

論文 MPS 法によるビンガム流体標準物質のレオロジー一定数の認証値に関する検証

清水 寛太*1・東舟道 裕亮*2・山田 義智*3・森田 浩史*4

要旨: 本研究は、米国国立標準技術研究所で規格されたビンガム流体標準物質を対象として、十字羽根回転粘度計のレオロジー試験の MPS 法による再現によりビンガム流体標準物質のレオロジー一定数の認証値の妥当性を検証した。はじめに、平行平板間の流れを模した流動解析を行い、提案する MPS 法の有用性を検証した。次に、この MPS 法を用いて十字羽根回転粘度計によるレオロジー試験の再現を行った結果、解析結果は実測結果の傾向を概ね再現できたことから、レオロジー一定数の認証値の妥当性が確認できた。また、十字羽根と試料との流体速度の関係に起因する疑似的なチクソトロピー性が生じることを確認した。

キーワード: ビンガム流体標準物質, 回転翼型粘度計, MPS 法, レオロジー一定数認証値, チクソトロピー性

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いる。コンクリート施工の合理化には、流動解析によるコンクリートの充填予測が有効であると期待されている。流動解析においては、フレッシュコンクリートの流動特性の把握が重要であり、そのためには、基材となるセメントペースト（以下、ペーストと称する）やモルタルのレオロジー一定数の把握が必要である。

ペーストやモルタルのレオロジー一定数の測定には、二重円筒型回転粘度計や球引上げ試験装置を用いる場合が多い。二重円筒型回転粘度計による測定には、応力とせん断ひずみ速度の関係式が示されており、球引上げ試験には球の抗力とレオロジー一定数の関係式が提案されている²⁾。しかし、モルタルやコンクリートを測定対象とする場合、二重円筒型回転粘度計は内外円筒間の隙間(ギャップ)を小さくする必要のあることから、骨材が隙間内に収まらない場合や試験装置と流体界面でのすべりの影響によって、正確なレオロジー一定数を測定することが難しいことが指摘されている³⁾。また、球引上げ試験においても球と試料界面ですべりが生じるため、正確なレオロジー一定数を測定することが難しいとされている。

一方、回転翼型粘度計では、測定中に試料が攪拌されやすく、モルタルやコンクリートにおいても、ギャップの問題や界面のすべりによる影響が少なく、安定したレオロジー一定数の測定が期待される⁴⁾。しかし、この測定方法には理論式が存在せず、レオロジー一定数が既知の物質を用いた粘度計の較正が必要である。そこで筆者らの一部は、米国国立標準技術研究所(以下、NIST と称する)にてレオロジー一定数が認証されたビンガム流体標準物質

(以下、標準物質と称する) SRM2492⁵⁾および SRM2493⁶⁾を用いて、回転翼型粘度計の一種である十字羽根回転粘度計の較正と小型 L 形フロー試験の流動解析によって、NIST によるレオロジー一定数の認証値(以降、認証値と略す)の妥当性を検証した⁷⁾。

本論文では、認証値の更なる検証として、十字羽根回転粘度計による測定を MPS 法で再現することで、標準物質の認証値の妥当性を確認した。ここで、MPS 法は、対象とする空間に粒子(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。

本論文は、ビンガム流体の平行平板間の流れの理論解と MPS 解析結果との比較により、提案する MPS 法の有用性を示したのちに、十字羽根回転粘度計による標準物質のレオロジー試験を MPS 法で再現することで認証値の妥当性を検証した。また、試験方法に起因して生じる疑似チクソトロピー性に関する考察も併せて報告する。

2. 標準物質とレオロジー試験の概要

2.1 標準物質の概要

(1) 標準物質の使用材料および配(調)合

標準物質の使用材料と配(調)合を、表-1と表-2にそれぞれ示す。なお、表-2の計量値は文献6)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

表-1 標準物質の使用材料

使用材料	記号	物性値・主成分
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
ガラスビーズ	GB	直径: 1mm, 実測密度: 2.650g/cm ³

*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 総合技術部 技術職員 博士(工学)(正会員)

*3 琉球大学 工学部工学科 教授 博士(工学)(フェロー会員)

*4 東洋建設(株) 美浦研究所 主任研究員 (正会員)

表-2 標準物質の配(調)合

試料名	NIST区分	計量値(g)				密度 (g/cm ³)
		W	CS	L	GB	
CP	SRM2492	63.16	200.00	458.10	-	1.947
MT20	SRM2493	63.16	200.00	458.10	196.80	2.064
MT40	SRM2493	63.16	200.00	458.10	524.80	2.192

表-3 標準物質の認証値

試料	降伏値 τ_y^{SRM} (Pa)	塑性粘度 η^{SRM} (Pa·s)
CP	23.1	8.1
MT20	31.0	14.9
MT40	38.8	57.9

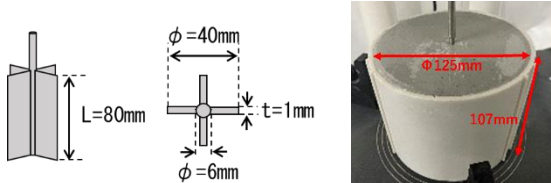


図-1 スピンドルの諸元 写真-1 試験の様子

各材料の実測密度から算出した。

CPは、練混ぜ水に相当するコーンシロップ水溶液と、石灰石微粉末から構成され、ペーストに相当する標準物質である。1mm径のガラスビーズは細骨材に相当する材料であり、ガラスビーズをCPに対して、体積分率で20%加えた試料がMT20であり、40%加えたものがMT40である。両試料はモルタルに相当する標準物質である。

標準物質の製造には、モルタルミキサーを用いた。CPの製造は文献5)を参考に、コーンシロップに蒸留水を注ぎ、十分に水溶するよう5分間攪拌した。その後、石灰石微粉末を投入して2分間練混ぜた。MT20およびMT40は文献6)を参考に、上記CPの製造工程後にガラスビーズを所定量投入して5分間練混ぜた。

(2) 標準物質の認証値について

表-3に、文献6)に示された各標準物質の認証値(レオロジー定数)を示す。なお、これら認証値は、NISTにおいて、回転粘度計を用いて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値である。検証方法の詳細は文献6)を参照されたい。

2.2 十字羽根回転粘度計によるレオロジー試験の概要

十字羽根回転粘度計によるレオロジー試験は、図-1に示すスピンドルを使用して、回転粘度計を用いて写真-1のように行った。本研究で採用した载荷プログラムは、各回転速度においてトルク値が数秒で定常状態に達することやMPS解析による計算時間の削減を考慮して、文献7)で採用した载荷プログラムA法の各回転速度の測定時間を5秒間に短縮した図-2に示す载荷プログラムを用いた。ここでは、図-2のように、回転速度Sを5→10→20→50→20→10→5rpmの順に5秒ごとにステップ式に変化させ、1秒に1回ずつトルクの測定を行った。

なお、標準物質の製造バッチごとの実測結果の差につ

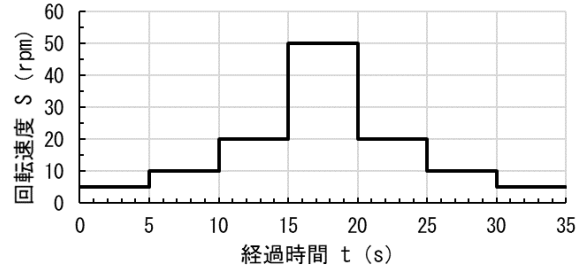


図-2 载荷プログラム

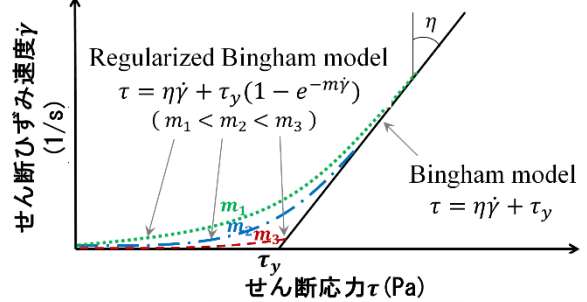


図-3 Regularized Bingham Model の概要

いても検証を行うために、文献7)での载荷プログラムA法の結果についても比較を行った。ここで、文献7)では、回転速度ごとの測定時間が30秒間であるため、各回転速度の測定時間のうち最初の5秒までの測定結果を抽出し、本研究の経過時間と揃えた。

3. MPS法の概要

3.1 流動構成式について

本研究で対象とするビンガム流体標準物質の流動構成式には、文献8)と同様に式(1)で表すRegularized Bingham Model(以下、RBMと略す)を適用した。

$$\tau = \eta \dot{\gamma} + \tau_y (1 - e^{-m \dot{\gamma}}) \quad (1)$$

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 は降伏応力(Pa)、 m は応力成長指数である。

図-3にRBMで表す流動曲線を示す。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。応力成長指数 m については4章にて後述する。

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 $\dot{\epsilon}_{ij}$ の関係を一般化し、RBMを適用すると、 τ_{ij} と $\dot{\epsilon}_{ij}$ の関係は、式(2)で表される⁸⁾。

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

ここで、 P は静水圧(Pa)、 δ_{ij} はクロネッカーデルタであり、 $\Pi = 2 \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}$ である。なお、粘塑性ひずみ速度テンソル $\dot{\epsilon}_{ij}$ (1/s)は、粒子速度 u_i (m/s)を用いて式(3)で表される。

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3)$$

3.2 運動方程式について

式(2)を流動構成式とする流体の運動方程式は式(4)となる⁸⁾。

$$\frac{Du_i}{Dt} = \frac{1}{\rho} \left\{ -\nabla P + \left(\eta + \frac{\tau_y(1-e^{-m\sqrt{\pi}})}{\sqrt{\pi}} \right) \nabla^2 u_i + 2\dot{\epsilon}_{ij} \frac{\partial \tau_y(1-e^{-m\sqrt{\pi}})}{\partial x_j} \right\} + F_i \quad (4)$$

ここで ρ は流体密度(kg/m³)、 F_i は重力加速度(m/s²)を表す。ところで、MPS法の離散化では、勾配(∇)、ラプラスアン(∇^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(4)をベクトル微分演算子にて次式のように展開する⁸⁾。

$$\frac{Du_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \{ \nabla P + \mu(\dot{\gamma}_{av}) \nabla^2 u_i + \{ \nabla u_i + (\nabla u_i)^T \} \nabla \mu(\dot{\gamma}_{av}) \} + F_i \quad (5)$$

ここで、 $\dot{\gamma}_{av}$ は平均せん断ひずみ速度(1/s)であり、 $\dot{\gamma}_{av} = \sqrt{\pi}$ である。また、式(5)では、式(4)の右辺第二項と第三項部分を式(6)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(7)となる。

$$\mu(\dot{\gamma}_{av}) = \eta + \tau_y \frac{(1-e^{-m\dot{\gamma}_{av}})}{\dot{\gamma}_{av}} \quad (6)$$

$$\nabla \cdot u_i = 0 \quad (7)$$

3.3 MPS法の解法について

MPS法は、式(5)の運動方程式における勾配 ∇ およびラプラスアン ∇^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(7)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 ∇ およびラプラスアン ∇^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。

4. MPS法のビンガム流体解析法としての有効性の確認

4.1 平行平板間のビンガム流れ解析の概要

本章では平行平板間の流れをMPS法による流動解析によって再現し、ビンガム理論解との比較を行うことで、MPS法のビンガム流体解析法としての有用性の確認を

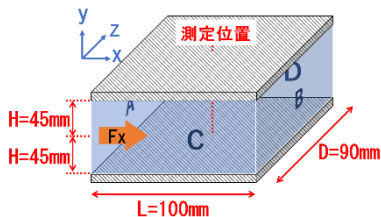


図-4 平行平板間の流れモデルの概略図

表-4 平行平板解析のパラメータ一覧

パラメータ	入力値	
応力成長指数m	1, 3, 100	
加速度 F_x (m/s ²)	0.49, 0.98, 1.225	
粒子径 (mm)	1	
粒子数 (個)	784179	
降伏値 τ_y (Pa)	CP	23.1
	MT20	31.0
	MT40	38.9
塑性粘度 η (Pa·s)	CP	8.1
	MT20	14.9
	MT40	57.9

行った。

図-4に平行平板間の流れモデルの概略図を示す。同図に示すように、平板(L:100mm×D:90mm)2枚を90mmの間隔を空けて平行に固定配置し、その平板間を流体試料で満たした。流入境界Aと流出境界Bには周期境界条件を用いた。また、境界CおよびDはスリップ条件とし、平板と流体試料の間はノンスリップ条件とした。

ここでは、x軸方向に加速度 F_x (m/s²)を与えた際の、平板中央部における各高さ(y方向)測定位置の流速 V_x (mm/s)の分布について理論解と解析解で比較した。

表-4に入力したパラメータ一覧を示す。RBMの応力成長指数mは1, 3, 100の3種類を設定し、加速度 F_x は3種類(0.49, 0.98, 1.225m/s²)を与えた。MPS法で用いた粒子径は1mmとし、粒子数を784,179個とした。なお、降伏値、塑性粘度は表-3に示される標準物質の認証値を入力した。

図-5にRBMによるせん断応力とせん断ひずみ速度の関係を示す。ここでは、一例としてMT20の関係を表しており、表-4に示したMT20の認証値(降伏値 τ_y^{SRM} : 31.0Pa, 塑性粘度 η^{SRM} : 14.9Pa·s)をもとに作成したビンガム直線も併せて示す。同図より、応力成長指数mが増大するにしたがって、ビンガム直線に近づき、m=100の場合ではビンガム直線に最も近い結果になることがわかる。

4.2 解析結果

図-6に流速 V_x と平行平板間の中心からの距離の関係について、ビンガム流体の理論解⁸⁾とMPS法による解析結果の比較を示す。破線はビンガム流体の理論解の結果を表し、マーカーはMPS法による解析結果を表す。ここで、△記号はm=1、○記号はm=3、×記号はm=100の場合である。図-6(a)はCP、(b)はMT20、(c)はMT40に対応する流体の理論解および解析結果である。

いずれの試料および加速度 F_x の場合でも、ビンガム流体の理論解では縦軸中央付近の範囲においてせん断ひずみ速度差がなく、流速 V_x が一定となるビンガム流体特有の栓流が確認できた。一方、MPS法による解析結果では、ビンガムモデルに最も近いRBMの応力成長指数m=100の場合には、低せん断ひずみ速度で見かけの粘度が非常に高いため、縦軸中央付近ではせん断ひずみ速度差

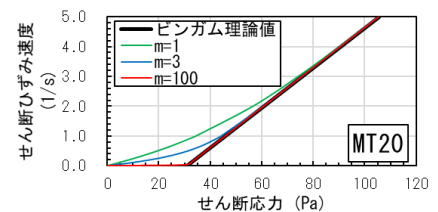


図-5 RBMのせん断応力とせん断ひずみ速度の関係

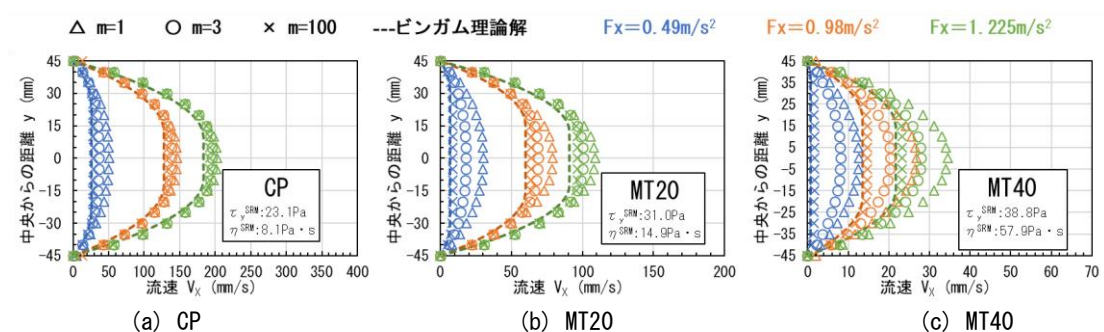


図-6 平行平板間の流動解析について解析値とビンガム理論値の流速分布の比較

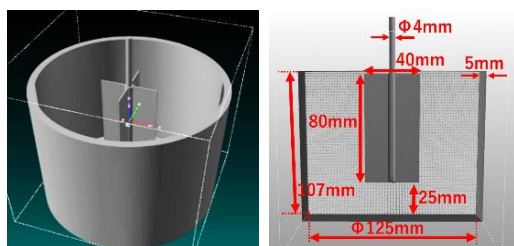


図-7 解析モデルの外観および断面図

が小さく、ほぼ栓流となることが確認され、流速 V_x も全域でビンガム流体の理論解と近い結果となった。

一方、低せん断ひずみ速度領域で見かけの粘度が低めの非ニュートン性のある RBM の応力成長指数 $m = 3$ および $m = 1$ の結果は、 y 軸方向全域でせん断ひずみ速度差が生じるため栓流が確認されず、縦軸中央部分ではビンガム流体の理論解よりも流速が高くなる傾向を示した。特に低せん断ひずみ速度領域での見かけの粘性が最も低い応力成長指数 $m = 1$ においては、その傾向が顕著であった。これらの結果は理論に則している。

ところで、文献6) では標準物質の粘度予測について、せん断ひずみ速度 $1.0(1/s)$ を境界として 2 つの領域に分割したモデルを示している。これは、標準物質が低せん断ひずみ速度領域において、ビンガム性から逸脱する非ニュートン性を有する事を示唆している。また、文献7) でも低せん断ひずみ速度領域での非ニュートン性が確認されている。

したがって、RBM を流動構成式とした MPS 法は、応力成長指数 m の値によって、近似的にビンガム流体や低せん断ひずみ速度領域での非ニュートン流体の流動特性を表すことができるため、標準物質のレオロジー試験を再現するのに有用であり、次章では、この MPS 法を用いて十字羽根回転粘度計のレオロジー試験の再現性について検討する。

5. MPS 法による十字羽根回転粘度計のレオロジー試験の再現性

5.1 再現モデルの概要

2.2 節にて示した十字羽根回転粘度計によるレオロジ

一試験の再現を MPS 法によって試みた。図-7 に十字羽根回転粘度計によるレオロジー試験の MPS 法の解析モデルの外観および断面を示す。本解析モデルでも写真-1 で示したように、円筒容器(内径 125mm、深さ 107mm)に試料を満たし、スピンドルの羽根上端部が試料上面から 2mm 下の位置となるように、実際のレオロジー試験の測定状況を再現した。スピンドルの载荷プログラムは図-2 に則った。

MPS 法で用いる粒子径は 1mm とし、粒子数を 1,275,016 個とした。時間刻みは 2.5×10^{-4} 秒で、流体と固体間の境界はノンスリップ条件で解析を行った。なお、トルクは十字羽根の板部分に各粒子を介して作用する法線方向の力と軸心までの距離を乗じたものを積算して求めた。降伏値および塑性粘度は表-3 で示した認証値を用いた。また、各試料の密度は表-2 で示した値を用いた。ここでは、低せん断ひずみ速度領域において非ニュートン性の影響を確認するため応力成長指数 m を 1, 3, 100 の 3 段階に設定し、実測値と比較した。なお、本解析では、チクソトロピー性は考慮していない。

5.2 標準物質のレオロジー試験結果と MPS 法解析結果の比較検討

図-8 に実測値と解析値の経過時間 t とトルク M の関係を示す。なお、実測値は今回の測定結果(図中◇記号)と文献7)の結果(図中□記号)を併せて示す。また、図中に回転速度 $S(\text{rpm})$ の値を付す。

実測値同士を比較すると、CP および MT20 の測定結果のばらつきはわずかであったが、MT40 においては今回の試験結果と文献7)の実測値がばらついた。この理由は不明だが、測定条件や標準物質の使用材料のロットの違いが影響した可能性が考えられ、今後の課題とする。

MPS 法による解析結果より、各試料において、回転速度 S が大きくなるにつれて応力成長指数 m によるトルク差は小さくなる傾向が示された。これは、図-5 に示す RBM のせん断応力とせん断ひずみ速度の関係から分かるように高せん断ひずみ速度域では、応力成長指数 m に関わらずビンガムモデルに一致するためである。

図-8 より、各試料とも解析結果と実測結果は同じよ

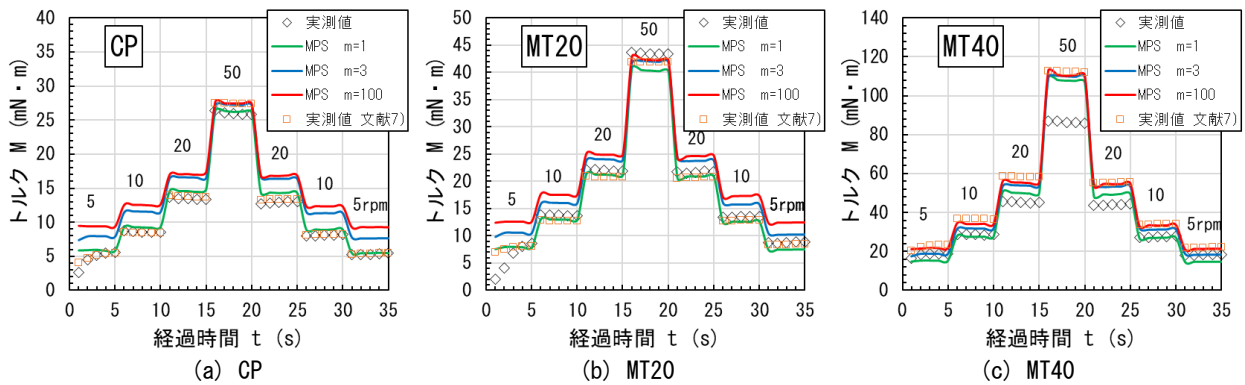


図-8 経過時間 t とトルク M の関係

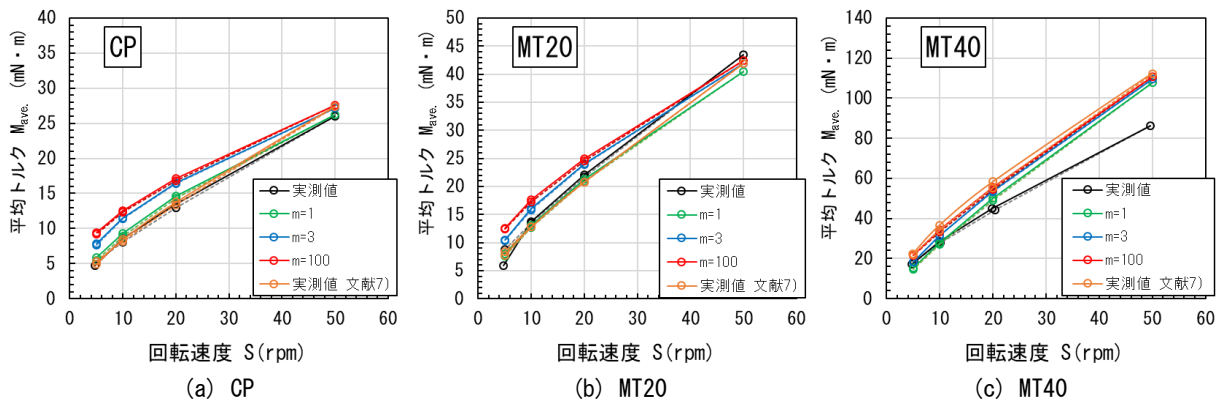


図-9 回転速度 S と平均トルク M_{ave} の関係

うな回転速度 S とトルク M の関係を示しているが、応力成長指数 m の違いにより実測値との一致度が異なった。CP および MT20 では $m = 1$ の場合に実測値により近い結果が得られた。一方、実測結果のばらつきの MT40 では、文献7) の実測結果と応力成長指数 $m = 100$ や $m = 3$ の解析結果が近い結果となった。今回の実測値では応力成長指数 $m = 1$ の場合が比較的近かったが、回転速度 S が増加するに従って、実測値と解析値の乖離が増大した。前述の通り、MT40 については実測結果のばらつきが認められており、今後、詳細な検討を行う。

以上より、標準物質は低せん断ひずみ速度域において非ニュートン性があり、それを表す応力成長指数 m の値は、実測値にばらつきがあることを考慮すると $m = 1 \sim 100$ 程度の範囲にあると考えられる。

各試料の実測値において測定開始時（経過時間 1 秒）のトルクが低く、3 秒程度までトルクが徐々に増大する傾向となった。これは十字羽根を試料に挿入した時に、羽根周りの試料が脆弱化してレオロジー定数が低下しているが、回転が進むことで試料が均質化したことで本来のレオロジー定数になりトルクが回復したものと推察されるが、確認には至っていない。

また、実測値や解析値において、経過時間 5 秒から 20 秒までの回転速度がステップ式に増大する往路区間に注目すると、いずれの試料においても回転速度の切り替わ

り初期に僅かにトルクが増大し、経過時間とともにトルクが減少することが確認された。一方、測定時間 20 秒から 35 秒までの回転速度がステップ式に低下する復路区間では、切り替わり初期にトルクが低下し、その後にトルクが上昇する現象が確認された。

この現象には流体に作用する慣性の法則が影響している。すなわち、回転速度が増加する往路区間の場合、前ステップで低い回転速度となっている羽根周囲の流体に対して、瞬間的に十字羽根により高い回転速度が作用することで流体抵抗が増加し、十字羽根に作用するトルクが上昇するが、十字羽根と流体の速度が平衡状態になるに伴い、トルクが下がり安定すると推察される。一方、復路区間では、前ステップにおいて高い回転速度となっている羽根周辺の流体に対して、十字羽根が前ステップに比べて小さい回転速度に切り替わるため流体抵抗が減り、十字羽根に作用するトルクが減少するが、十字羽根と流体の速度が平衡状態になるに伴い、トルクが上がり安定すると推察される。

図-9 に十字羽根回転粘度計による回転速度 S と平均トルク M_{ave} の関係を示す。なお、平均トルク M_{ave} は、各回転速度で測定したトルク 5 点の平均値である。同図では実測結果や応力成長指数 m の違いによる解析結果をそれぞれ色違いで表している。ここでは、回転速度がステップ式に増加していく往路区間の結果を直線で結び、減

少していく復路区間の結果を点線で結んだ。

図-9 からも、前述の図-8 と同様に実測結果のばらつきを考慮すると解析に用いる応力成長指数 m の値は $m = 1 \sim 100$ 程度の範囲であると考えられる。また、図-8 と図-9 の両図より、実測結果と MPS 法による解析結果がほぼ同じとなることから、NIST による各標準物質の認証値は妥当であると判断できる。

図-9 より、いずれの水準の場合でも、点線で結んだ復路区間は実線の往路区間よりもトルクが僅かではあるが減少する傾向を示すことが分かる。今回の解析ではチクソトロピー性を考慮していないため、先述の通り、回転速度が増加する往路区間では、前ステップで低い回転速度となっている羽根周囲の試料に対して、十字羽根に高い回転速度が作用することで、一時的に十字羽根に作用する流体抵抗が増してトルクが上昇するが、回転速度がステップ的に減少する復路区間では、前ステップにおいて高い回転速度となっている羽根周辺の試料に対して、十字羽根が前ステップに比べて小さい回転速度に切り替わるため流体抵抗が減り、トルクが僅かに低下することが影響したためと考えられる。

図-8 で示した実測結果の往路過程の各回転速度での経過時間に伴うトルク減少や、図-9 の往復路各区間での同一回転速度間のトルクの差は、チクソトロピー性を考慮しない解析でも同様の結果が得られている。これらの現象は、十字羽根周囲の流体に作用する慣性の法則によって生じる疑似的なチクソトロピー性であり、懸濁液内の凝集構造の破壊と回復の時間的なずれによって生じる物性としてのチクソトロピー性ではないと考察できる。

6. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) MPS 法による平行平板間流れの解析結果は、応力成長指数 m を変化させることで、近似的にビンガム流体の流動特性や低せん断ひずみ速度域での非ニュートン性の流動特性を表せた。よって、MPS 法は低せん断ひずみ速度域で非ニュートン性を有するビンガム流体標準物質の流動解析法として有用である。
- (2) 標準物質 MT40 は、文献 7) と今回測定の実測値の差が大きいことが認められた。この原因は不明であり、今後詳細な検討を行う必要がある。
- (3) 十字羽根回転粘度計によるレオロジー試験を MPS 法による解析で再現した結果、実測結果と解析結果がほぼ同じとなることから、NIST による各標準物質の認証値は妥当であると判断できる。また、標準物質の低せん断ひずみ速度域においては非ニュートン性があり、それを表す応力成長指数 m の値は、実測値にばらつきがあることを考慮すると、 $m = 1 \sim 100$ 程度の

範囲が該当する。

- (4) レオロジー試験およびチクソトロピー性を考慮しない MPS 解析において、往路過程の各回転速度において経過時間に伴うトルク低下の現象が確認された。また、復路区間において往路区間よりもトルクが僅かに減少した。これらの現象は十字羽根周囲の流体に作用する慣性の法則によって生じる疑似的なチクソトロピー性であり、懸濁液内の凝集構造の破壊と回復の時間的なずれによって生じる物性としてのチクソトロピー性ではないことを確認した。

謝辞：株式会社フローリックの平野修也主席研究員には、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) 山田義智，富山潤：セメントペーストの流動曲線予測に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.2，pp.20-24，2008.7
- 2) 小門武，宮川豊章：スランプフロー試験による高強度コンクリートのレオロジー定数評価法に関する研究，土木学会論文集，No.634/V-45，pp.113-129，1999.11
- 3) 三島直生，畑中重光，大村修太郎：試料の変形状態が回転粘度計の測定結果に及ぼす影響に関する基礎的実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，2007.7
- 4) 和美広喜，笠井浩，柳田克巳，亀田泰弘：回転翼型粘度計による高強度コンクリートの流動特性値測定方法に関する実験的研究，コンクリート工学論文集，第1巻第1号，1990.1
- 5) 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.
- 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) 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
- 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，第85巻，第771号，pp.663-672，2020.5