

論文 細骨材の粒径の違いがフレッシュモルタルの粘性に与える影響

西村 和朗*1・平野 修也*2・西 祐宜*3

要旨：細骨材の物理的性質がモルタルの塑性粘度および降伏応力に与える影響を把握することを目的に、粒径の異なる細骨材で作製したモルタルを用いて検討した。結果、本研究で用いた配合では、粒径 0.60~0.85mm と 0.85~1.20mm の細骨材を境に、モルタルの降伏応力が大きく変化した。また、0.15~0.30mm および 0.30~0.60mm の細骨材では、モルタルの降伏応力は、セメントペーストの降伏応力や W/C、細骨材の体積濃度に影響されることが分かった。また、モルタルの塑性粘度は、セメントペーストの塑性粘度、細骨材の体積濃度や比表面積、粒径に影響されることが分かった。

キーワード：モルタル、粘性、細骨材、粒径、体積濃度、比表面積

1. はじめに

一般的なコンクリート構造物の施工では、型枠内の所定の位置にフレッシュコンクリートを打ち込み、振動機で締め固められる。この際、フレッシュコンクリートの粘性が高いと材料分離は生じにくい、打込みや締め固めの作業性が低下し、充填不良が生じやすくなる。一方、フレッシュコンクリートの粘性が低いと打込みや締め固めの作業性は向上するが、材料分離が生じやすくなる¹⁾。このことから、均質なコンクリート構造物を建設するためには、施工条件に対して適切な粘性を有するフレッシュコンクリートを用いる必要がある。

コンクリートを高濃度サスペンションと考えると、モルタルが溶媒に、粗骨材が溶質にあたる。このため、コンクリートの粘性（塑性粘度と降伏応力の総称）はモルタルの粘性と粗骨材の物性から決定される。同様に、モルタルも高濃度サスペンションと考えると、モルタルの粘性はセメントペーストの粘性と細骨材の物性から定まる。このため、コンクリートの粘性は、セメントペーストの粘性や体積濃度、細骨材および粗骨材の物性によって表現できると考えられている²⁾。既往の研究³⁾では、セメントおよび細骨材の粗粒率と実積率、体積濃度を用いて算出した塑性粘度の推定値と、モルタルの塑性粘度の実測値を比較している。ただし、低水セメント比（以降、W/C と称する）は実施していないことや、降伏応力を推定できていないこと、細骨材の粒度の詳細な検討が不足していること等の更なる検討が必要と考えられる。

以上のことから、本研究では、細骨材の物理的性質が

モルタルの塑性粘度および降伏応力に与える影響を把握することを目的に、粒径の異なる細骨材で作製したモルタルを用いて検討した。

2. 粒径の異なる細骨材の影響

2.1 実験概要

(1)材料・配合

本研究では細骨材の物理的性質がモルタルの粘性に与える影響を把握することを目的としている。しかし、配合上、単位細骨材量が同一でも、細骨材の粒径によって比表面積や骨材同士の噛合い等が異なり、この結果、モルタルおよびコンクリートのフレッシュ性状は大きく異なるとされている⁴⁾。このため、本章では、粒径の異なる細骨材を用いたモルタルの塑性粘度および降伏応力を測定することで、細骨材の粒径の違いがモルタルの塑性粘度および降伏応力に与える影響の把握を試みた。

セメントには、普通ポルトランドセメント（密度 3.16g/cm³、比表面積 3200cm²/g）を用いた。化学混和剤には、ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤（JIS A 6204・標準形 I 種）を用いた。また、モルタルの連行空気がフレッシュ性状に与える影響を排除することを目的に、消泡剤も使用した。細骨材には、静岡県掛川産山砂（表乾密度 2.59 g/cm³、絶乾密度 2.54 g/cm³）を基に、ふるいによって 0.15~0.30mm、0.30~0.60mm、0.60~0.85mm、0.85~1.20mm、1.20mm~1.70mm にふるい分けた。配合は表-1 に示す 1 水準とし、W/C および S/C、化学混和剤の添加率を一定にすることで、粒径の違いのみに着目し

表-1 モルタルの配合

W/C (%)	S/C	単位量(kg/m ³)			単位量(C×%)
		W (水)	C (セメント)	S (細骨材)	高性能 AE 減水剤
45	2.2	277	616	1355	1.5

*1 株式会社フローリック 技術本部 コンクリート研究所 研究員 博士（工学）（正会員）

*2 株式会社フローリック 技術本部 コンクリート研究所 主任研究員 修士（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 所長代理 博士（工学）（正会員）

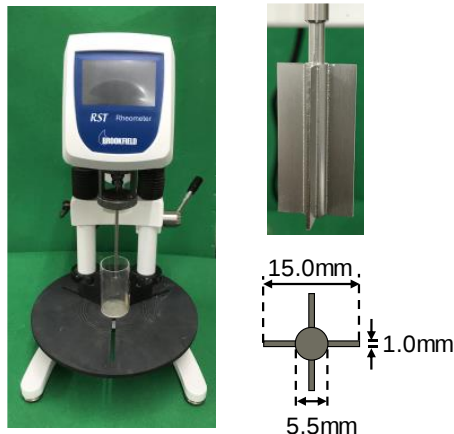


写真-1 十字羽根回転粘度計（左：全体、右：スピンドル）

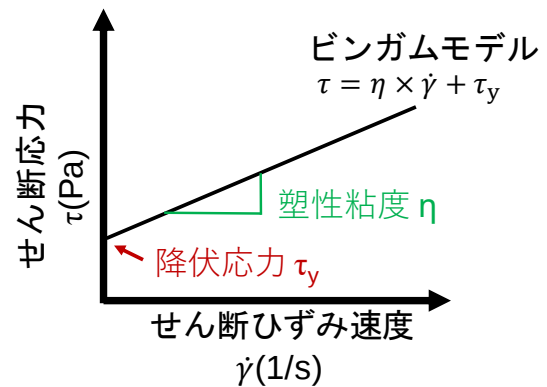


図-1 ビンガムモデル

表-2 各粒径のフレッシュ試験結果

細骨材の粒径 (mm)	0.15~0.30	0.30~0.60	0.60~0.85	0.85~1.20	1.20~1.70
ミンスランプ値 (cm)	測定不可	0.5	1.0	4.5	9.7
塑性粘度 (Pa・s)		0.740	0.835	0.786	0.576
降伏応力 (Pa)		2630	2955	505	489

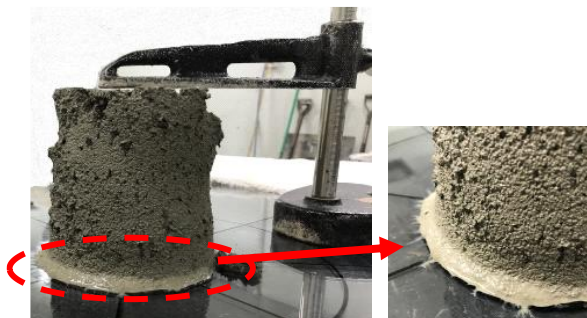


写真-2 試験時の分離状況

た。なお、それぞれの粒径の骨材の表乾密度は異なる可能性があるが、表乾状態の作製が困難であったことから、粒径に関わらず、表乾密度は一定と仮定した。また、モルタルの練混ぜ手順は、セメントと砂を低速で 10 秒間空練り後に注水し、低速で 30 秒間攪拌した。その後、搔落とし、高速で 90 秒間練り混ぜた。

(2)試験概要

本研究では、塑性粘度および降伏応力の測定は、十字羽根回転粘度計⁹⁾を用いた（写真-1 参照）。十字羽根回転粘度計で測定されたせん断応力およびせん断ひずみ速度の関係をビンガムモデルで近似することで、塑性粘度および降伏応力を算出した（図-1 参照）。加えて、フレッシュ性状の工学的な参考値として、JIS A 1171 を参考にミンスランプ値（以降 MSL と称する）を測定した。

2.2 実験結果

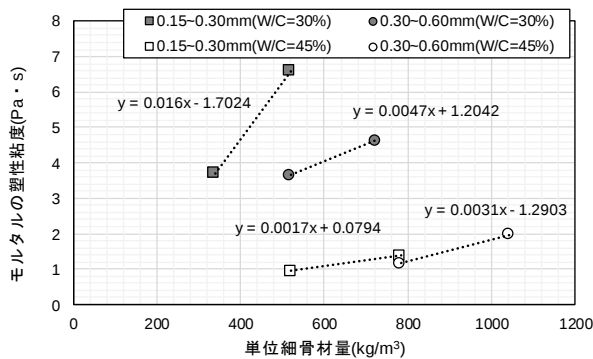
各粒径の MSL、塑性粘度および降伏応力を表-2 に示す。なお、0.15~0.30mm の細骨材の比表面積が大きいことから、対象とした配合のモルタルのコンシステンシー

が著しく高くなり、MSL、塑性粘度および降伏応力は測定できなかった。また、0.30~0.60mm も同様に、コンシステンシーが高く、塑性粘度および降伏応力が適切に測定できていない可能性が考えられる。既往の研究⁹⁾では、粘性が高すぎる試料を粘度計で測定した際に、すべり面が発生し、粘性が適切に測定できないことを報告している。本研究でも同様の現象が生じた可能性があるため、0.30~0.60mm の試験結果を除外して考察する。粒径の増加に伴い塑性粘度および降伏応力は低下し、MSL は増加した。また、0.85mm を境に、降伏応力は著しく小さくなった。これは、セメントペースト（以降、ペーストと称する）と 0.85mm 以上の粒径の骨材は一体化しなかったことが考えられる。ここで、ストークスの抵抗則⁷⁾を参考にすると、溶媒の粘性に対して 1 粒子当たりの溶質の質量の増加に伴い、溶質が沈降しやすくなる。このため、本検討で用いたペーストの粘性に対して 0.85mm 以上の細骨材は大きく、ペーストと細骨材が異なる挙動を示したことが考えられる。なお、0.85~1.20mm や 1.20~1.70mm の細骨材を用いた際に、ペーストと細骨材が一体化せず、ペーストが分離していることが観察された（写真-2）。

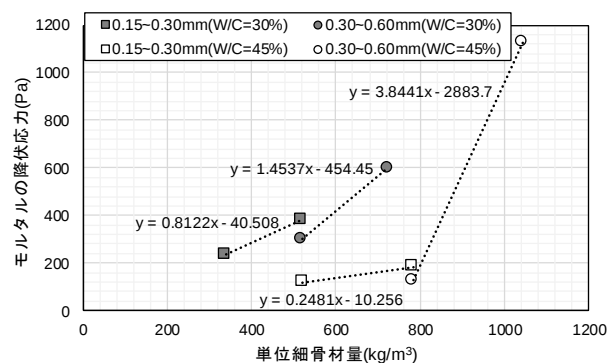
以上のことから、本研究で用いたペーストに対しては、0.85mm 以下の細骨材はペーストと一体化することが分かった。このため、ペーストと一体化すると考えられる 0.15~0.30mm および 0.30~0.60mm の細骨材に対して、単位細骨材量がモルタルのレオロジー定数に与える影響を検討した。配合を表-3 に示す。なお、W/C=45%のモルタルは、コンシステンシーが低いことから、高性能 AE 減

表－3 モルタルの配合

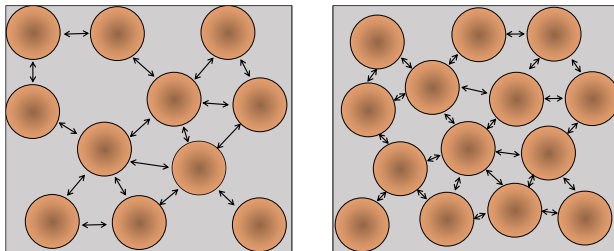
W/C (%)	S/C	単位量(kg/m ³)			単位量(C×%)	細骨材の粒径 (mm)	細骨材の総比表面積 (mm ² /mm ³)
		W	C	S	高性能 AE 減水剤		
30	0.24	423	1410	338	0.5	0.15~0.30	3480
	0.40	389	1297	519			5344
	0.40	389	1297	519	0.5	0.30~0.60	2672
	0.62	350	1168	724			3727
45	0.50	469	1042	521	0.0	0.15~0.30	5364
	0.86	410	910	783			8062
	0.86	410	910	783	0.0	0.30~0.60	4031
	1.34	351	779	1044			5375



図－2 単位細骨材量と塑性粘度の関係



図－3 単位細骨材量と降伏応力の関係



図－4 モルタル中の細骨材の粒子間距離のイメージ

水剤は用いなかった。また、配合に記載されている細骨材の比表面積は式(1)から算出した。ここで、細骨材の形状は1粒子ごとに異なっており、表面積および体積を正確に測定・算出することは難しい。このため、本研究では、全ての細骨材を真球と仮定し、1粒子あたりの細骨材の表面積および体積を式(2)および式(3)から算出した。

$$A_S = A_{S1} \times \frac{W_{od}/\rho_{Sod}}{V_{S1}} \quad (1)$$

$$A_{S1} = 4\pi \left(\frac{(D_{n+1} + D_n)/2}{2} \right)^2 \quad (2)$$

$$V_{S1} = \frac{4}{3}\pi \left((D_{n+1} + D_n)/4 \right)^3 \quad (3)$$

ここに、 A_S は細骨材の総比表面積(m²/m³)、 A_{S1} は1粒子あたりの細骨材の比表面積(m²/m³)、 W_{od} は絶乾質量(kg)、 ρ_{Sod} は細骨材の絶乾密度(kg/m³)、 V_{S1} は1粒子あたりの細骨材の体積(m³)、 D_{n+1} は細骨材が通過したふるいの呼び寸法(m)、 D_n 細骨材が留まったふるいの呼び寸法

(m)、である。

単位細骨材量と塑性粘度の関係を図－2に、単位細骨材量と降伏応力の関係を図－3に示す。いずれの結果でも、単位細骨材量の増加に伴い塑性粘度および降伏応力は増加した。また、0.15~0.30mmと比較して、0.30~0.60mmの単位細骨材量の増加に伴う降伏応力の増加量は大きかった。一方、W/C=45%では概ね同程度だが、W/C=30%では、0.30~0.60mmと比較して、0.15~0.30mmの単位細骨材量の増加に伴う塑性粘度の増加量は変化した。ここで、本研究で用いた配合は、S/Cが比較的低いW/C=45%のセメントペーストは、W/C=30と比べて、サスペンション濃度が低いため、粒径に関わらず、単位細骨材量の増加に伴うモルタルの塑性粘度の増加量が一定となったことが考えられる。一方、W/C=30%では、高濃度サスペンションと考えられることから、細骨材の粒径がモルタルの塑性粘度および降伏応力に与える影響を受けやすかったことが考えられる。

2.3 考察

(1)ペーストに作用した圧縮力

細骨材の粒径がモルタルの塑性粘度および降伏応力に与える影響を次のように整理した。フレッシュモルタルおよびコンクリートは圧縮力を受けることで、降伏応力が増加することが報告されている⁸⁾。このため、図－4に

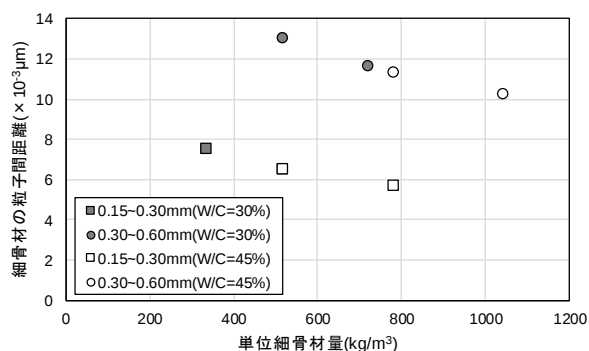


図-5 単位細骨材量と細骨材の粒子間距離の関係

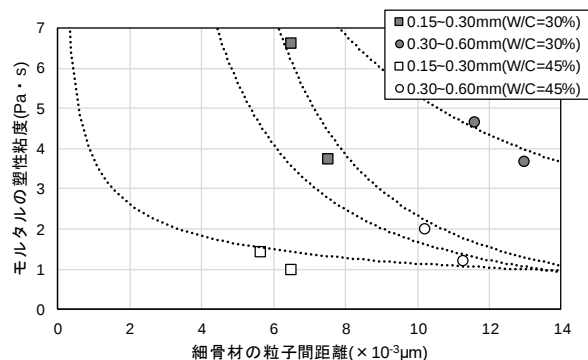


図-6 細骨材の粒子間距離と塑性粘度の関係

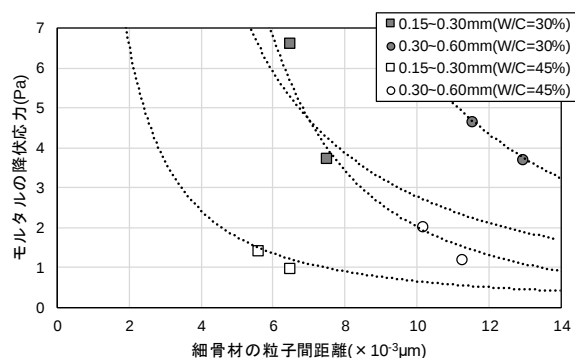


図-7 細骨材の粒子間距離と降伏応力の関係

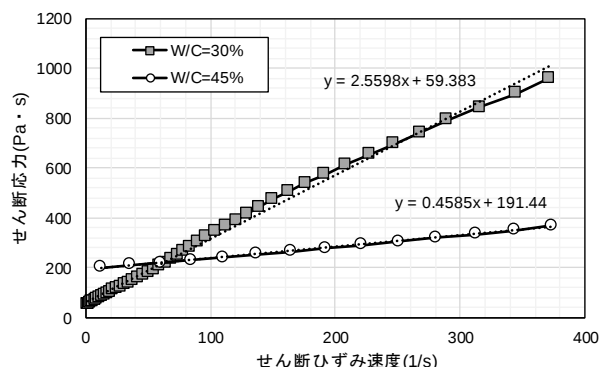


図-8 ペーストのレオロジー試験の結果

示すように、細骨材による自重が圧縮力としてモルタル中のペーストに加わったことで、細骨材の粒子間距離が短くなり、モルタルの塑性粘度および降伏応力が変化した可能性が考えられる。このため、既往の研究^{9) 10)}を参考に、式(4)を用いて細骨材の粒子間距離を算出した。なお、細骨材の平均粒子径は、式(5)から算出される面積体積平均粒子径を用いた。また、絶乾密度が測定できなかったことから、細骨材の実積率は未知数である。このため、いずれの粒径の細骨材も実積率は 60%と仮定した。

$$D_{ep} = \left(\sqrt[3]{\frac{C_s}{V_s} - 1} \right) D_{sm} \quad (4)$$

$$D_{sm} = \frac{1}{\sum_{n=1} \left\{ \frac{\ln(D_{n+1}) - \ln(D_n)}{D_{n+1} - D_n} V_{Rn} \right\}} \quad (5)$$

ここに、 D_{ep} は骨材の分散距離($\times 10^{-3} \mu\text{m}$)、 C_s は細骨材の実積率(=60%)、 V_s は細骨材の体積濃度(%), D_{sm} は細骨材の平均粒径(mm), V_{Rn} は $n+1$ 番目のふるいを通過し、 n 番目のふるいにとどまった細骨材の体積割合である。

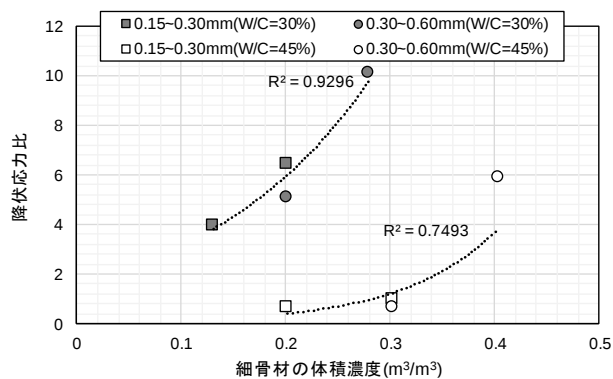
単位細骨材量と細骨材の粒子間距離の関係を図-5に示す。単位細骨材量の増加に伴い、細骨材の粒子間距離は短くなる。また、粒子間距離の変化量は、各粒径によって異なることが確認された。細骨材の粒子間距離と塑性粘度の関係を図-6に、細骨材の粒子間距離と降伏応力の関係を図-7に示す。なお、図中の点線は、粒子間

距離が著しく大きいモルタルは、セメントペーストの塑性粘度および降伏応力と等しくなると仮定し、回帰した。また、モルタル中のペーストを模擬した配合を作製し、十字羽根回転粘度計で測定した結果は図-8のようになった。粒子間距離が短くなることで、塑性粘度および降伏応力は増加した。また、セメントペーストの塑性粘度および降伏応力を考慮すると、この増加傾向は指数的に増加することが予想される。既往の研究⁸⁾でも同様に報告されていることから、骨材の粒径に伴うモルタルの塑性粘度および降伏応力の変化は、細骨材の粒子間距離が影響しているといえる。ただし、本研究では、近似曲線の一部しか測定できておらず、詳細については、範囲を拡大して今後の検討課題とする。

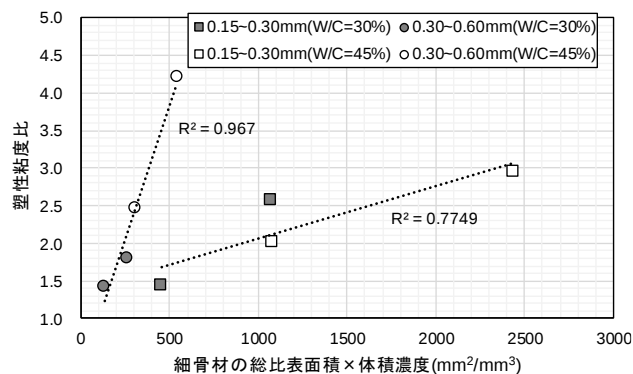
(2)材料の物性

次に、ペーストおよび細骨材の物性によってモルタルの塑性粘度および降伏応力が変化する可能性を考えた。このため、モルタルの塑性粘度および降伏応力に影響する材料の物性を整理した。

既往の文献^{2) 11)}より、サスペンションの塑性粘度は溶媒の塑性粘度や溶質の比表面積、溶媒と溶質の割合に影響されることが考えられる。このため、モルタルの溶媒であるペーストの塑性粘度および降伏応力、溶質である細骨材の比表面積や体積濃度を用いて、モルタルの塑性粘度および降伏応力と比較した。また、以降の結果は、塑性粘度および降伏応力の相関性の高かった細骨材の物



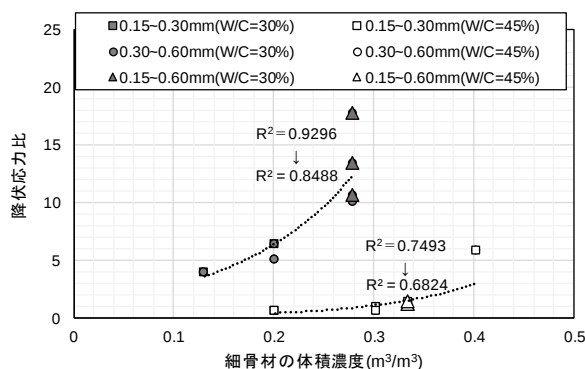
図－9 細骨材の体積濃度と降伏応力比の関係



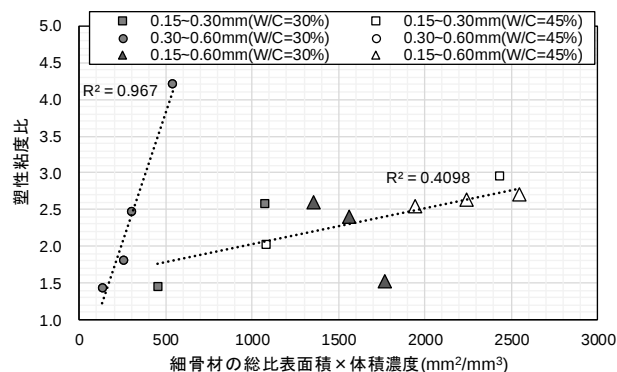
図－10 細骨材の物性指標と塑性粘度比の関係

表－4 モルタルの配合

W/C (%)	S/C	単位量(kg/m³)			単位量(C×%)	細骨材の割合 0.15~0.30mm : 0.30~0.60mm	細骨材の総比表面積 (mm²/mm³)
		W	C	S	高性能 AE 減水剤		
30	0.62	350	1168	724	0.5	3 : 7	4845
	0.62					5 : 5	5590
	0.62					7 : 3	6336
45	1.00	391	868	868	0.0	3 : 7	5809
	1.00					5 : 5	6702
	1.00					7 : 3	7596



図－11 細骨材の体積濃度と降伏応力比の関係



図－12 細骨材の物性指標と塑性粘度比の関係

性の結果を対象に記載する。細骨材の体積濃度と降伏応力比の関係を図－9 に示す。なお、降伏応力比は、モルタルの降伏応力をペーストの降伏応力で除した指標である。細骨材の体積濃度の増加に伴い降伏応力比は増加した。また、この傾向は W/C によって異なることが分かった。細骨材の物性指標と塑性粘度比の関係を図－10 に示す。なお、細骨材の物性指標は細骨材の比表面積と総比表面積を掛けた指標であり、塑性粘度比はモルタルの塑性粘度をペーストの塑性粘度で除した指標である。細骨材の物性指標の増加に伴い塑性粘度比は増加した。また、この傾向は粒径によって異なることが分かった。

以上のことから、モルタルの降伏応力は、ペーストの降伏応力や W/C、細骨材の体積濃度に影響されることが分かった。また、モルタルの塑性粘度は、ペーストの塑

性粘度、細骨材の体積濃度や比表面積、粒径に影響されることが分かった。

3. 粒径の範囲を拡大した細骨材の検討

3.1 実験概要

前章までの結果から、モルタルの降伏応力比は細骨材の体積濃度と相関性が高く、モルタルの塑性粘度比は細骨材の物性指標と相関性が高かった。このため、使用する細骨材の粒径の範囲を 0.15~0.60mm に拡大し、同様の検討を実施した。配合を表－4 に示す。なお、ペーストのフレッシュ性状は、前章と同様になるように、W/C および化学混和剤の添加率を表－3 と同様にした。

3.2 実験結果

細骨材の体積濃度と降伏応力比の関係を図－11 に、細

骨材の物性指標と塑性粘度比の関係を図-12に示す。粒径の範囲を拡大しても、細骨材の体積濃度と降伏応力比の相関性の低下量は小さかった。一方、細骨材の物性指標と塑性粘度比は、W/Cに関わらず、0.15~0.60mmの粒径の骨材は、0.15~0.30mmと比較して、0.30~0.60mmの細骨材の結果に近い値を示した。これは、0.15~0.60mmの粒径の骨材中の0.15~0.30mmの細骨材が、塑性粘度への影響度が少なくなっている、または、塑性粘度を表現するための細骨材の物性等の要因が不足していることが考えられる。今後、粒径の範囲を変更する等の検討をしていく必要がある。

4. まとめ

細骨材の粒径を調整したモルタルの塑性粘度および降伏応力の測定結果によって得られた知見をまとめると次のようになる。

- 1) 本研究で用いた配合では、粒径 0.60~0.85mm と 0.85~1.20mm の細骨材を境に、モルタルの降伏応力が大きく変化した。この原因として、ペーストと細骨材が一体化せず、ペーストが分離したためと考えられる。
- 2) 0.15~0.30mm および 0.30~0.60mm の細骨材では、細骨材量の増加に伴い塑性粘度は増加した。また、W/C=45%では概ね同程度だが、W/C=30%では、0.30~0.60mm と比較して、0.15~0.30mm の細骨材量の増加に伴う塑性粘度の増加量は大きかった。
- 3) 0.15~0.30mm および 0.30~0.60mm の細骨材では、細骨材量の増加に伴い降伏応力は増加した。また、いずれの W/C でも、0.15~0.30mm と比較して、0.30~0.60mm の細骨材量の増加に伴う降伏応力の増加量は大きかった。
- 4) 0.15~0.30mm および 0.30~0.60mm の細骨材では、モルタルの降伏応力は、セメントペーストの降伏応力や W/C、細骨材の体積濃度に影響されることが分かった。また、モルタルの塑性粘度は、セメントペーストの塑性粘度、細骨材の体積濃度や比表面積、粒径に影響されることが分かった。
- 5) 0.15~0.60mm の細骨材では、細骨材の体積濃度と降伏応力比の相関性は高かった。一方、細骨材の物性

指標と塑性粘度比は、W/Cに関わらず 0.30~0.60mm の細骨材の結果に近い値を示した。

参考文献

- 1) 公益社団法人 土木学会：コンクリートの施工性能の照査・検査システム研究小委員会（341 委員会）第 2 期委員会報告書，pp.145-147，2013
- 2) 村田二郎，菊川浩治：ポルトランドセメントペーストの粘度式に関する研究，土木学会論文集，第 354 号，V-2，pp.109-118，1985
- 3) 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，V-12，pp.109-118，1990
- 4) 小出水翔平，高巢幸二，小山田英弘，陶山裕樹：粒度調整した砕砂の物性値がモルタルの流動性に与える影響，セメント・コンクリート論文集，Vol.72，pp.91-98，2018
- 5) 平野修也，山田義智，西祐宜，崎原康平：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.41，No.1，pp.1073-1078，2019
- 6) 村田二郎，菊川浩治，杉山秋博：回転粘度計におけるフレッシュコンクリートの流動解析，セメント技術年報 XXIX，pp.204-207，1975
- 7) 社団法人土木学会：水理公式集，p.416，1949
- 8) 橋爪進：フレッシュモルタルの降伏条件に関する研究，名古屋大学，博士論文，2003
- 9) Weymouth, C.A.G : Effect of Particle Interference in Mortar and Concrete, Rock Products, Vol.36, No.2, pp.26-36, 1933
- 10) 近田孝夫：余剰ペースト厚さによるコンクリートのコンシステンシーの評価に関する基礎的研究，九州大学，博士論文，1997
- 11) 岡田秀敏，大谷俊浩，佐藤嘉昭，秋吉善忠：改質フライアッシュの物性がペーストとモルタルの流動性に及ぼす影響に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.36，No.1，pp.196-201，2014