

フライアッシュ置換率がダムコンクリートの強度・発熱特性に及ぼす影響

Effects of Fly-ash Substitution Ratio on the Strength and Heat Generation Properties of Dam Concrete

大平信吾^{※1} 柏木克之^{※1} 松元和伸^{※2}
Shingo Odaira Yoshiyuki Kashiwagi Kazunobu Matsumoto
松田浩朗^{※2} 平間昭信^{※3}
Hiroaki Matsuda Akinobu Hirama

【要旨】

ダムコンクリートは、コンクリートの温度ひび割れの原因となる発熱量を低減するため、また、コンクリートのワーカビリティの改善や、長期強度の増進を図るために、セメントの一部をフライアッシュで置換することが多い。さらに、夏期においては温度ひび割れの対策として、骨材冷却などにより練り混ぜ温度を低下させることや、夜間打設などが必要となる場合がある。このような対策が必要な時期において、フライアッシュを別添加できる貯蔵サイロを設置すればフライアッシュ置換率を任意に設定することができるので、ダムコンクリートの発熱量を低減させ、温度ひび割れ対策を軽減できる可能性がある。

本報告では、中庸熟ポルトランドセメントにフライアッシュ置換率30%とした混合セメントに対して、フライアッシュの別添加によりフライアッシュ置換率を40%、50%としたダムコンクリートの強度、発熱特性について実験を行い、温度ひび割れを軽減できる可能性について検討した。また、実験で得られた温度特性値を用いて解析を行い、その有効性について検証した。実験結果および数値解析結果より、フライアッシュを高置換とした方が発熱低減の効果および温度応力低減効果が大きいことを確認した。

【キーワード】 ダムコンクリート フライアッシュ 圧縮強度 断熱温度上昇 温度ひび割れ

1. はじめに

ダムコンクリートは、温度ひび割れの原因となる発熱量を低減するため、また、コンクリートのワーカビリティの改善や、長期強度の増進を図るために、セメントの一部をフライアッシュで置換することが多い。近年においては、中庸熟ポルトランドセメントにフライアッシュを30%置換し、混合セメントとして使用することが主流となっている。また、夏期においては温度ひび割れの対策として、骨材冷却などにより練り混ぜ温度を低下させることや、夜間打設などが必要となる場合がある。温度ひび割れ対策が必要な時期において、フライアッシュを別添加できる貯蔵サイロを設置すればフライアッシュ置換率（以下、FA置換率と記す）を任意に設定ことができ、ダムコンクリートの発熱量を低減させ、温度ひび割れ対策を軽減できる可能性がある¹⁾。

本報告は、中庸熟ポルトランドセメントにFA置換率30%とした混合セメントに対して、フライアッシュの別添加によりFA置換率を40%、50%としたダムコンクリートの強度、発熱特性についての実験を行い、実験から得られた温度特性値を用いて、数値解析によるシミュレーションを実施することで、フライアッシュを高置換と

することによる発熱低減の効果および温度応力低減効果について検証した結果について報告する。

2. 強度・発熱特性に関する実験

2.1 実験概要

(1) 使用材料および配合

使用した材料は、FA置換率30%の中庸熟フライアッシュセメント、別添加したフライアッシュはJISⅡ種（碧南火力）、骨材は川砂、川砂利を用い、粗骨材最大寸法は80mmである。混和剤は、リグニンスルホン酸化合物を主成分とするAE減水剤を用いた。検討した配合は、外部コンクリート（A配合）、内部コンクリート（B配合）の2配合、FA置換率はいずれの配合とも、30%、40%、50%とした。その配合を表-1に示す。

(2) 試験項目および試験方法

圧縮強度試験は、40mmでウエットスクリーニングしたコンクリートで試験体を作製し、養生は標準水中養生とした。試験材齢は、7日、28日、91日の3材齢として、圧縮強度試験はJISA1108に準拠して実施した。

断熱温度上昇試験は、供試体周辺温度と断熱槽内温度が同一となるように追従する試験装置により実施した。

1. 中日本土木支社 北陸土木事業部 2. 技術研究所 第一研究室 3. 技術研究所 第三研究室

表－1 検討配合

配合 No	FA 置換率 (%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水結合材比 W/C+FA(%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
						水 W	セメント C	フライアッシュ FA	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad
A-30	30	3±1	3.5±1	49	26	102	210	0	527	1,516	0.525
A-40	40			47		99	180	30		1,516	
A-50	50			46		97	150	60		1,513	
B-30	30			75	105	140	0	1,494	0.350		
B-40	40			74	103	120	20	1,494			
B-50	50			74	103	100	40	1,490			

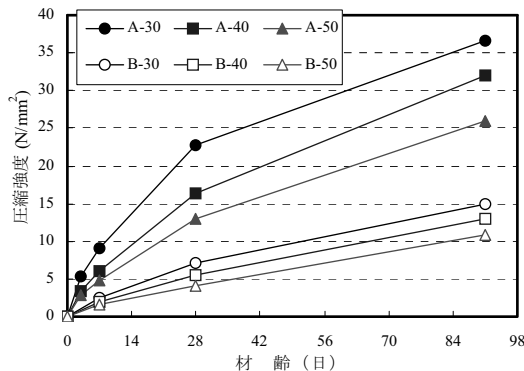
断熱温度上昇試験により得られた断熱温度上昇量の曲線を、最小二乗法により近似した。その近似式を式(1)に示す。特性値である定数K値は終局断熱温度上昇量を示し、 α および β は断熱温度上昇速度に関する定数である。

$$\Delta T(t) = K(1 - e^{-\alpha t^\beta}) \quad (1)$$

2.2 実験結果

(1) 圧縮強度試験結果

A配合およびB配合の圧縮強度試験結果を図－1に示す。いずれの配合とも、FA置換率の増加に伴い、圧縮強度は低下する。B配合については、結合材量が少なく、水結合材比が75%程度と大きいことから、圧縮強度が小さくなるため、FA置換率による圧縮強度の差は小さい。FA置換率が強度発現性に及ぼす影響を整理するために、FA置換率30%の圧縮強度に対するFA置換率40%および50%の圧縮強度比を表－2に示す。材齢とともに、FA置換率30%に対する圧縮強度比は増加する傾向であり、FAのポズラン反応による長期強度増進が確認できる結果となっている。また、FA置換率30%に対するFA置換率40%および50%のセメント量の比は、それぞれ0.86および0.71である。材齢3日および7日では、セメント量比に比べ圧縮強度は小さいが、材齢91日ではセメント量比と同等の比となっており、FA置換率が高いほど強度発現が遅いことを示している。



図－1 圧縮強度結果 (標準水中養生)

(2) 断熱温度試験結果

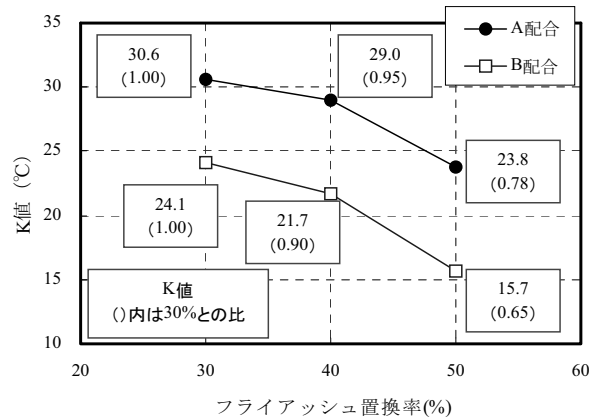
FA置換率に対するK値を図－2に示す。FA置換率の増加とともに、K値は減少しており、発熱低減の効果が大きいことが確認された。A配合の場合、FA置換率

表－2 圧縮強度比 (A-30, B-30を1として)

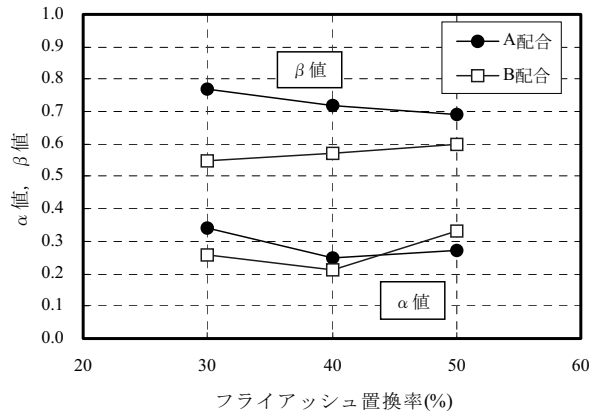
配合 No	3日	7日	28日	91日
A-30	1.00	1.00	1.00	1.00
A-40	0.61	0.67	0.72	0.87
A-50	0.54	0.53	0.57	0.71
B-30	-	1.00	1.00	1.00
B-40	-	0.81	0.77	0.87
B-50	-	0.66	0.58	0.72

50%では30%に比べて6.8℃小さくなっている。また、FA置換率30%のK値に対するFA置換率40%および50%のK値の比は、セメント量比(0.86, 0.71)と同程度の値であり、セメント量の影響が大きいことがわかる。

図－3に、FA置換率に対する断熱温度上昇速度に関する定数 α 値、 β 値を示す。今回の実験では、FA置換率に対して α 値および β 値に顕著な傾向は見られない。



図－2 FA置換率とK値の関係



図－3 FA置換率と α 値、 β 値の関係

2.3 まとめ

強度・発熱特性に関する実験結果をまとめると、以下のとおりである。

- 1) FA 置換率が高いと強度発現が遅れるが、材齢 91 日では圧縮強度比はセメント量比と同等の比となった。
- 2) FA 置換率の増加とともに、K 値は減少し、A 配合では FA 置換率 50% では 30% に比べて 6.8°C 小さくなっている。これらから、発熱低減の効果が大きいことが確認された。

3. 温度応力解析によるフライアッシュ高置換の有効性の検証

フライアッシュを高置換とすることによる、温度応力低減効果を検証する目的で、数値解析によるシミュレーションを実施した。検討は、重力式コンクリートダムを想定し、FA 置換率に対する温度および温度応力により、フライアッシュ高置換の比較検討を行った。

3.1 解析概要

解析対象は堤高 40m の重力式コンクリートダムを想定した。図-4 に解析モデルを示す。

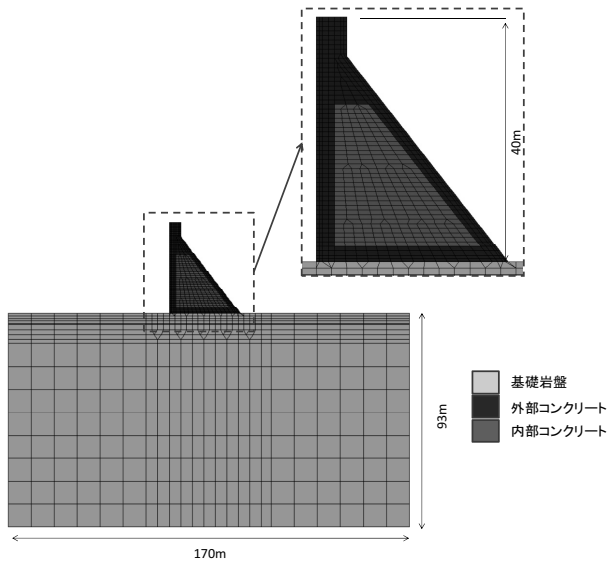


図-4 解析モデル

解析は、以下に示す 2 ケースを実施した。

- ① 外部コンクリート、内部コンクリートの両者とも FA 置換率 30% (以下、ケース①)，
- ② 外部コンクリートの FA 置換率 30%、内部コンクリートの FA 置換率 50% (以下、ケース②)，

これは、フライアッシュ高置換により水和発熱に伴う堤体内部温度の上昇を抑制する効果を検討するためである。

解析に使用した基礎岩盤の物性値を表-3に、コンクリートの物性値を表-4に示す。また、それぞれのコンクリートの温度上昇および圧縮強度に関する係数を表-5、表-6に示す。

設定した外気温およびコンクリート打設温度を図-5

に示す。外気温は平均温度 16.0°C、年内振幅 11.0°C とし、2月1日に最低温度、8月1日に最高温度となるよう設定した。コンクリート打設温度は外気温を基にしたヒートバランス計算により設定し、25°Cを超える場合は 25°C とした。なお、熱伝達境界の熱伝達率は 14W/m²C (散水養生) とした。

リフトスケジュールを表-7に示す。コンクリートの打設高さは第1リフトは 1.0m、それ以降は 1.5m とし、7月1日より12月30日まで1週間ごとに計27回打設している。なお、打設終了後の冬季の影響を把握するため、打設終了より1年後までの期間を解析した。

表-3 基礎岩盤の物性値

項目	入力物性値
熱伝導率 (W/m・°C)	3.45
比熱 (kJ/kg・°C)	0.800
熱膨張係数 (10 ⁻⁶ /°C)	10
密度 (kg/m ³)	2,650
ヤング係数 (N/mm ²)	1,500
ポアソン比	0.3

表-4 コンクリートの物性値

項目	入力物性値
熱伝導率 (W/m・°C)	2.7
比熱 (kJ/kg・°C)	1.155
断熱温度上昇 (°C)	$\Delta T(t) = k(1 - e^{-at^\beta})$ K: 終局断熱温度上昇量(°C)
密度 (kg/m ³)	2,300
ポアソン比	0.2
圧縮強度 (N/mm ²)	$f'ck(t) = \frac{1}{a+bt} f'ck(91)$ $f'ck(91)$: 材齢 91 日の圧縮強度(N/mm ²)
ヤング係数 (N/mm ²)	$Ee(t) = \phi(t) \times 4.7 \times 103 \sqrt{f'ck(t)}$ $f'ck(t)$: 材齢 t 日の圧縮強度(N/mm ²) $\phi(t)$: クリープ係数 材齢 3 日まで $\phi=0.73$ 材齢 5 日以降 $\phi=1.0$ 材齢 3 日から 5 日までは直線補間
引張強度 (N/mm ²)	$f'tk(t) = 0.44 \sqrt{f'ck(t)}$

表-5 コンクリートの断熱温度上昇に関する係数

項目	外部 (FA 置換率 30%)	内部 (FA 置換率 30%)	内部 (FA 置換率 50%)
K	30.6	24.1	15.7
a	0.34	0.26	0.33
β	0.77	0.55	0.60

表-6 コンクリートの圧縮強度に関する係数

項目	外部 (FA 置換率 30%)	内部 (FA 置換率 30%)	内部 (FA 置換率 50%)
a	23.08	43.00	60.18
b	0.75	0.53	0.34
$f'ck(91)$	36.6	15.0	10.8

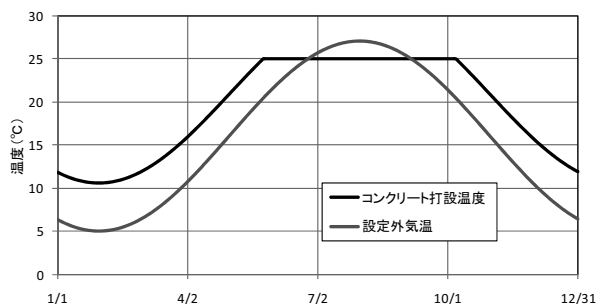


図-5 設定外気温および打設温度

表-7 リフトスケジュール

打設 リフト	基礎岩盤か らの高さ(m)	打設日	打設日 外気温(°C)	コンクリート 温度(°C)
1	1.0	7月1日	25.5	25.0
2	2.5	7月8日	26.1	25.0
3	4.0	7月15日	26.6	25.0
4	5.5	7月22日	26.9	25.0
5	7.0	7月29日	27.0	25.0
6	8.5	8月5日	27.0	25.0
7	10.0	8月12日	26.8	25.0
8	11.5	8月19日	26.4	25.0
9	13.0	8月26日	25.9	25.0
10	14.5	9月2日	25.3	25.0
11	16.0	9月9日	24.5	25.0
12	17.5	9月16日	23.6	25.0
13	19.0	9月23日	22.6	25.0
14	20.5	9月30日	21.5	25.0
15	22.0	10月7日	20.3	24.9
16	23.5	10月14日	19.1	23.8
17	25.0	10月21日	17.8	22.6
18	26.5	10月28日	16.5	21.3
19	28.0	11月4日	15.1	20.1
20	29.5	11月11日	13.8	18.9
21	31.0	11月18日	12.6	17.7
22	32.5	11月25日	11.3	16.5
23	34.0	12月2日	10.2	15.5
24	35.5	12月9日	9.1	14.4
25	37.0	12月16日	8.1	13.5
26	38.5	12月23日	7.2	12.7
27	40.0	12月30日	6.5	12.0

3.2 解析結果

ケース①の最小ひび割れ指数発生時（打設後翌年1月20日）のひび割れ指数分布、および温度分布を図-6に示す。岩着部および下流面においてひび割れ指数の小さい領域が認められ、下流面においてはひび割れ指数1.09、岩着部においては1.36が最小である。また、堤体内部の最高温度は42.6°Cである。

ケース②の最小ひび割れ指数発生時（打設後翌年1月20日）のひび割れ指数分布、および温度分布を図-7に示す。岩着部および下流面においてひび割れ指数の小さい領域が認められ、下流面においてはひび割れ指数1.17、

岩着部においては1.38が最小である。また、堤体内部の最高温度は36.5°Cである。

下流面におけるひび割れ指数は、ケース①に比べケース②の方が大きくなった。これは、FA置換率50%の内部コンクリートを使用したため、水和発熱に伴う温度上昇がケース①に比べ抑制され、堤体内部の温度がケース①に比べ低くなったことから、温度勾配が小さくなり、温度応力が小さくなったためと考えられる。

岩着部におけるひび割れ指数も、ケース①に比べケース②の方が大きくなったものの、その差は小さい。これは、基礎岩盤による外部拘束の影響が大きいことが主因と考えられる。

3.3 まとめ

数値解析によるシミュレーションを実施し、フライアッシュを高置換とすることによる、温度応力低減効果を検証した結果、想定した解析モデルにおいては、フライアッシュを高置換とした方が、堤体内部温度の上昇を抑制でき、温度勾配が小さくなったことから、温度応力低減効果が大きいことが確認された。

ただし、今回の圧縮強度は、養生条件を標準水中養生（20°C）とした結果であり、温度ひび割れ対策を講じる夏期においては環境温度が高いことから、今回の圧縮強度より良好な強度発現性が得られることが想定される。今後さらに、実用化に向けてのデータ収集および解析による検証などの総合的な検討が必要である。

4. 結論

フライアッシュ置換率がダムコンクリートの強度・発熱特性に及ぼす影響について、本報告で得られた知見をまとめると以下のとおりである。

中庸熱ポルトランドセメントにFA置換率30%とした混合セメントに対して、フライアッシュの別添加によりFA置換率を40%、50%としたダムコンクリートの強度、発熱特性に関する実験結果から、

- 1) FA置換率が高いと強度発現が遅れるが、材齢91日では圧縮強度比はセメント量比と同等の比となった。
- 2) FA置換率の増加とともに、K値は減少し、A配合ではFA置換率50%では30%に比べて6.8°C小さくなった。これらから、発熱低減の効果が大きいことが確認された。

数値解析によるシミュレーションを実施し、フライアッシュを高置換とすることによる温度応力低減効果について検証した結果、

- 3) 想定した解析モデルにおいては、フライアッシュを高置換とした方が、堤体内部温度の上昇を抑制でき、温度勾配が小さくなったことから、温度応力低減効果が大きいことが確認された。

4) ただし、今回の圧縮強度は、養生条件を標準水中養生(20°C)とした結果であり、温度ひび割れ対策を講じる夏期においては環境温度が高いことから、今回の圧縮強度より良好な強度発現性が得られることが想定される。今後さらに、実用化に向けてのデータ収集および解析による検証などの総合的な検討が必要である。

る。

【参考文献】

- 1) 鍵本広之, 菊池浩一郎, 佐藤道生, 長瀬重義: フライアッシュ置換率を60%まで高めたダムコンクリートの諸特性, 土木学会論文集, No.781/V-66, pp.45-56, 2005.2.

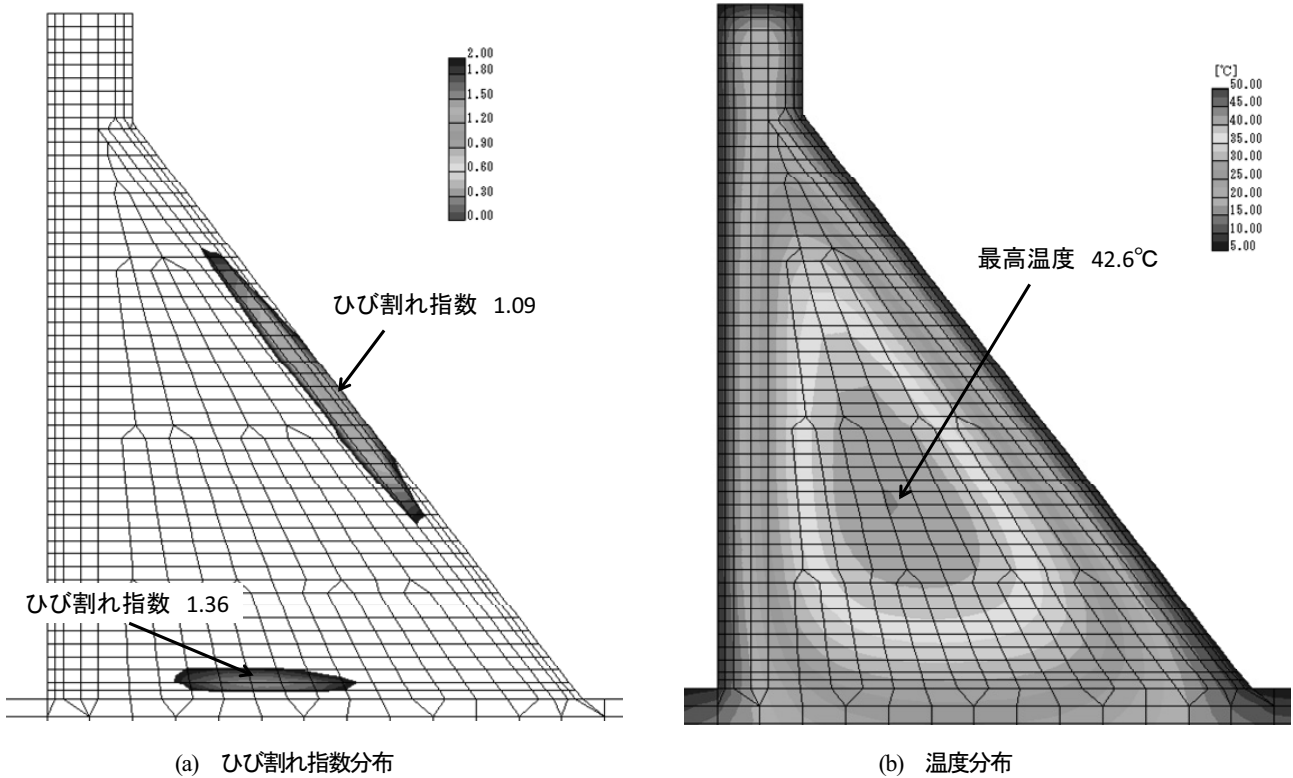


図-6 温度応力解析結果(ケース①: 最小ひび割れ指数発生時)

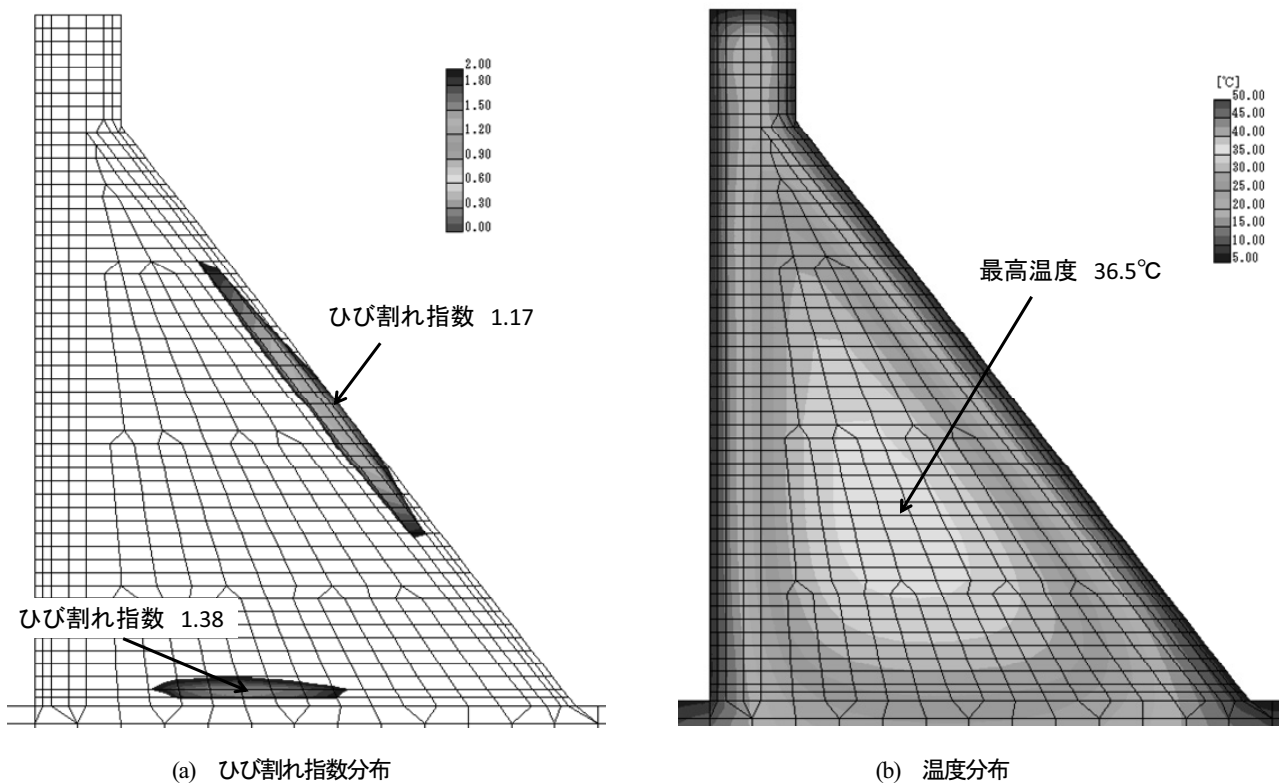


図-7 温度応力解析結果(ケース②: 最小ひび割れ指数発生時)

Summary In most dam concrete, a part of the cement is substituted by fly ash to reduce heat generation, which is a cause of thermal cracks of concrete, improve the workability and improve the long-term strength of concrete. The main stream in recent years is to replace 30% of moderate-heat Portland cement by fly ash and use it as blended cement. It is sometimes necessary in summer to lower the mixing temperature by cooling aggregates and place concrete at nighttime to prevent thermal cracks. When such measures are to be taken, the percentage of fly ash can be set at an arbitrary value by installing a storage silo and adding fly ash into the silo. The method is possibly effective for reducing the heat generation of dam concrete and also for taking other measures for controlling thermal cracks.

This report describes experiments on the strength and heat generation properties of dam concrete of fly-ash substitution ratios of 40% and 50%, which were prepared by adding fly ash to blended cement of moderate-heat Portland cement that contained 30% fly ash. An investigation on the feasibility of the method for reducing thermal cracks is also described.

Key Words : *Concrete for Dams, Fly Ash, Compressive Strength, Adiabatic Temperature Rise, Thermal Crack*