

論文 フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートに関する基礎研究

三岩敬孝*1・平岡伸哉*2・水口裕之*3・橋本親典*4

要旨: 石炭火力発電所からの排出される産業副産物であるフライアッシュを結合材としての使用に加え、細骨材の微粒分として代替使用することとし、フライアッシュ量が最大 400kg/m³ 使用した粉体系高流動コンクリートの凝結時間、ブリーディング特性および圧縮強度から、フライアッシュの使用量の限界について検討を行った。その結果、ブリーディング量が急激に増加し、また、凝結時間が急激に長くなる水微粉末比が存在し、その値は細骨材に代替使用したとき所要のスランプフローを得るために必要な高性能 AE 減水剤使用量が急激に増加する値とほぼ等しく、水微粉末比に限界値が存在することが明らかになった。

キーワード: フライアッシュ, 高流動コンクリート, 水微粉末比, ブリーディング量, 凝結

1. はじめに

近年、我が国で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伴い、石油資源の枯渇化の恐れにもよ、世界中で豊富な石炭を用いる石炭火力発電所が全国各地で建設あるいは計画されている。

この石炭火力発電所から副産される石炭灰はそのほとんどが埋め立て用として処理されており、JIS 規格値に合格するフライアッシュがセメント用混和材として使用されている。しかし、その使用量はセメント質量の 30%、すなわち一般には C 種がフライアッシュセメントとしての使用が限度とされている。今後、新たに建設される石炭火力発電所において副産されるフライアッシュは JIS 規格内のものが増加すると推測され、また、石炭火力発電所の増加に伴いフライアッシュの総排出量も増加することは容易に予測され、フライアッシュを多量使用した一般のコンクリートに関する研究が進められている。

また、近年、欠陥の少ないコンクリート構造物を合理的に施工するため、締固め不要の高流

動コンクリートが注目されており、多方面からの研究がされている²⁾。しかし材料分離抵抗性を高めるために使用される粉体は高炉スラグ微粉末が多く、次いでフライアッシュが使用されているものの、その使用量は多くても 300kg/m³ 程度であり、フライアッシュの使用限界に対する評価は示されていない。

本研究では、高流動コンクリートへのフライアッシュの多量使用の可能性について検討するため、結合材容積としての使用に加え、フライアッシュを細骨材の微粒分として代替使用することとし、細骨材容積の 10 および 20vol% と、最大 400kg/m³ のフライアッシュを使用した粉体系高流動コンクリートの凝結時間、ブリーディング特性および圧縮強度を調べ、フライアッシュの利用量の限界について検討を行った。

2. 実験概要

2.1 使用材料

(1)セメント

セメントは普通ポルトランドセメント、比重

*1 和歌山工業高等専門学校助手 環境都市工学科 工修 (正会員)

*2 徳島大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (正会員)

*3 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*4 徳島大学助教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

3.15, 比表面積 3,240cm²/g, 28 日圧縮強さ 42N/mm² を使用した。

(2)骨材

粗骨材は, 比重 2.64, 吸水率 0.73, 最大寸法 20mm の徳島県那賀川産玉砕石を用い, 細骨材は, 比重 2.63, 吸水率 1.24, F.M.=2.92 の徳島県那賀川産川砂を使用した。

(3)フライアッシュ

フライアッシュは, JIS に合格するものを使用した。その物理的性質および化学成分を表-1 および表-2 にそれぞれ示す。

(4)混和剤

混和剤として, ポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤および高アルキルカルボン酸系の空気量調整剤を使用した。

2.2 コンクリートの配合および試験方法

(1)配合設計の考え方

本実験で使用した粉体系高流動コンクリートの配合は, 単位水量 (V_w), 結合材容積 (V_B),

表-1 フライアッシュの物理的性質

	比重	粉末度 (cm ² /g)	単位水量比 (%)	圧縮強度比	
				28 日	91 日
JIS 規格	1.95 以上	2400 以上	102 以下	60 以上	70 以上
試験成績	2.21	3970	97.0	74.6	99.2

表-2 フライアッシュの化学成分

	二酸化ケイ素 (%)	湿分 (%)	強熱減量 (%)
JIS 規格	45 以上	1 以下	5 以下
試験成績	61.5	0.0	2.3

細骨材容積 (V_S) および粗骨材容積 (V_G) を一定とし, まず結合材容積に対して 35, 45, 55 および 65vol% のフライアッシュを代替使用した。

次に, 単位セメント量を一定とし, さらにフライアッシュの使用量を増加させるために, 粗骨材容積に対して 10 および 20vol% のフライアッ

表-3 使用したコンクリートの配合

配合 記号	結合 材代 替率 (vol%)	細骨 材代 替率 (vol%)	単位量								実測値			
			W (kg)	結合材		細骨材		全フライ アッシュ 量 (kg)	水 微 粉 末 比	粗骨 材 (kg)	高性能 AE 減 水剤 (kg)	空気量 調整剤 (kg)	空気 量 (%)	スラン プ フロー (cm)
				C (kg)	F _C (kg)	F _S (kg)	S (kg)							
F35-0	35	0	175	401	152	0	705	152	0.316	821	4.01	1.604	4.0	64.5
F35-10		10				59	634	211	0.286		4.41	1.684	4.2	65.5
F35-20		20				118	564	270	0.261		6.02	2.005	3.9	69.5
F45-0	45	0	175	340	195	0	705	195	0.327	821	4.08	1.700	4.0	68.5
F45-10		10				59	634	254	0.295		4.42	1.836	4.1	65.5
F45-20		20				118	564	313	0.268		5.78	2.040	3.9	70.0
F55-0	55	0	175	278	238	0	705	238	0.339	821	3.89	1.668	3.9	62.5
F55-10		10				59	634	297	0.304		4.45	1.807	3.9	64.0
F55-20		20				118	564	356	0.276		5.56	1.946	3.8	70.0
F65-0	65	0	175	216	282	0	705	282	0.351	821	3.67	1.512	3.9	67.5
F65-10		10				59	634	341	0.314		4.10	1.620	3.8	61.5
F65-20		20				118	564	400	0.284		4.75	1.728	3.9	60.0

シュを細骨材として代替使用することとした。以上により結合材に対する代替使用 (Fc) および細骨材に対する代替使用 (Fs) のそれぞれの影響について、また、全代替量について検討を行うものである。

(2)コンクリートの配合

フライアッシュの使用量は、結合材容積に対して 35~65vol%, さらに細骨材容積に対して 0~20vol% であり、最大 400kg/m³ である。

試験に使用した高流動コンクリートは、目標スランプフロー 65±5 cm, 目標空気量 5±1.5% とした。コンクリートの配合と実測したスランプフロー値および空気量を表-3に示す。高性能 AE 減水剤および空気量調整剤使用量を一定とした場合、必要なスランプフローおよび空気量が得られなかったため両混和剤使用量を変化させて調整を行った。

(3)コンクリートの練混ぜ

コンクリートの練混ぜには、水平 2 軸強制練りミキサ (容量 55ℓ) を使用した。練混ぜ方法は、まず、所定量の粗骨材、セメント、フライアッシュおよび細骨材を投入し、30 秒間空練りを行い、その後、あらかじめ混和剤を溶解した水を加えて 2分 30 秒間練混ぜを行った。

(4)成型および養生方法

圧縮強度試験用コンクリートは試験用供試体型枠に 1 層で詰め、翌日脱型し、所定の材齢まで、20±1℃ の水中で養生を行った。

(5)試験項目および試験方法

(a)スランプフロー試験

スランプフロー試験は、コンクリートの練混ぜ後、直ちに JSCE-F503「コンクリートのスランプフロー試験方法 (案)」に従い、試料は突固めや振動を与えずに一層に詰め、スランプフロー値および 500mm フロー到達時間を測定した。

(b)V 漏斗試験

コンクリートの練混ぜ後、直ちに V 漏斗試験装置 (容量 10ℓ, 吐出部の寸法 65×75mm) で、流下時間を測定した。

(c)ブリーディング試験

ブリーディング試験は、JIS A 1123 「コンクリートのブリーディング試験方法」に従って行い、ブリーディング量を測定した。

(d)凝結試験

凝結試験は、貫入針を用いてコンクリートの凝結時間を試験する方法に従って行い、貫入抵抗が 3.5N/mm² となる時を始発時間とし、28.0N/mm² の時を終結時間とした。

(e)圧縮強度試験

圧縮強度試験は、JIS A 1108 に準じ、φ10×20cm の円柱供試体を用いて、全ての配合のコンクリートに対して材齢 1 日, 3 日, 7 日および 28 日で行った。

3. 実験結果および考察

3.1 混和剤使用量

図-1 に水微粉末比と高性能 AE 減水剤使用量との関係を示す。ここで、水微粉末比とは、単位水量 (W) と細骨材容積に対して代替使用したフライアッシュ (Fs) を含めた全微粉末量 (C+Fc+Fs) との比 (W/(C+Fc+Fs)) とする。

水微粉末比が小さくなるほど、高性能 AE 減水剤使用量は多くなる。特に、細骨材容積に対して 20vol% のフライアッシュを代替使用した配合では、水微粉末比が 0.28 程度で、高性能 AE 減水剤使用量は急激に大きくなり、経済性を考慮すると、フライアッシュの細骨材への代替使用率は 20vol% までが適切であると考えられる。

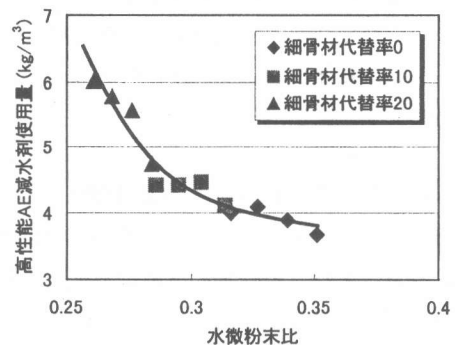


図-1 水微粉末比と高性能 AE 減水剤使用量との関係

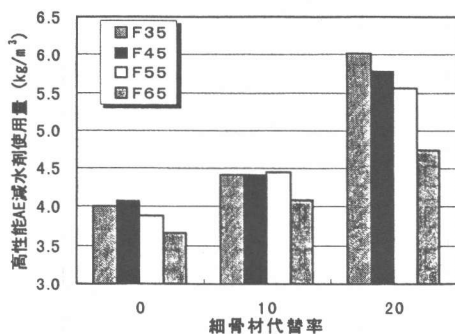


図-2 高性能 AE 減水剤使用量

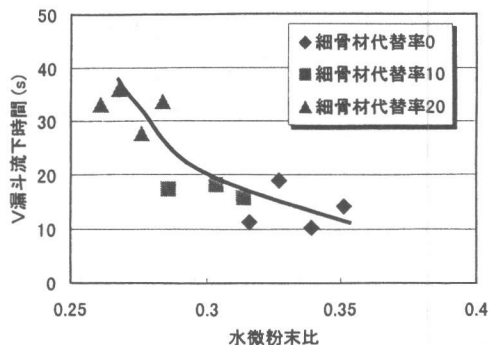


図-4 水微粉末比とV漏斗流下時間との関係

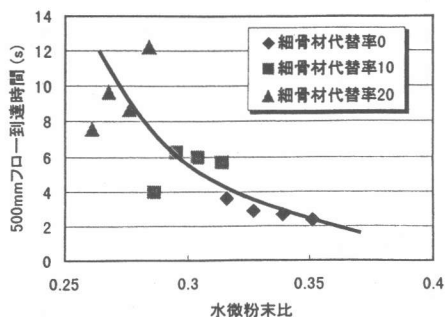


図-3 水微粉末比とフロー到達時間との関係

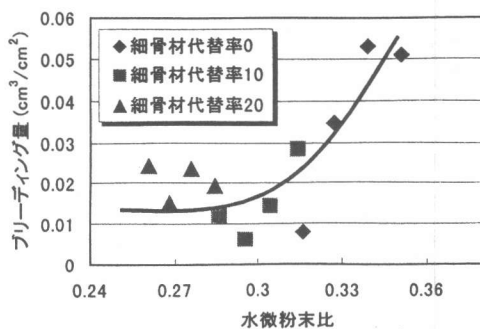


図-5 水微粉末比とブリーディング量との関係

また、図-2に12配合の高性能AE減水剤使用量を示す。細骨材容積に対してフライアッシュを代替使用することによって、必要なスランブフローを得るために、高性能AE減水剤が増加する。特に細骨材容積に対して20vol%のフライアッシュを代替使用した場合、混和剤使用量が代替使用しない場合の1.5倍程度増加する。しかし、結合材容積に対してフライアッシュの代替率を増加させた場合、高性能AE減水剤の使用量は代替率が増加してもあまり多くなり、むしろ少なくなる。これはフライアッシュがコンクリートの流動性を向上させる特性を持っていることによると考えられる。

3.2 スランブフローおよびV漏斗試験

図-3に水微粉末比と500mmフロー到達時間との関係、また、図-4に水微粉末比とV漏斗流下時間との関係を示す。これらの図より、水微粉末比が大きくなると、500mmフロー到達時間が短くなり、細骨材に対して代替使用した場

合、水微粉末比が小さくなることや細骨材の粒度が変化することから500mmフロー到達時間が長くなり、大きな粘性のコンクリートとなっていると考えられる。また、これはV漏斗試験結果でも同じであり、水微粉末比が大きくなるとV漏斗流下時間も短くなる。これらのことから、充填性を考慮し、V漏斗流下時間を10~20秒とすると水微粉末比0.3程度以上が適切と考えられる。

3.3 ブリーディング

図-5に水微粉末比とブリーディング量との関係を示す。高流動コンクリートは材料分離抵抗性を高めるためブリーディングが生じないこととしているものの、表面仕上げの困難さを考慮し、日本建築学会で規定されているブリーディング量 $0.3\text{cm}^3/\text{cm}^2$ 以下³⁾とすると、本実験で行った12配合全てにおいて十分使用可能である。

しかし、ブリーディング量は、水微粉末比が0.3程度までは非常に少ないものの、それ以上にな

ると規定範囲内ではあるが急激に増加する。

また、結合材容積を 0.196m^3 の一定とし、フライアッシュの代替率を 35, 45, 55 および 65vol% とした場合のブリーディング試験結果を図-6 に示す。また、セメントとフライアッシュを含めた微粉末容積を一定とし、フライアッシュの代替率を 0, 35, 45, 55 および 65vol% と増加させたペーストのフロー試験より得られたフロー値の平均から、基準面積を用いて、ペーストの相対フロー面積比を算出し、得られた相対フロー面積比と水セメント容積比との関係を直線回帰したときの切片の値を拘束水比とし⁴⁾、その拘束水比と代替率との関係を図-7 に示す。

細骨材に代替使用せず、結合材容積に対してフライアッシュの代替率を増加させた場合、ブリーディング量が大きくなる傾向がある。これは、フライアッシュはセメントに比較し拘束水比が小さい。このため、混和剤によってスランプフローが一定の条件においても、フライアッシュを代替使用することから拘束されない遊離水がブリーディング水となってコンクリート表面に染み出したと考えられる。

次に、細骨材容積に対してフライアッシュを代替使用した場合、バラツキは大きいものの、代替率の増加とともにブリーディング量は少なくなる傾向がある。これは、単位量あたりの粉体量が増加し、細骨材に比較しフライアッシュは水を拘束するためである。

3.4 凝結

図-8 に水微粉末比と配合別の凝結時間の関係を示す。日本建築学会規定では始発が 20 時間以内としている。本実験では全ての配合において満足しており使用可能である。ただし、翌日脱型を必要と見なし、初期強度を考慮して終結時間を 12 時間程度とすると、水微粉末比は 0.28 程度以上が適切である。

本実験結果では、水微粉末比が 0.3 以下となると急激に凝結時間が長くなり、結合材容積に対してフライアッシュを代替使用した場合および

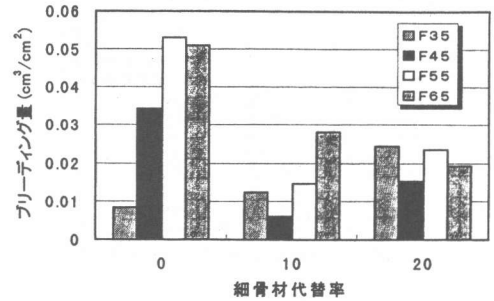


図-6 ブリーディング量

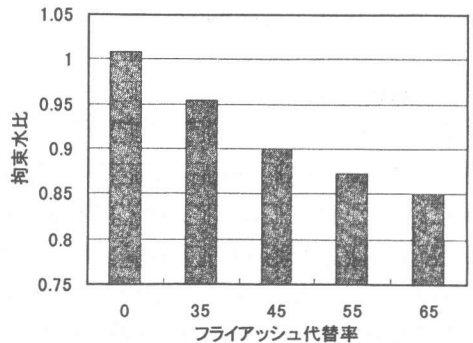


図-7 フライアッシュ代替率と拘束水比との関係

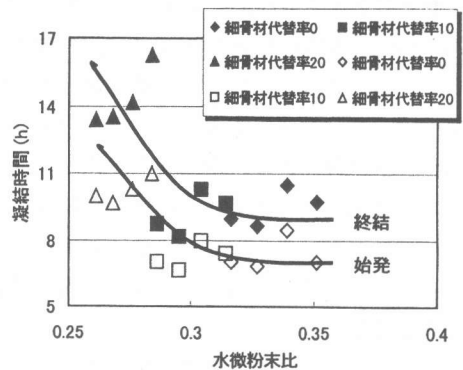


図-8 水微粉末比と凝結時間との関係

細骨材容積に対して 10vol% のフライアッシュを代替使用した場合の始発時間は約 7 ~ 8 時間、終結時間は約 9 ~ 12 時間でほとんど変わらないが、20vol% 使用した配合では、凝結時間の遅れが顕著である。これは、図-2 に示したように単位セメント量がそれぞれ一定であっても、フライアッシュ量が増加したことにより、必要なスランプフロー (65 ± 5 cm) を得るための高性能 AE 減水剤の使用量が増加したことによると考えられる。

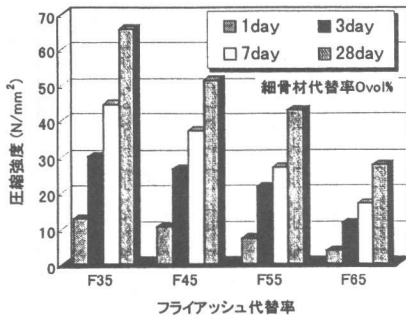


図-9 圧縮強度（結合材に代替使用）

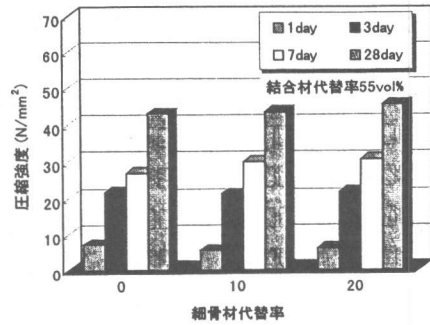


図-10 圧縮強度（細骨材に代替使用）

3.5 圧縮強度

図-9に結合材容積に対してフライアッシュを35, 45, 55および65vol%代替使用した場合の材齢1日, 3日, 7日および28日における圧縮強度を示す。日本建築学会では材齢28日強度で25N/mm²以上としている。本実験の範囲内では全ての配合において十分満足する強度を有する。また, 翌日脱型をするために, 初期強度として材齢1日強度を5N/mm²以上必要であるとすれば, 結合材容積に対して55vol%までの使用が可能である。これは, 結合材容積に対してフライアッシュを代替使用することによるセメント量の減少が原因であり, 水セメント比が大きくなったためと考えられる。このため, 結合材容積に対してフライアッシュを代替使用するには, 初期強度発現に必要な水セメント比を満足する必要がある。

次に図-10は結合材容積に対して55vol%のフライアッシュを代替使用し, さらに細骨材容積に対して10および20vol%のフライアッシュを加えた高流動コンクリートの圧縮強度を示す。細骨材容積に対して20vol%のフライアッシュを代替しても初期材齢で5N/mm²以上, 材齢28日で25N/mm²以上の強度が得られる。

また, 単位セメント量は一定であり, 細骨材容積に対してフライアッシュの代替率を増加させても, 各材齢とも圧縮強度はほぼ等しいかあるいは若干増加する程度である。このことから, フライアッシュを多量に使用する場合, 細骨材

として細骨材容積に対して代替使用できるものといえる。

4. まとめ

本実験で得られた結果を要約すると次のとおりである。

フライアッシュを多量に使用し, 微粉末量が非常に大きい高流動コンクリートにおいては, 水微粉末比でブリーディング量と凝結時間が急激に変化する値があり, その値は, 所定のスランプフロー値を得るために必要な高性能AE減水剤使用量が急激に増加する値にほぼ等しく, 水微粉末比に限界値が存在する。本実験の範囲内では, 限界の水微粉末比は0.3程度である。このときの単位フライアッシュ量は300kg/m³程度である。

参考文献

- 1)川口修宏, 河野 清, 森内誠司:フライアッシュを多量に使用したコンクリートの基礎的性質, セメントコンクリート論文集, No.49, pp.120-125, 1996.1
- 2)土木学会:高流動コンクリートに関する技術の現状と課題, コンクリート技術シリーズ, No.15, 1996.12
- 3)日本建築学会:高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針(案)・同解説, 技報堂出版, 1997.1
- 4)岡村 甫, 前川宏一, 小澤一雅:ハイパフォーマンスコンクリート, 技報堂出版, pp.39-40, 1993.9