

任意のパイブレアウトが可能なパイプクーリング解析手法の構築

名城大学大学院 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¹⁾によって確立されている。しかし従来の手法では、パイブレアウトを配置する際、図-1 左の様にパイプ節点とコンクリート節点を一致させ、パイプ要素をコンクリート要素に一致させる必要がある等、パイブレアウトに関するいくつかの問題が存在する。

そこで本研究では、これらの問題点を解消し、図-1 右の様な自由なパイブレアウトが可能なパイプクーリング解析手法の開発を目的とした。

2. パイプクーリングを考慮した熱移動モデル¹⁾

田辺、溝渕らは、図-2 の様なパイプが埋め込まれたコンクリートの体積領域において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に関する支配方程式を誘導している。¹⁾²⁾また、コンクリートとパイプ壁面での熱収支を考慮したコンクリート内での非定常熱伝導方程式と連成することで、パイプクーリングによる熱除去効果を表現するモデルを構築している。

²⁾最終的には次式で表される。

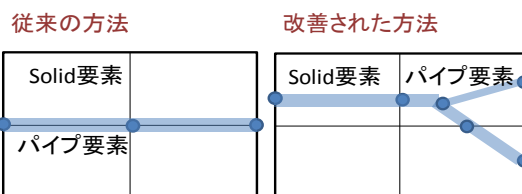


図-1 従来のパイブレアウトとその改善

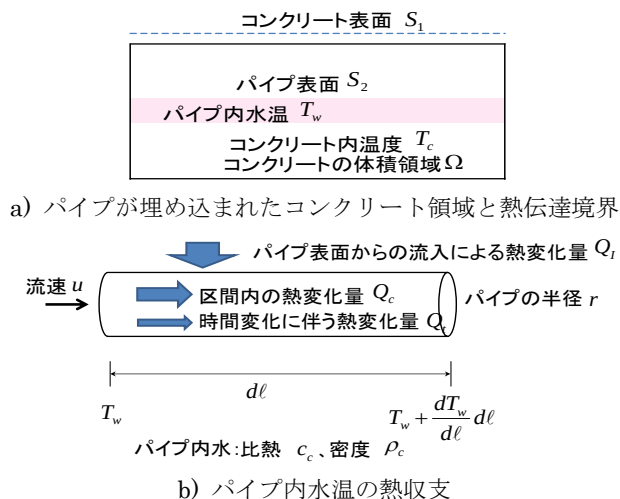


図-2 パイプクーリングを考慮した熱移動モデル

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

ここで、 $\bar{T}_c$ および $\bar{T}_w$ はそれぞれコンクリート及びパイプ内水の節点温度であり、 t は時間とする。なお K_c 、 K_w 、 K_{wc} 、 K_w 、 C 、 W 、 F_c はコンクリート及びパイプ内水温に関する熱物性値及び形状関数を用いて表されるマトリクスである。また、これらのマトリクスを求めるには、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おける面積分、パイプ要素に沿った線積分が必要である。

3. 従来の問題点とその改善策

パイプ要素を Truss 要素、コンクリート要素は Solid 要素とする。図-3 に示すように、パイプ要素に沿った経路積分をするにはガウス点に対応する局所座標を求める必要がある。Truss 要素を表す局所座標 ϕ_g は容易に求めることが出来る。しかし、Solid 要素の局所座標 ξ_g 、 η_g 、 ζ_g の解を得ることは容易ではない。よって従来の方法では、Solid 要素の局所座標が陽に定まる場合のみに限定されていた。そこで本研究では、コンクリート要素の形状や節点にとらわれない自由なレイアウトを実施させることを試みた。

ガウス点位置に対応する Solid 要素の局所座標解を求めることは、次式を解くことに等しい。

$$x(\xi, \eta, \zeta) = x_{pipe}, y(\xi, \eta, \zeta) = y_{pipe}, z(\xi, \eta, \zeta) = z_{pipe} \quad (2)$$

ここで x_{pipe} 、 y_{pipe} 、 z_{pipe} 座標はそれぞれの全体座標系のガウス点の座標である。これらの式の左辺を $\xi = \xi_0$ 、 $\eta = \eta_0$ 、 $\zeta = \zeta_0$ とし、第一次項まで Taylor 展開し整理すると次式が得られる。

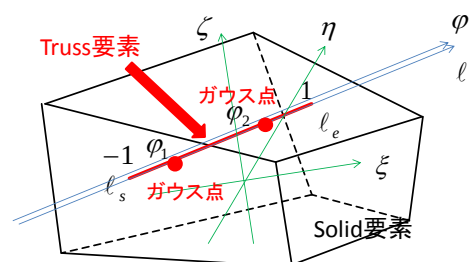


図-3 Truss 及び Solid 要素における局所座標系

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

ここで、 $[J]$ は ξ_0 、 η_0 、 ζ_0 に対応する Jacobi 行列である。得られた解を $\xi=\xi_0$ 、 $\eta=\eta_0$ 、 $\zeta=\zeta_0$ として繰り返し計算を実施することで Solid 要素の局所座標を求めることができる。この方法により Truss 要素を Solid 要素内の任意の位置に配置することが可能になる。

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検証するために、提案した手法により温度解析を実施した。解析対象モデルを図-4に示す。解析モデル a)、b)は $1000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 1000\text{mm}$ のコンクリート立方体である。パイプは図の様に配置し、a)は制約に囚われないモデル、b)は従来のモデルとして適応可能か検証した。コンクリートの表面部はすべて断熱境界とし、a)は打設後3日目、b)は打設直後から通水を開始した。図-5、図-6にそれぞれ半分に分断したコンクリート立方体の温度分布の経時変化を示す。図よりパイプ周囲から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。

また、現実的な構造モデルでの数値検証を行った。解析対象モデルを図-4c)に示す。橋脚を想定した1/4対象モデルである。始めにフーチングを打設し、その12日後に第1リフト、その15日後に第2リフトを打設することを想定している。パイプは配置間隔1m、表面から1mの深さに設置し、簡単のため底面から打設直後から通水することを仮定した。図-7にこのモデルのパイプクーリングの有無による温度履歴の比較を示す。図より第1リフト第2リフトそれぞれのパイプク

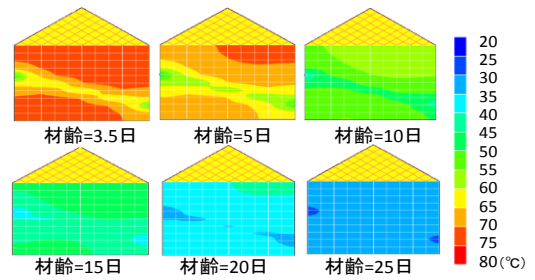


図-5 a)におけるコンクリートの温度分布の経時変化

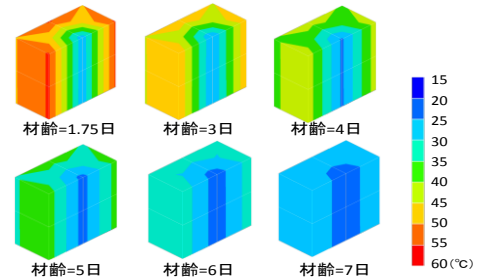


図-6 b)におけるコンクリートの温度分布の経時変化

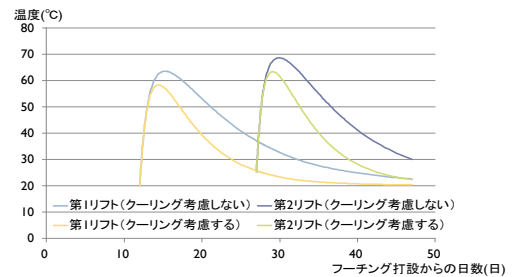


図-7 パイプクーリングの有無による温度履歴の比較

ーリングを考慮する場合には、考慮しない場合と比べ最高温度が5℃程度低減されることによりパイプクーリングの影響が表現できることが確認された。即ち今後さらに検証を行えば実際の問題でも本解析手法が適応可能であると思われる。

5. おわりに

本研究で提案した手法により、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要素形状にとらわれないパイプレイアウトを実現することが可能であることが確認された。また従来のパイプレイアウトにも対応していることが確認された。参考文献

- 1) 田辺忠顕、山川秀次、渡辺朗：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝導率決定ならびに冷却効果の解析、土木学会論文集、第343号、pp.171-179、1984.3
- 2) 溝渕利明、成田総一郎、都築慶剛、平戸裕之、田辺忠顕：マスコンクリートにおける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、pp147-163、2000.12

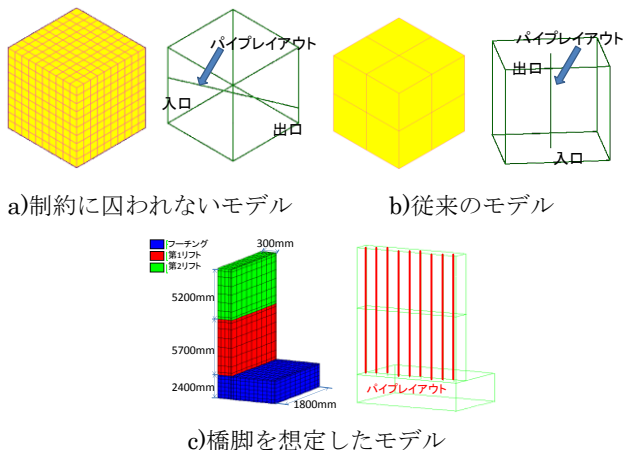


図-4 解析モデル