

# 冬季の道路トンネルにおける 環境要因を考慮したつらら発生予測

近藤 禎信<sup>1</sup>・林 久資<sup>2</sup>・岡崎 泰幸<sup>3</sup>・吉武 勇<sup>4</sup>・進士 正人<sup>5</sup>

<sup>1</sup>学生会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: b028vev@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>2</sup>正会員 山口大学大学院助教 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>3</sup>正会員 松江工業高等専門学校講師 環境・建設工学科 (〒690-8518 島根県松江市西生馬町 14-1)

E-mail: okazaki@matsue-ct.jp

<sup>4</sup>正会員 山口大学大学院教授 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

E-mail: yositake@yamaguchi-u.ac.jp

<sup>5</sup>フェロー会員 山口大学教授 (〒735-8511 山口県山口市吉田 1677-1)

E-mail: shinji@yamaguchi-u.ac.jp

冬季においてトンネル坑内の覆工につららが発生する場合がある。覆工に発生するつららは、交通障害やトンネル内設備に損傷を与える要因となるため、管理者はパトロールや手作業での除去作業により、つらら関連被害を未然に防いでいる。これらの作業はトンネル維持管理上、管理者への負担が大きいことが問題になっているため、冬季のトンネルの維持管理におけるつらら対策の効率化が必要であると筆者らは考えた。そこで本研究では、岩盤の不連続面の幾何学的な関係から透水性を数値化するクラックテンソル理論を覆工に適用させ、トンネル坑内における漏水発生リスクの評価を行った。また、トンネル坑内環境の実測によるつらら発生時の坑内環境の分析することで、つららが発生した日における坑内環境の条件を検討し、つらら発生日の予測を行った。

**Key Words:** icicle, leakage, tunnel lining, permeability, crack, prediction equation

## 1. はじめに

我が国では、冬季のトンネル坑内において覆工コンクリート（以下「覆工」と称する）につららが発生することがある。覆工に発生するつららは、通行する車や鉄道の車体・窓ガラス等の破損、電気設備に損傷を与える要因となるため、道路管理者は毎日早朝にパトロールや手作業での除去作業によりつらら関連被害を未然に防いでいる。これらの作業は安全のため交通規制を伴うなど、道路管理者への負担が大きいことが問題となっている。しかし、トンネル坑内におけるつららの発生メカニズムには、気温や坑内風などの気象条件の要因、地下水による覆工のひび割れ・打継ぎ目からの漏水の状況や覆工の健全度が複雑に関連し、トンネル坑内に発生するつららの予測は困難なものである。

そこで、本研究では冬季のトンネル維持管理における

つらら対策の省力化に寄与するため、覆工における漏水発生箇所の予測およびトンネル坑内環境の測定結果の分析によるトンネル坑内のつらら発生条件の解明を試みた。

一般に、つららの原因となるトンネル坑内の漏水発生要因は、覆工のひび割れや打継ぎ目の開口、覆工背面の地下水の存在、覆工背面への防水シートの施工の有無やシート切れなどが挙げられる。しかしながら、トンネル施工後に覆工背面の状態を点検することは困難であるため、漏水発生の予測を行うには覆工表面から得られる情報に限定される。そこで、岩盤の不連続面の幾何学的な関係から岩盤の透水性を数値化するクラックテンソル理論<sup>1,2)</sup>を覆工に適用し、覆工表面に発生したひび割れを透水テンソルで定量化するとともに、トンネル坑内の漏水発生箇所と比較することで覆工の漏水発生リスクを評価した。

また、トンネル坑内環境がつらら発生に与える影響を

探るため、つらら発生の報告があったトンネル坑内の現場計測と室内実験による気温の測定を行った。得られた計測結果をもとに重回帰分析を行い、つらら発生日の予測を試みた。

## 2. 覆工の漏水発生リスクの評価

### (1) クラックテンソル理論の概要<sup>1,2)</sup>

岩盤工学の分野では、岩盤中のひび割れの密度や方向、幅が岩盤物性値（変形係数・透水係数）に大きく影響するため、ひび割れの影響を総括的に定量化できる指標としてクラックテンソル理論が提案されている。そこで本研究ではひび割れが発生したトンネル覆工の透水性を評価する手法として、クラックテンソル理論を援用した。透水性に関するクラックテンソル $P_{ij}$ を式(1)、透水テンソル $k_{ij}$ を式(2)、ダルシー流速の透水係数 $K_{ij}$ を式(3)に示す。式(1)では、単位面積あたりの透水性に関するひび割れの幾何学的特性を表している。ここで、トンネルにおける1スパンとは一度に覆工を打設する間隔を示すものである。また、式(2)はひび割れに水が流れるとき、水がひび割れの幾何学的特性によって受ける影響を表している。なお、この値が大きいほど透水性が増すことを示す。式(3)より算出される透水係数は、ひび割れのトンネル横断方向成分 $K_{11}$ と縦断方向成分 $K_{22}$ に分けて算出することができ、本研究ではひび割れ方向別の透水係数が漏水発生に与える影響を考察した。

$$P_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m (t^{(k)})^3 (r^{(k)}) n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (1)$$

ここで、 $A$ ：1スパン当たりの覆工の面積

$m$ ：ひび割れの本数

$t^{(k)}$ ：ひび割れ $k$ の長さ

$r^{(k)}$ ：ひび割れ $k$ の開口幅

$n_i^{(k)}$ ：ひび割れ $k$ の法線ベクトルを $i$ 軸に投影させたベクトル

$n_j^{(k)}$ ：ひび割れ $k$ の法線ベクトルを $j$ 軸に投影させたベクトル

$$k_{ij} = \frac{\lambda}{12} (P_0 \delta_{ij} - P_{ij}) \quad (2)$$

ここで、 $P_0$ ：クラックテンソル $P_{ij}$ の第一不変量

$\delta_{ij}$ ：クロネッカーのデルタ

$\lambda$ ：クラックの連結性に関するスカラー量 ( $0 \leq \lambda \leq 1$ )

表-1 対象トンネルの詳細

トンネル名	全長	スパン数	建設年	工法	点検年
Aトンネル	270m	31	1996年	NATM	2013年、2018年
Bトンネル	82m	11	1990年	在来工法	2010年、2019年
Cトンネル	318m	58	1958年		2011年、2017年
Dトンネル	166m	17	1978年		2012年、2016年
Eトンネル	708m	61	1975年		2013年
Fトンネル	88m	14	1967年		2012年、2017年

表-2 6トンネルにおける覆工の状態の分類

分類	覆工スパンごとのひび割れの状態
I	ひび割れなし(補修工事によるものも含む)
II	ひび割れのみ
III	漏水発生+ひび割れ
IV	補修工事+ひび割れ
V	漏水発生+補修工事+ひび割れ

$$K_{ij} = \frac{g}{\nu} k_{ij} \quad (3)$$

ここで、 $g$ ：重力加速度 ( $\text{m/sec}^2$ )

$\nu$ ：動粘性係数 ( $\text{sec/m}^2$ )

$k_{ij}$ ：透水テンソル ( $\text{m}^2$ )

また、水の流れは以下の仮定を満足するものとする。

- [1] 水はクラックに沿ってのみ流れる
- [2] クラックは2枚の平行板として近似し、水の流れは平行平板間の層流とする。
- [3] 水頭の分布は十分なひび割れ密度のもとで一様とする。
- [4] クラックの連結部における水頭損失は無視する。

### (2) 分析対象トンネルの概要

山口県と島根県が管理する道路トンネルのうち、6本を対象とした。各トンネルの詳細を表-1に示す。トンネル点検時に得られる覆工変状展開図にひび割れの記載があるスパンから透水係数 $K_{ij}$ を算出した。また、本研究では覆工のひび割れの状態をスパンごとに5つに分類して考えたため、その分類を表-2に示す。ここでは、6本のトンネルのうち漏水が発生するひび割れの透水係数を確認するため、点検時にひび割れから漏水が確認されたトンネルの中でも覆工に補修工事の施されていない(表-2分類Ⅲの覆工の状態) Bトンネルの2010年点検結果について考察した。さらに、6トンネルにおける漏水発生箇所と透水係数を比較することによる覆工のひび割れから生じる漏水発生の予測を行った。

### (3) ひび割れ方向別の透水係数の比較

Bトンネルの2010年点検時にひび割れが確認されたスパンの中で、漏水が認められたひび割れのみに着目し、そのひび割れの透水係数をトンネルの縦断方向成分と横断方向成分に分けて算出した。その結果を図-1に示す。この図より、Bトンネルにおける漏水の確認された全てのひび割れの透水係数において横断方向成分に対し、縦断方向成分が10倍以上大きい値となることがわかる。すなわち、Bトンネルにおいて漏水の発生しているひび割れは縦断方向に卓越しているため、ひび割れ縦断方向成分の透水係数と漏水発生箇所の相関性は高いものと考えられる。

そこで、A~Fトンネルのひび割れが発生したスパンごとの透水係数の算出結果を図-2に示す。この図では縦軸に縦断方向成分、横軸に横断方向成分を取り、ひび割れ縦断方向成分と横断方向成分に分けて算出し、常用対数に換算したものをプロットした。算出結果より、漏水発生スパンはひび割れ縦断方向成分の透水係数が比較的卓越していることがわかる。したがって、6トンネルにおいてもひび割れ縦断方向成分の透水係数と漏水発生箇所における相関性は高いものと評価できる。

トンネル覆工に発生する縦断方向のひび割れは、地山や水圧による外力が原因として知られている。そのため、縦断方向のひび割れは覆工を貫通するひび割れが多く存在すると考えられる。

### (4) 漏水発生ひび割れの特異性の分析

ひび割れ縦断方向成分の透水係数と漏水発生箇所における相関性がみられたので、A~Fトンネルのひび割れが発生した全てのスパン(以下「全てのスパン」と称する)における縦断方向成分の透水係数の算出結果を図-3に示す。この図は縦軸がスパン数、横軸が透水係数の常用対数の頻度分布である。この図では、頻度分布を青線の正規分布に概ね従うことが確認できた。

次に、点検時に漏水が認められたひび割れが含まれるスパン(以下「漏水発生スパン」と称する)の分析を行った。図-3に示した全てのスパンにおける縦断方向成分の透水係数を青線、漏水発生スパンにおける縦断方向成分の透水係数を橙線に正規分布で図-4に示す。ここで、漏水発生スパンは、覆工に「漏水が認められた」かつ「補修工事が施されていない」スパン(表-2分類Ⅲの覆工の状態)を抽出した。この図において、全てのスパンにおける漏水発生スパンの正規分布の最頻値である-4.08以上の割合は20.8%である。全てのスパンの約20%がひび割れから漏水が発生したスパン、もしくは覆工背面に地下水が存在するとき漏水が発生するひび割れを含むスパンであることが想定できる。すなわち、常用対数-4.08を換算したひび割れ縦断方向成分の透水係数  $8.28 \times 10^{-5}$  (m/sec)

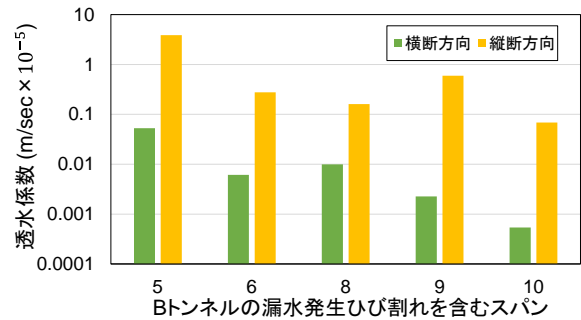


図-1 漏水発生ひび割れの方法成分別透水係数

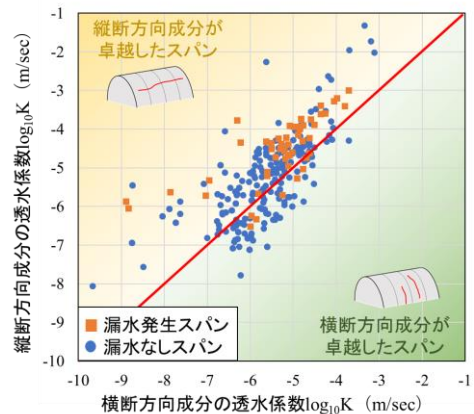


図-2 6トンネルのひび割れ方向成分別透水係数の常用対数

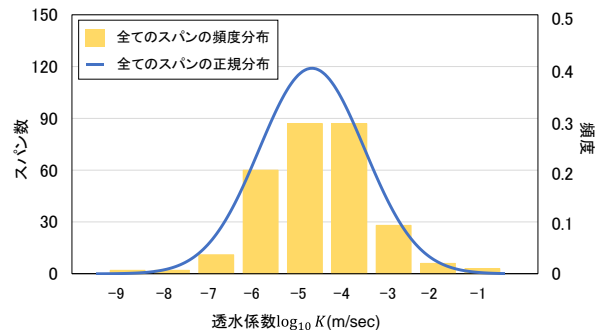


図-3 6トンネルの透水係数の頻度分布

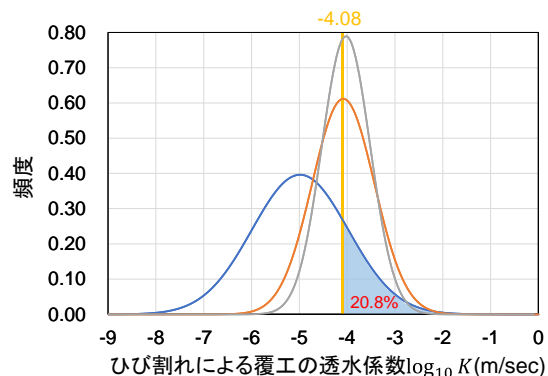


図-4 覆工スパンの状態ごとにおける透水係数の正規分布



図-5 つらら発生の様子

表-3 測定対象トンネルの詳細

トンネル名	全長	スパン数	建設年	工法	点検年
Gトンネル	110	13	1985	在来工法	2013, 2018
Hトンネル	194	22	1977		2016

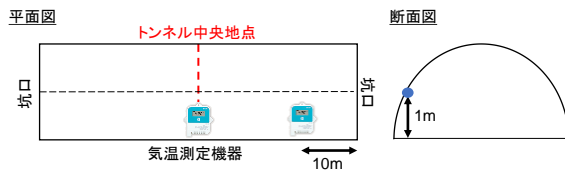


図-6 測定機器と配置概略図

以上の覆工スパンでは漏水発生のリスクが窺える。

また、この漏水発生リスクの評価を確認するために覆工に漏水対策工が施されていた箇所に着目した。B、C、Fトンネルでは、2回の定期点検の間に漏水対策工がひび割れに対して施されていた。そこで、3トンネルの点検結果の中でも漏水対策工が施される前に実施された点検結果を用いて、覆工スパンごとの透水係数を算出し、図-4中の灰色線の正規分布で示す。図より、漏水対策工が施工されるひび割れを含むスパンの正規分布の最頻値は漏水発生スパンの正規分布の最頻値と概ね一致している。このことから、透水係数を用いたトンネル覆工の漏水発生リスクの評価が可能であると考えられる。

### 3. つらら発生条件の分析

#### (1) トンネル坑内気温の測定による分析

##### a) 測定の概要

覆工の打継ぎ目や導水工の劣化部、メッシュシート等につららの発生(図-5参照)が報告された島根県が管理するトンネル2本において、坑内気温の測定を行った。各トンネルの詳細について表-3に示す。気温の測定方法はトンネル中央地点と坑口から10m地点に路面から高さ1mの覆工に測定機器を設置(図-6)し、10分毎の気温を測定した。気温測定機器にはT&D社のTR-42を用いた。測定期間は、12月から3月の月初めにかけて測定を行った。また、冬期期間におけるつららの発生日および発生位置等の発生状況を図-7示す記録用紙に記録した。対象の2本のトンネルにおいては、12月~2月にかけてトンネル坑口付近でつらら発生が報告されていたため、トン

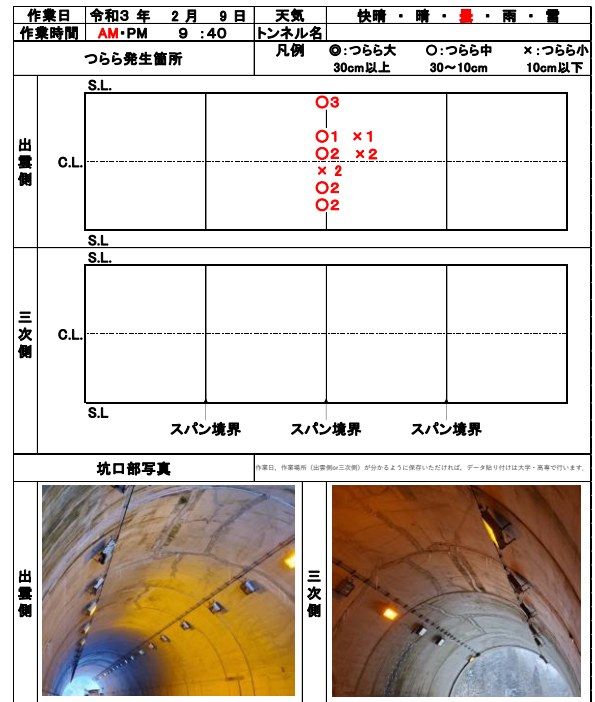


図-7 つらら発生状況記録用紙

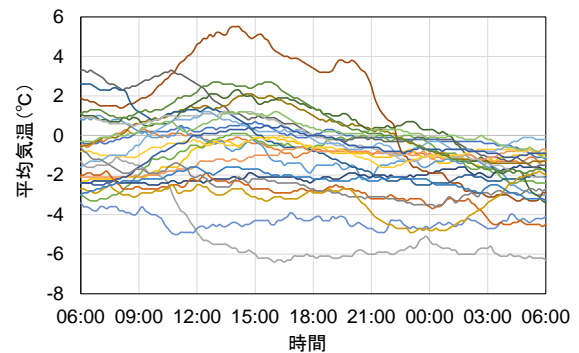


図-8 つらら発生日の気温の推移

ネル坑内環境の分析では12月、1月、2月のトンネル坑口から10m地点における気温の分析を行った。

##### b) 測定結果

Gトンネル坑内の1月、2月におけるつらら発生日24日における気温の経時変化を図-8に示す。本研究では、朝のパトロールによってつららを観測した場合、前日の6時からつらら観測日の6時までの平均気温の記録を「つらら発生日」と定義した。この図より、各つらら発生日において気温の推移にはばらつきがみられる。

そこで、つらら発生条件の解明のため、6時から18時までを日中、18時からつらら観測日の6時までを夜間として、Gトンネルの各時間帯における積算温度の関係(図-9参照)を確認した。ここで、本研究における積算温度とは計測で得られた10分ごとの平均気温を積算したものとす。この結果より、Gトンネルにおける日中の積算温度の範囲は4230(°C・分)~5860(°C・分)、夜間の積算温度が4310~5070(°C・分)を示す。また、つら

ら発生日に着目すると日中の積算温度が-2930～2530 (°C・分)、夜間の積算温度が-4310～-68.0 (°C・分)の範囲を示すことがわかる。このことから、夜間の積算温度が-68.0 (°C・分)以下のとき、つらら発生の可能性がある。

## (2) 室内実験によるつらら発生条件の解明

### a) 室内実験の概要<sup>3)</sup>

トンネル坑内の測定結果から、つらら発生には夜間の積算温度が強く関与すると推定し、積算温度がつらら発生・成長に与える影響の分析のため、室内実験によるつらら発生条件の解明を試みた。つらら発生実験装置の概略を図-10に示す。つららが発生している覆工コンクリートからの漏水は流速が低速であると考えられるため、低速ポンプ機器であるEYELA社のペリスタルティックチューブポンプMP-2000型を使用し、内径4mm、外径6mmのシリコンチューブを用いて水を供給した。本ポンプは水の供給量を0～89mL/secの範囲で長時間精度よく一定に保つことができる。本研究の実験では、13～40mL/secの範囲で行った。供給用ビーカー内の水温は、平均25°Cである。図に示すようにつららは、水平に張られた金網にガーゼを巻き付けた部分から発生・成長させた。気温計測機器はトンネル坑内に設置したTR-42を用い、外気の影響を受けない庫内の中心となる地点に配置して測定した。

### b) 室内実験結果

室内実験でつららが発生した各測定値とG、Hトンネル比較結果を図-11に示す。図-11では、横軸を最低気温、縦軸を積算気温とした。この図より、各トンネルのつらら発生日における測定値と室内実験時につららが発生した測定値が概ね一致していることがわかる。このことから、つらら発生の有無に積算温度が一つの指標になるものと考えられる。

また、実験における水の供給は13～40mL/secと微小な流速である。例えば、この程度の漏水がトンネル覆工から発生した場合、トンネル点検時に利用者の安全性には影響がない変状の状態と判断され、対策区分I、IIbなどと判定されるケースが想定される。そのため、点検時に漏水の変状に対する対策や措置を必要としない状態<sup>4)</sup>となり、つらら発生を未然に防ぐことが困難となる可能性がある。これらのことから、日本の寒冷地では漏水の変状対策の一つとしてつらら発生を考慮した基準を設定するとつららによる第三者被害の低減などに寄与できることが考えられる。

一方でマイナスの積算気温を示したにも関わらず、つららが非発生日が両トンネル合わせて94日間確認できた。これらは覆工背面の地山地下水が存在していない場合や前日のつらら除去作業後覆工背面の水が凍っている場合

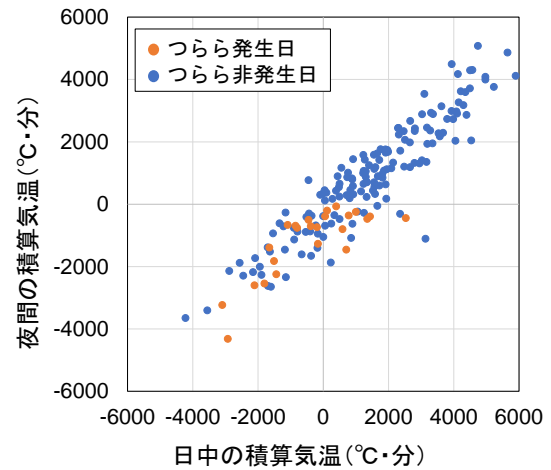


図-9 Gトンネルにおける日中積算気温と夜間積算気温の関係

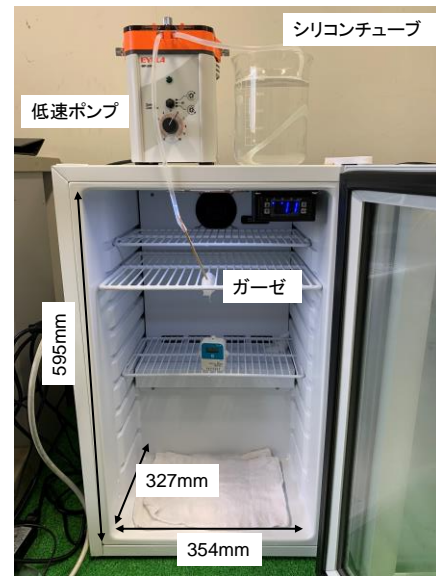


図-10 つらら発生実験装置

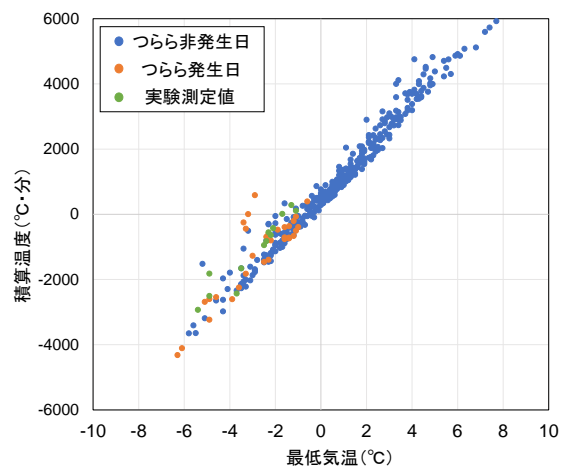


図-11 トンネル測定結果と実験測定結果の比較

が考えられる。そのため、トンネル坑内におけるつらら発生予測には発生要因の複合的な分析が必要である。

#### 4. 重回帰分析によるつらら発生日の予測

##### (1) 重回帰分析の適用<sup>5),6)</sup>

本研究の目的である冬季におけるトンネル維持管理の効率化のため、統計ソフトウェアJMP Pro 16を利用し重回帰分析を適用し、つらら発生日における予測式の算出を試みた。

重回帰式はある現象が発生する確率 $P$ を目的変数としてその現象の発生を説明する変数群 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ との関係が式(4)のような関数によって表せる。

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (4)$$

ただし、 $b$ は偏回帰係数であり $b = (b_1, b_2, \dots, b_n)$ である。確率 $P$ は0と1の間の値(0%~100%)をとる。

予測式の算出のために説明変数の抽出を行った。説明変数として、「つらら発生前日の夜間の積算温度」、 「つらら発生前日の日中の積算温度」に加えて「つらら発生前日目のつらら除去作業の有無」を抽出した。積算温度は標準化処理を施した値、つらら除去作業の有無は有:1, 無:-1となるような変換をした。目的変数は「つらら発生の有無」である。以上の条件から予測式は(5)になる。

$$P = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (5)$$

ここで、 $P$ : つららの発生確率

$x_1$ : つらら発生前日の夜間の積算温度

$x_2$ : つらら発生前日の日中の積算温度

$x_3$ : つらら除去作業の有無

重回帰分析によって得られた偏回帰係数は表-4に示す。

##### (2) 予測式の検証

予測式の検証方法として表-5に示すような方法で実測値と予測値の一致率を算出し、一致率の値によって予測式の適用性を検討した。予測値は発生確率 $P$ が設定したカットオフ値以上になったとき、その日はつららが発生すると判別する。そこで、本研究では最適なカットオフ値の設定のため、ROC曲線を用いた。設定方法として表に示すような方法で各カットオフ値の「感度」、「特異度」を算出した。ここで「感度」とはつららが発生した日をつららが発生すると判別した率、「特異度」とはつららが発生しない日をつららが発生しないと判別した率となる。感度と特異度の定義を表-5に示す。ここで最適

表-4 偏回帰係数

	Gトンネル	Hトンネル
$b_0$	-0.788961	-0.973191
$b_1$	0.1747545	0.2504727
$b_2$	-0.441932	-0.343097
$b_3$	-0.075856	-0.068136

表-5 一致率、感度、特異度の算出方法

		実測値	
		発生	非発生
予測値	発生	真つらら発生日数	偽つらら非発生日数
	非発生	偽つらら発生日数	真つらら非発生日数
一致率 = $\frac{\text{真つらら発生日数} + \text{真つらら非発生日数}}{\text{全日数}}$			
感度 = $\frac{\text{真つらら発生日数}}{\text{真つらら発生日数} + \text{偽つらら非発生日数}}$			
特異度 = $\frac{\text{真つらら非発生日数}}{\text{偽つらら発生日数} + \text{真つらら非発生日数}}$			

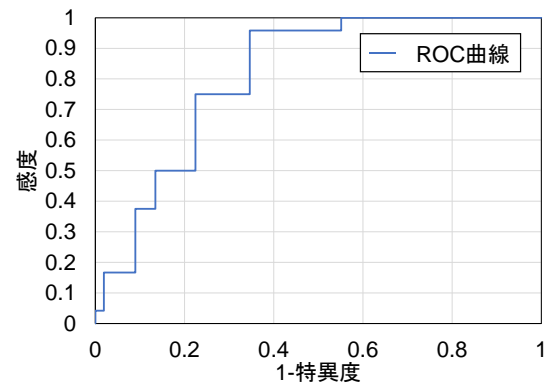


図-12 GトンネルにおけるROC曲線

表-6 Gトンネルにおける予測結果

		つらら発生の有無	
		発生	非発生
予測	発生	18日	35日
	非発生	6日	121日
一致率 = $\frac{18+121}{180} = 77.2\%$			

表-7 Hトンネルにおける予測結果

		つらら発生の有無	
		発生	非発生
予測	発生	7日	19日
	非発生	1日	153日
一致率 = $\frac{7+153}{180} = 88.9\%$			

表-8 Gトンネル予測式をHトンネルに  
適用させた予測結果

		つらら発生の有無	
		発生	非発生
予測	発生	7日	26日
	非発生	1日	146日
一致率 = $\frac{7+146}{180} = 85\%$			

な判別結果を与えるカットオフ値は、ROC曲線上の点がグラフの左上隅に最も近い点（感度が1、1-特異度が0）に対応する。GトンネルのROC曲線を図-12に示す。

設定したカットオフ値をもとに対象としたトンネル2本における重回帰分析による予測結果を表-6、表-7に示す。ここで正解数を全体数で割ったものを一致率とし、一般的に一致率が75%を超えると有効な予測結果<sup>7)</sup>とされる。これらの表よりGトンネルの一致率は77.2%、Hトンネルの一致率は88.9%を示したため、有効な予測結果と判断できる。また、各トンネルの予測の「つらら非発生」項目に着目すると、120日以上つらら未発生を予測できているのに対し、Gトンネルでは6日、Hトンネルでは1日つらら発生を予測できていないことがわかる。このような予測結果は、つらら発生時に適切な措置が行えないことが考えられる。

次にGトンネルで算出した予測式をHトンネルに適用し、Hトンネルで発生したつらら発生日の予測を行った（表-8参照）。検証フローは同様にROC曲線による最適なカットオフ値の設定を行い予測した。Gトンネルの予測式をHトンネルに適用させた結果、一致率が85%を示しており有効な予測結果を得ることができた。このことから、一般的な道路トンネルにおいても本予測式を適用することでつらら発生日の予測が可能と期待できる。

## 5. まとめと今後の課題

本論文では、冬季のトンネル維持管理におけるつらら対策の省力化のため、つらら発生の原因であるトンネル坑内の漏水発生箇所とひび割れに伴う覆工の透水係数を比較することでトンネル坑内の漏水発生リスクの評価を行った。また、トンネル坑内環境の測定結果とつららの

室内実験の測定結果を比較、分析することでつららが発生する日の坑内環境について検討した。さらに、測定結果を重回帰分析し、つらら発生日の予測を行った。本研究より得られた知見を以下にまとめて示す。

- (1) 覆工に発生したひび割れの方向成分別に透水係数を算出した結果、透水が発生したスパンではひび割れが縦断方向に卓越したスパンが比較的多く、ひび割れ縦断方向成分の透水係数と漏水発生に相関性がある。さらにひび割れが発生したスパンの透水係数を正規分布で表すことによって、透水係数が $8.28 \times 10^5$  (m/sec) 以上の覆工スパンでは漏水発生のリスクがある。
- (2) つららが発生したトンネル坑内の夜間における積算温度と室内実験によるつららが発生する積算温度が概ね一致することがわかった。トンネル坑内に発生するつらら予測には、トンネル坑内気温の積算温度が一つの評価指標となる。
- (3) トンネル坑内測定結果を重回帰分析することで、一致率 75%を超える有効な予測式を構築した。また、予測式を他のトンネルに適用した場合にも一致率 85%の有効な予測結果を得ることができた。

## 参考文献

- 1) M.Oda : Fabric tensor for discontinuous geological materials, *Soils and Foundations*, Vol.22, pp.96-108, 1982.
- 2) 山崎雅直, 津坂仁和, 大谷達彦, 進士正人: クラックテンソルによる現場スケールにおける透水係数の評価, 土木学会論文集F2, Vol.71, No.1, pp.1-10, 2015.
- 3) 前野紀一, 高橋庸哉: つららの研究 I -つららの構造と成長の一般的特徴-, 低温科学, 物理篇, 43, pp.125-138, 1985.
- 4) 公益社団法人日本道路協会: 道路トンネル維持管理便覧【本体工編】, pp.208-213, 2020.
- 5) 下川敏雄: JMPによる保健・看護研究のための医学統計学入門, 第1.1版, pp.43-49, 2018.
- 6) 廣野元久: JMPによる技術者のための多変量解析, 第1版, 日本規格協会, pp.254-273, 2018.
- 7) 内田治, 平野綾子: JMPによるデータ分析 第2版, 東京図書, pp.216-231, 2015.

(2022.8.26 受付)

PREDICTION OF ICICLES FROM LINING CONCRETE  
BY CONSIDERING ENVIRONMENTAL CONDITIONS OF ROAD TUNNEL

Yoshinobu KONDO, Hisashi HAYASHI, Yasuyuki OKAZAKI, Isamu YOSHITAKE  
and Masato SHINJI

In the winter season in Japan, icicles may occur from concrete lining of road tunnel. Such icicles may induce traffic obstruction and damage to the tunnel facilities. Hence, the icicles are often removed manually through patrols during winter. The foci of this study are to reveal the occurring conditions of icicles in tunnels and to contribute to the labor saving of icicle removal work in winter. The crack tensor theory to quantify the permeability of a rock mass based on the geometrics of discontinuities was used to predict water leakage locations. The leakage risk was evaluated by quantifying permeability of cracked lining concrete. To examine the effect of environmental conditions, the temperature in tunnels where icicles previously occurred was analyzed. The study revealed the environmental conditions inducing icicles.