

東海大学	学正会員	田中 修
東海大学大学院	学生会員	小川 直哉
東海大学	正会員	島崎 洋治

1. はじめに

フレッシュコンクリートの施工性能を合理的に評価するために、レオロジーの立場から論じた研究が数多く報告されるようになってきている。しかし、既往の研究では、フレッシュコンクリートを各種粘度計を用いてそのレオロジー定数を測定し把握することに重点を置いていることが多く、流動解析技術に関する研究は比較的少ない。本研究ではコンクリートの流動に大きな影響を与えるセメントペーストに着目し、これをビンガム塑性体と仮定して、有限要素法により解析する。解析はベクトルの外積を使ってマーカー粒子の移動を特定するアルゴリズムを使用し、スランプ試験に相当する問題をシミュレートする。

2. 支配方程式

非圧縮のビンガム塑性体の支配方程式は以下に示すように表される。

運動方程式：

[ナビエ - ストークスの運動方程式]

$$\rho u_{i,t} + \rho u_i u_{i,j} = \sigma_{ij,j} + b_i \quad (2.1)$$

ここで、

$$\begin{cases} \mu = \eta_r & |\dot{\gamma}| < \dot{\gamma}_c \\ \mu = \eta_{pl} + \tau_y / \dot{\gamma} & |\dot{\gamma}| \geq \dot{\gamma}_c \end{cases}$$

連続方程式 (非圧縮性)：

$$u_{i,i} = \varepsilon_{ii} = 0 \quad (2.2)$$

$$\dot{\gamma} = \sqrt{(\varepsilon_{ij} \cdot \varepsilon_{ij})}$$

構成方程式：

境界条件：

$$\varepsilon_{ij} = (u_{i,j} + u_{j,i}) / 2 \quad (2.3)$$

$$u_i = \bar{u}_i \quad (2.6)$$

$$\sigma_{ij} = -p\delta_{ij} + \sigma'_{ij} \quad (2.4)$$

$$v_j \sigma_{ij} = \bar{T}_i \quad (2.7)$$

$$\sigma'_{ij} = 2\mu \varepsilon_{ij} \quad (2.5)$$

ここで、 u ：速度、 ε ：ひずみ速度、 p ：圧力、 σ ：応力、 σ' ：偏差応力、 $\dot{\gamma}_c$ ：速度勾配、 τ_y ：降伏応力、 η_{pl} ：可塑粘性、 $\dot{\gamma}_c$ ：臨界速度勾配、 η_r ：降伏値内の粘性、 v_j ：外向き単位法線ベクトルの方向余弦である。

3. マーカー粒子法¹⁾

マーカー粒子法は、流体を複数のマーカー粒子で表現し、それらの粒子を時間経過とともに変化する流速に応じて移動させ流体の自由表面位置と流動現象を可視化できる。ここで使用するマーカー粒子法はベクトルの外積を使った方法である。この方法は、三角形要素の三辺に沿って定義する基準ベクトルと、要素の3つの頂点とマーカー粒子の位置を結ぶ基準ベクトルのそれぞれについて外積計算を行い、その正負の符号の組み合わせにより要素間を移動する粒子の位置を特定する方法である。

4. 解析

ここではスランプ試験に相当する問題のシミュレーションを行う。図1は管式粘度計を使用して計測した、水セメント比が45%のセメントペーストの流動をプロットしたものである²⁾。図中の直線①はビンガム流動

キーワード：有限要素法、マーカー粒子法、ビンガム塑性体、ベクトルの外積

連絡先：〒259-1292 神奈川県平塚市北金目 1117 東海大学土木工学科 TEL 0463-58-1211 FAX 0463-50-2045

してないときにプロットされた点から、直線②はビンガム流動としてプロットされた点から最小二乗法で求めたものである。2つの直線の傾きはそれぞれ異なる粘性係数となり、これらの交点の座標 V を臨界速度勾配 $\dot{\gamma}_c$ とする。有限要素法で計算する場合、 $\dot{\gamma}_c > V$ のときの粘性係数は η_r 、 $\dot{\gamma}_c \leq V$ のときの粘性係数は η_{pl} を用いる。

図2は527節点、210個の6節点三角形要素で構成されている解析領域を示してある。解析には、セメントペーストの密度 1.9g/cm^3 を与えて、軸対称部分の1ラジアン分について行った。領域内には流動体として640個のマーカー粒子を配置し、初期($t=0.0$)のマーカー粒子位置は図3に示す。時間経過に伴う流動形状を図4・(a)・(b)に示す。ここで図4・(a)は底面に滑りを与えたもの、(b)は滑りなしとした図である。

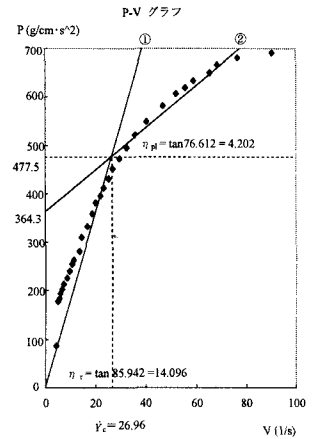


図1 セメントペーストモデル

5. まとめ

マーカー粒子 FEM によってセメントペーストの自重によるスランブ試験に相当する流動問題を解析した。セメントペーストはビンガム塑性体と仮定し、解析底面の境界で滑りのある場合とない場合での結果を示した。流れの広がりや境界条件が異なってもほぼ同程度であるが、流れの形状は異なる結果が得られた。底面での摩擦等を考慮することは今後の課題である。

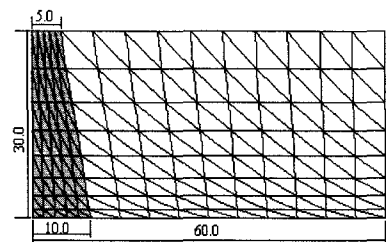


図2 解析領域 (単位: cm)

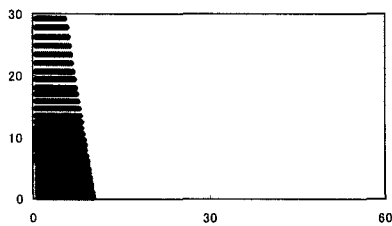


図3 $t=0.0$ sec のマーカー粒子位置

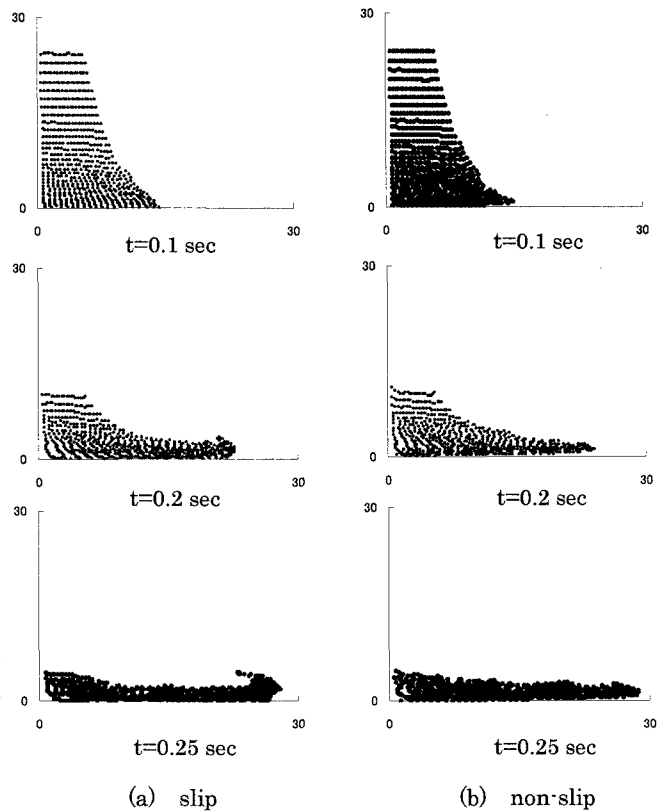


図4 流動形状

参考文献:

- 1) T. Toda, S. Hovanotayan, and Y. Shimazaki: "Visualization of Unsteady Creeping Viscous Flows Using Vector Products", IJCFD, 1999, Vol. 12, pp. 257-267.
- 2) 岡本篤樹 他: "管式粘度計を通過するセメントペーストの流動解析", 東海大学紀要 Vol. 38, No. 1 1998.