

## グラウト充填シミュレーションの検討

太平洋セメント(株)中央研究所 正会員 葉修 ○小川彰一  
 オリエンタル建設(株)技術研究所 正会員 江口信三  
 オリエンタル建設(株)建築支店 正会員 工修 大熊晃  
 オリエンタル建設(株)技術研究所 正会員 工博 呉承寧

### 1. はじめに

PC グラウトは、PC 鋼材の防食と、付着による構造物との一体化を目的として用いられ、シースダクトへ確実に充填を行う必要がある。グラウトのダクト内における流動状態は、セメントや混和材料などのグラウト材料、配合、練混ぜ方法、環境温度などによって決まるレオロジー特性、その経時的变化、注入速度、シース管の径と鋼材の種類や本数で決まるダクト内の空隙率など、多くの因子に影響される。特にグラウトのダクト下り勾配への充填では、ダクト底部に沿って流下する先流れ現象が生じ、注入方向とは逆に最下点から注入口に向かって充填される。この時に、内部に残留した空気はダクト内部に閉じ込められる可能性がある。従って、用いるグラウトの粘性の選定、適切な位置への排気口の設置など、グラウトの施工では多くの要因を考慮して行わなくてはならない。

グラウトの充填性の確認は、既に実績のある構造物では JP 漏斗によるグラウトの流動性で評価する。しかし、ダクトが特殊な配置を強いられるケースなどでは、実際の構造物と同等の条件下で予め施工試験を行って充填性を確認することを原則としており、適切なグラウトの選定、排気口の設置位置の決定には多くの時間と労力を要する。

これらの問題を解決するため、本研究ではグラウトの充填性を解析的に求めることを目的とし、グラウトのダクト内における流れのシミュレーションを試みた。

### 2. 解析および試験の概要

#### 2.1 グラウトのレオロジー測定

グラウトの充填解析では、その物性値であるレオロジーを把握する必要がある。本報告では、共軸二重円筒型回転粘度計を用いグラウトのレオロジーを測定した。回転粘度計の円筒の形状を図-1に示す。粘度の測定では、グラウトはチクソトロピー性を示す場合が多いため、外筒を1分間で100rpmまで回転速度を上昇させ、その後1分間で0rpmまで低下させる時に内筒に生じるトルクを測定した。

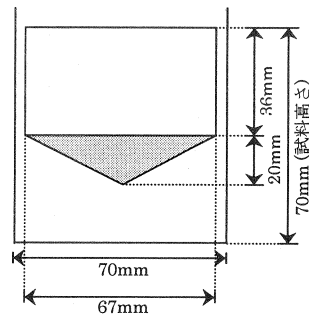


図-1 試験に用いた共軸二重円筒型粘度計

#### 2.2 粘性モデル

図-2(1)にグラウトの流動曲線を回転粘度計で測定した例を示す。レオロジー測定における外筒の回転数上昇時と比較して、回転数の下降時に測定されるせん断応力は低く、用いたグラウトがチクソトロピーの性質をもつことが分かる。グラウトの注入ではグラウトポンプや注入口などの狭まった部位を通過して静止することなく注入されることから、ダクト管内に注入されたグラウトは、既に高いせん断応力を受けており、チクソトロピーの原因であるセメント粒子間に経時的に形成される高次構造は破壊されていると考えられる。従って、解析では外筒回転下降時の流動曲線を用いることとした。

一方、数値計算では流動曲線をモデル化する必要があるが、流動曲線は緩やかな曲線を示したため、応力に対してひずみ速度が直線関係となるニュートンモデルやビンガムモデルを構成式として適応すると誤差が大きくなる可能性がある。また、このように粘塑性が変化するフレッシュコンクリートにおいても、その流動曲線のビンガムモデルによる定式化では不十分であることが指摘されている<sup>1)</sup>。そこで、本報告ではグラウトのレオロジーモデルとして、式(1)に示す Hershel-Bulkley モデル<sup>2)</sup>を適応することとした。

$$\tau = \kappa \cdot \gamma^n + \tau_0 \quad (1)$$

ここで、 $\tau$ : せん断応力,  $\gamma$ : ひずみ速度

このモデルでは、 $n=1$  の時は、 $\kappa$ が塑性粘度、 $\tau_0$ が降伏値となるビンガムモデルの塑性流動を表し、また、 $n=1$ かつ $\tau_0=0$ の時はニュートン流体を表わすこととなる。

図-2(2)に、測定されたグラウトを Hershel-Bulkley モデルで近似した結果を示した。このモデルを適応することでグラウトの流動曲線を上手く表現でき、特にグラウト先端部ではせん断応力が小さくなると考えられるが、この領域においても近似曲線は流動曲線をよく表わすものであった。

### 2.3 解析手法

基礎方程式を式(2)に示した。運動方程式としてグラウトを非圧縮性流体としたナビエーストークスの式(Navier-Stokes' equation)を用い、重力がグラウトに作用する力を考慮している。

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad (2)$$

ここで、 $u_{i,j}$ :  $i,j$  方向流速成分、 $\rho$ : 密度、 $p$ : 圧力、 $g_i$ :  $i$  方向重力、 $\mu$ : 粘性係数

グラウトの充填解析では、先端部のグラウトと空気との界面である自由表面を表わす必要があり、本報告ではその表現方法として VOF 法を用いた。その概念を図-3に示す。VOF 法は Euler 座標系で問題を記述し、流体占有率  $F$  (0 から 1 の連続関数) で流体存在を表現するモデルで、輸送方程式を式(3)に示した。 $F$  が 0.5 となる位置が自由表面の境界を表すこととなる。

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (u_i \cdot F) = 0 \quad (3)$$

### 2.4 注入試験

グラウトは、増粘剤を含有する市販のグラウト用混和剤を使用して製造した。水セメント比(W/C)は 40~45%とし、流動性は W/C で調整した。試験で使用したグラウトの JSCE-F 531-1999 に規定される JP 漏斗での流下時間は 10 秒以下であり、ノンブリーディング低粘性型のグラウトに分類されるものである。

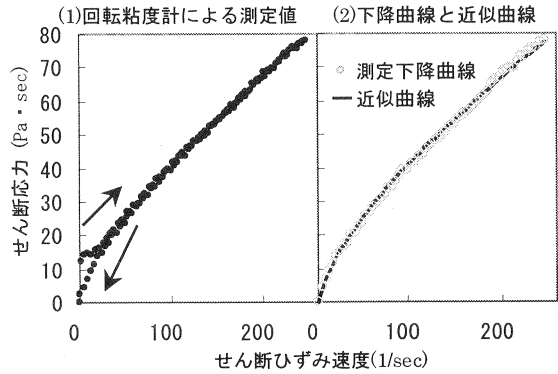


図-2 グラウトの流動曲線と Hershel-Bulkley モデルによる近似

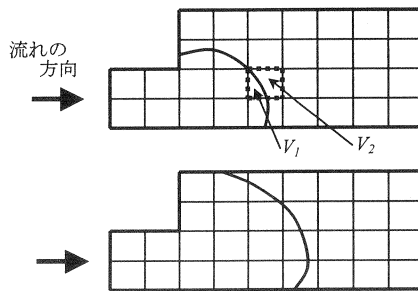


図-3 VOF 法における自由表面の概念

一方、注入ダクトとして、径の異なる長さ 2m の透明塩ビ管を用い、また、傾斜を条件ついても検討することとした。グラウトの注入速度は一定とし、注入ポンプは脈動が極めて少なく安定した突出量が得られるモノポンプを用いた。

### 3. 結果および考察

#### 3.1 解析で用いる塑性粘度係数

グラウトの注入試験は屋外で行ったが、解析に必要な練り混ぜられたグラウトのレオロジー測定を屋外で行うことは困難であった。これは、回転粘度計の校正に用いる標準粘度液(JIS Z 8809 適合品)の粘度が温度によって著しく影響を受けるためであり、グラウトのレオロジーを精度よく測定することが難しいためである。

そこで、JP 漏斗流下時間から解析に必要な塑性粘度係数 $\kappa$ (式(1))を求めることとした。まず、予め水セメント比を変化させることで流動性の異なるグラウトのレオロジーを測定して、Hershel-Bulkley モデルでの  $n$  の値を求めた。JP 漏斗流下時間が 4.4~9.8 秒としたグラウトの  $n$  値が 0.73~0.8 の範囲、平均で  $n=0.78$  であった。そこで、図-4 に示したメッシュを用いて  $n=0.78$  一定と仮定し、塑性粘度係数 $\kappa$ 値を変化させて JP 漏斗流下時間をシミュレーションを行った。得られた $\kappa$ 値と流下時間との関係を図-5 に示す。この関係式を用いて、注入実験時に測定した JP 漏斗流下時間の実測値から解析で用いる塑性粘度係数 $\kappa$ を決めた。

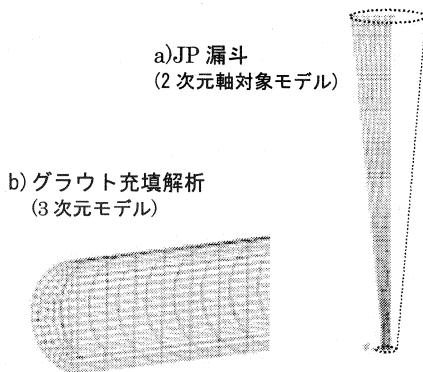


図-4 解析に用いたメッシュ

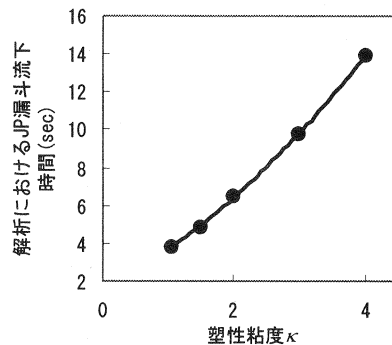


図-5 Hershel-Bulkley モデルにおける  $\kappa$  と JP 漏斗流下時間との関係 ( $n=0.78$ )

#### 3.2 実測値と解析値との比較

グラウトの注入実験の様子を図-6 に示した。また、結果のまとめを表-1 に、注入実験および解析におけるグラウト先端部の様子を図-7 に示した。

注入実験におけるグラウト先端部長さは、それぞれ、塩ビ管の注入口付近、中間部および排出口付近で測定し、何れの箇所でもほぼ同じ長さであることを確認した。また、流速は注入前の測定、および排出されるグラウトの単位時間あたりの量から求め、両者の流速

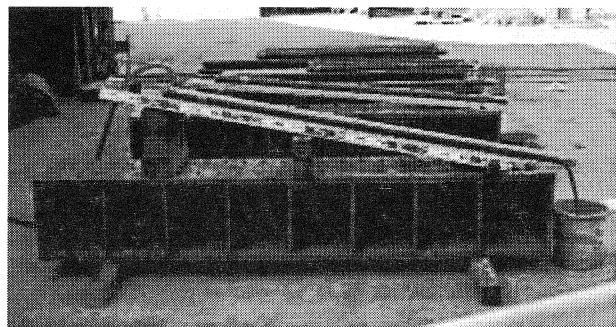


図-6 グラウト注入実験概況

もほぼ同じ値を示し、注入による圧力上昇が流速に与える影響は小さいと考えられる。

本研究で用いたグラウトの JP 漏斗流下時間はおよそ5秒前後と狭い範囲であり、またダクト内径が28および41mmと限られるものである。しかしながら、注入流速は3~10m/minと広範囲であり、また、下り勾配角度の試験(表-1 No.5~7)において、先流れ現象が解析的にも再現することができた。

しかしながら、表-1に示した先端部長さ、実測値と比較して解析値はやや長い先端部長さを示した。この原因として、グラウトはチクソトロピー性を示し、注入実験でのグラウト先端部の粘度は解析で用いた値より大きい可能性があること、Hershel-Bulkley モデルにおける  $n$  値(式(1))を0.78と仮定したが、この値が温度の影響を受け注入実験で用いたグラウトの  $n$  値と異なっていること、などが原因として考えられる。

実構造物におけるグラウト充填では、ダクト内にPC鋼材が配置されており、またダクトにはリブも存在する。本法を実構造物の充填解析に適用するには更なる検討が必要であるが、解析値はグラウト先端部の状態をよく表現し、このような数値シミュレーションはグラウト充填性の評価に利用できるものになり得ると考えられる。

#### 4. まとめ

グラウト流動曲線を Hershel-Bulkley モデルで近似し、数値計算によるグラウト流れ先端部のシミュレーションを行った。解析結果は実験結果をよく表現し、本方法はグラウトの充填性を確認するための有効な手段になり得ると考えられる。

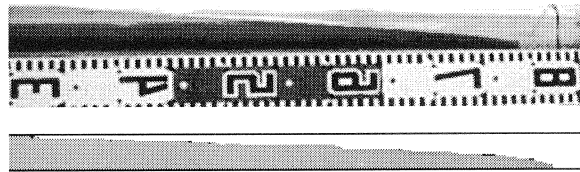
#### 参考文献

- 1) 山田義智、大城武：フレッシュコンクリートの粘塑性構成式とその流動特性に関する解析的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 24, No. 1, pp. 855-860, 2002
- 2) Harschel, W. & Bulkley, H. : Kollid-Z., Vol.39, pp.291, 1926

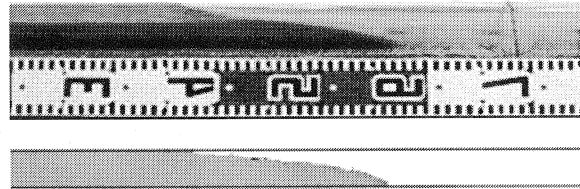
表-1 注入実験と解析値との比較結果

No.	ダクト内径 (mm)	角度 (°)	流速 (m/min)	JP流下時間 (sec)	先端部長さ	
					実測 (cm)	解析 (cm)
1	28	0	3.49	4.53	19.0	23.3
2	28	0	5.62	4.99	11.5	13.5
3	41	0	5.27	4.39	45.5	53.3
4	41	0	9.62	4.85	30.5	31.2
5	41	0	9.63	5.80	21.5	19.5
6	41	-5			48.0	49.1
7	41	-10			先流れ	先流れ

No. 3 Φ41 水平 5.27m/s JP4.39s



No. 5 Φ41 水平 9.63m/s JP5.80s



No. 6 Φ41 -5度 9.63m/s JP5.80s

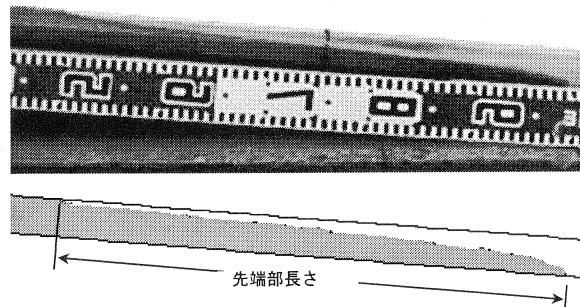


図-7 注入実験および解析でのグラウト先端部