論文　ビンガム流体標準物質によるセメントペーストのレオロジー試験の校正と MPS 解析による妥当性検証

清水　寛太[*1]・山田　義智[*2]・東舟道　裕亮[*3]・森田　浩史[*4]

要旨：本研究では，ビンガム流体標準物質 SRM2492 を用いて，十字羽根回転粘度計によるセメントペーストのレオロジー試験の校正を行った。校正係数は 3 種類（A 法，B 法，C 法）の載荷プログラムから得られたものを使用し，校正したレオロジー定数と既往の研究で示された推定レオロジー定数との比較を行った。その結果，塑性粘度および降伏値の値は，その値が小さい範囲では比較的一致していたが，値の大きい範囲では差が認められた。一方，得られたレオロジー定数の妥当性を，MPS 法によるフロー試験の再現解析によって検証した結果においては，C 法で校正したレオロジー定数が実測値の傾向を最も捉えていた。

キーワード：　ビンガム流体標準物質，セメントペースト，十字羽根回転粘度計，レオロジー定数，MPS 法

1. はじめに

近年，建設業界ではコンクリート工事の生産性向上が求められており，高流動コンクリートの使用や流動解析による充填予測が期待されている。その流動解析や高流動コンクリートに不可欠な混和剤開発においては，フレッシュコンクリートはもとより，基材となるセメントペースト（以降，ペーストと称する）やモルタルのレオロジー定数の正確な把握が必要である。

筆者らは，米国国立標準技術研究所によって開発されたビンガム流体標準物質（以降，標準物質と称する）を用いて，モルタルを対象とした十字羽根回転粘度計による測定の校正を行うことで，正確なレオロジー定数の測定を試みた。さらに，校正したレオロジー定数の妥当性を，流動解析によって検証した [1)]。

また，筆者らの一部は，ペーストを対象として，フロー試験および二重円筒型回転粘度計によるレオロジー定数の測定を行い，150mm フロー到達時間およびペースト密度から塑性粘度を推定し，フロー値から降伏値を推定する手法を提案した。そして，MPS 解析にてフロー試験を再現することで，その妥当性を確認した [2)]。

本研究では，ペーストを対象として，ペースト用の標準物質である SRM2492 を用いて，十字羽根回転粘度計によるペーストのレオロジー試験を校正し，レオロジー定数を測定した。また，文献 2)で提案されたフロー試験結果から推定するレオロジー定数との比較を行った。

さらに，各方法で得られたレオロジー定数を用いた MPS 解析により，フロー試験の再現を行うことで，各レオロジー定数の妥当性を検証した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配(調)合について

表－1 に標準物質およびペーストの使用材料を示す。ペーストに相当する標準物質 SRM2492 は，コーンシロップ CS, 蒸留水 W'および石灰石微粉末 L で構成される。また，ペーストは，セメント C に普通ポルトランドセメントを用い，化学混和剤は増粘剤含有高性能 AE 減水剤 VSP および消泡剤 DF を用いた。

表－2 に標準物質 SRM2492 の概要を示す。なお，これらの数値は文献 3)に示されたものであり，密度は各材料の計量値と**表－1** に示した各材料の実測密度から算出した。SRM2492 はレオロジー定数の認証値を有しており，当該認証値を用いてレオロジー試験の校正を行う(2.2 節にて後述)。なお，標準物質は，せん断応力を受け続けた時間によりレオロジー特性が変化するチクソトロピー性を有していない [4)]とされる。

標準物質の製造には，モルタルミキサーを用い，コーンシロップ CS に蒸留水 W'を注ぎ，5 分程度撹拌後，石

表－1　使用材料

対象	使用材料	記号	物性値・主成分
標準物質	蒸留水	W'	密度：1.00g/cm^3
	コーンシロップ	CS	グルコース100%，実測密度：1.427g/cm^3
	石灰石微粉末	L	実測密度：2.740g/cm^3
ペースト	上水道水	W	茨城県つくば市上水道水
	セメント	C	普通ポルトランドセメント（三種混合），密度:3.16g/cm^3
	化学混和剤	VSP	JIS A 6204 高性能AE減水剤 標準型Ⅰ種 ポリカルボン酸系化合物と界面活性剤系特殊増粘剤の複合体
		DF	消泡剤，ポリアルキレングリコール誘導体

表－2　標準物質 SRM2492 の概要

計量値(g)			密度 (g/cm^3)	レオロジー定数の認証値	
W'	CS	L		塑性粘度 η^{SRM} (Pa・s)	降伏値 τ_y^{SRM} (Pa)
63.16	200.00	458.10	1.947	8.1	23.1

*1　(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）
*2 琉球大学　工学部工学科　教授　博士（工学）（フェロー会員）
*3 琉球大学　総合技術部　技術職員　博士（工学）（正会員)
*4 東洋建設（株）　総合技術研究所　研究統括部・美浦　上席研究員（正会員）

灰石微粉末 L を投入して 2 分間混練した。

表－3 にペースト 6 試料の概要および練混ぜ手順を示す。W/C を 35%および 45%の 2 種類設定し，2.3 節にて後述するフロー試験にてフロー値が 250～400mm の範囲内で 3 点得られるように，VSP の添加率を調整した。DF は 0.005(C×%)添加し，目標空気量を 0%とした。なお，ペーストの練混ぜもモルタルミキサーにて行った。

2.2 十字羽根回転粘度計によるレオロジー試験

(1)標準物質による校正

十字羽根回転粘度計によるレオロジー試験には，**図－1** に示すスピンドル（φ40mm×L80mm×羽根厚 t1mm）を用いた。また，**写真－1** に示すように，内径φ125mm，深さ 107mm の円筒容器に試料を充填し，測定に供した。なお，容器の寸法は文献 5)を参考に設定した。文献 1)では，標準物質を対象に十字羽根回転粘度計を用いて**表－4** に示す載荷プログラム A 法，B 法，C 法の 3 種類にて校正係数を導出している。本研究では，後述するペーストのレオロジー試験結果を，**表－4** に示した各校正係数により校正し，レオロジー定数を求める。

A 法は，ステップ式に 4 段階の回転数で各 30 秒間ずつ測定を行う。B 法は，文献 6)に準拠し，150 秒間の撹拌後にせん断ひずみ速度を 0.1～50(1/s)の範囲で対数変化させるものである。C 法は，ステップ式に 14 段階の回転数で各 30 秒間ずつ測定を行う。

図－2 に回転数とトルクの関係の一例を示す。なお，図中の赤線は，文献 6)に従って導出した近似直線であり，図中にその近似式を付す。文献 6)では回転数とトルクの関係が直線となる範囲の測定点のうち最低 10 点から近似直線を作成しており，今回の検討では A 法および B 法では 5～50rpm 程度の範囲，C 法では 5～40rpm の測定点を近似の範囲とした。

図－2 中の近似式の傾き S と切片 I および**表－2** に示したレオロジー定数の認証値η^{SRM}およびτ_y^{SRM}を式(1)および(2)に代入し，校正係数K_μおよびK_τを算出する。なお，算出した各校正係数は**表－4** に示す。

$$K_\mu = \frac{\eta^{SRM}}{S} \tag{1}$$

$$K_\tau = \frac{\tau_y^{SRM}}{I} \tag{2}$$

ここでη^{SRM}は塑性粘度の認証値(Pa・s)，τ_y^{SRM}は降伏値の認証値(Pa)である。

K_μおよびK_τと，ペーストのレオロジー試験によって得られた回転数 N およびトルクΓを，式(3)および(4)に代入し，せん断ひずみ速度$\dot{\gamma}$(1/s)およびせん断応力τ(Pa)に変換する。なお，以上の校正方法は文献 6)に従った。

$$\dot{\gamma} = \frac{K_\tau}{K_\mu} N \tag{3}$$

$$\tau = K_\tau \Gamma \tag{4}$$

(2)ペーストのレオロジー試験の概要

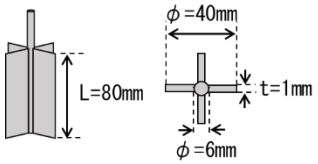
ペーストのレオロジー試験は標準物質と同様の試験装置およびスピンドルにて行った。ここで，ペーストはチクソトロピー性を有している [7]ことから，本実験での載荷プログラムは，十字羽根の回転数をそれぞれ 5，10，20，50rpm の一定値として 60 秒間回転を与え，**図－3(a)** のように応力緩和曲線を作成する方法をとった。そして測定結果について，**図－3(b)** のように，回転数NとトルクΓの関係として整理した。

ここで，文献 2)の二重円筒型回転粘度計によるペースト試料のレオロジー定数測定においては，塑性粘度を決

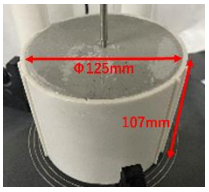
表－3　ペーストの水準および練混ぜ方法

No.	試料名	W/C (%)	VSP (C×%)	理論密度 (g/cm³)
1	N35VSP0.60	35	0.60	2.005
2	N35VSP0.80	35	0.80	2.005
3	N35VSP1.00	35	1.00	2.005
4	N45VSP0.20	45	0.20	1.873
5	N45VSP0.45	45	0.45	1.873
6	N45VSP0.70	45	0.70	1.873

[練混ぜ方法]C→低速10s.→W+Ad→低速30s.→かき落とし→低速90s.→5分静置→低速30s.→試験



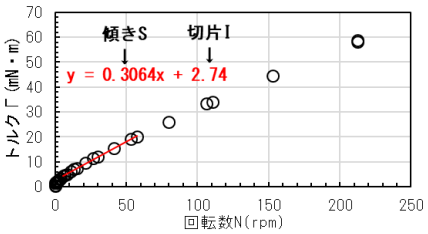
図－1　スピンドルの諸元



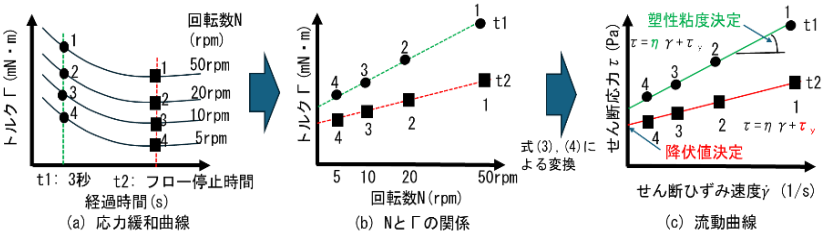
写真－1　試験の様子

表－4　載荷プログラムおよび校正係数 [1)]

載荷プログラム	概要	粘度の校正係数 K_μ	降伏値の校正係数 K_τ
A法	回転数5→10→20→50→20→10→5rpm（各30秒間）	16.8	6.7
B法	文献6)に準拠し，回転数0.01rpmで150秒間撹拌後，せん断ひずみ速度0.1～50(1/s)を対数変化させて測定	26.3	8.4
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）	14.7	4.1



図－2　回転数とトルクの関係(例:B 法)



図－3　応力緩和曲線の変換および標準物質による校正

定する際には応力緩和曲線の経過時間 2 秒時の結果を用い，降伏値を決定する際にはフロー停止時間における応力緩和曲線の結果を用いており，本研究でも，その方法に準拠した。なお，本研究においては，2 秒時では測定トルクが安定しなかったため，t1 を 3 秒とした場合と t2 をフロー停止時間とした場合の結果で整理した。整理した回転数NおよびトルクΓについて，**図－3(c)**に示すように式(3)および(4)で校正を行うことで，せん断ひずみ速度$\dot{\gamma}$およびせん断応力τに変換し，直線近似にて降伏値τ_yと塑性粘度ηをそれぞれ求めた。

2.3 ペーストフロー試験について

(1) 試験概要

ペーストフロー試験は，JIS R 5201 セメントの物理試験方法で規定されたフロー試験用のコーンを用いて，500×500mm のガラス製フロー板上にて無振動で行った。フロー板にはペーストの広がりを計測するための目盛りを書き込み，フローコーンの上部に設置したビデオカメラによって，コーン引上げ直後からペーストの広がりを測定した。

(2)フロー試験に基づくレオロジー定数の推定方法

レオロジー定数の推定は，上記のペーストフロー試験結果を基に，文献 2)で提案される式(5)で降伏値τ_y，式(6)で塑性粘度ηを推定した。

$$\tau_y = 2292e^{-0.01833Sf} \tag{5}$$

$$\eta = 4.98t_{150} + 3.049\rho - 6.133 \tag{6}$$

ここで，Sfはペーストのフロー値(mm)，t_{150}は 150mm フロー到達時間(s)，ρはペースト密度(g/cm^3)である。

3. MPS 法による流動解析の概要

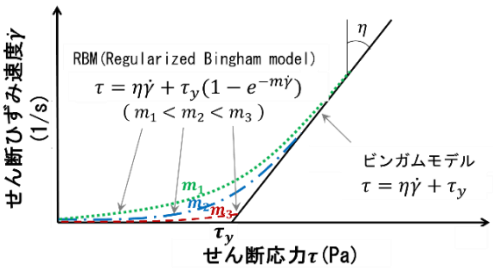
3.1 流動構成式について

2.2 節および2.3 節の各手法で得られたレオロジー定数の妥当性を MPS 法での流動解析にて評価する。流動解析で対象とするペーストの流動構成式には，文献 8)と同様に式(7)で表す Regularized Bingham Model（以下，RBM と略す）を適用した。

$$\tau = \eta\dot{\gamma} + \tau_y\left(1 - e^{-m\dot{\gamma}}\right) \tag{7}$$

ここで，τはせん断応力(Pa)，$\dot{\gamma}$は工学せん断ひずみ速度(1/s)，τ_yは降伏値(Pa)，mは応力成長指数である。

RBM で表す流動曲線を**図－4** に示す。RBM は高せん断ひずみ速度域ではビンガムモデルと一致し，低せん断ひずみ速度域では軟化型の非ニュートン性を示す。この非ニュートン性は応力成長指数mで決定され，この値を大きくすると RBM はビンガムモデルに近づく。本研究では，応力成長係数mの値は文献 2)を参考に 0.3 とした。



図－4　RBM の流動曲線

超過応力理論に基づき，応力テンソルτ_{ij}と粘塑性ひずみ速度テンソル$\dot{\varepsilon}_{ij}$の関係を一般化し，RBM を適用すると，τ_{ij}と$\dot{\varepsilon}_{ij}$の関係は，式(8)で表される [8]。

$$\tau_{ij} = -P\delta_{ij} + 2\left(\eta + \frac{\tau_y\left(1-e^{-m\sqrt{\Pi}}\right)}{\sqrt{\Pi}}\right)\dot{\varepsilon}_{ij} \tag{8}$$

ここで，Pは静水圧，δ_{ij}はクロネッカーデルタであり，$\Pi = 2\dot{\varepsilon}_{ij}\dot{\varepsilon}_{ij}$である。なお，粘塑性ひずみ速度テンソル$\dot{\varepsilon}_{ij}$は，粒子速度$u_i$を用いて式(9)で表される。

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2}\left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) \tag{9}$$

3.2 運動方程式について

式(8)を流動構成式とする流体の運動方程式は式(10)となる [8]。

$$\frac{Du_i}{Dt} = \frac{1}{\rho}\left\{-\nabla P + \left(\eta + \frac{\tau_y\left(1-e^{-m\sqrt{\Pi}}\right)}{\sqrt{\Pi}}\right)\nabla^2 u_i + 2\dot{\varepsilon}_{ij}\frac{\partial\frac{\tau_y\left(1-e^{-m\sqrt{\Pi}}\right)}{\sqrt{\Pi}}}{\partial x_j}\right\} + F_i \tag{10}$$

ここでρは流体密度，F_iは体積力ベクトルを表す。

ところで，MPS 法の離散化では，勾配(∇)，ラプラシアン(∇^2)および発散($\nabla\cdot$)の各ベクトル微分演算子を粒子相互作用モデルにより離散化する。そこで，式(10)をベクトル微分演算子にて次式のように展開する [8]。

$$\frac{Du_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho}\{\nabla P + \mu(\dot{\gamma}_{av})\nabla^2 u_i + \{\nabla u_i + (\nabla u_i)^T\}\nabla\mu(\dot{\gamma}_{av})\} + F_i \tag{11}$$

ここで，$\dot{\gamma}_{av}$は平均せん断ひずみ速度であり，$\dot{\gamma}_{av} = \sqrt{\Pi}$である。また，式(11)では，式(10)の右辺第二項と第三項部分を式(12)に示す平均せん断ひずみ速度$\dot{\gamma}_{av}$の関数を用いて表している。また，連続の式は式(13)となる。

$$\mu(\dot{\gamma}_{av}) = \eta + \tau_y\frac{\left(1-e^{-m\dot{\gamma}_{av}}\right)}{\dot{\gamma}_{av}} \tag{12}$$

$$\nabla\cdot u_i = 0 \tag{13}$$

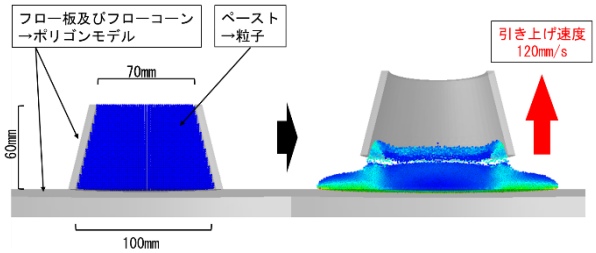
3.3 MPS 法の解法について

MPS 法は対象とする空間を要素分割することなく粒子（計算点）を発生させ，ラグランジュ法により個々の粒子の運動を観測して，非圧縮性流れを解析する手法である。具体的には式(11)の運動方程式における勾配∇およびラプラシアン∇^2の各微分演算子に対して，粒子間相互作用モデルが定義され，式(13)の連続の式を満たす解法となる。

なお，粒子間相互作用モデルによる勾配∇およびラプラシアン∇^2の式と，粒子数密度および重み関数の式，さらに圧力ポアソン方程式の解法や境界条件の計算方法などの詳細については文献 8)と同様であり，そちらを参照されたい。

図－5 に本研究の MPS 解析モデルの概要を示す。ペースト試料を粒子で表現し，解析精度を考慮し [9]，粒子径 1mm，全粒子数は 330,954 個を使用した。フローコーンおよびフロー板はポリゴンモデルで表現し，これらと試料の間の境界はノンスリップ条件とした。コーンの引き上げ速度は実際の試験を参考にし，鉛直方向に 120mm/s とした。

なお，流動停止の判定は，文献 2)と同様に各試料およびレオロジー定数ごとの流動曲線を基に，RBM 上でせん断応力が降伏値に達した際のせん断ひずみ速度を限界せん断ひずみ速度とし，全粒子のうち 99.9%以上が限界せん断ひずみ速度以下となった時点を流動停止と判断した。



図－5　フロー試験の MPS 解析モデルの概要

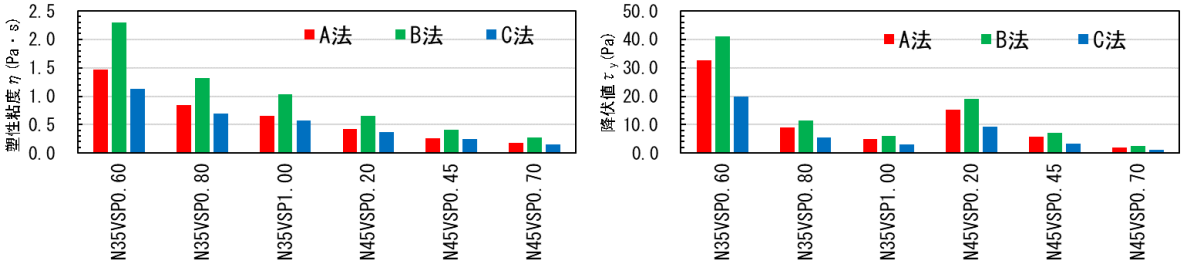
4. レオロジー定数の測定結果の考察

4.1 十字羽根回転粘度計とフロー試験で求めたレオロジー定数の比較

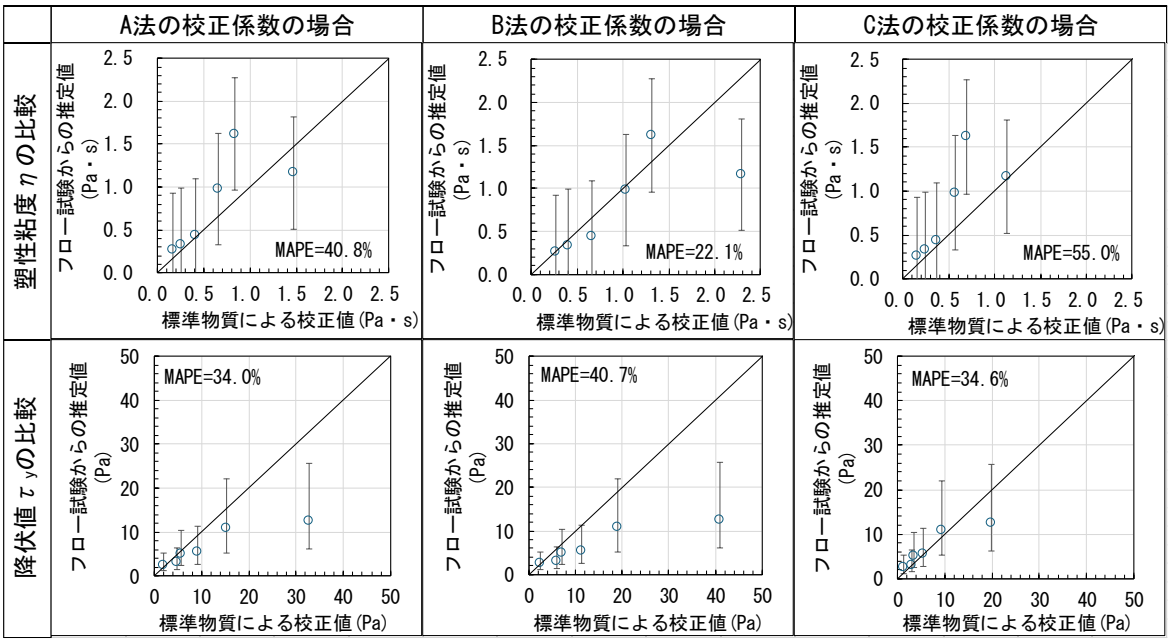
十字羽根回転粘度計による測定を A 法，B 法および C 法で得られた校正係数によって校正した場合の塑性粘度および降伏値を**図－6** に示す。A 法，B 法および C 法を比較すると，塑性粘度，降伏値どちらも C 法＜A 法＜B 法の順に増加した。また，同図より，同じ W/C で比較すると塑性粘度および降伏値は VSP の添加率が高いほど低下することが分かる。

図－7 に標準物質による校正で得られたレオロジー定数とフロー試験から推定したレオロジー定数の比較を示す。表の上段は塑性粘度，下段は降伏値についてそれぞれ示しており，表の列は十字羽根回転粘度計の測定結果に A 法，B 法，C 法それぞれの校正係数を用いた場合の結果を示している。

各図の横軸は十字羽根回転粘度計の測定結果より 2.2 節の方法によって校正して求めたレオロジー定数を表し，縦軸はフロー試験結果から 2.3 節のように推定したレオ



図－6　A 法，B 法，C 法の各校正で得た各ペースト試料のレオロジー定数



図－7　標準物質による校正で得たレオロジー定数とフロー試験から推定したレオロジー定数の比較

ロジー定数を示している。なお，フロー試験からの推定値については，式(5)，式(6)の推定式の上下限 95%の予測区間を示している [2]。各図中には十字羽根回転粘度計による測定結果の校正から得られた値とフロー試験による推定値の平均絶対パーセント誤差（MAPE(%)）を付している。MAPE は式(14)で表される。

$$MAPE = \left(\frac{1}{n}\sum\frac{|y_i-\hat{y}_i|}{|y_i|}\right)\times 100 \qquad (14)$$

ここで，nはサンプル数，y_iは実測値，$\hat{y}_i$は推定値である。

ここでは，$n=6$，y_iを標準物質による校正で得られたレオロジー定数，$\hat{y}_i$をフローからの推定値として，レオロジー定数を得る両手法の差を検討した。

塑性粘度については十字羽根回転粘度計の測定結果に B 法による校正係数を用いて求めた場合が，MAPE が最も小さく，フロー試験からの推定値に最も近い結果となった。また，降伏値については A 法による校正係数を用いた場合が MAPE が小さく，フロー試験による推定結果により近い結果となることが確認された。

また，**図－7** より，A 法，B 法，C 法それぞれの校正係数によるレオロジー定数とフロー試験による推定レオロジー定数を比較すると，塑性粘度および降伏値のいずれも，値が小さい範囲では両者は一致していたが，値の大きい範囲では両者に差が認められた。

4.2 ペーストフロー試験の再現によるレオロジー定数の妥当性の検証

図－8 にペーストフロー試験の実測値と MPS 法による解析によって得られた解析値の比較を示す。黒丸印によって実測値を示し，各種線はレオロジー定数の導出方法ごとの解析値を示している。また，各フロー曲線の終点には最終的なフロー値を付す。左列はフロー値の実測値が 300mm 未満，中央列は 300mm 以上 350mm 未満，右列は 350mm 以上のフロー広がり曲線を表している。

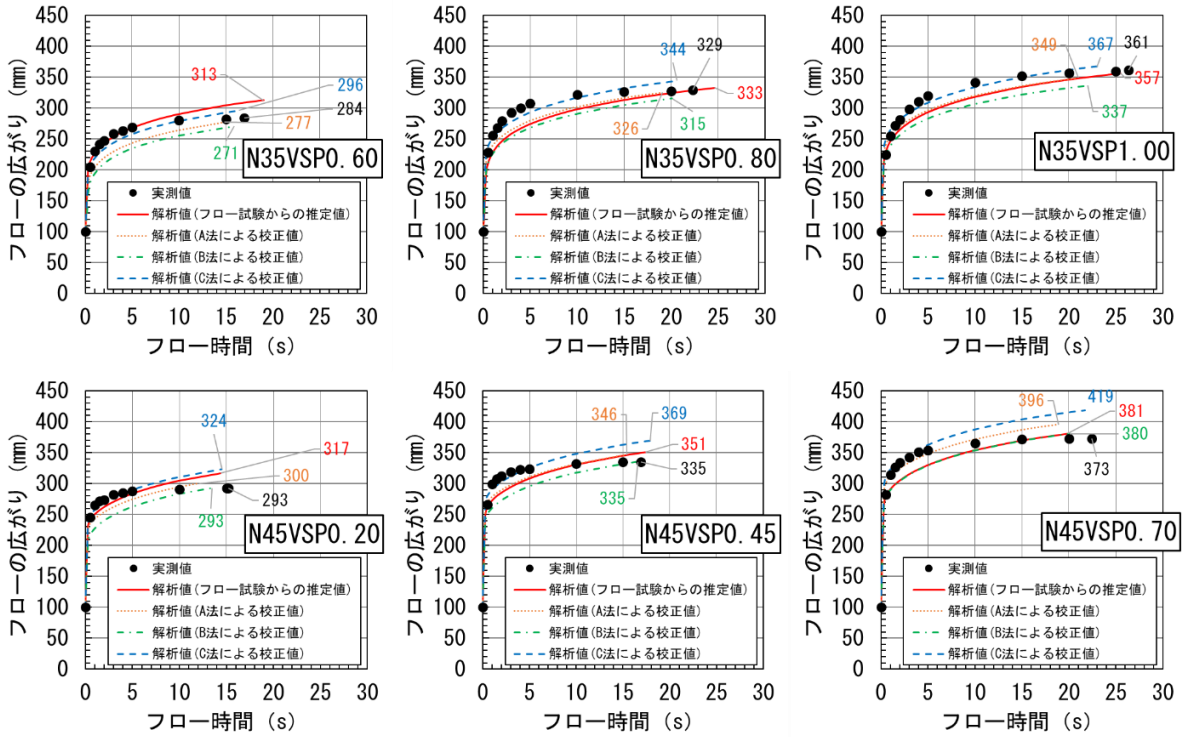
表－5 に実測値と各解析値の MAPE を示す。なお，MAPE の算出は実測フロー曲線の全ての点を対象とし，式(14)のy_iを実測値とし，$\hat{y}_i$を実測値に対応する解析値とした。最右列にはレオロジー定数導出方法ごとの MAPE の平均値を付しており，表中の赤字は各試料において MAPE が最も小さく，フロー曲線全体において実測値の再現性が高いものを表している。

図－8 より，フロー曲線全体の傾向を見ると，今回の検討範囲においては，いずれの方法で求めたレオロジー定数を用いてもフロー試験の再現性は概ね高かった。

図－8 および**表－5** より，フロー値の範囲別に詳細に検討すると，フロー値の実測値が 300mm 未満のフロー試験の場合は，C 法による校正値またはフロー試験による推定値を用いた場合の再現性が高かった。フロー値の実測値が 300mm 以上 350mm 未満のフロー試験の場合

表－5　実測値と解析値の平均絶対パーセント誤差 MAPE

解析値	MAPE (%)						
	N35VSP0.60	N35VSP0.80	N35VSP1.00	N45VSP0.20	N45VSP0.45	N45VSP0.70	平均値
フロー試験からの推定値	2.30	8.58	4.57	3.29	5.27	5.07	4.85
A法による校正値	8.61	5.97	4.25	5.22	4.42	2.53	5.17
B法による校正値	11.40	10.10	7.42	9.46	8.95	5.14	8.74
C法による校正値	3.42	3.04	2.56	2.08	2.62	4.37	3.01



図－8　ペーストフロー試験の実測値と MPS 法による解析値の比較

は，フロー値が僅かに高い傾向にあるが，C 法による校正係数で求めたレオロジー定数を用いた方の再現性が高かった。

また，フロー値の実測値が 350mm 以上のフロー試験の場合，フロー値に関してはフロー試験から推定したレオロジー定数による場合の再現性が高い結果であるが，フローの広がりの全体的な傾向は，A 法や C 法による校正係数で求めたレオロジー定数を用いた場合の再現性が高い結果となった。

以上の結果より，本研究の範囲においても文献 2)の手法でフロー試験から推定したレオロジー定数は概ね妥当であった。また，標準物質で校正した十字羽根回転粘度計によるペーストのレオロジー定数の測定値は，A 法，B 法，C 法いずれも妥当であり，MAPE の平均値は C 法によるものが最も小さかった（**表－5** 参照）。このことから，十字羽根回転粘度計の試験に C 法による校正係数で求めたレオロジー定数を用いた場合に再現性が高く，最も妥当性が高いと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) 載荷プログラム A 法，B 法，C 法によって得られた校正係数によって校正したレオロジー定数を比較すると，塑性粘度と降伏値のどちらも C 法＜A 法＜B 法の順に増加した。また，VSP の添加率が高いほど塑性粘度および降伏値は低下した。

(2) A 法，B 法，C 法で得られた校正係数によって導出したレオロジー定数と，フロー試験から推定したレオロジー定数を比較すると，塑性粘度は B 法で校正した場合が両手法間の平均絶対パーセント誤差が小さく，降伏値は A 法で校正した場合が小さかった。

(3) A 法，B 法，C 法それぞれの校正係数によるレオロジー定数とフロー試験による推定値を比較すると，塑性粘度および降伏値どちらも値が小さい範囲では一致していたが，値の大きい範囲では両者に差が認められた。

(4) MPS 法による解析によってフロー試験の再現性を確認した結果，いずれの方法で導出したレオロジー定数を用いてもフロー曲線の再現性は概ね高かった。

(5) 解析の再現性をより詳細に検討するため，平均絶対パーセント誤差 MAPE を比較すると，C 法による校正係数を用いて導出したレオロジー定数を入力した場合が他水準より MAPE が小さく，レオロジー定数の妥当性が最も高い結果であった。

今後は，本研究の手法を用いてモルタルやコンクリートの標準物質 [6),10)]の校正方法や，得られたレオロジー定数の妥当性を検証することが課題である。

謝辞：株式会社フローリックの平野修也主席研究員，秋山五郎研究員には，試験実施および論文作成に多大なご協力をいただいた。ここに記して感謝の意を表す。

参考文献

1) 森田浩史，平野修也，高淵稔貴，清水寛太：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.45，No.1，pp.736-741，2023.7

2) 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，Vol.88，No.803，pp.1-11，2023.1

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, Jun.2012.

4) 清水寛太，東舟道裕亮，山田義智，森田浩史：MPS 法によるビンガム流体標準物質のレオロジー定数の認証値に関する検証，コンクリート工学年次論文集，Vol.46，No.1，pp.907-912，2024.7

5) 平野修也，山田義智，西祐宜，崎原康平：十字羽根回転粘度計を用いたセメントペーストの流動特性とレオロジー定数の測定に関する実験的研究，コンクリート工学年次論文集, Vol.41, No.1, pp.907-912, 2019.7

6) 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, Oct.2017.

7) 山田義智，東舟道裕亮，上原義己，崎原康平：セメントペーストのレオロジー定数測定とマーカー粒子粘塑性有限要素法によるセメントペーストフロー解析，日本建築学会構造系論文集，Vol.84，No.756，pp.139-148，2019.2

8) 山田義智，上原義己，崎原康平，浦野真次：MPS 法による高流動コンクリートのスランプフローシミュレーション, 日本建築学会構造系論文集，Vol.85，No.771，pp.663-672, 2020.5

9) 東舟道裕亮，山田義智：フロー試験によるセメントペースト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, Vol.86, No.784, pp.860-870, 2021.1

10) 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, Apr.2019