

# 技術融合で夏の熱，地中に貯めて融雪

宮本 重信

福井県 雪対策・建設技術研究所（〒 918-8108 福井県福井市春日 3-303）

橋台の基礎鋼管杭に回転貫入工法を用いて杭底を密閉し杭内に貯水した。この水を路面内の放熱管内の水とで閉じたループにし，夏にポンプで循環させて路面の熱を杭とその周囲に移動蓄熱した。その蓄熱は杭相互の熱干渉で拡散せず初冬まで 28℃となり融雪に用いた。基礎杭が利用できない条件では，径 14cm の熱交換鋼管杭を 1.5m 間隔で多数設置すれば杭相互の熱干渉で長期蓄熱ができ，熱交換杭数を半減できることを数値シミュレーションで求め，福井市と札幌市で実験実証した。地盤面では連続鉄筋コンクリート舗装で鋼管放熱管を曲げ無しで施工，鋼床版面では放熱管を鋼繊維補強コンクリートで補強し合成鋼床版とした。これらで電熱融雪に比べ建設費が安く CO<sub>2</sub> 排出量 1/20 を実現した。

キーワード 融雪，熱交換杭，蓄熱，地中熱，技術融合，太陽熱

## 1. はじめに

地下水を汲み上げずに，地中熱を熱交換杭で集熱する地中熱融雪は，循環ポンプの電気使用だけで電気や化石燃料の熱源の融雪に比べて CO<sub>2</sub> 排出量が少なく，維持費も安価である。更に，散水融雪に比べて，歩行者に水をかけず路面の凍結抑制にも使えて人に優しい。しかし，建設費が融雪面積当たり 10～15 万円/m<sup>2</sup>と電熱融雪の約 2～3 倍にもなる。この問題を熱源部では基礎工法との融合と熱の相互干渉という群杭効果を用いて夏の熱の地中への長期保存で，さらに，融雪面では融雪用放熱管と舗装，床版との融合で解決し，建設費を従来の地中熱に比べて 1/6～1/3 に縮減した。このことで，平成 14～16 年度の研究開発後の今日までに，福井県内 4 箇所でも実用化が図られた。

## 2. 夏の熱を冬まで群杭効果で保存（熱源部）

### (1) 橋梁基礎杭を地中熱集熱に兼用（新清永橋）<sup>1)</sup>

橋台の鋼管基礎杭に先端閉塞施工となる回転貫入工法を導入し，杭内に貯水した。図-1 に示すように，舗装面からの融雪後の冷水は，橋台下流側面のヘッダー管で分岐し（写真-1），各杭の中に設置した細いポリ管内（施工時：写真-2）を流れて杭底に循環ポンプで送られる。杭底でポリ管から杭内に出た水は，その後周囲の地中熱を集熱しながら杭頭に戻る。杭頭からの水は，橋台上流側面のヘッダー管で，他の杭からの温水と合流して，ポンプで加圧されて，舗装内の融雪放熱管に流れ，路面上の雪を

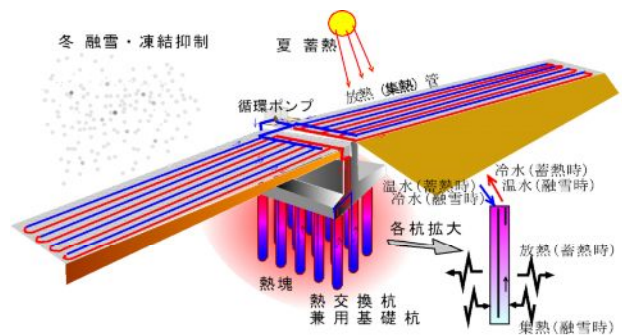


図-1 基礎杭兼用季節間蓄熱融雪の概念

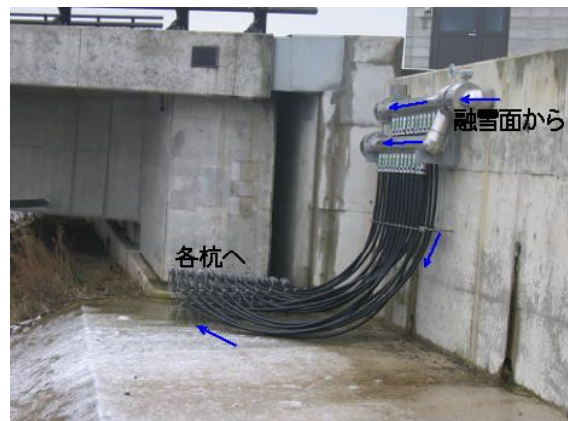


写真-1 融雪面から基礎杭兼用熱交換杭への分岐

溶かす。冷水となった水は杭へと再び流れる。

夏の日中，杭内水温より路面温度が高いとポンプを稼働させて路面の熱を杭に移動させる。筆者らが開発実用化した建築杭利用では，夏に蓄熱しても冬までに温度が拡散して約 1℃の蓄熱の効果しか得られなかった。しかし，橋梁鋼管杭では，その間隔が



写真-2 鋼管基礎杭への送水ポリ管の設置

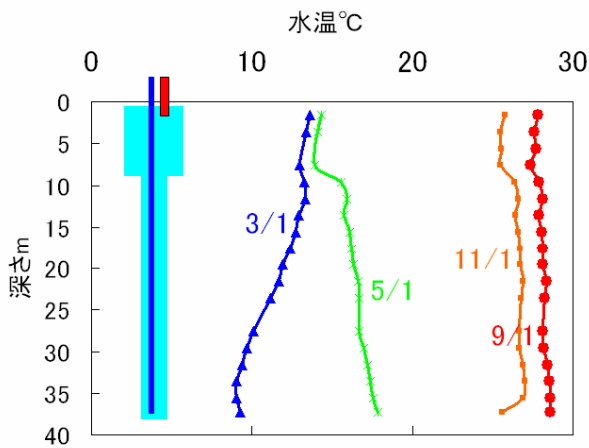


図-2 杭内水温の温度プロフィール

約 2m と狭いことでの杭相互の熱干渉（群杭効果）と杭内径が大きいことから、杭内水温の実測温度プロフィール図-2 が示すように、秋の竣工で夏蓄熱できずに融雪となった 3 月、本来の地中温度約 15℃ が約 10℃ に低下しても、その後の蓄熱運転で 9 月には 28℃ になり、その 2 ヶ月後の初冬でも 26℃ を保った。そのことで高い融雪能力を発揮した。

## (2) 群杭効果を用いた専用熱交換杭<sup>2)</sup>

基礎杭の兼用利用ができない条件では、住宅用の回転貫入鋼管基礎杭を用いて材工共で長さ当たり 7000 円/m として、従来のボーリング工法の 1/2 ～ 1/3 とした。但し、浅い層までしか施工できず杭本数が増える。この増える杭本数を行列に、その設置間隔を 1 ～ 4m と変えて、夏の熱を地中に貯めて融雪の数値シミュレーションを行った。その結果、周辺部の杭は拡散するが中心部の杭では冬まで夏の熱が保存されること、杭間隔が狭くすると蓄熱する領域が小さくなり高温になるが、融雪すると逆に急激に温度が下がり（図-3）、大雪では蓄熱が底を突き融雪能力が一気に低下し、最適な間隔は約 1.5m であることが分かった。更に、図-4 から、杭間隔を 1.5m

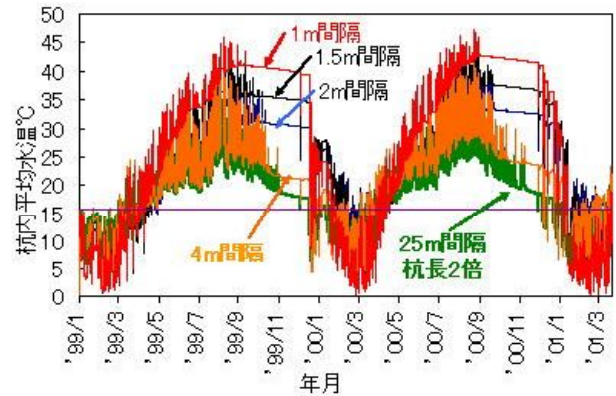


図-3 杭設置間隔と杭内水温の変化

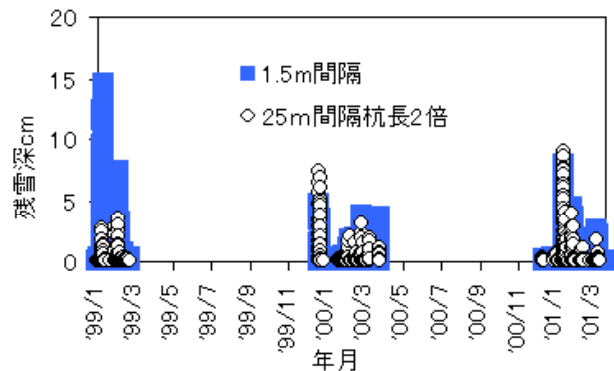


図-4 杭設置間隔（1.5m vs 25m 杭長 2 倍）と残雪深



写真-3 専用熱交換杭の施工

にしての蓄熱方式は、面積当たり杭長を 2 倍にした従来の離れた杭での地中熱融雪システムと同じ残雪深となる、この夏の運転によって杭を半減できた。なお、循環ポンプの融雪面積当たりの電気使用は約 5W/m<sup>2</sup> で、融雪での 200W/m<sup>2</sup> に比べて 1/40 と少ない。

長さ 18m 直径 14cm 5 行 5 列 25 本の鋼管杭と融雪面積 170 m<sup>2</sup> の放熱管を繋いだ福井市内の実験装置で実験し、季節間蓄熱融雪を検証した。札幌市内でも同様に検証し、その後、幸橋では杭径 14cm 長さ 23m の鋼管杭を 9 行 42 列 378 本河川敷に設置し



写真-4 連続鉄筋と放熱管，wet on wet の二層施工

(写真-3)，面積 3,694m<sup>2</sup> の融雪を施工した。

### 3. 融雪面での放熱管と舗装，床版の融合

#### (1) 地盤部（新清永橋の前後）

地盤部では，乾燥収縮の分散で目地をなくせる連続鉄筋コンクリート舗装を用いることで，鋼管放熱管を目地手前で反転することを無くし直線配管を実現した（写真-4）．鉄筋は鋼管放熱管のスペーサーに兼用した．放熱管は舗装かぶりを 40mm としても耐久性のあることを輪荷重走行載荷と FEM 解析で明らかにした．また下層は通常のコンクリートで施工し，その後 3 時間以内の wet on wet 工法で，放熱管から上の舗装を耐久性のある SFRC（鋼繊維補強コンクリート）で施工した．この工法で，鋼管放熱管の曲げが省かれて全体として安価になり，腐食と構造の耐久性を SFRC で確保しながら融雪面での熱抵抗削減も実現した．

#### (2) 鋼床版橋（幸橋）

近年の鋼床版溶接部の疲労の判明と当該幸橋での大型 28000 台/（1 車線・年）の交通量からすると，鋼床版橋にアスファルト舗装の組み合わせより，SFRC が望ましいと考え<sup>3)</sup>，更に放熱管の埋設を考慮し舗装部には SFRC を用いた．なお，100mm の厚さの中で表層 15mm は床版として，残り 85mm を床版として合成鋼床版橋とした．SFRC85mm の模型床版を用いて輪荷重走行試験を行い，その実験と解析から合成と耐久性を検証した．この研究は福井市の中心部の幸橋（融雪面積 3,694m<sup>2</sup>，写真-5）



写真-5 鋼床版上での放熱管の施工

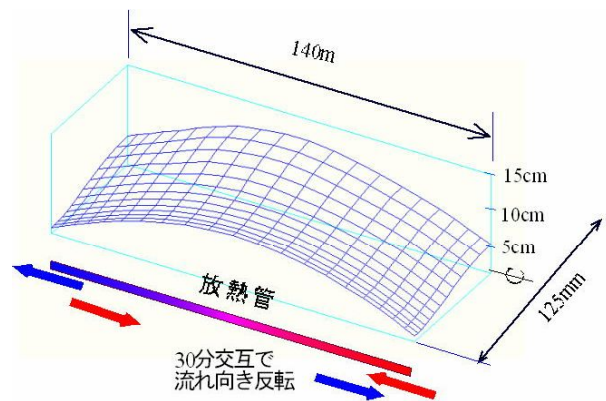


図-5 残雪深の数値シミュレーション

で実用化し，桁フランジ厚や鋼床版厚を薄くでき融雪面当たり 1.7 万円/m<sup>2</sup> のコスト縮減とした．なお，SFRC には黒顔料を混入し日射吸収率を高めた．

実施工では，放熱管によってコンクリートのブリーディング沈降が抑制され放熱管真上のコンクリート表面が約 2mm ほど高くなったこと，冬期施工では生じなかったが，春の施工では放熱管固定のため 1.5m 間隔に設置したフラットバー（写真-4）が誘発目地のように作用しその真上の表面に 0.2mm までの乾燥収縮ひび割れが生じた．SFRC の使用でひび割れの拡大が抑制されることと SF が酸素を補足することや電気抵抗を下げる等の防錆の効果が期待される<sup>4)5)</sup>．

この厚さ 100mm の床版・舗装では，温水と冷水を隣り合わせにするような放熱管の設置ができず，大きな融雪斑が生じると計算された．右岸からの温水流入を 30 分後には左岸に切り替えることで，溶け斑を無くした．残雪深の数値シミュレーション結果を図-5 に示す．この橋軸中心部で残雪が多くなるとの結果は，夏の蓄熱無しで行った写真-6 の融雪状況と一致した．



写真-6 鋼床版橋（幸橋）融雪状況（歩道, 車道）



写真-7 アスファルト駐車場での放熱管設置と黒色薄層SFRCの施工

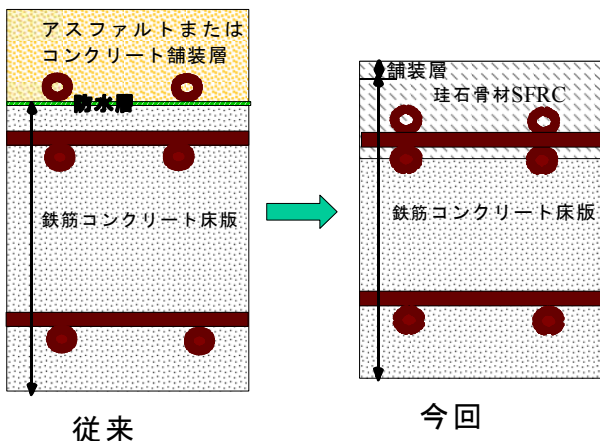


図-6 RC床版での融合：熱抵抗を下げ死荷重軽量化

### (3) 鉄筋コンクリート床版橋

鉄筋コンクリート床版についても、従来は図-6 左側に示すように床版上の舗装内に放熱管を設置していたが、図-6 右図のように床版内に放熱管を設置し、舗装と放熱管の上面の床版は一体的に黒顔料混入・高熱伝導骨材珪石の SFRC で施工することで、放熱管から舗装表面までの熱抵抗と橋の死荷重を同時に少なくし全体としてのコスト縮減とした。これを輪荷重載荷走行試験等で検証し、インターチェンジ橋での設計を終えている。

### (4) 駐車場でのSFRC舗装

やや広い駐車場では、3. (1) の車道と同じ方法で鋼管放熱管を曲げることない駐車場での融雪システムを実験施設として実現した。鋼管の直線的な設置の困難な比較的狭い既設のアスファルト舗装駐車場では、アスファルト舗装や路盤上に耐熱ポリエチレン放熱管を 75mm メッシュの溶接金網で固定設置し、その上に黒色顔料を混入した SFRC 厚さ 55mm を施工した（写真-7）。この薄層でのホワイト・トップ工法で、既存の排水溝やアスファルト舗装を取り壊すことなく、無散水融雪を施工出来た。

供用後 1 年半経過したが異常は生じていない。

### (5) SFRC舗装の摩耗での補修

長期供用による SFRC 舗装の摩耗への対処として、摩耗した SFRC 舗装をブラスト処理後、施工厚 10mm から端部は厚みが零となるように珪砂骨材ポリマーセメントモルタル（2.1W/mK 熱伝導率）を模型橋上にすりつけ、輪荷重走行試験機大型車輛用のダブルタイヤで 5 万回走行した。その結果、モルタルは剥離せずに、すべり抵抗性を確保しながら高い耐久性を有するとの結果を得て、将来保守工法の確立とした。

## 4. 制御と全体での検討

### (1) 熱解析数値シミュレーションの実験での検証

地方気象台の気象データを読み込んで融雪面では長波長と短波長の放射、対流、降雨降雪による潜熱と顕熱、結露蒸発の潜熱などを見積もり、放熱管内を流れる熱媒体液の流れに沿って 3 次元の数値シミュレーションをパソコンで行う。杭とその周囲の地盤についても融雪面からの出口水温を取り込んで 3 次元の熱解析を行い、杭からの出口水温を今度は融雪面に引き渡す。計算の時間間隔は 5 分とし後進差分法を用いた。

その計算結果は、福井市内での融雪面 170 m<sup>2</sup>、熱交換杭（径 14cm 杭長 23m）5 行 5 列 25 本の実験実測とほぼ同規模の札幌での実験によって検証されている<sup>6)7)</sup>。

図-7 は、福井市での杭群の中心部の温度の実測と数値シミュレーション値との比較で、計算と実測はよく一致している。融雪面内の放熱管出入口の温度差と流量の積から得られる積算放熱量を示す図-8

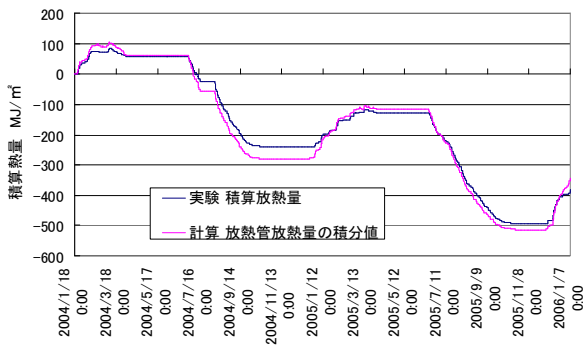


図-7 積算放熱管放熱量 実測VS計算 (福井市)

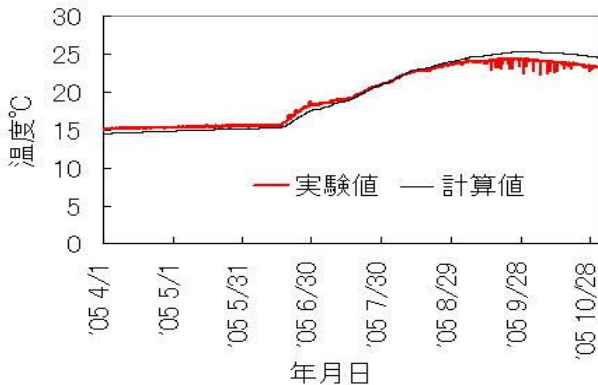


図-8 中心部深さ18.2mの地中温度 (福井市)



写真-8 札幌市内での融雪状況

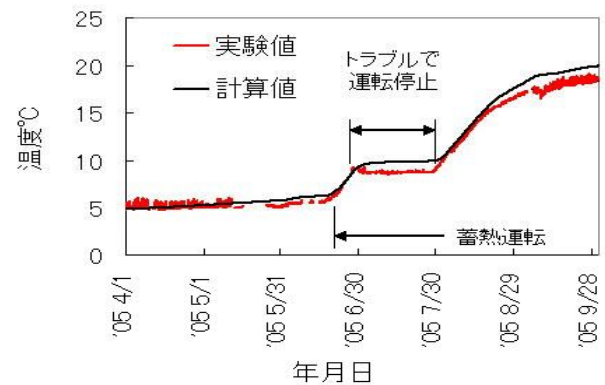


図-9 中心部深さ15.3mの地中温度 (札幌市)

でも、実測値と計算値はよく一致している。この図でから融雪・凍結での使用熱量の約2倍の熱量を夏に蓄えていることが分かる。また、その融雪(=集熱)面積当たりの蓄熱量は年間の水平面全天日射量の約10%であった。

札幌市での実験(融雪状況:写真-8)についても、蓄熱地盤中心部での温度図-9は、実測と計算がよく一致し、数値シミュレーションの精度が検証されている。

## (2) 画像処理タイプ積雪センサでの融雪制御

この蓄熱方式では熱源の温度変化が著しいことから、降雪センサでの融雪制御でなく融雪路面での積雪の有無を画像判定するシステムを開発した。これを幸橋や新清永橋では導入し、インターネットで、蓄熱運転状況と路面の画面が見られ、トラブルでの緊急呼び出しなども可能としている。

## (3) 蓄熱運転の制御

蓄熱は、安価に蓄熱部が得られる杭兼用方式では、杭内水温より路面温度が12°C高いと運転開始とし、その後路面放熱管での出入口の水温差が6°C以下になれば運転停止とした。年間で蓄熱に358時間、融雪に87時間、凍結抑制で67時間と見積もられ、融

雪面積当たり3.8W/m<sup>2</sup>の循環ポンプ消費電力から93円/(m<sup>2</sup>年)の電気料金となる。これは、ほぼ同じ融雪能力と数値シミュレーションされた250W/m<sup>2</sup>の電熱融雪の4.1%であった。なお、建設費は通常のアスファルト舗装に比べて耐久性のある特殊なSFRCとしたことを含めて約2.5万円/m<sup>2</sup>と電熱融雪の約50%で済んだ。

その専用熱交換杭となった幸橋では、杭内水温より路面温度が9°C高いと運転開始とし、その後路面放熱管での出入口の水温差が5°C以下になれば運転停止として、兼用杭方式に比べて運転時間を増やし蓄熱量を増やした。運転時間増での電気代(維持費)は増えるが、建設費が高い杭本数を少なくできたためライフ・サイクル・コストも下げられた。この条件では200年12月15日の杭群の中心杭、中心杭と中心杭の中間の土壌の温度は、杭の上下3mを除く17mで約34°Cにも達し、熱拡散しやすい四隅の杭でも24°Cになると計算された(図-10)。最大積雪が93cmとなった2001年1月15日の融雪時、各温度場は図-11に示すように、約9°Cで杭から放熱管に流れ、融雪後5°Cとなって戻ってくると計算された。この時でも中心部の土壌温度は25~30°Cと高く、3月中旬では土壌と杭との温度の違いは解消され、全て約12°Cとなった。

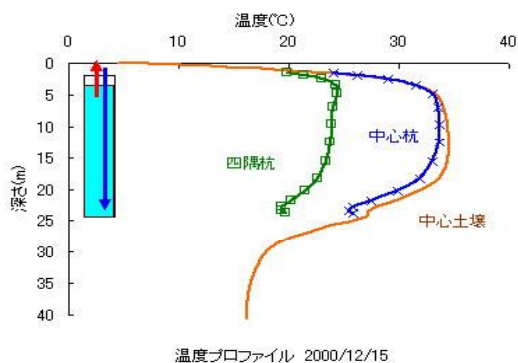


図-10 12月15日の杭内水温，中心土壌の温度

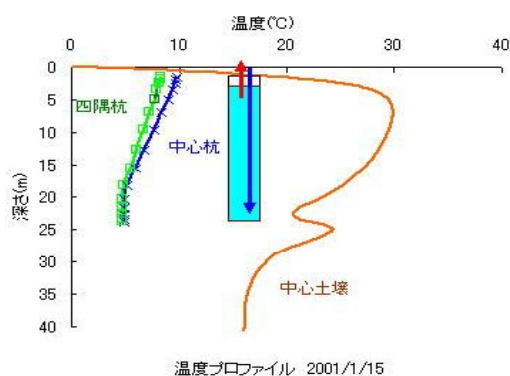


図-11 1月15日の杭内水温，中心土壌の温度

#### (4) 各要素の費用対効果を高いものから選択しての最適化<sup>2)</sup>

夏の蓄熱温度の設定に伴う蓄熱運転時間増減の効果を含めて、幸橋（写真-9）については、熱源杭の本数、放熱管の設置間隔、舗装の黒色化、放熱管への流水の30分ごとの反転など各要素を変えて数値シミュレーションで最大残雪深を求めた。その際のコストを求めてその費用対最大残雪深を求めて、目標とした電熱融雪  $250\text{W}/\text{m}^2$  と同じ残雪深になるまでそれぞれの費用対効果の高いものを順次選んだ<sup>1)</sup>。費用については、建設から50年間の運転で見積もった。こうした最適化もあって、建設費は約5万円/ $\text{m}^2$ （合成鋼床版化の効果を見込んだ実質では3.3万円/ $\text{m}^2$ 、電気代は100円/（ $\text{m}^2$ 年）とすることができた。これは電熱融雪に比べて、建設費は安価で電気代は約1/15となった。北陸地方整備局監修の設計要領で例示の地中熱融雪は出力が橋面での本システムの約  $250\text{W}/\text{m}^2$  に比べて  $170\text{W}/\text{m}^2$  と小さいにも拘わらず、その例示の建設費  $16.4\text{万円}/\text{m}^2$  を約1/5に、電気使用も約1/2にすることができた。50年間のライフ・サイクル  $\text{CO}_2$  排出量では電熱融雪の  $5,300\text{kg}/\text{m}^2$  を  $210\text{kg}/\text{m}^2$ 、約1/25にすると計算された。

## 5. おわりに

本研究の技術の融合、季節間蓄熱というブレークスルーは、大幅な建設費と維持管理、 $\text{CO}_2$  排出量の大幅な削減をもたらすことが実際の施工と運転管理で実証されつつある。このような舗装、橋梁基礎、橋梁床版、融雪との技術の融合は、全体を掌握する立場の公務技術者の役割の可能性、また、現場と大学などを繋いでいく身近な公的研究機関の可能性を示すものと思われる。

**謝辞：**本研究は、NEDO エネルギー使用合理化技術戦略的開発として、H14～16年度に福井大学竹内正紀教授・永井二郎助教授・荒井克彦教授、大阪大学松井繁之教授、大阪工大堀川都志雄教授、名古屋工大梅原秀哲教授、室蘭工大世利修美教授・上出英彦教授、北海学園大武市靖教授、石川高専西沢辰男教授と福井県との共同研究として実施され<sup>8)</sup>、研究と前後して、新清永橋、幸橋、福井駅北通り、民間駐車場などで実用普及としたものである。普及に際しても、NEDO、共同研究者、行政の各位からの助言、支援のあったことを記し、NEDOでの研究代表者としての謝辞とする。

### 文献

- 1) 宮本重信,竹内正紀:橋梁基礎杭を利用した地中への季節間蓄熱融雪,土木学会論文集 No.797/VII-36,51-62,2005.8
- 2) 宮本重信,竹内正紀,永井二郎,菅原桂一郎:熱交換杭群を用いた合成鋼床版橋での季節間蓄熱融雪の一設計 vol64.No.1,pp.10-25,2008.3
- 3) 西川和廣:SFRCによる鋼床版舗装—鋼とコンクリートの新しい関係—,橋梁と基礎,pp.84-87,2005.8.
- 4) 坂下真司,中山式典,杉井謙一,濱崎義弘,杉本克久:鋼0片添加によるコンクリート中鋼材の腐食抑制,神戸製鋼技報, No.2, pp.61-64,1999.9
- 5) 小林一輔,星野富夫,辻恒平:海洋環境下における鋼繊維補強コンクリートの鉄筋防食効果,土木学会論文集, No.414/V-12,pp.195-203,1990.2.
- 6) 永井二郎,宮本重信,西脇昌哉,竹内正紀:放熱管理設路面融雪の数値シミュレーション,日本機械工学会論文集(B編), pp.126-133,No.07-0734,2008.3
- 7) 宮本重信,青木靖,竹内正紀,永井二郎,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・報告書 Vol.22,06-II-029,pp475-480,2006.11
- 8) 宮本重信ほか:技術融合による地中熱融雪システムのコスト削減と省エネ化の研究開発(NEDO エネルギー使用合理化技術戦略的開発成果報告書 H14～H16(地中熱融雪シンポジウム pp.1-112 2005.3)