

# 論文 骨材の混合比率がモルタルの流動挙動に及ぼす影響

渡辺 健治<sup>\*1</sup>・小野 博宣<sup>\*2</sup>・大津 武<sup>\*3</sup>

要旨：本研究では，粒度分布の異なる3種類の骨材を用いたモルタルのフレッシュ性状をレオロジー的な観点から実験的に検討した。水セメント比や骨材の混合比率を変化させ，高性能AE減水剤の添加量によって降伏値を一定としたときの塑性粘度の変化に注目したところ，余剰ペースト膜厚の大きさと塑性粘度の大きさに相関関係がみられることが分かった。また，余剰ペースト膜厚が薄くなるほど，高性能AE減水剤の添加量は増加する傾向がみられた。調合や骨材を選定するときに余剰ペースト膜厚を考慮することことは有効であることが分かった。

キーワード：フレッシュモルタル，レオロジー，骨材，余剰ペースト膜厚。

## 1. はじめに

良質なコンクリート用天然骨材の枯渇などにより，各種骨材が新たに使用されるようになっており，解体コンクリートから製造する再生骨材などはその顕著な例である。多様な骨材を入手できるようになったものの，どの骨材をどのような比率で調合すれば良いかは，試験練りなどにより，実際にコンクリート中に混練してみても経験的に判断せざるを得ない場合が多い。本研究では，粒度分布の異なる細骨材3種類を混合使用したときに，そのフレッシュ性状がどのように変化するかを，レオロジーの観点から実験的に検討した。

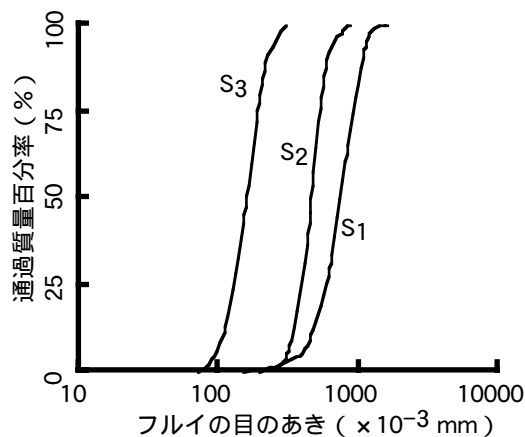


図-1 骨材の粒度分布曲線

## 2. 実験の概要

### 2.1 使用材料

セメントには普通ポルトランドセメントを用い，骨材には粒度分布の異なる3種類の珪砂を用いた。骨材の粒度分布曲線を図-1に示す。また，骨材の試験結果を表-1に示す。骨材の比表面積は，ふるい分け試験のときのふるいに残留する骨材を球形と仮定して求めた。高性能AE減水剤は，ポリカルボン酸塩系の高性能AE減水剤（標準形）を用いた。

### 2.2 調合条件

実験では，表-2に示すような調合条件のモルタルを使用した。水セメント比（W/C）および単位骨材容積は，3水準ずつとした。本研究では，たとえば，単位骨材容積(s)に対するS<sub>1</sub>骨材の容積(s<sub>1</sub>)をs<sub>1</sub>/sのように小文字で表記することにした。この単位容積質量の範囲内で，骨材3種類を20～60%の10%刻みの容積比率で混合した。1単位骨材

表-1 骨材試験結果

記号	FM値	密度 kg/m <sup>3</sup>	最大粒径 mm	比表面積 m <sup>2</sup> /kg
S <sub>1</sub>	2.75	2,590	0.850	3.44
S <sub>2</sub>	2.07	2,600	0.600	5.17
S <sub>3</sub>	0.580	2,620	0.210	15.3

\*1 中部大学 工学部建築学科助教授 工博（正会員）

\*2 中部大学 工学部建築学科教授 工博（正会員）

\*3 中部大学大学院 工学研究科建設工学専攻

表-2 調査条件

水セメント比(W/C) %	35, 45, 55
単位骨材容積(s/m) m <sup>3</sup> /m <sup>3</sup>	0.430, 0.460, 0.490
骨材中のS <sub>i</sub> 骨材の容積比(s <sub>i</sub> /s) %	20, 30, 40, 50, 60

容積につき骨材3種類の組合せは15通りあることから、1水セメント比につき45調合となり、合計135調合の検討を行った。練上り時の0打モルタルフロー値が210mm±10mmの範囲におさまるよう、高性能AE減水剤の添加量を調節した。

### 2.3 試験測定項目

試料のレオロジー性質（降伏値および塑性粘度）は、0打モルタルフロー試験およびロート流下試験で簡易に測定した。降伏値を推定するために用いた0打モルタルフロー試験とは、JIS R 5201で用いられるモルタルフロー試験と同様の手順だが、15回の落下を行わず、コーンを引き上げた時に、自重で崩れた試料の拡がり直径（0打モルタルフロー値）を測定する方法である。降伏値  $\tau_y$  (Pa)は式(1)のように算定した。

$$\tau_y = \frac{481 \times \rho}{r^2} \times 10^{-3} \quad (1)$$

ここで、 $\rho$  : 単位容積質量(kg/m<sup>3</sup>)、  
 $r = \frac{M_{f0}}{2000}$  (m)、 $M_{f0}$  : 0打モルタルフロー値(mm)。

骨材の混合比率を大きく変動させるとレオロジー性質も大きく変化する。広範なレオロジー定数（塑性粘度）を推定するためにJロート（JSCE-F541）の吐出口が、11、14および17mmとなるように切断したそれぞれJ11、J14およびJ17ロートを併用した。

図-2に、後述の実験結果の一部を示す。同図は、J14ロートで推定した塑性粘度に対して、J11あるいはJ17ロートを用いて推定した塑性粘度がどの程度異なるかを示したものである。図中には縦横軸の値が均しい場合の補助線を入れてある。J14ロートとJ17ロートそれぞれから推定した

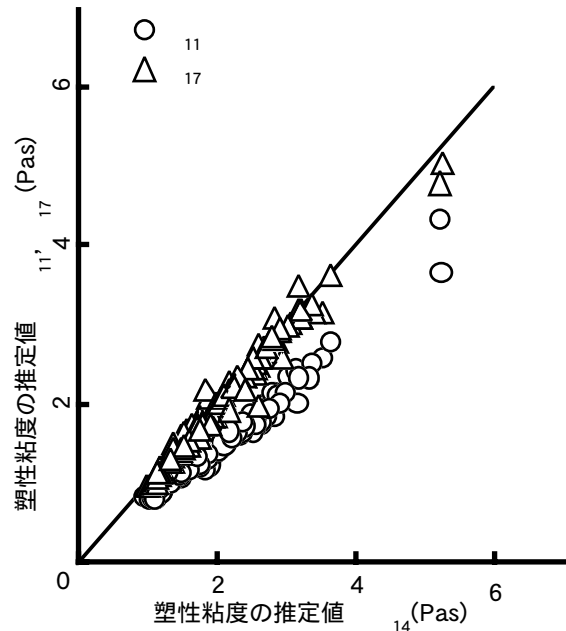


図-2 推定した塑性粘度の比較

塑性粘度には大きな違いは見られないが、J11ロートより推定した塑性粘度は、J14ロートより推定した値に比べてやや小さくなる傾向があることが分かる。いずれの塑性粘度が真の値であるかはここでは議論しないことにせず、広範なレオロジー性質の違いを簡単な試験で推定するために、3本のロートを用いた。塑性粘度を算定する場合には、3種類のロートそれぞれで推定された塑性粘度の平均をとって塑性粘度とすることにした。ただし、一部試料では、流下時間が速過ぎたりあるいは細径のロートでは閉塞する場合がみられたので、そのような場合は塑性粘度の算定から除外した。口径*i*(mm)のロート内壁面におけるすべり抵抗力  $\tau_{Ri}$  (Pa)を式(2)~(4)のように定義する。

$$\tau_{R11} = 0.117 \times \rho \quad (2)$$

$$\tau_{R14} = 0.118 \times \rho \quad (3)$$

$$\tau_{R17} = 0.120 \times \rho \quad (4)$$

媒介変数  $\beta_i$  を式(5)のおくと、塑性粘度  $\eta_i$  (Pas)は流下時間  $t_i$  (s)を用いて式(6)~式(8)のように表現できる。

$$\beta_i = 1 - \frac{4}{3} \frac{\tau_y}{\tau_{Ri}} + \frac{1}{3} \frac{\tau_y^4}{\tau_{Ri}^4} \quad (5)$$

$$\eta_{11} = 53.6 \times \rho \times \beta_{11} \times t_{11} \times 10^{-6} \quad (6)$$

$$\eta_{14} = 104 \times \rho \times \beta_{14} \times t_{14} \times 10^{-6} \quad (7)$$

$$\eta_{17} = 178 \times \rho \times \beta_{17} \times t_{17} \times 10^{-6} \quad (8)$$

0打モルタルフロー試験および各種Jロート試験を用いたレオロジー定数の簡易推定手法の詳細については既往の研究を参照されたい<sup>1),2)</sup>。

#### 2.4 実験手順

試料はホバートミキサー（容量20リットル）で2リットル練りとした。混練手順としては、空練りの後、高性能AE減水剤の入った混練水を添加して150秒間混練した。練上り直後に0打モルタルフロー試験を行って、目的のコンシステンシーになっていることを確認してから3種類のロート試験を行い、レオロジー定数を測定した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 ロート流下時間

$S_1$ 骨材の容積混合比率( $s_1/s$ )を20%の一定としたときの、試料のJ14ロート流下時間と $S_3$ 骨材の混合比率( $s_3/s$ )の関係の一例を図-3に示す。同図によれば、 $S_3$ 骨材の混合比率を増加させることにより、流下時間が増加する傾向が見られる。単位骨材容積( $s/m$ )を0.430から0.490  $m^3/m^3$ まで変化した事例を併記したが、最も単位骨材容積( $s/m$ )が多い場合がいずれの水セメント比(W/C)においても流下時間が長くなり、場合によっては、

管内で閉塞することもあった。しかし、それ以外の単位骨材容積( $s/m$ )の場合は、いずれも流下時間に大きな差異はみられなかった。

#### 3.2 塑性粘度の変化

流下速度より塑性粘度を算出し、骨材の混合比率の関係の一例を図-4に示す。0打モルタルフロー値を210mmの一定としているため、実験誤差や調合の違いによる若干の単位容積質量の違いはあるものの、基本的には流下時間と塑性粘度は比例する結果となっている。同図はW/C=40%の例だが、最も単位骨材容積( $s/m$ )の大きい場合が、塑性粘度も大きくなっているが、単純に、単位骨材容積( $s/m$ )と塑性粘度の大小の順番は一致してはいない。単位骨材容積が小さい場合は、せん断変形するペースト部の容積が大きいいため、ペースト自身は大変形しなくても所定の降伏値を得ることができ、単位骨材容積が大きい場合は、単位ペースト量あたりの負担しなければならない骨材量が増加するため、ペースト自身のコンシステンシーは大きくなることが考えられる。このように、単位骨材容積が大きくても小さくても、ペーストの塑性粘度が大きくなることが考えられるため、単純に単位骨材容積の大小と塑性粘度の大小が一致しないものと考えられる。

#### 3.3 充填ペーストと余剰ペースト

モルタルを骨材とペースト相から成る2相材料と考え、ペーストが骨材の表面に付着している状

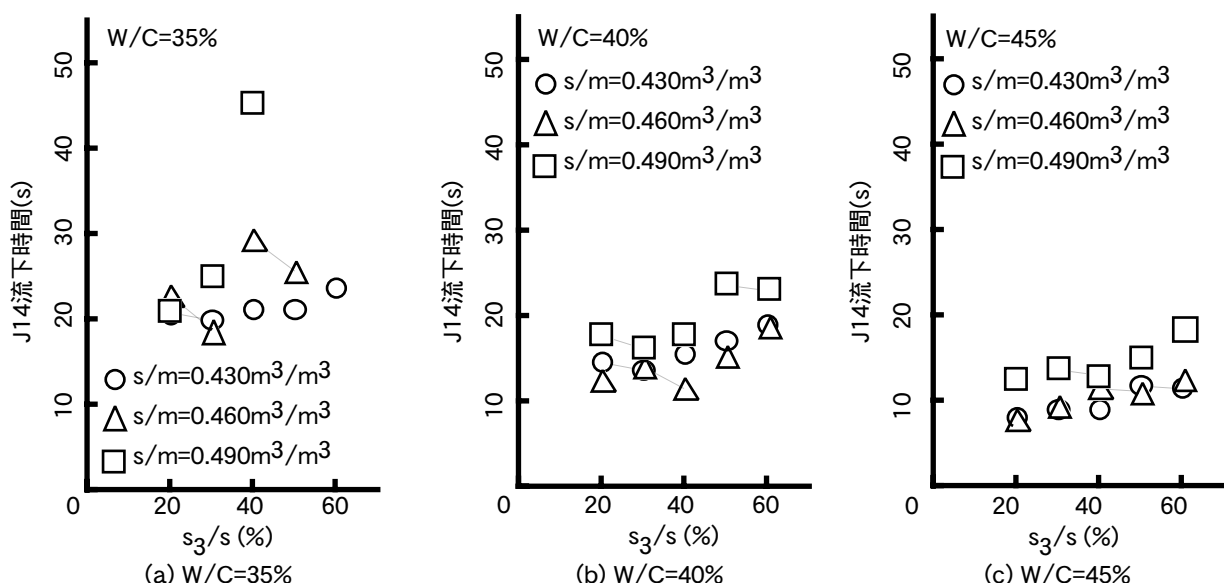


図-3 J14ロート流下時間と骨材 $S_1$ の混合比率の関係の一例 ( $s_1/s=20\%$ の場合)

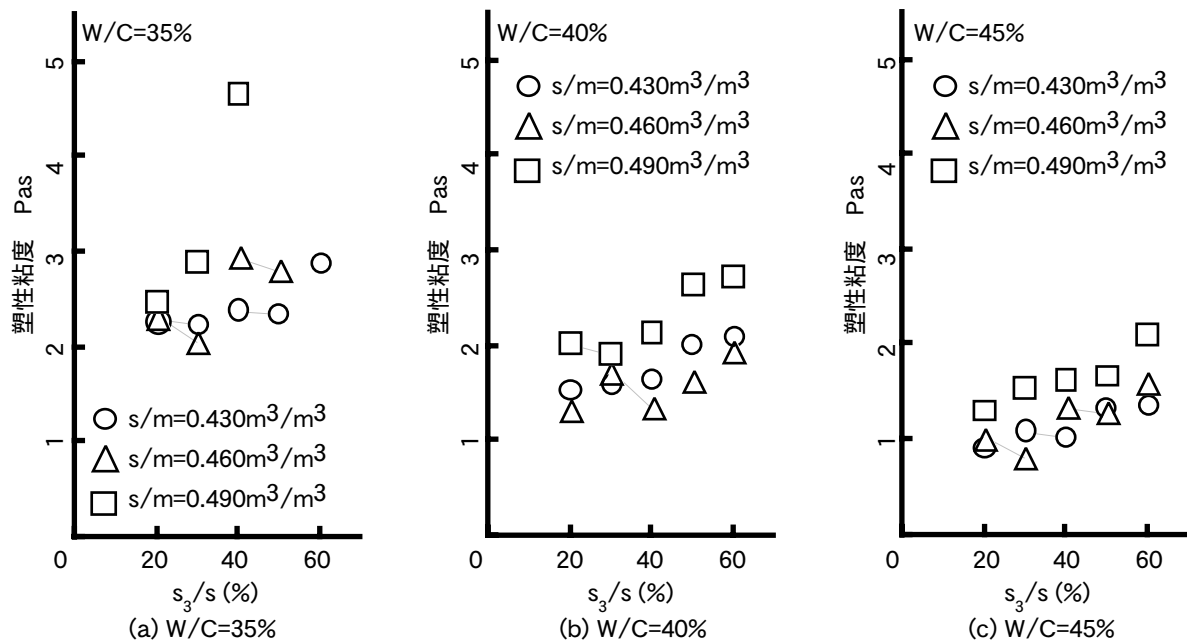


図-4 塑性粘度と骨材SCの混合比率の関係の一例 ( $s_1/s=20\%$ の場合)

態を考える<sup>3)</sup>。骨材に付着している余剰のペースト量は、図-5のように概念的に表現することができる。骨材を容器に入れると、単位骨材容積は実積率より小さいことから、上部に空間ができる。これを本研究では、余剰ペーストと呼ぶことにした。試料中の余剰ペーストは式(9)のように定義する。実積率Gは、骨材の種類や混合比率によって変化すると考えられるが、本研究で用いた骨材の組合せの範囲では、いずれも66%前後とほとんど違いがなかったことから、一定値と仮定した。

$$p_f = 1 - \frac{s}{G} = 1 - \frac{s}{0.66} \quad (9)$$

ここで、 $p_f$ : 余剰ペースト量 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )、 $s$ : 単位骨材容積 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )、 $G$ : 骨材の実積率 ( $\text{m}^3/\text{m}^3$ )。

下部の骨材の隙間を埋めるために必要なペーストを本研究では充填ペーストと呼ぶとし、これは必要最低限のペースト量である。試料はせん断変形して流動するが、実際にはペースト分がせん断変形しており、それは主に、図-5でいうところの、充填に寄与しないペースト部分の変形によるものと考えた。本研究ではこれを余剰ペーストと呼ぶことにする。試料全体系の変形

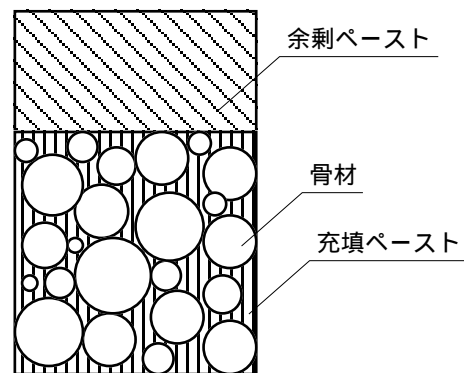


図-5 余剰ペーストの定義

量が同じであれば、余剰ペーストが多いほど、単位余剰ペースト量あたりのせん断変形は小さくて済むため、ペーストのコンシステンシーは大きくなることになる。

さらに、骨材の周辺に余剰ペーストが膜状に付着している状態を考える。ペーストが骨材の表面に均一に分散していると仮定したとき、その膜厚  $M_e$  は式(10)のように定義できる。

$$M_e = \frac{p_f}{A} = \frac{p_f}{\sum S_i \times A_i} \quad (10)$$

ここで、 $A$ : 骨材の総表面積 ( $\text{m}^2/\text{m}^3$ )、 $S_i$ : 骨材それぞれの単位容積質量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )、 $A_i$ : 骨材それぞれの比表面積 ( $\text{m}^2/\text{kg}$ )。

同一の余剰ペースト量であっても、骨材の表面積が大きいほど、骨材に付着する余剰ペーストの膜厚は薄くなる。そのため、試料全体系の変形量が同じであれば、余剰ペーストの厚みが厚いほど、マトリックス部のコンシステンシーは大きいことになる。これらのことから、単位骨材容積あるいは骨材の比表面積が変化することにより、マトリックス部のコンシステンシーは変化することになる。

本研究では、試料全体系の降伏値を0打モルタルフロー値により一定としているため、ペース

ト部のコンシステンシーの違いは、塑性粘度に表れることになる。

### 3.4 余剰ペースト膜厚と塑性粘度

試料の塑性粘度と余剰ペースト膜厚の関係を図-6に示す。同図は、水セメント比別にまとめたもので、それぞれの図には、単位骨材容積ごとに記号を変えて併記している。単位骨材容積が大きくなるほど余剰ペースト膜厚が小さくなっているが、単位骨材容積にかかわらず、塑性粘度と余剰ペースト膜厚には相関がみられる。W/Cに注目すると、W/Cが大きくなるほど塑性粘度は小さく

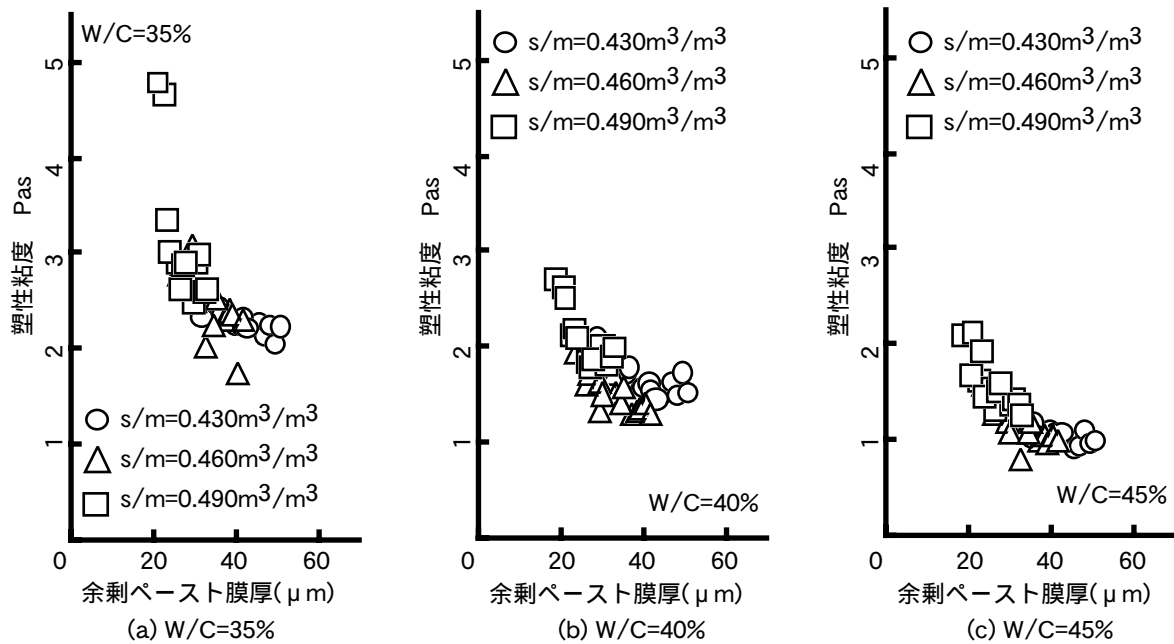


図-6 塑性粘度と余剰ペースト膜厚の関係

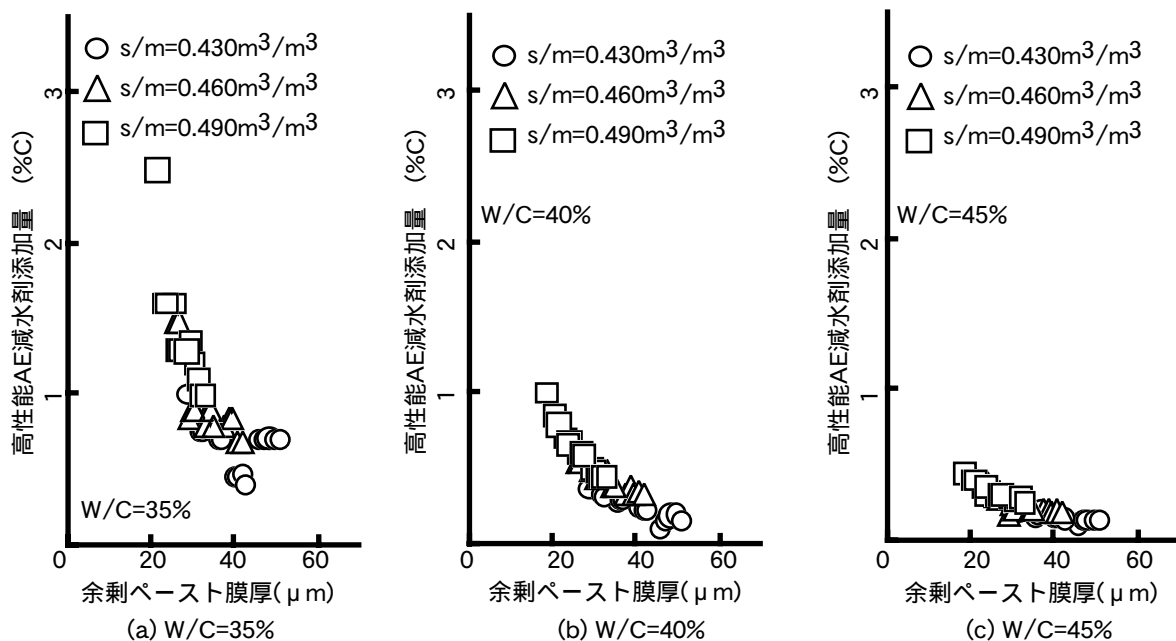


図-7 高性能AE減水剤の添加量と余剰ペースト膜厚の関係

なっており、余剰ペースト膜厚とはまた別のパラメータで塑性粘度に影響していることが分かる。

### 3.5 高性能AE減水剤の添加量

各試料の降伏値をそろえるために、高性能AE減水剤の添加量を変化させている。高性能AE減水剤の添加量と余剰ペースト膜厚の関係を図-7に示す。余剰ペースト膜厚が小さくなるほど、同一の降伏値を得るための高性能AE減水剤の添加量が増加していることが分かる。図-6と図-7を比較すると、塑性粘度と高性能AE減水剤の添加量のいずれも余剰ペースト膜厚に対して類似した相関を示しており、余剰ペースト膜厚が、試料のレオロジー性質の大きな因子の一つとなっていることが分かる。

## 4. まとめ

本研究では、3種類の骨材を用いたモルタルのフレッシュ性状をレオロジー的な観点から考察した。本研究で得られた知見は以下のようにまとめられる。

0打モルタルフロー試験とロート流下試験を併用することにより、簡易にレオロジー性質を推定することができた。大小の口径の異なるロートを併用することにより、広範な調合条件に対して安定してレオロジー定数を推定することができた。

粒径の小さい骨材の混合比率を増加させることにより、降伏値および単位骨材容積は同一であっても試料全体系の塑性粘度が増加する。骨材の実積率と表面積より余剰ペースト膜厚を求めると、試料全体系の塑性粘度と余剰ペースト

膜厚には、相関がみられた。

同等の降伏値を得るために必要な高性能AE減水剤の添加量は、余剰ペースト膜厚が小さくなるほど増加する傾向がみられた。これは、塑性粘度の増加と類似したパターンがみられた。

今後、高性能AE減水剤の違いや目標とする降伏値のレベルを変化させることにより、余剰ペースト膜厚の大小が試料のレオロジー性質にどのような影響を及ぼすかを定量的に把握していく予定である。

## 謝辞

本研究は、禰宜田章志氏（トヨタマテラン株式会社）、市坪純一君、加納功一君、森絵梨子君（いずれも中部大学）の助力を得た。また、本研究費の一部は、文部省科学研究費補助金・若手研究(B)、堀情報科学振興財団の援助によった。付記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 渡辺健治，小野博宣，谷川恭雄：フレッシュモルタルのレオロジー性質に及ぼす再攪拌の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.22, No.2, pp.427-432, 2000
- 2) 谷川恭雄，森博嗣，黒川善幸，小村理恵：粘塑性流体のロート試験に関するレオロジー的考察，日本建築学会 東海支部 研究報告集，No.31, pp.9-12, 1993
- 3) 吉野公，西林新蔵，井上正一，黒田保：高流動コンクリートのレオロジー定数に及ぼす配合要因の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20, No.1, pp.343-348, 1998