

## 久村第2高架橋の温度応力ひび割れ対策

(株)安部日鋼工業	正会員	○安藤 健
(株)安部日鋼工業	正会員	林 邦憲
(株)安部日鋼工業	正会員	横畑 勝彦
(株)安部日鋼工業		古川 正悟

キーワード：パイプクーリング，冷却水温度管理，温度応力ひび割れ

### 1. はじめに

本橋はPC2径間連続ラーメン箱桁橋であり，マスコンクリートとなる柱頭部に温度応力ひび割れが発生するおそれがあった。そこで，第2リフトのコンクリート打設を対象に温度応力解析に基づく熱分配方式パイプクーリングを実施した。本稿は，熱分配方式パイプクーリングに関する事前の効果確認，実施工に向けた計画および実施結果について報告を行う。

### 2. 熱分配方式パイプクーリング

熱分配方式パイプクーリングは，コンクリートの内部に2系統のパイプを設置し，それぞれに異なる冷却水温度を設定して，それを同時に管理する養生方法である。コンクリート中心部に配置する系統Aとコンクリート表層部に配置する系統Bのパイプにそれぞれ異なる温度履歴の冷却水を通水することで，温度応力ひび割れの発生を抑制する（図-1）。

本工法は，温度応力解析で得られたコンクリートの温度履歴を実施工で再現するように管理を行う。事前の温度解析で2系統のクーリングによるひび割れ抑制効果を確認し，そこで設定した冷却水温度と解析で得られたコンクリートの温度履歴を系統ごとに抽出して管理ソフトに入力する。クーリング時の冷却水は，温度解析で入力した温度履歴をもとに通水を行う。ただし，コンクリート温度の実測値が解析値を上回ったとき，冷却水温度を補正することでコンクリート温度を事前の解析値に近づける。

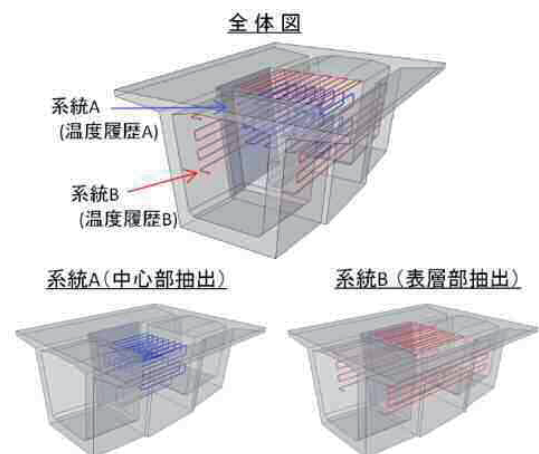


図-1 2系統のパイプ配置例

### 3. 温度解析による事前の効果確認

#### 3.1 施工方法を踏まえた条件設定

柱頭部のコンクリート打設は2リフトの分割施工とした。パイプクーリングの対象である第2リフトは，幅5.32～5.91m，高さ3.40m，長さ12.0m（内，充実部4.50m）である。

冷却用通水管の配置は，実施工を想定して配管長100m程度以下となるように計画した。中心部を通る系統Aは，横桁の左右に分けて2経路で配置した。表層部を通る系統Bは，1経路を橋面付近に位置する系統B-1とウェブ内に位置する系統B-2に分岐し，左右対称となるように合計4経路の配置とした。これは，クーリング装置の能力から，系統Aで20ℓ/min/経路，系統Bで10ℓ/min/経路，の通水量となるように計画している。クーリング対象部位と通水管の配置概要を図-2に示す。

冷却水の通水温度は，系統Aと系統Bでそれぞれ異なる温度を設定する。冷却水の入水温度の設定

は、トライアルの温度解析から温度応力ひび割れの抑制効果が高くなるように図-3の履歴とした。実施工では、冷却水がコンクリート内を通過する際、パイプ周辺の熱の影響を受けることで通水中に水温が変化する。この現象を考慮してひび割れ抑制効果を把握するため、解析における通水温度設定は移流拡散モデルを使用した。

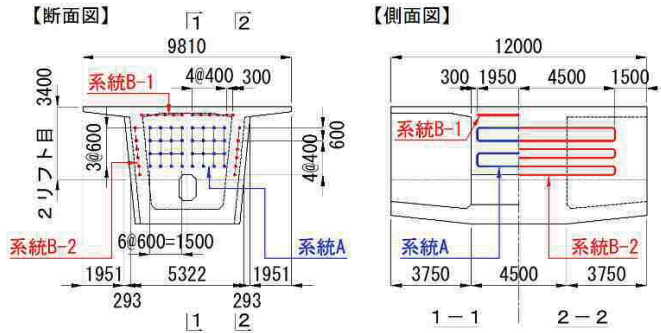


図-2 構造寸法およびパイプ配置図

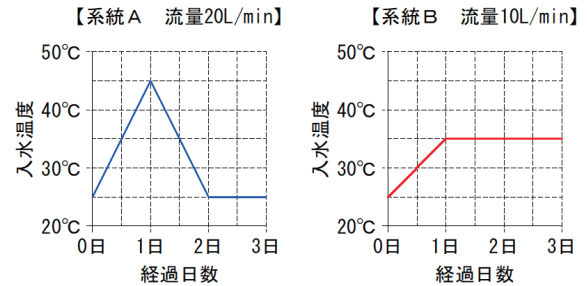


図-3 入水時の温度設定

### 3. 2 事前解析によるひび割れ抑制効果の確認

熱分配方式パイプクーリングを実施した場合、ひび割れ指数の最小値は、張出し床版先端 (A点) が1.31 (材令31.2h)、柱頭部側面 (B点) が1.41 (材令70d) ウェブ側面 (C点) が1.29 (材令70d) であった。この結果は、無対策および従来工法の場合と比較して、ひび割れ抑制効果が高いことを確認した。温度解析結果を図-4に示す。

	無対策	従来工法	熱分配方式
図			
概要	・パイプクーリングを実施しない	・パイプクーリングを実施する ・冷却水温度は、全ての配管を図-3の系統Aとする	・パイプクーリングを実施する ・中心部と表層部で異なる温度に設定する(図-3)。
指数 (確率)	A点 : 0.64 (99%) B点 : 1.05 (43%) C点 : 1.08 (40%)	A点 : 1.21 (27%) B点 : 1.36 (17%) C点 : 1.16 (31%)	A点 : 1.31 (20%) B点 : 1.41 (15%) C点 : 1.29 (21%)

図-4 事前解析によるひび割れ抑制効果の確認

### 4. クーリング実施に向けた温度計測計画

本工法によるコンクリート温度の制御は、温度解析で設定した冷却水温度履歴と解析結果で得られるコンクリートの温度履歴を管理ソフトに入力することで冷却水温度を調整し、基準位置のコンクリート温度を解析結果に近づける。そのため、監視基準位置の選定が重要となる。

監視基準位置は、冷却水の温度制御によってコンクリート温度を解析結果に再現する部位になるため、温度解析の結果からひび割れ指数が小さい位置に設定した。熱電対は、冷却水の影響を受けたコンクリート温度の変化を捉えられるよう、通水管からの離れを100mm程度に設定した。

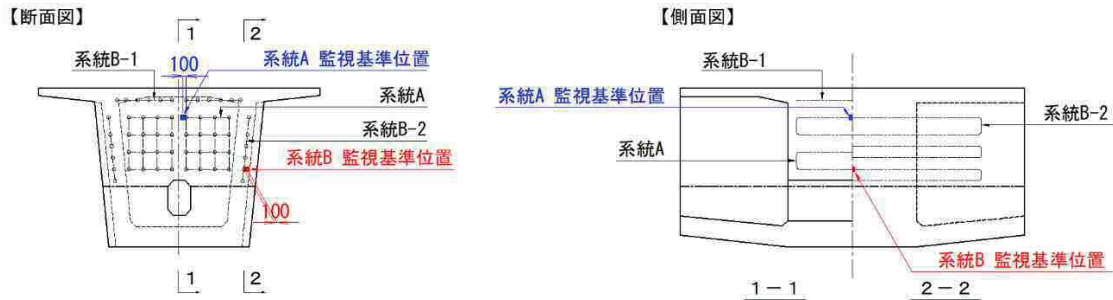


図-5 温度監視基準位置

## 5. パイプクーリングの実施

### 5. 1 コンクリート打設

コンクリート打設は、7/13の8:30a.m.頃から開始した。打設日の外気温は、打込み開始時に30℃を超え、日中の最高温度が33.4℃であった。系統Aの監視基準位置で計測した打設直後のコンクリート温度は、34℃で解析の想定より5℃高かった。また、クーリングを実施した3日間は、最高温度が連日30℃を超え、クーリング実施中の最高気温は34.8℃を記録した。

### 5. 2 パイプクーリング開始

パイプクーリング開始は、コンクリート打込み完了直後とした。その時のコンクリート温度は、系統Aの監視基準位置で40℃～50℃程度を想定していた。しかし、打設したコンクリートの温度上昇速度が事前解析結果より早く、実測値のコンクリート温度は約70℃と予定より高くなった。

### 5. 3 パイプクーリング期間の温度計測結果

パイプクーリングは、コンクリート打設後72時間実施した(写真-1)。監視基準位置のコンクリート温度とそれに対する冷却水温度の計測結果を図-6に示す。



写真-1 クーリング実施状況

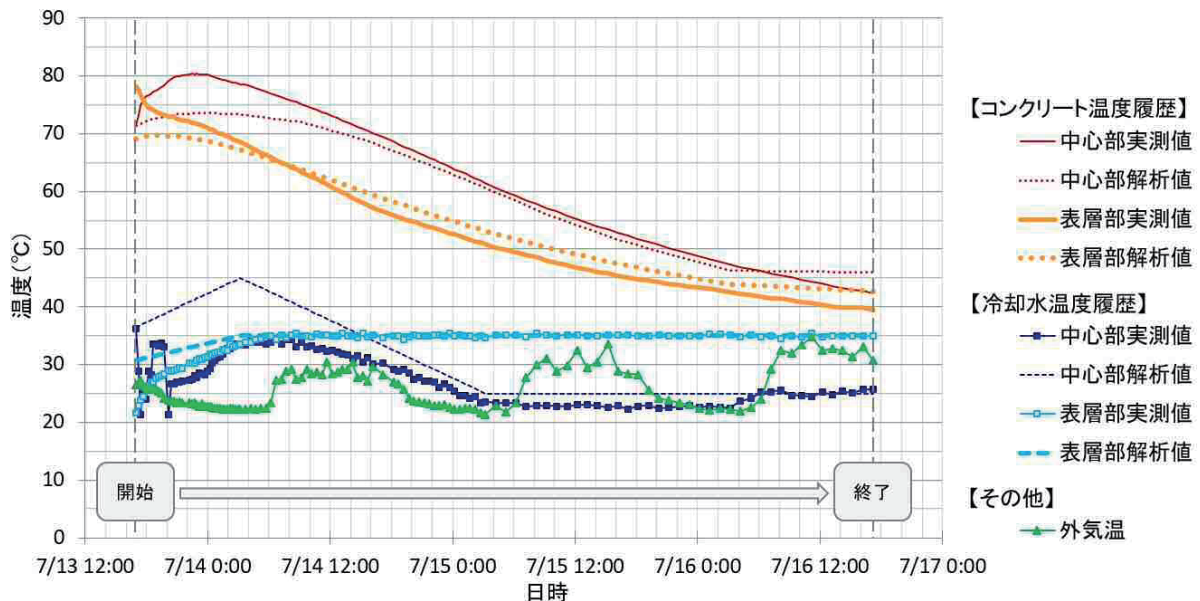


図-6 パイプクーリングによる温度計測結果

コンクリート温度に着目すると、中心部コンクリートの最高温度は、解析値よりも7℃程度高い80℃であった。また、表層部のコンクリート温度は、開始時に解析値よりも10℃高かった。これは、事前

の解析条件よりも打込み温度が5℃高いことなどが影響したと考えられる。

コンクリート温度が解析値よりも高くなったため、冷却水温度に補正が掛かり温度を下げた通水が行われた。コンクリートの温度制御は、中心部では18時間を有したものの、表層部では3時間後と比較的早い段階で解析値との温度差を5℃以内に近づけた。さらに、24時間以降の温度に着目するとコンクリート温度の実測値と解析値の差は、中心部で-3.7℃～+1.7℃の誤差範囲で平均値が+0.5℃、表層部で-3.2℃～-1.4℃の誤差範囲で平均値が-2.2℃であり、中心部と表層部ともに解析値に精度よく一致する結果が得られた。

### 6. 再現解析による効果検証

コンクリート材料の物性値や施工環境など、実際の諸条件を反映した再現解析を行い、パイプクーリングの効果を検証した。再現解析は、コンクリート中心部の実測温度と解析値を一致させるため、トライアル解析を行い断熱温度上昇特性式の係数を決定した(表-2)。事前に行った比較検討の3ケースと同様に再現解析の比較検討結果を図-7に示す。

表-2 断熱温度上昇特性式の設定値

設定項目		事前解析	再現解析
終局温度 (°C)	$Q_{\infty}$	70.2104	82.0000
上昇速度係数	$r$	3.10852	4.20000
上昇速度係数	$s$	1.00	0.75
発熱開始材令[日]	$t_0$	0.01363	0.13000

再現解析の結果、熱分配方式パイプクーリングは、無対策の場合と比較して、ひび割れ指数が張出し床版先端で0.66、支点部主桁側面で0.37、ウェブ付け根主桁側面で約0.03改善し、ひび割れ抑制効果が高くなったことを確認した。

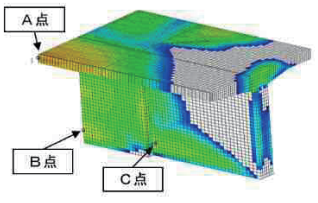
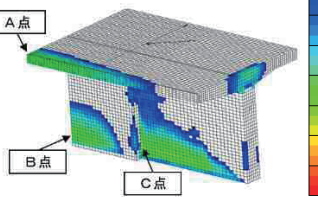
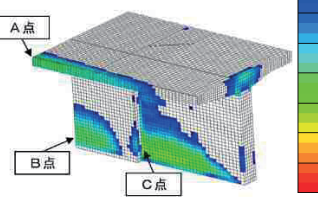
	無対策	従来工法	熱分配方式
図			
指数 (確率)	A点 : 0.48 (100%) B点 : 0.73 (93%) C点 : 0.77 (88%)	A点 : 1.05 (43%) B点 : 1.05 (43%) C点 : 0.82 (81%)	A点 : 1.14 (33%) B点 : 1.10 (37%) C点 : 0.80 (84%)

図-7 再現解析によるひび割れ指数の比較検証

### 7. おわりに

熱分配方式パイプクーリングシステムは、プログラムの自動温度調整により系統Aと系統Bのそれぞれ個別に、かつ同時に、異なる温度の冷却水を通水する温度管理を行うことができた。事前解析と実際の施工で諸条件が異なったため、パイプクーリング開始時のコンクリート温度が想定値よりも高くなったが、通水温度の自動補正機能により比較的早い段階でコンクリート温度を想定する履歴に近づけることができた。再現解析で本施工によるひび割れ抑制効果を確認するとともに、脱枠後の調査で、構造物に有害なひび割れが発生していないことを確認した。