

モルタルのミニスランプフロー試験を対象とした三次元流動解析に関する基礎的検討

東洋建設(株) 正会員 ○高淵 稔貴, 森田 浩史, 竹中 寛, 酒井 大樹, 増田 和輝
東洋建設(株) 岸本 豪太

1. はじめに

近年、コンクリート施工において、労働人口減少等の観点から生産性向上が求められている。コンクリートの流動解析を行い、施工時の流動特性を事前に把握することは、大規模な施工実験の省略や構造物に生じる瑕疵低減に有効であるが、コンクリートの流動解析に関する知見はまだ少ない。本研究では、VOF法による解析的評価の適用検討の一環として、回転粘度計から得られるモルタルの粘度の特性値を用いたミニスランプフロー試験の再現性について基礎的検討を行った。

2. モルタルの試験概要

モルタルの使用材料および配合を表-1, 2に示す。モルタルの配合は、消泡剤により空気量を0%とした。ミニスランプフロー（以下、MSLF）試験は、JIS R 5201に準拠して行い、目標のフロー値は 250 ± 25 mmとした。また、ミニスランプフロー試験は、ガラスのフロー板上で実施した。試験状況を真上からビデオカメラで撮影し、MSLFの経時変化を調べた。モルタルのレオロジー特性の測定は、十字羽回転粘度計を用いて行った。なお、レオロジー試験方法および使用した装置は、既往の知見¹⁾を参照した。モルタルの試験結果を表-3に示す。

3. 三次元流動解析の概要

三次元流動解析は、三次元数値流体解析ソフト(Ansys Fluent 2021)を用いた。解析ソフトの基礎方程式はNavier-Stokes方程式であり、粘性項は、非ニュートン流体（ビンガム流体）に用いられるHershel-Bulkleyモデル²⁾の式を与えた。また、自由表面流れはVOF法を用いた。解析に使用したPCのCPUは、intel core i9 10940X(14コア)であり、並列計算を12コアで実施した。MSLFのモデル化をするにあたり、モルタルやコンクリートにおいて流動性が大きい場合、スランプコーンの引抜き時の抵抗が、流動停止への影響は小さいが、流動初期には影響を及ぼすことが想定されるため³⁾、本検討ではスランプコーンをモデル化せず、計算開始直後にモルタルの流動が開始するように解析した。解析モデルの例を図-1に示す。また、解析に入力した主な物性値を表-4に示す。なお、本検討において計算格子（以下、メッシュ）間隔は10mmを基準とし、メッシュのサイズ、フロー板の形状、モルタルとフロー板の間の表面張力および接触角をパラメータとして、モルタルの流動解析を行った。検討ケースの一覧と各ケースにおけるMSLFの解析結果を表-5に示す。

3. 結果および考察

フロー板の形状の異なるCASE1~3の解析結果の例を図-2に示す。なお、VOF法は、体積分率0.5を空気とモルタルの境界として判定し、0.5を上回る場合をモルタル、0.5以下の場合を空気として扱う。CASE1は、流動停止時のフローがやや四角形となったのに対し、CASE2は、流動停止時のフローが円形となった。これは、CASE1は要素数が少なく解析に最適なメッシュ間隔でなかったことが要因であると考えられる。また、メッシュのサイズが大きく、VOF法によりメッシュ内のモルタルの体積分率が0.5を下回る要素が多くなり、実測値よりもMSLFの解析結果は小さくなったものと考えられる。CASE2は、メッ

表-1 モルタルの使用材料

材料・記号		種類・物理的性質
水	W	地下水
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm^3
細骨材	S1	茨城県神栖産陸砂, 表乾密度 2.59g/cm^3 , 粗粒率:2.30
	S2	栃木県佐野産砕砂, 表乾密度 2.63g/cm^3 , 粗粒率:3.30
混和剤	Ad	ポリカルボン酸系化合物 界面活性剤系特殊増粘剤の複合体

表-2 モルタルの配合

MSLF (mm)	W/C (%)	単位量 (kg/m^3)				
		W	C	S1	S2	Ad
250±25	45	280	622	949	413	7.78

表-3 モルタルの試験結果

項目	MSLF (mm)	モルタル 温度 ($^{\circ}\text{C}$)	空気量 (%)	流動停止 時間 (s)	降伏値 (Pa)	塑性 粘度 ($\text{Pa} \cdot \text{s}$)
実測値	270	22	0.0	8.0	27.58	4.75

表-4 解析に入力した物性値

項目		単位	入力値	
空気	密度	kg/m^3	1.225	
	粘度	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	1.7894×10^{-5}	
モルタル	密度	kg/m^3	2301	
	降伏値	τ_0	Pa	27.58
	塑性粘度	k	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	4.75
	最小せん断速度	γ	1/s	1.0×10^{-10}

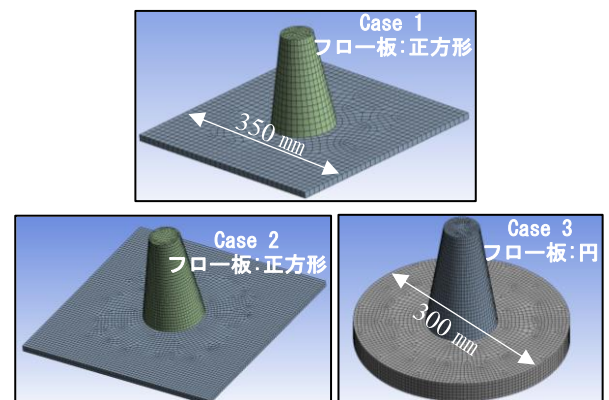


図-1 解析モデルの例

キーワード 流動解析, ビンガム流体, ミニスランプフロー試験, レオロジー特性
連絡先 〒300-0424 茨城県稲敷郡美浦村受領 1033-1 東洋建設(株) 美浦研究所 TEL 029-885-7511

シユのサイズが小さく、初期のモルタル形状と空気との境界付近のメッシュの粗さによる影響が少なくなったため、フローは円形になったものと考えられる。また、VOF法によるメッシュ内の体積分率が0.5を上回ったこともMSLFの解析結果がCASE1よりも大きくなった一因と考えられる。

一方、CASE3は、フロー板の形状を円形にしたことで初期のモルタル形状と空気の境界部分のメッシュ品質が向上し、要素数が約半分となった結果フローの形状が円形となったと考えられる。ただし、解析時間がCASE2よりもCASE3の方が長くなったことは、モルタルとフロー板の結合を補間する部分のメッシュ品質の条件に起因したと考えられるが、本検討の範囲においては明らかとならなかった。なお、Ansys Fluentでは、異なる流体間の表面張力の効果をBrackbillらが提唱する連続体表面力モデル⁴⁾により組み込むことができる。そこで、要素数が少なく、モルタルおよびフロー板のメッシュの形状が円形であるCASE3を対象に、モルタルとフロー板の間の表面張力と接触角をパラメータとして流動解析を行い、MSLFの経時変化と比較した。

接触角をパラメータとしたMSLFの経時変化を図-3に示す。なお、接触角をパラメータとする場合、表面張力も入力する必要があるため、既往の知見⁵⁾の値を採用した。CASE4~6のMSLFの経時変化はほぼ同等であったことから、接触角がMSLFの経時変化に及ぼす影響は小さいと考えられる。

表面張力をパラメータとしたMSLFの経時変化を図-4に示す。表面張力を大きくすることで、流動停止時のMSLFは小さくなることがわかった。本検討の範囲においては、表面張力を1(N)としたCASE7が最も実測値に近い結果となった。

モルタルの初期の流動性については、任意の値を用いているため再現性が低い。ミニスランプコーンが初期の流動性に与える影響や、モルタルの接触角と表面張力が与える影響も含めて今後検討していく予定である。

4. まとめ

本検討で得られた知見を以下に示す。

- (1) 三次元流動解析において、ミニスランプフロー試験をモデル化する場合、メッシュ間隔は5mmに設定することが望ましい。
- (2) 三次元流動解析において、モルタルの接触角はモルタルの流動性に及ぼす影響は小さく、モルタルの表面張力は流動性に及ぼす影響は大きい。
- (3) モルタルの表面張力を1(N)とすることで、三次元流動解析の結果は、最もミニスランプフロー試験の流動停止時におけるフローの再現性が高くなる。一方で、流動初期の乖離に課題が残る。

参考文献

- 1) 平野ほか: スランプで流動性が評価されるモルタルのレオロジー定数測定とMPS法によるモルタルのスランプおよびスランプフロー解析, 日本建築学会構造系論文集, 第85巻, 第774号, pp.993-1003, 2020年8月。
- 2) Herschel, W.H et al.: konsistenzmessungen von Gummi-Benzollösungen, Kolloid Zeitschrift, 39, pp.291-300, 1926.
- 3) 崎原ほか: MPS法によるセメントペーストの3次元流動解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.1067-1072, 2019.
- 4) Brackbil, J.U. et al.: A Continuum Method for Modeling Surface Tension, J. Comput. Phys. 100. 335-354. 1992.
- 5) 高橋ほか: セメントモルタルの初期収縮挙動に及ぼす攪拌作用と混和剤の影響, セメント・7コンクリート論文集, 2016年70巻1号 p.244-251.

表-5 検討ケース一覧

CASE	メッシュサイズ	要素数	フロー板形状	表面張力(N)	接触角(°)	解析結果(mm)	解析時間
1	10mm	24,845	正方形	-	-	258.8	0.5h
2	5mm	185,102	正方形	-	-	282.5	1.0h
3	5mm	109,818	円	-	-	287.5	1.5h
4	5mm	109,818	円	0.435	90	288.4	1.5h
5	5mm	109,818	円	0.435	45	287.1	1.6h
6	5mm	109,818	円	0.435	15	287.1	1.7h
7	5mm	109,818	円	1	90	271.5	1.5h
8	5mm	109,818	円	2	90	256.5	1.8h
9	5mm	109,818	円	5	90	248.9	7.8h

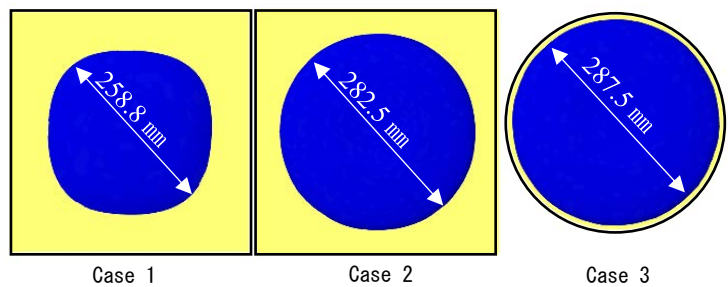


図-2 解析結果の例

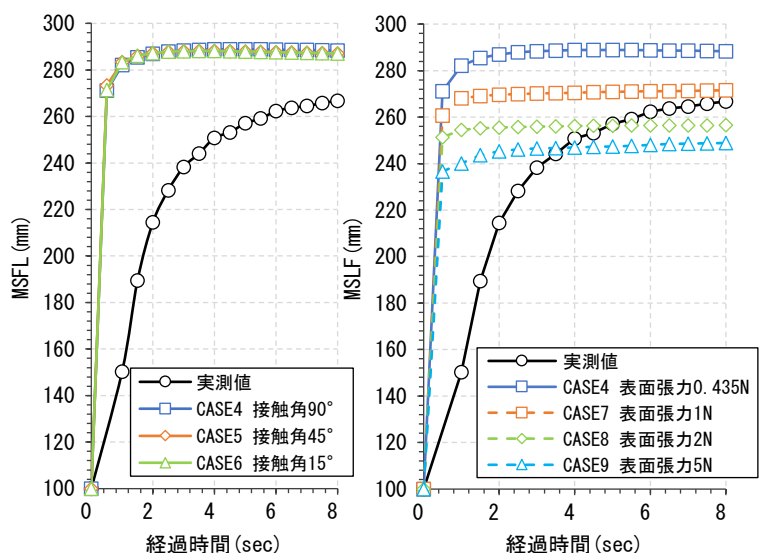


図-3 MSLFの経時変化

(接触角の影響)

図-4 MSLFの経時変化

(表面張力の影響)