

# 論文 フライアッシュをC種相当まで用いたコンクリートの断熱温度上昇特性と圧縮強度について

椎名 貴快\*1・真田 昌慶\*2・平田 周吾\*3・今岡 知武\*4

**要旨:** フライアッシュ(以下, FA)を置換率 25%の C 種相当まで用いたコンクリート(W/B: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。終局断熱温度上昇量  $Q_{\infty}$ は, 単位ポルトランドセメント量に対して JCI 指針のフライアッシュセメント B 種(置換率 18%)と概ね同じ傾向で, 結合材中のポルトランドセメントによる影響が支配的であった。また既往文献データを整理した結果,  $Q_{\infty}$ は FA 置換率によらず, 単位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。圧縮強度は従前と同様に, 材齢が大きいほど FA 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。

**キーワード:** フライアッシュ, C 種, 断熱温度上昇特性, 圧縮強度, 強度寄与率

## 1. はじめに

2011 年の東日本大震災以降, 原子力発電所の停止に伴う石炭火力発電所の積極的な稼働や新增設により, 国内での石炭灰の発生量は増加傾向である。民間の調査報告書<sup>1)</sup>によると, 2016 年度の石炭灰発生量は 1,234 万 t (2011 年度比 76 万 t 増)で, 震災以降 5 年連続で 1,200 万 t を超えた。ただし, この内の約 99%(1,225 万 t)が有効利用されており, 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%)に留まっており, 一層の活用促進が望まれる。

一般的に, 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, 水和熱の抑制やポゾ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二酸化炭素の排出量削減を目的に, セメント代替としての FA の利用も注目されている。しかし, 現行の指針類<sup>2,3)</sup>では, フライアッシュセメント B 種(以下, FB 種)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)が示されており, 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十分ではない。

そこで本稿では, FA に JIS A 6201 に適合する II 種を使用し, FC 種相当の 25%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。この他, 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  $Q_{\infty}$ に着目して調査した。

## 2. 実験概要

### 2.1 使用材料

本実験では, セメントに普通ポルトランドセメント(密度 3.16g/cm<sup>3</sup>, 比表面積 3,270cm<sup>2</sup>/g)を使用し, FA には JIS の II 種を用いた。表-1 および表-2 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 2.57g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 1.33%)と高炉スラグ細骨材(表乾密度 2.75g/cm<sup>3</sup>, 吸水率 0.57%)の 2 種類を 70:30 で容積混合して使用し, 粗骨材は砕石 2005 (石灰石, 表乾密度 2.71g/cm<sup>3</sup>, 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。

表-1 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 <sup>2</sup> /g	≥2,500	4,350
密度	g/cm <sup>3</sup>	≥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-2 フライアッシュの化学成分 (mass%)

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

\*1 西松建設(株) 技術研究所土木技術グループ上席研究員 工修 (正会員)

\*2 西松建設(株) 土木設計部設計 1 課副課長 工修

\*3 西松建設(株) 西日本支社課長

\*4 電源開発(株) 土木建築部ダム整備室 工修

表-3 コンクリート配合

配合名	打込温度 (°C)	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	425	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	379	0	516	237	1026	1.3

2.2 コンクリート配合

表-3 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, 単位水量を 170kg/m³, 細骨材率を 43.1%に固定した。目標フレッシュ性状は, スランプ 12cm±2.5, 空気量 4.5%±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 (容量 55L) 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 バッチの練混ぜ量は 35L 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 35L (直径 φ400mm × 高さ約 280mm) である。測定は 10 分間隔で 1 日当りの温度変化量が ±0.1°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, ひび割れ制御指針<sup>3)</sup>に示された式(1)とした。

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

ここで,  $t$ : 材齢(日),  $Q(t)$ : 材齢  $t$  日までの断熱温度上昇量(°C),  $Q_{\infty}$ : 終局断熱温度上昇量(°C),  $\gamma_{AT}$ ,  $S_{AT}$ : 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, 28 および 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-1, 図-2 および図-3 に, 断熱温度上昇試験の発熱曲線を示す。また表-4 には式(1)に基づき  $S_{AT}=1$  に固

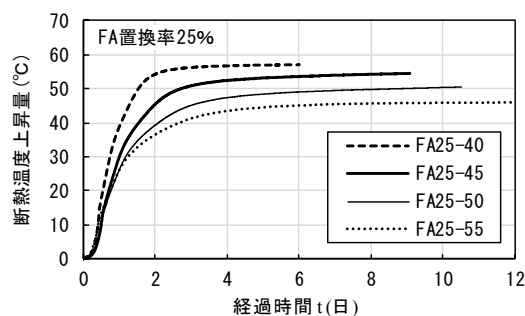


図-1 断熱温度上昇発熱曲線 (水結合材比)

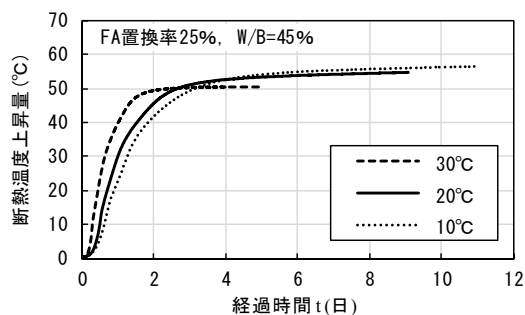


図-2 断熱温度上昇発熱曲線 (打込み温度)

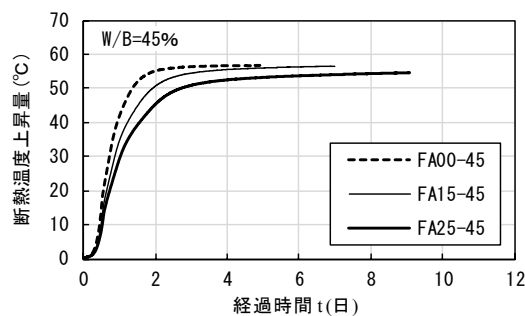


図-3 断熱温度上昇発熱曲線 (FA 置換率)

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 (°C)	断熱温度上昇特性式の係数			
			$Q_{\infty}$ (°C)	$\gamma_{AT}$ (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	1.000	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	20	58.0	1.400	1.000	0.159

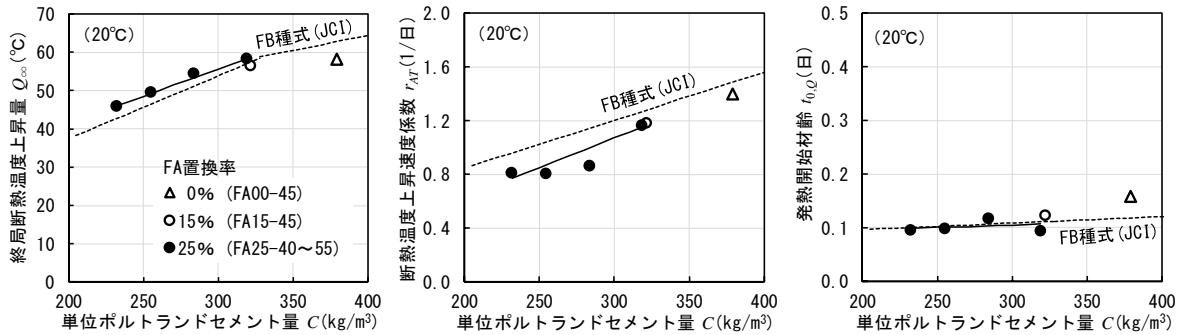


図-4 単位ポルトランドセメント量と断熱温度上昇特性式の係数との関係

表-5 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 ≤ C ≤ 319kg/m <sup>3</sup> )	B の式	
				(309kg/m <sup>3</sup> ≤ B ≤ 400kg/m <sup>3</sup> )	(400kg/m <sup>3</sup> < B ≤ 425kg/m <sup>3</sup> )
$Q_{\infty}$	°C	$Q_{\infty}=a_{AT}+b_{AT}\times T_a$	$a_{AT}=12.1+0.165\times C$ $b_{AT}=0.0458-1.15\times 10^{-3}\times C$	$a_{AT}=10.2+0.130\times B$ $b_{AT}=0.0458-8.60\times 10^{-4}\times B$	$a_{AT}=23.2+0.0972\times B$ $b_{AT}=0.0458-8.60\times 10^{-4}\times B$
$r_{AT}$	1/日	$r_{AT}=a_{AT}+b_{AT}\times T_a$	$a_{AT}=-0.0262+7.48\times 10^{-4}\times C$ $b_{AT}=-0.0118+1.85\times 10^{-4}\times C$	$a_{AT}=-0.0262+5.61\times 10^{-4}\times B$ $b_{AT}=-0.0118+1.39\times 10^{-4}\times B$	$a_{AT}=-0.0262+5.61\times 10^{-4}\times B$ $b_{AT}=-0.0118+1.39\times 10^{-4}\times B$
$t_{0,Q}$	日	$t_{0,Q}=a_{AT}\times \exp(-b_{AT}\times T_a)$	$a_{AT}=0.360-2.93\times 10^{-4}\times C$ $b_{AT}=0.0756-9.33\times 10^{-5}\times C$	$a_{AT}=0.360-2.20\times 10^{-4}\times B$ $b_{AT}=0.0756-7.00\times 10^{-5}\times B$	$a_{AT}=0.360-2.20\times 10^{-4}\times B$ $b_{AT}=0.0756-7.00\times 10^{-5}\times B$

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

定して最小二乗法により求めた断熱温度上昇特性式の係数 ( $Q_{\infty}, r_{AT}, t_{0,Q}$ ) の同定結果を示す。

### (1) 単位ポルトランドセメント量との関係

FA のポズラン反応は、セメントの水和反応に比べて非常に緩やかに進行するため、FA を用いたコンクリートの発熱特性は結合材中のセメント量に依存すると考えられる。図-4 に単位ポルトランドセメント量と断熱温度上昇特性式の係数  $Q_{\infty}, r_{AT}, t_{0,Q}$  の関係を示す。図中の FB 種式は、JCI 制御指針<sup>3)</sup>の式を、FA 置換率 18%として単位ポルトランドセメント量に換算して表記した。表-5 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 種相当配合での終局断熱温度上昇量  $Q_{\infty}$  は FB 種式と概ね同じ傾向となり、単位ポルトランドセメント量の影響が支配的であった。一方、断熱温度上昇速度係数  $r_{AT}$  は単位ポルトランドセメント量と相関があるものの、FB 種式よりも値が小さく、結合材中の FA 量による影響ではないかと考えた。発熱開始材齢  $t_{0,Q}$  は単位ポルトランドセメント量と相関はあるものの、その影響はごく小さい結果であった。

### (2) 打込み温度との関係

図-5に、FA25-45 配合でコンクリート打込み温度 10, 20, 30°C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)の値も併記した。 $Q_{\infty}$ 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-6に、W/B45% ( $B=379\text{kg/m}^3$ )でFA置換率を0%, 15% (FB種相当), 25% (FC種相当)とした時のFA置

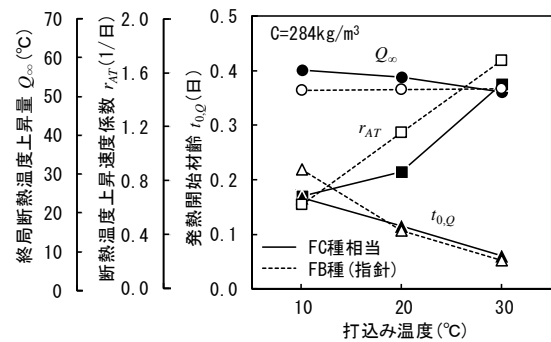


図-5 打込み温度と断熱温度上昇特性式の係数

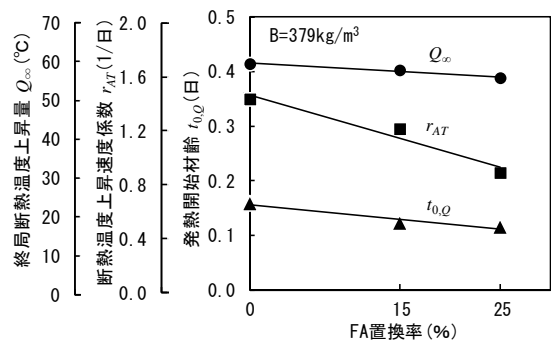


図-6 FA 置換率と断熱温度上昇特性式の係数

換率と断熱温度上昇特性式の係数 ( $Q_{\infty}, r_{AT}, t_{0,Q}$ ) 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(B 固定)の時、FA 混和による発熱特性への影響は、発熱速度に顕著に現れる結果となった。

### 3.2 圧縮強度

表-6に材齢7日、28日、91日での圧縮強度の試験結果を示す。養生方法は各打込み温度環境の水中養生とした。

表-6 圧縮強度試験結果

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

養生方法: 各打込温度環境の水中養生

(1) FA 置換率との関係

図-7にFA置換率0%, 15%, 25%での材齢と圧縮強度の関係をW/B45%(B=379kg/m<sup>3</sup>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-8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に基づく線形近似式と概ね同じ傾向となった。

(3) 有効材齢との関係

図-9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°C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/mm<sup>2</sup>)、 $a, b$ : 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/mm<sup>2</sup>)である。図-10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<sup>3)</sup>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。

(4) 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<sup>4)</sup>。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-11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

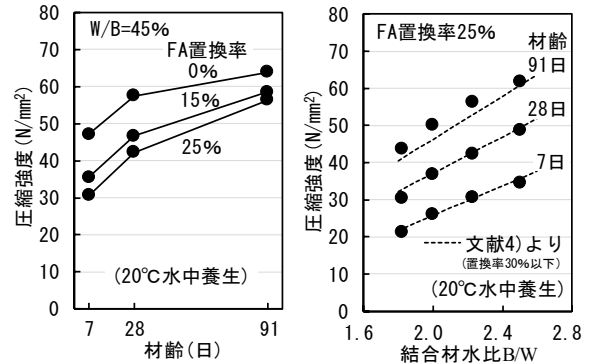


図-7 FA置換率と圧縮強度 図-8 B/Wと圧縮強度

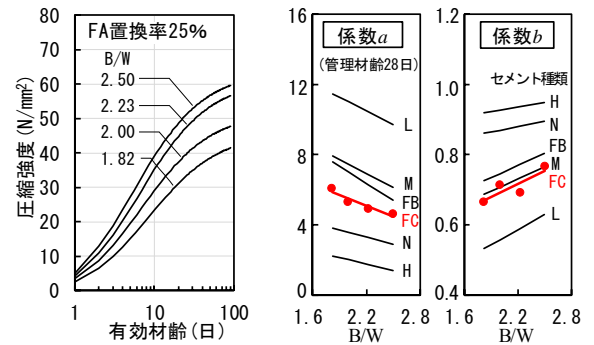


図-9 有効材齢と強度 図-10 B/Wと係数 a, b

表-7 圧縮強度発現式の各係数(同定結果)

管理材齢 $t_n$ (日)	$a = \alpha_1 + \beta_1(B/W)$		$b = \alpha_2 + \beta_2(B/W)$		$S_f$
	$\alpha_1$	$\beta_1$	$\alpha_2$	$\beta_2$	
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/mm <sup>2</sup> )	
	$p_1$	$p_2$
28	-16.9	26.4
91	-3.7	26.5

備考) B/W: 結合材水比(=(C+FA)/W)

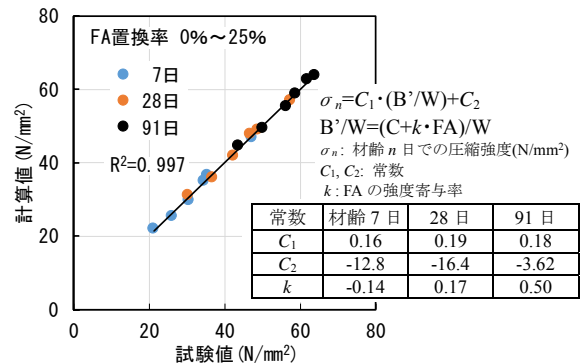


図-11 圧縮強度の試験値と計算値の比較

となり、材齢の進行に伴い $k$ 値が大きくなった。これはFAのポズラン反応による効果と考える。なお、土木学会(四国支部)の指針<sup>5)</sup>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(FA II種の時)を用いている。本実験での $k$ 値はやや小さいが、使用材料やFA品質、実験データ数等の影響と推測される。

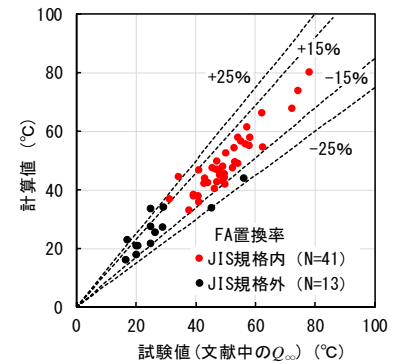
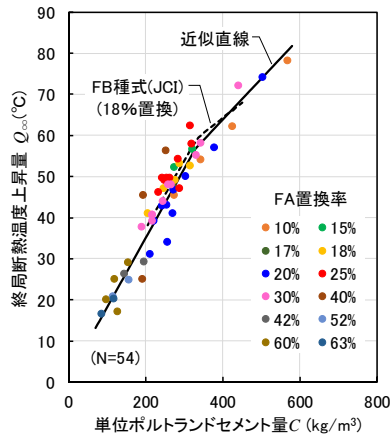
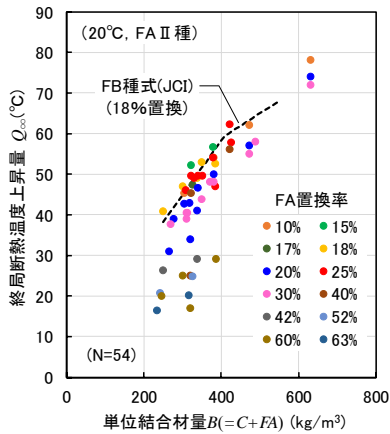


図-12 既往文献における FA コンクリートの終局断熱温度上昇量 (6-23)

図-13 文献中の  $Q_{\infty}$  と計算値の比較

#### 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  $Q_{\infty}$  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-12 に  $Q_{\infty}$  と単位結合材量 B および単位ポルトランドセメント量 C との関係を示す。図中の FA 置換率は 10~63% の 12 種類で、JIS の FA 置換率 (5% を超え 30% 以下) から外れたデータも含む。FA を用いたコンクリートの  $Q_{\infty}$  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<sup>3)</sup>の FB 種式 (18% 置換) と概ね等しく、指針同様に C 量が 328 kg/m<sup>3</sup> (=400 kg/m<sup>3</sup> (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-9)。また同式による計算精度は ±25% 程度で、FA 置換率が JIS 規格内では ±15% 程度であった (図-13)。

表-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)  $Q_{\infty}$ : 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/m<sup>3</sup>)

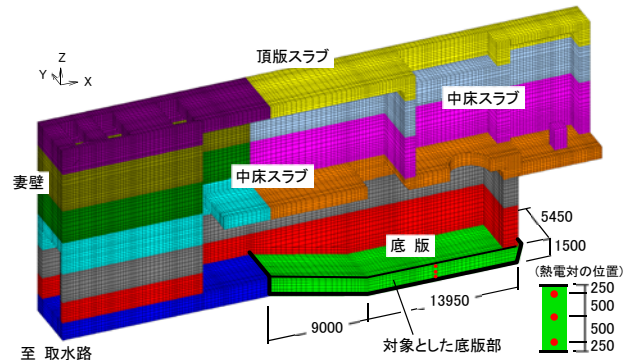


図-14 火力発電所ポンプ場概略図 (打設リフト別)

#### 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 (図-14) の建設工事において、塩害対策や副産物利用などを目的に、FA 置換率 25% で W/B45% のコンクリートが採用された。本工事では底版の一部 (約 380m<sup>3</sup>) を 10 月下旬 (日平均気温 14.6°C) に施工した。この時、スパン中央付近で、底版厚 1.5m の上下端から各々 250mm および版厚中央の計 3 箇所コンクリート温度を計測し、発熱モデルによる解析精度を検証した。なお打込み後の上面は湛水養生した。

##### 5.2 現場計測結果

###### (1) 圧縮強度

表-10 に圧縮強度試験結果を示す。試料は 150m<sup>3</sup> に 1 回の頻度で計 3 回 (1, 38, 75 台目) 採取し、翌日脱型後、

表-10 コンクリートの圧縮強度 (20°C 水中)

項目	C.T (°C)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )				
		2 日	7 日	28 日	91 日	
現場採取	1 台目	17	10.7	27.9	42.5	49.9
	38 台目	21	—	28.1	43.8	50.0
	75 台目	21	—	29.8	45.0	52.5
表-7 から算出		20	10.5	28.1	46.5	54.1

備考) 管理材齢 28 日, C.T: 採取時のコンクリート温度 (°C)

20°C 水中で試験材齢まで養生した。圧縮強度は採取時の温度の影響などでややバラツキがあるが、式(2)で表-7 の係数を用いて算出した値と概ね等しい結果となった。

###### (2) コンクリート温度

図-15 に底版コンクリートでの温度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は JCI 制御指針<sup>3)</sup>を参考に図中の値を使用し、断熱温度上昇特性式の係数 ( $Q_{\infty}$ ,  $r_{AT}$ ,  $t_{0,Q}$ ) は表-5 より  $C=284\text{kg/m}^3$ ,  $T_a=19.6^\circ\text{C}$  として設定した。解析の結果、下部は材齢後半に解析値が測定値を下回ったが、こ

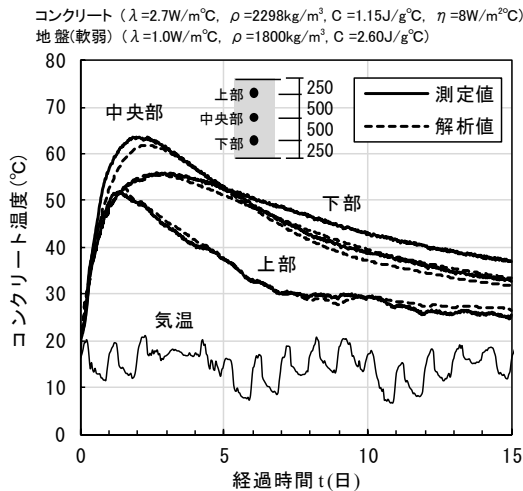


図-15 底版コンクリート温度の実測値と解析の比較

これは地盤の熱物性値設定が原地盤と異なっていたためと考える。それ以外は比較的精度良く測定結果を再現でき、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

本実験の範囲内において、FC 種相当配合での断熱温度上昇特性や強度特性に関して得られた結果を以下に示す。

- (1) 終局断熱温度上昇量  $Q_\infty$ には結合材中の単位ポルトランド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(B 固定)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) 材齢が大きいほど FA 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 であった。

## 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 28 年度実績），平成 30 年 2 月
- 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, 齋藤 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, 齋藤 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) 齋藤敏樹, 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, 2016.4