

供用中の道路トンネルにおけるつらら発生予測に関する研究

山口大学大学院 学生会員 ○近藤 禎信, 正会員 林 久資
 フェロー会員 進士 正人
 松江工業高等専門学校 正会員 岡崎 泰幸

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係していると考えられるため、トンネル坑内に発生するつららの予測は困難である。

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計測結果の分析によるトンネル坑内のつらら発生予測を試みた。

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¹⁾²⁾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共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調べるため、島根県が管理するトンネルのうち、

冬季パトロール時につらら発生の報告があったトンネルを選定し、計測結果から重回帰分析によるつらら発生予測式を構築した。

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¹⁾²⁾

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)に、透水テンソル k_{ij} を式(2)に示す。式(1)では、単位面積当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(2)より算出される透水テンソルには、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} があり、本研究では方向成分別の透水テンソル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

キーワード トンネル, つらら, 透水テンソル, 漏水, 積算気温, 重回帰分析

連絡先 〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1 山口大学大学院創成科学研究科 TEL0836-85-9306

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

ここで、 P_0 ：クラックテンソル P_{ij} の第一不変量

δ_{ij} ：クロネッカーのデルタ

λ ：クラックの連結性に関するスカラー量

($0 \leq \lambda \leq 1$)

(2) 漏水発生ひび割れの特異性の分析

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テンソルを算出した。A～F トンネルのひび割れが発生したスパンごとの透水テンソルの算出結果を図-1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テンソル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性の透水テンソルと漏水発生箇所の相関性は高いと考えた。

ひび割れ縦断方向成分の透水テンソルと漏水発生箇所に相関性が見られたので、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テンソルの算出結果を図-2に示す。この図は縦軸がスパン数、横軸が透水テンソル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。全てのスパンにおける縦断方向成分の透水テンソルを青線、漏水発生スパンにおける縦断方向成分の透水テンソルを橙線に正規分布で図-3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-11.2以上の割合は19%である。つまり、全てのスパンの19%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

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 | NAIM | 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 |

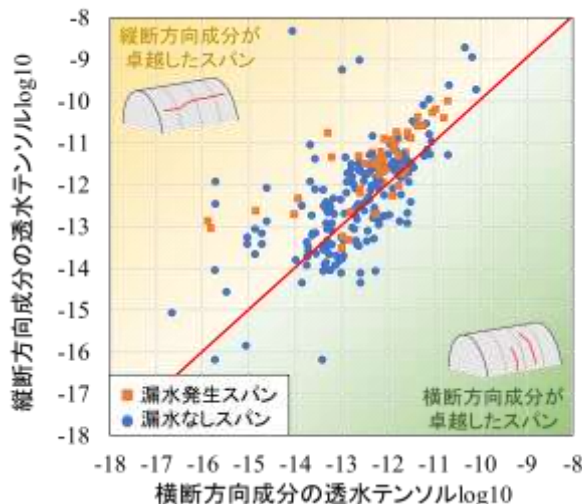


図-1 6トンネルのひび割れ方向成分別透水テンソルの常用対数

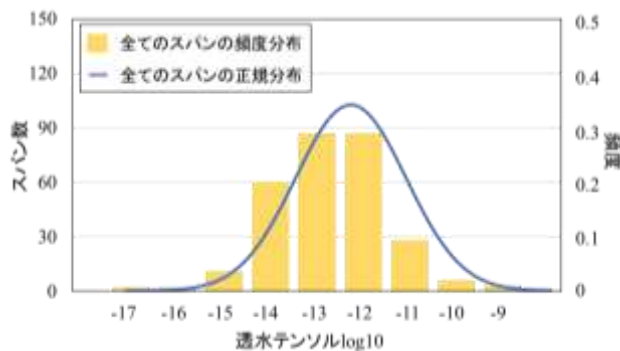


図-2 6トンネルのひび割れ縦断方向成分における透水テンソルの頻度分布

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-11.2を換算したひび割れ縦断方向成分の透水テンソル $63.1(\times 10^{-13})$ 以上の覆工スパンでは漏水発生リスクがあるといえる。

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、覆工スパンごとのひび割れ縦断方向成分の透水テンソルを算出し、**図-3** 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、透水テンソル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る。

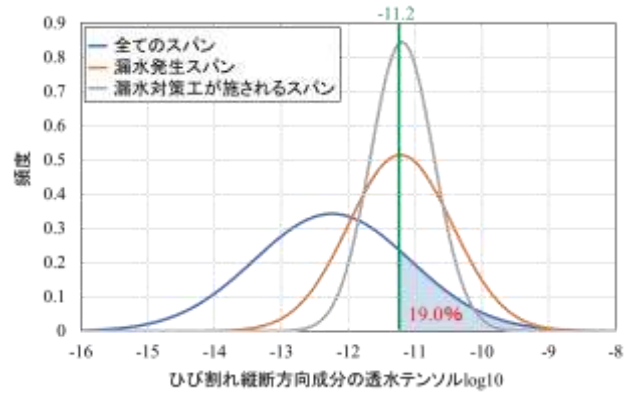


図-3 覆工スパンの状態ごとにおけるひび割れ縦断方向成分の透水テンソルの正規分布

3. トンネル坑内気温計測によるつらら発生の予測

(1) 分析対象トンネルの概要

覆工の打継ぎ目や導水工の劣化部、メッシュシート等から漏水によるつららの発生(**図-4** 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計測を行った。各トンネルの詳細について**表-2** に示す。気温の計測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 の覆工に計測機器を設置 (**図-5** 参照) し、10 分ごとの平均気温を計測した。気温計測機器には T&D 社の TR-42 を用い、2020 年 12 月から 2022 年 3 月にかけて計測を行った。対象期間中のつらら発生日は各トンネル合わせて 27 日である。対象の 2 本のトンネルにおいては、12 月から 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 地点における気温計測結果を用いた。



図-4 つらら発生の様子

表-2 測定対象トンネルの詳細

| トンネル名 | 全長(m) | スパン数 | 建設年(年) | 工法 | 点検年(年) |
|-------|-------|------|--------|------|--------|
| Gトンネル | 110 | 13 | 1985 | 在来工法 | 2018 |
| Hトンネル | 194 | 22 | 1977 | | 2016 |

(2) 計測結果

A トンネル坑内の 1 月、2 月におけるつらら発生日 24 日における平均気温の経時変化を**図-6** 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。このグラフからつらら発生日の気温は日の入り時刻である 17時から深夜にかけて気温がなだらかに低下していることがわかった。

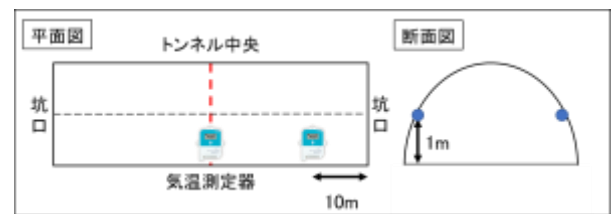


図-5 測定機器と配置機略図

各つらら発生日において平均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、A トンネルの各時間帯における積算気温の関係(**図-7** 参照)を確認した。ここで、本研究における積算気温とは計測で得られた

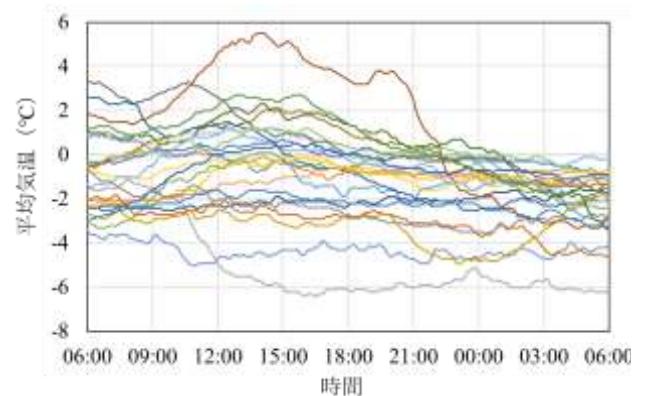


図-6 つらら発生日における気温の推移

10分ごとの平均気温を積算したものとする。この結果より、Aトンネルにおける日中の積算気温の範囲は-4230 (°C・分) ~ 5860 (°C・分)、夜間の積算気温が-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気温が-2930 ~ 2530 (°C・分)、夜間の積算気温が-4310 ~ -68.0 (°C・分) の範囲を示すことがわかる。このことから、夜の積算気温が-68.0°C以下を示すとき、つらら発生の可能性がある。

しかしながら、夜間の積算気温-68.0 (°C・分) 以下を示した一方で、つららが発生していない日が44日確認できる。これらは覆工背面の水が存在していない場合と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が考えられる。そのため、つらら発生予測には発生要因の複合的な分析が必要と判断した。

(3) 重回帰分析によるつらら発生日の予測

つらら発生要因の複合的な分析のため、統計ソフトウェアJMP Pro 16を利用し、重回帰分析による予測式³⁾を構築した。説明変数は「つらら発生日前日の夜間の積算温度」、「つらら発生日前日の日中の積算温度」、「前日のつらら落とし作業の有無」、目的変数を「つらら発生の有無」とした。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-3、表-4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⁴⁾とされる。これらの表よりAトンネルの一致率は77.2%、B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発生なし項目に着目すると、120日以上つらら未発生を予測できているのに対し、Aトンネルでは6日、B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。

4. まとめと今後の方針

本研究では、冬季のトンネル維持管理に関するつらら対策の省力化に寄与するため、トンネル坑内の漏水発生箇所の予測とトンネル坑内の気温測定によるつらら発生の予測を行った。透水テンソルによる覆工の評価の結果、ひび割れ縦断方向成分の透水テンソル $63.1(\times 10^{-13})$ 以上の復興スパンでは漏水発生のリスクがあると考えられる。また、トンネル坑内気温計測結果の重回帰分析によるつらら発生の予測式の構築を行った結果、各トンネルにおいて一致率75%

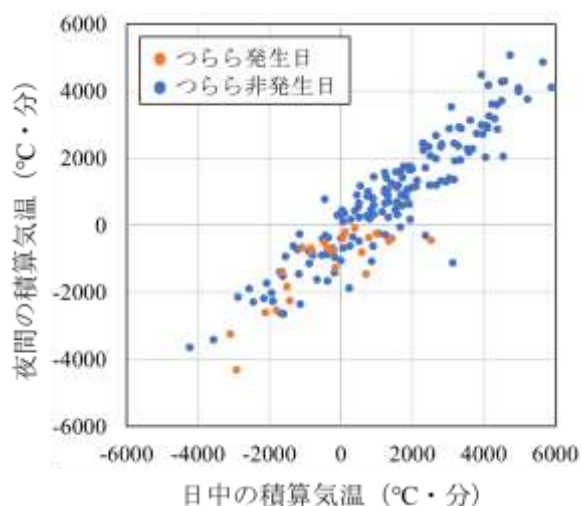


図-7 Aトンネルにおける日中積算気温と夜間積算気温の関係

表-3 Aトンネルの予測結果

| | | 実際のつららの有無 | |
|----|----|-----------|------|
| | | 発生 | なし |
| 予測 | 発生 | 18日 | 35日 |
| | なし | 6日 | 121日 |

表-4 Bトンネルの予測結果

| | | 実際のつららの有無 | |
|----|----|-----------|------|
| | | 発生 | なし |
| 予測 | 発生 | 7日 | 19日 |
| | なし | 1日 | 153日 |

を超える有効な予測結果を得られた。

今後はつらら発生日の予測精度向上のため、各トンネルにおける有効な説明変数の検討を続けて行う予定である。

参考文献

- 1) M.Oda : Fabric tensor for discontinuous geological materials, *Soils and Foundations*, Vol.22, pp96-108, 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, pp1-10, 2015.
- 3) 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, pp254-273, 2018.
- 4) 内田治, 平野綾子 : JMPによるデータ分析 第2版, 東京図書, pp216-231, 2015.