

報告 フライアッシュを使用するコンクリートの強度寄与率に関する検討

道正 泰弘^{*1}・峯 秀和^{*2}・松本 行平^{*3}・山本 武志^{*4}

要旨：フライアッシュを使用するコンクリートの安定的な利用拡大の実現を目的に、フライアッシュの特性であるポズラン反応により、セメントの水和反応と比較して遅い材齢からの強度増進に対する圧縮強度発現推定のための特性値として、強度寄与率（k 値）について検討を行った。同一産地で複数ロットの JIS A 6201 II 種相当のフライアッシュを対象とした評価の結果、k 値を取り入れた簡便な評価式を用いることにより、設計対象とする材齢における圧縮強度の推定が可能であることが判明した。

キーワード：フライアッシュ、コンクリート、圧縮強度、強度寄与率

1. はじめに

2011 年 3 月 11 日の東日本大震災以降、火力発電への依存率は増加しており、石炭火力発電を行った際に副産物として生成される石炭灰の一種であるフライアッシュの排出量も増加していくことが考えられる。現在、フライアッシュはセメント分野、土木分野、建築分野、農林分野など多岐に亘り利用されているが、セメント分野が全体の約 7 割を占めているのが現状であり、その中の約 98%がセメント原料として使用されている¹⁾。このセメント原料への利用を低減することにより、他産業からの廃棄物をセメント原料として利用する余地を増やし、より一層の社会的役割を果たすことができると考えられる。その一つとして、コンクリート用混和材としての普及拡大が挙げられる。これは、セメントを製造する際に生じる二酸化炭素の削減に繋がることにより、環境負荷低減の観点からも期待できる²⁾。また、フライアッシュを混和材として利用することで、長期強度の増進、アルカリシリカ反応の抑制、水和熱の低下による温度ひび割れの抑制など、コンクリート性能が向上するという利点が確認されている^{3),4)}。

本研究は、フライアッシュを使用するコンクリート（FA コンクリート）の安定的な利用拡大の実現を目的に、フライアッシュの特性であるポズラン反応により、セメントの水和反応と比較して遅い材齢からの強度増進に対する圧縮強度発現推定のための特性値として、強度寄与率（k 値）⁴⁾について検討を行った。

2. 実験概要

本検討では 2011～2017 年の間で実施したレディーミクストコンクリート工場における FA コンクリートの実験結果を対象とした。データの抽出条件として、①室内

表－1 本検討に使用したフライアッシュの品質

項目	JIS A 6201	JASS 5 M-401 ⁵⁾	本検討
二酸化けい素含有量(%)	45.0 以上	-	55.0～69.0
水分(%)	1.0 以下	-	0.5 以下
強熱減量(%)	5.0 以下	4.0 以下	3.5 以下
密度(g/cm ³)	1.95 以上	-	2.25±0.10
粉末度	網ふるい方法(%) (45μmふるい残分)	40 以下	-
	ブレン法(cm ² /g)	2500 以上	3000 以上
フロー値比(%)	95 以上	100 以上	100～112
活性度 指数(%)	材齢 28 日	80 以上	-
	材齢 91 日	90 以上	-

表－2 使用骨材の品質

骨材区分	産地・種類		表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)	粗粒率 F.M.	実積率 (%)
			JIS A 1109 JIS A 1110	JIS A 1102	JIS A 1104	
細骨材	砕砂	兵庫県西島産	2.58	1.78	2.80	-
	砕砂	大阪府茨木産	2.66	1.58	2.95	-
	砕砂	京都府亀岡産	2.66	1.69	2.95	-
	砕砂	兵庫県赤穂産	2.58	1.68	2.90	-
	海砂	佐賀県小川島沖	2.59	1.56	2.60	-
	石灰石砕砂	福岡県北九州産	2.68	0.67	2.40	-
粗骨材	砕石 1505	兵庫県西島産	2.62	0.80	-	58
	砕石 2010		2.62	0.75	-	58
	砕石 1505	京都府亀岡産	2.69	0.73	-	59
	砕石 2010		2.69	0.62	-	59
	砕石 1505	大阪府茨木産	2.69	0.72	-	58
	砕石 2010		2.69	0.57	-	58
	石灰石砕石 2005	福岡県北九州産	2.69	0.68	-	59
	石灰石砕石 2005	大分県津久見産	2.70	0.24	-	59

表－3 試験項目および試験方法

	試験項目	試験方法	備考
フレッシュ性状	スランプ	JIS A 1101	-
	空気量	JIS A 1128	-
	コンクリート温度	JIS A 1156	JIS 制定前は準拠
硬化性状	圧縮強度	JIS A 1108	材齢 7 日, 28 日, 56 日, 91 日

*1 名城大学 理工学部環境創造学科 教授 博士（工学）（正会員）

*2 （株）関電パワーテック 火力事業本部環境営業グループ マネージャー（正会員）

*3 関西電力（株）土木建築室保全技術グループ 修士（工学）（正会員）

*4 （一財）電力中央研究所 地球工学研究所構造工学領域 上席研究員 博士（工学）（正会員）

試験練り，②同一日に試験を実施した普通ポルトランドセメント単品および普通ポルトランドセメントの一部をフライアッシュに置換したもの，③高性能 AE 減水剤使用の3つの条件を満足するものを対象とした。なお，フライアッシュは同一産地のものとした。表－1に本検討で使用したフライアッシュの概要を，表－2に使用した骨材の品質を，表－3に試験項目および試験方法を，表－4および表－5に各種コンクリートの調合概要およびフレッシュコンクリートの試験結果を示す。なお，表－4は，日本建築学会近畿支部による実験データ⁶⁾，表－5は，筆者らによる実験結果である。

(1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント(N, 密度:3.16 g/cm³)，混和材として舞鶴産フライアッシュII種(FAII, JIS A 6201)を用いた。細骨材(S)には砕砂，石灰石砕砂および海砂を用いた。粗骨材(G)には砕石および石灰石砕石を用いた。化学混和剤には高性能 AE 減水剤を用いた。なお，試験練りは複数のレディーミクストコンクリート工場で実施したため，骨材の使用は細骨材，粗骨材ともに2から3種類を工場の実績に合わせて，別計量して実施した。

(2) 調合

セメントは普通ポルトランドセメント1種類，細骨材は3種類，粗骨材は2種類とし，水結合材比(W/B)を35%，40%，45%，46%，50%，55%および60%の7水準，フライアッシュの置換率は，無混入の0%，フライアッシュセメントA種相当の10%，B種相当の20%の3水準に変化させた合計90種類の試料コンクリートを用意した。化学混和剤には，カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物，ポリカルボン酸コポリマー，ポリカルボン酸系化合物，ポリカルボン酸エーテル系化合物を用いた。

目標スランプは12±2.5cm および18±2.5cm，目標空気量はいずれのコンクリートも4.5±1.5%とした。

(3) 試験項目および試験方法

フレッシュ性状は，スランプ，空気量およびコンクリート温度の測定を，硬化性状では，材齢7日(σ7)，28日(σ28)，56日(σ56)および91日(σ91)の圧縮強度を測定した。測定した圧縮強度のデータ数(n)は，σ7：n=53，σ28：n=90，σ56：n=45，σ91：n=88である。なお，圧縮強度試験体はいずれも標準養生とした。

表－4（1） 各種コンクリートの調合概要およびフレッシュ性状1

種類	使用骨材	置換率 (%)	W/C (%)	W/B (%)	F/W	単位量(kg/m ³)					化学混和剤		フレッシュ性状		
						C	FA	W	S	G	主剤 C,B×%	助剤 A※5	スランプ (cm)	空気量 (%)	CT (°C)
W/C60%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石	0	60	60	0.00	292	0	175	924	880	0.55※3	0	19.0	4.9	26
W/C50%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石	0	50	50	0.00	350	0	175	858	896	0.45※3	0	17.0	4.3	26
W/C40%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石	0	40	40	0.00	438	0	175	769	912	0.50※3	0.25	18.0	4.7	26
W/C60%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石	0	60	60	0.00	292	0	175	890	938	0.65※3	1.0	20.5	4.9	26
W/B60%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石,石灰石砕石	10	67	60	0.17	263	29	175	890	938	0.60※3	1.5	17.5	4.4	26
W/B60%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石,石灰石砕石	20	75	60	0.33	234	58	175	871	938	0.60※3	4.5	20.0	4.5	27
W/B55%-18-20N	海砂,砕砂,砕石,石灰石砕石	10	61	55	0.18	286	32	175	848	946	0.60※3	2.5	19.0	4.6	26
W/B55%-18-20N	海砂,砕砂,砕石,石灰石砕石	20	69	55	0.37	254	64	175	841	946	0.50※3	5.0	19.5	4.0	27
W/C50%-18-20N	海砂,砕砂,砕石,石灰石砕石	0	50	50	0.00	350	0	175	825	954	0.60※3	1.0	20.0	4.1	26
W/B50%-18-20N	海砂,砕砂,砕石,石灰石砕石	10	56	50	0.20	315	35	175	812	954	0.575※3	2.75	19.0	4.6	27
W/B50%-18-20N	海砂,砕砂,砕石,石灰石砕石	20	63	50	0.40	280	70	175	802	954	0.50※3	6.0	19.5	4.3	28
W/B45%-18-20N	海砂,砕砂,砕石,石灰石砕石	10	50	45	0.22	350	39	175	775	962	0.575※3	3.0	20.0	4.5	27
W/B45%-18-20N	海砂,砕砂,砕石,石灰石砕石	20	56	45	0.45	311	78	175	760	962	0.525※3	7.0	20.0	4.5	28
W/C40%-18-20N	海砂,砕砂,砕石,石灰石砕石	0	40	40	0.00	438	0	175	736	970	0.60※3	1.0	17.5	4.4	26
W/B40%-18-20N	海砂,砕砂,砕石,石灰石砕石	10	44	40	0.25	394	44	175	720	970	0.60※3	3.5	20.5	4.9	27
W/B40%-18-20N	海砂,砕砂,砕石,石灰石砕石	20	50	40	0.50	350	88	175	707	970	0.55※3	8.0	20.0	4.7	28
W/B35%-18-20N	海砂,砕砂,砕石,石灰石砕石	10	39	35	0.29	450	50	175	662	978	0.625※3	4.0	19.5	4.0	28
W/B35%-18-20N	海砂,砕砂,砕石,石灰石砕石	20	44	35	0.57	400	100	175	644	978	0.675※3	9.0	20.5	4.8	29
W/C60%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石,石灰石砕石	0	60	60	0.00	292	0	175	908	910	0.70※3	2.5	18.0	4.7	24
W/B60%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石,石灰石砕石	10	67	60	0.17	263	29	175	882	926	0.65※3	0	18.0	4.6	25
W/B55%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石,石灰石砕石	20	69	55	0.37	254	64	175	842	934	0.575※3	2.5	19.5	4.2	25
W/C50%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石,石灰石砕石	0	50	50	0.00	350	0	175	834	926	0.65※3	5.0	17.5	5.1	25
W/B50%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石,石灰石砕石	10	56	50	0.20	315	35	175	814	941	0.525※3	0	18.5	5.1	25
W/B50%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石,石灰石砕石	20	63	50	0.40	280	70	175	803	941	0.523※3	2.5	18.5	4.5	25
W/B45%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石,石灰石砕石	20	56	45	0.45	311	78	175	761	950	0.525※3	5.0	19.0	4.7	25
W/C40%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石,石灰石砕石	0	40	40	0.00	438	0	175	753	941	0.60※3	5.0	17.5	4.3	25
W/B40%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石,石灰石砕石	10	44	40	0.25	394	44	175	722	958	0.60※3	0	17.0	4.6	25
W/B40%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石,石灰石砕石	20	50	40	0.50	350	88	175	709	949	0.60※3	10.0	18.5	4.7	25
W/B35%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,砕石,石灰石砕石	20	44	35	0.57	400	100	175	616	965	0.775※3	1.25	19.0	4.7	25
W/C50%-18-20N	海砂,砕砂,砕石,石灰石砕石	0	50	50	0.00	350	0	175	825	954	0.55※3	1.0	19.5	4.9	24

※1 カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物，※2 ポリカルボン酸コポリマー，※3 ポリカルボン酸系化合物，※4 ポリカルボン酸エーテル系化合物，※5 1A=C(B)×0.01%

表－４（２） 各種コンクリートの調合概要およびフレッシュ性状１

種類	使用骨材	置換率 (%)	W/C (%)	W/B (%)	F/W	単位量(kg/m ³)					化学混和剤		フレッシュ性状		
						C	FA	W	S	G	主剤 C,B×%	助剤 A※ ⁵	スランプ ¹ (cm)	空気量 (%)	CT (°C)
W/B50%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	10	55	50	0.20	318	35	175	818	954	0.50 ^{※3}	2.5	19.5	4.9	23
W/B50%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	20	63	50	0.40	280	70	175	802	954	0.40 ^{※3}	5.0	19.0	4.9	23
W/C40%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	0	40	40	0.00	438	0	175	735	970	0.50 ^{※3}	1.0	19.5	4.1	24
W/B40%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	10	44	40	0.25	394	44	175	720	970	0.50 ^{※3}	3.0	19.5	4.9	23
W/B40%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	707	970	0.50 ^{※3}	5.0	20.5	5.0	23
W/C50%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	0	50	50	0.00	350	0	175	838	936	0.50 ^{※3}	1.5	19.0	4.4	23
W/B50%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	10	56	50	0.20	315	35	175	825	936	0.45 ^{※3}	2.5	19.0	4.6	24
W/B50%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	20	63	50	0.40	280	70	175	814	936	0.45 ^{※3}	4.5	19.5	5.0	24
W/C40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	0	40	40	0.00	438	0	175	749	952	0.45 ^{※3}	1.25	18.0	4.7	23
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	10	44	40	0.25	394	44	175	734	952	0.45 ^{※3}	3.0	18.5	4.5	24
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	720	952	0.45 ^{※3}	5.0	18.0	4.7	24
W/C50%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	0	50	50	0.00	350	0	175	828	931	0.60 ^{※3}	2.5	19.5	4.2	19
W/B50%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	10	56	50	0.20	315	35	175	815	931	0.55 ^{※3}	3.0	19.0	4.1	19
W/B50%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	20	63	50	0.40	280	70	175	805	931	0.475 ^{※3}	5.5	18.5	4.1	20
W/C40%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	0	44	40	0.25	438	0	175	741	948	0.55 ^{※3}	3.0	18.5	4.5	19
W/B40%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	10	44	40	0.25	394	44	175	725	948	0.55 ^{※3}	3.5	19.0	4.2	20
W/B40%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	712	948	0.475 ^{※3}	6.0	18.0	4.4	20
W/C60%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石	0	60	60	0.00	292	0	175	906	920	0.75 ^{※3}	1.5	18.0	4.0	21
W/B60%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石	20	75	60	0.33	234	58	175	885	920	0.60 ^{※3}	4.25	19.0	4.1	21
W/C50%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石	0	50	50	0.00	350	0	175	841	936	0.60 ^{※3}	1.5	19.0	5.0	21
W/B50%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石	20	63	50	0.40	280	70	175	817	936	0.50 ^{※3}	4.75	19.0	4.8	21
W/C40%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石	0	40	40	0.00	438	0	175	751	952	0.575 ^{※3}	1.25	20.0	4.5	21
W/B40%-18-20N	海砂, 砕砂, 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	723	952	0.475 ^{※3}	5.25	18.5	4.8	21
W/C50%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	0	50	50	0.00	350	0	175	838	936	0.475 ^{※4}	2.0	19.5	4.6	18
W/B50%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	20	63	50	0.40	280	70	175	814	936	0.475 ^{※4}	11.0	19.5	5.3	19
W/C50%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	0	50	50	0.00	350	0	175	838	936	0.50 ^{※3}	2.0	19.5	3.9	18
W/B50%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	20	63	50	0.40	280	70	175	814	936	0.475 ^{※3}	10.0	19.5	3.9	19
W/C50%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	0	50	50	0.00	350	0	175	838	952	0.475 ^{※3}	2.0	19.0	4.8	18
W/B50%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	20	63	50	0.40	280	70	175	814	952	0.45 ^{※3}	11.0	17.5	4.0	19
W/C40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	0	40	40	0.00	438	0	175	749	952	0.475 ^{※4}	2.25	19.0	4.5	19
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	720	952	0.475 ^{※4}	12.0	18.0	4.2	19
W/C40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	0	40	40	0.00	438	0	175	749	952	0.50 ^{※3}	2.25	19.0	4.5	19
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	720	952	0.45 ^{※3}	13.0	17.5	4.6	19
W/C40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	0	40	40	0.00	438	0	175	749	952	0.50 ^{※3}	2.5	19.0	4.8	19
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	720	952	0.475 ^{※3}	13.5	18.5	5.1	19
W/C40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	0	40	40	0.00	438	0	175	749	952	0.50 ^{※1}	1.25	18.0	3.9	19
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	720	952	0.50 ^{※1}	10.5	20.0	4.9	19
W/C40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	0	40	40	0.00	438	0	175	749	952	0.45 ^{※2}	2.5	18.0	4.7	18
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	720	952	0.45 ^{※2}	13.0	19.5	4.9	18
W/C40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	0	40	40	0.00	438	0	175	637	958	0.50 ^{※3}	3.0	20.5	5.5	18
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	709	958	0.475 ^{※3}	13.0	20.5	5.7	18
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	709	958	0.475 ^{※3}	13.0	19.0	4.9	18
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	709	958	0.475 ^{※3}	13.0	20.5	5.5	18
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	709	958	0.475 ^{※3}	13.0	19.0	5.0	18
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	709	958	0.475 ^{※3}	13.0	19.5	5.0	18
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	709	958	0.475 ^{※3}	13.0	20.5	5.0	18
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	709	958	0.475 ^{※3}	13.0	20.0	5.4	18
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	709	958	0.475 ^{※3}	13.0	21.0	5.7	18
W/B40%-18-20N	砕砂, 石灰石 砕砂, 碎石, 石灰石 碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	709	958	0.475 ^{※3}	13.0	19.5	5.8	18

※1 カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物, ※2 ポリカルボン酸コポリマー, ※3 ポリカルボン酸系化合物, ※4 ポリカルボン酸エーテル系化合物, ※5 1A=C(B)×0.01%

3 実験結果

3.1 フレッシュ性状

(1) スランプおよび空気量

目標スランプ 18±2.5cm のコンクリートについては、高性能 AE 減水剤は、セメント質量の 0.45~0.75%、もしくは結合材質量の 0.45~0.775%とし、助剤は 0~13.5A の

範囲で使用した。目標スランプ 12±2.5cm のコンクリートについては、セメント質量および結合材質量の 0.65%、助剤は 1.5~8.5A で使用した。以上の結果、スランプ、空気量ともにすべて目標値を満足した。

(2) コンクリート温度

試料コンクリート温度は、15~29℃の範囲にあり、いずれの試験体も 35℃を下回った。

表-5 各種コンクリートの調査概要およびフレッシュ性状²

種類	使用骨材	置換率 (%)	W/C (%)	W/B (%)	F/W	単位量(kg/m ³)					化学混和剤		フレッシュ性状		
						C	FA	W	S	G	主剤 C,B×%	助剤 A※ ⁵	スランプ ⁷ (cm)	空気量 (%)	CT (°C)
W/C55%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,碎石,石灰石碎石	0	55	55	0.00	327	0	180	858	899	0.45※ ³	1.0	18.0	5.5	18
W/B55%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,碎石,石灰石碎石	20	69	55	0.36	262	65	180	834	948	0.50※ ³	11.0	19.5	5.4	18
W/C50%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,碎石,石灰石碎石	0	50	50	0.00	360	0	180	822	928	0.45※ ³	1.0	19.0	4.9	17
W/B50%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,碎石,石灰石碎石	20	63	50	0.40	288	72	180	798	928	0.50※ ³	11.0	20.5	4.7	17
W/C45%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,碎石,石灰石碎石	0	45	45	0.00	400	0	180	780	936	0.55※ ³	1.0	19.5	4.7	15
W/B45%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,碎石,石灰石碎石	20	56	45	0.44	320	80	180	753	936	0.55※ ³	11.0	19.5	4.6	15
W/C40%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,碎石,石灰石碎石	0	40	40	0.00	438	0	175	753	941	0.70※ ³	1.25	19.0	4.0	26
W/B40%-18-20N	砕砂,石灰石砕砂,碎石,石灰石碎石	20	50	40	0.50	350	88	175	734	941	0.60※ ³	11.0	19.0	4.0	25
W/C50%-12-20N	砕砂,石灰石砕砂,碎石,石灰石碎石	0	50	50	0.00	340	0	170	800	989	0.65※ ³	1.5	12.0	4.7	20
W/B46%-12-20N	砕砂,石灰石砕砂,碎石,石灰石碎石	20	57	46	0.44	287	72	165	753	101	0.65※ ³	8.5	12.0	4.9	20
W/B50%-12-20N	砕砂,石灰石砕砂,碎石,石灰石碎石	20	63	50	0.40	264	66	165	785	100	0.65※ ³	8.0	11.5	4.9	20

※1 カルボキシル基含有ポリエーテル系化合物, ※2 ポリカルボン酸コポリマー, ※3 ポリカルボン酸系化合物, ※4 ポリカルボン酸エーテル系化合物, ※5 1A=C(B)×0.01%

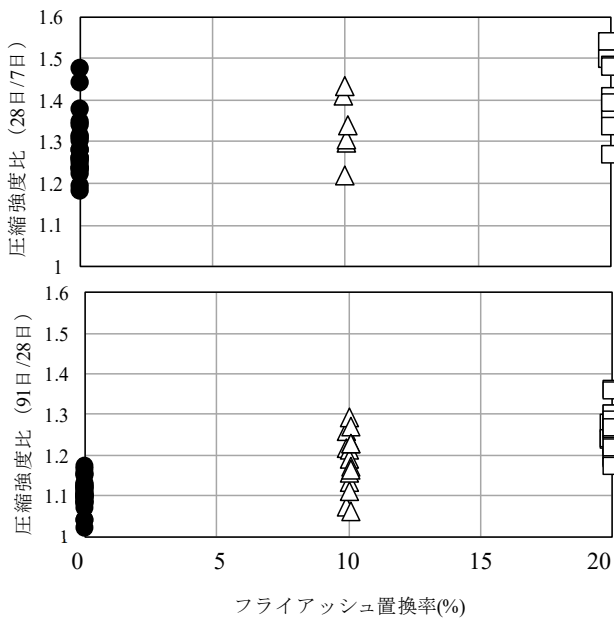


図-1 フライアッシュ置換率と圧縮強度比の関係

3.2 圧縮強度

(1) フライアッシュコンクリートの材齢効果

図-1は、フライアッシュの置換率と材齢による圧縮強度比の関係を示したものである。これによると、材齢7日に対する材齢28日の比では、置換率の増加に伴う強度増進はみられないが、材齢28日に対する材齢91日の比では、置換率の増加に伴う強度増進の傾向が明確に認められる。

図-2は、各種コンクリートにおけるC/Wと圧縮強度の関係を示したものである。図中の回帰線は無混入のコンクリートのものであるが、FAコンクリートのデータをプロットすると、材齢が経過するのに伴い、無混入のコンクリートの回帰線を上回る傾向がみられる。このことから、フライアッシュによる長期強度増進への効果が得られていることが確認できる。

(2) 強度寄与率(k値)を用いた強度推定式

土木学会「循環型社会に適合したフライアッシュコ

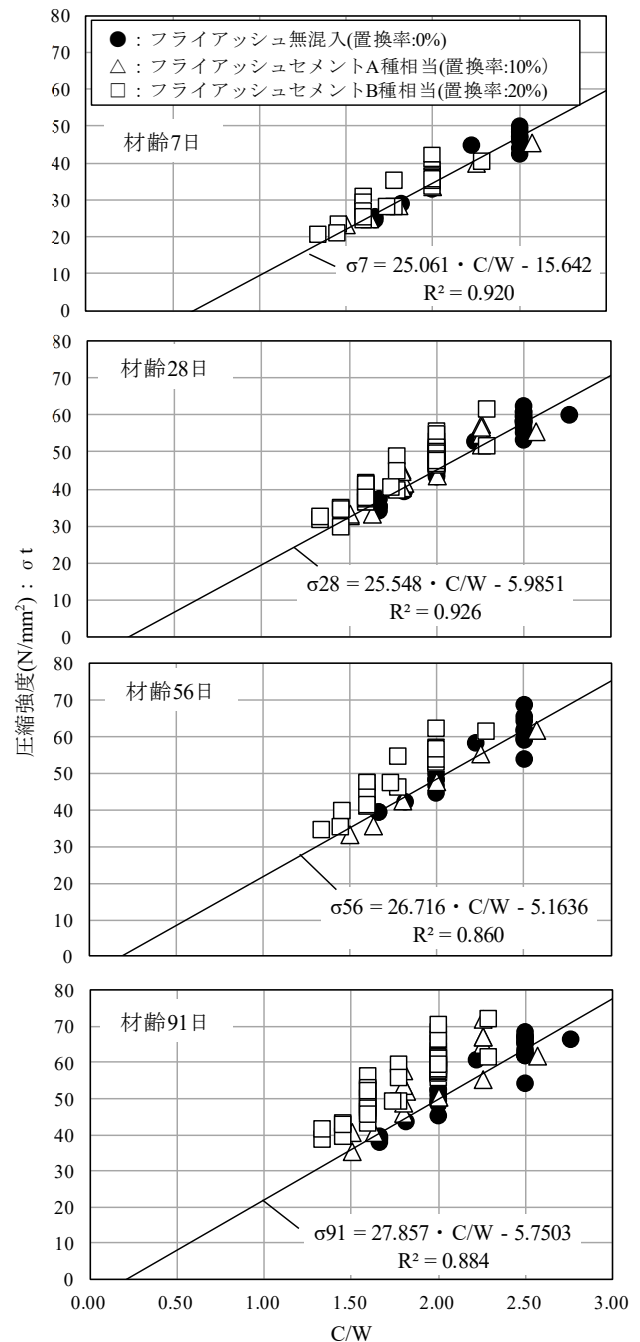


図-2 各種コンクリートのC/Wと圧縮強度の関係

表－6 k 値の比較

評価	材齢(日)			
	7	28	56	91
本検討	0.120	0.326	0.533	0.781
土木学会 ³⁾	0.253	0.390	-	0.549
日本建築学会 ^{4)※}	-	0.25≦	-	0.60≦

※単位ポルトランドセメント量 250kg/m³ 以上とした場合の値

ンクリートの最新利用技術³⁾に示されているフライアッシュを使用したコンクリートの材齢 n 日における圧縮強度の推定式を式(1)として示す。式(1)中のフライアッシュのセメント有効係数 (k 値) について、C/W および F/W によって重回帰分析により予測値を算出した結果を式(2)から式(5)に示す。なお、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(案)・同解説」⁴⁾においてもほぼ同様な考え方でフライアッシュを使用したコンクリートの調合強度と水結合材比の関係式^註が提案されている。本検討では、フライアッシュのセメント有効係数 (k 値) をフライアッシュの強度寄与率 (k 値) とした。

実測値と予測値の関係を図－3 に示す。これらによると各材齢ともに両者の間には、明確な相関関係がみられ、高い精度で予測値が推定できているものと考えられる。今回の検討結果においては、材齢 28 日での強度寄与率 (k 値) は 0.326、材齢 91 日では 0.781 であった。

表－6 は既往の強度寄与率 (k 値) の評価結果^{3), 4)}との比較を示したものである。このうち土木学会の評価結果³⁾と比較すると、材齢 7 日の 0.253、材齢 28 日の 0.390 に比べるとやや小さいものの、材齢 91 日では 0.549 に対して大きくなった。このことから、本検討で用いたフライアッシュは、ポゾラン反応による長期強度の増加の程度が大きくなる傾向にあるといえる。

$$\sigma_n = a \cdot (C/W + k \cdot F/W) + b \cdots \text{式 (1)}$$

ここに、 σ_n : 材齢 n 日における圧縮強度(N/mm²)

C/W : セメント水比

F/W : フライアッシュ水比

W : 単位水量(kg/m³)

k : フライアッシュの強度寄与率 (k 値) ※

※土木学会の評価方法³⁾ではフライアッシュのセメント有効係数 (k 値) としている。

a, b : 回帰分析から決まる定数

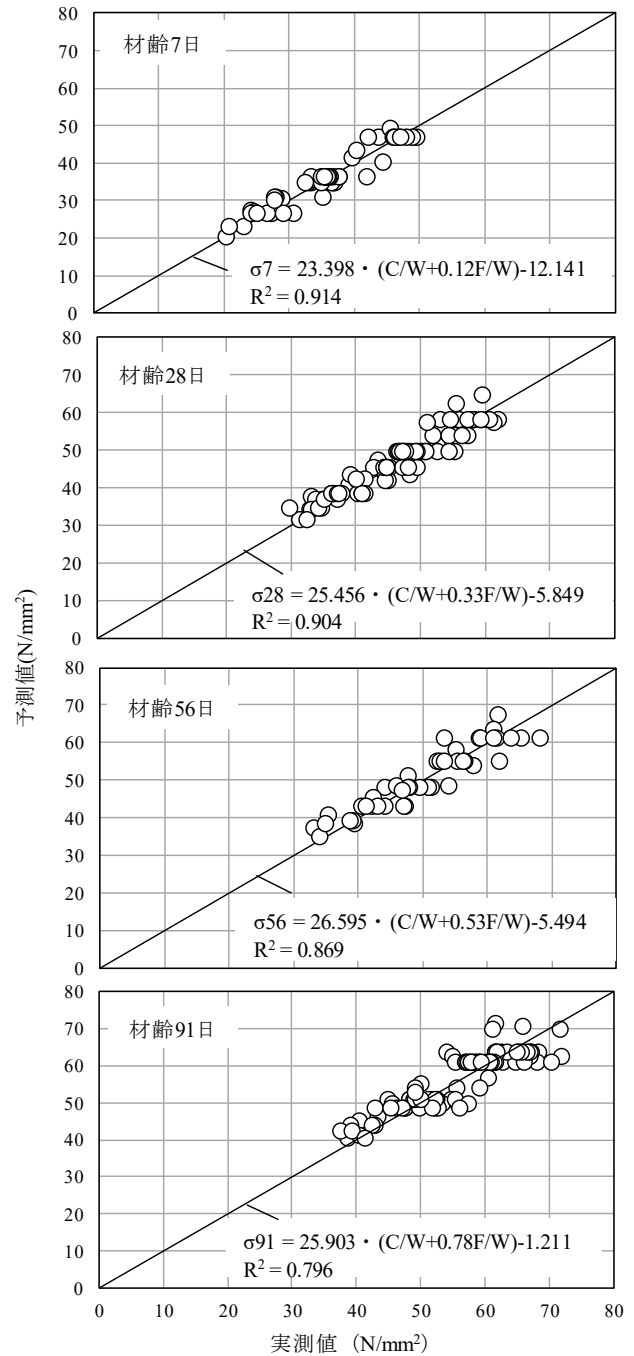
材齢 7 日 : $\sigma_7 = 23.398 \cdot (C/W + 0.120 \cdot F/W) - 12.141 \cdots \text{式 (2)}$

材齢 28 日 : $\sigma_{28} = 25.456 \cdot (C/W + 0.326 \cdot F/W) - 5.849 \cdots \text{式 (3)}$

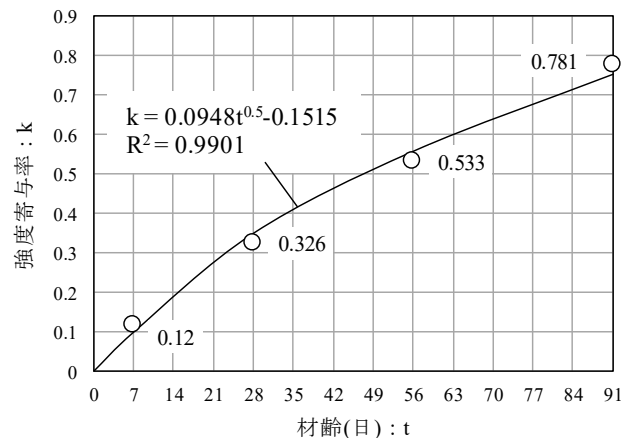
材齢 56 日 : $\sigma_{56} = 26.595 \cdot (C/W + 0.533 \cdot F/W) - 5.494 \cdots \text{式 (4)}$

材齢 91 日 : $\sigma_{91} = 25.903 \cdot (C/W + 0.781 \cdot F/W) - 1.211 \cdots \text{式 (5)}$

図－4 は、材齢と強度寄与率 (k 値) の関係を示した



図－3 圧縮強度の実測値と予測値の関係



図－4 材齢と強度寄与率 (k 値) の関係

ものである。これによると、材齢と k 値の間には明確な相関関係がみられ、FA コンクリートの圧縮強度は材齢の経過に伴い増加する。従って、この関係から、 k 値を取り入れた簡便な評価式を用いることにより、設計対象とする材齢における圧縮強度の推定が可能である。なお、FA コンクリートの圧縮強度は、フライアッシュの品質として、ブレン比表面積との相関が高く、その影響を加味する式が提案されている⁷⁾。しかし、本検討では、1 種類のフライアッシュのみを用いていることから、ブレン比表面積の影響は考慮していない。 k 値の評価においては、ポゾラン活性評価³⁾としてブレン比表面積などのフライアッシュの品質との関係を示すことにより、圧縮強度に及ぼす影響を明確化することが可能と考えられる。

4. まとめ

FA コンクリートの安定的な利用拡大の実現を目的に、フライアッシュの特性であるポゾラン反応による長期強度の増進の特性値として強度寄与率 (k 値) について検討を行った。その結果、大要以下のことがいえる。

- (1) 同一産地で複数ロットの JIS A 6201 II 種相当のフライアッシュを対象とした評価の結果、材齢の経過とともに k 値が増加する事を明確に示すことができた。
- (2) 材齢と k 値の間には明確な相関関係がみられ、FA コンクリートの圧縮強度は材齢の経過に伴い増加する。従って、 k 値を取り入れた簡便な評価式を用いることにより、設計対象とする材齢における圧縮強度の推定が可能である。なお、ポゾラン活性評価としてブレン比表面積などの関係を示すことにより、圧縮強度に及ぼす影響を明確化することが可能と考えられる。

注

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 (案)・同解説」⁴⁾に示されているフライアッシュを使用したコンクリートの調合強度と

水結合材比の関係式を以下に示す。

$$F_{Fa}=a\cdot(C+k\cdot Fa)/W+b\cdot\cdots\cdots\cdots(\text{解 } 7.5.2)$$

ここに、

F_{Fa} : フライアッシュを使用したコンクリートの調査強度(N/mm²)

C : 単位ポルトランドセメント量(kg/m³)

Fa : 単位フライアッシュ量(kg/m³)

W : 単位水量(kg/m³)

k : フライアッシュの強度寄与率

a, b : 工場の実験係数(N/mm²)

謝辞

本検討は、日本建築学会「フライアッシュコンクリート研究小委員会 (主査: 野口貴文 東京大学教授)」の活動で実施したものである。試験練りをはじめ各種実験に協力を頂いた関係各位に対し、ここに厚く謝意を表す。

参考文献

- 1) 日本フライアッシュ協会: 石炭灰ハンドブック 平成 27 年度版, 2015.11
- 2) 日本建築学会: コンクリートの調合設計指針・同解説, 2015
- 3) 土木学会: 循環型社会に適合したフライアッシュコンクリートの最新利用技術, コンクリートライブラリー 132, 2009
- 4) 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 (案)・同解説, 2007
- 5) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事 2009, 2009
- 6) 日本建築学会近畿支部: フライアッシュ使用コンクリートの特性に関する調査研究 報告書, 平成 26 年 7 月
- 7) 黄 光律, 野口貴文, 友澤史紀: 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, pp. 1-6, 1999.5