

平成22年5月28日現在

研究種目：若手研究（B）  
 研究期間：2008～2009  
 課題番号：20760377  
 研究課題名（和文） 改質フライアッシュコンクリートの単位水量低減およびひび割れ抑制に関する研究  
 研究課題名（英文） Study on the Reducing Effect of Water Content and Cracking of Concrete Containing Carbon-free Fly Ash  
 研究代表者  
 大谷 俊浩（OTANI TOSHIHIRO）  
 大分大学・工学部福祉環境工学科建築コース・准教授  
 研究者番号：00315318

## 研究成果の概要（和文）：

改質フライアッシュがコンクリートの流動性に及ぼす影響を明らかにするために、JIS基準の2種に相当するが流動性改善効果に差がある2種類改質フライアッシュの各種物性およびSEM画像による形状の画像解析を実施した。その結果、同一基準でありながら、形状および粒度分布に大きな違いがあり、流動性改善効果の小さな灰にはいびつな形状の粒子が多く含まれていることを明らかにした。

また、フライアッシュ混入コンクリートの鉄筋埋設型拘束による乾燥収縮ひび割れ試験を実施し、フライアッシュを20%混入することで乾燥収縮ひずみが減少し、ひび割れ発生が遅延することを明らかにした。

## 研究成果の概要（英文）：

Characteristics of two types of Carbon-free Fly Ash which complies with “Fly ash class II” of JIS A 6201, were measured. And these shapes of the particles were analyzed with SEM image to clear the influence of Carbon-free Fly Ash to slump of concrete. The results showed that the shape and size distribution are different even if same class of Carbon-free Fly Ash. And the fly ash that the improvement effect is low has a lot of non-spherical particles.

Then, drying shrinkage cracking tests was carried out. The test result showed that the cracking age of concrete containing fly ash which content is 20% is delayed than that of plain concrete.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	2,900,000	870,000	3,770,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学・建築構造・材料

キーワード：フライアッシュ、未燃カーボン、粒子形状、コンクリート、モルタル、流動性、乾燥収縮ひずみ、ひび割れ

## 1. 研究開始当初の背景

日本建築学会では、1999年に「フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針(案)・同解説」を発売し、本年にはその改訂が行われた。フライアッシュがコンクリート用材料として非常に魅力的な材料であることは周知の事実である。例えば、(1)球形の粒子によるフレッシュコンクリートの流動性改善効果がもたらす単位水量の減少、(2)ポゾラン反応による長期の強度発現、(3)微粒子の充填作用による組織の緻密化がもたらす水密性の向上、(4)ポゾラン反応で水酸化カルシウムを消費することによるアルカリ骨材反応の抑制効果、(5)耐久性の向上、(6)コンクリート仕上がり面の綺麗さ、などが指摘されている。

しかしながら、フライアッシュの有効利用が十分に促進されているとは言い難い。その理由の一つに、フライアッシュ中に含まれる未燃炭素量の変動がコンクリートの品質管理を困難なものとしていることが挙げられる。未燃炭素は、コンクリートに使用されるAE剤を吸着し、コンクリートの空気量に大きなばらつきを生じさせる。その未燃炭素量が常に一定であればそのような問題はないが、火力発電所で使用される石炭は定期的に生産地が変わること、昼夜の操業(燃焼温度)が変化すること、などが原因でその量は変動する。JISでは未燃炭素に対する品質基準として、強熱減量が規定されているが、5%以下の範囲で若干の変動によって空気量が大きく変動することがわかっている<sup>1)</sup>。そこで、最近、この未燃炭素を除去する技術が提案され、その処理システムによって得られた改質フライアッシュ(Carbon-free Fly Ash、以下、CfFA)が製造されるようになってきた<sup>2)</sup>。

また、現在、火力発電所より発生するフライアッシュの年間排出量は約1000万トン(フライアッシュ協会試算)であるが、これ以外に平成7年の電力自由化によって独自に火力発電施設を設けた企業で発生する灰が潜在的に増えてきている。これらの施設は、電力会社に比べて安定した運転が行われていないところが多く、JIS基準に適合しない低品質の灰が多く排出されている。上述のCfFAを製造する技術は、これら低品質のフライアッシュを改質させることを主眼に置いた技術であるが、このような低品質なフライアッシュを改質させたCfFAを用いた研究データが極めて少なく、これらのデータの蓄積と分析が喫緊の課題である。

## 2. 研究の目的

以上のように、有効利用において依然多くの課題を抱えるフライアッシュであるが、その単位水量の低減効果はコンクリートの収縮ひずみの低減に繋がり、さらに、コンクリートの収縮ひび割れの低減と制御や耐久性の向上も期待できる。そこで、本研究では、コンクリートの単位水量低減効果に及ぼすCfFAの物性値の影響を明らかにするとともに、CfFAによるコンクリートの乾燥収縮ひび割れ抑制効果を明らかにすることを目的とする。

## 3. 研究の方法

(1)コンクリートの流動性に及ぼすCfFAの物性値の検討

### ①粒子形状の影響

表1は同一調合のコンクリートに対して2種類のCfFAを混入したコンクリートのスランプ試験結果である。同じJISⅡ種に適合する灰であっても流動性の改善効果は大きく異なっていることが分かる。本実験では表に示すように、コンクリートの流動性の改善効果に差が認められる2種類のCfFAについて、粒度分布の測定および解析を用いて市販の画像解析ソフトを用いてSEM画像から選択した任意の約1000点の粒子の形状判定を行うことで粒子形状がコンクリートの流動性の改善効果に及ぼす影響を検討した。

表1 コンクリートスランプ試験結果

調合No.	混和材種類	混和材混入率(%)	W/B(%)	単位水量(kg/m <sup>3</sup> )	s/a(%)	スランプ(cm)	空気量(%)	単位容積質量(kg/L)
1	-	0	50	180	47.2	18.0	4.6	2.32
2	CfFA-A	20	50	180	46.5	21.0	4.7	2.30
3	CfFA-B	20	50	180	46.5	18.5	4.3	2.30

CfFA-A: 湿分:0.03%、強熱減量:0.18%、密度:2.22g/cm<sup>3</sup>、45μmふるい残分:38.0%、比表面積:2540cm<sup>2</sup>/g、フロー値比:104.3%、活性度指数(28日):85.2%、活性度指数(91日):90.1%

CfFA-B: 湿分:0.01%、強熱減量:0.64%、密度:2.28g/cm<sup>3</sup>、45μmふるい残分:17.0%、比表面積:3493cm<sup>2</sup>/g、フロー値比:95.5%、活性度指数(28日):85.4%、活性度指数(91日):101.1%

### ②流動性の予測

本実験ではCfFAコンクリートの流動性を予測することを最終的な目標とし、今回、嵩密度の異なる3種類のCfFA(①~③)を用いたモルタルフロー実験を行い、CfFAモルタルの流動性の予測について検討した。実験に使用したCfFAの物性を表2に示す。実験は、モルタル中の細骨材量の影響を把握するために、細骨材容積をモルタルの全容積で除した細骨材容積比を0.45、0.50、0.55の3水準とし、CfFAは質量置換でセメントに20%混入し、W/Pを変化させ実施した。モルタルに使用し

た細骨材は表乾状態の混合砂（表乾密度：2.64g/cm<sup>3</sup>、吸水率：2.58%）である。モルタルは4分間の練混ぜを行い、フローコンを用いて、振動を与えずにフロー値を測定した。

表2 CfFAの物性

記号	粉体種類	強熱減量 <sup>*2</sup> (%)	真密度 <sup>*3</sup> (g/cm <sup>3</sup> )	嵩密度 <sup>*4</sup> (g/ml)	空隙率 <sup>*5</sup> (%)	20%混入空隙率 <sup>*6</sup> (%)	比表面積 <sup>*7</sup> (cm <sup>2</sup> /g)	平均粒径 <sup>*8</sup> (μm)
OPC	OPC <sup>*1</sup>	-	3.16	1.667	47.2	-	3154	20.8
①	CfFA	0.79	2.29	0.833	63.0	54.0	3516	16.6
②	CfFA	0.26	2.23	1.031	53.8	50.3	2899	24.8
③	CfFA	0.98	2.31	1.230	46.8	49.7	2796	26.7

\*1 普通ポルトランドセメント  
 \*2 JIS A 6201「コンクリート用フライアッシュ」に準拠して測定  
 \*3 ピクノメータ法の真密度測定器にて計測  
 \*4 タッピングマシンによる1000打時の容積から算出  
 \*5 空隙率 = (1 - 嵩密度 / 真密度) × 100 (%) \*6 質量比 (OPC : CfFA = 8 : 2)  
 \*7 レーザ回折粒度測定装置で求めた値より近似的に算出  
 \*8 レーザ回折粒度測定装置で求めた値

(2) 乾燥収縮ひび割れの抑制効果

表3にコンクリートの調合および使用材料を示す。また、図1に実験に用いた鉄筋埋設ひび割れ試験体概要図を示す。拘束用の埋設鉄筋は両側をねじ切り加工したφ32mmの丸鋼を使用した。中央部分300mmはねじ切り加工をせず、厚さ1mmのテフロンシートを2重に巻きコンクリートの付着を除去した。拘束鉄筋のひずみの測定には貼付けゲージ（測長：5mm）を使用し、打設直後から測定を開始した。コンクリートの打設は恒温恒湿室（温度20±1℃、湿度60±5%R.H.）で行い、材齢1日で脱型した。材齢7日まで封かん養生とし、それ以降4面乾燥状態で乾燥を開始した。

表3 コンクリートの調合および使用材料

調合No.	W/B (%)	混和材種類	混和材混入率 (%)	s/a (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位容積質量 (kg/L)
1	50	-	0	46.5	18.5	4.6	2.31
2		FA	20	45.8	18	4.6	2.29
3		BFS	27	46.3	18.5	4.4	2.31
4		BFS	42	46.3	18	4.9	2.29
5		BFS	67	46.1	19	4.7	2.29
6		FA+BFS	20+42	45.6	17	4.7	2.28

C：普通ポルトランドセメント（密度3.16g/cm<sup>3</sup>）、  
 FA：フライアッシュ（密度2.24g/cm<sup>3</sup>）、  
 BFS：高炉スラグ微粉末（密度2.88g/cm<sup>3</sup>）、  
 S：細骨材（混合砂：表乾密度2.64g/cm<sup>3</sup>、粗粒率2.65）、  
 G1：粗骨材（碎石：表乾密度2.66g/cm<sup>3</sup>、実積率59.0%）、  
 G2：粗骨材（碎石：表乾密度2.66g/cm<sup>3</sup>、実積率60.0%）

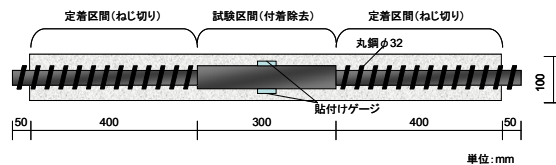


図1 鉄筋埋設ひび割れ試験体概要図

4. 研究成果

(1) コンクリートの流動性に及ぼす CfFA の物性値の検討

① 粒子形状の影響

写真1に CfFA の SEM 画像の一例を示す。この画像を基に市販の画像解析ソフトを用いて求めた円形度と画像投影面積の関係を図2に示す。円形度とは1に近いほど球形に近い形状であることを意味する。図より、流動性改善効果の小さな CfFA-B の方が、特に粒子径が大きな範囲で円形度が小さい形状が悪い粒子が多く存在していることがわかる。

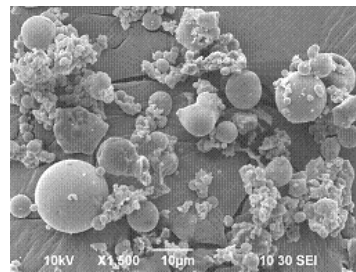
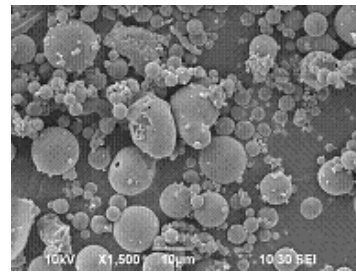


写真1 SEM画像（上：CfFA-A、下：CfFA-B）

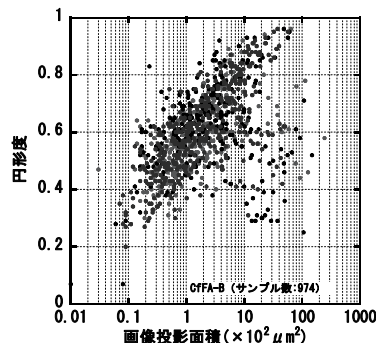
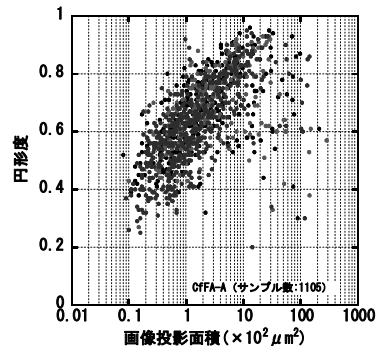


図2 画像解析結果（上：CfFA-A、下：CfFA-B）

図3に粒度分布測定結果を示す。CfFA-Bの方が平均粒径が小さいが分布の形状については特に異常は見られない。平均粒径が小さい場合、粒子の表面積の増加するため、練混ぜ水を多く吸着することが考えられるが、上記粒子形状の影響も考えられる。今後、データを蓄積し、これらの影響の定量化が必要である。

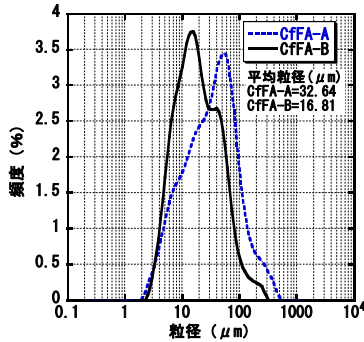


図3 粒度分布測定結果

②流動性の予測

モルタル拘束水比  $\alpha_m$  および変形係数  $\beta_m$  と調合の細骨材容積比の関係を図4に示す。図中の細骨材容積比0の値は、同様に実施したペースト実験の結果である。図より、細骨材容積比が0.5を越えると、モルタルの流動性は急激に低下していることが分かる。また、その影響は細骨材容積比より小さいが、CfFAの種類によっても差が認められ、空隙率が高いほど  $\alpha_m$  も大きくなる傾向を示した。ここから、モルタルの流動性は、細骨材量およびCfFAの空隙率に主に影響されると考えられる。そこで、この2つを用いて、モルタルフロー推定式を構築することとした。

細骨材容積比のみの影響を把握するために、図4について、表2に示す、各CfFAをセメントに20%混入した際の空隙率で除し、CfFAの種類による影響を取り除いた結果が図5である。図より、CfFA混入モルタルは図中に示した3つのCfFAの平均値と近い値となるが、セメント単体は傾向が違ふことが認められる。そのため、セメント単体とCfFA混入それぞれに近似を行い影響係数を求めた(表4)。次に、この近似式に、CfFA種類の影響として、各粉体の空隙率を乗じて、モルタルフロー推定式とした。ここで得られた推定式は、式(3)および式(4)として以下のように表される。

$$\alpha_m = \frac{(A \cdot V_s + B)}{(V_s + C)} \cdot V_p \dots (3)$$

$$\beta_m = \frac{(D \cdot V_s + E)}{(V_s + F)} \cdot V_p \dots (4)$$

ここに、 $\alpha_m$  : モルタル拘束水比、

$\beta_m$  : モルタル変形係数  
 $V_s$  : 細骨材容積比、  
 $V_p$  : 粉体空隙率(%)  
 $A \sim F$  : 細骨材容積比影響係数  
 (表4)

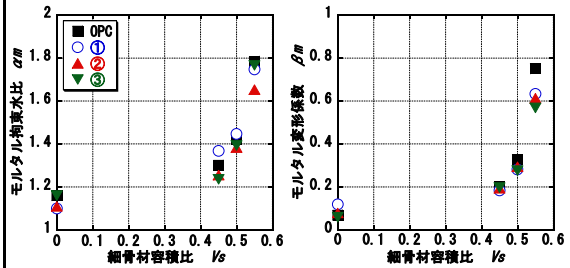


図4 モルタル拘束水比および変形係数と細骨材容積比の関係

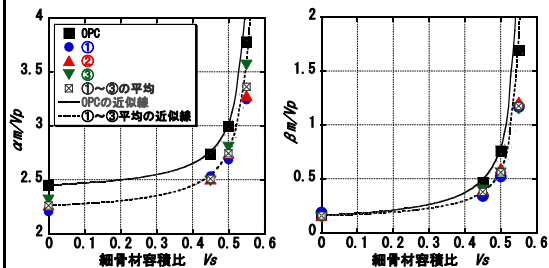


図5 空隙率で除したモルタル拘束水比および変形係数と細骨材容積比の関係

表4 細骨材容積比影響係数一覧

粉体種類	A	B	C	D	E	F
OPC	2.359	-1.44	-0.588	0.062	-0.093	-0.584
CfFA	2.173	-1.34	-0.593	0.097	-0.093	-0.584

これらの推定式を用いて算出した推定フロー値と実測のフロー値の関係を図6に示す。推定フロー値と実測値の間には高い相関性が確認できる。このことから、CfFAとセメントの混合粉体の空隙率と、細骨材容積比から、モルタルの流動性を推定することが可能であると考えられる。

今後、モルタルとコンクリートの流動性の関連について検討し、CfFAコンクリートの流動性の予測手法を確立していく予定である。

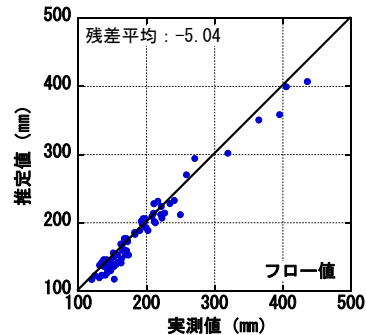


図5 実測値と推定値の関係

(2) 乾燥収縮ひび割れ抑制効果

図6に乾燥収縮ひずみの経時変化を示す。乾燥収縮ひずみは、若干ではあるが、FAを混入すると乾燥収縮ひずみは小さくなり、BFSを混入すると同等程度となる結果となった。

図7に拘束鉄筋のひずみとコンクリートの自由収縮ひずみの経時変化を示す。自由収縮ひずみは、本実験では材齢7日までが封かん状態、それ以降は乾燥状態のひずみである。収縮ひび割れは、調合にかかわらず、鉄筋ひずみ量が $100\sim 160\times 10^{-6}$ で発生している。また、ひび割れの発生は、BFS67%混入のNo.5が一番早く、FA混入のNo.2が一番遅くなるのがわかる。したがって、フライアッシュを20%混入することで同一の単位水量においても、乾燥収縮ひび割れの抑制効果があることを確認できた。

改質フライアッシュには流動性改善効果が認められたことより、単位水量を低減させても同一の流動性を確保することができる。この単位水量低減効果の定量化と、それによる乾燥収縮ひび割れ抑制効果について明らかにする必要がある。

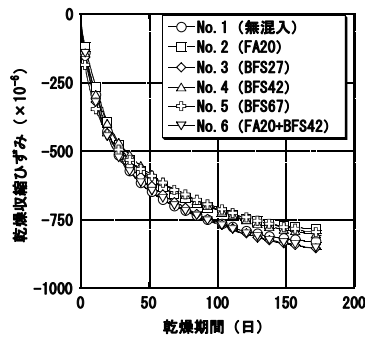


図6 乾燥収縮ひずみの経時変化

【参考文献】

- 1) 佐藤嘉昭ほか：焼成工程を備えた風力微粉砕処理システムによる石炭灰の改質（その1. 処理システムの概要）、日本建築学会報告会九州支部、第45号・1、pp.5-8、2006.3
- 2) 大城愛ほか：改質石炭灰（CFFA）の特性の違いがコンクリートの各種性状に及ぼす影響に関する研究（その2. ペーストフロー実験）、日本建築学会学術講演梗概集 A-1 材料施工、pp.549-550、2009.8

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔学会発表〕（計3件）

- ① 大城愛、佐藤嘉昭、山田高慶、大谷俊浩、清原千鶴、上田賢司、岡田秀敏、改質石炭灰（CFFA）の物理的性質がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響に関する研究（その2. モルタルの流動特性）、日本建築学会研究

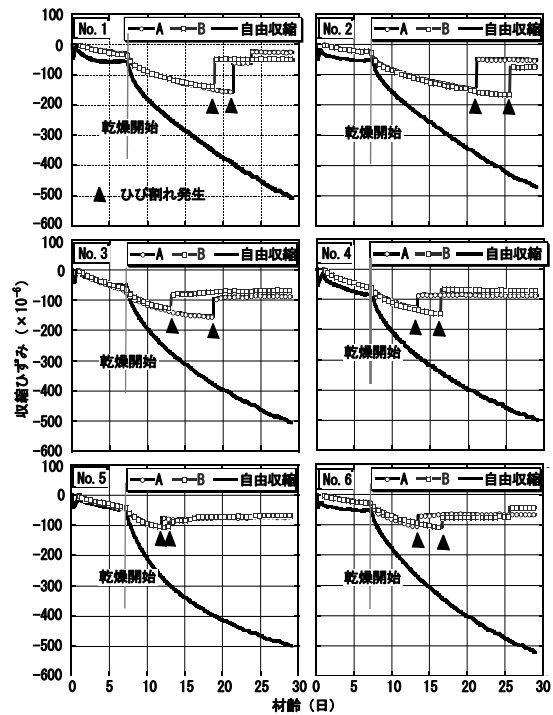


図7 拘束鉄筋のひずみとコンクリートの自由収縮ひずみの経時変化

- 報告九州支部、第49号、2010.3、pp.25-28
- ② 成田健志、濱永康仁、大谷俊浩、佐藤嘉昭、上田賢司、吉川悟史、清原千鶴、混和材混入コンクリートの収縮ひび割れ特性に関する研究（その1 諸性状および圧縮クリープ特性）、日本建築学会研究報告九州支部、第49号、2010.3、pp.61-64
  - ③ 濱永康仁、成田健志、大谷俊浩、佐藤嘉昭、上田賢司、吉川悟史、清原千鶴、混和材混入コンクリートの収縮ひび割れ特性に関する研究（その2 乾燥収縮ひび割れ特性）、日本建築学会研究報告九州支部、第49号、2010.3、pp.65-68

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.arch.oita-u.ac.jp/a-zai/zai00.htm>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大谷 俊浩 (OTANI TOSHIHIRO)

大分大学・工学部福祉環境工学科建築コース・准教授

研究者番号：00315318

(2) 研究分担者

( )

研究者番号：

(3) 連携研究者

( )

研究者番号：