

山岳トンネルにおける湧水を利用した 橋梁の融雪実験とその適用性

永井泉治¹・吉武 勇²・中村秀明³・浜田純夫⁴

¹正会員 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)

²正会員 博士(工学) 日本学術振興会 特別研究員 PD (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

³正会員 博士(工学) 山口大学助教授 工学部知能情報システム工学科(〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

⁴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の橋梁における車輛の積雪スリップ事故防止策として、山岳トンネル特有の湧水を利用した温水パイプ式ロードヒーティング実験を実施し、検討を試みたものである。またその基礎実験として、熱伝導特性の異なるコンクリートについて熱伝導試験を行うとともに、その融雪効果を調べた。トンネル湧水を用いた現場実験より 29cm/day の降雪量に対しても、無雪状態にすることができたため、温水パイプ式ロードヒーティングへのトンネル湧水適用の有効性が確認できた。

Key Words : mountain tunnel spring water, snow-melting, pipe heating, thermal conductivity

1. はじめに

積雪日数が少ない中国地方のような比較的温暖な地域においても、積雪・路面凍結に伴う車輛スリップ事故は多く、特に橋梁やトンネル坑口部などの路面状態の急変部では、頻繁にスリップ事故が発生している。これは、積雪・路面凍結に対するドライバーの認識・経験も乏しく、また積雪路面管理の設備が十分でないことに起因するものである。ここで、路面上の雪氷に対して僅かな熱の供給を行うことで、路面の融雪・凍結防止が可能であることから、この熱源として地熱や地下水等の自然エネルギー源が有望視される。比較的温暖な地方にある山岳トンネルでは、地山の有する熱量も多く、またトンネル内の気温変化も大きくないことから、トンネル湧水や地熱は安定した熱源となりうるものと思われる。

そこで本研究では、経済的且つ効率的な融雪・凍結防止方法の構築を目的に、現在未利用のエネルギー源である山岳トンネル湧水の温水パイプ式ロードヒーティングシステムへの適用性について検討を試みた。特にトンネル湧水利用の基礎データを資する目的から、山岳トンネルの地熱・湧水温度を測定するとともに、ドライバーにとって最も過酷な条件のひとつであるトンネル坑口部の橋梁を対象とし、実トンネルの湧水を用いた融雪実験を行った。

2. トンネル内の温度計測

(1) 温度計測対象トンネル

本研究の提案する融雪・消雪工法では、熱源がトンネル湧水または地熱であることから、トンネル内部の温度分布や(平均)湧水温度の把握が必要とされる。そこで現在供用中の平成トンネル(島根県掛合町)および美郷トンネル(山口県本郷村)においてトンネル軸方向の温度分布の計測を行った。なお、両トンネルともに比較的湧水量が豊富であった。本研究で計測・実験を行った各トンネルの所在地を図-1に示す。

(2) 温度計測方法

平成トンネルでは、図-2に示すように舗装部から深さ約0.5~1.0mの範囲内に熱電対(T.Type)を埋設し、携帯型データロガーを使用して地熱等の温度計測を行った。また美郷トンネルでは、側壁部孔に熱電対・白金測温体を挿入し温度計測を行った。

(3) 温度計測結果

図-3~図-4に平成トンネルおよび美郷トンネルの地熱・湧水温度の計測結果を示す。なお、両図における凡例は、計測日(1998~1999年)を表す。両結果より、トンネル坑口部は、坑外の温度変動の影響を受けて地熱が変動するが、トンネル中心に近づくにつれ恒温状態に近づいていることが分かる。図-4のB)



図-1 温度計測トンネル所在地

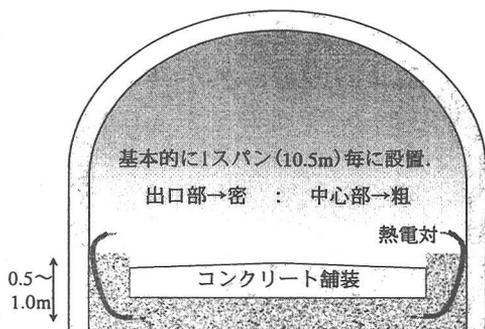


図-2 平成トンネルにおける熱電対埋設位置

に着目すると、冬期において湧水量が低下する傾向が認められるものの、最低でも5(l/sec)程度の湧水量があり、比較的安定した水源(熱源)となる可能性が伺える。また、両トンネルの湧水温度は、冬期においても約10℃以上と安定していることがわかる。

これらの結果より、トンネル内の地熱や湧水は、年間を通じて安定した未利用の自然エネルギー源であると考えられ、温水パイプ式ロードヒーティング等の融雪・凍結防止方法に適用すれば、その効果を発揮できるものと期待される。

3. 室内基礎実験

(1) 室内実験の目的

コンクリートの熱伝導特性(熱伝導率等)によって融雪効果が大きく異なることが予想される。宮本¹⁾は珪石および安山岩を使用したコンクリート舗装について熱伝導率を測定し、珪石を用いることで高熱伝導舗装となることを報告している。また、同報では現場打設に比べプレキャストコンクリートとする方が、優れた熱伝導性を得るとし、加えて鋼繊維(SF)による補強を行えば、パイプのかぶり厚を薄くすることが可能で、且つ熱伝導率が向上するとしている。

本研究では、異なるコンクリートの熱伝導特性が、融雪効果に及ぼす影響について検討するため、その基礎実験として異なる細骨材を用いたコンクリート

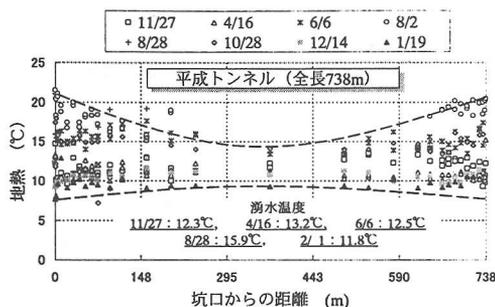
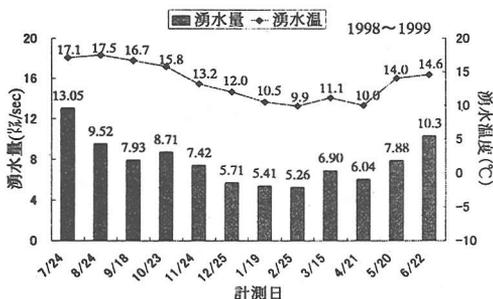


図-3 平成トンネル温度計測結果



A) トンネル縦断方向の温度分布



B) トンネル坑口部の湧水量および湧水温度

図-4 美郷トンネル温度計測結果

の熱伝導特性を調べた。具体的には粗骨材として安山岩を母岩とする砕石(山口県宮野産)を用い、細骨材に海砂(北九州若松産)および細骨材代替としてガラス廃材(以下、ガラス砂と表す)を用いた。

(2) 室内実験方法

本研究では、海砂・ガラス砂と異なる細骨材、および鋼繊維(SF)を用い、表-1に示すコンクリート供試体を4体(Type.I~IV)作製した。本室内実験では定常法による熱伝導試験をもとに²⁾、鋼製パイプ(内径15mm、外径18mm)を断面中央に埋設したコンクリート供試体に対して、温度制御された温水を通水する手法を用いて熱伝導特性を調べた(図-5参照)。ここで通水温度および环境温度(=供試体初期温度)はそれぞれ50℃、20℃である。温度の計測は熱電対(T.Type)を使用し、データロガー内の記録メディアに10分毎に記録した。

表-1 室内実験における配合条件

記号	単位量 (kg/m ³)				
	C	W	S	G	SF(外割)
Type.I, II	300	165	海砂 819	1040	(II : 79)
Type.III, IV			ガラス砂 788		(IV : 79)

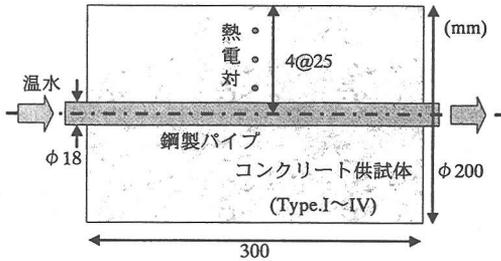


図-5 室内実験供試体

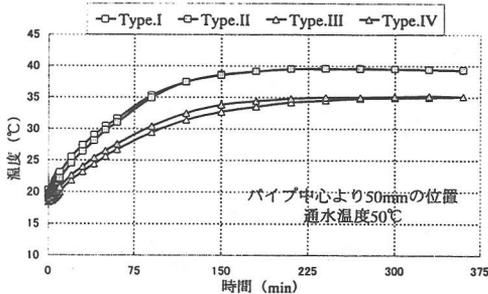


図-6 室内実験結果(温水温度 50℃, 環境温度 20℃)

表-2 熱伝導率試験の配合条件と試験結果

	単位量 kg/m ³				熱伝導率 W/mK	比率
	C	W	S	G		
セメント・スト	1500	524	---	---	1.10	---
モルタル	海砂	520	1420	---	2.29	0.38
	ガラス		1364	---	0.87	
コンクリート	海砂	300	819	1040	2.17	0.54
	ガラス		788		1.16	
ガラス	---	---	---	---	1.03	---
海砂	---	---	---	---	0.31	---

(3) 実験結果と考察

図-6にパイプ近傍および表面部におけるType.I~IVの温度変化を示す。ここで鋼繊維(SF)の混入有無に着目すると、鋼繊維(SF)を使用したType.IIおよびType.IVは、使用していないType.I・Type.IIIとほぼ同等の温度履歴となっていることがわかる。このことより、本研究の行った鋼繊維(SF)の混入量(単位体

積あたり1%)程度では、コンクリートの熱伝導性にほとんど寄与しないものと思われる。

また、異なる細骨材(海砂およびガラス砂)の影響に着目すると、通水開始の比較的早い段階より、海砂を使用したType.I~II供試体のほうが、ガラス砂を使用したType.III~IVよりも高い温度となっていることが分かる。特にほぼ150min以降においては、両者には5~10℃程度の温度差が生じており、Type.I~II供試体のほうが比較的早く定常状態に到達している。研究計画段階では、ガラスの高熱伝導性を期待したものであったが、実際には海砂を使用する場合よりも熱伝導性が低下するという結果となった。

ここでガラス砂および海砂コンクリートの熱伝導性を確認するため、JIS R 2618(耐熱レンガの熱伝導率測定法)に基づいて、両コンクリートの熱伝導率の計測を行った。また、比較を容易にするためガラス砂および海砂のモルタルについても計測した。得られた熱伝導率試験結果を表-2に示す。同結果よりコンクリートの熱伝導率を比較すると、ガラス砂/海砂で0.54、モルタルではガラス砂/海砂で0.38とガラス砂を用いた場合、著しく熱伝導率が低下することが分かった。

4. 現場融雪実験とその適用性について

(1) トンネルの詳細

本研究では、広島県の東北部にある丑の河トンネルにて現場融雪実験を行った。同トンネルは標高480mに位置し、日降雪量は最大30cm/dayにも達することから、中国地方においては積雪・凍結が問題となる箇所である。また、過去に20cm/day以上の連続降雪はほとんどなく、このトンネルにおける融雪実験を実施することで、比較的温暖な西日本を代表する積雪・凍結問題が処理可能な地点と考えられる。ここで蓄熱体となる地質は、古生代石炭紀~ペルム紀の粘板岩と石灰岩が基盤をなし、これに中生代白亜紀の花崗岩やひん岩が貫入しているものである。この花崗岩は中国地方に広く分布し、地熱分布や蓄熱状況においても代表的な岩盤と考えられる。

(2) 実験供試体

本研究では、温水パイプ式ロードヒーティングシステムに対し、トンネル湧水を利用した場合の融雪効果について検討するため、特にコンクリート舗装種類を変えて融雪実験を行った。供試体A(80mm厚)は、ガラス砂および鋼繊維(SF)を使用し、鋼製パイプ(内径15mm, 外径18mm)を150mm間隔で配置した。

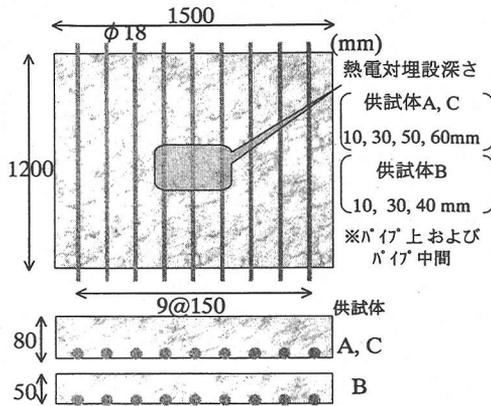


図-7 現場融雪実験供試体の詳細

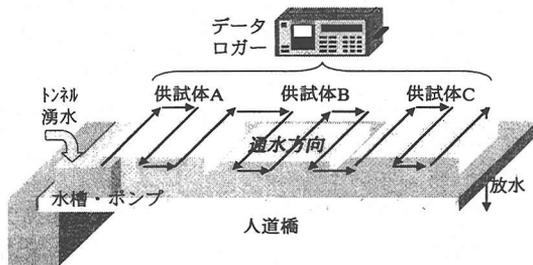


図-8 現場融雪実験フロー

また供試体B(50mm厚)および供試体C(80mm厚)は海砂を使用した一般的な配合条件であり、供試体A同様のパイプ間隔とした。なお、配合条件は室内実験に準ずるものである。また、各供試体の最下面にパイプを配置したことから、供試体A~Cはそれぞれ71, 41, 71mmのパイプ埋設深さとなる。

各供試体には、熱の伝達効果を確認する目的から予めパイプ上およびパイプ中間部に、高さ20mmピッチで熱電対(T.Type)を埋設した。実験供試体の詳細を図-7に示す。

(3) 実験方法

本研究では、トンネル坑口部の橋梁を想定するため、トンネル坑口付近にある人道橋(コンクリート床版橋)に5mm厚程度のモルタルを打設し、その上に供試体A~Cを敷設した。各供試体中の鋼製パイプは断熱材で被覆したビニールホースで連結され、図-8に示されるフローで通水を行った。なお、丑ノ河トンネルより排出された湧水は、大型ポンプ(最大排出量200ℓ/min)を用いて実験地まで圧送され、小型ポンプ(流量40ℓ/min)を用いて供試体内のパイプへ通水を行った。温度の計測にあたっては、データロガー内の記録メディアに10min毎に記録するとともに、30min毎には各供試体の雪載状況を計測した。

表-3 現場融雪実験の詳細

パイプ間隔	運転方法	パイプ埋設深	熱伝導性
供試体A	連続	71mm	ガラス&SF
供試体B		41mm	
供試体C	断続	71mm	海砂

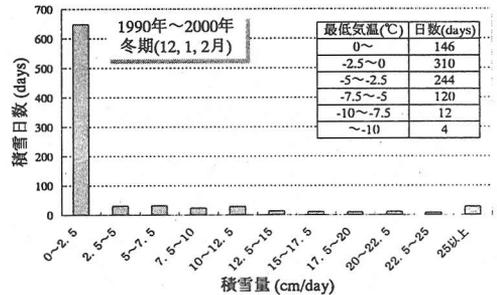


図-9 丑の河トンネルにおける積雪日数

無雪状態となるトンネル内路面と外気に曝され降雪のある坑口部では、積雪状態に大きな格差が生じやすい。ここでトンネル湧水が豊富なトンネルにおいては、トンネル湧水を温水パイプに連続して通水することで、比較的安定した路面の加温を行うことができるものと思われる。そこで本研究では、同システムの連続運転を想定するため、圧送されたトンネル湧水を供試体が定常状態(通水6時間後)となるまで循環し、その後の雪載状況の観察を行った。また、各供試体の融雪能力の定量化および同システムの間欠作動(断続運転)時の融雪効果を確認する目的から、長期間低温下の外気に曝した供試体上に高さ50mmを雪載し、融雪がほぼ完了するまで路面の加温を行った。ここで、いずれの実験においても、小型水槽内と放水時の水温差は、約1℃以内であったことから、供試体ごとの温度差はないものと仮定できる。本研究で行った実験の詳細を表-3にまとめて示す。

なお、実験当日は29cm/day(12mm/hour)の降雪があり、外気温も比較的低温(最低-6℃、平均-4℃程度)であった。これは、図-9に示されるように、同地域においては非常に低い頻度の気象条件であり、この気象条件下において融雪が可能であれば、冬期間を通じて路面をほぼ無雪状態にすることができるものと思われる。

(4) 実験結果と考察

a) 連続運転時における融雪効果

図-10に外気温・湧水温(水槽内水温)および供試体表面部近傍(パイプ上、深さ10mm)の温度変化を示す。なお、実験当日は29cm/dayの降雪があった。同結果

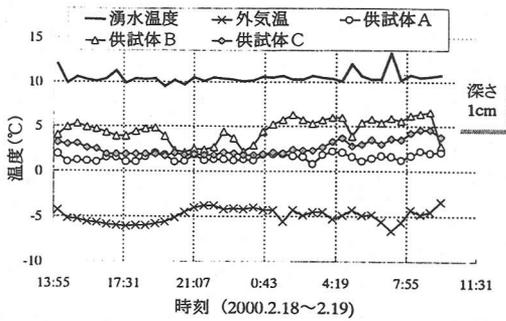


図-10 連続運転における供試体温度変化
(供試体表面より深さ1cm位置-パイプ上)

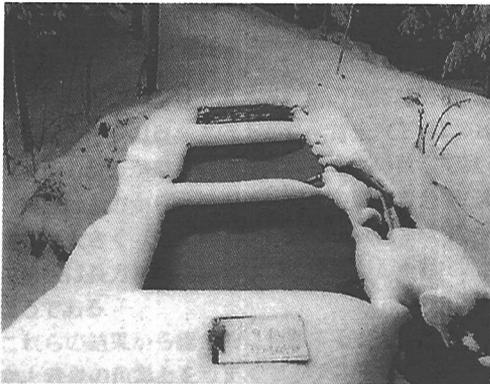


写真-1 連続運転中の路面状況(奥より供試体A, B, C)

より、供試体表面部近傍(深さ10mm)の温度は、いずれも約2℃以上の温度を保持しており、特に50mm厚の供試体Bでは、約5℃程度まで高まっていることが分かる。また供試体表面の雪載状況に着目すると、計測期間中(14:00～翌日10:00)において、目視可能な積雪・残雪は一度もなく、供試体表面を無雪状態にすることができた(写真-1参照)。

また、室内実験で得た熱伝導性が小さい配合条件(Type.IVと同配合)で作製した供試体Aにおいても、湧水温度10℃程度で供試体表面を無雪状態にすることができた。しかしながら図-10の結果より、3供試体中最も内部温度は低く、同実験条件よりも過酷な条件下(例えば気温低下が長期に渡って継続する場合や降雪が著しく多い場合等)では、その効果があまり期待できない可能性もあるといえる。

以上より、湧水が比較的豊富であり、且つ約10℃以上の湧水温を有するトンネルでは、温水パイプ式ロードヒーティングシステムの連続運転により、路面を無雪状態もしくは凍結抑制を可能にできるものと思われる。また、床版表面近傍部(深さ10mm)で約2℃程度確保できれば、無雪状態にできたことから、同温度を管理することで、次に述べる断続運転など

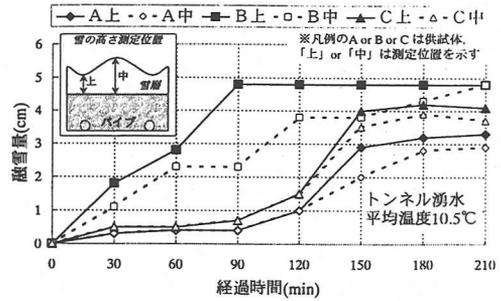


図-11 断続運転における融雪量の比較

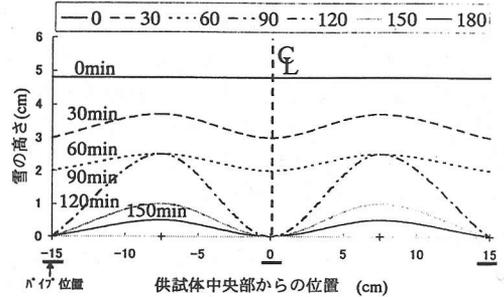


図-12 断続運転における供試体Bの雪の高さ変化

の運転方法を最適にできる可能性も伺える。

b) 断続運転を想定した融雪効果

トンネル湧水量に比して融雪面積が広範囲となる場合や経済性を求められる場合には、融雪箇所のブロック化により、断続的な運転とする場合が多くなるものと思われる。そこで、本研究では各供試体の融雪能力の定量化および同システムの間欠作動(断続運転)時の融雪効果を確認する目的から、長期間低温下の外気に曝した供試体上に高さ50mmで雪載し、連続運転同様、埋設パイプにトンネル湧水の通水を行った。なお、計測期間中における(雪載)雪層への降雪は、別途設けた容器から雪の高さおよびその重さを測定することで処理した。

図-11に各供試体の融雪量を示す。同厚で異なる熱伝導率を有する供試体A(ガラス砂+S F)と供試体C(海砂)を比較すると、通水開始60min程度までは大きな差は認められないものの、90min以降では、徐々に熱伝導性の高い供試体C上の雪が融けていることが分かる。特に180min後では、供試体A(ガラス砂+S F)上の融雪量は約3.2cm程度に対し、供試体Cは約4.2cmと効果の違いが明確になっている。

また、パイプ埋設深さが最も浅い供試体Bでは、通水30min後より融雪効果が現れており、他の2供試体に比べ早期に融雪が完了していることが分かる。供試体Bの雪の高さ変化を示す図-12に着目すると、通水開始より90min後において大きな融けむらが認

められるものの、通水150min後には、全残雪高さが1cm以下となっており、パイプ埋設深さの影響が大きいことが伺える。

(5) 融雪施設への適用性について

先の実験結果より、湧水が豊富な山岳トンネルにおいては、地山中の熱源(地熱や湧水)を有効に利用することで、温水パイプ式ロードヒーティングが実用可能と考えられる。しかしながら、多くの山岳トンネルでは融雪が必要な冬期間において、湧水が必要量を確保できないという問題がある。このような場合、できるだけ熱量を有効に利用するために舗装の高熱伝導化およびパイプ配置の最適化を行い、少ない水量で融雪可能とする運転システムの構築が必要とされる。本論文では、トンネル内の地熱収熱の方法や融雪に効果的な断続運転システムについては報告できなかったが、今後引き続き研究を進める予定である。

5. 結論

本研究では、温水パイプ式ロードヒーティングを対象に、コンクリートの熱伝導性に関する室内基礎実験を行うとともに、山岳トンネル特有の湧水の同施設への適用性について検討を試みた。本研究で得られた結論を以下に要約する。

- ① 海砂およびガラス砂で作製したコンクリートの熱伝導率は、海砂に対してガラス砂が0.54と著しく小さい。また、鋼繊維(SF)混入率1%の影響は比較的小さいものといえる。
- ② 水温10℃程度のトンネル湧水を直接利用した温

水パイプ式ロードヒーティングでは、降雪量29cm/dayに対しても無雪状態とすることが可能であった。

- ③ 断続運転を行った場合、異なる熱伝導性のコンクリートでは、融雪能力に大きな相違が現れる。また、パイプ埋設深さ41mmの供試体では、通水150min後において、5cmの雪載に対し雪の高さが全面で約1cm以下とすることができた。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、平成トンネル(深沢 忠所長)、大水峠トンネル(仙田繁雄所長)および丑ノ河トンネル(星野光則所長)の各工事関係者の方々に御協力を頂きました。また、(有)すずかには細骨材用ガラス廃材、(株)ブリヂストンには鋼繊維を提供して頂きました。トンネル内の温度計測および実験の実施にあたり、林一成氏(株)サンヨーコンサルタント)、山本竜海氏(株)富士P S)、三村陽一氏、仁尾彰一郎氏(山口大学大学院)に御協力頂きました。最後に宮本重信博士をはじめとする福井県雪対策・建設技術研究所の諸氏には、各融雪方法の利得やコンクリートの熱伝導率の評価について貴重な御意見を頂きました。ここに記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 1) 宮本重信：自然熱源による路面の融雪・凍結抑制システムに関する研究，名古屋工業大学学位論文，1999.3.
- 2) 川口 徹，樹田佳寛：コンクリートの熱伝導率，熱拡散率，比熱の測定方法とその応用，マスコンクリートの温度応力発生メカニズムに関するコロキウム，pp.11～14，1982.8.

(2000.7.10 受付)

APPLICABILITY OF TUNNEL SPRING WATER TO THE PIPE HEATING SYSTEM FOR SNOW MELT ON THE BRIDGE

Senji NAGAI, Isamu YOSHITAKE, Hideaki NAKAMURA and Sumio HAMADA

This study presents an experimental method and results for the snow melting system, where mountain tunnel spring water is used as heat source. This may prevent running cars from the slip accident at the bridge at exists of the mountain tunnel. In order to find an effective concrete material, several aggregates such as glass fine aggregate are mixed in the concrete. Based on the laboratory test results, the field tests are planned. In the field experiment, snow did not pile up at all even a quantity of snowfall of 29cm/day, when the tunnel spring water of 10℃ was used. As the result, the water pipe road heating by means of tunnel spring water was effective as a snow melting system.