

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

A STUDY ON THE EFFECT OF PIPE COOLING IN MASS CONCRETE

佐藤英明*・佐谷靖郎*

By Hideaki SATOH and Yasuo SATANI

The pipe cooling method has been used to control temperature rise and thermal stress in mass concrete. However, a practical method to analyze the correlative heat exchange between cooling pipes and mass concrete has not been established. Therefore, an experimental study on the effect of pipe cooling was conducted on actual structures and a analysis using the finite element method was applied to analyze the heat exchange on the field of three dimensional thermal conduction. The method of this analysis and the results of experiment are described in this paper. Results of the analysis well agreed with the experimentally measured data, and it is considered that the method of this analysis is widely acceptable for practical use. The effect of pipe cooling concrete is also discussed in this paper.

1. ま え が き

コンクリートダムにおける温度規制の一方法としてのパイプクーリングは、1930年代アメリカの USBR (Bureau of Reclamation) の Hoover ダム建設当時に施工法の一応の確立がなされ、コンクリートダムの建設とともに発展してきた。ダムにおけるパイプクーリングの目的は、セメントの水和熱によるコンクリートの温度上昇ならびにその後の温度変化を抑制して、ブロック内に発生する温度応力を低下させる一次クーリングと、収縮目地が十分に開くようにコンクリートを最終安定温度または設計温度まで低下させる二次クーリングとよばれるものであった。

一方、最近土木、建築構造物の多様化、大規模化に伴って、大型で重要なコンクリート構造物を構築する機会が増加し、このような構造物のマスコンクリートにおいても温度上昇を抑え、温度応力を積極的にコントロールする方法としてパイプクーリングが用いられる傾向にあるが、これらの構造物は富配合のコンクリートでありまた規模や形状、施工環境なども根本的にダムと異なることから、構造物に応じた適切なクーリングパイプの径

や配管網のレイアウト、クーリング水の水温や流速などの選定が要求されている。

パイプクーリングの冷却効果に関する研究は、1940年代に開発された手法¹⁾が現在のダムの設計、施工に至っても継承されているが、この手法では1本のパイプが受け持つ領域を円柱と仮定していること、パイプ内の水を温度固定境界として取り扱っていること、コンクリートの水和熱による発熱過程を考慮できないこと等の制約条件があるため、実際の現象を正しく評価しているとはいえ、またダム以外の構造物へそのまま適用することは困難であった。このためより精度の高い解析手法の開発が望まれており、最近では田辺らの一連の研究^{2)~4)}にみられるように、クーリングパイプ壁面における熱伝達率の取り扱いに関する実験式⁴⁾、コンクリートブロックをいくつかの二次元断面で代表させて解析する擬三次元解析手法⁴⁾などが提案されている。

本研究では、このような背景を踏まえ、マスコンクリートのパイプクーリング効果をより現実に近い三次元熱伝導場における熱収支問題としてとらえ、精度よくまた合理的にクーリング効果を把握するために、クーリング水の流速に着目し、速い流れに対してはクーリング水の熱輸送は定常的であるとした解析手法を提案した⁵⁾、また実構造物を用いたパイプクーリングの効果に関する実験

* 正会員 (株)熊谷組技術研究所第3技術部
(〒162 新宿区津久戸町17-1)

を行い解析手法の実用性を確認するとともに、パイプクーリングがマスコンクリートの温度応力に及ぼす影響についても検討を加えた。

2. パイプクーリングを考慮したコンクリートの温度解析手法

パイプクーリングは、マッシブなコンクリート中に熱伝導のよい材質のパイプを埋設し、それに冷水を流すことによって、コンクリートが硬化する際に発生する水和熱を強制的に除去しようとするコンクリートの温度規制の一手段であるが、その熱除去効果はパイプの材質および径、冷却水の水温および流速、配管網のレイアウトなどによって異なるものとなる。

いま、クーリングパイプの材質は十分に熱伝導性がよく、またきわめて肉厚が薄いものであるとすると、コンクリートに発生した熱はすみやかにパイプの内側に伝導する。ここで、パイプ内壁の温度が冷却水の温度より高い場合には冷却水への熱の移動が生じるが、Fig. 1 に示すように冷却水の流れが層流であると、パイプ内壁での流速は壁面抵抗によりきわめて小さくなり冷却水による熱の輸送量が少なくなることから、パイプクーリングによる冷却効果はあまり期待することはできない。一方、冷却水の流速が十分に大きく乱流状態であると、パイプ内壁の水は常に入れ換わるため、熱の移動量は大きくなり、冷却効果も増大してコンクリートの温度上昇を抑えることが可能となる。

すなわち、パイプクーリングによって十分な冷却効果をあげるためには、基本的に冷却水の流れが乱流であることが必要である。

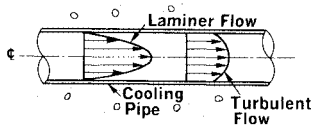


Fig. 1 Distribution of Velocity in Cooling Pipe.

パイプ内の流れが乱流であるための条件は、次式に示す Reynolds 数によって定めることができる。

$$R_e = \frac{vd}{\nu} \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 R_e ：Reynolds 数、 v ：パイプ内の平均流速、 d ：パイプ口径、 ν ：水の動粘性係数、である。

多くの実験によれば⁶⁾、円管内の流れにおいて層流状態が維持される限界の Reynolds 数は 2000 程度であり、それ以上の流れでは遷移が起こり乱流となることが知られている。そこで、一般的に用いられている $\phi 1$ インチ ($\phi 2.54$ cm) のクーリングパイプについて、乱流とな

る通水流量の最小限界を求めてみると、水の動粘性係数は常温でおよそ $0.01 \text{ cm}^2/\text{s}$ であるから、約 2 l/min となる。したがって、従来からコンクリートダムで行われているクーリング水の通水流量は $13\sim 16 \text{ l/min}$ であることから、そのパイプ内の流れは乱流であり、また冷却効果が十分に期待できることがわかる。

ところで、クーリングパイプの熱伝導がきわめてよいものとする、パイプクーリングによる冷却効果はコンクリートとクーリング水との間の熱の移動現象と考えることができるが、このような固体～流体間の熱の移動は対流熱伝達といわれ、熱移動量は次式に示す Newton の冷却の法則 (Newton's law of Cooling) で表わすことができる。

$$q = \alpha \cdot \Delta T \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 q ：単位時間に単位面積を通過する熱量、 α ：固体と流体間の平均熱伝達率、 ΔT ：温度差、である。

すなわち、コンクリートおよびパイプクーリング水の温度分布は、式 (2) に示す熱伝達境界を導入することによって統一的に取り扱うことが可能となる。

(1) コンクリートの三次元非定常熱伝導解析

a) 基礎方程式

三次元問題に関する非定常熱伝導方程式は、一般に次式によって与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T_c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T_c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T_c}{\partial z} \right) + Q_c(t) - C_c \rho_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 k_x, k_y, k_z ：コンクリートの異方性熱伝導率、 T_c ：コンクリートの温度、 $Q_c(t)$ ：コンクリートの内部発熱率、 C_c, ρ_c ：コンクリートの比熱および密度、である。

式 (3) が、非定常状態における三次元熱伝導に対する支配方程式であり、コンクリートの内部発熱を考慮した温度 T_c に関する準調和微分方程式 (quasi-harmonic equation) で与えられる。

b) 境界条件

境界条件は、いずれも時間と場所の関数となり、以下に示すものがある。

境界上で温度が与えられている場合は、温度固定境界として、

$$T_c(x, y, z, t) = T_{c0}(x, y, z, t) \dots\dots\dots (4)$$

境界において熱の流入、流出がある場合は、対流熱伝達境界として、

$$k_x \frac{\partial T_c}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T_c}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial T_c}{\partial z} l_z + q + \alpha_d (T_c - T_d) = 0 \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 l_x, l_y, l_z ：境界上の垂線の方向余弦、 q ：表面

での熱流束, α_a : 表面での熱伝達率, T_a : 外部の温度, である。

また, 境界上で熱の流入, 流出が全くない場合は, 断熱境界として,

$$k_x \frac{\partial T_c}{\partial x} l_x + k_y \frac{\partial T_c}{\partial y} l_y + k_z \frac{\partial T_c}{\partial z} l_z = 0 \dots\dots\dots (6)$$

なお, パイプクーリングによる熱の収支は, パイプ周辺の境界において式 (5) に示した一般の対流熱伝達境界と同様であると考えて, パイプと接する境界 ($\xi=1 \sim n$) において,

$$k_x \left(\frac{\partial T_c}{\partial x} \right)_\xi l_x + k_y \left(\frac{\partial T_c}{\partial y} \right)_\xi l_y + k_z \left(\frac{\partial T_c}{\partial z} \right)_\xi l_z + \alpha_w (T_{c\xi} - T_w) = 0 \dots\dots\dots (7)$$

ここに, α_w : コンクリートとクーリング水間の平均熱伝達率, T_w : クーリング水の温度, である。

c) 汎関数

変分原理によれば, 以上の境界条件を満たす汎関数 χ は, 次のように示される。

$$\begin{aligned} \chi = & \int_V \left[\frac{1}{2} \left\{ k_x \left(\frac{\partial T_c}{\partial x} \right)^2 + k_y \left(\frac{\partial T_c}{\partial y} \right)^2 + k_z \left(\frac{\partial T_c}{\partial z} \right)^2 \right\} \right. \\ & - \left. \left[(Q_c - C_c \rho_c \frac{\partial T_c}{\partial t}) T_c \right] \right] dV + \int_c q T_c dA \\ & + \int_c \frac{1}{2} \alpha_a (T_c - T_a)^2 dA + \sum_{\xi=1}^n \int_s \frac{1}{2} \alpha_w (T_{c\xi} - T_w)^2 dS \\ & \dots\dots\dots (8) \end{aligned}$$

したがって, 式 (3) の解は, 式 (8) に示した汎関数の値を最小にするような T_c の分布を求める問題と等価である。

d) 有限要素法による定式化

汎関数 χ を最小にするための条件を求めるために, 各要素で節点に関する微係数を求め, 全体の系について重ね合わせて和を 0 とし, マトリックス表示をすると⁷⁾,

$$[K_c] T_c + [Q_c] + [q_w] T_w + [P_c] \dot{T}_c = 0 \dots\dots\dots (9)$$

ここに, $[K_c]$, $[T_c]$, $[Q_c]$, $[P_c]$, $[\dot{T}_c]$: コンクリートの節点に関する熱伝導マトリックス, 温度ベクトル, 熱発生率ベクトル, 熱容量マトリックスおよび温度の時間変化率ベクトル, $[q_w]$, $[T_w]$: パイプクーリング境界の節点に関する熱損失率マトリックスおよびクーリング水の温度ベクトル, である。

式 (9) が, 有限要素法によるパイプクーリングの熱収支を考慮したコンクリートの三次元非定常熱伝導解析の基本式であり, クーリング水の温度分布 $[T_w]$ を知ったうえで, 初期条件ならびに境界条件のもとで解くことができる。

(2) パイプクーリング水の一次元定常熱輸送解析

a) 基礎方程式の誘導

クーリングパイプ内の冷却水の流速は十分に発達した乱流であるとすると, パイプ軸直角方向の水の温度分布

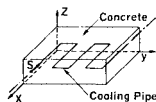


Fig. 2 Coordinate System of Concrete and Cooling Pipe.

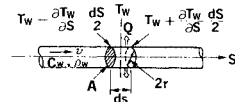


Fig. 3 Heat Exchange in Cooling Pipe.

は一様であると考えられるため, クーリングパイプの熱収支は, パイプ入口からの距離 s を局所座標にとった一次元方向の水の熱輸送だけを考えればよい。

いま, クーリングパイプの微小部分 dS を取り出し, その間のパイプ断面積および流速を一定とすると, 熱収支は dS 間の熱伝導を無視すると次式で表わすことができる。

$$\begin{aligned} C_w \rho_w A v \left\{ \left(T_w + \frac{\partial T_w}{\partial s} \frac{dS}{2} \right) - \left(T_w - \frac{\partial T_w}{\partial s} \frac{dS}{2} \right) \right\} \\ + Q + C_w \rho_w A dS \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \dots\dots\dots (10) \end{aligned}$$

ここに, C_w, ρ_w : 水の比熱および密度, A : クーリングパイプの断面積 ($=\pi r^2$, r はパイプ半径), v : 平均流速, T_w : 微小体中央の温度, Q : 水とコンクリート間の熱移動量, t : 時間, である。

ところでクーリング水とコンクリート間の熱の移動現象は, 式 (2) に示した Newton の冷却法則で表わされる対流熱伝達で示すことができ, クーリング水に流入する量を正とすると, 熱の移動量 Q は,

$$Q = 2\pi r dS \alpha_w (T_w - T_c) \dots\dots\dots (11)$$

となるから, 式 (10) は次のとおりとなる。

$$C_w \rho_w v \frac{\partial T_w}{\partial s} + \frac{2\alpha_w}{r} (T_w - T_c) + C_w \rho_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \dots\dots (12)$$

ここで, 式 (12) を,

$$\frac{\partial T_w}{\partial s} + \frac{1}{v} \frac{\partial T_w}{\partial t} = - \frac{2\alpha_w}{C_w \rho_w r v} (T_w - T_c) \dots\dots\dots (13)$$

と書き換えて考えると, 一般的なパイプクーリング, たとえば $\phi 1$ インチ ($\phi 2.54$ cm) のパイプを用い, 通水流量を 15 l/min (流速に換算すると $v \approx 1800$ m/h) として行った場合, 式 (13) において時間変化を表わす左辺第 2 項は左辺第 1 項に比べきわめて小さくなることから無視しても差し支えないものと考えられる。したがって, マスコンクリートにおける熱収支問題としてパイプクーリングの効果が期待できるような十分に速い流速を対象としている場合には, クーリング水の温度の時間的な変化は考慮しなくても実用上問題ないものと考え, 本解析では式 (14) に示す定常方程式を取り扱うものとした。

$$C_w \rho_w v \frac{\partial T_w}{\partial s} + \frac{2\alpha_w}{r} (T_w - T_c) = 0 \dots\dots\dots (14)$$

式 (14) が, クーリング水の温度 T_w に関する一次元

定常熱輸送解析の支配方程式である。

b) 重み付き残差法による基礎方程式の離散化

本手法では、重み付き残差法のうち最も一般的な Galerkin 法を用いて基礎方程式を離散化する。

いま、重み関数を T^* で表わすものとし、これを式(14)の両辺に乗じて任意の領域について積分すると、次の方程式が得られる。

$$\int_s T^* \left[C_w \rho_w v \frac{\partial T_w}{\partial s} + \frac{2\alpha_w}{r} T_w - \frac{2\alpha_w}{r} T_c \right] ds = 0 \dots (15)$$

なお、重み関数 T^* は、任意の値をとり得る関数である。

c) 有限要素による定式化

解析問題はクーリングパイプの軸方向のみの一次元であることから、トラス要素を用いて定式化を行うものとした。



Fig. 4 One-Dimensional Truss Element.

いま、トラス要素内で水温 T_w の分布が、次に示す最も簡単な線形関数に従うものとする。

$$T_w = \alpha_1 + \alpha_2 s \dots (16)$$

係数 α_1, α_2 を節点条件から求めると、式(16)は次のように表わされる。

$$T_w = N_i T_{wi} + N_j T_{wj} \dots (17)$$

ここに、 T_{wi}, T_{wj} : 節点 i, j の温度、である。また、形状関数は、

$$N_i = \frac{\alpha_i + b_i s}{L}, N_j = \frac{\alpha_j + b_j s}{L} \dots (18)$$

式(18)における各係数は、次のとおりである。

$$\begin{cases} \alpha_i = s_j \\ \alpha_j = -s_i \end{cases}, \begin{cases} b_i = -1 \\ b_j = 1 \end{cases} \dots (19)$$

ここに、 s_i, s_j : 節点 i, j の座標、である。ただし、

$$L = s_j - s_i \dots (20)$$

なお、Galerkin 法では、重み関数 T^* に対しても同じ形状関数を用いるので、 T^* は次のように表わす。

$$T^* = N_i T_i^* + N_j T_j^* \dots (21)$$

したがって、式(15)に示される方程式は一要素について考えると、次のようにまとめることができる。

$$\left(\frac{C_w \rho_w v}{2} [T_i^* T_j^*] \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{\alpha_w L}{3r} [T_i^* T_j^*] \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} T_{wi} \\ T_{wj} \end{Bmatrix} - \frac{\alpha_w L}{r} [T_i^* T_j^*] \begin{Bmatrix} T_{ci} \\ T_{cj} \end{Bmatrix} = 0 \dots (22)$$

式(22)において、 T_i^*, T_j^* は任意の値をとり得る量であるから、まず $T_i^* = 1, T_j^* = 0$ とし、次に $T_i^* = 0,$

$T_j^* = 1$ とおくことによって、次式の有限要素方程式を得ることができる。

$$\left(\frac{C_w \rho_w v}{2} \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -1 & 1 \end{bmatrix} + \frac{\alpha_w L}{3r} \begin{bmatrix} 2 & 1 \\ 1 & 2 \end{bmatrix} \right) \begin{Bmatrix} T_{wi} \\ T_{wj} \end{Bmatrix} - \frac{\alpha_w L}{r} \begin{Bmatrix} T_{ci} \\ T_{cj} \end{Bmatrix} = 0 \dots (23)$$

これを、全領域について加え合わせマトリックス表示すると、

$$[K_w] T_w + [q_c] T_c = 0 \dots (24)$$

ここに、 $[K_w], [q_c]$: クーリングパイプの節点に関する熱輸送マトリックスおよびコンクリートからの熱流入率マトリックス、である。

式(24)が、有限要素(一次内挿トラス要素)法によるパイプクーリング水の一次元定常熱輸送解析の基本式であり、コンクリートの温度分布 $\{T_c\}$ を知ったうえで、境界条件のもとで解くことができる。

(3) 連成問題としての解析手法

コンクリートの温度分布 $\{T_c\}$ に関する基本式(9)では $\{T_w\}$ が、パイプクーリング水の温度分布 $\{T_w\}$ に関する基本式(24)では $\{T_c\}$ がおのおの未知であるため、それぞれ独立して解くことはできないが、両者を連立させ (T_c, T_w) について解くことにより、コンクリートの三次元熱伝導場におけるパイプクーリングによる熱収支の相互作用の問題を解析することができる。本手法によれば、原子力発電所の基礎にみられるような円形のマットコンクリートや大型橋脚等におけるパイプクーリング、さらにパイプの屈曲部等における複雑な熱収支や立体的な配管網など、従来困難であった三次元的な取り扱いを必要とする問題に対しても解析が可能である。

なお、式(9)における時間項の取り扱いについては、Wilson-Clough 法を用いて解法を行った。

いま、時間ステップ Δt の間に、コンクリートの温度変化ベクトル $\{T_c\}$ の値は時間とともに直線的に変化するものとする、

$$\dot{T}_{c,t+\Delta t} = -\dot{T}_{c,t} + \frac{2}{\Delta t} (\{T_{c,t+\Delta t}\} - \{T_{c,t}\}) \dots (25)$$

したがって、時刻 $t + \Delta t$ における式(9)に、式(25)を代入すると、次の連立方程式が得られる。

$$\begin{cases} ([K_c] + \frac{2}{\Delta t} [P_c]) \{T_{c,t+\Delta t}\} = [P_c] \left(\frac{2}{\Delta t} \{T_{c,t}\} + \dot{T}_{c,t} \right) \\ -[q_w] T_{w,t+\Delta t} - [Q_{c,t+\Delta t}] \dots \dots \dots (26) \\ [K_w] T_{w,t+\Delta t} = -[q_c] T_{c,t+\Delta t} \dots \dots \dots (27) \end{cases}$$

ここに、各係数は時刻 $t + \Delta t$ における値である。したがって、 $\{T_{c,t}\}, \dot{T}_{c,t}$ がわかれば、式(26)と式(27)を連立させることによって $\{T_{c,t+\Delta t}\}, T_{w,t+\Delta t}$ を求めることができる。

また、最初の時間ステップでは、式(9)より $\dot{T}_{c,t=0}$

を求めておく。

$$-[P_c] \dot{T}_{cl,t=0} = [K_c] T_{cl,t=0} + [q_w] T_{wt,t=0} + |Q_{cl,t=0}| \dots (28)$$

すなわち、式(28)を解くことによって、初期の時間ステップにおける温度変化の勾配を定めることができる。

3. 実験結果と解析結果の比較

(1) 実験概要

本解析手法の適応性ならびにパイプクーリングの冷却効果を調べるために、実構造物においてパイプクーリングを実施し、温度、応力等の各種計測を行った。

構造物は、Fig. 5に示すような多柱鋼管杭上に打設された厚さ1mの鉄筋コンクリートの底盤であり、同じ形状のものが2体施工されたため、うち一体にクーリングパイプを埋設して、クーリング効果を対比できるようにした。

クーリングパイプの配管レイアウトは、Fig. 6に示すように2系統(A:78.5m, B:58.5m)とし、1m間隔に部材厚さの中心に配置した。また、クーリングパイプには、通常用いられている内径1インチ(φ2.54cm)の薄肉電綫鋼管を使用し、3台のチラーユニットを用いて水温を10°Cに、圧力流量制御装置を用いて流量を15 l/minに制御した。なお、クーリング水は循環式とし、循環水槽は断熱材で覆い、送水ホースにはエアホースを使用した。

コンクリート温度の計測には熱電対(銅-コンスタンタン型、φ6.5mm)を使用し、パイプクーリングを行わない試験体(No.1)と行った試験体(No.2)内に、それぞれ36点同一配置とした。Fig. 7に、熱電対の埋設位置を示す。またクーリング水の温度は、パイプの入口と出口につなげたエアホース内に取り付けた熱電対によって計測した。なお、クーリングの実施期間は、構造

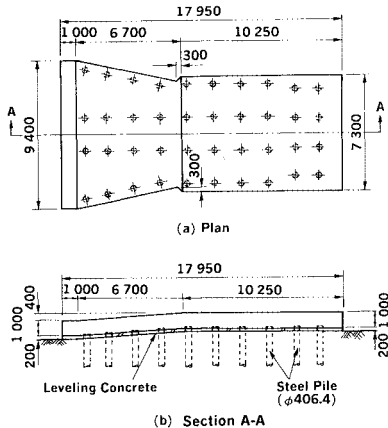


Fig. 5 Dimensions of Structure.

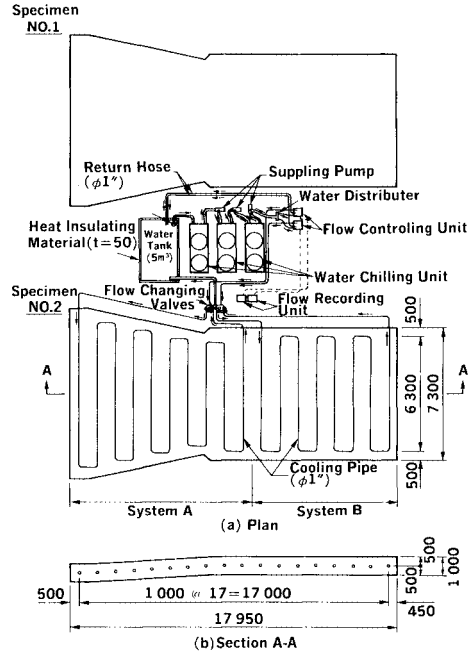


Fig. 6 Experimental Cooling System.

物内の中心温度が最高温度に達するまでとし、打設面は養生マットにて保護するものとした。

コンクリートの配合はTable 1に示すとおりであり、使用セメントは普通ポルトランドセメントである。コンクリートの打設は、試験体 No.1, No.2を並行して一度にポンプ打設され、打込み温度は30°Cであった。

(2) 解析条件

Table 2に、解析に用いたコンクリートの熱的性質を示す。なお、コンクリートの比熱はセメント、骨材の比熱をそれぞれ0.2 kcal/kg・°C, 0.18 kcal/kg・°Cとして各材料の相加平均により、熱拡散率はGlover法による試験結果より、また熱伝導率はこれらの関係式⁸⁾より算定し、断熱温度上昇式については温度実測値の初期の上昇曲線を最小2乗法で近似して求めた⁹⁾。また、コン

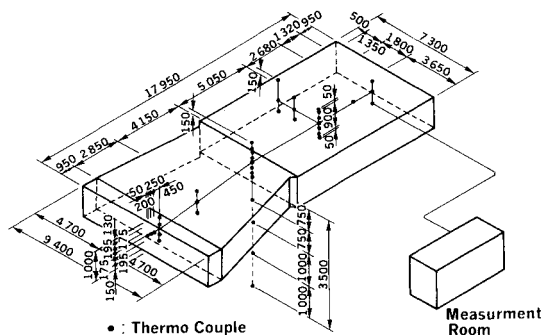


Fig. 7 Location of Thermo Couples in Concrete Structure.

Table 1 Mix Proportion of Concrete.

Nominal strength (MPa)	Maximum aggregate size (mm)	Slump (cm)	Air content (%)	W/C (%)	S/a (%)	Unit amount (N/m ³)				
						W	C [*]	S	G	Admixture (Wilson)
20.6	25	8	4	59.8	43.0	1559	2609	7885	10709	0.843

(※ : Normal Portland Cement)

Table 2 Thermal Properties of Concrete.

Unit Weight	22.76(KN/m ³)
Specific Heat	0.984(KJ/kg·°C)
Thermal Conductivity	2.003(W/m·°C)
Diffusivity of Heat	0.00316(m ² /h)
Adiabatic Temperature Rise	T=33.16(1-a ^{2.041})

(※ t : days)

クリート表面における熱伝達率は式 (29) に示す Jürges の実験式¹⁰⁾によって、また型枠面については型枠の厚さを l (m)、熱導率を K_f (kcal/m·h·°C) とすると、式 (30) に示す見掛けの熱伝達率によって求めることができる⁹⁾。

$$\alpha_s = 4.8 + 3.4w \dots\dots\dots(29)$$

$$\alpha_f = \frac{1}{\sum(l_f/K_f) + (1/\alpha_s)} \dots\dots\dots(30)$$

ここに、 α_s : 風による熱伝達率 (kcal/m²·h·°C)、 w : 風速 (m/s)、 α_f : 型枠を考慮した見掛けの熱伝達率 (kcal/m²·h·°C)、である。

したがって、解析に用いた熱伝達率は現場の環境を考慮して、材令 24 h までの風速は 2 m/s、それ以後は無風とし、また型枠は合板で厚さ 5 mm、熱伝導率は 0.13 kcal/m·h·°C、脱型は材令 42 h として、次のように定めた。

$$0 \leq t < 24 \text{ h} : 11.60 \text{ (8.02) kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C}$$

$$24 \text{ h} \leq t < 42 \text{ h} : 4.80 \text{ (4.05) } \quad \text{〃}$$

$$42 \text{ h} \leq t : 4.80 \text{ (4.80) } \quad \text{〃}$$

ただし、() 内は型枠面における熱伝達率を表す。一方、パイプクーリングの解析条件は、A、B 系統ともにパイプ内径を $\phi 2.54$ cm、入口水温を 10°C、通水流量を 15 l/min (流速は約 49 cm/s) とした。ここで、パイプとクーリング水の境界における平均熱伝達率は、

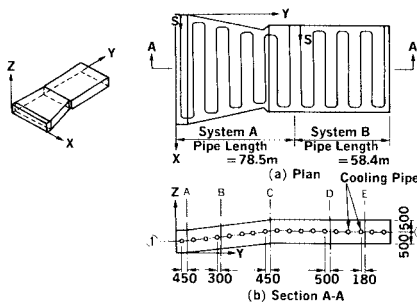


Fig.8 Notation of 3-D Analyzed model.

田辺らによればクーリング水の流速によって表わせるとした次式が提案されている⁴⁾。

$$\alpha_{w0} = 4.75v + 43.0 \text{ (kcal/m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C)} \dots\dots\dots(31)$$

ここに、 v : パイプ内の平均流速 (cm/s)、である。

したがって、本解析に用いる平均熱伝達率は、式 (31) によって 275 kcal/m²·h·°C と定めた。クーリングの実施期間は、コンクリート打設後 23 h までとした。

なお、構造物の底面は実測値による温度固定境界とし、外気温については日変動を考慮して、材令 5 日まで解析を行った。

(3) 実測値と解析値との比較

a) コンクリートの温度履歴

長さの異なる 2 系統のクーリングパイプを埋設した実構造物のコンクリート温度の実測値と、本手法による解析結果について、クーリングを行わない場合も含めて以下に示す。

Fig. 9 は、床版の厚さ中央におけるコンクリートの温度履歴を示したもので、実測値と解析値はきわめてよい一致を示しており、クーリングパイプからの水平距離による温度変化の違いがよく現われている。また、クーリングは材令 23 時間で停止したが、パイプから 180 mm の位置の温度は、その後周囲からの熱の流入により上昇し、およそ 12 時間で周囲の温度に漸近する傾向が認められた。

Fig. 10 は、断面①におけるコンクリートの温度履歴

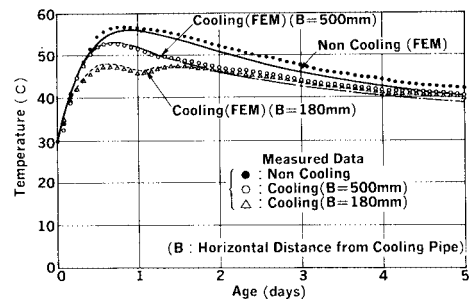


Fig.9 Histories of Concrete Temperature in Horizontal Distance from Cooling Pipe.

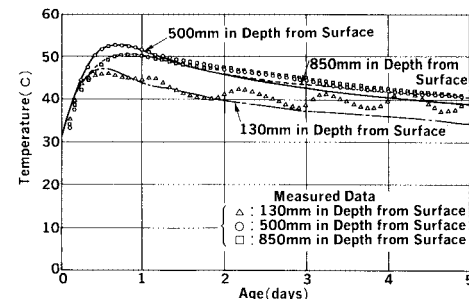


Fig.10 Histories of Concrete Temperature at Section ①.

であり、コンクリート表面近傍の実測値では気温の日変動の影響を強く受けているが、内部の温度履歴は解析値ときわめてよく一致しており、また実構造物は太陽光の直射を受けていたことから、これは解析上日射の影響を考慮していないためと考えることができる。

Fig. 11 は、A 系統のクーリングパイプ周りの入口、中央および出口付近のコンクリートの温度履歴の解析結果を示したもので、入口と出口近傍とではクーリング中に約7°Cの温度差が生じるようであり、またクーリング停止後は急速な温度上昇を示すが、その後の温度は位置的に大きな相違はみられないことが認められよう。た

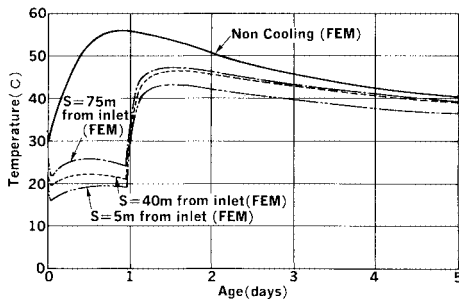


Fig. 11 Histories of Concrete Temperature around Cooling Pipe in System A (FEM).

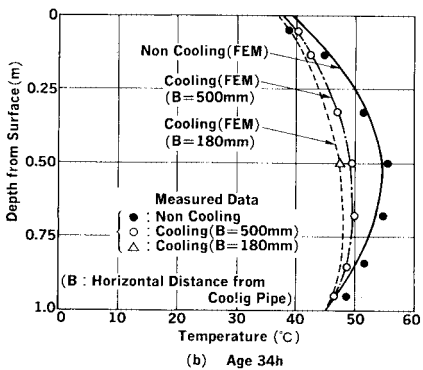
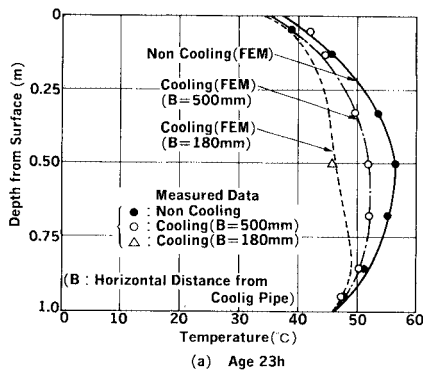


Fig. 12 Distribution of Concrete Temperature within Vertical Section in Horizontal Distance from Cooling Pipe.

だし、入口から5 mの位置におけるコンクリート温度は、クーリング停止後は側面からの大気への放熱の影響を受け、若干低い値を示す。

b) コンクリートの温度分布

Fig. 12 に、クーリングパイプからの水平距離の違いによる材令ごとのコンクリートの鉛直断面内の温度分布を示す。実測値と解析値とはよい適合性を示し、クーリング中ではパイプから180 mmと500 mmとの位置では、約6°Cの温度差が生じているが、クーリングを停止させて11時間後では、その差はほとんどなくなっている。

Fig. 13 は、クーリングパイプ位置におけるコンクリートの鉛直断面内温度分布の解析結果を示したもので、クーリング中はパイプ周辺に大きな温度勾配を生じることがわかる。また、その範囲はパイプから十数センチ程度と比較的パイプから近い領域のみに限られるようである。

Fig. 14 は、構造物の長手方向のクーリングパイプ位置でのコンクリートの温度分布を示したものであり、パイプ埋設位置におけるコンクリートの温度は、クーリング水の通水方向に従って徐々に大きくなっているがパイプ間の温度は場所的には大きな差が生じないようである。なお、Fig. 15 に、断面 A-A の等温度線図を示す。

c) クーリング水の温度

Fig. 16 に、クーリング水の入口ならびに出口水温の

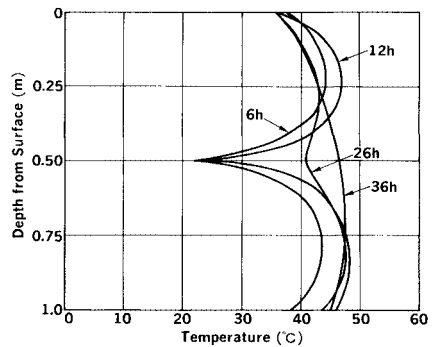


Fig. 13 Distribution of Concrete Temperature within Vertical Section at Cooling Pipe (FEM).

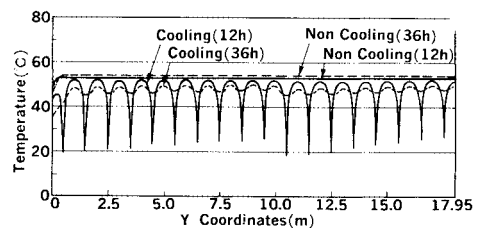


Fig. 14 Distribution of Concrete Temperature at Section ① (FEM).

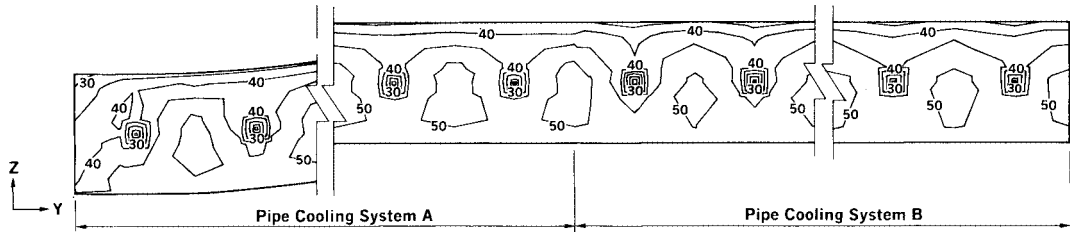


Fig. 15 Contour of Concrete Temperature at Section A-A (Age 23 h).

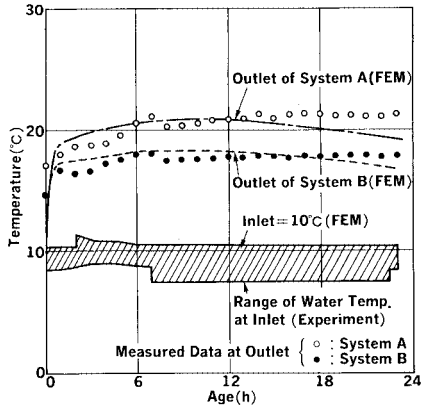


Fig. 16 Histories of Cooling Water Temperature at Inlet and Outlet.

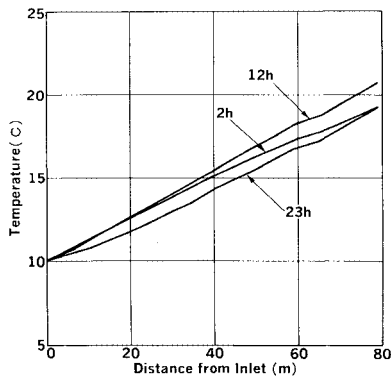


Fig. 17 Distribution of Cooling Water Temperature along Distance from Inlet (FEM).

経時変化を示す。クーリング水の入口温度は解析上 10°C 一定としたが、実験では3台の冷凍機のサーモスタットによる調整の結果、 $9 \pm 1.5^{\circ}\text{C}$ であった。パイプ出口における水温は、実測値と解析値はおおむねよい一致を示しているが、実測値では材令12hを超えるとほぼ一定の水温となっているのに対して、解析値は若干低下していく傾向がみられた。また、出口水温は、クーリングパイプの長さ按比例して高くなるようである。

Fig. 17は、A系統のクーリングパイプの材令に応じた長さ方向の水温分布を示したもので、通水の初期と後

期では分布の形状が若干異なるものの、ほぼパイプ長に対して直線的に上昇することが認められる。今回の実験では、およそパイプ長さ80mに対して水温は約 10°C の上昇で、単位長さ当たりの温度上昇は約 $0.125^{\circ}\text{C}/\text{m}$ であった。

一方、パイプ入口からの距離に伴って水温とコンクリートとの温度差は小さくなるため、クーリングとしての冷却効果が期待できるパイプの長さには、ある程度の限度があるものと思われる。そこで、クーリング水の温度が周囲のコンクリートの温度に等しくなる位置までをパイプの有効長さとする、実験によればクーリング水の入口温度とコンクリートの最高温度との差はおよそ 40°C であることから、このような構造物内においてその長さは300m程度と考えることができる。

4. パイプクーリング効果の考察

コンクリート内部の温度変化は、体積の膨張・収縮として現われるが、それが何らかの形で拘束を受けると温度応力が発生し、特にその引張り応力が強度を上回るとひびわれが発生する。温度ひびわれの発生は拘束の違いによって、内部拘束と外部拘束とに大別することができる。前者は、部材の断面内に不均一な温度分布が生じた場合に、位置的な体積変化の違いが互いに拘束しあうことによって、温度の低い側に生ずる引張り応力に起因するものであり、後者は時間的な温度降下に伴う体積の収縮が、外部から拘束されることによって生ずるものである。

このような機構によって発生する温度ひびわれの根本的な要因はコンクリート内部の温度変化であることは明らかであるが、特にマッシュなコンクリート構造物ではコンクリートの硬化の際に生じる水和熱が内部に蓄積されるため、部材内部の温度分布、温度履歴に大きな変化が現われる。

パイプクーリングは、蓄積された水和熱をコンクリート内部に埋設したパイプに冷水を流すことによって吸収し、コンクリートの温度上昇を抑える方法で、温度ひびわれを抑える有効な対策の一つとみることができる。

今回の実験によると、パイプクーリングを実施するこ

とによって、コンクリートの最高上昇温度は約5°C低減できたことから、その熱除去の効果を確認することができた。

ところで、パイプクーリングの熱除去の効果は、Fig. 18に示すようにパイプ長に対して一様ではなく、パイプ入口で大きく、出口に向かって徐々に小さくなる傾向がみられる。時間的には、コンクリートの発熱に従ってクーリング水の熱吸収量は増すが、パイプの入口および出口付近では、構造物の側面からの放熱によってコンクリートの温度が低下することから、熱吸収量は少なくなることがわかる。

なお、クーリングパイプの場所的な熱吸収の効果からみれば、パイプは一系統の長いものを埋設するよりも、短いものを数多く設置した方がよいと考えることができる。

次に、コンクリート内部に発生する温度応力に対するパイプクーリングの熱除去の効果について、実測値に基づいて検討を行った。なお、応力の計測には有効応力計(GK-60-202:東横エルメス)を使用し、Fig. 8に示す断面A、CおよびDにおけるコンクリート表面からの深さ13 cm, 50 cm, 85 cmの位置に配置した。

Fig. 19は、断面Dにおけるコンクリート内部の深さに応じた温度応力の経時変化を示したもので、全体的な挙動としては、床版の上部の応力は引張りから圧縮へ、中心および下部の応力は圧縮から引張りへ移行していることから、外部拘束の影響が少ない構造物であると考えられる¹¹⁾。

床版の上部の応力については、パイプクーリングの有無による顕著な差はみられないが、中心部および下部では温度降下材令における引張り応力の低減が明らかであり、特に中心部では有意な差となって現われている。たとえば、材令4.5日における引張り応力の減少分は、上部で0.12 MPa、中心部で0.76 MPa、下部で0.26 MPaであった。また、クーリング実施期間(材令23時間以内)における床版の中心部では、クーリングを行

わない場合に比べ、初期の温度上昇に伴う圧縮応力の増加が小さいが、クーリング停止後は圧縮応力が増大する傾向がみられる。これは、クーリングパイプ周辺に生じた大きな温度勾配によるものと思われる。クーリング停止後は周りからの熱の流入による温度上昇が圧縮応力に転化するものと考えられる。

なお、今回の実験では、コンクリート内部が最高温度となった時点でクーリングを停止したが、さらに継続してクーリングを行うと逆にクーリングパイプ周辺に引張り応力の発生が予想されるので注意を必要とする。ダムコンクリートでは、パイプクーリングによる過度な冷却を防止するために、一次クーリングにおいてコンクリートの最高温度後の冷却速度を0.25~0.5°C/日程度と規制されていることでもわかる。

また、パイプ位置での温度応力については、その周辺

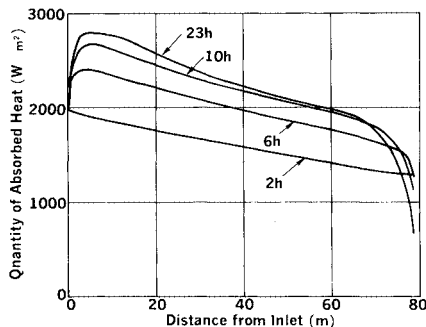
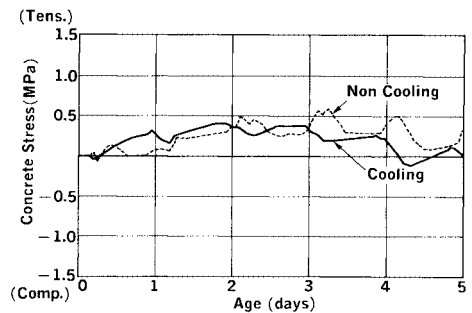
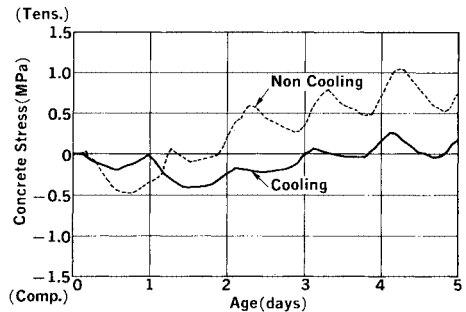


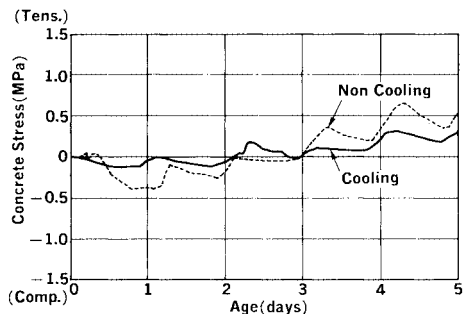
Fig. 18 Quantity of Absorbed Heat in System A (FEM).



(a) 130mm in Depth from Surface



(b) 500mm in Depth from Surface



(c) 850mm in Depth from Surface

Fig. 19 Histories of Concrete Stress at Section D.

の温度勾配や埋設する計器の大きさなどによって、直接に正確な測定を行うことは難しいが、本解析手法に基づいて温度応力の解析を行うことにより求めることができる。これらの数値解析の結果は、別の機会に発表していきたい。

以上より、マスコンクリートにおける温度上昇ならびに温度応力の低減方法として、適切な配管や水温、流速などに基づいたパイプクーリングは有効な一手段であるといえる。

5. 結 論

マスコンクリート構造物におけるパイプクーリングについて、三次元熱伝導場における熱収支問題として統一的に取り扱う解析手法を提案し、実構造物における実測結果との比較に基づきいくつかの考察を加えた。本研究で得られた結果を要約すると、以下のとおりである。

(1) 有限要素法による三次元熱伝導場におけるコンクリートとパイプクーリング水の熱収支の相互作用の実用的な解析手法は、式(26)、式(27)の連立方程式で表わされる。

(2) 本解析手法の適用性は、実構造物における実測と解析結果とを比較することによって確かめ、十分に実用的であることを示した。

(3) パイプクーリングを行うことによってパイプ周辺十数センチ程度の範囲のコンクリートには大きな温度勾配が生じるようであるが、クーリング停止後は12時間程度ではほぼ周辺の温度まで回復することが明らかとなった。

(4) クーリング水の温度分布は入口から出口にかけてほぼ直線的であり、実験に用いたような構造物におけるパイプの有効長はおよそ300mまでであると考えられた。

(5) パイプクーリングによる熱除去の効果は、入口付近で大きく通水方向に徐々に低下することを示し、また時間的には大きな変化はみられないことも明らかにし

た。

(6) クーリングパイプ周辺のコンクリートでは、初期の材令に通常発生する圧縮応力は小さくなるが、クーリング停止後は周囲からの熱の流入による温度上昇に伴って、圧縮応力が増加することが明らかになった。

(7) また、温度降下時に生ずるコンクリート内部の引張り応力は、パイプクーリングによって大きく減少することを示した。

参 考 文 献

- 1) U. S. Bureau of Reclamation : Boulder Canyon Project Final Reports, Part VII-CEMENT AND CONCRETE INVESTIGATIONS, Cooling of Concrete Dams, 1949.
- 2) 田辺忠顕・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5部，昭和56年10月。
- 3) 渡辺 朗・田辺忠顕：コンクリート構造物におけるパイプクーリング効果の擬3次元解析，日本鋼構造協会第17回大会研究集会マトリックス解析法研究発表論文集，昭和58年7月。
- 4) 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，1984.3.
- 5) (株)熊谷組技術研究所：マスコンクリートにおけるパイプクーリング効果の非定常熱伝導解析の研究，昭和59年8月(未発表)。
- 6) 本間 仁編：応用水理学 上 一般水理学，丸善，昭和41年。
- 7) 川井忠彦監訳：応用有限要素解析，丸善，昭和55年。
- 8) 岡田 清・六車 照編集：改訂新版コンクリート工学ハンドブック，朝倉書店，1985。
- 9) 佐藤英明・佐谷靖郎：マスコンクリートの温度応力に関する研究，熊谷技報第33号，1983.7.
- 10) 建築学体系8，彰国社，1957.7.
- 11) マスコンクリートの温度応力研究小委員会：マスコンクリートの温度応力推定方法に関する既往の研究とその総括(その3)，コンクリート工学，Vol.21, No.11, Nov. 1983.

(1985.9.30・受付)