

論文 分級フライアッシュの混和によるコンクリートの温度ひび割れ抑制効果の検討

伊藤 始^{*1}・大野 宏樹^{*2}・橋本 徹^{*3}・宮里 心一^{*4}

要旨：石炭火力発電所から産出されるフライアッシュを有効利用していくことは、持続可能な社会の構築の観点から重要である。本研究では、北陸産の分級フライアッシュを混和したコンクリートの温度ひび割れ抑制効果の検討を目的に、実構造物の計測および温度応力解析を実施した。その結果、対象とした3構造物のうち重力式擁壁でひび割れ抑制効果が得られ、逆T型擁壁や六脚ブロックでは抑制効果があまり得られなかったことから、部材厚が大きい構造物で抑制効果が大きいことが確認できた。加えて、温度応力解析により計測した温度履歴およびひずみ履歴をおおむね再現できることを確認した。

キーワード：フライアッシュ、ひび割れ抑制、実構造物、温度応力解析、ひずみ計測

1. はじめに

石炭火力発電所からの産業副産物である石炭灰の発生量は、石炭の質量の約1割であり、全国的にみて増加傾向にある¹⁾。石炭灰はこれまで主にセメントの原材料として使用されてきたが、昨今の経済低迷の影響でセメント需要が落ち込んだことを受けて、使用量が減少してきた。また、石炭灰処分場の残容量も少ない状況にあることから、他の用途に石炭灰を有効利用していくことが持続可能な社会の構築の観点から重要となっている。

石炭灰の使用方法の1つに、セメントの代替材としてコンクリートに混和する方法がある。この方法を用いることで、コンクリートの性能面で施工性能の向上や長期強度の増進、耐久性の向上のメリットがある^{1),2)}。また、セメント代替によりセメント量が減少することで環境面のCO₂削減、性能面の水和熱の抑制やアルカリ骨材反応の抑制の効果もある。

これらのうち水和熱の抑制効果は、土木学会コンクリート標準示方書（以下、示方書）³⁾等のマスコンクリートの検討において、フライアッシュを混和したコンクリート（以下、FA）の終局断熱温度上昇量が、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートや高炉セメントB種を用いたコンクリート（以下、BB）の値に比べて小さいことから確認できる。また、嵩らの研究⁴⁾でも断熱温度上昇試験を実施して、FAの水和熱抑制効果を確認している。しかし、これらの研究成果は供試体で得られたものが多く、実構造物で検討された事例は少ない。

本研究では、北陸産の分級フライアッシュを混和したコンクリートの温度ひび割れ抑制効果の検討を目的に、圧縮強度試験、実構造物の計測、および温度応力解析を実施した。研究の流れを図-1に示す。実構造物での施

工の前に生コンクリート工場ではFAの配合を選定し、圧縮強度試験を行った。実構造物への打込みの際には、供試体を採取して圧縮強度試験を実施するとともに、熱電対とひずみ計を埋め込んで温度とひずみを計測した。

研究では圧縮強度試験の結果から圧縮強度の発現式を検討した。圧縮強度試験には金沢工業大学の試験室、生コンクリート工場の試験室と実機ミキサ、実構造物のコンクリートから採取した供試体を使用した。

次に現場で計測した温度とひずみを分析し、実構造物を模擬した温度応力解析を行い、計測値と解析値を比較した。計測は重力式擁壁、逆T型擁壁、六脚ブロックの3構造物で実施した。温度応力解析には実際の施工条件を模擬するとともに、配合から算定した断熱温度上昇特性および前記の圧縮強度の発現式を用いた。研究では七尾大田火力発電所で発生した分級フライアッシュ（JIS II種相当）をセメント置換率15%（内割）で使用した。

2. 圧縮強度発現式の検討

2.1 圧縮強度試験

FAの圧縮強度発現を検討するために、圧縮強度試験を実施した。検討対象は表-1に示すように試験グループ

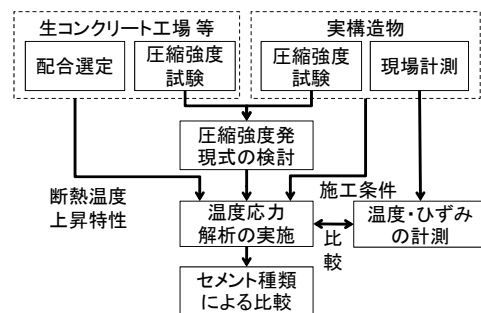


図-1 研究の流れ

*1 富山県立大学 工学部 環境工学科 准教授 博（工）（正会員）

*2 富山県立大学 工学部 環境工学科

*3 北陸電力株式会社 土木部 土木技術チーム 統括（正会員）

*4 金沢工業大学 環境・建築学部 環境土木工学科 教授 博（工）（正会員）

を4つ、粗骨材産地を3~4種類に変えた全15ケースとした。試験は粗骨材産地が常願寺川のケースを除き粗骨材最大寸法が25mm(常願寺川40mm)であり、直径D100mm、高さH200mm(常願寺川D125mm、H250mm)の円柱供試体を用いてJIS A 1108に準じて行った。セメント種類は普通ポルトランドセメントとした。試験を材齢7日、28日、56日、91日に実施することを基本に、いくつかのケースで材齢3日、5日、14日でも実施しており、全データ数は87個である。

2.2 試験結果

材齢28日と91日の圧縮強度試験の試験結果一覧を表-1に示す。すべてのケースにおいて材齢28日から91日で圧縮強度の増加が確認され、増加割合は1.235(23.5%)となった。増加割合の変動係数は4.6%であった。普通ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートの増加割合が約1割であることを考えると今回のFAの増加割合は大きいことが確認できた³⁾。

2.3 圧縮強度発現式

圧縮強度の発現式を得るために、各材齢の圧縮強度を材齢91日の圧縮強度に対する強度割合($f'_c(t)/f'_c(91)$)として整理した。強度割合を図-2に示す。材齢7日での平均値が0.56、変動係数が6.3%、材齢28日での平均値が0.81、変動係数が4.4%であった。これらの強度割合のうち材齢91日を除く72個のデータに対して、示方書の圧縮強度発現式(式(1))の a 、 b 、 $d(28)$ を検討した³⁾。

$$f'_c(t) = \frac{t}{a+bt} d(i) f'_c(91) \quad (1)$$

ここで、 t が材齢(日)、 i が設計基準強度の基準材齢(日)($i=28$ または 91)、 a と b がセメント種類による係数、 $d(28)$ が材齢28日に対する材齢91日の強度の増加率である。

検討には最小自乗法を用い、まず $d(91)$ を1に固定して a と b を変化させた時の差の2乗の合計値が最小となるように、 a と b を決めた。次に曲線の材齢28日の強度割合から $d(28)$ を決めた。検討の結果、 $a=6.37$ 、 $b=0.930$ 、 $d(28)=1.16$ となり、図-2の曲線(赤色)となった。以降の検討では、この発現式を使用することとした。ただし、この曲線は材齢14日と28日において試験データの上限值を通過しており、式(1)の形式ではFAの強度発現式への適合が十分でないことに留意が必要である。

3. 実構造物での計測および温度応力解析による検討

3.1 検討概要と共通事項

3つの構造物について、施工時にコンクリートの温度とひずみを計測し、構造物を模擬した温度応力解析を実施して、計測値と解析値を比較した。3構造物ともにコ

表-1 圧縮強度試験・試験ケース

試験グループ	粗骨材産地	配合		圧縮強度(N/mm ²)	
		W/B (%)	W (kg/m ³)	28日	91日
金沢工大室内試験	早月川	54.5	157	37.7	50.8
	庄川	50.0	150	35.7	48.5
	手取川	53.3	144	32.8	38.3
	能登	51.2	171	34.0	41.8
生コン工場室内試験	早月川	50.0	157	41.3	51.0
	庄川	50.0	150	37.3	46.1
	手取川	50.0	144	37.5	45.0
	能登	49.0	169	33.0	39.3
生コン工場実機試験	早月川	54.5	157	33.7	39.9
	手取川	53.3	144	30.3	36.9
	能登	51.2	171	26.2	31.6
	早月川	52.0	157	33.9	44.0
実構造物採取供試体	常願寺川	57.0	147	31.9	38.7
	手取川	53.3	144	31.7	38.1
	能登	54.6	171	25.4	31.7
	平均値			33.5	41.5

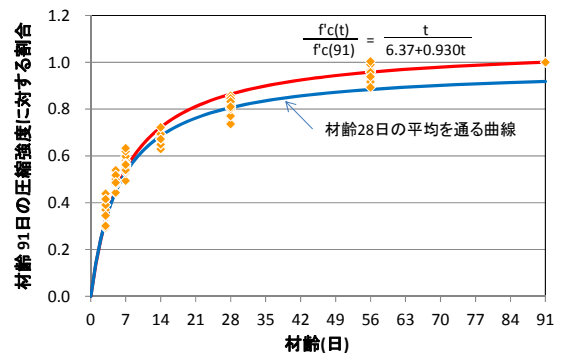


図-2 材齢91日に対する圧縮強度の割合

ンクリート種類の比較を目的に、FAとBBの異なる2種類を用いて施工した。計測は熱電対とひずみ計(測温機能付き)を用い、計測期間を1ヶ月程度とした。ひずみ計から得られた値は、計測器が受ける温度を考慮して補正した。ひずみの初期値は打込み完了時とした。

温度応力解析を解析プログラムASTEAMACSを用いて示方書に準拠して実施した^{3) 5)}。解析ケースは実施された2ケースに加え、BBの施工条件(形状寸法、打込み温度、外気温等)を用い、FAの断熱温度上昇特性と強度発現特性を用いたケースも実施した。

解析条件を表-2に示す。終局断熱温度上昇量 K と温度上昇速度 α は、セメント種類、単位セメント量(単位結合材量)および打込み温度から示方書の算定式に基づいて設定した。FAではフライアッシュセメントB種の算定方法を用いた。ヤング係数と引張強度は圧縮強度から算定することとし、初期クリープの影響を有効弾性係数法で考慮した。重力式擁壁と逆T型擁壁では構造物の寸法に対して3倍以上の寸法を持つ地盤を考慮し、地盤周囲は法線方向に拘束した。詳細は各節で記述した。

3.2 重力式擁壁

(1) 施工方法と計測方法

重力式擁壁は2011年秋に石川県で施工された。擁壁は高さ約2~3m、幅約2m、長さ20mのもので、道路線形

表-2 検討ケース、施工条件、および解析条件

			重力式擁壁			逆T型擁壁			六脚ブロック		
			FA	BB	BB-FA	FA	BB	BB-FA	FA	BB	BB-FA
配合条件	水結合材量比	W/B %	53.3	53.7	53.3	52.0	54.0	52.0	57.0	57.5	57.0
	単位結合材量(FA含)	B kg/m ³	297 (270)	316 (287)	297 (270)	302	293	302	258	260	258
	単位フライッシュ量	F kg/m ³	44 (40)	—	44 (40)	45	—	45	39	—	39
施工条件	打込み温度	T ₀ °C	21.8	24.2	24.2	12.6	17.5	17.5	30.4	30.2	30.2
	圧縮強度(材齢91日)	f _c N/mm ²	38.1	39.3	38.1	44.0	47.6	44.0	38.7	33.5	38.7
温度上昇特性 (解析)	終局断熱温度上昇量	K °C	46.08	52.56	46.08	48.42	50.32	47.34	40.62	44.68	40.62
	温度上昇速度	α	0.885	0.887	1.030	0.530	0.610	0.700	1.283	1.002	1.272
熱伝達境界 (解析)	熱伝達率	η W/m ² °C	6.0			表-3に従う			14.0		
	外気温	T _{air} °C	実測値			表-3に従う			実測値		
地盤条件	弾性係数	E _r N/mm ²	500			50			考慮していない		

*1 BB-FAとは、構造物の形状寸法や打込み温度、外気温の履歴をBBに合わせて、温度上昇特性と強度特性をFAとした解析ケース

*2 重力式擁壁の解析では最高温度を整合させるために単位結合材量を1.1倍して温度上昇特性を求めた。()内は原配合の単位量である。

表-3 逆T型擁壁の熱伝達境界条件

	FA		BB(BB-FA)	
	化粧型枠面側	埋戻し面側	化粧型枠面側	埋戻し面側
熱伝達率 η (W/m ² °C)	1.0(0-8日) 6.0(8-14日)	6.0(0-6日) 14.0(6-9日) 2.0(9-14日)	1.0(0-10日) 6.0(10-14日)	6.0
外気温 T _{air} (°C)	実測値	15°C(0-2日) 実測値 (2-14日)	実測値	実測値

に合わせて長さ方向に勾配を有する。温度は構造物の部材軸方向中央において図-3(a)のように表面付近、中央付近、その中間付近、ひずみ計位置、構造物外部(気温)の計5点に熱電対を設置し、測定した。ひずみも部材軸方向中央において図-3(a)のようにひずみ計を設置し、部材軸方向(図の奥行き方向)のひずみを測定した。

(2) 解析方法

解析モデルは地盤を考慮した2分の1モデルとし、擁壁全長にわたり中央位置の断面寸法を用いた(図-3(b))。熱伝達率は構造物にシート養生が行われたため、示方書の値を参考に6W/m²°Cとした。打込み温度と外気温の履歴、圧縮強度は実測した値を用いた。温度上昇特性を求めるための単位結合材量Bは、温度履歴の最高温度を整合させるためにFAとBBともに1.1倍して用いた。

(3) 温度履歴

FAとBBの計測と解析の温度履歴を図-4に示す。同図の計測値は構造物の中央付近に埋め込んだ熱電対によって、打込みから14日間計測された値である。最高温度を比較した結果、FAの計測値は54.1°C、解析値は52.8°Cとなり、BBの計測値は58.8°C、解析値は58.8°Cとなった。BBの値に比べ、FAの値が小さい要因は、打込み温度や温度上昇特性の影響と考えられた。

(4) ひずみ履歴

FAの計測と解析のひずみ履歴を図-5に示す。図中の実ひずみとはひずみ計で計測された値、温度ひずみとは温度変化量に線膨張係数(10×10⁻⁶/°C)を乗じた値、弾性ひずみとは実ひずみから温度ひずみを引いた値である。解析での実ひずみは構造物の体積変化が地盤から拘

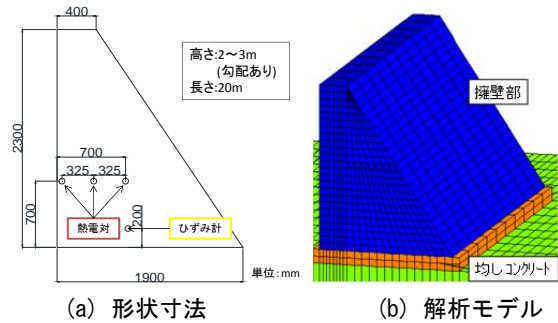


図-3 重力式擁壁の概要

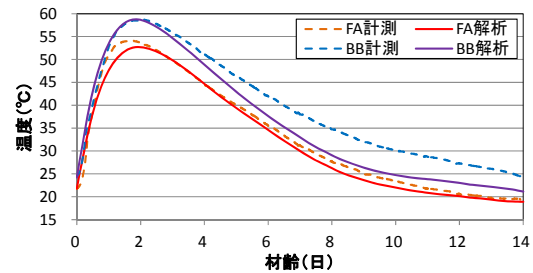


図-4 温度履歴(重力式擁壁, 中央点)

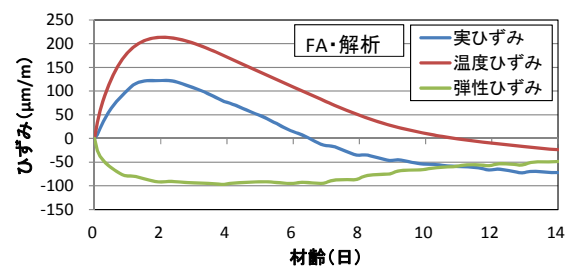
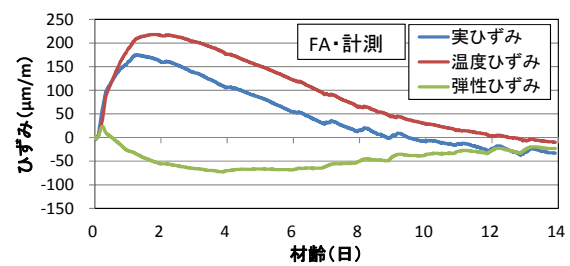


図-5 ひずみ履歴(重力式擁壁, FA)

束を受けたときの变形より求めている。解析の3つのひずみ履歴が計測のひずみ履歴とおおむね整合し、実構造物において理論どおりのひずみが生じたことが確認で

きた。相違する点として、解析の実ひずみが実測値よりも $50\mu\text{m/m}$ 程度小さいことがあり、要因は地盤側の強度物性を十分に再現できなかったことと考えられた。

3.3 逆 T 型擁壁

(1) 施工方法と計測方法

逆 T 型擁壁は 2011 年冬に富山県で施工された。擁壁は図-6(a)に示すようにベース部と壁体部からなる。実際の壁体部は道路線形に合わせて勾配を有する。FA の壁体部は高さ 3.89~4.21m (中央 4.05m), 幅 0.4m, 長さ 7.98m である。BB の壁体部が高さ 4.91~5.20m (中央 5.05m), 幅 0.5m, 長さ 7.98m である。FA ではベース部を打込んだあと 6 日 (BB : 5 日) で壁体部を打込んだ。壁体部の一方の側面には凹凸を有する最大厚さ 40mm の発泡スチロール製の化粧型枠が配置され、もう一方にはシート養生、給熱養生、土の埋戻しが行われた。熱電対は部材軸方向中央において、図-6(b)のように壁体部の高さ 2000mm の位置で両側の表面から 100mm の位置とその中間に設置した。ひずみ計も同様に部材軸方向中央において図-6(b)のように高さ 2000mm の位置の幅方向中央に、部材軸の向きに設置した。

(2) 解析方法

解析モデルは地盤を考慮した 2 分の 1 モデルとし、擁壁全長にわたり中央位置の断面寸法を用いた (図-6(a))。熱伝達率および外気温は、化粧型枠の脱型、シート養生、給熱養生、土の埋戻しを考慮して表-3 とした。打込み温度と圧縮強度は実測した値を用いた。

(3) 温度履歴

FA と BB の計測と解析の温度履歴を図-7 に示す。材齢 7 日以降の温度履歴はあまり一致しなかったが、最高温度や 7 日までの履歴では良く整合する結果となった。FA と BB を比較すると打込み温度の差が 4.9°C あることや部材厚の差が 100mm あること、温度上昇特性の違いから、最高温度に 7°C 程度の差異が生じた。

(4) ひずみ履歴

ひずみ履歴を図-8 に示す。FA では給熱養生や土の埋戻しの影響で、計測値が典型的な履歴とならなかったため、この影響のない BB の計測値と解析値、FA の解析値を比較する。

BB の計測値において材齢 2 日で温度ひずみと実ひずみの差に起因して負側 (圧縮側) の弾性ひずみが生じた。これは内部拘束型ひずみである。材齢 7 日で温度ひずみと実ひずみが一致し、それ以降は温度ひずみよりも実ひずみが大きくなり、正側 (引張側) の弾性ひずみが生じ、外部拘束型ひずみに移行した。

BB の計測値と解析値を比較すると、材齢 7 日まではほぼ一致したが、11 日以降に解析の温度ひずみと実ひずみが一致し、弾性ひずみがゼロとなり、異なる傾向とな

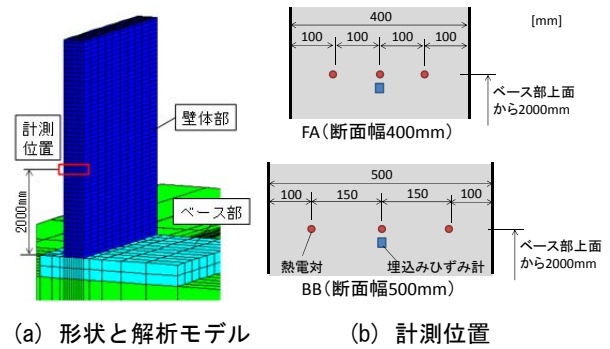


図-6 逆 T 型擁壁の概要

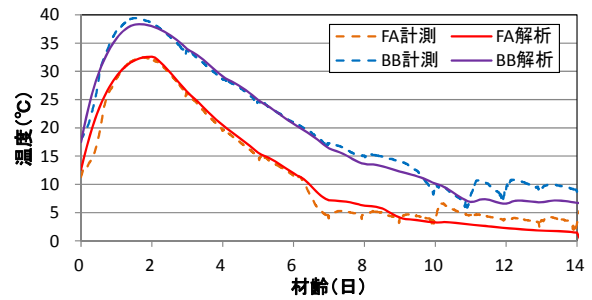


図-7 温度履歴 (逆 T 型擁壁, 中央点)

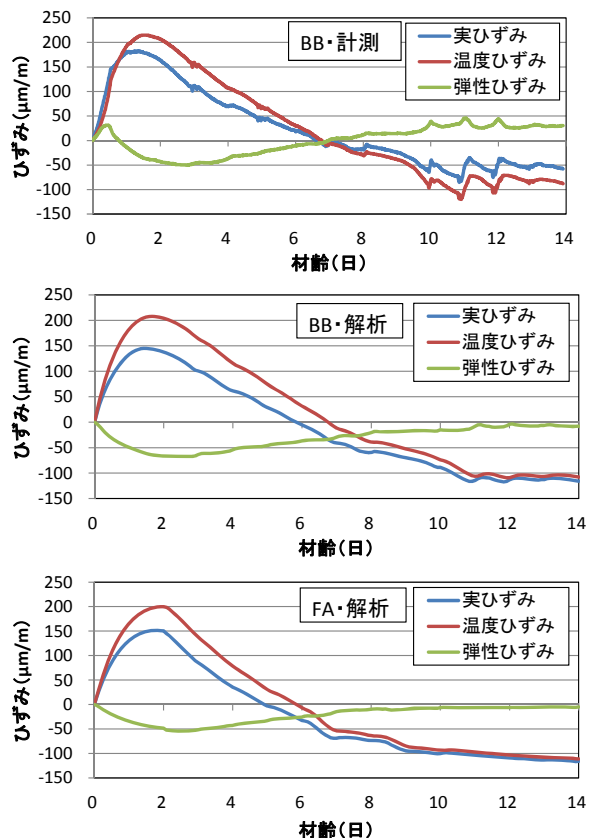


図-8 ひずみ履歴 (逆 T 型擁壁, BB・FA)

った。FA の解析でも同様の傾向を示した。計測値で正側の弾性ひずみが生じた要因は、逆 T 型擁壁の部材厚が 500mm (V/S=約 250mm) と小さく、乾燥収縮によるひずみが生じたことと考えられた。それに対して解析では乾燥収縮による体積変化を考慮しなかった。

3.4 六脚ブロック

(1) 施工方法と測定方法

六脚ブロックは 2012 年夏に富山県で施工された。構造物は、図-9 に示すように一辺 0.64m の立方体の脚を 6 つ持つ高さ 1.92m、幅 1.92m の護岸用ブロックである。熱電対は図-9 (a) のように中心に設置した。ひずみ計は鉄筋軸に平行において高さ方向中央に設置した。

(2) 解析方法

解析モデルはブロックの対称性を考慮して 8 分の 1 でモデル化した (図-9 (b))。熱伝達率 η は鋼製型枠が用いられたため、 $14\text{W/m}^2\text{C}$ を用いた。打込み温度、外気温の履歴、圧縮強度は実測した値を用いた。

(3) 温度履歴

FA と BB の計測と解析の温度履歴を図-10 に示す。FA と BB の解析値は、ともに材齢 3 日以降の温度が 2C 程度低い傾向にあったが、最高温度や初期の履歴など他の部分では良く整合する結果となった。FA と BB の最高温度は 50C 程度と同様になった。

(4) ひずみ履歴

FA の計測と解析のひずみ履歴を図-11 に示す。計測した実ひずみでは、温度上昇とともに正側 (伸び側) に大きく、温度下降とともに小さくなり、温度と整合した履歴であった。計測の材齢 7 日以降において、温度ひずみと実ひずみに差が見られ、正側の弾性ひずみが生じた。これは乾燥収縮ひずみの影響と考えられた。

4. ひび割れ抑制効果に関する検討

4.1 コンクリート種類を変えた比較

BB の施工条件 (形状寸法、打込み温度 等) を用い、BB と FA の断熱温度上昇特性と強度発現特性を用いた 2 ケースの解析を実施し、ひび割れ指数を比較した。

(1) 重力式擁壁

重力式擁壁のひび割れ指数の比較を図-12 に示す。同図は材齢 14 日までの最小値である。また同図では外部拘束型の応力が卓越する中心部分と内部拘束型の応力が卓越する表面部分において、最小ひび割れ指数の数値を表示した。中心部分の FA の値は 1.35, BB の値は 1.29, 表面部分の FA の値は 1.23, BB の値は 1.14 となり、いずれも FA の値が大きくなった。これは前述の温度上昇特性に加え、強度発現が影響したと考えられる。

(2) 逆 T 型擁壁

逆 T 型擁壁のひび割れ指数の比較を図-13 に示す。同図は材齢 14 日までの最小値である。解析の最高温度、最大引張応力がほぼ同じ値になったため、最小ひび割れ指数も同様の値になった。今回の逆 T 型擁壁のように部材厚 500mm と小さいときに、温度上昇特性の影響は小さく、FA の温度ひび割れ抑制効果は現れなかった。

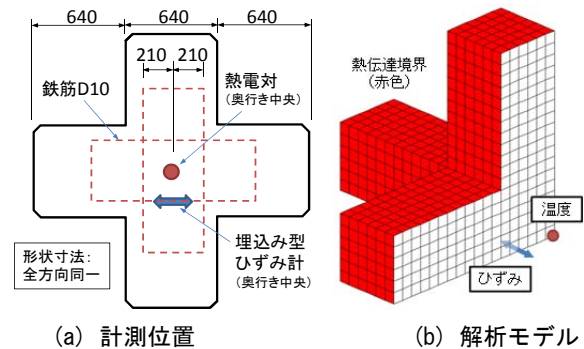


図-9 六脚ブロックの概要

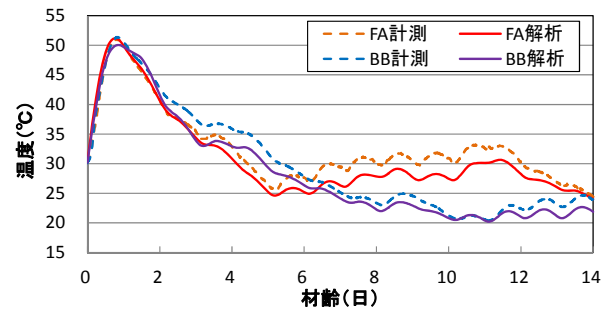


図-10 温度履歴 (六脚ブロック, 中心点)

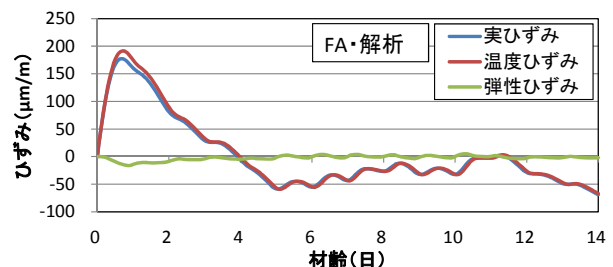
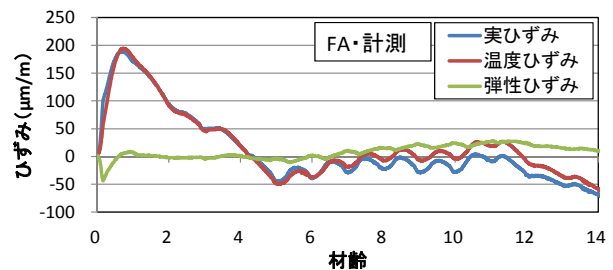


図-11 ひずみ履歴 (六脚ブロック, 中心点, FA)

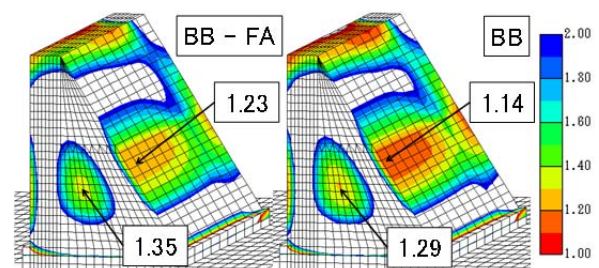


図-12 ひび割れ指数分布 (重力式擁壁)

(3) 六脚ブロック

六脚ブロックは外部からの拘束をほとんど受けないため、温度が安定した材齢 3 日以降、引張応力が発生せず、ひび割れ指数も大きくなった。そのため、図-14 では内部拘束型応力に着目して材齢 0.5 日のひび割れ指数

分布を示した。両者のひび割れ指数は同様の値となった。その要因は脚部の部材厚が 0.64m であり、5 面に熱伝達境界があることから、外気温の影響を受けやすく、セメント種類の違いによる断熱温度上昇量の違いの影響が小さかったためと考えられた。

4.2 効果が得られる構造物条件の検討

本検討において、FA によるひび割れ抑制効果は部材厚が大きい場合に得られ、小さい場合に得られなかった。そこで、FA と BB の温度差が生じる部材厚について、一次元温度解析を用いて検討した。解析条件は単位結合材量 300kg/m^3 、打込み温度および外気温 20°C 、熱伝達率 $14\text{W/m}^2\text{C}$ とした。断熱温度上昇特性は示方書に従って計算し、表-4 の値を用いた。

解析結果を図-15 に示す。横軸に部材厚、縦軸に FA と BB の最高温度の差、第 2 縦軸に FA と BB の中心点の最高温度を示す。最高温度の差は部材厚 0.5m でほぼゼロであり、部材厚が大きくなるのともなって大きくなり、部材厚 5m で 4°C 程度まで大きくなった。今回の逆 T 型擁壁や六脚ブロックの部材厚では最高温度の差がほとんどなく、FA による温度上昇の抑制効果は小さいことが確認できた。

この効果に加えて FA の流動性改善の利点を使い、配合設計で同一スランプを得るための単位水量を減少させ、単位結合材量を減少させることで、終局断熱温度上昇量と温度上昇速度をさらに小さくすることができる。重力式擁壁では FA の単位結合材量が 270kg/m^3 であることに対して BB の値が 287kg/m^3 であり、その利点を温度上昇の抑制に活かしている。

5. まとめ

本研究において得られた知見を以下にまとめる。

- 1) フライアッシュコンクリートの圧縮強度発現式を提案した。
- 2) 温度応力解析を用いることで、フライアッシュコンクリート構造物で計測した温度履歴およびひび割れ履歴をおおむね再現することができた。
- 3) 検討対象とした 3 構造物のうち重力式擁壁において、コンクリートを BB から FA に代えて使用することで、ひび割れ抑制に効果があることが確認できた。逆 T 型擁壁と六脚ブロックでは抑制効果は小さかった。
- 4) 部材厚が大きい構造物に適用することで FA の温度上昇抑制効果が大きくなり、配合設計で単位結合材量を減らすことで効果がより大きくなることを示した。

謝辞

本研究は「北陸地方におけるコンクリートへのフライアッシュの有効利用促進検討委員会（鳥居和之委員長）」

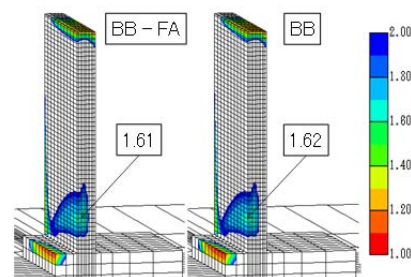


図-13 ひび割れ指数分布（逆 T 型擁壁）

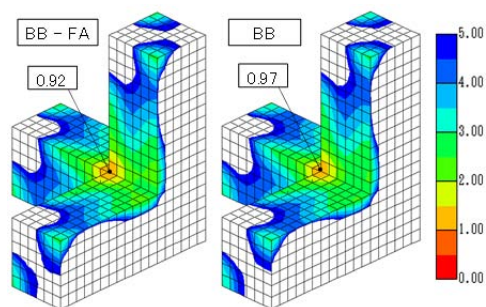


図-14 ひび割れ指数分布（六脚ブロック）

表-4 断熱温度上昇特性

		FA	BB
終局断熱温度上昇量	K	46.5	50.9
温度上昇速度	α	0.783	0.688

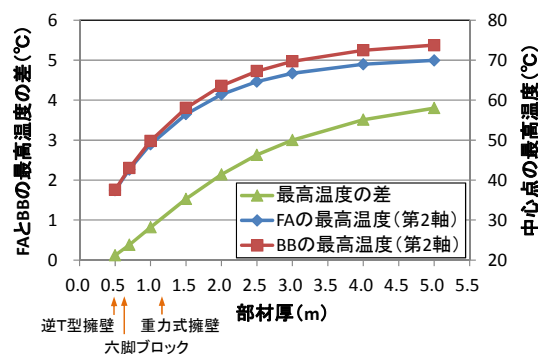


図-15 部材厚と中心点の最高温度の関係

の一部として行った。ご指導・ご協力頂きました皆様に対してここに感謝の意を示します。

参考文献

- 1) 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
- 2) 鳥居和之:フライアッシュ活用によるコンクリートの高耐久化—北陸地方の ASR 問題への取り組みと情報発信—, 電力土木, No.357, pp.11-15, 2012
- 3) 土木学会:コンクリート標準示方書・設計編, 2007
- 4) 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
- 5) 計算力学研究センター: ASTEA-MACS 資料, 2010