

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

関東学院大学 正会員 ○水上 伸介

関東学院大学 正会員 出雲 淳一

1. まえがき

PC グラウトの注入が確実に行われるような PC グラウト材の開発および施工方法の確立が望まれている。筆者らが提案した試験装置による実験¹⁾や既往の研究²⁾ ³⁾からグラウトがシース内を充填するためには、注入時のグラウト先端部の角度が十分に大きければシース内に空隙が生じずに充填することが明らかになってきた。これらの実験結果に基づき、注入時のグラウト先端部の角度をグラウトの物理的条件と注入条件より定式化し、グラウトの充填性能を定量的に評価するための手法について検討を行ってきた。⁴⁾

本研究では、定式化されたモデルを用いてグラウトの物理的条件および注入条件をパラメータにして、数値シミュレーションを行い、充填を確実にを行うためのグラウトの注入方法について検討することを目的としている。

2. 充填試験装置によるグラウトの定量的評価

2.1 グラウト先端角度の定式化

これまで図-1に示すような試験装置を用いて実験を行い、グラウトの管水平部を流れるグラウト先端角度に注目して、その角度が充填性に及ぼす影響について検討を行ってきた。その結果グラウト先端角度を評価することにより、グラウトの充填性能を定量的に評価できることが明らかとなってきた。また、シース内を流れるグラウト先端角度 θ (rad) は、図-2に示すようなグラウト先端部分とのつり合い条件より式(1)で定式化されている。⁴⁾

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

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

ここに、 v (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): 密度、 μ_0 (Pa·s): 水の粘性係数、 g (m/s²): 重力加速度、 C_1 : 静水圧係数、 C_2 : 圧力係数

式(1)から得られる角度 θ は、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とで定式化さ

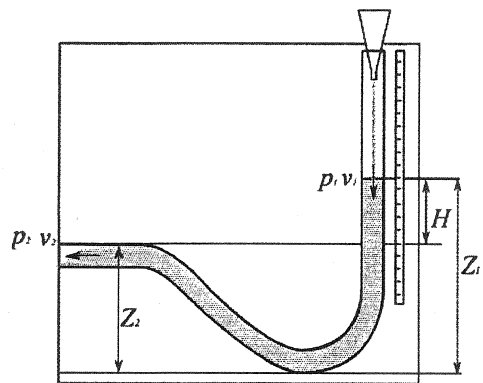


図-1 試験装置図

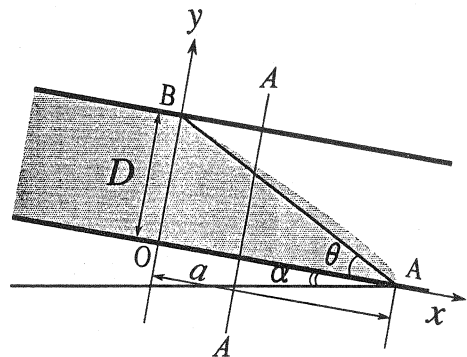


図-2 グラウト先端部のモデル化

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ことになる。

2.2 モデルの解析例

図-1に示すような試験装置を用いて行ったグラウト実験⁴⁾および西村ら⁵⁾の実験に式(1)を適用して求めたグラウトの先端角度の計算結果を図-4に示す。著者らが行った実験では、管の内径は32mm、傾斜角 α はゼロであり、グラウトの降伏値および塑性粘度はそれぞれ2.0 Pa \sim 41.5Pa、0.2 Pa \cdot s \sim 5.0Pa \cdot sの範囲にあった。また、西村らは、図-3に示すような傾斜した透明なアクリル管内にピストンでグラウトを一定速度で注入し、グラウトが流れ出る様子からグラウト先端角度を測定している。実験パラメータとして、管径、管傾斜角度およびグラウトの流速をそれぞれ変化させている。管径は、32mm \sim 70mm、管傾斜角度は0 $^{\circ}$ \sim 30 $^{\circ}$ 、グラウトの降伏値および塑性粘度は、それぞれ15.2Pa \sim 181.7Pa、1.7Pa \cdot s \sim 8.7Pa \cdot sの範囲にあった。図-4からは、いずれの実験に対しても、グラウトの種類、粘性、管径、管傾斜角度などに関係なく計算値は実験値とほぼ一致する結果が得られている。

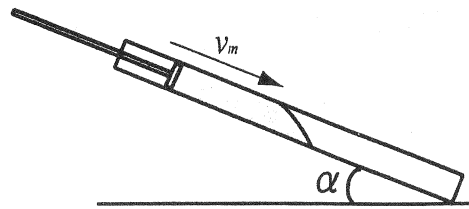


図-3 実験概要図

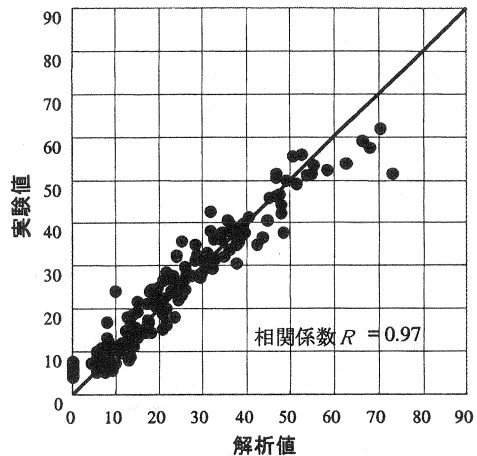


図-4 実験値と解析値の関係

3. 数値シミュレーションによる充填性評価

3.1 注入条件が充填性に及ぼす影響

定式化されたグラウトの先端角度式を用いて、注入条件がグラウトの充填性に及ぼす影響について検討を行ってみることにする。これまで著者らが行ってきた実験結果から、試験装置水平部において流動時のグラウト先端角度がほぼ20 $^{\circ}$ 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。⁴⁾ 管径、管の傾斜角度、グラウトの密度をパラメータにして先端角度が20 $^{\circ}$ 以上になる時のグラウトの降伏値と流速の関係を求めることにした。実験より塑性粘度は降伏値と相関関係があり、塑性粘度を式(2)で表すことができる。⁴⁾

$$\mu = 0.1235 \tau_f + 0.001 \quad (2)$$

図-5は解析パラメータとして管径を30mm、50mm、70mmに変化させた場合の流速と降伏値の関係を表している。図-6はパラメータとして管の傾斜角度を5 $^{\circ}$ 、10 $^{\circ}$ 、15 $^{\circ}$ に設定した場合、図-7はパラメータとして、グラウトの密度を1800kg/m³、2000kg/m³、2200kg/m³

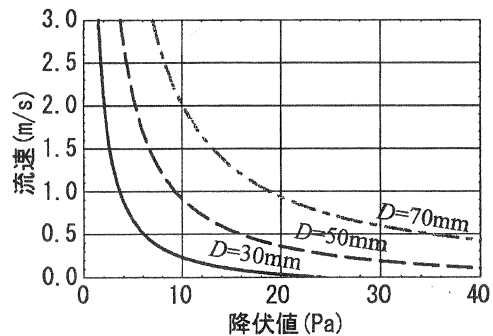


図-5 流速と降伏値の関係 (管径変化)

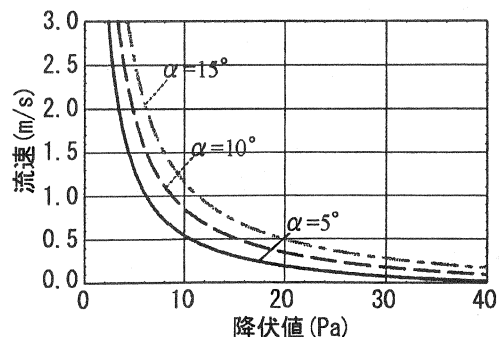


図-6 流速と降伏値の関係 (傾斜角度変化)

に設定した場合の流速と降伏値の関係を表している。いずれのグラフも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° 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、グラウトの流速は小さくてもよく、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、充填に必要な流速は上がることが理解される。さらに、図-5 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-7 から理解される。

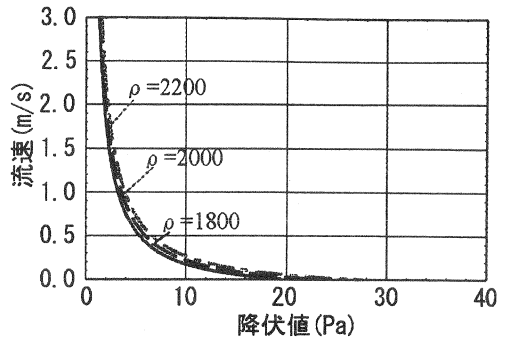


図-7 流速と降伏値の関係 (密度変化)

3.2 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程注入時の圧力も高くなることを意味している。施工条件として注入圧力は低い方がよいが、充填性能を損なわない条件を満たしながら注入する際の圧力について解析的に検討を行ってみることにした。

試験装置の曲がり部の損失を無視して、図-1 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にベルヌーイの運動方程式を適用すると式(3)が導かれる。

$$\frac{v_1^2}{2g} + \frac{p_1}{\rho g} + z_1 = \frac{v_2^2}{2g} + \frac{p_2}{\rho g} + z_2 + f \frac{l}{D} \frac{v_2^2}{2g} \quad (3)$$

ここに、 f は抵抗係数、 v は流速、 p は圧力、 z は高度水頭、 l は管内におけるグラウトの長さ、 D は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 $v_1=v_2=v$ とおくことができ、またグラウト先端の圧力は $p_2=0$ とみなすことができる。したがって、式(3)を整理して式(4)を得ることができる。

$$H = z_1 - z_2 + \frac{p_1}{\rho g} = f \frac{l}{D} \frac{v^2}{2g} \quad (4)$$

ここで、 H は流速 v でグラウトが流動している時の水頭差である。 H は、グラウト注入時に測定を行わなければならない、測定も難しい。そのため、グラウト静止後のつり合い状態にある時に測定される水頭差 h で H を代表させることにした。また、図-1 に示す試験装置の場合 $p_1=0$ とおくことができる。したがって、抵抗係数 f は式(5)を用いて実験結果から求めることができる。

$$f = \frac{2ghD}{lv^2} \quad (5)$$

図-8 は、実験結果に基づいて式(5)より求めた f を縦軸にレイノルズ数 Re を横軸にプロットしたものである。縦軸、横軸ともに対数軸を用い、ビンガム流体とみなされるグラウトのレイノルズ数は式(6)を用いて求めることにした。

$$Re = \frac{\rho v D (4a\alpha)}{\eta} \quad (6)$$

$$\text{ここに、} a = \frac{\tau_f}{\tau_f + \mu \left(\frac{8v}{D} \right)}, \quad \alpha = \frac{a^4 - 4a + 3}{12a}$$

図-8 から、抵抗係数 f とレイノルズ数 Re との関係は $f=14/Re$ で表され、その相関係数は 0.98 となっている。抵抗係数 f とレイノルズ数との間には一般には $f=64/Re$ の関係があると言われている。これに対し、今回の実験から得られる場合の係数は小さい値となっている。これは、グラウト流動中の水頭差 H の値を、静止後の釣り合い状態時の水頭差 h で代表させて f を求めているためと考えられる。また、曲がり部の影響も一因として考えられる。これらの点を考慮して、抵抗係数 f は係数 k を導入して式(7)のように表すことにした。

$$f = k \frac{64}{Re} \quad (7)$$

ここに、係数 k は試験方法により決まる値で、今回の実験では $k=0.22$ となる。

注入部の注入圧力 P を式(4)と式(7)を用いて表すと、式(8)が導かれる。

$$P = \rho gh = k \rho v^2 \frac{32}{Re} \frac{l}{D} \quad (8)$$

これまでの実験からは実際の注入圧力は計測されていないので、PC グラウト&プレグラウト PC 鋼材施工マニュアル(改訂版)⁶⁾に示されているグラウトの流量と注入圧力のデータを用いて式(8)より係数 k の値を推定することにした。グラウトには混和剤としてコンベックス 208T が添加されている。降伏値は J_{14} 漏斗による流下時間 t から式(9)を用いて推定することができる。⁴⁾

$$\tau_f = 2.77t - 5.83 \quad (9)$$

流速は 0.16m/s~1.41m/s、管径は 15mm~25.4mm まで変化している。なお PC 鋼材は挿入されていない。

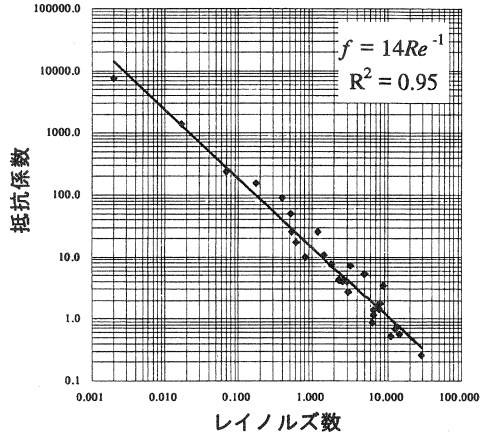


図-8 抵抗係数とレイノルズ数の関係

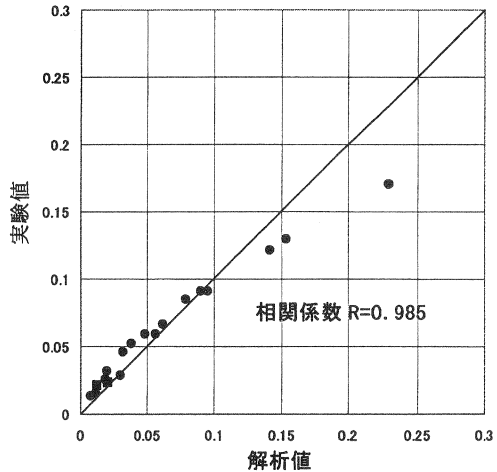


図-9 注入圧力の実験値と解析値の関係

このマニュアルに示してある値から逆に k を求めると、 $k=0.39$ に設定した時、解析値と実測値がほぼ一致していると認められる。(図-9 参照)。そのときの相関係数は 0.99 であった。図-1 に示す実験装置を用いた場合 $k=0.22$ となっており、実際のポンプ注入の際には $k=0.22$ よりも大き目の値を設定した方が良く分かる。

3.3 注入圧が充填性に及ぼす影響

注入条件として、例えば先端角度が 20° 以上になるようなグラウトの施工条件についても検討を行ってみたいことにする。グラウト先端部の角度が 20° 以上となるために必要な流速と降伏値の関係は式(1)より求めることができ、その傾向は図-5~図-7 に示されている。充填条件を満たすためにグラウトに必要とされる流速は、グラウトの降伏値が増加するに伴って減少し、ゼロに漸近する傾向がある。充填に必要とされる流速がゼロに近づくにつれて、注入に要する時間は無限大となり、実際の注入条件では起り得ないような流速領域に入る。したがって、実際のグラウト注入においては流速の下限值は存在する。そのため、流速の下限值として 0.1m/s を設定することにした。この値は PC グラウト&プレグラウト施工マニュアル(改訂版)に示されている事例の中で最小の流量を採用したものである。

計算モデルとして、全長 30m、内径 20mm、傾斜角度 0° の場合(ケース 1)と全長 10m、内径 50mm、下り勾配 15° の場合(ケース 2)の 2 つを例にして検討を行うことにした。ケース 1 およびケース 2 の場合のグラウト先端角度が 20° 以上となるために必要な流速と降伏値の関係を表すグラフをそれぞれ図-10 と図-11 に示している。この図の網掛け部分がそれぞれの条件で先端角度が 20° 以上になる領域を表している。この時の注入圧力 P と降伏値の関係を表したものをそれぞれ図-12 と図-13 に示している。ケース 1 の場合、流速が大きくなると圧力 P は大きくなり、また流速が小さくなくても充填に必要とされる降伏値が大きくなるために抵抗係数が大きくなり圧力 P も大きくなる。この場合には、注入圧力を最小にできるような降伏値が存在している。降伏値が 10.5Pa 付近で最も小さい注入圧力でシース内を充填させることができると考えられる。この時の圧力 P はおよそ 0.09MPa であり 1m 当たりの損失圧力はおおよそ 0.003MPa であった。

ケース 2 の場合には、管径が大きいことと傾斜があ

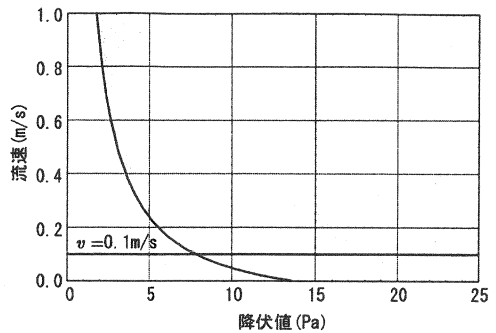


図-10 流速と降伏値の関係(ケース 1)
($L=30\text{m}$, $D=20\text{mm}$, $\alpha=0^\circ$)

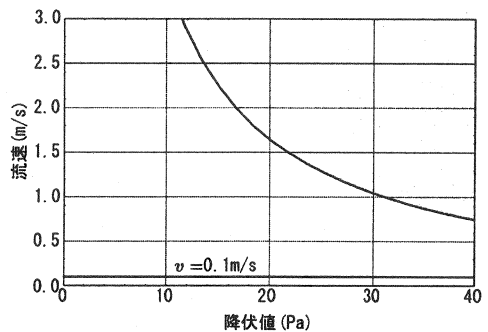


図-11 流速と降伏値の関係(ケース 2)
($L=10\text{m}$, $D=50\text{mm}$, $\alpha=15^\circ$)

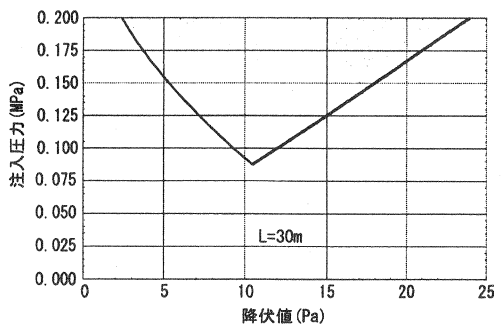


図-12 注入条件
($L=30\text{m}$, $D=20\text{mm}$, $\alpha=0^\circ$)

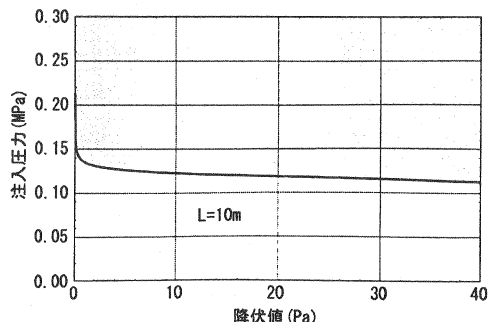


図-13 注入条件
($L=10\text{m}$, $D=50\text{mm}$, $\alpha=15^\circ$)

るために、ケース 1 に比べ同じ降伏値に対して必要とされる流速は大きくなるのが図-11 より認められる。注入圧力は、降伏値が増加するのに伴い低下する傾向が認められるが、降伏値が小さい場合を除いては、圧力の変化の程度は小さい。すなわち、このような場合には降伏値が小さいグラウトを用いた方が、流速も速くなり、施工能率も良くなることが理解される。この場合の 1m 当たりの損失圧力は 0.011~0.012 MPa であった。

今回、ケース 1 とケース 2 を例にとり、グラウトの材料特性が注入条件に及ぼす影響について検討を行った。これらの検討例のように、グラウトの特性およびシースの配置条件から充填を確実にする流速および注入圧力を施工計画時に設定することができると考えられる。

4. 結論

確実に容易なグラウトの施工を可能にするために、これまでの研究において定式化されたグラウト先端角度式と新たに導出した注入圧力の算定式を用いて、数値シミュレーションによる検討を行った。今回の検討で得られた結果をまとめると以下の通りである。

- (1)管内を流れるグラウトの抵抗係数とレイノルズ数との間には相関関係が認められ、実験から定式化された抵抗係数とレイノルズ数との関係から、グラウト注入に想定されるポンプの注入圧力を定式化することができた。
- (2)パラメータ解析を行った結果、グラウトの充填に必要な流速および降伏値は密度の影響はあまり受けず、一方で管径および管傾斜角度の影響を受ける。特に、管径の変化は充填に必要な流速および降伏値に大きく影響を及ぼすことが明らかとなった。
- (3)シースの管径および配置条件に応じて、充填に必要なグラウトの流速、降伏値の関係を求め、さらに注入圧力を算定することにより、合理的な施工を検討することが可能になることが解析を通して確認された。

謝辞：本研究は科学研究費補助金(課題番号 13650513)の一環として行われたものである。また、本研究を行うにあたり、関東学院大学 北野義則教授より貴重な助言をいただきました。紙面を借りてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 出雲淳一：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.5，2000.9
- 2) 西村繭果，魚本健人：数値解析手法による PC グラウトの充填性に関する定量評価，土木学会第 55 回年次学術講演会，V-408，2000.9
- 3) 伊藤一聡，足立一郎，魚本健人：PC グラウトの流動特性が充填性に及ぼす影響，土木学会第 55 回年次学術講演会，V-409，2000.9
- 4) 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.5，2001.9
- 5) 西村繭果，伊藤一聡，魚本健人：PC グラウトのレオロジー特性及び注入条件が充填性に与える影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，2000
- 6) 社団法人プレストレスト・コンクリート建設協会：PC グラウト&プレグラウト PC 鋼材施工マニュアル(改定版)，1999