

論文 フライアッシュのセメント有効係数に基づいたフライアッシュ コンクリートの特性評価

船本 憲治*1

要旨: フライアッシュ (FA) をセメント内割で使用したコンクリートは、長所や短所が存在するが、それらの特性の影響度を総合的に検討した研究は見受けられない。そこで、既往の文献により、水和発熱、強度増進 (標準養生)、中性化に関する FA のセメント有効係数の検討を行った。また、日本建築学会および土木学会で示されている最終断熱温度上昇量の推定式を基に今回算出した FA の水和発熱セメント有効係数により、各特性の影響度を総合的に検討した。その結果、FA のセメント有効係数の値は、単位ポルトランドセメント量が 250~370kg/m³ の範囲では、強度 7 日 ≤ 中性化 ≤ 強度 28 日 < 水和発熱 ≤ 強度 91 日程度となった。

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

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、初期強度が小さいが、ポゾラン反応によって長期強度が増進する。また、FA はセメントより水和による発熱量が小さく、マスコンクリートの水和熱低減に有効である。

一方、コンクリートの中性化速度は、FA のセメント置換により大きくなることが確認されている。

このように、FA コンクリートには長所や短所が存在するが、それらの特性の影響度を総合的に検討した研究は見受けられない。

そこで、今回、既往の文献により、水和発熱、強度増進 (標準養生)、中性化に関する FA のセメント有効係数の検討を行った。また、日本建築学会および土木学会で示されている最終断熱温度上昇量の推定式を基に今回算出した FA の水和発熱セメント有効係数により、各特性の影響度を総合的に検討した。なお、FA のセメント有効係数 K は、下式によるものとする。

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

ここで、 C_{eq} : 等価セメント量 (kg/m³)

C: 単位セメント量 (kg/m³)

K: セメント有効係数

FA: 単位 FA 量 (kg/m³)

2. 水和発熱に関する FA のセメント有効係数の検討

2.1 既往文献の調査

FA 置換率と断熱温度上昇特性を検討した論文は多いが、上記(1)式により最終断熱温度上昇量が等しくなる FA の水和発熱セメント有効係数を直接求めている論文は少なく、以下に、FA の水和発熱セメント有効係数に関する既往文献による知見を示す。

文献 1)では、FA2 種、FA 置換率 30%、単位結合材量

270~350kg/m³ のコンクリートの断熱温度上昇試験により、「フライアッシュの発熱性状に対する影響をセメント換算係数として表せば平均で 0.52 程度である」との報告がなされている。

一方、文献 2)では、FA 置換率 30~70%、水結合材比 33~37%の高流動コンクリートの断熱温度上昇試験により、「フライアッシュをセメントに換算するという方法でフライアッシュがもたらす影響を評価した場合に水和発熱量に対しては 0.37 程度である」との報告がなされている。

2.2 日本建築学会および土木学会基準での記載

日本建築学会のマスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針 (案)・同解説³⁾には、「付 2 断熱温度上昇データベース」として、多くの実験結果から、各種セメントを用いた場合の、任意の単位セメント量および打込み温度における最終断熱温度上昇量を推定するための式が提案されるとともに、具体的な付表が提示され、FA コンクリートに関しては FA セメント B 種の記載がなされている。

なお、上記提案式の作成において参照した資料として、文献 4)および文献 5)が示され、FA セメント B 種に関しては文献 6)のデータも採用されている。

一方、土木学会のコンクリート標準示方書 (設計編)⁷⁾には、コンクリート工学協会の文献 8)を引用し、各種セメントを用いた場合の、任意の単位セメント量および打込み温度における最終断熱温度上昇量を推定するための式が提案され、FA コンクリートに関しては FA セメント B 種の記載がなされている。

そこで、上記の日本建築学会および土木学会の各基準によるコンクリートの最終断熱温度上昇量を、打込み温度および単位結合材量 (C+FA) 毎に表-1 に示す。なお、ここで、普通ポルトランドセメントは N、FA セメ

*1 九州高圧コンクリート工業(株) 取締役 博士 (工学) (正会員)

表-1 コンクリートの最終断熱温度上昇量および
FAの水和発熱セメント有効係数

			打込 温度 (°C)	C+FA (kg/m ³)				
				250	300	350	400	450
日本 建築 学会 文献 3)	最終 断熱温度 上昇量 (°C)	N	10	44.7	50.8	57.0	63.2	69.3
			20	43.9	49.9	56.0	62.0	68.1
			30	43.1	49.1	55.0	60.9	66.9
		F B	10	39.2	45.2	51.3	57.3	63.4
			20	39.5	45.6	51.7	57.8	63.9
			30	38.9	44.9	50.9	56.9	62.9
	最終 断熱温度 上昇比 (F B/N)	10	0.88	0.89	0.90	0.91	0.91	
		20	0.90	0.91	0.92	0.93	0.94	
		30	0.90	0.91	0.93	0.93	0.94	
	FAの 水和発熱セメント 有効係数 K	10	0.32	0.39	0.44	0.48	0.53	
		20	0.44	0.52	0.57	0.62	0.66	
		30	0.46	0.52	0.59	0.64	0.67	
土木 学会 文献 7)	最終 断熱温度 上昇量 (°C)	N	10	45.1	50.9	56.7	62.5	
			20	44.4	50.3	56.3	62.2	
			30	43.7	49.8	55.9	62.0	
		F B	10	37.9	44.7	51.5	58.3	
			20	38.2	45.0	51.7	58.4	
			30	38.6	45.2	51.9	58.5	
	最終 断熱温度 上昇比 (F B/N)	10	0.84	0.88	0.91	0.93		
		20	0.86	0.89	0.92	0.94		
		30	0.88	0.91	0.93	0.94		
	FAの 水和発熱セメント 有効係数 K	10	0.11	0.32	0.49	0.63		
		20	0.22	0.41	0.55	0.66		
		30	0.35	0.49	0.60	0.69		
建築 / 土木	最終 断熱温度 上昇量 (°C)	N	10	0.99	1.00	1.01	1.01	
			20	0.99	0.99	0.99	1.00	
			30	0.99	0.99	0.98	0.98	
		F B	10	1.03	1.01	1.00	0.98	
			20	1.03	1.01	1.00	0.99	
			30	1.01	0.99	0.98	0.97	
	最終断熱温度 上昇比 (F B/N) の比	10	1.04	1.01	0.99	0.97		
		20	1.05	1.03	1.00	0.99		
		30	1.03	1.00	1.00	0.99		
	FAの水和発熱セメント 有効係数Kの差 (建築-土木)	10	0.21	0.07	-0.05	-0.15		
		20	0.22	0.11	0.02	-0.04		
		30	0.11	0.03	-0.01	-0.05		

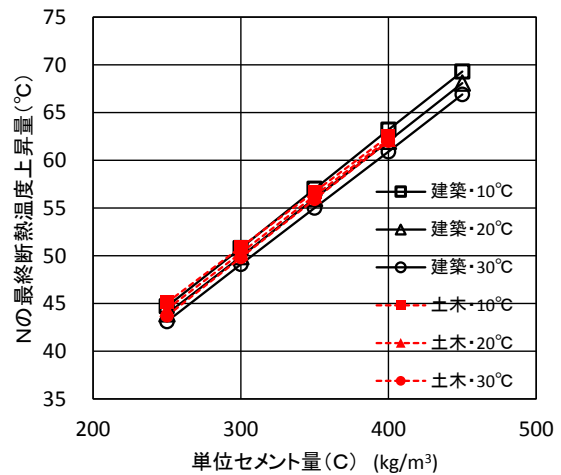


図-1 単位セメント量 (C) と普通ポルトランドセメント (N) の最終断熱温度上昇量の関係

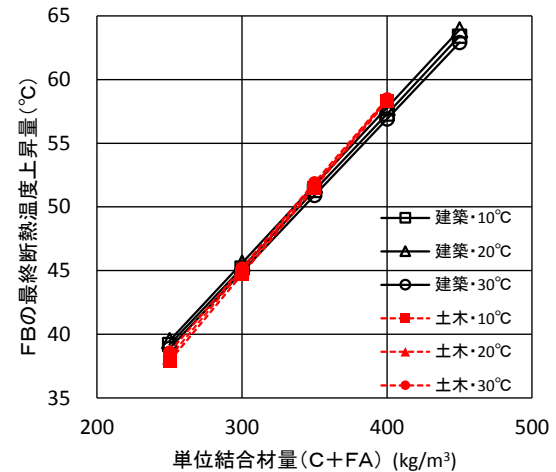


図-2 単位結合材量 (C+FA) と FA セメント B 種 (FB) の最終断熱温度上昇量の関係

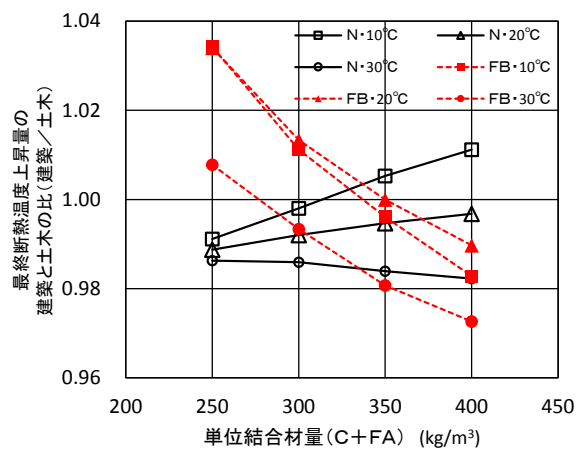


図-3 N および FB における最終断熱温度上昇量の建築と土木の比 (建築/土木)

ント B 種は FB と略記している。

また、今回、それらの各値に基づき前述の式(1)により算出した、最終断熱温度上昇量が等しくなる FA の水和発熱セメント有効係数を表-1 に示した。なお、FA セメント B 種の FA 置換率は、文献 3) には記載されていなかったが、文献 7) での記載および一般的な使用実績により 18% とした。

2.3 日本建築学会および土木学会基準による検討

文献 3) が用いられている建築分野および文献 7) が用いられている土木分野における、普通ポルトランドセメント (N) および FA セメント B 種 (FB) の最終断熱温度上昇量の違いを確認するために、打込み温度毎に、単位セメント量 (C) と普通ポルトランドセメント (N) の最終断熱温度上昇量の関係を図-1 に、単位結合材量 (C+FA) と FA セメント B 種 (FB) の最終断熱温度上

昇量の関係を図-2 に示す。また、各種セメントの場合の最終断熱温度上昇量の土木に対する建築の比を図-3 に示す。なお、建築および土木の単位結合材量の範囲は、各文献の適用範囲を基に、建築は 250~450kg/m³、土木は 250~400kg/m³とした。

図-1 の普通ポルトランドセメント (N) の場合は、建築と土木でほとんど差は見られないが、図-3 を見ると、温度上昇量が全体的に建築の方が土木より低めである。

一方、図-2 の FA セメント B 種 (FB) の場合は、建築と土木で幾分差が見られるが、図-3 に示すように、ほぼ±3%の範囲に入っている。しかし、建築の場合の方が土木の場合と比べて、単位結合材量が 400kg/m³と多くなると温度上昇量が小さくなりその比の低下は 1~3%程度であるのに対し、逆に、単位結合材量が 250kg/m³と少なくなると温度上昇量は大きくなりその比の増加は 3~5%となっている。

単位結合材量 (C+FA) とセメントの違いによる最終断熱温度上昇比 (FB/N) の関係を図-4 に示す。

図-4 によると、建築の場合、最終断熱温度上昇比は、0.82 (K=0) から 1.0 (K=1.0) の範囲に入っており、単位結合材量が多くなるほど、最終断熱温度上昇比は大きくなる傾向にある。一方、打込み温度に関しては、20℃と 30℃では有意な差は見られないが、10℃では、同一単位結合材量において、最終断熱温度上昇比が 0.02~0.03 程度小さくなっている。これは、FA が低温環境下で反応が緩慢となり、最終断熱温度上昇比が小さくなったものと考えられる。

一方、土木の場合も、最終断熱温度上昇比は、0.82 (K=0) から 1.0 (K=1.0) の範囲に入っており、単位結合材量が多くなるほど、最終断熱温度上昇比は大きくなる傾向にある。しかし、土木の場合は建築の場合に比べて、単位結合材量が 250kg/m³と少なくなると、最終断熱温度上昇比は小さくなっている。これは、図-2 から分かるように、土木の場合、単位結合材量が少なくなると FA の水和発熱は抑制され、その結果、最終断熱温度上昇比は小さくなると推定していることによる。

次に、単位ポルトランドセメント量 (C) と FA の水和発熱セメント有効係数 K の関係を図-5 に示すとともに、単位ポルトランドセメント量 (C) と FA の水和発熱セメント有効係数 K の建築と土木の差の関係を図-6 に示す。なお、ここで単位ポルトランドセメント量とは、FA セメント B 種に使用されているポルトランドクリンカー量のことであり、FA 置換率 18%により FA セメント B 種の重量比で 82%とした。

図-5 によると、建築の場合、単位ポルトランドセメント量が多くなるほど、FA の水和発熱セメント有効係数 K は大きくなり、打込み温度 20℃および 30℃の場合、

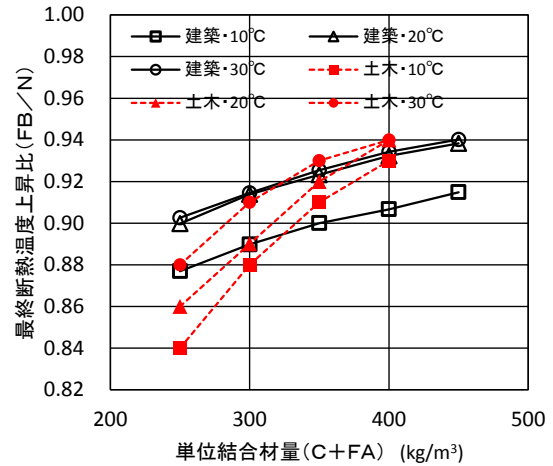


図-4 単位結合材量 (C+FA) とセメントの違いによる最終断熱温度上昇比 (FB/N) の関係

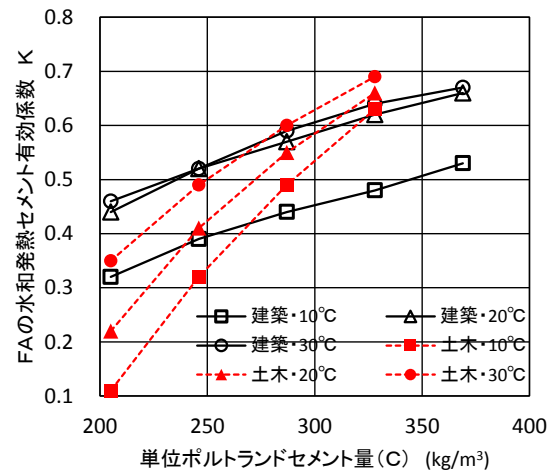


図-5 単位ポルトランドセメント量 (C) と FA の水和発熱セメント有効係数 K の関係

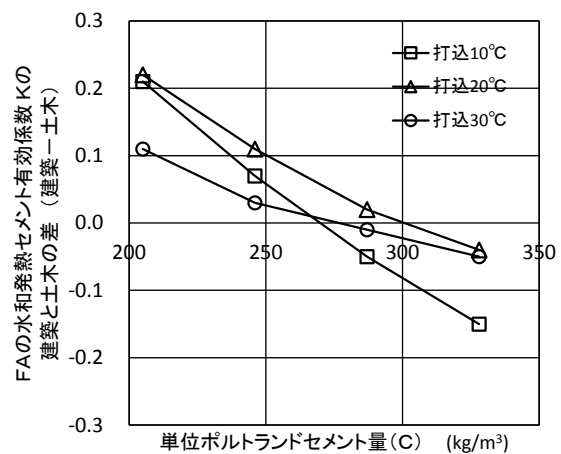


図-6 単位ポルトランドセメント量 (C) と FA の水和発熱セメント有効係数 K の建築と土木の差の関係 (建築-土木)

単位ポルトランドセメント量 $200\sim 370\text{kg/m}^3$ で $K=0.45\sim 0.67$ 程度である。また、打込み温度 10°C では、上記 K 値が打込み温度 20°C および 30°C の場合に比べて 0.12 程度小さくなっている。これは、FA が低温環境下で反応が緩慢となり、FA の水和発熱セメント有効係数が小さくなったものと考えられる。

一方、土木の場合も、単位ポルトランドセメント量が多くなるほど、FA の水和発熱セメント有効係数 K は大きくなり、打込み温度が高いほど上記 K 値は大きくなっている。しかし、土木の場合は建築の場合に比べて、単位ポルトランドセメント量が 200kg/m^3 と少なくなると図-2からも分かるように FA の水和発熱は抑制され、FA の水和発熱セメント有効係数は小さくなっている。

また、図-6によると、FA の水和発熱セメント有効係数は、どの打込み温度においても、単位ポルトランドセメント量が 200kg/m^3 と少ない場合は建築の方が土木より $0.1\sim 0.2$ 程度大きく、単位ポルトランドセメント量が 330kg/m^3 と多い場合は逆に建築の方が土木より $0.05\sim 0.15$ 程度小さくなっている。

なお、文献1)との比較では、FA 置換率が 30% と 18% との違いはあるが、文献1)の単位結合材量 $270\sim 350\text{kg/m}^3$ は単位ポルトランドセメント量 $190\sim 245\text{kg/m}^3$ に相当しており、文献1)の $K=0.52$ は、図-5の両学会基準の上限に位置している。また、文献2)は、FA 置換率が $30\sim 70\%$ と本検討の 18% と大きく異なっており、一概に比較はできないが、文献2)の $K=0.37$ は、図-5の日本建築学会よりも土木学会基準に近い。

3. 強度に関する FA のセメント有効係数の検討

3.1 土木学会基準による検討

土木学会の循環型社会に適合した FA コンクリートの最新利用技術⁹⁾では、多くの実験結果を基に、材齢 7 日、28 日、91 日の標準養生での圧縮強度における FA のセメント換算係数 K 値として、コンクリート配合に関係なく、それぞれ 0.25 、 0.39 、 0.55 が示されている。これは、材齢が長くなるほど、FA の強度セメント有効係数が大きくなっており、このことは、ポズラン反応による長期強度の増進効果が反映されている。

今回、FA の水和発熱特性と強度増進性を総合的に比較するために、単位ポルトランドセメント量と FA の水和発熱セメント有効係数の関係を示した図-5 の土木の場合における打込み温度 20°C の結果に、上記の FA の強度セメント有効係数を追記したものを図-7 に示す。

図-7によると、FA の水和発熱セメント有効係数は、強度的には、単位ポルトランドセメント量が 200kg/m^3 と少ないと材齢 7 日の強度セメント有効係数に近くなり、単位ポルトランドセメント量が 250kg/m^3 で材齢 28 日の

強度セメント有効係数と同程度となり、単位ポルトランドセメント量が 330kg/m^3 と多くなると材齢 91 日の強度セメント有効係数を越えるまでになっている。

3.2 日本建築学会基準による検討

日本建築学会の FA を使用するコンクリートの調査設計・施工指針・同解説¹⁰⁾の解説では、「標準養生での FA の強度寄与率 K 値は、単位ポルトランドセメント量の増加に伴い大きくなり、FA2 種を使用するコンクリートでは単位ポルトランドセメント量 $250\sim 450\text{kg/m}^3$ の場合、材齢 28 日の K 値は約 $0.25\sim 0.55$ 、材齢 91 日の K 値は約 $0.60\sim 0.95$ になる」、「封かん養生および気中養生での FA の K 値は標準養生の約 80% および 45% である」となっており、標準養生における材齢 28 日および 91 日の単位ポルトランドセメント量と FA の強度セメント有効係数の関係が示されている。

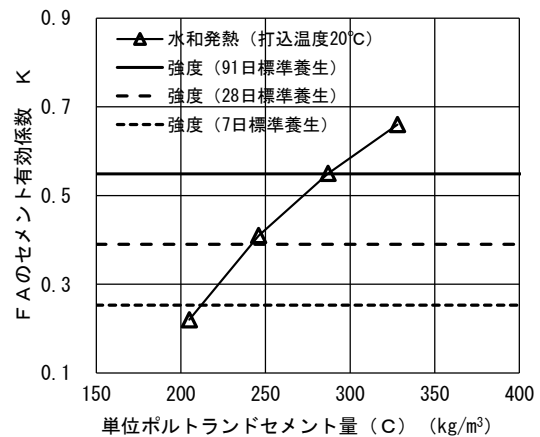


図-7 単位ポルトランドセメント量 (C) と FA のセメント有効係数 K (水和発熱・強度) の関係【土木】

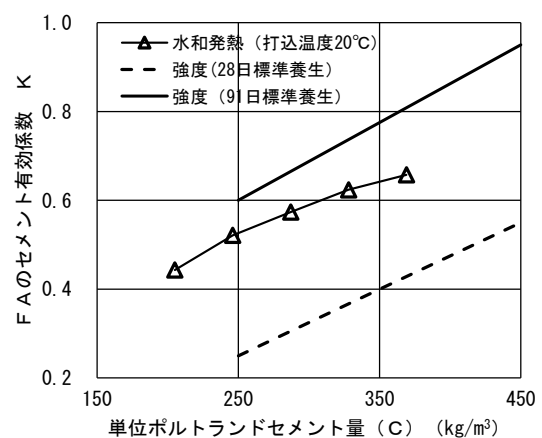


図-8 単位ポルトランドセメント量 (C) と FA のセメント有効係数 K (水和発熱・強度) の関係【建築】

そこで、今回、FAの水和発熱特性と強度増進性を総合的に比較する為に、単位ポルトランドセメント量とFAの水和発熱セメント有効係数の関係を示した図-5の建築の場合の打込み温度20℃の結果に、上記のFAの強度セメント有効係数を追記したものを図-8に示す。

図-8によると、FAの強度セメント有効係数は、水和発熱セメント有効係数と同じように、単位ポルトランドセメント量が多くなるほど大きくなっている。また、FAの水和発熱セメント有効係数は、材齢28日と材齢91日の強度セメント有効係数の中間にあり、材齢91日の方に近い。

4. 中性化に関するFAのセメント有効係数の検討

4.1 土木学会基準による検討

土木学会の循環型社会に適合したFAコンクリートの最新利用技術⁹⁾では、「FAのK値は、養生期間が長いほど大きくなり、セメント量が少ない場合に小さくなる傾向がある」と示され、中性化抵抗性に関するFAのセメント有効係数として、水結合材比およびFA置換率を用い、下式の提案がされている。

【 $(W/(C+FA)) \times (FA/(C+FA))^{0.25} \leq 0.35$ の場合】

K=0.30 (屋外暴露), K=0.20 (屋内暴露)

【 $(W/(C+FA)) \times (FA/(C+FA))^{0.25} > 0.35$ の場合】

K=0 (屋外および屋内暴露)

上記のように、FAの中性化セメント有効係数Kは、 $(W/(C+FA)) \times (FA/(C+FA))^{0.25} \leq 0.35$ の場合で、屋外暴露でK=0.30、屋内暴露でK=0.20であり、図-7と比較すると、水和発熱セメント有効係数に比べて小さく、強度セメント有効係数に対しては材齢28日より小さく材齢7日相当(K=0.25)となっている。

4.2 日本建築学会基準による検討

JASS5(日本建築学会:2015)では、中性化抵抗性は耐久設計基準強度で評価されるようになっており、FAを使用するコンクリートの調合設計・施工指針・同解説¹⁰⁾では、「FA置換率20%以下では耐久設計基準強度の割増しは不要」となっている。そこで、そのことを踏まえ、FAの水和発熱セメント有効係数の関係を示した図-5の建築の場合の打込み温度20℃の結果に、FAの中性化セメント有効係数と考えられる材齢28日標準養生による強度セメント有効係数を追記したものを図-9に示す。

図-9によると、FAの中性化セメント有効係数は、FAの水和発熱セメント有効係数と同じように、単位ポルトランドセメント量が多くなるほど大きくなり、単位ポルトランドセメント量250~450kg/m³の場合、K=0.25~0.55となり、前述のFAの水和発熱セメント有効係数より0.3程度小さい。

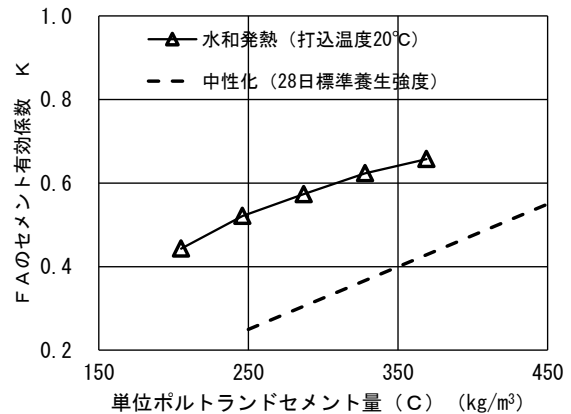


図-9 単位ポルトランドセメント量 (C) と FAのセメント有効係数K (水和発熱・中性化) の関係【建築】

5. 結論

今回、既往の文献により、FAの水和発熱、強度増進、中性化に関するセメント有効係数の検討を行い、以下の知見が得られた。

- (1) FAの水和発熱セメント有効係数K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。また、打込み温度が低いほど、上記K値は小さくなる。なお、日本建築学会基準では、打込み温度20℃と30℃では有意な差が無く、打込み温度20~30℃において、単位ポルトランドセメント量200~370kg/m³でK=0.45~0.67程度である。一方、土木学会基準との比較では、FAの水和発熱セメント有効係数は、どの打込み温度においても、単位ポルトランドセメント量が200kg/m³と少ない場合は建築の方が土木より0.1~0.2程度大きく、単位ポルトランドセメント量が330kg/m³と多い場合は逆に建築の方が土木より0.05~0.15程度小さくなっている。
- (2) 標準養生でのFAの強度セメント有効係数Kは、土木では、材齢7日で0.25、材齢28日で0.39、材齢91日で0.55となっており、前述のFAの水和発熱セメント有効係数は、強度的には、単位ポルトランドセメント量が200kg/m³と少ないと材齢7日のセメント有効係数に近くなり、単位ポルトランドセメント量が250kg/m³で材齢28日のセメント有効係数と同程度になり、単位ポルトランドセメント量が330kg/m³と多くなると材齢91日の値を越えるまでになっている。一方、建築では、標準養生でのFAの強度セメント有効係数は、単位ポルトランドセメント量が多くなるほど大きく、単位ポルトランドセメント量250~450kg/m³の場合、材齢28日で約0.25~0.55、材齢91日で約0.60~0.95となっている。なお、前述のFAの

水和発熱セメント有効係数は、強度的には、材齢 28 日と 91 日のセメント有効係数の中間にあり、材齢 91 日の方に近い。

- (3) FA の中性化セメント有効係数 K は、土木では、 $(W/(C+FA)) \times (FA/(C+FA))^{0.25} \leq 0.35$ の場合で、屋外暴露で $K=0.30$ 、屋内暴露で $K=0.20$ と考えられ、強度セメント有効係数では材齢 7 日相当 ($K=0.25$) となっている。一方、建築の耐久設計基準強度の考え方では、単位ポルトランドセメント量 $250 \sim 450 \text{kg/m}^3$ の場合、 $K=0.25 \sim 0.55$ となり、前述の FA の水和発熱セメント有効係数より 0.3 程度小さい。
- (4) 上記により、FA のセメント有効係数 K の値は、単位ポルトランドセメント量が $250 \sim 370 \text{kg/m}^3$ の範囲では、水和発熱、強度増進（標準養生）、中性化に対して、強度 7 日 \leq 中性化 \leq 強度 28 日 $<$ 水和発熱 \leq 強度 91 日程度となった。

参考文献

- 1) 國府勝郎ほか：フライアッシュを用いたコンクリートの断熱温度上昇，コンクリート工学年次論文集，Vol.23, No.2, pp.103-108, 2001
- 2) 福留和人ほか：フライアッシュを用いた高流動コンクリートの配合設計手法の検討，間組年報，pp.7-16, 1996
- 3) 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（案）・同解説，2008
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編），p.87, 2002
- 5) セメント協会：コンクリート専門委員会報告 F-51, 各種セメントを用いたコンクリートの初期強度発現および断熱温度上昇，p.56, 2002
- 6) 曾根徳明ほか：フライアッシュを大量に用いたコンクリートの諸物性に関する研究（その 2 フライアッシュ置換率と断熱温度上昇特性），日本建築学会大会学術講演梗概集（近畿），Vol.A-1, pp.477-478, 2005
- 7) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編：標準），2012
- 8) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針，2008
- 9) 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
- 10) 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・同解説，2007