

論文 フライアッシュを細骨材の一部と置換したコンクリートの諸特性

板井知明*1・尾之内厚志*2・望月真*2・依田眞*3

要旨: 石炭火力発電所から排出されるII種フライアッシュを、細骨材の一部として用いたコンクリートのフレッシュ性状および硬化後の特性について各種試験を行い、フライアッシュ混入によるコンクリートへの影響について検討した。またI種、IV種相当のフライアッシュについても一部の試験を行い、II種フライアッシュを用いたケースと比較検討した。その結果、フライアッシュを細骨材の一部として用いると、セメントの一部(結合材)として用いた場合の欠点が補われ、無混入のものに対して、同等以上の特性を有することが確認された。またI種フライアッシュを混入したコンクリートは、流動性と強度発現の点で非常に優れていることが分かった。

キーワード: 細骨材代替、フライアッシュの品質、微粉末効果、塩化物イオン

1. はじめに

中部電力(株)碧南火力発電所(海外炭専焼)では、石炭灰が平成11年末時点で1~3号機から年間約50万トン発生しており、その一部がセメントの原料(粘土代替)などに有効利用されているが、4、5号機(建設中)の運転開始時には発生量が増加するため、新規有効利用先の開拓が急務となっている。しかし、フライアッシュ(以下FAと記す)をコンクリートに混入する場合、一般的なセメントの一部と置換する考え方では、初期強度・耐久性低下などの問題から、使用量に限界がある。そこで、FAを多量に混入できるように、FAを細骨材の一部と置換して混入し、そのコンクリートのフレッシュ性状および硬化後の特性について、FAの種類、置換率をパラメータとして試験を実施した。同時に(セメント+FA)を結合材とみなした場合についても、ワーカビリティと強度特性について評価し、細骨材代替との違いを検討した。

およびIV種に相当する3種類(以下、それぞれFAI、FAII、FAIVと記す)とした。ただし、碧南火力発電所の通常の工程では、熱回収部分で落下するシンダアッシュと、4段の電気集塵機(EP)で捕集されるより粒子の小さいFAが混合されて原粉サイロに輸送され、さらに分級機により粗粉が除去されて分級灰となる。この原粉及び分級灰は、共にII種に適合する均質なものになっている。そこでFAIIのみを分級灰から採取し、残るFAIは電気集塵機の3段目から、FAIVは1段目から採取した。FAの品質は、FAIVの密度が1.90(g/cm³)とJIS規格値(1.95以上)を外れる以外は、いずれも規格に適合していた。

表一1 FAの品質

品質区分	密度 (g/cm ³)	強熱減量 (%)	MB吸着量 (mg/g)	ガラス化率 (%)
FAI	2.28	0.6	0.06	64.2
FAII	2.17	3.04	0.47	56.4
FAIV	1.90	0.4	0.04	53.7
品質区分	比表面積 (cm ² /g)	45μm残分 (%)	SiO ₂ (%)	Na ₂ O _{eq} (%)
FAI	6000	5.0	59.3	2.15
FAII	3230	21.1	58.2	1.37
FAIV	2250	39.0	61.8	1.71

$$Na_2O_{eq} = (Na_2O + K_2O) \times 0.658$$

2. 試験概要および結果

2.1 使用材料

表一1に使用したFAの品質を、表一2に試験材料を示す。FAは、比表面積がJIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」のI種、II種、

*1 東海コンクリート工業(株) 技術開発部

*2 中部電力(株) 土木建築部 工修

*3 中部電力(株) 電力技術研究所 工修

表一 2 試験材料

セメント	普通ポルトランドセメント (三社混合品) 密度 3.16(g/cm ³)
フライアッシュ	I 種、II 種、IV 種相当
粗骨材	密度 2.66(g/cm ³) 粒形判定実績率 57.8(%) G _{max} 20mm
細骨材	密度 2.62(g/cm ³) 粒形判定実績率 54.0(%)
AE 減水剤	オキシカルボン酸塩誘導体
AE 補助剤	脂肪酸とポリオキシエチレンアルキルエーテル

2. 2 モルタル試験

(1) 試験概要

FA 混入によるモルタルへの影響を調べるため、JIS A 6201 の規定に準じ、フロー値比と活性度指数の試験を実施した。試験は 3 種の FA の各々について、単位結合材量 (C+F) 一定の条件の下で FA 置換率 (F/(C+F)%) を 0~50% (内割) と変化させて行った。表一 3 に配合条件を示す。

表一 3 配合条件

FA 置換率 F/(C+F)	水結合材比 W/(C+F)	(C+F):S
0, 10, 20 25, 30, 50%	50%一定	1 : 3

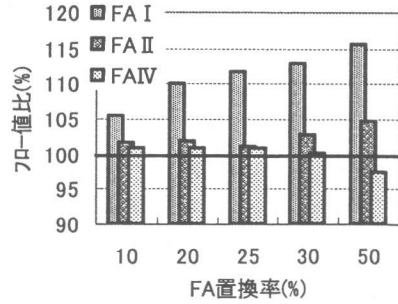
(2) 試験結果

a. フロー値比

フロー値比は、図一 1 に示すとおり、FA 置換率が高くなるにつれて FA I、FA II 混入では大きくなり、FA IV 混入では小さくなった。特に FA I 混入の増加率が顕著であり、FA II、FA IV 混入に較べて流動性がかなり高くなっていることがうかがえる。

b. 活性度指数

材齢 28 日までの活性度指数は、FA I、FA II 混入では大差ないが、FA IV 混入ではやや小さくなった。また材齢 91 日の FA I 混入の置換率 30% までは、FA 無混入配合以上の値を示した。このことから、FA I を用いたモルタルやコンクリートの強度は、長期材齢においてかなり高くなることが予想される。



図一 1 フロー値比

2. 3 コンクリート試験

2. 3. 1 配合設計および圧縮強度試験

(1) 試験概要

表一 4 に試験ケースを示す。練り上がり時の目標スランブを 8, 12, 15cm、空気量を 4.5 ± 0.5% に設定し、単位セメント量一定の条件下で FA を 0~40% (外割) と変化させた。単位セメント量は 200~350kg/m³ までの 6 ケースとし、単位セメント量 275kg/m³ (今回試験で設定した単位セメント量の中央値)、スランブ 8, 15cm のケースに 3 種類の FA を、それ以外のケースには、FA II のみを使用した。単位セメント量ごとの単位水量は、FA 置換率 0% (無混入) において目標スランブが得られる値で一定とし、FA 置換率の変更に対し AE 減水剤を増減して目標スランブを確保した。通常コンシステンシーの調整は単位水量で行うのが一般的であるが、本試験では、FA 混入によるコンクリートへの影響を調べるために、変動するパラメータを少なくし、AE 減水剤量で流動性を評価した。

圧縮強度試験の材齢は 3, 7, 28, 91 日とした。

なお、FA 置換率 (%) = (FA / (C+FA)) × 100 と定義し、粉体量の内割りとしても評価できる置換法とした。

(2) 試験結果

a. ワーカビリティ

本試験では、今後の骨材事情を考慮して細骨材として碎砂を使用したため、今までの一般的なコンクリートに比べて単位水量が多くなっているが、FA 置換による影響を検討するという観点から高

性能減水剤は使用しなかった。なお、ワーカビリティの良好な状態とは、材料分離がなく、現場で困難なくコンクリートを打つことができる状態とする。

単位水量が多いと、低粉体量域で材料分離傾向が強まり、ワーカビリティの良好な範囲が狭くなるが、図-3に示すとおりFAを混入すると、かなりの低粉体量域においても、材料分離のないワーカビリティの良好なコンクリートになる。しかし、粉体量が400kg/m³を越えると急激に粘性が増加し、ワーカビリティが悪化する。

粉体量の内割としてみると、粉体量300~400kg/m³ではどの置換率でも良好だが、200~300kg/m³では、単位FA量の少ない領域では材料分離する配合がある。細骨材代替としてみると、単位セメント量250kg/m³以下の低セメント量であっても、FAをある程度置換することによって、ワーカビリティを良好にすることができる。

図のFA寄与分の範囲は、セメント単体だけでは材料分離するが、FAを置換することにより、ワーカビリティが良好になる領域である。

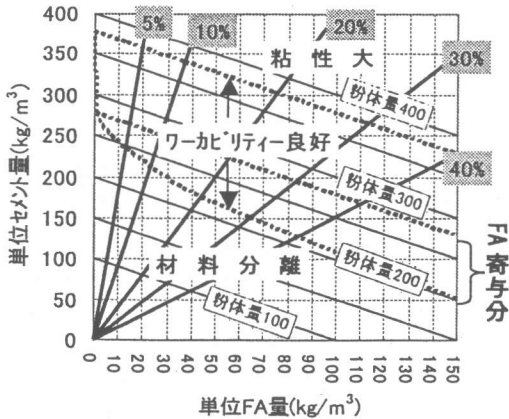


図-2 ワーカビリティの良好な範囲 (FA II)

図-3 解説

細骨材代替としての見方 縦軸の単位セメント量から右に線を延ばして、置換率(FA/(C+FA))の直線(%)と交わる点の横軸の値が細骨材代替(外割)で置換する場合の単位FA量になる。

セメント代替としての見方 粉体量の直線が置換率(FA/(C+FA))の直線(%)と交わった点の縦軸と横軸の値がその粉体量のセメント代替(内割)で置換する場合の単位セメント量と単位FA量になる。

表-4 配合試験および圧縮強度試験ケース

単位セメント量 (kg/m ³)	FA種類	目標スランプ (cm)	FA置換率 F/(C+F) (%)	単位水量 (kg/m ³)
200	FA II	8	30	180
225	FA II	8	20,30	180
250	FA II	8	10,20,30	180
275	FA I FA II FA IV	8,15	0,5,10 20,30	180 195
	FA II		12	0,5,10 20,30
300	FA II	8,15	0,5,10 20,30	180 195
			0,5,10 20,30	180 192

b. 混和剤使用量について

FA II混入の場合の減水剤およびAE補助剤使用量は、FA混入量の増加とともに増加した。特に単位セメント量350kg/m³の置換率30%の配合(粉体量500kg/m³)では、粘性が大きく、減水剤を標準添加量を大幅に越えて添加しても所定のスランプが得られなかった。また、AE補助剤の使用量も急増し、置換率20%時の10倍の量が必要となった。図-3にFA置換率に対する減水剤使用量を示す。この図によれば、減水剤使用量は、FA II、FA IV混入ではFA置換率が大きくなるにつれ漸増するが、FA I混入では激減し、置換率30%で不要になった。このように分級したFAは、ある程度以上比表面積が大きくなると、大幅に流動性が向上する。これは、比表面積が大きくなるにつれてFA粒子の球形率が増加し、中空粒子が減少するためといわれている¹¹⁾。本試験の場合、このようなボールベアリング効果が顕著に現れたことと、流動性を阻害する未燃カーボンが少ない(強熱減量0.6%)ことから、FA I混入の流動性が向上したと考えられる。

図-4に粉体量と AE 減水剤添加率の関係の図を示す。粉体量 400kg/m^3 までは、粉体量が多くなるにつれて、粉体量に対する AE 減水剤添加率が減少している。すなわち粉体量に対して FA を内割で混入すると、セメント単体よりも流動性が高くなることを示している。しかし粉体量 400kg/m^3 を越えると急激に粘性が高まり、流動性が悪化する。

これを図-5とあわせて考えると、比較的低粉体量域では粉体量の内 FA の割合が多いほど流動性は高くなるが、粉体量 400kg/m^3 を越えると、セメントと FA の割合に関係なく、粘性が急激に高まる。

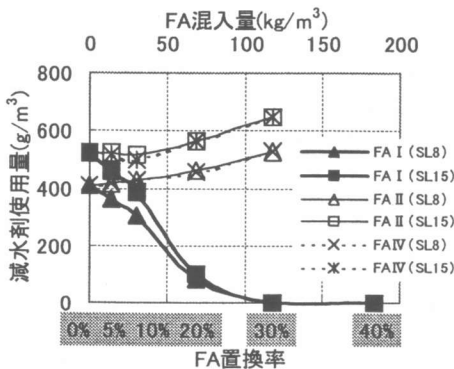


図-3 減水剤使用量

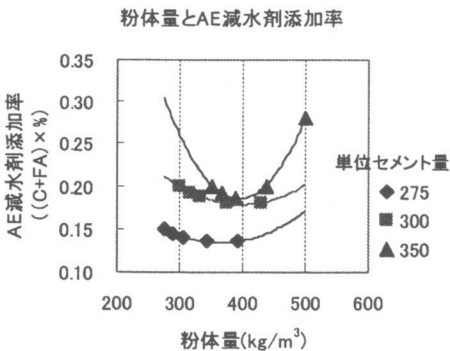


図-4 粉体量と AE 減水剤添加率

c. 圧縮強度

図-5に単位セメント量 275kg/m^3 、スランブ 8cm のケースの圧縮強度試験結果（活性度は FA 無混入配合に対する強度比）を示す。FA I、FA II、FA IV 混入とも、微粉末効果（セメント粒子のフロック解消による水和活性の高まり）^[2] に

より、セメントの水和が促進されて活性度が材齢 3 日でやや高まり、材齢 7 日でその効果がなくなった後再び大きくなっていく（ポゾラン反応）傾向にある。特に FA I 混入では、微粉末効果、ポゾラン反応ともに大きく、材齢 2 8 日以前からポゾラン反応の効果が現れ、置換率が大きくなるにつれて活性度が大きくなっている。FA II、FA IV 混入では、材齢 2 8 日前後から 9 1 日の間にポゾラン反応の効果が現れている。図-6に FA II 混入の場合の粉体量と圧縮強度の関係を示す。これによると、FA を結合材として置換した場合、材齢 2 8 日以降は、FA 置換率 10% 以下では、無混入の配合とほとんど同等の強度になっている。

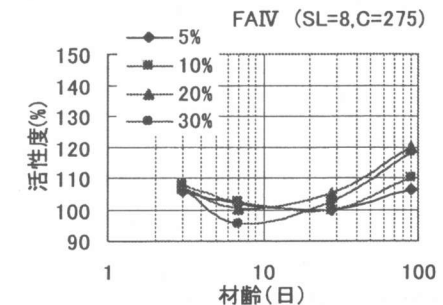
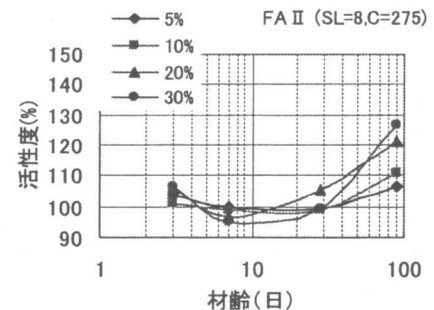
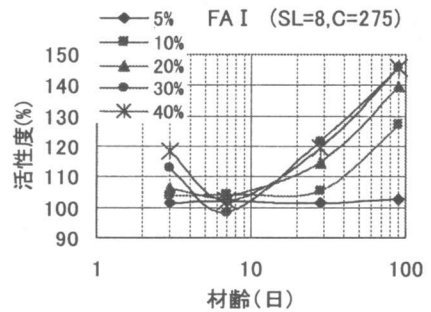


図-5 活性度

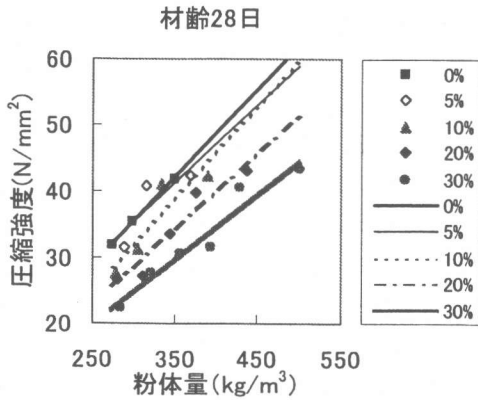


図-6 粉体量と圧縮強度 (FA II)

2. 3. 2 フレッシュ・硬化後特性試験

表-4 に示したケースの内 FAII 使用、単位セメント量 275kg/m^3 のケースの一部についてフレッシュ、硬化後のコンクリートの特性試験を実施した。この結果の概要を表-5 に示す。

(1) 試験結果

a. スランプの経時変化試験

直後のスランプ値が配合ごとに若干異なるので、スランプロスについての評価は、スランプロス率(%) $((\text{測定時のスランプ}) / (\text{直後のスランプ}) \times 100)$ によって行った。スランプ 8cm の配合では、FA 無混入配合に対して、スランプの経時変化の明確な差は認められなかったが、スランプ 15cm の配合では、図-7 に示すとおり無混入の配合が最もスランプロス率が大きくなり、FA 混入によるスランプロス低減効果が認められた。

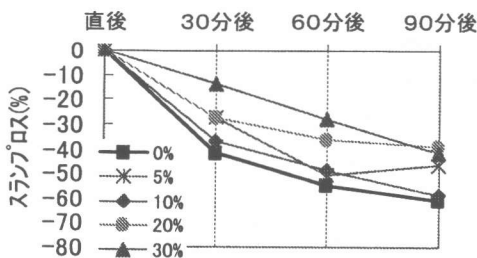


図-7 スランプロスの経時変化 (SL=15)

b. 断熱温度上昇試験

FA 混入量と最終上昇温度のグラフ (図-8) を見ると、最終上昇温度は FA 混入量に比例し、FA 20kg/m^3 について約 1°C 上昇している。これは FA の微粉末効果によるもので、強度増進に伴うものと考えられる。ひびわれ抵抗性を、圧縮強度 1N/mm^2 当りの上昇温度 [上昇温度強度比] = (最終上昇温度) / (圧縮強度) で評価すると、図-9 に示すとおり材齢 3 日と 9 1 日では、FA 無混入の配合が最も不利となる。微粉末効果やポゾラン反応による強度の増進により、FA を細骨材代替として混入した場合の温度上昇は、必ずしもひび割れ抵抗性において不利にはならないと思われる。

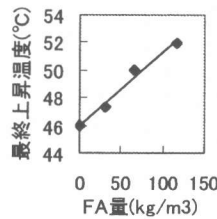


図-8 FA 量と最終上昇温度

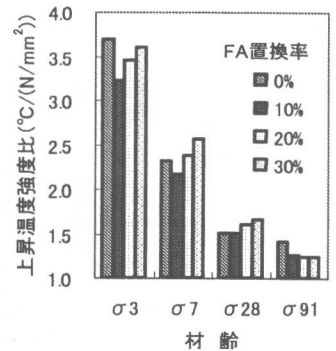


図-9 材齢と上昇温度強度比

c. 塩化物イオン浸透量試験

FA を混入したコンクリートの遮塩性について調べるために、以下の試験を行った。50°C 雰囲気中での 3% NaCl 溶液への浸漬と乾燥を 1 サイクル

1 週間として、その浸透深さを 4, 8, 16 サイクル

で測定した^[9]。結果を図-10 に示す。その結果、全サイクルで FA 置換率が大きくなるにつれて塩

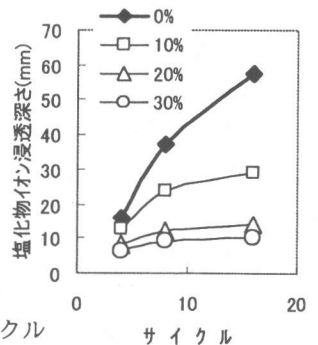


図-10 FA 置換率と塩化物イオン浸透深さ

化物イオン浸透深さが小さくなっており、FAの混入は、コンクリートの遮塩性向上に効果があるといえる。

d. 細孔径分布の測定

水銀圧入式ポロシメータにより、細孔径分布の測定（材齢56日）を行った。結果を図-11に示す。文献[4]によれば、材齢91日以前における細孔容積は、FA置換率が大きくなるにつれて増加する傾向にあるが、本試験でも同じ傾向がうかがわれる。しかし強度増進やイオン拡散性の低下に関係するとされる0.01 μm 以下の細孔容積の割合は増加している。^[5]

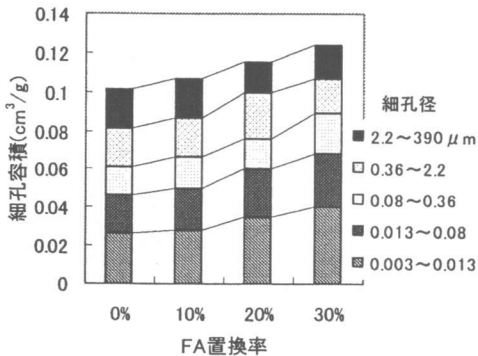


図-11 FA置換率ごとの細孔径分布

e. その他

ブリーディング試験において、FA置換率が大きくなると、ブリーディング率は小さくなった。凝結試験、凍結融解試験、乾燥収縮試験、促進中性化試験については、FA置換配合と無混入配合との明確な差は認められなかった。

3. まとめ

- (1) FAを細骨材代替としてコンクリートに混入すると、無混入のものと同程度以上の効果があるため、細骨材代替として配合設計するほうがFAをより多くコンクリートに混入することができ、FAの効果が期待できる。
- (2) 貧配合コンクリートにFAを混入すると、材料分離状態が解消され、ワーカブルなコンク

リートになる。逆に富配合コンクリートにFAを混入すると（粉体量 375kg/m³以上）、粘性が増大する。

- (3) I種FAの混入により減水剤使用量が減少し、置換率30%で減水剤が不要になり、流動性の増大が顕著である。
- (4) I種FAを置換したコンクリートの圧縮強度は、材齢28日以前からポゾラン反応の効果が現れ始め、II種、IV種相当のFAを混入したものは、材齢28日前後から91日の間にポゾラン反応の効果が現れ始める。
- (5) FAを細骨材の一部と置換したコンクリートは、スランプロスの低減、強度増進に伴う温度の上昇、遮塩性の向上が認められる。

【謝辞】

本試験を実施するにあたり、名古屋工業大学梅原秀哲教授、岐阜大学六郷恵哲教授および名古屋大学森博嗣助教授にご指導いただきました。ここに記して、感謝いたします。

「参考文献」

- [1] 大賀宏行他：「フライアッシュの潜在的品質とモルタルの諸物性」コンクリート工学年次論文報告集，Vol.18，No.1，pp339-344，1996
- [2] 山崎寛司：「鉱物質微粉末がコンクリートの強度におよぼす効果に関する基礎研究」土木学会論文集，第85号，pp98-118，1962
- [3] 笠井英志他：「高流動コンクリートの力学特性・耐久性に関する研究（その11，塩化物イオンの浸透性）」日本建築学会大会学術講演梗概集，1995.8
- [4] 羽原俊祐他：「多量の鉱物質粉末で細骨材の一部を置換したコンクリートの組織形成と物性発現」コンクリート工学年次論文報告集，Vol.17，No.1，pp325-330，1995
- [5] 羽原俊祐：セメント科学，セメント協会，pp.78-104，1993