

マスコンクリートのパイプクーリングによる 熱除去効果に関する研究

溝淵利明¹・成田総一郎²・都築慶剛²・平戸裕之³・田邊忠顕⁴

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農林水産省 東北農政局山王海鹿妻農業水利事業所 (〒028-3306 岩手県紫波郡紫波町日詰西 1-2-1)

³正会員 鹿島東北支店 山王海ダム JV 工事事務所 (〒028-3453 岩手県紫波郡紫波町土館字弥勒地 5-1)

⁴正会員 工博 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学教室 (〒463-0001 愛知県名古屋市千種区不老町)

本研究では、マスコンクリートの温度ひび割れ抑制対策の有効な手段のひとつであるパイプクーリングについて、実構造物への適用を目的に筆者らがこれまで提案しているパイプ内の流速をもつ水の熱収支を考慮したモデルを用いて、3次元有限要素法による解析手法を適用して、流量変化、通水温度変化および流速方向を変化させたダム洪水吐での実測値と比較検討した。その結果、本解析値はパイプ内の水温、パイプ壁面温度および周辺部の温度について実測値の挙動とよく一致したことから、本解析手法がパイプクーリングによる熱除去効果を評価する方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 cracks, crack control, thermal stress

1. はじめに

ダムや長大橋梁基礎などのマスコンクリート構造物では、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発生の可能性が高く、構造物の耐久性や止水性の観点から極力抑える必要がある。また、最近では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用いた構造物の施工が増加しており、これまでマス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ひび割れ発生の可能性が増大している。

施工時の温度応力によって生じるひび割れを制御するためには、通常事前に設計、材料、施工の各面からの制御対策を構造物の重要度に応じて検討する必要がある。

ひび割れ抑制対策方法としては、セメントの水和発熱自体を抑える低発熱セメントの使用や単位セメント量の低減、硬化時に膨張圧を与え、ケミカルプレストレスによって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材など材料・配合によるものや、練りま

ぜ水の一部に水を用いるもの、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、パイプクーリングを代表とするポストクーリング等各種の方法があり¹⁾、構造物の形状、施工場所、環境条件、施工条件やコンクリートの打込み量、制御効果等の条件によって実施する方法の選定が行われる。

このうちパイプクーリングは、従来からダムや長大橋梁基礎の非常にマッシブなコンクリート構造物に適用されており、パイプ間隔、パイプ配置、通水量、通水温度および通水期間を調整することで、コンクリート打込み後の温度上昇を制御することが可能なポストクーリングのひとつであり、セメントの水和熱に起因する温度応力の抑制には有効な方法である。

パイプクーリングの熱除去効果に関する予測技術は、Hoover ダムで提案された手法²⁾が長く適用されてきたが、大型コンピュータによる大容量解析が可能となった1980年代以降有限要素法を適用したいくつかの解析手法が提案されている^{3)~8)}。筆者らもクーリングパイプ壁面において特殊な熱伝達境界を設けた3次元解析手法を提案している^{9)・10)}。

本研究は、ひび割れ抑制対策としてのパイプクーリン

グの熱除去効果を検討するために、ロックフィルダムの洪水吐を対象に、パイプクーリングを実施するリフトでの施工時温度計測および計測結果を基に、本解析手法を適用して、解析手法の妥当性の評価を行った。

2. パイプクーリングによる熱除去を考慮した解析手法

パイプクーリングによる熱除去効果を定量的に求めようとする場合、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、かつ個々の熱伝達境界は場所および時間によって異なることを考慮した解析手法を確立する必要がある。また、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つの場を連成させて解く必要がある。さらに、パイプの配置は1次元方向だけでなく、平面的な場合が多く、立体的に配置する場合もあり、3次元的に考慮した解析手法が必要となってくる。このことは、配置されたパイプの入口から出口まですべて網羅した部位で、かつ3次元的に解析する手法が確立して初めて精度良くパイプクーリングの熱除去効果を評価できることになる。

(1) コンクリート場における熱伝導解析

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ることとした⁹⁾。

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

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, 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。

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

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_w : 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係数 (W/m²°C) , T_w : パイプ内の水温 (°C) である。

式(1)に Galerkin 法¹¹⁾を適用し、熱伝導項に部分積分およびガウスの定理を適用すると次式が得られる。

$$\int_S \delta T_c \lambda \left(\frac{\partial T_c}{\partial x} l + \frac{\partial T_c}{\partial y} m + \frac{\partial T_c}{\partial z} n \right) ds + \int_V \delta T_c \left(Q(t) - \rho c \frac{\partial T_c}{\partial t} \right) dV - \int_V \lambda \left(\frac{\partial \delta T_c}{\partial x} \frac{\partial T_c}{\partial x} + \frac{\partial \delta T_c}{\partial y} \frac{\partial T_c}{\partial y} + \frac{\partial \delta T_c}{\partial z} \frac{\partial T_c}{\partial z} \right) dV = 0 \quad (4)$$

ここで、 δT_c : コンクリート温度の重み関数である。

式(2)および式(3)の境界条件式を式(4)の面積分項に代入して整理すると、以下の式となる。

$$\int_V \lambda \left(\frac{\partial \delta T_c}{\partial x} \frac{\partial T_c}{\partial x} + \frac{\partial \delta T_c}{\partial y} \frac{\partial T_c}{\partial y} + \frac{\partial \delta T_c}{\partial z} \frac{\partial T_c}{\partial z} - Q(t) + \rho c \frac{\partial T_c}{\partial t} \right) dV + \int_{S_1} \delta T_c \{ \eta(T_c - T_w) + q_s \} dS_1 + \int_{S_2} \delta T_c h(T_c - T_w) dS_2 = 0 \quad (5)$$

ここで、 S_1 : 外気との境界面 (m²) , S_2 : パイプ壁面の面積 (m²) である。

式(5)について、コンクリート温度 T_c をマトリクス表示すると以下の式となる。

$$[K_c] \{T_c\} - [K_w] \{T_w\} + [C] \frac{\partial T_c}{\partial t} = \{F_c\} \quad (6)$$

$$[K_c] = \int_V [B]^T [D] [B] dV + \int_{S_1} \eta [N_c]^T [N_c] dS_1$$

$$+ \int_{S_2} [N_c]^T + \int_{S_2} h [N_c]^T [N_c] dS_2$$

$$[K_w] = \int_{S_2} h [N_c]^T [N_w] dS_2$$

$$[C] = \rho c \int_V [N_c]^T [N_c] dV$$

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

ここで、 $[B]$: 温度勾配マトリクス, $[D]$: 伝導係数マトリクス, $[N_c]$: コンクリート温度に関する形状関数マトリクス, $[N_w]$: クーリングパイプ内水温に関する

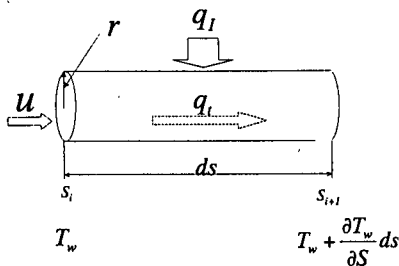


図-1 クーリングパイプでの熱収支

る形状関数マトリックスである。

(2) パイプ内水温に関する支配方程式¹⁰⁾

クーリングパイプ内の水温は、パイプ内の流速 u 、入口水温 T_w 、管径 r 、パイプ壁面温度 T_c 、パイプ壁面の熱伝達率 h およびパイプ入口からの距離 S 等多くの要因によって決定される。

$$T_w = f(u, T_w, r, T_c, h, S) \quad (7)$$

したがって、パイプ内の水温を求める場合には、式(7)に示す各要因を網羅した方程式を求める必要がある。そこで、図-1に示すような微小区間 dS を考え、この微小区間内でのパイプ壁面とパイプ内の水の熱収支を求めることによって、式(7)の各要因を満足するパイプ内水温の支配方程式を求めることとした。

一方、クーリングパイプはコンクリート内を平面的または立体的に網の目のように配置されており、デカルト座標上で考えた場合、3次元の方程式を考える必要があり、煩雑な式となる。そこで、本研究では、クーリングパイプはコンクリート部材内では分岐配管しないものとし、管入口から出口まで一本の管であるとして、管に沿った極座標を用いることとした。このように管に沿った極座標とすれば、管内の水の流れは一次元であると考えることができる。

いま、管入口からの距離が S である微小区間 dS において、パイプ内の水は S_i から S_{i+1} の方向に流速 u で流れているとする。この時、 S および S_{i+1} の水温は以下の値となる。ただし、パイプ断面内の温度分布は一様であるとする。

$$T_w(S_i) = T_w, \quad T_w(S_{i+1}) = T_w + \frac{\partial T_w}{\partial S} dS \quad (8)$$

式(8)の微小区間 dS における温度変化に対して、 dS 区間内での熱変化量 q_c は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} q_c &= \rho_w C_w r^2 \pi d S u (T_w(S_{i+1}) - T_w(S_i)) \\ &= \rho_w C_w r^2 \pi d S u \left(T_w + \frac{\partial T_w}{\partial S} dS - T_w \right) = \rho_w C_w r^2 \pi d S u \frac{\partial T_w}{\partial S} dS \end{aligned} \quad (9)$$

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

また、微小区間 dS のパイプ壁面から流入する熱量 q_l は以下の式で与えられる。

$$q_l = 2\pi r d S h (T_w - T_c) \quad (10)$$

さらに、この微小区間 dS での時間変化に伴う熱変化量 q_t は以下の式で与えられる。

$$q_t = \rho_w C_w r^2 \pi d S \frac{\partial T_w}{\partial t} \quad (11)$$

微小区間 dS での熱収支は、区間内での熱量変化、パイプ壁面での吸熱および時間変化による熱量変化の総和となる。

$$q_c + q_l + q_t = 0 \quad (12)$$

式(12)の各項に式(9)～式(11)を代入すれば、パイプ内水温の支配方程式を得ることとなる。

$$\begin{aligned} \rho_w C_w r^2 \pi u \frac{\partial T_w}{\partial S} dS + 2\pi r d S h (T_w - T_c) + \rho_w C_w r^2 \pi d S \frac{\partial T_w}{\partial t} \\ = \rho_w C_w u \frac{\partial T_w}{\partial S} + \frac{2h}{r} (T_w - T_c) + \rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \end{aligned} \quad (13)$$

式(13)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、10l/分～20l/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(13)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。

$$\begin{aligned} [K_w] \{T_w\} - [K_{wc}] \{T_c\} + [W] \frac{\partial \{T_w\}}{\partial t} = 0 \quad (14) \\ [K_w] = \rho_w C_w u \left[[N_w]^T [N_w] \right]_{S_i}^{S_{i+1}} - \rho_w C_w u \int_S \frac{\partial [N_w]}{\partial S} [N_w] dS \\ + \frac{2h}{r} \int_S [N_w]^T [N_w] dS \\ [K_{wc}] = \frac{2h}{r} \int_S [N_w]^T [N_c] dS \end{aligned}$$

$$[W] = \rho_w C_w \int_S [N_w]^T [N_w] dS$$

(3) クーリング効果を考慮した解析手法

パイプクーリングによる熱除去効果の解析は、式(6)および式(14)を連成して行うことで可能となる。また、解析手法としては有限要素法を用いることとする。ただし、式(14)における $[K_w]$ マトリックスは非対称となることから、マトリックスの解法として非対称行列をも解法可能な手法を選定する必要がある。さらに、実構造物を解析する場合には、数万節点、数千ステップに及ぶ大容量の解析を行う必要がある。そこで、非対称行列が解法可能でかつ大容量解析にも適している反復法の一つである共役勾配法^{1,2)}を適用することとした。

a) パイプ水温の初期温度および時間ステップ

パイプクーリングによる解法の場合、パイプ内水温とパイプ壁面温度の初期値を比較した場合、10℃以上の温度差を生じている場合が多く、局所部での大きな温度勾配により、解法初期の時間ステップおよびパイプ周辺部の要素分割を適切に与えないと解が発散または振動してしまう可能性が高い。ただし、共役分配法を適用すれば反復による解の収れん性が高く、要素分割および時間ステップにそれほどとらわれることなく解を求めることが可能となる。しかしながら、局所的に10℃以上の温度差を初期温度として与えることは、反復回数の増大や誤差の累積による解の精度低下を招くことになることから、本解析では、便宜的にパイプ内の水の初期温度にパイプ壁面の温度を与え、次ステップからパイプ水温を与えることで、解の発散および振動を抑制する手法を用いた。ただし、パイプ内水温が実挙動と大きく異ならないように、解析初期の数ステップについては、数分単位でのステップ間隔を用いることとした。

b) パイプ近傍の要素分割

クーリングパイプ周辺部での要素分割については、図-2に示すように半径2mの円の中央にパイプを設置し、パイプの敷設方向に対して直交する断面について放射線状に10cmおよび50cm間隔で要素分割した2次元モデルを用い、定常状態での厳密解との比較を行った。

その結果、パイプ近傍ではパイプ位置から10cm以上の幅で要素分割した場合、図-3に示すようにパイプ近傍で厳密解に比べてコンクリート温度が高くなり、その他の部位では低くなる結果となった。したがって、パイプ近傍の要素分割は、10cm以上としても50cmまで要素分割を粗くしなければ厳密解とほぼ近い結果が得られると考えられるが、発熱時のパイプ周辺部の温度勾配を考慮した場合、要素分割を粗くすることは実挙動と異なることが予想される。そこで、本解析手法に関してパイプ敷設方向に直交する断面についてパイプ位置からの要

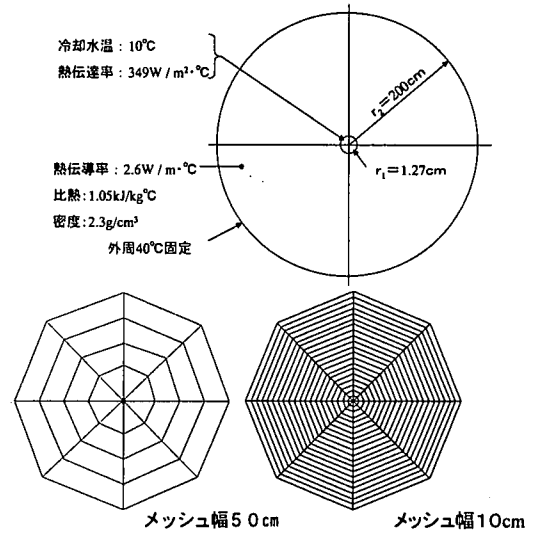


図-2 パイプ近傍の要素分割

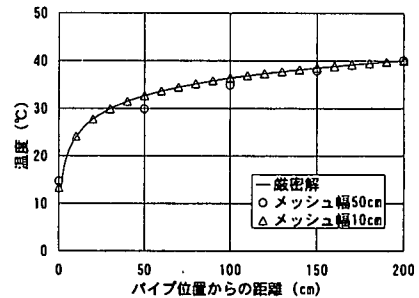


図-3 パイプ近傍での要素分割の影響

素分割は、10cm以内とした。パイプ敷設方向については、温度変化が直交方向に比べて小さいことから、要素数および節点数が増加しない程度に要素間隔を定めることとした。ただし、一般に1要素の縦横比が大きくなると解析精度が低下するといわれていることから、パイプ敷設方向の要素分割は最大でも1mを越えないようにすることとした。

3. ダム洪水吐におけるひび割れ抑制対策事例

2. で求めた解析手法を用いてパイプクーリングによる熱除去効果について評価するために、ダム洪水吐のひび割れ抑制対策として適用された事例を用いて検討を行った。

(1) 構造物の概要

本研究で対象としたのは、ロックフィルダムの洪水吐のうちダム堤体と接するダム軸ブロックであり、壁厚2.0~13.5m、1ブロックの幅が最大16m、高さ17.5m

平面図

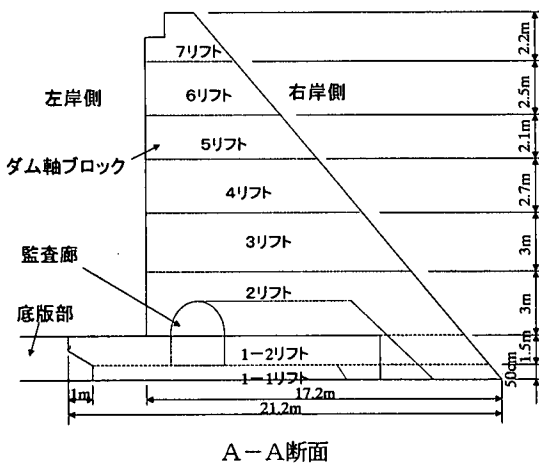
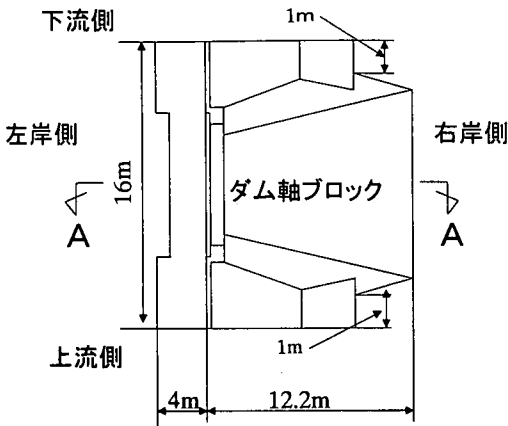


図-4 構造物の概要(ダム軸ブロック)

のマッシブな構造物である。当該ロックフィルダム洪水吐は、側水路、取水水路、急流水路および減勢工からなり、このうち、減勢工部、ダム軸ブロックおよび側水路部は、マッシブなコンクリート構造物となる。特に、ダム軸ブロックはダム堤体と接するため、高い止水性が要求される部位であることから、温度ひび割れを極力生じさせないための抑制対策が講じられることとなった。構造物の概要を図-4に示す。

(2) 使用材料およびコンクリート配合

本構造物では、セメント等の供給の点からひび割れ抑制を目的とした低発熱セメントの適用が難しいこと、ポンプ圧送による施工となるため、単位セメント量の低減が難しいことから、本検討では施工法によって温度ひび割れ抑制対策を講じることとした。本構造物で用いた材料および配合を表-1および表-2に示す。

表-1 使用材料

項目	摘要
セメント	フライアッシュセメントB種
	密度:2.95kg/ℓ, 比表面積:3240cm ² /g
細骨材	北上川産川砂および紫波町産砕砂
	混合質量比:7(川砂):3(砕砂) 表乾密度:2.58kg/ℓ, 吸水率:2.7%, 粗粒率:2.75
粗骨材	北上川産川砂利および黒川産碎石
	粗骨材最大寸法:40mm
	混合質量比:7(川砂利):3(砕石) 表乾密度:2.70kg/ℓ, 吸水率:2.0%, 粗粒率:6.95
混和剤	AE減水剤標準形

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
54.8	42.5	142	259	794	1129	2.59

設計基準強度: 24 N/mm² スラブ: 8 cm
空気量: 4 %

(3) 温度ひび割れ抑制対策の選定

当該ブロックでは、施工に際して構造物の形状、施工時期を考慮した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。特に、部材厚の大きい第2~第4リフトの施工時期が7~8月の暑中時期となることから、これらのリフトを中心に抑制対策の検討を行った。

事前検討で対象とした温度ひび割れ抑制対策は、液体窒素によって打込み温度を5℃低減するブレーキング、暑中時に施工する第2リフト~第4リフトまでのリフト厚を2分割(1.5m厚)~6分割(0.5m厚)まで低減する方法およびリフト打継ぎ部およびリフト中央部に1mピッチで配置したパイプクーリングの3つの方法とした。ただし、パイプクーリングにおけるパイプ位置およびパイプ間隔は、減勢工部でパイプクーリングの実施の有無によるクーリング効果検討での温度計測結果¹³⁾を基に行った事後解析から、クーリングパイプをリフト中央部に配置することでひび割れ抑制対策に効果があったこと、パイプクーリングによる温度低減効果が見られた範囲は30~50cmであったことから、リフト中央部でのパイプ配置およびパイプ間隔を1mとした。また、各抑制対策を比較するために、温度ひび割れ抑制対策を実施しないケースについても温度応力解析を実施した。

検討の結果、ブレーキングで打込み温度を5℃低減した場合よりもパイプクーリングを実施したほうが、ひび割れ抑制効果が高いと予想されたこと、リフト厚の低減に関しては、50cm厚まで低減すればパイプクーリングを実施するよりも効果が高くなる結果となったが、打継ぎ部が当初よりも6倍多くなり、構造物の一体性および施工性の点から判断して同等の効果が得られるパイプクーリングを実施することとした。

次に、パイプクーリングを実施するリフトに関しては、解析結果から、最小ひび割れ指数で1.5よりも小さくなるリフトを対象とした。その結果、第1-2, 2, 3リフトまでパイプクーリングを実施することとした。ただし、第3リフトのクーリング期間については、クーリングを実施しない第4リフトへの影響を考慮して、第3リフトの部材中央部のコンクリート温度が最高温度に到達した後は、クーリングを停止する方法とした。

4. パイプクーリングによるひび割れ抑制対策

(1) パイプレイアウトと通水条件

パイプクーリングを敷設するダム軸ブロックは、図-4に示すように部材中央部に堤体からの監査廊が横断する。そこで、クーリングパイプが監査廊を横断する部分については、監査廊高さの半分より低い位置において監査廊から50cm以上離れた下のリフトに敷設し、監査廊高さの半分以上に位置する部分については、監査廊から1m以上離して通すようにし、監査廊表面付近を急冷しないようにした。また、各リフトに敷設するクーリングパイプは打継ぎ面上およびリフト中央部を1本のパイプとした。これは、1コイルのパイプ延長が200m程度であり、これまでのダム等におけるパイプクーリングの実績から1コイルであっても十分熱除去効果はあると判断した。パイプクーリングの断面方向での配置を図-5に示すとともに、第2リフトでのパイプレイアウトを図-6に示す。

クーリング水は、熱除去効果に大きな影響を与えることから、冷気装置を用いて冷水を供給した。通水温度は、15℃を目標とした。通水量は、これまでのダム等のパイプクーリングでの実績を基に、部材コンクリート温度が最高温度に達するまで20 l/分 (66cm³/秒) とし、その後はコンクリート温度の日降下量が1℃以上にならないように流量を低減し、材齢14日でクーリングを停止した。コンクリートが最高温度に達した後もパイプクーリングを実施したのは、マッシュなコンクリート構造物において最高温度に達した段階で停止した場合、図-7の概念図に示すように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、次リフト打込みまで緩やかに冷却し、クーリングの効果を極力引き出すこととした。ただし、前述したように第3リフトでは、パイプクーリングを実施しない第4リフトとの温度差を大きくしないようにすることを考慮し、最高温度に達した時点でクーリングを停止することとした。また、通水方向は部位による冷却のばらつきを極力低減するために、1日に一回切り替えた。冷却水の流量パターンおよび通水方向パターンを図-8に示す。

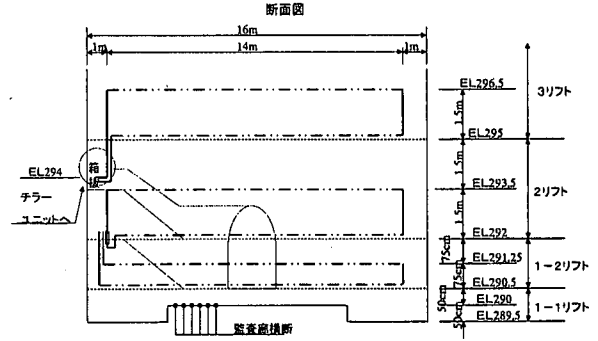
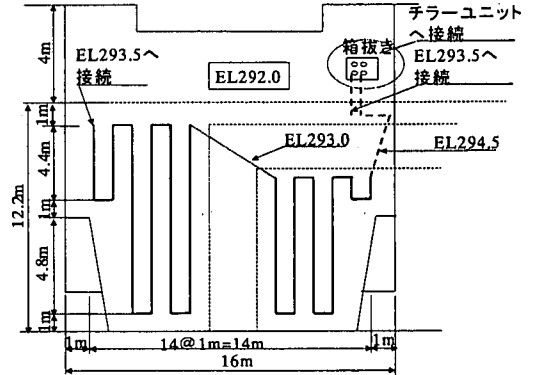
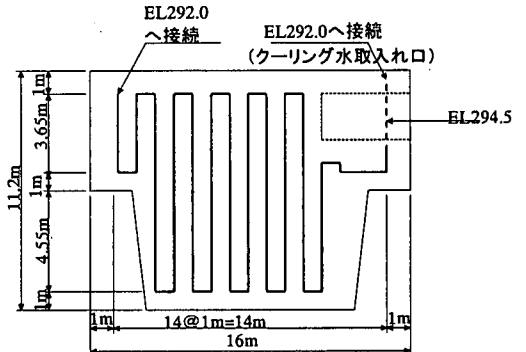


図-5 クーリングパイプ配置 (断面方向)



クーリングパイプ配置 (第2リフト打継ぎ面上)



クーリングパイプ配置 (第2リフト中央部)

図-6 クーリングパイプ配置 (平面方向)

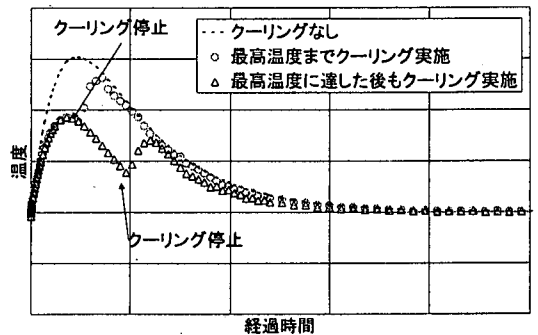


図-7 パイプクーリング実施期間の影響 (概念図)

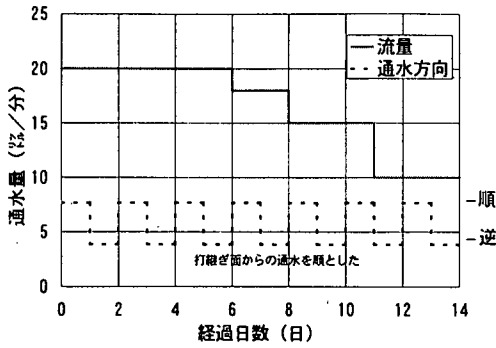


図-8 パイプクーリングの通水パターン

第2リフト中央部平面図
クーリング水温確認用熱電対配置図

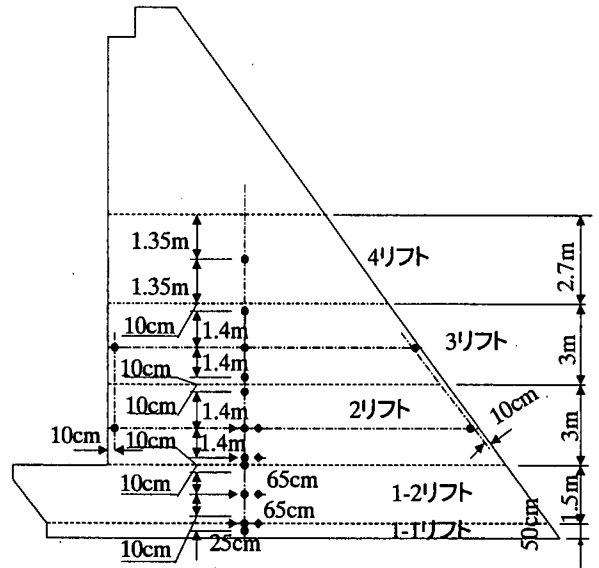
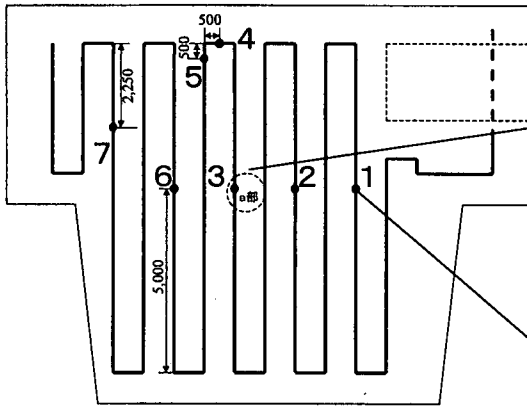
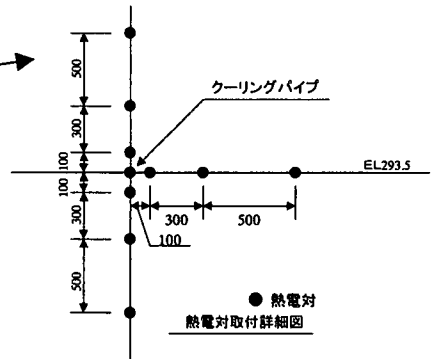


図-9 各リフトの温度計測位置の概要



パイプ壁面温度の計測; 1~7

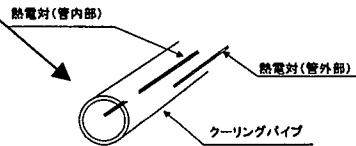


図-10 パイプクーリングによる熱除去効果確認用温度計測位置の概要

(2) 施工時温度応力計測

本研究では、実施工でのパイプクーリング効果を評価するために、施工時温度応力計測を行った。

a) 温度計測

温度計測は、パイプクーリング効果の確認、計測結果を基にした同定解析時の断熱温度上昇特性および表面熱伝達率推定のために実施したものである。

b) パイプクーリングの効果に関する温度計測

第2リフトでは、リフト中央部に敷設したクーリングパイプにおいて、約20m間隔で5箇所パイプ壁面部および管内水温が測定できるように熱電対を設置した。特に、パイプ壁面での熱伝達係数は、室内実験^{4),9),10)}から

得られたものであるが、実構造物においてこのパイプ壁面での熱伝達係数を評価するために、管壁面でのコンクリート温度およびパイプ内水温の計測を行うこととした。また、クーリングパイプの熱除去効果は、パイプ入口からの距離および時間に依存するものであることから、これらの点についても検証することとした。

さらに、曲がり等では管内流速が変化することで、その部分での吸熱効果が変化すると思われることから、この点を検証するために、クーリングパイプの曲がり部の前後にパイプ内水温および管壁面温度測定のための熱電対を設置した。また、クーリングの影響範囲を調査するために、リフト中央部付近で上下方向および水平方向に

表-3 コンクリートの熱特性値

項目		熱特性値	示方書の範囲	備考
熱伝導率 (W/m℃)		1.98	2.5~2.8	同定結果
比熱 (kJ/kg℃)		1.67	1.05~1.26	同定結果
密度 (kg/m ³)		2324	-	配合から算定
表面熱伝達率 (W/m ² ℃)	リフト上面	3日まで	20 (14 (湛水養生))	同定結果
		3日以降	14	同定結果
	側面		14 (鋼製型枠)	同定結果
	監査廊内		10	同定結果

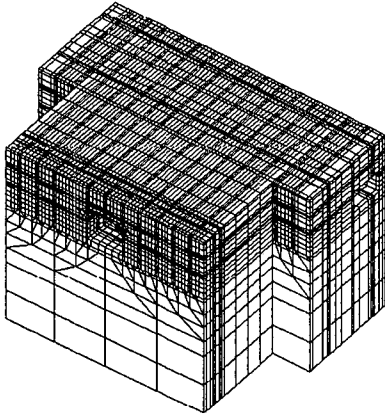


図-11 メッシュレイアウト

各3点ずつ熱電対を設置し、温度分布測定を行った。各リフトでの熱電対の設置位置の概要を図-9, 10に示す。

5. 本解析手法と計測結果との比較

(1) 熱特性値評価のための温度解析

パイプクーリングの熱除去効果解析を行うためには、事前に熱特性値を把握しておく必要がある。特に、断熱温度上昇特性や表面熱伝達率は、パイプクーリングによる熱除去効果に大きな影響を与えることが予想されるため、パイプクーリングを実施しなかったリフトでの温度計測結果を基に算定した。解析は、第4リフトまでをモデル化したものを用いて行った。

a) 熱伝導率および比熱

熱伝導率および比熱は、コンクリート中央部の温度が最高に達した後の温度降下域で計測値と一致させるように各値を変化させた。検討の結果を表-3に示す。

当該コンクリートでは、熱伝導率をコンクリート標準示方書に示された範囲の平均値よりも約30%小さくしてコンクリート内部の熱伝導を緩やかにするとともに、比熱を約40%大きくしてコンクリート自体の熱容量を大きくし、コンクリート自体冷えにくくする方向にすることで計測結果と比較的一致する結果となった。熱伝導率および比熱とも、コンクリート標準示方書に示されている平均的な範囲をはずれるものの、使用骨材等を考慮

すれば特異な値ではないと判断し、以後の同定解析に上記の値を用いることとした。

b) 断熱温度上昇式

断熱温度上昇式は、前年度に洪水吐減勢工部で実施した温度計測結果を基に算定した解析結果¹³⁾を基に、ダム軸ブロックでパイプクーリングを実施していないリフトを対象に同定解析を行い、減勢工部での算定結果を補正することで算定した。

算定の結果、終局断熱温度上昇量は減勢工部で求めた値に比べて約2℃高い結果となった。一方、上昇速度に関する定数は、減勢工部で選定した式と同じであり、発熱性状は減勢工部で用いたコンクリートとほとんど変わらなかった。終局断熱温度上昇量および上昇速度に関する定数と打込み温度の関係を以下に示す。

$$Q_{\infty}(T_c) = -0.718T_c + 55.19 \quad (15)$$

$$\gamma(T_c) = 0.0269T_c + 0.054 \quad (16)$$

ここで、 $Q_{\infty}(T_c)$: 終局断熱温度上昇量 (℃), T_c : 打込み温度 (℃), $\gamma(T_c)$: 上昇速度に関する定数 (1/日) である。

c) 表面熱伝達率

表面熱伝達率に関しては、表面部での温度計測結果と比較して同定を行った。検討の結果を表-3に示す。リフト上面部は、表-3に示すように湛水養生を行った材齢3日までのほうが湛水養生後の値よりも大きくなる結果となった。側面部は、型枠がメタルフォームであったことから脱型前後での変化は見られなかった。また、監査廊内は、風が通らないこととコンクリートの発熱温度が監査廊内に滞留することから、側面部に比べて小さい値であった。

(2) パイプクーリングを考慮した温度解析

パイプクーリングを考慮した温度解析は、クーリングパイプ周辺部での温度計測を実施した第2リフトを中心にモデル化をして行った。解析に用いたメッシュレイアウトを図-11に示す。解析対象範囲は地盤、第1リフトおよび第2リフトとした。ただし、部材内には監査廊があることから、この監査廊も含めたモデルとした。解析条件は、表-3に示す値を用いた。

パイプ壁面の熱伝達係数に関しては、筆者らが室内試験で求めた流速と熱伝達係数との関係を用いた。ただし、この関係は、これまで1次式⁹⁾としていたが、流速が早くなるにつれて熱伝達係数の増加率が小さくなる傾向にあり、流速の速い範囲で過大に熱伝達係数を評価してしまうことから、2次の多項式で回帰し直したものを採用することとした。パイプ壁面の熱伝達係数 h と流速 u との関係を図-12に示すとともに、関係式を以下に示す。

$$h = -0.059u^2 + 14.8u - 201 \quad (17)$$

外気温は、温度計測時に行ったダム軸ブロック近傍の値を用いた。パイプ入口水温は、温度計測時の値を用いた。また、流量は1日1回測定を行った結果を用いた。外気温および出入口水温を図-13に示す。

(3) 計測結果と解析結果との比較

a) パイプ内水温

リフト中央部に敷設したクーリングパイプにおいて、約20m間隔で計測したパイプ内水温と同じ位置での解析値を比較した結果を図-14に示す。本解析では、流速が時間とともに変化し、かつ流速方向が変更するという解析条件としては複雑であるにもかかわらず、クーリング実施期間での計測値との差異が1℃前後と良く一致する結果となった。特に、通水方向の変更によってパイプ位置からの距離が異なることによる計測点での温度変化に対しても非常に良く追従する解析結果となっている。ただし、コンクリート打込み後から1～2日のコンクリート温度が上昇する期間では、計測結果の方が解析結果よりも高く、両者に差異が生じる結果となった。これは、若材齢時においてコンクリートの水和発熱がパイプで吸熱する熱量を遙かに上まわる熱量が発生し、パイプ近傍ではパイプ壁面温度とパイプ内水温との差による熱伝達のみではなく、コンクリート表面部での熱伝達境界を考慮する場合の熱流束のような現象が生じているか、またはパイプ壁面での熱伝達係数が時間によって変化しているのではないかとと思われる。ただし、各測定点で解析値と計測値との温度差にばらつきがあり、今回だけのデータでは判断が難しいことから、この点については、他の実測データ¹⁴⁾も踏まえて検討を行う必要がある。

パイプ壁面温度は、パイプ内水温およびパイプ壁面の熱伝達係数に大きな影響を受けるが、本解析値が計測値とよく一致した結果となったことは、本解析手法が実構造物のパイプクーリングによる熱除去効果を評価するのに適した方法であり、また、筆者らが提案しているパイプ壁面での熱伝達係数と流速の関係式が、今回適用した15 l/分～20 l/分の範囲では妥当であったといえる。

b) パイプ壁面温度

リフト中央部に敷設したクーリングパイプにおいて、パイプ内水温測定位置でのパイプ壁面での温度計測値と同じ位置での解析値を比較した結果を図-15に示す。

パイプ壁面温度は、パイプ内水温と同様にクーリング実施期間において計測値とよく一致する結果となった。特に、通水方向を切り替えた時点でパイプ内水温が20℃以上急変し、パイプ壁面温度の計測値も1時間で5℃以上変化しているが、解析値と計測値との差異は1℃程度

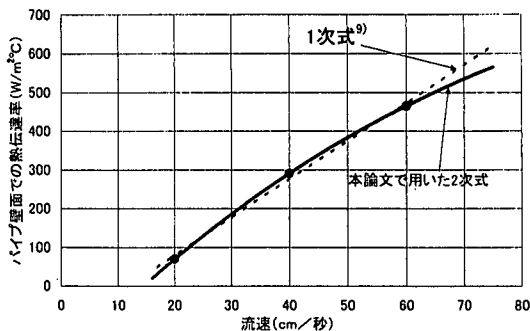


図-12 流速と管壁面の熱伝達率との関係

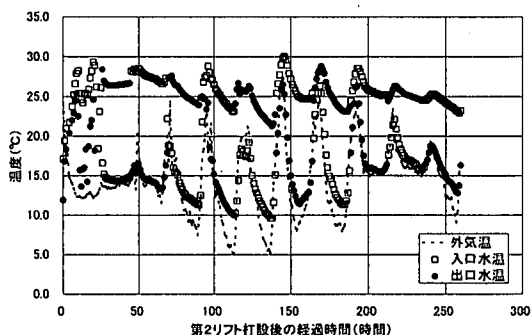


図-13 外気温および出入口水温

であった。また、図-8に示すように材齢6日以降において流量を徐々に低減させているが、この流量変化によっても、計測値との差異に変化は見られず、本解析手法およびパイプ壁面での熱伝達係数の設定が妥当であったといえる。

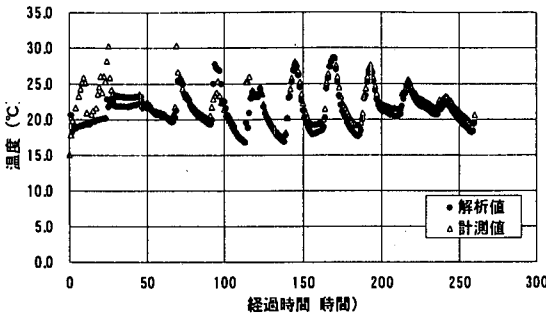
c) パイプ内水温およびパイプ壁面での温度分布

パイプ内水温およびパイプ壁面でのクーリング期間中の温度分布を図-16に示す。

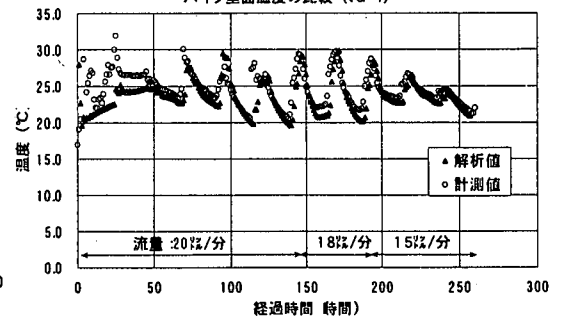
パイプ内水温は、入口から距離が長くなるにつれて徐々に吸熱して上昇するが、解析値と計測値とを比較した場合、温度勾配は両者ではほぼ一致する結果となった。また、通水方向が変わることで計測位置が150m以上変化するが、計測値と解析値とはよく一致する結果となった。一方、図-17に示すように通水方向を変えた直後の材齢では、出入口温度の差が小さく、パイプ内の水温も大きく変化することから、解に乱れが生じて計測結果の分布と異なる結果となった。しかしながら、図-14の履歴でもわかるように、その後は解析値と計測値の差異は1℃前後と小さくなった。本解析では、流速変更後の時間ステップを特に考慮せず計測データの収録間隔である1時間としたが、流速方向の変更による温度変化で生じる解の乱れに関しては、流速方向変更後の時間ステップを小さくする必要がある。

パイプの曲がり部では流速変化を生じることで、パイプ内水温に変化が生じるのではないかと予想したが、図

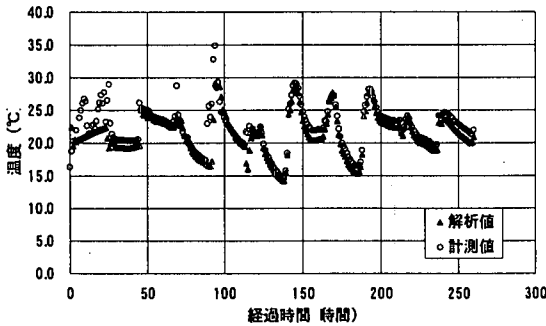
パイプ内水温の比較 (No 1)



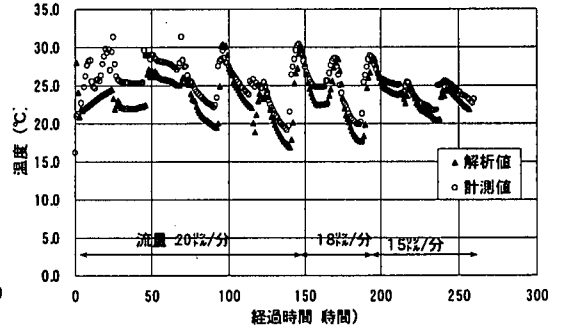
パイプ壁面温度の比較 (No 1)



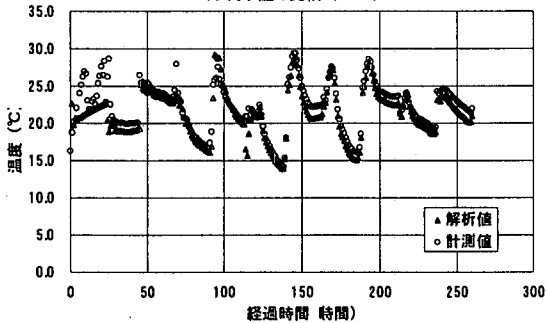
パイプ内水温の比較 (No 3)



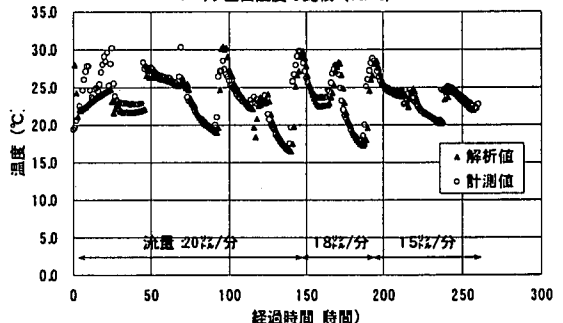
パイプ壁面温度の比較 (No 3)



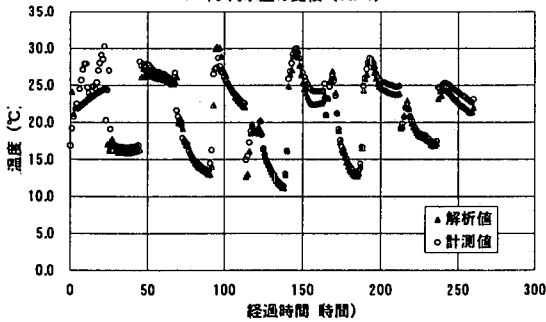
パイプ内水温の比較 (No 5)



パイプ壁面温度の比較 (No 5)



パイプ内水温の比較 (No 7)



パイプ壁面温度の比較 (No 7)

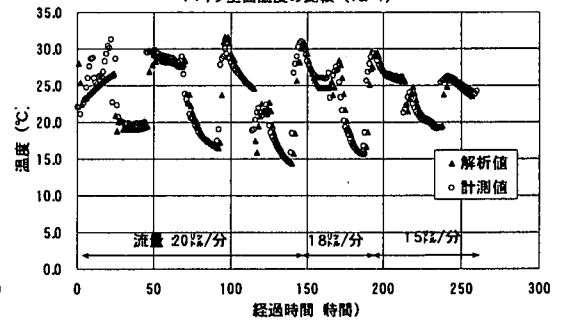


図-14 パイプ内水温の比較

図-15 パイプ壁面温度の比較

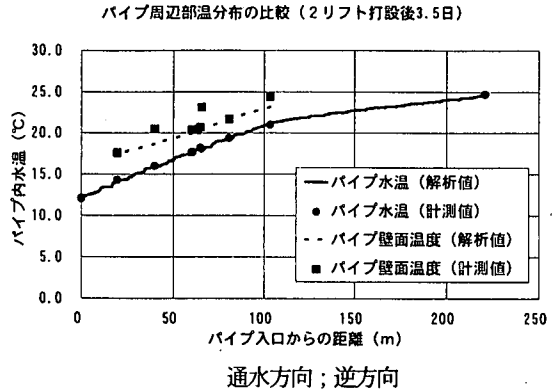
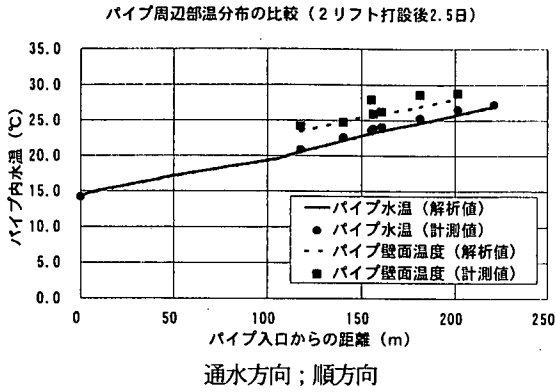


図-16 パイプ内水温およびパイプ壁面温度分布

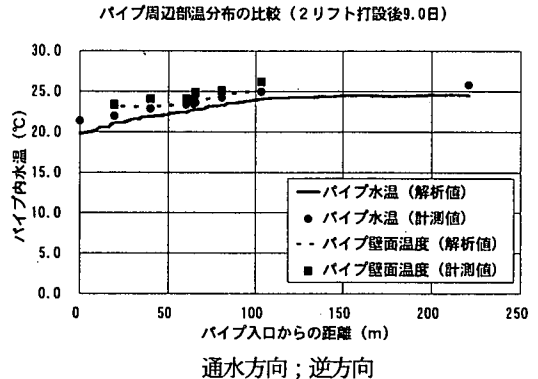
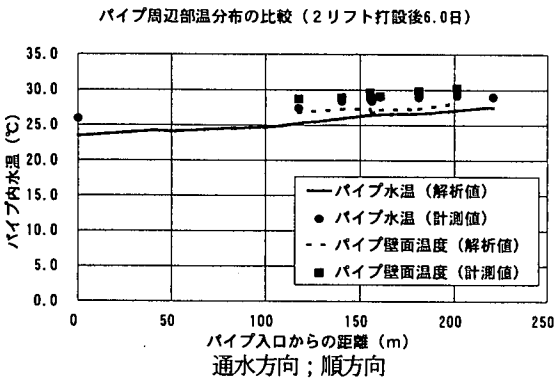


図-17 パイプ内水温およびパイプ壁面温度 (通水方向切替え直後)

図-16, 17 に示すようにほとんど変化がないことが明らかとなった。

パイプ内水温と通水入口からの距離については、リフト中央部および打継ぎ部ではほぼ直線的であるが、打継ぎ部とリフト中央部では通水距離に対する温度変化率が異なる結果となった。セメントの水和発熱によってコンクリート温度の高いリフト中央部と打継ぎ面において同一材齢で比較した場合、中央部の方が約 1.3 倍大きい勾配を示した。また、計測範囲内での温度勾配について解析値と比較した結果を図-18 に示す。温度勾配は、計測値においてコンクリートが最高温度に達する材齢 3 日まで増加し、その後コンクリート温度の低下および通水量の低減によって、温度勾配も徐々に小さくなる結果となった。解析値もほぼ計測値と同様な傾向を示した。また、通水方向の切り替え時に一時パイプ内水温が滞留するような現象を生じているが、本解析手法は、この点についても計測結果と比較的によく一致する結果を示した。

d) コンクリート温度分布

本検討では、パイプクーリングの熱除去効果の影響範囲を評価するために、図-9 に示すようにパイプ位置から 10cm, 40cm および 90cm 鉛直方向および水平方向に

離れた位置で温度計測を行うとともに、解析結果との比較を行った。また、パイプクーリングを実施しない場合の解析結果との比較も併せて行った。垂直方向および水平方向での各位置で比較した結果を図-19 に示す。各位置で計測値と解析値を比較した場合、解析期間内において解析値は、パイプ壁面での結果と同様に計測値とほぼ一致する結果となり、本解析手法はパイプ近傍のみならず解析対象範囲で実挙動をほぼ再現していることが確認された。

次に、パイプクーリングによる熱除去効果範囲については、パイプ位置から 90cm 離れた位置において、パイプクーリングを実施しない場合の解析結果と比較した場合、パイプクーリングを実施することでコンクリートが最高温度に達する材齢前後で約 4℃の温度低減効果があり、材齢 10 日では約 8℃の低減効果があった。パイプから 40cm 離れた位置では、パイプ上方においてコンクリートが最高温度に達する時点で約 8℃、材齢 10 日で 10℃以上の低減効果があった。水平方向では、パイプに挟まれていることから、上方に比べて若干低減効果が大きく、クーリングを実施しないケースでコンクリートが最高温度に達する時点で約 10℃、材齢 10 日で約 11℃

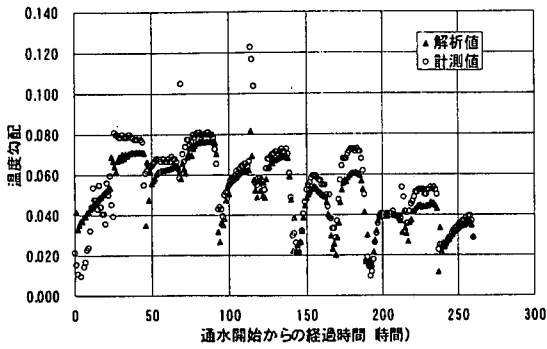


図-18 温度勾配の比較

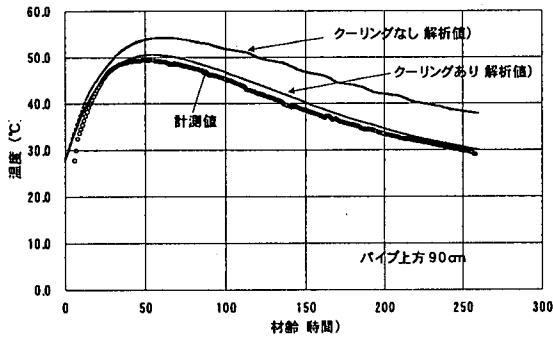
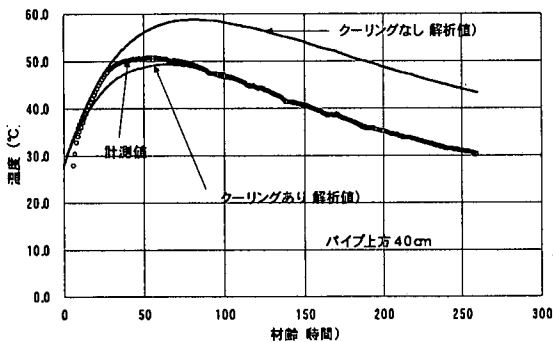
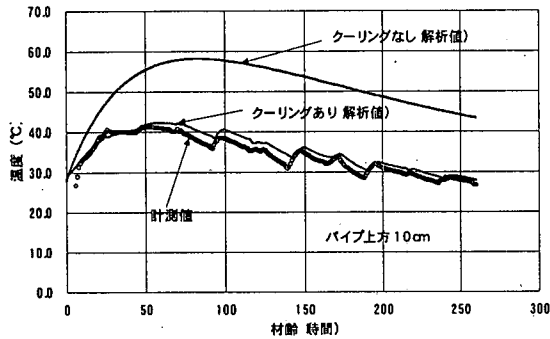


図-19 パイプ周辺部のコンクリート温度履歴

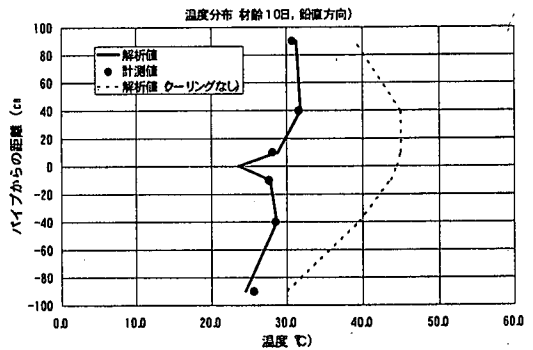
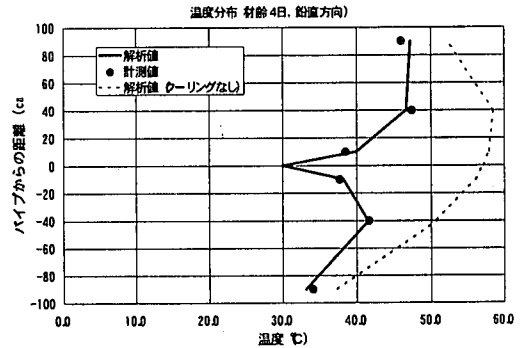
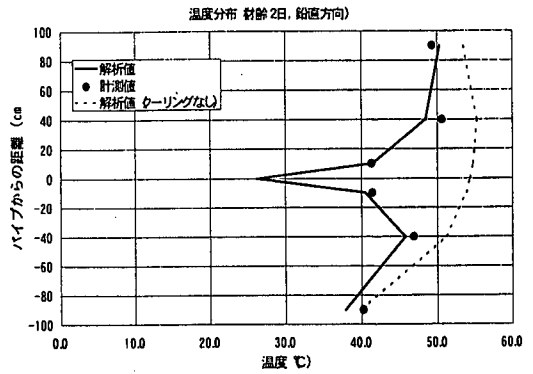


図-20 コンクリート温度分布

の低減効果であった。パイプから10cm離れた位置では、冷却効果が40cm以上離れた他の2点に比べて非常に大きく、最高温度に達する材齢で16~18℃の低減効果があった。

また、図-20に示すようにコンクリートが最高温度に達する材齢4日での鉛直方向の温度分布は、パイプ位置から30cm付近までが温度低減量10℃以上の範囲であり、熱除去効果の大きい範囲と考えられる。特にパイプ位置から10cm以内の範囲では20℃以上の低減があり、これまでいわれているようにパイプ近傍では内部拘束による引張応力が生じていると考えられる。ただし、部材全体の冷却効果を考慮した場合、局

所的な引張応力の増加よりも貫通ひび割れを抑制することが、構造物の性能向上に有利ではないかと考えられる。

パイプクーリングによる熱除去効果の範囲がどこまでか、温度低減が何℃までの範囲とするかは、構造物、使用材料、施工時期、環境条件等によってそれぞれ異なってくる。本検討で対象とした構造物は、パイプから90cm離れた位置においてコンクリートの最高温度を約4℃低下させたことから、パイプクーリングによる熱除去効果の範囲としては、パイプ位置から90cm程度まではあるものと考えられる。

6. 結論

本論文は、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について、3次元熱伝導場およびパイプ内における水の熱方程式を考慮した連成解法を適用して、実構造物における本解析手法の妥当性の評価を行ったものである。

本論文で得られた結果を以下に示す。

- (1) ひび割れ抑制対策を講じたダム洪水吐は、流速が時間とともに変化し、かつ流速方向が変更するという通水条件であったにもかかわらず、パイプ内水温の解析値が各計測位置およびクーリング実施期間のほぼ全体にわたって計測値と良く一致し、本解析手法がパイプクーリング時の水温の挙動を十分評価することが可能であることを示すものである。
- (2) コンクリート打込み後からコンクリート温度が最高温度に達するまでの期間では、パイプ内水温の計測値が解析値よりも高くなる結果となっており、これは、パイプ壁面で一種の熱流束が生じているか、またはパイプ壁面での熱伝達係数が時間によって変化しているのではないかと考えられる。温度上昇時の熱除去効果については、他の構造物のデータも含めた検討が必要である。
- (3) パイプ壁面温度は、パイプ内水温と同様にクーリング実施期間のほぼ全区間で計測値とよく一致する結果となった。これは、本解析手法が実構造物のパイプクーリングによる熱除去効果を評価するのに適した方法であり、また、パイプ壁面での熱伝達係数と流速の関係式が、今回適用した15 l/分~20 l/分の範囲では妥当であったといえる。
- (4) パイプ周辺部以外においても、パイプ壁面での結果と同様に本解析手法を用いた結果は、計測値とほぼ一致する結果となり、本解析手法はパイプ近傍のみならず解析対象範囲で実挙動をほぼ再現していることが確認された。
- (5) パイプクーリングによる熱除去効果については、リフト中央部においてパイプ位置から30cm付近まで

が温度低減量10℃以上の範囲であり、熱除去効果の大きい範囲と考えられる。特にパイプ位置から10cm以内の範囲では20℃以上の低減があり、パイプ近傍では内部拘束による引張応力が生じていると考えられる。当然、部材のどの部位に対しても極力ひび割れを生じさせないようにすることが望ましいが、本検討のように温度ひび割れ制御を主眼としたパイプクーリングの場合には、パイプ周辺部の局所的な引張応力の増加に着目することよりも耐久性などを考慮し、部材を貫通するひび割れを抑制することが構造物の性能向上に関しては重要であると考えられる。

- (6) パイプクーリングによる熱除去効果の範囲については、使用材料、施工時期、環境条件等各構造物によってそれぞれ異なってくるものの、本検討で対象とした構造物では、リフト中央部においてパイプから90cm離れた位置までパイプクーリングによる熱除去効果の範囲ではないかと考えられる。

謝辞：本論文において、東北農政局山王海鹿妻農業水利事業所の皆様には貴重な御意見、御助言をいただきました。また、計測の実施に際しては、山王海ダムJV事務所の方々に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、プログラム開発および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) 田邊忠頭, 山川秀次：マスコンクリートにおけるクーリング効果の解析, 土木学会第36回年次学術講演会講演概要集, 第V部門, pp.53-54, 1981.
- 4) 田邊忠頭, 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, 1984.3.
- 5) 佐藤英明, 佐谷靖郎：マスコンクリートにおけるパイプクーリング効果に関する研究, 土木学会論文集, No.372/V-5, pp.111-120, 1986.
- 6) 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.
- 7) 川原場博美, 鹿子木唯夫, 田邊忠頭：マスコンクリートの温度応力に対するパイプクーリング効果の大自由度FEM解析プログラムの開発, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.8, pp.45-48, 1986.

- 8) 大橋敏行, 吉川弘道, 小島隆志: 等価クーリング要素によるパイプクーリングのモデル化, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 第5部門, Vol.42, pp390-391,1987.
- 9) 田邊忠頭, 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, pp73-76,1983.
- 10) 溝淵利明, 田邊忠頭: 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, pp37-40,1985.
- 11) Gallagher.R.H: Finite Element Analysis Fundamentals, pp.117-124, Maruzen Co.,Ltd., 1976. (2000.1.27 受付)
- 12) 戸川隼人: シリーズ新しい応用の数学 17 共役勾配法, 教育出版, 1977.
- 13) 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.
- 14) 國松祥弘, 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, vol.21, No.2, pp.1159-1164,1999.

EFFECT OF HEAT ELIMINATION BY PIPE-COOLING SYSTEM IN MASSIVE CONCRETE

Toshiaki MIZOBUCHI, Soichiro NARITA, Yoshitake TSUZUKI,
Hiroyuki HIRATO and Tada-aki TANABE

The pipe-cooling system is one of the major methods that are used to control thermal stress of massive concrete. In this study, three-dimensional finite element method to consider the heat balance between concrete at the surface of cooling pipe and water in cooling pipe is proposed. The results of this theoretical analysis are agreed on the measurements of temperature in each point of water temperature in the pipe and concrete temperature at the surface of cooling pipe and around the cooling pipe. Therefore, this theoretical method is made clear to be one of the methods to estimate the effect of heat elimination applicably by the cooling pipe system.