

# フライアッシュ原粉及び高炉スラグ細骨材を用いた環境負荷低減コンクリートの基本特性に関する研究

宇都宮大学大学院 学生会員 ○小山田邦弘  
 宇都宮大学大学院 正会員 藤原浩巳  
 宇都宮大学大学院 正会員 丸岡正知

## 1. はじめに

石炭は他の化石燃料に比べ、供給の安定性や経済性に優れているため、石油代替エネルギーとして原子力に次ぐものとされており、近年、石炭火力発電設備が増えつつある。これに伴い、フライアッシュの排出量増加が予想される。環境に配慮した資源再利用の循環型社会形成のためには、より一層のフライアッシュの有効活用が望まれる。その一方、従来フライアッシュの大部分をセメント原料として利用したり、埋め立て処分されてきた。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有効利用量の増加は限界になりつつある。また、環境保全の意識の高まりにより埋め立て処分も困難となってきた。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ことで、長期強度、耐久性の増大が得られるとされているが、その品質の変動、未燃焼カーボンによる AE 剤の吸着など実用性、汎用性に問題がある。

一方、コンクリート用細骨材は、自然環境への配慮から天然骨材の採取は制限され、良質な骨材の相対的減少による全体的な品質の低下が問題となっている。特に近畿、中・四国地方で多く使用されていた海砂は採取制限が強化され海砂に代わる細骨材の安定的確保が課題となっている。また、安山岩、流紋岩系の骨材及び河川砂利・山砂はアルカリ骨材反応性に問題がある場合が多い。このような状況下、代替骨材資源の確保が重要な課題となっている。

そこで、板井ら<sup>1)</sup>によりフライアッシュを細骨材として使用する研究が行われており、フライアッシュの大量使用、細骨材代替とフライアッシュの新たな有効活用が示された。しかし、フライアッシュをコンクリート用細骨材として混入したコンクリートの研究は比較的少ない。また、フライアッシュだけでなく他のリサイクル材料をコンクリート用細骨材として併用した研究も少なく、更なる資源の有効活用のためにこのような研究は重要であると考えられる。

そこで本研究では、フライアッシュ原粉及び高炉スラグ細骨材を細骨材として使用したコンクリートの基本特性、耐久性に関して検討したものであり、これらの諸特性を明らかにしたものである。

## 2. 細骨材にフライアッシュ原粉及び高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートの基本特性

### 2.1 実験概要

前実験より、FA 原粉の最適細骨材置換率は 20%であるという結果が得られた。そこで、本章では品質の異なるフライアッシュ原粉を用いて、フライアッシュ原粉と川砂及び高炉スラグ細骨材を併用した場合のコンクリートのフレッシュ性状、硬化性状及び耐久性について検討を行った。

#### 2.1.1 使用材料

本研究で用いる使用材料を表-1 に示す。本研究はプレストレストコンクリート製品への適用も視野に入れているため、セメントには早強ポルトランドセメントを用いた。また、環境負荷低減及び耐久性向上を目的として産業副産物である高炉スラグ微粉末(ブレン値 4000cm<sup>2</sup>/g)を結合材として使用した。細骨材には鬼怒川産川砂、高炉スラグ細骨材及び国内の火力発電所から採取したフライアッシュ原粉(以下 FA 原粉)を用いた。本研究で用いたフライアッシュの品質、化学成分を表-2、表-3 にそれぞれ示す。なお、比較として同発電所から産出された JIS II 種品の品質の一例を併記した。一般的にコンクリート用混和材として使用されているフライアッシュは「JIS A 6201 コンクリート用フライアッシュ」に定められている II 種が多く用いられている。しかし、フライアッシュ原粉を規格に適合するまで何度も分級処理を施すために多量のエネルギーを消費する。よって本研究では環境負荷低減を目指し、フライアッシュ原粉(以下 FA 原粉)を用いた。なお、FA 原粉は品質の変動が大きいと考えられるため採取日を変えた 3 種類の FA 原粉を用いた。

**キーワード：**低品位フライアッシュ 高炉スラグ細骨材 代替細骨材

連絡先：〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2 宇都宮大学工学部建設学科材料研究室

TEL 028-689-6211

表-1 使用材料

種別	記号	名称	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	吸水率 (%)	F.M.	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)
結合材	C	早強ポルトランドセメント	3.14	--	--	4560
	BS	高炉スラグ微粉末	2.90	--	--	4400
細骨材	S	鬼怒川産川砂	2.60	1.93	2.90	--
	BS-S	高炉スラグ細骨材	2.70	0.68	2.70	--
	FA1	フライアッシュ原粉	1.99	--	--	3350
	FA2		2.01	--	--	3590
	FA3		2.05	--	--	4000
SP	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤		1.05	--	--	--
混和剤	DF	ポリアルキレン誘導体	1.00	--	--	--

表-2 FA原粉の品質

品質	JIS II 種品	フライアッシュ原粉			
		FA1	FA2	FA3	
二酸化ケイ素(%)	55.3	59.5	61.1	61.7	
強熱減量(%)	1.2	1.2	1.5	1.5	
密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.23	1.99	2.05	2.01	
比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	4410	3350	3590	4000	
フロー値比(%)	110	91	87	89	
活性度指数(%)	材齢28日	90	83	81	79
	材齢91日	104	78	81	82

表-3 FA原粉の化学成分

	化学成分(%)											
	ig-loss	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO
FA1	1.2	59.50	26.50	4.10	4.30	1.30	0.44	0.51	0.36	1.58	0.06	0.01
FA2	1.5	61.10	25.70	3.80	3.90	1.20	0.48	0.53	0.40	1.55	0.07	0.00
FA3	1.5	61.70	26.20	3.70	3.40	1.00	0.38	0.28	0.43	1.59	0.05	0.00

3.1.2 配合条件

配合条件を表-4に示す。記号は最初の数字が水結合材比, B30が高炉スラグ微粉末のセメント置換率・FA原粉の種類, 高炉スラグ細骨材の有無を意味している。例えば, 35B30F2BSは水結合材比35%で, セメントの30%を高炉スラグ微粉末で置換し, 細骨材にFA2を置換し, 残りの細骨材に高炉スラグ細骨材を用いた配合を示している。FA原粉は全細骨材容積に対して20%とし, 残りの細骨材に川砂を用いた配合をRSシリーズ, 高炉スラグ細骨材を用いた配合をBSシリーズとした。スランブフローの目標値は650±50mm, 空気量の目標値は1.5±1.0%とし, 高性能減水剤及び消泡剤の添加率は, 目標値を満たすように適宜調整した。供試体の養生は, 標準養生(20℃, 水中)及び蒸気養生とした。蒸気養生のパターンは前置き2時間(20℃, 60%RH), 温度上昇速度を20℃/時間, 最高温度は60℃とし, 最高温度保持時間4時間とした。最高温度保持時間終了後, 20℃まで自然降温とした。また, 蒸気養生後は20℃, 60%RHで気中養生とした。

表-4 配合条件

配合番号	記号	水結合材比(%)	スランブフロー(mm)	空気量(%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )							
					結合材			細骨材			粗骨材	
					水	C	BS	S	FA	BS-S	G	
No1	35B30	35	650±50	1.5±1.0	165	330	141	939	0	0	983	800
No2	35B30FA1							752	145			
No3	35B30FA2							752	146			
No4	35B30FA3							752	149			
No5	35B30BS							0	983			
No6	35B30FA1BS							145	787			
No7	35B30FA2BS							146	787			
No8	35B30FA3BS							149	787			

3.1.3 実験項目及び方法

(1) スランブフロー試験

スランブフロー試験はJIS A 1150に準拠して試験を行った。なお, コンクリートの流動性は所定のスランブフローを得るのに必要なSP添加率で評価した。また, スランブフローが500mmに到達する時のフロー時間を測定した。

(2) 空気量試験

空気量試験はJIS A 1128に準拠して試験を行った。コンクリートの空気連行性は消泡剤の添加率で評価した。

(3) 圧縮強度試験

圧縮強度は, φ10×20cm円柱供試体を用い, JIS A 1108に準拠して測定した。試験条件は, 標準養生供試体で材齢7, 28日, 蒸気養生供試体は材齢1, 14日とした。

(3) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験はJIS A 1129に準拠して試験を行った。脱型後, 供試体を水中養生し材齢7日に達した時点で水中から引き上げ, 第一回目の測定を行い基長とした。供試体は20℃, 60RHの恒温恒湿室に静置し, 乾燥開始から1, 7, 14, 28, 日でそれぞれ測定を行った。試験はNo5以外の配合で行った。

(4) 凍結融解試験

凍結融解試験は, JIS A 1148に準拠して試験を行った。試験はNo5以外の配合で行った。

3.2 実験結果及び考察

3.2.1 フレッシュ性状試験結果

フレッシュ性状試験結果を表-5に示す。所定のスランブフローを得るのに必要な高性能減水剤の添加率とFA原粉の種類との関係を図-1に示す。この結果より, RSシリーズにおいてはFA原粉を混和していない配合と比較してFA原粉を細骨材として用いた配合はSP添加率が小さくなっている。一般的に, フライアッシュは球形の形状をしているため, コンクリートの流動性が向上させる効果があるとされている。本研究においてもFA原粉を用いることでSP添加率が減少しておりフライアッシュのボールベアリングと考えられる。また, FA原粉の種類によ

表-5 フレッシュ性状試験結果

記号	SP (%)	DF (T)	スランブフロー (mm)	フロー時間 (s)	空気量 (%)
35-B30	1.50	5.0	645.0	9.4	1.3
35B30F1	1.30	5.0	680.0	13.3	1.5
35B30F2	1.30	5.0	660.0	18.4	2.3
35B30F3	1.30	5.0	685.0	16.0	1.6
35-B30BS	2.00	7.0	6.5cm	--	4.0
35B30F1BS	1.05	7.0	645.0	37.5	2.5
35B30F2BS	1.15	7.5	630.0	42.6	2.0
35B30F3BS	1.25	7.5	640.0	35.2	2.4

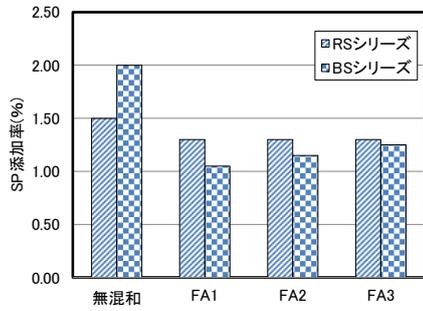


図-1 FA 原粉の種類と SP 添加率

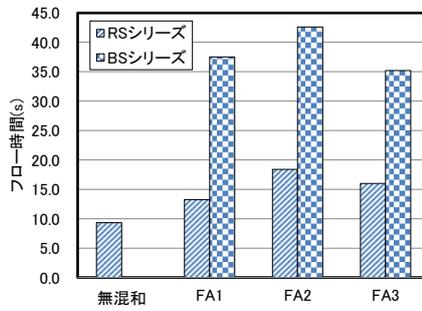


図-2 FA 原粉の種類とフロー時間

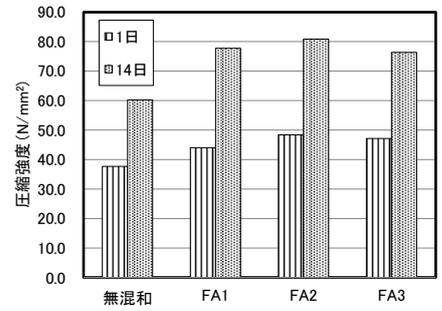


図-3 FA 原粉の種類と圧縮強度 (RS シリーズ, 蒸気養生)

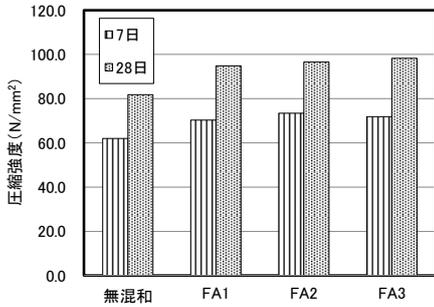


図-4 FA 原粉の種類と圧縮強度 (RS シリーズ, 標準養生)

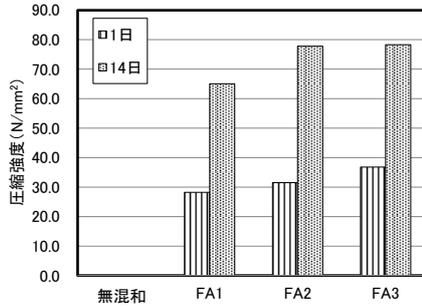


図-5 FA 原粉の種類と圧縮強度 (BS シリーズ, 蒸気養生)

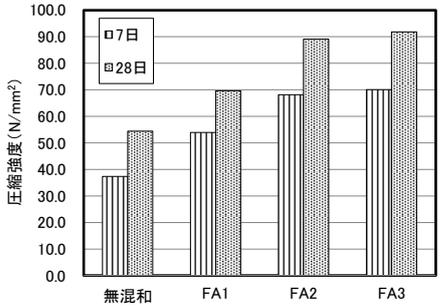


図-6 FA 原粉の種類と圧縮強度 (BS シリーズ, 標準養生)

って SP 添加率に差はなく、本研究で用いた FA 原粉の品質の範囲内においては、FA 原粉の品質がコンクリートの SP 添加率に及ぼす影響は小さいと考えられる。一方、本研究ではフライアッシュを細骨材に対して置換しているため、単位粉体量がセメントに対して置換の場合よりも増加する。これにより、コンクリート中の自由水が粉体に拘束され粘性が増加することが考えられる。そこで、FA 原粉の種類と 500mm フロー到達時間の関係を図-2 に示す。この結果より、FA 原粉が無混和の配合と比較して FA 原粉を細骨材として用いた配合はフロー時間が長くおり、コンクリートの粘性が増加する結果となった。次に BS シリーズにおいては、FA 原粉を混和しない配合は高性能減水剤の上限値と考えられる 2% を添加しても所定スランブフローを得ることができなかった。これは、高炉スラグ細骨材の微粒分量が少ないために流動性が得られなかったと推察できるが今後の検討課題としたい。これに対し、FA 原粉を混和した配合は FA 原粉を混和しない配合よりも少ない添加量で所定のスランブフローを得ることができた。また、FA 原粉の種類によって SP 添加率に多少の差があり、ブレン値が大きい FA 原粉が SP 添加率も大きくなるという結果になった。これは、微細な FA 原粉のほうが自由水を多く吸着するためであると考えられる。また、図-10 より RS シリーズよりも 500mm フロー到達時間が長くなっている。これは、高炉スラグ細骨材は粒径が角ばっており、丸みのある川砂を用いた場合よりも流動性が悪いためであると考えられる。

### 3.2.2 圧縮強度試験結果

RS シリーズにおける圧縮強度試験結果を養生条件ごとに図-3、図-4 に示す。これより、フライアッシュを細骨材として混和することで無混和の配合よりも高い圧縮強度を得ることができた。一般的に、フライアッシュはセメントに内割り置換することが多くこの場合コンクリートの初期強度が低下する。しかし、本研究では細骨材置換であるので単位セメント量は変化しない。また、細骨材を FA 原粉のような鉱物質微粉末で置換することによって、コンクリート中のペースト部分について、結合水量、および単位固相容積が大きくなることが既往の研究<sup>3)</sup>で示されている。本研究においても FA 原粉による微粉末効果が確認された。また、FA 原粉の種類が圧縮強度に及ぼす影響については本研究の範囲内では確認されなかった。次に、BS シリーズにおける圧縮強度試験結果を養生条件ごとに図-5、図-6 に示す。この結果より、BS シリーズにおいても FA 原粉の混和によって圧縮強度が増加することが確認された。また、FA1 も用いた配合が他の FA 原粉を用いた配合よりも 2 割程度圧縮強度が低下する結果となった。RS シリーズと、FA 原粉を混和していない配合に大きな差はあるが FA 原粉と併用することで同等の圧縮強度を得ることができると分かった。

### 3.2.3 乾燥収縮試験結果

乾燥収縮試験結果を図-7 に示す。これより、FA 原粉を使用していないコンクリートと比較し FA 原粉を用いたコンクリートは乾燥収縮が小さくなる結果となった。既往の研究<sup>4)</sup>において

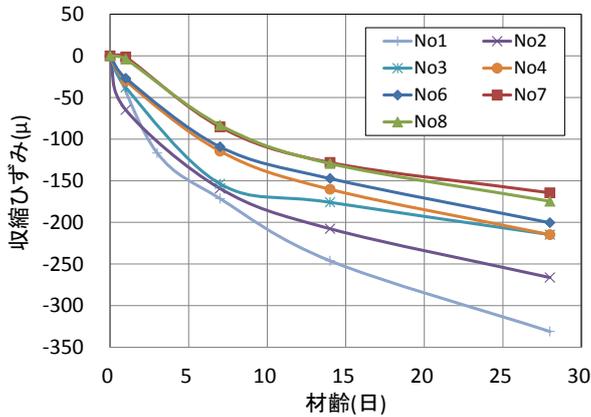


図-7 乾燥収縮試験結果

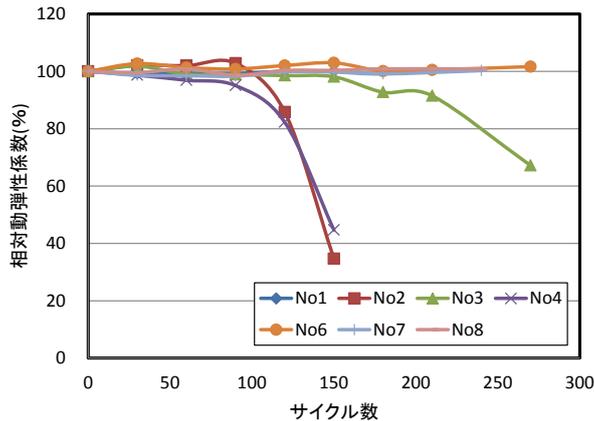


図-8 凍結融解試験結果

も、フライアッシュを用いたコンクリートの細孔容積は材齢が長くなるに伴って小さくなり、ポズラン反応によって硬化組織が緻密になり乾燥による水分の逸散が小さくなるとされている。本研究においても、硬化組織が緻密化することで、セメントペース部分の骨格が強固なものとなり、水分の逸散、毛細管張力による負力よりも変形抵抗力の方が大きくなったため、毛細管張力の増加ほどに収縮量は増加せず、乾燥収縮が小さくなったと考えられる。また、BS シリーズはRS シリーズよりも乾燥収縮が小さい。これは、既往の研究より<sup>5)</sup>高炉スラグ細骨材を用いたコンクリートは川砂を用いたコンクリートよりも弾性係数が大きいとされており、変形抵抗性が大きいため乾燥収縮が小さくなったと考えられる。

### 3.2.4 凍結融解試験結果

凍結融解試験結果を図-8 に示す。一般的に、凍結融解抵抗性向上のためには、AE 剤あるいは AE 減水剤を使用し 3~6% 程度のエントレインドエアを連行することが有効的であるとされている。しかし本研究では、FA 原粉の AE 剤吸着効果が不明確であるため消泡剤を使用し、密実な硬化組織を有するコンクリートとすることで、耐凍性の向上を目指した。RS シリーズにおいて、FA 原粉を細骨材として使用したコンクリートは、FA 原粉を使用していないコンクリートと比較して相対動弾性係数は低下しており、FA 原粉を細骨材として使用することで、圧縮強

度が  $100\text{N/mm}^2$  を程度の高強度コンクリートとなるが、凍結融解抵抗性は低下するという結果になった。特に FA1, FA3 を用いたコンクリートは 150 サイクルで相対動弾性係数が 60% を下回った。圧縮強度が大きくても凍結融解抵抗性が低下するという結果については今後、更に検討が必要である。しかし、BS シリーズにおいては FA 原粉を細骨材として使用したコンクリートは RS シリーズよりも圧縮強度が小さいにもかかわらず、270 サイクルを経過しても相対動弾性係数は 100% であり、高い凍結融解抵抗性を有するコンクリートといえる。

これは、高炉スラグ細骨材を用いた BS シリーズは RS シリーズと比較して空気連行性が高く、フレッシュ時の空気量が RS シリーズよりも大きかったため凍結融解抵抗性が向上したと考えられる。

### 4. まとめ

細骨材として FA 原粉及び高炉スラグ細骨材を使用することで以下の知見が得られた。

- (1)FA 原粉で細骨材の一部を置換することで、所定のスランプフローを得るのに必要な SP 添加率は減少する。しかし、フロー時間が長くなり粘性が大きくなる。
- (2)FA 原粉を細骨材として使用したコンクリートは通常のコンクリートと比較すると圧縮強度が大きくなる。また、FA 原粉の品質の差による影響は小さい
- (3)FA 原粉を細骨材として使用したコンクリートは通常のコンクリートと比較すると乾燥収縮が小さくなる。
- (4)FA 原粉を細骨材として使用したコンクリートは通常のコンクリートと比較すると凍結融解抵抗性は低下するが、高炉スラグ細骨材と併用することで耐凍害性が向上する。

### 【参考文献】

- 1)板井知明ほか：フライアッシュを細骨材の一部と置換したコンクリートの諸特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.23，No.2，pp.109-114，2001
- 2)江藤弘之ほか：フライアッシュの品質変動がコンクリートに及ぼす影響について，コンクリート工学年次論文集，Vol.24，No.1，pp.111-116，2002
- 3)山崎寛司：鋼物質微粉末がコンクリートの強度に及ぼす効果に関する研究，土木学会論文集，85 号，pp.15-45，1963
- 4)長岡誠一ほか：粗粉フライアッシュのコンクリートへの利用に関する研究，材料，Vol.50，No.8，pp.818-823，2001
- 5)小山田邦弘ほか：各種リサイクル材料のコンクリートへの有効活用に関する研究，コンクリート工学年次論文集 Vol.31，No.1，pp.1915-1920，2009