

## PC グラウトの粘性特性とそのモデル化

関東学院大学 工学部 学生会員 ○増田圭佑  
関東学院大学 工学部 正会員 出雲淳一  
太平洋セメント株式会社 正会員 小川彰一

### 1. はじめに

プレストレストコンクリート (以下、PC と呼ぶ) 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果たしている。我が国においても PC グラウトの重要性が再認識されており、PC 技術協会、土木学会などにおいて PC グラウトの確実な充填が行われるための材料の開発、施工システム、検査方法など様々な観点からの検討が行われている<sup>1) 2)</sup>。

最近では、解析技術の発達とともに、グラウトの充填性を流体解析から評価する試みが行われており、PC 技術協会 PC グラウト規準作成委員会などにおいてもグラウトの流体解析の検討が行われている<sup>3)</sup>。グラウトの流体解析では、グラウトは一般に非ニュートン流体として取り扱われ、グラウトのせん断応力-せん断ひずみ速度関係 (以下流動曲線と呼ぶ) は、解析結果に大きく影響を与えるために、流動曲線のモデル化は、解析において重要である。

本研究は、これまで PC 技術協会 PC グラウト規準作成委員会 (品質試験 WG) において行われた各種グラウト材料実験に基づき、各種グラウトの粘性特性を明らかにするとともに、流動曲線のモデル化を行ったものである。

### 2. グラウトの粘性特性

#### 2.1 フレッシュなグラウトの物理的性質

セメント系グラウトは、水を分散媒、セメントを分散質とした2相の懸濁液ということができ、セメントを水に分散させただけでは、それらの比重差からセメントは沈降してグラウト材として必要な均一性を失い、また、セメントが凝集して二次粒子や網目構造となるために流動性が劣ったものとなる。このような問題を解決するために、現行のノンブリーディンググラウトでは、流動性を向上させるセメント分散剤 (減水剤) を添加し、一方でセメントの沈降を抑制するための増粘剤などの混和材料を用い、流動性と分離抵抗性のバランスを取ったものになっている。したがって、フレッシュなグラウトの物理的な性質は、水である分散媒の性質だけでなく、セメント粒子間の相互作用が大きく影響する。そして、水粉体比のみならず混和材料はセメント粒子間の相互作用に影響して、懸濁液であるグラウト全体の挙動を大きく支配する。

#### 2.2 グラウトの粘度測定

グラウトの粘度測定には、B型回転粘度計、ブルックフィールド型回転粘度計 (以下 B.F. 回転粘度計と呼ぶ)、および共軸回転二重円筒型粘度計などが用いられている。B型回転粘度計および B.F. 回転粘度計は、スピンドルの先に付けた円筒または円板を回転させて、円筒または円板に働くトルクを測ることによって粘性が求められる。一方、共軸回転二重円筒型粘度計は、同心二重円筒の中間にグラウトを満たし、外円筒あるいは内円筒を回転させて円筒に作用するトルクを測ることによって粘性が求められる。

現在市販されているノンブリーディンググラウトは、JP 漏斗の流下時間の範囲の違いに応じて、高粘性、低粘性および超低粘性の3タイプに分類されている。これらの3タイプの粘性に対して、様々な種類のグラウトがあり、PC グラウト規準作成委員会 (品質試験 WG) において行われた粘度測定では、高粘性タイプグラウト (呼称 A-1, B-1, D-1, E-1)、低粘性タイプグラウト (呼称 A-2, D-2)、超低粘性タイプのグラウト (呼称 C-1, C-2) の計8種類のグラウトが用いられている。アルファベット A~E は各製造メーカーのグ

ラウトを表しており、その後の数字は、各製造メーカーの異なる種類のグラウトであることを示している。また、粘度の測定には、B型回転粘度計、B.F.回転粘度計、および共軸回転二重円筒型粘度計の3種類が用いられている。

B型回転粘度計の場合には、測定できる回転数は最大で60rpmであり、実際の測定においては13(1/s)程度までのせん断ひずみ速度の範囲の粘度が測定されている。

B.F.回転粘度計の場合には、測定できる回転数は最大で100rpmであり、20(1/s)程度までのせん断ひずみ速度の範囲で粘度が測定されている。また、B型回転粘度計およびB.F.回転粘度計の場合には、スピンドル先端部の形状によっても測定結果が異なる。グラウトの場合、No.3およびNo.4のロータを用いて測定が行われているが、すべてのグラウト試料に対して、安定した測定が行われたNo.4による測定結果について、ここでは検討を行うことにした。

一方、共軸回転二重円筒型粘度計の場合には、図-1に示すような载荷履歴で粘性が測定されている。せん断ひずみ速度は250(1/s)程度までの範囲の粘度が測定されているが、測定試料の中には、図-2に示すような流動曲線が観察され、トルクの測定限界を超えた例も見受けられ、载荷履歴の設定については検討の余地があると考えられる。

3. 流動曲線

3.1 B型回転粘度計、B.F.回転粘度計

B型回転粘度計およびB.F.回転粘度計の場合、粘度の測定原理が同じで、測定範囲も同程度である。同じグラウト試料に対して、これらの回転粘度計で測定した場合の測定点と、その回帰直線の一例を図-3に示す。この2つのタイプの粘度計による測定結果の相関性はよい。また、せん断応力-せん断ひずみ速度の関係はほぼ直線で表され、グラウトがビンガム流体としての挙動を示していると判断される。実験に使用されたすべてのグラウトに対して、B型回転粘度計およびB.F.回転粘度計で求められた測定結果を直線近似で表した場合（すなわち、ビンガム流体を仮定した場合）に求められる降伏値および塑性粘度の値をプロットしたのが、図-4および図-5である。B型回転粘度計およびB.F.回転粘度計で求められた降伏値および塑性粘度の相関性は高いことが理解される。今回実験に使用したグラウトは、20(1/s)程度まで

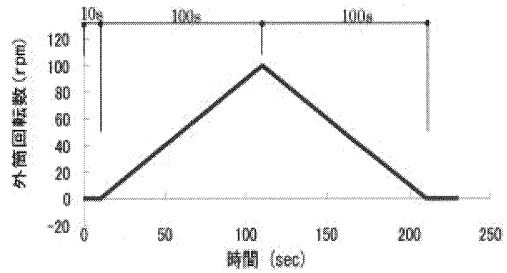


図-1 共軸回転二重円筒型粘度計の载荷履歴

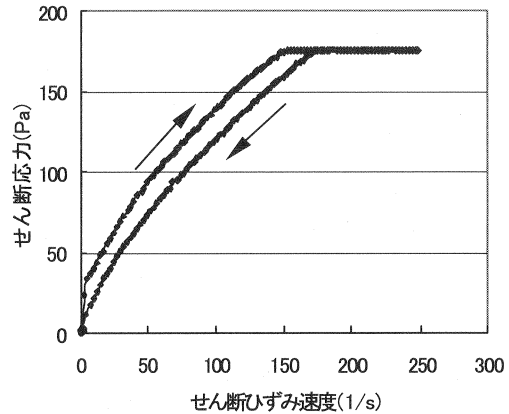


図-2 流動曲線の測定例

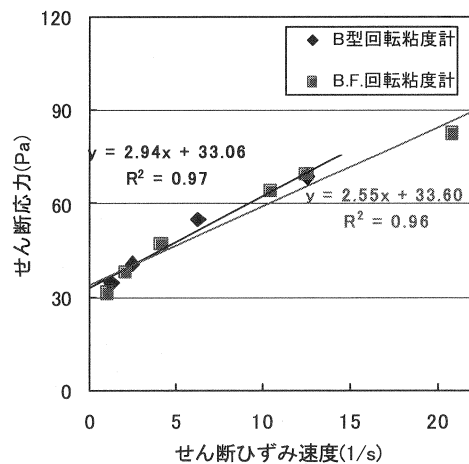


図-3 せん断応力-せん断ひずみ速度の関係 (B型・B.F.回転粘度計)

のせん断ひずみ速度の範囲においては、ビンガム流体を仮定することができると考えられ、また B 型回転粘度計および B.F. 回転粘度計から求めた粘度の測定結果の差はあまりないと判断される。

今回の実験では、各種グラウトの混和剤量は一定にして、水粉体比のみを変化させた場合の粘性の測定が行われている。各グラウトをビンガム流体と仮定して求めた降伏値、および塑性粘度と粉体水比 (P/W) との関係を図-6~7にまとめて示している。降伏値、および塑性粘度を粉体水比 (P/W) との関係で整理したのは、P→0 の場合、水の性質に近づき、P/W の増加に対して降伏値、および塑性粘度の増加がほぼ線形の関係が認められたためである。図-6~7からは、粉体水比 (P/W) が増加するのに伴い、降伏値および塑性粘度は増加する傾向が認められ、粉体の相対的な増加はグラウトの降伏値ならびに粘性を増加させることに寄与していると考えられる。しかし、各種グラウトは、適用される P/W の違いによって特徴付けられ、降伏値および塑性粘度の増加の傾向も異なる。

A および B タイプのグラウトは、P/W が他のグラウトに比べて小さい領域にあり、水に対する粉体量が相対的に少ない。これらのグラウトの場合、ブリーディングを抑制するために増粘剤を用い、流動性をセメント分散剤で調整する配合設計になっているのではないかと推測される。したがって、粉体量の増加が降伏値や塑性粘度に及ぼす影響も他のグラウトに比べて大きくなったものと考えられる。

一方、C および D タイプのグラウトの場合、P/W は他のグラウトに比べて大きい領域にある。P/W が比較的大きいのは、ブリーディングを抑制するために極力水の量を減らし、一方で流動性を持たせるために、セメント分散剤の効果を利用する配合設計になっているのではないかと考えられる。したがって、粉体量の増加が降伏値や塑性粘度に及ぼす影響も他のグラウトに比べて緩やかな傾向になったものと考えられる。E タイプのグラウトは、A および B タイプのグラウトと C および D タイプのグラウトのおよそ中間の位置に P/W がある。E タイプのグラウトの場合、ブリーディング抑制のためにセメント以外の粉体も利用しているために、粉体量が相対的に増加しているものと考えられる。この場合、セメント量の増加は、塑性粘度に影響するものの、降伏値への影響は緩やかなものとなっている。

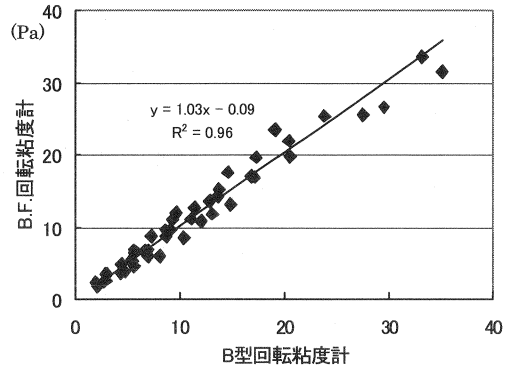


図-4 相関関係 (降伏値)

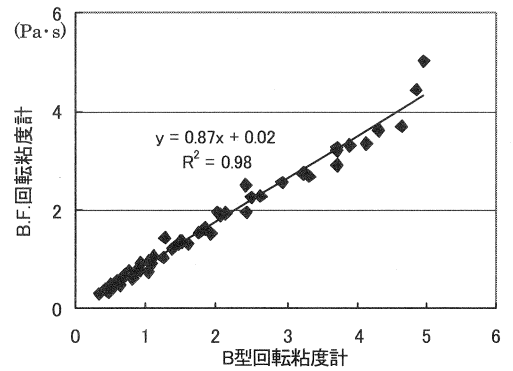


図-5 相関関係 (塑性粘度)

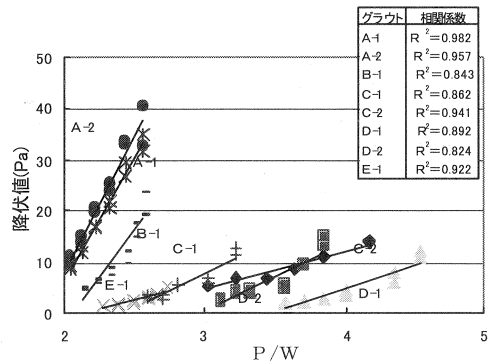


図-6 降伏値と P/W との関係

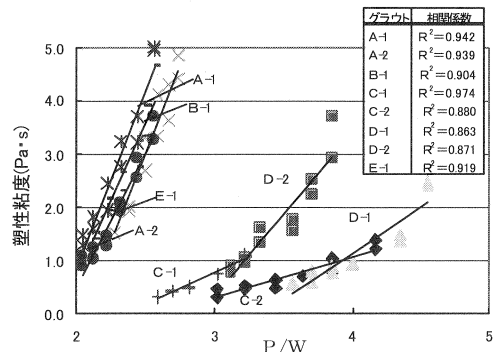


図-7 塑性粘度と P/W との関係

表-1 グラウトの降伏値と塑性粘度とP/Wとの関係 (B型, B.F. 回転粘度計)

粘性	グラウト	降伏値 ( $\tau_f$ )	R <sup>2</sup>	塑性粘度 ( $\mu$ )	R <sup>2</sup>
超低粘性	C-1	13.4(P/W)-32.4	0.989	1.2(P/W)-2.9	0.998
	C-2	7.6(P/W)-18.2	0.997	0.8(P/W)-2.0	0.934
低粘性	A-2	52.6(P/W)-97.1	0.943	5.0(P/W)-9.4	0.977
	D-1	9.4(P/W)-32.9	0.977	1.7(P/W)-5.8	0.985
高粘性	A-1	47.1(P/W)-87.6	0.978	6.6(P/W)-12.4	0.973
	B-1	35.7(P/W)-73.2	0.999	5.9(P/W)-11.2	0.994
	D-2	13.9(P/W)-41.5	0.972	3.1(P/W)-90.7	0.988
	E-1	39.0(P/W)-83.2	0.948	6.5(P/W)-13.1	0.968

水に対する粉体量が比較的低いA, BおよびEタイプのグラウトに粘性の高いグラウトが多く、逆に水に対する粉体量が比較的高いCおよびDタイプのグラウトが超低粘性, 低粘性グラウトとなっているのが特徴のようである。各種グラウトの降伏値および塑性粘度がP/Wと線形の関係があると仮定した場合の回帰曲線式を表-1に示している。各グラウトに対する降伏値および塑性粘度とP/Wとの間には強い相関関係が認められる。

3.2 共軸回転二重円筒型粘度計

図-8~10に、共軸回転二重円筒型粘度計で測定された各グラウトの流動曲線の例を粘性タイプごとに示している。せん断ひずみ速度の測定範囲が広い共軸回転二重円筒型粘度計の場合、グラウトの種類によっては直線よりも曲線で近似した方が、その特性をよく表すと考えられる。すなわち、測定されるせん断ひずみ速度の範囲が250(1/s)程度までに及ぶと、グラウトの種類によってはせん断ひずみ速度の影響を受ける傾向が認められるようになってくる。図-8に示したCタイプ、および図-9に示したAタイプのグラウトの場合のようにせん断ひずみ速度が小さい領域において、粘度が見掛け上一旦高くなるが、その後粘性が低下してさらに増加する傾向が認められるものもある。このような傾向は、高炉セメントを用いた場合にも、観察されている。これは低速の回転域での安定した粘性の測定が難しいことやグラウトの二次的な構造破壊による影響ではないかと考えられる。図-8~10に示したこれらのグラウトの中には、行き帰りの履歴曲線が異なり、ループを描くものも見受けられる。また、流動曲線の形状は、下に凸な傾向や、上に凸な傾向であったり、グラウトの種類によって様々であり、高粘性, 低粘性などの粘性タイプよりも、むしろ各種グラウト材料の特徴に応じて流動曲線がモデル化されるべきと考えられる。

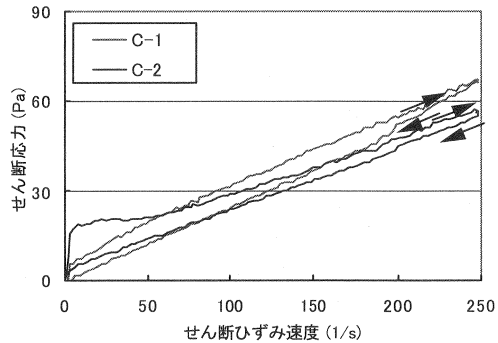


図-8 超低粘性グラウト

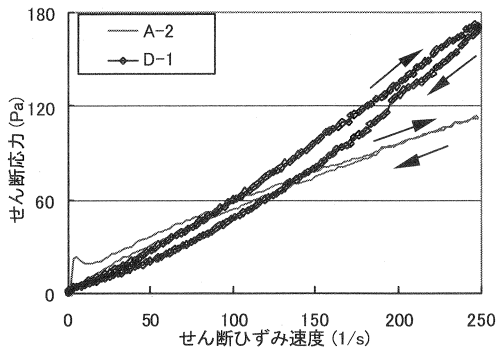


図-9 低粘性グラウト

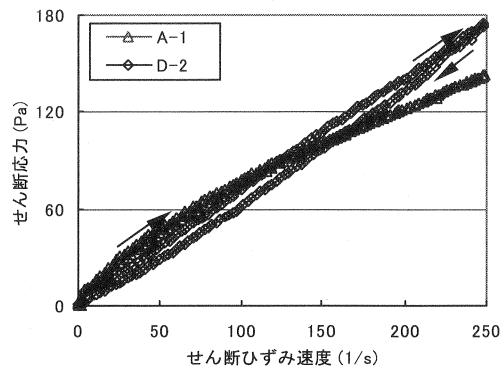


図-10 高粘性グラウト

共軸回転二重円筒型粘度計による測定結果に基づいて、各種グラウトの流動曲線をモデル化することにした。ただし、測定された流動曲線の中には、すべりが発生したと考えられる測定結果もある。すべりが生じると、除荷時の流動曲線に影響を与えるために、ここでは行きの流動曲線のみを検討の対象とすることにした。また、せん断ひずみ速度が小さい領域において、粘度が見掛け上高くなる不安定な領域は無視することにした。各グラウトのモデル化は、式(1)で表されるようなべき乗モデルを用いることにした。n=1の場合、ビンガム流体となる。

$$\tau = \tau_f + \mu \left( \frac{d\gamma}{dt} \right)^n \tag{1}$$

ここに、 $\tau$ はせん断応力 (Pa)、 $\tau_f$ は降伏値 (Pa)、 $\mu$ は塑性粘度 (Pa・s)、 $\gamma$ はせん断ひずみ、 $t$ は時間である

降伏値および塑性粘度は、B型回転粘度計の測定結果の整理と同様に、P/Wの関数として回帰曲線を求めることにした。回帰曲線としては、直線近似よりも指数関数の方が相関性がよいことから、指数関数を採用している。各種グラウトを式(1)で近似した場合の、降伏値、塑性粘度、nの値を表-2に示しており、実験結果とモデルから求められるせん断応力との相関係数を示している。超低粘性タイプから高粘性タイプまでの流動曲線モデルが、実験結果と整合性が良いことが理解される。A、およびEタイプのグラウトの場合、n<1となり流動曲線は上に凸の傾向となることを示している。一方、D-1タイプのグラウトは、n>1となり、下に凸の傾向となっている。また、B、CおよびD-2タイプのグラウトは、ビンガムとしてモデル化できると考えられる。

共軸回転二重円筒型粘度計の測定結果に基づいて、モデル化された各グラウトの流動曲線とB型およびB.F.型回転粘度計からモデル化された流動曲線とを比較するために、各モデルから求められる降伏値、B型粘度計およびB.F.型回転粘度計の測定範囲にあるせん断ひずみ速度10(1/s)および20(1/s)のせん断応力の値の比を求めることにした。各グラウトごとに、実験で用いられたW/Pに対して、降伏値、せん断ひずみ速度が10(1/sec)および20(1/sec)のせん断応力を求め、その平均値を求めた。さらに、共軸回転二重円筒型粘度計からモデル化された値を、B型およびB.F.型回転粘度計からモデル化された値で除した結果をグラウトごとに図-11に示している。降伏値に関しては、B型およびB.F.型粘度計からビンガム流体を仮定して求めた値と共軸回転二重円筒型粘度計からべき乗モデルを仮定して求めた値とでは、ばらつきが認められる。特に、B、D-2およびEタイプのような高粘性タイプのグラウトの場合、べき乗モデルは、ビンガムモデルよりも高くなる傾向が認められる。一方、A、CおよびD-1のタイプのグラウトの場合、べき乗モデルは、ビンガ

表-2 グラウトの降伏値と塑性粘度とP/Wとの関係 (共軸回転二重円筒型粘度計)

粘性の種類	グラウトの呼称	n	降伏値 ( $\tau_f$ )	R <sup>2</sup>	塑性粘度 ( $\mu$ )	R <sup>2</sup>	実験値と計算値 モデル: R <sup>2</sup>
超低粘性	C-1	1.00	$1.0 \times 10^{-3} e^{2.63(P/W)}$	0.844	$2.0 \times 10^{-3} e^{1.92(P/W)}$	0.992	0.971
	C-2	1.00	$2.7 \times 10^{-2} e^{1.57(P/W)}$	0.921	$3.0 \times 10^{-3} e^{1.05(P/W)}$	0.915	0.959
低粘性	A-2	0.80	$1.0 \times 10^{-3} e^{4.25(P/W)}$	0.903	$1.1 \times 10^{-2} e^{2.26(P/W)}$	0.993	0.981
	D-1	1.12	$7.0 \times 10^{-2} e^{0.99(P/W)}$	1.000	$1.0 \times 10^{-3} e^{1.83(P/W)}$	0.999	0.936
高粘性	A-1	0.76	$2.8 \times 10^{-1} e^{1.59(P/W)}$	0.922	$2.2 \times 10^{-2} e^{2.20(P/W)}$	0.977	0.893
	B-1	1.00	$4.3 \times 10^{-1} e^{1.82(P/W)}$	0.883	$3.0 \times 10^{-4} e^{3.25(P/W)}$	0.977	0.973
	D-2	1.00	$1.0 \times 10^{-3} e^{2.63(P/W)}$	0.844	$1.4 \times 10^{-3} e^{1.91(P/W)}$	0.899	0.934
	E-1	0.83	$8.4 \times 10^{-2} e^{2.34(P/W)}$	0.982	$1.2 \times 10^{-3} e^{3.02(P/W)}$	0.986	0.973

ムモデルよりも低くなる傾向が認められる。真の降伏値を測定から求めることは難しく、測定データの外挿による統計処理から降伏値が求められるが、測定領域の広い共軸回転二重円筒型粘度計と、測定領域の狭い B 型および B.F.型回転粘度計から降伏値を求めた場合とでは、その値は敏感に影響を受けるものと考えられる。せん断ひずみ速度 10(1/s) および 20(1/s) のせん断応力の値の比に関しては降伏値ほどのばらつきはなく、ベキ乗モデルから求めたせん断応力は、ビンガムモデルよりも低めの値を与える結果となっている。フロー試験の流体解析のように、降伏値が解析に影響を及ぼす場合、共軸回転二重円筒型粘度計からモデル化した流動曲線を用いるか、B 型および B.F.型回転粘度計からモデル化した流動曲線を用いるかについては慎重に検討する必要があると考えられる。一方、漏斗試験の流体解析の場合には、共軸回転二重円筒型粘度計と B 型および B.F.型回転粘度計によるモデル化の解析結果に及ぼす影響は少ないのではないかと考えられる。

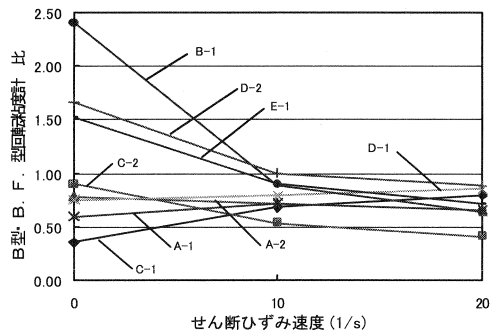


図-11 粘性モデルの比較値

#### 4. おわりに

粘性特性の異なる各種グラウトの流動曲線のモデル化を B 型回転粘度計、B.F.型回転粘度計および共軸回転二重円筒型粘度計による測定結果に基づき行った。今回の検討について以下のことが結論として得られた。

- (1) B 型回転粘度計と B.F.型回転粘度計から求めた粘度の測定結果の相関性は高く、このタイプの粘度測定の違いは認められなかった。
- (2) 今回測定を行ったグラウトに関しては、B 型回転粘度計と B.F.型回転粘度計から流動曲線を求めた場合、ビンガム流体としてモデル化しても実用上差し支えない。
- (3) 共軸回転二重円筒型粘度計のように広範囲の領域までの粘度を測定した場合、グラウトによっては、上あるいは下に凸な傾向が認められ、これらの傾向をベキ乗モデルで表すことができることが示された。
- (4) 共軸回転二重円筒型粘度計と B 型回転粘度計および B.F.型回転粘度計から流動曲線をモデル化する場合、その違いは降伏値に敏感に反映される。

#### 謝辞

本研究を行うに際し、PC 技術協会 PC グラウト規準作成委員会 (品質試験 WG) で実施された実験データを利用しました。ここに、紙面を借りて、お礼申し上げます。また、本研究の一部は、文部科学省学術フロンティア推進事業 (平成 16 年度～平成 20 年度) の補助を受けて行われたことを付記します。

#### 参考文献

- 1) 社団法人 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.52 PC 構造物の現状の問題点とその対策，2003.6
- 2) 社団法人 プレストレスト・コンクリート建設業協会：PC グラウト&プレグラウト PC 鋼材施工マニュアル (改訂版)，2002
- 3) 高瀬慎介，出雲淳一，堤 忠彦，熊井 規：PC グラウト流体解析の JP 漏斗試験への適用に関する研究，第 13 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集，pp. 179-182，2004 年 10 月