

スランプフロー試験の流動解析における構成則の一考察

大成建設 正会員 ○府川 徹
大成建設 正会員 畑 明仁

1. はじめに

本稿では、自己充填性を有する高流動モルタルおよび高流動コンクリート（以下、高流動モルタルおよび高流動コンクリート）のスランプフロー測定値を数値解析により同定し、その構成則について検討することを目的として、CEL（Coupled Eulerian Lagrangian）法による流動解析を行った。この手法は、FEMで算出される材料の変形と、リメッシュおよび材料の移流とを同一単位時間ステップ内で行う手法である。

高流動モルタルおよび高流動コンクリートの解析には、構成則として Regularized Bingham Model を用いた。

2. 構成則、材料定数の算出方法および試解析結果

Regularized Bingham Model の構成則を式(1)に、山田ら¹⁾による降伏値と塑性粘度の提案式を式(2)(3)に各々示す。

$$\tau = \left[\eta + \frac{\tau_y}{|\dot{\gamma}|} (1 - e^{-m|\dot{\gamma}|}) \right] \dot{\gamma} \quad (1)$$

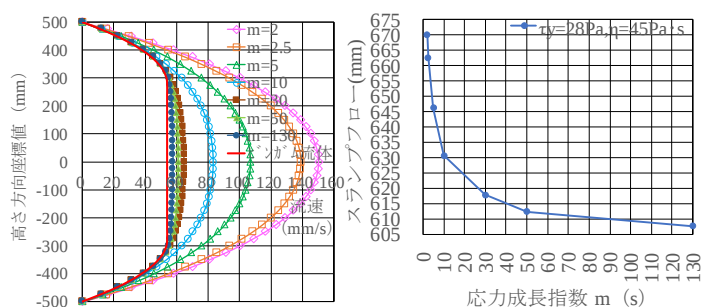
$$\tau_y = 9473.2 \exp(-0.009 S_f) \quad (2)$$

$$\eta = 7.8736 t_{500} + 1.308 \quad (600 \text{ mm} \leq S_f) \quad (3)$$

ここに、 τ ：せん断応力 (Pa)、 $\dot{\gamma}$ ：せん断ひずみ速度 (1/s)、 τ_y ：降伏値 (Pa)、 η ：塑性粘度 (Pa・s)、 m ：応力成長指数（以下、 m 値）、 t_{500} ：500mm フロー時間 (s)、 S_f ：停止時フロー値 (mm)

式(1)は、 m 値がゼロの場合にニュートン流体を表現し、 m 値とせん断ひずみ速度の絶対値との積である、べき指数が大きい場合に Bingham Model に近い構成則となることから、本稿では m 値をパラメータとした。

式(1)～(3)を用いて m 値をパラメータとした試解析 ($\tau_y=28\text{Pa}$, $\eta=45\text{Pa}\cdot\text{s}$, 小門ら²⁾)について、図-1a)に平行平板間流れの流速分布の変化を、図-1b)にスランプフロー値の変化を各々示す。 m 値が概ね 10s 以下の場合に、図-1a)ではビンガム流体の特徴である栓流部が明確でなくなり、図-1b)ではスランプフロー値の変化量が増大する。



a) 流速分布の変化 b) スランプフロー値の変化

図-1 m 値のパラメータスタディ ($\tau_y=28\text{Pa}$, $\eta=45\text{Pa}\cdot\text{s}$)

3. 粘性流体の構成則と解析結果

3. 1 スランプフロー値 624mm の高流動モルタルの場合

小門ら²⁾によるスランプフロー測定値が 624mm の高流動モルタルにおいては、球引上げ試験による τ_y , η の測定値は、 $\tau_y=35\text{Pa}$, $\eta=53\text{Pa}\cdot\text{s}$ であった。 $\eta_0=1000\text{Pa}\cdot\text{s}$, $\dot{\gamma}_c=\tau_y/\eta_0=0.035$ とした Bingham Model と Regularized Bingham Model の構成則の比較を図-2a) b) に、Regularized Bingham Model を用いた解析結果と測定値の比較を図-2c) に各々示す。ここに、 η_0 は未降伏時粘性係数を、 $\dot{\gamma}_c$ は降伏時せん断ひずみ速度を各々表す。

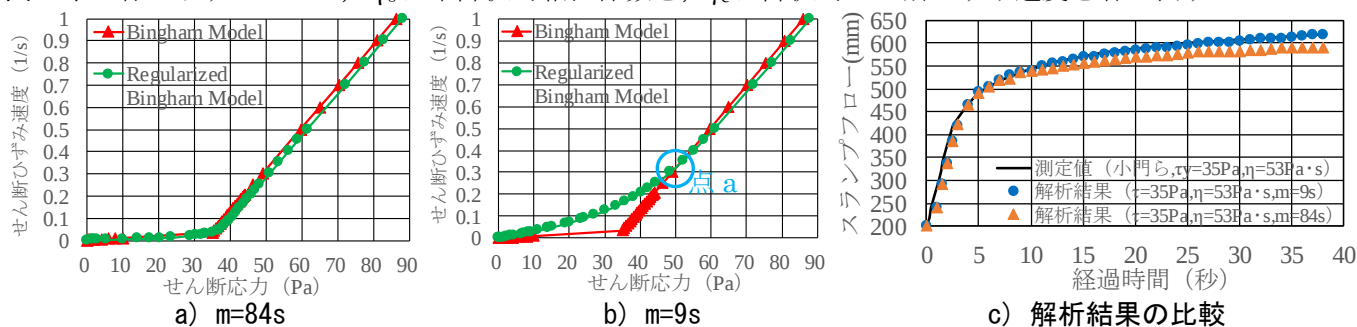


図-2 解析結果 ($\tau_y=35\text{Pa}$, $\eta=53\text{Pa}\cdot\text{s}$, $m=9\text{s}$, 84s)

キーワード 流動解析, スランプフロー, 平行平板間流れ, Regularized Bingham Model, 応力成長指数

連絡先 〒245-0051 神奈川県横浜市戸塚区名瀬町 344-1 大成建設(株) 技術センター TEL 070-2653-0172

この解析においては、Bingham Model の降伏点を Regularized Bingham Model に合わせるために m 値を 84s とした。解析結果 ($m=84s$) と測定値との間に生じた乖離は、 m 値を 9s とすることで概ね解消した。

3. 2 スランプフロー値 666mm の高流動コンクリートの場合

試験におけるスランプフロー測定値が 666mm, 500mm フロー通過時間が 4.3 秒の高流動コンクリートでは、式 (2), (3) から得られた材料定数 $\tau_y=24Pa$, $\eta=35Pa \cdot s$ を解析に用いた。なお、スランプフロー測定値 666 mm の小門らによる高流動モルタルの球引上げ試験²⁾における τ_y , η の測定値は、 $\tau_y=28Pa$, $\eta=45Pa \cdot s$ であった。

Bingham Model ($\eta_0=1000Pa \cdot s$, $\dot{\gamma}_c=0.024$) と Regularized Bingham Model ($m=165s$, $m=3s$) の構成則の比較を図-2a)b)に、Regularized Bingham Model ($m=165s$, $m=3s$) を用いた解析結果を図-3c)に各々示す。

m 値 165s は 3. 1 と同様に定め、解析結果 ($m=165s$) と測定値との間に生じた乖離は、 m 値を 3s とすることで概ね解消した。

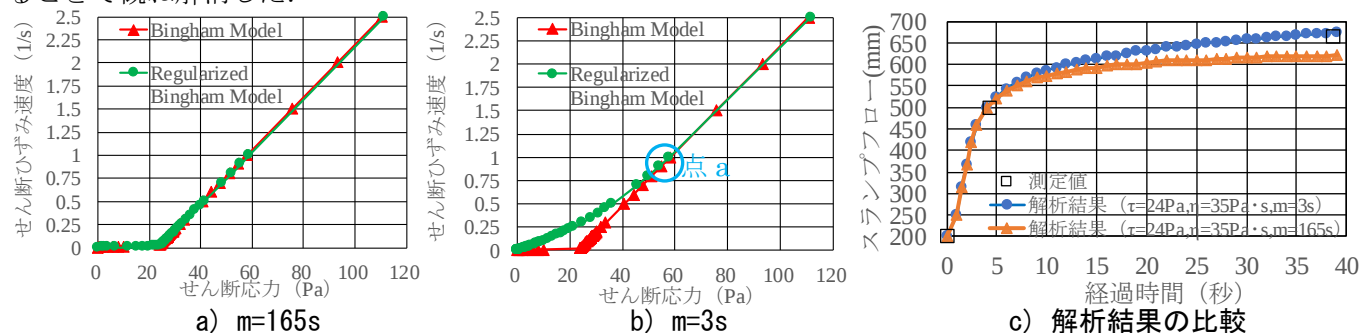


図-3 解析結果 ($\tau_y=24Pa$, $\eta=35Pa \cdot s$, $m=3s$, 165s)

3. 3 解析結果の比較

3. に示す限られた解析結果では、 m 値が 10 よりも小さい場合の Regularized Bingham Model は、図-2b), 図-3b) に示す点 a よりもせん断ひずみ速度、せん断応力が小さい領域で非線形性を示すモデルとなる。

また、3. 1 と 3. 2 の解析結果の比較では、スランプフローの実測値が約 40mm 大きい 3. 2 において Bingham Model ($m=165s$) を用いた場合、停止時における解析結果と測定値との乖離が 3. 1 より大きい。

当然ではあるが、スランプフロー値が大きいほど、Bingham Model による同定がより困難となるようである。

4. 考察

配合、使用材料の違い等を考慮せず、3. に示す限られた解析結果からの考察となるが、500mm フロー時間程度までの m 値の差異は、スランプフロー値にほとんど影響を与えないようである。これは、せん断ひずみ速度、せん断応力が図-2b), 図-3b) に示す点 a よりも大きい領域では、Regularized Bingham Model と Bingham Model がほぼ一致していることによると考えられる。一方、せん断ひずみ速度、せん断応力が点 a よりも小さい領域では両モデルに差異がみられ、この差異によりフロー停止近傍におけるフロー値が異なると考えられる。このことは、スランプフロー値の同定において、 m 値の設定が重要であることを示唆していると考えられる。

ただし、本稿の検討範囲では、測定されたフロー停止時間における明確な停止が表現しきれていない。この点については、構成則の適用等の工夫により改善する必要があると考えられる。

5. まとめ

本稿において検討対象としたスランプフロー値 620mm~670mm 程度の高流動モルタルおよび高流動コンクリートにおいては、Regularized Bingham Model を用いることでスランプフロー値の測定結果を概ね同定できた。

ただし、フロー停止については、構成則の適用等を工夫する必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 山田ら, [1315] MPS 法による高流動コンクリートのフローシミュレーション, 第 73 回セメント技術大会講演要旨 2019, pp.92-93, 2019.5
- 2) 小門ら, スランプフロー試験における高流動コンクリートのレオロジー定数評価法に関する研究, 土木学会論文集, No.634, V-45, pp.113-129, 1999.11