

報告 ヒートパイプを利用したパイプクーリング

伊吹 真一^{*1}・船本 恵一^{*2}・前田 智宏^{*3}・飯塚 隆博^{*3}

要旨: マスコンクリートにおけるひび割れ抑制対策として、断面内に熱移動量の大きなヒートパイプを設置し、コンクリートの水和熱による温度上昇を抑制する方法を行った。ヒートパイプは作動液の気化により熱移動が発生するメカニズムであり、一般的なコンクリートの温度応力解析への適用には熱伝導率を設定することが必要となる。実構造物での計測および模型実験を通して、ヒートパイプを利用したパイプクーリングによるコンクリートの温度低下量を測定し、解析用物性値の提案とそれを用いた解析でのひび割れ抑制効果の検証を実施した。

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

1. はじめに

近年、進められている工事は耐久性の観点から、コンクリートの初期欠陥を減少させることが求められている。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問題となるケースが増えている。

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、冷却水の循環管理・温度調整を行う装置が不要になり、大量の水の調達に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。

一般に、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している。解析を行う場合、マスコンクリートのひび割れ制御指針¹⁾を用いて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要素について見かけ上の熱伝導率の解析用値の設定が必要である。

2. ヒートパイプを利用したパイプクーリング

2.1 ヒートパイプとは

ヒートパイプ²⁾とはパイプ内に冷却媒体が密封されたもので、迅速に熱を輸送することが可能である。その熱移動スピードは銅棒の数十～数百倍の熱伝導率に相当し、その原理は電子機器の冷却などに一般的に利用されている。パイプには少量の作動液が真空状態で封入されてい

る。今回使用するヒートパイプの作動液は、エアコン等にも使われている冷媒 R134 a である。動作原理は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る。低温部では蒸気が凝縮して液体熱を放出する(潜熱放出)。この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。パイプの内部にはウィックが配置されており、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。

パイプの材質と作動液の種類組み合わせには、適用温度範囲に応じて種類があるが、本方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、扱いやすさを考慮して、ステンレス製のコルゲートパイプ(外径 27mm)をコンテナとし、作動液に R134 a を使用したヒートパイプを用いた。

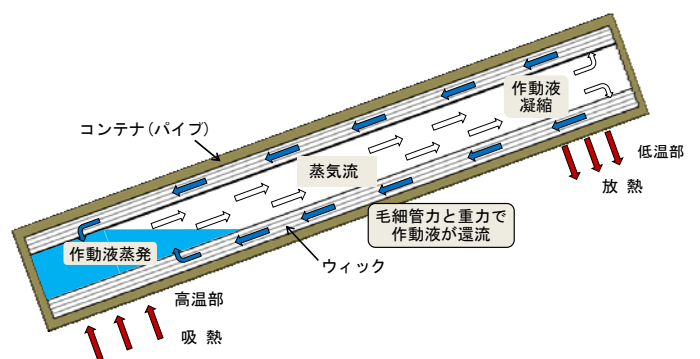


図-1 ヒートパイプの原理

*1 鉄建建設株式会社 土木本部 エンジニアリング部 工修 (正会員)

*2 国土交通省 中国地方整備局 広島国道事務所

*3 鉄建建設株式会社 大阪支店 東広島 PC 作業所

2.2 施工概要

パイプクーリングは一般に重力式コンクリートダムに適用されることが多いが、近年は鉛直に配置したシース管に冷却水を循環させる方法で橋脚やボックスカルバート³⁾に適用される事例が増加している。

ヒートパイプを利用したパイプクーリングは、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、コンクリート内部の熱を空气中に放出する方法である。ヒートパイプは、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鋼製シース管内に挿入し、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る。

また、ヒートパイプの空气中に突出部分を扇風機等で送風することにより、放熱を促進し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。

3. ヒートパイプの適用性の確認

3.1 概要

コンクリートの水和熱による温度上昇抑制(クーリング)のヒートパイプの適用性について、模型試験体を製作し確認試験を行った。コンクリート試験体のヒートパイプの有無により、ヒートパイプの放熱によるコンクリートの水和熱による温度上昇の低下量を確認し、ヒートパイプの適用性を確認した。

3.2 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。断熱材は発砲スチロール(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。

ヒートパイプは鋼製シース管(直径50mm)にコンクリート打込み後に挿入した。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。

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(%)	単用量(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

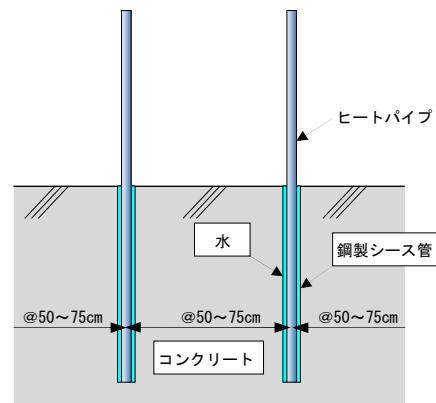


図-2 ヒートパイプを利用したパイプクーリングの概念図

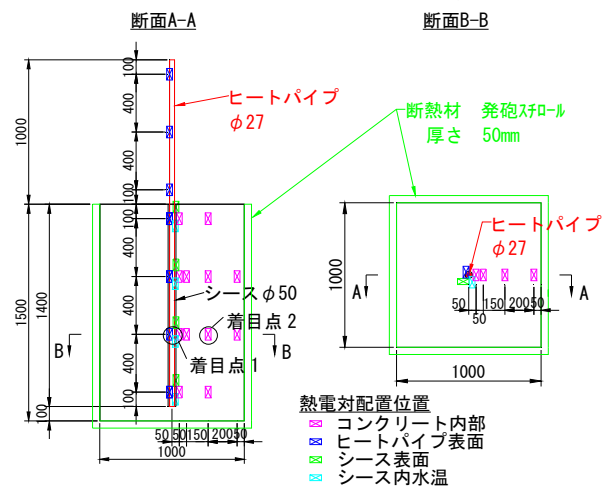
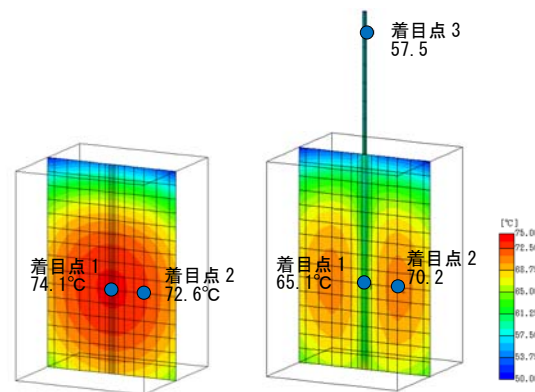


図-3 試験体形状図(試験体 No. 2)



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)

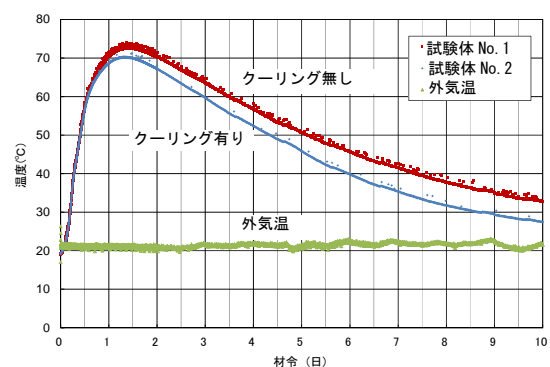


図-5 温度履歴の比較(着目点 2)

3.3 実験結果

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。クーリングの有無の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 の温度を比較すると、試験体 No.1 で 74.1°Cであるのに対し、それに対応する試験体 No.2 のヒートパイプ周囲のコンクリート温度は 65.1°C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 の温度履歴を図-5 に示す。着目点 2 では最高温度時においてはクーリングにより 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、クーリング実施期間にわたりヒートパイプは作動し続け、放熱が持続しコンクリート温度の上昇を抑制できていることが確認できた。

また、図-6 に示す断面 B の最高温度分布では、ヒートパイプ表面とシース表面の温度の差は 3.1°Cであり、コンクリートからヒートパイプ表面まで連続的に温度低下が見られるので、シース内の水が熱移動の障害となっていない。

ヒートパイプを用いた簡易なパイプクーリングについて、模型試験体を用いた試験より、コンクリートの温度上昇の抑制（クーリング）に効果があることが確認できた。

3.4 解析用物性値の設定

ヒートパイプを利用した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達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で算定した。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、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-7 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。計測結果で求められなかった物性値については、指針¹⁾に示されている一般的な値を用いた。

図-6 にフィッティングで特に着目した断面 B の最高温度時の実測と解析の比較した温度分布図を示す。

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。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

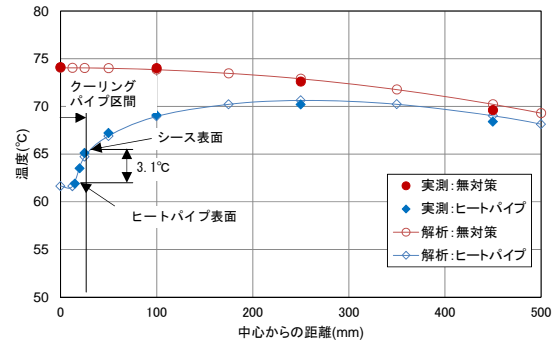


図-6 最高温度時温度分布(断面 B)

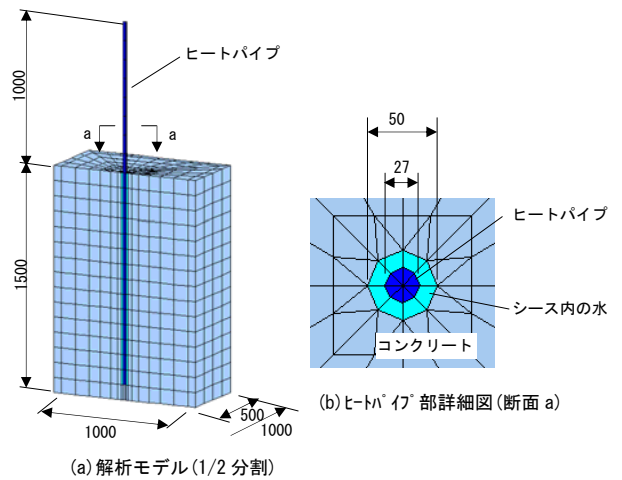


図-7 温度解析モデル

の熱輸送特性は、温度条件や長さなどにより変化する²⁾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

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
シース内の水	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
	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	
環境	比熱	4.2 J/g°C	
	外気温	20°C	

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
20W/m²K であり、一般的なメタルフォームの熱伝達率¹⁾
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。

3.5 ヒートパイプの放熱効果向上

コンクリート温度のピークを過ぎた状態からである
が、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℃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と考えられる。

これを、表-1 の物性値を用いた解析モデルをもとに、
気中部の表面熱伝達率について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
率はおおむね 70W/m²K という数値を得られた。

4. 実構造物での温度計測およびクーリング効果の検証

4.1 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 2.5m
×1.95m×5.4m のマッシュな構造であり、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

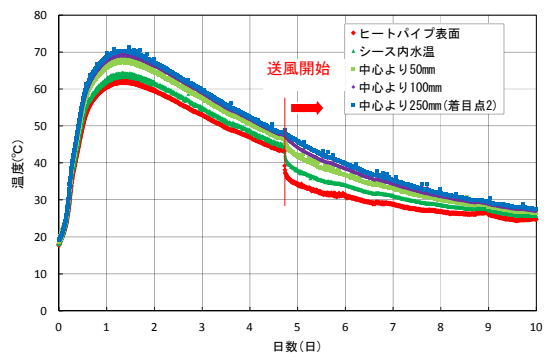


図-8 送風による温度変化（断面 B）

100℃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、
マッシュ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た。

4.2 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-9 に示す。ヒートパイプの設置位置は、500mm ピ
ッチを基本とし配置されている 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 40N/mm² 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
ヒートパイプの効率拡大を図った。また、ヒートパイプ
の放熱部において送風機による送風冷却も同時に実施し
た。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、温度解析上で無対策のケースを

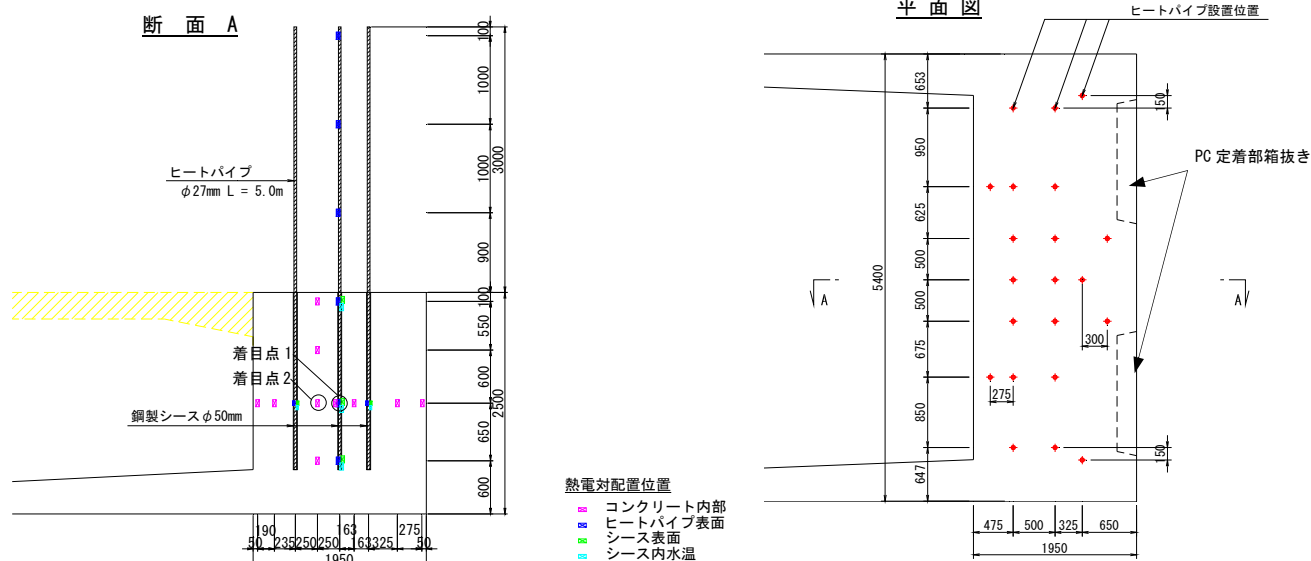


図-9 計測対象横桁の寸法形状およびヒートパイプの配置

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について計測を実施した。熱電対の配置を図-9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。

4.3 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使用した温度解析結果の比較を行う。解析において、コンクリートの発熱特性、熱的性質および強度特性についてはマスコンクリートのひび割れ制御指針¹⁾に基づいて行い、実測された外気温に対して解析を行った。コンクリートの配合表を表-2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における最高温度の比較を表-3に示す。また、温度解析で得られた最高温度分布図を図-10、着目点2の温度履歴を図-11に示す。

ヒートパイプを設置した実測値と解析で得られた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。



写真-1 ヒートパイプを利用したパイプクーリング状況

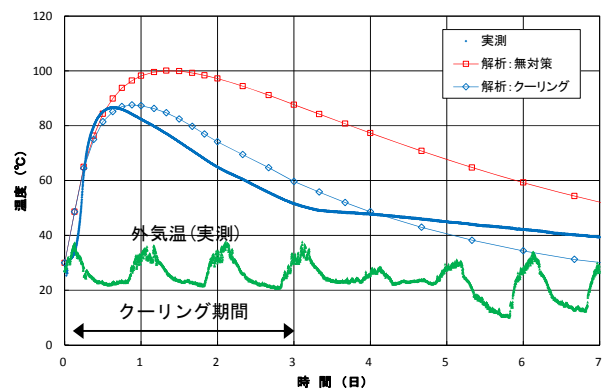


図-11 温度履歴の比較(着目点2)

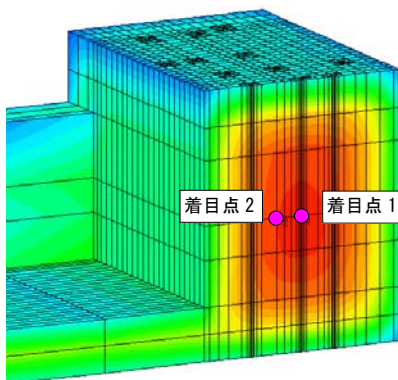
表-2 配合表

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-3 着目点2における最高温度の比較 単位：℃

	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

無対策



クーリング実施

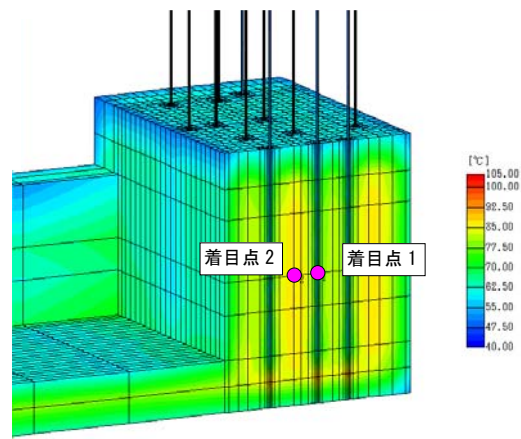


図-10 最高温度分布図

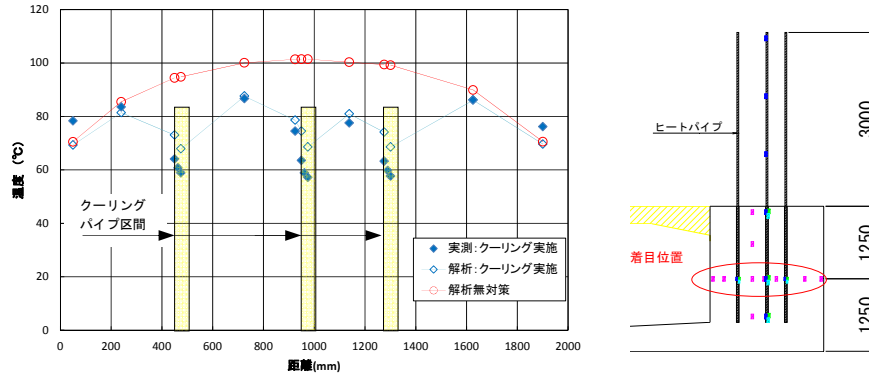


図-12 最高温度分布の比較 (断面 A)

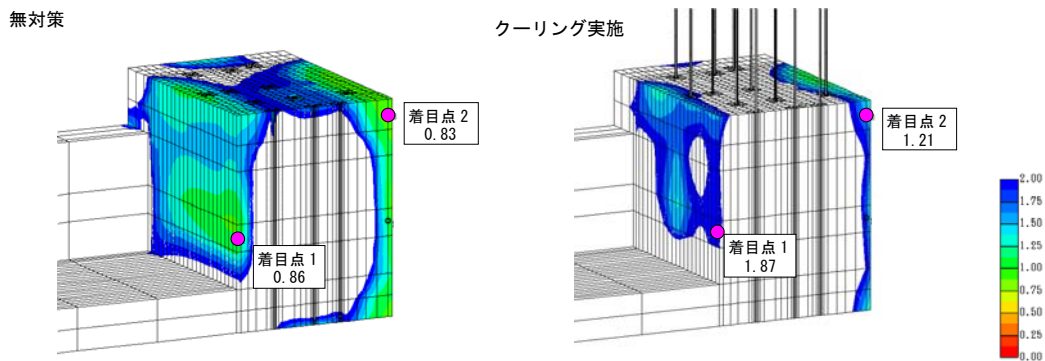


図-13 最小温度ひび割れ指数の分布

図-12 に中央断面 (断面 A) の最高温度の実測値と、それに対応する温度解析結果を比較したものを示す。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。

4.4 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-13 に示す。最小ひび割れ指数分布を見ると、ヒートパイプを設置していない無対策のケースでは、表面の大部分で指数が 1.0 を下回る値となっている。一方、ヒートパイプを設置したケースは指数が大きくなっており、指数の小さくなりやすい隅角部の着目点 2 において 1.21 であり、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た。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があることを確認できた。

5. まとめ

コンクリートの温度上昇抑制へのヒートパイプの適用について検討した結果、以下の知見が得られた。

- (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ことが確認できた。

- (2) ヒートパイプによるパイプクーリングの温度解析において、ヒートパイプの熱移動のメカニズムやシース内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) ヒートパイプの表面露出部に送風を行うことで放熱を促進させ、クーリング効果を向上させることができる。

今後は、放熱促進方法を改良することにより、より高いクーリング効果が期待できると考えられ、その検証を行っていく予定である。

参考文献

- 1) (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
- 2) 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
- 3) 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