

マスコンクリートのひび割れ制御 のための鉛直パイプクーリングの効果

西山秀哉¹・村田耕市郎²・村上祐治³

¹正会員 (株)間組 北陸支店 土木部 (〒950-0082 新潟市東万代町1-22風間ビル)

²北陸農政局 信濃川水系土地改良調査管理事務所 亀田郷農業水利事業建設所
(〒950-0164 新潟市亀田本町2丁目6-27)

³正会員 工博 (株)間組 技術・環境本部 技術研究所 (〒305-0822 つくば市荻間515-1)

橋台・橋脚の構築工事において、工期短縮を目的にセメントを普通ポルトランドセメントから早強ポルトランドセメントへ変更を行った。橋台・橋脚は15m×厚さ1.6m×高さ10mであり、マスコンクリートであるため、コンクリートの体積変化、特に急激な温度上昇によるひび割れの発生が考えられた。そこで、当工事では、鉛直パイプクーリングを実施し、コンクリートの体積変化で生じるひび割れ制御を実施した。その結果、温度ひび割れ指数が1.41で、ひび割れが発生せず、ひび割れ制御の目標値に対して十分満足できる効果を確認することができた。

**キーワード: マスコンクリート, 早強ポルトランドセメント, パイプクーリング,
温度応力解析, 温度ひび割れ制御**

1. はじめに

本工事は、「市道網川原楚川線橋梁他工事」に含まれるコンクリート構造物で、長さ15m×厚さ1.6m×高さ10m程度の橋脚・橋台である。

工事の目的は、新潟県亀田郷農業水利事業計画に基づき、現在新築している親松排水機場の取付水路及び橋梁を建設することである。

施工条件としては、工期9ヶ月を厳守することであったので、工期短縮のため、セメントを普通ポルトランドセメントから早強ポルトランドセメントへ変更を行った。橋台・橋脚はフーチングが拘束体となって、マスコンクリートとなるため、コンクリートの体積変化、特に、早強ポルトランドセメントを使用するため急激な温度上昇によるひび割れの発生が考えられた。

土木学会コンクリート標準示方書¹⁾では、セメントの水和に起因する温度ひび割れ照査方法として、温度ひび割れ指数がある。温度ひび割れ指数とは、コンクリートの引張強度とコンクリートに生じる応力を比較した値である。温度ひび割れ指数を用いたひび割れ判定は、以下の値を目安としている。

- ・ひび割れを防止したい場合、1.5以上
- ・ひび割れの発生をできるだけ制限した場合、1.2

以上

・ひび割れの発生を許容するが、ひび割れが過大とならないように制限する場合、0.7以上

今回の目標温度ひび割れ指数は、ひび割れをできるだけ制限したいことから1.2以上と設定した。

$$\text{温度ひび割れ指数} = \frac{\text{コンクリートの引張強度}}{\text{コンクリートに生じる引張応力}}$$

温度ひび割れ対策は、材料的対策では、例えばセメント量の低減、セメント種類の変更など、施工的対策では、プレクーリング、パイプクーリング、誘発目地などがある。今回は工期短縮のために早強ポルトランドセメントを使用しており、材料的な対策を行うことができないため、施工的な対策であるパイプクーリング²⁾³⁾を採用することとした。また、通常実施されている水平パイプクーリングでなく、鉛直パイプクーリングを行った。今回工期短縮の対象にしたのは下部工であり、詳細内容は橋脚1基、橋台2基である。

本論文は、マスコンクリートのひび割れ制御技術のうち、特に、鉛直パイプクーリングについて紹介し、その有効性を検討したものである。その結果、温度ひび割れ指数が1.41で、ひび割れが発生せず、

目標値に対して十分満足できる効果を確認することができた。

2. 鉛直パイプクーリングの施工方法

パイプクーリング²⁾³⁾は一般に重力式コンクリートダムに適用されているものである。今回は、一般にパイプを水平に配置したパイプクーリングではなく、**図-1**に示すようなパイプを鉛直に配置した鉛直パイプクーリングである。鉛直と水平パイプクーリングの比較を**表-1**に示す。

鉛直パイプクーリングは、予め、コンクリート打込み時に直径60mm程度のシース管を約1m間隔で埋設する。コンクリートの打込み後4～6時間後のコンクリートが硬化（凝結）し始めた時点で、シース管内に直径4mmビニール管を設置して冷却水を循環させる方法である。

今回の本工事で実施した橋台・橋脚の鉛直パイプクーリングについて述べる。橋脚・橋台のクーリング対象範囲は3基であり、今回は**図-1**に示すような躯体長14.7m×壁厚1.6m×高さ7.2mの橋脚に絞って報告する。

シース管の配置を**図-1**に示す。なお、橋脚のリフト割は2リフトで、1リフト当り高さは3.6mである。埋設用シース管は**写真-1**に示すように約1m間隔で壁の中央部に配置した。**写真-2**、**写真-3**に示すようにコンクリート打込み後4～6時間後に、直径4mmビニールホースを直径60mmシース管に挿入し、コンクリート内部に3リットル/分程度を注水した。なお、クーリングに使用する水は、現場の地盤改良工法のウエルポイント工法から得られた地下水で、水温は14.5℃で一定であり、クーリングが終了した回収した水はコンクリート表面の養生水とした。



写真-3 クーリング用ビニールホース



写真-1 シース管取付状況



写真-2 コンクリート打込み状況

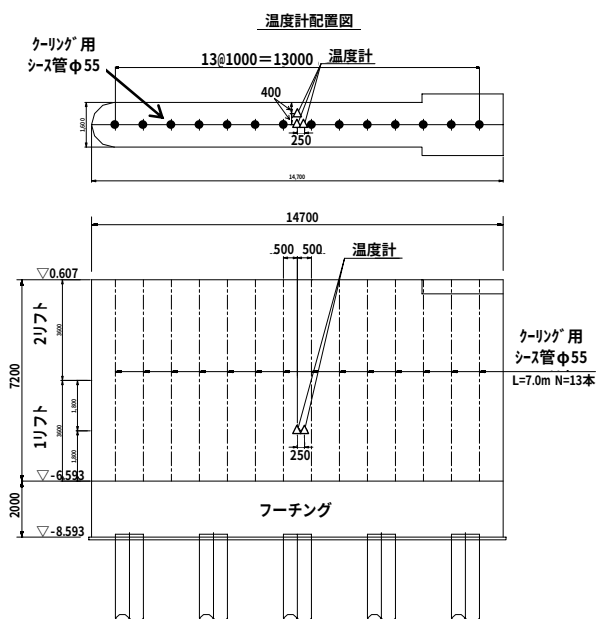


図-1 シース管配置および温度測定位置

表-1 鉛直と水平パイプクーリングの比較

項目	鉛直パイプクーリング	水平パイプクーリング
パイプ配置	鉛直配置	水平配置
パイプ間隔	1m間隔	1m間隔
リフト厚さ	影響を受けない	制限を受ける.リフト厚さ1m程度
得意な構造物	狭長and高構造物	平面的な構造物
パイプ	パイプ径は多少大きくてもよい	規格品
	パイプ直管のみ	継ぎ目管やベント管が必要
排水	コンクリート表面の養生水	排水となる
穴埋め	目視で確認できる	注入量などで確認

表-2 コンクリートの配合

打込み 部位	セメントの 種類	単位量(kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤
		W	C	S	G	Ad.
フーチング	高炉B種	138	265	687	1,208	0.531
壁	早強	142	273	678	1,208	0.546

表-3 解析ケース

ケース	セメント種類	パイプクーリング		備考
		有無	冷却水	
ケース1	早強	有	14.5℃	実施工
ケース2	〃	〃	25.0℃	仮想ケース
ケース3	〃	無	—	仮想ケース
ケース4	普通	〃	—	仮想ケース

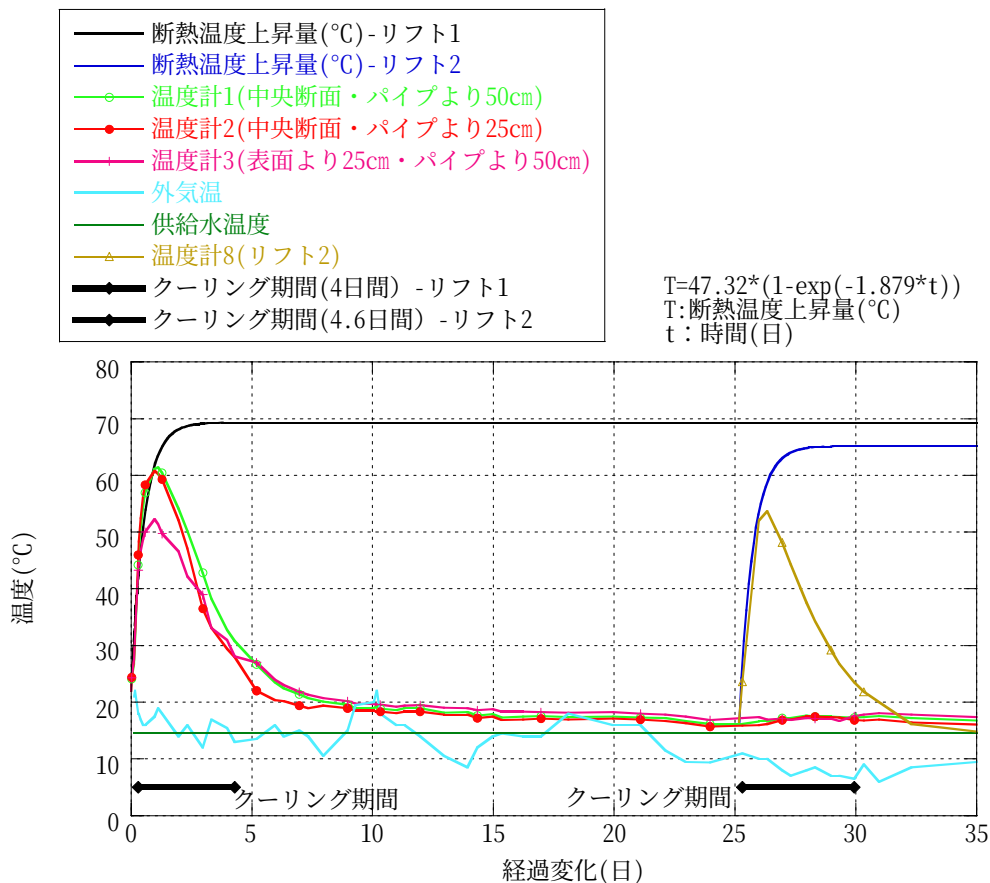


図-2 橋脚のコンクリート温度履歴

3. 現場で実施した温度測定結果

橋脚に用いたコンクリートの配合を表-2に示す。橋脚に温度計を埋設してコンクリート内部温度を測定した。温度計の測定位置は図-1のように、第1リ

フトの打込み高さの中間で、シース管とシース管の中央部と1/4の場所、壁中心線と外部型枠の中心部の計3箇所とした。

現場で施工した際の実測温度履歴を図-2に示す。なお、コンクリートの打込み温度は22℃であった。壁中央部の温度は急激に温度上昇し、1.2日で最大温度61.4℃となっており、上昇温度量は39.4℃で

表-4 温度応力解析に用いた入力値一覧表

項目			地盤	フーチング	壁1 (リフト1)	壁2 (リフト2)
材料・施工	打込み日		-	10月1日	10月18日	11月8日
	セメント種類		-	高炉B種	早強	早強
	スランプ (cm)		-	8.0	8.0	8.0
	単位セメント量 (kg/m ³)		-	265	273	273
	型枠	材料	-	木製型枠	木製型枠	木製型枠
		脱枠	-	材齢3日	材齢3日	材齢3日
	養生	上面	-	材齢7日散水養生	材齢7日散水養生	材齢7日散水養生
		側面	-	特になし	特になし	特になし
環境	外気温	°C	-	16.5	16.5	16.5
熱的特性	熱伝導率	W/m°C	3.45	2.70	2.70	2.70
	比熱	kJ/kg°C	0.80	1.16	1.16	1.16
	単位容積質量	kg/m ³	1,640	2,299	2,301	2,301
	打込み温度	°C	-	22	22	18
	断熱温度上昇式	基本式	-	$Q(t)=Q_{\infty}*(1-\exp(-\gamma*t))$		
		セメント種類	-	高炉B種	早強	早強
		単位セメント量	-	265	273	273
		°C (Q _∞)	-	41.50	47.32	47.32
		(γ)	-	0.870	1.879	1.879
		(β)	-	1.0	1.0	1.0
	線膨張係数	×10 ⁻⁶ /°C	10	10	10	10
力学特性	圧縮強度	基本式	-	$f_c=t/(a+b*t)$		
		a	-	0.1500	0.0472	0.0472
		b	-	0.0317	0.0259	0.0259
	弾性係数	N/mm ²	30	$E_c=\phi(t)*4700*f_c^{(0.5)}$		
	ポアソン比	—	0.45	0.2	0.2	0.2
	引張強度	N/mm ²	-	$f_t=0.35*f_c^{(0.5)}$		

ある。クーリング回収水の温度はクーリング前の水温 14.5°Cから 22~23°C程度まで上昇しており、コンクリート内の熱量がクーリング水へ移動していることを確認した。

また、土木学会コンクリート標準示方書を用いて推定した熱温度上昇特性と実測の温度上昇速度とほぼ一致していることがわかる。

クーリングの開始時間は、コンクリート打込み完了後、硬化が始まる直前であり目視で確認したが、大略、打込み完了後3~4時間である。クーリング実施期間は、コンクリート温度が30°Cを下回ることを目安として、概ね4~5日間をクーリングの終了の目安とした。これは、過度なクーリングによりコンクリート内部に温度差が生じてひび割れが発生することを防ぐためである。

4. 温度応力解析によるパイプクーリングの効果の検討

(1) 温度応力解析の解析ケース

パイプクーリングの効果を確認するために温度応

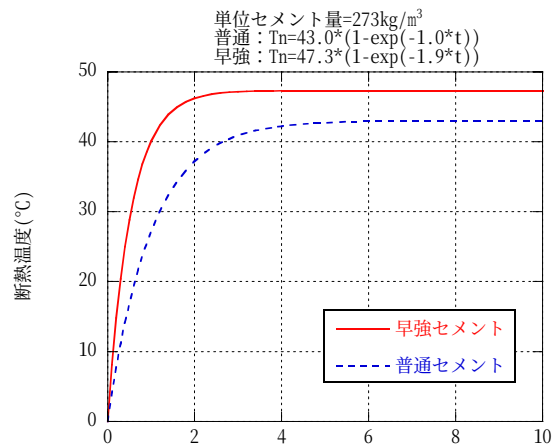


図-3 断熱温度上昇履歴

力解析を行った。その解析ケースを表-3に示す。

表-3に示すように、早強ポルトランドセメントを使用し冷却水を14.5°Cとした実施工をケース1に、早強ポルトランドセメントを使用し冷却水を25°Cとしたケースをケース2に、早強ポルトランドセメントを使用しパイプクーリングを行わないケースをケース3に、普通ポルトランドセメントを使用しクーリングを行わない当初設計をケース4として温度応力解析を行った。

また、温度応力解析手法は3次元有限要素法、解析モデルは3次元解析モデルとした。

(2)入力条件

a)断熱温度上昇式

表-2のコンクリートの配合から、土木学会コンクリート標準示方書によって式(1)に示す断熱温度上昇式を求めたものを図-3に示す。なお、表-2のコンクリート配合は早強ポルトランドセメントを用いた配合であり、図-3の普通ポルトランドセメントの断熱温度上昇式は、早強の単位セメント量と同様の $273\text{kg}/\text{m}^3$ にし、断熱温度上昇式を求めた。

$$T(t)=T_{\max}*(1-\exp(-\alpha*t)) \quad (1)$$

$T_{\max}$:最終温度

α :上昇速度

t :経過時間(日)

b)温度応力解析の入力条件

温度応力解析に用いた入力一覧表を表-4に示す。 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 供試体を用いた圧縮強度試験と割裂引張強度試験により得られた強度、双曲線の推定強度履歴を図-4に示す。圧縮強度、実測弾性係数、土木学会の推奨弾性係数の関係を図-5に示す。実験により得た値が推定値によく一致していることが分かる。

(3)解析結果

a)温度

コンクリート中を測定した温度の実測値と解析値の比較を図-6に示す。図-2の温度計配置図に示す。例えば、中央部クーリング管から50cmの1リフトの温度計を例にとると、実測最大温度が 61.4°C に対して解析最大温度が 64.1°C と、解析値と実測値がほぼ同じであることがわかる。

ケース1・2・3に関するコンクリートの温度履歴を図-7に示す。ケース1・2・3を比較すると、ピーク温度も実施工のケースが最も低く、リフト1・2ともに実施工のケースの温度低下速度が最も速くなっていることがわかる。これは、鉛直パイプクーリングによってクーリングパイプ周囲が冷やされていることによる効果であると思われる。

b)応力

コンクリートの応力履歴を図-7に示す。水温 14.5°C にてクーリングを行った場合ケース1は他の2ケースよりも温度応力による発生応力が抑えられる

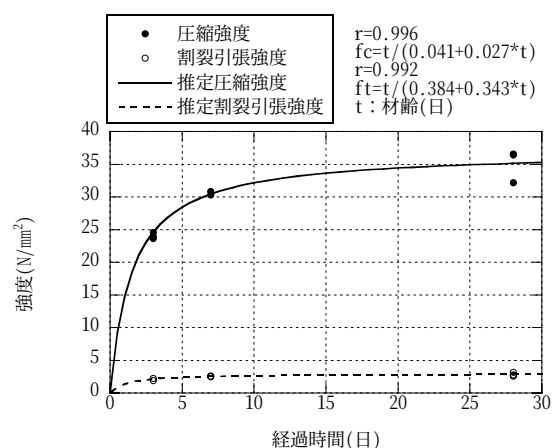


図-4 コンクリートの圧縮強度と割裂圧縮強度履歴

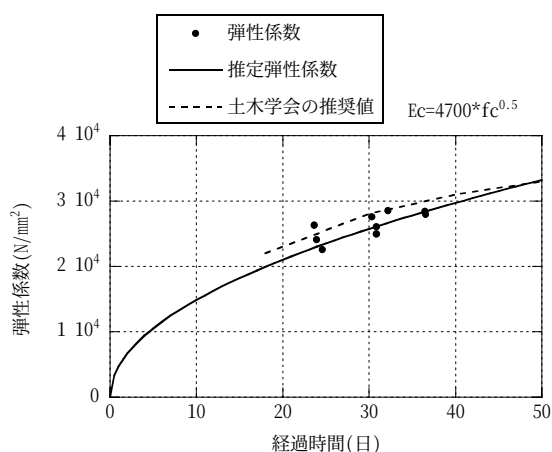


図-5 コンクリートの圧縮強度と弾性係数の関係

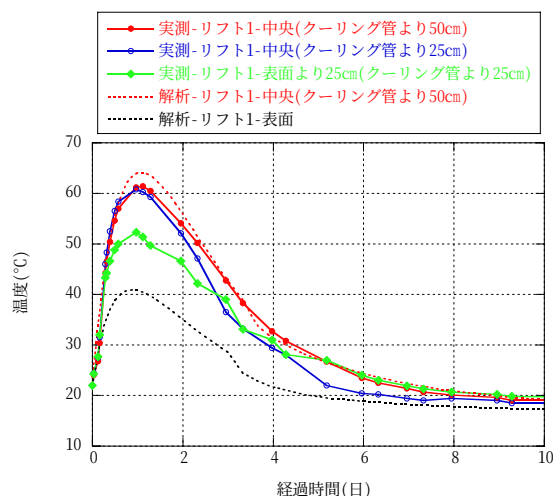


図-6 コンクリートの実測温度と解析温度履歴の比較

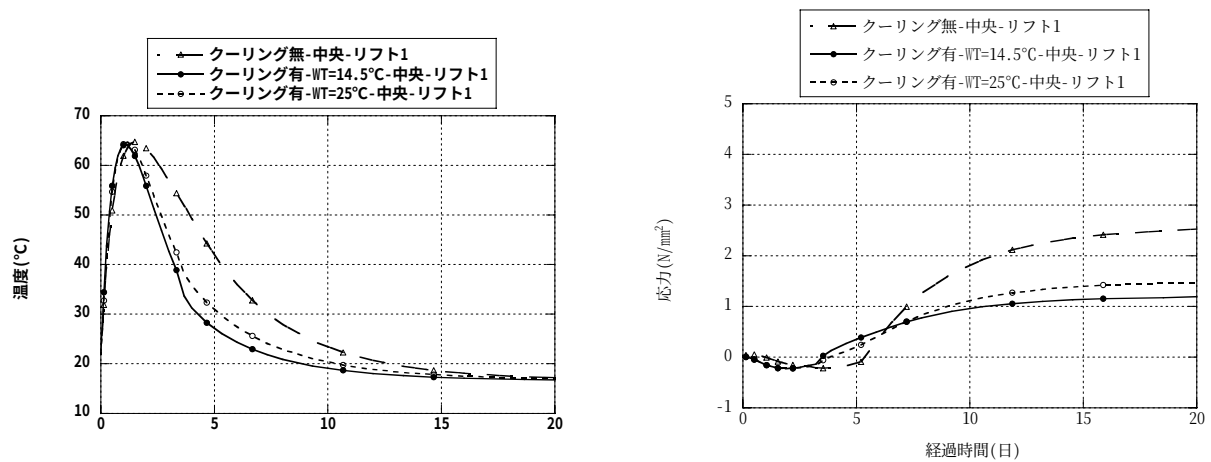


図-7 温度応力解析に関する温度・応力履歴

表-5 温度応力解析の一覧表

項目			打込み 温度 (°C)	最大温度		最大引張応力		圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	温度ひび割れ 指数	ひび割れ 幅 (mm)
				発生材齢 (日)	温度 (°C)	発生材齢 (日)	応力 (N/mm ²)				
クーリング無- 早強	リフト1	中央	22.0	1.5	64.7	20.9	2.55	35.51	2.09	0.818	0.36
		表面		1.0	41.1	1.4	2.08	16.64	1.43	0.687	0.42
	リフト2	中央	18.0	1.5	61.1	26.5	2.67	36.13	2.10	0.787	0.38
		表面		1.0	39.4	1.2	1.95	15.41	1.37	0.704	0.41
クーリング有+ クーリング水 14.5°C-早強 (実施工)	リフト1	中央	22.0	1.0	64.1	2.9	1.21	23.65	1.70	1.410	0.12
		表面		0.9	40.9	0.9	0.72	12.57	1.24	1.717	—
	リフト2	中央	18.0	1.2	60.7	26.5	1.37	36.13	2.10	1.540	0.07
		表面		1.0	39.1	1.8	0.76	18.91	1.52	1.998	—
クーリング有+ クーリング水 25°C-早強	リフト1	中央	22.0	1.2	64.7	2.1	1.48	20.62	1.59	1.072	0.26
		表面		0.9	41.0	0.9	0.94	12.57	1.24	1.317	0.16
	リフト2	中央	18.0	1.2	61.4	26.5	1.64	36.13	2.10	1.281	0.18
		表面		1.0	39.3	0.8	0.99	11.26	1.17	1.187	0.21
クーリング無- 普通セメント	リフト1	中央	22.0	2.3	56.0	20.9	2.08	22.86	1.67	0.806	0.37
		表面		1.7	35.6	3.2	1.43	11.33	1.18	0.823	0.36
	リフト2	中央	18.0	1.0	52.0	1.5	1.08	6.88	0.92	0.850	0.35
		表面		1.7	33.9	23.9	2.09	23.40	1.69	0.812	0.37

ことがわかる。コンクリートの材齢が若材齢時すなわち、弾性係数が低い時期にクーリングを行うと、温度応力が小さくなることが確認することができる。

c) 温度応力解析によるひび割れ指数とひび割れ幅

各ケースの温度応力解析の表面部と中央部の最高温度・応力などの結果一覧表を表-5に示す。なお、温度は最高温度とし、応力・温度ひび割れ指数・ひび割れ幅は、温度ひび割れ指数が最小となった時点の応力とひび割れ幅について求めたものである。

実施工の水温14.5°Cにてクーリングを行った場合、最低温度ひび割れ指数が1.41となり、ひび割れの可能性が低く、目標の1.2以上を達成したことが分かる。一方、早強クーリング無、当初設計の普通・ク

ーリング無の温度ひび割れ指数は、それぞれ、0.68、0.81であり、今回のクーリングによって2倍以上の効果があったことを示している。

クーリング水の温度相違に着目すると、クーリング水25°Cと14.5°Cの場合の温度ひび割れ指数は、それぞれ、1.07、1.41である。クーリング水の温度を低下させることにより温度ひび割れ指数を0.38程度改善できる。

温度応力解析結果からひび割れ幅を求めた。なお、ひび割れ幅の計算に用いた鉄筋量は、配力筋D16@150mmで、鉄筋比0.18%で求めた。水温14.5°Cのクーリングを行った場合のみ、ひび割れ幅0.2mmを下回る結果となった。しかし、実際の施工では、ひび割れの発生はなかった。

表-6 ひび割れ制御に関する費用比較表

項目			温度ひび割れ指数	ひび割れ幅	ひび割れ本数	補修ひび割れ本数	ひび割れ長(m)	費用比較(%)
クーリング無-早強セメント(実施工)	リフト1	中央	0.818	0.36	4	4	26.8	131.2
		表面	0.687	0.42				
	リフト2	中央	0.787	0.38				
		表面	0.704	0.41				
クーリング有+クーリング水 14.5℃-早強セメント	リフト1	中央	1.410	0.12	2	0	0	96.3
		表面	1.717	—				
	リフト2	中央	1.540	0.07				
		表面	1.998	—				
クーリング有+クーリング水 25℃-早強セメント	リフト1	中央	1.072	0.26	4	2	13.4	146.3
		表面	1.317	0.16				
	リフト2	中央	1.281	0.18				
		表面	1.187	0.21				
クーリング無-普通セメント	リフト1	中央	0.806	0.37	4	4	26.8	100.0
		表面	0.823	0.36				
	リフト2	中央	0.850	0.35				
		表面	0.812	0.37				

ひび割れ幅については、当初設計である普通・クーリング無の場合に0.37mmで、早強・クーリング無で0.36mmである。これに対して、実施工の早強・クーリング有では、ひび割れ幅が0.12mmに低減しており、クーリングの効果が高かったことが伺える。

クーリング水の温度相違に着目すると、クーリング水25℃と14.5℃の場合のひび割れ幅は、それぞれ、0.12mm、0.25mmである。クーリング水の温度を低下させることによりひび割れ幅を狭く改善できる。

今回の温度ひび割れ指数とひび割れ幅は普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントであり違いがなく、クーリング効果の方が高いことになった。

(4) ひび割れ費用効果

各解析ケースのひび割れ幅とクーリング効果の費用対効果について検討を行った結果を表-6に示す。なお、費用計上の際の条件を次のようにした。

- ・セメントを普通ポルトランドセメントから早強ポルトランドセメントへ変更した費用も含めた。
- ・ひび割れ注入補修を行うひび割れ幅は0.2mm以上とし、0.2mm以上のひび割れ幅は橋脚15mで、4本生じることにした。
- ・クーリング水温度25℃のケースの場合、ひび割れは橋脚15mで4本生じることにしたが、推定ひび割れ幅が0.2mm程度と狭いためひび割れの注入補修は4本のうち2本とした。

当初設計の普通コンクリート・クーリング無と、実施工の早強コンクリート・クーリング有(14.5℃)と比較した場合、ほぼ同様の費用であった。

クーリング水の温度相違に着目すると、クーリング水25℃と14.5℃の場合の費用比較は、それぞれ、146.3%、96.3%である。クーリング水の冷却水温度が25℃の場合は、クーリングを行うとともに、ひび割れ幅が0.21mmであるため補修を行なうことになる。そのため、全体費用がクーリング費用と補修費用を計上することになり高くなったことが考えられる。

今回施工した条件では、クーリングを行った方が費用に対する効果が高かったことが考えられるが、クーリング冷却水の温度によっては費用が高くなるケースもあることを確認した。

5. 結論

(1) 温度解析結果と実測温度

鉛直クーリングを行なった実施工の実測温度と、クーリングを模擬した温度応力解析の温度値がよく一致した。

(2) 温度応力解析結果

早強・クーリング無、普通・クーリング無の温度ひび割れ指数は、それぞれ、0.68、0.81であったの

に対して、早強・クーリング有の温度ひび割れ指数は1.41に上昇した。

早強・クーリング無、普通・クーリング無のひび割れ幅は、それぞれ、0.42mm, 0.37mmであったのに対して、早強・クーリング有の温度ひび割れ幅は0.12mmに低減した。しかし、実際の施工では、ひび割れの発生はなかった。

今回の温度ひび割れ指数とひび割れ幅は普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントであり違いがなく、クーリング効果が高いことに分かった。

(3)鉛直パイプクーリングの費用対効果

実施工の早強クーリング有(冷却水14.5℃, 実施工)は、ひび割れ補修がなく初期投資費用のみであるため、最低の経済的な支出であった。普通コンクリート・クーリング無と、早強コンクリート・クーリング有(冷却水14.5℃, 実施工)は、ほぼ同様の費用となった。

温度ひび割れ制御は予め、対策を講じる方が技術的、経済的な効果が高いことを示唆するものであると考えられる。また、構造物の耐久性に有利であると思われる。

6. あとがき

コンクリートの耐久性向上が求められる昨今、今回施工した鉛直パイプクーリングはダム以外のマスコンクリート構造物に対して非常に有効な耐久性向上手段であると考ええる。特に、以下のようなメリットがある。

- (1)背が高い、長い壁状構造物が得意。
- (2)クーリング設備は簡単な設備で施工可能で、安価。既製品の組み合わせ(タンク・ポンプ・ホースなど)で施工可能。

今後、鉛直パイプクーリング工法に対して、さらに、改良を加えて安価で取扱いやすいクーリングシステムを構築していきたい。

参考文献

- 1)平成8年度版土木学会コンクリート標準示方書
- 2)ダム技術センター：多目的ダムの建設（改訂版全5巻）
計画・行政・調査・設計・施工，全国建設研究センター，1987
- 3)藤沢侃彦，永山功：Cause and Control of Cracks by Thermal Stress in Concrete Dams, Trans. Of the 15th International Congress on Large Dams, 1985