

V-175

パイプクーリング管壁面における熱伝達率の理論的決定

〓熊谷組原子力開発室 正員 伊藤 洋 〇坂口雄彦
 〓熊谷組原子力開発室 正員 西山勝栄 森 清就

1. はじめに

マスコンの温度応力低減工法の一つであるパイプクーリング工法の評価に当って、パイプ壁面の熱伝達率の精度が重要であることは周知の通りである。著者らは、既に従来の解析手法では実験・経験式にたよらざるを得なかったパイプ壁面における熱伝達率を用いない理論解析手法を提示し、大型供試体を用いた実験結果とも比較してその精度を確認している。¹⁾ 本報では、さらにその予測手法を発展させ、解析結果より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、また従来不明確であった熱伝達率の時間・位置的依存性についても言及する。

2. 解析手法の概略

クーリング解析の基礎式は、式(1)に示したようにコンクリート場、パイプ内水の伝熱現象を同時に満足する伝熱方程式を用いる。

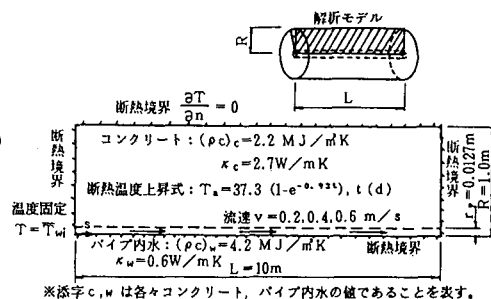
$$(\rho c) \frac{\partial T}{\partial t} = \text{div}(\kappa \text{grad} T) - \text{div}\{(\rho c)_w (v T)\} + q \quad (1)$$

ここに、 (ρc) : 熱容量, T : 温度, t : 時間, κ : 熱伝導率, v : パイプ内水の流速, q : コンクリートの内部発熱率, である。

式(1)の解析に当っては変形FLIC法を用いるが、その詳細については他文献に譲ることとしここでは省略する。¹⁾

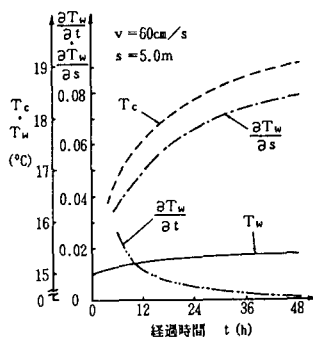
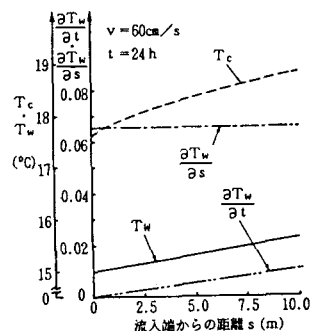
図-1に解析モデルおよび条件を示す。解析は、同図上部に示したような、中心に半径 $r_p = 1.27\text{cm}$ のパイプを有する半径 $R = 1\text{m}$ の円柱コンクリート構造体を設定し、その軸対称断面(図中斜線部)について行われる。境界条件はパイプ流入端水温のみ温度固定とする以外は全て断熱境界とし、パイプ内流速を $v = 20, 40, 60\text{cm/s}$ と変えた3ケースについて材令0~48hにわたる非定常解析を実施する。

以下の熱伝達率の決定に当って必要な解析結果の一例として、 $v = 60\text{cm/s}$ の場合の $s = 5.0\text{m}$ 位置における $T_c, T_w, \frac{\partial T_w}{\partial t}, \frac{\partial T_w}{\partial s}$ の経時変化および $t = 24\text{h}$ におけるこれらの位置的变化を各々図-2, 図-3に示す。



※添字 c, w は各々コンクリート、パイプ内水の値であることを表す。

図-1 解析モデルと条件

図-2 $T_c, T_w, \frac{\partial T_w}{\partial t}, \frac{\partial T_w}{\partial s}$ の経時変化図-3 $T_c, T_w, \frac{\partial T_w}{\partial t}, \frac{\partial T_w}{\partial s}$ の位置的变化

3. 熱伝達率の理論的決定

上述の解析によって、クーリングパイプ周辺の温度分布を理論・解析的に得ることが可能となるわけであるが、ここではその結果を用いての壁面熱伝達率の決定法とその基本的性質について述べることにする。

まず、熱伝達率を算定するに当っては、パイプ内水の熱収支に着目するが、ここでパイプ内水は流速 $v = 20 \sim 60 \text{ cm/s}$ の範囲でありレイノルズ数 $Re = 5 \times 10^3 \sim 1.5 \times 10^4$ をもつから流れは十分に発達した乱流とみなせ、パイプ軸直角方向の水温は一定であるとする。よって、クーリングパイプ内の熱収支は図-2に示すような一次元の水の輸送モデルによって表せることになる。

そこで、パイプ内水流入端からの距離を s とする局所座標系において微小部分 ds における熱収支を考えると、次のように表すことができる。

$$(\rho c)_w A v \left\{ T_w + \frac{\partial T_w}{\partial s} \cdot \frac{ds}{2} \right\} - \left\{ T_w - \frac{\partial T_w}{\partial s} \cdot \frac{ds}{2} \right\} + Q + (\rho c)_w A ds \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \quad (2)$$

ここに、 A : パイプ断面積 ($= \pi r_p^2$)、 T_w : ds 中央部の水温であり、 Q はコンクリートからパイプ内水に移動する熱流量でありパイプ壁面の局所熱伝達率を α_w とすると、

$$Q = 2 \pi r ds \alpha_w (T_w - T_c) \quad (3)$$

と書ける。ここに、 T_c : パイプ壁面位置 ($r = r_p$) のコンクリート温度である。従って、 α_w は

$$\alpha_w = \frac{(\rho c)_w r v}{2(T_w - T_c)} \left\{ \frac{\partial T_w}{\partial s} - \frac{1}{v} \frac{\partial T_w}{\partial t} \right\} \quad (4)$$

と表すことができる。同式に2.で実施した解析結果から、図-2, 3に示したような $\partial T_w / \partial t$ 、 $\partial T_w / \partial s$ 、 T_w 、 T_c を整理・代入することにより、理論的に $\alpha_w(s, t)$ の分布を算定することができる。

図-3, 4は、このようにして得られた α_w の $s = 5.0 \text{ m}$ 位置における経時変化および $t = 24 \text{ h}$ における位置的变化を、各々 $v = 60, 40, 20 \text{ cm/s}$ の場合について示したものである。これらより、 α_w は経時的にはほとんど変化していないが、流速が大きいほどその値は大きくなる傾向があり、この位置では $270 \sim 300 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ \text{C}$ 程度となっていることがわかる。一方、位置的には α_w は流入端から離れるに従って減小するがその勾配は徐々に緩やかになって一定値に漸近してくることが認められる。また、このとき α_w は流入端近傍では流速 v の小さい方が若干大きい、流入端から離れるにしたがってその方が減小率が大きくなるため $s = 1.5 \text{ m}$ 付近を境に逆に小さくなってくるのが判読できる。

結局、 α_w は経時的には安定であり、位置的には流入端より 10 m 付近まで変化するもののそれより離れると安定してくることが示唆された。また、熱伝達率は流速が速いほど大きいが大差はなく $v = 20 \sim 60 \text{ cm/s}$ で $\alpha_w = 250 \sim 350 \text{ kcal/m}^2 \text{ h}^\circ \text{C}$ 程度の値となることがわかった。

<参考文献> 1) 伊藤他：変形FLIC法によるパイプクーリング効果の高精度予測，第9回コンクリート工学論文集（投稿中），1987.6.

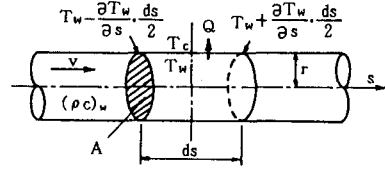


図-4 クーリングパイプ内の熱収支

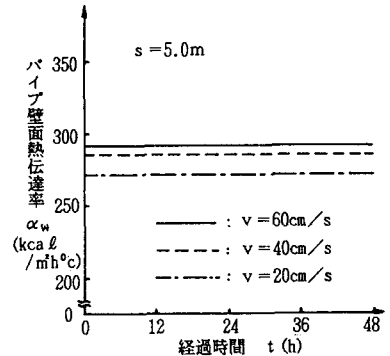


図-5 $S = 5.0 \text{ m}$ 位置におけるパイプ壁面熱伝達率 α_w の経時変化

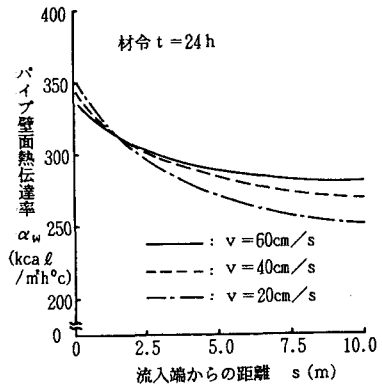


図-6 パイプ壁面熱伝達率 α_w の位置的变化