

## ヒートパイプとアルミニウム材料を用いたクーリング工法の開発

高橋 直希 小島 秋\*1  
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クーリング工法を開発した。アルミ製ヒートパイプの効果を確認するため、アルミ製ヒートパイプ単体の性能試験と、マスコンクリートを模擬した試験体においてクーリングを実施した。また、本工法適用時において、事前にコンクリートの温度推定が精度良く行えるよう、解析手法についても検討した。

その結果、室内実験において、コンクリートの断面平均温度が約10℃低下した。また、アルミ製ヒートパイプの単体性能試験の結果から算出した物性値と、熱流体解析によって算出した熱伝達率を用いることで、アルミ製ヒートパイプを使用した場合のコンクリート内部の温度を精度よく推定可能であることがわかった。

### Development 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. 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.

As a result, in the laboratory experiment, the average temperature in the cross section of concrete decreased by about 10 °C. Furthermore, by using the physical property values calculated from the results of the unit performance test of aluminum heat pipe and the heat transfer coefficient calculated by thermo-fluid analysis, it was also found that the temperature of concrete when using an aluminum heat pipe can be estimated accurately.

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、熱抵抗、クーリング

\*1 東日本支社 土木統括部

## §1. はじめに

マスコンクリートの温度ひび割れの対策の1つとして、ヒートパイプを用いたクーリング工法に関する報告が行われている<sup>1,2)</sup>。ヒートパイプは、熱抵抗および熱容量が小さいために、小さな温度差で多量の熱輸送が可能である<sup>3)</sup>。著者ら<sup>2)</sup>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。

本稿では、アルミ製ヒートパイプの効果を確認するために実施した、アルミ製ヒートパイプ単体の性能試験結果と、マスコンクリートを模擬した試験体におけるアルミ製ヒートパイプのクーリング効果を示す。また、クーリング工法を適用する場合には、事前の温度解析により、対策効果を確認しながら計画する必要があり、物性値を適切に設定する必要がある。そこで、アルミ製ヒートパイプ単体の性能試験から得られた熱伝導率と、熱流体解析によって得られた熱伝達率を用いて、一般的な非定常熱伝導解析ソフトによる解析を実施し、実験結果との比較により解析手法の妥当性を検討した。

## §2. アルミ製ヒートパイプの概要

ヒートパイプは小さな温度差で大きな熱量を輸送できる高性能な伝熱素子であり、コンテナと呼ばれる密閉容器および作動流体で構成される。このヒートパイプの一部を加熱し、他の部分を冷却することで、作動流体は加熱部から冷却部へ流れる蒸気の流れと冷却部から加熱部への液の還流とからなる液-蒸気のサイクルを構成する<sup>4)</sup>。このような作動流体の流れによって、熱の輸送が可能であり、熱交換器や電子装置などの冷却または均熱化に使用されている。

迅速な熱移動を可能とするヒートパイプの特徴を活かすためには、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)の性能が重要であり、入熱部および放熱部の形状や材質によっても性能が変化すると考えられる。そのため、熱伝導性の高いアルミニウム材料を使用し、入熱部にはコンクリートからヒートパイプへ効率的に熱を取り込むための集熱パイプ、放熱部には集熱パイプから外部へ効率的に熱を放出するための放熱フィンを取り付けた。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。集熱パイプおよび放熱フィンの構成を、図1に示す。また集熱パイプおよび放熱フィンを、写真1に示す。

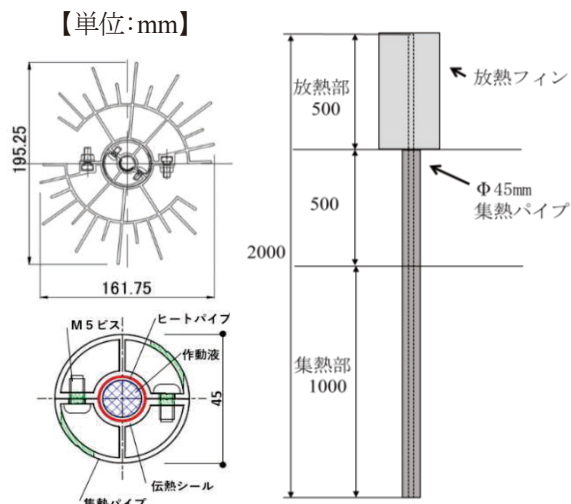


図1 放熱フィン(左上)、集熱パイプ(左下) アルミ製ヒートパイプ構成概念図(右)



(a) 集熱パイプ



(b) 放熱フィン

写真1 アルミ製ヒートパイプ

## §3. アルミ製ヒートパイプの単体性能試験

### 3.1 実験方法

ヒートパイプの重要な特性の1つである熱抵抗特性について、ヒートパイプに集熱パイプを取り付けたもの(以下、フィン無しHP)と、集熱パイプと放熱フィンを取り付けたもの(以下、フィン有りHP)の2水準で検討した。単体性能試験は、図2に示すように、集熱パイプの下部から1000mmの位置までヒーターを巻き付け、フィン無しHPのヒートパイプ表面の温度が60℃となるよう熱を与えることとし、ヒーターの

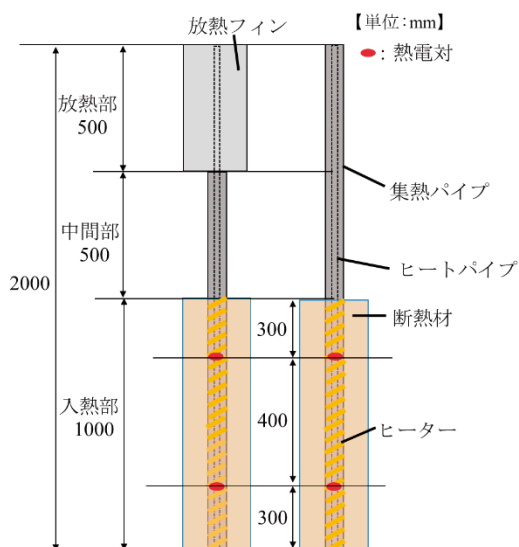


図2 試験概念図

表1 実験結果一覧

項目	温度(°C)		温度差 (°C)	入熱量 (W)	熱抵抗 (°C/W)
	入熱部	室内			
フィン無しHP	65.5	20.7	44.8	115	0.39
フィン有りHP	44.5	20.8	23.7		0.21

の上から断熱材を巻き付けた。熱電対による測定は、入熱部の集熱パイプ表面に2箇所と、室内温度とした。ヒートパイプの熱抵抗は、蒸発部と凝縮部に生じる温度差を熱輸送量で除したものであるが、本実験においてはヒートパイプ単体ではなく、アルミ製ヒートパイプ全体としての熱抵抗として評価するため、入熱部と実験室内の温度差を入熱量で除して算出した。

### 3.2 実験結果

試験結果を、表1に示す。放熱フィンを取り付けることにより、入熱部の温度が20°C以上低下し、入熱部と放熱部の温度差は小さくなった。熱抵抗はフィン無しHPが0.39(°C/W)、フィン有りHPで0.21(°C/W)であり、放熱フィンによって熱が移動しやすくなり、熱輸送能力の向上が確認できた。なお、ヒートパイプの熱輸送特性は、温度条件や長さによっても変化する<sup>3)</sup>ため、引き続き検討を進めていく予定である。

## §4. アルミ製ヒートパイプのクーリング効果の検証

### 4.1 実験概要

製作したアルミ製ヒートパイプのクーリング効果を実験的に検証した。使用するアルミ製ヒートパイプは、全長2mで

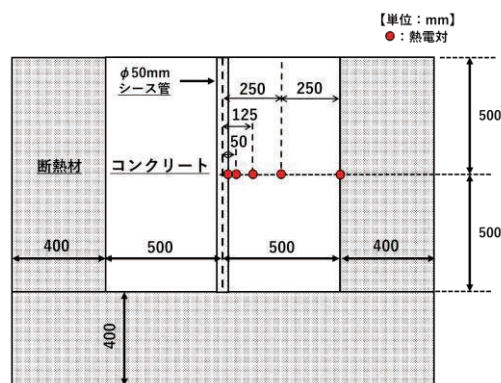


図3 実験概念図

表2 コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m <sup>3</sup> )			
		W	C	S	G
58.3	46.3	170	292	838	990

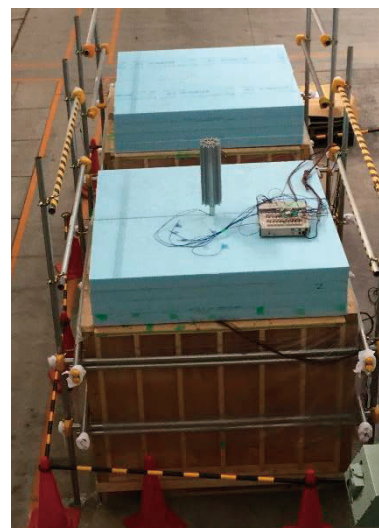


写真2 実験状況

あり、φ15mmのヒートパイプと、φ45mmの集熱パイプを一体化した構造とし、全長2mのうち上部先端の0.5mには放熱フィンを取り付けた。集熱パイプおよびアルミ製ヒートパイプの構成は、図1のものと同様である。コンクリート試験体の寸法は1m×1m×1mの立方体とし、型枠は木製とした。マスコンクリートを模擬するため、コンクリートの周囲を厚さ400mmの断熱材により被覆することとし、側面および底面の断熱材はあらかじめ設置、上面はコンクリートの打込み完了後に被覆した。また、アルミ製ヒートパイプは、コンクリートの打込み直後に挿入し、クーリングを開始する。そのため、アルミ製ヒートパイプを挿入するためのシース管をあらかじめコンクリートの中央に設置し、コンクリートを打ち込んだ。シース管の直径は50mmであり、アルミ製ヒートパイプ挿入後は、シース管の内部を水で充填した。

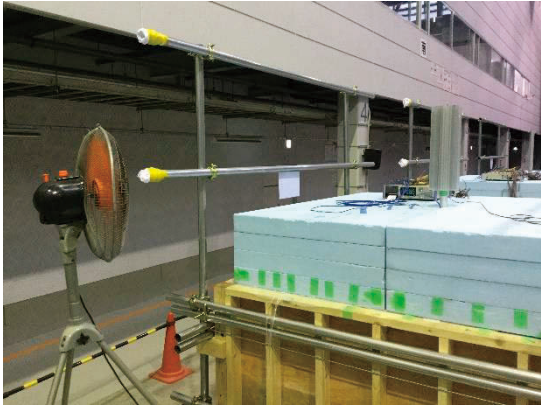
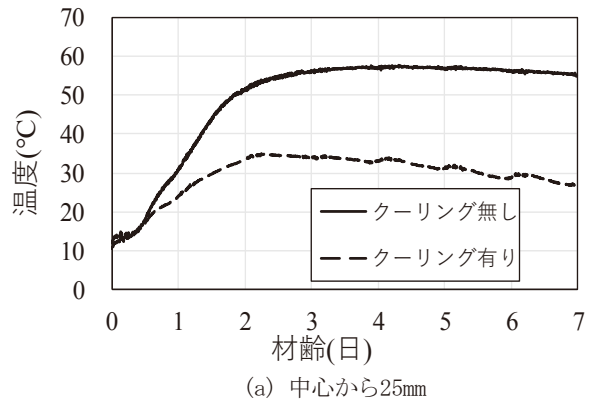
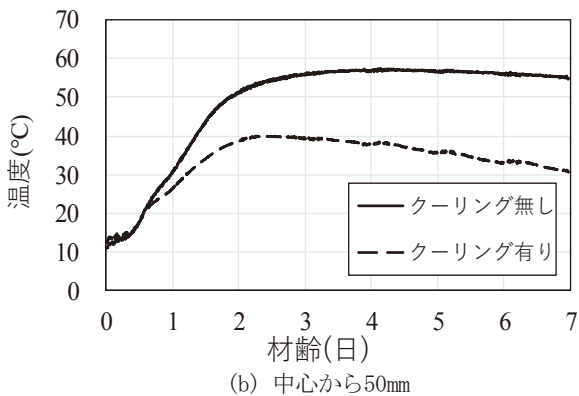


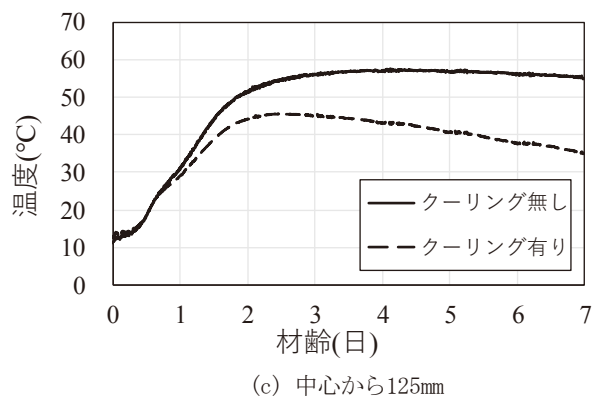
写真3 送風状況



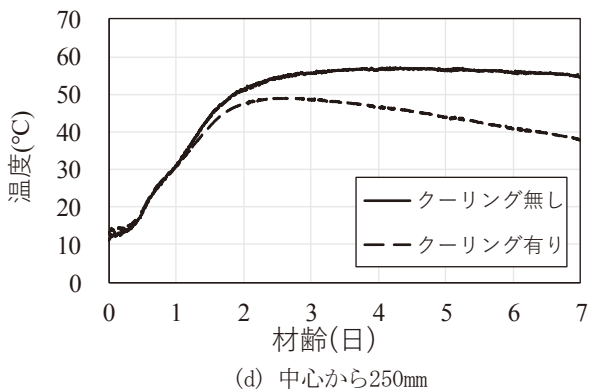
(a) 中心から25mm



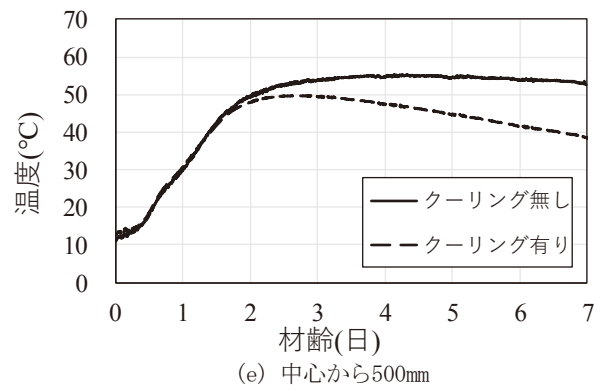
(b) 中心から50mm



(c) 中心から125mm



(d) 中心から250mm



(e) 中心から500mm

図4 各温度計測位置における温度履歴

試験水準は、“クーリング無し”と、“クーリング有り”の2種類とし、“クーリング有り”は、コンクリートを打ち込んだ後に、シース管内にアルミ製ヒートパイプを挿入し、クーリングを開始した。熱電対は、高さ方向は中央の500mm地点で、試験体中心から25、50、125、250および500mmの5箇所に設置した。試験体の断面と温度比較位置を、図3に、今回使用したコンクリートの配合を、表2に示す。コンクリート打込み後の状況を、写真2に示す。

放熱フィン部分は大気との間に熱の出入りがある熱伝達境界であり、熱伝達境界の特性である熱伝達率は、周囲の風速によっても変化する。そのため本実験においては、屋外での使用を想定し、風速が2~3m/sとなるよう送風機を用いて調整した(写真3)。

#### 4.2 実験結果

各温度測定箇所における温度履歴の比較を、図4に示す。中心から離れるほど、温度低下の程度は小さくなるものの、いずれの箇所においても、クーリングによってコンクリート内部の温度低下が確認できた。

クーリングの有無によるコンクリート内部の各計測位置の最高温度の比較を、図5に示す。“クーリング無し”の場合、断面内の最高温度はほぼ一定であるが、“クーリング有り”の場合には、断面内には温度勾配が生じ、中心に近いほど最高温度が顕著に低下した。また、各計測位置の最高温度をもとに算出した断面平均温度は、“クーリング無し”で56.9℃、“クーリング有り”で47.1℃であり、クーリングによって、コンクリート内部の温度は約10℃低下した。

§5. 解析手法の検討

5.1 物性値の算出実験概要

アルミ製ヒートパイプを用いた際のコンクリート温度を推定することを目的に、実験で得られた熱伝導率と、熱流体解析により得られた熱伝達率を用いた数値解析を実施し、実験結果との比較により解析手法の妥当性を検討した。熱伝導率  $\lambda$  (W/m°C) は、式(1)を用いて算出した。

$$\lambda = L/RA \tag{1}$$

ここに、 $L$ :長さ(m)  
 $R$ :熱抵抗(°C/W)  
 $A$ :断面積(m<sup>2</sup>)

熱伝導率は、集熱部から放熱部までの鉛直方向の熱の伝わりやすさとして考慮するため、放熱フィンを除いたヒートパイプおよび集熱パイプの物性値として評価する。長さは入熱部と放熱部の各中間点の距離である1.25(m)とし、断面積は、 $\phi$  15mmのヒートパイプを含む  $\phi$  45mmの集熱パイプ部分として、 $1.6 \times 10^{-3}$ (m<sup>2</sup>)とした。

熱抵抗はアルミ製ヒートパイプ単体の性能試験結果から算出した。アルミ製ヒートパイプの試験結果を、表3に示す。熱抵抗の算出は、アルミ製ヒートパイプの入熱部と放熱部の各平均温度の差を入熱量で除すこととし、入熱量によって熱抵抗値に違いが生じることから、平均値である0.057(°C/W)を採用した。

集中熱伝達率  $h$  (W/°C) は、式(2)により算出した<sup>6)</sup>。

$$h = A_0 \times \eta \tag{2}$$

ここに、 $A_0$ :放熱面積(m<sup>2</sup>)  
 $\eta$ :表面熱伝達率(W/m<sup>2</sup>°C)

放熱面積および表面熱伝達率は、風速を考慮した熱流体解析によって算定し、それぞれ1.125(m<sup>2</sup>)および22.95(W/m<sup>2</sup>°C)とした。なお、風速は、実験期間中の観測した風速の平均値である、2.8(m/s)とした。

解析に用いた物性値を、表4にまとめる。

5.2 実験結果と解析値の比較

前節で算出した物性値を用いた解析値と実験値の比較を、図6に示す。なお、コンクリートの断熱温度上昇量は、断熱温度上昇試験による実測値を用いた。温度履歴は、比較的良く一致しており、この他の温度計測位置においても同様の結果となった。したがって、アルミ製ヒートパイプ

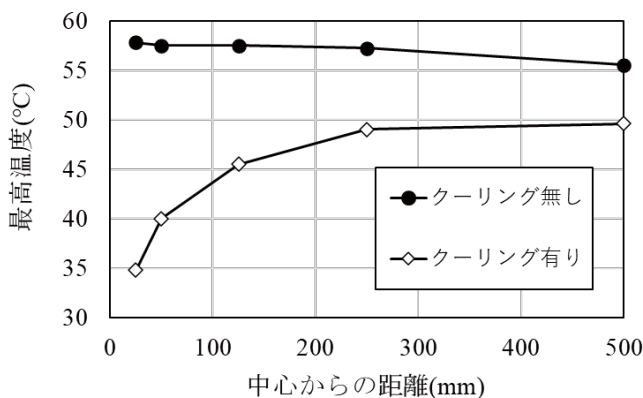


図5 各温度計測位置における最高温度

表3 アルミ製ヒートパイプの試験結果

入熱量 (W)	温度(°C)		温度差 (°C)	熱抵抗 (°C/W)
	入熱部	放熱部		
49.3	39.4	36.4	3.0	0.061
115.5	65.5	59.5	6.0	0.052

表4 解析に用いた物性値

項目	物性値	
	コンクリート	熱伝導率(W/m°C)
密度(kg/m <sup>3</sup> )		2290
比熱(J/g°C)		1.15
W/C		0.58
単位セメント量(kg/m <sup>3</sup> )		292
断熱温度上昇量(°C)		実測値
アルミ製ヒートパイプ	熱伝導率(W/m°C)	13700
	集中熱伝達率(W/°C)	25.8

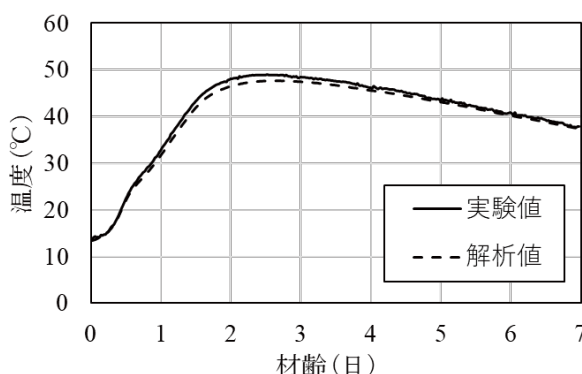


図6 温度履歴比較(中心からの距離:250mm)

の単体性能試験の結果から算出した物性値と、熱流体解析によって算出した熱伝達率を用いることで、アルミ製ヒートパイプを使用した場合のコンクリート内部の温度を精度よく推定可能であることが確認できた。

## §6. まとめ

- (1) 放熱フィンを取り付けることにより、入熱部と放熱部の温度差は小さくなったことから、放熱フィンによって熱が移動しやすくなり、熱輸送能力が向上した。
- (2) コンクリート試験体の寸法は1m×1m×1mの立方体とした場合、中心にアルミ製ヒートパイプを使用することで、コンクリートの断面平均温度が約10℃低下した。
- (3) アルミ製ヒートパイプの単体性能試験の結果から算出した物性値と、熱流体解析によって算出した熱伝達率を用いることで、アルミ製ヒートパイプを使用した場合のコンクリート内部の温度を精度よく推定可能である。

### 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、小島秋、平野勝識、井手一雄、田川義孝: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) 高岡道雄、馬渡恒明、坂谷益司、望月正孝、益子耕一、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、pp. 50-63、1984. 12
- 4) 日刊工業新聞社:実用ヒートパイプ、日本ヒートパイプ協会、2001
- 5) 伊藤謹司:ヒートパイプHeat Pipe、学献社、pp. 48-76、1978
- 6) 伊吹真一ほか:ヒートパイプを用いたパイプクーリングの1次元要素を用いた温度解析、土木学会第 70 回年次学術講演会、V-358、2015

#### ひとこと

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ヒートパイプによる新しいクーリング工法を開発した。これまでの実験結果をまとめ、実用化に向けて検討を進めていきたい。



高橋 直希