

論文

[1002] 分級フライアッシュを使用した高性能混和材に関する研究

正会員○石井光裕 (四国総合研究所)

浮田和明 (四国総合研究所)

正会員 高田 誠 (日曹マスタービルダーズ 中央研究所)

梅沢健一 (日曹マスタービルダーズ 中央研究所)

1. はじめに

石炭火力発電所の産業副産物であるフライアッシュは、主にマスコンクリート工事における水和熱低減の目的で使用されているが、近年、石炭の海外炭使用や燃焼条件等の問題から、フライアッシュの品質低下が指摘されている。一方、コンクリートは従来、耐久性に優れているものとして評価されてきたが、良質な骨材の枯渇に伴う単位水量の増加あるいはアルカリ骨材反応等、種々の問題点が提起されてきている。

本研究は、このような背景を踏まえフライアッシュの有効利用を図ると共に、骨材の品質低下に伴う問題点に対処することに主眼を置き、フライアッシュを気流分級して得た最大粒径5 $\mu$ m以下の微粒分<sup>3)</sup>に減水成分をプレミックスさせた高性能混和材(以下分級フライアッシュと呼ぶ)を用いてコンクリートの品質向上を検討したものである。

2. 実験概要

2.1 実験計画

分級フライアッシュを用いたコンクリートの諸性状を検討するため、以下に示す実験計画に基づいて実施した。

〔実験-I〕分級フライアッシュを用いたコンクリートの諸性質に関する検討 (表-1)

〔実験-II〕単位水量低減効果に関する検討 (表-2)

〔実験-III〕アルカリ骨材反応抑制効果に関する検討 (モルタルバー) (表-3)

表-1 (実験-I)

要因	水準	試験項目
スランブ (cm)	12, 18	1) スランブ 2) 空気量 3) 単位容積質量 4) 凝結時間 5) フリージング
フライアッシュ代替率 F/C+F (%)	0, 20, 30	6) 圧縮強度 材令 (3, 7, 28, 91日, 6, 12ヶ月) 7) 弾性係数 材令28日 (圧縮強度供試体使用) 8) 引張強度 材令 (7, 28, 91日) 9) 曲げ強度 材令 (7, 28, 91日) 10) 乾燥収縮
単位結合材量 C+F (kg/m <sup>3</sup> )	260, 300, 340	11) 凍結融解 (スランブ12cmのみ 材令14日開始) 12) 透水係数 (スランブ12cmのみ) 13) 断熱温度上昇試験 (スランブ12cmのみ)

表-2 (実験-II)

要因	水準	試験項目
スランブ	12, 18	1) スランブ 2) 空気量
細骨材の種類	陸砂, 混合砂	3) 凝結時間 4) フリージング
フライアッシュの種類	市販品, 分級フライアッシュ	5) 圧縮強度 材令 (3, 7, 28, 91日)
フライアッシュ代替率 (F/C+F)	20, 30	
単位結合材量 (kg/m <sup>3</sup> )	300	

表-3 (実験-III)

要因	水準	試験項目
細骨材	バイレックスガラス	ASTM C 441 に準拠した。モルタルバー膨張試験
フライアッシュの種類	市販品, 分級フライアッシュ	
フライアッシュ代替率 (F/C+F)	20, 30	
R <sub>2</sub> 0 (C×%)	0.6, 1.0, 1.5	

## 2.2 使用材料

2.2.1 セメント：実験-IおよびIIでは3銘柄の普通ポルトランドセメント（比重：3.16）を等量混合して、また、実験-IIIではO社製の普通ポルトランドセメント（アルカリ量：0.60%）を使用した。

2.2.2 フライアッシュ：S社製のフライアッシュを気流分級して得た最大粒径5 $\mu$ m以下の微粒子およびD社製の市販フライアッシュを使用した。それらの物理試験結果を表-4に示す。なお、モルタルおよびコンクリート実験には上記微粒子に減水成分をプレミックスして使用した。

2.2.3 骨材：細骨材として実験-Iでは大井川水系陸砂、実験-IIでは大井川水系陸砂および四国産混合砂（砕砂と海砂の混合）、実験-IIIではパイレックスガラスを使用した。また、粗骨材としては青梅産硬質砂岩砕石を使用した。それらの物理試験結果を表-5に示す。

2.2.4 混和剤：実験-IおよびIIでは標準形のAE減水剤を併用した。

## 2.3 コンクリートの配合

単位結合材量 300kg/m<sup>3</sup>におけるコンクリートの配合を表-6に示す。

## 2.4 試験方法

### 2.4.1 コンクリート実験（実験-IおよびII）

(a) コンクリートの練り混ぜおよびフレッシュコンクリートの試験：容量 100 $\ell$ パン型強制練りミキサーを使用し、全材料投入後90秒間練り混ぜた。なお、スランプ、空気量、ブリージング等のフレッシュコンクリートに関する試験は所定のJISの方法によった。

(b) 圧縮、引張および曲げ強度および静弾性係数：JIS A 1132により圧縮および引張強度試験用として $\phi$ 10 $\times$ 20cm、曲げ強度試験用として10 $\times$ 10 $\times$ 40cmの供試体を作製し、所定のJISに準じて試験を行った。供試体の養生はいずれの場合も20 $^{\circ}$ Cの湿潤養生（湿度95%以上）とした。なお、静弾性係数の測定は圧縮強度試験と併用して行った。

(c) 断熱温度上昇：二重の断熱槽を持つ空気循環式の試験装置を用い、練り上がり温度20 $^{\circ}$ Cの

表-4 フライアッシュの物理試験結果

銘柄・種類	比重	粉末度 (cm <sup>3</sup> /g)	単位水量比 (%)	圧縮強度比	
				28日	91日
市販フライアッシュ (D社)	2.22	2990	97	80.1	93.5
最大粒径5 $\mu$ m以下 の微粒子分 (S社)	2.54	8730	96	105.2	118.5
規格値 (JIS R 6201)	1.95 以上	2400 以上	102 以下	60 以上	70 以上

表-5 骨材の物理試験結果

種類	比重 (絶乾)	吸水率 (%)	洗い 損失量 (%)	塩化物 (%)	単位容 積質量 (kg/ $\ell$ )	実積率 (%)	粗粒率
陸砂	2.63 (2.59)	1.64	1.2	0.001 以下	1.76	68.0	2.75
混合砂	2.60 (2.55)	1.97	2.3	0.019	1.63	63.9	2.70
砕石 (2005)	2.64 (2.62)	0.71	0.2	—	1.62	61.8	6.77

表-6 コンクリートの配合（大井川水系陸砂の場合）

目標 スランプ 空気量	単位結 合材量 (kg/m <sup>3</sup> )	フライ アッシ ュの 種類	フライ アッシ ュ 代替率 (%)	結合材 水比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )							
						水	セメン ト	フライ アッシ ュ	AE減水 剤				
18 $\pm$ 1 cm 4~5 %	300	—	0	59.0	49	177	300	—	0.75				
						分級	20	53.7	48	161	240	60	0.75
							30	49.7	47	149	210	90	0.75
						市販	20	56.7	49	170	240	60	0.75
							30	55.7	48	167	210	90	0.75

コンクリートの断熱温度上昇を測定した。

(d) 乾燥収縮：JIS A 1129のダイヤルゲージ法に準じて測定した。なお、供試体の寸法は10×10×50cmの角柱とした。

(e) 凍結融解：JIS A 6204附属書.2に準じ300 サイクルまで測定を行った。

(f) 透水性：φ15×15cmの供試体を材令28日まで20℃の水中養生を行い、その後20℃の恒温室（湿度60%）で7日間養生したのちインプット法により透水試験を実施し拡散係数を算出した。

### 2.4.2 モルタルバー試験（実験-Ⅲ）

ASTM C 441に準拠した。アルカリ量はセメント重量に対して0.6～1.5%とし、NaOH水溶液で調整し用いた。

## 3. 試験結果および考察

### 3.1 分級フライアッシュを用いたコンクリートの性質

#### 3.1.1 強度特性に及ぼす影響

(a) 代替率と圧縮強度の関係 単位結合材量300 kg/m<sup>3</sup>における分級フライアッシュの代替率と圧縮強度の関係は図-1に示すように、材令3～7日ではいづれの代替率の場合もほぼ同等の強度発現性であるが、材令28日以降の長期材令においては代替したものの方が強度増進が大きく、材令91日では代替率20～30%で代替率0%に比べ約20～30%上回っている。

(b) 結合材水比と圧縮強度の関係 材令7日および91日における結合材水比と圧縮強度の関係は図-2に示すように、いずれの代替率においても両者の関係は各々密接な一次回帰で示される。

(c) 引張強度および曲げ強度 圧縮強度と引張強度の関係はいずれの代替率の場合も1/8～1/13の範囲にあり、通常のコンクリートの場合と同様である。また、圧縮強度と曲げ強度の関係も1/5～1/8程度である。

(d) 静弾性係数 圧縮強度と静弾性係数の関係は図-3に示すように、両者は代替率に関係なくACIで提示している関係式にほぼ一致している。

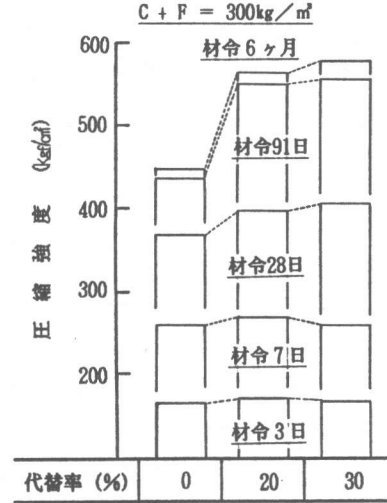


図-1 代替率の違いによる圧縮強度の比較

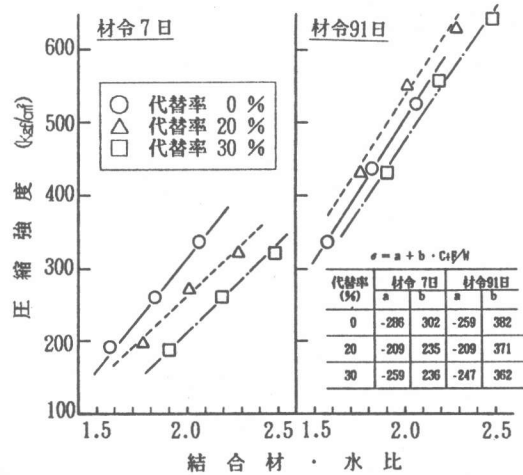


図-2 結合材水比と圧縮強度の関係（スランブ12cm）

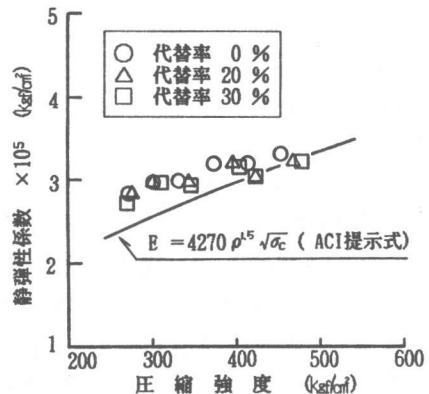


図-3 圧縮強度と静弾性係数の関係

### 3.1.2 強度以外の特性

(e) 断熱温度上昇 分級フライアッシュ代替率の相違による断熱温度上昇結果は図-4に示すように、代替率が增大するほど温度上昇速度が緩慢となり、また、マスコンクリートで重要視される断熱温度上昇量も小さくなっている。ちなみに代替率20%の場合、代替率0%に対する温度上昇量の低減効果は約20%である。

(f) 乾燥収縮 単位結合材量 $300 \text{ kg/m}^3$ の材令6ヶ月における分級フライアッシュ代替率と乾燥収縮の関係は図-5に示すように、代替率が增大するほど乾燥収縮は減少する傾向を示し、代替率0%に比べ代替率20~30%で約80~90%程度となっている。

(g) 水密性および凍結融解抵抗性 耐久性を判定する一つの指標である拡散係数は分級フライアッシュの代替率が增大するほど小さくなる傾向(図-6)を示しており、より密実なコンクリートであると判断できる。また、凍結融解に対する抵抗性を判定する耐久性指数も300サイクルにおいていずれの場合も90%以上と良好な結果を得ている。

以上の結果より分級フライアッシュをセメントの一部として代替すると初期強度は代替しないコンクリートとほぼ同等であるが、長期強度は増大し、さらに、硬化コンクリートの耐久性等に及ばず諸性質が向上されることが明らかとなった。

### 3.2 単位水量低減効果に関する検討

#### (a) 減水性

産地の異なる2種類の細骨材を用いた場合の分級および市販フライアッシュ代替率と所要スランプを得る単位水量の関係を図-7に示す。これによるといずれの細骨材に対してもフライアッシュの代替率が增大するほど単位水量は減少する傾向を示し、その程度は分級フライアッシュのほうが大きく代替率20%

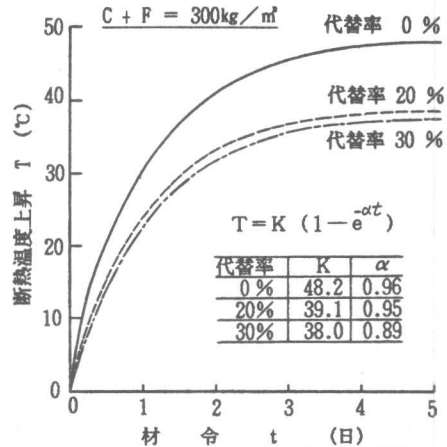


図-4 代替率と断熱温度上昇の関係

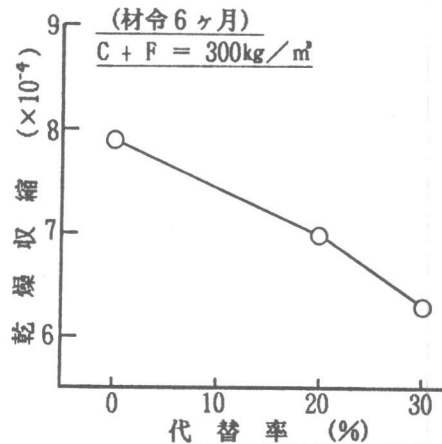


図-5 代替率と乾燥収縮の関係

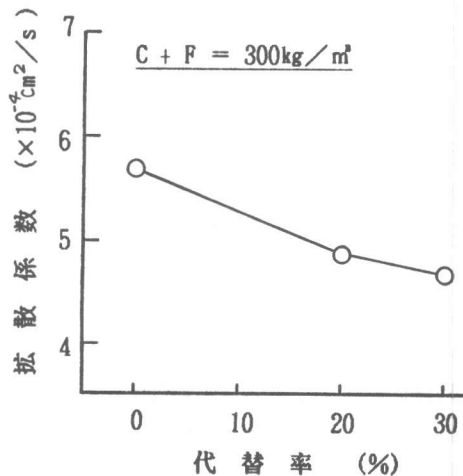


図-6 代替率と拡散係数の関係

で比較した場合、市販品が  $7 \text{ kg/m}^3$  (代替率 0% に対する減水性: 約 4%) であるのに対して分級フライアッシュが  $16 \text{ kg/m}^3$  (代替率 0% に対する減水性: 9%) となり非常に高い減水効果が得られた。このように分級フライアッシュ代替による高減水効果は、年々良質な骨材の枯渇による単位水量の増加現象に対して非常に有効な性能である。

(b) ブリージング抑制効果

フライアッシュ代替率とブリージング量の関係を図-8に示す。いずれの産地の細骨材においても市販フライアッシュは代替率が增大するほどブリージング量は増加する傾向を示したが、分級フライアッシュの場合は比表面積が非常に大きく、さらに単位水量が減少しているためブリージング量は代替率 0% に対して代替率 20~30% で約 30~40% となり、非常に高いブリージング抑制効果が認められた。

(c) 凝結特性

市販および分級フライアッシュとも代替率が增大するほど凝結時間は遅延する傾向を示し、代替率 0% に対していずれの場合も代替率 20% で約 2 時間、代替率 30% で約 3 時間 30 分程度遅延している。

(d) 強度発現特性

単位結合材量  $300 \text{ kg/m}^3$  におけるフライアッシュ代替率と圧縮強度の関係を図-9に示す。市販フライアッシュを代替したコンクリートの初期強度発現性状は周知の如く、通常のコンクリートに比べ緩慢となるが、分級フライアッシュを用いたものは単位水量の減少効果に加え分級フライアッシュ自身のポズラン活性度合が高いため初期強度である材令 3 および 7 日においても大きく市販フライアッシュの圧縮強度を上回っている。

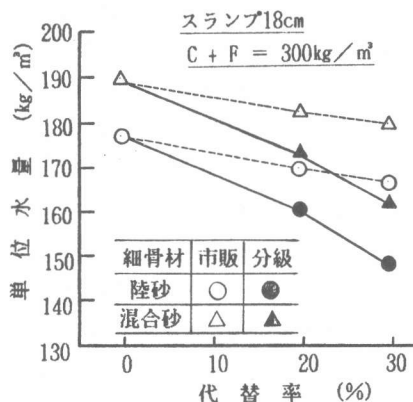


図-7 代替率と単位水量の関係

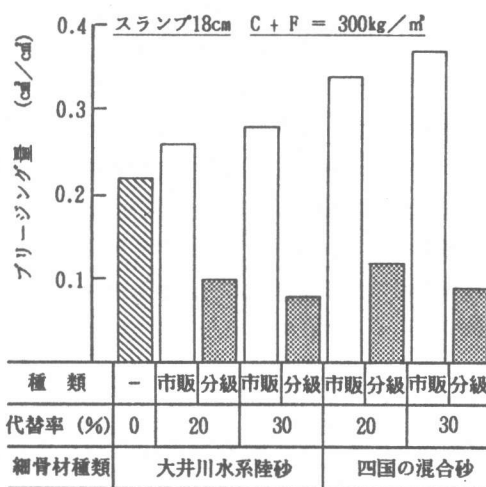


図-8 代替率とブリージング量の関係

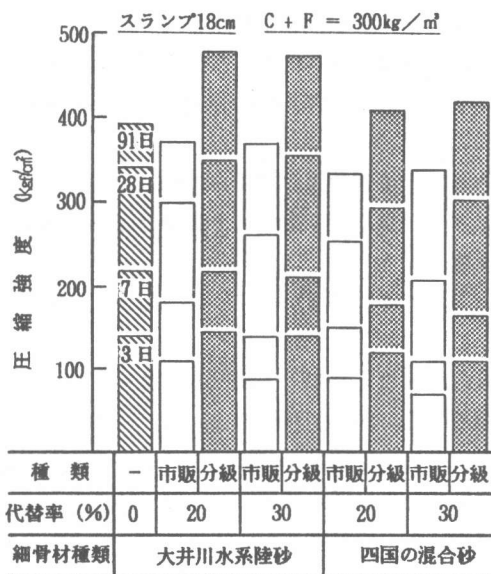


図-9 代替率と圧縮強度の関係

### 3.3 アルカリ骨材反応抑制効果に関する検討

材令3月におけるフライアッシュ代替率とモルタルバーによる膨張率の関係を図-10に示す。アルカリ骨材反応による膨張抑制対策の一つとして、ポズラン反応を有する混和材料の利用が有効であることは数多く報告されている。本実験においても同様に<sup>4)</sup>いずれのフライアッシュの場合も代替率の増加に伴い膨張量は減少する傾向を示しているが、その程度はフライアッシュの種類によって異なっており、市販品に比べ分級フライアッシュは特にその抑制効果が高くなっている。これは分級フライアッシュの比表面積が市販フライアッシュに比べ非常に大きいために、フライアッシュ中のシリカがアルカリと先行して反応する現象が市販品に比べ更に促進されることが一因であると考えられる。なお、反応性を有する天然骨材を用いたモルタルバー試験も併せて実施中であるが現在までのところ上記と同様な結果を得ている。

#### 4. 結論

通常のフライアッシュを気流分級して得た最大粒径 $5\mu\text{m}$ 以下の微粒分に減水成分をプレミックスさせた高性能混和材(分級フライアッシュ)を用いたコンクリートの品質向上について検討した結果、次のような結論を得た。

- (1) 大幅な単位水量の低減効果が得られた。
- (2) 強度発現性状は、代替しない通常のコンクリートに対し初期材令でフライアッシュを代替した場合に認められる初期強度の低下が改善され、材令28日以降の長期材令では大幅に上回ることが認められた。
- (3) 水和熱の低減効果が認められた。
- (4) アルカリ骨材反応に対して非常に高い抑制効果が認められた。

#### 参考文献

- 1) 大槻, 本條, 三浦, 小松; 最近のフライアッシュの性状, セメント・コンクリート, N0443 Jan. 1984, pp. 43~49
- 2) 長滝, 大賀, 嶋田, 矢島; 各種フライアッシュの品質とコンクリートの流動性, セメント技術年報, 39, 昭和60年, pp. 201~204
- 3) 石井, 浮田, 重松; 分級フライアッシュによるコンクリートの品質向上について, 土木学会第42回年次学術講演会, 昭和62年9月, pp. 628~629
- 4) 川村, 竹本, 榎場; フライアッシュおよび高炉スラグのアルカリ・シリカ膨張抑制効果, セメント技術年報, 40, 昭和61年, pp. 344~347

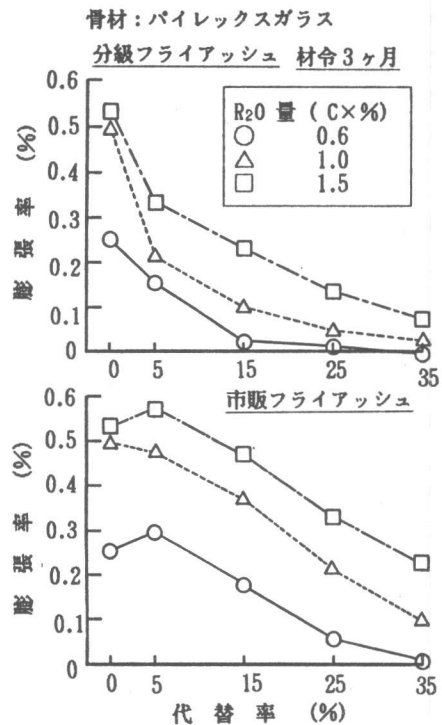


図-10 代替率と膨張率の関係