

論文 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

吉武 勇^{*1}・中村秀明^{*2}・谷本俊夫^{*3}・浜田純夫^{*4}

要旨：冬期において発生するスリップ事故の多くは橋梁や高架橋上で発生しており，その防止策として温水パイプをコンクリート床版中に埋設したロードヒーティングシステムが考えられている。温水パイプ利用の場合には，省エネ・環境保全の観点から恒温域での地下水の利用が考えられるが，地下水の利用を念頭に置いた研究は少なく，設計に関する十分な基礎資料は得られていない。

そこで本研究では，温水パイプを埋設したコンクリート床版の融雪・凍結防止に関する設計資料を提供するとともに，恒温域での地下水の利用について検討を行った。

キーワード：ロードヒーティング，パイプ配置，温水温度，融雪比率

1. まえがき

積雪時において橋梁や高架橋上でスリップ事故が多発する原因は，地温(地熱)などによって徐々に融雪される一般道路部と吹きさらし状態で残雪・凍結している橋梁や高架橋上では，路面状況にギャップが生じているためである。現在，わが国において機械除雪や薬剤散布など種々の冬期路面管理が実施されているが，それぞれ一長一短があり，著者らは，以前より温水パイプを埋設したコンクリート床版(以下温水パイプ式融雪床版と呼ぶ)の融雪効果について研究を行っている¹⁾。温水パイプ式融雪床版の設計では，設置地点の地熱伝達および外気温の状況から，その地域に応じたパイプ配置や温水温度などを適切に定める必要がある。また，温水パイプを利用した融雪では，省エネ・環境保全の観点から恒温域での地下水の利用が考えられる。しかしながら，これらを系統的に扱った研究は少なく，設計に役立つデータが十分に整理されていないのが現状である。そこで本研究では，図-1に示すように恒温域での地下水の利用を念頭に

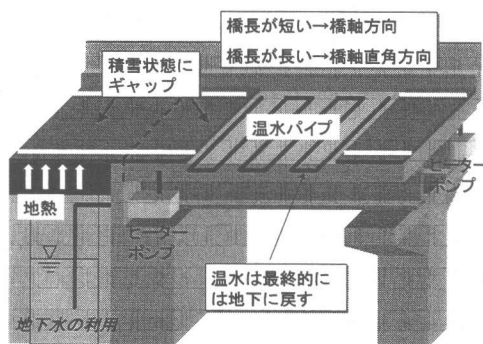


図-1 地下水を利用した実橋梁適用図

置いた温水パイプ式ロードヒーティングシステム設計の基礎資料を提供することを目的として，地中温度分布の測定，地中温度分布の予測式，地下水の利用による融雪効果の検討を行った。

2. 地中温度分布

2.1 地中温度分布測定結果

温水パイプによる融雪では，温水に比較的温度の安定した地下水を用いることで省エネ化を図ることができる。そこで，地下水の温度(以下，地下水温と表す)の定量的な把握を行うために，積雪寒冷地域である岡山県の山岳地(標高

*1 山口大学大学院 理工学研究科博士後期課程設計工学専攻，修士(工学) (正会員)

*2 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科，博士(工学) (正会員)

*3 ㈱エイトコンサルタント 技術本部長

*4 山口大学教授 工学部社会建設工学科，Ph.D. (正会員)

1000m)と比較的温暖な山口県宇部市にある山口大学構内(標高 10m)において、地下 10m および 8m までの温度分布を調べた。図-2 に地中の温度分布測定結果を示す。各地の年平均気温はそれぞれ 11.0℃, 15.8℃であり、地下 7m 以下の温度とほぼ一致しているため、地下水温は年平均気温から推定できるものと考えられる。

2.2 地下水温の推定

地下水温は年平均気温とほぼ一致しているため、地下水温の推定には、年平均気温を用いることにする。著者らは、緯度、標高、季節(月)の3つのパラメータから全国各地の日平均気温を簡易的に求める手法を提案している²⁾。

$$T_d = a_d(N - 35) + P_d - 0.006H \quad (1)$$

$$\left. \begin{aligned} a_d &= 0.212k - 1.864 \quad (N \leq 35) \\ a_d &= 0.076k - 1.355 \quad (N \geq 35) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$P_d = 4.35k - 6.007 \quad (3)$$

ここで、 T_d は日平均気温(℃)、 N は日平均気温を求めたい地点の緯度(°)、 H は標高(m)、 k は日平均気温を求めたい月である。ただし k の範囲は2(月)~8(月)とし、9(月)~1(月)は8月を境にそれぞれ対応する月を用いる。

年平均気温は月始めの日平均気温を1月~12月まで求めて、その平均値とした。推定式の整合性を確かめるため図-3 に理科年表気候表³⁾に記載されている全国44都市の年平均気温との比較を示す。この図より、著者らの方法で年平均気温を比較的高い精度で推定できると思われる。従って、この簡易手法により求められる年平均気温から、地下水温の予想が可能である。

3. 室内実験

コンクリート床版内に埋設された温水パイプにより、どの程度融雪可能か、また地下水利用の可否を検討するため室内融雪実験を行った。

3.1 実験方法

本研究では、室温を-30~10℃に温度設定できる冷凍庫内(設定温度と±0.25℃の誤差範囲で温度制御可能)において、融雪実験を行った。

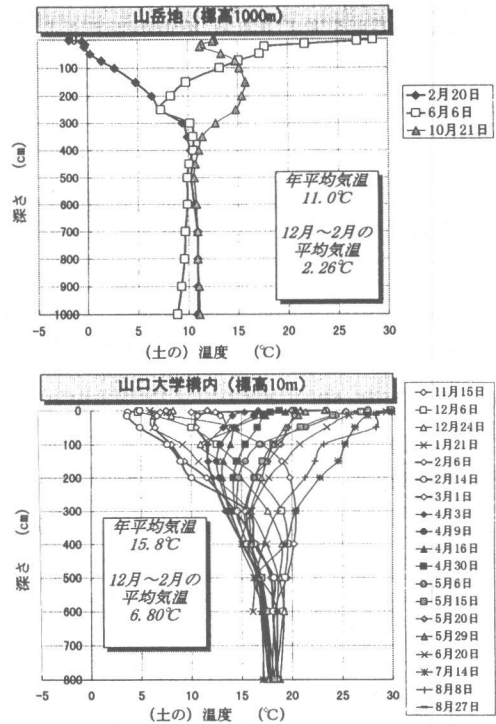


図-2 地中の温度分布(季節変化)

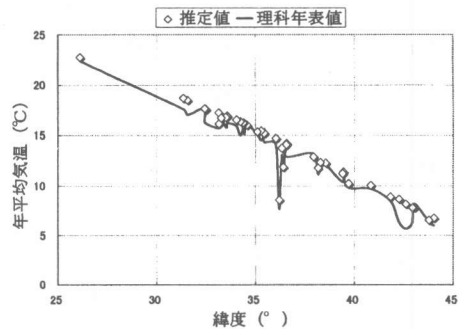


図-3 推定式の適合性

銅製温水パイプ(φ15mm)が埋設されたコンクリート供試体の表面に厚さ 5cm の雪を載せ、パイプに温水(通水量 327cm³/s, 流速 138cm/s)を流すことにより、コンクリート供試体への熱の供給を図った。なお、通水量は実橋梁への適用を考慮し、パイプ延長 20m 程度で温水温度の低下が小さい通水量(200cm³/s 以上)とした¹⁾。また、供試体内には熱電対が埋め込まれており、データロガーを介して計測された温度データは、10 分毎にパソコンに記録される。また 30 分毎に雪の高さ変化を測定した。なお、均質な天然の雪は

入手困難であるため、削氷機を用いて氷を削ったものを天然の雪の代用として用いた。供試体は冷凍庫内の温度との間に温度差が生じないように前日から冷凍庫内に入れ、実際の橋梁を想定する目的で吹きさらしの台上に設置した。なお

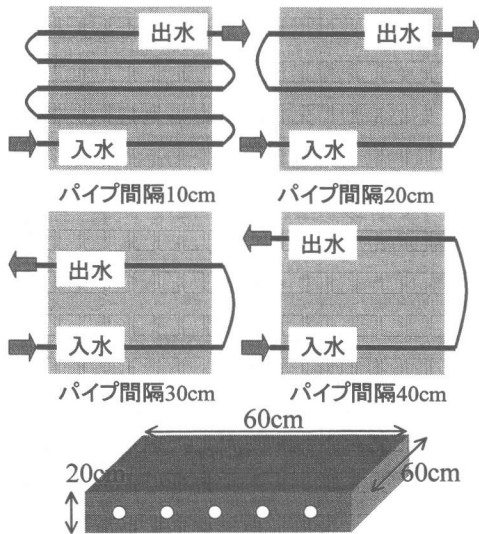


図-4 温水パイプ配置および温水経路

表-1 供試体詳細と熱電対埋設位置

単位 (cm)	床版厚	パイプ配置		熱電対埋設位置 (深さ方向)		
		深さ	間隔	最上面		ピッチ
				上面側	下面側	
供試体 a	20	3	10~40	1	2@2	1
供試体 b	20	5	10~40	1	2@2	1
供試体	1	8	10	2	2	2
	2	8	20	2	4@2	2
	3	8	30	2	2	2@6

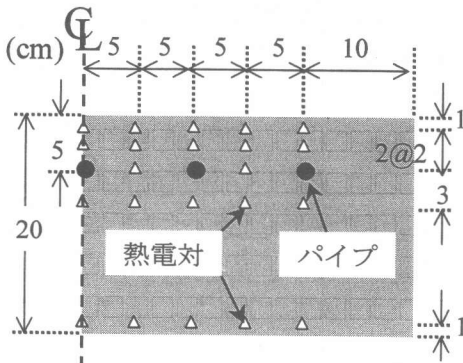


図-5 熱電対埋設位置 (供試体 b)

表-2 配合表

W/C (%)	S/a (%)	単位量 (kg/m ³)				
		セメント	水	細骨材	粗骨材	混和剤
54	45	300	162	811	1048	0.6

パイプの配置および温水の通水経路は図-4 に示す通りである。

3.2 実験供試体の詳細

中央断面において、供試体内部の温度分布を計測するための銅-コンスタンタン型の熱電対が 20~42 箇所埋設されている。実験供試体の詳細を表-1 および図-5 に示す。また、供試体を作製するにあたり、使用した材料は普通ポルトランドセメント (比重 3.15)、北九州若松産の細骨材 (比重 2.60, FM2.36) および山口県宮野産の砕石 (比重 2.72, 最大寸法 20mm) である (表-2 参照)。

3.3 実験項目

温水パイプ式融雪床版の設計にあたり最も重要な項目は、パイプの配置と通水する温水の温度である。そこで本研究では、一般的な舗装厚 5cm とコンクリート床版中のパイプが打ち換え時に破損しない余裕の深さ 3cm を見込んでパイプ埋設深さを 8cm とし、それを中心にパイプ間隔を 10~30cm、温水温度 20~40℃と変えた実験を行った。また埋設深さが浅いほど高い融雪効果が期待できるため、舗装体内に埋設した場合 (深さ 3cm) および床版表面に配置した場合 (深さ 5cm) を想定した同様の実験も併せて行った。

4. 実験結果と考察

4.1 床版内温度分布

図-6 にパイプ埋設深さ 8cm で温水温度 30℃と

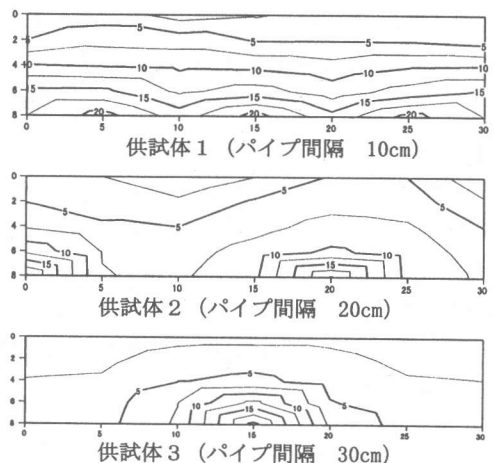


図-6 床版内温度分布

した時の供試体 1 (パイプ間隔 10cm), 供試体 2 (同 20cm) および供試体 3 (同 30cm) の運転開始後 2 時間における温度分布を示す。この図より供試体 1 では各等温線に谷山がみられず, 表面全体に 2.5℃以上の熱を供給していることがわかる。しかしパイプ間隔が広がるにつれ, 等温線の谷山形成が顕著になるとともに, 各等温線間隔が広がる結果となった。従って床版表面への均一な熱供給はパイプ間隔の狭いものが有効であり, 本結果から温水温度 30℃であればパイプ間隔 10cm で均一な熱の供給を行うことができるものと思われる。

4.2 融雪効果

(1) パイプ間隔の違い

融雪状況についても, 図-7 に示されるように均一な熱供給を行えるパイプ間隔 10cm の供試体 1 が, 最も均一に融雪できることが分かった。またパイプ間隔 20cm, 30cm の供試体 2, 3 は, 運転開始 60 分における雪の高さに全く変化が見られなかった。これはパイプに供給される熱が床版自体を暖めるのに使われたため, 温水を流してから融雪されるまでに時間がかかったものと考えられる。

(2) パイプ埋設深さの違い

図-7 に示されるように, 供試体 b (パイプ埋設深さ 5cm) の雪の高さ変化には 180 分後をピークに大きな谷山が形成される結果となった。これは熱の供給が, 融けかけの雪に対して局部的に多く行われ, 融雪速度を早めた結果と思われる。しかし供試体 a はそういった現象より先に雪に対して直接的な熱供給が行われたため, いずれの床版よりも早く融雪が進んだものと考えられる。従って, 埋設位置を浅くすれば融雪速度は早まるが, 熱の供給が不均一となり一部谷山が形成される傾向があるため, 均一に融雪を行うには床版全体として熱供給できる程度の埋設深さが必要であるものと思われる。

(3) 温水温度の違い

図-8 にパイプ埋設深さ 8cm, パイプ間隔 30cm

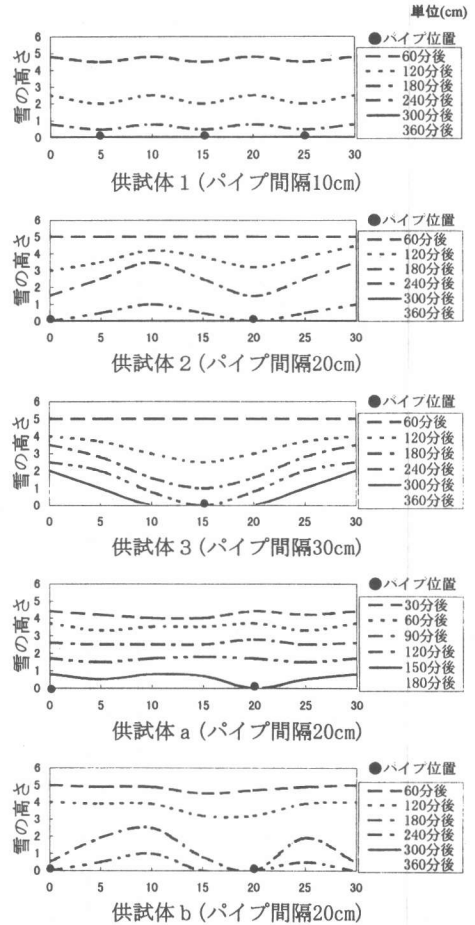


図-7 パイプ配置の違いによる融雪効果
(温水温度 30℃)

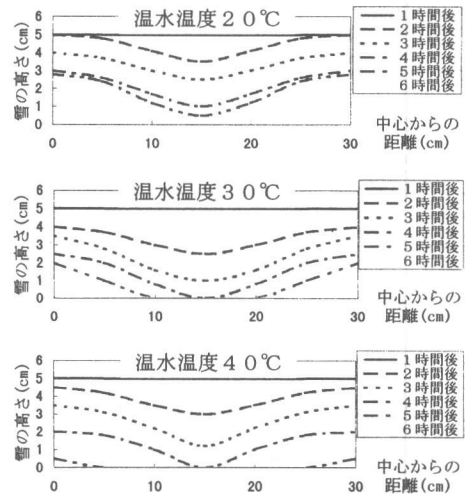


図-8 温水温度の違いによる融雪効果
(供試体 3:埋設深さ 8cm, 間隔 30cm)

で温水温度を 20, 30, 40℃と変えた供試体 3 の融雪状況を示す。この図から温水温度を高くしても、融雪効果に及ぼす影響は小さく、温水温度はパイプの配置ほど高い融雪効果は期待できないことがわかる。また温水の高温化に伴い、供試体表面近傍の温度差が顕著となり、その結果温度ひび割れ誘因する可能性も考えられる。従って温水温度を高めるよりもパイプ配置を適切にし、床版全体から熱を供給することが高い融雪効果につながるものと思われる。

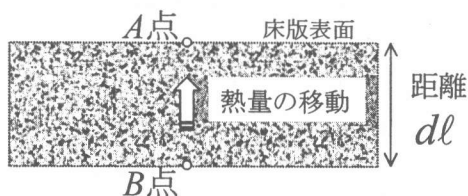


図-9 床版表面への熱量の移動

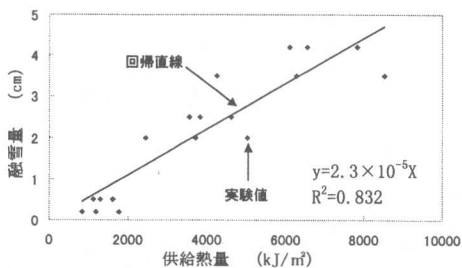


図-10 融雪量と供給熱量の関係

4.3 融雪比率

(1) 融雪効果の評価

融雪効果を定量的に評価するためには床版表面から雪層への供給熱量を正確に把握する必要がある。そこで図-9 に示される供試体表面において、フーリエの法則より式(4)で表される熱流束(W/m^2)を時間積分することにより算出した式(5)を用いて供給熱量の評価を行った。なお、ここで用いた供給熱量は供試体の表面から深さ2cmまでにおける実測の温度差から熱の移動量を算出し、供給熱量として用いている。

$$q(t) = -\kappa \frac{T_A(t) - T_B(t)}{dl} \quad (4)$$

$$Q(t) = \int q(t) dt \quad (5)$$

ここで、 q は熱流束 (W/m^2), k は熱伝導率 (W/m^2C), T_A, T_B は A および B 点の温度 (C), dl は A 点と B 点の距離 (m), Q は表面への供給熱量 (J/m^2) である。

また融雪量は床版からの供給熱量に比例し、原点を通る直線関係にあると考えられるため、図-10 のような実験結果を基に融雪量 (y) と供試体表面での供給熱量 (x) の関係を一次回帰し、単位供給熱量あたりの融雪量である勾配 k (m^3/kJ) を求めた。ここで密度 ρ の雪を融かすに当たり $2.98 \times 10^{-3} / \rho$ (m^3/kJ) の熱量が要される⁴⁾ため、本実験で使用した密度 $300kg/m^3$ の雪に要する熱量と実測勾配 k との比率 (融雪比率) から供試体表面での供給熱量と融雪量の関係を求めた。

表-3 融雪比率結果

深さ	間隔	温水温度			
		20℃	30℃	40℃	平均
3cm	10cm	21.8%	18.0%	21.0%	20.3%
	20cm	13.2%	14.0%	24.2%	17.1%
	30cm	14.3%	15.4%	22.1%	17.3%
	40cm	16.7%	28.5%	20.8%	22.0%
5cm	10cm	23.4%		30.5%	27.0%
	20cm		26.3%		26.3%
	30cm	43.0%	21.7%	14.7%	26.5%
	40cm		28.0%		28.0%
8cm	10cm	56.1%	51.2%	43.9%	50.4%
	20cm	48.8%	51.2%	43.9%	48.0%
	30cm	51.2%	56.1%	36.6%	48.0%
平均		32.1%	31.0%	28.6%	

(2) 融雪比率結果

パイプ配置および温水温度を変えた場合の融雪比率の結果を表-3 に示す。パイプ埋設深さ 8cm の供試体 1 ~ 3 では温水温度が高まるにつれ、融雪比率が低下することが分かる。しかし供試体 a および供試体 b では、雪層への直接的な熱の供給が大きいため、融雪量が大きく温水温度の違いによる融雪比率の差は見られなかった。また同様にパイプの間隔を変えても、特筆すべき結果は得られなかった。しかし各供試体において温水温度を変えた融雪比率の平均値は、わずかながら温水温度の高温化に伴い、低下していくことが分かる。このことから、本章 4.2(3) で述べたように温水温度を高くしても、融雪以

外に損失する熱量の占める割合が大きくなるため、高い融雪効果は期待できないものと思われる。また、いずれのパイプ間隔においても、パイプ埋設深さ 3cm, 5cm の供試体 a, b では融雪比率が 20%と 27%程度であり、パイプ埋設深さ 8cm の供試体 1～3 (融雪比率 50%程度) に比して、大きく低下する。パイプ埋設深さを浅くするほど、一部で熱源 (温水パイプ) と床版表面との間の移動熱量が大きくなるため、雪層自体は局部的に融解水となる。そして融解した水は比較的高い熱伝導性から外気に熱を奪われるために、供給される熱の損失が大きくなるものと考えられる。

表-4 地下水利用時の推定加熱温度

都市	緯度	標高 m	推定温度 地下水 ℃	雪 ℃	所要熱量 kJ/m ² hr	パイプ間隔					
						10cm	20cm	30cm			
旭川	43.8	111.9	6.5	-13.5	7053	13.5	7.0	27.1	20.5	40.6	34.7
札幌	43.0	17.2	7.8	-12.1	6999	13.4	5.6	26.9	19.0	40.3	32.5
青森	40.8	2.7	10.1	-9.3	6896	13.2	3.2	26.5	16.4	39.7	29.7
盛岡	39.7	155.2	10.2	-9.9	6918	13.3	3.0	26.6	16.3	39.8	29.6
仙台	38.3	38.9	12.3	-6.5	6787	13.0	0.7	26.1	13.7	39.1	26.8
新潟	37.9	1.9	12.9	-6.8	6801	13.1	0.2	26.1	13.2	39.2	26.3
金沢	36.6	26.1	14.1	-6.3	6782	13.0	0.0	26.0	11.9	39.1	25.0
長野	36.4	418.2	11.9	-9.5	6903	13.3	1.4	26.5	14.6	39.8	27.9
軽井沢	36.2	999.1	8.6	-11.7	6987	13.4	4.8	26.8	18.2	40.2	31.7
松江	35.5	16.9	15.2	-3.9	6689	12.8	0.0	25.7	10.5	38.5	23.3
東京	35.5	16.9	15.2	-2.9	6650	12.8	0.0	25.5	10.3	38.3	23.1
大阪	34.4	23.1	16.1	-2.6	6636	12.7	0.0	25.5	9.4	38.2	22.1
福岡	33.6	2.5	16.9	-0.3	6543	12.6	0.0	25.1	8.2	37.7	20.8
下関	33.6	3.3	16.9	-0.3	6543	12.6	0.0	25.1	8.2	37.7	20.8
松山	33.5	32.2	16.8	-1.3	6586	12.6	0.0	25.3	8.5	37.9	21.2

※条件 パイプ外径: 17mm, パイプ熱伝達率: 271W/m²K
雪密度: 300kg/m³, 時間降雪量: 5cm/hr, 割り増し係数1.3

4.4 地下水利用の検討

単位時間あたりの降雪量, 雪の密度, 比熱⁵⁾(式(6)参照)および温度を h (m/hr), ρ (kg/m³), c (kJ/kgK), T (K)とするととき, 融雪に要される熱量 J (kJ/m²hr)は式(7)で表すことができる⁶⁾。ただし β は熱損失分を考慮した割り増し係数であり, m は融解熱(kJ/kg)である。

$$c = 0.185 + 0.689 \times 10^{-2} T \quad (6)$$

$$J = \beta h \rho \{c(273 - T) + m\} \quad (7)$$

またパイプの熱伝達率を α (kJ/m²hrK), 単位長さあたりのパイプの表面積を S (m²/m), パイプ間隔を p (m)とするととき雪を融かすのに必要な地下水温度 T_p は式(8)で計算することができる。

$$T_p = \frac{p}{S\alpha} J \quad (8)$$

4.2の結果と式(8)を用いて全国15都市の推定地下水温度と各パイプ間隔に要される加熱温度 T_p の

結果を表-4に示す。ただし雪の温度は日振幅量を日平均気温²⁾から引いた推定日最低気温(0℃以上の場合には0℃と設定)で代用した。この結果より緯度40°以下ではパイプ間隔10cmを採用すると、ほとんど地下水温度だけで雪を融かすことができ、地下水温度が15℃以上の地域ではパイプ間隔30cmでも加熱温度が20℃前後であるため、経済性に優れるものと期待できる。

5. 結論

本研究で得られた結論を以下に要約する。

- ① 温度の安定した地下水温度は、簡易式を用いた年平均気温より推定できる。
- ② 均一な融雪を行うには、床版全体から雪層へ熱の供給できる程度のパイプ埋設深さが必要である。
- ③ 温水温度の高温化は外部へ逸散する熱量が多くなり、高い融雪効果は期待できない。
- ④ 地下水が15℃以上の地域では、パイプ間隔30cmにおいて20℃程度の加熱量となる。

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VI査読後修正投稿中
- 2) 吉武 勇, 中村秀明, 浜田純夫, 宮本文穂: 外気温の日変動を考慮したマスコンクリートの3次元温度応力解析, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.1375-1380, 1997.6.
- 3) 国立天文台: 理科年表, 丸善, 1997
- 4) D.M. グレイ, D.H. メール: 防雪技術ハンドブック, 築地書館, 1990.2.
- 5) S.Sakazume & N.Seki: Bulletin of J.S.M.E, 1980.11.
- 6) 山下 宏, 下村忠一, 石平貞夫: 温水循環方式による路面融雪について, 建設省技術研究会報告, 1971.