

PCグラウトの充填性評価の定量化とその施工への適用について

出雲 淳一*

1. まえがき

既存構造物のグラウト充填不良による劣化事例^{1), 2)}が報告されて以来、わが国においても注入が確実に行われるようなPCグラウトの検討が行われている^{3), 4)}。プレストレスト・コンクリート建設業協会（PC建協）においても、従来型のグラウトに代えてノンブリーディングタイプグラウトを採用することとなった⁵⁾。また、グラウト材に関しても高性能な製品が数多く開発されるに至っている。

グラウトのコンシステンシーを評価する方法として、一般に漏斗を用いた流動性試験が行われるが、漏斗試験によって測定される流下時間が、グラウトの充填性能や施工性にどのような影響を及ぼすのか、まだ明確にされていない点も多い。著者らは、グラウトの定量的な性能評価を確実な充填施工に反映させるための研究を行ってきた。まだ研究段階であるが、これまでの研究成果をレビューしながら、グラウトの性能評価とその施工への適用について紹介することにする。

2. グラウト試験とその評価方法

フレッシュなグラウトは、図-1に示すように水のようなニュートン流体とは異なり、一般にビンガム流体として取り扱われる。ビンガム流体は、降伏値と塑性粘度とでその特性が表現され、せん断応力と速度勾配との間に線形関係がある。グラウトのせん断応力と速度との関係は粘度計を用いて求めることができ、これまで行ってきた実験結果⁶⁾を整理すると、グラウトの降伏値と塑性粘度との間には、図-2に示すような相関関係が認められる。また、グラウトの粘性を変化させた場合、J₁₄漏斗による流下時間と降伏値との間にも、図-3に示すような相関関係が認められている⁶⁾。最近では、J₁₄漏斗に代わりJP漏斗が用いられるが、J₁₄漏斗とJP漏斗との間にも相関関係が認められるので⁷⁾、JP漏斗の流下時間からグラウトの降伏値および塑性粘度をある程度予測することも可能である。したがって、漏斗試験から得られる流下時間は、グラウトの粘性特性を表す一

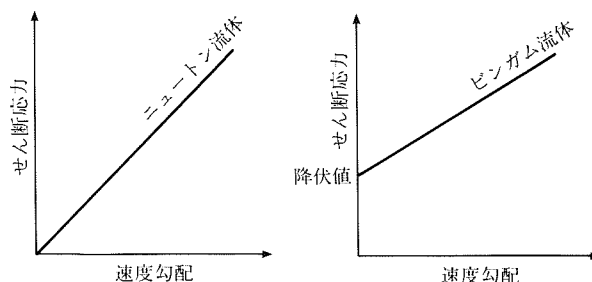


図-1 流体のせん断応力と速度勾配の関係

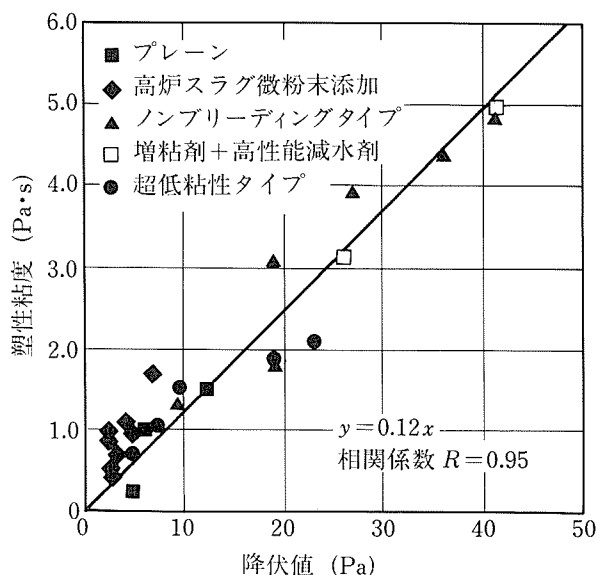


図-2 降伏値と塑性粘度の関係

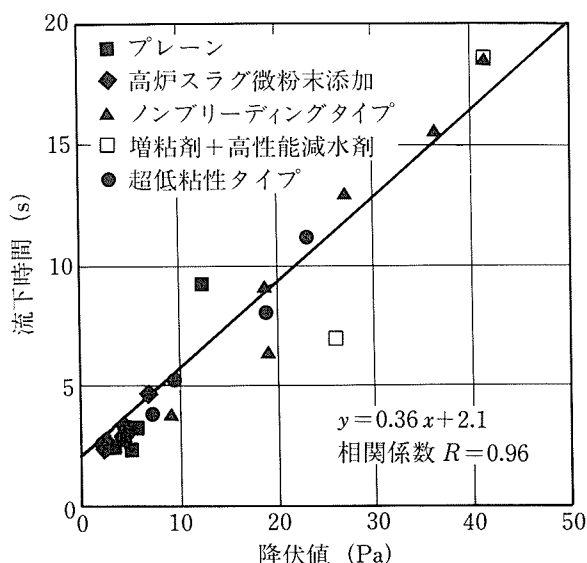


図-3 降伏値と流下時間の関係



* Jun-ichi IZUMO

関東学院大学
工学部 土木工学科 教授

指標と考えられ、流下時間からグラウトの塑性粘度と降伏値を間接的ではあるが予測することができる。

一方、著者はグラウトの充填性能を可視的に評価するために図-4に示すような装置を開発し、グラウトの充填性と流動特性について実験を行ってきた⁸⁾。この試験装置では、製造したグラウトを右端注入口からゆっくりと流し込み、左端排出口からグラウトが流出するまでの管内の充填状況および流動状況を観察することができる。たとえば、水のように粘性が非常に低い場合には、管右端から流れるグラウトは水平部分の管内を満たすことなく流れ出る。しかし、粘性が高い場合には、管右端から自然流下したグラウ

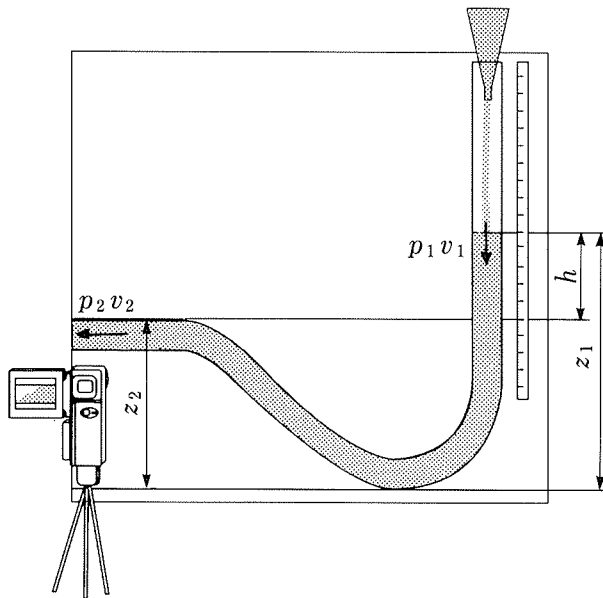


図-4 グラウト性能評価のための試験装置

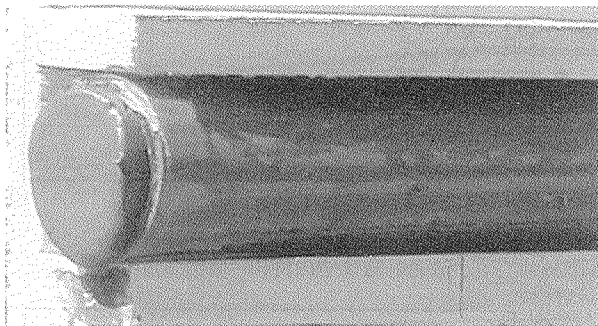


写真-1 排出部の充填状況

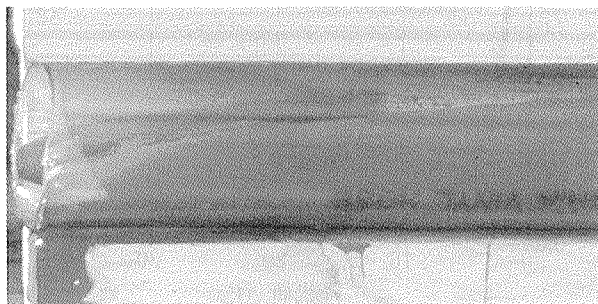


写真-2 排出部の未充填状況

トは管内の全断面を満たしながら管左端の排出口から流れ出る。写真-1, 2は、グラウトの粘性の違いによって、排出口で観察される充填状況の違いを示している。

試験装置において管水平部を流れる様子をデジタルビデオカメラに収め、定められた区間を流れる時間をビデオフレームから読み取ることにより、グラウトの流速を求めることができる。また、グラウト先端部の様子もデジタル画像で処理することにより、グラウト先端部分が管水平部となす角度を測定することができる。管排出口からのグラウトの流出が一定となる状態までグラウト注入を行うと、グラウトの粘性に応じて、管鉛直部分には水頭差が生じる。この水頭差は、試験装置内においてグラウトを流動させるために必要な圧力であり、施工時のグラウト注入圧と関係がある。試験装置内に生じる水頭差とグラウトの降伏値との間にも相関関係があることが確認されている(図-5)。

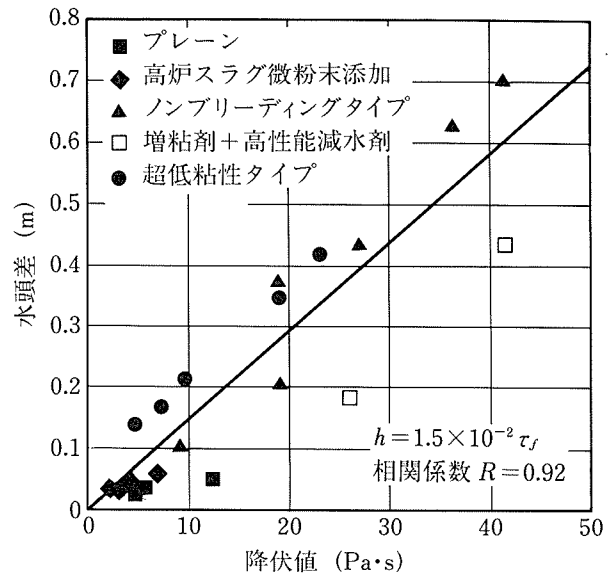


図-5 降伏値と水頭差の関係

グラウトの粘性特性は、この試験装置の測定結果に影響を及ぼす。試験装置の管内を自然流下によってグラウトを充填させるためには、流動するグラウトの先端部がある程度の角度を有していることが必要であり、さまざまな粘性のグラウトに対して行った実験からは、先端角度はおおよそ20度以上あれば管内を充填できることが確認されている。したがって、シース内を流れるグラウト先端角度 θ (rad)を予測することにより、グラウトの充填性能を評価することができる。グラウト先端角度は、式(1)で定式化されている⁶⁾。

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

ただし、

$$C_1 = \frac{1}{1 + 0.35 \ln \frac{\mu}{\mu_0}}, \quad C_2 = 4.0 \times 10^{-3} \tau_f$$

である。

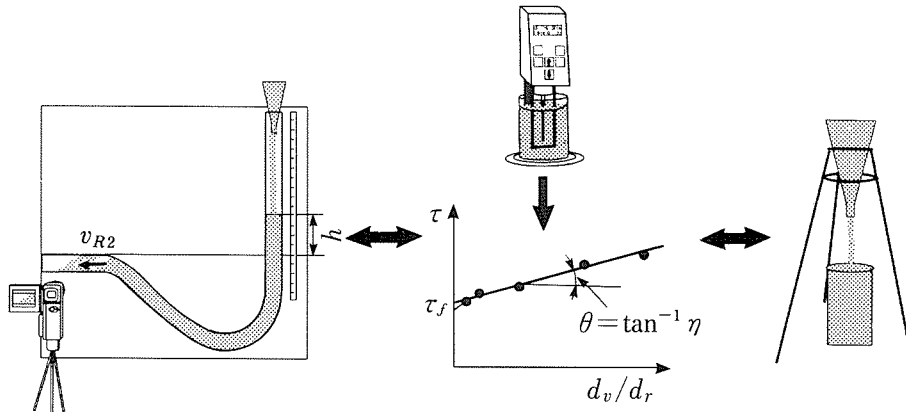


図-6 各試験の相関関係

ここに、

- v_m (m/s) : グラウトの流速
- D (m) : 管の内径
- α (rad) : 管の傾斜角度
- τ_f (Pa) : グラウトの降伏値
- μ (Pa·s) : グラウト塑性粘度
- ρ (kg/m³) : グラウトの密度
- μ_0 (Pa·s) : 水の粘度
- g (m/s²) : 重力加速度
- C_1 : 静水圧係数
- C_2 : 圧力係数

である。

式(1)から得られる角度 θ は、グラウトの流速、密度、塑性粘度および降伏値と管径および管の傾斜角度で表されており、これらの諸量がグラウトの充填性に影響を及ぼす。

図-6は、粘度計から得られるグラウトの粘性特性と漏斗試験との関係ならびに充填性試験との関係を模式的に示したものである。これまでの議論から個々の試験は、他の試験と関連性があり、たとえば、一つの試験結果から他の試験結果をある程度推測することも可能となっている。

3. グラウト性能および注入条件が充填性に及ぼす影響

図-4に示す試験装置で得られた結果は、限られた条件におけるグラウトの充填性能を示している。すなわち、自然流下によって流動させた場合のグラウトの性状を示しており、実際の施工時の流速とは異なると考えられる。また、シースの管径ならびに傾斜、鋼材が配置されていることなども試験装置とは異なる。したがって、試験装置から得られた試験情報を分析し、施工性の評価に反映させることが必要となる。シース内の鋼材の影響については、現在研究中であり、ここではそれについては省略する。たとえば、これまでの実験から、試験装置水平部におけるグラウト先端角度がほぼ20度以上であれば吐出口まで完全に充填することが確認されているので、管径、管の傾斜角度、グラウトの密度をパラメータにして式(1)を用いて、先端角度が20度以上になるときのグラウトの降伏値と流速の関係を図-7～9に示している。

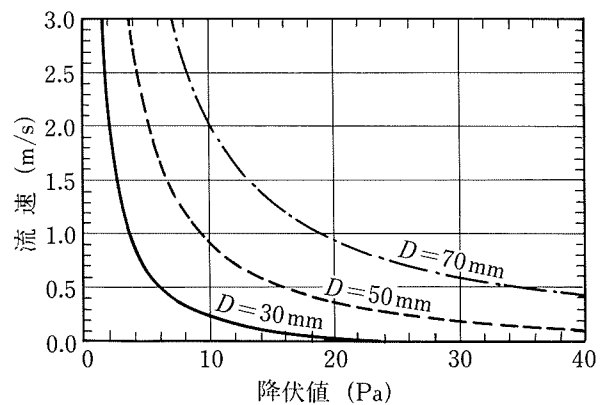


図-7 流速と降伏値の関係 (管径変化)

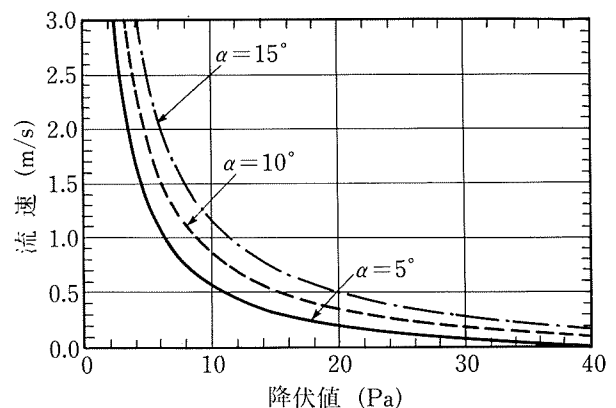


図-8 流速と降伏値の関係 (傾斜角度変化)

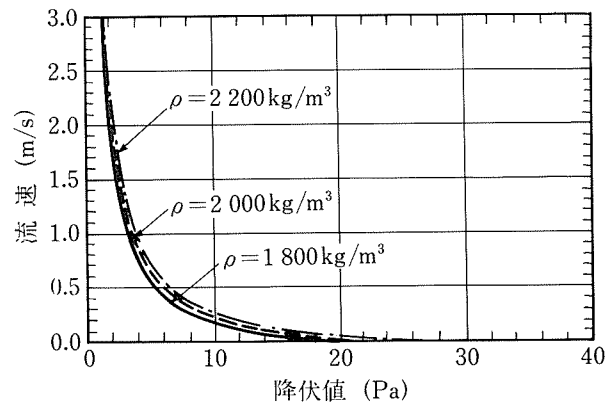


図-9 流速と降伏値の関係 (密度変化)

図-7は管径を30 mm, 50 mm, 70 mmに変化させた場合の流速と降伏値の関係を示している。図-8は管の傾斜角度を5度, 10度, 15度に設定した場合、図-9はグラウトの密度を1 800 kg/m³, 2 000 kg/m³, 2 200 kg/m³に設定した場合の流速と降伏値の関係を表している。いずれの場合もグラウトの降伏値が増加するのに伴い、流速が減少する傾向を示している。すなわち、グラウトの先端角度が20度以上の条件を満たすために、降伏値が大きいグラウトを用いる場合には、グラウトの流速は遅くてもよく、逆に降伏値が小さい場合には、流速を上げる必要があることが理解される。また、降伏値が一定の場合には、管径、管の傾斜角度が大きくなるほど、充填に必要な流速を上げる必要があることが理解される。さらに、図-7から管径の変化は、降伏値が一定の場合には、充填に必要な流速の影響は他のパラメーターの場合に比べて大きいことが分かる。一方、グラウトの密度の変化はそれほど充填性に影響を与えないことが図-9からも理解される。

4. グラウト注入圧力

著者らが提案する試験装置は、注入部でのグラウトの水頭差を利用して、グラウトを排出させる仕組みとなっている。この水頭差はグラウトの物理的性質によって異なり、水頭差が大きくなるほど注入時の圧力も高くなることを意味している。施工条件としての注入圧力と充填性能との関係についての解析的な検討結果を次に紹介する。

試験装置の曲がり部の損失を無視して、図-4に示す充填試験装置の注入口における断面1とグラウト先端部における断面2にベルヌーイの定理を適用すると式(2)が導かれる。

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + f \frac{l}{D} \frac{v_2^2}{2g} \dots\dots\dots(2)$$

- ここに、 f : 抵抗係数
- v : 流速
- p : 圧力
- z : 高度水頭
- l : 管内におけるグラウトの長さ
- D : 管の内径

を表している。また、添字の1および2はそれぞれの断面における諸量を意味している。

断面内を流れる流量 Q が一定で、管の内径が変化しない場合には、グラウトの流速はほとんど変化しないと考えられるので $v_1 = v_2 = v$ と置くことができ、またグラウト先端の圧力は $p_2 = 0$ と見なすことができる。したがって、式(2)を整理して式(3)を得ることができる。

$$H = z_1 - z_2 + \frac{p_1}{\rho g} = f \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} \dots\dots\dots(3)$$

ここで、 H は流速 v でグラウトが流動しているときの水頭差である。 H は、グラウト注入時の水頭差で、試験装置から求めることは実際に難しい。しかし、 H の代わりにグラウト静止後の釣合い状態にあるときに測定される水頭差 h を

用いることにより、式(3)を用いて抵抗係数 f をある程度予測することができる。

図-10は、式(3)を用いて実験から求められた抵抗係数 f とレイノルズ数 Re との関係を示している。この2つの諸量の間には $f = 14/Re$ の関係が認められる。しかし、抵抗係数 f とレイノルズ数との間には一般に $f = 64/Re$ の関係があると言われており、実験から得られた抵抗係数は低めに評価されている。これは、水頭差として低めの値を用いたことによる影響ならびに特殊な管配置の影響も一因としているものと考えられる。粘性の高いグラウトの場合にも、抵抗係数とレイノルズ数との間には相関関係があると考えて、式(4)で表すことにする。式(4)中の係数 k は試験方法により定められる値とし、図-4に示す試験装置を用いた場合の実験の場合 $k = 0.22$ となっている。実際の施工においては、あらかじめ実験などを行い係数 k の値を定める必要がある。たとえば、「PCグラウト&プレグラウトPC鋼材施工マニュアル(改訂版)」⁷⁾に示されているグラウトの流量と注入圧力のデータから、係数 k の値を求めると0.39程度と推定される⁹⁾。

$$f = k \frac{64}{Re} \dots\dots\dots(4)$$

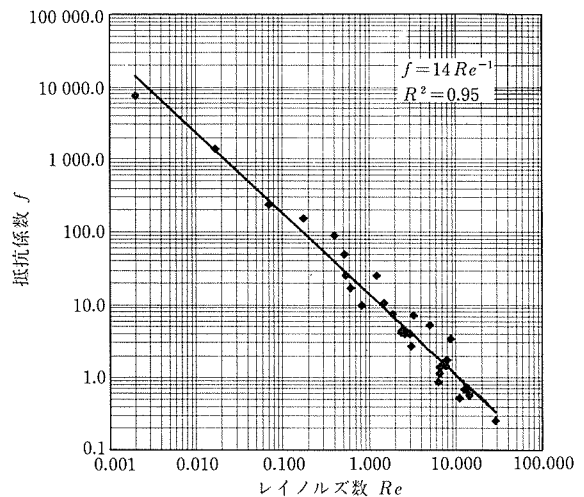


図-10 抵抗係数とレイノルズ数の関係⁹⁾

式(2)において $p_1 = P$ と置き、式(4)を用いて整理すると、式(5)が得られる。

$$P = \rho g (z_2 - z_1) + k \rho v^2 \frac{32}{Re} \frac{l}{D} \dots\dots\dots(5)$$

図-11はグラウト注入を模式的に示している。式(5)中の P は、図-11において、断面2までグラウトを注入するのに要する圧力を表している。実際のグラウト施工においては、流量で管理され、流量は一定と考えられる。したがって、管断面が変化しない場合、流速は管内で一定となり、式(5)を用いて、シースの各位置にグラウトが達したときの注入圧力を算定することができる。また、グラウトの降伏値、塑性粘度ならびに管径、管の傾斜角度と流速から各位置におけるグラウト先端角度を式(1)より算定することができる。

図-12は、実物大の注入試験装置の配置図を示している⁷⁾。このようなシース配置に、表-1に示す条件で注入を行った場合のシース各点における注入圧力と先端角度の算定結果を図示している。シースの傾斜角度が5度に配置される場合には、全区間において先端角度が20度以上となっている。しかし、傾斜角度が10度に配置される場合には、傾斜区間においてグラウトの先端角度は20度以上とならず、先流れによる充填不良が生じやすいことが理解され

る。また、注入圧力は、注入長さの増加に伴って増加する傾向が見られる。この解析例からも分かるように、グラウトの特性があらかじめ分かっている場合には、シース各点におけるグラウト先端角度を予測することができ、注入が確実にできる注入方法を施工計画時に検討することができる。将来は、グラウトの材料の評価を行い、それを施工計画に反映させることにより、より合理的な施工が可能になると考えられる。

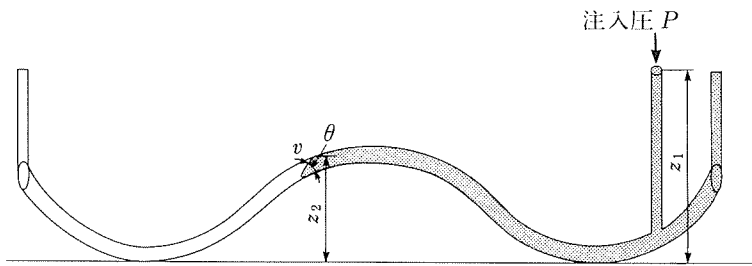


図-11 グラウト注入の模式図

表-1 解析条件

傾斜角度 α (度)	5	10
シース全長 L (mm)	10 000	12 000
高さ H (mm)	425	999
曲げ半径 R (mm)	10 000	
流量 Q (l/min)	15	
管内径 D (mm)	35	
降伏値 τ_f (Pa)	27	
塑性粘度 μ (Pa·s)	2.8	
密度 ρ (kg/m ³)	1 920	

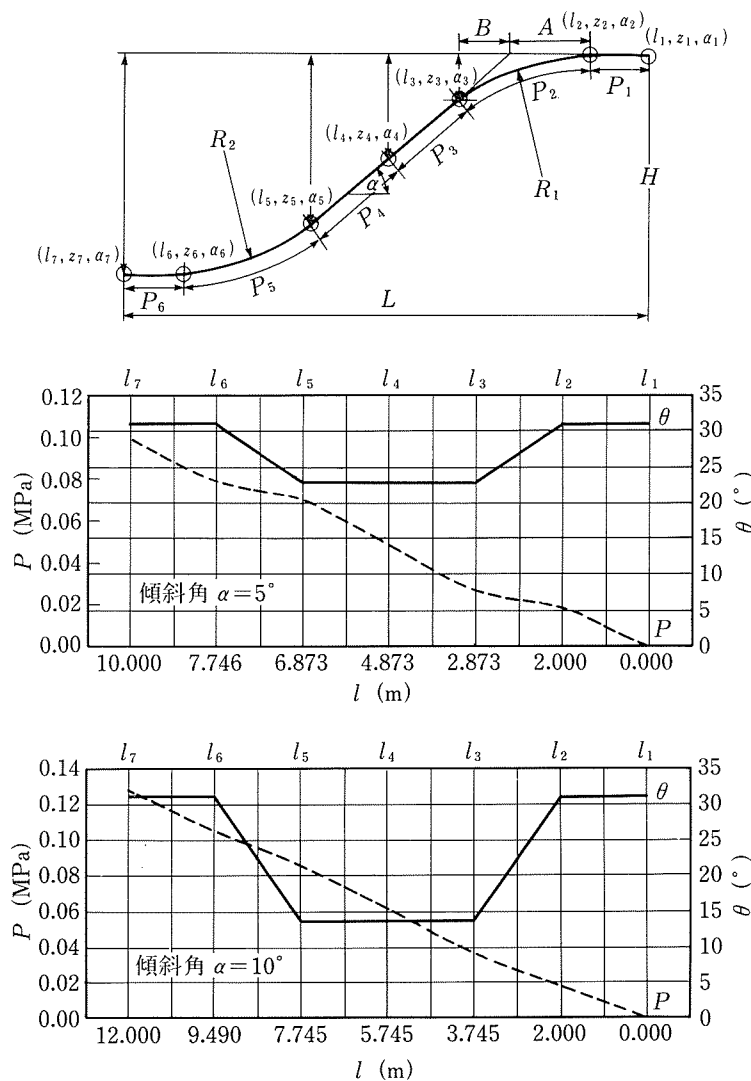


図-12 各点の注入圧力と先端角度

5. あとがき

グラウトの充填が確実に行われるために、材料の性能評価方法とそれを実施工に応用するための研究をこれまで行ってきた。グラウト材料の性能評価に関しては、ある程度評価が可能になってきていると考えている。しかし、これまでの検討では、シース内に鋼材がない場合の検討を行っている。シース内に鋼材がある場合には、シース内の摩擦抵抗は見かけ上、増加すると考えられるので、鋼材がない場合の方が充填性に関してはある程度安全側の検討になると考えられるが、鋼材の影響については今後の検討課題である。また、施工性に関する評価はまだ研究段階である。現在、実施工における検証を行うための実験を計画中であり、その結果については別の機会に報告したいと考えている。今回の報告が、グラウト施工管理技術の発展の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 小林, 宮川, 杉江, 森: PC構造物のグラウト不良とその補修のための注入材料に関する実験, プレストレストコンクリート, Vol.36, No.3, pp.75~81, 1994
- 2) 佐々木, 堺: グラウト不良により劣化したPC橋の調査と補修, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 18, No.1, pp.1 089~1 094, 1996
- 3) 菅原: プレストレストコンクリートのグラウト作業とグラウトの品質の改良, セメントコンクリート, No.603, pp.8~15, 1997.5
- 4) 出雲: PCグラウトの品質改善に関する基礎的研究, 土木学会論文誌, No.641/V-46, pp.133~151, 2000.2
- 5) プレストレスト・コンクリート建設業協会 耐久性委員会: ノンブリーディンググラウトへの移行について, プレストレストコンクリート, Vol.40, No.3, pp.71~75, 1998
- 6) 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
- 7) 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(改訂版), 1999.11
- 8) 出雲: PCグラウトの性能試験方法に関する一考察, プレストレストコンクリート, Vol.42, No.5, pp.37~42, 2000
- 9) 水上, 出雲: 数値シミュレーションによるPCグラウトの充填性能および施工性の評価, 第11回プレ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, pp.95~100, 2001.11

【2001年10月24日受付】