

## PCグラウトの圧力勾配に関する一提案

オリエンタル建設(株) 正会員 工修 ○西須 稔  
 オリエンタル建設(株) 正会員 博士(工学) 吳 承寧  
 ドーピー建設工業(株) 正会員 石川 昇  
 (株)安部日鋼工業 正会員 木村栄仁

### 1. はじめに

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&プレグラウトPC鋼材施工マニュアル(2002年改訂版)<sup>3)</sup>(以下、PCグラウトマニュアル2002)では、高粘性型グラウトについてポンプホース、注入ホースの流量と圧力勾配の関係を示している。また、PC鋼材とダクト径別の流量と圧力勾配に関する資料は乏しく、高粘性グラウトについて1種類のみ記載(PC鋼材 12S12.7, シース内径φ65mm)であり、様々なPC鋼材とダクト径の組合せにおける圧力勾配は不明である。そのため、最大注入圧力の予測は、この1種類の圧力勾配をよりどころとして行ってきた。ゆえに、PC鋼材 12S12.7, シース内径φ65mm以外のダクトにグラウト注入や、高粘性型以外のグラウトを使用する場合の注入施工計画(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)の立案は困難である。そこで本稿では、流体力学に基づいた円管内の層流式によって、高粘性型以外のポンプホース、注入ホースの圧力勾配を算出し、またPC鋼材とダクト種類別の圧力勾配では、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事を提案するものである。なお、本報告は(社)PC建設業協会施工委員会の活動の一環として報告するものである。

### 2. グラウト注入中の最大圧力の算出方法

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(ΔP/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(ΔP/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>。ポンプホースの直径を25.4mm、注入ホースの直径を19mmとした場合における高粘性

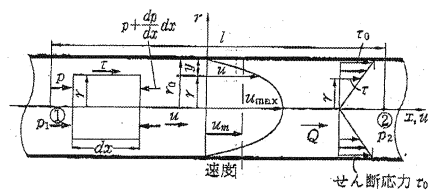


図-1 円管内の層流<sup>4)</sup>

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

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

ここで、ΔP/L: 圧力勾配 (Pa/m)  
 Q: 流量 (m<sup>3</sup>/s),  
 μ: グラウト塑性粘度 (Pa·s)  
 d: 管径 (m)

型グラウトの圧力勾配と、PCグラウトマニュアル 2002 に記載されている実験値を比較したものを表-1 に示す。これより、計算値は実験値とはほぼ同等であると言える。よって、式(3)のグラウト塑性粘度を変化させることで、高粘性型グラウトのみならず、低粘性型や超低粘性型グラウトの圧力勾配についても算出できる。表-2 に流量 10L/分における低粘性型と超低粘性型グラウトの圧力勾配 (計算値) を示す。

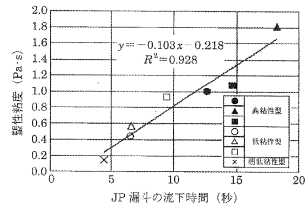


図-2 グラウト粘度とJPフロー 流下時間との関係<sup>5)</sup>

表-1 圧力勾配の比較 (ポンプホース)

ポンプホース径 (mm)	流量 (L/min)	圧力勾配 (MPa/m)	JP流下時間 (秒)	使用混和剤	備考
φ 25.4	10	0.017~0.027	12.0~18.1	高粘性型	計算値
		0.021~0.023		コンベックス208T	実験値
φ 19	10	0.053~0.086		高粘性型	計算値
		0.052~0.066		コンベックス208T	実験値

表-2 低粘性型・超低粘性型の圧力勾配 (ポンプホース)

ポンプホース径 (mm)	流量 (L/min)	圧力勾配 (MPa/m)	JP流下時間 (秒)	使用混和剤	備考
φ 25.4	10	0.007~0.020	6~14	低粘性型	計算値
		0.001~0.005	3~5	超低粘性型	計算値
φ 19	10	0.021~0.064	6~14	低粘性型	計算値
		0.005~0.015	3~5	超低粘性型	計算値

4. ダクト種類別の流量と圧力勾配算出

4. 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。

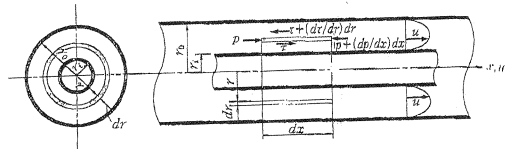


図-3 同心二重円管内の層流<sup>4)</sup>

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

4. 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 φ 80mm 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。

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

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)

4. 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、実際はPC鋼材の表面とダクト内側

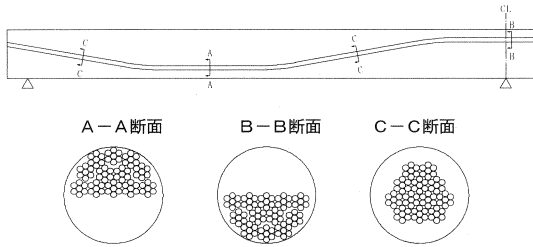


図-4 ダクト内部でのPC鋼材位置 (連続桁)

PC鋼材 12S15.2  
( $A_p=1664.2\text{mm}^2$ )

$$\text{直径 } \phi = \sqrt{4A_p / \pi} = 46\text{mm}$$

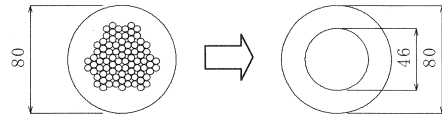


図-5 PC鋼材の評価 (円形換算)

リップ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。

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、現場での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た。その結果を表-3に示す。表中のA~Cについては3現場の注入結果を、Dについては実物大試験結果を示している。これより、PC鋼材の表面とダクト内側リップの摩擦係数  $k$  は1.76~2.0となる。そのため、摩擦係数を2.0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。

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

ここで、 $\Delta P/L$ : 圧力勾配 (Pa/m)  
 $Q$ : 流量 ( $\text{m}^3/\text{s}$ )  
 $\mu$ : 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

表-3 PC鋼材の表面およびダクト内側リップの摩擦係数の算出

	施工条件 ( )内はシース内径を示す	実測値	式(5)による 計算値	摩擦係数 $k$
現場注入結果A	PC鋼材12S12.7 ( $\phi 65, \phi 70$ ) 超低粘性型グラウト PC鋼材長=339m 流量 $Q=10\text{L}/\text{min}$ JPロート流下時間=3.7秒	最大注入圧力 =0.63MPa	最大注入圧力 =0.383MPa	1.95
現場注入結果B	PC鋼材12S15.2 ( $\phi 80$ ) 高粘性型グラウト PC鋼材長=142m 流量 $Q=10\text{L}/\text{min}$ JPロート流下時間=18秒	圧力勾配 =0.0060MPa/m	圧力勾配 =0.0034MPa/m	1.76
現場注入結果C	PC鋼材19S15.2 ( $\phi 100.7$ ) 高粘性型グラウト PC鋼材長=67m ポンプホース長=28m 流量 $Q=8\text{L}/\text{min}$ JPロート流下時間=18秒	最大注入圧力 =1.10MPa	最大注入圧力 =1.00MPa	1.94
実物大試験D <sup>6)</sup>	PC鋼材12S15.2 ( $\phi 75$ ) 高粘性型グラウト PC鋼材長=150m 流量 $Q=10\text{L}/\text{min}$ JPロート流下時間=14秒	圧力勾配 =0.0080MPa/m	圧力勾配 =0.0040MPa/m	2.00

↓  
 $k=2.0$ とする

### 5. 流体力学に基づく圧力勾配の算出方法の検証

4. 1~4. 3より算出したダクト種類別の圧力勾配 (計算値) の一例 (PC鋼材 12S12.7, シース内径  $\phi 65\text{mm}$ , 流量  $10\text{L}/\text{分}$ ) とPCグラウトマニュアル2002の記載値 (実験値) を比較したものを表-4に示す。これより、計算値は実測値とほぼ同等であった。これより、PC鋼材を考慮し、流体力学に基づいた同心二重円管内の層流式から算出した圧力勾配は、十分に活用が可能であると考えられる。

表-4 ダクト種類別の圧力勾配の比較

ダクト種類		流量 (L/min)	圧力勾配 (MPa/m)	JP流下時間 (秒)	使用混和剤	備考
径(mm)	鋼材					
φ 65	12S12.7	10	0.011~0.018	12.0~18.1	高粘性型	計算値
			0.010~0.011		コンパックス208T	実験値
			0.008		ボゾリスGF1720	実験値

表-5 ダクト種類別の圧力勾配の一例 (流量 10 L/min の場合)

ダクト種類		流量 (L/min)	圧力勾配 (MPa/m)	JP流下時間 (秒)	使用混和剤	備考
径(mm)	鋼材					
φ 45	1S28.6	10	0.0512~0.0900	14~23	高粘性型	計算値
			0.0167~0.0512	6~14	低粘性型	計算値
			0.0038~0.0124	3~5	超低粘性型	計算値
φ 65	12S12.4	10	0.0118~0.0208	14~23	高粘性型	計算値
			0.0039~0.0118	6~14	低粘性型	計算値
			0.0009~0.0029	3~5	超低粘性型	計算値
φ 65	12S12.7	10	0.0134~0.0235	14~23	高粘性型	計算値
			0.0044~0.0134	6~14	低粘性型	計算値
			0.0010~0.0032	3~5	超低粘性型	計算値
φ 75	12S15.2	10	0.0084~0.0148	14~23	高粘性型	計算値
			0.0028~0.0084	6~14	低粘性型	計算値
			0.0006~0.0020	3~5	超低粘性型	計算値
φ 100.7	19S15.2	10	0.0020~0.0035	14~23	高粘性型	計算値
			0.0007~0.0020	6~14	低粘性型	計算値
			0.0001~0.0005	3~5	超低粘性型	計算値

6. 様々なPC鋼材とダクト内の圧力勾配算出例

式(6)において、PC鋼材等の摩擦係数kを2.0として算出したダクト種類別の圧力勾配の一例を表-5に示す。これによって高粘性型から超低粘性型グラウトまで、また様々なPC鋼材とダクト種類別の圧力勾配を得ることができる。これらの圧力勾配を式(1)に代入することによって、最大注入圧力の算出が可能となる。

7. まとめ

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、ダクト種類別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2.0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、本手法により広範囲の粘性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, Mar.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 (2002年改訂版), (社)プレストレストコンクリート建設業協会, 2002.10.
- 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, Mar.2006
- 6)田村, 吉松, 西須, 河田: PCグラウトにおける真空ポンプ併用の効果について, 第12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, pp41~44, 2003年10月