

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

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

山口大学大学院 フェロー会員 進士 正人

1. はじめに

わが国では、地域により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る。覆工に発生するつらは、交通危害やトンネル内設備に損傷を与える要因となるため、維持管理上つらら発生による被害を未然に防ぐ必要がある。そこで本研究では、トンネル坑内のつらら発生の予測をするため、トンネル坑内における漏水発生の予測を試みた。

一般に、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ツの施工の有無が挙げられる。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・分析することで覆工の漏水発生リスクを評価した。

2. 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⁾。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。

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

(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

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

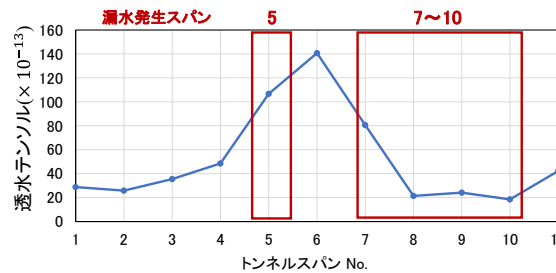


図-1 B トンネル透水テンソル（2010 年）

$r^{(k)}$ ：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

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

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

3. 透水テンソルの適用結果

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記載のあるひび割れが発生した覆工から透水テンソルを算出した。ここでは、対象とした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トンネルの透水テンソルと漏水発生箇所について考察した。

図-1に2010年点検時のBトンネルにおけるスパンごとの透水テンソル算出結果を漏水発生スパンと共

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

に示す。この図には、縦軸を透水テンソル ($\times 10^{-13}$)、横軸を覆工スパンNo.で表す。この結果より、全スパンの透水テンソルは18.5～141 ($\times 10^{-13}$)、漏水発生スパンの透水テンソルは18.5～107 ($\times 10^{-13}$) であることがわかるものの、これらの結果からは、透水テンソルと漏水発生スパンの関連性は確認できなかった。

そこで、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-2に示す。この図より、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ことがわかった。そのため、ひび割れ縦断方向成分の透水テンソルと漏水発生箇所の相関性は高いと考えられた。

4. 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に関連性が見られたため、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り、図中の青線に頻度分布を正規分布で示した。

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）の分析をした。図-3で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、ひび割れ縦断方向成分の透水テンソルが63.1 ($\times 10^{-13}$) 以上の覆工スパンでは漏水発生リスクがあるといえる。

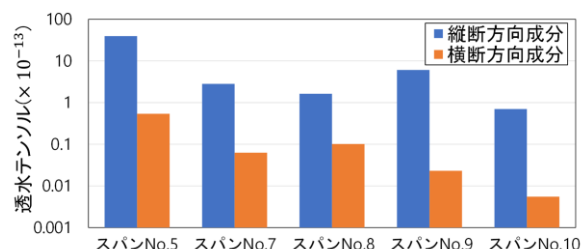


図-2 漏水発生ひび割れの方法成分別透水テンソル

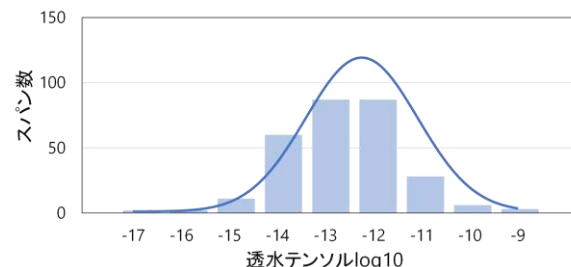


図-3 6 トンネルの縦断方向成分の透水テンソル

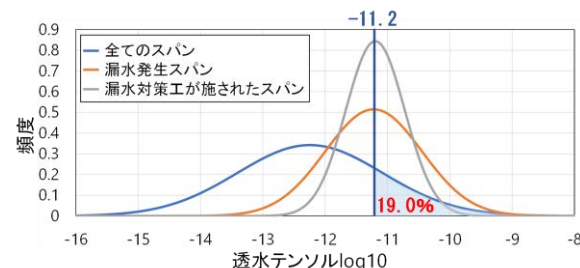


図-4 6 トンネルの縦断方向成分の正規分布

5. 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-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十分可能であることがわかる。

6. 今後の課題

今後は、トンネル坑内のつらら発生予測のため坑内気温を計測し、漏水がつららとなる発生機構を探る。また、漏水発生リスクの評価の精度向上のため、覆工打ち継ぎ目を考慮した評価方法を検討する。

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, pp1-10, 2015.