

パイプクーリングの三次元熱収支効果を考慮したコンクリートの二次元非定常熱伝導解析

(株)熊谷組	正会員	○佐藤 英明
(株)熊谷組	正会員	吉村耕市郎
(株)計算力学研究センター	正会員	吉川信二郎
(株)計算力学研究センター		石井 宏一

1. はじめに

コンクリート内部に敷設したパイプに冷却水などを通水させて強制的に熱を除去するパイプクーリング工法は、マスコンクリートの温度ひび割れの発生を抑制する有効な方法の一つである。一方、パイプクーリングはコンクリート内における複雑な熱収支であるため、その冷却効果を精度良く解析するためには三次元的な問題として取り扱う必要がある^{1), 2)}が、大規模な三次元解析は取り扱いが極めて煩雑であることから、実際のコンクリート構造物の設計などにおいて、より簡便で的確な解析方法が求められていた。

本研究は、コンクリートの二次元非定常熱伝導場において、パイプクーリングの三次元的な流れを考慮した実用的でより簡便な熱収支解析手法を提案するものである。

2. パイプクーリングの三次元効果を考慮した二次元非定常熱伝導解析手法

パイプクーリングの熱収支を簡易的に二次元解析を行うためには、パイプ位置での水温分布・履歴を仮定しなければならない³⁾ため予測解析ではその評価が重要であり、また擬三次元解析手法⁴⁾ではコンクリートブロックを複数のスライス断面を取り扱う必要があり、複雑で繁雑な作業が必要であった。

今回提案する解析手法は、クーリング水は流速が早く十分発達した乱流状態であるとし、クーリング水の温度変動は定常的であるとして取り扱う¹⁾ことで、図-1に示すような一般的な三次元熱伝導場において、クーリングパイプと直行する1つの二次元断面で代表できるとしたものである。すなわち、解析断面では、パイプ位置での熱収支は特殊な節点对流熱伝達境界として取り扱い、二次元断面の面外方向のパイプ延長による温度上昇は、隣接するパイプ境界点からの距離に線形的に上昇するものとして取り扱う方法である³⁾。

一般に、コンクリートの内部発熱を考慮した二次元問題に関する非定常熱伝導方程式は、次式で表される。

$$\frac{\partial}{\partial y} \left(k_y \frac{\partial T_c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k_z \frac{\partial T_c}{\partial z} \right) + Q_c(t) - C_c \rho_c \frac{\partial T_c}{\partial t} = 0 \quad \dots\dots\dots (1)$$

ここに、 k_y, k_z : コンクリートの異方性熱伝導率、 T_c : コンクリートの温度、 $Q_c(t)$: コンクリートの内部発熱率、 C_c, ρ_c : コンクリートの比熱および密度、である。

ここで、一般的な境界条件については既往の文献^{1)~3)}などに委ねるものとするが、パイプクーリングによる熱収支は、パイプを含む特殊な対流熱伝達節点境界として、パイプと接する境界($\xi = 1 \sim n$: 節点)において、

$$k_y \left(\frac{\partial T_c}{\partial y} \right) l_y + k_z \left(\frac{\partial T_c}{\partial z} \right) l_z + \alpha_w (T_{c\xi} - T_{w\xi}) = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここに、 l_y, l_z : 境界上の垂線の方法余弦、 α_w : コンクリートとクーリング水間の平均熱伝達率、 T_w : クーリング水の温度、である。

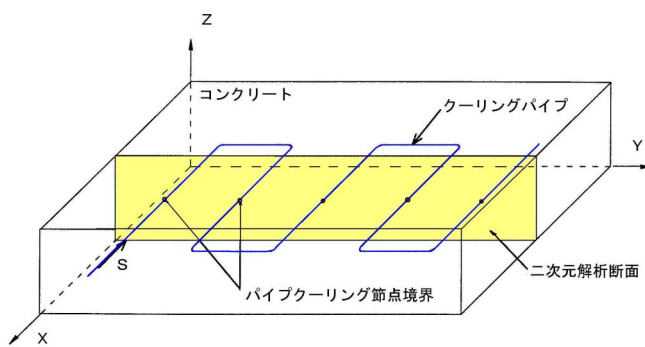


図-1 コンクリートの三次元熱伝導場における二次元解析断面とパイプクーリング(一次元)の座標系

キーワード マスコンクリート、パイプクーリング、有限要素法、温度応力解析、ひび割れ制御

連絡先 〒162-8557 東京都新宿区津久戸町2丁目1番地 (株)熊谷組 土木技術部 TEL 03-3235-8649

一方、クーリング水は、通水流速が早く十分に発達した乱流状態であるとする、クーリング水の温度 T_w 関する一次元定常熱輸送方程式は、Newton の冷却則に従うものとする、以下のとおりとなる。

$$C_w \rho_w v \frac{\partial T_w}{\partial s} + \frac{2\alpha_w}{r} (T_w - T_c) = 0 \quad \dots\dots\dots (3)$$

ここに、 C_w 、 ρ_w ：クーリング水の比熱および密度、 v ：クーリング水の平均流速、 r ：パイプの半径、である。したがって、式(1)および(3)を有限要素法により離散化し、連成問題として (T_c, T_w) について解くことによって、三次元問題と同様にコンクリートの二次元熱伝導場においてもクーリング水の流れ方向の水温上昇を考慮したパイプクーリングによる熱収支の相互作用の問題を解析することができる。

3. 本解析手法の妥当性ならびに適用例

本解析手法の妥当性を確認するため、延長 10m のダム の仮排水トンネルの閉塞コンクリートの検討を実施した。図-2 に示すとおり、クーリングパイプを直交する二次元断面で今回提案した解析を行い、三次元モデルによる解析結果と比較検討を行った。表-1 に、解析条件を示す。

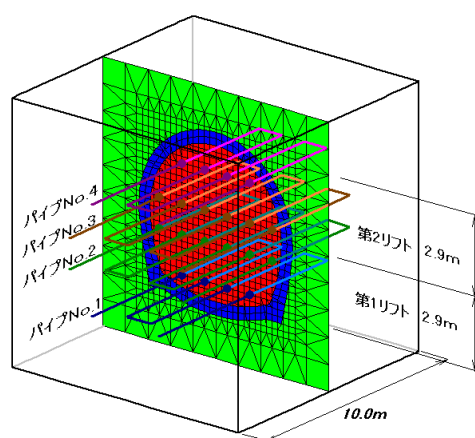


図-2 検討に用いた解析モデル

表-1 解析条件		
項目	条件	条件
施工条件	外気温度	5.0℃(一定)
パイプクーリング	パイプ延長	・第1リフト(1/10打設) パイプNo.1 : 38.5m パイプNo.2 : 57.5m ・第2リフト(1/17打設) パイプNo.3 : 57.5m パイプNo.4 : 38.5m
	通水水温	入り口 6.0℃(一定)
	通水期間	1/10~2/14
	密度	2,400kg/m ³
コンクリートの熱的性質	比熱	1,15kJ/kg℃
	熱伝導率	2.7W/m℃
	熱膨張係数	$Q(t)=42.8(1-e^{-0.485t})$
岩盤の熱的性質	密度	2,650kg/m ³
	比熱	0.79kJ/kg℃
	熱伝導率	3.45W/m℃
初期条件	コンクリートの打ち込み温度	11.0℃
境界条件(熱伝達率)	コンクリート打抜き面	12W/m ² ℃
	パイプクーリング界	431W/m ² ℃

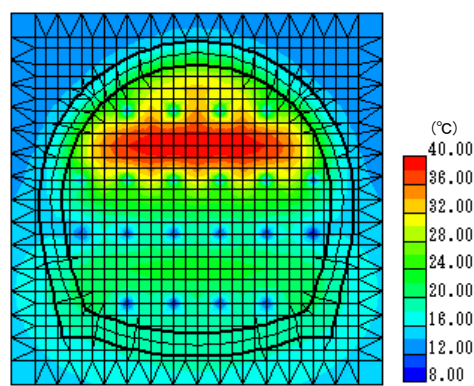


図-3 第2リフト打設後72hの温度分布(二次元モデル)

図-3 に、クーリング水の出口水温が最高となった第2リフト打設後72hでの温度分布を示す。パイプクーリングによる冷却効果がよく表現されている。

図-4 に、第2リフト打設後72hにおけるクーリングパイプの長さ方向の水温分布の比較を示す。二次元解析と三次元解析との水温分布は、共にほぼ直線的に上昇することが分かるが、両者は極めて良い一致を示しており、本手法は三次元解析と同等の精度で解析できることが分かる。なお、出口位置におけるクーリング水温の両解析結果の温度差は、最大0.05℃(57.5m地点)であった。

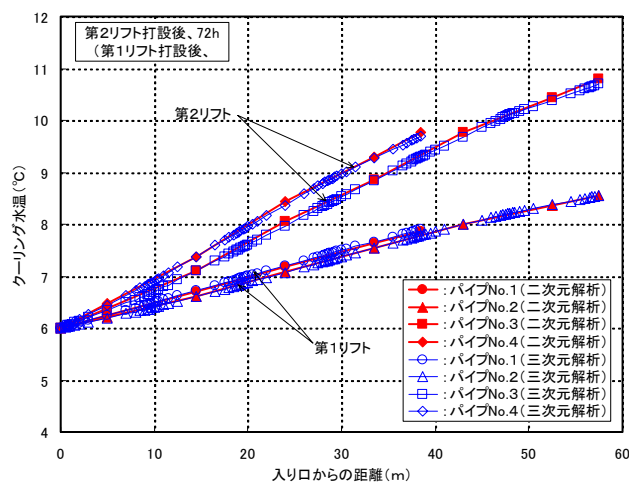


図-4 パイプクーリングの水温分布の比較

4. まとめ

本解析手法によれば、コンクリートの非定常熱伝導解析において、パイプクーリングによる熱収支を二次元問題として容易に取り扱うことができ、マスコンクリートのひび割れ制御の設計ならびに施工管理において十分な精度で解析できる実用的な方法であることが明らかとなった。

参考文献

- 1) 佐藤英明, 佐谷靖郎: マスコンクリートにおけるパイプクーリング効果に関する研究, 土木学会論文集, 第372号/V-5, 1986.8
- 2) 溝渕利明, 成田総一郎, 都築慶剛, 平戸裕之, 田邊忠顕: 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.655/V-48, 2000.8, など
- 3) 有馬 勇, 佐藤英明, 他: マスコンクリートにおけるパイプクーリングの冷却効果に関する一考察, 土木学会第49回年次学術講演会, V-568, 平成6年9月, など
- 4) 田邊忠顕, 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達率の決定ならびに冷却効果の解析, 土木学会論文報告集, 第343号, 1984.3, など