

分級フライアッシュを用いたコンクリートの防潮堤への適用

白根 勇二*¹・山田 倫*²・笹倉 伸晃*³・橋本 徹*⁴・久保 哲司*⁴・舟橋 政司*¹

An Application of Concrete using Classified Fly Ash to Seawall

Yuji SHIRANE, Hitoshi YAMADA, Nobuaki SASAKURA, Toru HASHIMOTO, Tetsuji KUBO, Masashi FUNAHASHI

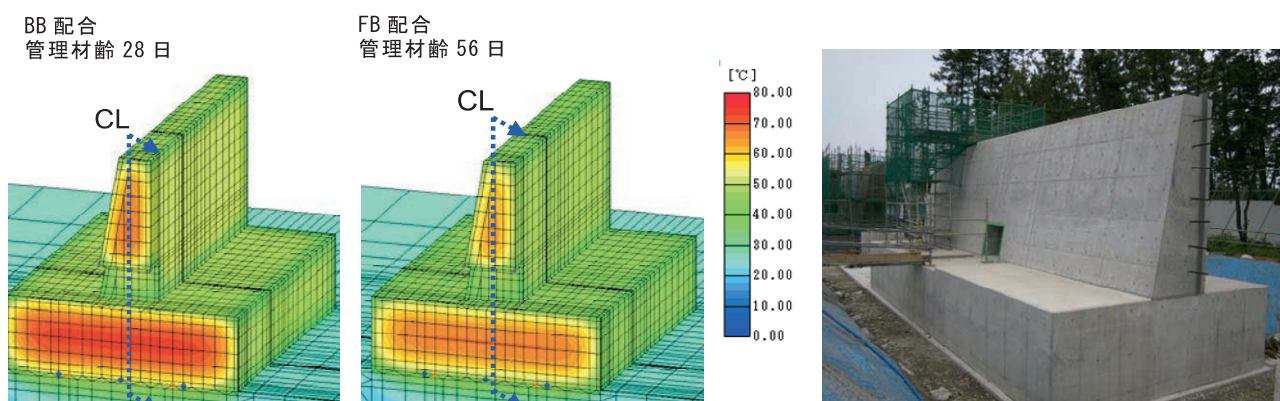


図-1 温度解析結果

写真-1 防波堤の完成状況

研究の目的

フライアッシュをコンクリート材料に利用する利点として、施工性能の向上、水和発熱の抑制、耐久性の向上などが挙げられる。また最近では、産業副産物の有効利用や、セメント材料の使用量抑制による環境負荷低減にも期待が寄せられている。

志賀原子力発電所の防潮堤構築工事では、七尾大田火力発電所から産出される分級フライアッシュを用いたコンクリートを初めて本格的に適用した。

技術の説明

分級フライアッシュを用いたコンクリートを防潮堤に適用するにあたり、強度特性、温度特性などを把握するとともに、防潮堤の温度ひび割れ抑制対策について検討した。そして、温度ひび割れの発生を最小限に抑えるためには、フライアッシュの水和熱抑制効果や強度増進効果を生かした配合設計が必要と考え、コンクリートの管理材齢延長による効果を検証した。

主な結論

- ・ 分級フライアッシュを用いたコンクリートは、従来用いられている高炉セメントB種セメントよりも水和発熱時の温度上昇が抑制されること、材齢 56 日においても圧縮強度が増加するため管理材齢を延長することが可能で、単位セメント量の減少できることから、温度ひび割れ抑制に効果が期待できることを示すことができた。
- ・ 実施工においてフライアッシュコンクリートの管理材齢を 56 日とすることで、構築した防潮堤には有害なひび割れは発生せず、温度ひび割れ抑制や品質向上に寄与することができた。

*1 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ
*2 北陸支店 土木施工グループ

*3 本店 土木設計・技術部
*4 北陸電力株式会社 土木部 土木技術チーム

分級フライアッシュを用いたコンクリートの防潮堤への適用

白 根 勇 二^{*1} 山 田 倫 ^{*2}
 笹 倉 伸 晃^{*3} 橋 本 徹 ^{*4}
 久 保 哲 司^{*4} 舟 橋 政 司^{*1}

要 旨

フライアッシュをコンクリート材料に利用する利点として、施工性能の向上、水和発熱の抑制、耐久性の向上などが挙げられる。また最近では、産業副産物の有効利用や、セメント材料の使用量抑制による環境負荷低減にも期待が寄せられている。

志賀原子力発電所の防潮堤構築工事では、七尾大田火力発電所から産出される分級フライアッシュを用いたコンクリートを初めて本格的に適用した。適用にあたり、分級フライアッシュを用いたコンクリートによる温度ひび割れ抑制対策について検討した。温度ひび割れの発生を最小限に抑えるためには、フライアッシュの水和熱抑制効果や強度増進効果を活かした配合設計が必要と考え、コンクリートの管理材齢を延長することによる効果について検証した。

本論文では、これらの検討内容について報告する。

キーワード 分級フライアッシュ／フライアッシュコンクリート／温度ひび割れ／管理材齢／防潮堤

目 次

- | | |
|-----------------|---------------------|
| 1. はじめに | 4. 温度ひび割れ対策の検討 |
| 2. 対象構造物および検討概要 | 5. フライアッシュコンクリートの施工 |
| 3. コンクリートの使用材料 | 6. まとめ |

An Application of Concrete Using Classified Fly Ash to Seawall

Yuji SHIRANE	Hitoshi YAMADA
Nobuaki SASAKURA	Toru HASHIMOTO
Tetsuji KUBO	Masashi FUNAHASHI

Synopsis:

Several advantages such as the improvement of workability, reduction of hydration heat, and improvement of durability are obtained by using fly ash into concrete. Reduction of environmental impacts by the utilization of industry waste and reduction of cement quantity are also expected recently.

The Concrete using classified fly ash was used for the seawall construction in the Shika Nuclear Power Plant. The classified fly ash was produced in Nanao-Ohta Thermal Power Plant.

Authors studied the effectiveness of classified fly ash on the reduction of thermal cracks. Through this study, it was clarified that the mix design of concrete shall be made to maximize the effects of classified fly ash on the reduction of thermal heat generation and the long term strength development. Finally, it was verified that the extension of controlling test age of concrete is recommended to increase the efficiency of classified fly ash on the reduction of thermal cracks.

* 1 本店 技術研究所 基盤技術研究グループ
 * 2 北陸支店 土木施工グループ

* 3 本店 土木設計・技術部 技術開発グループ
 * 4 北陸電力株式会社 土木部 土木技術チーム

1. はじめに

石炭火力発電所では、微粉炭の燃焼に伴う副産物として石炭灰（フライアッシュ、クリンカアッシュ）を産出する。石炭火力発電所は安定的な電力供給を確保するうえで非常に重要な役割を担っており、今後も石炭灰の産出量は増加することが予測されている。そのため、地球環境の保全や資源リサイクルの観点から石炭灰の有効利用を促進することを目的に、法改正や継続的な技術開発が行われており、普及拡大の検討が進められている。

フライアッシュに関わる規準は、「コンクリート用フライアッシュ（JIS A 6201）」や「フライアッシュセメント（JIS R 5213）」の JIS 規格が整備されており、コンクリートへ利用することでワーカビリティの改善、コンクリート発熱量の低減、長期強度の増加、アルカリ骨材反応の抑制、化学抵抗性の向上などの効果をもたらすと言われている。しかし、フライアッシュの品質のばらつき、供給体制の整備不足、配合設計手法の未整備などにより、必ずしも利用しやすい環境ではなく、実構造物への適用が進んでいないのが実状である。

一方、北陸地方では平成 23 年から産官学が連携して委員会を立ち上げ、コンクリート構造物の長寿命化と建設資材の地域的な活用による環境負荷低減を目指し、コンクリートへのフライアッシュの有効利用促進を図っている¹⁾。七尾大田火力発電所ではフライアッシュの高品質化、品質の安定を目的に分級装置を稼働させてフライアッシュを製造しており、委員会ではこの分級フライアッシュ（JIS A 6201 II 種品）を用いたコンクリートの性能の検証を進めている。

志賀原子力発電所の防潮堤の構築工事では、七尾大田火力発電所で製造された分級フライアッシュを使用したコンクリート（以下、フライアッシュコンクリートとする）が実工事へ初めて本格的に適用された。適用にあたり著者らは、フライアッシュコンクリートの強度特性、温度ひび割れ抵抗性、施工性などについて検討を行った。そして、ひび割れの少ない構造物の構築を目指し、分級フライアッシュを用いたコンクリートの強度発現特性や水和発熱抑制効果を活かした配合選定が必要と考え、一部、管理材齢延長によるひび割れ抑制対策を実施することとした。

2. 対象構造物および検討概要

2.1 対象構造物

本工事は、既設原子力発電所が地震・津波の影響により機能が喪失しないよう、発電所敷地内への浸水防止対策として防潮堤（全長約 690m）を構築する工事である。

防潮堤の標準断面を図-1 に示す。防潮堤は逆 T 字型の RC 造であり、杭径 3m の場所打ち杭（RC 造）、厚さ 2.0m のフーチング、高さ 4.0m の壁部で構成され、1 ブロックあたりのスパン長は 15.0m が標準となっている。フ

ーチングと壁部の設計基準強度は、 24N/mm^2 である。

フライアッシュコンクリートは、場所打ち杭、フーチングおよび壁部の全てに適用し、総コンクリート量は $17,000\text{m}^3$ であった。

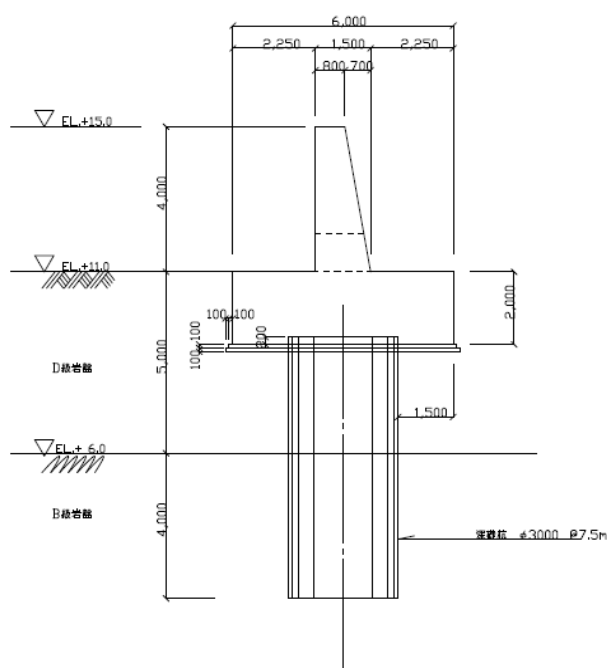


図-1 防潮堤の標準断面図

2.2 検討概要

図-2 に、フライアッシュコンクリートによる防潮堤構築工事の施工完了までの検討フローを示す。

まず、フライアッシュコンクリートの適用にあたり、製造を予定した生コンクリート工場（2 工場）においてフライアッシュコンクリートの強度特性を把握することを目的に、水セメント比などをパラメータとした配合試験を実施した（STEP1）。

対象構造物の防潮堤は部材断面が大きく、マスコンクリート構造物として取り扱われるため、温度ひび割れに対する検討が必要であった。防潮堤は海岸から 100m 以内

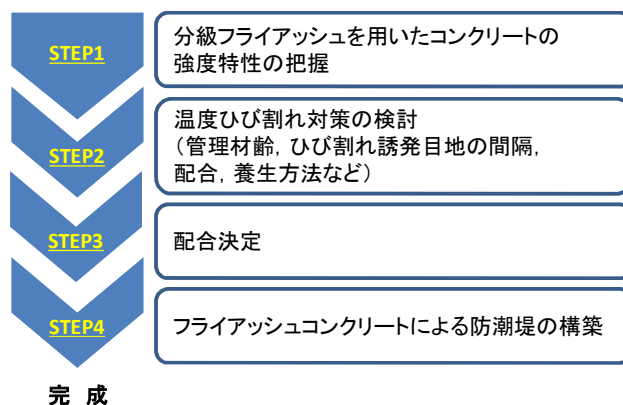


図-2 施工完了までの検討フロー

に位置しており，特に気中に曝される壁部に対する耐久性を考慮しなければならない．したがって，温度応力解析を実施し，有害なひび割れが発生しないよう対策の検討（ひび割れ誘発目地の間隔設定，配合，養生方法など）を行った（STEP2）．そして，この結果をもとに，配合試験を実施してフライアッシュコンクリートの配合を決定し（STEP3），防潮堤の構築工事に適用した（STEP4）．

本論文では，これらの検討のうち，主に STEP2 の温度ひび割れ対策の検討内容について報告する．

3. コンクリートの使用材料

フライアッシュコンクリートの使用材料を表-1 に示す．製造工場は A 工場と B 工場の 2 プラントであるが，いずれのプラントも分級フライアッシュを別計量するための貯蔵ビンや計量ビンを保有していなかった．そのため，分級フライアッシュは予め 17wt% の割合でポルトランドセメントに混合し，フライアッシュセメント B 種として使用した．

表-1 使用材料

種別		仕様・物性
セメント C		フライアッシュセメント B 種 密度 2.97g/cm ³ ，比表面積 3510cm ² /g
A 工場	細骨材 S	伊久留産山砂（七尾市） F.M.=2.66，密度=2.51g/cm ³ ，吸水率=1.86%
	粗骨材 G	庄川産陸砂利（小矢部市），Gmax=25mm F.M.=6.87，密度=2.64g/cm ³ ，吸水率=1.53%
	水 W	水道水
B 工場	細骨材 S	岩屋産山砂（七尾市）， F.M.=2.56，密度=2.54g/cm ³ ，吸水率=2.56%
	粗骨材 G	青海産石灰石砕石（糸魚川市），Gmax=20mm F.M.=6.77，密度=2.70g/cm ³ ，吸水率=0.50%
	水 W	地下水（10%）および上澄水（90%）
混和剤 1 AD		AE 減水剤：リグニンスルホン酸系
混和剤 2 AE		AE 剤：変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

表-2 分級フライアッシュの品質²⁾

項目		JIS 規格 Ⅱ 種	分級フライアッシュのデータ			
			最大	最小	平均	標準 偏差
二酸化けい素(%)		45.0 以上	63.6	51.9	57.8	3.6
湿分(%)		1.0 以下	0.4	<0.1	-	-
強熱減量(%)		5.0 以下	2.4	1.3	1.9	0.3
密度(g/cm ³)		1.95 以上	2.48	2.30	2.40	0.04
粉末度	45 μm 以下の残分(%)	40 以下	1.3	0.1	0.5	0.3
	比表面積 (cm ² /g)	2500 以上	5130	4330	4794	173
フロー値比(%)		95 以上	111	103	107	2.0
活性度 指数(%)	材齢 28 日	80 以上	96	82	89	4.1
	材齢 91 日	90 以上	110	96	103	3.5

分級フライアッシュの品質を表-2 に示す．分級フライアッシュは JIS A 6201 のⅡ種品であるが，分級により粒径の細かいものが多く，一般的なⅡ種品よりも比表面積が大きいという特徴を有する．そのため，フロー値比や活性度指数の値も従来のⅡ種品よりも大きく，流動性や強度発現性が改善されている²⁾．

また，工場によって骨材の産地および岩種が異なり，粗骨材は A 工場では陸砂利，B 工場では石灰石砕石を使用している．

4. 温度ひび割れ対策の検討

4.1 検討概要

STEP1 として強度特性把握を目的に A 工場と B 工場で配合試験を実施した結果，2 工場間でフライアッシュコンクリートの強度発現性が異なり，A 工場の強度が小さい傾向となった．この強度発現性の違いの要因は，粗骨材種類の違いにより骨材とモルタル界面の付着性状が異なることが影響しているものと推察される．

強度発現性が小さいコンクリートの場合，水セメント比を小さく設定する必要があるが，単位セメント量が増加することになるため水和発熱量が大きくなり，温度ひび割れの発生の可能性が高まることが懸念される．一方，フライアッシュはポゾラン反応による長期強度の増加も期待できる材料であり，材齢 28 日に所要の強度を達成していなくても，材齢が経過することで必要強度を満足する場合がある．したがって，フライアッシュコンクリートの管理材齢を長く設定することで，単位セメント量の抑制に繋がることが期待される．

そこで，三次元有限要素法による温度応力解析を実施し，フライアッシュセメントの使用，および管理材齢延長による温度ひび割れの抑制効果を検証した．

温度応力解析の代表ケースを表-3 に示す．ここでは，A 工場の配合を対象に，壁部の外部拘束型の温度ひび割れが発生する可能性が高まる夏季施工時について検討した．ケース 1 はフライアッシュセメント B 種を用い，単位セメント量の低減を目的に管理材齢を 56 日とした配合，ケース 2 は同じくフライアッシュセメント B 種を用い，管理材齢を通常の 28 日とした配合，ケース 3 は高炉セメント B 種を用い，管理材齢を 28 日とした配合である．ケース 1 とケース 2 の水セメント比および単位セメント量は，

表-3 温度応力解析の検討ケース（対象：A 工場）

ケース	配合名	管理 材齢	W/C (%)	単位セメント量 (kg/m ³)
ケース 1	27-12-25FB ₅₆	56 日	52.0	318
ケース 2	24-12-25FB ₂₈	28 日	48.3	342
ケース 3	27-12-25BB ₂₈	28 日	50.0	340

STEP1 のフライアッシュコンクリートの強度特性把握のために実施した配合試験結果から決定したものであり、ケース 3 は A 工場の実績配合である。壁部とフーチングの設計基準強度は 24N/mm^2 であったが、ケース 1 とケース 3 は、呼び強度 24 の配合を適用した場合、水セメント比の上限値 ($W/C \leq 55\%$) を満足できないため、呼び強度 27 の配合を選定した。ケース 1 の単位セメント量は 318kg/m^3 で、管理材齢を 28 日から 56 日に延長することで単位セメント量を 24kg/m^3 低減した（ケース 2 : 342kg/m^3 ）。

参考までに、図-3 にケース 1 とケース 2 の圧縮強度の発現履歴を示す。ケース 2 の材齢 56 日における圧縮強度は、ケース 1 の材齢 28 日における圧縮強度よりも大きくなっており、ケース 2 の配合で管理材齢を延長することが可能であることがわかる。また、いずれの配合も材齢 28 日から 56 日の圧縮強度の増加がそれ以前よりも大きく、フライアッシュコンクリートが長期強度の発現が大きいことを確認することができる。

図-4 に解析モデルを示す。防潮堤の標準ブロック長は 15m であるが、対称断面のため 1/2 モデルとした。実際の構造物に合わせ、ブロック中央部には排水ゲート ($1,000\text{mm} \times 1,000\text{mm}$) を、フーチング下部には直径 $3,000\text{mm}$ の杭基礎をモデル化（等価な断面積の矩形断面）した。また、壁部はフーチングによる外部拘束が大きいため、事前に実施した温度応力解析の結果からひび割れ誘発目地を 5m 間隔で 2 本設けること、壁部のコンクリート施工はフーチング施工後 14 日とすることを共通条件とした。

図-5 に断熱温度上昇特性を示す。ケース 1 とケース 2 は、試験で得られた結果から算定した近似式を解析条件として使用した。ケース 3 の断熱温度上昇特性は、「マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008」³⁾を参考に設定した。

また、その他の熱物性や硬化物性に関する入力条件は、同様に「コンクリートのひび割れ制御指針 2008」を参考とした。

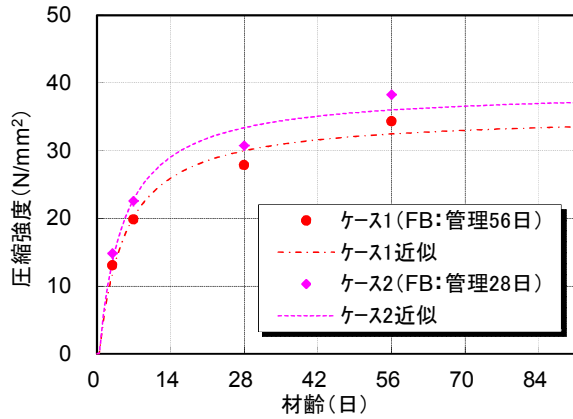


図-3 各ケースの圧縮強度発現履歴

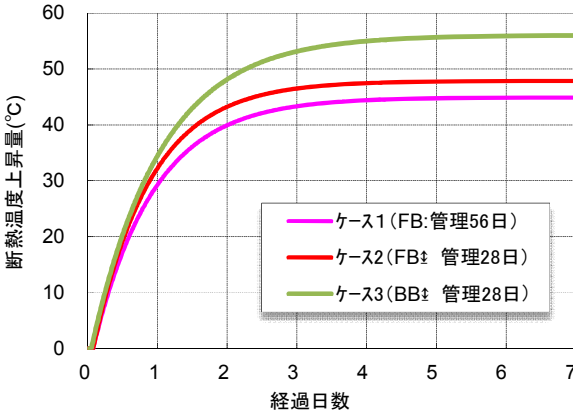


図-5 各ケースの断熱温度上昇特性

表-4 温度解析結果（コンクリート最高温度）

ケース	配合名	フーチング 最高温度 (°C)	壁部 最高温度 (°C)
ケース1	27-12-25FB ₅₆	64.2	62.8
ケース2	24-12-25FB ₂₈	67.2	65.8
ケース3	27-12-25BB ₂₈	72.7	69.8

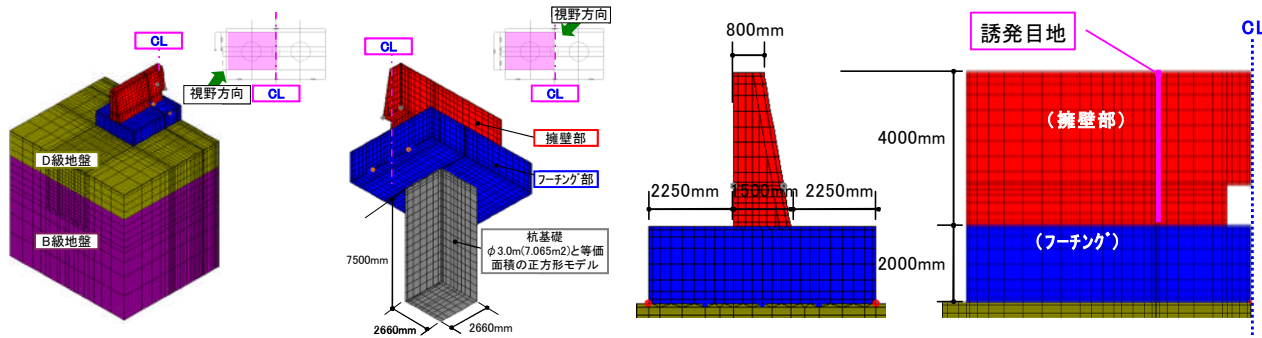


図-4 温度応力解析のモデル

4.2 検討結果

表-4 に夏季施工を対象に実施した温度解析の結果を示す。また、図-6～図-8 に、各ケースのコンクリート最高温度分布図と温度履歴図を示す。

一般的な土木構造物に用いられることが多い高炉セメント B 種を用いたケース 3 では、コンクリート最高温度がフーチングで 72.7℃、壁部で 69.8℃とであった。これに対し、フライアッシュセメント B 種を用いたケース 2（管理材齢 28 日）では、フーチングで 67.2℃、壁部で 65.8℃に低下し、セメントの発熱量が小さいフライアッシュセメント B 種を使用することによる水和発熱の抑制効果を確認できる。さらに、管理材齢を 56 日としたケース 1 では、フーチングで 64.2℃、壁部で 62.8℃となり、管理材齢の延長によって単位セメント量が減少したことに

よる効果を確認できる。以上の結果、フライアッシュセメントの適用と管理材齢の延長によって、コンクリートの最高温度が 7℃～8.5℃抑制される結果となった。

実施工に適用する配合は、応力解析の結果も考慮して、表-3 に示す「ケース 1」を選定した。

5. フライアッシュコンクリートの施工

温度ひび割れの事前検討を実施した結果、A 工場では製造されるフライアッシュコンクリートは管理材齢が 56 日の配合を適用した。

写真-1 および写真-2 に、防潮堤の外観を示す。防潮堤のフーチングおよび壁部に有害なひび割れの発生は認められず、断面が非常に大きい構造物においてもフライアッシュコンクリートの温度ひび割れ抑制果を確認するこ

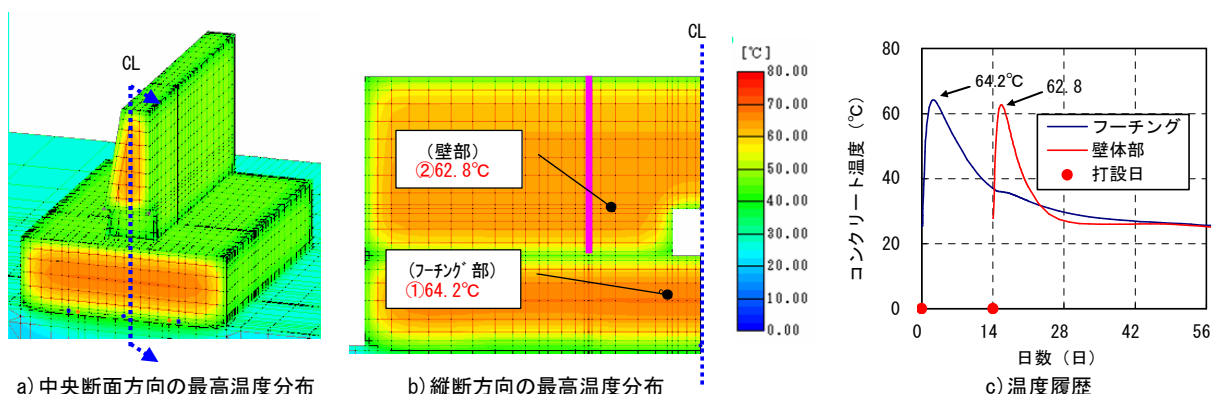


図-6 コンクリート温度（ケース1：27-12-25FB（管理材齢56日））

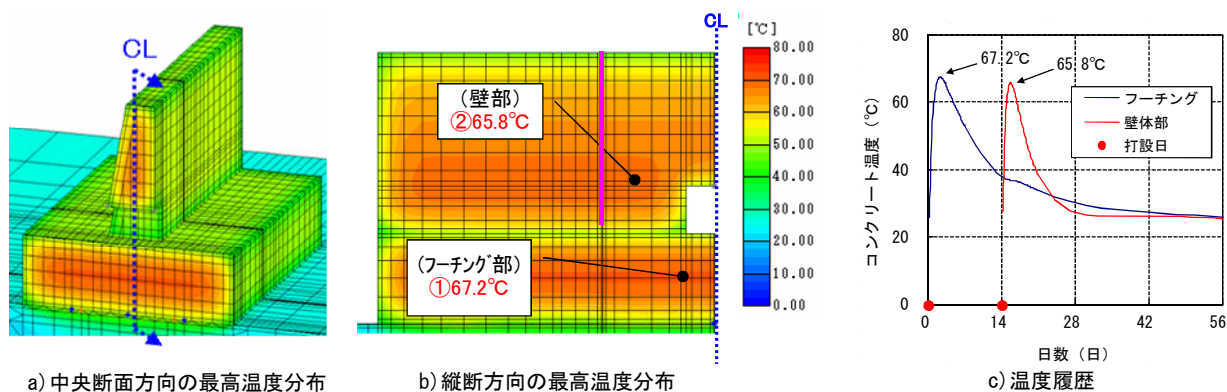


図-7 コンクリート温度（ケース2：24-12-25FB（管理材齢28日））

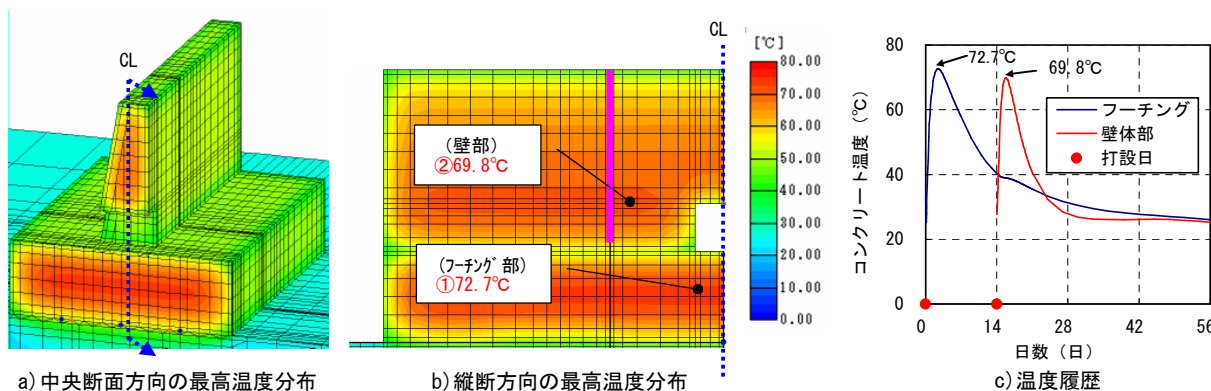


図-8 コンクリート温度（ケース3：27-12-25BB（管理材齢28日））



写真-1 防潮堤の外観（陸側）



写真-2 防潮堤の外観（海岸側）

とができた。また、コンクリート表面に色むらや表面気泡が非常に少なく、良好な仕上がりであった。

6. まとめ

分級フライアッシュを用いたコンクリートの防潮堤への適用にあたり、各検討を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 温度解析の結果、フライアッシュコンクリートは従来から使用されている高炉セメント B 種よりもコンクリートの温度上昇量が小さく、温度ひび割れ抑制に有効であることが示された。
- (2) 分級フライアッシュを用いたコンクリートは、材齢 28 日においても圧縮強度が増加するため管理材齢を延長することが可能であることが確認された。
- (3) 事前の配合検討およびひび割れ対策検討に基づき、分級フライアッシュの特性を活かした配合選定を行い、管理材齢を 56 日とした結果、有害なひび割れの無い防潮堤を構築することができた。

謝辞：本検討に際し、「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（委員長：金沢大学鳥居教授）」の関係者の皆様にご指導・御協力頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 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：報告書（富山・石川版），2012.3
- 2) 橋本徹，参納千夏男，江田明孝，鳥居和之：北陸産分級フライアッシュを用いたコンクリートの配合と強度，コンクリート工学年次論文集，Vol.35，No.1，pp.133-138，2013.
- 3) 公益社団法人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 2008，2008.11