論文　フライアッシュコンクリートの配合設計に関する研究

楠　貞則[*1]・添田　政司[*2]・大和　竹史[*3]・芦田　広喜[*4]

要旨：フライアッシュをコンクリート混和材として使用する場合，コンクリートの構成材料が同一であっても異なる配合設計手法が存在する。本研究は，使用しやすい統一的な配合手法の提案を目的に，フライアッシュを単位で構成要素と考えたコンクリートの配合および硬化性状について実験的な検討を行った。その結果，普通コンクリートと同様な配合調整が可能であるとともに，水セメント比ごとに単位水量を最小とする単位フライアッシュ量が存在し，AE 剤量も単位フライアッシュ量と C/W で定量的に評価できた。また,単位フライアッシュ量の強度発現に与える影響は高 W/C ほど大きいことを明らかにした。

キーワード：フライアッシュ，配合設計，強度発現，強度推定，細孔構造

1. はじめに

石炭火力発電所運転に伴い排出される石炭灰の発生量は，電力需要の拡大とともにともに年々増加し，定常的に年間 1,000 万トンを超える量が副産されている [1)]。この石炭灰の大部分を占めるフライアッシュ（以下, FA）は，JIS A 6201 でコンクリート混和材として，Ⅰ種，Ⅱ種，Ⅲ種およびⅣ種に分類され，単位水量の低減，水和熱の抑制，ASR の抑制等の品質改善を図るコンクリートの混和材として活用されている [2)]。しかし，FA の利用は少なく廃棄物として多くが埋立て処理され，資源の有効利用や廃棄物低減の観点から課題となっている。

この FA をコンクリート混和材として利用した場合，FA はセメントの内割り, 外割りの考え方で結合材として整理される。また，最近の海砂採取規制や天然骨材枯渇などの問題を背景に FA を細骨材補充混和材として使用する考え方も存在している [3)]。このように，FA をコンクリートに利用する場合，同一材料を用いるにも関わらず，異なる配合設計手法が存在する。今後，FA の生産量の増大を考慮し，FA の更なる利用拡大のためにも，使用しやすい統一的な配合設計の開発が望まれている [4)]。

本研究は，通常のコンクリートと同様に水セメント比（W/C）をもとに，FA を単位混和量で整理した統一的な配合手法を提案するとともに，その単位 FA 量がコンクリートの配合及び硬化性状に与える影響について実験的な検討を行った。

2. FA コンクリートの統一的配合設計の要領

従来の FA を用いるコンクリートの配合設計について，FA を結合材として使用する場合，結合材中に占める FA の質量に対する置換率は 10～30%（Ⅰ種では 40%）の範囲内で定められる [2)]。これより，高性能 AE 減水剤を使用しない普通コンクリートに FA を結合材として使用すると，水結合材比（W/B（B＝C+FA））が 65%～45%の範囲で単位水量が土木学会コンクリート標準示方書の上限値 175 kg/m^3 以下であれば，大凡 30～120 kg/m^3 の範囲となる。細骨材の補充材として使用する場合，土木学会四国支部から施工指針(案)[3)]が示されている。これには FA の細骨材の容積に対する置換率が 10～15%の範囲で推奨されており，結合材の使用範囲内となる。

本研究のコンクリート配合は，普通コンクリートへの適用を図るため，W/C を 45，55，65，70%の 4 水準変化させ，単位 FA 量を 0，30，60，90，120 kg/m^3 の 5 水準変化とした。

配合手順は，予め試し練りにより決定した FA 無混和（N 配合）の基本配合から単位粗骨材量を一定とし，所定のスランプ（8±1.0cm）及び空気量（4.5±1.0%）を満足するように単位水量，単位セメント量，混和剤量の調整を行うことで単位細骨材量を求めるものとした。

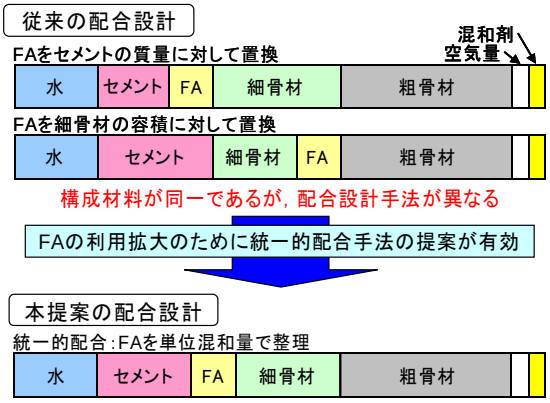
図－1 に本配合設計の概念を示す。先に述べたように FA コンクリートの配合設計は，一般に，内割り，外割りの考え方でセメントや細骨材の置換率等で整理されるが，本提案の配合設計は，普通コンクリートと同様に W/C をもとに配合調整が可能で扱いやすく，FA を単位 FA 量としてコンクリート構成材に位置づけることで，FA 混入の結合材や細骨材へ与える影響や効果に応じた FA を中心とした統一的な配合設計が可能となる。

3. 実験概要

3.1 使用材料及び配合

セメントは，普通ポルトランドセメント（密度

*1 福岡大学　工学部社会デザイン工学科助教　修士(工学)　（正会員）
*2 福岡大学大学院　工学研究科資源・循環工学専攻教授　博士(工学)　（正会員）
*3 福岡大学　工学部社会デザイン工学科教授　博士（工学）　（正会員）
*4 九州電力㈱　総合研究所土木グループ　研究員　（正会員）



図－1　配合設計の概念

3.16g/cm^3,比表面積 3,280g/cm^2）を使用した。FA は，**表－1**に示す JIS A 6201 のⅡ種を使用した。骨材は，細骨材が海砂（表乾密度 2.58g/cm^3,吸水率 0.96%）を，粗骨材が砕石 2005（表乾密度 2.75g/cm^3,吸水率 1.11%）を使用した。混和剤は，AE 減水剤と空気量調整剤（AE 剤）を用いた。なお，FA コンクリートには，FA 用の AE 剤を用いた。

コンクリート配合を**表－2**に示す。前述したように，配合は以下，W/C を 45，55，65，70%の 4 水準変化させ，単位 FA 量を 0，30，60，90，120kg/m^3 の 5 水準変化させた。なお，W/C=45%の FA 配合では単位 FA 量が 60kg/m^3 で土木学会コンクリート標準示方書の上限値 175 kg/m^3 を上回る結果となり，それ以上の単位 FA 量では行っていない。

コンクリートの練混ぜは，容量 55 リットルの強制二軸ミキサ内に，粗骨材，FA，セメント細骨材の順に投入して，30 秒空練りした後，混和剤を予め加えた練混ぜ水を投入して 90 秒間練り混ぜた。一回の練混ぜ量は 40 リットルである。

3.2 測定項目及び方法

表－1　フライアッシュの品質

品質項目			試験値
二酸化ケイ素		%	62.1
湿　　分		%	0.08
強 熱 減 量		%	2.0
密　　度		g/cm^3	2.26
粉 末 度	45μmふるい残分	%	4
	比表面積（ブレーン法）	cm^2/g	4050
フロー値 比		%	104
活性度指数	材齢28日	%	80
	材齢91日	%	98

測定および試験は，フレッシュ性状試験として，スランプ試験（JIS A 1101）および空気量試験（JIS A 1128）を行った。硬化性状試験として，圧縮強度試験（JIS A 1108）を材齢 7 日，28 日，91 日で行った。この圧縮強度試験用供試体はφ10×20cm の円柱供試体とし，養生は所定の材齢まで水中養生（20℃）とした。また，材齢 28 日の供試体からモルタル片（2.5～5.0mm）を採取し，水銀圧入法による細孔径分布の測定を行った。

4.実験結果

4.1 配合

(1) FA 量と単位水量の関係

図－2に各配合の単位 FA 量と単位水量の関係を示す。各 W/C の N 配合を基準とした場合，FA 混合による単位水量の減水効果は，W/C=70%では 90 kg/m^3 以下，W/C =65%では 60 kg/m^3 以下，W/C=55%では 45 kg/m^3 以下で見られた。また，いずれも単位水量を最小とする単位 FA 量が存在したが，W/C=45%では認められなかった。FA の使用量の増加を期待する場合，低 W/C より高 W/C の方が有効となっている。

表－2　コンクリート配合

配合名	W／C	W／B	s/a	単位量(kg/m^3)					AE減水剤	AE剤	フレッシュ性状	
				水	セメント	フライアッシュ	細骨材	粗骨材			スランプ	空気量
	(%)	(%)	(%)	W	C	FA	S	G	(kg/m^3)	(kg/m^3)	(cm)	(%)
45-0	45	45	43.6	168	374	0	750	1038	3.74	1.047	8.8	4.8
45-30	45	42	42.1	171	380	30	704	1038	3.8	7.410	7.5	4.5
45-60	45	39	38.7	184	409	60	612	1038	4.09	17.792	7.9	4.7
55-0	55	55	45.4	168	306	0	804	1038	3.06	1.040	7.3	4.7
55-30	55	50	44.5	167	304	30	776	1038	3.04	4.378	8.1	5.0
55-60	55	46	42.6	170	310	60	727	1038	3.1	6.789	8.9	4.4
55-90	55	43	41.0	175	319	90	673	1038	3.19	11.006	8.5	4.8
55-120	55	40	38.6	183	333	120	609	1038	3.33	17.682	8.3	4.1
65-0	65	65	46.5	168	259	0	843	1038	2.59	0.881	7.1	5.1
65-30	65	58	45.8	166	256	30	817	1038	2.56	3.610	7.7	4.9
65-60	65	53	44.4	168	259	60	774	1038	2.59	5.594	8.0	4.8
65-90	65	48	42.9	171	264	90	727	1038	2.64	8.712	7.9	4.1
65-120	65	45	41.1	176	271	120	676	1038	2.71	13.008	8.8	4.2
70-0	70	70	47.0	168	240	0	858	1038	2.4	0.720	7.6	4.5
70-30	70	62	46.3	165	236	30	835	1038	2.36	3.115	7.7	4.4
70-60	70	56	45.1	166	238	60	797	1038	2.38	5.141	8.0	4.7
70-90	70	51	43.8	168	240	90	756	1038	2.4	7.272	8.1	4.2
70-120	70	47	42.2	172	246	120	707	1038	2.46	14.760	8.2	4.4

図－３に W/B（B＝C+FA）と単位水量の関係を示す。W/C が一定でも単位 FA 量の増加に伴い W/B が小さくなり，単位水量の増加傾向が認められる。これらの結果より，W/C と単位 FA 量の組合せによっては，FA 混合による減水効果は生じず，単位粉体量が増加して粘性が増大することで単位水量の増加，すなわち流動性の低下が見られることがわかる。

(2) 水粉体容積比と単位水量の関係

福澤らは[5]，FA の細骨材補充混和材の研究でコンクリート中の細粒分容積(セメント+0.15mm>細骨材+FA)と単位水量との相関をもとに，水粉体容積比を用いて FA 外割混入率とその減水効果を検討している。本研究においても，FA 混入と単位水量の減水効果について，以下の式(1)の水粉体容積比より評価した。

$$\frac{V_w}{V_p} = \frac{W}{C + FA + S_{150\mu m}} \qquad (1)$$

$\frac{V_w}{V_p}$: 水粉体容積比

W: 単位水容積

C：単位セメント容積

FA：単位FA容積

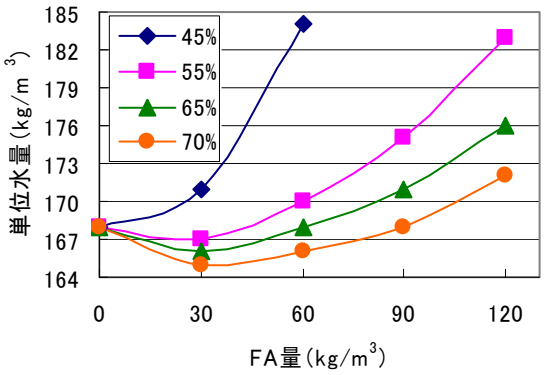
$S_{150\mu m}$: 海砂150μ m未満の容積

図－４に水粉体容積比と単位水量の関係を示す。いずれも W/C の影響は少なく，V_w/V_p が 1.25 以下になると単位水量が増加傾向を示し，減水効果が認められない。また,土木学会コンクリート標準示方書における単位水量の上限値を満足するのは，V_w/V_p が 1.15 以上であった。本研究の配合手法において，FA の混合による単位水量への影響は，減水効果を期待する場合，W/C によって FA の使用量が異なり，上限がある。この使用量は，W/C だけでなく単位セメント量や細骨材の微粒分量等を把握すれば，定量的に選定することが可能と考えられる。

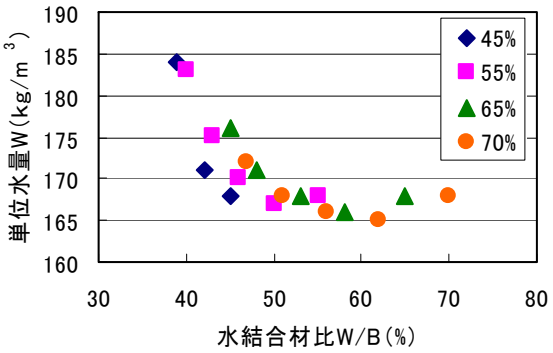
(3) 単位 FA 量と単位 AE 剤量の関係

図－５に単位 FA 量と単位 AE 剤量の関係を示す。W/C＝70%の単位 FA 量 120 kg/m^3 を除いた全ての配合は，単位 FA 量の増加に伴い単位 AE 剤量がほぼ直線的な増加傾向を示し，単位 FA 量が同一の場合，W/C が低いほど単位 AE 剤量は増加する傾向にある。FA/（C+FA）の割合が 30%を超える W/C＝70%の単位 FA 量 120 kg/m^{3}は，この直線的な傾向から外れ，急激に AE 剤量が増加している。FA/（C+FA）の割合が高い場合の AE 剤量について，今後詳細な検討が必要である。

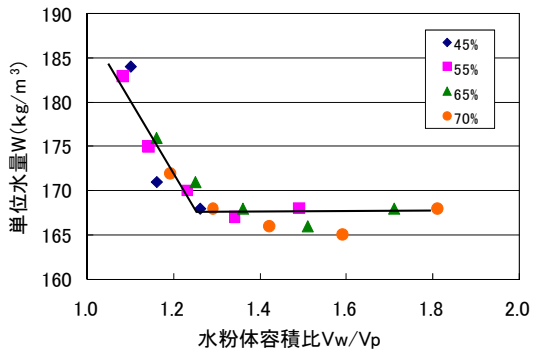
ここで， FA/（C+FA）の割合が 30%以下での各 W/C における単位 FA 量と AE 剤量は一次関数で表され，表－３の通りとなる。この表の係数 a と C/W の間には図－



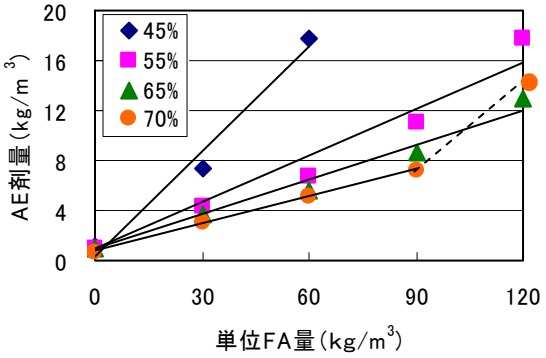
図－２　単位 FA 量と単位水量の関係



図－３　W/B と単位水量の関係



図－４　水粉体容積比と単位水量の関係



図－５　単位 FA 量と単位 AE 剤量の関係

６のように高い相関が見られ，切片ｂについても**図－５**からほぼ一定値と判断でき，各値の平均値（ｂ＝0.5）とすると，AE 剤の添加量の実験式は(2)で与えられる。

$$AE = 0.007\,e^{1.6c/w} \cdot FA + 0.5 \qquad (2)$$

AE：単位 AE 剤量

C/W：セメント水比

FA：単位 FA 量

FA の種類や骨材の種類などで差異が生じる可能性があるものの，本研究の範囲において，AE 剤の使用量を単位 FA 量と C/W を用いて定量的に評価することが可能である。

4.2 強度特性

(1)単位 FA 量と圧縮強度の関係

図－７に単位 FA 量，材齢別の圧縮強度試験の結果を示す。W/C＝45%を除いた全ての FA 配合の強度は，初期材齢より FA 無混合の N 配合に比べて単位 FA 量の増加と伴に大きくなっており，材齢 28 日以降も顕著な強度の伸びが認められる。これは，FA 混入による充填効果およびポゾラン反応によるものと考えられ，特に低 W/C よりも高 W/C の方で強度の発現性が向上している。また，**図－８**に W/C=65%と W/C=45%の材齢 28 日における細孔径分布の結果を示す。W/C＝65% の FA 配合は，N 配合に比べて単位 FA 量の増加に伴い細孔径分布が小径側に移行しており，FA の充填効果が認められる。他の W/C=55%，W/C=70%もほぼ同様な結果が得られた。これに対し，W/C=45%の FA 配合はいずれも N 配合と同等となっており，FA の充填効果が認められない。これは，W/C が一定にも関わらず，FA 配合が N 配合に比べてフレッシュ性状を確保するための単位水量が大幅に増加したためと考えられる。

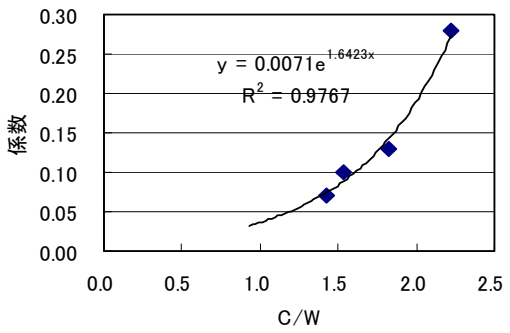
(2) 強度発現推定式

図－９に B/W と圧縮強度の関係を示す。一般に，FA コンクリートの圧縮強度は B/W の一次関数で示される。本研究で用いた単位 FA 量で整理した配合手法においても，各材齢の圧縮強度と B/W との間に**表－４**に示すような高い相関関係が見られ， FA がセメントと同様に結合材として機能していることがわかる。

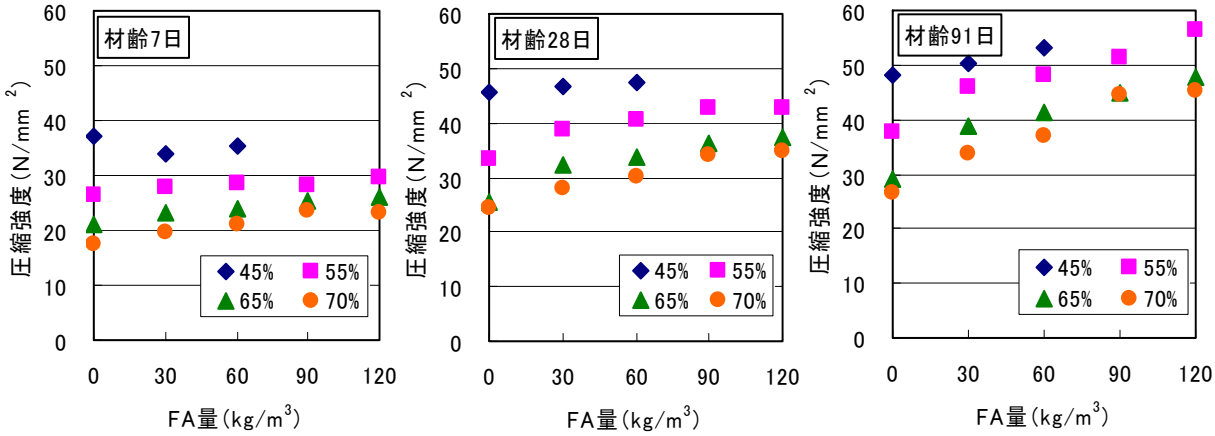
本研究は W/C をもとに，単位 FA 量で整理されている。FA を使用しない N 配合の圧縮強度は，**図－10** のように各材齢の C/W の一次関数で示される。ここで，**図－7**，**図－９**の結果より，W/C=45%を除く FA 配合の圧縮強度は，単位 FA 量の増加に伴い徐々に大きくなり，FA が結合材として効果が認められる。黄らは[6]，FA の結合材としての役割を強度寄与率 α とし，式(3)を用いて圧縮強度を定量的に推定している。この α は FA のポゾラン反応を示すものであり，材齢の進行に伴い変化する係数である。本研究の配合手法においても，この研究成果を基に，強度推定を実施した。

表－３　単位 FA 量と AE 剤量の関係式

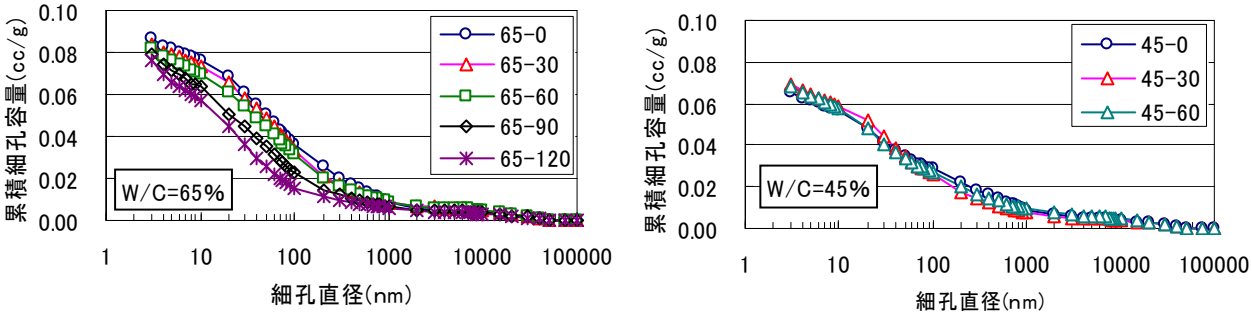
単位AE剤量＝a*単位FA量+b							
W/C=45%		W/C=55%		W/C=65%		W/C=70%	
a	b	a	b	a	b	a	b
0.28	0.38	0.13	0.20	0.10	0.49	0.07	0.81



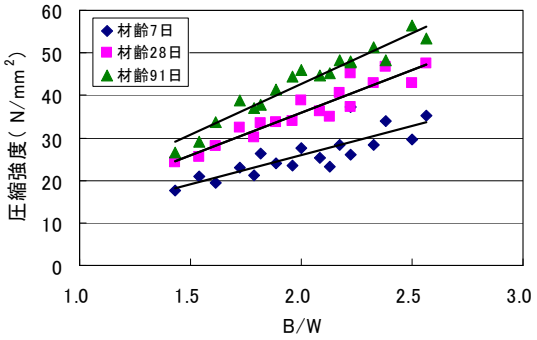
図－６　C/W と係数 a の関係



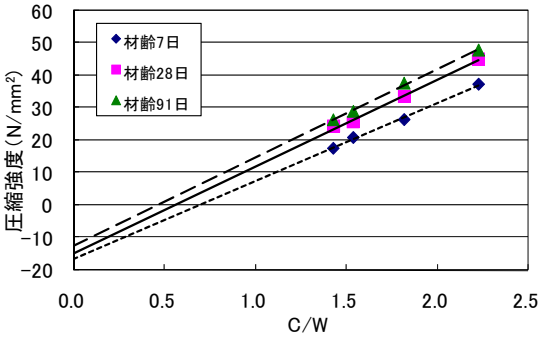
図－７　圧縮強度の測定結果



図－８　単位 FA 量と細孔径分布の関係



図－９　B/W と圧縮強度の関係



図－10　N 配合の C/W と圧縮強度の関係

表－４　B/W と圧縮強度の関係式

Fc＝C(t)*(B/W)+D(t)					
材齢7日		材齢28日		材齢91日	
C(7)	D(7)	C(28)	D(28)	C(91)	D(91)
13.7	−1.5	20.0	−4.1	23.8	−4.9

表－５　N 配合の C/W と圧縮強度の関係式

fc＝A(t)*(C/W)+B(t)					
材齢7日		材齢28日		材齢91日	
A(7)	B(7)	A(28)	B(28)	A(91)	B(91)
24.0	−16.6	26.8	−14.9	27.2	−12.4

$$f_c(t) = A(t) \cdot \left(\frac{\alpha \cdot FA + C}{W} \right) + B(t) \qquad (3)$$

$f_c(t)$: 材齢 t(日)の圧縮強度(N/mm^2)

t：材齢(日)

$A(t)$: 材齢tの関数

$$A(t) = \left(\frac{t}{a + bt} \right)$$

a, b：実験定数

α：FAの強度寄与率

$B(t)$: 材齢tの関数

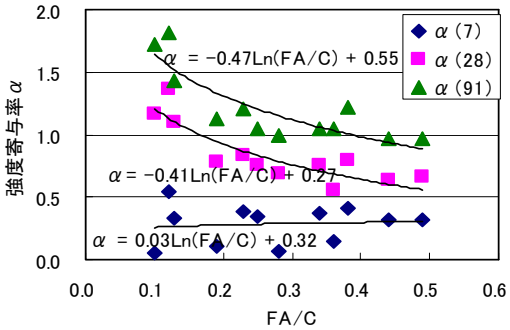
FA：単位FA量(kg/m^3)

C：単位セメント量(kg/m^3)

W：単位水量(kg/m^3)

$$A(t) = \left(\frac{t}{0.038 + 0.036t} \right) \qquad (4)$$

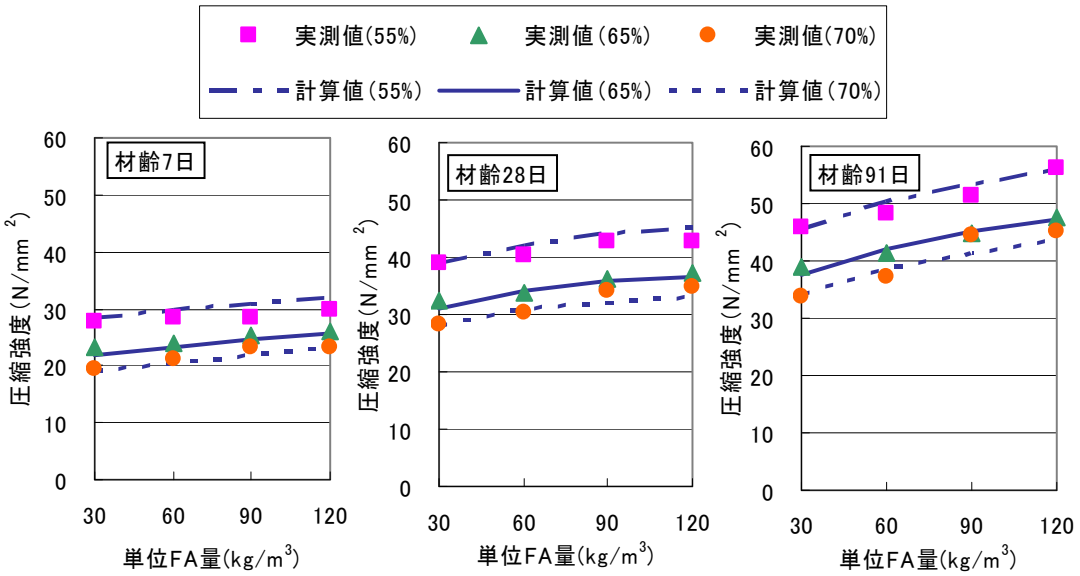
$$B(t) = 0.05t + 16.6 \qquad (5)$$



図－11　α と FA/C の関係

表－５に，N 配合の各材齢の C/W と圧縮強度の関係式を示す。A(t)は，材齢の進行に伴う強度発現を表しており，B(t)を含め材齢 t の関数として，表の結果をもとに算定した結果，A(t)および B(t)は式(4)および式(5)の通りとなる。

図－11 に各材齢の α と FA/C の関係を示す。既往の研究成果と同様に，α は材齢の増加と伴に増加傾向であり，FA/C と高い相関関係が認められ，FA のポゾラン反応は材齢 7 日を除き，FA/C が小さいほど速くなっている。この強度寄与率は，既往の研究では材齢 28 日で 0.2～0.5 程度となっているが，本研究の結果は 0.5 以上と大きい。この要因について，明らかでないものの，今後詳細に検



図－12　圧縮強度の計算値と実測値

討する必要がある。なお，図化していないものの W/C＝45%の場合，αは FA/C と関係なく,材齢 7 日で 0 以下となり，その後も低調に推移し，FA の強度に与える影響が小さく，他と異なる傾向を示した。W/C＝45%を除く圧縮強度の計算値と実測値の関係を**図－12** に示す。計算値は実測値との間で W/C，単位 FA 量に関係なく，良好な精度を得た。このことから,本研究で用いた W/C をもとに単位 FA 量でした配合設計手法でも強度発現を定量的に推定することが可能と考えられる。

5.まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

(1) W/C ごとに単位水量を最小とする単位FA量を含め，減水効果が得られる単位 FA 量の範囲が存在する。

(2) FA 混入による単位水量の減水効果は,水粉体容積比を用いて，定量的にその範囲を把握することが可能である。

(3) 単位 FA 量と単位 AE 剤量の関係は，W/C ごとに一次の相関で表され，この関係から AE 剤量も単位 FA 量と C/W で定量的に評価することが可能である。

(4) 単位FA量で整理したFAコンクリートの圧縮強度は B/W と高い相関関係が認められる。

(5) 単位 FA 量の強度発現に与える影響は，W/C が高いほど大きい。

(6) W/C をもとに単位 FA 量で整理した配合設計手法でも強度発現を定量的に推定することが可能である。

以上の結果より，本研究で提案の FA を単位でコンクリートの構成要素とした配合設計は，普通コンクリートと同様な配合計算が可能であり，既往の FA コンクリートの配合設計との整合性も取れ，統一的な配合設計として有効と考えられる。現在，耐久性に関するデータ収集も行っており，体系的に FA の単位量で整理した配合設計手法の構築に向けて更に検討を行う予定である。

参考文献

1) （財）石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書（平成 17 年度実績），2007.3

2) 土木学会：フライアッシュコンクリートを用いたコンクリートの施工指針（案），コンクリートライブラリー 94，1999.4

3) 土木学会四国支部：フライアッシュを細骨材補充混和材として用いたコンクリートの施工指針（案），2003.3

4) 堺孝司：コンクリート構造物の環境負荷低減に向けた技術とシステム―現状と展望―，Vol.45，No.5，pp.4-15，2007.5

5) 福澤祥宏他：海砂の粒度およびフライアッシュの外割混入率がコンクリートの流動性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.275-280，2006.6

6) 黄光律他：フライアッシュを混合したコンクリートの圧縮強度発現推定式，日本建築学会構造系論文集，第 519 号，1-6，1999.5