

# 論文 サスペンションの流動曲線群が結ぶ焦点位置の時間変化挙動についての粘度特性に基づいた考察

田中 俊成\*1・岸 利治\*2

**要旨:** 高性能 AE 減水剤の添加率を変えたセメント系材料の流動曲線群は、見かけせん断速度—せん断応力座標系の負のせん断速度領域において焦点を結び、さらにその焦点位置を回転速度切替後からの経過時間ごとに整理すると、正の傾きを持った直線上にプロットされるという規則性が報告されており、この規則性の要因について、塑性粘度と降伏値の時間変化量が高性能 AE 減水剤添加率に依存して変化することだと特定した。さらに、その傾向が凝集構造に基づいた粘度モデルを用いて、焦点位置の時間変化の規則性をサスペンションの応力時間依存性の一般的解釈に基づいて説明を試みた。

**キーワード:** 流動曲線, 焦点の時間シフト, 高性能 AE 減水剤, 塑性粘度, 降伏値, 凝集構造

## 1. はじめに

コンクリートの打設作業の効率化, および, 均質な充填による完成後の構造物の品質確保という観点からフレッシュコンクリートの流動特性を把握することは重要な事項である。フレッシュコンクリートの流動性にはモルタルやセメントペーストの流体的性質が密接に関連している。松本<sup>1)</sup>は共軸二重回転粘度計を用いて、高性能 AE 減水剤(以後 SP)添加率を様々に変えたモルタルに、段階的にせん断を与えたときに得られる、応力から見かけせん断速度とせん断応力関係(流動曲線)を描いたところ、流動曲線群は負のせん断速度領域で焦点を結ぶことを示している。さらに、焦点位置を、ローター回転速度変化後からの経過時間ごとに整理すると、正の傾きを持つ直線上をシフトしていくことを報告している。山崎<sup>2)</sup>は、焦点の時間シフト現象がセメントペーストにおいても同様に再現されることを確認している。山崎はこれら焦点の時間シフト挙動の要因として、2つの要因による応力時間変化挙動が影響すると予測している。第1に、サスペンションのチキソトロピー性による応力変化である。これは、セメントペーストをはじめとする凝集性のサスペンションの粘度特性であり、同じせん断速度を与え続けたとき、時間経過に伴い粘度が減少していくというものである<sup>3)</sup>。第2に、時間経過に伴う流動場の拡大・縮小である。回転粘度計による測定の際には外円筒とローターに間の試料のすべてが流動し、せん断を受ける状況が好ましいが、実際の測定では流動が外円筒まで達しない、部分流動となることがある<sup>2)</sup>。このような状況においては、ローターの回転速度に応じて流動域が変化し、せん断応力の測定結果に影響を与えるとしている。焦点の時間シフトについて以上のような予測がなさ

れているが、実際に得られた測定結果に対し、チキソトロピー性や流動場の時間変化の影響の有無は確認されていない。そこで本研究ではまず、石灰石微粉末ペーストを使用し、回転粘度計によるせん断応力測定を行い、焦点の時間シフト現象が再現されるかを確認した。石灰石微粉末を使用したのは、セメントと同様に凝集性の粉末であるが、不活性であり、水和によるせん断応力変化の影響を排除できるためである。そして、得られたせん断応力の結果を分析し、応力の時間変化挙動のうち、焦点位置の時間変化現象に影響する要素を特定した。

## 2. 実験概要

### 2.1 試料の配合と練混ぜ

本研究では、石灰石微粉末と水の水粉体比(W/P)を27%とし、SP添加率を1.11%~1.26%(粉体重量比)の間で5段階設定した。使用した水は水道水であり、SPは、ナフタレンスルホン酸系である。表-1に石灰石微粉末ペーストの配合を示す。練混ぜは自公転ミキサーを使用し、1000rpmで1分間練り混ぜた。

### 2.2 回転粘度計によるせん断応力測定

練り混ぜ終了後、1分間静置し、T社の共軸二重円筒回転粘度計によりせん断応力測定を開始した。使用したローターの半径は4.70mm、外円筒の半径は9.5mmである。設定した測定プログラムを図-1に示す。ローターの回転速度を5rpmから35rpmまで、5rpmずつ段階的に

表-1. 石灰石微粉末ペーストの配合

W/P(%)	SP添加量 (P×%)
27	1.11, 1.15, 1.19, 1.22, 1.26

\*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤学専攻 (学生会員)

\*2 東京大学生産技術研究所 教授 博(工)(正会員)

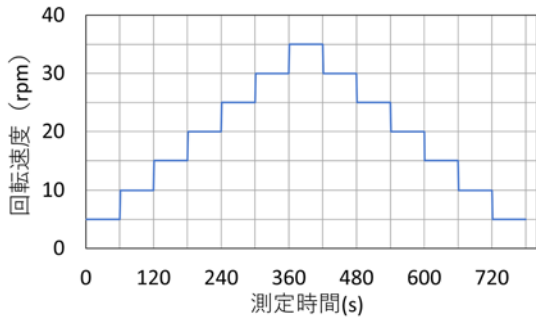


図-1 回転粘度計による測定ステップ

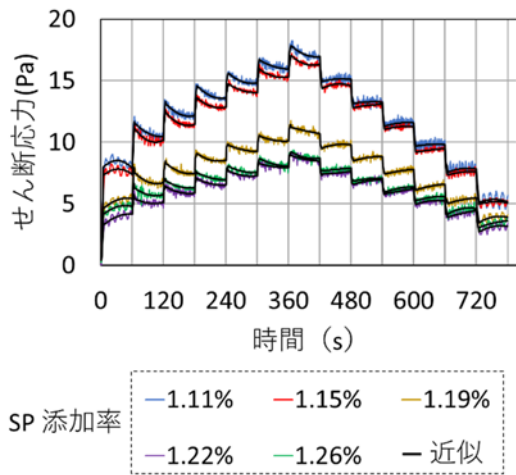


図-2 せん断応力のデータのノイズ処理

上昇させ(上昇過程とする), その後再び 5rpm まで減少させた(下降過程とする)。各ステップにおける測定時間は 60 秒とした。見かけせん断速度は, rpm の関数であり, 以下の式(1)を用いて計算する。

$$\dot{\gamma} = k \cdot \Omega \quad (1)$$

ここに,  $\dot{\gamma}$  は見かけせん断速度[1/s],  $k$  はローターおよび外円筒の寸法で決まる定数[-],  $\Omega$  は角速度[rad/s]である。本実験においては,  $k=0.277$  である。

### 2.3 応力時刻歴データのノイズ処理

回転粘度計を用い, 測定試料に図-1 の測定ステップを与えた際のせん断応力測定結果を, 図-2 に色付き線以示す。測定は, SP 添加率を表-1 のように設定した 5 種類の試料について行った。図-2 で示されるように同一回転速度内で正弦波的なノイズが観測された。既往の研究の実験結果<sup>2)</sup>中でも確認されており, 粘度計内部で生じる回転速度に比例したノイズによるものであるとされる。実際, 図-2 では 5rpm の時にはノイズのピークが 5 回現れており, rpm が高くなるにつれ, ノイズピークの発生頻度が高くなっていることが確認できる。本研究では, 機械由来のノイズを除去するために, 二次関数による近似を行った。図-2 中で黒実線が二次関数近似した測定データである。なお, 近似は測定ステップごと



図-3 焦点シフト算出までのデータ処理フロー (下降過程の場合)

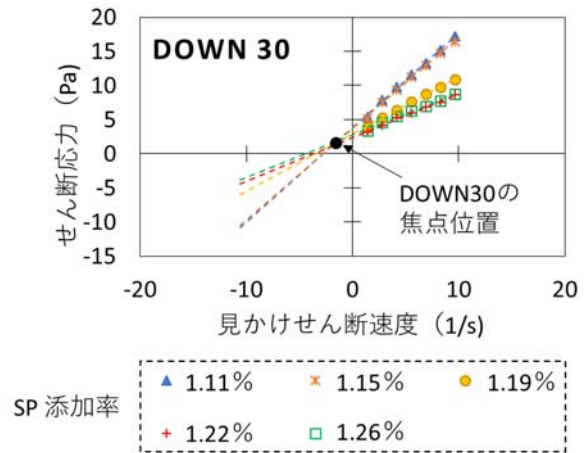


図-4 下降過程, 経過時間 30 秒の焦点

に行った。さらに, すべての測定ステップで rpm 変更後 5 秒程度までは直前のステップから遷移するために応力が急激に変化しており, その後応力の変化が緩慢になっていたことから, rpm 変更後 0 秒から 5 秒と 5 秒から 60 秒までを別で近似した。

### 2.4 流動曲線群の焦点位置の決定

本研究では, 既往の研究<sup>1), 2)</sup>に倣い, 上昇過程と下降過程を区別し, 焦点を算出した。図-3 にノイズを除去したせん断応力の測定結果から, 下降過程の流動曲線群の焦点位置とそのシフトを算出するデータ処理の流れを示す。SP 添加率  $x(P \times \%)$  の応力時刻歴データの,  $\Omega$  rpm の測定ステップにおける, rpm 変更後  $t$  秒時点のせん断応力データを  $\tau(x, \Omega, t)$  と表現する。さらに, 添え字 UP と DOWN を付し,  $\tau(x, \Omega, t)_{UP}$  や  $\tau(x, \Omega, t)_{DOWN}$  とすることにより, 上昇過程と下降過程のせん断応力データを区別する。例えば, 下降過程における 1 つの焦点位置は, 図-3 のフローに沿って, 以下のように算出される。 $x=x_i, t=t_i$  と固定し,  $\Omega=5, 10, \dots, 35$  とすれば, 7 点の  $\tau(x_i, \Omega, t_i)_{DOWN}$  のデータが得られる。せん断応力のデータを式(1)で計算される見かけせん断速度によって整理することにより, SP 添加率が  $x_i$

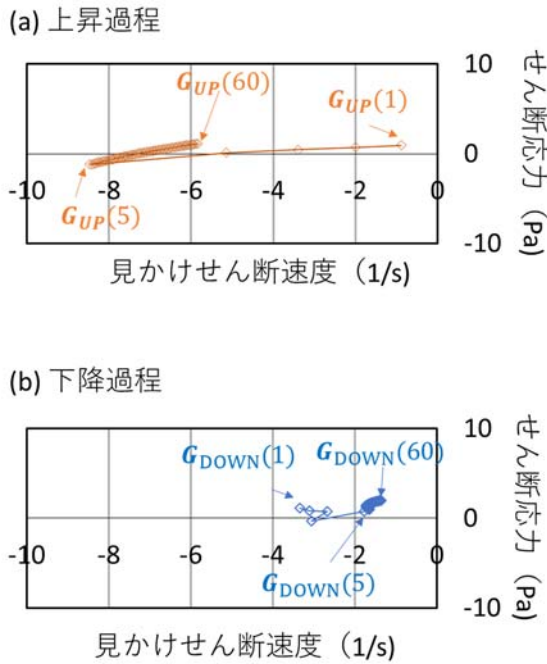


図-5 (a)上昇過程と(b)下降過程における  
焦点位置の時間シフト

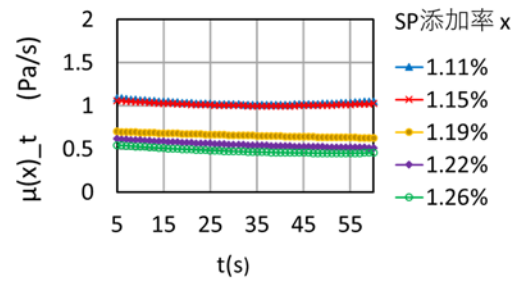
で下降過程，経過時間  $t_l$  における流動曲線  $F_{DOWN}(x)_t_l$  が得られる。5 種類の SP 量について  $F_{DOWN}(x)_t_l$  を求めることにより，5 本の流動曲線が得られる。5 本の流動曲線は見かけせん断速度  $\dot{\gamma}$ -せん断応力  $\tau$  座標上で，互いに交差し，計 10 の交点を結ぶ。これら 10 点の交点の  $\dot{\gamma}$  座標， $\tau$  座標をそれぞれ平均することで，下降過程の  $t_l$  における焦点  $G_{DOWN}(t_l)$  を得る。図-4 には，例として  $G_{DOWN}(30)$  および該当する流動曲線群を示す。最後に， $t = 1, 2, 3, \dots, 60$  として，60 個の  $G_{DOWN}(t)$  を見かけせん断速度-せん断応力座標系にプロットすることで，下降過程の焦点シフトを得る。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 焦点位置の時間変化

図-5 に上昇過程および下降過程の焦点シフトを示す。図-5(a)に示すように上昇過程では， $t=1$  から  $t=5$  までは，左下がりに焦点位置が変化し， $t=5$  から  $t=60$  までは，焦点位置は右上がりに連続的に推移している。一方，図-5(b)の下降過程においては， $t=1$  から  $t=5$  までは焦点位置は，緩やかに右下がりに推移し， $t=5$  から  $t=60$  までは，焦点位置は右上がりに推移している。これらの焦点位置の時間変化の傾向は山崎らがセメントペーストで行った実験と一致する。本研究では， $t=5$  を境に焦点位置の推移傾向が急激に変化しており，これは  $t=5$  を境に別の近似処理をしたためだと考えられる。だが，近似処理をしていない山崎の研究<sup>2)</sup>でも  $t=5$  付近で焦点位置の推

#### (a)塑性粘度の時間変化



#### (b)降伏値の時間変化

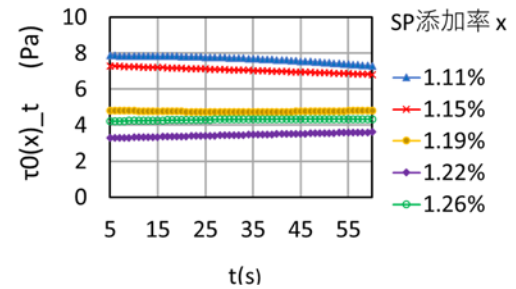
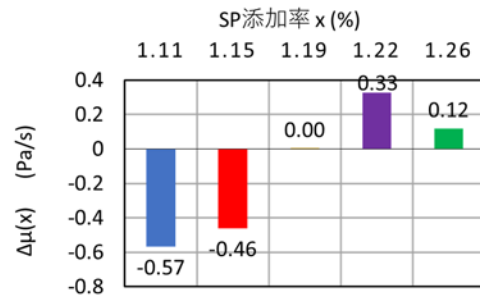


図-6 (a)塑性粘度の時間変化と(b)降伏値の時間変化

#### (a)SP添加率ごとの塑性粘度の時間変化量



#### (b)SP添加率ごとの降伏値の時間変化量

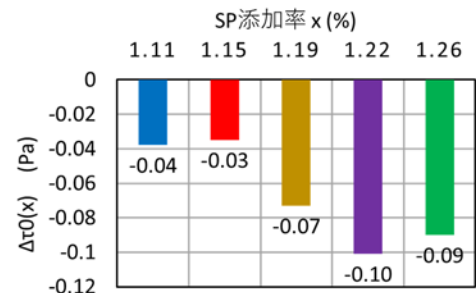


図-7 (a)塑性粘度の時間変化量と(b)降伏値の時間  
変化量

移傾向の緩やかな変化が報告されており，その要因については，元のせん断応力時刻歴のデータ  $\tau(x, \Omega, t)_{UP}$  および  $\tau(x, \Omega, t)_{DOWN}$  において， $t=1$  から  $t=5$  程度までは rpm 変更に伴う遷移領域にあり， $t=5$  程度以降とは，せん断応力の変化傾向が異なるためであると説明さ

れている<sup>2)</sup>。山崎, 松本はセメントペースト, モルタルにおいて  $t=5$  程度以降の焦点位置の変化は傾きが正の直線状になることを指摘しており, この変化の規則性は, 本実験の石灰石微粉末ペーストにおいても再現された。

### 3.2 焦点の右上がり推移の要因の特定

$t=5$  以降, すなわち, rpm 変更後の遷移段階以降の焦点位置変化が右上がりになる要因を検討する。焦点のシフトがより顕著であった上昇過程のデータを用いて検討する。2.4 で示したように,  $t=t_i$  における焦点位置は,  $x=1.11, 1.15, 1.19, 1.22, 1.26$  に対して求めた, 5本の流動曲線群  $F_{UP}(x)_t$  の交点群によって決定される。したがって, 焦点位置は, 5本の流動曲線群の傾きと切片に依存する。直線近似した流動曲線の傾きはいわゆる塑性粘度であり, 切片はいわゆる降伏値である。ここで, 流動曲線  $F(x)_t$  の塑性粘度と降伏値を  $\mu(x)_t, \tau_0(x)_t$  と表現する。図-6に  $\mu(x)_t, \tau_0(x)_t$  の時間変化を示す。さらに, 塑性粘度および降伏値の  $t=5$  から  $t=60$  までの時間変化量  $\Delta\mu(x), \Delta\tau(x)$  を図-7に示す。 $\Delta\mu(x), \Delta\tau_0(x)$  は, 以下の式(2), (3)により定義した。

$$\Delta\mu(x) = \mu(x)_{60} - \mu(x)_5 \quad (2)$$

$$\Delta\tau_0(x) = \tau_0(x)_{60} - \tau_0(x)_5 \quad (3)$$

図-6, 図-7より, 以下の傾向(i), (ii)が示される。

(i) 図-6(a)より, 塑性粘度  $\mu$  は, 時間経過とともに減少し, さらに図-7(a)よりその変化量の絶対値  $|\Delta\mu|$  は SP の添加率が多いほど大きい。つまり, 塑性粘度の時間変化量は SP 添加率と負の相関がある。二つの SP 添加率  $x$  について少ない方を  $x_{small}$ , 多い方を  $x_{large}$  と表記すると, この傾向は次の式(4)で表現できる。

$$\Delta\mu(x_{small}) > \Delta\mu(x_{large}) \quad (4)$$

(ii) 図-6(b), 図-7(b)より SP 添加率が少ない場合には降伏値  $\tau_0$  は時間経過とともに減少し, 逆に SP 添加率が多い場合には降伏値  $\tau_0$  は時間経過とともに増加する。つまり, 降伏値の時間変化量  $\Delta\tau_0$  は SP 添加率と正の相関があり, この傾向は次の式(5)で表現可能である。

$$\Delta\tau_0(x_{small}) < \Delta\tau_0(x_{large}) \quad (5)$$

さらに, 図-2, 図-4より傾向(iii)が示される。

(iii) 図-2より, 同一の  $\Omega$  および  $t$  の下では SP 添加率  $x$  が多いほど  $\tau$  は小さい。その結果, 図-4のように, SP 添加率が多い場合の流動曲線は下に位置し, SP 添加率が少ない場合の流動曲線は上に位置する。せん断応力と, SP 添加率には負の相関があり, この傾向は次の式(6)で表現可能である。

$$\tau(x_{small}, \Omega, t) > \tau(x_{large}, \Omega, t) \quad (6)$$

なお, SP 添加率が 1.22 と 1.26 の組み合わせに着目すると, (i), (ii), (iii)の傾向は当てはまらない。このようなケースは, 既往の研究<sup>2)</sup>にも見られ, 実験時の誤差の可能性はあるが, 原因は本研究では特定できず, 今後の検討

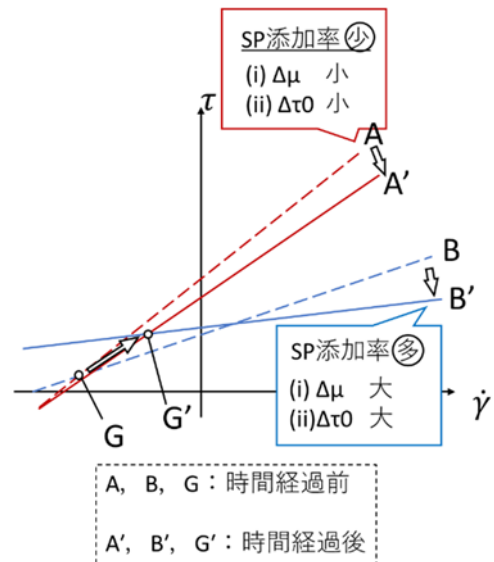


図-8 焦点の右上がりシフト発生要因

課題とする。

以上で確認した塑性粘度と降伏値の時間変化傾向, および流動曲線の位置関係を, 図-8のような時間とともに塑性粘度と降伏値が変化する単純な二直線の関係に帰着すると, その交点は右上にシフトする。同様の交点のシフトがすべての流動曲線の交点に対して起こることにより, 交点群の平均的位置である焦点も結果的に右上にシフトしていくと考えられる。

### 3.3 塑性粘度と降伏値の時間依存性

(i)~(iii)の傾向が発現する要因について, サスペンションの粘度特性の観点から考察する。まず, (iii)の傾向については, 多くの研究で報告されているように, SP の粒子分散作用によるものと考えられている<sup>4)</sup>。次に(i)の傾向について考察する。本研究のように, 段階的に回転速度を変化させていくせん断応力測定はよく行われるが, 取得される塑性粘度や降伏値の情報は, 直接的にペーストの材料特性を示すものではなく, 各測定ステップの経過時間  $t$  秒のせん断応力値を線形につなぎ合わせた結果得られる, 実験条件に依存する値であることに注意する。つまり, 塑性粘度や降伏値は, 各測定ステップにおけるせん断応力の時間変化情報を反映している。塑性粘度は, 流動曲線の傾きであるので次の式で表現できる。

$$\mu = \{\tau(\Omega_{high}) - \tau(\Omega_{low})\} / (\dot{\gamma}_{high} - \dot{\gamma}_{low}) \quad (7)$$

ここで,  $\dot{\gamma}_{high}, \tau(\Omega_{high})$  は高 rpm における見かけせん断速度とせん断応力であり,  $\dot{\gamma}_{low}, \tau(\Omega_{low})$  は低 rpm における見かけせん断速度とせん断応力である。式(7)により, 式(4)は以下のように書き直すことができる。

$$\{\Delta\tau(x_{small}, \Omega_{high}) - \Delta\tau(x_{small}, \Omega_{low})\} > \{\Delta\tau(x_{large}, \Omega_{high}) - \Delta\tau(x_{large}, \Omega_{low})\} \quad (8)$$

式(8)中で例えば,  $\Delta\tau(x_{small}, \Omega_{high})$  は SP 添加率  $x_{small}$  の時の, 高い回転速度における, せん断応力の時間変化量

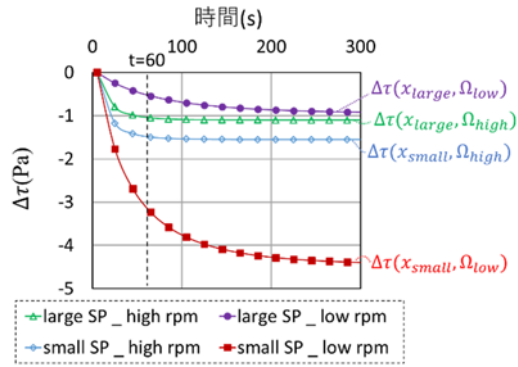


図-9 SP 添加率とせん断速度に依存したせん断応力の時間変化

を表す。式(8)のような大小関係になる理由を検証するには、せん断応力の時間変化量を、SP 添加率とせん断速度の両観点から知る必要がある。そこで、既存の粘性変化モデルの枠組みに則り、式(8)の関係性が成立する状況を数値解析的に検証した。セメントペースト等のサスペンションがチキントロピー挙動を示すことはよく知られた事実であり、これは、同じせん断速度でせん断をし続けたときに時間経過とともに粘度が減少したり増加したりする現象である。この現象は、サスペンション内部の凝集体構造の変化によって説明される<sup>5)</sup>。サスペンションがせん断を受けると、内部の凝集体がせん断によって破壊され、凝集体内部の不動水が解放されることで粘度が減少するが、同時に、せん断を受けることで、凝集体同士が衝突し、より大きな凝集体となり、さらに多くの不動水を取り囲むことによって粘度が回復する凝集効果もある<sup>6)</sup>。高いせん断速度では、凝集破壊が卓越し、系全体として発揮されるせん断応力は時間経過に伴い、減少する。一方で、低いせん断速度または静止状態では、凝集回復が卓越し、系全体のせん断応力は時間経過に伴い増加する。山田は、以上のようなペーストの凝集状態を考慮した粘度式<sup>6)</sup>を提案しており、それに倣えば、水和反応性のない石灰石微粉末ペーストの見かけ粘度  $\eta$  は以下の式(9)のように書ける。

$$\eta = \eta_0 \left[ \left( 1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right) \left\{ \frac{\lambda}{\lambda + \omega} - \frac{k(\lambda + \omega) - \omega}{\lambda + \omega} e^{-(\lambda + \omega)t} \right\} \right]^{-\beta} \quad (9)$$

$\eta_0$  は水の粘度、 $\phi$  および  $\phi_m$  はサスペンション中における粒子の体積分率、粒子の最密充填体積分率、 $\beta$  は粒子形状によって変化する形状係数である。 $k$  は凝集状態の初期値、 $\lambda$  は凝集破壊速度を表す変数、 $\omega$  は回復速度を表す変数であり、山田の実験結果に対しては、それぞれ、以下の式(10)、(11)のように表現される。

$$\lambda = \left( -0.025 \frac{W}{P} + 2.04 \right) \times 10^{-3} \times \dot{\gamma}^{-0.017 \frac{W}{P} + 1.005} \quad (10)$$

$$\omega = \left( -0.017 \frac{W}{P} + 11.14 \right) \times 10^{-3} \quad (11)$$

表-2  $k$  の値の設定例

ケース	kの値		
	パターン1	パターン2	パターン3
large SP_high rpm	0.4	0.5	0.6
large SP_low rpm	0.8	0.85	0.9
small SP_high rpm	0.45	0.55	0.65
small SP_low rpm	0.85	0.9	0.95

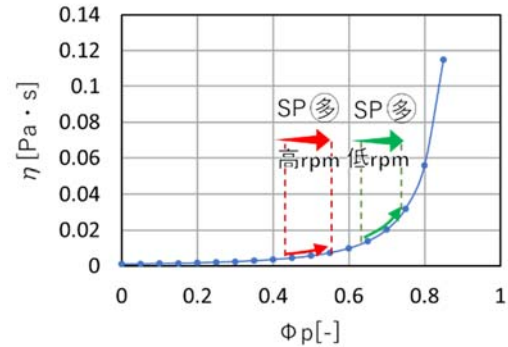


図-10  $\phi_p$  と粘度の関係

ここで、 $W/P$  は水粉体比であり、 $\dot{\gamma}$  はせん断速度である。一方で、SP が凝集構造に与える影響について、熊野<sup>4)</sup>が SP 添加したセメントペーストの粘度の経時変化を調べた結果によれば、SP 添加率が多いほど、粘度の上昇速度は遅くなる。このことから、SP 添加は、凝集回復を抑制する効果があると考えられる。以上の考察から、石灰石微粉末ペーストに一定のせん断速度を载荷した場合のせん断応力を経時的に計算した。図-9 にその結果を示す。縦軸の値は、 $t=0$  のせん断応力からの変化量  $\Delta \tau$  である。 $\Delta \tau$  が負であることは、せん断応力が時間経過とともに減少していくことを意味する。計算の際のパラメータ設定は以下のようにした。 $\eta_0=1.0[\text{mPa} \cdot \text{s}]$  とし、 $W/P$ 、 $\phi$  は配合をもとに、それぞれ 0.27、0.51 とした。 $\phi_m$  と  $\beta$  については、伊波らの報告<sup>7)</sup>を参考に、球状粒子の理論最密充填体積分率 0.74 および、球状粒子の形状係数 2.5 を採用した。本解析の目的は実験値の精緻な再現ではなく、SP 添加率やせん断速度に応じた、せん断応力減少の大小関係を比較することであるため、パラメータについては最も基本的なケースである、球状粒子からなるサスペンションを想定した値を採用した。高 rpm のケースとして、 $\dot{\gamma} = 15$ 、低 rpm のケースとして、 $\dot{\gamma} = 1.0$  と設定した。また、SP 添加率が多いとき、凝集回復が抑制される<sup>4)</sup>ことを想定し、式(9)の  $\omega$  を  $\omega/x$  に置き換えて計算した。 $x$  は 1.11 と 1.26 とした。以上の条件の下、解析した結果、例えば表-2 に示した 3 パターンのように  $k$  を設定したところ、式(8)の傾向が再現された。図-9 には、パターン 2 の場合の計算結果を示している。表-2 中に示されるような  $k$  の組み合わせについては整合性のある解釈ができる。SP 添加率が大きいくほど、分散性<sup>4)</sup>が増すた

め $k$ は小さくなる。また、高 rpm の場合はせん断開始時点で、すでにせん断履歴をえているため低 rpm の場合より $k$ が小さくなる<sup>6)</sup>。したがって、表-2のような $k$ の組み合わせは妥当であると考えた。さらに、 $k$ が表-2で示したような組み合わせを取る場合、式(8)が成立する理由をモデルの枠組みに沿って説明できる。まず、以下の式(12)は式(8)と同値である。

$$\{\Delta\tau(x_{large}, \Omega_{low}) - \Delta\tau(x_{small}, \Omega_{low})\} > \{\Delta\tau(x_{large}, \Omega_{high}) - \Delta\tau(x_{small}, \Omega_{high})\} \quad (12)$$

式(12)及び図-9によると、SP添加率の違いによる $\Delta\tau$ の差は低 rpmの方が高 rpmよりも大きい。見かけ粘度は、最終的に式(9) {}内の式で表現される凝集状態( $\Phi_p$ )はその時点の凝集状態に応じて0から1の値を取り、その変化は凝集破壊速度と凝集回復速度に依存する。 $\Phi_p$ と見かけ粘度の関係は図-10に示されるような指数関数となる。まず高 rpmと低 rpmを比較すると、高 rpmでは凝集破壊が卓越するため $\Phi_p$ は低い範囲に位置し、さらに、その付近でSP添加率に応じて $\Phi_p$ が変化する。逆に、低 rpmの場合、 $\Phi_p$ は高い範囲で変化する。関数が指数関数形であるため、SP添加率による粘度の差は $\Phi_p$ が高い範囲で変化する低 rpmの場合の方が大きくなる。せん断応力 $=\eta \times \dot{\gamma} \propto \eta \times \text{rpm}$ であるが、rpmを増加させたとき見かけ粘度は指数関数的に減少するのだから、せん断応力の増減の傾向に対しては $\Phi_p$ の変化が支配的要因となる。以上より、式(12)が成り立つ状況を説明可能である。そして、式(12)が成り立つならば、式(8)すなわち傾向(i)が成り立つ。

最後に式(5)、すなわち傾向(ii)の発生要因を考察する。降伏値 $\tau_0$ は以下の式(13)より求められる。

$$\tau_0 = \frac{\tau(\Omega_{low}) \times \dot{\gamma}_{high} - \tau(\Omega_{high}) \times \dot{\gamma}_{low}}{\dot{\gamma}_{high} - \dot{\gamma}_{low}} \quad (13)$$

ここで、 $\dot{\gamma}_{high}$ は高 rpmのときの見かけせん断速度、 $\tau(\Omega_{high})$ はその時のせん断応力である。同様に $\dot{\gamma}_{low}$ は低 rpmのときの見かけせん断速度、 $\tau(\Omega_{low})$ はその時のせん断応力である。式(13)より、 $\tau_0$ の時間変化 $\Delta\tau_0$ は式(14)のように表現可能である。

$$\Delta\tau_0 = \frac{\dot{\gamma}_{high} \times \Delta\tau(\Omega_{low}) - \dot{\gamma}_{low} \times \Delta\tau(\Omega_{high})}{\dot{\gamma}_{high} - \dot{\gamma}_{low}} \quad (14)$$

式(14)より、 $\Delta\tau_0(x_{large})$ と $\Delta\tau_0(x_{small})$ の差分をとり、前述した関係式(12)を代入することにより、式(5)の成立が導かれる。以上の議論より、傾向(i)が成り立つとき、傾向(ii)が同時に成り立つことが示される。

## まとめ

本研究で得られた知見を(1)、(2)、(3)にまとめ、今後の課題を(4)に述べる。

(1)セメントペーストやモルタルで確認されていた流動

曲線の焦点が時間変化とともに右上がりに変化していく現象が石灰石微粉末ペーストでも再現された。

(2)焦点位置が右上がり時間変化していく要因が、塑性粘度と降伏値の時間変化挙動がSP添加率に依存して変化することだと特定した。そして逆に、塑性粘度や降伏値が、SP添加率やせん断時間によって変化していく指標であることを認識した。

(3)凝集構造に基づく粘度モデルを用いて、(2)の現象が生じる要因の説明を試みた。凝集状態の初期値および凝集回復速度の二つの物理量が、SP添加率とrpmに依存して変化することが要因と推察される。

(4)本研究では、焦点が右上がりに変化する要因を粘度モデルにより説明したが、既往の研究<sup>2)</sup>では、流動場の成長と減退が焦点位置に関連するという報告もあり、その影響の有無については今後の検討課題である。

## 謝辞

本研究はJSPS 科研費 JP16H02354の助成を受けたものです。

## 参考文献

- 1) 松本利美, 岸利治: ビンガム流動近似したフレッシュモルタルが示すレオロジー挙動の焦点性, コンクリート工学年次論文集, の焦点性, コンクリート工学年次論文集 Vol.37, No.1, pp. 1051-1056, 2015
- 2) 山崎慈生: サスペンションの流動速度分布の定式化と流動曲線の焦点シフトから見た時間依存変化に関する研究, 東京大学修士論文, 2016
- 3) Roussel N., Le Roy R., Coussot P.: Thixotropy modeling at local and macroscopic scales, J.Non Newtonian Fluid Mech., Vol.117, No.2, pp. 85-95, Feb.2004.
- 4) 熊野知司, 矢村潔, 名倉健二: ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を用いた高流動ペーストの粘度の経時変化予測手法の検討, 土木学会論文集E, Vol.62, No.1, pp. 1-14, 2006.2
- 5) 足立泰久, 岩田進牛: 土のコロイド現象, 学会出版センター, 2003
- 6) 山田義智, 伊波咲子, 赤嶺糸織, 浦野真次: フレッシュコンクリートのレオロジー一定数推定に関する基礎的研究: その1. 粘度式の概要とレオロジー一定数の推定方法, 2012年度大会(東海)学術講演会・建築デザイン発表会, 学術講演梗概集, Vol.2012, pp. 213-214, 2012.9
- 7) 伊波咲子, 赤嶺糸織, 山田義智: 凝集状態を考慮したセメントペーストの粘度式に関する基礎的研究, セメント・コンクリート論文集, Vol.66, pp. 645-652, 2012.12