

マスコンクリートのパイプクーリングにおける 流量制御システムの開発

Development of Flow Control System for Pipe Cooling for Mass Concrete

齋藤隆弘* 川口昇平* 外木場康将**

要 旨

マスコンクリートのひび割れ制御方法の一つであるパイプクーリングについて、クーリング水の流量をコンクリート温度に応じて制御するシステムを開発した。本システムでは、ひび割れ抑制を目的として事前に行った解析により算出したコンクリート温度変化に追従するようにクーリング流量を自動で制御し、さらにクーリング水の温度上昇によるコンクリートの冷却効果の損失を解消するために、クーリング水の流方向を逆転できるようにした。

また、本システムの実施工への適用性を確認するため、実規模のコンクリート供試体について、コンクリート打設後 1 週間にわたり本システムを適用したパイプクーリングを実施した。その結果、システムが想定通りに稼働することを確認するとともに、ひび割れ抑制に効果的なコンクリート温度に制御することができた。

キーワード：マスコンクリート、パイプクーリング、流量制御、流方向制御

1. まえがき

マスコンクリートの施工では、所要の性能および機能を有するコンクリート構造物を構築するため、セメントの水和熱による温度ひび割れについて検討を行ったうえで、適切な対策が講じられる。温度ひび割れを抑制あるいは制御する方法としては、ひび割れ誘発目地、パイプクーリング、膨張コンクリートの使用、ひび割れ制御鉄筋の使用等があり、その効果と経済性を総合的に判断して対策が決められる。この中で、パイプクーリングは、水門、橋脚等数多くの施工実績^{例(1)}を有し、有効な手法の一つといえる。

パイプクーリングを適用する際には、クーリングパイプの位置、クーリング水の温度および流量をパラメーターとして変化させたFEMによる温度応力解析が行われ、パイプクーリング計画が作られる。また、温度応力解析では、ひび割れの発生が抑制できるコンクリートの温度履歴も求められる。

一般的なパイプクーリングは、定量のクーリング水を一定期間コンクリート中に配置された鋼管内に流すのみであり、ひび割れ抑制に最適なクーリング流量などのコントロールを行っているわけではない。一方、パイプクーリングにおいて、コンクリートの冷却効率はクーリング流量の影響を受ける²⁾ことから、クーリング流量を適宜変更することにより、コンクリート温度をひび割れ

抑制に適した温度履歴に追従させることが可能であると考えられる。また、コンクリートに埋設されるクーリングパイプの1系統あたりの延長が長いと、パイプ内でクーリング水が温められ、下流側での冷却効果が損なわれる。

このため、開発したパイプクーリング制御システムにおいては、パイプクーリングを適用した場合の温度応力解析を行い、有害なひび割れが発生しない発熱履歴を算出する。その結果に基づいたコンクリート温度制御位置の温度履歴から、クーリング実施中のコンクリート温度の管理目標値を設定する。管理目標値の設定フローを図-1に示す。クーリング実施時には、制御位置でのコンクリート温度と管理目標値の差分に基づきクーリング流量を制御することによって、コンクリート温度を効果的に制御した。さらに、パイプクーリング内の流方向を一定条件のもと逆転させることにより、クーリング水の温度差に起因する冷却効果の損失の解消を図った。パイプクーリングの実施フローを図-2に示す。

ここでは、奥村組技術研究所敷地内での実大規模の供試体を用いた施工実験により、開発したシステムの稼働状況および効果を確認したので結果を報告する。

2. パイプクーリング制御システムの概要

コンクリートのクーリング制御システムを図-3に示

*技術研究所土木研究グループ **東日本支社土木技術部

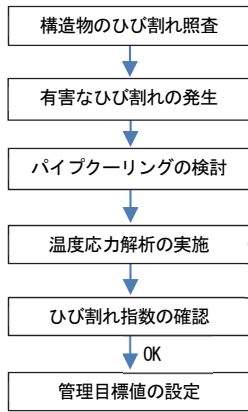


図-1 管理目標値の設定フロー

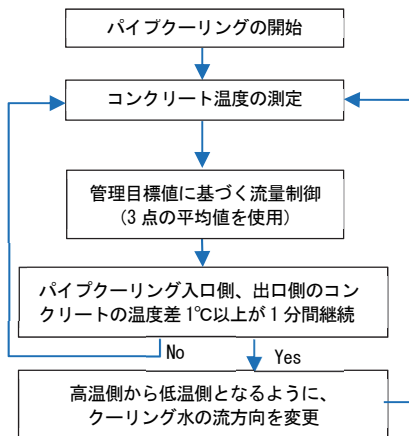


図-2 パイプクーリングの実施フロー

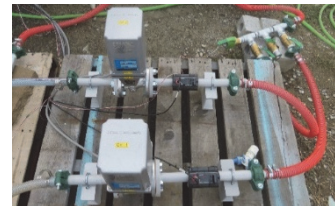


写真-1 流量コントロールバルブセット



写真-2 方向制御用バルブセット

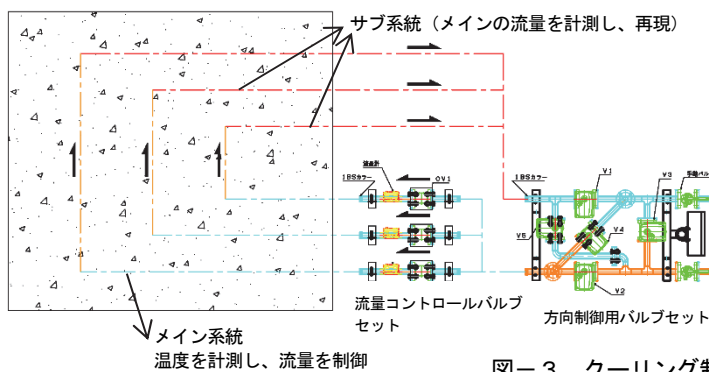
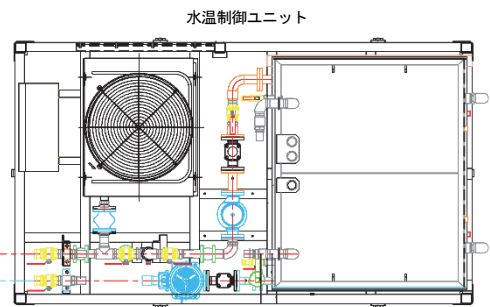


図-3 クーリング制御システム



水温制御ユニット

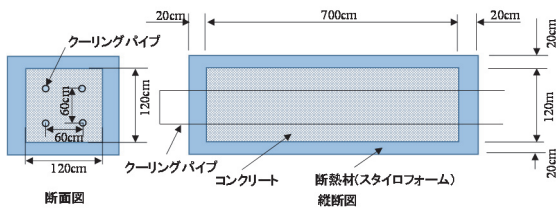


図-4 供試体と断熱材の寸法

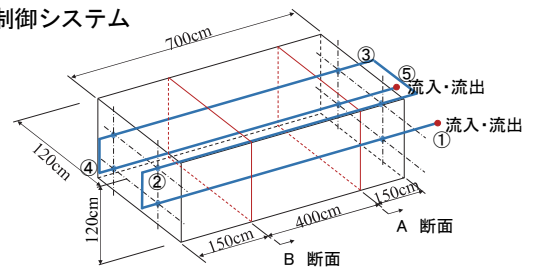


図-5 クーリングパイプの配置

す。クーリング水の温度を10～20℃に保つための水温制御ユニット、クーリング水の流方向を変える方向制御用バルブ、流量コントロールバルブ、制御用のPLC（シーケンサ）、コンクリート温度を測定する熱電対、から構成されている。クーリング制御システムの特長は下記の通りである。

水温制御ユニットを使用して冷却水の温度を管理するとともに、予定する流量が確保できるように、付属ポンプのインバーターにより水圧調整を行う。

メインシステムにおいてコンクリート温度のモニタリングを行い、あらかじめ実施したFEMによる温度応力解析の結果に基づき設定したコンクリート温度の管理目標値に漸近させるように、PID制御によりクーリング流量を制御する。流量の変更は、コントロールバルブを制御することにより行い、制御にはPLCを使用する（流量コントロールバルブセットは写真-1を参照）。

クーリングパイプ下流側のクーリング水の温度上昇による冷却効果の損失を防ぐため、コンクリート中のクーリングパイプの流入口と流出口近傍のコンクリート温度が所定の温度差以上になるとクーリング水の流方向を変える（方向制御用バルブセットは写真-2を参照）。

複数系統でクーリングを行う場合、制御系をシンプルにするため、サブシステムについては、メインシステムの流量を計測し、それを再現するように制御する。

3. 実規模施工実験

3.1 実験概要

a. 供試体および実験設備

パイプクーリングに使用した供試体と断熱材の寸法を図-4に、クーリングパイプの配置を図-5に、実験状況を写真-3に示す。試験体の大きさは120cm×120cm×

700cmである。試験体の周囲には、試験体表面の断熱のために厚さ20cmのスタイロフォームを配置した。クーリングパイプは、図-5に示すように断面内に4本配置し、パイプの間隔を60cm、パイプから供試体端部までの距離を30cmとした。クーリングパイプの仕様を表-1に示す。クーリングパイプの系統は、供試体内を通過するメイン系統に加え、サブ系統においてメイン系統の流量を再現できるかを確認するため、供試体外にダミーの配管を1系統配置した。

b. 計測値の配置

図-5に示すA断面、B断面にコンクリート温度測定用の熱電対を設置し、A断面には制御用の熱電対も設置した。A断面における計測器の配置を図-6に示す。図中の●はクーリングパイプの位置を示し、その他の○は熱電対の位置を示している。また、制御に使用した熱電対の位置は、クーリングパイプの入口側(制御-2)、中間(制御-3)、出口側(制御-1)のパイプ外縁から10cmの離隔とし、位置を○で示す。クーリング流量の制御については、上記の3点の平均値を使用している。熱電対および流量のデータは制御用に0.1秒ごとにサンプリングし、3分ごとにロガーに記録した。

流方向の制御に関しては、制御用の熱電対のうち、入口側(制御-2)、出口側(制御-1)の温度を採用し、その差が1℃以上となる状態が1分間継続したとき、流方向を逆転させる制御としている。

クーリング水のルートを下に示す(図-5参照)。すなわち、①から流入⇒供試体外⇒②から流入⇒供試体外⇒③から流入⇒供試体外⇒④から流入⇒⑤に流出⇒水温制御ユニットに流入、となる。クーリング水の流方向が逆転した場合は前述の流れの逆となる。クーリング水の温度を測る水温計は、供試体外側のクーリングパイプに、入口側と出口側、合計2箇所設置した。

c. コンクリート配合およびクーリング条件

コンクリートの配合は、単位セメント量349kg/m³、呼び強度33、スランブ15cm、最大骨材寸法20mmとした。クーリング期間は、コンクリートの発熱が収束する材齢7日までとした。クーリングの最大流量は30L/min、最低流量は0L/min(停止状態)とする。ただし、一定水圧をインバーターで作用させているので、コントロールバルブを全閉にするとシステムに過剰な負荷がかかる。それを避けるため、コンクリート外に別途設けたバイパス配管にクーリング水を流すことにより、クーリング流量を0L/minとしている。

d. 事前解析結果に基づく温度の管理目標値の設定

実験の管理目標値を設定するため、供試体をモデル化し、パイプクーリングを適用した温度解析により、打設から1週間の温度履歴を求めた。本解析では、パイプクーリングの流量・水温は一定であり、管理目標値との差分によって流量を制御する実際の状況とは異なる。ここ

で、実施工の場合はひび割れの検討を行うために温度応力解析を行うのに対して、本実験ではひび割れが生じる要因である外部拘束体が存在しないため、温度解析のみを実施した。解析条件は、実験時の平均的な流量を想定し、最大流量の50%の流量として15L/minを採用し、コンクリートの初期温度を20℃、クーリング水温を15℃、供試体外縁を断熱状態として、メッシュ間隔を5cmとした。クーリング実施時のパイプからの離隔ごとのコンク

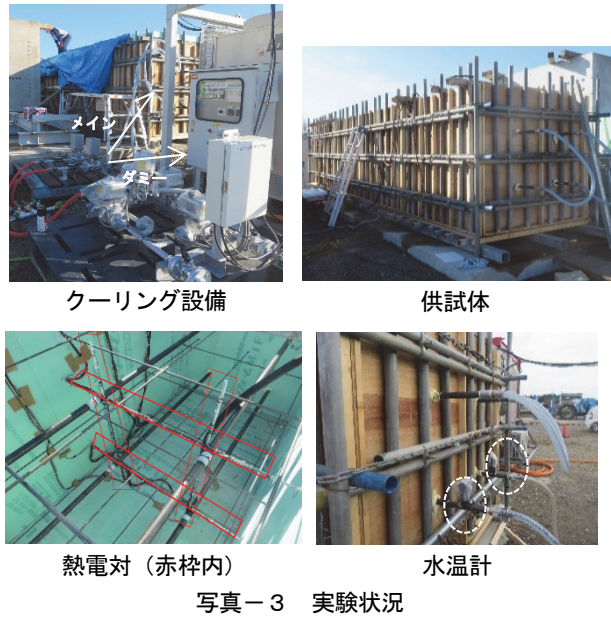


表-1 クーリングパイプの仕様

規格	配管用炭素鋼鋼管 JIS G3452
外径	34.0mm
内径	27.6mm
延長	28.0m

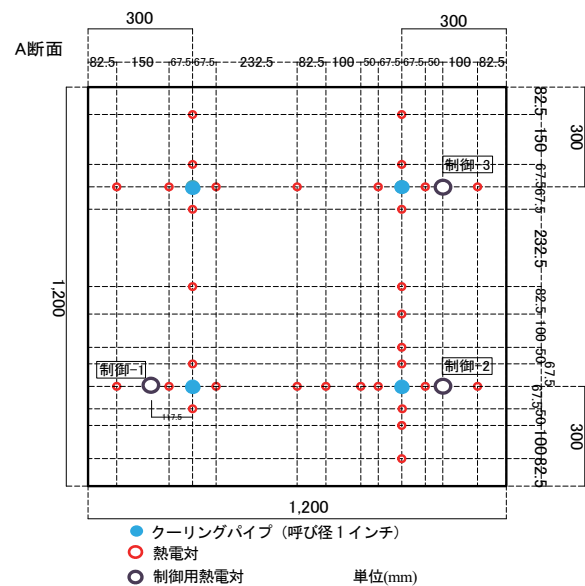


図-6 計測器の配置(A断面)

リート温度、温度の管理目標値、および比較のためにクーリングを行わない場合のパイプから10cmの位置における温度履歴を図-7に示す。温度のサンプリング位置は、図-6における右上のクーリングパイプより水平右方向である。クーリングを行わない場合、コンクリート温度の最高値は66.0℃となるのに対し、クーリングの実施により、最高値は55℃以下に抑えられている。

制御に用いる熱電対の位置は、パイプから近すぎるとクーリングパイプの温度の影響を過度に受け、遠すぎるとクーリング流量の変化に対する反応が遅延する。このため中間的な温度履歴の傾向を示す、パイプから10cmの位置を制御用の熱電対の位置とした。また、温度の管理目標値は、パイプから10cmの位置の解析結果を基準として設定し、概ね1日を1期間として温度を変更した。ここで、1期間における管理目標値は、その期間の解析結果の概ね平均値とした。ただし、発熱量が大きい、打設開始から24時間までは、パイプクーリングの冷却効果を最大とすることがひび割れ制御上好ましいことから、最大流量を確保するため、温度解析の結果より低い管理目標値(30℃)とした。

e. 流量制御方法

制御方法としてPID制御を用いている。PID制御は、使用したPLC(株キーエンス社製 KV-8000)に組み込まれた制御プログラムにより稼働させている。PID制御の理論式は式(1)の通りであり、目標値との偏差による比例制御を行う1項目に、目標値にフィットするために2項目の偏差の積分項を、フィットする時間を早めるために3項目の微分項を加えたものである。

$$q(t) = K_p(\Delta\Phi + \frac{1}{T_i} \int_0^t \Delta\Phi dt + T_d \frac{d\Delta\Phi}{dt}) \quad (1)$$

ここに、

- $q(t)$: 制御流量(L/min)
- K_p : 比例定数
- T_i : 積分時定数(ms)
- T_d : 微分時定数(ms)
- $\Delta\Phi$: 目標温度とコンクリート温度の差(℃)

式(1)におけるコンクリート温度は、前述したようにクーリングパイプの入口、出口、およびその中間位置近傍の3点のコンクリート温度の平均値を使った。各定数については、打設前の流水試験において次の手順で設定し、実験に適用した。

- ①比例定数 (K_p) : 3分程度で流量が収束する値(データをロガーに記録する間隔と同程度)を選定
 - ②積分時定数 (T_i) : 上記比例定数を用いた場合に、収束ズレがなくなる程度の値
 - ③微分時定数 (T_d) : 積分時定数の1/4
- PIDの時間刻み、各設定値の入力値を表-2に示す。

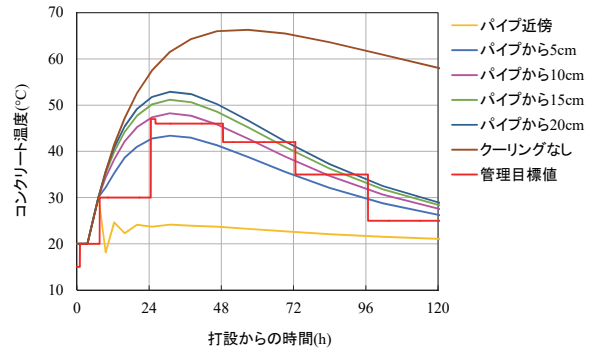


図-7 事前解析結果と管理目標値

表-2 PID制御の設定値

PIDの時間刻み	100 ms
K_p (比例定数)	0.025
T_i (積分定数)	2,000 ms
T_d (微分定数)	500 ms

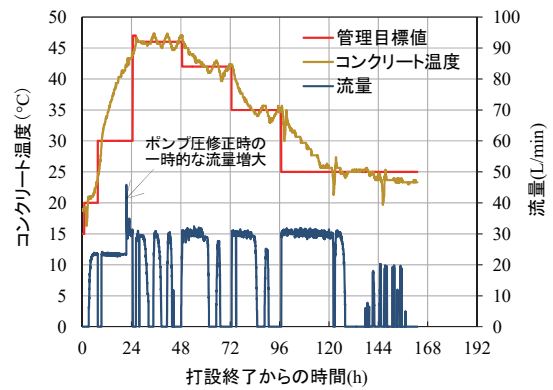


図-8 コンクリート温度と流量

3.2 実験結果

a. コンクリート温度に基づく流量・流方向制御

制御に使用した管理目標値と制御に用いた3点のコンクリート温度の平均値の温度変化、クーリング水の流量を図-8に示す。コンクリート温度の実測値と管理目標値の差分を指標としてクーリング水の流量を制御しているが、求められた流量が最大流量30L/minを越える場合は上限の30L/minに制御している。また、図からわかるように、打設開始から22時間までは、ポンプの圧力が不足したため最大流量に至っていない。しかしながら、ポンプ圧を正常に設定してからは、管理目標値とコンクリート温度の差分を指標として正常に流量制御が行われ、管理目標値前後にコンクリート温度が漸近するように制御できていることがわかる。

クーリングパイプ出入口部におけるクーリング水の温度(図-5の①と⑤で測定)を図-9に、図-6の制御-1と制御-2のコンクリート温度を図-10に示す。それぞれ、流方向の正送、逆送、バイパス運転の切り替え状況を併記している。図-9から、コンクリート内のクーリ

ングパイプ延長28m間で、クーリング水の入口側と出口側で2°Cから3°C程度の水温差が生じていることがわかる。ただし、図-9において、一時的に水温の急増、急減する箇所が複数存在するが、これは水温計が供試体外部にあるため、クーリング流量が停止もしくは極めて少ないときに、外気による冷却、コンクリートによる吸熱の影響を過剰にうけたためである。

また、図-10から、出口と入口のコンクリートの温度差が設定した1°C以上となったときに、正送と逆送の変更が行われており、この変更が正常に行われた結果、出口側と入口側の温度差は、最大でも2°Cの範囲に収まっている。このことから、パイプ内の流下のためにクーリング水の温度変化が生じた場合でも、流方向の制御により、コンクリートの冷却効果の損失を解消することが可能であることが確認できた。

図-11に打設終了後20時間から40時間におけるコンクリート内のメインシステムのクーリング流量とサブシステムの流量を示す。瞬間的に流量の変動がある場合を除き、両者がほぼ一致していることから、コンクリート温度による制御をしているパイプ内のクーリング流量がサブシステムに反映できることを確認した。

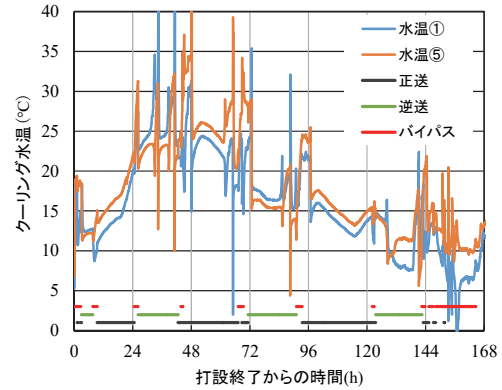
b. コンクリート内の温度分布

A 断面の、クーリングパイプが設置されている下から300mmの位置における水平方向の打設後12、24、55、78、105、120 時間の温度分布を図-12に示す。300mmと900mmの位置の温度はクーリングパイプ外縁部の温度であり、その他はコンクリートの温度を示す。この図から、クーリングパイプ外縁部の温度が最も低く、クーリングパイプから離れるにしたがってコンクリート温度が高くなっていることがわかる。また、水和反応による温度ピークにさしかかっている打設後24時間では、クーリングパイプ近傍（位置900mm）とコンクリート壁面近傍（位置1117 mm）の温度差は約26°Cになっている。一方、試験体中央部（位置600mm）では、時間の経過とともにコンクリート温度は上昇し、打設後55時間で最高温度を示し、その後徐々に低下している。

次に、A断面において、クーリングパイプが設置されている、図-6に示す右から300 mmの位置における鉛直方向の温度分布を図-13 に示す。図-12と同様に、高さ300mm と900mmの位置はクーリングパイプ外縁部の温度を示す。水平方向の温度分布と同様に、クーリングパイプから離れるにしたがってコンクリート温度は徐々に高くなっており、事前解析と同様の傾向を示す。

c. パイプクーリング制御システムによる制御結果

図-14に、事前実施した温度解析と実規模施工実験のコンクリート温度履歴の比較を示す。解析結果はパイプから10cm位置の結果であり、実験値は制御用3点の平均値である。材齢24時間以降の解析値と実測値の差の平均値の絶対値は、1.3°C、その標準偏差は1.0°Cであり、



※ 水温①と水温⑤は、図-5の①と⑤で測定

図-9 クーリング水温と流方向

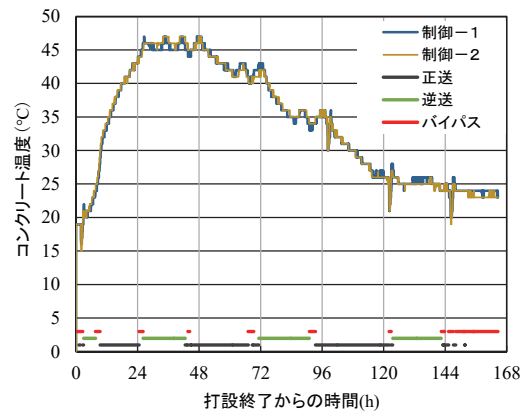


図-10 制御箇所のコンクリート温度と流方向

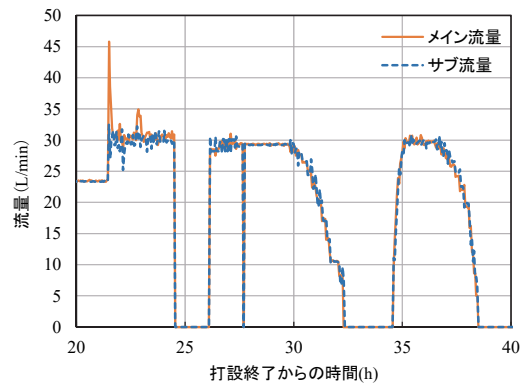


図-11 メイン流量とサブ流量の比較

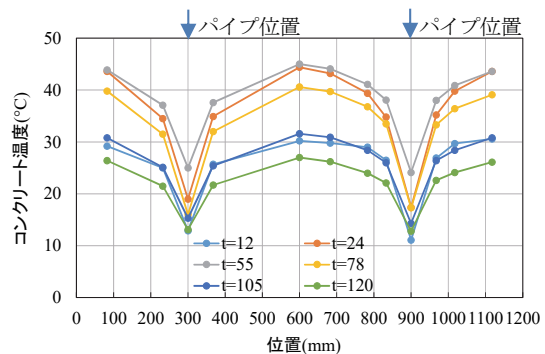


図-12 水平方向のコンクリート温度分布

解析と実験の温度履歴はほぼ一致しているといえる。このことから、コンクリート温度をフィードバックしたパイプクーリングの流量制御によって想定通りにコンクリートの温度制御が可能であることを示した。

4. まとめ

実大規模の供試体を用いた実験により、以下の事項を確認し、開発したパイプクーリング制御システムを現場で適用できる見通しが得られた。

- i. 事前解析によりコンクリート温度の管理目標値を設定し、コンクリート温度の実測値をフィードバックしてパイプクーリングの流量制御を適切に行うことで、想定通りのコンクリートの温度制御が実現できる
- ii. 流方向逆転機構を使用することにより、パイプ内の流下によってクーリング水の温度上昇が起きても、コンクリートの冷却効果の損失を解消できる
- iii. 制御対象とするメイン系統のパイプのクーリング流量をサブ系統に反映することで、システムを簡素化できる

5. あとがき

本実験の後、道路橋の下部工を築造する工事のフーチングコンクリートに、開発したシステムを適用してパイプクーリングを実施した(写真-4、写真-5)。本システムを用いたパイプクーリングにより、計画通りにコンクリート温度を制御でき、温度が十分に低下した埋め戻し前の材齢10日の時点でフーチングコンクリートに温度ひび割れ発生は確認されていない。本適用の詳細は、別途報告する予定である。

今後は、実規模施工実験および上記の現場適用で得られた知見をもとに、システムの完成度をさらに高めていきたい。

謝辞

本開発は、株式会社アクティオとの共同開発のもと実施した。また、本開発を進めるにあたり、東邦和博士、栗本雅裕博士には、開発メンバーとして多大なるご助力、ご助言をいただいた。ここに記して感謝の意を表したい。

【参考文献】

- 1) 山田浩平、齋藤隆弘、中村方紀、東 邦和、小原明彦、「水門床版コンクリート(躯体厚3m)の水平パイプクーリングの効果」、土木学会年次学術講演会、Vol.70、V-009、2015.8
- 2) 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導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

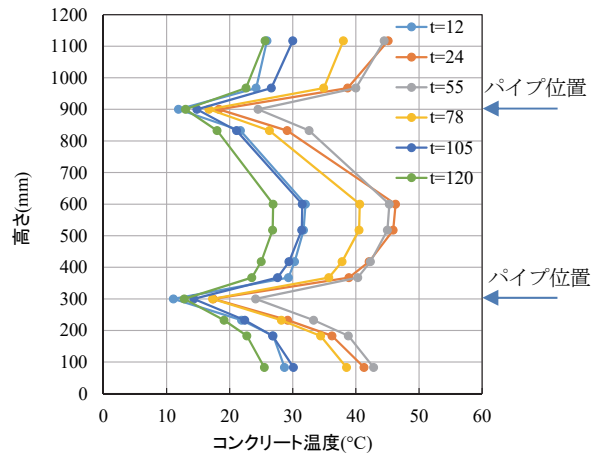


図-13 鉛直方向のコンクリート温度分布

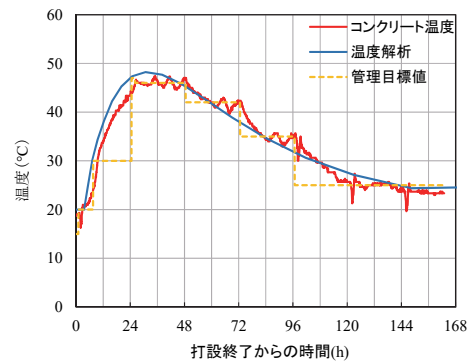


図-14 温度解析と実規模施工実験のコンクリート温度履歴の比較



写真-4 設備配置状況



写真-5 クーリングパイプ配置(躯体内)