1.4乗に比例して増加する。一方、濃度の薄い $W/B=25$ の場合には、流速は圧力勾配の約1.1乗に比例して増加し、比較的ニュートン流体に近い流動特性を示す。流速が増加してレイノルズ数が2700程度となると、流れは層流から乱流に移行し、乱流域においては、流速は圧力勾配のほぼ0.35乗に比例して増加する（低濃度のB液による実験結果より）。

3.3 流路の断面急変部における圧力損失

閉塞モデルの閉塞部における流れを模式的に表すと図-3.12のようになり、断面急変部の下流において渦巻状の流れが生じる。このとき、流体のもつエネルギーの一部はこの渦動によって消費され、その結果は、図中の断面Ⅰと断面Ⅱにおける圧力差となって現れる。このような場合の損失圧力は、一般に次式で表される。

$$P_s = f_s \rho \frac{v^2}{2g} \quad \dots\dots (3.10)$$

ここに、 P_s : 損失圧力, f_s : 損失係数

そこで、この式の両辺を単位体積重量 ρ で除し、実験結果より、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-3.13である。なお、この際、損失圧力は次式より求めた。

$$P_s = \Delta P_b - i_{pn} L_n - i_{pn}' L_b \quad \dots\dots (3.11)$$

ここに、 ΔP_b : 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_{pn} : 無閉塞モデルにおける流速 v に対する圧力勾配

i_{pn}' : 無閉塞モデルにおける流速 $5v$ に対する圧力勾配

L_n : 一般部の長さ

L_b : 閉塞部の長さ

ここで、 i_{pn}' を実験結果から内挿によって求め得る範囲に限定すると、損失圧力を求め得る範囲が流速 v が小さい範囲に限定されてしまうため、 i_{pn}' については無閉塞モデルにおいて測定された最大流速の2倍を限度として外挿によって求めた値も使用している。ただし、この場合、外挿を行う流速域における流れが層流であるか乱流であるかが明確でなければならず、またその流れの特性も明らかでなければならない。したがって、このような外挿は層流域あるいは乱流域における回帰曲線が得られている場合

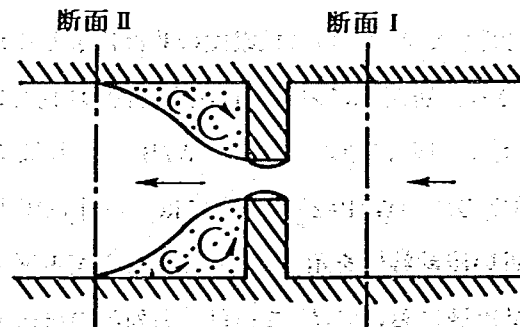
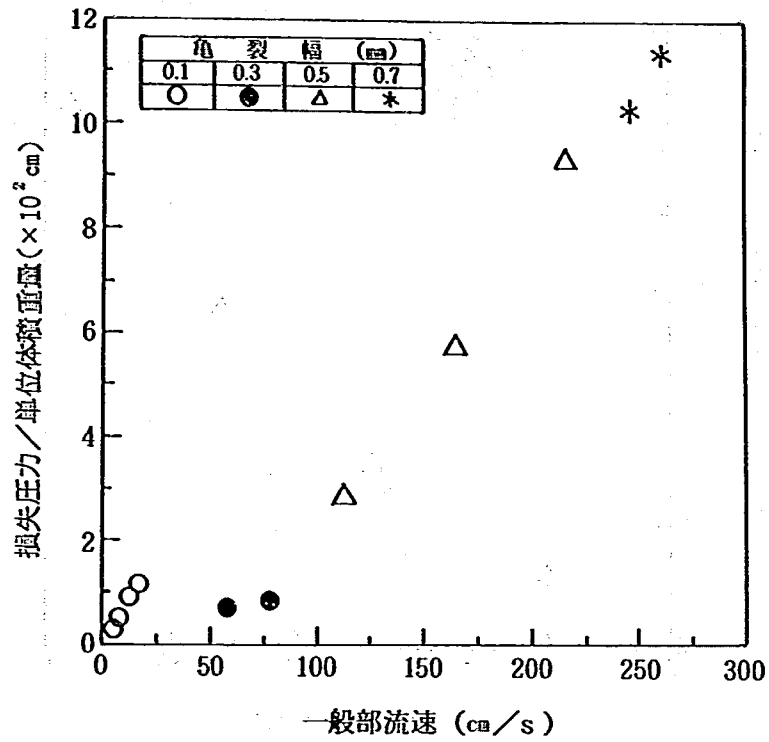
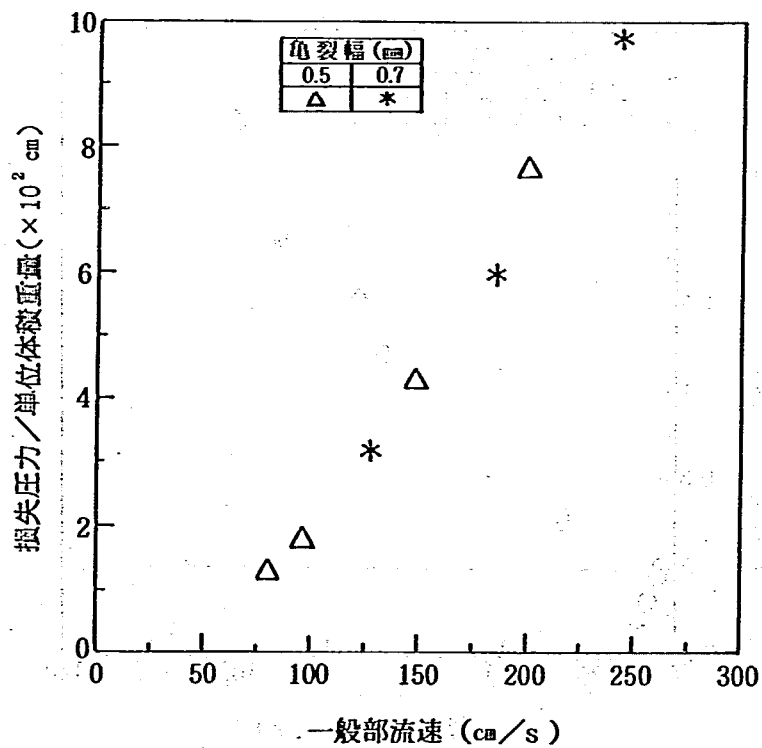


図-3.12 閉塞部における流れ

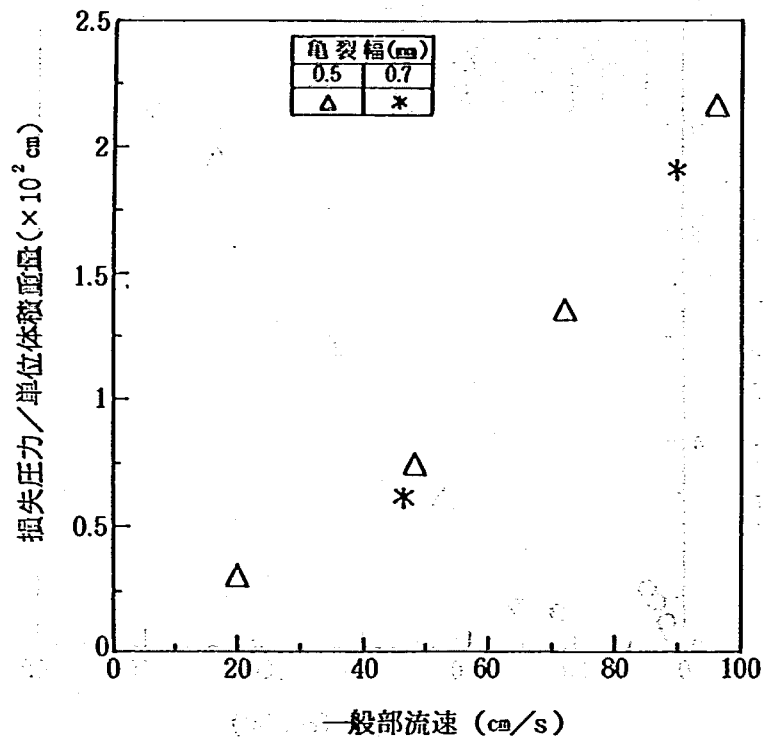


(1) 水

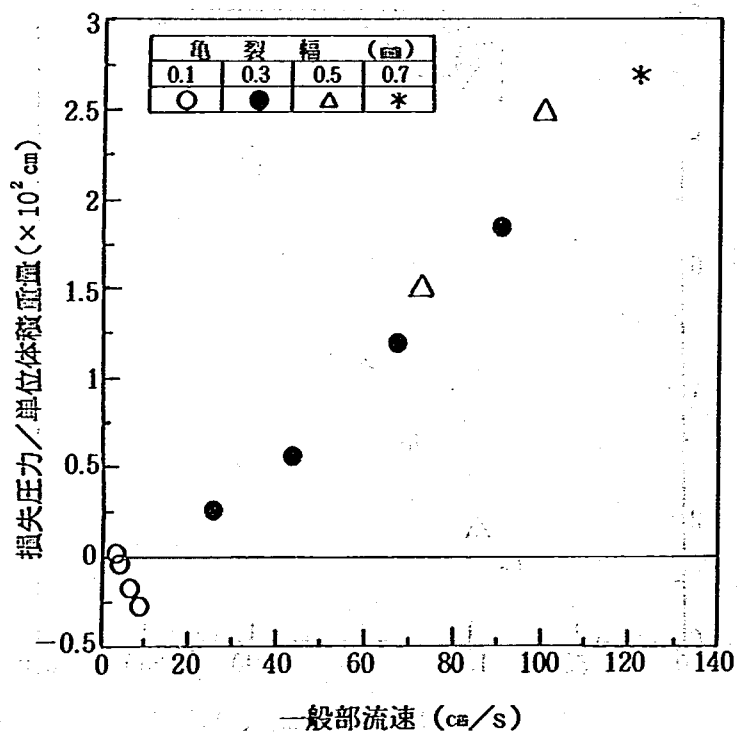


(2) F 液 (W/F=6)

図-3.13 損失圧力と流速の関係

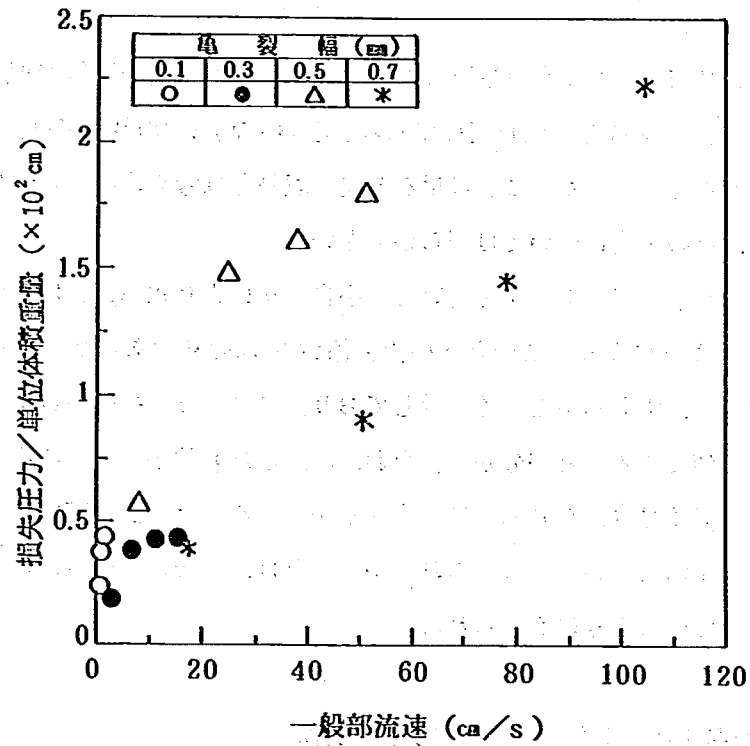


(3)F 液 (W/F=1.5)

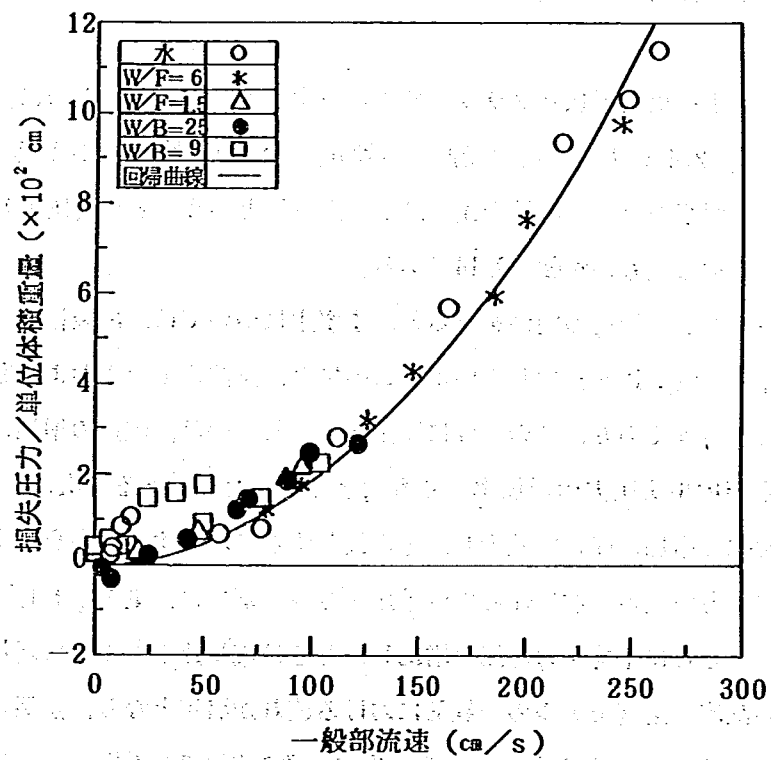


(4)B 液 (W/B=25)

図一 3.13 損失圧力と流速の関係



(5) B液 (W/B=9)



(6) 全注入材料

図-3.13 損失圧力と流速の関係

に限って行うものとした。

図-3.13によれば、 $W/B=25$ のB液の亀裂幅 0.1mm の場合を除いて、流速の増加に伴って損失圧力が増加し、その傾向は各注入材料とも概ね同様である。なお、 $W/B=9$ のB液では、亀裂幅 0.5mm の場合に損失圧力が特に大きくなっているが、これは単なる実験誤差とは考え難い。しかし、データ数が限られていることもあって、その理由については明らかでない。

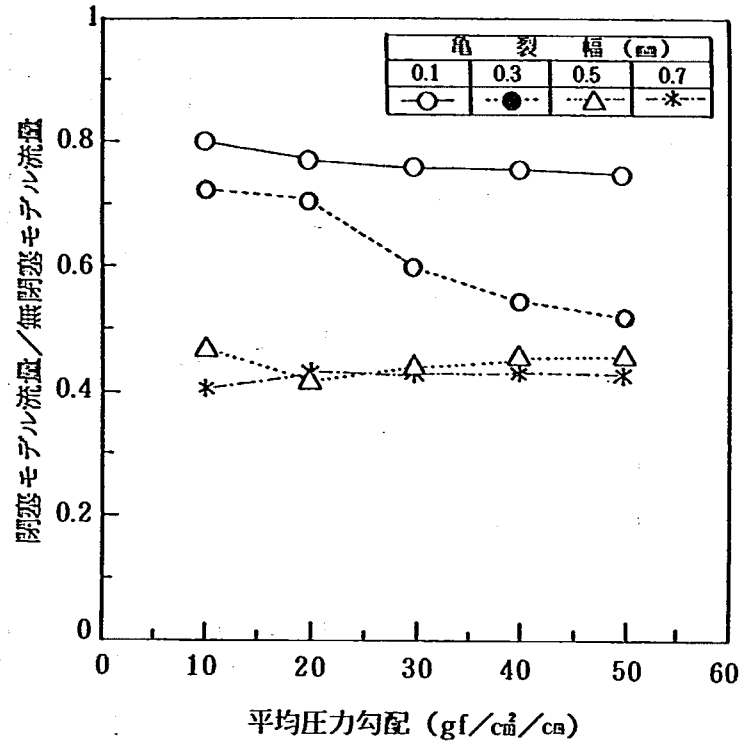
次に、図-3.13に示した全てのデータを用いて最小自乗法により式(3.10)に基づく回帰曲線を求めると図-3.13(6)の実線のようになり、このときの損失係数 f_s は約35であった。なお、回帰曲線は、上記の一部のデータを除くと、実験結果とよく一致しており、これより、損失係数は注入材料あるいは亀裂幅によらずほぼ一定の値であることが分かる。なお、流速が比較的小さいところで回帰曲線よりも損失圧力が大きいデータが多く見受けられるのは、流速が小さくなると断面急変部における損失係数がやや大きくなるということを示していると考えられるが、これは、過去における水理実験等によって確認されている事実と対応しているようにも思われる。

3.4 注入仕様、亀裂形状とグラウトの流れやすさの関係

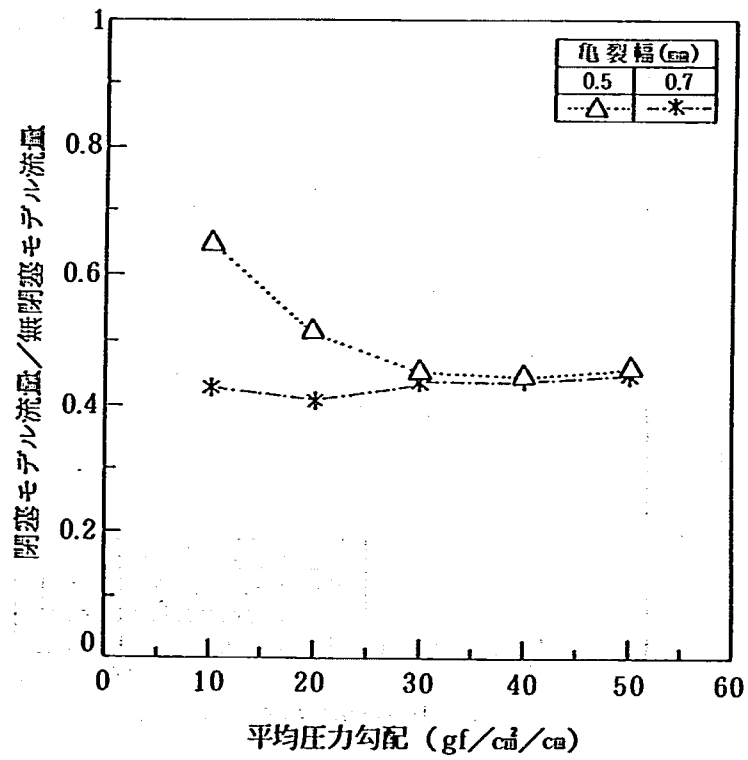
一般に、亀裂性の岩盤に対してボーリング孔からグラウトの注入を行う場合、1つの注入区間にある種々の形状の亀裂に対して同時に注入を行うこととなる。この場合、注入圧力、グラウトの濃度等の注入仕様およびグラウトが注入される亀裂の形状によって、各種亀裂に対する注入流量比が異なるものと考えられる。

そこで、注入仕様および亀裂形状とグラウトの流れやすさの関係を見るために、亀裂の全流路長に対する平均圧力勾配(図-2.4における圧力変換器の設置位置間の平均圧力勾配)が等しい場合について、閉塞モデルの流量と無閉塞モデルの流量の比(以下、流量比という)と平均圧力勾配および亀裂幅の関係を各注入材料について示したものが図-3.14である。

図より、平均圧力勾配と流量比の関係をみると、まず水については、亀裂幅 0.1 、 0.3mm の場合、平均圧力勾配の増加に伴って流量比が減少している。この場合、無閉塞モデルおよび閉塞モデルの一般部における流れはいずれも層流であり、このように流量比が減じるのは、流速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ためである。次に、亀裂幅 0.5mm の場合、流量比は平均圧力勾配の増加に伴って減少し、その後わずかに増加する傾向を示す。ここで、平均圧力勾配が小さいときに圧力勾配の増加に伴って流量比が減少するのは、亀裂幅 0.1 、 0.3mm の場合と同じ理由によるものであり、さらに平均圧力勾配が増加したときに流量比がわずかに増加するのは、無閉塞モデルにおける流れが乱流、閉塞モデルの一般部における流れが層流となり、無閉塞モデルの流速の増加率が相対的に小さくなることによるものである。次に、亀裂幅 0.7mm の場合、流量比は平均圧力勾配の増加に伴ってわずかに増加し、さらに平均圧力勾配が大きくなるとほとんど変化しなくなる。ここで、平均圧力勾配が小さいときに圧力勾配の増加に伴って流量比がわずかに増加するのは、亀裂幅 0.5mm の場合と同じ理由によるものであり、さらに平均圧力勾配が増加したときに流量比が変化しなくなるのは、

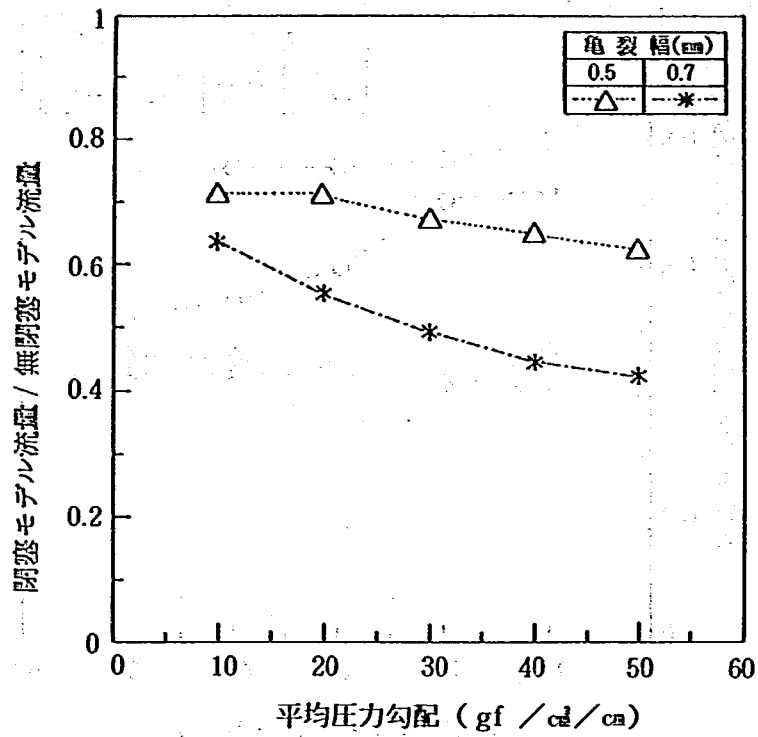


(1) 水

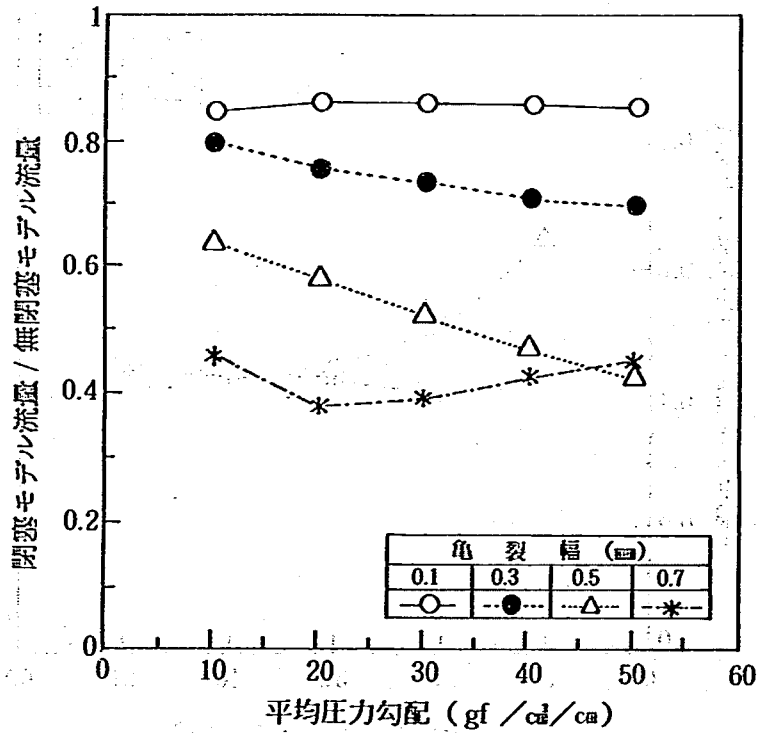


(2) F 液 (W/F=6)

図-3.14 平均圧力勾配と流量比の関係

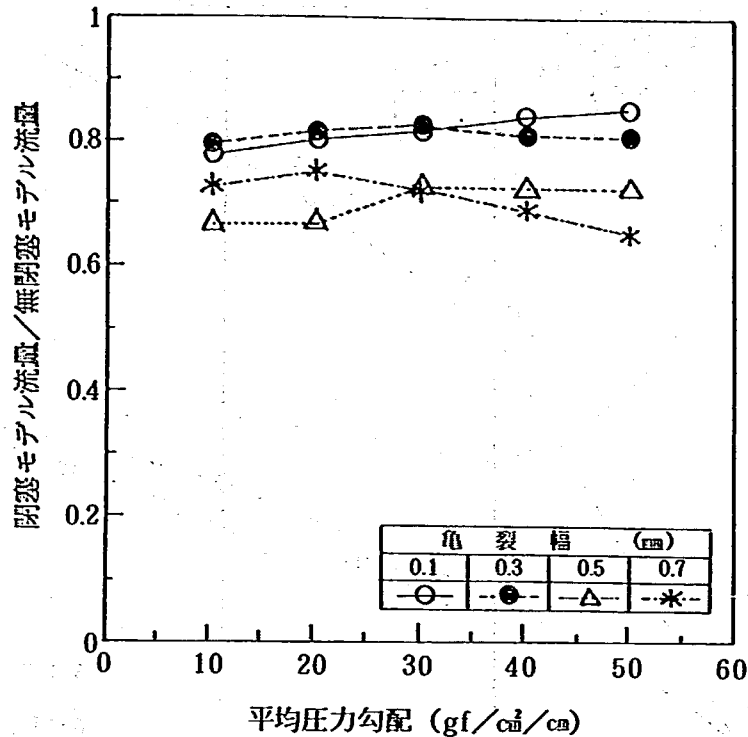


(3) F 液 (W/F=1.5)



(4) F 液 (W/B=25)

図-3.14 平均圧力勾配と流量比の関係



(5) B液 (W/B=9)

図-3.14 平均圧力勾配と流量比の関係

無閉塞モデルおよび閉塞モデルの流れがいずれも乱流となり、平均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くなることを示している。以上のように、平均圧力勾配の変化に伴う流量比の変化は無閉塞モデルおよび閉塞モデルにおける流れの状態によって定まる。これを模式的に表現すると図-3.15のようになる。すなわち、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、無閉塞モデルの流量は平均圧力勾配に比例するが、閉塞モデルの流量は、閉塞部における圧力損失の影響を受けるため平均圧力勾配に比例した量よりは小さくなる。このため、流量比は平均圧力勾配の増加に伴って減少することになる。さらに平均圧力勾配が増加すると、閉塞モデルの一般部における流れよりも無閉塞モデルにおける流れの方が先に乱流域に移行する。流れが乱流となった無閉塞モデルにおいては、その流量は平均圧力勾配の約0.5乗に比例するが、閉塞モデルの一般部における流れはこの段階ではまだ層流であり、その流量は平均圧力勾配の0.5乗に比例した量よりは大きくなる。よって、この段階においては流量比は平均圧力勾配の増加に伴ってやや増加することになる。さらに平均圧力勾配が増加すると、閉塞モデルの一般部における流れも乱流に移行し、その流量は平均圧力勾配の約0.5乗に比例する。よって、流量比は平均圧力勾配が増加しても変化しなくなる。

なお、図-3.14(1)において、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、亀裂幅0.1mmの場合の方が亀裂幅0.3mmの場合よりも平均圧力勾配の増加に伴う流量比の減少の

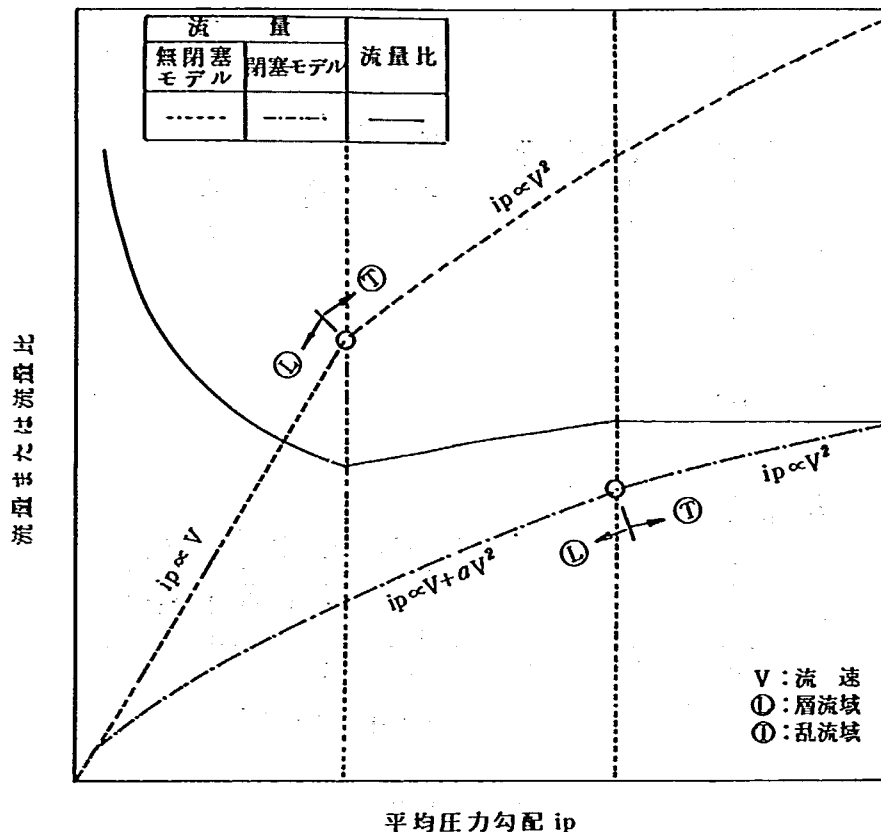


図-3.15 無閉塞および閉塞モデルの流の状態で
流量比の関係の模式図（水）

割合が小さいのは、亀裂幅が小さいほど断面急変部の損失圧力よりも摩擦損失圧力の方が卓越するため、相対的に断面急変部の影響が小さくなるためと考えられる。

次に図-3.14(2)の $W/F=6$ のF液については、亀裂幅0.5mmの場合、流量比は平均圧力勾配の増加に伴って減少し、その後わずかに増加している。また、亀裂幅0.7mmの場合、流量比は平均圧力勾配の増加に伴ってわずかに減少し、その後わずかに増加する傾向にある。これらの現象も水の場合と同様に説明できる。

次に図-3.14(3)の $W/F=1.5$ のF液については、亀裂幅0.5, 0.7mmのいずれの場合においても流量比は平均圧力勾配の増加に伴って減少している。この現象も上と同様に説明できる。また、亀裂幅による違いをみると、亀裂幅0.5mmの場合の方が、平均圧力勾配の増加に伴う流量比の減少の割合が小さい。これも、水の場合と同様の理由によるものである。

次に図-3.14(4)の $W/B=25$ のB液については、亀裂幅0.1mmの場合、平均圧力勾配が変化しても流量比はほとんど変化していない。これは、表-3.2に示したように実験時における閉塞モデルの流出グラウトの濃度が無閉塞モデルの流出グラウトの濃度よりもやや薄かったために、閉塞モデルの流量が相対的に大きくなったことによるものと考えられる。亀裂幅0.3, 0.5mmの場合、平均圧力勾配の増加に伴って流量比が減少しており、また、亀裂幅0.7mmの場合には流量比は平均圧力勾配の増加に伴って減少し、その後徐々に増加する傾向にある。これらの現象も水の場合と同様に説明できる。なお、亀裂幅0.7mm

の場合において、平均圧力勾配20 gf/cm²/cm以上における流量比の増加率が、水の亀裂幅0.5mmの場合あるいは $W/F = 6$ のF液の亀裂幅0.7mmの場合と比較してやや大きい。ここでの流れの状態は、無閉塞モデルでは乱流、閉塞モデルの一般部では層流と考えられるが、3.2において述べたように、 $W/B = 25$ のB液の乱流域における圧力勾配と流速の間の非線形性が、水および $W/F = 6$ のF液と比較してやや大きかったために、無閉塞モデルの乱流流速が相対的に小さなり、このような結果となったものと考えられる。

次に図-3.14(5)の $W/B=9$ のB液については、亀裂幅0.1mmの場合、平均圧力勾配の増加に伴って流量比は徐々に増加し、亀裂幅0.3、0.5mmの場合、流量比は平均圧力勾配の増加に伴ってわずかに増加した後、ほとんど変化しなくなっている。また、亀裂幅0.7mmの場合、流量比は平均圧力勾配の増加に伴ってわずかに増加した後、減少する傾向を示している。これらの状態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層流の場合であるが、このような傾向は他の注入材料とは異なっている。これは、図-3.13(5)に示したように、 $W/B=9$ のB液の場合、断面急変部における損失圧力が他の注入材料のそれとやや異なる傾向となっていることと関連しているが、損失圧力の値そのものが小さいためにデータの信頼性がやや低く、またデータ数も少ないため、これが材料の特性によるものかどうかは断定できない。

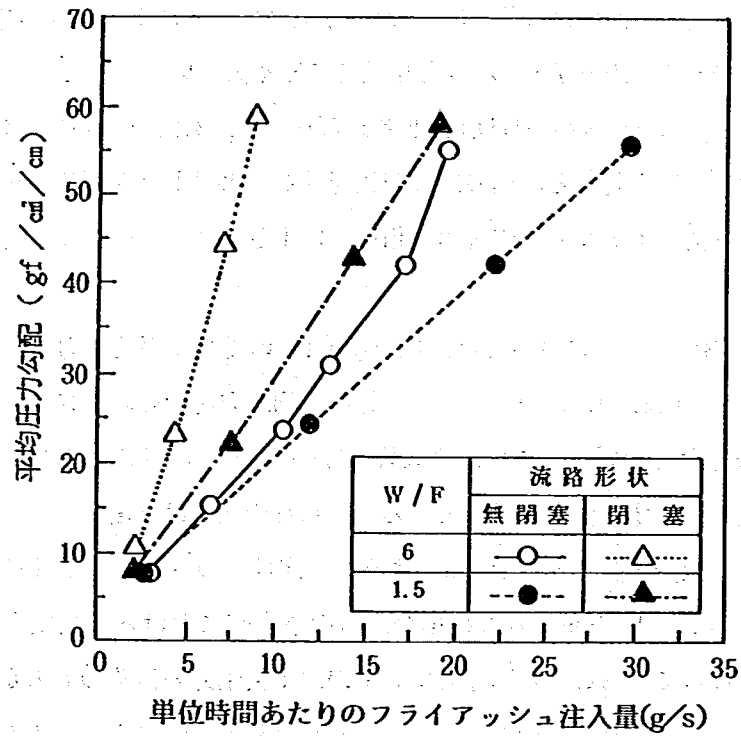
次に、亀裂幅あるいは注入材料と流量比の関係をみると、無閉塞モデルおよび閉塞モデルの一般部における流れがいずれも層流の場合には、流量比は、亀裂幅が小さいほど、また注入材料の濃度が濃いほど大きくなる傾向にある。これは、亀裂幅が小さいほど、あるいは粘性が大きいほど断面急変部における損失圧力よりも摩擦損失圧力の方が卓越するため、閉塞による影響が相対的に小さくなることによっている。また、無閉塞モデルおよび閉塞モデルにおける流れがいずれも乱流の場合には、亀裂幅あるいは注入材料の違いが流量比に及ぼす影響は比較的小さくなっている。

3.5 グラウトの濃度とグラウト材の注入量の関係

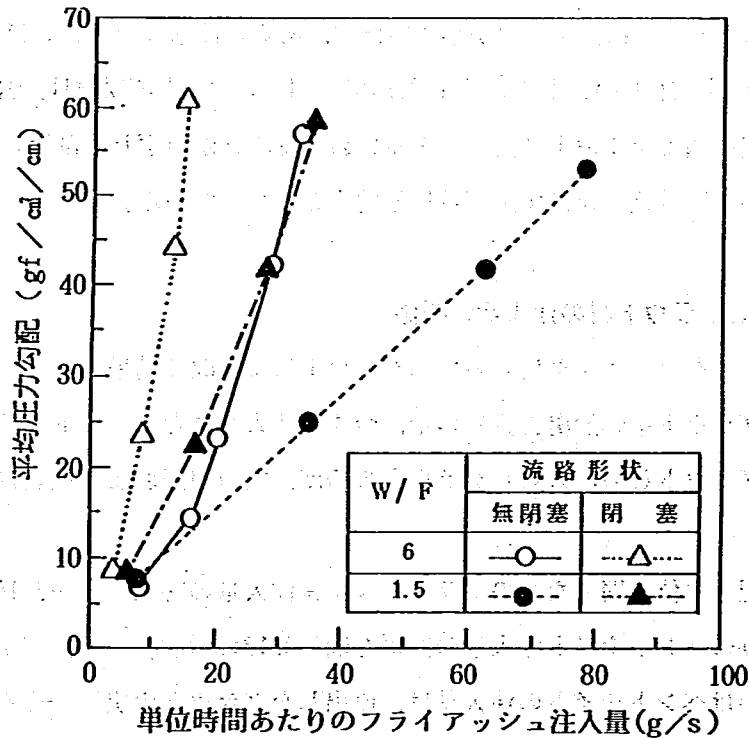
一般にダム基礎岩盤のグラウチングにおいて、グラウトによる改良効果と密接な関係があるのは注入されたグラウト材（グラウト中の懸濁物質）の量、つまり注入されたセメント量である。そこで、今回の実験においても、グラウト材の注入量とグラウトの濃度、圧力勾配および亀裂幅等の関係について検討する。

まず、平均圧力勾配と単位時間あたりのフライアッシュ注入量の関係を図-3.16に、同様に平均圧力勾配と単位時間あたりのベントナイト注入量の関係を図-3.17に示す。なお、図中の単位時間あたりのフライアッシュあるいはベントナイトの注入量は、流出したグラウトの実測濃度を用いて計算したものである。

次に、グラウトの濃度が濃い場合と薄い場合について、グラウト材の注入量を比較するために、高濃度のグラウトを注入した場合のグラウト材の注入量と低濃度のグラウトを注入した場合のグラウト材の注入量の比を求め、これと平均圧力勾配の関係を示したのが図-3.18および図-3.19である。なお、フ

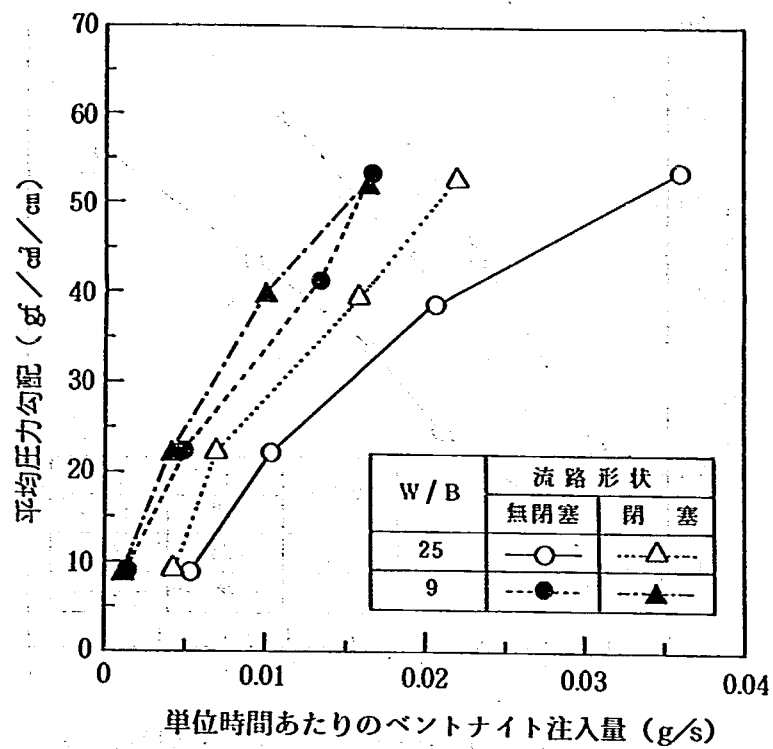


(1) 亀裂幅 0.5 mm

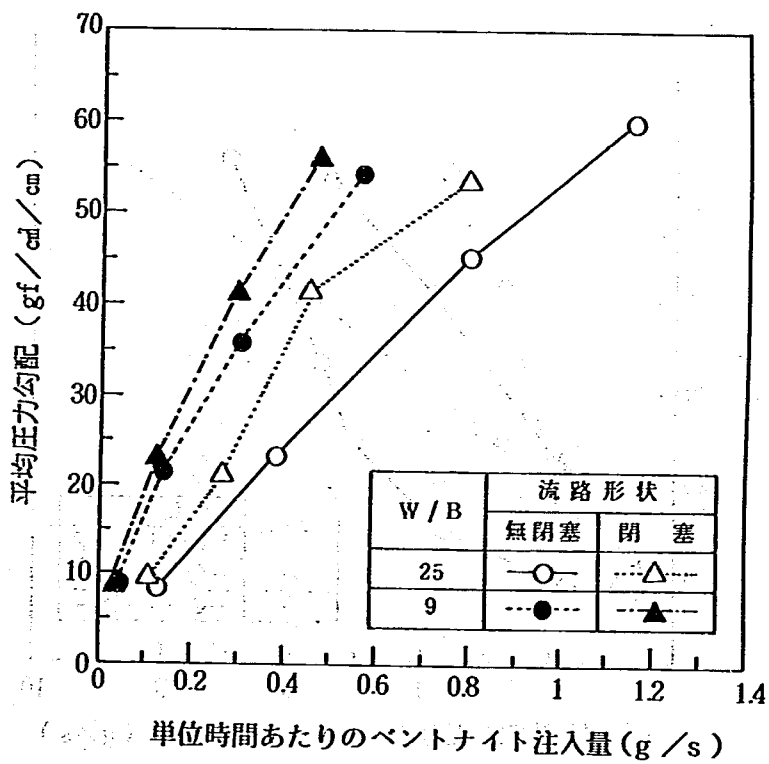


(2) 亀裂幅 0.7 mm

図— 3.16 単位時間あたりのフライアッシュ注入量と平均圧力勾配の関係

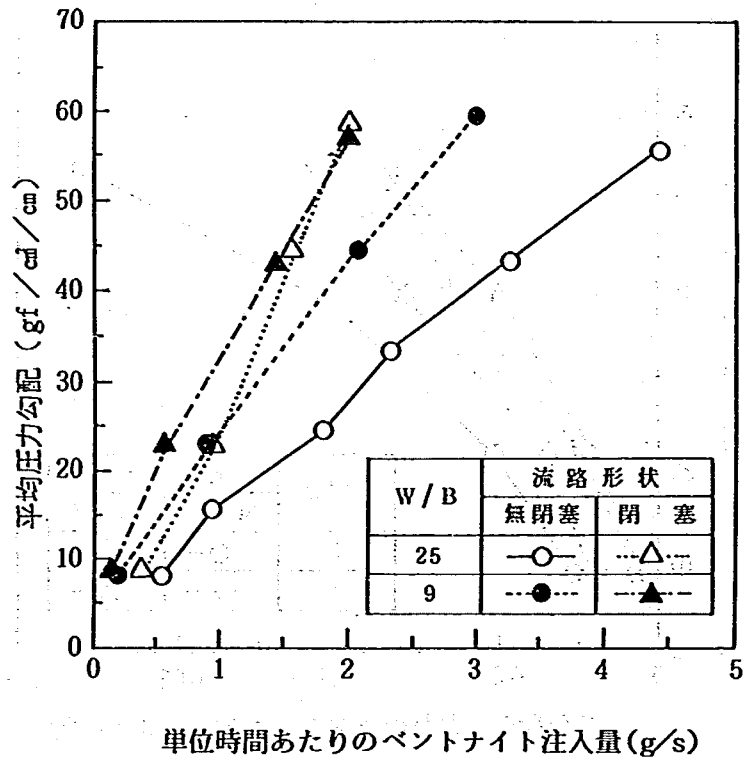


(1)亀裂幅 0.1mm

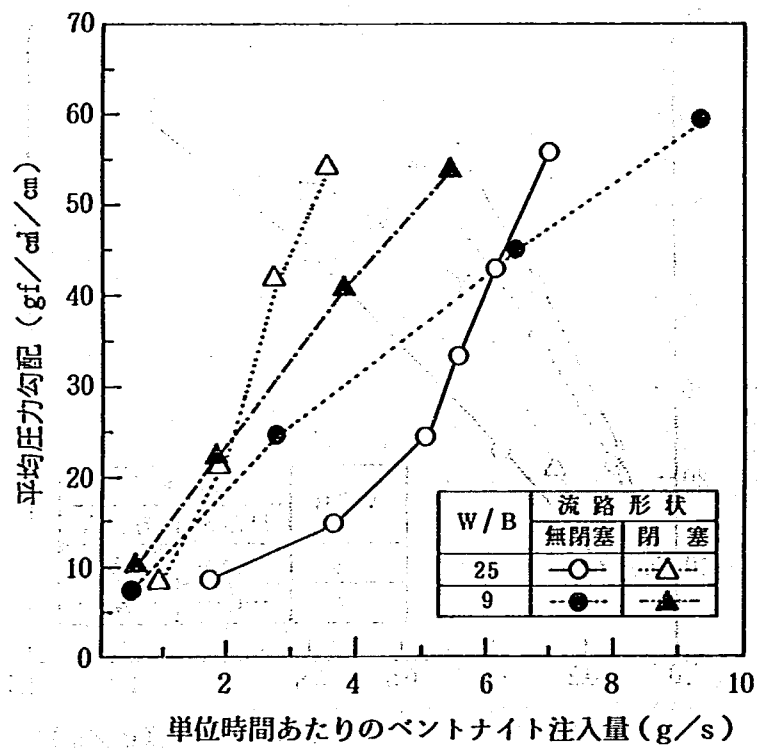


(2)亀裂幅 0.3mm

図一 3.17 単位時間あたりのベントナイト注入量と平均圧力勾配の関係



(3)亀裂幅 0.5mm



(4)亀裂幅 0.7mm

図一 3.17 単位時間あたりのベントナイト注入量と平均圧力勾配の関係

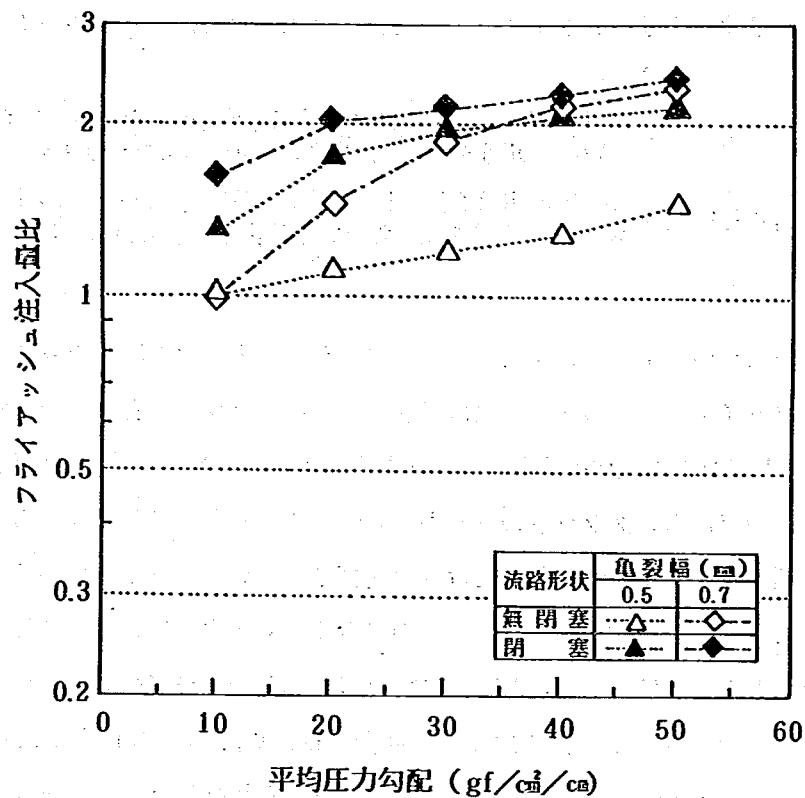


図-3.18 平均圧力勾配とフライアッシュ注入量比の関係

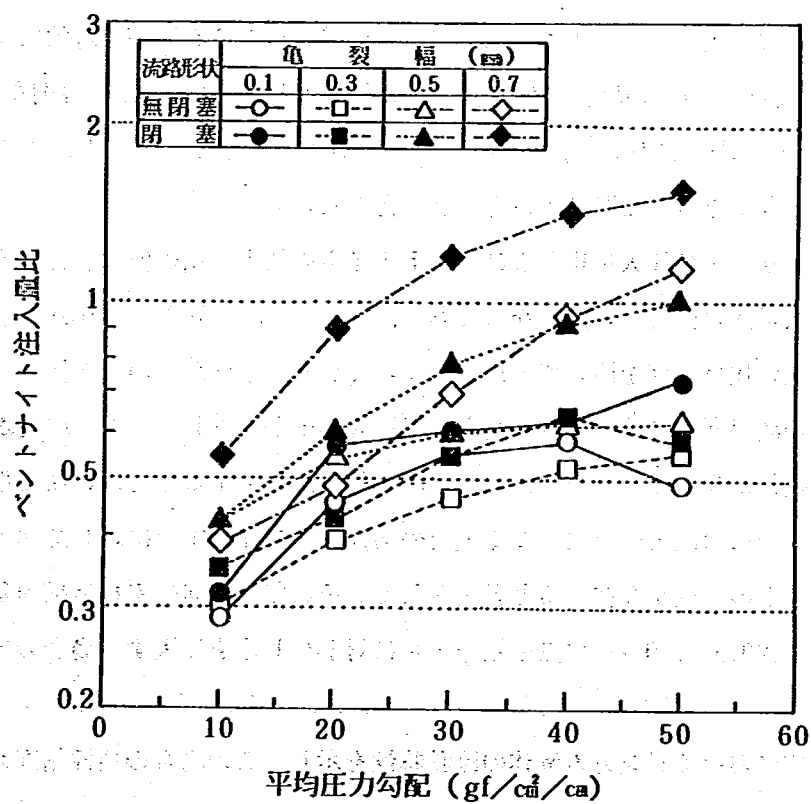


図-3.19 平均圧力勾配とベントナイト注入量比の関係

ライアッシュの注入量比およびベントナイトの注入量比は以下の式により求めたものである。

$$\text{フライアッシュの注入量比} = \frac{W/F=1.5 \text{ の F 液を注入した場合の単位時間あたりのフライアッシュ注入量}}{W/F=6 \text{ の F 液を注入した場合の単位時間あたりのフライアッシュ注入量}}$$

$$\text{ベントナイトの注入量比} = \frac{W/B=9 \text{ の B 液を注入した場合の単位時間あたりのベントナイト注入量}}{W/B=25 \text{ の B 液を注入した場合の単位時間あたりのベントナイト注入量}}$$

……(3.12)

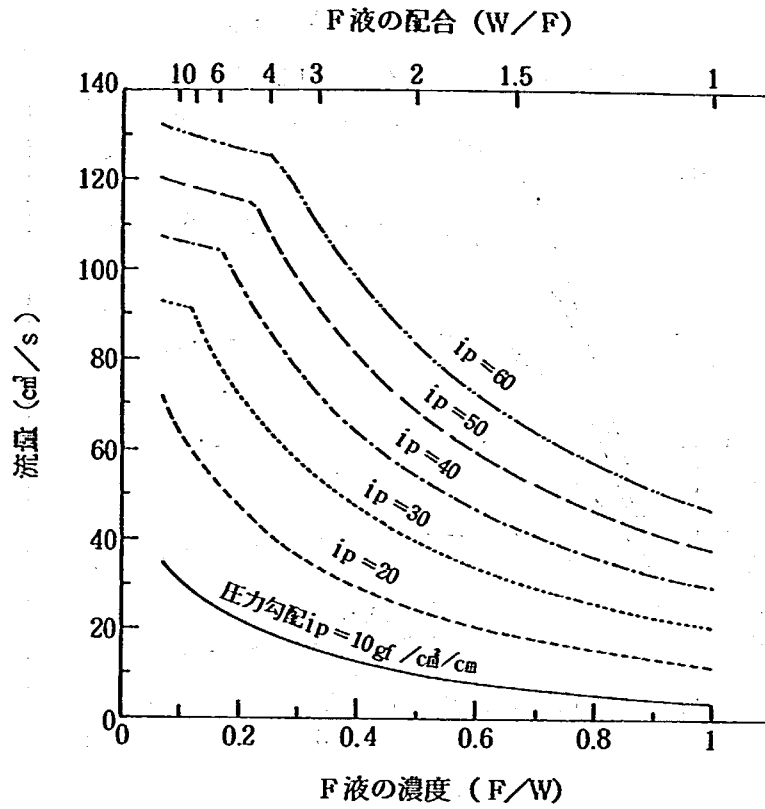
図より、まずF液について平均圧力勾配とフライアッシュ注入量比の関係をみると、圧力勾配が大きくなるのに伴ってフライアッシュの注入量比は増加し、濃いグラウトの有利性が相対的に大きくなっている。これは、F液がビンガム流体の流動特性を示し、濃度の濃いF液ほどその降伏値が大きいために、圧力勾配が小さい範囲では濃いグラウトの流量が相対的に小さくなってしまいうからである。すなわち、濃いグラウトの有利性は注入圧力が大きくなければ発揮されないことを示している。また、無閉塞モデルにおいて亀裂幅0.7mmの場合の方が亀裂幅0.5mmの場合よりも圧力勾配の増加に伴うフライアッシュ注入量比の増加割合が大きいのは、亀裂幅0.5mmの場合には、 $W/F=1.5$ のF液、 $W/F=6$ のF液ともその流れが層流であるのに対し、亀裂幅0.7mmの場合には、 $W/F=1.5$ のF液ではその流れが層流で、 $W/F=6$ のF液では小さい圧力勾配の段階からその流れが乱流となるため、 $W/F=6$ のF液では圧力勾配が増加しても流量がそれほど増加しないからである。

次にB液についてみると、平均圧力勾配とベントナイトの注入量比の関係は全般的にはF液の場合とほぼ同様の傾向となっている。これは、B液が擬塑性流体の流動特性を示し、濃度の濃いB液ほどその非線形性が強いために、圧力勾配が小さい範囲では濃いグラウトの流量が相対的に小さくなってしまいうからである。なお、亀裂幅0.1mmの場合については他の亀裂幅と異なり、やや不規則な変動をしているが、これは、特に $W/B=25$ の場合において、流出濃度の変動がやや大きかったこと、および流量が小さく実験誤差が相対的に大きくなったことによるものと考えられる。

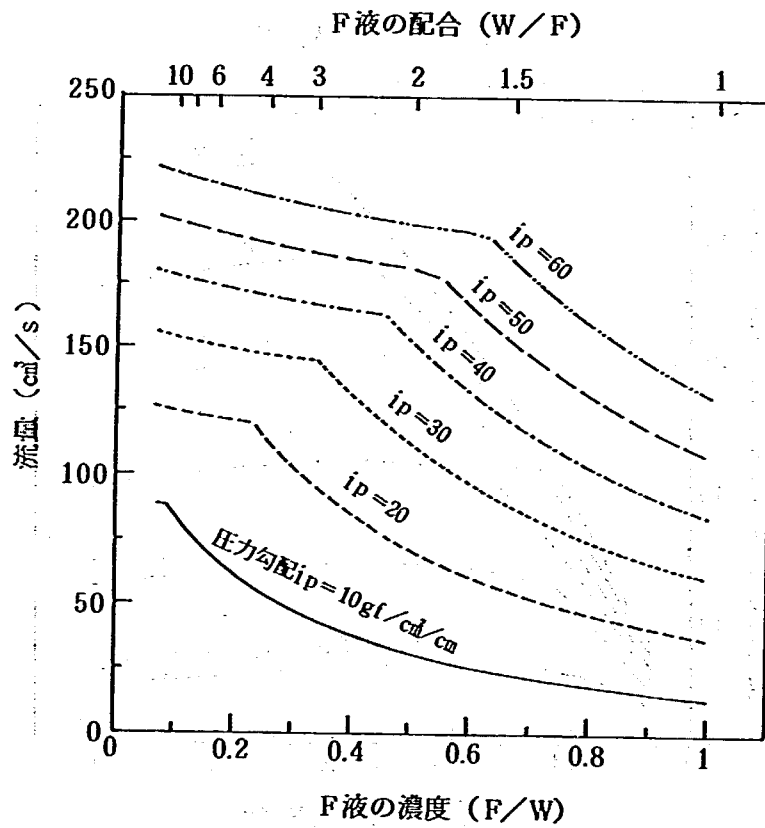
最後に、フライアッシュの注入量比およびベントナイトの注入量比の値に着目すると、図によればフライアッシュの注入量比は全て1以上となっており、濃度が濃い方が注入効率がよくなっている。一方、ベントナイトの注入量比は一部を除いて1以下となっており、濃度が薄い方が注入効率がよくなっている。しかし、濃度が濃過ぎれば流動抵抗が増大して注入効率が低下し、一方、濃度が薄過ぎてもグラウト中のグラウト材の量が少なくなるためにやはり注入効率が低下することは容易に推定できることである。したがって、実際には注入の対象となる亀裂の条件および注入圧力に対して注入効率が最大となるような最適なグラウトの濃度が存在すると考えられる。そこで、今回の実験結果のに基づき、次に示す条件を仮定して、亀裂幅0.5mm、0.7mmの無閉塞モデルに対してF液を注入する場合の最適濃度に関する検討を行った。

①F液は、層流域においてビンガム流体の流動特性を示し、この場合の塑性粘度および降伏値とF液の濃度の関係は、図-3.7に示した直線によって与えられる。

②見かけの粘性係数を用いて計算したレイノルズ数(式(3.8)による)が2300以下では流れは層流で

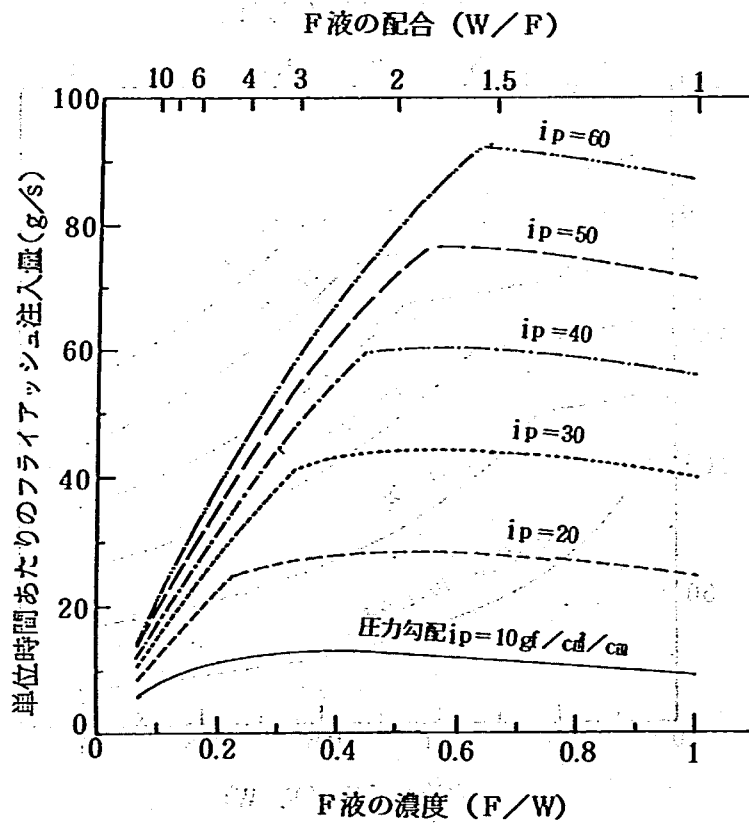
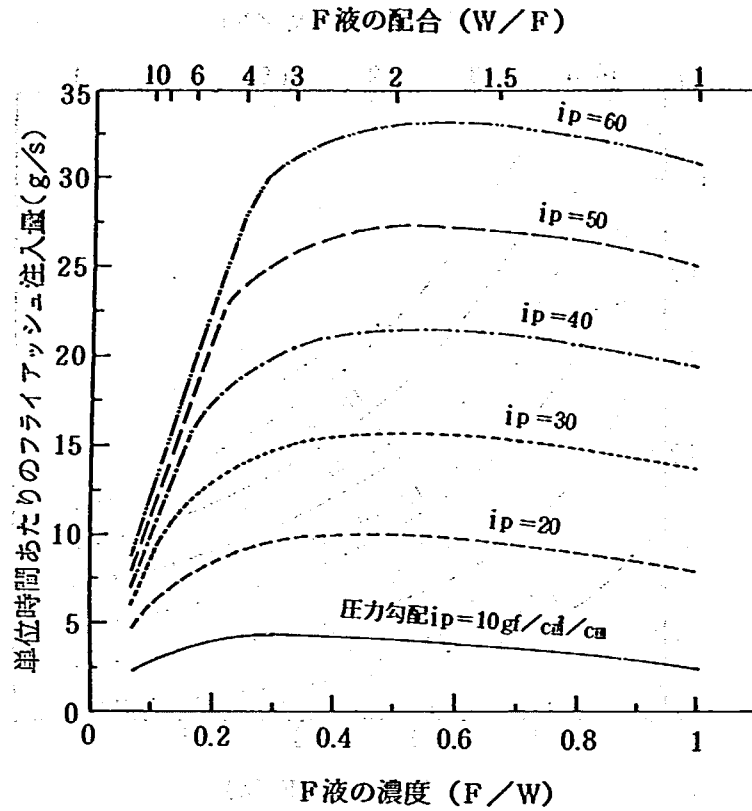


(1) 亀裂幅 0.5mm

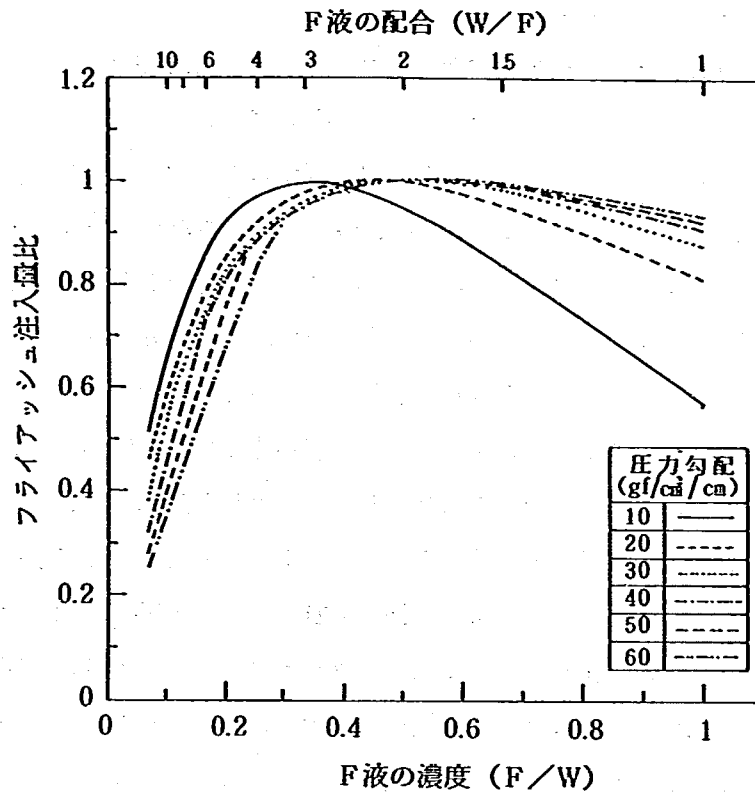


(2) 亀裂幅 0.7mm

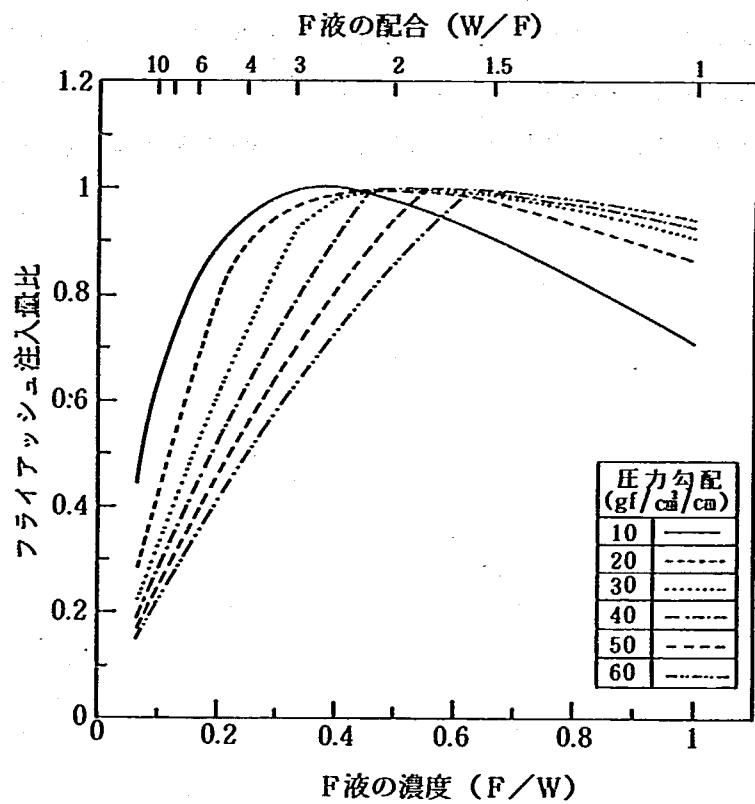
図-3.20 F液の濃度と流量の関係



図— 3.21 F 液の濃度と単位時間あたりのフライアッシュ注入量の関係



(1) 亀裂幅 0.5mm



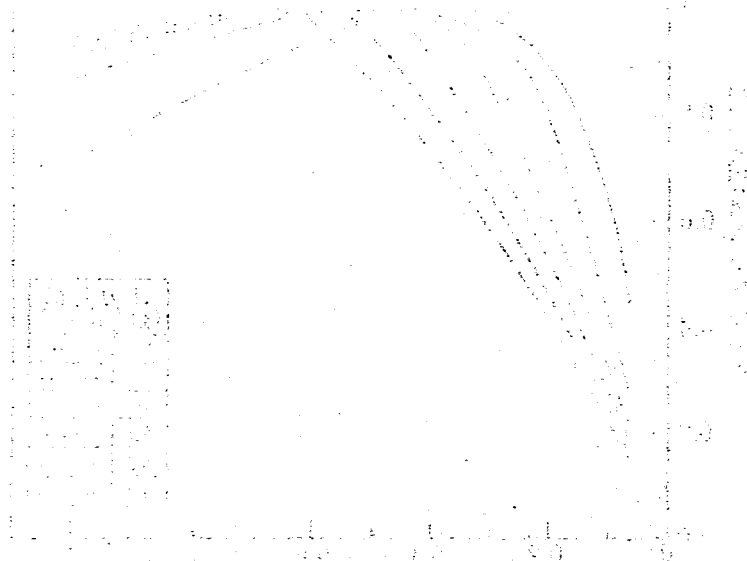
(2) 亀裂幅 0.7mm

図-3.22 F液の濃度とフライアッシュ注入量比の関係

あり、2300を超えると乱流となる。

③乱流域における流速は、圧力勾配の0.513乗に比例する（表-3.6 より）。

以上の仮定の下に、F液の濃度と流量の関係を種々の圧力勾配について求めた結果を図-3.20に示す。図中の曲線の折れ曲がり点は、流れが層流から乱流に移行する点を示している（折れ曲がり点の右側が層流状態、左側が乱流状態を示す）。次に、この場合の単位時間あたりのフライアッシュの注入量を図-3.21に示す。これより、亀裂幅および圧力勾配に応じて、単位時間あたりのフライアッシュの注入量が最大となる最適濃度が存在することが分かる。また、単位時間あたりのフライアッシュの注入量は、層流状態が得られる濃度の範囲（折れ曲がり点の右側）においては濃度による差が比較的小さいが、乱流状態となる濃度の範囲（折れ曲がり点の左側）では濃度が薄くなるのに伴って急激に減少している。また、濃度がかなり薄くなると、圧力勾配を大きくしても、流れが乱流状態となるため単位時間あたりのフライアッシュの注入量はそれほど大きくならず、このような亀裂に対して濃度の薄いグラウトを高圧で注入することは得策でないといえる。次に、図-3.21に示した各圧力勾配における単位時間あたりのフライアッシュの注入量の最大値を1として求めたフライアッシュ注入量比を図-3.22に示す。これより、最適濃度は圧力勾配が大きいほど、また亀裂幅が大きいほど濃くなることが分かる。なお、濃度の濃いF液では、その流れが乱流となり、圧力勾配が大きくなるほどフライアッシュ注入量比が小さくなっており、この傾向は亀裂幅が大きいほど顕著である。一方、濃度が濃くなると、圧力勾配が小さくなるほどフライアッシュ注入量比が小さくなっており、この傾向は亀裂幅が小さいほど顕著である。これは、濃度が濃くなると降伏値が大きくなり、圧力勾配が小さいほど、また亀裂幅が小さいほどその影響を大きく受けることによるものである。このことは、特に圧力勾配が小さい10 gf/cm²/cmの場合に、濃度の増加に伴ってフライアッシュ注入量比が著しく小さくなっていることに顕著に現れている。



4. まとめと今後の課題

以上の実験結果をまとめると以下のようになる。

- ①幅 0.1, 0.3mmといった小さな亀裂にフライアッシュ液を注入した場合、注入開始後まもなく流入部が閉塞する。この場合、亀裂幅0.3mmの亀裂については、低濃度のグラウトを高圧で注入することにより注入量を増やすことが可能であるが、亀裂幅0.1mmの亀裂については、グラウトの配合あるいは注入圧力を変化させても注入量の増加は期待できない。一方、粒子の小さいベントナイト液については、幅 0.1mmの亀裂に対しても十分注入が可能である。以上より、懸濁粒子の径と亀裂幅の比がある値以上に大きくなると、グラウトの注入効果は急激に低下するといえる。
- ②J. A ロートによるフロー値がほぼ等しいフライアッシュ液とベントナイト液でも、等しい圧力勾配に対する流速は大きく異なる結果となった。すなわち、フロー値は亀裂内のグラウトの流動特性を必ずしも反映するものではないといえる。
- ③層流域においてフライアッシュ液はビンガム流体、ベントナイト液は擬塑性流体に近い流動特性を示す。
- ④式(3.8) によって見かけの粘性係数を用いて計算した限界レイノルズ数は、注入材料によらずほぼ一定である。
- ⑤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。ただし、今回の実験ではデータ数が少ないため必ずしも断定はできない。
- ⑥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、さらに詳細な検討が必要である。
- ⑦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、等しい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。
- ⑧グラウト材（グラウト中の懸濁物質）の単位時間あたりの注入量が最大となるような最適濃度は、注入圧力勾配が大きいほど、また、亀裂幅が大きいほど高濃度となる。

今回の実験により、フライアッシュ液およびベントナイト液が単一亀裂内を流れる場合の基礎的な流動特性を明らかにすることができた。今回の実験では、一般にダム基礎岩盤のグラウティングにおいて使用されるセメント液の代わりにフライアッシュ液を用いたが、その実験結果からセメント液の流動特性もある程度推定できるものと考えられる。しかし、一般にフライアッシュ粒子はほぼ球形であるのに対しセメント粒子は不規則な多面体であること、また、今回の実験に使用したフライアッシュは比表面積がやや小さく、一般の普通ポルトランドセメントと比較してやや粒径が大きいと考えられること等から、

今回の実験のみでセメント液の流動特性が把握できたとは考え難い。したがって、今後何らかの方法によりセメント液の流動特性に関する検討を行う必要があると考えられる。また今後は、より複雑なモデル岩盤に対するグラウチング試験を行うことによって、実岩盤におけるグラウトの流動機構あるいは注入特性をより具体的に検討することが必要と考える。

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) 流体輸送工学編集委員会：流体輸送工学ハンドブックⅨ，産業経済技術研究所，1960
- 3) 物部長穂：水理学 増補改訂版，岩波書店，1950

参考資料

層流域における亀裂内の平均流速式

1. ニュートン流体と非ニュートン流体

図-1に示すような距離*t*だけ離れた2つの平行平面の間が流体で満たされている場合を考える。いま、上面と下面が速度差 Δv で移動するとき、流体に粘性があり、流体が上下面に接する部分において滑らないと仮定すると、流体内には速度差が生じ、2つの平行平面間の単位長さ当たりの流速の変化(せん断速度) D は次式で表される。

$$D = \frac{\Delta v}{t} \quad \dots\dots (1)$$

このとき、流体内の流れに平行な面には速度差による力(せん断力)が働き、その値は流体の粘性が大きいほど大きい。この力を単位面積当たりの応力(せん断応力)で表すと、ニュートン流体においては図-2のようにせん断応力とせん断速度の関係は比例関係にあり、これを式で表すと次式のとおりとなる。

$$\tau = \mu D \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 τ ：せん断応力、 μ ：粘性係数

これに対し、流体によってはせん断速度とせん断応力の関係が直線で表されないものがあり、それらは非ニュートン流体と呼ばれている。そのうち図-3に示すように、せん断応力がある一定の値(降伏

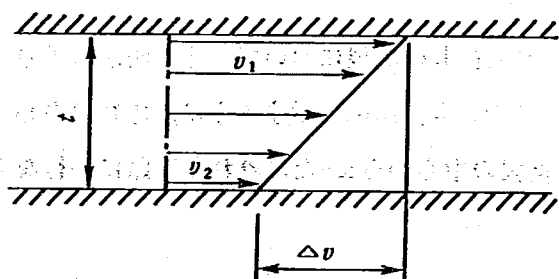


図-1 平行平面間における粘性流体の流れ

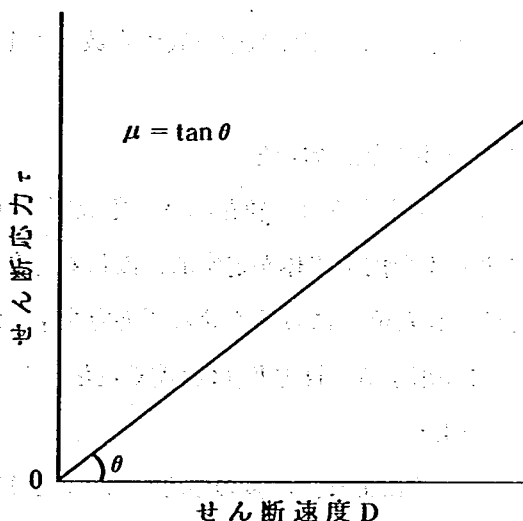


図-2 ニュートン流体のせん断速度とせん断応力の関係

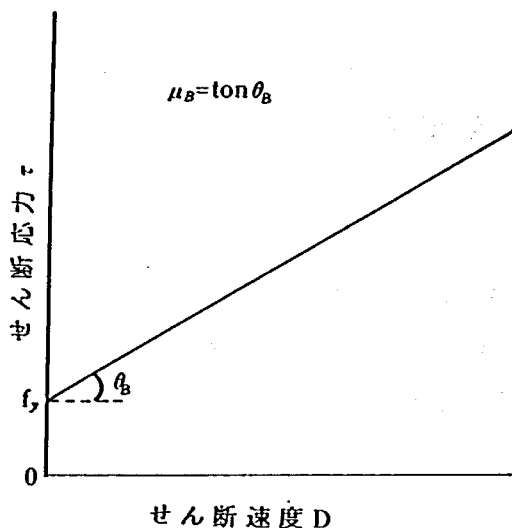


図-3 ビンガム流体のせん断速度とせん断応力の関係

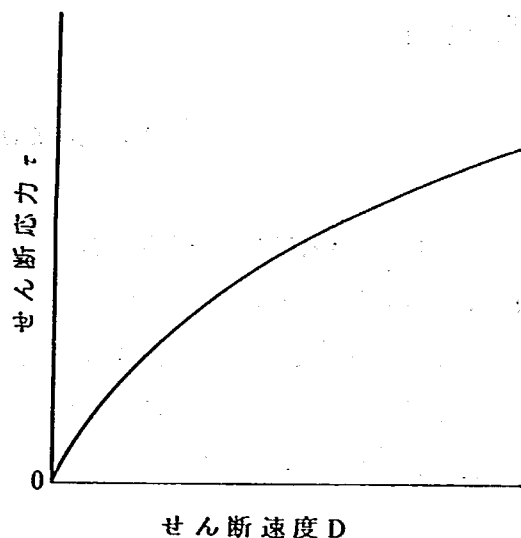


図-4 擬塑性流体のせん断速度とせん断応力の関係

値) 以下では流動せず, その値を超えるとせん断速度とせん断応力の関係が直線で表されるような流体はビンガム流体と呼ばれ, せん断速度とせん断応力の関係は次式で表される。

$$\tau = f_y + \mu_B D \quad \dots\dots (3)$$

ここに, f_y : 降伏値, μ_B : 塑性粘度

また図-4に示すように, 原点を通り, せん断応力の増加に伴ってせん断速度の増加率が增大するような流体は擬塑性流体と呼ばれ, せん断速度とせん断応力の関係は, 次式のような形で表される。

$$\tau^n = \mu_p D \quad \dots\dots (4)$$

ここに, n : 塑性状態を表す定数 (> 1), μ_p : 擬塑性粘度

2. ニュートン流体の流速式

図-5に示すような, 粒路幅 B , 亀裂幅 t ($\ll B$), 流路長 L の亀裂において, その両端の圧力差 ΔP により亀裂内を流体が定常的に流れる場合を考える。このとき, 同図に示すように, 亀裂の中心から z だけ離れた位置におけるせん断応力を τ_z とすると, 亀裂の中心から $\pm z$ だけ離れた流路に平行な 2 つの面に作用する粘性力 F_1 は次式で表される。

$$F_1 = 2BL \tau_z \quad \dots\dots (5)$$

一方, 圧力差により, 亀裂の中心から $\pm z$ だけ離れた流路に平行な 2 つの面に挟まれた流体に作用する力 F_2 は次式で表される。

$$F_2 = 2Bz \Delta P \quad \dots\dots (6)$$

このとき, 流れが定常であれば $F_1 = F_2$ であり, これより次式が得られる。

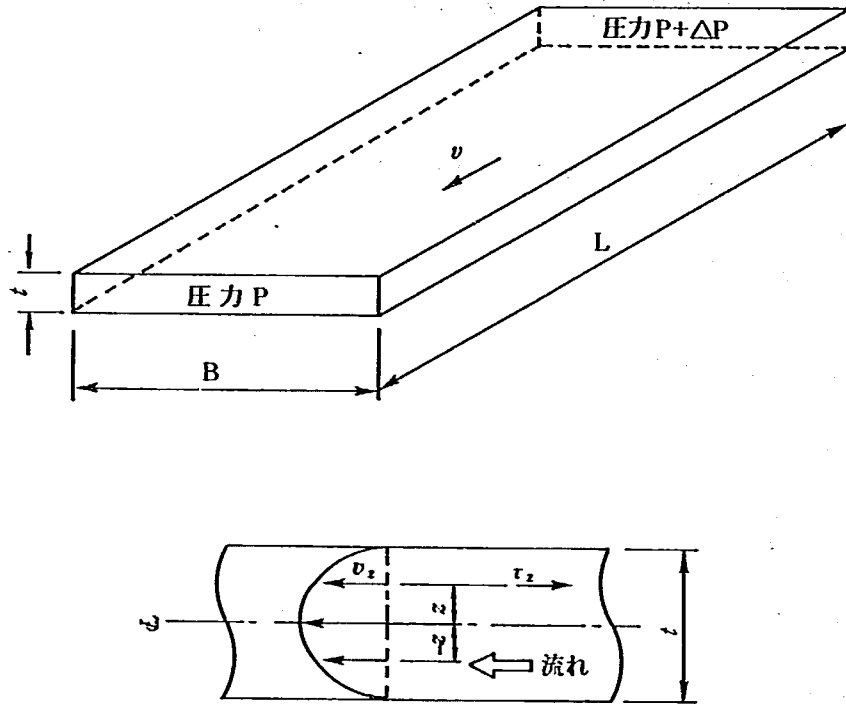


図-5 圧力差による亀裂内の流れ

$$\tau_z = z \frac{\Delta P}{L} \quad \text{..... (7)}$$

また、亀裂の中心から z だけ離れた位置における流速を v_z とし、それよりさらに dz だけ離れた位置における流速を dv_z とすると、その位置におけるせん断速度 D_z は次式で表される。

$$D_z = -\frac{dv_z}{dz} \quad \text{..... (8)}$$

ここで、式(7)から得られる次式、

$$dz = \frac{L}{\Delta P} d\tau_z \quad \text{..... (9)}$$

を式(8)に代入すると、

$$dv_z = -\frac{L}{\Delta P} D_z d\tau_z \quad \text{..... (10)}$$

よって、次式の関係が得られる。

$$v_z = -\frac{L}{\Delta P} \int_{\tau_{t/2}}^{\tau_z} D_z d\tau_z \quad \text{..... (11)}$$

ここに、 $\tau_{t/2}$ ：亀裂壁面 ($z=t/2$) におけるせん断応力

ここで、流体がニュートン流体の場合は、式(2)から次式が得られる。

$$D_z = \frac{\tau_z}{\mu} \quad \text{.....(12)}$$

これを式(11)に代入して v_z を求めると次式のとおりとなる。

$$v_z = \frac{\Delta P}{2\mu L} \left\{ \left(\frac{t}{2} \right)^2 - z^2 \right\} \quad \text{.....(13)}$$

これより、断面内の平均流速 v は、

$$\begin{aligned} v &= \frac{2}{t} \int_0^{t/2} v_z dz \\ &= \frac{\Delta P}{t\mu L} \int_0^{t/2} \left\{ \left(\frac{t}{2} \right)^2 - z^2 \right\} dz \\ &= \frac{t^2}{12\mu} \cdot \frac{\Delta P}{L} \end{aligned} \quad \text{.....(14)}$$

となり、圧力勾配 $\Delta P/L = i_p$ とおくと、

$$v = \frac{t^2}{12\mu} i_p \quad \text{.....(15)}$$

が得られる。

3. ビンガム流体の流速式

ニュートン流体の場合と同様に、ビンガム流体の流速式を求める。流体がビンガム流体の場合は、図-6に示すように亀裂の中心付近の $\tau_z < f_y$ の範囲では流速が一定となってしまう、いわゆる栓流状態となる。一方、 $\tau_z > f_y$ の範囲では式(3)から次式が得られる。

$$D_z = \frac{\tau_z - f_y}{\mu_B} \quad (\text{ただし, } \tau_z > f_y) \quad \text{.....(16)}$$

これを式(11)に代入して v_z を求めると次式のとおりとなる。

$$v_z = \frac{\Delta P}{2\mu_B L} \left\{ \left(\frac{t}{2} \right)^2 - z^2 - \frac{2f_y L}{\Delta P} \left(\frac{t}{2} - z \right) \right\} \quad \text{.....(17)}$$

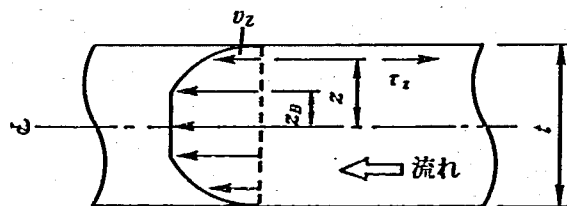


図-6 亀裂内におけるビンガム流体の流れ

一方, $\tau_z < f_y$ においては v_z は一定となるが, このとき, 亀裂の中心から $\tau_z = f_y$ となる位置までの距離を z_B とすると式(7)より,

$$f_y = z_B \frac{\Delta P}{L} \quad \dots\dots(18)$$

となり, よって,

$$z_B = \frac{f_y L}{\Delta P} \quad \dots\dots(19)$$

となる。以上より, 断面内の平均流速 v は,

$$\begin{aligned} v &= \frac{2}{t} \int_0^{t/2} v_z dz \\ &= \frac{\Delta P}{t \mu_B L} \left\{ z_B \left[\left(\frac{t}{2} \right)^2 - z_B^2 - \frac{2f_y L}{\Delta P} \left(\frac{t}{2} - z_B \right) \right] + \int_{z_B}^{t/2} \left[\left(\frac{t}{2} \right)^2 - z^2 - \frac{2f_y L}{\Delta P} \left(\frac{t}{2} - z \right) \right] dz \right\} \\ &= \frac{t^2 \Delta P}{12 \mu_B L} \left\{ 1 - 3 \frac{f_y}{t i_p} + 4 \left(\frac{f_y}{t i_p} \right)^3 \right\} \quad \dots\dots(20) \end{aligned}$$

となり, 圧力勾配 $\Delta P/L = i_p$ とおくと,

$$v = \frac{t^2}{12 \mu_B} \left\{ 1 - 3 \frac{f_y}{t i_p} + 4 \left(\frac{f_y}{t i_p} \right)^3 \right\} i_p \quad \dots\dots(21)$$

が得られる。なお, 式(19)より, $i_p \leq 2f_y/t$ のときには $v_z = 0$ となり, 流動は生じないことになる。また, 式(21)において $f_y = 0$ のとき, ニュートン流体の流速式(19)と一致する。

4. 擬塑性流体の流速式

ニュートン流体の場合と同様に, 擬塑性流体の流速式を求める。流体が擬塑性流体の場合, 式(4)から次式が得られる。

$$D_z = \frac{\tau_z^n}{\mu_p} \quad \dots\dots(22)$$

これを式(1)に代入して v_z を求めると次式のとおりとなる。

$$v_z = \frac{1}{\mu_p (n+1)} \left(\frac{\Delta P}{L} \right)^n \left[\left(\frac{t}{2} \right)^{n+1} - z^{n+1} \right] \quad \dots\dots(23)$$

これより, 断面内の平均流速 v は,

$$\begin{aligned} v &= \frac{2}{t} \int_0^{t/2} v_z dz \\ &= \frac{2}{t \mu_p (n+1)} \left(\frac{\Delta P}{L} \right)^n \int_0^{t/2} \left[\left(\frac{t}{2} \right)^{n+1} - z^{n+1} \right] dz \\ &= \frac{t^{n+1}}{2^{n+1} (n+2) \mu_p} \left(\frac{\Delta P}{L} \right)^n \quad \dots\dots(24) \end{aligned}$$

となり、圧力勾配 $\Delta P/L = i_p$ とおくと、

$$v = \frac{l^{n+1}}{2^{n+1}(n+2)\mu_p} i_p^n \quad \dots\dots (25)$$

が得られる。なお、この式において $n=1$ のとき、ニュートン流体の流速式(15)と一致する。

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

ISSN 0386-5878
土木研究所資料第3113号
平成4年6月(1992)

永山 功, 則松 秀晴, 庄司 俊介

要 旨

通常、ダム基礎岩盤の止水処理はグラウチングによって行われているが、グラウトの配合および注入圧力等の注入仕様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。このため、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望まれている。本検討は、これに関連して、岩盤に注入されたグラウトの基礎的な流動特性を把握することを目的として、岩盤内の亀裂を単純化した模型を作製し、これに対するグラウト注入実験を行った結果について考察を加えたものである。

キーワード： グラウト、開口亀裂、流動特性、フライアッシュ、ペントナイト



郵便はがき

41円切手
をはって下
さい。

305-□□

茨城県つくば市大字旭一番地

建設省土木研究所

ダム構造研究室 御中

No. _____

No. _____

配布先氏名

配布先住所





土木研究所資料第 3113 号 部

上記のとおり受領しました。

所 属 (住所)

氏 名

印

