

論文 分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの強度予測式の作成に関する研究

大久保敏彦*¹・中村成春*²・梶田佳寛*³・阿部道彦*⁴

要旨：本研究は、粉末度と強熱減量の組み合わせが広範囲となる種々の分級フライアッシュを使用した高強度コンクリートの圧縮強度性状を実験検討し、その強度予測式を作成することを目的とした。その結果、1) 分級フライアッシュを使用した60～100MPa級高強度コンクリートの強度予測式を提案したこと、2) 強度に及ぼす分級フライアッシュ混入効果を等価係数 β により定量評価し、長期材齢で β が高まること、3) 粉末度と活性度指数が大きくなると β は高まるが、強熱減量との相関は見られないこと、ならびに製造プラントが同じ場合には強い相関が見られることを示した。

キーワード：分級フライアッシュ、高強度コンクリート、圧縮強度予測式、回帰分析

1. はじめに

近年、省資源・省エネルギー政策が本格化し、環境に配慮し実用化に耐える産業副産物の高度利用システムが模索されている。電力事業においては、石炭火力発電所の増設により、石炭灰の大量処理が問題視されている[1]。石炭灰のうちフライアッシュは、コンクリート用混和材としての有効利用方法が確立しているが、その再利用量は発生総量の約1割程度しかなく、高度利用が望まれる。一方、高性能コンクリートの研究開発が活発に行われている[2]が、60～100MPa級の高強度コンクリートの製造には、シリカフェームや高炉スラグ微粉末の利用が考えられており[3]、特に近年、製造可能となった粒度分別された分級フライアッシュ（以下、CFA）が期待されている[1]。しかしながら、CFAの混入効果については、研究例が少なく不明な点が多い。旧来より様々な強度予測式が提案されている[4]が、CFA混入効果を定量評価した60～100MPa級高強度コンクリートに関する強度予測式は、ほとんど提案されていない。

本研究は、粉末度と強熱減量の組合せが広範囲となる種々のCFAを使用した高強度コンクリートについてその強度性状を実験的に検討し、強度に及ぼすCFA混入効果を定量評価することで、CFAを使用した高強度コンクリートの強度予測式を提案したものである。

2. 強度発現に及ぼすCFA混入効果の評価方法

2.1 等価係数 β によるCFA混入効果の表現

コンクリートの圧縮強度は、セメント結合能力に強い影響を受ける。このため、セメントに混和材を混入した場合、混和材結合能力をセメント結合能力と等価になるよう置換することで、従来の圧縮強度とセメント結合能力との関係が間接的に適用できると考えられる[5]（式(1)）。

$$\text{等価}(C/W) = (C + \beta \cdot CFA) / W \quad (1)$$

*1 宇都宮大学大学院 工学研究科建設学専攻, (正会員)

*2 宇都宮大学助手 工学部建設学科, 工博(正会員)

*3 宇都宮大学教授 工学部建設学科, 工博(正会員)

*4 建設省建築研究所 第2研究部無機材料研究室室長, 工博(正会員)

ここで、 W ：水量， C ：セメント量， CFA ：分級フライアッシュ量であり， β 値を強度発現に及ぼす CFA 混入効果を表現した等価係数と定義する。

2.2 強度予測式の定式化

普通骨材を用いたコンクリートの場合，結合材水比と圧縮強度との関係は，結合材水比 B/W が 4 程度までは B/W の増加に伴って直線的に増加する傾向がみられる[6]。従って，一次式で表現された Lyse の強度予測式に式(1)を適用し，以下の式(2)を定式化する。

$$f_c = a \cdot (C + \beta \cdot CFA) / W + b \quad (2)$$

ここで， f_c ：圧縮強度， a ：傾き， b ：定数項。

2.3 等価係数 β の算定

まず，式(2)を展開し，セメント水比 C/W と分級フライアッシュ水比 CFA/W を説明変数 x_1 及び x_2 と置き，コンクリートの圧縮強度 f_c を目的変数 y と置く（式(3)）。

$$y = a_1 \cdot x_1 + a_2 \cdot x_2 + b ; y = f_c ; x_1 = C/W ; x_2 = CFA/W ; a_1 = a ; a_2 = a \cdot \beta \quad (3)$$

次に，目的変数 y を，セメントが負担する圧縮強度 y_P と， CFA が負担する圧縮強度 y_F の和で表されると仮定する（式(4)）。

$$y = y_P + y_F \quad (4)$$

ここで， y_P を，予め実測された CFA 無混入時の圧縮強度 f_{cP} を近似する推定値 f_{cP}' による単回帰分析式(5)で表す。

$$y_P = a_1 \cdot x_1 + b ; y_P = f_{cP}' ; x_1 = C/W ; a_1 = a \quad (5)$$

以上より，式(3)，式(4)，式(5)を整理すると，目的変数を y_F に，説明変数を x_2 とする単回帰分析式(6)が表され，等価係数 β が式(7)で算定される。

$$y_F = f_c - f_{cP}' = a_2 \cdot x_2 ; x_2 = CFA/W ; a_2 = a \cdot \beta \quad (6)$$

$$\beta = a_2 / a_1 \quad (7)$$

3. 実験概要

3.1 実験の要因と水準

水結合材比 W/B を 25, 30, 40% の 3 段階に設定し，粉末度と強熱減量との組み合わせを $A \sim G$ 種の 7 種に分類した CFA を内割り混入した。セメント質量に対する CFA 混入置換率は 20, 30% の 2 水準とし，その他に CFA 無混入の置換率 0% も検討した。試験材齢は，7, 28, 91 日とした。

3.2 使用材料の種類及び品質

表-1 に使用 CFA の種類を，表-2 に使用 CFA の品質を示す。 CFA は， A, C, F 種ならびに B, D 種とが，各々同一プラントで製造されたものである。セメントは 3 社等量混合した普通ポルトランドセメント（比重 3.16，比表面積 $3300 \text{ cm}^2/\text{g}$ ）を使用し，骨材は鬼怒川産川砂（表乾比重 2.60，吸水率 2.02，粗粒率 2.61）と岩瀬産硬質砂岩碎石（表乾比重 2.66，吸水率 0.65，粗粒率 6.67）を使用した。混和剤は，高性能 AE 減水剤（ポリカルボン酸エーテル系）を使用し，空気量調整剤に AE 剤（高アルキルカルボン酸系）を併用した。

3.3 コンクリートの調合及びフレッシュ性状

表-3にコンクリートの調合及びフレッシュ性状を示す。すべての調合は、単位水量を 170 kg/m^3 一定にし、 W/B 条件毎に単位粗骨材かさ容積も一定とした。また、フレッシュ性状も、スランプが $20 \sim 25\text{cm}$ に、空気量が $2 \sim 5\%$ になるよう、混和剤の添加により調整した。その結果、スランプ及び空気量とも所要値が得られた。養生は、すべて 20°C 水中養生とした。以後、各試験体条件の呼び名は、本表中の記号に従うものとする。特に、CFA無混入条件の測定精度を高めるために、CFA無混入条件の練り混ぜは、複数回実施した。

4. 実験結果、解析結果及び考察

4.1 セメントが負担する圧縮強度 y_P

表-3中に圧縮強度実測結果を示す。また、図-1にセメント水比 C/W と CFA無混入時の圧縮強度 f_{cP} との関係を示す。a)が材齢7日

を、b)が材齢28日を、c)が材齢91日を表す。各図中には、 f_{cP} を近似する推定値 f_{cP}' を目的変数とする単回帰分析結果も表示した。各回帰式の重決定係数 R^2 は、いずれも高く有意である。材齢が進むと回帰式の傾き a_1 値及び定数項 b 値が増加する。以上より CFA無混入時の圧縮強度推定値 f_{cP}' を、セメントが負担する圧縮強度 y_P と表すことで2.3項で示した式(5)が算定された。

4.2 CFAが負担する圧縮強度 y_F

図-2に分級フライアッシュ水比 CFA/W と CFAが負担する圧縮強度 y_F との関係を示す。 y_F 値は、CFA混入時の圧縮強度実測値 f_c と、表-3中の C/W 値を代入した式(5)の y_P 値との差によった。各 a)~g)が、CFAのA種~G種を表す。各図中には、材齢毎の原点を通る単回帰分析結果も表示した。各回帰式の重決定係数 R^2 は、多少ばらついているが、 y_F と CFA/W との全体の傾向は捉えている。以上より、2.3項で示した式(6)が算定された。

4.3 等価係数 β 及び強度予測式

表-4に等価係数 β 及び強度予測式の解析結果を示す。ここに、2.3項に示した強度予測式(2)が提案された。図-3に圧縮強度実測値と強度予測式解析値との関係を示す。材齢91日で若干のばらつきがあるが、すべての条件でほぼ合致している。 β は、材齢が進むと高まる傾向にあり、材齢91日でほぼ0.8以上となり、CFA混入は長期材齢で強度向上に寄与することがわかる。

図-4にCFA特性値と等価係数 β (91日)との関係を示す。ここで、今回使用したCFAは、表-1中の設定範囲に応じた場合、粉末度と強熱減量に相関が認められないほど範囲を大きく設定したため、特に製造条件が合致する同一製造プラント間に着目し論じる。a)より、同一プラント間では、高粉末度ほど β も高まり強度に寄与することがわかる。b)より、 β は強熱減量が2%以上でほとんど変化がなかった。c)より、活性度指数が増加すると β も高まり、同一プラント間で顕著な傾向がある。

表-1 使用CFAの種類

CFA種類の範囲		強熱減量 %		
		1.0未満	1.0~5.0	5.0以上
粉末度	6000以上	A種	B種	E種
	4000~6000	C種	D種	
cm ² /g	4000未満	F種	G種	

表-2 使用CFAの品質

種類	比重	粉末度 cm ² /g	50%平均粒径 μm	強熱減量 %	フロー値比 %	活性度指数 28日
A種	2.51	10460	3.5	0.43	109	93
B種	2.42	6610	4.2	3.16	106	99
C種	2.33	4517	12.6	0.82	108	87
D種	2.29	4030	10.2	2.26	102	91
E種	2.27	4020	11.7	5.70	98	76
F種	2.24	2570	21.8	0.72	104	80
G種	2.28	3870	9.1	2.50	94	81

A, C, F種, B, D種: 各々同一プラントで製造

表-3 使用コンクリートの調合、フレッシュ及び強度性状試験結果

記号	CF A 種類	W/B %	CFA 置換率 C*%	B/W	C/W x1	CFA/W x2	単位量 kg/m ³					混和剤*		スランプ cm	空気量 %	圧縮強度 MPa		
							CFA	C	W	S	G	主剤	助剤			7日	28日	91日
P250	P	25	0	4.0	4.000	0.000	0	680	170	601	929	1.9	0.5	22.0	3.8	75.5	92.3	92.5
							0	680	170	601	929	1.7	0.5	20.0	1.7	86.0	94.2	116.2
P300	P	30	0	3.3	3.335	0.000	0	567	170	663	961	1.0	1.0	23.0	4.9	66.3	78.1	86.6
							0	567	170	663	961	1.0	0.0	22.5	2.4	68.9	85.8	99.7
P400	P	40	0	2.5	2.500	0.000	0	425	170	749	993	1.1	1.0	21.0	4.3	46.2	60.3	63.7
							0	425	170	749	993	1.1	0.0	21.5	2.2	54.7	67.9	73.3
P260	P	26	0	3.8	3.824	0.000	0	650	170	637	928	1.5	1.0	23.0	2.4	75.1	96.4	98.0
P310	P	31	0	3.2	3.235	0.000	0	550	170	689	960	1.0	0.0	21.5	2.2	64.8	84.0	89.8
P380	P	38	0	2.6	2.647	0.000	0	450	170	702	992	0.9	3.0	21.0	4.9	45.0	57.5	66.5
P490	P	49	0	2.1	2.059	0.000	0	350	170	783	992	1.2	3.0	21.5	4.1	35.1	44.7	52.2
A252	A	25	20	4.0	3.200	0.800	136	544	170	572	929	1.2	1.0	23.5	4.3	68.8	87.0	100.9
A253	A	25	30	4.0	2.800	1.200	204	476	170	556	928	1.1	2.0	22.0	4.6	65.6	80.7	93.0
A302	A	30	20	3.3	2.671	0.665	113	454	170	637	961	0.9	1.0	21.5	4.5	59.5	73.4	95.0
A303	A	30	30	3.3	2.335	1.000	170	397	170	624	961	1.0	2.5	23.0	4.6	52.4	67.0	85.5
A402	A	40	20	2.5	2.000	0.500	85	340	170	728	993	1.1	1.0	21.0	2.5	43.8	61.7	72.1
A403	A	40	30	2.5	1.747	0.753	128	297	170	720	992	1.1	2.0	22.0	4.6	36.1	51.8	66.4
B252	B	25	20	4.0	3.200	0.800	136	544	170	567	929	1.2	2.0	22.5	2.8	74.8	90.8	92.6
B253	B	25	30	4.0	2.800	1.200	204	476	170	549	928	1.2	3.0	23.5	3.6	66.5	89.1	108.4
B302	B	30	20	3.3	2.671	0.665	113	454	170	632	961	1.0	3.0	23.0	2.6	60.6	83.9	95.0
B303	B	30	30	3.3	2.335	1.000	170	397	170	619	961	1.0	4.0	22.5	2.9	58.0	76.3	85.9
B402	B	40	20	2.5	2.000	0.500	85	340	170	725	993	1.1	2.0	21.5	2.0	43.3	54.5	75.3
B403	B	40	30	2.5	1.747	0.753	128	297	170	715	992	1.1	3.5	23.5	3.6	34.8	49.7	67.6
C252	C	25	20	4.0	3.200	0.800	136	544	170	562	929	1.2	1.0	22.5	2.7	69.0	87.3	97.3
C253	C	25	30	4.0	2.800	1.200	204	476	170	538	928	1.2	2.0	23.5	4.0	64.7	82.3	100.2
C302	C	30	20	3.3	2.671	0.665	113	454	170	629	961	1.0	1.5	23.5	5.0	55.3	73.4	90.9
C303	C	30	30	3.3	2.335	1.000	170	397	170	611	961	1.0	2.0	25.0	4.5	51.9	68.0	85.0
C402	C	40	20	2.5	2.000	0.500	85	340	170	723	993	1.1	1.0	21.5	2.6	39.7	52.4	67.8
C403	C	40	30	2.5	1.747	0.753	128	297	170	710	992	1.1	2.0	23.5	4.0	35.9	48.2	56.3
D252	D	25	20	4.0	3.200	0.800	136	544	170	559	929	1.4	2.0	22.0	2.9	73.0	91.1	104.3
D253	D	25	30	4.0	2.800	1.200	204	476	170	536	928	1.4	3.0	20.0	3.1	69.6	87.3	103.7
D302	D	30	20	3.3	2.671	0.665	113	454	170	627	961	1.0	1.5	21.0	2.5	62.0	77.6	95.3
D303	D	30	30	3.3	2.335	1.000	170	397	170	608	961	1.0	3.0	22.0	4.0	50.2	68.4	85.1
D402	D	40	20	2.5	2.000	0.500	85	340	170	720	993	1.1	1.0	21.5	2.0	39.1	53.1	70.3
D403	D	40	30	2.5	1.747	0.753	128	297	170	707	992	1.1	3.0	20.0	3.1	32.8	46.7	57.4
E252	E	25	20	4.0	3.200	0.800	136	544	170	556	929	1.8	3.0	25.5	3.8	73.8	85.2	95.0
E253	E	25	30	4.0	2.800	1.200	204	476	170	533	928	1.6	2.0	20.0	3.2	66.2	89.7	110.0
E302	E	30	20	3.3	2.671	0.665	113	454	170	624	961	1.1	1.5	22.0	4.4	55.6	76.6	93.9
E303	E	30	30	3.3	2.335	1.000	170	397	170	606	961	1.2	2.0	20.0	3.0	53.1	69.1	90.0
E402	E	40	20	2.5	2.000	0.500	85	340	170	720	993	1.1	1.5	21.5	4.0	39.4	51.6	64.5
E403	E	40	30	2.5	1.747	0.753	128	297	170	707	992	1.1	2.0	20.0	3.2	33.6	44.9	60.8
F252	F	25	20	4.0	3.200	0.800	136	544	170	554	929	1.2	1.0	23.0	2.8	70.3	84.8	94.8
F253	F	25	30	4.0	2.800	1.200	204	476	170	530	928	1.2	2.0	20.0	4.5	61.5	80.0	92.7
F302	F	30	20	3.3	2.671	0.665	113	454	170	624	961	1.1	1.0	23.0	4.0	56.7	71.8	86.0
F303	F	30	30	3.3	2.335	1.000	170	397	170	603	961	1.0	2.0	23.0	4.5	51.3	63.7	76.9
F402	F	40	20	2.5	2.000	0.500	85	340	170	718	993	1.1	1.5	22.0	3.5	40.1	52.8	63.0
F403	F	40	30	2.5	1.747	0.753	128	297	170	705	992	1.1	2.0	20.0	4.5	34.2	44.6	56.2
G252	G	25	20	4.0	3.200	0.800	136	544	170	556	929	1.2	1.5	21.5	3.2	68.5	87.2	98.7
G253	G	25	30	4.0	2.800	1.200	204	476	170	536	928	1.2	1.5	20.0	2.8	62.7	85.4	109.8
G302	G	30	20	3.3	2.671	0.665	113	454	170	624	961	1.1	1.0	25.0	3.1	58.6	80.2	94.7
G303	G	30	30	3.3	2.335	1.000	170	397	170	606	961	1.0	2.0	23.0	3.8	48.8	62.1	81.1
G402	G	40	20	2.5	2.000	0.500	85	340	170	720	993	1.1	1.5	22.0	3.0	38.8	51.5	66.6
G403	G	40	30	2.5	1.747	0.753	128	297	170	707	992	1.1	2.0	20.0	2.8	31.8	47.5	59.2

* 主剤；セメント質量に対する%添加率(B*%)、助剤；セメント質量に対する0.001%添加率(B*0.001%)

P250, P300, P400は、CFA置換率20%及び30%条件下の打込み時にて各々作製した。

P260, P310, P380, P490は、別条件の打込み時にて各々作製した。

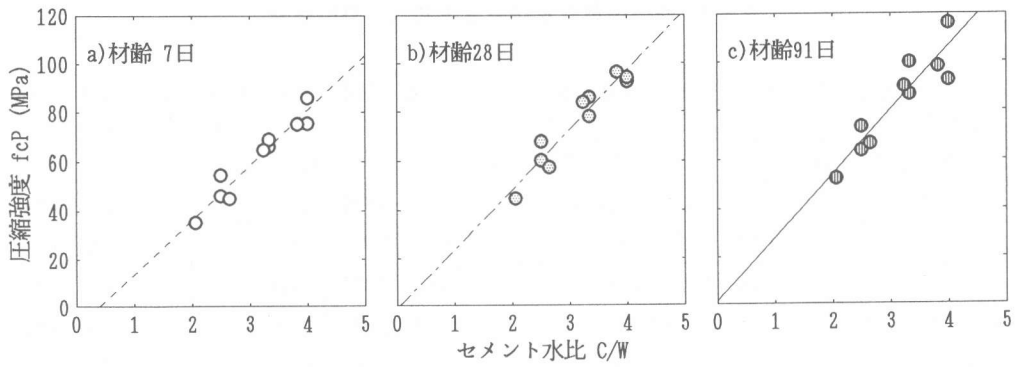


図-1 CFA無混入時のセメント水比 C/W と圧縮強度 fcP との関係

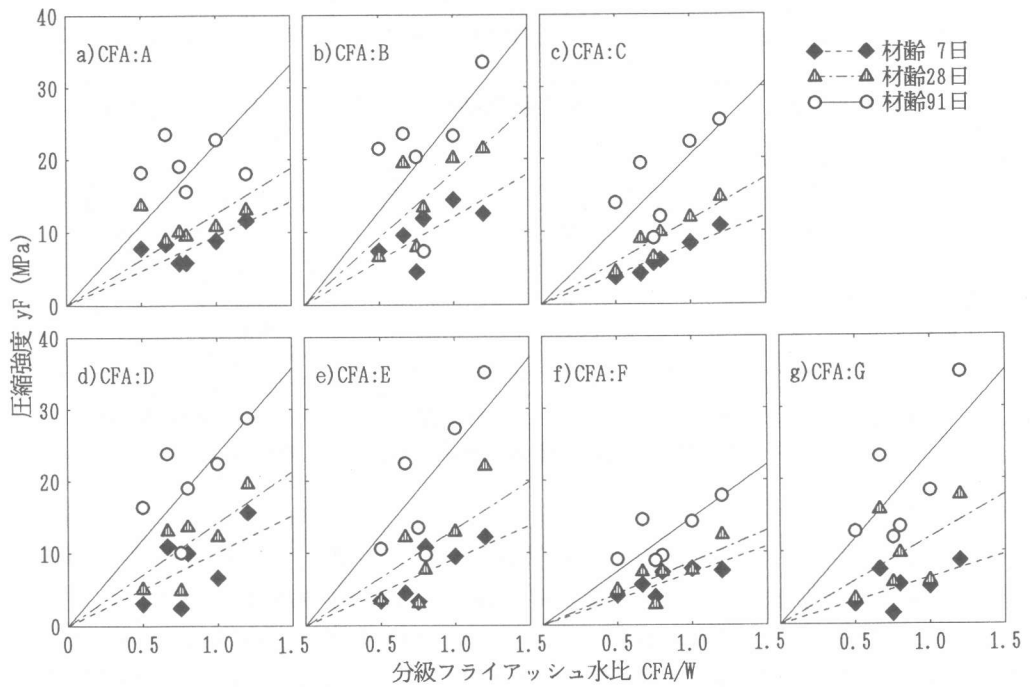


図-2 分級フライアッシュ水比 CFA/W と CFA が負担する圧縮強度 yF との関係

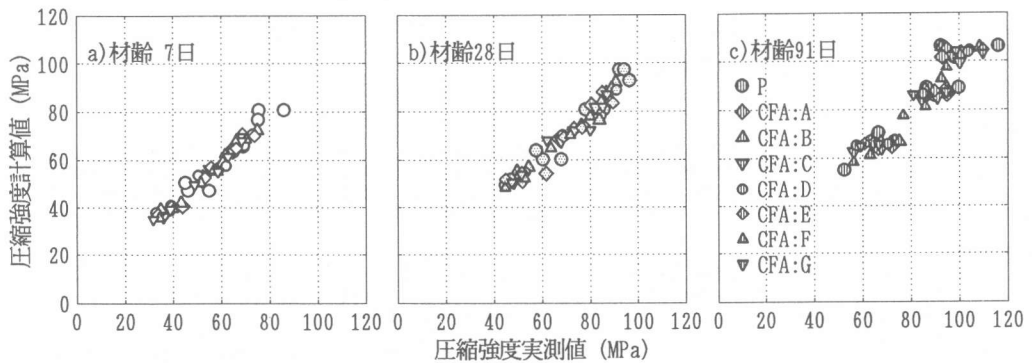


図-3 圧縮強度実測値と強度予測式解析値との関係

表-4 等価係数β及び強度予測式の解析結果

材齢	7日					28日					91日				
	重決定係数 R^2	傾き a_1	定数項 b	傾き a_2	等価係数 β	重決定係数 R^2	傾き a_1	定数項 b	傾き a_2	等価係数 β	重決定係数 R^2	傾き a_1	定数項 b	傾き a_2	等価係数 β
P	0.931	22.5	-9.0	-	-	0.918	24.6	-1.2	-	-	0.850	26.1	1.6	-	-
A	0.191	-	-	9.5	0.421	-2.32	-	-	12.5	0.509	-3.53	-	-	22.2	0.847
B	0.419	-	-	12.0	0.534	0.533	-	-	18.1	0.736	0.143	-	-	25.6	0.976
C	0.913	-	-	8.0	0.355	0.860	-	-	11.6	0.470	0.450	-	-	20.5	0.783
D	0.405	-	-	10.1	0.450	0.579	-	-	14.2	0.577	0.302	-	-	23.9	0.914
E	0.619	-	-	9.2	0.408	0.550	-	-	13.3	0.540	0.612	-	-	24.8	0.947
F	0.528	-	-	7.2	0.319	0.578	-	-	8.6	0.351	0.485	-	-	14.8	0.564
G	0.347	-	-	6.3	0.281	0.259	-	-	11.9	0.482	0.511	-	-	23.5	0.896

$f_c = a_1 \cdot (C + \beta \cdot CFA) / W + b$, f_c : 圧縮強度, W : 水量, C : セメント量, CFA : 分級フライアッシュ量

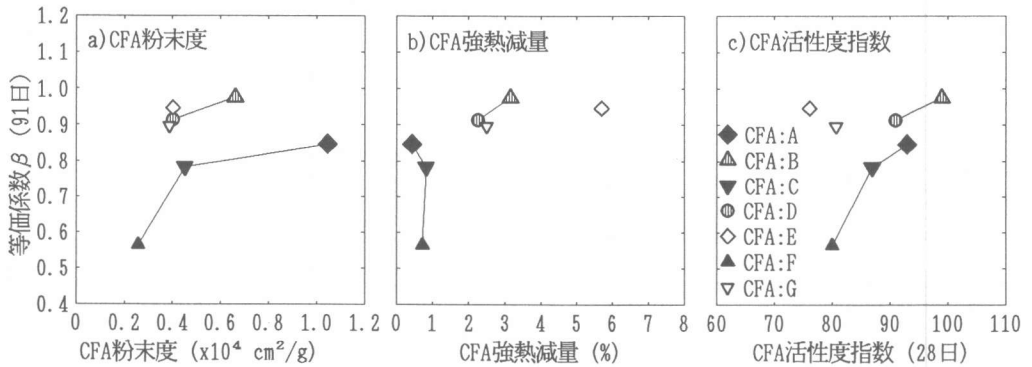


図-4 CFA 特性値と等価係数β (91日) との関係

5. 結論

種々の分級フライアッシュ (CFA) を使用した高強度コンクリートの圧縮強度性状を実験検討し、強度に及ぼす CFA 混入効果を定量評価した結果、本研究の範囲で以下が明らかとなった。

- 1) CFA を使用した 60 ~ 100MPa 級高強度コンクリートの強度予測式を定式化し提案した。
- 2) 圧縮強度に及ぼす CFA 混入効果を等価係数βにより定量評価し、CFA 混入は長期材齢で強度増加に寄与することを示した。
- 3) CFA が同一製造プラントの場合、粉末度及び活性度指数 (28 日) が大きくなると CFA 混入効果が高まり、強度増加に寄与するが、プラントが異なると粉末度、強熱減量及び活性度指数 (28 日) との相関は見られなかった。

謝辞

本研究は、日本フライアッシュ協会の委託により、日本建築学会に設けられたフライアッシュ調査研究小委員会の一環として行ったものである。本研究の実施にあたりまして、建設省建築研究所第 2 研究部無機材料研究室 主任研究員の鹿毛忠継氏、同 部外研究員の大下昭三氏、藤田克己氏、宇都宮大学大学院 手島則夫氏、宇都宮大学卒論生 新井 暢氏、押谷式子氏、大野吉昭氏、梶原伸悟氏、高橋祐一氏、深川正浩氏に御協力を賜りました。ここに記して厚く謝意を表します。

参考文献

- [1] 大賀宏行: フライアッシュや石炭灰を用いたコンクリート, コンクリート工学, Vol. 34, No. 6, pp. 69-74, 1996. 6
- [2] ACI 1994 International Conference on HIGH-PERFORMANCE CONCRETE: November 15-18, 1994, Singapore
- [3] 日本建築学会編: 高強度コンクリートの技術の現状, 日本建築学会, 1991. 1
- [4] 例えば, 小阪義夫: コンクリートと力(2), コンクリート工学, Vol. 17, No. 5, pp. 56-61, 1979. 5
- [5] 児島孝之, 高木宜章: シリカフェームコンクリートの力学的特性に関する 2, 3の実験, 材料, 第38巻, 第431号, pp. 58-64, 1989. 8
- [6] 友澤史紀, 阿部道彦, 梶田佳寛: 高強度コンクリートの開発, コンクリート工学, Vol. 32, No. 10, pp. 11-19, 1994. 10