論文　高品質フライアッシュを用いたコンクリートの調合設計に関する研究

伊藤　七恵[*1]・佐藤　嘉昭[*2]・上田　賢司[*3]・大谷　俊浩[*4]

要旨：本研究では，強熱減量を 1%以下に抑えた高品質フライアッシュをセメントの代替で混入したコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度について検討を行った。その結果，高品質フライアッシュを混入することにより単位水量を低減でき，その低減量はフライアッシュの空隙率に依存することを明らかにした。また，フライアッシュの比表面積とセメント水比，それに材齢の関数として表わされる強度寄与率を用いることによってフライアッシュを混入したコンクリートの圧縮強度を推定できることを示した。

キーワード：高品質フライアッシュ，フレッシュ性状，圧縮強度，強度寄与率，空隙率，比表面積

1. はじめに

フライアッシュ（以下，FA）は，ポゾラン反応による長期強度発現性や組織の緻密化による水密性の向上，アルカリ骨材反応の抑制効果などコンクリートの耐久性向上に寄与する大変に魅力的な混和材料の一つとしてよく知られている。筆者らは，この FA の利用促進を目的として，比較的品質の安定した FA を製造するために強熱減量を 1%以下に加熱処理する FA 処理システム [1)] を開発した。この FA 処理システムによって製造される FA を高品質フライアッシュ（Carbon-free Fly Ash，以下，CfFA）と呼ぶことにしたが，これまでに石炭銘柄および改質処理工程が異なる CfFA を混入したコンクリートの諸特性について明らかにしてきた [2)]。しかしながら，生コン工場において CfFA コンクリートを製造・出荷する場合，調合強度を算出するための強度式や所要のスランプを満足するための単位水量を決定する必要がある。そこで，本報告ではこれまでに行った CfFA コンクリートの実験結果を基に CfFA がフレッシュ性状に及ぼす影響および CfFA コンクリートの調合設計に必要な強度式について検討を行うことにした。

2. 実験概要

2.1 実験計画

実験はシリーズ A，B，C からなっている。シリーズ A は，FA の物性がフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響を把握するために銘柄および処理工程の異なる 10 種類の FA を用いることとした。シリーズ B および C は，シリーズ A で用いた 1 種類の FA のみで実験を行い，FA の置換率や水セメント比（以下，W/C）がフレッシュ性状および圧縮強度に及ぼす影響を把握するために，広範囲の調合に対し実験を行うこととした。

2.2 使用材料および調合

図-1 に FA の改質処理システム，**表-1** に使用した FA の物性値を示す。FA1～FA5 は焼成工程によって改質処理を行い，強熱減量を抑えた CfFA であり，FA6 は市販の JIS II 種灰である。また，FA2 を粉砕・分級処理し，その結果 BG，B/C，H/C から得られたものをそれぞれ FA2-1，FA2-2，FA2-3 とした。FA2-4 は，FA2-2 と FA2-3 を 3:1 で混合したものである。

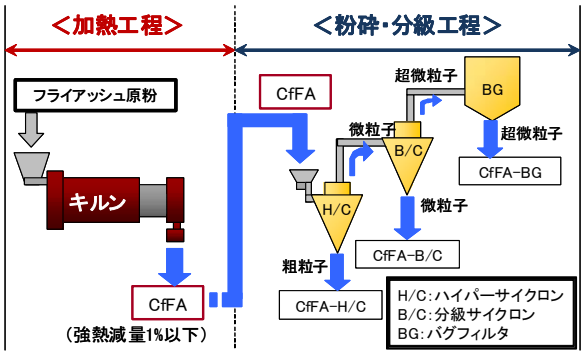

図-1　フライアッシュの改質処理システム

表-1　FA の物性値

表記	強熱減量 (%)	密度 (g/cm³)	二酸化ケイ素 (%)	空隙率	比表面積 (cm²/g)	フロー値比 (%)	活性度指数 (%)	
							28 日	91 日
FA1	0.98	2.26	65.9	0.454	3820	103.9	89.8	92.8
FA2	0.26	2.24	61.5	0.540	3200	105.3	80.8	91.8
FA2-1	1.51	2.45	64.3	0.629	8630	105.5	91.2	109.4
FA2-2	0.20	2.26	61.5	0.480	3230	101.8	82.2	96.5
FA2-3	0.26	2.12	59.4	0.458	1320	87.1	76.2	77.2
FA2-4	0.21	2.23	60.9	0.453	3030	100.9	80.5	95.0
FA3	0.79	2.24	77.9	0.628	4690	95.5	81.7	106.6
FA4	0.18	2.17	60.8	0.417	2780	104.3	91.8	96.9
FA5	0.36	2.24	69.0	0.588	3620	96.1	82.0	96.5
FA6	2.72	2.31	63.2	0.529	4310	111.2	80.5	98.3

空隙率＝(1-かさ密度/密度)

*1 大分大学大学院　工学研究科博士後期課程環境工学専攻　修士（工学）（正会員）
*2 大分大学　工学部福祉環境工学科建築コース教授　工博（正会員）
*3 （株）ゼロテクノコンサル　技術調査部　博士（工学）（正会員）
*4 大分大学　工学部福祉環境工学科建築コース准教授　博士（工学）（正会員）

表-2　使用材料および物性

シリーズ	種別	記号	使用材料および物性
共通	セメント	C	普通ポルトランドセメント：密度 3.16g/cm^3
	水	W	上水道水
	混和剤	Ad1	SP：高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸エーテル系） WR：AE 減水剤標準形（リグニンスルホン酸化合物とポリオールの複合体） HWR：AE 減水剤標準形・高機能タイプ（リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体）
	空気量調整剤	Ad2	AE 助剤（アルキルエーテル系） 消泡剤（ポリアルキレングリコール誘導体）
A	細骨材	S	海砂（30%）：表乾密度 2.60g/cm^3,吸水率 1.95% 砕砂（70%）：表乾密度 2.66g/cm^3,吸水率 1.23%
	粗骨材	G	砕石：表乾密度 2.70g/cm^3,吸水率 0.48%
B	細骨材	S	混合砂：表乾密度 2.59g/cm^3,吸水率 1.73%
	粗骨材	G	硬質砂岩砕石（70%）：表乾密度 2.65g/cm^3,吸水率 1.20% 石灰石砕石（30%）：表乾密度 2.71g/cm^3,吸水率 0.32%
C	細骨材	S	混合砂：表乾密度 2.62g/cm^3,吸水率 2.81%
	粗骨材	G	硬質砂岩砕石：表乾密度 2.66g/cm^3,吸水率 0.58%

表-2 に使用材料および物性，表-3 に調合[3), 4)]を示す。FA を使用しないプレーンコンクリート（以下，基準コンクリート）に対し，FA を置換する場合，FA を混入したコンクリート（以下，FA コンクリート）の単位粗骨材量は基準コンクリートと同一で，FA はセメント質量に対し内割り置換とし，水結合材比（以下，W/B）が同じになるようにした。

シリーズ A は，基準コンクリートの W/C を 40，50，60，70%の 4 水準とした。W/C が 40，50，60%の基準コンクリートに対して，FA コンクリートの単位水量および混和剤の添加量を一定とし，FA の混入がスランプに及ぼす影響を確認することとした。FA の置換率は 20%を基本としたが，一部の調合では置換率 10 および 15%も併せて行った。なお，基準コンクリートの目標スランプは 18±1cm，目標空気量は 4.5±0.5%としたが，FA コンクリートについてはスランプの目標値は設定せず，空気量のみ 4.5±1%になるように AE 助剤を用いて調整した。W/C が 50%の調合に関しては，単位水量がスランプに及ぼす影響を確認するために，一部の調合で基準コンクリートの調合に対し，単位水量を 5 および 10kg/m^3 低減した。また，圧縮強度試験の供試体は，単位水量が 175 kg/m^3 のコンクリートから採取した。

シリーズ B は，基準コンクリートの W/C を 37.5，40，45，55，65%の 5 水準とした。基準コンクリートに対し，FA コンクリートの単位水量の低減量を確認するため，混和剤の添加量を一定として，基準コンクリートと同じスランプになるように単位水量を変化させた。FA の置換率は 20%を基本とし，W/C37.5%は置換率 10 および 15%，W/C40 および 45%は置換率 15%を追加した。なお，すべてのコンクリートの目標スランプは 18±1cm，目標空気量は 4.5±0.5%とし，空気量は AE 助剤によって調整した。

シリーズ C は，基準コンクリートの W/C を 30，40，50，60，80，100%の 6 水準とし，W/C を 30，40，50，

表-3　調合およびフレッシュ性状

シリーズ	W/C (%)	W/B (%)	FA/B (%)	FA の種類	s/a (%)	単位量 (kg/m^3) W	単位量 (kg/m^3) G	Ad1※1 (B×%)	Ad2※2 (B×10^{-3}%)	スランプ (cm)	空気量 (%)
A	40.0	40	0	－	43.5	182	959	0.75 (HWR)	0.0	19.0	4.1
	44.4		10	FA1	43.0				0.5	20.0	4.1
	47.0		15	FA1	42.9				1.0	19.5	4.2
	50.0		20	FA1	42.6				2.0	19.5	4.8
				FA2	42.5				1.0	19.5	4.5
				FA3	42.5				1.5	17.0	3.8
				FA6	42.6				4.0	20.0	4.5
	50.0	50	0	－	47.2	180	942	0.25 (WR)	0.5	18.0	4.6
	62.5		20	FA1	46.5	180			1.0	20.0	4.1
				FA1	47.2	175			1.0	18.0	3.9
				FA1	47.9	170			1.5	16.5	3.8
				FA2	46.5	180			1.0	20.5	4.2
				FA2	47.1	175			2.0	18.5	4.8
				FA2-1	47.3	175			6.0	19.5	3.7
				FA2-2	47.1	175			1.5	19.0	4.4
				FA2-3	47.0	175			1.5	16.5	5.0
				FA2-4	47.1	175			1.5	19.5	4.3
				FA3	46.5	180			2.0	18.5	4.3
				FA3	47.1	175			2.5	16.5	4.2
				FA4	46.5	180			1.5	21.0	4.7
				FA4	47.1	175			1.5	19.0	4.7
				FA4	47.8	170			1.5	17.5	4.7
				FA5	47.1	175			2.0	19.0	4.8
				FA6	46.5	180			5.0	20.0	4.4
				FA6	47.2	175			6.0	18.5	4.9
	60.0	60	0	－	49.9	177	926		0.5	18.0	5.1
	75.0		20	FA1	49.3				1.0	19.0	4.2
				FA2	49.3				1.0	20.0	4.7
				FA3	49.3				1.5	18.0	4.6
				FA6	49.4				3.0	19.5	3.5
	70.0	70	0	－	51.2	182	910		0.5	17.5	4.3
B	37.5	37.5	0	－	42.0	181	961	0.375 (WR)	0.5	18.5	4.6
	41.6		10	FA1	41.6	181			0.5	18.0	4.3
	44.0		15	FA1	41.3	181			0.5	18.5	4.3
	46.9		20	FA1	41.0	181			0.75	19.0	4.8
	40.0	40	0	－	43.2	177	967		0.5	19.0	4.8
	47.0		15	FA1	42.9	175			0.25	18.5	4.6
	50.0		20	FA1	42.6	175			0.5	19.0	4.6
	45.0	45	0	－	44.3	179			0.0	19.0	4.0
	52.9		15	FA1	44.2	176			0.0	19.0	4.1
	56.1		20	FA1	44.0	176			0.25	19.0	4.5
	55.0	55	0	－	47.8	180	935		0.0	19.0	4.9
	68.6		20	FA1	47.9	175			0.0	19.0	4.0
	65.0	65	0	－	50.7	185	894		0.0	18.5	4.8
	81.3		20	FA1	51.1	178			0.0	18.5	4.7
C	30.0	30	0	－	39.4	175	960	0.75	0.5	19.5	5.0
	37.5		20	FA1	37.8			0.65	0.75	17.0	4.9
	50.0		40	FA1	36.2			0.65	2.0	21.0	4.3
	40.0	40	0	－	43.7			0.70	0.5	20.0	4.4
	50.0		20	FA1	42.7			0.60	3.0*	18.5	4.1
	57.1		30	FA1	42.2			0.50	1.0*	19.5	4.5
	66.7		40	FA1	41.7			0.40	0.0	19.9	4.9
	100		60	FA1	40.6			0.45	0.5	20.0	5.0
	50.0	50	0	－	46.1			0.75	0.0	19.5	4.6
	62.5		20	FA1	45.3			0.45	0.25	19.0	4.6
	71.4		30	FA1	45.0			0.35	0.5	18.0	4.9
	83.3		40	FA1	44.6			0.25	1.0	18.0	4.0
	125		60	FA1	43.8			0.15	3.0	19.5	4.0
	60.0	60	0	－	47.5			0.80	0.25	17.0	5.0
	75.0		20	FA1	46.9			0.50	0.5	16.5	4.4
	85.7		30	FA1	46.6			0.40	1.0	20.0	4.8
	100		40	FA1	46.4			0.30	2.5	20.0	5.0
	150		60	FA1	45.7			0.15	4.0	18.5	5.0
	80.0	80	0	－	49.2			1.00	1.0*	13.0	4.7
	100	100		－	50.2			1.30	1.5*	5.5	5.0

※1 シリーズ C ではすべて SP を使用

※2 ＊印は消泡剤でそれ以外は AE 助剤を使用

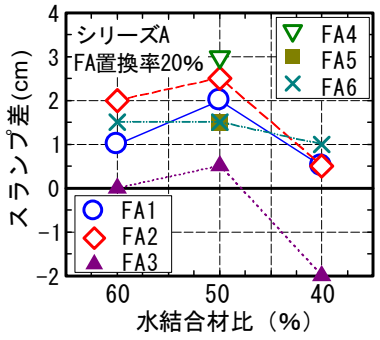

図-2　基準コンクリートとFA コンクリートのスランプ差

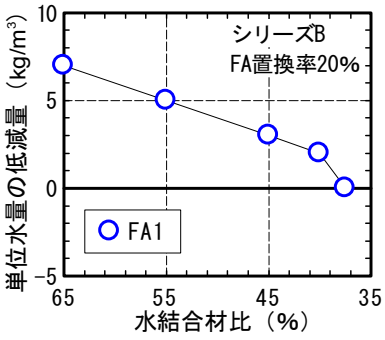

図-3　単位水量の低減量と水結合材比の関係

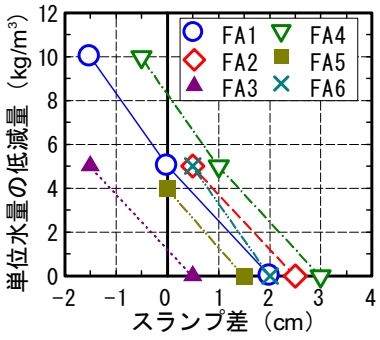

図-4　単位水量の低減量とスランプ差の関係

60%の基準コンクリートに対し，FA の置換率を 20，30，40，60%の 4 水準とした。ただし，W/C30%のみ，置換率は 20，40%の 2 水準である。FA の混入による影響を広範囲の調合で確認するため，すべての調合で単位水量は 175kg/m^3，粗骨材量は 960kg/m^3 と一定とし，高性能 AE 減水剤を使用した。なお，すべてのコンクリートの目標スランプは 18±2cm，目標空気量は 4.5±0.5%とし，目標値を満足するように混和剤および空気量調整剤によって調整したが，W/B80 および 100%の調合では粉体量が少ないためスランプの調整ができなかった。

2.3 実験方法

スランプと空気量の測定は，JIS A 1101，JIS A 1128 に準じ，圧縮強度試験は JIS A 1108 に準じて行った。供試体の寸法はφ100×200mm とし，各条件に 3 体ずつ使用し，材齢 28，91 日，1 年において圧縮強度を測定した。

3. フレッシュ性状

3.1 スランプ

図-2 にシリーズ A における基準コンクリートと FA コンクリートのスランプ値の差，**図-3** にシリーズ B における基準コンクリートと FA コンクリートの単位水量の差をそれぞれ W/B ごとに示す。FA の粒子が球形であるためセメントと置換した場合に流動性が向上することにより，単位水量が同じ場合にはスランプが大きくなり，スランプを同一とすると単位水量が低減する。しかしながら，流動性の向上効果は，W/B によって異なり，シリーズ A では W/B50%で最も効果が大きいが，W/B が小さくなると効果が小さくなる傾向が見られる。W/B が小さくなると密度の小さい FA は粉体の容積が増加し，水が吸着する粉体の表面積が増加する影響であると考えられる。

図-4 にシリーズ A における W/C50%の基準コンクリートと FA コンクリートのスランプ差と単位水量低減量の関係を示す。FA によって単位水量の低減量は異なるが，直線の傾きは同程度であり，単位水量の減少によるスランプの変化の割合に FA の種類による影響は見られない。

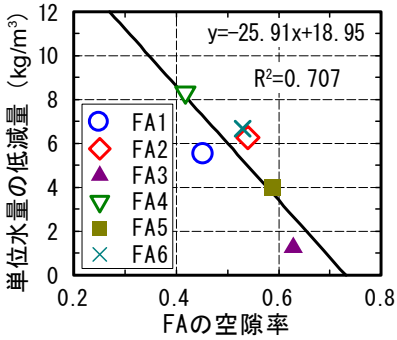

図-5　単位水量の低減量と FA の空隙率の関係

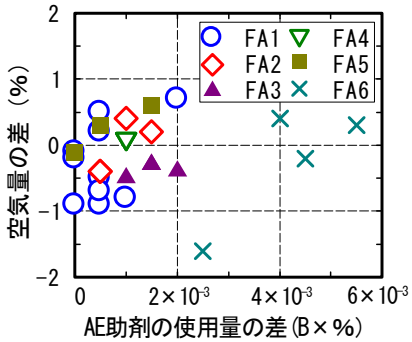

図-6　空気量の差と AE 助剤の使用量の差の関係

図-5 に単位水量の低減量と FA の空隙率の関係を示す。空隙率は，かさ密度と密度から算出したものである。単位水量の低減量は，**図-4** から直線回帰して求めたスランプ差が 0cm に相当する場合の値である。全ての FA において単位水量を減らすことができ，最大で FA4 が約 8kg/m^3 減らすことができるが，FA の種類によって最大 7kg/m^3 程度の相違がある。また，空隙率との相関性が見られ，FA を混入したモルタルおよびペーストの流動特性は，FA の空隙率に影響を受ける [5]が，コンクリートの流動特性にも空隙率が関係すると考えられる。このことから，W/C50%の基準コンクリートに対しての置換率 20%の FA コンクリートの結果ではあるが，空隙率を考慮することにより適切な単位水量を設定することができるものと考えられる。

3.2 空気量

図-6 にシリーズ A における基準コンクリートと FA コ

ンクリートの空気量の差と AE 助剤の使用量の差の関係を示す。FA1～FA5 を用いたコンクリートは AE 助剤の使用量差が 2×10^{-3}（B×%）以内にあり，基準コンクリートとほぼ同じ使用量で目標空気量を得ることができる。また，FA6 を用いたコンクリートは AE 助剤の使用量差が大きく，所定の空気量を得るためには多く添加しなければならないことがわかる。これは，加熱処理を行っていない FA6 の強熱減量の値が FA1～FA5 と比較して高く，未燃カーボンが AE 助剤を吸着してその効果を発揮することができなかったことが原因と考えられる。

4. 圧縮強度

4.1 FA コンクリートの強度寄与率の算出方法

圧縮強度とセメント水比（以下，C/W）の関係を**図-7** に示す。図中の直線は，基準コンクリートの圧縮強度を直線回帰したものである。一般に基準コンクリートの C/W と圧縮強度の関係は直線式で表わすが，C/W が大きくなると強度発現は小さくなり直線式で表示することには無理が生じてくる。強度寄与率を正確に求めようとする場合，基準コンクリートの強度式はできるだけ精度が良いことが望ましい。そこで，シリーズ B および C については，実験結果を的確に表わすために基準コンクリートの強度式を区間に分けて直線近似とした。

FA コンクリートの圧縮強度は，C/W が同じ場合には基準コンクリートと同等以上となる。また，FA のポゾラン反応による強度発現への寄与効果によって，材齢の進行に伴い基準コンクリートとの強度の差が大きくなる。この強度発現への寄与は一般に強度寄与率 [6)]で表わされ，式（1）によって算出することができる。そこで，**図-7** に示す基準コンクリートの強度式を用いて，FA を混入したコンクリートの圧縮強度と同一圧縮強度になる基準コンクリートの単位セメント量を求め，強度寄与率を算出した。

$$x' = \frac{C + k \cdot FA}{W} \qquad (1)$$

ここに，x' ：FA コンクリートの圧縮強度と同一の圧縮強度となる基準コンクリートの C/W

W ：単位水量（kg/m^3）

C ：単位セメント量（kg/m^3）

k ：強度寄与率

FA ：単位 FA 量（kg/m^3）

4.2 FA コンクリートの調合強度の検討

(1) 比表面積の影響

FA コンクリートの圧縮強度を推定するためには適切な強度寄与率を与える必要がある。FA を混入することによる強度の増加は，粉体充てん効果とポゾラン反応によ

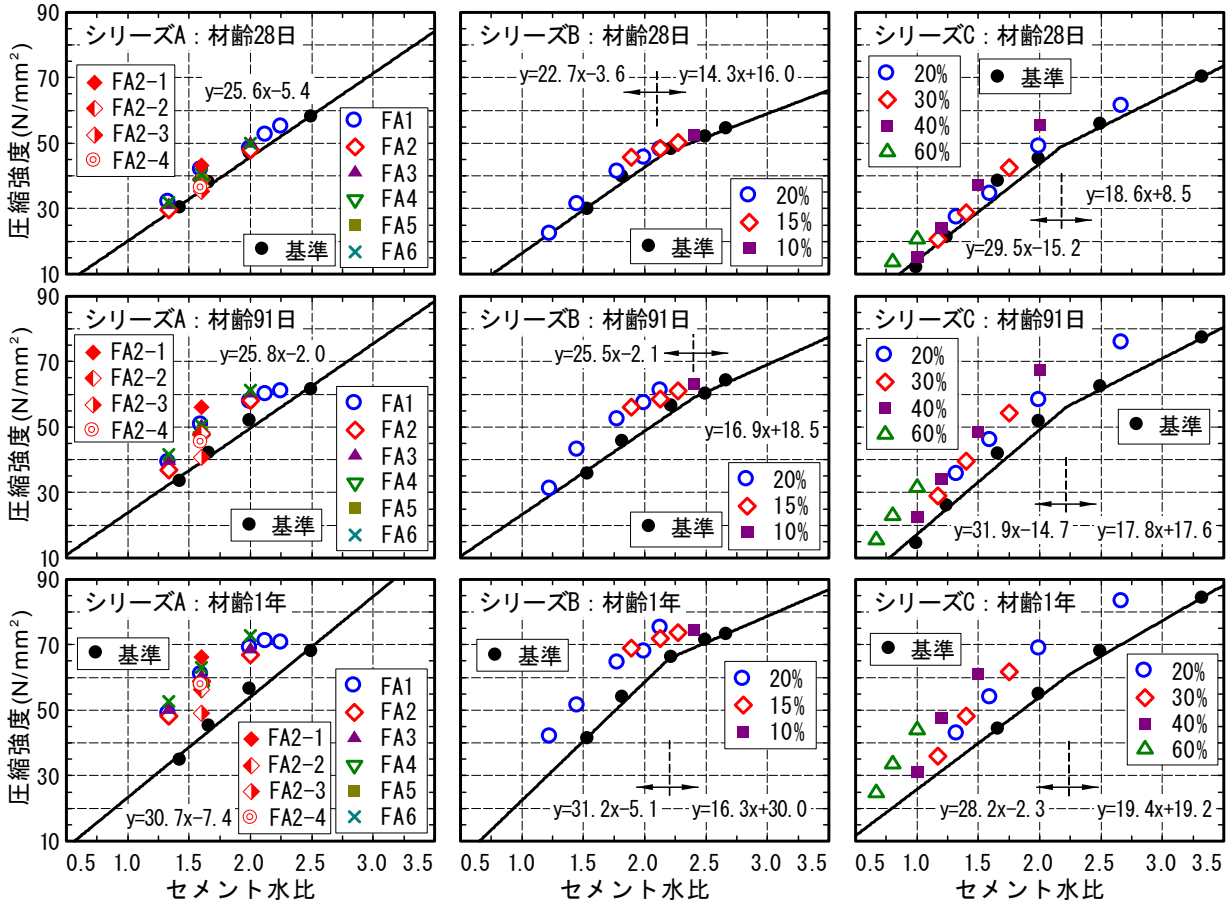

図-7　圧縮強度と C/W の関係

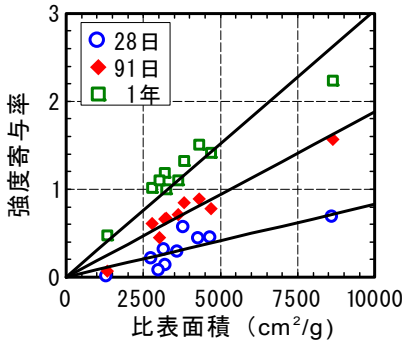

図-8　強度寄与率と比表面積の関係

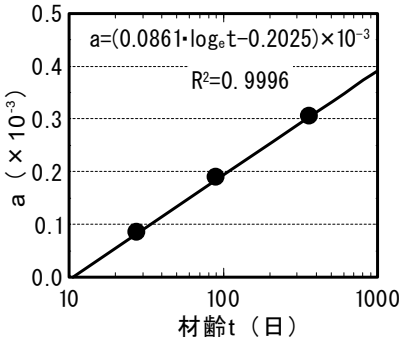

図-9　係数 a の経時変化

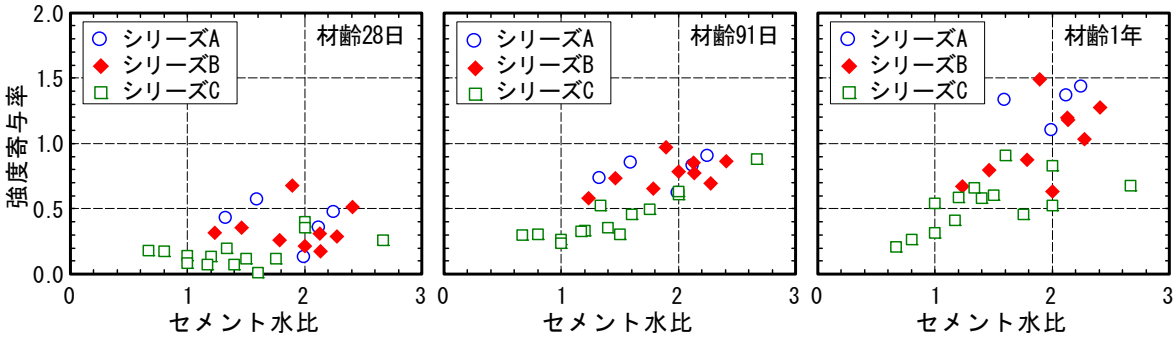

図-10　強度寄与率と C/W の関係

るものと考えると，強度発現に及ぼす比表面積の影響が大きいものと考えられる。**図-8** は，シリーズ A の基準コンクリートの W/C が 50%で，材齢 28，91 日および 1 年における強度寄与率と比表面積の関係を示したものであり，すべて FA 置換率は 20%で C/W が 1.6 の場合である。C/W が同じ場合，比表面積と強度寄与率には相関が見られ，比表面積が大きくなるに伴い充てん効果の向上および FA の反応する面積が増加するため強度寄与率が大きくなる。また，材齢の進行とともにポゾラン反応が進行するため強度寄与率も大きくなる。そこで，C/W が 1.6 の場合の強度寄与率を k'と表わし，材齢ごとに直線回帰すると，式（2）～（4）が得られる。

$$k'_{28} = 0.0827 \cdot S \times 10^{-3} \quad (2)$$

$$k'_{91} = 0.1879 \cdot S \times 10^{-3} \quad (3)$$

$$k'_{365} = 0.3037 \cdot S \times 10^{-3} \quad (4)$$

ここに，S：FA の比表面積（cm²/ g）

図-9 に式（2）～（4）で得られた直線式の傾き a と材齢の対数との関係を示すが，高い相関が見られる。このことから，k'は式（5）のように材齢と比表面積の関数で表わすことができる。

$$k'(t,S) = (0.0861 \cdot \log_e t - 0.2025) \cdot S \times 10^{-3} \quad (5)$$

ここに，t：材齢（日）

(2) セメント水比の影響

ポゾラン反応が進行するためにはセメントの水和反応によって生成される水酸化カルシウムが十分に存在することが必要であり，単位セメント量の増加によって生成される水酸化カルシウムの量が相対的に増加する。呉ら [7]は，単位セメント量と強度寄与率との関係について，ばらつきはあるものの全体的には単位セメント量が多くなるほど強度寄与率も大きくなることを示している。**図-10** には，比表面積が 3820 cm²/g である FA1 のみを使用した場合の強度寄与率と C/W の関係を示す。調合ごとの単位水量に大差がないため，C/W が大きいものほど単位セメント量も多いことになり，既往の研究と同様にセメント量の増加および材齢の経過に伴い強度寄与率が高くなる傾向が見られる。そこで，強度寄与率を式（6）のように表わすこととした。

$$k(t) = k'(t,S) \cdot f(C/W) \quad (6)$$

図-10 に示す強度寄与率を式（5）で除した値と C/W の関係を**図-11** に示す。ばらつきは大きいが，両者の関係には材齢の違いよる影響は見られず C/W が大きくなるほど強度寄与率が大きくなる傾向が見られる。そこで，両者の関係を直線回帰し，C/W の影響を式（7）によって表わすこととした。

$$f(C/W) = 0.4378 \cdot C/W + 0.0641 \quad (7)$$

(3) 強度寄与率の推定式

以上の結果，強度寄与率は，式（5）に示す FA の比表面積と材齢の影響を表わす関数 $k'(t,S)$と式（7）に示す C/W の影響を表わす関数 $f(C/W)$の積である式（8）によって表わすことができる。

$$k(t) = (0.0861 \cdot \log_e t - 0.2025) \cdot S \times 10^{-3} \cdot (0.4378 \cdot C/W + 0.0641) \quad (8)$$

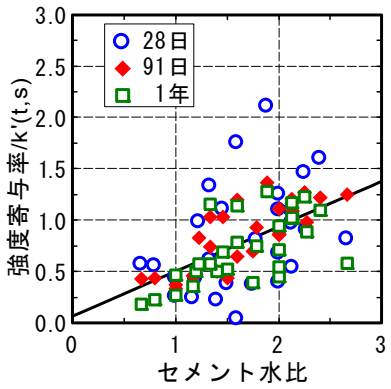

図-11　強度寄与率値と C/W の関係

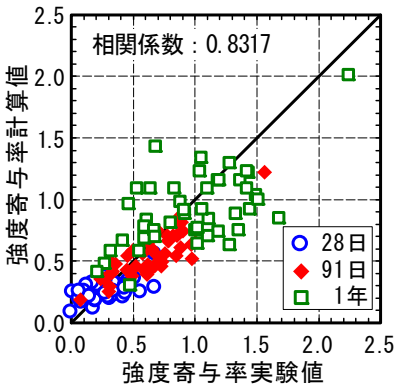

図-12　寄与率の計算値と実験値の関係

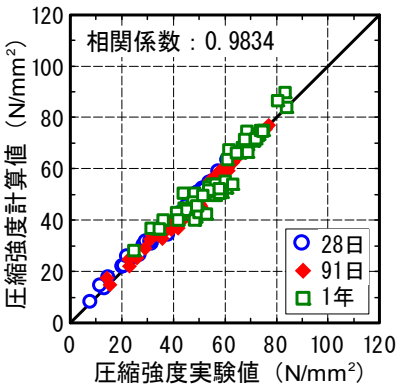

図-13　圧縮強度の計算値と実験値の関係

図-12 に寄与率の計算値と実験値の比較を示す。材齢 1 年の結果ではばらつきが大きくなるもの，式（8）により強度寄与率を求めることができる。

(4) 圧縮強度の推定式

FA コンクリートの圧縮強度は, 基準コンクリートにおける C/W と圧縮強度の関係式と強度寄与率によって以下の式によって求めることができる。

$$F(t) = a(C + k \cdot FA)/W + b \qquad (9)$$

ここに，a, b：基準コンクリートの強度式の係数

図-13 に圧縮強度の計算値と実験値の比較を示す。強度寄与率の推定における材齢 1 年の結果のばらつきは，圧縮強度の推定に対しては影響が小さく，係数 a, b を精度良く表わしていることから圧縮強度の計算値と実験値には高い相関性が得られた。したがって，基準コンクリートの強度式が明らかである場合には, FA コンクリートの圧縮強度は FA の種類や置換率が異なる場合でも式（8）および（9）によって適切な圧縮強度を算出することができる。

5. まとめ

本研究では, CfFA を用いたコンクリートのフレッシュ性状および圧縮強度について検討した。本研究で得られた知見を以下に示す。

（1）W/B50%の基準コンクリートに対しての置換率 20%の FA コンクリートの結果ではあるが, 空隙率を考慮することにより適切な単位水量を設定することができる。

（2）CfFA コンクリートは, 基準コンクリートと同程度の AE 助剤の使用量で，目標空気量を得ることができる。

（3）FA コンクリートの圧縮強度は，FA の種類や置換率が異なる場合も， FA の比表面積および C/W から求めた強度寄与率を用いて，基準コンクリートの強度式から算出することができる。

謝辞

本研究は,「住宅・建築関連先導技術開発助成事業（国土交通省）(平成 20～22 年度)」, ならびに, 大分大学 VBL プロジェクト研究 A「研究課題：低炭素社会の実現を目指した汎用型長寿命コンクリートの製造技術の確立（平成 21～25 年度），研究代表：大谷俊浩」の支援を受けて実施したものである。

参考文献

1）李相培ほか：焼成工程を備えた風力処理微粉砕システムによる石炭灰の改質，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.183-188，2007.7

2）山田高慶ほか：改質石炭灰（CfFA）を混入したコンクリートの諸特性に関する研究（その 1. 原粉の銘柄の違いがフレッシュ性状に及ぼす影響），日本建築学会九州支部研究報告，第 47 号・1，pp.21-24，2008.3

3）上田賢司ほか：改質石炭灰（CfFA）を混入したコンクリートの調合設計の確立に関する研究，日本建築学会九州支部研究報告，第 49 号, pp.21-24, 2010.3

4）佐藤嘉昭ほか:CfFA コンクリートの耐久性に関する研究（その 1. フレッシュ性状と強度特性），日本建築学会九州支部研究報告, 第 49 号, pp.29-32, 2010.3

5）大城愛ほか：改質石炭灰（CfFA）の物理的性質がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響（その 2. モルタルの流動特性），日本建築学会九州支部研究報告，第 49 号，pp.25-28，2010.3

6）日本建築学会：フライアッシュを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説，2007.10

7）呉富栄ほか：フライアッシュのポゾラン反応とコンクリート強度への寄与の解明，セメント・コンクリート，No.708，pp.14-23，2006.2