

鋼床版橋路面の蓄熱材封入による凍結抑制の研究

宮本重信¹・室田正雄²

¹正会員 福井県雪対策・建設技術研究所 (〒918 福井市春日3丁目303)

²正会員 福井県雪対策・建設技術研究所 (〒918 福井市春日3丁目303)

鋼床版橋の路面は、熱容量が小さいため、冬期に結露凍結しやすく雪も積もりやすい。この路面上のみが凍結することが原因で、しばしば交通事故が生じている。この問題を解決しようと、比較的温暖な雪国福井市で試験と観測を行った。まず、鋼床版橋下面の断熱は効果がないことが分かった。ついで、鋼床版上の舗装に凝固・融解温度が3~5℃の蓄熱材を封入し、凍結直前での熱容量を大きくする工法を試験的に施工した。蓄熱材は、昼間の日射熱を蓄え、翌朝の路面上の凍結や積雪を抑制することが分かった。

Key Words : steel deck bridge, antifreezing, snow-melting, phase change material, heat storage

1. はじめに

写真-1と写真-2は、降雪のあった朝のほぼ同時刻の福井市内の鋼床版橋とコンクリート床版橋の状況を示すものである。後者が地盤部舗装と同じようにほぼ無積雪であるにもかかわらず、前者は圧雪となっている。このように、鋼床版橋は、他に比べて著しく雪も積もりやすく結露凍結しやすい^{1)・2)}。自動車運転の途中、鋼床版橋に至り、突然、圧雪・結露凍結の路面に遭遇することが、しばしば交通事故につながっている。また、消雪装置が設置されていても、降雪センサーが適正に作動しなかったなどで、大きな事故となった例が少なくない。更に、路面が結露凍結した際に消雪装置で散水すると、その水がタイヤに引きずられ、散水区間外の路面は氷面になってしまう。現在行われている融雪剤の散布は、凍結予知・散布作業の煩わしさだけでなく、橋梁鋼材の錆の促進と周辺環境への影響が懸念される。こうした鋼床版橋の凍結は、雪国以外の地域でもしばしば生じ、当該道路管理者は、融雪剤散布などの対策を行っている。

そこで、本研究では、鋼床版橋だけが凍結・圧雪となる状況を、自然エネルギーのみで、運転管理なしで、地盤部なみに改善することを目標にした。まず、鋼床版橋の舗装・床版の熱収支を調査し、次に、その調査結果から考えられた蓄熱材封入工法を示し、試験施工によって、その効果の検証を行った。

2. 鋼床版橋下面の熱移動と断熱効果



写真-1 鋼床版橋の積雪状況 (96.4.12.6:50)



写真-2 コンクリート床版橋の積雪状況 (96.4.12.7:00)

(1) 鋼床版橋の裏面の熱移動

福井市内の鋼床版橋（城東橋）で、その床版と舗装、床版下の空気、河川水、護岸の温度などを自動

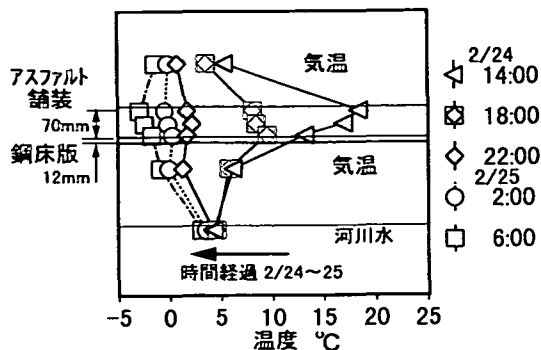


図-1 鋼床版橋と上下気温,下面河川水の温度

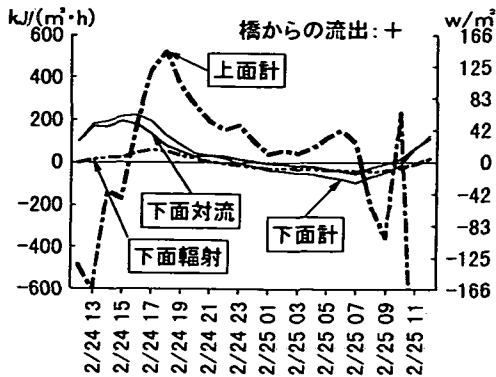


図-3 鋼床版・舗装からの熱流出量

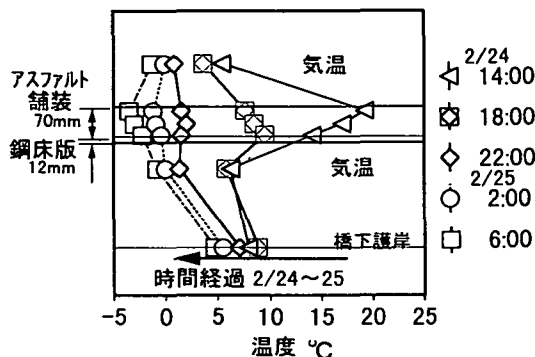


図-2 鋼床版橋と上下気温,下面護岸の温度

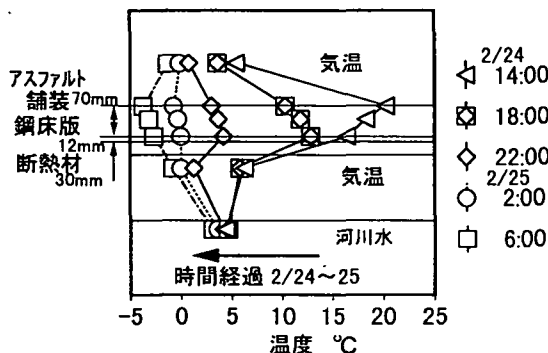


図-4 下面断熱鋼床版橋と上下気温,下面河川水の温度

計測した。1996年2月24日の午後2時から舗装表面が結露凍結した翌朝6時までの床版上下の温度変化を4時間ごとに示したのが図-1である。この図から、昼間は、日射で舗装表面は18.3℃にまで暖められ、気温、河川水の温度に比べ10℃以上も高くなっていることが分かる。したがって、河川(輻射)や空気(対流)によって、床版は冷やされていることになる。

ところが、天空への放射で床版が冷やされた午後10時には、3.1~4.6℃で安定している河川水より、床版下面の方が低温になってしまう。図-2は、図-1の河川水温度を床版下の構造物(護岸)温度に代えたものである。この護岸も、温度変化が鋼床版橋より小さく、午後10時には、床版の下面温度より高温となっている。鋼床版橋に比べて河川水や護岸の温度変化がこのように小さいのは、その熱容量が鋼床版橋に比べ大きいことと、護岸については、更に天空への放射がないことによると推測される。そのことから、どの地域でも、放射冷却の夜は、河川水や下面護岸が床版下面部より高温になり、河川や護岸からの輻射熱で床版は暖められていると考えられる。その輻射熱を床版下面に設置した正味輻射熱量計で計測した結果が図-3の下面輻射で、輻射熱は、午後

10時から河川・護岸から床版へと流れるように変わり、朝7時までに 297kJ/m²の熱が床版に流入する結果を得た³⁾。

次に、対流による下面の熱移動について述べる。日が没すると、床版下面部の温度は急激に低下しはじめ、午前2時には、ほぼ床版直下30cmの気温と同じ温度になっている(図-1)。以後は、気温の方が高くなり、床版には下面の空気から熱が流れることになる。放射冷却の際は、風速が弱い上に、橋梁下面は、桁とリブで囲まれ、更に風が弱い。そこで、床版下面における熱伝達率を熱流上向で8.1w/(m²·k)、下向で5.8w/(m²·k)と推定し⁴⁾、床版から対流による熱流出を求めると図-3の下面対流となる。

床版下面では結露は見られず潜熱熱移動はなかったため、舗装・床版の温度変化から流出した熱量を求め、そこから下面の輻射と対流の熱流出を差し引くことで、上面での熱流出量が求められる。その結果が図-3の上面計である。図-3から、床版上面での熱流出(流入)で、やがて床版が低温(高温)になると、床版下面では、それを緩和するような熱の流入(流出)が生じることが分かる。

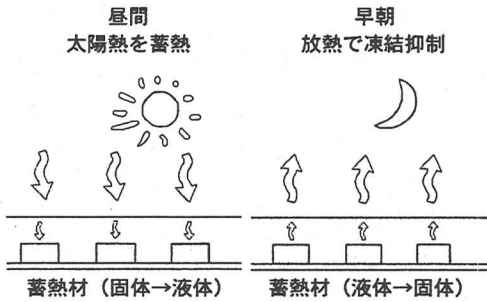


図-5 蓄熱材による凍結抑制の概念

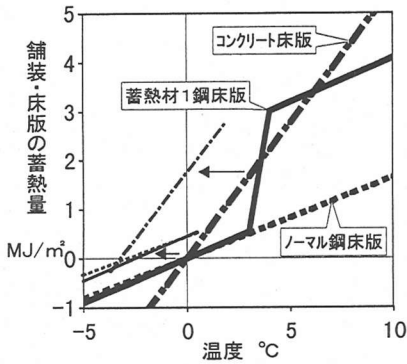


図-6 各種橋の舗装・床版の温度-蓄熱量

(2) 下面断熱の凍結抑制効果

これまで明らかにした熱移動からは、床版下面を断熱しても、凍結を抑制する効果は期待できないと考えられる。しかし、それが効果的ならば容易なので、同じ橋の一部区域の下面を発泡ウレタン（熱伝導率 $0.021\text{w}/(\text{m}\cdot\text{K})$ ）厚さ 3cm で断熱し、その結果を計測した。なお、この断熱によって、鋼床版への下面からの対流による熱通過率は、設置前の 11% 以下になる。この下面断熱鋼床版橋の温度変化を図-1と同じ時刻で示したのが図-4である。断熱によって、昼間は床版下面からの熱流出が少なくなり、午後2時におけるこの下面断熱鋼床版橋の舗装表面温度は、図-1の鋼床版橋より 1.9°C 高い 20.2°C に上昇している。しかし、翌日午前6時には逆に 0.7°C 低い -3.7°C にまで低下している。下面断熱は、凍結抑制には逆効果となった。これは、断熱材によって、深夜には下面からの熱流入が遮断されたことによる。

3. 蓄熱材封入工法の原理とその熱特性

(1) 蓄熱材封入工法の原理

これまで示した実験結果は、床版橋が凍結しやすいのは、下面での冷却にあるのではなく、別に原因が

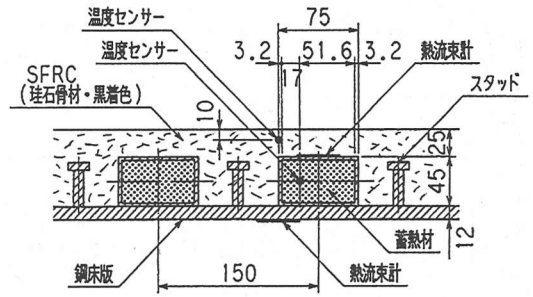


図-7 舗装内蓄熱材封入の断面図

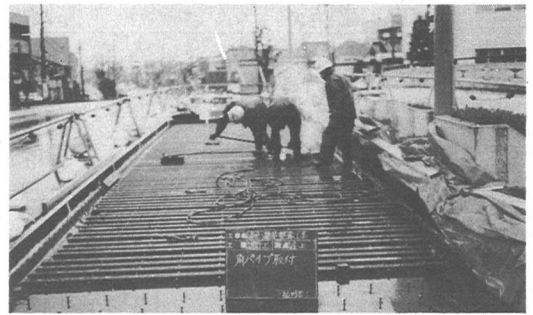


写真-3 蓄熱材封入鋼管の設置

あることを示している。ここで、最初に写真で示した鋼床版橋（舗装厚 7cm 、鋼床版厚 1.2cm の鋼床版橋、以下ノーマル鋼床版橋）とコンクリート床版橋（舗装厚 6cm 、コンクリート床版厚 20cm ）の熱特性の違いを考えてみる。その違いは、それらの熱容量が各々約 $160\text{kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ 、約 $550\text{kJ}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ で、前者が著しく小さいことにある。日射で暖かかった後に降雪があると、熱容量の大きな橋は蓄熱量も多いので、雪がよく溶け、熱容量の小さなものより積雪が少なくなる。その典型例が、先の写真の鋼床版橋だけの圧雪である。もちろん、厳しい冷え込みが続いた後ならば、熱を貯める器が大きくても熱は貯まらないので、鋼床版橋、コンクリート床版橋、地盤部の積雪の差は少なくなる。このように考えると、橋梁部が凍結しやすいのは、熱容量が小さいことによることが分かる。

そこで、死荷重を増やすことなく凍結直前の熱容量を大きくする方法として、 0°C よりやや高い温度で凝固融解する物質を舗装表面近くに封入することを考えた^{5)・6)・7)・8)}。昼間には日射で舗装は暖められ、蓄熱材も融解温度以上になり潜熱蓄熱される(図-5左)。降雪や凍結の早朝には、舗装表面温度が 0°C に下がる直前に、その蓄熱材は液体から固体になり潜熱が放出され、凍結は抑制され、あるいは舗装上の雪を溶かす(図-5右)。

表-1 蓄熱材

蓄熱材呼び名	蓄熱材 1	蓄熱材 2
主要材料	パラフィン	芒硝
凝固温度 ℃	3.1~4.6	4 ~7.5
融解温度 ℃	3.1~4.6	8~10
熱伝導率w/mK	0.163	0.99
顕熱容量J/cm ³ K	1.74	3.0(固) 4.2(液)
融解熱量J/cm ³	130	260
液体での状態	コンクリート	ゲル

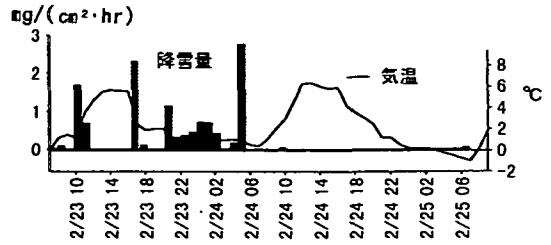


図-8 気温・降雪量の変化

表-2 比較type一覧

type番号	type 1	type 4	type5	type6	type11	type13	
橋/地盤	鋼床版橋	鋼床版橋	鋼床版橋	鋼床版橋	地盤部	コンクリート橋	
蓄熱材	有無	なし	封入	封入	封入	なし	なし
	種類		パラフィン系	芒硝系	芒硝系		
敷厚		1.77cm	1.77 cm	1.77 cm			
舗装	アスファルト7cm	熱伝導SFRC7cm	熱伝導SFRC7cm	熱伝導SFRC7cm	アスファルト 15cm	アスファルト6cm	
下面	鋼床版1.2cm	鋼床版1.2cm	鋼床版1.2cm	鋼床版1.2cm 断熱材3cm	路盤 路床	コンクリート版20cm	

ここで、ノーマル鋼床版橋、コンクリート床版橋、後述する蓄熱材（凝固融解温度:3~4.6℃，凝固潜熱量:130J/cm³）を厚さ1.77cm封入した鋼床版橋の3種類の橋の舗装・床版・蓄熱材の温度と蓄熱量の関係を考える。各々の舗装・床版・蓄熱材の内部には温度差が生じないとして、その温度-蓄熱量を示すと、図-6の太線が得られる。この図から、同じ熱量が舗装・床版から流出（流入）すれば、ノーマル鋼床版は、コンクリート床版に比べ、低温（高温）になることが分かる。実際には、低温（高温）になるほど、それを抑制する熱移動が生じ、同じ熱量の流出（流入）にはならない。しかし、この抑制は、低温（高温）の程度に伴って生じるので、相対的にノーマル鋼床版が低温（高温）になることには変わりない。

更に、この図から、ノーマル鋼床版の熱容量は、蓄熱材の封入によって、ほぼ0~7℃の範囲では、コンクリート床版の蓄熱状態にまで改善されることが分かる。また、例えば蓄熱材封入鋼床版とコンクリート床版の両方が図-6の7℃の状態から同時に同量の熱量が奪われ、蓄熱量が0~2MJ/m²の範囲にまで冷えると、蓄熱材封入鋼床版の温度の方が、コンクリート床版の温度より高くなることが分かる。実際には、表面と内部で温度差があるので、この時の舗装表面温度は、図示の太線の温度より数℃低く、図中の←方向にシフトしたものとなる。したがって、蓄熱材封入鋼床版とコンクリート床版の各々シフトした線の交点（マイナス数℃）までの凍結では、蓄熱材封入鋼床版橋の方が表面温度が高くなる。以上

から、蓄熱材封入鋼床版は、マイナス数℃の凍結では、コンクリート床版より、表面温度を高く保てる事が分かる。

(2)蓄熱材・舗装の特性

蓄熱材に関しては、蓄熱材の凝固温度を0℃近くまで下げ過ぎると蓄熱材の潜熱放出が遅くて、舗装表面を0℃以上に保てない。また、融雪では融雪速度が遅くなり、降雪に追いつけず積雪となる。逆に、融解温度が高すぎると、昼間に蓄熱材が液体に戻らず潜熱蓄熱できない。そこで、凝固・融解温度が適切で潜熱量の大きな蓄熱材を封入することが必要となる。ここでは、安全性・コスト・潜熱量・凝固融解温度を勘案し、比較のためパラフィン系(蓄熱材1)と芒硝系(蓄熱材2)の2種類を用いた⁹⁾。その熱特性を表-1に示す。融解温度が高い芒硝系は、暖かくなる3月まで、十分液体に戻れず、潜熱蓄熱効果が発現しなかったため、ここでは主にパラフィン系について述べる。

また、舗装と蓄熱材を熱伝導の良いものにすれば、舗装表面と蓄熱材の温度差は小さくなり、舗装表面温度を0℃以上にしながら、蓄熱材の凝固温度を0℃近くまで下げられ、昼間の蓄熱も容易となる。

蓄熱材の設置については、蓄熱材を封入した角型鋼管を鋼床版橋上に設置し、高熱伝導(6.05w/(m·K))の珪石骨材の鋼繊維補強コンクリート(SFRC)で覆い、これを舗装とした(図-7, 写真-3)。SFRCを舗装として用いるのは、アスファルトでは夏の流動で角鋼管上に凹凸が生じることと鋼繊維なしのコ

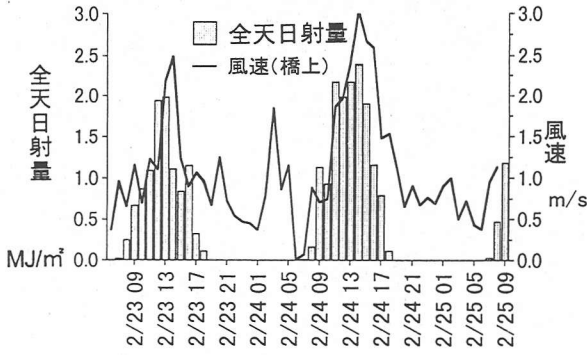


図-9 全天日射量・風速の変化

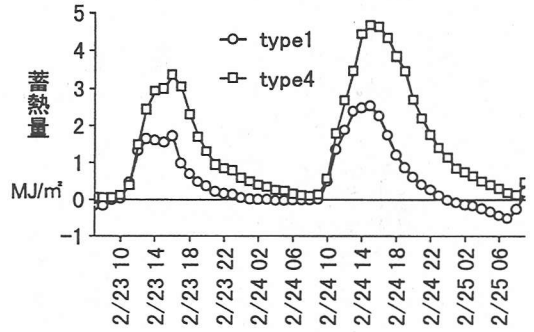


図-11 蓄熱量の変化 (城東橋)

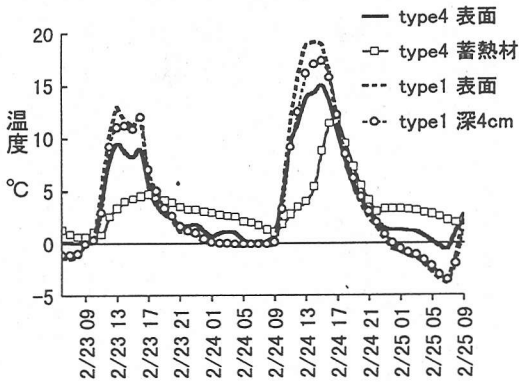


図-10 蓄熱材と舗装表面の温度変化(城東橋)

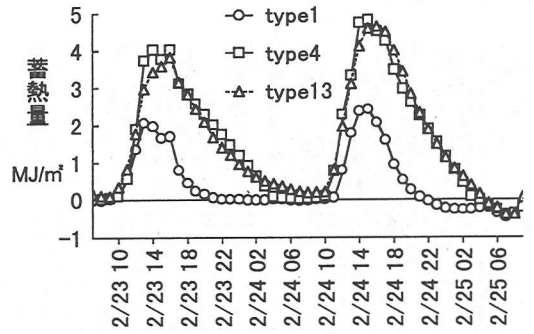


図-12 蓄熱量の変化 (模型橋)

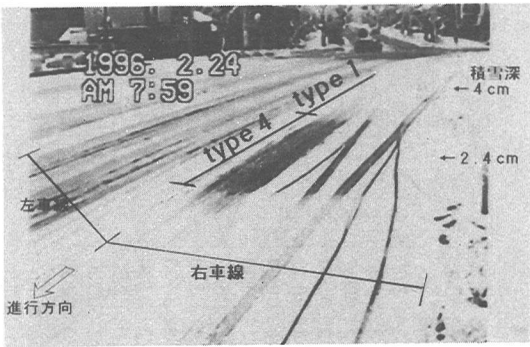


写真-4 路面状況 2/24 8:00

ンクリートでは、橋のたわみに追従できないと考えたことによる。なお、鋼床版橋でのSFRC使用に関しては、名古屋高速道路公社での実績などを参考にした^{10)・11)}。

(3) 実験の方法

前述の熱収支計測と同じ鋼床版橋の一部で蓄熱材封入で試験施工を行った。更に、その現場から1kmの野外にコンクリート床版橋を含めた模型を地上10

cmに設置し、比較を行った。実験の対象とした橋・地盤部の別、橋の種類、蓄熱材の種類、舗装の種類などの組み合わせのtype一覧を表-2に示す。

効果測定のため図-7に示す位置に温度センサを設置し、近くの地盤部の舗装温度なども同時に計測した。更に、結露凍結の際には、路面の滑り抵抗を実測した。

4. 蓄熱材封入工法の降雪時の効果

(1) 代表的な降雪日の効果

ここでは、降雪と結露凍結が連続した1996年2月23日7時から25日9時までを取り上げて考察する。期間中の気温・降雪量を図-8に、日射量・風速を図-9に示す。また、type4の舗装表面温度、蓄熱材温度、type1の表面、type4蓄熱材と同じ深さでのtype1の温度を図-10に示す。蓄熱材の温度は、23日朝は1°C以下であることから、それまでの降雪で完全に固体となっていると推測される(図-10)。以後10.4 MJ/(day・m²)の日射でtype1はほぼ全層が13°Cにまで上昇している。しかし、type4では、融点の3°Cに達した12時以後は、蓄熱材の温度上昇速度が鈍くなり、同時に舗装表面と蓄熱材との温度差が大きくなっている。

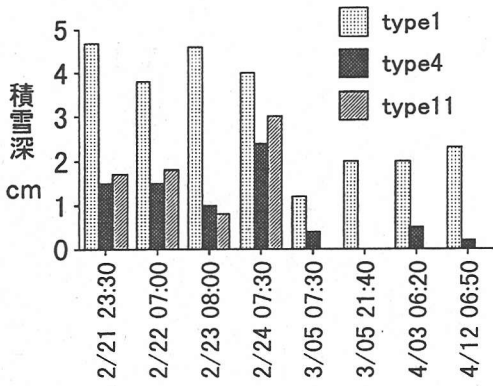


図-13 各type上の積雪深 (城東橋)

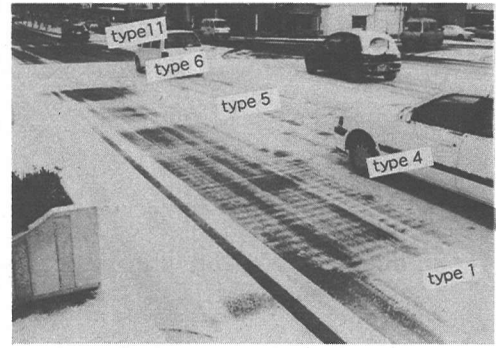


写真-6 路面状況 (96.3.12 7:50)

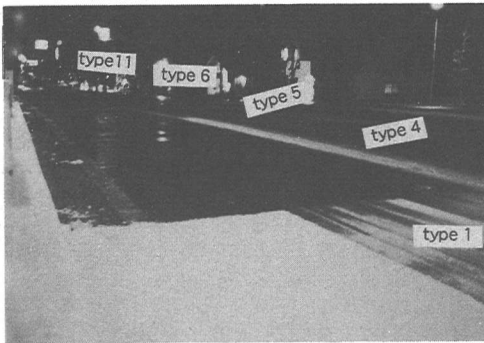


写真-5 路面状況 (96.3.21 21:30)

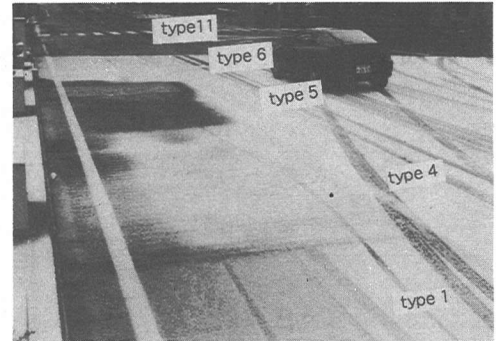


写真-7 路面状況 (96.4.3 6:10)

これは、蓄熱材が一定温度で蓄熱を行っていることによって生じる。夕方17時までに蓄熱材は4.7℃に達した。この温度は、翌日24日の蓄熱材が急激に温度上昇しはじめる温度であることから、鋼管内の蓄熱材はほぼ液体に達したと推定される。

雪は、夕方16時から翌朝まで断続的に降った(図-8)。この間、type1では舗装の表面と深部で0.5℃の差を保ちつつ徐々に冷えていく。そして、表面温度が0℃を示す21時からは路面に雪が積もりはじめた。これに対して、type4の蓄熱材は約3℃から非常にゆっくりと低下している。これは、蓄熱材が液体から固体になって、潜熱を放出していることによる。type4の表面温度は、24日1時に0.7℃に下がったものの、3時には1.1℃に上昇している。これは、表面から奪われる熱量以上の熱が蓄熱材から舗装表面に流れたことによる。このtype4の路面は、2.8mg/(m²・hr)の強い降雪が始まる5時15分まで無積雪であった。朝8時における路面状況は、写真-4に示すとおりである。写真では車輪の通過量の違いが路面状況に影響しているため、その比較は同じ車輪通過線上で行わねばならない。右車線の車輪通過帯では、

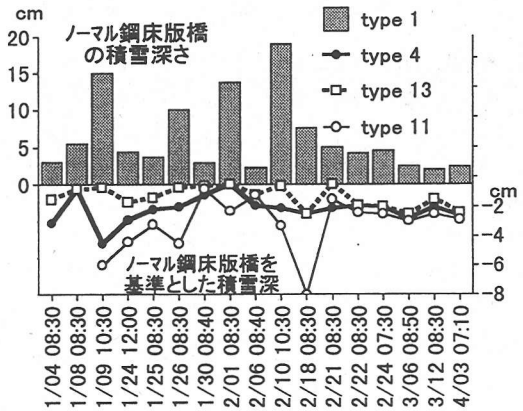


図-14 ノーマル鋼床版橋を基準とした積雪深比較

type4のみが無積雪で、その差が写真からも分かる。そして、路側部の積雪は、type1の4cmに対して、type4は2.4cmと少なかった。

次に、舗装・床版と蓄熱材を含めた蓄熱量を、それぞれの温度と熱特性などから求めると図-11が得られる。ここで降雪密度を福井での平均値0.1g/cm³とすると、1MJ/m²で深さ約3cmの雪を溶かせるの見積もられる。この見積もりと図-11の蓄熱量から、

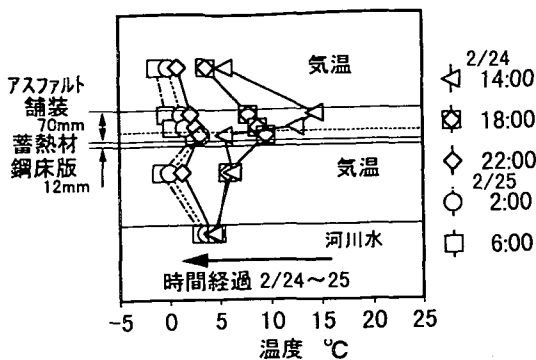


図-15 蓄熱材封入鋼床版 (type4) の温度変化

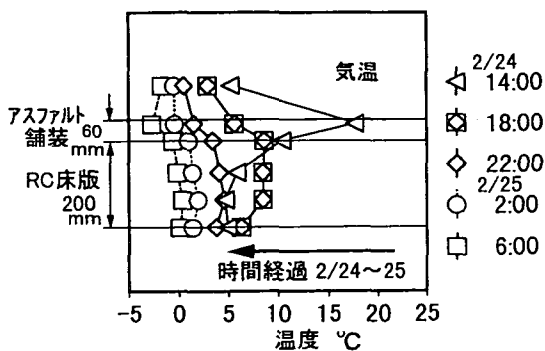


図-16 コンクリート床版 (type13) の温度変化

16時以後翌朝までの累積降雪9.74mg/cfに対して、残雪深は、type1では4.6cm、type4ではなしと見積もられる。実測の残雪量は、前者が5.5cmで、後者は3.0cmであった。type1では16時の蓄熱量の全てが融雪に使われ、type4では67%が融雪に使われたことになる。その融雪効率の差は、type1は、21時には朝まで残る雪が積もり、雪という断熱材で覆われたが、type4では、5時15分まで無積雪で、融雪以外に輻射や風で熱を奪われたこと、更に、type1では、積雪の沈降も大きくなり見かけ上効率が上がり、100%にも達したと考えられる。

次に、コンクリート床版橋 (type13) との比較について述べる。type1、type4、type13の模型を並べて試験した同期間量を示したのが図-12である。この図から、type4の蓄熱量は、type13のそれとほぼ一致していることが分かる。図-6では、舗装・床版・蓄熱材の内部に温度差が生じず全て同一温度になるとしたことから、type4は凝固温度で急激に蓄熱されるように表されたが、実際には、内部に温度差が生じるので、図-12のように、type13とtype4は、ほぼ同じ蓄熱をたどる。路面状況は、24日4時の時点では、type4には積雪がなかったが、type13の上にはわずかな積雪があった。これは、type13では、コンクリート床版厚が厚くて中心部の熱が舗装表面に伝わりにくく、雪が溶けるのに時間を要することによる。24日の5時から6時の強い降雪後の7時30分には、両者の積雪は同じ3.0cmとなり、type1の5.5cmに比べ2.5cm少ないものとなった。

以上、蓄熱材に蓄熱されることで、降雪時の鋼床版橋路面の早くからの積雪がかなり改善されることが確認された。

(2) 1シーズンでの効果

次に、実際の橋で2月下旬以降春までの積雪深を

比較すると図-13が得られる。この図から、蓄熱材封入で鋼床版橋の積雪量は、2月下旬には地盤部とほぼ同じまでに減ることが分かる(写真-5)。3月以降は、地盤部の方が積雪量が少なくなっているが、効果は見られる(写真-6)。なお、この写真では、蓄熱材封入鋼管上の雪がよく溶けて、筋状となっている。

ここで、蓄熱材2を封入したtype5、type6が写真に見えるので、簡単に述べる。蓄熱材2は潜熱量は大きいと融点が8~10°Cと高い(表-1)ことから、1月と2月はtype4に比べて効果が少なかった。これが、3月になり暖かくなると、下面を断熱したtype6は、type4より効果が得られた(写真-6)。これは、昼間に下面から熱が流出せず高温になり、type4を上回る蓄熱となったことによる。4月になると、type5も潜熱蓄熱でき、写真-7のようにtype4より効果が得られた。

模型橋での計測結果である図-14からは、type13に比べ、type4は、ほぼ全期間にわたって積雪量が少ないことが分かる。しかし、地盤部 (type11) までの改善には至っていない。

図-13と図-14から、総じて蓄熱材封入によって鋼床版橋は約2cmほど積雪深が少なくなることが分かる。

5. 蓄熱材封入の結露凍結時の効果

(1) 代表的な結露凍結日の効果

先の2月24日朝から結露凍結のあった翌朝までについて考察する。図-1と同じ時刻でのtype4の温度変化を図-15に示す。

24日は全天日射量が14.9MJ/m²と23日より日射しが強く(図-9)、舗装温度は、より高温となった(図-10)。蓄熱材は、3°C(10時)になってから5°C(14

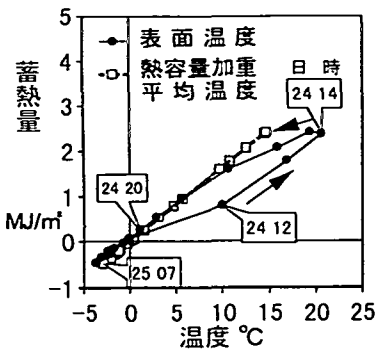


図-17 type1の温度-蓄熱量

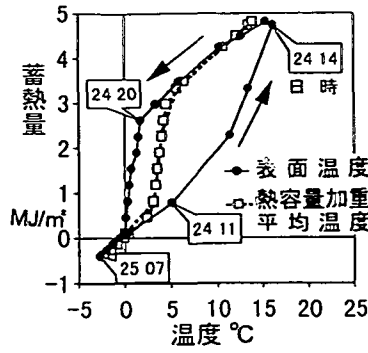


図-18 type4の温度-蓄熱量

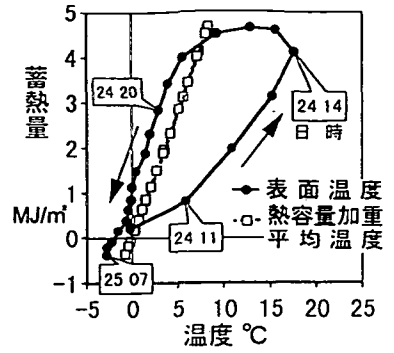


図-19 type13の温度-蓄熱量

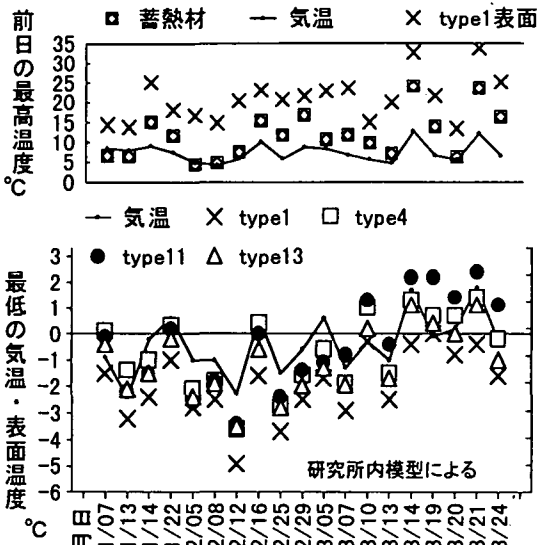


図-20 各typeの表面温度と前日の蓄熱材最高温度

時)となるまでは、潜熱蓄熱で、その温度上昇が遅い。約5°Cとなった後は、急速に温度が上昇し、蓄熱材が完全に液体になったことが推測される。

放射冷却によって、蓄熱材は、24日22時には3.0°Cまで低下するが、23時には3.3°Cまで上昇し、25日1時まで3.3°Cを維持している。ここで、蓄熱材が一度3.0°Cまで下がり、3.3°Cにまで上昇するのは、過冷却によるもので、固体化の始まりを示す。蓄熱材の潜熱放出にともない、蓄熱材封入の舗装表面温度は、21時1.4°Cから3時の1.1°Cまでほぼ一定温度を維持している。その後type4は、ほぼtype1と同じ速度で温度が下がり、type1との差はすぐには縮まらず、最低表面温度(7時)ではtype1が-3.4°Cに対して、2.9°C高い-0.5°Cに止まった。なお、地盤部表面の最低温度は、-1.1°Cであった。

次に、3.(1)で示した原理を実測データで検証

する。3.(1)ではコンクリート床版(type13)と比較したので、type13の温度変化を図-16に示す。また、図-6の温度-蓄熱材に対応させて、実測に基づく熱容量加重平均温度、舗装表面温度-蓄熱の関係を図-17、図-18、図-19を得る。昼間の最高熱容量加重平均温度は、type1, type4, type13で、各々14.7°C, 14.0°C, 8.3°Cで、蓄熱量は、type4が若干type13を上回り、type1の約2倍になっている。図-6でtype13がtype4と同じ蓄熱量となるとした7°Cを越えた温度域でもtype4の蓄熱量が大きいのは、type4では舗装表面近くの熱容量が大きいから、蓄熱変動が大きいことによる。

冷却過程については、蓄熱材が4.6°Cで潜熱を放出し始めた20時から舗装表面温度の低下が鈍くなり、23時にはtype13の表面温度より高くなり、2時まで0°C以上となっている。この時間帯では、type4の舗装表面は熱容量加重平均温度より2.9°Cも低いが、以後潜熱放出がなくなるとその差は約0.5°Cにまでに縮まっている。一方、type13では、この温度差は約2°Cである。このような表面温度と熱容量加重平均温度とのズレと蓄熱材の凝固温度が数°Cであることが、舗装表面温度が-2.8°Cとなる7時でもtype4がtype13より高温となることをもたらしめている。

以上、3.(1)で示した表面温度がマイナス数°Cの範囲ではtype4の方がtype13より表面温度が高くなることが実測からも明らかになった。

(2) 1シーズンでの効果

放射冷却でtype1舗装表面が0°C以下となった日の午前7時の表面温度を、type1, type4, type11, type13について比較すると、図-20の下図を得る。図の上部には前日の蓄熱材の最高温度を示した。これらのいずれの日においても、蓄熱材温度が融解温度以上

であることから蓄熱材はほぼ完全に液体になったものと推測される。

放射冷却の際のtype4の表面温度は、凍結が厳しくない時はtype13より1℃ほど高いが、温度が下がるにつれて、type13の温度に近づき、-3℃ほどではほぼ同じになる。この時にも、type1に比べるとtype4は1℃ほど高く、効果が見られる。図-20の下図の最低温度の平均を求めると、type1で-1.93℃、type4で-0.66℃、type11で-0.36℃、type13が-1.08℃であった。したがって、平均値では、蓄熱材は鋼床版を1.27℃上昇させ、コンクリート床版よりも0.4℃高温になっている。このことは、マイナス数℃までの凍結では、コンクリート床版より当該工法は、表面温度を高く保てるという3.(1)で述べた原理を検証するものとなっている。

更に、気象との関わりで図-20の気温を見ると、シーズン中の最低気温は-2.4℃で、この程度の冷え込みでは、当該工法は十分効果が得られることが分かる。

(3) 滑り抵抗での効果測定

放射冷却の強い深夜早朝、鋼床版路面の温度が氷点以下になり更に露点よりも下がると、空気中の水分が乾燥した路面に凝結し、それに伴い、路面は急激に滑りやすくなり、その結露量が10g/m²以上になると、滑り抵抗値BPN (British Pendulum Number) は、氷板と同じ20になることが福井市内での観測で明らかにされている¹²⁾。そこで、ここでは、当該工法によって、滑り抵抗がどの程度改善されるかを、各路面のBPNを結露凍結の朝実測することで調べた。

図-21は、2月25日の朝7時の各typeの路面の滑り抵抗比(乾燥時のBPNを100とした比)を縦軸に、舗装表面の最低温度を横軸にして表したものである。type1の舗装表面温度-3.7℃に対して、滑り抵抗は乾燥時の54%に下がっている。表面温度がtype1より約1.0℃高いtype13、type4、type11では滑り抵抗はほとんど低下しなかった。ここでは、表面温度1℃の違いが、滑り抵抗では46%もの違いになっている。

図-22は、他に計測した3日を含めて、舗装表面最低温度を上部に、滑り抵抗比を下部に示した。いずれの日も、舗装表面温度を1℃でも高くできれば、滑り抵抗は大幅に改善される結果となっている。

6. 他地域での当該工法の適用

福井市内では、結露凍結のほとんどの日の前日に潜熱蓄熱されて、当該工法が効果を発揮することが明

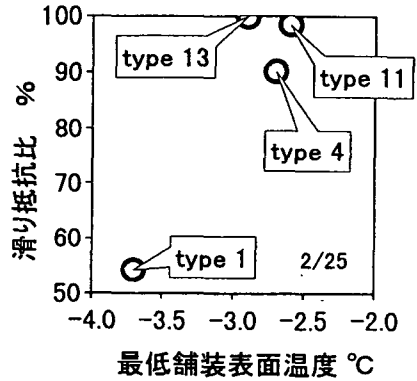


図-21 舗装表面の最低温度と滑り抵抗

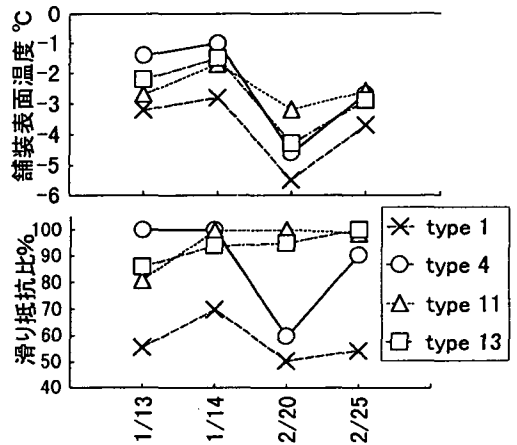


図-22 舗装表面温度と滑り抵抗比

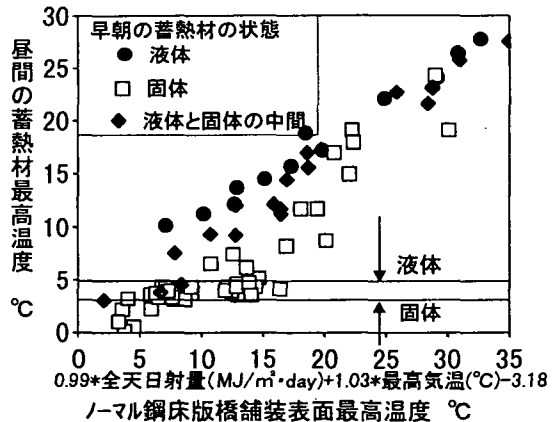


図-23 全天日射量,最高気温と蓄熱材最高温度

らかになった。他地域での当該工法の効果を考える上で、効果発揮の前提となる潜熱蓄熱を気象台のデータから推定できれば有用である。そこで、まず、

ノーマル鋼床版舗装表面の日々の最高温度は、その日の全天日射量と最高気温に依存するとして、城東橋でのデータで回帰分析を行った。その結果、ノーマル鋼床版最高温度(°C)= $0.99 \times \text{全天日射量}(\text{MJ}/\text{m}^2 \cdot \text{day}) + 1.03 \times \text{最高気温}(\text{°C}) - 3.18$ の式(相関係数0.88)が得られた。次に、この式と気象データから得られたノーマル鋼床版舗装表面の日々の最高温度とtype4の蓄熱材のその日の最高温度の関係を図-23に示した。この図では、その日の早朝の蓄熱材の状態を固体、液体、一部液体の3ケースに分けて整理した。降雪などで早朝に蓄熱材が固体になっていても、その日の全天日射量や最高気温から求められるノーマル鋼床版の最高温度が約14°C以上となれば、完全に潜熱蓄熱されることなどが分かる。それは、図-20の上図のtype1の温度とも一致する。図-23と各地の気象月報の日毎の日射量、最高気温、降雪量、早朝の最低気温のデータを付き合わせていくなら、その効果を概ね知ることができよう。

7. まとめ

本研究で得られた結論は以下のとおりである。

- ①鋼床版橋は、放射冷却の深夜から早朝にかけて、橋下の気温や河川・護岸の温度より低温となり、床版は下面から暖められている。
- ②したがって、鋼床版橋下面を断熱すると、鋼床版橋路面の凍結は、逆に促進される。
- ③鋼床版は、コンクリート床版に比べ、熱容量が小さいので、凍結しやすく、雪も積もりやすい。鋼床版に3~5°Cで相変化する蓄熱材を封入することで、これらは抑制される。鋼床版橋の積雪深を蓄熱材封入で約2cm減らし、コンクリート床版より積雪深が少なくなり、地盤部舗装部の積雪に近づく。
- ④コンクリート床版の舗装表面が約-3°Cになる程度の放射冷却までは、蓄熱材封入で、ノーマル鋼床版橋をコンクリート床版温度以上にすることができる。福井市内の凍結では1シーズンで、蓄熱材封入で、平均約1.3°C上げることができた。この程度の温度上昇であっても、滑り抵抗では大幅な改善となり得る。
- ⑤日々の全天日射量と最高気温から、ノーマル鋼床版舗装最高温度が推定でき、それが約14°C以上では蓄熱材は液化し、潜熱蓄熱できる。福井市内では、放射冷却のあった1シーズン19日間の全ての前日にほぼ完全に潜熱蓄熱がされた。

総じて、この蓄熱材封入の当該工法を用いれば、鋼床版橋のみが圧雪・凍結となる事態をほとんど回

避できることが分かった。その結果を踏まえ、1996年度福井市内でコンクリート床版橋に続く鋼床版橋カーブ区間に、当該工法が施工された¹³⁾。

今後の課題として、より優れた蓄熱材の開発、封入方法の改善、当該舗装の耐久性の検証、他の地域の気象条件での効果の検証などが挙げられる。本論が、当該工法の利用と課題克服の契機になれば幸いである。

謝辞：この研究では、蓄熱材については三菱電機(株)中央研究所木村寛氏、三菱電線工業(株)、三菱油化エンジニアリング(株)、三菱化学(株)、熱については福井大学竹内正紀教授、SFRCP舗装については建設省中村俊行氏、県生コンクリート工業組合中央試験所、設計・施工については福井鉄鋼(株)、(株)横河メンテック寺田博昌氏、路面の結露については福井大学福原輝幸教授、計測については職場の杉森正義氏などに助言と多大な協力を頂いた。更に、県道路建設課には、当該試験施工を支援して頂いたことを記し謝意とする。

参考文献

- 1) 洲崎治平, 井上要三, 仙黒邦行, 飯塚敏樹, 矢島篤: 橋梁部における路面凍結調査, 雪と道路, No.21, pp. 60~70, 1989.
- 2) 山田忠幸, 福原輝幸, 横江重行, 元木真二: サーマルマッピングに頼られる橋梁路面温度特性, 土木学会第49回年次学術講演概要集第4部, pp.650~651, 1994.
- 3) 宮本重信, 杉森正義, 室田正雄: 橋梁路面の凍結と熱収支に関する研究, 第14回日本雪工学会大会論文報告集, pp.175~178, 1996.
- 4) 建築学大系編集委員会: 建築学大系 8 音・光・空気・色, pp.343, 1959.6.
- 5) 宮本重信, 室田正雄: 蓄熱材封入による路面の凍結抑制, 舗装, No.7, pp.15~20, 1996.
- 6) 宮本重信: 蓄熱剤封入による路面凍結緩和の実験的研究, 土木学会第50回年次学術講演概要集第5部, pp.648~649, 1995.
- 7) 宮本重信: 凝固潜熱利用による路面凍結緩和の実験, 第11回日本雪工学会大会論文報告集, pp.81~86, 1994.
- 8) 福井県, 宮本重信: 蓄熱材を格納した舗装道路, 特許出願平成6年特許願第059931号, 1996.10認証.
- 9) 木村寛, 小坂孝雄: 蓄熱材材料・ブライン1.3水和反応物蓄熱材, 冷凍, 第71巻, 第823号, pp.18~23, 1996.5.
- 10) 寺田博昌: 鋼繊維補強コンクリートを用いた合成床版の開発研究, 名古屋大学学位論文, 1986.
- 11) 前野裕文, 鈴木教義, 梅原秀哲, 吉田弥智: 鋼繊維補強コンクリートを用いた鋼床版の舗装, コンクリート工学, Vol.24, No5, May, 1986.
- 12) 木曾忠幸, 福原輝幸: 橋梁路面の結露凍結に関する基礎的研究, 土木学会第50回年次学術講演概要集第4部, pp. 748~749, 1995.
- 13) 日経コンストラクション: 舗装の凍結抑制に新技術 pp.86~91, 1996.11.22.

(1996.12.19 受付)

STUDY ON PREVENTING ROAD SURFACES ON STEEL DECK BRIDGES FROM FREEZING WITH HEAT STORAGE MATERIALS

Sigenobu MIYAMOTO and Masao MUROTA

The road surfaces on steel deck bridges have more amount of frost and snow cover than those on any other ones, because the former heat capacity is smaller. Therefore, traffic accidents occur frequently. Some field investigations were carried out to solve this problem in Fukui, a snowy and rather mild city. It was found that the insulator beneath the steel deck was ineffective. Phase change material which has the 3~5 °C solidifying and melting point was set in the pavement on the steel deck to increase the heat capacity at just above the freezing point of water. This experiment showed that the phase change material saved solar energy in daytime for preventing the road surface from freezing on the following morning.