

小規模重力式コンクリートダム嵩上げ工の品質確保

Quality control of raising the level of a small dam

柚村 孝彦*

Takahiko Yumura

富岡 直人***

Naoto Tomioka

真田 昌慶**

Masanori Sanada

足立 順一****

Junichi Adachi

要 約

薄いコンクリートを既設ダム下流に打設する嵩上げダムでは、新設コンクリートにひび割れが発生する事例が多い。今回既設ダム下流に打設したコンクリートは、耐磨耗性を確保するため設計強度が 40 N/mm^2 となっており、温度応力によるひび割れの発生が予測された。そのため、温度応力解析に基づき、配合・施工・構造による温度ひび割れ対策を実施した。また、工程上の制約により気象条件の厳しい夏期（左岸側）、冬期（右岸側）のコンクリート打設となったため、既設コンクリートの取壊し、コンクリート製造・打込み・養生の各施工段階でも品質確保のための対策を講じた。以上の対策により、ひび割れ等の不具合の発生を抑制した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 配合による温度ひび割れ対策
- § 3. 施工・構造による温度ひび割れ対策
- § 4. ひび割れ補強鉄筋
- § 5. 温度ひび割れ対策の検討結果の総括
- § 6. 施工段階ごとの対策
- § 7. まとめ

§ 1. はじめに

当該工事は、発電を目的として昭和6年に竣工した小規模重力式コンクリートダムの改良を行う工事である。越流部を嵩上げし、堤体下流面に 1.0 m の増厚コンクリートを打設する。また、洪水吐きをゲート放流方式から自然越流方式に改修し、堤体下流面左右岸に導流壁を新設する（図-1、2参照）。

増厚コンクリートは、耐磨耗性を確保するため設計強度が 40 N/mm^2 となっており、単位セメント量が 436 kg/m^3 と多く、温度応力によるひび割れの発生が懸念された。また、ブロック長に対してリフト高さが低く且つ下方リフトと既設堤体の2面で拘束されるため、拘束度が高く温度ひび割れが発生し易い構造であった。

* 西日本（支）四国支店（現：関西支店土木工事課）

** 土木設計部設計一課

*** 西日本（支）四国支店（現：横瀬川ダム（出））

**** 西日本（支）四国支店（現：土木課）

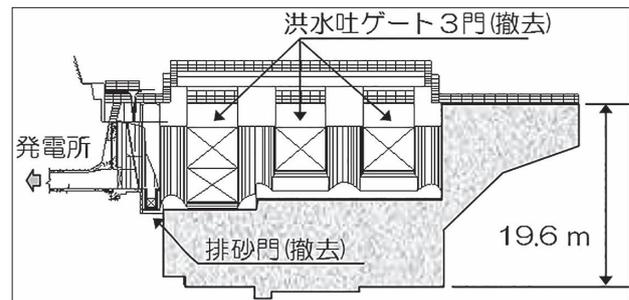


図-1 ダム改良前（上流面図）

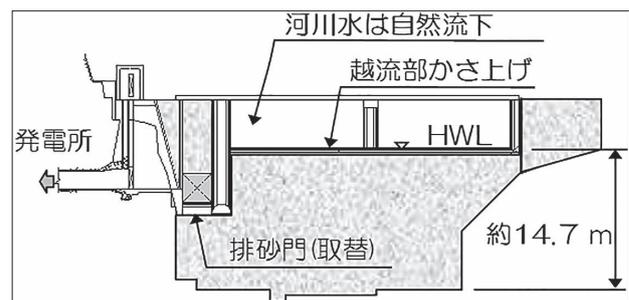


図-2 ダム改良後（上流面図）

標準配合で温度応力解析を行ったところ最小ひび割れ指数（コンクリートの引張強度／コンクリートの最大主引張応力度の最小値）が $0.12 \sim 1.16$ となったため、配合・施工・構造による温度ひび割れ対策を検討（最小ひび割れ指数の目標値： 1.0 ）し、当現場で最も有効と考えられる対策を選定するとともに、補強鉄筋によるひび割れ対策を実施した。

§2. 配合による温度ひび割れ対策

2-1 配合による対策の選定

今回の工事では、施工箇所と近隣の生コンプラントの位置関係より使用できるプラントは1社に限られた。このため、配合による対策として実施可能な、(1)フライアッシュ添加と管理材齢の変更、(2)高性能減水剤の使用、(3)膨張材の使用の3案を選定し、温度応力解析により対策工の効果を確認した。各対策の概要を以下に示す。

(1) フライアッシュの添加 (FB種相当) と管理材齢の変更 (28日⇒91日)

セメントの20%程度をフライアッシュに置き換え (FB種相当 [Ⅱ種灰])、結合材中のセメント量を低減することにより、コンクリートの発熱を抑えて温度ひび割れの発生を抑制する。フライアッシュを使用するとコンクリートの強度が長期に渡って持続的に増加することから、管理材齢を28日から91日に変更することにより、水結合材比を大きくすることができ (同一の水量であれば結合材料を低減できる)、さらなる発熱と温度ひび割れの抑制が可能となる。

(2) 高性能 AE 減水剤の使用

高性能 AE 減水剤を用いることにより、コンクリートの単位水量および単位結合材量を低減し、コンクリートの発熱を抑えて温度ひび割れの発生を抑制する。高性能 AE 減水剤は、AE 減水剤や AE 減水剤高機能タイプ (標準配合で使用) よりも高い減水能力を有しており、結合材量の低減とこれに伴うコンクリートの発熱・温度ひび割れ発生抑制に、より大きな効果を持つ対策である。また、長期的な乾燥収縮も低減される。

(3) 膨張材の使用

膨張材は、コンクリート中にエトリングイトと水酸化カルシウムを生成させることによってコンクリート自体を膨張させる材料である。標準配合での温度上昇のピークは2日以内であるのに対して、膨張材の効果は7日程度でピークを迎えるため、温度降下時の収縮ひずみを低減することができ、コンクリートの収縮に伴う温度ひび割れを抑制することができる。

2-2 配合設計と温度応力解析の実施

温度応力解析で検討したコンクリートの標準配合と変更配合を表-1に示す。変更配合は、FB種相当およびFB種相当 (膨張材あり) の2ケースである。セメント単体の比較では、120 kg/m³程度の低減効果があった。温度応力解析による標準配合での最高温度を図-3に、FB種相当に変更した場合の最高温度を図-4に、解析結果の比較を表-2に示す。

表-1 設計配合

種類	W/B	単位量 (kg/m ³)								
		セメント	水	細骨材		粗骨材	混和剤		混和材	
				砂	フライアッシュ		AE減水剤 高機能型	高性能 AE減水剤	フライアッシュ	膨張材
プラント標準配合	36.5%	436	159	634	41	1054	4.8	-	-	-
FB種相当	38.5%	316	152	676	-	1085	-	2.37	79	-
FB種相当 (膨張材あり)	37.5%	304	152	667	-	1085	-	2.43	81	20

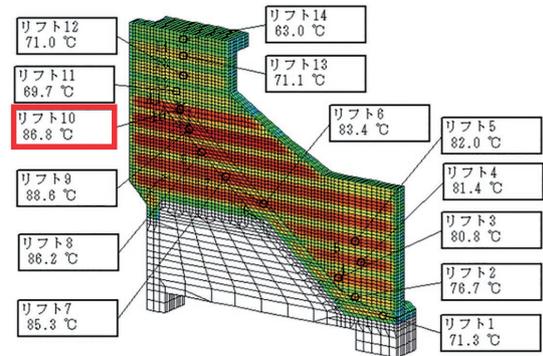


図-3 コンクリート内部最高温度 (標準配合)

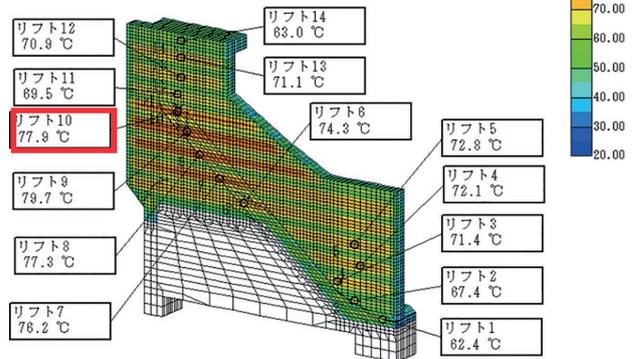


図-4 コンクリート内部最高温度 (変更配合)

表-2 標準配合と変更配合の解析結果の比較表

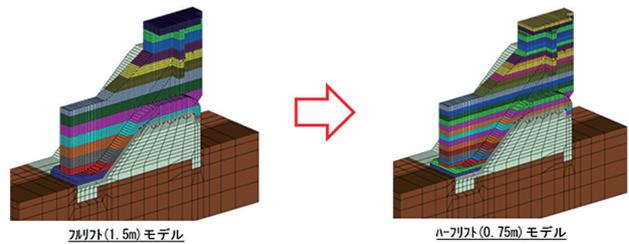
	標準配合		フライアッシュ (膨張材なし)			フライアッシュ (膨張材あり)		
	最小ひび割れ指数	最高温度	最小ひび割れ指数	ひび割れ指数の改善率*	最高温度	最小ひび割れ指数	ひび割れ指数の改善率*	最高温度
1リフト	0.12	71.3°C	0.14	117%	62.4°C	0.51	425%	63.6°C
2リフト	0.25	76.7°C	0.29	116%	67.4°C	0.56	224%	65.9°C
3リフト	0.38	80.8°C	0.41	108%	71.4°C	0.49	129%	72.8°C
4リフト	0.38	81.4°C	0.41	108%	72.1°C	0.56	147%	73.5°C
5リフト	0.32	82.0°C	0.34	106%	72.8°C	0.63	197%	74.2°C
6リフト	0.37	83.4°C	0.40	108%	74.3°C	0.43	116%	75.6°C
7リフト	0.40	85.3°C	0.43	108%	76.2°C	0.46	115%	77.6°C
8リフト	0.25	86.2°C	0.29	116%	77.3°C	0.35	140%	78.7°C
9リフト	0.36	88.6°C	0.44	122%	79.7°C	0.54	150%	81.1°C
10リフト	0.41	86.8°C	0.52	127%	77.9°C	0.65	159%	79.2°C
11リフト	0.61	69.7°C	0.60	98%	69.5°C	0.67	110%	69.6°C
12リフト	0.59	71.0°C	0.58	98%	70.9°C	0.77	131%	70.9°C
13リフト	0.64	71.1°C	0.64	100%	71.1°C	0.64	100%	71.1°C
14リフト	0.81	63.0°C	0.81	100%	63.0°C	0.83	102%	63.0°C
平均値	0.42	78.4°C	0.45	109%	71.9°C	0.58	160%	72.6°C

※ : ひび割れ指数の改善した箇所

2-3 配合変更による対策効果の一次判定

配合をFB種相当に変更した場合、ひび割れ指数が躯体全体に渡って改善するとともに、最高温度も9°C程度抑制された。FB種相当 (膨張材あり) では、温度の抑制効果はFB種相当よりも若干劣るが、最小ひび割れ指数の改善効果 (変更/標準) の平均値は、FB種相当で109%

であるのに対して、FB種相当（膨張材あり）では160%と大きくなった。以上より、配合による対策としてFB種相当（膨張材あり）が最も有効な対策であった。しかし、配合による対策のみでは最小ひび割れ指数1.0以上を満足しないため、施工・構造の対策による更なる最小ひび割れ指数の改善について検討を行った。



図一五 検討モデル図

§3. 施工・構造による温度ひび割れ対策

3-1 リフト高による対策

左岸施工は夏期施工であることから、コンクリート温度上昇の抑制を目的として、一回の打設リフト高さの低減（1.5 m ⇒ 0.75 m）を検討した。温度応力解析の結果、一回の打設リフト高さが抑えられる事により、コンクリートの温度低下に効果があることは確認されたが、最小ひび割れ指数については、低下するリフトも多く見られた（表一三参照）。これは、温度低下の影響よりも、打設ブロックの縦横比（以降 H/L）が小さくなることによる躯体の拘束度の増加が大きく影響したためと考えられる。

右岸側施工については、冬期施工であることや工程短縮の観点からリフト高さを増加（1.5 m ⇒ 2.25 m）した温度応力解析を行ったところ、最小ひび割れ指数に大きな相違が見られなかった。これは、冬期施工であることからコンクリートの温度上昇が抑えられるとともに、H/Lが改善したためと考えられる。

以上より、右岸施工時のみ打設リフト高を変更した。

3-2 型枠による対策

一般に、型枠の材料および残置期間を変更して、コンクリートの保温状態を改善し、コンクリートの温度降下勾配を緩やかにすることにより、硬化初期の内外温度差が小さくなり、内部拘束による温度ひび割れが改善される。

左岸側施工時（夏期施工）については、断熱型枠の使用および残置期間を延長を考慮した温度応力解析を実施した結果、コンクリートの最高温度が上昇し、最小ひび割れ指数が若干悪化する結果となった。

右岸施工時（冬期施工）については、クレスト部において養生期間延長（2日⇒7日）による効果が確認されたが、下流面については型枠残置期間の延長による最小ひび割れ指数の改善は見られなかった。

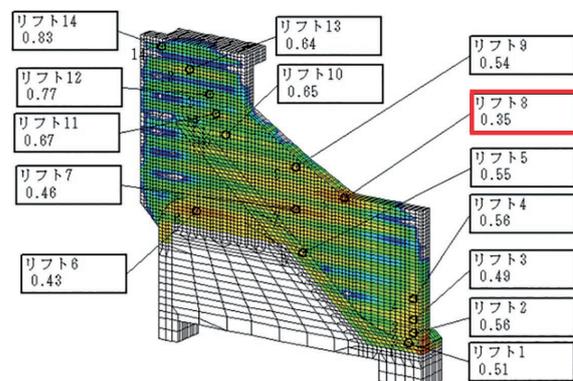
以上より、型枠による対策として、右岸施工時（冬期施工）のクレスト部の保温養生期間7日以上を採用した。

3-3 構造体の分割

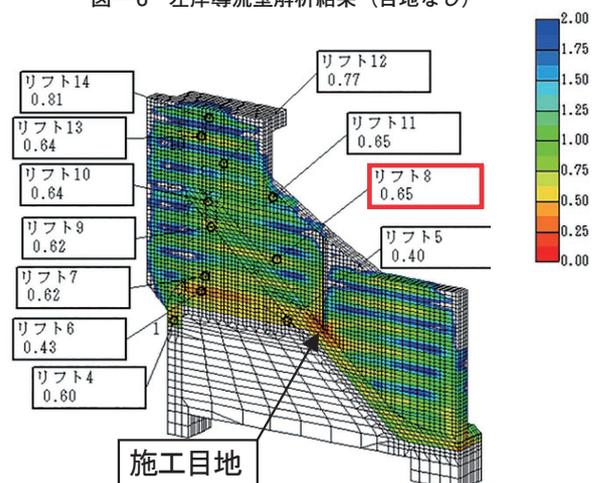
導流壁は、上下流方向に延長が長く、拘束度の大きい構造物である。左岸導流壁（約21 m）については、構造

表一三 フルリフトとハーフリフトの解析結果の比較表

	フルリフト打設 (H=1.5m)		ハーフリフト打設 (H=0.75m)		
	最小ひび割れ指数	最高温度	最小ひび割れ指数	ひび割れ指数の改善率 [※]	最高温度
1リフト	0.51	63.6℃	下層 0.19	37%	51.3℃
			上層 0.14	27%	54.7℃
2リフト	0.56	68.7℃	下層 0.28	50%	56.7℃
			上層 0.45	80%	53.9℃
3リフト	0.49	72.8℃	下層 0.45	92%	67.4℃
			上層 0.46	94%	64.0℃
4リフト	0.56	73.5℃	下層 0.48	86%	67.2℃
			上層 0.49	88%	65.8℃
5リフト	0.63	74.2℃	下層 0.37	59%	69.2℃
			上層 0.35	56%	72.0℃
6リフト	0.43	75.6℃	下層 0.44	102%	68.4℃
			上層 0.36	84%	70.1℃
7リフト	0.46	77.6℃	下層 0.49	107%	70.2℃
			上層 0.61	133%	69.8℃
8リフト	0.35	78.7℃	下層 0.43	123%	69.7℃
			上層 0.40	114%	69.7℃
9リフト	0.54	81.1℃	下層 0.54	100%	72.0℃
			上層 0.57	106%	68.6℃
10リフト	0.65	79.2℃	下層 0.60	92%	68.3℃
			上層 0.66	102%	63.9℃
11リフト	0.67	69.6℃	下層 0.68	101%	58.3℃
			上層 0.51	76%	53.5℃
12リフト	0.77	70.9℃	下層 0.60	78%	55.3℃
			上層 0.90	117%	54.6℃
13リフト	0.64	71.1℃	下層 0.95	148%	53.3℃
			上層 0.92	144%	53.0℃
14リフト	0.83	63.0℃	下層 1.37	165%	46.2℃
			上層 1.13	136%	44.3℃
平均値	0.58	72.8℃	0.57	96%	61.8℃



図一六 左岸導流壁解析結果（目地なし）



図一七 左岸導流壁解析結果（目地有り）

的に分割可能であったことから、H/Lの向上（1.5 m/21.336 m=0.070 ⇒ 1.5 m/11.455 m=0.131）による温度ひび割れの改善を目的として、躯体中央付近に施工目地を追加した温度応力解析を実施した。解析の結果、H/Lの改善にともないひび割れ指数が最大0.3向上することが確認されたことから、左岸導流壁に施工目地を追加することとした（図-6、7参照）。

§ 4. ひび割れ補強鉄筋

4-1 ひび割れ補強鉄筋の検討

前述の温度応力解析結果より、配合・施工・構造による対策を実施しても局部的には最小ひび割れ指数1.0以上とならない結果となり、温度ひび割れの発生は抑制は困難と考えられた。このため、発生するひび割れの幅が過大とならないように制限するために、ひび割れ補強鉄筋の配置を検討した。

これまでの検討で算定された最小ひび割れ指数を用いて、図-8中の式-4.1により許容ひび割れ幅に対して必要な補強鉄筋量を算定した。許容ひび割れ幅については、コンクリート標準示方書に示される表-4より、『一般の水密性を確保する場合』に必要とされるひび割れ幅の設計限界値の目安である0.2 mmとした。当初の配筋図とひび割れ補強鉄筋による対策後の配筋図の一例を図-9、10に実際の組立状況を写真-1に示す。

§ 5. 温度ひび割れ対策の検討結果の総括

上記の検討結果より、対策工には、ひび割れ指数の改善を目的として、フライアッシュの使用、高性能AE減水剤の使用、膨張材の使用、構造体の分割を採用し、ひび割れ幅を『一般の水密性を確保する場合』に必要とされるひび割れ幅の設計限界値の目安である0.2 mm以内に抑えるために、ひび割れ補強鉄筋を配置することとした。

表-4 水密性に対するひび割れ幅の設計限界値の目安²⁾

要求される水密性の程度	高い水密性を確保する場合	一般の水密性を確保する場合
卓越する断面力	軸引張力 曲げモーメント ²⁾	0.1 0.2

1) 断面力によるコンクリート応力は全断面において圧縮状態とし、最小圧縮応力度を0.5 N/mm²以上とする。なお、詳細解析により検討を行う場合には、別途定めるものとする。
2) 交番荷重を受ける場合には、軸引張力が卓越する場合に準じることとする。

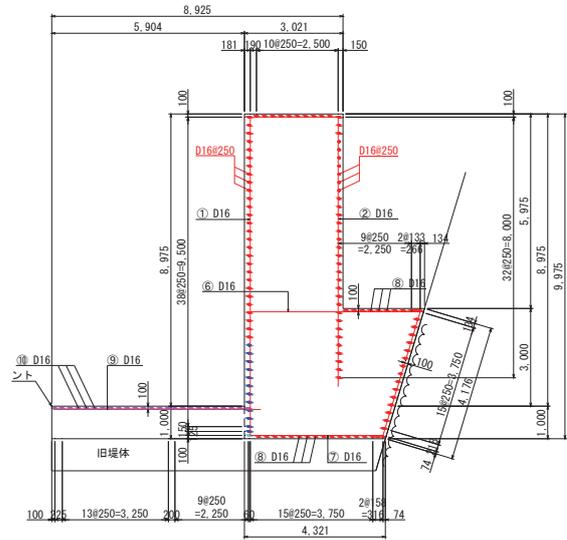


図-9 当初配筋（左岸導流壁）

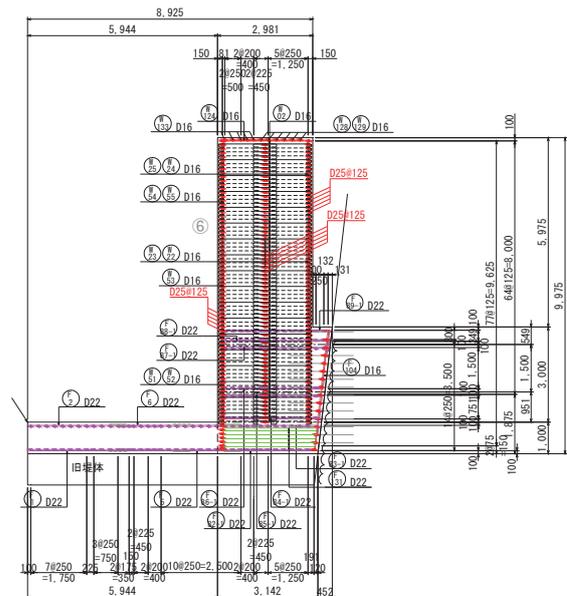


図-10 対策後の配筋（左岸導流壁）



写真-1 ひび割れ補強鉄筋組立状況

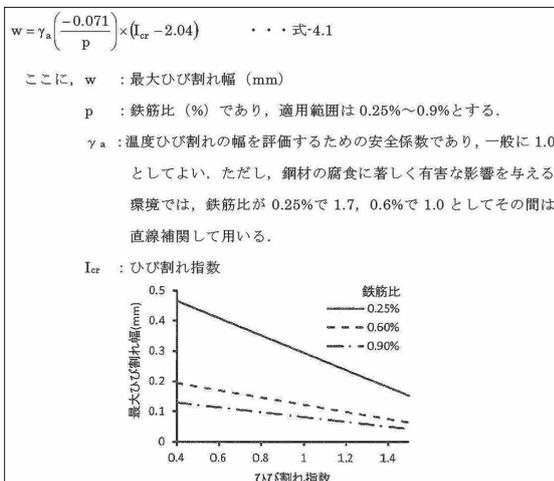


図-8 ひび割れ幅の照査式¹⁾

§6. 施工段階ごとの対策

6-1 既設堤体の取壊し

既設堤体の取壊し時に、今回撤去しない既設構造物に悪影響を与えないこと、右岸施工時に先行して打設した左岸新設コンクリートに悪影響を与えないことを念頭に取壊し工法の選定を行った。ゲートピア上部はワイヤーソー工法、それ以外は非火薬破砕剤による1次破砕および大型ブレーカ・ニブラによる2次破砕の併用工法を採用し、仕上げはハンドブレーカによる人力施工で慎重に行った。

また、撤去する既設堤体の厚みが薄い箇所については、ロックライミングマシンにスパイクハンマを装着して使用（写真-2参照）し、新設コンクリートと近接する箇所の取壊しでは静的破砕剤を使用することで既設堤体および新設コンクリートへの影響を最小限に抑えることができた。

取壊し後の既設堤体の表面については、高圧水洗浄により取壊し時に浮いたコンクリートを除去した後、新設コンクリートの打設を行った。

6-2 左岸側施工時（夏期施工）の対策

高性能 AE 減水剤の特徴として、外気温が20℃を超えるとスランプの経時変化が大きくなり、1時間経過後のスランプロスが2~3cm程度発生する。このため、綿密な配車計画と運行管理を行うことで練り始めから打設開始までが1時間を超えないように管理した。

また、製造時の対策として、プラントとの協議により骨材への散水および練り混ぜ水に地下水のみを使用することで打込み温度の低減を図った。現場到着後は、待機場所にて生コン車のドラムをハイウォッシャーで冷却（写真-3参照）し、打設待機時の温度上昇の抑制を図った。コールドジョイントの発生を防ぐため打設箇所にミスト噴霧を行い、打ち重ね時間が75分以内となるよう管理した。

打設完了後は、直ちに湛水養生を開始し、脱型後は散水養生を継続的に行うことで急激な乾燥による収縮ひび割れの発生を抑制した。

6-3 右岸側施工時（冬期施工）の対策

製造時の対策として、練り混ぜ水に地下水のみを使用することで練り上がり温度を確保し、打込み温度が5℃以下とならないように管理した。

綿密な配車計画と運行管理を行うことで練り始めから打設開始までの時間をできるだけ短くし、コンクリート温度の低下を防止した。

打ち重ね時間は左岸施工と同様に75分以内となるよ

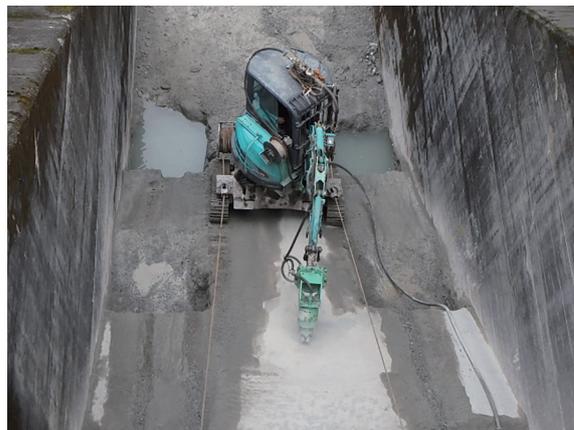


写真-2 スパイクハンマによるチッピング



写真-3 生コン車ドラムの冷却

うに管理した。打設完了後は湛水+シート養生を行い露出面が外気に長時間さらされないようするとともに、凍結の恐れがある場合は、ジェットヒーターと練炭による給熱養生を行った。脱型後は散水養生を継続的に行うことで急激な乾燥による収縮ひび割れの発生を抑制した。湛水および散水に使用する水は、パイプヒーターで温めた温水を使用した。堤体内部温度、養生温度、湛水温度管理を行い、養生温度および湛水温度が5℃以下とならないように管理した。

クレスト部については保温・保湿性に優れた養生マットを使用し、温水による養生を7日以上継続することで露出面の急激な乾燥と温度低下を防止した。

6-4 実測値のフィードバック

表-5に左岸側での堤体コンクリート内部温度（最高温度）の測定結果を示す。最高温度の解析値と実測値を比較すると、ほとんどのリフトで解析値の方が大きい値となっており、実測値の方が高くなったリフトにおいても最大0.4℃の誤差でほぼ同等の値となった。

右岸側では、施工の進捗によってリフトスケジュールの変更があり、外気温および打込み温度が当初の解析条件と大きく乖離することが想定された。左岸側での解析結果と実測値（温度）の比較から、解析で設定したパラ

メータは概ね妥当であると考えられたことから、右岸側では、外気温および打込み温度を変更した温度応力解析を行い、再解析結果に基づいて補強鉄筋を更に追加した。表一六に右岸側での堤体コンクリート内部温度（最高温度）の測定結果を示す。右岸側での最高温度の解析値と実測値についても左岸側と同様の傾向であった。

左岸側、右岸側ともに、温度応力解析は、実測値（温度）を比較的に精度よく推定しており、今回実施した対策工も概ね妥当なものであったと考えられる。

§7. まとめ

『フライアッシュ+高性能減水剤+膨張材』、『構造体の分割』、『ひび割れ補強鉄筋の追加』という対策を実施することで、発生するひび割れ幅を『一般の水密性を確保する場合』に必要とされるひび割れ幅の設計限界値の目安の0.2 mm以下とすることを目標として施工した結果、有害なひび割れの発生がない良質な嵩上げコンクリートを打設することができた。

配合の対策としては、内部温度を低減するために低発熱型セメント、中庸熱セメントの使用も検討したが地域的に調達することができなかつた。このため、内部温度を十分に下げることができず、温度ひずみが大きいコンクリートとなり、ひび割れ幅を抑制するための補強鉄筋量が増加した。

最もひび割れ指数が小さくなった左岸導流壁では、壁厚2.0 mに対して、ひび割れ補強鉄筋をD25を@125で3列配置した。通常の補強鉄筋のイメージをはるかに超える鉄筋量であり、配合および構造での対策後のひび割れ指数が0.59と小さいため、微細なクラックが多く入ることも想定したが、実際には全くひび割れが確認されなかつた。この通常よりも多く配置した鉄筋と今回実施したその他の対策の相乗効果でひび割れの発生を抑制できたと考えられる。

また、夏期打設においては、少しでも打込み温度が低くなるように、冬期打設においては、打込み温度と養生温度が5℃以下にならないように創意工夫を積み重ね施工を行い、養生期間中は、急激な乾燥や温度低下を防止するとともに、露出面への養生水の供給を継続的に行うことで表面が緻密なコンクリートとなり、ひび割れの発生を防止できたと考えられる。

謝辞. 本工事の詳細設計、温度応力解析と配合検討、施工計画、および施工にあたり、ご指導、ご協力いただいた関係者の皆様に、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) コンクリート標準示方書 設計編 JSCE2012 P.305~306
- 2) コンクリート標準示方書 設計編 JSCE2012 P.241

表一五 解析値と実測値の比較（左岸側）

	打設日	外気温	コンクリート温度 (打込み温度)	①最高温度 (解析値)	②最高温度 (実測値)	誤差 (2-1)
1リフト	2016/6/10	25.0℃	25.0℃	63.7℃	52.6℃	-11.1℃
2リフト	2016/6/17	21.0℃	26.0℃	65.8℃	64.8℃	-1.0℃
3リフト	2016/6/27	22.0℃	27.0℃	72.9℃	71.9℃	-1.0℃
4リフト	2016/7/5	27.0℃	30.0℃	73.6℃	74.0℃	0.4℃
5リフト	2016/7/13	23.0℃	29.0℃	74.3℃	70.0℃	-4.3℃
6リフト	2016/7/26	25.5℃	28.0℃	75.2℃	75.3℃	0.1℃
7リフト	2016/8/8	21.0℃	29.0℃	77.6℃	77.9℃	0.3℃
8リフト	2016/8/24	23.0℃	29.0℃	78.7℃	78.9℃	0.2℃
9リフト	2016/9/9	23.0℃	28.0℃	81.1℃	74.4℃	-6.7℃
10リフト	2016/9/21	18.0℃	26.0℃	79.2℃	65.1℃	-14.1℃
11リフト	2016/10/3	20.0℃	27.0℃	69.1℃	63.4℃	-5.7℃
12リフト						
13リフト						
14リフト	2016/10/13	13.6℃	22.0℃	74.3℃	69.0℃	-5.3℃

表一六 解析値と実測値の比較（右岸側）

	打設日	外気温	コンクリート温度 (打込み温度)	①最高温度 (解析値)	②最高温度 (実測値)	誤差 (2-1)
1リフト	2017/2/1	0.5℃	10.0℃	35.3℃	31.4℃	-3.9℃
2リフト	2017/2/15	0.0℃	8.0℃	39.2℃	34.7℃	-4.5℃
3リフト	2017/2/23	10.0℃	11.0℃	41.8℃	40.4℃	-1.4℃
4リフト	2017/3/6	7.0℃	13.0℃	44.9℃	45.0℃	0.1℃
5リフト	2017/3/15	3.0℃	11.0℃	48.3℃	47.9℃	-0.4℃
6リフト	2017/3/23	5.0℃	13.0℃	49.1℃	49.1℃	0.0℃
7リフト	2017/4/3	2.0℃	12.0℃	72.2℃	56.2℃	-16.0℃



写真一四 ダム改良前



写真一五 ダム改良後