

環境対応型ヒートパイプによるクーリング効果と 1次元要素を用いた温度応力解析

柳 博文*1・伊吹 真一*2・加古 昌之*3

概 要

マスコンクリートにおけるひび割れ抑制対策として、ヒートパイプを用いたパイプクーリング工法がある。本工法のヒートパイプは、作動液に代替フロン R134a を使用していたが、代替フロン R134a は温室効果が高く、京都議定書の削減対象の一種であることから、取り扱い時の環境への影響が課題となっていた。そこで、環境への影響の少ないエタノールを作動液としたヒートパイプを使って適用性の確認試験を行った。さらに、設計時の解析モデルを簡素化するために、棒状のヒートパイプを1次元要素で表すように温度応力解析ソフトを改良し、解析結果を検討した。

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

DEVELOPMENT AND PRACTICAL APPLICATION OF THE CONCRETE COOLING METHOD USING HEAT PIPES

Hirofumi YANAGI *1, Shinichi IBUKI *2, Masayuki KAKO *3

Abstract

One measure for controlling cracking of mass concrete is pipe cooling using heat pipes. However, this heat pipe technique involved using R134a that has a large greenhouse impact and is an alternative CFC controlled under the Kyoto Protocol. There were concerns that it might produce an adverse effect on the environment when handled at the construction site. Accordingly, we have used a heat pipe that employs ethanol, which has lower environmental impact, as the working fluid to conduct a test to verify its applicability. In addition, for simplification of the analysis model to use for design, we have improved the thermal stress analysis software to allow a rod-shaped heat pipe to be represented with a one-dimensional element to study the analysis results.

Keywords: mass concrete, heat pipe, pipe cooling, thermal stress analysis

*1 Manager, Foundation / Structure Group, Research & Development Center, Construction Technology General Center

*2 Civil Engineering Department, Civil Engineering Division

*3 Manager, Structure Renewal Planning Group, Engineering Planning Department, Civil Engineering Division

環境対応型ヒートパイプによるクーリング効果と 1次元要素を用いた温度応力解析

柳 博文*1・伊吹 真一*2・加古 昌之*3

1. はじめに

コンクリート構造物においては、品質向上や耐久性向上の観点から、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。マスコンクリートの場合は、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おり、その対策として、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。しかしながら、この方法は冷却装置の設置や複雑な配管が必要となり、コストや作業環境が課題となっていた。そこで、筆者らはヒートパイプを用いて、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工法を開発した^{1),2)}。

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となり、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上昇を抑制することができる。

ただし、これまで本工法に用いていたヒートパイプは、ステンレス製のコルゲートパイプをコンテナとし、作動液として代替フロン R134a が採用されていた。代替フロン R134a は、温室効果が二酸化炭素の 1300 倍と高く、京都議定書の削減対象である HFC(ハイドロフルオロカーボン)の一種であることから、本工法では、ヒートパイプ取り扱い時の環境への影響が課題となっていた。

そこで、環境への影響の少ないエタノールを作動液としたヒートパイプ(以降、「環境対応型ヒートパイプ」と記す。)を用いることとし、パ

イプクーリングへの適用性の確認試験を行った。

また、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。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る。そこで、解析モデルを簡素化するため、ヒートパイプを棒状の 1次元要素で表すように、温度応力解析ソフトの改良を行い、解析結果を検討した。

2. 環境対応型ヒートパイプによるクーリング効果

2. 1 環境対応型ヒートパイプ

ヒートパイプ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³⁾。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

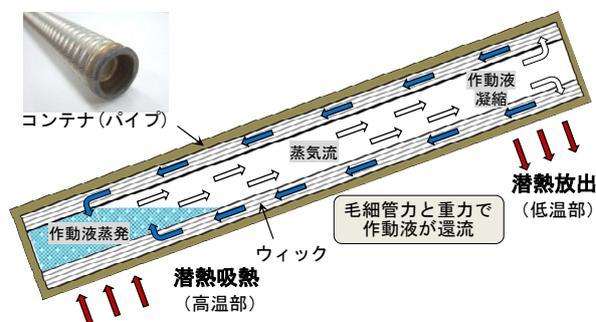


図-1 ヒートパイプの原理

*1 建設技術総合センター 研究開発センター 基礎・構造グループ グループリーダー

*2 土木本部 土木部

*3 土木本部 エンジニアリング企画部 大規模更新グループ グループリーダー

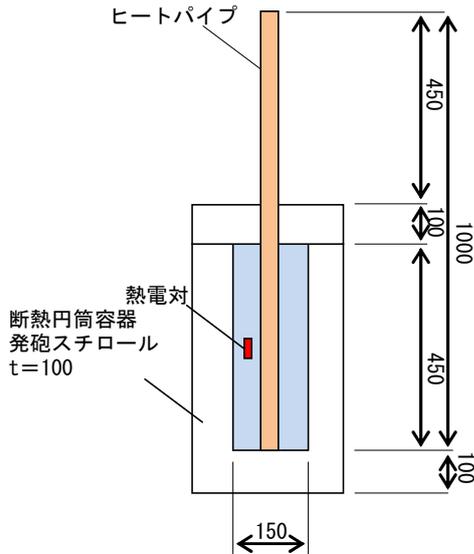


図-2 要素試験概要図

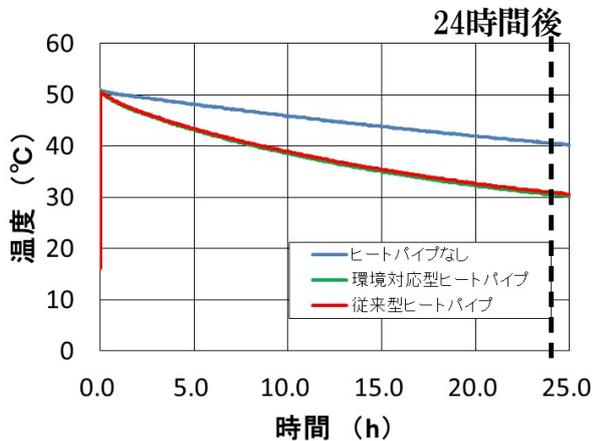


図-3 水温が50°Cの温度履歴

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へ移動する。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。

本工法では、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、作動液にはエアコン等にも使われている代替フロンR134aを用いたが、今回環境への影響を少なくするために、エタノールを作動液としたヒートパイプ

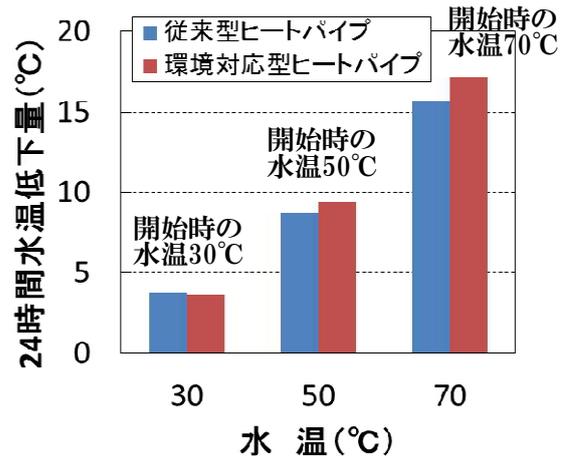


図-4 水温低下量の比較

を用い、その性能を確認した。

2.2 要素試験によるクーリング性能比較

環境対応型ヒートパイプの性能を把握するため、断熱容器内の温水のクーリング性能を従来型ヒートパイプと比較した。一般にエタノールを作動液としたヒートパイプの使用温度範囲は0~150°C程度とされている²⁾などが、本工法の使用温度領域は30°C~60°Cと比較的低温の領域であること、作動液の沸点がR134aは-28.18°Cであるのに対し、エタノールは78.4°Cと高いことなどから、環境対応型ヒートパイプは、従来のヒートパイプに比べてクーリング性能が低下することが懸念された。

試験は、図-2に示す断熱容器内の温水に長さ1mのヒートパイプを挿入し、24時間後の水温低下量を比較した。なお、試験は室内で行い、室温が20°C一定となるように空調を管理した。図-3に開始時の水温が50°Cのときの24時間の水温の変化を示す。環境対応型ヒートパイプは従来型ヒートパイプとほぼ同等の水温低下傾向であった。図-4に開始時の水温が70°C、50°C、30°Cのときの24時間後の水温低下量を示す。環境対応型ヒートパイプの水温低下量は、水温30°Cの場合に従来型よりもやや劣り、50°C以上の場合にやや大きくなったが、その差はわずかで、本工法の使用温度領域では、両者の温水の冷却性能は同等であることが確認できた。

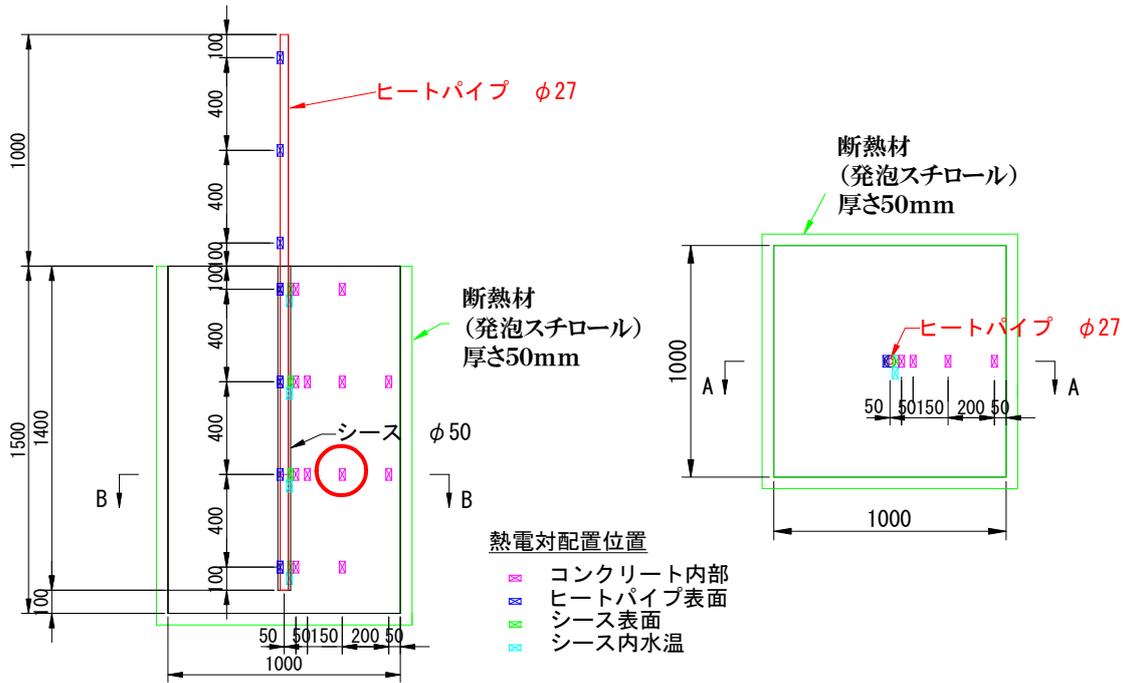


図-5 試験体形状図(試験体 No. 2, No. 3)

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

2.3 マスコンクリートのクーリング性能確認

環境対応型ヒートパイプのコンクリートの水和熱による温度上昇抑制（クーリング）への適用性を確認するため、模型試験体を製作し、ヒートパイプの放熱によるコンクリートの温度上昇の低下量を計測した。

模型試験体はヒートパイプなし(試験体 No.1)と従来型ヒートパイプ(試験体 No.2)、環境対応型ヒートパイプ(試験体 No.3)の3体として比較検討を行った。模型試験体の形状を図-5に示す。試験体は、寸法が 1m×1m×高さ 1.5m、側面および底面を型枠+断熱材としてマスコンクリートを模擬したものである。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℃程度となるように表-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、試験は室内で行い、室温が 20℃一定となるように空調を管理した。

試験体に配置された熱電対によって計測された温度から求めた断面Bの最高温度分布を図-6に示す。環境対応型ヒートパイプと従来型ヒ

試験体に配置された熱電対によって計測された温度から求めた断面Bの最高温度分布を図-6に示す。環境対応型ヒートパイプと従来型ヒ

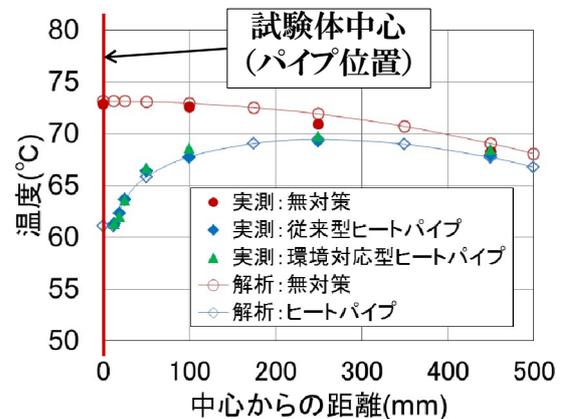


図-6 最高温度時温度分布(断面B)

ートパイプの最高温度分布はほぼ等しく、無対策の試験体に比べヒートパイプの周囲の温度はよく低下している。また、**図-6**には従来型ヒートパイプで求めた解析用物性値^リによる温度解析結果を併せて示しており、環境対応型ヒートパイプの実測値が解析値と概ね一致していることが確認できた。

次に、ヒートパイプありの試験体の断面 B でコンクリート温度が最大となる中心からの距離が 250mm の着目点における温度履歴を**図-7**に示す。環境対応型ヒートパイプは、従来型ヒートパイプと同様の温度履歴を示し、クーリングの全実施期間に亘りヒートパイプによるクーリングが持続していることが確認できた。

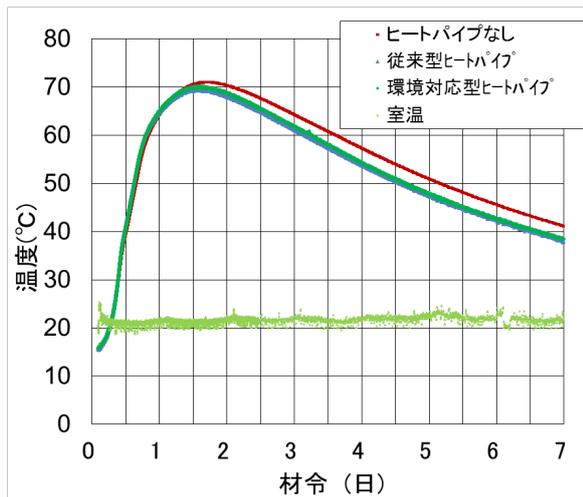


図-7 温度履歴の比較(着目点)

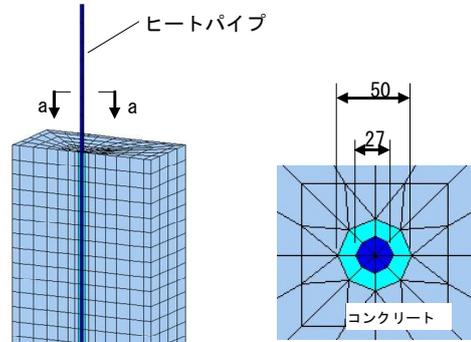
3. 1次元要素を用いた温度解析

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る。そこで、解析モデルを簡素化するために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の改良を行った。

3.1 ヒートパイプ1次元要素の導入

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-

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-8**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る。そこで、ヒートパイプを棒状の1次元要素として扱いモデルを簡素化した。



(b)ヒートパイプ部詳細図(断面 a)

(a)解析モデル(1/2分割)

図-8 従来の解析モデルの例

簡素化は、従来の3次元 FEM 温度応力解析システムの節点トラス要素に、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、ヒートパイプを1次元要素として扱えるようにした。ヒートパイプの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てクーリングを実施している期間を設定することができる。

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-9**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 (W/°C)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、次式により算出する。

$$h = A_0 \times \eta$$

ここで、 η : 表面熱伝達率 (W/m²°C)

$$A_0 : \text{放熱面積(m}^2\text{)} = \pi RL + \pi R^2 / 4$$

R : ヒートパイプ直径(m)

L : ヒートパイプ放熱区間長(m)

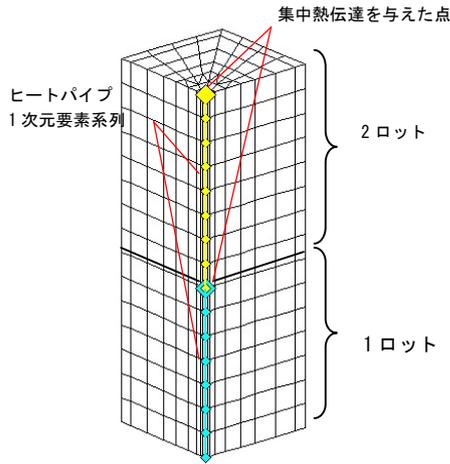


図-9 ヒートパイプ1次元要素のモデル例

集中熱伝達率 h は、ヒートパイプの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て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。

3. 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¹⁾を例に、ヒートパイプの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。

温度解析に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-10に示す。ヒートパイプの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、試験体の最高温度は、従来モデルおよびヒートパイプの1次元要素を用いた簡易モデルともに70.6°Cであった。

図-11に断面Aの最高温度時の温度分布解析結果を示す。クーリングパイプ周囲のコンクリート温度は、従来モデルと簡易モデルのどちらの解析結果も実測値との差は小さい。ヒートパイプに1次元要素を用いた簡易モデルは、シーす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。

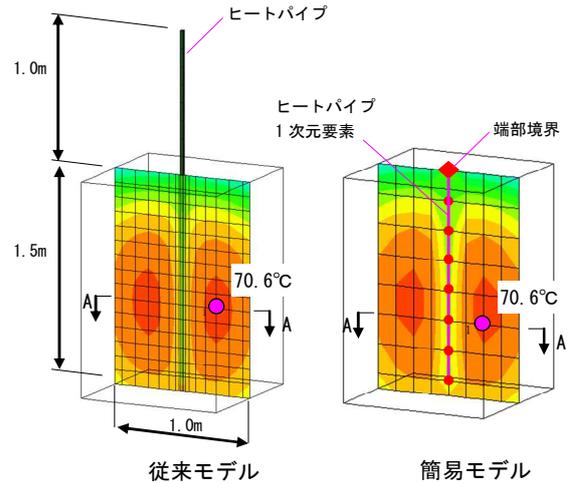


図-10 最高温度分布図の比較

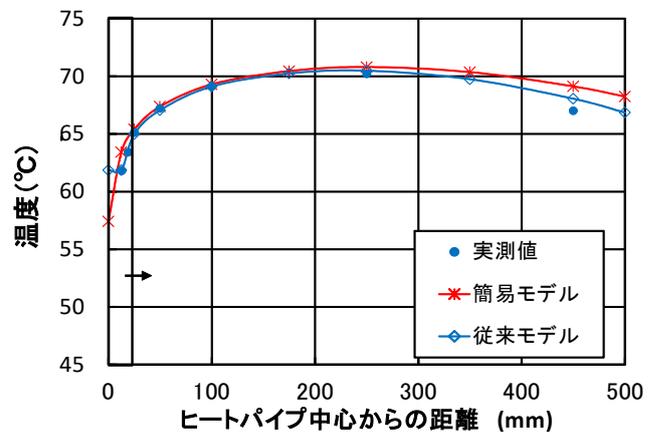


図-11 最高温度時温度分布(断面A)

4. まとめ

今回、環境対応型ヒートパイプのクーリング効果とヒートパイプに1次元要素を取り入れた温度応力解析の適用性について検討した。

検討の結果、以下の知見を得た。

- (1) 作動液にエタノールを使用した環境対応型ヒートパイプは、マスコンクリートのクーリングの使用温度領域において、従来型ヒートパイプと同等の温水冷却性能を有している。
- (2) 環境対応型ヒートパイプを用いたパイプクーリングは、従来型ヒートパイプを使用した場合と同等のコンクリートの温度上昇抑制効果を有している。
- (3) ヒートパイプに1次元要素を導入すること

により、解析モデルが容易に作成できる。

- (4) 気中の放熱区間は、ヒートパイプの 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することができる。
- (5) ヒートパイプの 1 次元要素を用いた簡易モデルは、シース内の水を考慮していないが、従来モデルと概ね同等の温度解析結果を得ることができる。

今後は、環境対応型ヒートパイプを用いたパイプクーリングの実施工に向けた仕組みを確立し、実績を積んでいく所存である。

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) 高須賀伸生, 船本恵一, 前田智宏, 伊吹真一 : ヒートパイプを利用したパイプクーリングの施工報告, 第 23 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.17-20, 2014.10
- 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, pp.50-63, 1984