

論文 砕石粉の高流動コンクリート用混和材としての利用に関する研究

福山 知広^{*1}・麓 隆行^{*2}・石野 梨紗^{*3}・山田 優^{*4}

要旨：砕石粉の発生量は、砕石・砕砂の生産量とともに増加するが、その利用用途はほとんどない。本研究では、砕石粉の高流動コンクリート用混和材としての使用可能性を検討するため、モルタルおよびペーストを作製して、従来使用の微粉末と比較する実験を行った。その結果、砕石粉は、BET 比表面積が大きいため、高性能 AE 減水剤の吸着量が多く、見かけの飽和吸着量の高性能 AE 減水剤を添加した微粉末ペーストの場合でも、同じ流動性の他の微粉末に比べて、塑性粘度が低下することが分かった。

キーワード：高流動コンクリート、砕石粉、BET 比表面積、拘束水比、見かけの飽和吸着量

1. はじめに

砕石・砕砂を製造する際に 1～2%の砕石粉が発生するが、そのほとんどが最終処分されている。砕石・砕砂の生産量は、平成 12 年度には約 4 億トンにのぼる。天然骨材の枯渇のため、その需要はここ数年変化していない。最終処分場が減少する近年では、砕石粉の利用用途の模索が必要である。コンクリート用混和材としての利用は、以前から検討されており、2000 年には TR も作成された。しかし、製造方法や産地によって品質変動が大きく、その利用はあまり進んでいない。微粉末の物理的性質がコンクリートに及ぼす影響を解明することが、砕石粉などの未利用微粉末の有効利用を検討する第一歩と考えられる。

本研究では、高流動コンクリートへの適用を目的とし、微粉末の物理的性質とモルタルおよびペーストのフレッシュ性状との関係を調べた。まず、高性能 AE 減水剤の添加量を一定とし、砕石粉を細骨材の一部と置換したモルタルの塑性粘度とモルタルフローについて検討した。次に、一成分の微粉末ペーストを用い、微粉末の吸着量を考慮して高性能 AE 減水剤を添加した

表-1 モルタルの実験で用いた微粉末の種類および物理的性質

微粉末の種類	記号	密度 (g/cm ³)	ブレン値 (m ² /g)
石灰石微粉末	LS5 ^{*1}	2.70	0.530
	LS8	2.71	0.852
高炉スラグ微粉末	BS4	2.89	0.452
	BS8	2.89	0.864
フライアッシュ	FA3	2.01	0.337
	FA4	2.41	0.415
砕石粉	高槻	2.72	0.443
	家島	2.63	0.329
	武雄	2.62	0.154

*1:記号の数字はブレン値の少数第1位の値

表-2 モルタルの実験で用いた配合^{*1*2}

種類	水粉体 質量比 (%)	単位量 (kg/m ³)			
		W	C ^{*3}	F ^{*4}	S
LS5	28	245	408	385	1179
	31			300	1260
	34			231	1326
	37			172	1382
	40			123	1430
高槻	43～55	282	470	186～43	1162～1298
家島	40～49	275	458	229～103	1140～1265
武雄	43～49	282	470	186～106	1156～1235

*1:LS5の配合から体積置換にて従来の微粉末を使用

*2:全粉体質量に対する減水剤添加率は 0.7%で一定

*3:W/C=60%で一定 *4:Fは微粉末

*1 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻(正会員)

*2 大阪市立大学大学院助手 工学研究科都市系専攻 修(工)(正会員)

*3 大阪市立大学 工学部土木工学科

*4 大阪市立大学大学院教授 工学研究科都市系専攻 工博(正会員)

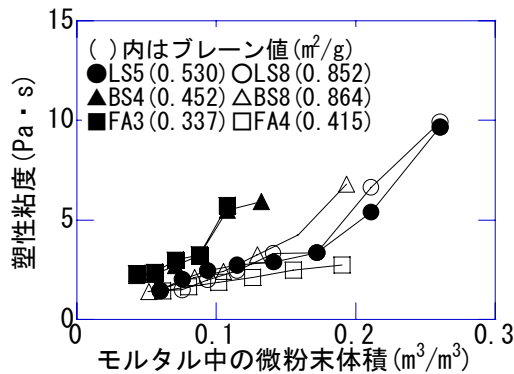


図-1 従来の微粉末を用いた時の塑性粘度

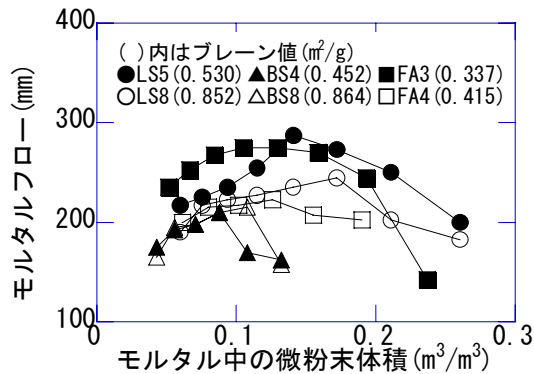


図-2 従来の微粉末を用いた時のモルタルフロー

時のフレッシュ性状について検討した。

2. 砕石粉を用いたモルタル性状に関する実験

2.1 実験概要

本実験で使用した微粉末の種類および物理的性質を表-1 に示す。高流動コンクリートに従来の使用している微粉末として、石灰石微粉末 (LS)、高炉スラグ微粉末 (BS) およびフライアッシュ (FA) のブレン値が異なる 2 試料ずつを用意した。また、砕石粉は砕石を製造した時に乾燥状態で回収したもので、産地の異なる 3 試料 (高槻産、家島産、武雄産) を用意した。その他の材料として、普通ポルトランドセメント、揖斐川産川砂およびポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤を用いた。材料分離状態ではないと目視判断した石灰石微粉末 (LS5) を用いた高流動コンクリートの配合から粗骨材を取り除き、モルタルの基本配合とした。砕石粉の粒度が粗いため、微粉末を細骨材の一部と置換して用いた。微粉末の添加によるモルタルの材料分離抵抗性の変化を調べるため、ペースト量を一定とし、

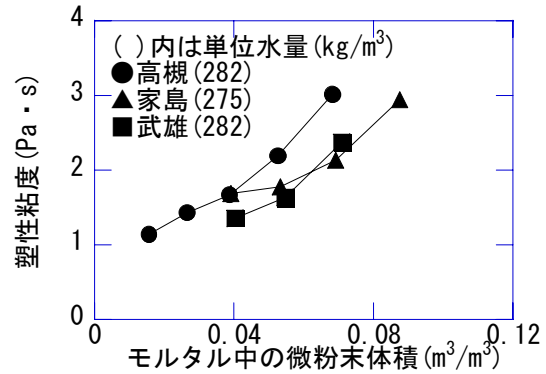


図-3 砕石粉を用いた時の塑性粘度

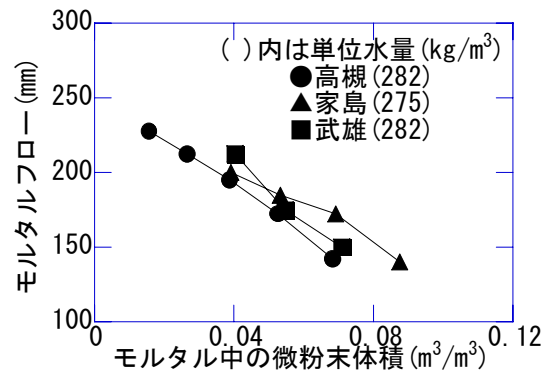


図-4 砕石粉を用いた時のモルタルフロー

各微粉末において、置換率を基本配合を中心として 3～8 水準に増減させてモルタルの性状を調べた。また、高性能 AE 減水剤の添加率は、すべてのモルタルで一定とした。LS5 を用いたモルタルの基本配合を表-2 に示す。なお、砕石粉を用いた場合、従来の微粉末と同じ配合では十分な流動性が得られなかったため、同程度のフローを得るために単位水量を 30～37kg/m³ 程度増加させた。モルタルの作製には、ホバートミキサを用い、細骨材、セメントおよび微粉末を低速で 30 秒攪拌後、水および高性能 AE 減水剤を加え、さらに低速 30 秒、高速 2 分攪拌した。攪拌後、5 分間静置した。モルタルのフローおよび B 型回転粘度計による塑性粘度を測定した。

2.2 実験結果および考察

図-1 および図-2 に示すとおり、従来の微粉末を用いた場合、モルタル中の微粉末体積を減らすと塑性粘度は減少するが、モルタルフローの増加には限界がみられた。これは、粘性の減少により、細骨材の粒子間の相互作用の影響が

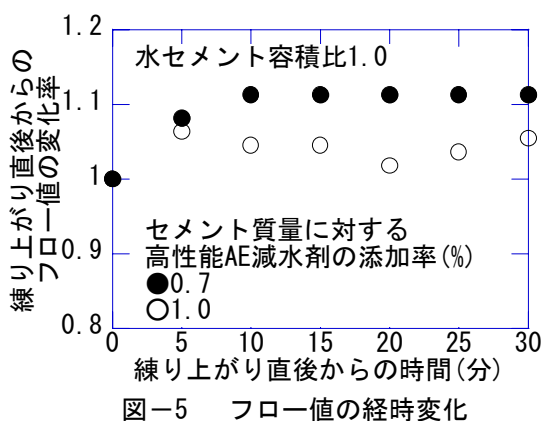


図-5 フロー値の経時変化

表-3 統計量

項目	フロー値 (mm)	塑性粘度 (Pa・s)	P ロート流 下時間(s)
平均値	191	2.16	18.1
標準偏差	2.90	0.249	1.49
分散	8.39	0.0618	2.22
変動係数	0.0152	0.115	0.0821

大きくなるためと考えられる¹⁾。碎石粉を用いた場合、図-3 および図-4 に示すとおり、微粉末体積を減らすと塑性粘度が低下し、モルタルフローは増加するが、従来の微粉末の場合と異なり、最終的に材料分離を起こした。以上より、碎石粉が水だけでは十分に分散されず、団粒となったと考えられる。

3. 微粉末ペーストの流動性に関する実験

3.1 測定手順と測定値の精度に関する考察

前章の結果から、碎石粉を用いたペーストの分散性に関する知見を得るため、各種微粉末のみを用いたペーストを用いて、拘束水比や高性能 AE 減水剤の吸着特性を調べた。しかし、高性能 AE 減水剤の効果が安定するには、練り上がり後、時間を要する。そこで、セメントと混合して使用することを考慮し、高性能 AE 減水剤を添加したセメントペーストのフローが安定する時間を調べた。配合は、水セメント容積比を 1.0 と一定とし、高性能 AE 減水剤をセメント質量に対し 0.7 および 1.0% 添加した。ペーストの作製には、ASTM ミキサーを用い、普通ポルトランドセメント(ブレン値 : 0.357m²/g)、高性能 AE 減水剤および一次水を入れ、低速 60

表-4 微粉末の物理的性質の試験方法

試験項目	試験方法
真密度・ブレン値	JIS R 5201
粒度分布	吸光度法
Sw	多点 BET 吸着法
見かけ密度	JIS K 5101
充填率	見かけ密度/真密度

秒間、高速 60 秒間攪拌後、二次水を入れて低速で 120 秒間練り混ぜた。なお、セメント投入から作業終了までの時間は 7 分とした。フロー値は、内径 4cm、高さ 7cm の円筒形容器を用いて、練混ぜ直後から 5 分ごとに 30 分後まで測定した。さらに、微粉末ペーストのフレッシュ性状を測定する時の測定値の精度を把握するために、水粉体容積比を 1.05、高性能 AE 減水剤添加率を微粉末質量の 0.25% と一定とし、高炉スラグ微粉末(ブレン値 : 0.639m²/g)を用いた微粉末ペーストを 6 回作製し、先と同様のフロー値、B 型回転粘度計でのレオロジー定数および投入量を 500ml とした P ロート流下時間を測定し、統計分析を行った。

円筒形容器を用いたフロー値の経時変化を図-5 に示す。高性能 AE 減水剤添加量をセメント質量に対し 1.0% 添加した場合に少しばらついたが、10~30 分の間で比較的安定な領域が認められた。次に、同一微粉末ペーストのフレッシュ性状を検討した。表-3 に示すとおり、フロー値では変動係数が小さく、ばらつきが小さいが、塑性粘度および P ロート流下時間では、ばらつきはやや大きい結果となった。

以上より、高性能 AE 減水剤を用いた実験では、練混ぜ直後から 10 分および 20 分後の測定値の平均をフロー値とした。また、P ロート流下時間の測定も同時に行い、2 回の平均値を P ロート流下時間とした。

3.2 微粉末ペーストの性状に関する実験概要

使用した微粉末の種類とそれらの物理的性質を表-5 に、物理的性質の試験方法を表-4 に示す。石灰石微粉末(LS)、高炉スラグ微粉末(BS) およびフライアッシュ(FA)についてブレン値

表-5 ペーストの実験で用いた微粉末の種類と物理的性質

微粉末の種類	記号 ^{*1}	密度 (g/cm ³)	ブレン値 (m ² /g)	充填率 (%)	Sw ^{*2} (m ² /g)	Sc ^{*3} (m ² /g)	Sw/Sc
石灰石微粉末	LS4	2.71	0.403	58.3	1.28	0.356	3.60
	LS5	2.72	0.576	54.3	1.64	0.418	3.92
	LS9	2.69	0.931	46.1	2.30	0.593	3.88
高炉スラグ微粉末	BS4	2.90	0.425	48.5	0.636	0.269	2.37
	BS6	2.90	0.600	40.8	1.26	0.330	3.81
	BS8	2.90	0.775	35.1	1.63	0.467	3.48
フライアッシュ	FA3	2.13	0.335	56.0	2.49	0.229	10.8
	FA5	2.38	0.529	46.2	3.03	0.497	6.09
碎石粉	高槻	2.72	0.516	47.8	6.52	0.270	24.1
	高槻 8	2.71	0.826	46.0	7.05	0.375	18.8
	高槻 11	2.71	1.11	42.0	9.42	0.525	17.9
	家島	2.63	0.329	55.4	3.87	0.176	22.0

*1:2章で用いた表-1の微粉末と同記号であっても、製造時期が異なる

*2:SwはBET比表面積 *3:Scは粒子を球形と仮定したときの比表面積²⁾

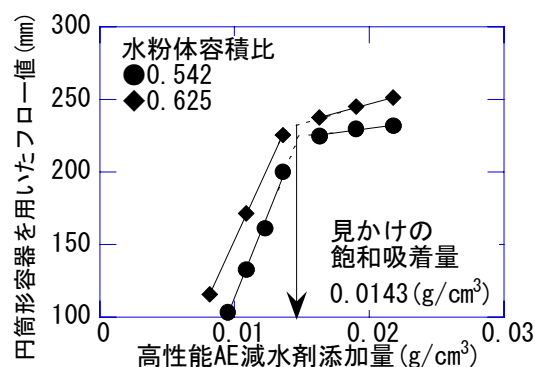


図-6 石灰石微粉末 (LS5) への高性能 AE 減水剤添加量とフロー値との関係

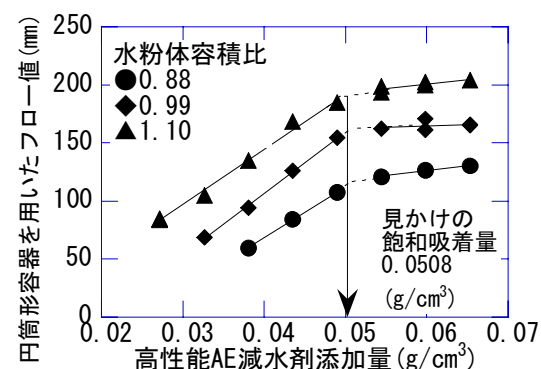


図-7 碎石粉 (高槻) への高性能 AE 減水剤添加量とフロー値との関係

が異なる 2 または 3 試料を用意した。また、碎石粉には産地の異なる 2 試料(高槻産、家島産)を用意し、そのうち高槻産碎石粉についてボールミルにより粉砕し、ブレン値の異なる 3 試料、計 4 試料を用意した。なお、同記号であっても、2 章で用いた表-1 の微粉末とは製造時期が異なる。微粉末の拘束水比は、JIS R 5201 に規定されたフローコーンを用いてペーストフローを測定し、その相対フロー面積比と水粉体容積比との関係より算出した¹⁾。また、一定の水粉体容積比で、内径 4cm、高さ 7cm の円筒形容器を用いて、高性能 AE 減水剤を添加した微粉末ペーストのフロー値を測定し、図-6 に示すとおり高性能 AE 減水剤の添加量を増加させた際のフロー値の増加量が急に減少する添加量を見かけの飽和吸着量として測定した³⁾。

また、微粉末への高性能 AE 減水剤の実際の吸着量を測定した。10%の分散剤水溶液(固形分 1.7%)を用い、各種微粉末と水粉体容積比 1.0 のペーストを 3.1 節と同じ方法で練り混ぜた。その後、ペーストを 3000rpm で 10 分間遠心分離し、上澄み液の分散剤濃度を全有機炭素(TOC)から推定し、練混ぜ前との濃度差を微粉末に対する吸着量とした。

3.3 微粉末ペーストの拘束水比と高性能 AE 減水剤の吸着特性に関する考察

図-6 および図-7 に石灰石微粉末(LS5)および碎石粉(高槻)の微粉末ペーストに関する高性能 AE 減水剤の添加量と円筒形容器を用いたフロー値との関係を示す。水粉体容積比が変化してもペーストの見かけの飽和吸着量は変化しない。ここでは示していないが、他の微粉末でも

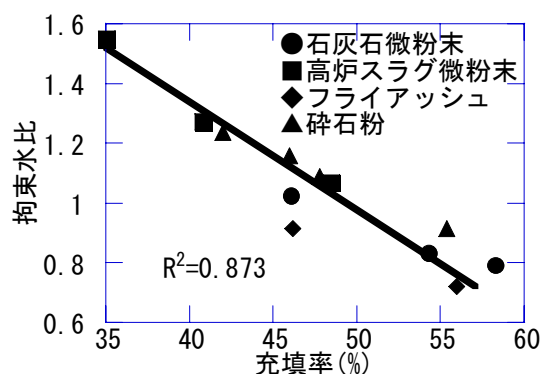


図-8 充填率と拘束水比との関係

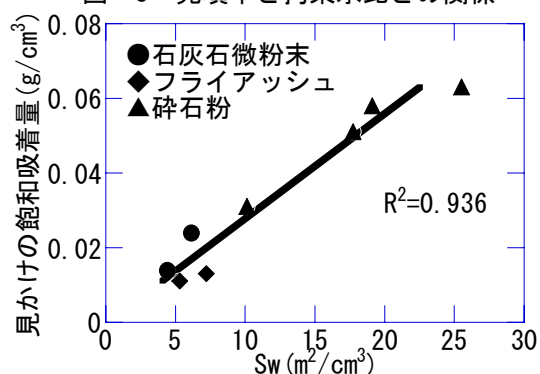


図-9 Sw と見かけの飽和吸着量との関係

同様の傾向が見られたため、見かけの飽和吸着量は配合に関係なく、微粉末の物理的性質と関係すると考えられる。そこで、見かけの飽和吸着量と微粉末の物理的性質との関係を調べた。拘束水比でも同様の検討をした。その結果、図-8および図-9に示すとおり、拘束水比は充填率と、見かけの飽和吸着量は S_w との相関が高かった。充填率は粒子間の付着力に関係があり、粒子の物性や粒子間の接点の数に影響されるため⁴⁾、拘束水比には粒子径および形状の影響が大きいと考えられる。また、 S_w は窒素ガスを用いて測定した比表面積であり、見かけの飽和吸着量には微細な凹凸を含めた表面積が影響を及ぼすと考えられる。ここで、TOCを用いて測定した微粉末への吸着量と見かけの飽和吸着量との関係を図-10に示す。相関性は高いが、流動性から判断した見かけの飽和吸着量では、TOCによる測定値に比べ、少し大きくなった。

砕石粉は従来の微粉末と比べ、充填率は同程度であるが、 S_w は大きい。このため、拘束水比は従来の微粉末とほぼ同程度であるが、高性能

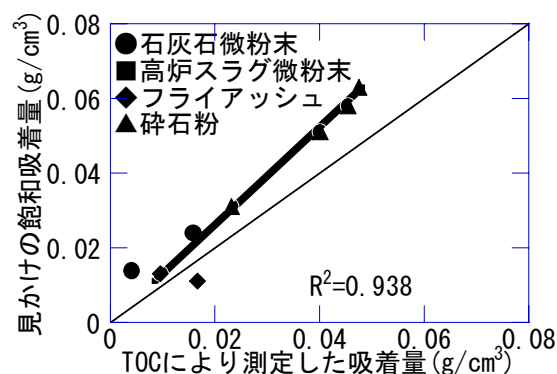


図-10 TOCにより測定した吸着量と見かけの飽和吸着量との関係

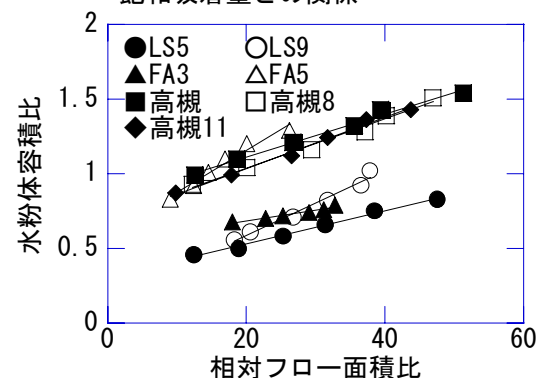


図-11 相対フロー面積比と水粉体容積比との関係

AE 減水剤の吸着量が多い。同一配合の場合、微粉末の十分な分散が得られず、混和材としての効果が見られなかったと考えられる。また、砕石粉をボールミルで破碎処理した場合でも、 S_w が増大するため、高性能 AE 減水剤の添加量は、処理前に比べ増加する結果となった。以上より、砕石粉を用いる場合、水よりも高性能 AE 減水剤の添加量の増加により、分散性を確保する必要があると考えられる。

4. 混和剤の吸着量を考慮したペーストの性状について

4.1 実験概要

次に、高性能 AE 減水剤により、砕石粉が十分な分散性を確保した時の混和材としての使用可能性を調べるため、見かけの飽和吸着量の高性能 AE 減水剤を添加した微粉末ペーストを用い、数種類の水粉体容積比のフレッシュ性状を測定した。実験として、4×7cm の円筒形容器によるフロー値、B 型回転粘度計によるレオロジ

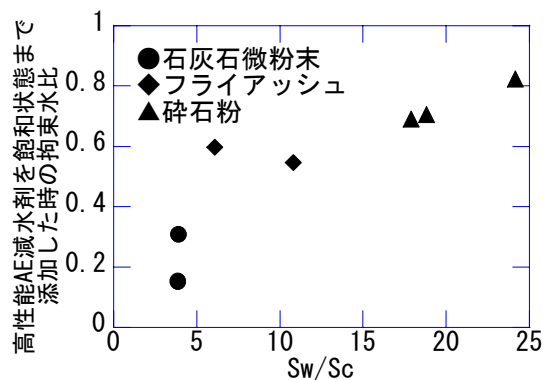


図-12 Sw/Sc と高性能 AE 減水剤の飽和状態での拘束水比との関係

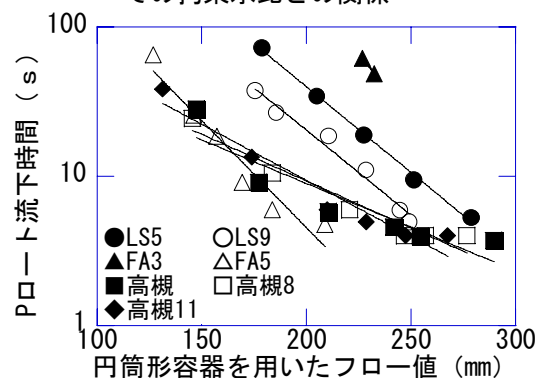


図-13 円筒容器を用いたフロー値と P ロート流下時間との関係

一定数および投入量 500ml とした P ロート流下時間を測定した。なお、練混ぜおよび測定方法は 3.1 節、使用材料は 3.2 節と同じである。

4.2 実験結果および考察

まず、図-11 に示すとおり高性能 AE 減水剤を見かけの飽和吸着量まで添加した微粉末ペーストの水粉体容積比と相対フロー面積比との関係では、微粉末ごとにほぼ直線関係が得られた。碎石粉は他の微粉末に比べ、同じフロー値での単位水量は増加する傾向にある。これは、図-12 に示すとおり、粒子表面の微細な凹凸に関係すると考えられる。また、フロー値と P ロート流下時間との関係を図-13 に示す。片対数グラフで表すと、微粉末ごとに直線関係が見られた。図-14 に示すとおり、塑性粘度と P ロート流下時間は相関性があり、同じフロー値での粘性を見ると、碎石粉は FA5 と同様に他の微粉末に比べ低くなる結果となった。すなわち、高性能 AE 減水剤を微粉末の飽和吸着量まで添加した場合、碎石粉は表面の微細な凹凸が多いため、単位水

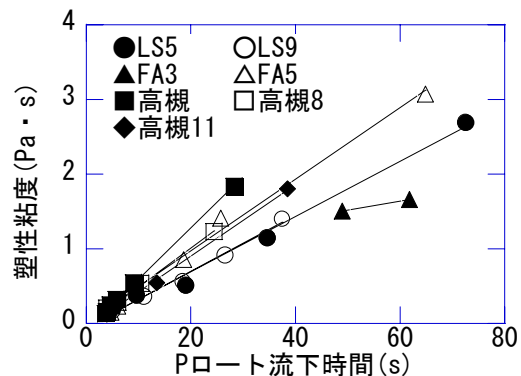


図-14 P ロート流下時間と塑性粘度との関係

量が多くなり、粘性が低下した。しかし、フライアッシュの I 種(FA5)と同程度の性状が得られた。

5. 結論

- 1) 微粉末の拘束水比は充填率に反比例し、微粉末への高性能 AE 減水剤の見かけの飽和吸着量は BET 比表面積に比例する。
- 2) 碎石粉は BET 比表面積が大きいいため、高性能 AE 減水剤の吸着量が大きく、従来の微粉末に比べ、その添加量の増加が必要である。
- 3) 見かけの飽和吸着量の高性能 AE 減水剤を添加した碎石粉を用いたペーストの流動性を、従来の微粉末を用いた場合と同じにした場合、表面の微細な凹凸が多いため、単位水量が多くなり、塑性粘度は低くなる。

参考文献

- 1) 枝松良展, 山口省三, 岡村 甫: モルタルの変形性を表す細骨材の材料特性の定量化, 土木学会論文集, No.538, Vol.31, p37-46, 1996.5
- 2) 大島敏男, 張 佑林, 廣田満昭, 鈴木道隆, 中川 武: 粉碎産物の流動性に及ぼす粉碎機種の影響, 粉体工学会誌, Vol.30, No.7, p30-35, 1993
- 3) 太田 晃, 魚本健人: 微粉末粒子に対するポリカルボン酸系分散剤の分散効果に関する検討, コンクリート工学論文集, Vol.10, No.2, p131-139, 1999.5
- 4) 神保元二他: 微粒子ハンドブック, (株)朝倉書店, p207-213, 1991