

論文 高流動コンクリートの流動性に及ぼす強熱減量および粗粒率の影響

三岩 敬孝*1・水口 裕之*2・橋本 親典*2・石丸 啓輔*3

要旨：本研究は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合理的な配合設計を構築することを目的とし、流動性に及ぼすフライアッシュの強熱減量および細骨材の粗粒率の影響について、所要の流動性を確保するために必要な高性能 AE 減水剤使用量を用いて定量的に評価した。その結果、細骨材の粗粒率が小さく、強熱減量が大きくなるほど所要の流動性を確保するために必要な高性能 AE 減水剤使用量は増加する。また、細骨材の粗粒率および強熱減量が大きくなるほど、高性能 AE 減水剤量の変化に対するコンクリートの粘性の変化は大きくなることが明らかになった。

キーワード：高流動コンクリート、フライアッシュ、強熱減量、粗粒率、高性能 AE 減水剤使用量

1. はじめに

近年、作業の少人数化、締固め作業にともなう騒音の解消、また、耐久性、締固め性、信頼性の高いコンクリート構造物の実現の一つとして、高流動コンクリートの利用が注目されている。高流動コンクリートの特徴としては、材料分離抵抗性を高める方法により粉体系、増粘剤系および併用系に分類され、流動性を確保するために高性能 AE 減水剤使用量が多いことが挙げられる¹⁾。

高流動コンクリートの配合設計方法について研究が進められているものの、流動性を確保するために必要な高性能 AE 減水剤使用量の合理的な決定方法については、大内らを始め^{2),3)}、多くの研究者が取り扱っているテーマの一つである。高性能 AE 減水剤は、高流動コンクリートの流動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決定されているのが現状であり、土木学会においても「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¹⁾。しかし、高性能 AE 減水剤使用量は、高性能 AE

減水剤の主成分によっても大きく異なり、使用する粉体の種類によってはメーカ推奨使用量を大きく上回ることもある⁴⁾。

著者らは、産業副産物であるフライアッシュを粉体とした粉体系高流動コンクリートについて調べ、配合方法の一つとして、所要の流動性を確保するために必要な高性能 AE 減水剤の使用量は、大内らが提案する高流動モルタルと同様に、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で推定できることを明らかにした⁵⁾。しかし、高性能 AE 減水剤使用量は、フライアッシュの品質、特に強熱減量の違いによって影響を受ける。また、細骨材の粒度、特に微粒分量の違いによっても異なることが考えられる。

本研究では、フライアッシュを使用した粉体系高流動コンクリートに必要な高性能 AE 減水剤使用量を推定するために、所要の流動性を確保するために必要な高性能 AE 減水剤使用量に及ぼすフライアッシュの強熱減量および細骨材の粗粒率 (F.M.) の影響について検討した。

*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 徳島大学教授 工学部建設工学科 工博 (正会員)

*3 徳島大学技官 工学部建設工学科 (正会員)

2. 実験概要

2.1 使用材料

使用材料としては、表-1に示すものを用いた。セメントは普通ポルトランドセメント、粗骨材は玉砕石を使用した。細骨材は粗粒率(F.M.)が2.42、2.79および2.98の川砂を用いた。フライアッシュとしては、強熱減量が2.1~5.0%の範囲の3種類を使用した。なお、全てのフライアッシュはJIS A 6201のⅡ種に相当するものとした。混和剤としては、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。

実験に使用したフライアッシュの電子顕微鏡写真を写真-1に示す。

2.2 コンクリートの配合および試験方法

(1) コンクリートの配合

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、単位粗骨材容積、単位細骨材容積および単位結合材容積を一定とし、結合材容積に対して15、35および55vol%のフライアッシュを代替使用した。

実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値 650 ± 50 mm、目標空気量 $5 \pm 1.5\%$ とし、高性能 AE 減水剤および空気量調整剤の使用量を変えて調整した。

実験に使用した高流動コンクリートの配合を表-2に示す。

(2) 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混合した水を加えて2分30秒間練混ぜを行った。

(3) 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JSCE-F503「コンクリートのスランプフロー試験方法」に準じて行い、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

V漏斗試験はJSCE-F512「高流動コンクリートの漏斗を用いた流下試験方法(案)」に準じて行い、流下時間を測定した。なお、試験に使用した漏斗試験装置は容量10ℓ、吐出部の寸法 65×75 mmとした。

(c) 間隙通過性試験

間隙通過性試験はJSCE-F511「高流動コンクリートの充てん装置を用いた間隙通過性試験方法(案)」に準じて行い、充てん高さを測定した。なお、充てん装置はボックス型充てん装置を使用し、障害条件はR2とした。

2.3 評価方法

(1) コンクリートの相対フロー面積比と相対ロート速度比の定義

大内ら^{2),3)}によると、相対フロー面積比はJIS A 5201に定めるフローコーンを使用し、突固めや振動を加えず1層に詰め、フローコーンを取り除いた直後の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)と同様の式で算定することができるものと定義している。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、ここで得られる資料を基に、コンクリートを用いて、再度、試験練りを行う必要がある。

そこで、本実験では、コンクリートを直接対象とし、高流動コンクリートの相対フロー面積比を算出するために、同様の試験をJIS A 1101に規定されているスランプコーンを用いてスランプフロー値を測定し(図-1参照)、同様に式(1)によって得られる値をコンクリートの相対フロー面積比とした。

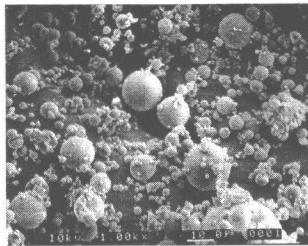
$$\Gamma_c = \frac{d_1 d_2 - d_0^2}{d_0^2} \quad (1)$$

ここに Γ_c :コンクリートの相対フロー面積比

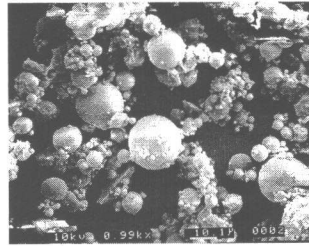
d_0 :フローコーン底面の直径(mm)

d_1 :スランプフローの長直径(mm)

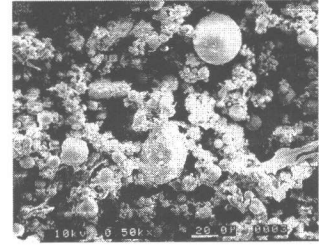
d_2 :スランプフローの短直径(mm)



(a)フライアッシュ 1 (Ig.loss2.1%)



(b)フライアッシュ 2 (Ig.loss3.9%)



(c)フライアッシュ 3 (Ig.loss5.0%)

写真－1 使用したフライアッシュの電子顕微鏡写真

表－1 使用材料

使用材料		品質
セメント		普通ポルトランドセメント (密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3280cm ² /g)
フライアッシュ (Ⅱ種)	IG2	S 社 (密度 2.29 g/cm ³ , 比表面積 3510cm ² /g, 強熱減量 2.1%)
	IG4	D 社 (密度 2.21 g/cm ³ , 比表面積 4410cm ² /g, 強熱減量 3.9%)
	IG5	S 社 (密度 2.20 g/cm ³ , 比表面積 4210cm ² /g, 強熱減量 5.0%)
細骨材	F.M.小	徳島県小松島産川砂 (表乾密度 2.60 g/cm ³ , 吸水率 2.26%, F.M.=2.42)
	F.M.中	徳島県那賀川産川砂 (表乾密度 2.62 g/cm ³ , 吸水率 1.75%, F.M.=2.79)
	F.M.大	徳島県那賀川産川砂 (表乾密度 2.62 g/cm ³ , 吸水率 1.98%, F.M.=2.98)
粗骨材		徳島県那賀川産玉砕石 (表乾密度 2.64 g/cm ³ , 吸水率 1.22%, F.M.=6.67, 最大寸法 20mm)
混和剤		高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸エーテル系) 空気量調整剤 (高アルキルカルボン酸系)

表－2 実験に使用した高流動コンクリートの配合

配合の 種類	フライッシュ の代替率 (Vol%)	細骨 材の 種類	フライッ シュの 種類	水 (kg)	結合材		細骨 材 (kg)	粗骨材 (kg)	高性能 AE 減水 剤 (kg)	空気量調 整剤 (kg)
					セメント (kg)	フライッシュ (kg)				
F15-S-2	15	F.M. 小	IG2	175	526	66	697	821	7.872	1.574
F35-S-2	35				400	158			7.224	1.605
F55-S-2	55				277	247			5.279	1.389
F15-M-2	15	F.M. 中			526	66	702		6.822	2.099
F35-M-2	35				400	158			5.217	2.007
F55-M-2	55				277	247			4.723	1.667
F15-L-2	15	F.M. 大			526	66	702		5.248	1.574
F35-L-2	35				400	158			4.414	1.605
F55-L-2	55				277	247			3.334	1.389
F15-S-4	15	F.M. 小	IG4		526	64	697		8.397	2.099
F35-S-4	35				400	152			6.020	2.408
F55-S-4	55				277	239			5.834	1.945
F15-M-4	15	F.M. 中			526	64	702		6.822	2.099
F35-M-4	35				400	152			5.618	2.007
F55-M-4	55				277	239			5.557	1.945
F15-L-4	15	F.M. 大			526	64	702		6.297	1.574
F35-L-4	35				400	152			4.816	1.605
F55-L-4	55				277	239			4.445	1.389
F15-S-5	15	F.M. 小	IG5		526	64	697		7.872	2.099
F35-S-5	35				400	152			7.625	2.408
F55-S-5	55				277	238			7.501	2.223
F15-M-5	15	F.M. 中			526	64	702		6.822	2.099
F35-M-5	35				400	152			6.421	2.408
F55-M-5	55				277	238			7.224	2.223
F15-L-5	15	F.M. 大			526	64	702		6.297	2.099
F35-L-5	35				400	152			6.020	2.007
F55-L-5	55				277	238			5.557	1.667

同様に、相対ロート速度比とは、V漏斗流下試験において、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^{2),3)}で、同様の試験をJSCE-F512に規定されている漏斗試験装置を用いて流下時間を測定し、式(2)によって得られる値をコンクリートの相対ロート速度比とした。

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

ここに Rc:コンクリートの相対ロート速度比
t: V漏斗流下時間(s)

3. 実験結果および考察

3.1 高性能 AE 減水剤使用量

図-2 (a)~(c)に所要の性能を得るのに必要な高性能 AE 減水剤使用量をフライアッシュの代替率別にそれぞれ示す。フライアッシュの強熱減量が大きくなると高性能 AE 減水剤使用量は、若干増加する。細骨材の粗粒率が小さくなると所要の性能を得るのに必要な高性能 AE 減水剤使用量は増加する。細骨材の粗粒率が小さくなることにより、細骨材中の微粒分量が増加し、高性能 AE 減水剤を吸着しているものと考えられる。また、細骨材の微粒分が水も拘束しているものと考えられる。

3.2 500mm フロー到達時間およびV漏斗流下時間

図-3 および図-4に 500mm フロー到達時間およびV漏斗流下時間をそれぞれ示す。

500mm フロー到達時間およびV漏斗流下時間はコンクリートの粘性を表す指標と考えられている。目標スランプフロー値は650±50mmにあるにもかかわらず、フライアッシュの強熱減量が大きくなると、500mm フロー到達時間とV漏斗流下時間は長くなる。強熱減量が大きくなると粘性の高いコンクリートになる。特に、強熱減量5%のフライアッシュを使用した配合および強熱減量5%のフライアッシュを55vol%代替使用した場合、500mm フロー到達

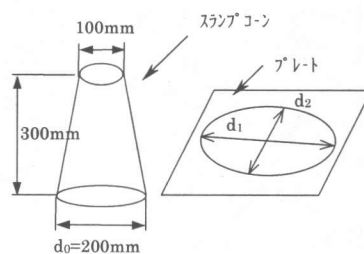
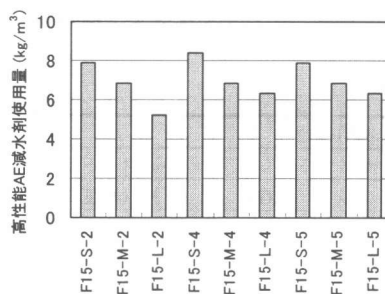
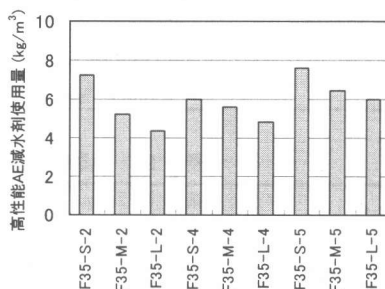


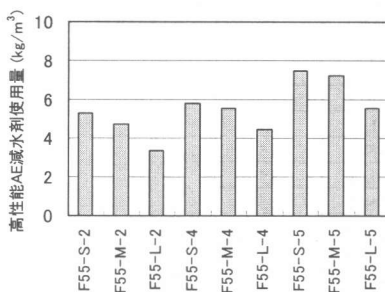
図-1 スランプフロー試験



(a) フライアッシュ代替率 15vol%



(b) フライアッシュ代替率 35vol%



(c) フライアッシュ代替率 55vol%

図-2 高性能 AE 減水剤使用量

時間とV漏斗流下時間は非常に長くなっている。これは写真-1に見られるように、強熱減量の増加に伴い、フライアッシュの形状が角張っているためフライアッシュの使用が流動性向上に寄与していないことや、セメントに比較

してフライアッシュは形状が小さいこと、また、高性能 AE 減水剤の使用量が増加していることが原因と思われる。

3.3 充てん高さ（間隙通過性試験）

図-5 に充てん高さの結果を示す。全ての配合において自己充てん性は、300mm 以上となりランク2の規準を満足する。ランク2の自己充てん性に対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粘性は無関係である。

3.4 相対フロー面積比および相対ロート速度比

高性能 AE 減水剤の使用量を調整することによってスランプフロー値を一定とした場合、相対フロー面積比は一定となる。この時、結合材容積に対してフライアッシュを代替使用すると相対ロート速度比は変化する⁵⁾。

フライアッシュの密度はセメントに比較して小さく、結合材容積を一定にしてフライアッシュを代替使用と粉体質量は減少する。一方、高流動コンクリートとして所要の流動性を満足するための高性能 AE 減水剤使用量 (SP) は、使用する粉体質量 (P) と密接な関係がある。

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) と全粉体質量に対する高性能 AE 減水剤使用量 (SP/P) との関係を求め、後述する推定式による推定量も併せて強熱減量別に図-6 にそれぞれ示す。

高流動モルタルと同様^{2),3)}にコンクリートとしての SP/P と Γ_c/R_c においても、ある x 切片を持つ直線関係で表すことができる。つまり、高性能 AE 減水剤は、全粉体質量に対してある量までは使用した粉体に吸着されたり、流動性

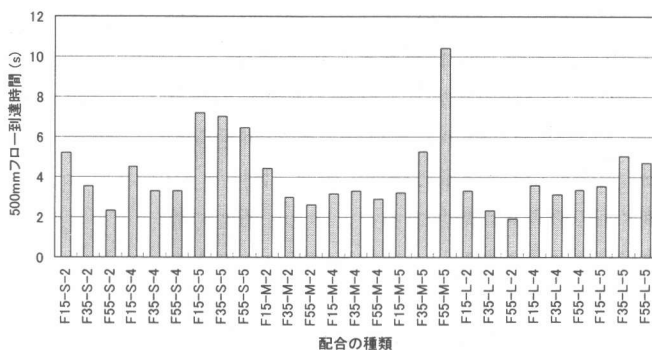


図-3 500mm フロー到達時間

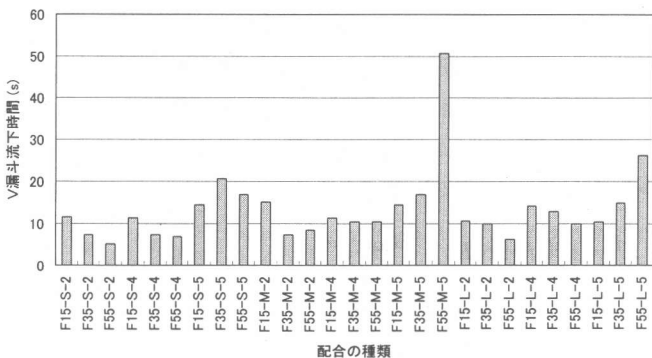


図-4 V漏斗流下時間

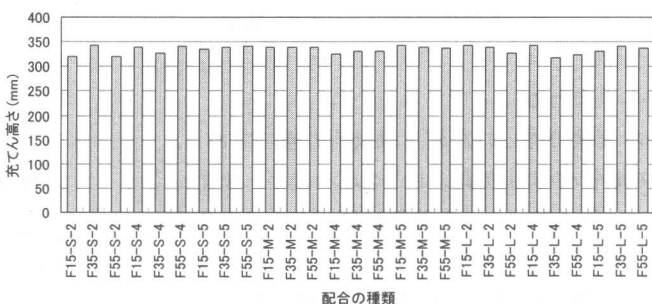


図-5 間隙通過性試験による充てん高さ

向上に寄与しない部分があると考えられ、その量を超えると分散効果が現れ、流動性に寄与する。

また、細骨材の粗粒率が大きくなると直線の傾きは大きくなる傾向がある。同時に直線の x 切片は小さくなる。つまり、粗粒率の大きな細骨材を使用すると、細骨材に吸着される高性能 AE 減水剤使用量や水量が減少することから、所要の流動性を満足するために必要な高性能 AE 減水剤使用量は減少すると考えられる。しかし、高性能 AE 減水剤の使用量の増減により

コンクリートのフレッシュ性状，特にコンクリートの粘性が大きく変化することとなる。

また，強熱減量が大きくなるほど直線の傾きおよび x 切片の値が大きくなる傾向が見られる。つまり，強熱減量の増加に伴い，高性能 AE 減水剤の吸着量が増加することから，所要の流動性を満足するために必要な高性能 AE 減水剤使用量が増加する。

これらの結果を基に，それぞれの粗粒率および強熱減量における直線の傾きおよび x 切片の値を算定し，粗粒率および強熱減量と傾きおよび x 切片の値との関係をさらに直線近似することによって，それぞれの要因が及ぼす影響について分析を行った結果，高性能 AE 減水剤の使用量(SP)は次式で決定できる。

$$SP = 100 P (\Gamma_c / Rc + e^\alpha \beta) / e^\alpha$$

$$\alpha = (0.60Ig - 0.48)FM - 1.11Ig + 3.01$$

$$\beta = (0.16Ig - 0.84)FM - 0.29Ig + 2.50$$

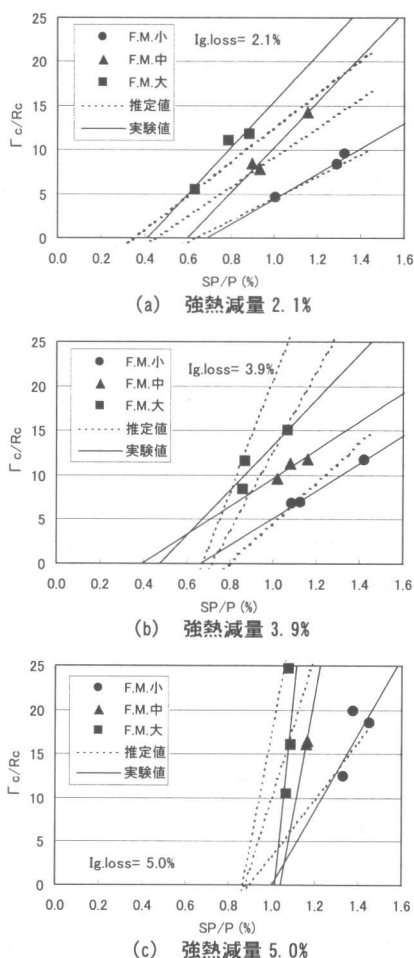
ここで， Ig ：強熱減量（％）， FM ：粗粒率

P ：全粉体質量（＝ $C+F$ ）（kg）

4. まとめ

本実験で得られた結果は以下の通りである。

- (1) 細骨材の粗粒率が小さくなるほど，また，フライアッシュの強熱減量が大きくなるほど，所要の流動性を確保するために必要な高性能 AE 減水剤使用量は増加する。
- (2) 細骨材の粗粒率およびフライアッシュの強熱減量が大きくなるほど，高性能 AE 減水剤使用量の増減によりコンクリートの粘性が大きく変化する。
- (3) コンクリートの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 減水剤の使用量の比との関係は，粗粒率および強熱減量によって異なるものの，ある切片を持つ直線関係で表すことができることから，スランプフロー値および漏斗流下時間を設定することで合理的に高性能 AE 減水剤の使用量を決定できる。



図－6 高性能 AE 減水剤の効果

謝辞

本実験を行うにあたり試料をご提供下さったテクノ・リソース㈱に厚くお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：高流動コンクリート施工指針，コンクリートライブラリー93，丸善，1998.7
- 2) 大内雅博，日比野誠，菅俣 匠，岡村 甫：自己充填コンクリート用高性能 AE 減水剤の効果の定量的評価法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，pp.355-360，1998
- 3) 大内雅博，枝松良展，菅俣 匠：自己充填性を支配するフレッシュモルタルの性状の評価法と材料特性の定量化への応用，セメント・コンクリート，No.640，2000.1
- 4) 植浦敏共，橋本親典，三岩敬孝：高流動ハイブリッドフライアッシュコンクリートの凝結に及ぼす混和剤の主成分の影響，土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集，pp.360-361，1999.5
- 5) 森田貴史，三岩敬孝，鈴木洋一：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，土木学会四国支部技術研究発表会講演概要集，pp.402-403，2000.5