フライアッシュの品質および代替率が高流動コンクリートの諸特性に及ぼす影響[†]

三 岩 敬 孝* 戸 川 一 夫* 中 本 純 次*

Effect of the Quality and Replacing Ratio of Fly Ash on the Property of Self-Compacting Concrete

by

Yoshitaka MITSUWA*, Kazuo TOGAWA* and Junji NAKAMOTO*

In order to use fly ash being discharged from the boilers of a coal fired in thermal power station effectively, the authors aimed at self-compacting concrete using high-volume fly ash. However, the qualities of fly ash vary in each of the power station. This study shows the effects that the replacing ratio, the qualities and the specific surface area have on the fluidity, the setting time and the carbonation depth about self-compacting concrete including fly ash. The results obtained are as follows: The fluidity is improved with the decrease of the specific surface area of fly ash. The setting time is increased with the increment of the specific surface area of fly ash. The carbonation depth of self-compacting concrete is very susceptible to the replacing ratio of fly ash. And the effect that the specific surface area of fly ash has on the carbonation depth of self-compacting concrete is small.

Key words: Fly ash, Water retaining ratio, Modulus of deformation, Specific surface area, Setting time, Carbonation depth

1 緒 言

現在、我が国ではエネルギー源の多くを石油に依存している。しかし、石油資源の枯渇化が危惧されるようになり、最近では、世界中に豊富に分布している石炭を用いた石炭火力発電所が再び脚光を浴びてきている。このため、全国各地で石炭火力発電所が建設あるいは計画されている。

石炭火力発電所から副産される石炭灰のなかで JIS 規格に合格しないものは埋め立て用として処理されており、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の質量の 30%、すなわち一般に C 種がフライアッシュセメントとして限度とされている。今後、石炭火力発電所の建設が進むにつれて、副産されるフライアッシュが増加することは明らかであり、また、ボイラー等の改善により新しく建設された発電所から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る。このため、フライアッシュを多量に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。^{1)~3)}

一方、近年の労働力不足から欠陥の少ないコンクリート構造物を合理的に施工する目的で、締固め不要の高流動コンクリートが注目され、様々な面から研究されてきている。^{4)~6)} この高流動コンクリートには、粉体を多量に用いることにより材料分離抵抗性を高めた粉体系高流動コンクリート、増粘剤によって材料分離抵抗性を高めた増粘剤系高流動コンクリートおよび両者を併用した併用系高流動コンクリートがある。筆者はフライアッシュ

を多量に有効利用するため粉体系高流動コンクリートに着目し、現在、上限とされているセメント質量に対して 30% よりも多量に使用した高流動コンクリートについて、フライアッシュの使用量の限界について検討を行った。⁶⁾ しかし、フライアッシュは副産される発電所により品質が異なり、さらに最近では、粒度調整を行った分級フライアッシュ等、品質は大きく異なっている。このため、使用するフライアッシュの品質によって高流動コンクリートの品質が変化することが考えられる。

そこで本研究では、フライアッシュの品質、特に比表面積に着目し、比表面積が $10\,000\text{cm}^2/\text{g}$ 程度の分級フライアッシュを含めた 4 種類のフライアッシュを使用し、その代替量および比表面積がフライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートとして問題となる流動性、凝結特性および中性化に及ぼす影響について検討を行うとともに、粉体系高流動コンクリートに適したフライアッシュについて検討した。

2 実験概要

2.1 使用材料

2.1.1 セメント セメントは普通ポルトランドセメント、密度 $3.15\text{g}/\text{cm}^3$ を使用した。

2.1.2 骨材 粗骨材は、表乾密度 $2.64\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 1.30%、実積率 = 56.7%、最大寸法 13mm の和歌山県由良産の硬質砂岩碎石を用い、細骨材は、表乾密度 $2.54\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 2.60%、粗粒率 = 2.97 の和歌山県日高川産川砂を使用した。

2.1.3 フライアッシュ フライアッシュは、比表面

[†] 原稿受理 平成 10 年 11 月 2 日 Received Nov. 2, 1998

* 正 会 員 和歌山工業高等専門学校環境都市工学科 〒644-0023 御坊市名田町野島, Dept. of Civil Eng., Wakayama National College of Tech., Nada-cho, Gobo, 644-0023

積 $2660\text{cm}^2/\text{g}$, $4410\text{cm}^2/\text{g}$, $6430\text{cm}^2/\text{g}$ および $9910\text{cm}^2/\text{g}$ の JIS に合格するものを 4 種類使用した. フライアッシュの物理的性質を Table I に示す.

2・1・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 ペーストおよびコンクリートの配合

フライアッシュの品質が凝結特性に及ぼす影響についてはペーストで検討を行った. また, 流動性および中性化についてはペーストおよび高流動コンクリートで検討した.

使用したペーストは, セメントのみを使用し, JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に規定する標準軟度のものを基準とした. まず, 流動性を評価するため, 結合材容積を一定とし, 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. ただしフライアッシュの品質の影響が明確に現れるよう高性能 AE 減水剤および空気量調整剤は使用しないこととした.

高流動コンクリートについては, 結合材容積に対して 35 ~ 65vol% のフライアッシュを代替使用し, さらに単

位セメント量を一定とし細骨材容積に対して 10 および 20vol% のフライアッシュを代替使用した.

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 $60 \pm 5\text{cm}$, 目標空気量 $5 \pm 1.5\%$ である. ここで, 高性能 AE 減水剤使用量を一定とした場合, 必要なスランプフロー値が得られなかったため, 混和剤使用量を変化させて調整を行った. 使用した高流動コンクリートの配合条件を Table II に示す.

2・3 ペーストおよびコンクリートの練混ぜ

ペーストの練混ぜには JIS R 5201 に規定するモルタルミキサを使用し, セメントと一次水とを低速で 60 秒練り混ぜたあと, ミキサに付着したペーストをかき落として, さらに高速で 60 秒間練り混ぜ, 次いで二次水を投入し低速で 60 秒間練り混ぜた後, 再びミキサに付着したペーストをかき落として, さらに低速で 60 秒間練り混ぜた. ここで, 一次水の水量は, 粉体としてセメントのみを使用したときの標準軟度水量に対して 1.1 倍である.⁷⁾

高流動コンクリートの練混ぜには, パン型強制練りミキサを使用した. 練混ぜ方法は, 所定の粗骨材, 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 秒間練り混ぜた.

2・4 試験項目および試験方法

2・4・1 ペーストのフロー試験 ペーストのフロー試験は, JIS R 5201 に基づき, ただし振動を加えず行った.

2・4・2 凝結試験 ペーストの凝結試験では, JIS R 5201 の判定基準に基づいて始発および終結時間を判定した.

2・4・3 高流動コンクリートの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, スランプフロー値を測定した. ただし, 試料は突固めや振動を与えずに一層で詰めた.

2・4・4 促進中性化試験 促進中性化試験は, 供試体作成後材齢 28 日まで, $20 \pm 1^\circ\text{C}$ の水中養生した後, 7 日間気中で乾燥させ, 促進中性化試験装置(温度 30°C , 湿度 60 ~ 70%, CO_2 濃度 15%)を用いて, 所定の材齢まで中性化促進養生を行った.

Table I . Physical properties of fly ash.

No.	Kind of fly ash	Density (g/cm ³)	Specific surface area (cm ² /g)
1	Fly ash	2.22	2660
2	Fly ash	2.27	4410
3	Classified fly ash	2.51	6430
4	Classified fly ash	2.40	9910

Table II . Mix condition.

Item	Mix condition
Slump flow	$60 \pm 5\text{cm}$
Air	$5 \pm 1.5\%$
Maximum size of coarse aggregate	13mm
Unit water content	0.175m^3
Replacing ratio of water to a cementitious material	89vol%
Unit coarse aggregate content	0.311m^3
Replacing ratio of fly ash to a cementitious material	35, 45, 55, 65vol%
Replacing ratio of fly ash to fine aggregate	0, 10, 20vol%
Specific surface area of fly ash (cm ² /g)	2660, 4410, 6430, 9910

Fig. 1. Relation between relative flow area and water powder ratio by volume paste.

2・5 拘束水比 βp および変形係数 E_p

本研究では、ペーストの流動性を拘束水比 βp と変形係数 E_p とで評価した。⁷⁾

拘束水比 βp とは、相対フロー面積比 Γp (式 (1)) と水粉体容積比との関係を一次近似したとき、 $\Gamma p = 0$ となるところの水粉体容積比の値とし、変形係数 E_p とはその時の傾きとした (Fig. 1 参照)。

$$\Gamma p = (Fp/100)^2 - 1 \quad (1)$$

ここで、 Γp : ペーストの相対フロー面積比

Fp : 振動を加えない場合のペーストのフロー値(mm)

3 実験結果および考察

3・1 流動性

3・1・1 代替率の影響 単位水量を一定とし、比表面積 $2660\text{cm}^2/\text{g}$ のフライアッシュを結合材容積に対して代替使用したときのペーストの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係を Fig. 2 に示す。各配合における相対フロー面積比と水粉体容積比の間には非常に高い相関関係があり、単位水量を一定としていることから、結合材に対してフライアッシュを代替使用するほど流動性は向上する。

3・1・2 比表面積の影響 単位結合材容積および単位水量を一定とし、比表面積の異なる4種類のフライアッシュを結合材容積に対して55vol%代替使用したときのペーストの相対フロー面積比と水粉体容積比との関係を Fig. 3 に示す。また、さらに、比表面積 $2660\text{cm}^2/\text{g}$ のフライアッシュを結合材容積に対して55vol%代替使用した高流動コンクリートの混和剤使用量において、比表面積の異なるフライアッシュを使用した時のスランプフロー試験結果を Fig. 4 に示す。図から、比表面積の大きなフライアッシュを用いるほど流動性は低下するといえる。

3・2 拘束水比 βp および変形係数 E_p

3・2・1 拘束水比 βp 結合材に対してフライアッシュを代替使用したときの代替率と拘束水比との関係、また比表面積と拘束水比との関係を Fig. 5, Fig. 6 にそれぞれ示す。

結合材に対するフライアッシュの代替率が大きいほど、また、代替するフライアッシュの比表面積が小さいほど拘束水比は小さくなることが分かる。これらのことから単位水量を一定とした場合、比表面積の小さいフライアッシュを結合材に代替使用するほど拘束されない遊離水が多くなり、その結果ブリーディング量が増加する結果となる。

3・2・2 変形係数 E_p 結合材に対してフライアッシュを代替使用したときの代替率と変形係数との関係、また比表面積と変形係数との関係を Fig. 7, Fig. 8 にそれぞれ示す。

フライアッシュの代替率が大きくなるにつれて変形係数は小さくなり、また比表面積が小さくなるにつれて変形係数が小さくなる。これらのことから、比表面積の小さなフライアッシュを多量に使用するほど水量の変化に

Fig. 2. Relationship between relative flow area and water powder ratio by volume paste. (Effect of replacing ratio).

Fig. 3. Relationship between relative flow area and water powder ratio by volume paste. (Effect of specific surface area).

Fig. 4. Relationship between specific surface area and slump flow.

対する流動性が大きく変化するといえる。

これらのことから、フライアッシュを多量に使用するためには水量の管理が困難になるものの、流動性を向上させ、混和剤の使用量を低減することができる比表面積の小さなフライアッシュが適しているといえる。

Fig. 5. Relationship between replacing ratio of fly ash and water retaining ratio.

Fig. 8. Relationship between specific surface area of fly ash and modulus of deformation.

Fig. 6. Relationship between specific surface area of fly ash and water retaining ratio.

Fig. 9. Relationship between specific surface area of fly ash and setting time.

Fig. 7. Relationship between replacing ratio of fly ash and modulus of deformation.

3・3 凝結特性

Fig. 9 に水粉体容積比一定のもとで、結合材容積に対して 55vol% のフライアッシュを代替使用し、フライアッシュの比表面積を変化させたペーストおよび JIS R 5201 に規定する標準軟度水量を添加して作成したペーストの凝結試験結果を示す。また、比較用としてフライアッシュ無添加で標準軟度のペーストの凝結試験も行った。

フライアッシュの化学成分の影響についてここでは考慮していないが、フライアッシュを結合材に代替使用することにより凝結時間が長くなることは明らかである。また、フライアッシュの比表面積が大きくなるほど凝結時間は長くなる。特に比表面積が $6430\text{cm}^2/\text{g}$ と大きなフ

ライアッシュを代替使用した場合、JIS 規格値より若干大きな比表面積 $2660\text{cm}^2/\text{g}$ のフライアッシュと比較すると 1.5 倍程度凝結時間が長くなり、また、フライアッシュ無添加のペーストに比較すると 2 倍程度凝結時間が長くなっている。これは、全てのペーストを標準軟度とした場合でも同じであることから、セメントの水和によって溶出される Ca^{2+} イオンや SO_4^{2-} イオン等がフライアッシュの粒子表面に吸着され、その結果、細孔溶液中のイオン濃度が低下し、セメントの水和反応を遅延させているものと考えられる。

3・4 促進中性化試験

比表面積 $2660\text{cm}^2/\text{g}$ のフライアッシュを結合材容積に対して 35, 45, 55 および 65vol% 代替使用した高流動コンクリートの中性化試験結果を Fig. 10 に示す。また、結合材容積に対して 55vol% のフライアッシュを代替使用し、さらに比表面積 $2660\text{cm}^2/\text{g}$ のフライアッシュを細骨材容積に対して 10 および 20vol% 代替使用した高流動コンクリートの促進中性化試験結果を Fig. 11 に示す。さらに、比表面積の異なるフライアッシュを結合材容積に対して 55vol% 代替使用した時の影響について、Fig. 12 に示す。

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、フライアッシュの代替率の増加に伴って、中性化深さは大きくなる。これは、フライアッシュをセメントに

Fig. 10. Result of carbonation test (replacing ratio to a cementitious material).

Fig. 12. Result of carbonation test (specific surface area of fly ash).

Fig. 11. Result of carbonation test (replacing ratio to fine aggregate).

代替することにより、単位セメント量が減少し、その結果、生成される水酸化カルシウム量が減少するためである。また、フライアッシュをセメントに代替使用したことにより強度発現が遅れていることが考えられる。

次に、結合材に対する代替率を 55vol% と一定とし、細骨材に対して 10 および 20vol% のフライアッシュを代替使用した。その結果、Fig. 11 より中性化深さに余り影響がないことが分かる。これは粉体系高流動コンクリートとしていることから、結合材量が通常のコンクリートに比較して多く、そのため、結合材容積に対して 55vol% のフライアッシュを代替しても十分なセメント量が確保できていると考えられる。

さらに Fig. 12 より、若干バラツキは大きいものの、フライアッシュの比表面積が変化しても、中性化の進行に余り影響がないものと思われる。

これらのことから、フライアッシュを結合材のみならず細骨材の一部として多量に代替使用した場合、十分なセメント量を確保しておくことが重要である。

4 結 論

フライアッシュを多量に有効利用することを目的に、粉体系高流動コンクリートに着目した。しかし、フライアッシュは副産される発電所によって品質が大きく異なることから、フライアッシュの代替率および品質、特に比表面積が、フライアッシュを利用した高流動コンクリートについて問題となる流動性、凝結特性および中性化について検討を行った。その結果を要約すると次の通りである。

- (1) 比表面積の小さなフライアッシュを多量に使用するほど流動性は向上する。
- (2) フライアッシュの比表面積が大きくなるほど凝結時間は長くなる。
- (3) フライアッシュの代替率が高流動コンクリートの中性化の進行に及ぼす影響は大きく、比表面積が中性化の進行に及ぼす影響は小さい。

参 考 文 献

- 1) V. M. Malhotra, Advances in Concrete Technology, p.433 (1992).
- 2) 川口修宏, 河野 清, 森内誠司, セメントコンクリート論文集, No.49, 120 (1995).
- 3) 河野 清, 川口修宏, 三田正和, 馬越唯好, セメント・コンクリート, No.593, 10 (1996).
- 4) 土木学会, “高流動コンクリートシンポジウム論文報告集”コンクリート技術シリーズ (1996).
- 5) 土木学会, コンクリート技術シリーズ, No.15 (1996).
- 6) 三岩敬孝, 平岡伸哉, 水口裕之, 橋本親典, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, 391 (1998).
- 7) 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”, p.40 (1993) 技報堂出版.