

論文 PC グラウトのレオロジー特性及び注入条件が充填性に与える影響

西村 蘭果*1, 伊藤 一聡*2, 魚本 健人*3

要旨: PC 構造物の寿命に大きな影響を及ぼす PC グラウト施工において, 完全充填するための条件として, グラウトがシース内の全断面を充填しながら流下する全断面流下を考えた。そして全断面流下の条件を定量的に把握するために, グラウトのレオロジー特性とシース管の直径, 傾斜及びグラウトの注入流量等を要因として, 実験による検討を行った。得られた結果より, PC グラウトが全断面流下を実現するのに必要な流量と, 流下するとき断面形状を推定する式を構築した。

キーワード: PC グラウト, 残留空気, レオロジー特性, 全断面流下, 流動勾配

1. はじめに

PC グラウトは, PC 構造物において①PC 鋼材と部材本体のコンクリートとの一体化, ②PC 鋼材の腐食からの保護, という 2 つの役割を担っており, その品質や施工の良否により構造物の寿命に大きな影響を与える¹⁾。

上記の PC グラウトの目的を達成させるためには, シース内にグラウトを完全に充填することが必要となるが, ここでグラウトの完全充填の障害となるのが, プリーディング水と残留空気存在である。このうち, プリーディング水に関しては, 近年, 混和材の改良が進められ, 1997 年からのノンプリーディングタイプグラウトへの全面移行が提案されるに至っている²⁾。

残留空気とは, グラウトが下り勾配においてシースの底部に沿って流下して下部から充填することによって空気が内部に閉じ込められることによって生じる。そこで, この残留空気に関しては, 粘性の高いタイプのグラウトを用いて, シース断面を充填 (以下, 全断面流下) させながら注入することにより, 空気溜りができないような施工法が用いられている。

しかし, 全断面流下の条件には, 使用するシースの直径や空隙率, シースの勾配や流量及び配合

など, さまざまな要因が関わっており, それらを全体について定量的な把握がされていないのが現実である。

そこで, 本研究では PC グラウトの代替としてスラグペーストを用い, それをビンガム流体で表現したときのレオロジー定数 (塑性粘度, 降伏値) 及びシースの断面積と勾配, PC グラウトの流量を要因として挙げ, PC グラウトの完全充填を実現させるための条件を定量的に把握するために, 実験的検討を行った。

2. 実験概要

2.1 フレッシュ試験

本研究においては PC グラウトをビンガム流体として扱ったときの, 全断面流下を実現させるための定量的条件を求めることが目的であるため, 経時変化の著しいセメントペーストに替えて, スラグペーストを主に用いて実験を行った。実験に用いた材料及び配合は表-1 に示す。スラグ配合は, 基準の配合に対して, 増粘剤の添加量を変化させた 4 配合と水粉体比を変化させた 4 配合の計 9 配合とした。増粘剤には, 水溶性熱可塑性樹脂 (ポリエチレンオキサイド) を用い, 水に対する重量比を外割で添加した。また, 比較のためノ

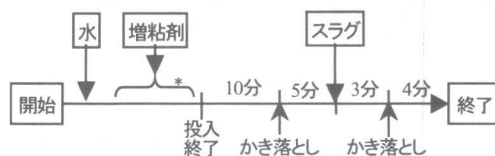
*1 株式会社 竹中土木 (正会員)

*2 千葉工業大学大学院 土木工学専攻

*3 東京大学国際・産学共同研究センター教授 工博 (正会員)

表-1 配合及び使用材料

		スラグペースト									PC グラウト
		SD	A1	A2	A4	A5	B1	B2	B4	B5	GF
水粉体比	(W/P)	75	75	75	75	75	65	70	80	85	45
増粘剤添加率	(W×N)	3	1	2	4	5	3	3	3	3	1 (C×N)
使用材料		スラグ：高炉スラグ微粉末(JIS A 6206) 増粘剤：ポリエチレンオキサイド PCグラウト混和剤：ノンブリーディング・粘性タイプ									



*増粘剤を少量ずつ投入しながら練混ぜを行う

図-1 練混ぜ方法

ンブリーディング・粘性タイプの PC グラウトについても実験を行った。PC グラウトの混和剤には、高縮合トリアジン系化合物と水溶性高分子エーテル系化合物を主成分とする PC グラウト用混和剤を用いた。練混ぜ量は 5500ml、グラウトミキサは毎分 1000 回転のハンドミキサを用いた。練混ぜ時間及び順序については図-1 に示すとおりで、増粘剤を完全に溶かすために、合計で 22 分以上練混ぜを行った。PC グラウト配合の練混ぜは、水と混和剤を混ぜて 10 秒練混ぜた後、セメントを投入し、3 分間練混ぜを行った。

まず、9 種類の配合について、レオロジー定数の測定と、コンシステンシー試験を行った。レオロジー定数の測定には、二重円筒型回転粘度計を用い、せん断速度とせん断応力の関係より、塑性粘度と降伏値を算出した。コンシステンシー試験としては、土木学会規準による J₁₄ ロート流下時及びモルタルフローコーン（底面直径 100mm）を用いたフロー値の測定を行った。フロー値は、フローコーンの底面の直径で除した、フロー面積比を用いて評価を行った。

2.2 パイプ流下実験

図-2 に示すように、一定の傾斜でアクリルパイプを固定し、その一端からピストンを用いて一定の速度で流体を押し出すことにより、流量一定でスラグペーストを注入して、流体の断面を観察する実験を行った。本実験に用いる配合は、スラグペーストが SD、A1、A5、B1、B5 の 5 配合、及び PC グラウト（GF）である。

実験ケースは表-2 に示すとおりである。アクリルパイプは長さ 1 m のものを用い、直径は 32

mm、50mm、70mm の 3 種類とした。水平からの傾斜角度は、0°、10°、20° の 3 水準で、それぞれにおいてピストンの押し出し速度を変えて、注入流量を変化させた。表中の流速は、ピストン部分の流速（押し出し速度）を表す。ピストンの直径は、アクリルパイプの直径の小さいほうから順に対応して、19mm、32mm、50mm とした。

流下断面の観察には、ビデオカメラを設置して撮影を行った。アクリルパイプの真横から録画された画像で、図-3 のように流体が管の下面と上面に接している点を結び、管の傾斜方向からなす角度を求め、これを流動勾配と定義した。

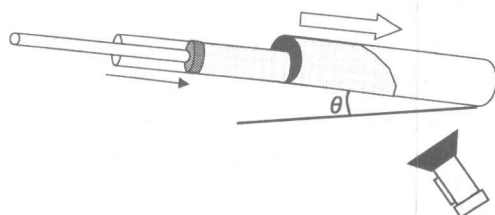


図-2 パイプ流下実験の様子

表-2 パイプ流下実験ケース

	管の直径(mm) ()内は断面積(mm ²)		
	32 (804)	50 (1963)	70 (3847)
アクリルパイプ			
ピストン	19	32	50

角度	0°	10°	20°
注入速度 (cm/s)	5		
	10	10	
	20	20	20
	40	40	40
		60	60
			80
			100
			140

表-3 フレッシュ試験結果

		SD	A1	A2	A4	A5	B1	B2	B4	B5	GF
J ₁₄ ロート 流下時間	(s)	10.61	3.06	4.73	16.59	82.18	18.33	14.93	9.43	9.19	9.45
スランフフロー	(mm)	233	255	245	231	203	205	216	239	249	260
塑性粘度	(Pa・s)	1.83	0.39	0.9	2.7	8.75	2.93	2.35	1.84	1.69	2.06
降伏値	(Pa)	10.37	2.34	6.39	15.02	37.24	20.06	19.00	9.62	10.46	10.86

3. 実験結果

3.1 フレッシュ試験結果

レオロジー試験及びコンシステンシー試験の結果を表-3に示す。また図-4, 5, に塑性粘度と降伏値, ロート流下時間と塑性粘度の関係をそれぞれ示す。

図-4の塑性粘度と降伏値の関係において、配合の種類によってばらつきがあるものの、全体として、原点を通る直線で近似できると考えられる。従って、2つのレオロジー定数のうち、1つを用いることにより、流体のレオロジー特性を評価することができる。そこで、本研究では塑性粘度を用いて、流体のレオロジー特性を評価することとした。

また、図-5のロート流下時間と塑性粘度の関係において、配合の種類によらず高い相関関係が見られる。これより、塑性粘度はロート流下時間を計測することにより、推定できることがわかる。

3.2 パイプ流下実験結果

図-6に、パイプ流下実験におけるアクリルパイプの断面積と全断面流下を満たすときの注入流量との関係を各配合について示す。管の傾斜が0°のときには、A1を除く全ての配合について最大管径であるφ70mmにおいても、全断面流下を満たしている。しかし、管の傾斜が大きくなるにつれ、全断面流下を満たす配合が絞られ、20°かつφ70mmで全断面流下を満たすのは、最も塑性粘度の大きいA5配合だけであった。

図-7及び図-8に管の傾斜10°と20°において、流量と流動勾配の関係を示す。

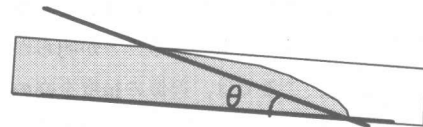


図-3 流動勾配の定義

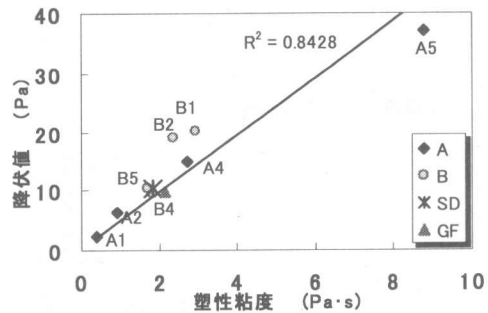


図-4 塑性粘度と降伏値

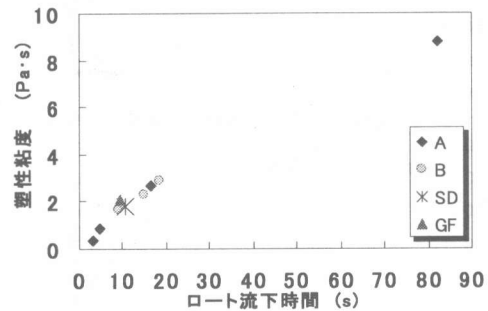


図-5 ロート流下と塑性粘度の関係

4. 考察

4.1. 全断面流下の条件

実際の施工において全断面流下を満たすための条件を得るために、以下のような検討を行った。

まず、図-6において、断面積と全断面流下を満たす流量（以下、限界流量）の関係を、原点を通る直線で近似した。

$$\text{限界流量} = a \times \text{断面積} \quad \dots(1)$$

次にこの傾き a と流体の塑性粘度との関係を調べたところ、図-9のように、傾きの逆数 $1/a$ と流体の塑性粘度が線形関係で近似できることが明らかとなった。ただし、ここでは、近似の精度を高めるために、シースの傾斜 0° においては、A5の配合を除いた点で近似を行った。

$$1/a = b \times \text{塑性粘度} \quad \dots(2)$$

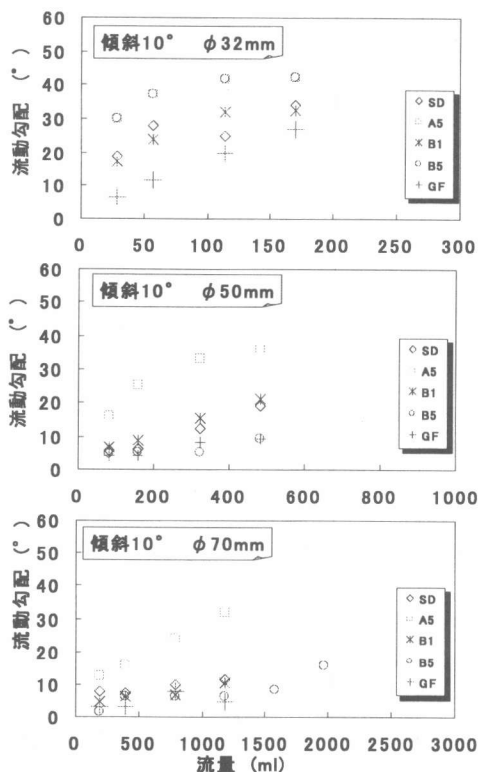


図-7 流動勾配 (傾斜 10°)

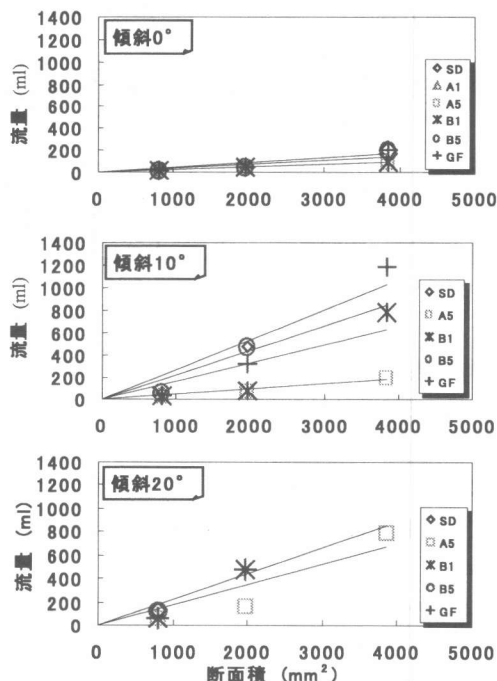


図-6 断面積と全断面流下の流量の関係

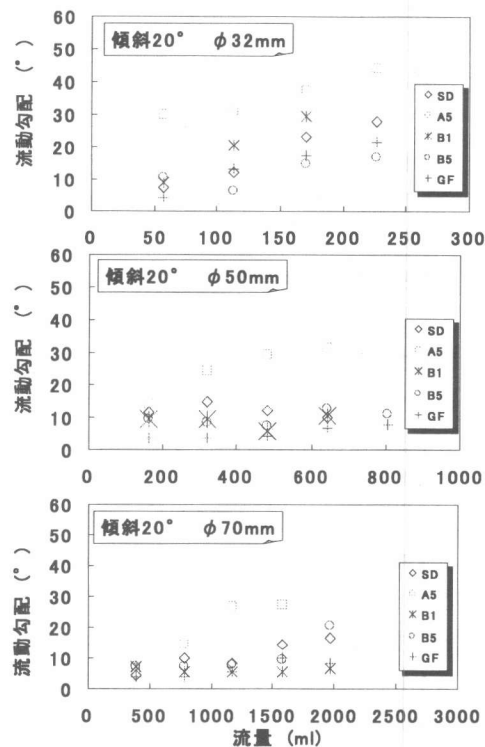


図-8 流動勾配 (傾斜 20°)

したがって、管の傾斜ごとに係数 α ($=1/b$) を定めることにより、管の断面積と流体の塑性粘度に対して、限界流量を定めることができる。

$$\text{限界流量} = \alpha \times \text{断面積} / \text{塑性粘度} \quad \dots(3)$$

ここで得られた係数 α は、表-4 のようになる。

表-4 傾斜と係数 α の関係

傾斜(°)	係数 α
0	0.077
10	0.431
20	1.235

式(3)で得られた条件式を用いて得られた、配合 GF と A5 についての断面積と限界流量の関係を図-10 に示す。高い粘性を持つ配合 A5 では、得られた条件式が実験結果とよくあっているといえる。しかし、PC グラウト配合である GF については、管の傾斜が 20 度の場合において、限界流量を大きく見積もっており、補正が必要と考えられる。

4.2 流動勾配の推定

流体が管内の全断面を満たしながら流下しても、その流動勾配が非常に小さい場合には、空隙ができる可能性が考えられる。したがって、完全充填を満たすためには、流動勾配を考慮する必要がある。そこで、シースの傾斜が 10° と 20° の場合について以下のように流動勾配を推定する式を導出した。

図-11 に塑性粘度と注入流量の積と流動勾配との関係を示す。この図において、塑性粘度と注入流量の積と流動勾配との関係を原点を通る直線で近似し、以下の式を導いた。

$$\text{流動勾配} = \text{傾き } c \times (\text{塑性粘度} \times \text{注入流量})$$

…(4)

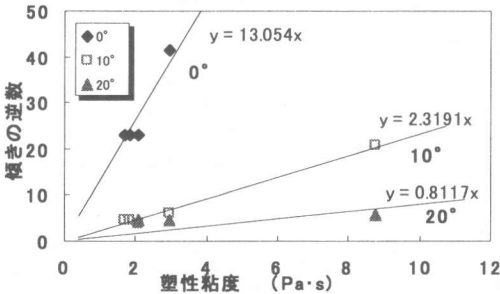


図-9 塑性粘度と傾きの逆数 $1/a$

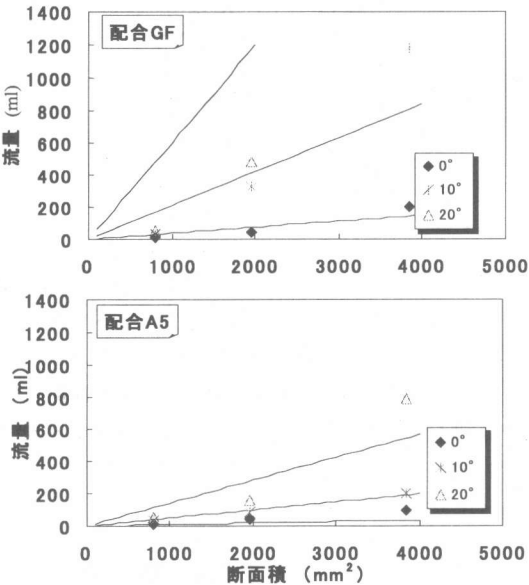


図-10 配合ごとの限界流量

この式において、傾き a は、シースの大きさによって定まるので、次にシースの断面積と直線の傾き c との関係を求めた。

図-12 にシースの断面積の逆数と傾き c との関係を示す。ここで、推定式の簡略化を図るため、これらの関係を原点を通る直線で近似して、それぞれのシースの傾斜に対して、関係式を以下のよう求めた。

$$\text{傾斜 } 10^\circ : c = 4.5 \times 10^4 / \text{シー断面面積} \quad \dots(5)$$

$$\text{傾斜 } 20^\circ : c = 2.9 \times 10^4 / \text{シー断面面積} \quad \dots(6)$$

以上より、流動勾配の推定式は次のように表すことができる。

$$\text{流動勾配} = \text{係数 } \beta \times \frac{\text{塑性粘度} \times \text{注入流量}}{\text{シース断面積}} \dots (7)$$

ただし、係数 β はシースの傾斜によって定められる係数で、その値は表-5 のとおりである。

表-5 傾斜と係数 β の関係

傾斜(°)	係数 β
10	4.5×10^4
20	2.9×10^4

5. まとめ

PC グラウトの注入に際して、残留空気が発生させない条件として、本研究ではグラウトがシース内を流下するときの全断面流下を考えた。流体のレオロジー特性、管の径、傾斜、注入流量を変化させて実験を行った結果、以下に示す全断面流下を満たすための条件式と、流体が流下するときの流動勾配の推定式を導いた。

(1) 全断面流下の条件式

$$\text{限界流量} = \alpha \times \text{断面積} / \text{塑性粘度}$$

ただし、 α は管の傾斜で決まる係数

(2) 流動勾配の推定式

$$\text{流動勾配} = \beta \times \frac{\text{塑性粘度} \times \text{注入流量}}{\text{シース断面積}}$$

ただし、 β は管の傾斜と断面積で決まる係数

これらの式を用いて、PC グラウトの完全充填を実現させるための条件として、グラウトのレオロジー特性だけでなく、注入条件も併せて定量的に評価することができると考えられる。

今後の課題として、曲上げ部を有する流路モデルにおける実験を行い、流動勾配を変化させたときの残留空気の発生機構を考える必要があると考えられる。

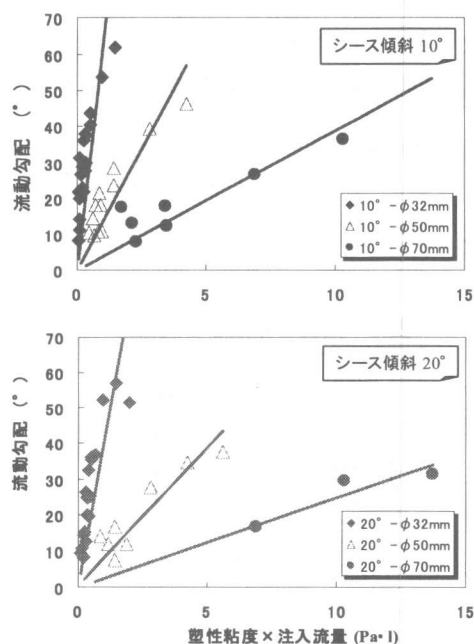


図-11 塑性粘度×注入流量と流動勾配の関係

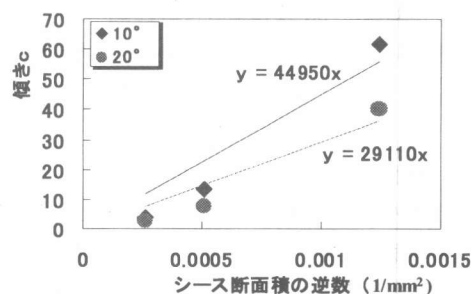


図-12 断面積の逆数と傾き c

謝辞

本研究を行うにあたり、(株)エヌエムビー 菅俣氏、(株)住友精化 宮本氏に実験材料及び測定機械を提供していただきました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) プレストレスト・コンクリート建設業協会: PC グラウト施工マニュアル, 1996
- 2) 宮川豊章: 日経コンストラクション, 1997.1.24