

# 論文 セメントペーストの流動曲線予測に関する基礎的研究

山田 義智<sup>\*1</sup>・富山 潤<sup>\*2</sup>

**要旨:** 本研究ではセメントペーストの非ニュートン流動特性を表すことが可能で、かつ、濃厚懸濁液に対応した流動曲線予測式を提案する。提案する流動曲線予測式の特徴は、セメントペーストの非ニュートン流動特性の発現がセメント粒子の凝集体で形成される内部構造の破壊過程にあると考え、この破壊過程を確率論的に表す Weibull モデルを用いたことである。この流動曲線予測式による結果をレオロジー試験結果と比較したところ両者はよく一致し、提案する流動曲線予測式は有効であることが確認された。なお、本研究は定常状態におけるセメントペーストの流動特性についてのみ検討している。

**キーワード:** セメントペースト, レオロジー, 凝集体, Weibull モデル, 流動曲線予測式

## 1. はじめに

懸濁液（サスペンション）の粘度式は、Einstein の希薄懸濁液の粘性理論式をはじめとして、濃厚懸濁液も含めて多くの理論式や実験式が提案されている<sup>1)</sup>。これらの式のいずれにおいても、粒子の体積分率 $\phi$ の値は、分散媒と粒子間の相互作用力や粒子間同士の相互作用力を評価し、粘性予測において支配的な役割を果す。

一般に、セメントペーストは粒子（セメント粒子）の体積分率が大きいため濃厚懸濁液とみなすことが出来る。セメントペーストを濃厚懸濁液とみなし、濃厚懸濁液の粘度式として提案された Rosco 式や森・乙竹式をセメントペーストに適用した粘度式としては村田・菊川式<sup>2)</sup>、角田・明石式<sup>3)</sup>が挙げられる。これらの式は、懸濁液粘度を分散媒粘度と粒子の体積分率を用いて表す式である。この特徴より、分散媒を水、セメントペースト、モルタルに置き換え、対応する粒子をセメント、細骨材、粗骨材とすることでセメントペーストからモルタル、コンクリートまでの粘度式が統一された理論で構築できるところに利点を有する。しかし、これらの粘度式の基礎となる Rosco 式や森・乙竹式の対象がニュートン流体であるため、非ニュートン流動の特性を示すセメントペーストや、それを分散媒とするモルタルおよびコンクリートの粘度式としては限界があるものと考えられる。

そこで、本研究ではセメントペーストの非ニュートン流動特性を表すことが可能で、かつ、濃厚懸濁液に対応した流動曲線予測式を提案する。この流動曲線予測式では、セメント粒子の凝集体で形成される内部構造のひずみ速度による破壊進行がセメントペーストの非ニュートン挙動を引き起こすものと考えている。

なお、本研究において、研究の着目点が粘度予測式ではなく流動曲線予測式であるのは、非ニュートン流動ではニュートン流体のように定まった粘度は存在しないこ

とや、流動挙動をコンピュータ等でシミュレーションする場合にはせん断応力とひずみ速度の関係、すなわち流動曲線をモデル化することがあるためである。

ところで、セメント粒子の凝集体で形成される内部構造の破壊進行は、ひずみ速度とそれが作用している時間に依存する非定常特性を有する。本研究では、研究の第一歩として、ひずみ速度の作用時間に依存しない領域、すなわち定常状態の流動曲線についてのみ検討した。非定常過程については今後の研究・検討課題とする。

## 2. セメント粒子凝集体で形成される内部構造の破壊過程を考慮した流動曲線予測式の提案

本研究で提案するセメントペーストの流動曲線予測式は、Rosco 式をベースとする。Rosco 式を流動曲線予測式のベースとしたのは、Rosco 式が分散媒粘度と粒子の体積濃度のみに依存する式であり、セメントペーストからモルタル、コンクリートまでの粘度式が統一された理論で簡潔に構築できる可能性を有し、かつ、その理論的根拠が比較的明快であるのが理由である。

提案するセメントペーストの流動曲線予測式の特徴は、本来ニュートン流体の懸濁液に対して成り立つ粘度式である Rosco 式を非ニュートン流体の流動曲線予測式に拡張している点にある。

以下の節では、提案する流動曲線予測式の説明のため、まず Rosco 式の概要を示す。次に、セメント粒子の凝集体で形成される内部構造が、ひずみ速度により破壊される過程を Rosco 式に導入する方法を具体的に示す。

### 2.1 Rosco 式の概要<sup>4)</sup>

Einstein は、流体力学に基づき流体中に粒子が存在することによるエネルギー散逸を計算して粘度の増加を求めた<sup>5)</sup>。しかし、この式は希薄な懸濁液に対してしか成立しない。濃厚懸濁液の粘度を求める理論式は Brinkman

\*1 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 博士（工学）（正会員）

\*2 琉球大学 工学部環境建設工学科准教授 博士（工学）（正会員）

が Einstein 式を利用することで提案しているが、Brinkman 式は粒子の体積分率  $\phi$  が 1 近くに近づくと懸濁液の粘度は急激に増加せず、実験で観測される濃厚懸濁液の粘度特性を表していない。そこで、Rosco は最密充填値  $\phi_m (=0.74)$  に粒子の体積分率が近づくと粘度が無限になるとの仮定を導入し、実験結果を説明できるようにしている。以下に Rosco 式を示す。

$$\eta = \eta_0 \left( 1 - \frac{\phi}{\phi_m} \right)^{-2.5} \quad (1)$$

ここで、 $\eta$  は懸濁液の粘度、 $\eta_0$  は分散媒（本研究の場合は水）の粘度、 $\phi$  は粒子の体積分率を表す。

ところで、Rosco 式はニュートン流体の濃厚懸濁液粘度を予測対象としており、ある体積分率に対して一定粘度しか与えず、ひずみ速度による粘度変化は表せない。しかし、本研究の対象となるセメントペーストは非ニュートン流体であり、ひずみ速度によって変化する粘性を有する。そこで、本研究では、次節に示す仮定と手法により、Rosco 式に非ニュートン流体の特徴であるひずみ速度依存性を持たせた。

## 2.2 セメント粒子凝集体で形成される内部構造の破壊過程への Weibull モデルの適用

本研究では、セメントペーストの非ニュートン流動特性の発現が、セメントペースト内の凝集体による分散媒（水）の拘束と凝集体が形成する内部構造の破壊過程にあると考え、提案式の定式化にあたり以下の仮定を設けた。

- ①セメント粒子は、ひずみ速度を受ける前は凝集体による内部構造を形成する。この内部構造では流動に寄与しない分散媒（水）を拘束するため、実際の粒子の体積分率より見かけ上大きくなる。この見掛けの体積分率をここでは凝集体積率  $\phi_c$  とする。
- ②セメント粒子の凝集体による内部構造は、ひずみ速度による外乱を受けるとそのひずみ速度に対応して破壊が進み、拘束していた分散媒（水）を放出する。つまり、ひずみ速度に対応して凝集体積率  $\phi_c$  は変化する。
- ③セメント粒子の凝集体による内部構造は、懸濁液中で均一な構造を作っているとは考えにくく、その大きさと構造強度は確率分布を持っているものと考えられる。したがって、凝集体の内部構造の破壊過程は確定論的に起こるのではなく、確率論的に起こるものとする。

上記①の仮定より、本研究で提案する流動曲線予測式の粘度においては、式(1)右辺の粒子の体積分率  $\phi$  に代わり凝集体積率  $\phi_c$  を用いた。また、上記仮定の②および③によれば、凝集体積率  $\phi_c$  はひずみ速度で生じる内部構造破壊に対応して変化し、その破壊過程は確率論的に起こる。そこで、凝集体による内部構造の生存確率が Weibull の破壊危険確率より求まるいわゆる Weibull モデル<sup>6)</sup>を用い、

凝集体積率  $\phi_c$  を次式で表した。

$$\phi_c = (\alpha \phi_m - \phi) \exp \left\{ - \int \left( \frac{\dot{\gamma} - \dot{\gamma}_y}{\sigma_0} \right)^m dV \right\} + \phi \quad (2)$$

ここで、 $\dot{\gamma}$  はひずみ速度であり、 $\dot{\gamma}_y$  は閾値、 $V$  は懸濁液の体積である。また、 $\sigma_0$  は母数尺度、 $m$  は形状係数であり、これらは内部構造の生存確率を決定するものである。 $\alpha$  は凝集係数と称し、凝集体による見掛けの体積分率の増加を表す係数であり、以下の範囲をとる。

$$\phi / \phi_m \leq \alpha \leq 1 \quad (3)$$

式(2)によれば、 $\alpha = 1$  に近く、かつ、ひずみ速度が小さい場合には、凝集体積率  $\phi_c$  が最密充填値  $\phi_m$  に近づき非常に大きな粘度を持つ。この場合、流体は非常に大きな粘度のため流動が小さく、ビンガム流体の降伏値を超えるまでの挙動を近似的に表す。一方、セメント粒子が分散され、流動に寄与する水が多い場合に  $\alpha$  は  $\phi / \phi_m$  に近づく。この場合、懸濁液はニュートン流体の特性が顕著になり、 $\alpha = \phi / \phi_m$  の場合には完全にニュートン流体となり Rosco 式で表される粘度を持つ。

図-1 に式(2)で表される凝集体積率  $\phi_c$  とひずみ速度の関係概念図を示す。これより、ひずみ速度の小さい範囲では凝集体による内部構造の破壊程度は小さく、凝集体積率は  $\alpha \phi_m$  に近い大きな値となる。ひずみ速度が大きくなると、凝集体積率は指数関数的に減少し、粒子の体積分率  $\phi$  に近づくことが分かる。

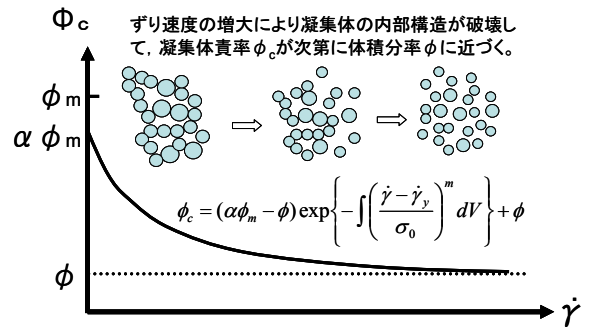


図-1 ひずみ速度と凝集体積率の関係概念図

式(1)の右辺の体積分率  $\phi$  に代わり、式(2)の凝集体積率  $\phi_c$  を用いると、懸濁液の粘度はひずみ速度と懸濁液の体積に依存する次式で表される。

$$\eta_c = \eta_0 \left( 1 - \frac{\phi_c}{\phi_m} \right)^{-2.5} \quad (4)$$

式(4)より、せん断応力  $\tau$  とひずみ速度の関係を表す流動曲線予測式は次式となる。

$$\tau = \eta_c \dot{\gamma} \quad (5)$$

式(1)、式(4)を級数展開すると式(6)で表され(但し、式(1)の場合は式(6)において $\phi_c$ が $\phi$ となる)、式中の $\phi_c$ (あるいは $\phi$ )に関する2次以上の項が濃厚懸濁液の粒子間相互作用の影響を表すものである<sup>7)</sup>。ここで、W/Cを低くして $\phi_c$ (あるいは $\phi$ )を増加させると、その2次以上の項の合計が1次項の値以上となり、粒子の接触・衝突等を含む粒子間相互作用による粘性増加の影響が強くなる。

$$\eta_c = \eta_0 \left( 1 + 3.38\phi_c + 7.97\phi_c^2 + \dots \right) \quad (6)$$

前章で示したように、凝集体により形成される内部構造破壊はひずみ速度を受けている時間も影響するが、本提案式は時間に依存しない定常状態を対象とする。

以下の章では、式(5)を具体的に計算する際に必要な凝集係数、母数尺度、閾値、形状係数をレオロジー試験より求める方法を示し、さらに提案式の有効性を示す。

### 3. レオロジー試験による定常状態のセメントペーストの流動曲線作成

#### 3.1 使用材料と調合

試験試料であるセメントペーストのW/Cは、表-1に示す5種類とした。

セメントは普通ポルトランドセメントを使用している。表-2にはセメント試験成績表を示す。

表-1 セメントペーストの調合

W/C (%)	W (g)	C (g)	V (ℓ)
60	85.1	141.9	0.13
55	82.5	150.0	0.13
50	79.6	159.2	0.13
45	76.3	169.6	0.13
40	72.6	181.4	0.13

表-2 セメント試験成績表(メーカー提供)

密度 g/cm <sup>3</sup>	3.16	酸化マグネシウム %	1.30
比表面積 cm <sup>2</sup> /g	3220	三酸化硫黄 %	1.89
凝結水量 %	28.4	強熱減量 %	1.60
凝結時間 h-min	2-17	全アルカリ %	0.57
凝結終結 h-min	3-32	塩化物イオン %	0.006

セメントの粒度分布はレーザー回折法(CILAS社製レーザー散乱式粒度分布測定装置HR-850B)により測定した。使用したセメントの粒度分布は、0.1~60 $\mu$ mの測定範囲では粒径中間サイズが8.46 $\mu$ mであり、50 $\mu$ m以上の粒径を有するセメント粒子は認められなかった。

練り混ぜ水は上水道水を用いた。また、今回の試験では混和材(剤)は用いていない。

#### 3.2 レオロジー試験装置と試料調整

レオロジー試験は、写真-1に示す外円筒回転式の共軸二重円筒形回転粘度計(協和科学株式会社製DPV-II型粘

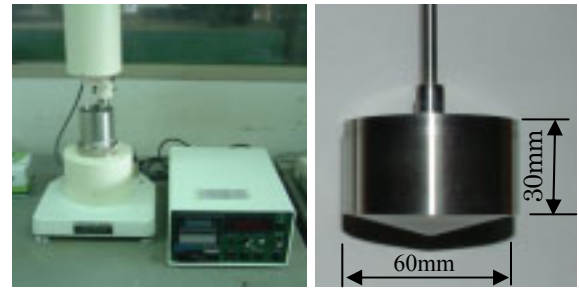


写真-1 共軸二重円筒形回転粘度計外観と内円筒寸法

度計:内円筒径60mm、外円筒径70mm)を用いた。本粘度計を用いた理由は、本粘度計が懸濁液の流動特性を理論的に、かつ、精度良く測定できる<sup>8),9)</sup>からである。

本研究では、ひずみ速度による凝集体で形成された内部構造変化を主体に測定できるように、水和反応の停滞する誘導期の状態にあると考えられる注水から30分経過後の試料を用いてレオロジー試験を行った。

今回は30分経過後の試料を用いることから、ブリーディングによる分離でレオロジー特性の変化が懸念された。そこで、試料を測定前にスプーンを用いてゆっくり攪拌することで、事前にブリーディングによる影響を取り除き、試料を均一なものとした。

レオロジー試験実施中の試験室温度は26.0 $\pm$ 1.8 $^{\circ}$ Cであり、セメントペーストの温度は29.0 $\pm$ 2.4 $^{\circ}$ Cであった。

内円筒の底面の影響を取り除くため、写真-1に示すように円錐状に加工された内円筒底面を用い、粘度校正用標準液を用いて内円筒底面の影響を見積もり、セメントペーストのレオロジー試験の際にこの影響分を補正した。具体的には内円筒長さ*l*に $\Delta l$ 分を割り増した(式(10)参考)。ここで、レオロジー試験は各W/Cについて、それぞれ3回ずつ試験を行い、その平均値で評価している。

#### 3.3 応力緩和曲線作成と定常状態の流動曲線

回転粘度計のローターを一定の角速度 $\Omega$ で連続的に回転させ、測定トルク*M*を一定時間ごとに読み取り、ひずみ速度毎にせん断応力 $\tau$ とずり時間*t*(一定の回転速度を試料に与え続けた時間)の関係グラフを描く。この曲線が応力緩和曲線<sup>10)</sup>である(図-2参照)。

本研究で対象とするセメントペーストは、非ニュートン流体であるので、ひずみ速度 $\dot{\gamma}$ を求める際には次式により補正<sup>9)</sup>を行った。

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \left[ 1 + k_1 \left( \frac{d \log \phi_a}{d \log \tau} \right) + k_2 \left( \frac{d \log \phi_a}{d \log \tau} \right)^2 \right] \quad (7)$$

ここで、 $\phi_a (= \dot{\gamma}_0 / \tau)$ は見掛けの流動度、 $k_1$ 、 $k_2$ は外筒半径 $R_2$ と内筒半径 $R_1$ の比*s*(= $R_2/R_1$ )より次式で求まる。

$$k_1 = \frac{s^2 - 1}{2s^2} \left( 1 + \frac{2}{3} \ln s \right), \quad k_2 = \frac{s^2 - 1}{6s^2} \ln s \quad (8)$$

また、 $\dot{\gamma}_0$ および $\tau$ は各々次式で与えられる。

$$\dot{\gamma}_0 = \frac{2\Omega}{r^2(1/R_1^2 - 1/R_2^2)} \quad (9)$$

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2(l + \Delta l)} \quad (10)$$

なお、外円筒と内円筒との差が小さければ、ひずみ速度勾配は一定と見なせ、ニュートン流体のひずみ速度で代用できる。JIS R 1652 (セラミックスラリーの回転粘度計による粘度測定方法)によれば、上記の代用が成り立つ条件として、外円筒と内円筒の直径比として1.2以下が推奨されている。本研究で用いた外円筒と内円筒の直径比は推奨値を満たしており、実際に式(7)により補正を行ったひずみ速度値と、式(9)によりニュートン流体として求めたひずみ速度値との差は小さいものであった。このことより、式(2)右辺の体積積分項を解く際にはひずみ速度勾配は対象体積内で一定として解いた。

図-2に各W/C毎のセメントペーストの応力緩和曲線を示す。なお、応力緩和曲線の測定中、目視できる範囲のコンクリート表面において、目視で確認できる水膜等は認められなかった。図-3には、比較として粘度計校正用標準液(ニュートン流体)の応力緩和曲線を示す。

図-2と図-3を比較すると、図-3に示すニュートン流体は応力緩和曲線の変化、すなわち非定常特性が認められない。一方、図-2のセメントペーストはずり時間とともに応力緩和曲線の低下が認められ、その低下は収束傾向が認められる。このように、セメントペーストのレオロジー特性には非定常特性も関わるが、本研究では定常状態、すなわち応力緩和曲線が収束した範囲のみを検討の対象とする。ところで、流動化剤の添加量に応じてセメントペーストの粘性が低下し、非ニュートン流動からニュートン流動に変化することが報告されている<sup>11)</sup>。これは、流動化剤による粒子分散効果であり、図-2のせん断応力低下はひずみ速度による分散効果と考えられる。

図-2より、ひずみ速度が大きいとずり時間に伴うせん断応力の低下も著しい。この傾向はW/Cの低い試料ほど顕著である。ところで、W/C=60%の応力緩和曲線において、ひずみ速度が最も大きい(86.29(1/s))時に応力の低下が若干大きい。これは、外円筒が高速で回転するため、水分の多い本試料は遠心力で内円筒側からセメント粒子が移動し、局所的に粒子(あるいは凝集体)が少なくなって粘性が低下し、せん断応力が低く観測されたと考えられる。但し、この低下による影響は小さいと考え、次章で行う提案式の検証の際にはこのデータも用いた。

各水セメント比の応力緩和曲線は、非定常部分と定常部分で応力を評価する次式で近似できる<sup>10)</sup>。

$$\tau = a * \exp(-b * t) + c \quad (11)$$

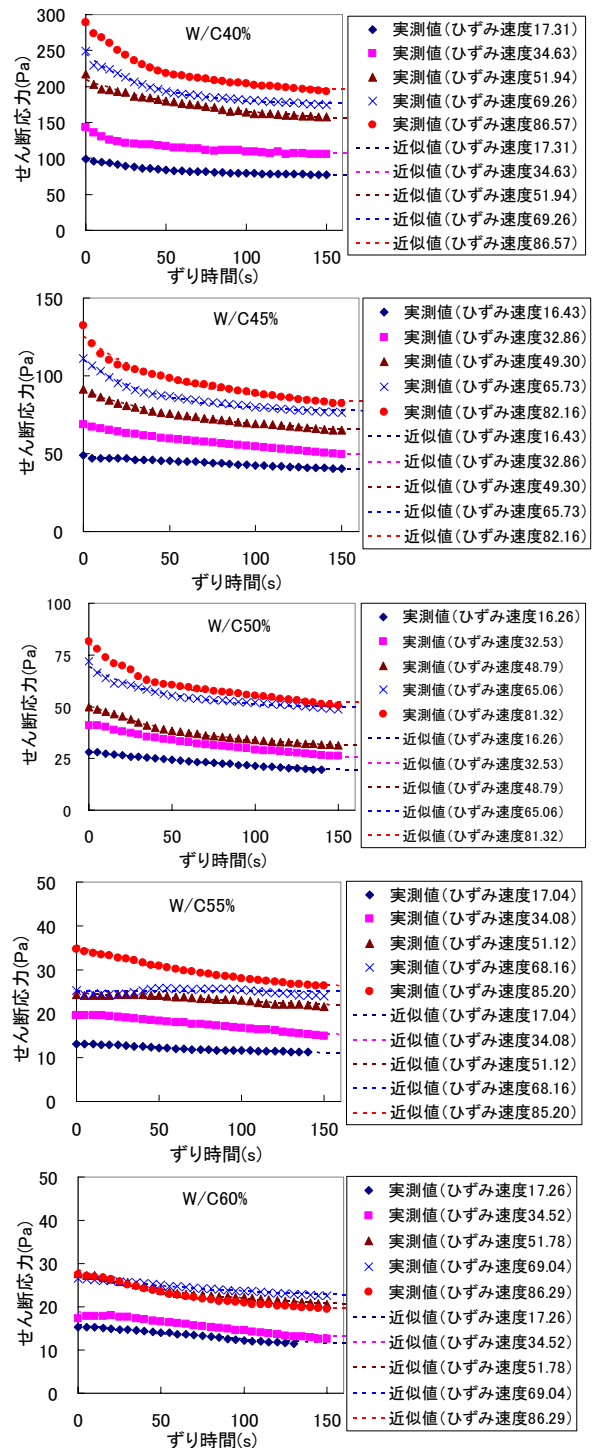


図-2 各水セメント比試料の応力緩和曲線

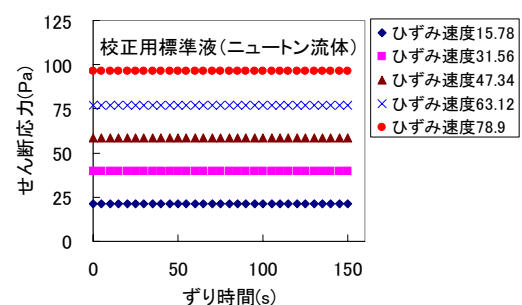


図-3 ニュートン流体の応力緩和曲線

ここで、式(11)の右辺第一項は、非定常状態のせん断応力を表し、ずり時間  $t$  の経過とともに指数関数的に低下する。一方、第二項の  $c$  は定常状態のせん断応力を表す。本研究ではこの第二項が検討対象である。

式(11)右辺第二項  $c$  を対応するひずみ速度で整理すると定常状態における流動曲線データとなる。 $c$  の値は、図-2 の応力緩和曲線を式(11)で近似することで求めた。

#### 4. 提案式による流動曲線の予測

一般に W/C が小さくなるにつれてセメント量が多くなるため、W/C の大きい場合に比べて凝集体の数が多い。そのため、全水量に対して凝集体で拘束される水の割合も高く、凝集体積率が大きくなり、粘度も高くなると推察される。一方、セメント粒子の粒度分布が適切な場合は、凝集体で形成される空隙に比較的細かいセメント粒子が入る。その結果、拘束される水が少なくなり粘度は低くなると考えられる。そこで、式(2)中の凝集係数  $\alpha$  は W/C やセメント粒度分布の程度で変化するものと考えた。

本研究では同じ普通ポルトランドセメントを用い、かつ、注水から同じ経過時間後に実験を行っていることより、セメント粒子間の結合力は同程度であり、W/C の違いにより凝集体の数は異なるものの、個々の凝集体強度のばらつき具合と凝集体の大きさのばらつき具合は同じになると推定される。従って、W/C に係わらず凝集体で形成される内部構造の破壊進行は同じ確率密度で起ると考えられる。そこで、破壊の進行を表す母数尺度  $\sigma_0$  と形状母数  $m$  は W/C に係わらず同じ値になると推定した。なお、 $\alpha$ 、 $\sigma_0$ 、 $m$  の各係数は水和の進行程度で変化する可能性のある値である。

##### 4.1 各係数値の同定

レオロジー実験結果を提案式(式(2)、(4)、(5))で近似することで、凝集係数  $\alpha$ 、母数尺度  $\sigma_0$ 、形状母数  $m$  を同定した。上述の推定に従って、凝集係数  $\alpha$  は水セメント比により変化する値として扱い、母数尺度  $\sigma_0$  と形状母数  $m$  は W/C に係わらず共通の値とした。これら各係数の同定には準ニュートン法を用いた。

なお、本研究におけるレオロジー試験では、ひずみ速度の小さい領域の測定が不十分である。したがって、低ひずみ速度領域にあると考えられる閾値  $\dot{\gamma}_y$  については明確な同定が困難と考え、ここでは  $\dot{\gamma}_y = 0$  とした。また、各試料とも同一寸法の外円筒と内円筒を用いており、計算対象となる試料体積は ( $V = 4.14 \times 10^{-5} \text{ m}^3$ ) で一定である。

図-4 は、3章のレオロジー試験で得られた結果と提案式(式(2)、(4)、(5))で近似された流動曲線を併せて示し両者の関係を比較する。比較対象としたのは、W/C=45%、50%、55%のセメントペーストであり、定常状態の流動曲線を対象とする。図-4 より、レオロジー試験結果と提

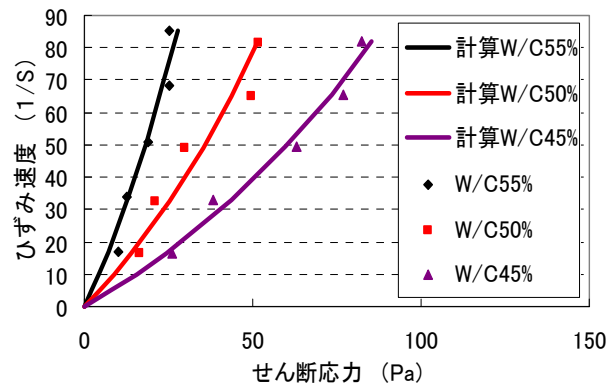


図-4 流動曲線の近似

表-3 W/C 毎の体積分率と同定された各係数値

W/C (%)	体積分率	$\alpha$	$\sigma_0 (\times 10^{-2})$ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	$m$
55	0.365	0.9138	1.6893	0.7751
50	0.387	0.93628		
45	0.413	0.9494		

案式結果は良く一致している。したがって、W/C によって凝集係数  $\alpha$  のみが変化し、破壊の進行を表す母数尺度  $\sigma_0$  と形状母数  $m$  は W/C に係わらず同じ値になるとの推定は適当であったと言える。

表-3 には同定で得られた凝集係数  $\alpha$ 、数尺度  $\sigma_0$  および形状母数  $m$  の各係数値を示す。体積分率  $\phi$  は調査時のセメント重量と水量および使用セメントの密度より求めた。なお、レオロジー試験時のセメント粒子は水和のため調査時の体積分率とは異なることや、水和生成物微粒子の影響も考えられるが、本提案式ではこれらのファクターを考慮していない。したがって、これらの影響は凝集係数  $\alpha$  に含まれている。

##### 4.2 流動曲線予測式の検証

係数同定に用いた試料以外の調査試料を用いて、レオロジー試験結果と提案式による結果を比較した。ここでは、この比較により提案式の有効性を確認する。

表-4 には、提案式で用いる各係数を示す。ここで、体積分率は調査から求め、母数尺度  $\sigma_0$  と形状母数  $m$  は、W/C によらないとの推定から表-3 と同じ値を用いる。

凝集係数  $\alpha$  は W/C で変化する値のため、前節で得られた W/C=45%、50%、55%のセメントペーストの結果を直線近似することで決定した。なお、広範囲の W/C について、この直線性は成り立たないものと考えられるが、今回対象とした W/C (60%、40%) が係数を求めた W/C (45%、50%、55%) 近傍の値であるため直線近似でも大きな差はでないものと判断した。

図-5 に W/C=60%、40%のセメントペーストのレオロジー試験結果と提案式による流動曲線を比較する。図-5

より、提案式はレオロジー試験結果によるせん断応力とひずみ速度の関係、すなわち流動曲線を比較的良く捉えているものと判断され、本提案式の有効性が確認される。

本研究で提案する流動曲線予測式は、式(2)に示すように体積効果が考慮されている。この体積効果は、セメントペーストの周りが骨材で囲まれるモルタルやコンクリートの流動特性を評価する際には重要な課題であると考えられ(例えば余剰ペースト理論との関連など)、非正常領域でのレオロジー特性の解明と同様に、今後の研究・検討課題である。

表-4 提案式に用いる係数一覧

W/C (%)	体積分率	$\alpha$	$\sigma_0 (\times 10^{-2})$ ( $m^3/s$ )	m
60	0.345	0.8952	1.6893	0.7751
40	0.441	0.9672		

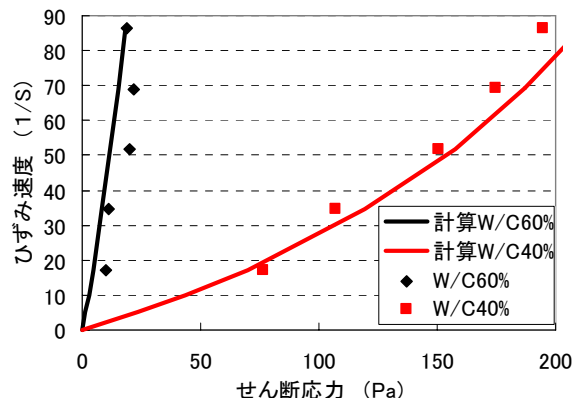


図-5 提案式による試験結果の予測

## 5. まとめ

本研究ではセメントペーストの非ニュートン性発現の理由が、セメント粒子凝集体による内部構造とその破壊過程にあると考えた。そして、その破壊過程を確率モデルである Weibull モデルで表し、Rosco 式に組込むことで非ニュートン特性を考慮可能な濃厚懸濁液の流動曲線予測式を提案した。本研究で得られた知見を以下に纏める。

- (1) セメントペーストを対象として、共軸二重円筒形回転粘度計を用いて 5 種類の調合(W/C=60,55,50,45,40%)の応力緩和曲線を求めた。ここで応力は、ずり時間とともに指数関数的に低下し、一定時間後には収束値を持つことが観察された。なお、本研究では応力が収束して変化しなくなる定常状態を研究対象範囲とした。
- (2) セメントペーストのレオロジー試験で得られた応力緩和曲線より、ひずみ速度が大きいほどずり時間経過による応力低下が著しいことが認められた。な

お、この傾向は W/C が低いほど著しい。

- (3) セメントペーストのレオロジー試験結果と提案式(式(2),(4),(5))で近似した流動曲線はともに非ニュートン性を示しており、その値もよく一致する。このことより、W/Cにより凝集係数 $\alpha$ は変化し、破壊の進行を表す母数尺度 $\sigma_0$ と形状母数mはW/Cに係わらず同じ値になると推定したことは適当であると考えられる。
- (4) 提案する流動曲線予測式は、係数同定に用いた試料以外の試験結果に対しても、その流動特性を良く捉えるものであった。このことより、本研究で提案する流動曲線予測式の有効性が伺える。

謝辞：太平洋セメント株式会社の山田一夫博士には、セメントの粒度分布測定に際しご協力頂いた。レオロジー試験は琉球大学大学院生金城賢作氏のご協力を得た。また、本研究は平成18・19年度科学研究費補助金(基盤研究(C))「研究課題名：合理的なフレッシュコンクリートの流動構成式と流動解析手法の開発(研究代表者：山田義智)」による助成を受けた。記して感謝の意を表す。

## 参考文献

- 1) 例えば、松本孝芳：分散系のレオロジー、(株)高分子刊行会、pp.25-33,1997.08
- 2) 村田二郎、菊川浩治：ポルトランドセメントペーストの粘度式に関する研究、土木学会論文集, No.354, pp.109-118, 1985
- 3) 角田忍、明石外世樹：セメントペーストの粘度式について、セメント技術年報, No.32, pp.86-91,1978
- 4) 例えば、(社)セメント協会：流動性研究委員会報告書、(社)セメント協会研究所、pp.55-109,2003.09
- 5) 桂井富之助：コロイドの理論、河出書房、pp.26-46, 1947
- 6) 松尾陽太郎 編訳：セラミックスの寿命と破壊－ワイブル統計の利用－、内田老鶴圃、pp.26-30, 1989.05
- 7) 中江利昭 監修：レオロジー工学とその応用技術、(株)フジ・テクノシステム、p.192, 2001.01
- 8) 飯田孝道ほか：熔融スラグ・ガラスの粘性、アグネ技術センター、pp.107-108,2003.06
- 9) 小野木重治：化学者のためのレオロジー、(株)化学同人、pp.23-31, 2000.09
- 10) 金城賢作、山田義智、富山潤：セメントペーストのレオロジー特性に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.2, pp.31-36, 2007
- 11) 松本孝芳：コロイド科学のためのレオロジー、丸善株式会社、pp.145-146,2003.03