

論文 フライアッシュコンクリートの諸性状におけるフライアッシュのセメント有効係数に関する調査研究

船本 憲治*1・屠 強*2

要旨：既往の文献により、水和発熱、圧縮強度、中性化、塩分浸透性における日本国内のフライアッシュ（以下、FA）のセメント有効係数（K値）の検討を行った。その結果、まず、圧縮強度のK値に関する影響因子を正の相関か、負の相関か取りまとめた。次に、FA セメント B 種を使用したコンクリートにおける FA の K 値は、単位ポルトランドセメント量が多くなるほど大きくなることを明らかにするとともに、材齢 28 日標準養生圧縮強度、材齢 91 日標準養生圧縮強度、水和発熱、屋外暴露中性化、塩分浸透性に関する K 値と単位ポルトランドセメント量の関係を明らかにした。

キーワード：フライアッシュ、セメント有効係数、圧縮強度、水和発熱、中性化、塩分浸透性

1. はじめに

FA のセメント有効係数（K 値）は、圧縮強度に関しては今までに多くの研究がなされているが、それらの影響因子を纏まった形で整理した文献は見当たらない。一方、水和発熱、中性化、塩分浸透性の K 値に関する研究は現状僅かしかなされていない。そこで、本論文は、水和発熱、圧縮強度、中性化、塩分浸透性の諸性状における FA のセメント有効係数（K 値）の検討を既往文献により行い、FA の特性を検証したものである。

FA のセメント有効係数（K 値）に関しては、FA の強度発現性能をポルトランドセメントの性能に対する比率で表すことが進められており¹⁾、FA のセメント有効係数（K 値）は下式による。

$$C_{eq} = C + K \times FA \quad (1)$$

ここで、 C_{eq} ：等価セメント量（ kg/m^3 ）

C ：単位セメント量（ kg/m^3 ）

FA：単位 FA 量（ kg/m^3 ）

この K 値により FA の諸性能を反映させた水セメント比や単位セメント量を計算することができる。しかし、各国の FA およびセメントの品質は異なり、また、各国の気象条件も様々であることから、今回の検討は、日本国内における FA およびセメントを対象とした。

2. FA のセメント有効係数（K 値）の記載

2.1 日本建築学会

FA を使用するコンクリート調合設計・施工指針・同解説（2007）の解説では、「標準養生強度に対し、FA II 種を使用するコンクリートで単位ポルトランドセメント量 $250\text{kg}/\text{m}^3$ 以上の場合には材齢 28 日の K 値は約 0.25 以上、材齢 91 日の K 値は約 0.60 以上となる」と示されている。

2.2 土木学会

循環型社会に適合した FA 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）では、FA の種類や置換率による違いはなく、「標準養生強度に対し、材齢 7 日の K 値は 0.253、材齢 28 日の K 値は 0.39、材齢 91 日の K 値は 0.549」となっている。

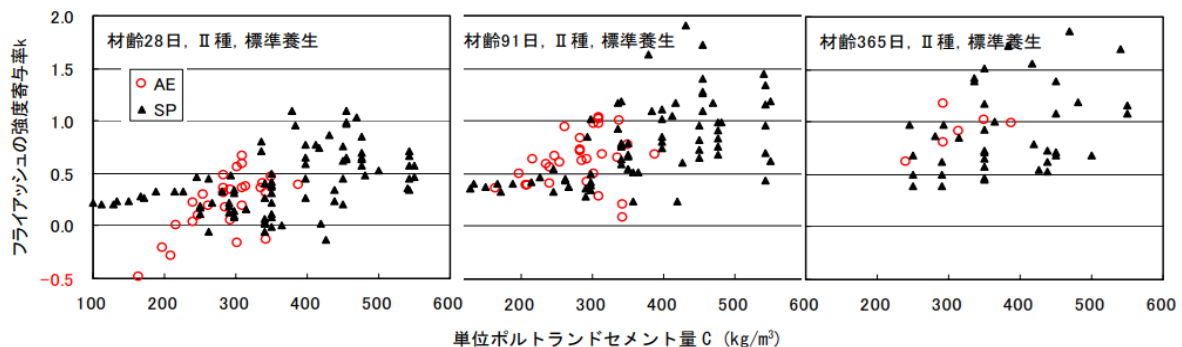
2.3 ISO 規格

ISO 22965-2 では、FA 置換率 33%未満の場合に、置換率および材齢にかかわらず、セメント強度クラスが 32.5 級で $K=0.2$ 、セメント強度クラスが 42.5 級で $K=0.4$ と一定値が推奨値として示されている²⁾。

3. 圧縮強度における FA のセメント有効係数（K 値）

3.1 検討文献

検討文献は、日本国内における FA およびセメントを



図ー1 標準養生における単位ポルトランドセメント量と強度寄与率(K値)の関係⁷⁾

*1 西日本工業大学 デザイン学部建築学科教授 博士（工学）（フェロー会員）

*2 西日本工業大学大学院 環境システム分野専攻

表－1 圧縮強度におけるFAのセメント有効係数（K値）に関する既往文献一覧

文献	FA		調合			試験体	養生条件	材齢 (日)	評価指標	性能評価 条件***				
	種別 *	比表面積 (cm ² /g)	セメント **	FA 置換率 (%)	水結合 材比 (%)					供試体				構造体
										標準 養生	封 緘 気中	環 境 温度	長期 暴露	
3	Ⅱ	4070	N	0, 15～45	35～55	φ100×200	標準養生	28, 91	水結合材比, 材齢, FA置換率	○	—	—	—	—
4	I, Ⅱ	—	N	0, 15～30	40～60	φ100×200	水中(10, 20, 30℃)	7～91	材齢, I種, Ⅱ種, 養生温度	○	—	○	—	—
5	Ⅱ	3890	N	0, 16～33	40～60	φ100×200	標準養生	7～91	材齢, 湿潤養生期間	○	○	—	—	—
6							湿潤, 封緘, 気中							
7	I～Ⅳ	—	N	0 8～70	25～65	φ100×200	標準養生 封緘, 気中	28～365	材齢, Ⅱ種, Ⅳ種, 単位セメント量 標準養生, 封緘養生, 気中養生	○	○	—	—	—
8	I～Ⅳ	2570～10460	N	0～46	25～40	φ100×200	標準養生 封緘, 気中	28～365	材齢, 比表面積, C/FA, 標準養生 封緘養生, 気中養生	○	○	—	—	—
9	Ⅱ	3760	N	0, 15～31	30～65	φ100×200	標準養生	28～365	材齢, 単位セメント量, 標準養生	○	○	—	—	—
10						水中, 封緘, 気中	水中養生, 封緘養生, 気中養生							
11	I Ⅱ Ⅲ	3410～6510	N	0, 15～45	27～79	φ100×200	標準養生 暴露(つくば, 北海道, 九州)	28～ 365, 3 年, 10年	材齢, FA置換率, 屋内暴露・屋外暴露 (つくば・北海道・九州)	—	—	—	○	—
12	Ⅱ	3830	N	0, 15～35	40～60	φ50×100	水中(10, 20, 30℃)	3～91	材齢, 養生温度	○	—	○	—	—
13	Ⅱ	—	N	0, 15～45	40～60	φ50×100	水中(20, 30℃)	7～91	材齢, 養生温度, FA置換率, SiO ₂ /C ₃ S	○	—	○	—	—
14	Ⅱ	4130	N	0, 15	50～60	φ50×100	水中(10, 20, 30℃, 屋外)	28, 91	材齢, 養生温度, 積算温度	○	—	○	—	—
15	CfFA	—	N	0, 20～60	30～60	φ100×200	標準養生	7～91	材齢	○	—	—	—	—
16		2796	N, BB	0, 10～20	37～65	φ100×200	標準養生	7, 28	材齢, セメント水比	○	—	—	—	—
17		1320～4690	N	0, 10～60	30～100	φ100×200	標準養生	28～365	材齢, 比表面積, セメント水比	○	—	—	—	—
18		3820	N	0, 10～30	38～65	φ100×200	標準養生	7～91	材齢	○	—	—	—	—
19		3700～4350	N BB	0, 10～30	33～65	φ100×200	封緘(10, 30℃)	7～91	材齢, 環境温度, FA置換率, セメント	—	○	○	—	—
20									材齢, 環境温度, FA種類, FA置換率					
21		2240～4070	N	0, 20～40	25～45	φ100×200	標準養生	7～91	材齢, 比表面積	○	—	—	—	—
22	—	—	N H	0, 10～40	50	φ50×100	封緘(20℃)	7～91	材齢, 細孔容積率, SiO ₂ /C ₃ S (SiO ₂ +Al ₂ O ₃)/(C ₃ S-C ₂ S)	—	○	—	—	—
23	Ⅱ	3503	N	0, 10～40	50	φ50×100	封緘(20, 40℃)	3～28	材齢, 養生温度, FA反応率	—	○	○	—	—
24	スリー Ⅱ	4150	N	0, 30	27～45	φ100×200 柱(1×1×1m)	標準養生 夏期, 標準期	28, 91	材齢, 単位セメント量, 夏期, 標準期 コンクリート練上り温度・最高温度	○	—	—	—	○
26	I～Ⅳ	—	N	10～70	—	φ100×200	標準養生	28, 91	材齢, FA置換率, 単位セメント量	○	—	—	—	—
27	CfFA	1320～8630	N	0, 10～40	30～65	φ100×200	標準養生	7～365	材齢, 比表面積, FA置換率, セメント水比	○	—	—	—	—
28	Ⅱ	3990～4050	N	20～30	27～48	φ100×200	標準養生 簡易断熱	28～91	材齢, 活性度指数, 養生温度 単位セメント量	○	—	○	—	—
* CFFAは加熱改質FA ** Nは普通ポルトランド, BBは高炉B種 *** ○は検討項目														

表－2 圧縮強度におけるFAのセメント有効係数（K値）に関する影響因子（○は正，●は負の相関）

影響因子			強度 K 値		
			初期	28日	91日 365日
FA 品質	JIS	比表面積	○ ^{8), 17), 21), 27)}		
		28日活性度指数	—	○ ²⁸⁾	—
		91日活性度指数	—	—	○ ²⁸⁾
	JIS 以外	(SiO ₂ +Al ₂ O ₃)/(C ₃ S+C ₂ S)	● ²²⁾		
コンク リート 調合		細孔容積率	● ²²⁾		
		単位セメント量：C	○ ^{7), 24)～26), 28)}		
		FA置換率：FA/(C+FA)	● ^{13), 26), 27)}		
環境 条件		材齢	○ ^{3)～9), 12)～18), 21), 24)～28)}		
		温度（簡易断熱供試体）	○ ^{4), 12)～14), 19), 20), 28)}		
		温度（マスコン構造体）	—	○ ²⁵⁾	
		湿潤状況	—	○ ^{5)～9)}	○ ^{7), 10)}

対象とし、日本建築学会および日本コンクリート工学会のホームページの論文検索システムにより、まず、「FA」、「強度寄与率」、「セメント有効係数」で論文を抽出し、次に、それらの論文の参考文献の中で強度寄与率等が検討されている論文を土木学会も含め選定した。今回対象とした26編の論文^{3)～28)}を表－1に示す。なお、前述の日本建築学会指針の解説の記載の引用文献は文献⁷⁾であり、その結果を図－1に示す。

3.2 影響因子の検討

筆者は、環境条件など条件別に、各文献毎にK値の検討結果を文献²⁹⁾に纏めている。しかし、文献²⁹⁾ではFAのセメント有効係数（K値）に与える影響因子を総合的に分析するまでには至っていない、今回、その影響因子について正の相関になるのか、負の相関になるのか検討を加え表－2に示す。なお、○、●の次の上付き数字は文献番号である。

FAのJIS規格に関しては、比表面積および活性度指数と正の相関があり、比表面積および活性度指数が大きくなるとK値も大きくなる。一方、FAの化学成分では(SiO₂+Al₂O₃)/(C₃S+C₂S)、粒子性状では細孔容積率とは負の相関となり、両者が大きくなるとK値は小さくなる。

コンクリートの調合に関しては、単位セメント量が多くなり、FA置換率が小さくなるほどK値は大きくなる。環境条件に関しては、材齢が長くなるほどK値は大きくなる。また、温度が高く、湿潤状態を長く確保できた場合にK値は大きくなる。

以上のことは、FAのボゾラン反応に影響を及ぼす要因を検討した文献³⁰⁾の「FAの反応性は、ガラス相のCaO量が増加すると高まり、酸可溶性成分(SiO₂+Al₂O₃)量

と良い対応を示し、長期材齢では $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の添加量または $\text{Ca}(\text{OH})_2$ の供給可能量が多いほど高い反応性を示す」、また、文献³¹⁾の「FAのポズラン反応は温度依存性が高く、反応率は養生温度が高い程大きく、水粉体比が高い程大きい」との結果と一致していると考えられる。

4. 水和発熱・中性化・塩分浸透性におけるFAのセメント有効係数(K値)【FAセメントB種を使用した場合】

4.1 検討文献

表-3に、文献^{32)・33)・34)}による、FAセメントB種を使用したコンクリートの場合の水和発熱・中性化・塩分浸透性の評価式を示す。なお、今回は、日本国内におけるFAおよびセメントを対象とし、日本建築学会および土木学会の指針類等の評価式を用いた。

水和発熱に関しては、日本建築学会で2019年に最新版として改定された文献³²⁾を用い、中性化に関しては、主に建築分野で屋外暴露のデータが多く収集されている最新文献³³⁾を用いた。一方、塩分浸透性に関しては、土木学会より提案式が示されている文献³⁴⁾を用いた。

4.2 水和発熱における検討

表-3に示す文献³²⁾の最終断熱最高温度上昇量の係数(a, b)は打込み温度20℃の場合であり、打込み温度10℃、30℃は別途補正係数(p)が示されている。なお、この提案では、普通ポルトランドセメント(以下、N)は単位セメント量400kg/m³の前後で2つの近似式を用いているが、FAセメントB種(以下、FB)は単位セメント量450kg/m³を超える資料がないため単位セメント量250kg/m³以上450kg/m³以下の範囲で1つの近似式を用いている。そこで、これらの係数を用い、単位結合材量(C+FA)とNおよびFBの最終断熱最高温度上昇量 K_h の関係を図-2に示す。

その結果、同一結合材量の場合、最終断熱最高温度上昇量はFBの方がNより小さくなり、このことはFAが普通ポルトランドセメントより水和発熱量が小さいこと

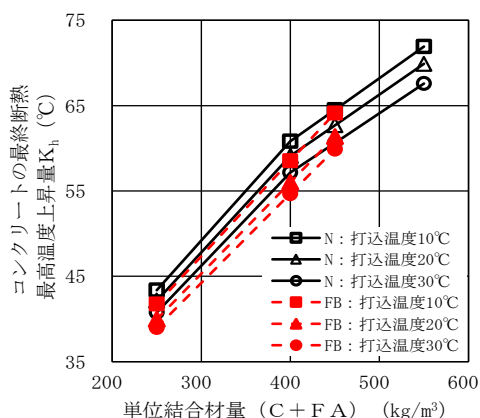


図-2 単位結合材量 (C+FA) とコンクリートの最終断熱最高温度上昇量 K_h の関係

を意味している。なお、N および FB とも打込み温度が低いほど最終断熱最高温度上昇量は大きくなっている。

そこで、最終断熱最高温度上昇量比 (FB/N) を基に前述の(1)式より算出したFAの水和発熱によるK値を求め、単位ポルトランドセメント量 (C) との関係を図-3に示す。なお、FAセメントB種のFA置換率は一般的な使用実績により18%とし、 $K = (\text{FB}/\text{N} - 0.82) / 0.18$ とした。また、図-3には、圧縮強度K値との比較を行うために、日本建築学会のFAを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説(2007)の解説に示されている関連直線を追記した。

その結果、K値は、 $C = 200 \sim 330 \text{ kg/m}^3$ で0.7~0.8とほぼ変わらないのに対し、 $C = 370 \text{ kg/m}^3$ では0.88~0.97と増加している。なお、水和発熱によるK値は、実建物におけるFAセメントB種を使用したマスコンクリートで想定される単位ポルトランドセメント量330 kg/m³以下³⁵⁾

表-3 水和発熱・中性化・塩分浸透性の評価式

文献	特性	評価式																																					
32)	水和発熱	・最終断熱最高温度上昇量 K_h (°C) <table><tr><td rowspan="4">セメント種類</td><td colspan="5">$K_h = p(a(C+FA) + b)$</td></tr><tr><td>a</td><td>b</td><td>a</td><td>b</td><td>p</td></tr><tr><td colspan="2">C+FA</td><td colspan="2">400<C+FA</td><td>打込み温度</td></tr><tr><td colspan="2">$\leq 400 \text{ kg/m}^3$</td><td colspan="2">$\leq 550^* \text{ kg/m}^3$</td><td>10°C 20°C 30°C</td></tr><tr><td>普通ポルトランドセメント (N)</td><td>0.113</td><td>13.9</td><td>0.072</td><td>30.3</td><td>1.029</td><td>1.000</td><td>0.987</td></tr><tr><td>FAセメントB種 (FB)</td><td>0.107</td><td>13.2</td><td>0.107</td><td>13.2</td><td>1.045</td><td>1.000</td><td>0.976</td></tr></table> * FAセメントB種のC+FAの上限値は450kg/m³	セメント種類	$K_h = p(a(C+FA) + b)$					a	b	a	b	p	C+FA		400<C+FA		打込み温度	$\leq 400 \text{ kg/m}^3$		$\leq 550^* \text{ kg/m}^3$		10°C 20°C 30°C	普通ポルトランドセメント (N)	0.113	13.9	0.072	30.3	1.029	1.000	0.987	FAセメントB種 (FB)	0.107	13.2	0.107	13.2	1.045	1.000	0.976
		セメント種類		$K_h = p(a(C+FA) + b)$																																			
				a	b	a	b	p																															
				C+FA		400<C+FA		打込み温度																															
			$\leq 400 \text{ kg/m}^3$		$\leq 550^* \text{ kg/m}^3$		10°C 20°C 30°C																																
普通ポルトランドセメント (N)	0.113	13.9	0.072	30.3	1.029	1.000	0.987																																
FAセメントB種 (FB)	0.107	13.2	0.107	13.2	1.045	1.000	0.976																																
33)	中性化	・FAセメントB種相当の場合 (屋外暴露) $Y = 8.4 \times W / C - 3.574$ (3)																																					
		・普通ポルトランドセメントの場合 (屋外暴露) $Y = 8.7 \times W / C - 3.314$ (4)																																					
		Y : 中性化速度係数 (mm/√年), W : 単位水量 (kg/m ³) C : 単位ポルトランドセメント量 (kg/m ³)																																					
34)	塩分浸透性	・FAセメントB種相当の場合 $\text{Log}_{10} Dk = 3.0 \times W / (C + FA) - 1.9$ (5)																																					
		・普通ポルトランドセメントの場合 $\text{Log}_{10} Dk = 3.0 \times W / C - 1.8$ (6) Dk : 塩化物イオンの見かけの拡散係数 (cm ² /年) C : 単位ポルトランドセメント量 (kg/m ³) W : 単位水量 (kg/m ³), FA : 単位FA量 (kg/m ³)																																					

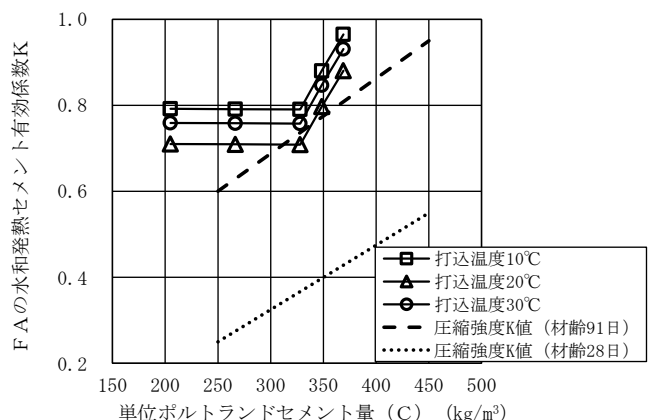


図-3 単位ポルトランドセメント量とFAの水和発熱によるK値の関係

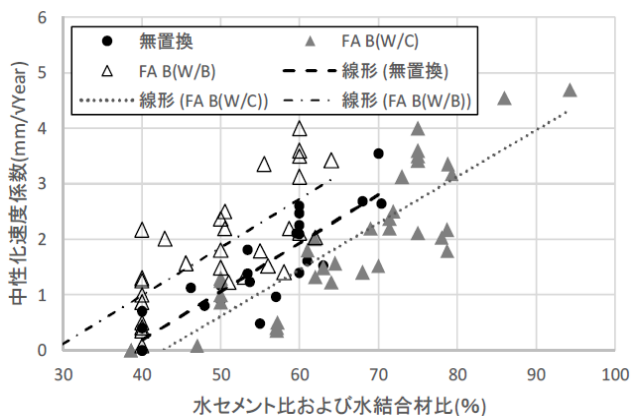


図-4 水ポルトランドセメント比および水結合材比と中性化速度係数の関係（屋外暴露）³³⁾

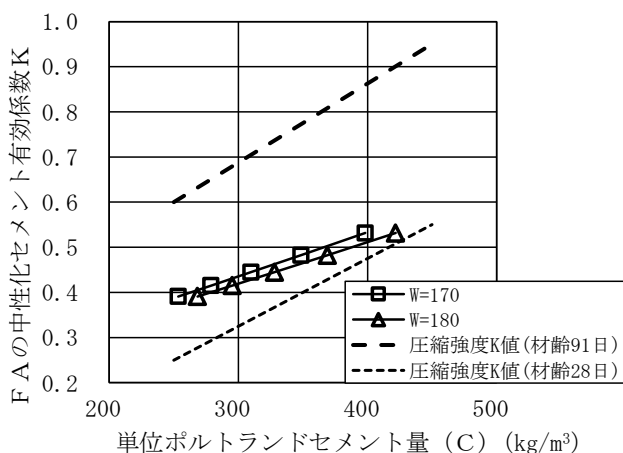


図-5 単位ポルトランドセメント量とFA の中性化によるK値の関係（屋外暴露）

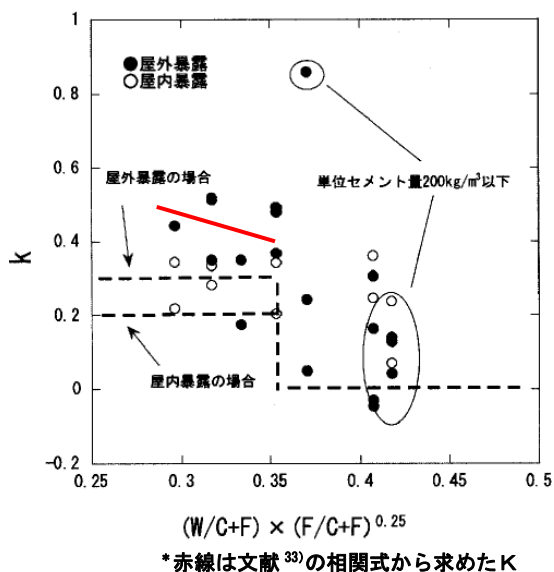


図-6 自然暴露試験の中性化K値（文献³⁶⁾に赤線加筆*）

ではほぼ0.7～0.8程度と一定で、 $C=330\text{kg/m}^3$ 程度で材齢91日の圧縮強度K値とほぼ同等となっている。なお、打込み温度の差異は見受けなかった。

4.3 中性化における検討

文献³³⁾では、屋外暴露試験により、図-4のように水ポルトランドセメント比(%)と中性化速度係数との関係を求め、平均値として表-3に示す相関式(3), (4)を導いている。

そこで、まず、FA セメント B 種を使用したコンクリートの(3)式における複数の水結合材比の場合の中性化速度係数を求め、次に、その中性化速度係数と同じとなる等価セメント量 C_{eq} を(4)式により求める。そして最後に、(1)式により FA の中性化によるセメント有効係数K値を算出し、単位ポルトランドセメント量(C)との関係を図-5に示す。なお、検討条件のうち、FA 置換率は一般的な使用実績により18%とし、その他の条件は下記の通りとした。

- 1) 水結合材比： $W/(C+FA)=0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55$
- 2) 単位水量： $W=170, 180\text{kg/m}^3$

その結果、単位ポルトランドセメント量が多くなるほどK値は大きくなり、 $C=250\sim420\text{kg/m}^3$ で $K=0.39\sim0.53$ 程度である。また、中性化K値は、材齢28日と材齢91日の圧縮強度K値の中間にあり材齢28日のK値に近くなっている。なお、土木系文献を主体として纏められた文献³⁶⁾に今回の建築系を主体とした文献³³⁾の相関式から求めたK値を加筆したものを図-6に示すが、今回の結果は文献³⁶⁾の屋外暴露の場合のほぼ平均的な値となっている。

4.4 塩分浸透性における検討

文献³⁴⁾では、既往のデータに基づく塩化物イオンの見かけの拡散係数推定式として表-3に示す相関式(5), (6)が示されている。

ここで、FA 置換率を18%とした場合の表-3の(5), (6)式の関係の横軸を水ポルトランドセメント比として図-7に示すが、FA の混入により同一水ポルトランドセメント比で $\text{Log}_{10}D_k$ が小さく(D_k が小さく)なり、FA 有の方が塩分浸透抵抗性が大きくなっている。

そこで、塩分浸透性をこの拡散係数で評価することとし、まず、FA セメント B 種を使用したコンクリートにおける複数の水結合材比の場合の塩化物イオンの見かけの拡散係数を(5)式により求め、次に、その拡散係数と同じとなる等価セメント量 C_{eq} を(6)式により求める。そして最後に、(1)式により FA の塩化物イオンの見かけの拡散係数によるK値を算出し、単位ポルトランドセメント量(C)との関係を図-8に示す。なお、検討条件のうち、FA 置換率は一般的な使用実績により18%とし、その他の条件は下記の通りとした。

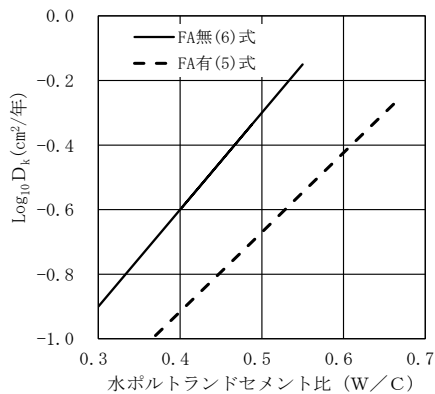


図-7 水ポルトランドセメント比(W/C)と
Log₁₀ D_kの関係

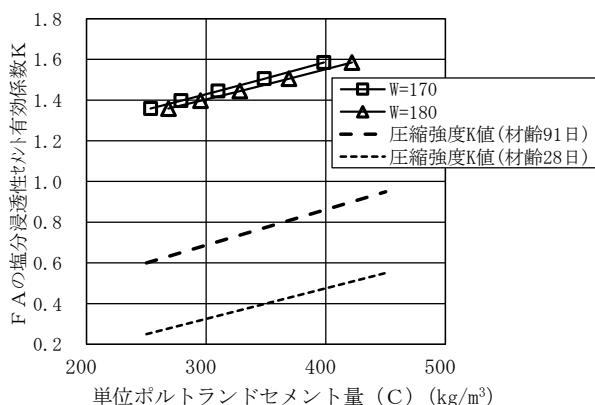


図-8 単位ポルトランドセメント量と
FAの塩分浸透性によるK値の関係

- 1) 水結合材比: $W/(C+FA)=0.35, 0.4, 0.45, 0.5, 0.55$
- 2) 単位水量: $W=170, 180\text{kg/m}^3$

その結果、単位ポルトランドセメント量が多くなるほどK値は大きくなり、 $C=250\sim 420\text{kg/m}^3$ で $K=1.35\sim 1.6$ 程度である。また、塩分浸透性K値は、標準養生圧縮強度におけるK値より大幅に大きく、すべて1.0を超えており、このことはFAの混入により塩分浸透性が大幅に改善されることを示している。なお、文献³⁷⁾では同一水結合材比でもFAコンクリートの方が塩分浸透深さが小さくなる(即ち、 $K>1.0$)との報告がなされている。

5. 結論

FAコンクリートに関して、水和発熱、圧縮強度、中性化、塩分浸透性における日本国内のFAのセメント有効係数(K値)の検討を既往文献により行った。なお、各性能によるK値の評価は、水和発熱は最高温度上昇量、中性化は中性化速度係数、塩分浸透性は塩化物イオンの見かけの拡散係数とした。

その結果、まず、圧縮強度のK値に関する影響因子を正の相関か、負の相関か取りまとめた。次に、FAセメントB種を使用したコンクリートにおけるFAのK値は、

単位ポルトランドセメント量が多くなるほど大きくなることを明らかにするとともに、材齢28日標準養生圧縮強度、材齢91日標準養生圧縮強度、水和発熱、屋外暴露中性化、塩分浸透性に関するK値と単位ポルトランドセメント量の関係を明らかにした。これらの諸性状に関するK値は今後の日本国内におけるFAコンクリートの調合設計法に向け有益な知見であり、今後、海外も含めた検討も必要と考える。

一方で、実際に使用するFAの品質は各火力発電所の操業条件等によって大きく異なると考えられ、FAの品質を影響因子としたデータの蓄積が必要と考える。

参考文献

- 1) Smith I. S. : The design of fly-ash concretes, Proceedings of institution of civil engineers, Vol.36, pp.769-790, 1967.4
- 2) 小川由布子: コンクリートの強度発現に対するセメント有効係数に関する研究事例, コンクリート工学, Vol.57, No.3, 2019.3
- 3) 牧野真之, 江口清, 飛坂基夫, 柳啓: FAを用いたマスコンクリートの諸性状に関する検討, 日本コンクリート工学会年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.103-108, 1998
- 4) 國府勝朗, 上野敦, 平野将司: FAの強度発現に関する養生温度および材齢効果の定量的評価, 日本コンクリート工学会年次論文集, Vol.22, No.2, pp.79-84, 2000
- 5) 呉富栄, 梶田佳寛, 中村成春, 新沼大史: FAを使用したコンクリートの強度発現性に及ぼす養生変化の影響, 日本コンクリート工学会年次論文集, Vol.25, No.1, pp.569-573, 2003
- 6) 石川晋平, 呉富栄, 梶田佳寛, 新沼大史ほか: FAを使用したコンクリートの強度発現に及ぼす湿潤養生の影響, 日本建築学会年次大会, pp.735-736, 2003.9
- 7) 呉富栄, 梶田佳寛, 中村成春: FAの強度寄与率に及ぼすコンクリートの調合および養生の影響, 日本建築学会年次大会, pp.3-4, 2004.8
- 8) 呉富栄, 梶田佳寛, 中村成春: 高強度コンクリートにおけるFAの強度寄与効果, 日本建築学会構造系論文集, No.587, pp.1-6, 2005.1
- 9) 小川浄, 梶田佳寛, 石川嘉崇, 和泉意登志ほか: FAコンクリートを使用した構造体コンクリートの諸性質に関する実験的研究, 日本建築学会年次大会, pp.469-470, 2005.9
- 10) 呉富栄, 梶田佳寛, 石川嘉崇, 和泉意登志ほか: FAコンクリートを使用した構造体コンクリートの諸性質に関する実験的研究, 日本建築学会年次大会,

- pp.471-472, 2005.9
- 11) 岡野智哉, 安田正雪, 小山智幸, 千歩修ほか: FA を使用したコンクリートの長期材齢における強度寄与率の検討, 日本建築学会年次大会, pp.641-642, 2008.9
 - 12) 小川由布子, 宇治公隆, 上野敦: 置換率および養生条件が FA を用いたモルタルの品質に及ぼす影響, 日本コンクリート工学会年次論文集, Vol.30, No.1, pp.207-212, 2008
 - 13) 小川由布子, 寺川麻美, 宇治公隆, 上野敦: モルタルの強度発現性状に置ける FA の性能評価, 土木学会年次学術講演会講演梗概集, V-486, pp.971-972, 2010
 - 14) 小川由布子, 宇治公隆, 上野敦: FA の結合材としての性能に対する養生温度の影響, 土木学会論文集 E2, Vol.67, No.4, pp.482-492, 2011
 - 15) 佐藤嘉昭, 伊藤七恵, 大谷俊浩, 上田賢司ほか: CFaFA コンクリートの耐久性に関する研究, 日本建築学会年次大会九州支部研究報告, 第 49 号, pp.29-32, 2010.3
 - 16) 上田賢司, 佐藤嘉昭, 山田高慶, 大城愛ほか: 改質石炭灰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
 - 17) 伊藤七恵, 佐藤嘉昭, 上田賢司, 大谷俊浩: 高品質 FA を用いたコンクリートの調合設計に関する研究, 日本コンクリート工学会年次論文集, Vol.33, No.1, pp.167-172, 2011
 - 18) 古賀大嗣, 濱永康仁, 伊藤七恵, 上田賢司ほか: CfFA コンクリートの耐久性に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 51 号, pp.33-36, 2012.3
 - 19) 上本洋, 佐藤嘉昭, 上田賢司, 佐藤貴之: コンクリートの温度が加熱改質 FA を混和したコンクリートのフレッシュ性状および硬化性状に及ぼす影響, 日本コンクリート工学会年次論文集, Vol.38, No.1, pp.93-98, 2016
 - 20) 上田賢司, 上本洋, 佐藤嘉昭, 大谷俊浩ほか: コンクリート温度が FA コンクリートの諸性状に及ぼす影響, 日本建築学会年次大会, pp.67-68, 2016.8
 - 21) 上田賢司, 石田征男, 佐藤嘉昭, 大谷俊浩ほか: 加熱改質 FA を用いた高流動コンクリートの基本物性に関する検討, 日本建築学会年次大会, pp.27-28, 2017.8
 - 22) 羽尻雅司, Huynh T. Phat, Bui P. Trinh, 小川由布子ほか: FA モルタルの強度発現におけるセメント有効係数に関する実験的検討, 土木学会中国支部第 69 回研究発表会, V-1, pp.311-312, 2017
 - 23) 三吉勇輝, HUYNH TAN PHAT, 小川由布子: 異なる養生温度における FA モルタルの強度発現性態に対するセメント有効係数および FA の反応率の検討, 土木学会年次学術講演会, V-219, pp.437-438, 2018.8
 - 24) 船本憲治: 高温環境下の FA コンクリートにおける FA の強度寄与率に関する研究, 日本建築学会年次大会, pp.33-34, 2017.7
 - 25) 船本憲治: 高温環境下の高強度・高流動コンクリートにおける FA の強度寄与率および構造体強度補正值に関する研究, 日本コンクリート工学会年次論文集, Vol.40, No.1, pp.117-122, 2018
 - 26) 陶山裕樹, 小山智幸, 高巢幸二, 小山田英弘: 文献調査に基づく FA の強度寄与率を考慮したコンクリートの調合設計方法に関する検討, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 58 号, pp.9-12, 2019.3
 - 27) 佐藤嘉昭, 石田征男, 大谷俊浩: 改質石炭灰の強度寄与率を用いた配調合設計に関する研究, 日本建築学会九州支部研究報告, 第 58 号, pp.13-24, 2019.3
 - 28) 屠強・船本憲治: FA の強度寄与率に関するレディミクストコンクリート工場での実態調査, 日本建築学会九州支部研究報告第 59 号, pp.69-72, 2020.3
 - 29) 船本憲治・屠強: FA の強度寄与率 (K 値) に関する文献調査およびレディミクストコンクリート工場での実態調査, コンクリート工学年次論文集, Vol.42, No.1, pp.53-58, 2020
 - 30) 内川浩: 混合セメントの水和および構造形成に及ぼす混和材の効果 (その 2), セメント・コンクリート, N0.484, pp.81-93, 1987.6
 - 31) 小早川真, 黄光律, 羽原俊祐, 友澤史紀: 日本コンクリート工学会年次論文報告集, Vol.21, No.2, pp.121-126, 1999
 - 32) 日本建築学会: マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針・同解説, 2019
 - 33) 今川健一, 石川嘉崇, 小山明男: 異なる環境に暴露された FA コンクリートの中性化抵抗性に関する一考察, 日本建築学会技術報告集, 第 25 号, 第 61 号, pp.1031-1034, 2019.10
 - 34) 土木学会: コンクリート標準示方書 (設計編), 2017
 - 35) 船本憲治: FA II 種 (JASS5M-401) を使用したコンクリートの調合設計に関する考察, 日本建築学会技術報告集, 第 25 号, 第 61 号, pp.1013-1017, 2019.10
 - 36) 土木学会: 循環型社会に適合した FA 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
 - 37) 和田真平, 阿部道彦, 藤田克己: FA コンクリートの中性化, 水密性および遮塩性に関する実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.121-127, 1998