

[1001] 分級フライアッシュを混入したコンクリートの基礎物性

浮田和明（四国総合研究所）

正会員 石井光裕（四国総合研究所）

正会員 ○ 重松和男（鹿島建設技術研究所）

正会員 野尻陽一（鹿島建設技術研究所）

1. はじめに

近年、石油代替エネルギーとして石炭が見直され、火力発電所における石炭使用量の増加に伴い副生される石炭灰の発生量は飛躍的に増大してきている。しかし、石炭灰の処理あるいは利用に関しては、埋立処理、セメント原料としての利用が主流を占め、コンクリート混和材としての有効利用は、以前のようには広く行われていないのが実状と考えられる。

コンクリート混和材としてみた場合、近年のフライアッシュは、①固定炭素が多く融点の高い海外炭の使用が急増していること、②環境規制の強化（SOx, NOx 対策）に伴い、燃焼温度が低めになっていること等のため、従前のフライアッシュに比べ品質のバラツキが指摘されている[1]。

本研究は、このような情勢を踏まえて、フライアッシュの品質の向上及びバラツキを少なくするために、原粉を分級することにより細粒化したフライアッシュ（以後“分級フライアッシュ”と呼ぶ）は、①数ミクロンオーダのものが多く含まれていること、②しかも、これらの殆どは球形を呈していること（写真-1 参照）、等の特徴を有することに着目し、これをコンクリートに混和した場合、強度を始め品質改善に寄与することが考えられ、研究の第一段階として、フレッシュコンクリート及び硬化コンクリートの基礎物性について検討した。

2. 実験概要

2.1 使用材料

本実験に使用した材料は、普通ポルトランドセメント（N社、O社、S社の等量混合：比重=3.16、ブレン値=3240 $\text{cm}^2/\text{g}$ ）、四国電力備西条火力発電所製の原粉1種類（市販品）、分級フライアッシュ2種類（FA20：最大粒径20 $\mu\text{m}$ 、FA10：最大粒径10 $\mu\text{m}$ ）、富士川産川砂と木更津産山砂を8:2に混合した細骨材（比重=2.62、吸水率=2.30%、FM=2.84）、青梅産硬質砂岩碎石（最大寸法=20 $\text{mm}$ 、比重=2.64、吸水率=0.78%、FM=6.77）及びリグニンスルホン酸塩ポリオール複合体のAE減水剤である。分級フライアッシュの製造は、形状特性を損なわずかつ、オンラインによる大量処理が可能な気流分級方法により行ったものであり、その粒子形状は写真-1に、物理的・化学的特性は表-1に示すとおりである。

表-1 分級フライアッシュの物理・化学的性質

種類	物理的性質			化学的性質			
	比重	粉末度 ( $\text{cm}^2/\text{g}$ )	平均粒径 ( $\mu\text{m}$ )	Ig. loss (%)	SiO <sub>2</sub> (%)	湿分 (%)	メチレンブルー 吸着量 (mg/g)
原粉	2.28	3310	12.3	2.1	61.2	0.2	0.97
FA 20	2.40	5960	4.6	1.3	57.8	0.1	1.07
FA 10	2.54	9700	3.6	1.6	56.5	0.2	1.39

## 2.2 配合条件

コンクリートの配合は、水結合材比を一定(50%)としスランブを8cm, 16cmの2種類とした(表-2)。

## 2.3 試験項目

コンクリートの試験項目一覧を表-3に示す。

## 2.4 試験方法

### (1) 練り混ぜ

コンクリートの練り混ぜは20℃恒温室においてパン型強制練りミキサ(容量50l)を用いて細骨材, セメント(フライアッシュを含む), 粗骨材及び水(混和剤を含む)の順に投入し, 全材料投入後連続して120秒練り混ぜた。

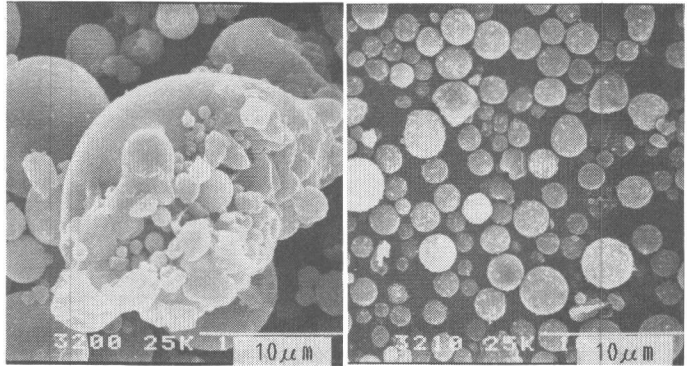
### (2) コンクリート試験方法

表-3に示す試験は, 原則としてJISの方法に従い, 静弾性係数試験及び圧縮クリープ試験についてはJIS原案に示す方法に従い行った。

## 3. 試験結果及び考察

### 3.1 配合試験

試し練りにより決定したコンクリートの配合及びまだ固まらないコンクリートの性質を表-4に示す。



(a) 原粉 (b) 分級フライアッシュFA10

写真-1 フライアッシュの粒子形状(SEM像)

表-2 配合条件

配合種別	骨材最大寸法 (mm)	水結合材比 W/C+F (%)	フライアッシュ 混和率 F/C+F (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)
土木配合	20	50	0, 15, 30	8±1.0	4±0.5
建築配合	20	50	0, 15, 30	16±1.0	4±0.5

表-3 試験項目一覧

フライアッシュの種別	PL	原粉		FA20		FA10	
混和率(%)	-	15	30	15	30	15	30
配合試験	○	○	○	○	○	○	○
スランブ	○	○	○	○	○	○	○
空気量	○	○	○	○	○	○	○
単位容積重量	○	○	○	○	○	○	○
温度	○	○	○	○	○	○	○
ブリージング	○	○	○	○	○	○	○
圧縮強度	○	○	○	○	○	○	○
曲げ強度	○	○	○	○	○	○	○
引張強度	○	○	○	○	○	○	○
静弾性係数	○	○	○	○	○	○	○
圧縮クリープ	○	○	○	-	-	○	○
乾燥収縮	○	○	○	●	●	●	●

注1) PLは、プレーン配合である。  
 注2) 圧縮強度試験の材令は、1, 2, 4W, 3M, 6M, 1Yである。  
 注3) 曲げ, 引張強度および静弾性試験の材令は、4Wである。  
 注4) 乾燥収縮試験の●印は、土木配合のみ実施した。

表-4 配合試験結果

コンクリート種別	フライアッシュ割合(%)	土木配合												建築配合											
		目標値												目標値											
		スランブ 8±1 cm		単位量 (kg/m³)										スランブ 16±1 cm		単位量 (kg/m³)									
W/C+F	S/a	W	C+F	S	G	No70	303A	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	単位容積重量 (kg/m³)	W/C+F	S/a	W	C+F	S	G	No70	303A	スランブ (cm)	空気量 (%)	温度 (°C)	単位容積重量 (kg/m³)		
-	-	50	45.0	165	330	815	1003	825	13.2	8.8	3.9	20.5	2334	50	44.0	174	348	778	1001	870	11.8	16.7	4.1	20.5	2326
15	原粉	50	44.5	157	314	815	1022	785	18.8	8.0	3.7	20.0	2326	50	43.5	171	342	770	1006	855	27.4	15.9	3.9	20.0	2308
	FA20		44.0	156	312	807	1038	790	34.7	9.0	4.1	20.0	2333		43.0	169	338	765	1022	845	47.3	16.9	3.5	20.0	2313
	FA10		44.0	153	306	815	1045	765	42.8	8.9	3.9	20.0	2341		43.0	167	334	770	1027	835	50.1	16.8	3.6	20.0	2323
30	原粉	50	43.5	153	306	796	1043	765	36.7	9.0	4.3	21.0	2323	50	42.5	170	340	747	1016	850	51.0	15.6	4.4	20.5	2298
	FA20		43.0	153	306	789	1056	765	85.7	8.8	4.1	20.5	2319		42.0	166	332	747	1040	830	93.0	16.3	4.3	20.5	2296
	FA10		43.0	150	300	796	1067	750	96.0	8.5	4.4	20.5	2333		42.0	165	330	752	1045	825	106.0	15.3	4.2	20.5	2304

### (1) 単位水量

単位水量は、フライアッシュを混和することにより減少するが、その程度はフライアッシュが細粒になるほど（原粉，FA20，FA10の順に）大きくなっている（図-1）。

分級フライアッシュの減水量は、土木用配合では、FA20の場合、混和率15%、30%いずれも原粉と同程度であるが（8～12kg/m<sup>3</sup>），FA10になると12～15kg/m<sup>3</sup>となり、減水効果が大きくなっている。建築用配合

の場合の減水量は原粉の3～4kg/m<sup>3</sup>に比べ、FA20では5～8kg/m<sup>3</sup>，FA10では7～9kg/m<sup>3</sup>である。このように分級フライアッシュを混和することにより、単位水量を低減することができるが、これは、フライアッシュ自体の減水効果（別途行った実験結果によれば、単位水量比99%）と細骨材率の低減（無混和のものより、土木用、建築用いずれも、15%混和で1%30%混和で2%減少）による減水効果である。

### (2) 単位結合材量

前述のように、分級フライアッシュを混和することにより単位水量を減少できるので、同一強度を得るための単位結合材量を減少することができる（図-1）。その減少量は、フライアッシュの分級の程度及び混和率により異なるが、土木用配合の場合を例に述べれば、16～30kg/m<sup>3</sup>である。原粉と分級フライアッシュを比較すれば、原粉の16～24kg/m<sup>3</sup>に比べ、FA10では24～30kg/m<sup>3</sup>となり、減少量は大きくなる。

### (3) AE 剤量

補助AE剤量は、図-2から明らかなように、フライアッシュの粒径が小さくなるほど増加し、原粉に比べ、分級フライアッシュの場合は1.8～2.6倍になった。この原因は、粒径が小さくなるほど未燃カーボン量の指標となるメチレンブルー吸着量が増加していることから、フライアッシュの中の未燃カーボン量の影響と考えられる。

#### 3.2 ブリージング

図-3に示したブリージング試験結果から明らかなように、分級フライアッシュを用いたコンクリート（土木用配合）は、いずれも、ブリージング量・率とも無混和のものより小さく、かつ混和率の高いほうが小さくなっている。また、分級により細粒化するほどブリージング量・率と

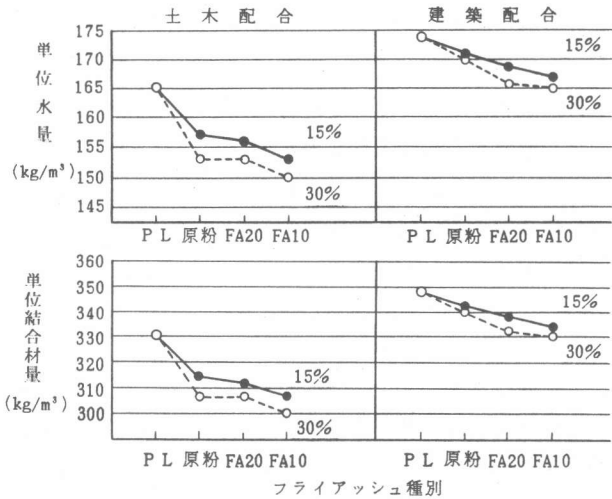


図-1 各フライアッシュと単位水量及び単位結合材量との関係

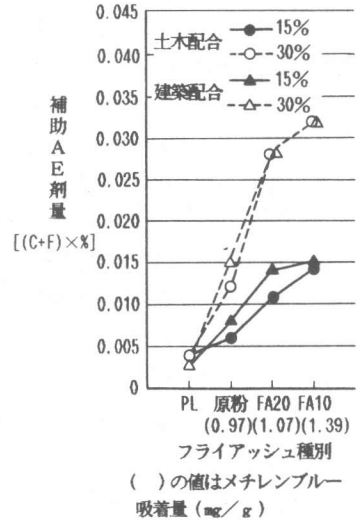


図-2 各フライアッシュと補助AE剤量との関係

も減少している。

一方、建築用配合では、原粉を30%混和した場合のブリージングが無混和の場合よりも大きくなったが、分級フライアッシュの場合は土木用配合のものと同様な傾向を示している。

### 3.3 圧縮強度・引張強度・曲げ強度

圧縮強度、引張強度及び曲げ強度試験結果を図-4～5に示す。

フライアッシュを混和したコンクリートの圧縮強度は、材令と共に大きくなり、その強度比（無混和の強度を100とした場合の比率）は材令28日ではフライアッシュ混和率15%で土木用配合が約90%、建築用配合が約88%であり、混和率30%では、夫々73%、70%となっている。

これが、材令3ヶ月以上になると、混和率15%では土木用配合、建築用配合いずれも約100%以上となっている。

この強度発現性は、フライアッシュを分級することにより、その粒径が小さくなるに従い、若干優れている傾向を示しているようである。

一方、混和率30%の場合は、短期材令においては、強度比が低くなる。

引張強度及び曲げ強度は、いずれのフライアッシュも混和率15%では、土木用・建築用配合とも無混和に比べやや低い程度で大きな差はないと言えよう。

図-6は、材令28日における

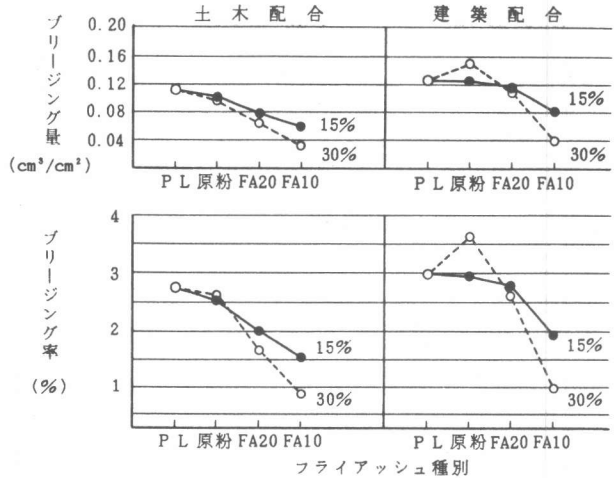


図-3 ブリージング試験結果

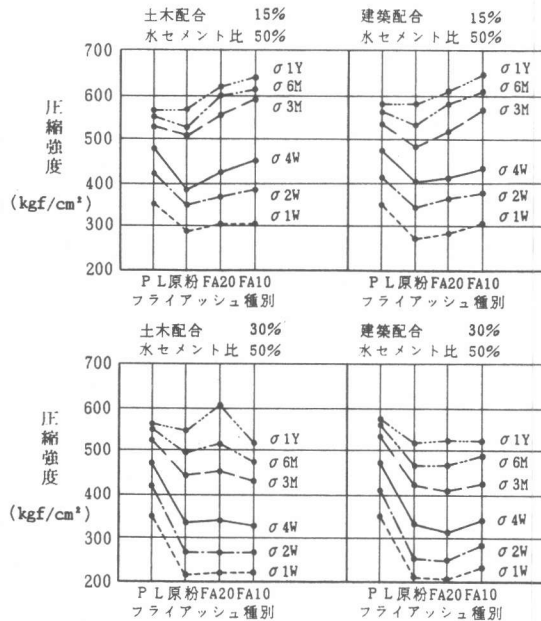


図-4 圧縮強度試験結果

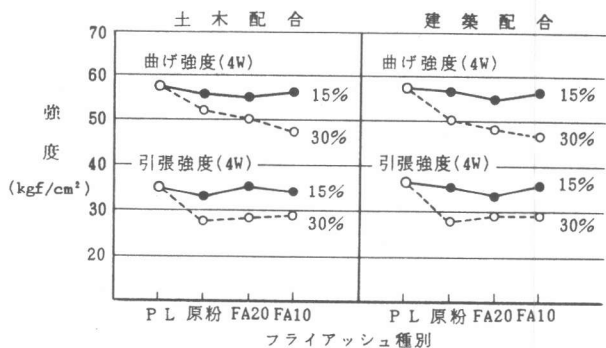


図-5 曲げ・引張強度試験結果

コンクリートの引張強度と圧縮強度との関係を示したものである。同図における破線は土木学会コンクリート標準示方書設計編（RC示方書）に示されている関係式を表示したものである。分級フライアッシュを混和したコンクリートの引張強度は、圧縮強度300～500kgf/cm<sup>2</sup>の範囲においては、圧縮強度の1/12～1/13であり、いずれもRC示方書の関係式より大きくなっている。このことは、分級フライアッシュを混和したコンクリートの引張強度は、普通コンクリートの場合と同様に扱って良いと考えられ、この場合安全側になる。

図-7は、曲げ強度と圧縮強度との関係を土木学会RC示方書で与えられている関係式（破線）と共に示したものである。分級フライアッシュを混和したコンクリートの曲げ強度は、圧縮強度の1/7～1/8であり、RC示方書の関係式を上回っている。曲げ強度に関しても、普通コンクリートにおける関係式を用いても問題ないと考えられる。

### 3.4 静弾性係数

図-8に、静弾性係数試験結果を示す。図-8より、静弾性係数は土木用・建築用配合いずれもフライアッシュの混和の有無及び分級の程度により大きな差はないと考えられる。

図-9は、静弾性係数と圧縮強度との関係を示したものである。図-9より、分級フライアッシュを混和したコンクリートの静弾性係数は普通コンクリートとほぼ同様に扱って良いと考えられる。

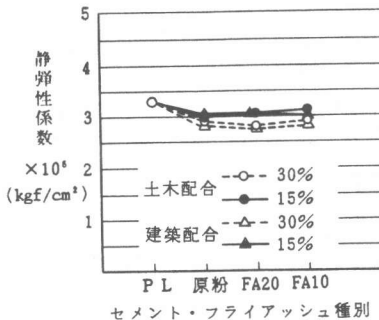


図-8 静弾性係数試験結果

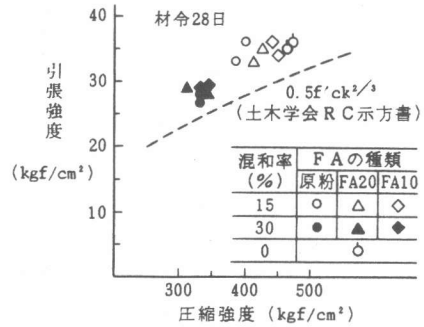


図-6 引張強度と圧縮強度との関係

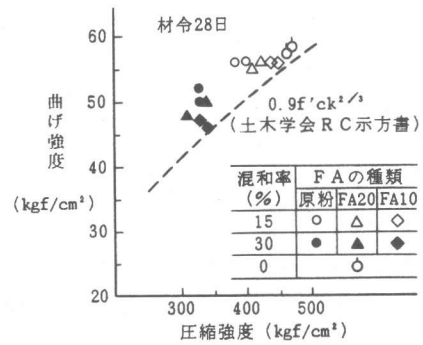


図-7 曲げ強度と圧縮強度との関係

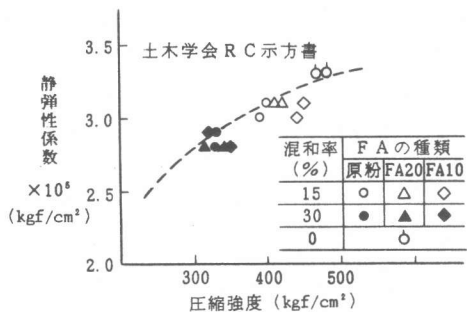


図-9 静弾性係数と圧縮強度との関係

### 3.5 圧縮クリープ

図-10に、クリープ係数の経時変化を示す。載荷日数300日におけるクリープ係数は、分級フライアッシュ無混和の場合2.3程度であるが、原粉を15%混和した場合は、2.2であり無混和の場合と大きな差はないが、分級フライアッシュを15～30%混和することにより、1.9～1.6に減

少した（無混和に対する比率69～80）。

これらのことは、分級フライアッシュを混和することにより、コンクリートのマトリックスがより緻密な構造になったことを示唆していると考えられる。

### 3.6 乾燥収縮

図-13にフライアッシュの混和率と乾燥収縮との関係を示す。フライアッシュの混和率が増加するに従い乾燥収縮は減少する傾向を示す。この傾向は長期材令になるほど顕著である。一方、フライアッシュの分級の程度が乾燥収縮に及ぼす影響は少ないようである。

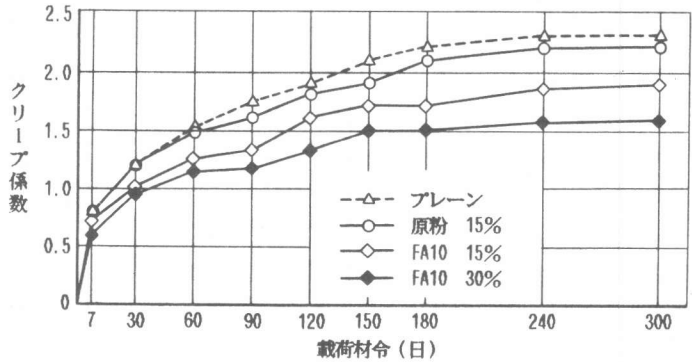


図-10 クリープ係数の経時変化（土木用配合）

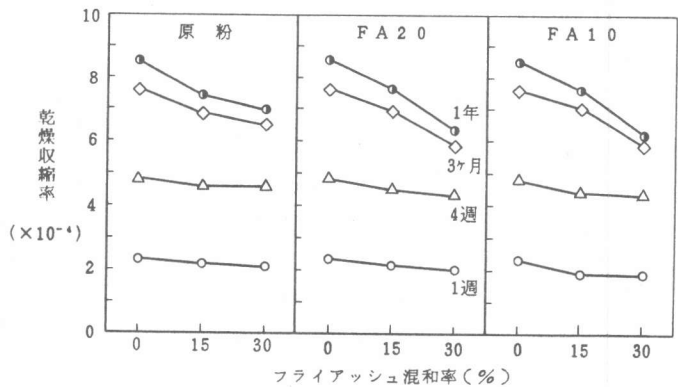


図-11 乾燥収縮に及ぼすフライアッシュの影響（土木用配合）

## 4. ま と め

本実験の範囲内で、次のことが明らかになった。

- (1) 分級フライアッシュを混和することにより、コンクリートの単位水量を低減することができ、それに伴いブリージングも減少する。その傾向は、分級により細粒化されるほど大きい。
- (2) 分級フライアッシュを混和することにより、水結合材比が一定の場合は、単位結合材量を減少できる。
- (3) 所定の空気量を得るためのAE剤使用量は、フライアッシュが細粒になるほど増加する。
- (4) 分級フライアッシュを混和することにより、圧縮強度は短期材令（材令28日まで）において無混和のものより若干低下するが、長期材令においては無混和の強度を上回る。この強度発現性は、原粉よりも分級により細粒化されるほど優れている傾向を示す。引張強度、曲げ強度、静弾性係数については、フライアッシュの混和の有無及び分級の程度による差はほとんどなく、普通コンクリートと同等と考えて良い。
- (5) クリープ係数は、原粉を混和した場合は無混和の場合と同等であるが、分級フライアッシュを混和することにより、減少する。
- (6) 乾燥収縮は、フライアッシュの混和率が増加するに従い減少する傾向を示すが、原粉と分級フライアッシュの差はほとんど認められない。

### <参考文献>

- (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, pp.197～pp.200, 1985。