

論文 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

辻 和秀^{*1}・吉武 勇^{*2}・山口哲矢^{*3}・浜田純夫^{*4}

要旨：パイプヒーティング機能を有するコンクリート舗装版は，パイプ配置に伴い構造的な弱点となりやすい。本研究では，パイプヒーティング舗装版を対象に，種々の剛性を有するパイプを埋設したコンクリートの圧縮破壊に関する実験的検討を試みた。その結果，パイプを中心に埋設した全ての供試体において，パイプ周辺部に端を発した割裂型の破壊現象が確認された。また，パイプの剛性に応じて破壊荷重が異なる傾向を示し，パイプを埋設していない供試体に比べ 10～30%程度の強度低下となった。

キーワード：パイプヒーティング，コンクリート舗装版，破壊荷重

1. はじめに

日本の国土のおよそ5割は積雪寒冷地にあり，冬季において路面の積雪・凍結に伴う車輛のスリップ事故はあとを断たない。また，スリップ事故を生じなくても，路面状況に応じて道路閉鎖や通行速度の制限がなされるため，各地に交通渋滞を招く要因となりうる。

冬季の気象条件が極めて厳しい北海道や東北・北陸地方においては，降雪量も多く，積雪期間も長いことから，機械除雪や融雪舗装といった路面管理の整備が進められてきた。これに対して，比較的温暖な地方では，積雪日数およびそれに伴うスリップ事故の絶対数が少ないため，このような道路整備事業はほとんどなされていないのが実情である。しかしながら，このような地方においても，特に山間部などでは，深夜早朝にかけて積雪・凍結路面となり，車輛のスリップ事故を引き起こしている。このような事故は，橋梁上やトンネル出口といった路面状態に大きなギャップが生じるようなところで頻繁に発生する特徴を有している。

著者らは，地下水や地熱といった自然熱エネルギーを活用することを前提に，高い融雪効果が得られ，且つ経済的な路面管理方法となりう

るパイプヒーティングを対象に，これまで研究を進めてきている。その研究成果として，比較的温暖な地方では，適切なパイプ配置を行うことで，年平均気温にほぼ一致する地下10m程度の地下水やトンネル湧水，地熱等を直接的に用いても，融雪(主にコンクリート舗装)が十分に行えることを報告している^{1)~3)}。

本研究はパイプヒーティングの合理的な設計法の構築を目的とするものであり，その一環としてパイプを埋設したコンクリート舗装版の力学的性能評価について検討を試みたものである。これは，従来融雪に関する研究の多くが熱の有効利用に主眼をおいたものが多く，あまり力学的な耐久性について議論されていないことによるものである。本論文では，パイプヒーティング舗装を模擬した供試体を用いて，多様にパイプを配置・内在させた場合の力学的性質を定量的に評価することを目的としている。

2. 実験計画

2.1. 供試体の寸法

実験に用いる供試体の寸法を決定するため，汎用 FEM 解析ソフトを用いて，図-1 に示すパ

*1 株式会社エイトコンサルタント 岡山支社 技術部 (正会員)

*2 山口大学助手 工学部 社会建設工学科 博(工) (正会員)

*3 山口大学大学院 理工学研究科 社会建設工学専攻

*4 山口大学教授 工学部社会建設工学科 Ph.D (正会員)

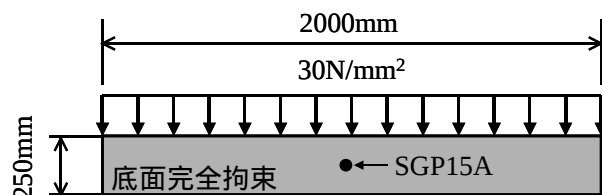


図-1 解析モデル

表-1 配合条件

W/C (%)	単位量 (kg/m³)				
	C	W	S	G	Ad
55	300	165	819	1040	0.01C

パイプを中心に埋設したコンクリート舗装版モデルの応力計算を行った。なお、一般に舗装は弾性支承上にあり、曲げ破壊となるものであるが、上載荷重(圧縮)がパイプ近傍に及ぼす影響を明らかにするため、底面部を完全拘束した条件下(支圧モデル)で解析を試みた。

その結果、径 15mm の鋼製パイプ近傍における応力分布は、パイプ中心から約 30mm の範囲のみに影響がみられる程度であった。この解析結果を踏まえ、本研究ではパイプを中心、あるいは中心より 50mm 位置に配置した 200×200×200mm の矩形供試体を作製した。

2.2. 配合条件と埋設パイプについて

(1) 配合条件

本研究で作製した供試体は、普通ポルトランドセメント(密度 3.15g/cm³)、および海砂(密度 2.6g/cm³)と安山岩砕石(密度 2.7g/cm³)を用い、連続鉄筋コンクリート舗装や踏掛版などに用いられる標準的なコンクリート配合とすべく W/C=55%のコンクリートとした(表-1 参照)。なお混和剤として、セメント質量に対して 1% 相当量の AE 減水剤を添加した。

(2) 埋設パイプ

パイプの剛性の相違が破壊挙動や耐力に及ぼす影響を求める目的から、パイプヒーティングにしばしば採用される鋼製パイプや銅製パイプに加え、より剛性の低い PC 用シース、塩化ビニルパイプ(以降、シース、塩ビ管と略す)を埋設した。さらに、比較用として密実な PC

表-2 パイプの寸法

パイプ種類	外径 mm	内径 mm	厚さ mm
鋼製	21.8	16.0	2.9
銅製	16.0	14.0	1.0
シース	24.5	23.0	0.8
塩ビ管	26.0	19.8	3.1
PC 鋼棒	17.0	----	----

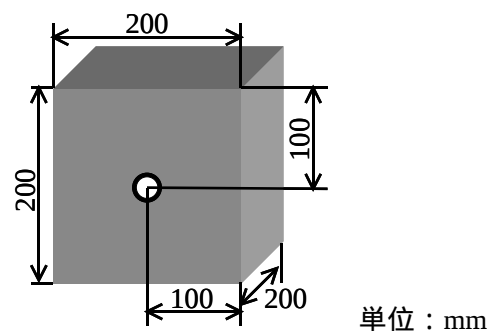


図-2 パイプ配置図(パターン A)

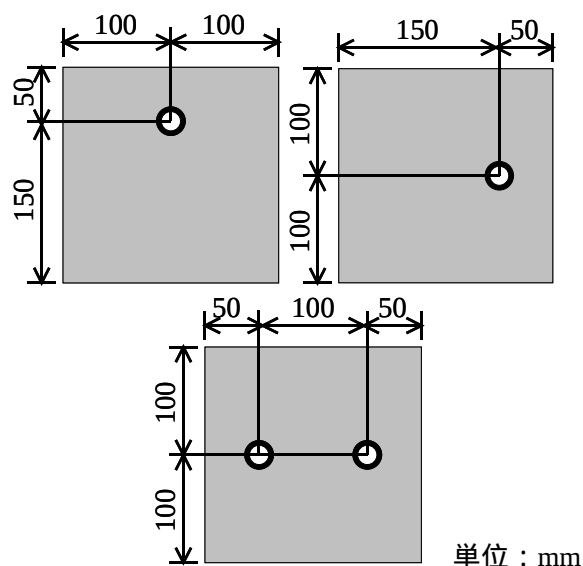


図-3 パイプ配置図(パターン B)

鋼棒を埋設した供試体も同時に作製した。本研究で用いたパイプの寸法を表-2 にまとめて示す。なお、これらのパイプは外径 16～25mm 程度と幅があるが、いずれも市販品であり、供試体寸法と先述の解析結果から考慮すると、その差異の影響はあまり大きくないものと考え、耐力の比較に用いた。

2.3. パイプの埋設方法

(1) パターン A(中心埋設)

パターン A は、図-2 に示すように供試体中心にパイプを 1 本埋設したものであり、パイプの剛性相違によるコンクリートの破壊挙動や

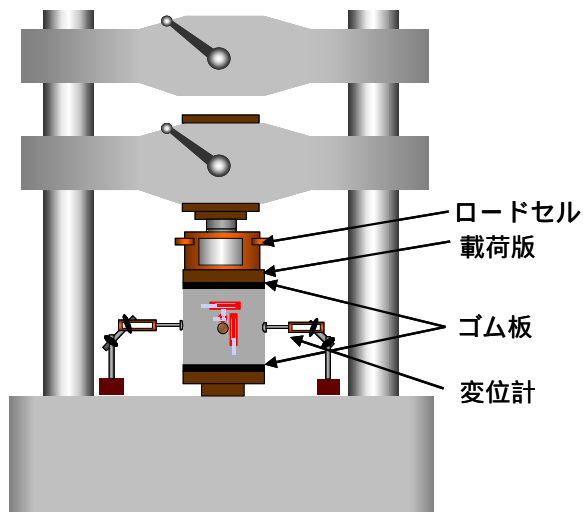


図-4 载荷試験の概略図

その時の荷重(破壊荷重)を調べるために、表-2に示す各種パイプを用いて载荷試験を行った。

(2) パターン B(偏心埋設)

パイプの配置に伴う破壊挙動の相違を検討するため、パイプかぶりを 50mm 変えた場合 (Type.1)、中心から水平方向に 50mm ずらした場合 (Type.2) および水平方向に 2 本埋設した場合 (Type.3) の 3 タイプについて载荷試験を行った。なお、ここで用いたパイプはいずれも鋼製パイプである。

さらに、両パターン共通の基本物性試験として、埋設物を含まない供試体(プレーン)についても同様の载荷試験を行った。

2.4. 実験方法

本研究では、油圧式万能試験機 (Max:980kN) を用いて载荷試験を行った。その際、供試体と载荷板間に生じる端面摩擦の影響を小さくするため、10mm 厚のゴム板を挿入した。これは、一般的な(圧縮)载荷試験に比べ、径長比 L/H が 1.0 と小さく、また相当に広いパイプヒーティング舗装における破壊挙動を考慮するためである。载荷試験の概略図を図-4 に示す。

ここで供試体表面には、パイプ近傍を中心に 2 種類の電気抵抗式ひずみゲージを X-Y 方向に貼付し(図-5, 図-6 参照)、コンクリートの变形性能に対するパイプの影響を調べた。さらに、供試体側面部には 1/1000mm 精度の変位計を設

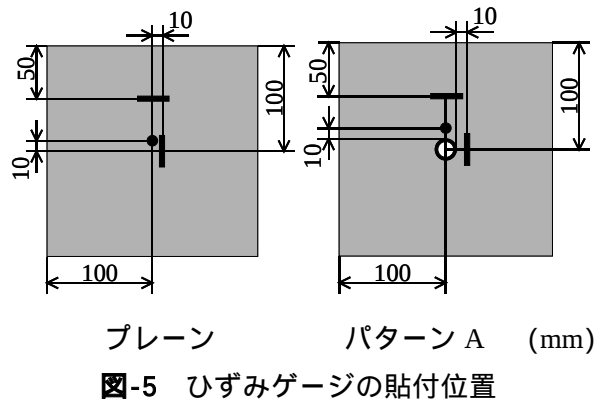


図-5 ひずみゲージの貼付位置

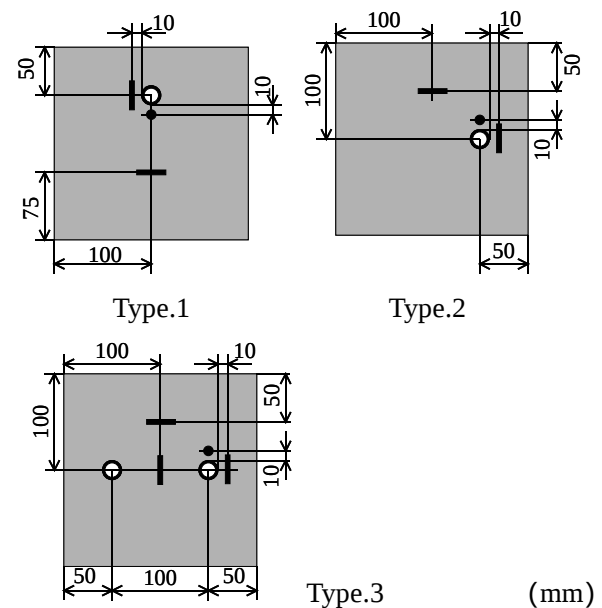


図-6 ひずみゲージの貼付位置(パターン B)

置し、载荷に伴う供試体側面のはらみを計測することで、先述の解析結果の妥当性を調べた。

3. 実験結果および考察

3.1. パターン A

(1) 破壊状況

破壊状況の一例としてプレーンおよび鋼製パイプ供試体のひび割れ状況を写真-1, 写真-2 に示す。両写真に示されるように、パイプの有無に係わらず供試体のほぼ中央断面に大きな貫通ひび割れが生じ、割裂型の脆性的な破壊に至った。また、パイプを含む供試体では、破壊後の破断面に着目すると(写真-3 参照)、いずれもパイプの破損は生じず、パイプ界面部でのコンクリートの剥離破壊が確認された。



写真-1 プレーン破壊状況



写真-2 パターン A 破壊状況



写真-3 破断面

表-3 破壊荷重とコンクリートの圧縮強度

種類	圧縮強度 (シリンダー)	破壊荷重				破壊時の載荷 応力(平均値)
		1	2	3	Ave.	
プレーン	45.0 N/mm ²	647 kN	698 kN	---	672 kN	16.8 N/mm ²
PC 鋼棒	46.2 N/mm ²	617 kN	601 kN	623 kN	614 kN	15.3 N/mm ²
鋼製	47.2 N/mm ²	619 kN	632 kN	594 kN	615 kN	15.4 N/mm ²
銅製	43.5 N/mm ²	549 kN	539 kN	523 kN	537 kN	13.4 N/mm ²
塩ビ管	41.2 N/mm ²	531 kN	558 kN	510 kN	533 kN	13.3 N/mm ²
シース	47.0 N/mm ²	494 kN	468 kN	498 kN	487 kN	12.2 N/mm ²

(2) 破壊荷重

表-3 に各供試体の破壊荷重, および破壊時における断面平均の載荷応力(以下, 単に載荷応力と称す)を示す。なお, 同表には用いたコンクリートの圧縮強度(φ100×200mm: 端面摩擦含)を併記している。ここで示されるように, 各供試体の破壊荷重は 468~698kN であり, プレーンの供試体が最も高強度であった。

ここで, プレーンの破壊荷重を基準にとった際の, 各供試体の破壊荷重の比(強度低下比率)を図-7 に示す。この図によると, パイプを内在した供試体はプレーンの破壊荷重に対して, 10~30%程度の強度低下であり, 採用したパイプの中で最も剛性の低いシースを含む供試体が最弱のものであった。ここで, 密実な PC 鋼棒の供試体においても, プレーンに比して 10%程度の強度低下を示し, 鋼製パイプとほぼ同程度の強度であった。これは, より剛な PC 鋼棒では, 周囲のコンクリートの変形性能に追従できず, 両者間の相対的な応力負担の相違によって, 微細なひび割れが生じやすく, 結果的に強度低下がみられたものと推察される。

(3) 載荷応力 - ひずみ

2 軸ひずみゲージを用いて求めたパイプ直上

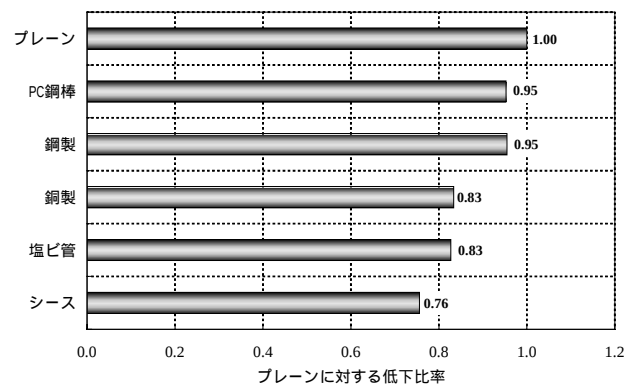


図-7 パイプ配置に伴う強度低下比率

の鉛直・水平ひずみを各々図-8, 図-9 に示す。

図-8 に示す鉛直ひずみは, いずれの供試体においても, コンクリートのひび割れ前までは別途試験で求めたヤング係数(40kN/mm²)の計算値より若干小さいものであった。これは, 載荷上面から 50mm 位置の鉛直ひずみにおいても同様の傾向であり, これらの破壊までのひずみ挙動は, 載荷応力に対してリニアなものであった。

ここで, 水平ひずみに着目すると, プレーンおよび PC 鋼棒といった空洞部を含まない供試体では, 明確なひずみの変化点はなく, 載荷応力に応じて増加するものであった。これに対し, 各種パイプを埋設した供試体では, 急激にひずみが増加する変化点(急変点)がみられた。この

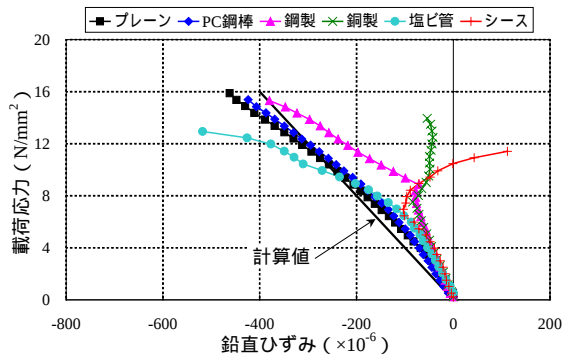


図-8 パイプ直上における鉛直ひずみ

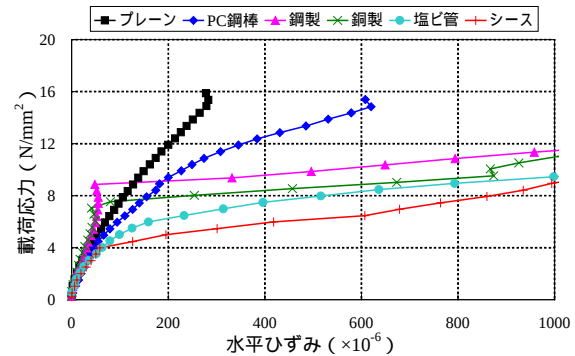


図-9 パイプ直上における水平ひずみ

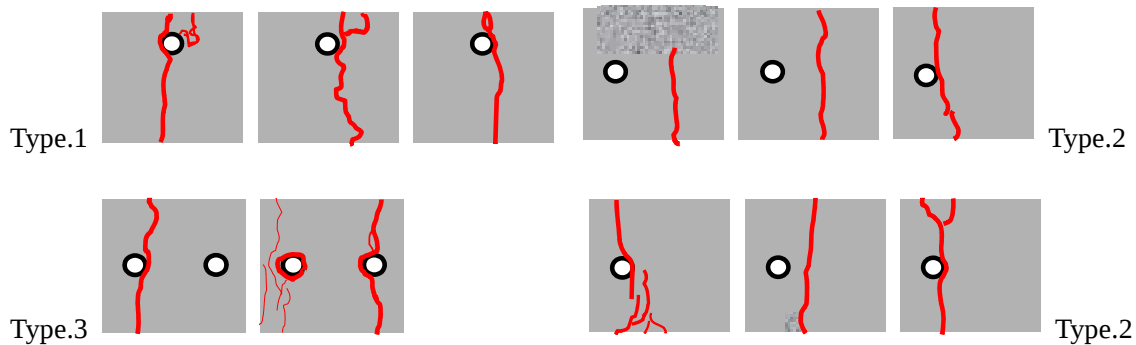


図-10 パターン B におけるひび割れ状況模式図

ひずみの急変点は、局所的な微細ひび割れの発生を示す現象と捉えられ、先述の破壊荷重が低い順、すなわちシース→塩ビ管→鋼製パイプ→鋼製パイプの順に並ぶものであった。

これらの結果から、鋼製パイプは局所的なひび割れ発生荷重も高く、パイプを設けないプレーンに比べても 10%程度の強度低下にとどまったことに加え、その熱伝導性(融雪能力)も比較的高いため³⁾、パイプヒーティング舗装には適した材料のひとつと結論づけられる。

3.2. パターン B

パターン B では、種々のパイプ配置に伴うコンクリートの破壊挙動および破壊荷重を求めるため、鋼製パイプを用いて図-3 に示すパイプ配置の供試体の載荷試験を実施した。

図-10 に載荷試験後のひび割れ状況スケッチを示す。ここで示すように、パイプを供試体中心軸上に配置したものは、パターン A 同様にパイプ近傍部に大きなひび割れが生じ破壊に至るものであった。これに対し、パイプを中心軸より水平方向に 50mm ずらした供試体、あるいは

表-4 破壊荷重(パターン B)

Type.1	600 kN	603 kN	605 kN
Type.2	623 kN	624 kN	703 kN
	720 kN	723 kN	740 kN
Type.3	805 kN	733 kN	---

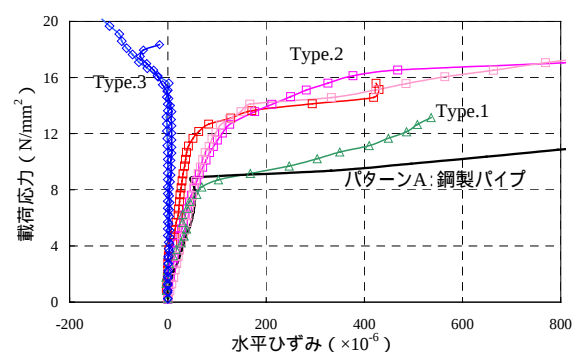


図-11 パイプ直上における水平ひずみ

はパイプを中心軸対象に 2 本配置した供試体においては、パイプ近傍部にひび割れがみられるものに加え、パイプを含まない断面でひび割れが生じているものなど様々であった。

この原因のひとつとして、コンクリートに比べ剛性の高い鋼製パイプでは、作用する圧縮力に対する補強材として寄与したものと推察さ

れる。すなわち、埋設するパイプは、コンクリートとの界面等が構造的弱点になる可能性も秘めているが、逆に鉄筋のような補強効果も併せ持つため、コンクリート中にパイプを埋設することが、必ずしも構造的欠陥部とはならないものと推察される。

ここで、破壊荷重を示す表-4に着目すると、パターン A ではブレーンが最も高強度であったのに対し、ブレーンの破壊荷重を上回る強度を有する供試体はいくつかみられた。特に引張力が卓越しないような箇所にパイプを2本配置した供試体(Type.3)は、いずれもブレーンに対して10～25%程度高い破壊荷重であった。

また、パイプ直上のひずみ変化を示す図-11によると、Type.1でのひずみの急変点は、パターン A と同等レベルであるが、Type.2ではより高い応力レベルまで急変点が生じていないことが分かる。さらに Type.3 においては、ひび割れの起点となりやすいパイプを含む断面がより平均的に変形できるようになることから、コンクリートのひび割れをもたらす水平ひずみはほとんど生じず、破壊直前に至って若干の圧縮ひずみに推移する特徴が認められた。これは、パイプ配置に伴う応力集中の影響に対して、パイプとコンクリートの剛性比に応じた荷重負担機能が働くためと考えられる。

4. まとめ

本研究は、パイプヒーティング機能を有するコンクリート舗装版の力学的特性に着目し、種々のパイプを埋設した際の圧縮破壊機構について検討を試みたものである。さらに、パイプ配置を変えた載荷試験も併せて行い、パイプ配置に伴う力学性状を調べた。本研究の範囲内で得られた結論を以下に要約する。

- (1) パイプを中心に埋設した矩形形状の供試体では、パイプの有無や種類に係わらず、ほぼ中央断面に大きな貫通ひび割れが生じ、割裂型の脆性的な破壊に至った。
- (2) パターン A における破壊荷重は、パイプを

埋設していないブレーンが最も高強度であり、他の供試体の破壊荷重は、ブレーンより10～30%程度低いものであった。特に密実な PC 鋼棒を埋設した場合においても、鋼製パイプと同様にブレーンに比して10%程度の強度低下がみられた。

- (3) パイプ近傍の鉛直ひずみは、載荷応力に対してほぼリニアであるが、水平ひずみは局所的な微細ひび割れの影響で、ひずみが急増する変化点が認められた。また、各供試体のひずみの急変点は、破壊荷重が小さいほど早い段階で発生していた。
- (4) 中心軸上にパイプを配置しない供試体では、パイプ近傍部以外でもコンクリートにひび割れが発生し、パイプを配置することが必ずしも構造的な弱点にはならないものであった。

謝辞

実験およびデータ整理にあたり、三村陽一氏(株式会社エイトコンサルタント)と蛸谷祐至氏(山口大学大学院)に多大な御協力頂きました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 谷本俊夫,吉武 勇,中村秀明,谷 直彦,浜田純夫:温水パイプによる橋梁床版の融雪・凍結防止システムに関する研究,土木学会論文集, No.595/VI-39, pp.103-116, 1998.6.
- 2) 吉武 勇,中村秀明,谷本俊夫,浜田純夫:温水パイプを埋設したコンクリート床版の融雪効果に関する研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.2, pp.1075-1080, 1998.7.
- 3) 永井泉治,吉武 勇,中村秀明,浜田純夫:山岳トンネルにおける湧水を利用した橋梁の融雪実験とその適用性,土木学会論文集, No.665/VI-49, pp.183-188, 2000.12.