

(I-15) パイプクーリング効果に対するマスコンクリートの温度上昇解析

中央大学 学生員 ○山下敦馬
中央大学 正会員 榎山和男
熊谷組 正会員 佐藤英明

1. はじめに

セメントの水和熱による構造物の温度変化に伴って生じる温度応力は、構造物にひびわれを発生させたり、あるいは構造物の設計において無視できない影響を与える場合がしばしば見られる。近年、そのような構造物に対してパイプクーリングにより温度上昇を抑え、温度応力を積極的にコントロールする方法が行われている。本手法は、このパイプクーリングを考慮した三次元熱伝導、熱応力解析法の構築を行うものである。

2. 基礎方程式

コンクリートの三次元問題に関する非定常熱伝導解析は一般に次式によって与えられる。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(k_x \frac{\partial T_c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T_c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T_c}{\partial z} \right) + Q_c(t) - C_c \rho_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

ここに、 ρ_c 、 C_c ：コンクリートの密度および比熱、 k_x 、 k_y 、 k_z ：コンクリートの異方性熱伝達率、 T_c ：コンクリートの温度、 t ：時間、 $Q_c(t)$ ：コンクリートの内部発熱率、である。

パイプクーリング水の一次元熱輸送解析は次のようになる。

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

ここに、 C_w 、 ρ_w ：水の非熱および密度、 r ：クーリングパイプの半径、 v ：クーリング水の平均流速、 T_w ：クーリング水の温度、である。

3. 境界条件

境界条件は、いずれも時間と場所の関数となる。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次式が与えられる。

$$k_x \frac{\partial T_c}{\partial x} \cdot l_x + k_y \frac{\partial T_c}{\partial y} \cdot l_y + k_z \frac{\partial T_c}{\partial z} \cdot l_z = -\alpha_a (T_c - T_a) \quad (3)$$

ここに、 α_a ：表面での熱伝達率、 T_a ：外部の温度、である。

また、パイプクーリングによる熱の収支は、パイプと接する境界 ($\xi = 1 \sim n$) において次式が与えられる。

$$k_x \left(\frac{\partial T_c}{\partial x} \right)_\xi \cdot l_x + k_y \left(\frac{\partial T_c}{\partial y} \right)_\xi \cdot l_y + k_z \left(\frac{\partial T_c}{\partial z} \right)_\xi \cdot l_z = -\alpha_w (T_{c\xi} - T_{w\xi}) \quad (4)$$

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。

4. 離散化法

(1)、(2) 式を、空間方向にはガラーキン法に基づく有限要素法を、時間方向にはオイラー法を用いて離散化する。そして、コンクリートについては八節点六面体要素を用い、クーリングパイプについては一次元要素を用いると、最終的に次式で示される有限要素方程式を得る。

$$\{T_c\}^{n+1} = \{T_c\}^n - \Delta t [\bar{P}_c]^{-1} ([K_c] \{T_c\}^n - \{Q_c(t)\}) \quad (5)$$

$$\{T_w\}^{n+1} = \{T_w\}^n - \Delta t [\bar{P}_w]^{-1} ([K_w] \{T_w\}^n - \{q_c\} \{T_c\}^n) \quad (6)$$

ここに、 n は時刻ステップを、 Δt は微小時間増分量である。

有限要素方程式の (5) 式と (6) 式を各時刻ステップにおいて連立させて解析を行う。

5. 解析例

解析例として図-2、図-3 に示す問題の解析を行なった。

コンクリートの打ち込み温度は 30°C であり、図-1 の影のかかった 3 つの面を合板型枠面としその中にコンクリートを流し込んで硬化させるものとし、型枠はコンクリート打設後 42h で取り除くことにする。また、コンクリートの底面は実測値による温度固定境界、図-2 の斜線の部分は断熱境界とし、外気温については日変動を考慮して解析を行うものとする。また、クーリングパイプの配管レイアウトは図-3 のようにコンクリートの厚さ中央に 1m 間隔に設置し、初期条件として 10°C 、入口水温を常に 10°C とする。なお、クーリングの実施期間はコンクリート打設後 23h までとする。コンクリートとパイプクーリング水の解析条件を表-1 に示す。

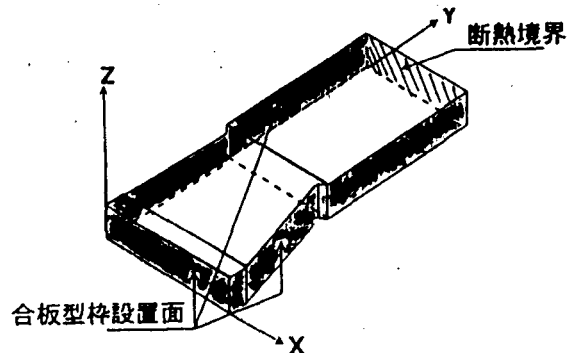


図-2 計算例(その1)

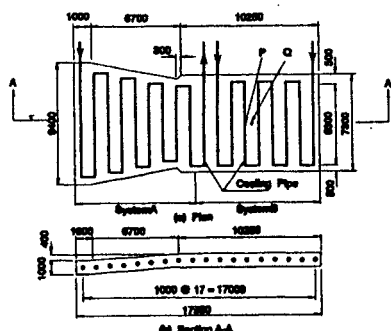


図-3 計算例(その2)

コンクリートの密度	$\rho_c = 2600 \text{ kg/m}^3$
コンクリートの比熱	$C_c = 0.2 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$
コンクリートの真法性熱伝達率	$k_x, k_y = 0.000478 \text{ kcal/ms}^\circ\text{C}$
断熱温度上昇曲線	$Q_c = 33.16(1 - e^{-2.504t})$
クーリング水の温度	$T_w = 10^\circ\text{C}$
水の比熱	$C_w = 1.0 \text{ kcal/kg}^\circ\text{C}$
水の密度	$\rho_w = 1000 \text{ kg/m}^3$
クーリングパイプの半径	$r = 0.0254 \text{ m}$
クーリング水の平均流速	$v = 0.49 \text{ m/s}$
平均熱伝達率	$\alpha_w = 0.0764 \text{ kcal/m}^2 \text{ s}^\circ\text{C}$
	(t:days)

表-1 解析条件

また、コンクリートの表面での熱伝達率は主に風の影響を受けるが解析に用いた熱伝達率は、材令 24h までの風速は 2m/s、それ以後は無風として次のように定めた。

$$\begin{aligned}
 0 \leq t < 24h &: 3.22(2.23) \times 10^{-3} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{s}^\circ\text{C} \\
 24 \leq t < 42h &: 1.33(1.13) \times 10^{-3} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{s}^\circ\text{C} \\
 42 \leq t &: 1.33(1.13) \times 10^{-3} \text{ kcal/m}^2 \cdot \text{s}^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

ここで、() 内の値は型枠面での熱伝達率である。

以上の解析条件は文献[2]で佐藤らによって用いられたものと同様なものであるが、文献[2]では時間方向の離散化の方法において Wilson - Clough 法を用いているのに対し、本報告では Euler 法を用いている点において違いがある。したがって、両手法の解析結果について比較・検討し、本手法の妥当性について検証する。

図-4、図-5 は P 点での鉛直断面内における温度分布を示したもので、図-4 はクーリングを行わない場合、図-5 はクーリングを行った場合である。

図-4 では、23 時間後と 34 時間後の両者とも良い一致を示している。

図-5 では、分布形においては良い一致を示しているが、絶対値に大きな相違が見られる。

図-6 は Q 点の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、クーリングを行わない場合については両者とも良い一致を示しているが、クーリングを行った場合では差異が見られる。

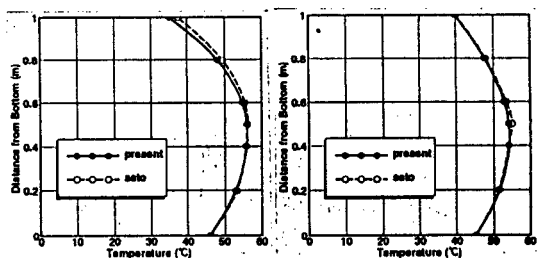


図-4 コンクリートの温度分布図

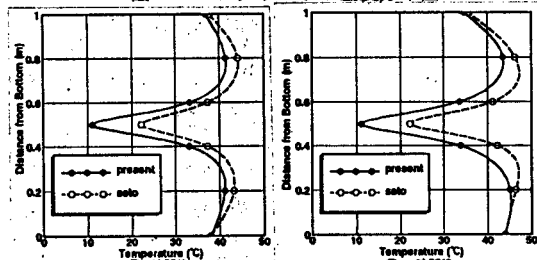


図-5 パイプクーリング位置における

コンクリートの温度分布図

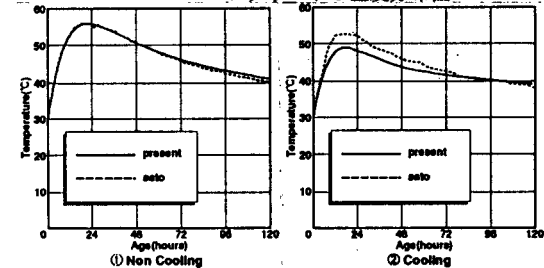


図-6 コンクリートの温度履歴図

6. おわりに

本報告において、パイプクーリング効果を考慮した三次元熱伝導解析を行った。非冷却状態では概ね良い結果が得られたが、パイプクーリングで冷却した場合においては検討の余地がある。今後の課題としては、パイプクーリングを行った場合について引き続き検討するとともに今回用いたモデルに生ずる熱応力についても解析しておく所存である。

7. 参考文献

1. 川原 隼人、吉田 裕：新体系土木工学 3 有限要素法，技法堂，1979.9
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，1986.8.
3. 土木学会：コンクリート標準示方書 施工編，土木学会，1991.7.
4. 矢川 元基、宮崎 則幸：有限要素法による熱応力・クリープ熱伝導解析，サイエンス社，1985.2.