

山岳トンネルにおける融雪施設のコストパフォーマンスについて

株式会社エイトコンサルタント 正会員 ○辻 和秀
株式会社エイトコンサルタント 正会員 永井泉治
山口大学工学部 正会員 吉武 勇
山口大学工学部 正会員 浜田純夫

1. はじめに

中国地方のような比較的温暖な地域においても、冬季における山岳道路の気象条件は厳しく、しばしば積雪・路面凍結状態となる。平野部に比べ、山岳道路では橋梁やトンネルの占める割合が高くなるため、一般道路部と路面状態に格差が生じ易い。このような路面状態の格差は、車輛スリップ事故の大きな原因のひとつとなりうるものであり、スリップ事故抑止のためには、先ずは路面状態の格差をなくすることが、効果的にも、経済的にも有利な手段と考えられる。

数多く提案・実施されている融雪手段のうち、パイプヒーティング工法は、山岳地における恒温地熱や恒常湧水が利用できるため、最も経済的な手段のひとつである。本研究は、山岳トンネル出口部におけるパイプヒーティングを適用するにあたり、いくつか考えられる運転方法について、その経済性評価を試みたものである。

2. パイプヒーティングの経済性試算の適用対象

本研究で取り扱った融雪施設（パイプヒーティング）の経済性試算の適用対象事例は、I.広島県西城町丑の河トンネルおよびII.岡山県道58号線の野間峠（トンネル出口部）である。両地はいずれも冬季において厳しい気象条件の地方に位置し、特に山岳道路トンネル出口部にかけては、トンネル内外では積雪状況が急変するとともに、縦断勾配も急であるため、積雪時における車輛のスリップ事故発生の危険性は極めて高いものと考えられる。

一例として丑の河トンネルにおけるパイプヒーティングの必要熱量を表-1に示す。なお、ここで示す必要熱量は、融雪に要される熱量（融雪所用熱量）であるが、このうち⑦融解熱の項を除くと、便宜的に凍結防止熱量が推定されるものと考えた。その仮定に基づくと、丑の河トンネルにおける凍結防止熱量は、一般路面（72 W/m²）および橋梁部（94 W/m²）、計 166 W/m² が算出される。また、野間峠（融雪所用面積 3000 m²）においても同様に試算したところ、融雪所用熱量および凍結防止熱量は、各々162 W/m²、87 W/m²が求まった。

表-1 丑の河トンネルにおけるパイプヒーティングの必要熱量計算（融雪所用熱量の場合）

①	t	降雪温度	-2.6℃
②	H_m	平均日降雪深	73mm/day
③	S	時間降雪深	17.1mm/day
④	q_d	熱損失率	25% (0.25)
⑤	r_s	雪の密度	80kg/m ³
⑥	q_r	顕熱	2.08 W/m ²
⑦	q_n	融解熱	127.03 W/m ²
⑧	q_0	融雪熱量 [⑥+⑦]	129.11 W/m ²
⑨	q_1	一般路面 [⑧×(1+④)]	161.39 W/m ²
⑩	q_2	橋梁部 [⑧×1.3]	209.81 W/m ²
必要水量		$Q_r = 60 q_i A / (r_w C_w dt)^*$	1.45m ³ /min

※A：融雪所用面積 3500m²， q_i ： q_1 or q_2 ，
 $r_w C_w$ ：水の熱容量(J/m³℃)， dt ：管内水温低下

3. 検討した融雪施設の詳細

本研究においてコスト評価を試みた融雪施設は、表-2に示される散水方式、電熱線方式、地中熱交換方式、パイプヒーティング方式（それぞれ Case1～5 に相当）である。さらにパイプヒーティング方式においては、融雪するためには循環水のボイラー加温が不可欠であるが、凍結防止熱量を満足できる程度のものであれば、ボイラー加温を要さないため、凍結防止のみにターゲットを絞った場合において、地熱・湧水直接利用によるパイプヒーティング方式（Case6：Case5のボイラー加温なし）についてもコスト評価の検討を試みた。

表-2 検討した路面管理方法とコスト試算比較結果（対象例：丑の河トンネルの融雪所用熱量を用いた場合）

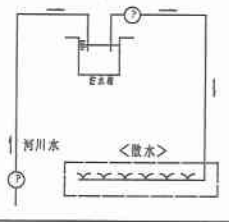
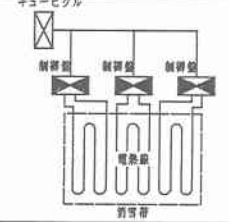
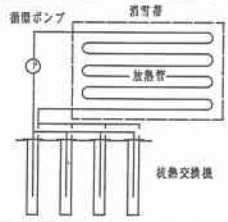
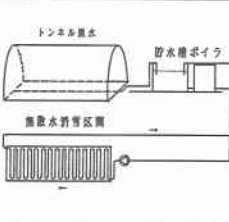
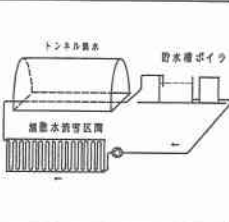
Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
散水方式	電熱線方式	地中熱交換方式	湧水利用 ボイラー方式	地熱・湧水利用 ボイラー方式
河川水を散水し、水の熱エネルギーと流速・流下により直接的消雪。	舗装体内に電熱線を埋設し、通電時の抵抗発熱により路面を加温。	地下 100m の熱交換機から採熱し、舗装内のパイプに不凍液を循環。	循環水をボイラーに返すとともに、恒常湧水をボイラーにより加温。	循環水をトンネル内にて加温。恒常湧水をボイラーにより加温。
				
維持費 903 千円/年 設備費 40,128 千円	同 12,182 千円/年 同 161,737 千円	同 1,307 千円/年 同 627,164 千円	同 2,778 千円/年 同 189,324 千円	同 2,057 千円/年 同 201,214 千円
耐用年数 15 年とする場合の平均年間経費と Case5 に対する比率				
3,578 千円/年 0.231	22,964 千円/年 1.484	43,118 千円/年 2.787	15,400 千円/年 0.995	15,471 千円/年 1.000

表-3 凍結防止熱量を用いたコスト評価結果

対象	方式	設備費	維持費	平均経費※
		千円	千円/年	千円/年
I 丑の河 トンネル	Case4	174,534	1,794	13,430
	Case5	175,114	1,349	13,023
	Case6	152,064	723	10,860
II 野間峠	Case4	159,120	2,189	12,797
	Case5	154,180	1,707	11,986
	Case6	115,180	868	8,546

※耐用年数 15 年と仮定

4. コストパフォーマンス

表-2 に示される丑の河トンネルの融雪所用熱量を用いた場合において、散水方式が他の方式に比して極めて経済性に優れることが分かる。本研究で主対象とするパイプヒーティング方式は、無散水方式の中では最も経済的な手法であり、Case4 と Case5 のコストパフォーマンスは

ほぼ同程度であった。耐用年数 15 年とした場合の平均経費について Case5 を基準にとると、Case2 の電熱線方式では約 1.5 倍、Case3 の地中熱交換方式では約 2.8 倍程度となる。なお、各施設の耐用年数はそれぞれ異なるために、ここで示した評価手法が必ずしも適切ではないことに留意しなければならない。

ここで、必要熱量を凍結防止熱量とした場合におけるコスト評価結果を表-3 に示す。なお、表-3 では Case4～6 までを対象としている。同表に示される結果より、当然のことながらボイラー加温を行わない Case6 が最も経済性に優れ、平均年間経費でみると Case4～5 に比べ約 2,200～3,400 千円/年程度押さえることが可能である。これは、ボイラー設備等の設備費に加え、運転時における燃料費を要さないことに依るものである。

常時融雪を行えるほどの熱量供給を施さなくとも、凍結防止程度で事故防止に十分寄与出来るような地方においては、本研究で示す凍結防止熱量を用いた設計が適切といえよう。

5. おわりに

現在の融雪・凍結防止工法は、地域環境の問題の配慮から可能な限り無散水型のロードヒーティング方式へ以降しつつある。その中でもパイプヒーティングは、これまで未使用とされてきた地下水や地熱といった自然エネルギーを有効に利用できるため、最も効果的な手段になりえるものと考えられる。本報は、自然エネルギーを用いた際におけるパイプヒーティング工法の経済的な有効性を示すものであったが、同工法のより現実的な設計に関し、将来的にはパイプ配置に伴う諸問題をクリアにし、その対策を十分に検討する必要があるといえる。さらに、融雪・凍結防止工法に対し、自然エネルギーの更なる適用範囲の拡大も、今後検討すべき課題に挙げられよう。