

論文 セメントペーストの流動構成式に関する研究

東條 良太*1・山田 義智*2

要旨: 本研究は、確率過程理論と Roscoe 式を用いてセメントペーストの流動構成式を導いた。この流動構成式は、水和の影響やセメントペーストの流動する空間寸法による影響を考慮することが出来るものである。さらに、この流動構成式は非定常状態および定常状態の非ニュートン流動特性を表せるものであるが、今回は定常状態における流動構成式を用いて流動曲線を求め、回転粘度計を用いて求めた流動曲線と比較検討した。その結果、提案する流動構成式は試験結果を良く表すことが確認された。

キーワード: セメントペースト, 凝集, レオロジー, 流動構成式, 流動曲線

1. はじめに

コンクリートの流動特性を把握するためには、セメントペースト（以後、ペーストと略す）の流動特性を理解する必要がある。ペーストの流動特性は非ニュートン性を含め様々な流動特性を有しており、この特性を調合（配合）より予測する流動構成式の確立が望まれている。

本研究では、横堀らが提案する確率過程理論の手法¹⁾と Roscoe 式を用いて²⁾、ペーストの応力とひずみ速度の関係式（流動構成式）を導出する。そして、回転粘度計を用いたレオロジー試験結果との比較を通して、提案する流動構成式の有効性を確認するとともに、水和やペーストの流動する空間（以後、流動空間と称す）寸法への依存性についても説明する。

2. 凝集体のモデル化と流動構成式の定式化

2.1 内部構造および凝集体のモデル化

ペーストに分散性能を有する混和剤が無添加の場合、セメント粒子同士が凝集し、水セメント比等に依存する内部構造（ネットワーク）が形成される。本研究では、ネットワークを次のようにモデル化する（図-1 参照）。

- (1) セメント粒子を平均粒径の同一球形として、その粒子の凝集でネットワークが構成されるものとする。
- (2) ネットワーク要素は、接触している粒子同士の中心間を結ぶ線で表す。したがって、ネットワーク要素数 n は粒子の接触点数と等しくなる。
- (3) ネットワーク要素の周りには流動に寄与しない一定の水を拘束し（以後、拘束水と称す）、セメント粒子の見掛けの体積分率は、実際の体積分率 ϕ より増える。ペースト全体における見掛けの体積分率を凝集体積分率 ϕ_c とし、その最大値を最密充填時の体積分率 ($\phi_m = 0.74$) とする。
- (4) ペーストの流動により、ネットワーク要素が破壊すると拘束水が開放されるとするため、凝集体積分率 ϕ_c は、ネットワーク要素の生存数に応じて変化する。

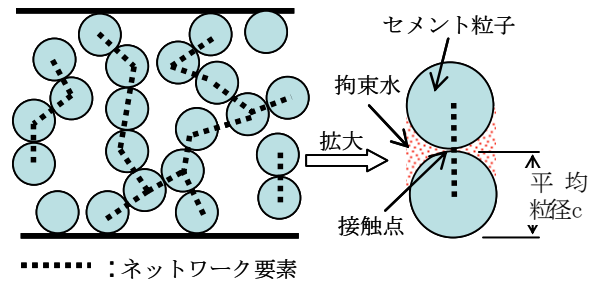


図-1 ペーストの内部構造モデル概略図

以上のモデル化を基に、流動の際に生じるひずみ速度による凝集破壊（ネットワーク要素の破壊）で変化する凝集体積分率 ϕ_c の概略を図-2 に示す。

ここで、凝集体積分率 ϕ_c とセメント粒子の実際の体積分率 ϕ との差を上昇体積分率と称する。この上昇体積分率の最大値は $\alpha\phi_m - \phi$ である。 α は拘束係数と称する 1 以下の正数値である。拘束係数 α はネットワークの発達程度を表すもので、水セメント比や混和剤量さらに流動空間寸法に依存すると考えた。拘束係数 α が流動空間に依存すると考えた理由は、流動空間が狭くなると粒子径との相対関係で流動に直交する方向に連結したネットワークが見掛け上多くなりやすいと考えられ、そのネットワークに囲まれた水は流動に寄与しにくくなり、見掛け上の拘束水が増えると考えたからである（図-3 参照）。

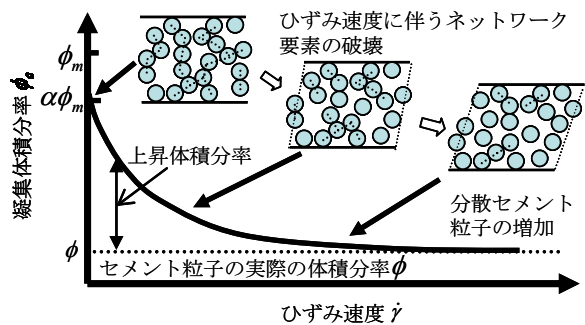


図-2 凝集体積分率 ϕ_c の変化の概略図

*1 琉球大学大学院 理工学研究科環境建設工学専攻 (正会員)

*2 琉球大学 工学部環境建設工学科教授 博士(工学) (正会員)

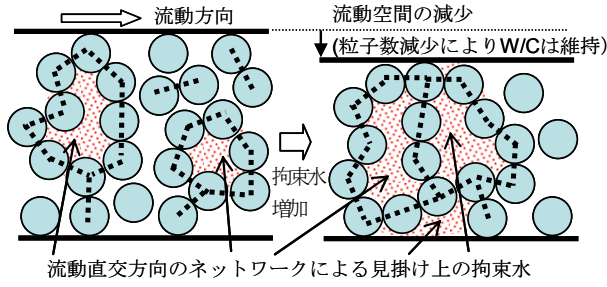


図-3 流動空間減少で生じる見掛けの拘束水の増加概念図

以下においては、凝集体積分率 ϕ_c の変化を具体的に求めるため、上述のモデル化を踏まえて、まずセメントペースト中の凝集体(ネットワーク要素)の生存確率を導き、これよりひずみ速度とずり時間(ひずみ速度を加え続ける時間)に依存した凝集体積分率 ϕ_c を定める。次にこの凝集体積分率 ϕ_c を Suspension の粘性予測式として実績のある Roscoe 式に適用して応力とひずみ速度の関係式(流動構成式)を導出する。

2.2 確率過程理論による流動構成式の導出

セメント粒子の凝集が生じてネットワークが形成されている場合を考える。ここで、ペースト中の n 個のネットワーク要素に $1, 2, 3, \dots, i, \dots, n$ の番号を附す。ある一定のひずみ速度を与えた場合、番号 1 のネットワーク要素に時刻 t までに破壊(故障)が生じない確率を $P_1(t)$ とする。 $\mu_1(t)$ は番号 1 のネットワーク要素に時刻 t までに破壊が起こらず、 $t + dt$ 後までに破壊が起こる故障確率とする。

番号 1 の凝集体が時刻 t まで破壊しない生存確率 $P_1(t)$ は、次式で表される。

$$P_1(t) = \exp\left(-\int_0^t \mu_1(t) dt\right) \quad (1)$$

同様に任意の番号 i のネットワーク要素が時刻 t までに破壊しない確率を $P_i(t)$ とし、番号 i ネットワーク要素の故障確率 $\mu_i(t)$ とすると、時刻 t までに n 個のネットワーク要素がいずれも破壊しない生存確率 $P(t)$ は次式となる。なお、 $\mu(t)$ はペースト全体のネットワーク要素の故障確率である。

$$\begin{aligned} P(t) &= P_1(t) \cdot P_2(t) \cdots P_i(t) \cdots P_n(t) \\ &= \exp\left[-\int_0^t \{\mu_1(t) + \mu_2(t) \cdots + \mu_i(t) \cdots + \mu_n(t)\} dt\right] \\ &= \exp\left(-\int_0^t \mu(t) dt\right) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、番号 $1 \sim n$ の各ネットワーク要素の故障確率は全て同じ ($\mu_1(t) = \mu_2(t) = \dots = \mu_i(t) = \dots = \mu_n(t)$) とすると、ペースト全体のネットワーク要素の故障確率 $\mu(t)$ は任意凝集体の故障確率 $\mu_i(t)$ を用いて次式で表される。

$$\mu(t) = n\mu_i(t) \quad (3)$$

ここで、任意ネットワーク要素の故障確率 $\mu_i(t)$ は、次式で仮定する。

$$\mu_i(t) = hc^3 \dot{\gamma} e^{-\delta t} \quad (4)$$

Smoluchowski のせん断流れ場における粒子同士の衝突頻度関数³⁾は、粒径の3乗およびひずみ速度に比例する。粒子の衝突が破壊の一因と考えられるネットワーク要素の故障確率はこれに対応するものと考えられる。ここで、式(4)においては、これらの影響を考慮した。

任意ネットワーク要素の故障確率 $\mu_i(t)$ には、ネットワーク要素自身、即ち粒子接点の強度も影響すると考えられる。この粒子接点間の強度には水和度の影響もあると考え、これを係数 h で表した。この係数 h を水和係数と称し、水和が進行するほど係数 h は小さくなり故障確率は小さくなる。

本来、せん断流れ場においては、凝集の破壊とともに衝突による再凝集も考えられる。従って、流動初期に高い故障確率で破壊が起こっても、時間経過とともに再凝集もおこり、そのバランスで見掛けの故障確率は次第に減少して0になると考えられる。ここでは、この関係を指数関数で仮定した。凝集の破壊と再凝集過程については、理論的に検討の余地を残している。

指数係数 δ は、ネットワーク要素数とひずみ速度およびペーストの流動する空間に影響されると考え、式(5)で仮定した。流動空間を考える理由は、流動空間が変化すると粒子同士および空間を形成する固体部分(コンクリートだと骨材、本研究の場合は回転粘度計の内外円筒部)との衝突の様子が変化し、凝集の破壊や再凝集の傾向も変わると考えられるからである。ここでは、係数 a および係数 b が流動空間寸法の影響を受けると考えた。

$$\delta = an\dot{\gamma}^b \quad (5)$$

式(4)を式(3)に代入すると次式となる。

$$\mu(t) = nhc^3 \dot{\gamma} e^{-\delta t} \quad (6)$$

式(6)に式(5)を考慮して式(2)に代入すると生存確率 $P(t)$ は次式となる。

$$\begin{aligned} P(t) &= \exp\left(-\int_0^t \mu(t) dt\right) \\ &= \exp\left(-k\dot{\gamma}^m (1 - e^{-\delta t})\right) \end{aligned} \quad (7)$$

式(7)においては、係数の使用が煩雑化して式を冗長させないために、 $k = hc^3/a$ および $m = 1 - b$ とし、さらに指数部の係数を再度式(5)にしたがって δ に変換している。

2.1 節のモデル化および図-2で示した様に、凝集体積分率 ϕ_c はペースト中のネットワーク要素の生存確率 $P(t) (=1 \sim 0)$ に対応して最大 $\alpha\phi_m$ から最小 ϕ まで変化し、次式で表せる。

$$\begin{aligned} \phi_c &= (\alpha\phi_m - \phi)P(t) + \phi \\ &= (\alpha\phi_m - \phi) \exp\left(-k\dot{\gamma}^m (1 - e^{-\delta t})\right) + \phi \end{aligned} \quad (8)$$

この凝集体積分率 ϕ_c を Roscoe 式に代入すると非定常の流動構成式となり、次式で表せる。なお、 τ はせん断応力を表し、 η_0 は水の粘度である。

$$\tau = \eta_0 \left[1 - \frac{\phi_c}{\phi_m} \right]^{-2.5} \dot{\gamma}$$

$$= \eta_0 \left[1 - \frac{(\alpha\phi_m - \phi) \exp(-k\dot{\gamma}^m(1 - e^{-\delta t})) + \phi}{\phi_m} \right]^{-2.5} \dot{\gamma} \quad (9)$$

上式においてひずみ速度を長時間負荷した定常状態を考えると、指数関数部分は文献 2) と同様に Weibull モデルとなり、流動構成式は次式となる。

$$\tau = \eta_0 \left[1 - \frac{(\alpha\phi_m - \phi) \exp(-k\dot{\gamma}^m) + \phi}{\phi_m} \right]^{-2.5} \dot{\gamma} \quad (10)$$

本論文においては、式(10)の定常状態における流動構成式の有効性について、レオロジー試験結果(3章)を基に4章において確認する。

3. ペーストのレオロジー試験

3.1 使用材料と調査

試験に用いたペーストの水セメント比は、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た。表-2にはセメント試験成績表を示す。表中のセメントAはボブM(写真-1(b)参照)の全試験およびボブL(写真-1(b)参照)の回転速度 20rpm, 40rpm の試験に使用した。また、セメントBはボブLの回転速度 2rpm, 5rpm, 10rpm, 60rpm, 80rpm, 100rpm の試験で使用した(表-1参照)。

なお、セメントの粒度分布はレーザー回折散乱法(CILAS 社製レーザー散乱式粒度分布測定装置)により測定した。使用したセメントの粒径中間サイズはセメントAで $10.49 \mu\text{m}$ 、セメントBで $10.27 \mu\text{m}$ であった。両セメントともに $75.00 \mu\text{m}$ 以上の粒径を有するセメント粒子は認められなかった。以上より、今回実験で使用したセメントAおよびセメントBはほぼ同じと言え、使用セメントの違いによる実験への影響は無いと考えた。

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)は使用していない。

表-1 セメントペーストの調査と使用セメント

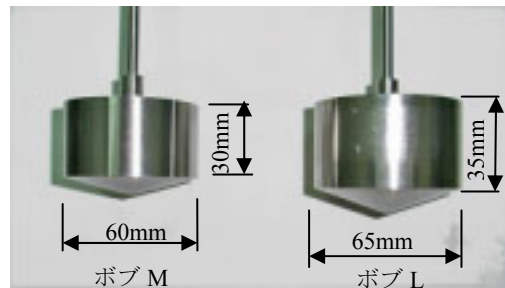
	W/C (%)	W (g)	C (g)	V (l)	使用セメント(表-2参照)
ボブM	55	82.5	150.0	0.130	全ての回転速度において、セメントAを使用
	50	79.6	159.2	0.130	
	45	76.3	169.6	0.130	
	40	72.6	181.4	0.130	
	35	68.3	195.1	0.130	
ボブL	55	54.0	98.1	0.085	回転速度が20,40rpmの場合にはセメントAを使用し、2.5,10,60,80,100rpmの場合にはセメントBを使用
	50	52.1	104.1	0.085	
	40	47.4	118.6	0.085	

表-2 セメント試験成績表(メーカー提供)

	セメントA	セメントB
密度 g/cm^3	3.16	3.16
比表面積 cm^2/g	3270	3280
凝結水量 %	28.5	28.9
凝結時間 h-min	2 - 11	2 - 08
凝結終結 h-min	3 - 23	3 - 24
酸化マグネシウム %	1.37	1.39
三酸化硫黄 %	1.94	1.95
強熱減量 %	1.54	1.52
全アルカリ %	0.54	0.57
塩化物イオン %	0.008	0.007



(a) 装置全体概要



(b) 内円筒

写真-1 共軸二重円筒型回転粘度計外観と内円筒寸法

3.2 レオロジー試験装置概要とペースト試料の調整

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型回転粘度計(協和科学株式会社製 DPV-II型粘度計: 外円筒径 70mm)を用いた。内円筒径は 60mm(ボブM)、65mm(ボブL)の2種類を用い、流動空間寸法によるペーストの流動特性の差異を検討している。

本研究では、水和進行による影響を見るために注水から30分、60分、90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~90分静置した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 $24 \pm 1.3^\circ\text{C}$ であり、セメントペーストの温度は $32 \pm 1.9^\circ\text{C}$ 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、さらに粘

度校正用標準液を用いて内円筒底面の影響を見積もり、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 Δl 分を割り増した (式(11)参照)。なお、レオロジー試験は水セメント比毎に 3 回ずつ試験を行い、その平均値で評価している。

3.3 非ニュートン流体のせん断応力とひずみ速度の評価

共軸二重円筒型回転粘度計内の軸中心から r 離れた位置にあるニュートン流体のせん断応力 τ とひずみ速度 $\dot{\gamma}_0$ は各々次式で得られる。

$$\tau = \frac{M}{2\pi r^2(l + \Delta l)} \quad (11)$$

$$\dot{\gamma}_0 = \frac{2\Omega}{r^2(1/R_1^2 - 1/R_2^2)} \quad (12)$$

ここで、 Ω は与えた角速度であり、 M は計測されたトルクである。

本研究で対象とするペーストは非ニュートン性を示すため、ひずみ速度を求める際には、次式で示す非ニュートン補正を行った²⁾。

$$\dot{\gamma} = \dot{\gamma}_0 \left[1 + k_1 \left(\frac{d \log \phi_a}{d \log \tau} \right) + k_2 \left(\frac{d \log \phi_a}{d \log \tau} \right)^2 \right] \quad (13)$$

ここで、 $\phi_a (= \dot{\gamma}_0 / \tau)$ は見掛けの流動度であり、 k_1 、 k_2 は外筒半径 R_2 と内筒半径 R_1 の比 $s (= R_2/R_1)$ を用いて次式で求めた。

$$k_1 = \frac{s^2 - 1}{2s^2} \left(1 + \frac{2}{3} \ln s \right), \quad k_2 = \frac{s^2 - 1}{6s^2} \ln s \quad (14)$$

3.4 応力緩和曲線を用いた流動曲線の作成方法

ペーストは溶媒中に固体粒子を含む Suspension で分散系流体である。分散系流体の有する流動特性としてはチキソトロピーの性質 (揺変性) があり、このチキソトロピーを表す内容は次の 2 つである⁴⁾。

(ア) ひずみ速度依存性：ひずみ速度による粘性変化

(イ) ずり時間依存性：ずり時間による粘性変化

この 2 つの性質のため、回転粘度計を用いてひずみ速度を連続的 (あるいは段階的) に変化させて流動曲線を求めても、得られた結果は、上記の 2 つの性質のいずれによるものなのか分離することはできない。

そこで、本研究では、回転粘度計のローターを一定の角速度 Ω で連続的に回転させて (すなわち同一のひずみ速度下で)、測定トルク M (せん断応力) をその値がほとんど変化しなくなる 300 秒後まで 2 秒間隔で読み取った。これを複数の異なる角速度 Ω (ひずみ速度) 毎に行い、せん断応力 τ とずり時間 t (一定の回転速度を試料に与え続けた時間) の関係グラフを描いた。この曲線が応力緩和曲線⁴⁾である (図-4 (a) 参照)。

応力緩和曲線において、定常状態に達した時点のせん断応力と対応するひずみ速度をプロットしたものが、純粋なひずみ速度依存性のみを有する流動曲線 (図-4 (b))

参照) であり、この曲線によって式(10)に示す定常状態の流動構成式の有効性を評価した。ずり時間依存性を含む非定常状態の流動構成式 (式(9)) の検討については、今後の課題とする。

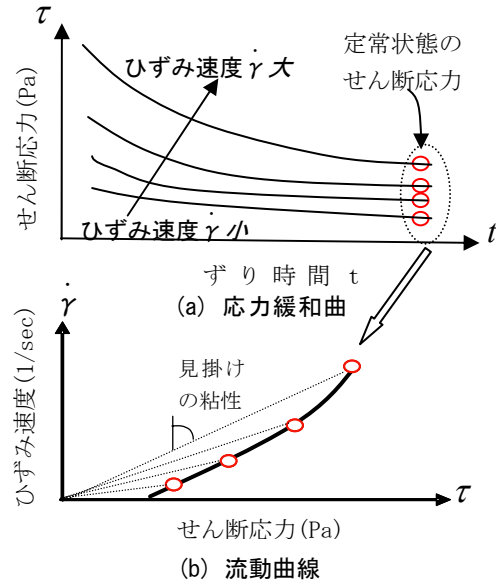


図-4 応力緩和曲線と流動曲線

3.5 レオロジー試験結果 (流動曲線)

3.4 節に示す方法にて作成した流動曲線の一部を図-5に示す。同図においては、水セメント比による影響、水和の進行による影響が分かりやすいようにマトリックス状に図を配置した。さらに、図中には 2 種類のボブ (回転粘度計の内円筒) による試験結果を併せて示し、ペーストが流動する空間寸法によってその流動特性を異にする性質があるか否かを検討しやすいようにした。

図-5に示す流動曲線より、水セメント比が低いと見掛けの粘度が高くなることがわかる (水セメント比毎に図中の横軸スケールが異なることに注意)。これは、相対的にセメント量が多く固相の体積分率が大きくなるほか、凝集構造 (ネットワーク) が発達し、見掛け上の固相の体積分率が増加するため、セメント粒子間及びセメント粒子-液相・固相間の摩擦による抵抗が増大しているものと考えられる。さらに、ネットワークの破壊が進まない低ひずみ速度領域では見掛けの粘性は大きい。しかし、ひずみ速度が大きくなるとネットワーク破壊が進行するため見掛けの粘性は次第に小さくなっている。

静置時間が長くなっても見掛けの粘度が大きくなる。この理由は、誘導期でも水和反応がわずかながら進み、セメント粒子間の結合力が増していることが考えられる。

ボブ M を使用した場合とボブ L を使用した場合は、流動曲線に差が見られる。この差はペーストの流動特性の流動空間への依存性を表している。図-5によれば、

ひずみ速度が 10(1/sec)以下程度の小さい範囲においては、ボブ L を使用した場合の見掛けの粘性が大きく、せん断速度が 20(1/sec)を超えたあたりから、逆にボブ M を使用した場合の見掛けの粘性が大きくなる傾向にある。

この理由は、次のように考えられる。ボブ L のようにボブ M に比べてペーストの流動空間が狭いと流動に直行する方向に連結した凝集構造（ネットワーク）を作りやすいと考えられる（図-3 参照）。このため、流動空間が狭い場合の方が流動に寄与しない見かけ上の拘束水が増えると考えられる。そのため凝集破壊が進まない低いひずみ速度においては見掛けの粘性が大きい。しかし、ひずみ速度が大きくなると、流動に直行方向に繋がった各セメント粒子接点には大きな力が働き凝集を保つことができなくなり分散して、拘束水を急速に失うので見掛けの粘性が小さくなると考えられる。

以上で述べた、実験的な流動特性の考察結果は、2 章で示したペーストの凝集構造のモデル化および流動構成式を導出するにあたって仮定した各係数の意味と矛盾するものではない。このことを確認するため、次章においては、レオロジー試験結果（流動曲線）を提案した流動構成式(式(10))で表すことができるか否か検討するほか、その過程で得られた各係数値を考察することで提案した流動構成式（式（10））の有効性を検証する。

4. 流動構成式の検証

まず前章のレオロジー試験結果より、ボブMを使用した注水 30 分後の水セメント比 55%、50%、45%、40%、35%の流動曲線を用いて、提案した流動構成式（式（10））が流動曲線を表せるか否かを検討するとともに、式に含まれる拘束係数 α 、係数 k および係数 m を同定した。

図-6 には、レオロジー試験結果と提案流動構成式による計算結果の関係を示した。この図より、提案流動構成式は試験結果を良く表現できていることが分かる。

図-7 には、試験結果より同定した拘束係数 α の水セメント比による変化を示す。ここで、水セメント比の低下に従い α は増加している。これは、モデル化で設定したように水セメント比が低下すると粒子が増えて凝集し易くなり、ネットワーク要素が増えて拘束水を取り込み見掛けの体積分率が増加するためである。よって、比較的高い水セメント比でも最密充填状態 ($\alpha=1.0$) になりえる。

注水からの時間と使用ボブサイズが同じであると、水和程度と流動空間に影響する係数 k と流動空間に影響する係数 m は、水セメント比に係らず一定である。その値を表-3 に示す。

拘束係数 α は水セメント比に影響されるが、係数 k 、係数 m を一定に出来る結果は、2 章のモデル化の妥当性を示しており、文献 2) の結果と同様である。

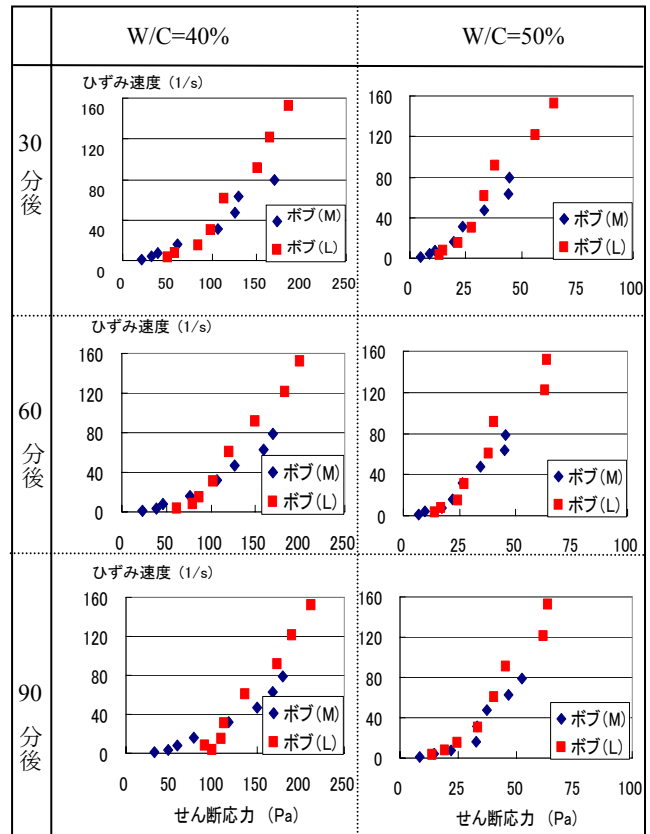


図-5 各要因による流動曲線

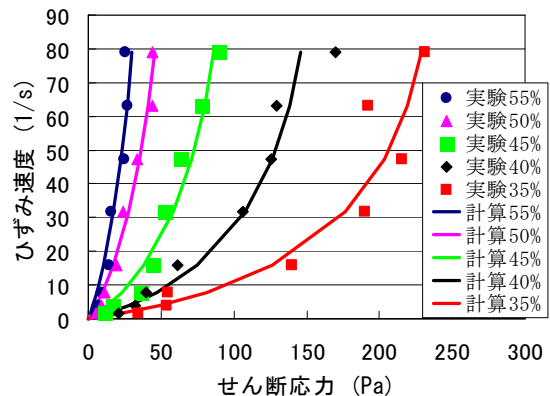


図-6 実験結果と提案式の比較（ボブM）

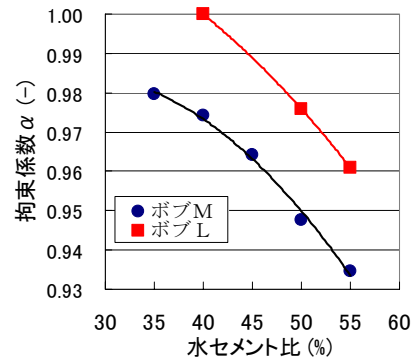


図-7 拘束係数 α と水セメント比との関係

表-3 提案式の係数同定結果（注水 30 分ボブM使用時）

拘束係数 α	k	m
$-8.3 \times 10^{-5}(W/C)^2 + 0.00517(W/C) + 0.9$	0.00326	0.68107

図-8には、注水30分後でボブL使用時の水セメント比55%、50%、40%の流動曲線の試験結果および提案流動構成式(式(10))の結果(実線)を示す。また、同図中にはボブM使用時の計算結果も破線で併せて示す。提案流動構成式は、ボブL使用時の試験結果を良く表している。さらに、図-5で示した結果と同様に、ボブLを使用した場合、低ひずみ速度域ではボブM使用時よりも見掛けの粘性が大きいが、ひずみ速度が大きくなると逆転して見掛けの粘性が小さくなることを表している。

表-4には、ボブL使用時の拘束係数 α 、係数 k 、係数 m の同定結果を各々示す。

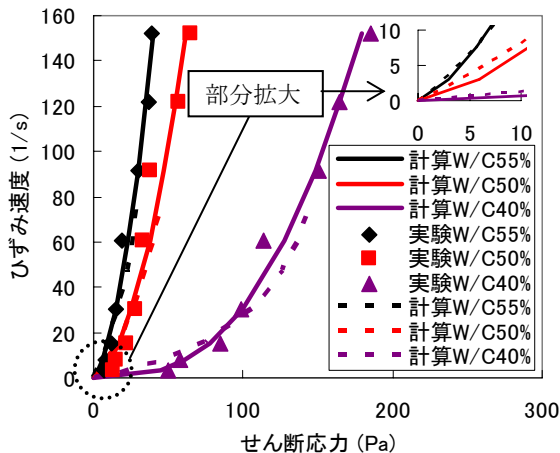


図-8 実験結果と提案式の比較 (注水30分)

表-4 提案式中の係数同定結果 (ボブL使用時)

拘束係数 α	k	m
$-9.3 \times 10^{-5} (W/C)^2 + 0.00619(W/C) + 0.9$	0.04038	0.27152

図-7および表-3, 4からわかるように、拘束係数 α は流動空間が狭くなると2章のモデル化で考えたように大きくなるのが分かる。また、空間の影響を受ける係数 a , b を含む係数 k , m の値も流動空間寸法で変化することが分かる。流動空間寸法の影響は、コンクリートの流動性を説明する余剰ペースト理論にも係ると思われる、そのメカニズムを詳細に検討する必要があると考える。

表-5にはボブMを使用した場合の注水から30分後、60分後、90分後の係数 k の変化を示す。これらの値は、実験値を同定して求めた。係数 k は時間経過で水和が進むと小さくなっている。2章の定式化の過程で示したように、係数 k には水和係数 h が含まれており、この値が経過時間とともに小さくなり故障確率が小さくなっていることを表している。

図-9には、注水から30分後、90分後の実験結果と提案構成式による結果を比較する。高ひずみ速度域では両者はよく合っているが、低ひずみ速度域では、実験値を過小評価している。これは、拘束係数 α に水和の影響

表-5 係数 k の水和進行による変化 (ボブM使用時)

30分後の k 値	60分後の k 値	90分後の k 値
0.00326	0.00298	0.00271

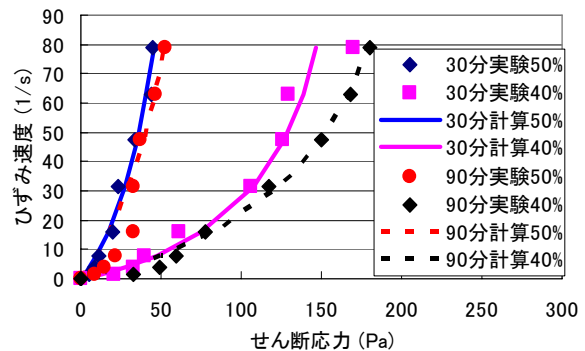


図-9 実験結果と提案式の比較 (ボブM)

を入れていないためと考えられ、今後の課題である。

5. まとめ

本研究では、確率過程理論およびRoscoe式を用いて、非定常状態および定常状態におけるペーストの流動構成式を提案した。この流動構成式を用いて定常状態の流動曲線を求めて実験結果と比較検討したところ、以下の知見を得た。

- (1)水セメント比35%~55%範囲で実験結果をよく表せた。
- (2)水和の影響による見掛けの粘性増加を表せた。
- (3)流動空間寸法の違いによる流動特性の変化を表せた。

以上より、提案した凝集体のモデル化および流動構成式は、今回の試験範囲においては有効であると言える。

しかし、より精緻な流動構成式の確立のためには、以下の課題を残していると考えている。

- (1)凝集体の破壊と再凝集過程のメカニズムと定式化。
- (2)混和剤が添加されたときの提案式の有効性の確認。
- (3)セメント粒度分布のモデル化。
- (4)非定常状態での流動曲線(履歴現象)の検討。
- (5)拘束係数 α に水和の影響を考慮するモデル。

参考文献

- 1) 横堀武夫, 沢木洋三:破壊強度と寿命に対するWeibull表示の確率過程理論からの導出, 日本材料強度学会誌, 第6巻, 第4号, pp.109-114, 1972
- 2) 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, 31-36, 2008.
- 3) 足立泰久, 岩田進午 編著:土のコロイド現象, 学芸出版センター, pp.162-164, 2003.2
- 4) 梅屋薫, 磯田武信:分散系の流動特性(特にチキソトロ皮的性質について), 季刊レオロジー, pp.16-33, 1972.