

# 論文 普通ポルトランドセメントまたは石灰石微粉末を用いたフレッシュモルタルのレオロジー特性に関する一検討

大野 誠彦\*1・岸 利治\*2

**要旨:** 粉体に普通ポルトランドセメントあるいは石灰石微粉末を用いたモルタルに対し高性能 AE 減水剤を使用し、回転数と測定時間をプログラムできる回転粘度計を用いてフレッシュモルタルのレオロジーパラメータを取得した。見かけのせん断速度と見かけのせん断応力の関係から塑性粘度と降伏値を算出したところ、いずれの配合でも高性能 AE 減水剤の使用量増加に伴って降伏値が低下した。しかし、普通ポルトランドセメントの配合では使用量の増加に伴って塑性粘度が低下するのに対して、石灰石微粉末の配合では使用量の増加に伴って塑性粘度が上昇し、両配合でレオロジー的な挙動が顕著に異なることを明らかにした。

**キーワード:** 高性能 AE 減水剤, レオロジー, せん断速度, せん断応力, ビンガム流動

## 1. はじめに

フレッシュコンクリートの流動特性は材料、配合や温度条件などの様々な要因が複雑に作用することで変化する。通常、コンクリートの製造では化学混和剤が使用されており、特に高強度領域ではポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤 (SP) が不可欠である。この SP もフレッシュコンクリートの流動特性に大きな影響を及ぼし、その主成分であるポリカルボン酸系高分子 (PC) の分子構造の特徴に由来する立体反発力によりセメント粒子が分散され、フレッシュコンクリートの流動性が向上するとされている<sup>1)</sup>。フレッシュコンクリートにおける SP の流動性向上効果は、主にスランプ試験やスランプフロー試験によって評価される。また、レオロジー的な性質の一つであり、一般的に「粘性」と呼ばれる性質はスランプフローの 50cm 到達時間や停止時間、各種漏斗の流下時間などで評価されることが多い。実務上、熟練の技術者や打設現場の作業員がハンドリングした際の「感覚的な粘性」の大小も重要である。一方で、SP による流動性向上効果を含めたフレッシュコンクリート、モルタルあるいはペーストの流動特性に関するレオロジー的な研究も数多く行われており、それらの流動特性はチクソトロピーやビンガム流体といった分類に当てはめられている<sup>2)</sup>。そして、第一著者らは、状態改良型 SP を用いたフレッシュモルタルのレオロジーパラメータの測定から、塑性粘度と「感覚的な粘性」の間にはある程度の相関が認められることを報告している<sup>3)</sup>。しかし、実務上重要な「感覚的な粘性」をレオロジー的な観点からどのように定量化できるかは未だ明らかになっていない課題である。

本研究は、レオロジーパラメータである塑性粘度と降伏値に対する理解を深めることを目的に、2 種類の異なる

粉体を用いたフレッシュモルタルを対象として、SP 使用量がレオロジー特性に与える影響について検討した。実験では、材料の容積比を一定とした 2 つの配合に対して SP 使用量を変化させてフレッシュモルタルを作製した。そして、測定パターンのプログラムが可能な粘度計を用いてフレッシュモルタルの塑性粘度と降伏値を取得し、見かけのせん断速度と見かけのせん断応力の関係から塑性粘度および降伏値を算出し、考察を加えた。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料と配合

表-1 に使用材料を示す。粉体には普通ポルトランドセメント、または、これと同等の比表面積を持ち水和反応の影響を排除できる石灰石微粉末を用い、フレッシュモルタルのレオロジー特性を比較した。混和剤には汎用的な市販の SP を用いた。表-2 に試験に供したモルタルの配合を示す。いずれの粉体を用いた場合でも各材料の容積比は同一とした。OPC-NS 配合ではモルタルフローが 250mm~350mm 程度、LSP-NS 配合では 250mm 程度以上となるよう PCA 使用量を定めた。表中には示していないが、消泡剤を用いて空気量を 3±1% に調製し、空気による測定への影響を排除した。

### 2.2 モルタルの試料作製

モルタル試料の作製は ASTM モルタルミキサを用い、混和剤を含む練混ぜ水と粉体を 60 秒間練混ぜた後に混練容器内部に付着した材料を 20 秒間で掻き落とし、次に細骨材を加えて 60 秒間練混ぜ、20 秒間で再度掻き落としを行った後に 120 秒間練混ぜることで行った。練上がり完了直後のモルタルをサンプリングし、レオロジーパラメータ測定の試料とした。また、温度の影響を排除

\*1 BASF ジャパン (株) 建設化学品事業部 修士 (工学) (正会員)

\*2 東京大学 生産技術研究所 人間・社会系部門 教授 博士 (工学) (正会員)

表-1 使用材料

|               |      |  |
|---------------|------|--|
| 水 (W)         | 上水道水 |  |
| 粉体 (P)        | OPC  | 普通ポルトランドセメント (密度: 3.16g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3300cm <sup>2</sup> /g)    |
|               | LSP  | 石灰石微粉末 (密度: 2.70g/cm <sup>3</sup> , 比表面積: 3000cm <sup>2</sup> /g)          |
| 細骨材 (S)       | NS   | 大井川水系陸砂 (表乾密度: 2.58g/cm <sup>3</sup> , 吸水率: 2.15%, 実積率: 68.1%, F.M.: 2.68) |
| 高性能AE減水剤 (SP) | PCA  | 主成分: ポリカルボン酸エーテル系化合物   |

するため、モルタルの練上がり温度が 20±2℃になるように材料温度ならびに実験室温度を管理した。

### 2.3 粘度計によるレオロジーパラメータの測定

ローター表面と容器内表面間のクリアランスを 8mm とし、コンピューターにより測定パターンをプログラム可能な粘度計 (東機産業製 R115 型粘度計) を用いてレオロジーパラメータの取得を行った。測定に使用した装置およびローターの外観を図-1 に示す。ローターには両端円錐型 (外形 20mm) の物を用いたが、これは端面効果を減少させる目的で使用した。粘度計付属のソフトウェアにより粘度計の回転数を 5, 10, 15, 20, 25, 30rpm と上昇させ、各回転数での粘度計指示値 (最大許容トルクに対する百分率) を 120 秒間ずつ測定する過程と、その後連続して回転数を 25, 20, 15, 10, 5rpm と下降させ同様の測定を行う過程をプログラムしデータの取得を行った。粘度計指示値の測定間隔は 1 データポイント/s で行った。但し、使用した粘度計の仕様から粘度計指示値が 100% を超えると次の測定 (回転数) へ自動的に移行するため、必ずしも全回転数領域を測定してはいない。

## 3. 実験結果および考察

### 3.1 粘度計指示値の処理

図-2 に測定結果の一例として OPC-NS 配合の PCA 使用量 P×1.275% の測定時間と粘度計指示値の関係を示す。測定が進行すると回転数切替のタイミングを除いても粘度計指示値の振幅が徐々に大きくなっていることが分かる。これは試料の分離や細骨材の沈降・噛みこみなどに起因すると考えられた。図-3 に LSP-NS 配合の PCA 使用量 P×1.80% の測定時間と粘度計指示値の関係を示す。LSP-NS 配合の場合でも OPC-NS 配合の場合と同様、測定時間の進行に伴い、粘度計指示値の振幅が大きくなった。この現象はいずれの配合でも PCA 使用量によらず同様であった。そこで、粘度計指示値が比較的安定している領域で検討するため、本報では上昇過程の 20rpm までを評価対象とすることとした。

図-4 に図-2 に示した OPC-NS 配合の PCA 使用量 P×1.275% の 10rpm 部分の抜粋を示す。粘度計指示値は回転数切替直後に急上昇し、遅くとも 15 秒程度までの間に極大を迎え、その後低下し一定値に漸近するような挙動を示している。この挙動は他の回転数や LSP-NS 配合でも

表-2 モルタルの配合

| 配合記号   | V <sub>W</sub> /V <sub>P</sub> | V <sub>S</sub> /V <sub>P</sub> | W/P (%) | S/P  | 単体量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |     |      |
|--------|--------------------------------|--------------------------------|---------|------|--------------------------|-----|-----|------|
|        |                                |                                |         |      | W                        | OPC | LSP | NS   |
| OPC-NS | 1.17                           | 1.47                           | 27.0    | 1.20 | 249                      | 924 | -   | 1109 |
| LSP-NS | 1.17                           | 1.47                           | 31.6    | 1.40 | 249                      | -   | 789 | 1109 |



図-1 粘度計およびローターの外観

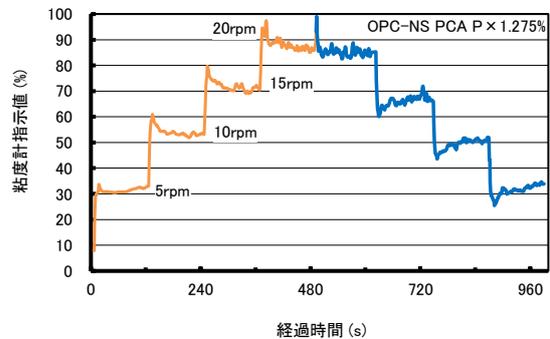


図-2 測定時間と粘度計指示値の関係 (OPC-NS)

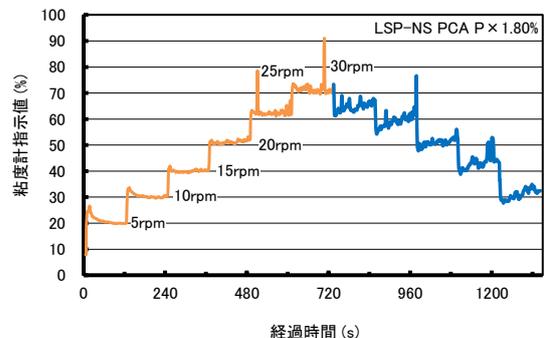


図-3 測定時間と粘度計指示値の関係 (LSP-NS)

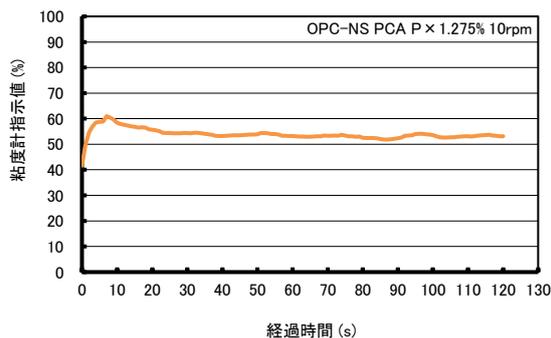


図-4 測定時間と粘度計指示値の関係 (図-2 の 10rpm)

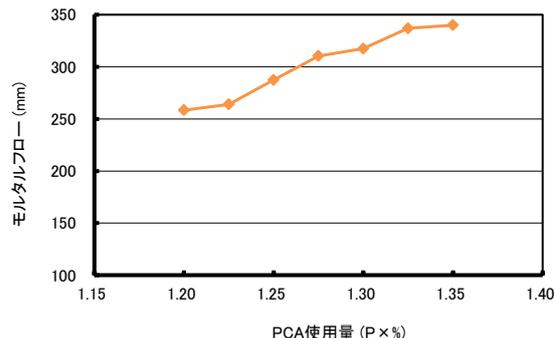


図-5 PCA 使用量とモルタルフローの関係 (OPC-NS)

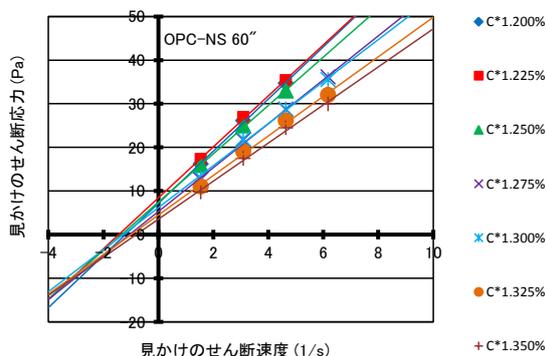


図-6 見掛けのせん断速度と見掛けのせん断応力の関係 (OPC-NS)

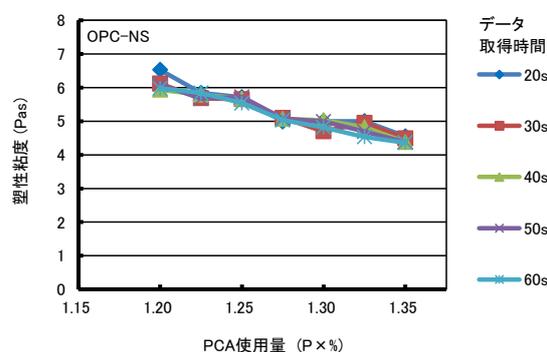


図-7 PCA 使用量と塑性粘度  $\eta_B$  の関係 (OPC-NS)

同様であった。回転数切替直後は切替直前の試料の流動の慣性の影響を受け、また流動場が安定するまでに時間を要すると考えられる。これを回転粘度計の応答の遅れ<sup>4)</sup>とする指摘もある。この影響を排除するために、粘度計指示値は 20 秒以降の値を評価に用いることとした。

### 3.2 流動挙動の解釈

#### (1) OPC-NS 配合

図-5 に PCA 使用量とモルタルフローの関係を示す。モルタルフローは PCA 使用量の増加に伴って増大した。流動特性は、回転数からローターの寸法およびクリアランスを考慮して換算した見かけのせん断速度と粘度計指示値から換算した見かけのせん断応力との関係で評価した。粘度計指示値は、上昇過程の各回転数において回転数切替後 20 秒、30 秒、40 秒・・・と 10 秒刻みでみかけのせん断応力に換算した。

図-6 に一例として回転数切替後 60 秒後の見かけのせん断速度と見かけのせん断応力の関係を示す。いずれの使用量においても両者は Y 切片を有する直線関係を描き、ビンガム流動としてよく近似できる。このような焦点性の意味するところについては本報の主題ではないので別報に譲るが、同様の焦点性は 20 秒以降のどのデータ取得時間においても認められた。これらの近似直線の回帰式

から使用量ごとに塑性粘度  $\eta_B$  および降伏値  $p_y$  をデータ取得時間ごとに得た。

図-7 に PCA 使用量と塑性粘度  $\eta_B$ 、図-8 に PCA 使用量と降伏値  $p_y$  の関係を示す。データ取得時間 20 秒以降は粘度計指示値が比較的安定しており、データ取得時間 60 秒の結果とほぼ同様であるが、それぞれの図には 20 ～ 60 秒までの結果を全て示した。塑性粘度  $\eta_B$ 、降伏値  $p_y$  は PCA 使用量  $P \times 1.20\%$  を除いて PCA 使用量の増加に伴って概ね様に低下していることが分かる。図-9 にモルタルフローと塑性粘度  $\eta_B$ 、図-10 にモルタルフローと降伏値  $p_y$  の関係を示す。PCA 使用量  $P \times 1.20\%$  を除いて PCA 使用量の増加に伴ってモルタルフローは増大しているため、モルタルフローが大きいくほど、塑性粘度  $\eta_B$ 、降伏値  $p_y$  とともに低下している。

#### (2) LSP-NS 配合

図-11 に PCA 使用量とモルタルフローの関係を示す。モルタルフローは PCA 使用量が  $P \times 2.5\%$  までは PCA 使用量の増加に伴って 245mm 程度から 270mm 程度まで増大したが PCA 使用量に対する変化量は OPC-NS 配合と比べるとわずかであった。

PCA 使用量が  $P \times 2.5\%$  以上になるとモルタルフローは減少に転じた。この現象は PCA が固形分であるため LSP

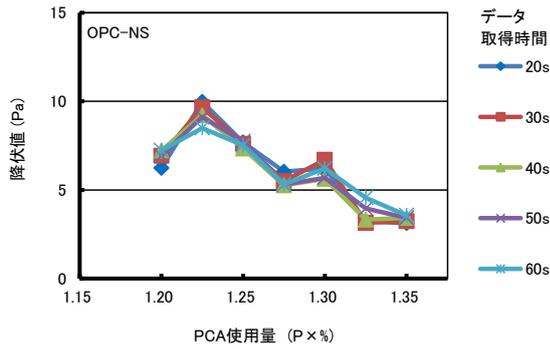


図-8 PCA 使用量と降伏値  $\rho_y$  の関係 (OPC-NS)

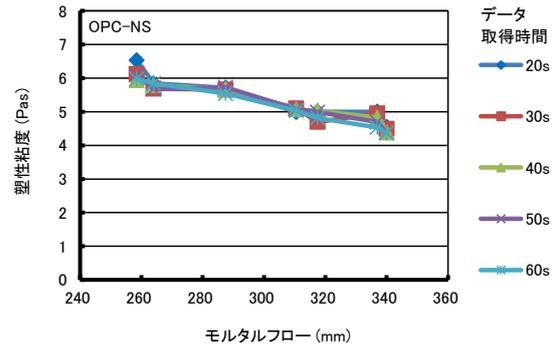


図-9 モルタルフローと塑性粘度  $\eta_\beta$  の関係 (OPC-NS)

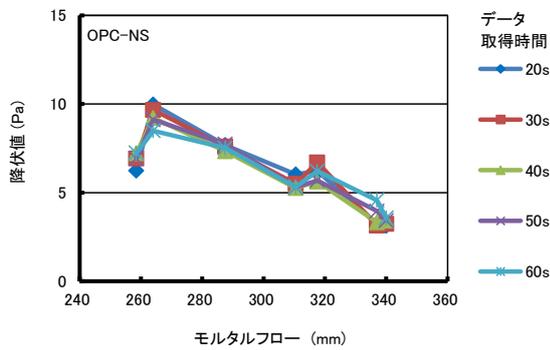


図-10 モルタルフローと降伏値  $\rho_y$  の関係 (OPC-NS)

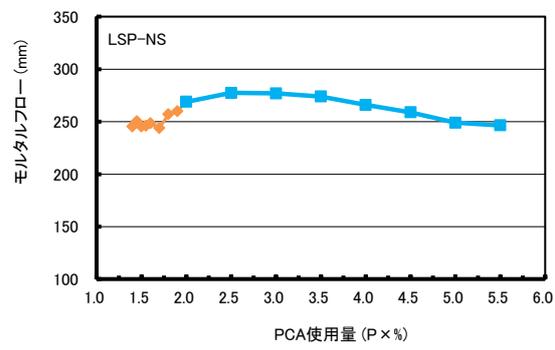


図-11 PCA 使用量とモルタルフローの関係 (LSP-NS)

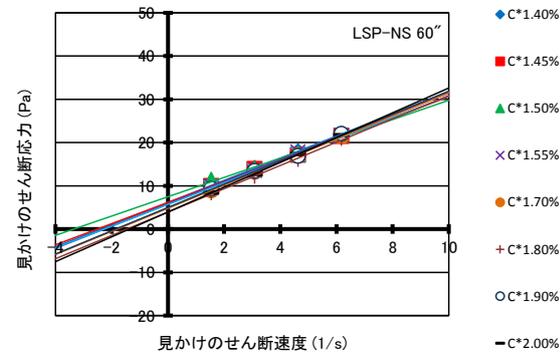


図-12 見掛けのせん断速度と見掛けのせん断応力  
の関係 (LSP-NS, PCA 使用量  $C \times 2.0\%$  以下)

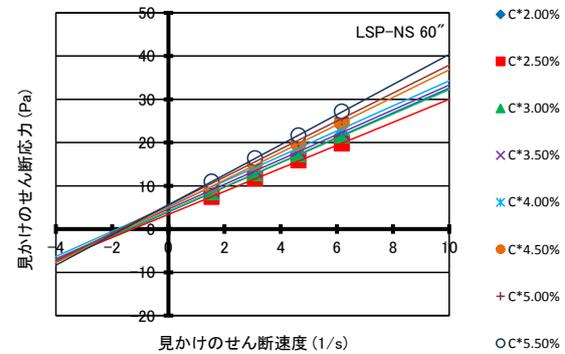


図-13 見掛けのせん断速度と見掛けのせん断応力  
の関係 (LSP-NS, PCA 使用量  $C \times 2.0\%$  以上)

の分散に寄与しない余剰 PCA が練混ぜ水の一部として機能せず、単位水量が低下したことによる可能性があるが詳細は不明である。

図-12 に PCA 使用量  $P \times 2.0\%$  以下の回転数切替後 60 秒後の見かけのせん断速度と見かけのせん断応力の関係を示す。図にはモルタルフローが極大となる PCA 使用量  $P \times 2.0\%$  までの値を示した。両者の関係はビンガム流動として近似できる直線関係を示したが、OPC-NS 配合の場合とは異なり、この PCA 使用量の範囲では第 3 象限に焦点性は認められず、逆に第 1 象限に不明確ながら弱い焦

点性を確認することができる。このような傾向を示す理由については不明であるが、試料が容器表面ないしローター表面でスリップしている可能性も含めて検討する必要があると考えている。次に、図-13 に PCA 使用量  $P \times 2.0\%$  以上の回転数切替後 60 秒後の見かけのせん断速度と見かけのせん断応力の関係を示す。両者には良好な直線関係が認められ、ビンガム流動として近似できる。また、この PCA 使用量の範囲では OPC-NS 配合と同様に第 3 象限に焦点性の存在を確認することができる。

図-14 に PCA 使用量  $P \times 2.0\%$  までの PCA 使用量と塑

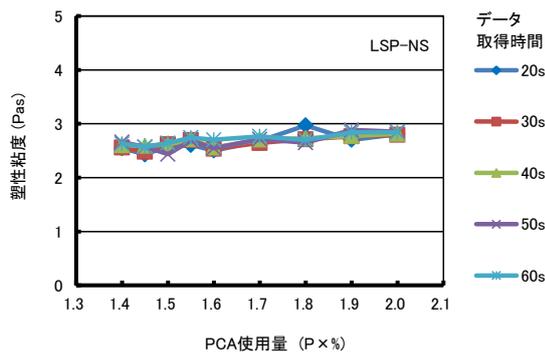


図-14 PCA 使用量と塑性粘度  $\eta_B$  の関係 (LSP-NS)

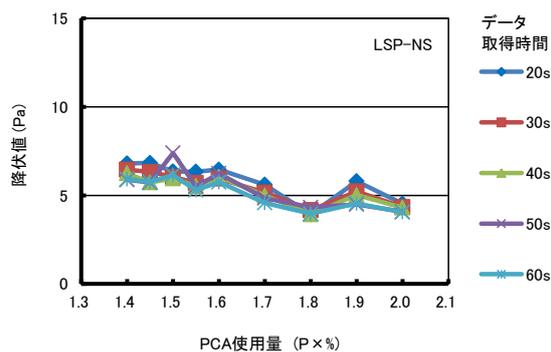


図-15 PCA 使用量と降伏値  $p_y$  の関係 (LSP-NS)

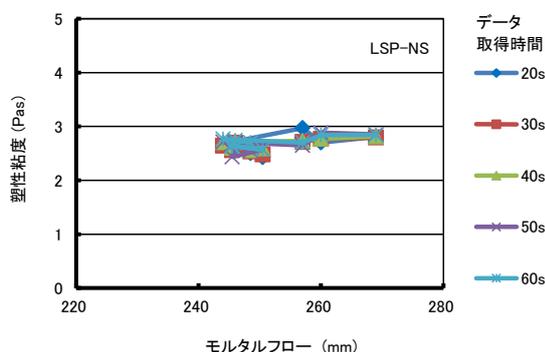


図-16 モルタルフローと塑性粘度  $\eta_B$  の関係 (LSP-NS)

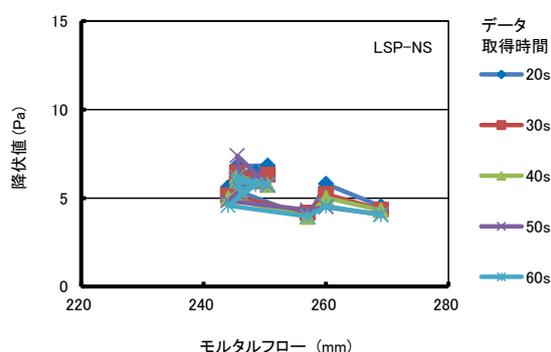


図-17 モルタルフローと降伏値  $p_y$  の関係 (LSP-NS)

塑性粘度  $\eta_B$  の関係を、また、図-15 に PCA 使用量と降伏値  $p_y$  の関係を示す。塑性粘度  $\eta_B$  は OPC-NS 配合とは異なり、モルタルフローが増大しているのにも拘らず、ごく僅かに上昇している。このような傾向を示す要因の一つとしてモルタルフローの増大に寄与しない余剰の PCA の影響が考えられるが、その詳細については明らかではない。一方、降伏値  $p_y$  は PCA 使用量の増加に伴って僅かに低下した。図-16 にモルタルフローと塑性粘度  $\eta_B$ 、図-17 にモルタルフローと降伏値  $p_y$  の関係を示す。この PCA 使用量の範囲では、PCA 使用量の増加に伴うモルタルフローの変化量が小さいため、塑性粘度  $\eta_B$  および降伏値  $p_y$  との関係は明確ではない。

図-18 に PCA 使用量  $P \times 2.0\%$  以上の PCA 使用量と塑性粘度  $\eta_B$  の関係を、また、図-19 に PCA 使用量と降伏値  $p_y$  の関係を示す。塑性粘度  $\eta_B$  は、図-14 に示した PCA 使用量  $P \times 2.0\%$  までの範囲での上昇傾向と同様に、PCA 使用量が増加するのに伴って大よそ一貫して上昇している。この PCA 使用量の範囲では、PCA 使用量の増加に伴ってモルタルフローは低下しているが、このような塑性粘度  $\eta_B$  の上昇傾向は、図-7 に示した OPC-NS 配合の低下傾向とは大きく異なるものである。また、降伏値  $p_y$  は、図-15 に示した PCA 使用量  $P \times 2.0\%$  までの範囲での低下傾向とは異なり、PCA 使用量が増加するのに伴って

上昇している。図-20 にモルタルフローと塑性粘度  $\eta_B$ 、図-21 にモルタルフローと降伏値  $p_y$  の関係を示す。この PCA 使用量の範囲では、PCA 使用量の増加に伴ってモルタルフローは低下している、概ねモルタルフローが大きいほど塑性粘度  $\eta_B$  は低下し、降伏値  $p_y$  も低下している。

### (3) 両配合の相違点

降伏値  $p_y$  はいずれの配合でもモルタルフローが大きいほど小さくなり、粉体種類による違いは認められなかった。一方、塑性粘度  $\eta_B$  は、OPC-NS 配合では PCA 使用量の増加に伴って低下したのに対し、LSP-NS 配合では PCA 使用量の増加に伴ってほぼ一貫して上昇し続けた。なお、PCA 使用量の範囲は OPC-NS 配合で  $P \times 1.2 \sim 1.35\%$ 、LSP-NS 配合で  $P \times 1.4 \sim 5.5\%$  と両者で大きく異なるが、モルタルフローの値はいずれも大よそ 250mm 程度以上で十分な流動性を有するものである。

高性能 AE 減水剤量の増加に伴うモルタルの塑性粘度の変化に関して、OPC と LSP で全く異なる傾向を示す理由については現時点で明らかではないが、両者の傾向の相違は SP の作用機構とレオロジーパラメータに対する理解を深める上で極めて興味深いものと思われる。

OPC 粒子あるいは初期水和した OPC 粒子と LSP 粒子の表面粗度・形状・粒度分布などの物理的性質の相違や、

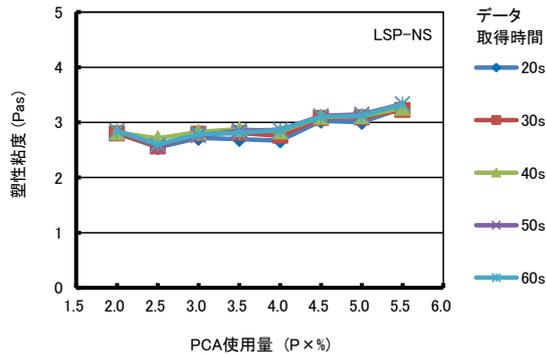


図-18 PCA 使用量と塑性粘度  $\eta_B$  の関係 (LSP-NS)

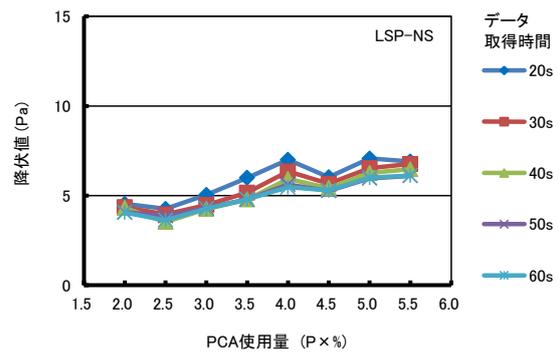


図-19 PCA 使用量と降伏値  $\rho_y$  の関係 (LSP-NS)

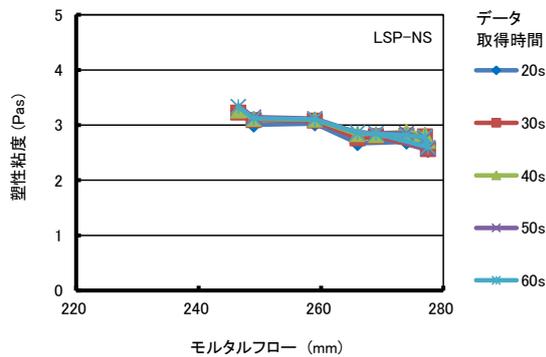


図-20 モルタルフローと塑性粘度  $\eta_B$  の関係 (LSP-NS)

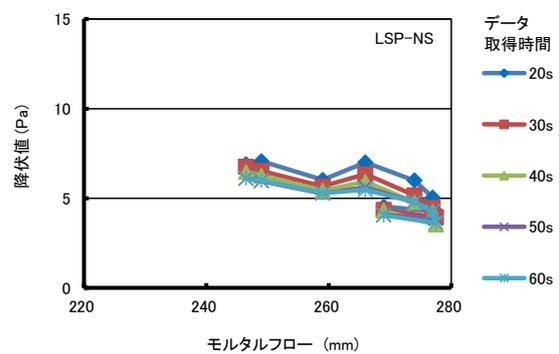


図-21 モルタルフローと降伏値  $\rho_y$  の関係 (LSP-NS)

成分・電荷等の化学的性質が異なることが影響していると思われるが、それらいずれか単独の相違による影響というよりは、粉体粒子の諸特性の相違により、今回使用した SP とそれぞれの粉体との相互作用が異なり、粒子の反発・分散や摩擦機構などが異なっているものと考えられる。また、せん断場における流速分布が単純ずりの想定とは異なり、実際の流速分布の想定からの乖離が OPC と LSP の場合で異なっている可能性もあり、その影響も慎重に見極める必要があると考えている。

#### 4. まとめ

OPC あるいは LSP を用いた高流動モルタルの SP 使用量の増加に伴うレオロジー特性の変化を検討した。その結果、降伏値  $\rho_y$  はいずれの配合でもモルタルフローが大きいか小さくなった。一方で、塑性粘度  $\eta_B$  は OPC-NS 配合では PCA 使用量増加に伴って低下したが、LSP-NS 配合では PCA 使用量増加に伴って上昇した。PCA 使用量と塑性粘度  $\eta_B$  の関係が粉体によって異なることが明らかとなったが、本研究の範囲内ではその原因は明らかでなく、今後の詳細な検討が必要である。

#### 参考文献

- 1) 例えば, Sakai, E., Yamada, K. and Ohta, A. : Molecular Structure and Dispersion-Adsorption Mechanisms of Comb-Type Superplasticizers in Japan, Journal of Advanced Concrete Technology, Vol. 1, No. 1, pp. 16-25, 2003
- 2) 例えば, Ferraris, C. F. : Measurement of Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art Report, NISTIR 5869, 1996
- 3) 大野誠彦, 大島正記, 杉山知巳 : 回転粘度計を用いた高強度コンクリートのハンドリングの簡易評価方法に関する一考察, 土木学会第 62 回年次学術講演会講演概要集, Vol.62, V-0538, pp.1075-1076, 2007
- 4) Barnes, H. A. : Thixotropy - a review, J. Non-Newtonian Fluid Mech., 70, pp. 1-33, 1997