

論文 MPS 法によるセメントペーストの 3 次元流動解析

崎原 康平*1・山田 義智*2・浦野 真次*3・平野 修也*4

要旨：本研究は、既往研究にて行われたペーストフロー試験で得られたフロー値と、レオロジー試験から得られたペーストのレオロジー定数を用いて、フローコーンの影響を考慮した高精度化 MPS 法によるセメントペーストのフロー解析を実施した。フロー試験の再現性を検討した結果、MPS 法によるフロー解析の結果は、有限要素法による解析結果およびフロー試験による実測値の傾向と概ね一致することを確認した。さらに、フローコーンの有無やフローコーンの引き上げ速度によるフロー値の変化をフロー解析にて再現した。

キーワード：高流動コンクリート、セメントペースト、レオロジー定数、フローの広がり、MPS 法

1. はじめに

近年、コンクリート工場の現場では、高密度な配筋の構造物の増加や薄肉化、良質な骨材の不足、様々な混和材料（フライアッシュ、高炉スラグ、高性能 AE 減水剤等）の使用頻度が増加している背景に加えて、熟練施工者や経験豊富な技術者が不足する傾向にあるため、確実に高品質な施工が困難になる場合も増えてくるのが危惧されている。また、特殊な施工条件の場合、実大モデルによる施工実験が必要な場合もあり、その実施には過大なコストと時間を要する。これらの問題を解決するためにコンクリートの打込み充填にコンピュータシミュレーションを用いた予測技術の開発が期待されている。

筆者らは建築分野で利用が進む BIM と、自由表面を有する流体解析に有用な粒子法の一つである MPS 法¹⁾による流動解析を援用したコンクリート充填解析法を情報化施工の一つとして提案し、その適用例として過密配筋部位である柱梁接合部の充填解析例を示している²⁾。

その一方で、流動解析を行う MPS 法については、オリジナルの MPS 法では流動の駆動力となる圧力の振動が大きく、解析精度に問題があった。現在は、その振動を押さえて解析精度を高めるための研究が盛んにおこなわれており³⁾、筆者らもそれらの研究成果を用いてコンクリートのスランブ試験の解析精度を高める試みを行ってきた⁴⁾。しかし、実験において測定されたレオロジー定数を用いて、高流動コンクリートの流動性の再現確認についての検証は不十分であった。

コンクリートのレオロジー定数の測定では、種々の試験方法が提案されているが、試験毎にその値が異なることも知られている。このように、試験方法によって得られるレオロジー定数の値が異なる原因は、試験法に起因する流動抵抗をレオロジー定数として評価してしまう事や、

骨材による影響が大きいものと思われる。

そこで、本研究においては、骨材の影響が少なく、レオロジー定数が測定しやすいセメントペースト（以後、ペーストと略す）を用いた。さらに、文献 5)において、回転粘度計によるレオロジー試験で得られたレオロジー定数を用いて、MPS 法によりペーストフロー試験（以後、フロー試験と略す）を再現し、それを実測された結果と比較検討を行ったので報告する。

2. ペーストのレオロジー定数の測定について

本研究では、文献 5)のフロー試験およびレオロジー試験で得られたフロー値とレオロジー定数を使用した。以降では、文献 5)中に示されているペーストの使用材料や配（調）合、フロー試験およびレオロジー試験の詳細について述べる。

2.1 使用材料・配（調）合

文献 5)で使用したセメントは、普通ポルトランドセメントおよび中庸熱ポルトランドセメントの 2 種類であり、練混ぜ水は上水道水を用いた。なお、文献 5)において、ポリカルボン酸エーテル系化合物の高性能 AE 減水剤を用いたペーストは、降伏値が負値となる場合がほとんどであり、回転粘度計の円筒界面でペーストの滑りが生じているとしている。そこで、ペーストの粘りが増加し円筒界面で滑りにくく、正確なレオロジー測定が可能な増粘剤一液型高性能 AE 減水剤（VSP）を使用している。使用材料の種類と物性を表-1 に示す。

文献 5)中のセメントの使用量は 1000g で統一し、水量を変えて水セメント比（W/C）を 35%と 40%の 2 種類としている。また、VSP の使用量は、0.7%、1.0%（セメント質量比）の 2 種類としている。ペーストの配（調）合を表-2 に示す。

*1 琉球大学 工学部工学科助教 博士（工学）（正会員）

*2 琉球大学 工学部工学科教授 博士（工学）（正会員）

*3 清水建設（株） 技術研究所 建設基盤技術センター 博士（工学）（正会員）

*4（株）フローリック 技術本部コンクリート研究所主査 修士（工学）（正会員）

表-1 使用材料の種類と物性

材料項目	記号	種類および物性
水	W	上水道水
セメント	N	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³ 比表面積：3430cm ² /g
	M	中庸熱ポルトランドセメント 密度：3.21g/cm ³ 比表面積：3560cm ² /g
混和剤	VSP	増粘剤一液型高性能 AE 減水剤 ※ポリカルボン酸エーテル系化合物と増粘性高分子化合物の複合体

表-2 ペースト配(調)合

試料名	W/C (%)	混和剤添加量 (G×%)	ペースト密度 (g/cm ³)
N35VSP0.7	35	0.7	2.03
N35VSP1.0	35	1.0	2.03
N40VSP0.7	40	0.7	1.95
N40VSP1.0	40	1.0	1.95
M35VSP0.7	35	0.7	2.04
M35VSP1.0	35	1.0	2.04
M40VSP0.7	40	0.7	1.97
M40VSP1.0	40	1.0	1.97

2.2 フロー試験の概要

文献5)において、フロー試験は JIS R5201 セメントの物理試験方法で規定されるフロー試験用のフローコーン(以後、コーンと略す)を用いて、800×800mmの鋼製フロー板上において無振動にて行っている。フロー板上には、ペーストの広がりを目盛りの書き込み、コーン上部に設置したビデオカメラによって、コーン引き上げ直後からペーストの広がりを測定している。ペーストの広がり、0~2秒の間は0.5秒刻み、2~5秒の間は1.0秒刻み、5秒以降は5.0秒刻みで流動停止時刻を含めて測定している。なお、流動停止は目視にて判断している。フロー値はペーストの広がりの最大直径とその直角となる方向の直径の平均値としている。フロー試験は各試料で2回ずつ行っており、測定結果は平均を用いている。

2.3 レオロジー試験の概要と試験結果

文献5)において、レオロジー試験で使用した測定装置は、外円筒回転式の共軸二重円筒形回転粘度計を用いている。回転粘度計の外円筒と内円筒のサイズはそれぞれφ70×120mm、φ65×35mmであり、内円筒と外円筒のギャップは2.5mmとしている。レオロジー試験は、5組の回転速度(5, 10, 20, 40, 60rpmもしくは5, 10, 20, 60, 100rpm)を一定として300秒間与え続け、2秒間隔でせん断応力を測定している。ここで、せん断ひずみ速度の負荷時間がずり時間である。

ペーストのような懸濁液では、ずり時間によりレオロジー特性が変化するチクソトロピー性を有する場合があ

る。そこで本研究では、文献5)を参考に、ペーストの流動開始から流動停止までの平均的なレオロジー定数を表す代表的なずり時間の条件である、「ずり時間2秒と各試料のフロー停止時間と同じずり時間との中間時間」を用いて、流動曲線およびレオロジー定数をMPS解析に使用した。表-3に、フロー値および上述のずり時間条件で求めたレオロジー定数一覧を示す。

表-3 フロー値およびレオロジー定数一覧

試料名	フロー値 (mm)	塑性粘度 (Pa·s)	降伏値 (Pa)
N35VSP0.7	227	1.43	16.98
N35VSP1.0	267	1.54	20.80
N40VSP0.7	273	0.89	13.39
N40VSP1.0	285	0.79	16.02
M35VSP0.7	241	1.21	26.71
M35VSP1.0	248	1.11	24.08
M40VSP0.7	290	0.45	16.02
M40VSP1.0	304	0.43	12.76

3. 流動構成式と運動方程式およびMPS法の概要とその高精度化

3.1 流動構成式

超過応力理論とミーゼスの降伏条件を用いると、ニュートン流体、ビンガム流体、さらには非ビンガム流体にも成り立つ偏差応力 τ'_{ij} とひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}$ の関係式は、次式で求められる。

$$\tau'_{ij} = \frac{\tau_y + (2\sqrt{I}/2\sqrt{1/(4\eta^2)})}{\sqrt{I}} \quad (1)$$

ここで、 τ_y は降伏値、 η は塑性粘度、 $I = \dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}/2$ である。べき乗 n は流動曲線の形状を表すゼロ以上の値であり、 $n=1$ のときはニュートン流体もしくはビンガム流体となり、それ以外は擬塑性流体やダイラタント流体さらには非ビンガム流体を表す。

本研究では、 $n=1$ とにおいて式(1)をビンガムモデルの偏差応力 τ'_{ij} とひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}$ の関係とした。この関係を次式で表す。

$$\tau'_{ij} = 2 \left(\eta + \frac{\tau_y}{\sqrt{\Pi}} \right) \dot{\epsilon}_{ij} \quad (2)$$

ここで、 $\Pi = 2\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}$ である。さらに、式(2)を応力 τ_{ij} とひずみ速度 $\dot{\epsilon}_{ij}$ の関係を一般化すると次式となる。

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + 2 \left(\eta + \frac{\tau_y}{\sqrt{\Pi}} \right) \dot{\epsilon}_{ij} \quad (3)$$

ここで、 P は静水圧、 δ_{ij} はクロネッカーデルタである。本研究では、式(3)の降伏値 τ_y に指数関数 $(1 - e^{-m\sqrt{\Pi}})$ を乗じて低ひずみ速度では非常に粘度の高い流体を表し、高ひずみ速度ではビンガムモデルと一致するように工夫した次式に示す Regularized Bingham model を使用し、文献7)に示される bi-viscosity モデルにおける流動・不動の場合分けが生じる計算上の複雑な取り扱いを排除した。

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\left(\eta + \frac{\tau_y(1-e^{-m\sqrt{\pi}})}{\sqrt{\pi}}\right)\dot{\epsilon}_{ij} \quad (4)$$

ここで、 m は応力成長指数であり、時間(s)の次元を持つ。予備解析の結果から、本研究では応力成長指数 m の値を 1 として、以後の解析を実施した。

3.2 運動方程式

流体内部に任意の領域 V を考える。その V に働く体積力の合計とその領域の表面 S に働く面積力の合計より、次式に示す i 方向成分に関する運動方程式が成り立つ。

$$\rho V \frac{Du_i}{Dt} = \int_V \rho g dV + \int_S \tau_{ij} n_j dS \quad (5)$$

ここで、 ρ は流体密度、 g は重力加速度、 n_j は領域 V の面要素 dS の外向き単位法線、 D/Dt は実質微分である。式(5)の右辺第2項の面積分にガウスの発散定理を用いて展開すれば次式となる。

$$\frac{Du_i}{Dt} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + F_i \quad (6)$$

ここで、 F_i は体積力である。式(6)に式(4)を代入することで、次式に示す流体の運動方程式となる。

$$\frac{Du_i}{Dt} = \frac{1}{\rho} \left[-\nabla P + \left\{ \eta + \tau_y \left(1 - e^{-m\sqrt{\pi}} \right) / \sqrt{\pi} \right\} \nabla^2 u_i + 2\dot{\epsilon}_{ij} \frac{\partial \left\{ \tau_y \left(1 - e^{-m\sqrt{\pi}} \right) / \sqrt{\pi} \right\}}{\partial x_j} \right] + F_i \quad (7)$$

3.3 MPS 法の概要と高精度化

(1) MPS 法の概要

MPS 法は、対象とする空間の要素分割を必要とせず粒子 (計算点) を発生させ、個々の流体粒子の運動を観測するラグランジュ法により非圧縮性流れを解析する手法である。従来の MPS 法では、式(7)の Regularized Bingham model を用いた流体の運動方程式中の勾配 ∇ や ∇^2 の各微分演算子に対して、粒子間相互作用モデルが式(8)と式(9)で定義される。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \sum_{j \neq i} \frac{d}{n^0} \left[\frac{\phi_j - \phi_i}{|r_j - r_i|} (r_j - r_i) w(|r_j - r_i|) \right] \quad (8)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \sum_{j \neq i} \frac{2d}{\lambda n^0} [(\phi_j - \phi_i) w(|r_j - r_i|)] \quad (9)$$

ここで、 ϕ は任意の物理量であり、 $\langle \rangle_i$ は粒子 i における粒子間相互作用を表す。 r は粒子の位置ベクトル、 j は近傍粒子番号、 d は次元数、 n^0 は初期配置から求めた粒子数密度、 λ は変数分布の分散を解析解と一致させるための係数、 w は重み関数である。また、粒子数密度 $\langle n \rangle_i$ および重み関数 w は式(10)、式(11)で定義される。

$$\langle n \rangle_i = \sum_{j \neq i} w(|r_j - r_i|) \quad (10)$$

$$w(|r_j - r_i|) = \begin{cases} r_e / |r_j - r_i| & |r_j - r_i| \leq r_e \\ 0 & |r_j - r_i| > r_e \end{cases} \quad (11)$$

ここで、 r_e は粒子間相互作用の及ぶ影響半径であり、本研究では、初期粒子間距離の 3.1 倍とした。これは越塚

らの文献 6)での推奨値である初期粒子間距離の 2~4 倍という条件を満たすものである。

(2) MPS 法の高精度化について

従来の MPS 法では、次式に示す圧力ポアソン方程式より圧力が計算される。

$$\nabla^2 P = \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n^0 - n^*}{n^0} \quad (12)$$

ここで、 ρ は流体の密度、 Δt は解析の時間刻み幅、 n^* は粘性や重力から計算される仮の粒子数密度である。しかしながら、式(12)を用いた場合、時間・空間的に激しく圧力が振動し、計算の精度や安定性が低下する問題が指摘されている。そこで田中ら³⁾は式(12)の右辺項を次式のように修正した圧力ポアソン方程式を提案している。

$$\nabla^2 P = \frac{\rho}{\Delta t} \nabla \cdot v^* + \gamma \frac{\rho}{\Delta t^2} \frac{n^0 - n^k}{n^0} \quad (13)$$

ここで、 v^* は粘性や重力から計算される仮速度、 γ は圧縮性を考慮した場合においても体積を保つための係数、 n^k は現在のタイムステップにおける粒子数密度である。式(13)の右辺項は、第 1 項が滑らかな圧力分布を得ることができる速度の発散条件、第 2 項は体積誤差の蓄積が少ない従来 MPS 法で用いられている粒子数密度一定条件を組み合わせた形となっている。本研究では、式(13)を適用することで、MPS 法の高精度化を図った。また、係数 γ については、計算の安定性を考慮して 0.05 とした。

3.4 フロー解析モデル

(1) ポリゴンモデルによる境界条件について

従来の MPS 法では、壁境界条件として位置を固定した壁粒子を格子状に配置する必要がある。しかし上述の方法では、壁粒子は格子状に配置されるため、斜面のような境界を再現することは困難である。また、MPS 法における粒子は計算点であるため、3 次元解析の際には、多くの壁粒子が必要となり、計算負荷が増大する。

そこで本研究では、上述の課題を解決するために、壁境界をポリゴンで表現するポリゴンモデルを適用した。ポリゴンモデルとは、ポリゴンから流体粒子までの距離を用いて壁から受ける力を計算することができる境界条件である。そのため、より正確な境界条件の設定が可能となり、計算負荷も大幅に軽減することができる。

ポリゴンから粒子までの距離は、距離関数⁶⁾を線形補間することで求められる。ここで距離関数とは、計算領域を格子に分割し、各格子の中心点とポリゴンまでの壁境界までの最小距離として定義される (図-1 参照)。

ここでは、2 次元問題の距離関数を概説する。2 次元空間のある位置に流体粒子があるとすると、その周囲 4 つの距離関数を用いて流体粒子の位置で距離関数を内挿することができる。図-1 のように、流体粒子が周囲の 4 つの格子に対して、 x 方向に $a : b$ および $c : d$ の位置にあ

るとすると、 x 方向について、上側と下側の各ポリゴンに対する距離関数を、式(14)にて内挿する。

$$\left. \begin{aligned} r_u &= \frac{b \cdot r_1 + a \cdot r_2}{a+b} && \text{(上側)} \\ r_v &= \frac{b \cdot r_3 + a \cdot r_4}{a+b} && \text{(下側)} \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

ここで、 r_u は上側のポリゴンに対する距離関数、 r_v は下側のポリゴンに対する距離関数である。さらに、 y 方向について内挿することで、流体粒子とポリゴンとの距離関数は式(15)で表される。

$$r_{iw} = \frac{c \cdot r_u + d \cdot r_v}{c+d} = \frac{bc \cdot r_1 + ac \cdot r_2 + bdr_3 + ad \cdot r_4}{(a+b)(c+d)} \quad (15)$$

ここで、 r_{iw} は流体粒子とポリゴンとの距離関数である。なお、距離関数を用いた重み関数や粒子間相互作用モデルの具体的な解法については、文献 6)を参照されたい。

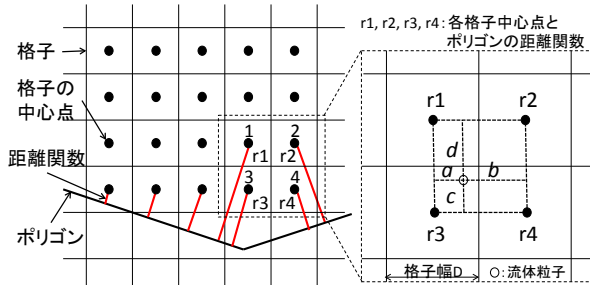


図-1 距離関数の概念図

(2)コーンの考慮について

既往の研究では、コーンに充填されたペースト形状を初期状態としてフロー解析を行うことが多い。この理由は、有限要素法などのメッシュが必要な解析手法では、コーンを引き上げるような移動境界問題を取り扱うこと

が難しいこと等が挙げられる。しかしながら、実際のフロー試験はコーンを人為的に引き上げるため、フロー解析を行う際には、コーンの有無やコーンの引き上げ速度がフローの広がりを与える影響を考慮する必要がある。

一方 MPS 法は、メッシュを必要とせず、移動境界問題も比較的容易に解析することができる利点を有することから、第 4 章では、コーンの有無やコーンの引き上げ速度が、フローの広がりを与える影響について検討した。

4. MPS 法によるフロー試験の再現性の検討

全試料の解析結果と実測結果を図-2 に示す。なお、本検討では、他の解析手法による結果とも比較するために、粘塑性有限要素法 (FEM) による流動解析も行っている。図-2 中の各線は、MPS 法および FEM によるずり時間毎の広がり曲線であり、黒丸は実測した広がり曲線である。また、図-2 の各図中に、流動初期部分の拡大図を合わせて示す。MPS 法で使用した全粒子数は 39,859 個、フロー板およびコーンはポリゴンとして扱い、これらの生じるペーストとの界面は、ノンスリップ条件とした、また、コーンは人為的な引き上げによって真上に並行移動する移動境界とし、その引き上げ速度は、60, 120mm/s の 2 種類とした。FEM で使用した要素は 4 節点アイソパラメトリック要素であり、要素数 420 要素、節点数 464 個、マーカー粒子数は 3,000 個とした。また、FEM の流動構成式は、文献 7)の bi-viscosity モデルを使用した。フローの流動停止判定は、MPS 法では、式(4)を用いて、表-3 に示す各降伏値に対する限界せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_L$ を求め、全粒子の 99.99%のせん断ひずみ速度が $\dot{\gamma}_L$ 以下になったとき流動停止と判断し、解析を終了した。

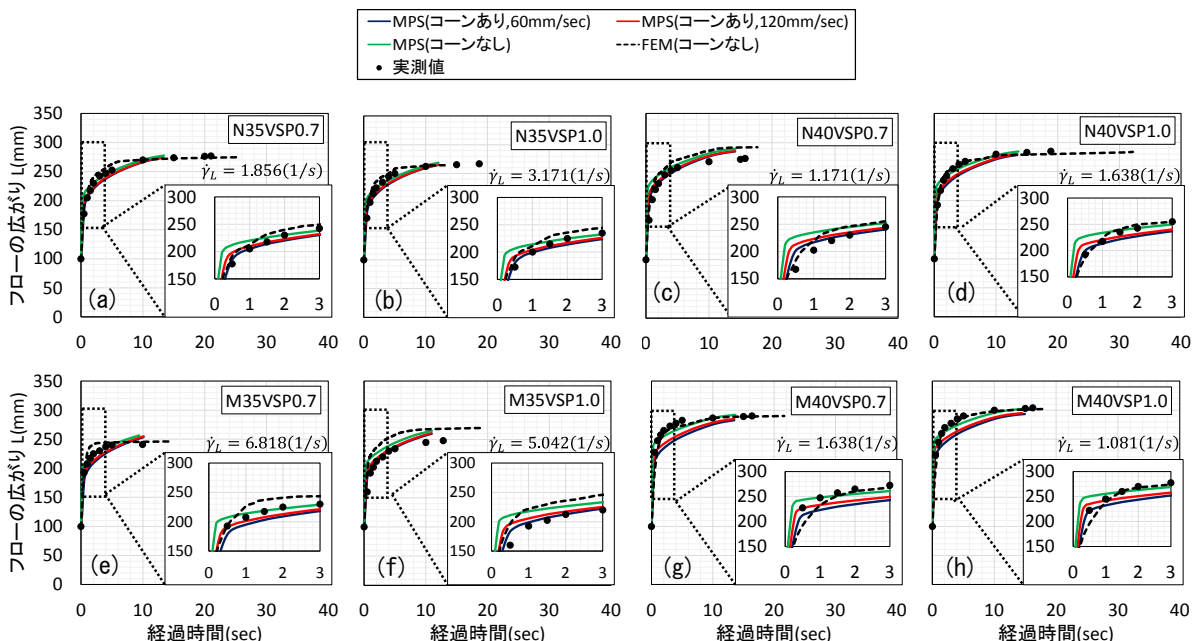


図-2 経過時間とフローの広がり関係

一方 FEM では、全要素のせん断ひずみ速度が限界せん断ひずみ速度より小さいときに流動停止と判定した。

図-2 より、MPS 法および FEM の結果は、実測値の傾向を良く捉えられることが確認された。MPS 法の結果に着目すると、経過時間 3 秒までの流動初期において、コーンなし、コーンあり 120mm/s、コーンあり 60mm/s の順に、経過時間に対するフローの広がりが大きい。

図-3 に、MPS 法による N35VSP0.7 のコーンなしとコーンあり 120mm/s のフローの速度分布を示す。同図の結果から、コーンなしでは、ペーストはそのまま流動するが、コーンありではコーンがペーストの流動を遮蔽する様子がわかる。これは、図-2 の結果とも一致する。図-3(b)と(f)を比較すると、コーンなしの場合は、ペースト表面の速度は速いが、コーンありの場合では、コーンに接する面でノンスリップ条件が作用し、ペースト表面の速度が小さくなっているのが確認された。

図-4 に、MPS 法による N35VSP0.7 のせん断ひずみ速度分布を示す。なお、図中のカラーバーの下限値は N35VSP0.7 の限界ひずみ速度に設定している。図-4(b)と(f)より、コーンなしの場合では、ペースト表面のせん断速度は小さいが、コーンありの場合では、ペースト表面のせん断速度は大きい。これも、コーンの接する面で

ノンスリップ条件が作用するためと考えられる。

小門らは⁸⁾、降伏値 τ_y は、ペースト密度 ρ とフロー値 S_f の 5 乗で除した値 ($\tau_y = \rho/S_f^5$) で表せるとしている。また古賀ら⁹⁾は、本研究のずり条件における降伏値 τ_y とフロー値 S_f の関係について比較検討を行っている。そこで本研究では、古賀らの結果に、MPS 法および FEM の各解析結果を追加し、比較検討を行った。その結果を図-5 に示す。図-5 中には、実測値の回帰直線(実線)および上下限 95%の予測区間(点線)も併せて示す。

同図より、決定係数が 0.83 と高いことから、本研究で用いたずり条件における降伏値とフロー値の間には高い相関があることがわかる。また、MPS 法および FEM の解析結果は、すべて上下限 95%の予測区間の範囲内であり、実験値の傾向を良く捉えられることが確認された。

塑性粘度については、小門らの研究⁸⁾によれば、塑性粘度と高い相関が認められるフロー値の到達時間は、フロー曲線が直線と見なせる範囲のフロー値の到達時間としている。また古賀ら⁹⁾は、フロー開始からフロー値の 150mm 到達時間までが、フローの広がり曲線を直線的と見なせる範囲としている。そこで本検討では、古賀らの結果に MPS 法および FEM の解析結果を新たに加え、150mm 到達時間と塑性粘度の関係について比較検討を

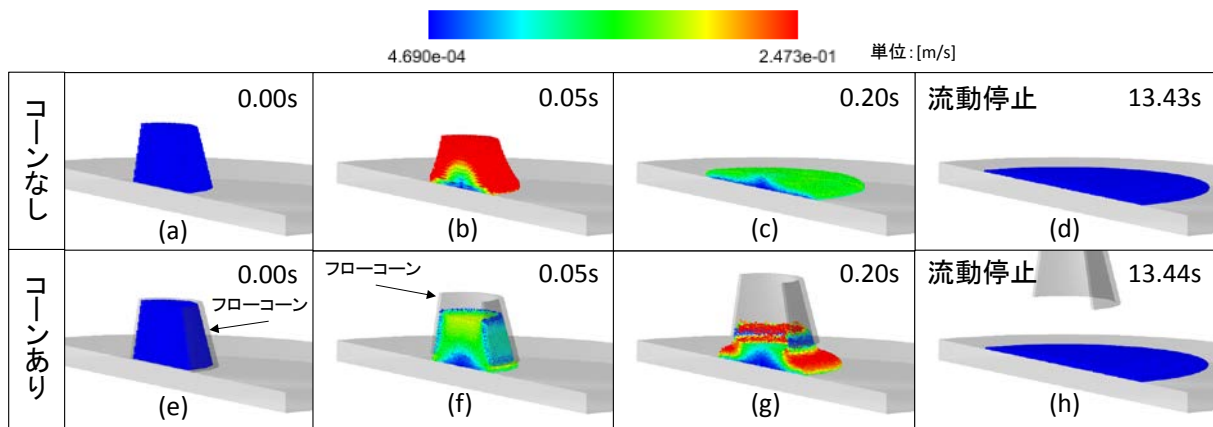


図-3 コーンの有無によるフローの速度分布 (N35VSP0.7)

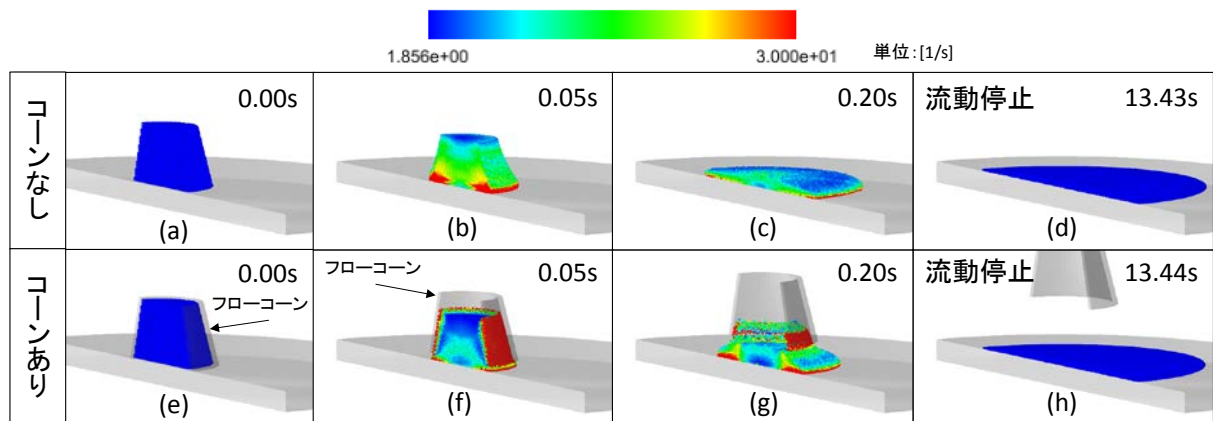


図-4 流動初期および流動停止のせん断ひずみ速度分布 (N35VSP0.7)

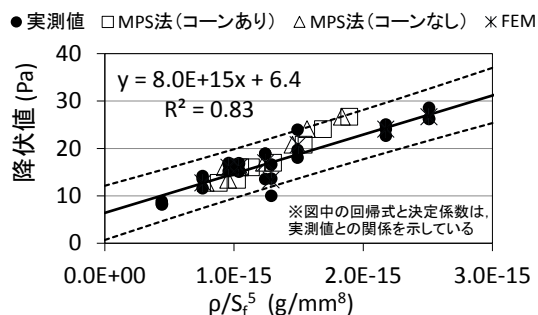


図-5 フロー値と降伏値の関係

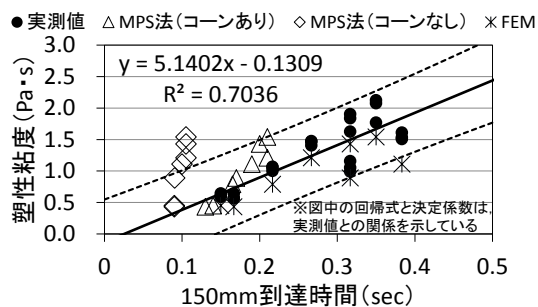


図-6 150mm 到達時間と塑性粘度の関係

行った結果を図-6 に示す。同図中には、実測値の回帰直線（実線）と上下限 95%の予測区間（点線）も示す。

フロー値と降伏値の関係と同様に、150mm 到達時間と塑性粘度の間には高い相関があることが確認された。MPS 法のコーンありの解析結果と FEM の解析結果は、上下限 95%の予測区間の範囲内であり、MPS 法の流動速度は、FEM より速い傾向であった。MPS 法のコーンなしの結果は、全解析結果の中で最も 150mm 到達時間が早く、塑性粘度が 1.0Pa·s 以上では、95%予測区間外であった。これは、コーンありの場合では、ペーストの流動初期において、コーンがペーストの流動を遮蔽する（図-3 の (f), (g) 参照）が、コーンなしの場合は、ペーストの初期流動は遮蔽されないため（図-3 の (b), (c) 参照）、その結果、150mm 到達時間が早くなったと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) MPS 法の解析結果は、実測値の傾向と概ね一致した。また、コーンの有無やコーンの引き上げ速度が、流動初期のフローの広がりに影響を与えることが示唆された。
- (2) フローの速度分布を検討した結果、流動初期において、コーンがない場合はペースト表面の速度は、コーンがある場合と比べて速い。これは、コーンに接する面では、ノンスリップ条件により、せん断ひずみ速度が高くなるためと考えられる。
- (3) フロー値と降伏値の関係では、MPS 法と FEM の解

析結果は実測値の傾向をよく捉えており、実験結果における上下限 95%予測区間の範囲内であった。

- (4) 150mm 到達時間と塑性粘度の関係では、コーンなしの場合、ペーストの流動がコーンに遮蔽されないため 150mm 到達時間が早くなり、塑性粘度 1.0Pa·s 以上では実験結果における上下限 95%予測区間範囲外であった。

謝辞

本研究の一部は、平成 29 年度科学研究費補助金（基盤研究 (B) 一般、課題番号：17H03344、研究代表者：山田義智）による助成を受けた。記して感謝の意を表す。

参考文献

- 1) S. Koshizuka and Y. Oka : Moving-Particle Semi-implicit Method for Fragmentation of Incompressible Fluid, Nucl. Sci. Eng., Vol. 123, pp. 421-434, 1996
- 2) 上原義己ほか：BIM を利用した粒子法によるフレッシュコンクリートの充填シミュレーション，日本建築学会大会（九州）学術講演梗概集，pp.267-268, 2016.3
- 3) 田中正幸，益永孝幸：疑似圧縮性効果による MPS 法の安定化と圧力の平滑化，日本計算工学会論文集，Transactions of JSCES, No.20080025, 2018.10
- 4) 上原義己，崎原康平，山田義智，浦野真次：高精度手法を用いた MPS 法によるフレッシュコンクリートのスランプ解析に関する一考察，セメント・コンクリート論文集，Vol.67, pp.626-633, 2015.2
- 5) 東舟道裕亮，山田義智，上原嘉己，崎原康平：セメントペーストのフロー特性とレオロジー定数推定に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.39, No.1, pp.1153-1158, 2017.6
- 6) 越塚誠一，柴田和也，室谷浩平：粒子法入門，丸善，pp.77, 2014.6
- 7) 山田義智，赤嶺糸織，伊波咲子，浦野真次：フレッシュコンクリートのレオロジー定数推定に関する基礎的研究，セメント・コンクリート論文集，Vol.66, pp.661-668, 2012.3
- 8) 小門武，宮川豊章：スランプフロー試験による高流動コンクリートのレオロジー定数評価法に関する研究，土木学会論文集，第 634 号，V-45, pp.113-129, 1999.11
- 9) 古賀志門ほか：ペーストフロー試験におけるセメントペーストのレオロジー定数推定方法の研究，日本建築学会大会（東北）学術講演梗概集，pp.393-394, 2018.9