

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

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 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、その求解法としてメッシュレス法の一つであるフリーメッシュ法(FMM)を採用し、L 型フロー試験の解析を平面ひずみ問題と仮定し良好な結果を得た¹⁾。そこで今回は 3 次元フリーメッシュ法(FMM3D)²⁾により、スランプ試験の解析を行い、本手法の妥当性を検討した。

2. フリーメッシュ法

FMM3D 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。

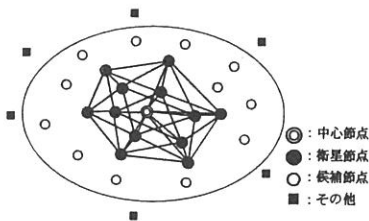


図-1 衛星節点とローカル要素

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。

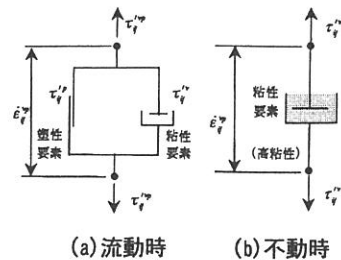


図-2 構成モデル

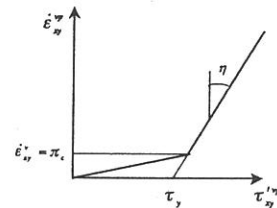


図-3 ビンガムモデル

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

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

ここで、 τ_{ij} 、 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ はそれぞれ粘塑性流体の応力成分、粘塑性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、 $\Pi_C = (2\pi_c)^2$ 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)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、レオロジー、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。それを防ぐために選択低減積分を用いた。具体的には、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点積分とし、次式のように定式化した。

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

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 FMM の利点を生かし、解析ステップ毎に節点のスムージング(Laplacian smoothing)および局所要素のリメッシングを行い、フレッシュコンクリートの変形の進行に伴う歪んだ局所要素の発生を防いだ。

5. 数値解析例

ここでは、スランピング試験の解析を示す。節点分布は図-4 に示す節点分布とした。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¹⁾、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を表-1 に示す。

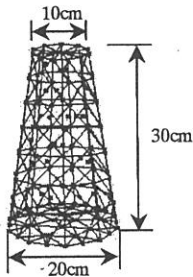


図-4 解析モデル(141 節点)

表-1 ビンガム定数

モデル	A	B
τ_y (Pa)	900	300
η (Pa·s)	300	100

体積一定条件の比較として、モデルBの条件でペナルティ数 $\alpha = 10^5, 10^8, 10^{10}$ の3ケースで行った。本手法では体積減少率が5%以上になると解析は不適当とし、解析をストップした。 $\alpha = 10^5$ で体積減少率が5%以上となった0.3(s)時での比較を図-5 に示す。図-5 より0.3(s)の段階では、 $\alpha = 10^8$ 程度の使用で体積減少率2%弱とほぼ体積一定条件が満足されているのが分かる。また、スムージング・リメッシングを行うことで体積減少が多少改善されることも確認できた。これ以降の

解析では、 $\alpha = 10^8$ を使用した。

図-6 にモデル A, B のスランピング曲線を示す。比較のために山田らの MAC 法による解析結果³⁾(約2秒まで)を示す。

この図から本手法は多少低めではあるが山田らの解析結果と近い値を示していることが分かる。

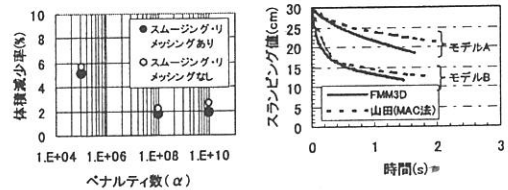


図-5 体積減少率(0.3 秒)

図-6 スランピング曲線

図-7 にモデル B の変形進行状況を示す。この図より本結果は、実際のスランプ試験と類似した変形を示していることが分かる。

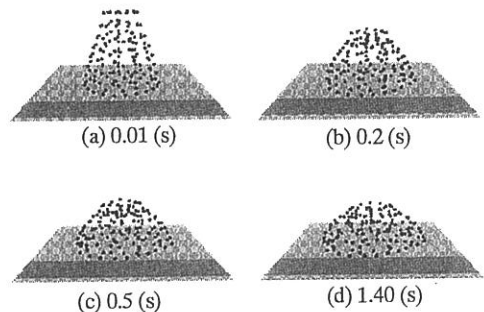


図-7 スランプの変形進行状況(モデル B)

6. まとめ

今回、FMM3D をフレッシュコンクリートの流動解析へ適用し、スランプ試験を対象に解析を行い、良好な結果を得た。

参考文献:

- 1) 富山潤, ほか: 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, Vol.24, CD-ROM, 2002
- 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, 2003