

道路トンネルにおける つらら発生条件の検討に関する基礎的研究

近藤 禎信¹・林 久資²・岡崎 泰幸³・進士 正人⁴

¹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二丁目 16-1)

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

²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二丁目 16-1)

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

³正会員 松江工業高等専門学校助教 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

⁴フェロー会員 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二丁目 16-1)

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省力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明らかにした。

Key Words: icicle, leakage, tunnel lining, permeability tensor, crack, tunnel environment

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¹⁾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探るため、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、つらら発生時期およびトンネル坑内の気温および露点測定結果の分析を行った。

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

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

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

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クラック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。

表-1 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)
Aトンネル	270	31	1996	NATM	2013, 2018
Bトンネル	82	11	1990	在来工法	2010, 2019
Cトンネル	318	58	1958		2011, 2017
Dトンネル	166	17	1978		2012, 2016
Eトンネル	708	61	1975		2013
Fトンネル	88	14	1967		2012, 2017

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

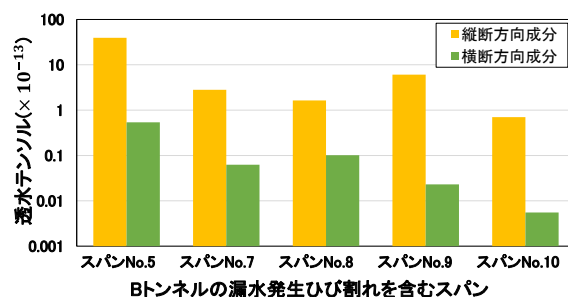


図-1 漏水発生ひび割れの方向成分別透水テンソル

(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テンソルを算出した。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テンソルを確認するため、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テンソル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) ひび割れ縦断方向成分と横断方向成分の透水テンソルの比較

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テンソル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テンソル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テンソルと漏水発生箇所との相関性は高いと考えた。

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テンソルの算出結果を図-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成分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。

(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-3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を確認できた。

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-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-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

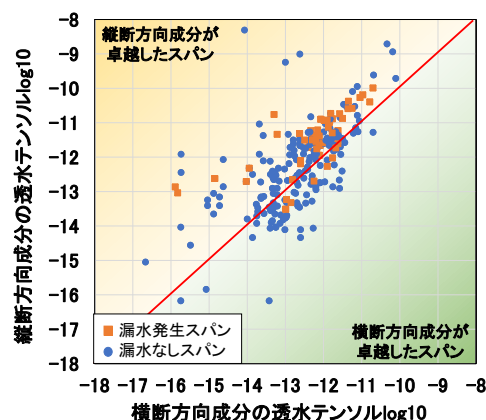


図-2 6トンネルのひび割れ方向成分別透水テンソルの常用対数

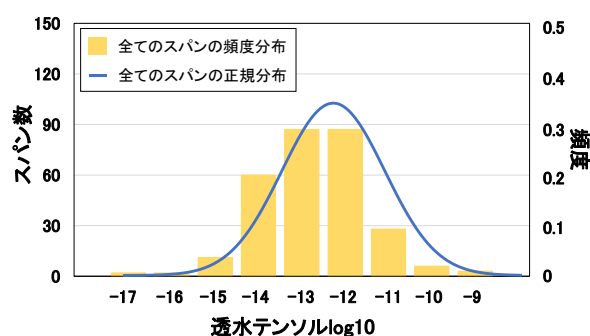


図-3 6トンネルのひび割れ縦断方向成分における透水テンソルの頻度分布

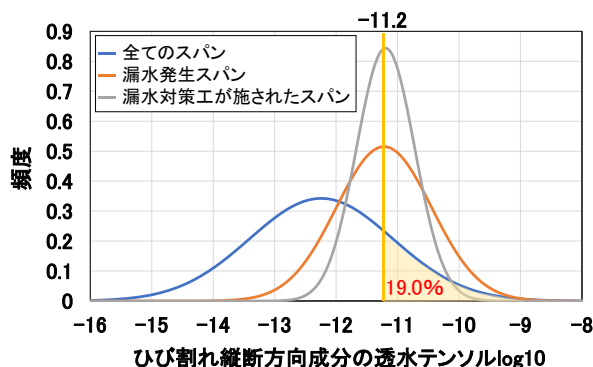


図-4 覆工スパンの状態ごとにおけるひび割れ縦断方向成分の透水テンソルの正規分布

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-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られる。

3. トンネル坑内環境測定結果の分析

(1) 坑内環境測定の概要

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・露点の測定を行った。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、1時間毎の露点を測定した。気温測定機器にはT&D社のTR-42を用い、露点測定機器にはLascar社のEL-USB-2-LCD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、1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、トンネル坑内環境の分析では1月、2月のトンネル坑口から10m地点における気温・露点測定結果の分析を行った。

ちなみに、計測期間における1日の平均気温の推移を図-8 に示す。この図から、1月6日から1月12日、1月17日から1月20日をはじめ、計26日間で平均気温がマイナスとなっていることがわかる。そのうち、最も平均気温が低い1月8日の10分毎の平均気温の推移を図-9 に示す。このように、冷え込みの厳しい日においては、終日気温がマイナスを示していることがわかる。

(2) 温度計測の結果

トンネル坑内のつらら発生の有無による気温の推移の違いを確認するために、1月、2月におけるつらら発生日とつらら非発生日における平均気温の経時変化を図-10 に示す。この図では、1月および2月の計測時間ごとの平均値を平均気温としてグラフにプロットをしている。また、当該地域におけるおおよその日の入り時間である17時からトンネル坑内のパトロールが完了する10時までの気温を示している。ここでは、朝のパトロールによってつららを観測した場合、前日の17時からつらら観測時までの気温の記録を「つらら発生日」と定義した。

まず、つらら発生日の平均気温に着目すると、1月が2月よりも低い気温であることがわかる。また、1月および2月における全ての時間帯においてマイナスの気温が観測されていることも分かった。平均気温の経時変化に着目すると、つらら発生日は、20時から7時にかけて気温が概ね-1℃から-2.6℃まで気温がなだらかに下がっていることがわかる。これは夜間から朝方にかけて放射冷却によって気温が低下し、朝方の冷え込みが厳しい日に、特につららが観測されていることが示唆された結果である。



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(m)	スパン数	建設年(年)	工法	点検年(年)
GTトンネル	110	13	1985	在来工法	2013, 2018
HTトンネル	194	22	1977		2016

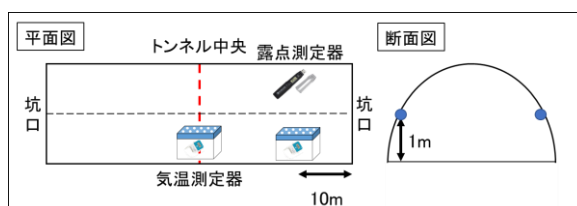


図-6 測定機器と配置概略図

作業日	令和3 年 2 月 9 日	天気	快晴・晴・曇・雨・雪
作業時間	AM・PM 9 : 40	トンネル名	
つらら発生箇所		凡例	●:つらら大 30cm以上 ○:つらら中 30～10cm ×:つらら小 10cm以下
出雲側	S.L.		
	C.L.	O3 O1 ×1 O2 ×2 ×2 O2 O2	
	S.L.		
三次側	S.L.		
	C.L.		
	S.L.		
坑口部写真		作業日、作業場所（出雲側/三次側）が分かるように撮影したものを、データ入力用紙は、データ貼り付けは、大学・高専で行います。	
出雲側			
			
三次側			

図-7 つらら発生状況記録用紙

(3) つらら発生時の気温と露点の関係分析

トンネル坑内では、外気に比べて高い湿度が保たれる傾向がある。そこで、トンネル坑内におけるつららが発生、および成長する要因としてトンネル坑内の湿度に着目した。1時間ごとの気温と露点の関係図を図-11に示した。この図では、つらら発生日を黄色、つらら非発生日を青色で示した。ここから、つららは露点が1度以下になると発生すること。また、露点および気温ともにマイナスが観測されるときに多く発生していることがわかる。一方で、気温と露点が等しい一次関数の赤線を引くと、ほとんどのプロットが露点よりも気温が高い傾向がみられた。つまり、坑内での結露発生は限定的で、つららの発生および成長にはトンネル坑内の湿度の影響は小さく、つらら発生、成長のための水の供給はトンネル漏水によってもたらされている可能性が高い。

4. 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覆工に発生したひび割れの透水テンソルを比較することによるトンネル坑内の漏水発生リスクの評価を行った。さらに、トンネル坑内環境の測定結果を分析することで、つららが発生する日の坑内環境の条件について検討した。それにより得られた知見は以下の通りである。

- ① 覆工に発生したひび割れの方向成分別に透水テンソルを算出した結果、漏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テンソルと漏水発生に相関性がある。
- ② ひび割れ縦断方向成分の透水テンソルを正規分布で表すことによって、ひび割れ縦断方向成分の透水テンソルが $63.1(\times 10^{-13})$ 以上を示すスパンでは、漏水発生リスクがあると評価した。
- ③ 朝方につららが観測される日のトンネル坑内の平均気温は、前日の20時から朝方の7時にかけて気温が -1°C から -2.6°C にかけて低下している。また、つららの発生・成長のための水の供給は、トンネル背面からの湧水である可能性が高い。

今後は、つららが発生・成長の原因となる条件の解明のため、引き続きトンネル坑内の気温と露点の測定を行うとともに、坑内風速を計測する予定である。また、測定で得られた結果をもとにつららの発生のシュミレーションや室内実験を行い、つらら発生の予測を行う。



図-8 12月～3月の1日の坑内平均気温

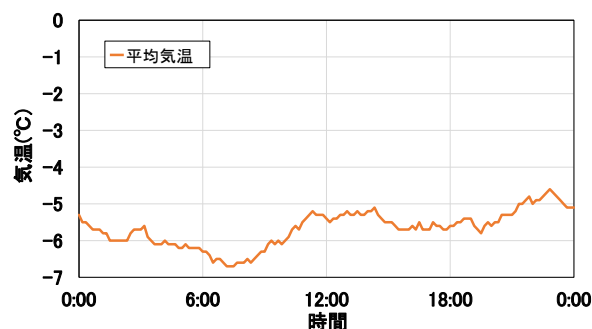


図-9 1月8日の坑内平均気温の経時変化

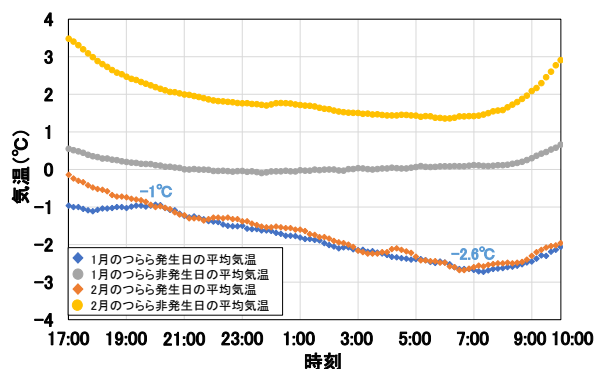


図-10 1月および2月における気温測定結果

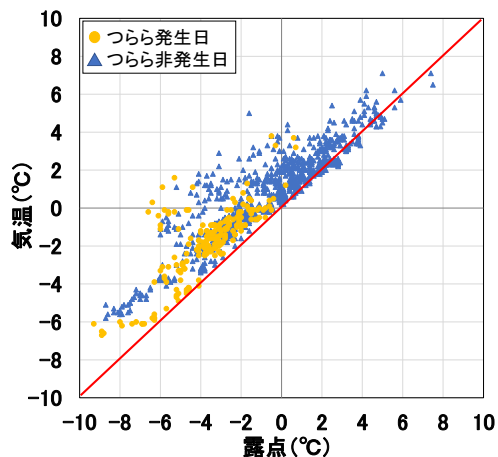


図-11 露点と気温の関係図

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.

(2021.8.6 受付)

A STUDY ON THE CORRELATION BETWEEN CRACKS AND ICICLES IN TUNNEL LINING

Yoshinobu KONDO, Hisashi HAYASHI, Yasuyuki OKAZAKI and Masato SHINJI

In the winter season in Japan, Icicles may occur in the concrete lining of the tunnel. Icicles on the tunnel lining can cause traffic obstruction and damage to the tunnel facilities, so works prevent Icicle related damage through patrols and manual removal. The purpose of this study was to reveal the conditions for the occurrence of icicles in tunnels and to contribute to the labor saving of icicle removal work in winter. For this purpose, leakage locations in the tunnel were predicted and the environment in the tunnel was measured. The crack tensor theory, which quantifies the permeability of a rock mass based on the geometric relationship of discontinuities, was applied to the lining as a method of predicting the location of leakage, and the risk of leakage in the lining was evaluated by quantifying the cracks on the lining surface using the permeability tensor. In order to clarify the relationship between the temperature around tunnels and the occurrence of Icicles, the environment inside tunnels where Icicles occurred in the past was analyzed. Clarification of the conditions occurrence of such icicles in tunnels is expected to reduce the burden of tunnel management in winter