

パイプクーリング効果の高精度予測に関する研究

A STUDY ON HIGH ACCURATE PREDICTION OF PIPE COOLING EFFECT

伊藤 洋*・坂口雄彦*・西山勝栄*・森 清就**

By Yo ITO, Takehiko SAKAGUCHI, Katsue NISHIYAMA and Kiyonari MORI

The pipe cooling method is of use for control of thermal cracks in various massive concrete structures. This paper presents a new theoretical technique for solving the pipe cooling problems. The numerical computation is made by means of the modified Fluid in Cell (MFLIC) method which was developed for simulating energy equation with a large Péclet number. The experiment is done by using a large-sized rectangular concrete prism. Comparing theoretical results with experimental ones, the application technique of MFLIC method is confirmed. In addition, some characteristics of heat transfer at cooling pipe surface are theoretically clarified by the aid of computed results.

Keywords: mass concrete, pipe cooling, thermal crack, heat transfer, numerical analysis

1. はじめに

パイプクーリング工法は、元来ダムコンクリートの熱応力を低減させる方法の1つとして発展してきたものであるが、最近では原子力発電所や大型橋梁の橋脚などの大型で重要なコンクリート構造物においても実施されつつあり、多様化を呈してきている。そのため、クーリング効果に対する評価・解析にあたってはダム以外の構造物にも適用し得るようできるだけ制約条件を少なくした高精度の予測手法を確立する必要がある。最近では田辺(1984)¹⁾や佐藤(1986)²⁾らの研究によって、クーリング効果の三次元解析も可能となりつつある。しかしながら、従来の評価・解析手法では、パイプ壁面での熱伝達率を適切に与えることが条件となっており、クーリング効果の理論的説明は必ずしも十分にされていないように思われる。

本論では、このような背景にあって、まず従来のコンクリートとパイプ内水のおのの伝熱方程式より未知量であるパイプ壁面熱流束項を消去することにより支配方

程式を一本化し、理論的に温度場を評価することを可能にしたうえで、その解法に変形 FLIC 法を適用させてパイプクーリング周辺の伝熱を軸対称場において高精度に解析する手法を提示する。また、その精度の検証にあたっては大型供試体(幅・高さ1m、長さ10m)を用いたクーリング実験を実施し、その結果と解析結果を比較・検討する。さらに、この予測手法を発展させ、複雑な三次元クーリング構造等に有効な従来解析手法・技術の精度向上に必要となるパイプ壁面熱伝達率を理論的に決定することを試み、不明確であったその基本的性質についても検討を加える。得られた成果は、この種の予測・評価精度を向上させるうえで有用と思われるのでここに報告する。

2. 基礎式と変形 FLIC 法による解析法

ここでは、本論で用いるパイプクーリング解析の基礎式とその解法について述べることにする。

パイプクーリング解析において従来用いられてきた基礎式は、次式に示すようにコンクリートとパイプ内水の2つの場についてのおのの独立した伝熱方程式で表わされている^{1),2)}。

$$(\rho c)_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = \text{div}(x_c \text{grad } T_c) + q_1 - q_2 : \text{コンクリート}$$

* 正会員 (株)熊谷組原子力開発室土木技術部
(〒162 新宿区津久戸町2-1)

** 正会員 (株)熊谷組原子力開発室土木技術部課長
(同上)

$$\dots\dots\dots(1)$$

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = -\text{div} \{(\rho c)_w (v T_w)\} + q_2 : \text{パイプ内水}$$

$$\dots\dots\dots(2)$$

ここに、 (ρc) ：熱容量、 T ：温度、 t ：時間、 κ ：熱伝導率、 q_1 ：コンクリートの内部発熱率、 q_2 ：コンクリートからパイプ内水に吸収される熱吸収率 ($q_2 = h(T_c - T_w)$ 、 h ：パイプ壁面の局所熱流束に係る係数)、 v ：パイプ内水の流速、であり、添字 c, w はおのおのコンクリート、パイプ内水の諸量であることを表わす。

これらの2式を解くことによりコンクリートとパイプ内水の温度分布が得られるわけであるが、その際両式に含まれる熱交換流束項 q_2 は今日まで実験・経験的な値を用いているのが現状である。しかし、 q_2 に関与する物理量は $f((\rho c)_c, (\rho c)_w, T_c, T_w, \kappa_c, \kappa_w, q_1, \alpha, r_p, v, L, R) = 0$ 、(ここに、 α ：躯体表面熱伝達率、 r_p ：パイプ半径、 L ：躯体長さ、 R ：コンクリート厚さ)と多く一義的に決めることは困難であり、実験・経験的に求めるにはおのずと限界がある。そこで、本論では上式(1)、(2)より未知量 q_2 を消去し、一方パイプ内外表面の温度はその管厚が非常に薄く、かつ熱伝導性も十分大きいことからそれらを等しいと仮定することにより、パイプ内水とコンクリート場の伝熱を同時に満足する伝熱方程式を導くと、

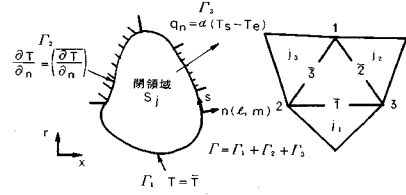
$$(\rho c)_c \frac{\partial T_c}{\partial t} + (\rho c)_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = \text{div}(\kappa_c \text{grad } T_c) - \text{div} \{(\rho c)_w (v T_w)\} + q_1 \dots\dots\dots(3)$$

となる。

さらに、同式は全体系に対する伝熱方程式となっているため、定式化の便宜上任意の要素系に着目して一般的な形に整理すると次式のように書くことができる^{3),4)}。

$$(\rho c) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\kappa \text{grad } T) - \text{div} \{(\rho c)_w (v T)\} + q_1 \dots\dots\dots(4)$$

式(4)は伝導、対流という2つの熱輸送形態を同時に含む伝熱方程式であり、上述の q_2 に係る物理量もすべて含まれることになる。同式を精度よく解析することによりパイプクーリング周辺の伝熱現象を理論的に得ることが可能となるが、ここで対象とするような伝熱場ではコンクリート中の伝導とパイプ内水の対流による熱輸送量が大きく異なってくる。よって、通常の有限要素法や差分法では解析精度の大きく異なる伝導項と対流項を同時に収束安定させることが難しく、解の振動・発散を生じ解析手法そのものにも工夫を要することになる。ここでは著者らがすでに平面二次元場における伝熱・移流分散方程式のペクレ数(Péclet number)の広い範囲にわたる解法に提案している変形 FLIC 法を軸対称回転体



図一 軸対称場の境界と三角形要素

三次元場のそれに拡張・応用する^{4),5)}。FLIC (Fluid in Cell) 法は、直交格子で分割された Cell 内の流体のもつ諸量(質量、運動量、エネルギー等)の時間的変化を2段階に分けて計算するというものであり、流体運動を記述する Lagrange, Euler の2通りの方法の特徴を有している。変形 FLIC 法は、FLIC 差分法を三角形領域に拡張したものである。以下にその変形 FLIC 法による定式化を具体的に述べる⁴⁾⁻⁸⁾。

まず、軸対称場における計算領域を図一に示すように三角形に分割し、その中の任意の要素 j に注目する。ここに、図中の i, \bar{i} ($i=1, 2, 3$) は三角形の頂点および対辺を意味する。また、 j, \bar{j} ($i=1, 2, 3$) は三角形の図心であるとす。そこで、基礎式(4)を図一の任意の閉曲線内で面積積分し、半径 r の軸対称回転体であることを考慮すると次のようになる。

$$\int_{S_j} \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \text{div}(\eta v T) \right] r dr dx = \int_{S_j} \left[\text{div}(a \text{grad } T) + \zeta \right] r dr dx \dots\dots\dots(5)$$

ここに、 $\eta = (\rho c)_w / (\rho c)$ 、 $a = \kappa / (\rho c)$ 、 $\zeta = q_1 / (\rho c)$ 、 S_j ：要素 j の領域または面積である。

式(5)に Gauss の発散定理を適用して整理すると次式を得る。

$$\left. \begin{aligned} \int_{S_j} \frac{\partial T}{\partial t} \cdot r dr dx + \int_{\Gamma_j} \eta v_n T r ds &= \int_{\Gamma_j} \epsilon_n r ds \\ &+ \int_{S_j} \zeta r dr dx \end{aligned} \right\} \dots\dots(6)$$

$$\left\{ \begin{matrix} \epsilon_n \\ \epsilon_s \end{matrix} \right\} = \begin{pmatrix} l & m \\ -m & l \end{pmatrix} \left\{ \begin{matrix} \epsilon_r \\ \epsilon_x \end{matrix} \right\}, \left\{ \begin{matrix} \epsilon_r \\ \epsilon_x \end{matrix} \right\} = a \text{grad } T$$

ここに、 Γ_j ：要素 j を構成する境界、 v_n ：境界上における n 方向の速度、 l, m ：法線 n の方向余弦、である。

そこで、上述したように変形 FLIC 法を適用して2段階に分けて差分化するため、初めに式(5)の左辺を Lagrange 微分で表わし、式(6)を書き直すと次のようになる。

$$\frac{D}{Dt} \int_{S_j} r T dr dx = \int_{\Gamma_j} \epsilon_n r ds + \int_{S_j} \zeta r dr dx \dots\dots(7)$$

ここで、

$$\int_{S_j} r dr dx = S_j \frac{r_{Gj}}{2} \dots\dots\dots(8)$$

$$\int_{r_j} r ds = R_{\bar{c}i} \frac{l_i}{2} \dots \dots \dots (9)$$

を考慮し、さらに Lagrange 微分を前進差分で近似し、それを時刻 $(n+1)\Delta t$ における中間的な値 \tilde{T}_j について整理すると、

$$\tilde{T}_j = T_j^{(n)} + \frac{\Delta t}{S_j r_{c_j}} \left\{ \sum_{i=1}^3 \varepsilon_{\bar{n}i} R_{\bar{c}i} \cdot l_i + \zeta_j^{(n)} S_j r_{c_j} \right\} \dots \dots \dots (10)$$

となる。ここに、 $T_j^{(n)}$ ：要素 j における時刻 $t=n\Delta t$ の温度、 r_{c_j} ：三角形要素 j の図心の r 座標 ($r_{c_j} = (r_1 + r_2 + r_3)/3$)、 $\varepsilon_{\bar{n}i}$ ：辺 \bar{i} を共有する 2 要素の平均値、 $R_{\bar{c}i}$ ：辺 \bar{i} の構成節点の r 座標の和 (たとえば $R_{\bar{c}i} = r_2 + r_3$)、 l_i ：辺 \bar{i} の長さ、である。

次に、第 2 段階では式 (6)、(7) の左辺を等置することにより、

$$\frac{D}{Dt} \int_{s_j} r T dr dx = \int_{s_j} \frac{\partial T}{\partial t} r dr dx + \int_{s_j} \eta v_n T r ds \dots \dots \dots (11)$$

となり、これを離散化すると、

$$\frac{(\tilde{T}_j - T_j^{(n)}) S_j r_{c_j}}{\Delta t} = \frac{(T_j^{(n+1)} - T_j^{(n)}) S_j r_{c_j}}{\Delta t} + \sum_{i=1}^3 l_i P_i R_{\bar{c}i} \dots \dots \dots (12)$$

となる。したがって時刻 $t=(n+1)\Delta t$ における温度 $T_j^{(n+1)}$ は次のように導かれる。

$$T_j^{(n+1)} = \tilde{T}_j - \frac{\Delta t}{S_j r_{c_j}} \cdot \sum_{i=1}^3 l_i P_i R_{\bar{c}i} \dots \dots \dots (13)$$

ここで、 P_i は風上差分の考え方を導入して次のように表わす。

$$P_i = \eta v_{\bar{n}i} \{ \delta_i \tilde{T}_{\bar{n}i} + (1 - \delta_i) \tilde{T}_j \} \dots \dots \dots (14)$$

$$\delta_i = \delta \quad v_{\bar{n}i} < 0 \text{ (辺 } \bar{i} \text{ を通じて流入)}$$

$$\delta_i = 1 - \delta \quad v_{\bar{n}i} > 0 \text{ (辺 } \bar{i} \text{ を通じて流出)}$$

ここに、 δ は上流パラメーターで $0.5 \leq \delta \leq 1.0$ の値をとり、解の精度・収束性を考慮して決定することになる。一般的に δ が 0.5 に近いほど解の精度が増し、逆に 1.0 に近いと収束性がよくなるといった傾向がある。後述の解析では収束性を重視し、 $\delta=1.0$ とする。

以上が変形 FLIC 法による定式化の概要であり、境界条件は以下の Dirichlet, Neumann, 対流熱伝達型の境界を設定する。

$$\left. \begin{aligned} T &= \bar{T} \text{ on } \Gamma_1, \quad \partial T / \partial n = \bar{\partial T} / \partial n \text{ on } \Gamma_2 \\ q_n &= \alpha (T_s - T_e) \text{ on } \Gamma_3 \end{aligned} \right\} \dots \dots \dots (15)$$

ここに、 q_n ：単位面積当たりの熱流束、 α ：躯体表面熱伝達率、 T_s ：コンクリート表面の温度、 T_e ：外気温であり、 $\bar{\quad}$ (バー) はその境界において既知であることを表わす。

したがって、式 (10)、(13) を式 (15) の境界条件下で解くことによりコンクリートとパイプ内水の温度場を同時に求めることができる。

3. 実験結果と解析結果の比較・検討

(1) パイプクーリング実験

2. で述べた解析手法の妥当性を確認し、また、パイプクーリング効果の基本的性質を調べるため、大型供試体を用いたパイプクーリング実験を実施する。

本実験に用いた供試体の概要を図-2 に示す。供試体は、パイプクーリングを実施するクーリング供試体 (同

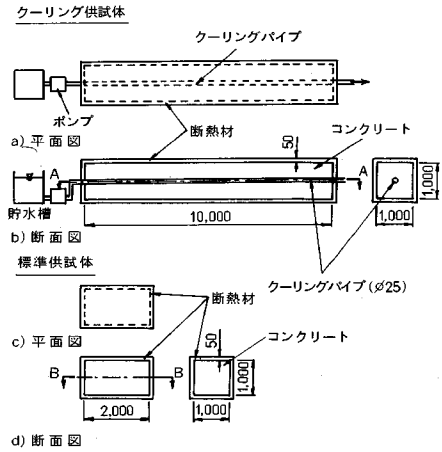


図-2 実験供試体概要 (単位：mm)

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の最大寸法 G _{max} (mm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	W/C (%)	s/a	単位量 (N/m ³)			
					W	C	S	G
15	12	4	54.8	44.8	1,934	3,528	7,419	10,564

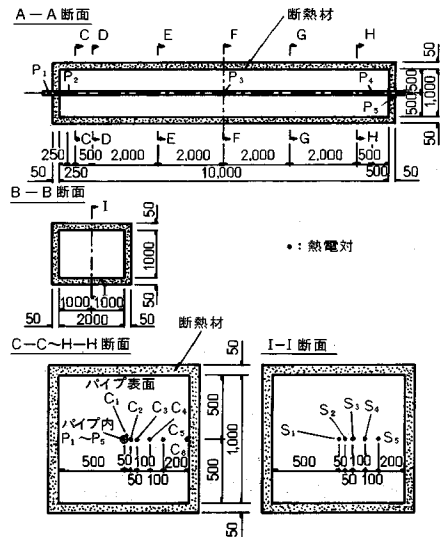


図-3 計測位置 (単位：mm)

図上)とそれを行わない標準供試体(下)の2体である。前者は、幅、高さとも1mの正方形断面で長さ10mの直方体コンクリート躯体であり、中心には内径 $r_p=25$ mmの薄肉電縫鋼管が設置されている。また、供試体の周囲すなわち型枠の内側および供試体上部には、表面放熱を防止するために厚さ50mmの断熱材(発泡スチロール製)が取り付けられている。一方、後者は前者と同断面を有する長さ2mの無筋コンクリート躯体であり、同様に全面が断熱材で覆われている。

コンクリートの打設は両供試体とも同時に行われたが、クーリング供試体においては打設開始と同時にポンプを始動し、クーリングパイプ内に毎分15l(流速 $v=0.5$ m/s)の水道水(常温)を材令35時間まで通水する。使用したコンクリートの配合は表一に示すとおりであり、セメントは普通ポルトランドセメントを使用している。

計測は、T型熱電対およびデジタル温度測定器によって打設開始時より材令45時間まで行われ、コンクリートおよびパイプ内水の温度分布の経時変化が自動測定・記録される。温度計測のための熱電対設置位置を図一3に示す。計測点は、パイプ内水については5点($P_1 \sim P_5$)、コンクリート内部はクーリング供試体で5断面(C-C~H-H断面)で各6点($C_1 \sim C_6$)、標準供試体の1断面(I-I断面)で5点($S_1 \sim S_5$)の計40点である。

(2) 解析モデルと条件

本解析に用いた解析モデルは、上述の実験と条件を整合させるため、図一4に示すような長さ $L=10.0$ mで半径 $r_p=0.0125$ mのパイプを中心とした軸対称回転体三次元モデルとする。クーリング水は左から右へ流速 $v=0.5$ m/s(断面一様)で流れており、半径 $R_1=0.5$ mのコンクリート躯体は全周にわたり厚さ $R_2=0.05$ mの

表一2 解析に用いた諸定数

コンクリートの熱容量 (ρC) _c	2.2	MJ/m ³ K
コンクリートの熱伝導率 κ_c	2.3	W/mK
断熱材の熱容量 (ρC) _a	31.4	kJ/m ³ K
断熱材の熱伝導率 κ_a	0.041	W/mK
水の熱容量 (ρC) _w	4.2	MJ/m ³ K
水の熱伝導率 κ_w	0.60	W/mK
断熱材表面の熱伝達率 α	11.63	W/m ² K
パイプ内水流速 v	0.50	m/s
モデル寸法	長さ L	10.0 m
	パイプ半径 r_p	0.0125 m
	コンクリート半径 R_1	0.50 m
	断熱材厚 R_2	0.05 m
コンクリートの断熱温度上昇式 $T_a(^\circ\text{C})=50(1-e^{-\beta t})$, t (d)		
打設時のコンクリート温度	24.0	°C
パイプ内水入口の水温	22.0~24.0	°C

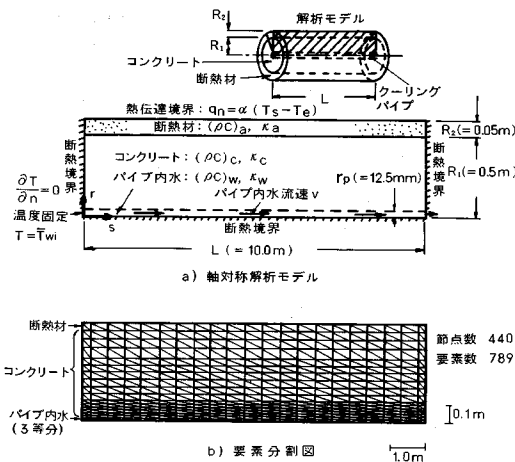
(1 MJ/m³K=238.1 kcal/m³°C)
(1 W/mK=0.86 kcal/mh°C)

断熱材で覆われているものとする。解析は、同図上部に示したような半断面(図中斜線部)について軸対称解析を行うが、境界条件は、パイプ部左端が温度固定(Dirichlet)境界 Γ_1 ($T=\bar{T}_{wi}$, \bar{T}_{wi} :流入水温度)、モデル周囲の断熱材表面が熱伝達境界 Γ_3 ($q_n=\alpha(T_s-T_e)$)であり、それ以外は断熱(Neumann)境界 Γ_2 ($\partial T/\partial n=0$)とする。表一2には本解析に用いた諸定数を示している。コンクリート、断熱材、パイプ内水の熱容量はおのおの(ρC)_c=2.2, (ρC)_a=31.4, (ρC)_w=4.2 MJ/m³K, 熱伝導率は $\kappa_c=2.3$, $\kappa_a=0.041$, $\kappa_w=0.6$ W/mKとし、断熱材表面の熱伝達率は $\alpha=11.63$ W/m²Kとする。また、コンクリートの断熱温度上昇は、上述の実験結果(標準供試体I-I断面中心温度 T_{s1} , 図一3参照)より得た近似式, $T_a(^\circ\text{C})=50(1-e^{-\beta t})$ を用いる。なお、解析時間きざみは、クーラン数 $C_r=v\Delta t/\Delta s<0.5$ ($v=0.5$ m/s, $\Delta s=0.25$ m)より $\Delta t=6.25 \times 10^{-5}$ hととる⁹⁾。

(3) 実験・解析結果とその考察

実験により得られた結果のうち代表的なものを示し、パイプクーリング実施による冷却効果の基本的性質について考察しつつ、本手法による解析結果と比較検討する。

初めに、図一5はクーリング供試体長手方向のコンクリート温度分布の経時変化をみるため、図一3中のA-A断面におけるそれを材令 $t=6, 12, 18, 24$ hについて示したものである。図中には、測点 C_2, C_3, C_4, C_5 の温度実測値(図中・)と解析値(図中破線)を同時に示している。これより、当然ながらコンクリート温度はクーリングパイプに近い点 C_2 においてクーリング効果が最も大きいために低く、それより離れるに従って高くなっているが、全体的には経時的に上昇しつつ各点の温度差が広がる傾向にあることが認められる。実験値と解析値を比較すると全体的によく一致している。



図一4 解析モデル

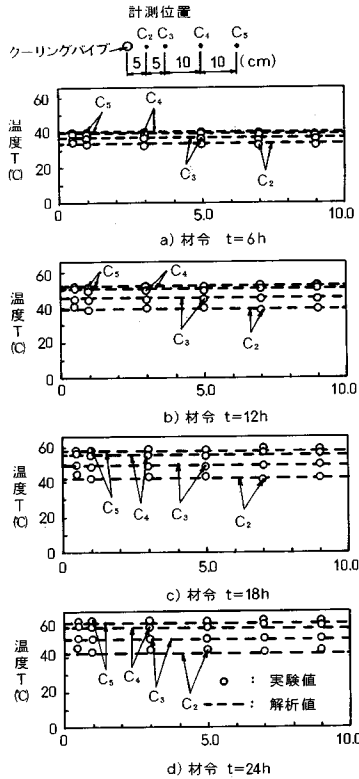


図-5 長手方向コンクリート温度分布の経時変化 (図-3 A-A 断面)

次に、供試体長手方向直交断面である F-F 断面における測定温度の経時変化を示した図-6 に着目する。図中、実線 T_{P3} はパイプ内水温、 $T_{C2} \sim T_{C5}$ はおのこのパイプ中心より 5, 10, 20, 30 cm の各点におけるコンクリート温度、一点鎖線 T_{S1} は標準供試体中央断面 (I-I 断面) の中心温度である。また、破線は解析値であり、点線は T_{S1} の実験値より近似した断熱温度上昇曲線 $\{T_a = 50(1 - e^{-2t}), t(d)\}$ を示している。図より、パイプ内水温 T_{P3} は計測期間を通じてほとんど変化は認められないが、コンクリート温度 $T_{C2} \sim T_{C5}$ はいずれも材令 2 時間頃より急激に上昇し、徐々に緩やかになって材令 20 時間を経過するとほぼ一定値となることがわかる。各点の温度はクーリングパイプに近いほど低いことが確認できる。クーリング効果は断熱上昇温度 T_a との差ということになるが、今回の実験では $10 \sim 30^\circ\text{C}$ 程度低減されている。クーリング停止材令 (35 h) 後はパイプに近い点ほど急激に温度上昇し、いずれも数時間後には T_{C5} に一致してくることが読み取れる。解析値は打設直後に実験値より若干低くなっているが、その後はよく追従・再現している。この若材令時の差異は打設時刻の時間・空間的ばらつきや環境条件変化等によるものと考

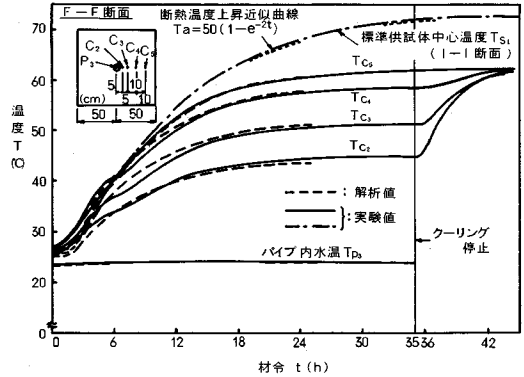


図-6 クーリングパイプ周辺測点におけるコンクリート温度の経時変化 (F-F 断面)

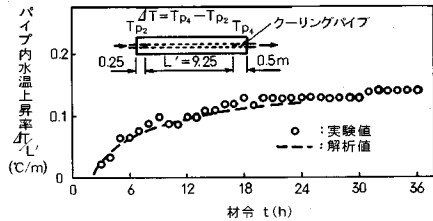


図-7 パイプ内水温上昇率の経時変化

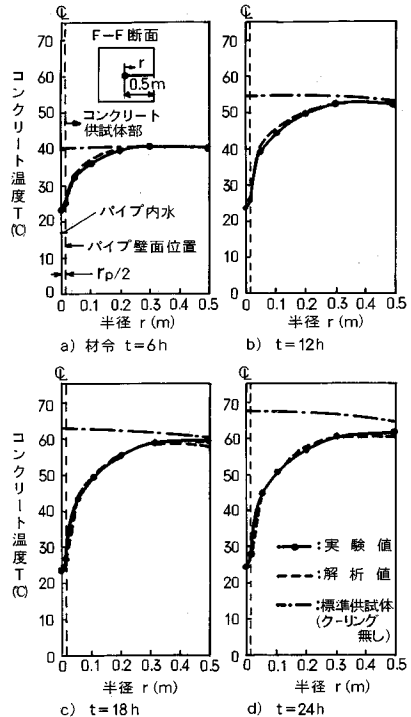


図-8 クーリングパイプ周辺における温度分布の経時変化 (F-F 断面)

得る。

一方、図-7はパイプ内水温の流水方向上昇率 $\Delta T/L'$ の経時変化を示したものである。ここで、 $\Delta T = T_{P4} - T_{P2}$ であり、 L' はその間の距離である。パイプ内水温は図-6に示したコンクリート温度の上昇に対応して材令2時間頃より上昇し始め、材令20時間を超えるとほぼ一定の値 ($\Delta T/L' \approx 0.13^\circ\text{C}/\text{m}$, $\Delta T \approx 1.2^\circ\text{C}$) となっている。水温上昇はこのようになりに微妙な値であるが、この場合においても解析値は実験結果とよく整合しており、十分な精度を得ている。

図-8は、図-6と同じF-F断面におけるパイプ周辺の温度分布の経時変化を示したものである。図中、実線は実験値、一点鎖線は標準供試体温度、破線は解析値である。同図においても標準供試体温度との差がクーリング効果を表わすことになる。これより、パイプ近傍での温度勾配は経時的に大きくなり、クーリング効果の影響半径も広がっていくことが認められる。ただ、ある時間を経過するとコンクリート温度自体はしだいに安定してくるようになる。解析値と実験値はこのような断面温度分布をとってもよく一致している。

4. パイプ壁面熱伝達率の理論的決定

2. で提示した解析手法を応用し、ここでは従来技術の精度向上にあたって大切となるパイプ壁面熱伝達率を理論的に算定・決定することを試み、また従来未解明であったその基本的性質についても検討を加える。

(1) 熱伝達率の決定法

熱伝達率を算定するにあたり、まずよく知られているクーリングパイプ内水の熱収支を示した図-9に着目する。ここで、パイプ内水は乱流であって断面流速分布は一樣であるとする。同図より、微小部分 ds における熱収支およびコンクリートと水の間の熱流束 Q は、パイプ半径 $r = r_p$ 、断面積 $A (= \pi r_p^2)$ 、平均水温 T_w 、パイプ壁面位置 ($r = r_p$) でのコンクリート温度 T_{cs} 、パイプ壁面熱伝達率 α_w を定義すると式 (2) より次式のよりに表わすことができる^{1), 2)}。

$$(\rho c)_w \frac{\partial T_w}{\partial t} A ds = -(\rho c)_w v \frac{\partial T_w}{\partial s} A ds + Q \dots \dots (16)$$

$$Q = q_w A ds = 2 \pi r_p ds \alpha_w (T_{cs} - T_w) \dots \dots (17)$$

これより、式 (17) を式 (16) に代入し整理すると結果的に α_w は、

$$\alpha_w = -\frac{(\rho c)_w r_p v}{2(T_w - T_{cs})} \left(\frac{\partial T_w}{\partial s} - \frac{1}{v} \frac{\partial T_w}{\partial t} \right) \dots \dots (18)$$

と書くことができる。同式において、 $(\rho c)_w$ 、 r_p 、 v は既知量であるから、3. で示したような解析結果を利用して T_w 、 T_{cs} 、 $\partial T_w / \partial t$ 、 $\partial T_w / \partial s$ の時間・位置的分布を整理・代入することにより理論的に $\alpha_w(s, t)$ を算定・決

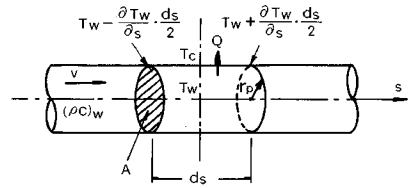
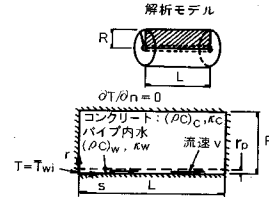


図-9 クーリングパイプ内の熱収支



コンクリートの熱容量 $(\rho c)_c$	2.2	MJ/m ³ K
コンクリートの熱伝導率 κ_c	2.7	W/mK
パイプ内水の熱容量 $(\rho c)_w$	4.2	MJ/m ³ K
パイプ内水の熱伝導率 κ_w	0.60	W/mK
パイプ内水流速 v	0.2, 0.4, 0.6	m/s
モデル寸法	長さ L	10.0 m
	パイプ半径 r_p	0.0125 m
	コンクリート半径 R	1.0 m
コンクリートの断熱温度上昇式	$T_b = 37.3(1 - e^{-0.93t})$, t (d)	
初期温度	20.0	°C
パイプ内水入口の水温	15.0	°C

図-10 解析モデルと諸条件

定することが可能となる。

(2) 解析モデルと条件

上述した手法を用い、図-10に示したようなモデル・諸条件を設定してパイプ壁面熱伝達率の基本的な性質を吟味してみることとする。解析モデルは、中心に半径 $r_p = 0.0125$ m のパイプを有する長さ $L = 10$ m、半径 $R = 1.0$ m の断熱状態にあるようなコンクリート躯体を設定し、解析はその軸対称断面 (図中斜線部) について実施する。要素分割は図-4 b) に示したものとほぼ同様であり、パイプ内は r 軸方向に3分割とする。伝熱物性値は、同図中に示したようにコンクリートおよびパイプ内水の熱容量 $(\rho c)_c = 2.2$ 、 $(\rho c)_w = 4.2$ MJ/m³K、熱伝導率 $\kappa_c = 2.7$ 、 $\kappa_w = 0.60$ W/mK とし、コンクリートの断熱温度上昇式は普通ポルトランドセメント 300 kgf/m³ を用いたような場合を想定し、 $T_b = 37.3(1 - e^{-0.93t})$ 、 t (d) とする¹⁰⁾。また、境界条件はパイプ内水入口の水温を 15.0°C の温度固定境界とし、それ以外はすべて断熱境界とする。解析は、パイプ内水流速を $v = 0.2, 0.4, 0.6$ m/s と変えた3ケースについて、材令48時間までの非定常伝熱解析を実施する。

(3) 熱伝達率の基本的性質

上述したように熱伝達率を算定するにあたり必要となる (式 (18) 参照) パイプ内水温 T_w 、パイプに隣接

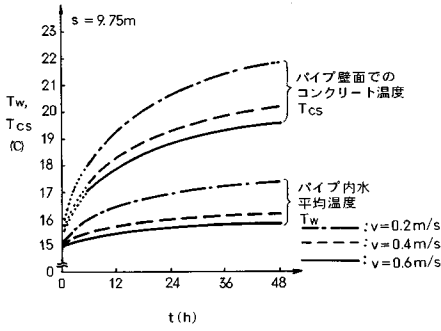


図-11 $s=9.75\text{ m}$ 位置における T_w, T_{cs} の経時変化

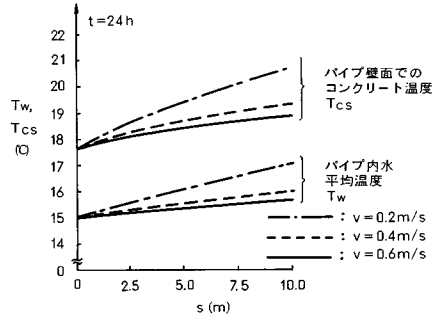


図-13 材令 $t=24\text{ h}$ における T_w, T_{cs} の位置的变化

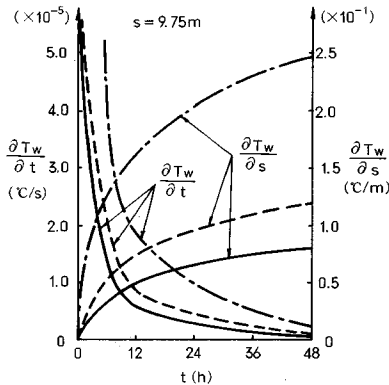


図-12 $s=9.75\text{ m}$ 位置における $\partial T_w/\partial t, \partial T_w/\partial s$ の経時変化

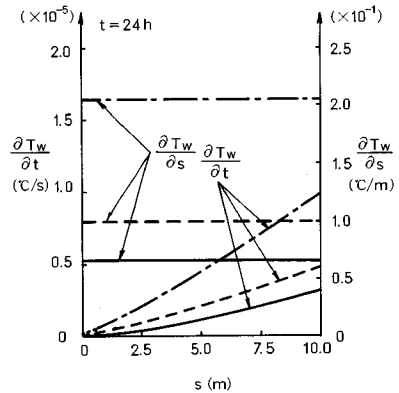


図-14 材令 $t=24\text{ h}$ における $\partial T_w/\partial t, \partial T_w/\partial s$ の位置的变化

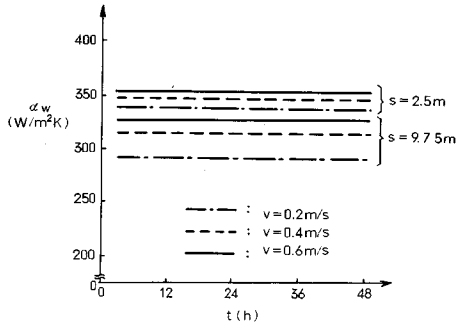
するコンクリート温度 T_{cs} , T_w の単位時間・距離当たりの変化率 $\partial T_w/\partial t$, $\partial T_w/\partial s$ の時間・位置的分布の代表的なものを提示し、それぞれの基本的性質を検討したうえで最終的に α_w を算定してみることとする。

まず、 $s = 9.75\text{ m}$ 位置における T_w, T_{cs} および $\partial T_w/\partial t, \partial T_w/\partial s$ の経時変化を、流速 $v=0.2\text{ m/s}$ (一点鎖線), 0.4 m/s (破線), 0.6 m/s (実線) をパラメータにして示したものが図-11, 12である。3. ですでに述べたように、コンクリート温度 T_{cs} が上昇するにつれ水温 T_w およびその上昇率 $\partial T_w/\partial s$ は上昇するが、経時的にそれらの上昇勾配は徐々に減少し一定値に漸近してることが確認できる。逆に $\partial T_w/\partial t$ は減少することとなる。また、パイプ内水の流速による影響も顕著に現われ、それが速いほどコンクリート、水の温度および水温上昇率は小さくなることがわかる。つまり、水の速度が速いとそれだけ熱輸送量が大きくなるわけで、コンクリートからの熱流束がそれに比して増大しない限り水温上昇が小さくなることは十分納得できる。

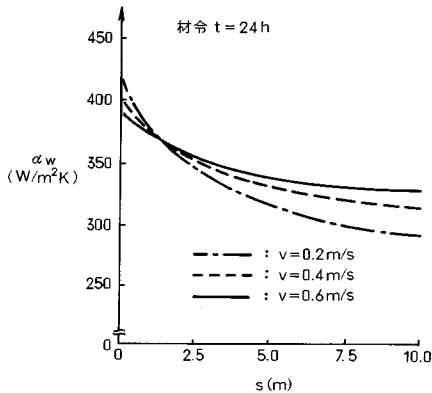
図-13, 14は、おのおの材令 $t=24\text{ h}$ における T_w, T_{cs} および $\partial T_w/\partial t, \partial T_w/\partial s$ のパイプ軸方向の分布を示したものである。 T_w, T_{cs} はパイプ流入端からの距離

s に比例して上昇するが、 $\partial T_w/\partial s$ は一定値となって位置による変化はほとんど現われない。一方、 $\partial T_w/\partial t$ は $s=0\text{ m}$ で温度固定としているので流入口より離れるに伴って増大することとなっている。当然ながらこの場合もパイプ内流速が速いほど温度およびその上昇率は小さい。

次に、図-11~14で示した解析結果を踏まえ上述の手順に従ってパイプ壁面熱伝達率 α_w を決定し、その基本的性質を調べてみることにする。まず、図-15は $s = 2.5\text{ m}$ および 9.75 m 位置における α_w の経時変化を $v = 0.2, 0.4, 0.6\text{ m/s}$ の場合について示したものである。 α_w は流入端に近く、また水流速が速いと若干大きい値をもつが、経時的にはほとんど変化せず、一定値となっている。 α_w の時間依存性が小さいことは、式 (18) において流速 $v=0.2\sim 0.6\text{ m/s}$ の範囲ではごく初期を除いて図-12から $\partial T_w/\partial s \gg 1/v \cdot \partial T_w/\partial t$ となることから十分理解できる。一方、図-16は材令 $t=24\text{ h}$ における α_w の位置的变化について示したものである。 α_w は流入口で大きくそれから離れるに従って減少しつつだいに一定値に漸近してることが認められる。このとき α_w は流入端近傍では流速による差は小さく、いずれも



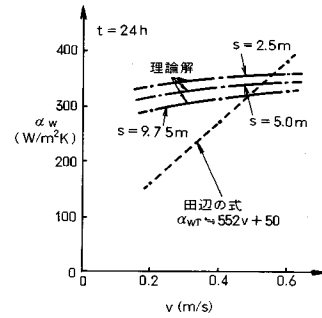
図—15 パイプ壁面熱伝達率 α_w の経時変化



図—16 材令 $t=24$ h におけるパイプ壁面熱伝達率 α_w の位置的变化

400 W/m²K 前後の値をとっているが、それから離れると差を生じ、全体的に流速の速い方が大きい。この場合の変化は、式 (18) において v , $\partial T_w / \partial s$ (図—14) は一定値であるから、温度差 ($T_w - T_{cs}$) (図—13) の増大に起因したものと判断できる。

以上のようにして得られた本モデルにおけるパイプ壁面熱伝達率 α_w をパイプ内水流速 v との関係に整理すると図—17 のようになる。同図には参考のため田辺らにより実験から導かれた平均熱伝達率算定式 α_{wr} (W/m²K) $\approx 552v + 50$ によるものも併せて示してある (図中破線)¹⁾。本解析により得られた α_w は流速が大きいと若干増大するものの、その依存性は小さいこととなっている。これは、式 (18) において図—14 に示したように v が大きいと逆に $\partial T_w / \partial s$ が小さくなるといった関係から結局はお互いに相殺されて流速依存性が現われてこないことによる。具体的に $s = 9.75$ m における $v \cdot \partial T_w / \partial s$ を計算してみると、 $v = 0.2$ m/s のときは 4.09×10^{-2} °C/s, 0.4 m/s では 3.98×10^{-2} °C/s, 0.6 m/s では 3.94×10^{-2} °C/s とほとんど同一の値となっている。一方、温度差 ($T_w - T_{cs}$) は図—13 にみられるように大きな差はない。また、熱輸送量はパイプ内水の方がコ



図—17 材令 $t=24$ h におけるパイプ壁面熱伝達率 α_w とパイプ内水流速 v の関係

ンクリート部の熱伝導伝熱によるものより十分大きく、熱交換流束はむしろコンクリート部におけるその能力によって決まってくることを考えれば、熱伝達率は必ずしも流速に依存したものでないことが示唆される。田辺式との差異は、実験が温水注入方式であったことなどいくつかの要因が考えられるが、通常クーリングを行う場合の流速 $0.4 \sim 0.6$ m/s 程度ではいずれも適切な値を与えているものと考え得る。結局、パイプ内水の流速は、パイプ壁面熱伝達率にはあまり影響を与えないが、水温上昇率が大きく変化しクーリング効果を支配することが示唆される結果となった。

5. 結 論

本研究ではパイプクーリング効果を理論的に評価し得る手法を提案し、大型実験供試体を用いてその妥当性・精度を吟味した。さらに、それらの手法を発展させ、理論・解析的にパイプ壁面熱伝達率を決定することを試み、従来明確でなかったその基本的性質を解明し得た。本研究で得られた成果は以下のように要約される。

(1) パイプクーリング周辺伝熱場は、伝導、対流項を含む1つの移流伝熱方程式を用いることにより理論的に評価し得ることを確認した。

(2) 軸対称二次元移流伝熱方程式の解法に変形FLIC法を適用し、クーリングパイプ周辺の伝熱場の精度よい解を得ることができた。

(3) 単位長さ当たりの水温上昇率は、経時的に上昇してしだいに安定してくるが、単位時間当たりのそれは逆に急激に減少する。

(4) 単位長さ当たりの水温上昇率は、流入口より一定であり位置的变化はほとんど認められないが、単位時間当たりのそれは流入口より離れるほど大きくなる。

(5) 水温上昇率は、時間・位置的にも流速による影響を強く受ける。

(6) 理論・解析結果よりパイプ壁面熱伝達率を理論的に決定することが可能となった。

(7) パイプ壁面熱伝達率の時間依存性は、ごく初期を除いて十分小さく、一方、位置的には流入端で大きくそれより離れると減少するが、しだいに一定値となってくる。

(8) パイプ壁面熱伝達率は流速の増大に伴ってやや大きくなるもののその影響は顕著ではない。

ここで述べた解析手法は、現状では複雑な三次元伝熱場にそのまま適用することは解析上難しいと思われるが、従来技術と併せ応用することによってもこの種の予測・評価精度を十分向上させ得るものと考えられる。

最後に、本実験を遂行するにあたり多大な協力を得た(株)熊谷組技術研究所 松村哲夫氏に謝意を表します。

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，pp.171～179，1984.3.
- 2) 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，第372号，pp.111～120，1986.8.
- 3) Combarous, M. and Bories, S. : Hydro-thermal convection in saturated porous media, *Advance in Hydro-science*, edited by Ven te Chow, Vol.10, Academic Press, pp.231～307, 1975.
- 4) Sato, K., Shimizu, T. and Ito, Y. : Fundamental study on permeability and dispersion in double porosity rock masses, 5th Int. Conf. on Numerical Methods in Geomechanics, pp.657～664, 1985.4.
- 5) 佐藤邦明・伊藤 洋：地下空洞周辺の伝熱に関する研究，土木学会論文集，第363号，pp.97～106，1985.11.
- 6) 鷺津久一郎・田中義一・池川昌弘：変形FLIC法による非圧縮粘性流解析，日本航空宇宙学会誌，第27巻，第307号，pp.26～34，1979.8.
- 7) 足立武司・辻村玄隆・今泉全通：分岐集合部を有する管内非定常流の一解析法，日本機械学会論文集（第2部），43巻，366号，pp.596～602，1977.2.
- 8) 廣瀬直喜：流体力学における計算機実験の方法とその応用，日本航空宇宙学会誌，第20巻，第277号，pp.25～38，1972.12.
- 9) 伊藤 洋・佐藤邦明・清水昭男：放射性核種移行問題における変形FLIC法の安定性と精度について，土木学会第41回年次学術講演会Ⅱ部門，pp.201～202，1986.11.
- 10) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートの温度応力研究委員会報告書，技報堂出版，pp.3～7，1985.11.
(1987.7.6・受付)