

# パイプクーリング解析の新たな展開

名城大学 学生会員 ○池村 穰  
名城大学 正会員 石川 靖晃

## 1. はじめに

パイプクーリングを考慮した温度解析手法は、田辺、溝渕ら<sup>1)</sup>によって既に確立されている。一方で、数値解析を行う際、パイプ節点とコンクリート節点位置を完全に一致させ、かつパイプ要素をコンクリート要素辺に一致させる必要がある等、パイプレイアウトに関する問題が依然としていくつか存在する。

そこで本研究では、パイプクーリング解析を実施する上での問題点を解決する方法を提示し、数値検討することで、パイプクーリング解析の新たな可能性を探ることを目的とした。

## 2. パイプクーリングを考慮した熱移動モデル<sup>1)</sup>

図-1のようにパイプが埋め込まれたコンクリートの体積領域を考える。田辺、溝渕らは、パイプ微小区間における熱収支の釣り合いからパイプ内水温の支配方程式を誘導している。そして、パイプ内水温の支配方程式およびパイプ-コンクリート間の熱伝達境界を、コンクリートの熱伝導方程式と連成させることで、パイプクーリングによる熱除去効果を表現する数理モデルを構築している。最終的に、有限要素にて離散化された支配方程式は次式で表される。

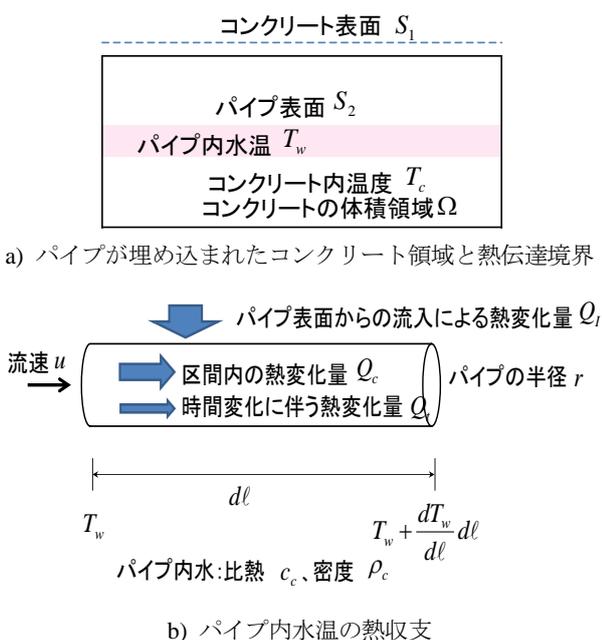


図-1 パイプクーリングを考慮した熱移動モデル

$$\begin{bmatrix} K_c & -K_{cw} \\ -K_{wc} & K_w \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \bar{T}_c \\ \bar{T}_w \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} C & 0 \\ 0 & W \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{Bmatrix} \bar{T}_c \\ \bar{T}_w \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} F_c \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{T}_c$  および  $\bar{T}_w$  はそれぞれコンクリートおよびパイプ内水の節点温度であり、 $t$  は時間である。また、 $K_c$ 、 $K_{cw}$ 、 $K_{wc}$ 、 $K_w$ 、 $C$ 、 $W$  および  $F_c$  はコンクリート温度およびパイプ内水温に関する熱物性値および形状関数を用いて表されるマトリクスである。式(1)を時間差分化することで、コンクリートおよびパイプ内水温の節点温度を求めることができる。なお、これらのマトリクスを数値的に求めたい場合、コンクリート要素に関する体積積分、コンクリート表面に関する面積積分およびパイプ要素に沿った線積分が必要となる。式(1)の詳細については文献1)を参照されたい。

## 3. 従来の解析手法の問題点とその改善

コンクリート領域は Solid 要素、パイプ要素は Truss 要素で補間されるものとする。パイプ要素に沿った数値積分を実施する場合、図-2に示すように、パイプ区間のガウス点位置に対応する局所座標値を求める必要がある。Truss 要素においては、ガウス点位置に対応する局所座標値  $\phi_g$  は容易に求まることは明らかである。一方、Solid 要素でのガウス点位置に対応する局所座標値  $\xi_g$ 、 $\eta_g$  および  $\zeta_g$  を陽に求めることは一般的に容易ではない。ゆえに、従来は、図-3左に示すように、パイプ内節点水温を、コンクリート節点と同一位置とし、さらにパイプを表現する Truss 要素を、コンクリートを表現する Solid 要素の辺上に配置することで、数値解析を実施せざるを得なかった。しかし、このことが

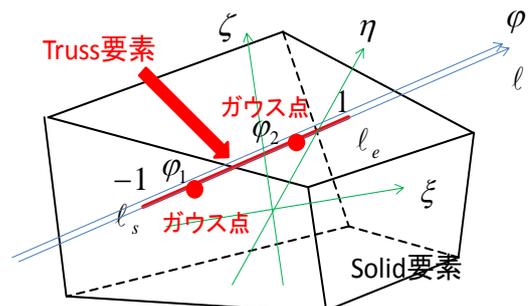
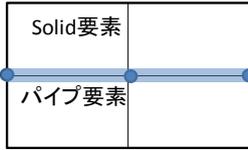


図-2 Truss 及び Solid 要素における局所座標系

従来の方法



改善された方法

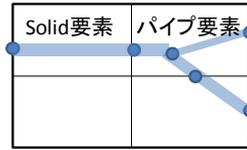


図-3 従来のパイプレイアウトとその改善

パイプレイアウトの自由度に大きな制約を与えることは明らかであり、多角的な視点からのパイプレイアウトに関する検討を実施する上で大きな障害となっていた。そこで本研究では、図-3 右に示すようにコンクリート要素形状やコンクリート節点位置に依らない自由なパイプレイアウトを数値解析上実現させることを試みた。

ガウス点位置に対応する Solid 要素の局所座標を求めることは、結局、以下の式を解くことと等価である。

$$x(\xi, \eta, \zeta) = x_p, y(\xi, \eta, \zeta) = y_p, z(\xi, \eta, \zeta) = z_p \quad (2)$$

ここで、 $x_p, y_p, z_p$  は、それぞれ全体座標系  $xyz$  におけるガウス点位置の座標であり、容易に求めることができる。式(2)の左辺を  $\xi = \xi_0, \eta = \eta_0, \zeta = \zeta_0$  にて、第一次項まで Taylor 展開し、整理すると次式が得られる。

$$\begin{pmatrix} \xi \\ \eta \\ \zeta \end{pmatrix} = [J]^{-1} \begin{pmatrix} x_p - x(\xi_0, \eta_0, \zeta_0) \\ y_p - y(\xi_0, \eta_0, \zeta_0) \\ z_p - z(\xi_0, \eta_0, \zeta_0) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \xi_0 \\ \eta_0 \\ \zeta_0 \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、 $[J]$  は  $\xi = \xi_0, \eta = \eta_0, \zeta = \zeta_0$  における Jacobi 行列である。式(3)から得られた  $\xi, \eta$  および  $\zeta$  を第一近似解とする。そして  $\xi_0 = \xi, \eta_0 = \eta$  および  $\zeta_0 = \zeta$  として、再度式(3)を用いて  $\xi, \eta$  および  $\zeta$  を更新する。この操作を繰り返すことにより、ガウス点位置に対応する Solid 要素の局所座標を求めることができる。

#### 4. 数値解析例

コンクリート要素に囚われないパイプレイアウトが可能かどうかを実際に確認するために、改善されたパイプクーリング解析手法により、温度解析を実施した。

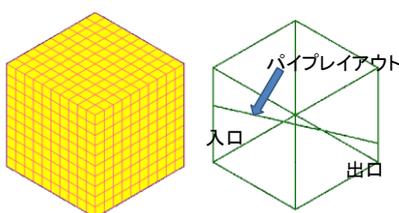


図-4 解析モデル

表-1 解析に用いた熱特性値

単位セメント)	300kg/m <sup>3</sup>
終局断熱温度上昇量	45.0°C
速度定数	1.54
パイプの流速	0.002m/sec
パイプの半径	0.02m
水の密度	1000kg/m <sup>3</sup>
水の比熱	4.18/(kg°C)
パイプの熱伝達率	14W/m <sup>2</sup> °C
コンクリートの熱伝導率	2.7W/m°C
コンクリートの密度	2300kg/m <sup>3</sup>
コンクリートの比熱	1.10kJ/(kg°C)

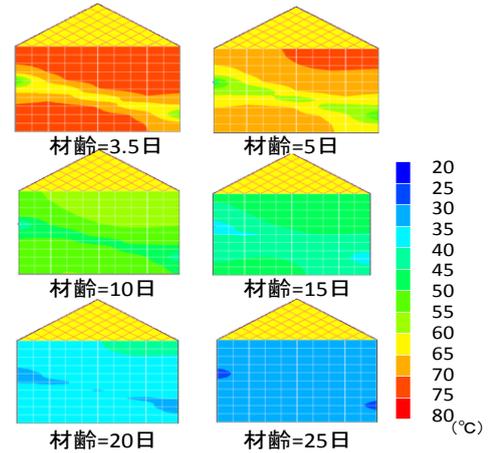


図-5 コンクリート温度分布の経時変化

解析対象モデルを図-4 に示す。解析対象モデルは 1000mm×1000mm×1000mm のコンクリート立方体であり、パイプ要素が斜めにレイアウトされている。コンクリートの表面部は全て断熱境界であり、3 日目に通水を 0.002m/sec にて開始した。コンクリートおよびパイプ内水の初期温度はそれぞれ 30°C および 20°C であり、パイプ入口の水温は 20°C 固定とした。解析に用いた熱特性値を表-1 に示す。

図-5 にコンクリート温度分布の経時変化を示す。図より、パイプ周囲からの熱除去効果が合理的にシミュレートされていることがわかる。

#### 5. おわりに

本研究で提案した数値解析手法により、パイプクーリングを考慮した温度解析を実施する際、コンクリート節点位置やコンクリート要素形状にとらわれないパイプレイアウトを実現させることが可能であることが確認された。今後、多くの事例に対して数値検討を行うことにより、本手法の検証を行いたいと考えている。

#### 参考文献

- 1) 溝渕利明、成田総一郎、都築憲剛、平戸裕之、田辺忠顕：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に関する研究、土木学会論文集、No.665、V-49、pp.147-163、2000.12