

粒子法によるビンガム流体の流動解析

琉球大学 学生会員 ○入部 綱清 琉球大学 正会員 伊良波 繁雄
 琉球大学 正会員 富山 潤 琉球大学 正会員 山田 義智
 琉球大学 学生会員 松原 仁

1. 目的

近年、配筋の過密化や充填確認の困難な部分でコンクリートの施工不良が問題となっている。そのため、その流動特性を力学的に評価しようとするレオロジー的な研究も盛んに行われている。¹⁾

本研究では、非圧縮性流れを解析する有力な解析法の一つであり、セルや要素を必要としない粒子法の一つである MPS (Moving particle semi-implicit) 法²⁾をフレッシュコンクリートの流動解析に適用した。

2. MPS 法

MPS 法は非圧縮性流体を解析する手法であり、支配方程式は、次式の連続の式と Navier-Stokes 式で与えられる。

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = F + -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u \quad (2)$$

ここで、 u : 流速ベクトル、 p : 圧力、 ρ : 流体の密度、 F : 外力ベクトル、 ν : 渦動粘性係数である。

MPS 法では Navier-Stokes 式の右辺に示される勾配とラプラシアンについて粒子間相互作用を考慮した特殊な離散化が行われている。

粒子 i の物理量 ϕ の勾配とラプラシアンはそれぞれ次式で表される。

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{\phi_j - \phi_i}{|r_j - r_i|^2} (r_j - r_i) w(|r_j - r_i|) \right] \quad (3)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(\phi_j - \phi_i) w(|r_j - r_i|)] \quad (4)$$

ここで、 j は近傍粒子番号、 r は粒子間距離、 w は粒子間相互作用モデルより求めた重み関数である。

3. フレッシュコンクリートの構成式³⁾

本手法ではフレッシュコンクリートを粘塑性モデルと仮定し、構成側をビンガム流体として扱う。

ビンガム流体はせん断応力が降伏値を超えるまで

はひずみ速度がゼロであり解析不能であるが、本手法では、せん断応力が降伏値を超えるまでを高粘性流体として扱い、流動速度を小さくすることで不動状態としている。流動時、不動時における構成式はそれぞれ次式で表される。

$$\text{(流動時)} \quad \tau_{ij} = -P \delta_{ij} + 2 \left(\eta + \frac{\tau_y}{\sqrt{\Pi}} \right) \dot{\epsilon}_{ij} \quad (6)$$

$$\text{(不動時)} \quad \tau_{ij} = -P \delta_{ij} + 2 \left(\eta + \frac{\tau_y}{\sqrt{\Pi_c}} \right) \dot{\epsilon}_{ij} \quad (7)$$

ここで、 τ_y は降伏値、 η は塑性粘度である。 $\Pi = 2 \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}$ とし、 $\Pi_c = (2\pi_c)^2$ とする。また、 π_c は流動限界ひずみ速度である。

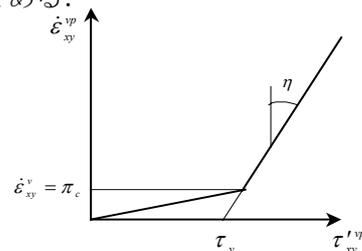


図-1 ビンガムモデル

4. MPS 法によるフレッシュコンクリートの流動解析

フレッシュコンクリートの解析的研究では構成モデルをビンガム流体として扱うことが多い。

Navier-Stokes 式を誘導する際に省略されることが多い微小項として扱われる項を本手法では考慮し、より構成モデルに近い構成式を用いた。

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F + -\frac{1}{\rho} \nabla p + (\eta + \Lambda) \nabla^2 u + 2e \frac{\partial \Lambda}{\partial x} \quad (8)$$

ここで、 e : 各方向成分のひずみ、 $\Lambda = \tau_y / \sqrt{\Pi}$ である。

式(6)、(7)での流動判定に用いられる Π は、次式で表される。

$$\Pi = 2 \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (9)$$

$$\dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} = \dot{\epsilon}_{xx}^2 + \dot{\epsilon}_{yy}^2 + \dot{\gamma}_{xy}^2 / 2 \quad (10)$$

$\dot{\epsilon}_{xx}$ は x 方向のひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_{yy}$ は y 方向のひずみ速度、 $\dot{\gamma}_{xy}$ はせん断ひずみ速度である。各ひずみ速度は

キーワード フレッシュコンクリート、粒子法、レオロジー、ビンガムモデル

連絡先 〒903-0129 沖縄県中頭郡西原町字千原1番地 琉球大学工学部環境建設工学科 TEL098-895-8663

$$\begin{bmatrix} \dot{\epsilon}_{xx} & \dot{\gamma}_{xy} \\ \dot{\gamma}_{yx} & \dot{\epsilon}_{yy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} & \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \\ \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y} \right) & \frac{\partial v}{\partial y} \end{bmatrix} \quad (11)$$

で表され、式(3)を用い、次式より導出する。

$$\nabla \bar{u}_i = \left(\frac{\partial u}{\partial x}, \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (12)$$

$$\nabla \bar{v}_i = \left(\frac{\partial v}{\partial x}, \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (13)$$

\bar{u}_i は粒子 i における x 方向速度、 \bar{v}_i は y 方向速度である。ここで導出された各ひずみ速度を式(9)に代入し、 Π を求めることができる。

5. 数値解析例

数値解析例として L フロー試験を対象に解析を行った。粒子数を 410 粒子、時間ステップ 1/10000 で行い、塑性粘度は 50Pa・s とした。また、フレッシュコンクリート粒子と L 型フロー試験機の底面は完全固着とした。比較のため式(8)の右辺第四項を省略し得られた解析値を解析例 1 として示した。

図-2 は時間と L フロー値の関係を示している。図より、流動開始直後は勢いよく流れているが、約 6 秒後からは緩やかな流れとなっている。そこで本解析では、粒子数の 90% 以上が不動状態と判定された時刻の L フロー値を解析値とした。図-3 は降伏値と L フロー値の関係を示している。比較のため、宮本ら⁴⁾の行った実験値の近似曲線と、解析例 1 を同時に示した。図より、本解析値は実験値のように降伏値の増加に伴い、L フロー値が減少するという傾向が一致し、また解析値は実験値に近い値を示した。

次の解析例として、図-5 に示すように、フレッシュコンクリートを型枠に詰め、突き棒で鉛直に突き、上、中、下段での混合状況をシミュレーションした結果を示した。図-5(b), (c), (d) より、突き数の増加とともに各層で上、中、下段の粒子の総数が 30% 付近になり、均一に混合していくことがわかる。

6. まとめ

粒子法的一种である MPS 法を用い、構成モデルをビンガム流体としたフレッシュコンクリートの流動解析を行い、降伏値の違いによる L フロー値を比較した結果、良好な結果を得ることができた。

構成式、式(8)の右辺第四項のせん断応力の勾配に関する項を考慮しても解析値に与える影響は少ない。

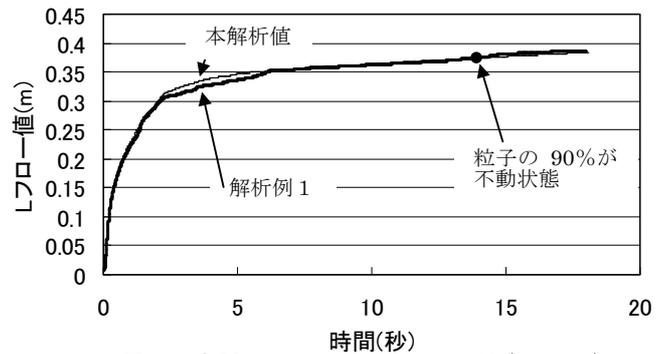


図-3 時間と L フロー値の関係(125Pa)

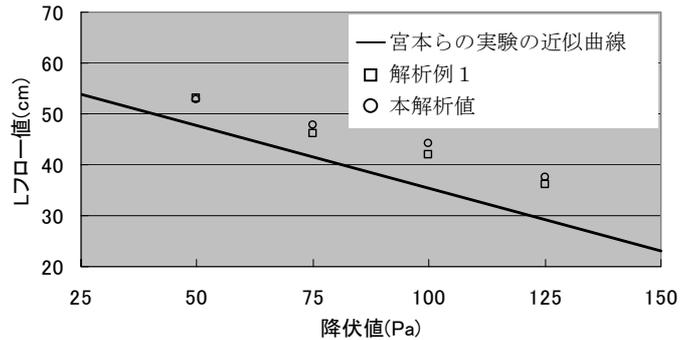


図-4 降伏値と L フロー値の関係

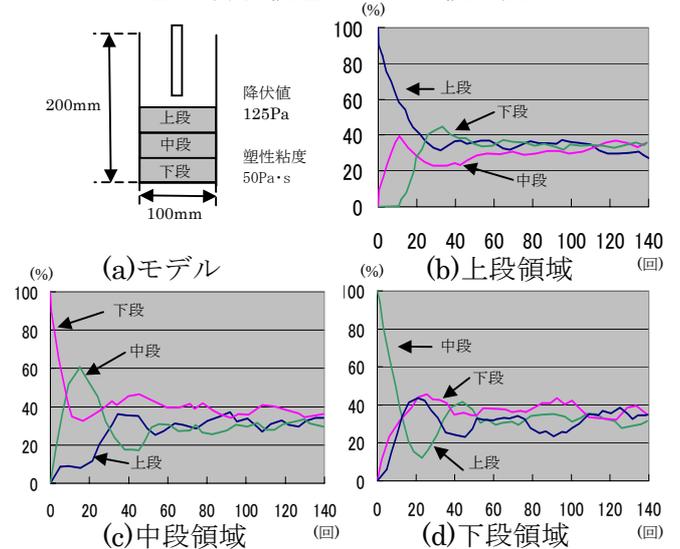


図-5 棒突き試験における練り混ぜ解析結果

参考文献

- 1) 森博嗣, 谷川恭雄: フレッシュコンクリートの流動解析技術の現状, コンクリート工学, Vol. 32, No. 12, pp. 30-40, 1994. 12
- 2) 越塚誠一: 数値流体力学, インテリジェントエンジニアリングシリーズ, 培風館, p163, 1997
- 3) 富山潤, 山田義智, 伊良波繁雄, 矢川元基: フリーメッシュ法によるフレッシュコンクリートの粘塑性流動解析, 土木学会年次学術講演会, CD-ROM, 2002
- 4) 宮本欣明, 山本康弘: J 型フロー試験による高流動コンクリートの流動特性・調査に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 547, pp. 9-15, 2001. 9