

## 超低粘性型グラウト (プレミックスタイプ) の圧力勾配について

オリエンタル白石(株) 正会員 工修 ○西須 稔

### 1. はじめに

グラウト混和剤は、後添加タイプとプレミックスタイプの2種類ある。後添加タイプは、現場において袋詰めセメントと水と一緒に練混ぜるものである。プレミックスタイプは製造工場出荷時に既にセメント粉体に混和剤が混ぜられており、現場では所定の水量を混ぜるだけのものである。プレミックスタイプは、製造工場においてセメントと混和剤を精度よく計測し、混合され出荷していることから、袋セメントの内容量誤差による影響を受けないため、品質の更なる安定が期待できる。2010年5月から、このプレミックスタイプの超低粘性型グラウトが開発・生産され実績を増やしつつある。

また、PCグラウトの注入作業はダクト内の狭小な密閉空間にセメント系ミルクを密実に充填するという高度な技術を要する作業である<sup>1)</sup>。それゆえ、安全で確実な注入作業を行うためには、最大注入圧力の把握が重要となる<sup>2)</sup>。PCグラウトマニュアル&プレグラウトPC鋼材施工マニュアル(2006年改訂版)<sup>3)</sup>では高粘性型グラウトから超低粘性型グラウトまでの圧力勾配が記載されており、グラウト注入の施工計画(グラウトホースの長さ、ステップバイステップ方式の有無、PCグラウトプラントの位置の決定)を行なうことが可能である。しかし、その中での超低粘性型グラウトに関する圧力勾配は後添加タイプとなっており、現在主流となりつつあるプレミックスタイプについては示されていない。

そこで本稿では、新材料である超低粘性型(プレミックスタイプ)の実物大試験の注入圧力結果を利用して、PC鋼材とダクト種類別の圧力勾配を、PC鋼材等の摩擦を考慮したダクト同心二重円管内の層流式を用いて算出するものである。

### 2. グラウト注入中の最大圧力

注入計画においては、最大注入圧力の把握が重要となる。現在のところPCグラウトの最大注入圧力は式(1)によって算出されている<sup>3)</sup>。

$$\text{最大注入圧力 (MPa)} = \Sigma \{ \text{各部材長 (m)} \times \text{各部材の圧力勾配 (MPa/m)} \} + \text{高低差に必要な圧力 (MPa)} \dots (1)$$

ここで、各部材長とは、グラウトホース・注入ホース長、PC鋼材ダクト長のことである。各部材長は既知であるため、最大注入圧力は各部材の圧力勾配が分かれば算出できる。

### 3. ポンプホース、注入ホースの圧力勾配

ポンプホース、注入ホースの圧力勾配を算出するにあたって、図-1に示すような円管内の層流を参考にした<sup>4)</sup>。これより、真つすぐな円管内を非圧縮性粘性流体が層流の状態で定常的に流れる場合、流量Qは式(2)で与えられる。式(2)より圧力勾配( $\Delta P/L$ )は、式(3)に変形でき、ポンプホース・注入ホースの管径、注入流量、グラウト塑性粘度が分かれば、圧力勾配( $\Delta P/L$ )は算出できる。ここで、グラウト塑性粘度に関しては、既往の研究で、JPロート流下時間との関係が図-2で提案されている<sup>5)</sup>。

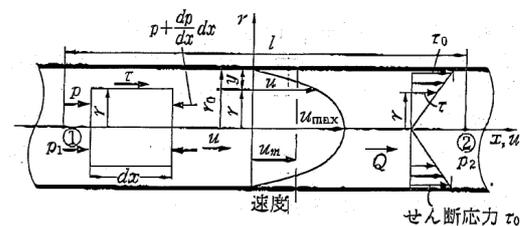


図-1 円管内の層流<sup>4)</sup>

$$Q = \int_0^r 2\pi r u dr = \frac{1}{8\mu} \frac{\Delta P}{L} \pi r_0^4 = \frac{\pi d^4 \Delta P}{128\mu L} \dots (2)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{128\mu \cdot Q}{\pi d^4} \dots (3)$$

ここで、 $\Delta P/L$ : 圧力勾配 (Pa/m)  
 Q: 流量 (m<sup>3</sup>/s),  
 $\mu$ : グラウト塑性粘度 (Pa·S)  
 d: 管径 (m)

4. グラウト塑性粘度

今回着目しているグラウト材は新材料であることから、グラウト塑性粘度については図-2の計算式を用いず、B型粘度計を使用した実測値(3回の平均値)を使用することとした。これらの比較を表-1に示す。

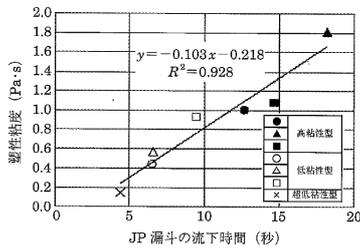


図-2 グラウト塑性粘度とJPロート流下時間の関係<sup>5)</sup>

表-1 グラウト塑性粘度(実測値と計算式の比較)

試験項目	実測値	計算式 <sup>5)</sup>
試験温度(°C)	20	—
水セメント比	36	—
J P ロート値 (秒)	4.3	4.3
塑性粘度 (Pa・S)	0.290	0.225

5. ダクト種類別の圧力勾配算出

5.1 圧力勾配算出方法の理論基礎

ダクト種類別の圧力勾配を算出するにあたって、図-3に示すような同心二重円管内の層流を参考にした<sup>4)</sup>。これより、外側の円管の内半径  $r_o$ 、内側の外半径  $r_i$  とした時の同心二重円管内を非圧縮性粘性流体が層流状態で定常的に流れる場合の流量は、式(4)で与えられる。式(4)より圧力勾配 ( $\Delta P/L$ ) は式(5)に変形できる。

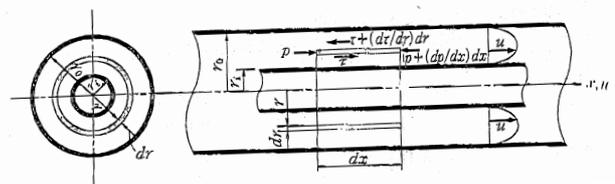


図-3 同心二重円管内の層流<sup>4)</sup>

$$Q = \int_{r_i}^{r_o} 2\pi r u dr = \frac{\pi \Delta P}{8\mu L} \left( r_o^4 - r_i^4 - \frac{(r_o^2 - r_i^2)^2}{\ln(r_o/r_i)} \right) \dots (4)$$

$$\frac{\Delta P}{L} = \frac{8\mu \cdot Q}{\pi \left( r_o^4 - r_i^4 - \frac{(r_o^2 - r_i^2)^2}{\ln(r_o/r_i)} \right)} \dots (5)$$

ここで、 $\Delta P/L$ : 圧力勾配 (Pa/m)  
 $Q$ : 流量 (m<sup>3</sup>/s)  
 $\mu$ : グラウト塑性粘度 (Pa·S)  
 $r_o$ : 外側円管の内半径 (m)  
 $r_i$ : 内側円管の外半径 (m)

5.2 PC鋼材の評価方法

PC鋼材は図-4に示すように、連続桁の支間中央部ではダクト上縁に、支点部ではダクト下縁に偏心し、それらの中間部ではダクト内のほぼ中央に位置していると考えてよい。このように、ダクト内のPC鋼材位置は、ダクトの断面位置により異なっている。ここでは、それらを簡略化するために中央に位置するものと仮定し、図-5に示すように、PC鋼材断面を断面積が等しくなるような円形断面と評価した。図-5に示した例はPC鋼材 12S15.2、シース内径  $\phi 80$ mm の場合である。このように評価することで、様々なPC鋼材とダクト形状は式(5)へ適用することが可能となる。

5.3 PC鋼材の表面およびダクト内側リブの摩擦係数

式(5)は滑らかな同心二重円管内の層流式から算出している。しかし、実際にはPC鋼材の表面とダクト内側リブにはグラウト注入中に摩擦が生じるため、式(5)にそれらの摩擦係数  $k$  を乗じることとし式(6)で表現した。

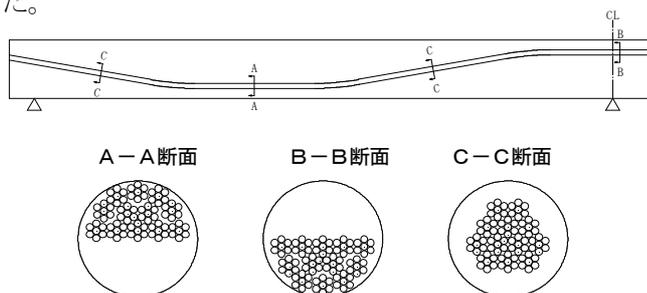


図-4 ダクト内部でのPC鋼材位置(連続桁)

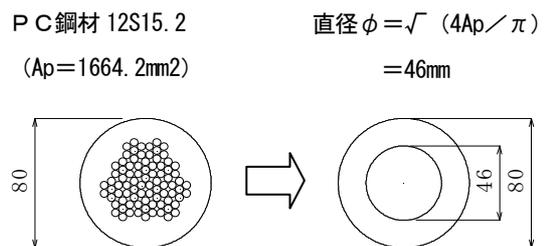


図-5 PC鋼材の評価(円形換算)

PC鋼材はダクト内部で様々な位置に配置されているため、この摩擦係数を理論的に算出するのは困難である。それゆえ、注入作業で計測した実測値と比較することによって、この摩擦係数の算出を試みる。

$$\frac{\Delta P}{L} = k \frac{8\mu \cdot Q}{\pi \left( r_o^4 - r_i^4 - \frac{(r_o^2 - r_i^2)^2}{\ln(r_o/r_i)} \right)} \dots (6)$$

ここで、 $\Delta P/L$ : 圧力勾配 (Pa/m)  
 $Q$ : 流量 (m<sup>3</sup>/s)  
 $\mu$ : グラウト粘度 (Pa·S)  
 $r_o$ : 外側円管の内半径 (m)  
 $r_i$ : 内側円管の外半径 (m)  
 $k$ : PC鋼材等の摩擦係数

6. 実物大の注入試験

今回の試験目的は前述した摩擦係数の算出を試みるものであるため、様々なダクト種類別の最大注入圧力値（実測値）が必要となった。グラウト注入を行ったケーブルの種類およびコンシステンシー試験結果を表-2に、ケーブル形状を図-6、注入状況および実物大試験体全景を写真-1に示す。

表-2 ケーブル種類およびコンシステンシー試験結果

ケーブル番号	鋼材種類	シース内径 (mm)	JP ロート平均 流下時間 (秒)	グラウト 温度 (°C)	ケーブル 形状番号	ケーブル長 (m)
C 1	1S21.8	35	4.4	24	①	10.017
C 2	1S28.6	45	4.4		①	10.017
C 3	7S12.7	55	4.4		②	21.805
C 4	12S12.7	65	4.1	27	②	21.805
C 5		70	4.1		②	21.805
C 6	12S15.2	75	4.1	28	②	21.805
C 7		80	4.1		②	21.805

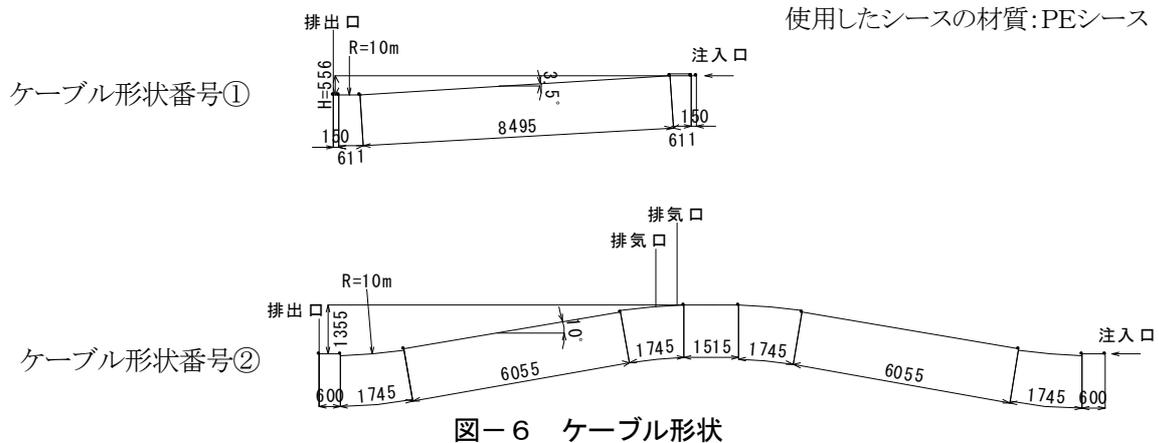


図-6 ケーブル形状

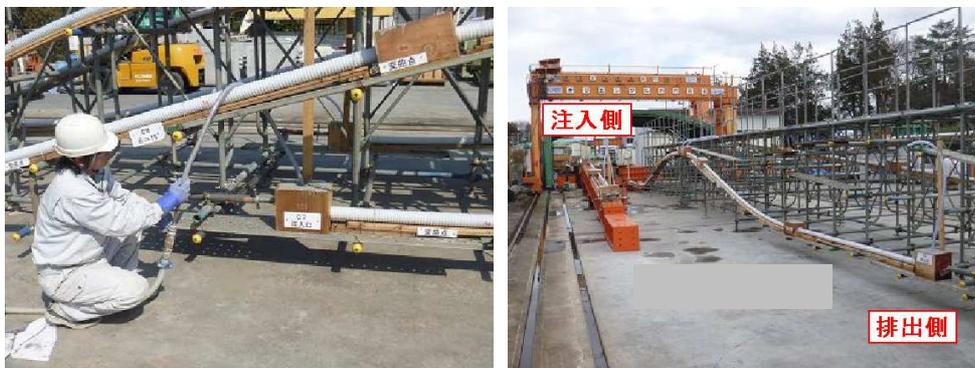


写真-1 注入状況および実物大試験体全景

グラウト注入は、注入速度を毎分 15 リットルで行い、長さ 20mのポンプホース (φ25.4mm)、1.5mの注入・排出ホース (φ19mm) を用いた。注入速度および注入圧力はチャート式にて記録し、注入作業で計測し

た実測値の一覧を表-3に示す。

表-3 注入作業で計測した実測値

ケーブル番号	鋼材種類	シース内径 (mm)	注入作業で計測した実測値 (MPa)	備考
C 1	1S21.8	35	0.55	注入速度：150/分 ポンプホース長：20m 注入・排出ホース：1.5m×2
C 2	1S28.6	45	0.40	
C 3	7S12.7	55	0.40	
C 4	12S12.7	65	0.40	
C 5		70	0.35	
C 6	12S15.2	75	0.35	
C 7		80	0.30	

### 7. PC鋼材と表面及びダクト内側リブの摩擦係数

注入作業で計測した実測値から式(3), (5), (6)を利用してPC鋼材と表面及びダクト内側リブの摩擦係数を算出した結果を表-4に示す。その結果, 摩擦係数kは 1.44~4.79 となる, そのため, 摩擦係数を 4.8 とすることによって圧力勾配を実測値と同等もしくは安全側に評価できると考えられる。

表-4 各ケーブルの摩擦係数の算出結果

ケーブル番号	①ポンプホース圧力 (MPa) 式(3)より	②ダクト圧力 (MPa) 式(5)より	③注入作業で計測した実測値 (MPa)	摩擦係数 k = (③-①) / ②	備考
C 1	0.2099	0.2361	0.55	1.44	グラウトの塑性粘度を 0.290 (Pa・S) として圧力勾配を算出した。
C 2	0.2099	0.0912	0.40	2.08	
C 3	0.2099	0.0698	0.40	2.72	
C 4	0.2099	0.0518	0.40	3.67	
C 5	0.2099	0.0292	0.35	4.79	
C 6	0.2099	0.0327	0.35	4.28	
C 7	0.2099	0.0195	0.30	4.62	

k = 4.8 とした。

### 8. おわりに

ポンプホース, 注入ホースの圧力勾配を算出するにあたっては, 円管内の層流式を参考にし, ダクト種類の圧力勾配を算出するにあたっては, 同心二重円管内の層流式を参考にした。それぞれの式は流体力学に基づいたものである。また, PC鋼材の表面とダクト内側リブの摩擦については, 摩擦係数を 4.8 とすることで, 実測値と同等もしくは安全側の評価となることが分かった。

限られた範囲の検証なので, 適用範囲や精度などは不明であるが, 一般的なPC鋼材とダクト配置の範囲では, 本手法によりプレミックスタイプの超低粘性型のグラウトを対象とした施工計画 (グラウトホースの長さ, ステップバイステップ方式の有無, PCグラウトプラントの位置の決定) の立案に十分活用が可能であると考えられる。

### 参考文献

- 1) 池田, 山口, 手塚: PCグラウトの歴史, プレストレストコンクリート, Vol. 48, No. 2, pp. 53~58, 2006
- 2) 水上, 出雲: 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
- 3) PCグラウト&プレグラウトPC鋼材施工マニュアル (2006年改訂版), (社)プレストレストコンクリート建設業協会, 2006.6.
- 4) 松岡, 青山, 児島, 應和, 山本: 流れの力学-基礎と演習-, コロナ社, pp. 121~124, 2001
- 5) 岩永, 永淵, 山下, 小松: PCグラウト材料の変遷と今後の方向性, プレストレストコンクリート, Vol. 48, No. 2, pp. 64~67, 2006