

粒子法によるフレッシュコンクリートの流動解析

琉球大学 学生会員 ○崎原 康平 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 学生会員 松原 仁

1. 目的

フレッシュコンクリート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。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ともな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¹⁾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

本手法は非圧縮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界面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。

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

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

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、式(2)左辺第二項の移流項、右辺の圧力項の各項について離散化が行われる。この離散化手法を簡単に示す。

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。

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

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

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²⁾

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的に不可能である。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、 $\Pi_c = (2\pi_c)^2$ とする。

π_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。

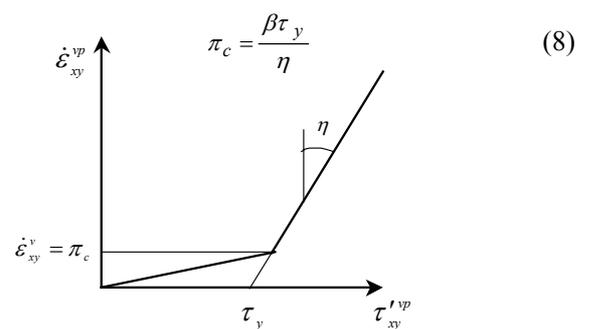


図-1 ビンガムモデル

4. 数値解析例

ここでは、本解析手法の妥当性を示すために図-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 50Pa・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。

キーワード フレッシュコンクリート、粒子法、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

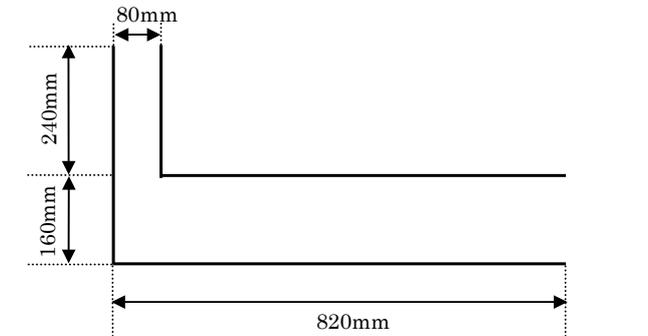


図-2 L型フロー試験解析

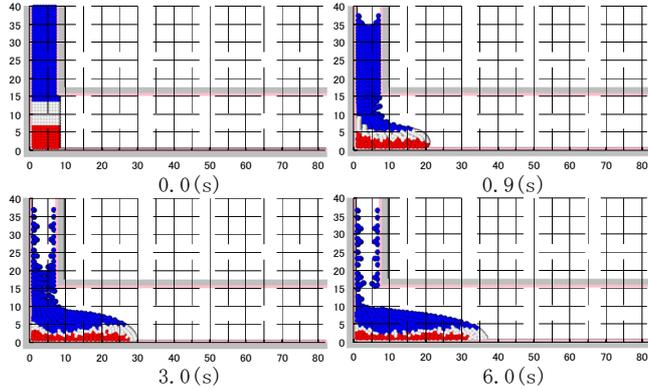


図-3 L型フロー試験解析状況

図-3は、粒子数410、降伏値125Pa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らみ、時間と共に流動している様子をシュミレートできているのが確認できる。

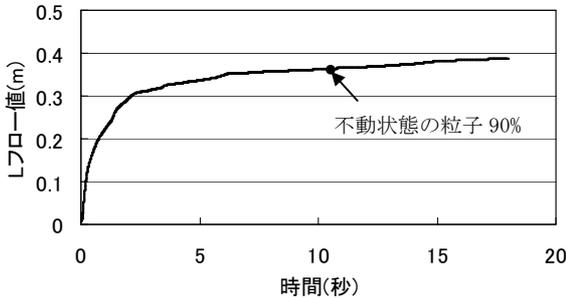


図-4 時間とLフロー値の関係(降伏値 125Pa)

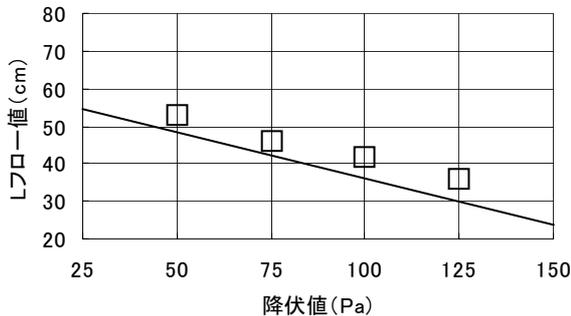


図-5 せん断応力降伏値とLフロー値の関係

図-4は時間と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。本研究では、粒子の90%以上が不動状態と判定された時を流動停止とし、本解析値のLフロー値を求めた。図-5に降伏値とLフロー値の関係と、比較のために宮本ら³⁾の行った実験の近似曲線を示す。これより、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、実験値と同様な結果が得られた。

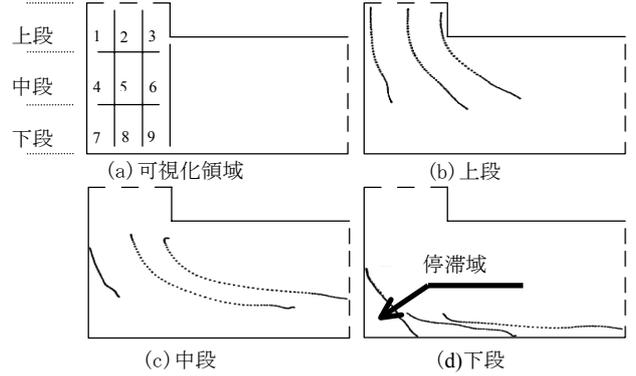


図-6 佐藤らの実験(降伏値 150Pa)

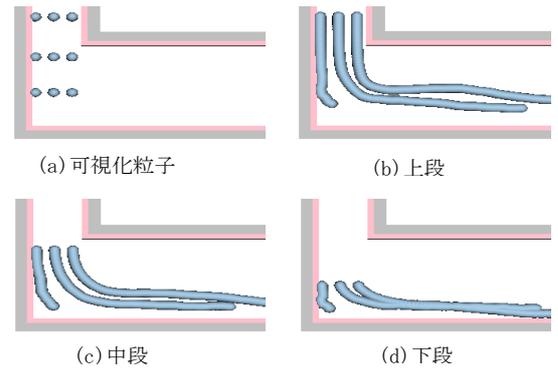


図-7 本解析結果の流跡線(降伏値 150Pa)

図-6に佐藤ら⁴⁾が行ったL型フロー試験の流動挙動の可視化実験を示す。実験では可視化領域をL型コーナー付近とし、図-6(a)のように分割している。図-7は本解析結果より求めた流跡線である。解析結果は図-6と同様に左側の壁付近での鉛直方向の移動量が少なく、中段、下段のL型コーナー付近で停滞域が確認できた。

5.結論

本研究では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。解析結果と実験値との一致も良好であり、本手法の妥当性が示された。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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，CD-ROM，2002
- 3) 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
- 4) 佐藤良一，若林正憲，橋本親典，辻幸和：超流動コンクリートのコンシステンシー評価試験の可視化，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.16，No.1，pp.189-194，1994.6