

論文

[1204] 橋梁床版上の路面の融雪・凍結防止システムに関する研究

田中周次*1 中村秀明*2 浜田純夫*3

1. まえがき

スパイクタイヤの法規制などを契機に冬期道路の安全性に対する国民のニーズはますます高度化しつつある。特に山間部のような積雪寒冷地域では過疎化を抑え、町を活性化するためには冬期の道路における車両交通の安全確保は、円滑な経済活動や日常生活を進めるため必要不可欠のものとなっている。現在我国において実施されている一般的な冬期路面管理としては、グレーダやロータリ車等による機械除雪や塩化物などを中心とした凍結防止剤を路面に散布する方法があるが、除雪には多くの手間と費用を要し、また薬剤散布はコンクリート中の鉄筋の腐食や車両の錆、環境への影響が懸念される。

冬期におけるスリップ事故の多くは日の当たらない山の北側斜面や橋梁上で多く起こっている。これは一般道路部が日照や地温（地熱）によって徐々に融雪されるのに対し、吹きさらしの橋梁上や日の当たらない山の北側斜面では残雪や凍結の状態となるため、運転者は制限速度内で走っていてもその場所でスリップを起こしてしまうためである。

このような問題を解決するため種々の方策が考えられている。最も確実な融雪・凍結防止を行うことができるのはロードヒーティングシステムである。ロードヒーティングシステムには現在主に2つの方法がある。一つは電熱線方式であり、もう一つは温水方式である[1]。温水方式は温水を床版内に埋め込まれたパイプに通すことにより路面を暖め、融雪するものである。これらの研究は過去にもいくらか行われているものの、設計に役立つ実用的な研究は少ない。そこで本研究では、温水方式を対象に橋梁における路面の融雪・凍結防止システムの実用化のため、種々の供試体を作製し、室内実験および冬期における融雪のための現場実験を行い路面への熱の伝達状況を調べるとともに、路面に効率よく熱を伝える橋梁床版の設計について検討する。

2. 室内実験

2.1 実験概要

路面の融雪および凍結防止効果を調べるため、橋梁床版の一部分を想定した図-1に示すような実験供試体を作製した。供試体は、普通コンクリートのみで打設したもの、普通コンクリートを上層に、熱伝導率の小さい軽量コンクリートを下層にした2種類の異なるコンクリートを用いて打設したもの、パイプの埋設深さを変えたものなど計5種類作製

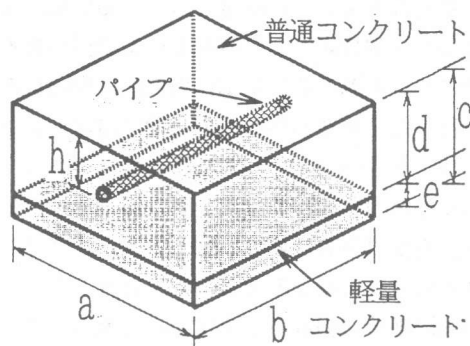


図-1 実験供試体

- *1 山口大学大学院 工学研究科社会建設工学専攻 (正会員)
- *2 山口大学助手 工学部社会建設工学科、工修 (正会員)
- *3 山口大学教授 工学部社会建設工学科、Ph.D. (正会員)

した。5種類の供試体は、表-1に示す断面寸法で、それぞれ供試体A、B1、B2、B3、Cとした。供試体内部には、銅製のパイプ（φ15mm）が埋め込まれており、このパイプに温水を流すことにより周囲のコンクリートに熱を供給している。また、コンクリート側面から外部への熱の放出を防ぐために供試体の側面には厚さ20cmの断熱材（発砲スチロール）を使用した。コンクリート内部の温度計測には、熱電対（銅-コンスタンタム型、φ6.5mm）を使用し、供試体内に42点配置した。

図-2に、熱電対の埋設位置を示す。また、パイプに通す温水の温度はパイプの入口と出口につなげたホース内に取り付けた熱電対によって計測し、入水温が常に40℃となるように温度センサーのついた水槽で制御した。なお、測定期間は温水の流しはじめから15時間後までとし、温水はポンプによりパイプ内の流れが乱流となるように毎分60.0ℓ流した。また、測定は室温20℃の養生室で行った。室内実験では、これらの5種類の供試体を用いてパイプの最適な埋設深さ、軽量コンクリートの厚さについて検討を行う。

2. 2室内実験結果および考察

路面の融雪および凍結を防止するには、短時間に供試体表面の温度を上げる必要がある。そこで、それぞれの供試体の表面温度の比較を行った。ただし供試体の表面温度は、コンクリート表面から1cmの深さに埋め込まれている熱電対によって計測された温度で代用した。表面温度の評価は、図-3に示すように各時間ごとの斜線部分の面積を計算した。この斜線部分の面積は、単位長さ（奥行き1m）あたりの供試体表面の温度上昇量に節点間の距離を掛けたものであり、以下温度積と呼ぶ。

図-4に、時間の経過による温度積の変化を示す。供試体表面の温度積を見ると、供試体表面には供試体Aが熱を良く伝えていることがわかる。これは、パイプの埋設位置がコンクリート表面から4cmの深さに埋め込まれているからである。次に供試体B1、供試体B2が良く熱を伝え

表-1 供試体断面諸元

| 供試体 | 寸法 (a×b×c)cm | 普通 (d)cm | 軽量 (e)cm | ハイツ位置 (h)cm |
|-----|-----------------|-------------|-------------|----------------|
| A | 40×40×25 | 25 | 0 | 4 |
| B1 | 40×40×25 | 25 | 0 | 10 |
| B2 | 40×40×25 | 20 | 5 | 10 |
| B3 | 40×40×25 | 15 | 10 | 10 |
| C | 40×40×25 | 25 | 0 | 14 |

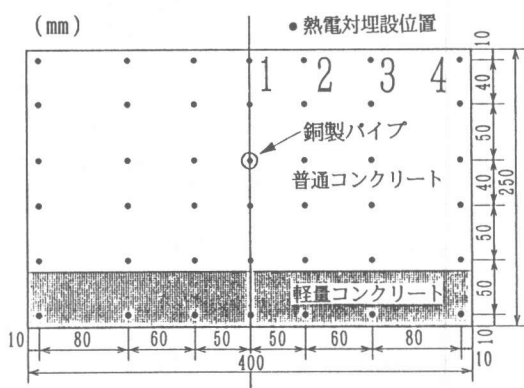


図-2 熱電対埋設位置

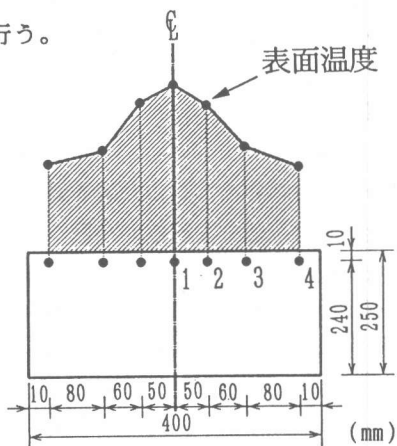


図-3 温度積の説明

ることがわかる。供試体下面に軽量コンクリートを5cm打設している供試体B2の温度積は、初期の時間においてはパイプ埋設位置が同じ供試体B1、B3と比べると最も良い。供試体Cの温度積は時間が経過するにつれて上昇しているが、供試体表面の温度が上がるのが遅い。しかし、下面に軽量コンクリートを打設した供試体B2、B3は軽量コンクリートによる下面の断熱効果により表面温度の上昇を狙ったものであるが、実際には供試体B3は表面温度の上昇が一番小さかった。

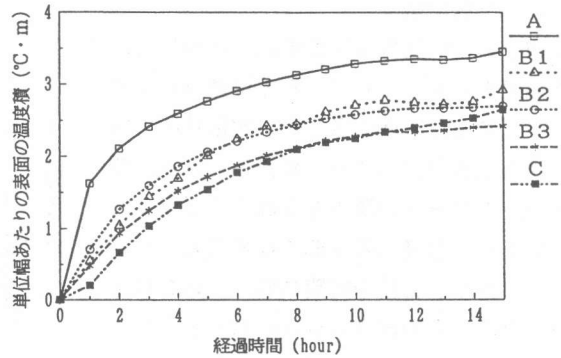


図-4 供試体表面の温度積

上述のように、5つの供試体の中では供試体Aが一番融雪能力をもっていると考えられる。次に融雪能力が高いのは供試体B1と供試体B2である。この供試体Bは他の供試体と比べてパイプの埋設位置が供試体の中立軸付近にあり、圧縮や引張によるパイプの破壊を起こしにくいと考えられる。また供試体Bは供試体Aに比べて、融雪開始時間は遅くなると考えられるが、供試体の強度などを考慮するとパイプの埋設位置は表面から10cmの位置が適当で、軽量コンクリートは5cmくらいが適当であると思われる。

3. 軽量コンクリートの厚さの検討

3.1 解析方法

供試体下層の軽量コンクリートの厚さを検討するために、供試体表面から埋設パイプの位置が10cmの深さにある供試体Bを用い、図-5に示すような解析モデルとし、表-2に示す解析条件で熱伝導解析を行った[2]。解析は供試体中央断面を想定し、2次元で行い、有限要素メッシュは、供試体断面が対称であること、熱電対での温度測定位置に節点がかかること等を考慮して定めた。また熱源の取扱いとしては、銅製パイプの位置に対応する節点を温度固定境界（固定温度40°C）とした。この有限要素メッシュを用い、供試体下面の軽量コンクリートの厚さが0cm、1cm、5cm、6cm、10cm、11cm、15cmと変化させた時の表面温度の計算をした。

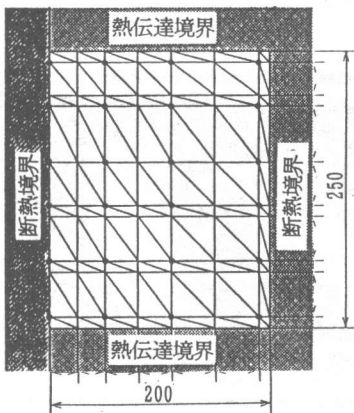


図-5 有限要素メッシュ

表-2 解析条件

| | |
|-------------|-------------------------------|
| 普通コンクリートの比熱 | 0.21kcal/kg·°C |
| 密度 | 2350kg/m ³ |
| 熱伝導率 | 2.00kcal/m·hr·°C |
| 熱伝達率 | 4.8kcal/m ² ·hr·°C |
| 軽量コンクリートの比熱 | 0.41kcal/kg·°C |
| 密度 | 1750kg/m ³ |
| 熱伝導率 | 0.60kcal/m·hr·°C |
| 熱伝達率 | 4.8kcal/m ² ·hr·°C |
| 外気温 | 20°C |
| 入水温 | 40°C |

3. 2 解析結果

図-6 に供試体表面の節点1における解析温度を示す。これを見ると軽量コンクリートの厚さが5 cmの場合が、定常状態の時に温度上昇が良いことがわかる。また、軽量コンクリートの厚さを5 cmよりも厚くしていくと、温度上昇は低くなることがわかる。しかし、初期の時間においては、軽量コンクリートの厚さが0 cmから5 cmまでは、温度上昇の差がほとんどないこともわかる。以上のことから室内実験および解析結果では、軽量コンクリートの厚さは5 cmまでにするのが、適切と考えられる。

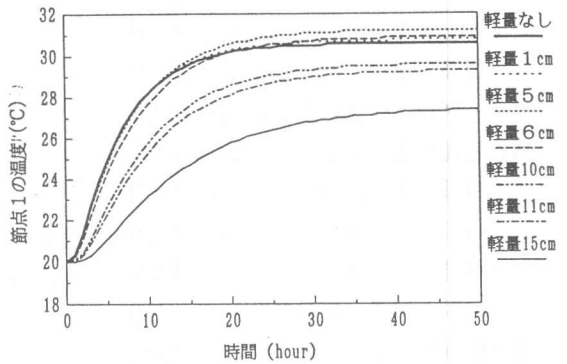


図-6 厚さの検討

4. 屋外融雪実験

4. 1 屋外融雪実験方法

実際に融雪および凍結防止効果を調べるため、室内実験に用いた5種類の実験供試体を中国地方の豪雪地域である広島県山県郡戸河内町恐羅漢に設置し、融雪・凍結防止実験を行った。供試体の設置状況を図-7に示す。

この実験では、供試体Aから供試体Cまですべて連結して、40°Cの温水を供試体間での入水温度差がなくなるよう毎分60ℓ通水した。供試体の表面には、新雪(比重0.21)を厚さ7cmにのせて、その融雪状態を1時間ごとにカメラで撮影し、また供試体内部の温度を計測した。5つの供試体のパイプの継ぎ目にはビニールパイプを使用し、さらに放熱を防ぐために、ビニールパイプには断熱材を巻いた。なお、供試体Aの入口と供試体Cの出口に取り付けた熱電対で温水の温度を計測しているが、供試体間の温度差は約0.1°Cであった。また計測中の外気温は約-4°Cだった。

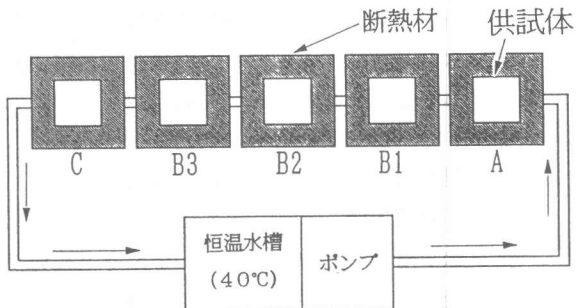


図-7 供試体の配置状況

4. 2 現場実験結果および考察

5つの供試体の中で一番早く雪が融け始めたのは供試体Aだった。これは、室内実験の結果からでもわかるようにパイプの埋設深さが一番浅いために供試体の表面が他の供試体よりも温まりやすいからである。次に供試体B1、供試体B2、供試体B3、供試体Cの順に融けたが、6時間後には供試体Cを除いて、他の供試体表面は同じ程度融けていた。このときの融雪状況を供試体B2を例に写真-1に示す。供試体の表面は、パイプの埋設

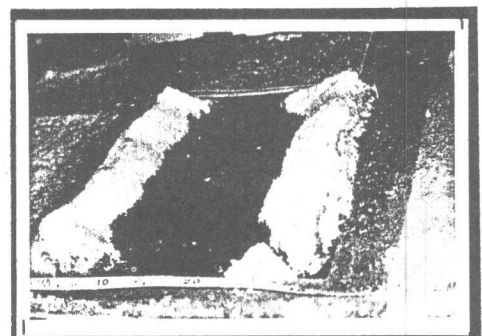


写真-1 6時間後の融雪状況

ラインに沿って幅約18cmにわたり融けている。また、この供試体B 2の表面から1cmのところ埋設された熱電対(図-3に示す)の測定温度を図-8に示す。埋設パイプの上にある節点1の測定温度は上下に変動しているが、節点1から11cm離れている節点3の温度は少しずつ上がって変動は見られない。これは、パイプの埋設ライン上の節点1では、写真-2に示すように表面が空洞になっているためである。この空洞を形成している雪が、表面に崩れ落ち、図-8に見られるように2時間後から4時間後まで温度が下がるのであり、その後表面に雪がなくなるまでこの変動を繰り返す。逆に節点3では空洞がなく、雪が融けながら表面温度は上昇するものと考えられる。また供試体表面から深さ1cmの位置の温度は2℃以上あれば、融雪すると考えられる。

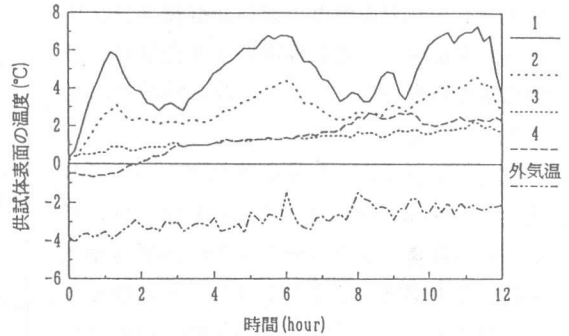


図-8 表面温度履歴(供試体B 2)

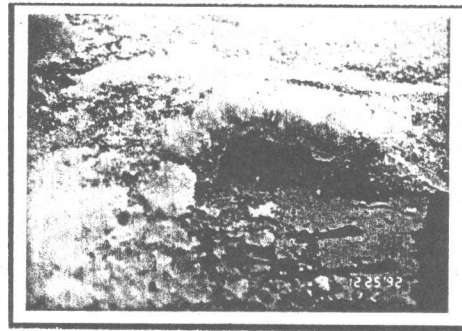


写真-2 融雪状況(空洞)

5. 融雪床版の最適設計

室内実験においては、床版厚が25cmでパイプの埋設深さが10cmの供試体(B 1, B 2, B 3)では、軽量コンクリートの厚さが5cmである供試体B 2が適当であるという結果が得られ、屋外融雪実験においては、普通コンクリートだけの供試体B 1と、軽量コンクリートを有する供試体B 2が適当であるという結果が得られた。また解析においても供試体Bでは軽量コンクリートの厚さは5cmが適切であるという結果が得られた。そこで、軽量コンクリートの厚さについて考察を行う。

表-3に供試体に使用した普通コンクリートと軽量コンクリートの熱容量および熱拡散率を示す。熱容量は物体の蓄熱能力を表し、熱拡散率は温度の伝わり易さを表す[3]。軽量コンクリートは、普通

表-3 熱特性値

| | |
|--------------|--|
| 普通コンクリートの熱容量 | 493.5 kcal/m ³ °C |
| 熱拡散率 | 4.05×10 ⁻³ m ² /hr |
| 軽量コンクリートの熱容量 | 717.5 kcal/m ³ °C |
| 熱拡散率 | 8.36×10 ⁻⁴ m ² /hr |

コンクリートと比べ、蓄熱能力が大きく熱拡散率が小さいことから熱を伝えるにくいと考えられる。

図-9に、室内実験における供試体B 1と供試体B 3の15時間後の温度分布を示すが、供試体B 3は、供試体B 1に比べ供試体の端部の表面温度は低く、供試体下層の等温線が密である。伝熱量は温度勾配に比例するので、パイプの熱は等温線の密な軽量コンクリートに伝わり、さらに普通コンクリートと比べ蓄熱能力が大きいので次々に熱を蓄積していく。すなわち軽量コンクリートが厚いと表面への伝熱量が減ってしまうのである。逆に軽量コンクリートが薄いと蓄熱には時間がかからないが供試体下面の保温効果があまりないため、下面より熱が逃げてしまい表面温度はそれほど上昇しない。しかし軽量コンクリートの厚さが5cmのものは、短時間では普通コン

クリートより表面温度は低いが軽量コンクリート部が蓄熱されると保温効果を発揮し、表面温度を普通コンクリートのみの供試体よりも上げることができる。

図-10に示すように床版厚 h cm、パイプの埋設深さ a cm、軽量コンクリート厚 c cm、パイプから軽量コンクリートまでの距離 b cmとする。表面温度は軽量コンクリートを厚くしたとき ($a > b$)、下面に熱が多く伝わるの上で上がり、軽量コンクリートが薄いと ($a < b$)、保温効果が少ないのであまり上がらない。すなわち $a = b$ の時、表面温度が一番良く上がる。要するに普通コンクリートの厚さはパイプ埋設深さの2倍 ($= 2a$) とすることが望ましいと考えられる。したがって、普通コンクリートの厚さが $2a$ の時に軽量コンクリートの厚さは、

$$c = h - 2a \quad (h > 2a) \quad (1)$$

となる。融雪床版の設計において、床版厚が決定されパイプの埋設深さが決定すれば、軽量コンクリートの厚さをこのようにして求めると、表面に効率よく熱を伝えることができる。また、温水パイプは埋設位置によっては圧縮や引張により破断を起こすことも考えられるが、パイプを中立軸に配置することにより対処できる。このようにして普通コンクリートと同じ強度の軽量コンクリートを使用し融雪床版を設計すれば、床版自体の自重を軽減でき表面への熱の伝導も良くなり路面の融雪能力を高めることができると思われる。

6. 結論

本研究は路面の融雪・凍結防止システムの実用化のため、路面に効率よく熱を伝える橋梁床版の設計について検討を行った。その結果、床版の下層に軽量コンクリートを使用することにより、床版自体の自重を軽減でき、また、床版下層からの熱の放出を低減できるため表面によく熱を伝えられることがわかった。しかし軽量コンクリートの厚さが薄かったり厚かったりすると表面温度が下がる。したがって最適な厚さが存在する。軽量コンクリートの最適な厚さは、床版厚からパイプの埋設深さの2倍を引いたものであると考えられる。このように床版を設計することにより、表面に効率よく熱を伝え、床版自体の自重を軽減できる。

参考文献

- 1) 宮本修司・小長井 宣生：道路の消融雪・凍結防止技術、開発土木研究所月報、No.460、pp.48-58、1991.9
- 2) 矢川元基：流れと熱伝導の有限要素法、pp.103-121、1983
- 3) 谷下市松：伝熱工学、掌華房、pp.32-85、1986

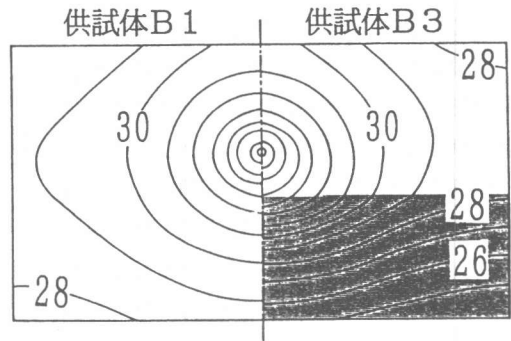


図-9 供試体内部の温度分布

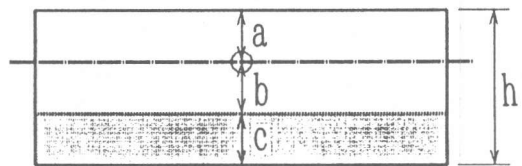


図-10 融雪床版の断面