

# 論文 コンクリート材料としてのフライアッシュの適用限界に関する研究

町 勉\*1・荒島 猛\*2・上原 匠\*3・梅原 秀哲\*4

**要旨:** フライアッシュの有効利用を目的として、フライアッシュの品種、細骨材との置換方法の違い、および混和剤の種類による適用限界を検討した。その結果、AE減水剤を用いた場合、細骨材の微粒分との置換によりセメントと同程度の量のフライアッシュが混入可能となり、一般的な土木用コンクリートとして適用可能であることを明らかにした。また、高性能 AE 減水剤を用いた場合、セメントの2倍の量のフライアッシュが混入可能となった。しかし、粉体量の増加により粘性が著しく増加することから、その用途は打設時の施工性の面では高流動コンクリートが最適であることを明らかにした。

**キーワード:** フライアッシュ、流動性、空気連行性、粘性、ブリーディング、圧縮強度

## 1. まえがき

近年、石炭火力発電所の増加に伴い、産業副産物であるフライアッシュも増加の一途をたどり、その有効利用が強く求められている。一般的には、フライアッシュのセメントに対する置換率は30%以下であり、ダムコンクリートや舗装用コンクリートを対象として用いられている。今後フライアッシュの有効利用を実現するためには、フライアッシュをコンクリート中に多量に混入すること、および実構造物の施工において広く適用することの2点が重要であると考えられる。さらに、実構造物へ適用するには、フライアッシュを多量に混入したコンクリートが、施工性・強度・耐久性を満足する必要があるといえる。

そこで本研究では、フライアッシュの有効利用を目的として、結合材としての使用に加え、混和材として細骨材の一部とも置換したコンクリートを製造し、その物性試験を行うことによって、フライアッシュの品種、細骨材との置換方法の違い、および混和剤の種類による適用限界を検討した。なお、本研究でいう「適用限界」とは、「実用面での適用性を保持した上での混入量の限界」と定義する。

表-1 フライアッシュの品質

項目 品種	強熱減量 [750°C] (%)	MB 吸着量 (mg/g)	ガラス 化率 (%)	化学成分		比重	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	フロー 値比 (%)	活性度指数	
				SiO <sub>2</sub> (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%)				28日 (%)	91日 (%)
FA1	2.8	0.61	64	58.5	26.6	2.25	3800	99	91	100
FA2	1.1	0.25	72	61.5	25.1	2.23	3210	102	84	98
FA3	3.8	0.36	54	51.4	36.2	2.16	3750	98	95	91
JIS規格	5≧	—	—	45≦	—	1.95≦	2400≦	92≦	80≦	90≦

## 2. 使用材料

フライアッシュは、海外炭から産出された JIS 規格を満足する 3 品種を対象とした。

表-1 にフライアッシュの品

質を示す。表より、主な品質の違いは強熱減量およびガラス化率である。ガラス化率は、X線回折結果を定量化したもので、ガラス (SiO<sub>2</sub> や Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) と結晶 (石英やムライト) の相全体におけるガラスの比率である。強熱減量から推定した未燃焼炭素の含有量、およびガラス化率から推定した結晶の含有量は、ともに多いものから順に FA3、FA1、FA2 であることがわかる。写真-1,2,3

\*1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)

\*2 竹本油脂(株) 第三事業部 (正会員)

\*3 名古屋工業大学講師 工学部社会開発工学科 工博 (正会員)

\*4 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 Ph.D. (正会員)

に、粒子形状を観察した光学顕微鏡写真（写真-1,2は位相差法、写真-3は偏光法）を示す。ガラスは表面が滑らかな球形の粒子であるのに対して、未燃焼炭素や結晶は不定形の粒子であり、不定形の粒子がコンクリートの流動性を低下させるとと思われる。

セメントは、3種類の普通ポルトランドセメント（平均比重3.15）を混合して使用した。細骨材は山砂（表乾比重2.55、F.M.=1995年：2.73，1996年：2.76）を、粗骨材は碎石（表乾比重2.64，Gmax=20mm）を使用した。混和剤には、A E減水剤または高性能A E減水剤を使用し、それぞれA E助剤を併用した。A E減水剤は、コンクリートの流動性をA E減水剤の添加率で評価するため、空気非連行性のものを使用した。また、高性能A E減水剤は、ポリカルボン酸系がフライアッシュに最も吸着されにくい性能を有することから、ポリカルボン酸系を使用した[1]。

### 3. 試験概要

#### 3. 1 検討項目および試験項目

本研究の検討項目は、①フライアッシュの品種による適用限界、②細骨材との置換方法による適用限界、③混和剤の種類による適用限界である。以下に、その概要を述べる。

我が国の使用する石炭の主流が海外炭であるのに加え、NO<sub>x</sub>やCO<sub>2</sub>の発生量を抑制するため燃焼条件を厳密に調整する必要があることから、フライアッシュは低品質化・バラツキの拡大傾向にある。そこで①では、3種類のフライアッシュを対象として検討した。

フライアッシュを細骨材と置換して使用した場合、コンクリート中の総粉体量が増加し、流動性および空気連行性の低下が懸念される。本研究では、それを抑制するためには、細骨材中の微粒分量の低減が有効であると考えた。そこで②では、細骨材との置換において、無作為に細骨材の一部と置換する方法（Sシリーズ）と細骨材の微粒分と置換する方法（PSシリーズ）の2通りの置換方法を比較した。なお、使用した細骨材のふるい分け試験結果（0.15mm以下=5%，0.15～0.3mm=20%）を考慮して、PSシリーズでは、0.3mmのふるいを通過する分を細骨材の微粒分とし、ふるい目の細かなものから順に置換した。

③では、フライアッシュを多量に混入したコンクリートの実用面での適用性を明らかにするため、A E減水剤と高性能A E減水剤を使用した場合の両者について一般的な土木用コンクリートへの適用性を評価した。

これらすべての検討項目に対して、基礎的なコンクリートの物性試験としてスランプ試験、空気量試験、ブリーディング試験、凝結硬化試験、圧縮強度試験を行った。

#### 3. 2 配合設計

示方配合表を表-2に示す。試験は1995年と1996年の2年間にわたって実施した。フライアッシュを用いたコンクリートの配合は、フライアッシュがコンクリートに与える影響を置換率をパラメータとして検討するため、次のように決定した。まず、フライアッシュ無混入のコンクリー

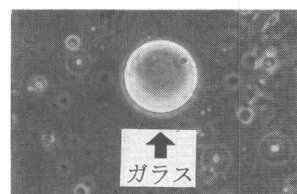


写真-1 ガラスの粒形(×400)

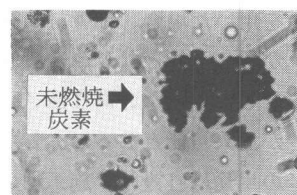


写真-2 未燃焼炭素の粒形(×400)



写真-3 結晶(ムライト)の粒形(×400)

表-2 示方配合表とフレッシュ性状

混和剤種	置換方法	FA 品種	置換率	その他	Series	s/a (%)	配合						スランプ (cm)	空気量 (%)	ポリマー添加率 (%)	凝結 (分)																		
							W	C	FA	S	G	A E 減水剤				A E 助剤		始発	終結															
							(kg/m <sup>3</sup> )					(%)				(g/m <sup>3</sup> )	(%)			(g/m <sup>3</sup> )														
		AE			45		292	0	788	998	0.4	1168	0.005	14.6	11.5	5.1	1.93	500	650															
		C- FA1- 30			43	175	204		1016		0.3	876	0.03	87.6	14.0	8.2																		
		S- FA1- 05																		88	742													
		PS- FA1- 05																		122	704													
		S- FA1- 15																		187	630					0.6	2346	0.03	117.3	8.0	4.0	13.68	1855	2185
		PS- FA1- 15																																
		S- FA1- 25																		252	556						2736		136.8	3.5	2.2	8.76	1540	1900
		PS- FA1- 25																												5.5	2.9	12.65	1250	2160
		C- FA2- 30																		88	740						584		43.8	13.5	7.0	9.57	775	980
		S- FA2- 05																		121	701						650		48.8	14.0	4.6	7.77	650	815
		PS- FA2- 05																												13.0	4.4	6.01	605	785
		S- FA2- 15																		184	627						776	0.015	58.2	11.5	2.8	5.58	365	720
		PS- FA2- 15																												12.5	6.0	7.51	725	900
		S- FA2- 25			247	553						1804		67.7	9.5	4.2	9.33	1265	1470															
		PS- FA2- 25													14.5	6.6	13.69	1370	1590															
		AE *			45		275	0	806	1022	0.2	550	0.003	8.30	13.0	4.4	7.36	450	590															
		C- FA1- 30																																
		C- FA2- 30					83		760	1040	0.12	330	0.009	24.8	14.5	5.0	10.04	555	755															
		C- FA3- 30 *							1038																									
		S- FA3- 05					757				0.2	550		44	11.5	5.5	11.78	555	735															
		PS- FA3- 05					115	719				614	0.016	49.1	10.0	3.3	10.33	520	755															
		S- FA3- 15							1040						11.0	3.6	10.97	570	745															
		PS- FA3- 15 *					180	643				1488		59.5	6.0	3.1	10.86	1080	1240															
		S- FA3- 25													8.0	3.3	14.21	1110	1330															
		PS- FA3- 25					243	569				1740	0.02	87	0.5	1.5	10.12	1050	1380															
		H- S- FA2- 15			43	165	192	181	643		0.5**	1865	0.008	29.8	13.5	5.2	5.81	390	550															
		H- PS- FA2- 15													14.5	6.6	6.07	545	735															
		H- S- FA2- 45-No.1*					375	416			0.65**	3686	0.007	39.7	9.5	3.8	1.26	705	925															
		H- PS- FA2- 45													9.5	3.1	1.23	705	895															
		N- PS- FA3- 15 *			43	175	204	183	627	1014	0.2	774	0.018	69.7	7.5	4.0	7.95	635	850															
		H- S- FA3- 15 *			44	160	187	179	668	1032	0.75**	2745	0.006	22.0	7.0	4.1	4.42	635	820															
		H- S- FA2- 45-No.2*			48	170	198	408	459	937	0.9**	5454	0.005	29.4	22.0	6.5	0	820	1040															
		H- S- FA2- 45-No.3*									1.0**	6060	0.004	24.2	25.5	6	0	975	1210															

\*: 検討項目③にも含む。 \*\*: 高性能 A E 減水剤の添加率

【備考】二重線より上は1995年、下は1996年に実施。

ト (以下、AEシリーズと称す) の配合をもとに、フライアッシュをセメントに対してのみ置換 (質量比で 30%) したコンクリート (以下、Cシリーズと称す) を基本配合とした。次に細骨材と置換してフライアッシュを加えることで多量混入の配合を決定した。

①および②では、A E 減水剤を使用し、細骨材に対する置換率 (以下、細骨材置換率と称す) は容積比で 5%、15%、25% の 3 水準とした。なお、②では、高性能 A E 減水剤を使用した場合も 15% と 45% について検討した。③では、②の結果をふまえて細骨材置換率を 15% と 45% にした。

AEシリーズの配合は、レディーミクストコンクリートでよく用いられる呼び強度 24N/mm<sup>2</sup> を設定し、配合強度を 29N/mm<sup>2</sup> として、水セメント比は 60% にした。また、各シリーズの水結合材比 (セメントと置換したフライアッシュは結合材量に含む) は、60% で一定とした。

①および②の目標のスランプ、空気量は、それぞれ 12 ± 2.5cm、4.5 ± 1.5% とした。各置換率の単位水量および s/a (細骨材と置換したフライアッシュは細骨材量に含む) は一定とし、スランプおよび空気量の補正は混和剤の添加率で調整した。ただし、A E 減水剤の過剰添加は凝結遅延を伴うため、A E 減水剤の添加率には上限を設けた (1995年は 0.6%、1996年は 0.4%)。また、各置換率における Sシリーズおよび PSシリーズの混和剤の添加率は一定とした。

③の目標スランプおよび空気量は、一般的な土木用コンクリートを対象としてそれぞれ 8 ± 2.5cm、4.0 ± 1.0% とした。また、混和剤の添加率は標準使用量とし、s/a は試し練りによってスランプが最大となる値を求め、スランプの補正は単位水量の調整で行った。

#### 4. 試験結果と考察

##### 4. 1 フライアッシュの品種による適用限界

図-2に細骨材置換率とAEシリーズに対するAE減水剤添加量の比率(AEシリーズの添加量を1とする)の関係を示す。図に示すように、置換率の増加に伴って、目標スランプを得るためのAE減水剤添加量は増加した。この傾向は、FA3、FA1、FA2の順で顕著となった。これは、表-1の強熱減量およびガラス化率と相関があり、粒形が不定形である未燃焼炭素と結晶が、流動性の低下を招くことが主な原因と思われる。

図-3に細骨材置換率とAEシリーズに対するAE助剤添加量の比率の関係を示す。なお、AE助剤の添加率の比率は、各シリーズの空気量が目標の4.5%となるように添加率を補正した値をもとに算出した。図に示すように、置換率の増加に伴って、目標空気量を得るためのAE助剤添加量は著しく増加し、この傾向は、FA1、FA3、FA2の順で顕著となった。これは、表-1のメチレンブルー吸着量と相関がある。メチレンブルー吸着量およびAE剤吸着量は、単に未燃焼炭素の含有量に支配されるのではなく、炭素の吸着能力によると思われる[2]。

以上のことから流動性の面では、強熱減量が小さくガラス化率が大きな品種ほど、また空気連行性の面では、メチレンブルー吸着量が少ない品種ほど多量の混入が可能といえる。

##### 4. 2 細骨材との置換方法による適用限界

図-4にスランプ試験結果を、図-5に空気量試験結果を示す。図に示すとおり、ほとんどの水準で流動性および空気連行性ともにPSシリーズがSシリーズを上回った。細骨材置換率15、25%のときには、特に流動性の向上に大きなメリットがあった。例えば、FA1の細骨材置換率15%において、SシリーズのスランプはAE減水剤の添加率が上限の0.4%で目標を逸脱したのに対し、PSシリーズは同じ添加率で目標値が得られた。これは、細骨材の微粒分との置換により、細骨材の

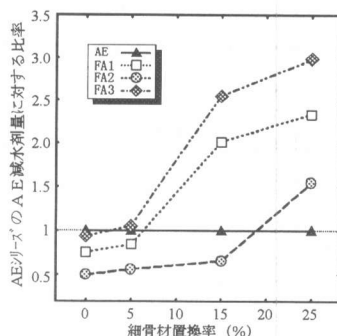


図-2 置換率とAE減水剤添加量の関係

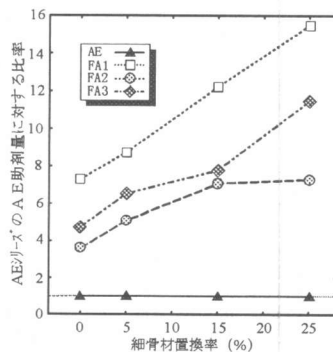
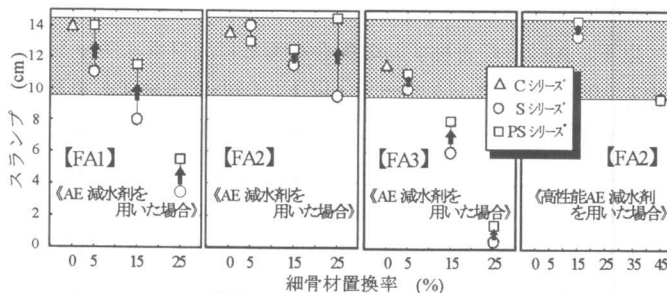
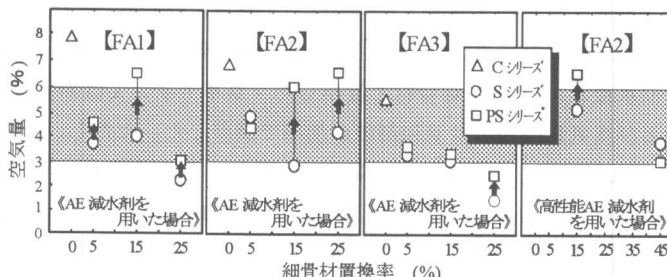


図-3 置換率とAE助剤添加量の関係



※図中のメッシュは目標スランプの許容範囲を示す

図-4 スランプの比較



※図中のメッシュは目標空気量の許容範囲を示す

図-5 空気量の比較

総表面積が減少し、骨材の表面に付着する水が減る分自由水が増加して、流動性が向上したものとされる。また、空隙を形成しやすい粗い粒子が多くなるために空気の連行が向上したものとされる。以上のことから、細骨材の微粒分との置換は、細骨材中の微粒分量を低減し、流動性および空気連行性の面でフライアッシュの混入量の増大を可能とするといえる。

高性能AE減水剤を用いた場合、PSシリーズは細骨材置換率15%のときには流動性および空気連行性ともに向上した。細骨材置換率45%のときにはSシリーズとPSシリーズの差はなく、また、Sシリーズでも目標のスランプと空気量が得られた。ただし、45%置換のコンクリートは著しく粘性が高く、一般的な土木用コンクリートとしては打設困難なコンクリートとなった。これは、コンクリート中の粉体量が大幅に増加したためと思われる。以上のことから、高性能AE減水剤を用いた場合は、混和剤の添加率の調整により目標のスランプと空気量を有したコンクリートが得られるが、置換率の大幅な増加はコンクリートの粘性を著しく高めることが明らかとなった。

#### 4.3 混和剤の種類による適用限界

##### (1) 細骨材置換率15%

前節で、フライアッシュの混入量の限界は、いずれの品種においても、PSシリーズならば細骨材置換率15%以上であることが明らかとなった。そこでここでは、細骨材置換率15%のコンクリートについて、混和剤を変えることによって、一般的な土木用コンクリートとしての適用性を検討した。シリーズは、混和剤の特性を生かし、AE減水剤を使用した場合はPSシリーズ（以下、N-PSシリーズ）、高性能AE減水剤を使用した場合はSシリーズ（以下、H-Sシリーズ）とした。フライアッシュの品種としては、細骨材置換率15%で混入の限界となるFA3とした。

フレッシュ性状の各種試験結果は表-2のとおりであり、N-PSシリーズ、H-Sシリーズともに、スランプと空気量は目標範囲内となった。また、前節の細骨材置換率45%のコンクリートのように、打設に支障をきたすほどの高い粘性もなかった。図-6にブリーディング率の経時変化を示す。ブリーディング率は、N-PSシリーズはAEシリーズとほぼ同じであり、H-SシリーズはAEシリーズよりも3%程度低かった。また、終結時間は表-2に示すように、ブリーディングの経時変化に対応し、両者ともAEシリーズより4時間程度、Cシリーズより2時間程度遅れた。

図-7に圧縮強度試験結果を示す。すべての材齢において、N-PS、H-SシリーズともにCシリーズを上回り、フライアッシュを細骨材と置換することで、強度が増進しただけでなく、初期強度も改善された。また、材齢28日では、N-PSシリーズは呼び強度 $24\text{N/mm}^2$ を超え、H-Sシリーズは $24\text{N/mm}^2$ をわずかに下回った。H-Sシリーズの強度が低いのは、単位セメント量がN-PSシリーズに比べて $17\text{kg/m}^3$ 小さいためと思われる。したがって、単位セメント量を多くすることによってPSシリーズと同等の良好な強度が得られると思われる。

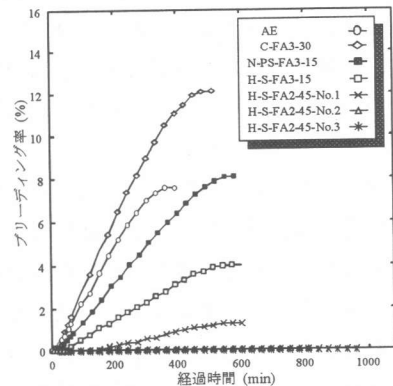


図-6 ブリーディング率の経時変化

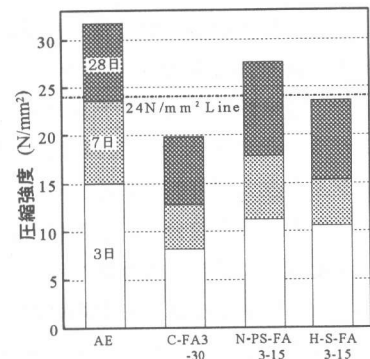


図-7 圧縮強度の比較

表-2に示すように、細骨材置換率を15%とした場合、セメントと同程度の量のフライアッシュの混入となる。したがって、セメントと同程度の量のフライアッシュを混入したコンクリートは、AE減水剤を使用する場合にはフライアッシュを細骨材の微粒分と置換し、高性能AE減水剤を使用する場合には添加率を調整することによって、一般的な土木用コンクリートとして適用可能といえる。

## (2) 細骨材置換率45%

前節で細骨材置換率45%のフライアッシュ(FA2)を混入したコンクリートは、著しく粘性が高く打設困難であ

った。ここでは、高性能AE減水剤の添加率を上げ、単位水量も増すことで粘性の緩和を試みた。表-2のH-S-FA2-45-No.2がそれである。表-3にそのフレッシュ性状を示す。しかし、粘性は改善されず、ブリーディング率がゼロという新たな問題が生じた。そこで、その過剰な粘性を利用して、材料分離抵抗性を必要とする高流動コンクリート(H-S-FA2-45-No.3)へ適用した。

表-3に示すように、フロー値は、高流動コンクリートの一般的な範囲の値が得られた。写真-4は、スランプフロー試験後のフレッシュコンクリートの状態を示す。円の中心に多少粗骨材が多く残ったが、骨材は隅まで行き渡り、良好な材料分離抵抗性をもつといえる。また、50cmフロー時間は9.6秒となり、やや粘性の高い高流動コンクリートであるといえる。凝結時間はAEシリーズの2倍程度を要し、遅延現象が見られた。細骨材置換率を45%とした場合、セメントの2倍程度の量のフライアッシュの混入となる。したがって、セメントの2倍程度の量のフライアッシュを混入したコンクリートは、打設時の施工性の面では高流動コンクリートへの適用が最適であるといえる。

表-3 S-FA2-45のフレッシュ性状

Series	スランプ または フロー (cm)	フロー時間(S)		空気量 (%)	ブリーディ ング率 (%)	凝結(分)	
		50cm	最終			始発	終結
H-S-FA2-45-No.1	9.5	—	—	3.8	1.26	705	925
H-S-FA2-45-No.2	22	—	—	6.5	0	820	1040
H-S-FA2-45-No.3	70*65	9.6	57.0	6.0	0	975	1210

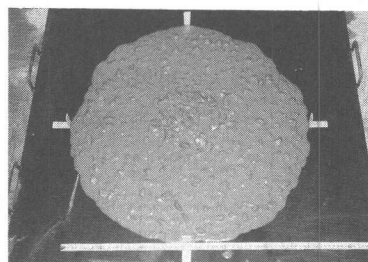


写真-4 スランプフローの状態

## 5. まとめ

- (1) AE減水剤添加量は強熱減量およびガラス化率に、AE助剤添加量はメチレンブルー吸着量に相関があり、強熱減量およびメチレンブルー吸着量が小さく、ガラス化率が大きな品種ほどより多量のフライアッシュの混入が可能となる。
- (2) 細骨材の微粒分との置換は、無作為に細骨材の一部と置換した場合に比べ、コンクリートの流動性および空気連行性を向上させ、より多量のフライアッシュの混入を可能とする。
- (3) AE減水剤を使用した場合は、細骨材の微粒分と置換することでセメントと同程度の量(細骨材置換率15%)のフライアッシュの混入が可能となり、一般的な土木用コンクリートとして適用可能である。
- (4) 高性能AE減水剤を使用した場合は、添加率の調整でセメントの2倍の量(細骨材置換率45%)のフライアッシュが混入可能となった。しかし、粉体量の増加により粘性が著しく増加するため、その用途は打設時の施工性の面では高流動コンクリートが最適である。

## 参考文献

- [1] 鳥羽瀬孝臣ほか：フライアッシュを用いた高流動コンクリートの開発、建設用原材料, Vol.6, No.1, pp.20-27, 1996
- [2] 長滝重義：フライアッシュペーストの流動性と高性能減水剤の吸着、セメント技術年報, Vol.36, pp.57-60, 1982