

# 論文 加熱改質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

吉川 悟史\*1・大谷 俊浩\*2・秋吉 善忠\*3・佐藤 嘉昭\*4

**要旨:** 無混和コンクリートと同程度の強度となるように調合した加熱改質フライアッシュコンクリートのマスコンクリート部材への適用を目的として、模擬柱試験体を用いた試験により熱特性および強度特性を把握し、温度応力解析により温度ひび割れ抑制効果を検討した。その結果、加熱改質フライアッシュコンクリートは、無混和コンクリートに比べ同程度以上の強度を発現し、構造体強度補正値を小さくすることが可能であること、終局断熱温度上昇量が小さくなることがわかった。また、温度応力解析よりひび割れ指数が大きくなり、温度ひび割れ発生の可能性が小さくなることがわかった。

**キーワード:** フライアッシュ, マスコンクリート, 断熱温度上昇量, 構造体強度補正値, 温度ひび割れ

## 1. はじめに

セメントの水和熱による温度応力が起因となる温度ひび割れは、ダムや橋脚などに代表されるような土木構造物において主な検討課題となっていた。近年は、耐震性や耐久性の向上、長寿命化の観点から、建築物においても基礎や耐圧版などの部材が大断面化しており、また、設計基準強度が大きく単位セメント量の多いコンクリートを用いることが増えているため、マスコンクリートとしては比較的小さな断面の部材においても温度ひび割れ発生の危険性が高まっている。

セメントの水和熱抑制の手法として、フライアッシュ（以下、FA と示す）を混和材料としてセメント置換し、セメントの使用量を減らす方法は従来から検討され、適用されている。FA は、コンクリートに混和すると単位水量の低減やポゾラン反応による長期強度の増進など、水和熱抑制以外でも耐久性能の向上が期待できる材料である。また、管理材齢を 56 日とすることで、FA の強度寄与効果の増進によって単位セメント量を低減することが可能となり、さらなる温度抑制効果が期待できる。しかしながら、FA をセメントの一部を置換したコンクリートは初期の強度発現性が小さいこと、また、FA 中の未燃カーボンが AE 剤を吸着し、空気量の品質が安定しないなどの問題がある。そこで、フレッシュ性状の品質の安定を図るため FA の未燃カーボンを 1%以下とした加熱改質 FA を混和し、材齢 28 日および 56 日の強度が無混和と同等となるような加熱改質フライアッシュを使用したコンクリート（以下、FA コンクリート）のマスコンクリート部材への適用を目的として、模擬柱試験体を作製し、熱特性および強度特性を把握した。さらに、試験で得られた熱特性や強度特性を用いて温度応力解析を行い、FA コンクリートの温度ひび割れ抑制効果について検討した。

## 2. 試験概要

### 2.1 コンクリートの調合

表-1 に使用材料を、表-2 にコンクリートの調合を示す。FA を混和していないコンクリート（以下、基準コンクリート）は、建築工事の基礎や耐圧版に用いられることが多い「普通 30-15-20N（管理材齢 28 日）」の JIS の認証を取得しているレディーミクストコンクリートとした。FA-1 は、基準コンクリートと材齢 28 日強度が同等となるよう既報<sup>1)</sup>の結果を参考に FA の強度寄与率 (k) を 0.3 とし、 $W/C' (C' = C+k \cdot FA)$  が同じとなるようにした。FA-2 は管理材齢 56 日となることを想定して、材齢 56 日強度が基準コンクリートの材齢 28 日強度と同等となるように強度寄与率を 0.6 としたものである。なお、FA コンクリートは、AE 減水剤の高機能タイプを用いて単位水量を 5kg/m<sup>3</sup> 低減した。

表-1 使用材料

種類	記号	物性値
セメント	N	普通ポルトランドセメント：密度 3.16 g/cm <sup>3</sup>
混和材	FA	加熱改質フライアッシュ II 種：密度 2.05 g/cm <sup>3</sup> 、 プレーン比表面積 3270 cm <sup>2</sup> /g、強熱減量 0.6%
	S1	山砂：表乾密度 2.57 g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率 2.65
細骨材	S2	陸砂：表乾密度 2.59 g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率 2.54
	S3	砕砂：表乾密度 2.66 g/cm <sup>3</sup> 、粗粒率 3.01
	G1	碎石 1505：表乾密度 2.70 g/cm <sup>3</sup> 、実積率 58.2%
粗骨材	G2	碎石 2010：表乾密度 2.70 g/cm <sup>3</sup> 、実積率 57.8%
	W	上水道水
混和剤	Ad1	AE 減水剤標準型 I 種
	Ad2	AE 減水剤標準型 I 種（高機能タイプ）

表-2 コンクリートの調合

調合	W/C (%)	W/B (%)	k	W/C' (%)	FA 置換率 (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )									
							C	W	FA	S1	S2	S3	G1	G2	Ad	
基準	48.0	48.0	0	48.0	0	43.2	365	175	0	371	223	152	511	511	3.65 <sup>*1</sup>	
FA-1	51.1	46.0	0.3	47.9	18	41.6	333	170	74	201	202	275	524	522	3.70 <sup>*2</sup>	
FA-2	54.5	49.0	0.6	48.0	18	42.3	312	170	70	207	209	287	524	522	3.47 <sup>*2</sup>	

\*1:Ad1, \*2:Ad2

\*1 大分大学大学院 工学研究科博士後期課程環境工学専攻 修士(工学) (日本国土開発(株))(正会員)

\*2 大分大学 理工学部創生工学科建築学コース教授 博士(工学)(正会員)

\*3 大分大学 理工学部創生工学科建築学コース助教 博士(工学)(正会員)

\*4 大分大学 名誉教授 工博(フェロー会員)

フレッシュ性状の品質管理目標値は、練上がり 60 分後のスランブを  $15 \pm 2.5\text{cm}$ 、空気量を  $4.5 \pm 1.5\%$  をとした。そのため、経時変化を考慮し練り上がり直後のスランブは  $16 \pm 1.0\text{cm}$ 、空気量は  $5.0 \pm 0.5\%$  を目標とした。

## 2.2 試験項目

試験項目を表-3 に示す。スランブおよび空気量は、経時変化を把握するため、練混ぜ直後から 30 分間隔で、練上がり 90 分後まで測定を行った。

圧縮強度試験は、標準水中養生、簡易断熱養生ならびに模擬柱試験体からコアを採取して表-3 に示す材齢にて行った。簡易断熱養生は強度管理に使用することを目的として行い、JASS5 T-606 に準拠し発砲スチロールで作製した容器の中に供試体を入れ、供試体間を発砲ビーズで充填して外気温近くなるまで封かんした。

コンクリート温度測定位置およびコンクリートコア採取位置の平面図を図-1 に示す。柱模擬試験体の寸法は  $1000 \times 1000 \times 1000\text{mm}$  であり、上下面を厚さ 200mm の断熱材（発泡スチロール）で、側面を厚さ 12mm の合板で覆った。断熱材および合板は、JASS5<sup>2)</sup>の湿潤養生期間を参考に材齢 7 日（フライアッシュ B 種・標準期）に撤去した。コンクリート温度は熱電対を用い、データロガーにより 10 分間隔で測定を行った。測定位置は、平面上で中心、側面の中央、端部の 3 点とし、高さはすべて試験体の中央（500mm）とした。また、簡易断熱養生においても各調合 1 点でコンクリート温度を測定した。

## 2.3 練混ぜおよび供試体作製

コンクリートの練混ぜ量は 1 調合当たり  $2\text{m}^3$  とし、模擬柱試験体への打設および各種試験用供試体作製は練り上がり 60 分後とした。なお、コンクリートの打設は 6 月上旬に宮城県石巻市で行った。打設時の外気温は  $22 \sim 23^\circ\text{C}$  であり、すべての調合の打設が終了するまでほぼ一定であった。

## 3. 実験結果

### 3.1 フレッシュ性状

図-2 にスランブおよび空気量の経時変化を示す。スランブロスには、FA コンクリートの方が、基準コンクリートに比べやや大きかった。しかしながら、練上がり 90 分後におけるスランブ値は品質管理目標値の範囲内（ $15 \pm 2.5\text{cm}$ ）であり、品質に問題は見られなかった。

空気量の経時変化は、FA コンクリートの方が、基準コンクリートに比べ低下量が若干小さかった。加熱改質 FA を混和したコンクリートの空気量は、練上がり 90 分後においても管理目標値以内（ $4.5 \pm 1.5\%$ ）であり、品質は安定していた。

### 3.2 コンクリート温度

模擬柱試験体で測定をしたコンクリート温度の経時

表-3 試験項目

試験項目	試験方法	目標値および材齢
スランブ	JIS A 1101	$16 \pm 1.0\text{cm}$
空気量	JIS A 1128	$5.0 \pm 0.5\%$
圧縮強度 (標準水中養生)	JIS A 1132 (供試体採取) JIS A 1108 (測定方法)	7, 28, 56, 91 日
圧縮強度 (簡易断熱養生)	JIS A 1132 (供試体採取) JASS5 T-606 (養生方法) JIS A 1108 (測定方法)	28, 56, 91 日
圧縮強度 (コア)	JIS A 1107 (供試体採取) JIS A 1108 (測定方法)	28, 56, 91 日
静弾性係数 (標準水中養生)	JIS A 1132 (供試体採取) JIS A 1149 (測定方法)	28 日
割裂強度 (標準水中養生)	JIS A 1132 (供試体採取) JIS A 1113 (測定方法)	28 日
乾燥収縮ひずみ	JIS A 1129-3	前養生 7 日

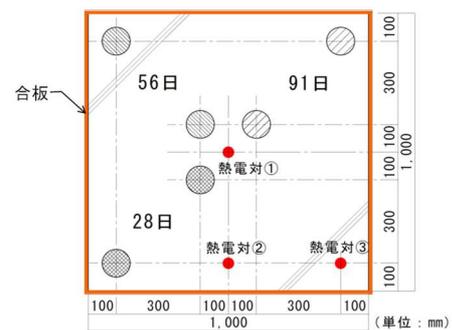


図-1 温度測定位置およびコア採取位置（平面図）

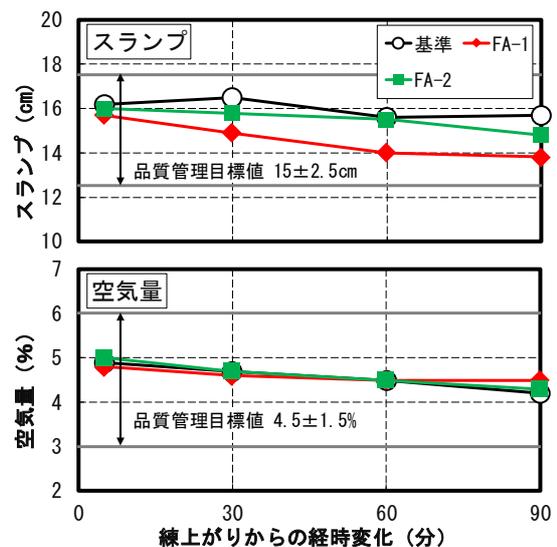


図-2 スランブおよび空気量の経時変化

変化を図-3 に示す。中心部の最高温度は、基準コンクリートが  $57.1^\circ\text{C}$ （打設温度  $23.2^\circ\text{C}$ ）と最も高く、FA-1 が  $55.8^\circ\text{C}$ （打設温度  $23.9^\circ\text{C}$ ）、FA-2 が  $54.0^\circ\text{C}$ （打設温度  $24.5^\circ\text{C}$ ）であった。温度上昇量は基準コンクリートが  $33.9^\circ\text{C}$ 、FA-1 が  $31.9^\circ\text{C}$ 、FA-2 が  $29.5^\circ\text{C}$  であり、温度上昇量の差は、FA-1 は基準コンクリートに対して  $-2.0^\circ\text{C}$ 、FA-2 は  $-4.4^\circ\text{C}$  であった。

簡易断熱供試体で測定をしたコンクリート温度の経時変化を図-4 に示す。簡易断熱供試体での温度上昇量は、基準コンクリートが  $29.5^\circ\text{C}$ 、FA-1 が  $28.8^\circ\text{C}$ 、FA-2 が  $26.6^\circ\text{C}$  であり、温度上昇量の差は、FA-1 は基準コンクリ

ートに対して-0.7℃、FA-2は-2.9℃であった。また、FAコンクリートは基準コンクリートに比べ最高温度に達したあとの下降が緩やかであった。

一般的に普通ポルトランドセメントの場合、単位セメント量が 10kg/m<sup>3</sup> 減少すると終局断熱温度上昇量を 1℃低下させると言われており、基準コンクリートに対してFA-1では32kg、FA-2では53kg単位セメント量が低減していることから、それぞれ 3.2℃、5.3℃低下することになるが、模擬柱試験体および簡易断熱供試体では、それよりも小さな低下量を示した。そのため、この低下量の差および温度下降が緩やかであったのはFAのポズラン反応による発熱が影響したものと推察される。

### 3.3 強度試験結果

表-4に強度試験結果を、図-5にそれぞれの圧縮強度の経時変化を示す。標準水中養生では、FA-1は材齢28日で、FA-2は材齢91日で基準コンクリートと同等以上となっており、調合設計で用いたFAの強度寄与率が概ね適切であったと考えられる。

簡易断熱養生は材齢7日からFA-1が最も高く、材齢28日でFA-2が基準コンクリートと同程度となった。これは、FAの反応性には温度依存性があることが示唆されており<sup>3)</sup>、水和熱によりポズラン反応などが活発になったためであると考えられる。材齢28日から材齢91日にかけての強度増進については、基準コンクリートに比べFAを混和した方が増加の程度が大きかった。

コア強度は、簡易断熱養生に比べて1~4N/mm<sup>2</sup>程度大きくなっているが、調合の比較では同様の傾向であった。また、基準コンクリートでは材齢28日および56日において中心部と外端部で採取したコアの圧縮強度に差が見

られたが、FAコンクリートでは中心部と外端部との差が小さい結果となった。これは、コンクリート温度の経時変化より、外端部ではFA-1が基準コンクリートより高く、中心部と外端部との温度差が小さいことや水和熱によりFAのポズラン反応などが活発になったことが影響したものと考えられる。

材齢28日の割裂引張強度および静弾性係数は各調査ともに同程度であった。

図-6に平均気温と構造体強度補正值の関係を示す。構

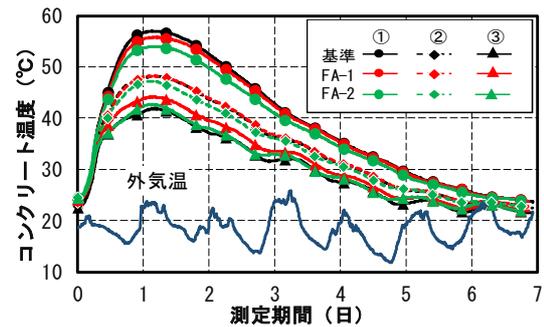


図-3 模擬柱試験体のコンクリート温度の経時変化

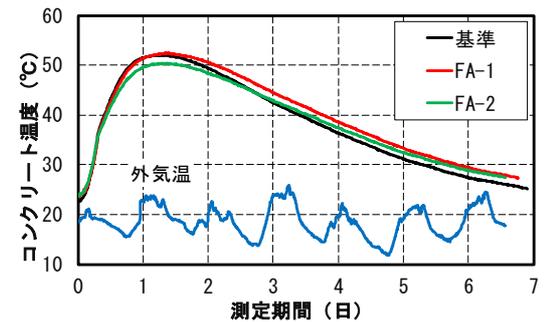


図-4 簡易断熱養生供試体のコンクリート温度の経時変化

表-4 コンクリートの強度試験結果

調査	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )											構造体強度補正值 (N/mm <sup>2</sup> )	割裂強度 (N/mm <sup>2</sup> )	静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )	
	標準水中				簡易断熱				コア*						
	7日	28日	56日	91日	7日	28日	56日	91日	28日	56日	91日				
基準	27.6	34.3	36.6	37.4	26.9	30.0	32.3	34.5	35.0	37.4	38.2	-3.8	-1.6	2.65	29.3
									29.6	32.8	38.1				
FA-1	27.5	35.5	40.3	43.2	28.8	32.2	36.3	39.1	36.2	39.7	42.1	-6.8	-2.0	2.85	29.7
									36.4	41.5	42.5				
FA-2	23.1	31.1	34.7	38.2	25.3	29.4	33.7	35.6	31.4	34.1	36.5	-5.9	-2.2	2.51	28.9
									32.2	34.9	37.4				

※コア強度の上段は中心部から採取したコア強度を、下段は端部から採取したコア強度を示す。

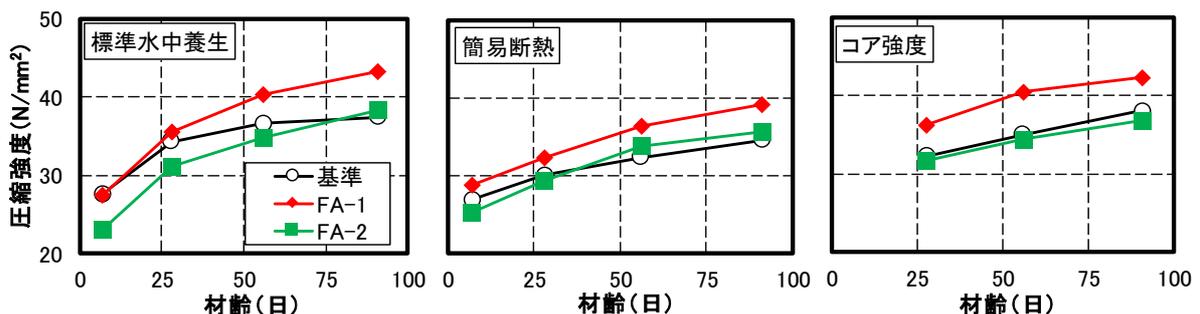


図-5 圧縮強度の経時変化

構造体強度補正値は、すべての調合で  $0\text{N/mm}^2$  以下となっており、FA-1 の  $_{28}\text{S}_{91}$  は基準コンクリートに比べて  $3\text{N/mm}^2$ 、FA-2 の  $_{56}\text{S}_{91}$  は  $0.6\text{N/mm}^2$  小さくなっている。FA コンクリートの場合、ポズラン反応により材齢 28 日から 91 日の強度増進は普通ポルトランドセメントに比べて大きくなる。また、ポズラン反応は温度依存性が高く、温度が高いほど強度の増進が大きい。したがって、構造体強度補正値も基準コンクリートよりも小さくなったものと考えられる。既往の研究においても、構造体強度補正値は FA の有無によって有意な差が生じ、FA コンクリートの方が小さくなる<sup>4)</sup>ことが示されている。また、暑中期において FA コンクリートの構造体強度補正値が  $0\text{N/mm}^2$  以下になる結果<sup>5)</sup>が示されている。JASS5 では、フライアッシュセメント B 種の構造体強度補正値  $_{28}\text{S}_{91}$  の標準値として、強度管理材齢までの予想平均気温によって 3 または  $6\text{N/mm}^2$  が示されており、FA 指針<sup>6)</sup>では、3、6 または  $9\text{N/mm}^2$  が示されている。FA コンクリートは、本研究ならびに既往の実験結果からも上記の指針で示されている構造体強度補正値よりも小さくすることが可能であると考えられ、特にマスコンクリートの温度ひび割れ対策として適用する場合には、構造体強度補正値を小さくし、単位セメント量を小さくした方が望ましいと思われる。

### 3.4 乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみの経時変化を図-7 に示す。FA コンクリートの単位水量が  $5\text{kg/m}^3$  少ないため FA 混和の影響は明確ではないが、同程度の強度レベルにおいて FA コンクリートが基準コンクリートに比べ若干小さい結果となった。

## 4. 温度応力解析による温度ひび割れ抑制効果の検討

### 4.1 断熱温度上昇量の推定

温度応力解析を行うにあたり、模擬柱試験体から測定したコンクリート温度履歴を再現するように、式 (1) の終局断熱温度上昇量 ( $K$ ) および温度上昇速度に関する係数 ( $\alpha$ )、ならびにコンクリートそれぞれの比熱 ( $c$ )、熱伝導率 ( $\lambda$ ) を推定した。

$$Q(t) = K(1 - \exp^{-\alpha t}) \quad (1)$$

ここに、 $t$ : 材齢 (日)

$Q(t)$ : 材齢  $t$  日までの断熱温度上昇量 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$K$ : 終局断熱温度上昇量 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$\alpha$ : 温度上昇速度に関する係数

非定常の熱伝導方程式は、フーリエの法則に基づく式 (2) で表現される。ある  $n$  点における  $\Delta t$  秒間に  $\Delta T_n$  だけ温度が変化したとすると、 $\Delta T_n$  は隣り合う点 ( $n-1, n+1$ ) の熱量の収支およびセメントの発熱であり、テイラー展

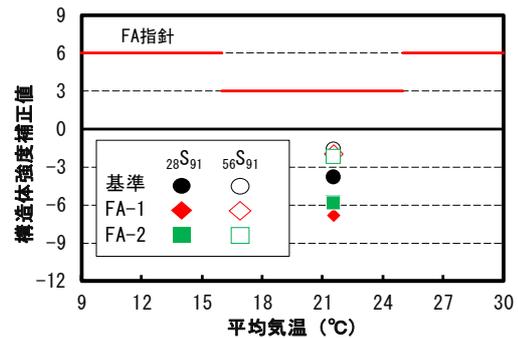


図-6 平均気温と構造体強度補正値の関係

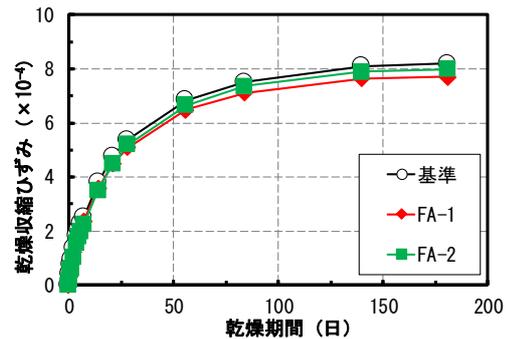


図-7 乾燥収縮ひずみの経時変化

開を用いた差分式を用いて表現すると式(3)となる。 $\Delta T_n$  が模擬柱試験体の実測値の温度変化である  $\Delta T$  と一致するような、 $K, \alpha, c, \lambda$  を最小二乗法により算出した。算定を容易にするため、模擬柱試験体は上下面を断熱材で覆っており完全断熱とし、熱の拡散は平面のみと仮定した。なお、外気温は実測値を用い、合板の熱伝達率は  $8.0\text{W/m}^2\text{C}$  とした。

$$\rho c \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + Q(t) \quad (2)$$

ここに、 $\rho$ : 密度 ( $\text{kg/m}^3$ )

$c$ : 比熱 ( $\text{J/kg}^{\circ}\text{C}$ )

$\lambda$ : 熱伝導率 ( $\text{W/m}^{\circ}\text{C}$ )

$T$ : 温度 ( $^{\circ}\text{C}$ )

$x$ : 距離 (m)

$$\Delta T_n = \frac{\lambda \Delta t}{\rho c \Delta x^2} (T_{n+1} + T_{n-1} - 2T_n) + Q(t) \quad (3)$$

表-5 に熱特性値の推定結果一覧を示す。また図-7 に算出した断熱温度上昇量の経時変化を示す。終局断熱温度上昇量は基準コンクリートに比べ FA-1 が約  $1^{\circ}\text{C}$ 、FA-2 は約  $5^{\circ}\text{C}$  小さく、FA を混和することで終局断熱温度上昇量が小さくなった。既往の研究では、結合材の量から終局断熱温度上昇量を求める場合、実験から得られた FA II 種のセメント換算係数は  $0.45 \sim 0.61$  となった報告<sup>7)</sup>、FA  $20\text{kg/m}^3$  の増加に対して断熱温度上昇試験における最高温度が約  $1^{\circ}\text{C}$  上昇する報告<sup>8)</sup> など、FA の発熱量はセメントの半分程度である結果が示されている。一方、セメ

ントが断熱温度上昇量の支配的要因であり、FA の温度上昇に対する影響は極めて小さいとの報告<sup>4),9)</sup>もある。本研究では、FA-1 のセメント換算係数は 0.33、FA-2 は 0.20 であり、既往の研究と同様に FA の断熱温度上昇量に対する影響はゼロではないものの、小さいと考えられる。

また、表-5 より比熱、熱伝導率に関しては、FA を混和することで基準コンクリートより大きくなっている。島田らの研究<sup>10)</sup>でも、フライアッシュセメントを用いたモルタルの方が無混和モルタルより熱電伝達率、熱拡散率とも大きくなる報告がなされており、本実験でも同様の傾向となった。

FA コンクリートの熱特性に関してはまだ不明確な部分もあるが、セメントに比べると FA の温度上昇に与える影響は小さく、材齢 28 日強度が同等となるよう調査設計した FA-1 においても断熱温度上昇量を低減できることが確認でき、管理材齢を 56 日とした FA-2 では、断熱温度上昇量を大きく低減できることがわかった。

#### 4.2 温度応力解析概要

図-8 に本研究で想定した対象構造物および要素分割図を、表-6 に打設日程を示す。建築物のマスコンクリート部材としては、耐圧版や外部拘束となる壁状構造物が多いため、厚さ 2,000mm の耐圧版に、厚さ 1,500mm の壁部材を打ち継いだ 1/4 モデルを対象とした。

表-7 に温度応力解析に用いたコンクリートならびに地盤の物性値一覧を示す。温度応力解析は 3 次元 FEM により行い、熱特性値は前節で得られた推定値を用いた。圧縮強度およびヤング係数は、JCI マスコンクリートひび割れ制御指針<sup>11)</sup>で示されている予測式を用い、材齢 28 日のコア強度試験結果を近似するような係数を定め算出した。引張強度、自己収縮ひずみ、クリープの影響等の予測式は JCI マスコンクリートひび割れ制御指針に準拠した。外気温は、気象庁発表の宮城県石巻市の日平均気温を用いた。

#### 4.3 解析結果

表-8 に解析結果一覧を示す。壁部材は長辺方向の値である。耐圧版および壁部材のコンクリート最高温度は、基準コンクリートと比較して FA-1 では 1.8℃および 1.6℃、FA-2 は 4.6℃および 4.3℃低かった。部材断面が大きいほど低下の度合いが大きかった。

図-10 に解析期間におけるひび割れ指数の最小値分布を、図-11 に壁部材の最小値を示した点のひび割れ指数の経時変化を示す。図-10 は図-9 の検討部と示されたメッシュ位置である。準コンクリートと比較して FA コンクリートは 0.1~0.15 大きくなっており、1.0 以下を示した範囲も小さくなっている。また、温度応力も基準コンクリートと比べ、FA-1 は 0.24N/mm<sup>2</sup>、FA-2 は 0.45N/mm<sup>2</sup> 小さくなっている。基準コンクリートと材齢 28 日強度

表-5 熱特性値の推定結果一覧

項目	記号	基準	FA-1	FA-2
終局断熱温度上昇量 (°C)	$K$	47.9	46.9	42.8
温度上昇速度に関する定数	$\alpha$	1.76	1.67	1.75
比熱 (J/kg°C)	$c$	1.08	1.13	1.17
熱伝導率 (W/m°C)	$\lambda$	3.27	3.67	3.87

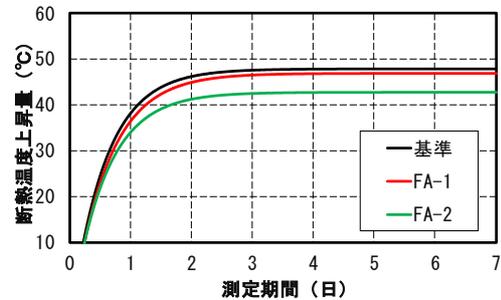


図-8 断熱温度上昇の経時変化

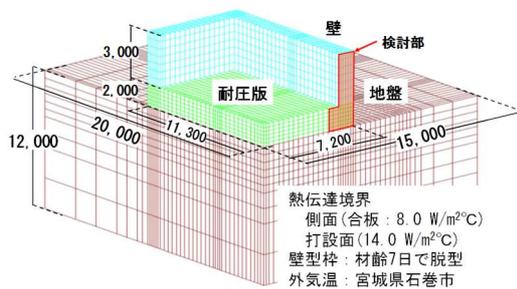


図-9 対象構造物の要素分割図

表-6 打設日程

打設箇所	打設日	外気温 (°C)	打設時コンクリート温度 (°C)
耐圧版	6月1日	17.9	22.9
壁	7月1日	21.6	26.6

表-7 解析値一覧

項目	コンクリート	地盤
熱伝導率 (W/m°C)	表-5による	1.70
比熱 (kJ/kg°C)	表-5による	1.40
ヤング係数 (N/mm <sup>2</sup> )	JCI 指針に準拠	50
ポアソン比	0.2	0.3
線膨張係数 (10 <sup>-6</sup> /°C)	10	10

表-8 解析結果一覧

調査	コンクリート最高温度 (°C)		ひび割れ指数の最小値		温度応力 (N/mm <sup>2</sup> )	
	耐圧版	壁	耐圧版	壁	耐圧版	壁
基準	60.6	62.6	0.65	0.74	0.91	2.77
FA-1	58.8	61.0	0.77	0.91	0.92	2.53
FA-2	56.0	58.3	0.76	0.90	0.87	2.32

を同程度の強度となるように調査設計した FA-1 でも、コンクリートの最高上昇量の低下、温度応力の低下が確認された。さらに、管理材齢 56 日とした FA-2 は、FA-1 よりも温度上昇量の低下、温度応力の低下量が大きかった。したがって、FA コンクリートは、温度ひび割れが発生する可能性が小さく、温度ひび割れ抑制効果が期待できると考えられる。

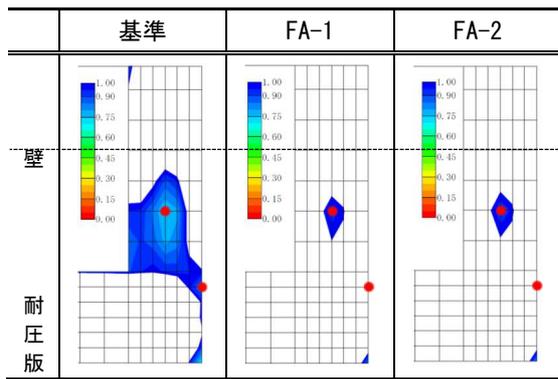


図-10 ひび割れ指数の最小値分布図

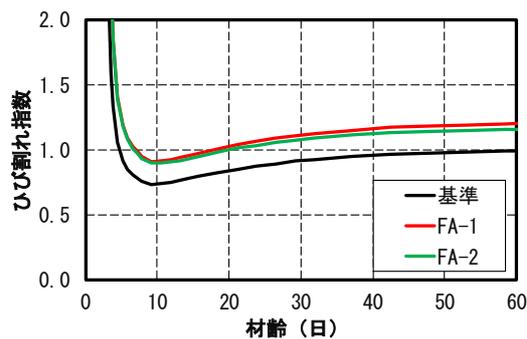


図-11 ひび割れ指数の経時変化

## 5. まとめ

本研究では、加熱改質 FA を混和したコンクリートのマスコンクリート部材への適用を目的とし、熱特性および強度特性の把握や、解析的に温度ひび割れ抑制効果について検討した。以下に、得られた知見を示す。

- (1) 温度上昇量の差は、模擬柱試験体において基準コンクリートに対し FA-1 は $-2.0^{\circ}\text{C}$ 、FA-2 は $-4.4^{\circ}\text{C}$ であった。また、簡易断熱供試体では、基準コンクリートに対して FA-1 は $-0.7^{\circ}\text{C}$ 、FA-2 は $-2.9^{\circ}\text{C}$ であり、最高温度に達したあとの下降が緩やかであった。これは、FA のポゾラン反応による発熱による影響である。
- (2) 強度寄与率を 0.3 とした FA-1 は、基準コンクリートに対して材齢 28 日強度で同等以上であり、材齢 91 日のコア強度は $4\text{N}/\text{mm}^2$ 程度大きかった。強度寄与率を 0.6 とした FA-2 は、材齢 91 日強度およびコア強度は同程度であった。
- (3) 構造体強度補正值は、すべての調合で $0\text{N}/\text{mm}^2$ 以下であり、FA-1 の $_{28}\text{S}_{91}$ は基準コンクリートに比べて $3\text{N}/\text{mm}^2$ 、FA-2 の $_{56}\text{S}_{91}$ は $0.6\text{N}/\text{mm}^2$ 小さく、構造体強度補正值を普通ポルトランドセメントよりも小さくすることが可能である。
- (4) 終局断熱温度上昇量は基準コンクリートに比べ FA-1 が $1^{\circ}\text{C}$ 程度、FA-2 は $5^{\circ}\text{C}$ 程度小さく、FA を混和することで終局断熱温度上昇が小さくなった。また、比熱、熱伝導率は、FA を混和することで大きくなる傾向が見られた。

- (5) 温度応力解析の結果、FA コンクリートは基準コンクリートに比べ、コンクリートの最高上昇量の低下、温度応力の低下が確認され、温度ひび割れ抑制効果が期待できる。

## 謝辞

本実験を実施するにあたり(株)平成生コンクリート(代表取締役 本間泉)の協力を得た。ここに謝意を表す。

## 参考文献

- 1) 伊藤七恵, 佐藤嘉昭, 上田賢司, 大谷俊浩: 高品質フライアッシュを用いたコンクリートの調合設計に関する研究, コンクリート工学年次論文集, vol.33, No.1, pp.167-172, 2011
- 2) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2015.7
- 3) 大塚拓, 森慎一郎, 石川元樹, 坂井悦郎: フライアッシュの鉱物組成とポゾラン反応性, Cement Science and Concrete Technology, Vol. 63, pp. 16-21, 2009
- 4) 船本憲治, 田中利光, 渡辺勝, 松藤泰典: フライアッシュをスラリーとして $120\text{kg}/\text{m}^3$ セメント外割使用した高強度・高流動コンクリートの強度発現および発熱特性, Cement Science and Concrete Technology, Vol. 69, pp. 319-326, 2016
- 5) 小山智幸ほか: 暑中環境で施工される構造体コンクリートの品質管理に関する研究 その 6 柱試験体の強度性状, 日本建築学会九州支部研究報告会 第 52 号, pp. 201-204, 2013
- 6) 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
- 7) 国府勝郎, 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
- 8) 板井知明, 尾之内厚志, 望月真, 依田真: フライアッシュを細骨材の一部と置換したコンクリートの諸特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.109-114, 2001
- 9) 高橋昭裕, 高橋和之, 斉藤直, 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, 2009
- 10) 島田秀樹ほか: フライアッシュセメントの特性と鉱山への適用について, 資源と素材, vol.120, pp.469-475, 2004
- 11) 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