

フライアッシュセメント C 種相当配合の発熱特性と圧縮強度 Heat Characteristic and Compressive Strength of Concrete using Fly ash at 25% Substitution of Portland Cement

椎名 貴快*

Takayoshi Shiina

平田 周吾***

Syuugo Hirata

真田 昌慶**

Masanori Sanada

杉本 拓弥***

Takuya Sugimoto

要 約

フライアッシュⅡ種品を普通ポルトランドセメントの25%置換で用いたC種相当コンクリート（水結合材比40～55%）の断熱温度上昇特性および圧縮強度を室内実験で確認した。実験の結果、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} は結合材中のポルトランドセメント量による影響が支配的で、既往文献データを整理した結果では、フライアッシュ置換率によらず、ポルトランドセメント量を用いた線形近似式で概ね推定できることを示した。断熱温度上昇速度係数 r_{AT} は、フライアッシュセメントB種（置換率10～20%）よりも値が小さく、また打込み温度によって大きな影響を受ける結果となった。一方、圧縮強度は従来からの知見と同様に、材齢が大きいほどフライアッシュの強度寄与率が大きく、本実験では材齢28日で0.17、材齢91日で0.50となった。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 実験概要
- § 3. 実験結果
- § 4. 既往研究データの調査
- § 5. 実施工への適用
- § 6. まとめ

§ 1. はじめに

2011年の東日本大震災以降、原子力発電所の稼働制限に伴い、石炭火力による発電量が増加している。2016年度のエネルギー統計（経産省）では、国内発電量の約3割に達しており、主要OECD加盟国（2015年度調査）と比較しても高い（図-1）。このような今般の石炭火力の積極的な稼働もあり、国内での石炭灰発生量は高止まり状態で、民間の調査報告書¹⁾によると、2011年度以降5年連続で1,200万tを超え、過去最大を更新した（図-2）。ただし、この内の約99%（1,225万t）が有効利用され、その大半をセメント原材料（粘土代替）が占めている。一方で、セメント混合材やコンクリート混和材としての利用は合計19.6万t（全有効利用量の1.6%）に留ま

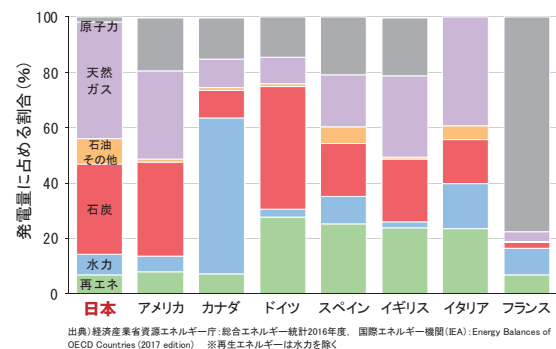


図-1 主要OECD加盟国との発電バランスの比較

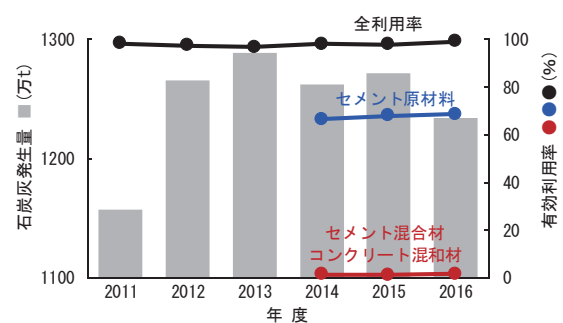


図-2 石炭灰発生量と有効利用率 (年度別)

っており、今後一層の活用促進が望まれる。

一般的に、球状微粒の石炭灰である「フライアッシュ」（以下、FA）を結合材として用いたコンクリートは、水和熱の抑制やポズラン反応による長期強度の増進などを期待できる。また近年では、コンクリート製造に関わるCO₂の排出量削減を目的に、セメント代替としてのFA

* 技術研究所土木技術グループ

** 土木設計部設計一課

*** 西日本(支)

の利用も注目されている。しかし、コンクリート標準示方書²⁾や JCI ひび割れ制御指針³⁾(以下、制御指針)といった現行の指針類では、JIS R 5213 に準拠したフライアッシュセメント B 種(以下、FB 種)についてのみ断熱温度上昇や強度発現に関わる特性式の係数(標準値)が示されているのみで、置換率の高いフライアッシュセメント C 種(以下、FC 種)やそれに相当する結合材に関する情報はまだ十分に整備されていない。

そこで本稿では、FA に JIS A 6201 に適合する II 種品を使用し、FC 種相当まで置換した配合の断熱温度上昇特性や圧縮強度を試験で確認した。また FA 置換率を 0%、15%、25% と増やした時の水和熱の抑制効果や長期強度発現性を比較した。その他、コンクリート用 FA の JIS 改正が行われた 1999 年以降の既往文献データを収集・整理し、FA を用いたコンクリートの断熱温度上昇特性について、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} に着目して調査した。

§ 2. 実験概要

2-1 使用材料

実験では、セメントに普通ポルトランドセメント(密度 3.16 g/cm^3 、比表面積 $3,270 \text{ cm}^2/\text{g}$)を使用し、FA には JIS II 種品を用いた。表一および表二に FA の物理試験結果および化学成分を示す。細骨材は砕砂(石英斑岩、表乾密度 2.57 g/cm^3 、吸水率 1.33%)と高炉スラグ細骨材(表乾密度 2.75 g/cm^3 、吸水率 0.57%)の 2 種類を 70:30 で容積混合して使用し、粗骨材は碎石 2005(石灰石、表乾密度 2.71 g/cm^3 、吸水率 0.23%)を用いた。化学混和剤は、AE 減水剤(高機能タイプ)標準形(I 種)および空気量の調整に AE 剤(I 種)を使用した。AE 剤は高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体を主成分とした FA 用を使用し、FA 未使用配合ではアルキルエーテル系陰イオン界面活性剤を用いた。

2-2 コンクリート配合

表三にコンクリートの配合ケースを示す。FA 置換率 25%(FC 種相当)で水結合材比(以下、W/B)を 40%、45%、50%、55% とした 4 配合のほか、W/B が 45% で

FA 置換率 15%(FB 種相当)と 0% の 2 配合を加えた全 6 配合である。なお、単位水量は 170 kg/m^3 、細骨材率 43.1% に固定した。目標フレッシュ性状は、スランプ $12 \text{ cm} \pm 2.5$ 、空気量 $4.5\% \pm 0.5$ で、コンクリートの打込み温度は 20°C 標準とし、FA25-45 配合のみ 10°C と 30°C も試験を実施した。配合名は「FA (FA 置換率)-(W/B)」を表す。

2-3 練混ぜ手順

恒温恒湿室内(20°C 標準, 60%)において、二軸強制練りミキサ(定格容量 55 L)を用いて、粗骨材、細骨材、粉体(C, FA)を 20 秒間空練りした後、水と化学混和剤を加えて 60 秒間練り混ぜ、掻き落ししてからさらに 60 秒間練って排出した。1 バッチ当たりの練混ぜ量は 35 L とした。

2-4 試験方法

(1) 断熱温度上昇試験

断熱温度上昇試験は JCI-SQA3 に準拠し、試験装置には空気循環式を用いた。試料容積は 35 L(直径 ϕ 400 mm $\times$ 高さ約 280 mm)である。測定は 10 分間隔で 1 日当りの温度変化量が $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 以下になるまで最長 12 日間継続した。断熱温度上昇特性を示す近似曲線は、制御指針³⁾に示された式(1)とした。

表一 フライアッシュの物理試験結果

試験項目		単位	JIS A 6201 II 種規格値	試験値
粉末度		cm^2/g	$\geq 2,500$	4,350
密度		g/cm^3	≥ 1.95	2.32
フロー値比		%	≥ 95	111
活性度 指数	材齢 28 日	%	≥ 80	88
	材齢 91 日	%	≥ 90	97
湿分		%	≤ 1.0	0.1
MB 吸着量		mg/g	—	0.55

備考) 粉末度はブレン方法(比表面積)、MB 吸着量は製造者管理

表二 フライアッシュの化学成分

ig.loss	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
2.38	58.26	29.62	2.74	1.49	0.72	0.20

単位) mass%

表三 コンクリート配合

配合名	打込温度 (℃)			FA 置換率 (%)	W/C (%)	W/B (%)	B (= C + FA) (kg/m³)	s/a (%)	単位量 (kg/m³)						混和剤 (B×%)	
									W	C	FA	S1	S2	G	Ad	AE
FA25-40	20			25	53	40	42 5	43.1	170	319	106	496	226	984	1.1	0.050
FA25-45	10	20	30		60	45	379			284	95	506	235	1008	1.1	0.056
FA25-50	20				67	50	340			255	85	517	237	1030	1.0	0.040
FA25-55					73	55	309			232	77	526	242	1045	0.7	0.044
FA15-45	20			15	53	45	379	43.1	170	322	57	510	235	1015	1.2	0.040
FA00-45				0	45					379	0	516	237	1026	1.3	0.004

備考) FA25-45 の混和剤量は打込温度 20°C での値

$$Q(t) = Q_{\infty} \left[1 - \exp \left\{ -r_{AT}(t - t_{0,Q})^{S_{AT}} \right\} \right] \quad (1)$$

ここで、 t ：材齢（日）、 $Q(t)$ ：材齢 t 日までの断熱温度上昇量（℃）、 Q_{∞} ：終局断熱温度上昇量（℃）、 r_{AT} 、 S_{AT} ：断熱温度上昇速度に関する係数、 $t_{0,Q}$ ：発熱開始材齢（日）である。

(2) 圧縮強度試験

コンクリートの圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠し、脱型後、打込み温度と同温度の水中で試験材齢まで養生した。試験材齢は 7 日、28 日、91 日の 3 材齢である。

§ 3. 実験結果

3-1 断熱温度上昇特性

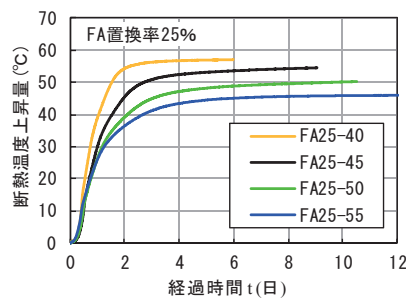
図-3 に断熱温度上昇試験の発熱曲線を示す。表-4 には式(1)に基づき $S_{AT}=1$ に固定して最小二乗法で求めた断熱温度上昇特性式の係数 Q_{∞} 、 r_{AT} 、 $t_{0,Q}$ の同定結果を示す。

(1) 粉体量との関係

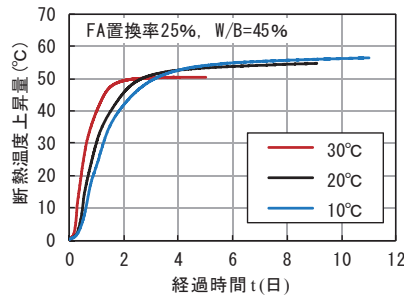
FA のポズラン反応に伴う発熱量はセメントに比してごく微少のため、FA を用いたコンクリートの発熱特性は結合材中のポルトランドセメント量に依存すると考えられる。図-4 にポルトランドセメント量と断熱温度上昇特性式の係数 Q_{∞} 、 r_{AT} 、 $t_{0,Q}$ の関係を示す。また図-5 に

表-4 断熱温度上昇特性式の係数（同定結果）

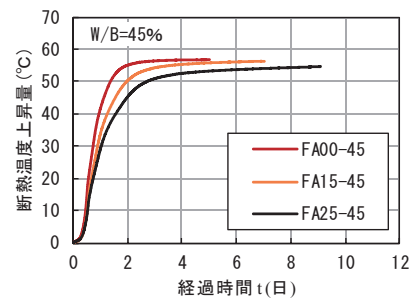
配合名	FA 置換率 (%)	打込 温度 (℃)	断熱温度上昇特性式の係数			
			Q_{∞} (℃)	r_{AT} (1/日)	S_{AT}	$t_{0,Q}$ (日)
FA25-40	25	20	58.1	1.161	1.000	0.094
FA25-45		10	56.2	0.680		0.167
		20	54.3	0.860		0.116
		30	50.6	1.498		0.061
FA25-50		20	49.4	0.806		0.098
FA25-55			45.8	0.810		0.095
FA15-45	15	20	56.3	1.180	1.000	0.123
FA00-45	0		58.0	1.400		0.159



(a) 水結合材比別



(b) 打込み温度別



(c) FA 置換率別

図-3 断熱温度上昇発熱曲線

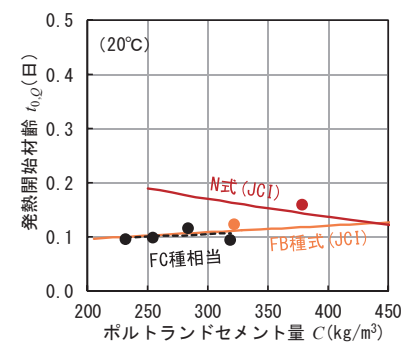
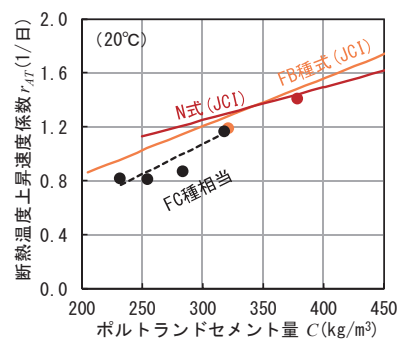
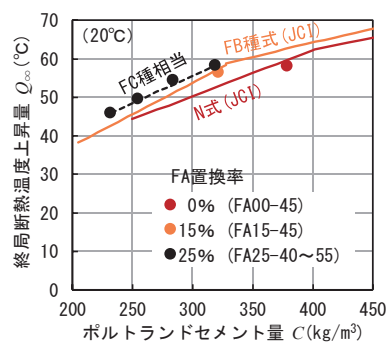


図-4 ポルトランドセメント量と断熱温度上昇特性式の係数との関係

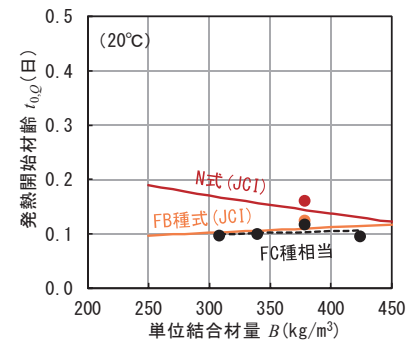
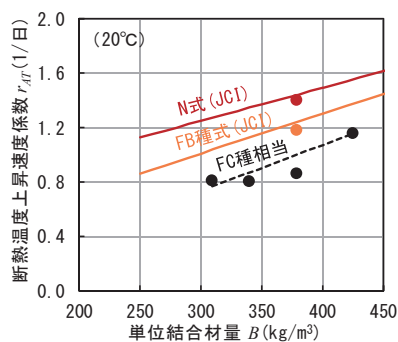
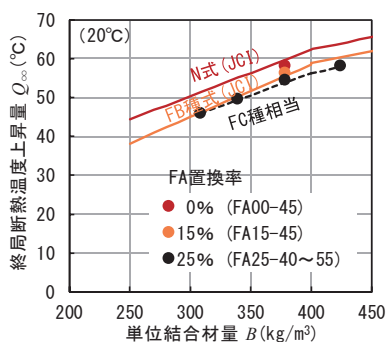
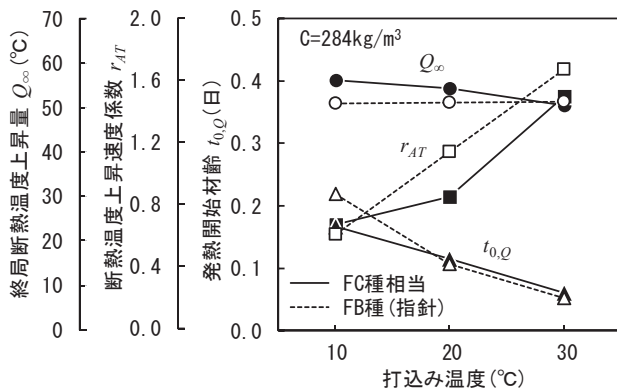


図-5 単位結合材量と断熱温度上昇特性式の係数との関係

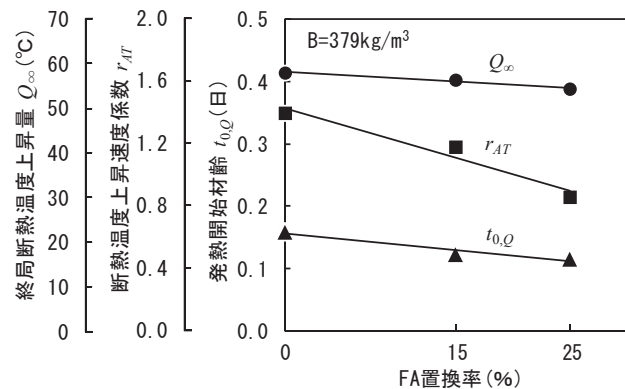
表一五 断熱温度上昇特性式の係数 (FA 置換率 25%) (同定結果)

係数	単位	近似式	C の式 ($232 \leq C \leq 319 \text{ kg/m}^3$)	B の式	
				($309 \leq B \leq 400 \text{ kg/m}^3$)	($400 < B \leq 425 \text{ kg/m}^3$)
Q_{∞}	℃	$Q_{\infty} = a_{AT} + b_{AT} \times T_a$	$a_{AT} = 12.1 + 0.165 \times C$ $b_{AT} = 0.0458 - 1.15 \times 10^{-3} \times C$	$a_{AT} = 10.2 + 0.130 \times B$ $b_{AT} = 0.0452 - 8.58 \times 10^{-4} \times B$	$a_{AT} = 23.2 + 0.0972 \times B$ $b_{AT} = 0.0452 - 8.58 \times 10^{-4} \times B$
r_{AT}	1/日	$r_{AT} = a_{AT} + b_{AT} \times T_a$	$a_{AT} = -0.0262 + 7.48 \times 10^{-4} \times C$ $b_{AT} = -0.0118 + 1.85 \times 10^{-4} \times C$	$a_{AT} = -0.0262 + 5.61 \times 10^{-4} \times B$ $b_{AT} = -0.0118 + 1.39 \times 10^{-4} \times B$	
$t_{0,Q}$	日	$t_{0,Q} = a_{AT} \times \exp(-b_{AT} \times T_a)$	$a_{AT} = 0.360 - 2.93 \times 10^{-4} \times C$ $b_{AT} = 0.0756 - 9.33 \times 10^{-5} \times C$	$a_{AT} = 0.360 - 2.20 \times 10^{-4} \times B$ $b_{AT} = 0.0756 - 7.00 \times 10^{-5} \times B$	

備考) a_{AT} , b_{AT} : 係数, T_a : 打込み温度 (℃), C : ポルトランドセメント量 (kg/m^3), B : 単位結合材量 ($= C + \text{FA}$) (JCI 指針式の W_c と同じ) (kg/m^3)



図一六 打込み温度と断熱温度上昇特性式の係数



図一七 FA 置換率と断熱温度上昇特性式の係数

は単位結合材量との関係を示す。図中には制御指針³⁾の普通ポルトランドセメントの式 (N 式) および FB 種式を併記し、特に FB 種式は FA 置換率 18% として表記したものである。表一五には FA 置換率 25% 配合での断熱温度上昇特性式の係数を示す。FC 種相当配合での断熱温度上昇特性式の係数について、終局断熱温度上昇量 Q_{∞} や発熱開始材齢 $t_{0,Q}$ は FB 種式と概ね同じ挙動であった。一方、断熱温度上昇速度係数 r_{AT} は FB 種よりも小さい傾向となった。

(2) 打込み温度との関係

図一六に、FA25-45 配合でコンクリート打込み温度 10℃, 20℃, 30℃での断熱温度上昇特性式の係数を示す。図中には FA25-45 配合と同じ $C = 284 \text{ kg/m}^3$ での FB 種式 (制御指針³⁾) の値も併記した。 Q_{∞} は打込み温度が高いほどやや減少し、一方で r_{AT} や $t_{0,Q}$ は打込み温度に対する感度が大きく、これらの温度依存性は FB 種と概ね同傾向であった。

(3) FA 置換率との関係

図一七に、W/B45% ($B = 379 \text{ kg/m}^3$ 固定) で FA 置換率を 0%, 15% (FB 種相当), 25% (FC 種相当) とした時の FA 置換率と断熱温度上昇特性式の係数 (Q_{∞} , r_{AT} , $t_{0,Q}$) の関係を示す。断熱温度上昇特性式の係数と FA 置換率との間には相関性があり、特に、断熱温度上昇速度係数 r_{AT} は FA 置換率が増加すると大きく減少する傾向がみられた。つまり、W/B 一定の時、FA 混和による発熱特性への影響は、特に発熱速度に顕著に現れる結果となった。

表一六 圧縮強度試験結果 (水中養生)

配合名	FA 置換率 (%)	B/W	打込み温度 (℃)	圧縮強度 (N/mm^2)		
				7 日	28 日	91 日
FA25-40		2.50	20	34.6	48.7	61.9
FA25-45	25	2.23	10	26.3	38.0	49.3
			20	30.6	42.3	56.4
			30	38.5	55.0	66.0
FA25-50		2.00	20	26.1	36.8	50.1
FA25-55		1.82	20	21.3	30.4	43.7
FA15-45	15	2.23	20	35.5	46.7	58.5
FA00-45	0			47.2	57.5	63.9

備考) 養生中の水温は打込み温度に合わせた

3-2 圧縮強度

表一六に材齢 7 日, 28 日, 91 日での圧縮強度 (水中養生) の試験結果を示す。水温は打込み温度に合わせた。

(1) FA 置換率との関係

図一八に FA 置換率 0%, 15%, 25% での材齢と圧縮強度の関係を W/B45% ($B = 379 \text{ kg/m}^3$ 固定) の配合で示す。従来からの知見と同様に、FA 置換率が大きいくほど、FA のポズラン反応による長期強度の増進傾向が見られた。

(2) 結合材水比との関係

図一九に FA 置換率 25% での結合材水比 (以下、B/W) と圧縮強度の関係を材齢ごとに示す。各材齢での圧縮強度は B/W の増加とともに大きくなり、文献 4) に示された試験データ (FA 置換率 30% 以下) に基づく線形近似

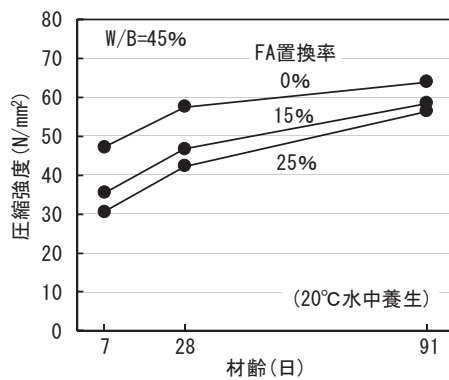


図-8 FA 置換率と圧縮強度

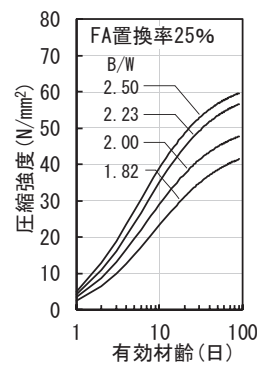


図-11 有効材齢と強度

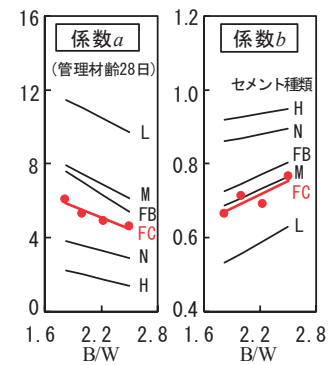


図-12 B/W と係数 a,b

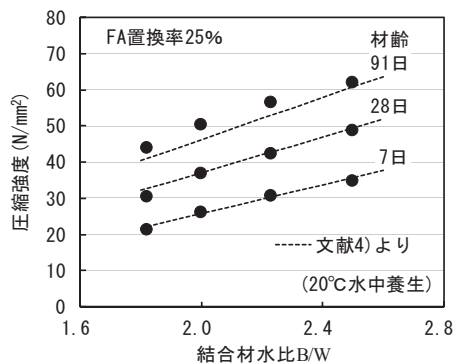


図-9 B/W と圧縮強度

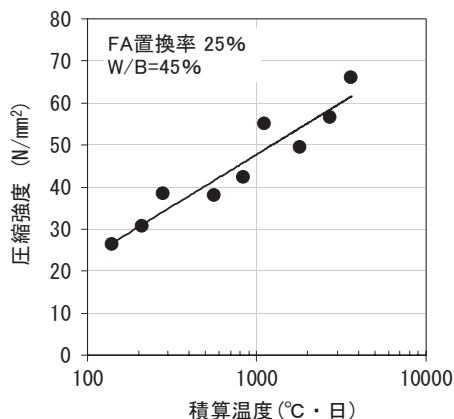


図-10 積算温度と圧縮強度の関係 (FA25-45 配合)

表-7 圧縮強度発現式の各係数 (同定結果)

管理材齢 t_n (日)	$a = \alpha_1 + \beta_1(B/W)$		$b = \alpha_2 + \beta_2(B/W)$		S_f
	α_1	β_1	α_2	β_2	
28	9.56	-2.03	0.443	0.124	0.47
91	15.6	-3.99	0.920	0.0224	

備考) B/W: 結合材水比 (= (C+FA)/W)

表-8 各管理材齢での圧縮強度推定式 (同定結果)

管理材齢 t_n (日)	$f'_c(t_n) = p_1 + p_2(B/W)$ (N/mm²)	
	p_1	p_2
28	-16.9	26.4
91	-3.7	26.5 xx

備考) B/W: 結合材水比 (= (C+FA)/W)

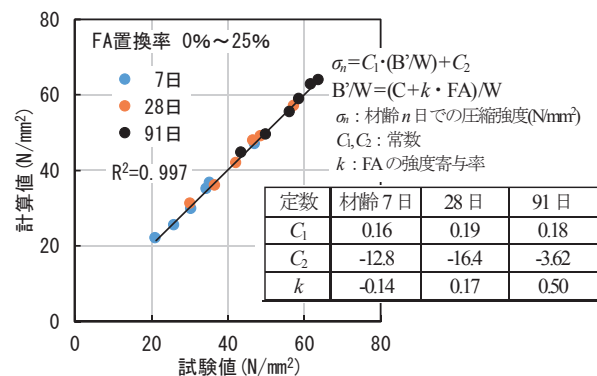


図-13 圧縮強度の試験値と計算値の比較

式と概ね同じ傾向となった。

(3) 温度の影響

図-10 に FA25-45 配合 (FA 置換率 25%, W/B45%) における積算温度と圧縮強度の関係を示す。試験データは、打込み温度や脱型までの環境温度、および脱型後の水中養生温度が 10℃, 20℃, 30℃ (±2℃ 範囲) での供試体の圧縮強度結果を用いた。その結果、フライアッシュ置換率が C 種相当のコンクリートでも積算温度との相関関係が認められることがわかった。

(4) 有効材齢との関係

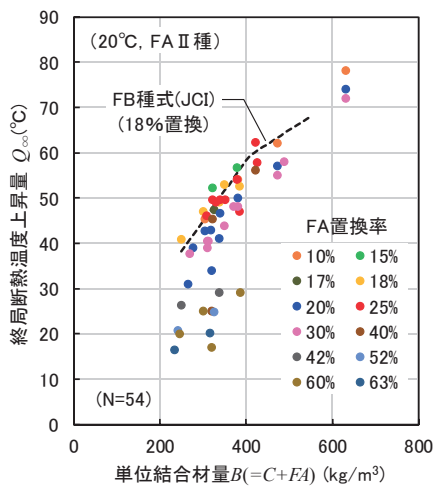
図-11 に FA 置換率 25% 配合での有効材齢と圧縮強度の関係を B/W ごとに示す。また表-7 には式(2)の有効材齢を用いた圧縮強度発現式での各係数を、表-8 に管理材齢 28 日および 91 日での圧縮強度の推定式を示す。

$$f'_c(t_e) = \frac{t_e - S_f}{a + b(t_e - S_f)} f'_c(t_n) \quad (2)$$

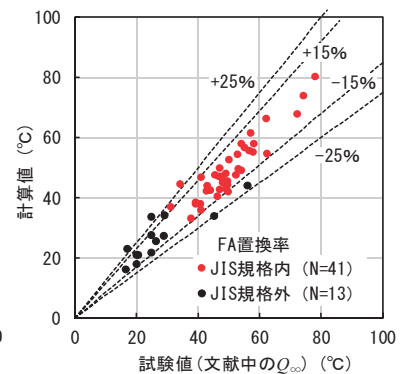
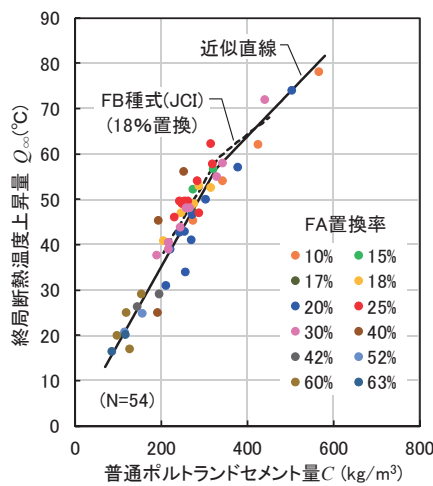
ここで、 t_e : 有効材齢 (日), t_n : 20℃ 水中で養生したコンクリートの管理材齢 (日), $f'_c(t_e)$: 有効材齢 t_e 日における圧縮強度 (N/mm²), a, b : セメント種類および管理材齢に応じた圧縮強度の発現を表す係数, S_f : セメント種類に応じた硬化原点に対応する有効材齢(日), $f'_c(t_n)$: 管理材齢 t_n 日における圧縮強度 (N/mm²) である。図-12 の管理材齢 28 日での B/W と係数 a, b との関係から、係数 a はひび割れ制御指針³⁾ の FB 種 (FB) よりもやや小さく、係数 b は中庸熱ポルトランドセメント (M) に近い値となった。

(5) FA の強度寄与率

FA による強度の増進は、FA の結合材としての性能を



図一14 既往文献における FA コンクリートの終局断熱温度上昇量⁶⁾⁻²³⁾



図一15 文献中の Q_{∞} と計算値の比較

セメント硬化性能に対する比率としたセメント有効係数(以下、強度寄与率) k 値で表せる⁴⁾。この時、有効結合材水比(以下、 B'/W)は $(C+k \cdot FA)/W$ と表記でき、材齢に応じた圧縮強度は $\sigma_n = C_1 \cdot (B'/W) + C_2$ と表せる。式中の常数(C_1, C_2, k)を圧縮強度の材齢ごとに最小二乗法で同定し、同値を用いて算出した各材齢での圧縮強度の計算値と試験値の比較結果を図一13に示す。 R^2 値は0.997で相関性が高く、FAの強度寄与率 k は、材齢7日では-0.14と負値であったが、材齢28日では0.17、材齢91日で0.50となり、材齢の進行に伴い k 値が大きくなった。これはFAのボゾラン反応による効果と言える。なお、土木学会(四国支部)の指針⁵⁾では、材齢28日での k 値は0.2~0.5程度で、配合計算例では実績値として「0.3」(FAⅡ種の時)を用いている。本実験での k 値は同値よりもやや小さいが、使用材料やFA品質、実験データ数等の影響と推測される。

§ 4. 既往研究データの調査

FAを用いたコンクリートの断熱温度上昇特性を把握するため、既往の研究データ⁶⁾⁻²³⁾を収集・整理し、特に終局断熱温度上昇量 Q_{∞} に着目して調査した。文献調査期間は、コンクリート用FAがⅠ~Ⅳ種に等級化された1999年のJIS改正以降とした。またFAはⅡ種適合品で、打込み温度20°Cの条件データのみ対象とした。

図一14に終局断熱温度上昇量 Q_{∞} と単位結合材量Bおよび普通ポルトランドセメント量Cとの関係をFA置換率ごとに色分けして示す。図中のFA置換率は10~63%の12種類で、JIS R 5213に示されたFA置換率(5%を超え30%以下)から外れたデータも含めて表記した。データ整理の結果、FAを用いたコンクリートの Q_{∞} は、B量とは明確な相関性を見出せないものの、C量が同量であればFA置換率の違いによらず概ね等しい値となった。つまり発熱量に対してC量の影響が支配的であった。なお、その関係は制御指針³⁾のFB種式(18%置換)と概

表一9 終局断熱温度上昇量とC量の関係式

区分	FA 置換率	直線近似式 (20°Cの時)	
		$C \leq 328$	$328 < C$
文献整理	10~63% (JIS 外含む)	$Q_{\infty} = 0.169C + 1.27$	$Q_{\infty} = 0.0991C + 24.2$
参考	18% (指針FB種式)	$Q_{\infty} = 0.164C + 4.51$	$Q_{\infty} = 0.0741C + 34.6$

備考) Q_{∞} : 終局断熱温度上昇量 (°C), C: 普通ポルトランドセメント量 (kg/m³)

ね等しく、指針同様にC量が328 kg/m³ (=400 kg/m³ (B量)×0.82 (FA置換率18%より))を境界とした直線的な関係で示すことができた(表一9)。また同式による計算精度は±25%程度であり、FA置換率がJIS規格内では±15%程度であった(図一15)。

§ 5. 実施工への適用

5-1 工事概要

火力発電所設備更新に伴うポンプ場建屋および取水路の建設工事(写真一1)において、塩害対策や副産物利用等を目的にフライアッシュコンクリート(普通ポルトランドセメント使用, FA置換率25%)が採用された。コンクリート製造時におけるFA供給は、生コン工場内の



写真一1 施工状況(ポンプ場建屋)

専用サイロから行うポストミックス方式である。コンクリートの配合は、ポンプ場建屋が 36-12-20N (W/B=45%), 取水路が 33-12-20N (W/B=50%) の 2 配合となっている。ここでは、ポンプ場建屋の施工時におけるフレッシュ性状(荷卸し時)および圧縮強度の試験結果のほか、底版部での躯体温度の測定結果を解析値と比較して示す。

5-2 現場計測結果

(1) フレッシュ性状試験結果

図-16 にコンクリート荷卸し時におけるフレッシュ性状の試験結果を示す。夏期に練上がり温度が最大 34℃ にまで達したものの、スランプおよび空気量は所要の性状範囲内で施工を行うことができた。

(2) 圧縮強度

図-17 に圧縮強度試験の結果を示す。試料の採取はコンクリート 150 m³ に 1 回の頻度で実施し、採取翌日に脱型した後、20℃ 水中で所定の試験材齢まで養生した。試験の結果、圧縮強度は採取時の温度の影響などでややバラッキが見られたものの、所要の圧縮強度を満足する結果を得られた。

(3) コンクリート温度

底版の一部(図-18)を 10 月下旬(日平均気温 14.6℃)に施工した時、スパン中央付近で、底版厚 1.5 m の上下端から各々 250 mm および版厚中央の計 3 箇所ではコンクリート温度を計測し、前記の発熱モデルによる解析精度を検証した。なお、コンクリート打込み後の上面は湛水養生を行った。図-19 に底版部でのコンクリート温度の測定結果と解析結果を比較して示す。解析条件として、コンクリートと地盤の熱特性値(熱伝導率、比熱等)は制御指針³⁾の値を参考とし、断熱温度上昇特性式の係数(Q_{∞} , r_{AT} , $t_{0,Q}$)は表-5 より $C=284 \text{ kg/m}^3$, $Ta=19.6^\circ\text{C}$ (実測)として設定した。解析の結果、比較的高い精度で測定結果を再現することができ、断熱温度上昇特性モデルの係数が適切であったと考える。

§ 6. まとめ

フライアッシュ II 種品をフライアッシュセメント C 種相当の置換率 25% まで用いたコンクリートの断熱温度上昇特性や圧縮強度特性に関して、本実験の範囲内で得られた知見を以下に示す。

- (1) 終局断熱温度上昇量 Q_{∞} には結合材中のセメント量が支配的で、既往文献データの収集・整理の結果、FA 置換率によらず、普通ポルトランドセメント量と線形近似性が認められた。
- (2) W/B 一定の時、FA 混和による発熱への影響は、発熱速度に対して顕著に現れた。
- (3) 既往の結果と同様に、材齢が大きいほど FA の強度寄与率が大きくなり、本実験では材齢 28 日で 0.17, 材齢 91 日で 0.50 であった。

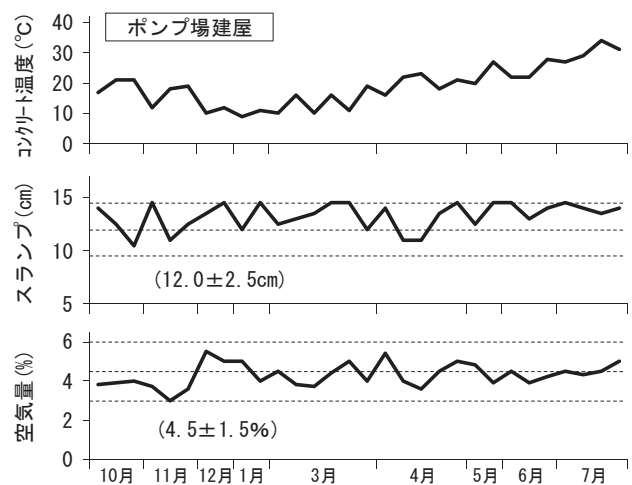


図-16 フレッシュ性状試験結果

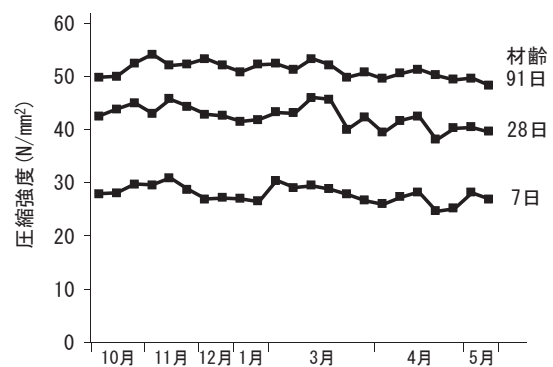


図-17 圧縮強度試験結果

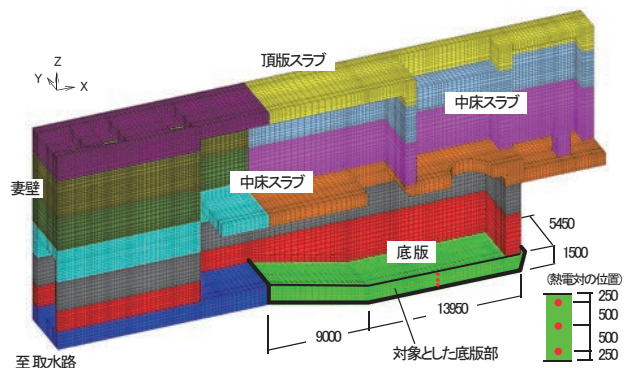


図-18 火力発電所ポンプ場概略図(打設リフト別)

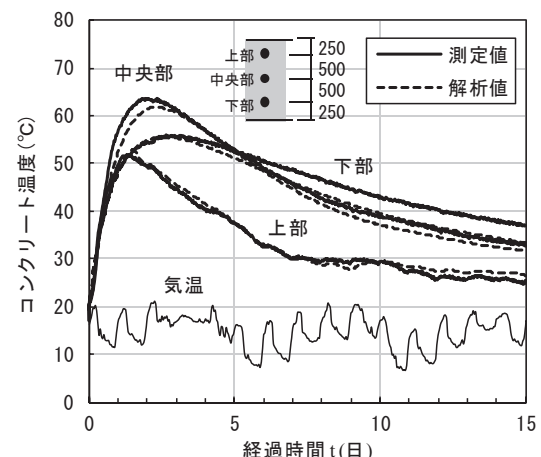


図-19 底版コンクリート温度の実測値と解析の比較

謝辞. 本稿の執筆にあたりご指導ご協力を賜りました電源開発(株)の関係者様には心より御礼申し上げます.

参考文献

- 1) 石炭エネルギーセンター：石炭灰全国実態調査報告書（平成 26～28 年度実績）
- 2) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕
- 3) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016
- 4) 土木学会：C.L132 号「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」, 2009
- 5) 土木学会四国支部：四国版フライアッシュを結合材として用いたコンクリートの配合設計・施工指針, 2016. 3
- 6) セメント協会：F-50 コンクリートの断熱温度上昇試験方法に関する研究, 1999. 3
- 7) セメント協会：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, 2002. 3
- 8) セメント協会：F-59 各種セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇に関する研究, 2014. 3
- 9) 國府勝郎, 佐々木和徳, 上野敦, 宇治公隆：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
- 10) 原田奈央, 國府勝郎, 上野敦, 宇治公隆：フライアッシュコンクリートの断熱温度上昇と強度発現性に及ぼす練上り温度の影響, 土木学会第 57 回年次学術講演会, V-743, pp. 1485-1486, 2002
- 11) 嵩英雄, 川口徹, 浜島雅尚, 江口清, 曾根徳明, 守屋健一：マスコンクリート部材におけるフライアッシュコンクリートの諸性質に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 619 号, pp. 13-19, 2007. 9
- 12) 吉岡慧, 吉田和隆, 吉武勇, 浜田純夫, 北原敦志：簡易試験による HVFA コンクリートの断熱温度上昇量の推定, 材料, Vol. 57, No. 5, pp. 509-514, 2008. 5
- 13) 高橋昭裕, 高橋和之, 齊藤直, 吉武勇：断熱温度上昇量と強度性状におよぼすフライアッシュの影響に関する基礎実験, セメント・コンクリート論文集, No. 62, pp. 262-268, 2008. 2
- 14) 阿部徹, 山本正司, 吉武勇, 高橋和之, 齊藤直：フライアッシュ原粉を混和したコンクリートの現場実証による評価, 土木施工, pp. 49-54, 2009. 12
- 15) 細川大介, 室野井敏之, 竹内直也, 溝渕利明：フライアッシュ多量添加によるコンクリートの水和熱抑制効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 33, No. 1, pp. 179-184, 2011
- 16) 中里剛, 中山英明：石灰石骨材と用いたマスコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 1294-1299, 2012
- 17) 橋本亮良, 溝渕利明：フライアッシュ多量添加によるコンクリートのひび割れ抑制効果に関する検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 34, No. 1, pp. 1360-1365, 2012
- 18) 中村正義, 朝比奈俊和, 岡田裕, 岡田茂, 峯秀和：フライアッシュのマスコンクリートへの適用に関する研究（その 1 断熱温度上昇および簡易断熱試験）, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 2013. 8
- 19) 齊藤敏樹, 毛馬内学, 加藤政治：各種低発熱型セメントを用いたコンクリートの耐久性について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 1, pp. 667-672, 2015
- 20) 藤崎明, 片岡義信, 森澤勝弘, 島弘：高強度コンクリートに結合材としてフライアッシュを使用した場合の諸性状, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp. 1467-1472, 2016
- 21) 石川学, 石川嘉崇, 中村英佑：単位水量低減効果を見込んだ早強セメントをベースセメントとしたフライアッシュコンクリートの基礎物性, コンクリート工学年次論文集, Vol. 38, No. 1, pp. 87-92, 2016
- 22) 宇部三菱セメント：技術資料第 6 版, 2013. 4
- 23) 太平洋セメント：セメント総合技術資料第 2 版, 2016