

# フライアッシュセメントを用いたダムコンクリートの断熱温度上昇特性に関する検討

## A Study on the Characteristics of Adiabatic Temperature Rise of Dam Concrete Using Fly Ash Cement

小林 聖 坂井 吾郎 取違 剛  
坂田 昇<sup>1)</sup> 石田 哲也<sup>2)</sup>

### 要 約

RCD 工法で施工されたコンクリートダム内部温度を調べ、FEM による温度解析結果との比較を行った。その結果、実際の堤体内部の温度履歴は施工前に実施した温度解析の結果と大きく異なり、長期的に温度が上昇して想定よりも高い温度に達していることが確認された。そこで、その原因および影響について実験および解析による検討を行い、ダムコンクリート用セメント (MF30) の一般に解析で用いている断熱温度上昇特性がフライアッシュのポズラン反応に伴って長期的に生じる水和熱を適切に表現できていないこと、それによって現況の温度応力解析は危険側の結果を与える可能性があることを明らかにした。

### 目 次

- I. はじめに
- II. 堤体内部温度の測定結果と解析結果の乖離
- III. 乖離の理由
- IV. 簡易断熱試験による断熱温度上昇式の検証
- V. ダム堤体内部温度の上昇に着目した温度応力解析
- VI. まとめ

#### I. はじめに

1970 年代後半から 1980 年代にかけて開発された RCD (Roller Compacted Dam-Concrete) 工法は、コンクリートダムの施工において革新的な合理化をもたらした。RCD 工法は面状工法であり、大型の汎用機械を用いた連続的な施工が可能という特徴により、大量施工とこれによる工期の短縮、工事費の削減、作業の安全性向上などを実現しており、現在では従来の柱状ブロック工法に替わってダム施工の標準的な工法となっている。また、近年では、品質を確保した上で、さらなる施工の高速化を達成する工法として最新の RCD 工法 (以下、巡航 RCD 工法) が開発されており<sup>1)</sup>、これまでにない短工期での建設を実現するに至っている。

一方、コンクリートダムに用いられるセメントは、温度ひ

び割れを抑制するために「水和熱の小さいものを用いなければならぬ」とされている<sup>2)</sup>。その種類としては、中庸熱ポルトランドセメント、高炉セメント B 種、フライアッシュセメント B 種または C 種などが用いられてきたが、RCD 工法や拡張レーヤ工法のような面状工法においては、水和熱のさらなる抑制を目的に、中庸熱ポルトランドセメントをベースに、質量で 30% 程度をフライアッシュに置換したダム用セメント (以下、MF30) が標準的に用いられている。

ダム堤体の温度規制の基本的な考え方として、コンクリートに蓄えられる熱量を抑制することが挙げられ、MF30 に代表される水和熱の小さいセメントの使用のほか、打設リフトや打上がり速度を制限することが有効とされてきた。しかし、RCD 工法の研究開発の進展に伴って施工速度が向上し、先述の巡航 RCD 工法では、従来の RCD 工法に比較して打設速度が 1.5~2.0 倍になっている<sup>3)</sup>。そのため、MF30 のようなセメントを用いても放熱が追いつかず、ダム内部に熱が蓄積されて温度ひび割れのリスクが高まることが考えられる。

上記について検討するため、近年 RCD 工法で施工されたコンクリートダム内部温度を調べ、有限要素法 (以下、FEM) による温度解析結果との比較を行った結果、両者に乖離があることを確認した。本報文では、その原因および影響につい

1) 土木管理本部 Civil Engineering Management Division

2) 東京大学 Tokyo University

**キーワード:** ダムコンクリート, RCD 工法, フライアッシュ, 断熱温度上昇特性, 温度ひび割れ

**Keywords:** dam concrete, RCD, fly ash, adiabatic temperature rise, thermal crack

て検討することを目的に実施した実験および解析の結果を示す。

II. 堤体内部温度の測定結果と解析結果の乖離

近年、RCD 工法により施工された A ダムにおける堤体の内部温度の測定結果と FEM による温度解析の結果の比較を Fig.1 に示す。測定結果では打込み直後からコンクリート温度が上昇し、翌日から降下に転じている。材齢 5 日で 2 リフトのコンクリートが打ち込まれると、再び温度は上昇し、さらに 3 リフトのコンクリートが打ち込まれることにより、温度上昇は材齢 80 日程度まで続く。その結果、材齢 80 日時点での到達温度は 1 リフトのピークを大きく超え、10℃程度高い結果となっている。一方、解析結果では、材齢 10 日で 3 リフトのコンクリートが打ち込まれるまでの状況は測定結果とほぼ傾向は同じであるが、その後の温度上昇はわずかであり、2 リフト後のピークを越えることはなく、材齢 20 日程度で再び降下に転じている。

こうした傾向は、RCD 工法で施工されたほかのダムや拡張レーヤ工法で施工されたダムにおいて共通しており、いずれにおいても測定結果と解析結果では上層のコンクリートの打込み以降の温度が乖離していた。また、これらのダムの温度測定結果に見られる長期的な温度上昇は、RCD 工法開発初期に建設された玉川ダムや布目ダムの堤体温度管理の実績においても報告されており<sup>4)5)</sup>、近年施工されたダムに限った特徴ではないことが確認できている。

III. 乖離の理由

前述のとおり、堤体内部温度の長期的な上昇は、複数のダムに共通した事象であることから、測定機器の不具合などによるものではなく特定のメカニズムに基づいて生じる事実であり、温度解析の方に何らかの問題があるものと考えられる。温度解析の設定条件は種々あるが、解析結果に最も影響を及ぼすものとしてセメントの断熱温度上昇量が挙げられる。Fig.2 に、セメントメーカーの技術資料<sup>6)</sup>(以下、技術資料)に記載される MF30 の断熱温度上昇量と、Fig.1 に示した堤体内部温度の実測値に合うように FEM 温度解析により断熱温度上昇式を同定(逆解析)したときの断熱温度上昇量の比較を示す。なお、A ダムで使用した MF30 は技術資料を発売したメーカーの製造したものである。また、断熱温度上昇式以外の解析条件はすべて技術資料、逆解析で同一としている。

ここで、MF30 の特性について考えると、MF30 に含まれるフライアッシュのポゾラン反応は、可溶性の二酸化けい素がセメントの水和に伴って生成される水酸化カルシウムと徐々に化合して、不溶性の安定的なけい酸カルシウム水和物を生成するものであり、主に材齢 28 日以降の強度増進に寄与するとされる。ダムコンクリートの強度が数年以上の長

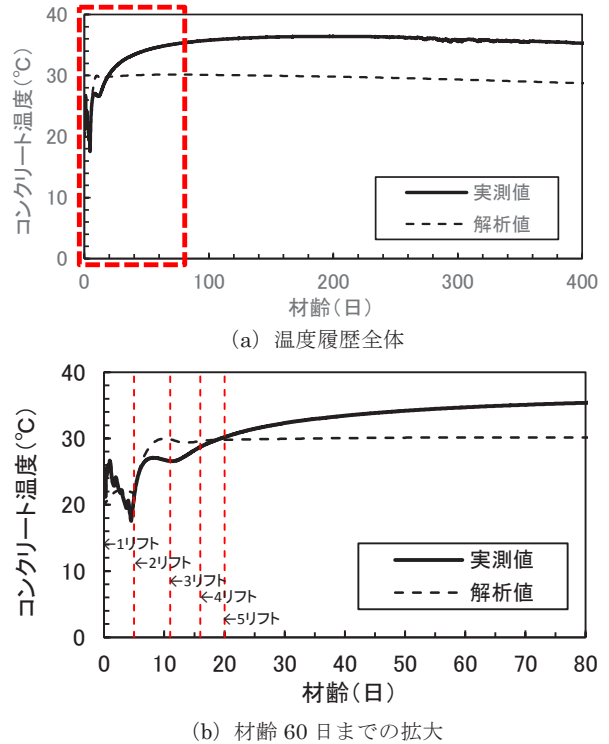


Fig.1 A ダムにおける堤体内部温度の測定結果と温度解析結果の比較  
(Comparison of Measurement Result of Internal Temperature of Dam at A Dam and Temperature Analysis Results)

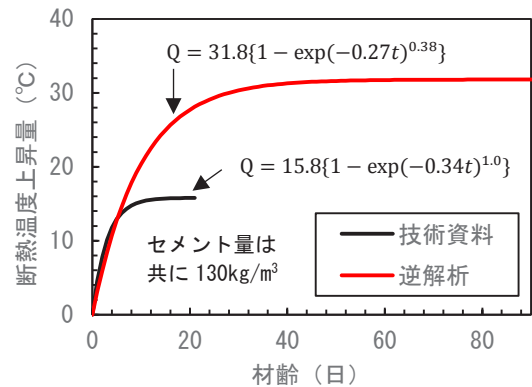


Fig.2 セメント技術資料と逆解析による MF30 の断熱温度上昇式の比較  
(Comparison of Adiabatic Temperature Rise Formula of MF30 by Cement Technical Data and Inverse Analysis)

期に亘って増進するのはこのためであるが、強度の増進が見られる間はポゾラン反応に伴う発熱も継続している。すなわち、断熱に近い状態においては数ヶ月程度に亘って発熱に伴うコンクリートの温度上昇が続くと考えられ、Fig.2 に示した逆解析の結果からもそのような傾向が認められる。一方、技術資料では材齢 21 日までの断熱温度上昇量しか示されていないが、終局温度上昇量 15.8℃に対し、材齢 21 日の時点でほぼ終局温度に達しており、以後の発熱がほとんどないものになっている。

技術資料に基づく断熱温度上昇量が堤体内部温度からの逆解析による断熱温度上昇量と乖離する理由は、MF30のような低発熱セメントを用いたコンクリートの断熱温度上昇量を測定することが非常に難しいことに加え、ダムコンクリートの単位セメント量が極めて少ないことに起因するものと考えられる。

断熱温度上昇量を求めるための試験方法として一般的なものは、空気循環槽式の試験装置を用いる方法<sup>8)</sup>である。その原理は、コンクリート試料を容器に密封し、その容器を断熱槽に入れ、試料の中心温度を測定して断熱槽内の空気の温度を試料温度に一致させる（追従させる）ように制御することで断熱状態を作り出すものである。発熱量が比較的多い一般的なコンクリート配合であれば精度よく断熱温度上昇量を測定できる方法であるが、供試体と層内の温度差の制御精度は±1℃程度であることから、ダムコンクリートのように低発熱セメントを貧配合で用い、極めて微少な発熱が長期に亘って継続する場合には、層内温度の制御が追いつかず、早期に発熱が終了したものとする誤った判断がなされることが考えられる。

#### IV. 簡易断熱試験による断熱温度上昇式の検証

III章で述べた推論の検証を目的に、実際のダムコンクリートを対象として簡易断熱容器を用いた逆解析手法による断熱温度上昇量の推定<sup>9)</sup>を試みた。同手法による推定は試験装置として市販化もされているが、MF30を用いたダムコンクリートの微少な発熱量を可能な限り精密に捉えるために、また実際にバッチャープラントで製造したコンクリートを用いて屋外で試験ができることを念頭に、マスブロック試験による断熱温度上昇曲線の同定方法<sup>10)</sup>と組み合わせた新たな装置を製作して試験を実施した。以下にその内容と結果を示す。

#### 1. 試験装置の概要

試験装置の概要を Fig.3 に示す。これまでに行われたマスブロックの簡易断熱試験においては、断熱材としてブロック状の発泡スチロールを用いることが一般的であった。しかし、断熱効果を十分に得るためには発泡スチロールの断面の厚さを少なくとも1m程度とする必要があること、ブロックの合わせ目からの熱の逸散が懸念されることから、本試験では

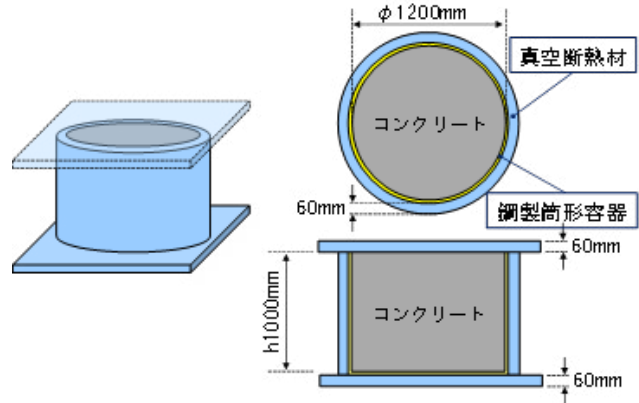


Fig.3 簡易断熱試験装置の概要  
(Outline of Simplified Adiabatic Test Equipment)



Photo 1 簡易断熱試験装置内に埋設した無線式温度計  
(A Wireless Thermometer in The Simple Adiabatic Test)

Table 1 使用材料  
(Materials)

使用材料	記号	摘要
セメント	C	中庸熱フライアッシュセメント (フライアッシュ混合率 30%) , 密度 : 2.88g/cm <sup>3</sup> , 比表面積 : 3,378cm <sup>2</sup> /g
細骨材	S1	砕砂, 表乾密度 : 2.65g/cm <sup>3</sup> , FM : 2.90
	S2	海砂, 表乾密度 : 2.60g/cm <sup>3</sup> , FM : 2.12
粗骨材	G1	砕石 (粒径 80~40mm) , 表乾密度 : 2.68g/cm <sup>3</sup> , FM : 8.90
	G2	砕石 (粒径 40~20mm) , 表乾密度 : 2.67g/cm <sup>3</sup> , FM : 7.91
	G3	砕石 (粒径 20~5mm) , 表乾密度 : 2.67g/cm <sup>3</sup> , FM : 6.50
練混ぜ水	W	河川水
AE 減水剤	Ad	AE 減水剤 : 遅延型リグニンスルホン酸塩とオキシカルボン酸塩の複合体
AE 剤	AE	アニオン及びノニオン系特殊界面活性剤

Table 2 コンクリート配合  
(Mix Proportion)

G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	s/a (%)	スランプの範囲 (cm)	空気量の範囲 (%)	単位数(kg/m <sup>3</sup> )						Ad (C×%)	
					W	C	S1	S2	G1	G2		G3
80	71.9	30.0	4.0±1.0	3.5±1.0	115	160	379	248	522	445	520	1.60



Photo 2 試験体の作製状況  
(Preparation of Test)

真空断熱材を用いることとした。この真空断熱材は、ガラスウールの芯材をアルミシートで包んで内部を真空にしたものであり、その熱伝導率は  $0.002 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  と発泡スチロールの  $1/10$  以下（発泡スチロールの熱伝導率は  $0.035 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  程度）である。

コンクリート試料を鋼製の円筒容器（ $\phi 1200 \times h1000 \text{ mm}$ ）に詰め、その外周および上下を厚さ  $60 \text{ mm}$  の真空断熱材で覆って密封した。なお、鋼製の円筒容器と真空断熱材の間には、真空断熱材の外装アルミシートが破損して真空状態が失われることを防ぐことを目的に、厚さ  $10 \text{ mm}$  のウレタン樹脂シートを挟み込んだ。また、容器の密封性を保つため、コンクリート試料の内部温度は、Photo 1 に示す無線式の温度計を埋設して測定し、ケーブルなどによる貫通孔が無いようにした。

2. 使用材料およびコンクリート配合

使用材料を Table 1 に、コンクリートの配合を Table 2 に示す。試験の対象としたコンクリートは、試験体作製の容易さも考慮して実際のダムの一部（付帯設備）にて使用される MF30 を用いた単位セメント量  $160 \text{ kg/m}^3$ 、目標スランプ  $4 \text{ cm}$  の配合とした。

3. 試験体の作製状況

試験体の作製状況を Photo 2 に示す。バッチャープラントで製造したコンクリートを2層に分けて打ち込み、 $\phi 150 \text{ mm}$ 、振動数約  $120 \text{ Hz}$ 、遠心力約  $15 \text{ kN}$  の大型パイプレータにより各層約  $15$  秒ずつ締め固めを行った。前述の無線式温度計および送信機を試料に埋め込んだ後、上板で密封し、その外周を型枠用合板で覆った。試験体の作製は2月下旬に行い、打ち込み時のコンクリート温度は  $11.5^\circ\text{C}$ 、外気温は  $5.7^\circ\text{C}$  であった。なお、コンクリートのスランプは  $3.5 \text{ cm}$ 、空気量は  $3.6\%$  であり、いずれも目標品質を満足するものであった。

4. 温度計測結果

コンクリート試料の中心温度および外気温の計測結果を Fig.4 に示す。温度測定の間は、実験の都合上  $32$  日間であった。この間、外気温は概ね  $0^\circ\text{C}$  から  $15^\circ\text{C}$  の間で変動したが、コンクリート試料の中心温度は安定的に推移していることが確認された。

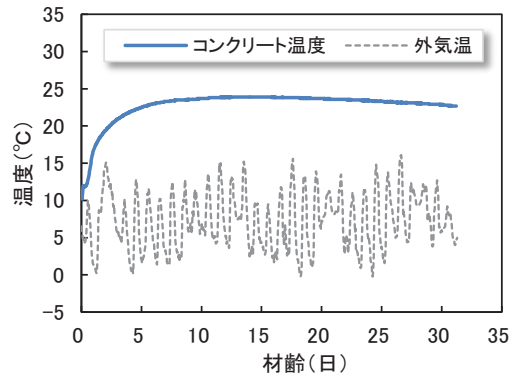


Fig.4 コンクリート試料の中心温度および外気温の計測結果  
(Measurement Result of Center Temperature and Outside Temperature of Concrete Sample)

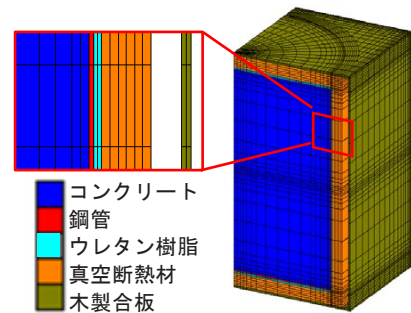


Fig.5 簡易断熱試験装置を模擬した解析モデル  
(Analytical Model Simulating a Simple Adiabatic Test Device)

Table 3 解析条件一覧  
(Analysis Condition List)

項目	単位	入力値
コンクリート	熱伝導率	$\text{W/m}^\circ\text{C}$ 2.65
	比熱	$\text{J/g}^\circ\text{C}$ 0.79
	密度	$\text{kg/m}^3$ 2432
	温度上昇特性	- 逆解析にて決定
真空断熱材	熱伝導率	$\text{W/m}^\circ\text{C}$ 0.002
	比熱	$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ 0.9
	密度	$\text{kg/m}^3$ 210
木製合板	熱伝導率	$\text{W/m}^\circ\text{C}$ 0.15
	比熱	$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ 1.3
	密度	$\text{kg/m}^3$ 550
ウレタン樹脂	熱伝導率	$\text{W/m}^\circ\text{C}$ 0.042
	比熱	$\text{kJ/kg}^\circ\text{C}$ 1.25
	密度	$\text{kg/m}^3$ 20

5. 3次元 FEM による断熱温度上昇式の同定

前項に示した温度計測結果を基に、3次元 FEM による温度解析を行って断熱温度上昇式の同定（フィッティング）を行った。解析モデルを Fig.5, 解析条件（コンクリートの温度特性値等）を Table 3 に示す。

6. 断熱温度上昇式の比較と考察

同定によって得られた断熱温度上昇式を Fig.6 に示す。には比較として技術資料に従って算出した値も記載した。技術資料に比較して、同定の結果の終局温度  $Q_{\infty}$  はかなり大きな値となっており、実際のダム堤体内部の温度測定結果と解析結果が乖離することの原因が断熱温度上昇量の設定にあることを裏付ける結果であった。

7. 実構造物における温度計測結果と解析値との比較

上述した同定の結果と技術資料の断熱温度上昇特性を用いて、実構造物における温度計測結果との比較を行い検証するための解析を実施した。対象構造物の概要を Fig.7 に示す。同構造物は底幅 16,000mm、高さ 14,250mm の三角形断面であり、中心部（Fig.7 の赤丸）にて温度計測を行った。実際の施工のリフトスケジュールや外気温などを入力値とし、Fig.6 に示した断熱温度上昇式を用いて温度解析を行った結果を、実際の温度計測結果と比較して Fig.8 に示す。技術資料の値を用いた解析では、打込み後 10 日程度で温度が降下し、計測結果と大きく乖離するのに対し、簡易断熱試験の結果から同定した値による解析では、計測結果を比較的精度よく再現できており、今回の同定結果の妥当性を示唆するものと考えられる。なお、今回の簡易断熱試験は都合上材齢 32 日で終了しており、長期に亘って継続するポゾラン反応を十分に反映できていないと考えられる。この点を改善すれば、さらに解析の再現度を向上されることが可能であるものと推察される。

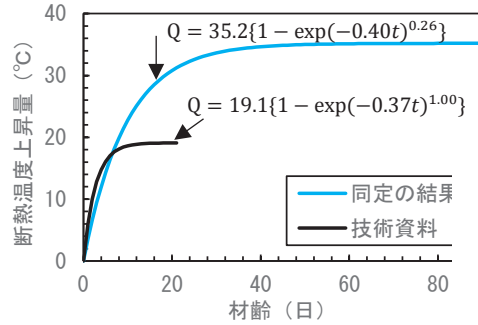


Fig.6 断熱温度上昇式の同定結果 (Identification Result of Adiabatic Temperature Rise Formula)

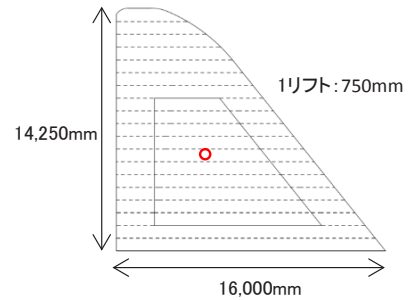


Fig.7 対象構造物の概要 (Outline of Target Structure)

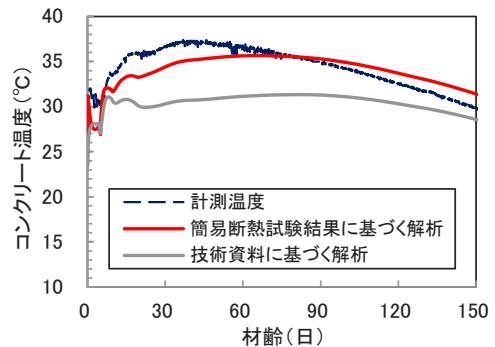


Fig.8 実構造物における温度計測結果と解析値の比較 (Comparison of Temperature Measurement Result and Analysis in Structure)

Table 4 解析条件一覧 (Analysis Condition List)

項目	技術資料に基づく解析				同定結果に基づく解析			
	$Q_{\infty}$	$\gamma$	$\delta$	$t_0$	$Q_{\infty}$	$\gamma$	$\delta$	$t_0$
断熱温度上昇特性	15.5	0.70	0.40	0.50	31.8	0.27	0.38	0.00
	材齢 7 日		1.1		材齢 7 日		3.95	
	材齢 28 日		3.5		材齢 28 日		8.43	
圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )	材齢 91 日		11.8		材齢 91 日		16.4	
初期温度(°C)	外気温 + 3°C							
熱伝導率(W/m°C)	2.7							
密度(kg/m <sup>3</sup> )	2,431							
比熱(kJ/kg°C)	1.15							
ヤング係数(N/mm <sup>2</sup> )	$E_c = 4700 \times f_c^{0.50}$							
引張強度(N/mm <sup>2</sup> )	$f_t = 0.13 \times f_c^{0.85}$							
ポアソン比	0.2							
熱膨張係数( $\mu$ /°C)	10							
クリープ構成則	コンクリート標準示方書[設計編]2017年制定に準ずる							
表面熱伝達率(W/m <sup>2</sup> °C)	外部:14, 打込み面:8							

※ 断熱温度上昇式 :  $Q = Q_{\infty} \{1 - \exp(-\gamma(t - t_0)^{\delta})\}$

V. ダム堤体内部温度の上昇に着目した温度応力解析

前章までの検討結果を踏まえ、MF30の長期的な発熱を考慮した断熱温度上昇特性を用いて試解析を行って、ダム堤体内部温度を評価した。解析モデルは堤高100m級のコンクリートダムを想定し、過去に施工された同規模の重力式コンクリートダムにおける堤体内部の温度計測結果から同定により求めた断熱温度上昇式を用いて温度解析を行った。施工期間は2年とし、1リフト1mで打ち上げていく設定とした。また、比較として技術資料による断熱温度上昇式を用い、断熱温度上昇式および圧縮強度の発現式以外の条件を同一とした解析を行った。解析条件の一覧をTable 4に示す。同表に示すとおり、同定によって得られた断熱温度上昇式特性における終局断熱温度上昇量は、技術資料に基づく値に比べて大きく、Fig.6にて示した簡易断熱試験装置にて得られる断熱温度上昇特性と同様の傾向を示している。

技術資料に基づく断熱温度上昇式を用いた温度解析における最高温度分布をFig.9に、同定にて得られた断熱温度上昇式を用いた温度解析における最高温度分布をFig.10に示す。技術資料に基づく解析では、堤体内部の最高到達温度が32.7℃であるのに対し、同定結果に基づく解析では44.0℃と高く、かつ温度の高い部分が技術資料に基づく解析に比較して広範囲であることが分かる。これは、MF30の長期的な発熱により堤体内部に蓄熱されたことを示唆するものと考えられる。

次に、ダム堤体内部温度の履歴に着目した整理を実施した。同解析における、ダム堤体施工完了時、施工完了から5年後、

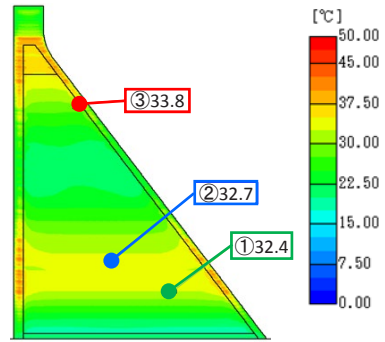


Fig.9 技術資料に基づく断熱温度上昇式を用いた解析における最高温度のコンター図  
(Contour of Maximum Temperature in Analysis Using Adiabatic Temperature Rise Formula Based on Cement Technical Data)

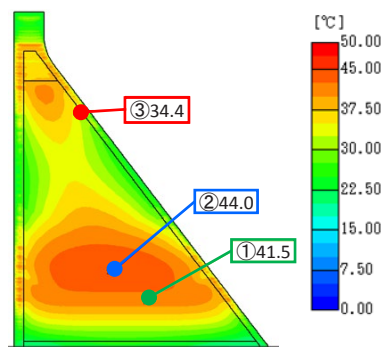


Fig.10 同定結果に基づく断熱温度上昇式を用いた解析における最高温度のコンター図  
(Contour of Maximum Temperature in Analysis Using Adiabatic Temperature Rise Formula Based on Identification Results)

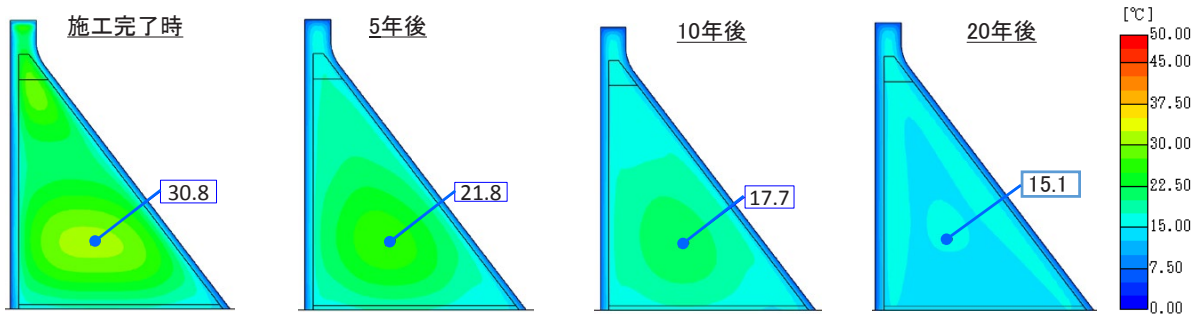


Fig.11 技術資料に基づく断熱温度上昇式を用いた解析における堤体の温度履歴  
(Temperature History of Dam in Analysis Using Adiabatic Temperature Rise Formula Based on Cement Technical Data)

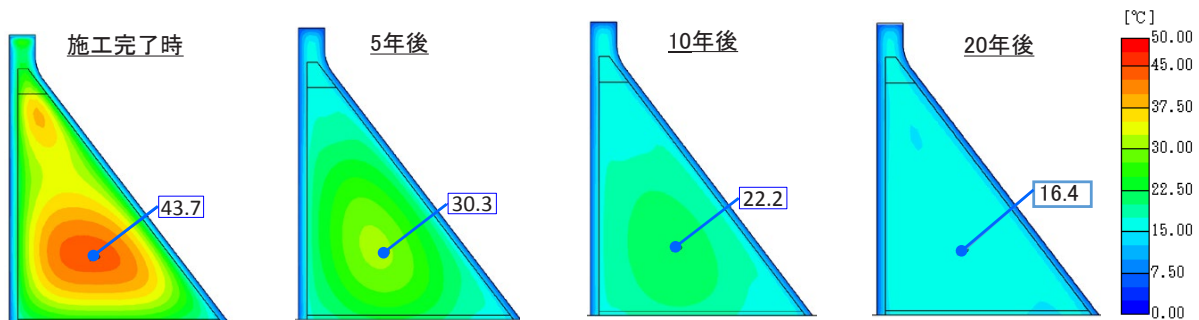


Fig.12 同定結果に基づく断熱温度上昇式を用いた解析における堤体の温度履歴  
(Temperature History of Dam in Analysis Using Adiabatic Temperature Rise Formula Based on Identification Result)

10年後および20年後の堤体内部温度の分布を Fig.11 および Fig.12 に示す。技術資料に基づく解析においては、施工完了時点ですでに堤体中心部の温度が 30.8℃まで低下するのに対し、同定結果に基づく解析では、Fig.10 に示した最高到達温度とほぼ変わらない結果となった。また、同定結果に基づく解析では、技術資料に基づく解析に比べて堤体温度の降下が非常に緩やかであり、5年後も堤体内部の最高温度は 30℃を超える結果となった。なお、両者の解析における温度分布は、施工完了から20年後でほぼ同等となった。

温度応力解析により、応力とひび割れ指数を算出した。ダム堤体施工完了時、ならびに施工完了から5年後、10年後、20年後の主応力の履歴を Fig.13 および Fig.14 に示す。技術資料に基づく解析においては、施工完了時点における最大引張応力は 0.26N/mm<sup>2</sup> であり、20年後も 0.97N/mm<sup>2</sup> と低い値であるのに対し、同定結果に基づく解析では、施工完了時点では最大引張応力は 0.52N/mm<sup>2</sup> であるが、20年後は 1.90N/mm<sup>2</sup> まで上昇する結果となり、技術資料に基づく結果の約2倍となることが確認された。

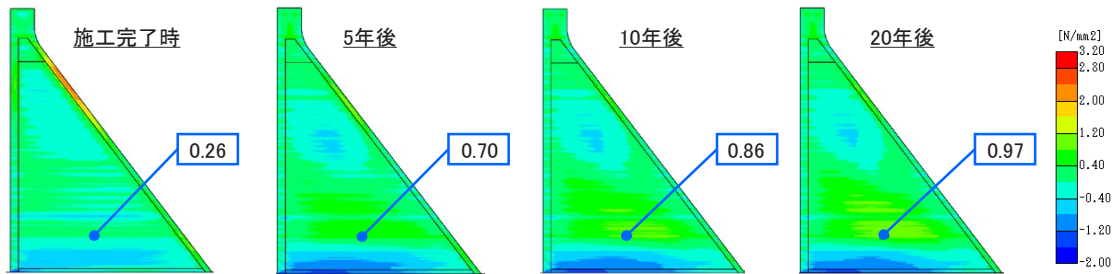


Fig.13 技術資料に基づく断熱温度上昇式を用いた解析における堤体の主応力履歴  
(Principal Stress History of Dam in Analysis Using Adiabatic Temperature Rise Formula Based on Cement Technical Data)

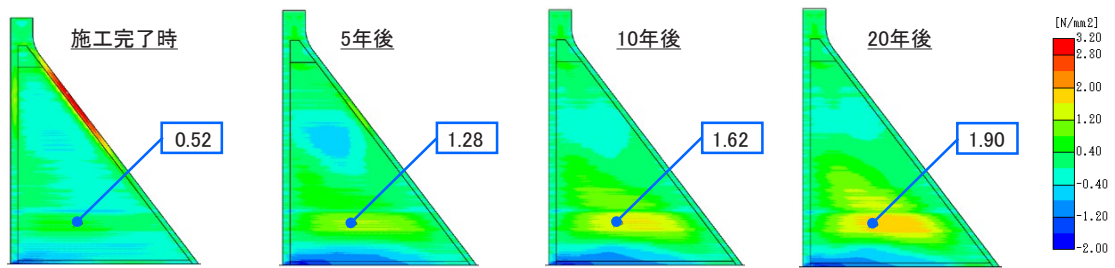


Fig.14 同定結果に基づく断熱温度上昇式を用いた解析における堤体の主応力履歴  
(Principal Stress History of Dam in Analysis Using Adiabatic Temperature Rise Formula Based on Identification Result)

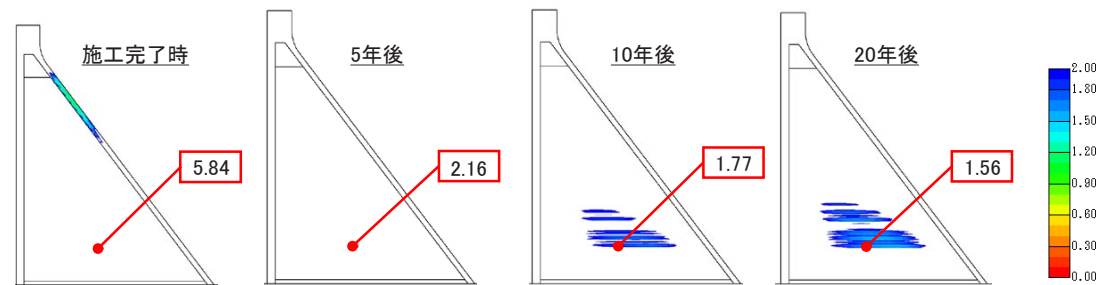


Fig.15 セメント技術資料に基づく断熱温度上昇式を用いた解析における堤体の最小ひび割れ指数履歴  
(Minimum Cracking Index History of Dam in Analysis Using Adiabatic Temperature Rise Formula Based on Cement Technical Data)

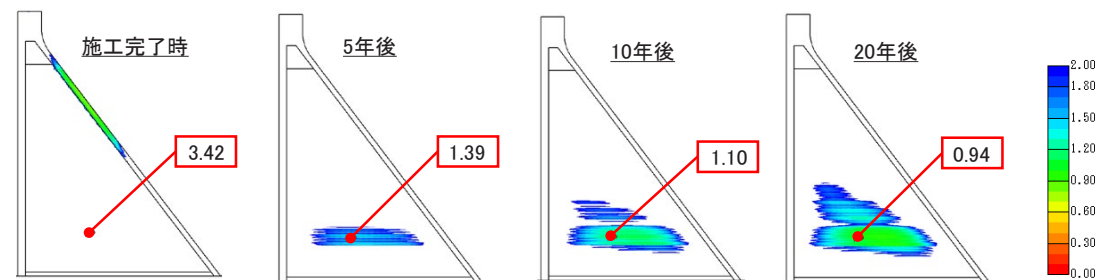


Fig.16 同定結果に基づく断熱温度上昇式を用いた解析における堤体の最小ひび割れ指数履歴  
(Minimum Crack Index History of Dam in Analysis Using Adiabatic Temperature Rise Formula Based on Identification Result)

ダム堤体施工完了時、ならびに施工完了から5年後、10年後、20年後の最小ひび割れ指数の履歴を Fig.15 および Fig.16 に示す。技術資料に基づく解析においては、施工完了時点におけるひび割れ指数は2.00以上であり、20年後も1.56と高い値であるのに対し、同定結果に基づく解析では、施工完了時点ではひび割れ指数は2.00以上であるが、10年後は1.10、20年後では0.94となり、ひび割れ指数1.00（ひび割れ発生確率50%）を下回る結果となった。

今後、貯水の影響について精査する必要があるが、これらの温度応力解析の結果は、MF30を用いたダムコンクリートにおいては、非常に微小な発熱反応の蓄積により堤体内部の温度が高い状態を維持し、その後の温度低下に伴ってひび割れ発生のリスクが、20年以上の長期にわたって増加していく可能性を示唆していると考えられる。しかし、微小な発熱に伴い、強度も増進していると考えられるため、今後は強度増進のデータも拡充して温度応力解析の精度を高める必要がある。

## VI. まとめ

本検討では、新しく開発した簡易断熱試験装置にて、MF30を用いた単位セメント量の少ないダムコンクリートの断熱温度上昇特性を評価した。その結果、フライアッシュの長期的なポズラン反応の進行に伴う微量な発熱量を踏まえたダムコンクリートの断熱温度上昇特性を把握した。また、同試験にて得られた断熱温度上昇特性を用いることで、ダムコンクリートを用いた構造物における温度履歴をおおむね再現できることを確認した。さらに、MF30の長期にわたる微量な発熱特性を考慮して100m級のコンクリートダムの温度解析を実施した結果、堤体内部温度がこれまでの認識よりも高

い温度となり、かつそれが長期間続く可能性を示唆した。その後の温度低下に伴い引張応力が発生し、ひび割れ発生リスクが20年以上の長期に亘って増加していく可能性が示唆された。今後は、MF30の長期的なポズラン反応によるダムコンクリートの強度ならびに剛性の変化を考慮したうえで、さらに精度の高い温度応力解析によるひび割れリスク評価を行っていきたいと考えている。

## 参考文献

- 1) ダム技術センター；巡航RCD工法施工技術資料，2010.
- 2) 土木学会；2013年制定コンクリート標準示方書【ダムコンクリート編】，2013.
- 3) 藤澤侃彦；RCD工法の真の実力と巡航RCD工法，ダム技術，No.331，2014，pp.3-20.
- 4) 加藤敏治，横山光直，舟木純孝；玉川ダム堤体温度管理の実績（第二報），ダム技術，Vol.6-2，1988，pp.64-74.
- 5) 貞弘丈佳，森田義則；布目ダム温度規制計画と実績－堤体温度管理の速報－，ダム技術，No.60，1991，pp.76-93.
- 6) 宇部三菱セメント社；技術資料 第6版，2018.
- 7) 内田ほか；中庸熟フライアッシュコンクリートの長期強度発現性に関する一考察，土木学会第72回年次学術講演会，2017，pp.21-22.
- 8) 日本コンクリート工学会；JCI規準集(1977～2002年度)，2004，pp.373-386.
- 9) 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，pp.249-254.
- 10) 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，pp.255-257.

## A Study on the Characteristics of Adiabatic Temperature Rise of Dam Concrete Using Fly Ash Cement

*Satoru Kobayashi, Goro Sakai, Takeshi Torichigai,  
Noboru Sakata<sup>1)</sup> and Tetsuya Ishida<sup>2)</sup>*

The internal temperature of a concrete dam constructed by the RCD method was investigated and compared with the results of temperature analysis by FEM. As a result, it was confirmed that the actual temperature history inside the dam was significantly different from the results of the temperature analysis conducted before the construction, and that the temperature rose in the long term and reached a higher level than expected. Therefore, the causes and effects were examined by experiment and analysis, and it was found that the adiabatic temperature rise characteristics of the cement for dams (MF30) generally used in analyses cannot properly express the heat of hydration that occurs in the long term along with the pozzolanic reaction of fly ash. In addition, it is clarified that the present temperature stress analysis may lead to a dangerous result.