

トンネル坑内におけるつらら発生条件の解明に関する基礎的研究

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

表-1 対象トンネルのデータ

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

1. はじめに

わが国では、冬季に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場合があります。覆工に発生するつらは、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。しかし、これらの作業は負担が大きく、省力化に寄与する研究が必要である。例えば、岩花らはトンネル坑内の気温測定結果を用いたつらら発生予測を行っているが、トンネル坑内においてつららの発生位置や発生時期を精度良く予測できている研究は見られない。そこで、本研究ではトンネル坑内のつらら発生条件を明らかにし、冬期におけるつらら対策の省力化に寄与するため、透水テンソルを援用した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測定結果の分析を行った。

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、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²⁾³⁾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・分析することで覆工の漏水発生リスクを評価した。

また、トンネル坑内の気温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、冬期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、つらら発生時期と、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

2-1. 透水テンソルの概要

ひび割れが発生した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の式を用いた²⁾³⁾。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、単位面積あたりのひび割れの透水性を表している。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。

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

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 の法線ベクトルの i 軸方向成分

$n_j^{(k)}$ ：ひび割れ k の法線ベクトルの j 軸方向成分

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

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

2-2. 透水テンソルの適用結果

山口県と島根県が管理する道路トンネルのうち、点検記録を有しているトンネル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

キーワード トンネル, 漏水, 覆工, 透水テンソル, ひび割れ

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 TEL0836-85-9332

ンから透水テンソルを算出した。ここでは、6本のトンネルのうち、漏水の発生したひび割れの透水テンソルを算出するため、2010年点検時まで覆工に補修工事の施されていないBトンネルについて考察した。

Bトンネルの2010年点検時の漏水発生スパンのひび割れの中で、漏水が発生している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発生しているひび割れの透水テンソルは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、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。

2-3. 漏水発生ひび割れを有するスパンの分析

ひび割れ縦断方向成分の透水テンソルと漏水発生箇所とに相関性が見られるので、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り、図中の青線に頻度分布を正規分布である。

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）の分析をした。図-2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-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19.0%である。つまり、全てのスパンの19.0%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。

2-4. 漏水対策工が施工されたスパンの分析

覆工から発生した漏水が問題となり漏水対策工が

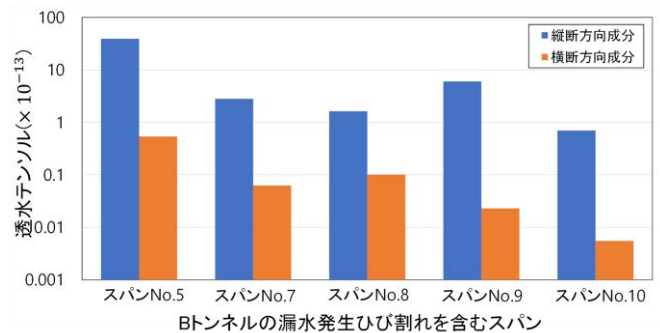


図-1 漏水発生ひび割れの方成分別透水テンソル

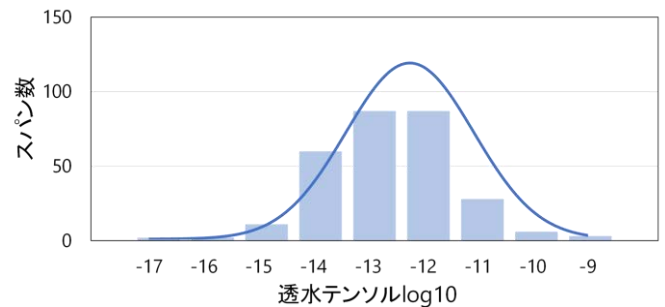


図-2 6トンネルの縦断方向成分の透水テンソル

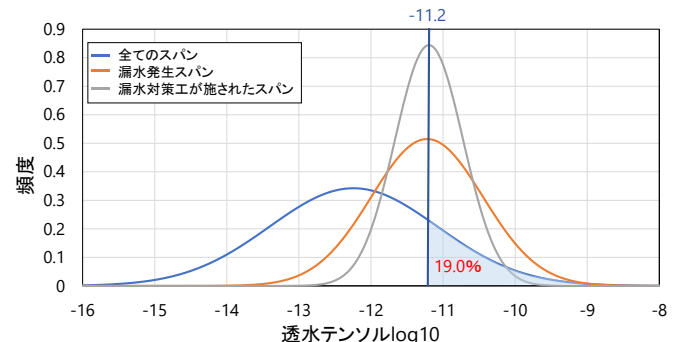


図-3 6トンネルの縦断方向成分の正規分布

施された箇所に着目した。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より漏水対策工が施される前に実施された点検結果の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られる。

3. トンネル坑内環境測定結果の分析

3-1. トンネル坑内における気温分析

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が報告された島根県が管理するGトンネルにおいて、坑内気温の測定を行った。測定方法としてトンネル坑口から10m、路面から高さ1m地点の覆工に気温計を設置し、10分ごとの気温を測

定した。測定機器はT&D社のTR42を用いた。

Gトンネルにおいて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-4に示す。この図では、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月におけるすべ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わかった。平均気温の経時的変化に着目すると、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。

3-2. 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。前項における気温測定と共にGトンネル坑内の露点測定を行った。測定にはLascar社のEL-USB-2-LCDを用いた。ここで、露点は1時間ごとの測定結果を用い、17時から10時までの1時間ごとの気温と露点の関係図を図-5に示した。この図では、つらら発生日を橙色、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

本研究では、つらら発生の予測を行うため、透水テ

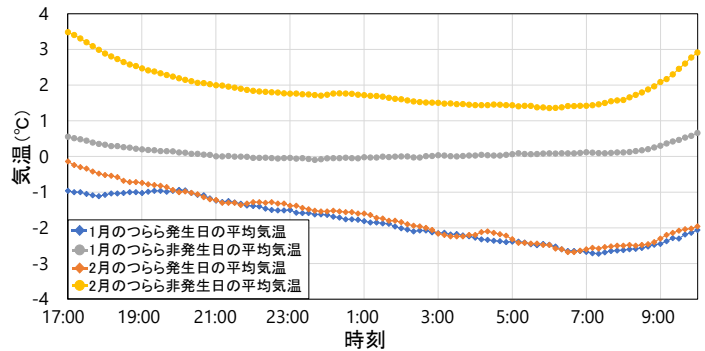


図-4 Gトンネルの気温測定結果

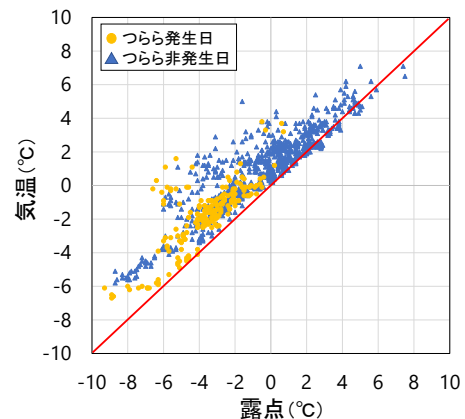


図-5 露点と気温の関係図

ンソルを援用した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測定結果の分析を行った。透水テンソルによる評価の結果、覆工の透水テンソルが $63.1 (\times 10^{-13})$ 以上の覆工スパンでは漏水発生のリスクがあると考えられる。また、トンネル坑内環境測定結果の分析では夜間から朝方にかけて気温が低下し、朝方の気温が冷え込む日につららが観測され、つららの発生・成長に関してトンネル漏水が主に影響している可能性が高いことがわかった。

今後の課題としては、漏水発生リスクの精度向上のため、覆工の打継ぎ目を含めた評価方法を検討する。また、トンネル坑内の風速や漏水量がつららの発生に与える影響を調査する。

参考文献

- 1) 岩花剛, 鈴木大樹, 小川直仁, 赤川敏: 気温データによる鉄道トンネル内のつらら発生予測の試み, 土木学会第63回年次学術講演会第4部門, 227-228頁, 2008.
- 2) M.Oda: Fabric tensor for discontinuous geological materials, *Soils and Foundations*, Vol.22, pp.96-108, 1982.
- 3) 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.