

論文 フライアッシュ高混合セメントの強度性状

浜田純夫^{*1}・松尾栄治^{*2}・縫部慎治^{*3}・斎藤直^{*4}

要旨：石炭火力発電において発生する石炭灰は、今後発生量の急激な増加が予測される。その有効利用として、現在フライアッシュセメントとして規定されているものより、多量にセメントをフライアッシュで置換したものの実用化は、建設コスト低減の観点からも期待が大きい。本研究では、これをハイボリュームフライアッシュセメント（以下HVFAセメントと略記）と定義し、低強度低コスト材料の開発を目的として、ペーストおよびモルタルの強度性状等を検討した。

キーワード：フライアッシュ置換率、圧縮強度、曲げ強度、材齢、養生条件

1. まえがき

石炭火力発電所において発生する石炭灰は、エネルギー源の多様化を重要課題とする時代の要請により、今後急激な発生量の増加が見込まれている。全国規模では、石炭火力発電所の建設計画にともない、現状の年間 470 万トンから西暦 2000 年には、約 2 倍程度に伸びると予想されている。

その一方で、石炭灰の有効利用率は現在でも 65%程度であり、将来はより多量の石炭灰が廃棄処分されることになる。周知のようにフライアッシュはコンクリート混和材として極めて有益な材料であり、これをさらに有効利用することは、資源環境保護の観点からも大いに望まれるところである。

フライアッシュのポゾラン活性による長期強度増進など、強度的なメリットが発現されるのは、セメントのフライアッシュ置換率が約 40%以下という限定さ

れた範囲¹⁾である。フライアッシュを硬化体の主成分とした材料、すなわちセメントへの置換率を極端に大きくした HVFA セメントの強度性状については、強度性状が普通セメントと比較して大幅に小さくなる²⁾ことがわかっている。また、そのような低強度の材料は実用的な範囲外であると一般に見なされており、定量的なデータの提供は少ない。

しかし、低強度でも十分に機能する構造物を対象とすることにより、フライアッシュの有効利用範囲を広げることができる。例えば、旧坑道や防空壕などの地下空洞の充填材や、トンネルの裏込め材料、軟弱地盤の改良材、舗装用の

表-1 フライアッシュの性状

	試験の対象	結果	JIS 品質規格			
			I 種	Ⅱ種	Ⅲ種	Ⅳ種
	湿分(%)	0.1	1.0 以下			
	強熱減量(%)	4.5	3.0 以下	5.0 以下	8.0 以下	5.0 以下
	SiO ₂ (%)	71.7	45.0 以上			
	密度(g/cm ³)	2.12	1.95 以上			
	フロー値比(%)	101	105 以上	95 以上	85 以上	75 以上
粉末度	45μm ふり残分(%)	21	10 以下	40 以下	40 以下	70 以下
	比表面積(cm ² /g)	3120	5000 以上	2500 以上	2500 以上	1500 以上
活性度 指数	28 日(%)	81	90 以上	80 以上	80 以上	60 以上
	91 日(%)	90	100 以上	90 以上	90 以上	70 以上

*1 山口大学教授 工学部社会建設工学科 Ph. D. (正会員)

*2 山口大学助手 工学部社会建設工学科 工博 (正会員)

*3 山口大学大学院 理工学研究科 博士前期課程

*4 中国電力(株)土木部

路盤材など、強度発現を比較的急がなくてよいものなどがその対象と考えられる。そのような材料の必要強度としては、圧縮強度が 1.0MPa 程度でも十分であると考えられる。

そこで本研究では、HVFA

セメントの強度性状を把握することを目的に、より経済性と軽量化を追求する意味でのエアーミルクへの適用や、ペーストおよびモルタルの圧縮、曲げ強度性状を実験的に検討した。また地下構造物を対象とする場合は地下水の存在の有無により強度性状が異なることを想定し、エアーミルクについては、養生条件が強度性状に及ぼす影響についても検討した。

2. 実験方法

2.1 使用材料

本研究で用いたフライアッシュの物理的性状を表-1 に示す。JIS の新規格ではⅡ種に相当する。セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材を用いる場合は海砂（表乾比重 2.60）を使用した。

2.2 配合

本研究で用いた供試体の配合を表-2～4 に示す。エアーミルクでは水粉体比、セメントのフライアッシュへの置換率（＝FA 置換率）、空気量を配合要因とした。HVFA ペーストおよびモルタルについては FA 置換率と水粉体比を配合要因とした。エアーミルクでの気泡導入は、プレフォームで行った。

2.3 供試体

供試体は、エアーミルクにおいては打設が容易な $\phi 5 \times 10\text{cm}$ の円柱、ペーストおよびモルタルにおいては曲げ強度も測定することと、規定の突き固めを行うことが容易であることを考慮して $4 \times 4 \times 16\text{cm}$ の角柱とした。また試験材齢は 7, 28, 91 日とした。

表-2 エアーミルク用配合表

配合	W/P (%)	FA 置換率 (%)	エアー (%)	単位量 (kg/m ³)				実測値		
				C	FA	W	エアー (/m ³)	エアー (%)	比重	フロー (mm)
①A67-50	52.0	67	50	174	378	287	500	50.0	0.86	194
②A75-45	53.5	75	45	118	353	252	450	47.5	0.86	187
③A80-40	50.0	80	40	86	345	216	400	42.5	0.99	190
④A83-30	48.0	83	30	128	640	369	300	30.0	—	163
⑤A83-40	50.0		40	107	537	322	400	37.5	1.04	204
⑥A83-50	50.0		50	89	447	268	500	50.0	0.88	180

表-3 ペーストの配合表

配合	W/P (%)	FA 置換率	単位量 (kg/m ³)			フロー値 (mm)
			C	FA	W	
①P50-45	45	50%	597	597	539	228
②P70-45		70%	347	810	522	224
③P90-45		90%	112	1009	506	218
④P95-45		95%	56	1057	502	214
⑤P70-40	40	70%	369	861	492	197
⑥P70-45	45		347	810	522	213
⑦P70-50	50		329	767	548	251

表-4 モルタルの配合表

配合	W/P (%)	S/P	FA 置換率	単位量 (kg/m ³)			
				C	FA	W	S
①M50-60	60	2.0	50%	285	285	342	1140
②M70-60			70%	169	393	337	1122
③M90-60			90%	55	497	332	1105
④M95-60			95%	28	523	330	1101

円柱における圧縮強度試験はひずみ速度を約 1mm/分に制御して行った。養生方法は、地下構造物の場合は地下水が存在することも考慮して、水中および気中養生を行い比較した。エアーミルクを水中養生する場合には、打設後直ちに水中に投入すると起泡剤が溶解するおそれがあったため、材齢 5 日まで気中養生し、その後浸水させた。ペーストおよびモルタルの曲げ強度は 3 本平均、圧縮強度は 6 本平均で求めた。

供試体の記号は、A がエアーミルク、P がペースト、M がモルタルを、数字は順に FA 置換率、水粉体比を示す。

3. 実験結果と考察

3.1 エアーミルクの強度性状

図-1～2 に材齢と圧縮強度の関係を示す。気中養生の場合は、材齢 28 日までは順調な強度増進が見られるが、その後強度は大きく低下した。一方、水中養生では長期材齢にわたって強度は増加

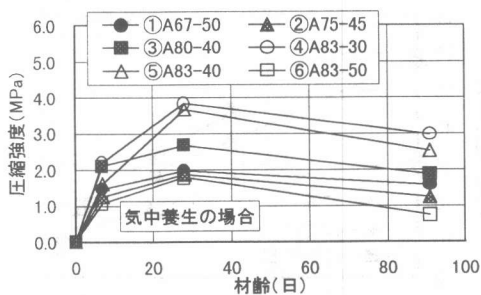


図-1 材齢と圧縮強度の関係

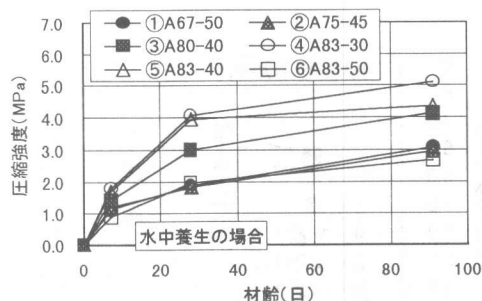


図-2 材齢と圧縮強度の関係

しており、ポズラン反応が活発に行われたことがわかる。水中養生に対する気中養生の強度発現を図-3 に示す。材齢 7 日においては気中養生が水中養生よりも大きな強度発現を示すが、材齢 28 日になると両者の差は小さくなり、その後、気中養生の低下が顕著である。

この原因の一つとして比重の変化を考慮する必要があるため、図-4～5 に比重の経時変化を示す。気中養生の場合は比重が小さくなる傾向を、水中養生の場合は比重が大きくなる傾向を示す。しかし、いずれの場合も変動幅は小さく、気中養生の場合は水分の供給がないことにより水和反応およびポズラン反応の進行が緩慢になることに加えて、供試体の観察結果から窺われた乾燥による供試体の脆性化が主原因と考えられる。また、初期材齢における気中養生の強度発現は、ポズラン反応のみならず、乾燥による塑性固化に大きく起因していると考えられる。

すなわち気中養生における水分の逸散により、初期材齢では塑性固化が起こり、さらに乾燥す

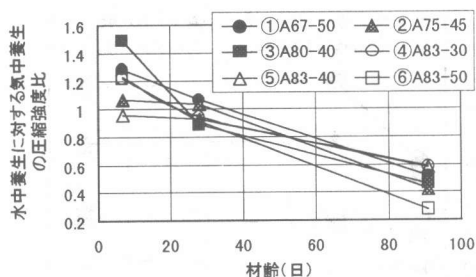


図-3 水中養生と気中養生の強度比の比較

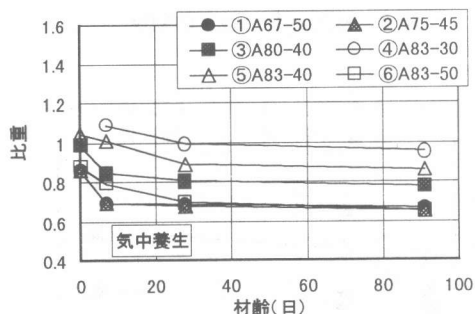


図-4 材齢にともなう比重の変化

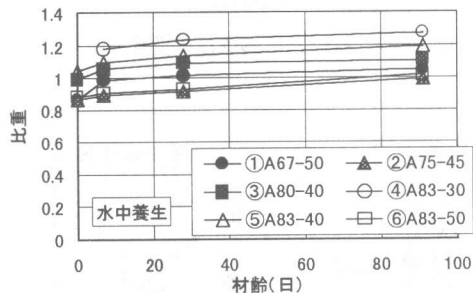


図-5 材齢にともなう比重の変化

ると逆に脆性化が著しくなり強度は低下する。

以上より、エアーミルクの場合は、地下水などが豊富な場所においては有効な材料といえるが、水分の供給が期待できない現場などにおいては、十分な養生方法の確保などの対策が必要と考えられる。また目標強度を 1.0MPa とすると、FA 置換率 83%でも材齢 7 日において強度発現が可能であった。

3.2 HVFA ペーストの強度性状

図-6～7 に HVFA ペーストの材齢と曲げ強度お

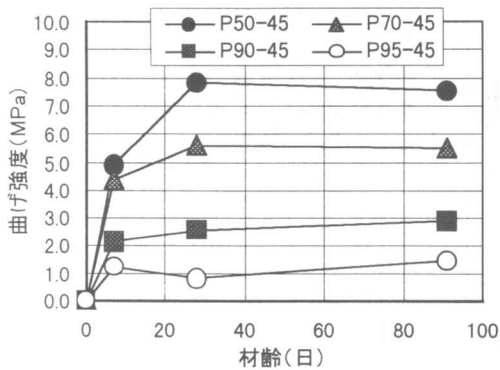


図-6 材齢と曲げ強度の関係

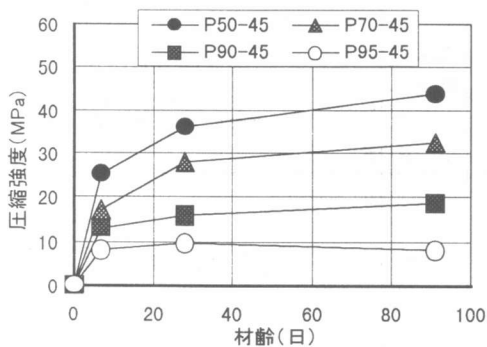


図-7 材齢と圧縮強度の関係

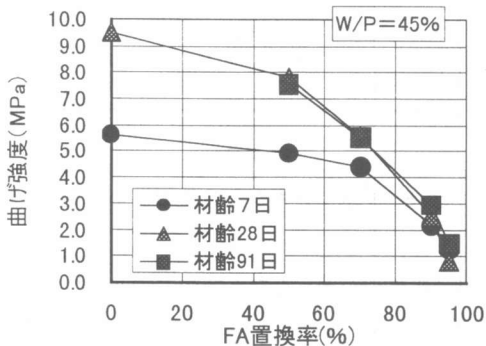


図-8 FA置換率と曲げ強度の関係

よび圧縮強度の関係を示す。また、図-8~9 にフライアッシュ置換率と曲げ強度および圧縮強度の関係を示す。図中にはフライアッシュを用いない場合(置換率0%)も比較して示す。FA置換率の増加にともない曲げ強度、圧縮強度ともに

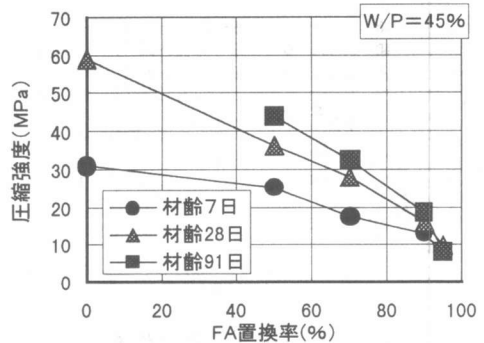


図-9 FA置換率と圧縮強度の関係

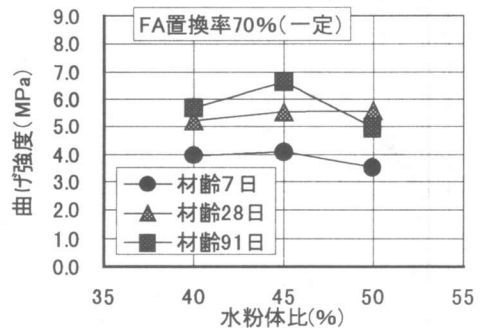


図-10 水粉体比と曲げ強度の関係

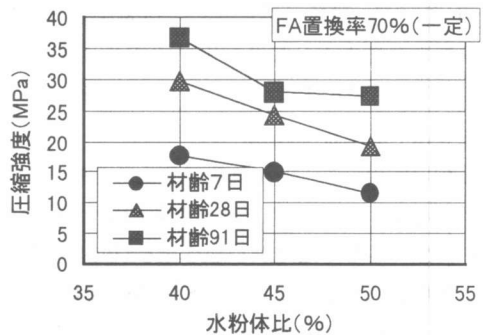


図-11 水粉体比と圧縮強度の関係

大きく低下する。ただし、低強度材料としての目標強度は十分に発現しており、さらにセメント量を低減させた経済的な配合が可能ともいえる。

HVFA セメントのように FA 置換率が 40%より大きくなると、以上のようにフライアッシュセメントの特長の一つである長期材齢の強度増進

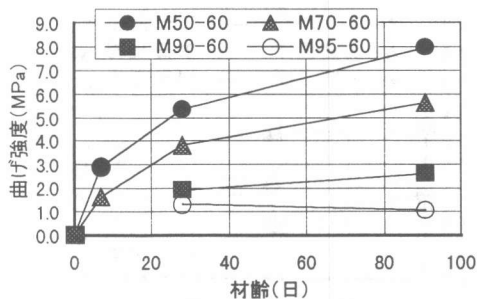


図-12 材齢と曲げ強度の関係

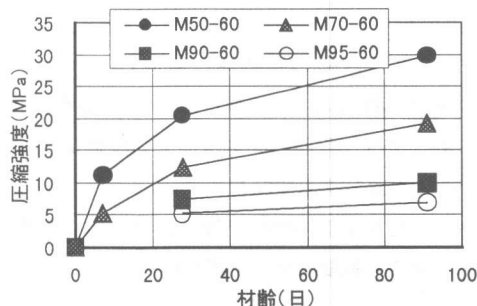


図-13 材齢と圧縮強度の関係

割合が小さい。すなわちセメント量が極端に少ない場合は、水和反応生成物の発生も少なくなり、そのような場合はポズラン反応も期待できないと推察される。

図-10～11 に水粉体比と曲げ強度および圧縮強度の関係を示す。圧縮強度においては普通コンクリートと同様に、水粉体比（水結合材比）が大きくなると、強度の低下が各材齢において確認できる。

しかしながら曲げ強度については、水粉体比が 45% 近傍において強度のピークが確認され、この傾向は材齢が大きくなるにつれて顕著になる。すなわち、供試体中の水分が少なすぎる場合は、水和生成物の発生に伴うポズラン反応も活発でなくなり、曲げ強度は低下する可能性がある。

3.3 HVFA モルタルの強度

図-12～13 に HVFA モルタルの材齢と曲げ強度および圧縮強度の関係を示すが、材齢 28 日までには順調な強度増進を示している。これはペースト

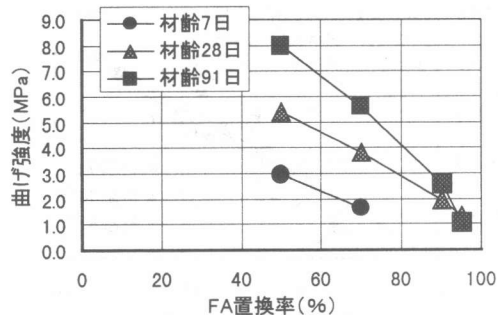


図-14 FA 置換率と曲げ強度の関係

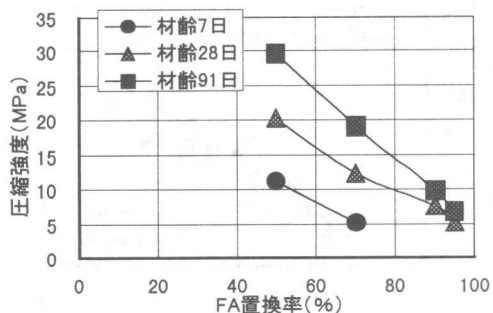


図-15 FA 置換率と圧縮強度の関係

の場合と同様であるが、今後長期強度的にも検討する必要がある。

また図-14～15 に FA 置換率と曲げ強度および圧縮強度の関係を示す。ペーストと同様に、FA 置換率の増加にともない曲げ強度および圧縮強度は大きく低下している。図-16～17 に圧縮強度と曲げ強度の関係を示す。このように、圧縮強度 σ_c と曲げ強度 σ_b には

$$\sigma_b = a \sigma_c^{2/3} \quad (a : \text{比例定数}) \quad (1)$$

の関係が高い相関で得られ、普通コンクリートと同様の傾向が見られる。比例定数は普通コンクリートの 0.42 と比較³⁾すると、0.6 前後とかなり大きな値になるのが特徴といえる。また材齢による比例定数の変化は小さい。このことから一般的なフライアッシュセメントの特徴である「普通コンクリートの場合よりも、圧縮強度に対する曲げ強

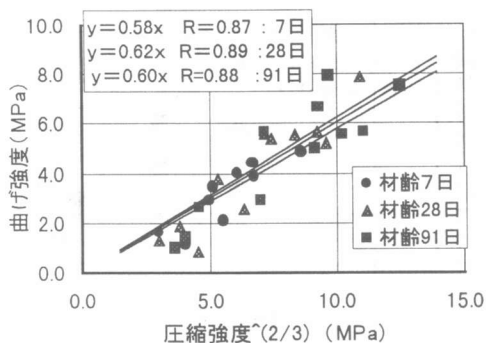


図-16 圧縮強度と曲げ強度の関係

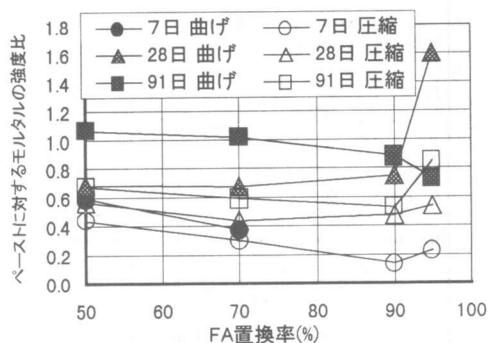


図-18 FA置換率と強度比の関係

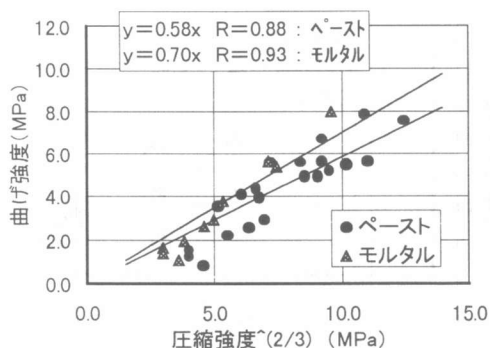


図-17 圧縮強度と曲げ強度の関係

度の発現割合が大きい¹⁾という現象が、HVFA セメントにおいても確認できる。またペーストとモルタルの比例定数の変化も小さいものであった。

図-18 に FA 置換率とペーストに対するモルタルの強度比を示す。フライアッシュ置換率の増加にともない圧縮強度比、曲げ強度比ともに横ばいあるいは低下傾向を示すが、置換率 90% から 95% にかけては大きくばらつく。

4. 結論

本研究で得られた結論を以下に要約する。

- (1) HVFA エアーミルクは水中養生により、空洞充填材として実用的な強度を得る場合、FA 置換率を 83% 程度まで大きくできる。
- (2) HVFA セメントにおいてはセメント水和物の生成も緩慢になるために、ポズラン反応による長期強度の増進割合の増大は期待できない。

- (3) HVFA セメントにおいても、普通 FA セメントの場合と同様に、圧縮強度に対する曲げ強度の割合では、普通コンクリートの場合より曲げ強度が卓越する傾向を示す。
- (4) HVFA セメントの曲げ強度は、水粉体比を小さくすると強度の低下を招く場合がある。

参考文献

- 1) 笠井芳夫, 小林正凡: セメント・コンクリート用混和材, 技術書院, pp. 85-86, 1986
- 2) 金森誠治, 河村彰男, 石関嘉一: ハイポリュームフライアッシュコンクリートのフレッシュ性状と強度特性, 土木学会第 53 回年次学術講演会 V-142, pp. 284-285, 1998
- 3) 土木学会コンクリート標準示方書: 設計編, p. 18, 1996