

エアパイプクーリングによる温度ひび割れの抑制

川田建設(株) 正会員 ○住谷 安子
 川田建設(株) 林 勉
 川田建設(株) 布野 勝文
 川田建設(株) 正会員 渡部 寛文

1. はじめに

PC上部工の張出し施工の柱頭部、中間支点や端支点の横桁部など、断面が大きくマスコンクリートとなる部材の温度ひび割れ抑制対策の一つとして、部材の内外温度差を小さくするため、内部にパイプを配置して「水」や「空気」を通し内部温度を下げるパイプクーリングがある。PC構造物では、コンクリート内のシース管などをクーリングパイプとして利用することが可能であり、合理的な温度ひび割れ抑制対策である。さらに冷却媒体として「空気」を使用するエアパイプクーリングは、水を汲み上げる大きな設備や河川などへの排水の心配がいない等のメリットがある。

本稿は、施工面でも利点の大きいエアパイプクーリングによる温度ひび割れの抑制における評価方法の検証(解析条件の妥当性確認試験)と、実施工での施工結果について報告する。

2. 実構造物の温度ひび割れ抑制対策

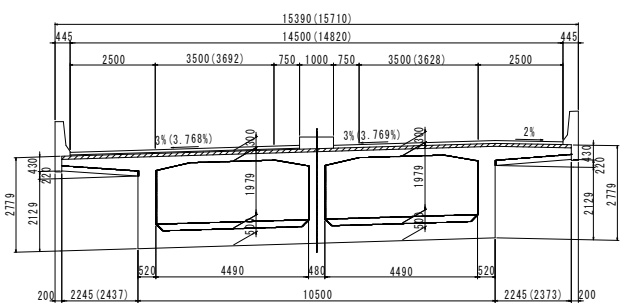
日本海沿岸東北自動車道 村上ICランプ橋は、新潟県村上市に位置するポストテンション方式PC単純箱桁橋で、支間長66mを有する国内最大級の単径間PC箱桁である。桁高は最大3.3mで、桁高支間比(H/L)は1/20となり、桁高を制限している。このため、富配合の高強度コンクリート($\sigma_{ck} = 50\text{N/mm}^2$)を使用している。さらに、端支点部は主桁幅10.5m、横桁幅2.6mで桁高2.8mを有するマスコンクリート部材となる(図-1)。これらのことから、セメントの水和熱に起因する温度応力の発生によるひび割れが懸念された。

そこで、施工時に発生する温度応力の把握を目的とした3次元FEM温度応力解析を行い、ひび割れの発生が懸念される箇所を調査し、温度ひび割れ抑制対策の必要性を検討した。

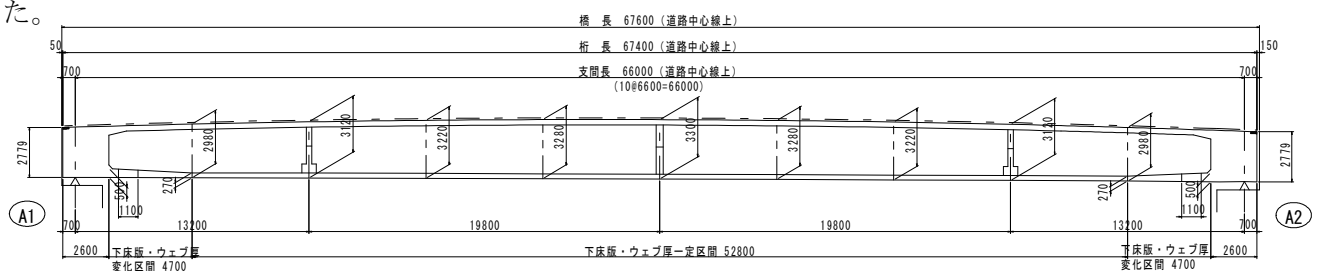
3. 解析条件の妥当性確認試験

3.1 エアパイプクーリングの境界条件

今回、温度ひび割れ抑制対策としてエアパイプクーリングを採用するにあたり、事前の温度解析によりコンクリート内部の冷却効果を評価し、確認する必要がある。そのためには、クーリングパイプの送風状況を再現するための、コンクリートとクーリングパイプとの熱伝達境界条件(熱伝達率およびパイプ内温度)の推定が必要であった。



A1 (A2) 断面図



側面図

図-1 構造一般図

3.2 熱伝達率

熱伝達率の推定は、土木学会コンクリート標準示方書[設計編] (以下、標準示方書と記す) の数値を用いて行った。標準示方書において4編：温度応力解析の境界条件に関する項目では、風速の記述として「風速の影響は、通常のコンクリートの露出面では風速2~3m/sの場合、熱伝達率は12~14w/m²°Cであり、風速の増加に伴い、熱伝達率は増加し、その増加割合の目安は風速1m/s当り2.3~4.6w/m²°C程度である」とあり、これを基に推定した風速と熱伝達率との関係を図-2に示す。

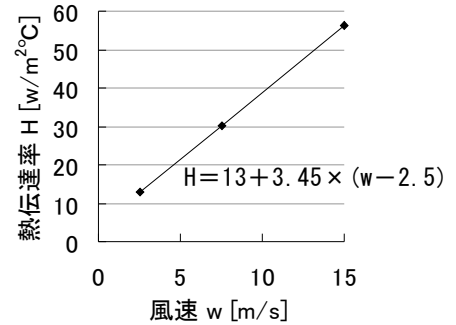


図-2 風速と熱伝達率との関係

3.3 解析に用いた物性値

解析に用いた熱物性値、強度物性値および熱伝達境界条件を表-1に示す。

表-1 解析条件

項目	係数・単位	物性値	備考
熱伝導率	W/m°C	2.7	
密度	Kg/m ³	2340	
比熱	KJ/kg°C	1.29	
打設温度	°C	17	実測値
セメント種類	—	普通	
セメント量	Kg/m ³	413	50N/mm ² 配合
断熱温度	0 _∞	59.07	
上昇特性	γ	1.3	
木枠		8	
境界条件	W/m ² °C	0.173	厚さ200mm
パイプ①		30.3	風速7.5m/s
パイプ②		56.1	風速15m/s
外気温 (パイプ内温度)	°C	実測値	

3.4 試験体

試験体は実物大のパイプ近傍の切出しモデルとし、断面は外ケーブルの標準的な配置ピッチから600mm×600mmの正方形断面とした。試験体の周囲には断熱材として厚さ200mmの発泡スチロールを配置して断熱境界とした。試験体の形状を図-3に示す。

3.5 試験体種類

試験体は全9体作製し、試験体の種類は、クーリングの有無、試験体長さ(柱頭部5.0mと端支点横桁部2.5m)、クーリングパイプの材質(鋼管とポリエチレン管)、送風する風速(7.5m/sと15m/s)の各2種類ずつとした。試験体種類を表-2に示す。

3.6 試験方法

送風機(φ400, 風量110m³/min)に分岐管を設置し、2つに分岐したホースをクーリングパイプに挿入して送風を行った。吸気口で風速計にて風速を計測し、風速7.5m/sおよび15m/s程度になるよう風量を調整した。なお、エアパイプクーリングの送風期間は5日間とした。

3.7 温度解析モデル(試験体)

温度解析モデルは、断面中央にクーリングパイプを配置した試験体の対称1/2モデルとした。解析モデルおよび熱伝達境界条件を図-4に示す。

3.8 試験体の実測値

試験体長さ5.0mの断熱境界近傍(最高温度)でのコンクリート温度を図-5に示す。

各ケースとも、標準示方書の風速より推定した熱伝達率を用いた解析値と実測値はほぼ一致した。

クーリングの有無による比較では、実測値はパイプに送風しない場合(AS-1)、コンクリート内部で70°Cまで上昇するのに対し、エアパイプクーリングを行う(AS-2およびAS-3)ことで50°C以下に低減した。

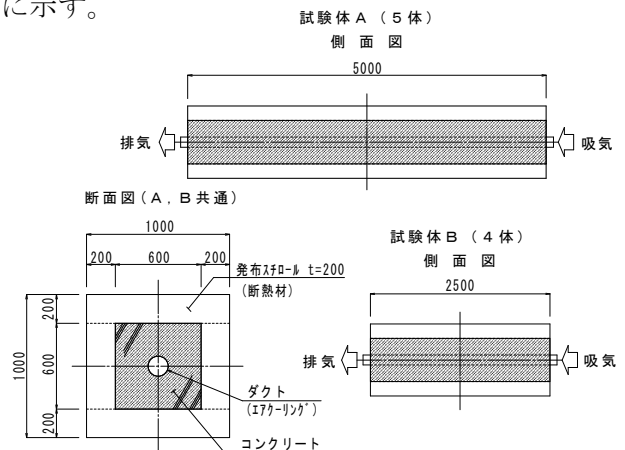


図-3 試験体

表-2 試験体種類

NO.	試験体長さ	パイプ材質	風速 m/s	熱伝達率 W/m ² °C	備考
AS-0	5.0m	鋼管 (φ139.8)	0	0	パイプ端閉鎖
AS-1			0	0	パイプ端解放
AS-2			7.5	30.3	(肉厚4.5mm)
AS-3			15	56.1	(肉厚4.5mm)
AP-2	2.5m	ポリエチレン (φ175)	7.5	30.3	(肉厚5.0mm)
BS-1			0	0	パイプ端解放
BS-2			7.5	30.3	(肉厚4.5mm)
BS-3			15	56.1	(肉厚4.5mm)
BP-2		ポリエチレン (φ175)	7.5	30.3	(肉厚5.0mm)

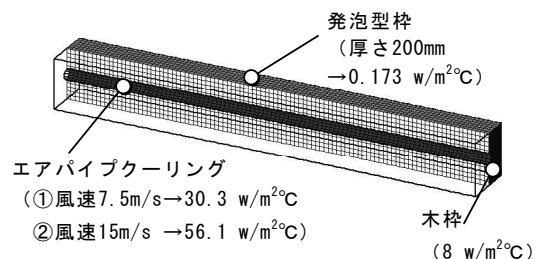


図-4 解析モデル(試験体)

また、パイプ端を閉鎖した場合 (AS-0) と開放した場合 (AS-1) では、内部温度はほぼ同値となり、パイプ内を断熱状態 (熱伝達率 $0\text{W}/\text{m}^2\text{C}$) とした場合の解析値とほぼ一致した。

パイプの材質の比較では、鋼管およびポリエチレン管の計測値は差がほとんどなく、パイプクーリングの冷却効果はパイプの材質によらないことを確認した。

上記の結果は2.5mの試験体 (BS-1~3およびBP-3) でも同じ傾向を示した。

今回の妥当性確認試験により、エアパイプクーリングは、「風速」により推定される熱伝達率を用いることでコンクリート内部の冷却効果が評価できることを確認した。

4. 実構造物への適用 (事前解析)

4.1 施工方針の検討

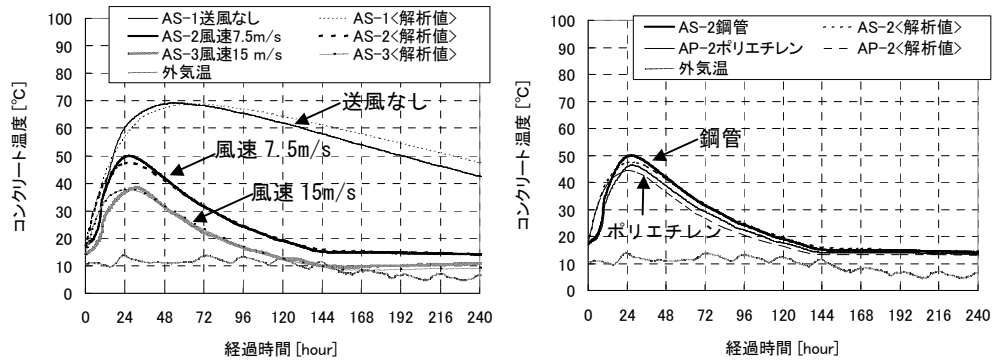
実構造物でのエアパイプクーリングの効果を事前に確認するため、実橋の解析モデルにて温度応力解析を行い、温度ひび割れ抑制効果の比較検討を行った。

標準示方書では、温度ひび割れ照査方法として温度ひび割れ指数がある。ひび割れ指数は、その値が小さいほどひび割れが発生しやすいとされており、今回の比較検討では、ひび割れ指数が1.0以下 (発生する引張応力がコンクリートの引張強度を超える) になる領域を比較し、クーリングの効果を確認した。解析ケースを表-3に示す。風速によるクーリングパイプの熱伝達率は先述の妥当性確認試験にて使用した値を用いた。

解析ケースは、クーリングを行わない場合と、クーリングパイプとして、橋軸方向の既設外ケーブル用定着管 (鋼管 $\phi 139.8\text{mm}$) および落橋防止装置孔 (鋼管 $\phi 140\text{mm}$) を使用した場合 (送風は2種類)、さらに橋軸直角方向にポリエチレン管 ($\phi 35\text{mm}$) を追加した場合の合計4ケースとし、冷却効果やコスト面を考慮して最適なケースを選択することとした。

4.2 解析モデル (実橋)

温度解析モデルは、外ケーブル用定着管および落橋防止装置孔を配置した端支点横桁部および2室箱桁部の対称形1/2モデルとした。解析条件を表-4、解析モデルを図-6に示す。



(a)クーリングの有無による比較 (b)材質による比較 (風速 7.5m/s)

図-5 温度履歴の比較 7.5m/s)

表-3 解析ケース

CASE	パイプ材質		風速 m/s
	橋軸方向	橋軸直角方向	
1 対策なし	外ケーブル +落橋防止 (送風なし)	-	0
2 外ケーブル+落橋防止のみ送風(風速7.5m/s)	外ケーブル +落橋防止	-	7.5
3 外ケーブル+落橋防止のみ送風(風速15m/s)	鋼管 $\Phi 139.8\text{mm}$ (送風)	-	15
4 外ケーブル+落橋防止+横方向にパイプを追加		ポリエチレン管 $\Phi 35\text{mm}$	7.5 7.5

表-4 解析条件 (村上ICランプ橋)

項目	係数・単位	物性値	備考	
熱物性	熱伝導率	$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$	2.7	
	密度	Kg/m^3	2340	
	比熱	$\text{KJ}/\text{kg}^{\circ}\text{C}$	1.29	
	打設温度	$^{\circ}\text{C}$	21	外気温+5 $^{\circ}\text{C}$
	セメント量	Kg/m^3	418	
	断熱温度上昇特性	Q_{∞} γ	58.18 1.918	
強度物性	圧縮強度	a	4.5	
		b	0.95	
		d	1.11	
		N/mm^2	50	28日強度
	ヤング係数	N/mm^2	JSC式	
	引張強度	N/mm^2	JSC式	
ポアソン比	-	0.2		
線膨張係数	$\mu / ^{\circ}\text{C}$	10		
境界条件	木枠		8	
	パイプ①	$\text{W}/\text{m}^2\text{C}$	30.3	7.5m/s
	パイプ②		56.1	15.0m/s
	外気温 (パイプ内温度)	$^{\circ}\text{C}$	1年周期	

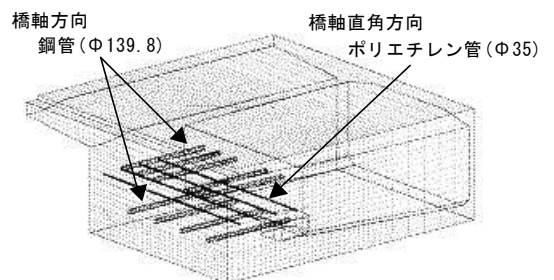


図-6 解析モデル (実橋)

4.3 解析結果

各解析ケースの最小ひび割れ指数の分布を図-7に示す。着色部分はひび割れ指数1.0以下を示す。

エアパイプクーリングを行わないCASE-1と比較して、送風したCASE-2およびCASE-3では、横桁端面の着色面積が大幅に減っていることが確認できる。更に、橋軸直角方向にポリエチレン管を配置したCASE-4では、横桁内部の着色面積も小さくなり、最小のひび割れ指数も0.5から0.9程度まで大きく改善することができた。

以上より、本橋では橋軸方向の既設の外ケーブル定着管（横桁片側10本）および落橋防止装置孔（片側8本）に追加して、橋軸直角方向にポリエチレン管を片側4本配置してエアパイプクーリングを行うこととした。

4.4 風速による効果の比較

CASE-1からCASE-3の風速の異なる3ケースについて、着色部分の合計面積を比較したグラフを図-8に示す。対策なしのCASE-1と比較して、送風を行うことで着色面積を約70%低減することができた。ただし、送風する風量（風速）については、風速7.5m/sと15m/sで大きな差がなかったことから、本橋では送風設備のコスト等を考慮して、風速7.5m/sで送風を行うこととした。

5. 実橋の計測結果

コンクリート温度の計測結果を図-9に示す。解析値と実測値の最高温度の差は約5℃となった。これは外気温が解析と打設当日の実測値で約5℃の差があり、その影響と思われる。それらの点を考慮し、事前解析と実測値ではコンクリート温度の推移はほぼ一致する結果となった。

6. まとめ

PC構造物の温度ひび割れ抑制対策（マスコンクリート対策）として空気を送風するエアパイプクーリングを行った。今回の検討により以下の結果を得られた。

- ・エアパイプクーリングはコンクリート内部温度を下げ、発生する引張応力を低減できる、温度ひび割れ抑制対策として有効な方法であることが確認できた。
- ・クーリングの効果は、送風したシースの熱伝達率を管内風速の関数として与えた方法（標準示方書による方法）で再現できることが確認できた。

エアパイプクーリングによる温度ひび割れ抑制対策を事前解析および妥当性確認試験から定めた方法に従って施工した結果、有害なひび割れのないPC箱桁橋が完成した。

今後は、本橋での施工や実測の結果をふまえ、エアパイプクーリングを行う際のパイプの設置位置や送風量、送風設備など、さらに改良を重ね、有効なひび割れ抑制対策として採用していきたい。

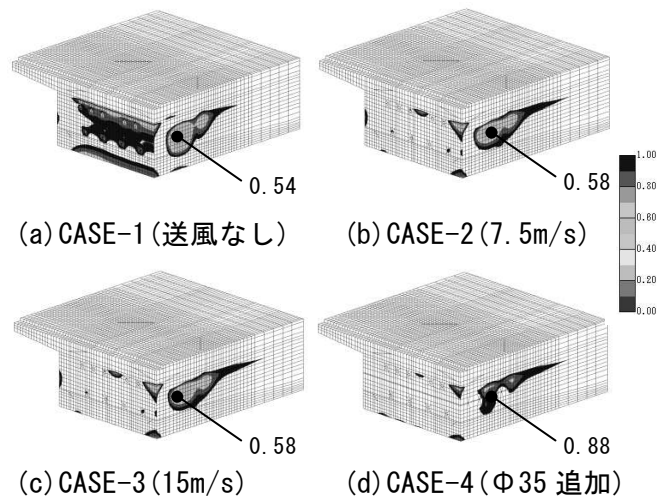


図-7 ひび割れ指数分布図

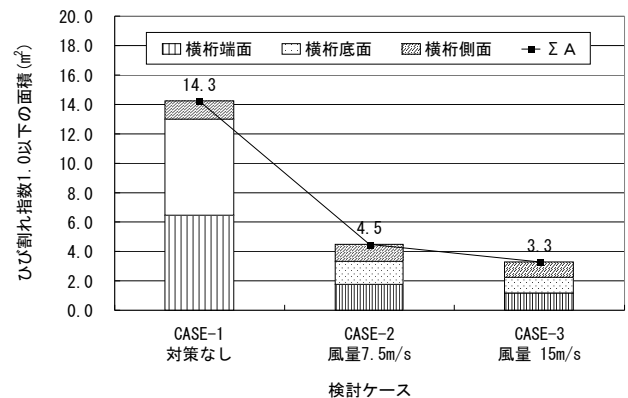


図-8 ひび割れ指数 1.0 以下の領域比較

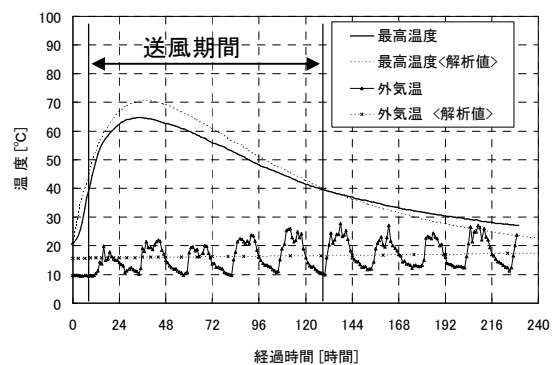


図-9 コンクリート温度