

コンクリートパイプクーリングの自動制御に関する研究

Study on the Automatic Control of the Concrete Pipe Cooling

樋口 正典 MASANORI HIGUCHI

佐々木 亘 WATARU SASAKI

谷口 秀明 HIDEAKI TANIGUCHI

土木設計部 村尾 光則 MITSUNORI MURAO

土木技術部 斯波 明宏 AKIHIRO SHIBA

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、パイプクーリングにおける温度解析精度向上と自動制御について検討を行った。温度解析精度向上については、パイプ壁面での熱伝達率が既往の研究での値と大差ないこと、セメントの水和熱については温度依存性を考慮する必要があることを確認した。パイプクーリングの自動制御については、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装置を試作し、自動制御が可能であることを実証した。

キーワード：コンクリート、パイプクーリング、自動制御、水和熱、熱伝達率

This paper describes the improvement of accuracy in thermal analysis and automatic control in the pipe cooling for the purpose of reliable thermal crack control in concrete structures. In the analytical accuracy, the following results were obtained; 1) Heat transfer rate in the pipe wall has no much difference as compared with the value in the previous studies, 2) It is necessary to consider the temperature dependence of heat of hydration of cement. In the automatic control of the pipe cooling, the prototype device that control water temperature of the pipe cooling automatically based on temperature of the placed concrete demonstrated that automatic control is totally feasible.

Key Words: Concrete, Pipe Cooling, Automatic Control, Heat of Hydration, Heat Transfer Rate

1. はじめに

セメントの水和熱に起因する温度ひび割れの発生が懸念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。しかしながら、事前の照査では、標準的な物性値や打込み時に想定される環境条件などを用いた照査となり、それらに変化が生じた場合には計画した制御効果が得られない可能性もある。また、一般的な温度ひび割れ制御対策¹⁾を図-1に示すが、そのほとんどが設計や施工計画の段階において決定され、実施されるもので、実際の施工時における条件変化にはほとんど対応できない。そこで、より確実な温度ひび割れ制御を行うため、コンクリート打込み後においても運転制御が可能なパイプクーリングに着目し、施工時における温度ひび割れ制御について検討を行った。

パイプクーリングとは、あらかじめコンクリート中に

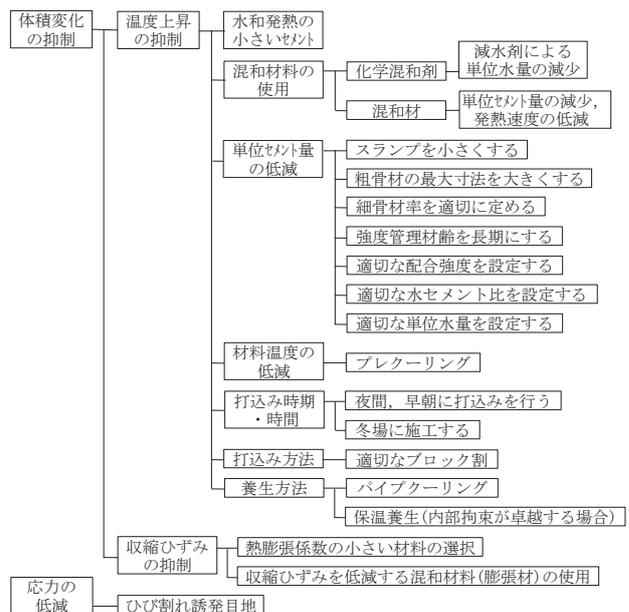


図-1 温度ひび割れ制御対策¹⁾

埋め込んだパイプの中に水や空気を流して、打込んだ後のコンクリートを冷却する方法である。一般には、事前の温度応力解析によって決定された条件で運転が行われるが、コンクリート温度の計測データを参考にして、技術者が手動で温度や流量などを調整することも可能である。ただし、最も調節が必要になる温度上昇時は夜間になることが多く、手動での十分な管理・調整は困難と考えられる。また、アラーム機能などを用いた遠隔操作も可能と考えられるが、タイムラグが大きく、急激な変化に対しては対応できない可能性がある。

本研究では、事前解析の精度をできるだけ上げ、施工時における変動を調節可能な範囲に収めるために、パイプクーリングの温度解析において特に重要となる、パイプ壁面での熱伝達率について検証を行い、パイプ中を流れる水や空気の温度や流量がコンクリートの冷却効果に及ぼす影響について検討を行った。また、施工時におけるパイプクーリングの自動制御を目的として、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装置を試作し、その検証試験を行った。

2. パイプクーリング試験

(1) 試験概要

コンクリート打込み後にパイプクーリングの運転制御を行う場合、施工時における変動を調節可能な範囲に収めるため、事前解析の精度をできるだけ上げておく必要がある。そこで、パイプクーリングの温度解析において特に重要となる、パイプ壁面での熱伝達率について試験を行った。

試験は、図-2に示すような供試体を用いて、パイプに水や空気を流して冷却した時のコンクリート温度を計測し、逆解析によってパイプ壁面での熱伝達率を求めた。供試体におけるコンクリート部分の形状は 376×376×1400mm であり、外周を厚さ 12mm の合板と厚さ 200mm の断熱材で覆い、断熱を行った。断熱材は発泡スチロールを使用した。試験はパイプ中に水を流す水冷試験と、

空気を流す空冷試験を実施した。

水冷試験では、一般に 1 インチ程度の鋼管が使用されることから、外径 38.1mm、内径 34.9mm の電縫鋼管を使用した。空冷試験では、冷却効率と実績²⁾から、外径 83mm、内径 80mm のスパイラルシース管を使用した。温度計測位置は、図-2にも示すように、パイプ外面、型枠の内壁面、内壁面から 100mm の中間位置の 3 点とした。また、使用したコンクリートの水和発熱特性を確認するために、パイプを設置せず冷却を行わない供試体についても同時に試験を行った。その場合は、パイプ外面に代わり供試体の中心位置で温度計測を行った。

コンクリートは、早強ポルトランドセメントを使用した呼び強度 40 のレディーミクストコンクリートを使用した。配合条件を表-1に示す。また、水冷および空冷試験における冷却条件を表-2に示す。水冷試験における流速については、一般的な流量が 10~20l/min であることから、流量として 15l/min を設定した。空冷試験における流速については、実施が可能と考えられる範囲で 3 水準を設定した。

表-1 コンクリートの配合条件

呼び強度	スランプ (cm)	粗骨材の最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)	
						セメント(早強)	水
40	12	20	47.4	45.9	4.5	353	167

表-2 パイプクーリングの冷却条件

	設定温度(実温度)	設定流速(実流速)
水冷試験	25℃(平均 25.8℃)	26.1cm/s(平均 26.1cm/s)
空冷試験	外気吸引 (-0.1~10.2℃)	2.0m/s(平均 2.1m/s)
		7.5m/s(平均 7.6m/s)
		15m/s(平均 15.2m/s)

逆解析は、2次元有限要素法による温度解析とし、解析モデルは、長手方向に直交する断面を、断熱材を含めて 1/4 のみモデル化した。パイプクーリング供試体の解析モデルを図-3に示す。なお、逆解析を行う上で、合板と断熱材を個別に扱うことは難しいため、合板は断熱材の一部としてモデル化した。



図-2 供試体の概要図

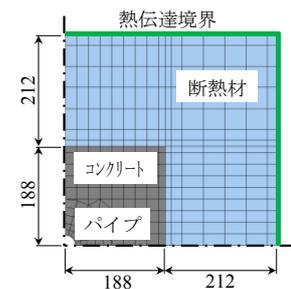
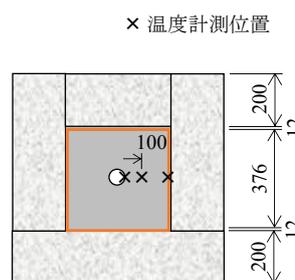


図-3 解析モデル

(2) コンクリートおよび断熱材の熱特性

パイプを設置せず冷却を行わなかった供試体での試験結果を用い、逆解析によってコンクリートおよび断熱材の熱特性を求めた。その結果を表-3に示す。表中には、参考として標準的な値も併記したが、コンクリートの熱特性値の標準値は、コンクリート標準示方書[設計編]³⁾に示される値であり、断熱材に使用した発泡スチロールの熱伝導率の標準値は、コンクリート標準示方書[設計編]²⁾に示される熱伝達率の参考値から算出したもので、外気にふれる面の熱伝達率 6W/m²°C (シート) と発泡スチロール (厚さ 50mm) +シートの熱伝達率 2W/m²°Cを用い、修正熱伝達率の式³⁾から逆算したものである。

逆解析に用いたコンクリートの断熱温度上昇式は、日本コンクリート工学会の提案¹⁾する式(1)を用いた。ここに、tは材齢(日)、Q(t)は材齢t日までの断熱温度上昇量(°C)、Q_∞は終局断熱温度上昇量(°C)、rは断熱温度上昇速度に関する係数、t_{0,Q}は発熱開始材齢(日)である。

$$Q(t)=Q_{\infty}[1-\exp\{-r(t-t_{0,Q})\}] \quad (1)$$

表-3 コンクリートおよび断熱材の熱特性の推定値

		断熱温度上昇式		水和発熱モデル		標準値(参考)		
		水冷	空冷	水冷	空冷	水冷	空冷	
コンクリート	打込み温度(°C)	33.2	16.8	33.2	16.8	33.2	16.8	
	密度(kg/m ³)	2330		2330		2330		
	比熱(kJ/kg°C)	1.22		1.13	1.14	1.15		
	熱伝導率(W/m°C)	2.7		2.7		2.7		
	水和発熱特性	Q _∞ (°C)	55.3	55.9	岸モデル ⁴⁾		60.3	61.9
		r	4.38	1.99			2.97	1.75
t _{0,Q} (日)		0.104	0.214	0			0	
断熱材	初期温度(°C)	34.0	11.4	34.0	11.4	34.0	11.4	
	密度(kg/m ³)	34		34		34		
	比熱(kJ/kg°C)	1.25		1.25		1.26		
	熱伝導率(W/m°C)	0.0741		0.0741		0.15		
	熱伝達率(W/m ² °C)	14.0	7.6	14.0	7.6	14	8	

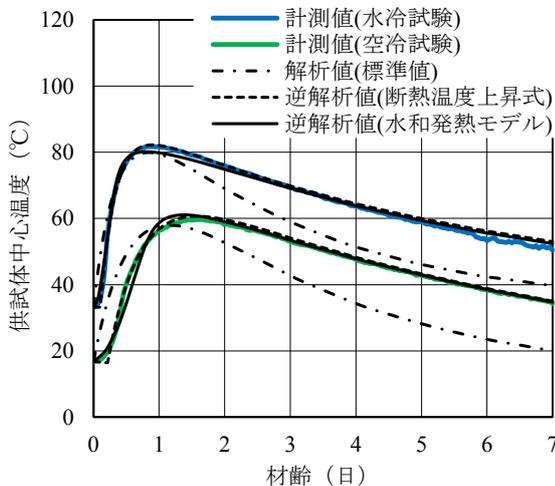


図-4 無冷却供試体における計測値と解析値の比較

水和発熱モデルは、岸らが提案する複合水和発熱モデル⁴⁾を使用した。本モデルは、セメントの水和反応を構成鉱物ごとに記述し、鉱物組成の違いとして表現した水和発熱モデルであり、鉱物反応ごとに異なる温度依存性を反映して、任意の温度履歴に対応したものである。

計測値と解析値の比較を図-4に示す。断熱温度上昇式および水和発熱モデルを用いた逆解析値と計測値は非常に良く一致しており、精度よく逆解析が行われていることがわかる。また、標準値を用いた解析では、最高温度に達するまでの昇温過程は一致するが、降温過程が異なることがわかる。

(3) パイプ壁面での熱伝達率

パイプクーリング供試体での試験結果を用い、逆解析によってパイプ壁面での熱伝達率を求めた。コンクリートおよび断熱材の熱特性は、表-3に示す推定値を用いた。

水冷試験における熱伝達率の推定結果を図-5に示す。図中の実線は、田辺らが提案する熱伝達率と流速の関係⁵⁾で、式(2)で表される。ここに、hはパイプと水との境界における熱伝達率(kcal/m²h°C)、uは水の流速(cm/s)である。

$$h=4.75u+43.0 \quad (2)$$

水冷試験におけるパイプ壁面での熱伝達率は、断熱温度上昇式を用いた場合で 337W/m²°C、水和発熱モデルを用いた場合で 159W/m²°Cと推定され、水和発熱モデルを用いた方が小さい値を示した。これは、水和発熱モデルが温度依存性を考慮したもので、放熱に伴う温度低下に対応しているためと考えられる。また、田辺の式との比較では、水和発熱モデルを用いた方が比較的近い値を示

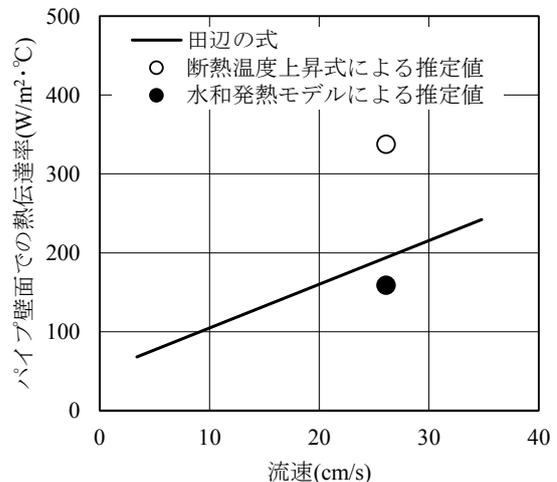


図-5 水冷試験における熱伝達率の推定結果

した。ただし、計測値と解析値の比較を図-6 に示すが、いずれの発熱特性を用いた場合でも、田辺の式から得られる熱伝達率を用いた場合との差は小さく、ピーク温度で2~3℃の差である。このことから、温度解析に使用するパイプと水との境界の熱伝達率については、田辺の式が適用できることが確認できた。

空冷試験における熱伝達率の推定結果を図-7 に示す。図中の破線は、コンクリート標準示方書[設計編]³⁾に示される、コンクリートの露出面における熱伝達率の参考値から算出したもので、風速 2~3m/s の場合は 12~14W/m²℃で、風速 1m/s 当たり 2.3~4.6W/m²℃程度増加するという条件を満足する範囲を示したものである。三厨ら⁶⁾は、空気を用いたパイプクーリングでは、このコンクリート露出面における熱伝達率と風速の関係が適用できるとしている。

空冷試験におけるパイプ壁面での熱伝達率は、水和発熱モデルを用いた場合に比べて、断熱温度上昇式を用いた場合に大きな値を示し、水和発熱モデルを用いた場合

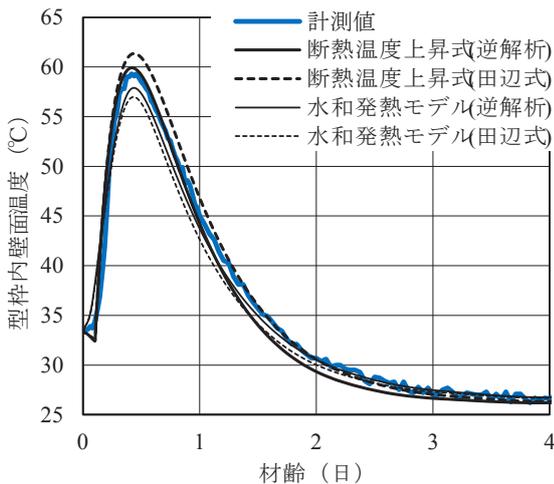


図-6 水冷試験における計測値と解析値の比較

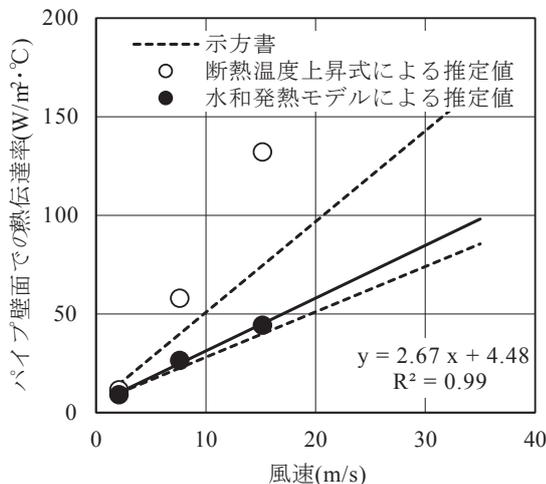


図-7 空冷試験における熱伝達率の推定結果

には示方書での参考値の範囲内にあるが、断熱温度上昇式を用いた場合には大きく外れる結果となった。これは、水冷試験での結果と同様で、水和発熱モデルが温度依存性を考慮したもので、放熱に伴う温度低下に対応しているためと考えられる。このことから、パイプクーリングの温度解析では、クーリングによる温度変化も考慮する必要があり、特に温度依存性を考慮した水和発熱モデルを適用する必要があるものとする。

また、今回の試験で得られた、パイプと空気との境界における熱伝達率 h_{air} (W/m²℃)と風速 u_{air} (m/s)の関係は式(3)で表され、コンクリート標準示方書に示される、コンクリート露出面での熱伝達率と風速の関係が適用できることが確認できた。

$$h_{air}=2.67u_{air}+4.48 \quad (3)$$

(4) クーリング温度や流量が冷却効果に及ぼす影響

パイプ中を流れる水や空気の温度や流量がコンクリートの冷却効果に及ぼす影響を確認するために感度解析を行った。コンクリートや環境条件は水冷試験と同様とし、コンクリートの水和発熱特性は、岸らが提案する複合水和発熱モデル⁴⁾を使用した。また、解析モデルは図-3 を使用し、パイプ壁面での熱伝達率は式(2)および式(3)を用いて算出した。

パイプクーリングにおける水の温度と流速がコンクリートの冷却に及ぼす影響を図-8 に、空気の温度と流速がコンクリートの冷却に及ぼす影響を図-9 に示す。なお、ここでの内壁面は図-2 における型枠の内壁面を指す。

この結果から、水や空気の温度が低いほど、また流量が多いほど、冷却効果は高くなることがわかる。ただし、

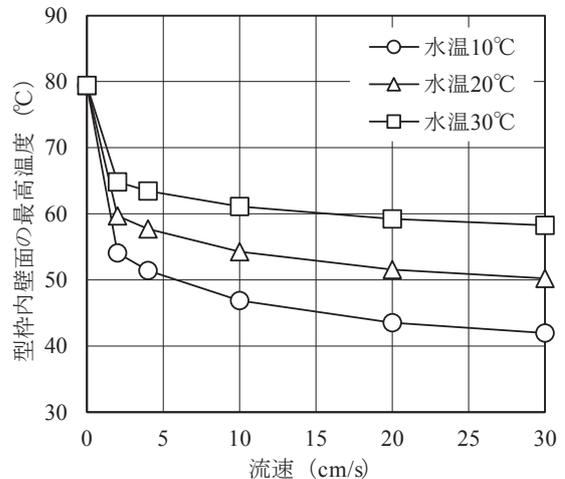


図-8 パイプクーリングにおける水の温度と流速がコンクリートの冷却に及ぼす影響

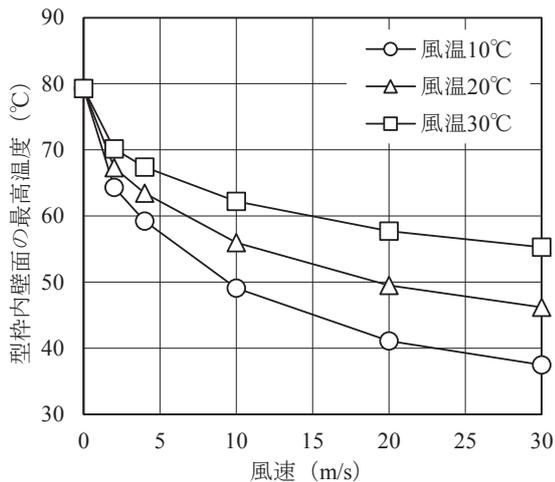


図-9 パイプクーリングにおける空気のと風速がコンクリートの冷却に及ぼす影響

流量については、ある程度以上の流量で効果が頭打ちになる傾向があり、それは水冷において顕著である。前述の水冷試験では、パイプ壁面での熱伝達率が大きく変化しても、効果に大きな差が生じない結果が得られたが、この頭打ち現象が影響していることが考えられる。

3. パイプクーリングの自動制御に関する検討

パイプクーリングの運転条件は、一般に事前の温度応力解析によって決定されるが、その際に想定した物性値や環境条件が施工時になって変化した場合には、計画した制御効果が得られない可能性もあり、水や空気の温度や流量の調整が必要になることもある。

そこで、より迅速かつ確実な制御を目指し、パイプクーリングの自動制御について検討を行った。

(1) パイプクーリング水温自動制御装置の試作

より一般的な水を用いたパイプクーリングを対象とすれば、前述の感度解析の結果からも明らかなように、流量の効果には頭打ちがあり、流量よりも水温を制御した方が効率は良い。そこで、装置の単純化も考慮し、パイプクーリングの水温を自動制御する装置を試作した。装置の概要図を図-10に示す。

本装置は、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装置である。その特徴としては、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制御効率のよい水温制御を採用した、③常温水に低温水を混合する、電動混合3方調節弁を用いた冷水混合方式による水

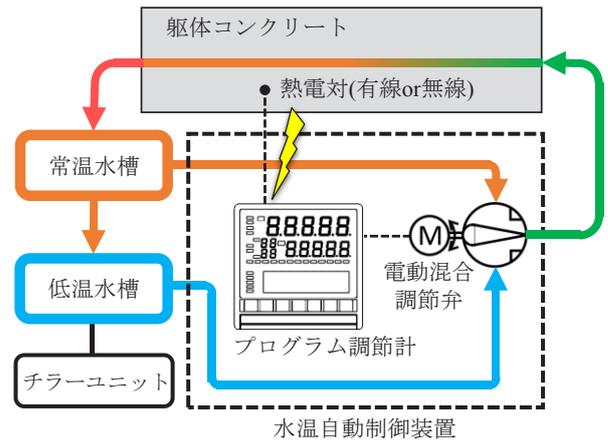


図-10 パイプクーリング水温自動制御装置の概要図

温制御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、④躯体コンクリートの温度が最高温度に到達した後は、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、などが挙げられる。

一方、本装置を適用する上での留意点としては、水温の調節幅を確保する必要がある、常温水と低温水の温度差が小さくなる冬期は適用が困難である。また、設計段階では常温水でのクーリングを前提とする。

(2) 試作装置の性能確認試験

試作したパイプクーリング水温自動制御装置の性能確認試験を行った。供試体は図-2を使用し、温度計測位置も同一とした。低温水の温度は10°C、冷却水の流量は15 l/minに設定した。試験状況を写真-1に示す。

供試体の温度計測結果を図-11に示す。図中の赤線は型枠内壁面における設定温度で、この温度をもとに通水温度の制御を行う。すなわち、型枠内壁面における温度が、この設定温度を超えると低温水が混合され、通水温度が低下することになるが、最高温度到達後は過冷却を防止するために最高温度を維持する設定としている。

計測結果を見ると、型枠内壁面での温度が設定温度を上回ると通水温度が低下し、設定温度を下回ると通水温度

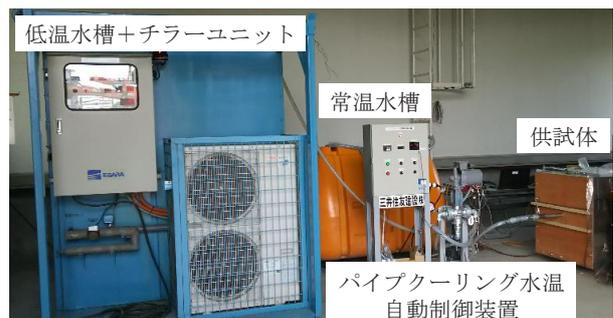


写真-1 試験状況

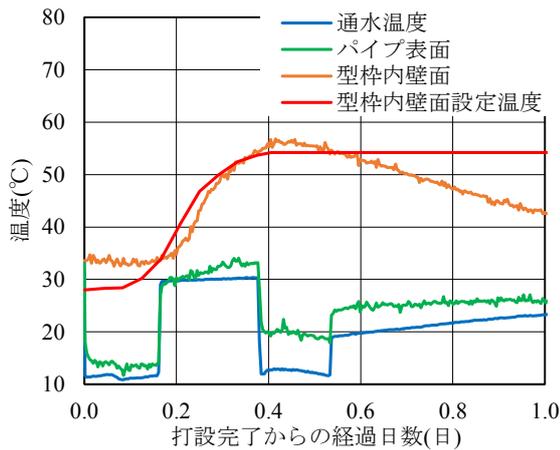


図-11 供試体の温度計測結果

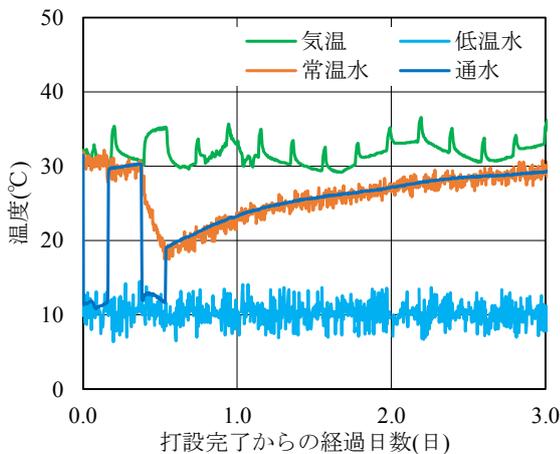


図-12 気温と水温の計測結果

度が上昇していることがわかる。このことから、装置は正常に動作しており、自動制御の可能性が確認できる。一方、設定温度を超えた段階で通水温度が下がるため、実際の温度は設定温度よりも少し高くなるのがわかる。そのため、設定温度は目標温度よりも小さく設定する必要がある。その程度については、諸条件によって異なると考えられるが、 -5°C 程度と考える。なお、今回の試験では、前述の水冷試験での計測値(図-6)から 5°C を差し引いた値を設定値としている。

また、気温と水温の計測結果を図-12に示すが、設定温度以下で、最高温度に達した後は、常温水の循環によって通水温度が徐々に上昇する傾向を示し、過冷却を防止する効果が確認できた。

4. まとめ

今回得られた知見を以下に示す。

① パイプクーリングにおける解析精度の向上を目的として、パイプ壁面での熱伝達率について試験を行った結果、パイプと水との境界の熱伝達率については田辺の式⁵⁾が、パイプと空気との境界における熱伝達率に

については、コンクリート標準示方書[設計編]³⁾に示される、コンクリート露出面での熱伝達率と風速の関係が適用できることが確認できた。なお、今回の試験で得られた、パイプと空気との境界における熱伝達率 h_{air} ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$)と風速 u_{air} (m/s)の関係は次式で表される。

$$h_{\text{air}}=2.67u_{\text{air}}+4.48$$

② パイプクーリングの感度解析を行った結果、水や空気の温度が低いほど、また流量が多いほど、冷却効果は高くなることがわかった。ただし、流量については、ある程度以上の流量で効果が頭打ちになる傾向があり、それは水冷において顕著である。したがって、水を用いたパイプクーリングの場合、流量よりも水温を制御した方が効率は良い。

③ 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装置を試作し、その性能確認試験を実施することによって、自動制御が可能であることを実証した。今回試作した装置の特徴は、常温水に低温水を混合する、電動混合3方調節弁を用いた冷水混合方式による水温制御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ところにあるが、水温の調節幅を確保する必要があり、常温水と低温水の温度差が小さくなる冬期は適用が困難である。また、設計段階では常温水でのクーリングを前提とすることに留意する必要がある。

参考文献

- 1) コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008, 2008.11
- 2) 小坂寛巳, 山口正晃, 竹内 光, 樋口正典：張出し式PC橋りょう柱頭部への高流動コンクリートの適用, コンクリート工学, Vol.33, No.6, pp.36-43, 1995.6
- 3) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書[設計編], 2012
- 4) 岸 利治, 前川宏一：ポルトランドセメントの複合水和発熱モデル, 土木学会論文集, No.526, V-29, pp.97-109, 1995.11
- 5) 田辺忠顕, 山川秀次, 渡辺 朗：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達率の決定ならびに冷却効果の解析, 土木学会論文報告集, 第343号, pp.171-179, 1984.3
- 6) 三厨晋也, 小坂寛巳, 山口正晃, 吉田光男：PC鋼線用シースを利用した空気によるパイプクーリング工法, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.17, No.1, 1995