

モルタルの変形モデルを用いた粘性評価の基礎的検討

東京理科大学 学生会員 ○増谷 直輝

東京理科大学大学院 学生会員 西村 和朗

東京理科大学大学院 学生会員 橋本 永手

東京理科大学 正会員 加藤 佳孝

1. はじめに

コンクリートの流動は、自重やバイブレータによる振動波によってコンクリートが変形させられることで生じる。このため、コンクリートの流動挙動は一般的に、変形の学問であるレオロジーで表現できるとされ、コンクリートの「降伏値」と「塑性粘度」というレオロジー定数を定量的に評価する研究が多くなされている。谷川らは、スランプフロー試験の結果であるフロー値を「降伏値」、その速度を「塑性粘度」として考えることで、コンクリートのレオロジー定数を算出している¹⁾。スランプフロー試験はフレッシュコンクリートの静的な変形挙動を捉えているが、一般的なコンクリートは振動締固めによって充填されるため、加振下の動的な変形挙動が重要となる。

本研究では、加振下のコンクリートの粘性（レオロジー定数）を評価することを最終目標とし、その基礎段階として、モルタルのスランプフローの変形挙動を表現するモデルを構築するとともに、加振下のモルタルへの応用を通して粘性評価の可能性について検討した。

2. 変形モデル概要

本研究では、まず、モルタルの静的な変形挙動であるスランプフローの経時変化を、試料に作用する自重とレオロジーモデルにより、定式化する。

クーロン土圧理論やランキン土圧理論から、自重による変形は、任意の水平断面に与える応力とすべり角によって表現できる。しかし、スランプコーンの形状である円錐台では、すべり角の一般解を推定することは困難であり、スランプコーンの形状を円柱とし、ランキンの土圧理論を参考にすべり角を 45° とした。また、流れ場による拘束圧に対して、せん断抵抗力は増加しない仮定した。以上のことから、試料に作用する

自重は式(1)で表され、応力は式(2)で表される。

$$F_H = 2x \times \pi \times \frac{\gamma y^2}{2} - 2\sigma_{yd} \times 2x \times \pi \times y \quad (1)$$

$$\sigma(x) = F_H / 2x\pi \times y \quad (2)$$

ここに、 F_H ：土圧(N)， x ：円柱中央部からのフロー値(m)， γ ：単位体積重量(N/m³)， σ_{yd} ：降伏応力(N/m²)， y ：供試体高さ(m)， $\sigma(x)$ ：応力(N/m²)

既往の研究により、フレッシュコンクリートのレオロジーモデルは、ビンガムモデルで表現されているため²⁾、本研究でもビンガムモデルを適用した。ビンガムモデルを式(3)に示す。

$$\sigma = \eta \dot{\varepsilon} + \sigma_{yd} \quad (3)$$

ここに、 σ ：応力(N/m²)， η ：塑性粘度(Pa・s)， $\dot{\varepsilon}$ ：ひずみ速度(1/s)

続いて、試料のひずみ速度には次のように考えた。一定の応力を微小時間受けた試料の変形量は、試料の長さひずみ量を掛けた値であるため、式(4)で表すことができる。

$$x(t + \Delta t) = x(t) + x(t)\varepsilon(t) \quad (4)$$

ここに、 $x(t)$ ：試料の長さ(m)， ε ：ひずみ量
さらに、式(4)の両辺を微小時間で割ることで、式(5)に示すような試料の速度に関する微分方程式が導出される。

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{x(t + \Delta t) - x(t)}{\Delta t} = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{x(t)\varepsilon(t)}{\Delta t} \quad (5)$$

$$\frac{dx}{dt} = x(t) \times \dot{\varepsilon}$$

式(5)の微分方程式に、式(2)，(3)を代入することで、自重による静的な変形挙動であるスランプフローのモデルを式(6)のように表すことができる。

$$\frac{dx}{dt} = x(t) \times \left(\frac{\rho g y - 6\sigma_{yd}}{2\eta} \right) \quad (6)$$

ここに、 ρ ：単位体積重量(kg/m³)， g ：重力加速度(m/s²)

キーワード 粘性，振動，降伏応力，塑性粘度，スランプフロー

連絡先 〒278-8510 千葉県野田市山崎 2641 TEL04-7124-1501 n.masuya0314@gmail.com

表-1 モルタルの配合

W/C(%)	S/C	単位量(kg/m ³)		
		W	C	S
50	2.5	282	566	1414

3. スランプフローの経時変化と粘性評価

本研究で構築したモデルを検証するために、W/C＝50%のモルタルを作製し、スランプフロー試験を実施した。試験に用いた配合を表-1 に示す。スランプフロー試験結果を、式(6)を用いて回帰分析することで「塑性粘度」と「降伏値」を算出した。図-1 にスランプフローの実測値とモデルを用いた分析結果の比較を示す。なお、図中の $\tan\theta$ はスランプフローの平均増加速度である。経過時間に伴い実測値は増加し、約 1.6 秒で変形が終了した。これは、供試体高さの減少に伴い自重による鉛直応力が減少し、鉛直応力とモルタルの降伏値が釣り合うことで停止した結果と考えられる。以上から、本研究で提案した変形モデルは、モルタルの静的な変形挙動を表現できていると考えられる。

4. 加振下のスランプフローの経時変化

加振下のスランプフローの経時変化を確認するために、加振スランプフロー試験を実施した。スランプコーンを抜くと同時に、スランプ板の裏側に設置した型枠バイブレータで加振した。なお、試験には表-1 に示した配合を用いた。図-2 にスランプフローの実測値とモデルを用いた分析結果の比較を示す。静的な変形と比較して、加振時の動的な変形の $\tan\theta$ は大きく、また、時間の経過に伴い加振時のフローは増加し続けることが確認された。

5. 考察

本研究のモデルから、モルタルは静的な変形挙動では塑性粘度が $1.03\times10^3(\text{Pa}\cdot\text{s})$ 、加振下の動的な変形挙動では $1.21\times10^3(\text{Pa}\cdot\text{s})$ となった。しかし、本研究の変形モデルは、自重による静的な変形挙動を対象として構築したため、バイブレータによる変形挙動を再現出来ていない。加振下の変形挙動は図-3 に示すようにバイブレータによる駆動力を考慮する必要がある。式(6)にバイブレータの加速度を考慮することで式(7)を得る。

$$\frac{dx}{dt} = x(t) \times \left\{ \left(\frac{\rho g y - 6\sigma_{yd}}{2\eta} \right) + a \right\} \tag{7}$$

ここに、 a ：バイブレータの加速度(m/s^2)
今後、バイブレータの加速度を測定し、バイブレータの影響を考慮したモデルを検証する。

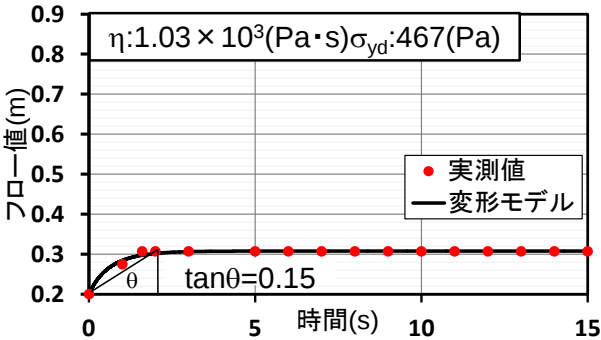


図-1 スランプフローの実測値と変形モデル

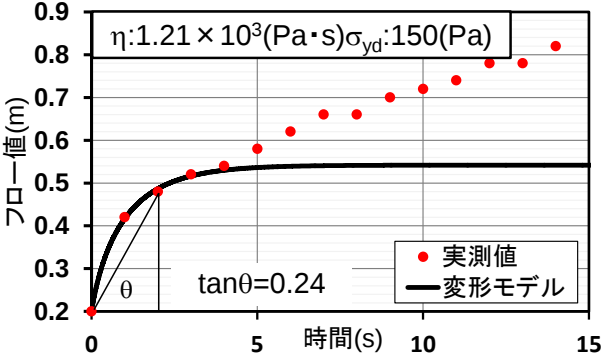


図-2 加振下スランプフローの実測値と変形モデル

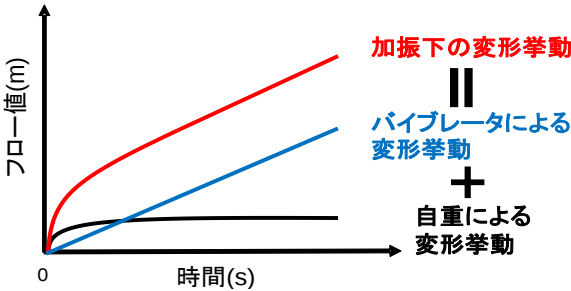


図-3 加振下の変形挙動のイメージ図

6. まとめ

モルタルのスランプフローの経時変化に対して、本研究で提案したモデルは分析可能であったことから、モデルは静的な変形挙動を表現できていることが考えられる。また、本研究のモデルを用いてモルタルのレオロジー一定数を算出した結果、静的な変形挙動と比較して、加振下の動的な変形挙動の降伏値は小さく、塑性粘度は大きくなった。しかし、本研究のモデルは振動の影響を考慮していないため、今後、振動を考慮したモデルの構築が必要である。

参考文献

1) 小林理恵ら：フレッシュコンクリートのスランピング挙動に対するレオロジー的研究，日本建築学会構造系論文集，第 464 号，1-10，1994.8
2) 日本コンクリート工学会：コンクリートの確実な施工のための PDCA サイクル研究委員会報告書，pp.52，2016.9