

フレッシュコンクリートの流動問題への粒子法の適用

琉球大学 学生会員 〇入部 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 学生会員 松原 仁

1. 目的

フレッシュコンクリートの流動特性の解析的研究では差分法, 有限要素法などが用いられてきた¹⁾. しかし, 差分法では流動条件によって空セルが生じたり, 有限要素法では変形に伴い歪んだ要素の発生などの問題点がある. このため本研究では, 自由境界を容易に表現できる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) 法をフレッシュコンクリートの流動解析に適用する方法を示す.

2. MPS 法²⁾

本法は非圧縮性流れを解析する有力な解析法の一つであり, 格子やセルを使用する解析法に比べ境界の大変形を扱うことが容易である.

非圧縮性流体の支配方程式は, 次式の連続の式と Navier-Stokes 式で与えられる.

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (1)$$

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

ここで, $\mathbf{u}$: 流速ベクトル, p : 圧力, ρ : 流体の密度, $\mathbf{F}$: 外力ベクトル, ν : 渦動粘性係数である. MPS 法では, 式(2)左辺第二項の移流項, 右辺の圧力項, 粘性項, 外力項(重力項)の各項について, 粒子間相互作用モデルを用いた特殊な離散化が行われる. この離散化手法を簡単に示す.

支配方程式(1)(2)には微分演算子として勾配とラプラシアンが含まれる. 例えば粒子 i のある物理量を ϕ とすると勾配とラプラシアンはそれぞれ次式で表される.

$$\langle \nabla \phi \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j=1} \left[\frac{\phi_j - \phi_i}{|r_j - r_i|^2} (r_j - r_i) w(|r_j - r_i|) \right] \quad (3)$$

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j=1} [(\phi_j - \phi_i) w(|r_j - r_i|)] \quad (4)$$

ここで, j は近傍粒子番号, w は粒子間相互作用モ

デルより求めた重み関数, r は粒子間距離である.

また, 本解析では Navier-Stokes 式を誘導する際に用いられる式(5)で示す構成式の代わりに次項で説明するフレッシュコンクリートの構成式を用いた.

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\eta\dot{\epsilon}_{ij} \quad (5)$$

ここで, τ_{ij} , $\dot{\epsilon}_{ij}$ はそれぞれ粘性流体の応力成分, ひずみ速度成分である. P は静水圧, δ_{ij} はクロネッカーデルタ, η は粘性係数である.

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ひずみ速度がゼロであり本手法では解析が不可能である. そこで本手法ではせん断応力が降伏値に達するまでを高い粘性を持つ流体として扱う. (流動時)

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

(不動時)

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

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, $\Pi_c = (2\tau_c)^2$ とする.

τ_c は流動限界ひずみ速度であり, 次式で定義した. 値は 0.2 とし, この値は, L フロー試験を対象に予備解析を行い決定した.

$$\tau_c = \frac{\beta \tau_y}{\eta} \quad (8)$$

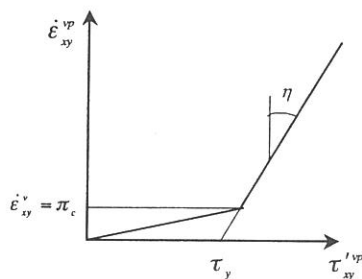


図-2 ビンガムモデル

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

4. 数値解析例

ここでは、本解析手法の妥当性を検討するために図-2に示すL型フロー試験の流動解析を行った。解析例として塑性粘度を $50\text{Pa}\cdot\text{s}$ と一定とし、降伏値を50, 75, 100, 125Paの4ケースの解析を示す。また、解析は時間ステップ 0.0001s で行った。

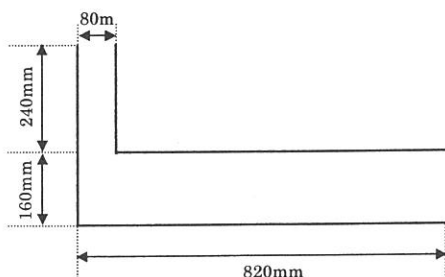


図-2 L型フロー試験解析

図-3は、粒子数410、降伏値75PaにおけるL型フロー試験の流動進行状況である。この図よりフレッシュコンクリートが開口部より膨み出し、時間と共に流動している様子をシミュレートできているのが確認できる。また、図-4は図-3で示した解析結果の時間とLフロー値（開口部から流動先端までの距離）との関係を示したものである。これより、はじめに勢いよく流れ出したフレッシュコンクリートが約6秒程度でLフロー値（42cm）付近に達し、その後はゆるやかな流れとなっているのが分かる。このため本研究では、粒子の90%以上が不動状態と判定されたときを流動停止とし、本解析値のLフロー値を求めた。

図-5に降伏値とLフロー値の関係を示す。比較のために宮本ら⁴⁾の行った実験の近似曲線も同時に示した。図-5より本手法における結果は降伏値が小さくなるに従いLフロー値が大きくなり、実験値と同様な傾向が得られ、その値も実験値に近い値を示した。

5. 結論

本研究では粒子法的一种である自由境界を容易に表現できるMPS法をフレッシュコンクリートの流動解析に適用する方法を示した。数値解析例としてL型フロー試験の解析を行い本手法の妥当性を検討した結果、実験値との一致も良好であった。

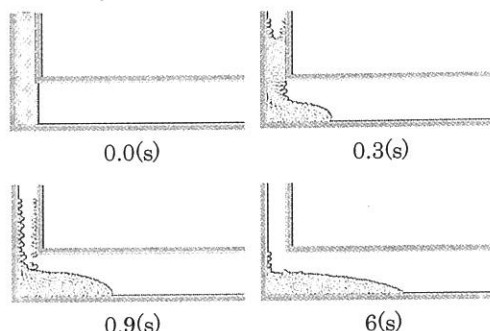


図-3 Lフロー試験解析進行状況

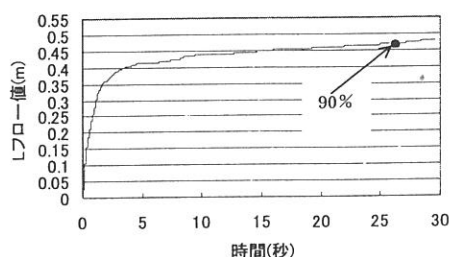


図-4 時間とLフロー値の関係

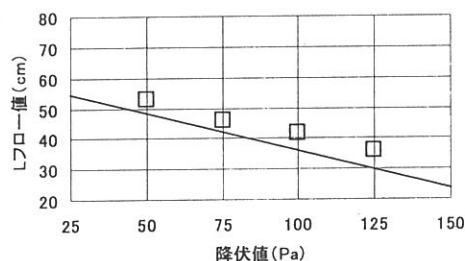


図-5 せん断応力降伏値とLフロー値の関係

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) 山田義智, 大城武, 梶田佳寛: フレッシュコンクリート流動解析へのMAC法への適用, コンクリート工学年次講演会報告集, Vol. 20, No. 1, pp. 131-136, 1998
- 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・調合に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, No. 547, pp. 9-15, 2001. 9