

## 埋込クーリング要素を用いたコンクリートの温度応力解析

(株)奥村組 正会員 ○外木場康将  
 (株)奥村組 正会員 清水 智明  
 (株)奥村組 正会員 森田 修二

### 1. はじめに

コンクリート温度ひび割れ対策の一つに、ピーク温度の上昇を抑える目的としてパイプクーリング工法がある。本工法の適用にあたり、パイプの材質、径、配置、通水量と通水温度、期間などの仕様を算定する必要がある。これまでは模型実験や過去の実績から仕様を選定していたが、近年ではパイプクーリング工法を考慮した有限要素法による温度応力解析により仕様を算定することが多い。従来の温度応力解析では、パイプは熱伝達境界要素で表現するため、コンクリート要素と節点の共有が必要であった。そのため、パイプの配置を変更するたびに要素の再分割を行い、複雑な形状の構造体のモデル化では、要素数の極端な増加や要素形状がいびつになる不具合が生じた。そこで、パイプクーリングの解析手法として、埋込クーリング要素の適用を行った。メッシュ分割に関わらず要素内でのパイプの配置が評価できる。本報告では理論解による検証と実構造物への適用結果を報告する。なお、計算には汎用解析コード“FEAST”(JIP テクノサイエンス)を使用する。

### 2. 埋込クーリング要素の定式化

埋込クーリング要素は、コンクリート要素内の任意の位置に設置でき、節点を共有する必要がないため、要素分割はパイプの位置に依らず簡便に行うことができる(図-1)。埋込クーリング要素を含む熱伝導方程式のマトリックス表示を式(1)~式(4)に示す。式(2)の熱伝導マトリックスの項、式(4)の節点流量ベクトルの項に埋込クーリング要素による熱収支を付加することでパイプクーリングの効果が表現できる。

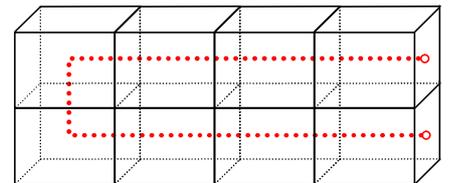


図-1 埋込クーリング要素概要

$$[H]\{\phi\} + [E] \frac{\partial \{\phi\}}{\partial t} + \{f\} = 0 \tag{1}$$

$$[H] = \iiint \left\{ k_x \frac{\partial N^T}{\partial x} \frac{\partial N}{\partial x} + k_y \frac{\partial N^T}{\partial y} \frac{\partial N}{\partial y} + k_z \frac{\partial N^T}{\partial z} \frac{\partial N}{\partial z} \right\} dx dy dz + s_p \int_{l_p} N^T \alpha N dl \tag{2}$$

$$[E] = \iiint N^T c \rho N dx dy dz \tag{3}$$

$$\{f\} = - \iiint N^T Q dx dy dz - s_p \int_{l_p} N^T \alpha \phi_a dl \tag{4}$$

ここに、 $\phi$  : 温度、 $k_x, k_y, k_z$  : 熱伝導率、 $c$  : 比熱、 $\rho$  : 密度、 $t$  : 時間、 $Q$  : 単位体積あたりの発生熱量、 $\alpha$  : 熱伝達係数、 $\phi_a$  : 通水温度、 $s_p$  : 埋込クーリング要素の周長、 $l_p$  : 埋込クーリング要素長、 $N$  : ソリッド要素の形状関数

### 3. 理論解との検証

埋込クーリング要素の妥当性を確認するために、1次元定常熱伝達理論解との比較を行う。図-2 に示す  $\phi_a=0$  なる流体中に、断面積  $A$ 、周長  $s$  である一様断面の棒があり、棒の両端は、温度  $\phi_0$  に固定されているとする。このときの基礎方程式は、

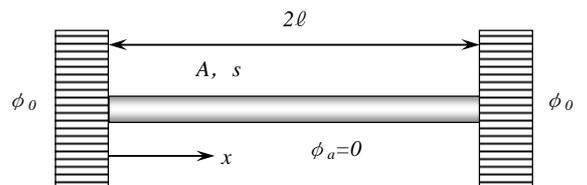


図-2 1次元解析モデル概要

$$kA \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - s\alpha \phi = 0 \tag{5}$$

で示され、解は式(6)のようになる。

キーワード 埋込クーリング要素, パイプクーリング, 有限要素法

連絡先 〒108-8381 東京都港区芝 5-6-1 (株)奥村組 TEL:03-5427-8041 FAX:03-5427-8114

$$\frac{\phi}{\phi_0} = \cosh \beta \xi + \frac{1 - \cosh 2\beta}{\sinh 2\beta} \sinh \beta \xi \quad (6)$$

ここに、 $\xi = x/l$   $\beta = \sqrt{sl^2 \alpha / kA}$

図-3 に埋込クーリング要素を使用した計算結果と理論解を比較して示す。なお、検討ケースは、パラメータ  $\beta$  を  $\beta=2$ ,  $\beta=3$ ,  $\beta=5$  の3ケース設定する。同図より、いずれのケースにおいても理論解とよく一致していることがわかり、埋込クーリング要素の定式化の妥当性が確認できる。

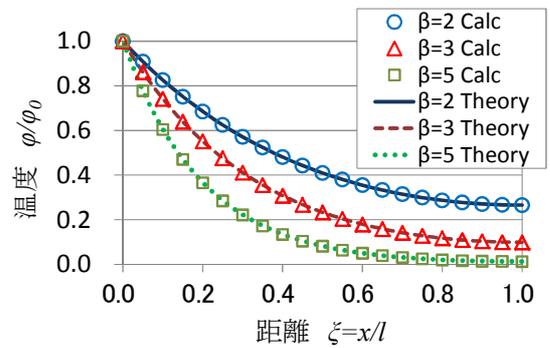


図-3 1次元定常熱伝達理論解との比較

4. 実構造物への適用

図-4 に示す構造物に本解析手法を適用し、パイプクーリング工法の効果を確認する。本構造物は門柱工の床版コンクリートを増打ちするものであり、増打ち厚が 800mm と大きいため、既設床版コンクリートの拘束によるひび割れの発生が懸念される。また、既設門柱工の形状により、既設門柱工周辺の要素分割が複雑になるため、要素分割に依存しない埋込クーリング要素の使用が適している。図-5 にパイプクーリングによる対策の概要を示す。パイプクーリングは、径が 2.54cm の鋼管を使用する。配置は、鉛直方向は増打ちコンクリートの中央に、水平方向には 750mm 間隔で設置する。通水量は 5l/min, 通水温度は 20℃, 通水期間は打設後 5 日までと設定する。

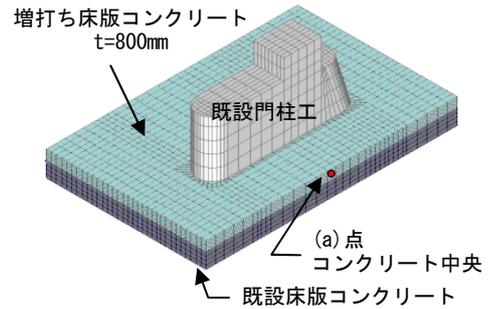


図-4 対象構造物

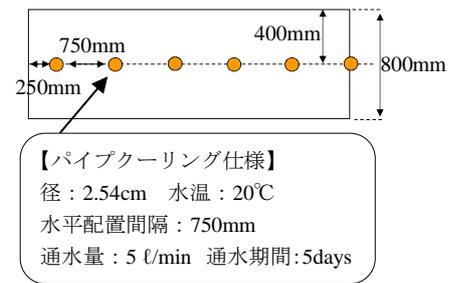


図-5 パイプクーリング仕様

図-4 に示す(a)点(コンクリート中央)の温度履歴を図-6 に示す。同図より、パイプクーリングにより、ピーク温度が 11℃ 低減されたことがわかる。次に、同点でのひび割れ指数の履歴を図-7 に示す。同図より、対策なしでは、コンクリート温度低下時にひび割れ指数が低下し、ひび割れ指数が 0.94 と 1.0 を下回り、既設床版の拘束によるひび割れの発生が懸念される。一方、パイプクーリングの対策では、ピーク温度が抑えられたため、ひび割れ指数が 1.47 までに改善され、ひび割れの発生を抑制することが示唆された。図-8 に打設 20 日後のひび割れ指数コンターを示す。同図からも対策なしでは、ひび割れ指数の低下が見られ、パイプクーリングにより、ひび割れ指数が改善された様子が確認できる。以上の結果より、増打ちコンクリートの温度ひび割れ対策にパイプクーリングが有効であることが確認された。

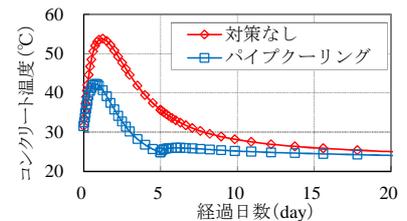


図-6 コンクリートの温度履歴

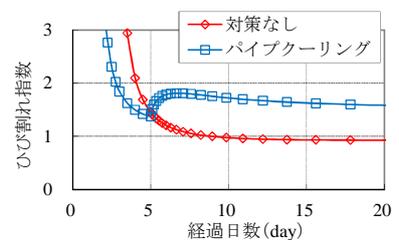


図-7 ひび割れ指数履歴

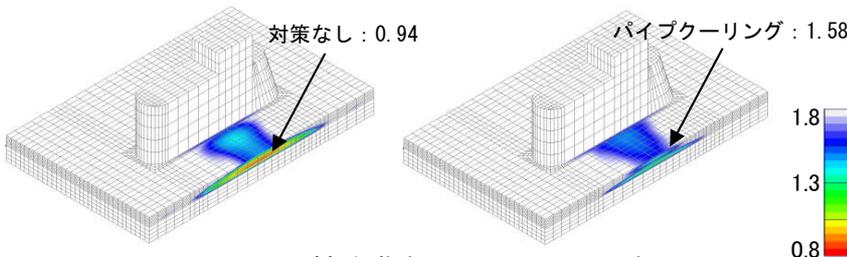


図-8 ひび割れ指数コンター (20日後)

5. まとめ

要素分割に依存せずパイプクーリングを適切に表現できる埋込クーリング要素について検討を行った。はじめに、理論解との比較を行い、結果から埋込クーリング要素の定式化の妥当性を検証した。次に、本解析手法を複雑な形状の構造物に適用し、パイプクーリングの温度ひび割れ抑制効果を確認した。今後、温度計測、逆解析を実施し、パイプクーリング工法ならびに解析手法の妥当性を検証する予定である。