

フレッシュコンクリートの流動解析における粒子法の適用

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

近年、充填性に優れた高流動コンクリートの開発が盛んに行われており、その流動特性をレオロジーの観点から力学的に評価する様々な研究が行われている。フレッシュコンクリートの流動特性を解析的に求める従来の求解法には差分法や有限要素法などが挙げられる。そこで本研究では新たにその求解法として解析領域の大変形を比較的容易に表現でき、セルや要素を必要としない粒子法の一つであるSPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)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. SPH 法

SPH 法では、位置 x の物理量を $f(x)$ そのものではなく、以下の kernel 近似の概念を用いる。

$$f(x) = \int f(x') \cdot W(x-x', h) dx' \quad (1)$$

ここで、 $f(x)$ は任意関数、 $W(x-x', h)$ は重み関数、 h は影響半径、 x 、 x' はそれぞれ評価中心、任意粒子の座標値である(図-1)。SPH 法で用いる重み関数には多数提案されているが、本手法では現在一般的な3次の spline 関数(2次元)を用いている(図-2)。

$$W(x-x', h) = \frac{10}{7\pi h^2} \begin{cases} 1 - \frac{3}{2}v^2 + \frac{3}{4}v^3 & 0 \leq v < 1 \\ \frac{1}{4}(2-v)^3 & 1 \leq v < 2 \\ 0 & 2 \leq v \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $v = |x-x'|/h$ である。

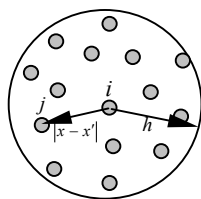


図-1 SPH 法の概念図

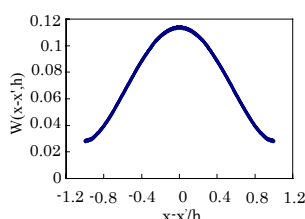


図-2 spline 関数

3. 非圧縮性流体への適用

SPH 法は基本的には圧縮性流れの数値解析手法であるが、本手法では密度と比例関係にある粒子数密度(式(3))を初期配置における粒子数密度と一致させることで非圧縮条件を満たしている。また粘性項導入に関しては、酒井ら¹⁾が提案した SPH 理論の一階微分式の二段階操作による手法を採用した。

$$n_i = \sum_{j=1}^N W(x_i - x_j, h) \quad (3)$$

4. フレッシュコンクリートの構成則²⁾

本手法では、フレッシュコンクリートの構成モデルとして流動開始値を越えるまでフレッシュコンクリート非常に粘性の高い流体として扱い、その流動速度を非常に小さくすることで不動状態とみなす bi-viscosity(図-3)モデルを用いた。また、式(4)(5)に流動時、不動時の構成式をそれぞれに示す。

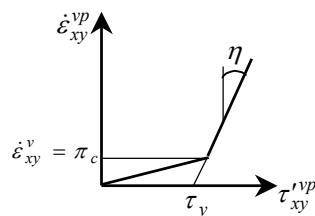


図-3 bi-viscosity モデル

$$(\text{流動時}) : \tau_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\left(\eta + \frac{\tau_y}{\sqrt{\Pi}}\right)\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \quad (\Pi \geq \Pi_c) \quad (4)$$

$$(\text{不動時}) : \tau_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\left(\eta + \frac{\tau_y}{\sqrt{\Pi_c}}\right)\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \quad (\Pi < \Pi_c) \quad (5)$$

ここで、 τ_y 、 η はそれぞれ降伏値と塑性粘度、 $\Pi = 2\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ 、 $\Pi_c = (2\pi_c)^2$ である。また、本解析では π_c を次式で定義した。

$$\pi_c = \frac{\beta\tau_y}{\eta} \quad (6)$$

キーワード SPH 法、フレッシュコンクリート、レオロジー、bi-viscosity モデル、L 型フロー試験
 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

ここで、 β の値は本手法における不動時と判定される粒子の粘度を決定するパラメータであり、本解析では予備解析を行った結果、 β の値を 0.5 とした。

5. 数値解析例

ここではまず、本解析手法で用いた非圧縮アルゴリズム導入手法の妥当性を検討する為、低粘性流体に関して水柱崩壊問題の解析を行った。比較の為、Martin らが行った実験結果も同時に示す(図-4)。

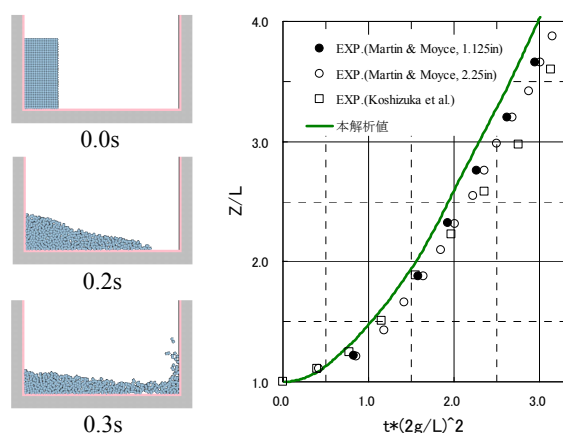


図-4 崩壊進行状況および先端位置の変化

ここで、 Z は流動フロー値、 L は水柱幅、 t は時間、 g は重力加速度である。右壁に衝突するまでの本解析結果と実験値とはよく一致しているのが確認できる。

次に図-5 に示すフレッシュコンクリートの L 型フロー試験を対象に解析を行った。解析条件として降伏値を 150Pa、塑性粘度 50Pa・s で行った。

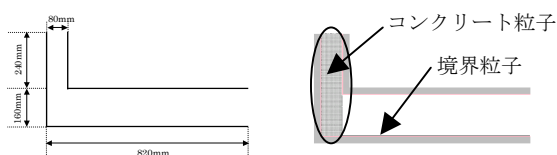


図-5 解析モデル

図-6 に L 型フロー試験の解析進行状況を示す。本解析では解析領域を 3 層に分割し、流動挙動をより視覚的に確認できるようにした。フレッシュコンクリートの先端が巻き込みながら流動している様子を表現できているのが確認できる。

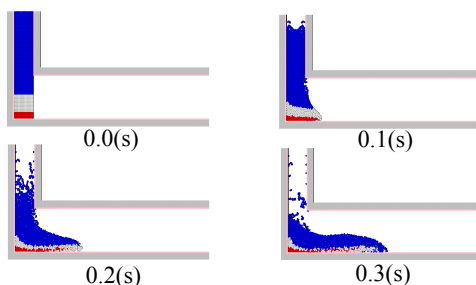


図-6 L 型フロー試験解析進行状況

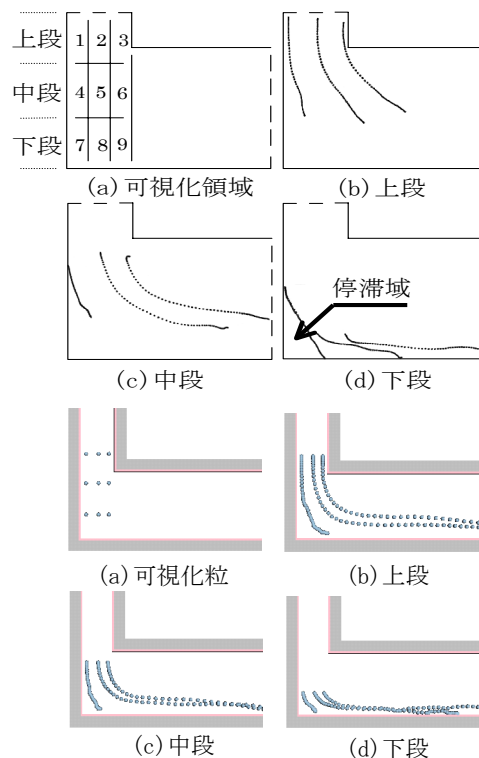


図-6 流跡線の比較(上：実験結果，下：本解析)

図-6 は佐藤ら³⁾ による実験結果と本解析で得られた流跡線の比較である。実験結果と同様に左壁付近での鉛直方向の移動量が少なく、特に下段の L 型コーナー付近では停滞域が確認できた。

6. 結論

本研究では粒子法的一种である SPH 法をフレッシュコンクリートの流動解析へ適用し、その有用性を検討した結果、以下のようなことが確認できた。

- (1) 水柱崩壊解析を行い、本解析結果と実験結果を比較したところ良好な値を得た。
- (2) L 型フロー試験を対象にフレッシュコンクリートの流動解析においては、先端粒子を巻き込みながら流れ出す状況を表現できた。また、追跡粒子の流跡線の比較を行った結果、特に下段において L 型フロー試験で見られる停滞域を表現できた。

参考文献

- 1) 酒井謙，ほか：SPH 粒子法による流体・構造連成解析，計算工学講演会論文集，Vol. 8，pp. 123-126，2003
- 2) 山田義智，ほか：有限要素法によるフレッシュコンクリートの粘塑性流動解析，コンクリート工学年次講演会報告集，Vol. 23，No. 2，pp. 253-258，2001
- 3) 佐藤良一，ほか：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