

高炉スラグ微粉末を混入したPCグラウトの流動特性に関する実験的研究

(株) ピーエス三菱 正会員 工学修士 ○桐川 潔
 関東学院大学 正会員 工学博士 出雲 淳一
 (株) ピーエス三菱 正会員 工学修士 鈴木 雅博

1. はじめに

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。特にシーズ曲げ下がり部においては、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、粘性が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、シーズ内でグラウトが閉塞したりグラウトの漏れが発生することも考えられる。

ブレン値が10,000cm²/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、ブリーディングを抑え、見掛けの粘性を増加させるが、流動状態では粘性が減少する性質を有している。そのため、圧力を受けないグラウト先端部では粘性が大きいため、先流れを防ぎ、その他の部分においては粘性が低下し、注入圧力が低下することが予測される。そこで、本研究では曲げ下がり部を模擬した試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充填性能および注入圧力を確認し、既往のグラウト先端部分の角度を指標とした充填性能評価方法²⁾への適用について検討を行った。

2. 試験概要

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 3.16g/cm³, ブレン値 3,290cm²/g)、高炉スラグ微粉末(密度 2.90g/cm³, ブレン値 12,400cm²/g)、ポリカルボン酸系の粉末状高性能減水剤、増粘剤、既往の高粘性型および低粘性型の混和剤を使用してグラウトを製造した。

2.2 配合

1m³当たりのグラウト配合を表-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。

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て行った。

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

2.4 実験方法

本試験に使用した実験装置を図-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曲げ下がり部を模した実験装置を製作し、管底面に PC 鋼線を配置した。この実験装置に、電動グラウトポンプにより一定注入量(約 13 リットル/分)でグラウトを注入して、グラウトの先端角度、ポンプの注入圧力およびグラウトの充填状況について調べることにした。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

グラウトタイプの違い、傾斜角、シース径の異なる 13 通りの注入試験を行った。曲げ下がり部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が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 用シース径と、空隙率は同等であるがより先流れの発生しやすい 12T15.2 用シース径の 2 ケースを実験パラメータとした。

3. 試験結果および考察

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-2、各種グラウトのフロー状況を写真-1 示す。降伏値および塑性粘度は、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²⁾。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-2 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。

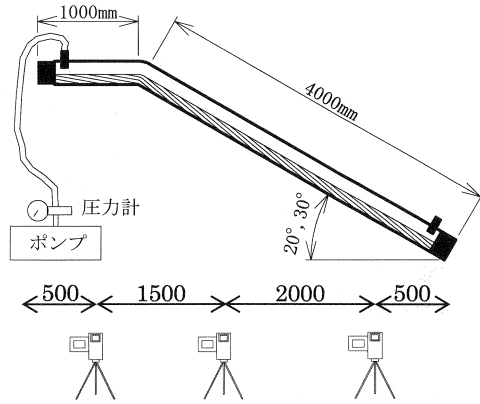


図-1 実験装置概要図

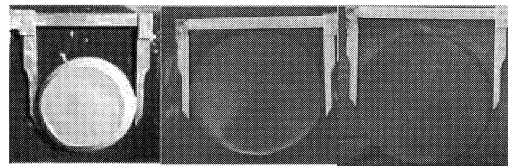


写真-1 スラグ添加型・高粘性型・低粘性型グラウトのフロー状況

3.2 充填状況

スラグの置換率が大きくなるほど、先端角度が大きくなる傾向が認められる。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、高粘性型グラウトで傾斜角 20 度の場合を除き、高粘性型および低粘性型グラウトにおいて先流れが発生し、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

表-2 フレッシュ性状

No	試験体記号	傾斜角(度)	シース径(mm)	流下時間(秒)	フロー値(mm×mm)	塑性粘度(Pa·s)	降伏値(Pa)	
1	B-40	20	68 (内径)	閉塞	155×155	2.9	58.5	
2		30		閉塞	155×155	3.8	43.4	
3		20		閉塞	155×155	4.5	41.5	
4	B-50	30		20.8	220×230	2.2	44.3	
5		20		18.1	255×255	2.9	26.6	
6	B-60	30		11.1	225×225	1.5	27.9	
7		20		閉塞	155×155	2.9	58.5	
8	HG	30		閉塞	165×170	3.9	50.9	
9		20		閉塞	150×150	4	32.8	
10	LG	30		79 (内径)	閉塞	155×155	2.9	58.5
11		20			閉塞	165×170	3.9	50.9
12	30	閉塞			150×150	4	32.8	
13	B-50	20			閉塞	155×155	2.9	58.5
12		30	閉塞		165×170	3.9	50.9	
13		20	閉塞		150×150	4	32.8	

かった。これは、スラグ添加型グラウトは、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、全断面流下となり、管内に空隙が生じず充填できたと考えられる。

3.3 先端角度

充填性能の一指標となる出雲・山口³⁾が提案する先端角度予測式(1)は、ビンガム流体を対象とした力の釣り合いから定式化した式であり、管内面に作用するせん断応力 τ をずり応力—ずり速度関係を式(2)のように直線近似した式として用いている。しかし、スラグ置換型グラウトは、ずり応力—ずり速度関係が直線近似できないため、図-3に示すように、ずり応力—ずり速度関係をバイリニア型、対数型、累乗型に近似し、その近似式より求まる τ を用いて先端角度の計算を行った。ただし、式(1)は鋼材を中央に配置した場合の先端角度式であり、鋼材を管底面に配置した場合、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、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が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³⁾、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。

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

$$\tau = \tau_f + \mu \frac{v_m}{D-d} \quad (2)$$

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(3)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 、 C_2 は静水圧係数、圧力係数であり、式(4)、式(5)により求められる。

$$d = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad (3)$$

$$C_1 = \frac{1}{1 + 0.35 \ln \frac{\mu}{\mu_0}} \quad (4)$$

$$C_2 = 4.0 \times 10^{-3} \tau_f \quad (5)$$

スラグ置換型グラウトにおいては、水平部および傾斜部ともにバイリニア型に近似した場合の計算値が他型に近似した場合の計算値より、

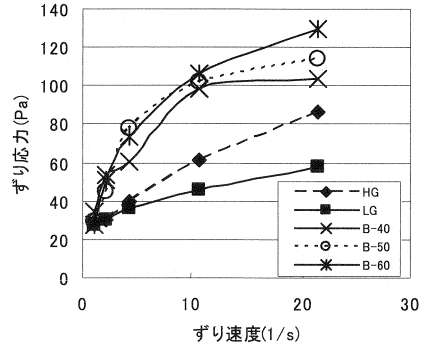


図-2 ずり応力—ずり速度の関係

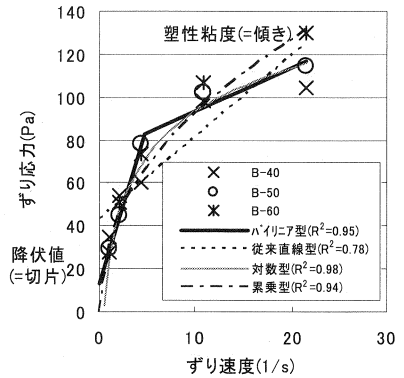


図-3 ずり応力—ずり速度モデル

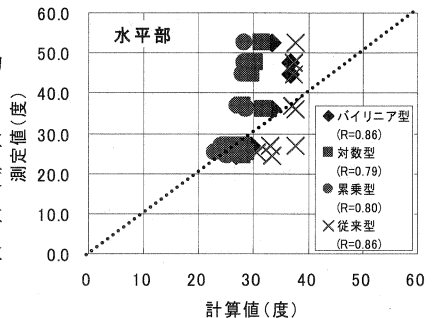


図-4 計算値と測定値の関係 (水平部)

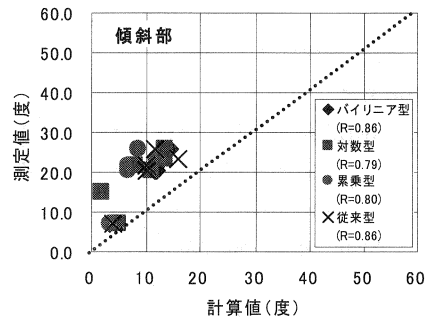


図-5 計算値と測定値の関係 (傾斜部)

より測定値に近づく結果となった。図-4, 5 は横軸に先端角度の計算値, 縦軸に測定値をプロットしたものである。負の値を示す計算値を除き, 相関係数を比較してみると, 水平部, 傾斜部共にバイリニア型に近似し求めた計算値が最も高い相関性を示す結果となった。

しかし, 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はチキソトロピー性を有するため, 非加圧状態でグラウトの先端部は時間の経過により粘性が回復し, 一つの塊として移動することとなり, グラウト先端部にはあまり大きなずり速度が発生せず, 粘性が更に見掛け上大きくなったのではないかと考えられる。

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-6 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, 注入圧力は大きくなる傾向が認められる。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。しかし, スラグ置換型グラウトの塑性粘度は高粘性型グラウトよりも大きいにも関わらず, 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は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があり, 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低下し, 注入圧力が高粘性型グラウト程に上がらなかったものと考えられる。

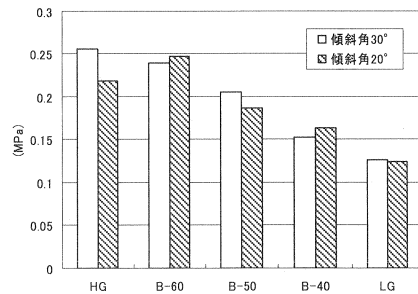


図-6 ポンプ注入時最大圧力

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 12,000cm²/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 12,000cm²/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。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) 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
- 3) 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