

論文 ビンガム流体標準物質のレオロジー定数および流動解析に関する基礎的研究

森田 浩史*1・平野 修也*2・高淵 稔貴*3・清水 寛太*4

要旨：ビンガム流体標準物質のレオロジー定数を確認するとともに、それを用いて回転粘度計のキャリブレーションを行った。また、ビンガム流体標準物質およびモルタルのコンシステンシーの実測値と数値流体解析（格子法）によって計算された解析結果を比較し考察した。ビンガム流体標準物質を用いて回転粘度計をキャリブレーションした結果、数値流体解析によって小型 L 形フロー試験を精度良く再現できた。また、解析に入力したビンガム流体標準物質の認証値の妥当性が認められた。せん断ひずみ速度とせん断応力の関係曲線の直線域から乖離した最初の測定点を臨界せん断ひずみ速度とすることが解析精度向上に有効であった。

キーワード：ビンガム流体標準物質, レオロジー, 回転粘度計, 流動解析, 臨界せん断ひずみ速度

1. はじめに

フレッシュコンクリートの材料性質であるコンシステンシーは、変形あるいは流動に対する抵抗性の程度を表す。コンシステンシーの測定方法は、コンクリートに一定の外力を与えたときの変形量を測定する手法（スランプ試験およびスランプフロー試験等）が一般的に用いられている。しかしながら、近年のコンクリートの多様化に伴い、材料分離抵抗性の評価を始めとして、固液混相流体であるフレッシュコンクリートの粘度の影響を把握するために、スランプ試験やスランプフロー試験のみによって性状の良し悪しを判断することは難しくなっている。レオロジー試験による見かけの粘性の数値化等を加え、施工性の良し悪しの判断を高度化する必要がある。

モルタルやコンクリートのレオロジー試験は、回転粘度計や回転翼粘度計が主に用いられている。これらの粘度計は、一般的に既知の粘度を有する油由来のニュートン流体用標準液により較正するが、標準液は骨材等の固体粒子を含まないことやモルタルとコンクリートが非ニュートン流体であることから、測定されたレオロジー定数の妥当性については不明である。また、測定中の試料の材料分離、回転粘度計の種類およびロータやスピンドルの形状寸法の相違等によって、レオロジー定数は変化することが指摘されている¹⁾。その他のレオロジー定数の測定手法として、スランプ試験や L 形フロー試験の結果を解析的に同定した事例^{例えば 2)}があるが、得られたレオロジー定数の正確性については議論されていない。

近年、これらの課題を解決するために、米国国立標準技術研究所（以下、NIST と称す）によってビンガム流体標準物質（以下、標準物質）（セメントペースト：

SRM2492³⁾、モルタル：SRM2493⁴⁾およびコンクリート：SRM2497⁵⁾）が開発された。これらの標準物質は、理想的なクエット流れのコンピュータシミュレーションを通じてレオロジー定数の認証値を定めており、この認証値を用いることで回転粘度計および回転翼粘度計のキャリブレーション（以下、CB と称す）が可能となる。

本研究では、これらのビンガム流体標準物質のうち、SRM2492 および SRM2493 のレオロジー定数を確認するとともに、これらを用いて回転粘度計の CB を行い、一般的なモルタルのレオロジー定数の測定を試みた。また、SRM2492、SRM2493 およびモルタルのコンシステンシーの実測値と数値流体解析（以下、流動解析と称する場合がある）によって計算された解析結果を比較し考察した。

2. 回転粘度計に関する実験の概要

2.1 標準物質

(1) 材料、配合および製造方法

標準物質の材料および配合を表-1 および 2 に示す。

表-1 標準物質の材料

使用材料	記号	物性値・主成分
上水道水	W	密度:1.00g/cm ³
石灰石微粉末	L	[実測]密度2.74g/cm ³ , 比表面積:3570cm ² /g [文献4)]密度2.724g/cm ³ ±15g/cm ³
コーンシロップ	CS	グルコースシロップ (グルコース100%) [実測]密度1.427g/cm ³
ガラスビーズ	GB	[実測]密度2.65g/cm ³ , 直径:1mm [文献4)]密度2.465g/cm ³ ±3g/cm ³

表-2 標準物質の配合

Case	区分	単位量(g)				密度 (g/cm ³)
		W	L	CS	GB	
CP	SRM2492	63.16	458.10	200.00	—	1.947
MT20	SRM2493	63.16	458.10	200.00	196.80	2.064
MT40	SRM2493	63.16	458.10	200.00	524.80	2.192

*1 東洋建設（株） 美浦研究所 主任研究員 （正会員）

*2 （株）フローリック 技術本部コンクリート研究所 主席研究員 博士（工学） （正会員）

*3 東洋建設（株） 美浦研究所 研究員

*4 （株）フローリック 技術本部コンクリート研究所 研究員 修士（工学） （正会員）

コーンシロップは測定中のレオロジー経時変化を抑制するために加えた。なお、密度は質量法から算出した実測値であり、標準物質の配合の容積換算値は同一にはならない⁴⁾。標準物質の製造には、モルタルミキサーを用いた。CP は文献 4) を参照し、コーンシロップに水を注ぎ 5 分程度攪拌した後、ASTM C 1738 に準拠して石灰石微粉末を投入し、モルタルミキサーにより練り混ぜた。MT20 および MT40 は、製造された CP にガラスビーズを体積割合で 20% および 40% 混合し、モルタルミキサーでさらに 5 分間練混ぜて製造した。

(2) レオロジー定数

文献 4) に記される標準物質のレオロジー定数(認証値)を表-3 に示す。この認証値は、回転粘度計を用いて室内で測定されたレオロジー定数と流動解析によってフィードバックされたレオロジー定数を検証して導出された。同表より、CP, MT20, MT40 の順でレオロジー定数は増加し、MT20 にガラスビーズをさらに混合した MT40 は塑性粘度が急激に増加する傾向が認められる。

2.2 試験項目

試験項目を表-4 に示す。回転粘度計の CB のためにレオロジー試験を実施した。標準物質のコンシステンシーを把握する目的でミニスランプフロー試験および小型 L 形フロー試験を実施し、動画撮影により流動状況を 60 秒間記録した。小型 L 形フロー試験は、流体解析におけるダンプレイクを模擬したものである。レオロジー試験は、回転数を段階的に変化させて測定する手法を A 法、文献 4) に準拠した B 法および後述する臨界せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_c$ を整理するために A 法と B 法を組み合わせた C 法を定義して実施した。レオロジー試験に用いた回転粘度計はニュートン流体用標準液で事前に校正した Brook Field 社製の羽根型回転粘度計で、表-5 に示すスピンドル 4 水準により測定した。環境温度は $23 \pm 1^\circ\text{C}$ とした^{3), 4)}。

2.3 回転粘度計の CB の手順

回転粘度計の CB の手順は文献 4) に従って実施した。CB の手順を以下に示す。標準物質を用いたレオロジー試験 B 法で得られた図-1 (例: CP, V-4) に示すトルク Γ と回転数 N の関係から曲線の直線部分(回転数: 約 5 ~ 50rpm の範囲)の 10 測点程度から傾き S と切片 I を求め、式(1)より校正係数 K_τ , K_μ を算出する。 K_τ , K_μ を Γ と N の関係式(2)~(4)に入力して値を求める。なお、回転粘度計の種類によっては、回転数の単位を rpm から rad/s へ変換する際、 $2\pi/60$ を乗じる必要がある。

$$K_\tau = \frac{\tau_{y,SRM}}{I}, \quad K_\mu = \frac{\eta_{SRM}}{S} \quad (1)$$

$$\mu = K_\mu \Gamma / N \quad (2)$$

$$\dot{\gamma} = \frac{K_\tau}{K_\mu} N \quad (3)$$

$$\tau = K_\tau \Gamma \quad (4)$$

ここに、 K_τ : 降伏値の校正係数、 K_μ : 粘度の校正係数、 μ : 見かけの粘度(Pa・s)、 $\dot{\gamma}$: せん断ひずみ速度(1/s)、 τ : せん断応力(Pa)

2.4 回転粘度計による測定結果および CB の結果

回転粘度計で得られた CB 前の各レオロジー試験のレオロジー定数を表-6 に示す。同表には比較のため NIST の認証値^{3), 4)}を併載する。なお、2.3 と同じ回転数の範囲において整理した。文献 1) と同様に、いずれのケースに

表-3 標準物質のレオロジー定数(認証値)

Case	塑性粘度 η_{SRM} (Pa・s)	降伏値 $\tau_{y,SRM}$ (Pa)
CP	8.1	23.1
MT20	14.9	31.0
MT40	57.9	38.8

表-4 試験項目

試験項目	規格・概要
レオロジー試験	回転粘度計により以下の方法で測定 [A法] 回転数 5→10→20→50→20→10→5rpm (各30秒間) [B法] 文献 4) に準拠し回転数 0.01rpm で 150 秒間攪拌後、せん断ひずみ速度 0.1~50[1/s] を対数変化させて測定 [C法] 回転数 5→10→20→40→20→10→5→2.5→1.0→0.75→0.5→0.4→0.3→0.2→0.1→0.05→0.01rpm (各30秒間)
ミニスランプフロー試験	JIS A 1171 を参考
小型 L 形フロー試験	JSCE-F514 を参考、W100×H100×L500mm (内 W100×H100mm に試料を充填)

表-5 スピンドルの諸元

記号	スピンドル種類	高さ L (mm)	直径 Φ (mm)
V-1	VT3015	30	15
V-2	VT4020	40	20
V-3	VT6030	60	30
V-4	VT8040	80	40

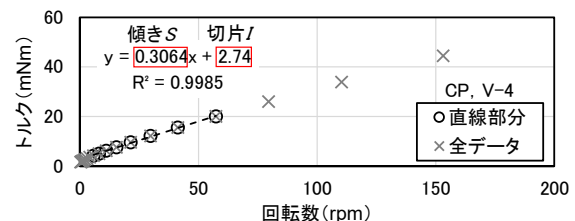


図-1 トルクと回転数の関係(例: CP, V-4)

表-6 CB 前の各レオロジー試験のレオロジー定数

試験法	Case	塑性粘度 η (Pa・s)				
		V-1	V-2	V-3	V-4	認証値
A法	CP	10.80	9.74	9.51	8.69	8.07
	MT20	17.54	16.65	16.00	13.30	14.9
	MT40	46.56	47.45	45.56	35.20	57.9
B法	CP	8.65	8.85	8.91	8.99	8.07
	MT20	9.68	10.27	10.77	12.39	14.9
	MT40	19.32	19.64	21.64	31.80	57.9
C法	CP	10.17	10.80	10.29	9.92	8.07
	MT20	18.91	18.87	18.36	20.51	14.9
	MT40	33.62	37.08	37.39	37.24	57.9
試験法	Case	降伏値 τ_y (Pa)				
		V-1	V-2	V-3	V-4	認証値
A法	CP	25.76	19.52	16.81	14.63	23.1
	MT20	23.99	25.94	26.90	23.18	31.0
	MT40	51.24	57.39	66.05	60.74	38.8
B法	CP	17.29	19.97	18.59	17.96	23.1
	MT20	27.55	26.55	27.10	27.50	31.0
	MT40	64.84	55.34	57.57	76.08	38.8
C法	CP	43.45	23.51	23.85	24.19	23.1
	MT20	54.36	39.35	40.83	27.23	31.0
	MT40	82.60	61.55	70.65	74.75	38.8

においてもスピンドルの寸法によって得られるレオロジー定数は変化した。CB 前のレオロジー定数が認証値と異なる原因については、試験方法ごとに測定点数が異なること等が影響しているものと考えられるが、本検討の範囲においては明らかにならなかった。

式(1)より得られた粘度および降伏値の校正係数を表-7 に示す。同表より、スピンドルの寸法が大きくなると、校正係数は小さくなる傾向が確認された。また、低せん断ひずみ速度域において、スピンドルの寸法が最も小さい V-1 のせん断応力値がゼロとなる場合もあったことから、CB の際には測定可能な範囲で寸法の大きいスピンドルを用いることが良いと考えられる。

CB 前後のせん断ひずみ速度とせん断応力の関係を図-2 に示す。図中の近似式の傾きは塑性粘度、切片は降伏値を指す。表-8 に V-4 の CB 前後のレオロジー定数を示す。小数第一位で整理すると CB 後のレオロジー定数は認証値と等しく、誤差 0% で校正された。

2.5 標準物質のコンシステンシー

標準物質のミニスラップフロー値（以下、MSLF と称す）および小型 L 形フロー試験の流動距離の経時変化を写真-1 および 2 に示す。写真より、標準物質は水中不分離性材料のように高粘性でフローコーンに試料が付着しやすく、流動停止に時間を要する性質であることが認められた。なお、写真-1 のようにコーンに付着した試料は静かに掻き落とした。また、撮影した動画を画像解析し、MSLF および流動距離の経時変化を求めた。

標準物質の MSLF および流動距離（小型 L 形フロー試験）の経時変化を図-3 に示す。左図において、試料がフローコーンに付着しやすい性状であるため、MSLF の流動初期の立ち上がりは緩やかとなった。MSLF および流動距離の経時変化は、CP, MT20, MT40 の順に増加し、

ガラスビーズ混合率の増加により MSLF および流動距離は減少する傾向を示した。

3. 標準物質の三次元流動解析の概要

3.1 流動解析の諸条件

流動解析は、付着の影響の小さかった小型 L 形フロー試験の再現性について検討した。三次元流動解析は、格

表-7 粘度および降伏値の校正係数

試験法	Case	粘度の校正係数 K_μ				降伏値の校正係数 K_τ			
		V-1	V-2	V-3	V-4	V-1	V-2	V-3	V-4
A法	CP	257.0	119.9	36.4	16.8	72.5	40.4	13.9	6.7
	MT20	291.0	129.7	40.0	20.3	104.3	40.8	11.7	5.7
	MT40	426.0	176.8	54.6	29.8	61.1	23.1	5.9	2.7
B法	CP	320.2	132.1	49.9	26.3	108.0	39.5	14.7	8.4
	MT20	528.4	210.2	59.4	21.8	88.9	39.8	11.6	4.6
	MT40	1028.4	427.0	115.0	32.9	48.4	23.9	6.8	2.2
C法	CP	272.6	108.3	33.7	14.7	43.0	33.5	9.8	4.1
	MT20	270.9	114.4	34.9	14.8	46.1	26.9	7.7	3.2
	MT40	591.4	226.2	66.5	28.1	38.0	21.5	5.6	2.2

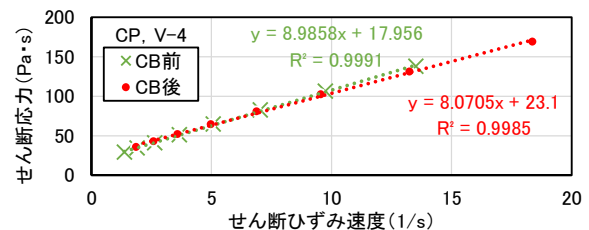


図-2 CB 前後のせん断ひずみ速度とせん断応力の関係

表-8 CB 前後のレオロジー定数 (V-4)

試験法	Case	塑性粘度 η (Pa·s)			降伏値 τ_y (Pa)		
		CB前	CB後	認証値	CB前	CB後	認証値
A法	CP	8.7	8.1	8.1	14.6	23.1	23.1
	MT20	13.3	14.9	14.9	23.2	31.0	31.0
	MT40	35.2	57.9	57.9	60.7	38.8	38.8
B法	CP	9.0	8.1	8.1	18.0	23.1	23.1
	MT20	12.4	14.9	14.9	27.5	31.0	31.0
	MT40	31.8	57.9	57.9	76.1	38.8	38.8
C法	CP	9.9	8.1	8.1	24.2	23.1	23.1
	MT20	20.5	14.9	14.9	27.2	31.0	31.0
	MT40	37.2	57.9	57.9	74.7	38.8	38.8

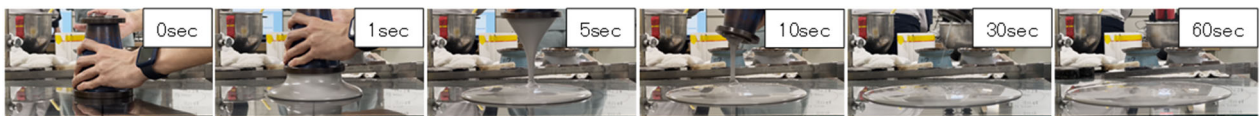


写真-1 MSLF の経時変化 (CP のミニスラップフロー試験)



写真-2 流動距離の経時変化 (CP の小型 L 形フロー試験)

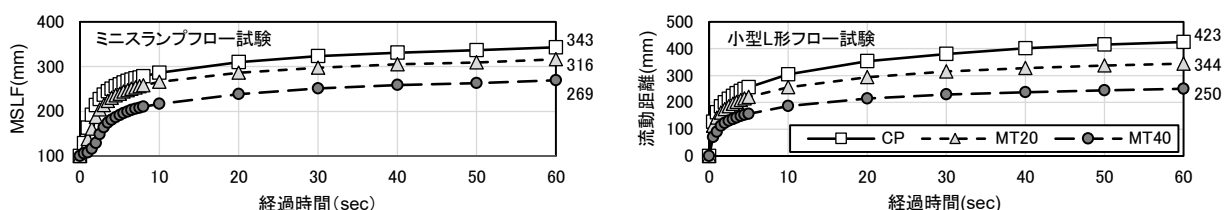


図-3 標準物質の MSLF および流動距離の経時変化

子法によって行い、三次元数値流体解析ソフト(Ansys Fluent 2021R2)を用いた。解析ソフトの基礎方程式は Navier-Stokes 方程式(5)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 モデルに文献2)に示された流動状態と不動状態の境界に当たる臨界せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_c$ をパラメータとして与えた式(6)、(7)を用いた。式(6)は、 $\dot{\gamma} > \dot{\gamma}_c$ の場合にべき乗則流体として流れ、式(7)は、 $\dot{\gamma} \leq \dot{\gamma}_c$ の場合に剛体物質として非常に粘性の強い流体に近い挙動を示す。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 corei9 10940X(14コア)であり、並列計算を12コアで実施した。計算格子間隔は5mmを基準とした。

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu \nabla^2 v + F \quad (5)$$

$$\eta = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + k\dot{\gamma}^{n-1} \quad (6)$$

$$\eta = \frac{\tau_y(2 - \frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c})}{\dot{\gamma}_c} + k(\dot{\gamma}_c)^{n-1} \left[(2-n) + (n-1)\frac{\dot{\gamma}}{\dot{\gamma}_c} \right] \quad (7)$$

ここに、 $\frac{\partial v}{\partial t}$ ：非定常項、 $(v \cdot \nabla)v$ ：移流項、 $-\frac{1}{\rho}\nabla p$ ：圧

力項、 $\nu \nabla^2 v$ ：粘性項、 F ：外力項、 k ：粘稠度指数、 n ：べき乗則指数

解析モデルおよび解析手法を図-4に示す。解析モデルは1/1モデルとし、試験開始と同時に流体が流動するダムブレイク方式で実験を再現した。なお、解析における壁面の境界条件は非すべり条件とした。

解析の主な入力値を表-9に示す。なお、CB後は誤差0%で較正されたため、本検討においては表-3の認証値を用いた。また、 $\dot{\gamma}_c$ は、2.3の既述により、 Γ と N から算出したせん断ひずみ速度とせん断応力の関係曲線の直線域から乖離した最初の測定点（回転数2.5rpm）の数値を用いた。回転数0.01~10rpm付近のせん断ひずみ速度とせん断応力の関係を図-5に示す。

3.2 流動解析の結果および考察

流動距離の実測値と解析値の比較を図-6に示す。また、実測値と解析値の各経過時間の誤差を表-10に示す。解析の精度は40~60秒間での誤差が±5%以内となることを目標とした。また、誤差は解析値が実測値より大きい場合を正、小さい場合を負とした。図表より、CP、MT20およびMT40の実測値を流動解析により非常に精度良く再現することが可能であった。さらに、全区間の平均の誤差はCP-CB後が0.4%、MT20-CB後が-2.2%となり、非常に高い精度で再現された。これは、標準物質の認証値がコンピュータシミュレーションによって定められたものであり、レオロジー定数としての妥当性についても図-6の再現性から裏付けられたと言える。また、前掲図-5のように、 $\dot{\gamma}_c$ を導出したことも適当であったと考え

られる。

但し、MT40-CB後は0~5秒間での誤差が大きかったため、 $\dot{\gamma}_c$ をさらに小さい0.100(1/s)を入力して解析したと

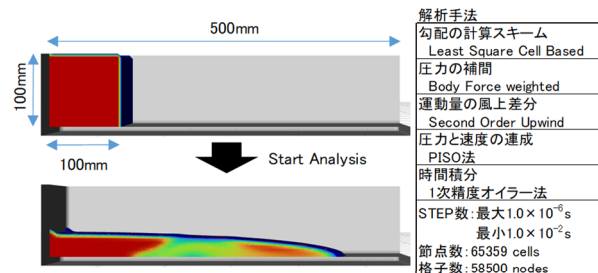


図-4 解析モデルおよび解析手法

表-9 解析の主な入力値

項目		単位	入力値
標準物質	密度	ρ	g/cm ³
	CB後の塑性粘度	η_{SRM}	Pa・s
	CB後の降伏値	$\tau_{y,SRM}$	Pa
	臨界せん断ひずみ速度	$\dot{\gamma}_c$	1/s
	最小せん断速度	$\dot{\gamma}_{min}$	1/s
	最大粘度	μ_{max}	Pa
空気	空気の密度	kg/m ³	1.225
	空気の粘度	Pa・s	1.7894×10^{-5}

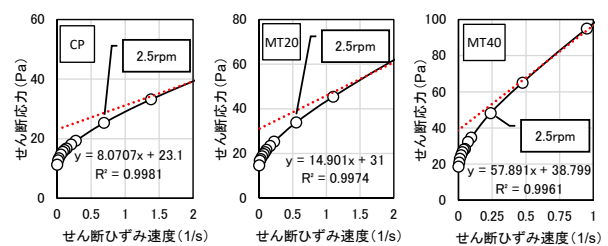


図-5 せん断ひずみ速度とせん断応力の関係

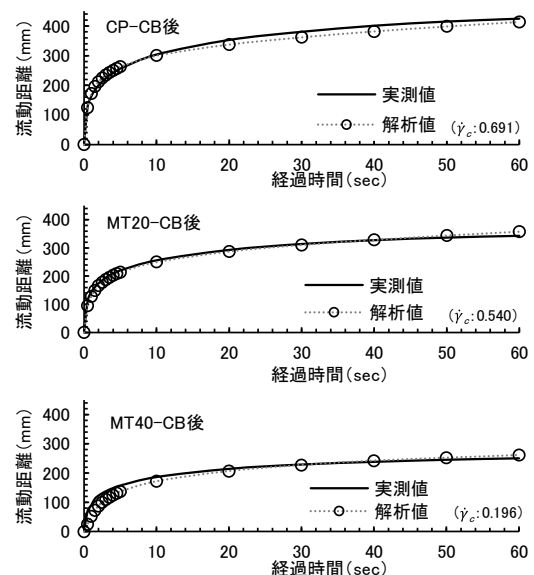


図-6 流動距離の実測値と解析値の比較

表-10 実測値と解析値の経過時間ごとの誤差

Case	誤差(%)			
	0~5秒間	10~30秒間	40~60秒間	全区間の平均
CP-CB後	2.2	-2.9	-3.2	0.4
MT20-CB後	-3.7	-1.4	1.6	-2.2
MT40-CB後	-17.2	-2.6	2.1	-10.8

ころ、0～5 秒間の解析精度は変化せず、40～60 秒間での誤差は負側で大きくなる結果となった。標準物質の配合の違いが $\dot{\gamma}_c$ に与える影響に関しては、筆者らの知る限り明確な知見が無いため、今後の検討課題とする。

4. モルタルのレオロジー定数と流動解析の検討

4.1 モルタルの材料、配合および製造方法

モルタルの材料および配合を表－11 および 12 に示す。モルタルの配合は、標準物質が水中不分離性材料のように高粘性であることを踏まえて、理論密度および MSLF を MT20 と同等になるように調整した MT20-AWU と、水セメント比を 35%，目標 MSLF を 250mm±50mm とした MT35 の 2 水準とした。どちらも消泡剤 DF を C*0.005% 添加し、目標空気量を 0% とした。なお、密度は質量法から算出した実測値である。モルタルの製造には、モルタルミキサーを用いた。MT20-AWU の製造方法は、C と S1 を 10 秒空練りした後、W、Ad1 および Ad2 を加えて低速で 30 秒攪拌し、掻き落としを行って高速で 90 秒攪拌、5 分静置後にさらに低速で 30 秒間攪拌した。MT35 の製造方法は、C と S2 および S3 を 10 秒空練りした後、MT20-AWU の製造方法と同様とした。

4.2 試験項目

モルタルの試験項目は、表－4 に示す標準物質の試験項目と同様とした。但し、レオロジー試験については C 法のみを行った。レオロジー試験に用いた羽根型回転粘度計は、表－5 に示すスピンドルのうち、V-4 のみを使用した。環境温度は 23±1℃ とした。

4.3 モルタルのレオロジー定数

モルタルのレオロジー定数を表－13 に示す。塑性粘度と降伏値は表－7 の C 法、MT20 の校正係数によって CB を行った結果である。MT20 と理論密度および MSLF を同等になるように調整した MT20-AWU のレオロジー定数は、MT20 のレオロジー定数に近い値を示した。なお、MT20-AWU の $\dot{\gamma}_c$ は、回転数 2.5rpm でのせん断ひずみ速度とした。MT35 の $\dot{\gamma}_c$ は、回転数 2.5rpm でのせん断ひずみ速度において後述する小型 L 形フロー試験の流動解析の再現が難しかったため、回転数 1.0rpm でのせん断ひずみ速度を用いた。

4.4 モルタルのコンシステンシー

モルタルの MSLF と流動距離（小型 L 形フロー試験）の経時変化を図－7 に示す。また、MT20-AWU の比較用に MT20 も併載する。MT20-AWU の経時変化は、水中不分離性混和剤由来の粘性によって MT20 の経時変化と同様に推移し、MSLF と流動距離は経時的に増加する傾向を示した。即ち、市販の材料により標準物質に近いコンシステンシーを再現可能であることが示唆された。一方、水中不分離性混和剤を不使用の MT35 の MSLF と流動距

離は、20 秒経過付近から流動停止に近い挙動を示した。

4.5 モルタルの流動解析

モルタルの流動解析は、標準物質と同様に三次元数値流体解析ソフト(Ansys Fluent 2021R2)を用いて行った。解析の主な入力値は表－9、12 および 13 のとおりである。

モルタルの実測値と解析値の比較を図－8 に示す。また、モルタルの実測値と解析値の誤差を表－14 に示す。解析の精度および誤差は標準物質と同様として評価した。図表より、MT20-AWU の解析値は実測値を精度良く再現できており、MT35 の解析値は、経過時間 30 秒までは実測値を精度良く再現できているが、それ以降から徐々に実測値と乖離していく傾向が認められた。これは、SRM2493 の標準物質は球状かつ単一粒径のガラスビーズで細骨材同士の摩擦を極力小さくしているのに対し、MT35 に使用した S2 および S3 の形状は複雑であり、流動中に細骨材同士の接触や噛み合いが生じることで見掛

表－11 モルタルの材料

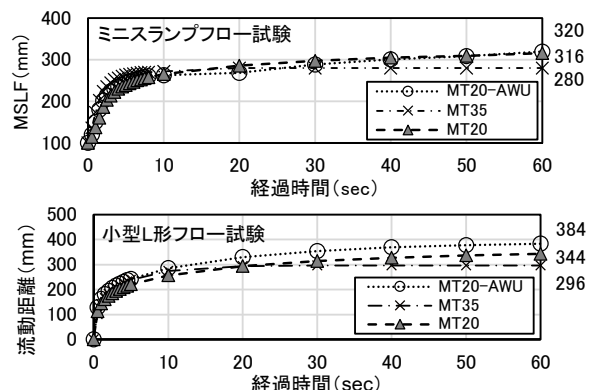
使用材料	記号	産地・物性値
上水道水	W	密度:1.00g/cm ³
セメント	C	密度:3.16g/cm ³ 、普通ポルトランドセメント（三種等量混合）
標準砂	S1	絶乾密度:2.64g/cm ³ 、セメント強さ試験用(JIS R 5201)
石灰砕砂	S2	福岡県北九州市産、表乾密度:2.70g/cm ³ 、吸水率:0.50%、実積率:67.6%、F.M.:2.32
硬質砂岩砕砂	S3	茨城県桜川市産、表乾密度:2.60g/cm ³ 、吸水率:1.35%、実積率:79.0%、F.M.:3.03
化学混和剤	Ad1	水中不分離性コンクリート用混和剤(主剤)
	Ad2	JIS A 6204 高性能 AE 減水剤(増粘剤一液タイプ) 標準形 I 種
	DF	空気量調整剤（消泡剤）

表－12 モルタルの配合

Case	W/C (%)	単位量(kg/m ³)							C*% (g/cm ³)
		W	C	S1	S2	S3	Ad1	Ad2	
MT20-AWU	41.3	472	1142	440	—	—	3.0	0.65	2.043
MT35	35.0	257	736	—	797	531	—	0.90	2.310

表－13 モルタルのレオロジー定数

Case	塑性粘度 η (Pa·s)	降伏値 τ_y (Pa)	臨界せん断ひずみ速度 $\dot{\gamma}_c$ (1/s)
MT20-AWU	8.19	21.50	0.540 回転数: 2.5rpm
MT35	9.58	37.50	0.211 回転数: 1.0rpm
MT20	8.07	23.10	0.540 回転数: 2.5rpm



図－7 モルタルの MSLF と流動距離の経時変化

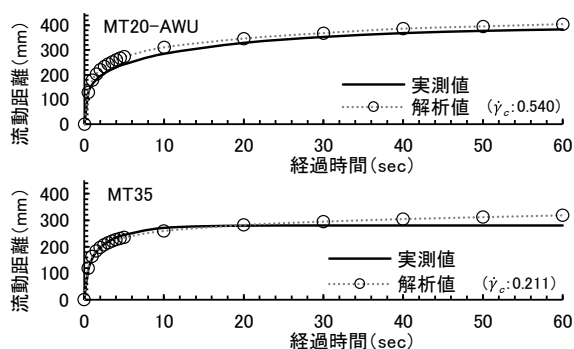


図-8 モルタルの実測値と解析値の比較

表-14 モルタルの実測値と解析値の誤差

Case	誤差(%)			
	0～5秒間	10～30秒間	40～60秒間	全区間の平均
MT20-AWU	7.2	4.4	3.8	6.0
MT35	-0.1	3.7	7.6	1.3

けのレオロジー定数が変化しているものと推察される。一方、MT20-AWUは水中不分離性混和剤によりセメントペーストの粘度が比較的大きくなり、細骨材同士の接触や噛み合わせが緩和されたものと考えられる。また、標準物質はコーンシロップによってレオロジーの経時変化が抑制されているのに対して、セメント系材料では水和や凝集による流動性の経時的低下を無視できない。本研究では、MT20-AWUは製造から120分経過後も流動性を保持していることを確認したが、MT35は製造からコンシステンシー試験終了後までにMSLFが約40mm低下し、これに起因してモルタルのレオロジー定数はコンシステンシー試験中に増加したものと推察される。

このことから、標準物質のレオロジー定数は経時安定性に優れる点で非常に有効であるが、セメント系材料はセメントの水和や凝集および細骨材の物理的接触の影響を受けるため、標準物質を流動解析に応用する上でチクソトロピー性およびダイラタンシー性を考慮した補正が必要になると考える。既往の研究⁹⁾では、高流動モルタルのフロー試験を流動解析で再現するため、フローが広がる過程で生じるセメント粒子の凝集破壊と回復の時間的ズレ(チクソトロピー)によって塑性粘度が減少すると仮定し、モルタルフローの挙動を精度良く再現している。今後、チクソトロピー性の考慮も含めて、細骨材同士の噛み合いの影響を解析に反映することを課題とする。

5.まとめ

以下に本研究で得られた知見を示す。

- (1) ビンガム流体標準物質SRM2492およびSRM2493のレオロジー定数は、文献3)および4)に準じて回転粘度計のキャリブレーションを行うことで認証値と概ね同値となり、誤差0%で較正が可能である。
- (2) ビンガム流体標準物質の小型L形フロー試験の数値

流体解析の結果は、流動距離の実測値と概ね同等であり、解析に適用したレオロジー定数の認証値の妥当性が確認された。

- (3) トルク T と回転数 N から算出したせん断ひずみ速度とせん断応力の関係曲線の直線域から乖離した最初の測定点を臨界せん断ひずみ速度とすることが、数値流体解析の精度向上に有効である。
- (4) 水中不分離性混和剤を用いることで、ビンガム流体標準物質SRM2493と同等のレオロジー特性を有するモルタルを製造できる可能性が示唆された。
- (5) SRM2493により較正したモルタルの数値流体解析結果は、実際の小型L形フロー試験結果と若干乖離した。細骨材同士の噛み合わせやセメントの水和および凝集によって、モルタルの流動中にレオロジー定数が変化したことが起因したと推察される。

6.今後の課題

解析精度をさらに向上させるため、ビンガム流体標準物質による回転粘度計のキャリブレーションに加えて、モルタルのチクソトロピー性の考慮も含めて、細骨材同士の噛み合いの影響を検討する必要がある。

参考文献

- 1) Ferraris, C. F. and Brower, L. E.: Comparison of Concrete Rheometers: International Tests at MB (Cleveland OH, USA) in May 2003, NISTIR 7154, National Institute of Standards and Technology, 2004.
- 2) 浦野真次, 根本浩史, 崎原康平: 高流動コンクリートの充てん性評価への流動解析手法の適用に関する研究, 土木学会論文集E2, Vol68, No.1, pp.38-48, 2012.
- 3) Ferraris, C. F. et al., "Certification of SRM 2492: Bingham Paste Mixture for Rheological Measurements," NIST Special Publication 260-174, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2012.
- 4) Olivas, A. et al., "Certification of SRM 2493: Standard Reference Mortar for Rheological Measurements," NIST Special Publication 260-187, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2017.
- 5) Ferraris, C. F. et al., "Certification of SRM 2497: Standard Reference Concrete for Rheological Measurements," NIST Special Publication 260-194, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 2019.
- 6) 東舟道裕亮, 山田義智, 平野修也: フロー試験によるセメントペーストおよびモルタルのレオロジー定数推定法に関する研究, 日本建築学会構造系論文集 第88巻 第803号, 1-11, 2023年1月