

論文 高炉スラグ微粉末を混入した PC グラウトの流動性および充填性

桐川 潔^{*1}・出雲 淳一^{*2}・岩永 豊司^{*3}・鈴木 雅博^{*4}

要旨：ブレン値が $10,000\text{cm}^2/\text{g}$ を超えるような高炉スラグ微粉末は、グラウト中のポルトランドセメントと置換することにより、見掛けの粘性を増加させるとともに、ブリーディングを減少させるが、従来の高粘性型グラウトに比べ注入時の圧力を増加させない性質を有している。本論文では、高炉スラグ微粉末を用いたグラウトの流動性、充填性および施工性について調べるために、先流れが生じ易い曲げ下り部を模擬した実験装置により注入試験を行った。その結果、高炉スラグ微粉末を 50%程度置換することにより、下り勾配が 30 度の場合においても、先流れが発生せず、低い注入圧力でグラウトを充填できることが確認された。

キーワード：高炉スラグ微粉末、下り勾配、先端角度、注入圧力

1. はじめに

プレストレスコンクリート (PC) グラウトは、PC 鋼材を腐食から守り、コンクリート部材との一体化を図るために極めて重要な役割を果たしている。そのため、PC グラウトが確実に充填される材料や施工システムの開発が必要となっている。特にシース曲げ下り部（以下、下り勾配部）においては、グラウトの先流れによる空隙が発生しやすいため、真空ポンプの併用による施工方法¹⁾なども検討されているが、現状では、粘性の高いグラウトを用いて、施工が行われている。しかし、粘性の高いグラウトの場合、注入区間が長いと、注入圧力がポンプやホースの許容圧力を超えてしまい、シース内でグラウトが閉塞したりグラウト漏れが発生することもあると考えられる。

ブレン値が $10,000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上の高炉スラグ微粉末をセメントと置換したグラウトは、チクソトロピー性を有しており、見掛け上の粘性が高く、先流れが生じにくい、注入時の圧力をそれほど高めない性質を有している。この性質に着目し、下り勾配部を模擬した実験装置により注入試験を行い、高炉スラグ微粉末を混入したグ

ラウトの流動性および充填性についての検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験においては、普通ポルトランドセメント（密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$ 、ブレン値 $3,290\text{cm}^2/\text{g}$ ）、高炉スラグ微粉末（密度 $2.90\text{g}/\text{cm}^3$ 、ブレン値 $12,400\text{cm}^2/\text{g}$ ）、ポリカルボン酸系の粉末状高性能減水剤、増粘剤およびメラミンスルホン酸系化合物と水溶性高分子化合物を主成分とする混和剤を使用してグラウトを製造した。

2.2 配合

1m^3 当たりのグラウトの配合を表-1 に示す。粘性特性の違いや高炉スラグ微粉末の置換量が流動性、および充填性に与える影響を調べるため、高粘性型グラウト、低粘性型グラウト、スラグ置換型グラウト（置換率 40, 50, 60%）の 5 種類のグラウトを製造することにした。スラグ置換型グラウトについては、これまでの予備試験の検討結果から、JIS R 5201 に規定されるフロー試験値が $150 \pm 20\text{mm}$ の範囲内に収まるような配合を選定した。高粘性型グラウトおよび低粘

*1 (株) ピーエス三菱技術本部開発技術部 工修 (正会員)

*2 関東学院大学 工学部社会環境システム学科教授 工博 (正会員)

*3 (株) ポゾリス物産混和剤営業部課長 (正会員)

*4 (株) ピーエス三菱技術本部技術研究所材工研グループ GL 工修 (正会員)

性型グラウトについては、グラウトの配合例²⁾を参考にし配合を選定した。

2.3 練混ぜ方法

グラウトの練混ぜは、回転数 1,000rpm、練混ぜ容量 100 リットルのグラウトミキサを使用し行った。

2.4 実験方法

本試験に使用した実験装置を図-1 および写真-1 に示す。透明な塩化ビニルパイプを用いて、直線部および下り勾配部からなる実験装置を製作した。管底面には PC 鋼線を配置し、電動グラウトポンプにより一定注入量（約 13 リットル/分）でグラウトをこの実験装置に注入して、グラウトの先端角度(図-2)、ポンプの注入圧およびグラウトの充填状況について調べることにした。実験に使用した電動グラウトポンプは、連続的にグラウトが注入できるスネーク式ポンプを採用することにし、注入時の圧力を計測するためにポンプ吐出口に圧力計を取付けた。また、注入時のグラウトの先端角度および平均速度については、直線部に 1 台、および下り勾配部に 2 台のデジタルビデオカメラを計 3 台設置して撮影を行い、実験終了後、撮影したデジタル画像を解析することにより求めた。

2.5 実験パラメータ

本実験のパラメータを表-2 に示す。グラウトタイプの違い、傾斜角、鋼材種類を実験パラメータとし、13 通りの注入試験を行った。下り勾配での流動状況および充填状況の違いがより明

確となるよう、傾斜角については、PC 橋の中で最も曲げ下り角度が大きいと考えられる斜版橋やフィンバック橋の傾斜角を想定し、20 度および 30 度を実験パラメータとした。また、シース径については使用頻度の高い 12T12.7 と、空隙率は同等であるがより先流れの発生しやすい 12T15.2 を実験パラメータとした。

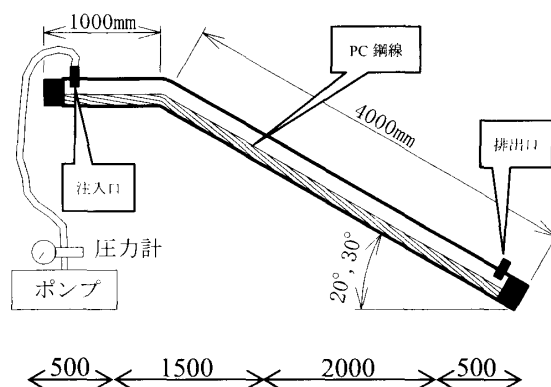


図-1 実験装置概要図



写真-1 実験状況

表-1 グラウト配合 (1m³ 当たり)

試験体 記号	グラウト タイプ	水粉体比 (%)	置換率 (%)	C (kg)	BS (kg)	W (kg)	SP (kg)	SF (kg)	Ad (kg)
B-40	スラグ 置換型	43	40	792	528	567	0.0	26.4	—
B-50		43	50	657	657	565	5.3	19.7	—
B-60		43	60	524	786	563	10.5	13.1	—
HG	高粘性型	42.5	—	1349	—	573	—	—	13.5
LG	低粘性型	44	—	1322	—	582	—	—	13.2

※C：普通ポルトランドセメント，BS：高炉スラグ微粉末，W：水道水，SP：高性能減水剤，

SF：増粘剤，Ad：混和剤

3. 実験結果および考察

3.1 フレッシュ性状

JSCE-F 531-1999 に規定される JP 漏斗を用いた流下時間、フロー試験値および回転粘度計による粘度の測定結果を表-3、各種グラウトのフロー状況を写真-2 に示す。降伏値および塑性粘度については、グラウトをビンガム流体と仮定して、回転数 5,10,20,50,100 rpm の場合に計測された値の直線近似より求めた値である³⁾。スラグ置換型グラウトの場合、JP 漏斗試験ではグラウトが閉塞してしまい計測が行えなかった。また、塑性粘度の値も、高粘性型グラウトよりも高い結果となった。しかし、回転粘度計により求めたずり応力-ずり速度の関係からは、スラグ置換型グラウトは高粘性型グラウトや低粘性型グラウトと違い、ずり速度が増加してもずり応力がそれ程増加しない傾向が認められる(図-3 参照)。すなわち、スラグ置換型グラウトの場合、塑性粘度は一定ではなく、ずり速度の増加に伴い塑性粘度は減少する特徴を有していることが理解される。

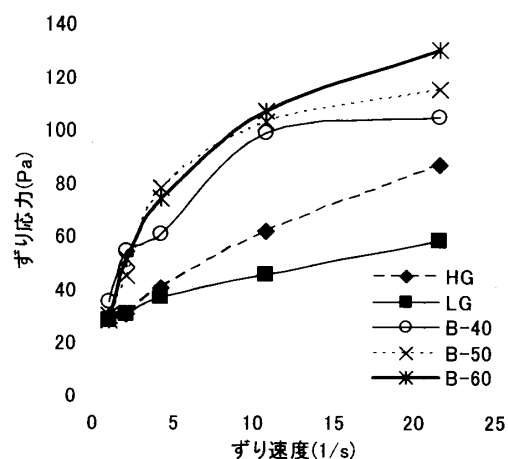


図-3 ずり速度-ずり応力の関係

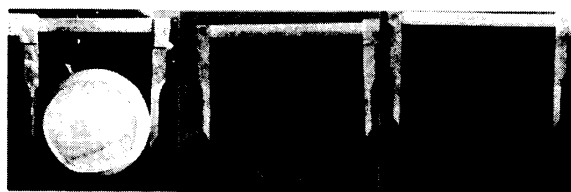


写真-2 スラグ添加型・高粘性型・低粘性型
グラウトのフロー状況

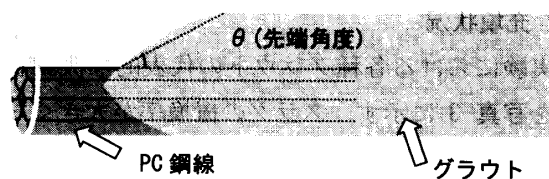


図-2 先端角度の定義

表-2 実験パラメータ

No	試験体 記号	傾斜角 (度)	PC 鋼材	シース内径 (mm)
1	B-40	20	12T12.7	68
2	B-40	30	12T12.7	68
3	B-50	20	12T12.7	68
4	B-50	30	12T12.7	68
5	B-60	20	12T12.7	68
6	B-60	30	12T12.7	68
7	HG	20	12T12.7	68
8	HG	30	12T12.7	68
9	LG	20	12T12.7	68
10	LG	30	12T12.7	68
11	B-40	20	12T15.2	79
12	B-40	30	12T15.2	79
13	B-50	30	12T15.2	79

表-3 フレッシュ性状

No	試験体 記号	流下時間 (秒)	フロー値 (mm×mm)	塑性粘度 (Pa・s)	降伏値 (Pa)
1	B-40	閉塞	155×155	2.9	58.5
2					
3	B-50	閉塞	155×155	3.8	43.4
4					
5	B-60	閉塞	150×155	4.5	41.5
6					
7	HG	20.8	220×230	2.2	44.3
8		18.1	255×255	2.9	26.6
9	LG	11.1	225×225	1.5	27.9
10					
11	B-40	閉塞	155×155	2.9	58.5
12		閉塞	165×170	3.9	50.9
13	B-50	閉塞	150×150	4.0	32.8

3.2 充填状況

実験における各種グラウトの代表的な流動状況を写真-3に示す。スラグの置換率が大きくなるほど、先端角度が大きい傾向が認められる。また、粘性の違いに着目すると、スラグ置換型、高粘性型、低粘性型の順に先端角度が大きい傾向が認められた。空隙については、高粘性型および低粘性型グラウトでは高粘性型グラウトで傾斜角 20 度の場合以外は先流れが発生し、管内に空隙が生じる結果となった。スラグ置換型グラウトについては、すべてのケースにおいて先流れは発生せず、空隙も生じなかった。これは、スラグ添加型グラウトは、これまでの知見³⁾と同様に実験から観察された傾斜部の先端角度が高粘性型グラウトおよび低粘性型グラウトに比べて大きかったために管内に空隙が生じずに充填できたものと考えられる。

3.3 先端角度

デジタル画像により求めた、注入時における各種グラウトの先端角度および出雲・山口⁴⁾が提案する式(1)により求めた先端角度の計算値を表-4に示す。ただし、鋼材を管底面に配置した場合は、鋼材上部と下部のグラウトの間で速度差が生じ、先端部は複雑な形状を示すため、グラウト先端角度の予測式は定式化されていない。そこで、鋼材を中央に配置した場合の先端角度と、管底面に配置した場合の先端角度の比は 0.6 ~ 0.7 倍程度であったことが実験より確認されているため⁴⁾、鋼材が管中央に配置された場合の予測式である式(1)から求めた角度に 0.65 を乗じた値を計算値とした。また、予測式から求めた角度が負になるものは 0 度とした。

$$\tan \theta = \frac{4 \left(\tau_f + \mu \frac{v_m}{D-d} \right) (D+kd)}{\rho g (D^2 - d^2) (C_1 + 2C_2)} - \frac{\sin \alpha}{C_1 + 2C_2} \quad (1)$$

ここに θ はグラウトの先端角度(rad), v_m はグラウトの平均流速(m/s), D は管の内径(m), A は PC 鋼より線の実断面積(m²), d は PC 鋼より線の換算径(m)であり式(2)により求められる。 k は鋼材の種類により周長を補正する係数, ρ はグラウトの密度(kg/m³), g は重力加速度(m/s²), α は管の傾斜角度(rad), τ_f はグラウトの降伏値(Pa), μ はグラウトの塑性粘度(Pa・s), μ_0 は水の粘性係数(Pa・s), C_1 および C_2 は静水圧係数, 圧力係数であり, 式(2)および式(3)により求められる³⁾。

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (2)$$

$$C_1 = \frac{1}{1 + 0.35 \ln \frac{\mu}{\mu_0}} \quad (3)$$

$$C_2 = 4.0 \times 10^{-3} \tau_f \quad (4)$$

表-4 先端角度の測定値と計算値

No	試験体 記号	測定値 先端角度(度)		計算値(直線型) 先端角度(度)	
		水平部	傾斜部 (平均)	水平部	傾斜部
1	B-40	27.1	23.2	37.4	16.0
2	B-40	37.0	7.2	37.0	4.0
3	B-50	47.5	20.4	37.3	10.0
4	B-50	44.5	15.7	37.3	0.0
5	B-60	52.6	25.7	37.6	11.8
6	B-60	36.1	15.2	37.6	0.0
7	HG	35.7	15.1	33.4	6.3
8	HG	-	2.4	30.6	0.0
9	LG	46.6	3.9	28.2	0.0
10	LG	47.8	3.2	27.5	0.0
11	B-40	27.1	21.5	33.0	10.3
12	B-40	24.3	9.1	33.3	0.0
13	B-50	25.3	19.5	30.5	0.0

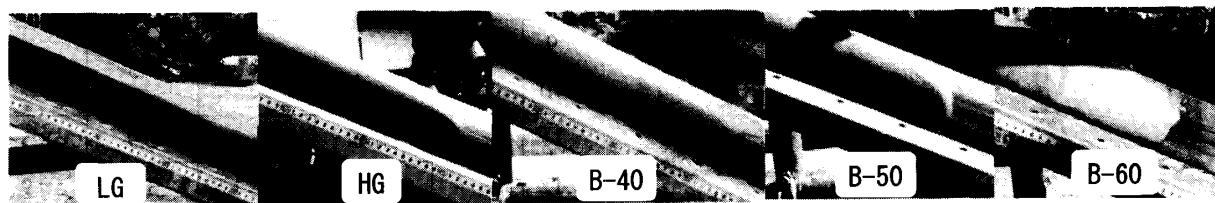


写真-3 先端部 (LG, HG, B-40, B-50, B-60)

低粘性型グラウトおよび高粘性型グラウトの傾斜部の計算値については、先流れの発生した試験 No. において負の値を示し、先流れを予測できていると考えられる。水平部については、低粘性型グラウトにおいて、先端角度が 45 度を超えるような測定値が示されたが、この理由として、粘性が低いと鋼材上部から流れ込むグラウトよりも下部を流れるグラウトで管底面付近が充填され、鋼材上部から管底面にグラウトが流れ込まないためであると考えられる⁴⁾。

スラグ置換型グラウトについては、水平部および傾斜部ともに測定値は、計算値より大きな値を示す結果となった。この理由として、スラグ置換型グラウトの先端部におけるグラウトは一つの塊として移動し、グラウト内部にはあまり大きなずり速度が発生していないため、粘性が見掛け上大きくなり式(1)で算定される先端角度よりも大きくなったのではないかと考えられる。そこで、図-4 に示すように、スラグ置換型グラウトのずり応力とずり速度の関係をバイリニア型に近似し、ずり速度の遅い前半部から求めた塑性粘度および降伏値を使用して先端角度を計算した。計算結果を表-5 に示す。バイリニア型に近似した場合の計算値は水平部、傾斜部共に直線近似した場合の計算値より大きくなり、より測定値に近づく結果となった。図-5, 6 は横軸に先端角度の計算値 (バイリニア型)、縦軸に測定値をプロットしたものであるが、バイリニア型に近似した場合の計算値は、直線近似した場合と比較し、傾斜部に関しては相関係数 $R=0.86$ の変化はなかったものの、水平部の計算値においては、相関係数が $R=0.70$ から $R=0.84$ に変化し、相関関係についてもより高い相関性を示す結果となった。また、水平部の低粘性型および負の値を示した計算結果を除くと、実験データが少ないため判断しがたいが、バイリニア型に近似した場合のスラグ置換型グラウトの計算値は、高粘性型グラウトと同程度のばらつきの範囲内に収まっていると考えられる。

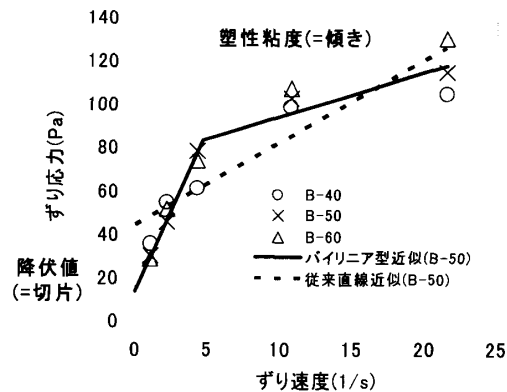


図-4 ずり応力-ずり速度モデル

表-5 先端角度の計算値 (バイリニア型)

No	試験体 記号	計算値 (バイリニア型) 先端角度(度)		計算値 (バイリニア型) 計算値(直線型)	
		水平部	傾斜部	水平部	傾斜部
1	B-40	29.6	13.2	1.2	1.3
2	B-40	28.7	3.4	1.2	1.3
3	B-50	36.5	11.9	1.5	1.8
4	B-50	36.5	0.0	1.5	—
5	B-60	33.3	14.4	1.4	1.9
6	B-60	33.3	0.0	1.4	—
11	B-40	24.8	6.8	1.2	1.0
12	B-40	26.7	0.0	1.2	—
13	B-50	24.8	0.0	1.3	—

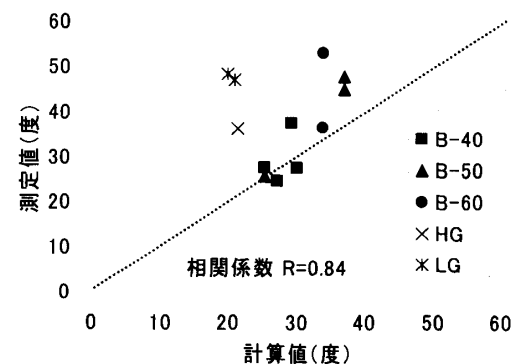


図-5 計算値と測定値の関係 (水平部)
(バイリニア型)

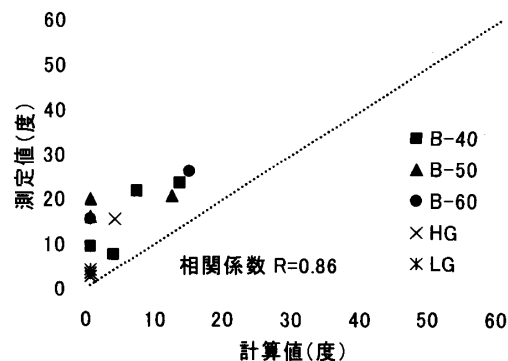


図-6 計算値と測定値の関係 (傾斜部)
(バイリニア型)

3.4 注入圧力

注入試験時におけるグラウトポンプの注入圧力を図-7に示す。高炉スラグ微粉末の置換率が大きくなるに従って、注入圧力が大きい傾向が認められた。これは、スラグ置換率が大きくなるに従って、塑性粘度が増加するためであると考えられる。また、スラグ置換型グラウトは傾斜角度20度における置換率60%のタイプを除けば、高粘性型グラウトよりも注入圧力が小さい結果となった。これは、スラグ置換型グラウトは、ずり速度の増加に伴い粘性が低下する性質を持つため、グラウト注入時には、管内面および鋼材表面と接するグラウトの粘性が流動することによって、高粘性型グラウトよりも粘性が低下し、注入圧力が高粘性型グラウト程上がらなかったと考えられる。

4. まとめ

グラウト注入を模擬した下り勾配部からなる実験装置を用いて実験を行い、高炉スラグ微粉末を用いたグラウトの、流動性および充填性について検討を行った。本実験により、以下のことが結論として得られた。

- (1) ブレーン値 $12,000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度の高炉スラグ微粉末を用いたグラウトの場合、スラグ置換率を大きくすると、粘性が増加する傾向が認められ、傾斜が急な下り勾配においても先流れすることなくグラウトを充填できることが確認された。
- (2) スラグ置換型グラウトの先端角度を、定式化された先端角度の予測式より求める場合、ビンガム流体と仮定するよりも、ずり応力とずり速度の関係をバイリニア型に近似した方が、計算より求めた先端角度と実験値との相関性が良いことが確認された。
- (3) ブレーン値 $12,000\text{cm}^2/\text{g}$ の高炉スラグ微粉末を用いたグラウトの場合、スラグ置換率を大きくすると、グラウトポンプの注入圧力が増加する傾向が認められたが、スラグ置換型グラウトはずり速度の増加に伴い粘

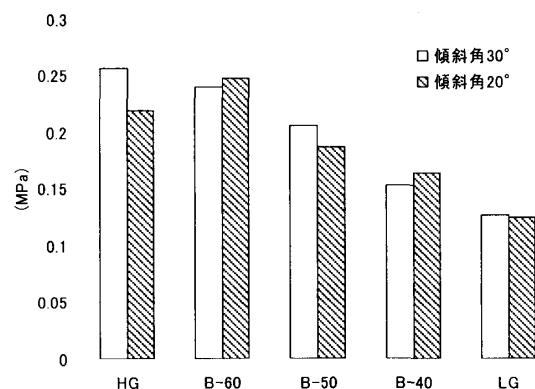


図-7 ポンプ注入時最大圧力

性が低下する性質を持つため、高粘性型グラウト程注入圧力は増加しないことが確認された。

謝辞

本研究を行うにあたり、グラウト材料に関しましては、三菱マテリアル（株）よりご協力を賜りました。また、実験に際しては、関東学院大学の島村健太郎氏、高橋豊氏に助力を受けました。ここに記し、感謝の意を表します。なお、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ものである。

参考文献

- 1) SEEE 協会グラウト特別分科会：真空ポンプを併用した PC グラウト注入工法について、プレストレストコンクリート, Vol.45, No.1, pp.97-104, 2003.1
- 2) PC グラウト&プレグラウト PC 鋼材施工マニュアル（改訂版）、プレストレスト・コンクリート建設業協会、2002.10
- 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.71-80, 2001.9
- 4) 出雲淳一、山口征伸：シース管内の鋼材がグラウトの充填性に及ぼす影響について、プレストレストコンクリート, Vol.46, No.6, pp.84-93, 2004.1