

[10] 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

正会員 〇 溝 渕 利 明 (鹿島建設技術研究所)
正会員 田 辺 忠 顕 (名古屋大学工学部)

1. はじめに

マスコンクリートの熱応力制御手法には、各種のものがあるが、コンクリート中に冷却水を流す管路を埋設し、コンクリートが硬化する際に発生する水和熱を除去するパイプクーリングは、その中でも重要な技術的手法と言える。パイプクーリングを効果的に実施するには、事前に最適なパイプ網のレイアウト、クーリングパイプの管径、冷却水の流速、初期水温等を定める必要がある。

近年、精度向上を目的としたクーリング効果の解析がなされつつある。その中には、定常熱伝導方程式の Green 関数を求め、パイプ内の熱収支とコンクリートの熱収支とから支配積分方程式を導き数値解析⁽¹⁾したものや3次元マスコンクリートブロックをいくつかの2次元断面で代表させ、クーリングパイプ位置を特殊な熱伝達境界として解析したもの⁽²⁾等があるが、前者は複雑な構造物や複雑な施工工程を有するものには適用が困難であるといった問題点があり、後者は3次元解析に比べ簡便であるが厳密解とは言いがたい。

本研究では、より厳密なクーリング効果を把握するため、コンクリートについては、3次元非定常熱伝導方程式を適用し、パイプ内の水の熱収支および、水とコンクリートとの熱伝達を理想化した状態の境界条件を用い、Galerkin 法によって有限要素法による定式化を行った。

本文では、非定常解析における解の収束性について述べるとともに、実際の構造物に則したモデルを仮定し、上記の解析理論による数値解析を行い、パイプクーリング効果について論じたものである。

2. クーリング効果の解析における有限要素法による定式化

コンクリートにおける熱伝導方程式は Laplace の方程式を用い、コンクリートとクーリングパイプとの境界条件を考慮して、ガラーキン法により有限要素法による定式化を行った。その式及び解析手順については、別稿にゆずる⁽³⁾。

次にパイプ内の水の支配方程式は、次式で与えられる。

$$\rho_w C_w U \frac{\sigma T_w}{\sigma S} + \rho_w C_w \frac{\sigma T_w}{\sigma t} + \frac{2}{r} h (T_w - T_c) = 0 \quad (1)$$

ここで、 ρ_w 、 C_w は水の密度および比熱であり、 r はパイプの半径であり、 h はパイプとコンクリートとの熱伝達率である。また、 T_w 、 T_c はパイプ内の水の温度およびパイプに接する点でのコンクリートの温度である。

ただし、(1)式において、クーリング水の流速分布及びパイプ断面内の温度分布は一定とする。

(1)式にガラーキン法を適用し、有限要素法による定式化を行えば、下式を得る。

$$[K_w] \{T_w\} + [W] \frac{\sigma(T_w)}{\sigma t} - [K_{wc}] \{T_c\} = 0 \quad (2)$$

ここで

$$[K_w] = \rho_w \cdot C_w \cdot U \left[\{ [N_w]^T [N_w] \}_{S_i} - \int_S \frac{\sigma [N_w]}{\sigma S} [N_w] \alpha S \right] + \frac{2h}{r} \int_S [N_w]^T [N_w] \alpha S$$

$$[W] = \rho_w \cdot C_w \int_S [N_w]^T [N_w] \alpha S, [K_{wc}] = \frac{2h}{r} \int_S [N_w]^T [N_c] \alpha S$$

ただし、 $[N_w]$ 、 $[N_c]$ はパイプ内の水及びコンクリートの各要素における形状関数であり、 S はパイプの水の一元流れ方向である。

3. 非定常解析における解の収束性について

本研究において、コンクリートおよびパイプ内の水の支配方程式を解くのに、Wilson-Clough によって提案された解法を用いて、非定常解析を行うのであるが、式(2)における伝導マトリックス $[K_w]$ が非対称であるため、時間刻みがある値を超えると解が発散する。

(2)式から時間 t と $t - \Delta t$ での支配方程式を求め、時間 t における温度 $\{\theta\}_t$ について整理すると、次式に示す漸化式が得られる。

$$\{\theta\}_t = [A] \{\theta\}_{t-\Delta t} - \{F\} \quad (3)$$

ここで、

$$[A] = \left[[K_w] + \frac{2}{\Delta t} (W) \right]^{-1} \left[\frac{2}{\Delta t} (W) - [K_w] \right], \{F\} = \{F\}_t + \{F\}_{t-\Delta t}$$

(3)式の解が、収束するための条件は、係数マトリックス $[A]$ の固有値が1以下でなければならない。

$$|[A] - \lambda [E]| = 0 \quad (|\lambda| \leq 1) \quad (4)$$

ただし、 λ は固有値であり $[E]$ は単位行列である。

いま、パイプ内の水の支配方程式(2)式を、図-1に示すもっとも簡単なモデルで固有値解析した。

その結果として、 $|\lambda| \leq 1$ なる条件は、

$$f(\Delta t, \ell, r, h, u) \geq 0$$

である。(ただし、 f は時間 t およびパイプの形状、熱定数などによって定められる相関関数である。)

ここで、本解析においては、 u, h, r は一定と仮定しているので解の収束に影響するのは、パイプ長 ℓ および時間刻み Δt である。例えば、流速 20 cm/sec 、パイプの半径 2.54 cm 、パイプとコンクリートの熱伝達率 $130 \text{ kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ \text{C}$ とし、パイプ長 1 m とすると、最大時間刻み幅は 3 sec となる。

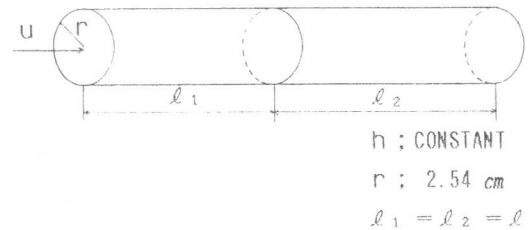


図-1 固有値解析モデル

4. 大型構造物に対するクーリング効果解析手法の適用

本研究では、本解析手法が実際の大型構造物に対して適用可能かどうかを、実大モデルを用いて数値解析を行った。本数値解析で対象としたコンクリートブロックは図-2に示すように、幅 4 m × 高さ 0.85 m × 長さ 11 m の直方体ブロックで、クーリングパイプのレイアウトは図-2に示すとおりである。境界条件として、上面及び側面を対流条件とし、底面は、巨大なコンクリートマット上に打設されていると仮定し、断面温度境界とした。

クーリングパイプに関しては、直径 2.54 cm 、全長約 50 m の薄肉鉄管とし、クーリング水の入口温度を 14°C とし、その流速を 15 cm/sec 、 30 cm/sec 、 60 cm/sec の3ケースについて検討した。

ここで本研究で用いたコンクリートの計算条件を表-1に示す。

ただし、断熱温度上昇式に関しては、マスコンクリートの場合、低発熱セメントや遅延剤等の混和剤の使用が一般的であることから、初期材令における温度上昇始発の遅れ等を

表-1 熱定数一覧

単位セメント量 (kg/m^3)	300
単位体積重量 (kg/m^3)	2350
熱伝導率 ($\text{kcal/m} \cdot \text{hr} \cdot ^\circ \text{C}$)	2.3
比熱	0.3
コンクリートの表面熱伝達率 ($\text{kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ \text{C}$)	10
使用セメント	フライアッシュB種
コンクリートと管	15 cm/sec 106
壁面での熱伝達率 ($\text{kcal/m}^2 \text{ hr}^\circ \text{C}$)	30 cm/sec 183
	60 cm/sec 338

考慮して次式とした。(4)

$$\begin{aligned} 0 \leq t < 9 \text{ hr} & \quad T = 0.4 t \\ t = 9 \text{ hr} & \quad T = 0.15 \\ 9 \text{ hr} < t & \quad T = 3.2 (1 - e^{-0.4(t-0.25)}) \end{aligned} \quad (\text{°C})$$

ただし、 t は材令(日)を表わす。

また、パイプとの熱伝達率 h ($\text{Kcal}/\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}$) については、図-3に示すように著者らが前に報告した流速と管壁面の熱伝達係数の関係から、流速が $60 \text{ cm}/\text{sec}$ 以下ならば両者はほぼ線形となるとし、次式を得た。

$$h = 5.15U + 28.5 \quad \left(\frac{\text{Kcal}}{\text{m}^2\text{h}^\circ\text{C}} \right) \quad (5)$$

ここで h は管壁面の熱伝達係数であり、 u はパイプ内の水の流速である。

5. クーリング効果の検討

今回の数値解析におけるパイプクーリングの実施期間として、材令1日から2日の1日間のみとした。材令2日におけるパイプ内の温度分布を図-4に示す。

流速の変化に伴うパイプ内の水の温度の影響については、流速の増加により熱吸収も大きくなるが、図-4からわかるようにそれほど大きな温度変化は見られなかった。

ただし、流速が増加すれば単位時間当りにパイプを通過する水量は増加するわけで、50mのパイプ間で一定の熱の供給があるとするならば、本解析において $60 \text{ cm}/\text{sec}$ の熱吸収量は $20 \text{ cm}/\text{sec}$ の約3倍となり、かなり大きなクーリング効果があると考えられる。

次にパイプクーリングによるコンクリートの温度分布を図-6および図-7に示す。ここで、図-6は図-5におけるP-P'断面であり図-7はC-C断面を示す。

両図から判るように、クーリングパイプを横切るP-P'断面はクーリングを行わない場合に比べ、パイプ周囲で $5^\circ\text{C} \sim 8^\circ\text{C}$ ($15 \sim 60 \text{ cm}/\text{sec}$) の温度差を生じており、パイプクーリングによる熱除去はパイプ周囲でかなり効果的であることがわかる。他方、C-C'断面においては、クーリングを行わない場合との温度差は、 $60 \text{ cm}/\text{sec}$ で 3°C 程度であり、パイプから 30 cm 以上離れると、パイプクーリングの効果は激減してしまう。

流速の影響としては、当然流速の大きい方がコンクリート温度の低減を顕著にするが、やはりパイプから 30 cm 以上離れてしまうと、流速による差はほとんど見られない。

以上の事から、パイプクーリングの有効半径はせいぜい $20 \sim 30 \text{ cm}$ 程度と考えられる。

更に本解析では、P-P'断面においてパイプクーリングを実施した場合(ただし、流速は $15 \text{ cm}/\text{sec}$) と実施しなかった場合の長手方向に対する温度応力を求めた。

その結果、パイプクーリングを行った場合、材令2日において、

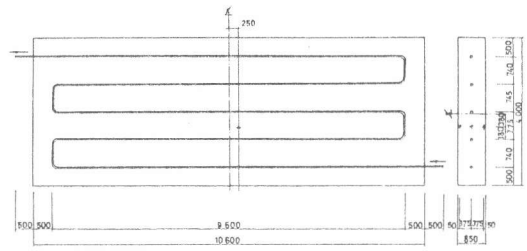


図-2 数値解析モデル

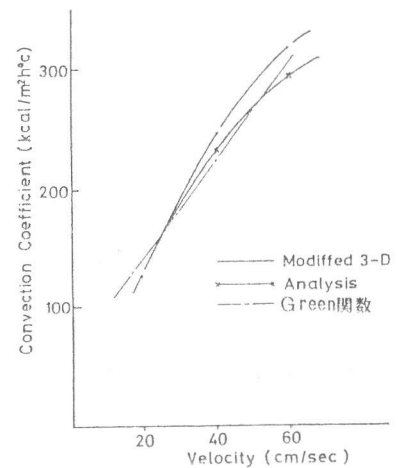


図-3 流速-熱伝達係数関係

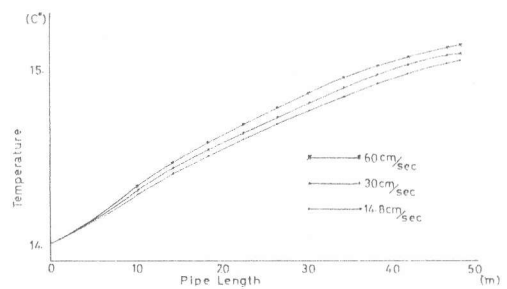


図-4 材令2日でのパイプ内の温度分布

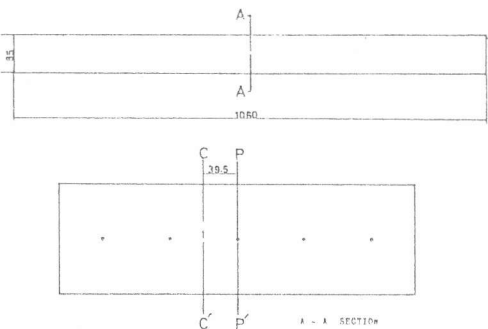


図-5 解析モデル断面図

パイプ周辺に約 1 kg/cm^2 の引張応力を生じていることがわかった。これは、パイプクーリングによってパイプ周囲が冷却されたことによるものと考えられる。

また材令8日では、クーリングパイプの周辺に約 4 kg/cm^2 の引張応力が生じているが、クーリングを行わない場合、同位置に約 8.5 kg/cm^2 と、2倍以上の引張応力が生じていることがわかった。このことは、パイプクーリングがクラック発生を防止するのに大きな効果があることを示すものである。

ただし、上述したようにパイプクーリングを実施している間はパイプ周囲が冷却されることによって引張応力を生じるが、流速が増せばそれは顕著なものとなり、パイプクーリングによってクラックを発生させてしまう恐れがある。

以上のことから、コンクリートが発熱する際にパイプクーリングによりセメントの水和熱を除去することは、本解析結果からもわかるようにクラック発生防止に大きく役立つが、パイプ内の水の流速および初期水温を十分考慮する必要がある。

6. 結 論

マスコンクリート構造物の熱応力制御は、重要な技術的要素であり、パイプクーリングはその制御方法として有効な方法であるといえる。

本研究は、パイプクーリングによる水とコンクリートの熱交換過程をあらゆる温度変動場、境界形状について理論的に解析できるように、有限要素法を用いる、3次元解析を行った。そして、本解析手法を用いて、実際の大型構造物を想定し、数値解析を行い、その解析結果から、パイプクーリング効果の検討を行った。

その結果、パイプクーリングを行わなかった場合に比べ、コンクリートの温度上昇を十分に制御できる範囲は主としてパイプを中心として半径 $20 \sim 30 \text{ cm}$ 程度であること、しかし、コンクリートブロック中心断面における温度応力はパイプクーリングを行わない場合に比べ、引張応力を約半分に低減できたこと（材令8日）、ただし、流速の増加に伴いパイプ周囲が冷却され、クラック発生の危険性があることが判明した。

今後、本研究を用いて、更に多くの実構造物について数値解析を行い、最適のパイプレイアウト、流速、初期温度を求めていく予定である。

参考文献

- (1) 田辺 忠顕, 山川 秀次 著 ; 「マスコンクリートにおけるクーリング効果の解析」 土木学会年次講演会 (1981)
- (2) 田辺, 山川, 渡辺 著 ; 「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」
- (3) 田辺, 溝淵 著 ; 「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」
- (4) 平賀, 倉林 著 ; 「コンクリートの断熱温度上昇特性に関する既往の研究成果について」 マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム (1982)

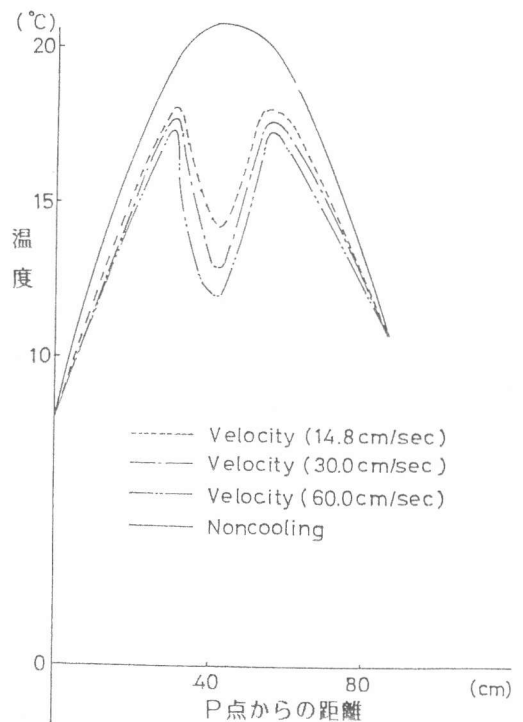


図-6 温度分布図 (P-P')

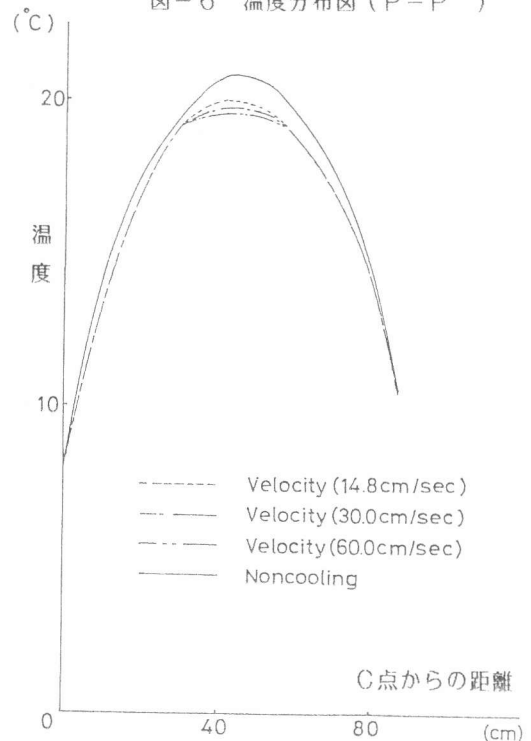


図-7 温度分布図 (C-C')