

橋脚における温度ひび割れ制御のための 鉛直パイプクーリング工法について

北原正博¹・上田信也²・小倉芳則²・村上祐治³

¹正会員 ㈱間組 関東土木支店 土木部 (〒105-8479 東京都港区虎ノ門2-2-5)

²国土交通省 関東地方整備局 北首都国道事務所 三郷国道出張所 (〒341-0023 埼玉県三郷市仁蔵282)

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

渇水期という限られた期間内に橋脚を構築する工事において、工程短縮のために構造物のコンクリートに早強ポルトランドセメントを使用した。しかし、橋脚の形状によりマスコンクリートとなることから、温度応力によるひび割れの発生が懸念された。そこでコンクリート硬化時における温度上昇を抑制するため、躯体内部にクーリングパイプを鉛直に設置してクーリングを行う鉛直パイプクーリングを実施した。その結果、温度上昇を抑え温度応力によるひび割れ発生の防止を確認することができた。

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

1. はじめに

圏央道（首都圏中央連絡自動車道）を建設する工事のうち「圏央道利根川高架橋下部その1工事」は、圏央道が利根川を横断する箇所における高架橋の下部工を施工するもので、図-1.1に示すように河川区域内に5基の橋脚を建設する工事である。これら5基の橋脚のうち、河川内の3基はニューマチックケーソン工法で施工し、堤防部の2基は開削工法で施工する。その橋脚の標準形状寸法は橋軸方向に4m、橋軸直角方向に7m、高さ25mである。

本工事は、河川区域内での施工となるために施工時期は渇水期のみと限られており、各工種において急速施工が求められている。構築工においては、コンクリートに早強ポルトランドセメントを使用し工程短縮を図る計画であるが、本構造物は厚さ50cm以上であるためマスコンクリートであり、温度応力によるひび割れの発生が懸念された。

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、式(1.1)に示す温度ひび割れ指数がある。

$$\text{温度ひび割れ指数} = \frac{\text{コンクリートの引張強度}}{\text{コンクリートに生じる引張応力}} \quad (1.1)$$

温度ひび割れ指数を用いたひび割れ判定は、温度ひび割れ指数とひび割れ発生確率の関係によって行っており、ひび割れ発生確率に対する温度ひび割れ指数は、次の値を目安としている。

表-1.1 ひび割れ発生確率に対する温度ひび割れ指数

内 容	指 数
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い場合	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

今回の温度ひび割れ指数の目標値は、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。

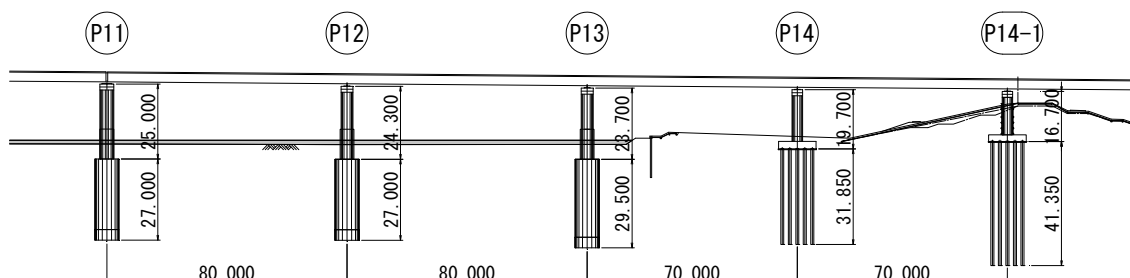


図-1.1 全体側面図

一般的にマスコンクリートの場合は、躯体内部の温度上昇を抑制することにより温度応力によるひび割れの発生を制御する。躯体内部の温度上昇を抑制する方法として、材料的には単位セメント量の低減、セメント種類の変更などがあり、施工的にはプレクーリング、パイプクーリング、誘発目地設置などがある。本工事では、コンクリート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。よって、施工的な対策の一つであるパイプクーリング^{2), 3), 4)}を実施することとした。本工事のパイプクーリングには、従来から実施されている水平パイプクーリングではなく、クーリングパイプを鉛直に設置してクーリングを行う鉛直パイプクーリングを採用した。

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工法について紹介し、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1.21で、温度応力による有害な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. コンクリートの配合、力学および熱特性

(1) コンクリートの配合

本工事で使用したコンクリートの配合を表-2.1に示す。このコンクリートでは、単位セメント量が300kg/m³を超える早強ポルトランドセメントを使用しており、水和熱によるコンクリートの温度上昇が課題である。

(2) コンクリートの力学特性

a) 物性値履歴

2010年5月7日にP11⑦ロットのコンクリートを打ち込んだ際、供試体（φ100×200mm）を採取し、コンクリートの力学特性を把握した。

コンクリートの圧縮強度、引張強度、静弾性係数は材齢とともに増大しており、土木学会では、式(2.1)を用いて各物性値と材齢の関係を示している。

コンクリートの圧縮強度、割裂引張強度、静弾性係数の履歴を図-2.1、図-2.2、図-2.3に示す。

$$f_c, E_c, f_t = t / (a + b \times t) \quad (2.1)$$

ここに、 f_c : 圧縮強度 (N/mm²)
 E_c : 静弾性係数 (N/mm²)
 f_t : 割裂引張強度 (N/mm²)

表-2.1 コンクリートの配合

使用箇所	設計基準強度 σ_{ck} (N/mm ²)	粗骨材最大寸法 (mm)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)
P11~P13	27	20.0	8.0	4.5	52.0	42.3
P14-1	27	20.0	8.0	4.5	47.5	42.3

使用箇所	セメントの種類	単位量(kg/m ³)				
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad.
P11~P13	早強	164	316	759	1,047	8.295
P14-1	早強	164	339	754	1,041	3.627

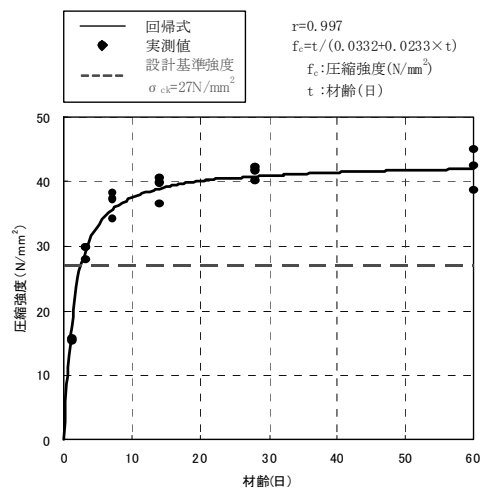


図-2.1 コンクリートの圧縮強度履歴

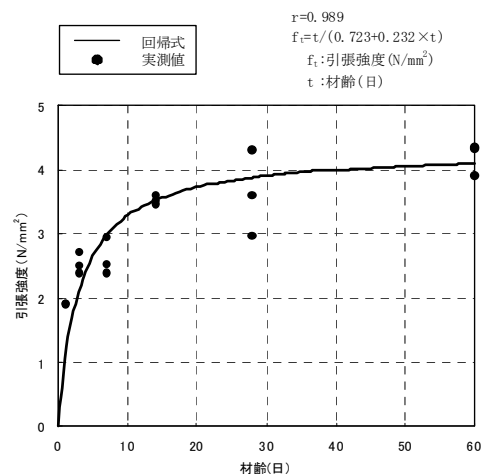


図-2.2 コンクリートの割裂引張強度履歴

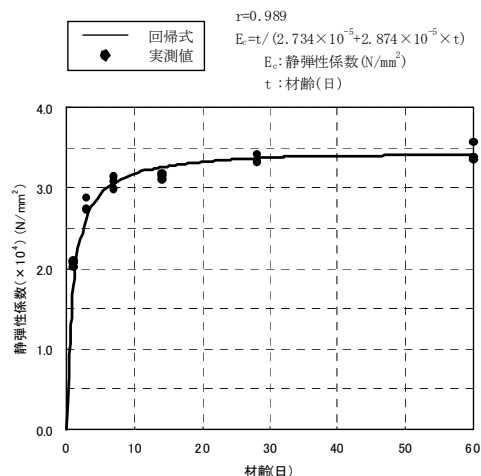


図-2.3 コンクリートの静弾性係数履歴

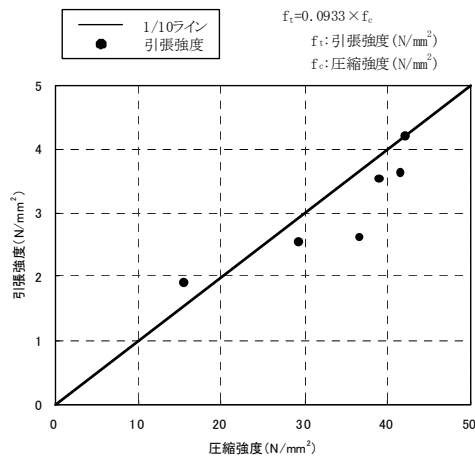


図-2.4 コンクリートの圧縮強度と引張強度の関係

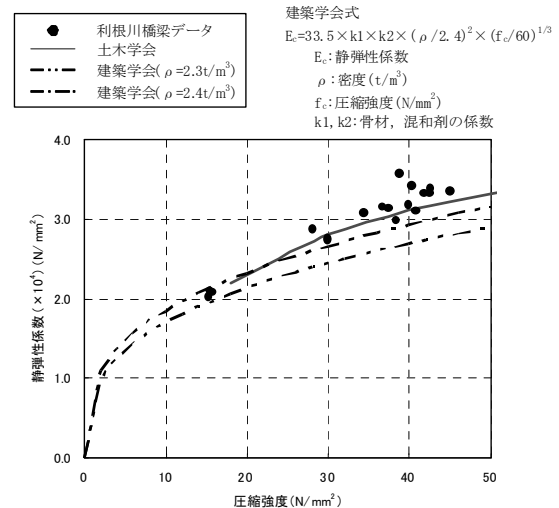


図-2.5 コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係

b) 圧縮強度と引張強度の関係

コンクリートの圧縮強度と引張強度の関係を図-2.4に示す。一般に、引張強度は圧縮強度の1/10と言われており、本工事で使用したコンクリートの引張強度は圧縮強度の1/8～1/11程度であり、一般的な値と同等であることが分かる。

c) 圧縮強度と静弾性係数の関係

コンクリートの圧縮強度と静弾性係数の関係を図-2.5に示す。圧縮強度と静弾性係数の関係は、土木学会および建築学会においてその推奨値が示されている。本工事で使用したコンクリートの静弾性係数は土木学会および建築学会の推奨値とほぼ同様の値となっていることが分かる。

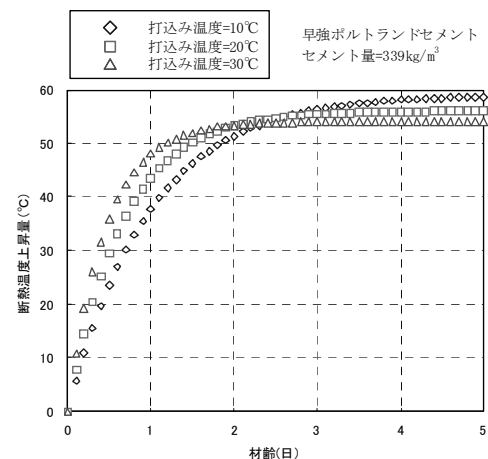


図-2.6 単位セメント量 339kg/m³の断熱温度上昇量履歴

(3) コンクリートの熱的特性

本工事で使用したコンクリートの熱的特性のうち、単位セメント量339kg/m³のコンクリートの断熱温度上昇履歴を図-2.6に示す。コンクリートの断熱温度はコンクリートの配合で定まる単位セメント量、セメントの種類およびコンクリートの打込み温度などで決定される。

3. 鉛直パイプクーリング工法の施工概要

(1) パイプクーリング工法について

従来のパイプクーリングは、写真-3.1に示すように水平に配置したクーリングパイプ内にクーリング水などを通すことにより構造物の発熱を抑制する方法であり、コンクリートダムなどで実施されている。本工事においては、躯体内部にクーリングパイプを鉛直に設置してクーリングを行う鉛直パイプクーリングを実施した。鉛直パイプクーリングと水平パイプクーリングの比較を表-3.1に示す。

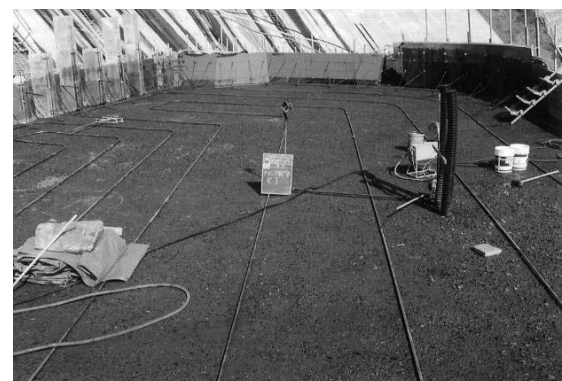


写真-3.1 水平パイプクーリングの施工例

表-3.1 鉛直パイプクーリングと水平パイプクーリングの比較表

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
	間隔	1m程度
	形状種類	パイプ:シース管(直管) 給水:フレキシブルホース
排水	コンクリート表面の養生水	排水
穴埋め	材料:モルタル 目視確認可能	材料:ペースト 注入量などで確認
リフト厚さ	影響を受けない	制限される リフト厚さ1m程度
得意な構造物	狭長、高構造物	平面的な構造物

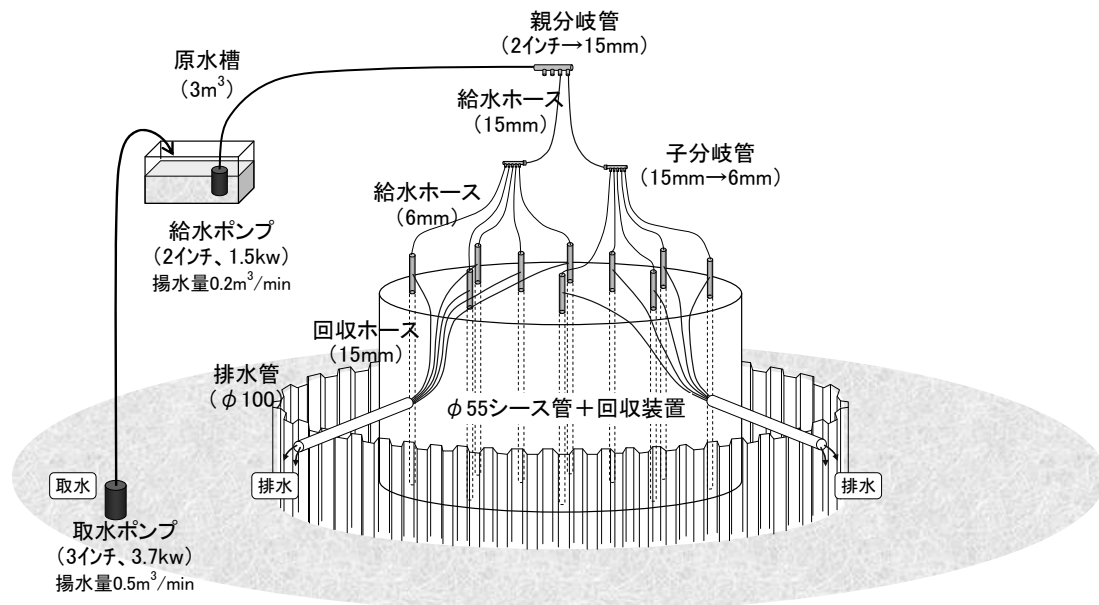


図-3.1 鉛直パイプクーリングシステムの概要図

(2) システムの概要

本工事で採用した鉛直パイプクーリングシステムの概要を図-3.1に示す。また、使用機材を表-3.2に示す。

鉛直パイプクーリング工法は、躯体内に1m程度の間隔で鉛直に配置したクーリングパイプ（φ55mmシース管）の中にクーリング水を流すことにより、セメントの水和熱による躯体内部の温度上昇を抑え、温度応力によるひび割れを抑制する工法である。

(a) 取水、貯水、給水

鉛直パイプクーリング工法に用いるクーリング水は、利根川から取水した。

取水用ポンプおよび給水用ポンプは、クーリングパイプ1本当りに30 /minの水を供給できるものとするために、必要供給量の2倍程度の性能があるものとした。

2インチの給水ポンプの先に親分岐管、子分岐管を取付け、最終的に6mmホースでクーリングパイプ内へ給水した。

(b) クーリングパイプの材料および配置

クーリング水を循環させるために躯体内に事前に埋め込むクーリングパイプとして、写真-3.2に示すような垂鉛メッキ鋼板製のφ55mmシース管を使用した。シース管の形状は直管で、躯体のリフト高さに合うように専用の継手でジョイントし、シース管の長さを調整して使用した。また、シース管の最下端部は、コンクリートの流入やクーリング水が漏出しないように折り曲げ加工した。

表-3.2 使用機材一覧表

施工フロー	使用機材	仕様・性能
取水	取水用水中ポンプ	口径3インチ、出力3.7kw、揚水量0.5m³/min
貯水	原水槽	容量3.0m³
給水	給水用水中ポンプ	口径2インチ、出力1.5kw、揚水量0.2m³/min
	親分岐管	2インチ×1本→15mm×4本
	子分岐管	15mm×1本→6mm×5本
クーリング	クーリングパイプ	内径φ55mm
冷却水回収	回収装置	50×20異形チズ+VUφ50
排水	排水管	VUφ100



写真-3.2 φ55mm シース管

(c) クーリングパイプの配置

クーリングパイプは、橋脚の寸法や開口部の大きさなどを考慮し1m程度の間隔となるように配置した。橋脚の1/4断面についてのクーリングパイプの配置例を図-3.2に示す。

(d) クーリング水回収、排水

従来、クーリング水をコンクリート表面の養生水としてすべて使用していた。しかし、1橋脚当りのクーリング水の使用量は最大10.3m³/hであり、養生水はコンクリートに接触することによって水素イオン濃度がpH10以上となることが考えられることから、中和処理装置によって多くの水を処理する必要が生じる。よって、クーリングパイプを通ったクーリング水をコンクリートに接触させないように回収し処理量を抑制するために、写真-3.3に示すように、クーリングパイプの上部に冷却水回収装置を取付け排水した。

環境省の排水基準では水素イオン濃度の許容値はpH5.8～8.6であるが、排水したクーリング水の水素イオン濃度を実測したところ、pH7.0であった。

(3) コンクリート温度の計測システム

コンクリート打込み後に、コンクリートの温度上昇が解析値と同等であるか、異常な温度上昇はないか、あるいはクーリング終了時期の判定などのために、躯体の内部と表面に熱電対を設置し、コンクリート温度を測定した。

熱電対の設置位置を図-3.3に示す。図中の■は躯体内部、●は躯体表面の熱電対を示す。

熱電対は各ロットの高さの中央に取り付けた。構造物の表面温度を測定する熱電対(図中●)は、躯体表面から10cm程度内部に設置した。

構造物の内部と表面温度を測定する熱電対のほかに、排水温度測定のためにシース管内に3個、原水温度測定のために原水槽に1個、気温測定のために1個を設置し、1リフト当たり合計7個設置した。

(4) クーリング水に用いる水質調査

本工事のパイプクーリングに使用する利根川の河川水の水質調査結果を表-3.3に示す。

本工事のパイプクーリングに用いる水の水質は、表-3.4に示す土木学会の練り混ぜ水(JSCE-B-101-1999)の水質基準値以下であり、コンクリートに触れても問題はない。特に、塩化物イオン量も200ppm以下であり、鉄筋の腐食の問題もない。

以上のことから、利根川の河川水をクーリング水に使用できることがわかった。

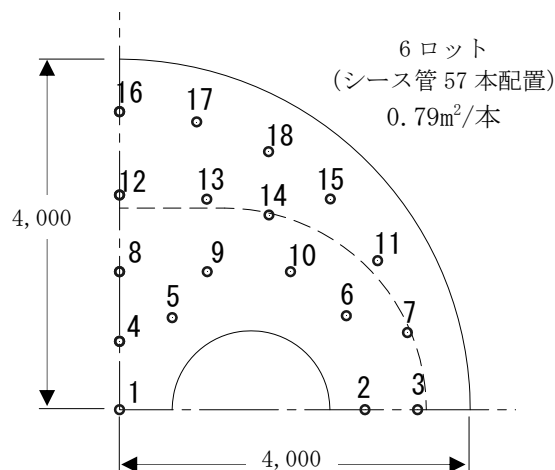
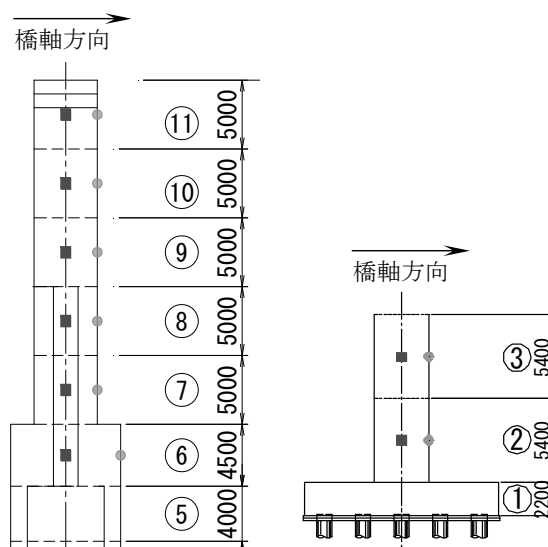


図-3.2 クーリングパイプ概略配置図 (P11, P12, P13 橋脚)



写真-3.3 冷却水回収装置



P11, 12, 13 橋脚

P14-1 橋脚

図-3.3 熱電対設置位置

表-3.3 利根川河川水の水質調査結果

分析時	水温	pH	EC-25				
2/12 17時採取	22.3	6.51	29.0				
2/13 8時採取	22.3	6.50	31.4				
補正 EC-25(25℃換算電気伝導率)の単位:ms/m							
(単位:ppm)							
陽イオン	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺		
2/12 17時採取	24.28	1.86	5.20	4.80	16.10		
2/13 8時採取	25.18	1.66	4.17	6.47	16.96		
(単位:ppm)							
陰イオン	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	Br ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ²⁻	SO ₄ ²⁻
2/12 17時採取	1.69	29.28	n.a.	n.a.	11.28	n.a.	36.33
2/13 8時採取	0.36	31.53	n.a.	n.a.	12.03	n.a.	41.74
200ppm以下							

表-3.4 クーリング水に用いる水の水質基準
(JSCE-B-101-1999)

上水道水以外の水の水質	
項目	品質
懸濁物質の量	2g/l以下
溶解性蒸発残留物の量	1g/l以下
塩化物イオン(Cl ⁻)量	200ppm以下
水素イオン濃度(pH)	5.8~8.6
モルタルの圧縮強度比	材齢1, 7および28日 ⁽¹⁾ で90%以上
空気量の増分	±1%

注⁽¹⁾ 材齢91日における圧縮強度比を確認しておくことが望ましい。

(5) 実施期間

温度応力解析に基づく計画段階でのクーリング実施期間は、P11, 12, 13橋脚は3日間、P14-1橋脚は4日間であった。しかし、躯体内外のコンクリート温度の実測値や外気温を元にクーリング実施期間の調整を行い、最短で4.7日間、最長で9.5日間、平均で6.0日間クーリングを実施した。

4. 鉛直パイプクーリングの適用結果

(1) 温度の実測値および解析値

各橋脚における実測値、解析値および特性値を表-4.1に示す。

躯体内部および表面の最高温度に関する実測値と解析値の差は、内部では0~14.3℃で平均6.2℃であり、表面では9.3~20.9℃で平均13.2℃である。このように、最高温度に関して解析値と実測値に差があることがわかる。

この原因としては、以下のことが考えられる。

内部については、リフト高さの中央に設置している温度計にコンクリートが達した際には、既にコンクリートは水和反応により発熱している。しかも、クーリングの開始時期は、コンクリートの打込みおよび仕上げの完了後なので、温度計の位置における内部コンクリート温度はさらに5~8℃程度上昇している。一方、解析においては、コンクリートの打込みおよび仕上げに要する時間は考慮していない。こ

表-4.1 実測値および解析値一覧表

項目		実測値 最高温度 (℃)	解析値 最高温度 (℃)	実測値と 解析値の 温度差	解析値		
					発生 応力 (N/mm ²)	引張 強度 (N/mm ²)	最小温度 ひび割れ 指数
P11	⑥	内部	67.4	58.6	8.8	2.5	3.1
		表面	50.0	40.7	9.3	1.7	2.6
	⑦	内部	64.1	57.5	6.6	2.5	3.2
		表面	55.4	42.8	12.6	1.2	2.5
	⑧	内部	62.1	58.7	3.4	2.3	3.1
		表面	55.3	44.9	10.4	1.0	2.6
P12	⑥	内部	61.5	59.6	1.9	2.6	3.1
		表面	51.9	41.5	10.4	1.8	2.7
	⑦	内部	64.1	49.4	14.7	2.5	3.2
		表面	52.4	41.4	11.0	1.2	2.7
	⑧	内部	61.7	55.8	5.9	2.1	3.0
		表面	59.8	43.7	16.1	1.0	3.2
P13	⑥	内部	62.6	59.4	3.2	2.5	3.1
		表面	58.4	41.2	17.2	1.8	2.6
	⑦	内部	59.0	50.2	8.8	2.4	3.0
		表面	51.7	42.0	9.7	1.2	2.7
	⑧	内部	56.9	56.9	0.0	2.1	3.1
		表面	57.2	44.2	13.0	1.1	2.6
P14-1	②	内部	61.1	55.1	6.0	1.5	2.9
		表面	55.6	34.7	20.9	1.3	1.8
	③	内部	65.4	56.5	8.9	1.6	2.9
		表面	51.3	36.5	14.8	1.1	1.7

のように実測温度の発熱時間と解析温度の発熱時間に差が生じていることが、内部コンクリート温度の実測値と解析値に差が生じた原因であると考えられる。

また、表面については、解析ではコンクリート表面の節点温度である。しかし、実施工では温度計をコンクリート表面に設置することができないため、実測温度はコンクリート表面の温度でなく、コンクリート表面から10cm程度躯体内の温度である。このことによって、実測温度と解析温度に差が生じたものと考えられる。

コンクリートの最小温度ひび割れ指数に着目すると、内部では1.21であり、表面では1.38である。また、各橋脚の最小温度ひび割れ指数は1.20以上を確保しており、コンクリート表面に温度応力による有害なひび割れを確認することはなかった。

コンクリート温度の実測値と解析値の温度履歴として、P11橋脚⑦ロットの結果を図-4.1に示す。

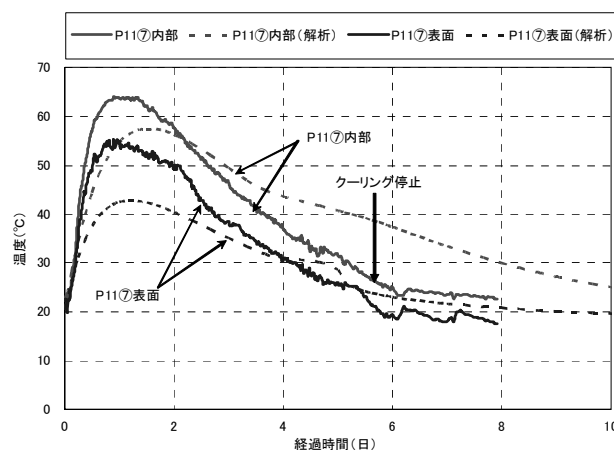


図-4.1 実測値と解析値の温度履歴

(2) パイプクーリングの効果

鉛直パイプクーリング工法の使用有無による実験的な検討が必要であるが、このような大規模な実験は実施することが困難である。そのため、鉛直パイプクーリング工法の有無をパラメーターにして温度応力解析を行った。検討した橋脚はP14-1橋脚②ロットである。

図-4.2に温度応力解析によるコンクリートの温度、発生応力、温度ひび割れ指数の履歴を示す。また、温度応力解析による特性値の一覧を表-4.2に示す。

a) 温度

パイプクーリング無の場合の内部の最高温度は72.7℃であるが、クーリングを実施すると55.1℃になり、17.6℃低下している。表面の最高温度については、クーリングの有無で大きな差は表れなかった。

b) 発生応力

発生引張応力については、クーリング無の場合2.74N/mm²であるが、クーリングを実施することにより半分以下の1.06N/mm²に低下している。

c) 温度ひび割れ指数

コンクリート温度や発生引張応力の低下により、温度ひび割れ指数も1.07から2.77に改善されている。

d) 温度応力解析結果

温度応力解析結果から、コンクリートの最高温度は内部で17.6℃低下しており、発生応力は1.68N/mm²低下していることがわかる。このことによって最小温度ひび割れ指数が1.70改善されており、鉛直パイプクーリング工法の効果が確認できる。

5. まとめ

本工事において、温度ひび割れ対策の一つである鉛直パイプクーリング工法を行い、次の結論を得た。

(1) 鉛直パイプクーリング工法の設備について

- ・鉛直パイプクーリングの設備には特殊なものではなく、シース管や水中ポンプなどすべての設備において既製品で対応することができた。
- ・排水については、全てのクーリング水をpH処理装置によって処理するのでなく、コンクリート表面の養生水使用分を除き、ほとんどのクーリング水をコンクリートに接触しないように回収しpHの上昇を防いだ上で排水した。結果として、クーリング水の水素イオン濃度（pH）は、pH7.0程度であった。

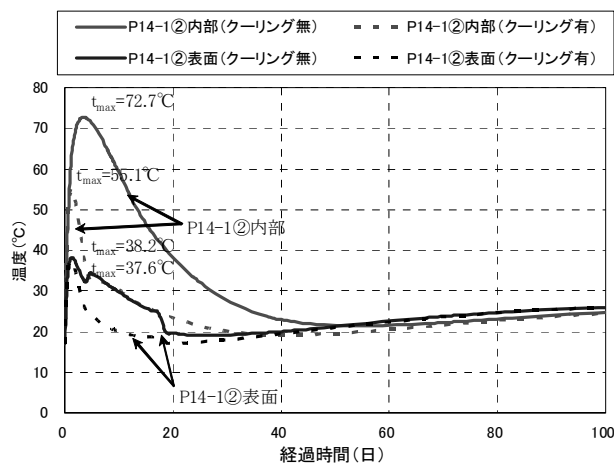


図-4.2(a) 温度応力解析によるコンクリート温度履歴

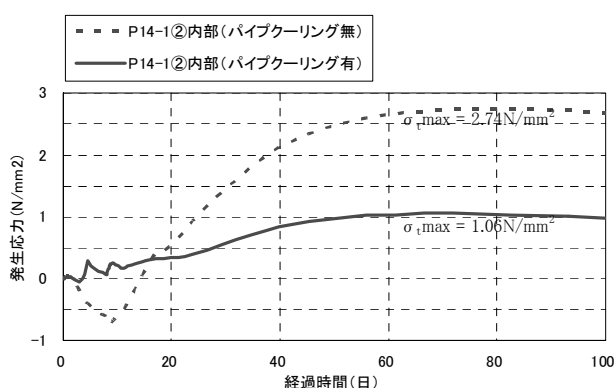


図-4.2(b) 温度応力解析による発生応力履歴

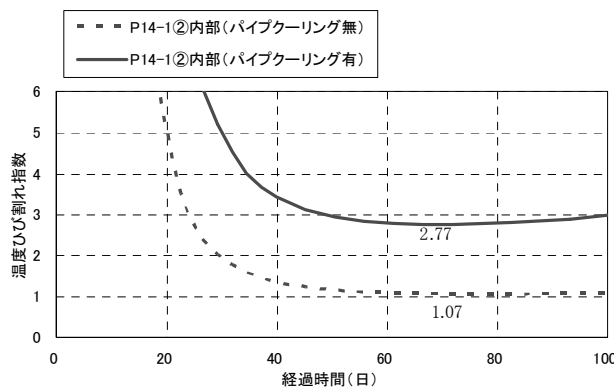


図-4.2(c) 温度応力解析による温度ひび割れ指数履歴

表-4.2 温度応力解析による特性値一覧表

項目	温度(℃)		発生応力 (N/mm ²)	最小温度 ひび割れ指数
	内部	表面		
パイプクーリング無	72.7	38.2	2.74	1.07
パイプクーリング有	55.1	37.6	1.06	2.77
差	17.6	0.6	1.68	1.70

(2) クーリング水について

- ・クーリング水として使用した利根川の河川水の水質調査を事前に行った結果、土木学会の練り混ぜ水基準値以下であったため、クーリング水として問題なく使用できることを確認した。
- ・鉛直パイプクーリング工法を適用するには、豊富な水が必要であるが、本工事においては、施工場所が河川内であったため容易に水を確保することができた。

(3) クーリング実施期間について

- ・実際のクーリング実施期間は4.7～9.5日間となり、平均で6.0日間となった。

(4) 温度の実測値と解析値について

- ・温度ひび割れ指数は、目標値である1.20以上確保することができた。また、コンクリート構造物の外観調査によって、コンクリートに有害な温度ひび割れが発生していないことを確認した。
- ・実測値と解析値におけるコンクリートの最高温度は、内部で0～14.3℃、表面で9.3～20.9℃の差があった。これは、実施工と解析でクーリング開始時期に数時間の差があったためである。
- ・表面の温度差については、実施工ではコンクリート表面から10cm程度躯体内部に温度計を設置しており解析条件と異なっているためである。

(5) 鉛直パイプクーリング工法の効果について

- ・温度応力解析結果によると、クーリング無の場合

の内部の最高温度は72.7℃であるが、クーリングを実施すると55.1℃になり、クーリングによる内部温度の低下量が17.6℃であった。また、発生引張応力については、クーリング無の場合2.74N/mm²であるが、クーリングを実施することにより半分以下の1.06N/mm²に低下した。

- ・最小温度ひび割れ指数は1.07から2.77に改善されており、鉛直パイプクーリング工法の効果がかなり大きいことが確認できた。

以上のように、コンクリート構造物の外観調査によるひび割れ発生無の確認、温度応力解析からわかる発生温度応力の半減による温度ひび割れ指数の改善の確認などから、鉛直パイプクーリング工法は温度応力によるひび割れに対して有効な工法であることを確認した。

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) 神崎浩二，米澤朗，樋口晃，村上祐治：2径間ラーメンボックスカルバートの温度ひび割れに対する誘発目地間隔と形状の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol. 26，No. 1，pp. 1341-1346，2004
- 3) 神崎浩二，吉本靖俊，樋口晃，村上祐治：マスコンクリート構造物のひび割れ制御，コンクリート工学年次論文集，Vol. 28，No. 1，pp. 1283-1288，2006
- 4) 西山秀哉，村田耕市郎，村上祐治：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，土木建設技術シンポジウム論文集，2006