

MPS法によるフレッシュコンクリートの流動特性に関する解析的研究

琉球大学	学生会員	入部 綱清	琉球大学	学生会員	崎原 康平
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			

1. 目的

フレッシュコンクリートに含まれる粗骨材は、打設時に隙間の狭い個所での詰まりの原因となる。

近年、フレッシュコンクリートの解析的研究は盛んに行われており、本研究では粗骨材を考慮したフレッシュコンクリートの流動解析を行うことを目的とした。求解法として粒子法の一つであるMPS(Moving particle semi-implicit)法¹⁾を用いた。

2. MPS法¹⁾

MPS法は非圧縮性流体を解析する手法であり、また計算に要素やセルを必要とせず、粒子を用いるLagrange的手法であるため、自由境界の大変形を容易に表すことができる。

非圧縮性流体の支配方程式は、Navier-Stokes式と連続の式で与えられる。

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

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0 \quad (2)$$

ここで、 \bar{u} は流速ベクトル、 p は圧力、 ρ は流体の密度、 \bar{F} は外力ベクトル、 ν は粘性係数である。

式(2)を解く際、微分演算子のラプラシアンと勾配は粒子間相互作用を考慮した離散化が行われている。MPS法では、粒子 i の物理量 ϕ のラプラシアンと勾配はそれぞれ次式で表す。

$$\langle \nabla^2 \phi \rangle_i = \frac{2d}{\lambda n^0} \sum_{j \neq i} [(\phi_j - \phi_i) w(|\vec{r}_j - \vec{r}_i|)] \quad (3)$$

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

ここで、 j は近傍粒子番号、 r は粒子間距離、 w は重み関数、 λ は変数分布の分散を解析解と一致させるための係数である。

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仮定した。

しかし、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解析不能であるため、本手法では図に示すbi-viscosityモデルを用いた。bi-viscosityモデル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う。

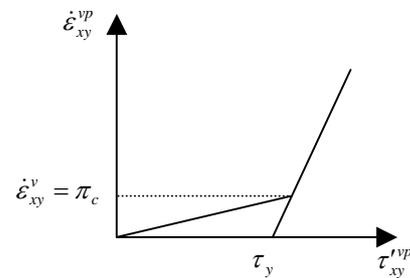


図 1 bi-viscosity モデル

流動時、不動時における構成式は式(6)、(7)で表される。

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

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

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。

4. MPS法による流動解析

4.1 運動方程式

本手法で用いたフレッシュコンクリートの運動方程式を式(8)に示す。

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

ここで $\Lambda = \tau_y / \sqrt{\Pi}$ 、 ϵ_{ij} はひずみ速度である。

式(8)に含まれるひずみ速度は式(4)を用い式(9)で表される。

キーワード フレッシュコンクリート, MPS法, bi-viscosity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

$$\langle \nabla \bar{u} \rangle_i = \frac{d}{n^0} \sum_{j \neq i} \left[\frac{\bar{u}_j - \bar{u}_i}{|\bar{r}_j - \bar{r}_i|^2} (\bar{r}_j - r_i) w(|\bar{r}_j - \bar{r}_i|) \right] \quad (9)$$

4.2 粗骨材の計算手法¹⁾

本手法では粗骨材を剛体で形状が立法体であると仮定し、8つの頂点に粗骨材粒子として質点を配置して重心に作用する運動量を計算し、粗骨材の並進運動と回転運動を表現した。

$$\bar{T} = \frac{1}{8} \sum_{i=1}^8 \bar{u}_i \quad (10)$$

$$\bar{R} = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^8 \bar{u}_i \times \bar{q} \quad (11)$$

$$\bar{u} = \bar{T} + \bar{q}_i \times \bar{R} \quad (12)$$

\bar{q} は重心からの距離、 I は粗骨材の慣性モーメント、 \bar{T} は重心の並進クトル、 \bar{R} は重心の角速度ベクトル、 \bar{u} は粗骨材粒子の速度ベクトルである。

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。解析は表1に示すように粗骨材なしを5ケース、粗骨材考慮を2ケース行った。

表1 解析対象

	粗骨材なし	粗骨材考慮
フレッシュコンクリート粒子	800 粒子	5120 粒子
粗骨材粒子	-	7680 粒子
塑性粘度	50Pa·s	50Pa·s
降伏値	25,50,75,100,125Pa	100,125Pa
β	1.5	2.0

図2はL型フロー試験流動進行状況（粗骨材なし：降伏値125Pa）である。横からの図より、先端部で丸みを帯びた流れとなっている。また、上からの図より、側面付近で壁からの影響を受けて流れが遅くなっている。本解析ではL型フロー試験器のコーナー部に粒子の水平移動の少ない停滞域も確認できた。

図3は宮本ら³⁾の行った実験値と本解析値を比較したものである。本解析値は実験値に近い値であり、降伏値が増加するとLフロー値が減少するという傾向も表れた。しかし、粗骨材を考慮した解析では粗骨材を簡易的に8粒子で構成したため、粗骨材の運動が流動に影響をあまり与えなかった。粗骨材の構

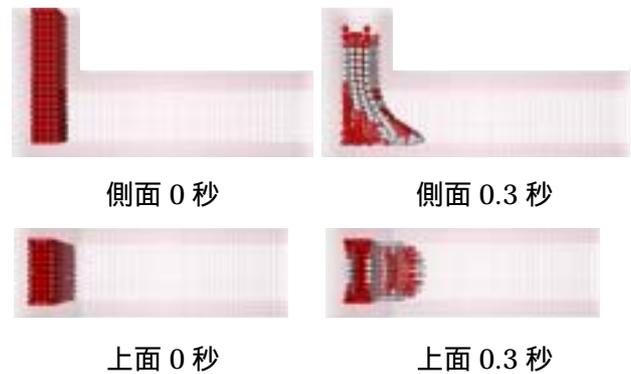


図2 流動状況（降伏値125Pa）

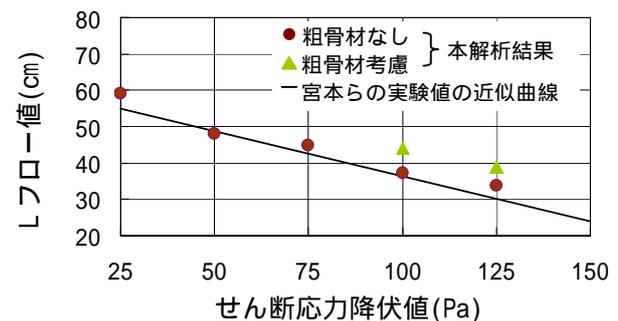


図3 せん断応力降伏値とLフロー値の関係

成粒子を増やし、モデル全体の粒子数を多くすることでさらに精度良く解析できると考えられる。

6. まとめ

MPS法の非圧縮性流体アルゴリズムをフレッシュコンクリートの流動解析に適用した。数値解析例としてL型フロー試験を対象に解析を行い、降伏値の違いによるLフロー値を実験値と比較した結果、良好な結果を得ることができた。

また、基礎的研究として簡易的に粗骨材を考慮することで解析を行ったが、今後は粒子数を多くし現場レベルの問題への適用を課題とする。

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) 山田義智，大城武：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論文集，Vol.20，No.1，pp.131-136，1998
- 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