

論文 フライアッシュの性質が混和剤の添加量に及ぼす影響

吉野 公^{*1}・井上 正一^{*2}・黒田 保^{*3}・村山 真一^{*4}

要旨：本研究では、フライアッシュを有効利用するための基礎的資料を得るために、まず、フライアッシュを含めた粉体の性質がペーストの流動性および混和剤使用量に及ぼす影響を検討した。つぎに、フライアッシュをコンクリートの細骨材の一部として代替使用することを想定したモルタルで、その流動性、空気連行性、凝結時間を検討した。これらの結果に基づき、フライアッシュの性質の内、BET 比表面積に基づいた混和剤の添加量決定方法を提案している。また、混和剤の添加量を減らすための効果的な練り混ぜ順序に関しても検討している。

キーワード：フライアッシュ, BET 比表面積, 拘束水比, 変形係数, 混和剤添加量

1. はじめに

石炭灰の多くは、セメント原料およびコンクリート用混和材(フライアッシュ)として利用されてきたが、その使用量は、セメント質量に対して 30%が限度と比較的少なく、増加する石炭灰の処理問題についてさらなる有効利用が課題となっている。さらに、フライアッシュの品質は、石炭火力発電の増進に伴う海外炭の使用量の増加、ならびに窒素酸化物や硫黄酸化物低減のための石炭燃焼炉における排ガス循環、2 段燃焼等の実施により副産される石炭火力発電所によってバラツキが大きくなっていることやフライアッシュの性質が単位水量あるいは混和剤使用量に大きく影響することなどの問題点も挙げられている^{1), 2)}。

これらの問題に大きくかかわっているのは、フライアッシュ中に含まれる未燃炭素量である。フライアッシュ中の未燃炭素は多くの空隙を有し、水および混和剤を吸着することから、未燃炭素量の大小により、単位水量および混和剤使用量が異なってくる。また、フライアッシュ中の未燃炭素量は同じ火力発電所から生産されて

いてもその変動が大きい。

この問題を解決するために、フライアッシュの品質改善および品質安定化のための未燃炭素除去方法の研究¹⁾なども行われているが、新たな設備の設置やコストの問題が生じる。単位水量あるいは混和剤添加量に及ぼすフライアッシュの物理的指標が明らかになれば、混和剤によるフレッシュコンクリートの品質安定を図る手法が提案できるものと考えられる。

本論文では、フライアッシュを混入したフレッシュコンクリートの品質安定を図る手法を提案するための基礎的資料を得ることを目的として行った研究の結果を報告するものである。

2. 実験計画

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質を表-1に示す。なお、フライアッシュ FA1 と FA2 はおなじ石炭火力発電所から得られたものであるが、採取時期の異なるものである。また、フライアッシュ中の未燃炭素は内部に多くの空隙を有すが、ブレーン法では未燃炭素の表面積

*1 鳥取大学 工学部土木工学科助教授 工博 (正会員)

*2 鳥取大学 工学部土木工学科教授 工博 (正会員)

*3 鳥取大学 工学部土木工学科助手 工博 (正会員)

*4 鳥取大学大学院 工学研究科博士前期過程

を正確に測定できないと考えられ、窒素吸着による BET 比表面積を測定した。セメントは、普通ポルトランドセメントを用いたが、粉体の性質を比較する研究では、参考のため高炉セメントおよび高炉スラグ微粉末も用いた。これらの物理的性質を表－2に示す。

混和剤は、リグニンスルホン酸系の AE 減水剤とアルキルアリルスルファン酸系の AE 助剤、ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤と変性アルキルカルボン酸系の AE 助剤を用いた。また、モルタルの試験における細骨材は、0.15mm 以下の微粒分の少ない中国産細骨材（密度：2.59，FM：2.83，0.15mm 以下 2%）を用いた。

2.2 実験計画

本研究は、以下の項目に関して実験を行った。

(1) フライアッシュの性質やフライアッシュの混合率がセメントペーストの流動性および混和剤の使用量に及ぼす影響

(2) フライアッシュをコンクリートの細骨材の一部として代替使用することを想定したモルタルに対しての流動性，空気連行性，凝結時間の検討

(3) 混和剤の添加時期がペースト，モルタルの流動性およびモルタルの空気連行性に及ぼす影響の検討

まず，(1)に関して，6種類の粉体を使用し，粉体の種類がペーストの流動性に及ぼす影響を検討した。試験は，フロー試験を行い，流動性の評価方法としては，相対フロー面積比と水粉体容積比の関係およびそれから求まる拘束水比および変形係数を用いた³⁾。また，得られた結果に基づいて，減水剤の添加量の検討を行った。

表－1 フライアッシュの性質

記号		FA1	FA2	FB
密度	(g/cm ³)	2.26	2.28	2.22
比表面積	ブレーン (cm ² /g)	3,191	3,090	4,252
	BET (m ² /g)	3.591	4.358	5.215
強熱減量	(%)	1.94	—	4.64
フロー値比	(%)	95	—	93

表－2 セメント，高炉スラグ微粉末の性質

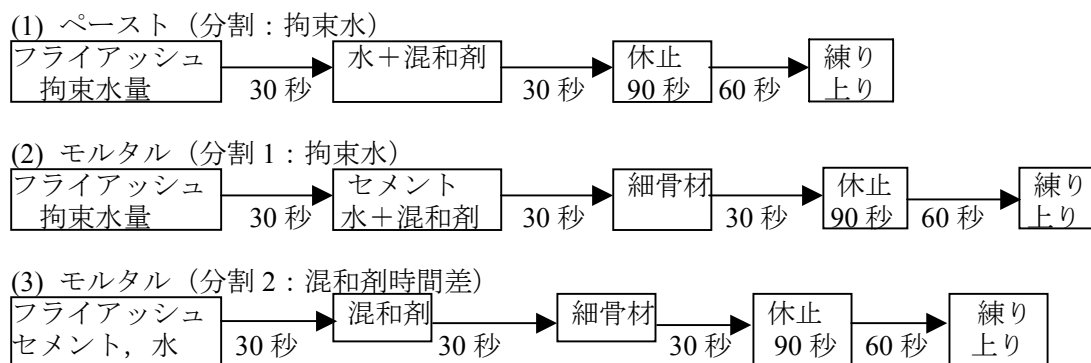
名 称		普通	高炉	高炉スラグ
記 号		C	B	FS
密度	(g/cm ³)	3.15	3.02	2.89
比表面積	ブレーン (cm ² /g)	3,300	3,940	4,540
	BET (m ² /g)	0.690	1.045	—

(2) に関しては，微粒分量の少ない中国産砂へ置換率 10%でフライアッシュを置換することを想定し，スランプ 8cm が得られている中国産細骨材使用コンクリートのモルタル部分の配合とした⁴⁾。表－3に参考としたコンクリートの配合およびモルタルの配合を示す。なお，フライアッシュは，細骨材に対して容積で 10%置換とした。検討項目は，AE 助剤量と空気量の関係，フロー値および凝結時間である。

(3) に関しては，ペーストでは図－1に示すようにあらかじめ拘束水に相当する水量でフライアッシュを 30 秒間練混ぜ，その後残りの水と減水剤を添加し練混ぜる方法を，またモルタルでは，ペーストと同様の練混ぜ方法とフライアッシュとセメントを混和剤を除く水量であらかじめ練混ぜる方法を採用し，これらの方法がペーストの流動性あるいはモルタルの流動性

表－3 配合表

種 類	最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	W/C (%)	空気量 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
						W	C	F	S	G
コンクリート	20	8	55	6.0	45	150	273	—	818	1014
無置換モルタル	—	—	55	8.0	—	245	445	—	1380	—
FA1 モルタル	—	—	55	8.0	—	245	445	121	1243	—
FA2 モルタル	—	—	55	8.0	—	245	445	121	1243	—
FB モルタル	—	—	55	8.0	—	245	445	118	1243	—



図－1 練混ぜ方法

および空気連行性に及ぼす影響を検討した。

なお、練混ぜは、JIS R5201 に準拠し、全材料投入後 30 秒までは低速で練混ぜ、試料のかき落としの 15 秒間を含む 90 秒の休止の後は高速で練混ぜを行った。

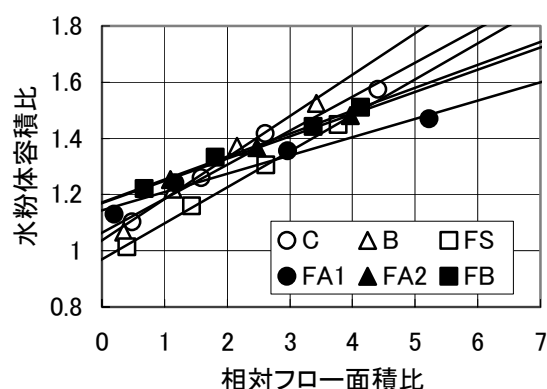
3. 結果および考察

3.1 粉体の種類がペーストの流動性に及ぼす影響

図－2 に各種粉体の相対フロー面積比と水粉体容積比の関係を示す。また、表－4 に各種粉体の拘束水比と変形係数を示す。拘束水比は、ペーストが変形し始めるときの水粉体容積比であり、粉体に拘束される水量の程度を表す。変形係数は、主に粒子形状に支配されるもので、ペーストが変形する際の変形のし易さの程度を表すものである。これらの値が小さいほど、所定の相対フロー面積比を得るための水量は小さくなり、粉体の特性が良好であることを示している²⁾とされている。

図－2、表－4 より、本研究で用いたフライアッシュは、セメントおよび高炉スラグ微粉末に比べ、拘束水比が大きく、変形係数が小さいことがわかる。また、セメントの直線とフライアッシュの直線は交わっており、水粉体容積比によって、流動性の大小が異なる。フライアッシュ間では、BET 比表面積が大きいものほど拘束水比、変形係数とも大きくなっており、粉体の特性としては、悪くなることを示している。

図－3 は AE 減水剤を規定量 (粉体質量×



図－2 相対フロー面積比と水粉体容積比との関係 (混和剤無添加)

表－4 拘束水比と変形係数 (混和剤無添加)

粉体の種類	拘束水比	変形係数
C	1.06	0.121
B	1.04	0.147
FS	0.97	0.128
FA1	1.14	0.065
FA2	1.16	0.079
FB	1.17	0.082

0.25%) 添加したときの相対フロー面積比と水粉体容積比の関係を示したもので、図－4 は高性能 AE 減水剤を AE 減水剤と同量添加したときの相対フロー面積比と水粉体容積比の関係を示したものである。また、表－5 はそのときの拘束水比と変形係数を示したものである。フライアッシュ以外の粉体は減水剤を添加しない場合に比べ拘束水比、変形係数とも小さくなっており、流動性がよくなっていることがわかる。それに比べるとフライアッシュは、拘束水比、変形係数の変化は僅かであり、ほとんど減水剤を添加

した効果が表れていない。

配合設計において、AE 減水剤添加量は粉体質量に対して一定の割合で添加されている。これは、粉体の表面に混和剤が吸着し、粉体粒子の分散を促すため、粉体質量が増加すると減水剤の添加量も増加させる必要があるためである。

しかし、前述のように、フライアッシュは、他の粉体に比べると減水剤の添加量を質量比において一定とするとあまり効果が期待できない結果となった。本来、減水剤は粉体の表面に吸着し、粉体粒子を分散させるものである。したがって、セメントと密度が異なったり、比表面積が異なったりする場合には、粉体の表面積が減水剤の添加量基準になるものと考えられる。また、フライアッシュを混合したコンクリートに所定の空気量を得るための AE 剤量は、フライアッシュの BET 比表面積と比例することが明らかになっている⁵⁾。したがって、混和剤が粉体表面に吸着することを考えると、窒素吸着による BET 比表面積の方がブレン比表面積よりも混和剤の添加量と関連が深いと考えられる。そこで、フライアッシュの減水剤添加量を普通ポルトランドセメントに対する BET 比表面積の比率で増加させた場合のペーストの流動性の検討を行った。なお、FA1 の BET 比表面積は普通ポルトランドセメントの 5.20 倍、FA2 は 6.32 倍、FB は 7.56 倍となる。相対フロー面積比と水粉体容積比との関係を図-5、図-6 に、拘束水比、変形係数を表-6 に示す。

BET 比表面積に対する比率で減水剤を添加した場合のフライアッシュは、拘束水比、変形係数ともほとんど同じ値となっている。このことより、BET 比表面積の大きいフライアッシュを使用するときには、減水剤が多く必要になることが考えられる。また、減水剤の添加量を増加させたとき、ある値の水粉体容積比を超えると普通ポルトランドセメントよりも相対フロー面積比が大きくなることが確認できた。

3.2 モルタルのフレッシュ性状

通常、AE 減水剤を多量に添加すると流動性に

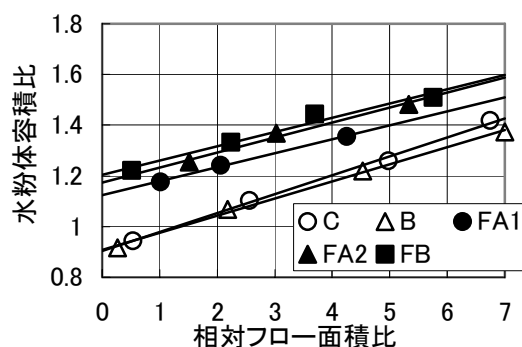


図-3 相対フロー面積比と水粉体容積比との関係 (AE 減水剤添加)

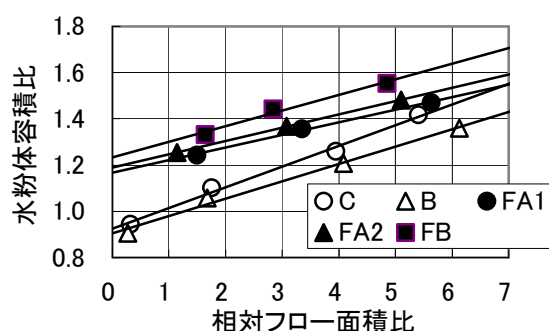


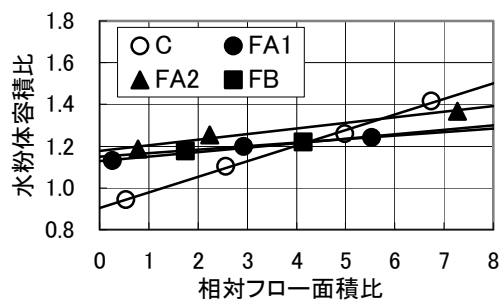
図-4 相対フロー面積比と水粉体容積比との関係 (高性能 AE 減水剤添加)

表-5 拘束水比と変形係数 (減水剤添加)

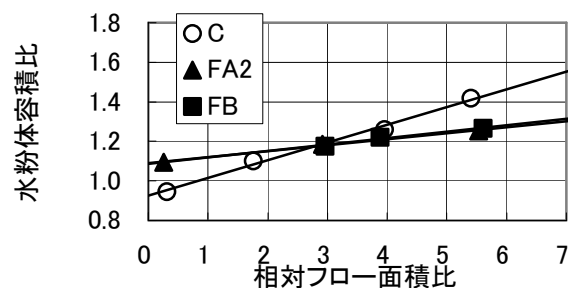
減水剤	粉体の種類	拘束水比	変形係数
A E 減水剤	C	0.90	0.075
	B	0.91	0.066
	FA1	1.12	0.055
	FA2	1.17	0.059
	FB	1.21	0.056
高性能 A E 減水剤	C	0.93	0.090
	B	0.91	0.075
	FA1	1.16	0.055
	FA2	1.19	0.058
	FB	1.23	0.068

は効果的に作用するが、凝結遅延や過大空気連行が弊害となる。そこで、フライアッシュを細骨材の一部として代替使用することを想定したモルタルに対して、フライアッシュに対しては BET 比表面積の比率でもとめた減水剤量を添加し、フロー値、空気量、凝結時間の検討を行った。

図-7 は AE 助剤量と空気量の関係を示した



図－５ 相対フロー面積比と水粉体容積比と関係（AE 減水剤量変更）



図－６ 相対フロー面積比と水粉体容積比と関係（高性能 AE 減水剤変更）

ものである。フライアッシュを置換しないモルタル（F0）では、AE 助剤を添加しなくても所定の空気量が得られているが、フライアッシュ置換を行ったモルタルでは、減水剤の添加量を増やしたにもかかわらず、AE 助剤を添加しなければ、所定の空気量を達成することはできず、また、BET 比表面積の大きいフライアッシュほど AE 助剤量が多くなることがわかる。

所定の空気量が得られたモルタルのフロー値を図－８に示す。比表面積に対して減水剤を添加することによって、モルタルのフロー値は、同程度の値が得られた。

表－７は凝結試験の結果である。AE 減水剤を用いた場合には、AE 減水剤添加量が増加するに従ってかなりの凝結遅延が見られる。したがって、流動性を確保するために AE 減水剤添加量が増加することは、空気連行性にはほとんど影響しないが、凝結時間には悪影響を及ぼすといえる。一方、高性能 AE 減水剤添加量を増加した場合には、凝結遅延はほとんど問題ないことがわかる。

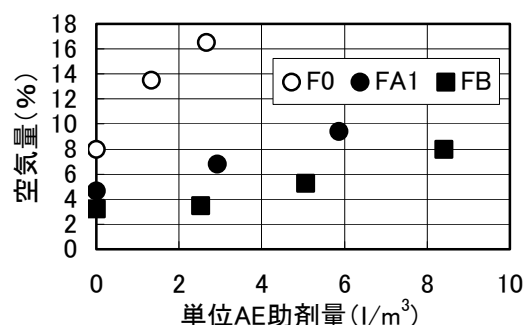
3.3 水分割練混ぜの影響

フライアッシュの未燃炭素にまず水だけを吸着させた後、混和剤を添加すれば、混和剤の効果が大きくなると考え、水を分割して練混ぜる方法の効果を検討した。

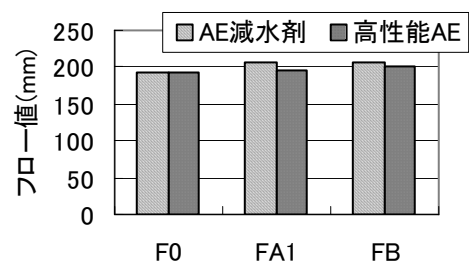
図－９は、標準的な練混ぜを行ったペーストと拘束水量の水で練混ぜた後残りの水と減水剤を添加したペーストの流動性を比較したものである。図より、あらかじめ拘束水で練混ぜ、未

表－６ 拘束水比と変形係数（減水剤量変更）

減水剤	粉体の種類	拘束水比	変形係数
A E 減水剤	C	0.90	0.075
	FA1	1.13	0.021
	FA2	1.18	0.027
	FB	1.15	0.017
高性能 A E 減水剤	C	0.93	0.090
	FA2	1.09	0.030
	FB	1.09	0.033



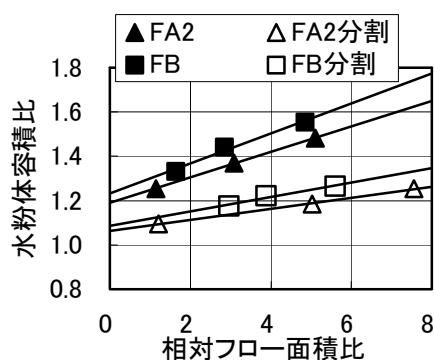
図－７ AE 助剤量と空気量の関係



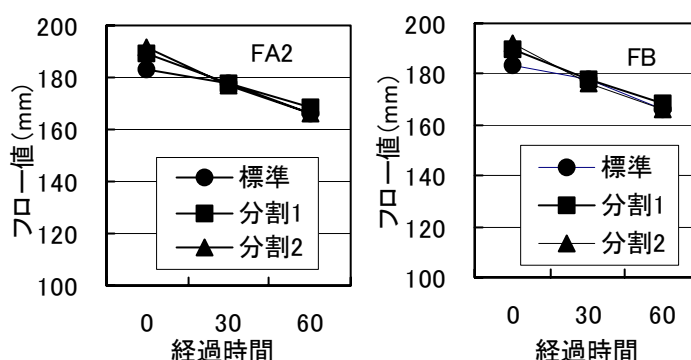
図－８ モルタルのフロー値

表－７ 凝結時間結果

試料	AE 減水剤		高性能 AE 減水剤	
	始発	終結	始発	終結
F0	7:30	10:25	6:40	9:00
FA1	10:05	12:40	7:55	9:50
FB	11:35	14:35	8:10	10:05



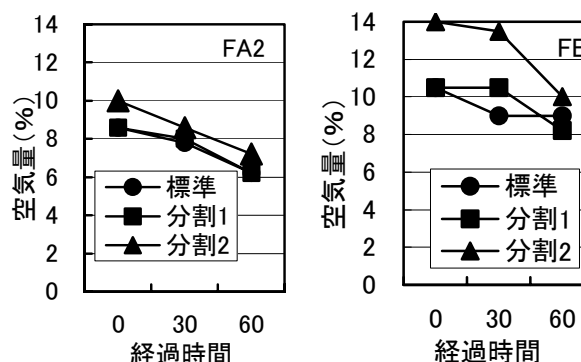
図－9 水分割添加の影響（ペースト）



図－10 水分割添加の影響（モルタル：フロー値）

燃炭素に水を吸着させてから減水剤を添加する方が減水剤の効果がより発揮されていることがわかる。

図－10 および図－11 は、モルタルにおいて、練混ぜの影響を検討したものである。図より、ペーストの場合ほど水分割の効果は表れていないが、フライアッシュとセメントを混和剤量を除く水量であらかじめ練混ぜた場合（分割2）に、連行空気が増加する傾向が見られた。



図－11 水分割添加の影響（モルタル：空気量）

4. まとめ

本研究の範囲内で得られた知見を以下に要約し、まとめとする。

- (1) BET 比表面積が $3.60 \text{ m}^2/\text{g}$ 以上のフライアッシュでは、セメントと同じ質量比率で減水剤を添加した場合には、BET 比表面積の大きいものほど流動性が悪い。
- (2) BET 比表面積に基づいた減水剤量添加を行うと、フライアッシュは性質の違いにかかわらず同様の流動性が得られる。
- (3) 細骨材の一部をフライアッシュ置換したモルタルにおいて、BET 比表面積に基づいた減水剤添加を行うと、フライアッシュ置換をしないモルタルと同等の流動性が得られるが、空気連行性にはほとんど影響せず、AE 減水剤の場合には凝結遅延が生じる。
- (4) フライアッシュにあらかじめ水を吸着させる練混ぜ方法により、減水剤の添加量を少なくできる可能性がある。

参考文献

- 1) 松藤泰典ほか：石炭灰をコンクリートに大量使用するための安定化処理に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.115-120，2000
- 2) 三岩敬孝：フライアッシュを大量使用した高流動コンクリートに関する基礎的研究，徳島大学博士論文，p.15，2001.4
- 3) 枝松良展，山口昇三，岡村 甫：モルタルの変形性を表す細骨材特性の定量化，土木学会論文集，No.538，pp.37-46，1996.5
- 4) 吉野 公ほか：中国産砂と廃棄微粉末の細骨材への利用に関する研究，材料，Vol.51，No.10，pp.1086-1091，2002.10
- 5) 松永 篤，伊藤智章，松嶋信行：石炭灰を細骨材に置換して用いたコンクリートの流動性および空気連行性，セメント・コンクリート論文集，No.53，pp.336-372，1999