

論文 各種フライアッシュを使用した高流動コンクリートの基礎物性

橋 紀久夫*1・田中 伸幸*2・武田 啓二*3・村井 浩展*4

要旨:フライアッシュの種類および混入量が高流動コンクリートに及ぼす影響を明らかにするためにJIS I種, II種およびIV種に相当するフライアッシュを使用した高流動コンクリートについて, フライアッシュの種類および混入量が最適配合に及ぼす影響を検討した。その結果, フライアッシュの種類および混入量により最適水粉体容積比が異なることがわかった。また, I種では60%まで混入しても強度や凍結融解抵抗性の低下はおきないこと, II種では初期強度の低下があるが長期的には未混入場合と同等の強度を発現すること, I種を使用することにより乾燥収縮量を大幅に低減できることなどが明らかになった。

キーワード: 高流動コンクリート, フライアッシュI種, フライアッシュII種, フライアッシュIV種, 混入率

1. はじめに

近年, 電力需要の増大や化石燃料の有効利用の観点より大容量石炭火力発電所の新增設が続いている。それに伴い副産物であるフライアッシュの排出量も増大してきた。これまでは, 排出されたフライアッシュの大部分をセメント原料として再利用したり, 管理型産業廃棄物として埋立て処理等により処分されてきた。

しかし, 近年のセメント需要の低迷によりセメント原料としての再利用率の増加は限界になりつつある。また, 近年の環境保全意識の高まりにより埋立て処理用地の確保も困難になってきている。これら, 副産物の再利用や省資源化の観点からフライアッシュの有効利用の促進が望まれている。

このような状況に鑑み, フライアッシュのコンクリート用混和材への利用拡大を目的として1999年にJIS A 6201『コンクリート用フライアッシュ』が改正された。この改正によりフライアッシュの品質は4種類に分類さ, それぞれの品質に応じた分野への利用が可能となった。

一方, コンクリート施工の省力化やコンクリートの高品質化を目指して自己充填型の高流動コンクリートの開発が行われてきた。高流動コンクリートは自己充填性を付与させるために粉体量が非常に多くなることが配合上の特徴となっている。しかし, 粉体にセメントのみを使用すると水和熱の増加等の影響により耐久性が低下する場合がある。そのため, 通常は混合セメントを使用するか混和材を使用している。また, 高流動コンクリートは低水セメント比で高強度となる場合が多いため, 混和材を多量に添加することが可能である。そこで, フライアッシュを高流動コンクリート用の混和材として使用すれば多量に有効利用できると考えられる。

本研究ではフライアッシュの高流動コンクリート用混和材としての適用性を評価するために, 異なる粒度分布を持つフライアッシュを用いることにより, フライアッシュの種類および混入量が高流動コンクリートの最適配合に及ぼす影響について検討した。また, それらが硬化後の性状に及ぼす影響についても検討した。

*1 住友大阪セメント株式会社 セメント・コンクリート研究所 工修 (正会員)

*2 住友大阪セメント株式会社 セメントコンクリート研究所

*3 四国電力株式会社 建設部 計画課

*4 テクノ・リソース株式会社 企画開発部

2. 実験の概要

2. 1 使用材料

本試験では表-1に示す4種類のフライアッシュを使用した。それぞれのフライアッシュはJIS A 6201におけるI種、II種およびIV種に相当するものである。それぞれのフライアッシュの粒度分布を図-1に示す。また、試験に使用した材料の特性値を表-2に示す。

2. 2 コンクリートの配合条件

高流動コンクリートの自己充填性能には骨材量が大きく影響することから、粗骨材量および細骨材量を固定することとした。まず、粗骨材容積比(G/G_{lim})は間隙通過性に及ぼす影響が大きいことが明らかになっており、良好な間隙通過性を持たせるため50%とした。また、細骨材同士の噛み合いによる変形抵抗が小さい範囲に細骨材モルタル容積比(V_s/V_m)を設定する必要があるため、細骨材モルタル容積比と細骨材の拘束水比の関係から細骨材モルタル容積比を求めた²⁾。高性能AE減水剤量および空気量調整剤量は各条件下でスランプフローおよび空気量が目標値となるよう調整した。スランプフローの目標値は 650 ± 50 mm、空気量の目標値は $5.0 \pm 0.5\%$ とした。

2. 3 練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜ方法は図-2に示す通りとした。ただし、練混ぜ水は2分割投入とし、細骨材の表面水量と1次水(W1)量をあわせた水量は単位水量の85%とした。また、2次水(W2)

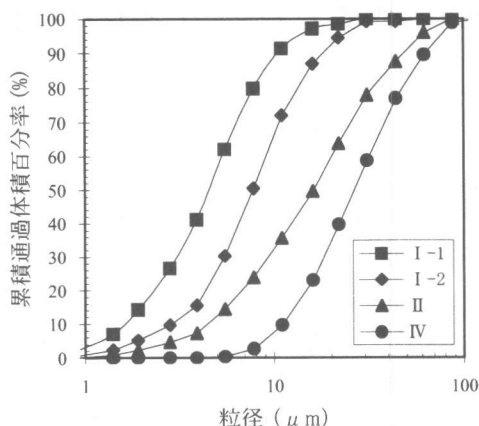


図-1 フライアッシュの粒度分布



図-2 練混ぜ方法

表-1 フライアッシュの品質

	I-1	I-2	II	IV
二酸化けい素 (%)	51.5	53.6	58.2	55.7
湿分 (%)	0.23	0.02	0	0
強熱減量 (%)	2.6	1.7	1.9	1.5
密度 (g/cm^3)	2.44	2.36	2.24	2.21
比表面積 (cm^2/g)	8,550	5,610	3,060	1761
フロー値比 (%)	107	114	105	104
活性度指数				
材料齢28日 (%)	108	95	81	81
材料齢91日 (%)	123	114	94	89
JIS A 6201における種類	I種	I種	II種	IV種

表-2 使用材料

材料	記号	種類	特性値
粉体	C	普通ポルトランドセメント	密度: $3.15 \text{ g}/\text{cm}^3$ (表-1参照)
	FA	フライアッシュ	
細骨材	S	滋賀県野州川産川砂	表乾密度: $2.59 \text{ g}/\text{cm}^3$, 吸水率:1.31%, 粗粒率:3.01, 洗い損失:1.1%, 実積率:67.1%, 粒形判定実積率:60.3%
粗骨材	G	大阪府高槻産碎石	表乾密度: $2.71 \text{ g}/\text{cm}^3$, 吸水率:0.57%, 粗粒率:6.73, 実積率:59.7%
混和剤	SP	高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系 変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤
	AE	空気量調整剤	

量は単位水量から1次水量，骨材の表面水量および混和剤量を差し引いた量とした。

また，コンクリートの練混ぜには強制2軸練りミキサを使用した。

3. 試験結果および考察

3. 1 フライアッシュの種類の影響

フライアッシュの種類が高流動コンクリートの最適配合および硬化性状におよぼす影響を検討した。なお，フライアッシュの混入率は全粉体容積の40%一定とした。

(1) 最適配合

それぞれの粉体ごとに，水粉体容積比(V_w/V_p)を変化させてコンクリートを練り混ぜ，フレッシュ性状を測定した。スランブフローおよび空気量が目標値を満足するよう混和剤添加量を調整し，充填高さを測定した。水粉体容積比と充填高さの関係の一例を図-3に示す。

それぞれの粉体についての水粉体容積比と充填高さの関係より，充填高さがもつとも高くなる水粉体容積比を求め，これを最適水粉体容積比とした。各粉体の最適配合を表-3に示す。

これより，フライアッシュの種類が異なると最適水粉体容積比が異なることがわかる。これは，それぞれのフライアッシュの粒度分布や粒形が異なることによると思われる。

また，フライアッシュを混入することにより最適水粉体容積比が低下している。これは，フライアッシュを混入することによって粒度分布の幅が広くなること，およびセメント量の減少に伴いセメント中の間隙質(C_3A および C_4AF)の絶対量が少なくなることが影響しているものと

考えられる。さらに，I-1やI-2では粒径が小さいため表面に吸着する水量は多くなるが，破砕物等がほとんどなく球形粒子が非常に多いため，微粒子による粘性の増加作用より，ボールベアリング効果やセメント粉体中の間隙を埋める効果による流動性向上効果が卓越したと思われる。そのため，自己充填性を得るために必要な粘性が不足し，最適水粉体容積比が大きく低下したと考えられる。また，IIは粒径も大きく破砕物等の混入もあり，流動性向上効果は大きく低下していると考えられる。さらに，IIはI-1やI-2より微粒子が少ないため，ボールベアリング効果や充填効果が大きく低下し，表面に水が吸着することによる粘性増加作用の影響が大きくなっていると考えられる。そのため，微粒分のほとんどないIVより最適水粉体容積比が高くなったと考えられる。

(2) フレッシュ性状

フレッシュ性状の測定結果を表-4に示す。

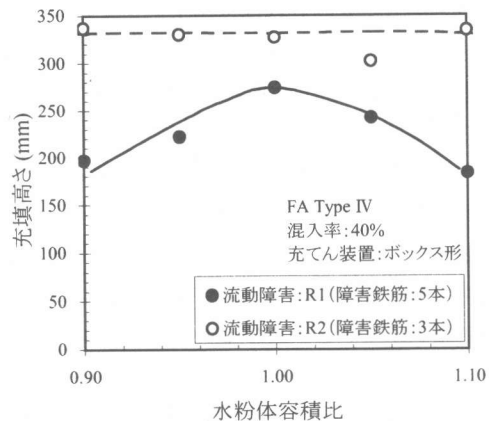


図-3 水粉体容積比と充填高さの関係

表-3 最適配合

フライアッシュ		単位量 (kg/m^3)				SP		AE	
種類	混入率	V_w/V_p	V_s/V_m	G/Glim	W	C	FA	添加率 ($P \times \% - \text{wt}$)	添加率 ($P \times \% - \text{wt}$)
-	0%	1.20	0.490	0.500	185	487	-	1.50	0.013
I-1	40%	0.80	0.490	0.500	151	357	184	2.00	0.035
I-2	40%	0.85	0.490	0.500	156	347	173	1.80	0.017
II	40%	1.05	0.490	0.500	174	313	149	1.10	0.010
IV	40%	1.00	0.490	0.500	170	321	150	1.10	0.010

表-4 フレッシュ性状

種類	混入率	500mm フロー 到達時間	V漏斗 流下時間	充填高さ (mm)	
		(sec)	(sec)	R1	R2
-	0%	3.1	4.16	305	330
I-1	40%	3.4	15.1	305	321
I-2	40%	4.3	14.2	170	322
II	40%	2.4	6.3	172	319
IV	40%	3.3	7.8	274	327

500mmフロー到達時間は各粉体間で顕著な差は認められなかった。しかし、V漏斗流下時間は、水粉体容積比が大きくなるほど短くなっている。これは、水粉体容積比とほぼ連動した結果となっており、粉末度の高いフライアッシュを使用した場合の方が、より高いコンクリートの粘性が必要となると考えられる。

(3) 圧縮強度

圧縮強度の測定結果を図-4に示す。

IIおよびIVのフライアッシュを使用した場合はセメント単体の場合と比較して材齢初期の強度低下が大きい。これはフライアッシュのポゾラン反応速度がセメントの水和に比べて遅いためと考えられる。IIの場合は材齢13週でほぼセメント単体と同じ強度を発現しており長期的な強度増進が期待できる。また、I-1およびI-2の場合は初期材齢からセメント単体より圧縮強度が大きくなっている。これは、水粉体容積比が小さくなっていることも原因の一つであるが、依然水セメント比はセメント単体より大きいことを考えると、フライアッシュの粒径が小さいためポゾラン反応性が高くなっていること、微粒子によるセメント粒子の間隙への充填効果が現れていることなどが考えられる。

(4) 乾燥収縮

乾燥収縮試験の結果を図-5に示す。ただし、IVの結果については材齢13週までの結果を記載している。

IIを使用した場合、セメント単体とほぼ同等の収縮量を示した。しかし、I-1およびI-2を使用した場合は収縮量が非常に低減し、質量変

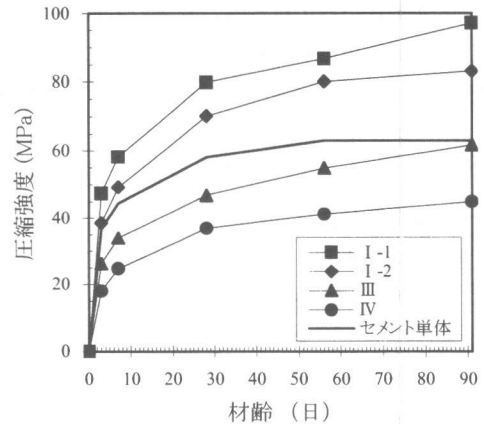


図-4 圧縮強度試験結果

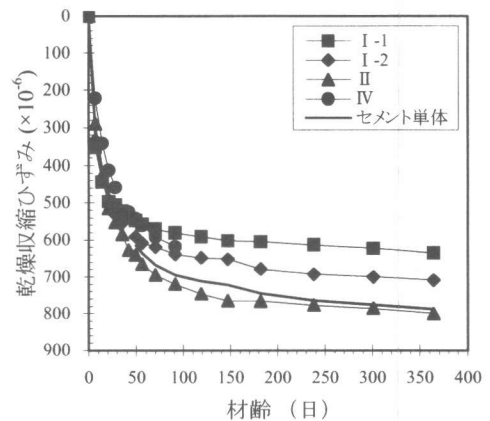


図-5 乾燥収縮試験結果

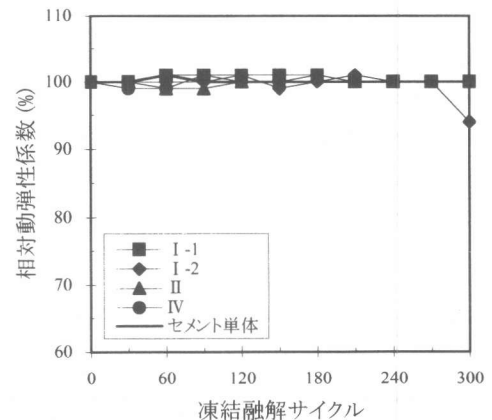


図-6 動弾性係数測定結果

表-5 最適配合

フライアッシュ		Vw/Vp	Vs/Vm	G/Glim	単位量 (kg/m ³)					SP 添加率 (P×%-wt)	AE 添加率 (P×%-wt)
種類	混入率				W	C	FA	S	G		
I-1	20%	0.90	0.490	0.500	161	451	87	846	768	1.80	0.025
	40%	0.80	0.490	0.500	151	357	184	846	768	2.00	0.035
	60%	0.90	0.490	0.500	161	225	262	846	768	2.10	0.046
IV	20%	1.00	0.490	0.500	170	428	75	846	768	1.10	0.008
	40%	1.00	0.490	0.500	170	321	150	846	768	1.10	0.010
	60%	1.00	0.490	0.500	170	214	225	846	768	1.00	0.011

化率もセメント単体と同等以下であった。これは、I-1およびI-2を使用した場合水粉体容積比が小さくなることによる単位水量の低減の影響のみならず、フライアッシュの反応性が高いため組織が緻密になっていることも原因と考えられる。そのため、I種相当のフライアッシュは乾燥収縮特性に優れていると考えられる。

(5) 凍結融解試験

凍結融解試験の結果を図-6に示す。

いずれのフライアッシュを使用しても耐凍害性に優れた結果となっており、フライアッシュの種類の影響は認められなかった。

3. 2 フライアッシュ混入量の影響

フライアッシュの混入量が高流動コンクリートの最適配合および硬化性状に及ぼす影響を検討した。なお、フライアッシュにはI-1およびIVを用い、それぞれ全粉体容積に20、40および60%混入して使用した。

(1) 最適配合

各粉体について3.1と同様に最適水粉体容積比を求めた。最適配合を表-5に示す。

I-1の場合は混入率40%で最適水粉体容積比が最小となった。これは混入率40%程度までは粉体の粒度分布改善効果とセメント中の間隙質の減少により流動性が向上し、それ以上混入すると、I-1のフライアッシュが高粉末度であることから、表面に吸着する水量の影響が大きくなり流動性が低下するためと考えられる。しかしIVでは混入率にかかわらず最適水粉体容積比は一定であった。これより、IVの混入により間隙質の低下やボールベアリング効果によってセメ

表-6 フレッシュ性状

フライアッシュ		500mm フロー 到達時間 (sec)	V漏斗 流下時間 (sec)	充填高さ (mm)	
種類	混入率			R1	R2
I-1	20%	2.9	13.0	117	274
	40%	3.4	15.1	305	321
	60%	2.2	10.1	160	290
IV	20%	3.8	8.0	285	324
	40%	3.3	7.8	274	327
	60%	3.2	7.9	288	333

ント単体より粘性は低下するが、IVは単一粒度の粗粉であるため混入量を増加させても粒度分布が悪化する影響と均衡すると考えられる。

(2) フレッシュ性状

フレッシュ性状の測定結果を表-6に示す。

今回の試験では、各フレッシュ性状に及ぼすフライアッシュ混入率の影響は比較的小さかった。

(3) 圧縮強度

I-1を用いた場合の圧縮強度の測定結果を図-7に示す。

混入率20と40%はほぼ同じ強度発現性を示した。これは、フライアッシュ混入による強度低下を水セメント比の低減によって相殺したためと考えられる。しかし、混入率60%の場合はセメント単体の場合より低下している。これは混入率増加による強度低下を水セメント比の低減で補えなかったためと考えられる。

(4) 乾燥収縮

I-1を用いた場合の乾燥収縮の測定結果を図-8に示す。

混入率20と40%はほぼ同等の収縮量を示す

が、混入率60%の場合は収縮量が大幅に低減している。しかし、混入率60%の場合は質量減少率が非常に大きくなっていた。これは、圧縮強度の結果からも推察されるが、硬化体が他の混入率より粗であるため、水分の逸散量が多いもののメニスカスは低下し、収縮量が低減したと考えられる。

(5) 凍結融解

I-1を用いた場合の動弾性係数の測定結果を図-9に示す。

混入率40%までは、劣化がほとんどないことを示しているが、混入率が60%の場合は劣化の兆候が窺える。これは、硬化体の強度が低く、組織が粗であることが原因と考えられる。

4. まとめ

- ①フライアッシュの種別により高流動コンクリートの最適配合は異なる。通常は粉末度が高くなると最適水分粉比は低下する。粒度分布によっては、この関係が異なる場合もある。
- ②I種のフライアッシュでは混入率40%程度で最適水分粉体容積比が最小となるが、IV種の場合では混入率による変化は少ない。
- ③I種では混入率40%程度までセメントに置換しても、強度発現性は初期より未混入の場合より高くなる。
- ④フライアッシュを混入することにより乾燥収縮量を大幅に低減できる。
- ⑤I種のフライアッシュでは混入率が40%以下であれば凍結融解抵抗性は低下しない。

参考文献：

- 1) 松尾茂美, 小沢一雅：自己充填コンクリートの充填性に及ぼす粗骨材特性の影響, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.165-170, 1994.6
- 2) 枝松良展, 安本礼持：高流動コンクリートの自己充填性に及ぼす細骨材量の影響, 土木学会第51回年次学術講演会講演概要集, 第5部, pp.616-617, 1996.9

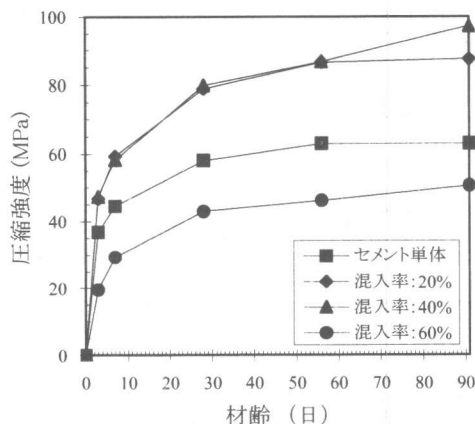


図-7 圧縮強度試験結果

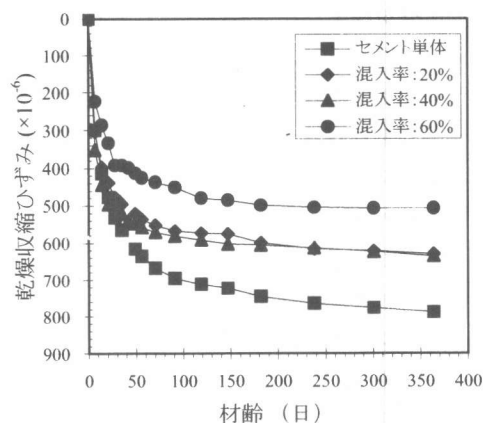


図-8 乾燥収縮試験結果

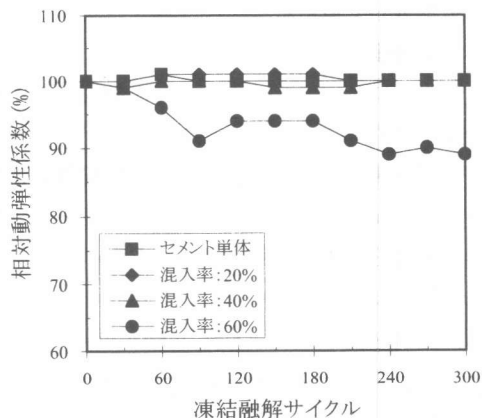


図-9 動弾性係数