

流動解析におけるコンクリートの流動停止に関する検討

清水建設技術研究所 正会員 ○浦野 真次
 清水建設土木技術本部 正会員 根本 浩史
 プロメテックソフトウェア 正会員 崎原 康平

1. 目的

事前の施工性予測技術の確立を目的として、これまでコンクリートの流動解析手法の検討が行われている¹⁾。ここで、粒子法の1種であるMPS(Moving Particle Semi-implicit)法²⁾は、ニュートン流体を液相とする実現象をよく再現でき、非圧縮性流れを解析する有力な解析法の1つとしてセルや要素を必要とせずに自由境界の大変形を容易に表現できる手法であり、フレッシュコンクリートにおいても検討され、その有効性が示されている¹⁾。

実際の構造物にコンクリートを打ち込む際の挙動を対象として、MPS法を用いて流動勾配や未充填個所等を解析するためには、まず自重で流動するコンクリートの流動停止を精度よく表現する必要がある。そこで、本研究では、MPS法を用いたフレッシュコンクリートの流動解析を行い、流動停止の判定条件について検討を行った。

2. 流動解析の概要

本解析では、コンクリートを連続体モデルとして取り扱い、ビンガム流体と仮定した。既往の文献¹⁾と同様に、ビンガム流体として仮定した場合、せん断応力が降伏値未満では不動状態とみなされ、ひずみ速度が零の状態となるため応力が不定となり解析が不可能となる。そのため、本解析手法においても、図-1に示すようにせん断応力が降伏値近傍の応力に達するまでは、高粘性流体として扱うbi-viscosityモデルとした。構成式は(1)、(2)の二つの式で示される。ここで、 P は圧力、 η は塑性粘度、 τ_y は降伏値、 $\dot{\epsilon}_{ij}^{vp}$ は流動時のひずみ速度、 $\dot{\epsilon}_{ij}^v$ は不動時のひずみ速度、 δ_{ij} はクロネッカーのデルタ、 $\Pi = 2\dot{\epsilon}_{ij}\dot{\epsilon}_{ij}$ である。 Π_c は流動状態と不動状態の降伏基準値であり、流動限界ひずみ速度 π_c を用いて(3)式であらわされる。

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

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

$$\Pi_c = (2\pi_c)^2 \quad (3)$$

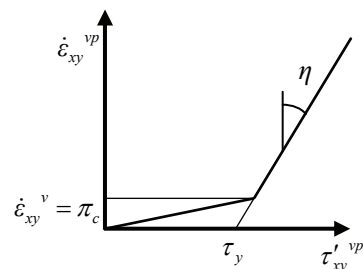


図-1 bi-viscosity モデル

この流動限界ひずみ速度 π_c をより低く設定することにより、構成則上はビンガムモデルに近づくこととなる。しかし、 π_c を小さくした場合、実際よりも解析上の流動停止時間が長くなったり、安定条件を満たす解析時間間隔が短くなるため計算時間が長くなるなどの点が指摘されている。また、降伏値近傍の応力以下では、高粘性流体として挙動するため、適切な流動停止の判定が行われなければ、流動途中の挙動は精度よく解析できたとしても、最終的に領域内を流動してしまい、流動勾配や未充填個所を評価することはできない。このため、本解析では、適切な π_c の検討を行った。

3. 流動解析結果

フレッシュコンクリートのスランプ試験の解析を行い、任意のスランプあるいはスランプフローを表現するため、流動停止の判定の基準として扱う流動限界ひずみ速度 π_c を検討した。図-2に示すように、解析は3次元としてコンクリート部分を粒子径10mmで粒子化し、実際の試験でスランプ板となる底面は図-2には示していないが、コンクリートの下面に配置して壁境界として表面メッシュを用いた。粒子化はコンクリートのみであり、生成粒子数は5342個であった。1つ1つの粒子が均質なビンガム流体の流動を表現しており、コンクリート中の骨材の動きを

キーワード フレッシュコンクリート、流動解析、MPS法、ビンガム流体、スランプ

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17 清水建設(株)技術研究所 TEL 03-3820-6967

表現するものではない。スランプ試験のスランプ開始からフローしていく流動の途中で、その流動が停止する状態を模擬することを目的として、降伏値 $\tau_y=1000\text{Pa}$ 、塑性粘度 $\eta=300\text{Pa}\cdot\text{s}$ を入力値とした。既往の文献³⁾によれば、降伏値 $\tau_y=1000\text{Pa}$ の場合、スランプは約 17.5cm となる。

上記のレオロジー定数を入力値として、流動限界ひずみ速度 π_c を 0.01~0.5 と変化させた解析を実施した。すべての粒子のひずみ速度が流動限界ひずみ速度以下となり、粒子が流動停止と判定された時点でのスランプとの関係を図-3 に示す。 π_c が小さくなるほど流動停止と判定された時点のスランプが大きくなり、入力値とした降伏値 $\tau_y=1000\text{Pa}$ に相当するスランプ約 17.5cm を超えて流動する状況となった。この図から、スランプ 17.5cm で流動停止と判定できる条件として、 $\pi_c=0.1$ 程度が妥当であると考えられる。

塑性粘度 $\eta=300\text{Pa}\cdot\text{s}$ を一定、降伏値 τ_y を 160Pa および 1000Pa とし、 π_c を 0.1 とした場合のスランプ試験の解析例を図-4 に示す。ここで、 $\tau_y=160\text{Pa}$ の場合は、既往の文献³⁾からスランプフロー 50cm 程度のコンクリート、 $\tau_y=1000\text{Pa}$ の場合は前述のとおりスランプ 17.5cm の降伏値を表すと考えた。任意の解析ステップにおいて π_c 以上のせん断ひずみ速度が生じている粒子を赤で表示し、流動限界ひずみ速度以下のせん断ひずみ速度となった（流動停止と判定された）粒子を青で示す。解析結果 (a) に示す $\tau_y=160\text{Pa}$ の場合、流動開始から 5 秒経過後においてスランプフローが 45cm 程度となり、まだ $\pi_c=0.1$ の以上のせん断ひずみ速度となる部分（赤の部分）がある。一方、(b) に示す $\tau_y=1000\text{Pa}$ の場合、スランプする速度が遅くなり、流動開始から 2.8 秒経過後において、ほぼ 100% の粒子が π_c のせん断ひずみ速度（青）となった。この時、スランプ 17.8cm、スランプフローは 28.5cm であった。以上のスランプ試験の解析結果より、降伏値の相違に対して、 π_c を 0.1 とすれば、流動解析上の流動停止の相違を表現可能であると考えられる。

図-4 に示す解析結果 (b) のケースおよびスランプ 16.5cm の実際のコンクリートのスランプ挙動の変化（コーンを引き上げてからの上端の下がり）を図-5 に示す。開始から 0.5 秒程度のスランプ挙動は、解析の方が大きくなるものの、それ以降のスランプ変化量の傾向は概ね一致している。0.5 秒程度までは実際のスランプ試験のコーンの引上げなどが影響していると考えられるが、今後流動途中の変形挙動についても塑性粘度の影響も検討する予定である。

4. まとめ

本研究の結果、フレッシュコンクリートの流動勾配や未充填箇所を検討する場合に重要な流動停止の判定のための流動限界ひずみ速度 π_c に関して、スランプフローの流動解析結果より、 $\pi_c=0.1$ 程度とすることにより、流動解析上の流動停止の判定条件とすることができると考えられる。

参考文献

- 1) 富山潤, 入部綱清, 崎原康平, 伊良波繁雄, 山田義智: フレッシュコンクリートの流動解析における MPS 法の適用, 構造工学論文集, Vol.55A, pp.164-171, 2009.
- 2) 越塚誠一: 日本計算工学会編 計算力学レクチャーシリーズ 5 粒子法, 丸善, 2005.
- 3) 日本コンクリート工学協会: 第 3 章各種試験時の流動挙動に関するアプローチ, フレッシュコンクリートの力学モデル研究委員会報告書, pp.93-122, 1996.4.

図-2 スランプ試験の粒子モデル

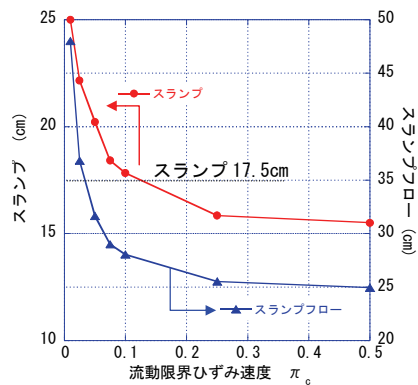


図-3 流動限界ひずみ速度による流動停止の判定

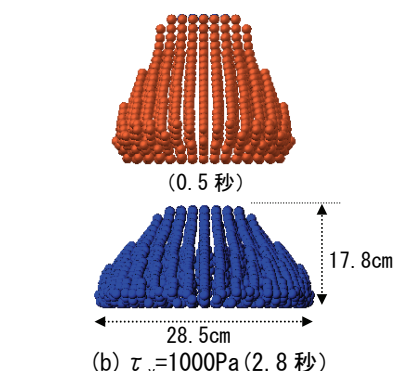
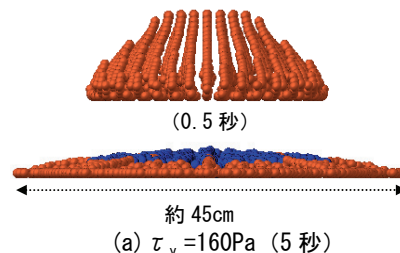


図-4 降伏値を変化させた解析結果

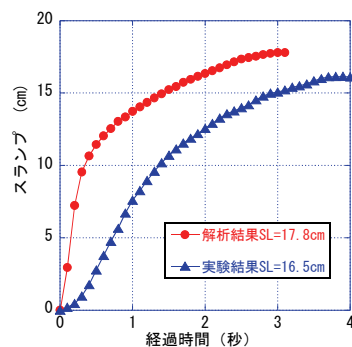


図-5 スランプ挙動の解析結果および実験結果との比較