

# 論文 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範囲に関する一考察

溝淵 利明\*1・田邊 忠顕\*2

**要旨:** パイプクーリングによる冷却効果は、これまでパイプ位置から数 10cm 程度であると言われているが、実際にどの程度までパイプクーリングの効果が及んでいるのかを定量的に把握されていないのが現状である。本稿では、パイプクーリングによる冷却効果範囲の定量的評価を行うための第一歩として、筆者らが提案した解析手法を用い、通水量がパイプクーリングによる冷却効果範囲に及ぼす影響についての検討を行った。その結果、パイプクーリングによる冷却効果範囲は通水量が変化しても定量的に評価できる可能性のあることを確認した。

**キーワード:** パイプクーリング, 冷却効果, 水和熱, マスコンクリート

## 1. はじめに

マスコンクリート構造物の施工において、セメントの水和発熱に起因する温度応力によって生じる温度ひび割れは、止水性や耐久性上極力抑えなければならないものである。温度ひび割れ抑制対策には、これまでに多くの方法が提案されているが、そのほとんどはコンクリートを打込むまでに行われるものであり、コンクリート打込み後に部材の発熱状況や外気温変化等の環境条件に追従したものではない。一方、コンクリート打込み後に環境条件や施工条件の変化に対応して、コンクリート温度を低減する方法としては、パイプクーリングがある。

パイプクーリングは、コンクリート部材内にあらかじめパイプを埋設しておき、コンクリート打込み後にパイプ内に冷水を通し、コンクリート部材内で生じる熱を除去する方法である。パイプクーリングの利点としては、当該部位の打込み後の状況に応じて、自由に冷却程度を変更できる点にある。また、部材内で最もコンクリート温度が高くなる部位にクーリングパイプを最適設置できれば、コンクリートの内外温度差を小さくすることができ、内部拘束応力の低

減を図ることも可能である。

一方、パイプクーリングによる冷却効果範囲は、これまで通水温度や流量に大きく影響されることなくパイプ位置から数 10cm 程度であるといわれている<sup>1)</sup>。また、パイプクーリングを実施する際の条件(パイプ設置位置、パイプ間隔、パイプ長など)は、これまでの実績を基に選定されている場合がほとんどであり、必ずしも最適なパイプクーリングとはなっていない場合があり、ひび割れ抑制対策として有効に活用されていないのが現状である。

本報文では、上記の現状を踏まえ、パイプクーリングの冷却効果範囲の定量的な評価を行うこととした。その第一歩として、筆者らが提案しているパイプクーリングの冷却に関する解析手法<sup>2), 3)</sup>を用いて、通水量がパイプクーリングによる冷却効果範囲に及ぼす影響についてパラメータ解析を行った結果について報告するものである。

## 2. パイプクーリングの冷却効果解析手法

本検討で用いたパイプクーリングによる冷却効果解析では、クーリングパイプ内の水とパイ

\*1 鹿島技術研究所 LCE プロジェクトチーム 工博(正会員)

\*2 名古屋大学大学院教授 工学研究科土木工学教室 工博(正会員)

壁面の熱収支を、コンクリート内の熱伝導場に連続した熱伝達境界面がある間隔で存在しているとした境界条件を設定し、かつパイプ内の流れを持った水の温度と水和発熱するコンクリートの異なる2つの場を上記の境界条件を導入して連成させて解いている。ただし、パイプの配置は立体的に配置する場合があることから、パイプ入口から出口まで連続したものとして解析する必要があり、解析手法自体3次元で取り扱うものとした。

コンクリート場における非定常熱伝導方程式、クーリングパイプ壁面における境界条件式及びパイプ内水温の支配方程式を以下に示す。

$$\lambda \left( \frac{\partial^2 T_c}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_c}{\partial z^2} \right) + Q_c(t) = \rho c \frac{\partial T_c}{\partial t} \quad (1)$$

$$\lambda \left( \frac{\partial T_c}{\partial x} l + \frac{\partial T_c}{\partial y} m + \frac{\partial T_c}{\partial z} n \right) + h(T_c - T_w) = 0 \quad (2)$$

$$\rho_w C_w u \frac{\partial T_w}{\partial S} + \frac{2h}{r} (T_w - T_c) + \rho_w C_w \frac{\partial T_w}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

ここで、 $\lambda$  : コンクリートの熱伝導率 (W/m°C),  $T_c$  : コンクリート温度 (°C),  $Q_c(t)$  : コンクリートの発熱率 (W/m³),  $\rho$  : コンクリートの密度 (kg/m³),  $c$  : コンクリートの比熱 (kJ/kg°C),  $l, m, n$  : 境界面における方向余弦,  $h$  : パイプ壁面での熱伝達率 (W/m²°C),  $T_w$  : パイプ内の水温 (°C),  $\rho_w$  : 水の密度 (kg/m³),  $C_w$  : 水の比熱 (kJ/kg°C),  $r$  : パイプ半径 (cm),  $u$  : 流速 (m/秒),  $S$  : パイプ入口からの距離 (m) である。

上記に示した解析手法は、これまでにロックフィルダムの洪水吐<sup>4)</sup>、斜張橋橋脚部<sup>5)</sup>及びアーチダム堤体<sup>6)</sup>で実施したパイプクーリングの計測結果とよく一致していることが確認されており、パイプクーリングの冷却効果を適切に評価する手法として妥当であると考え、本検討に用いることとした。

### 3. 検討方法

#### 3.1 検討ケース

本検討では、流量を要因として4水準変化さ

せて解析を行った。流量の検討範囲は、パイプクーリングの実績を参考に5ℓ/分~20ℓ/分とした。

#### 3.2 解析モデル

本解析では、クーリングパイプ1本での冷却範囲をできるだけ明確にするため、図-1に示すように幅10m×高さ10m×長さ50mのコンクリートブロックの中央部にクーリングパイプを1本敷設したモデルを用いることとした。クーリングパイプの径は、2.54cmとした。解析は、上述したモデルの1/4とした。

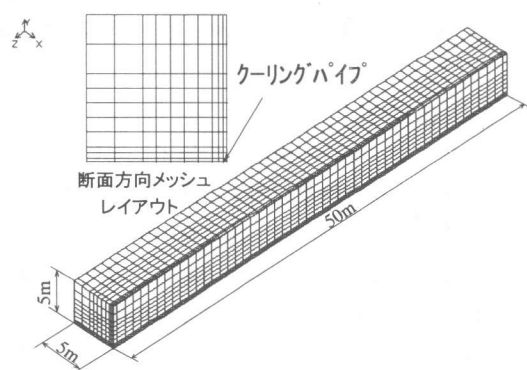


図-1 解析モデル

#### 3.3 解析条件

本解析では、普通ポルトランドセメントを用い、単位セメント量300kg/m³とした。また、打込み温度は20°Cとした。

コンクリートの熱特性値は、土木学会・コンクリート標準示方書施工編に示された標準的な値の範囲の平均値を用いた。断熱温度上昇式は、標準示方書に示された式を用いて終局断熱温度上昇量及び上昇速度に関する定数を求めた。境界条件は、コンクリートブロック周囲を断熱境界とした。解析条件を表-2に示す。

パイプクーリングは、解析期間中(解析期間60日間)実施するものとし、その間通水温度、流量、通水方向の変化はないものとした。

パイプ壁面での熱伝達率は、室内試験で求めた流量と熱伝達率との関係を用いた<sup>3)</sup>。パイプ壁面の熱伝達率 $h$ と流量 $U$ (ℓ/分)との関係

式を以下に示す。また、パイプ入口水温は 10℃ とした。

$$h = -0.63U^2 + 47.7U - 198 \quad (4)$$

$$(5 \text{ ㊦/分} \leq U \leq 30 \text{ ㊦/分})$$

#### 4. 検討結果及び考察

##### 4.1 パイプクーリングの効果範囲

本検討では、パイプクーリングによる冷却影響範囲の評価を行うために、各ケースについてパイプ入口から 5m, 30m 及び 50m での位置を検討対象断面とした。また、材齢としてはパイプクーリングを実施しない場合で終局断熱温度上昇量に達する 3 日、ほぼ定常状態となる 10 日とした。

パイプクーリングによる冷却効果範囲は、各部位で流量の影響を一元的に評価するために、以下に示す式を用いて各部位でのコンクリート温度を無次元化することとした。

$$R = \frac{T_{c0}(d,t) - T_{cc}(d,t)}{T_{c0}(d,t)} \quad (5)$$

ここで、R：パイプクーリングによる温度低減率、d：パイプからの距離 (m)、t：材齢 (日)、 $T_{c0}(d,t)$ ：パイプからの距離 d で材齢 t におけるパイプクーリングを実施しない場合のコンクリート温度 (℃)、 $T_{cc}(d,t)$ ：距離 d で材齢 t におけるコンクリート温度 (℃) である。

各ケースの材齢 3 日及び 10 日におけるパイプクーリングの影響範囲分布を図-2, 3 に示す。材齢 3 日においては、図-2 に示すように流量及びパイプ入口からの距離に関係なくパイプクーリングによる冷却効果範囲が約 1m であった。パイプクーリングによる冷却は、流量 20 ㊦/分の場合、パイプ入口からの距離 5m でのパイプ壁面において、クーリングを実施しない場合の約 75% であった。ただし、10cm 離れた位置で 30% 程度、50cm 離れた位置では 10% 程度であり、コンクリートの温度上昇時では、パイプクーリングの効果範囲がパイプのごく近傍に限られていることがわかる。また、流量変化による影響はほとんどなく、パイプクーリングによ

表-1 解析条件

項目	入力データ	
熱伝導率 (W/m <sup>2</sup> ℃)	2.7	
密度 (kg/m <sup>3</sup> )	2300	
比熱 (kJ/kg℃)	1.155	
初期温度 (℃)	20	
断熱温度上昇式	Q <sub>∞</sub> (℃)	46
	γ (1/日)	1.104

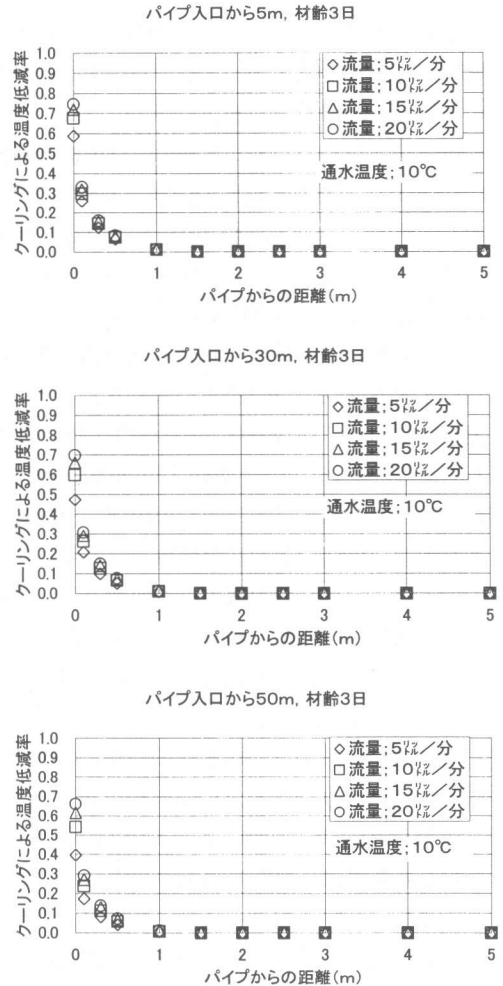


図-2 パイプクーリングの影響範囲分布 (材齢 3 日)

る温度低減率が 0% を示す位置はどのケースもほぼ 1m であった。

材齢 10 日においては、図-3 に示すようにパイプクーリングの影響範囲が 2.5m まで広がる結果となった。パイプ壁面での温度低減率は、

流量が 15 ㎥/分以上のケースにおいて材齢 3 日とほとんど変化がないが、流量が 10 ㎥/分以下では 5%程度低減率が大きい結果となった。また、パイプから 10cm 以上離れた位置では、各ケースとも 7~8%程度温度低減率が大きい結果となった。これは、流量がある程度大きい範囲においてパイプ壁面でのコンクリート温度とパイプ内水温がほぼ同様な値となっているのに対して、流量の小さい範囲では材齢 10 日の段階においても同様な値となっておらず、低減率が上昇したと考えられる。

図-2, 3 から、パイプクーリングの影響範囲はクーリング期間が主たる要因になっていると考えられる。一方、パイプクーリングの影響する範囲が同じであっても流量及びパイプ入口からの距離によって各部位でのパイプクーリングによる冷却効果は異なってくる。そこで、図-2, 3 に示す各グラフの回帰式を求めることとし、各材齢でのパイプクーリングの効果が及ぶ範囲を求めることとした。回帰式は、材齢、パイプからの距離、パイプ入口からの距離、流量及び通水温度の各変数を含んだ関数となるが、ここでは、パイプからの距離のみを変数とし、その他の変数は定数として与えられるものとして回帰することとした。回帰式を以下に示す。

$$R = a \log d + b \quad (6)$$

ここで、a, b: 材齢、パイプ入口からの距離、流量及び通水温度から定まる定数である。

流量 15 ㎥/分で回帰した結果を図-4 に示す。回帰した結果は、材齢 3 日及び 10 日も解析値とほぼ一致する結果となり、パイプと直交する断面でのパイプクーリングの効果範囲は、式(6)の関係にパイプに沿った方向での関係を加えれば、任意のパイプ位置での冷却効果範囲を算定することができることとなる。

#### 4.2 パイプクーリングによる冷却効果範囲の算定

前項では、パイプクーリングの効果範囲を中心に述べたが、実際には何時の時点でパイプクーリングの冷却効果の範囲がどこまでなのかと

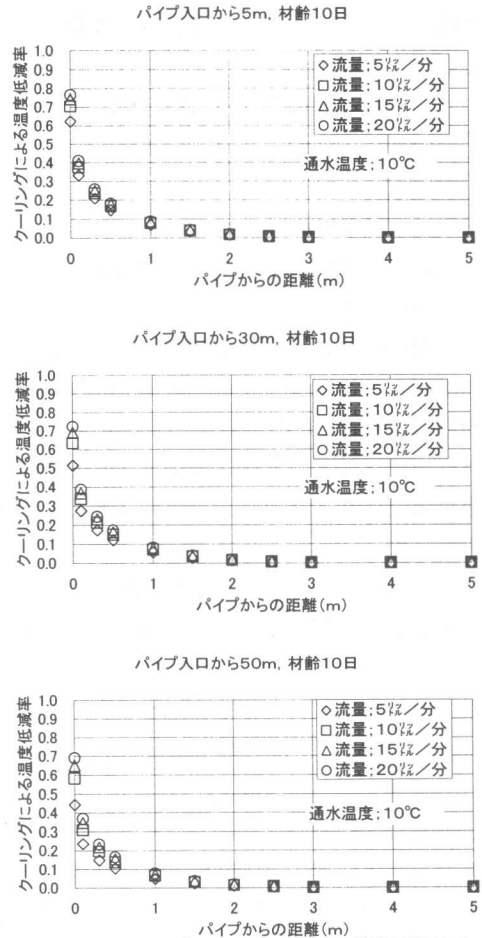


図-3 パイプクーリングの影響範囲分布 (材齢 10 日)

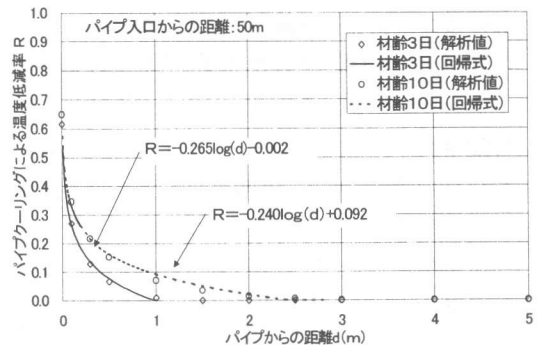


図-4 パイプからの距離とパイプクーリングの低減効果範囲との関係

いう点が重要である。図-2, 3 は、パイプクーリングの影響が僅かでも及ぶ範囲を示しているが、実施工において温度ひび割れ抑制対策として見た場合、どの部位までが何程度低減できてい

るか評価することが重要となってくる。温度ひび割れ抑制対策としての効果を求める場合、プレクーリングでは打込み温度の低減の目標として5℃～10℃をひとつの目安としている<sup>1)</sup>。これは、打込み温度を5℃以上低減しないとひび割れ抑制効果が顕著に表れてこないためと考えられる。そこで、本検討ではパイプクーリングの影響範囲を評価するだけでなく、実際の構造物での適用を考慮するために、パイプクーリングによって5℃及び10℃低減できる範囲を算定することとした。これにより、ひび割れ抑制対策を考慮した場合のパイプ間隔の設定、パイプクーリング期間選定の目安とすることができることとなる。

材齢ごとの温度低減範囲を図-5に示す。パイプクーリングによる影響範囲は、流量、温度低減量及び材齢によって異なるが、同一材齢で温度低減量が同じであれば、流量の増加に伴い影響範囲が増加する傾向を示した。

図-5を用いれば、例えばパイプクーリング期間3日、温度低減量5℃、パイプ間隔(パイプクーリングの影響範囲;50cm)の条件における流量条件を算定することが可能となる。上記の条件の場合、通水温度10℃では流量を15ℓ/分以上としないと条件を満足することができない結果となる。一方、材齢7日までパイプクーリングを継続した場合には、流量5ℓ/分で所定の条件を満足することが可能となる。また、温度低減量を10℃としてパイプ間隔を1m間隔とした場合には、材齢7日まで連続してパイプクーリングを実施しても流量20ℓ/分以下のクーリング条件では満足することができず、さらに通水温度を下げるか流量を増加させる必要がある。ただし、この場合にはパイプ近傍のみを冷却する局部冷却となる危険性があると思われることから、むしろパイプ間隔を小さくしてやることで条件を満足することが望ましいと考えられる。

さらに、材齢10日までパイプクーリングを実施した場合、パイプクーリングによる5℃の

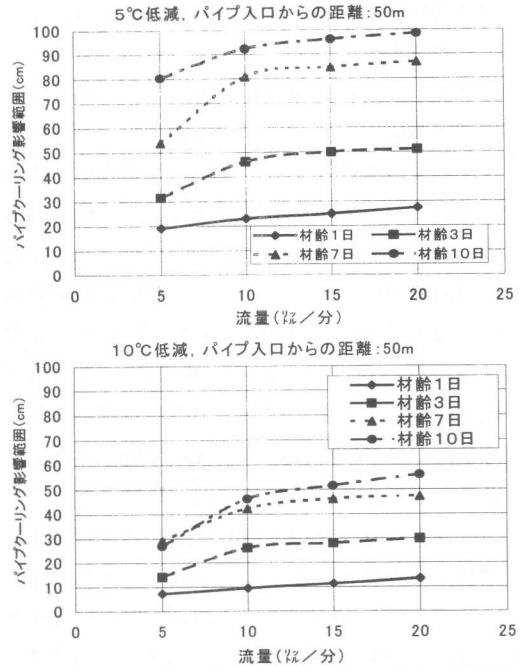


図-5 パイプクーリングの温度低減範囲

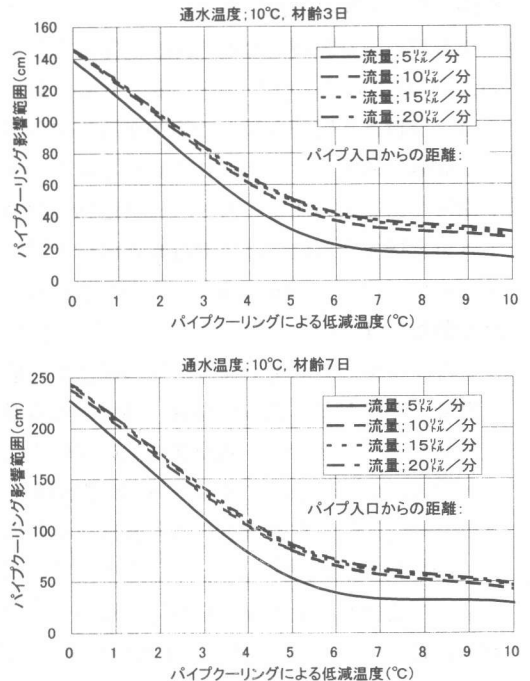


図-6 パイプクーリングによる低減温度と影響範囲との関係

温度低減は、流量が5ℓ/分で所定の条件を満足することが可能となるが、10℃以上の温度低

減を実施するためには、13 ㎥/分以上の流量が必要となる。

以上のように、図-5 に示すような関係図を作成すれば、いつまでにどこまでパイプクーリングによって冷却するか条件を定めれば、その条件に合った流量を選定することが可能となる。また、図-6 に示すようにパイプクーリングによる低減温度とパイプクーリングによる影響範囲の関係を求めておけば、例えば目標とする温度ひび割れ指数に対して、事前解析において何℃低減する必要があるかが求めれば、それに応じたパイプ間隔、通水温度及び流量を選定することができる。ただし、図-6 に示すようにパイプクーリングによる低減温度が5℃以上の場合、冷却範囲の変化が少ないことがわかる。したがって、対象とするコンクリート温度を5℃以上低減したい場合には、例えばパイプクーリングの期間を3日とした場合、パイプ間隔を図-6 に示す低減温度5℃でのパイプクーリングの最小影響範囲となる60cmと決めてしまい、5℃以上のコンクリート温度の低減に対しては、流量または通水温度で調整する方法がパイプ間隔を低減温度にあわせて変化させるよりも簡便であるといえる。また、実構造物において外気と接する部位の近傍や打継ぎ面付近は、部材中央に比べて温度上昇が小さいことから、冷却効果も部材中央と異なることとなる。例えば、部材中央と表面部に比較的近い部位での最高温度の差異が5℃あった場合、部材中央の温度低減を10℃とした時、表面部に近い部位ではパイプ入口からの距離によって冷却効果が変化するために、この点を考慮する必要はあるものの、5℃の低減でよいこととなる。パイプ位置によって流量及び通水温度を変化させることは非常に難しいことから、事前に本解析を実施し、部位ごとにパイプ間隔を変化させることでパイプクーリングを部材全体で均一に実施することが可能となり、部位による過冷却を抑えることが可能になる。

## 5. まとめ

パイプクーリングの冷却効果範囲の定量的な評価を行うための第一歩として、通水量がパイプクーリングによる冷却効果範囲に及ぼす影響について検討を行った。その結果、本解析手法を適用すればパイプクーリングの影響範囲をある程度定量的に評価でき、これまで経験と実績で選定されてきたパイプ間隔や通水温度、流量、通水期間などを定量的に選定する可能性を示唆することができたと考えられる。ただし、本検討で示したモデルに対して、実構造物ではコンクリート表面からの放熱も加味されることから、本項で示した結果に比べてパイプ間隔、流量及び通水温度が大きくなるものと思われる。また、本検討では隣り合うパイプの影響を考慮していないことから、実際の構造物でのパイプクーリングによる冷却効果範囲を定量的に評価するためには、今後これらの点についてもさらに検討していく必要がある。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート技術シリーズ No.14, 最新のマスコンクリート技術, 1996.
- 2) 田邊忠顕, 溝淵利明：パイプクーリングにおける管壁面の熱伝達係数についての検討, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol.5, pp73-76,1983.
- 3) 溝淵利明, 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の解析, コンクリート工学年次講演会講演論文集, Vol.7, pp37-40,1985.
- 4) 溝淵利明, 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,pp.119-132,2000.8
- 5) 溝淵利明, 二塚保之, 村尾義則：パイプクーリングによるひび割れ抑制対策効果に関する研究, 土木学会論文集, No.655/VI-49,147-163,2000.12
- 6) 國松祥弘, 溝淵利明, 森田義則, 梅原秀哲：パイプクーリングによる温度制御の影響範囲に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, vol.21, No.2, pp.1159-1164,1999