

パイプクーリングにおける水温自動制御装置の開発

三井住友建設(株)	正会員	○ 葦	哲義
三井住友建設(株)	正会員	樋口	正典
三井住友建設(株)		原	勝哉
三井住友建設(株)		村尾	光則

Abstract : 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 greatly varies depending on material, 2) It is necessary to consider the temperature dependence of heat of hydration of cement. In the automatic control of the pipe cooling, a prototype device was developed to automatically control the water temperature of pipe cooling based on temperature of the placed concrete. Its characteristic is a method of instantly adjusting the water temperature by mixing low temperature water and normal temperature water, and demonstrated that automatic control is possible in laboratory test.

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。一般的な温度ひび割れ対策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の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構造物内に配置されたパイプ内に、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。一般的には、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、コンクリート温度の計測データを参考として、技術者が手動で温度や流量などを調整する方法もある。しかし、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。また、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。

本研究では、パイプクーリングにおけるより確実な温度ひび割れ制御を目指し、その自動制御について検討を行った。まず、事前解析の精度向上を目的として、とくに重要な境界条件となるパイプ壁面での熱伝達率について検討を行った。解析精度の向上は、変動幅を抑え制御幅を確保するために重要となる。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、その検証試験を行った。

2. パイプクーリング試験

2.1 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あ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とくに重要となる、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-1のような供試体を用いて、パイプに水を流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の発泡スチロールで覆い断熱を行った。温度計測位置は、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。

試験条件を表-1に示す。パイプの材質を電縫鋼管、ポリエチレン管およびブレードホース（ポリ塩化ビニル）の3種類とし、通水流量は3~150 /minの範囲で3水準を設定した。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-2に示す。

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、図-2に示すように、長手方向に直交するコンクリート断面を1/4のみモデル化した。解析には、汎用の温度応力解析専用プログラムを使用し、共通の解析条件を表-3に示す。

2.2 電縫鋼管における熱伝達率

電縫鋼管（厚さ1.6mm）における熱伝達率の試験結果を図-3, 4に示す。図-3は、コンクリートの発熱特性に岸らが提案する複合水和発熱モデル¹⁾を用いた結果である。複合水和発熱モデルは、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

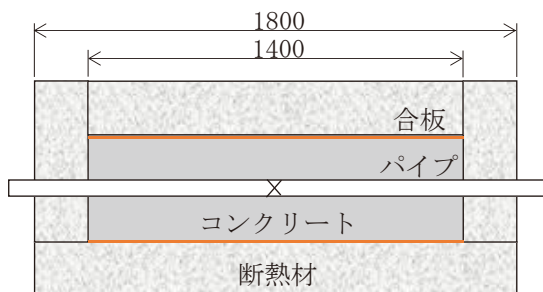


図-1 供試体の概要図

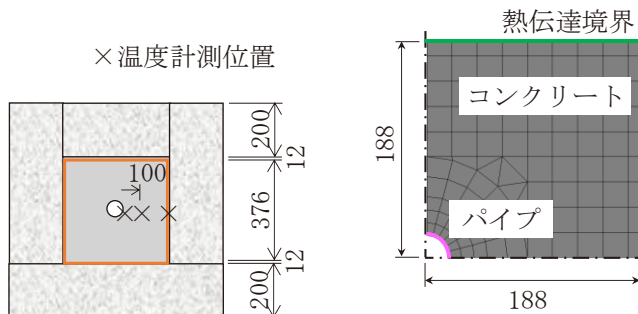


図-2 解析モデル

表-1 試験条件

配管		コンクリート 打込み温度 (°C)	冷却条件(実測値)		
種別	形状(mm) 外径×内径×厚さ		平均水温 (°C)	平均流速 (cm/s)	平均流量 (ℓ/min)
電縫鋼管	38.1×34.9×1.6	33.2°C	25.8	26.2	15.0
	28.6×25.4×1.6	12.9°C	9.6	10.1, 25.2, 47.6	3.1, 7.7, 14.5
ポリエチレン管	21.5×15.6×2.7	12.9°C	10.5	27.7, 69.4, 131.2	3.2, 8.0, 15.0
ブレードホース (ポリ塩化ビニル)	22.0×15.0×3.5	33.2°C	24.7	26.2, 68.0, 142.2	2.8, 7.2, 15.1

表-2 コンクリートの配合条件

呼び 強度	スランブ (cm)	Gmax (mm)	W/C (%)	s/a (%)	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

Gmax : 粗骨材の最大寸法 W/C : 水セメント比 s/a : 細骨材率

表-3 解析条件 (共通項目)

コンクリートの密度(kg/m ³)	2330
コンクリートの比熱(kJ/kg°C)	1.15
コンクリートの熱伝導率(W/m°C)	2.7

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。一方、図-4は、式(1)で表される日本コンクリート工学会の提案する断熱温度上昇式²⁾を用いたものである。ここに、 t は材齢(日)、 $Q(t)$ は材齢 t 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。また、図中の破線は、田辺らが提案する薄肉電縫管における熱伝達率と流速の関係³⁾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。

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

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

試験結果より、電縫鋼管(厚さ1.6mm)における熱伝達率と流速の関係は、使用する水和発熱モデルによって異なり、複合水和発熱モデルを使用した場合には、管径や温度履歴が異なっても同様な関係を示すが、断熱温度上昇モデルを使用した場合には、その関係が異なることが分かる。これは、複合

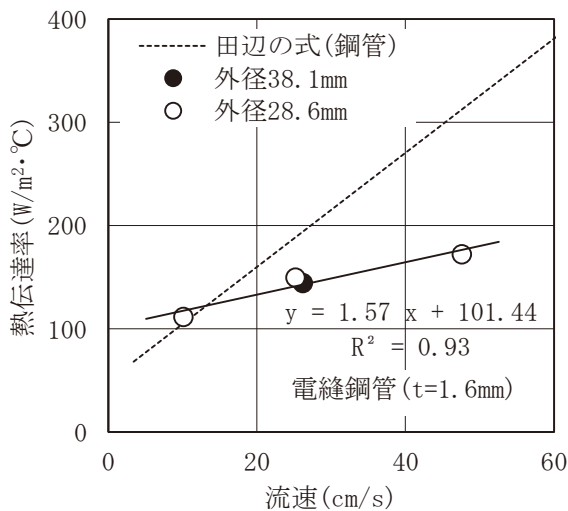


図-3 複合水和発熱モデルを用いた場合の熱伝達率と流速の関係

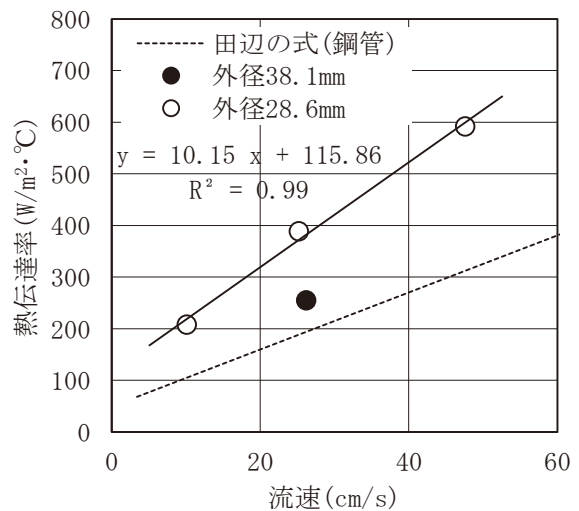


図-4 断熱温度上昇式を用いた場合の熱伝達率と流速の関係

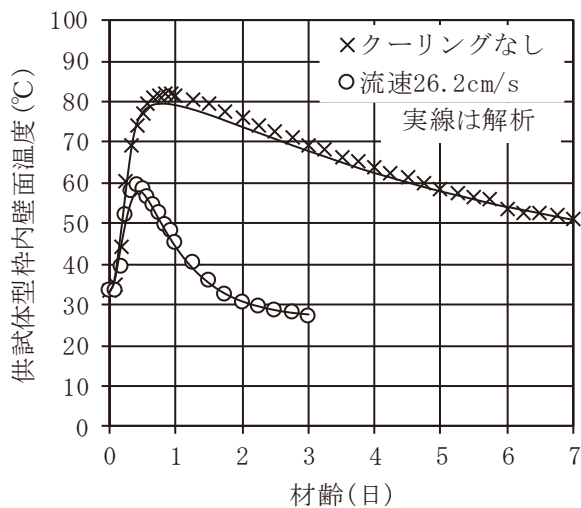


図-5 電縫鋼管(外径38.1mm)を用いた場合の計測値と解析値の比較

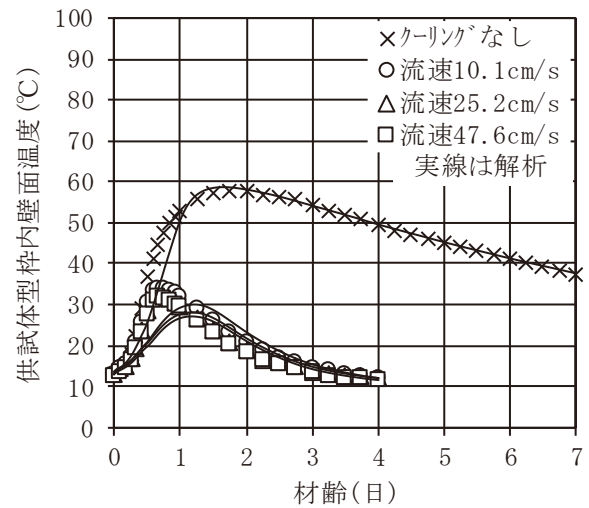


図-6 電縫鋼管(外径28.6mm)を用いた場合の計測値と解析値の比較

水和発熱モデルが温度依存性を有するのに対して、断熱温度上昇モデルは断熱状態における発熱を表すものであり、放熱などによる温度低下の影響が考慮されていないことが原因と考えられる。したがって、これまでも指摘⁴⁾があるように、放熱やパイプクーリングを伴う条件下では温度依存性を考慮した水和発熱モデルを使用する必要があると考える。なお、田辺式との比較では傾きが若干異なるが、その要因としては鋼管の厚さなどの影響が考えられる。

複合水和発熱モデルを使用した場合の計測値と解析値の比較を図-5, 6に示す。ここで、供試体型枠内壁面とは図-1における型枠の内壁面を指す。この結果から、複合水和発熱モデルを用いることによって計測値と解析値が比較的良く一致することが分かるが、コンクリートの打込み温度が低い場合に、温度上昇時の計測値と解析値に差が生じている。更なる解析精度向上を図る上には、実際に使用するコンクリートの発熱特性を使用する必要があると、現地における確認方法が今後の課題になると考える。

また、電縫鋼管(外径28.6mm)を使用した場合の計測結果をみると、型枠内壁面温度の最高値は、流速10.1cm/s(流量3.10 l/min)で34.1℃、流速25.2cm/s(流量7.70 l/min)で32.3℃、流速47.6cm/s(流量14.50 l/min)で31.9℃であり、流速が冷却効果に及ぼす影響は小さいことが分かる。ただし、実際の施工では配管が長くなることから通水に伴う水温上昇も考慮する必要があり、そのような場合には流速、すなわち流量についても配慮する必要があるものと考えられる。

2.3 パイプの材質が熱伝達率に及ぼす影響

材質の異なるパイプを用いた熱伝達率試験の結果を図-7に、ポリエチレン管およびブレードホースにおける計測値と解析値の比較を図-8, 9に示す。ポリエチレン管やブレードホースでは、電縫鋼管に比べ熱伝達率が小さく、流速の影響も小さいことが分かる。また、流速の影響は熱伝達率が大きいほど大きくなる傾向にある。今回の流量3~150 l/minの試験範囲で得られたポリエチレン管(厚さ3.5mm)およびブレードホース(厚さ3.5mm)の熱伝達率は、それぞれ55~62W/m²・℃および24~25W/m²・℃であった。熱伝達

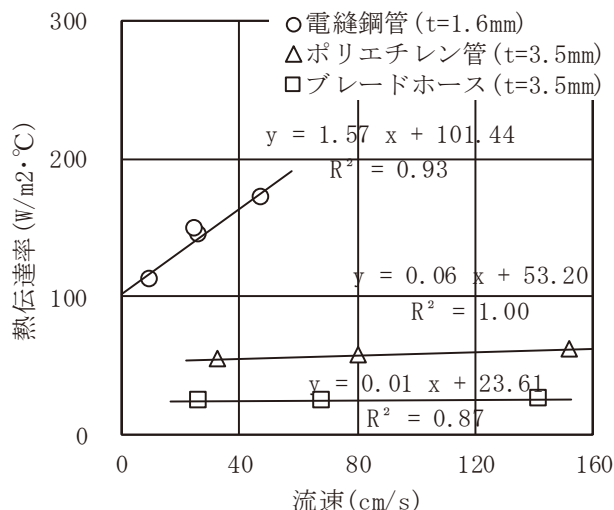


図-7 パイプの材質が熱伝達率に及ぼす影響

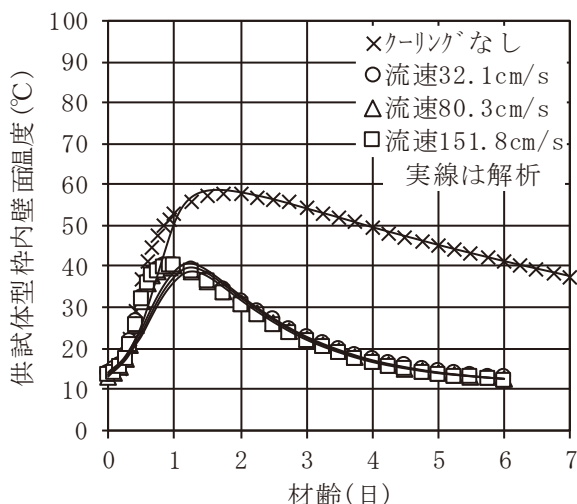


図-8 ポリエチレン管を用いた場合の計測値と解析値の比較

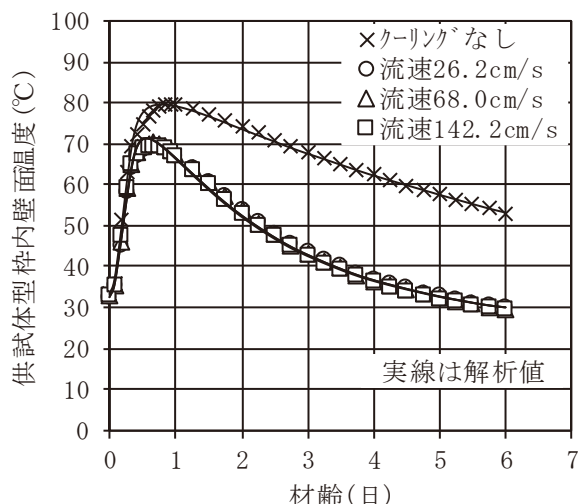


図-9 ブレードホースを用いた場合の計測値と解析値の比較

率は、流速の他に素材の熱伝導率や厚さによって変化するが、これらの結果はそれを裏付けるものであり、パイプ壁面での熱伝達率は材質によって大きく異なることが分かる。したがって、実際に使用するパイプの熱伝達率については、今回実施したような試験によって事前に確認しておくことが望ましいものとする。

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。

3.1 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、前述の結果からも明らかなように、流量の効果は小さく、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、躯体コンクリートの温度を計測し、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が、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。

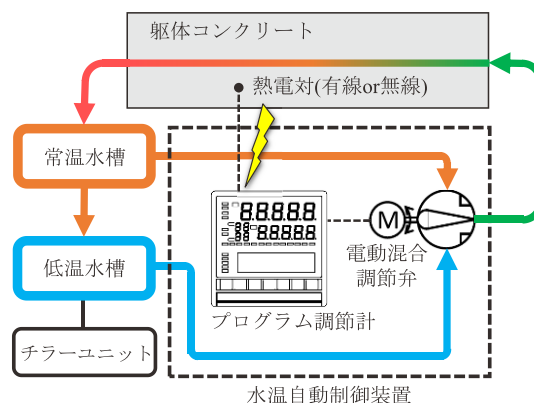


図-10 パイプクーリング水温自動制御装置の概要図

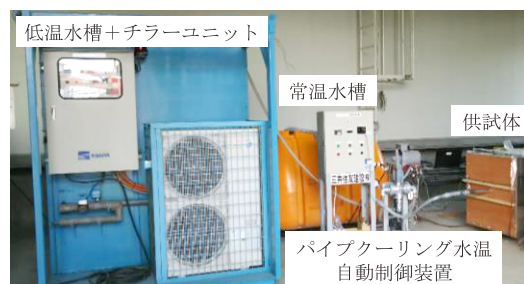


写真-1 試験状況

3.2 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-1を使用し、温度計測位置も同一とした。低温水の温度は10℃、冷却水の流量は150 /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。図中の型枠内壁面設定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が上昇していることが分かる。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分かる。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、前述の試験での計測値(図-5)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) 温度解析においてパイプクーリングの効果を適切に評価するためには、複合水和発熱モデルのような温度依存性を考慮した水和発熱モデルを使用する必要がある。
- 2) パイプ壁面での熱伝達率は材質によって大きく異なり、流速の影響は熱伝達率が大きいものほど大きくなる傾向にある。今回の通水流量 $3\sim 150$ /minの試験範囲では、電縫鋼管(厚さ 1.6mm)で $111\sim 172\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ 、ポリエチレン管(厚さ 2.7mm)で $55\sim 62\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ 、ブレードホース(厚さ 3.5mm)で $24\sim 25\text{W}/\text{m}^2\cdot^{\circ}\text{C}$ の熱伝達率が得られた。
- 3) 今回使用したパイプの種類および通水流量 $3\sim 150$ /minの範囲では、流速が冷却効果に及ぼす影響は小さいことが分かった。
- 4) 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) 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
- 2) 土木学会: 2012年制定 コンクリート標準示方書[設計編], 2012
- 3) 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
- 4) 内田清彦, 榊原弘幸, 斉藤豊: 積算発熱量に基づくセメントの水和発熱速度の定式化と温度上昇の予測, コンクリート工学, Vol. 24, No. 4, pp. 105-113, 1986. 4

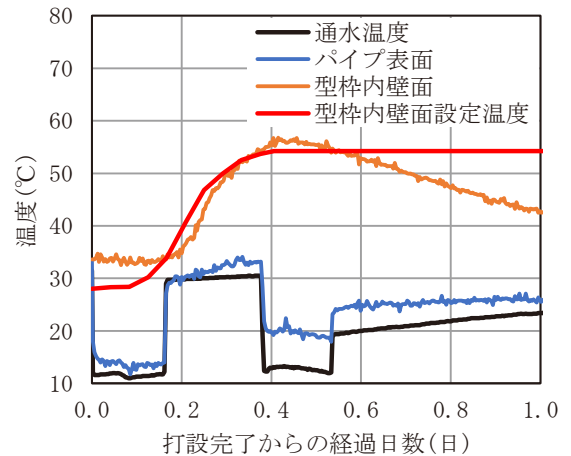


図-11 供試体の温度計測結果

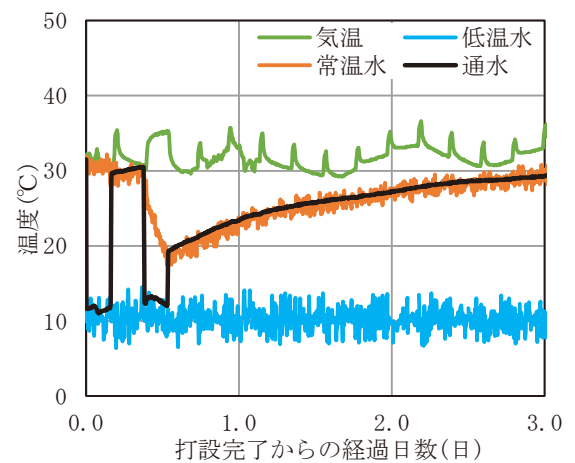


図-12 気温と水温の計測結果