

アルミ製ヒートパイプを用いたクーリング工法の適用と効果

高橋 直希 小島 秋*
平野 勝識 井手 一雄

概 要

マスコンクリートの温度ひび割れの対策の1つとして、アルミニウムで構成したヒートパイプを用いた簡易なクーリング工法(以下、本工法)を開発した。これまでに、室内実験においてコンクリート温度の低減温度を確認し、アルミ製ヒートパイプを用いた場合の解析手法を確立した。本稿では、アルミ製ヒートパイプを用いたクーリング工法の実構造物への適用の概要と適用結果を示す。

本工法を実構造物へ試験的に適用した結果、コンクリートの温度が低減し、ひび割れ指数が改善した。さらに、ひび割れの発生も認められなかったことから、本工法がマスコンクリートの温度ひび割れ制御対策として有効であると考えられる。また、アルミ製ヒートパイプの物性値を適切に設定することで、本工法適用時のコンクリート温度を精度よく推定できることがわかった。

Application and effect of cooling method using heat pipe made of aluminum materials

Abstract

As one measure to prevent cracks due to thermal stress of mass concrete, we have developed a cooling method using a heat pipe made of aluminum materials. So far, in order to confirm the cooling effect of the aluminum heat pipe, a performance test of the aluminum heat pipe alone and cooling were performed on a test specimen simulating mass concrete. In addition, when applying this method, as it is necessary to accurately estimate the temperature of concrete in advance, an analysis method was also examined. This paper presents an overview of the application of the cooling method using aluminum heat pipes to actual structures and the results of the application.

As a result of experimentally applying this cooling method to an actual structure, the concrete temperature decreased and the cracking index improved. Furthermore, since no cracks were observed, it is considered that this is an effective method for controlling temperature cracks in mass concrete. In addition, it was found that by appropriately setting the physical properties of the aluminum heat pipe, it is possible to accurately estimate the concrete temperature when this method is applied.

キーワード: マスコンクリート、ヒートパイプ、
アルミニウム、クーリング工法

*1 首都圏土木支店

§1. はじめに

マスコンクリートの温度ひび割れの対策として、ヒートパイプを用いたクーリング工法が開発されている^{例えば、1~3}。著者らは、ヒートパイプの高い熱伝導性を生かすため、熱伝導性が高く、形状の自由度が有り軽量であるアルミニウム材料を用いて、集熱性と放熱性を向上させた新たなヒートパイプ(以下、アルミ製ヒートパイプ)を開発した^{2,3}。これまでに、室内実験において、コンクリート温度の低減温度を確認し、アルミ製ヒートパイプを用いた場合の解析手法を確立した。

本稿では、アルミ製ヒートパイプを用いたクーリング工法(以下、本工法)の実構造物への適用の概要と温度計測結果を示す。また、計測した温度に基づいて実施した事後解析と構造物の目視観察によって検証した本工法の温度ひび割れ制御効果も示す。

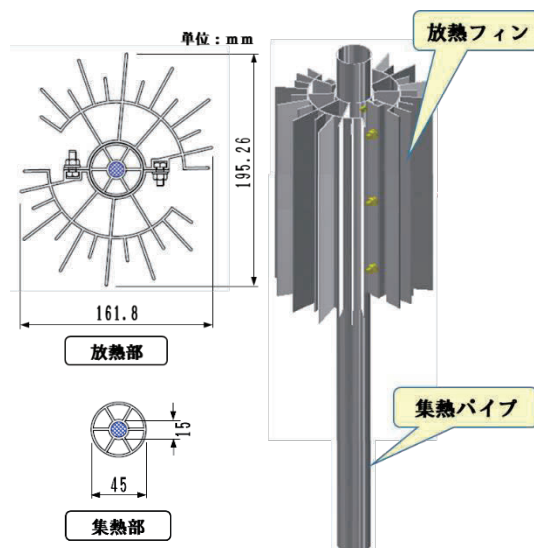


図1 アルミ製ヒートパイプの構成

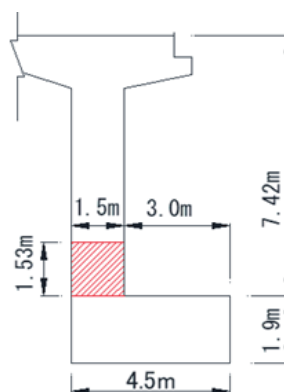


図2 本工法の適用箇所

表1 コンクリートの配合表

Gmax (mm)	セメント 種類	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
				W	C	膨張材	S	G
20	BB	49.2	42.2	159	303	20	761	1073

§2. アルミ製ヒートパイプ

ヒートパイプは、金属製のパイプ内部に作動液と呼ばれる少量の液体が密封されている。この作動液が高温で蒸発し、低温で凝縮するというサイクルにより、大きな熱量を輸送できる伝熱素子である。このように、ヒートパイプは熱を輸送するためのエネルギーが不要なため、メンテナンスも不要である。

迅速な熱移動を可能とするヒートパイプの特長を活かしたクーリングを行うためには、外部から熱が伝わる部分(以下、入熱部)と移動した熱を放出する部分(以下、放熱部)の性能が重要である。クーリングの性能は、入熱部および放熱部の形状や材質によって変化すると考えられる。ヒートパイプの形状は、筒状や扁平形などがあるが、外気との接触面積が小さい場合には、クーリング性能が低下する恐れがある。また、使用する材質の熱伝導率が小さい場合にも、クーリング性能が低下する恐れがある。

このため著者らは、形状加工がしやすく、熱伝導性が高い金属であるアルミニウムを使用したアルミ製ヒートパイプを開発した。アルミ製ヒートパイプの構成を、図1に示す。アルミ製ヒートパイプの放熱部は、形状の自由度が高く、軽量であるアルミニウムの特長を生かし、表面積を増やして放熱性能を高めるためにフィン構造とした。ヒートパイプのパイプの径はφ15mm、材質はアルミ材A1050とし、作動流体はHFC-134aとした。集熱パイプおよび放熱フィンの材質はアルミ材A6063とした。

ヒートパイプの熱輸送には動力が必要ないことから、本工法は、脱炭素社会の実現に貢献すると考えられる。

また、ヒートパイプはメンテナンスフリーで、外的な損傷や劣化がない限り半永久的に使用できるため、ランニングコストも不要となる。

§3. 適用概要および計測概要

3.1 対象構造物

本工法を適用した構造物は、橋長19.8mのPRCポータルラーメン橋の橋台堅壁部の一部(幅約1.5m、高さ約1.5m、長さ約14.6m)であり、フーチングに拘束されたマスコンクリートとなるため、温度応力ひび割れの発生が懸念された。適用箇所(図中の赤色ハッチング箇所)を、図2に示す。使用したコンクリートの配合表を、表1に示す。

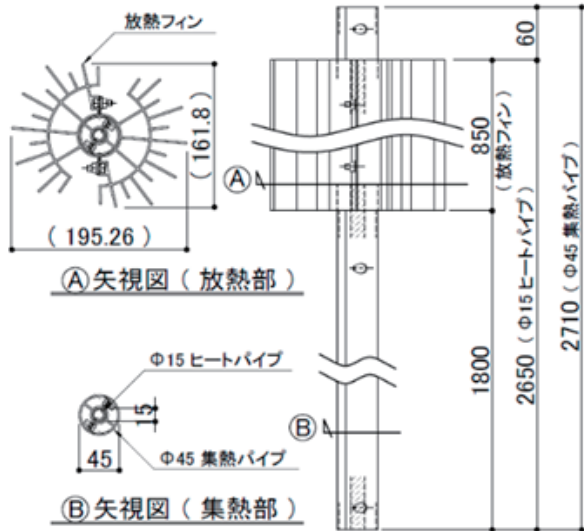


図3 アルミ製ヒートパイプの形状および寸法

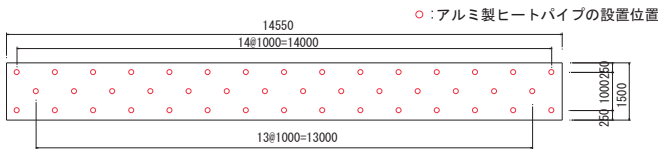


図4 アルミ製ヒートパイプの挿入位置(平面図)

3.2 クーリング工法概要

今回使用したアルミ製ヒートパイプは全長2.71mであり、φ15mmのヒートパイプとφ45mmの集熱パイプを一体化した棒状の構造とし、全長2.71mのうち上部の0.85mには放熱フィンを取り付けた構造とした。使用したアルミ製ヒートパイプの形状および寸法を、図3に示す。

本工法における施工の流れを以下に記す。

- ①コンクリート打込み前にあらかじめシース管を配置し、コンクリートの打込みや締固めなどによって移動しないよう鉄筋などに堅固に固定する。
- ②コンクリートの打込み後、アルミ製ヒートパイプをシース管内に挿入し、シース管内の隙間は水で充填する。
- ③クーリング終了後はアルミ製ヒートパイプを引き抜き、コンクリート内に残置したシース管内には無収縮モルタルを充填する。

本工法の適用に際し、アルミ製ヒートパイプの挿入位置やクーリング期間は、コンクリートの配合、セメントの水和発熱特性、コンクリートの力学特性、施工現場の気象条件、施工方法などを考慮した3次元有限要素法による温度応力解析によって決定した。今回のアルミ製ヒートパイプの挿入位置を、図4に示す。また、クーリングの期間は5日間とした。シース管設置状況およびクーリングの実施状況を、写真1および写真2に示す。



写真1 シース管設置状況

写真2 クーリング状況

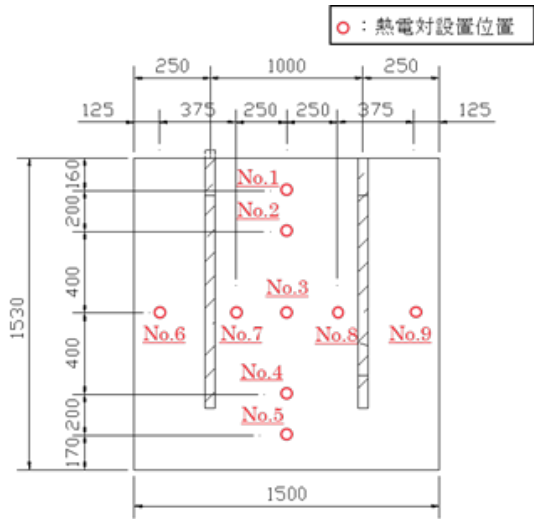


図5 温度計測位置

3.3 温度計測概要

本工法の温度低減効果の確認は、コンクリートの温度計測結果と、本工法を適用しなかったと仮定した場合の温度解析結果との比較により行った。また、コンクリートの温度計測結果と、室内試験で得られた本工法の解析用値を適用した場合の温度解析結果を比較検討し、解析用値の妥当性を検証した。

温度は、熱電対によってコンクリート温度および外気温を測定した。計測点数は構造物中央断面で9箇所および外気温で1箇所とした。構造物中央断面の計測位置を、図5に示す。なお、計測期間は14日間とした。

§4. 温度計測結果および効果検証

4.1 温度計測結果

コンクリート打込みからの温度履歴を、図6および図7に示す。ここで、図6は高さ方向(No.1~5)、図7は橋軸方向(No.3, 6~9)の計測結果である。

いずれの計測箇所においても、コンクリートの温度は、

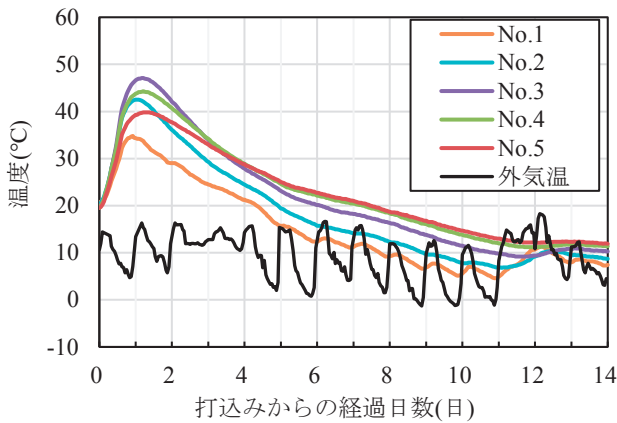


図6 温度履歴(高さ方向(No.1~5))

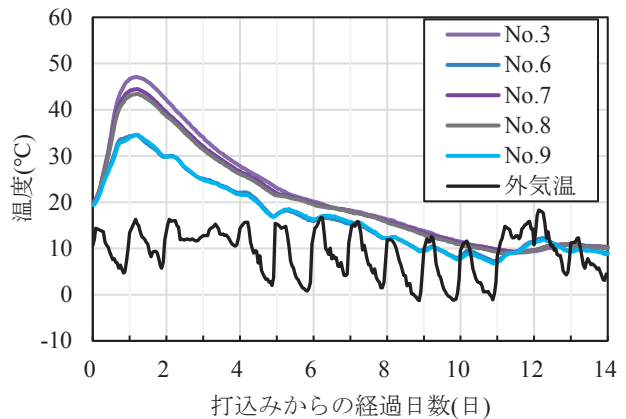


図7 温度履歴(橋軸方向(No.3, 6~9))

打込みから1~1.5日程度で最高温度に達し、その後は徐々に降下している。コンクリートの最高温度は、材齢1.2日で47.1°C(No.3の箇所)であった。

表面に近い箇所(No.1, No.6, No.9)の最高温度は35°C程度であった。また、他の箇所に比べて早期に外気温と同程度の温度となった。打込みから12日前後で温度が高くなっているが、外気温が高くなったことでコンクリート表面の温度が高くなったためと考えられる。フーチングに近い箇所(No.5)の最高温度は40°C程度と、No.1よりも高い温度であり、温度の降下は緩やかであった。

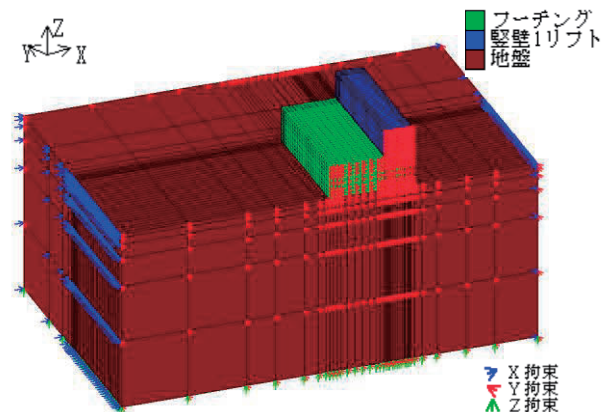


図8 解析モデル

4.2 検証概要

本工法による温度ひび割れ制御効果は、コンクリート温度、コンクリート応力、ひび割れ指数および出来映えにより検証する。コンクリート温度、コンクリート応力およびひび割れ指数については、3次元有限要素法による温度応力解析を実施し、以下の項目の比較により検証した。

①コンクリート温度

- ・計測値
- ・本工法を適用しなかった場合の解析値(クーリング無)

②コンクリート応力

- ・温度計測結果に基づく解析値(クーリング有)
- ・本工法を適用しなかった場合の解析値(クーリング無)

③ひび割れ指数

- ・温度計測結果に基づく解析値(クーリング有)
- ・本工法を適用しなかった場合の解析値(クーリング無)

検証に用いた解析モデルを、図8に示す。温度解析には、現場で実施した簡易断熱温度上昇試験から得られた断熱温度上昇特性、実際のコンクリートの温度や外気温を反映した。

アルミ製ヒートパイプによる熱の輸送は熱伝導要素でモデル化し、外部への熱の排出は集中熱伝達でモデル化した。アルミ製ヒートパイプの解析条件を、表2に示す。その

表2 アルミ製ヒートパイプの解析条件

熱伝導率 (W/m°C)	集中熱伝達率 (W/°C)	クーリング期間 (日)
13,700	30.3	5

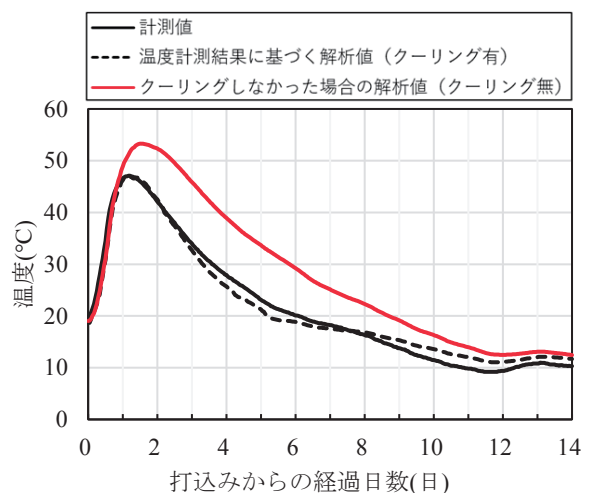


図9 温度履歴の比較(No.3)

他の解析条件については、コンクリート標準示方書[設計編]⁴⁾およびマスコンクリートのひび割れ制御指針⁵⁾に準拠して設定した。

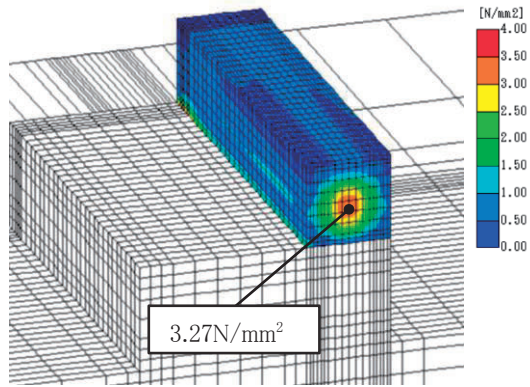


図10 主応力度分布

(本工法を適用しなかった場合の解析値(クーリング無))

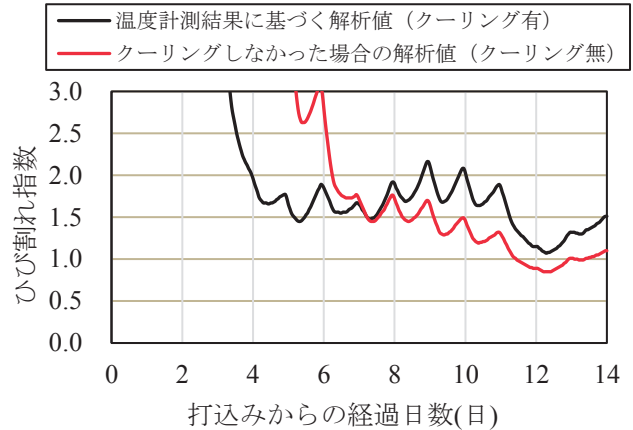


図12 ひび割れ指数履歴の比較

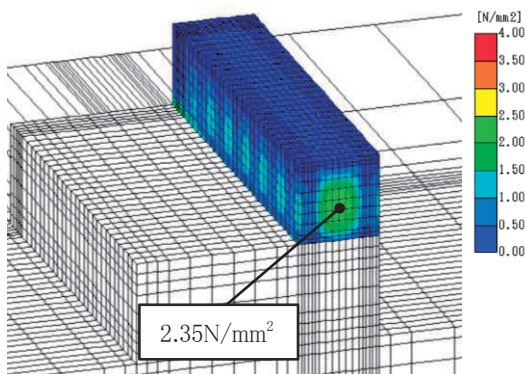


図11 主応力度分布

(温度計測結果に基づく解析値(クーリング有))

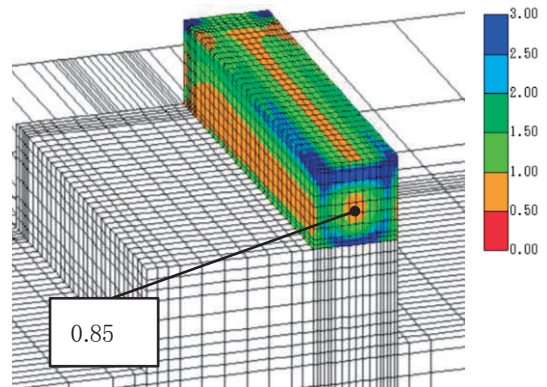


図13 ひび割れ指数分布

(本工法を適用しなかった場合の解析値(クーリング無))

(1) コンクリート温度

コンクリート温度の検証は、計測値と本工法を適用しなかった場合の解析値(クーリング無)により行った。一例として、温度が最も高くなった箇所(No.3)の温度履歴を、図9に示す。計測値と温度計測結果に基づく解析値(クーリング有)は良好に一致した。

コンクリートの最高温度は、本工法を適用しなかった場合の解析値(クーリング無)で53.3℃、計測値で47.1℃であり、本工法により最高温度が6.2℃低下した。また、他の箇所においても、温度が低減されており、本工法による温度低減効果が確認できた。

(2) コンクリート応力

コンクリート応力の検証は、本工法を適用しなかった場合の解析値(クーリング無)と温度計測結果に基づく解析値(クーリング有)により行った。本工法の有無による主応力度の分布図を、図10および図11に示す。

最大主応力度は、本工法を適用しなかった場合の解析値(クーリング無)で3.27N/mm²、温度計測結果に基づく解析値(クーリング有)で2.35N/mm²となり、本工法により主応力度は0.92N/mm²小さくなった。これより、本工法によるコン

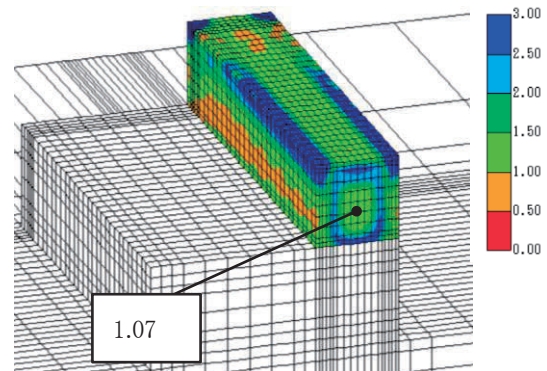


図14 ひび割れ指数分布

(温度計測結果に基づく解析値(クーリング有))

クリート応力の低減効果が確認できた。

(3) ひび割れ指数

ひび割れ指数による効果の検証は、本工法を適用しなかった場合の解析値(クーリング無)と温度計測結果に基づく解析値(クーリング有)により行った。断面中央部のひび割れ指数履歴を、図12に示す。また、ひび割れ指数の分布図を、図13および図14に示す。



写真3 堅壁1リフト構築状況

断面中央部のひび割れ指数は、本工法を適用しなかった場合の解析値(クーリング無)で0.85、温度計測結果に基づく解析値(クーリング有)で1.07となり、本工法によるひび割れ指数の改善効果が確認できた。なお、表面の一部でひび割れ指数が1.0を下回っているが、外観観察の結果ではひび割れの発生は認められなかった。

(4) 出来映え

堅壁1リフトの脱型後の状況を、写真3に示す。堅壁1リフト全体にわたりひび割れの発生はなく、本工法がひび割れ制御に有効であることを確認した。

§5. まとめ

アルミ製ヒートパイプによるクーリング工法を実構造物へ試験的に適用し、得られた知見を以下に示す。

- ① 本工法により、コンクリートの温度が低減し、ひび割れ指数が改善した。また、ひび割れの発生も認められなかった。
- ② アルミ製ヒートパイプの物性値を適切に設定することで、本工法適用時のコンクリート温度を精度よく推定できた。

以上より、本工法がマスコンクリートの温度ひび割れ制御対策として有効であると考えられる。

参考文献

- 1) 伊吹真一、船本恵一、前田智宏、飯塚隆博:ヒートパイプを利用したパイプクーリング、コンクリート工学年次論文集、Vol. 36、No. 1、pp. 1500-1505、2014. 6
- 2) 高橋直希ほか:ヒートパイプとアルミニウム材料を用いたクーリングに関する検討、土木学会第 75 回年次学術講演会、V-68、2020
- 3) 高橋直希ほか:ヒートパイプとアルミ材料を用いたクーリング工法の効果の検証と解析手法の検討、土木学会第 76 回年次学術講演会、V-69、2021
- 4) 土木学会コンクリート委員会:2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編]、2018 年
- 5) 日本コンクリート工学会:マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016、2016 年

ひとこと

アルミニウム材料を用いたヒートパイプによるクーリング工法を実構造物へ適用した。適用の結果から、本工法がひび割れ制御に有効であることが確認できた。



高橋 直希