

論文 温度応力解析に用いるフライアッシュコンクリートの断熱温度上昇量および強度性状に関する実験的検討

高橋 昭裕*1・高橋 和之*2・齊藤 直*3・吉武 勇*4

要旨: 本研究では、フライアッシュをセメントまたは細骨材の一部代替材とするコンクリートの断熱温度上昇量や強度性状について実験的検討を試みた。また、これらの実験から得られた結果をもとに温度応力解析を行うことで、フライアッシュ混和によるコンクリートの温度ひび割れ抑制効果を評価した。本実験より、フライアッシュをセメント・細骨材の双方に内割置換した場合、強度発現が緩慢になる傾向を示したが、断熱温度上昇量の抑制は最も効果的であった。また、温度応力解析の結果より、フライアッシュをセメント・細骨材の双方に内割置換したコンクリートが、検討した範囲内で最も高い温度ひび割れ抑制効果を示した。

キーワード: フライアッシュ, 終局断熱温度上昇量, 圧縮強度, 割裂引張強度, 温度応力解析

1. はじめに

石炭火力発電設備の増加に伴い、副産物としてフライアッシュ（以下、*FA* と記す）の発生量も増加しており、その有効利用の拡大が叫ばれている。一方で、生コンクリート工場のセメントサイロの制約により、混和材としての *FA* の利用拡大が進まないことも事実である。また、近年における川砂・海砂の採取規制および良質な砕石山の減少などによる骨材品質の低下に伴う、コンクリートのワーカビリティの低下が問題となっている。さらに、最近のセメントの多くは、JIS 規格（例えば、高炉セメント B 種であれば $3000\text{cm}^2/\text{g}$ 以上）を大幅に超過する高い粉末度（比表面積）を有するため、初期発熱が大きく、長期的な強度増進がほとんどみられない傾向にある。特に、土木構造物にしばしば使われている高炉セメント B 種は、普通ポルトランドセメントより断熱温度上昇量が高くなる場合もあり、条件によっては温度応力によるひび割れが生じやすいことが指摘されている¹⁾。

そこで、本研究では *FA* を（高炉）セメントおよび細骨材に対して内割置換することで断熱温度上昇量を調べるとともに強度発現性状について実験的検討を試みた。さらにその実験結果を基に温度応力解析を行い、*FA* による温度ひび割れの抑制効果について検討した。

2. 実験方法

2.1 実験目的

既往の研究において、セメント容積の 70% まで大量置換した *HVEA* コンクリートの断熱温度上昇量²⁾と強度発現性状³⁾が報告されている。これらの研究を通じて、*FA* を大量混和する場合においても、断熱温度上昇量の抑制

や長期的な強度寄与効果は確認されているが、このような *HVEA* コンクリートでは、特に初期強度の発現が緩慢となることから、その用途は限られるものであった。これに対して本研究では、標準的な配合・強度レベルのコンクリートを主対象に、その構成材料の一部を *FA* に代替置換したコンクリートの断熱温度上昇量と強度発現性状を調べ、得られた特性から温度応力解析を行うことで、*FA* がおよぼす影響を求めることを目的とした。

2.2 使用材料

本実験では、セメント *C* に高炉セメント B 種（密度 $3.04\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $3830\text{cm}^2/\text{g}$ 、以下、*BB* と記す）を使用し、*FA* には JIS A 6201 の II 種相当品（密度 $2.20\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $3540\text{cm}^2/\text{g}$ 、 SiO_2 61.9%、活性度指数 95%）を使用した。細骨材 *S* および粗骨材 *G* は、それぞれ海砂（密度 $2.60\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 0.74%）、安山岩系砕石（密度 $2.70\text{g}/\text{cm}^3$ 、吸水率 0.61%）である。混和剤 *Ad* としてリグニンスルホン酸系の *AE* 減水剤、さらに、*FA* を混和したコンクリートについては、*FA* 用 *AE* 剤（高級脂肪酸系界面活性剤；*AE*）も添加した。

2.3 配合条件

本研究では、表-1 に示すように *FA* をセメントおよび細骨材に 10% または 20% 内割置換したコンクリートを作製した。表-1 に示す配合記号のうち、*BB* は高炉セメント B 種を表しており、*Fc*・*Fs* に続く数字は、それぞれセメント質量・細骨材容積に対する *FA* の内割置換率（%）を表している。なお、*Base* は比較のために作製した *FA* を用いていないコンクリートであるが、これは生コンクリートの標準的な配合を参考にしたものである。*Base* 配合の水セメント比 *W/C* を 55.0% に設定した上で、

*1 (株) オリエンタルコンサルタンツ 修(工) (正会員)

*2 (株) エネルギア・エコ・マテリア 技術部技術第二担当副長

*3 (株) エネルギア・エコ・マテリア 技術部長 博(工) (正会員)

*4 山口大学大学院 理工学研究科准教授 博(工) (正会員)

表－1 配合表

配合の種類	W/C (%)	W/P (%)	Fc (%)	Fs (Vol.%)	単位量(kg/m ³)							
					W	C	FA		S	G	Ad	AE ^{**}
							Fc	Fs				
BB-Base	55.0	55.0	—	—	164	298	—	—	853	980	3.0	—
BB-Fc10	61.3	55.0	10	—	164	268	30	—	853	975	3.0	17.9
BB-Fc20	68.9	55.0	20	—	164	238	60	—	848	970	3.0	31.3
BB-Fc20-Fs10	68.9	44.2	20	10	164	238	60	73	763	969	3.7	100.2

セメント質量あるいは細骨材容積に10~20%代替置換を行っているため、W/Cは配合によって若干異なる。なお本研究では、いずれのコンクリートにおいても目標スランプ8cm、目標空気量4.5%とした。

2.4 供試体作製

本研究では、強制二軸練りミキサ（最大容量 50l）によって練混ぜを行い、プラスチックモールドを用いて d100×h200mm の円柱供試体を作製した。スランプ試験は JIS A 1116, 空気量試験は JIS A 1128 に準拠して行った。

各強度試験に用いる円柱供試体を打設後直ちに 20℃環境下に静置し、さらに脱枠を行った材齢 1 日後において、各強度試験に供するまで標準養生を行った。また、各コンクリートの断熱温度上昇試験は、これらの強度試験と同バッチで作製したコンクリートを用いた。

3. 強度試験

3.1 試験方法

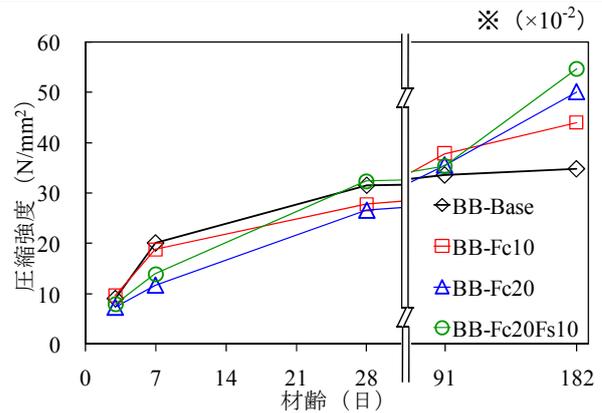
本研究における圧縮強度試験および割裂引張強度試験は、各々 JIS A 1108・JIS A 1113 に準拠して行った。なお、試験材齢は 3 日、7 日、28 日、91 日、182 日である。

圧縮強度試験は各材齢において、供試体 3 本としたが、割裂引張強度試験では、試験結果のばらつきを低減するため、各材齢において供試体 5 本を用いて試験を行い、その 3 本の中間平均を用いて割裂引張強度を求めた。

3.2 実験結果

圧縮強度試験結果を図－1に示す。また表－2には、同時に実施した FA 無置換コンクリート (Base) に対する各コンクリートの強度比を示す。同様に、割裂引張強度試験の結果を図－2に示し、表－3に同強度比を示す。

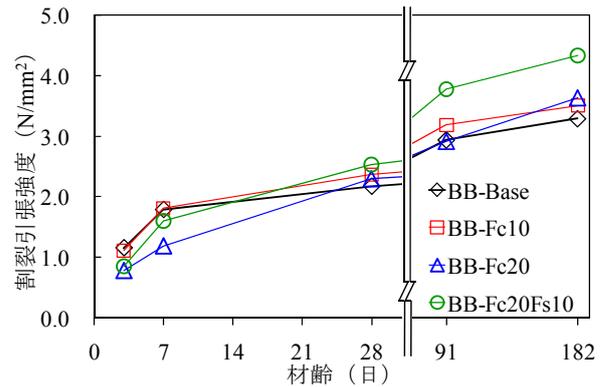
FA を置換したコンクリートは、圧縮強度が材齢 28 日で Base 配合と同等、さらに材齢 91 日以降においては Base 配合よりも大きくなった。これらの結果は割裂引張強度試験結果においても同様の傾向が得られた。FA は圧縮強度のみならず引張強度においても長期的な強度寄与効果をもたらしている。特に、FA を混和したコンクリートは材齢 7 日以上において、引張強度比の向上が認められる。このことから、断熱温度上昇量の低減効果も勘



図－1 圧縮強度

表－2 圧縮強度比 (対 Base)

配合	3日	7日	28日	91日	182日
BB-Base	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
BB-Fc10	1.06	0.93	0.88	1.13	1.26
BB-Fc20	0.80	0.58	0.84	1.06	1.44
BB-Fc20Fs10	0.87	0.69	1.03	1.05	1.57



図－2 割裂引張強度

表－3 引張強度比 (対 Base)

配合	3日	7日	28日	91日	182日
BB-Base	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
BB-Fc10	0.96	1.01	1.09	1.08	1.07
BB-Fc20	0.68	0.67	1.06	0.99	1.10
BB-Fc20Fs10	0.74	0.90	1.16	1.28	1.32

案すれば、FA 混和の有効性の高さが窺える。さらに、細骨材にも FA を内割置換したコンクリートは、同じセメント内割置換のコンクリート (BB-Fc20) に比べると強度増加傾向が顕著であった。これは FA のポズラン反応による強度寄与に加え、FA を細骨材に対して一部内割置換したことによる微粉末の充填効果⁴⁾によるものと考えられる。

3.3 定数の算出

FA を混和材としてコンクリートに使用した場合、初期材齢において強度発現が遅延し、長期材齢で強度が増進することが知られており^{2),3)}、本研究の強度試験結果からもそれらの特性が確認された。このことから FA を混和したコンクリートの温度応力解析には、一般的に使用されている圧縮強度推定式 (式(1)) および引張強度推定式 (式(2)) の係数⁵⁾の準用は必ずしも妥当ではないものと考えられる。そこで、本研究では得られた各配合の圧縮強度試験および引張強度試験結果を用いて、各推定式中の係数 a , b , c を求めた。

$$f_c'(t) = \frac{t}{a + b \cdot t} f_c'(91) \quad (1)$$

$$f_t(t) = c \cdot \sqrt{f_c'(t)} \quad (2)$$

ここで、 t : 材齢 (日)、 $f_c'(t)$: 材齢 t 日における圧縮強度 (N/mm²)、 $f_t(t)$: 材齢 t 日における引張強度 (N/mm²) を意味する。

本研究では、温度ひび割れが問題となる材齢 28 日以内の実験結果に着目し、最小二乗法により諸係数を求めた (表-4 参照)。以下では、実験から得られた強度を実験強度 Ex 、表-4 の諸係数を用いて求めた強度を推定強度 Es 、示方書に基づき算出した強度を示方書強度 Es' と記載する。

表-4 に示した各係数を用いて求めた推定強度および示方書強度の整合性を図-3、図-4 に示す。ここで、これらの図の縦軸は、実験強度に対する各強度の比を示しており、1.0 に近いほど高い整合性を示すものである。

図-3 および図-4 より、推定強度と実験強度の比 (Es/Ex) が、特に材齢 28 日以内の結果に対して、より 1.0 に近いことがわかる。これより、本研究で求めた係数を用いた方が示方書で定められた係数を用いるよりも強度発現性状を適切に推定できるものと思われる。

4. 断熱温度上昇量

4.1 試験方法

本研究では、コンクリートの断熱温度上昇量を求めるにあたり、吉武ら⁶⁾の提案した簡易断熱温度上昇試験 (以下、簡易試験) を実施した。簡易試験では、図-5 に示

表-4 算出した諸係数

配合	a	b	c
示方書	6.2	0.93	0.44
BB-Base	6.0	0.85	0.39
BB-Fc10	9.0	0.90	0.42
BB-Fc20	11.9	0.91	0.40
BB-Fc20Fs10	11.3	0.69	0.42

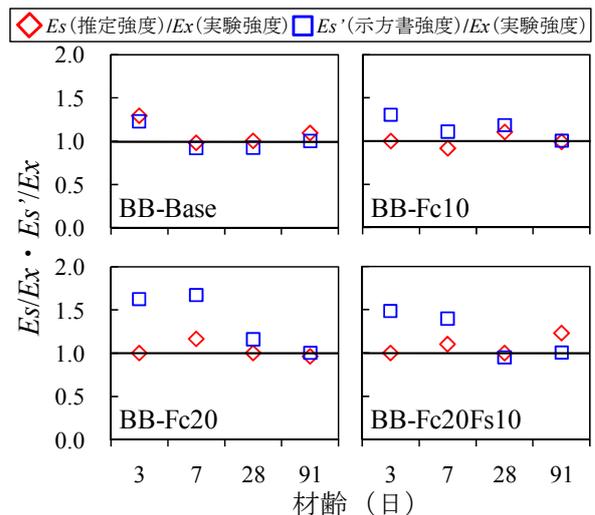


図-3 推定強度と示方書強度の整合性比較 (圧縮強度)

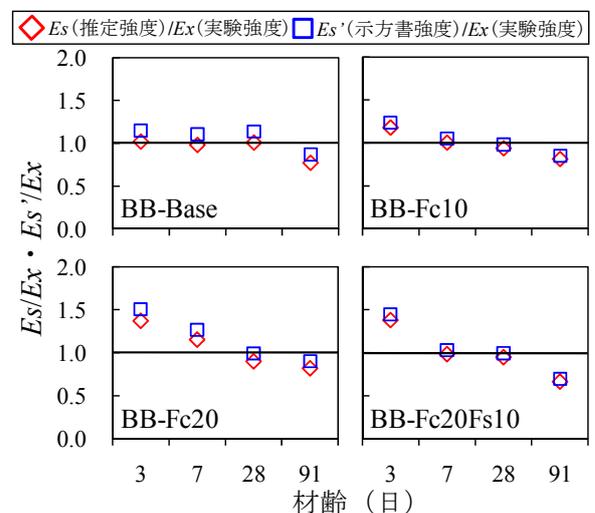


図-4 推定強度と示方書強度の整合性比較 (引張強度)

すように、発泡スチロールで作製した 400×400×400mm 状の断熱型枠の中心に、200×200×200mm 状のコンクリートを打設する。そして熱電対 (T-type) を用いてコンクリート供試体の中心温度 (コンクリート温度 T_c) の経時変化を測定するとともに、図-6 に示すように、この断熱型枠の放熱特性に応じた (推定) 温度損失量 T_l をコンクリート温度 T_c に随時加算することで、断熱温度 T_{ad} を推定するものである。ここで、温度損失量 T_l は、予め求

めた断熱型枠の温度降下勾配式（温度差との1次関数）に、コンクリートと基準温度間の温度差を代入することで求めることができる。この簡易試験による断熱温度上昇量の推定に用いる基礎式を式(3)に示すとともに、そのフローチャートを図-7に示す。

$$T_{ad}(t) = T_c(t) + \int_0^t \alpha \cdot (\bar{T}_c(t) - \bar{T}_0(t)) dt \quad (3)$$

ここで、 T_c : コンクリート温度、 T_0 : 基準温度、 T_d : 温度差、 T_l : 温度損失量、 T_{ad} : 断熱温度、 t : 時間（材齢）、 k_i : 断熱型枠の温度降下勾配式、 α : 断熱型枠の放熱特性を示す係数（実験値）を表し、上添字 $\bar{\quad}$ は微小時間 dt 間の平均を意味する。

本研究では、以下のような手順で断熱型枠における温度降下勾配式を求めた。

- i) 簡易試験に用いたモルタルまたはコンクリート供試体（材齢7日以降）を断熱型枠から取り出し、60℃に温度制御された恒温機内に24時間以上静置
- ii) 内部まで60℃に均等に加熱された各供試体を再び断熱型枠内に設置
- iii) 同断熱型枠を20℃の恒温室内に静置し、各供試体の内部温度と恒温室内の温度（基準温度）を10分毎に計測
- iv) 単位時間あたりの温度低下量（℃/min）と温度差の関係を整理し、その一次回帰から温度降下勾配式を決定

4.2 実験結果

本研究で実施した簡易試験における各コンクリートの断熱温度上昇量を図-8に示す。さらにその終局断熱温度上昇量を、凡例中の括弧内に示す。

FAを用いないコンクリート（Base）の終局断熱温度上昇量が最も高い結果となっているが、これは既往の研究^{2), 7)}にも示しているように、発熱主源のセメント量に起因する結果である。この簡易試験の結果、ならびに既往の研究を勘案すれば、セメント量のみが断熱温度上昇量の支配的要因と考えられ、FA混和の影響は事実上無視できるものといえよう。ここで、FA置換率が高くなるほど断熱温度上昇曲線は緩やかな上昇過程を示し、その終局断熱温度上昇量は低減できるものであった。このような断熱温度上昇量の抑制効果は、セメント・細骨材の双方に対してFAを内割置換することの優位性を示すものであり、断熱温度上昇量の抑制が最も効果的である。しかしながら前章に示したように強度発現性状も緩慢になるため、温度上昇特性ならびに強度発現性状の双方の効果を鑑みて、FAの内割置換率の設定を行う方が賢明と思われる。

4.3 終局断熱温度上昇量

本研究では、表-5に示す単位セメント量Cと終局断

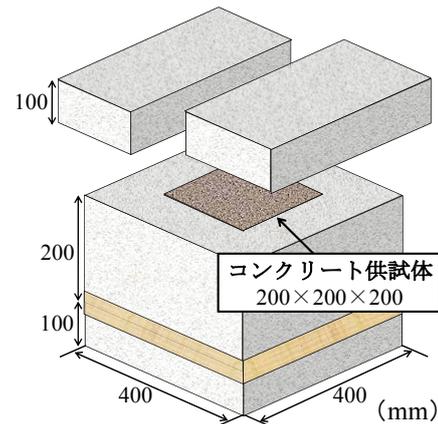


図-5 コンクリート供試体と断熱型枠

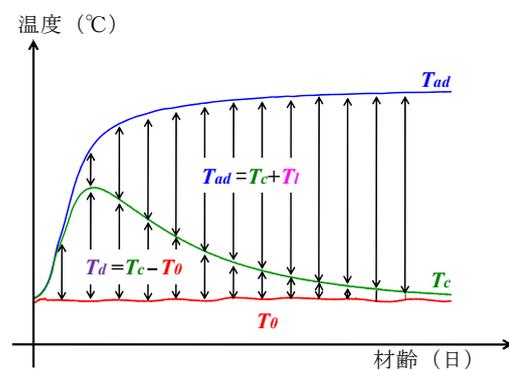


図-6 断熱温度上昇量の概念図

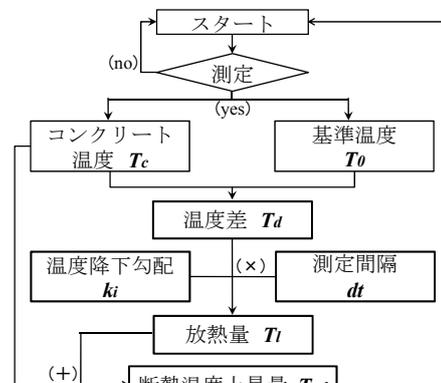


図-7 簡易試験のフローチャート

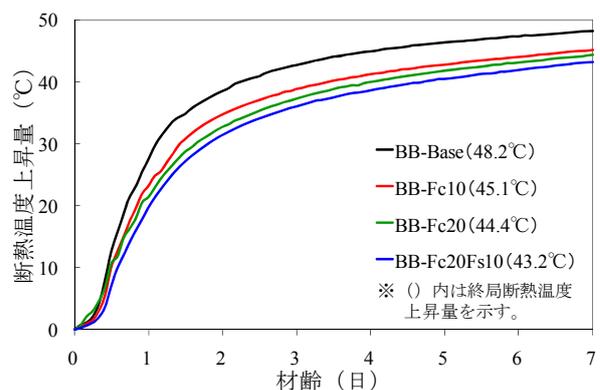


図-8 断熱温度上昇量

熱温度上昇量 Q_{∞} を用いて、次章に示す温度解析を行い、 FA をセメントに混和したコンクリートの温度ひび割れ抑制効果を検討した。比較のため、コンクリート標準示方書〔設計編〕⁹⁾に示される終局断熱温度上昇量の推定式を用いて求めた値（設計値）も併記する。両者の比較より、簡易試験による終局断熱温度上昇量は、概ね妥当な値であることがわかる。

なお、簡易試験では、完全断熱ではないため、温度上昇速度に関する係数を適切に求めることはできない⁶⁾。既往の研究⁸⁾より同係数は、 FA の置換率によって低下するとされているが、その影響は小さいものである。そこで、本研究では、コンクリート標準示方書〔設計編〕⁹⁾に示される推定式および定数を用いて、同係数 γ を設定し、温度応力解析を行った。

5. 温度応力解析

5.1 解析条件

本研究で想定した対象構造物および要素分割図を図-9に示す。図-9に示すように、岩盤上にコンクリートスラブが打設（第1リフト）され、さらに壁が打設（第2リフト）された橋台を対象とした。この対象構造物は左右対象であり、右半分のみを要素分割し、解析を行った。温度解析は2次元FEMで行い、温度応力解析はCP法によって行った。

解析対象の壁状構造物は、山口県において、コンクリートスラブは10月1日に打設し、壁部分はその7日後の10月8日に打設されたものとした。なお、解析は壁部分の打設28日後の11月5日までを対象とした。ここで、本解析で用いた物性値を表-6に示す。また、温度応力解析に用いた圧縮強度・引張強度の推定式には、表-4で示した係数を用い、その他はコンクリート標準示方書⁵⁾に準拠した。なお、温度解析に用いた単位セメント量および終局断熱温度上昇量は表-5に示す値を用いた。

5.2 温度解析

温度解析より得られた最高温度分布図を図-10に示す。図-10に示すように、 FA 置換率の増加に伴い、コンクリート中の温度も低下傾向にあった。また、コンクリート中の温度は FA 無置換コンクリートで最大60°C付近まで上昇するのに対し、 FA をセメントに対して20%置換することで50°C程度まで抑制された。

5.3 温度ひび割れ指数

最小ひび割れ指数によると、全配合において、既設コンクリート（第1リフト部分）との打ち継ぎ面が最も温度応力が卓越した。この箇所を図-10中にA点およびB点として示す。

A点およびB点における最小ひび割れ指数をまとめた

表-5 終局断熱温度上昇量と温度上昇速度に関する係数

配合	C (kg/m ³)	Q_{∞} (°C)		γ ^{※2}
		実験値	設計値 ^{※1}	
BB-Base	298	48.2	50.6	0.952
BB-Fc10	268	45.1	46.7	0.877
BB-Fc20	238	44.4	42.8	0.802
BB-Fc20Fs10	238	43.2	42.8	0.802

※1：比較のためコンクリート標準示方書に準じて求めた値

※2：コンクリート標準示方書に準じて求めた係数

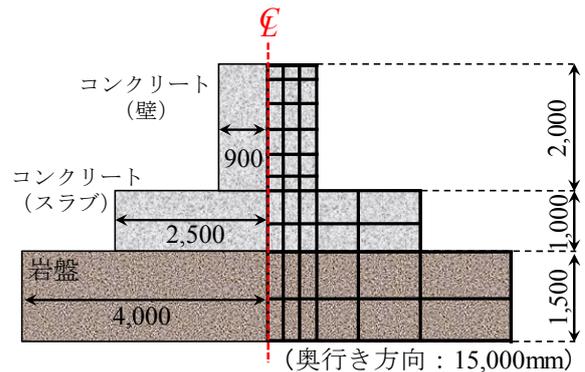


図-9 解析対象構造物および要素分割図

表-6 温度応力解析に用いた諸物性値

物性値	岩盤	コンクリート
初期温度 (°C)	15	20
比熱 (kJ/kg·°C)	0.8	1.1
密度 (kg/m ³)	2600	2300
熱伝導率 (W/m·°C)	2.3	2.8
線膨脹係数 (1/°C)	—	1.0×10^{-5}
ヤング係数 (N/mm ²)	4000	$\phi(t) \cdot 4.7 \times 10^3 \cdot \sqrt{f_c'(t)}$ ※

※ $\phi(t)$ ：コンクリート標準示方書の値に準じる

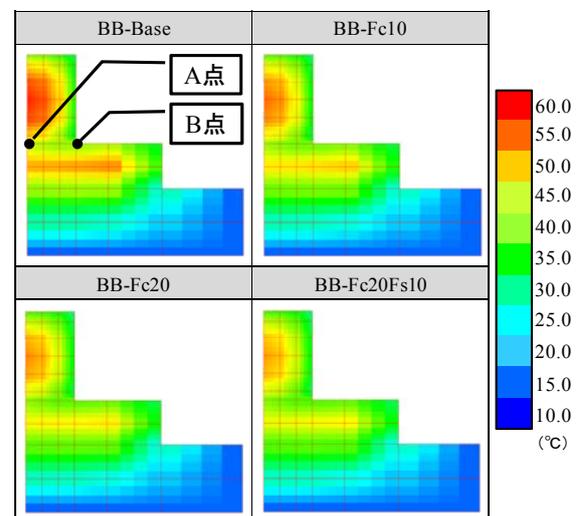


図-10 最高温度分布図

表一 7 最小ひび割れ指数

配合	A 点	B 点
BB-Base	1.39	1.47
BB-Fc10	1.57	1.72
BB-Fc20	1.44	1.68
BB-Fc20Fs10	1.61	1.84

ものを表一 7 に示す。表一 7 から、FA 無置換コンクリート (Base) においては最小ひび割れ指数が A 点で 1.39、B 点で 1.47 となった。これは一般的な配筋の構造物における標準的なひび割れ指数の参考値で、ひび割れの発生をできるだけ制限したい場合の値 (1.45) とほぼ同程度の値であり、ひび割れ発生確率はほぼ 25% に相当する¹⁰⁾。これに対して、FA をセメント・細骨材の双方に内割置換したコンクリート (BB-Fc20Fs10) の最小ひび割れ指数は A 点で 1.61、B 点で 1.84 となった。これは同参考値で、ひび割れの発生を防止したい場合の 1.75 とほぼ同程度の値となっている。この値におけるひび割れ発生確率はほぼ 5% に相当する¹⁰⁾。すなわち、セメント・細骨材の双方に FA を内割置換したコンクリートは温度ひび割れの発生を高い確率で防止できることを示した。

また、A 点および B 点の両点について BB-Fc20 と BB-Fc20Fs10 (セメントに対して、FA 置換率が同じ) の温度ひび割れ指数を比較すると、セメント・細骨材の双方に対して FA を混和したコンクリート (BB-Fc20Fs10) の方が温度ひび割れを抑制できることが示された。これは前述したように、細骨材に対しても FA を内割置換することで微粉末による充填効果が得られるとともに、温度上昇量が抑制されたことに起因するものと思われる。

6. まとめ

本研究は、FA をセメントおよび細骨材の一部代替置換したコンクリートの物性評価の一環として、断熱温度上昇試験や強度試験を実施した。さらにこれらの結果に基づいて温度応力解析を行い、温度ひび割れの可能性について検討した。本研究の範囲内における結論を以下に要約する。

- (1) FA をコンクリートに混和することによる長期強度の増進が、圧縮・引張強度実験から確認された。特に、FA をセメント・細骨材の双方に内割置換したコンクリートは、セメント内割置換のみのコンクリートに比べて大きな強度向上が認められた。
- (2) FA をセメント・細骨材の双方に内割置換したコンクリートは、断熱温度上昇量の抑制に最も効果的である。ただし、FA の内割置換率の設定は、初期材齢における

強度発現性状ならびに断熱温度上昇特性の双方の効果を勘案する必要がある。

- (3) FA 置換率に伴い、最高温度は低下し、最小ひび割れ指数は向上した。特に FA をセメント・細骨材の双方に内割置換したコンクリートは、微粉末の充填効果と断熱温度上昇量の抑制効果が望めるため、温度ひび割れの発生を高い確率で防止できることを示した。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、山口大学大学院中村秀明教授に御指導頂きました。ここに深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：2007 年度制定コンクリート標準示方書 [施工編]，p.43，2008.
- 2) 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.
- 3) 吉田和隆，吉岡 慧，高橋昭裕，浜田純夫：HVFA コンクリートにおける材齢 1 年までのフライアッシュの強度寄与，土木学会論文集 F，Vol.64，No.1，pp.104-109，2008.3.
- 4) 伊藤智章，松永 篤，仲松照隆，佐久田朝男：フライアッシュを細骨材の一部に用いたコンクリートの強度および耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.217-222，2000.
- 5) 土木学会：2007 年度制定コンクリート標準示方書 [設計編：標準]，pp.340-342，2008.
- 6) 吉武 勇，中村秀明，谷本俊夫，浜田純夫：現場利用可能なマスコンクリートの簡易断熱温度上昇測定法の提案，土木学会論文集，No.606/V-41，pp.103-110，1998.11.
- 7) 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.262-268，2009.2.
- 8) 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.
- 9) 土木学会：2007 年度制定コンクリート標準示方書 [設計編：標準]，pp.342-343，2008.
- 10) 土木学会：2007 年度制定コンクリート標準示方書 [設計編：本編]，pp.179-182，2008.