

ヒートパイプを利用したパイプクーリングの実用化

鉄建建設株式会社 正会員 ○伊吹 真一
鉄建建設株式会社 正会員 柳 博文
株式会社計算力学研究センター 正会員 吉川信二郎

1. はじめに

近年の発注される工事は、品質向上や耐久性向上をキーワードとしたコンクリートの初期欠陥を減少させる技術が求められている。特にマスコンクリートでは、セメントの水和発熱によるひび割れがテーマとなるケースが増えている。従来より橋脚やボックスカルバート等のマスコンクリート対策として、コンクリート内にパイプを設置し、冷却水を循環させるパイプクーリングが実施されてきた¹⁾。しかし、この場合、冷却水の循環管理・温度調整を行うプラント設置が必要であり、コストの高さが課題となっていた。そこで、熱移動量の大きなヒートパイプを用い、コンクリートの水和熱による温度上昇を抑制する簡易な方法を開発した。

ヒートパイプを利用したパイプクーリングは、熱移動量の大きい棒状ヒートパイプをマスコンクリート内に設置し、高温になる内部熱をヒートパイプにより移動させ、外部に熱を放出させる工法である。本工法は、冷却水の循環が無い簡便なパイプクーリングで、冷却水のプラントが不要になり、大量の水の調達が困難な作業現場においても、必要な部位のみの温度を制御することができる。

通常、パイプクーリングなどのマスコンクリートのひび割れ抑制対策を実施する場合は、事前に温度応力解析を実施する。解析を行う場合、マスコンクリートのひび割れ制御指針²⁾を用いるのが現状であり、一般に普及しているプログラムを含め、有限要素法[FEM]による熱伝導計算を基本としている。したがって、パイプ内の蒸気流の移動を利用したヒートパイプを一般のプログラムに適用するためには、クーリングを構成する各要素について、解析のための見かけ上の熱伝導率の設定が必要となる。

また、ヒートパイプを用いたパイプクーリングの検討を3次元FEMによる温度応力解析で行う場合、ヒートパイプ周囲の要素サイズが小さいため、解析モデルが煩雑となっている。そこで、解析モデルを簡素とするためヒートパイプを棒状の1次元要素で表せるように温度応力解析ソフト「ASTEAMACS」の改良を行い、その解析結果の検討を行った。

2. ヒートパイプとは

ヒートパイプ³⁾はパイプ内に冷却媒体となる少量の作動液が真空状態で密封されており、迅速な熱移動を可能としている。熱移動のスピードは銅棒の数十～数百倍の熱伝導率に相当し、その原理は路面融雪や電子機器の冷却などに広く利用されている。ヒートパイプの動作原理を図-1に示す。ヒートパイプの一方を加熱すると、作動液は蒸発し（潜熱吸収）、蒸気流は音速に近いスピードで低温部に移動する。低温部では蒸気が凝縮して液体となり熱を放出する（潜熱放出）。パイプの内部にはウィック（芯）が配置されており、ウィックの毛細管力や重力を利用して低温部の液体を高温部に還流する構造となっている。低温部の液体が高温部に還流することにより、作動液の熱の吸収と放出が連続して起こり、熱の移動が継続する。

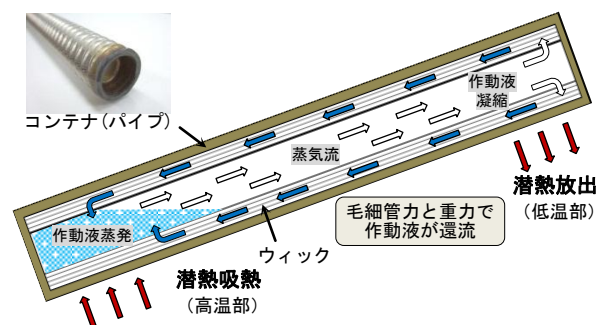


図-1 ヒートパイプの原理

パイプの材質と作動液の種類の間には適用温度に応じて種類があるが、本工法ではコンクリートの打設後の温度上昇量を考慮した温度範囲と扱い易さを考慮して、ステンレス製のコルゲートパイプ（外径 27mm）

キーワード マスコンクリート、ヒートパイプ、パイプクーリング、温度応力解析

連絡先 〒286-0825 千葉県成田市新泉 9-1 鉄建建設株式会社 研究開発センター TEL 0476-36-2334

をコンテナとし、作動液にはエアコン等にも使われている冷媒 R134 a を用いたヒートパイプを使用した。

3. 施工概要

ヒートパイプを利用したパイプクーリングは、コンクリート打込み後 4～6 時間後のコンクリートが硬化し始めた時点で、**図－2**に示すように、あらかじめ 50～75cm 間隔に埋設した直径 50mm 程度の鋼製シース管にヒートパイプを挿入し、その後に水を注入する。コンクリート内部の熱は、鋼製シースおよび水を介してヒートパイプに熱伝達され、空气中に放出される。

また、ヒートパイプの空气中に突出した部分を扇風機等で送風することにより、放熱を促進してヒートパイプの熱移動作用を増強すると、コンクリートのクーリング効果が高くなる。従来のパイプクーリングでは大量の水と冷却装置等のプラント設備が必要であるが、本工法はプラントが不要であるため低コストとなる。また、従来工法では、循環に必要な大量の水の確保、および排水方法が問題となり、施工できる現場に限られていた。本工法は大量の水の調達が困難な現場や小規模な工事においても適用が可能である。

ヒートパイプは繰返しの使用が可能であるため、RC 橋脚等の多ロットのコンクリート打込みのある現場ではコスト低減効果を得やすい。また、施工中は水温の調整等の管理が不要であるため、施工の省力化も図れる。

4. ヒートパイプの適用性の確認

コンクリートの水和熱による温度上昇を、ヒートパイプによりクーリングすることの適用性について、模型試験体を製作し確認試験を行った。

確認試験は、ヒートパイプの有無により、コンクリート試験体の水和熱による温度上昇の違いを計測してヒートパイプのクーリングに関する適用性を確認した。

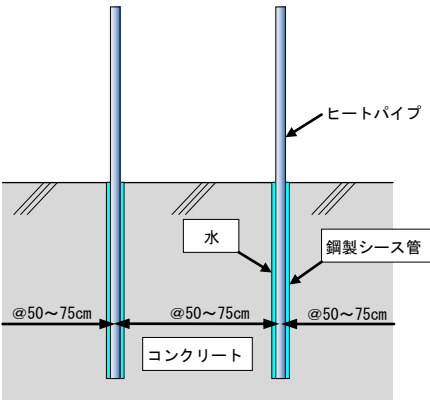
4. 1. 模型試験体および計測概要

模型試験体はクーリング無し（試験体 No. 1）とクーリング有り（試験体 No. 2）の 2 体とし比較検討を行った。ヒートパイプによるクーリングを行った試験体 No. 2 の形状寸法を**図－3**に示す。試験体寸法は 1m×1m×高さ 1.5m とし、側面および底面は型枠＋断熱材としたマスコンクリートを模擬したものである。断熱材は発泡スチロール（厚さ 50mm）で、型枠の内側に設置した。橋脚等の一般的なコンクリート構造物を想定し、コンクリート温度が最大 70℃程度となるよう**表－1**の配合とした。

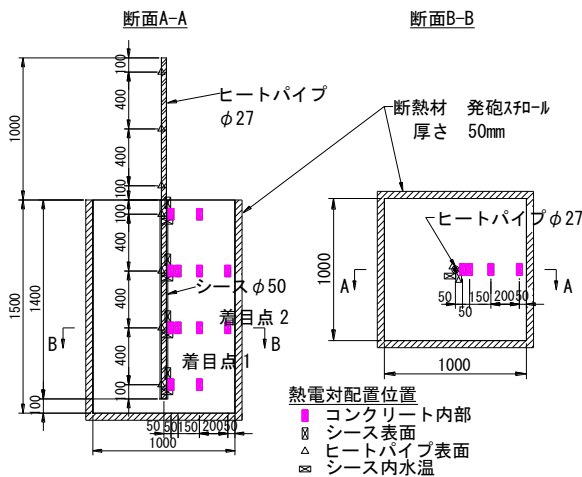
コンクリート打込み後、鋼製シース管にヒートパイプを挿入した。計測は、熱電対を用いてコンクリート内部・ヒートパイプ表面・シース表面の温度およびシース内の水温を測定した。なお、室内で試験を行い外気温は 20℃一定となるように空調を行った。

4. 2. 実験結果

試験体断面 A の最高温度分布図を**図－4**に示す。クーリングの有無で試験体の最高温度分布を比較すると、ヒートパイプの周囲の温度の低下が確認できる。試験体中心部の着目点 1 のコンクリート温度を比較すると、試験体 No.1 が 74.1℃であるのに対し、試験体 No.2 のヒートパイプ周囲の温度は 65.1℃であった。試験体 No.2 でコンクリート温度が最大となる着目点 2 の温度履歴を試験体 No.1 の温度履歴とともに**図－5**に示す。



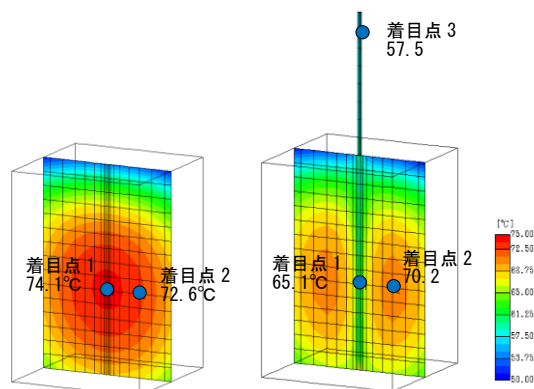
図－2 工法概要図



図－3 試験体形状図(試験体 No. 2)

表－1 配合表

セメント 種類	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	セメ ント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤
N	20	44.2	42.4	190	430	689	963	4.3



試験体 No. 1 クーリング無し 試験体 No. 2 クーリング有り

図-4 最高温度分布図(断面A)

着目点 2 では最高温度時にクーリングにより 2.4°C の温度差が確認できた。その後も温度差が拡大しており、ヒートパイプは、クーリングの実施期間中作動し続け、放熱が持続してコンクリート温度の上昇を抑制できることが確認できた。

これらの試験結果より、コンクリートの温度上昇の抑制にヒートパイプが有効であることが確認できた。

4. 3. 解析用物性値の設定

ヒートパイプを利用したパイプクーリングを温度解析に適用する場合、ヒートパイプの熱移動特性およびシース内の水の熱伝導特性を考慮する必要がある。そこで、一般的な温度応力解析用プログラムでヒートパイプの冷却効果を評価するために、ヒートパイプおよびシース管内の水の見かけの熱伝導率を試験結果から逆解析して算定した。すなわち、模型試験体で得られた計測温度結果を用いて、試験体 No.1 を基準とし、試験体 No.2 との温度差をヒートパイプによるクーリングの影響としてヒートパイプに関する解析用の物性値を求めた。

温度解析モデルを図-6 に示す。モデル上のヒートパイプおよびシース内の水については、固体要素として見かけの熱伝導率を与えて評価することとした。解析に用いた熱物性値および境界条件を表-2 に示す。なお、計測結果で求められなかった物性値については、指針 2) に示されている一般的な値を用いた。図-7 の最高温度分布図では、フィッティングで特に着目した断面 B の実測値と解析結果を併せて示している。

ヒートパイプの見かけの熱伝導率は 40000W/mK とし、密度および比熱については銅と同じとした。

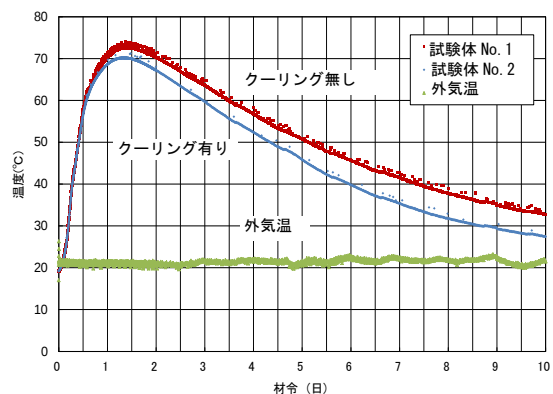


図-5 温度履歴の比較(着目点 2)

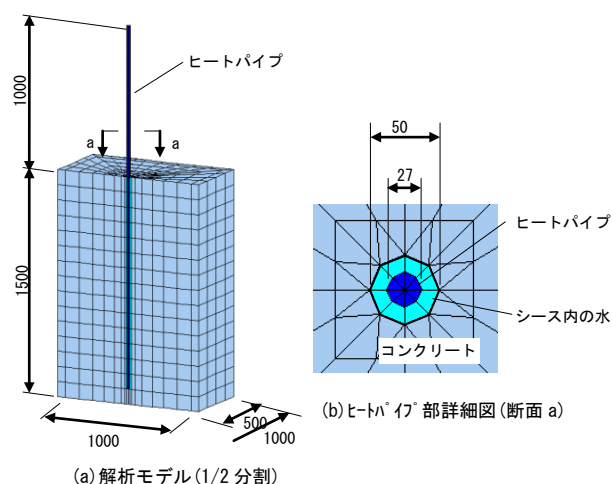


図-6 温度解析モデル

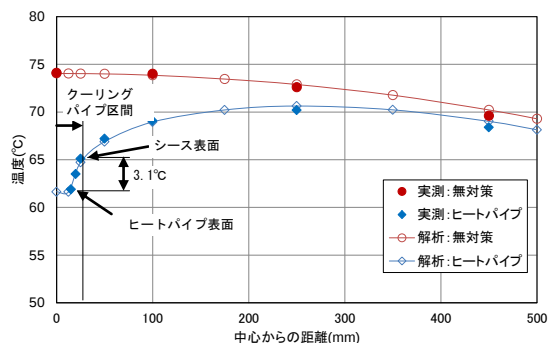


図-7 最高温度時温度分布(断面 B)

表-2 解析に用いた物性値

項目	物性値	備考
コンクリート	熱伝導率	2.7 W/mK
	密度	2400 kg/m ³
	比熱	1.15 J/g°C
	断熱温度特性	$Q(t) = Q_{\infty}(1 - e^{-\gamma t})$ $Q_{\infty} = 68.6, \gamma = 1.67$ 計測より近似
	打込み温度	18.0 °C 実績より
	型枠+断熱材	1.5 W/m ² °C 計測・逆解析より
ヒートパイプ	見かけの熱伝導率	40000 W/mK 銅の約 100 倍
	密度	8940 kg/m ³ 銅と同じ
	比熱	0.38 J/g°C 銅と同じ
	表面熱伝達率	20 W/m ² K 計測・逆解析より
	表面熱伝達率 扇風機による送風	70 W/m ² K 計測・逆解析より 風速 5m/s 程度
シース内の水	見かけの熱伝導率	1.8 W/mK 計測・逆解析より
	密度	1000 kg/m ³
	比熱	4.2 J/g°C
環境	外気温	20°C

これは、ヒートパイプの要素モデルとして銅の約 100 倍の熱伝導特性を持つ要素として評価したものである。ヒートパイプの熱移動特性は、温度条件や長さなどにより変化する³⁾が、ここでは一定値として設定した。

シース内の水の見かけの熱伝導率については、シース表面・シース内の水・ヒートパイプ表面の実測値の温度勾配に着目して解析値を求めた。その結果、見かけの水の熱伝導率は 1.8W/mK となり、水の一般的な熱伝導率の 3 倍の値となった。これは、水の対流の影響と金属シースの影響を含んだ値と考えられる。

ヒートパイプの気中放熱部の表面熱伝達率は $20\text{W/m}^2\text{K}$ であり、一般的なメタルフォームの熱伝達率²⁾より大きい結果となった。今回使用しているヒートパイプのコンテナはステンレス製のコルゲート管であるため表面積が大きいことによる影響と考えられる。

4. 4. 送風による放熱効果向上

コンクリート打設後 4 日過ぎより、試験体 No.2 のヒートパイプの表面露出部に扇風機を用いて送風を行い、放熱の促進を行った。扇風機の風速は約 5m/s であった。

断面 B に配置された熱電対が計測した温度変化を図-8 に示す。扇風機の送風によりヒートパイプ表面温度は 10°C 程度減少した。それに伴い、シース内の水温および周囲のコンクリート温度も低下していることが確認できた。これは、ヒートパイプの表面露出部の放熱を促進させたことで、コンクリート内部の吸熱も促進されクーリング効果が高まったためと考えられる。

気中部の表面熱伝達率について、表-2 の物性値を用いた解析モデルをもとに、同様の逆解析を実施したところ、今回の条件におけるヒートパイプの表面熱伝達率はおおよそ $70\text{W/m}^2\text{K}$ という数値を得た。

4. 5. ミストによる放熱効果の向上

ミストファンを用いたヒートパイプの放熱促進効果について、模型試験体を作成して比較検討を行った。試験体寸法は $1\text{m} \times 1\text{m} \times$ 高さ 1.1m とし、断熱型枠としたものである。

ミストファンによる噴霧状況を写真-1 に示す。ミストファンは 10m^3 水槽からポンプを用いて給水するもので、滴水状態から約 1 日程度連続運転が可能であった。水温は $15 \sim 20^\circ\text{C}$ 程度であり、ヒートパイプ表面は常に水滴が付いている状態であり、送風による風速は 3m/s 程度であった。試験体に配置された熱電対により計測された温度から求めた最高温度分布図を図-9 に示す。ヒートパイプの表面温度は 8.4°C 低下し、着目点 2 において 3.5°C のクーリング効果の向上がみられた。

本計測結果を用いて、ミストファンによる放熱促進を行っているヒートパイプの表面熱伝達率の逆解析を行ったところ、今回の条件における表面熱伝達率はおおよそ $100000\text{W/m}^2\text{K}$ という数値が得られた。

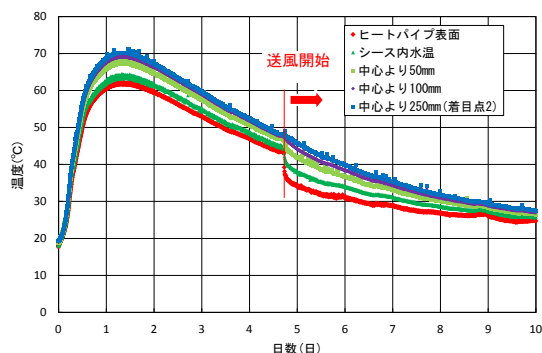


図-8 送風による温度変化 (断面 B)



写真-1 ミストファンによる噴霧状況

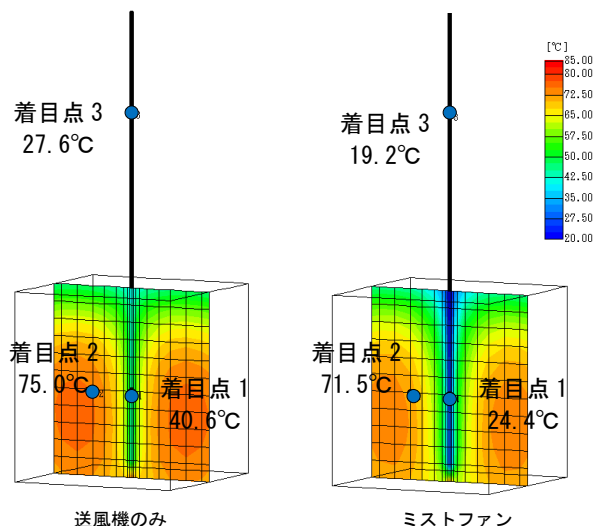


図-9 最高温度分布図 (中央断面)

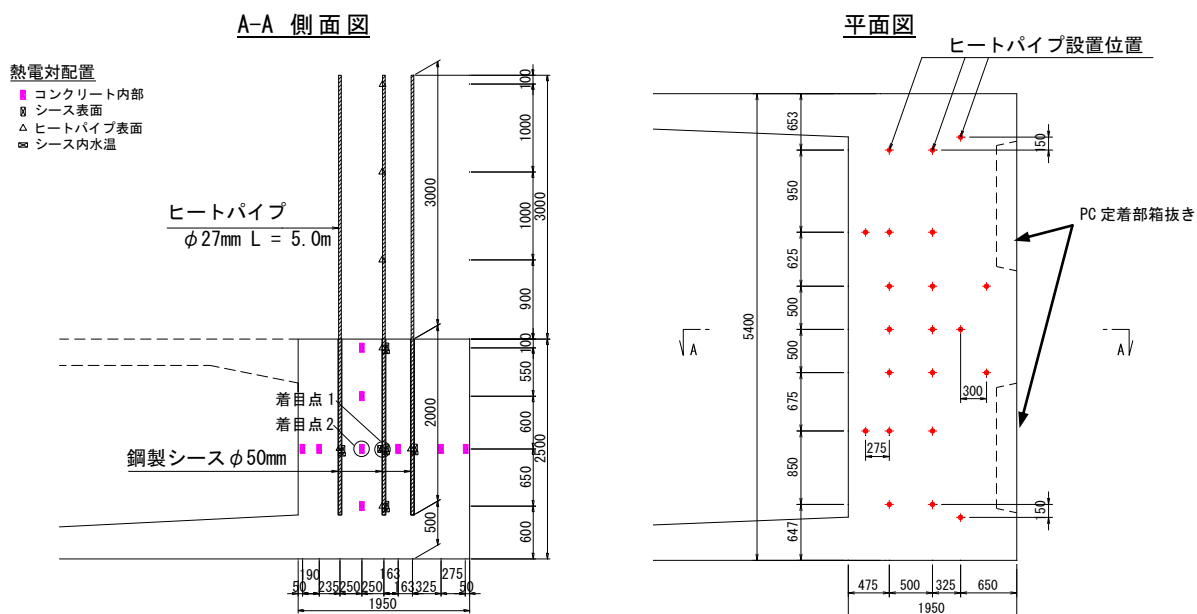


図-10 端部横桁ヒートパイプ・温度計測配置図

5. 実構造物での温度計測およびクーリング効果の検証

5.1. 概要

計測対象構造物は、国土交通省中国地方整備局「東広島・呉道路馬木高架橋 PC 上部工事」に含まれる 4 径間 PC ラーメン高架橋の端部横桁である。端部横桁は $2.5\text{m} \times 1.95\text{m} \times 5.4\text{m}$ のマッシブな構造であり、コンクリートも早強セメントを用いているため、横桁中心部の温度が 100°C 近くになる部位である。そのため、コンクリート内部と外部の温度差による表面ひび割れの発生が予想されていた。ヒートパイプを利用したパイプクーリングは、マッシブな端部横桁において温度上昇を抑制し、ひび割れ発生を抑制することを目的として行った。

5.2. 計測概要

計測対象横桁の寸法形状およびヒートパイプの配置を図-10 に示す。ヒートパイプの設置位置は、 500mm ピッチを基本とし、PC 鋼材・鉄筋に干渉しないように決定した。

対象が PC 構造物であり設計基準強度が $40\text{N}/\text{mm}^2$ で、予想される水和熱による温度上昇量が高い。そのため、ヒートパイプの長さは 5m とし、コンクリート内部に 2m 埋込み、気中の放熱区間を 3m とし、放熱面積を確保してヒートパイプの効率拡大を図った。また、ヒートパイプの放熱部に送風機による送風冷却も同時に実施した（写真-2）。ヒートパイプによるクーリングは、コンクリート打設後 4 時間後から 3 日間実施した。

ここで、比較対象となるクーリングを行わない「無対策ケース」がないため、温度解析により無対策のケースを求め、ヒートパイプを利用したクーリングの効果を確認することとした。

クーリングを行う端部横桁に熱電対を用い、コンクリート内部・ヒートパイプ表面・シース表面の温度、シース内の水温および外気温の計測を実施した。熱電対の配置は、図-10 に示すように、コンクリート打ち込み高さの中間で、横桁の中央断面（断面 A）に配置した。



写真-2 ヒートパイプを利用したパイプクーリング状況

5.3. 温度計測結果と解析値との比較

ヒートパイプを利用したクーリングを実施した端部横桁について、熱電対による計測結果と模型試験で得られたヒートパイプの熱物性値を用いた温度解析結果の比較を行った。解析は、コンクリートの発熱特性、熱的性質および強度特性はマスコンクリートのひび割れ制御指針²⁾に基づき、実測された外気温に対して行った。コンクリートの配合表を表-3に示す。

中央断面において最も高いコンクリート温度が測定された着目点2における無対策（解析結果）と実測値の最高温度の比較を表-4に示す。また、温度解析で得られた最高温度分布図を図-11に、着目点2の温度履歴を図-12に示す。ヒートパイプを設置した実測値と無対策の解析結果を比較すると、コンクリート内部の着目点2の低下量は13.4℃であった。ヒートパイプを利用したクーリングを行うことにより、端部横桁の水和熱による温度上昇が抑制されていることが確認できた。

図-13に中央断面（断面A）の最高温度の実測値

表-3 配合表

セメント 種類	粗骨材 の最大 寸法 (mm)	水セメ ント比 (%)	細骨材 率 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				水 W	セメ ント C	細骨材 S	粗骨材 G	高性能 AE 減水剤
H	20	38	42.1	170	447	717	996	4.92

表-4 着目点2における最高温度の比較

	着目点1 横桁中心	着目点2 コンクリート内部
無対策 解析 (A)	101.4	100.0
クーリング実施 実測 (B)	57.1	86.6
クーリング効果 (B) - (A)	—	-13.4

単位：℃

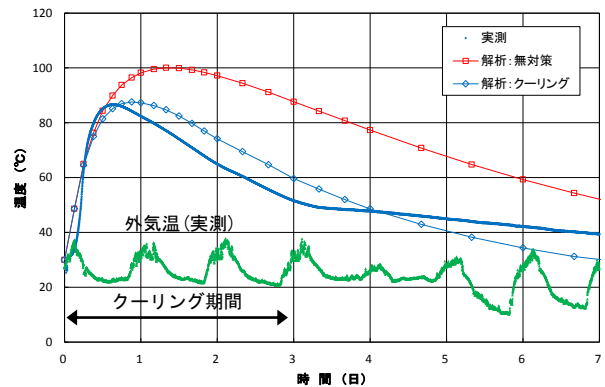


図-12 温度履歴の比較(着目点2)

無対策

クーリング実施

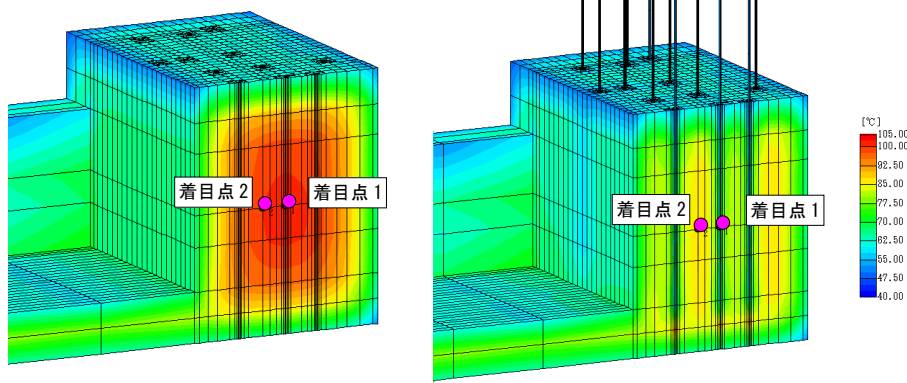


図-11 最高温度分布図

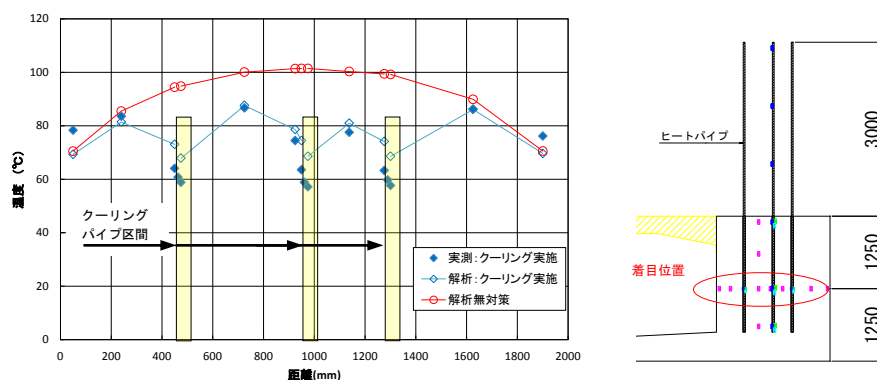
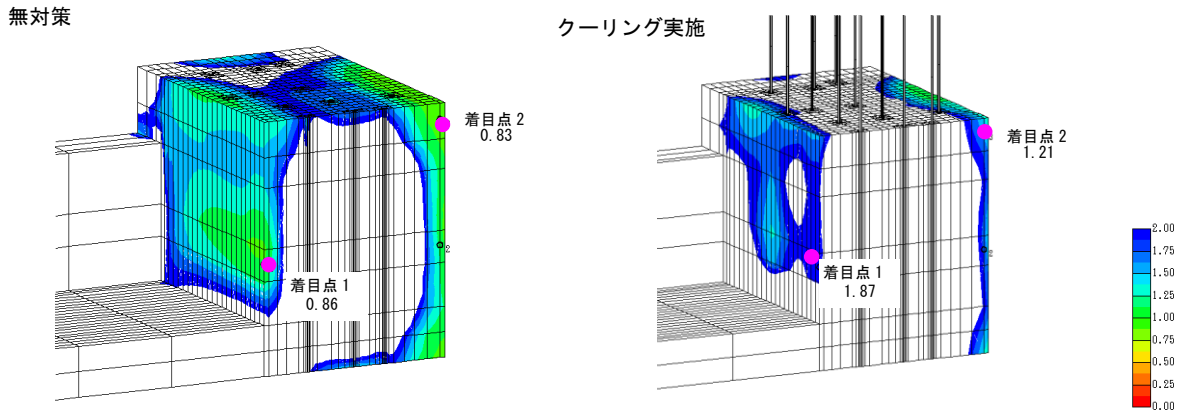


図-13 最高温度分布の比較(断面A)



図－15 最小温度ひび割れ指数の分布

とそれに対応する温度解析結果を比較して示す。ヒートパイプを使用した場合の温度解析結果と熱電対による実測値は概ね一致しており、今回採用した温度解析の手法は妥当と考えられる。ただし、今回の解析用物性値は少ない測定結果より求めているため、今後はさまざまな環境条件に対応できるよう検証を行っていきたい。

5. 4. ヒートパイプによるクーリングの効果

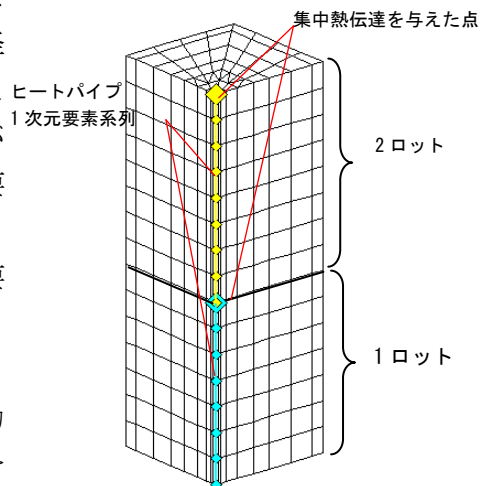
解析結果として、最小温度ひび割れ指数の分布を図－15 に示す。図をみると、ヒートパイプを設置していない無対策の場合は、表面の大部分で指数が 1.0 を下回っている。一方、ヒートパイプを設置した場合は指数が大きくなり、指数が小さくなりやすい隅角部の着目点 2 でもひび割れ指数は 1.21 となる。また、ひび割れ発生確率が 5%以下とされる 1.81 を上回る部分も拡大している。これらの結果から、ヒートパイプを利用したパイプクーリングにひび割れ抑制効果のあることが確認できた。

6. ヒートパイプ 1 次元要素の導入

6. 1. ヒートパイプ 1 次元要素の概要

ヒートパイプを用いたパイプクーリングを 3 次元 FEM による温度応力解析で行う場合、50mm 程度の鋼製シースに直径 27mm のヒートパイプを挿入し、シース内に水を充填させることから、図－6 に示すようにヒートパイプ周囲の解析モデルが煩雑となっている。そこで、ヒートパイプを棒状の 1 次元要素としモデルが簡素になるようにした。

従来の 3 次元 FEM 温度応力解析システムに、節点トラス要素に 2 節点熱伝導の特性値（等価断面積・熱伝導率・熱容量）を指定可能とすることによりヒートパイプ 1 次元要素とした。ヒートパイプ 1 次元要素は熱伝導率・熱容量は一定値の入力となるが、稼動時間を指定することにより、ヒートパイプを挿入しクーリングを実施している期間を設定できる。



図－16 ヒートパイプ 1 次元要素のモデル例

解析ソフトの FEM 解析システムの仕様では 1 次元要素は、3 次元要素モデル内しか配置することができない。そのため、ヒートパイプの空气中に突出した放熱区間は、図－16 に示すモデル表面の 1 次元要素の端部境界に集中熱伝達率 h を与え、ヒートパイプの放熱を模擬することとした。集中熱伝達率 h は、次式より算出する。

$$h = A_0 \times \eta \quad (\text{W}/^\circ\text{C})$$

ここで、表面熱伝達率 : η ($\text{W}/\text{m}^2\text{C}$)

放熱面積 : $A_0 = \pi R \times L + \pi R^2/4$ (m^2)

ヒートパイプ直径 : R (m)

ヒートパイプ放熱区間長 : L (m)

集中熱伝達率 h はヒートパイプ 1 次元要素系列の端部境界上の節点に与え、熱伝達と外気温の時間変化を可能としている。なお、次の打設ロットとしてコンクリート要素が出現し集中熱伝達率を与えた点が端部境界でなくなると、その系列の 1 次元要素の熱伝導機能は停止する。

6. 2. 解析結果の比較検討

マスコンクリートを模擬した模型試験体の温度計測結果を例に、ヒートパイプ 1 次元要素を用いた簡易モデルと従来モデルの温度解析結果の比較を行った。ヒートパイプ等の熱物性値は模型試験で得られたものを使用した。

温度解析より得られた従来モデルと簡易モデルの最高温度分布図を図-17 に示す。ヒートパイプ 1 次元要素を使用した簡易モデルと従来モデルの温度分布は概ね一致しており、試験体の最高温度を比較すると、従来モデルおよびヒートパイプ 1 次元要素を用いた簡易モデルともに 70.6℃であった。

図-18 に断面 A の最高温度時の温度分布を示す。クーリングパイプの周囲のコンクリート温度はいずれの解析モデルの結果も実測値との差異は小さい。ヒートパイプ 1 次元要素を用いたモデルは、シース内の水は考慮していないが、従来モデルと概ね同等の温度解析結果が得られた。

7. まとめ

コンクリートの温度上昇抑制のためのヒートパイプの適用について検討し、以下の知見を得た。

- (1) ヒートパイプを利用したパイプクーリングは、コンクリートの水和熱による温度上昇量の低減が可能であり、ひび割れ抑制対策として有効な手段である。ヒートパイプの表面露出部に送風およびミストの噴霧などの放熱を促進させることにより、クーリング効果を向上させることができる。
- (2) ヒートパイプによるパイプクーリングの温度解析は、ヒートパイプの熱移動のメカニズムやシース内の水の対流といった要素を見かけの熱伝導率に置き換えることで簡易的に解析できる。
- (3) ヒートパイプ 1 次元要素を導入することにより、より容易にヒートパイプを用いたパイプクーリングの温度応力解析モデルを作成できるようになった。気中の放熱区間は、ヒートパイプ 1 次元要素の端部境界に表面熱伝達率や長さを考慮した集中熱伝達率を用いて表現した。
- (4) ヒートパイプ 1 次元要素を用いた簡易モデルは、シース内の水は考慮していないが、従来モデルと概ね同等の温度解析結果が得られることが確認できた。

参考文献

- 1) 神崎浩二, 吉本靖俊, 樋口晃, 村上裕治: マスコンクリート構造物の温度ひび割れ制御, コンクリート工学年次論文集, Vol. 28, No. 1, pp. 1283-1288, 2006. 6
- 2) (社) 日本コンクリート工学協会, マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008
- 3) 高岡道雄, 馬渡恒明, 坂谷益司, 望月正孝, 益子幸一, 伊藤雅彦: 長尺ヒートパイプの開発とヒートパイプの応用製品, 藤倉電線技報, 第 68 号, pp50-63, 1984. 12

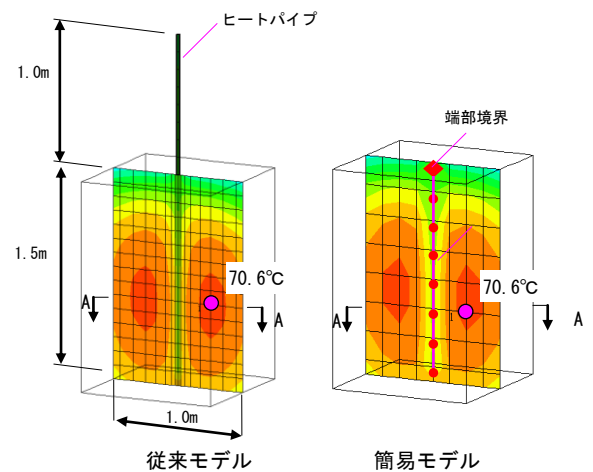


図-17 最高温度分布図の比較

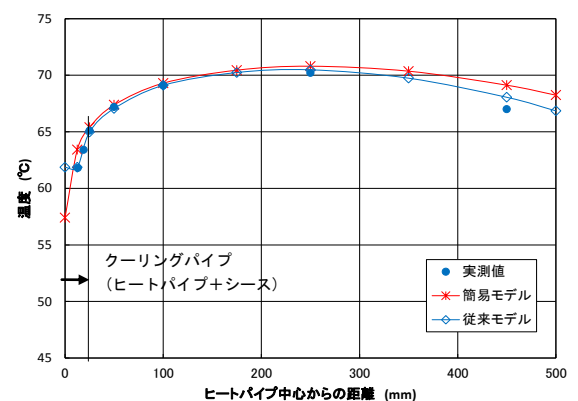


図-18 最高温度時温度分布(断面 A)