

# 実物大レベルにおける PC グラウトの流動性および充填性に関する基礎的実験

山口 征伸\*<sup>1</sup> 水上 伸介\*<sup>2</sup> 川村 幸典\*<sup>3</sup> 鈴木 雅博\*<sup>4</sup> 出雲 淳一\*<sup>5</sup>

## 1. まえがき

プレストレストコンクリート（以下、PCとよぶ）用グラウトは、PC鋼材とシースとの間の空隙を埋めてコンクリートと一体とするとともに、PC鋼材の腐食を防ぐ働きをしており、PCの強度や耐久性の面で重要な役割をはたしている。現在、PCグラウトの注入が確実にされるような施工方法の確立が必要とされており、筆者らはグラウトの充填性能を定量的に評価するための方法について、グラウトの先端角度に注目し、検討を行ってきた<sup>1), 2), 3)</sup>。実験室レベルのグラウトの充填性試験においては、その評価方法の妥当性が検証されているが、実物大レベルの試験においては、まだ、検証されていない。そこで本研究では実物大レベルを想定した試験装置を製作してグラウトの充填性試験を行い、実験室レベルの実験から得られたグラウトの先端角度と充填性との関係が、実物大レベルのグラウト注入においても適用できるかどうかを検証することを目的としている。

## 2. 実験計画

### 2.1 実験方法

実験は透明な管を、図-1のように配置して、練混ぜ直後のグラウトをホッパーに移し、電動ポンプでグラウトを注入することによって実験を行うことにした。実際のシース配置は、曲線部などが存在し、より複雑な形状であるが、今回は注入長さによるグラウトの先端角度、流速、圧力の変化、管内に鋼材を配置した場合、下り勾配におけるグラウトの充填性を調べるためにモデルを単純化して実験を行うことにした。管の内径は32mm、63mm、83mmの3種類を使用した。図-1中の測定区間4の位置が可変式になっており、10度の勾配をつけることができる。グラウトポンプには連続的に注入するスネーク式電動ポンプ、および一般的に使われているスクイズ式の電動ポンプを使用することにした。また、圧力を測定するためにポンプ排出口には圧力計を取り付けることにした。また、管内を流れるグラウトを観察するために、デジタルビデオカメラを2m間隔に5台設置し、それぞれの測定区間を流れるグラウト先端部を撮影することにした。実験終了後、撮影したデジタル画像をパーソナルコンピュータで解析し、グラウト先端部の角度と平均速度を求めた。

今回の実験を行う前に、J<sub>14</sub>漏斗による流下時間の測定と回転粘度計による粘度測定も行うことにした。実験風景を写真-1に示す。

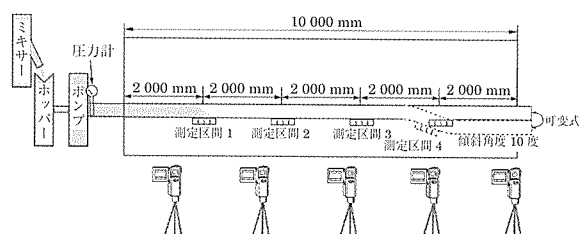


図-1 実験装置



写真-1 実験の概要

### 2.2 使用材料

実験に用いたグラウトは普通ポルトランドセメント、水道水、公称ブレン値が10000 cm<sup>2</sup>/gの高炉スラグ微粉末、ポリカルボン酸エーテル系の高性能減水剤で構成されるグラウト（Bシリーズ）と普通ポルトランドセメントに混和剤を添加して製造するノンブリーディング・粘性型グラウト（Gシリーズ）の2種類を用いることにした。

### 2.3 配合

セメントを高炉スラグ微粉末で置換したグラウト（Bシリーズ）の配合は、水セメント比を45%、スラグ置換率を70%、高性能減水剤を0.2%に設定した。この配合は、こ

\*<sup>1</sup> Yukinobu YAMAGUCHI：関東学院大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 博士前期課程

\*<sup>2</sup> Shinsuke MIZUKAMI：(株)ピーエス三菱 東京土木支店 PC事業部

\*<sup>3</sup> Yukinori KAWAMURA：(株)ピーエス三菱 東京土木支店 PC事業部

\*<sup>4</sup> Masahiro SUZUKI：(株)ピーエス三菱 技術本部開発技術第1部

\*<sup>5</sup> Junichi IZUMO：関東学院大学 工学部 土木工学科 教授

表 - 1 グラウトの配合

シリーズ 記号	グラウトタイプ	W/P (%)	R (%)	Ad (P×%)	SP (P×%)	C (kg)	W (kg)	SI (kg)	Ad (kg)	SP (kg)
B	スラグ添加型グラウト	45	70	0	0.2	391	585	913	0	2.6
G	ノンブリーディング・ 粘性型グラウト	45	0	1.0	0	1 305	587	0	13.0	0

〈備考〉P：セメントを含む結合材，W：水，R：スラグ置換率，SP：ポリカルボン酸エーテル系高性能 AE 減水剤，SI：スラグ微粉末，Ad：ノンブリーディング・粘性型用混和剤をそれぞれ表す。

れまでの配合データから充填性，施工性が良好であり，またブリーディングがゼロの条件を満たすものから選出した。ノンブリーディング・粘性型のグラウト（Gシリーズ）は，グラウトの配合例<sup>4)</sup>を参考にし，水セメント比を45%，混和材の添加量を1%に設定した。本研究では，1バッチあたり80ℓ練ることとした。1m<sup>3</sup>あたりの配合を表-1に示す。

2.4 練混ぜ方法

グラウトの練混ぜには，回転数が1 000 rpm，練混ぜ量100ℓ用のグラウトミキサを用いて，1バッチあたり80ℓのグラウトを製造した。グラウトの練混ぜ方法は，材料投入後3分間練混ぜたあと一旦ミキサを停止させ，こびり付いたグラウトをかきおとした後にさらに2分間練混ぜて製造した。グラウトの練混ぜは屋外で行い，練上り温度は21 ± 2℃の範囲であった。

2.5 実験パラメーター

実験に用いた管は，内径32 mm，63 mm，83 mmの3種類で，内径32 mmと63 mmの管の材質は塩化ビニール，内径83 mmの管の材質はプラスチックを使用した。鋼材が配置されているときの充填状況を観察するために，内径63 mmの管にはφ26の鋼棒を配置した実験も行うことにした。ただし，今回の実験装置では鋼棒を緊張して配置することが難しいために鋼棒を緊張せずに管底面に配置したままグラウトの注入を行うことにした。注入には，スネーク式およびスクイズ式の電動グラウトポンプを用い，注入ポンプの違いについても検討することにした。それぞれのポンプの性能を表-2に示す。また，電動グラウトポンプを写真-2～3に，実験パラメーターを表-3に示す。スネーク式ポンプの場合，流量を大きく設定することができる。今回の実験において，管径が大きくなると全断面を充填させることが難しくなると予想されたために，流量は各管内に対して充填が行われるような値を筆者らが提案する式<sup>3)</sup>より求めて，設定することにした。今回の実験における流量の範囲は2ℓ/分～180ℓ/分にあり，実際のグラウトの施工における流量5ℓ/分～20ℓ/分<sup>4)</sup>に比べ，かなり速い流速でのグラウト注入も実施しているが，実験では流量が大きくなっても気泡を巻き込むことはなく，グラウトの流動状況および管内の充填状況を観察することができた。

表 - 2 電動ポンプの仕様

形式	スネーク式	スクイズ式
吐出能力	2～417ℓ/min	6～45ℓ/min
最大吐出圧	2.4 MPa	3.5 MPa
動力	3.7 kW	3.7 kW

表 - 3 実験パラメーター

No.	シリーズ 記号	管径 (mm)	流量 (ℓ/min)	鋼材	勾配 (度)	ポンプ形式
1	B	32	3.5	—	—	スネーク式
2	B	32	20.0	—	—	
3	B	32	2.3	—	10	
4	B	63	25.0	—	—	
5	B	63	90.0	—	—	
6	B	63	120.0	—	10	
7	B	83	130.0	—	—	
8	G	63	100.0	—	—	
9	G	63	180.0	—	10	
10	B	63	25.0	φ26	—	スクイズ式
11	G	63	25.0	φ26	—	
12	B	32	6.0	—	10	
13	B	32	2.0	—	10	
14	B	63	7.0	—	10	
15	B	63	7.0	φ26	—	
16	G	63	7.0	φ26	—	

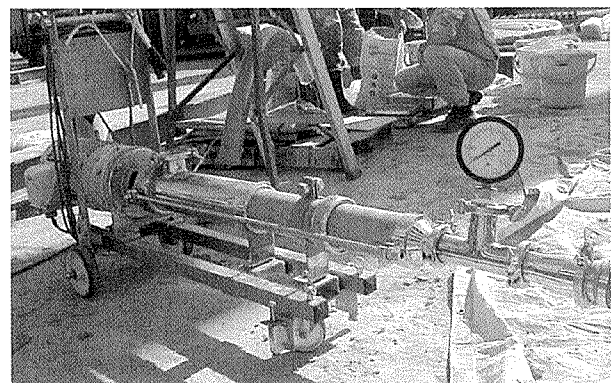


写真 - 2 スネーク式ポンプ

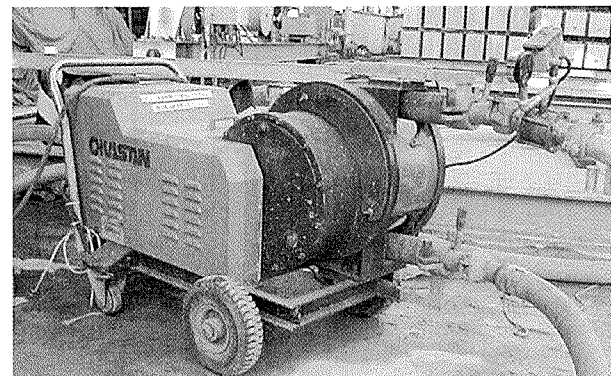


写真 - 3 スクイズ式ポンプ

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 実験結果

グラウトのJ<sub>14</sub>漏斗による流下時間と回転粘度計による粘度の測定結果を表 - 4 に示す。B シリーズおよびG シリーズのJ<sub>14</sub>漏斗における流下時間は5～12秒の範囲にあり、大半のグラウトの流下時間はおよそ9秒であった。この2種のグラウトの流下時間はほぼ同じ値であっても回転粘度計から求めた塑性粘度と降伏値は、それぞれ異なる値を示す結果となっている。B シリーズのグラウトは、G シリーズのグラウトに比べ塑性粘度が約2倍程度大きくなっている。一方、降伏値に関してはおよそ1/4程度になっている。したがって流下時間が同じものでもグラウトの流動特性は異なることを考えることができる。表 - 5 に、各測定点におけるグラウト先端部の角度、流速の計測値およびレイノルズ数の計算結果を示す。今回の実験に用いた管の材質は、塩

化ビニールとプラスチックである。流れが乱流になると、流体は管壁の影響を受けるようになるという一般的ないわれており<sup>5)</sup>、実験結果より求められるグラウトのレイノルズ数を用いて、実験におけるグラウトの流れを調べることとする。グラウトをビンガム流体とみなすとレイノルズ数は、式(1)より求めることができる。

$$Re = \frac{\rho v D (4a\alpha)}{\mu} \quad (1)$$

$$\text{ここに、} a = \frac{\tau_f}{\tau_f + \mu \left(\frac{8v}{D}\right)}, \quad \alpha = \frac{a^4 - 4a + 3}{12a}$$

$\rho$  (kg/m<sup>3</sup>) : 密度,  $v$  (m/s) : 流速,  $D$  (m) : 内径,  $\mu$  (Pa·s) : 塑性粘度,  $\tau_f$  (Pa) : 降伏値

レイノルズ数の計算には、各側定点で測定された流速の中でもっとも大きい流速を用いることにして、式(1)からレイノルズ数を求めると0.3～60.6の範囲にあった。ただし、レイノルズ数の算定において鋼棒が挿入されているものは、除外することにした。円管の場合、 $Re$ が2000以下の流れはつねに層流になるため、この実験におけるグラウトの流動状態は層流であったと判断される。よって、管の材質の違いが流動性におよぼす影響は少ないと考えることができる。

スネーク式ポンプの場合には、グラウトを連続的に注入するので、写真 - 4 に示すように各測定点におけるグラウト先端部には脈動は見られなかった。また、先端角度および流速はほぼ一定になる傾向が認められた。しかし、スクイズ式ポンプの場合には、グラウトを連続的に注入することが難しいので、グラウトは脈動しながら管内を流れ、写真 - 5 に示すように測定点ごとに先端角度が異なる結果と

表 - 4 試験結果

No.	シリーズ 記号	練上り温度 (°C)	T (s)	$\mu$ (Pa·s)	$\tau_f$ (Pa)
1	B	23.6	8.7	5.0	6.0
2	B	22.6	8.7	5.0	6.0
3	B	21.5	8.7	5.0	6.0
4	B	20.6	8.4	5.0	6.0
5	B	23.1	8.5	5.0	6.0
6	B	21.4	4.8	3.0	5.0
7	B	23.1	10	5.0	6.0
8	G	22.6	8.8	2.8	27
9	G	22.0	7.9	2.8	27
10	B	22.8	9.6	5.0	6.0
11	G	21.6	9.8	2.8	27
12	B	21.5	8.3	5.0	6.0
13	B	21.5	8.3	5.0	6.0
14	B	21.5	8.3	5.0	6.0
15	B	20.0	7.6	5.0	6.0
16	G	21.3	12.3	4.0	27

〈備考〉 T : J<sub>14</sub>流下時間,  $\mu$  : 塑性粘度,  $\tau_f$  : 降伏値

表 - 5 充填性試験結果

No.	シリーズ 記号	先端角度 (度)				流速 (cm/s)				Re
		2(m)	4(m)	6(m)	8(m)	2(m)	4(m)	6(m)	8(m)	
1	B	32	38	39	35	7.9	7.2	7.2	6.9	0.9
2	B	53	52	53	52	42.9	41.7	40.5	40.5	5.0
3	B	38	39	38	20	6.3	5.7	5.3	1.7	0.7
4	B	10	8	8	8	12.4	13.2	12.4	10.7	2.8
5	B	25	25	25	27	48.4	48.4	48.4	46.9	10.9
6	B	17	14	14	12	52.0	48.0	60.0	94.0	21.5
7	B	16	18	18	18	38.5	40.5	40.5	40.5	11.9
8	G	21	17	12	17	52.0	83.0	38.0	48.0	31.8
9	G	13	18	18	10	54.0	100.0	150.0	79.0	60.6
10	B	39	39	39	40	14.4	14.3	14.9	14.2	—
11	G	13	30	34	24	11.0	14.7	16.7	18.8	—
12	B	33	35	38	33	11.7	10.3	13.9	10.6	2.9
13	B	34	26	17	11	3.9	3.3	4.3	3.1	0.8
14	B	18	15	19	9	3.8	3.4	3.7	4.0	0.3
15	B	29	39	31	37	4.9	4.5	4.9	4.4	—
16	G	24	24	23	23	4.2	4.2	4.0	4.2	—

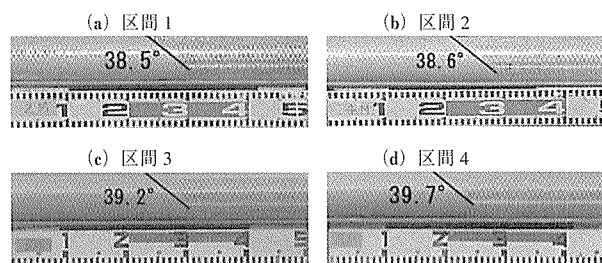


写真 - 4 流動状況  
(No.10 : B シリーズ, D=63, Q=25, 鋼材 φ 26, スネーク式)

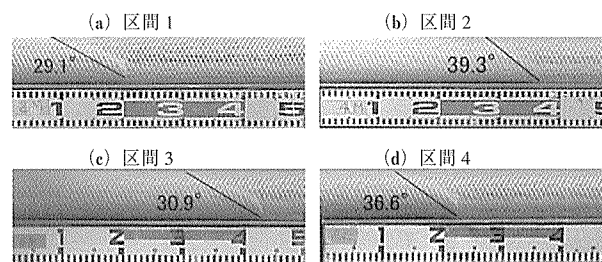


写真 - 5 流動状況  
(No.15 : B シリーズ, D=63, Q=7.0, 鋼材 φ 26, スクイズ式)

なった。また、注入長さによる流速の減少は両ポンプともに認められなかった。

図-2は、鋼棒が配置されている場合のグラウトの流動状況を模式的に示している。管内に鋼棒がある場合には、鋼棒はシース底面に位置するために、グラウトは鋼棒の上部の方が下部よりも流れやすくなり、鋼棒を巻き込むようにして流動するのが観察された。したがって、グラウト先端部では、図-2に示すように「くの字形」になりやすく、先端角度を明確に求めることが難しかった。グラウト先端部において、図-2に示すように鋼棒の上面と管上面のグラウトとの接点を結ぶ直線と鋼材上面とがなす角度を先端角度として測定した場合、鋼材が配置されていない場合に比べて先端角度が大きくなる傾向が認められた。これは、鋼材を配置することで管内を流れる有効断面積が減少すること、グラウトの接地面積が増えるために、内部抵抗が見掛け上増加するためと考えられる。また、グラウトの種類の違いによる管内の流れは、BタイプのグラウトよりもGタイプグラウトの方が脈動は大きくなる傾向が認められた。これは、塑性粘度の違いによる影響ではないかと考えられる。

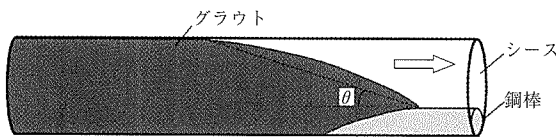


図-2 鋼棒を配置した場合のグラウト流動状況

ポンプ排出口に圧力計を取り付けたが、グラウト注入時に圧力計は内径32mmの管を使用した時にかぎり0.1MPa程度の圧力を示したが、その他の場合には圧力が小さく、用いた圧力ゲージでは精度よく計測することはできなかった。

### 3.2 グラウト先端角度

著者らはグラウト先端部の角度を算定するために式(2)を提案している<sup>3)</sup>。この式は、グラウトの物性と注入条件からグラウト先端角度を求めることができる。

$$\tan \theta = \frac{4 \left( \tau_f \left\{ \mu \frac{v_m}{D} \right\} - \rho g D \sin \alpha \right)}{\rho g D (C_1 + 2C_2)} \quad (2)$$

ただし、 $C_1 = \frac{1}{1 + 0.35 \ln(\mu / \mu_0)}$  ,

$$C_2 = 4.0 \times 10^{-3} \tau_f$$

ここに、 $v$ (m/s)：グラウトの流速、 $D$ (m)：管の内径、 $\alpha$ (rad)：管の傾斜角度、 $\tau_f$ (Pa)：グラウトの降伏値、 $\mu$ (Pa·s)：グラウト塑性粘度、 $\rho$ (kg/m<sup>3</sup>)：密度、 $\mu_0$ (Pa·s)：水の粘性係数、 $g$ (m/s<sup>2</sup>)：重力加速度、 $C_1$ ：静水圧係数、 $C_2$ ：圧力係数

スネーク式ポンプの場合、グラウトの脈動が少なく、流速のばらつきも少ないので流量を断面積で除した値をグラ

表-6 先端角度式の解析結果

No.	シリーズ記号	測定点 (m)	D (mm)	v (cm/s)	$\theta$ cal (度)	$\theta$ exp (度)	$\theta$ exp/ $\theta$ cal	
1	B	2	32	7	22	32	1.5	
		4			22	38	1.8	
		6			22	39	1.8	
		8			22	35	1.6	
2	B	2	32	41	59	53	0.9	
		4			59	52	0.9	
		6			59	53	0.9	
		8			59	52	0.9	
3	B	2	32	5	18	38	2.1	
		4			18	39	2.2	
		6			18	38	2.1	
		8			17	20	1.2	
4	B	2	63	13	11	10	0.9	
		4			11	8	0.8	
		6			11	8	0.7	
		8			11	8	0.7	
5	B	2	63	48	28	25	0.9	
		4			28	25	0.9	
		6			28	25	0.9	
		8			28	27	1.0	
6	B	2	63	64	23	17	0.7	
		4			23	14	0.6	
		6			23	14	0.6	
		8			30	12	0.4	
7	B	2	83	40	15	16	1.1	
		4			15	18	1.2	
		6			15	18	1.2	
		8			15	18	1.2	
8	G	2	63	53	20	21	1.1	
		4			20	17	0.9	
		6			20	12	0.6	
		8			20	17	0.9	
9	G	2	63	96	26	13	0.5	
		4			26	18	0.7	
		6			26	18	0.7	
		8			26	10	0.4	
							平均値	1.0

〈備考〉  $\theta$  cal：先端角度計算値、 $\theta$  exp：先端角度実験値

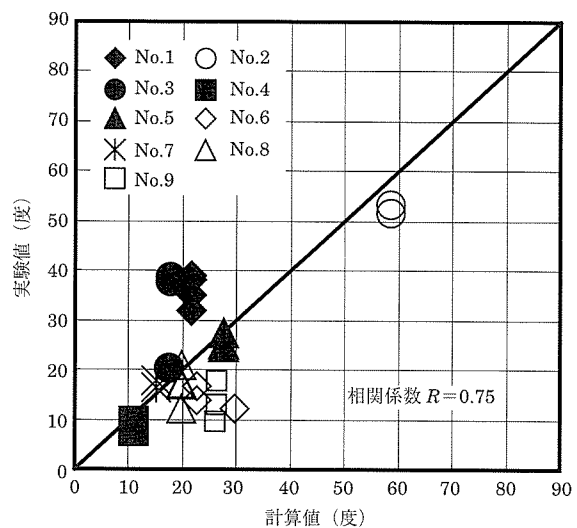


図-3 先端角度の計算値と実験値の関係

ウトの平均流速として、式(2)を用いて求めたグラウト先端角度と実測値の比較を表-6に示す。また、図-3は、スネーク式ポンプを用いた場合のグラウト先端角度の測定値と式(2)から求めた先端角度の計算値を図示したものである。

表-6において、グラウト先端角度の実験値に対する計算値の比の平均値は1.0であるが、ばらつきは大きい結果となっている。これは、グラウト先端部では、管断面中央部のグラウトがやや膨らみ気味になること、および、大型の供試体を撮影するためにビデオカメラの設置位置が管から離れ、解像度が低下したことによって、グラウト先端角度の測定の精度が低下したことが、ばらつきの原因ではないかと考えられる。計算値と実験値との間にばらつきも認められるが、計算結果はある程度実験結果を予測しうると考えられる。

鋼材をシース内に配置した場合の影響については、鋼材を配置しない同径のシースと比べた場合にグラウト先端角度は大きくなる傾向が認められ、実験においても完全な充填が確認された。式(2)は鋼材の影響については考慮されておらず、鋼材を配置した場合のグラウト先端角度を直接求めることはできない。そこで、式(2)から得られる先端角度と実際の実験から得られた角度を比較することにした。鋼材を配置しない場合のグラウト先端角度の計算値に対する、鋼材を配置した場合のグラウト先端角度の実験値との比を求めるとスネーク式ポンプでは平均で3.6、スクイズ式ポンプでは平均で5.6となった。すなわち鋼材を配置した場合には鋼材を配置しない場合よりもグラウト先端角度も3～5倍程度大きくなる傾向があり、鋼材が配置されていることがグラウトの充填性をよくする方向に影響していると考えられる。スクイズ式ポンプの場合、脈動が生じ実験値にばらつきがあったため、計算値との比も大きくなったと考えられる。

#### 4. 結 論

これまで行ってきたグラウトの充填性評価方法が実物大

レベルのグラウト注入においても適用できるかどうかを検証するために今回実験を行った。今回行った実験の範囲で得られた結論は以下のとおりである。

- (1)  $J_{14}$  漏斗による流下時間がほぼ同じであっても、粘性特性が異なるグラウトの場合には、管内における流動性に違いが認められた。
- (2) 実物大レベルのグラウトの充填性試験においても、実験室レベルから構築されたグラウト先端角度の解析値は実験値の傾向を表現しうることが確認できた。
- (3) 管内に鋼棒を配置した場合、鋼棒が配置されていない場合に比べて先端角度が大きくなる傾向が認められた。これは、鋼棒を配置することで管内を流れる有効断面積が減少すること、グラウトの接地面積が増えるために、内部抵抗が見掛け上増加するためと考えられる。

#### 謝 辞

実験に際して、(株)ピーエス三菱の奥山和俊氏、青山敏幸氏、春山漢同氏、また関東学院大学工学部に在学中であった金川史寛、須賀政幸、埜口航平、山口紀彦、依田知久各氏のご協力を得ました。ここに深く感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 出雲淳一：PCグラウトの性能試験方法に関する一考察，プレストレストコンクリート，Vol.42，No.5，2000.9
- 2) 出雲淳一：PCグラウトの充填性能評価の定量化とその施工への適用について，プレストレストコンクリート，Vol.43，pp 104 - pp 109，No.6，2001.
- 3) 水上伸介，出雲淳一：PCグラウトの充填性能評価に関する一考察，プレストレストコンクリート，Vol.43，No.5，pp 71 - pp 80，2001.9
- 4) 社団法人プレストレスト・コンクリート建設協会：PCグラウト&プレグラウトPC鋼材施工マニュアル（改定版），1999
- 5) 例えば，鮭川登：水理学，コロナ社，pp 75 - 77，1987.3

【2003年5月21日受付】