

# 論文 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

小山田 邦弘\*1・藤原 浩巳\*2・丸岡 正知\*3

**要旨:** 資源の枯渇, 天然骨材の採取制限などにより代替骨材資源の確保が重要な課題となっている。本研究では, フライアッシュ原粉, 高炉スラグ細骨材を細骨材の一部として用いたモルタル, コンクリートの基本的性状, 耐久性について各種試験を行い, フライアッシュ原粉の細骨材置換率及び品質がモルタル, コンクリートの基本特性及び耐久性にどのような影響を及ぼすか検討を行った。その結果, フライアッシュ原粉, 高炉スラグ細骨材を細骨材として用いたとしても通常のコンクリートと同等以上の強度発現性, 耐久性を有することがわかった。

**キーワード:** フライアッシュ原粉, 高炉スラグ細骨材, 細骨材代替 細骨材容積置換率

## 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ている。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モルタル, 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モルタルの基本特性

### 2.1 実験概要

本章では品質の異なるフライアッシュ原粉を入手し, 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フライアッシュ原粉細骨材容積置換率及び品質がモルタルのフレッシュ性状, 硬化性状に影響をどのように及ぼすか検討した。そして, フライアッシュ原粉の最適細骨材置換率を実験的に求めることとした。

#### (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 種品の品質の一例を併記した。

\*1 宇都宮大学大学院 工学研究科地球環境デザイン学専攻 (正会員)

\*2 宇都宮大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)

\*3 宇都宮大学大学院 工学研究科助教 工博 (正会員)

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
混和剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤	1.05	---	---	---
	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(%)	45.0以上	59.5	61.1	61.7	
強熱減量(%)	5.0以下	1.2	1.5	1.5	
密度(g/cm <sup>3</sup> )	1.95以上	1.99	2.05	2.01	
比表面積(cm <sup>2</sup> /g)	2500以上	3350	3590	4000	
フロー値比(%)	95以上	91	87	89	
活性度指数(%)	材齢28日	80以上	83	81	79
	材齢91日	90以上	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

表-4 配合条件

水結合材比 (%)	高炉スラグ微粉末 置換率(%)	FA細骨材置換率 (%)	モルタルフロー (mm)	空気量 (%)
35	30	0,10,20,30,40	250±30	1.5±1.0

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□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。

### (2) 配合条件

配合条件を表-4に示す。水結合材比は35%で一定とし、高炉スラグ微粉末の置換率はセメントに対し30%とした。また、FA原粉の置換率は全細骨材容積に対し0,10,20,30,40%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。

高性能減水剤及び消泡剤の添加率は、モルタルフローが250±30mm、空気量が1.5±1.0%となるように適宜調整

した。供試体の養生は、標準養生(20□, 水中)とした。

### (3) 実験項目及び方法

#### 1) モルタルフロー試験

モルタルフロー試験は「JIS R 5201 セメントの物理試験方法」に準拠した。モルタルの流動性は所定のモルタルフローを得るのに必要なSP添加率で評価した。

#### 2) 空気量試験

空気量試験は「JIS A 1116 フレッシュコンクリートの空気量の質量による試験方法(質量法)」に準拠した。

#### 3) 圧縮強度試験

圧縮強度は、φ5×10cm 円柱供試体を用い「JSCE-G 505 円柱供試体を用いたモルタルの圧縮強度試験方法」に準拠した。養生条件は、標準養生、材齢7日、28日、91日とした。

## 2.2 実験結果及び考察

### (1) フレッシュ性状試験結果

各シリーズにおけるフレッシュ性状試験結果を表-5、表-6にそれぞれ示す。また、所定のモルタルフローを得るのに必要なSP添加率とFA細骨材置換率の関係を図-1、図-2にそれぞれ示す。RSシリーズ、BSシリーズの双方においてFA原粉の細骨材置換率が大きくなるにしたがって所定のモルタルフローを得るのに必要なSP添加率が増大する結果となった。これは、粉体量の増加によってモルタル中の自由水が粉体に拘束され、粘性が増加し流動性が低下していることを示している。特にFA原粉の細骨材置換率が20%を超える配合においては、SP添加率が急激に増大しており、練り時間も長くなった。また、目視ではあるが置換率が20%を超えた配合ではダイランタンシー性状が確認された。また、本研究で用いたFA原粉の品質によってSP添加率に大きな差はなかった。既往の研究より<sup>2)</sup>、モルタルの流動性とフライアッシュの品質については、粉末度、フロー値比、未燃焼カーボン量が流動性に影響を及ぼすとされている。しかし、本研究で用いたFA原粉の品質の差は小さく、フロー値比もすべてのFA原粉において同等であった。よって、本研究で用いたFA原粉の品質の範囲内においては、モルタルの流動性に及ぼす影響は小さいと考えられる。

### (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材齢ごとに図-3から図-5にそれぞれ示す。この結果より、初期材齢においてはFA置換率の増加に伴って圧縮強度も増加する傾向にあり、FA原粉の細骨材置換率をFA1を用いた配合で20%以上、FA2、FA3を用いた配合で10%以上とすることでFA原粉無混和の配合よりも圧縮強度が増加することが分かった。しかし、材齢28日以降の材齢においてはFA置換率の増加に伴って圧縮強度は増加

表-5 フレッシュ性状試験結果 (RS シリーズ)

記号	SP (%)	DF (T)	フロー値 (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)	練り時間 (S)
35B30	0.80	5.00	250	1.8	13.0	300
35B30F1-10	0.90	5.00	270	1.7	17.0	300
35B30F1-20	0.90	5.00	228	1.0	17.5	300
35B30F1-30	1.10	5.00	278	1.4	18.5	360
35B30F1-40	1.20	5.00	303	1.4	19.0	480
35B30F2-10	1.00	5.00	280	2.2	17.0	300
35B30F2-20	1.00	5.00	270	2.2	18.5	300
35B30F2-30	1.15	5.00	268	1.8	20.0	360
35B30F2-40	1.30	5.00	200	2.9	20.0	540
35B30F3-10	0.90	5.00	263	1.3	19.0	300
35B30F3-20	1.00	5.00	268	1.9	18.5	300
35B30F3-30	1.20	5.00	255	1.1	19.0	420
35B30F3-40	1.50	5.00	270	1.5	19.0	600

表-6 フレッシュ性状試験結果 (BS シリーズ)

記号	SP (%)	DF (T)	フロー値 (mm)	空気量 (%)	温度 (°C)	練り時間 (S)
35B30BS	0.70	5.0	165	2.0	28.0	300
35B30F1-10BS	0.70	5.0	243	2.9	27.0	300
35B30F1-20BS	0.80	5.0	268	1.1	28.0	300
35B30F1-30BS	1.10	5.0	233	0.8	33.5	480
35B30F1-40BS	1.35	5.0	260	0.5	34.2	480
35B30F2-10BS	0.90	5.0	245	2.2	28.0	300
35B30F2-20BS	0.80	5.0	220	0.6	28.5	300
35B30F2-30BS	1.20	5.0	290	1.8	31.5	420
35B30F2-40BS	1.50	5.0	315	2.0	30.5	420
35B30F3-10BS	0.70	5.0	255	0.9	27.8	300
35B30F3-20BS	0.80	5.0	270	0.7	28.0	300
35B30F3-30BS	1.10	5.0	288	1.1	31.0	680
35B30F3-40BS	1.30	5.0	250	1.9	32.0	480

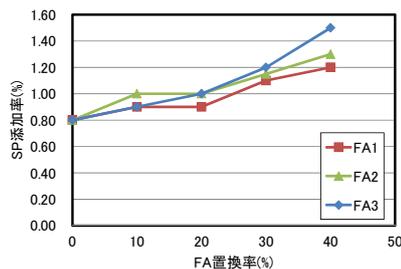


図-1 FA置換率とSP添加率の関係

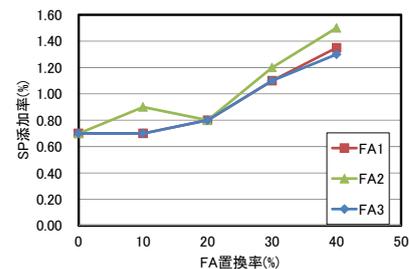


図-2 FA置換率とSP添加率の関係

(RS シリーズ)

(BS シリーズ)

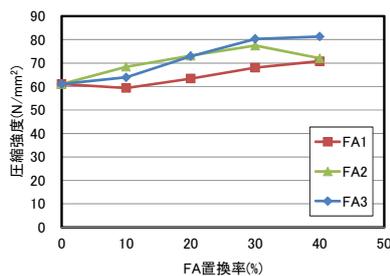


図-3 圧縮強度試験結果 (RS シリーズ材齢 7 日)

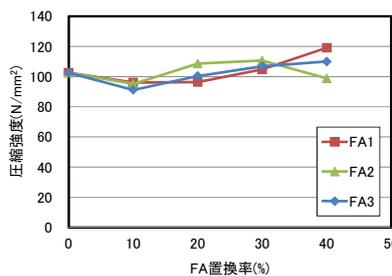


図-4 圧縮強度試験結果 (RS シリーズ材齢 28 日)

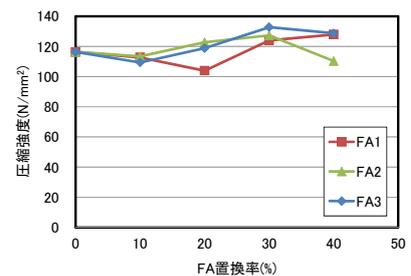


図-5 圧縮強度試験結果 (RS シリーズ材齢 91 日)

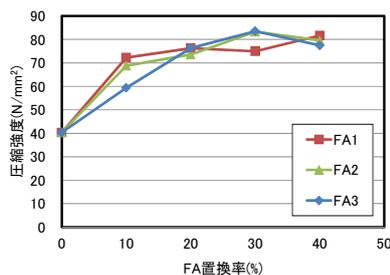


図-6 圧縮強度試験結果 (BS シリーズ材齢 7 日)

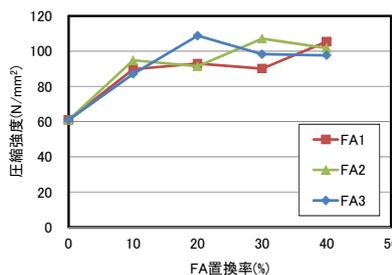


図-7 圧縮強度試験結果 (BS シリーズ材齢 28 日)

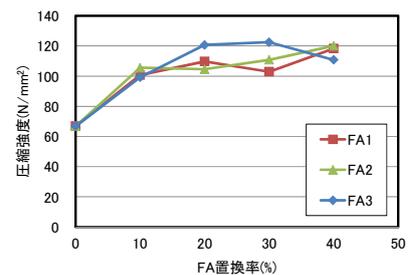


図-8 圧縮強度試験結果 (BS シリーズ材齢 91 日)

しているが、初期材齢ほどの強度増進は得られなかった。これは、FA 原粉の微細な粒子がセメント粒子間に入り込むことで、セメント粒子周辺における水和物を析出できるスペースが広くなり、初期強度が FA 原粉を使用していない配合よりも大きくなったと考えられるが、今後詳細な検討が必要である。次に、BS シリーズにおける圧縮強度試験結果を材齢ごとに図-6 から図-8 に示す。この結果より、初期強度は FA 置換率の増加に伴って圧縮強度も増加することが分かった。ま

た、FA 原粉と高炉スラグ細骨材を併用した配合は、高炉スラグ細骨材のみを使用した配合と比較して、圧縮強度が 2 倍程度となった。これは、高炉スラグ細骨材単体ではブリーディングが発生しやすく、硬化体組織が粗になり強度が低下したと推察できる。これに対し、FA 原粉と高炉スラグ細骨材を併用することで、ブリーディングを抑制し、FA 原粉の微粉末効果によって強度が増進したと考えられる。以上の試験結果より、FA 原粉の最適置換率は 20% であると考えられる。

### 3. 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及び耐久性

#### 3.1 実験概要

前章のモルタル実験より、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。

##### (1) 使用材料

使用材料を表-7に示す。

表-7 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		3590			
	FA3		4000			
粗骨材	G	笠間産砕石	2.65	0.57	6.54	--
混和剤	SP	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤	1.05	--	--	--
	DF	ポリアルキレン誘導体	1.00	--	--	--

##### (2) 配合条件

配合条件を表-8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、残りの細骨材を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、サイクルは24時間とした。また、蒸気養生後は20□、60%RHで気中養生とした。

表-8 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 (%)	単位数 (kg/m <sup>3</sup> )							
					水	結合材			細骨材			粗骨材
					W	C	BS	S	FA	BS-S	G	
No1	35B30	35	650±50	1.5±1.0	165	330	141	939	0	0	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) 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。

#### 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。

#### 4) 乾燥収縮試験

乾燥収縮試験は、10×10×40cm角柱供試体を用い、JIS A 1129に準拠して試験を行った。脱型後、供試体を標準養生し材齢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。

#### 5) 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。養生は標準養生とした。

### 3.2 実験結果及び考察

#### (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-9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-9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を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効果と考えられる。また、FA原粉の種類によって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

表-9 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

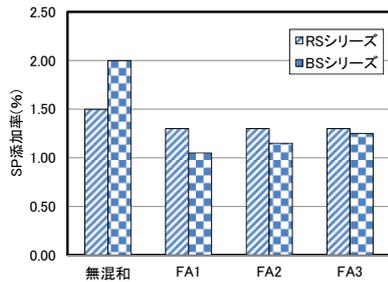


図-9 FA原粉の種類とSP添加率

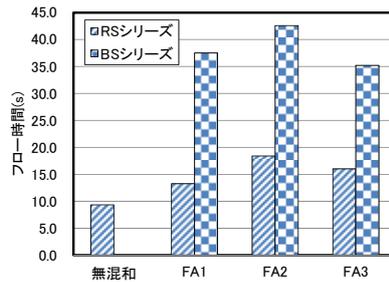


図-10 FA原粉の種類とフロー時間

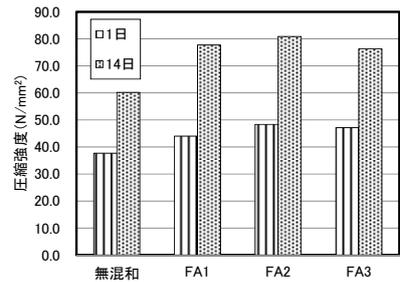


図-11 FA原粉の種類と圧縮強度 (RSシリーズ, 蒸気養生)

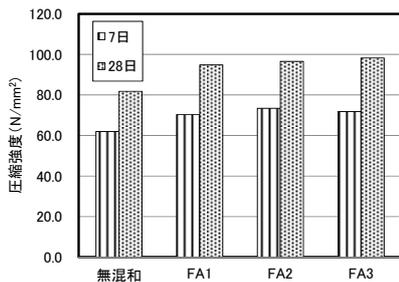


図-12 FA原粉の種類と圧縮強度 (RSシリーズ, 標準養生)

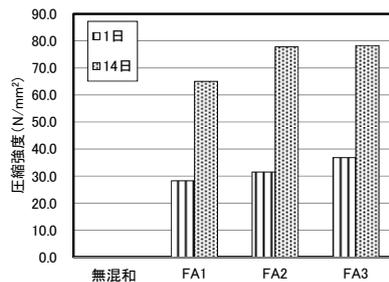


図-13 FA原粉の種類と圧縮強度 (BSシリーズ, 蒸気養生)

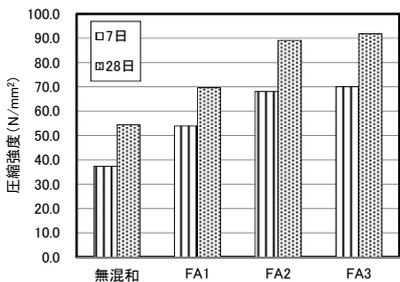


図-14 FA原粉の種類と圧縮強度 (BSシリーズ, 標準養生)

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-10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なっており、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プ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プ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形が角ばっており、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。

## (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-11、図-12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-13、図-14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分かった。

## (3) 乾燥収縮試験結果

乾燥収縮試験結果を図-15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、

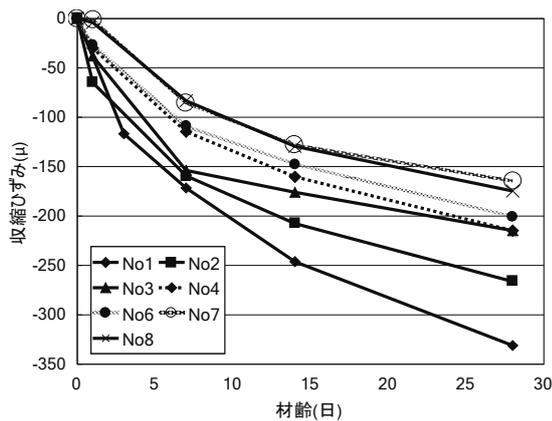


図-15 乾燥収縮試験結果

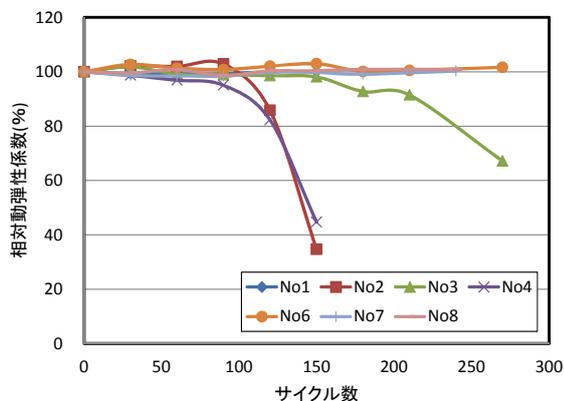


図-16 凍結融解試験結果

セメントペース部分の骨格が強固なものとなり、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、変形抵抗力が大きいため乾燥収縮が小さくなったと考えられる。

#### (4) 凍結融解試験結果

凍結融解試験結果を図-16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100N/mm<sup>2</sup>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

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 サイクルを經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可能性がある。

#### 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したモルタルは細骨材置換率が20%を超えると所定のスランプフローを得るのに必要なSP 添加率が急激に増加する。また、FA 原粉と高炉スラグ細骨材を使用したモルタルも同様の傾向にある。
- (2)FA 原粉で細骨材の一部を置換したモルタルの圧縮強度は細骨材置換率が大きくなるに伴い大きくなる。FA 原粉混和による強度増進は特に初期材齢において顕著に表れる。
- (3)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。
- (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
- (5)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。
- (6)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可能性がある。

#### 【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