

フリーメッシュ法によるフレッシュコンクリートの流動解析

琉球大学 正会員 ○富山 潤・琉球大学 山田 義智
 琉球大学 正会員 伊良波 繁雄・琉球大学 学生会員 松原 仁
 東京大学 矢川 元基

1. はじめに

本研究は、フレッシュコンクリートの流動挙動を解析的に求めることを目的とするものである。従来用いられている求解法としてフレッシュコンクリートを連続体または非連続体としてモデル化したものがある。前者は MAC(Marker and Cell) 法や粘塑性有限要素法など、後者は粘塑性サスペンション要素法や個別要素法などである¹⁾。本論文では、流動解析の求解法として移動境界問題の解析に適しているフリーメッシュ法(FMM)²⁾を採用し、その適用性を検討した。

検討は L フロー試験の解析を平面ひずみ問題を仮定して行い、実験値と比較した。その結果、本解析法によるフレッシュコンクリートの流動解析への適用性が示された。

2. フリーメッシュ法

FMM は、図-1 に示すように領域内の各節点ごと(中心節点または着目節点)に、その付近の他の節点(衛星節点)と中心節点から、一時的に仮想三角形要素(局所要素)を生成し、これらの要素剛性マトリックスから中心節点に寄与する成分を求め、全体剛性マトリックスを生成する手法で、要素生成から計算までをシームレスに行うことができる。これらの処理を節点ごとに行うことから並列分散処理に適している。

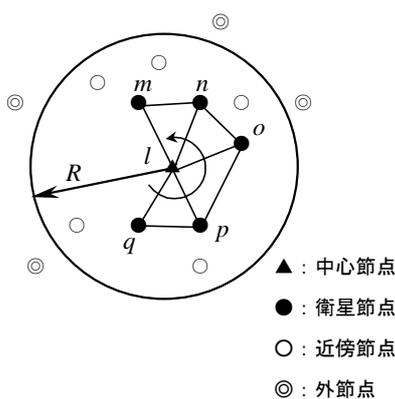


図-1 衛星節点とローカル要素

3. フレッシュコンクリートの構成式

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、図-2 に示すモデルを仮定した³⁾。流動開始値を超えるまで

はフレッシュコンクリートを非常に高い粘性流体として扱い、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した。一方、ある流動開始値を超えた後は、図-3 に示すビンガムモデルの応力とひずみ速度関係を満足するような粘塑性流体として扱う。

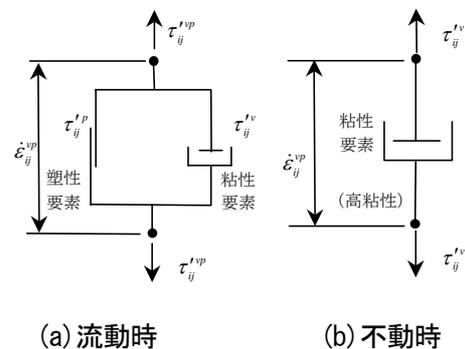


図-2 構成モデル

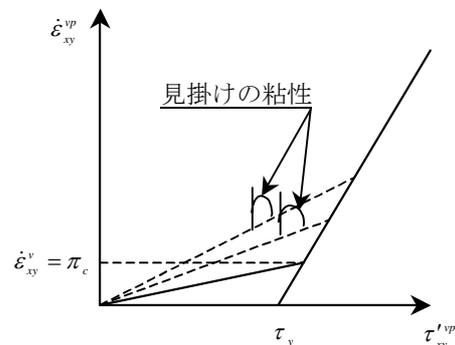


図-3 ビンガムモデル

流動時、不動時の構成式をそれぞれ式(1)(2)に示す。

$$\tau_{ij}^{vp} = -P\delta_{ij} + 2\left(\eta + \frac{\tau_y}{\sqrt{\Pi}}\right)\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} \quad (1)$$

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

ここで、 τ_{ij}^{vp} 、 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ はそれぞれ粘塑性流体の応力成分、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 は塑性粘度、 τ_y は降伏値、 Π は、 $2\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ である。また、

キーワード フリーメッシュ法、フレッシュコンクリート、レオロジー、ビンガムモデル

連絡先 〒903-0213 沖縄県西原町字千原 1 番地 琉球大学工学部環境建設工学科 098-895-8649

$\Pi_c = (2\pi_c)^2$ である。なお、 π_c は流動限界ひずみ速度(図-3参照)であり、ここでは文献(3)と同様に次式で定義した。

$$\pi_c = \frac{\beta\tau_y}{\eta} \quad (3)$$

本解析において、 β 値は0.1を使用した。

この構成式(1)(2)は右辺第二項から理解されるように一種の材料非線形である。そのため、非線形剛性方程式の解法が必要である。本手法は非線形剛性方程式の解法として直接反復法を用いた。

4. 運動方程式の離散化

本解析手法は、フレッシュコンクリートを均質連続体とみなしている。また、今回の解析はLフロー試験を対象とするので流動領域を平面ひずみ問題と仮定した。本解析で使用した基本式として平面ひずみ問題における運動方程式を仮想仕事の原理により定式化を行い、加速度項を逐次積分法であるニューマークの β 法を用い離散化すると次式を得る。

$$\left\{ \frac{2}{\Delta t} [M] + [K] \right\} \{ \dot{u}^{t+\Delta t} \} = [M] \left\{ \frac{2}{\Delta t} \{ \dot{u}^t \} + \{ \ddot{u}^t \} \right\} + \{ F \} \quad (4)$$

ここで、 $[M]$:集中質量マトリックス、 $[K]$:粘塑性マトリックス、 $\{ \dot{u} \}$:速度成分、 $\{ \ddot{u} \}$:加速度成分、 $\{ F \}$:体積力成分、 Δt :時間ステップ(0.001sec)である。

本解析では、粘塑性マトリックスの定式化の際、ペナルティ関数法を用いて非圧縮性を満足させている。局所要素として回転自由度を有する3節点三角形要素⁴⁾を使用し、変位のロッキングを防ぐために選択低減積分を用いた。

5. 数値解析例

本解析手法の妥当性を検討するためにLフロー試験の解析を行った。今回の解析では塑性粘度を固定(50Pa・s)、降伏値のみを変えLフロー値と変形状について検討した。解析に用いた降伏値は3ケースで、それぞれ、Case1(50Pa), Case2(100Pa), Case3(125Pa)である。

本解析では、変形量に応じて節点をラグランジュ的に移動させているが、変形が進むと変形の大きな領域でいびつな節点分布となり解析の破綻や計算が不安定となる。そこで本解析では、FMMの利点を生かし、解析ステップごとに解析領域内部の流動節点にLaplacian Smoothingを施し、リメッシュを行うことで比較的良好的な要素形状となるようにした。

次に解析結果を示す。図-4に降伏値とフロー値の関係を示す。比較のために宮本ら⁵⁾の行った実験値の近似曲線も同時に示した。図-4より、本手法における結果は降伏値が小さくなるにつれてLフロー値が大きくなり、実験値の近似曲線に近い値を得た。

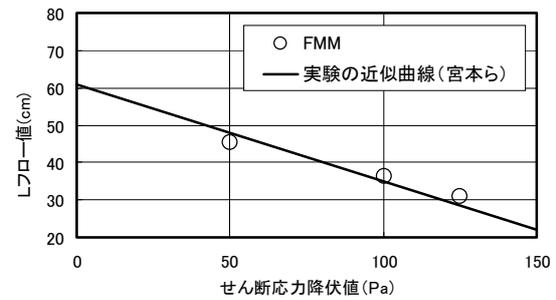


図-4 降伏値とLフロー値

図-5に最もLフロー値の大きなCase1の変形進行状況を示す。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出し、時間と共に流動する様子がシミュレートできているのが確認できる。

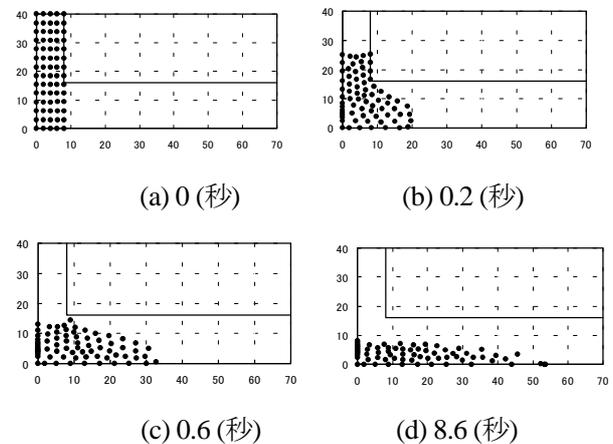


図-5 変形状況

6. まとめ

本論文は、移動境界問題に適したFMMをフレッシュコンクリートの流動解析に適用し、良好な結果を得た。

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) 山田知典:フリーメッシュ法の並列化, 東京大学修士論文, 1997
- 3) 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
- 4) 安和守史, ほか:改良アイソパラメトリック要素を用いた高精度フリーメッシュ法の二次元応力解析への適用に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.3, pp.1-6, 2001
- 5) 宮本欣明, ほか: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