

## MPS法を用いたPCグラウトのダクト内における充填性評価の基礎的研究

オリエンタル白石(株)	正会員	○中村 敏之
福岡大学	正会員	博士 (工学) 橋本紳一郎
福岡大学		博士 (工学) 千田 知弘
オリエンタル白石(株)	正会員	博士 (工学) 吉村 徹

Abstract : The purposes of this study are establishment of the way to confirm the residual air in a duct and visualization for PC grout. A basic study of flow analysis of PC grout in the duct was tried with MPS(Moving particle semi-implicit) method which is particle method utilized by an analysis of fluid of a tidal wave. The analysis condition has been decided by reproducing a JP funnel flow test and a flow test prescribed by JIS. An analysis of a duct in the descent angle with this analysis condition as compared with an experiment. As a result, flow behavior in an analysis could reproduce an experiment precisely. It was possible to visualize PC grout by being able to reappear.

Key words : PC grout , MPS method , Bingham fluid

## 1. はじめに

PCグラウトはPC鋼材を腐食から保護する性能と部材コンクリートとPC鋼材を一体化する性能が要求され、ポストテンション方式のプレストレストコンクリートにとって重要な要素のひとつである。それらの要求を満足させるためには、PCグラウトの注入後においてダクト内に有害となる残留空気を生じさせてはならない。PCグラウトをダクト内に確実に充填し、残留空気を生じさせないためには、ケーブル構造条件や施工条件に応じたPCグラウトの種類を選定が重要である。最近では粘性が低いことから注入圧力が低く、閉塞などのトラブルが少ない超低粘性型PCグラウトが多く用いられている。しかし、超低粘性型PCグラウトは施工しやすい一方で、ダクトの下り勾配におけるPCグラウトの先流れが生じやすいため、ダクト内に閉じ込められた空気に対して適切な位置に排気孔を設けてそれらを除く必要がある。PCグラウトの設計施工指針<sup>1)</sup> (以下、指針)によれば、それを確認する方法として、実物大実験または条件が同等である過去に実績のある実物大実験によるものとしているが、これには比較的労力と時間を要し、指針に示される実績と施工条件が異なることも少なくない。また、既往の研究<sup>2)</sup>では有限要素法や有限体積法を用いた数値解析によるシミュレーションも行われているが、現状では空隙位置や大きさを検討するには精度が十分であると言いがたい。そこで、より効率的な残留空気の確認方法の構築とダクト内におけるPCグラウトの精度の高いシミュレーションを目的として、近年、津波などの流体の解析で活用されている粒子法の一つであるMPS (Moving particle semi-implicit) 法を用いて、ダクト内のPCグラウトの流体解析の基礎的な研究を試みた。本稿では、JIS R 5201に規定されるフローコーンを用いた0打フロー試験 (以下、フロー試験) とJP漏斗を用いた流下時間測定試験 (以下、JP漏斗試験) の再現による解析条件の検討と、その解析条件をもとに、下り勾配のダクトを模した試験体 (以下、斜め管試験) の解析と注入実験とを比較検討した結果を報告する。

## 2. 解析方法の検討

### 2.1 MPS法の概要

MPS 法は、近年、津波や自動車のエンジン内の流体解析などで多くの実績を挙げている粒子法の一

つである。本研究の解析には汎用粒子法解析ソフト Particleworks を用いた。MPS 法の解析モデルは形状データに粒子を等間隔に配置して作成し、粒子には対象となる材料の密度や塑性粘度、降伏値などのレオロジー特性を条件として与える。試験容器等は剛体とし、全方位拘束がゼロ自由度の設定となるため、粒子に与えた条件が試験容器との接触面の摩擦や粘着等に影響する。有限要素法などの格子法における要素構成と異なり、MPS 法は粒子同士の位置関係が固定されないため、大きな変形に対する計算を可能とする。また、流体の飛沫や流体表面の微妙な変化などが容易に解析できるため、流体解析の精度向上が期待される手法である<sup>3)</sup>。しかし、解析精度は粒子の大きさに依存され、粒子径が小さいほど向上するが、粒子数が膨大となると解析に多くの時間を要することになる。そのため、PC グラウトの流体解析に適用するためには、残留空気の再現に必要な精度を把握し、かつ、解析容量など実用を考慮した適切な粒子径を設定する必要がある。同時に、精度良く再現するための適切な粒子の物性値や流体としての構造モデルなどの解析条件を設定する必要がある。以下、超低粘性型 PC グラウトを対象に解析条件の検討を行った。

## 2.2 物性値の検討

本解析に必要な物性値は密度 (g/cm<sup>3</sup>)、塑性粘度 (Pa・s)、降伏値 (Pa) である。密度は本検討で用いる水粉体比 36%の配合 (水: 525kg/m<sup>3</sup>, 粉体 (プレミックス材): 1458kg/m<sup>3</sup>) から算出した。塑性粘度は実際に練り混ぜた超低粘性型グラウトを用いて B 型回転粘度計により求めた。表-1 に試験条件を示す。図-1 に粘度の測定値を示す。これから塑性粘度は定常状態となった測定時間 50s から 300s の塑性領域の平均値 0.271Pa・s とした。一般に、降伏値も B 型回転粘度計によって、せん断ひずみ速度が 0 となったときのせん断応力として測定することができるが、超低粘性型 PC グラウトは粘性が非常に小さいため、測定が不安定となり算出が困難であった。そこで、既往の文献<sup>4)</sup>の普通ポルトランドセメントを使用した水セメント比 40~100%のセメントペーストの塑性粘度と降伏値のデータの関係を回帰し (図-2)、降伏値を式(1)から求めることとした。なお、参考文献 4)より、セメントペーストの塑性粘度には粉末度の影響がほとんど認められないことから、よりデータ数の多い普通ポルトランドセメントから引用した。

$$\tau_f = (15.434 \times \eta_p) - 1.1951 \quad (1)$$

ここに、 $\tau_f$ : 降伏値 (Pa)

$\eta_p$ : 塑性粘度 (Pa・s)

表-1 粘度の測定の試験条件

回 転 子	低粘度用 LV-4
回 転 数	12 rpm
容積壁までの距離	40 mm
容 器 容 積	500 ml
試 験 時 温 度	20 °C
試 験 時 湿 度	65%

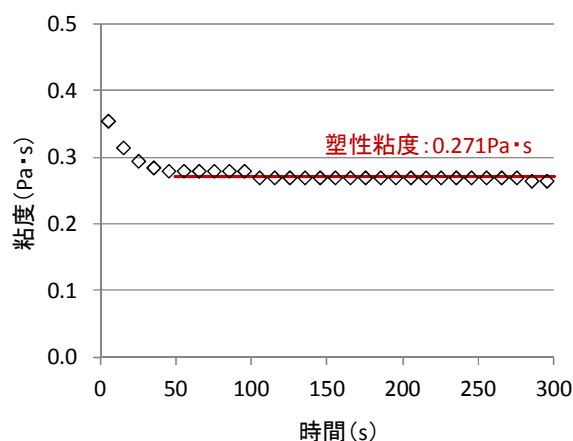


図-1 粘度の測定値

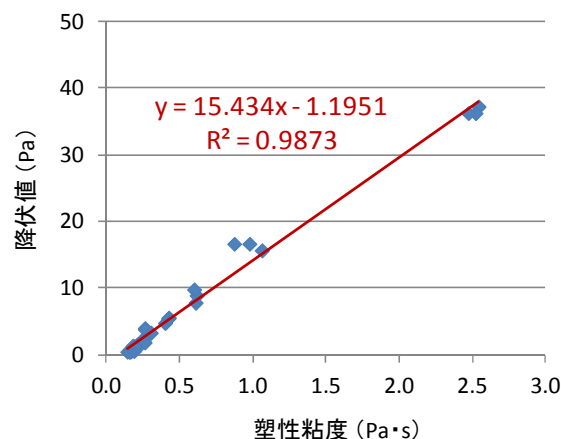


図-2 塑性粘度と降伏値の関係

表-2 解析における入力値

密 度	g/cm <sup>3</sup>	1.98
塑 性 粘 度	Pa・s	0.271
降 伏 値	Pa	2.99

表-2 に測定および式(1)の算出から得られた密度、塑性粘度および降伏値を示す。これらを本解析における物性値の入力値とした。

2.3 構造モデルの検討

一般的に、軟練りコンクリートや高流動コンクリートはビンガム流体とみなされる。ニュートン流体との違いは降伏値の存在であるが、前述の測定から、超低粘性型 PC グラウトの降伏値は 2.99Pa と非常に小さいため、ニュートン流体とみなすことができる可能性がある。ニュートン流体の方が比較的容易な解析となり、解析時間が短くなるなど有利な面がある。そこで、より降伏値の影響を受けやすいフロー試験で、ニュートンモデルとビンガムモデルの解析による再現性の比較を行った。ただし、数値解析においてもビンガムモデルを扱う場合に課題となるのが、降伏前のせん断ひずみ速度が 0 ということである。そのため、その区間での応力が不定となり、モデル化が困難となる。そこで、図-3 に示す bi-viscosity モデル<sup>5)</sup>を用い、降伏前の流動限界ひずみ速度をごく小さな値 ( $\pi_c=0.1$ ) として入力し、降伏前においても計算可能となるようにした。

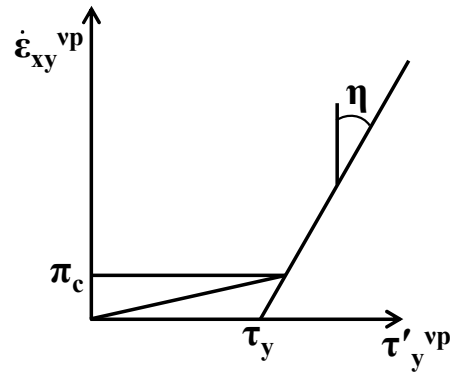
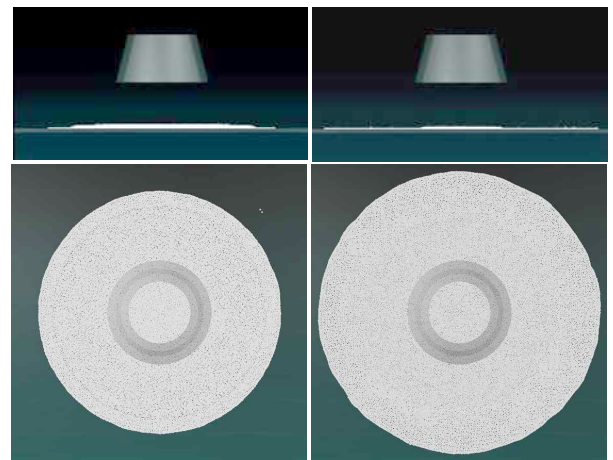


図-3 bi-viscosity モデル<sup>5)</sup>

図-4 に解析結果を示す。物性の入力値は表-1 によるものとし、粒子径は 2.0mm とした。なお、フローコーンの引上げは 2 秒としている。ニュートンモデルの挙動はフローが広がり続け、流動が停止しなかった。一方、ビンガムモデルは実際の試験によるフロー値が 305mm であったことに対し、275mm で流動が停止した。このことから、降伏値が極めて小さい材料であっても、数値解析上、流動を忠実に再現するためには降伏値の考慮は必要であり、それを考慮できるビンガムモデルの適用が妥当であることを確認した。



(a) ビンガム流体 (b) ニュートン流体

図-4 構成モデルの違い

2.4 粒子径の検討

実験値（流下時間、流動挙動）と解析値の整合性と解析時間の両者を考慮した粒子径を確認するため、前述の解析条件を用いて、粒子径を 1.0, 1.3, 1.5, 1.7, 2.0mm と変化させた JP 漏斗試験の解析を行った。なお、過去の検討<sup>6)</sup>で粒子径 1.0mm 以下では流下時間に変化がなく、収束すること、また、粒子径 2mm であれば実用的に解析が行えることを確認している。表-3 に示すように、実際の試験による流下時間は 3 回の平均で 4.26 秒である。図-5 に解析による流下

表-3 JP 漏斗試験の PC グラウトの品質

水 粉 体 比	%	36
流 下 時 間	s	4.26
練 上 が り 温 度	℃	25.5

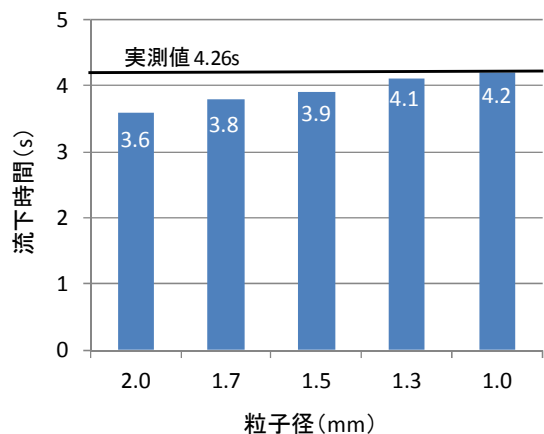
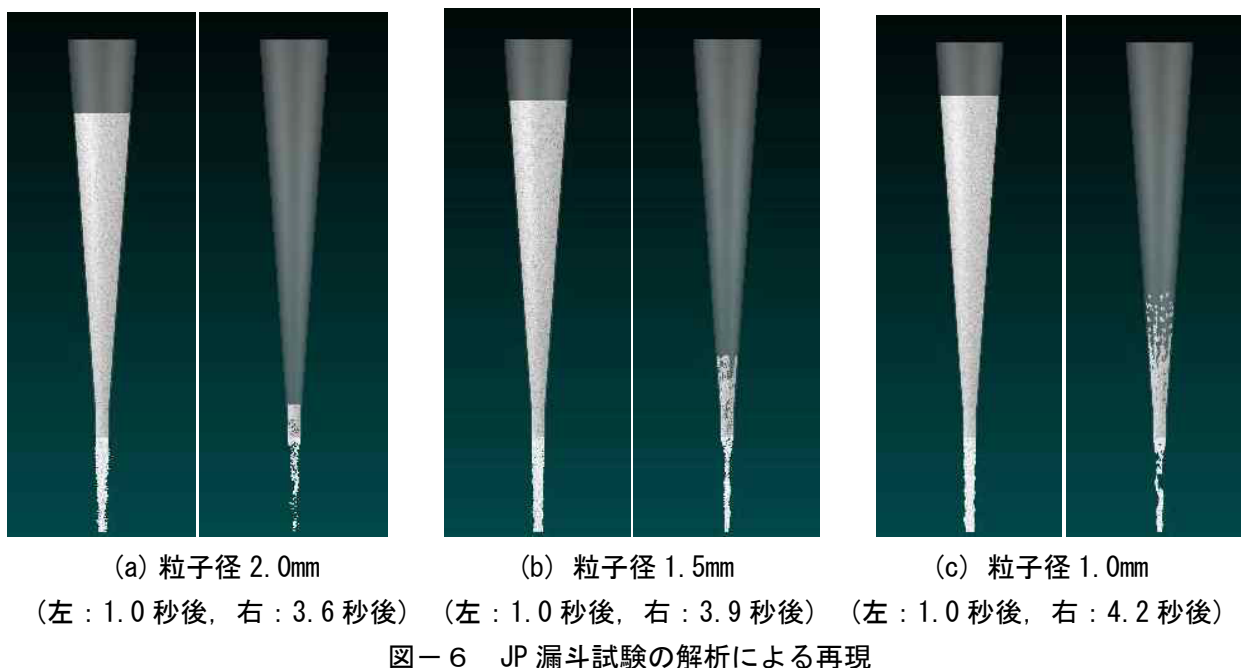


図-5 流下時間の解析値



時間を示す。この図から粒子径が小さいほど実測値に近づき、精度が高くなることがわかった。図-6に粒子径 2.0mm, 1.5mm, 1.0mm の場合の JP 漏斗試験の解析による PC グラウトの流動挙動 (左側 : 流下開始から 1 秒後, 右側 : 流下終了直前) を示す。粒子径が小さい場合ほど流下終了直前において粒子が漏斗に多く残留する現象が見られる。これは粒子径が大きい場合と比べて粒子が小さいことから漏斗と接触する粒子数が増え、それによって摩擦や粘着が大きくなったからと推察される。粒子径 1.0mm の場合では摩擦や吸着の現象が適当であるため、流下時間が一致したと考えられる。このことから、解析条件を粒子径 1.0mm とすることで、JP 漏斗試験における流動挙動と流下時間は再現できたとと言える。

しかし、現状における粒子径の違いによる解析時間を比較すると、表-4に示すように、粒子径が小さいほど粒子数が増加することにとともに、解析時間が大幅に増加している。実用にあたっては、JP 漏斗よりも粒子数が遥かに多いダクトを対象とするため、粒子径 1.0mm や 1.5mm とすることは実用的ではない。一方、粒子径 2.0mm における JP 漏斗試験の解析誤差でも実際のダクト内の残留空気が検出できる精度であればよい。このように、解析精度と解析時間は相反する関係にあるため、今後の課題として、残留空気の検出に対して必要となる流動挙動の精度の見極めやパソコンのスペック等のハード面も含む解析作業環境などを整理することが挙げられる。

しかし、現状における粒子径の違いによる解析時間を比較すると、表-4に示すように、粒子径が小さいほど粒子数が増加することにとともに、解析時間が大幅に増加している。実用にあたっては、JP 漏斗よりも粒子数が遥かに多いダクトを対象とするため、粒子径 1.0mm や 1.5mm とすることは実用的ではない。一方、粒子径 2.0mm における JP 漏斗試験の解析誤差でも実際のダクト内の残留空気が検出できる精度であればよい。このように、解析精度と解析時間は相反する関係にあるため、今後の課題として、残留空気の検出に対して必要となる流動挙動の精度の見極めやパソコンのスペック等のハード面も含む解析作業環境などを整理することが挙げられる。

### 3. 斜め管試験の解析と注入実験の比較

#### 3.1 解析条件と実験条件

以上のように超低粘性型PCグラウトの流体解析における諸条件が概ね把握できたことから、実際の下り勾配のダクトを模した斜め管試験の解析と注入実験を実施し、それらを比較検討することとした。解析における構造モデルはbi-viscosityモデルを適用することとした。粒子径については前述のように課題が残っているが、本検討では現状の筆者らの解析能力を考慮して2.0mmとした。そのため、粒子径2.0mmの場合ではJP漏斗試験の解析結果で確認したように、流動挙動が実際と異なり、斜め管試験

表-4 粒子数と解析時間

粒子径 mm	流下時間 s	粒子数	解析時間
2.0	3.6	72810	41分
1.5	3.9	176780	2時間30分
1.0	4.2	604620	18時間42分



においても実験と解析が一致しない可能性が高い。そこで、斜め管試験に用いた超低粘性型PCグラウト

の実際の流下時間4.11秒と同じとなる見掛けの塑性粘度と降伏値を解析のトライアルによって求めることとした。表-5に斜め管試験に使用したPCグラウトの品質を、表-6に解析条件を示す。なお、実際の超低粘性型PCグラウトは流下時間を4秒程度とするため、水粉体比は39% (密度 $1.94\text{g/cm}^3$ ) としている。以上の

表-5 斜め管試験のPCグラウトの品質

水粉体比	%	39
流下時間	s	4.11
練上がり温度	℃	13.7
外気温	℃	6.0

表-6 斜め管試験の解析条件

密度	$\text{g/cm}^3$	1.94
見掛けの塑性粘度	$\text{Pa}\cdot\text{s}$	0.379
見掛けの降伏値	Pa	4.65

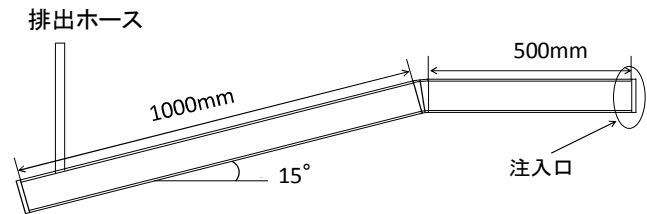


図-7 解析モデル

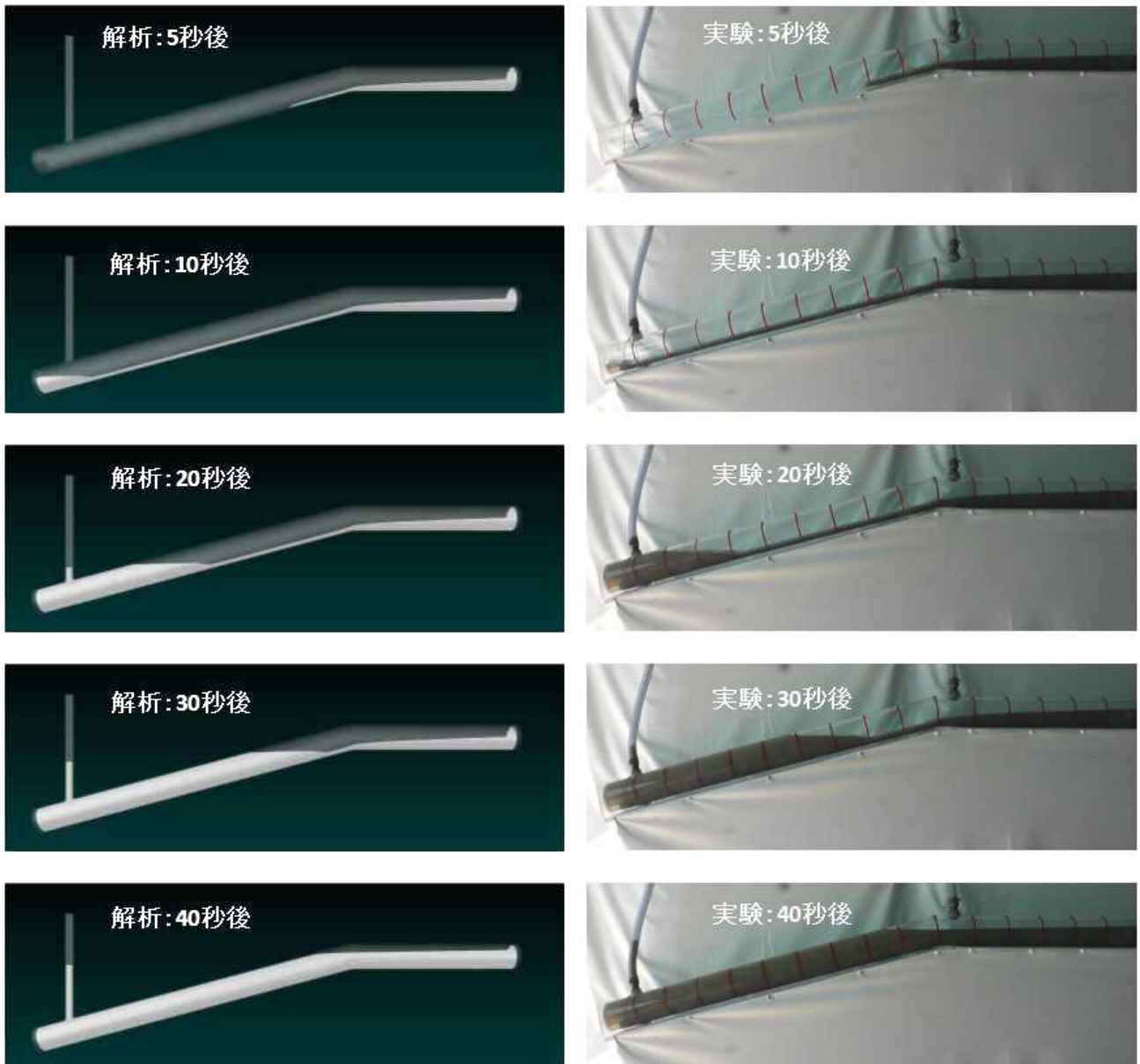


図-8 解析と注入実験の比較

条件におけるJP漏斗試験の流下時間の解析値は4.1秒であった。

図-7に斜め管試験の解析モデルを示す。注入実験の試験体はこれを再現したものとした。ダクトには内径75mmの亚克力製透明管を用い、斜め部の下端から100mmの位置に内径19mmのグラウトホースを設置した。なお、現状の解析では、ダクト内の空気のモデル化に至っておらず、圧縮空気は生じないため、その条件に合致するように注入試験体には頂点部（水平部左端）に排気ホースを設置している。注入は図-7の右側から注入速度を毎分10リットルで行い、左側のホースから排出した。

図-8に解析と注入実験の流動挙動の比較を示す。図中には注入開始からの時間を示している。斜め管試験では、注入開始後の段階的な時間におけるPCグラウトの到達距離の実験値と解析値が概ね一致した結果が得られた。このことから、粒子径2.0mmの場合においてもJP漏斗試験の流下時間を一致させた見掛けの塑性粘度を入力値とすることで、ダクト内の流動挙動の再現という観点ではシミュレーションによる確認ができる可能性があることがわかった。ただし、本検討のように、JP漏斗試験の流下時間から求めた見掛けの塑性粘度を適用することの妥当性は今後確認する必要がある。仮にダクト内の流動挙動と見掛けの塑性粘度の関係が正しければ、実用に際して、解析上でJP漏斗試験の流下時間に応じた見掛けの塑性粘度を設定しておくことで、任意の状況における解析が可能となることが予想される。また、本来ならば、図-7に示すダクト形状はPCグラウトが下り勾配を先流れしたあとにダクト内に閉じ込められた圧縮空気存在により、下り勾配のダクトを遡上することはない。本検討では流動挙動の再現は認められたが、充填確認を目的として残留空気の発生を再現し、シミュレーションするためには、圧縮空気をモデル化することが必要であり、これも合わせ、今後の検討課題としたい。

#### 4. まとめ

本研究では、MPS法を用いて、ダクト内の超低粘性型PCグラウトの流体解析の基礎的な検討を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 解析条件の設定に課題は残るものの、本解析手法を用いて下り勾配のダクトの流動挙動を再現し、それをシミュレーションにより確認することができる可能性を示した。
- 2) 粒子径の入力値が小さいほど解析精度は向上するが、解析時間は大幅に増加する。今後、残留空気の検出に対して最適な粒子径に関する知見を整理する必要がある。
- 3) 斜め管試験の解析に使用した見掛けの塑性粘度などの入力値の妥当性を再確認する必要がある。
- 4) 実用に向けて、残留空気を可視化するためには圧縮空気のモデル化することが今後の課題である。

#### 参考文献

- 1) (公社)プレストレストコンクリート工学会：PCグラウトの設計施工指針—改訂版—，2012.12
- 2) (社)プレストレストコンクリート技術協会：PCグラウトの設計施工指針，V 流体解析マニュアル，2005.12
- 3) 越塚誠一：粒子法による流れの数値解析，(社)日本流体力学会，ながれ，21巻，第3号，pp.230-239，2002.6
- 4) 村田ら：ポルトランドセメントペーストの粘度式に関する研究，(社)土木学会，土木学会論文集，No.354，V-2，p.112，1985.2
- 5) 富山ら：フレッシュコンクリートの流動解析におけるMPS法の適用，(社)土木学会，構造工学論文集，Vol.55A，pp.164-171，2009.3
- 6) 高木ら：MPS法を用いたシース管におけるグラウトの充填性の解析，(社)土木学会，平成28回年度西部支部研究発表会，2017.3