

分岐したパイプレイアウトに対する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理論は田辺ら, その FEM 解析手法は溝渕らによってすでに確立および開発されている¹⁾²⁾. 従来の手法は, パイプレイアウトがコンクリートを構成する辺上に配置する制約やパイプレイアウトは一本続きである必要があった. 著者ら³⁾によって自由なパイプレイアウトが可能となったが, 一本続きである制約は依然残っている. 本研究では, パイプの分岐を考慮したパイプクーリング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

本解析手法の基となる温度解析理論は, コンクリートの熱伝導方程式とコンクリート表面と外気における対流境界, クーリングパイプ壁面とコンクリートの熱伝達境界, パイプ内水温の熱収支の釣り合いを基に構築されている.

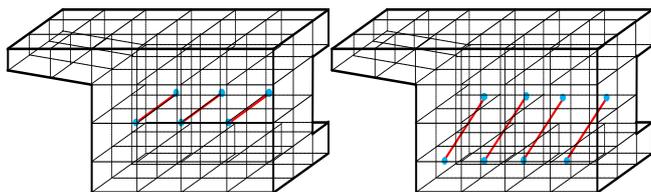
パイプ内水温に関する支配方程式は, 微小区間におけるパイプ壁面から流入する熱量, 微小区間内の熱変化量, 時間変化に伴う熱変化量を考慮することにより, 熱収支の釣り合いから最終的に次式で表わされる.

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

ここで, ρ_w は水の密度, c_w は水の比熱, u はパイプ内流速, T_w はパイプ内の水温, α_w はクーリングパイプ壁面での熱伝達係数, T_c はコンクリートの温度である. 理論の詳細は文献¹⁾²⁾を参考にされたい.

3. 従来の解析手法の改善

従来のパイプクーリングを考慮した温度解析を行う際には, 図-1(a)のようにパイプはコンクリート要素を構成する稜線上に配置する必要があった. 著者ら



(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

はその制約を解消し, 図-1(b)のような任意の位置にパイプレイアウトが可能な解析手法を構築した. 詳細は文献³⁾を参考にされたい.

4. 分岐したパイプ内流量の計算手法

著者らによって任意の位置にパイプを配置したパイプクーリング温度解析が可能となった. しかし, 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. パイプが管網で構成されている場合, 当然ながらパイプ毎により流速が異なる. 式(1)における流速 u はそれぞれのパイプ毎に異なるため, それぞれの流速を求める必要がある. 本研究では, 節点水頭法を用いて各パイプの流速を求めることを試みた.

節点水頭法の基礎方程式は, 各管路の流量を節点エネルギー位で表わす流量式と各節点に接続する管路の流量が満たすべき節点方程式の 2 つからなり, 次式で表わされる.

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

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

ここで, 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, E_i は節点 i でのエネルギー位, p_i は節点 i における流出量である. 式(2)を式(3)に代入し整理すると次式となる.

$$E_i \sum_j s_{ij} - \sum_j s_{ij} E_j = -p_i \quad (4)$$

ここで, s_{ij} は次式で与えられる.

$$s_{ij} = R_{ij} |e_i - e_j|^{a-1} \quad (5)$$

なお, e_i は節点 i におけるエネルギー位の仮定値である. 式(4)は, 管路中の節点数から既知エネルギー位を含む節点数を引いた数だけ存在する. 式(4)において, e_i, e_j を適宜仮定し, E_i, E_j を解く. そして E_i, E_j を e_i, e_j とし, 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られる. 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に変換し, 式(1)に反映させることで管

網配管を構成したパイプレアウトにおけるパイプクーリング解析が可能となる。

5. 数値解析例

図-2 は、一般的に施工されるパイプレアウトの一部を想定したものである。図-3 は図-2 のパイプレアウトにバイパスを繋ぎ、管網を構成したレイアウトを想定している。従来のパイプレアウトにバイパスを繋いだ場合、どのような冷却効果が出るか数値的検討を行った。解析対象モデルは4500mm×4500mm×1000mmのコンクリート体とした。緑色部分のパイプ径は24.5mmとした。バイパスとして繋いだ青色部分のパイプ径は24.5mm, 12mm, 6mmの3パターンとした。コンクリートの表面はすべて断熱境界とし、3日目より注水口から $2.5 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{sec}$ で通水を開始した。まず先に述べた各パイプの流量を求めた。なお、 R_{ij} はヘーゼン・ウィリアムス式に基づき決定した。表-1 に管網解析によって得られた各管路の流量を示す。続いてパイプクーリング温度解析を実施した。なお、熱特性値は一般的な値を使用し、パイプの熱伝達率は溝渕らの研究を参考に決定した²⁾。

図-4 および図-5 に各節点における温度履歴を示す。節点 A では、パイプを通したことで従来レイアウトより大きい冷却効果が確認された。また、節点 B におけるクーリング効果は、バイパスを通したレイアウトが従来レイアウトより 2~4℃ほど冷却されたことが確認された。今回の解析は一例であり、今後多くの数値検討を行っていきたいと考えている。

6. まとめ

以上より、パイプの分岐を考慮したパイプクーリング解析が実施可能であることが確認された。

謝辞

本研究の一部は、名城大学自然災害リスク軽減研究センター(代表者：小高猛司)と JSPS 科研費 24520467 の助成を受けて実施したものである。

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、1978

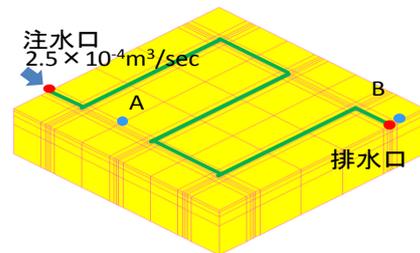


図-2 一般的なパイプレアウト

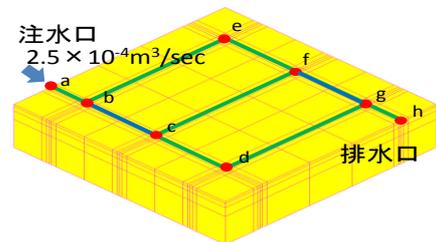


図-3 バイパスを繋いだパイプレアウト
表-1 管網解析によって得られた計算結果

パイパスパイプ径	流量(m ³ /sec)		
	24.5mm	12mm	6mm
管路ab	2.50×10^{-4}	2.5×10^{-4}	2.5×10^{-4}
管路bc	1.53×10^{-4}	0.61×10^{-4}	1.35×10^{-4}
管路cd	0.97×10^{-4}	1.89×10^{-4}	2.37×10^{-4}
管路be	0.97×10^{-4}	1.89×10^{-4}	2.37×10^{-4}
管路cf	0.55×10^{-4}	-1.29×10^{-4}	-2.23×10^{-4}
管路dg	0.97×10^{-4}	1.89×10^{-4}	2.37×10^{-4}
管路ef	0.97×10^{-4}	1.89×10^{-4}	2.37×10^{-4}
管路fg	1.53×10^{-4}	0.61×10^{-4}	1.35×10^{-4}
管路gh	2.5×10^{-4}	2.5×10^{-4}	2.5×10^{-4}

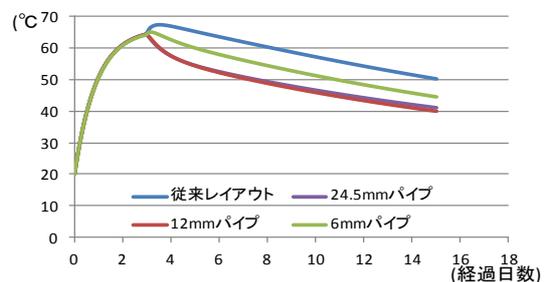


図-4 節点 A における温度履歴

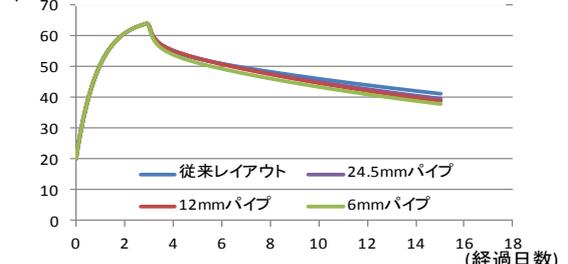


図-5 節点 B における温度履歴