

回転粘度計を用いたフレッシュペーストの粘度測定における 「すべり量」の定量化

Quantity of Slip Behavior between Paste and Rotor of Rotational Viscometer

緑川 猛彦・鈴木 摩耶*・吉田 敦彦*・山ノ内 正司・菊地 卓郎

福島工業高等専門学校 建設環境工学科

*福島工業高等専門学校 物質・環境システム工学専攻

Takehiko Midorikawa, Maya Suzuki*, Athuhiko Yoshida*, Masaji Yamanouchi and Takuro Kikuchi

Fukushima National College of Technology, Department of Civil Engineering

*Fukushima National College of Technology, Advanced Course in Chemical and Environmental System
Engineering

(2010年9月9日受理)

The purpose of this study is to quantitatively grasp the slipping behavior that happens between the rotor and the paste at the rotational viscosimeter. To evaluate the quantity of slipping, pictures of the interface between the rotor and the paste at the viscometer was taken with the high-speed camera, and the difference of the rotational speed of the rotor and the paste was observed. As the result, it was clear that this experimental method can evaluate the slipping behavior quantitatively, and the quantity of slipping become large as the rotational speed of the rotor become fast.

Key Words: Slipping behavior, Rotational viscometer, Superplasticizer, Shape of rotor

1. はじめに

1.1 研究背景

所定の耐荷力を有し欠陥の生じない耐久性のあるコンクリート構造物を作るためには、コンクリートの性質を熟知して製造および施工を行うことが必要である。

特に、コンクリートの施工においては、型枠の隅々にまでコンクリートを行き渡らせる事が重要であることから、適切な流動性を有しかつ材料分離のないコンクリートを用いることが必要である。フレッシュコンクリートの性状が適切でない場合には、コンクリート工事の施工性能に悪影響を及ぼすだけでなく施工ミスを誘発させることから、コンクリート構造物の耐久性にも大きな影響を及ぼすことになる。

しかしながらコンクリートのフレッシュ性状は、コンクリートの変形性や流動性さらには材料分離抵抗性など種々の要因が影響することから、それを評価する試験方法により結果が異なることとなり、フレッシュ性状を定量的に評価する簡便な方法を確立することが重要である。

1.2 フレッシュ性状の評価方法

コンクリートのフレッシュ性状は、工事に重大な影響を及ぼすにも関わらず、それを現場で簡易にかつ適切に評価する試験方法が無い等の理由で、一般的には

スランプ試験により評価されている¹⁾。

スランプ試験は、コンクリートのコンシステンシー試験として最も一般的に用いられている方法であり、専用のコーンを引き上げた後の自重によるコンクリートの沈下量を測るものである。このスランプ試験は、大まかにはコンクリートの柔らかさを評価しているものであるが、厳密な意味での物理量を測定しているものではない。しかしながら、現場で誰でも容易に測定できることから、世界中で用いられているコンクリートのフレッシュ性状評価方法である。

1.3 レオロジー試験

コンクリートのフレッシュ性状をレオロジーの観点から定量的に評価しようとする試みは以前から行われており、フレッシュコンクリートのレオロジー性質を定量的に把握することは、コンクリートの実施工における品質管理や施工性予測を行う際に本来不可欠である。

フレッシュコンクリートのレオロジーモデルとしてはビンガムモデルを用いるものが最も一般的であり、フレッシュコンクリートのレオロジーに関する研究のほとんどではビンガム定数、すなわち、降伏値と塑性粘度の二つのパラメータを用いてフレッシュ性状の定量化を試みている²⁾。



Fig.1 Rotational viscometer

したがって、レオロジーの観点からコンクリートのフレッシュ性状を定量的に評価するためには、粘性流体理論に基づいたレオロジー定数を正確に評価することが必要である。フレッシュコンクリートのレオロジー定数を求める試験方法は種々あるが、Fig.1 に示すような回転粘度計を用いるのが最も容易でかつ一般的である^{3), 4)}。

回転粘度計は、コンクリート中に挿入したローターを回転させた時の回転数とその時のトルクから、せん断ひずみ速度とせん断応力を測定し流動曲線を求めるものである。回転粘度計は、測定が簡便なことや測定前の準備等が不要なことが長所ではあるが、測定に際して試料と回転ローターとの間に「すべり」を生じ⁵⁾、正確なレオロジー定数を測定することが困難なことが短所である。このため、回転粘度計によるレオロジー定数の測定では、すべりを生じない回転ローターの開発に多大な労力が費やされることになるが、コンクリートに代表されるような固液二相流体にすべりを生じさせないローターの開発は、一般的に非常に困難である。

1.4 研究目的

Fig.2 に回転粘度計で測定される流動曲線の概要図を示す。一般的に、回転粘度計で測定されるコンクリートやモルタルまたはペースト等の流体は、降伏値と見かけ粘度を有する非ビンガム流体であるとされている。これはせん断速度により粘度が変化し、せん断速度が大きくなるにつれてせん断応力の微分値が小さくなるためである。一方、回転粘度計による粘度測定に

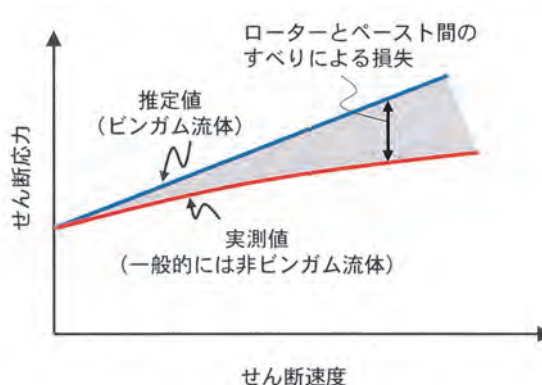


Fig.2 Outline of viscosity curve of concrete

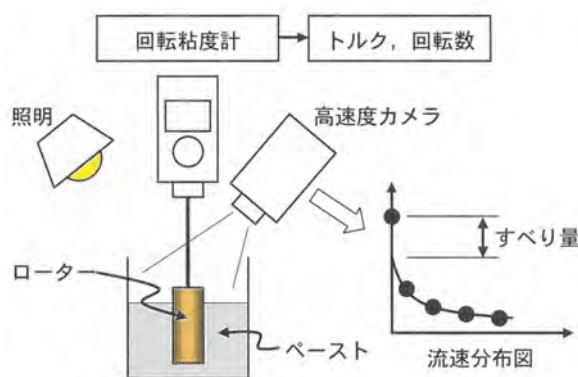


Fig.3 Experimental outline

おいては、回転ローターとペーストの間には「すべり」が生じることが明らかになっており、より精密な流動曲線を求めるためには、すべりによるせん断応力の損失分を測定値に加算する必要があるものと考えられる。

本研究は、測定が最も簡便である回転粘度計を用いてより精密な流動曲線を求めることに資することを目的とし、回転ローターとペーストとのすべりによるせん断応力の損失分を定量的に求める手法について、実験方法の妥当性およびすべり量の評価について検討したものである。

2. 実験方法

2.1 実験概要

Fig.3 にすべり量の測定方法を示す⁶⁾。ペーストとローターとの界面付近を高速度カメラで撮影し、その後スロー再生した動画データを用いてペーストの回転挙動を観察した。さらに、ペースト上に置いた浮子のローターを周回する速度を測定し、それを回転粘度計を用いた時のレオロジー基礎式に適用して、ペーストとローターとのすべり量を逆解析的に定量化した。

Fig.4 にペースト上にセットした浮子の様子を示す。測定するペーストを容器に入れ回転粘度計のローター

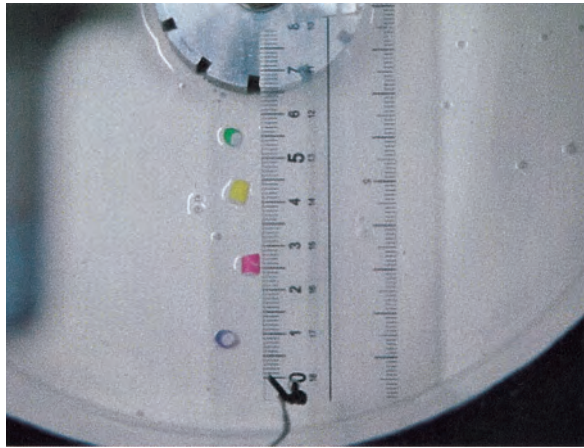


Fig.4 Installation of float

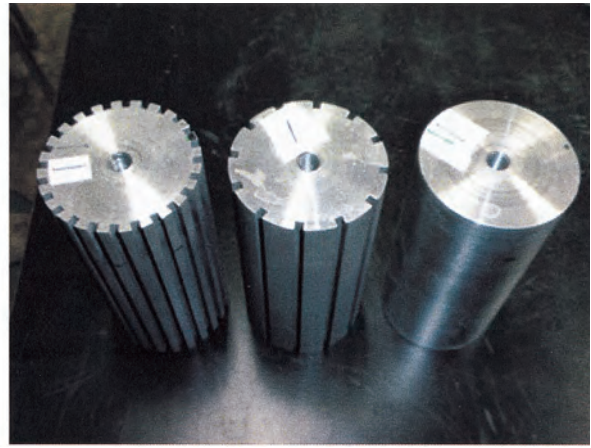


Fig.5 Type of rotor (left:R3, center:R2, right:R1)

Table 1 Mix proportion of paste

実験ケース	水粉体体積比 (w/p)	減水剤添加率 (%)	粉体の比表面積 (cm ² /g)
Case 1	0.60	1.50	4300
Case 2	0.60	0.85	4300
Case 3	0.84	0.65	3500

をセットした後、ペースト表面に発泡スチロール製の浮子（直径約3mm）を設置した。浮子は、ペーストの挙動が容易に測定できるように、直線的に約10mmの間隔で置いた。また、浮子の位置は、セットした規定により確認できるようにした。

Fig.5 に実験で使用した回転ローター（右から R1、R2、R3、全て直径 50mm、高さ 100mm の円柱形）を示す。R1 はローター表面に凹凸がなく滑らかなもの、R2 は中心角度 30° 毎に幅と深さがそれぞれ 3mm の凹部を設けたもの、R3 は中心角度 15° 毎に幅と深さがそれぞれ 3mm の凹部を設けたものである。R1→R2→R3 とローター表面が粗くなることを意図している。

実験における各ローターの所定の回転速度は、30rpm、50rpm、75rpm、100rpm の 4 パターンとした。測定時間は、外側の浮子がおおよそ 6 回転する程度を考え約 5 分間とした。

ペーストには石灰石微粉末（密度 $\rho=3.00\text{g/cm}^3$ 、比表面積 $3500\text{cm}^2/\text{g}$ および $4300\text{cm}^2/\text{g}$ の 2 種類を使用）と水道水を用いた。Table 1 にペーストの配合を示す。Case 1 は水粉体体積比 $w/p=0.60$ 、高性能減水剤添加率 1.50% とし、Case 2 は水粉体体積比を変化させずに高性能減水剤添加率のみ 0.85% に変化させたものとした。Case 3 は石灰石微粉末の粒子の大きさを変化させた（比表面積 $3500\text{cm}^2/\text{g}$ ）配合とし、水粉体体積比 $w/p=0.84$ 、高性能減水剤添加率を 0.65% とした。

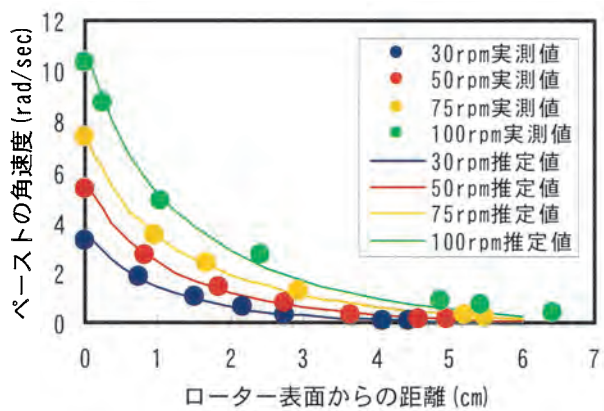


Fig.6 Flow velocity of paste (Case 1)

ペーストの作製量は 3 リットルとし、練混ぜにはホバートミキサーを用いた。

2.2 解析概要

測定された浮子の回転中心からの距離と回転速度を、回転粘度計を用いた時のレオロジー基礎式⁷⁾に適用して、ローターとペーストの界面部の回転速度を求めた。レオロジー基礎式中の未知量である降伏応力と塑性粘度を、実測された全ての点を満足するように最小二乗法により同定し、その結果を用いてローターの理論速度を逆解析した。実測されたローターの回転速度と逆解析で求められたローターの回転速度との差を、ローターとペーストとの「すべり量」と定義した。用いたレオロジー基礎式を以下に示す。

$$\theta = \left[\frac{M}{4\pi h} \left(\frac{1}{r^2} - \frac{1}{r_0^2} \right) + \tau_f \ln \frac{r}{r_0} \right] / \eta_{pl}$$

ここで、 θ : 半径 r における試料の角速度 (rad/sec)、 M : トルク (N・mm)、 r_0 : 試料の流動領域の外側半径 (mm)、 r : 試料の流動部の任意点の半径 (mm)、 h :

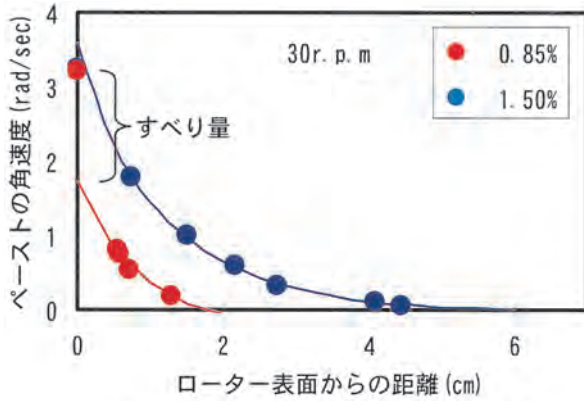


Fig.7 Difference of slipping behavior caused by adding superplasticizer (30rpm)

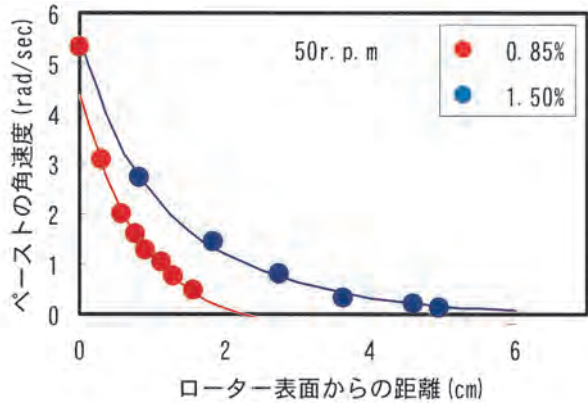


Fig.8 Difference of slipping behavior caused by adding superplasticizer (50rpm)

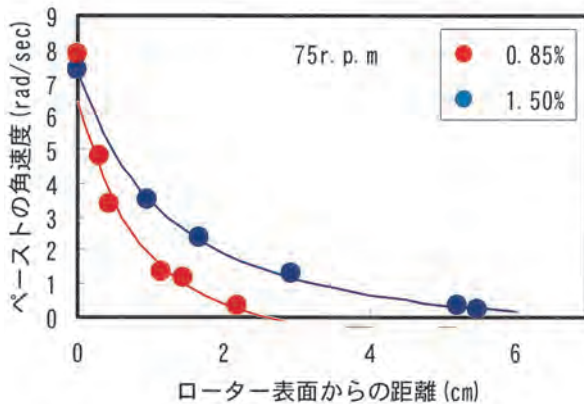


Fig.9 Difference of slipping behavior caused by adding superplasticizer (75rpm)

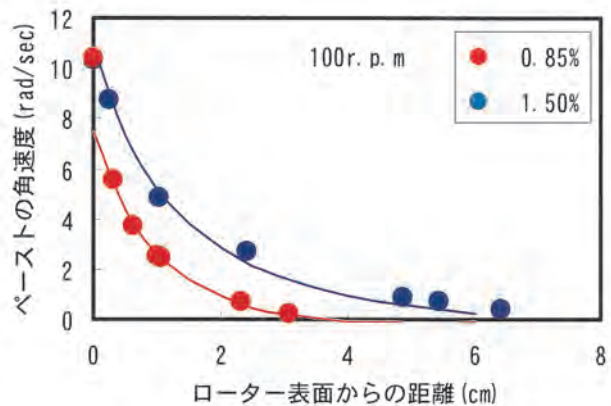


Fig.10 Difference of slipping behavior caused by adding superplasticizer (100rpm)

試料の深さ (mm)、 τ_f : 降伏応力 (N/mm^2)、 η_{pl} : 塑性粘度 (poise) である。

3. 実験結果

3.1 ペーストの挙動

Fig.6に Case 1 のペーストにおける流速分布を示す。ペーストの角速度は、ローターの回転速度に関わらずローター付近が最も早く、ローター表面からの距離が大きくなるにつれて遅くなっている。ペーストの角速度は、理論的に回転半径が大きくなるにつれて遅れることになるが、本ペーストでは粘度と降伏値の影響により外側に離れるほど理論値以上に遅くなっている。また、ペーストが回転する半径は、ローターの回転数が大きくても小さくてもほぼ同じであり約5cm程度であった。

実測されたペースト部の速度をレオロジー基礎式に代入し逆解析した推定値を見ると、いずれの回転速度においても実測値と良く一致する結果となった。特に、ローターの速度(ローター表面からの距離が0の地点)が実測値と推定値とでほぼ同じ速度となったことから、

本手法によりローター界面におけるペースト速度の推定が可能であることが示唆された。本結果では、いずれの回転速度においても、ローター速度の実測値と推定値が同じであったことから、すべりは生じないペーストであったことが伺える。

3.2 高性能減水剤によるすべり量の変化

Fig.7から Fig.10に Case 1 と Case 2 のペーストにおける流速分布を示す。ここでは、高性能減水剤の添加量によるすべり量の違いについて示している。高性能減水剤添加率が1.50%のペーストにおいては、ローター表面におけるペーストの角速度の実測値と推定値がほぼ同じであることからすべりを生じていないと推察されるが、高性能減水剤添加率が0.85%に低下させることによって、ローター表面におけるペーストの角速度の推定値が実測値を大きく下回ることから、すべりが生じているものと考えられる。また、高性能減水剤添加率を低下させるとペーストが回転する範囲が狭くなるものの、ペーストの回転速度の低下率はほぼ同じであり、言い換えれば、高性能減水剤添加率を低下させた場合の流速分布は、ローターとペーストのすべり

Table 2 Difference of rheology coefficient caused by adding superplasticizer

回転速度 (rpm)	減水剤添加率 (%)	降伏応力 (N/mm ²)	塑性粘度 (poise)
30	0.85	0.0045	0.0038
	1.50	0.0019	0.0028
50	0.85	0.0069	0.0030
	1.50	0.0020	0.0036
75	0.85	0.0137	0.0046
	1.50	0.0000	0.0066
100	0.85	0.0160	0.0066
	1.50	0.0000	0.0067

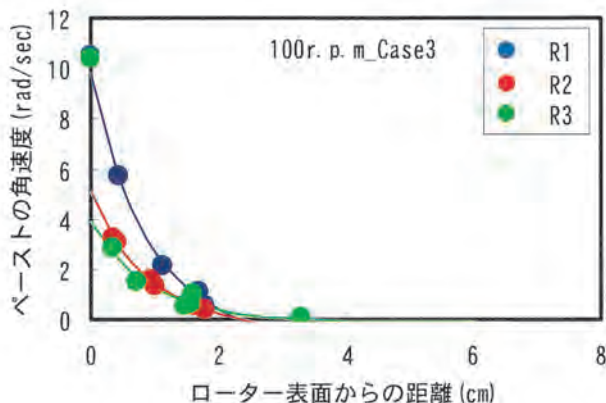


Fig.12 Flow velocity of paste changing rotor

量だけ下側にシフトした流速分布になる。

Table 2 に高性能減水剤添加率の違いがペーストのレオロジー定数に及ぼす影響を示す。この表は、実験結果をレオロジー基礎式に代入し降伏応力と塑性粘度を逆解析した結果を纏めたものであり、高性能減水剤添加率の違いが、降伏応力と塑性粘度のどちらに大きく影響を及ぼすかを示したものである。高性能減水剤添加率を 0.85% から 1.50% に増加したとき、降伏応力と塑性粘度のどちらの値も変化するものの、特に降伏応力を大きく低下させていることが分かる。一般的に、ペーストのレオロジー定数に及ぼす影響は、水量が粘度に対して、高性能減水剤量が降伏値に対して大きく影響すると言われているが、Table 2 よりこのことを定量的に示すことができた。

以上のことを鑑みると、ローター表面とペーストとのすべりは主に降伏値に原因があると考えられ、降伏値が大きくなることによりすべりが顕在化するものと推察される。

Fig.11 にローターの角速度とすべり量との関係を示す。角速度が 3.2 rad/sec におけるすべり量が多少大きい傾向を示すが、ローターの角速度が増加するにつれてすべり量も増加する傾向となった。

以上のことから、ローターの回転速度が大きくなる

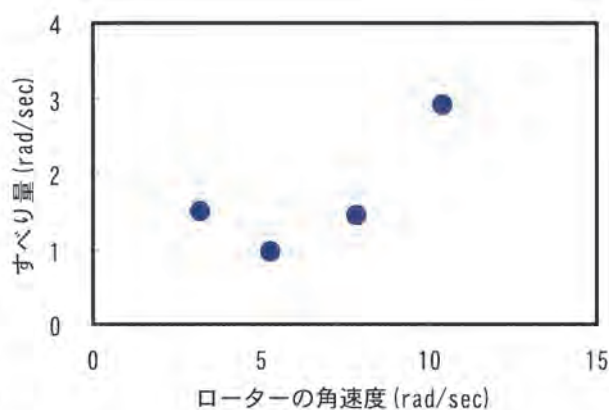


Fig.11 relationship between angular velocity of paste and slipping

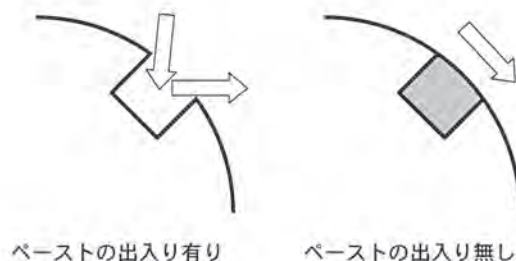


Fig.13 Behavior of paste at concave of rotor

につれてすべり量は指数的に大きくなるのが分かり、回転粘度計でのレオロジー定数の測定は、ローターの回転速度が大きくなるほどすべりの影響を大きく受けるため、正確な流動曲線の測定が困難になることが明らかになった。

3.3 ローターの表面形状によるすべり量の変化

Fig.12 に Case 2 の配合における流速分布を示す。ここでは、ローターの種類によるすべり量の違いを示した。R1 はローター表面が滑らかなものであるが、実測値と推定値との差がほとんど見られないことから、すべりを生じていない結果となった。これに対して R2 および R3 はローター表面に凹凸を設けたものであるが、実測値と推定値に開きがあることから、すべりを生じている結果となった。また、すべり量はローター表面の凹凸が最も大きい R3 において顕著であった。

R2 および R3 の回転時におけるペーストの挙動を観察すると、ローターの回転が遅い場合にはローター表面の凹部にペーストが出入りしながらペーストが回転するものの、ローターの回転が速くなるにつれてローター表面の凹部へのペーストの出入りが無いように見受けられた。つまり、一度凹部に入り込んだペーストはそのまま凹部を充填した状態であり、あたかもローターの一部であるように振る舞う挙動を示した

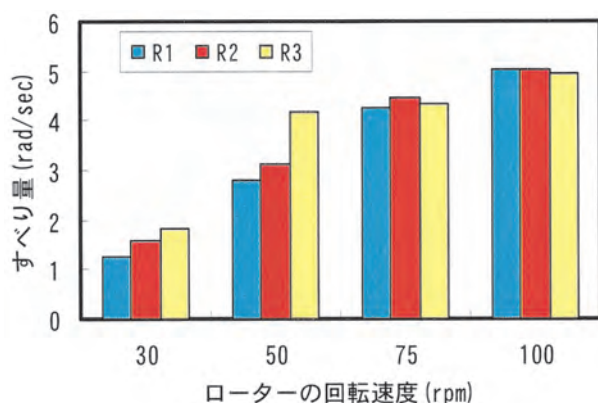


Fig.14 Relationship between type of rotor and slipping

(Fig.13)。したがって、ローターとペーストとの摩擦面積は、ローター表面に凹部が少ないほど大きく、結果として、R1において摩擦が最も大きくなりすべり量が少なく、逆に R3 において摩擦面積が最も少なくなりすべり量が大きくなったものと考えられる。

一般的に、ローター形状を複雑にするほど、ローター表面とペーストとの摩擦係数が増加しすべりが生じ難くなると考えられるが、これはローターの凹部に入り込んだペーストが、外部のペーストと入れ変わる場合にのみ適用できるものと考えられる。本実験においては、ローターの凹部の幅および深さを 3mm としたが、これをより大きくすることで、ペーストの入れ換えが生じ、すべりが生じにくくなる可能性がある。このメカニズムについては、さらなる検討が必要である。

Fig.14 に Case 3 の配合におけるローター種類とすべり量との関係を示す。この Case 3 の配合は、Case 1 や Case 2 よりもペーストの粘度を低く抑えかつ降伏値を大きくするとともに、粉体の粒径を大きくしてすべりを生じやすくした配合である。ローターの回転数が増加するにつれてすべり量は増加するものの、前述したように相対的に R1 ですべり量が少なく、R3 においてより大きなすべりを生じる結果となった。ローターの回転数が増加するにつれて R1、R2、R3 におけるすべり量の差が小さくなっていくが、これは絶対的なすべり量が増加することにより相対的な差が縮小したものと考えられることができる。

以上のことから、回転粘度計におけるレオロジー定数の測定は、ローターの表面形状によりすべり量が大きく影響され、その要因はローターの表面形状とペーストの挙動に関係する可能性があることが示唆された。

4. まとめ

回転粘度計によるレオロジー定数の測定において、ペーストと回転ローターのすべり量を定量的に評価することを目的とし実験を行った。本研究により得られた知見を以下に示す。

- 1) ペーストと回転ローターの挙動を高速度カメラで撮影し、そこから得られたデータをレオロジー基礎式に代入しすべり量の評価した。本実験方法によりすべり量を定量的に求めることができた。
- 2) 高性能減水剤添加率によりすべり量が異なり、また、高性能減水剤の添加は塑性粘度より降伏応力により多くの影響を与えることから、すべりは降伏応力の増加が要因で生じるものと推察される。
- 3) ローターの表面形状によりすべり量が異なる。すべり量は、ローター表面の凹凸とそこに流入・流出するペーストの挙動により影響されるものと推察される。

文 献

- 1) 谷川恭雄：フレッシュコンクリートの流動特性とその予測、セメントジャーナル社、pp.9-62、2004
- 2) 菊川浩治：モルタルおよびコンクリートの粘度式に関する研究、土木学会論文集第 414 号、pp.109-118、1990
- 3) 谷川恭雄、森博嗣、増田一幸、渡辺健治：回転粘度計によるレオロジー定数測定方法に関する有限要素解析、コンクリート工学年次論文報告集 10-2、pp.321-326、1988
- 4) 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、pp.37-42、2007
- 5) コンクリート技術シリーズ フレッシュコンクリートのコンシステンシー評価に関する技術の現状と課題、土木学会、pp.1-20、2003
- 6) 村田二郎、菊川浩治：まだ固まらないコンクリートのレオロジー定数測定法に関する一提案、土木学会論文報告集、第 284 号、pp.117-126、1979
- 7) 川田裕郎：計量管理技術双書(1) 改訂 粘度、コロナ社、pp.99-125、1980