

[49] 石炭灰のコンクリート用混和材としての適用性

正会員 ○鳥居和之（金沢大学工学部）

正会員 川村満紀（金沢大学複合材料センター）

正会員 楠場重正（金沢大学工学部）

谷口公一（間組）

1. まえがき

近年、石炭火力発電所より副産物として多量に発生する石炭灰の有効利用について大きな関心が寄せられている。石炭灰は採取場所によりフライアッシュ、シンダーアッシュおよび炉底灰に分類されているが、それらの物理的および化学的性質は微粉炭の品質や燃焼方式などにより大きく相違することが知られている¹⁾。コンクリート用混和材としてマスコンクリートなどに利用されてきたフライアッシュについては、NO_x規制による石炭燃焼温度の低下や海外炭の使用の増大などの要因によるフライアッシュ中の未燃炭素分や粒子形状の変化が問題点として指摘されている²⁾。このような現状において、有効利用があまり検討されていないフライアッシュ粗粉の利用、最近のフライアッシュの物理的および化学的性状とコンクリート用混和材としての利用法について再検討しておくことが必要であると考えられる。

このような観点より、本研究は、フライアッシュの物理的および化学的性状とポゾラン材料としての性能について比較検討するとともに、比較的多量のフライアッシュをコンクリートに混入させた場合のワーカビリティ、ブリージング、A E剤による空気連通性、強度特性および凍結融解に対する抵抗性について検討を行ったものである。

2. 実験概要

石炭専焼火力発電所（T火力）より供給された2種類のフライアッシュおよび炉底灰粉末の化学成分および物理的性状を表-1に示す。SEMによる粒子形状の観察（写真-1参照）より、フライアッシュ細粉（主に10 μm前後の粒子）および粗粉（10～100 μmの範囲の粒子）の形状はほとんど球形であるが、粗粉中には不規則な形状の粒子、未燃カーボンおよび中空状の粒子（CenosphereおよびPlerosphere）が多く観察される。コンクリート用の細骨材および粗骨材は早月川産の川砂（比重：2.61、吸水率：1.3%、F.M.：2.46）および砕石（比重：2.69、吸水率：0.8%、F.M.：7.13）である。使用セメントは普通ポルトランドセメント（N社）であり、A E剤はビンソールレジン（Y社）を使用した。

JIS A 6201に基づいて作成したフライアッシュモルタルは所定材令にて圧縮および曲げ強度試験を行うとともに、示差熱分析、X線回折による反応過程の検討、SEM-EDXAによるポゾラン反応層の観察、および水銀圧入式ポロシメータによる細孔径分布の測定を

表-1 フライアッシュの化学成分および物理的性状

	フライアッシュ 細粉	フライアッシュ 粗粉	炉底灰粉末
湿分 (%)	0.2	0.2	0.5
強熱減量 (%)	1.9	3.2	9.9
シリカ分 (%)	54.7	48.5	53.1
アルミナ分 (%)	27.0	26.5	22.9
比重	2.27	2.21	2.15
ブレーン値 (cm/g)	3390	3140	2210
BET比表面積 (cm ² /g)	2.1	2.1	7.7
88μm残分 (%)	0.3	11.4	—
単位水重量比 (%)	9.6	9.9	10.5
モルタル28日 (%)	87	76	65
モルタル90日 (%)	105	91	79
M/B吸着量 (mg/g)	0.213	0.347	0.631
結晶鉱物 (X線回折)	α-石英 ムライト	α-石英 ムライト	β-石英 ムライト 長石

表-2 コンクリートの配合とフレッシュコンクリートの諸性質

	単位量 (kg/m ³)					W/C+F (%)	A E割量 (%)	ブリーン シラバ (%)	終了 時間 (時間)	スランプ (mm)	空気量 (%)
	セメント	アッシュ	水	細骨材	粗骨材						
普通 コントロ ン	ブレーン	300	0	177	783	1116	59	—	4.0	3.5	5.5
	細粉30%	210	90	175	783	1114	58	—	6.1	5.0	4.0
	50%	150	150	155	788	1122	52	—	6.2	6.5	5.0
	粗粉30%	210	90	167	780	1114	56	—	5.6	5.0	6.0
	50%	150	150	159	780	1114	53	—	6.6	5.5	5.0
	ブレーン	400	0	177	749	1068	44	—	2.4	3.5	5.0
	細粉30%	280	120	166	746	1060	42	—	3.1	4.5	4.0
	50%	200	200	158	744	1057	40	—	—	5.0	1.0
	粗粉30%	280	120	168	741	1057	42	—	2.5	4.0	4.0
	50%	200	200	163	736	1046	41	—	—	4.0	1.1
AE コントロ ン	ブレーン	300	0	153	694	1170	51	0.05	2.5	3.5	5.0
	細粉30%	210	90	141	697	1170	47	0.12	3.8	4.5	4.0
	50%	150	150	137	694	1165	46	0.18	5.3	7.5	4.5
	粗粉30%	210	90	146	689	1162	49	0.15	2.8	4.5	4.0
	50%	150	150	143	686	1151	48	0.20	4.1	6.5	4.0
	ブレーン	400	0	162	655	1103	41	0.05	1.3	3.5	4.0
	細粉30%	280	120	155	647	1089	39	0.17	1.9	4.5	4.0
	50%	200	200	148	645	1084	37	0.22	—	4.5	5.6
	粗粉30%	280	120	155	647	1087	39	0.18	1.6	4.5	4.0
	50%	200	200	152	639	1073	38	0.23	—	3.0	5.1

実施した。

コンクリートの配合は単位結合材量を 300 および 400 kg/m^3 、フライアッシュ置換率を 0、10、30 および 50% とし、所定のスランプ ($5 \pm 1 \text{ cm}$) および空気量 ($5 \pm 1 \%$) が得られるように試験練りによって単位水量および A-E 剤の添加量を決定した。コンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの諸性質を表-2 に示す。コンクリートに関する試験項目は、ブリージング (JIS A 1123)、圧縮、圧裂引張および曲げ強度、および凍結融解に対する抵抗性 (ASTM C-666(A)) である。

3. 実験結果および考察

3-1. フライアッシュモルタルの強度発現と水和反応過程

フライアッシュモルタルの材令にともなう圧縮強度の変化を図-1 に示す。フライアッシュ細粉および粗粉を使用したモルタルの圧縮強度は 90 日材令以後の長期において標準モルタルを上まわる。モルタルの強度発現性よりみたポゾラン材料としてのフライアッシュの性能は細粉の方が粗粉よりも若干良好である。水銀圧入式ボロシメータによって測定した細孔径分布の結果はフライアッシュモルタルの強度発現状況と良く一致している (図-2)。すなわち、材令 28 日では粗粉を使用したモルタルは細粉の場合よりも大きな細孔量を示しているが、材令 1 年では両者の間に細孔径分布の相違がほとんど存在せず、いずれの場合も標準モルタルと比較して小さい径の細孔量が増大して、全細孔量が減少する傾向が認められた。また、SEM によるモルタル破断面の観察 (写真-2 参照) より、材令 28 日程度では粒子表面がまだ平滑であるが、材令 90 日以後ではポゾラン反応の進行とともにフライアッシュの粒子表面に微細な生成物より成るポゾラン反応層が形成されているのが認められた。フライアッシュ粒子のポゾラン反応の形跡は粒径の細かいものほど顕著であり、粗粉中に含有されている $50 \sim 100 \mu\text{m}$ 程度の不規則な形状の粒子は 1 年材令においてもポゾラン反応があまり進行していないようである。

3-2. フレッシュコンクリートの諸性質

フライアッシュの形状はなめらかな球形であるために、フライアッシュ置換率の増加とともにコンクリートの流動性が改善され、所定のスランプを得るために必要な単位水量を大きく減少できる (図-3)。フライアッシュの種類が単位水量の減少程度に及ぼす影響は、フライアッシュ置換率 30% 以上において明瞭となり、粒径が大きく、かつ不規則な形状の粒子を含む粗粉は細粉よりも同一フライアッシュ置換率における単位水量の減少量

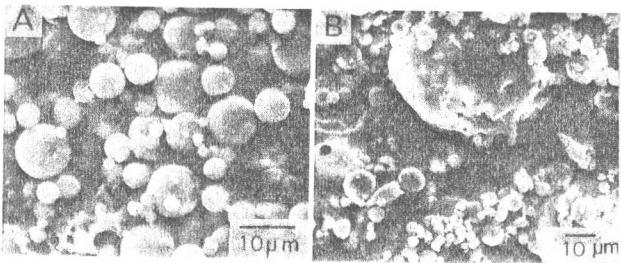


写真-1、フライアッシュの SEM 像 (A: 細粉、B: 粗粉)

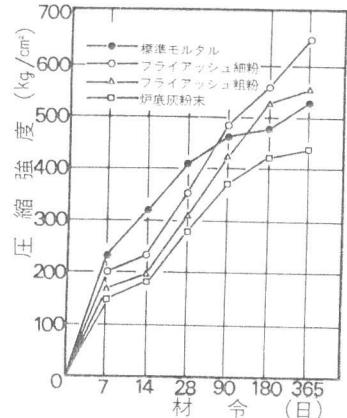


図-1、フライアッシュモルタルの圧縮強度

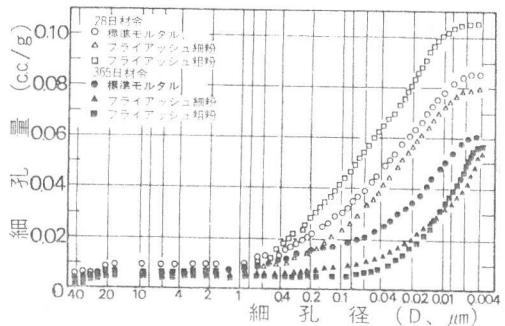


図-2、フライアッシュモルタルの細孔径分布

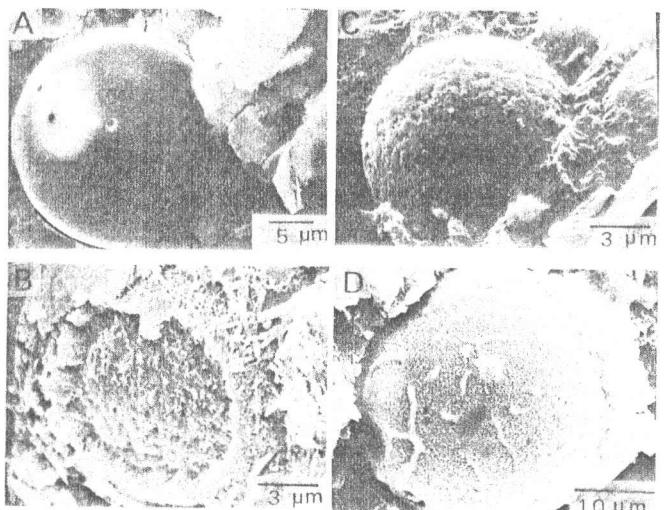


写真-2、フライアッシュモルタルの SEM 像 (A: 細粉、28 日、B: 細粉、90 日、C: 細粉、365 日、D: 粗粉、365 日)

が小さくなる。フライアッシュによるAE剤の吸着性については、未燃炭素量とともに炭素の含有形態が重要であるが、同一の空気量を得るためにAE剤量は結合材中に占めるフライアッシュの絶対量にはほぼ比例して増大しており、強熱減量およびM.B.吸着量において大きな値を示す粗粉を使用した場合には細粉よりもAE剤を10～30%程度多く必要とする（表-2）^{3), 4)}。また、フライアッシュの添加がコンクリートのブリージングに及ぼす影響は単位結合材量が小さいものほど顕著であり、AEコンクリートにすることによりブリージング特性が大きく改善される⁵⁾。すなわち、単位結合材量300kg/m³の場合にはコンクリートのブリージング率はフライアッシュ置換率とともに著しく増大し、ブリージングが終了するまでの時間もかなり長くなるが、単位結合材量400kg/m³の場合にはフライアッシュの添加がブリージングに及ぼす影響はあまり認められない。フライアッシュの種類については粗粉の方が細粉よりも全体としてブリージングが小さくなる傾向を示す（表-2）。

3-3. 圧縮および曲げ強度特性

フライアッシュを混和材として使用したコンクリートの圧縮強度とフライアッシュ置換率の関係を図-4～7に示す。フライアッシュを混和材として使用したコンクリートの圧縮強度は、一般に言われているように初期材令ではプレーンコンクリートの強度を大きく下まわるが、長期材令ではフライアッシュ置換率の大きなものはほど顕著な強度の伸びが認められ、フライアッシュ置換率が50%までのものはプレーンコンクリートを上まわるか、若干低下する程度の強度発現が得られる。SEM観察において認められたように、フライアッシュのボゾラン反応は粒径の細かいものほど早期に進行することから、細粉を使用した方が粗粉よりも強度の発現が著しいが、普通コンクリートの場合90日材令以後では両者の差が小さくなるようである。

また、単位結合材量について比較すると、単位結合材量400kg/m³の場合には比較的早期の段階より強度が発現しており、フライアッシュの添加による強度の改善効果がより顕著に現われている。一方、AEコンクリートの場合には普通コンクリートと比較して初期における強度の発現が幾分小さくなるようである。未燃炭素分の多いフライアッシュを使用した場合、比較的多量にAE剤を使用することがAEコンクリートの初期材令における低い強度増加と関係するようである。

フライアッシュを混和材として使用したコンクリートの曲げ強度とフライアッシュ置換率の関係を図-8および9に示す。フライアッシュの添加によるコンクリートの強度特性の改善効果については、フライアッシュ置換率が小さい場合には圧縮強度と曲げ強度の間に大きな相違が認められないが、フライアッシュ置換率が30%以上になるとフライアッシュの種

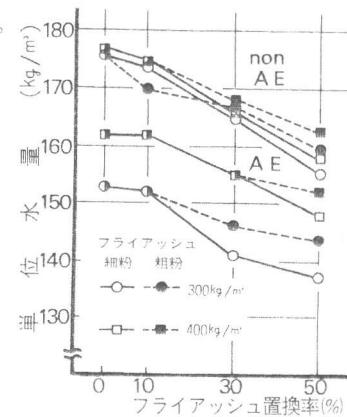


図-3 フライアッシュを添加したコンクリートの単位水量

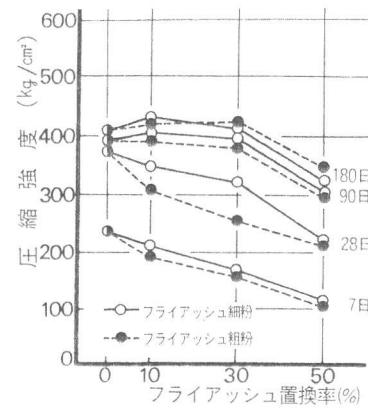


図-4 普通コンクリート(結合材量:300kg/m³)の圧縮強度

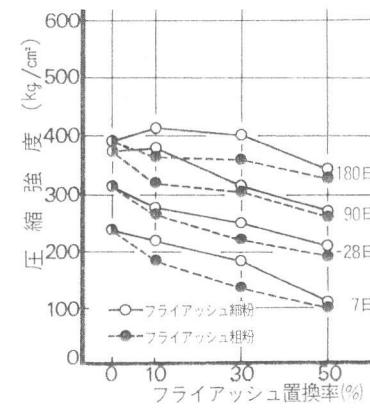


図-5 AEコンクリート(結合材量:200kg/m³)の圧縮強度

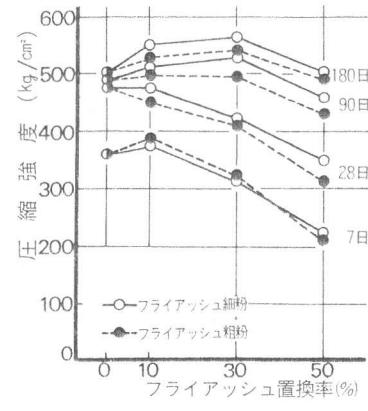


図-6 普通コンクリート(結合材量:400kg/m³)の圧縮強度

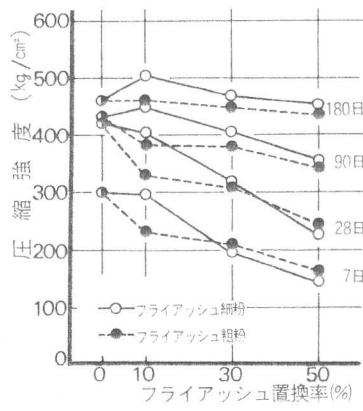


図-7 AEコンクリート(結合材量:400kg/m³)の圧縮強度

類に関係なく圧縮強度と比較して曲げ強度の増大がかなり顕著になる⁶⁾。

3-4. 凍結融解に対する抵抗性

フライアッシュを混和材として使用したコンクリートの凍結融解試験の結果を表-3に示す。普通コンクリートの場合、コンクリートの配合や養生期間にあまり関係がなく150サイクルまでにすべての供試体が崩壊した。一方、AEコンクリートの場合、耐久性指数（300サイクル）についてはいずれの配合のもの70%以上であり、フライアッシュの添加が凍結融解に対する抵抗性に及ぼす影響があまり明確には現われてはいない。しかし、重量減少率については水-結合材比=0.55の配合のものではフライアッシュ置換率が50%になると重量減少率がかなり増大しているのが認められる。凍結融解試験終了後の供試体表面の比較（写真-3参照）より、水-結合材比=0.55のものはそれ以下の水-結合材比のものと比較してコンクリート表面のスケーリングが顕著であり、粗骨材が表面に浮き出ている様子が観察される。

4. 結論

本研究において得られた主な結果をまとめると次のようである。

- (1)、フライアッシュのポゾラン反応は粒径の細かいものほど早期から進行しており、不規則な形状の粒子は反応があまり活発ではない。
- (2)、フライアッシュの添加による単位水量の減少効果は粒径が細かく、均一なものほど優れており、単位AE剤量はフライアッシュの強熱減量およびM.B.吸着量にはほぼ比例する。
- (3)、フライアッシュを比較的多量に混入したコンクリートでも長期材令においてはプレーンコンクリートと同程度の強度発現が得られ、強度の改善効果は圧縮強度よりも曲げ強度において顕著である。
- (4)、フライアッシュを添加したAEコンクリートの凍結融解に対する抵抗性はプレーンコンクリートと比較して大きく劣ることはないが、水-結合材比が大きくなるとコンクリートのスケーリングが増大する。

参考文献

- 1). 玉貫：石炭燃焼灰システムと有効利用技術、フジテクノシステム、1981.
- 2). 大槻他：最近のフライアッシュの性状、セメント・コンクリート、No.443、1984.
- 3). 吉越：混和材としてのフライアッシュに関する研究、土木学会論文報告集、No.31、1955.
- 4). 内川他：フライアッシュのキャラクターと各種混和剤の吸着特性、セメント技術年報、No.36、1982.
- 5). 山崎：フライアッシュを用いたコンクリートの諸性質、セメント技術年報、No.12、1958.
- 6). M.N.Hargue et al : High FlyAsh Concretes, ACI Journal, Jan-Feb, 1984.

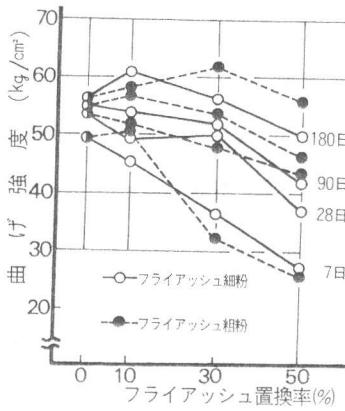


図-8 普通コンクリート(結合材量:300kg/m³)の曲げ強度

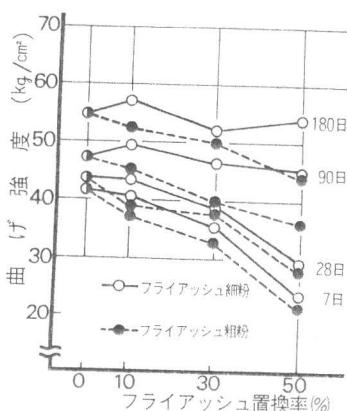


図-9 AEコンクリート(結合材量:300kg/m³)の曲げ強度

表-3 普通およびAEコンクリートの耐久性指数(%)

	結合材300kg/m ³ 、スランプ5cm		水/結合材比 0.55	
	普通コンクリート		AEコンクリート	
	14日材令	90日材令	14日材令	90日材令
ブレーン	7 (30)	28 (120)	94 (1.1)	—
細粉10%	4 (15)	13 (60)	93 (1.0)	—
30%	4 (15)	21 (90)	95 (1.7)	89 (0.9)
50%	4 (15)	10 (60)	97 (1.7)	79 (2.5)
粗粉10%	4 (15)	27 (120)	96 (0.6)	—
30%	4 (15)	10 (60)	96 (1.6)	88 (2.1)
50%	4 (15)	7 (30)	96 (2.5)	82 (3.2)
			85 (9.1)	75 (8.5)

() : 破壊繰返し数 () : 重量減少率(%)

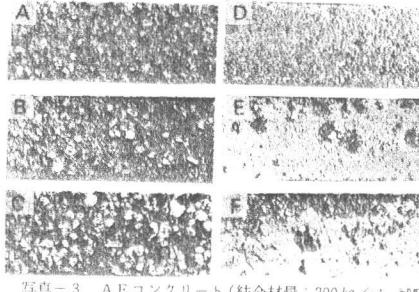


写真-3 AEコンクリート(結合材量: 300 kg/m³)、試験時材令: 14日)の凍結融解試験後の外観

A:水-結合材比:0.55, ブレーン D:水-結合材比:0.51, ブレーン
B:水-結合材比:0.55, 粗粉30% E:水-結合材比:0.49, 粗粉30%
C:水-結合材比:0.55, 粗粉50% F:水-結合材比:0.48, 粗粉50%