

パイプクーリング水温自動制御装置の適用

Application of Automatic Control Device in Pipe Cooling

建設基盤技術部 葦 哲義 AKIYOSHI DAI
 建設基盤技術部 樋口 正典 MASANORI HIGUCHI
 中部支店 伊藤 篤 ATUSHI ITO
 土木技術部 竹之井 勇 ISAMU TAKENOI

コンクリート構造物における確実な温度ひび割れ制御を目的として開発したパイプクーリング水温自動制御装置（以下、インテリジェントパイプクーリングシステムと称す）を、PC 上部工工事で横桁部 145 箇所に応用した。その結果、循環水の水温制御が確実に実施されていることを確認し、システムの性能と現場での適用性および自動化による省力化を検証できた。また、事前解析において、簡易断熱試験による使用材料の適正確認と、施工条件を含め適切な条件設定が重要であることが分かった。

キーワード：パイプクーリング、自動制御、マスコンクリート、温度ひび割れ、温度解析

For the purpose of reliable thermal crack control in concrete structures, 145 automatic control devices in the pipe cooling were applied to a prestressed concrete bridge superstructure. As a result of that, field applicability and labor saving were confirmed. In addition, it was found that it is important that, in pre-analysis, proper materials are selected by thermal insulation test, and appropriate condition is set.

Key Words: Pipe cooling, Automatic control, Massive concrete, Thermal crack, Thermal analysis

1. はじめに

セメントの水和発熱により発生する温度ひび割れが想定されるコンクリート構造物に対しては、ひび割れ発生の有無やひび割れが構造物の性能に与える影響を事前に照査し、適切な対策を講じる必要がある。PC 上部工の横桁部においてはマスコンクリートになるケースが多く、さまざまな対策が講じられている。一般的な水循環式パイプクーリング工法は、図-1 に示すように水槽を用いた常温水や冷却水を循環させる方式であるが、コンクリートを通過した水は高温となって戻ってくるため想定した効果を得られない場合がある。これを解決すべく、筆者らは打込み後のコンクリート温度をもとにパイプクーリングの水温を自動制御するインテリジェントパイプクーリングシステムを開発し、水門カーテンウォール工事に適用してその有効性を確認してきた²⁾。本システムは図-2 に示すように、常温水槽と低温水槽を有し、躯体コンクリートの温度が装置に入力した制御温度を上回ると自動で低温水を混合して冷却するシステムである。

本稿では PC 上部工における端支点横桁と中間支点横桁の上下線合わせて 145 箇所に応用したシステムの概要

と適用結果について報告する。

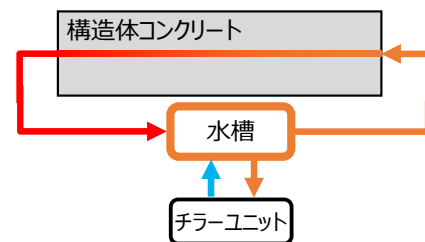


図-1 通常の水循環式パイプクーリングの概要図

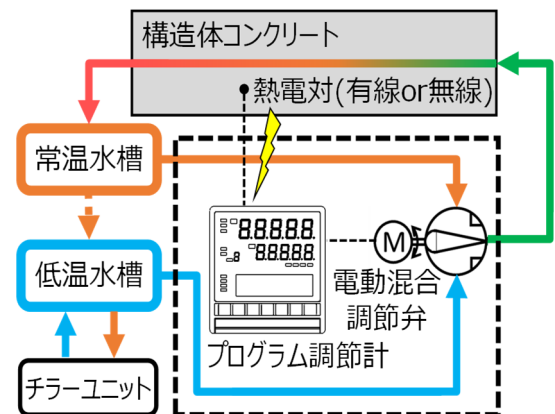


図-2 インテリジェントパイプクーリングシステムの概要図

2. インテリジェントパイプクーリングシステム

一般的なパイプクーリングの場合、事前の温度応力解析により定められた条件で運転が行われるが、解析時に想定されたコンクリートの打込み温度や周囲の環境温度が事前解析時の想定されたものとは異なることがあり、想定された制御効果が十分に得られない場合がある。また、施工時の計測データをもとに技術者が手動で温度や流量などを調整することもあるが、最も調整が必要となる温度上昇時は夜間になることが多く、リアルタイムでの管理・調整は困難と考えられる。アラームによる遠隔操作などの方法も考えられるが、タイムラグが大きく急激な温度変化には対応できない可能性がある。さらに、常温水や冷却水を循環させる方式は、コンクリートを通じた水が高温となって戻ってくるため、水槽内の水温を一定に保つには大型なチラー設備が必要となり、設置場所やコストなど様々な問題が出てくる。

一方、インテリジェントパイプクーリングシステムは、躯体コンクリートにおける代表的な温度を計測し、その温度が設計時に想定された温度を上回らないように、パイプクーリングの水温を自動制御するものである。循環する水は、常温水に常温水よりも10℃程度低い温度の低温水を混合する混合方式とすることで、通常の温まった循環水を冷却する方式よりも早く循環水を冷却できる。システムの特徴としては、以下である。

- ① 完全自動制御のため迅速かつ確実な制御が可能で、省力化も図れる。
- ② 常温水に低温水を混合する水温制御方式を採用することによって、水温調節のレスポンスを高めた。
- ③ 躯体コンクリートの温度が最高温度から制御温度以下に低下した後は、常に常温水が循環し、常温水槽の水温も徐々に上昇することから過冷却を防止できる。
- ④ 装置や水槽が独立しているため設置場所が施工箇所に合わせてアレンジできる。

本システムを適用することにより、無人であっても迅速かつ確実な温度ひび割れ制御が可能になる。

3. 対象構造物

インテリジェントパイプクーリングシステムを導入したのは、橋長約850m～950mの3現場のPC上部工工事である。橋梁形式はいずれも連続プレキャストU形コンボ橋であり、現場内で製作したプレキャスト桁を運搬して架設ガーダーにより、別途施工した柱頭部に一括架

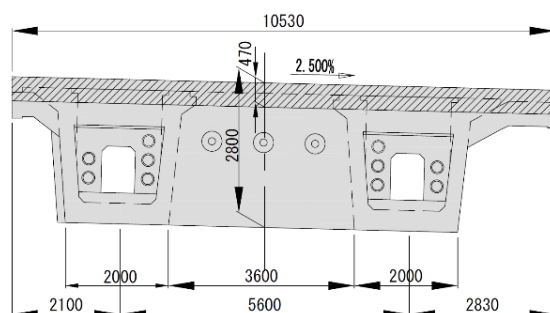


図-3 端支点横桁の構造図(標準断面)

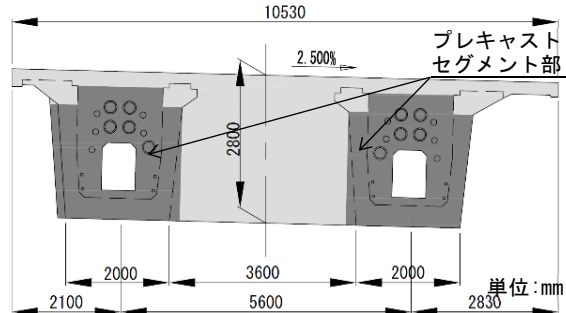


図-4 中間支点横桁の構造図(標準断面)

設するU桁リフティング架設工法が主に採用されている。マスコンクリート対策としてシステムを適用した端支点横桁と中間支点横桁は上下線あわせて145箇所になる。中間支点横桁はいずれも同様な構造であることから、主桁部分および隔壁部をプレキャストセグメント部材とするハーフプレキャスト構造が採用されている。端支点および中間支点横桁の構造図を図-3、図-4に示す。いずれも桁高は約2.8m、幅は約10m、奥行は端支点横桁で約2.4m、中間支点横桁で約3.6mである。マスコンクリートとなる部分はどちらも隔壁部間で3.6mほどの幅である。施工は2018年6月から2019年12月までの1年半と長期にわたり、寒中対策が必要になる冬期から暑中対策が必要になる夏期と環境条件也多岐にわたった。

4. 事前解析と制御温度の設定

インテリジェントパイプクーリングシステムは、事前解析で得られた温度をもとに制御を行うため解析の精度が非常に重要となる。そのため、以下の手順により実験と事前解析を行なった。

- ① 実際に打設するコンクリートを用いた簡易断熱試験。
- ② パイプクーリングに使用する材料の設定。
- ③ 解析モデルの作成。
- ④ 打設時期に合わせた条件の設定。
- ⑤ 解析。
- ⑥ 解析結果より求めた制御温度の決定。

表-1 コンクリートの配合と熱物性値

工場	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					密度 ρ (kg/m ³)	比熱 c_c (kJ/kg°C)	熱伝導率 λ (W/m°C)	熱拡散率 h_c^2 (m ² /s)
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP				
A	43.0	47.7	160	372	843	949	2.604	2324	1.30	2.10	7.04×10^{-7}
B	42.9	48.6	152	368	880	951	2.478	2351	1.29	2.40	7.83×10^{-7}
C	43.0	48.2	159	370	860	929	2.960	2318	1.31	1.60	5.25×10^{-7}

セメント：普通ポルトランドセメント，混和剤：高性能 AE 減水剤



写真-1 熱伝導率試験状況

コンクリートの発熱特性は使用する材料や配合によっても異なることから、熱流センサーを使用した簡易断熱試験³⁾⁴⁾を実施することにより、熱伝導率と温度依存型の水和発熱速度式を求めて解析精度の向上を図った。また、ひび割れをできるだけ制限するために、事前解析ではひび割れ指数が1.4以上になる条件を求めた。

(1) コンクリートの配合および熱物性値

端支点および中間支点横桁部において使用したコンクリートの配合および熱物性値を表-1に示す。コンクリートの呼び強度は36，スランプは12±2.5cm，空気量は4.5±1.5%である。密度 ρ は配合値とし，比熱 c_c はコンクリート標準示方書⁵⁾に示されている式(1)を用いて密度より算出した。熱伝導率 λ も躯体コンクリートの温度上昇に影響することから，実際に打設するコンクリートを用いた試験により求めた。試験方法は，中心部に熱電対を埋め込んだφ150×300mmの円柱供試体を50℃の温水中で一様に温めた後に20℃の水槽に移し，時間経過とともに低下する供試体中心温度を計測した。試験状況を写真-1に示す。熱伝導率については，円柱供試体をモデル化した3次元FEM温度解析においてさまざまな値を設定し，温度の解析結果が実測値に最も近くなる値を決定した。熱拡散率 h_c^2 はコンクリート標準示方書に示されている式(2)を用いて算出した。

$$c_c = 3.03 \times 10^3 / \rho \quad (1)$$

$$h_c^2 = \lambda / \rho c_c \quad (2)$$

(2) コンクリートの水和発熱速度

コンクリートの発熱速度は温度の影響を受ける。今回の対象物のように，表面からの放熱の影響を受けなが

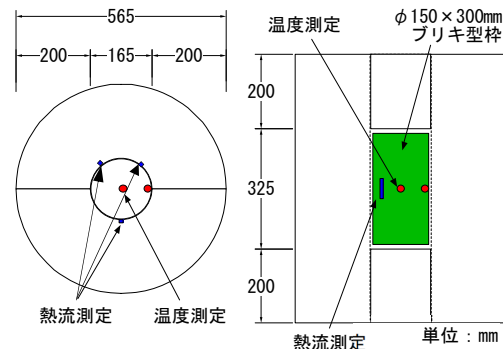


図-5 簡易断熱型枠と測定位置

らパイプクリーニングを行う条件（すなわち部位ごとの発熱速度が異なる条件）での温度解析の精度を高めるには，温度依存性を考慮した発熱速度のモデルを用いることが有効である。そこで，鈴木ら⁶⁾によってコンクリートへの適用が確認されている，式(3)で示される温度依存型の水和発熱速度式を用いることとした。試験では積算発熱量 Q と限界水和発熱速度の対数 $\log H_\infty$ の関係を求め，各位置，各時点における積算発熱量 Q と絶対温度 T から水和発熱速度 H を求めた。

$$\log H = \log H_\infty(Q) - \frac{E(Q)}{R} \left[\frac{1}{T} \right] \quad (3)$$

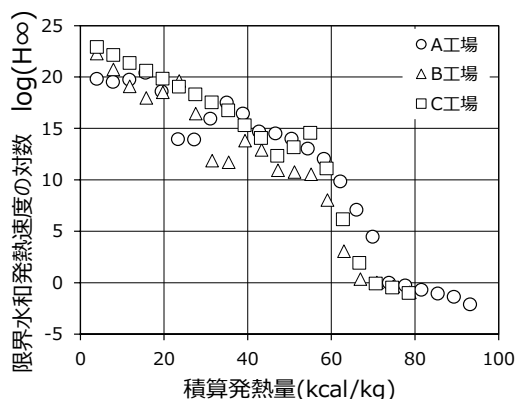
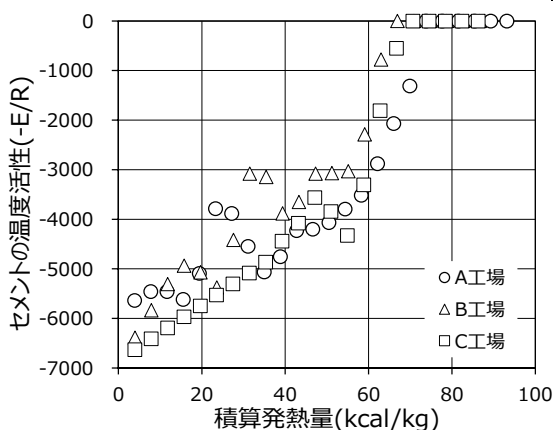
ここに， Q ：積算発熱量， H_∞ ：限界水和発熱速度 T ：絶対温度， $-E/R$ ：セメントの温度活性

鈴木らによれば，打込み温度を2水準以上に変化させた断熱温度上昇試験により求めた断熱温度上昇量より，上記の関係を算定する方法が提案されているが，ここでは実際の施工で使用するコンクリートの発熱速度を求めるために，現地の生コン工場でも実施可能な簡易断熱試験を実施し，その結果より算定することとした。試験に使用した発泡スチロール製の保温型枠は図-5に示すとおり，外径565mm，高さ725mmの円柱状で中心部にはφ150×300mmのブリキ型枠を配置した。型枠は全面が200mmの断熱材で覆われる形状である。測定項目は外気温，コンクリート温度，ブリキ型枠面での熱流束とした。試験に用いたコンクリートは，打込み温度の変化を模擬するため，練上がったコンクリートと，練り上がり温度+10℃程度に加温および-10℃程度に冷却したコンク



写真-2 加温と冷却状況

写真-3 試験状況

図-6 積算発熱量 Q と限界水和発熱速度の対数 $\log H_{\infty}$ 図-7 積算発熱量 Q とセメントの温度活性 $-E/R$

リートの3水準について試験を行った。供試体の加温、冷却状況を写真-2、試験状況を写真-3に示す。また、簡易断熱試験の結果を用いて算定した積算発熱量 Q と限界水和発熱速度の対数 $\log H_{\infty}$ の関係を図-6に積算発熱量 Q とセメントの温度活性 $-E/R$ の関係を図-7に示す。同じ呼び強度のコンクリートであっても、使用している材料が違ふと発熱速度には差がある事が分かる。解析にはこの結果を水和発熱モデルとして定義した。

（3）パイプクーリングとそのほかの物性値

パイプクーリングには実際に工事で使用する外径21.5mm、内径15.6mmのポリエチレン管の熱伝達率を使用し、そのほかのパイプクーリングの条件は表-2とした。木型枠の熱伝達率については、これまでの実績から $5W/m^2$ とし、それ以外の物性値についてはコンクリート

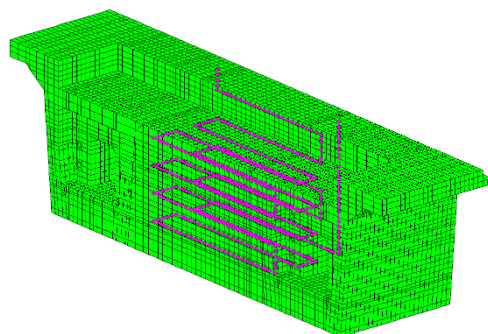


図-8 端支点横桁解析モデル

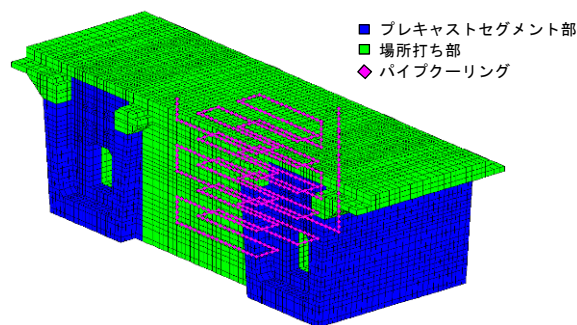


図-9 中間支点横桁解析モデル

表-2 温度解析に用いたパイプクーリングの条件

水槽容量(m^3)	3.0
通水温度($^{\circ}C$)	通水開始時は日平均気温と同温 その後は循環による水温上昇
通水流量(l/min)	10
通水流速(cm/sec)	87.2
熱伝達率 ($kcal/m^2h^{\circ}C$)	50.2 (当社試験値)
通水時間(時間)	72

標準示方書の値を使用した。

（4）解析モデルとパイプの配置

今回の橋梁の形状に合わせて作成した端支点横桁および中間支点横桁の解析モデルを図-8、図-9に示す。中間支点部は前述のとおり、いずれも同様な構造であることから、主桁部分および隔壁部をプレキャストセグメント部材とするハーフプレキャスト構造となっている。パイプは橋軸直角方向に40～50cmの間隔で高さ方向には4段配置した。コンクリート中の配管延長は端支点モデルで62.9m、中間支点モデルで68.8mである。

（5）外気温と打込み時のコンクリート温度

事前解析に用いた工事場所付近の月別平均気温と日最高気温の平年値（統計期間：1981～2010年）を表-3に示す。1年間の気温の変化はサインカーブで近似し、月平均気温の平年値を外気温として用い、コンクリートの打込み温度は外気温 $+5^{\circ}C$ を使用した。また、寒中対策が必要となる12月から3月の期間は足場全体をシートで覆

表-3 外気温の平年値 単位：℃

項目	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月
月別平均気温	2.5	3.1	6.2	11.3	15.5	18.9	22.4	23.7	20.5	15.1	9.9	5.0
日最高気温	7.7	8.1	11.2	16.5	20.4	23.1	26.6	28.4	25.1	20.0	15.1	10.4



写真-4 実施状況



写真-5 装置配置状況

い、打設時から4日間は5℃の環境を保持する条件とした。コンクリートの打込み温度は、各プラントにおけるこれまでの実績温度を用いた。

(6) 制御温度の設定

インテリジェントパイプクーリングシステムは計測値が制御温度を超えた段階で通水温度を下げる設定となっており、実際の温度は制御温度よりも少し高くなるため、事前解析である設計値よりも低く設定する必要がある。そのため、循環水の温度をコントロールするための制御温度は温度の事前解析値に対して、その最大値が-5℃低くなる比率を乗じることによって定めた。

5. 実施工

(1) インテリジェントパイプクーリングシステムにおける水温自動制御の検証

インテリジェントパイプクーリングシステムの実施状況を写真-4、写真-5に示す。一体型のシステムでは大型となり設置場所が制限されてしまうが、本システムは装置や水槽が独立しているため、施工箇所に合わせて配置できるコンパクトな仕様となっている。

代表的な実測温度と通水温度、常温水槽水温と低温水槽水温の計測結果を図-10に示す。実測温度の計測は、事前解析で温度が最大になった位置で行なった。温度計測結果をみると、コンクリート温度が制御温度よりも低い場合には比較的温度的の高い常温の水が流れ、コンクリート温度が制御温度よりも高い場合にはそれよりも20℃程度低い温度の水が流れていて、本装置の特徴である水温調節のレスポンスの高さが分かる。このことから、インテリジェントパイプクーリングシステムは正常に動作しており、適切に自動制御が行われている事が確認できた。また、水温が自動で切り替わる点で、通水時

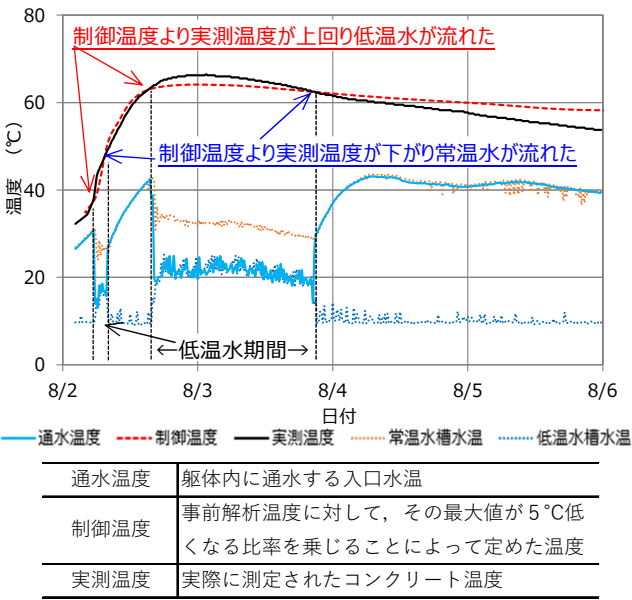


図-10 代表的な温度計測結果

に常時データを管理する人員が省け、省力化にも貢献するシステムであることが分かる。

(2) 計測結果と検証

長期にわたるシステムの適用において、事前解析値と実測値が乖離するケースがいくつか出てきた。原因究明のため、施工条件や環境条件を再調査するとともに再現解析を行った。施工時期の異なる実測温度と通水温度の計測結果に、事前解析結果、制御温度と新たに実施した再現解析の結果を加えた例を図-11に示す。再現解析は施工時に打ち込まれたコンクリート温度や環境温度、通水温度と通水速度をもとに実施した。

図-11に示すように、冬期施工の寒中対策期間において実際の温度が事前解析を上回る箇所が確認された。この原因として以下のことが考えられ、再現解析によって確認した。

- ① 施工開始当初の事前解析に用いた外気温は、気象庁が提供する1981～2010年の月平均気温の平年値を用いていたが、実際には施工時の外気温が高く、それに伴い打込み温度も高くなり、温度上昇も早く、打込み後のコンクリートの最高温度が上がったこと。
- ② 寒中対策として実施した給熱養生の影響が考えられ、事前解析では5℃で設定していた給熱養生

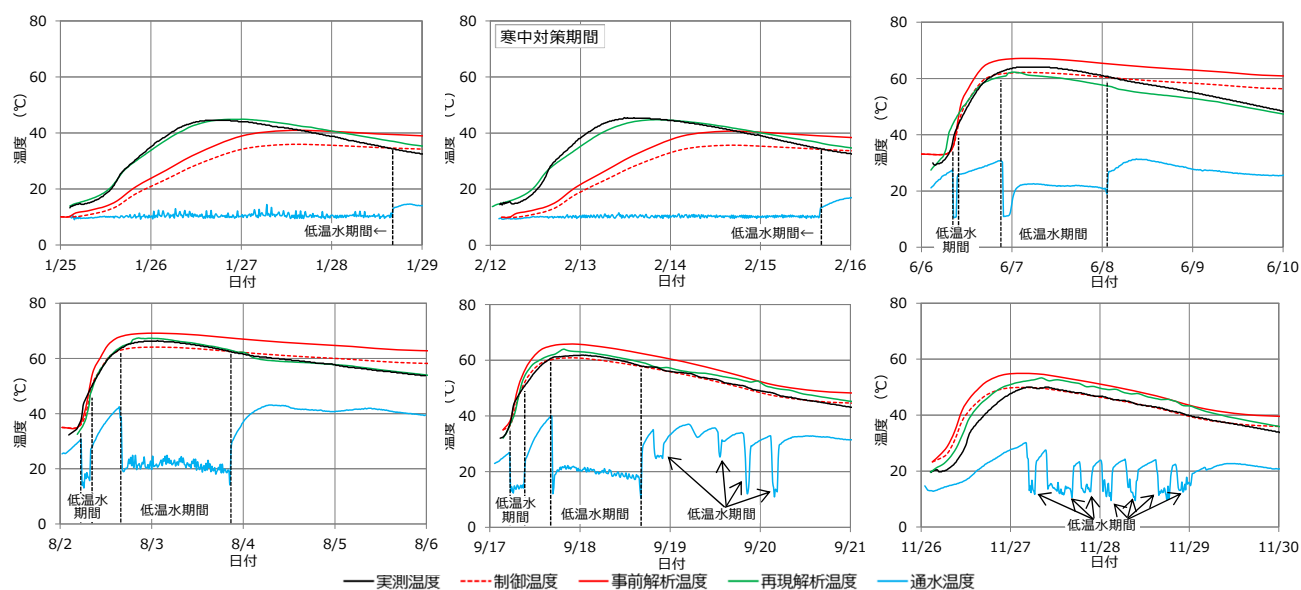


図 - 11 水温自動制御結果と解析結果

に対し、実際には 5～15℃程度であったこと。

①については 2018 年 11 月までの計測データに基づき検討を行い、2018 年 12 月以降の外気温については日最高気温を使用し、コンクリートの打込み温度は外気温 +8℃と対策した。しかし、②については、実施工において給熱養生を実施する場合、環境温度を適切に検討し、設定および管理する必要があることが分かったが、本工事では対処できず今後の課題となった。ただし、実際の温度が事前解析を上回った箇所においては、再現解析を実施し、ひび割れ指数が 1.4 以上であることと、ひび割れが発生していないことを確認している。

実測温度と再現解析温度を比較すると、最高温度の差は最大 5℃程度と小さく、温度の昇温および降温勾配もほぼ等しく、適切に再現できていることが確認できた。インテリジェントパイプクーリングシステムを使用する際は制御温度の精度、すなわち事前解析の精度が重要になるので、実際に打ち込むコンクリートの熱伝導率や温度依存型の発熱速度式を簡易断熱試験によって求めることは有用な手段であることが分かる。

6. まとめ

PC 上部工横桁部の 145 箇所にインテリジェントパイプクーリングシステムを適用した結果、完全自動制御による水温制御が確認でき、システムの性能と現場での適用性および省力化の効果が確認された。また、確認できるすべての施工箇所においてひび割れ指数 1.4 以上に制御でき、ひび割れもない良質な横桁部を構築することができた。今回、1 年半と長期にわたる施工を通して事前解析の重要性を改めて再認識した。特に条件設定につい

ては次の点に留意する必要がある。

- ① 近年、外気温は上昇している傾向にあるので、解析時に用いる外気温の設定には注意する必要がある。
- ② 実施工において給熱養生などの寒中対策を実施する場合は、環境温度を適切に検討し、設定、管理する必要がある。

参考文献

- 1) 基哲義，樋口正典，原勝哉，村尾光則：パイプクーリングにおける水温自動制御装置の開発，プレストレストコンクリート工学会第 26 回シンポジウム論文集，pp.243-248，2017.10
- 2) 二木英人，基哲義，原勝哉，樋口正典：水温自動制御機能を有するインテリジェントパイプクーリングを適用したマスコン対策技術，日本コンクリート工学会コンクリート工学，pp.585-590，2018.7
- 3) 基哲義，樋口正典，梶貢一，澤本武博：熱流センサーを用いたコンクリートの簡易断熱試験，土木学会第 73 回年次学術講演会，V-399，pp.797-798，2018.8
- 4) 基哲義，樋口正典，梶貢一，澤本武博：簡易断熱試験による温度依存性を考慮した発熱速度推定に関する研究，プレストレストコンクリート工学会第 27 回シンポジウム論文集，pp.543-548，2018.11
- 5) 土木学会：2017 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，2017
- 6) 鈴木康範，辻幸和，前川宏一，岡村甫：コンクリート中に存在するセメントの水和発熱過程の定量化，土木学会論文集，第 414 号，V-12，pp.155-164，1990.2