

論文 パイプヒーティングシステムにおけるコンクリート舗装の剥離機構に関する実験的検証

岡部 能直^{*1}・吉武 勇^{*2}・安村 成史^{*3}・加々谷 治^{*4}

要旨：本研究では、冬期路面管理技術のひとつである地熱・地下水を用いたパイプヒーティングシステムに着目した。本研究で対象とした同システムの冬期休止中において、コンクリート舗装表面の一部で剥離損傷の事例がみられた。これらの剥離はパイプ継手部に集中しており、同箇所を起点としたひび割れに起因するものであった。本研究では、この剥離損傷機構を実験的に検証するため、コンクリート舗装内外に生じる力や、パイプ内水の凍結を模擬した要素実験を実施した。その結果、パイプ内水の凍結膨張を主因とする剥離損傷の可能性が推察された。

キーワード：パイプヒーティング, コンクリート舗装, 剥離, 凍結, パイプ継手

1. はじめに

冬期の陸上交通において、路面の積雪・凍結による交通傷害は、その経済活動への影響が多岐に及ぶ。また交通事故など人命にも関わる問題である。特に、橋梁・高架橋上やトンネル出口など、一般路面部と格差が生じやすい箇所では、車輛のスリップ事故があとを絶たない。そのため、冬期の路面管理技術に関する研究開発が、これまでに活発に行われており、路面の積雪・凍結を解消するための様々なシステムが供用されている。本研究においても、自然熱エネルギーのみを主熱源とするパイプヒーティングシステムを考案し、山口県内にある一般国道の山間部の橋梁区間において、2005年冬期から運転を開始している¹⁾。このシステムは他の多くのパイプヒーティングシステムに用いられるような不凍液等を利用せず、恒温層(同地では約12℃)にある地下水を地下タンク内に保存し、必要に応じて循環・使用するところに特徴がある。

ここで2006年1月の本システム休止中に、コンクリート路面の数カ所において剥離損傷がみられた。剥離損傷箇所はいずれもパイプを連結する継手部上であり、同箇所を起点に発生したひび割れに起因するものであった。

本研究では、ここでみられたコンクリート舗装の剥離損傷の原因究明と、その損傷機構の検証を行なうことを目的とし、パイプヒーティング舗装のパイプ継手部分を含む要素供試体を作製し、コンクリート舗装内外に生じる力や、パイプ内水の凍結を模擬した要素実験を実施した。本論文は、これらの要素実験から推定された剥離損傷機構について報告するものである。

2. コンクリート舗装における剥離損傷

2.1 パイプヒーティングシステム

本研究で対象としたパイプヒーティングシステムは、地下水や地熱などの熱エネルギーを、路面融雪・凍結防止に活用するシステムである。このシステムでは(コンクリート)舗装版内にパイプを埋設し、パイプ内の循環水を通じて融雪・凍結防止できる程度に路面を加温するものである。

パイプヒーティングシステムにおける採熱方法は、熱交換器により熱源から循環水に熱を伝達する熱交換方式や、地下水や温泉を直接流す直接通水方式があるが、本研究で対象とシステムは後者に分類されるものである。このシステムでは、自然採熱によりランニングコストの削減が期待できるため、広く普及している散水方式で問題とされる水はねや地下水位の低下等を抑制できる特徴を有している。さらに、パイプヒーティングシステムのライフサイクルコスト(LCC)の試算結果によれば、冬期にしばしば用いられる凍結防止剤散布による管理方法よりも、経済的に有利となることも示されている²⁾。

2.2 コンクリート舗装

パイプヒーティングシステムでは、加温用のパイプを舗装体内に埋設するため、耐久性・熱効率の観点からコンクリート舗装がしばしば用いられる。既往の研究^{3),4),5)}によると、コンクリート舗装体内にパイプを配置しても、必ずしも構造的な弱点にならないことが報告されている。

本研究では、写真-1に示すように既設舗装を剥ぎ取った後、既製のパイプヒーティング用パネル(パイプ間隔150mm, 鋼製パイプ15A)を路面より深さ50mm位置に配置した。なおパイプヒーティングを行った路面では、

*1 山口大学大学院 理工学研究科 (正会員)

*2 山口大学大学院 理工学研究科准教授 博(工) (正会員)

*3 山口県 山口きらら博記念公園管理事務所

*4 国土交通省 中部地方整備局

2つの橋梁部にはひび割れ防止の観点からポリプロピレン繊維補強コンクリートを採用し、2橋梁間の土工部には標準的なコンクリート舗装とした。

2.3 コンクリート舗装の剥離損傷事例

本研究では同システムを2005年11月から運用開始したが、運用開始間もない12月から2006年1月にかけて「平成18年豪雪」と呼ばれる寒波が到来した。特に当該地域では、12月中旬の降雪量が著しく、同システムの設計値を超過するものであり、最長で8時間を超える停電も発生した。この停電よりパイプヒーティング用の送水・集水本管が破損し2006年1月中旬から3月下旬にかけて本システムの運転停止を余儀なくされた。

この運転停止から数日内で、コンクリート路面に写真-2に示すような（コーン状コンクリート片の）剥離損傷が発生した。この剥離損傷が生じた箇所は土工部のみであり、ポリプロピレン繊維補強コンクリートを用いた橋梁路面には、このような剥離損傷はみられなかった。

また剥離損傷発生箇所は、いずれもパイプを連結する継手部上であった。後日、損傷箇所をはつり調査したところ、写真-3に示すような継手部における止水のためのゴムパッキンが一部露出していた。なお、コンクリートのパイプかぶり厚の実測値は、パイプ部では設計値通りの50mmであったが、継手部ではパイプ接続用のカプラーを用いたため、50mmに満たないものであった。

先ず土工部における舗装コンクリートの強度を調べるため、コア採取を行った。パイプヒーティング舗装には、パイプが150mm間隔、メッシュ鉄筋が100mm間隔で配置されており、通常の舗装用コア削孔は困難である。そこで、φ25mmの小径コアを、パイプヒーティング舗装の起点側・中間・最終点側の3箇所にて採取した。また、設計値に準じて表-1に示す配合のコンクリートブロックを実験室で作製し、ここからφ25×h50mmの円柱供試体を作製した。現地採取および室内実験で作製した小径コア供試体ともに、圧縮強度が35N/mm²を超え両者間の有意な差異もみられなかったことから、コンクリートそのものの影響は小さいものと判断した。

2.4 剥離損傷要因の仮説

本研究では、剥離損傷部の調査に基づいて、次のような剥離損傷要因の仮説を考えた。

「I. 輪荷重(外力)に起因する損傷機構」・・・パイプ継手部は、各車線の中央部に位置しており、直接輪荷重が作用することはほとんどない。しかしシステム停止時は機械除雪により幅員が道路中央の約一車線分と減少したため、輪荷重がパイプ継手部に負荷する可能性があった。既往の研究³⁾⁴⁾⁵⁾では、コンクリート舗装体内に鋼製パイプを配置した場合においても、鋼製パイプを含まない舗装体と同等の構造性能を有することが確かめられている



写真-1 パイプヒーティングパネル設置状況



写真-2 コンクリート舗装における剥離損傷



写真-3 ゴムパッキン変状

表-1 舗装コンクリートの配合条件

W/C	単体量 (kg/m ³)				Air (%)
	W	C	S	G	
0.43	147	342	653	1171	4.5

が、継手部ではかぶりが30mm程度と比較的薄く、このような外力が作用した場合に脆弱となる可能性もある。

「II. パイプ内水の凍結膨張力(内力)に起因する剥離損傷」・・・システム停止初期の外気温は、寒波の影響で夜間は氷点下が長時間続いたことから、パイプ内水が凍結膨張した可能性が考えられる。この凍結膨張に伴い、

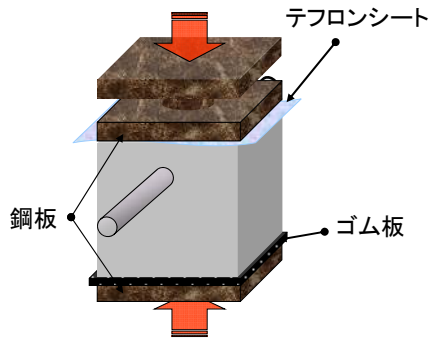


図-1 圧縮载荷実験



写真-4 圧縮载荷実験における破壊状況例

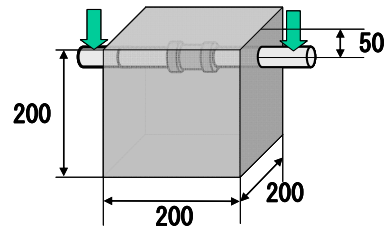


図-2 曲げ実験

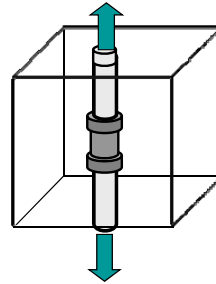


図-3 引張実験

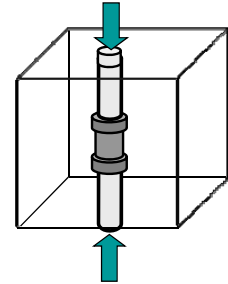


図-4 圧縮実験



写真-5 曲げ実験の状況



写真-6 圧縮実験におけるひび割れ状況

折り曲げ加工されたパイプおよびその継手部に作用する内力が剥離破壊をもたらした可能性も否めない。

「III. パイプ内水の凍結・漏水に起因する剥離損傷」・・・現地調査より、継手部のゴムパッキンの一部露出がみられた。これはパイプ内水の凍結膨張によりパイプ内で水圧が上昇し、継手部で漏水したものと推察される。そして、コンクリート舗装内に浸透した漏水が再凍結することで、剥離損傷をもたらした可能性も考えられる。

本研究では主にこれらの剥離損傷要因について、実験的な検証を試みることにした。

3. 外力・内力による剥離損傷に関する検証実験

3.1 実験供試体

本章では、前述の剥離損傷要因のうち、特にコンクリートおよびパイプに外力・内力が作用したときの影響を実験的に検証する。本章で示す実験供試体は、いずれも15Aのパイプ(かぶり50mm)と同パイプ継手部(φ30mm×h40mm)を含むコンクリートブロック(高さ200mm)である。なお、ここで用いたコンクリートは、表-1に示す配合で作製した設計曲げ強度4.5N/mm²とする舗装コンクリートである。

3.2 パイプ継手部を含むコンクリートの载荷実験

前述の「I. 輪荷重(外力)に起因する損傷機構」を検証・評価するため、パイプ継手部を含む実験供試体

(150mm×150mm×200mm)に対して(圧縮)载荷実験(図-1)を実施した。本実験では、表-1に示す配合で作製した実験供試体Aおよびそのモルタル成分で作製した実験供試体B、パイプ内に水充填・凍結させた実験供試体Cの計3体について検討した。いずれの実験供試体に

においても、 載荷実験前に設定温度 $-2.0 \pm 1.0^{\circ}\text{C}$ とした大型冷凍庫に24時間以上静置し、 試験に供した。ここで用いた実験供試体では、 径長比 H/L が1.33と比較的小さく、 端面摩擦の影響が顕著に現れることが予想された。そこで載荷面における端面摩擦の影響を低減させるため、 ゴム板(厚さ20mm)およびテフロンシートを挿んで圧縮載荷実験を行った。

圧縮載荷実験における破壊状況の一例を写真-4に示す。この例に示すように縦方向に貫通するひび割れが生じ破壊に至った。特にこれらのひび割れは、 パイプ継手部を迂回して発生しており、 いずれの実験供試体においても、 剥離損傷事例でみられたひび割れ等を再現することはできなかった。

このことから、 パイプ継手部上に作用した輪荷重(外力)が主因となって、 剥離損傷をもたらした可能性は小さいことが窺えた。

3.3 パイプに作用する内力の影響評価実験

本研究で対象としたパイプヒーティング用パネルは、 写真-1に示すように折り曲げ加工されたものであり、 このパイプ内水が局部的に凍結膨張すると、 パイプ継手部には様々な力が作用することが予想される。そこで本実験では、 図-2に示すようなパイプ継手部を含む $200 \times 200 \times 200\text{mm}$ 状のコンクリートブロックを作製し、 その両側面から突出させたパイプに曲げ・引張・圧縮荷重を与えた(図-2~図-4)。以下では便宜上、 曲げ実験・引張実験・圧縮実験と称す。

引張実験では、 継手部からのパイプの引抜けが先行しコンクリートには全く損傷が生じなかった。同様に、 曲げ実験では張出したパイプの変形が先行し、 コンクリートにひび割れ等の変状はみられなかった(写真-5)。

圧縮実験では、 写真-6に示すようにパイプ線上に沿ったひび割れが発生したものの、 本システムで発生したようなパイプ継手部を起点とするひび割れ損傷とは異なるものであった。

これらの結果より、 現地で生じたコンクリート舗装の剥離損傷は、 パイプ内水の凍結膨張に伴う内力によるひび割れに起因するものとは考えにくいと判断した。

4. 凍結・漏水に起因した剥離損傷に対する検証実験

4.1 パイプ内水の凍結膨張に伴う漏水の可能性

水は、 液相から固相へ相転移する際、 体積が増加する性質を有しており、 凍結膨張が剥離損傷の要因である可能性は否定できない。システム停止中、 夜間の外気温が氷点下である日が数日間続いており、 路面温度も 0°C を下回っていた。密閉された管内で水が凍結すると水圧が $0 \sim 207\text{MPa}$ の範囲では、 体積膨張によりパイプ内の圧力は上昇し、 圧力上昇に伴って氷点が降下することが確認

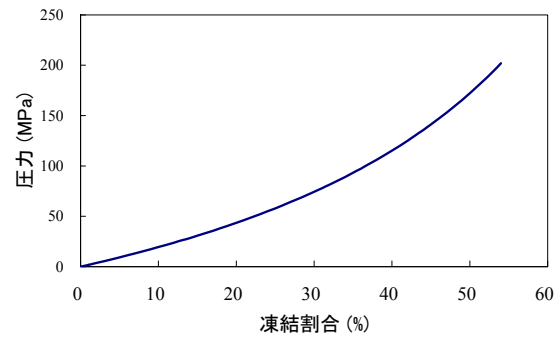


図-5 凍結に伴うパイプ内圧力変化

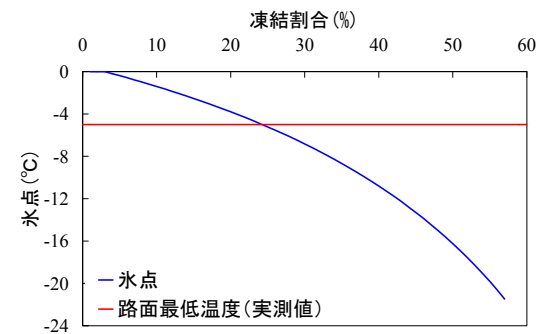


図-6 凍結割合-氷点関係

されている。密閉されたパイプ内の凍結進行による、 パイプ内圧力上昇を以下の式(1)により求め、 さらに氷点降下を Clausius-Clapeyron の関係式(2)より求めた^{6),7)}。

$$dP = \frac{2}{\alpha S} \{(\rho_w - \rho_i) / \rho_w\} dS \quad (1)$$

ここに、 dP : パイプ内圧力上昇量 (Pa), S : 未凍結水量 (m^3), ρ_w : 水の密度 ($1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$), ρ_i : 氷の密度 ($0.919 \times 10^3 \text{kg/m}^3$), α : 圧縮率 ($4.5 \times 10^{-10} \text{m}^2/\text{N}$)

$$dT = \frac{(v_w - v_i)T}{L} dP \quad (2)$$

T : 氷点温度 (K), $v = 1/\rho$ (m^3/kg), L : 潜熱 (334kJ/kg)

密閉されたパイプ内水の凍結進行と管内部圧力変化を図-5に示すと共に、 氷点降下の関係を図-6に示す。図-5に示すように、 凍結割合10%で20MPaと、 内部の圧力は急激に上昇することがわかる。損傷が生じた現地の調査より、 本システムで使用された一般的な鋼管継手は10MPa程度でゴムパッキンから漏水することがわかっており、 実際には10%に満たない凍結で漏水することが予想される。このことから、 凍結膨張による漏水が剥離損傷の要因である可能性が高い。また、 図-6において冬期夜間の路面最低温度は -5°C 程度であったことから、 凍結割合約25%で氷点と路面温度の差がなくなり凍結が停止する点、 いわゆる凍結限界が存在することが試算より示された。換言すれば、 パイプヒーティング舗装においてパイプ及び継手部が、 凍結限界時における内部の圧

力に耐えうる構造とする必要がある。

4.2 静的破砕材を用いた模擬実験

本実験では、パイプ内の凍結膨張により内部水圧が上昇し、継手部から漏水する機構を模擬するため、静的破砕材を用いた検証実験を実施した。供試体として用いたパイプ継手部を含む長さ 500mm パイプ内において、パイプ内水の凍結による(自由)膨張量は $1.41 \times 10^4 \text{mm}^3$ であり、本研究で対象としているパイプヒーティングパネルにおける凍結膨張量は $2.73 \times 10^6 \text{mm}^3$ と比べ約 1/200 と非常に小さいため、本実験で使用するパイプ長では、現場で想定されるような膨張量が再現できないと考え、静的破砕材を使用することを考案した。

ここで用いた静的破砕材の膨張圧は 72 時間で $6.0 \times 10^7 \text{N/m}^2$ までに達するものである。本研究では、静的破砕材の有する卓越した膨張量と圧力を利用し、凍結膨張を模擬する実験を試みた。供試体概念図を図-7に示す。供試体の寸法は $200\text{mm} \times 400\text{mm} \times 160\text{mm}$ とし、継ぎ手部を含む 500mm のパイプをかぶり 50mm で埋設した。パイプ軸方向では、パイプとコンクリート間の一体性が損なわれる可能性があり、パイプ軸方向の膨張を拘束する必要がある。そこで、写真-7のような鋼板を用い、四隅を拘束鋼材で固定することで、供試体の両端から拘束した。なお両端をねじ切り加工したパイプに静的破砕剤を充填し、両端の鋳鉄製キャップを閉めることで、充填材の漏れを防ぐとともに、拘束を与えた。なお、充填した静的破砕材には、内部のコンクリートと識別を容易にするため、朱液を用いて着色した。その後、3 日間静置し変状を観察した。しかし、供試体に目視で確認できるような変状がなかったことから、実験後の供試体を割裂し、内部を観察したところ、コンクリート内部にもひび割れは確認されなかった。また、ゴムパッキンからの漏れもみられなかった。これは、水粒子に比べ、固化した静的破砕剤の粒子が大きいためにゴムパッキンから漏れ出すことができなかったことが原因と考えられる。

4.3 パイプ内水の凍結漏水によるひび割れ損傷

静的破砕材を用いた実験では剥離損傷を再現できなかったため、実際にパイプ内に水を充填し、大型冷凍庫において凍結実験を実施した。ここで、本要素実験で用いるような供試体では、埋設するパイプの長さが短いため、水では破壊に至るほどの十分な膨張が望めない。そこで、パイプかぶりを 50mm から 30mm に変更し、供試体寸法は $120\text{mm} \times 400\text{mm} \times 130\text{mm}$ とすることで、剥離損傷が生じやすい形状とした。そして、冷凍庫温度はシステム設置箇所の夜間外気温より低い $-10 \pm 0.5^\circ\text{C}$ に設定し、初期温度 0°C から変状がみられるまで供試体を静置した。

実験結果状況を写真-8に示す。パイプ継手部上のコンクリート表面に十字状のひび割れが生じた。これは、

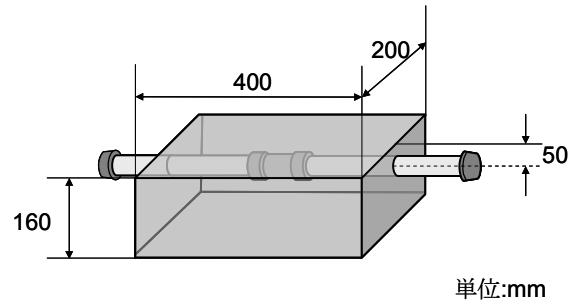


図-7 供試体概念図

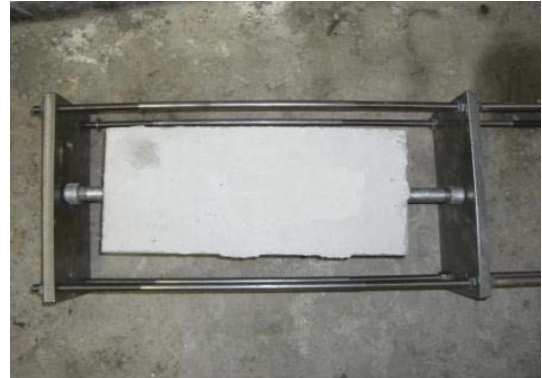


写真-7 拘束板取り付け状況



写真-8 凍結実験結果状況

かぶりが 30mm と比較的浅いため継手部を起点としたコーン状の破壊形状にはならなかったが、継手部上であることから、パイプ内の凍結膨張による変状の可能性が窺えた。これより、本システムでおきた剥離損傷の主な原因は、凍結膨張により内部圧力が上昇し、未凍結水が漏水したことによるものと推察された。

4.4 コンクリート表面のひずみ

パイプ内水の凍結膨張の進行による、コンクリート表面のひずみを調べるため、前述の凍結実験と同じ寸法の供試体(写真-9 手前)を別途作製し、継手部上のコンクリート表面にひずみゲージを貼付した上で、再度凍結実験を実施した。別途作製した供試体(写真-9 奥)中のパイプに熱電対(Tタイプ)を貼付け、パイプ内の

水温を計測した。本研究では、パイプ内の水温≒パイプ表面温度と仮定する。なお、コンクリート表面のひずみゲージ貼付箇所は、パイプ軸方向、及び軸直角方向の2方向とし、計測されたひずみ値から、線膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ として求めたコンクリートの温度ひずみを差し引くことで、コンクリート表面のひずみを求めた。設定温度 $-10 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ とした冷凍庫内に両供試体（初期温度 0°C ）をいれ、10分間隔で計測を行った。

パイプ内の水温低下に伴うコンクリート表面のひずみ変化を図-8に示す。図-8に示すように、パイプ内水温 -2°C 程度でひずみが増加し始め、 -4°C 近くからひずみが急増したことから、 -2°C 付近で漏水が生じ、 $-3.5 \sim -4^{\circ}\text{C}$ でコンクリート表面にひび割れが生じたものと思われる。このようなパイプ内の水温低下に起因した漏水～凍結により、コンクリート表面に剥離をもたらすひび割れが生じることから、運転休止中においてもパイプ内の水温管理には注意が必要である。

5. まとめ

本研究では、パイプヒーティング舗装で生じたコンクリートの剥離損傷事例の原因・機構の究明を行うべく、模擬試験体を用いて検証実験を実施した。本研究の範囲内で得られた結論を以下に列記する。

- (1) パイプ継手部を含むコンクリートの載荷試験によると、パイプ継手部が、交通荷重等の直接載荷に対する耐荷性能に与える影響は大きくない。またパイプに作用する内力のみでは、コンクリートの剥離が生じるようなひび割れは生じない。
- (2) パイプ内水が10%に満たない凍結で、パイプ継手部から漏水する可能性を示唆した。
- (3) 静的破砕材を用いた模擬実験では、膨張量はあるものの、パイプ継手部からの漏水を再現することができず、コンクリートにひび割れ等の損傷は生じなかった。
- (4) 水を充填拘束したパイプを含むコンクリートの凍結実験により、パイプ継手部からの漏水およびコンクリート表面のひび割れが再現できた。これより本システム剥離損傷の主原因は、パイプ内水の凍結膨張に伴う漏水に起因したものと推測された。

謝辞：本研究は、(社)中国建設弘済会の技術開発支援を受けるとともに、(株)エイトコンサルタントおよび(株)日本地下水開発より、実験試料・情報提供を受けております。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 例えば 菖蒲迫正之, 安村成史, 永井泉治, 吉武

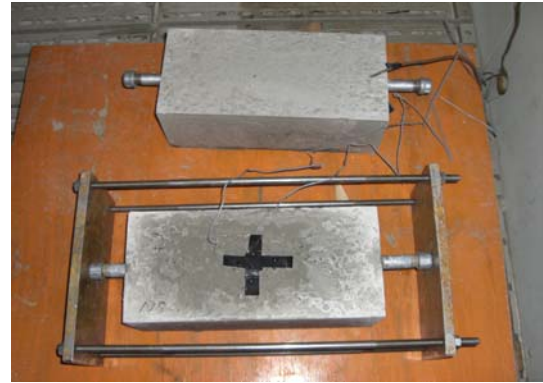


写真-9 ひずみを測定した凍結実験

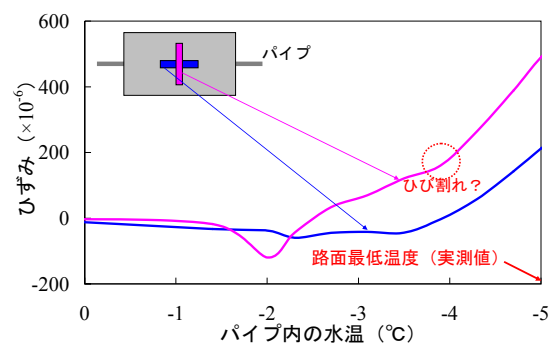


図-8 パイプ内の水温-ひずみ

勇：地中熱地下備蓄タンク方式による路面融雪の実用化に関する検討，寒地技術論文・報告集，Vol.20，pp.198-204，2004。

- 2) 辻 和秀, 吉武 勇, 谷本俊夫, 浜田純夫：パイプヒーティング機能を有するコンクリート版のライフサイクルコスト，土木学会論文集，No.805/VI-69，pp.131-136，2005。
- 3) 辻 和秀, 吉武 勇, 山口哲矢, 浜田純夫：圧縮力作用下にあるコンクリート舗装耐力への埋設パイプの影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1121-1126，2003。
- 4) 三村陽一, 辻 和秀, 吉武 勇, 浜田純夫：パイプを埋設したコンクリート部材の曲げ・付着強度試験，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.1，pp.405-410，2004。
- 5) 吉武 勇, 辻 和秀, 三村陽一, 山口哲矢, 浜田純夫：パイプヒーティングの構造設計に用いるコンクリート版の要素実験，土木学会論文集，No.770/VI-64，pp.53-63，2004。
- 6) 前野紀一：氷の科学，北海道大学図書刊行会，1988。
- 7) 菅原征洋, 太田照和, 山田悦朗：固液密度変化を考慮した管内水の凍結と圧力変化，日本機械学会論文集（B編）Vol.49，No.439，pp.741-744，1983。