

マスコンクリート構造物のパイプクーリング効果 についての F.E.M. 温度解析^{**}

野 中 資 博^{**}

Tsuguhiro NONAKA
F. E. M. Temperature Analysis about Pipe-cooling
Effect within a Mass Concrete Structure

1 ま え が き

温度クラックの発生原因を検討するために、実構造物の温度場を F. E. M. を用いて解析するにはどうすればよいかという事について研究を続けてきたが、マスコンクリート構造物についてはパイプクーリングを施こされるものがあるので、ここで、そのパイプクーリングの効果の F. E. M. への処理の手法の整理を行い、さらに、その手法をモデル構造物へ適用して得られた結果を示す事にする。非定常温度場解析の F. E. M. については、別に詳しく述べているので、¹⁾ここでは省略する。なお、モデル構造物はフーチング状のものであり、セメントの種類、外気温の状態についても合せて検討している。

2 パイプクーリング効果の F. E. M. における処理

F. E. M. における非定常熱伝導問題の最終的なマトリクス方程式は次の様になる。

$$[K]\{\dot{\phi}\} + [C]\{\phi\} = \{R\} \quad \dots\dots(1)$$

ここで、 $[K]$ は熱伝導率マトリクスであり、表面熱伝達による寄与も含んでいる。又、 $[C]$ は熱容量マトリクス、さらに $\{R\}$ は荷重項ベクトルで、内部熱発生、規定された表面の熱流束、表面熱伝達の寄与よりなっている。もちろん $\{\phi\}$ は節点温度ベクトルであり、 $\{\dot{\phi}\}$ はその時間導関数を表わしている。さて、パイプクーリングの効果を(1)式の有限要素方程式中に組み込むには、SEGERLIND ²⁾によれば、これを点(線)源と考え

て、単位衝撃関数 $\delta(x-x_0)$, $\delta(y-y_0)$ を用いて、

$$Q = Q^* \delta(x-x_0) \delta(y-y_0) \quad \dots\dots(2)$$

とおく。ここで、 Q^* はこの点(線)源が単位長さ当り、単位時間当りにうばう(与える)熱量を表わす。すると、単位厚さを仮定した平面問題によれば、荷重ベクトル $\{R\}$ への寄与は、三角形要素の形状関数を $[N]$ で表わすとすると、

$$\begin{aligned} & \int_v [N]^T Q dv \\ &= Q^* \int_A [N_i N_j N_k]^T \delta(x-x_0) \delta(y-y_0) dx dy \\ &= Q^* \begin{Bmatrix} N_i \\ N_j \\ N_k \end{Bmatrix}_{\substack{x=x_0 \\ y=y_0}} \quad \dots\dots(3) \end{aligned}$$

となる。

ここでは、パイプクーリングをこの点(線)源と考えているので、 $x=x_0$, $y=y_0$ はそれが配置されている位置となる。(3)式はパイプクーリングが節点に位置しない、すなわち、要素内に存在する場合であり、もしその位置に節点を置くとするなら、 Q^* を全体荷重ベクトル $\{R\}$ に加え合わせればよいと述べている。

すなわち、式で書けば、

$$R_i = R_i + Q^* \quad \dots\dots(4)$$

次に、WILSON ³⁾はクーリングパイプ周りの熱の流れより、

$$q = H(T_w - T_o) \quad \dots\dots(5)$$

という式を導き、係数 H の評価によりクーリングパイプの効果を導入するとしている。

※ 農業施設工学研究室
※※ 第32回農業土木学会中国四国支部講演会発表

ここで、 H ：クーリングパイプの効果を表わす係数

T_w ：水の温度

T_o ：みかけのパイプ位置での節点温度

である。

この場合は、クーリングパイプは節点に置くものである。この式によれば、表面熱伝達の影響と同様、荷重ベクトル $\{R\}$ に対する寄与 $H \cdot T_w$ と、剛性マトリクス $[K]$ の対角項に対する寄与 H が存在する。

これを式で書けば、

$$K_{ii} = K_{ii} + H \quad \dots\dots(6)$$

$$R_i = R_i + H T_w \quad \dots\dots(7)$$

となる。

いずれにしても、 Q^* 、 H の数値を評価しなければならない。そこで、小川等⁴⁾によれば、パイプの通水が t 時間後にコンクリートからうばう熱量 $Q(t)$ として、

$$Q(t) = C_w \cdot \gamma_w \cdot V_w (\theta_o - \theta_i) \cdot t \quad \dots\dots(8)$$

という式が述べられている。この式において、

C_w ：水の比熱 γ_w ：水の密度

V_w ：単位時間当りの水量

θ_i ：入口での水の温度 θ_o ：出口での水の温度

である。

これを、単位長さ当り、単位時間当りとすれば Q^* となる。さて、前述の WILSON の H は、

$$H = \frac{2\pi kt}{\ln\left(\frac{a}{R}\right) - 2} \quad \dots\dots(9)$$

であり、ここで

k ：熱伝導率 t ：要素の厚さ (単位)

R ：パイプの半径 a ：要素の大きさ

である。

(9)式の場合はパイプの径まで考慮に入れてある。両式で数値を試算してみると、(8)式においては、 $C_w = 1\text{kcal/kg}^\circ\text{C}$ 、 $\gamma_w = 1000\text{kg/m}^3$ 、通水量を 10l/min とすれば、 $V_w = 0.6\text{m}^3/\text{h}$ であり、入出水の温度差を 2°C とし、1本のクーリングパイプの長さを 10m とすると、

$$Q^* = (1 \times 1000 \times 0.6 \times 2) / 10 = 120\text{kcal/mh}$$

となる。又、(9)式においては、コンクリートの平均的な熱伝導率 $k = 1\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$ を

用いて、半径 25mm のパイプを使用し、要素の代表的寸法を 50cm とすれば、

$$H = \frac{2 \times 3.14 \times 1}{\ln\left(\frac{0.5}{0.025}\right) - 2} = 6.3\text{kcal/mh}^\circ\text{C}$$

さらに、水温を 20°C とすれば、

$$H \cdot T_w = 126\text{kcal/mh} \quad \text{となる。}$$

この様に持つ意味としても同じであるが、オーダーとしても同一であるという事が明らかである。

3 解析例

モデル構造物は Fig. 1 に示すフーチング状のものである。高橋等によれば、クーリングパイプの配置が縦横 2m ピッチの場合は、全く冷却されない個所が生じるという事を述べているので、標準的な 1m ピッチの配列を想定してみる事にした。又、3リフト各 1m という打設状況とし、打設間隔一週間、コンクリート打込み温度

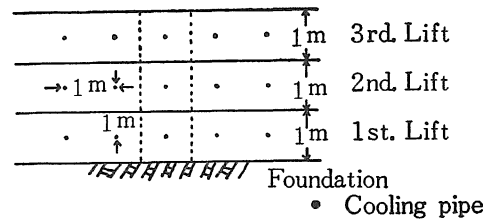


Fig. 1 モデル構造物

20°C 、水温 20°C 、通水期間2週間という標準例を考えている。このモデル構造物の有限要素化を示すと Fig. 2 である。ここで、基礎の影響も考慮しなければならぬという事が以前、明確になっていたので、単位深さだけ基礎も有限要素化している。フーチング状の構造物の場合、横への熱の流れは少ないと考えられるので側方断熱と仮定し、リフトの打ち継ぎまで上面よりの表面熱伝達がたとみなす。表面熱伝達係数には一律に $200\text{kcal/m}^2\text{day}^\circ\text{C}$ を用いた。又、基礎温度は 20°C 一定と規定する事にした。以上の事を考慮した上で、セメントの種類と外温状況の組み合わせを、さらに加味したものである。セメントの種類は低発熱性である事を考慮して、普通ポルトランドセメント、中庸熱セメント、高炉B種、フライアッシュセメントの4種類を用い、外温状況は、冬期、春秋期、夏期を考えて、 $10, 20, 30^\circ\text{C}$ の3組をとっている。

又、各種セメントコンクリートについての断熱温度上昇は塚山⁷⁾の実験式によっているが、その他の熱定数は各

セメントコンクリートについての平均的な値を用いている。さらに、パイプクーリングの効果については、(8)式は実測が必要である事より、ここでは(9)式を用いる事にし、黒ガス管25Aが使用されるとして、各種コンクリートについて計算した。なお、解析結果の比較には2ndリフトを用いる事にした。Fig. 3. 4. 5に普通ポルトランドセメント使用の場合で、外温が10, 20, 30°Cの結果を示す。

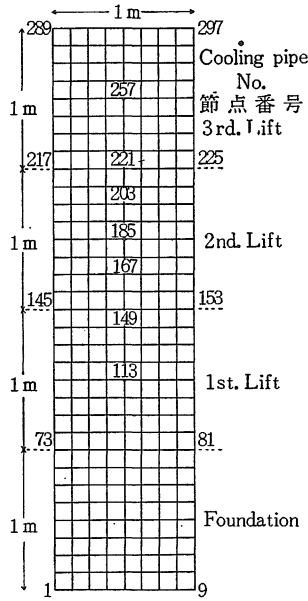


Fig. 2 要素分割

この様に外温状況のみが異なる場合を比較検討してみると次の事が述べられる。

- i) クーリングパイプ位置の温度の経日変化の状態は、外温が10, 20, 30°C と高くなるにつれて少しだけ高温になってはいるが、さほど変わらない。
- ii) リフト下部(No. 149, 167)も変化の状況は同様であり max. 温度が少々上昇するのみである。
- iii) 上表面近くの変化の形が非常に異なる。この事は表面熱伝達の影響が非常に強いという事を示している。
- iv) クーリングパイプ位置近くでは15~25°C程度max. 温度上昇が低下する。

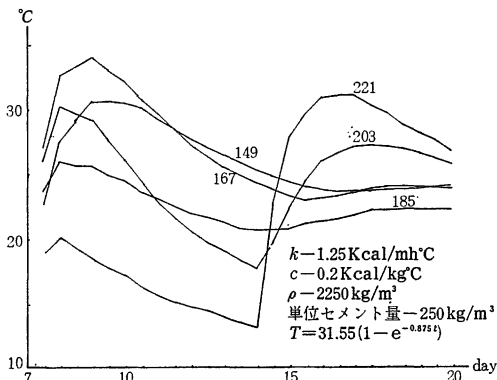


Fig. 3 普通ポルトランドセメント・外温10°C

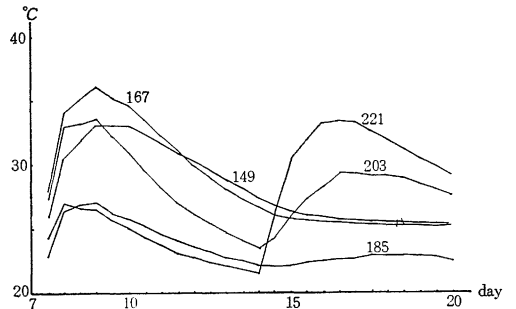


Fig. 4 普通ポルトランドセメント・外温20°C

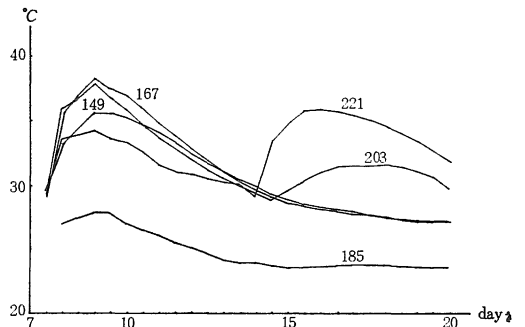


Fig. 5 普通ポルトランドセメント・外温30°C

- v) 外温が低いほど、温度場は不均一となる。
- vi) 高温期にパイプクーリングを行う方が効果がある(温度場が均一に近くなる)。低温期だと上表面近くの放熱による温度降下の影響が大きく、温度場が複雑である。以上の様な事は Fig. 6. 7. 8 の高炉B種, Fig. 9. 10. 11 の中庸熱, Fig. 12. 13. 14 のフライアッシュについても言える。次に外温状況が同じで、セメントの種類が異なる場合をみでみる事にする。例えば外温 10°C

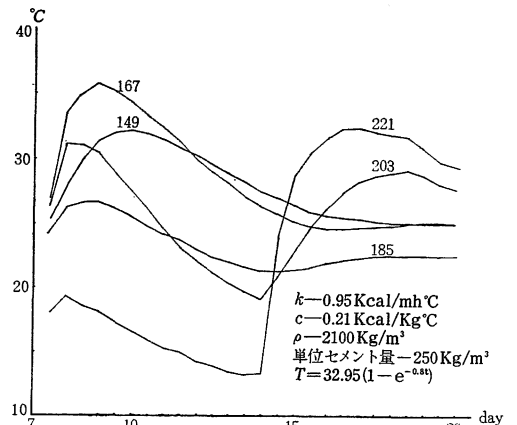


Fig. 6 高炉B種・外温10°C

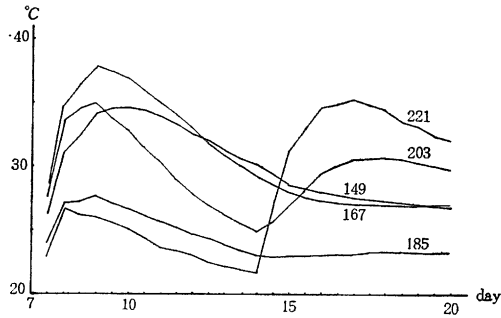


Fig. 7 高炉B種・外温20°C

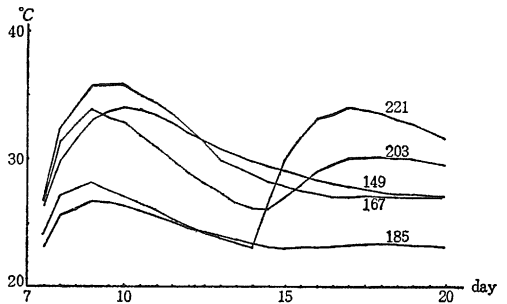


Fig. 10 中庸熱セメント・外温20°C

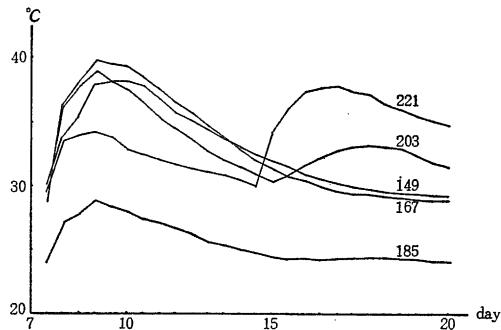


Fig. 8 高炉B種・外温30°C

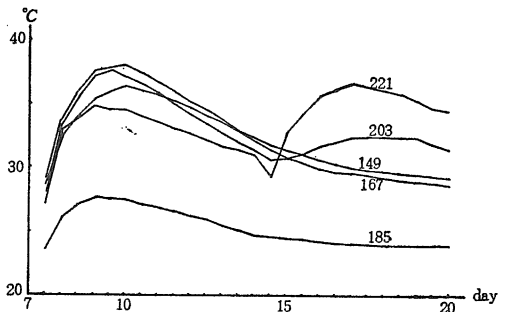


Fig. 11 中庸熱セメント・外温30°C

の場合についてみると、Fig. 3. 6. 9. 12 より述べられる事は、

vii) セメントの種類による温度場の変化は断熱温度上昇の形に依存する。なぜなら、上表面近くは外温に影響され、クーリングパイプ近くは打込み温度より少々高い温度状況であり、残りの部分は(打込み温度+断熱温度上昇分)より少々低い程度であるという事が想定できるからである。よって max. 温度上昇から述べれば、高炉B種、中庸熱、普通、フライアッシュの順となる。こ

こで、中庸熱、普通は max. 温度上昇は同じ程度であるが、時間的に中庸熱が遅れる。

viii) 温度降下の勾配はほとんど同じ程度である。すなわち、外温とパイプクーリングの効果は不変である。

ix) 温度場不均一の程度は、高炉B種、普通、中庸熱、フライアッシュの順である。

x) クーリングパイプ位置の温度はさほど変わらない。

以上同様な事が 20°C の場合の Fig. 4. 7. 10. 13, 30°C の場合の Fig. 5. 8. 11. 14 の組合せについても述べられる。

4 まとめ

ここでは、施工条件が同じモデル構造物について、4種類のセメントと3種類の外温状況の組合せ計12通りの場合についてのパイプクーリングの効果を比較検討してみた。詳細は前項で述べているが、それらをさらに整理してみると次の事が言える。

(1) どのような状況でもパイプクーリングの効果は不変であり、その近傍の max. 温度上昇を 20°C 内外低下させる。

(2) 発熱量はセメントの種類、配合に直接的に関係するので、パイプクーリングにより熱を除去するにしても

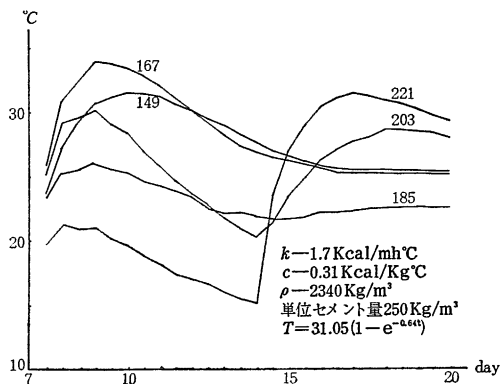


Fig. 9 中庸熱セメント・外温10°C

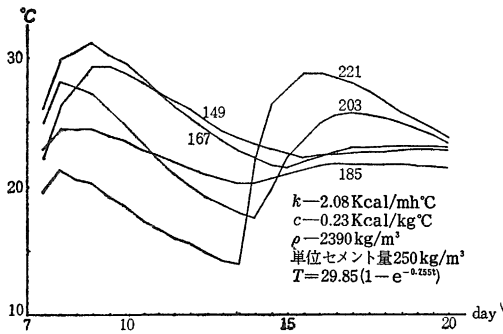


Fig. 12 フライアッシュセメント・外温10°C

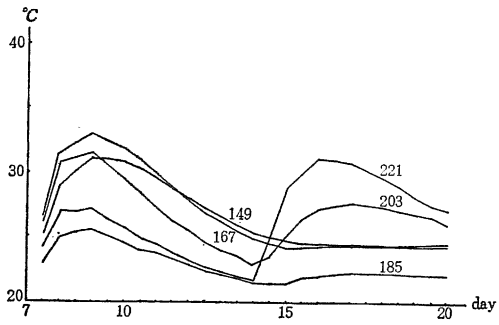


Fig. 13 フライアッシュセメント・外温20°C

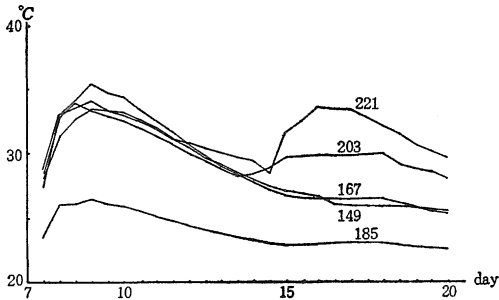


Fig. 14 フライアッシュセメント・外温30°C

コンクリートの熱伝導率が小さい事から、その効果が構造物全体についてまんべんなく表われるという訳ではない。

(3) パイプクーリングの効果よりも表面熱伝達の効果の方が影響を及ぼす範囲は著しい。

さらに、max. 温度上昇を下げ、温度場を均一にするという事がマスコンクリート構造物の温度クラッキングを避ける為の指針であるとするならば、結局、低発熱性セメントの使用、低配合の方がプレクーリング、ポストクーリング総体よりも超越して、又、表面よりの放熱から外温降下期は要注意という事が再び確認できる。

5 あとがき

本計算には、京都大学大型計算機センター、FACOM M-190 を使用した。

参考文献

- 1) 野中：農業土木学会論文集 投稿中
- 2) SEGERLIND, L. J. : Applied Finite Element Analysis John Wiley & Sons New York 1976, 157-161
- 3) WILSON, E. L. : Contract Report No. 68-17 USAE Walla Walla Dist. : 16-18, 1968.
- 4) 小川・山内・鷹原：コンクリートジャーナル10(7) : 7-15, 1972.
- 5) 高橋・西川・永井：大林組技術研究所報10 : 133-138, 1975.
- 6) 野中：農土学会中国四国支部講演要旨集 : 100-102, 1976.
- 7) 塚山・宮地：セメント技術年報 : 220-224, 1971.

Summary

Sometimes pipe-cooling is performed within mass concrete structures.

Then, in analysing temperature field with F. E. M., we must deal with the effect of pipe-cooling.

Here, a few methods to use were discussed.

Thereafter, considering a model structure like footing, twelve analyses were carried out about the combination of four cement types and three ambient temperatures.

From these results, some suggestions were given.