

パイプの分岐を考慮したパイプクーリング解析手法の提案

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理論およびその解析手法は田辺、溝渕らによって確立された¹⁾²⁾。しかし、従来の解析手法は、パイプ要素がコンクリート構成辺上に配置する制約や、パイプレイアウトが一本続きである制約があった。パイプ要素をコンクリート構成辺に囚われず配置する手法は、池村ら³⁾によって提案されているが、パイプレイアウトが一本続きである制約は未だ残っている。

本研究では、分岐を考慮したパイプレイアウトの配置が可能な温度解析手法の構築を目的とした。

2. パイプクーリングを考慮した温度解析理論

田辺、溝渕らは、熱伝導方程式とコンクリート表面と外気およびパイプ壁面とコンクリートの熱伝達境界条件、並びにパイプ内水の熱収支のつり合い条件を基にした温度解析手法を構築している。

パイプの微小区間における熱収支に関する支配方程式は、パイプ表面からの流入による熱変化量、パイプ区間内の熱変化量、時間変化に伴う熱変化量を考慮することにより、熱収支のつり合いから最終的に次式ようになる。

$$\rho_w c_w u \frac{\partial T_w}{\partial \ell} + \frac{2\alpha_w}{r} (T_w - T_c) + \rho_w c_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

ここで、 ρ_w は水の密度、 c_w は水の比熱、 α_w はパイプ壁面での熱伝達係数、 u はパイプ内流速、 r はパイプ管径、 T_w はパイプ内水温、 T_c はパイプ壁面温度である。理論の詳細は文献¹⁾²⁾を参考にされたい。

3. パイプレイアウトの改善

パイプクーリングを考慮した FEM 温度解析を行う際、従来は図-1(a)に示すように、要素の稜線上にパイプを配置する制約があった。池村ら³⁾はその例約を解消し、図-1(b)のような任意位置にパイプを配置する手法を構築した。詳細については、文献³⁾を参考にされたい。

4. 分岐したパイプの流量計算手法

上記手法により、パイプを自由に配置した状態でパイプクーリング温度解析を実施することが可能と

なったが、パイプレイアウトが一本続きである問題は依然存在している。パイプが一本続きではなく枝状あるいは管網で構成されている場合、式(1)中のパイプ内流速はパイプ要素毎に異なるため、それらの流量を適切に求める必要がある。本研究では節点水頭法を用い各パイプ要素の流速を求めることを試みた。基礎方程式は次式で表わされる。

$$Q_{ij} = R_{ij} |E_i - E_j|^{a-1} (E_i - E_j) \quad (2)$$

$$\sum_j Q_{ij} + p_i = 0 \quad (3)$$

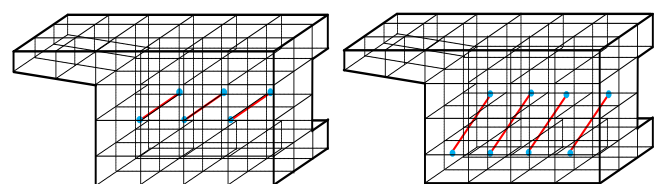
ここに、 i, j は節点番号、 Q_{ij} はパイプ要素 ij 間の流量、 R_{ij} 、 a はパイプの材料と形状より求める特性値である。 E_i および p_i は節点 i でのエネルギー位と節点 i における流出量である。これらの式は、管路を構成する要素数の流量式と節点数から既知または仮定した一定のエネルギー位の数をついた数の節点方程式である。式(2)の非線形部を次式で置き直す。

$$s_{ij} = R_{ij} |e_i - e_j|^{a-1} \quad (4)$$

ここで、 e_i は節点 i におけるエネルギー位の仮定値である。式(2)(4)を式(3)に代入し整理すると次式のようになり、 E_i, E_j で線形化された方程式が得られる

$$E_i \sum_j s_{ij} - \sum_j s_{ij} E_j = -p_i \quad (5)$$

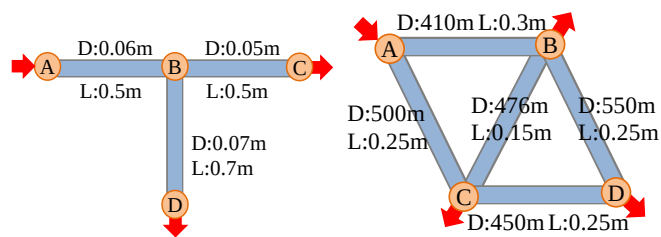
式(5)を繰り返し計算することでエネルギー位 E_i, E_j を求めることができる。さらに、式(2)よりパイプ内流量を求めることができる。詳細は文献⁴⁾を参考にされたい。ここで求めた流量を流速へ変換し、式(1)の流速に反映させることにより、分岐を考慮したパイプクーリング解析が可能となる。



(a) 従来の手法

(b) 改善された手法

図-1 従来と改善されたパイプレイアウト



Case1

Case2

表-1 管網の流量計算結果

Case1	流量(m ³ /s)	Case2	流量(m ³ /s) (節点水頭法)	流量(m ³ /s) (ハーディ・クロス法)
パイプAB	1.44×10^{-3}	パイプAB	4.95×10^{-2}	4.95×10^{-2}
パイプBC	0.476×10^{-3}	パイプAC	3.25×10^{-2}	3.25×10^{-2}
パイプBD	0.964×10^{-3}	パイプBC	4.23×10^{-3}	4.23×10^{-3}
		パイプBD	3.13×10^{-2}	3.13×10^{-2}
		パイプCD	2.97×10^{-2}	2.97×10^{-2}

5. 数値解析例

まず、分岐したパイプの流量の数値計算を試みた。数値計算対象のパイプレイアウトモデルを図-2に示す。Case1は枝状、Case2は管網のパイプレイアウトを模擬している。Case1では節点Aから $1.44 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{s}$ 、Case2では $0.082 \text{ m}^3/\text{s}$ で注水すると仮定する。流量計算結果を表-1に示す。なお、Case2では他の流量計算手法であるハーディ・クロス法による計算結果も併記している。両者の手法は同様な結果を与えていることが分かる。

次にCase1のパイプレイアウトを組み込んだマスコンクリートモデルに対して温度解析を行った。解析モデルを図-3に示す。解析対象モデルは $1000\text{mm} \times 1000\text{mm} \times 500\text{mm}$ のコンクリート直方体である。コンクリートの表面は断熱境界とし、3日目に通水を開始した。熱特性値を表-2に示す。表-2中の流速は、表-1に示すCase1の流量をパイプ断面積で除することにより決定している。図-4にコンクリート温度分布の経時変化を示す。図よりパイプレイアウトに沿って冷却効果が表現されていることが確認された。

6. まとめ

以上より、分岐したパイプレイアウトでの温度解析が実施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い本手法の検証を行いたいと考えている。

参考文献

- 1) 田辺忠顕、山川秀次、渡辺朗：パイプクーリング

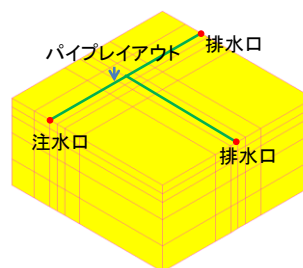


図-3 解析モデル

表-2 解析に用いた熱特性値

単位セメント量	$300\text{kg}/\text{m}^3$
流速(パイプAB)	$0.40\text{m}/\text{s}$
流速(パイプBC)	$0.194\text{m}/\text{s}$
流速(パイプBD)	$0.196\text{m}/\text{s}$
熱伝達率(パイプAB)	$322.56\text{W}/\text{m}^2\text{C}$
熱伝達率(パイプBC)	$79.09\text{W}/\text{m}^2\text{C}$
熱伝達率(パイプBD)	$79.09\text{W}/\text{m}^2\text{C}$
水の密度	$1000\text{kg}/\text{m}^3$
水の比熱	$4.18\text{kJ}/\text{kgC}$
コンクリートの熱伝達率	$2.7\text{W}/\text{m}^2\text{C}$
コンクリートの密度	$2300\text{kg}/\text{m}^3$
コンクリートの比熱	$1.1\text{kJ}/\text{kgC}$

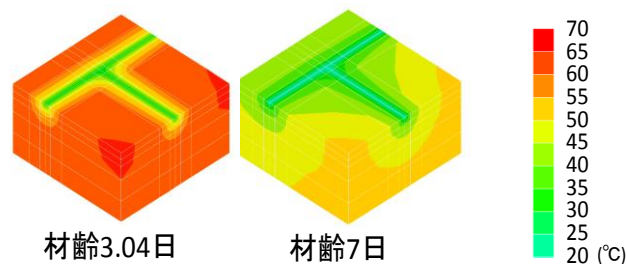


図-4 コンクリート温度分布の経時変化

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
- 3) 池村穰、石川靖晃：任意のパイプレイアウトに対するパイプクーリング解析の提案、第22回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集、pp59-64、2013
- 4) 高桑哲男：配水管網の解析と設計、森本出版、1979
- 5) 松梨順三：水理学、土木工学基礎講座、朝倉書店、1975