

## ダム基礎グラウチングに用いるグラウトの 流動特性に関する実験的検討

安田裕一\* 佐藤弘行\*\* 佐々木隆\*\*\* 山口嘉一\*\*\*\*

### 1. はじめに

近年、地質条件の良好でないサイトにダムを建設する事例が増加するにつれて、所要の遮水性を達成するための止水処理に要する費用が増加する傾向にある。そのため所要の安全性の確保を前提とした合理的なグラウチングの設計・施工技術の確立が強く望まれている。

グラウチングは岩盤内に存在する多様な性状の亀裂を対象とするため、その注入圧力、配合等の注入仕様は、既往の施工事例から経験的に決定されたものが多く、対象岩盤に適した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、岩盤内亀裂を流れるグラウトの流動特性を明らかにする必要がある。これまで土木研究所において、グラウトの流動特性について、二次元模型<sup>1)</sup>の検討を経て、三次元模型による検討<sup>2)</sup>を進めてきている。

本報文は、透明アクリル管を網目状に接続することにより作製した三次元細管網模型(以下、「細管網」という)に対してメチルセルローズ系増粘剤水溶液(以下、「増粘剤水溶液」という)を疑似グラウトとして注入した結果について報告するものである。具体的には、まず実験で使用する増粘剤水溶液の配合を決定するため、単一管路を用いてセメント懸濁液と増粘剤水溶液の注入実験を行い、粘性特性を比較した。

その後、単一管路実験結果を基に設定した配合の増粘剤水溶液を細管網に対して注入し、濃度及び注入圧力が細管網でのグラウトの流動特性に及ぼす影響について実験的検討を行った。なお、ここで増粘剤水溶液を用いたのは、この実験では同一模型に対して繰り返し実験を行う必要があり、ダム基礎グラウチングに用いられるセメント懸濁液は水硬性があるので使用できなかったためである。

### 2. 単一管路での実験

#### 2.1 単一管路及び実験装置

図-1に実験装置の概要を示す。

単一管路は、内径3mm、長さ600mmの透明アクリル管とし、注入口と流出口には圧力計を設置した。

実験装置は、グラウトタンク内の注入材料を窒素ガスで加圧し、注入口から単一管路に注入材料を注入するものである。窒素ガスは、窒素ガスボンベより供給され、調圧タンクを経て安定した一定圧力での加圧を可能とする構造になっている。なお、全ての実験は、液温が20~24℃の範囲で行った。

#### 2.2 セメント懸濁液注入実験

##### 2.2.1 実験ケース

表-1にセメント懸濁液注入実験ケースを示す。一般的にダム基礎グラウチングで用いられているセメント懸濁液の配合は、質量比である水セメント比( $W/C$ )が10~0.8の範囲で選定される<sup>3)</sup>が、今回は極端な例も調査する意味で $W/C = 0.8$ よりも濃い配合( $W/C = 0.6, 0.7$ )についても実験を行った。なお、セメントは、普通ポルトランドセメントを使用した。

##### 2.2.2 実験結果

実験結果を図-2のように動水勾配と注入流量の関係でA・B・Cパターンの3つに分類した。Aパターンは流れが完全に乱流と判断したケース、Bパターンは動水勾配が小さいと流れが層流、動水勾配が大きいと流れが乱流と判断したケース、Cパターンは流れが完全に層流と判断したケースである。図-3~5にそれぞれのパターンの動水勾配と注入流量の関係を示す。 $W/C = 10 \sim 1.5$ の範囲ではAパターン、 $W/C = 1.0 \sim 0.7$ の範囲ではBパターン、 $W/C = 0.6$ のケースではCパターンと判断した。

ここで、実験結果を次の式(1)で回帰し、求め

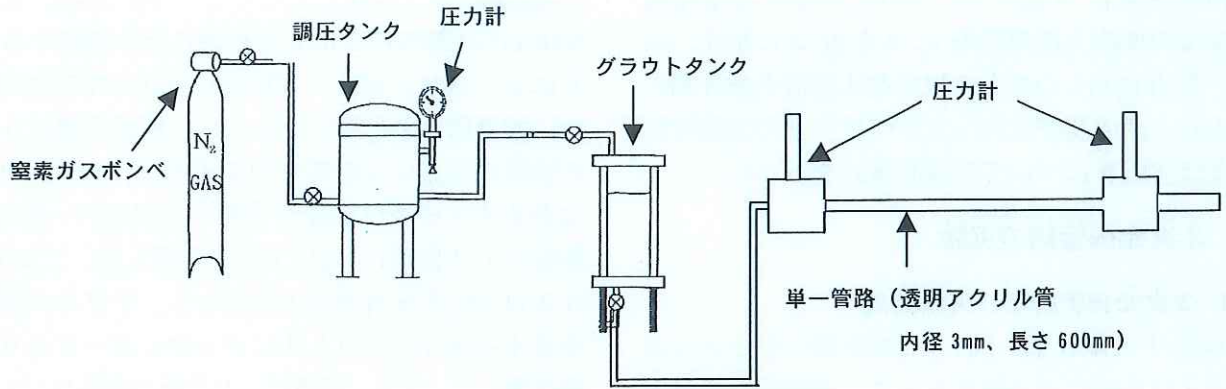


図-1 実験装置の概要

表-1 セメント懸濁液注入実験ケース

ケース	水セメント比 (W/C)	ケース	水セメント比 (W/C)
1	10	6	1
2	6	7	0.9
3	4	8	0.8
4	2	9	0.7
5	1.5	10	0.6

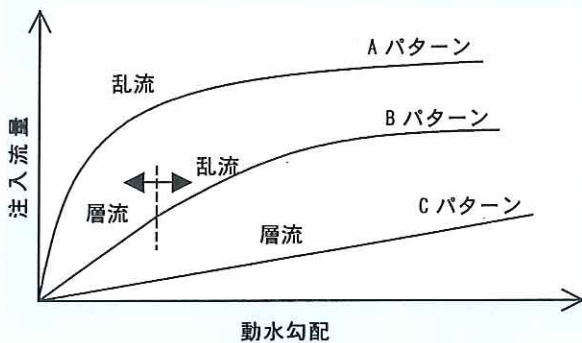


図-2 動水勾配と注入流量の関係 (パターン模式図)

た回帰係数  $a$ ,  $b$  を表-2 に示す。なお、AパターンとCパターンについては全データを一括回帰したが、Bパターンについては層流、乱流データに分け、それぞれについて回帰を行った。

$$Y = aX^b \quad (1)$$

ここに、 $Y$  : 注入流量 ( $\text{cm}^3/\text{s}$ )、 $X$  : 動水勾配、 $a$ ,  $b$  : 係数。

### 2.3 増粘剤水溶液注入実験

想定する各配合のセメント懸濁液に粘性特性が近い増粘剤水溶液の濃度を決定する目的で増粘剤水溶液注入実験を行った。なお、増粘剤のグレードとしてはSM15を用いた。図-6に、例として、 $W/C = 10$ におけるセメント懸濁液の動水勾配と注入流量の関係をほぼ近似できる濃度0.5%

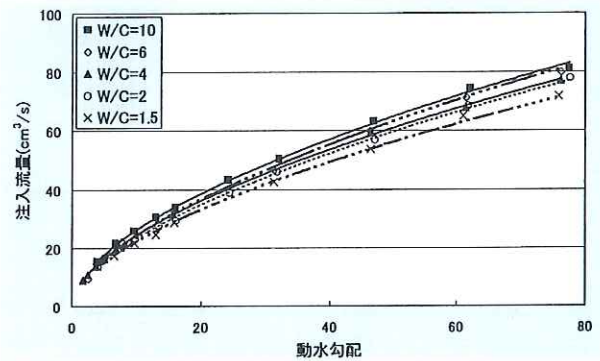


図-3 動水勾配と注入流量の関係 (Aパターン)

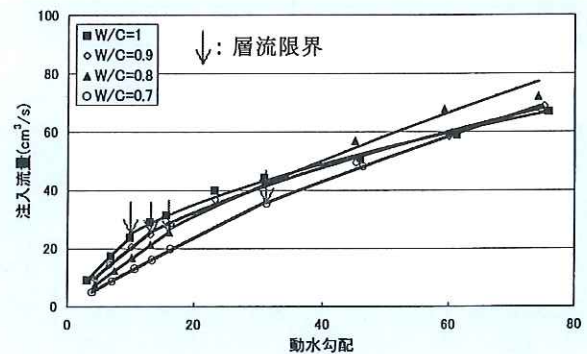


図-4 動水勾配と注入流量の関係 (Bパターン)

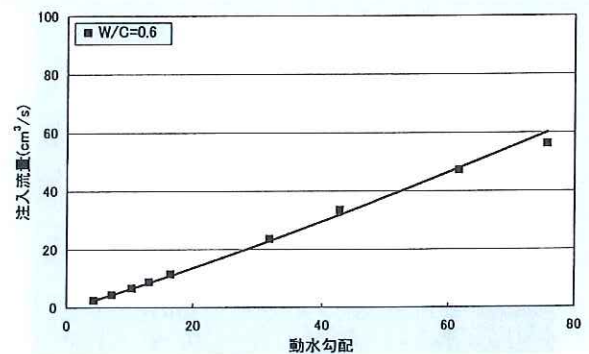


図-5 動水勾配と注入流量の関係 (Cパターン)

(SM15-0.5%)の増粘剤水溶液の注入実験結果を示す。

このようにして決定したセメント懸濁液の配合



と回帰係数  $a$ ,  $b$  及びそれぞれに対応する増粘剤水溶液の濃度と回帰係数  $a$ ,  $b$  を表-3 に示す。以後、表-3 に示した配合の増粘剤水溶液を細管網に注入し、濃度及び注入圧力がグラウトの流動特性に及ぼす影響について実験的検討を行った。

### 3. 3次元細管網の実験

#### 3.1 3次元細管網及び実験装置

写真-1 に細管網、図-7 に細管網の中心部にある注入口を縦に切る断面を示す。細管網は岩盤内

表-2 回帰係数  $a$ ,  $b$  (セメント懸濁液)

水セメント比 $W/C$	パターン	層流域		乱流域	
		$a$	$b$	$a$	$b$
10	A	—	—	7.12	0.56
6	A	—	—	6.20	0.59
4	A	—	—	6.55	0.57
2	A	—	—	5.99	0.59
1.5	A	—	—	5.95	0.57
1	B	3.40	0.84	8.25	0.48
0.9	B	2.56	0.89	5.95	0.56
0.8	B	1.73	0.97	3.86	0.70
0.7	B	1.30	0.96	2.60	0.76
0.6	C	0.50	1.11	—	—

の流路網をモデル化したもので、内径3mm、長さ100mmの透明アクリル管を網目状に接続することにより600×600×600mmの立方体を作製した。細管網の中心部には注入口、模型外側の6面の細管の交点には開閉可能な流出口バルブ、中心にある注入口及び細管が交差する部分の一部(全体数の1/4箇所)には圧力計を設置した。ここで、注入口の圧力を有効注入圧力とし、アクリル管が交差する部分の圧力と共にデータロガーにより自動計測した。なお、実験は、上下面の流出口バルブ

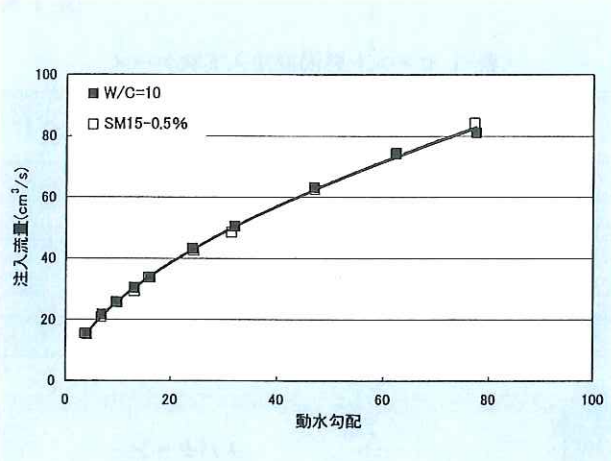


図-6 粘性特性が近いセメント懸濁液と増粘剤水溶液の動水勾配と注入流量の関係の一例

表-3 回帰係数  $a$ ,  $b$  (セメント懸濁液及び増粘剤水溶液)

水セメント $W/C$	パターン	層流域		乱流域		増粘剤 グレード	濃度 %	パターン	層流域		乱流域	
		$a$	$b$	$a$	$b$				$a$	$b$		
10	A	—	—	7.12	0.56	SM15	0.5	A	—	—	7.16	0.56
2	A	—	—	5.99	0.59		1.0	A	—	—	6.87	0.56
1	B	3.40	0.84	8.25	0.48		1.3	B	2.74	0.91	7.85	0.53
0.8	B	1.73	0.97	3.86	0.70		1.7	B	2.23	0.87	3.81	0.71
0.7	B	1.30	0.96	2.60	0.76		2.2	B	1.49	0.93	1.04	0.84
0.6	C	0.50	1.11	—	—		2.7	C	0.66	1.05	—	—

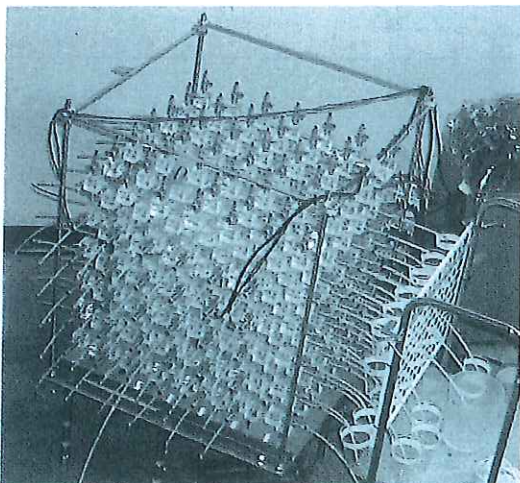


写真-1 細管網

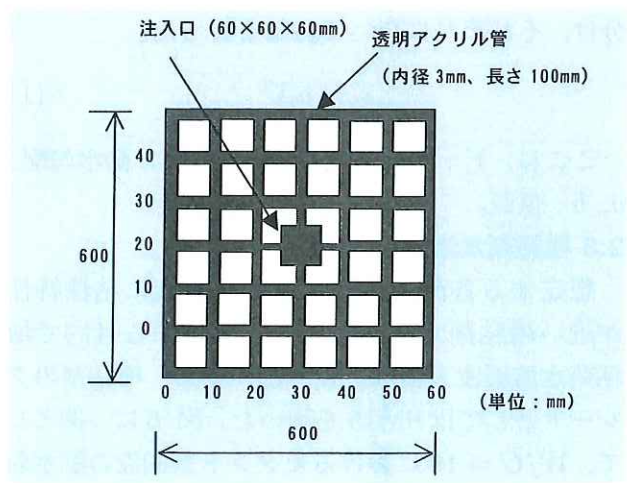


図-7 細管網断面



を全て閉じる条件で行った。なお、細管網以外の実験装置は、図-1 に示す単一管路に対する装置と同じものを用いた。

3.2 実験方法及び実験ケース

実験ケースは、表-3 に示す濃度の増粘剤水溶液 6 種類、注入圧力 20~500kN/m<sup>2</sup> の範囲で 10 種類設定した。

各ケースにおいて、予備注入を行い透明アクリル管内を増粘剤水溶液で満たした後、注入実験を行った。注入実験は、注入圧力 20~80kN/m<sup>2</sup> の範囲では 1 分間の注入、注入圧力 100~500kN/m<sup>2</sup> の範囲では 30 秒間の注入を行った。注入圧力は、調圧タンクに設置した圧力計により管理し、注入流量は、模型外側の 6 面からの流出流量を計測することにより求めた。また、模型外側の 6 面の内 1 面については個々の流出口からの流出流量を計測した。

3.3 実験結果

3.3.1 有効注入圧力と注入流量の関係

図-8 に有効注入圧力と注入流量の関係を示す。図-8 によると、同一の有効注入圧力では、濃度が低くなるほど粘性が低くなるので注入流量が大きくなる傾向が見られる。ここで、実験結果を式 (1) で回帰した。なお、この場合の X は動水勾配ではなく、有効注入圧力 (kN/m<sup>2</sup>) としている。また、図-8 には回帰曲線も描いている。

表-4 に求めた回帰係数 a, b を示す。濃度が 0.5% のケースでは注入流量は有効注入圧力の約 0.5 乗に比例していることから、流れはほぼ完全乱流に近い状態であると考えられ、濃度が高くなるほどべき数 b が 1 に近づき流れは層流状態に近づくことがわかる。

3.3.2 換算水セメント比とグラウタビリティの関係

前節より、同一の有効注入圧力では、注入流量は濃度が低くなるほど大きくなることが確認されたが、効果的なグラウチングとは短時間に効率的にセメントを注入することであると考えられる。図-9 に換算水セメント比とグラウタビリティの関係を示す。ここで、換算水セメント比とは表-3 に示す想定するセメント懸濁液の濃度に対応する水セメント比のことであり、グラウタビリティとは、次式 (2) のように、単位時間あたりの注入セメント量として定義する。

$$\text{グラウタビリティ} \left( \frac{g}{s} \right) = \text{注入流量} \left( \frac{\text{cm}^3}{s} \right) \times \text{換算セメント量} \left( \frac{g}{\text{cm}^3} \right) \quad (2)$$

図によると、換算水セメント比が一定の場合、有効注入圧力が高いほどグラウタビリティが高い。また、有効注入圧力が一定の場合、グラウタビリティは換算水セメント比が小さい配合であるほど高くなり、流れが層流に近づくほど単位時間あたりの注入セメント量が多くなる結果となった。

3.3.3 各流出口の流動特性

図-10 に有効注入圧力 60kN/m<sup>2</sup> における濃度と流出率の関係を示す。なお、流出率は、流出流量計測を行った面の各流出口数 (35 箇所) の内、流量が計測された流出口の数の割合として定義する。図-10 によると、濃度が薄く流れが完全乱流

表-4 回帰係数 a, b

濃度 (%)	係数 a	係数 b
0.5	29.60	0.55
1.0	27.67	0.56
1.3	23.69	0.59
1.7	19.16	0.64
2.2	15.30	0.68
2.7	10.46	0.75

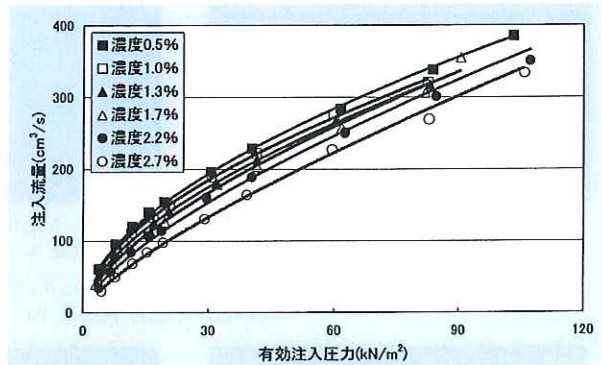


図-8 有効注入圧力と注入流量の関係

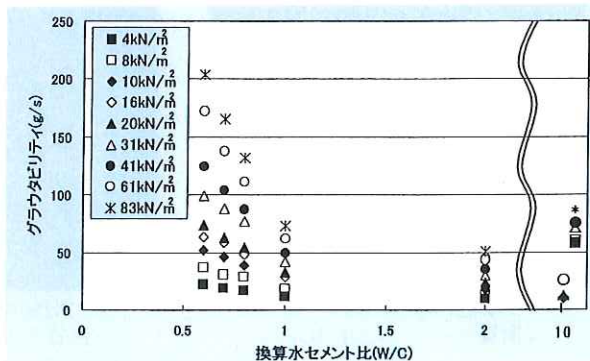


図-9 換算水セメント比とグラウタビリティの関係



に近い状態であると流出率が悪く選択的な流れが発達し、濃度が濃く流れが層流状態に近づくと流出率が良好になる結果となった。

図-11 に有効注入圧力  $60\text{kN/m}^2$  の各配合の増粘剤水溶液の定常流入状態における各流出口の流量比を示す。なお、流量比は「各流出口の流量」を「注入口から最短距離にある計測面中心の流出口の流量」で除した値として定義した。有効注入圧力  $60\text{kN/m}^2$  は水頭で約  $6\text{m}$  に相当し、細管網の

高さ  $600\text{mm}$  に比較して十分大きい。また、縦軸が  $40\text{cm}$  となっているのは、上下面の流出口バルブを全て閉じる条件で実験を行ったため、流量計測面の上下辺における流出口での流出量が計測できないことによる。なお、座標は、図-7 と対応する。図-11 によると濃度が薄く流れが完全乱流に近い状態のケースにおいては、注入口から最短距離にある計測面中心に増粘剤水溶液が偏って流れる傾向が見られ、濃度が濃く流れが層流状態に近づいたケースにおいては、隅々まで増粘剤水溶液が行き渡ることがわかる。

### 3.3.4 細管網内の圧力分布

図-12 に有効注入圧力  $60\text{kN/m}^2$  の注入時における圧力分布状況を示す。なお、圧力の値は、有効注入圧力で正規化し、それを百分率表示したものである。図-12 によると、濃度が薄く流れが完全乱流に近い状態のケースでは、注入口付近で注入圧力が大きく低減し、隅々まで注入圧力が伝達していない傾向が見られる。一方、濃度が濃く流れが層流状態に近づいたケースでは、隅々まで注

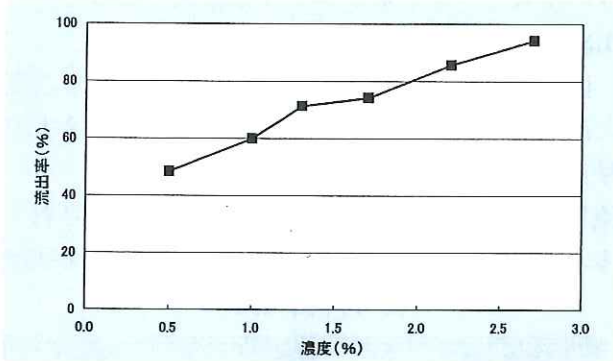


図-10 有効注入圧力  $60\text{kN/m}^2$  における濃度と流出率の関係

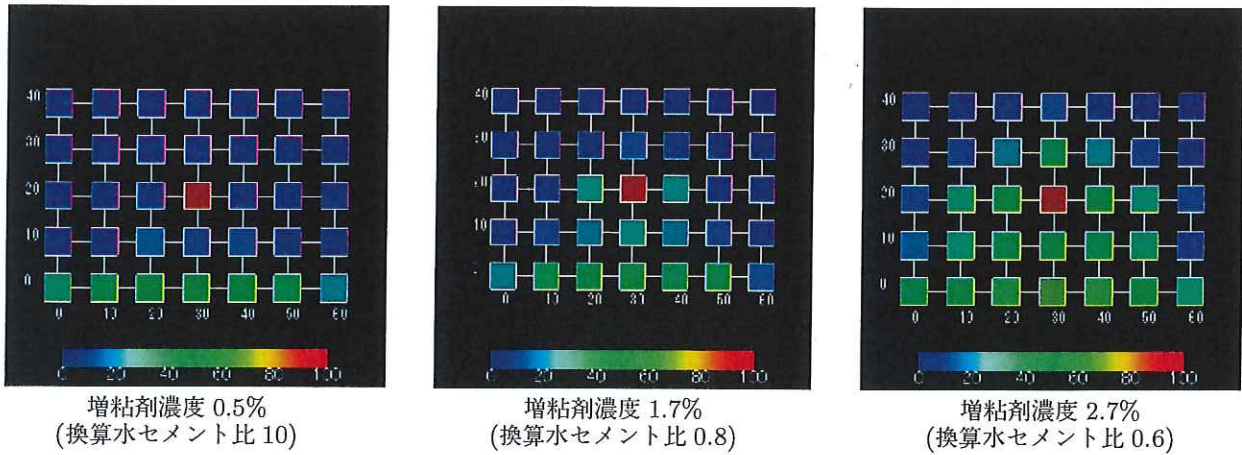


図-11 各配合グラウトの定常流入状態における各流出口の流量比分布 (有効注入圧力  $60\text{kN/m}^2$ 、百分率表示、座標は  $\text{cm}$  単位)

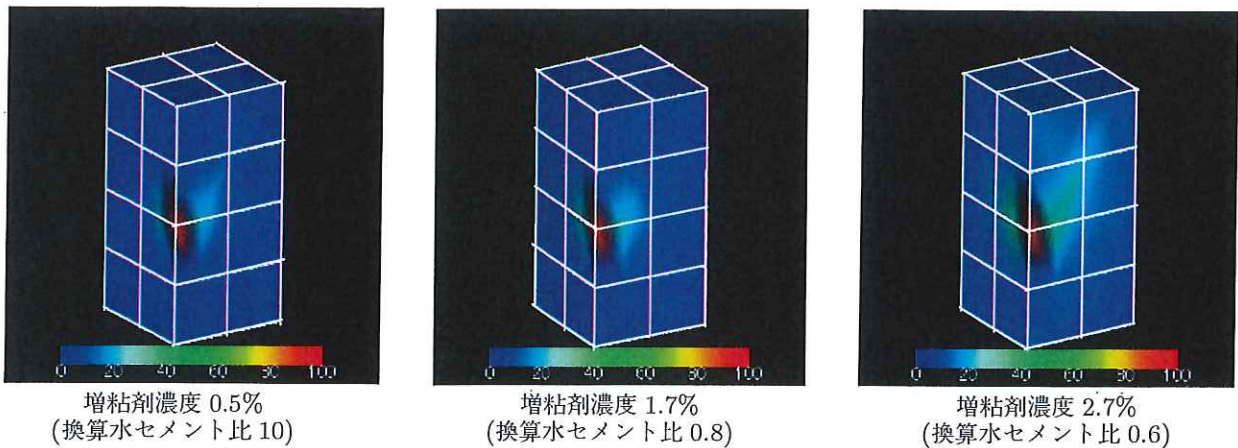


図-12 各配合グラウトの定常流入状態における圧力分布 (有効注入圧力  $60\text{kN/m}^2$ 、百分率表示)

入圧力が伝達することがわかる。

#### 4. おわりに

本研究では、まず実験で使用する疑似グラウトとしての増粘剤水溶液の濃度を決定するため、単一管路を用いてセメント懸濁液と増粘剤水溶液の注入実験を行い、粘性特性を比較した。その後、単一管路実験結果から、ダム基礎グラウチングで用いる配合のセメント懸濁液と粘度が概ね一致する増粘剤水溶液の濃度を選定し、その濃度の増粘剤水溶液を細管網に対して注入し、濃度及び注入圧力が細管網でのグラウトの流動特性に及ぼす影響について実験的検討を行った。以下に得られた結果をとりまとめる。

- (1) 換算水セメント比が一定の場合、有効注入圧力が高いほどグラウタビリティが高くなり、有効注入圧力が一定の場合、グラウタビリティは換算水セメント比が小さい配合であるほど大きな値となる。
- (2) 濃度が薄く流れが完全乱流に近い状態だと、隅々まで増粘剤水溶液が行き渡らず、濃度が濃く流れが層流状態に近づいたケースは、隅々まで増粘剤水溶液が行き渡る。
- (3) 濃度が薄く流れが完全乱流に近い状態のケースでは、注入口付近で注入圧力が大きく低減し、隅々まで注入圧力が伝達していない傾向が見られ、濃度が濃く流れが層流状態に近づいたケースでは、隅々まで注入圧力が伝達する。

今回、細管網に対して増粘剤水溶液を疑似グラウトとして注入実験を行った結果、流れが乱流になりやすい薄い配合より、流れが層流に近づく濃い配合の方が、単位時間あたりのセメント注入量が多くなる結果となった。しかし、適切なグラウトの配合は、グラウトの流況のみならず亀裂の粗度や屈曲の程度などによっても変化するものと考えられる<sup>4)</sup>。このようなことから、今後は、より実際の岩盤に近い条件での検討も行い、適切なグラウト配合の設定方法の確立を目指したい。

#### 参考文献

- 1) 永山功、新高康介、佐々木隆、斉藤正明：亀裂性岩盤模型を用いたグラウトの流動特性試験，土木研究所資料，第 3367 号，1995 年 8 月
- 2) 安田裕一、山口嘉一、佐々木隆、佐藤弘行：三次元岩盤亀裂模型を用いたグラウト流動特性に関する検討，第 11 回岩の力学シンポジウム講演論文集，2002 年 1 月
- 3) 土木学会岩盤力学委員会：ダム建設における水理地質構造の調査と止水設計，p.101，2001 年 6 月
- 4) 山口嘉一：ダム基礎グラウチングにおける技術的課題，ワークショップ「グラウチング注入技術の課題」講演概要集，p.6，1999 年 10 月

安田裕一\*



北海道開発局石狩川開発建設部幾春別川ダム建設事業所調査設計班第 1 設計係  
(前 独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム研究員)  
Yuuichi YASUDA

佐藤弘行\*\*



独立行政法人土木研究所水工研究グループダム構造物チーム研究員  
Hiroyuki SATOH

佐々木隆\*\*\*



同 水工研究グループダム構造物チーム主任研究員  
Takashi SASAKI

山口嘉一\*\*\*\*



同 水工研究グループダム構造物チーム 首席研究員，工博  
Dr. Yoshikazu YAMAGUCHI