

[1039] フライアッシュコンクリートの品質管理手法に関する研究

正会員 長瀧 重義 (東京工業大学)
 正会員 大賀 宏行 (東京工業大学)
 正会員 増田 和機 (東京電力 技術研究所)
 正会員 ○谷 直樹 (前田建設工業 技術研究所)

1. まえがき

火力発電所から産出されるフライアッシュは、流動性ならびに長期強度の改善および水和熱の低減などコンクリートの品質を改善するうえで有用な混和材の1つである。しかしながら、近年火力発電所の環境問題にからむNOx規制や外国炭使用の増大、さらに発電負荷(燃焼温度)の変動によるフライアッシュの品質の低下・変動が問題となっている。フライアッシュの品質を判定する場合、単位水量比、粉末度、強熱減量、メチレンブルー吸着量等が目安となっているが、これらの指標は試験に時間がかかるうえ、熟練を要するなどの理由からフライアッシュを混入したコンクリート(以後FAコンクリートと呼ぶ)の製造時の品質管理を行なう上では、必ずしも適切とはいえない。

本報告はこのような観点に立ってFAコンクリートを製造する際に生じるスランプ、空気量の変動に対処できるような品質管理手法を確立することを目的として行なった実験の結果について検討を加えたものである。

2. 実験概要

本研究では以下のことを対象に実験を行なった。

- ①燃焼条件がフライアッシュの品質に及ぼす影響の把握
- ②フライアッシュの変動がFAコンクリートに及ぼす影響の把握
- ③品質管理上有効な試験方法の確立
- ④新たに開発されたFAコンクリート用AE剤の効果と問題点の把握

2.1 使用材料

フライアッシュの品質が変動する原因は数多く存在するが、ここでは炭種と発電負荷に着目し、同一燃焼炉からこれらを変化させて採取した6種類のフライアッシュを用いた。炭種の組合せ、発電負荷は表-1に示すとおりである。採取した各フライアッシュは試験に先立ちそれぞれV型混合機を用いて混合した。セメントは普通ポルトランドセメントとし、細骨材、粗骨材にはそれぞれ大井川産川砂(比重2.61, 吸水率1.07%, FM 2.63)、信濃川産川砂利(Gmax25mm, 比重2.75, 吸水率1.20%, FM7.52)を用いた。またAE剤はレジン系AE剤(以後OAEと呼ぶ)およびFAコンクリート用として開発されたポリオキシエチレン系AE剤(以後CAEと呼ぶ)の2種類とした。

表-1 実験に用いたフライアッシュの燃焼条件

試料No	F1	F2	F3	F4	F5	F6
炭種	釧路48: プレアソール: マウントソール (1: 1: 1)			釧路48: 釧路61: プレアソール (1: 1: 1)		
発電負荷(MW)	600	350	200	450	350	200
炉内温度(℃)	1565~1620	1400~1530	1380~1470	—	—	—

(ただし、釧路48、釧路61は釧路産で発熱量が5,280, 6,100Kcal/kg プレアソール、マウントソールはオーストラリア産で発熱量6,470, 6780Kcal/kgのものである。)

2.2 フライアッシュの品質に関する試験方法

フライアッシュの品質を判定するために本実験ではJISに定められている化学、物理的試験に加えて、メチレンブルー吸着量、長瀧らが提案したみつかさ比重およびW₂₀の試験を行なった。

みつかさ比重は写真-1に示すようにモルタル用フローテールをベースとした、自動みつかさ比重測定器により測定した。この試験器を用いた衝撃回数とフライアッシュのかさ比重の関係は図-1のようになり、1,000回以上衝撃を加えるとかさ比重は、その値が安定することから、本実験では2,000回衝撃を加えた後のかさ比重をみつかさ比重と定義した。

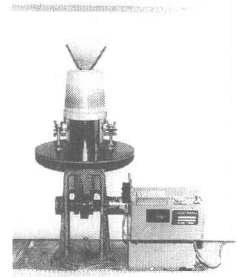


写真-1 みつかさ比重試験器

2.3 フレッシュコンクリートの性質に関する実験方法

本実験で設定した配合条件は表-2のとおりである。練り混ぜ直後のコンクリートのスランプ、空気量をそれぞれ一定とし、フライアッシュの品質、W/C+F、AE剤の種類をパラメータとしたシリーズI・IIと空気量の減少を考慮にいられて60分経過後のコンクリートの空気量が一定となるようにしたシリーズIIIの3シリーズから構成されている。

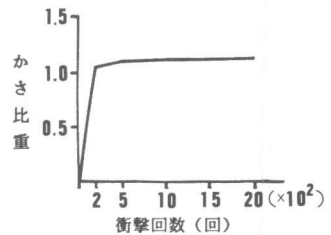


図-1 衝撃回数とかさ比重の関係

材料の投入・練り混ぜ順序および試験順序は図-2に示す。ミサキは公称160ℓの可傾式ミキサを用い、1バッチ当りの練り混ぜ量は140ℓとした。なお、練り混ぜ後のコンクリートは所定の試験時まですべて周速30cm/secでアジテートした。

表-2 コンクリートの配合条件

シリーズNo	使用したフライアッシュ	水結合材比(%)	AE剤	スランプ(cm)	空気量(%)	フライアッシュ置換率(%)	目的
シリーズI	Non. F	4.5	OAE	12±2	4.5±1	0	フライアッシュごとのスランプ、空気量の変化をW/C+Fを変えて把握
	F1~F6	5.5				2.0	
シリーズII	Non. F	4.5☆	CAE	12±2	4.5±1	0	シリーズIに対応させてAE剤による違いを把握
	F1~F6	5.5				2.0	
シリーズIII	Non. F, F1	5.5	OAE	—	60分後	0	経時変化による空気量の減少を考慮した場合の物性の把握
	F3, F4, F6				4.5±1	2.0	

ただし、☆はNonF, F1, F3のみ行なった。

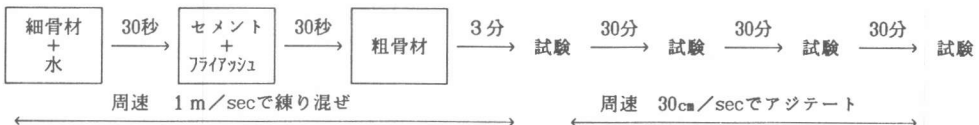


図-2 材料の投入・練り混ぜ順序および試験手順

3. フライアッシュの燃焼条件とフ

ライアッシュの品質特性の関係

フライアッシュの品質試験の結果を燃焼条件とともに表-3に示す。燃焼条件が大幅に異なるにもかかわらずF3, F6のフライアッシュを除いて、その他はすべてJISの規格を満足していることがわかる。フライアッシュの粉末度を発電負荷に

表-3 品質特性試験一覧表

試料 No	F1	F2	F3	F4	F5	F6	
水分(%)	0.34	0.45	1.02☆	0.26	0.40	0.71	
強熱減量(%)	4.06	4.75	8.11☆	2.16	3.79	5.08☆	
SiO ₂ (%)	61.44	60.97	58.81	55.37	55.54	54.68	
比重	2.11	2.11	2.18	2.09	2.12	2.13	
粉末度(c#/#)	3,870	4,590	6,330	3,260	4,080	5,070	
単位水量比(%)	97	99	100	95	97	99	
圧縮強度比	28日	75.3	74.8	77.0	78.5	80.1	76.9
	91日	89.5	94.2	94.2	93.0	96.0	89.3
メルゾル-吸着量(mg/g)	0.25	0.40	0.60	0.15	0.25	0.60	
みつかさ比重	1.06	0.98	0.85	1.13	1.11	0.94	
W20(%)	64.2	81.4	90.0	54.5	54.0	76.7	

ただし、☆はJISの規格をはずれたものである。

対してプロットすると図-3のようになり3,200~6,300 cal/gの範囲で大きく変化している。フライアッシュの粉末度はブレン方法によって得られる比表面積が大きい炭素の量に大きく影響される。強熱減量が発電負荷の増大とともに減少することから、図-3のような傾向を示すのであろう。図-3中の破線はみつかさ比重の値を示したものであるが、これは粉末度とは逆に発電負荷の増大、すなわち燃焼条件が良くなるに伴って0.85~1.13まで増加していく。なお、粉末度、みつかさ比重は炭種の違いによっても若干異なっている。フライアッシュの単位水量比と W_{20} を発電負荷をパラメータとして示すと図-4のようになる。単位水量比、 W_{20} は炭種による差も見られるものの、いずれも発電負荷の増加とともに小さくなる傾向にある。その値は単位水量比で95~100%、 W_{20} で54~90%と変化している。一方、メチレンブルー吸着量と強熱減量は図-5のようになり、単位水量比や W_{20} と同様炭種よりも発電負荷に強く影響される。

このように、フライアッシュの各特性値は、ここで設定した燃焼条件の範囲でも大きく変化する。さらに品質に及ぼす影響は炭種によるものより発電負荷の方が著しく大きくなっている。

このことは、フライアッシュを混入したコンクリートの品質管理を行なう上で、フライアッシュの品質変化に着目した管理体制を確立することの必要性を示唆しているものと考えられる。

4. フライアッシュの品質変化がフレッシュコンクリートの性状に与える影響

4.1 スランプと単位水量

FAコンクリートの練り混ぜ直後の空気量を $4.5 \pm 1\%$ 一定として 12 ± 2 cmのスランプを得るのに必要な単位水量をフライアッシュごとに示すと図-6のようになる。図-6は $W/C + F = 55\%$ の場合を示したものであるが、同一スランプを得るために必要なコンクリートの単位水量はフライアッシュの違いにより $135 \sim 145 \text{ kg/m}^3$ まで変化している。同様な傾向が $W/C + F = 45\%$ の場合についても認められ、フライアッシュの品質の変動がコンクリートのスランプに大きく影響を与えることがわかる。

表-3に示したフライアッシュの性質のうちFAコンクリートのスランプに影響すると思われる粉末度、単位水量比とコンクリートの単位水量の関係を図-7に示す。粉末度が大きくなるに従ってFAコンクリートの単位水量は増大して

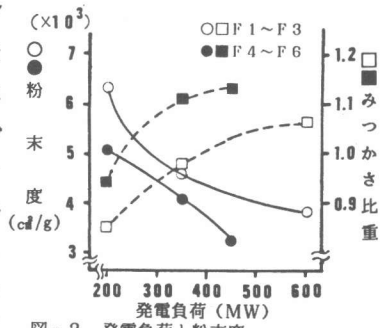


図-3 発電負荷と粉末度
発電負荷とみつかさ比重の関係

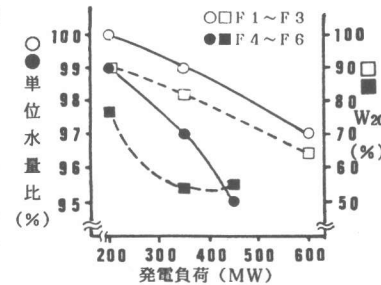


図-4 発電負荷と単位水量比
発電負荷と強熱減量の関係

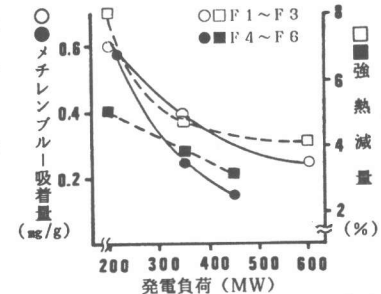


図-5 発電負荷とメチレンブルー吸着量
発電負荷と強熱減量の関係

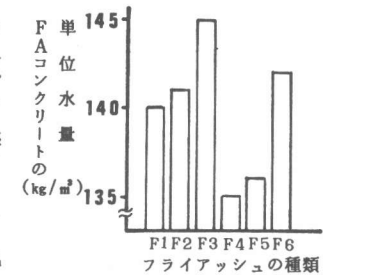


図-6 フライアッシュの種類ごとの単位水量 (シリーズI, w/c+F=55%)

おり、NO_x規制以前の良質なフライアッシュの場合とその傾向は異っている。次に、W₂₀とFAコンクリートの単位水量の関係を図-8に示す。単位水量比と単位水量、W₂₀と単位水量との相関を求めるとW₂₀の方が単位水量比よりもFAコンクリートの単位水量との相関が大きく、本実験においてもW₂₀の有用性が認められた。また、図-8中にはみつかさ比重とFAコンクリートの単位水量の関係も示した。みつかさ比重もW₂₀と同じようにFAコンクリートの単位水量との相関が極めて大きいことがわかる。このことは、みつかさ比重がフライアッシュの流動性状を判断する指標としてW₂₀同様にフライアッシュの単位水量比にかわり得る特性であることを示している。これはみつかさ比重が、フライアッシュの粒度、粒形を総合的に表わす指標であること、およびフライアッシュの粒度、粒形が流動性状に大きく影響することを考慮すると、みつかさ比重はフライアッシュの流動性状を間接的に評価し得るものと考えることができる。W₂₀とみつかさ比重の関係(図-9)において両者が非常に良く対応していることから裏付けられる。さらにコンクリートの品質管理で要求される試験の難易度、迅速性、再現性の点からもみつかさ比重は、FAコンクリートのスランプ特性を評価する指標としてすぐれていると考えられる。

4.2 練り混ぜ直後の空気量

フライアッシュの品質変動によりFAコンクリートの空気量が増えることは衆知の事実であり、そのためのフライアッシュの品質の指標としてメチレンブルー吸着量や強熱減量が用いられている。練り混ぜ直後の目標空気量を4.5%とするのに必要な単位AE剤量の単位結合材量に対する重量比をAE剤使用量と定義し、OAEの場合のそれをメチレンブルー吸着量ならびに強熱減量に対してプロットすると図-10が得られる。これら2つのパラメータはいずれもAE剤使用量と強い相関を有している。

FAコンクリートの空気量の変化は、フライアッシュ中に含まれるカーボンにAE剤が吸着されることによって生じると言われており、両者ともそのカーボン量をある程度適切に評価しているものと判断される。しかしながら、これらの試験はその結果の判定までに時間を要したり、あるいはその判断に個人差が生じる等、FAコンクリートの品質管理を行なう上での試験方法としては必ずしも十分であるとは言いがたい。

図-11にみつかさ比重とAE剤使用量の関係を示した。み

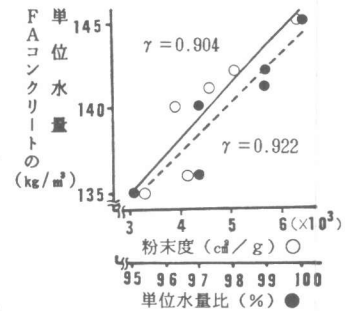


図-7 単位水量比および粉末度とFAコンクリートの単位水量の関係 (シリーズI, w/c+F=55%, OAE)

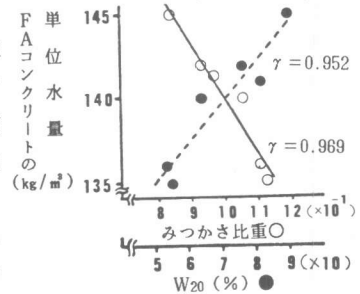


図-8 みつかさ比重およびW₂₀とFAコンクリートの単位水量の関係 (シリーズI, w/c+F=55%, OAE)

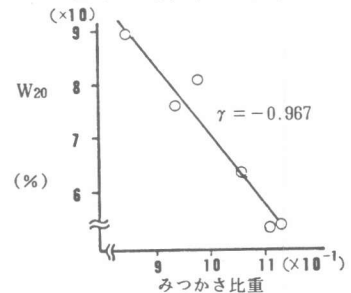


図-9 みつかさ比重とW₂₀の関係 (シリーズI, w/c+F=55%, OAE)

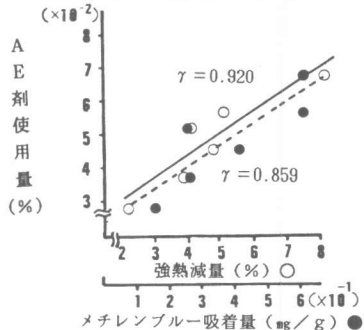


図-10 強熱減量およびメチレンブルー吸着量とAE剤使用量の関係 (シリーズI, w/c+F=55%, OAE)

つかさ比重は強熱減量、メチレンブルー吸着量と同様に、A E剤使用量と高い相関を有することが認められる。フライアッシュは、カーボンを多く含むと、粒形や粒度分布が悪くなり、その結果みつかさ比重が小さくなるものと推定される。すなわち、みつかさ比重は、間接的にカーボン量に対応するためと考えられる。したがってみつかさ比重はその作業性を考えると、強熱減量、メチレンブルー吸着量に比べて品質管理上、より優れた指標となるものと考えられる。

次に、FAコンクリート用A E剤として開発されたA E剤(CAE)を用いてOAEと同様の試験を行なった結果は図-12のようになった。CAEを使用した場合でもOAEと同様練り混ぜ直後の空気量を一定とするために必要なA E剤使用量はフライアッシュの品質に伴って大きく変化しており、その使用に際してはOAEと基本的に同じ取り扱いをしなければならないことがわかる。ただし、この場合についてもみつかさ比重がその使用量とよい相関を示しており、管理上の指標として有効である。

4.3 空気量の経時変化

FAコンクリートを用いる場合、荷卸し地点までの運搬中に生じる空気量の減少も大きな問題となることが多い。図-13はシリーズIでW/C+F=55%でOAEを用いた場合の空気量の経時変化を示したものである。FAコンクリートの空気量の時間経過に伴う減少はフライアッシュ無混和のものより大きく、練り混ぜ直後に4.5±1%であったものが、30分後に2%前後にまで減少しており、この経時変化は、練り混ぜ直後の空気量の管理と同様、FAコンクリートを製造する際の重要な管理項目と考える必要がある。

一方、CAEをA E剤として用いる場合の空気量の経時変化は図-14のごとくなる。CAEの場合、空気量の減少傾向はOAEのそれと比べ著しく異っている。CAEを使用した場合、空気量は最初の30分はほとんど低下せず、その後徐々に減少し、60分経過後でも4.5±1%の中にあるものが多い。これからCAEはOAEより優れた空気保持能力を有しており、フライアッシュコンクリート用として有用なA E剤であると考えられる。特に運搬時間が30~60分以内の場合にはCAEを用いると空気量の減少はほとんど考慮する必要はない。

図-15はFAコンクリートの運搬時間を60分に想定して行なったシリーズIIIの実験の結果を示している。練り混ぜ後60分で4.5±1%の空気量を得るためには、練り混ぜ直後の空気

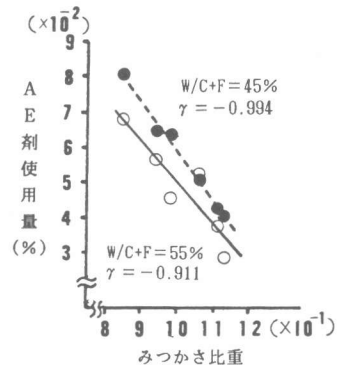


図-11 みつかさ比重とA E剤使用量の関係 (シリーズI, OAE)

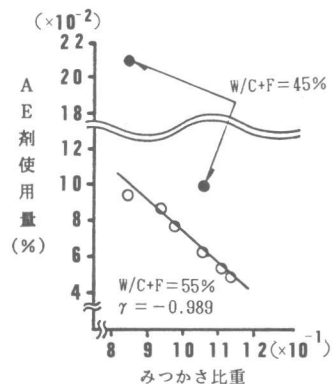


図-12 みつかさ比重とA E剤使用量の関係 (シリーズII, CAE)

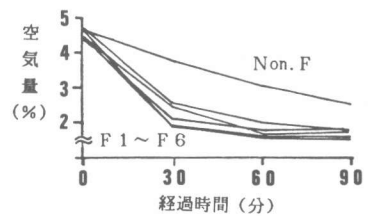


図-13 空気量の経時変化 (シリーズI, W/C+F=55%, OAE)

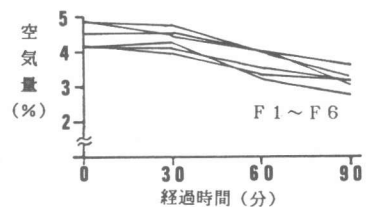


図-14 空気量の経時変化 (シリーズII, W/C+F=55%, CAE)

量をフライアッシュ無混和のもので約6%，FAコンクリートの場合9%まで大きくする必要のあることがわかる。

さらに、図-16は、 $W/C+F=45\%$ とした場合のCAEを用いたFAコンクリートの経時変化を示したものである。 $W/C+F=45\%$ （本実験ではスランブを一定としているため単位結合材量が多くなる）では、30分後の空気の減少傾向が $W/C+F=55\%$ の場合と大きく異なっており、品質の悪いフライアッシュF3では減少するどころか逆に著しく増大している。この原因については本実験では明らかとなっていないが図-12のCAEのAE剤使用量をみると $W/C+F=45\%$ の場合、 $W/C+F=55\%$ に比べ著しく増加しており、アジテート中に残存していたCAEによって引き続き空気が連行されていたためではないかと思われる。この種のAE剤を使用する場合、今後も検討していかなければならない問題であると考えられる。

なお品質管理という観点に立つ場合、強度を検討する必要があるが、本実験で用いたフライアッシュの変動範囲では大きな強度差は見られなかった。

5. まとめ

本実験の範囲内で以下のことが結論される。

- ① フライアッシュの品質特性は発電負荷、炭種の影響を受け大きく変化する。フライアッシュの品質はJISの規格を満足しているものの、その変動値はFAコンクリートのスランブ、空気量の管理上無視できないものである。
- ② みつかさ比重はFAコンクリートのスランブ、空気量を管理する上でより優れた指標と考えることができる。
- ③ FAコンクリート用AE剤は、空気量の保持能力が大きく、FAコンクリートの運搬に伴う空気量の減少に対しては有用である。練り混ぜ直後の空気量の管理については、従来のAE剤と同様であるが、単位フライアッシュ量の多いFAコンクリートの場合、アジテート中に空気量が著しく増大することもあり、使用上注意する必要がある。

最後に本実験を行なうにあたって多大な御協力を賜った常磐共同火力㈱には深く感謝の意を表します。

文 献

- 1) 長滝, 大賀, 越智, 中村: フライアッシュの品質とその評価に関する研究
第7回コンクリート工学年次講演会論文集 P197~P200, 1985
- 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 P201~P204, 1985
- 3) 西, 大森, 山本, 沖村: フライアッシュセメントコンクリート用AE剤について
セメント技術年報37 P187~P190, 1983

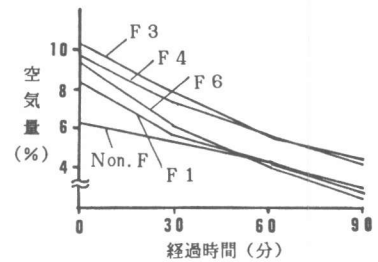


図-15 空気量の経時変化
(シリーズⅢ, $W/C+F=55\%$, OAE)

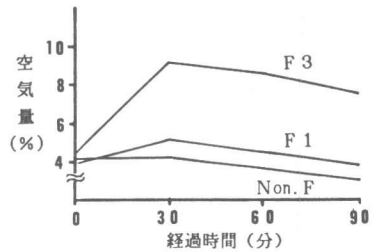


図-16 空気量の経時変化
(シリーズⅡ, $W/C+F=45\%$, CAE)