

# 砂防堰堤の打設における高スランブ コンクリートのひび割れ対策について

笠松 孝行

長野県企業局 水道事業課

当該砂防堰堤工事では、用地及び地形的な制約があり、堰堤コンクリートの施工において、クレーン車による打設が実施できないことから、比較検討の結果、ケーブルクレーンでコンクリートを打設箇所まで運搬し、さらに定置式ポンプで横引きし打設する方法を選定している。定置式ポンプでの打設を行うためには、スランブを高くする必要があるため、セメント量を増大させたコンクリートを使用することとした。

これにより、セメントの水和熱に起因する温度ひび割れの発生リスクが高まり、ひび割れの防止または抑制することが課題となった。この温度ひび割れに対して照査を行い、対策を検討した事例を紹介する。

キーワード 砂防堰堤、スランブ、温度ひび割れ、温度応力解析

## 1. はじめに

千曲建設事務所では、千曲市の千曲川左岸側に位置する普携寺沢において、透過型砂防堰堤の整備を進めている。この堰堤は高さ10.5m、延長74m、体積約2,300m<sup>3</sup>であり、スリットの鋼重は24.7tである。堰堤の整備によって、下流域に広がる観光拠点の戸倉上山田温泉街を土石流から保全することができる。

しかし、本堰堤の整備には、溪流左岸側の土地が使用できないという制約及び地形条件から、現場まで生コン車及びクレーン車が進入できず、一般的な打設方法がとれない。そのため、市道から現場までケーブルクレーンでコンクリートを運搬後、定置式ポンプにより横引き圧送打設する方法を選定した。

ポンプ打設を行うためには、配合スランブを高く設定する必要がある。そのため、ポンプの圧送能力及びケーブルクレーンによる運搬中のスランブ低下を考慮し、配合スランブを5cmから15cmへ変更することになった。これに伴いコンクリートの配合を検討した結果、単位セメント量が増加することとなり、セメントの水和に起因する温度ひび割れの懸念が高まった。あわせて、本堰堤の打設規模からマスコンクリートとして扱う必要があると判断し、「2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕」（以下、「示方書」）<sup>1)</sup>に基づき、温度ひび割れ対策の検討を行った事例を紹介する。

## 2. ひび割れ対策の検討方法について

### (1) 検討の進め方

今回の検討の流れを図-1に示す。温度応力解析によりひび割れ発生リスクを照査し、その結果から有効なひび割れ対策を抽出する。抽出した対策を比較し、最も妥当な対策を選定するという流れで検討を進めた。

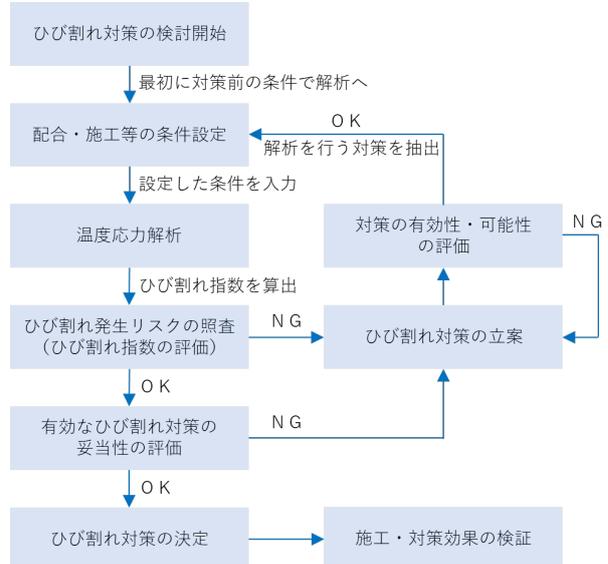


図-1 温度ひび割れ対策の検討フロー

### (2) ひび割れ発生リスクの照査方法

温度ひび割れ発生リスクの照査は、温度応力解析結果から得られるひび割れ指数の評価によって行う。ひび割れ指数 $I_0(\theta)$ は式(1a)で表され、その値が大きいほどひび割れが発生しにくく、小さいほど発生しやすい。一般にひび割れ指数が小さいほど、ひび割れの数が多く、ひび割

れ幅も大きくなる。照査はひび割れ指数 $I_{\sigma}(t)$ の最小値を用いて式(1b)により行う。<sup>1)</sup>

$$I_{\sigma}(t) = f_{sk}(t) / \sigma_f(t) \quad (1a)$$

$$I_{\sigma}(t) \geq \gamma_{\sigma} \quad (1b)$$

ここで、 $f_{sk}(t)$  は材齢 $t$ 日におけるコンクリート引張強度、 $\sigma_f(t)$ は材齢 $t$ 日におけるコンクリート最大主引張応力度をそれぞれ示す。また、 $\gamma_{\sigma}$ はひび割れ発生確率に関する安全係数で、表-2に示すように対策レベルに応じて定められる。

表-2 一般的な配筋の構造物における標準的なひび割れ発生確率と安全係数 $\gamma_{\sigma}$ の関係<sup>1)</sup>

対策レベル	ひび割れ発生確率	安全係数 $\gamma_{\sigma}$
ひび割れを防止したい場合	5%	1.85以上
ひび割れの発生をできる限り制限したい場合	15%	1.40以上
ひび割れの発生を許容するが、ひび割れ幅が過大とならないように制限したい場合	50%	1.0以上

一般的な構造物の場合、費用対効果を考慮して安全係数 $\gamma_{\sigma}$ を1.0とすることが多い。本構造物においても安全係数 $\gamma_{\sigma}$ が1.0以上であることをひび割れ発生リスクの照査における目標値とした。

### (3) 温度応力解析方法

解析には温度応力解析ソフトを使用した。入力した条件を基にセメントの水和熱による熱伝導及び体積変化等の解析を三次元メッシュの解析モデル上でを行い、コンクリートの体積変化による応力を求め、部位ごとのひび割れ指数を算出する。

解析を行う対象箇所は、部材厚及び躯体長が大きく、ひび割れ発生リスクが高くなると考えられる打設ブロックを選定し、解析モデルを作成した。(図-3,4)

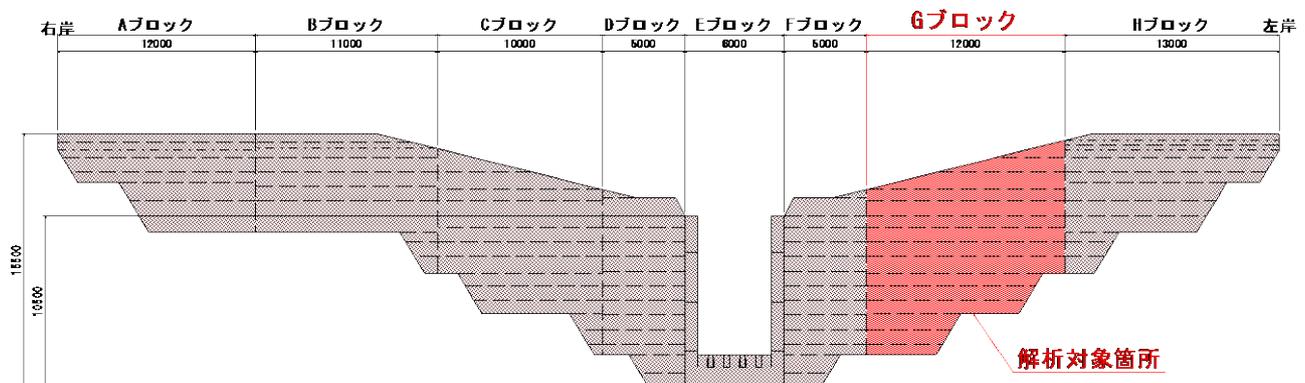


図-3 堰堤のコンクリート打設ブロック割・リフト割図

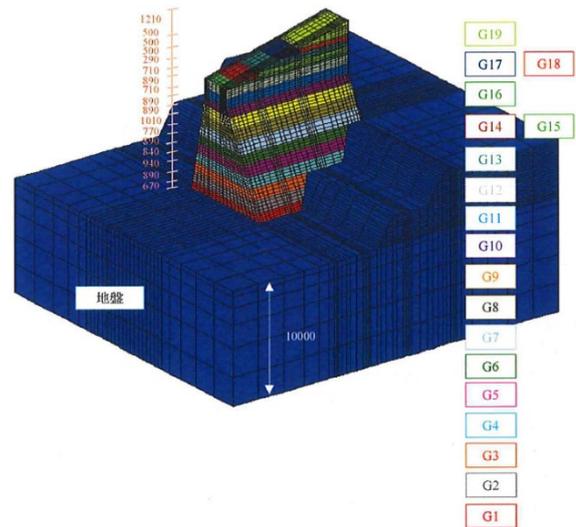


図-4 作成した解析モデル (Gブロック)

続いて、解析条件及び解析に用いる数式は以下の項のとおりとし、ひび割れ対策を行う前のひび割れ指数を算出するため、解析を行った。

#### a) 配合条件

配合条件は表-5のとおりとした。

表-5 配合条件

セメント	W/C (%)	単位セメント量 (kg/m <sup>3</sup> )	呼び強度 (N/mm <sup>2</sup> )	設計材齢 (日)
高炉セメントB種	53.9	306	21	28

#### b) 打設時期及び打設順序

打設時期及び打設順序は計画工程表のとおりとした。

#### c) 外気温、打込み温度及び初期温度

外気温は過去の気象データを用いた。また、これに基づき、打込み温度及び初期温度を設定した。

#### d) 熱物性値

示方書を参考に表-6のとおり設定した。

表-6 材料の熱物性値

物性値	コンクリート	地盤
比熱(kJ/kg°C)	1.15	2.6
密度(kg/m³)	2400	1800
熱伝導率(W/m°C)	2.7	1.7
弾性係数(N/mm²)	表-7の有効ヤング係数参照	500

e) 断熱温度上昇特性

コンクリートの断熱温度上昇特性は、式(2)による。

$$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-r(t-t_0)^S}) \quad (2)$$

ここで、 $Q(t)$  は材齢 $t$ 日における断熱温度上昇量(°C)、 $Q_{\infty}$ は終局断熱温度上昇量、 $t$ は材齢(日)、 $t_0$ は温度上昇の原点をそれぞれ示す。また $r$ 及び $S$ は温度上昇速度に関する定数でセメントの種類、打込み温度及び単位セメント量によって定まる。

f) 熱伝達率

表面の養生状態は熱伝導率によって反映される。本堰堤では鋼製残存型枠を使用することから、示方書より、熱伝導率 $\eta=14(W/m^2C)$ とした。

g) 材料の物性値

解析に用いる物性値は示方書より表-7のとおりとした。

表-7 材料の物性値

項目	物性値
圧縮強度(N/mm²)	$f_c'(t) = (t^a \cdot S_f) / (a + b(t^a \cdot S_f)) \times f_c'(i)$
引張強度(N/mm²)	$f_{tk}(t) = c_1 \times f_c'(t)^{c_2}$
有効ヤング係数(N/mm²)	$E_e(t) = \Phi_e(t) \times 6.3 \times 10^3 f_c'(t)^{0.45}$
ポアソン比	0.2
自己収縮	$\epsilon'_{as} = 153 \times 10^{-6}$
膨張係数	$12 \times 10^{-6}$

ここで圧縮強度について、 $f_c'(t)$ と $f_c'(i)$ はそれぞれ有効材齢 $t$ 日、設計基準強度の基準材齢 $i$ 日におけるコンクリートの圧縮強度を示す。 $a, b$ はセメントの種類によって定まる定数、 $S_f$ はセメントの種類に応じた硬化原点に対応する有効材齢(日)である。

引張強度について、 $f_{tk}(t)$ は有効材齢 $t$ 日におけるコンクリート引張強度を示す。 $c_1, c_2$ は養生方法により定まる定数である。

有効ヤング係数について、 $E_e(t)$ は有効材齢 $t$ 日における有効ヤング係数、 $\Phi_e(t)$ はクリープの影響を考慮するためのヤング係数の低減係数である。

3. 温度応力解析結果

ひび割れ対策を行う前のひび割れ指数は表-8のとおりとなり、ひび割れ指数の平均値はどの部位でも目標値の1.0を下回る結果となった。

表-8 ひび割れ対策を行う前のひび割れ指数

硬化時コンクリート温度(最大)		62.8°C	
ひび割れ指数(範囲値)	表面	上段部	0.90 (0.63~1.29)
		中段部	0.90 (0.63~1.29)
		下段部	0.98 (0.69~1.77)
	中心	上段部	0.87 (0.64~1.15)
		中段部	0.87 (0.64~1.15)
		下段部	0.65 (0.67~0.98)
ひび割れ指数評価(1.0以上)		×	

次に打設後の時間経過とコンクリート温度またはひび割れ指数の変化を、各打設リフトの部位ごとに表したグラフの抜粋をそれぞれ図-9、10に示す。

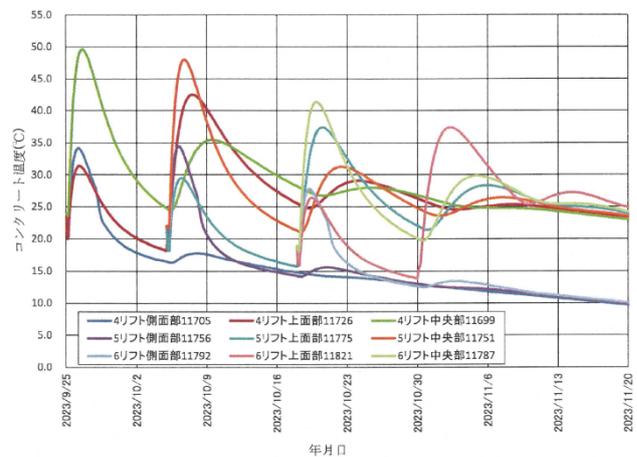


図-9 打設後の時間経過とコンクリート温度の関係

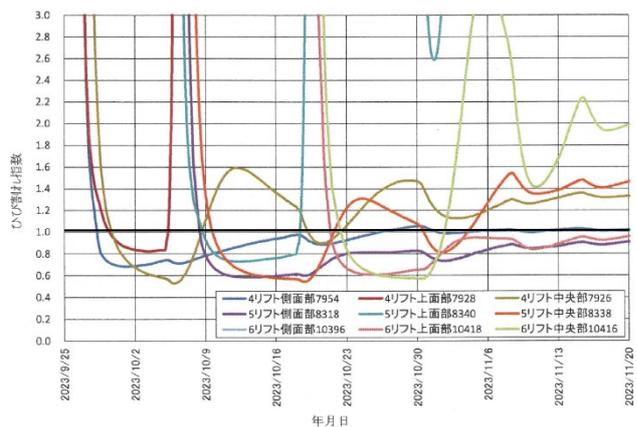


図-10 打設後の時間経過とひび割れ指数の関係

このグラフからは、打設直後の温度上昇時に、同じリフト内で中央部とその他の箇所の最大温度差が15°C前後発生している。その後、温度は低下するが引き続き打継いだコンクリートの水和熱の影響を受けていることがわかる。ひび割れ指数はコンクリート温度の降下時に低下し、目標値である1.0を下回る箇所が多く確認できる。また、ひび割れ指数が1.0を長期にわたり下回る箇所も見られ

ることから、堤体の性能に影響を及ぼすような貫通ひび割れの発生も推測でき、ひび割れ発生リスクは高いと考えられる。これにより、ひび割れ対策を講じた上で施工する必要があると判断した。

#### 4. ひび割れ対策の立案

照査結果よりひび割れ対策を講じる必要があることから、対策を立案し、主な対策案について次の3つの区分に整理した。それぞれ、(1)コンクリートの温度上昇量を低減させる対策、(2)コンクリート内に発生する引張の温度応力を低減させる対策、(3)温度ひび割れ幅を低減させ、過大とならないようにする対策となった。

続いて、それぞれの立案した対策について、有効性が高く、実施可能な対策を抽出し、再度温度応力解析を行うこととした。

##### (1) コンクリートの温度上昇量を低減させる対策

コンクリートの温度上昇量の低減は温度応力の減少につながり、ひび割れ対策として有効である。この区分の対策案の方法、内容及び実施の可否を表-11に整理した。また、単位セメント量の低減も温度上昇量の低減に効果があるが、打設条件により単位セメント量が多くなる結果となっているため、ここでは除外した。

表-11 コンクリートの温度上昇を低減させる対策案

対策方法	対策内容	実施の可否
打込み温度の低減	プレクーリング対策 骨材、練り混ぜ水の冷却	・プラント対応困難
	打設時期(季節、時間等)対策 夏期・日中の打設を避ける	・現場及びプラント対応困難
部材からの放熱の増大	打設リフト規模の縮小 打設リフト高、長さ	・打設リフト見直し可能 →対策案(1)として解析
部材温度の強制的低減	温度上昇の強制的低減 パイプクーリング	・実施可能 →対策案(2)として解析
低発熱系セメントの使用	中庸熱ポルトランドセメント 低熱ポルトランドセメント	・プラント対応困難

##### a) 打込み温度の低減

打込み温度を低減させる対策は2案を検討したが、どちらも実施不可能であると判断した。プレクーリング対策は、コンクリート製造時に骨材及び水をあらかじめ冷却しておく対策だが、生コンクリート工場での対応が困難であることが確認できた。また、施工時期対策についても、夏期及び日中を避けた作業は現場及び工場の対応が困難と判断した。

##### b) 部材からの放熱の増大

部材からの放熱を増大させる対策は、打設リフト規模を縮小させるもので、当初の打設リフト高さ100cmから50cmに変更することが可能であるため、実施可能と判断

した。これを対策案(1)として対策効果を温度応力解析により確認することとした。

##### c) 部材温度の強制的低減

部材温度を強制的に低減させる対策として、パイプクーリングを検討した。コンクリート内部に設置したパイプに水を循環させて部材を冷却させる工法で、効果が大きいと考えられる。そのため、これを対策案(2)として対策効果を温度応力解析により確認することとした。

##### d) 低発熱系セメントの使用

低発熱系セメントを使用する対策は、中庸熱または低熱ポルトランドセメントを用いることで高炉セメントよりも水和熱を抑制し、コンクリートの温度上昇量を低減させることができる有効な対策案である。しかし、工場で別途新たなセメントサイロが必要になる等、対応が困難であることから実施不可能と判断した。

##### (2) コンクリート内に発生する引張の温度応力を低減させる対策

コンクリートのひび割れの原因となる引張応力を低減させることでひび割れを抑制する対策で、この区分の対策案についても同様に表-12に整理した。

表-12 コンクリート内に発生する引張応力を低減させる対策案

対策方法	対策内容	実施の可否
圧縮応力の導入	膨張材の適用	・膨張材の使用可能 →対策案(3)として解析
外部拘束の低減	打込み区画・ブロック寸法の縮小	・打設リフト見直し可能 →対策案(1)として解析
	伸縮継目の設置	・構造上伸縮継目の設置困難
	新旧コンクリート間の温度差縮減	・打設リフト見直しにより可能 →対策案(1)として解析
内部拘束の低減	部材内温度の低減	・構造上部材内温度差の縮減が困難

##### a) 圧縮応力の導入

膨張材を使用することで、コンクリートに圧縮応力を導入し、温度下降時に発生する引張応力を低減し、ひび割れを抑制する。膨張材はプラントミキサにセメントと同時に投入し、練り混ぜるが、工場での対応可能であることが確認できたため、実施可能と判断した。これを対策案(3)として対策効果を温度応力解析により確認することとした。

##### b) 外部拘束の低減

外部拘束を低減させる対策として3案を検討した。打込み区画・ブロック寸法を縮小する対策は、寸法を縮小することで温度降下時の収縮幅も減少し、外部拘束を軽減できる。この対策については、打設リフトを見直す対策案(1)と同様の対策となる。

伸縮継目を設置する対策は、新たに目地を設置することで打設ブロック寸法の縮小ができ、伸縮目地による外部拘束の軽減も期待できる。しかし、一般的な目地間隔幅未満になることや、段切り勾配部に設置する場合には小段を新たに設置する必要があり、堤体形状が変わることから、今回は実施しないこととした。

新旧コンクリート間の温度差を縮減させる対策は、打継の時間間隔を短縮することで温度差を縮減させ、温度変化による応力減少、外部拘束の低減につながる。打設リフト見直しにより、打設間隔を4日から3日に短縮できることから、対策案(1)に盛り込んで解析を行うこととした。

### c) 内部拘束の低減

内部拘束は、放熱しにくい部材中心部と表面部の温度差に伴う膨張量の差により発生する。部材内温度を低減させることで表面部との温度差を縮減させることができるが、構造上、部材内の温度を軽減させることは困難なため、実施不可能と判断した。

### (3) 温度ひび割れ幅を低減させ、過大とならないようにする対策

ひび割れ指数の改善につながる対策ではないが、補助的な対策として、温度ひび割れ幅を低減させる対策で、この区分の対策案についても同様に表-13に整理した。

表-13 温度ひび割れ幅を低減させ、過大とならないようにする対策案

対策方法	対策内容	実施の可否
ひび割れと直交する鉄筋の配置	ひび割れ制御鉄筋の配置	・施工障害の課題が多い
ひび割れの分散	繊維補強	・天端仕上げ面に設置可能 →対策案(4)

### a) ひび割れと直交する鉄筋の配置

ひび割れ制御鉄筋を配置し、ひび割れ幅を低減させる対策であるが、鉄筋が支障となり、ポンプ圧送管の配管が困難となることや、残存型枠の設置に本来不要な足場

が必要になるため、実施は困難と判断した。

### b) ひび割れの分散

ひび割れの発生が予想される場所に網状の繊維補強材を配置して、ひび割れが集中しないようにし、ひび割れ幅を低減する対策である。天端仕上げ面において実施可能なため、必要に応じて補助的に使用できると判断し、対策案(4)とした。

## 4. ひび割れ対策案の温度応力解析結果と評価

前章で抽出したひび割れ対策案について温度応力解析を行い、ひび割れ指数を算出した。その結果を表-14に整理した。

対策案(1)では、硬化時のコンクリート温度の低減効果がみられ、ひび割れ指数は表面部の中下段で対策効果が大きくみられたが、目標であるひび割れ指数1.0以上を満足しない結果となった。

対策案(2)では、対策効果が大きくひび割れ指数を目標値である1.0以上を満足する結果となった。しかし、目標値を満たすパイプの配置とした結果、パイプの設置間隔が狭くなるためコンクリート打設作業スペースの確保が困難であること及び対策費用が高額となるという課題が生じた。このため、実施する対策案としての妥当性は低いと判断した。

対策案(3)では、全体的に対策効果が大きく、表面部は多くの箇所目標値1.0以上を満足したが、中心部は本対策のみでは不十分であると考えられた。

抽出した対策案からは、ひび割れ指数の目標を満足し、実施が妥当と考えられるものはなかった。対策案(1)と(3)の対策は複合して行うことが可能なため、複合案として再度温度応力解析を行い、その結果は表-14の最右列のとおりとなった。

複合案の解析結果では、平均値ではどの部位でもひび割れ指数は目標値の1.0を上回る結果となった。また、上段部に1.0未満の箇所がやや存在するが、ひび割れ指数を解析モデル上で表現した図-15を見ると、多くが天端表面部であることが確認できた。

表-14 ひび割れ対策案のひび割れ指数

対策案	対策無し	対策案(1)	対策案(2)	対策案(3)	対策案(1)+(3)		
		打設リフトの縮小	パイプクーリング	膨張材添加	打設リフト縮小+膨張材添加		
硬化時コンクリート温度(最大)	62.8℃	54.7℃	56.0℃	64.0℃	56.0℃		
ひび割れ指数(範囲値)	表面	上段部	0.90 (0.63~1.29)	0.81 (0.51~1.22)	1.58 (1.02~3.28)	0.82 (0.57~1.02)	1.20 (0.64~1.86)
		中段部	0.90 (0.63~1.29)	1.24 (0.94~2.36)	1.12 (1.03~1.61)	1.35 (0.99~1.92)	3.17 (2.77~3.68)
		下段部	0.98 (0.69~1.77)	1.27 (0.85~2.71)	1.20 (1.11~1.35)	1.35 (0.99~1.92)	2.56 (1.40~4.36)
	中心	上段部	0.87 (0.64~1.15)	0.79 (0.56~1.24)	1.11 (1.02~1.36)	0.91 (0.76~1.15)	1.09 (0.74~1.90)
		中段部	0.87 (0.64~1.15)	0.99 (0.75~2.04)	1.24 (1.03~1.61)	1.02 (0.81~1.26)	1.67 (1.21~3.08)
		下段部	0.65 (0.67~0.98)	0.90 (0.72~1.35)	1.08 (1.03~1.18)	1.02 (0.81~1.26)	1.30 (0.84~1.56)
ひび割れ指数評価(1.0以上)	×	×	◎	△	○		
考察	-	温度上昇量の低減効果はあるが、指数は目標値以下	対策効果は大きい、施工面及び費用面で大きな課題	対策効果は大きい、指数が目標値以下の箇所が多い	指数の目標値を満足、一部箇所では追加対策が必要		
対策実施の妥当性	-	×	×	×	○		

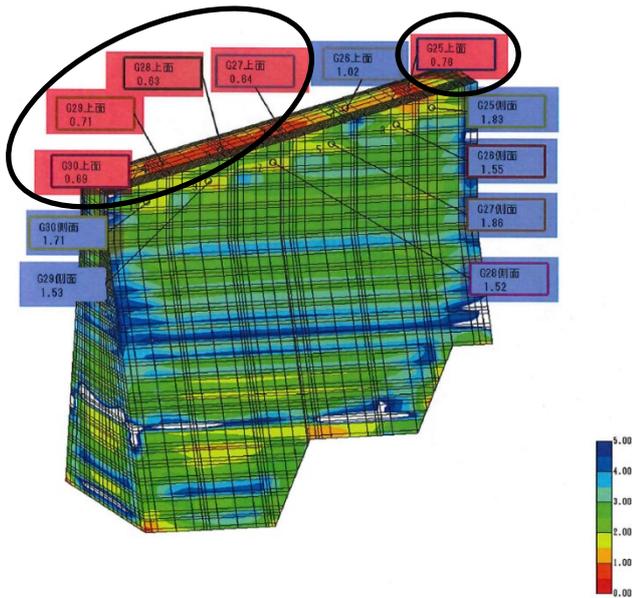


図-15 解析モデルに複合案のひび割れ指数を表現したもの  
(表面部) (丸囲みがひび割れ指数1.0未満の箇所)

当該箇所は堰堤天端の傾斜部であり、打設厚がゼロになる擦り付けが発生しないよう階段形状の打設計画とした箇所である。さらなる分割打設は難しく、これ以上のコンクリートの温度上昇量低減対策の実施は困難であると考えられる。しかし、天端部は雨水や日光等に晒される箇所であるため、対策案(4)を併用してひび割れを低減させる対策を行うこととした。

以上より、本堰堤の施工は対策案(1)の打設リフトを見直し、部材からの放熱を増大させ、かつ外部拘束を低減させる対策、対策案(3)の膨張材を使用し圧縮応力を導入する対策、及び対策案(4)の天端部に繊維補強材を配置し、ひび割れ幅を低減させる対策を実施することとした。

## 5. まとめ

今回の堰堤の打設においては、コンクリートのスランブを大幅に変更し、単位セメント量が増大したことによる温度ひび割れのリスクの高まりが問題となった。これに対し、温度応力解析によるひび割れリスクの照査を行いながら、ひび割れ対策を検討し、有効な対策を選定す

ることができた。これによりコンクリートのひび割れリスクを低減し、一定の品質を確保したうえで施工に進むことができたと考えている。

現在、現場では堤体工のコンクリート打設を進めている。今後は、現場を進捗させるとともに、実施している対策の効果を確認する必要があると考えている。本堰堤の表面は残存型枠に覆われており、天端以外は目視による観測ができない。そのため、打設後のコンクリート温度を測定し、記録された温度変化状況を確認することでひび割れ発生の有無の想定を行い、対策の効果や課題をまとめたい。あわせて、温度解析結果と実態の差異を確認し、温度解析の課題や、砂防堰堤における温度応力やそれによるひび割れの発生についての知見を深められるよう努めていきたい。



写真-16 現在の施工状況 (2024年6月末撮影)

## 6. 謝辞

本稿の執筆にあたり、堰堤の打設方法及び温度応力解析によるひび割れ対策の検討並びに現場施工に関わる皆様へこの場をお借りしお礼申し上げたい。

## 参考文献

- 1) 土木学会：2017年制定コンクリート標準示方書〔設計編〕