

# 論文 コンクリートの諸性質に及ぼすフライアッシュの粉末度の変化に関する実験

金子 樹<sup>\*1</sup>・守屋 健一<sup>\*2</sup>・全 洪珠<sup>\*3</sup>・嵩 英雄<sup>\*4</sup>

要旨：現在流通しているフライアッシュ 種の粉末度は JIS 規格の下限値 2500cm<sup>2</sup>/g に対して 3000～4500cm<sup>2</sup>/g に分布している。本論文は FA コンクリートに及ぼす FA の粉末度の影響を明らかにするため、計画調合一定の場合と単位水量と AE 剤量を変化させてスランプ・空気量を一定とした場合のコンクリートの諸性質について実験したものである。その結果 FA の粉末度の変化が単位水量, 圧縮強度, 乾燥収縮に及ぼす影響が大きいことを明らかにした。  
キーワード：フライアッシュ, 比表面積, 空気量, 単位水量, 圧縮強度, 乾燥収縮

## 1. はじめに

わが国のフライアッシュ（以下, FA と略記する）の産出量は, 石炭火力発電所の増設に伴い年々増加しており, 今後建設業界での使用がさらに求められ, 多くの FA が流通されと考えられる。

コンクリート用 FA は粉末度・強熱減量等により 種から 種に区分される。現在流通している FA 種の比表面積は約 3000cm<sup>2</sup>/g 以上であり, そのうち 3400～3600cm<sup>2</sup>/g と 3800～4000cm<sup>2</sup>/g にピークを持つと報告されている<sup>1)</sup>が, JIS 規格(種)では上限を定めず, かつ下限値は 2500cm<sup>2</sup>/g と現状と大きく乖離している。

そのため現在多く流通しているものとは品質の違う FA が供給される可能性があり, FA のガイドライン案として FA 種の比表面積の下限値

を 3000cm<sup>2</sup>/g とする<sup>2)</sup>検討もされている。

FA の品質変動については pH, 強熱減量等がフレッシュコンクリートの流動性におよぼす影響<sup>3)</sup>や 種, 種, 種による FA コンクリートの違いについて<sup>4)</sup>報告されているが既往の研究はまだ少ない。

本報告では FA の比表面積の変化による単位水量の低減, 乾燥収縮の低減, 強度発現性などにおよぼす影響について明らかにした。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験概要

同一石炭火力発電所で同時期に製造された FA 種, 種および 種を混合し, 比表面積を 2500～4400cm<sup>2</sup>/g の範囲で変化させ, 計画調合一定の場合(実験 1)と調合補正してスランプ, 空気量

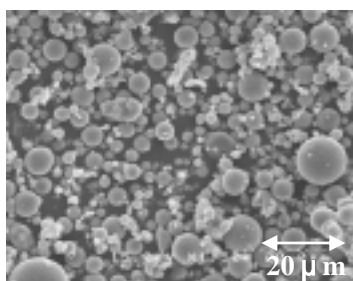


写真 - 1 FA 種

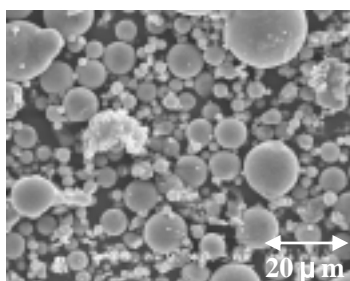


写真 - 2 FA 種

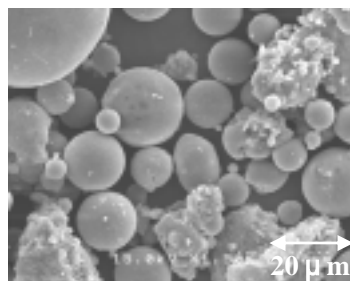


写真 - 3 FA 種

\*1 工学院大学 建築学科 (正会員)

\*2 工学院大学大学院 工学研究科建築学専攻修士課程 (正会員)

\*3 工学院大学大学院 工学研究科建築学専攻博士後期課程 修士(工学) (正会員)

\*4 工学院大学 建築都市デザイン学科教授 博士(工学) (正会員)

を一定の場合(実験2)の2シリーズの実験を行い、FAの比表面積の変化がFAコンクリートの諸性質と調合におよぼす影響について検討した。

## 2.2 使用材料

使用したFA、種、種の顕微鏡写真を写真-1~写真-3に、品質を表-1に示す。FAは写真より、種類によって粒径の大きさの違いがあり、種は、球状でないものが多く粒形が悪い。また、3種類のFAの品質は、密度、フロー値比、活性度指数の差は比表面積の違いによるものと考えられ、強熱減量やMB吸着量の値は小さく、比表面積以外の品質は同等であった。3種類のFAの混合比率と混合後の品質について計算した結果を表-2に示す。また、混合比率は質量比によった。なお、比表面積の計算値は実際の値と大きな差がない<sup>5)</sup>とできる。計算の結果比表面積の減少に伴い密度は減少し、強熱減量は微増した。

セメントは普通ポルトランドセメント(密度3.16g/cm<sup>3</sup>、比表面積3310g/cm<sup>3</sup>)を、粗骨材は青梅産硬質砂岩碎石2005を(表乾密度2.66g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.01%、実積率59.1%)、細骨材は大井川産川砂(表乾密度2.63g/cm<sup>3</sup>、吸水率1.08%、粗粒率2.82)を、化学混和剤はリグニンスルホン酸塩系のAE減水剤と非イオン系のFA用AE剤を使用した。なお、使用材料は実験1、実験2で共通である。

## 3. 実験 (コンクリートの計画調合一定の実験)

### 3.1 実験の目的および概要

本実験はFAの品質変化をコンクリート製造者が知らず、計画調合を一定のま

まで製造した場合を想定して、FAの比表面積の変化がコンクリートの諸性質に及ぼす影響を明らかにすることを目的とした。FA種を100%使用したコンクリート(以下F4コンと略記)を基準で計画調合を定め、その他のFAコンクリートではF4コンと同じ質量調合として実験を行った。

### 3.2 コンクリートの調合

FAは表-2に示したF1~F6の6種類を使用し内割混合とし、セメント質量に対しFA置換率25%、水結合材比(W/B)50%とした。F4コンのスランプと空気量が18cm、4.5%となるように計画調合を定め、その調合を表-3に示す。他のFAコンクリートはFAの品質変動があったことを製造者が知らないことを想定し、F4コンと同じ質量で計量した。AE減水剤は結合材の質量に対して0.3%を、AE剤は0.066%を添加した。

### 3.3 実験方法

練混ぜ方法は、室温20の実験室で温度20にした材料を用い、容量50Lの強制水平パン型

表-1 使用したFAの種類と品質

種類	SiO <sub>2</sub> (%)	密度 (g/cm <sup>3</sup> )	比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	強熱減量 (%)	フロー値比 (%)	MB吸着量 (%)	活性度指数(%)	
							28日	91日
FA	60	2.39	5070	0.9	114	0.31	93	111
FA	60	2.29	3760	0.9	107	0.39	84	103
FA	57	2.15	1970	1.7	104	0.43	74	86

表-2 FA混合率と混合後の品質の計算値

要因 記号	混合比(質量%)							
	-	F1	F2	F3	F4	F5	F6	-
FA	-	-	-	-	-	30	50	100
FA	-	30	50	70	100	70	50	-
FA	100	70	50	30	-	-	-	-
比表面積 (cm <sup>2</sup> /g)	1970	2507	2865	3323	3760	4088	4415	5070
密度(g/cm <sup>3</sup> )	2.15	2.19	2.22	2.25	2.29	2.32	2.34	2.39
強熱減量(%)	1.7	1.5	1.3	1.1	0.9	0.9	0.9	0.9

表-3 F4基準コンクリートの計画調合(実験1)

記号	W/B (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	絶対容積(L/m <sup>3</sup> )				単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
					B		S	G	B		S	G
					C	FA			C	FA		
F4	50	67	42.9	185	88	40	275	366	278	93	724	975

ミキサーで練混ぜた。  
フレッシュコンクリートの試験はスランプ、空気量、単位容積質量、練上がり温度とし、硬化コンクリートの試験は材齢 7, 28, 91 日の標準水中養生圧縮強度、および促進中性化試験とした。促進中性化試験は JIS A 1153 により行った。

### 3.4 実験結果及び考察

#### (1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートの試験結果を図 - 1, 図 - 2 に示す。計画調合を一定とした場合, FA の比表面積の減少に伴いスランプは減少し, 空気量は増加する。F4 コンを基準としたスランプの変動幅は +0.5, - 1.5cm, 空気量の変動幅は +0.4, - 0.8%と, JIS A 5308 の範囲内であるがスランプ、空気量ともに比表面積との相関が見られた。これは FA の粒径が大きく, 粒形が悪くなり, FA の比表面積の減少によるためである。

表 - 4 に実測空気量と FA 密度の変化を考慮し, 計画調合を補正した調合表を示す。調合補正後の単位水量は FA の比表面積の減少に伴い減少

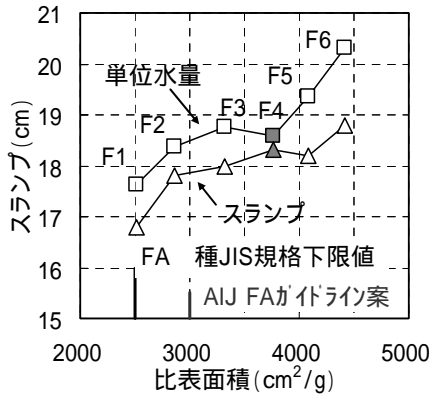


図 - 1 FA の比表面積とスランプ

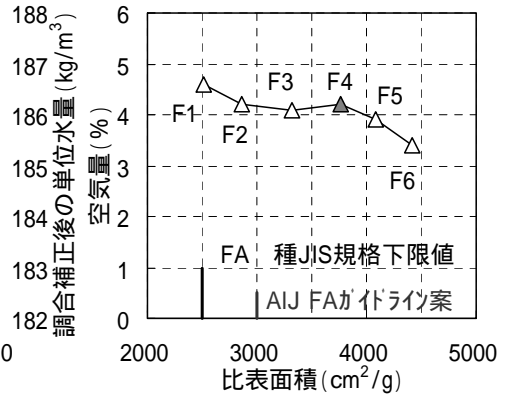


図 - 2 FA の比表面積と空気量

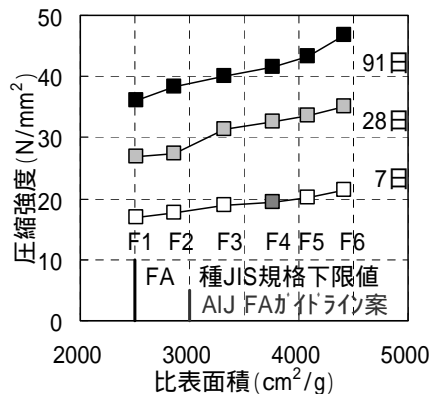


図 - 3 FA の比表面積と圧縮強度

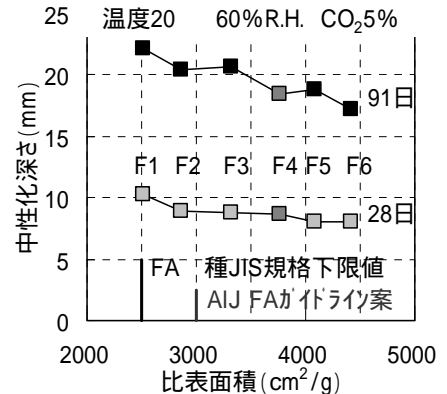


図 - 4 FA の比表面積と中性化深さ

し, 単位水量とスランプの関係では FA の比表面積の変化に係わらず相関関係が見られる。

#### (2) 圧縮強度

比表面積と圧縮強度の関係を図 - 3 に示す。標準水中養生の圧縮強度は比表面積の減少に伴って低下し, F4 コンを基準とした 28 日強度の変動幅は +2.6, - 5.7N/mm<sup>2</sup>であった。強度増進は比表面積の増減による変化が見られなかったことから空気量の増減の影響による。

表 - 4 実際の空気量と FA 密度によって計画調合を補正した調合

記号	フレッシュコンクリート		W/B (%)	W/C (%)	s/a (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	絶対容積(L/m <sup>3</sup> )				単位量(kg/m <sup>3</sup> )			
	スランプ (cm)	空気量 (%)					B		S	G	B			
							C	FA			C	FA	S	G
F1	16.8	4.6	50.0	66.5	42.6	184.6	88	42	274	365	277	92	722	973
F2	17.8	4.2	49.9	66.5	42.6	185.4	88	42	276	367	279	93	726	977
F3	18.0	4.1	50.0	66.5	42.6	185.8	88	41	276	368	279	92	727	979
F4	18.3	4.2	49.7	66.5	42.6	185.6	88	41	276	367	279	94	726	978
F5	18.2	3.9	49.9	66.5	42.6	186.4	89	40	277	369	280	93	729	982
F6	18.8	3.4	49.8	66.5	42.6	187.3	89	40	278	371	281	95	733	987

### (3) 中性化

促進中性化試験における FA の比表面積と中性化深さの関係を図 - 4 に示す。中性化深さは FA の比表面積の減少に伴い増加した。F4 コンを基準とした中性化深さの変動幅は促進期間 28 日で +1.56, -0.56mm, 促進期間 91 日では +3.78, -1.15mm であり, 28 日より 91 日の方が FA の比表面積による傾きが大きいことから材齢が経つに連れ, 中性化への影響が大きくなる。

#### 3.5 実験 1 のまとめ

FA の品質が変化したことを知らず, 計画調合一定で計量してコンクリートを製造した場合, FA の比表面積の減少に伴いスランプは減少し空気量は増加した。実際の空気量と FA 密度で計画調合を補正すると比表面積が小さくなるに連れ単位水量が減少していることが分かり, 単位水量の減少により, スランプが小さくなり, 比表面積の減少に伴い空気量が増え圧縮強度の低下, 中性化の増大を確認した。

## 4. 実験 2 (スランプ・空気量一定の実験)

### 4.1 実験の目的および概要

本実験では実験 1 と同様に製造者が FA の品質変動を知らずに, 同一調合で計量した場合を想定しているが, 実験 1 で明らかにしたようにスランプと空気量は FA の品質変動によって変わるため, 製造者は出荷に際し目標とするスランプと空気量に調整する必要がある。製造者はスランプの調整を本来と違う表面水率を設定して行くと推測し, スランプの調整は単位水量と細骨材量を, 空気量の調整は AE 剤の添加量により

調整した。本実験では, 結果的に単位水量の増減によって調整されたコンクリートの圧縮強度, 静弾性係数, 乾燥収縮, 中性化におよぼす影響について明らかにした。

### 4.2 コンクリートの調合

FA は F1 ~ F5 の 5 種類を使用し, セメントの質量 25% を F4 で置換し, 水結合材比 50%, 目標をスランプ 18cm, 空気量 4.5% とし調合を定めた。他の調合も目標スランプ, 空気量となるように単位水量, 細骨材量, AE 剤の添加量を調整し定めた調合を表 - 5 に示す。なお AE 減水剤は結合材の質量の 0.3% を添加した。

### 4.3 実験方法

練混ぜは実験 1 と同様とした。試験項目は 3.3 項に加えて 5, 10, 15 低温養生と 20 封緘養生の圧縮強度と圧縮強度試験時に静弾性係数試験, 乾燥収縮を試験行った。

### 4.4 実験結果及び考察

#### (1) フレッシュコンクリート

単位水量は実験 1 で比表面積の減少に伴いスランプが減少したため同一スランプを得るために増加し, 実際の水結合材比も増加した。また, AE 剤の添加量は実験 1 より, 比表面積の減少に伴い空気量が増加したため同一空気量を得るために減少傾向が見られたが, 本実験では FA 用 AE 剤を使用したため増減の幅は小さい<sup>6)</sup>。

図 - 5 に空気量 1% 当りの AE 剤添加量を示す。比表面積の減少に伴い AE 剤の添加量は減少した。FA の空気連行性については未燃炭素である強熱減量や MB 吸着量が影響すると報告されている<sup>7)</sup>が, 今回使用した FA ではこれらの値が小

表 - 5 コンクリートの計画調合 (実験 2)

記号	W/B (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )					AE 剤 (B × %)	フレッシュコンクリート	
				W	B		S	G		スランプ (cm)	空気量 (%)
					C	FA					
F1	51.9(+1.9)	69.2(+2.5)	43.1(-0.3)	189(+7)	273	91	731(-7)	975	0.058(-0.014)	18.5	4.2
F2	51.1(+1.1)	68.1(+1.4)	43.2(-0.2)	186(+4)	273	91	734(-4)	975	0.062(-0.010)	18.0	4.2
F3	50.5(+0.5)	67.4(+0.4)	43.3(0.1)	184(+2)	273	91	736(-2)	975	0.066(-0.006)	18.3	4.7
F4	50.0	66.7	43.4	182	273	91	738	975	0.072	18.3	4.7
F5	49.5(-0.5)	65.9(-0.8)	43.4(0.0)	180(-2)	273	91	740(+2)	975	0.076(+0.004)	18.3	4.9

さいためこの影響は小さく、比表面積の減少に伴い FA 自体の AE 剤吸着量が減少しているためと考えられる。

(2) 圧縮強度

図 - 6 に比表面積と圧縮強度の関係を示す。圧縮強度の差は標準水中養生材齢 28 日で  $1.9\text{N/mm}^2$  と小さいが比表面積  $3300 \sim 3800\text{cm}^2/\text{g}$  を頂点に山なりの傾向が見られる。低温養生 (10 ) との圧縮強度差は比表面積の減少により増加し、F1 で最大の  $5.6\text{N/mm}^2$  となった。図 - 7 に積算温度と圧縮強度の関係を示す。FA の比表面積が変化しても積算温度と圧縮強度は相関関係になり、基準となる F4 コンと比表面積が JIS 下限値となる F1 では積算温度の増加により圧縮強度の差が微増する。養生温度による標準水中養生との圧縮強度差を図 - 8 に示す。養生温度を 10, 15 と変えた全ての FA コンクリートで JASS 5 の気温による強度補正值 T (フライアッシュ B 種) の範囲内でほぼ満足した。しかし、養生温度 5 では全ての FA で規格の  $6.0\text{N/mm}^2$  よ

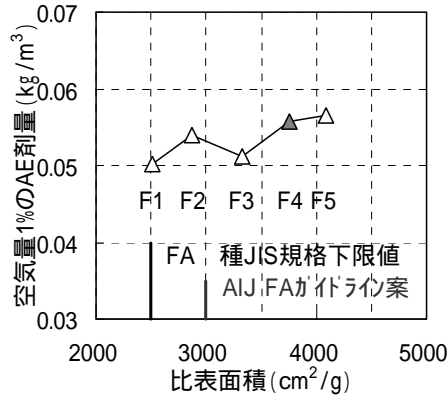


図 - 5 空気量 1% 当りの AE 剤添加量

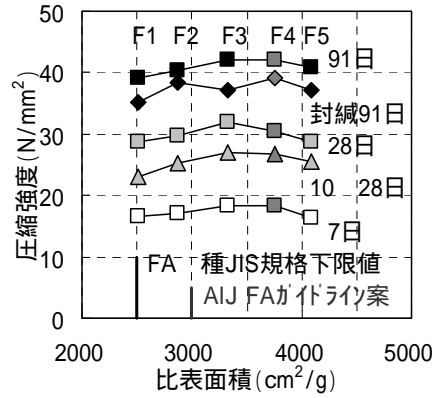


図 - 6 比表面積と圧縮強度

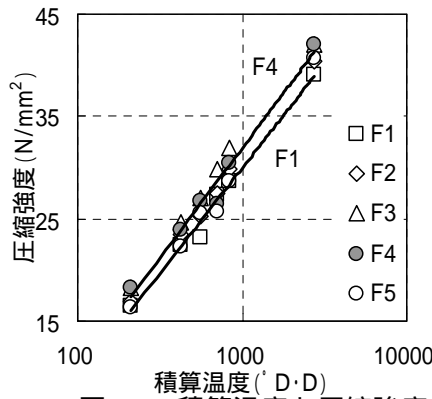


図 - 7 積算温度と圧縮強度

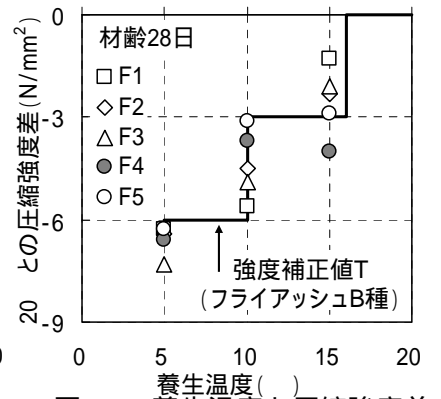


図 - 8 養生温度と圧縮強度差

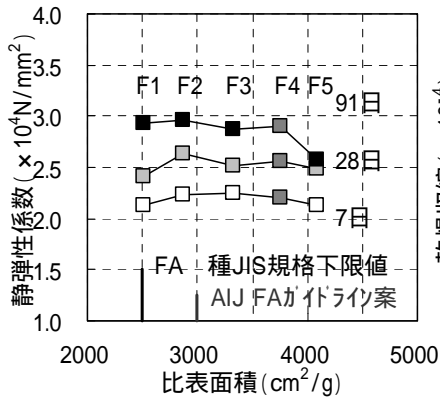


図 - 9 FA の比表面積と静弾性係数

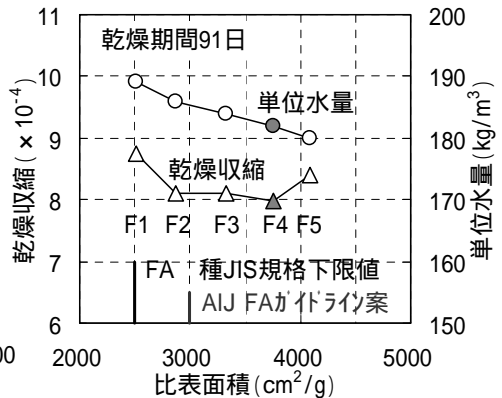


図 - 10 乾燥収縮と単位水量

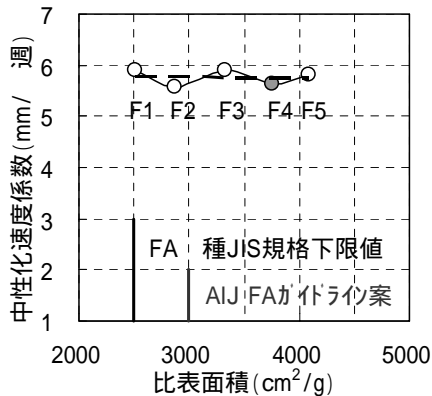


図 - 11 比表面積と中性化速度係数

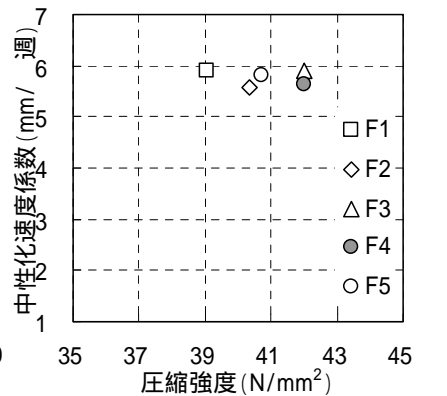


図 - 12 圧縮強度と中性化速度係数

りも大きくなったがこれは本実験の FA 置換率が 25%と C 種に相当しているためと考えられる。

### (3) 静弾性係数

比表面積と静弾性係数の関係を図 - 9 に示す。比表面積の変動による静弾性係数への大きな差は見られないが、F1、F5 でやや低い値を示した。

### (4) 乾燥収縮

比表面積と乾燥収縮、単位水量の関係を図 - 10 に示す。乾燥期間 91 日で F4 コンを基準とした乾燥収縮の変動幅は  $+0.8 \times 10^{-4}$  となり、F1 と F5 では高い値を示した。特に F5 においては単位水量が減少しているにも係わらず乾燥収縮が大きくなった。

### (5) 促進中性化

比表面積と中性化速度係数の関係を図 - 11 に示す。中性化速度係数は比表面積による違いは見られず、ほぼ一定となった。図 - 12 に示す圧縮強度と中性化速度係数の関係でも、圧縮強度の増加による中性化速度係数の差は見られない。

## 4.5 実験 2 のまとめ

スランプと空気量を一定とした実験 2 では、実験 1 よりも FA の比表面積の影響が中性化速度係数を除く諸性質で確認された。現在多く流通している比表面積  $3500\text{cm}^2/\text{g}$  程度のものに対して、JIS 規格下限値に近くなると単位水量は増加、圧縮強度は減少、乾燥収縮は増大した。また比表面積が大きくなると単位水量は減少するが、乾燥収縮への改善は見られず、圧縮強度もやや低かった。圧縮強度、乾燥収縮の改善に効果がある比表面積は  $3300 \sim 3800\text{cm}^2/\text{g}$  程度であった。

## 5. まとめ

- 1) 実験 1 において FA の比表面積の変化に対して計画調合を一定とした場合、FA の比表面積の減少によりフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの品質は低下した。
- 2) 実験 2 において FA の比表面積の変化に対してスランプと空気量を一定とする場合、FA の比表面積の減少により、単位水量は増加し、水セメント比、水結合材比が増加した。

3) FA 種の JIS 規格下限値の比表面積  $2500\text{cm}^2/\text{g}$  では単位水量、圧縮強度、乾燥収縮においてコンクリートの品質は大きく低下した。

4) FA の比表面積が大きくなると単位水量は減少するが、乾燥収縮への改善は見られず、圧縮強度もやや低くなった。

5) FA 種を 100%使用コンクリート近辺の比表面積  $3300 \sim 3800\text{cm}^2/\text{g}$  で、強度は大きく、乾燥収縮は小さくなり、改善効果が大きい。

なお、本研究は工学院大学 EEC 研究、電力共通研究による建築学会受託研究の一環として行ったものである。

## 参考文献

- 1) 石川嘉崇ほか：フライアッシュ JIS 規格品の品質に関する一考察，第 48 回日本学会材料研究連合講演会，pp.145-146，2004.10
- 2) 日本建築学会，材料施工委員会，鉄筋コンクリート工事運営委員会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工ガイドライン，シンポジウム資料，2005.3
- 3) 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報告集，vol.24，No.1，pp.111-116，2002
- 4) 全洪珠ほか：フライアッシュを大量使用したコンクリートの強度および耐久性に関する実験的研究（その 1～その 3），日本建築学会大会学術講演梗概集 A - 1，pp.15-20，2004.8
- 5) 粉末度測定委員報告：セメント技術年報，p.188，1955
- 6) 安田正雪ほか：高性能 AE 減水剤を用いたフライアッシュコンクリートの調合と基礎物性，その 1．実験計画および調合，日本建築学会大会学術講演梗概集 A - 1，pp.601-602，1998.9
- 7) 飛坂基夫ほか：空気連行性に及ぼす石炭灰の物性に関する検討，セメント・コンクリート論文集，No.51，pp.132，1997