

# パイプヒーティングによる路面融雪のための トンネル坑内加温実験とコスト評価

永井泉治<sup>1</sup>・吉武 勇<sup>2</sup>・仁尾彰一郎<sup>3</sup>・浜田純夫<sup>4</sup>

<sup>1</sup>正会員 博(工) 株式会社エイトコンサルタント(〒700-0087 岡山県岡山市津島京町3丁目1-21)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 山口大学助手 工学部社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

<sup>3</sup>正会員 修(工) 株式会社エイトコンサルタント(〒700-0087 岡山県岡山市津島京町3丁目1-21)

<sup>4</sup>正会員 Ph. D. 山口大学教授 工学部社会建設工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

本研究は、山岳トンネル坑口部近傍におけるパイプヒーティングシステムの構築を目的とするものである。特に、山岳トンネルの持つ湧水量が、融雪所要面積に比して不足する場合を想定するため、トンネル外部からトンネル内へ水供給を行った際の排水量・温度を調べるとともに、トンネル周辺の岩盤および中央排水管内の温度変化の計測を行った。また、同実験結果に基づいて各種融雪工法の維持費・設備費の試算を行い、本研究で提案するパイプヒーティングシステムの経済的有効性が確認された。

**Key Words** : snow-melting, pipe-heating, tunnel spring water, geothermal heat, cost performance

## 1. はじめに

これまで著者らは、山岳トンネルの出口部における車輛のスリップ事故防止を目的に、トンネル湧水の温水パイプ式ロードヒーティング工法(以下、パイプヒーティングと称す)への適用性について検討を進めてきた<sup>1)</sup>。その結果、トンネル湧水は積雪時においても安定した熱源に成り得ること、また約10℃程度と比較的低温なトンネル湧水でも29cm/dayの降雪に対して路面を無雪状態とすることが出来たことを報告した<sup>1)</sup>。ここで得られた研究成果は、融雪に所要される面積(融雪所要面積)に対して十分な湧水量が確保出来る場合には有効であるが、実際には多くのトンネルにおいて、融雪所要面積に比して湧水量が乏しいことが予想される。このような状況下では、ほとんどの場合、トンネル湧水による融雪は行われず、トンネル外部の地下水熱による融雪<sup>2)</sup>や他の無散水式融雪工法を採用するケースが多くなっている。トンネル湧水量が乏しいケースにおいて、パイプヒーティングを採用するには、融雪に使用する水を循環するか、若しくは外部(例えば、河川水等)から不足分の水供給が必要とされる。本研究は、融雪所要面積に比して湧水量が不足する山岳トンネルを対象に、主に実際のトンネル湧水および外部から導入する水(河川水)のトンネル内の自然エネルギーによる加温実験を行うとともに、その経済性について若干の考察を加えたものである。

## 2. 丑の河トンネルについて

本研究において実験を行ったトンネルは、既報<sup>1)</sup>で示した丑の河トンネル(延長715m)である。同地方は、最大の日降雪量が30cm/dayにも達し、中国地方のなかでも積雪・路面凍結が頻繁に発生する地方である。丑の河トンネル(図-1参照)は、東坑口から西坑口にかけて約3%の下り勾配を有するとともに、西坑口部がそのまま5~7%と比較的急な下り勾配の曲線状(R=60m)のコンクリート橋梁となり、積雪時にはスリップ事故発生の危険性が極めて高いものと予想される。ここで丑の河トンネルの西坑口部から橋梁にかけては、融雪所要面積が約3,500m<sup>2</sup>(土工部2,850m<sup>2</sup>、橋梁部650m<sup>2</sup>)あり、ここに路面消・融雪施設等設計要領<sup>3)</sup>に基づいて熱量計算を行うと、表-1の結果が得られ、最低1.45m<sup>3</sup>/minの水源を確保しなければならない。なお同計算では、文献に基づき管内流速 $v=0.6$ m/secとする流量で算定すると水温低下 $dt=6$ ℃となる。

しかしながら、丑の河トンネルにおける湧水は、表-2に示されるように比較的少なく、最大でも約0.15m<sup>3</sup>/minと融雪所要水量の約10%しか確保出来ない。そこで、トンネル上流(東坑口部)からの通水(河川水)により、トンネル中の地熱加温を行うことで、水量ならびに熱量の確保を図った。ここで、冬季(2000年12月~2001年2月)における河川水の日最高水温、日最低水温および日平均水温変化を図-2に示す。本研究の融雪システムフローの概念図を図-3に示す。

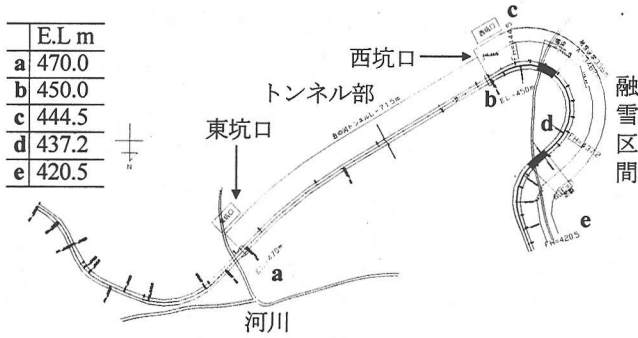


図-1 丑の河トンネル平面図

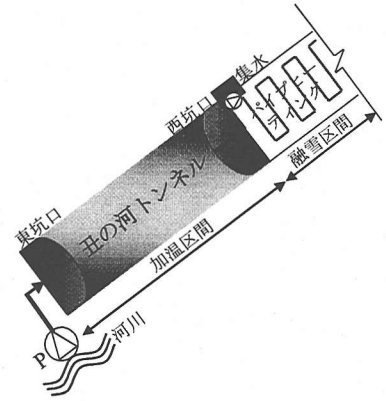


図-3 融雪システムフロー概念図

表-1 パイプヒーティングシステムの熱量計算

①	$t$	降雪温度	-2.6°C
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 <sup>3</sup>
⑥	$q_s$	顕熱	2.08 W/m <sup>2</sup>
⑦	$q_n$	融解熱	127.03 W/m <sup>2</sup>
⑧	$q_0$	融雪熱量 [⑥+⑦]	129.11 W/m <sup>2</sup>
⑨	$q_1$	一般路面 [⑧×(1+④)]	161.39 W/m <sup>2</sup>
⑩	$q_2$	橋梁部 [⑨×1.3]	209.81 W/m <sup>2</sup>
必要水量	$Q_r = 60 q_1 A / (r_w C_w dt)^*$		1.45m <sup>3</sup> /min

※A: 融雪所用面積,  $q_1$ :  $q_1$  or  $q_2$ ,  
 $r_w C_w$ : 水の熱容量(J/m<sup>3</sup>°C),  $dt$ : 管内水温低下

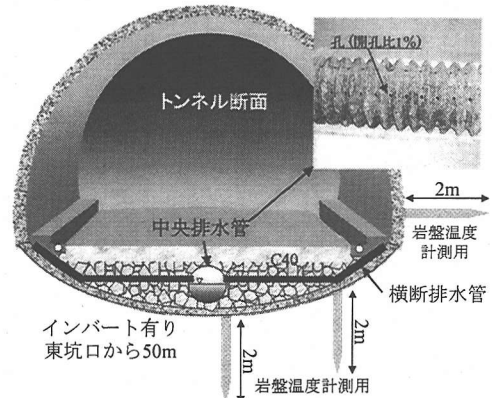


図-4 中央排水管および岩盤温度計測箇所

表-2 丑の河トンネルにおける湧水量および湧水温度

計測期間		平均湧水温度 (= ⑬) °C	湧水量 <sup>※1</sup> m <sup>3</sup> /min
2000	11 16 ~ 30	-----	0.145 (27)
	12 1 ~ 15	13.23	0.135 (8)
	12 16 ~ 31	12.64	0.131 (25)
2001	1 1 ~ 15	9.54	-----
	1 16 ~ 31	4.49 <sup>※2</sup>	0.032 (16) <sup>※2</sup>
	2 1 ~ 15	10.95	0.137 (1)
	2 16 ~ 22	10.84	0.109 (22)

※1 ( )内は計測日を表す ※2 坑外水路の工事中データ

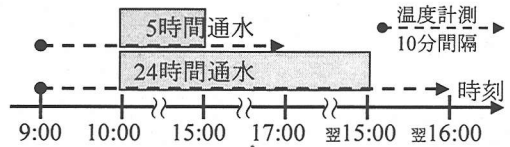


図-5 温度計測フロー

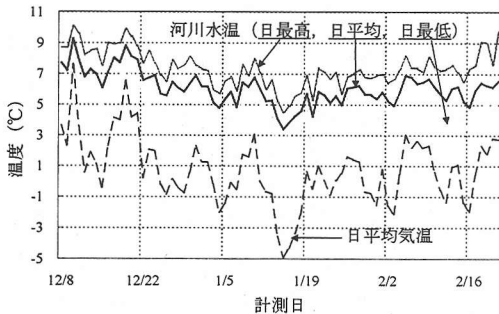


図-2 導入する河川水の冬季における水温

### 3. 河川水導入実験

#### (1) 実験方法

##### a) 河川水導入方法

河川水の汲み上げに際し、トンネル東坑口より約60m離れた河川に設置された水中ポンプ(最大揚水量 1.0m<sup>3</sup>/min)を用い、トンネル東坑口において流量調整用バルブを設け、中央排水管へ接続を行った。使用した排水管は、ポリエチレン製の蛇腹形状の管(平均直径φ=300mm)であり、周辺の地下水(トンネル湧水)の移動を可能とする開孔比1.0%の穴が設けられたタイプである。中央排水管は、トンネル内舗装の0.8m下に埋設されており、その周辺には碎石(C40)による埋戻しを行っている(図-4参照)。

##### b) 中央排水管内水温の計測方法

本研究では、中央排水管に導入する河川水量

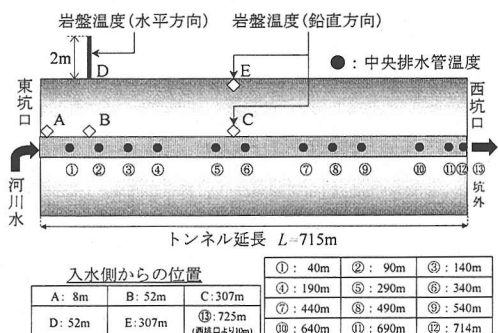


図-6 温度計測点

(0.25m<sup>3</sup>/min, 0.5m<sup>3</sup>/min, 1.00m<sup>3</sup>/min)を主な実験パラメータとし、通水前～通水期間～通水停止の一連のフロー(図-5参照)において、中央排水管内の水温およびトンネル周辺の岩盤温度といった各種温度の計測を行った。なお、いずれの通水量の実験においても通水期間は5時間(10:00～15:00)とし、その前後をそれぞれ1時間(9:00～10:00)および2時間(15:00～17:00)の温度計測を試みた。また、通水水量1.00m<sup>3</sup>/minに限り、別途24時間(10:00～翌10:00)連続して河川水を通水した際の温度計測(通水停止後6時間; 10:00～16:00)を行った。また、これらの温度計測と同時に、中央排水管からトンネル外部へ排出される水(河川水+湧水)の流量変化の計測を試みた。

### c) 岩盤温度の計測方法

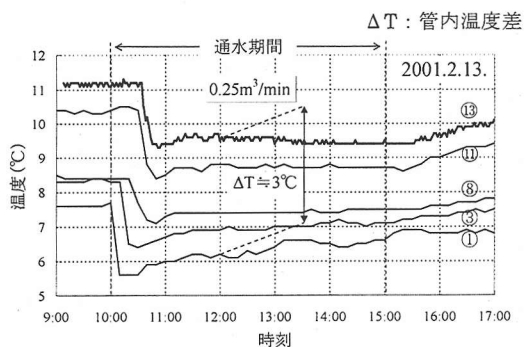
本研究では、通水時における中央排水管内の水温およびトンネル周辺の岩盤温度変化を求めるにあたり、熱電対(T.type)を使用し、図-6に示される各計測点(起点:東坑口)に設置されたデータロガーの内部メモリに10分間隔で温度データの記録を行った。なお、トンネル周辺の岩盤の温度計測には、舗装下部または側壁部に設けられたロックボルト孔(2m)に、0.5mピッチで熱電対(T.type)を添付した塩化ビニールパイプ(図-4参照)を埋設し、これを用いた。

## (2) 中央排水管の温度分布

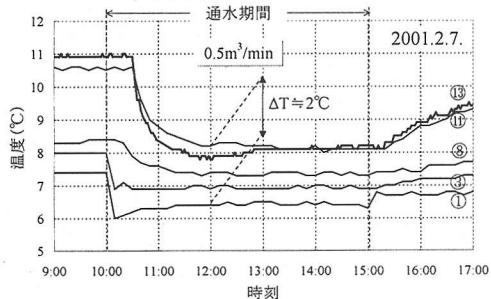
### a) 中央排水管内水温の経時変化

中央排水管を流れる水の水温度経時変化を図-7に示す。なお、同図において着目した計測点は、図-6に示される計測点①(東坑口より40m)、③(同140m)、⑧(同490m)、⑪(同690m)および⑬(同725m;西坑口より外側10m)である。図-7の結果では、通水直後から①→⑬の順に急激に管内水温が低下するとともに、その後各計測点に応じた定常温度に達していることが分かる。また、断水後からの管内水温の回復も①→⑬の順に生じており、断水直後から20分程度かけて水温回復に移行していることが分かる。

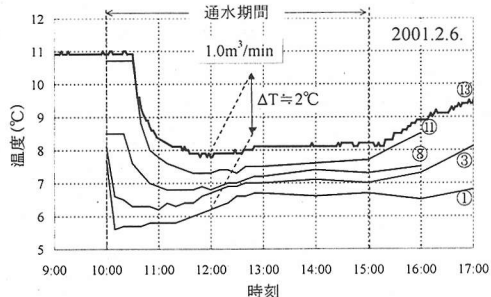
また同結果では、河川水導入量が小さくなるにし



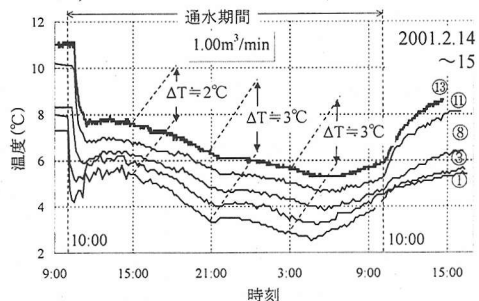
A) 河川水通水量 0.25m<sup>3</sup>/min



B) 河川水通水量 0.50m<sup>3</sup>/min



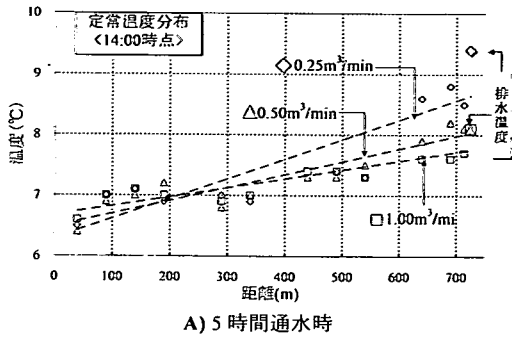
C) 河川水通水量 1.00m<sup>3</sup>/min(5時間通水)



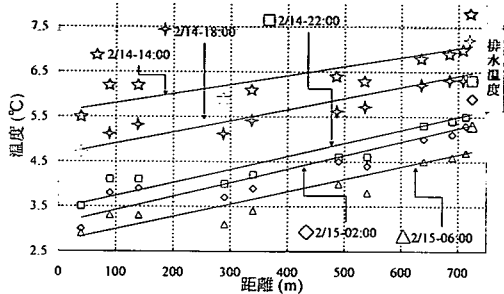
D) 河川水通水量 1.00m<sup>3</sup>/min(24時間通水)

図-7 中央排水管における水温の経時変化

たがって、計測点①と⑬の水温(すなわち東坑口と西坑口付近の管内水温)の差が大きくなっていることが分かる。これは、中央排水管を流れる水が、河川水導入側(①)では、流量の減少および蛇腹形状の管との摩擦抵抗に伴って管内流速が低下することで、排水側(⑬)では全排水量に対して、比較的暖かい



A) 5時間通水時



B) 24時間通水時

図-8 定常温度期における管内水温分布

トンネル湧水の占める割合が大きくなり、結果として両測点間の水温差を来すものと考えられる。

#### b) 中央排水管内の水温分布変化

図-8のA)に5時間通水実験における14:00時点(通水後4時間)、B)に24時間通水における定常温度期の中央排水管内水温分布結果ならびに線形回帰結果を示す。また、両図には排水時の水温(=⑬; パイプヒーティング初期水温)を併せて示している。

図-8のA)に示される結果より、 $1.00\text{m}^3/\text{min} \rightarrow 0.25\text{m}^3/\text{min}$ の順、すなわち通水量が少ないほどにトンネル坑内における熱の享受が大きくなっていることが分かる。ここで丑の河トンネルでは、排水量 $1.45\text{m}^3/\text{min}$ を確保しなければならないが、それを満足できる通水量 $1.00\text{m}^3/\text{min}$ の実験においても(図-9参照)、計測点①から排水側の計測点⑬にかけて、約 $2^\circ\text{C}$ 程度の温度上昇することが分かった(図-7、図-8参照)。

また、図-8のB)の結果からも管内水温は、通水距離に対してほぼ右上がりに温度上昇していることが分かり、本システムの連続運転を行う際にも、河川水をトンネル内に通水することで、ある程度の水温上昇は望めるものと考えられる。また、外気温の低下に応じて通水する河川水温も低下したことから、トンネル東坑口近傍の管内水温は大きく低下傾向を示した。しかしながら、管内水の排出側であるトンネル西坑口(=⑬)では、東坑口近傍ほど水温の低下は生じていない。これは、水温の低下に伴って、湧水や周辺岩盤との温度差が大きくなることから、それ

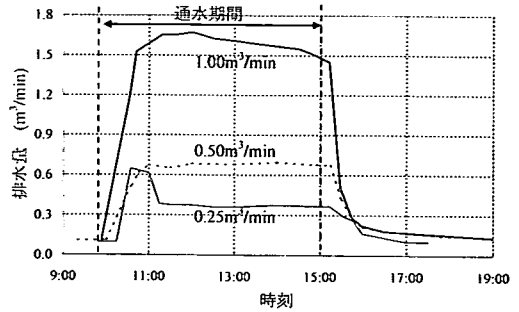


図-9 5時間通水時における排水量変化

に応じた熱の享受が行われているものと推察される。

#### (3) 岩盤温度の変化

図-10に24時間河川水通水時およびその前後の岩盤温度変化を示す。なお、A地点における $2.0\text{m}$ 深では、熱電対破損のためデータが得られていない。同図より、河川水通水側(トンネル東坑口)に最も近いA地点の $0.5\text{m}$ 深では岩盤温度が低下していることが分かる。しかしながら、中央排水管のごく近傍に配置されている他の地点でも、岩盤温度の変化はほとんど認められないことが分かる。さらに、図-7からも分かるように、河川水を通水した際の中央排水管内水温(=岩盤温度)は、通水停止後より水温が上昇し、後日にはほぼもとの水温まで回復していることが分かる。これは、中央排水管内を流れる水温(湧水+河川水)に比して、周辺の岩盤が極めて大きな熱容量を有していることに起因するものと考えられる。

## 4. 融雪施設の経済性

#### (1) コスト検討を試みた路面管理方法について

本現場実験結果より、通水量や周辺岩盤との温度差、トンネル延長によって、山岳トンネルから享受可能な熱量が異なることが推察された。そこで、この現場実験を踏まえ、丑の河トンネル西坑口より橋梁のある急カーブ区間および縦断勾配が急な区間である約 $3,500\text{m}^2$ において、各種融雪設備の設備費および維持管理費の試算を行い、本研究の提案するパイプヒーティングシステムの適用性について検討を行った。実験では、トンネル坑内に比較的低温な河川水を通水した場合の加温特性について検討しているものの、実施では、パイプヒーティングに使用した水を循環使用することが熱効率および水供給の安定性の観点から採択されるケースが多いものと予想される。このような見解から、本論ではパイプヒーティング使用水を循環使用する工法(Case4~5)についてコスト比較を行った。さらに、比較のため丑の河トンネルの坑口部付近に採用可能な方法として、

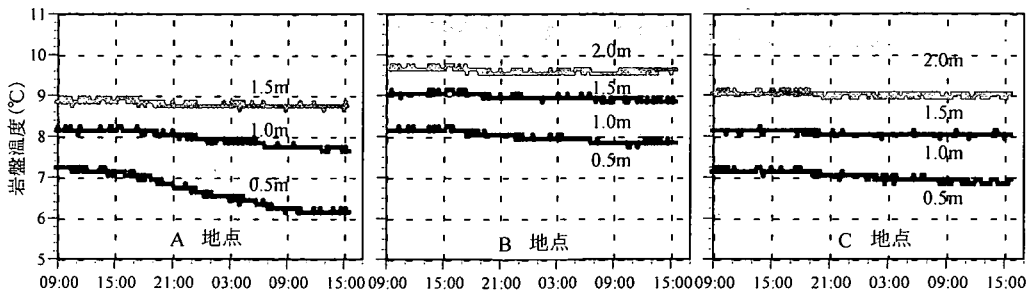


図-10 岩盤温度計測結果

散水方式(Case1), 電熱線方式(Case2), 地中熱交換方式(Case3)についてコスト評価を試みた。なお, いずれの方法においても, 丑の河トンネルに近接する広島県西城町の過去10年間の気象結果に基づく融雪所要熱量をクリアするものであり, 表-3に示される各パラメータに基づいて計算を行ったものである。

## (2) コスト試算結果

本研究で検討を行った各方式のコスト試算結果を表-4に示す。なお, 同表では一律の比較となるよう, 耐用年数を15年として試算した。これらは, 初年度の「設備費」に加え, 設備の耐用年数を15年と仮定した上で, 電気料金や燃料費, 点検費といった諸経費を, 工法ごとに積み上げたものを「維持費」として取り扱ったものである。

同結果より, 水源(河川)がトンネル坑口部に近接し, 設備費および維持管理費ともに最小となる散水方式が最も経済的であることが分かる。電熱線方式の設備費は, 散水方式の次に安価であるが, 年間の維持費(電力料金)が最大で, Case1およびCase3の約10倍以上, Case5の約6倍となっている。

地中熱交換方式は, 設備費が比較的高価であるがおおよそ循環ポンプの電力のみしか必要としないことから, 維持費は散水方式とほぼ同額であり, 耐用年数を長く設定すると, 有利な方式に成り得る。なお, 本研究でコスト比較検討を行った範囲では, 同方式は耐用年数15年の平均年間経費は最大であった。

Case4およびCase5に示されるパイプヒーティング融雪方式では, 他の無散水型融雪工法(Case2やCase3)に比べ, (平均)年間経費は低いことが分かる。また, 両者の比較より, トンネル延長が700m程度では, 地熱による導入水の水温上昇が $2^{\circ}\text{C}$ 程度であることから, 回収水( $6^{\circ}\text{C}$ )を直接ボイラーに返しても, トンネル坑内にて加温( $6^{\circ}\text{C}+2^{\circ}\text{C}=8^{\circ}\text{C}$ )を行っても, 設備費の差は約12,000千円程度であった。これは, Case5では比較的小型のボイラー設備( $250\text{kW}\times 2$ 基)で十分とされるが, Case4では大型のボイラー設備( $465\text{kW}\times 2$ 基)が必要とされる一方, Case5におけるポンプ設備や配管がCase4に比べ大きくなることに起因するもので

表-3 コスト比較計算用パラメータ

パラメータ		関連
融雪所要熱量 (表-1 参照)	一般路面 $161.39\text{W/m}^2$ 橋梁 $209.81\text{W/m}^2$	Case1~5
舗装形態	コンクリート舗装 200mm厚	Case1~5
初期水温	$12.0^{\circ}\text{C}$	Case4~5
回収水温	$6.0^{\circ}\text{C}$ ( $\therefore dt=6^{\circ}\text{C}$ )	Case4~5
最低河川水温	$2.0^{\circ}\text{C}$	Case1
放熱管種類	15A	Case3~5
放熱管ピッチ	200mm	Case3~5
放熱管理設深	70mm	Case3~5
坑外排水量(温)	$1.45\text{m}^3/\text{min}$ ( $8^{\circ}\text{C}$ )	Case5

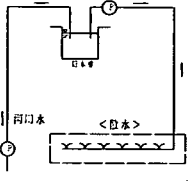
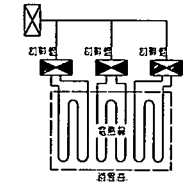
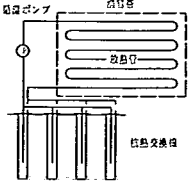
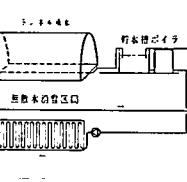
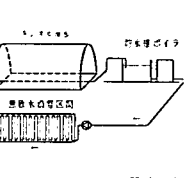
ある。なお, 両者の維持管理費の比較を行うと, トンネル坑内にて加温するCase5が, 回収水を直接ボイラー加熱するCase4に比べ優れる結果を得た。

これらのコスト比較検討結果をまとめると, 利用できる水源が近くにあり, 均一に散水できるような路面状況の場合には(例えば, ワダチが多い路面や急な片勾配路面には不均一な路面融雪となる可能性が高い), 散水方式が最も経済的に有利な方法であることが分かる。しかしながら, 外気温が低く散水布の再凍結や周辺環境への散水飛沫の影響がみられる条件下では, Case4の湧水利用ボイラー方式やCase5の地熱・湧水利用ボイラー方式が有効な手段になることが分かった。特に, Case5の地熱・湧水利用ボイラー方式は, トンネル延長が長い場合や, 坑内温度上昇量が $2^{\circ}\text{C}$ 以上に期待できる場合では, より経済性に優れた方法に成り得るものと予想される。

## 5. まとめ

本研究では, 特にパイプヒーティングによる融雪所要面積に比して, トンネル湧水が不足する場合を想定し, トンネル外部からの水補給を行う際のトンネル坑内における加温特性について実験的検討を試みたものである。さらに, 実験成果を踏まえて, 同トンネル坑口部に対する5種類の融雪工法について設備費・維持管理費の計算を行い, 耐用年数15年とする場合の, 平均年間経費の算出を行った。本研究

表-4 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)

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戻すとともに、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。
				
<ul style="list-style-type: none"> <li>・連続運転→凍結抑制可</li> <li>・散布水の再凍結</li> <li>・降雪量への対応困難</li> <li>・路面形態に影響大</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・路面形態から影響少</li> <li>・部分的融雪可能</li> <li>・破損時の漏電</li> <li>・路表面にひび割れ</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・燃料不要→環境良</li> <li>・無雪状態可能</li> <li>・不凍液の漏水</li> <li>・一杭の対応面積小</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>・路面形態からの影響が少なく、無雪状態可能</li> <li>・気象条件に応じた設計が可能</li> <li>・パイプからの水漏れおよび破損部の検出困難</li> <li>・配管の長大化に伴うポンプ等の設備規模大</li> </ul>	
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

で得られた所見を以下に要約する。

- ① 中央排水管に外部から低温水(河川水)を供給することで、管内水温は一旦急激に低下するが、その後各点に応じた定常状態となるとともに、通水停止から 20 分程度かけて水温回復に移行した。
- ② 融雪所要面積に必要な水量 1.45m<sup>3</sup>/min を満足できる通水量 1.00 m<sup>3</sup>/min の実験でも、トンネル坑内にて約 2℃程度水温を上昇させることができた。
- ③ 24 時間通水実験においても、中央排水管内水温は、通水距離にほぼ比例して温度上昇し、連続運転を行っても、ある程度の水温上昇は望める。
- ④ 低温な河川水を連続して通水しても、中央排水管近傍の岩盤温度はほとんど変化が見られなかった。これは、周辺岩盤が管内水に比して極めて大きな熱容量を有していることに起因する。
- ⑤ 利用できる水源が近くにあり、路面形態に大きな支障がない場合は、散水方式が最も経済的な方法

である。しかしながら、散水方式が利用できないような条件下では、トンネル湧水等によるパイプヒーティングは、経済的にも有効な手段となる。

#### 参考文献

- 1) 永井泉治, 吉武 勇, 中村秀明, 浜田純夫: 山岳トンネルにおける湧水を利用した橋梁融雪実験とその適用性, 土木学会論文集, No.665/VI-49, pp.183~188, 2000.12.
- 2) 例えば村上芳明, 溝川克巳, 森山和馬, 森 拓男: 地中熱利用による路面融雪と岩盤蓄熱の経年的評価, 土木学会第 54 回年次学術講演会 VII, pp.242~243, 1999.9.
- 3) 建設省北陸地方建設局: 路面消・融雪施設等設計要領, 1990.7.
- 4) オンサイト型都市融雪システム研究会: オンサイト型都市融雪システムの実際と計画, 理工図書, 2000.4.
- 5) 森田泰司, 押尾良衛, 新藤博行: 配管技術の基礎, 啓学出版, 1980.1.

(2001. 6. 28 受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE WATER HEATING BY MEANS OF THERMAL ENERGY IN MOUNTAIN TUNNEL AND ITS COST PERFORMANCE

Senji NAGAI, Isamu YOSHITAKE, Shoichiro NIO and Sumio HAMADA

The object of this research is to construct the pipe-heating pavement system at mountain tunnel exits. When the amount of spring water is short for thawing of snow, additional water must be supplied from the outside of tunnel. The amount and temperature of river water were surveyed when the water run through pipe under the tunnel, i.e. center drain. It was proven that an enough volume of water and the water temperature were secured from the experiment results for heating of the river water possible by the tunnel pit. Finally, initial cost and running cost of this system was calculated on trial based on experimental results, its economical effectiveness was confirmed.