# 論文 十字羽根回転粘度計を用いたセメントペーストの流動特性と レオロジー定数の測定に関する実験的研究

平野 修也\*1·山田 義智\*2·西 祐宜\*3·崎原 康平\*4

要旨:本研究では、十字羽根を装着した回転粘度計を用いてセメントペーストのせん断応力の緩和曲線を測定し、せん断応力とせん断速度の関係(流動曲線)からレオロジー定数を導出した。一般的な二重円筒形の回転粘度計で得られた結果と比較したところ、十字羽根回転粘度計ではせん断速度の増加に伴ってせん断応力が大幅に高くなる傾向を示した。また、十字羽根の回転によって試料が渦流を形成する場合があり、このときの流動曲線はダイラタント性を高く見積もる傾向を示した。これにより、十字羽根回転粘度計を用いてレオロジー定数を精度良く推定するためには、適切なレオロジーモデルを選定する必要性が示唆された。 キーワード:回転粘度計、セメントペースト、流動曲線、レオロジー定数、十字羽根

# 1. はじめに

フレッシュコンクリートの流動特性を把握し,それを 精度良く推定することは,コンクリート工事の施工精度 の向上に寄与するものと考えられる。コンクリートの流 動特性を捉える上で,非ニュートン流体を対象としたビ ンガムモデルを適用し,回転粘度計を用いてセメント系 材料(セメント・モルタル・コンクリート)のレオロジー 定数(降伏値および塑性粘度)を求めた事例が存在する。

伊波ら<sup>1)</sup>は、コンクリートの構成材料であるセメント ペースト(以降、ペーストと略記)を対象に外円筒回転式 の共軸二重円筒回転粘度計を用いたレオロジー試験を実 施し、セメントの凝集や水和の影響を考慮した粘度式(修 正 Roscoe 式)を考案し、ペーストの流動特性を推定した。 ペーストは骨材の接触や内部摩擦による影響が無く、回 転粘度計の二重円筒の内外径比を小さくできることから、 レオロジー定数を精度良く推定する観点からすると、セ メント系材料の中で最適な試料であると言える。

一方,筆者らはフレッシュコンクリートの取り扱い易 さをハンドリングと称し、体感的なハンドリングの違い を数値化することを目的としてベーンせん断試験を実施 した<sup>2)</sup>。フレッシュモルタルを対象にベーンせん断試験 を実施した結果、化学混和剤を構成するポリカルボン酸 系分散剤の違いにより変化するハンドリングの微小な差 を表わせることを見出した。すなわち同一フロー値であ っても最大トルク値(せん断抵抗値)が変化し、測定値が 大きいものほどハンドリングで感じられる見かけの粘性 が高くなる傾向が得られた。本試験機の特徴は、十字断 面の羽根型スピンドル(以降、十字羽根と略記)を試料に 挿入して、手動で回転させて最大トルク値を測定できる 点である。二重円筒形の回転粘度計は,層流状態を形成 するのに内円筒と外円筒のギャップを小さくするため, 骨材を含むセメント系材料での適用は困難であるが,十 字羽根による測定では,骨材を含むモルタルやコンクリ ートのせん断抵抗値を測定可能と考える。しかし,十字 羽根の回転によって,試料がどのように振舞うのかは不 明であり,回転速度(せん断速度)が最大トルク値(最大せ ん断応力)に及ぼす影響について検証する必要がある。

そこで本研究では、十字羽根を装着した回転粘度計(以降、十字羽根回転粘度計または十字羽根と略記)を用いて ペーストのレオロジー試験を実施した。せん断速度とせ ん断応力の関係から流動曲線を導出し、先ずはビンガム モデルによる近似からレオロジー定数を求めた。

#### 2. 本論文の構成

本論文では、ポリカルボン酸系分散剤を用いて目標フ ローを得たペーストを対象に、内円筒回転式の共軸二重 円筒回転粘度計(以降、二重円筒形回転粘度計または二重 円筒形と略記)を用いてレオロジー試験を実施した。この 測定と同じペースト試料を対象に十字羽根回転粘度計に よるレオロジー試験を行い、測定結果を比較検討した。

また,十字羽根回転粘度計ではペースト試料の振舞い (せん断流)を直接観察できるため,せん断速度を変化さ せた場合のせん断流の変化を動画撮影により記録した。

さらに、二重円筒形で得られた流動曲線と十字羽根に より得られた流動曲線を比較し、レオロジー定数を求め るのに適したレオロジーモデルの選定を試みた。

最後に,二重円筒形と十字羽根の各々で求めたレオロ ジー定数を比較し,十字羽根回転粘度計が有するレオロ

\*1 株式会社フローリック 技術本部コンクリート研究所 主査 修士(工学) (正会員) \*2 琉球大学 工学部工学科建築学コース 教授 博士(工学) (正会員) \*3 株式会社フローリック 技術本部コンクリート研究所 主席研究員 博士(工学) (正会員) \*4 琉球大学 工学部工学科建築学コース 助教 博士(工学) (正会員) ジー試験装置としての特性について考察した。

#### 3. 実験概要

#### 3.1 使用材料

実験に使用した材料を表-1 に示す。セメント分散剤は, 化学構造の異なる2種類(重量平均分子量:PC-A<PC-B, 側鎖長:PC-A<PC-B)を使用した。

#### 3.2 回転粘度計

実験に使用した回転粘度計は,BrookField 社製の共軸 定せん断速度型である。使用したロータ・スピンドルの 形状寸法を図-1 に示す。内円筒回転型の二重円筒形は, 内円筒(ロータ)と外円筒(ジャケット)のギャップが約 1mm と狭く,試料は層流状態となる。これを基準とし, ロータを十字羽根(板厚 1mm)に置換した場合の測定結果 と比較した。十字羽根を用いる場合は,15 ↔ × 10 cm のプ ラスチック製容器にペーストを充填し,試験に供した。

#### 3.3 試験項目

表-2 に試験項目を示す。フロー試験は,目標フロー(後 述の表-3 に示す)に到達するように分散剤の添加率を調 整して,ペーストの0打フローを測定した。

レオロジー試験では、回転粘度計を用いて、目標フロ ー値に到達したペーストを対象に 5 水準(後述の表-3 に 示す)のせん断速度を 180 秒間与え続けて、せん断応力の 緩和曲線(以降,応力緩和曲線と称する)を得た。図-2 に 示すように応力緩和曲線から任意のせん断時間における 流動曲線を導出した。本研究では、文献 2)を参考に、試 料のフロー停止時間が最長で 30 秒程度であったことか ら、その中間時間に相当するせん断時間 15 秒、およびペ ーストの流動が定常状態を表すと考えられるせん断時間 180 秒の流動曲線を求め、各々のレオロジー定数を求め た。なお、一部の水準で十字羽根の回転によるせん断流 を上部より動画撮影し、せん断速度やペーストの体積分 率(次項で後述)がせん断流に及ぼす影響を検証した。

# 3.4 実験結果および考察

表-3 に実験の要因と水準を示す。ペーストの体積分率 は、ペースト中のセメント量の割合を容積比で表し、懸 濁液の濃度に相当するものである。

#### 4. 実験結果および考察

#### 4.1 フロー試験

図-3 に分散剤添加率(固形分添加率)とペーストフローの関係を示す。同一フロー値における分散剤添加率を比べると、いずれの W/C においても PC-A に比べて PC-Bの方が高くなる傾向を示し、この傾向は W/C の低下に伴い顕著となった。図-4 にペーストの体積分率 Φ と目標フローを得るのに必要な分散剤添加率の関係を示す。図中にはΦ に対応する W/C を参考値として示す。W/C=40%

表-1 使用材料

材料	記号	概要・品質・主成分		
水	W	上水道水(つくば市)		
セメント	С	普通ポルトランドセメント(密度:3.16g/cm <sup>3</sup> )		
セメント 分散剤	PC-A	ポリカルボン酸系化合物,ハンドリングで感じら れる見かけの粘性が比較的低い <sup>2)</sup>		
	PC-B	ポリカルボン酸系化合物,ハンドリングで感じら れる見かけの粘性が比較的高い <sup>2)</sup>		
助剤	DF	消泡剤(ポリアルキレングリコール誘導体)		

混練手順: C+W+PC-A or PC-B+DF→低速 30 秒→掻落し 30 秒→低速 90 秒 →5 分静置→低速 30 秒→排出



図-1 二重円筒ロータと十字羽根スピンドルの形状寸法

表-2 試験項目

試験項目	規格・概要
フロー試験	JIS R 5201:2015 0 打フロー値を測定.
レオロジー試験	回転粘度計による測定.一定のせん断速度におけ るせん断応力の緩和曲線を得る.一部の水準を対 象に十字羽根によるせん断流を動画で撮影.



表-3 実験の要因と水準			
要 因	水 準		
セメントの種類	N		
ペーストの W/C(%)	$45 \cdot 40 \cdot 35 \cdot 30$		
(ペーストの体積分率 Φ)	$(0.41 \cdot 0.44 \cdot 0.47 \cdot 0.51)$		
セメント分散剤の種類	PC-A • PC-B		
目標ペーストフロー(mm)	$250\pm25 \cdot 300\pm25 \cdot 350\pm25$		
回転粘度計のロータの形状	二重円筒形・十字羽根		
回転粘度計のせん断速度ý(1/sec.)	7.1 · 28.3 · 56.6 · 84.9 · 141.6		



から35%の間に分散剤添加率が飛躍的に増加する傾向を 示し、側鎖の長い PC-B において顕著となることから、 ペースト濃度の増加に伴い分散剤の化学構造の違いが流 動特性に及ぼす影響が大きくなることが示唆された。 4.2 レオロジー試験

# (1) 二重円筒形回転粘度計による応力緩和曲線

二重円筒形回転粘度計による測定結果の一例として, 図-5 に W/C=30%・目標フロー300mm のペーストにお ける応力緩和曲線を示す。せん断速度 $\dot{\gamma}$ が小さい履歴で は応力緩和の傾向が緩やかであるが, $\dot{\gamma}$ の増加に伴い応 力緩和傾向が顕在化した。 $\dot{\gamma}$ =84.9 および 141.6(1/sec.)で は, PC-A に比べて PC-B のせん断応力 $\tau$ の初期値が高く なる傾向を示し,他の調合でも同様の傾向を示した。

#### (2) 十字羽根回転粘度計による応力緩和曲線

+字羽根回転粘度計による測定結果の一例として,図 -6 に図-5 と同一水準のペーストにおける応力緩和曲線 を示す。比較の対象として,図-5 のせん断速度 $\dot{\gamma}$ = 141.6(1/sec.)の履歴(凡例の CDC)を破線で併載した。特筆 すべきは、縦軸  $\tau$ の数値が二重円筒形に比べて十字羽根 の方が大幅に大きいことである。PC-Bの $\dot{\gamma}$ =141.6(1/sec.) における  $\tau$ の初期値を比べると,破線の二重円筒形(CDC) に対して約 3.3 倍の値を示した。また、高せん断速度時 における PC-A に対する PC-B のせん断応力の増加傾向 は、二重円筒形に比べて顕著となった。このことから回 転粘度計のロータの形状の違いにより、ペースト試料の せん断応力特性が大きく変化することが示唆された。

# (3) 十字羽根の回転によるペーストせん断流の観察

十字羽根の回転によって試料がせん断される様子を確 認するため, PC-B を用いて目標フロー300mm を得たペ ーストを対象にせん断応力測定に併行してせん断流を動 画撮影し、せん断時間1秒、15秒および180秒時点の静 止画を切り出した。一例として、写真-1に W/C=35%の (a) γ=7.1(1/sec.), (b) γ=84.9(1/sec.)のせん断流(点線で境 界を付記)を示す。実験では試料の上面から約 1mm の深 さに上端部が位置するように十字羽根を沈めており, (a) y=7.1 のせん断時間1秒では羽根が回転する様子が窺 える。15秒になると羽根の回転軌道に沿って境界が認め られ、180 秒では境界が顕在化して界面の外側に薄い層 が見受けられた。(b) y=84.9 では、せん断時間1秒で試 料が回転軸を中心に渦状に流動し始める様子が認められ た。15秒になると渦流の外側にある程度厚みを持つ別の 層が見受けられる。このとき、目視によると同心円状の 内側の方が流速は速く、外側になるにつれて遅くなるよ うに感じられた。その後のせん断領域の拡大は緩やかに なり, せん断時間 70 秒程度で概ね収束する様子が確認さ れた。写真-1のせん断時間 180 秒(T=180)の(a)と(b)を比 べると, γの違いによるせん断領域の差は歴然であった。



図-5 二重円筒形回転粘度計による応力緩和曲線の例

------ $\dot{\gamma}$ =7.1(1/sec.) —  $\dot{\gamma}$ =28.3(1/sec.) —  $\dot{\gamma}$ =56.6(1/sec.)



図-6 十字羽根回転粘度計による応力緩和曲線の例



写真-1 十字羽根の回転によるペーストせん断流の変化 (W/C=35%・目標フロー300mm)



#### (4) ペーストのせん断半径とせん断応力の関係

写真-1 のような一連の静止画から十字羽根の回転に よるペーストのせん断領域を判定し,せん断径の半分を せん断半径 R として求めた。さらに,図-6の PC-B の応 力緩和曲線から T=15sec.および T=180sec.のせん断応力 を $\tau_{15}$ および $\tau_{180}$ として抽出し,各時点のせん断半径  $R_{15}$ および  $R_{180}$ との関係を図-7に示した。同図には,せん断 速度 $\dot{\gamma}$ およびペーストの体積分率  $\Phi$ ごとにデータをプロ ットし,その関係を折れ線で示した。先ず,せん断半径 R は $\dot{\gamma}$ の増加に伴って増加する傾向を示し, $R_{180}$ は最大で 約50mm となった。これは十字羽根の回転半径の5倍に 相当する。 $R_{15}$ から  $R_{180}$ への経時的な伸び幅は 1~5mm の範囲となった。一方,せん断応力は、 $\tau_{180}$ よりも $\tau_{15}$ の 方が大きな値を示し、この傾向は $\phi=0.51$ において顕著 であった。体積分率が高い調合では粒子同士の衝突や摩 擦の影響が大きく、流動初期の $\tau_{15}$ ではこうした粒子間相 互作用の影響が大きいと考える。流動時間が長くなるに つれて相互作用は収束し、流動性が定常状態に近い $\tau_{180}$ では、せん断応力が低下する傾向を示した。

十字羽根の回転速度の増加によりせん断半径が増加す る本現象は、羽根の回転半径の外側の粒子が引きずられ る状態にあり,これをランキンの複合渦<sup>\_0</sup>で以下のよう に仮説する。羽根の回転範囲では強制渦、その外では自 由渦が生じ、後者は中心から離れるにつれて速度が自ず と低下するが、羽根の回転速度が大きければ自由渦の幅 は自ずと拡がる。図-7のせん断半径の増加が自由渦の幅 の拡がりによるものならば、本実験は粒子の引きづり度 合いを評価していると言える。図-8 に概念図を示す。自 由渦の範囲内に在る粒子は、強制渦の速度に引っ張られ るように流動する。このとき、セメント粒子に吸着した ポリカルボン酸系分散剤は、側鎖を液相に配向した状態 にあり, 粒子が引きづられる際に側鎖が流動抵抗として 作用する可能性がある。図-6のように同じ流動性を有す るペーストにおいて、側鎖が長い PC-B の方が、同じせ ん断速度でもせん断応力が大きくなる傾向を示したのは, 上述した仮説の妥当性を示唆するものと考える。

#### 5. レオロジー定数に関する考察

#### 5.1 流動曲線の導出

# (1) ビンガムモデルによる近似

前章で得られた実験結果から図-2 の手法でせん断応 力とせん断速度の関係を抽出し,流動曲線を求めた。一 般にペーストの流動曲線は,降伏値を有する非ニュート ン性の流動特性を示し,塑性粘度を有するビンガムモデ ルで近似できるものとされる。本論文では,先ず式(1)の ようにビンガムモデルによる流動曲線の近似を試みた。

$$\tau = \tau_{\gamma} + \eta \dot{\gamma}$$

ここで、 $\tau$ はせん断応力、 $\tau_y$ は降伏値、 $\eta$ は塑性粘度、 $\dot{\gamma}$ は せん断速度を表す。以降、二重円筒形によるせん断時間 15 秒時点のせん断応力を $\tau_{c15}$ 、十字羽根によるせん断時 間 15 秒時点のせん断応力を $\tau_{v15}$ と表し、同様に $\tau_{c180}$ 、 $\tau_{v180}$ の各々についてもビンガム近似を実施した。

(1)

図-9 にビンガム近似の代表例を示す。実線で示した τ<sub>c15</sub>・τ<sub>v15</sub>に比べて,点線のτ<sub>c180</sub>およびτ<sub>v180</sub>の方が同じせ ん断速度でもせん断応力が低下するせん断時間依存性, 即ちチキソトロピー性が確認された。

図-10は W/C=30%・目標フロー250mm, 図-11は W/C =30%・目標フロー350mm のペーストの流動曲線をビン ガム近似したものである。いずれも十字羽根による τ<sub>v15</sub> および τ<sub>v180</sub> 共に降伏値が負の値を示し,これらの水準で は流動曲線をビンガム近似できないことが示唆された。

# (2) ハーシェル・バークレイ式による近似

前節において流動曲線がビンガム近似できない場合, 式(2)に示す粘性係数にべき乗の粘性指数を設けたハー シェル・バークレイ式を採用し,再び近似を試みた。

$$\tau = \tau_y + \mu \dot{\gamma}^n$$
 (2)  
ここで, τはせん断応力,  $\tau_v$ は降伏値,  $\mu$ は非ニュートン







(W/C=45%・目標フロー250mm)





粘性係数(以下,粘性係数と略記), $\dot{\gamma}$ はせん断速度,nは 粘性指数を表す。なお,n=1のとき式(2)はビンガム塑性 を示し,  $\mu$ は塑性粘度 $\eta$ に相当するものとなる。

図-12 は、図-10 の中から  $\tau_{v15}$ ,  $\tau_{v180}$ をハーシェル・バ ークレイ式で近似(図中の  $\tau_{v15H-B}$ ,  $\tau_{v180H-B}$ )したものである。 粘性指数 n > 1 となり, 十字羽根ではペーストの流動特性 をダイラタント挙動として捉える可能性が示唆された。

図-13 は、図-11 で降伏値が負の値を示した τ<sub>v15</sub>・τ<sub>v180</sub> をハーシェル・バークレイ式で近似したものである。こ こでは、文献 4)を参考に式(3)に示す降伏値 τ<sub>y</sub>を持たない べき乗則(オストワルドモデル)による近似を試みた。

#### $\tau = \mu \dot{\gamma}^n$

(3) 法由运

ここで,式中の係数は,式(2)と同様のため割愛する。図 -13 では n>1 となり,図-12 と同様にγの増加に伴いペ ーストの粘度が増加する傾向,即ち硬化性状を示すこと が示唆された。以上のように,本実験では二重円筒形回 転粘度計で得られた流動曲線は,全てビンガムモデルで 近似できた。一方,十字羽根で得られた流動曲線は,粘 性係数が卓越することで降伏値が負の値となる場合があ り,粘性指数を設けた近似式が必要となった。

#### 5.2 レオロジー定数の導出

#### (1) 降伏値

前節で展開した流動曲線の近似を経て、レオロジー定数を導出した。先ずは、二重円筒形で得られた降伏値についてペーストの体積分率 $\Phi$ との関係を図-14 に示す。 せん断時間 15 秒時点の流動曲線から得た降伏値  $\tau_{yc15}$  と 180 秒時点の  $\tau_{yc180}$ を併載し、目標フロー別にまとめた。 参考に  $\tau_{yc15}$ の近傍に実測フロー値( $\tau_{yc180}$ も共通の値)を付 記した。PC-A・PC-B 共に同一 $\Phi$ で同等のフロー値が得 られており、目標フローが高くなるにつれて降伏値は低 くなる。本実験では同一目標フローにおいて  $\tau_{yc15}$ が $\Phi$ の 大小を問わず概ね同等の値を示すのに対して、 $\tau_{yc180}$ は $\Phi$ が小さい、即ち単位水量が多い調合ほど降伏値が低くな る傾向を示した。これは、180 秒の測定時間でペースト の水とセメントが分離した影響であると推察する。以降、 測定精度に信頼性のあるせん断時間 15 秒を対象として、 レオロジー定数に関する考察を行うこととする。

図-15 にペーストの体積分率と十字羽根で得られた降 伏値の関係を示す。前節で述べた通り、十字羽根による 測定ではペーストのダイラタント挙動を抽出するため、 ビンガム近似では塑性粘度が卓越し、降伏値が負の値と なる場合がある。二重円筒形で得られた降伏値が図-14 のように同一フロー値で概ね同等であるのに対して、十 字羽根による τ<sub>yv</sub>は、一部を除いてペーストの体積分率 Φ の増加によって減少する傾向にあり、装置特性を窺わせ るものとなった。なお、τ<sub>yvH-B</sub>の赤いプロットが示すよう に、十字羽根の降伏値はハーシェル・バークレイ式を用 いることで適正に近似できる可能性が示唆された。

# (2) 塑性粘度および粘性係数

ペーストの体積分率  $\Phi$  と塑性粘度  $\eta$  または粘性係数  $\mu$ の関係を図-16(縦軸ラベルを  $\eta$  or  $\mu$  と略記)に示す。ビンガム近似により得た二重円筒形の塑性粘度  $\eta_c$ は,  $\Phi$ の増加に伴い直線的に増加した。一方,十字羽根の $\eta_v$ は,  $\Phi$ 











の増加に伴い指数的に増加する傾向を示し、十字羽根の 装置特性によりペースト粘度を高く見積もることが示唆 された。また、どの目標フローにおいても、 $\Phi$ =0.51 では PC-A に比べて PC-B の方が  $\eta_v$  は高い値を示した。この ことは、分散剤の化学構造の違いに由来するペースト粘 度の差を十字羽根によって評価できる可能性を示唆して いる。なお、ハーシェル・バークレイ式による十字羽根 の粘性係数  $\mu$  は、ビンガム近似による  $\eta_v$  よりも粘度を低 く評価した。

# 5.3 二重円筒形と十字羽根のレオロジー定数比較 (1) 降伏値

二重円筒形による降伏値  $\tau_{yc}$  と十字羽根による降伏値  $\tau_{yv}$ の関係を図-17 に示す。ここでは、ビンガム近似で降 伏値  $\tau_{yv}$ が負の値を示した場合、ハーシェル・バークレイ 式により修正した  $\tau_{yv}$ を採用してプロットした。 $\tau_{yc}$ は目 標フロー値ごとに概ね一定値を示すのに対して、 $\tau_{yv}$ はペーストの流動性が低い場合はばらつくが、流動性が高く なるにつれて  $\tau_{yc}$ に近い値に収束する傾向を示した。

# (2) 塑性粘度および粘性係数

二重円筒形による塑性粘度  $\eta_c$  と十字羽根による塑性 粘度  $\eta_v$  または粘性係数  $\mu$ の関係を図-18(縦軸ラベルを  $\eta_v$ or  $\mu$  と略記)に示す。図-17 に対応してビンガム近似で降 伏値  $\tau_{yv}$ が負の値を示した場合は、ハーシェル・バークレ イ式で近似した粘性係数を採用してプロットした。分散 剤別に  $\eta_c$  と  $\eta_v$  または  $\mu$  の関係をまとめると直線回帰が 可能となり、いずれの目標フローにおいても PC-B の方 が PC-A よりも直線の傾きが大きくなる傾向を示した。 これは、分散剤の構造の違いによるペースト粘度の違い を十字羽根による測定で評価できることを示唆している。

既述の通り,ペーストの調合条件や流動特性によって, 十字羽根では二重円筒形に比べてペースト粘度を高く見





積もる傾向があるため、レオロジーモデルの最適化が重要となる。本実験では、ビンガム近似による塑性粘度の 推定が W/C=45 ~ 40% までは可能であるが、 W/C=35%(Φ=0.47)よりもペースト濃度が高くなる場合、 粘性係数にべき乗の指数を考慮したハーシェル・バーク レイ式によるモデル化が必要となる可能性が示唆された。

#### 6. まとめ

本論文では、十字羽根を装着した回転粘度計を用いて セメントペーストを対象にレオロジー測定を実施した。 得られた主な知見を以下に示す。

- (1)ペーストのせん断応力緩和曲線を比較すると、十字 羽根では二重円筒形に比べてせん断応力が高くなる 傾向を示し、試料のせん断速度依存性およびチキソ トロピー性が顕著となる傾向が得られた。
- (2) 十字羽根の回転によるペーストのせん断流は、回転軸を中心に同心円状の渦流となり、せん断速度の増加に伴ってせん断領域が拡がる傾向を示した。この測定原理に基づき、二重円筒形に比べてセメントペーストの粘度が高く見積もられていると考える。
- (3) 二重円筒形で得られた流動曲線がビンガムモデル で近似できたのに対して、十字羽根ではペーストの 体積分率が増加するにつれてダイラタント性が顕 著となるため、レオロジー定数を適正に求めるため には、ハーシェル・バークレイ式に則って非ニュー トン粘性係数に粘性指数を設ける必要がある。

#### 参考文献

- 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
- 平野修也,西祐宜:ベーンせん断試験によるフレッシュコンクリートのハンドリングの評価に関する 実験的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.40, No.1,pp.1107-1112,2018.6
- 東舟道裕介、山田義智、上原義己、崎原康平:セメントペーストのフロー特性とレオロジー定数に関する研究、コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1,pp.1153-1158, 2017.6
- 4) 日本機械学会 流体工学部門 ホームページ: http://www.jsme-fed.org/experiment/index.html (閲覧 日:2019年1月9日)
- 5) 東舟道裕介,山田義智,上原義己,崎原康平:高性 能 AE 減水剤添加量によるセメントペーストの流動 特性変化に関する実験的研究,日本建築学会九州支 部研究報告, Vol.55, pp.137-140, 2016.3