論文　加熱改質フライアッシュを用いたセメントペーストおよびモルタルのコンシステンシーとその評価指標に関する研究

石田　征男[*1]・上田　賢司[*2]・佐藤　嘉昭[*3]・大谷　俊浩[*4]

要旨：セメントおよび 2 種類の加熱改質フライアッシュからなる混合粉体の物理的性質が流動性に及ぼす影響を確認し，コンシステンシーの評価指標について検討を行った。その結果，セメントペーストおよびモルタルのコンシステンシーは混合粉体の構成比率によって変化することが分かった。混合粉体を用いたセメントペーストのフロー値は，水膜厚粒子径比を指標として概ね評価可能であったが，小径粒子を多く含む粉体は粒子の凝集の影響を強く受け評価が困難であった。モルタルの 15 打フロー値およびミニスランプは，ペースト細骨材空隙比とペーストフロー値の積により評価できる可能性があることを明らかにした。

キーワード：加熱改質フライアッシュ，コンシステンシー，余剰水膜厚，ペースト細骨材空隙比

1. はじめに

近年，地球環境への影響や副産物の有効利用の観点から，各種混和材料の利用拡大の機運が高まっている。フライアッシュについては，コンクリートの品質向上に多くの利点を有するものの，品質変動が大きいことが普及の阻害要因となっている。このような中，加熱改質装置を用いて強熱減量を 1%以下に低減した加熱改質フライアッシュ(以下 CfFA)が開発され，実用化されている[1)]。また，この加熱改質装置は風力微粉砕処理システムを備えており，JIS A 6201 に規定される I 種，II 種およびIV 種の品質に適合する CfFA に分級することができるため，コンクリートの用途や要求性能に応じた CfFA 種類の選定や粉体粒度を調整などが可能となる。

筆者らは，CfFA の利点を活かした効果的な活用技術として，高流動コンクリートへの適用を検討中である。コンクリートの粉体材料は，構成材料の中で最も小さい固体粒子であるため，その特性はコンクリートの流動性に影響を及ぼす。コンクリートの流動性に及ぼす粉体特性の影響については，コンクリートの構成要素であるセメントペーストやモルタルの性状を明らかにし，これらの材料構成を理論的に検討することが重要である[2)3)4)]。そこで，CfFA を用いたセメントペーストおよびモルタルの流動性に関する基礎的検討を行い，セメントおよび CfFA からなる粉体の粒度分布および充填率の影響を受けることを明らかにした[5)]。本研究では，CfFA を用いた高流動コンクリートの粉体構成設計手法の確立を目的とした初期検討として，セメントおよび品質が異なる 2 種類の CfFA を組み合せて物理的性質を変化させた複数の混合粉体についてセメントペーストおよびモルタルのコンシステンシー試験を実施し，粉体の物理的性質と流動性の関係を明らかにするとともに，コンシステンシー評価指標について検討を行った。

表-1 使用材料

種類	記号	使用材料および物性
水	W	上水道水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度: 3.16g/cm^3，平均粒径: 19.6μm ブレーン比表面積: 3240cm^2/g
CfFA	FA I	JIS A 6201 I 種相当 密度: 2.39g/cm^3，平均粒径: 3.16μm ブレーン比表面積: 7820cm^2/g
	FA II	JIS A 6201 II 種相当 密度: 2.16g/cm^3，平均粒径: 20.3μm ブレーン比表面積: 2760cm^2/g

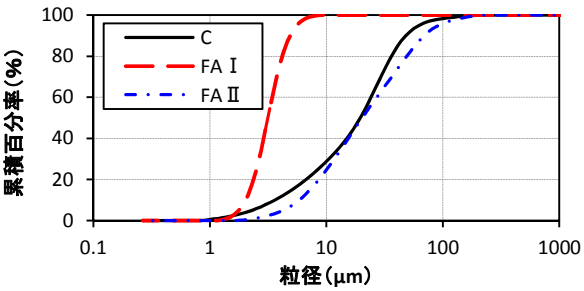

図-1　粉体材料の粒度分布

2. 混合粉体の特性およびセメントペーストの流動性

2.1 実験概要

(1) 使用材料および調合水準

実験に用いた粉体材料を表-1 に，粒度分布を図-1 に示す。粉体材料は，普通ポルトランドセメントおよび CfFA を使用した。実験に用いた CfFA は，1 種類のフライアッ

*1 大分大学大学院　工学研究科博士後期課程環境工学専攻(太平洋セメント(株)　中央研究所)　修士(工学)　(正会員)
*2 (株)ゼロテクノ　技術部部長　博士(工学)　(正会員)
*3 大分大学　工学部福祉環境工学科建築コース教授　工博　(正会員)
*4 大分大学　工学部福祉環境工学科建築コース准教授　博士(工学)　(正会員)

表-2 セメントペーストの調合水準

項目	記号	水準
CfFA 置換率	FA/P(vol.%)	0, 10, 20, 30, 40
FA Ⅰ混合比	FA1/FA(mass)	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
水粉体容積比	W/P(vol.)	1.0, 1.1, 1.2, 1.3

※ FA=FA Ⅰ+FA Ⅱ, P=C+FA

表-3 混合粉体の特性

FA/P (vol.%)	FA Ⅰ/FA	記号	密度 (g/cm^3)	比表面積 (cm^2/g)	平均粒径 D_{50} (μm)	充填率 (%)
0	0.0	C	3.16	3240	19.6	54.6
10	0.0	10-0.0	3.05	3210	19.6	54.5
	0.2	10-0.2	3.06	3280	19.2	54.4
	0.4	10-0.4	3.07	3350	18.7	54.3
	0.6	10-0.6	3.07	3430	18.2	54.2
	0.8	10-0.8	3.08	3510	17.7	54.1
	1.0	10-1.0	3.09	3600	17.1	55.0
20	0.0	20-0.0	2.95	3170	19.7	55.4
	0.2	20-0.2	2.96	3320	18.8	56.1
	0.4	20-0.4	2.97	3470	17.8	55.5
	0.6	20-0.6	2.98	3630	16.7	55.8
	0.8	20-0.8	3.00	3800	15.4	54.7
	1.0	20-1.0	3.01	3980	13.9	55.4
30	0.0	30-0.0	2.84	3130	19.8	56.4
	0.2	30-0.2	2.86	3360	18.4	56.1
	0.4	30-0.4	2.88	3600	16.9	55.9
	0.6	30-0.6	2.90	3840	15.0	55.6
	0.8	30-0.8	2.92	4100	12.8	54.4
	1.0	30-1.0	2.94	4380	9.92	54.2
40	0.0	40-0.0	2.73	3090	19.8	56.6
	0.2	40-0.2	2.76	3410	18.0	57.1
	0.4	40-0.4	2.78	3730	15.8	56.8
	0.6	40-0.6	2.81	4070	13.1	56.5
	0.8	40-0.8	2.84	4420	9.73	55.3
	1.0	40-1.0	2.87	4790	6.20	53.9

シュ原粉を加熱改質し，風力微粉砕処理システムによって分級した JIS Ⅰ種（以下 FA Ⅰ）および Ⅱ種（以下 FA Ⅱ）に適合する 2 種類とした。また，ここでは，主として粉体の物理的性質がセメントペースト（以下 ペースト）のコンシステンシーに及ぼす影響を明らかにすることを目的としているため，その他の影響因子を極力排除するために化学混和剤は使用しなかった。

ペーストの調合水準を表-2 に示す。CfFA は全粉体体積に対する内割り置換とし，CfFA 中の FA Ⅰ と FA Ⅱ の混合割合は質量比とした。なお，水粉体容積比は，1.1～1.3 の範囲で実験を行うことを基本とし，FA/P が 40vol.%，FA Ⅰ/FA が 0～0.8 の水準は流動性が高かったため 1.0～1.2 とした。

(2) 混合粉体の特性

各混合粉体の特性を表-3 に，粒度分布を図-2 に示す。以降では，FA/P と FA Ⅰ/FA から定まる粉体を用いた水準の名称は，表-3 中の記号で表す（例えば，FA/P=20%，FA Ⅰ/FA=0.4 の場合は“20-0.4”と表記）。混合粉体の特性としては，密度，比表面積，粒度分布および充填率を

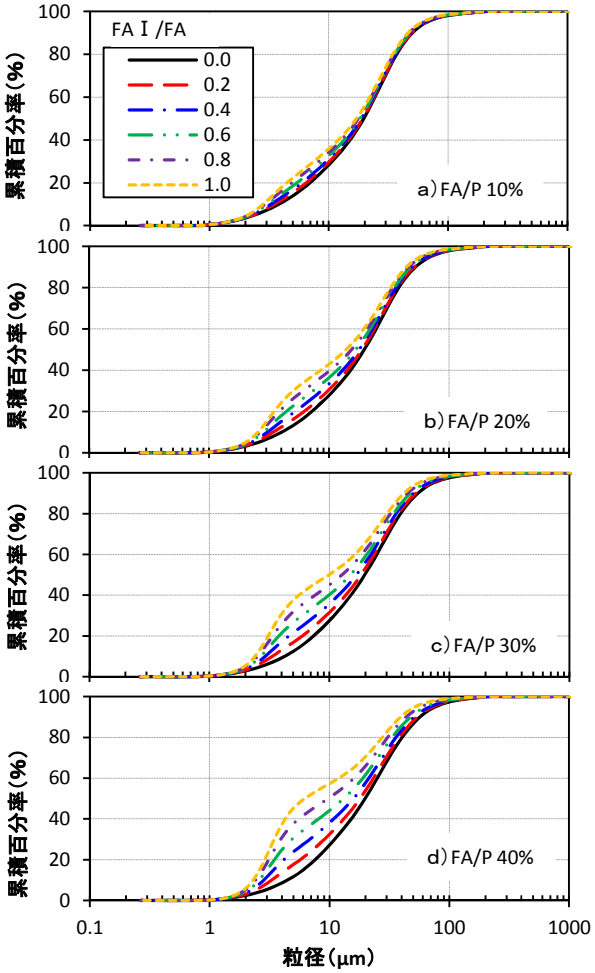

図-2 混合粉体の粒度分布

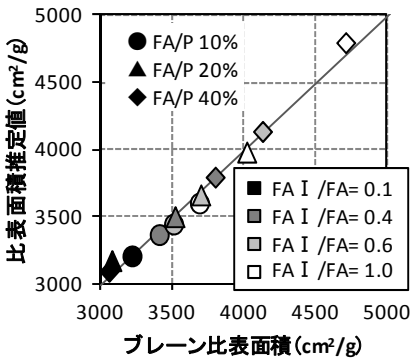

図-3 混合粉体の比表面積

求めた。密度および粒度分布については，各粉体材料の測定結果とそれぞれの構成比率より算出した値を用いた。比表面積については，事前の検討において，実測値と混合比率を基に計算した値がほぼ等しくなることを確認できたことから（図-3 参照），各粉体材料の比表面積と構成比率から算出した値を用いた。充填率は，タッピングによる充填率試験の結果を用いた。充填率試験は，事前に V 型混合機を用いて所定の比率で混合した粉体を 250ml のメスシリンダー容器に入れ，自動タッピング試験機により，60 回/min の速さで 200 回タッピングしたの

ちに，240 回/min の速さで 1800 回タッピングを行い，かさ容積の変化がなくなるまで合計 2000 回タッピングを行った。粉体の充填率は，試験によって得られたかさ密度と，混合粉体の密度から算出した。

(3) ペーストの練混ぜおよび試験方法

ペーストの練混ぜは，容量 5 リットルのモルタルミキサを使用した。セメント，CfFA および一次水を投入し，低速で 60 秒間練り混ぜ，30 秒間でかき落としを行い，高速で 60 秒間練り混ぜた。その後二次水を投入し，同じく低速 60 秒間，30 秒間でかき落とし，高速で 60 秒間練り混ぜた。練上り後は直ちに JIS R 5201 に規定のフローコーンを用いて，打撃無しのフロー試験を行った。

2.2 実験結果

(1) 混合粉体の充填率

混合粉体の充填率を**図-4** に示す。混合粉体の充填率は，FA Ⅰ/FA が 0.6 以下の場合において FA/P が大きいほどわずかに大きくなった。また，FA/P が 20%以上では，FA Ⅰ/FA が 0.2～0.6 の範囲でやや大きくなった。粉体の充填性については，粗粉の間隙に微粉が入り込むことによって空隙率が減少し，その微粉量が適量の場合に最も空隙率が小さく（充填率が大きく）なると考えられている[2)]。本研究においても，粒度の異なる粉体の構成比率を変化させることによって，粉体の充填率が変化することを確認した。

(2) ペーストのフロー試験結果

ペーストフロー値と FA Ⅰ/FA の関係を**図-5** および**図-6** に示す。ペーストフロー値は，FA/P が大きいほど大きくなった。また，FA/P が 30%および 40%の場合は，FA Ⅰ/FA が 0 および 0.4～0.6 において最も大きくなった。この傾向は，粉体充填率と類似しているものの，FA Ⅰ/FA が 0.2 以下ではやや異なっており，粉体充填率のみでペーストの流動性を評価することは困難と考えられた。

(3) ペーストフローの評価指標

モルタルのコンシステンシーについて，三宅らは，液相を水，固相をセメントおよび骨材粒子として考える余剰水膜厚に着目した検討を行い，水膜厚粒径比（平均余剰水膜厚／固相材料の比表面積平均粒径）を指標とすることで，配合や細骨材粒度に係わらずモルタルのコンシステンシーを評価できることを示した[6)]。

そこで，本研究においても，余剰水膜理論を用いたペーストの流動性評価の可能性について検討することとした。検討においては，ペースト中のセメントおよび CfFA を固相とし，余剰水膜厚がゼロの場合の充填状況はセメントと CfFA の混合粉体の充填状態に等しいと仮定した。また，ペーストのフローについては，既往の研究[6)] を参考に，水膜厚粒子径比を指標として評価し，その適用性について検討した。ペーストの余剰水量および余剰水膜

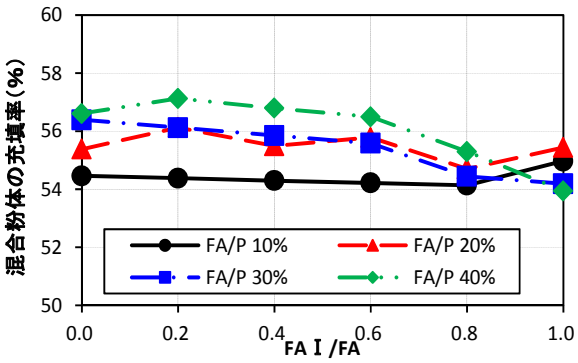

図-4　混合粉体の充填率

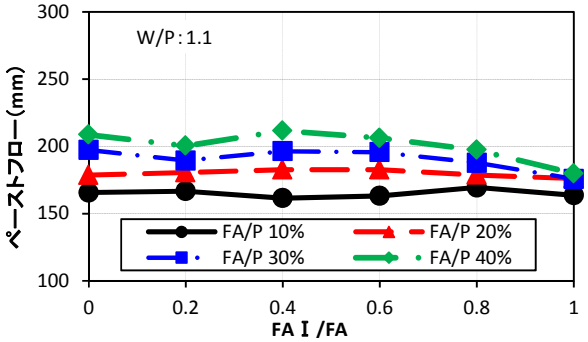

図-5　ペーストフロー値（W/P：1.1）

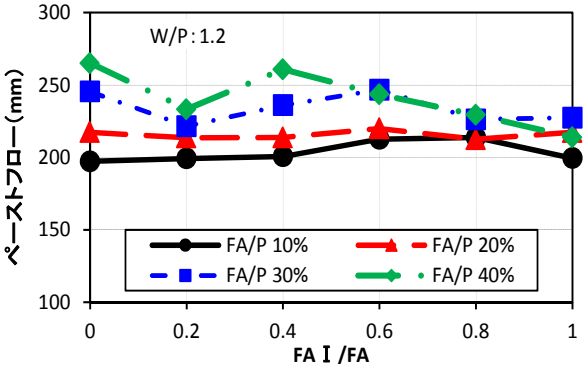

図-6　ペーストフロー値（W/P：1.2）

厚の計算式を式（1）および式（2）に示す。式中の表面積は，**表-3** に示す比表面積を用いて算出した。また，混合粉体の充填率は，タッピングによる充填性試験より測定した値を使用した。

$$W_{exc}=10^4\cdot(G_p-G_{pp}) \qquad (1)$$

$$\delta_w=10^4\cdot W_{exc}/S_p=10^8\cdot(G_p-G_{pp})/S_p \qquad (2)$$

ここに，W_{exc}：余剰水量（cm^3/ペースト m^3），G_p：混合粉体充填率（%），G_{pp}：ペースト体積中に占める粉体体積比率（%），S_p：ペースト $1m^3$ 中の粉体の表面積（cm^2/m^3），δ_w：余剰水膜厚（μm）

ペーストフロー値と水膜厚粒子径比の関係（以下 f-δ_w/d 関係）を**図-7** に示す。f-δ_w/d 関係は，概ね直線関係で表すことができたが，30-1.0，40-0.8 および 40-1.0 では傾きが緩やかになり，異なる関係を示した（図中破

線部分)。これらの水準については，平均粒径が 10μm 未満と小さく，**図-2** に示す粒度分布においても粒径が 10μm 以下の粒子が 50%以上占めており，小径粒子を多く含む粉体であることが分かる。このことから，上記水準が異なる f-δ_w/d 関係を示した原因としては，小径粒子の増大によって混合粉体の充填構造が変化したことや粒子の凝集が影響していることなどが考えられる。しかしながら，余剰水膜厚の算出にあたっては，実測した混合粉体の充填率を用いているため，f-δ_w/d 関係には充填構造の変化の影響は既に反映されていると考えられることから，これらの結果には粒子の凝集が影響していると推察した。

(4) f-δ_w/d 関係に及ぼす粒子の凝集の影響について

粒度分布を有する粒子においては，粒径が小さいものほど粒子個数が多くなるため，粒子の凝集に大きく寄与すると考えられる [7]。粒子が凝集すると，凝集体の内部に水が拘束される [3] ことや，見かけの粒度分布が粗粒側にシフトする [8] ことなどが指摘されている。緑川らは，粒子の凝集を考慮した水膜モデルを適用してペーストの性状を評価できることを明らかにしており，その中で様々な粉体の凝集個数を相対的に評価している [4]。その結果を粒径との関係で表したものが**図-8** である。この図より，粒径が 20μm を下回ると急激に凝集個数が増大していることが分かる。本研究において異なる f-δ_w/d 関係を示した 30-1.0，40-0.8 および 40-1.0 の平均粒径は，それぞれ 9.92μm，9.73μm および 6.20μm であり他の水準よりも小さい。このため，これらのペーストでは粒子の凝集個数が増大し，余剰水膜厚や見かけの平均粒径に変化が生じたことによって，実際の δ_w/d と計算値が乖離したものと考えられる。その一方で，30-1.0，40-0.8 および 40-1.0 の δ_w/d は比較的大きく，凝集を改善することができれば高い流動性を得られることが期待される。今後は，粉体の凝集を緩和する方法の検討，ならびに粉体の凝集を緩和した条件での δ_w/d とペーストの流動性の関係を再評価したうえで，高流動コンクリートの粉体構成設計に反映することが重要である。

3. モルタルの流動性に関する検討

3.1 実験概要

(1) 使用材料

実験に用いた粉体材料および練混ぜ水は，ペースト実験と同様である。細骨材は，静岡県掛川市産の山砂を使用した。使用した細骨材の物性を**表-4** に示す。

(2) モルタルの調合条件

モルタルの調合水準を**表-5** に示す。モルタルの調合においてもペーストの実験と同様に，CfFA は全粉体体積に対する内割り置換とし，CfFA 中の FA Ⅰ と FA Ⅱ の混合割合は質量比とした。モルタルの細骨材容積比（以下 Vs）は，0.4～0.55 とした。なお，モルタルにおいてもペーストの場合と同様に，化学混和剤を使用しなかった。これは，モルタルのコンシステンシーにおいては，粉体の物理的性質のみならずペーストの性状を考慮した検討を行う必要があるためである。

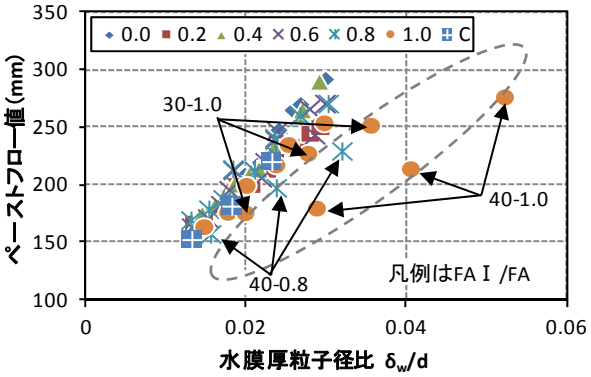

図-7　ペーストフロー値と δ_w/d の関係

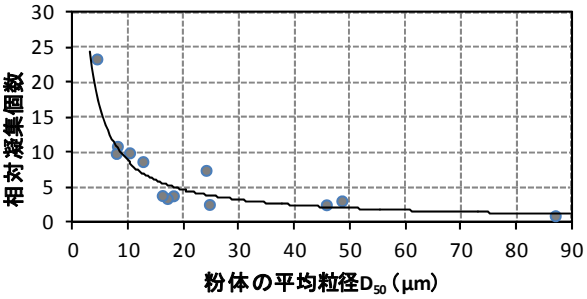

図-8　相対凝集個数 [4]

表-4　細骨材の物理性状

表乾密度 (g/cm^3)	吸水率 (%)	粗粒率	単位容積質量(kg/l)	実積率 (%)	微粒分量 (%)
2.58	1.98	2.88	1.70	67.0	1.8

表-5　モルタルの調合水準

項目	記号	水準
CfFA 置換率	FA/P(vol.%)	0, 20, 40
FA Ⅰ 混合比	FA Ⅰ /FA	0, 0.2, 0.4, 0.6, 0.8, 1.0
水粉体容積比	W/P (vol.)	1.2, 1.3
細骨材容積比	V_s	0.4, 0.45, 0.50, 0.55

※ FA=FA Ⅰ +FA Ⅱ , P=C+FA

(3) モルタルの練混ぜおよび試験方法

モルタルの練混ぜは，容量 5 リットルのモルタルミキサを使用した。練混ぜ手順は，JIS A 6201 附属書 C に準拠した。練上り後は直ちに JIS R 5201 に準拠してフロー試験を行った。また，モルタル試験では，JIS A 1171 に規定されるスランプ試験（スランプコーン寸法：上端内径 50mm，下端内径 100mm，高さ 150mm，以下 ミニスランプ）も実施した。

3.2 実験結果

(1) モルタルのフローおよびミニスランプ試験結果

モルタルのフローおよびミニスランプの結果を**図-9**

および図-10 に示す。フローおよびミニスランプの結果は，いずれもペーストの試験結果と同様の傾向を示した。すなわち，モルタルのコンシステンシーは，CfFA を混和することにより改善し，その置換率が大きいほど良好であった。FA Ⅰ/FA の影響については，FA/P が 20%の場合は認められず，40%の場合は FA Ⅰ/FA が 0.4 のときに緩やかなピークが確認された。また，細骨材量（Vs）は少ないほど，W/P は大きいほど，それぞれコンシステンシーが良好であった。

(2) モルタルのコンシステンシー評価指標

以上のように，モルタルのコンシステンシーにおいても粉体の性状の影響を受けることが明らかになった。ここでは，モルタルのコンシステンシーの評価指標について検討する。

既往の研究[6), 9)]において，モルタルのコンシステンシーは，余剰ペースト理論や余剰水膜理論によって評価できることを示している。本研究においてもペーストの流動性は，余剰水膜理論を用いた δ_w/d により評価できる可能性があることを示した。しかし，上記理論を活用するには，固相材料（骨材もしくは粉体と骨材の混合材料）の充填率および表面積を求める必要があるが，これらの値を正確に求めることは容易ではない。そこで，ここでは細骨材の実積率やペーストの体積および流動性がモルタルのコンシステンシーに大きな影響を及ぼすと仮定し，土木分野で用いられている超硬練りコンクリートの配合設計指標であるペースト細骨材空隙比[10)]（細骨材が形成する空隙量に対するペーストの体積比，以下 K_p）に着目し，K_p とペーストフロー値の積（以下 $K_p \cdot F_p$）を用いてモルタルのコンシステンシーを評価した。K_p の算定式を式（3）に示す。

$$K_p = P / S \cdot e_s \qquad (3)$$

ただし，$e_s = 1/T_s - 1/\rho_s$

ここに，K_p：ペースト細骨材空隙比，P：単位ペースト量（l/m^3），S：細骨材の単位量（kg/m^3），ρ_s：細骨材の表乾密度（g/cm^3），T_s：表乾状態の細骨材の単位容積質量（kg/l）

モルタルの 15 打フロー値およびミニスランプと $K_p \cdot F_p$ の関係を図-11 および図-12 に示す。モルタルの 15 打フロー値およびミニスランプは，$K_p \cdot F_p$ が大きいほど大きくなった。しかし，15 打フロー値およびミニスランプともに 40-1.0 がやや大きめに評価された。ペーストの検討において，40-1.0 のペーストフロー値は粒子の凝集の影響を大きく受け，粉体特性を基に算出した推定値よりも小さくなっている可能性があることを指摘したが，モルタルに適用した場合は細骨材粒子との接触によって粒子の凝集が緩和され，ペーストの流動性が改善された可能性が考えられる。

これらの結果より，モルタルのコンシステンシーは，平均粒径が小さく，ペースト中で凝集が懸念される粉体を用いる場合を除けば，$K_p \cdot F_p$ により大まかに評価することは可能と考えられる。K_p は，細骨材の実積率とペースト容積から算出する指標であるため，容易に求めることが可能である。また，ペーストフローは，前述のように，粉体特性から推定できる可能性がある。このことか

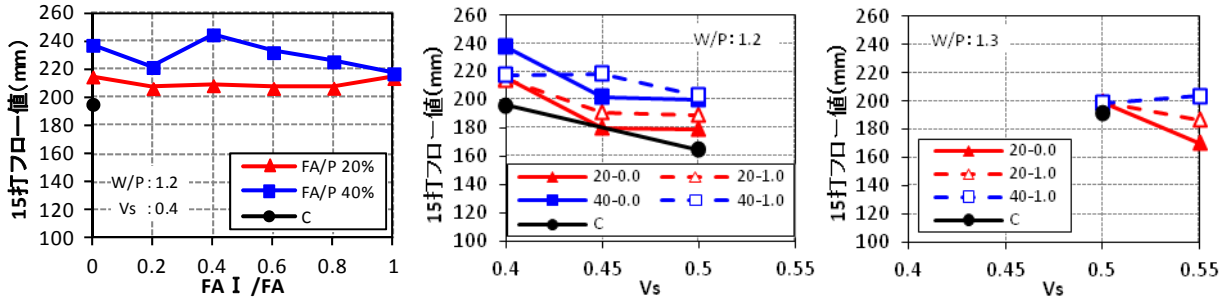

図-9　モルタルの 15 打フロー値

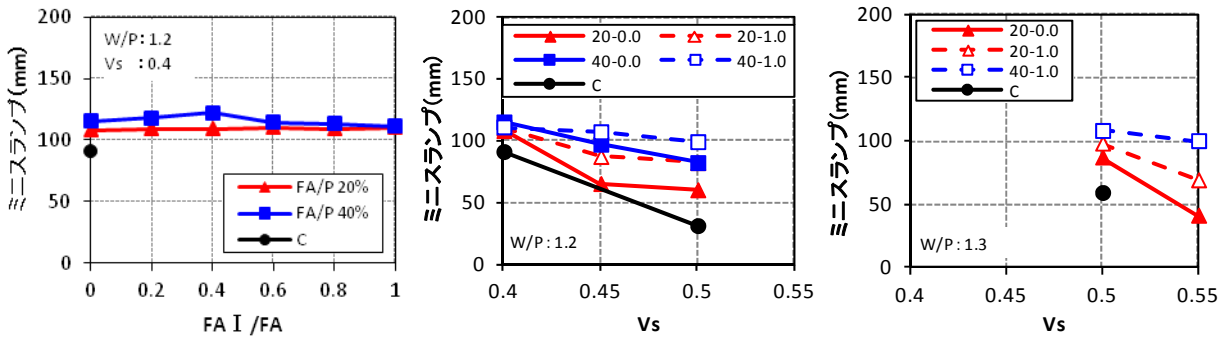

図-10　モルタルのミニスランプ

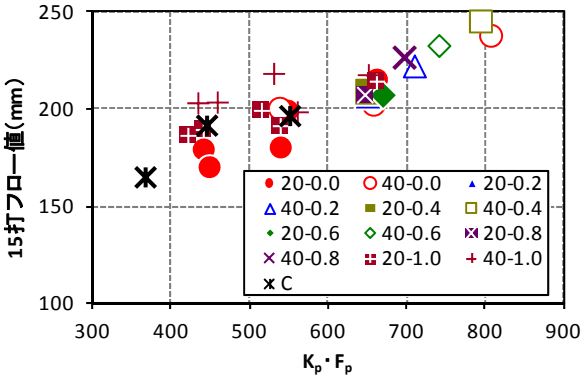

図-11　15 打フロー値と K_p・F_p の関係

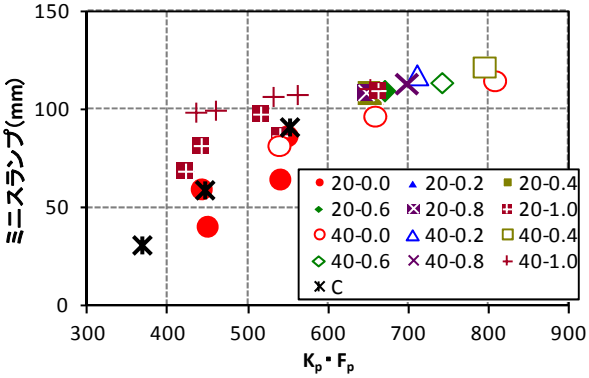

図-12　ミニスランプと K_p・F_p の関係

ら，今後，ペースト中の粉体凝集を緩和することができれば，K_p・F_p により複数の粉体を用いたモルタルのコンシステンシーを事前に推測できる可能性があると考える。

5. まとめ

CfFA を用いた高流動コンクリートの粉体構成設計手法の確立を目的とした初期検討として，セメントおよび 2 種類の CfFA からなる混合粉体を用いてペーストおよびモルタルのコンシステンシー試験を実施し，粉体の物理的性質と流動性の関係を明らかにするとともに，コンシステンシー評価指標について検討を行った。本研究の範囲内で得られた結果を以下に示す。

(1) 混合粉体の充填率は，全粉体中の FA/P および FA I /FA により変化する。

(2) 混合粉体を用いたセメントペーストのフロー値は FA/P が大きく，FA I /FA が 0 および 0.4～0.6 において大きい値となった。

(3) 混合粉体を用いたペーストのフロー値は，水膜厚粒子径比を指標として概ね評価可能であるが，小径粒子を多く含む粉体においては粒子の凝集の影響を強く受けるため評価が困難である。

(4) 混合粉体を用いたモルタルのコンシステンシーは，粉体の物理的性質の影響を受け，FA/P が 40%，FA I /FA が 0.4 の場合に最も良好であった。

(5) 混合粉体を用いたモルタルの 15 打フロー値およびミニスランプは，平均粒径が小さく，ペースト中で凝集が懸念される粉体を除けばペースト細骨材空隙比とペーストフロー値の積により評価することができる可能性がある。

謝辞

本研究を実施するにあたり，本学修論生・後藤竜太郎君，同卒論生・宇都宮佑太君に多大なご協力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) 佐藤嘉昭，大分大学コンクリート工学研究室：高品質フライアッシュ（CfFA）の可能性を探る-コンクリート構造物の長寿命化に向けて，　セメント・コンクリート，No.777，pp.2-12，2011.11

2) 緑川猛彦，丸山久一：保水能力に関する各種粉体の粒子形状や粒度分布の評価，土木学会論文集，No.544/V-32，pp.121-130，1996.8

3) 太田　顕，名和豊春，大沼博志：セメント粒子の凝集構造とセメントペーストの流動性の関係，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.271-276，2001

4) 緑川猛彦，丸山久一，下村　匠，桃井清至：粉体特性の定量化手法に基づくペーストの流動性評価方法，土木学会論文集，No.578/V-37，pp.99-110，1997.11

5) 後藤竜太郎ほか：改質フライアッシュ混入ペーストおよびモルタルの流動性に関する研究　その 3 重回帰分析による検討，日本建築学会研究報告　九州支部　構造系第 54 号，pp.117-120，2015.3

6) 三宅淳一，松下博通，取違　剛：余剰水膜によるモルタルおよびコンクリートのコンシステンシーの評価に関する研究，土木学会論文集 E，No.62，No.2，pp.306-319，2006.5

7) 薄井洋基，岸本啓介，鈴木　洋：粒度分布を持つ凝集性スラリーの粘度予測，化学工業論文集，　第 26 巻，第 3 号，pp.423-430，2000

8) 緑川猛彦，丸山久一，下村　匠，中村博之：凝集状態を考慮した粉体の保水能力の評価，コンクリート工学年次論文集，　Vol.19，No.1，pp.43-48，1997

9) 松下博通，近田孝夫，前田悦孝：コンクリートの配合設計への余剰ペースト理論の適用に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.578/V-37，pp.57-70，1997.11

10) 中原康，平田重信，横田慎一：超かた練りコンクリートの配合の考え方とコンシステンシー，セメント・コンクリート，No.384，pp.12-18，1979.2