

論文 粉体総表面積に着目したセメントペーストの変形性に関する実験的検討

江口 康平*1・加藤 佳孝*2・石川七恵*3

要旨: 本研究では、異なる物性を有する粉体を使用したセメントペーストを作製し、比表面積や密度といった物性の違いが変形性に与える影響について検討した。また、通常、モルタルフローコーンを使用するフロー試験は15回振動を加えた後のフローの広がりを試験値とするが、本研究では物性の違いがフローの変化に与える影響も検討するために変化がなくなるまで試験した。その結果、変形がなくなるまでフロー試験を行った場合、使用材料の特性に依らず配合中の粉体総表面積が増加するほど自由水が減少する結果となり、締固めを行うような普通コンクリートの場合、配合中の粉体総表面積からペースト部の最終的な変形性を予想できると考えられる。

キーワード: 変形性, フロー試験, 拘束水比, 粘性係数, 粉体総表面積

1. はじめに

コンクリートは水、セメント、細骨材、粗骨材、混和材および化学混和剤からなる複合材料であり、安価で任意の形状の構造物を作製可能といった利点があることから、主たる建設材料として様々な構造物に利用されている。そのため、要求される性能を満たすコンクリートを得るための配合設計は以前から検討されており、膨大な経験に基づく調整方法が提案され、現在ではコンクリート標準示方書にも記載されている¹⁾。

一方で、コンクリートに使用する材料は社会情勢に対応するように変化してきている。特にフライアッシュは2011年に発生した東日本大震災以降、原子力発電所の停止によって火力発電所の稼働率増加に伴ってその排出量が増加してきており、利用の拡大が求められる。しかし、フライアッシュは産地や発電設備ごとで品質の変動が大きく、使用に際して十分な配合検討を行う必要があり、利用拡大の妨げになっているとの指摘もある²⁾。その他にも、近年では産業副産物の有効利用や、コンクリートの高機能化を目的に新しい混和材が開発されている。これらの材料の中には、従来の材料とは異なる材料物性を有している場合がある。そのような材料に対しては、既往の経験則に基づく配合調整方法では対応できないことが予想される。そのため、材料物性に着目した論理的な配合決定方法が必要になると予想される。

セメントペーストおよびモルタルの流動性に関しては、例えば余剰ペースト膜厚に基づく論理的な検討がされているものの^{3) 4)}、このような指標を算出するためには、粒度分布や形状などの情報が必要になる。その

ため、一般に入手できる材料物性である比表面積や密度から、変形性等を予測することができればより効率的に配合設計ができると考えられる。また、「セメントの物理試験(JIS R 5201)」に規定される通常のフロー試験は、モルタルフローコーンを取り除いてからフローテーブルを15回落下させた後のフロー値を測定する。この場合、15回時のフロー値が同程度であっても、振動を加え続けることで最終的なフロー値が異なる可能性があり、ペーストが持つ最大の変形量を把握できていない可能性がある。

本研究では、水結合材比、混和材種類および置換率を変化させることで、配合中の粉体の比表面積や密度、拘束水比等の特性値がフロー値に与える影響について検討した。また、フロー試験については、一般に行われるような落下回数15回までではなく、フローの増加がほぼ停止するまで試験し、材料ごとの特性値がフローの増加速度に与える影響についても検討する。

2. 実験概要

2.1 使用材料

セメントには密度 3.15g/cm³、比表面積 3410cm²/g の

表-1 使用材料の物性

	密度 (g/cm ³)	ブレン値 (cm ² /g)
普通ポルトランドセメント(OPC)	3.15	3410
フライアッシュ(FA)	2.28	3920
高炉スラグ微粉末(BS)	2.89	4300
メタカオリン系混和材(MKP)	2.62	9630

*1 東京理科大学 理工学部土木工学科助教 博士(工学) (正会員)

*2 東京理科大学 理工学部土木工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*3 東京理科大学 理工学部土木工学科

表-2 配合

表記	W/(C+F) (%)	混和材 置換率(%)	単位量(g/L)					粉体の 総体積 (cm ³ /L)	粉体の 総表面積 (m ² /L)
			W	C	F				
					FA	BS	MKP		
30-OPC	30	0	486	1620	0	0	0	514	552
50-OPC	50	0	612	1223	0	0	0	388	417
70-OPC	70	0	688	983	0	0	0	312	335
30-FA10	30	10	476	1428	159	0	0	523	549
30-FA30		30	458	1068	458	0	0	540	544
30-FA50		50	441	734	734	0	0	555	538
50-FA10	50	10	602	1084	120	0	0	397	417
50-FA30		30	584	818	351	0	0	414	417
50-FA50		50	568	568	568	0	0	429	416
70-FA10	70	10	680	874	97	0	0	320	336
70-FA30		30	663	663	284	0	0	335	337
70-FA50		50	648	463	463	0	0	350	339
30-BS30	30	30	479	1119	0	479	0	521	588
30-BS50		50	475	792	0	792	0	525	611
30-BS70		70	471	471	0	1100	0	530	634
50-BS30	50	30	606	848	0	363	0	395	445
50-BS50		50	602	602	0	602	0	399	464
50-BS70		70	598	359	0	837	0	404	482
70-BS30	70	30	682	682	0	292	0	318	358
70-BS50		50	679	485	0	485	0	322	374
70-BS70		70	675	289	0	675	0	325	389
30-MKP10	30	10	481	1443	0	0	160	519	646
30-MKP30		30	471	1099	0	0	471	529	828
30-MKP50		50	462	770	0	0	770	538	1004
50-MKP10	50	10	607	1092	0	0	121	393	489
50-MKP30		30	598	837	0	0	359	403	631
50-MKP50		50	589	589	0	0	589	412	768
70-MKP10	70	10	684	879	0	0	98	316	394
70-MKP30		30	675	675	0	0	289	325	508
70-MKP50		50	667	476	0	0	476	333	621

普通ポルトランドセメント（以下、OPC）を使用した。混和材としては、密度 2.28g/cm³、比表面積 3920cm²/g のフライアッシュⅡ種（以下、FA）、密度 2.89g/cm³、比表面積 4300cm²/g の石こう無添加の高炉スラグ微粉末（以下、BS）および、近年開発された新しい混和材料として、密度 2.62g/cm³、比表面積 9630cm²/g の非常に細かい粉体であるメタカオリン系混和材料（以下、MKP）を使用した。この材料はセメントに混合することで、長期強度を損なうことなく材齢 3~7 日程度の初期強度の向上が期待できるポゾラン材料である⁵⁾。使用した材料の物性を取り纏めて表-1 に示す。

2.2 配合条件

配合を表-2 に示す。水結合材比がフロー値および粘性係数に与える影響を検討するために W/(C+F)は 30,

50, 70%の 3 水準とした。また、同一の W/(C+F)に対してペースト中に占める粉体の特性を変化させるために、置換率を変化させた配合も検討した。水結合材比 30, 50, 70%とした配合に、ポゾラン材料である FA および MKP を使用する配合では置換率を 10, 30, 50%の 3 水準とし、BS に関しては 30, 50, 70%の 3 水準の計 30 配合で検討した。

2.3 試験方法

セメントペーストは、「セメントの物理試験方法 (JIS R 5201-1997)」に準拠して練り混ぜ、作製したペーストは直ちにフロー試験および回転粘度計による粘性を測定した。フロー試験は前述した JIS 規格を参考に試験を行うが、フロー値の測定は通常の 15 回落下後 (15 打

フロー) だけでなく、フローコーンを取り除いた直後の 0 回 (0 打フロー), 最終的にフローの変化が 1mm 以下となるまで 5 回刻みに測定した。フロー値の測定はノギスまたはメジャーを用いて 1mm 単位で短辺と長辺を測定しフロー面積を算出した。また、フローの測定に際しては、ペーストがフローテーブルを超えることが予想されたため、フローテーブルの上に 80×80cm のスランブ版を振動しないように設置して試験を行った。自由水比は既往の研究³⁾を式(1), (2)を用いて算出した。具体的には、Ww/Vp を変化させたペースト (W/B30, 50, 70%)を用いて、相対フロー面積比と Vw/Vp の関係から相対フロー面積比が 0 となる時の水量を拘束水比とし、ペーストに占める水容積比 Vw から拘束水比を引くことで算出した。混和材を使用した配合に関しても同様に、同置換率の配合の W/B を変化させて自由水比をそれぞれ算出した。加えて、規定回数落下させた際の相対フロー面積比と Vw/Vp の関係から、打数ごとの自由水比も算出した。粘性の測定に関しては、「液体の粘度測定方法(JIS Z 8803:2011)」を参考に回転粘度計を使用して測定する。測定はまず、フレッシュペーストを円筒形の容器に詰めた後、0~105rpm までのトルクを 5rpm 毎に読み取り、その傾きから粘性係数 (mPa・s)を算出した。

$$V_w / V_p = E_p \times \Gamma_p + \beta_p \quad (1)$$

$$\Gamma_p = (F_p / 100)^2 - 1 \quad (2)$$

ここで、 V_w =ペースト中の水容積比

V_p =ペースト中の粉体容積比

E_p =ペーストのフロー変形係数

Γ_p =ペーストの相対フロー面積比

β_p =ペーストの拘束水比

F_p =ペーストの平均フロー値(mm)

3. 実験結果および考察

図-1 には、一例として W/(C+F)30%の落下回数の増加に伴うフロー値の変化を示す。W/(C+F)30%の場合、いずれの供試体もフローコーンを取り除いた直後の 0 打フロー値が 100mm となっている。これはフローコーンの底辺の長さであり、変形していないことを示している。その後、フローテーブルを落下させると、OPC, FA, BS は 0~5 打の間にフロー値が 50mm 以上増加している。一方で、MKP では 30mm 程度しか増加せず、その後も緩やかに変形を続けている。FA および BS は、通常の 15 打フロー値は OPC よりも 20mm 程度小さい結果となっているが、その後も落下させ続けると、最終的に BS は OPC と同程度のフロー値となっている。

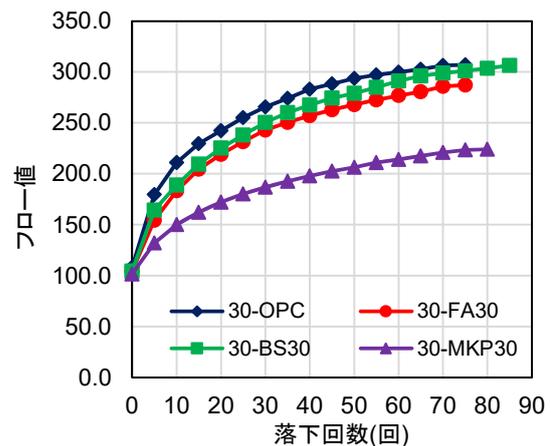


図-1 落下回数毎のフロー値の例

FA および MKP はそれぞれ 75, 80 打を超えた時点で増加量が 1mm 以下となり変形が終了したが、OPC, BS よりもフロー値は小さい。このことから、現在行われているモルタルのフロー試験はフレッシュペーストの潜在的な変形性能を正しく測定できていない可能性がある。また、本研究で検討したフローの変化が 1mm 以下になるまで打撃を与えることは、ペーストに過剰な外力を加え材料分離が生じる可能性が考えられるが、今回の検討の範囲ではいずれの配合でも材料分離は確認されなかった。

図-2 に相対フロー面積比と落下回数を平方根で表したものの関係を示す。なお、W/(C+F)70%の、BS30% および FA10%の配合は、置換率が低いにも拘わらず 0 打時の相対フロー面積比が小さくなっている。これはその他の配合と異なる傾向を示しており、試験時にミスがあった可能性があるため、今後の検討からは除外する。まず、W/(C+F)30%の配合を見ると、いずれの混和材を使用した配合も 0 打時のフロー面積比は 0 となっている。これは、ペースト中の自由水が不足しており、自重のみでは変形できなかったためである。その後、フローテーブルを落下させると、相対フロー面積比は増加するが、その際、FA および BS を使用した配合は OPC と同様な増加傾向を示している。一方で、MKP を使用した場合、置換率によって傾きが変化している。この原因としては、MKP は比表面積が 9630cm²/g と非常に細かいため、置換率の影響がそのほかの混和材よりも顕著に表れたためだと考えられる。

次に、W/(C+F)50%の場合、FA および BS を使用した配合の切片は、OPC よりも小さいものの全ての配合で正の値をとり、自由水が変形性に寄与していることが確認できる。これは、OPC に対して比表面積が 500~1000cm²/g 程度大きいため、外力を与えない時の拘束水比が大きくなったことが考えられる。MKP を使用した場合、置換率 50%の配合は切片が 1 以下となっており、自由水の働きが殆どないような結果になった。

これについても、比表面積が OPC の倍以上大きい MKP を使用したことで、配合中の粉体の総表面積が増大し、拘束水比が増加したことが予想される。これについては後ほど詳細に検討する。傾きに注目すると、置換率毎に多少の変動はあるものの、概ね同程度の傾きを示しており、外力が加わる場合は材料の特性によらず同様の変形挙動を示すという結果となった。これは、W/B30%の場合と異なる傾向となっている。これに関しては今後より詳細に検討する必要があるが、W/B30%のMKPを使用した配合のみこのような結果になっていることから、変形性が急激に変化する境界条件があった可能性がある。

同様に W/(C+F)70%の場合を見ると、いずれの配合も切片が大きくなっていることから、W/(C+F)の増加に伴い自由水も増加し、初期の変形性が増加していることが分かる。材料ごとの違いを見ると、FA30、50%の結果を見ると、W/(C+F)50%の際と同様に置換率が異なっても外力による変形性は同程度となった。また、

BS を 50%以上置換した配合は OPC と同程度の切片となっており、高 W/(C+F)で BS を使用しても変形性は OPC と変わらない結果となった。次に MKP を使用した場合についてみると、配合ごとで切片の差が大きい。これは、MKP の比表面積が大きいため置換率の差が大きく影響したことによると考えられる。

図-3には自由水比と配合 1L 中の粉体中の総表面積の関係落下回数ごとに取り纏めて示す。まず、0 打時の自由水比と粉体総表面積の関係を見ると、いずれの配合も粉体総表面積の増加に伴い自由水比が低下している。特に粉体の総表面積が 500m²/L を超えると計算上の自由水比の値が負の値となり、変形性の顕著な低下が予想される。この自由水比がマイナスの値を取る配合は W/(C+F)30%の配合であり、配合に占める水容積比が小さいため全ての水が粉体に拘束され、図-2の左列に示すように自重による変形が生じなかったと考えられる。一方で、MKP のように比表面積が極端に大きい材料の場合、赤い破線で囲む配合において、FA

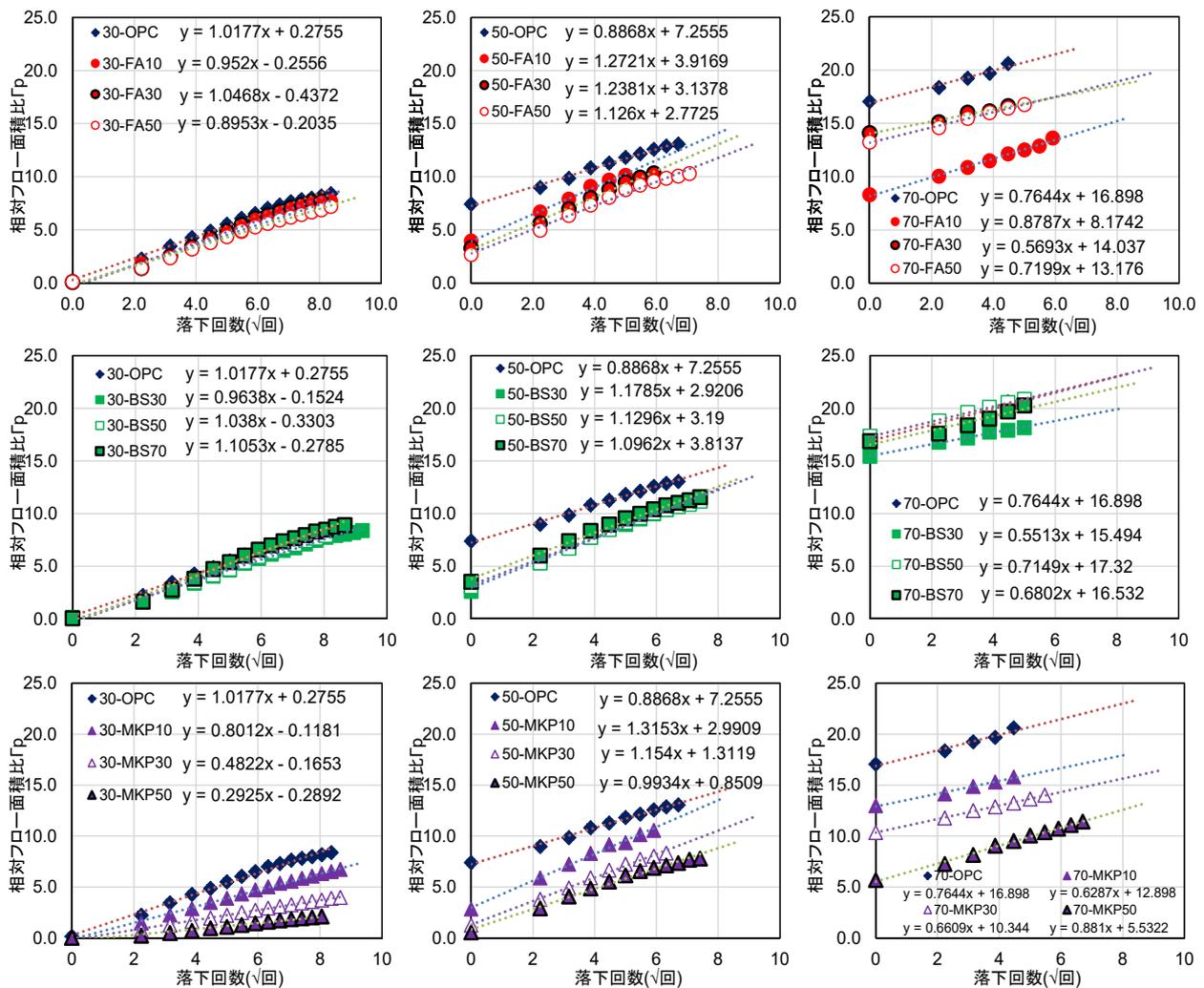


図-2 相対フロー面積比と落下回数(√回)の関係

(上段:FA, 中段:BS, 下段:MKP, 左列:W/(C+F)=30%, 中列: W/(C+F)=50%, 右列: W/(C+F)=70%)

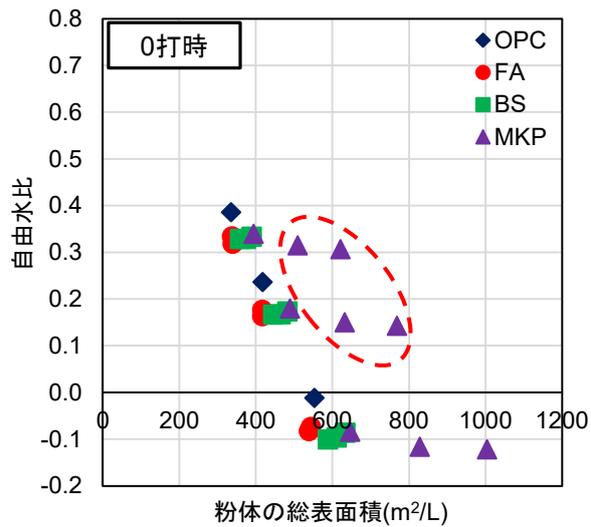


図-3 自由水比と粉体の総表面積の関係（その1）

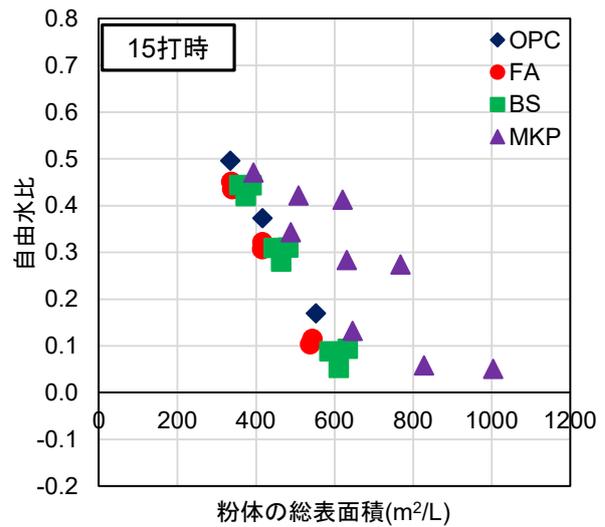


図-3 自由水比と粉体の総表面積の関係（その2）

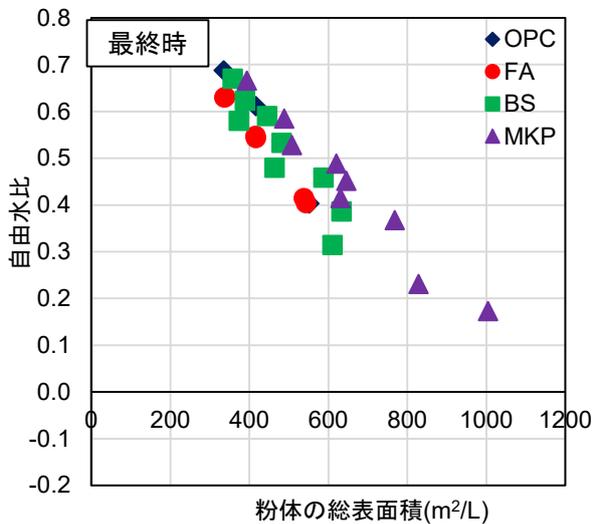


図-3 自由水比と粉体の総表面積の関係（その3）

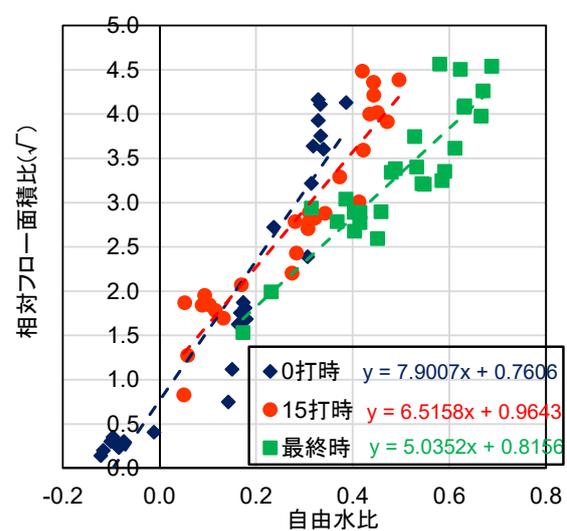


図-4 自由水比と相対フロー面積比の関係

や BS よりも粉体総表面積が大きいにも拘わらず自由水比が大きい点がある。これは、MKP は 20nm 程度の非常に細かな微粒子であり、この微粒子が凝集体を形成して比較的大きな粒体となることで、実際のペースト中での粉体総表面積が減少した可能性がある。そのため、粉体総表面積が 600m²/L を上回っても自重による変形が生じ、本論文で定義する自由水比が 0 以上となったと考えられるが、今後、詳細な検討が必要である。変形が終了するまでフロー試験を行った結果をみると、混和材の種類による影響はなく、ペースト中の自由水比は粉体の総表面積と負の相関関係にあるといえる。これは、外力を加えることで粉体に拘束されていた水が放出され、自由水が増加し、変形性が増加したと考えられる。

以上のことより、外力を加えない場合、ペースト部の変形性は配合中の粉体総表面積と凝集の影響を受ける可能性があり、外力が作用する場合は、粉体総表面積を考慮することで変形性を予想できる可能性がある。

図-4 には、自由水比と相対フロー面積比を平方根で表した場合の関係を示す。これまでの検討からもわかるように、自由水比と相対フロー面積比には正の比例関係がみられる。15 打時の結果に着目すると、自由水比が 0.4 を超えるとそれ以上相対フロー面積比が増加しなくなっている。その後、変形がなくなるまで落下させた場合は、自由水比が 0.5 を超えたあたりから相対フロー面積比の増加がなくなっている。このことから、ペースト中の自由水比が 0.4~0.5 を超えると、それ以上の自由水はペーストの変形性に影響を与えなくなることが示唆された。

図-3 に示す 0 打時の自由水比と総表面積の関係から、総表面積が 500m²/L を上回るとペースト中の水が粉体粒子にすべて拘束され、変形性が大きく低下することが確認されている。そこで、総表面積とペーストの粘性について検討した。試験結果を図-5 に示す。結果を見ると、総表面積が約 500m²/L を上回ったあたりから急激に粘性係数が増加している。これらは低

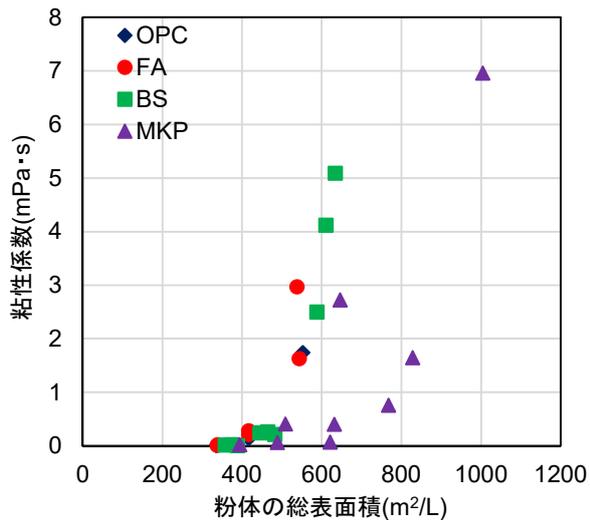


図-5 粉体の総表面積と粘性係数の関係

W/(C+F)の配合であり、配合中の粉体の比率が大きいことから、粒子同士の間隔が狭まることで大きな表面張力を生じ、結果として粘性が増加したことが予想される。

4. まとめ

異なる物性を有する混和材を混合したセメントペーストを作製し、各混和材の物性が変形性能に及ぼす影響について検討した結果、次の知見が得られた。

- (1) 一般的に行われるフロー試験ではペーストの潜在的な変形性能を把握できていない可能性がある。
- (2) 外力を加えて変形させる場合、セメントペーストの変形性能は、配合中の粉体総表面積に依存する。今回の検討では総表面積が 500cm²/L を超えると

急激に粘性が増加し、変形性が低下する結果となった。

- (3) 非常に細かい粒子を持つ材料を使用する場合、自己充填コンクリートの様に外力を加えない時の変形性は総表面積だけでなく、凝集の影響も考慮する必要があると示唆された。
- (4) 普通コンクリートの様に締固めを行う場合は、粉体の種類によらず、配合中の粉体の総表面積からペーストの変形性を予想できる可能性がある。

参考文献

- 1). 土木学会：2013 年制定コンクリート標準示方書「設計編」、2013
- 2). 公益社団法人日本コンクリート工学会：未利用資源の有効利用に関する FS 委員会報告書，2014.3.
- 3). 枝松良展，西田直樹，菅俣匠，大内雅博：粉体・細骨材の物理的特性に影響されるモルタル流動性の定量化，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.367-372，2000.7
- 4). 塚本順也，堺耕司：コンクリートの流動性評価指標に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.19，No.1，pp.25-30，1997.7
- 5). 江口康平，武若耕司，山口明伸，畠中優成：メタカオリン含有人工ポゾランと普通セメントおよび各種混和材料を混合した三成分系セメントペーストの強度特性，土木学会第 69 回年次学術講演会概要集，V-207，pp.413-414，2014.7