

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

溝淵利明¹・二塚保之²・村尾義則³

¹正会員 鹿島技術研究所 LCEプロジェクトチーム (〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1)

²石川県津幡土木事務所 土木技術専門員 (〒929-0325 石川県河北郡津幡町加賀爪ヌ111-1)

³正会員 鹿島北陸支店 河北潟放水路橋左岸JV工事事務所 (〒920-0268 石川県河北郡内灘町ハマナス2-78)

パイプクーリングは、温度応力による温度ひび割れ抑制対策として有効な手段である。本研究では、橋梁橋脚部を対象にクーリングパイプを立体的に配置し、パイプクーリングによる効果的な熱除去を実施した。適用に際しパイプ内の流速をもつ水の熱移流を考慮した3次元有限要素法を適用し、事前に最適な配置を選定するとともに、パイプクーリングを実施した部材について温度計測を行い、パイプクーリングによる温度ひび割れ抑制効果の評価を行った。その結果、事前に理論解析によって選定したパイプの立体配置が、温度ひび割れ抑制に効果があったことを確認するとともに、適用した解析手法がパイプクーリングによる熱除去効果評価法として適していることが明らかとなった。

Key Words: pipe-cooling, mass concrete, thermal cracking, crack control, thermal stress, concrete bridge

1. はじめに

コンクリート打込み後のセメントの水和発熱に起因する温度応力によって生じる温度ひび割れは、これまでダムや長大橋梁基礎などのマスコンクリート構造物に多く見られるものであった。しかしながら、最近では橋梁の橋脚や桁などに高強度コンクリートや高流動コンクリートなど単位セメント量の多い配合を適用する工事が増加しており、これまでマッシブなコンクリートの範疇に入らないような部材断面の比較的小さいものでも温度応力による温度ひび割れ発生の可能性が増大しており、これらに対する温度ひび割れ抑制対策が重要な課題となっている。特に、上記に示した構造物は単位セメント量が多いことから、部材温度の上昇速度が速く、また部材寸法が比較的小さいために温度降下速度の速い場合が多い。さらに急速施工やプレストレスの導入などによって、低発熱セメントの適用が難しい場合がある。

これらの構造物に対する温度ひび割れ抑制対策としては、硬化時に膨張圧を与えるケミカルプレストレスによって温度ひび割れを抑制する膨張材や水和発熱に伴う上昇速度を抑制して放熱効果によって部材温度の上昇を低減する水和熱抑制剤など材料・配合による方法や、練りま

せ水の一部に氷を用いる方法、コンクリートに液体窒素を噴入して打込み温度を下げるプレクーリングによる方法などが適用されている¹⁾。ただし、対象とする構造物がダムなどの大型構造物に比べて温度上昇量が大きいことから、プレクーリングによる方法の場合、打込み温度の低減量を10℃以上にしないと十分な抑制効果が得られないこと、実施時期としては、暑中だけでなく冬期に近い施工の場合もあることから、プレクーリングによって打込み温度を数℃にするといったこととなり、凝結遅延や硬化遅延を生じて、プレストレスの導入や型枠脱型の遅延などを起こすことも考えられる。また、水和熱抑制剤の適用もプレクーリングの場合と同様に冬期での施工に適用が難しいと考えられる。

このように、部材寸法が比較的小さい構造物に対して温度ひび割れ抑制対策を講じることは難しいのが現状である。そこで、筆者らは部材寸法の比較的小さい構造物の温度ひび割れ抑制対策として、温度上昇量を低減するポストクーリングによる方法を適用することとし、その方法としてパイプクーリングを適用することとした。

パイプクーリングは、ダムや長大橋梁基礎のマッシブなコンクリート構造物に適用されている方法^{2)・3)}であるが、これまで適用されている構造物のほとんどは部材

温度を構造物の周辺温度まで降下されることを第一の目的としており、水和発熱時の温度上昇を積極的に低減させることを第一の目的としているものは少ないので現状である^{4)~6)}。ただし、パイプ間隔を小さくし、通水速度を速くし、かつ部材温度が最も高くなる部位に配置することができれば、短期間に大量の熱除去が可能であり、セメントの水和熱に起因する温度応力の積極的な抑制対策になると考えられる。

本研究では、筆者らが提案しているパイプクーリングによる熱除去効果解析手法を用いて、セメントの水和発熱による温度上昇量低減を第一の目的とした温度ひび割れ抑制対策について、斜張橋橋脚部を対象に、事前解析でクーリングパイプを熱除去に最も効果的な部位に配置させる検討を行うとともに、実際適用した部位での温度計測を実施し、事後解析によって温度ひび割れ抑制対策効果の評価を行った。また、立体配置および通水速度の速い場合の熱除去効果についても評価を行った。

2. パイプクーリングによる熱除去解析手法

パイプクーリングによる熱除去解析手法は、これまでに詳細を報告していることから^{7)~9)}、ここでは適用している基本な考え方及び解析手法に適用した基本式を示す。

筆者らが提案している解析手法は、クーリングパイプ内の水とパイプ壁面の熱の収支を、コンクリート内の熱伝導場に連続した熱伝達境界面がある間隔で存在しているものとした境界条件を設定し、かつパイプ内の流れを持った水の温度と水和発熱するコンクリートの異なる2つの場に上記の境界条件を導入して連成させて解くものである。ただし、パイプの配置は1次元方向だけでなく、立体的に配置することを考慮する必要があり、パイプ内水温に対して流速および各位置での熱吸収を考慮する必要性があることから、パイプ入口から出口まで連続したものとして解析する必要があり、解析手法自体3次元で取り扱うものとした。

(1) コンクリート場における温度解析

本研究では、コンクリート場において以下に示す3次元の非定常熱伝導方程式を用いた。

$$\lambda \left(\frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} \right) + Q_c(t) = \rho c \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad (1)$$

ここで、 λ ：熱伝導率 (W/m°C)， T_c ：コンクリート温度 (°C)， $Q_c(t)$ ：コンクリート内部の発熱率(W/m³)，

ρ ：コンクリートの密度 (kg/m³)， c ：コンクリートの比熱 (kJ/kg°C) である。

境界条件は、外気と接する対流境界およびクーリングパイプ壁面と接する境界がある。外気と接する対流境界は一般に以下の式で表される。

$$\lambda \left(\frac{\partial T_c}{\partial x} l + \frac{\partial T_c}{\partial y} m + \frac{\partial T_c}{\partial z} n \right) + \eta(T_c - T_\infty) + q_s = 0 \quad (2)$$

ここで、 l ， m ， n ：境界面における方向余弦、 η ：コンクリートの表面熱伝達率 (W/m²°C)， T_∞ ：外気温 (°C)， q_s ：コンクリート表面での熱流束 (W/m²) である。

クーリングパイプ壁面での境界条件は、クーリングパイプ内の水とコンクリートと接しているパイプ壁面で熱伝達が行われていると仮定して以下に示す境界条件式を設定した。

$$\lambda \left(\frac{\partial T_c}{\partial x} l + \frac{\partial T_c}{\partial y} m + \frac{\partial T_c}{\partial z} n \right) + h(T_c - T_w) = 0 \quad (3)$$

ここで、 h ：パイプ壁面での熱伝達率、 T_w ：パイプ内の水温 (°C) である。

式(1)に Galerkin 法¹⁰⁾を適用し、式(2)および式(3)の境界条件を適用し、マトリックス表示すれば以下の式が得られる。

$$\begin{aligned} [K_c] [T_c] - [K_{cw}] [T_w] + [C] \frac{\partial T_c}{\partial t} &= \{F_c\} \quad (4) \\ [K_c] = \int_V [B]^T [D] [B] dV + \int_{S_1} \eta [N_c]^T [N_c] \mu S_1 + \int_{S_1} q_s [N_c]^T dS_1 \\ &+ \int_{S_2} h [N_c]^T [N_c] \mu S_2 \\ [K_{cw}] &= \int_{S_1} h [N_c]^T [N_w] dS_1 \\ [C] &= \rho c \int_V [N_c]^T [N_c] dV \end{aligned}$$

$$\{F_c\} = Q(t) \int_V [N_c]^T dV - \int_{S_1} T_\infty [N_c]^T dS_1$$

ここで、 $[B]$ ：温度勾配マトリックス、 $[D]$ ：伝導係数マトリックス、 $[N_c]$ ：コンクリート温度に関する形状関数マトリックス、 $[N_w]$ ：クーリングパイプ内水温に関する形状関数マトリックスである。また、 S_1 ：外気との界面、 S_2 ：パイプ壁面の面積である。

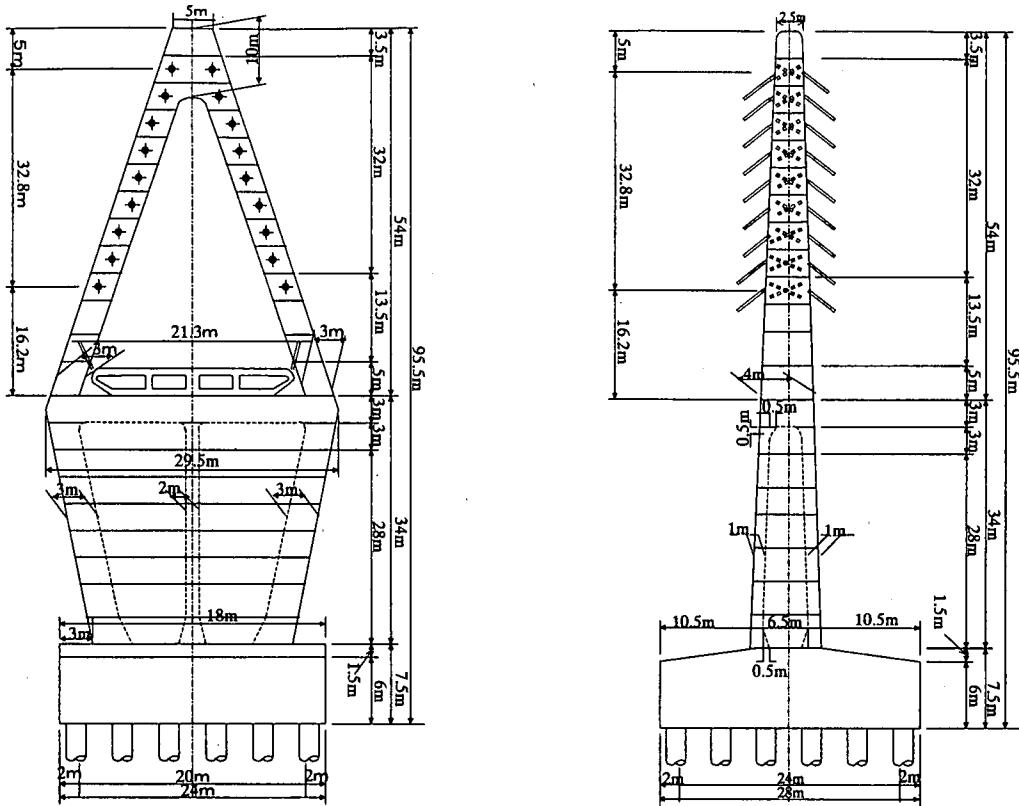


図-1 斜張橋主塔の概要

(2) パイプ内水温に関する支配方程式

パイプ内水温に関する基本方程式では、クーリングパイプが入口から出口まで一本の管であるとして、管に沿った極座標とすることで管内の水の流れは一次元であるとした。

管入口からの距離が S である微小区間 dS においてパイプ内の水が S_i から S_{i+1} の方向に流速 u で流れている場合のパイプ内水温の支配方程式は以下の式となる。

$$\rho_w C_w r^2 \pi u \frac{\partial T_w}{\partial S} dS + 2\pi r dSh(T_w - T_c) + \rho_w C_w dS \frac{\partial T_w}{\partial t} = \rho_w C_w u \frac{\partial T_w}{\partial S} + \frac{2h}{r}(T_w - T_c) + \rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \quad (5)$$

ここで、 ρ_w : 水の密度 (kg/m^3)、 C_w : 水の比熱 ($\text{kJ}/\text{kg}\text{°C}$)、 r : パイプ半径 (mm) である。

式(5)において、流速 u は管内では一様であるとする。また、パイプクーリングを行う際の流速範囲は、10 メートル/分～20 メートル/分の場合が多いことから、管内は乱流状態と考えることができ³⁾、十分な熱交換が行われているものとする。

式(5)にコンクリート場と同様に Galerkin 法を適用し、パイプ内水温についてマトリックス表示した式を以下に

示す。

$$\begin{aligned} [K_w] \{T_w\} - [K_{wc}] \{T_c\} + [W] \frac{\partial \{T_w\}}{\partial t} &= 0 \quad (6) \\ [K_w] &= \rho_w C_w \mu \left[[N_w]^T [N_w] \right]_{S_1}^{S_{i+1}} - \rho_w C_w \mu \int_S \frac{\partial [N_w]}{\partial S} [N_w] dS \\ &\quad + \frac{2h}{r} \int_S [N_w]^T [N_w] dS \\ [K_{wc}] &= \frac{2h}{r} \int_S [N_w]^T [N_c] dS \\ [W] &= \rho_w C_w \int_S [N_w]^T [N_w] dS \end{aligned}$$

式(4)および式(6)を連成させることで複雑なパイプレイアウトで、流速や通水温度が逐次変化してもパイプクーリングによる熱除去効果を解析評価することが可能となる。これまでにダム洪水吐の温度ひび割れ抑制対策検討に適用し、本手法を用いた解析結果が温度計測結果とよく一致することを確認している¹¹⁾。さらに、アーチダムの一次クーリングの温度評価にも適用し、パイプ壁面の熱伝達率に関して検討を加える必要はあるものの、パイプ周辺部において計測値とよく一致する結果が得られている¹²⁾。

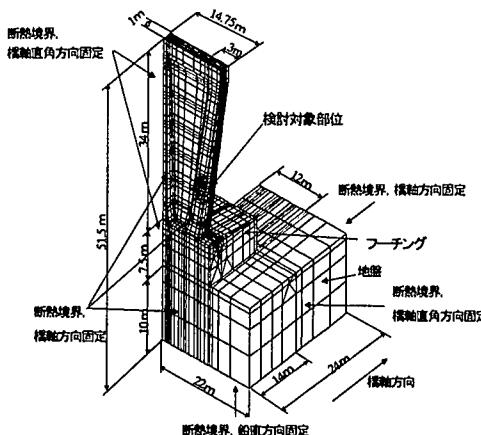


図-2 メッシュレイアウト

3. 斜張橋橋脚部における温度ひび割れ抑制対策

斜張橋橋脚部の温度ひび割れ抑制対策（部材中央部での目標最小ひび割れ指数 1.5 以上、表面部で 1.2 以上）として適用したパイプクーリングについて、2. で示した解析手法を用い、事前に熱除去効果の高い位置へのクーリングパイプの配置とそれによる温度ひび割れ発生確率の低減効果の評価を行った。次に、実施工での温度計測を実施し、計測結果を基にした事後解析によって水和発熱時のパイプクーリング効果を評価するとともに、事前検討で配置したクーリングパイプ位置が温度ひび割れ抑制に効果があったことの確認を行った。

(1) 構造物の概要

本研究で対象としたのは、PC 斜張橋主塔橋脚部である。橋脚部は、高さ 34.0m、幅 6.7~4.0m、長さ 18.0~29.5m の比較的マッシブなコンクリート構造物である。また、断面は 2 層の中空断面である。構造物の概要を図-1 に示す。本構造物が建設される場所は、海岸に比較的近いことから、耐久性の点から極力温度ひび割れ発生を生じさせないための抑制対策が講じられることとなつた。

(2) 温度ひび割れ抑制対策の選定

対象とした橋脚部は、施工に際して材料・配合および施工法について温度ひび割れ抑制対策を選定するための事前検討を行った。事前検討では、橋脚部全リフトを対象とし材料・配合の選定を行った。解析には、橋脚部が中空断面であること、各リフトで断面が変化していることから、3 次元モデルを用い、有限要素法を適用して行った。事前解析に用いたメッシュレイアウトを図-2 に示す。

表-1 使用材料

項目	摘要				
	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤	
セメント	高炉セメント B 種 密度: 3.04g/cm ³ 、比表面積: 3840cm ² /kg	手取産砂および内灘産砂 混合質量比: 65(手取産): 35(内灘産)	表乾密度: 2.57g/cm ³ 、吸水率: 2.44%、粗粒率: 2.57	手取産砂利 粗骨材最大寸法: 40mm	
細骨材				表乾密度: 2.61g/cm ³ 、吸水率: 1.80%、実積率: 63%	
粗骨材				AE 減水剤標準形 I 種	
混和剤					

表-2 コンクリート配合

水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
		水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
53.0	40.4	146	276	747	1118	0.552

設計基準強度: 30N/mm² (保証材齢 91 日)

スランプ: 8cm、空気量: 4.5%

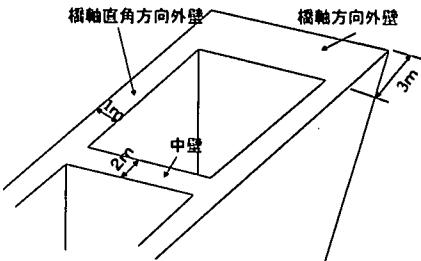


図-3 橋脚部第 3 リフトの概要

検討の結果、材料・配合は高炉セメント B 種を用い、単位セメント量 276kg/m³とした。使用材料および配合を表-1、2 に示す。ただし、表-1、2 に示す材料・配合を用いても、図-3 に示す橋脚部第 3 リフト外壁部（部材厚 3m）において温度ひび割れ発生の可能性が高い結果となった。そこで、橋脚部第 3 リフト外壁部を対象にパイプクーリングによる温度ひび割れ抑制対策を講じることとした。本構造物でパイプクーリングを温度ひび割れ抑制対策として選定したのは、温度ひび割れ発生の可能性が高い部位が暑中に施工する 3~4 リフトであること、1 回の打設量が 300m³ 前後と比較的少なくプレーキーリングを対策として選定した場合、経済性の点で適切でないと判断したこと、夏場でも 20℃以下の地下水が得られることからである。

4. パイプクーリングによる温度ひび割れ抑制対策

(1) 最適パイプレイアウト選定のための事前解析

パイプクーリングを実施する橋脚部第 3 リフトに対して、高いクーリング効果が得られるように、事前解析でパイプレイアウトの選定を行った。検討方法は、パイプ

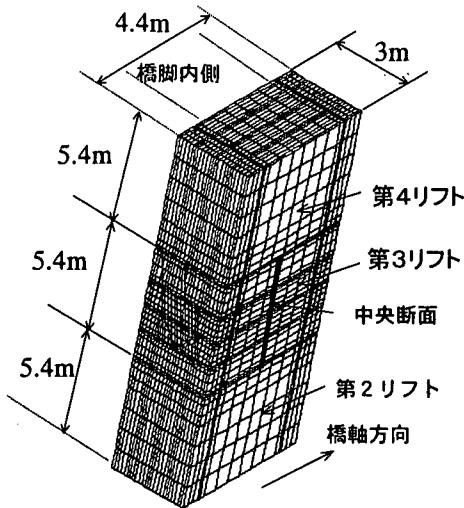


図-4 橋脚部第3リフト外壁メッシュレイアウト

クーリングを実施しない場合を基本として、その部材内で最も温度の高い位置にパイプを1本敷設する。次に、クーリングパイプを1本敷設した場合の解析を実施し、最小温度ひび割れ指数分布および最高温度分布を求め、次に敷設すべき位置を定める。これを繰り返し実施し、部材全体が最小温度ひび割れ指数1.5以上を極力満足できるようにクーリングパイプのレイアウトを選定した。

(2) 解析方法

a) 解析モデル

パイプクーリングを実施する部位は、第3リフトの中でも外壁部に相当する部材のみであることから、その部分のみを切り出してモデル化することとした。ただし、当該部位に対して、温度、応力解析で影響を受ける第2リフトおよび第4リフトの外壁部も併せてモデル化することとした。解析モデルを図-4に示す。

b) パイプクーリングの通水条件

パイプクーリングの通水条件において、通水量はダムの場合これまで20L/s/分以下の場合が多い^{13)~15)}。ダムのように低発熱セメントを用い、かつセメント量の少ない構造物では、水和発熱量も少なく、温度の上昇速度も緩やかであり、パイプからの吸熱量およびパイプ周辺部の過冷却を考慮すれば流量を絞ってパイプクーリングを実施することは妥当であると考えられる。一方、本検討で対象とする橋脚部では温度上昇量の低減を目的としていることから、これまでの流量よりも多くすることとした。ただし、パイプクーリングを実施する場所が地上より約15mの高さに位置していること、流量を増加させた場合、管内圧力が増加し継ぎ目部からの漏水を生じる可能性があること、パイプ周辺部が過冷却となることを考慮して、

表-3 热特性値および力学的特性値

項目	入力データ	
熱伝導率 (W/m°C)	2.7	
比熱 (kJ/kg°C)	1.2	
密度 (kg/m³)	2300	
断熱温度上昇式 $Q_{(t)} = Q_0(1 - e^{-\tau t})$	第2リフト	Q ₀ 48
		τ 0.94
	第3リフト	Q ₀ 47.7
		τ 1.08
	第4リフト	Q ₀ 47.6
		τ 1.11
表面熱伝達率 (W/m²°C)	外側面	材齢3日まで 8 材齢3日以降 14
	内側面	材齢3日まで 8 材齢3日以降 14
	上面	材齢7日まで 8 材齢7日以降 14
		流量 (L/s/分) 30
		パイプ壁面での熱伝達係数 (W/m²°C) 624
外気温 ⁽¹⁾	金沢の月別平均気温	
圧縮強度 (N/mm²)	$f_c(t) = 22.69 \times \log(\text{積算温度}) - 29.33$	
引張強度 (N/mm²)	$f_t(t) = 0.72 \times [f_c(t)]^{0.5}$	
弾性係数 (N/mm²)	$E_c(t) = 4680 \times [f_c(t)]^{0.5}$	
クリープによる弾性係数低減率 ψ	材齢3日まで	0.5
	材齢3日以降	0.65
線膨脹係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	10	
ボアソン比	0.167	

30 L/s/分で検討することとした。管径については、本検討の場合クーリングパイプを立体的に配置することが予想されたため、管径を大きくするとパイプを支える架台も大型化し、部材内に納めることができなくなることから、本検討ではこれまで用いてきた管直径25.4mmで検討することとした。

通水方向の切り替えに関しては、通水距離が数10mと短いことから、出入口での温度差は少ないと想されるため、切り替えは行わないこととして検討を行った。通水期間は、部材内が最高温度に達した段階で停止した場合、冷却時の最高温度よりも高くなり、クーリング効果が低減されてしまう場合があることから、最高温度に達した3日後に停止することとして検討を行った。

(3) 解析条件

事前解析に用いた熱特性値および力学的特性値を表-3に示す。熱特性値は、土木学会・コンクリート標準示方書の施工編に示された標準的な値の範囲の平均値を用いた。ただし、断熱温度上昇式および力学的特性値に関しては実施工で用いるセメントメーカーの技術資料を基に算定した。

パイプ壁面の熱伝達率に関しては、筆者らが室内試験で求めた流速と熱伝達率との関係を用いた^{7)~9)}。この関係式は、ダムでの計測結果との比較検討でも実際の挙動とほぼ一致する結果を得ている¹²⁾。パイプ壁面の熱伝

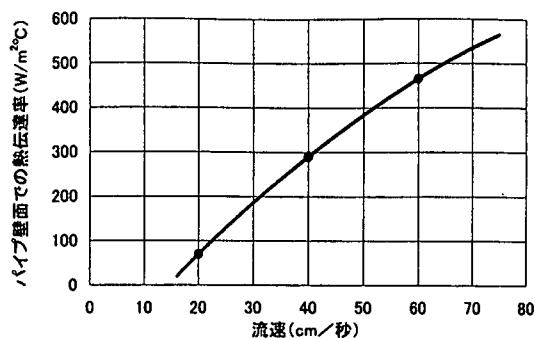


図-5 流速とパイプ壁面の熱伝達率との関係

達率 h と流速 u との関係を図-5 に示すとともに、関係式を以下に示す。

$$h = -0.059u^2 + 14.8u - 201 \quad (7)$$

境界条件に関しては、温度解析において第2リフト下端、橋軸直角方向の外壁が接する部位及び第4リフト上面で第5リフト打設予定日以降断熱境界とした。また、本検討では、構造物の周囲をシートで囲んで風があたらないようにするとともに、直射日光もあたらないようにする計画であったことから、日射の影響を考慮せず、風速の影響も壁の内側および外側で差異はないものと判断し熱伝達率を同じとした。

応力解析では、第2リフト下端および橋軸直角方向外壁が接する部位をローラ支持とした。また、解析時間刻みは解析開始直後から10ステップまで10分刻みとし、その後は1時間刻みとした。解析期間は、第3リフト打込み後1ヶ月とした。

(4) 解析結果

a) パイプクーリングを実施しない場合

同一モデル、同一条件での解析結果を比較するために、パイプクーリングを実施しない場合について解析を実施した（以後ケース0と称する）。また、パイプクーリングの効果を比較検討する断面として、図-4 および図-6 に示すように外壁の中央断面（橋軸方向と直交する断面で、橋軸方向に対しては、部材長さの半分の位置）で行うこととした。図-7 に第3リフトでのリフト中央部が最高温度に達する材齢2日での温度分布を示すとともに、最大主応力分布および最小ひび割れ指数分布を示す。ここで、最大主応力・最小温度ひび割れ指数分布とは解析期間内でその要素の最大または最小となる値を示すものである。したがって、各々の要素での最大・最小を示す材齢は異なっている。

図-7 から、リフト中央部においてコンクリート温度が最も高く約70°Cであった。また、60°Cを越す部位は部材表面から約1m以深の範囲であり、これらの部位も冷却する必要があると思われたが、最も温度の高い中央部

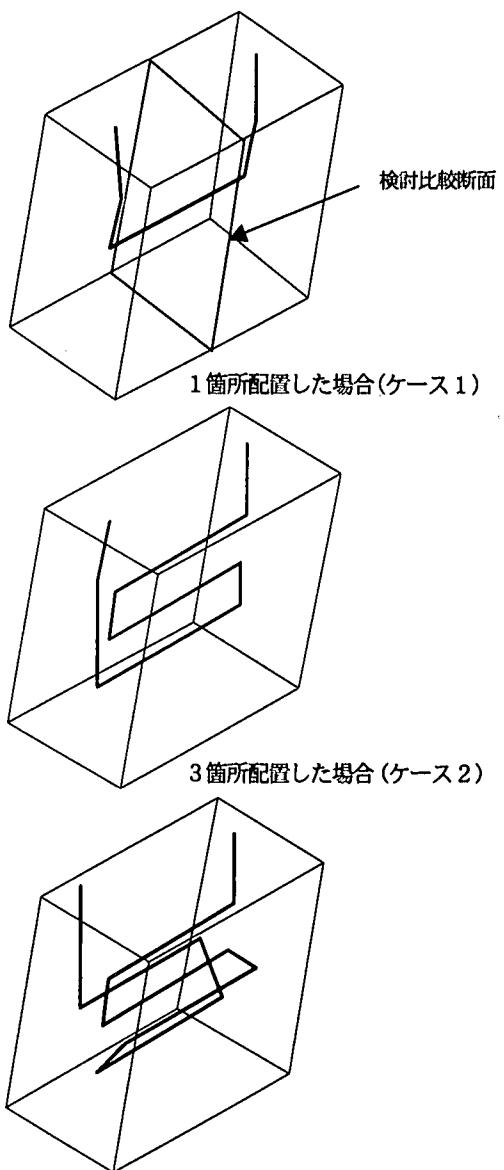


図-6 パイプレイアウトの概要
b) リフト中央部にパイプ1箇所配置した場合

にパイプを設置した場合の効果を確認することとした。

ケース0での解析結果を基にリフト中央部にパイプを一本設置した場合（以後ケース1と称す）について解析を行った。パイプレイアウトは、実際の施工を考慮して図-6 に示すようにリフト上面から凹形に配置した。解析の結果、図-7 に示すようにリフト中央部はパイプクーリングを実施することでケース0に比べて約10°C低減し、70°Cを越える範囲がケース0に比べて約半分程度まで小さくなかった。ケース1における最高温度分布では、第2リフト上面から約1/3 および2/3 リフト上方で熱塊が残ったことから、熱除去効果を高めるためにこれらの

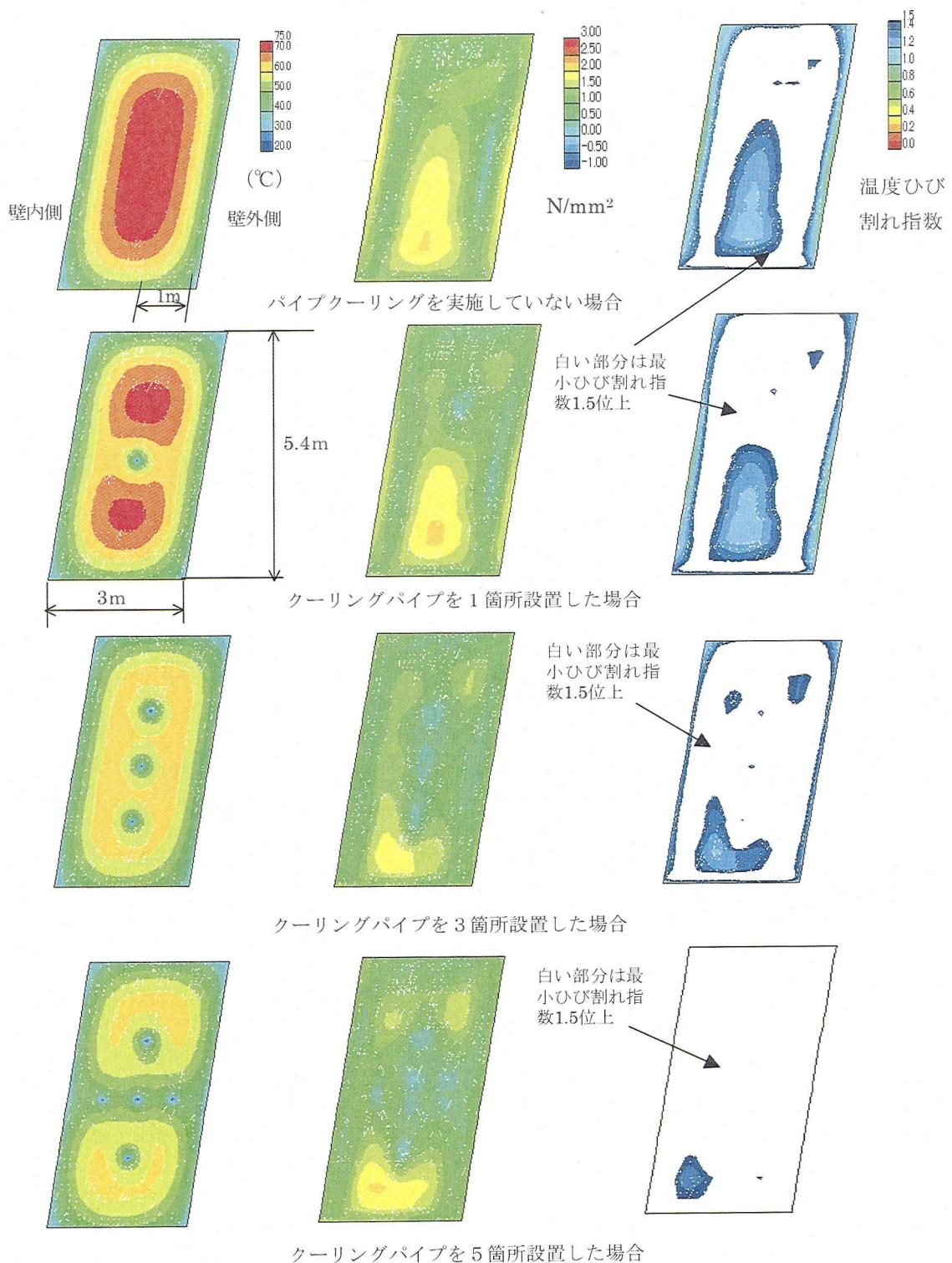


図-7 最適パイプレイアウト選定のための事前解析結果

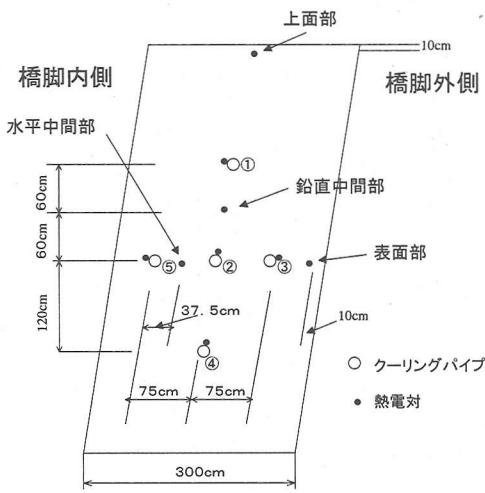


図-8 クーリング効果の比較評価および計測位置

部分にパイプを設置した場合についてさらに解析を行うこととした。

c) リフト縦断方向にパイプを3箇所設置した場合

ケース1での結果を基に、図-6に示すようにリフト縦方向にパイプを配列した場合（ケース2）について解析を行った。図-7の最高温度分布から、コンクリート温度が60°C以上の高い範囲は、外壁の両側および上下面部にあり、その幅は約50cmであった。リフト中央部両側は高温域の中で若干高い部位であったことから、さらにこれらの部分にパイプを配置することとした。

d) リフト内にパイプを5箇所配置した場合

ケース2までの結果を基に、図-6に示すようにリフト縦方向に3箇所、中央部両脇に2箇所クーリングパイプを立体配置した場合について解析を行った。図-7から、部材内で60°Cを越える範囲はリフト上下面部のみであり、温度ひび割れ指数分布では、第2リフトとの打継ぎ面上でわずかに1.5以下（最小ひび割れ指数1.4以上）となる部位があるが、部材中央には位置しておらず、部材を貫通するひび割れには進展しないと判断した。したがって、リフト全体ではクーリングパイプを5箇所配置することで目標とした温度ひび割れ指数1.5以上をほぼ満足する結果となった。パイプ5箇所が最適と判断した理由としては、最小の本数で温度ひび割れを抑制することを考慮した場合、パイプ5箇所でほぼ当初の目標を達成しており、これ以上パイプを増加させても過剰配置になると判断したためである。実施工でもこのパイプレイアウトでクーリングを実施することとした。

(5) パイプクーリングによる温度ひび割れ抑制効果

前項に示したクーリングパイプ位置の設定に関する事前解析結果において、クーリングパイプの設置箇所がリフト各部位にどのような温度ひび割れ抑制効果があった

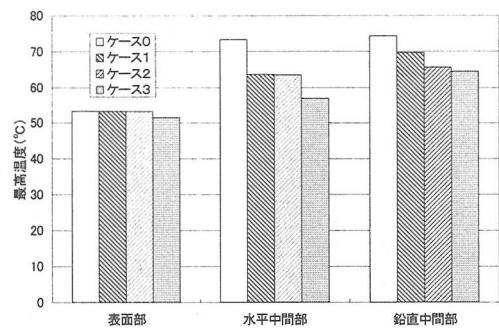


図-9 各ケースの最高温度の比較

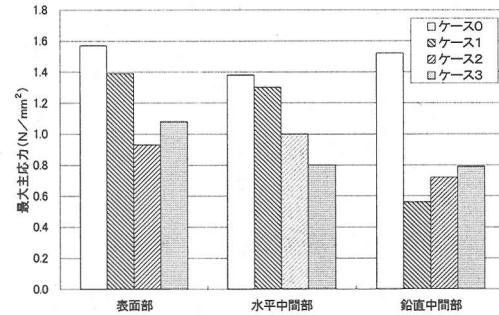


図-10 各ケースの最大主応力の比較

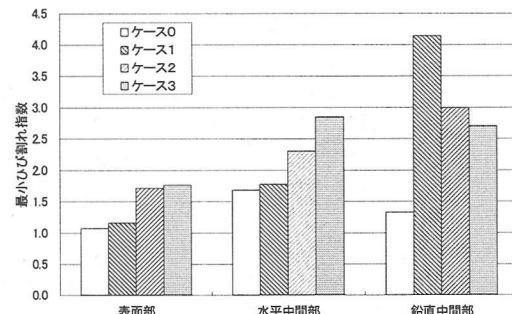


図-11 各ケースの最小ひび割れ指数の比較

かを比較検討した。クーリング効果を比較した箇所は、図-8に示すように中央断面でクーリングパイプを設置した中間およびコンクリート表面部について比較を行った。各部位での比較検討結果を図-9～11に示す。

図-9～11から、リフト中央部付近ではパイプを1本設置することで約10°Cの温度低減されるものの、最大主応力はほとんど低減されない結果となった。しかしながら、中央位置にパイプを水平方向に3箇所配置したケース3では、パイプ間隔が75cmとなり、パイプクーリングによる熱除去効果が高く、実施しない場合に比べて約17°Cの温度低減効果が得られるとともに、最大主応力は0.6N/mm²低減され、最小温度ひび割れ指数が1.68から2.85まで増加する結果となった。

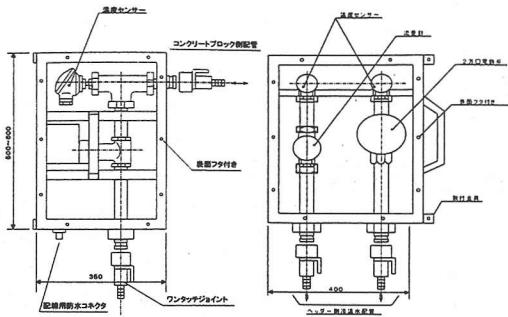


図-12 クーリング水自動制御ユニットの概要

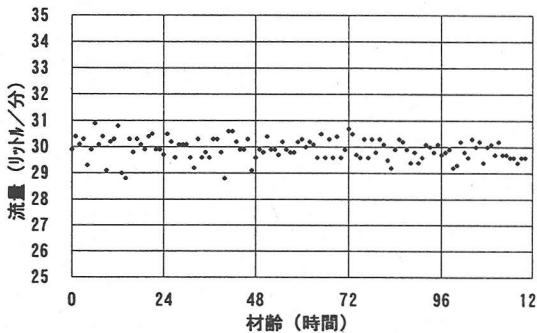


図-13 クーリング水の流量履歴

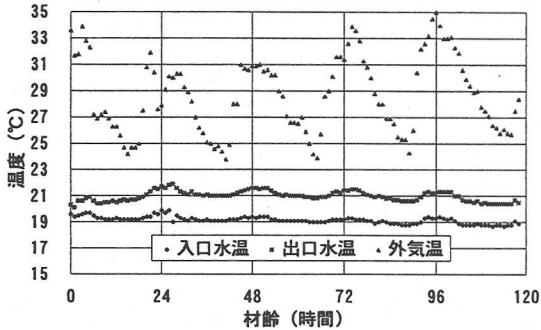


図-14 出入口温度および外気温履歴

鉛直方向に配置したパイプの中間では、図-9～11に示すようにパイプ間隔が水平方向に比べて 1.6 倍の 120cm であったことから、パイプを 1 本配置したケース 1 で約 3℃、3 本鉛直方向に配置したケース 2 で約 8℃ の低減効果となり、水平方向に比べて約半分の低減効果であった。ただし、最大主応力は垂直方向にパイプを 3 本配置することで実施しない場合の半分以下の値となり、温度ひび割れ指数に関してはクーリングを実施しない場合、最小温度ひび割れ指数が 1.32 であったのに対して、パイプクーリングを 1 箇所以上設置することで 2.5 以上となり、高い温度ひび割れ抑制効果が認められた。

クーリングパイプを1箇所および鉛直方向に3箇所配置した場合、水平中間部に比べて鉛直中間部に対する

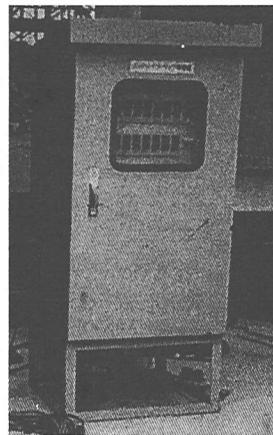


写真-1 流量制御盤

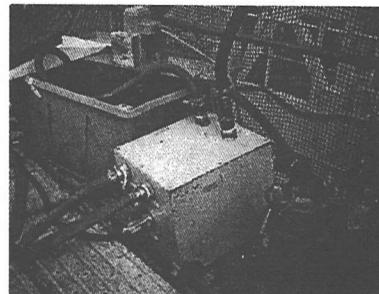


写真-2 自動制御ユニット設置状況

ひび割れ抑制効果が高く見えるのは、鉛直中間部の場合応力が鉛直方向および橋軸方向に卓越しており、パイプを設置することで橋軸方向の応力も緩和されるが、鉛直方向の応力も緩和される結果となった。一方、水平中間部は橋軸方向の応力が卓越していることから、リフト中央部にパイプを設置して温度を低減しても鉛直方向に比べて応力低減が小さかったものと考えられ、鉛直中間部の方が水平中間部に比べてひび割れ抑制効果が高く見える結果となったためと考えられる。ただし、水平方向にもパイプを設置した5個所の場合には、水平中間部の方が鉛直中間部よりも高いひび割れ抑制効果を示している。これは、鉛直方向に比べて水平方向のパイプ間隔が小さく、パイプクーリングによる熱除去効果が高かったためと考えられる。

コンクリート表面部においては、パイプクーリングの実施の有無によってコンクリート温度に差異が見られなかつたが、部材中央部の温度が低減されることで表面部との温度差が小さくなり、内部拘束応力が大きく低減され、クーリングを実施しなかつた場合に比べて約半分程度まで低減する結果となつた。このことは、パイプクーリングによる熱除去効果が温度上昇量の低減によるひび割れ抑制ばかりでなく、部材全体の温度差を小さくする

ことによって、内部拘束応力を低減する効果があり、表面ひび割れの抑制対策として高い効果を有していると考えられる。ただし、今回のように通水量を多くして短期間で多量の熱除去を行うことによって温度ひび割れ抑制効果を高めようとする場合には、クーリングパイプの過密配置による過冷却を十分留意する必要がある。

5. 実施工での温度ひび割れ抑制効果の評価

(1) 実施工での施工時温度計測

事前解析で熱除去効果の高い位置でのクーリングパイプの配置を選定した。そこで、実際の施工においてパイプクーリングによる温度ひび割れ抑制効果を確認するために、施工時の温度計測を行った。計測は、パイプクーリングによる熱除去効果を評価するために、図-8に示す中央断面において、橋軸方向に対して水平に配置したパイプのパイプ入口から3m(①の位置)、8m(②の位置)、12m(③の位置)、17m(④の位置)、22m(⑤の位置)の各位置でパイプ壁面およびパイプ内水温を測定するとともに、パイプ間のコンクリート温度およびコンクリート表面部の温度測定も行った。パイプ壁面の温度は、パイプに熱電対の先端を貼り付けて測定を行った。パイプ内水温は、パイプ壁面とほぼ同一位置に穴を開けた熱電対を差込み、その後穴の周囲を防水加工した。パイプ内水温測定用の熱電対は、先端がパイプのほぼ中央にくるように設置した。さらに、同一リフトでパイプクーリングを実施しない中壁の中央部にも温度計を設置し、計測結果から断熱温度上昇量の算定を行うこととした。測定間隔は、外気温の日変動、クーリング水の温度変化をできるだけ正確に評価するために1時間ごととした。外気温は、橋脚外側の当該リフト横の足場内で測定を行った。橋脚内部の外気温は、上部が抜けていること、外壁、中壁が比較的広く空いている(約10m)こと、さらに橋脚側面をシートで覆い、日射および風の影響を受けないようにしたことから、橋脚内側と外部とはほとんど変わらないと判断して測定を実施しなかった。

(2) パイプクーリング自動管理装置の設置

パイプクーリングを実施する場合、流量および通水温度が熱除去効果に対して大きな影響を与えるといわれている¹³⁾。また、実施工での流量管理はこれまで手動による場合がほとんどであり、どの程度の流量変動があるか明らかとなっていないのが現状である。本検討では、流量がこれまで報告されているよりも多く、パイプクーリング実施時に流量が大きく変化した場合、熱除去効果に大きな影響を与え、事前に予測した温度ひび割れ抑制効果が十分得られない可能性のあることが予想された。そ

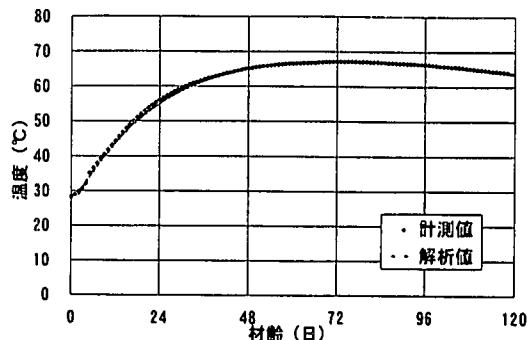


図-15 断熱温度上昇式の同定(中壁温度履歴)

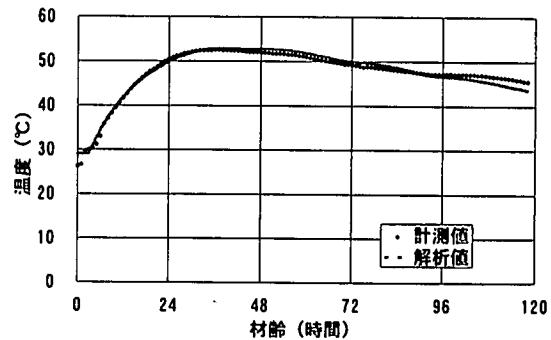


図-16 表面熱伝達率の同定結果(外壁外側表面)

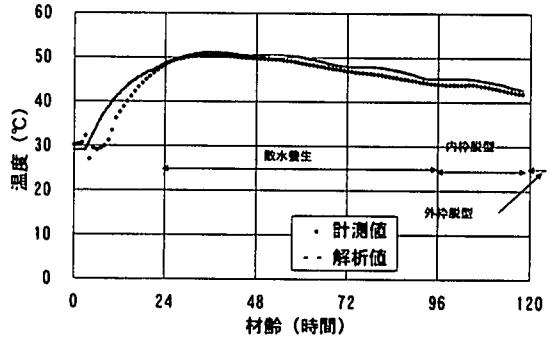


図-17 表面熱伝達率の同定結果(上面部)

こで、流量の安定供給と出入口温度計測を目的としたパイプクーリング自動管理装置を設置した。

本装置は、図-12に示すように対象とするブロックの出入口に温度計、流量計および電磁弁を設けたユニットボックスをセットし、常時流量を測定しながら別の場所に設置した制御盤の流量調節計で所定の流量になるように電磁弁を開閉する機構となっている。流量および温度測定ユニットと制御盤を写真-1、2に示す。また、流量および出入口温度を自動計測して記録計でデータの記録を行うようになっている。本装置は、プログラムによって流量の自動変更も可能となるようになっており、コンクリート内部の温度計測値と連動して、流量を調整することも可能である。本検討では、流量の安定供給と出

入口温度の計測を目的として適用した。

クーリング自動管理装置での流量および出入口温度の計測結果を図-13, 14に示す。また、図-14には第3リフト付近で測定した外気温も併記した。橋脚第3リフトでのコンクリート打込みが7月23日に行われ、部材中央部付近のコンクリート温度が材齢2日で最高温度に達したことから、材齢5日までパイプクーリングを実施し、流量および出入口温度はその期間計測・管理を行った。

流量は、図-13に示すように目標流量30L/minに対し、クーリング実施期間中流量のはらつきは±1L/min程度であり、安定した流量を供給することができた。入口温度は、地下水を汲み上げたものを用いたことから、図-14に示すように外気温が35°C近く温度を示してもほぼ19°Cで一定であった。ただし、外気温が上がる日中では0.3°C程度入口温度が上昇する傾向にあった。これは、地下水を一旦地上のタンク（容量約1m³）に汲み上げ、さらに20m高い第3リフトにある小型のタンク（容量約0.2m³）まで汲み上げた水をクーリング水として用いたことから、その間に温度上昇したものと考えられる。

(3) 温度計測結果を基にした熱特性値の同定解析

パイプクーリングによる熱除去効果および温度ひび割れ抑制効果を評価するために、温度解析に大きな影響を与える断熱温度上昇特性、表面熱伝達率およびパイプ壁面での熱伝達率について、施工時温度計測結果を基にした同定を行った。解析モデルは、事前解析に用いたものを適用した。また、同定する熱特性値以外の特性値に関しては、表-3に示す値を用いた。同定方法として、断熱温度上昇式はパイプクーリングを実施していない中壁で行った。中壁の壁厚は2mあり、コンクリート表面から1mの位置である壁中央部では既往の解析結果から判断して¹⁾、表面熱伝達率の影響をほとんど受けないと考えられる。したがって、この部位で断熱温度上昇式の同定を行った。次に、中壁中央部で断熱温度上昇式を求めた後、側面部および上面部の2箇所での計測結果を基に表面熱伝達率の同定を行った。表面部付近では、パイプ壁面での熱伝達率の影響をほとんど受けず、ほぼ外気温の影響のみを考慮することで同定することが可能となる。また、橋脚周囲は、シートで囲み、風の影響及び日射による影響を極力除く対策を実施した。

断熱温度上昇式および表面熱伝達率同定後、パイプ壁面での熱伝達率の検討を行った。パイプ壁面での熱伝達率は、断熱温度上昇式の影響を大きく受けること、表面熱伝達率も計測期間が長い場合には影響を受ける可能性がある。したがって、パイプ壁面での熱伝達率は上記の二つの熱特性値同定後実施した。同定方法としては、パイプ壁面温度およびパイプ内水温の測定値と解析値が一

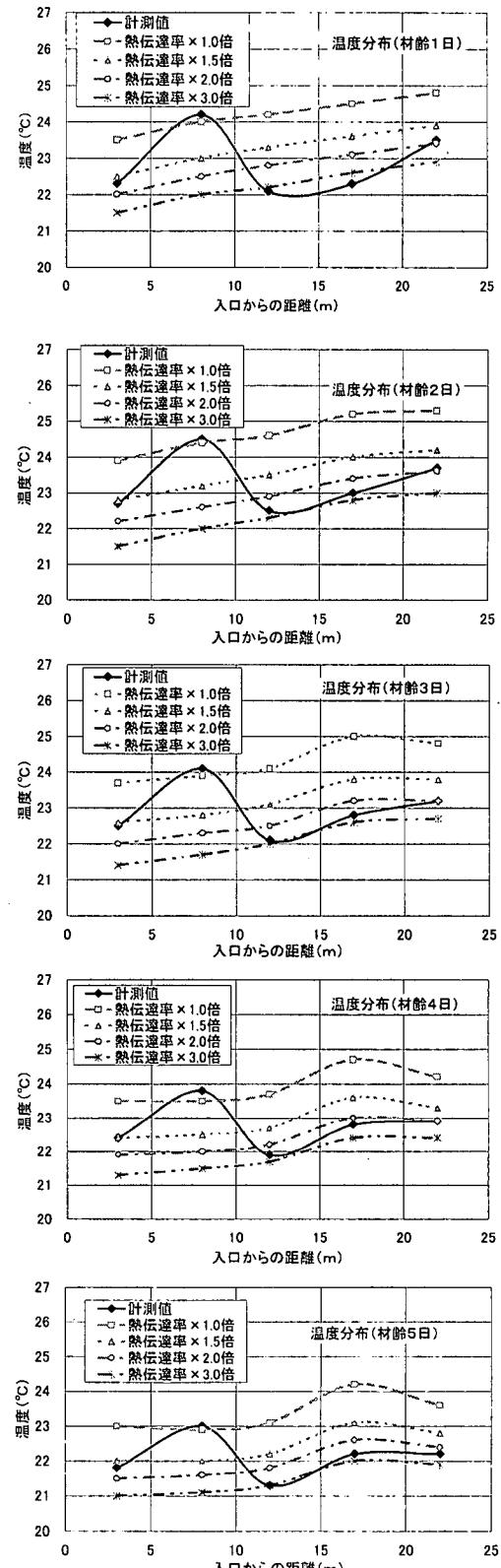


図-18 パイプ壁面での各材齢での温度分布

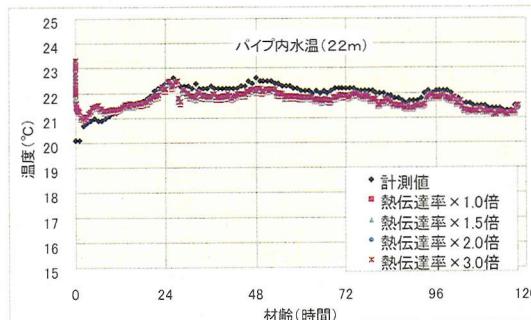
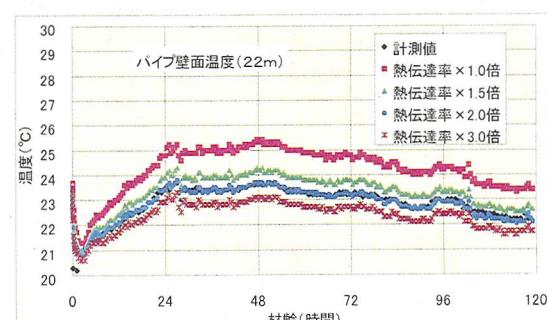
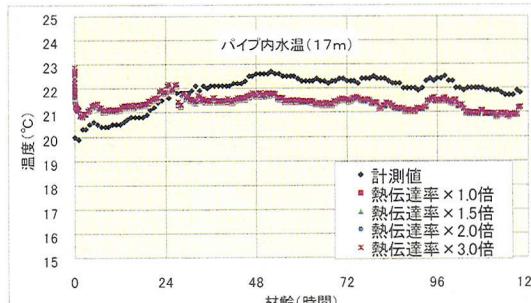
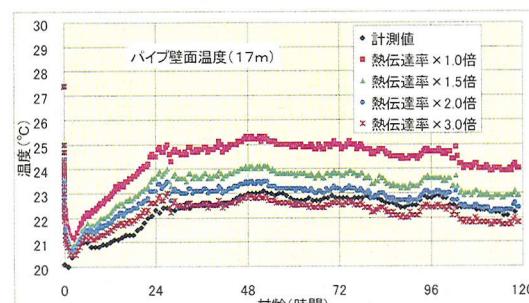
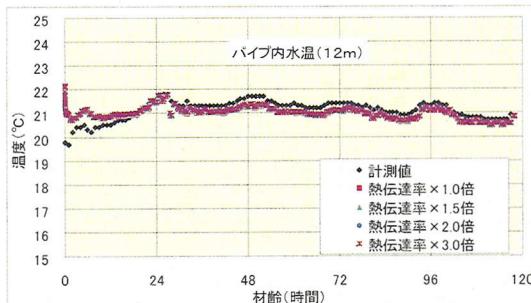
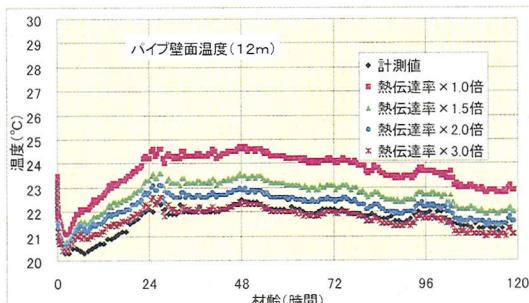
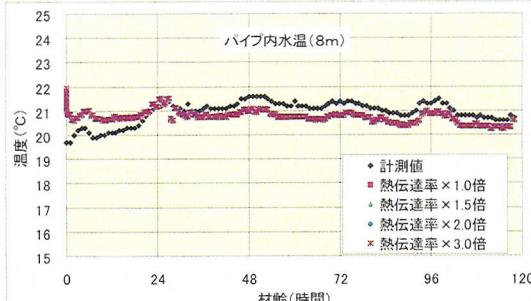
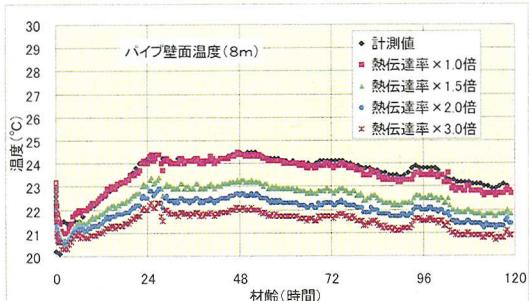
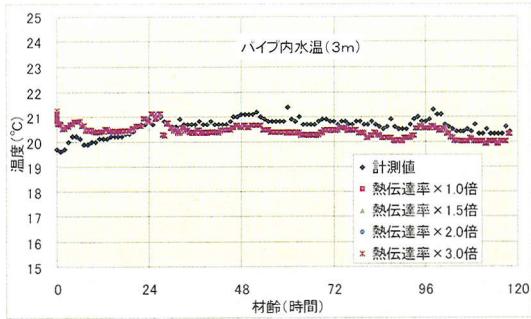
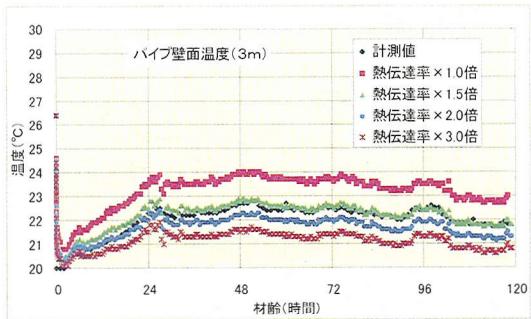


図-19 パイプ壁面での温度計測結果との比較

図-20 パイプ内水温の計測結果との比較

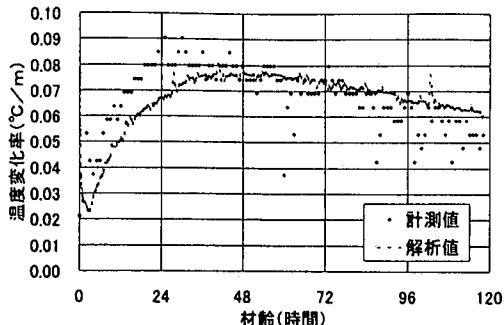


図-21 パイプ内水温の温度勾配の経時変化

致するように熱伝達率を変化させて行った。解析での時間ステップに関しては、事前解析の場合と同様に通水開始直後から10ステップまで10分刻みとし、その後は1時間刻みとした。解析期間は、通水期間中の5日間とした。以下に、各特性値の同定結果を示す。

a) 断熱温度上昇式

断熱温度上昇式は、対象とした第3リフトでパイプクリーリングを実施していない中壁中央部での温度計測結果を基に同定した。計測値との同定結果を図-15に示すとともに、断熱温度上昇式を以下に示す。

$$Q_{(t)} = 42.5 \times (1 - e^{-1.02(t-0.125)}) \quad (8)$$

式(8)は、事前解析に用いた式に比べて終局断熱温度上昇量が約5°C低く、上昇速度に関する定数も0.05小さい結果であった。また、打込み後約3時間は発熱が見られなかったことから、同定解析では遅れ時間を考慮した式とした。

b) 表面熱伝達率

表面熱伝達率は、外壁外側表面および上面部での温度計測結果と比較して同定を行った。ただし、表面熱伝達率の同定解析ではパイプ壁面での熱伝達率の影響を大きく受けないことから、式(7)で求めた値を用いて行った。また、外壁内側の表面熱伝達率の同定については、前述したように橋脚の形状および橋脚側面をシートで覆っていることから、日射や風の影響に関して外側表面部および内側表面部で熱伝達率がほぼ同等であると判断し、計測および同定は橋脚外側のみで行った。計測結果と比較した期間中、側面部は木製型枠を取り付けた状態であった。同定結果を図-16、17に示す。

同定した結果、側面部の表面熱伝達率は、5W/m²°Cとなり、土木学会コンクリート標準示方書に示されている値よりも若干小さい結果であった。上面部については、散水養生（養生水は、パイプクリーリングに用いた水とほ

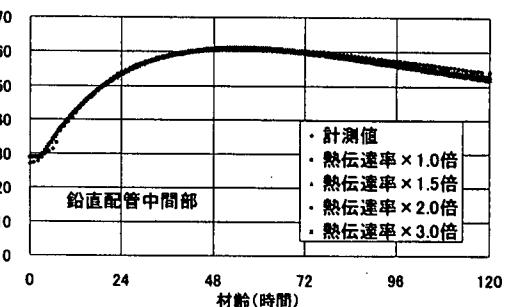
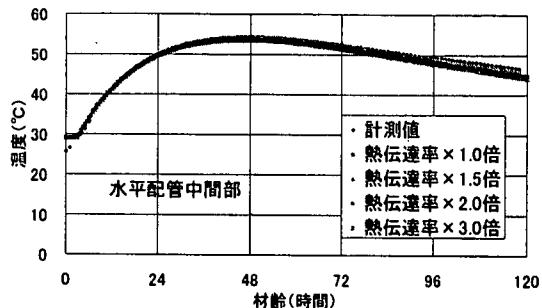


図-22 クーリングパイプ間の温度計測結果との比較

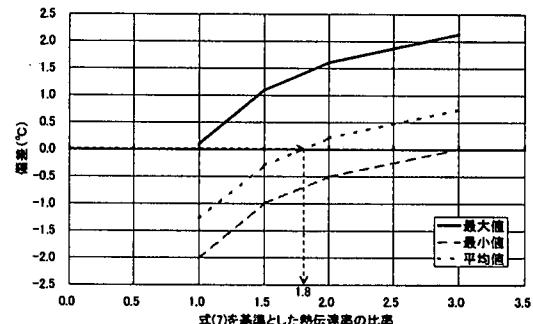


図-23 パイプ壁面の平均熱伝達率と偏差との関係

ば同様であり、18~20°Cであった)を実施していることおよび周囲が型枠およびシートで覆われており風がほとんど当たらなかつたことから、10 W/m²°Cであった。

c) パイプ壁面の熱伝達率

パイプ壁面の熱伝達率の同定に関しては、図-8に示すパイプ壁面温度、パイプ内水温、パイプ間に配置した温度計の計測結果を基に行った。同定に際して、パイプ壁面の熱伝達率は筆者らがこれまで提案している式(7)の値を基準として同定を行った。

パイプ壁面での各位置での温度計測結果とパイプ壁面の熱伝達率を式(7)で求めた値とを比較した材齢1日~5日までの温度分布結果を図-18に示す。また、各計測位置での温度履歴と熱伝達率を変化させた場合とを比較した結果を図-19に示す。

パイプ壁面の温度は、各材齢とも図-8に示す②位置

のリフト中央部での温度が最も高く、外気に比較的近い③位置での温度が低い結果となった。パイプ壁面での熱伝達率に式(7)で算定した値を用いた場合、図-18および図-19からパイプ壁面温度が最も高い②位置（入口から8mの距離）で解析と測定値がよく一致する結果となつたが、その他の位置では計測値よりも約2°C高い結果であった。そこで、パイプ壁面の熱伝達率を式(7)で算定した値の1.5倍～3倍にした場合の解析値と計測値を比較すると、図-18および図-19に示すように入口から3mの距離の①位置では係数の1.5倍で計測値とほぼ一致し、入口から12mおよび17mの距離では係数の3倍、入口から22mの距離では係数の2倍でほぼ一致する結果となり、各計測位置でパイプ壁面での熱伝達率が異なる結果となつた。ただし、図-19に示すように各計測位置での熱伝達率の値が異なるものの、時間経過に伴う挙動は各位置とも計測値とよく一致する結果となつた。

各測定位置でパイプ壁面の熱伝達率が異なつた理由としては、計測に用いた熱電対の測定精度に起因している点があると思われるが、本検討で対象としたリフトが鉄骨や太径鉄筋が配置されており、部材周囲が高密度配筋となっている一方で、リフト中央部では周囲に比べて配筋密度が疎くなつておらず、部位ごとでコンクリートの熱伝導が異なつていることも影響しているものと考えられる。本検討での同定結果では、太径鉄筋や鉄骨等の鋼材が少ないリフト中央部および鉛直方向上部の熱伝達率が1倍～1.5倍であるのに対し、リフト中央部でも水平方向に配置した部位および鉄骨等の鋼材が多い鉛直方向下部では、熱伝達率が2.0～3.0倍となっており、上述した熱伝導の違いが熱伝達率への影響を与えている要因の一つである可能性があるものと考えられる。鉄筋および鉄骨の熱特性値を考慮した解析を実施するためには、鉄筋を考慮した見掛けの熱伝導率を与えることが考えられるが、その場合には熱伝導が卓越する方向に熱伝導率を大きくしてやる必要性がある。特に、本解析のような局部的な冷却方法について検討する場合、鉄筋のある要素に見かけ上当方性の熱伝導率を与えても局所的な温度変化を評価することができず、鉄筋の有無による差異は十分でないものと考えられる。鉄筋部を考慮した解析を実施するためには、鉄筋を要素分割するか、鉄筋を含む見掛けのコンクリート要素について熱伝導率の異方性を考慮する必要があり、実際に解析を行うことは膨大な時間を有することとなる。

一方、無筋であるコンクリートダムにおいて水和発熱時および定常時でのパイプ近傍の温度計測を実施し、本解析手法を適用した事例¹¹⁾では、水和発熱時においてパイプ壁面の熱伝達率を式(7)に示した値よりも大きくする必要があるとしている。一方、定常時ではほぼ式(7)の値が適用できることを示している。これは、パイプ壁

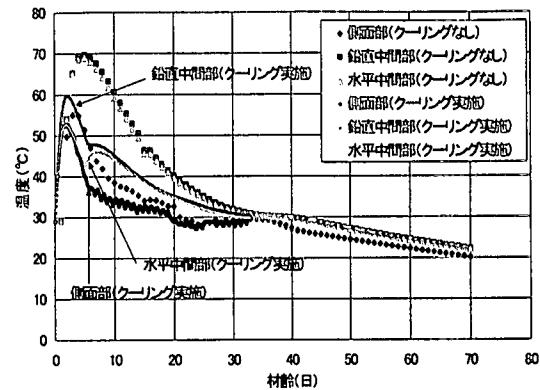


図-24 温度履歴（クーリングの抑制効果の比較）

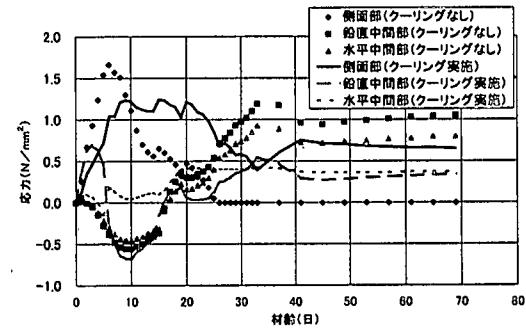


図-25 応力履歴（クーリングの抑制効果の比較）

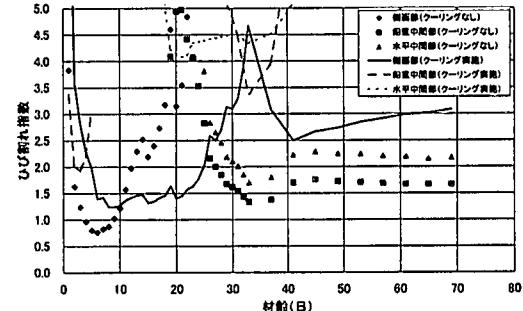


図-26 ひび割れ指数履歴（抑制効果の比較）

面での熱伝達率が鉄筋の有無だけでなく温度上昇時と定常状態では異なる可能性を示しているといえる。さらに、熱伝達率は厳密にある特定の温度条件ごとに異なつて定まるものであり、場所ごとにも局所熱伝達率として異なつて決まるものであつて、一般にどのような場合にも当てはまる熱伝達率は定義上ありえないし、実際問題を解決するためには平均化された熱伝達率を一様に与えて解析する場合が多いとする報告もある¹²⁾。つまり、パイプ壁面の熱伝達はパイプ周辺での熱伝導や温度条件等によって局所的に変化する可能性があり、本解析でのパイプ壁面の熱伝達率の変化は、配筋状況の影響も考えられるが、その他の要因も影響しているものと考えられ、

本解析結果のみで、判断することは難しいといえる。

したがって、現状では計測精度、鋼材などによる部位ごとの熱伝導率の違い、パイプ壁面での熱伝達率の水和発熱時と定常状態で異なること、熱伝達率自体局所的に異なるために部位ごとで変化することなど熱伝達率が変化する要因が種々あると考えられ、本検討のみでそのすべてを評価することは難しく、他の構造物の同様な計測結果と解析結果との比較から検討していく必要がある。

実際、図-19に示すようにパイプ壁面での解析値と測定値との差異は1~2℃程度であり、クーリングパイプ間の温度履歴については、計測値と解析値とを比較した結果、図-22に示すように水平中間部および鉛直中間部において、式(7)で算定された熱伝達率の倍率を大きくしてもその差異は1℃以下で熱伝達率の変化が解析値に大きな影響を与えていないのがわかる。また、パイプ内水温は、図-20に示すように解析値が熱伝達率の変化による影響をほとんど受けず、ほぼ同様な値を示し、計測値ともほぼ一致する結果となり、図-21に示すように各材齢での計測値と解析値との温度勾配（出入口水温の差をパイプ長で除した値）もほぼ一致する結果となった。

以上の結果から、パイプ壁面での熱伝達率の変化はパイプ中間部に対する影響が比較的小さいことを考慮して、本検討ではパイプ壁面での熱伝達率を今回の測定区間全体で最も偏差が小さくなる平均熱伝達率を用いることとし、図-23に示すように式(7)の熱伝達率に対する比率と各部位の計測値と解析値の偏差の平均値との関係から算定した。その結果、式(7)の熱伝達率を1.8倍した1123W/m²℃を本検討対象部位でのパイプ壁面での平均熱伝達率として用いることとした。

(4) 同定解析結果を基にした温度応力解析

前項の熱特性値の同定解析結果を用いて、パイプクーリング実施による温度ひび割れ抑制対策効果を比較検討するための温度応力解析を行った。解析では、同定解析で用いたのと同じ第2~4リフトの橋軸方向外壁のみをモデル化したものを用いた。解析条件のうち断熱温度上昇式、表面熱伝達率およびパイプ壁面での熱伝達率は、前項で同定した値を用いることとした。また、圧縮強度は第3リフト打設時の品質管理試験結果を基に算定した強度発現式を用いた。その他の熱定数および力学的特性値に関しては、表-3に示す値を用いた。圧縮強度発現式を以下に示す。

$$f_c(t) = 21.53 \log(M) - 29.3 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (9)$$

ここで、Mは積算温度(h℃)である。

解析は、パイプクーリングを実施した場合と実施しなかった場合の比較を行った。解析結果を図-24~26に示

す。パイプクーリングの有無に関して比較した部位は、図-8のリフト中央断面での水平中間部、鉛直中間部および側面部である。

図-24から、パイプクーリングによる熱除去効果は、水平中間部で約25℃、鉛直中間部で約20℃であった。事前解析では、クーリングによる熱除去効果が水平中間部で約17℃、鉛直中間部で約8℃であった。これは、事前解析で用いたパイプ壁面での熱伝達率よりも事後解析で用いた熱伝達率の方が倍近く大きいために、パイプクーリングによる吸熱量自体が大きくなり、実施工での熱除去効果が事前解析で想定したものよりも高い結果を示したためと考えられる。

一方、リフト中央部と表面部との温度差は、パイプクーリングを実施しない場合で約25℃であったのに対して、パイプクーリングを実施した場合で約13℃であり、パイプクーリングを実施することで部材の内外温度差を大幅に低減する結果となつた。事前検討においても、内外温度差がクーリングを実施しない場合で21℃、実施した場合13℃であり、ほぼ予想した結果と一致した。

各部位での主応力を比較した結果では、図-25に示すように材齢初期での表面部の引張応力がパイプクーリングを実施することで約0.4N/mm²低減される結果となつた。事前解析でも0.5N/mm²低減される結果となつておらず、予想した効果とほぼ同様の結果となつた。水平中間部および鉛直中間部では、最大引張応力がパイプクーリングを実施することにより半分以下まで低減される結果となつた。

温度ひび割れ指数に関しては、図-26に示すように表面部の最小温度ひび割れ指数が1.0未満となつたのに対して、パイプクーリングを実施した場合には最小温度ひび割れ指数1.3となつた。このことは、パイプクーリングが内部拘束応力による表面部の温度ひび割れ抑制に対して効果があったことを示すものである。部材内部については、鉛直中間部の最小温度ひび割れ指数が1.5を下回っているのに対して、パイプクーリングを実施した場合には3.0以上となり、温度ひび割れ抑制対策として高い効果が得られる結果となつた。

以上の結果から、実施工での温度計測結果を基にした熱特性値の同定解析結果と品質管理データを用いた事後解析結果から、コンクリートの発熱が事前解析に比べて約5℃小さかったものの、パイプクーリングによる温度ひび割れ抑制効果は、事前に予測した結果とほぼ同様な効果があつたものと考えられる。これは、筆者らが提案した解析手法がパイプクーリングによる熱除去効果を適切に評価していることを示すものである。事後解析では、圧縮強度の発現が事前解析よりも速かったことから、コンクリート表面部でのひび割れ指数が若干小さい値を示したが、第3リフト打設後3ヶ月以上経過した段階でも

部材表面部に温度ひび割れの発生は確認されておらず、パイプクーリングによる温度ひび割れ抑制対策の効果があったことを示しているといえる。

6. 結論

本論文は、コンクリート構造物のパイプクーリングによる温度ひび割れ抑制効果について、筆者らが提案した解析手法を用い、事前に温度ひび割れ抑制に最適な位置へのクーリングパイプ配置の選定を行うとともに、実施工での温度ひび割れ抑制効果を確認するために施工時温度計測を実施し、その計測結果を基に同定解析を実施した。さらに、同定した結果を用いてパイプクーリングによる温度ひび割れ抑制効果の検討を行った。

本論文で得られた結果を以下に示す。

- (1) パイプクーリングによる温度上昇量の低減を主眼とした温度ひび割れ抑制対策は、事前に温度ひび割れ抑制に最も効果がある部位にクーリングパイプを配置することで、温度ひび割れ抑制に対して効果があるといえる。また、最適なクーリングパイプの配置を選定する方法としては、筆者らが提案している解析手法を適用することで、立体配置のような複雑なパイプ配置でも最適配置を選定することが可能であることが確認された。
- (2) パイプクーリングによる熱除去効果は、温度上昇量の低減による温度ひび割れ抑制ばかりでなく、部材全体の温度差を小さくすることによって、内部拘束応力を低減する効果をも有しており、表面ひび割れ抑制対策としても高い効果を有している。ただし、今回のように通水量を多くし、短期間で多量の熱除去を行うことによって温度ひび割れ抑制効果を高めようとする場合には、クーリングパイプの過密配置による過冷却を十分留意する必要がある。
- (3) パイプ壁面での熱伝達率は、太径鉄筋や鉄骨等の鋼材が少ない部位で筆者らが提案している値の1倍～1.5倍であるのに対し、高密度配筋部に近い部位では、2.0～3.0倍と示す結果となり、鋼材による部位ごとの熱伝導の違いが影響している可能性が考えられる。より精度の高いパイプ壁面での熱伝達率算定のためには、今後鉄筋および鉄骨の熱特性値を考慮した解析を実施していく必要がある。さらに、水和発熱時にはパイプ壁面での熱伝達率が筆者らの提案している値よりも大きくなるという報告もあり、他の構造物での計測事例などを含めたパイプ壁面での熱伝達率の検討が必要である。
- (4) 今回の検討結果から、比較的部材寸法が小さく、粉体量が多く、かつ打設量が比較的少ない構造物に対

して、十分な事前検討を実施すれば温度ひび割れ抑制にパイプクーリングを適用することは非常に有効な手段である。

謝辞：本論文において、河北潟放水路橋左岸JV事務所の方々には計測の実施に際して多大なる御協力をいただきました。さらに、(株)計算力学研究センターの吉川信二郎氏および石井宏一氏には、解析作業において御協力いただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.14, 最新のマスコンクリート技術, 1996.
- 2) U.S. Bureau of Reclamation : Boulder Canyon Project Final Reports, Part VII-CEMENT AND CONCRETE INVESTIGATIONS, Cooling of Concrete Dams, 1949.
- 3) 加島聰, 藤田時男 : 吊橋下部工マスコンクリートのクーリングによる温度制御, コンクリート工学, vol.24, No.6, pp.21～31, 1986.
- 4) 宮城敏明, 石川雅美, 渡辺弘子 : パイプクーリングによるマスコンクリート温度ひび割れ対策について, 土木学会年次学術講演会講演概要集 第V部門, vol.49, pp.592～593, 1994.
- 5) 藤田哲夫, 仲義史 : PC桁柱頭部における温度ひび割れ対策, 阪神高速道路公団技報, No.12, pp.104～112, 1992.
- 6) 清宮理, 野口孝俊, 横田弘 : コンクリート部材の温度ひび割れ発生の簡易予測法の適用, 港湾技研資料, No.664, 1990.
- 7) 田邊忠顯, 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, 土木学会論文集, No.343, pp.171-179, 1984.
- 8) 田邊忠顯, 溝淵利明 : パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達係数についての検討, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol.5, pp.73-76, 1983.
- 9) 溝淵利明, 田邊忠顯 : マスコンクリートのパイプクーリングによる熱除去効果の解析, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol.7, pp.37-40, 1985.
- 10) Gallagher, R.H.: Finite Element Analysis Fundamentals, pp.117-124, Maruzen Co.,Ltd., 1976.
- 11) 国松祥弘, 溝淵利明, 森田義則, 梅原秀哲 : パイプクーリングによる温度制御の影響範囲に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, 第21巻, 第2号, pp.1159-1164, 1999.
- 12) 伊坂大輔, 溝淵利明, 豊島弘三, 森山信弘 : ダム洪水吐の施工時温度応力の制御方法に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1507-1512, 1997.
- 13) 溝淵利明, 峰村修, 藤原和也, 阪田昇 : アーチ式ダムにおける2次クーリングが温度応力に及ぼす影響に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, vol.19, No.1, pp.1513～1518, 1997.
- 14) 本田幸一, 大隅敏伸 : 広沢ダム堤体温度管理について, 農業

- 土木学会大会講演会講演要旨集, vol.72, pp.33~36, 1991.
- 15)角谷和一郎:本庄川ダムのクーリング計画とその実施について, 農業土木学会京都支部研究発表会講演要旨集, vol.48, pp.176~177, 1991.
- 16)国立天文台:理科年表, 1998.
- 17)伊藤洋, 坂口雄彦, 西山勝栄, 森季清就:パイプクーリン
- グ効果の高精度予測に関する研究, 土木学会論文集, No.396
／V-9, pp.29~37, 1988.
- (2000.1.27受付)

CONTROL OF THERMAL CRACKING BY PIPE-COOLING SYSTEM IN CONCRETE STRUCTURES

Toshiaki MIZOBUCHI, Yasuyuki FUTATSUKA and Yoshinori MURAO

A pipe cooling system is one of the major methods that are used to control thermal stress of concrete structures. In this study, three-dimensional finite element method to consider the heat balance between concrete and water in cooling pipes was used to estimate the effect of controlling thermal cracking by the pipe cooling system stationed three-dimensionally and suitably for the part of a pier in the cable stayed bridge. Therefore, this theoretical method showed applicability for estimating the effect of control of thermal cracking.