

高い構造粘性を有するPCグラウト材の配合設計

宇部興産(株) 正会員 工修 ○宮本 一輝
 宇部興産(株) 工博 高橋 恵輔
 極東興和(株) 正会員 工博 河金 甲

Abstract : Generation of residual air voids after grouting needs to be prevent as it causes steel colosion. This study described mix design of the PC grout that has a strong structure viscosity in order to avoid the generation of residual air voids, and that does not require to install vents between inlet and outlet. A rheograph, which is a vectorized visible approach of mix design, demonstrated that the use of ultra fine inorganic powder and a specific type of methylcellulose effectively increased structure viscosity and decreased bleeding of the PC grout. Results of field tests showed good filling properties and pumpability of the PC grout.

Key words : Plastic viscosity, Yield stress, PC grout, Rheograph

1. はじめに

ポストテンション方式のPC構造物において、シース内に未充填箇所が生成する要因として、充填したPCグラウトの先流れやブリーディングがある。先流れとは、図-1で表されるように、PCグラウトをシース内に充填した際、下り勾配においてPCグラウトの先端部が先行した状態で水平部まで到達したとき、シース上面が充填されておらず、残留空気が生じる現象のことである。

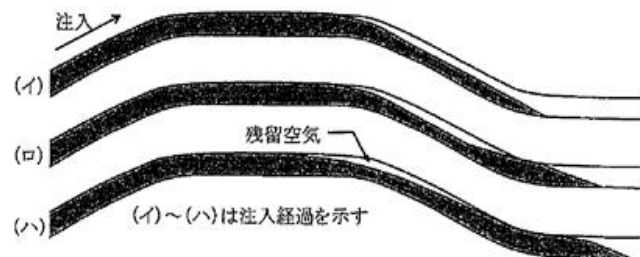


図-1 PC グラウトの先流れ¹⁾

ブリーディングとは、シースに充填されたPCグラウトが硬化する前に、構成材料の分離や沈降により遊離した水がシース上部に溜まったのち、水の消失により残留空気が生成する現象のことである。これらの残留空気が生じる箇所では、PC鋼材の表面に十分な不動態皮膜が形成されず、雨水や酸素の侵入によるPC鋼材の腐食や破断が原因となって、PC構造物の耐久性が低下する恐れがある。PCグラウトの粘度を高めれば先流れやブリーディングを低減することができるが、粘度が高すぎるとポンプやホースに作用する圧力が高くなり、汎用的な設備や機器を用いた施工が困難になる。なお、ポンプ圧力が2.0MPa以下、注入ホースに作用する圧力が0.8MPa以下であれば、既存の設備や機器を用いることができる²⁾。

既往のPCグラウトは、適度な圧力で注入できる粘弾性体であり、ブリーディングを生じないが、10度程度の下り勾配で先流れする²⁾。PCグラウト注入時に先流れが予想される場合、空隙が残留しやすい頭頂部付近に予め中間排気口を設けるなど、施工方法を工夫して残留空気の発生を防いでいる。以上を考慮すると、PCグラウトの配合設計には、下り勾配部において先流れしにくく、注入圧力が小さい、すなわち、高い構造粘性と、ブリーディングの抑制が必要となる。高い構造粘性を有し、ブリーディングが抑制できるPCグラウトは、残留空気によって構造物の耐久性が低下する懸念を解消できる。さらに、下り勾配部における中間排気口が不要となることから、グラウトホースを介した構造物内部への水分侵入の懸念も解消できる。

PCグラウトのような高濃度懸濁液は、降伏値と塑性粘度により流動特性を表すビンガム流体に近似できる。たとえば、降伏値の高い材料ほど先流れが抑制でき、塑性粘度が低い材料ほどポンプ注入時の注入圧力を低減できる。加藤らの流体解析では、適度な降伏値と塑性粘度を有するPCグラウトを用いれば、下り15度勾配でも先流れを生じにくく、シース内を均一に充填できることが示唆されている³⁾。

本研究では、まず初めに、混和材料がPCグラウトの流動特性やブリーディングに与える影響を測定した結果をもとに、Wallevikらが

提唱するレオグラフ⁴⁾を活用して、高い構造粘性を有しつつブリーディングを抑制できるPCグラウトの配合を設計した。図-2に、自己充填コンクリートの空気量 (Air) , 混練水量 (Water) , シリカフューム (SF) および流動化剤 (SP) の添加量が塑性粘度 (μ) と降伏値 (τ_0) に与える影響を一つのグラフ上に表したレオグラフ⁴⁾を示す。たとえば空気量を増やすことで、降伏値を変化させずに、塑性粘度を低下させることができる。一方、流動化剤を増やすことで、塑性粘度を変化させずに、降伏値を下げるることができる。このように、レオグラフを活用することで、混和材料の種類や添加量が複数の材料特性に与える影響を可視的に効率良く理解することができる。

次に、実物大規模の試験体を用いた注入実験を行い、高い構造粘性を有するPCグラウトの先流れ抵抗性、ポンプ注入圧力およびシース内の充填性を測定した結果を報告する。

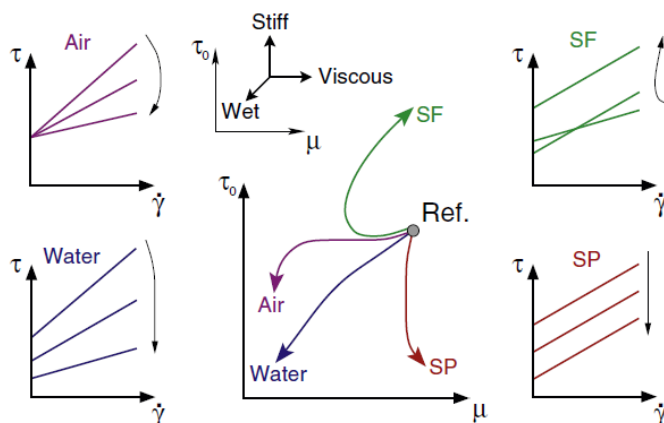


図-2 各種要因が流動特性に与える影響⁴⁾

2. 試験の概要

2.1 試験配合

ポルトランドセメント、ポリカルボン酸系流動化剤および表-1に示す混和材料を乾式混合した粉体と水道水を、攪拌機を使用して2分間混練してPCグラウトを調製した(水粉体比40%)。表-1に混和材料の種類と総粉体重量に対する内割りの添加率を示す。BET比表面積 $20\text{m}^2/\text{g}$ の鉍物質超微粉末を無機粉末Aとし、ブレン比表面積 $8500\text{cm}^2/\text{g}$ の鉍物質微粉末を無機粉末Bとした。アクリルアミド系吸水ポリマーおよびメチルセルロース系増粘剤の1%溶液の粘度はそれぞれ $2200\text{mPa}\cdot\text{s}$ および $7\text{mPa}\cdot\text{s}$ であった。

表-1 混和材料の種類と添加量

混和材料の種類	添加率 (%)
無機粉末 A (鉍物質超微粉末)	3.20, 9.60
無機粉末 B (鉍物質微粉末)	3.20
アクリルアミド系 吸水ポリマー	0.10
メチルセルロース系 増粘剤	0.10, 0.18, 0.28, 0.38

2.2 降伏値および塑性粘度の測定

共軸二重円筒型レオストレスマーターを用いて、せん断速度を 0s^{-1} から 50s^{-1} まで対数上昇後、 50s^{-1} から 0s^{-1} まで対数下降させて、流動曲線を得た。凝集していない状態のPCグラウトの降伏値および塑性粘度を測定するために、同様の操作をもう一回繰り返して、得られた流動曲線の戻り曲線を用いて、降伏値および塑性粘度を求めた。本研究では、塗料のタレ性評価⁵⁾を参考にして、せん断速度 0.1s^{-1} のときのせん断応力値を降伏値とした。また、ポンプ注入時にPCグラウトに作用するせん断速度を 30s^{-1} 程度と考えて、せん断速度 30s^{-1} のときのせん断応力値をせん断速度で除した値を塑性粘度とした。図-3に流動曲線の測定例を示す。試料調製および各種測定は $20^\circ\text{C}65\%RH$ の恒温恒湿室にて行い、3

回以上再現性を確認した。

2.3 ブリーディング率測定

混練した直後のPCグラウト400mlを直径100mm、高さ100mmの円筒状容器に流し込み、PCグラウト表面に浮いたブリーディング水をピペットで採取した。ブリーディング水の採取は、流し込み後から30分間隔で最大24時間まで行い、採取したブリーディング水の積算体積をPCグラウトの体積で除した値をブリーディング率とした。試料調製および各種測定は20°C65%RHの恒温恒湿室にて行い、3回以上再現性を確認した。

2.4 注入実験

本研究では、傾斜部を想定した試験体および実際の施工を模擬した実物大試験体を用いて注入実験を行った。図-4に傾斜部を想定した試験体を示す。内径70mm、長さ3mの半透明のポリエチレン製シースを用い、シース内底部にPC鋼より線12S12.7を配置した。シースの傾斜は、過去に試験された実物大試験体⁶⁾において、既存のPCグラウトでは先流れが確認された15度とした。混練したPCグラウトを試験体上端に設置したグラウトホースからPCグラウトを注入して、先流れ抵抗性を測定した。実験には高い構造粘性を有する開発品と市販のPCグラウト材料（高粘性型）を用いて調製したPCグラウトAの2種類のPCグラウトを用いた。

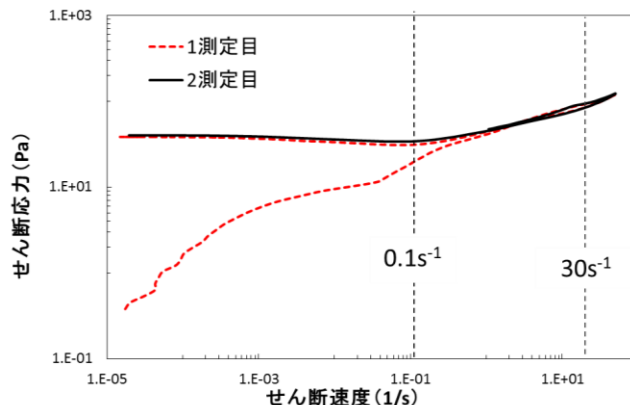


図-3 流動曲線の測定例

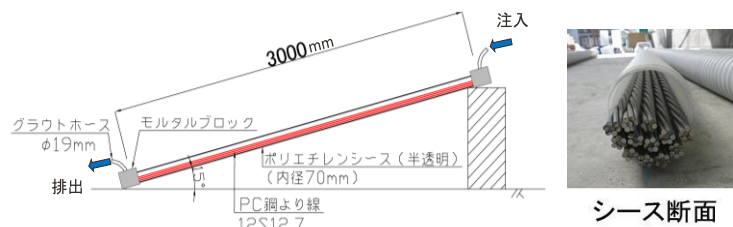


図-4 傾斜部を想定した試験体とシース断面

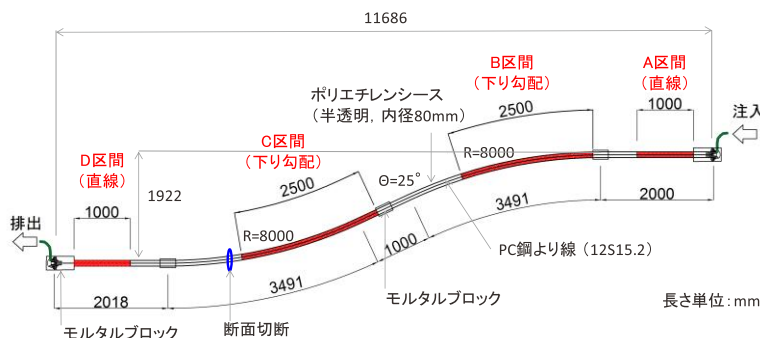


図-5 実施工を模擬した実物大試験体

注入にはスクイズ式ポンプを用い、実施工で想定される最小吐出量5 L/minに設定した。

図-5に実物大試験体を示す。試験体形状はプレストレスト・コンクリート建設業協会試験²⁾を参考に決定した。全長12mのPC鋼より線12S15.2と内径80mmのシースを用い、シースの下り勾配は実施工においてもっとも急な下り勾配を想定して25度に設定して、実施工を模した定着具を両端に設置し、グラウトキャップを介してPCグラウトを注入した。PCグラウトには、高い構造粘性を有する開発品のみを用いた。中間排気口は設置せず、PCグラウトの先流れ抵抗性、ポンプ注入圧力およびシース内の充填性を測定した。ポンプホース（内径25.4mm）の長さは20m、注入および排出ホース（内径19mm）の長さは1.5mとし、注入圧力はチャート式の流量計を用いて測定した。注入にはスクイズ式ポンプを用い、吐出量は5 L/minに設定した。

注入実験は屋外実験場にて行い、室内測定結果との相関をとるため、PCグラウトの温度を25~30°Cに調整した（室内試験時のPCグラウトの温度は27°C程度であった）。

3. 試験結果と考察

3.1 混和材料が流動特性に与える影響

図-6は、混和材料の添加がPCグラウトの塑性粘度および降伏値に与える影響を示したレオグラフである。まず、無機粉末が流動特性に与える影響を説明する。同一添加量(3.20%)では、無機粉末Aと比較して、無機粉末Bを添加したPCグラウトの塑性粘度と降伏値は大きくなった。

無機粉末の添加量の増加に伴い、PCグラウトの塑性粘度および降伏値は上昇した。同等の降伏値の場合、無機粉末B(3.20%)と比較して、無機粉末A(9.60%)の塑性粘度は大きくなった。この塑性粘度の差は、凝集した粒子間に拘束された不動水量の差によって説明できる。濃厚系懸濁液は、凝集した粒子間に水膜を生成することで流動(せん断に伴う軟化)が可能となる⁷⁾が、不動水量が多いほど流動に使える水が少なくなり、懸濁液はより強固な構造を形成する。粒子径が小さく、単位体積あたりの粒子数が多いほど、不動水化する水の量は多くなる。したがって、比表面積が大きく、添加量の多い無機粉末Aの方が塑性粘度が高くなったと考えられる。

次に、有機系高分子であるアクリルアミド系吸水ポリマーとメチルセルロース系増粘剤を比較する。アクリルアミド系吸水ポリマーは少ない添加量でPCグラウトの降伏値および塑性粘度を上昇させた。メチルセルロース系増粘剤を添加すると、わずかに降伏値が低下した。メチルセルロース系増粘剤の場合、少ない添加量で降伏値が低下した理由としては、セメント粒子間にメチルセルロースのような非吸着性ポリマーが少量存在することで、せん断が作用した際にセメント粒子間で滑りが生じやすくなったためと考えられる。

3.2 混和材料がブリーディングに与える影響

混和材料が塑性粘度とブリーディング率に与える影響を図-7に、降伏値とブリーディング率に与える影響を図-8に示す。まず、無機粉末の影響を比較する。同一添加量(3.20%)では、無機粉末Bと比較して、無機粉末Aはブリーディング率を大きく低減することができ、塑性粘度と降伏値の上昇は小さかった。さらに、無機粉末Aを9.60%添加とすることで、ブリーディング率は0.0%になったが、降伏値と塑性粘度は大きく上昇した。ブリーディングは粒子が沈降分離する現象であり、無機粉末の与える影響の差は以下のStokes式で説明できる。

$$u_t = \frac{(\rho_s - \rho)gD^2}{18\mu} \quad (1)$$

ここでは、 u_t ：粒子の沈降速度、 D ：粒子の直径、 t ：時間、 ρ ：混練水の密度、 ρ_s ：粒子の密度、 μ ：PCグラウトの塑性粘度とする。無機粉末Bと比べて、無機粉末Aは粒子径が小さいため、沈降速度が遅くなり、ブリーディング率が小さくなったと考えられる。

次に有機系高分子の影響を比較する。アクリルアミド系吸水ポリマーを添加した場合、ブリーディング率は小さくなったが、塑性粘度と降伏値は大きくなった。メチルセルロース系増粘剤を添加した場合、添加量の増加によりブリーディング率は低下したが、塑性粘度と降伏値の変化は小さかった。有機系高分子によるブリーディング抑制は、先述した粒子の沈降分離の抑制よりも、ポリマーの水素結合によりポリマー自体もしくはポリマー間に余剰水が捕捉されることの方が主要因となる。本研究

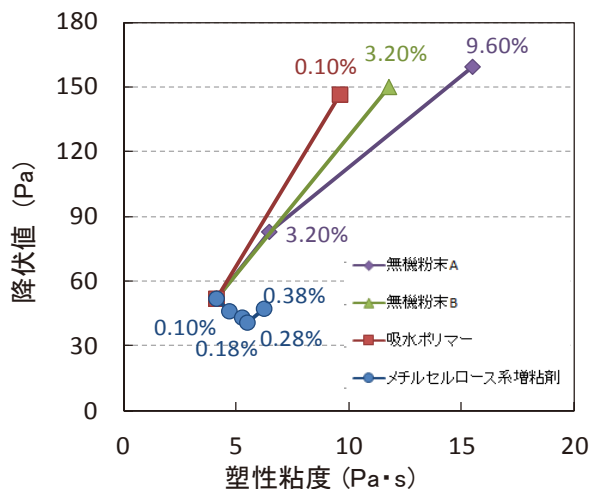


図-6 混和材料が流動特性に与える影響

で用いたメチルセルロース系増粘剤は、吸水ポリマーと比較して水素結合が強く、また1%溶液の塑性粘度が低く、ブリーディングを抑制するために添加量を増加しても、PCグラウトの塑性粘度の上昇を抑制できたと考えられる。

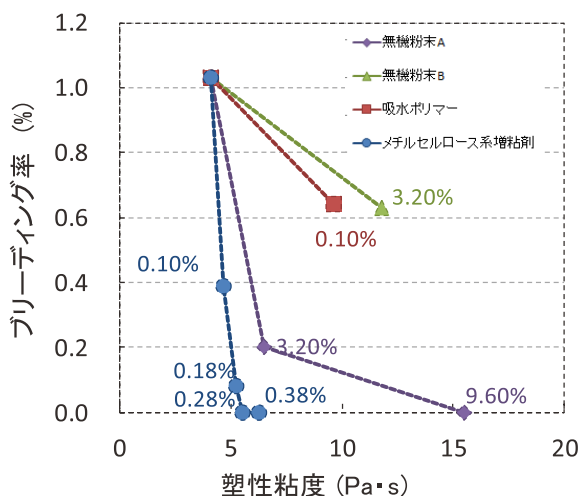


図-7 塑性粘度とブリーディング率の関係

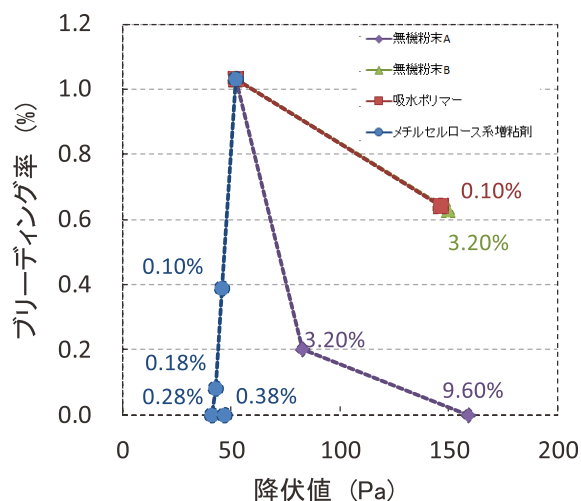


図-8 降伏値とブリーディング率の関係

3.3 実物大規模の試験体を用いた注入実験の結果

傾斜部を想定した試験体を用いた注入実験の結果とPCグラウトの材料特性を表-2および図-9に示す。先述の実験結果から選定した、無機粉末Aとメチルセルロース系増粘剤を含む、高い構造粘性を有しつつブリーディングを抑制できるPCグラウトを開発品とした。図-9中の実線は、注入時のシース内部のPCグラウト充填位置を表す。PCグラウトAは注入開始直後から先流れを呈したが、開発品は注入開始直後からPCグラウトが排出口から出るまで先流れを生じなかつたため、開発品は優れた先流れ抵抗性を有すると言える。

表-2 材料特性と先流れ抵抗性

材料	開発品	PC グラウト A
降伏値(Pa)	46	20
塑性粘度(Pa·s)	6.2	4.7
先流れ有無	無	有

次に、実施工を模擬した実物大試験体に、開発品のPCグラウトを用いた注入実験の結果を説明する。下り25度勾配のB区間での注入状況を図-10に示す。図中の網掛け部はPCグラウトの充填位置を表す。下り25度勾配においても、開発品は先流れを生じなかつた。PCグラウトの硬化後にシース上面を剥ぎ取り撮影した、注入口付近の直線区間Aと下り勾配区間Bでの充填具合を図-11に示したが、すべての確認箇所で見逃し空気はシースのリブ内に収まっていた。なお、注入時のポンプ圧力の最大値は0.85MPaであり、今回の検討で用いた試験体(注入長12m)では、注入圧力の上限2.0MPa以下で注入できた。

次に、実施工を模擬した実物大試験体に、開発品のPCグラウトを用いた注入実験の結果を説明する。下り25度勾配のB区間での注入状況を図-10に示す。図中の網掛け部はPCグラウトの充填位置を表す。下り25度勾配においても、開発品は先流れを生じなかつた。PCグラウトの硬化後にシース上面を剥ぎ取り撮影した、注入口付近の直線区間Aと下り勾配区間Bでの充填具合を図-11に示したが、すべての確認箇所で見逃し空気はシースのリブ内に収まっていた。なお、注入時のポンプ圧力の最大値は0.85MPaであり、今回の検討で用いた試験体(注入長12m)では、注入圧力の上限2.0MPa以下で注入できた。

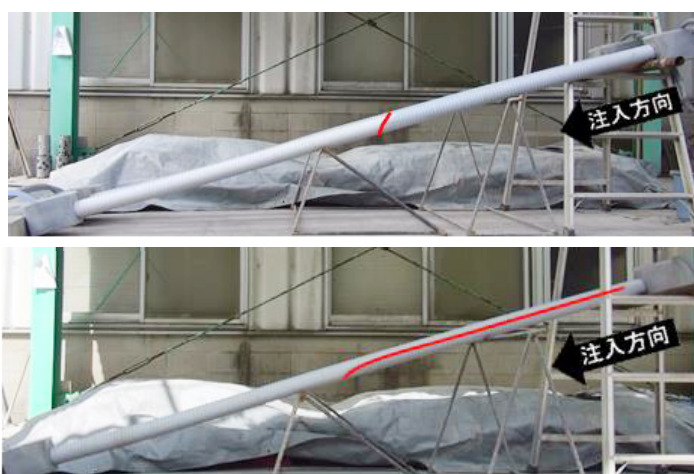


図-9 開発品(上)とPCグラウトA(下)の注入状況



図-10 下り25度勾配での注入状況



図-11 シース内の充填性
(上：A区間，下：B区間)

4. まとめ

本研究では、レオグラフを活用し、混和材料の種類や添加量がPCグラウトの流動特性やブリーディング特性に与える影響を測定して、高い構造粘性を有しつつブリーディングを抑制できるPCグラウトの配合を設計した。さらに、実物大規模の試験体を用いて注入実験を行った結果、高い構造粘性を有するPCグラウトは、下り25度勾配においても先流れが生じなかった。

今回開発したPCグラウトは高い構造粘性を有しているため、ポンプ圧送性を含めた施工性の確保が重要となる。今後、流動特性の経時変化を把握するとともに、注入長をさらに長くした試験体を用いて注入圧力の確認を行う予定である。さらに、高い構造粘性を有していることからPC鋼材間のような狭小部への充填性も確認する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会：コンクリート標準示方書，2012年制定，施工編，2012
- 2) 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，2013
- 3) 加藤勝秀，国枝稔，上田尚史，中村光：CIP法によるPCグラウトの充填解析，プレストレストコンクリート技術協会第19回シンポジウム論文集，pp.503-508，2010
- 4) O. Wallevik et al：Rheology as a tool in concrete science: The use of rheographs and workability boxes, Cement and Concrete Research, Vol.41, pp. 1279-1288, 2011
- 5) 上田隆宣：測定から読み解くレオロジーの基礎知識，日刊工業新聞社，2012
- 6) 公益社団法人プレストレストコンクリート工学会：PCグラウトの設計施工指針，2012年度改訂版，付録I-6，2012
- 7) 岩田進牛，足立泰久：土のコロイド現象，学会出版センター，pp.217-220，2003