フライアッシュセメントB種を使用したコンクリートの屋外暴露中性化速度係数に関する研究

STUDY ON CARBONATION RATE COEFFICIENTS OF CONCRETE USING FLY ASH CEMENT (TYPE-B) IN OUTDOOR EXPOSURE TEST

船本憲治 ——— * 1

キーワード：
フライアッシュセメントB種, 中性化, 中性化速度係数,
中性化速度係数比, 屋外暴露試験

Keywords:
Fly ash cement (type-B), Carbonation, Carbonation rate coefficient,
Carbonation rate coefficient ratio, Outdoor exposure test

Kenji FUNAMOTO ——— * 1

This paper describes the results of research study on carbonation rate coefficients of concrete using fly ash cement (type-B) in outdoor exposure test continued more than five years. As the result, the main conclusions are as follows. 1) The carbonation rate coefficients of concrete using fly ash cement can be expressed by the water-cement ratio. 2) The water-binder ratio has a good association with carbonation rate coefficient ratio. 3) The cement factor (α_2) of the AIJ durability design recommendation can be calculated with 1.1 and the water-binder ratio factor (α_3) can be calculated with $(W/(C+F) - 0.304)$.

1. はじめに

フライアッシュ（以下, FA）をセメント内割で使用したコンクリートは, 初期強度が小さく, セメントの水和により生成した $\text{Ca}(\text{OH})_2$ がポゾラン反応によって消費されるため, 一般のコンクリートに比べて中性化速度が速くなる。しかし, 初期段階において十分な養生を行えば, 長期的にはコンクリート中で緻密な硬化体組織が形成され, 中性化が抑制されることが期待される。

そのような中, FA コンクリートの中性化の性状は, 促進試験では多くの知見が得られているが, それはそのまま実構造物の性状を表しているとは言い難く, 暴露試験の成果の反映が求められている。

そこで, 本論文では, FA セメント B 種を使用したコンクリートに関して, 屋外暴露した既往文献を調査し, 長期に亘る中性化特性を検討した。さらに, この結果を基に, 日本建築学会（以下, AIJ）「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）・同解説（2004）（以下, RC 建築物耐久設計施工指針）」で示されている中性化速度式の諸係数について一つの提案を行った。なお, 今回の検討では, 普通ポルトランドセメントに FA を 20% 置換した結合材を対象とした文献もあり, それも FA セメント B 種に含めた。

2. FA コンクリートの中性化特性および耐久設計基準強度に関する AIJ 指針等の記述

「建築工事標準仕様書・同解説（JASS5）（2009）」では, 「促進中性化試験では, セメントの種類に関係なく試験開始時の圧縮強度の逆数と中性化速度とは直線関係にあり, 圧縮強度を指標に中性化速度が評価できる」, 「屋外暴露試験では, 強度が同じであれば同程度の中性化速度係数となる結果が得られる」となっている。

「FA を使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説（2007）」では, 「屋外暴露中性化試験の結果より, FA II 種で FA の置換率が 20% 以下の場合には耐久設計基準強度の割増しは必要ないが, 置換率が 30% を超える場合は一般のコンクリートに比べておよ

そ 3N/mm² の強度割増しが必要になる」となっている。

「高流動コンクリートの材料・調査・製造・施工指針（案）・同解説（1997）」では, 促進中性化試験の結果より, 「中性化速度係数は水セメント比との間に直線関係が認められ, 結合材として用いた FA は中性化抵抗性にほとんど関与しない」となっている。

「RC 建築物耐久設計施工指針」では, 中性化速度係数 A の評価式が下式(1)のように示されている。

$$A = k \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 \cdot \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3 \cdots \cdots (1)$$

k : 定数 (mm/√年)

α_1 : 骨材種類による係数 β_1 : 温度による係数

α_2 : セメント種類による係数 β_2 : 湿度による係数

α_3 : 水セメント比による係数 β_3 : CO₂ 濃度による係数

上式(1)において, 普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートの場合は, $\alpha_2=1$, $\alpha_3=W/C-0.38$ であり, 中性化は W/C が 38% 以下ではゼロであるとの考えが反映されている。一方, FA セメント B 種の場合は, $\alpha_2=1.8$ が推奨されているが, α_3 はセメントの種類に関係なく W/C-0.38 が適用できると考えられているように読める。

3. 既往文献における屋外暴露中性化試験の概要

今回, 実構造物の長期的な中性化性状を評価する目的で, FA セメント B 種および普通ポルトランドセメントに対し FA を 20% 置換した結合材 (FA セメント B 種相当) を使用したコンクリートを, 5 年以上屋外暴露した既往文献^{1)~5)}を調査し, その結果を表-1 に示す。なお, 選定文献は, FA の有無による中性化速度比を求める必要があり, 水結合材比一定で FA の有無のデータが得られている文献とし, FA セメント B 種の FA 置換率は平均的な 18% と仮定した。また, FA 種別は, 1999 年以降は FA II 種であるが, それ以前は JIS 改定前の FA であり FA II 種相当品である。

文献 1) は, 普通ポルトランドセメントおよび FA セメント B 種を使用した調査で, 前水中養生期間を 3~28 日とし, $\phi 15 \times 30$ cm 供試

*1 九州高圧コンクリート工業(株) 取締役・博士 (工学)
(〒 869-1205 熊本県菊池市旭志川辺 1349-4)

*1 Director, Kyushu Kouatsu Concrete Industries Co., Dr. Eng.

表 1 屋外暴露中性化試験の条件および結果並びに中性化速度比の推定

文献	試験体	試験機関	暴露状況	スランブ (cm)	空気量 (%)	混和剤	前養生	単位量 (kg/m ³)			F/ (C+F) (%)	W/ (C+F) (%)	W/C (%)	試験結果				逆算した FAセメント B種の α_2^*	推定値 γ^{**}							
								W	C	F				材齢 (年)	深さ (mm)	中性化 速度係数 A (mm/√年)	中性化 速度係数比 (FA有/無) γ									
1)	$\phi 15 \times 30$ cm	小野田セメント	屋外	設定値 18	設定値 4	AE減水剤	3日水中	180	327	0	0	55	55	5	2.3	1.03	1.43	0.99	1.59							
								180	267	60	18	55	67	5	3.3	1.48										
							7日水中	180	327	0	0	55	55	5	2.3	1.03	1.74	1.20	1.59							
								180	267	60	18	55	67	5	4.0	1.79										
							28日水中	180	327	0	0	55	55	5	0.5	0.22	4.00	—	—							
								180	267	60	18	55	67	5	2.0	0.89										
2)	$\phi 15 \times 30$ cm	足利工業大学	屋外	18.0	3.4	AE剤	7日水中	165	300	0	0	55	55	10	9.9	3.13	1.63	1.12	1.60							
								157	234	51	18	55	67	10	16.1	5.09										
								162	249	0	0	65	65	10	15.5	4.90	1.35	1.06	1.41							
								154	194	43	18	65	79	10	20.9	6.61										
3)	$15 \times 15 \times 50$ cm	建設省建築研究所	屋外 (半分に屋根)	設定値 18	4.3	AE減水剤	28日水中	178	356	0	0	50	50	10	3.7	1.17	1.54	0.94	1.80							
					4.4			173	284	62	18	50	61	10	5.7	1.80										
					4.3			176	293	0	0	60	60	10	7.8	2.47	1.27	0.95	1.48							
					5.0			171	234	51	18	60	73	10	9.9	3.13										
					4.6			176	251	0	0	70	70	10	11.2	3.54	1.29	1.04	1.36							
					4.0			171	200	44	18	70	86	10	14.4	4.55										
					4)			$10 \times 10 \times 40$ cm	九州電力・九州大学	屋外	19.0	4.2	AE減水剤	5日封緘	180	450	0	0	40	40	9	—	0.70	1.79	0.37	—
											19.5	4.5			175	350	88	20	40	50	9	—	1.25			
20.0	4.0	180	300	0		0	60				60	9			—	2.60	1.54	1.15	1.48							
19.5	4.6	175	234	58		20	60				75	9			—	4.00										
19.0	4.2	7日封緘	180	450		0	0				40	40			9	—	0.00	—	—	—						
19.5	4.5		175	350		88	20				40	50		9	—	1.30										
20.0	4.0		180	300		0	0				60	60		9	—	2.25	1.56	1.16	1.48							
19.5	4.6		175	234		58	20				60	75		9	—	3.50										
19.0	4.2	10日封緘	180	450		0	0				40	40		9	—	0.00	—	—	—							
19.5	4.5		175	350		88	20				40	50		9	—	1.00										
20.0	4.0		180	300		0	0				60	60		9	—	2.10	1.71	1.28	1.48							
19.5	4.6		175	234		58	20				60	75		9	—	3.60										
5)	$10 \times 10 \times 40$ cm	竹中工務店・関西電力	屋外	設定値 18		設定値 4.5	AE減水剤				28日水中	169		423	0	0	40	40	7	—	0.40	2.18	0.44	—		
					169			338	85	20		40	50	7	—	0.87										
					160			320	0	0		50	50	7	—	0.90	1.66	1.01	1.80							
					160			256	64	20		50	63	7	—	1.49										
					162			270	0	0		60	60	7	—	1.40	1.51	1.12	1.48							
					162			216	54	20		60	75	7	—	2.11										
* 逆算したFAセメントB種の α_2 =試験値 $\gamma \times$ (普通ポルトランドセメントのW/C-0.38) / (FA有のW/(C+F)-0.304)																										
** $\alpha_2=1.1$, α_3 =(FA有のW/(C+F)-0.304)と仮定した時の推定値 $\gamma=\alpha_2 \times \alpha_3$ / (普通ポルトランドセメントのW/C-0.38)																										

体を材齢5年まで屋外暴露した試験である。なお、混和剤はAE減水剤を使用している。

文献2)は、普通ポルトランドセメントおよびFAセメントB種を使用した調合で、 $\phi 15 \times 30$ cm供試体を材齢10年まで屋外暴露した試験である。なお、混和剤はAE剤を使用し、前養生は、材齢7日まで20℃水中養生とし、材齢28日までは室温20℃・湿度80%とし、その後、屋外暴露している。

文献3)は、普通ポルトランドセメントおよびFAセメントB種を使用した調合で、15×15×50 cm供試体を材齢10年まで屋外暴露した試験である。なお、混和剤はAE減水剤を使用し、養生は、材齢28日まで20℃水中養生とし、その後、架台上に暴露している。また、

この架台の半分には屋根がかかっており、この下の供試体は雨がかりが無い条件となっている。

文献4)は、ベースセメントを普通ポルトランドセメントとし、FA置換率を0、20%とした調合で、前封緘養生期間を5～10日とし、10×10×40 cm供試体を材齢9年まで屋外暴露した試験である。なお、混和剤はAE減水剤を使用している。

文献5)は、ベースセメントを普通ポルトランドセメントとし、FA置換率を0、20%とした調合で、前水中養生期間は28日とし、10×10×40 cm供試体を材齢7年まで屋外暴露した試験である。なお、混和剤はAE減水剤を使用している。

図1 W/Cと中性化速度係数の関係
(文献1)【N≒FA】

図2 W/Cと中性化速度係数の関係
(文献2)【N>FA】

図3 W/Cと中性化速度係数の関係
(文献3)【N>FA】

図4 W/Cと中性化速度係数の関係
(文献4)【N≒FA】

図5 W/Cと中性化速度係数の関係
(文献5)【N≒FA】

図6 水結合材比 (W/(C+F))と
中性化速度係数比 (FA有/無) の関係

図7 水結合材比 (W/(C+F))と
中性化速度係数比 (FA有/無) の関係

4. 既往文献による屋外暴露中性化試験の結果

4.1 水ポルトランドセメント比 (W/C) との関係

今回対象とした文献の屋外暴露中性化試験結果を表-1に示す。
なお、水セメント比40%で中性化速度係数がゼロとなっている場合は中性化速度係数比 (FA有/無) の値が無限大となるので、以降の検討ではそのデータは削除した。

各文献における水ポルトランドセメント比 (W/C) と中性化速度

係数の関係を図-1~5に示す。なお、ここで、Nは普通ポルトランドセメント、FAはFAセメントB種である。

その結果、各中性化速度係数は、環境条件や養生等の影響により各文献により異なっているが、中性化速度係数をW/Cで評価すると、FAの有無に関係なく良い相関が見られ、同一W/Cでは、FAコンクリートの方が同等かやや中性化が小さくなっている。また、多少のはらつきはあるものの、中性化は、前述のAIJ「RC建築物耐久設計施工指針」の考えとも一致しW/C=38%近くでゼロになっている。

4.2 FAの有無による中性化速度の影響

今回対象とした文献の屋外暴露中性化試験による、FAの有無による中性化速度係数比 (γ) の結果を表-1に示すとともに、水結合材比 (W/(C+F)) との関係を図-6および図-7に示す。なお、図-6では、文献1)において、普通ポルトランドセメントの場合で前水中養生28日の中性化深さのみが他に比べて著しく小さく、その結果、中性化速度係数比が一つだけ4.0と特に大きい値となっており、そのことを考慮し図-7はその値を除いて再度相関を分析したものである。

図-7によると、水結合材比とFAの有無による中性化速度係数比に良い相関 ($Y=2.803-0.022X$, 相関係数0.791)が見られ、水結合材比が大きくなるほど中性化速度係数比 (FA有/無) は小さくなっている。

図8 水結合材比 (W/(C+F)) と α_2 の関係

図9 推定式による中性化速度係数比 (FA有/無) と
試験値による中性化速度係数比 (FA有/無) の関係

5. AIJ「RC 建築物耐久設計施工指針」における中性化速度係数に関する考察

FA セメント B 種の場合は、 $\alpha_2=1.8$ が推奨されているが、 α_3 はセメントの種類に関係なく $W/C=0.38$ が適用できると考えられているように読み、今回、考察を行った。

FA セメント B 種の場合は、前述の図-1~5 のように、中性化深さを水ポルトランドセメント比 (W/C) で評価すると FA の有無に関係なく良い相関が見られ、多少のばらつきはあるものの、中性化は $W/C=38\%$ 近くでゼロになっている。

従って、FA を 20% 置換している FA コンクリートの $W/C=0.38$ は $W/(C+F)$ では 0.304 に相当しており、FA セメント B 種では $\alpha_3=W/(C+F)-0.304$ となり、中性化は $W/(C+F)$ が 30.4% 以下ではゼロであると考えるのが適当と推察される。

その考えのもと、文献 1)~5) の試験値から逆算した FA セメント B 種の α_2 を表-1 に、水結合材比 ($W/(C+F)$) との関係を図-8 に示す。その中で、FA セメント B 種の水結合材比 40% では、比較した普通ポルトランドセメントの水セメント比が 40% と中性化ゼロの 38% に近く中性化が僅かでありその中性化速度比の影響が大きく現れ易いことによるものか、 α_2 が著しく小さな値になっている。しかし、水結合材比 50~70% ではほぼ $\alpha_2=1.1$ が採用できると思われる。

その結果、FA セメント B 種において、中性化速度係数算出に対し、 $\alpha_2=1.1$ 、 $\alpha_3=W/(C+F)-0.304$ が提案できそうである。なお、ここで α_2 が FA 置換率 18~20% による混合比 ($(C+F)/C$) の 1.22~1.25 より小さい値となっているのは、同一 W/C では FA コンクリートの方が中性化が同等かやや小さくなっており、FA が多少中性化に寄与していることによるものではないかと考えられる。

上記を検証するために、文献 1)~5) の試験において、推定式による中性化速度係数比 (FA 有/無) と試験値による中性化速度係数比 (FA 有/無) の関係を図-9 に示す。なお、ここで、推定式による中性化速度係数比 (FA 有/無) γ の算定は、前述の(1)式において、 α_1 、 β_1 、 β_2 、 β_3 は FA の有無で同じとし、 α_2 および α_3 が影響するものとし、 $\gamma=1.1 \times \{ \text{FA 有の } W/(C+F)-0.304 \} / \{ 1.0 \times (\text{普通の } W/C-0.38) \}$ とした。

図-9 によると、推定値と試験値は、ばらつきはあるもののほぼ対応しており、FA セメント B 種の水結合材比 50~70% の範囲にお

いて、中性化速度係数算出のための $\alpha_2=1.1$ 、 $\alpha_3=W/(C+F)-0.304$ の妥当性が確認できた。

6. まとめ

今回、FA セメント B 種を使用したコンクリートに関して、5 年以上屋外暴露した既往文献を調査し、長期に亘る中性化特性を検討した。さらに、この結果を基に、AIJ「RC 建築物耐久設計施工指針」で示されている FA セメント B 種における中性化速度式の係数の検討を行い、以下の結果が得られた。

- 1) 中性化深さを水ポルトランドセメント比 (W/C) で評価すると、FA の有無に関係なく良い相関が見られ、同一 W/C では FA コンクリートの方が同等かやや中性化が小さくなる傾向となる。
- 2) 水結合材比 ($W/(C+F)$) と FA の有無による中性化速度係数比に良い相関が見られ、水結合材比が大きくなるほど中性化速度比 (FA 有/無) は小さくなる。
- 3) 水結合材比 ($W/(C+F)$) 50~70% の範囲において、中性化速度係数算出に関して $\alpha_2=1.1$ 、 $\alpha_3=W/(C+F)-0.304$ が有効である。

なお、今回は異なる環境条件や養生条件に対して中性化速度係数比 (FA 有/無) を共通の指標として検討を行ったため、水結合材比 40% では十分な結果が得られず、結果として得られた提案式は適用範囲が狭くなっており、今後、同一の条件で α_2 と α_3 を同時に求める等の検討も行い、更に適用範囲の広い予測式を検討していきたい。

参考文献

- 1) 中村秀三ほか：各種セメントを用いたコンクリートの屋外暴露永年材齢試験、セメント・コンクリート論文集、No.48, pp.524-529, 1994
- 2) 依田彰彦ほか：8 種類のセメントを用いた AE コンクリートの中性化速さについて、第 52 回セメント技術大会講演要旨, pp.258-259, 1998
- 3) 長谷川拓哉ほか：中性化における環境条件を考慮した曝露試験と促進試験の対応に関する検討、第 52 回セメント技術大会講演要旨, pp.268-269, 1998
- 4) 船本憲治ほか：FA を使用したコンクリートの材齢 9 年における中性化曝露試験報告 (その 1 : FA を内割混合したコンクリートの試験結果), AIJ 大会学術講演梗概集 (九州), pp.373-374, 2007.8
- 5) 押田文雄ほか：中庸熱 FA セメントを使用したコンクリートの中性化速度係数, AIJ 技術報告集, Vol.20, No.45, pp.451-456, 2014.6

[2014 年 10 月 14 日原稿受理 2015 年 2 月 16 日採用決定]