

# 論文 フライアッシュ超微粉末の高強度コンクリート混和材への適用に関する研究

藤原 了\*1・二戸 信和\*2・久保田 賢\*3・藤原 浩巳\*4

**要旨:** 石炭火力発電所から排出されるフライアッシュを用いた新たな高強度コンクリート混和材の適用について検討を行った。50%累積体積通過径 (以下,  $D_{50}$ ) が  $0.4\sim 2\mu\text{m}$  程度のシングルミクロンからサブミクロンオーダーのフライアッシュ超微粉末を試作し, これを混和材として混入したモルタルおよびコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度の確認を行った。その結果,  $D_{50}=0.8\mu\text{m}$  程度のフライアッシュ超微粉末を用いることでシリカフェームと同等以上の強度発現性および作業性を示すことにより, 高強度コンクリート混和材としての適用の可能性を見出した。

**キーワード:** フライアッシュ超微粉末, 高強度コンクリート, 粒度分布, 流動性, シリカフェーム

## 1. はじめに

フライアッシュは, 石炭火力発電所で石炭を微粉砕した微粉炭を燃焼した際に発生する石炭灰のうち, 集塵装置で集められた微粉末状の副産物である。フライアッシュは, それ自身に水硬性はないが, セメントの水和によって生じた水酸化カルシウムと水の存在のもと, 常温で化合し, 不溶性の珪酸カルシウム水和物を生成する性質があり, これをポゾラン反応と呼ぶ<sup>1)</sup>。

シリカフェームは, フェロシリコン, シリコン合金などを製造する際に生じる排ガス中に含まれる  $\text{SiO}_2$  を, 電気集塵機で回収される極めて微細な副産物である。シリカフェームはフライアッシュと同様にポゾラン反応が期待できる材料であり, 極めて細かい粒子のため, 水和の初期に水酸化カルシウムと結合する。そのため, シリカフェームのポゾラン反応率は比較的早く, その反応率は材齢 1 日で 1/3, 材齢 3 日で約 40%, 材齢 28 日で 50~60%, 材齢 1 年で約 80% の測定例がある<sup>2)</sup>。さらに, シリカフェームは超微粒子であるため, マイクロファイラー効果と呼ばれるセメント硬化体中の空隙を充填する作用を有しており, 硬化体組織は緻密化し, コンクリートの強度および耐久性向上に大きく寄与するため, 高強度コンクリートにおいて混和材として広く利用されている。

シリカフェームと同様にポゾラン反応を有するフライアッシュを超微粉末化し, 高強度コンクリート混和材として利用する研究はいくつか実施されている。既往の研究<sup>3), 4)</sup>では,  $D_{50}=5\mu\text{m}$  程度のサイズのフライアッシュ超微粉末を用いた強度特性を把握する研究が多い。しかしながら,  $5\mu\text{m}$  以下の領域 ( $D_{50}=0.8\sim 2\mu\text{m}$  程度) の研究例や, 作業性や練混ぜ性能などに着目した研究は少ない。また, サブミクロン領域の粒径のフライアッシュ超微粉

末の製造の際には液体中で粉砕する湿式粉砕による手法がほとんどであるが, 乾式粉砕より製造コストが高価になる。

本研究では, 粉砕コストが比較的安価である気体中で粉砕する乾式による粉砕・分級によってフライアッシュを  $D_{50}=0.8\sim 2\mu\text{m}$  程度のシングルミクロンからサブミクロンオーダーにまで超微粉末化したフライアッシュ超微粉末を試作した。試作したフライアッシュ超微粉末を用いてモルタルおよびコンクリートのフレッシュ性状, 圧縮強度および作業性などの各種性状について確認を行い, フライアッシュ超微粉末の最適粒径や置換率について検討した。また, シリカフェームを用いたモルタルおよびコンクリートと比較することで, フライアッシュ超微粉末の混和材としての適用の可能性についても検討した。

## 2. フライアッシュ超微粉末材料の特性

### 2.1 使用したフライアッシュ超微粉末

本研究で用いたフライアッシュ超微粉末はフライアッシュ II 種を原料とし, 乾式粉砕・分級による微粉砕方法により製造した。製造したフライアッシュ超微粉末は, 乾式粉砕後に分級機で収集したサイクロン粉 (以下 Cy 粉) および乾式粉砕・分級後に集塵機で捕集したバックフィルター粉 (以下 BF 粉) の 2 種類とした。Cy 粉は  $D_{50}=1.8\pm 0.2\mu\text{m}$  程度, BF 粉は  $D_{50}=0.7\pm 0.2\mu\text{m}$  程度のサイズであった。この 2 種類のフライアッシュ超微粉末を組み合わせ, 異なる粒径のフライアッシュ超微粉末を試作し, その最適粒径や置換率の検討を行った。

### 2.2 フライアッシュ超微粉末の粒度分布

製造したフライアッシュ超微粉末の粒度および比表面積を表-1 に, 粒度分布を図-1 に示す。表-1 に示すブレ

\*1 (株)デイ・シイ 技術センター 技術開発課 サブリーダー 修士(工学) (正会員)

\*2 (株)デイ・シイ 技術センター 技術開発課 課長 博士(工学) (正会員)

\*3 (株)デイ・シイ 技術センター 執行役員 センター長

\*4 宇都宮大学 地域デザイン科学部 社会基盤デザイン学科 教授 博士(工学) (正会員)

表-1 粒度および比表面積

種類	粒度(μm)				比表面積	
	D <sub>25</sub>	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	D <sub>99</sub>	ブレン (cm <sup>2</sup> /g)	BET (m <sup>2</sup> /g)
FA II種	3.82	9.96	32.4	83.3	3,960	1.76
Cy粉	1.13	1.87	3.49	5.88	14,240	4.69
BF粉	0.49	0.67	2.54	12.1	36,920	12.0

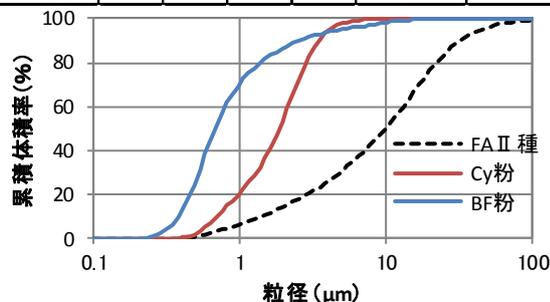


図-1 粉砕・分級前後の粒度分布

ブレン比表面積は空隙率に依存しない方法<sup>5)</sup>で測定した。BET比表面積は、温度105℃で5時間真空吸引による前処理後、窒素ガス吸着により測定した。粒度分布はレーザー回折式粒度分布測定器(Microtrac MT3300EX II)によって測定を行った。

粉砕前は粒径が0.6~100μmまでの広範囲に分布している。乾式粉砕・分級による微粉砕により0.5~5μmまでの粒度分布が得られた。

### 2.3 フライアッシュ超微粉末の化学成分および鉱物組成

Cy粉およびBF粉のメチレンブルー吸着量、密度、化学成分を表-2に示す。表-2に示すメチレンブルー吸着量は未燃カーボン量の評価を目的とし、セメント協会標準試験方法JCAS I-61に準拠して測定した。化学成分はJIS R 5202「セメントの分析方法」に準拠して測定した。密度はJIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠して測定を行った。

粒径がCy粉、BF粉と小さくなるほど、ig-lossおよび

メチレンブルー吸着量が大きくなる傾向を示した。特にBF粉のig-lossおよびメチレンブルー吸着量が大きくなった理由として、分級によりBF粉の方に未燃カーボンが多くなったことが考えられる。また、粒径が小さくなるほど、フライアッシュII種と比べて、密度が大きくなる傾向を示した。これは、フライアッシュバルーンに代表される中空粒子の粉砕により粒子中の空隙が減少したため密度が大きくなったと考えられる。図-2に示す粉砕・分級前後の走査型電子顕微鏡2次電子像(SEM画像)から、粉砕・分級によりCy粉、BF粉と粒径が小さくなるほど、球形粒子から凸凹を有する複雑な形状へ変化することが分かる。また、このSEM画像からはCy粉、BF粉ともに凝集しているとは判断できず、良好に分散している状態の粉体であると考えられた。

回折X線分析装置を用いて結晶相の同定を測定した結果を図-3に示す。同定されたものは、ムライトおよび石英であった。フライアッシュII種、Cy粉およびBF粉ともにほぼ同様の各ピークが確認されたことから結晶性に大きな違いはないと考えられるが、今後XRD/リードベルト法などにより結晶相および非晶質相の定量評価を行う必要がある。

### 2.4 モルタルの活性度指数における比較

表-3にモルタルによる活性度指数の試験結果を示す。モルタルによる活性度指数の確認は、JIS A 6207 付属書C「シリカフェュームのモルタルによる活性度指数の試験方

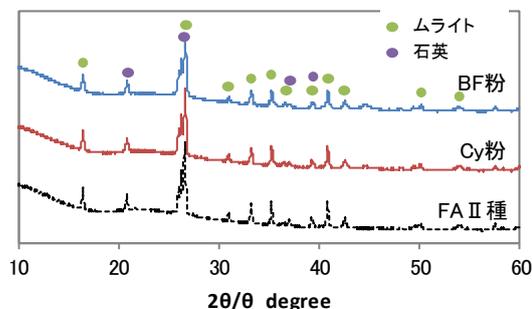


図-3 粉砕・分級前後の回折X線

表-2 メチレンブルー吸着量、化学成分および密度

種類	MB吸着量 (mg/g)	化学成分(%)													密度 (g/cm <sup>3</sup> )
		ig-loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	total	
FA II種	0.46	1.72	56.58	30.90	3.84	2.07	0.59	0.10	0.50	0.78	1.67	0.54	0.04	99.33	2.29
Cy粉	0.61	2.20	56.00	30.79	4.31	1.86	0.49	0.20	0.50	0.79	1.47	0.60	0.04	99.25	2.61
BF粉	2.72	4.45	55.10	28.85	5.19	1.83	0.48	0.29	0.48	0.68	1.31	0.61	0.04	99.31	2.63

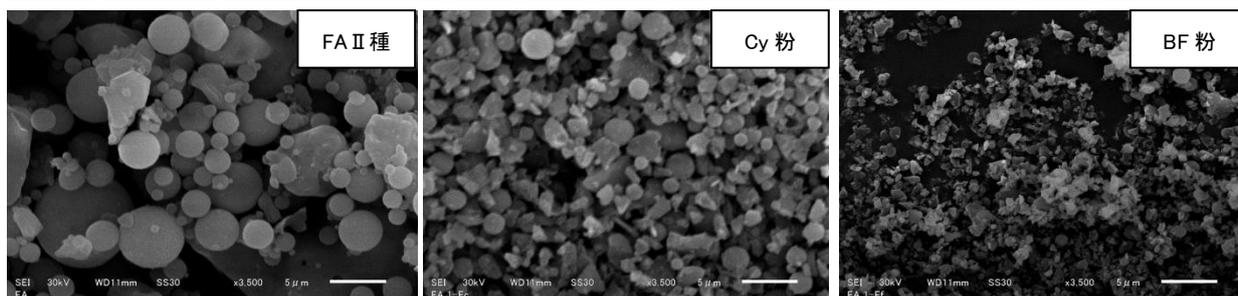


図-2 粉砕・分級前後のフライアッシュの形状

表-3 モルタル試験結果 (JIS R 6207)

種類	減水剤 添加率 (%)	消泡剤 添加率 (%)	フロー 値	空気 量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )					活性度指数 (%)				
					1日	3日	7日	28日	91日	1日	3日	7日	28日	91日
FAⅡ種	0.89	0.020	261	0.5	28.7	72.2	86.8	109	125	86	90	92	96	103
Cy粉	0.85	0.010	262	0.5	28.7	76.2	95.0	122	143	86	95	101	108	118
BF粉	1.15	0.001	266	0.1	27.4	81.0	105	129	148	82	101	111	114	122
SF	1.80	0.020	255	1.5	26.4	74.3	97.0	131	143	79	93	103	116	118
基準モルタル	1.05	0.020	259	0.4	33.4	79.9	94.2	113	121	100	100	100	100	100

法」を参考に試験を実施した。比較としてシリカフェームを用いた水準も同時に実施した。基準モルタルに対し、水結合材比は 30%一定とし、各種混和材 (FAⅡ種, Cy粉, BF粉およびSF) をセメント質量の内割として 10%重量置換した。高性能減水剤添加率はフロー値が 260±10mm の範囲になるように添加率を調整し、消泡剤は空気量が 2.0%以下になるように添加率の調整を行った。圧縮強度は標準水中養生とし、材齢 1, 3, 7, 28 および 91 日について確認を行った。

フロー値を調整するための高性能減水剤添加率は、Cy粉およびBF粉を用いた水準ともにシリカフェームを用いた水準の半分程度の添加率となった。これは、シリカフェームの BET 比表面積が 20m<sup>2</sup>/g 程度であり、Cy粉 4.7m<sup>2</sup>/g, BF粉 12m<sup>2</sup>/g と比べて非常に大きな値であるため、シリカフェーム自体への高性能減水剤の吸着量が多くなり、同一フローを得るための高性能減水剤が多く必要になったと思われる。また、Cy粉とBF粉を比べるとBF粉の方が高性能減水剤添加率は多くなった。これは、BF粉の方がCy粉より BET 比表面積およびig-loss が大きいために未燃カーボンなどへの高性能減水剤の吸着量が増加したためと思われる。

活性度指数は、Cy粉およびBF粉を用いた水準は材齢 28 日を除く全ての材齢においてシリカフェームを用いた水準とほぼ同等以上の活性となった。BF粉を用いた水準の方が、Cy粉を用いた水準より圧縮強度は大きい結果となった。この理由は、BF粉の方がCy粉より粒径が小さいため、ポズラン反応の活性が向上したことおよび微粉末効果によりモルタル中の微細な空隙が充填され、セメント鉱物中のカルシウムシリケートの水和を促進させたことが考えられる。材齢 28 日における活性度指数がシリカフェームより小さい理由は、フライアッシュのポズラン反応がシリカフェームのポズラン反応より低かったことが考えられる。Cy粉とBF粉の材齢 3 日および 7 日における活性度指数がシリカフェームより大きい理由として微粉末効果が考えられる。したがって、ポズラン反応を定量評価し、圧縮強度がシリカフェームより大きくなった理由をポズラン反応の活性あるいは微粉末効果であるのか明確にする必要がある。材齢 1 日圧縮強度については、材齢 3 日以降の傾向と若干異なる傾向を示すため、

高性能減水剤添加率の影響も考えられる。

以上のことより、フライアッシュを D<sub>50</sub>=1.0μm 程度まで超微粉末化することにより、強度特性面ではシリカフェームと同程度の圧縮強度特性を有する結果が得られた。しかし、今回は水結合材比 30%と高強度コンクリートとしては、比較的大きい水結合材比での比較であった。そのため、高強度コンクリートの重要な性能である作業性や練混ぜ性能の確認を行うためには、より低水結合材比での実験が必要である。次の節ではより低水結合材比において、フライアッシュ超微粉末の最適置換率や粒径の検討を行った。

### 3. 低水結合材比モルタルでのフライアッシュ超微粉末の最適置換率と粒径の検討

#### 3.1 使用材料

使用材料を表-4 に示す。フライアッシュ超微粉末 2~4 は、Cy粉 (D<sub>50</sub>=1.8±0.2μm) と BF粉 (D<sub>50</sub>=0.7±0.2μm) の混合割合を調整して試作した。比較用としてフライアッシュ超微粉末 1 (FA2.4) は別途乾式粉碎で試作した。また、シリカフェームと同程度の粒径のフライアッシュ超微粉末 5 (FA0.4) は湿式粉碎にて試作した。なお、表-4 中の記号の数値はフライアッシュ超微粉末およびシリカフェームの D<sub>50</sub>を表す。

#### 3.2 実験水準および方法

実験水準を表-5 に示す。フライアッシュ超微粉末 1~3 では置換率 30%とし、フライアッシュ超微粉末 4 では置換率 15 および 30%とした。フライアッシュ超微粉末 5 およびシリカフェームでは置換率 15%とした。

モルタルの配合および練混ぜは、JASS 5M-701:2015 を

表-4 使用材料

名称	材料名	記号	D <sub>50</sub> (μm)
水	上水道水	W	-
セメント	普通ポルトランドセメント	OPC	-
混和材	フライアッシュ超微粉末1	FA2.4	2.37
	フライアッシュ超微粉末2	FA1.5	1.52
	フライアッシュ超微粉末3	FA1.0	1.08
	フライアッシュ超微粉末4	FA0.6	0.61
	フライアッシュ超微粉末5	FA0.4	0.38
	シリカフェーム	SF0.4	0.39
細骨材	標準砂	S	-
混和剤	高性能減水剤	SP	-



図-4 モルタル化時間の判断の目安

参考とした。結合材と標準砂の割合はそれぞれ質量比で B : S = 1 : 1.4, 水結合材比は 17%とした。ここで水結合材比 17%とした理由は, SF0.4-15 の水準が SP の推奨添加量上限で練混ぜが可能な最小水結合材比であったためである。練混ぜは, ホパートミキサーの回転数 139rpm (低速) で空練 30 秒→注水→モルタル化時間+120 秒→5 分静置→30 秒練混ぜとした。ただし, 結合材についてセメント, フライアッシュ超微粉末およびシリカフェームは練混ぜ時に別々に計量して練混ぜ時に混合した。0 打フローは 260±10mm となるようにポリカルボン酸エーテル系の SP 添加率によって調整を行った。

表-5 実験水準

配合No.	W/B(%)	混和材種類	混和材置換率(%)
FA2.4-30	17	FA2.4	30
FA1.5-30		FA1.5	30
FA1.0-30		FA1.0	30
FA0.6-30		FA0.6	30
FA0.6-15		FA0.6	15
FA0.4-15		FA0.4	15
SF0.4-15		SF0.4	15

表-6 実験結果

配合No.	SP/B (%)	フロー値	モルタル化時間 (s)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	
				7日	28日
FA2.4-30		モルタル化せず練混ぜ不可			
FA1.5-30	1.1	270	40	110	135
FA1.0-30	1.1	254	20	108	136
FA0.6-30	1.8	270	90	105	129
FA0.6-15	1.6	252	240	109	132
FA0.4-15	2.5	262	180	112	139
SF0.4-15	4.0	254	120	106	138

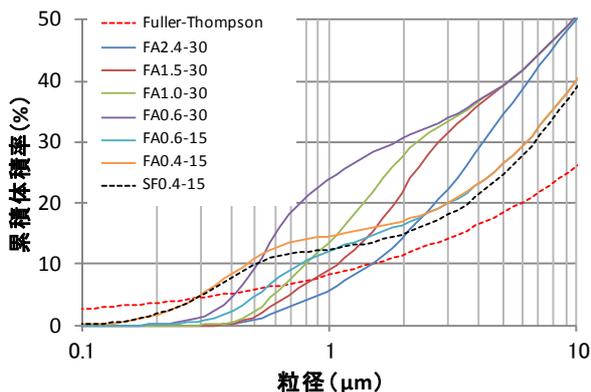


図-5 各実験水準における結合材の粒度分布

本実験では, モルタル化時間, 0 打フロー, 圧縮強度の確認を行った。モルタル化時間は図-4 に示すように練り混ぜ開始から目視によりモルタルが一体化するまでの時間を測定した。図-4 の右写真に示すように水と結合材と砂が一体化し, その後一体化の状態がほとんど変化しないと判断される時間をモルタル化時間とした。圧縮強度は φ50×100mm の円柱供試体とし, 材齢 7 および 28 日強度は, 24 時間後の脱型から 20℃ の水中で所定材齢まで養生を行った。

### 3.3 実験結果および考察

本実験結果を表-6 に示す。フロー値を調整するための SP 添加率は前節 2.4 の結果と同様にシリカフェームを用いた水準よりフライアッシュ超微粉末を用いた水準の方が大幅に低減できた。

モルタル化時間は, FA1.0-30, FA1.5-30, FA0.6-30, SF0.4-15, FA0.4-15, FA0.6-15 の順で早く練混ぜが可能であった。置換率 30% の水準では, FA2.4-30 の水準が SP 推奨添加率の上限で 10 分以上の練混ぜを行ったがモルタル化することができなかった。また, FA1.5-30, FA1.0-30 とフライアッシュが細くなるほどモルタル化時間が短くなった。しかし, FA0.6-30 の水準まで細くなると, 逆にモルタル化時間が長くなった。

ここで, 最密充填状態をとるための粒度分布曲線である Fuller-Thompson の理想粒度曲線に近い粒度分布であれば, 結合材の粒子が最密充填状態となり, より少ない水量で良好な流動性が得られる。図-5 に今回の実験水準に用いた結合材の粒度分布と Fuller-Thompson の理想粒度曲線を示す。FA2.4-30 の水準が 1μm 以下の粉体の割合が小さく, 粉体の最適な充填性が得られなかったためモルタル化することができなかったと推測される。逆に FA0.6-30 の水準は 0.6~3μm 程度の粒径が多すぎるためにモルタル化時間が長くなったと思われる。

図-5 からほぼ同様の粒度分布を示している SF0.4-15 の水準と FA0.4-15 の水準は, モルタル化時間が 60 秒ほど FA0.4-15 の水準の方が長くなった。これはフライアッシュ超微粉末の方がシリカフェームよりも球形でなく角張っているためにモルタル化時間が遅くなったと推測される。SF0.4-15 の水準と FA0.4-15 の水準とで SP 添加率

の違いも考えられるが、フロー値を目標範囲にするために SP 添加率を調整した予備試験において、FA0.4-15 の水準は、SP 添加率が大きい場合でも、フロー値が大きくなるだけでモルタル化時間は変化しなかった。

また、FA1.0-30 の水準のモルタル化時間が 20 秒、SF0.4-15 の水準のモルタル化時間が 120 秒であり、FA1.0-30 の水準の方が SF0.4-15 の水準と比べて大幅にモルタル化時間を短縮することができた。FA1.0-30 の水準は、Fuller-Thompson の理想粒度曲線と比較すると 0.6 $\mu$ m 以下の粒径が不足している。SF0.4-15 および FA0.6-15 の水準は、FA1.0-30 の水準と比べ、0.4 $\mu$ m 程度の粒径は多く 2 $\mu$ m 前後の粒径が少ない。一方、セメントをシリカフュームで置換する場合、置換率を 10~20% とすることで最密充填されやすいと報告<sup>9)</sup>があり、図-5 から SF0.4-15 の水準が Fuller-Thompson の理想粒度曲線に最も近い粒度分布を示す。しかし、モルタル化時間は FA1.0-30 の水準より大幅に長くなった。シリカフュームと粒子形状が異なるフライアッシュ超微粉末では、0.6~2 $\mu$ m 程度の粒径がモルタル化時間の改善には有効な粒径であると考えられる。したがって、微粒子を含む粒子の充填状態がモルタルの流動性に及ぼす影響については今後の課題である。

圧縮強度は全ての水準において材齢 7、28 日ともにシリカフュームを用いた水準と同程度の値を示した。

以上のことより、結合材に対して D<sub>50</sub>=0.6~1.5 $\mu$ m 程度のフライアッシュ超微粉末で置換する場合、シリカフュームの 2 倍の割合で内割置換することで、シリカフュームを用いた場合より低水結合材比の練混ぜ時間を短縮することが可能であることが分かった。

これまでの、粗骨材を使用していないモルタルでの検討であった。そのため、実際に高強度コンクリート混和材として適用の可能性について、コンクリートにおける実際のワーカビリティ（作業性）やコンクリートでの練混ぜ性能の確認が必要である。したがって、次節の 4. では、コンクリートでの低水結合材比において、フライアッシュ超微粉末の最適置換率や粒径の検討を行った。

#### 4. コンクリートにおける最適置換率と粒径の検討

##### 4.1 使用材料

使用材料を表-7 に示す。フライアッシュ超微粉末 1 および 2 は、Cy 粉と BF 粉の混合割合を調整して試作した。フライアッシュ超微粉末 1 は D<sub>50</sub>=1.6 $\mu$ m 程度、フライアッシュ超微粉末 2 は D<sub>50</sub>=0.8 $\mu$ m 程度となるように調整した。

##### 4.2 実験水準および方法

実験水準を表-8 に示す。フライアッシュ超微粉末の置換率は、前節 3. の結果から FA0.8 を用いた水準は重量置

換率 30、18 および 13% とし、FA1.6 を用いた水準は 30% のみとした。比較用のシリカフュームを用いた水準は 15% の置換率とした。コンクリートの水結合材比および単位水量は、全ての水準においてそれぞれ 15%、150kg/m<sup>3</sup> と一定とした。

練混ぜの順序は、結合材+細骨材投入→空練 30 秒→注水→モルタル化時間+60 秒→粗骨材投入後 120 秒→5 分静置→30 秒練混ぜとした。ただし、結合材についてセメント、フライアッシュ超微粉末およびシリカフュームは練混ぜ時に別々に計量して練混ぜ時に混合した。練混ぜ時のミキサおよび容量は、強制二軸型ミキサにて公称容量 60L に対して 30L とした。コンクリートフロー値は 70 $\pm$ 10cm となるように SP 添加率によって調整した。各水準のコンクリートの 50cm 通過時間とフロー停止時間による流動性や粘性の違いを確認する目的で、フロー値は 70cm と大きめの目標値に設定した。また、消泡剤添加率は結合材に対して 0.03% と一定とした。

実験項目を表-9 に示す。モルタル化時間は練り混ぜ開始から目視によりモルタルが一体化するまでの時間を測定した。圧縮強度は  $\phi$ 100 $\times$ 200mm の円柱供試体とし、24 時間後の脱型から 20 $^{\circ}$ C の水中で所定材齢まで養生を行った。作業性の順位は、スコップによる練返しや供試体成型時の力の必要具合を表-8 の水準内で順位をつけて定性評価を行った。

##### 4.3 実験結果および考察

本実験結果を表-10 に示す。フロー値を調整するための SP 添加率はモルタルでの結果同様にシリカフュームを用いた水準よりフライアッシュ超微粉末を用いた水準

表-7 使用材料

名称	材料名	記号	物性
水	上水道水	W	-
セメント	普通ポルトランドセメント	OPC	密度 3.16g/cm <sup>3</sup>
	フライアッシュ超微粉末1	FA1.6	密度 2.65g/cm <sup>3</sup> 、D <sub>50</sub> 1.57 $\mu$ m
混和材	フライアッシュ超微粉末2	FA0.8	密度 2.67g/cm <sup>3</sup> 、D <sub>50</sub> 0.75 $\mu$ m
	シリカフューム	SF0.4	密度 2.25g/cm <sup>3</sup> 、D <sub>50</sub> 0.39 $\mu$ m
細骨材	安山岩砕砂	S	密度 2.63g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	安山岩砕石	G	密度 2.64g/cm <sup>3</sup>
混和剤	高性能減水剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系
	消泡剤	AE	ポリアルキレングリコール誘導体

表-8 実験水準

配合No.	W/B (%)	混和材種類	混和材置換率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
				W	B	S	G
FA0.8-30	15.0	FA0.8	30	150	1000	497	824
FA0.8-18		FA0.8	18			516	
FA0.8-13		FA0.8	13			523	
FA1.6-30		FA1.6	30			495	
SF0.4-15		SF0.4	15			489	

表-9 試験項目

試験項目	試験方法	目標
スランプフロー	JIS A 1150	70 $\pm$ 10cm
空気量	JIS A 1128	2.0%以下
コンクリート温度	JIS A 1156	-
圧縮強度	JIS A 1108	標準養生(7,28,56,91日)
作業性の順位	-	-

表-10 実験結果

配合No.	SP/B (%)	フロー (cm)	50cm (s)	停止 (s)	空気量 (%)	練上がり温度 (°C)	モルタル化時間 (s)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )				作業性の順位	SFと比較した場合の評価			
								7日	28日	56日	91日		フレッシュ	練混ぜ	強度	作業性
FA0.8-30	1.9	68	12	145	1.3	24.6	40	132	157	164	164	1	○	◎	◎	◎
FA0.8-18	2.0	72	16	153	1.4	23.1	210	126	151	156	157	3	○	○	○	○
FA0.8-13	2.8	72	34	181	1.4	23.7	510	122	144	147	151	5	○	△	△	△
FA1.6-30	1.4	65	25	199	2.0	24.5	540	123	145	147	156	4	○	△	△	△
SF0.4-15	2.8	70	31	263	1.8	24.0	240	128	151	162	160	2	○	○	○	○

の方が低減できた。

モルタル化時間は FA0.8-30 の水準が 40 秒、SF0.4-15 の水準が 240 秒となった。FA0.8-30 の水準の方が SF0.4-15 の水準と比べ、モルタル結果と同様に大幅にモルタル化時間を短縮することができた。また、FA0.8-30、FA0.8-18 および FA0.8-13 とフライアッシュ超微粉末の置換率の低下とともにモルタル化時間が長くなる傾向であった。これはフライアッシュ超微粉末の置換率の低下とともに最密充填に必要な  $D_{50}=0.6\sim 2\mu\text{m}$  程度の粒径が不足したためと思われる。

フライアッシュ超微粉末を用いた水準の 50cm 通過時間とフロー停止時間はシリカフェームを用いた水準より短い傾向となった。この結果からシリカフェームを用いた場合と同程度以上の流動性や充填性状を示すと推測できるが、今後 V ロートや U 型充填試験などの評価が必要である。

圧縮強度は、FA0.8-30 の水準は全ての材齢において SF0.4-15 の水準より大きい結果となった。FA0.8 を用いた場合、フライアッシュ超微粉末の置換率の低下とともに圧縮強度は低下する傾向を示した。FA1.6-30 の水準は SF0.4-15 の水準より特に初期材齢において小さい結果となった。これは、 $D_{50}=1.6\mu\text{m}$  の方が  $0.8\mu\text{m}$  よりポゾラン活性が低下したために小さくなったと考えられる。

作業性の順位は、FA0.8-30、SF0.4-15、FA0.8-18、FA1.6-30 および FA0.8-13 の順でスコップでの練返しなどの作業性は良好であった。これは、モルタル化時間が短いほど作業性は良好になる傾向とほぼ同様であった。特に FA0.8-30 の水準は SF0.4-15 の水準と比べてもスコップで練返す際の抵抗がほとんどなく作業性が良好なコンクリートであった。一方、FA1.6-30 の水準や FA0.8-13 の水準は 50cm 通過時間やフロー停止時間から流動性は良好であると判断されるが、スコップで練返す際にダイラタンシー性状が確認でき作業性は非常に悪いコンクリートであった。50cm 通過時間やフロー停止時間では作業性が評価できないため、作業性の定量評価は今後の課題である。

以上のことより、水結合材比 15% のコンクリートにおいては、 $D_{50}=0.8\mu\text{m}$  程度のフライアッシュ超微粉末を結合材に対して 30% 程度内割置換することにより、フレッシュ性状、圧縮強度および作業性はシリカフェームを用

いた場合と比べて、良好な結果となることが分かった。

## 5. まとめ

乾式による粉砕・分級によってシングルミクロンからサブミクロンオーダー ( $D_{50}=0.8\sim 2\mu\text{m}$  程度) にまで超微粉末化したフライアッシュを高強度コンクリート用混和材として検討を行った。以下の結果が得られた。

(1)水結合材比 30% のモルタルでは、フライアッシュを  $1.0\mu\text{m}$  程度まで超微粉末化により、シリカフェームと同程度の強度特性を示す。

(2)水結合材比 17% のモルタルでは、結合材に対して  $D_{50}=0.6\sim 1.5\mu\text{m}$  程度のフライアッシュ超微粉末で置換する場合、シリカフェームの 2 倍の割合で内割置換することで、シリカフェームを用いた場合より低水結合材比の練混ぜ時間を短縮することが可能である。

(3)水結合材比 15% のコンクリートでは、 $D_{50}=0.8\mu\text{m}$  程度のフライアッシュ超微粉末を結合材に対して 30% 程度内割置換した場合、15% 程度シリカフェームを内割置換した場合よりフレッシュ性状、圧縮強度および作業性が良好な結果となる。

## 参考文献

- 1) 内川浩：混合セメントの水和および構造形成に及ぼす混和材の効果，セメント・コンクリート，No.483，p.15-23，1987
- 2) 小菅ほか：シリカフェームのポゾラン反応と反応率測定方法，コンクリート技術シリーズ No.4，土木学会，pp.1-6，1993
- 3) 波多野眞司ほか：石炭灰の微粉砕化によるセメント混和材の開発，土木学会論文集，Vol.63，No.1，pp.42-51，2007.1
- 4) 石川嘉崇，中山一孝：超微粉砕フライアッシュを用いたモルタルの基本的な性質，コンクリート工学，Vol.27，No.1，pp.181-186，2005.5
- 5) 近松竜一，山本泰彦：高炉スラグ微粉末の粉末度評価法に関する研究，土木学会論文集，第420号/V-13，pp.71-80，1990.8
- 6) 笠井哲郎，笠井芳夫：セメントーシリカフェーム混合粉体の最密充填の評価方法に関する研究，東海大学紀要工学部，Vol.35，No.1，pp.175-179，1995