

並列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 正会員 伊良波 繁雄
 琉球大学 正会員 山田 義智 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。筆者らは、その求解法としてフリーメッシュ法(FMM)を採用し、スランプ試験を対象に3次元流動解析を示した¹⁾。しかし、3次元解析だと解析自由度が大幅に増え、計算時間に問題がある。そこで、本研究では、FMM が節点ベースな解析手法であることから本解析法の並列化を行い、スランプ試験を対象にその有効性を示した。

2. フリーメッシュ法

FMM²⁾は、図-1に示すように解析領域内の各節点ごと(中心節点)に、中心節点とその付近の他の節点(衛星節点)から、一時的に局所要素を生成し、これらの要素剛性行列から中心節点に寄与する行成分を全体剛性行列に足し込み、得られた全体剛性行列を解く手法である。このように FMM は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手法であるため、並列計算やアダプティブ解析に適している。

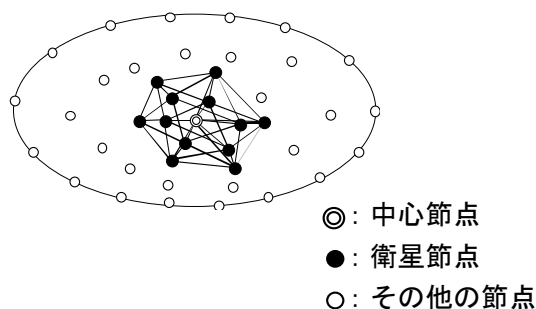


図-1 衛星節点とローカル要素群

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⁾。本モデルでは流動開始値を超えるまでフレッシュコンクリートを高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す。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

体とした。ここで、流動時、不動時の構成式をそれぞれ式(1)(2)に示す。

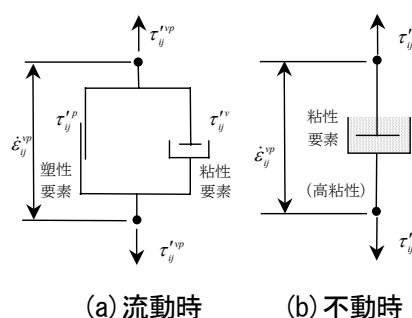


図-2 構成モデル

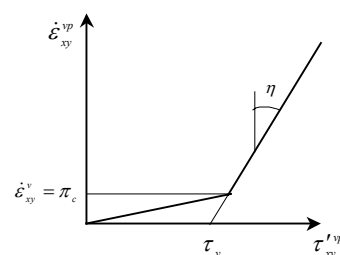


図-3 ビンガムモデル

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

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

ここで、 τ_{ij} 、 $\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$ はそれぞれ粘塑性流体の応力テンソル、粘塑性ひずみ速度テンソルである。 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 $2\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}\dot{\varepsilon}_{ij}^{vp}$ である。また、 $\Pi_C = (2\pi_c)^2$ 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)同様に次式で定義した。また、本解析において、 β 値は 0.1 を使用した。

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

この構成式(1)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。このため、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収斂解法として直接反復法を用いた。

キーワード フレッシュコンクリート、フリーメッシュ法、並列計算、ビンガムモデル

連絡先 〒903-0129 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 TEL098-895-8649

4. 粘塑性行列および解析方法

本解析では、局所要素として回転自由度を有する四面体要素を用いた⁴⁾。また、フレッシュコンクリートを非圧縮性と仮定しているため粘塑性行列 $[K]$ の定式化の際、ペナルティ法を用いた。このため変位のロッキングが生じる可能性がある。それを防ぐために偏差応力に関する項を4点積分、平均応力に関する項を1点積分とする選択低減積分を用いた。

$$[K] = \int_V [B]^T [D_S] [B] dV + \int_V [B]^T [D_V] [B] dV \quad (3)$$

ここで、 $[B]$ は速度一ひずみ速度マトリックス、 $[D_S]$ は偏差応力に関する応力一ひずみ速度マトリックス、 $[D_V]$ は平均応力に関する応力一ひずみ速度マトリックスである。また、 T はマトリックスの転置を表す。なお、今回の解析では慣性項を省略して定式化を行い、各ステップ(0.01secごと)に節点を変位量に応じた位置に移動させながら計算する準動的な解法を採用した。また、本手法では、解析ステップ毎に節点のスムージングおよび局所要素のリメッシュングを行っている。

また、本手法における並列計算では、各PE(プロセッサエレメント)の計算負荷が均一になるようにリカーシブバイセクション法を用いて担当節点数をほぼ等しくなるように領域分割した。なお、本手法では非線形収斂判定部以外、すべて並列化してある。

5. 数値解析例

ここでは、スランブ試験の解析を示す。節点分布は、625節点(図-4参照)とし、PE(Pentium4 2GHz)1台、3台、5台での並列効率を考察した。また、本手法はフレッシュコンクリートと底板とのすべりを考慮し、摩擦係数を0.3とした。今回解析したフレッシュコンクリートのレオロジー定数文献(1)で用いた塑性粘度 $100\text{Pa}\cdot\text{s}$ 、降伏値 300Pa とした。

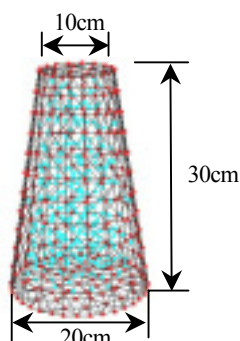
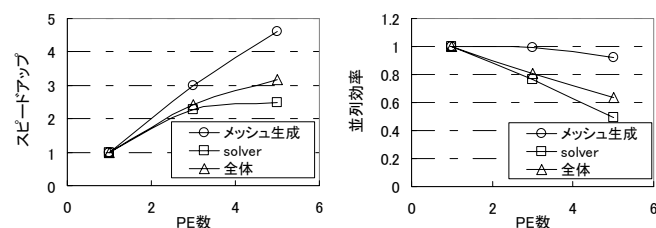


図-4 解析モデル(625 節点)

図-5 に解析ステップ 5 回までの(a)スピードアップと(b)並列効率を示す。比較は、ローカルメッシュ生成部、solver 部 (ICCG)、および全体の解析時間で比較した。なお、ローカルメッシュ生成部と solver 部の時間は、最終ステップ目の時

間である。



(a) スピードアップ

(b) 並列効率

図-5 スピードアップおよび並列効率

図-5 より、ローカルメッシュ生成部に関しては、9 割以上の並列効率を得られた。しかし、solver 部に関しては、5PE でスピードアップも 2.5 倍程度、並列効率 5 割程度しか得られなかった。本手法による弾性解析での検討では、solver 部も 5PE で 9 割以上の並列効率が出ていたことを考えると、原因が不明であるが、ペナルティ法を用いて粘塑性マトリックスを定式化しているため、マトリックスの性質が悪く、このため、ICCG の収束が PE ごとに差がでて、同期待ちで時間をロスしている可能性がある。全体(5 ステップまで)に要した時間は、結局 solver 部に依存してくるので、5PE で 6 割程度の並列効率しか得られなかった。

6. まとめ

今回、フリーメッシュ法によるフレッシュコンクリートの並列流動解析を示した。並列効率としては、solver 部がネックとなり、あまり良好な結果は得られなかった。今後の課題である。また、今回は並列効率のみの検討であったが、今後実現象の再現についての検討も行う。

謝辞: 本研究を行うにあたり、(株)アドバンスソフトの稲葉正和氏作成のメッシュ生成ライブラリーを使用した。ここに感謝の意を表す。

参考文献:

- 1) 富山潤, ほか: 3 次元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, 土木学会西部支部研究発表会, pp.A-494-495, 2003
- 2) 稲葉正和, ほか: フリーメッシュ法のための局所要素生成アルゴリズム, 機械学会, No.02-9, Dynamics and Design Conference, CD-ROM 論文集, 2002
- 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) 伊良波繁雄, ほか: 高精度 3 次元要素を用いたフリーメッシュ法, 平成 14 年度西部支部発表会, pp.A-206-207, 2003