

PC グラウトの流体解析

出雲 淳一*1・大城 壮司*2・高瀬 慎介*3・堤 忠彦*4

1. はじめに

PC グラウトは設計供用期間を通じて PC 構造物の機能を維持するうえできわめて重要な要素であり、品質の向上に関わるさまざまな試みがなされている。とくに PC グラウトに要求される性能のうち、もっとも重要なものは PC 鋼材を腐食から保護する性能であり、そのためには確実な充てん性を確保する必要がある。通常、PC グラウトの充てん性の確認は、施工しようとする構造物を実物大で模した試験供試体を用いた注入実験により行われる場合が多い。しかし、この方法による場合、必要となる時間とコストは莫大であり、必ずしも合理的な方法とはいえない。そこで、これに代わる有効な手段の確立が期待される場所である。

プレストレストコンクリート技術協会 PC グラウト規準作成委員会では、PC グラウトの性能を照査する方法を確立するにあたり、PC グラウトの材料特性に関するさまざまな実験を行い、これをもとにした検討を実施した。委員会では、この活動の一環として PC グラウトの充てん性を照査する手段として、FEM による流体解析の適用を提案し、その適用性に関する検討を実施した。本報告では、JP 漏斗試験やフロー試験の結果を対象として実施した PC グラウトのモデル化に関する検討、およびこの結果をもとに実物大実験を解析的にシミュレーションした結果について報告する。

2. 流体解析の基本

ここではまず、PC グラウトの流動性状、および注入状況を解析的にシミュレーションする流体解析を行う場合の基礎となる基本式、離散化手法、解析対象のモデル化手法、および解析手順について概説する。

2.1 基本式

流体解析を行うための基本式として、運動量保存式、質量保存式、状態方程式、界面移動式の 4 つの式がある。こ

れらの 4 式を解くことにより、グラウトの流れを解析することができる。以下にこれらの式を概説する。

(1) 運動量保存式 (ナビエーストックスの式)

運動量保存の式として、式 (1.1) で表されるナビエーストックスの式が適用されている。式中の左辺の大括弧内のうち第 1 項が時間項であり、第 2 項、第 3 項、第 4 項は、移流項あるいは慣性項とよばれるものであり、運動量が慣性力として運ばれることを表している。また、右辺第 1 項が圧力項であり、グラウト注入圧力によって流れが生じる。グラウトの解析においては、境界条件として注入口の圧力が設定される。右辺第 2 項および第 3 項はそれぞれ粘性項および外力項を表している。

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) + \rho F_x \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + \rho F_y \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \rho F_z \end{aligned} \quad (1.1)$$

ここに、 ρ は密度、 u は流速、 P は圧力、 μ は粘性係数、 F は外力を表す。

(2) 質量保存式

解析領域内への流入、解析領域からの流出を合計すると解析領域内では、つねに質量は保存されており、これを表す式として式 (1.2) が適用される。グラウトの解析では、密度の変化がなく一定 (非圧縮性流体)、すなわち $\partial \rho / \partial t = 0$ とし、全体を密度で割って得られる式 (1.3) を用いる。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \rho \frac{\partial u}{\partial x} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.2)$$

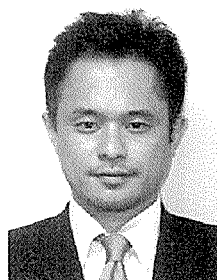
$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1.3)$$

(密度変化がない場合—非圧縮粘性流体)



*1 Junichi IZUMO

関東学院大学 工学部 社会環境システム学科 教授



*2 Takeshi OSHIRO

中日本高速道路(株) 中央研究所



*3 Shinsuke TAKASE

(株) 計算力学研究センター



*4 Tadahiko TSUTSUMI

(株) 富士ピー・エス 技術本部

(3) 状態方程式

施工時の温度変化や湿度変化など、PC グラウトの状態を表現する式として、状態方程式が用いられる。一般的には、これらの影響は小さいものと仮定し、一定温度を仮定して解析を行うことで、状態方程式 (1.4) は用いられていない。

$$f(\rho, p, T) = 0 \quad (1.4)$$

(4) 界面移動式

流体解析を行う場合、主に密度と粘度が材料定数として与えられるので、その密度と粘度を要素ごとで決定するために、体積分率 α ($0 \leq \alpha \leq 1$) を用いて各要素での密度を以下のように決定する。この式は、グラウトと空気それぞれの質量保存式であるといえる。要素ごとに α を計算し、流入方向から順次境界表面の位置を求める。

すなわち、

$\alpha = 0$: 要素に流体は存在しない

$\alpha = 1$: 要素は流体に占有されている

$0 < \alpha < 1$: 要素に液体と気体の界面が含まれているとし、 $0 \leq \alpha \leq 1$ の場合 $\alpha = 0.5$ を界面位置とする。この方法を VOF (Volume of Fluid) 法と呼ぶ。

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + u \frac{\partial \alpha}{\partial x} + v \frac{\partial \alpha}{\partial y} + w \frac{\partial \alpha}{\partial z} = 0 \quad (1.5)$$

$$\rho = \alpha \rho_{Liq} + (1 - \alpha) \rho_{Gas} \quad (1.6)$$

2.2 離散化手法

離散化手法は、有限要素法 (以下 FEM : Finite Element Method) を用いるのが一般的である。FEM は、解析領域を多数の部分領域 (有限要素) に分割して解析を行う方法である。各要素を構成する節点に形状関数と呼ばれる関数を設定し、この形状関数を解析領域全体に重ね合わせ、さらに偏微分方程式を弱形式と呼ばれる積分形式に変換し、解析領域全体を積分し間接的に解く方法である。有限要素法の利点は、解析領域を任意の要素 (立方体, 3角錐等) でモデル化でき、形状を正確にモデル化できることである。また、境界条件等を節点毎のデータで簡単に与えられる等、汎用プログラムとして使いやすいことなどがあげられる。

2.3 解析方法

ここでは、有限要素法による汎用熱流体解析ソフトを用いる場合の解析手順を示す。基礎方程式であるナビエーストックス方程式は非線形方程式であるため、非線形方程式を解くために反復計算を行う必要がある。

解析は、まず最初にナビエーストックスの圧力項を取り出し、圧力 Poisson 方程式の形に変形し、反復解法 (共役勾配法系列) を用いて、解析領域全体についての圧力値を求める。そこで求められた圧力をナビエーストックスの式に戻し、解析領域全体を質量保存の式を満足するように、反復解法 (共役勾配法系列) を用いて流速を求める。求められた流速を用いて自由表面位置の計算を行い、収束判定を行って次のステップに進むという手順で行う。

3. 材料特性のモデル化

グラウトの材料特性の一つである流動特性は、解析結果に大きく影響を与える。ここでは、グラウトの基本的な性質に基づいて、グラウトの材料特性のひとつである流動性をモデル化する手法について解説する。

単純な 1 相系の流体である水や油では、通常、せん断ひずみ速度とせん断応力の関係は原点を通る直線で表されるニュートン流体となる。しかしながらグラウトのような懸濁液で、しかも分散状態に大きく影響を及ぼす増粘剤などの混和材料が添加された系では、その挙動も複雑となり、せん断ひずみ速度とせん断応力の関係はほとんど直線関係とはならず、粘度がせん断速度に依存する性質を表す。このようなグラウト特性は、せん断ひずみ速度とせん断応力との関係曲線 (以下、流動曲線) として捉えることができる。

さらに、グラウトの種類によっては、せん断力を与えることで粘度が時間の経過とともに低下し、せん断応力を除くと徐々に粘度が復元するチクソトロピー性や、温度によって流動性が変化する温度依存性を示す場合がある。解析ではこれらグラウトの材料特性を考慮した上で、グラウトの粘度を測定し、その結果得られる流動曲線をモデル化して用いている。

3.1 粘度の測定

PC グラウトの塑性粘度の測定には、一般に単一円筒形回転粘度計の一種類である B 型回転粘度計 (ブルックフィールド形回転粘度計) や共軸二重円筒形回転粘度計が用いられる。これら粘度計による測定方法や装置の校正方法は JIS に規定されている^{1)~4)}。

写真 - 1 に、共軸二重円筒形回転粘度計による粘度の測定状況を示す。図 - 1 に共軸二重円筒形回転粘度計により計測された各種グラウトの流動曲線を示す。また、図 - 2 には、代表的な 2 種類のグラウトについて、回転上昇および下降時の流動曲線を示す。図 - 1 より、グラウトの種類によって流動曲線が異なり、粘性はせん断ひずみ速度の影響を受け、さらにグラウトの種類によって流動曲線のパターンが大きく異なることが分かる。また、図 - 2 より回転

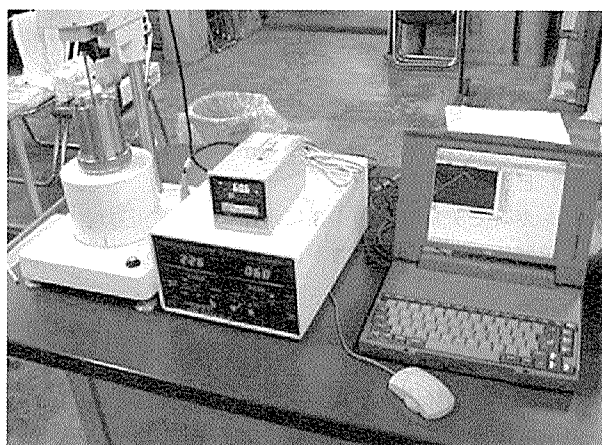


写真 - 1 共軸二重円筒形回転粘度計

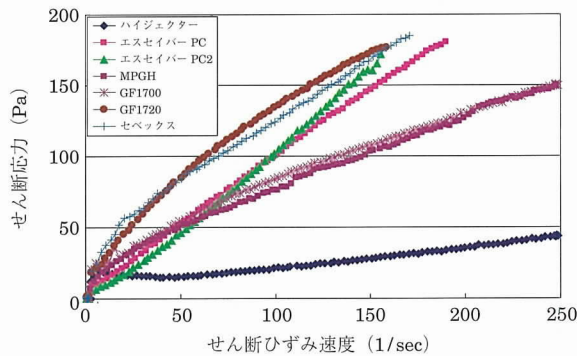


図 - 1 共軸二重円筒形回転粘度計により計測された各種グラウトの流動曲線

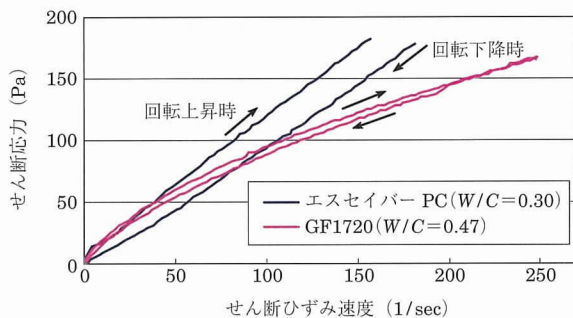


図 - 2 回転上昇および下降時の流動曲線

上昇時と下降時で流動曲線が異なったカーブを描き、チクソトロピー性が現れていることが分かる。解析では、このように異なる流動曲線をどのようにモデル化するのが重要となる⁵⁾。

3.2 流動曲線モデル

流動曲線のモデルで一般的に用いられるニュートンモデル、ビンガムモデル、べき乗モデルについて以下に概説する。

(1) ニュートンモデル

ニュートンモデルでは、得られた流動曲線を原点を通る直線として表す。

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1.9)$$

ここに、 τ はせん断応力、

μ は粘度、

$\dot{\gamma}$ はせん断ひずみ速度を表す。

粘性はせん断ひずみ速度の影響を受けず、ニュートンモデルでは、解析に用いる構成則は粘度のみとなる。

(2) ビンガムモデル

ビンガムモデルでは図 - 3 に示すように、応力とひずみは直線関係であるが、応力がある値（降伏値）以下では流動を示さない。

$$\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma} \quad (1.10)$$

ここに、 τ_y は降伏値を表す。

ビンガムモデルを用いる場合の構成則は、降伏値および粘度である。

(3) べき乗モデル

グラウトの流動曲線は、ニュートン流体やビンガム流体のように必ずしもせん断応力とせん断ひずみ速度は直線関係にならず、これらでモデル化を行う場合には、どのひずみ速度領域を用いて近似するかといった問題がある。そこでべき乗モデルでは（図 - 3）、これらモデル化にともなう不現実性を少なくするため、指数関数を用いて、流動曲線を曲線のまま近似するものである。

$$\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma}^n \quad (1.11)$$

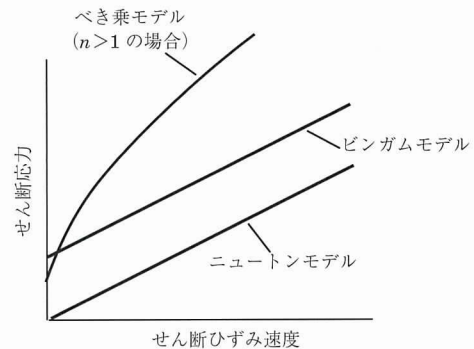


図 - 3 流動曲線モデル

4. PC グラウトへの適用

4.1 概要

実施工のグラウト注入を解析的にシミュレーションして PC グラウトの充てん性照査を可能にするためには、まず、JP 漏斗試験やフロー試験等の簡易な現象を解析的に精度よく再現できる必要がある。そこで、塑性粘度試験結果から得られた PC グラウトの流動曲線を用いて、解析で使用する PC グラウトの材料特性のモデル化に関する検討を JP 漏斗試験およびフロー試験結果を対象としたベンチマーク解析で実施し、試験結果との比較を行って、流体解析の基本的な適用性に関する検討を行った。その後、ベンチマーク解析で得られた知見をもとに実物大注入実験を対象とした解析を実施し、実施工における PC グラウトの充てん性照査に対する流体解析の適用性を検討した。

4.2 ベンチマーク解析

ベンチマーク解析で使用した実験データは、「PC グラウト規準作成委員会」品質試験 WG で実施した各種試験から抜粋したものである。解析の対象とした PC グラウトの材料特性を表 - 1 に示す。

解析には、有限要素法による汎用熱流体解析ソフトを使用した。JP 漏斗試験解析やフロー試験解析の場合、PC グラウトの界面位置が時間の経過とともに変形するため、界面状態を評価する方法として、2.1 (4) で述べた VOF (Volume of Fluid) 法を用いて解析を行っている。

4.2.1 JP 漏斗試験解析

(1) 解析条件

JP 漏斗試験の場合、流れが等方的な現象であるため、軸対称モデルを用いてモデル化を行い、流出口での最小要素

表 - 1 各 PC グラウトの材料特性

PC グラウト	塑性粘度 Pa·s	降伏値 Pa	単位容積従量 kg/m ³
A (低粘性タイプ)	0.44	28.8	1 901.0
B (高粘性タイプ)	1.00	31.8	1 919.0
C (低粘性タイプ)	0.57	10.2	1 907.0
D (超低粘性タイプ)	0.15	11.0	2 026.0
E (低粘性タイプ)	0.93	6.4	2 031.0
F (高粘性タイプ)	1.81	4.7	2 128.0
G (高粘性タイプ)	1.08	33.0	1 909.0

幅が 0.35 mm になるように要素分割を行っている。また、境界条件として、JP 漏斗壁面はすべりがないと仮定し、流出口境界において重力による自由流出として解析では取り扱っている。図 - 4 に解析に用いた JP 漏斗の解析領域と境界条件を示す。PC グラウトの材料特性は、共軸二重円筒形回転粘度計を用いて測定された上昇時の結果をもとにビンガムモデルとしてモデル化を行っている。また、図 - 5 に共軸二重円筒形回転粘度計より得られたせん断応力-せん断ひずみ速度の関係および計算で使用したビンガムモデルの例を示す。

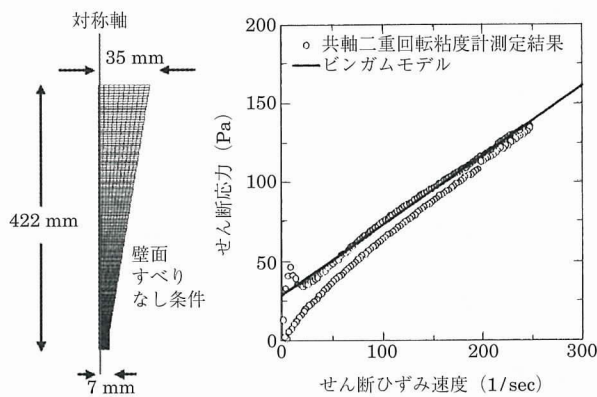


図 - 4 解析領域および境界条件

図 - 5 せん断応力-せん断ひずみ速度の関係

(2) 解析結果

JP 漏斗試験解析の結果を表 - 2, 図 - 6 に示す。実測値と解析値の比の平均値は 0.91 であり、おおむね実測値とよい一致を示していることが分かる。このことにより、超低粘度から高粘度までの粘度の違う PC グラウトでも材料特性の違いによらず、PC グラウトの流動性の評価指標である JP 漏斗試験に対して、流体解析が可能であることがわかった。また、材料 D, E, F に関しては、解析値と実測値の誤

表 - 2 実測値と解析値の比較

PC グラウト	JP 漏斗試験		解析／実測
	解析 (s)	実測 (s)	
A (低粘性タイプ)	6.5	6.5	1.00
B (高粘性タイプ)	13.3	12.7	1.05
C (低粘性タイプ)	6.3	6.6	0.96
D (超低粘性タイプ)	3.2	4.4	0.73
E (低粘性タイプ)	8.3	9.5	0.87
F (高粘性タイプ)	14.0	18.2	0.77
G (高粘性タイプ)	14.9	14.7	1.01

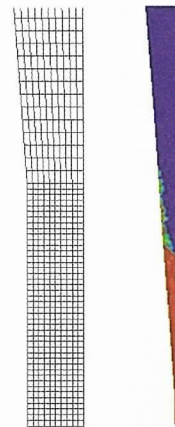


図 - 6 有限要素分割図と解析結果

差が他に比べて比較的大きいことから、塑性粘度のモデル化について感度解析を実施している。本誌では紙面の関係で省略するが、その結果についてはべつの機会に報告する。

4.2.2 フロー試験解析

(1) 解析条件

フロー試験の場合も JP 漏斗試験と同様、流れが等方的な現象であるため、軸対称モデルでモデル化を行い、有限要素分割は、最小格子幅が 2 mm の等間隔として解析を行った。また、境界条件として、底面でのすべりがないと仮定し、初期条件としてすべての境界で流速は 0 を与えて、重力による自由崩壊の解析として取り扱っている。図 - 7 に解析に用いた有限要素分割図、解析領域、解析条件を示す。PC グラウトの材料特性は、JP 漏斗試験で使用したものと同一のものを使用している。

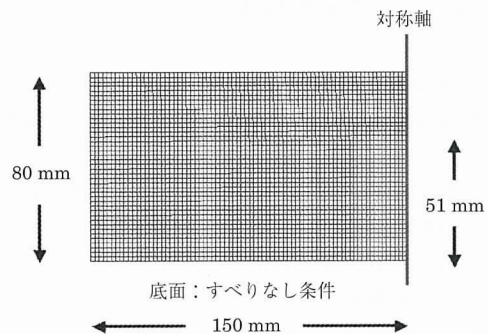


図 - 7 解析領域と解析条件(最小分割幅 2 mm)

(2) 解析結果

フロー試験解析結果を表 - 3, 図 - 8 に示す。また、図 - 9 に代表的に材料 B の解析結果から得られたひずみ速度の時刻歴変化を示す。ひずみ速度は、各解析時間における解析領域内の最大値を出力している。表 - 3 の結果より、実測値と解析値の比の平均値は 0.85 であり、おおむね実測値とよい一致を示していることが分かる。また、図 - 9 より、ひずみ速度は、0.1 秒前後でピークになり、0.2 秒後には 0 に近い値を示していることがわかる。

表 - 3 実績値と解析値の比較

PC グラウト	フロー実験		解析／実績
	解析 (mm)	実測 (mm)	
A (低粘性タイプ)	149	144	1.03
B (高粘性タイプ)	133	139	0.96
C (低粘性タイプ)	161	220	0.73
D (超低粘性タイプ)	197	183	1.08
E (低粘性タイプ)	133	193	0.69
F (高粘性タイプ)	125	207	0.60

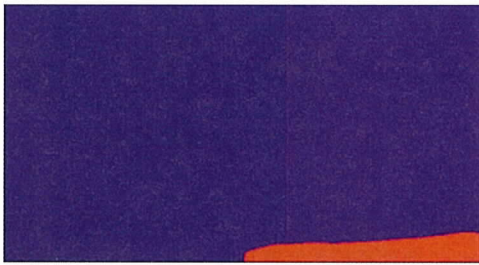


図 - 8 解析結果 (材料 B)

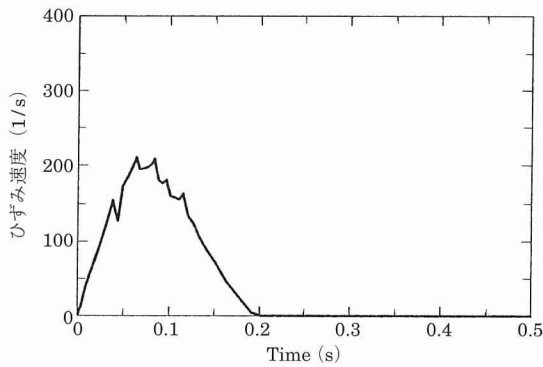


図 - 9 ひずみ速度の時刻歴変化 (材料 B)

4.3 注入実験解析

現在の流体解析技術で、実施工のグラウト注入を解析的にシミュレーションして充てん性を照査することは、モデル化、計算時間等の観点から課題も多い。そのため、ベンチマーク解析の結果から得られた材料特性のモデル化に関する知見の範囲でどこまで充てん解析のシミュレーションが再現できるか調べるために、実物大実験の試験体に対して、PC グラウトの充てん解析を行った。

解析は、東九州自動車道丸山橋 (PC 上部工) 工事 (西日本高速道路株式会社 大分工事事務所) で実施された実物大注入実験を対象としている。写真 - 2 に試験の状況を、

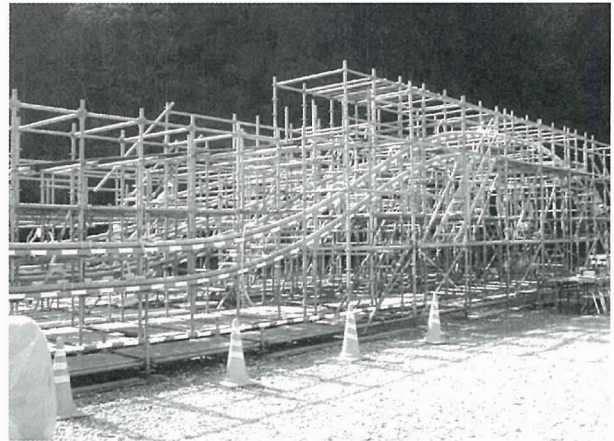


写真 - 2 実物大注入実験状況

また図 - 10 に試験体形状図を示す。

(1) 解析条件

図 - 10 より、PC 鋼材は 12S15.2 を使用し、最大下り勾配は 15° になっている。解析では、12 本組線の PC 鋼材を等価な断面積を有する円筒形鋼材としてモデル化し、実験と同じ条件に近づけるため、シース形状が上に凸な部分では底面に、下に凸の部分では上面に配置している。また、実物大試験の場合、流れの対称性が仮定できるため、対称モデルでモデル化を行った。領域分割は、流れ方向に 0.02 m で分割した。図 - 11 に要素分割図を示す。PC グラウトの材料特性はビンガムモデルを用いてモデル化し、密度：1 945 [kg/m³]、塑性粘度：2.1 [pa·s]、降伏値：11.9 [Pa] を用いた。流入条件として注入口で流量 10 L/min を与え、鋼材、ダクト壁面では、すべりなしという条件を与えて解析を行った。

(2) 解析結果

実物大試験解析の解析結果のうち、注入口からの PC グラウトの注入から 100 秒後の状態を図 - 12 に示す。図より、排気口付近から先流れをしていることが分かる。解析では、180 秒後に排気口から PC グラウトが排出されたので、排気

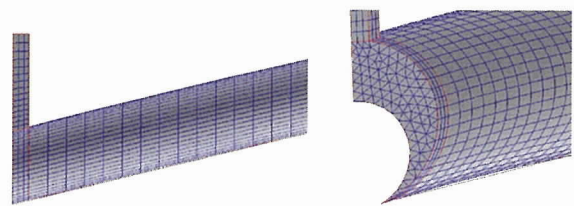


図 - 11 要素分割図

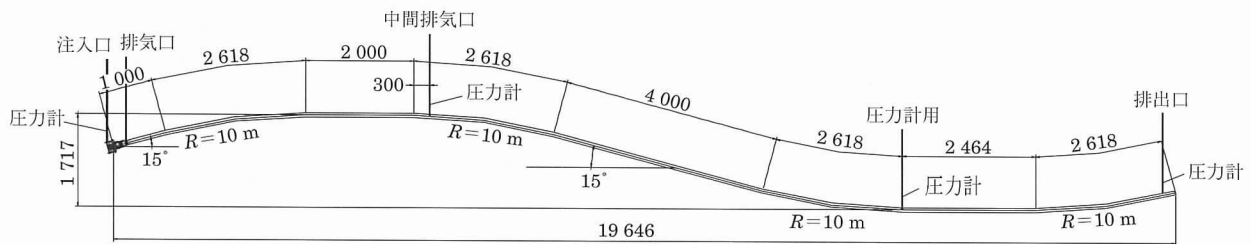


図 - 10 試験体形状図

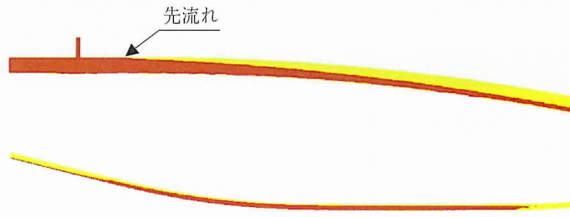


図 - 12 実物大試験解析結果

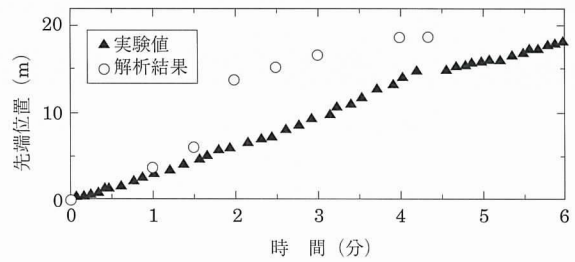


図 - 13 グラウト先端位置の比較図

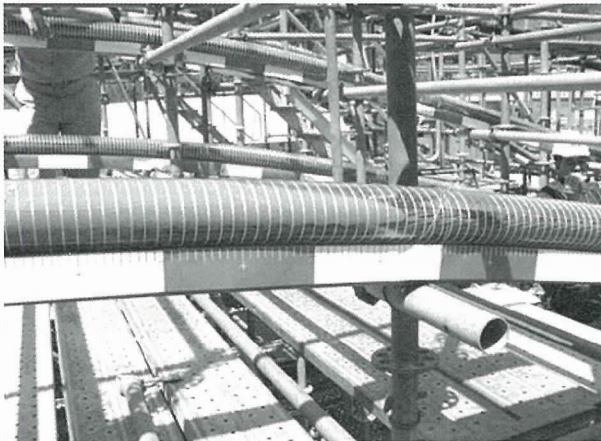


写真 - 3 PC グラウト先流れ状況

口からの流出をとめ、そのまま注入解析を行った。260 秒後には、排出口から PC グラウトが排出されているのが確認された。下り勾配で大きな空気だまりが確認できた。図 - 13 に実験値と解析で得られたグラウト先端位置の比較を示す。この図より解析では、実験値より速く充てんされていることがわかる。

(3) 解析結果の考察

実験値と PC グラウト先端位置の比較より、下り勾配が始まるまでは実験値とも比較的良好一致を示していることがわかる。しかし、下り勾配が始まると、解析では先流れ現象が現れ、実験値より速いことがわかる。

計算時間の関係から、要素数の数がある程度制限されるため、図 - 14 のようにダクト底面部でゆがんだ要素形状ができてしまい、グラウトの充てんが正確に表現できない。さらに、12 本より線である PC 鋼材を忠実に再現していないことから、鋼材内へ浸透していくグラウトが表現されない。以上の原因により先端位置が実験値と異なる結果になったと考えられる。このため、今後 PC 鋼材を含めたモデル化の検討が必要である。

5. 技術の現状と今後の課題

ベンチマーク解析の結果より、JP 漏斗試験やフロー試験など、簡易な事象は流体解析により精度良くシミュレーションできることが分かった。しかし、現時点ではチクソトロピー性など PC グラウトに特有の流動特性をどのように測定、モデル化し、さらに解析結果に及ぼす影響を明らかにして、適切なモデル化の方法を示すには至っていない。

一方で実物大注入実験を解析的にシミュレーションし、

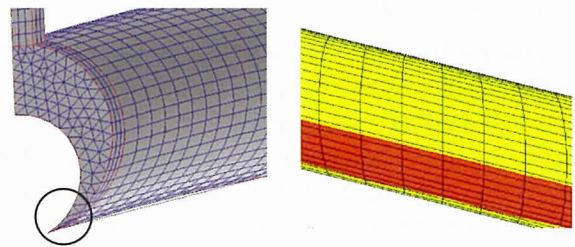


図 - 14 下り勾配部の拡大図

注入圧力や PC グラウトの先流れ現象を再現することができた。実験結果による場合、シース内の空気を完全排気するためには、先流れ開始点と排気口配置位置の関係が重要であることが分かっており、これを解析的にシミュレーションできたことは、PT システム (Post-Tensioning System) の計画において有効であると考えられる。今後さらに解析精度を向上させるための検討を行い、PC グラウトの性能照査や、施工計画を立案するための有効なツールとなることが期待される。

6. おわりに

PC グラウトの材料構成則やモデル化が解析結果に及ぼす影響などについての検討を行った。その結果、現時点においては、流体解析のみによって PC グラウトの充てん性を照査することは、その信頼性の点において課題が残されていると考えられるが、今後実用に供与できるレベルを確保することができることが確認された。現時点において活用可能などから活用を行い、解析が蓄積されることによって、解析精度がより一層向上していくことが期待される。本報告が、解析技術の向上と PC グラウトの品質向上に寄与できれば幸いである。

参考文献

- 1) 日本工業規格 JISZ8803 (1991) 液体の粘度 / 測定方法
- 2) 日本工業規格 JISZ8809 (2000) 粘度計校正用標準液
- 3) 日本工業規格 JISK7117-1 (1999) プラスチック / 液状、乳濁状、又は分散状の樹脂 / ブロックフィールド形回転粘度計による見かけ粘度測定方法
- 4) 日本工業規格 JISK7117-2 (1999) プラスチック / 液状、乳濁状、又は分散状の樹脂 / 回転粘度計によるせん断速度での粘度の測定方法
- 5) 増田圭祐, 出雲淳一, 小川彰一 グラウトの粘性特性とモデル化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 (2005)

【2006 年 1 月 24 日受付】