

## フライアッシュの品質と使用量がPC用コンクリートの諸性状に与える影響

川田建設(株) 正会員 ○北野 勇一  
川田建設(株) 正会員 水戸 健介

キーワード：フライアッシュ，分級，加熱改質，アンモニア臭

### 1. はじめに

石炭火力発電の副産物であるフライアッシュは炭種やボイラー形式および発電状況により品質が変動し<sup>1)</sup>，また分級等の処理が行われることで変質し<sup>2)</sup>，さらに構造物の要求性能に応じて使用量が変化することから，JIS A6201に規定されるII種を用いても製造されるコンクリートは千状万態となり得る。とくに，PC構造物へのフライアッシュの利用は皆無に等しく，水結合材比40%を下回る早強コンクリートに関するデータ蓄積は十分になされていない。そこで本稿では，フライアッシュの品質と使用量がPC用コンクリートの諸性状に与える影響を実験的に確認した結果について報告する。

### 2. 実験概要

#### 2.1 使用材料

表-1に使用材料を示す。セメント，骨材（化学法により無害と判定されるもの），混和剤はN工場で使用されるものであり，混和剤は表-2に示すフライアッシュII種に該当する4品種を用いた。品種aは微粉炭燃焼時に発生するばい塵を集塵機にて捕集した粉体（原粉）であり，品種bと品種cは原粉を粗粉と細粉に分級した際の細粉（分級品）である。分級品は原粉より比表面積が大きく，一般にフロー値比（ワーカビリティに影響）や活性度指数（強度発現に影響）が向上すると言われている<sup>2)</sup>。また，品種dは原粉を600～950℃の高温に加熱しフライアッシュの物理化学特性を改質したもの（加熱改質品）であり，主に多孔質である未燃炭素が除去されることで強熱減量の低減（1.0%以下）やフロー値比の向上が図れ，コンクリートの空気連行性やワーカビリティが改善されるとしている<sup>3)~5)</sup>。

表-1 使用材料

材料	記号	仕様
セメント	C	早強セメント，密度3.14g/cm <sup>3</sup>
混和材	FA	表-2に示すフライアッシュ4品種
細骨材	S	砕砂，表乾密度2.64g/cm <sup>3</sup>
粗骨材	G	砕石，表乾密度2.66g/cm <sup>3</sup>
混和剤	SP	高性能AE減水剤(標準系I種)
	AE	AE剤(フライアッシュ用ではない)

表-2 フライアッシュの主な品質

品種	SiO <sub>2</sub> (%)	強熱減量(%)	密度(g/cm <sup>3</sup> )	比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	フロー値比(%)	活性度指数(%)	
						材齢28日	材齢91日
a 原粉	57.0	3.8	2.17	3990	95	82	96
b 分級品1	60.7	3.0	2.24	4460	106	84	103
c 分級品2	53.0	1.7	2.48	4870	107	100	108
d 加熱改質品	64.4	0.7	2.26	3840	106	80	94
規格値*	45.0以上	5.0以下	1.95以上	2500以上	95以上	80以上	90以上

\*JIS A 6201 フライアッシュII種の規定を示す。

表-3 PC用コンクリート配合

配合	スランプ(cm)	空気量(%)	W/B(%)	FA/C(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )				
					W	結合材B		S	G
						C	FA		
H	12 ±1.5	4.5 ±0.5	38.4	0	162	422	0	765	980
FA12			34.2	12			51	706	
FA20			32.0	20			84	663	

注) Sの単位量は品種aのフライアッシュを用いた場合。

#### 2.2 PC用コンクリート配合

表-3に今回用いた配合を示す。配合HはN工場のプレテンションPC部材に通常使われ，FA12およびFA20はフライアッシュを細骨材と置換しフライアッシュセメント比(FA/C)を12%（品種dのみ）および20%としたものである。各配合はプレストレス導入時強度35N/mm<sup>2</sup>（材齢1日）および設計基準強度50N/mm<sup>2</sup>（材齢28日）を確保し，所定のスランプと空気量が得られるように混和剤量を調節した。

### 2.3 供試体の作製および実験項目

供試体は最高温度45℃の蒸気養生を行い、注水後24時間以内に脱型および封緘し、20℃の室内にて保管した。この供試体を用い、圧縮強度試験 (JIS A1108) と塩分浸透試験 (JSCE-G572に従い10%NaCl水溶液に浸せきし、所定材齢で割裂し0.1N-AgNO<sub>3</sub>水溶液を噴霧し発色境界を塩分浸透深さとして測定) を行った。なお、品種cについては注水直後から練混ぜが終わるまで断続的にアンモニア臭がしたため、3.4に示す調査を実施した。

## 3. 実験結果

### 3.1 フライアッシュの品質と使用量がPC用コンクリートの混和剤使用量に与える影響

図-1と図-2に各配合に用いたSP量とAE量を示す。両図には配合FA20の実験回帰結果を示したが、SP量とフロー値比は負の関係が、AE量と強熱減量は正の関係が認められた。とくに、強熱減量2%を超えるとAE量は配合Hの10倍以上を要した。このため、N工場のPC用コンクリートで空気量4.5%を確保するには強熱減量2%程度以下のフライアッシュを用いる必要があると判断された。

なお、強熱減量2%以下のフライアッシュであってもAE量は配合Hの5倍を要した。これについては、FA/Cを20%から12%に減じることでAE剤の量を概ね半減できることがわかった。

### 3.2 フライアッシュの品質と使用量がPC用コンクリートの圧縮強度に与える影響

図-3に配合Hに対するフライアッシュコンクリートの圧縮強度比を示す。材齢1日では活性度指数およびFA/Cが大きい配合の圧縮強度が増すものの、配合Hとの差は配合FA20で3~7%でありフライアッシュ混入による初期強度の向上はほとんど見込めない結果になった。また、28日強度はいずれも配合Hの約10%増となり長期強度が増進する反面、フライアッシュの品質並びに使用量の影響は減退した。

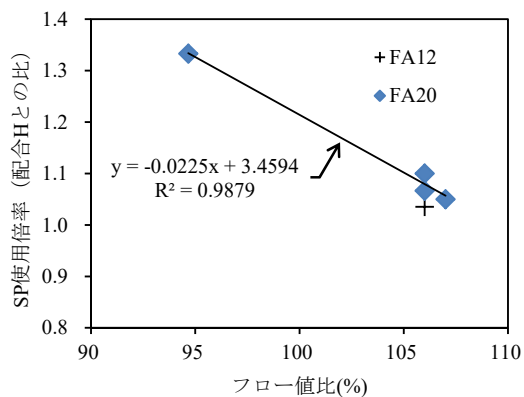


図-1 フロー値比と SP 量の関係

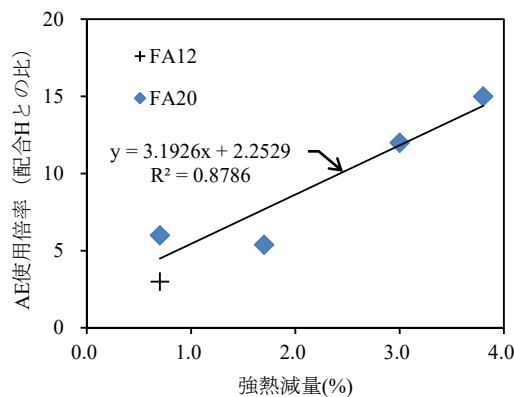


図-2 強熱減量と AE 量の関係

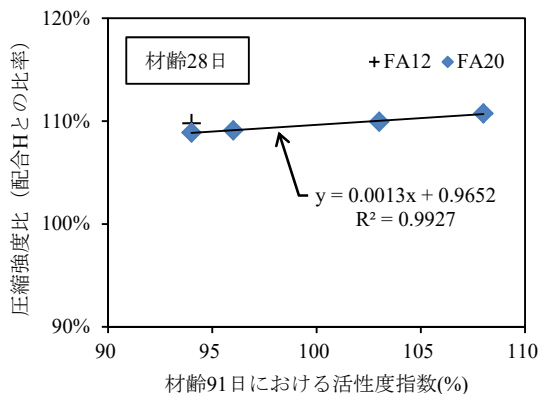
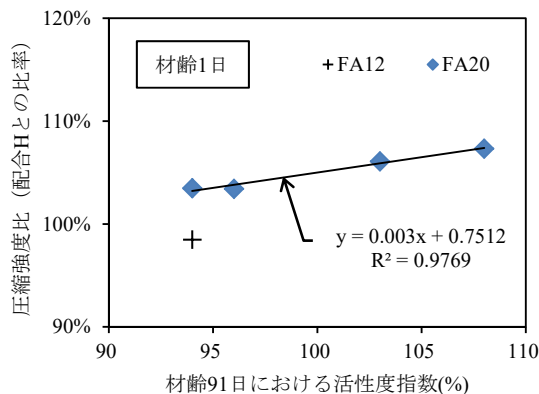


図-3 圧縮強度試験結果

### 3.3 フライアッシュの品質と使用量がPC用コンクリートの遮塩性に与える影響

図-4に塩分浸透深さの測定結果を示す。フライアッシュコンクリートの塩分浸透深さは配合Hより小さく、フライアッシュの品種およびFA/Cの違いはあまり見られなかった。また、浸せき期間の平方根と塩分浸透深さの関係を調べると配合Hは概ね線形関係にあったが、フライアッシュを用いた3配合とも0.7年<sup>0.5</sup> (=0.5年) を境に2段階の勾配となった。理由として、高橋ら<sup>6)</sup>はフライアッシュコンクリート構造物の調査結果から、液状水の浸潤限界に伴った塩分浸透の停滞が生じている可能性を指摘していることが挙げられる。フライアッシュを用いた3配合の実験データを2段階に分けて回帰した結果、前半の傾きは配合Hと同程度であるが、後半の傾きは配合Hの1/2以下であった。すなわち、今回検討したフライアッシュコンクリートの遮塩効果は短期的には早強コンクリートと同程度だが、長期的には塩分浸透速度(拡散係数)が1/4以下となり、表層の鉄筋位置における塩化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界塩化物イオン濃度に到達する時間は4倍以上に延びるといえる。

参考までに、図-5に浸せき1年時点におけるEPMA面分析結果、図-6にEPMAデータを深さ0.5mm毎に平均し塩化物イオン濃度分布として表示した結果、図-7に塩化物イオン濃度分布を拡散方程式の解で回帰して拡散係数を求めた結果(拡散係数:一定)および差分法を用い浸せき0.5年以前を配合Hと同じ拡散係数とし以降の拡散係数を最小二乗法により求めた結果(拡散係数:2段階)を示す。

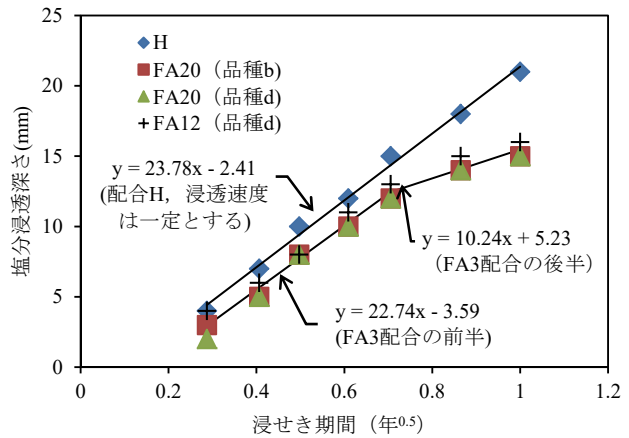


図-4 塩分浸透深さの測定結果

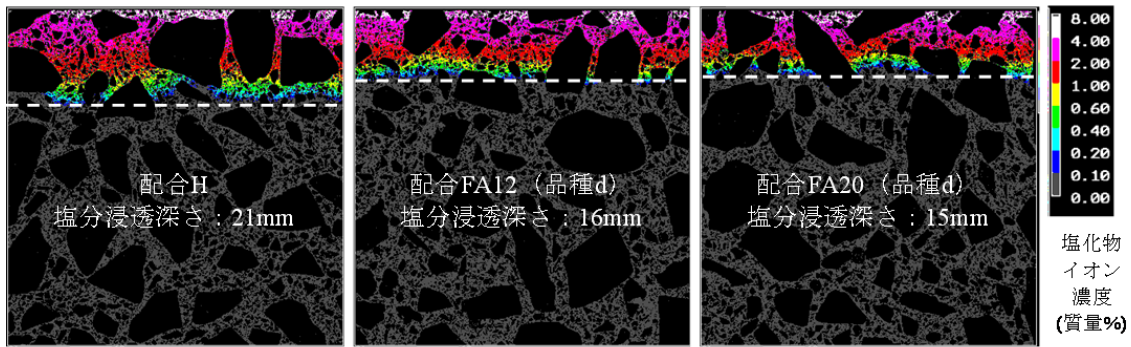


図-5 EPMA 面分析結果 (対象: ペースト部, 浸せき期間: 1年)

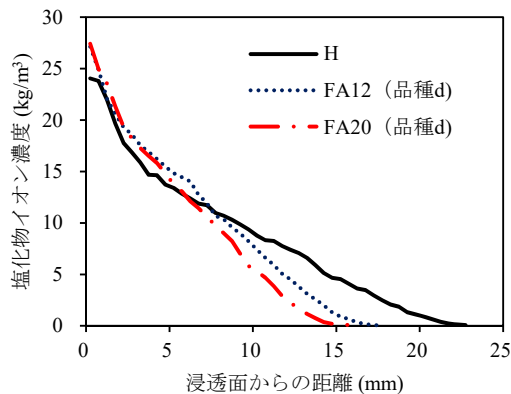


図-6 塩化物イオン濃度分布

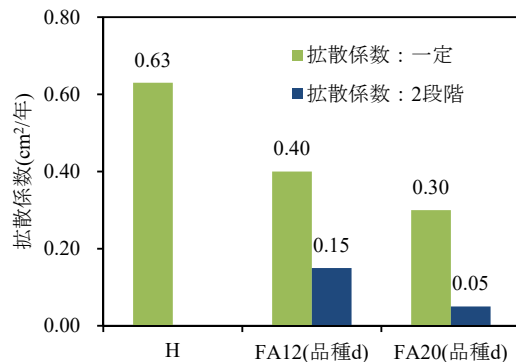


図-7 拡散係数算出結果 (浸せき1年)

### 3.4 アンモニア臭に関する調査

表-4にフライアッシュの $\text{NH}_4^+$ （JIS K0102を参考にアルカリ溶液に入れ発生したアンモニアを酸性溶液に吸収させイオンクロマトグラフで測定）とpH（液固比10としpH計で測定）の調査結果を示す。品種cの $\text{NH}_4^+$ は20mg/kgであり、定量下限値未満であった品種d（加熱改質時に窒素分が除去される）よりは多いものの、既往データ<sup>7)</sup>と比べ過多と言えるほどではなかった。また、品種cと品質dのpHは十分なアルカリ領域にあったことから、酸性のフライアッシュ（コンクリートとしての品質および耐久性を損なうおそれがある）で確認される硫酸アンモニウムの大量付着<sup>7)</sup>はなかったと考えられる。

表-4 フライアッシュ調査結果

	品種	$\text{NH}_4^+$ (mg/kg)	pH
c	分級品2	20	11.3
d	加熱改質品	<10*	11.3

\*定量下限値未満

## 4. まとめ

フライアッシュの品質（Ⅱ種）と使用量（フライアッシュセメントB種相当）が早強ポルトランドセメントを用い水結合材比40%以下としたPC用コンクリートの諸性状に与える影響について実験的に確認し、今回の検討範囲において以下の結果を得た。

- (1) AE剤使用量の増加を抑えつつ空気量4.5%を確保するには強熱減量2%程度以下のフライアッシュを用いる必要があった。また、フライアッシュセメント比を20%から12%に減じることでAE剤の量を概ね半減できた。
- (2) フライアッシュ混入による初期強度の向上はほとんど見込めない結果となった。
- (3) 塩水浸せき期間が半年を超えてからの塩化物イオン拡散係数は、フライアッシュの品質や使用量によらず、同強度の早強コンクリートに比べ1/4以下となった。
- (4) 一部フライアッシュでは練混ぜ時にアンモニア臭がしたが、アンモニア付着量は過多でなかった。

なお、今回対象としたN工場では化学法で無害と判定される骨材を用いASR対策が不要なため、PC用コンクリートとして要求される強度発現や遮塩性等を確保しつつPC部材製作のための施工性と生産性を損ねない範囲でフライアッシュの品種および使用量を適切に選択するのが良いと考えられる。

謝辞：本稿を取り纏める上で貴重なご支援ご助言を頂いた北陸電力（株）の参納氏並びに（株）ゼロテクノ四国の秋吉氏には、紙面を拝借いたしまして、感謝の意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会：フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針（案），1999
- 2) 北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会：同委員会報告書（富山・石川・福井版）ーコンクリート構造物の長寿命化と環境負荷低減を目指してー，2013.6
- 3) 国土交通省新技術情報提供システム（<http://www.netis.mlit.go.jp>）：コンクリート混和材（CfFA：改質フライアッシュ），QS-100005-VE
- 4) 李相培，佐藤嘉昭，岡田秀敏，清原千鶴：焼成工程を備えた風力微粉碎処理システムによる石炭灰の改質，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.183-188，2007
- 5) 須藤祐未，佐藤嘉昭，清原千鶴，大谷俊裕：石炭灰の未燃炭素がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.25-26，2004.8
- 6) 高橋佑弥，岸利治：フライアッシュコンクリートの塩分浸透抑制現象と液状水浸潤限界の関与，土木学会第65回年次学術講演会，V-177，2010.9
- 7) 田野崎隆雄，野崎賢二，白坂優，曾根徳明：コンクリート混和用石炭灰の品質について，コンクリート工学年次論文集Vol.18，No.1，pp.333-338，1996