

論文 低流速パイプクーリングの実大実験と効果の解析的検証

東 邦和*1・森田 修二*2

要旨: 近年, 適用の多い鉛直パイプクーリングを対象として, 低流速パイプクーリングの実大室内実験を行い, 熱交換率設定のための通水量と熱伝達率の関係を求めた。また, 汎用構造解析コード“FEAST”にパイプ延長方向の水温変化を考慮できる機能を構築し, これにより実験結果を精度よく表すことができた。さらに, 鉛直パイプクーリングの現場適用時のデータと, 構築した手法による解析結果の比較から解析精度を検証した。これにより, 低流速パイプクーリングに適用できる, クーリング水温のパイプ延長方向の変化や, 熱伝達率のモデル化を可能にし, 効果的なクーリング計画を行うための解析手法が得られた。

キーワード: 鉛直パイプクーリング, 温度応力解析, 熱伝達率, マスコンクリート, ひび割れ

1. はじめに

パイプクーリングは, コンクリート構造物の温度ひび割れ対策として, 従来から大規模なコンクリート構造物, 例えばコンクリートダムや大型橋脚基礎に適用されてきた。近年は, 一般のマスコンクリート構造物にもパイプクーリングの適用が増加してきている。パイプクーリングは, 初期材齢におけるコンクリート内部の最高温度を下げ, 内外の温度差を小さくすることで, ひび割れ低減を目的とする工法である。一方, パイプクーリング適用時における熱伝達率などの特性は, 十分には明らかになっていない。通常, 水平パイプクーリングで使用されるパイプは, $\phi 25\text{mm}$ 程度の薄肉鋼管が用いられ, 流速 $20\sim 60\text{cm/s}$ の例が多く, これらは研究事例がある¹⁾²⁾。しかし, 近年多用される鉛直パイプクーリング ($\phi 60\text{mm}$ 程度) は, $1\sim 18\text{cm/s}$ と低流速であり, 現場計測データを基にした研究事例が数例あるのみである。

そこで, 低流速で使用されるパイプクーリングを対象に, 室内実験によりクーリングの特性を検証した。また, 低流速の場合にもクーリング水温の変化が無視できない場合があるので, 水温変化が簡易な手法で考慮できる解析手法を構築した。室内実験と現場計測データにより解析精度を検証したので, それらの結果を報告する。

2. パイプクーリングの実験

2.1 パイプクーリング室内実験

(1) 実験概要

低流速パイプクーリングを対象に通水量と熱伝達率の関係を求め, クーリング水温の変化を検証するための実大室内実験を実施した。

使用材料と配合を表-1に示す。パイプクーリング試験体を写真-1に示す。鉛直パイプクーリングでは, 通

常, $\phi 60\text{mm}$ 程度のスパイラルシース管が用いられ, パイプの上部から供給ホースを底部まで差し込んで, 水を流出させて用いる。本試験体は, 鉛直パイプクーリングを模擬しているが, 長さを確保するために水平に設置している。

(2) 試験体と計測項目

試験体は, $300\text{mm}\times 300\text{mm}\times 10\text{m}$ の大きさであり, 断面中心にスパイラルシース管を設置した。計測位置 No.1~No.7 に, 温度計を設置している。試験体計測器設置位置を図-1に示す。それぞれの計測断面の計測器位置を図-2に示す。試験体は 28 日養生後, コンクリート周囲に設置した電熱シートで加温した。電熱シートは, 設定温度を制御装置により管理し, ヒーター温度 60°C 設定で加温した場合, 試験体の No.2~No.6 の各計測断面での温度の差は約 2°C 以内である。加温時のパイプ内水は満管状態であり, 加温終了時の各断面の水温は約 55°C で一定である。したがって, コンクリート中は, 外側のヒーターから, パイプ中の水温まで温度勾配をもって加温されている。

クーリング水は, 養生水槽の水温 $19.5\sim 20.5^\circ\text{C}$ の水を用い, 水中ポンプで通水した。通水量に対して, 水槽は十分な容量がある。通水は No.1 側から流入させているが, 逆方向から流入させても同様の温度測定結果を得ている。

表-1 使用材料と配合

セメント	高炉セメント B 種, 密度 3.04g/cm^3
細骨材	陸砂: 茨城県行方市産 砕砂: 栃木県佐野市会沢産
粗骨材	砕石: 茨城県つくば市産 $G_{\text{max}}20\text{mm}$
混和剤	AE 減水剤遅延形 I 種
配合	SL 12cm, W/C 54.5%, セメント C 306kg/m^3

*1 (株) 奥村組 技術研究所 博 (工) (正会員)

*2 (株) 奥村組 西日本支社土木技術部 工博

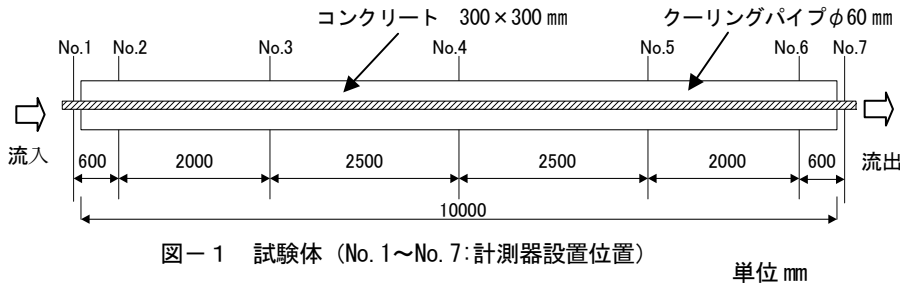


図-1 試験体 (No. 1~No. 7:計測器設置位置)

単位 mm

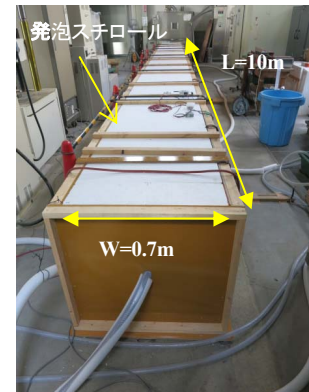
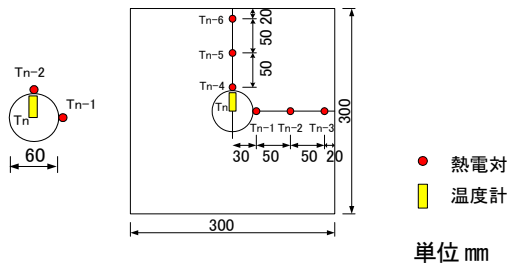


写真-1 パイプクーリング試験体



No. 1, 7 No. 2, 3, 4, 5, 6

図-2 計測断面の計測器設置位置

単位 mm

表-2 実験ケース

ケース No.	設定温度 (°C)	クーリング時の電熱ヒータ	流量 (L/min)	流速 (cm/s)
1-1	60	無し	30	17.7
1-2			20	11.8
1-3			10	5.9
1-4			5	2.9
1-5			3	1.77
1-6			2	1.2
2-1	60	有り	30	17.7
2-2			20	11.8
2-3			10	5.9
2-4			5	2.9
2-5			3	1.77
2-6			2	1.2

(3) 実験ケース

実験ケースを表-2に示す。温度設定は、60°Cとした。クーリング時のヒータとは、電熱シートでコンクリートを加熱しながら、クーリングを行うことである。これにより、コンクリート断面内では温度が定常状態になり、より正確な熱伝達率が算定される。

流量は、2~30 L/min の6水準に設定した。実際に鉛直パイプクーリングとして適用される場合の、流量範囲を選定している。この場合に、流速は1.2~17.7cm/sの範囲となる。

本試験体は、水平にパイプを配置しており、水平にクーリング水を流す場合の流量と管内の上下の温度分布については、別途試験体で測定している。5L/min以下の流速では、上下方向に水温分布が発生することから、熱伝達率の同定に際して、上部と中央部の温度差を考慮することによって、同じ熱伝達率が得られることを確認している。10L/min以上の流速においては、管内の上下の温度分布は生じていない。

2.2 実験結果

(1) 測定結果

クーリング水の水量は、流量計で管理している。流量はバルブで設定し、通水中の変動はない。

ケース 1-1, 流量 30L/min のパイプ流水の水温を図-3に示す。本ケースでは、クーリング開始前に、電熱シートの加温を停止している。温度計 No.1~No.7 でパイプ中の流水温度は上昇しており、通水開始から3.5時間経過後の No.1 と No.7 の温度差は約 1.5~1.1°Cである。中央計測断面 No.4 の計測点 T4-1~T4-6 のコンクリート温度の変化を図-4に示す。パイプに貼りつけた T4-1

と T4-4 では、57°Cからそれぞれ 25°C, 28°Cに急速に低下している。上部に位置する T4-4 の方が温度が高い。パイプから 50mm 離れた T4-2 と T4-5 では 38°Cに低下し、パイプから 100mm 離れた T4-3 と T4-6 では、42°Cに温度が低下している。

ケース 2-4, 流量 5L/min のパイプ流水の水温を図-5に示す。本ケースでは、クーリング中も電熱シートによる加温を継続している。8時間の測定中に温度計 No.1~No.7 でのパイプ中の流水温度はそれぞれ一定しており、温度分布は定常状態になっている。流量が小さいことから、通水開始から1時間経過後の No.1 と No.7 の温度差は約 8°Cである。中央計測断面 No.4 の T4-1~T4-6 のコンクリート温度の変化を図-6に示す。T4-1 と T4-4 では、上部に位置する T4-4 の方が温度が高い。パイプから 50mm 離れた T4-2 と T4-5 では 48°C, パイプから 100mm 離れた T4-3 と T4-6 では 54°Cの温度を示している。

(2) 熱交換率の算定

各断面 (No.1~No.7) において、コンクリート温度が 6 点 (T-1~T-6) と水温が 1 点 (パイプ中心) で測定されており、これらの測定結果からパイプクーリングにおける熱交換率 (パイプ表面の熱伝達率) を算定する。パ

イブからコンクリートへの熱移動量は式(1)、コンクリート内部の熱移動量は式(2)で表される。なお、コンクリート内部の熱移動は軸対称を仮定している。ここで、温度分布が平衡状態であると仮定すると、 $Q_1=Q_2$ が成立し、パイプクーリングの熱伝達率 α は式(3)で求められる。なお、コンクリート温度が変化する場合式(4)に示す単位時間あたりの温度変化 ΔT に対する補正值 ΔQ を加えればよい。

ケース 2-4 について式(3)から求めた熱伝達率を図-7に示す。断面（水平方向）ごとに求めた熱伝達率のクーリング中の経時変化を示している。断面によって幾分ばらつきはあるが、ほぼ安定した結果が得られた。

流量が 5~30L/min の実験結果（ケース 2-4~2-1）と流量が 2~3L/min の実験結果（ケース 2-6, 2-5）の流量と熱伝達率の関係を図-8に示す。図中には田辺式¹⁾で求まる熱伝達率も示した。各断面によってばらつきが大きい、近似式は流量 5L/min で区分した式(5)で表される。田辺式と比較して 2~3 倍の熱伝達率となっているが、田辺式とはパイプの径や材質、対象とする流速が異なることが原因と考えられる。

$$Q_1 = \alpha \times A_0 \times (T_1 - T_0) \quad (1)$$

$$Q_2 = \frac{2\pi \times \lambda \times (T_1 - T_2)}{\ln(r_1) - \ln(r_2)} \quad (2)$$

$$\alpha = \frac{1}{A_0 \times (T_1 - T_0)} \times \left\{ \frac{2\pi \times \lambda \times (T_1 - T_2)}{\ln(r_1) - \ln(r_2)} + \Delta Q \right\} \quad (3)$$

$$\Delta Q = \Delta T \times c \times \rho \times V \quad (4)$$

$$\alpha = 8.7 \times Q_w + 250 \quad (Q_w > 5) \quad (5)$$

$$= 30 \times Q_w + 143.5 \quad (Q_w < 5)$$

ここに、 Q ：熱流量(W), ΔQ ：補正熱流量(W)
 $T_1(Tn-1$ や $Tn-4)$, $T_2(Tn-2$ や $Tn-5)$ ：コンクリート温度(°C), T_0 ：水温(°C), α ：熱伝達率(W/m²°C)
 ΔT ：コンクリートの温度変化(°C/sec)
 A_0 ：パイプ単位長さあたりの表面積(m²)
 λ , c , ρ , V ：コンクリートの熱伝導率(W/m°C)
 比熱(J/kg°C), 単位体積質量(kg/m³), 体積(m³)
 r_1 , r_2 ：パイプ中心との離隔(m), Q_w ：流量(L/min)

3. 簡易解析手法

3.1 定式化

解析には、汎用構造解析コード”FEAST”を用いた。コンクリートとクーリング水の熱収支を図-9に示す。クーリング水はコンクリートから熱量 Q を吸収し、下流ほど水温が高くなる。水温変化を考慮したクーリング水温の算定式を式(6)~式(9)に示す。

クーリング水温は上流から累積するコンクリートとの

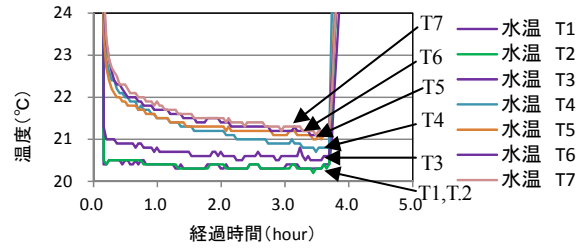


図-3 パイプ流水の水温（ケース 1-1, 流量 30L/min）

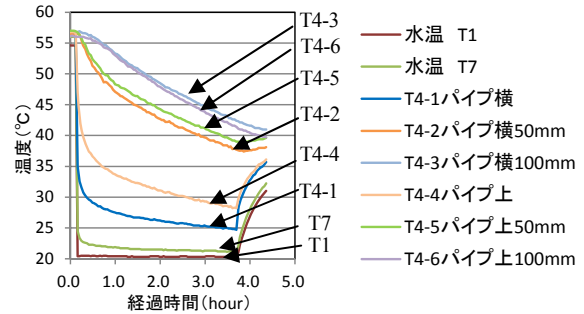


図-4 コンクリート温度（ケース 1-1, 流量 30L/min）（計測点：中央計測断面 T4-1~T4-6）

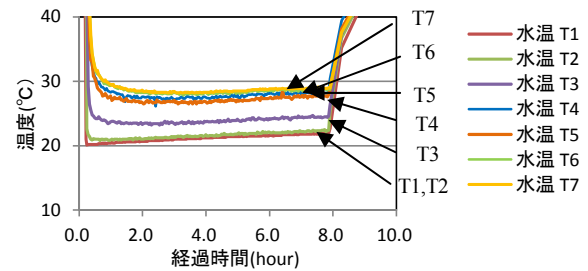


図-5 パイプ流水の水温（ケース 2-4, 流量 5L/min）

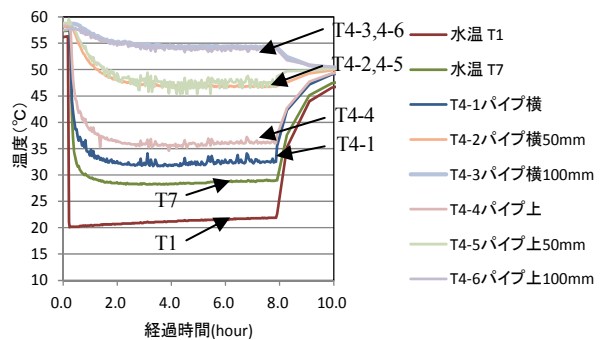


図-6 コンクリート温度（ケース 2-4, 流量 5L/min）（計測点：中央計測断面 T4-1~T4-6）

熱収支で決定する。タイムステップごとに式(6)により要素 i の次ステップ $n+1$ のクーリング水温を更新する。式(7)はタイムステップごとの水温変化、式(8)はステップ n における要素 i の上流要素の平均水温、式(9)は水温変化に寄与する水量を表している。式(6)はタイムステップごとに反復収束計算を行う。

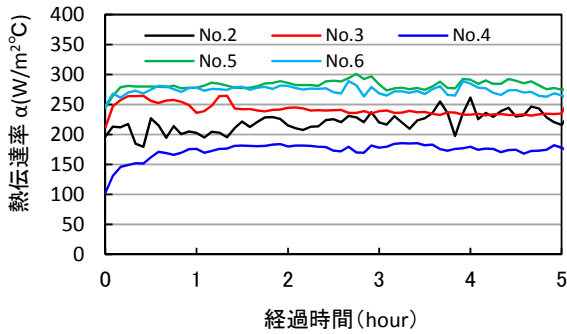


図-7 熱伝達率 (ケース 2-4, 流量 5L/min)

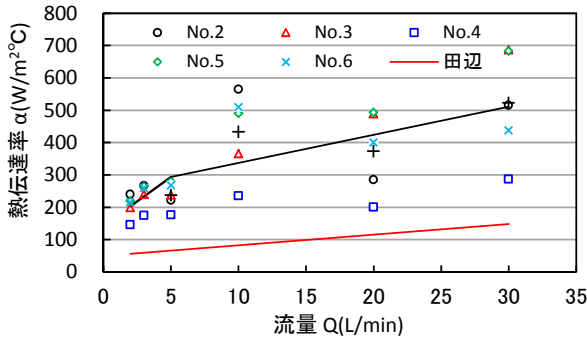


図-8 流量と熱伝達率の関係

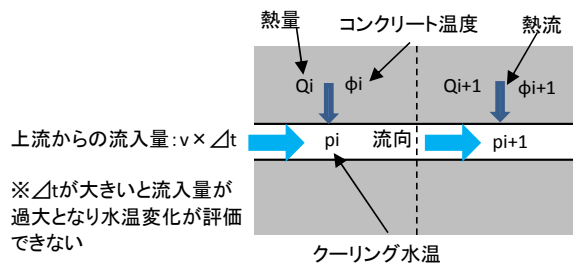


図-9 コンクリートとクーリング水の熱収支

$$p_i^{n+1} = p_i^n + \Delta p_i^n \quad (6)$$

$$\Delta p_i^n = \frac{\alpha(\phi_i^n - P_i^n)sl_i}{c\rho W_i} \quad (7)$$

$$P_i^n = \frac{\sum_{j=i}^{i-m} l_j p_j^n}{v\Delta t} \quad (8)$$

$$W_i = A(l_i + v\Delta t\beta_i) \quad (9)$$

ここに、 p : 水温(°C), Δp : 水温変化(°C)

ϕ : コンクリート温度(°C), v : 流速(m/sec)

l : クーリング要素長(m), s : 周長(m)

P : 要素 i の上流要素の平均水温(°C)

m : 1 ステップでクーリング水が流れる上流要素数

Δt : タイムステップ間隔(sec)

W : 水温変化に寄与する水量(m^3), A : 断面積(m^2)

β : 重み係数(パイプ全長に対する要素長 l の比率)

一般に、コンクリート内の熱伝導とクーリング水の熱流は熱移動の速度が大きく異なるため、コンクリート温度解析と同じタイムステップではクーリング水温の変化

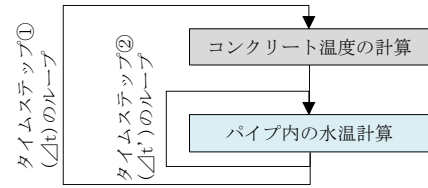


図-10 クーリング水温計算の内部ループ

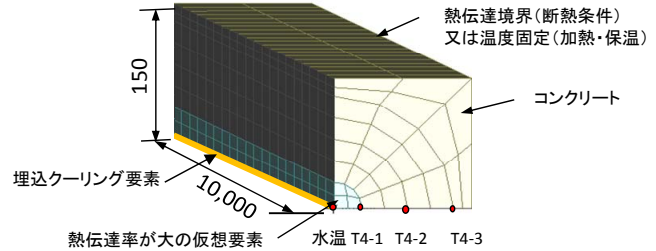


図-11 実験の解析モデル

が精度よく求められない。この問題は簡易手法に限らず FEM 解析にも共通することである。本手法では、図-10 に示すようにコンクリート温度解析のタイムステップ Δt に対して内部ループのタイムステップ $\Delta t'$ はクーラン数($=v\Delta t'/l$)を 2~3 に設定し、クーリング水温の計算を行う。この手法でコンクリートの温度解析も同じ短いタイムステップで計算した結果と一致することを確認している。

3.2 実験結果による検証

本実験をモデル化した FEM の解析モデルを図-11 に示す。対称性を考慮して 1/4 モデルとしている。パイプクーリングには、熱伝導性のよい仮要素(熱伝導率が十分高く、熱容量が十分小さい)を配置し、仮要素の中心に埋込みクーリング要素を配置した。外周の境界条件は、断熱材で保温した実験では熱伝達境界に設定し、電熱シートで温度一定に維持した実験では温度固定条件に設定した。

クーリング流量が $Q=5L/min$ における断熱保温条件(ケース 1-4)の実験結果および解析結果から、パイプ中の水温の経時変化を図-12 に、パイプ表面から 50mm 離れた位置のコンクリート温度の経時変化を図-13 に示す。上流から下流の計測位置 No.2~No.6 の温度の計測値と解析値の比較を示している。実線が計測結果、丸印が解析結果で同色が同じ位置の結果を表す。

図-12 は、クーリングパイプ中の水温の経時変化であり、計測ではクーリングを開始してから温度低下が解析結果と比較して早い。1 時間経過の時点で、下流端の水温 T6 は計測と解析では約 7°C の差がある。通水開始の初期はパイプ内の水温差が大きく、解析では考慮していないパイプ内の対流(攪乱)による熱分散で下流側の水温が早く低下している可能性がある。

一方、一定の時間が経過すれば上流と下流の温度差が縮減する状況など計測結果が解析でよく再現できている。

図-13 は、パイプ表面から 50mm 位置の結果を比較している。上流と下流の温度差はやや解析結果の方が大きいですが、クーリング開始から徐々に温度低下する状況が解析でよく再現できている。図-12, 13 の結果から、温度が急変する部分では差が見られ、簡易解析手法の課題と考えられる。しかし、コンクリートの温度は打設後に徐々に上昇し急激な変化は生じないことを考慮すると、本手法は実工事に十分適用できると考えられる。

4. 実証試験

4.1 現場計測

水門工事の堰柱部において測定したデータによる検証を行う³⁾。堰柱コンクリートは、幅 2.0m、高さ 8.15m、長さ 23.5m の壁体が、厚さ 2.0m の床版の上に打設されるという、ひび割れの抑制が難しい構造物である。

堰柱第 1 リフト（リフト高さ 2600mm）の計測器の配置を図-14 に示す。平面図は、床版から 1600mm 高さ位置である。熱電対はクーリングパイプ位置とパイプ 2 本の中間位置に設置した。

立面図は、リフトの幅中心位置である。パイプ位置の熱電対は、クーリングパイプ側面と、100mm 離れ位置を組みにして、床版から高さ 800mm（下段）、1600mm（中段）および 2400mm 位置（上段）に設置した。

クーリングは、打設翌日から 5 日間実施した。クーリング水温は 17~22℃であり、クーリング水量は、1 本当たり 12L/min である。

4.2 壁体解析モデルによる検証

床版コンクリートと堰柱第 1 リフトのパイプクーリングに挟まれた部分について、対称形状を考慮した 1/4 の解析モデルを図-15 に示し、解析条件を表-3 に示す。断熱温度上昇は、現場での断熱箱試験体から逆解析により求めた。

パイプ径 $\phi 60\text{mm}$ で流量 12L/min の時、流速は 7.1cm/sec になる。パイプの流入水温を 20℃、パイプの熱伝達率を、前章の結果から $350\text{W/m}^2\text{C}$ と設定した。

解析によるクーリングパイプ水温の経時変化を図-16 に示す。クーリングは、コンクリート打設 1 日後に開始しており、解析では開始直後に温度が急変するため、ややばらつきが生じる。パイプの下段（流入）、中段、上段（流出）の順に、コンクリートの熱を吸収して流出側の温度が高くなっている。水温上昇は 1.0℃以下であり大きな変化がないのは、クーリングパイプ長が 2.2m と短いためである。コンクリート温度が低下してくると、流入側と流出側の温度差がほとんどなくなる。

クーリングパイプ近傍（100mm）のコンクリート温

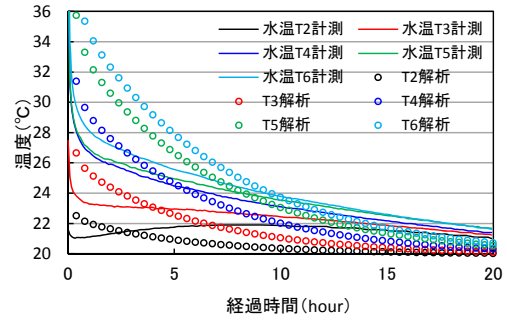


図-12 パイプ中の水温の経時変化

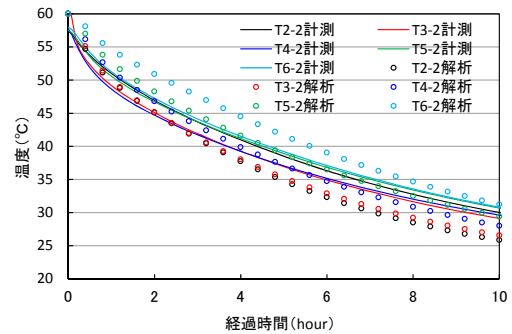


図-13 コンクリート温度の経時変化
(パイプ表面から 50mm 位置)

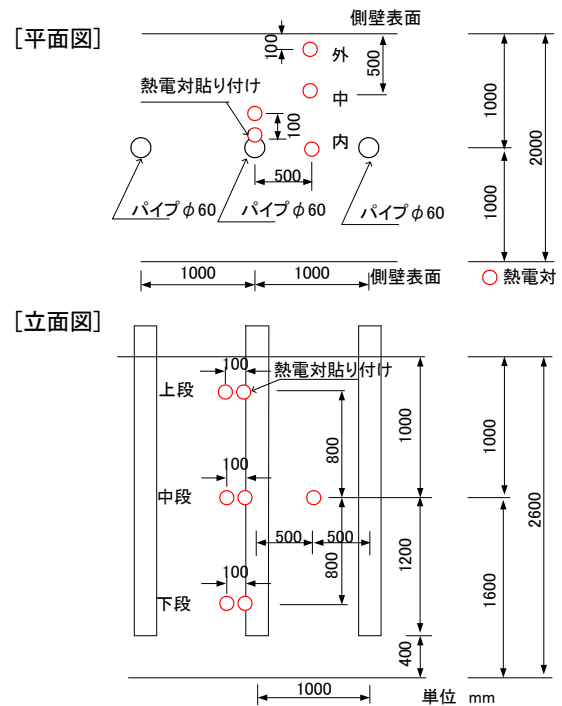


図-14 計測器の配置（堰柱第 1 リフト）

表-3 解析条件

解析項目	解析パラメータ ³⁾
断熱温度上昇 低熱高炉セメント B 種+ 膨張材	Q_{∞} 38.50, r 0.950, t_{aQ} 0.262 打設温度 25℃
コンクリート面熱伝達率	側壁脱型前 $6\text{W/m}^2\text{C}$, 脱型後 $14\text{W/m}^2\text{C}$
外気温変化	7 日まで 20℃, 7 日~15 日は 20℃~ 15℃, 15 日~28 日は 15℃~10℃
クーリングパイプ	流入水温 20℃, 熱伝達率 $350\text{W/m}^2\text{C}$

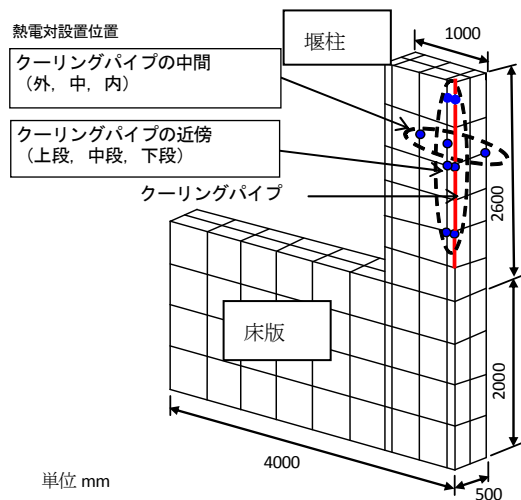


図-15 壁体コンクリートの解析モデル

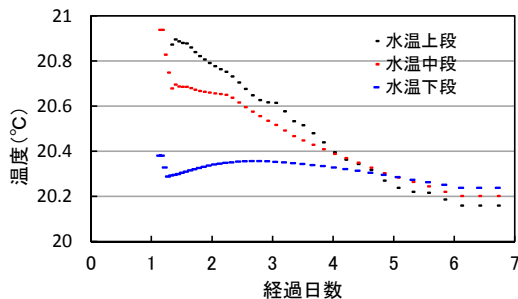


図-16 クーリングパイプ水温の経時変化 (解析)

度の経時変化を図-17に示す。計測結果を実線、解析結果を同色の点で示している。コンクリートの上面から放熱されるため、中段の温度が最も高く、上段の温度が最も低い。コンクリート打設直後のピーク温度や上段～下段の温度分布が解析でよく再現できている。クーリングを開始(1日後)してからの急激な温度低下は解析の方がやや大きい、クーリングによって中段と下段の温度差が縮小し、クーリングを終了(6日後)してからは再び温度上昇して中段よりも下段の温度が高くなる状況などが解析でよく表されている。

パイプ中間断面のコンクリート温度の経時変化を図-18に示す。計測結果を実線、解析結果を同色の点で示している。平面図(図-14)に示すコンクリート表面から100mmを中間/外、500mmを中間/中、中心を中間/内で表している。コンクリート表面から放熱されるので、表面に近いほど温度が低い。ピーク温度やクーリングを終了すると中心(中間/内)の温度がやや高くなる状況が解析でよく再現できている。

5. まとめ

パイプクーリングの室内実験、解析手法、現場測定データとの対比により、次の結果が得られた。

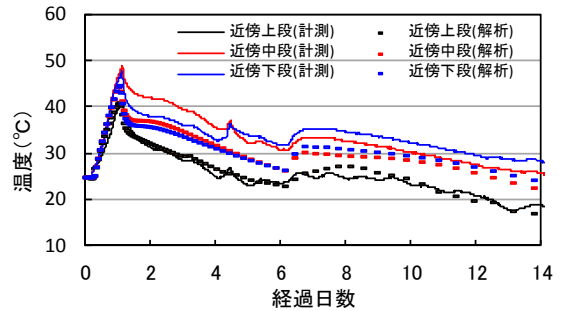


図-17 パイプ近傍のコンクリート温度の経時変化

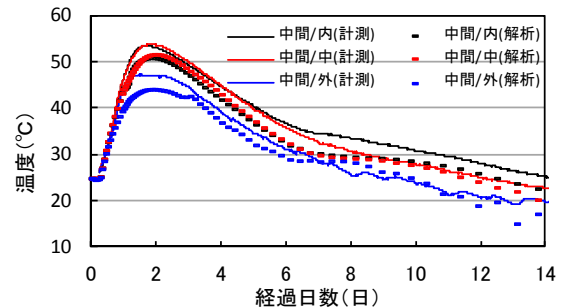


図-18 パイプ中間断面のコンクリート温度の経時変化

- (1) パイプクーリング (パイプ内径φ60mm) の流速1.2~17.7cm/s (流量2~30L/min) の低流速範囲の実験により、流速に応じた200~500W/m²°Cの熱伝達率の値が得られた
- (2) パイプ中の水温変化を考慮できる簡易解析手法を構築し、解析プログラムに組み込んだ
- (3) 構築した解析手法を用いて、現場におけるパイプクーリングモデルを解析し、クーリングパイプ近傍の現場測定データと比較することにより、適用するに当たり十分な精度を持つことが確かめられた

低流速パイプクーリングについて、クーリング水温のパイプ延長方向の変化や、熱伝達率のモデル化を可能にし、効果的なクーリング計画を行うことのできる解析手法が得られた。今後、本手法の適用を進めていきたい。

参考文献

- 1) 田辺忠顕, 山川秀次, 渡辺 朗「パイプクーリングにおける管断面の熱伝達率の決定ならびに冷却効果の解析」, 土木学会論文集 No.343, pp.171-179, 1984.3
- 2) 溝淵利明, 二塚保之, 村尾義則「パイプクーリングによるひび割れ抑制対策効果に関する研究」, 土木学会論文集 No.665/VI-49, pp.147-163, 2000.12
- 3) 東 邦和, 塚本耕治, 森田修二, 井 君人「マッシュポンプな水門コンクリートの温度応力対策と効果の評価」, コンクリート工学年次論文集 Vol.37, pp.1165-1170, 2015.7