

中国地方における地熱を活用したパイプヒーティングによる適切な冬季路面管理法の開発

※吉武 勇¹

¹ 山口大学大学院 理工学研究科 (〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1)



※発表者

本研究では、中国地方のような比較的温暖な地域に適した冬期路面管理方法のひとつとして、冬期においても比較的高い地中熱を用いたパイプヒーティングシステムの提案を行う。本報では、このシステムによる冬期路面の融雪・凍結防止効果を紹介するとともに、長期にわたって計測した温度データ等に基づく温度特性を報告する。さらに本システムに適した稼働方法に関する基礎的実験ならびに温度解析について報告する。

キーワード パイプヒーティング, 地中熱, 路面管理, コンクリート舗装

1. はじめに

近年では、凍結防止剤を用いない冬期路面管理方法のひとつとして、パイプヒーティングシステムが注目されている。パイプヒーティングは、舗装版内にパイプを埋設し、パイプ内の循環水によって路面に熱を伝える融雪・凍結防止システムである。ここで山口県では、年平均気温に概ね一致する地下10m程度の比較的浅い層にある地中熱が高い傾向にある。舗装体内に埋設したパイプに水循環し加温するパイプヒーティングシステムに地中熱や地下水を用いることで、路面の積雪・凍結の抑制が可能となり、冬期における車両の安全性を確保できるものと推察される。

そこで本研究では、地下10m程度の地表近傍に構築したコンクリート製貯水タンク（地中熱地下備蓄タンク）内に、路面融雪・凍結防止に必要な熱量（地下水）を備蓄保温しておき、必要に応じてコンクリート路面下に埋設したパイプ内にタンク内水を供給する「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」（図-1）を考案した¹⁾。本報では、同システムの設計・施工を中心にまとめるとともに、その冬期路面状況や温度計測結果について報告する。

2. 地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム

本システムの設置箇所は、標高約 570m の山間部にある一般国道 315 号の葉の内 3 号橋から同 4 号橋（橋梁部 430m², 土工部 265m²）である。図-2 に示すように、計画地は S 字カーブ区間にあり、道路線

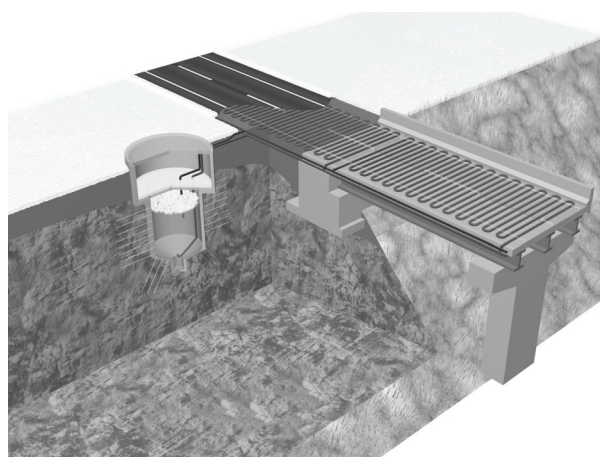


図-1 地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム

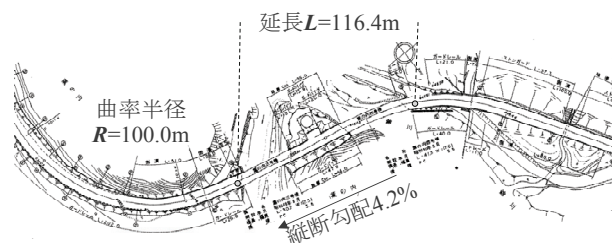


図-2 パイプヒーティングシステム設置道路（山口県周南市鹿野葉の内 国道 315 号）

形は縦断勾配 4.2%である。

パイプヒーティング舗装の融雪面積（橋梁部 430m², 土工部 265m²）に対して、既往の設計書²⁾を基に必要とする熱量から貯水タンクの水量の検討

を行った。貯水タンクの容量は 225m^3 以上を確保できるサイズ（容量 230m^3 ）に設定した。貯水タンクの主形状を図-3 に示す。なお、このタンクは直径 $5.5\text{m} \times$ 高さ 9.5m （深さ 12.75m ）の円筒状であり、下端部には水循環・対流を考慮して 45° のテーパを設けている。

本研究において主対象とするパイプヒーティング舗装は、路面内に鋼製パイプを埋設し、融雪・凍結防止が必要な場合において、同パイプ内に通水・循環するものである。このような構造においては、耐久性や熱効率の観点から、コンクリート舗装がしばしば採用される。本研究で構築したシステムにおいても、一般路面部はコンクリート舗装とし、橋梁部においてはひび割れ抑制の観点から、ポリプロピレン繊維補強コンクリートを用いている。本研究では、既設道路上面を切削した後、既製のパイプヒーティングパネル（標準パイプ間隔 150mm ）を路面より深さ 50mm 位置に設置した。

地中熱地下備蓄タンク方式によるパイプヒーティングシステムについて、2005 年冬期より運用を開始した。水中ポンプは降雪、気温、路面温度、水分センサーにより自動稼働が可能であるため、外気温が $+3^\circ\text{C}$ 以下、あるいは橋梁部の路面温度が $+1^\circ\text{C}$ 以下となった場合にシステムが自動制御するように設定した。しかし、供用開始後に明らかに路面が凍結しない場合でもポンプが稼働していた。このシステムが稼働していない間（非稼働時）に計測した温度データを図-4 に示す。

図-4 に示すように、外気温が大きく変動する場合においても、土工部や橋梁部の路面温度の変動は比較的小さい。このことは、外気温に基づいて管理温度を設定することにより過剰な運転を行う可能性が高くなることを示している。すなわち、外気温に基づいて制御するよりも、より直接的に土工部や橋梁部の路面温度で管理することが、過剰な運転を少なくし経済的にも望ましいものと推察される。そこで、システム稼働における管理基準を、外気温・橋梁部路面温度の双方による制御から橋梁部路面温度のみによる制御に変更することで、システム稼働に伴う過剰なエネルギーの浪費を防ぐことができ効率的と考えた。これらの検討結果を踏まえ、橋梁路面温度が $+0.5^\circ\text{C}$ 以下となった場合にシステムが自動制御するように設定を変更している³⁾。

本システムの供用開始後における冬期標準運転時における路面状況例を写真-1 に示す。この写真に示すように、一般路面と同様に、パイプヒーティングを設置した橋梁上にはほとんど残雪はなく、十分に融雪できていた。特に、設置区間の路面が非設置区

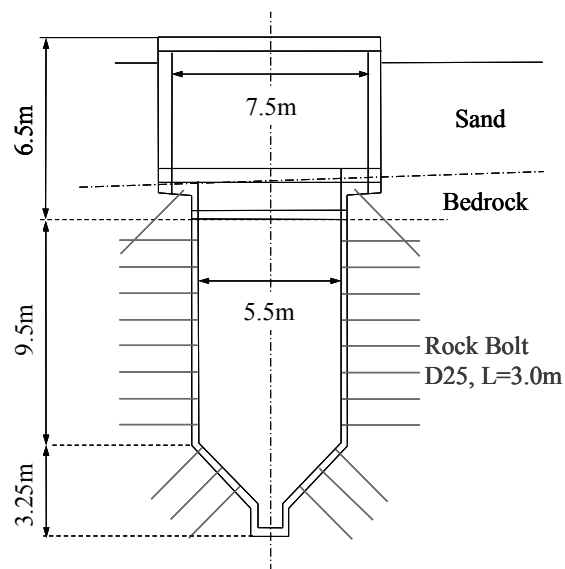


図-3 貯水タンクの主形状

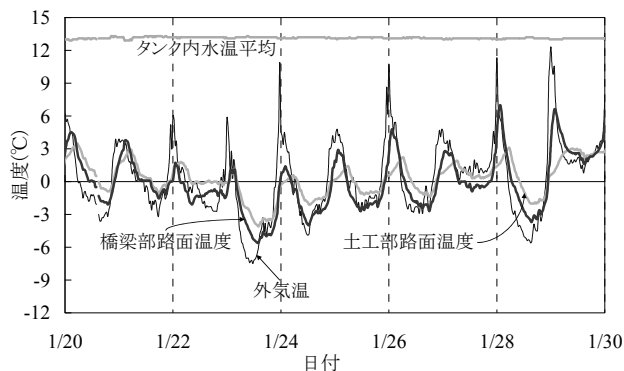


図-4 非稼働時の路面温度の推移

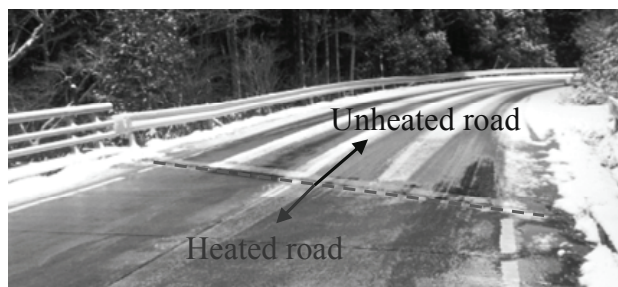


写真-1 パイプヒーティング境界面の路面状況

間の路面より先に乾燥していることからその効果が窺える。このように一般路面（非設置区間）と橋梁路面（設置区間）の格差を少なくすることで、車両のスリップ事故防止に大いに貢献できるものと期待される。

3. 長期計測に基づく温度特性と加温方法

深さ 21m におけるタンク内水温、タンク周辺の地盤および地盤における温度計測結果例を図-5 に示す。

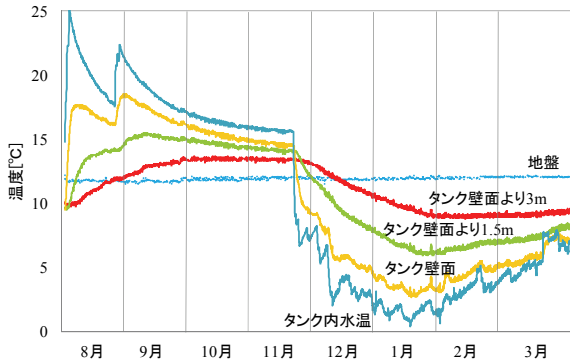


図-5 2008年7月～2009年3月の温度計測結果

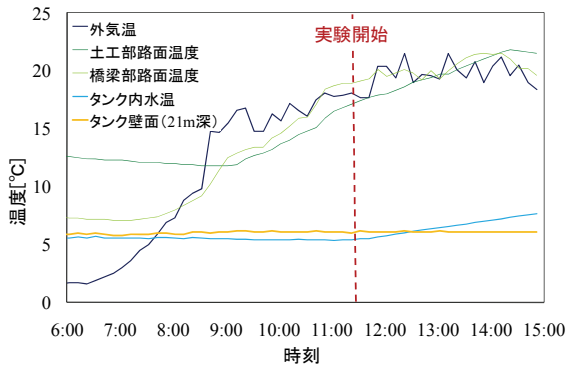


図-6 冬期における逆熱交換実験

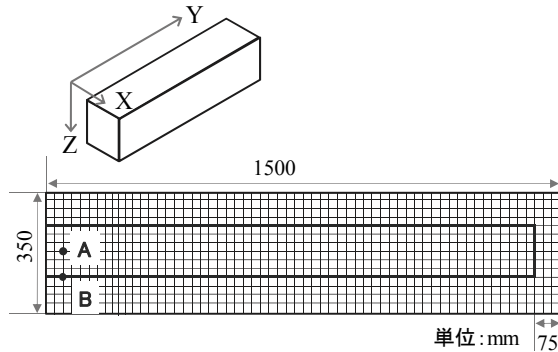


図-7 解析モデル

これらの計測結果に示すように、深さ21mでは外気の影響をほとんど受けないため、年間を通じて地盤の温度は約12°Cで一定となっている。また、タンク壁面に近いほど、通年の温度変化は小さくなっている。11月下旬にシステムが稼働するとともにタンク内水温は低下し、12月には約3°C、1月には約1°Cを計測した。2月以降は自然採熱により、徐々に温度が上昇し、3月上旬には5°Cを上回っている。その後、5月以降は温度上昇が停止し、10°C程度にとどまっている。タンク壁面の地盤も同様に、夏期には約18°C、冬期には約3°Cと大きく温度が変動している。

一方、タンク壁面より3mの位置の地盤は冬期にお

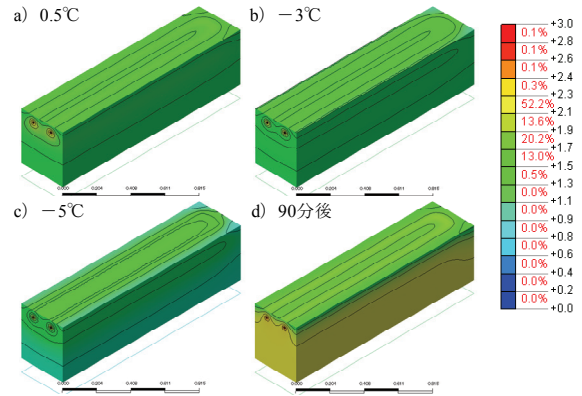


図-8 温度分布の解析結果（通水温度1°C）

いても8°C程度を維持しており、2月以降のタンク内水温の上昇に寄与しているものと思われる。

そこで本研究では、低下したタンク内水温を早期に上昇させる目的と、地熱温度より高温の温水をタンク内に備蓄させる目的で、比較的気温の高い時間帯（3時間程度）にシステムを稼働させ短期的な逆熱交換実験⁴⁾を行った。しかしながら夏期における逆熱交換実験より、夏期に水温を上昇させても、真冬の凍結防止・融雪が必要な時期まで水温を確保することは難しいことがわかった。そこで、夜間時には氷点下まで気温が下がるものの、昼間時には気温が上昇することを活かし、システムの稼働により低下したタンク内水温を上昇させるため、冬期の比較的気温の高い日中に数時間システムを稼働させる実験を行った。

冬期の逆熱交換実験として実施した2009年3月18日の実験結果を図-6に示す。同日の気温は夜間には約1°Cと低いが、日中には20°C前後まで上昇している。システムの稼働は11時半から15時と短い時間であったが、実験の結果、水温は5.5°Cから7.7°Cまで2.2°Cの上昇がみられた。さらに実験終了後から3月20日まで水温は7.7°C前後を保っていた。

夏期の逆熱交換実験のようにタンク周辺地盤の温度を上昇させることはできなかったが、短時間で水温を上昇させることができ、水温が著しく低下した際や、寒波の到来などによる数日におよぶ気温の低下が懸念される前などに、同システムを稼働させることで水温確保ができ、より確実に凍結防止・融雪効果を得られるものと考えられる。

4. 温度解析に基づく適切な運転方法

本研究では、地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムにおいて、設計時に想定していた凍結防止に必要な温度である土工部路面温度 4.6°Cおよび橋梁部路面温度 4.9°Cより低いタンク内

表-1 通水時間・温度のまとめ

通水温度 (°C)	外気温 (°C)	路面の 初期温度 (°C)	0.5°Cまで上昇させるのに 要する時間		3分後の温度(°C)		収束温度(°C)	
			A点	B点	A点	B点	A点	B点
1	0	-5	7分	6分	0.21	0.29	0.55	0.58
3	0		50秒	40秒	1.18	1.35	1.65	1.75
3	-5		-	-	-1.13	-0.78	-0.60	-0.33
5	-5		15分	5分	-0.16	0.28	0.50	0.84
8.5	-9		8分	4分	-0.31	0.43	0.63	1.22

水温で稼働した場合の温度特性の把握を試みた。冬期のパイプヒーティング路面に低いタンク内水温を通水した場合を想定し、コンクリート路面の温度変化を解析的に評価した。実際のパイプヒーティングシステムの一要素としてコンクリート舗装モデルに1本のパイプをU字状に配置した解析モデル(図-7)を用い、3次元温度解析を行った。本研究で実施した解析パラメータを以下に列挙する。

- ・外気温 0°C, 水温 3°C, 初期温度 0.5°C, -3°C, -5°C
- ・外気温 0°C, 水温 1°C, 初期温度 -5°C
- ・外気温 -5°C, 水温 3°C, 5°C, 初期温度 -5°C
- ・外気温 -9°C, 水温 7°C, 8°C, 8.5°C, 初期温度 -5°C

さらに、上記における解析で得られた結果を基に路面温度を0.5°C以上まで上昇させるのに要する通水時間の比較を行った。

図-8に示す温度分布からは、パイプ直上のコンクリート路面表層のみならず、パイプ間の表層においてもパイプ直上とほぼ同様の効果が得られることがわかる。そして解析結果を踏まえ、初期温度を一定とした場合に、路面温度を0.5°C以上まで上昇させるのに要する時間の比較を行った。路面温度を0.5°C以上まで上昇させるのに要する時間を表-1にまとめて示す。

通水温度3°C, 外気温0°Cでは初期温度が-5°Cと低温でも1分以内に路面温度を0.5°Cまで上昇させることができた。通水温度1°Cとした場合ではA点では7分、B点では6分程度要し、通水温度3°Cと比較すると、遅延する傾向はあるものの、3分以内に0°C以上まで上昇させることができる。

5. まとめ

本報では「地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステム」の設計概念や特徴を記載するとともに、冬期の温度計測結果や融雪・路面凍結防止効果について報告した。その結果、山口県のような比較的温暖な地方においては、地下10m程度の恒温層に構築した貯水タンク内に備蓄保温した水を、降雪時など必要に応じてパイプヒーティングに用いることで、一般路面と同等の路面状態にすることができた。パイプヒーティングに用いた循環水がタ

ンク内に環流することで、タンク内水温は一時的に低下するものの、システムの非稼働時間中に、周辺にある地中熱等によって、徐々にタンク内水温は上昇するため、同システムは連続的な降雪が少ない地方においては有効な手段のひとつと評価できた。

加えて、地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムにおいて計測した温度データを基に、同システムの温度特性を示すとともに、実測の温度データを用いた数値実験を行った。冬期の日中における逆熱交換実験の結果、比較的短時間で水温を上昇させることができた。夏期に逆熱交換を行い、水温を上昇させても、冬期の凍結防止・融雪が必要な時期まで水温を確保することは難しいため、冬期に逆熱交換を行うことで、凍結防止・融雪に必要な水温確保ができることがわかった。本研究で示した通水温度と外気温による解析結果から、設計時に想定していた凍結防止に要する土工部路面温度4.6°Cおよび橋梁部路面温度4.9°Cより低い温度の水でも通水することで、路面凍結防止効果が得られる可能性を示した。

本研究を通じて、地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングに関する多くの基礎的データを収集するとともに、その運転・管理方法について様々な知見を得ることができた。本研究で得られたデータの分析結果および実測現象から得た知見等を基に、効果的な同システムの運用手法を確立する必要があると考えている。

謝辞: 本システムの開発ならびに各種計測にあたり、山口県の安村成史氏、(株)エイト日本技術開発の永井泉治氏・菖蒲迫正之氏、山口大学大学院の中村秀明教授、志賀亮子氏(現、広島市)をはじめとする多くの方々へ協力を頂いた。ここに記して、関係者各位に深甚の謝意を表す。

【参考文献】

- 1) 日経コンストラクション, p.20, 2006/03/10号, 2006.
- 2) 建設省北陸地方建設局:「路面消・融雪施設等設計要領」, 2000.
- 3) 東 克樹, 安村成史, 梅田高正, 菖蒲迫正之, 吉武 勇: 地中熱地下備蓄タンク方式パイプヒーティングシステムの効率的な温度管理, 寒地技術論文・報告集, Vol.23, pp.66-70, 2007.
- 4) 宮本重信, 青木 靖, 竹内正紀, 永井次郎, 五十嵐俊介, 藤井政志, 広松 淳: 夏の熱, 群杭効果で地中に保存して融雪, 寒地技術論文・報告集, Vol.22, pp.475-480, 2006.