

報告 ダム洪水吐の施工時温度応力の制御方法に関する検討

伊阪大輔*¹・豊島弘三*²・森山信弘*²・溝渕利明*³

要旨：ダムを代表とするマスコンクリート構造物では、セメントの水和熱による温度ひび割れを制御することが重要な課題である。温度ひび割れの制御方法には各種のものがあるが、パイプクーリングは温度応力制御方法の一つである。本報文では、パイプクーリングによる温度ひび割れ抑制効果を確認するために、建設中のダム洪水吐においてクーリングを実施したブロックとしないブロックを施工し、施工時温度応力の測定を行うとともに、測定結果を用いて逆解析を行った。その結果、パイプクーリングがひび割れ抑制対策として有効であることが確認された。

キーワード：パイプクーリング，温度ひび割れ制御，マスコンクリート，ダム洪水吐

1. はじめに

マスコンクリート構造物では、施工時の温度応力によって生じるひび割れを制御することが重要な課題であり、通常事前に設計、材料、施工の各面からの制御対策が重要度に応じて検討されている。ひび割れ制御対策には各種の方法があり、構造物の形状、施工場所、環境条件、施工条件やコンクリートの打設量、制御効果等の条件によって実施する方法の選定が行われる。

温度ひび割れ制御方法のうちパイプクーリングは、従来からダムや長大橋梁基礎の非常にマッシブなコンクリート構造物に適用されてきた。パイプクーリングは、パイプ間隔、パイプ配置、通水量、通水温度及び通水期間を調整することで、コンクリート打設後の温度上昇を制御することが可能なポストクーリングのひとつであり、セメントの水和熱に起因する温度応力の抑制には有効な方法である。ただし、従来のダム等のパイプクーリングでは、経験的にパイプ配置、通水量及び通水温度などを決定している場合が多く、目的に応じた最適な方法を事前に選定していない場合が多いのが現状である[1]。

本報文では、パイプクーリングの最適な方法を検討するための第一歩として、ロックフィルダムの洪水吐を対象に、クーリングパイプを埋設したブロックとひび割れ制御対策を実施しないブロックを施工し、パイプクーリングによるひび割れ抑制効果の比較検討を行った。ただし、両者の効果を定量的に評価するために、各ブロックには熱電対、ひずみ計、有効応力計及び無応力計を埋設し、施工時の温度応力の測定を行った。また、計測結

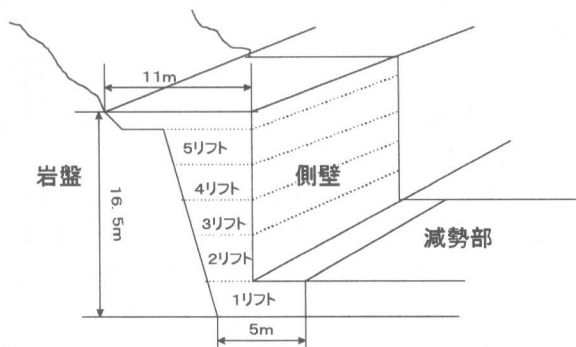


図-1 構造物の概要

* 1 鹿島建設(株) 東北支店 山王海ダム共同企業体工事事務所(正会員)

* 2 山王海鹿妻農業水利事業所

* 3 鹿島建設(株) 技術研究所第二研究部第2研究室(正会員)

果を用いて逆解析を実施し、その結果を基にパイブレイアウト等を変化させた場合の低減効果について解析を行った。

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
54.8	42.5	142	259	794	1129	2.59

設計基準強度: 24N/mm²
スランブ: 8cm

細骨材: 川砂(7): 砕砂(3)
粗骨材: 川砂利(7): 碎石(3)

2. 構造物の概要

本検討で対象とした構造物は、ロックフィルダムの洪水吐の減勢部の左岸側の導流壁で、厚さ2~11m、幅9m、高さ16.5mのマッシュなコンクリート構造物である。各ブロックともリフト厚2~3mで6リフトに分けて施工した。構造物の概要を図-1に示す。

コンクリートの配合条件は、設計基準強度 21 N/mm²、粗骨材最大寸法 40mm、スランブ 8cmで、使用したセメントはフライアッシュB種セメントである。コンクリート配合を表-1に示す。

3. パイブクーリングの仕様

本検討で実施したパイブクーリングは、図-2に示すように各リフトの下段、中段に配置した。パイブ間隔は、ダム等で標準となっている1.5m間隔とし、パイブの配置については、パイブからの熱除去効果を有効に利用するためにコンクリート温度が最も高くなるリフト中央部に配置した。パイブの配管長は、各リフトで異なり、41.5m~104.0mであった。使用する水は河川水とし、通水量は15ℓ/分とした。ただし、打設開始からコンクリート温度が最高温度に達した後は、温度降下速度が2℃/日を越えるごとに通水量を半分に低減することで、過冷却による温度ひび割れ発生に対する抑制対策とした。

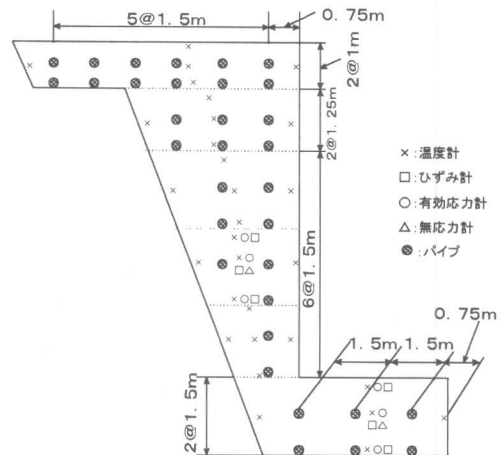


図-2 パイブレイアウト及び計測器設置位置

表-2 計測機器の仕様

計器名	型式	仕様
温度計	C-C熱電対	
ひずみ計	KM-100B	容量: 5000X10 ⁻⁶
無応力計	KM-100B	容量: 5000X10 ⁻⁶
有効応力計	GK-60-505	容量: 60kgf/cm ²

4. 計測概要

計測は、図-2に示すようにクーリングパイブを埋設したブロックとポストクーリングを実施しないブロックの各リフトの下面部、中央部、上面部、岩着部及び表面部の5箇所に温度計を設置し、コンクリート温度の測定を行うとともに、第1、3リフトの下面部、中央部及び上面部にひずみ計及び有効応力計を設置し、コンクリートのひずみ及び応力測定を行った。また、第1、3リフトに無応力計を設置し、コンクリートの自由膨張の測定を行い、線膨張係数の算定を行った。各計器の仕様を表-2に示す。

5. 計測結果

5.1 温度計測結果

各ブロックの温度計測結果を表-3に示す。また、クーリングパイブを埋設したブロックとポストクーリングを実施しないブロックの第1リフトのクーリング実施期間でのリフト中央部とク

ーリングパイプの出入口水温との関係を図-3に示し、各リフトのクーリングの有無と温度上昇量との関係を図-4に示す。

クーリングに用いた水の温度は、7月が20℃前後、8、9月が15℃前後であった。

クーリング水の出入口での温度差は配管長によって異なるが3～5℃であり、単位長さ当りの温度上昇量は0.07～0.09℃/mで各リフトともほぼ同様な値であった。

図-3から、第1リフト中央部において温度上昇時にはクーリングの有無にかかわらずほとんど同じ履歴を示した。一方、温度上昇量が2℃/日となる材齢2日以降から徐々にパイプクーリングによる熱除去効果が見られ、クーリングを実施しないリフトが最高温度に達する材齢5日においては、パイプクーリングによって約7℃の低減効果が見られた。また、図-4に示すように各リフトともパイプクーリングを実施することで、4～7℃の温度低減効果が見られた。ただし、第5リフトは打設時期が1ヶ月以上違い、外気温及び打込み温度が異なったために両者の差異が他のリフトに比べ小さい結果となった。

5. 2 温度応力計測結果

(1). 線膨張係数

無応力計による温度変化量とひずみ変化量との関係から算定した線膨張係数は、図-5に示すように温度上昇時において、クーリングを実施したリフトが若干ではあるがクーリングを実施しないブロックよりも小さい傾向にあった。一方、温度降下時にはクーリングの有無に関係なく

表-3 計測結果

クーリングの有無	リフトNo.	対象部位	打設日	打込み温度(°C)	最高温度(°C)	温度上昇量(°C)
クーリングあり	1	リフト中央部	7/25	24.9	54.4	29.5
	2		8/27	31.5	55.6	24.1
	3		9/5	28.2	56.4	28.2
	4		9/13	28.1	51.5	23.4
	5		9/26	24.5	53.3	28.8
クーリングなし	1	リフト中央部	8/2	25.5	60.6	35.1
	2		9/19	31.4	58.0	26.6
	3		10/2	25.9	56.5	30.6
	4		10/16	22.5	53.9	31.4
	5		11/8	15.8	47.0	31.2

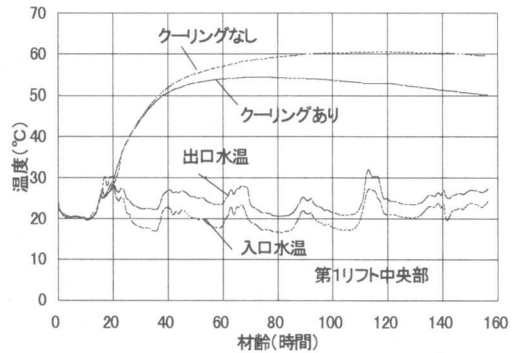


図-3 温度計測結果(第1リフト)

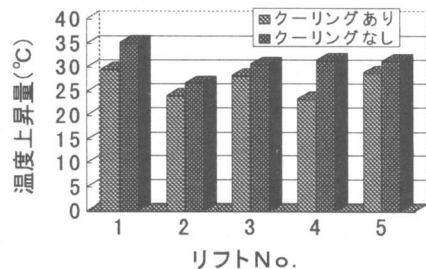


図-4 各リフトの温度上昇量

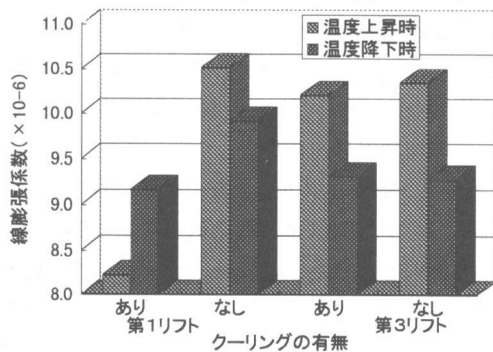


図-5 コンクリートの線膨張係数

ほぼ同様な値を示した。

(2).コンクリートひずみ

コンクリートの自由ひずみから実測ひずみを除いた拘束ひずみに関して、クーリングを実施したブロックと実施しなかったブロックの第1リフト中央部での履歴を図-6に示す。パイブクーリングを実施したリフトでは、圧縮時での最大ひずみが -160μ に対してクーリングを実施しなかったリフトが -205μ であった。一方、クーリングを実施したリフトは引張ひずみに移行する材齢が早いものの、打設後100日で比較した場合、クーリングを実施したリフトが 70μ であるのに対してポストクーリングを実施しなかったリフトでは 120μ であり、クーリングを実施することで引張ひずみを 50μ 程度低減する結果となった。

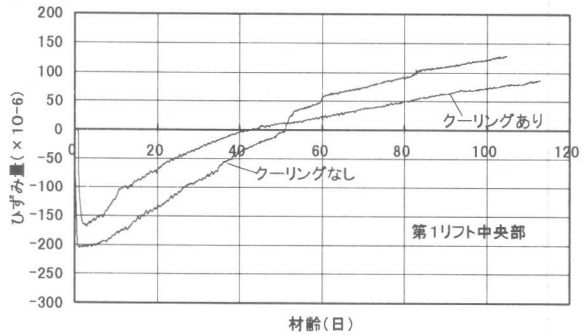


図-6 ひずみ計測結果 (第1リフト)

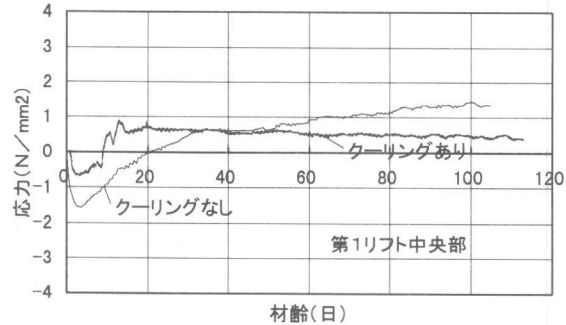


図-7 有効応力計による計測結果 (第1リフト)

(3).コンクリート応力

有効応力計によって計測された第1リフト中央部の応力履歴を図-7に示し、各リフトの最大引張応力を図-8に示す。

図-7に示す第1リフト中央部での応力履歴は、図-6に示したコンクリートひずみとほぼ同様な履歴を示しており、クーリングを実施したリフトは比較的初期の材齢で最大引張応力に達し、その後徐々にクリープによる応力緩和が見られたのに対して、クーリングを実施しないリフトでは、材齢100日以降も応力の増加がみられた。

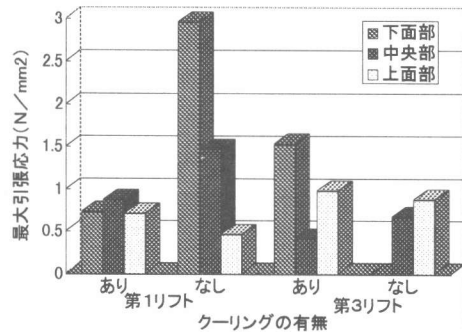


図-8 各リフトの温度応力の比較

図-8から、第1リフト中央部ではパイブクーリングを実施した場合、実施しなかったものに比べ引張応力を 0.5 N/mm^2 以上低減する結果となった。一方、下面部では 2 N/mm^2 以上の差異が生じる結果となった。これは、クーリングを実施したリフトでの測定位置がクーリングパイプ近傍であったためであり、パイプ近傍での応力低減が大きいことを示すものである。第3リフトにおいては、リフト中央部はクーリングによる低減効果が見られたが、リフト下面部及び上面部ではクーリングを実施したリフトの方が引張応力の発現が実施しないリフトに比べて早いため、

同じ材齢で発生応力を比較した場合クーリングを実施したリフトの方が大きい結果となった。これは、クーリングを実施したブロックが先行ブロックで、後行ブロックの施工までに1ヶ月近くあったために側面からの放熱が大きかったためではないかと思われる。

以上の計測結果から、コンクリート温度が最も高くなるリフト中央部にパイプクーリングを行うことによって、最高温度を3～7℃低減することができ、引張応力を部位によっては低減することが可能であることを確認した。特に、リフト内で最も温度が高くなる中央部へのパイプ配置が、温度ひび割れ制御に対して有効であったのではないかとと思われる。

6. 温度応力の逆解析

本検討では、クーリングを実施したブロック及びポストクーリングを実施しなかったブロックの施工時温度応力の計測結果を基に、断熱温度上昇特性及び表面熱伝達率のコンクリートの熱特性について同定することを目的に逆解析を行った。ただし、断熱温度上昇特性及び表面熱伝達率はクーリングを実施しなかったブロックを用いて推定し、パイプ壁面との境界条件は、水とパイプ壁面との熱伝達境界として推定した[2,3]。解析は、3次元有限要素法を用いて行い、比熱、熱伝導率及び密度の熱定数は土木学会コンクリート標準示方書に示された推奨範囲の平均値を用いた。解析モデルは図-9に示すように岩盤も含めたものとした。

次に、推定した結果を用いて、表-5に示すようにパイプ間隔及びパイプ配置を変化させてパイプクーリングの効果についての温度応力解析を行った。解析モデルは図-9に示すように、クーリングを実施したブロックを対象に背面の岩盤部も含めた3次元モデルとした。また、外気温、打込み温度、リフトスケジュール等の解析条件は、クーリングを実施したブロックと同一条件とし、その他の解析条件は表-6に示すようにコンクリート標準示方書に準拠した。

計測結果を基に推定した終局断熱温度上昇量及び上昇速度に関する定数と打込み温度との関係

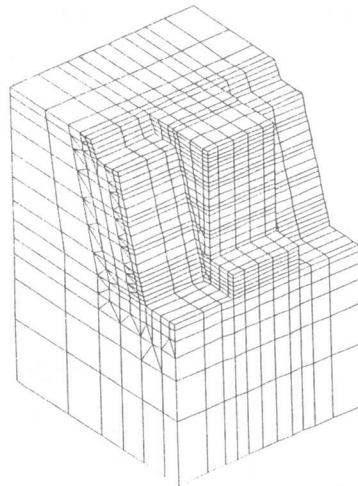


図-9 解析モデル

表-5 検討ケース

ケース No.	クーリングの有無	パイプ間隔 (m)	パイプ配置
1	なし	—	—
2	あり	1.5	下段のみ
3	あり	1.0	下段、中段

表-6 解析条件

項	目	コンクリート	岩盤
比熱 (kJ/kg °C)		1.155	0.795
熱伝導率 (W/m °C)		2.7	3.45
密度 (kg/m ³)		2310	2000
圧縮強度 (N/mm ²)		$f_c(91)*t/(6.86+1.04t)$	
		$f_c(91)=30.7$	
引張強度 (N/mm ²)		$0.35*(f_c(t))^{0.5}$	
弾性係数 (N/mm ²)	ψ	$(t)*4700*(f_c(t))^{0.5}$	907
		$\psi(t):0.73(\text{材齢3日まで})$	
		$\psi(t):1.0(\text{材齢5日以降})$	
ポアソン比		0.2	0.2

を図-10に示す。また、パイプ壁面との熱伝達率は $280 \text{ W/m}^2\text{°C}$ であった。

逆解析の結果を用いたクーリング効果に関する解析結果を図-11~13に示す。

図-11から、リフト中央にパイプを配置することで下面のみの場合に比べコンクリート温度を 2°C 程度低減し、さらにパイプ間隔を 1 m にすることで 6°C 程度低減することができることから、対策をしない場合に比べて約 8°C の低減効果があると考えられる。また、図-12, 13 から応力低減効果も制御対策をしない場合に比べてリフト中央部で最大 0.6 N/mm^2 、ひび割れ指数で $0.1\sim 2.2$ の低減効果があると考えられる。

7. まとめ

温度ひび割れ制御対策のひとつであるパイプクーリングの制御効果について検討するために、フィルダムの洪水吐を対象に施工時温度応力の計測及び計測データを用いた解析を行った。その結果、パイプを 1.5 m 間隔、各リフト下段及び中段に配置することで、コンクリートの最高温度を最大 7°C 、引張応力を約 0.5 N/mm^2 低減することができ、温度ひび割れ抑制対策として有効であることが確認された。

今回得られた計測データ及び解析結果を基に、今後施工するブロックに対してパイプクーリングシステムの最適手法を検討するとともに、同様な部位に対して有効な温度ひび割れ制御対策をさらに検討していくつもりである。

参考文献

- [1] 国府勝太郎ほか：最新のマスコンクリート技術，土木学会 コンクリート技術シリーズ14, pp.110-118, 1996
- [2] 溝瀬利明，田辺忠顕：マスコンクリートのパイプクーリングによる熱除去効果の解析，第7回コンクリート工学年次講演会論文集，pp.37-40, 1985.6
- [3] 田辺忠顕，山川秀次，渡辺朗：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率の決定ならびに冷却効果の解析，土木学会論文報告集，第343号，pp.171-179, 1984.3

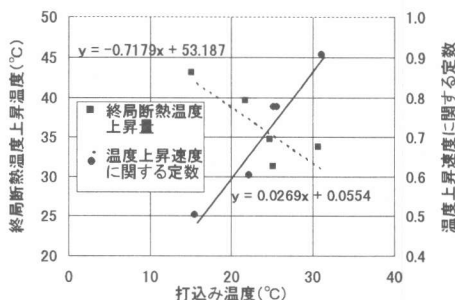


図-10 打込み温度と断熱温度上昇特性との関係

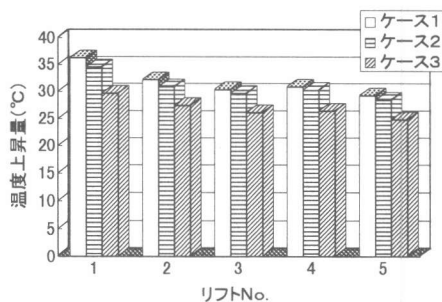


図-11 各リフトの温度上昇量

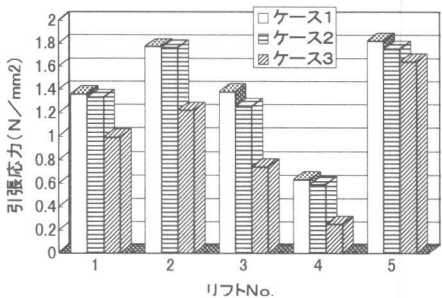


図-12 各リフトの引張応力

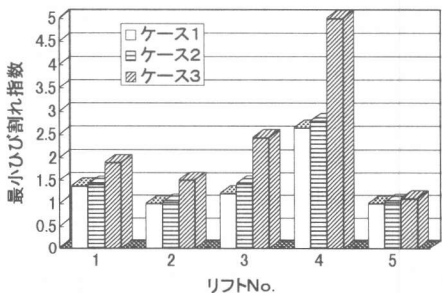


図-13 各リフトの最小ひび割れ指数