

令和3年度～5年度
一般社団法人日本トンネル技術協会研究助成報告書
助成番号：JTA-R3-助2

既設トンネルのつらら対策業務の低減に資する研究

令和6年3月31日

助成研究者氏名	林 久資
助成研究者所属	西日本工業大学

目次

第1章	序論	1
第2章	トンネル維持管理の現状と課題	5
第3章	透水係数を用いたトンネル坑内における漏水発生箇所の予測	23
第4章	現場計測に基づくつらら発生日の予測	45
第5章	室内実験によるつらら発生要因の分析	66
第6章	結論	75

第1章

序論

1-1 研究概要

1-1-1 背景

冬期のトンネル坑内では、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可能性がある。トンネル坑内に発生するつららは、通行する車の車体・窓ガラス等の破損、トンネル電気設備に損傷を与える要因となる。現在、我が国で実施されている道路トンネルの定期点検におけるつららの判定区分は、利用者の安全への影響の有無によって判断される。このとき、トンネル路面直上にできるつららは全て利用者への影響ありと判断されるため、つららが確認された覆工スパンの大半が判定区分Ⅲ、Ⅳと判断され、緊急に対策を講じる必要がある補修対象となる¹⁾。

しかしながら、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に加え、覆工背面の地下水の存在による漏水状況や覆工の健全度が複雑に関連するため、補修部分とは異なる箇所からつららが発生する場合があります。トンネル坑内に発生するつらら発生を未然に防ぐ導水工や止水工等の漏水対策工を施すことは困難である。そのため、道路管理者は毎日早朝にパトロールを行い、目視点検でつららが確認され次第、人力でのつらら除去作業（写真-1.1）を行い、つららに起因する被害を未然に防いでいる。これらの除去作業は交通規制を伴い道路管理者への負担が大きいばかりでなく、通行車両の渋滞や事故につながることを懸念される。

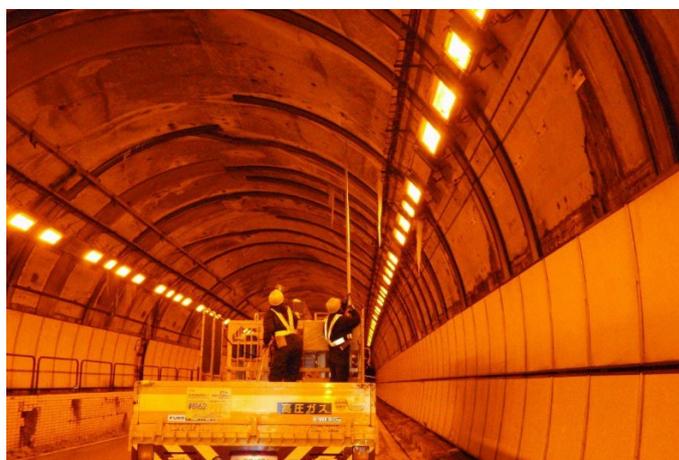


写真-1.1 つらら除去作業の様子

1-1-2 トンネル坑内に発生するつららに関する既往研究

つらら発生が報告されているトンネル坑内における気温の計測によるつらら発生状況とトンネル坑内気温の関係について研究²⁾が行われている。代表的なものとしては、トンネル延長による気温の分布とつららの発生位置の比較を行っている。これらの研究では、時期の違いによるつらら発生箇所の違いや最低気温の違いによるつららの発生状況（場所・本数・長さ）の関係が示されている。

また、寒冷地つらら防止工としてトンネル設計における断熱材の最適化について研究されている³⁾。この研究では、断熱材の材質とその厚さをトンネルのおかれている気象条件に基づいて最適化するため、非定常伝達/熱伝導トンネル地山モデルによる温度解析を行っている。

しかしながら、極寒冷地以外の地域における供用中のトンネルでは前節で述べたようにつららの除去作業が日々行われており、つららが発生することを未然に防止する明確な対策方法が示されていないのが現状である。

1-1-3 本研究の目的

そこで、本研究では冬期のトンネル維持管理作業におけるつらら発生を考慮した点検・診断に有用な知見を得ることを目的とし、まずつららの原因となるトンネル坑内の漏水発生箇所を分析した。その手法として、岩盤の透水性を評価する際に用いられるクラックテンソル理論^{2),3)}をトンネル覆工に適用し、覆工表面に発生したひび割れを透水係数で定量化することで漏水発生リスクを評価した。また、トンネル坑内のつらら発生メカニズム解明のため、つららが発生したトンネル坑内の現場計測に基づく重回帰分析によるつらら発生予測、およびつららの発生・成長過程を比較する室内実験を行った。

1-2 本報告の構成

本報告は6つの章で構成されており、以下に各章の概要を述べる。

第1章 序論

冬期道路トンネルにおけるつららによる問題やつらら対策における現状を述べた上で、本研究の目的を述べる。

第2章 トンネル維持管理の現状と課題

我が国における道路トンネルの維持管理状況を述べ、現在実施されている点検方法、健全性評価方法の概要を説明する。また、漏水に関する変状に対する健全度評価に対する課題を述べる。

第3章 クラックテンソル理論を用いたトンネル坑内における漏水発生箇所の予測

本研究で用いたクラックテンソル理論の概要および透水係数を用いたトンネル坑内の漏水発生箇所の分析結果について述べる。

第4章 現場計測に基づくつらら発生の予測

つらら発生が報告されているトンネルを対象に行った計測の概要および計測結果に基づく重回帰分析を用いたトンネル坑内に発生するつららの予測結果について述べる。

第5章 室内実験によるつらら発生要因の分析

室内実験によるつららの発生条件について、現場計測で得られたデータと比較した結果について述べる。

第6章 結論

本研究を通して得られた結果および課題を述べ、本報告の結論とする。

参考文献

- 1) 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】，pp208-214，2020.8
- 2) 鈴木大樹，小川直仁，岩花剛，赤川敏：鉄道トンネル内のつららの観測，日本雪氷学会，北海道の雪氷 No.27，pp.17-20，2008.
- 3) 岩花剛，鈴木大樹，小川直仁，赤川敏：北海道の鉄道トンネル内のつらら発生特性，日本雪氷学会，雪氷研究大会，
- 4) 岡田勝也，松本嘉司：既設トンネルにおける気象条件の確率量を考慮した断熱つらら防止工の断熱材の最適化，土木学会論文集第400号/Ⅲ-10，pp.171-177，1988.
- 5) M.Oda：Fabric tensor for discontinuous geological materials，*Soils and Foundations*，Vol.22，pp.96-108，1982.
- 6) 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.

第2章

トンネル維持管理の現状と課題

2-1 我が国におけるトンネル維持管理の概観

本節では、我が国における道路トンネルの整備状況及びトンネル維持管理に関する概観について述べる。

2-1-1 道路トンネルの整備状況

山岳地帯が広がる我が国では、高度経済成長期における道路整備の進展とトンネル技術の進歩とともに道路トンネルの建設が集中的に行われた。2020年3月現在に供用されているトンネルの総数は約11000箇所、累計延長は約5200kmに達する¹⁾。また、供用開始年代別全国のトンネル箇所数とその割合²⁾を図-2.1に示す。図より1989年以前に建設され、供用30年以上経過したトンネルが約60%、1969年以前に建設され供用後50年経過するトンネルは約35%に及んでおり、今後老朽化が加速度的に進行することが想定される。

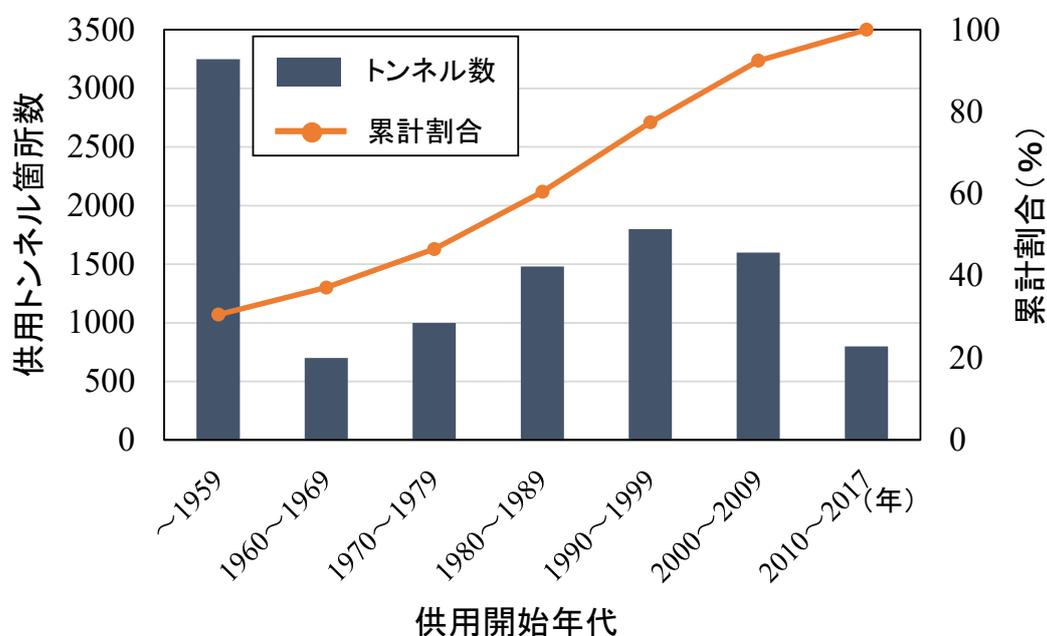


図-2.1 供用開始年代別全国のトンネル箇所数とその割合

2.1.2 トンネル老朽化問題の事例とトンネル維持管理に関する取組み³⁾²⁾

平成 24 年 12 月に中央自動車道上り線笹子トンネルの東京側坑口から約 1150m 付近において、トンネル換気のために設置されている天井板および隔壁板等が約 140m にわたり落下した。同区間を走行中の車両 3 台が天井板の下敷きになるなどにより巻き込まれ、うち 2 台から火災が発生し焼損した。その後の消防庁の調べによると、この事故による人的被害は死者 9 人、負傷者 2 人であった。

この事故に関する報告書によると、事故の原因の一つとして事故前の不十分な点検内容や維持管理体制、さらには膨大な数の補修補強履歴の保存体制の不備が指摘された。この事故を受け、利用者の安全性確保のためには適切な頻度・機会・方法で点検を実施し、点検・補修補強の履歴や目的の記録を残し、その後の点検等の維持管理に反映させるような仕組みの構築やマネジメントが不可欠であることが再確認された。

これにより、平成 26 年に道路法が一部改正され、トンネルの点検は、国が定めた統一的な基準により 5 年に 1 回の頻度で行うことを基本とし、結果について記録・保存すること、統一的な尺度で健全性の診断結果を分類することが定められた。これは安全かつ効率的な維持管理を実現するためには道路の劣化が進行してから修繕を行う「事後対応」型ではなく、損傷が軽微なうちに修繕等の対策を講じる「予防保全」型の維持・修繕を行うことが重要であるという考え方にもとづいたものである。また、定期点検における技術的助言として平成 26 年 6 月に「道路トンネル定期点検要領（国土交通省道路局）」が策定され、円滑な点検の実施のための具体的な点検方法等が提示された。



写真-2.1 笹子トンネル天井板落下事故⁴⁾

2-2 我が国のトンネル維持管理の概要

本節では、現状のトンネルにおける維持管理の手順についてまとめ、代表的な点検方法について述べる。

2-2-1 トンネル維持管理の手順^{5), 6)}

前節で述べたように、事故の影響によりトンネルの安全性を確保するために、定期的な維持管理の重要性が再確認された。現在の道路トンネルにおける維持管理に関する一般的な手順を図-2.2に示す。トンネル本体の維持管理は点検、診断、措置、記録の手順で行われる。これらの手順は、予防的な保全による維持管理の実施を基本としている。また、道路管理者が定期的な点検、診断を行うことにより構造物の安全性及び維持管理の効率性を確保できるように実施するためのメンテナンスサイクルに基づいている。図中の※については、以下に詳細を述べる。

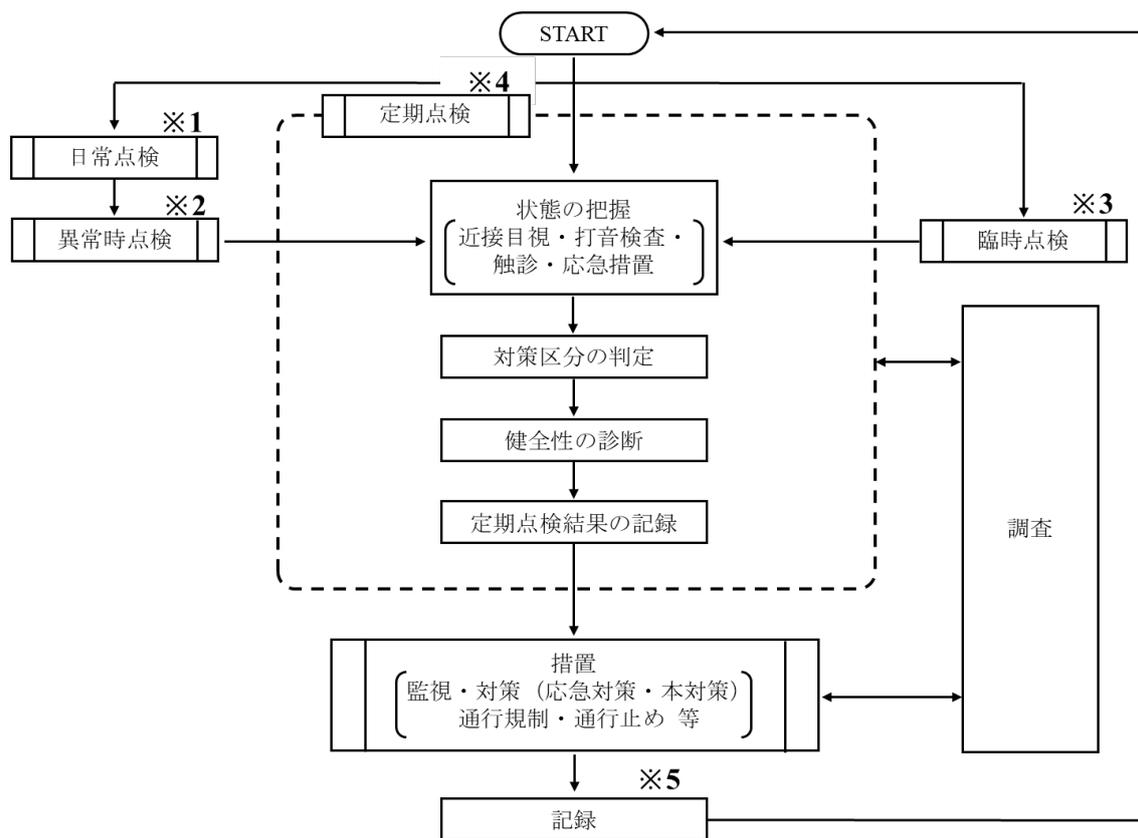


図-2.2 維持管理に関する一般的な手順

※1) 日常点検

日常点検とは、道路の巡回に合わせてパトロールカー等で道路上を走行しながら、車中から視認できる範囲のトンネルの状況並びに道路の利用状況を、原則として車上目視または車上感覚によって把握し、覆工片のはく落および多量な漏水等のトンネル利用者の安全性、快適性等に問題が生じる可能性のある変状等を早期に発見するための点検である。

※2) 異常時点検

異常時点検とは、日常点検により発見された変状や異常に対して、近接目視の必要性を判定するために行う点検である。日常点検で変状や異常が発見され、異常時点検が必要と判定された際に実施する。

※3) 臨時点検

臨時点検とは、あらかじめ定められた規模の地震、集中豪雨等の自然災害およびトンネル内の事故災害等が発生した場合に主に通行の安全を確認するために行う点検である。

※4) 定期点検

定期点検とは、近接目視等によりトンネルの変状を把握して、利用者被害の可能性のあるコンクリート等のうき、はく離部等の撤去、附属物の取付状態の改善等を行う応急措置を講じる。また、次回定期点検までに変状等に対して、必要な応急対策、本対策および監視の判断を行ううえで必要な情報を得るために必要に応じて調査も併せて実施するなど安全で効果的な維持管理を行うための点検である。定期点検の詳細を図-2.3に示す。

※5) 記録⁷⁾

記録とは、点検結果、調査結果、健全性の診断結果、措置後の確認結果を適時、定められた様式に記録、記載することである。道路トンネル定期点検要領⁸⁾では、定期点検に関わる記録の様式、内容や項目について法令上の定めはなく、道路管理者が適切に定めればよいとされている。同要領では、定期点検結果が適切に実施されたことの最低限の証明としての観点からトンネル変状・異常箇所写真位置図と変状写真台帳の二つの様式が示されている。定期点検結果記録様式にはトンネル台帳、定期点検記録様式、診断調書がある。これらの様式例を図-2.4に示す。これらは、維持・修繕等の計画を立案するうえでの基礎的な情報であり、適切な方法で記録し蓄積しておく。

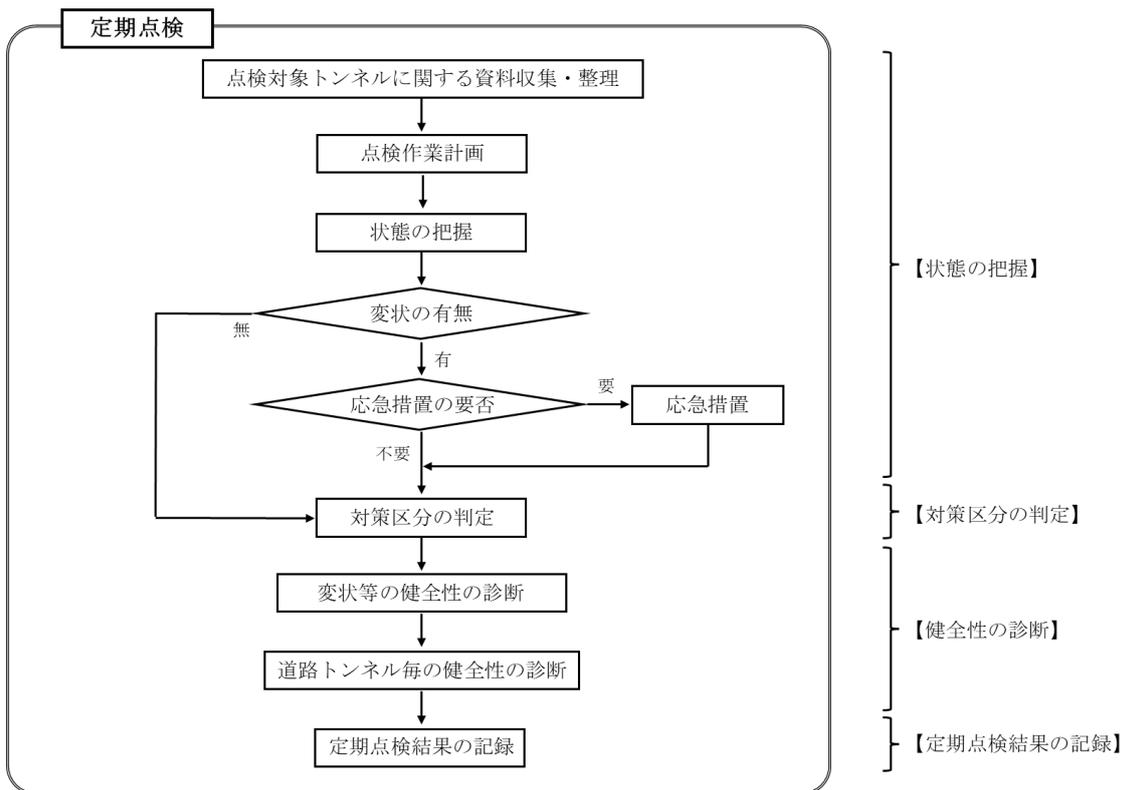
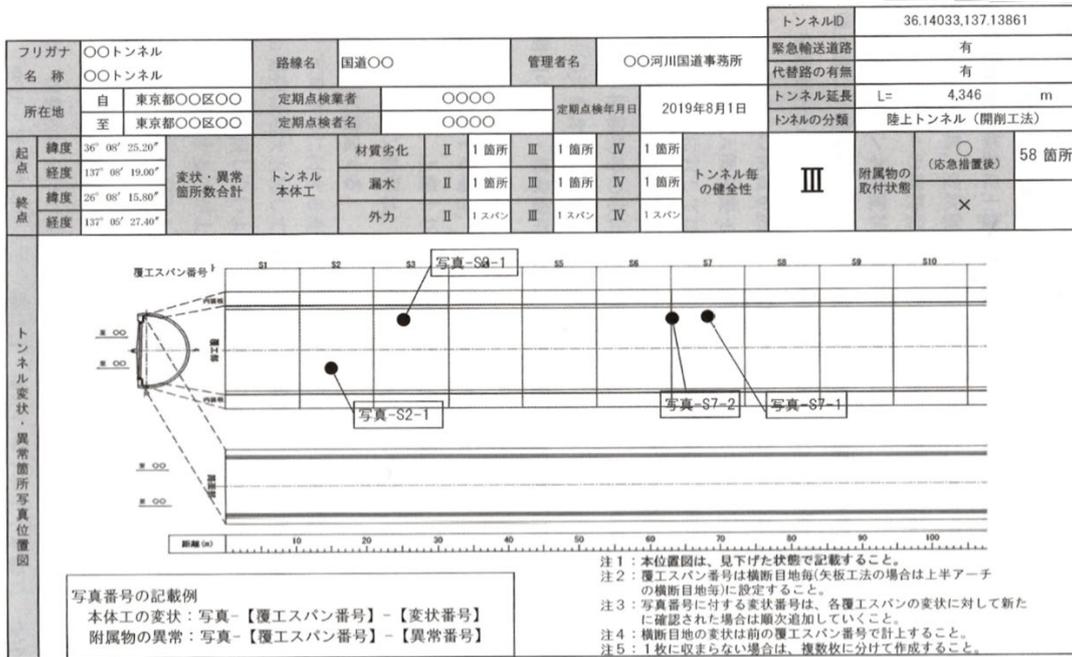


図-2.3 定期点検フロー

フリガナ		トンネルID		緊急輸送道路		有		
名称		36.14033,137.13861		緊急輸送道路		有		
所在地		管理者名		代替路の有無		有		
自 東京都〇〇区〇〇		〇〇河川国道事務所		トンネル延長		L= 4346 m		
至 東京都〇〇区〇〇		作成年月日		トンネルの分類		陸上トンネル (掘進工法)		
完成年月日	2012/1/1	種別	コンクリート系	施設の内訳	種別・方式	型式	個数	更新年度
供用年月日	2013/1/1	厚さ	0.5 m	通報設備	非常電話	-	29	2012
トンネル区分	AA	面積	37375.6 m ²	操作型通報設備	押しボタン式通報装置	I型	86	2012
内装種類	覆工 (内装なし)	更新年次		自動通報設備	火災検知器	-	185	2012
天井板種類	-	種別	U型・暗渠排水	非常警報設備	非常警報装置	LED式	10	2012
一般有料区分	無料	更新年次		消火器	消火器	2本入り	86	2012
土かぶり	80 m	トンネル非常用施設		消火栓設備	消火栓	20111002M	86	2012
内空断面積	54 m ²	トンネル非常用施設		誘導表示設備	誘導表示板	反射式	25	2012
交通量	18,611 台/日	トンネル非常用施設		避難情報提供設備	ラジオ再放送設備 (緊急時専用)	AM・FM	1	2012
幅員	道路幅 9.5 m	トンネル非常用施設		避難通路	避難通路	-	15	2012
	車道幅 3.5 m	トンネル非常用施設		排煙設備	ジェットファン	JF-1250X	14	2012
	歩道等幅 1.4 m	トンネル非常用施設		給水栓設備	給水栓	-	24	2012
高さ	建築限界高 4.7 m	トンネル非常用施設		無線通信補助設備	無線通信補助設備	K-C03M03	2	2012
	中央高 7.1 m	トンネル非常用施設		水噴霧設備	水噴霧設備	-	87	2012
	有効高 4.7 m	トンネル非常用施設		監視設備	監視装置(CCTV)	DT-A6090	35	2012
線形	縦断勾配 上り0.4%	トンネル非常用施設		非常発電設備	ディーゼル発電機	-	1	2012
	直線区間長 498.7m	トンネル非常用施設		非常用施設				
	区間長 233.9m	トンネル非常用施設		その他	非常駐車帯	-	10	2012
	起点側クワッド -	トンネル非常用施設			方向転換所			
	曲線半径 1300m	トンネル非常用施設						
	終点側クワッド 450m	トンネル非常用施設						
トンネル工法	矢板工法	トンネル非常用施設						

a) トンネル台帳 (様式 A-1)



b) 定期点検記録様式（様式B）

フリガナ 名称	〇〇トンネル 〇〇トンネル	路線名	国道〇〇	管理者名	〇〇河川国道事務所	定期点検業者	〇〇〇〇	定期点検年月日	2019年8月1日	トンネル毎 の健全性	IV																									
【覆工スパン毎の変状数、健全性の診断、変状規模】																																				
覆工 スパン 番号 (m)	変状数											トンネル毎の 健全性の診断		変状の発生範囲の規模 (㎡)																						
	対照区分の判定						変状等の健全性の判断 (変状単位)						トンネル毎の 健全性の診断		変状の発生範囲の規模 (㎡)																					
	外力		材質劣化		漏水		外力		材質劣化		漏水		健全性	健全性	トンネル毎の 健全性の診断		トンネル毎の 健全性の診断		トンネル毎の 健全性の診断		トンネル毎の 健全性の診断		トンネル毎の 健全性の診断													
PS	0.7	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	I	III	II	III	0.00	1.50	0.00	0.30	0.00	0.00	5.00	0.00									
S1	9	1	0	0	0	1	1	1	0	0	2	2	1	1	1	2	0	0	4	IV	IV	II	IV	9.0	0.10	0.13	1.25	2.00	0.00	0.00	9.00	9.00				
S2	9	0	0	1	0	0	1	3	0	0	1	3	1	1	0	1	4	0	4	II	III	II	III	9.0	0.00	1.00	1.00	5.00	0.00	0.00	8.00	11.00				
S3	9	0	0	1	0	0	0	1	3	0	0	1	1	1	0	0	4	0	3	II	II	II	II	9.0	0.00	0.00	1.25	2.50	0.00	0.00	8.00	8.00				
S4	9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	I	I	I	I	9.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00				
S5	9																																			
S6	9.0																																			
S7	9.0																																			
S8	9.0																																			
S9	9.0																																			
S10	9.0																																			
S11	9.0																																			
S12	9.0																																			
S13	9.0																																			
S14	9.0																																			
S15	9.0																																			
S16	9.0																																			
S17	9.0																																			
S18	9.0																																			
S19	9.0																																			
S20	9.0																																			
S21	9.0																																			
S22	9.0																																			
S23	9.0																																			
S24	9.0																																			
S25	9.0																																			
S26	9.0																																			
S27	9.0																																			
S28	9.0																																			
S29	9.0																																			
S30	9.0																																			
S31	9.0																																			
PE	0.7																																			
計		1	0	2	0	1	3	3	8	0	0	5	6	1	0	2	1	3	11	0	0	12														

c) 診断調書（様式F）

図-2.4 定期点検様式例

2-2-2 代表的な点検方法⁶⁾

定期点検において行われる点検方法には、主に近接目視と打音検査がある。以下に詳細を示す。

a) 近接目視

路面からでは覆工等の外観性状を十分に把握できないアーチの上部や、坑門の上部等に対して、トンネル点検車等を用いて肉眼により変状等の状態を把握し評価が行える距離まで接近し、ひび割れ，うき・はく離，漏水の状況，附属物等の取付状態を把握する。ひび割れについては，その位置，長さ，幅，段差等をクラックスケール等により計測する。また，ひび割れの形態を開口，圧ぎ，段差等に分類して整理し，点検表に記載したうえで変状原因を推定するための資料とする。写真-2.2 に実際の近接目視作業状況を示す。

b) 打音検査

打音検査にあたっては，頭部重量 100～300g 程度の点検用ハンマーを用いて行う。これは，覆工表面のうき・はく離等が懸念される箇所に対し，うき・はく離の有無及び範囲等を把握するために行う。初回の点検では，覆工表面を全面的に打音検査することを基本とする。また，二回目以降の点検においては，前回の定期点検で確認されている変状箇所，新たに変状が確認された箇所，対策工が施されている箇所およびその周辺，水平打継ぎ目・横断目地部およびその周辺に対して打音検査することとする。写真-2.3 に実際の打音検査作業状況を示す。



写真-2.2 近接目視作業状況



写真-2.3 打音検査作業状況

2-3 トンネル健全性診断方法の現状

本節では、現状のトンネル健全性診断の手順や手法についてまとめ、そのうちひび割れに関する対策区分とそれに伴う健全性評価の概要について述べる。

2-3-1 健全性診断方法^{8),9)}

本項では、これまで述べた定期点検の結果に基づくトンネルの健全性評価方法について述べる。トンネルごとの健全性の診断は、管理者が道路構造物を一括管理し、効率的な維持管理を行うために実施するためのものであり、トンネルの状態の把握と次回定期点検までの間の措置の必要性について総合的に判断するために、トンネルの変状・異常の程度を判定区分に分類するものである。そのために、まず、①トンネルに発生する個々の変状に対して表-2.1に示すような対策区分によって変状状況を5段階で評価する。②その結果をもとに、各変状の発生要因を外力、材質劣化、漏水に分類し、表-2.2に示すI～IVの区分により変状の健全性の診断を4段階で行う。その後、③覆工スパン単位で各変状（外力、材質劣化、漏水）のうち最も評価の厳しい判定区分結果を採用し、そのスパンの健全性評価を行う。最後に、④トンネルの覆工スパンごとで最も厳しい判定区分結果を採用し、そのトンネルの健全性とする流れとなっている。健全性の診断の流れの例を図-2.5に示す。

表-2.1 本体工における対策区分

対策区分	変状の状態
I	利用者に対して影響が及ぶ可能性がないため、措置を必要としない状態
II	IIb 将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、監視を必要とする状態
	IIa 将来的に、利用者に対して影響が及ぶ可能性があるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的な対策を必要とする状態
III	早晩、利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、早期に措置を講じる必要がある状態
IV	利用者に対して影響が及ぶ可能性が高いため、緊急に対策を講じる必要がある状態

表-2.2 道路トンネル毎の健全性の判定区分

区分	定義
I 健全	道路トンネルの機能に支障が生じていない状態
II 予防保全段階	道路トンネルの機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態
III 早期措置段階	道路トンネルの機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずるべき状態
IV 緊急措置段階	道路トンネルの機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態

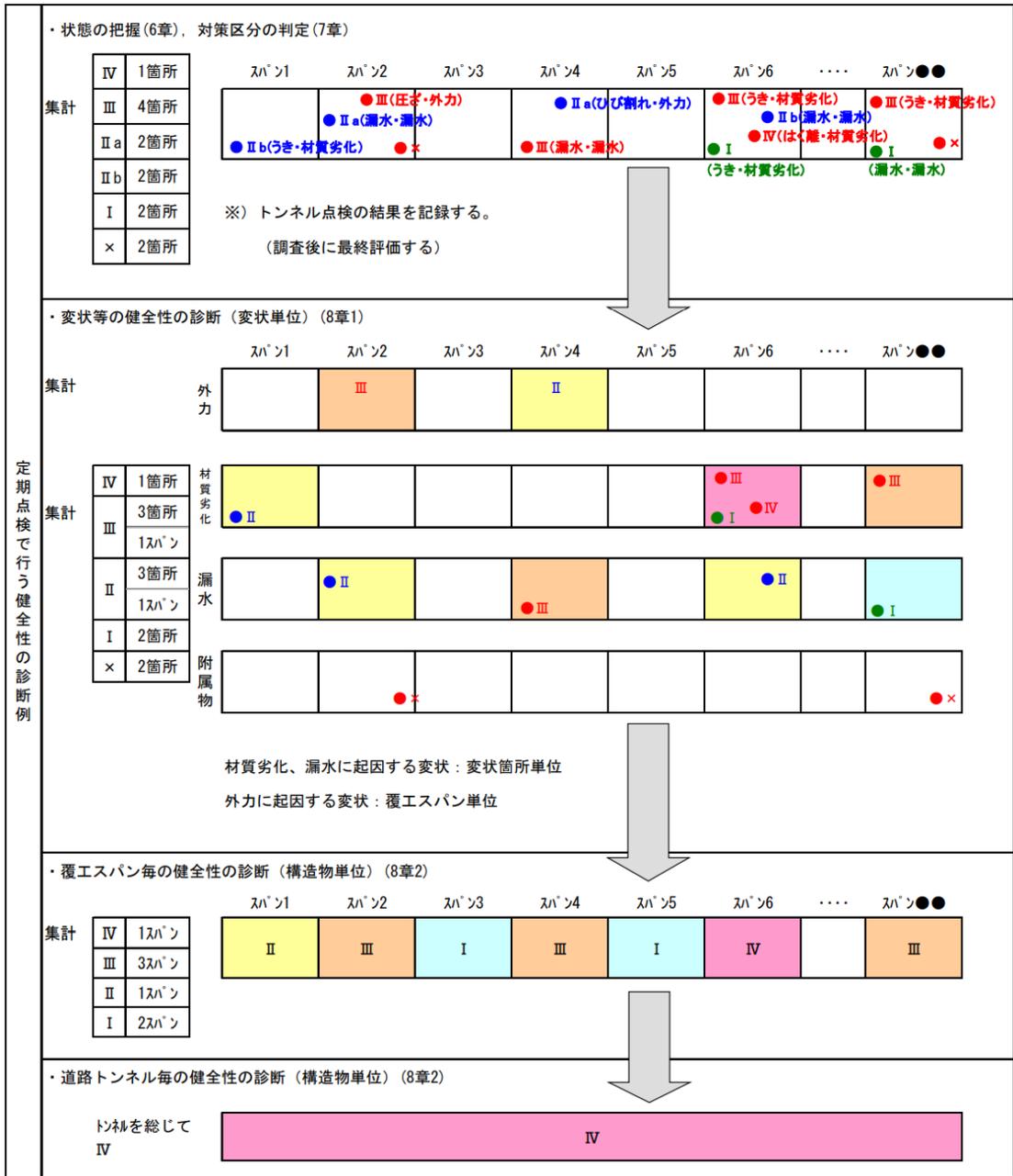


図-2.5 健全性の診断の流れ

2-3-2 対策区分の判定⁸⁾

対策区分とは、利用者への影響の可能性と措置の必要性の観点から変状の状態を表すものであり、その判定区分は本体工に対してはI, IIb, IIa, III, IVの5段階、附属物の取付状態に対しては「○」、「×」で区分される。対策区分の判定は、本体工の変状あるいは附属物の取付状態の異常が利用者にとぼす影響を詳細に把握し、適切な措置を計画するために行うものである。

トンネルにおける変状の区分は、変状対策の目的や対応から外力による変状、材料劣化による変状、漏水による変状に大別できることから、本体工における対策区分の判定は以下の3種類に分類する。

- ① 外力による変状に対する対策区分
- ② 材料劣化による変状に対する対策区分
- ③ 漏水による変状に対する対策区分

変状区分に対応する変状種類を表-2.3に示す。対策区分の判定は、3種類の変状区分ごとに対応する変状種類に関して行い、外力による変状については覆工スパンごとに、材料劣化・漏水については個々の変状ごとに行う。これらは、変状区分ごとに変状種類の評価を行い、その総合評価により本体工の判定区分がなされる。

対策区分の判定は、その判定結果を参考に前節で述べた健全性の診断を行うことから対策区分の判定はトンネル全体の健全性の診断に直結する。

表-2.3 変状区分に対応する変状種類¹²⁾

変状種類	変状区分		
	外力	材質劣化	漏水
① 圧ぎ, ひび割れ	○	○	
② うき, はく離	○	○	
③ 変形, 移動, 沈下	○		
④ 鋼材腐食		○	
⑤ 巻厚の不足または減少, 背面空洞		○	
⑥ 漏水等による変状			○

2-3-3 ひび割れに関する健全性診断⁸⁾

覆工におけるひび割れに関する健全性評価は前項で示した表-2.3における変状種類のうち外力に起因する圧ざ，ひび割れに対する対策区分の判定によって行う。この判定は圧ざ，ひび割れの進行性等に着目し，表-2.4を参考に判定を行う。また，表-2.5，表-2.6は判定の目安例として示したものであり，機械的に適用するのではなく，現場の状況に応じて判定を行うものとされているため，定量的な判断基準が明記されておらず，技術者によって定性的な判断されるためばらつきが生じる可能性がある。

表-2.4 圧ざ，ひび割れに対する対策区分

対策区分	変状の状態
I	ひび割れが生じてない，または生じていても軽微で，措置を必要としない状態
II	IIb ひび割れがあり，その進行が認められないが，将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため，監視を必要とする状態
	IIa ひび割れがあり，その進行が認められ，将来的に構造物の機能が低下する可能性があるため，重点的な監視を行い，予防保全の観点から計画的な対策を必要とする状態
III	ひび割れが密集している，またはせん断ひび割れ等があり，構造物の機能が低下しているため，早期に措置を講じる必要がある状態
IV	ひび割れが大きく密集している，またはせん断ひび割れ等があり，構造物の機能が著しく低下している，または圧ざがあり，緊急に対策を講じる必要がある状態

表-2.5 点検時（ひび割れの進行の有無が確認できない場合）の対策区分の目安例

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ						判定区分
		幅			長さ			
		5mm以上	3~5mm	3mm未満	10m以上	5~10m	5m未満	
覆工	断面内			○	○	○	○	I~IIa
			○				○	IIb, IIa
			○			○		III
			○		○			III
		○					○	IIb~III
		○				○		III
		○			○			IV

表-2.6 調査の結果、ひび割れの進行が確認された場合の判定の目安例

対象箇所	部位区分	外力によるひび割れ				判定区分
		幅		長さ		
		3mm以上	3mm未満	5m以上	5m未満	
覆工	断面内		○	○	○	IIa, III
		○			○	III
		○		○		IV

2-3-4 漏水等による変状に対する判定¹⁰⁾

漏水等による変状は、表-2.7を参考に変状ごとに対策区分の判定を行う。判定の目安として、利用者の安全性に影響がない場合、判定区分はIとなる。一方、利用者への影響はほとんどないが監視を必要とするもの、あるいは利用者への影響がある場合の判定区分はIIb～IVのいずれかに分類される。この場合の漏水等による変状について、判定の目安例を表-2.8に示す。同表中の漏水度合いは、表-2.9に示すような状態を表している。

寒冷地では、裏面排水の不良が変状の原因となる場合があるので、十分に留意する必要がある。路面上の氷盤については、車両走行の障害になるものはIII～IVとする。また、車両走行や歩行者への影響が懸念されるつららや側氷は日常点検においても注視し、必要に応じて除去する必要がある。このように、側氷やつららについては、日常の維持管理作業にも影響することも留意すべきである。表-2.8に示すつららの判定区分に関しては、トンネル路面直上にできるつららは全て利用者への影響ありと判断されるため、つららが確認された覆工スパンの大半が判定区分III、IVと判断され、緊急に対策を講じる必要のある補修対象となる。判定区分別の漏水等の変状状況例を表-2.10に示す。

表-2.7 漏水等による変状に対する判定区分

対策区分	変状の状態	
I	漏水がみられないもの、または漏水があっても利用者の安全性に影響がないため、措置を必要としない状態	
II	IIb	コンクリートのひび割れ等から漏水が浸出しており、利用者の安全性にはほとんど影響がないが、監視を必要とする状態
	IIa	コンクリートのひび割れ等から漏水の滴水があり、将来的に利用者の安全性を損なう可能性のあるもの、または、排水不良により、舗装面に滞水を生じるおそれのあるため、重点的な監視を行い、予防保全の観点から計画的に対策を必要とする状態
III	コンクリートのひび割れ等から漏水の流下があり、または、排水不良により舗装面に滞水があり、利用者の安全性を損なう可能性のあるため、早期に対策を講じる必要がある状態	
IV	コンクリートのひび割れ等から漏水の噴出があり、または、漏水に伴う土砂流出により舗装が陥没したり沈下する可能性があり、寒冷地において漏水等により、つららや側氷等が生じ、利用者の安全性を損なうため、緊急に対策を講じる必要がある状態	

表-2.8 漏水等による変状に対する判定の目安例

箇所	現象	漏水の度合				利用者への影響		判定区分
		噴出	流下	滴水	浸出	有	無	
アーチ	漏水				○		○	IIb
				○		○		IIa
			○			○		III
		○				○		IV
	つらら						○	IIb
						○		III, IV
側壁	漏水						○	IIb
				○		○		IIa
			○			○		IIa
		○				○		III
	側氷						○	IIb
						○		III, IV
路面	土砂流出						○	IIb
						○		III, IV
	滞水						○	IIb
						○		III, IV
	凍結						○	IIb
						○		III, IV

表-2.9 漏水の度合

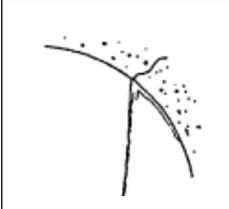
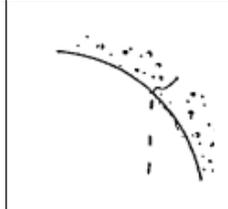
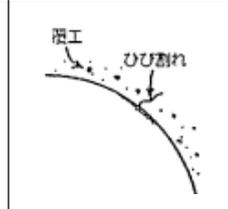
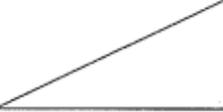
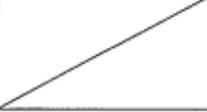
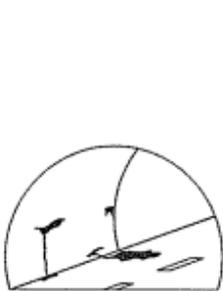
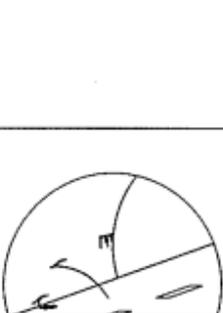
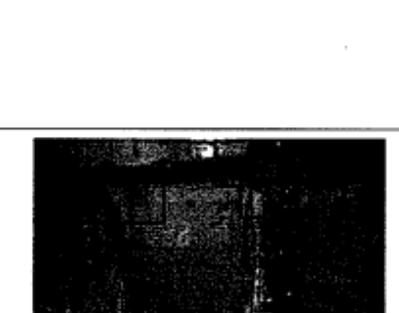
漏水度合	噴出	流下	滴水	浸出 (にじみ)
漏水状態	水圧の作用により水が噴き出している	自然流下のような状態で、連続的に水が流出している	ポタポタと落ちるような状態で、断続的に水が流出している	表面が濡れている状態で、滴水等はない
模式図				

表-2.10 判定区分別の漏水等の変状状況例

対策区分	変状模式図例	変状写真例 ¹⁾	変状状況
I			<ul style="list-style-type: none"> ・漏水がない ・利用者の安全性に影響がない漏水がある
II	II b 		<ul style="list-style-type: none"> ・覆工の表面が濡れているが、滴水はない ・側壁下部等、利用者への影響がほとんどない箇所での漏水の滴下がある ・非常に小規模なつらら、側氷がみられる
	II a 		<ul style="list-style-type: none"> ・車道や歩道の上部・側部から、滴水がある ・側壁下部等で漏水の流下がある ・排水不良により、舗装面が濡れている
III			<ul style="list-style-type: none"> ・車道や歩道の上部・側部から流下がある ・側壁下部等で噴出がある ・漏水をともなうつらら、側氷で落下の危険性は少ないが、いずれ規模が大きくなると考えられる ・排水不良により、舗装面に滞水がある（凍結が懸念される場合はIV)
IV			<ul style="list-style-type: none"> ・車道や歩道の上部・側部から、噴出がある ・落下の危険性の高いつらら、側氷が形成される ・土砂をともなう漏水がみられる

2-4 現状のトンネル維持管理における課題

ここ数十年で全国的にトンネルの維持管理の重要性が明らかになり、2014年以降、各管理者によって定期点検が実施されている。2019年3月までに全国のほぼすべてのトンネルにおいて1巡目の点検が完了し、現在順次2巡目の点検が行われている¹³⁾状況である。その中で、今後も各管理者が適切な頻度で定期点検を行うために以下に示すような課題が挙げられる。

- ・現状の覆工健全性の評価基準は技術者の技術、経験に依存しており、定性的であるといえる。そのため、技術者によって、健全性評価結果にばらつきが生じる可能性がある。
- ・人口減少にともない適切なトンネル点検ならびに健全性診断を行える技術者数の不足が問題となっている。年代別の技術者数の推移¹⁴⁾を図-2.8に示す。図より2020年現在は技術者数が多少増加傾向にあるものの、近年における技術者数の推移は減少傾向にある。今後、少子高齢化の影響もあり、さらに技術者が減少することが懸念される。また、それに加えて、技術者の高齢化が進行している。図-2.9に年代別の建設業従事者割合の推移¹⁴⁾を示す。それぞれ55歳以上の就業者割合と29歳以下の就業者割合を示す。図より2020年における就業者割合は、55歳以上が約36%、29歳以下が約12%であり、深刻な技術者の高齢化が進んでいることがわかる。これらのことから、トンネルにおける点検・診断・措置を行う技術者の人材育成や技術継承の実施が急務である。
- ・予防保全の考え方にもとづく維持管理の実施を基本とし、また、近年の取組みを踏まえて国土交通省によって、今後30年後までの道路における維持管理・更新費の推定¹⁵⁾がされている。その詳細を表-2.11に示す。図より、長期的な費用の増加の程度は、20年後、30年後ともに約1.3倍となる見込みである。このことから、今後のトンネルの維持管理においても、現在よりさらに省力的で、かつ効率的な維持管理システムが必要になる。

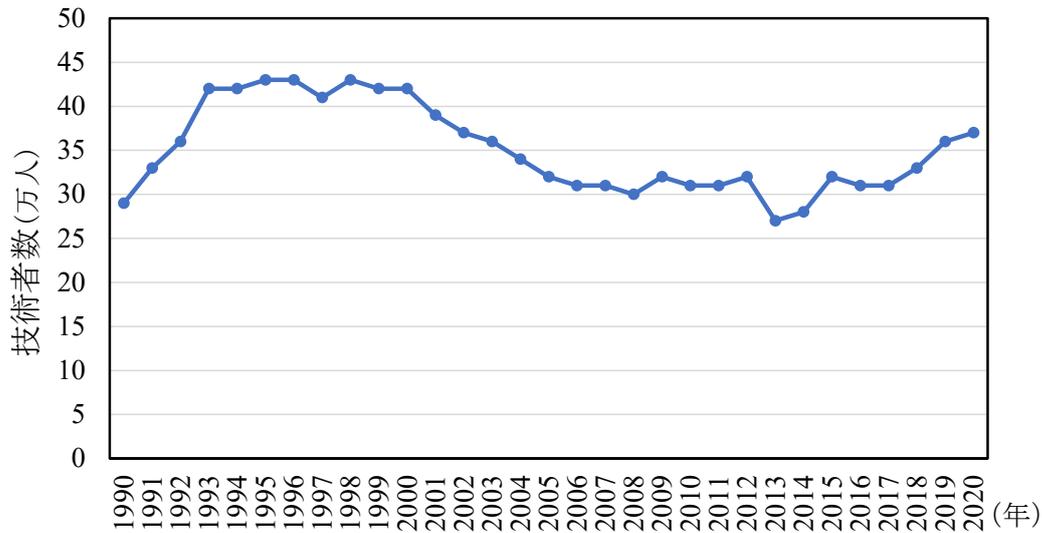


図-2.8 年代別の技術者数の推移¹⁴⁾

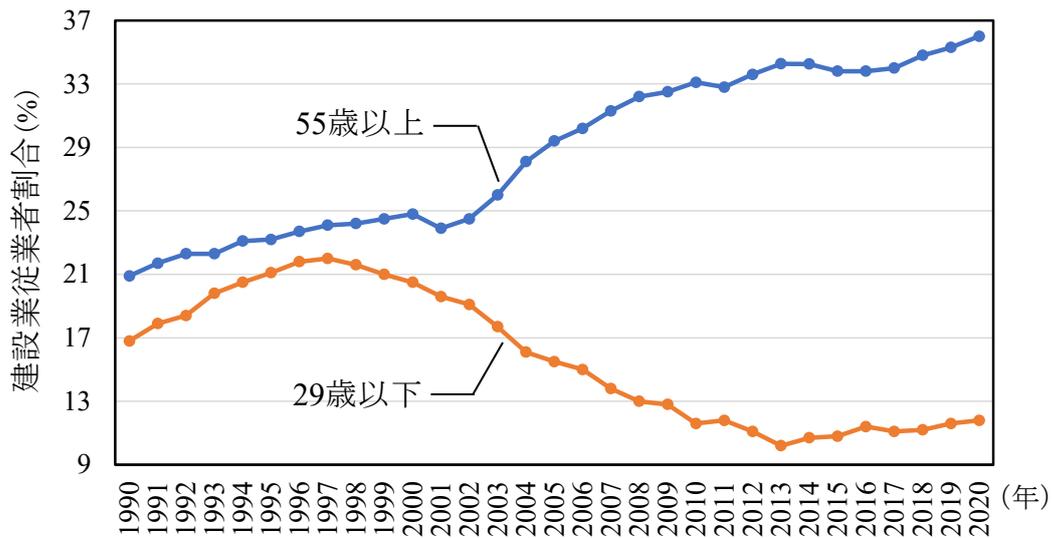


図-2.9 年代別の建設業従事者割合の推移¹⁴⁾

表-2.11 今後30年までの道路における維持管理・更新費の推計¹⁵⁾

	2018年度	5年後 (2023年度)	10年後 (2028年度)	20年後 (2038年後)	30年後 (2048年度)
道路における 維持管理・更新費	1.9	2.1~2.2	2.5~2.6	2.6~2.7	2.1~2.2

単位：兆円

参考文献

- 1) 国土交通省：道路統計年報 2021 トンネルの現況，2022.2 現在
- 2) 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】，pp1-2，2020.8
- 3) 国土交通省：トンネル天井板の落下事故に関する調査・検討委員会報告書，pp1-45，2013.6
- 4) 公益社団法人 土木学会：地下構造物のアセットマネジメント（導入に向けて），p.13，pp.35-37，2015.2.
- 5) 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】，pp21-38，2020.8
- 6) 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】，pp115-174，2020.8
- 7) 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】，pp375-413，2020.8
- 8) 国土交通省道路局：道路トンネル定期点検要領，2019.2
- 9) 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】，pp175-220，2020.8
- 10) 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】
- 11) 中日本高速道路株式会社：雪氷対策作業の流れ，
(<https://www.c-nexco.co.jp/images/news/4175/d1c66a012a>)，2023.1 現在
- 12) 中日本高速道路株式会社：安全性向上3ヵ年計画取組み状況，
(<https://www.c-nexco.co.jp/corporate/safety/torikumi/torikumi/vol05/>)，2023.1 現在
- 13) 公益社団法人 土木学会：2020 インフラ健康診断書，p12-13，2021.6
- 14) 国土交通省：維持管理の担い手確保について，p9，2021.12
- 15) 国土交通省：維持管理に関する現状と課題，p7，2018.12

第3章

クラックテンソル理論を用いた漏水発生箇所の予測

3.1 クラックテンソル理論の概要

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、漏水発生箇所の分析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)}を覆工に適用させた。

岩盤中のひび割れの密度や方向、幅が岩盤物性（変形係数・透水係数）に大きく影響することが知られている。岩盤工学の分野では、これら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。本節では、クラックテンソル理論をトンネル覆工に適用させ、覆工表面に発生したひび割れを透水係数で定量化することで覆工の漏水発生リスクを評価した。

3.1.1 クラックの定義

ここで、クラックが統計的に均一に分布する領域を仮定する。クラックは、クラック面に対して単位法線ベクトル n の方向を持つ、直径 r の円盤と定義し、ある任意の場所のクラックを、図-3.1のように表した。ただし、図中には、1つのクラックの表と裏に n と $-n$ の対をなす2つのベクトルを示しているが、これらをまとめて n と表すこととする。

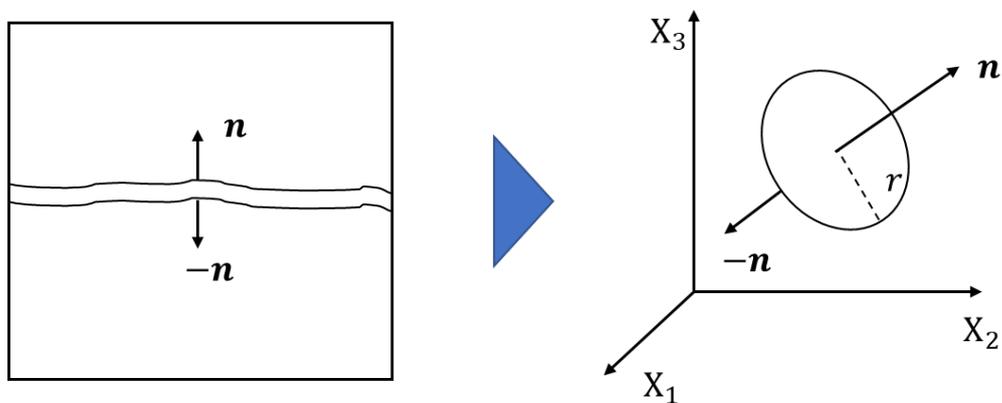


図-3.1 クラックの定義

3.1.2 覆工の劣化（ひび割れ）

クラックテンソルを算出する際に必要となる覆工のクラック情報を以下に列挙する.

- ・クラックの本数 n (本)
- ・クラックの開口幅 t (mm)
- ・クラックの方向 θ ($^{\circ}$)
- ・クラックの長さ r (m)

一方, 覆工ひび割れの代表的なパターンを図-3.2 に示す.

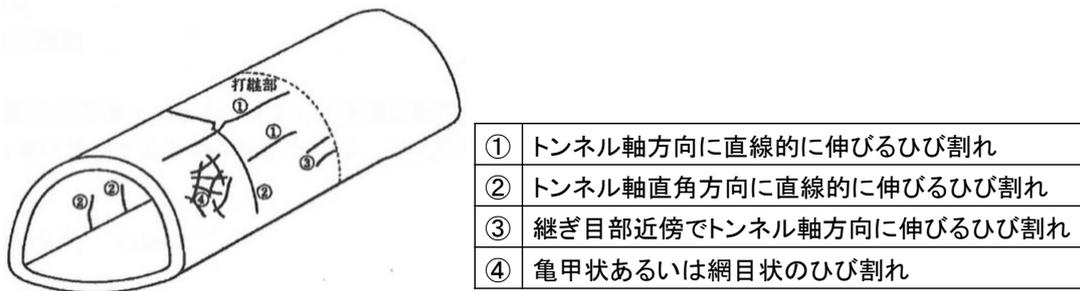


図-3.2 クラックの代表的なパターン

3.1.3 クラックテンソル

透水性に関する2階クラックテンソル P_{ij} の一般式は, 以下の形で定義される.

$$P_{ij} = \frac{\pi\rho}{4} \int_0^{r_m} \int_0^{t_m} \int_{\Omega} r^2 t^3 n_i n_j E(n, r, t) d\Omega dr dt \quad (1)$$

ここに, 式(1)の説明を以下に示す.

- ρ : ひび割れの体積密度
- r : ひび割れの直径の最大値
- t : ひび割れの開口幅の最大値
- $E(n, r, t)$: 確率密度関数
- Ω : 全立体角
- m : ひび割れの総和

図-3.3 のように覆工ひび割れの状況を2次元の平面に展開したものが, 覆工変状展開図となっている. そこで, 式(1)を2次元かつ和の式に変形したものを以下に示す.

$$P_{ij} = \frac{1}{A} \sum_{k=1}^m (t^{(k)})^3 (r^{(k)}) n_i^{(k)} n_j^{(k)} \quad (2)$$

ここに、式(2)の説明を以下に示す.

A : 1 スパン当たりの覆工の面積 (m²)

m : ひび割れの本数 (本)

$t^{(k)}$: ひび割れ k の長さ (m)

$r^{(k)}$: ひび割れ k の開口幅 (m)

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

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

式(2)によって求められたクラックテンソル P_{ij} から透水テンソル k_{ij} は、式(3)で表される.

$$k_{ij} = \frac{\lambda}{12} (P_0 \delta_{ij} - P_{ij}) \quad (3)$$

ここに、式(3)の説明を以下に示す.

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 ($i = j$ のとき $\delta_{ij} = 1$, $i \neq j$ のとき $\delta_{ij} = 0$)

λ : クラックの連結性に依存したスカラー量 ($0 \leq \lambda \leq 1$)

透水テンソルの式は、クラック網に水が流れるとき、水が受けるクラックの幾何学的特性による影響を表している。また、水の流れは以下の仮定を満足するものとする。

- ・水はクラックに沿ってのみ流れる。
- ・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。
- ・水頭の分布は十分なクラック密度のもとで一様とする。
- ・クラックの連結部における水頭損失は無視する。

さらに、ダルシー流速の透水係数 K_{ij} (m/sec) を式(4)により計算した。

$$K_{ij} = \frac{g}{\nu} k_{ij} \quad (4)$$

ここに、式(4)の説明を以下に示す.

g : 重力加速度9.81 (m/sec²)

ν : 動粘性係数 1.0×10^{-6} (m²/sec) (水温20°Cと仮定)

k_{ij} : 透水テンソル (m²)

式(5)で示す K_{11} 値は覆工に発生したひび割れのトンネル横断方向成分によって求められる透水係数、 K_{22} 値は覆工に発生ひび割れのトンネル縦断方向成分によって求められる透水係数であり、その和を K_0 として透水係数の評価値とする。

$$K_0 = K_{11} + K_{22} \quad (5)$$

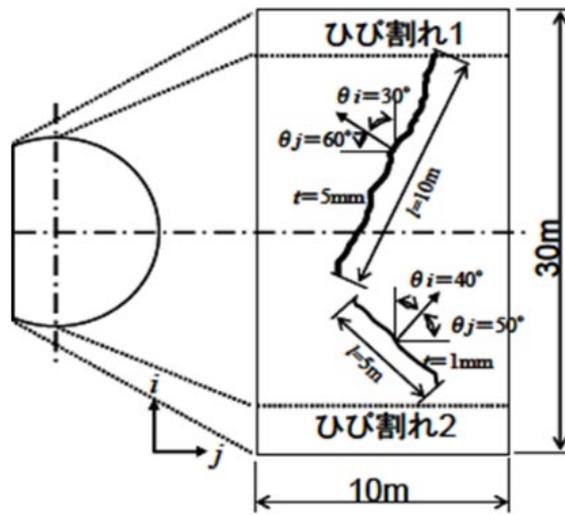


図-3.3 トンネル覆工におけるクラックテンソルの概念図

3-1-4 覆工における透水係数の算出例

図-3.4に示すようなクラックモデルのクラックテンソルと透水係数計算例を以下に示す。また、 K_0 は算出する覆工面の総和であるため、図-3.4に示すような範囲内の透水テンソルを算出する場合、この範囲内の K_0 値はひび割れ番号1、ひび割れ番号2の K_{11} 値と K_{22} 値を足し合わせる。以下にサンプルデータを用いた際の算出式を示す。

$$P_{11} = \frac{1}{10 \times 30} \times 0.001^3 \times 10 \times \cos 30^2 + \frac{1}{10 \times 30} \times 0.0005^3 \times 5 \times \cos 40^2$$
$$= 2.62 \times 10^{-11}$$

$$P_{22} = \frac{1}{10 \times 30} \times 0.001^3 \times 10 \times \sin 30^2 + \frac{1}{10 \times 30} \times 0.0005^3 \times 5 \times \sin 40^2$$
$$= 9.19 \times 10^{-12}$$

$$P_0 = P_{11} + P_{22} = 2.62 \times 10^{-11} + 9.19 \times 10^{-12} = 35.39 \times 10^{-12}$$

ここで、ひび割れがすべて連結していると仮定すると $\lambda = 1$

$$k_{11} = \frac{1}{12} \times (35.39 \times 10^{-12} - 26.2 \times 10^{-12})$$
$$= 7.66 \times 10^{-13}$$

$$k_{22} = \frac{1}{12} \times (35.39 \times 10^{-12} - 9.19 \times 10^{-12})$$
$$= 21.8 \times 10^{-13}$$

$$K_{11} = \frac{9.81}{1.0 \times 10^{-6}} \times (7.66 \times 10^{-13})$$
$$= 7.51 \times 10^{-6}$$

$$K_{22} = \frac{9.81}{1.0 \times 10^{-6}} \times (21.8 \times 10^{-13})$$
$$= 21.4 \times 10^{-6}$$

$$K_0 = K_{11} + K_{22} = 7.51 \times 10^{-6} + 21.8 \times 10^{-6}$$
$$= 28.91 \times 10^{-6}$$

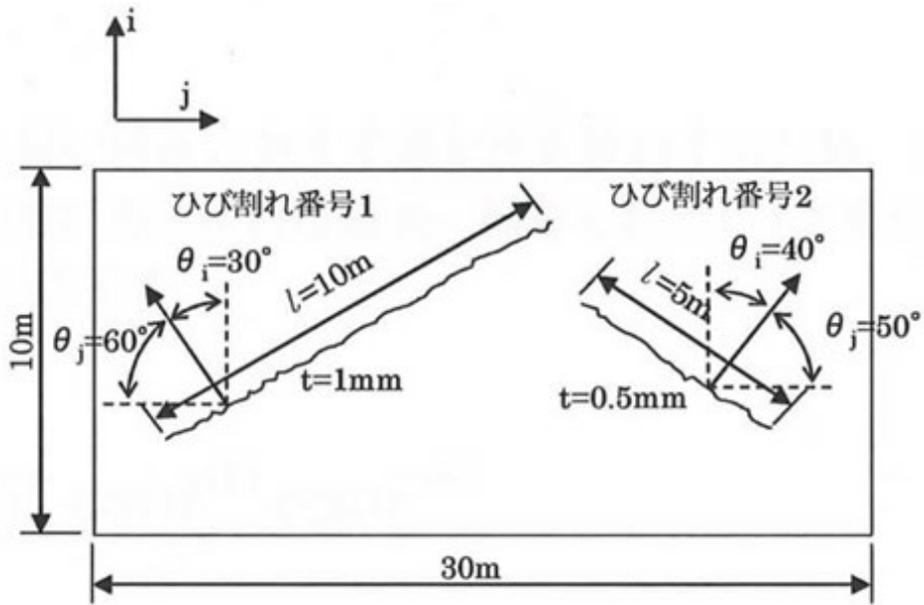


図-3.4 クラックのモデル図

3-2 供用中の道路トンネルへのクラックテンソル理論の適用

本節では、研究対象とした供用中の道路トンネルの概要と透水係数算出手順について述べる。

3-2-1 対象トンネルの概要

本研究では、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-3.1に示す。A～D, Fトンネルは山口県が管理するトンネル、Eトンネルは島根県が管理するトンネルである。今回対象としたトンネル6本のうち、NATMによって施工されたトンネルが1本、在来工法によって施工されたトンネルが5本である。漏水発生が比較的多い在来工法を中心に考察を行う。その中でもCトンネルの供用年数が一番長く、63年経過している。

表-3.1 対象トンネルの概要

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

3-2-2 覆工展開図を用いた透水係数算出手順

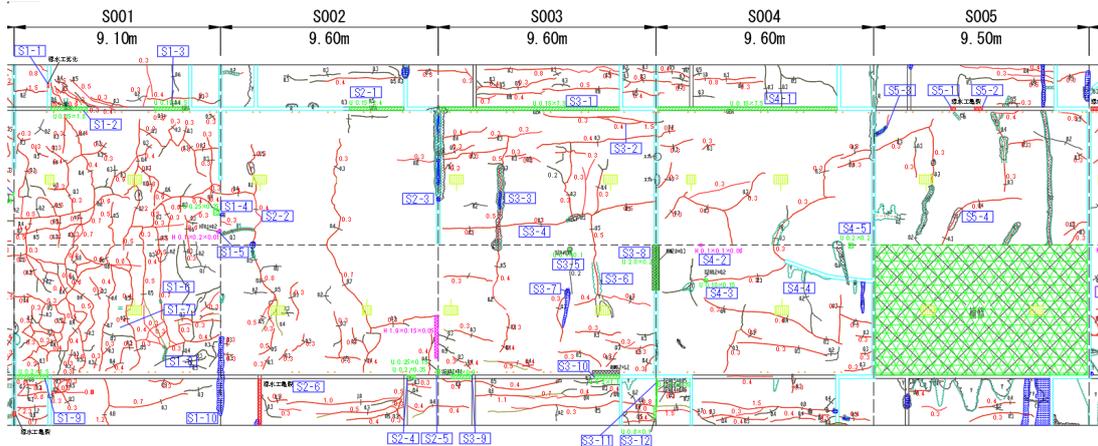
本研究では、クラックテンソル理論をトンネル覆工に適用させるにあたり、定期点検で得られる変状展開図に記載されているクラックの情報を使用する。ここで、覆工展開図とは点検結果をもとにトンネルの変状状況を示したもので、トンネル覆工の健全度を評価するために種々の評価マニュアルが事業者ごとに制定されており、それらのマニュアルの中で、クラック情報は健全度評価に重要な役割を果たしている。具体的にはひび割れや圧ざ、漏水の位置、パターン等をスパンごとに記載したもので、健全性評価に用いられている。一例として、トンネル D の 2017 年点検時におけるスパン No.1～No.5 の覆工変状展開図とその凡例を図-3.5 に示す。

透水係数を求める手順は以下の通りである。

- 1) 覆工変状展開図から一本一本のひび割れ情報（ひび割れ幅、長さ、角度）を読み取る。
- 2) 読み取ったひび割れ情報を 3-1-3 の式(1)～(3)に代入し、各ひび割れの透水係数を求める。
- 3) 1 スパンごとの透水係数を算出し、グラフ等に整理する。

ここで、トンネルにおける 1 スパンとは施工時に覆工コンクリートの打設間隔を示すものである。一般的にはスパン長 10.5m×覆工周長約 20m である。本研究では、この 1 スパンの面積を式(1)に代入し、1 スパンごとのひび割れ量から覆工の透水性を数値化している。

また、トンネル A のスパン No.5 のように、繊維シート等によって覆工に補修が施されている場合は、ひび割れはなくなったものとみなし、透水係数を 0 として算出している。しかし、補修を行っても補修箇所の劣化によって漏水等が再度発生し、つらら発生の原因となっているのが現状であり、今後は補修後も覆工の状況を経過観察できるような補修方法の実用化が課題である。



(a) Fトンネルにおける2017年点検時の覆工変状展開図（一部抜粋）

凡 例		補修・補強対策	
変 状			
-----	施工目地 / 打継目		化粧板
	ひび割れ (0.3mm) 未満		ひび割れ補修工(注入, 充填)
	ひび割れ (0.3mm) 以上 数値はひび割れ開口幅 (mm)		導水工
	段差 矢印側突出、数値は段差 (mm)		対策補修
	コールドジョイント		コケ
	圧ざ		照明月施設
	うぎ、剥離 (m×m) (ハンマー打診異常箇所)		非常用施設
	剥落 (剥落跡) (m×m)		附属物の損傷
	骨材の露出 (m×m)		写真番号
	漏水 (滴水以上 漏水量 \geq 1/分)		写真番号(附属物)
	漏水 (濡れている部分)		
	滞水、氷盤、沈砂 (○の厚さ cm)		
	溶脱物 (遊離石灰など)		
	堆砂		
	導水工の損傷 (亀裂、劣化、破損)		

(b) 凡例

図-3.5 覆工変状展開図例

3-3 対象トンネルにおける透水係数算出結果と考察

3-3-1 対象トンネルの透水係数算出結果

本研究で対象とした 6 本の道路トンネルに 3-2-2 の手順で透水係数を求めた結果を図-3.6～図-3.11 に示す。透水係数が比較的高いトンネルでは、縦軸のスケールを C トンネルでは 6000×10^{-5} 、E トンネルでは 140×10^{-5} 、そのほかのトンネルを 40×10^{-5} として表している。

これらの図より、トンネルによって透水係数の大きさから覆工スパンごとの経年変化やひび割れの進行性がみられ、同一のトンネル内においてもスパンごとで覆工の劣化による透水性が異なることがわかる。特に、C、E トンネルでは、局所的に透水係数が大きくなっていることから、トンネルに外力が働き発生したひび割れだと推察できる。C トンネルの 2 回目の点検時に透水係数が減少しているのは、覆工に補修工事が施されていたためである。

また B、C、F トンネルでは、2 回の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ため、透水係数が 2 回目の点検時のほうが減少しているスパンが存在することが確認できる。

このように、各トンネルのひび割れ発生状況を透水係数に換算することで、スパンごとのひび割れと漏水発生箇所の関係が視覚的に把握できるようになる。

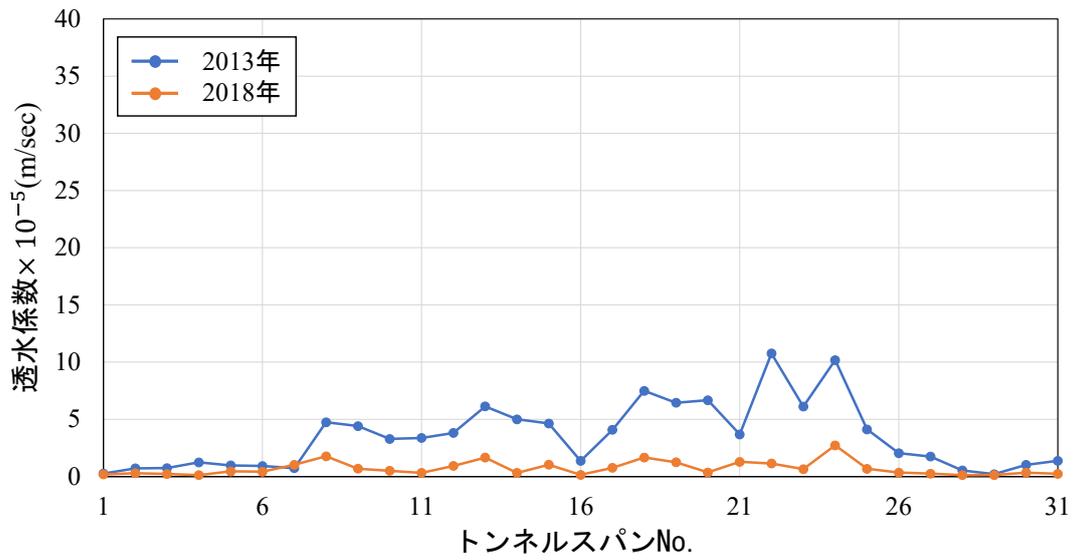


図-3.6 A トンネルの透水係数の算出結果

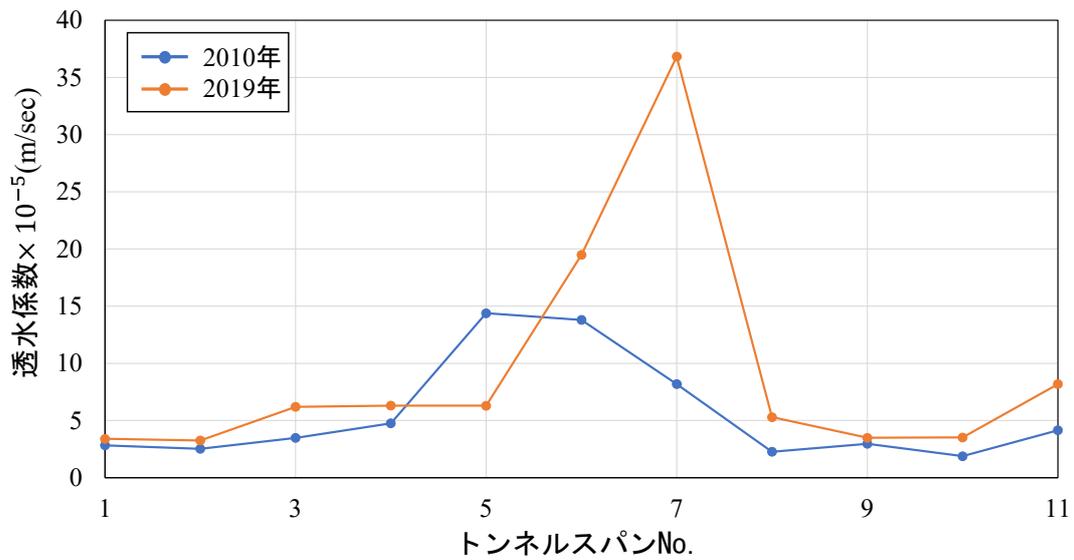


図-3.7 B トンネルの透水係数の算出結果

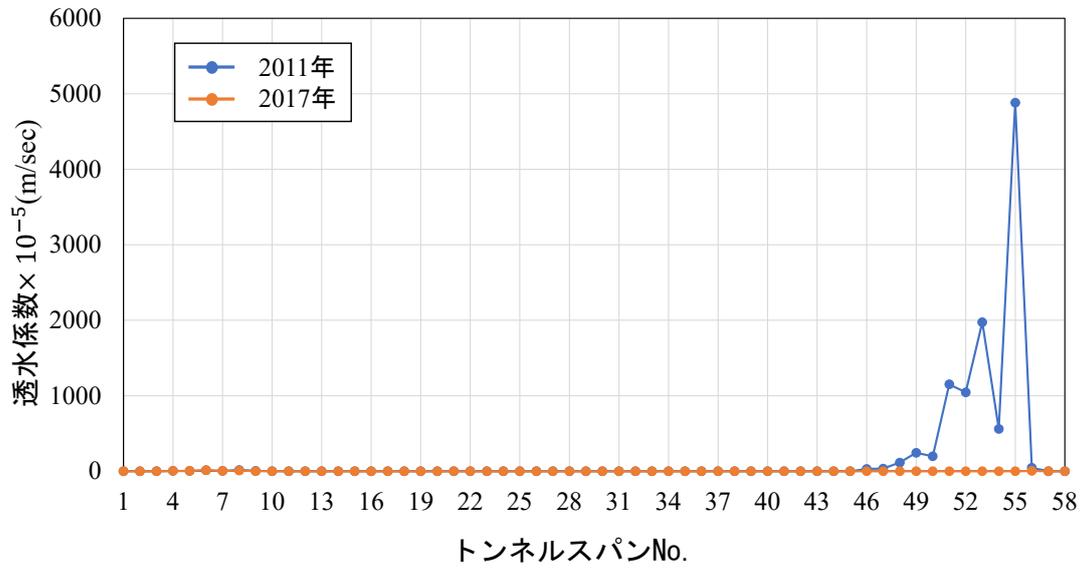


図-3.8 C トンネルの透水係数の算出結果

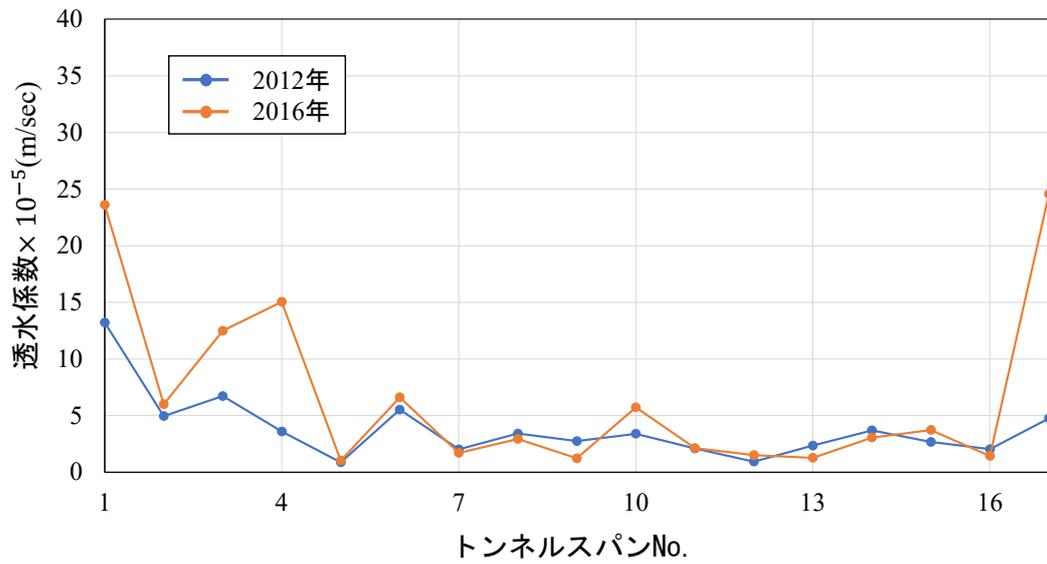


図-3.9 D トンネルの透水係数の算出結果

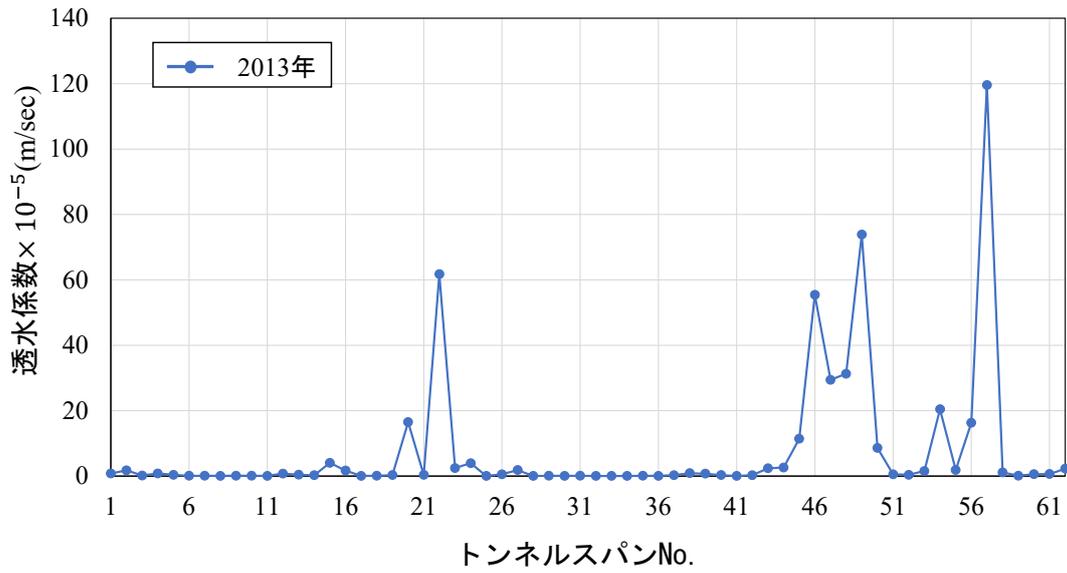


図-3.10 E トンネルの透水係数の算出結果

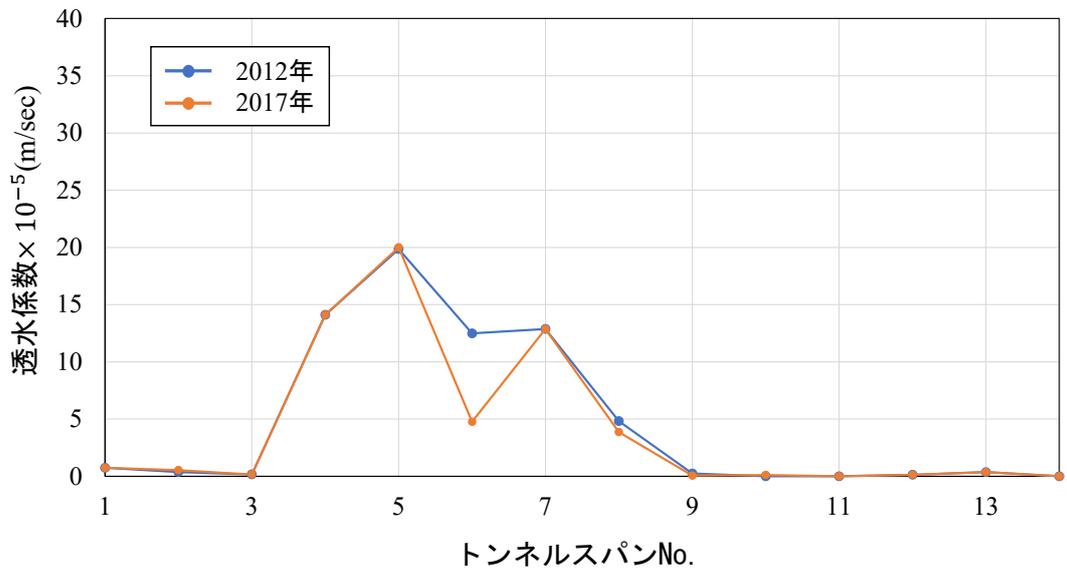


図-3.11 F トンネルの透水係数の算出結果

3-3-2 ひび割れ方向成分別の透水係数算出結果

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-3.2 に示す。

漏水の発生にひび割れの方向が与える影響を調べるため、B トンネルの補修工事前である 2010 年点検時のひび割れを、トンネル縦断方向成分と横断方向成分に分離して図-3.12 に示す。図-3.12 より、ひび割れ縦断方向成分と横断方向成分を比較すると、透水係数が縦断方向成分では、 $1.12\sim 12.7 (\times 10^{-5})$ 、横断方向成分では $0.158\sim 6.83 (\times 10^{-5})$ と全体的にひび割れ縦断方向の透水係数が大きいことが確認できる。

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-3.2 分類Ⅲの覆工の状態）B トンネルの 2010 年点検結果（図-3.13 参照）について考察した。漏水発生スパンに着目すると、漏水が発生しているひび割れがトンネル縦断方向のひび割れであることがわかる。また、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-3.14 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、縦断方向性成分が 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と考えられる。

表-3.2 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

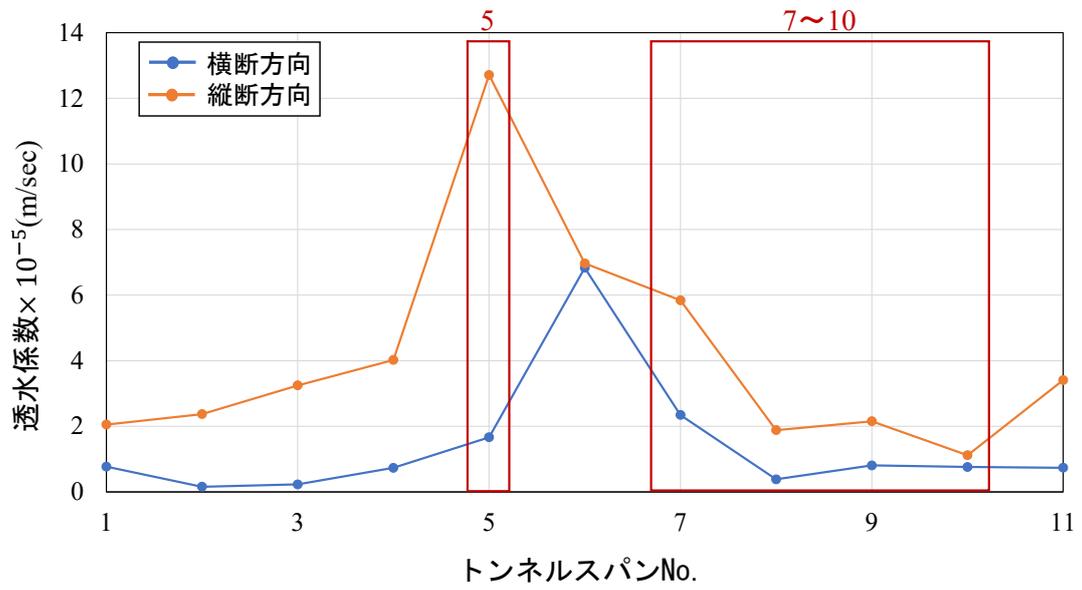


図-3.12 B トンネルひび割れ方向成分別透水係数

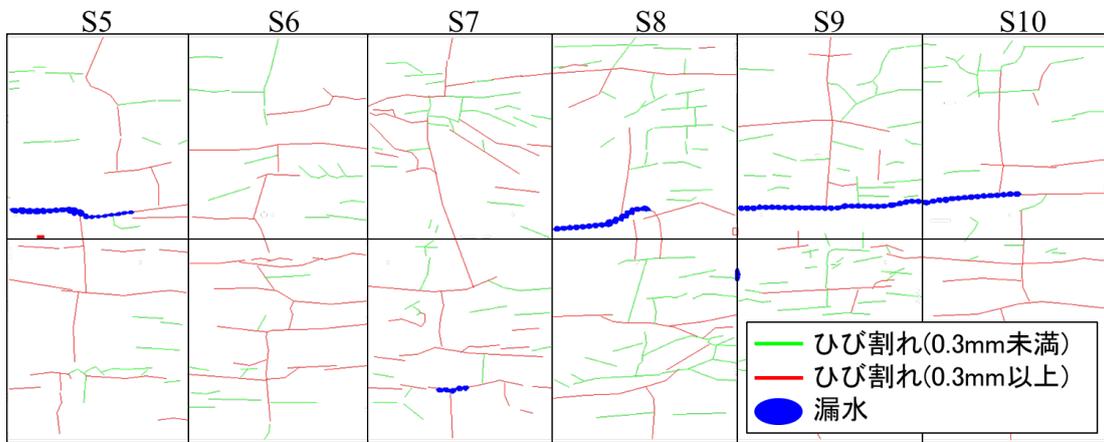


図-3.13 B トンネル覆工変状展開図 (2010年点検時)

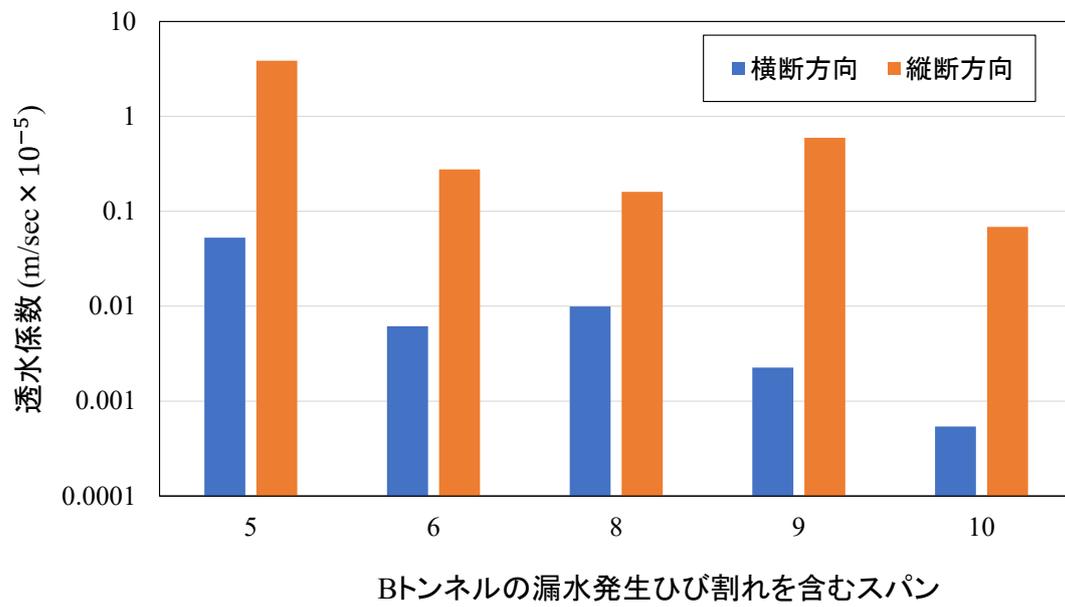


図-3.14 漏水発生ひび割れの方向成分別透水係数

3-3-3 漏水発生ひび割れ特性の分析

漏水が発生した覆工のひび割れ特性を分析するため、A～Fトンネルにおける覆工のひび割れをトンネルの縦断方向と横断方向に分けて透水係数を求め、分析を行った。A～Fトンネルのスパンごとに求めた透水係数を図-3.15に示す。この図ではひび割れを縦断方向成分と横断方向成分に分けて透水係数を求め、常用対数に換算している。また、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）を青、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）を橙でプロットした。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。

図-3.15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。このことから、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高いものと評価できる。なお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であることから、貫通ひび割れが多く存在するものと考えられる。

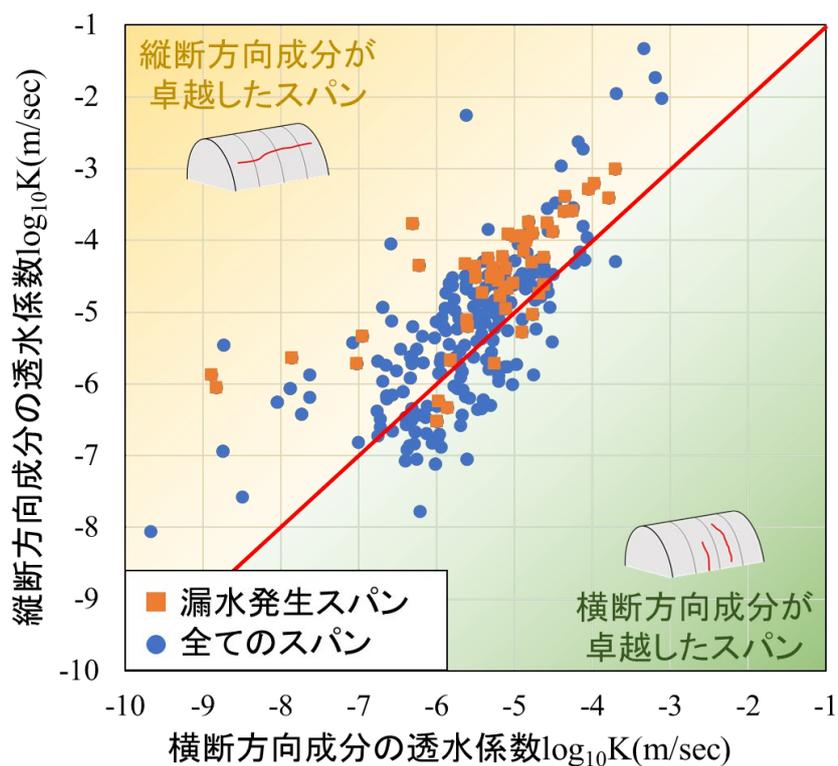


図-3.15 6トンネルのひび割れ方向成分

3-4 透水係数による漏水発生ひび割れを有するスパンの分析

次に漏水発生スパンの分析のため、正規分布を用いた漏水発生リスクの評価を行った。全てのスパンにおける透水係数の算出結果を図-3.16に示す。この図は縦軸の主軸にスパン数、副軸に頻度、横軸が透水係数の常用対数で示すヒストグラムと正規分布を表している。この二つのグラフを比較すると、ヒストグラムは青線の正規分布に概ね従うことが確認できる。

そこで全てのスパンと漏水発生スパンの正規分布を比較した。全てのスパンの透水係数を青線、漏水発生スパンの透水係数を橙線に正規分布で図-3.17に示す。図-3.17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-4.23以上の割合は20.3%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ものと推察される。すなわち、常用対数-4.23を換算した透水係数 8.28×10^{-5} (m/sec)以上を示す覆工スパンでは漏水発生リスクが高いものと推察される。

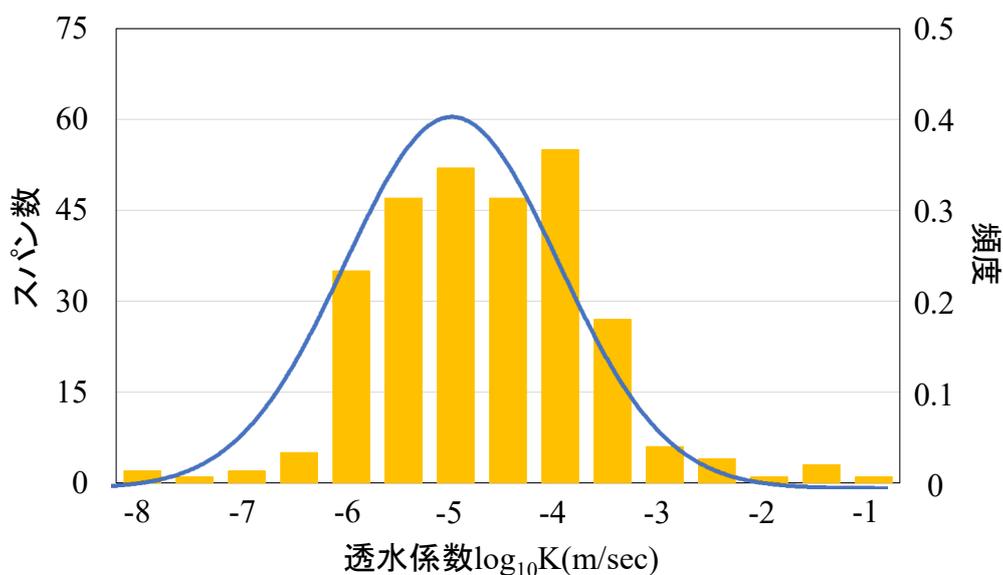


図-3.16 6トンネルにおける透水係数のヒストグラム

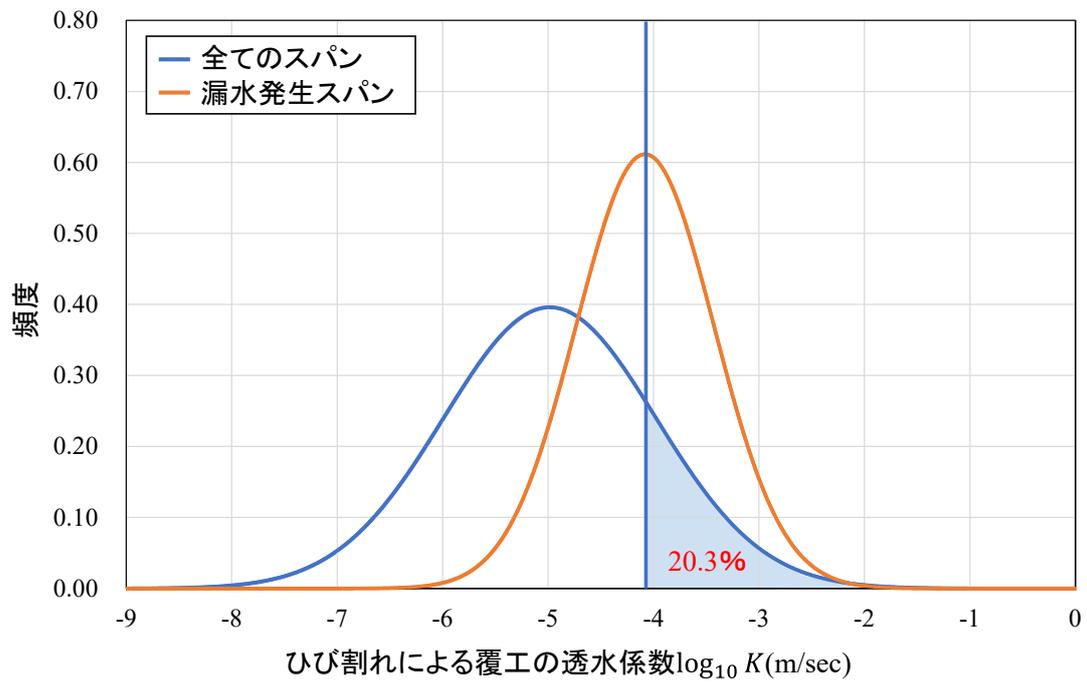


図-3.17 透水係数の正規分布

3-5 透水係数による漏水対策工が施工されたスパンの分析

漏水発生リスク評価の検証のため、覆工に漏水対策工が施されていた箇所に着目し、正規分布による比較を行った。B, C, F トンネルでは、2回の定期点検の間にひび割れに対して漏水対策工が施されていた。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求めた。漏水対策工が施されたスパンにおける透水係数の正規分布を灰色線で図-3.18に示す。この結果より、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

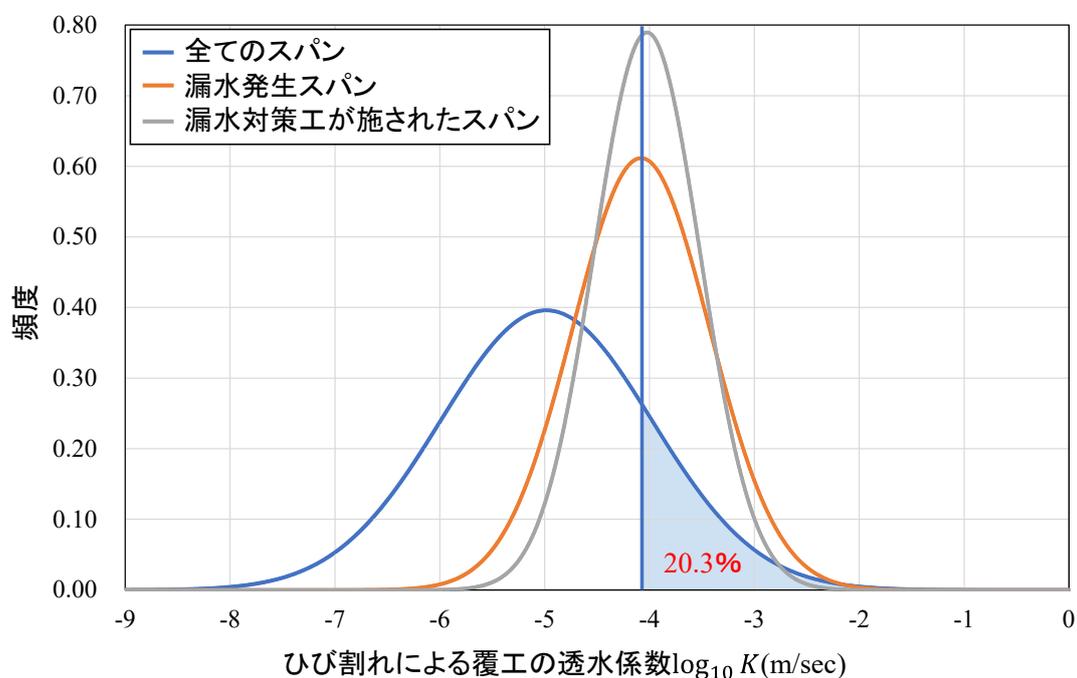


図-3.18 漏水補修工事が施された覆工スパンにおける透水係数の正規分布

3-6 3章のまとめ

本章では、クラックテンソル理論をトンネル覆工コンクリートに適用させ、覆工コンクリートに生じたひび割れから透水係数を算出し、漏水発生リスクの評価を行った。

その結果、漏水が発生したスパンはひび割れが縦断方向に卓越したスパンが比較的多く、ひび割れ縦断方向によって生じる透水係数と漏水発生に相関性が高い。さらに求めた透水係数を正規分布で表し比較した結果、透水係数が 8.28×10^{-5} (m/sec) 以上を示す覆工スパンでは漏水発生リスクが高いことが評価できる。

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, pp.1-10, 2015.

第4章

現場計測に基づくつらら発生日の予測

4-1 計測概要

本節では、つらら発生が確認されたトンネルを対象に計測を行い、その分析結果について述べる。

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（-4.1 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。各トンネルの詳細を表-4.1にまとめる。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し（-4.2）、10minごとの気温を測定した。測定期間は2020年12月から2022年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発生日及び発生位置等の発生状況を-4.3に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地点に設置した測定機器で記録された気温の分析を行った。

ちなみに、計測期間における1日の平均気温の推移を-4.4に示す。この図から1月6日～1月12日、1月17日～1月20日をはじめ、計26日間で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分ごとの気温の推移を-4.5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。



図-4.1 つらら発生状況

表-4.1 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	漏水判定区分
Gトンネル	110	13	1985	在来工法	2013, 2018	IIa
Hトンネル	194	22	1977		2016	II

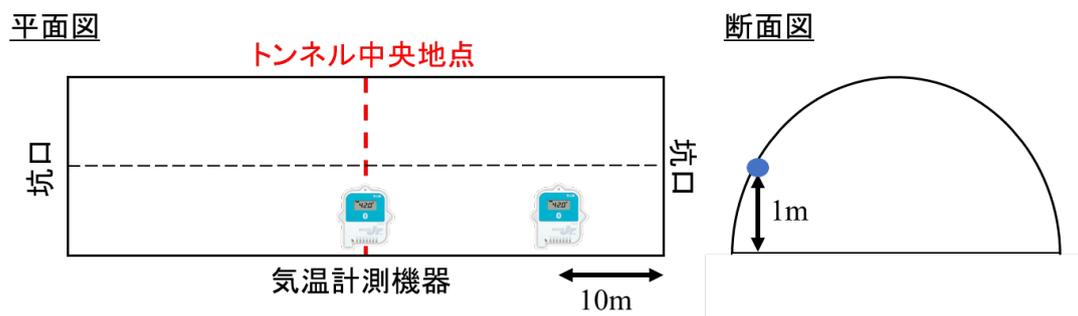


図-4.2 測定機器の設置箇所

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	<p>S.L.</p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td></td> <td>◎3</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>○1 ×1</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>○2 ×2</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>×2</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>○2</td> <td></td> </tr> <tr> <td></td> <td></td> <td>○2</td> <td></td> </tr> </table> <p>C.L.</p> <p>S.L.</p>					◎3				○1 ×1				○2 ×2				×2				○2				○2	
			◎3																								
		○1 ×1																									
		○2 ×2																									
		×2																									
		○2																									
		○2																									
三次側	<p>S.L.</p> <table border="1"> <tr> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table> <p>C.L.</p> <p>S.L.</p> <p>スパン境界 スパン境界 スパン境界</p>																										
坑口部写真		作業日、作業場所（出雲側or三次側）が分かるように保存いただければ、データ貼り付けは大学・高専で行います。																									
出雲側			三次側																								
																											

図-4.3 つらら発生状況記録用紙

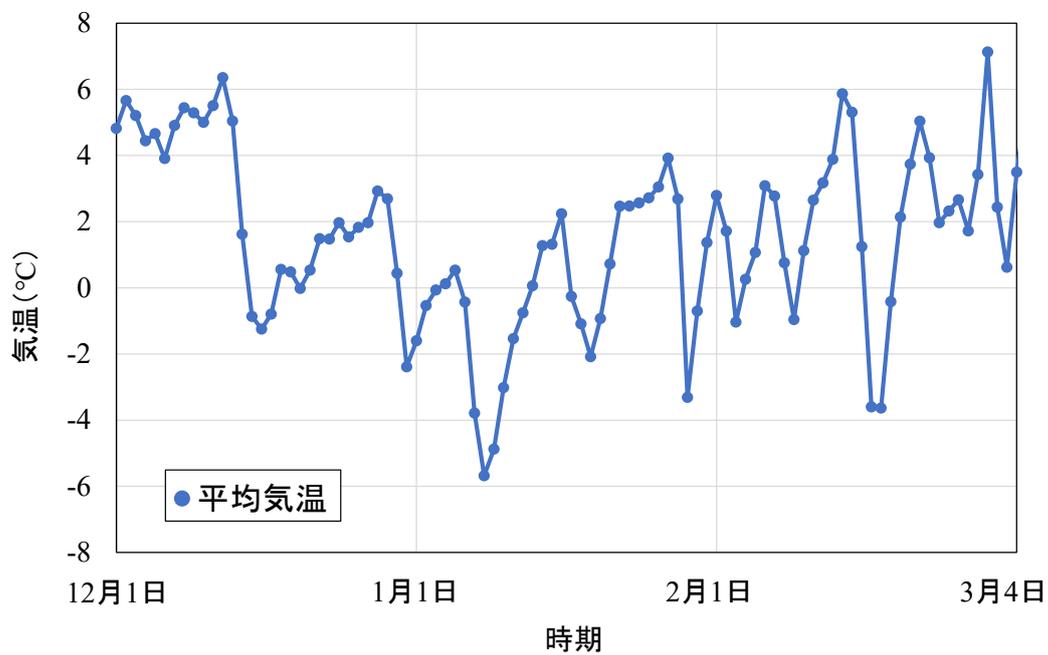


図-4.4 12月～3月までの平均気温

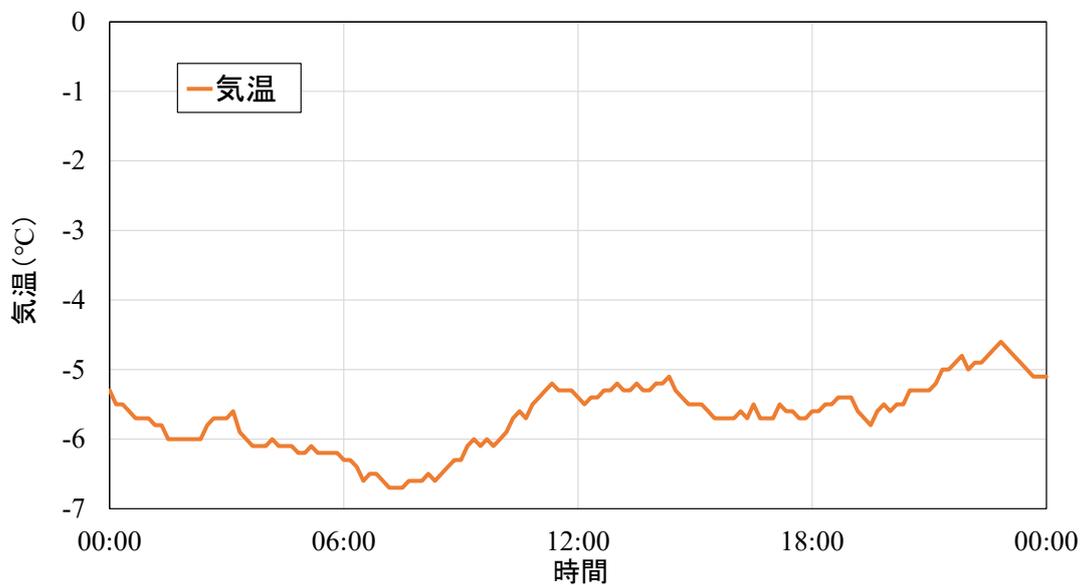


図-4.5 1月8日の気温の経時変化

4-2 計測結果

本節では、トンネル坑内の計測結果に基づくつらら発生の分析を行った。

4-2-1 つらら発生箇所と計測位置の違いによる坑内気温の差

今回対象とした2つのトンネルのなかでも、Gトンネルでは特に多くつららが観測されたため、Gトンネルにおけるつらら発生エリアをGトンネルの覆工変状展開図上（図-4.6参照）に示す。図-4.6には覆工のひび割れや補修箇所の劣化等から発生した漏水箇所と各スパンにおける透水係数を算出した結果を示した。ここで、表-4.1にも示したようにGトンネルの点検時（7月）の漏水判定区分はⅡaとなっている。ここから、覆工のひび割れから算出した透水係数からも漏水発生リスクの考えらえるスパンがトンネル坑口から中央にまで確認できた。また、覆工変状展開図からもトンネル全体で漏水が発生していることが確認できるにも関わらず、トンネル坑内で発生したつららは坑口から4m～25mに限定されている。

そこで、Gトンネルの坑口から10m地点と坑口から55m地点におけるつららが確認された24日間の平均気温の推移を図-4.7、図-4.8に示す。この図より坑口から10m地点と55m地点の坑内気温、覆工内温度ともに朝方にかけて気温が低下していることが確認できる。しかし、どの時間帯においても計測した気温が坑口10m地点のほうが1℃低いことがわかる。これは、坑口付近のほうが外気温の変化の影響を受けやすいことを示しており、この差がつらら発生の有無に関係していることが考えられる。

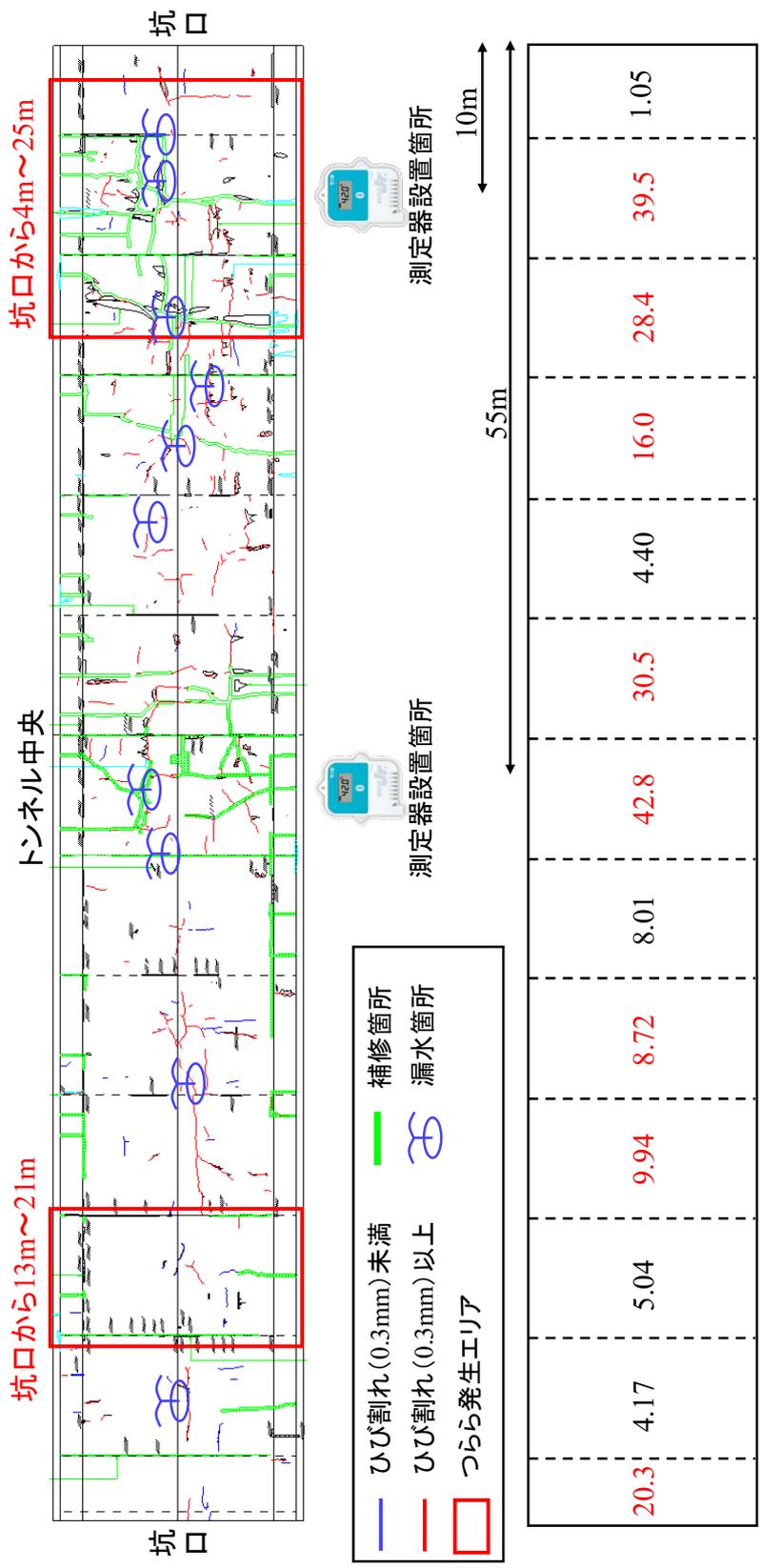


図-4.6 Gトンネルの覆工変状展開図とスパンごとの透水係数

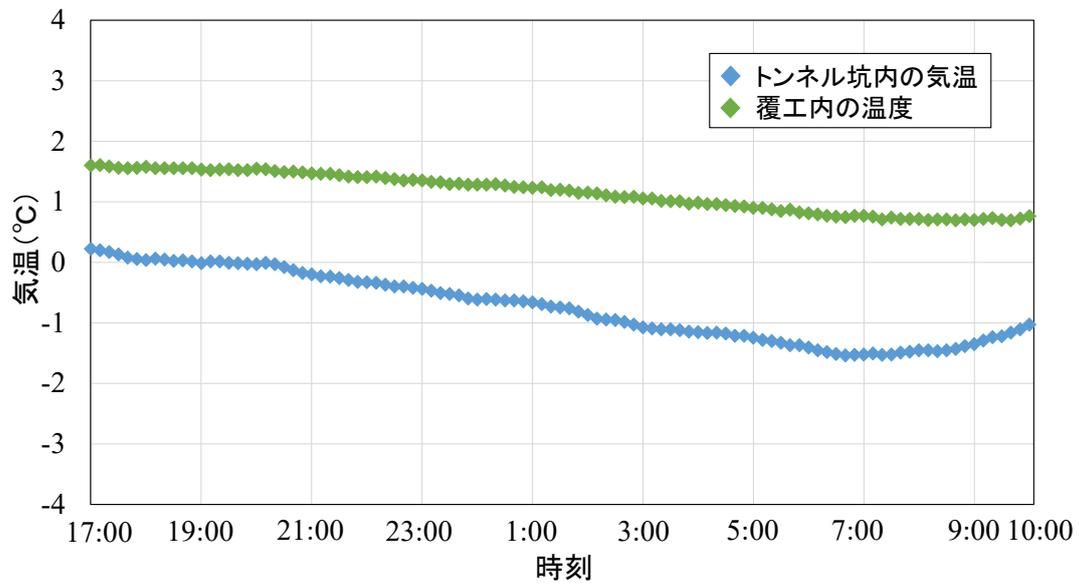


図-4.7 トンネル坑口から 55m 地点における平均気温の推移

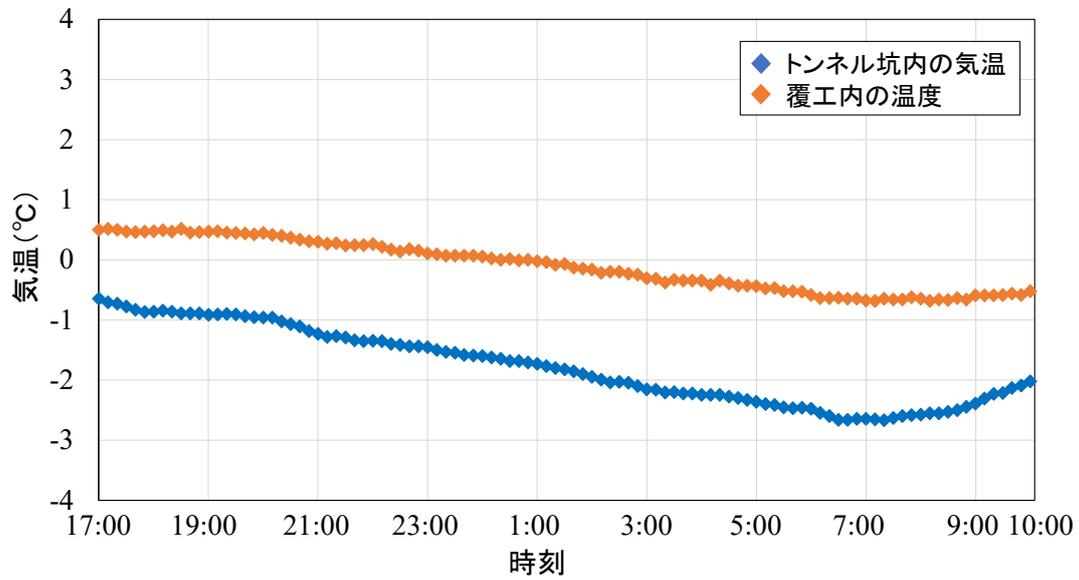


図-4.8 トンネル坑口から 10m 地点における平均気温の推移

4-2-2 つらら発生日における坑口付近の気温の推移

Gトンネル坑内におけるつららが発生した24日間における気温の経時変化を図-4.9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、前日の午前6時からつらら観測日の午前6時までの気温の記録を「つらら発生日」と定義した。図-4.9に示す結果では、各つらら発生日において気温の推移にばらつきがみられる。

そこで、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、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-4.10に示す。この図では、1月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している。また、凍害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。

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が示唆された結果である。

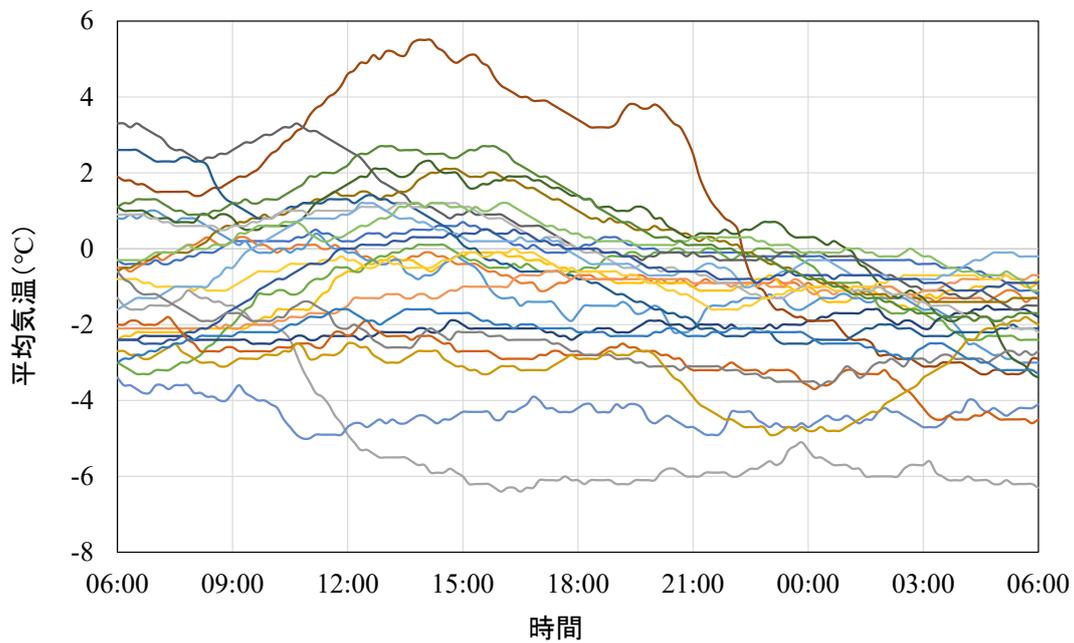


図-4.9 つらら発生日の気温の推移

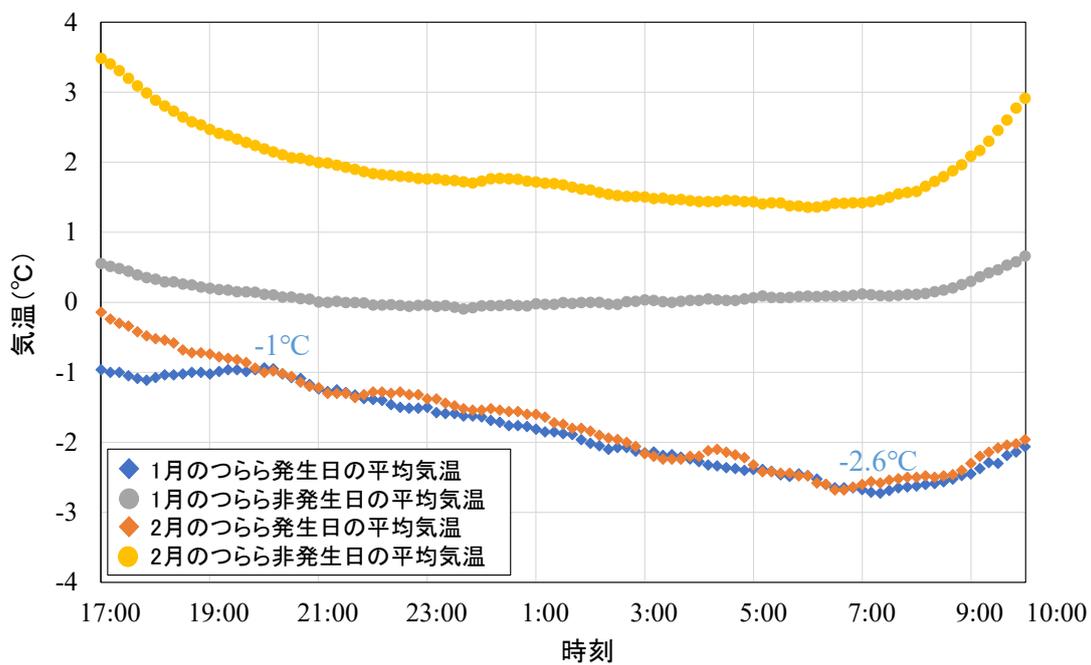


図-4.10 トンネル坑内の10分ごとの平均気温の経時変化

4-2-3 坑内の積算温度におけるつらら発生の分析

前項でつらら発生日における気温の推移にはばらつきがみられたため、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、Hトンネルの各時間帯における積算温度の相関性（図-4.11，図-4.12参照）を調べた。ここで、本研究における積算温度とは計測で得られた10minごとの気温を積算したものである。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 $-4230\sim 5860^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}$ 、夜間の積算温度が $-4310\sim 5070^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}$ を示した。また、つらら発生日に着目すると日中の積算温度が $-2930\sim 2530^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}$ とばらつきがみられたのに対して、夜間の積算温度が $-4310\sim -68^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}$ とマイナスの積算気温が大半を占めた。このことから、つらら発生には夜間の積算温度が影響を与えていることがわかった。

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

Hトンネルのつらら発生日では、日中の積算温度が $-2450\sim 3031^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}$ 、夜間の積算温度が $-4107\sim 589^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}$ を示した。Hトンネルの計測結果では、つらら発生日の積算温度に幅があることとつらら発生回数が少ないことから、積算温度の幅からは影響の有無は確認できない。

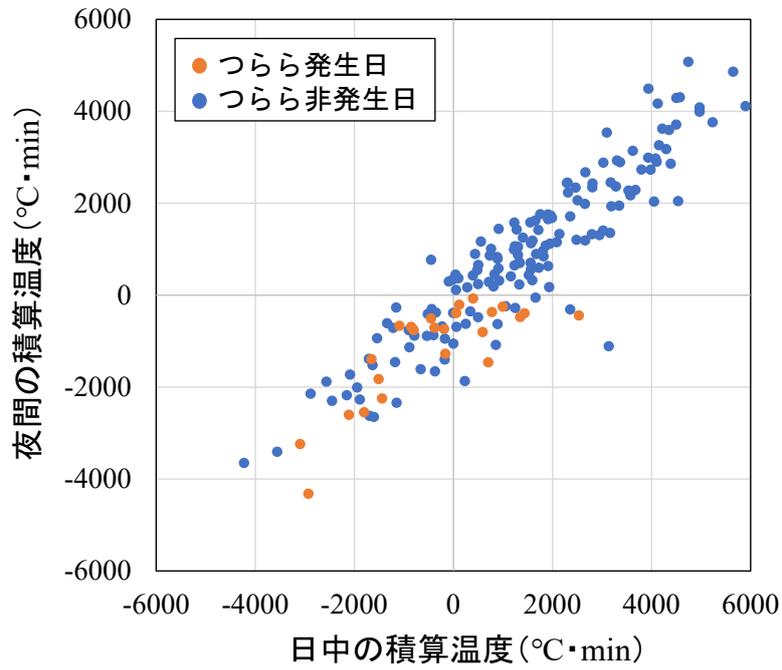


図-4.11 Gトンネルにおける日中積算気温と夜間積算気温の関係

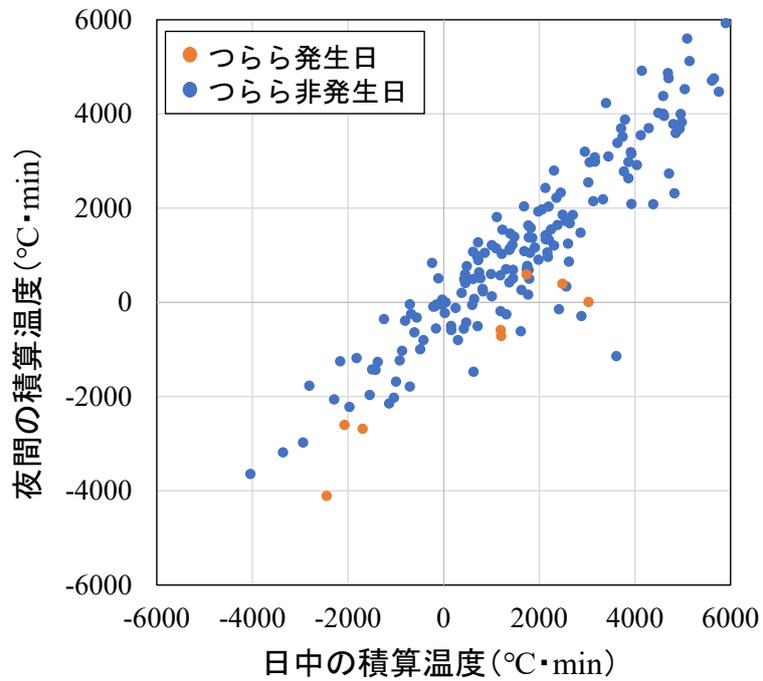


図-4.12 Hトンネルにおける日中積算気温と夜間積算気温の関係

4-3 重回帰分析を用いたつらら発生日の予測

つらら発生のリスクを高めると考えられる様々な要因を複合的に分析したうえで、本研究の目的である冬期におけるトンネル維持管理作業の効率化を図るため、統計ソフトウェア JMP Pro 16 を利用し、最小二乗法による重回帰分析を適用し、予測式の導出を試みた。

4-3-1 重回帰分析の適用

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 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ との関係式が式(3)のような関数により表現できる。

$$P(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + \dots + b_nx_n \quad (3)$$

ただし、 b_0 は切片であり、 $b_{1\sim n}$ 偏回帰係数である。確率 P は0と1の間の値(0%~100%)をとる。重回帰分析では現象の有無と説明変数の値 $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ が明らかになっているデータから $b = (b_0, b_1, \dots, b_n)$ を求めることである。主に医療分野で用いられることがあり、患者の陽性率、陰性率を求める場合に用いられる。土木の分野では地震発生時のトンネル被災に関する統計分析のために用いられている。重回帰分析の適用フローを図-4.13に示す。

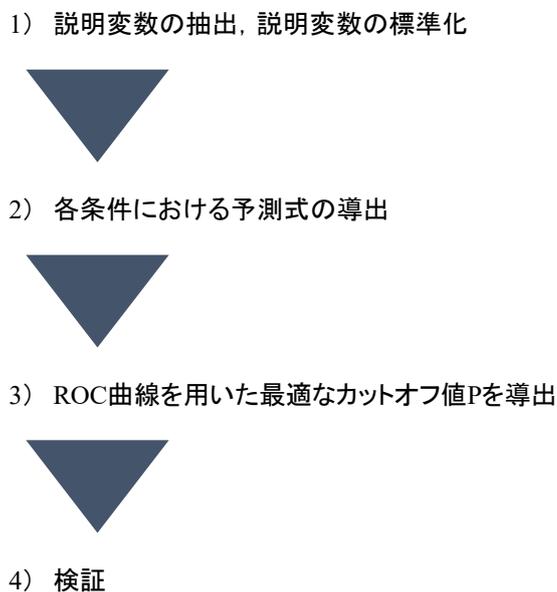


図-4.13 ロジスティック回帰分析の適用フロー

4-3-2 予測式の検証

a) 夜間の積算温度による予測式

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18時から0時までの積算温度」、「つらら発生日0時から6時までの積算温度」に加えて「つらら発生前日のつらら除去作業の有無」を抽出した。つらら発生確率の予測式を式(4)に示す。平均値と標準偏差を基に標準化した積算温度 (x_1 , x_2) を用い、つらら除去作業の有無 (x_3) は有 : 0, 無 : 1と設定した。また、本研究の重回帰分析によって得られた偏回帰係数を表-4.2に示す。

$$P = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 \quad (4)$$

ここで、 P : つららの発生確率

x_1 : 18時から0時の積算温度の標準化した値

x_2 : 0時から6時の積算温度の標準化した値

x_3 : つらら除去作業の有無

予測式の検証方法として表-4.3に示す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-4.3に示す式から各カットオフ値の「感度」、「特異度」を求めた。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確率、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確率となる。ここで最適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（感度が1、1-特異度が0）に最も近い点に対応する。G、HトンネルのROC曲線を図-4.13、図-4.14に示す。

設定したカットオフ値をもとに対象としたGトンネル、Hトンネルの重回帰分析による予測結果を表-4.4、表-4.5に示す。ここで正解数を全体数で除した一致率が75%を超えると一般的に有効な予測結果とされる⁶⁾。予測結果はGトンネルの一致率が76.7%、Hトンネルの一致率が82.7%を示したため、有効な予測結果と評価できる。

また、予測値における一番寄与度の高い説明変数は「つらら発生日0時から6時までの積算温度」であり、夜間から朝方にかけての気温がつらら発生に大きく影響を与えていることが考えられる。

表-4.2 偏回帰係数

	Gトンネル	Hトンネル
b_0	0.070	-0.047
b_1	0.14	0.20
b_2	-0.28	-0.26
b_3	0.074	0.096

表-4.2 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 = $\frac{\text{真つらら非発生日数}}{\text{偽つらら発生日数} + \text{真つらら非発生日数}}$			

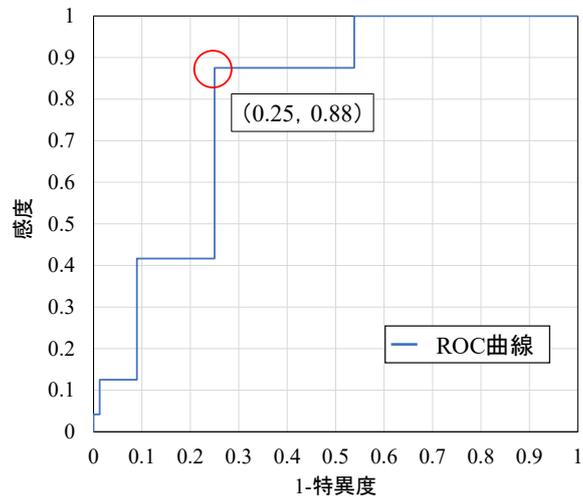


図-4.13 GトンネルにおけるROC曲線

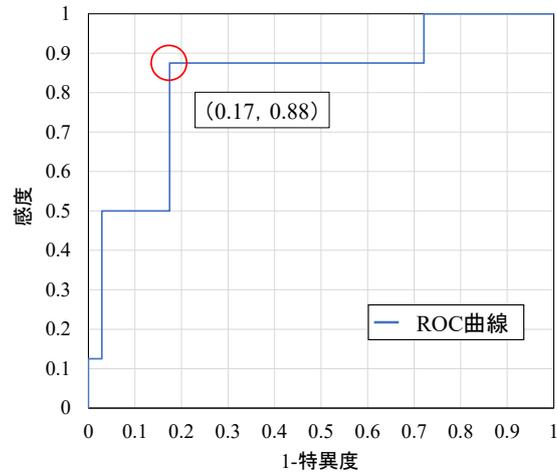


図-4.14 Hトンネルにおける ROC 曲線

表-4.3 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	21日	36日
	非発生	3日	117日
一致率 = $\frac{21+117}{180} \times 100 = 76.7\%$			

表-4.4 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	30日
	非発生	1日	142日
一致率 = $\frac{7+142}{180} \times 100 = 82.8\%$			

b) 夜間の積算温度を4分割

a)では、つらら発生前日18時からつらら発生日の6時までの積算温度を6時間ごとに分けて分析を行った。本項では、つらら発生に影響を与える時間帯の調査と予測精度の向上のため夜間の12時間を4分割し、説明変数として検証した。

説明変数として、「つらら発生前日の18時から21時までの積算温度」、「つらら発生前日の21時から0時までの積算温度」、「つらら発生日0時から3時までの積算温度」、「つらら発生日3時から6時までの積算温度」に加えて「つらら発生前日のつらら除去作業の有無」を抽出した。得られた偏回帰係数を表-4.5に示す。a)で示した算出方法と同様にROC曲線を用いて最適なカットオフ値を設定した。GトンネルにおけるROC曲線を図-4.15に示す。Gトンネル、Hトンネルにおける予測結果を表-4.6と表-4.7に示す。予測結果はGトンネルの一致率が76.1%、Hトンネルの一致率が80%を示したため、a)と同様に有効な予測結果と評価できる。しかし、a)よりも一致率が低下していることが確認できる。これは、夜間の積算時間を細分化することで、つらら発生日と非発生日の差が小さくなり予測精度の低下につながったことが考えられる。

また、予測値における一番寄与度の高い説明変数は「つらら発生日3時から6時までの積算温度」であり、つらら除去作業を行う3時間前までの時間帯の積算温度がつらら発生に影響を与えることが考えられる。

表-4.6 偏回帰係数

	Gトンネル	Hトンネル
b_0	0.075	-0.047
b_1	0.16	0.18
b_2	-0.26	-0.13
b_3	0.34	0.16
b_4	-0.39	-0.27
b_5	0.067	0.091

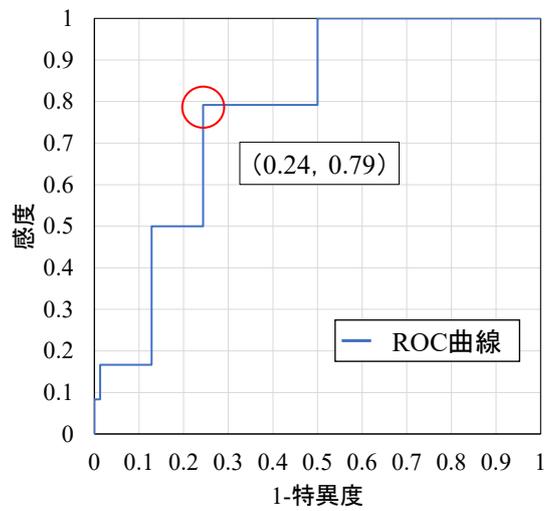


図-4.15 ROC 曲線

表-4.6 G トンネルの予測結果

		つらら発生の有無	
		発生	非発生
予測	発生	19日	38日
	非発生	5日	118日
一致率 = $\frac{19+118}{180} \times 100 = 76.1\%$			

表-4.7 H トンネルの予測結果

		つらら発生の有無	
		発生	非発生
予測	発生	8日	36日
	非発生	0日	136日
一致率 = $\frac{8+136}{180} \times 100 = 80\%$			

c) 日中の積算気温

日中の積算温度マイナスの場合、凍ってしまった覆工背面の地下水が溶けずにつららが発生しないことが考えられたため、日中の積算温度を説明変数に加えた予測式を求めて検証を行った。説明変数として、「つらら発生前日の18時からつらら発生日の6時まで夜間の積算温度」、「つらら発生前日の6時から18時までの日中の積算温度」に加えて「つらら発生前日のつらら除去作業の有無」を抽出した。重回帰分析によって得られた偏回帰係数は表-4.8に示す。a)で示した算出方法と同様にROC曲線を用いて最適なカットオフ値を設定した。GトンネルにおけるROC曲線を図-4.16に示す。Gトンネル、Hトンネルにおける予測結果を表-4.6と表-4.7に示す。予測結果はGトンネルの一致率が77.2%、Hトンネルの一致率が72.8%を示したため、Gトンネルでのみ有効な予測結果と評価できる。Gトンネルでは予測結果の向上がみられたが、Hトンネルでは予測結果が著しく低くなったことが確認できた。これはGトンネルに比べてHトンネルの日中の積算温度がマイナスの場合が少ないため、覆工背面の地下水が凍らなく予測結果が低くなったことが考えられる。

表-4.8 偏回帰係数

	Gトンネル	Hトンネル
b_0	0.042	-0.021
b_1	-0.22	-0.17
b_2	0.080	0.13
b_3	0.076	0.068

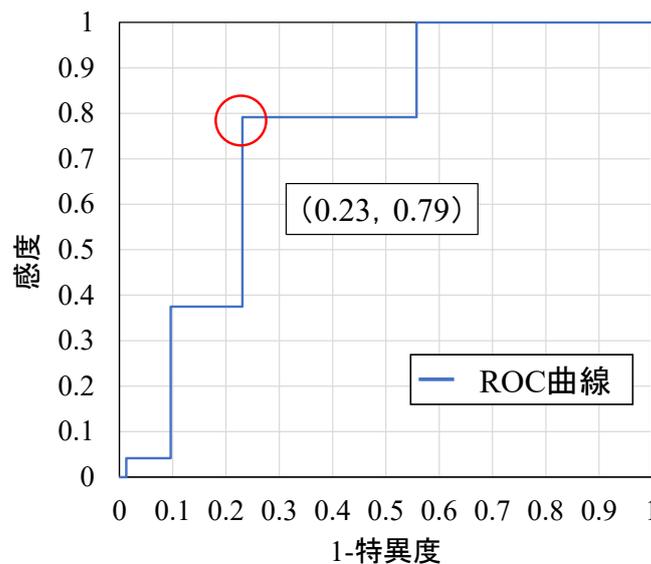


図-4.16 GトンネルにおけるROC曲線

表-4.9 Gトンネルの予測結果

		つらら発生の有無	
		発生	非発生
予測	発生	19日	36日
	非発生	5日	120日
一致率 = $\frac{19+120}{180} \times 100 = 77.2\%$			

表-4.10 Hトンネルの予測結果

		つらら発生の有無	
		発生	非発生
予測	発生	8日	49日
	非発生	0日	123日
一致率 = $\frac{8+123}{180} \times 100 = 72.8\%$			

4-4 予測式の有用性の検証

前項で検証した結果、a), b), c) の中でも特に a) で求めた予測結果の一致率が有効的な数値を確認できたため、a) で求めた 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を予測を行い、予測式の検証を行った。検証フローは同様に ROC 曲線 (図-4.16 参照) 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 トンネルに適用した結果 (表-6 参照)、一致率が 88.9% を示しており比較的予測精度の高い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を予測できるものと考えられる。

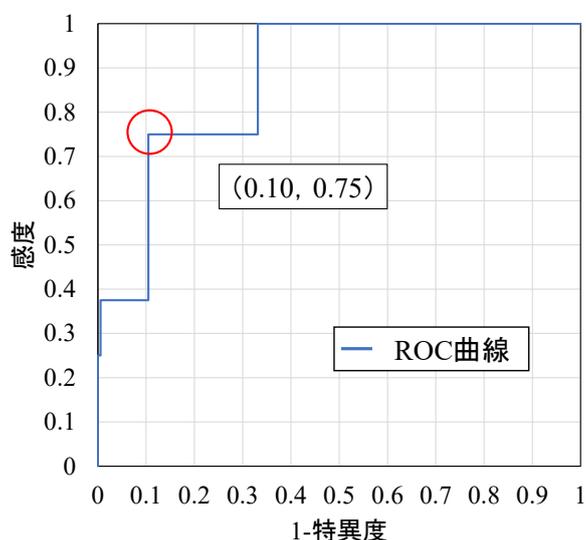


図-4.17 G トンネルの予測式を H トンネルに適用したときの ROC 曲線

表-4.11 G トンネルの予測式を H トンネルに適用した予測結果

		つらら発生の有無	
		発生	非発生
予測	発生	6日	18日
	非発生	2日	154日
一致率 = $\frac{6+154}{180} \times 100 = 88.9\%$			

4-5 4章まとめ

本章では、トンネル坑内計測結果に基づく重回帰分析を適用したつらら発生予測を行った。

Gトンネルにおいて、坑内全体で漏水が発生していたにも関わらず、トンネル坑口付近でつらら発生が確認されていた。これはトンネル中央とトンネル坑口付近における平均気温の差が関係していることがわかった。また、坑口付近に設置した計測結果から積算温度を求めると、つらら発生には夜間における積算温度が大きく影響していることがわかった。

このことから、積算温度を説明変数とした重回帰分析によるつらら発生の予測式の求め、予測結果の検証を行った。その結果、75%を越える有効な予測結果を算出することができ、このことから夜間におけるトンネル坑内の積算温度が一つの評価指標となることがわかる。

第 5 章

室内実験によるつらら発生要因の分析

5-1 実験の目的と概要

4 章よりトンネルの計測結果に基づく重回帰分析から、つらら発生には夜間の積算温度が強く関与すると推定され、積算温度がつらら発生・成長に与える影響因子を把握するため、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-5.1 に示す。つららが発生する覆工からの漏水の流速は低速であることから、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 の範囲で長時間一定に保つことができる。本研究では、8～57mL/sec の範囲で行った。供給用ビーカー内の水温は平均 25℃である。図-5.1 に示すように、つららは水平に張っ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計測で用いた機器と同様の機器を用い、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計測した。

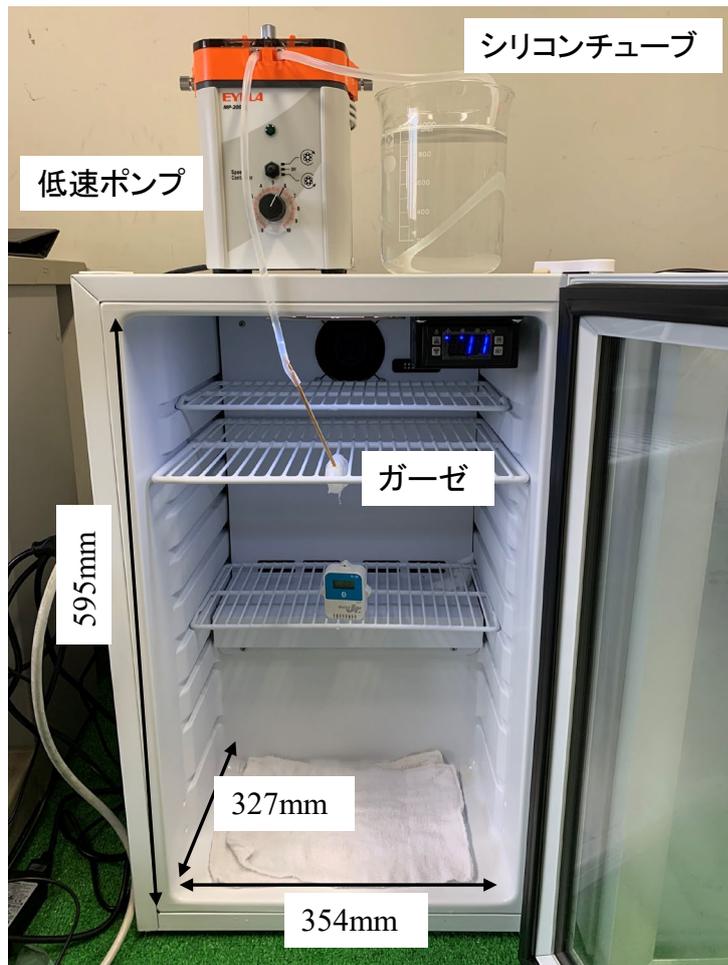


図-5.1 つらら発生装置

5-2 低速ポンプの供給量の決定

低速ポンプのダイヤルごとによって変化する水の供給能力を調べるため、ポンプの供給試験を行った。試験の概略図を図-5.2に示す。計測方法として、1~10 まであるポンプのダイヤルを設定し、1 分ごとに供給された水の質量を計測する。この計測を 10 分間行い、計測された質量をグラフに表し、線形近似直線の傾きから設定したダイヤルにおける流速を求めた。ダイヤル 5 のときにおける 1 ごとに計測した水量を表-5.1 に示す。このとき平均水温は 25℃であったため、水の密度 0.99704g/cm^3 である。また、表-5.1 をもとに線形近似直線のグラフを図-5.3 に示す。このグラフから、ダイヤル 5 におけるポンプの流速は約 0.73mL/min ($=43.7\text{mL/h}$) であることがわかる。これらの作業をダイヤルごとに行い、試験結果から求められたダイヤルごとの流速を表-5.2、表-5.3 に、ダイヤルと流速の関係を図-5.4 に示す。

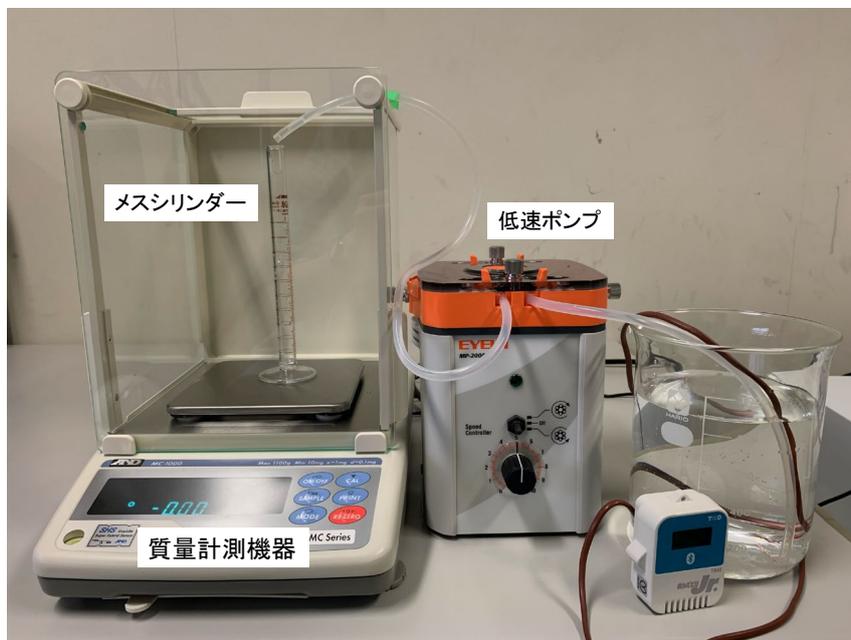


図-5.2 水の供給試験実験装置

表-5.1 ダイアル5における時間経過ごとの水量

分	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
mL	0.74	1.43	2.18	2.86	3.68	4.36	5.13	5.81	6.56	7.31

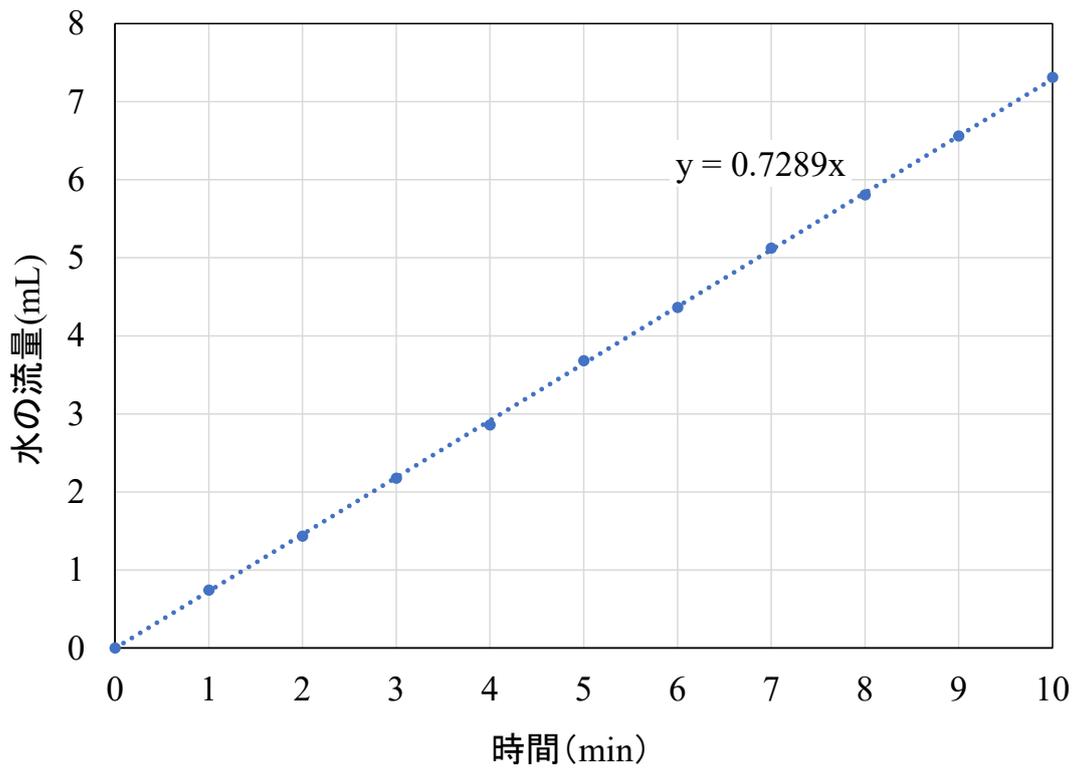


図-5.3 ダイアル5における時間と水量の関係

表-5.2 ダイアル 1.5~6 までの流速

ダイアル	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5	5	5.5	6
mL/h	7.90	13.01	18.04	24.64	28.27	33.58	38.55	43.73	50.66	56.65

表-5.3 ダイアル 6~10 までの流速

ダイアル	6.5	7	7.5	8	8.5	9	9	9.5	10
mL/h	62.05	68.10	73.18	76.10	82.78	86.73	86.73	87.75	89.11

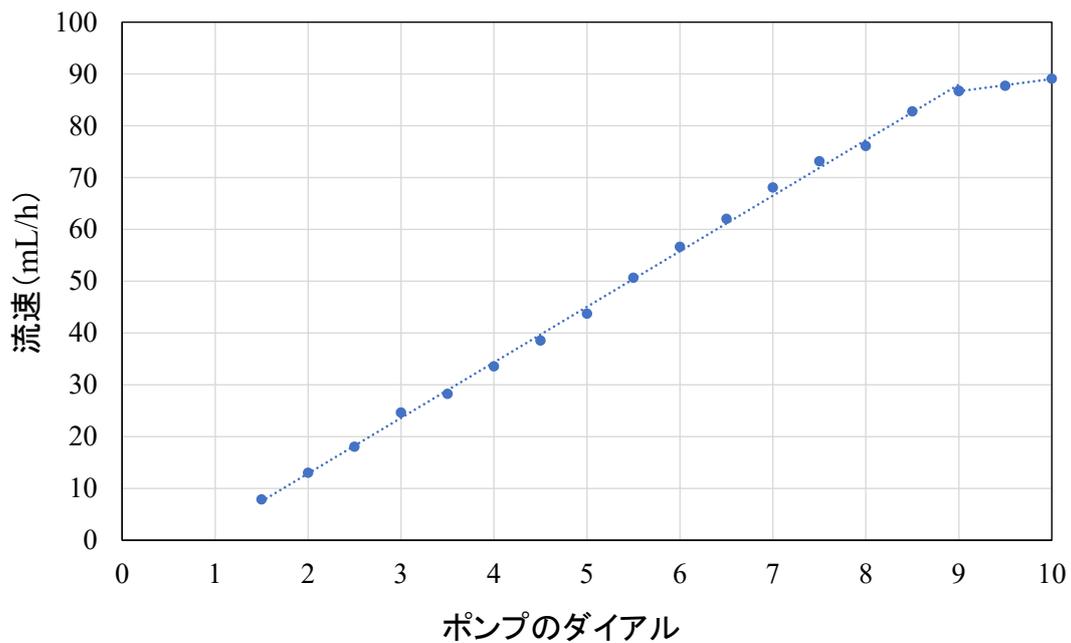


図-5.4 ポンプのダイアルと流速の関係

5-3 実験結果

5-3-1 実験装置内の条件

室内実験でつららが発生した各計測値と G, H トンネル比較結果を図-5.5 に示す. この図では, 横軸を最低気温, 縦軸を積算気温としている. この結果より, 各トンネルのつらら発生日における計測値と室内実験時につららが発生した計測値が概ね一致していることから, 庫内の気温がつららが発生したトンネル坑内気温を模擬できるものと仮定した.

また, 実験結果の例を図-5.6 に示す. 実験条件として水の供給量が 13mL/h, 設定温度を -3°C で 12 時間実験を行った. その結果, 30 cm 以上のつららが発生・成長したことを確認でき, 30 cm のつららは除去作業時に確認されたつららの中でも最大長さに近い規模となる.

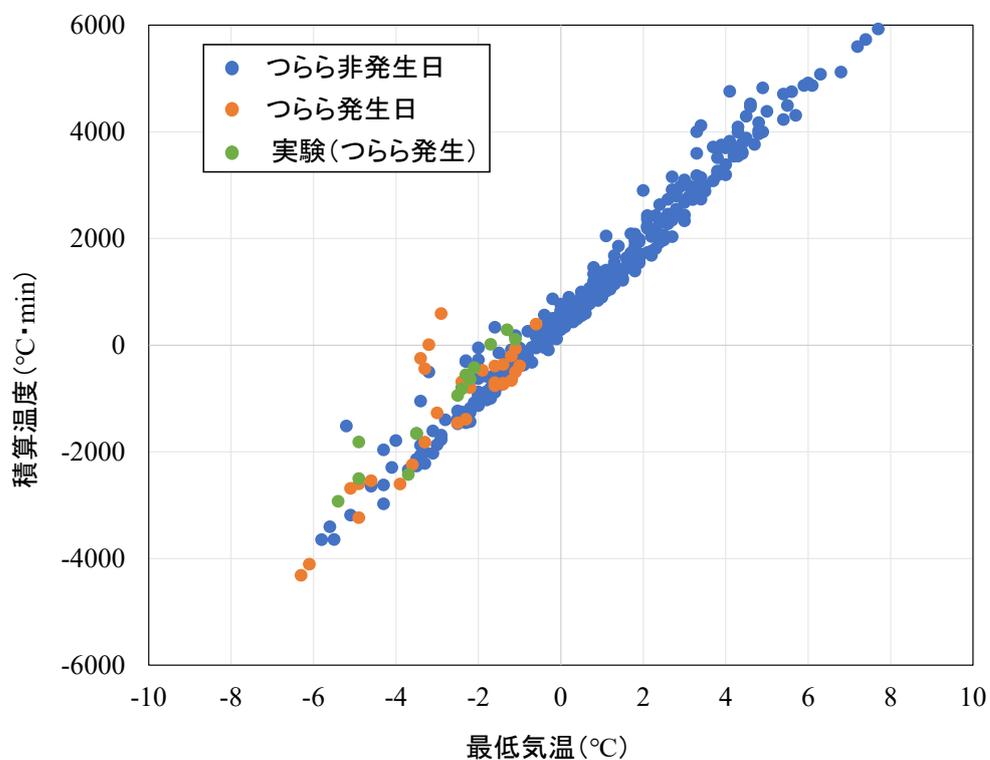


図-5.5 トンネル計測結果と実験値の比較

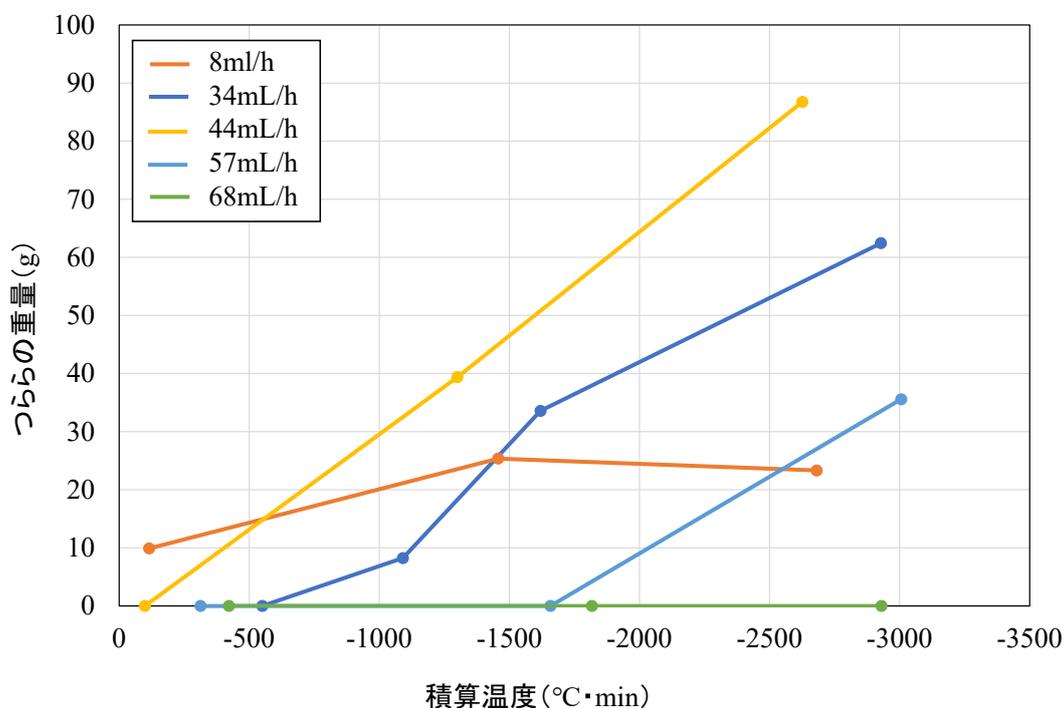


図-5.6 つらら室内実験結果

5-3-2 つららの質量と積算温度の関係

次に、条件別に発生したつららの実験結果を図-5.7 に示す。この図では、ポンプからの水の流速別に行った実験をつららの質量と積算温度で表している。図-5.7 より、流速が 34～44mL/h においては、つららの質量が積算温度に比例して増加傾向がみられるのに対して、57mL/h では積算温度が約-3000°C・min を下回る場合にのみつららが発生し、68mL/h のときつららは発生しないことがわかる。

また、8mL/h と微小な流速において、積算温度-115～-2681°C・min のとき 10g 以上のつららを観察した。この程度の漏水の流速は供用中のトンネル覆工から発生した場合、点検時に利用者の安全性には影響がほとんどない変状と判定される。対象とした G, H トンネルにおいても、定期点検実施時（7 月）は冬期におけるつらら発生有無を確認できないため、技術者は漏水の状態のみから早期の補修を必要としないIIa またはIIと判定した。しかしながら、冬期の G, H トンネルの覆工アーチ部にはつららが発生したことが報告されている。したがって、日本の寒冷地におけるトンネル点検時には、夜間の積算温度がマイナスであることや漏水の流速が 8～57mL/h であること、漏水発生位置が覆工の天端部やアーチ部の場合、つらら発生を考慮した判定区分を策定する必要があるものと考えられる。



5-4 5章まとめ

本章では、室内実験の条件別におけるつららの発生・成長過程を比較した。

室内実験において流速 8~57ml/h の条件下でつららが発生した。トンネル点検時には、利用者の安全性に影響がほとんどないと考えられる。8mL/h と微小な流速においても、積算温度-115~-2681°C・min の範囲内でつららを観測したことから、寒冷地のトンネルでは、冬期坑内における積算温度、覆工からの漏水量、漏水発生箇所を考慮した上で、つらら発生の点検・診断を実施する必要がある。

第6章

結論

本研究では、冬期のトンネル維持管理作業におけるつらら発生を考慮した点検・診断に有用な知見を得ることを目的とし、つらら発生原因であるトンネル坑内の漏水発生箇所を分析した。その手法として、岩盤の透水性を評価する際に用いられるクラックテンソル理論をトンネル覆工に適用し、覆工表面に発生したひび割れを透水係数で定量化することで漏水発生リスクを評価した。また、つらら発生の報告されているトンネルを対象に坑内気温の計測を実施し、計測結果の分析とつらら発生予測を行った。さらに、現場計測で得られた知見から、つらら室内実験を行い、つらら発生・成長過程を比較する室内実験を行った。それにより得られた知見を以下に示す。

- 1) 漏水が発生したスパンはひび割れが縦断方向に卓越したスパンが比較的多く、ひび割れ縦断方向によって生じる透水係数と漏水発生に相関性が高い。さらに求めた透水係数を正規分布で表し比較した結果、透水係数が 8.28×10^{-5} (m/sec) 以上を示す覆工スパンでは漏水発生のリスクが高いことが評価できる。
- 2) トンネル坑内気温の計測結果を重回帰分析することで、一致率 75%を越える有効な予測式を構築した。トンネル坑内に発生するつらら予測には、夜間におけるトンネル坑内の積算温度が一つの評価指標となることを明らかにした。
- 3) 室内実験において流速 8~57ml/h の条件下でつららが発生した。トンネル点検時には、利用者の安全性に影響がほとんどないと考えられる 8mL/h と微小な流速においても、積算温度-115~-2681°C・min の範囲内でつららを観測したことから、寒冷地のトンネルでは、冬期坑内における積算温度、覆工からの漏水量、漏水発生箇所を考慮した上で、つらら発生の点検・診断を実施する必要がある。

以上より、覆工に発生したひび割れから求めた透水係数の情報が、漏水発生箇所の分析および漏水発生リスクのあるスパンの評価に有益なものとなることがわかった。また、今回の現場計測および室内実験から、点検時に利用者の安全性には影響がほとんどない変状(表-6.1における判定区分IIIbおよびIIa)と判定されるトンネルにおいて、冬期トンネル坑内では覆工アーチ部につらら発生(表-6.1における判定区分IIIおよびIV)の可能性が示唆された。このことより、今後実施される点検や補修等のトンネル維持管理作業において、寒冷地ではつららを考慮した判定を下すことが人力によるつらら除去作業の効率化につながり、結果的に第三者被害の抑制となることが考えられる。

今後は、ひび割れの点検結果からつらら発生のリスクのあるスパンの判定を示すため、覆工の透水係数とつらら発生の関係を確認していく予定である。

以上

表-6.1 漏水等による変状に対する判定の目安

箇所	現象	漏水の度合				利用者への影響		判定区分
		噴出	流下	滴水	浸出	有	無	
アーチ	漏水				○		○	Ⅱb
				○		○		Ⅱa
			○			○		Ⅲ
		○				○		Ⅳ
	つらら						○	Ⅱb
						○		Ⅲ, Ⅳ
側壁	漏水						○	Ⅱb
				○		○		Ⅱa
			○			○		Ⅱa
		○				○		Ⅲ
	側氷						○	Ⅱb
						○		Ⅲ, Ⅳ
路面	土砂流出						○	Ⅱb
						○		Ⅲ, Ⅳ
	滞水						○	Ⅱb
						○		Ⅲ, Ⅳ
	凍結						○	Ⅱb
						○		Ⅲ, Ⅳ