フライアッシュを多量使用した高流動コンクリート に対する高性能 AE 減水剤使用量の推定方法[†]

三 岩 敬 孝* 中 本 純 次* 戸 川 一 夫*

Estimate of Dosage of Superplasticizer in Self-Compacting Concrete Using High-Volume Fly Ash

by

Yoshitaka MITSUIWA*, Junji NAKAMOTO* and Kazuo TOGAWA*

Authors have been studying for several years on the effective utilization of fly ash, which is a by-product of the combustion of pulverized coal fired thermal power plants. The purpose of this study is to obtain the fundamental data on mixture proportioning of self-compacting concrete incorporating high-volume fly ash, especially how to determine the dosage requirement of superplasticizer in order to get the self-compacting concrete.

The results obtained in this study can be summarized as follows ;

(1) When fly ash is substituted for not only a part of cementitious materials but also a part of fine aggregate, it can be said that the relative flow area ratio (Γ_c) is in proportional to the relative funnel speed ratio (R_c). And the gradients of the lines, which means the value of the relative flow area ratio divided by the relative funnel speed ratio, increases continuously with increasing in the percent by volume of portland cement replaced by fly ash.

(2) There is a linear relation between the ratio of Γ_c to R_c and the dosage of superplasticizer for dosage of powder. Therefore, the dosage of superplasticizer can be predicted by supposing the aimed slump flow and the aimed efflux time of concrete.

Key words : High-volume fly ash, Self-compacting concrete, Superplasticizer, Relative flow area ratio, Relative funnel speed ratio

1 緒 言

近年、我が国ではエネルギー源の多様化が重要課題とされている。将来、石油資源の枯渇化が指摘されている中、世界中で豊富に残存する石炭が見直され、石炭火力発電所が全国各地で建設中あるいは計画されている。しかし、石炭火力発電所から副産される石炭灰を処分する際の埋め立て用地の確保、環境問題等を考慮すると、発電所の増加に伴い、今後、石炭灰の処理が課題になることが予測される。

一方、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、さまざまな研究がなされている。混和材としてフライアッシュを使用した粉体系高流動コンクリートもその一例である。^{1), 2)} フライアッシュは、コンクリート用混和材として使用すると、フレッシュ時のコンクリートの流動性が向上し、材料分離抵抗性が高まり、自己充てん性を有することから高流動コンクリートとして適した材料である。しかし、フライアッシュを用いた高流動コンクリートの配合手法については、いくつか提案されているものの、^{3) ~ 6)} 具体的に配合上必要な単位量の算出方法については確立されていないのが現状である。特に、高性能 AE 減水剤は、高流動コンクリートとしての要求

性能である流動性および材料分離抵抗性を確保するために必要不可欠な材料であるものの、その使用量は試し練りによって定めることとし「十分な実績がない場合には、製造メーカーの推奨値を参考に」となっている。³⁾

粉体系高流動コンクリートは使用する粉体質量が非常に多く、高性能 AE 減水剤使用量によって流動性および材料分離抵抗性は大きく異なる。しかし、高流動コンクリートとしての要求性能を満足するために必要な高性能 AE 減水剤使用量の算出方法については、高流動モルタルで検討が行われているだけで、高流動コンクリートとしては適用が可能であるかどうか定かではない。^{7), 8)}

本研究は、フライアッシュの多量有効利用を目的として、フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの流動性および材料分離抵抗性におよぼす高性能 AE 減水剤使用量の影響について明らかにするために、大内らの研究をもとに、高流動コンクリートの相対フロー面積比および相対ロート速度比⁹⁾を求めることによって、所要の性能を満足するために必要な高性能 AE 減水剤使用量の算出方法について検討を行った。

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

[†] 原稿受理 平成 12 年 10 月 30 日 Received Oct. 30, 2000

* 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

ント(密度 3.15g/cm^3 , 比表面積 $3390\text{cm}^2/\text{g}$)を使用した。

2・1・2 細骨材 細骨材は徳島県那賀川産の川砂(表乾密度 2.62g/cm^3 , 吸水率 2.25% および粗粒率 2.36)を使用した。

2・1・3 粗骨材 粗骨材は兵庫県赤穂産碎石(表乾密度 2.61g/cm^3 , 吸水率 1.21%, 粗粒率 6.67 および最大寸法 20mm)を使用した。

2・1・4 フライアッシュ 使用したフライアッシュは、電源開発(株)産の JIS A 6201 においてⅡ種に相当するものであり、フライアッシュの品質を Table I, Table II および電子顕微鏡写真を Fig. 1 にそれぞれ示す。

2・1・5 混和剤 高性能 AE 減水剤使用量を算出することが目的であるが、高性能 AE 減水剤はその主成分により、現在、ポリカルボン酸系、ナフタリン系、メラミン系およびアミノ酸系の 4 種に分類することができる。フライアッシュを多量に使用した高流動コンクリートの場合、所要の流動性を得るために必要な高性能 AE 減水剤使用量は主成分によって大きく異なり、かつ、その使用量によっては凝結および硬化後のコンクリートに悪影響を及ぼすものもある。

本研究では、実験の結果から、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所要の流動性を満足し、凝結時間が最も短い混和剤として、ポリカルボン酸エーテル系の高性能 AE 減水剤 (SP)⁹⁾ および高アルキルカルボン酸系の空気量調整剤 (AEA) を使用した。

2・2 コンクリートの配合および練混ぜ

2・2・1 配合の考え方 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)、細骨材容積 (V_S) および粗骨材容積 (V_G) を一定とし、まず、フライアッシュ (F_c) を結合材容積に対して 10, 20, 30, 40 および 50vol% 内割使用した。

次に、さらにフライアッシュの使用量を増加させるために、細骨材容積に対して 5, 10, 15 および 20vol% のフライアッシュ (F_s) を細骨材として代替使用することを計画した。

なお、粗骨材容積および細骨材容積は、汎用ハイパフォーマンスコンクリートの配合設計⁷⁾に基づいて決定した。

本実験で使用したコンクリートの配合を Table III に示す。

2・2・2 混和剤の使用量 混和剤の使用量は、結合材に対してのみフライアッシュを代替使用した配合を基準配合として、目標スランプフロー値 $65 \pm 5\text{cm}$ 、目標空気量 $5 \pm 1.5\%$ を満足する量とした。なお、細骨材の一部

をフライアッシュで代替使用する配合については、細骨材に対して代替しない基準配合の混和剤使用量の場合と同一量とした。その結果、細骨材に対してフライアッシュを代替使用すると、スランプフロー値などは異なる。

2・2・3 コンクリートの練混ぜ コンクリートの練混ぜには、パン型強制練りミキサ(容量 55 リットル)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 秒間空練りを行った。その後、あらかじめ混和剤を溶解した水を加えて、さらに 2 分 30 秒間練混ぜを行った。

2・3 試験項目および試験方法

2・3・1 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、スランプフロー値を測定した。

2・3・2 V 漏斗流下試験 コンクリートの練混ぜ後、直ちに V 漏斗試験装置(容量 10 リットル、吐出部の寸法 $65 \times 75\text{mm}$)で、流下時間を測定した。

3 実験結果

3・1 高性能 AE 減水剤使用量

結合材容積に対してのみフライアッシュを 10 ~ 50vol% 代替使用した場合、所要の流動性を得るために必要な高性能 AE 減水剤使用量を Fig. 2 に示す。

結合材容積に対してフライアッシュを代替使用すると、代替率の増加につれて高性能 AE 減水剤使用量が減少する。これは、セメントに比較してフライアッシュは球形の形状をしており、セメントに対して代替使用することによるボールベアリング作用からコンクリートの流動性が向上する。このため、代替率 0vol% が最も大きく、代替率が増加するにつれて、所要の流動性を得るために必要な高性能 AE 減水剤使用量は減少したと考えられる。

また、各配合におけるスランプフロー値および V 漏斗

Table II. Chemical properties of fly ash (Type II).

	SiO ₂ (%)	Hygroscopic moisture (%)	Loss on ignition (%)
JIS (Type II)	45.0 over	1.0 under	5.0 under
Test results	59.5	0.1	2.4

Table I. Physical properties of fly ash (Type II).

	Density (g/cm^3)	Specific surface area (cm^2/g)	Compressive strength (%)	
			28 days	91 days
JIS (Type II)	1.95 over	2500 over	80 over	90 over
Test results	2.26	4410	88	106

Fig. 1. SEM micrograph of fly ash.

Table III. Mixture proportions of concrete used in this study.

Type of mixture	W/(C+Fe+Fs) (%)	Total fly ash (kg)	Replacing ratio of cementitious materials (Vol%)	Replacing ratio of fine aggregate (Vol%)	Water (kg/m ³) (W)	Cementitious materials (kg/m ³)		Fine aggregate (kg/m ³)		Coarse aggregate (kg/m ³)	SP (kg/m ³)	AEA (kg/m ³)
						Cement (C)	Fly ash (Fc)	Fly ash (Fs)	Sand (S)			
F10-0	29.2	44	10	0	175	556	44	0	702	812	8.335	0.167
F10-5	27.8	75		5				30	667			
F10-10	26.5	105		10				61	632			
F10-15	25.3	135		15				91	597			
F10-20	24.7	165		20				121	562			
F20-0	30.0	89	20	0		494	89	0	702	812	7.903	0.148
F20-5	28.6	119		5				30	667			
F20-10	27.2	149		10				61	632			
F20-15	26.0	179		15				91	597			
F20-20	24.9	210		20				121	562			
F30-0	31.0	133	30	0		432	133	0	702	812	7.347	0.130
F30-5	29.4	163		5				30	667			
F30-10	28.0	193		10				61	632			
F30-15	26.7	224		15				91	597			
F30-20	25.5	254		20				121	562			
F40-0	32.0	177	40	0		370	177	0	702	812	7.038	0.111
F40-5	30.3	207		5				30	667			
F40-10	28.8	238		10				61	632			
F40-15	27.4	268		15				91	597			
F40-20	26.2	298		20				121	562			
F50-0	33.0	221	50	0		309	221	0	702	812	6.483	0.093
F50-5	31.2	252		5				30	667			
F50-10	29.6	282		10				61	632			
F50-15	28.2	312		15				91	597			
F50-20	26.9	343		20				121	562			

Notation: For example(F10-0), the front number shows the percent by volume of cementitious materials replaced by fly ash, and the back number shows the percent by volume of fine aggregate replaced by fly ash.

流下時間との関係を Fig. 3 および Fig. 4 にそれぞれ示す。なお、測定値を示していない配合 (F40-20, F50-20 など) は、スランプフロー値が 500mm に達しないもの、あるいは V 漏斗内で閉塞したものである。

高性能 AE 減水剤使用量および結合材に対するフライアッシュの代替率を一定とし、フライアッシュを細骨材に対して代替使用するとスランプフロー値は小さくなる。これは、コンクリート中における全粉体量が増加することにより、高性能 AE 減水剤が粉体粒子に吸着され、粉体の分散効果が低下したため、また、フライアッシュは細骨材に比較して粒子が細かく、水を拘束する力が大きいことによると考えられる。次に、Fig. 4 より所要の流動性を確保した配合 (F10-0, F20-0 など) は、流下時間はほとんど変わらないが、細骨材容積に対してフライアッシュを代替使用すると、すなわち、全粉体量が増加すると粘性の大きなコンクリートとなり V 漏斗流下時間が長くなる。

以上により、高流動コンクリートとして所要の性能、特にスランプフロー (流動性) および漏斗流下時間から評価することができる材料分離抵抗性を確保するためには、高性能 AE 減水剤による調整が必要であり、また、所要の性能を満足するために必要な高性能 AE 減水剤使用量は、使用される全粉体重量に影響を受けることが明らかになった。

Fig. 2. Relationship between the replacing ratio of fly ash for cementitious materials and the dosage of superplasticizer.

そこで、高流動コンクリートの配合設計において、フレッシュ時の要求性能である流動性および材料分離抵抗性を満足するために必要な高性能 AE 減水剤使用量を推定する手法として、流動性と材料分離抵抗性を相対フロー面積比および相対ロート速度比とで評価することとした。

3・2 相対フロー面積比と相対ロート速度比の定義

大内らによると、相対フロー面積比は、JIS A 5201 (セメントの物理試験方法) に定めるフローコーンを使用

Fig. 3. Results of slump flow test.

Fig. 4. Results of V-funnel test.

し、突固めや振動を加えず1層に詰め、行ったフロー試験より得られるフロー値の平均から、基準面積（直径100mmの円の面積）を用いて、式(1)で算定することができる。^{7), 8)}しかし、これは、モルタルでの測定を前提としていることから、高流動コンクリートとした場合、再度、試験練りを行う必要がある。

そこで、本実験では、同様の試験をJIS A 1101（コンクリートのスランプ試験）に規定されているコンクリート用のスランプコーンを用いてFig. 5に示すように高流動コンクリートのフロー試験を行い、測定されたフロー値の平均から同様に式(1)によって得られる値を相対フロー面積比と定義した。

$$\Gamma_c = \frac{d_1 d_2 - d_0^2}{d_0^2} \quad (1)$$

ここに、 Γ_c ：相対フロー面積比

d_0 ：フローコーン底面の直径 (mm)

Fig. 5. Size of slump flow test equipment used.

d_1 ：スランプフローの長直径 (mm)

d_2 ：スランプフローの短直径 (mm)

また、相対ロータ速度比とは、V漏斗流下試験 (Fig. 6

Fig. 6. Schematic of the V-funnel test apparatus.

参照)において、コンクリートが流下してしまうまでの時間(流下時間)を秒で表した値の逆数を10倍したもので評価するもので、式(2)により算出した。

$$R_c = \frac{10}{t} \quad (2)$$

ここに、 R_c ：相対ロート速度比

t ：V漏斗流下時間(s)

3・3 高性能 AE 減水剤使用量の推定

Fig. 7 に各配合における相対フロー面積比(Γ_c)と相対ロート速度(R_c)との関係を示す。

結合材に対するフライアッシュの代替率および高性能 AE 減水剤使用量を一定としていることから、細骨材に対するフライアッシュの代替率が多くなるにつれてスランプフロー値は小さく、また、漏斗流下時間は長くなり、相対フロー面積比および相対ロート速度比も小さくなる。ここでは相対フロー面積比と相対ロート速度比との関係は、結合材容積に対するフライアッシュの代替率が一定のもとでは原点を通る直線関係で表すことができた。また、結合材容積に対するフライアッシュの代替率を高くするにつれて直線の傾きは大きくなっている。すなわち、同じ流動性をもつ高流動コンクリートであっても、結合材に対するフライアッシュの代替率が異なると、材料分離抵抗性は異なることを表している。

Fig. 7. Relationship between relative flow area ratio (Γ_c) and relative funnel speed ratio (R_c).

一般にフライアッシュの密度はセメントに比較して小さく、結合材容積に対する代替率が増加することにより結合材質量は減少する。一方、高流動コンクリートとして所要の流動性および材料分離抵抗性を満足するための高性能 AE 減水剤使用量 (S_p) は使用する粉体質量 (P) によって大きな影響を受ける。つまり、Fig. 7 における直線の傾きは、全粉体量に対する高性能 AE 減水剤使用量 (S_p/P) に影響されることになる。

そこで、相対フロー面積比と相対ロート速度比との比 (Γ_c/R_c) と全粉体量に対する高性能 AE 減水剤使用量 (S_p/P) についてプロットしてみた (Fig. 8 参照)。

また、Fig. 9 および Table IV に、これまで著者らが行った実験データについて同様に処理した結果およびその使用材料を示す。

これらの図より、高性能 AE 減水剤による粉体粒子の分散効果は、使用される粉体の種類、品質等で異なるものの、 S_p/P と Γ_c/R_c との関係は、ある切片を持つ直線で表すことができた。ポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤は、主に立体障害反発力に基づいて粉体粒子を分散させ、コンクリートを流動化させると考えられており、¹⁰⁾ 切片の値は、高性能 AE 減水剤の分散効果を顕在化させるのに必要な最小限の添加量を意味する。

すなわち、高性能 AE 減水剤は、全粉体質量に対してある値(横軸切片)までは使用した粉体に吸着されるが、その値を超えると、分散効果が現れ、流動性に寄与すると考えられる。本研究で用いた高性能 AE 減水剤については S_p/P が 0.7 程度から分散効果が現れた。

Fig. 8. Effect of superplasticizer.

Fig. 9. Effect of superplasticizer.

Table IV. Materials used.

Cement	Density (g/cm ³)	3.15
	Specific surface area (cm ² /g)	3240
Fly ash	Density (g/cm ³)	2.21
	Specific surface area (cm ² /g)	4210
	SiO ₂ (%)	59.5
	Loss on ignition (%)	2.4
Fine aggregate	Density (g/cm ³)	2.63
	F.M.	2.92
Coarse aggregate	Density (g/cm ³)	2.64
	F.M.	6.88
	Maximum size (mm)	20

土木学会では、粉体系高流動コンクリートの配合設計において、配合条件であるフレッシュ時の要求性能として流動性および材料分離抵抗性を設定している。³⁾つまり Fig. 10 に示すように、要求性能である流動性および材料分離抵抗性を表すスランプフロー値および漏斗流下時間をあらかじめ設定することで、相対フロー面積比 (Γ_c) および相対ロート速度比 (R_c) を算出することができ、それぞれの比 (Γ_c/R_c) および配合上使用される粉体質量 (P) から、要求性能を満足するために必要な高性能 AE 減水剤使用量 (S_p) が推測できることが分かった。

4 結 論

フライアッシュの多量有効利用を目的に、フライアッシュを多量に使用したコンクリートの特性を生かした高流動コンクリートに対する高性能 AE 減水剤使用量の推定方法について検討を行ったものである。

Fig. 10. Calculation method of dosages of superplasticizers.

本実験で得られた結果を要約すると以下のようである。

(1) 高性能 AE 減水剤使用量を一定とし、細骨材に対してフライアッシュを代替使用すると、相対フロー面積比と相対ロート速度比の間には直線関係が認められ、その傾きは結合材容積に対するフライアッシュの代替率によって変化する。

(2) 相対フロー面積比と相対ロート速度比との比と、全粉体量に対する高性能 AE 減水剤使用量の比との間の関係は、ある切片を持つ直線関係で表すことができ、要求性能であるスランプフロー値および漏斗流下時間をあらかじめ設定することで所要の流動性および材料分離抵抗性を満足するために必要な高性能 AE 減水剤使用量が推測できる。

今回は、実験数が少なく、使用したポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤は一種類であり、同じ主成分をもつ高性能 AE 減水剤についても同様の実験を行う必要があると思われる。また、Fig. 8 および Fig. 9 にみられるように、高性能 AE 減水剤使用量は、フライアッシュの品質、特に、強熱減量および細骨材の微粒分量の影響が大きいと考えられることから、これらの影響についても今後検討を行う予定である。

参 考 文 献

- 1) 土木学会, 高流動コンクリートシンポジウム論文報告集 (1996).
- 2) 三岩敬孝, 水口裕之, 橋本親典, 平岡伸哉, コンクリート工学年次論文報告集, **20**, 391 (1998).
- 3) 土木学会, 高流動コンクリート施工指針 (1998).
- 4) 土木学会, フライアッシュを用いたコンクリートの施工指針 (案) (1999).
- 5) 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 (1997).
- 6) 日本建築学会, フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針 (案)・同解説 (1999).
- 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.
- 8) 大内雅博, 日比野誠, 菅俣 匠, 岡村 甫, コンクリート工学年次論文報告集, **20**, 355 (1998).
- 9) 植浦歆共, 橋本親典, 三岩敬孝, 第 5 回土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集, 360 (1999).
- 10) 名和豊春, コンクリート工学, **37**, 8 (1999).