

画像情報でトンネルを 経年劣化から守る



仲山 貴司
Takashi Nakayama
構造物技術研究部
トンネル研究室
主任研究員



山下 雄大
Yudai Yamashita
構造物技術研究部
トンネル研究室
研究員



野城 一栄
Kazuhide Yashiro
構造物技術研究部
トンネル研究室長

はじめに

日本の鉄道トンネルの多くは戦前または高度経済成長期に建設され、その70%以上が経年60年を超えています。このため経年劣化が進行しており、熟練した検査員による定期的な検査と必要な補修、補強が講じられています。しかしながら、日本全国の鉄道トンネル総延長は約4000km¹⁾に及び、検査には膨大な時間と労力を要しています。今後は労働人口の減少が見込まれているなかで、検査業務をいかに効率化するか課題になっています。このような背景から、近年はトンネルの検査にもデジタル技術の導入が進められており、代表的なものには、トンネル壁面画像の撮影技術²⁾や、撮影画像からのひび割れを検出するAI技術³⁾などがあります。本記事では、これらの画像情報の活用技術をさらに発展させた2つの研究開発を紹介します。一つめ

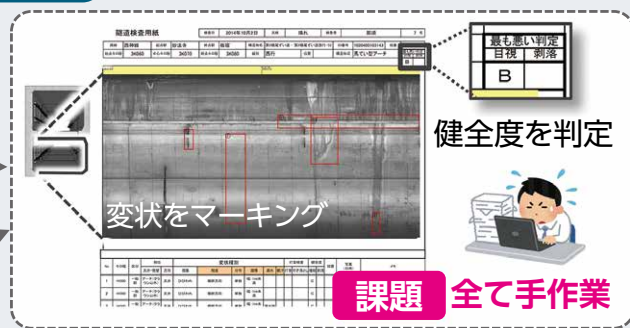
は、撮影画像からひび割れ以外の変状と補修跡もAIで検出し、トンネルの健全度を判定する「健全度自動判定システム」です(図1)。二つめ

図1 健全度自動判定システム

画像撮影(既存技術)



ひび割れ
検知 AI
(既存技術)



置き換え



変状検出 AI で、
変状等を抽出
↓
判定マトリックスと
照合し、健全度を判定
↓
人による確認修正

(a) システムの位置づけ

(b) タブレット PC での
システム起動状況



は、AI検出した変状のうち詳細確認すべき要注意箇所をトンネル壁面に投影する「要注意箇所投影システム」です(図2)。



目視, 打音を実施

課題

暗い坑内で
手元の紙資料を
見て変状を探す

置き換え

健全度自動判定システムの開発

一般にAI検出技術は、顔認証のように対象が識別しやすい場合に、高い精度を発揮します。一方、トンネルの変状は複合して発生するため対象の識別が難しく、ある程度の精度しか得られないことが想定されました。しかしながら、現在は撮影画像の確認作業は全て人手に頼ってるため、ある程度の精度しか確保できない場合であっても検査の補助ツールとしては有用と考え、本システムを開発しました。



移動式プロジェクションマッピング装置



要注意箇所

図2 要注意箇所投影システム

変状検出AI

トンネル検査の技術基準として広く用いられている「維持管理標準(トンネル)」⁴⁾では、トンネルで発生する代表的な変状や補修方法がまとめられています。本研究では、このうち都市部のトンネルで多く見られる変状や補修跡を検出対象としました。具体的には、検出対象の変状として鉄筋露出やさび汁、漏水、漏水跡などを、補修跡として断面修復、導水樋を^{とい}設定しました。

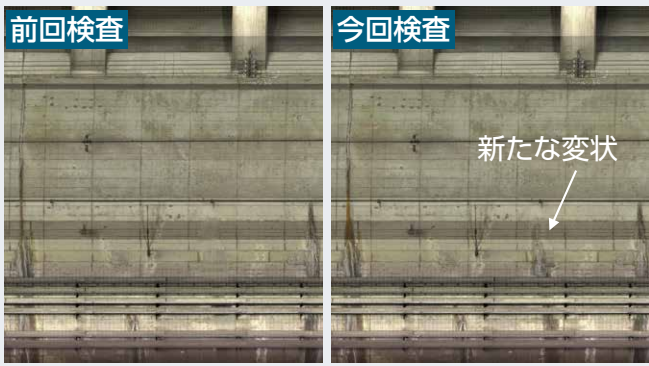
AIを構築するためには、これらの変状と補修跡が写りこむ画像を多数準備し、画像内の位置(座標)を学習させる必要があります。本研究では、鉄道総研がこれまでに蓄積してきた画

像を用いました。また、画像内の位置(座標)の整理は、変状を適切に見分ける専門知識が必要になるため、鉄道トンネルの専門技術者が行いました。

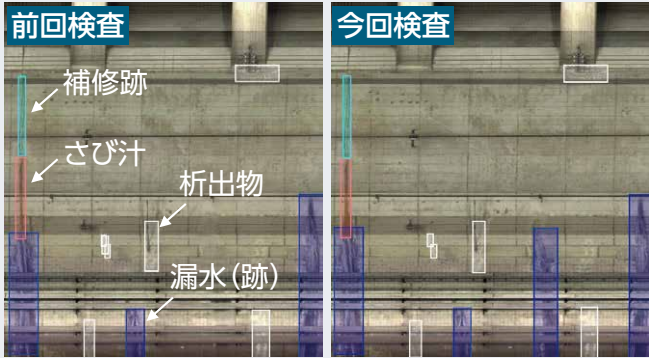
結果として作成できたAIの正答率を図3に示します。鉄筋露出箇所の検出精度は90%、その他については95%以上の精度が得られました。図4には検出結果の一例を示します。図4(a)は元画像で、画像処理を行って前回検査と今回

図3 構築したモデルの正答率

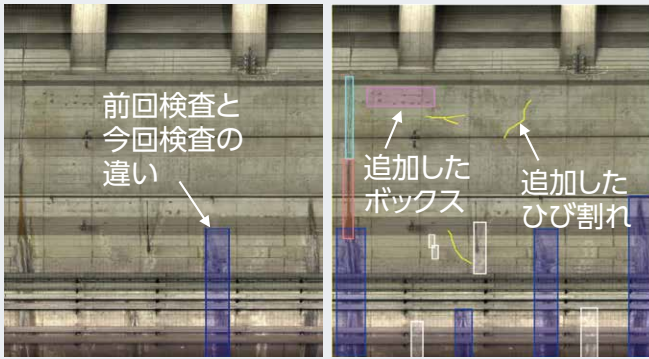
		正答(評価用データ)					
		0 鉄筋露出	1 さび汁	2 漏水	3 漏水跡	4 補修跡	5 導水樋
推定結果	0. 鉄筋露出	0.90					
	1. さび汁		0.96				
	2. 漏水			0.98			
	3. 漏水跡				0.96		
	4. 補修跡					0.98	
	5. 導水樋						0.97



(a) 元画像



(b) 検出結果



(c) 差分表示

(d) 他データの追加

検査で漏水箇所が増えている状態の画像を作成しました。図4(b)が検出結果であり、これらの差分は図4(c)のとおりです。漏水や析出物などが色枠(ボックス)として検出されていること、新たに発生した漏水がピックアップできていることがわかります。なお、システムは、検査員が検出対象ではない他データの追加や、個々の検出結果の修正と削除が行える機能を有しています。手入力で追加したボックスと、CADから読み込んだひび割れを合わせて示した一例を図4(d)に示します。

健全度の判定マトリックス

維持管理標準(トンネル)では、2年に1度の定期検査(通常全般検査)を行い、表1のように4段階でトンネルの健全度を判定することが定められています。また、健全度Aと判定されたものは詳細な個別検査により措置を検討する必要があります。

本研究では、維持管理標準(トンネル)に記載されている標準的な判定例を反映しつつ、安全側の判定が得られるよう表2の判定マトリックスを作成しました。システム内では、この判定マトリックスに個々の変状を当てはめ、最も重い判定を指定区間の健全度としています。また、各変状には「影響大」、「影響小」の2段階の

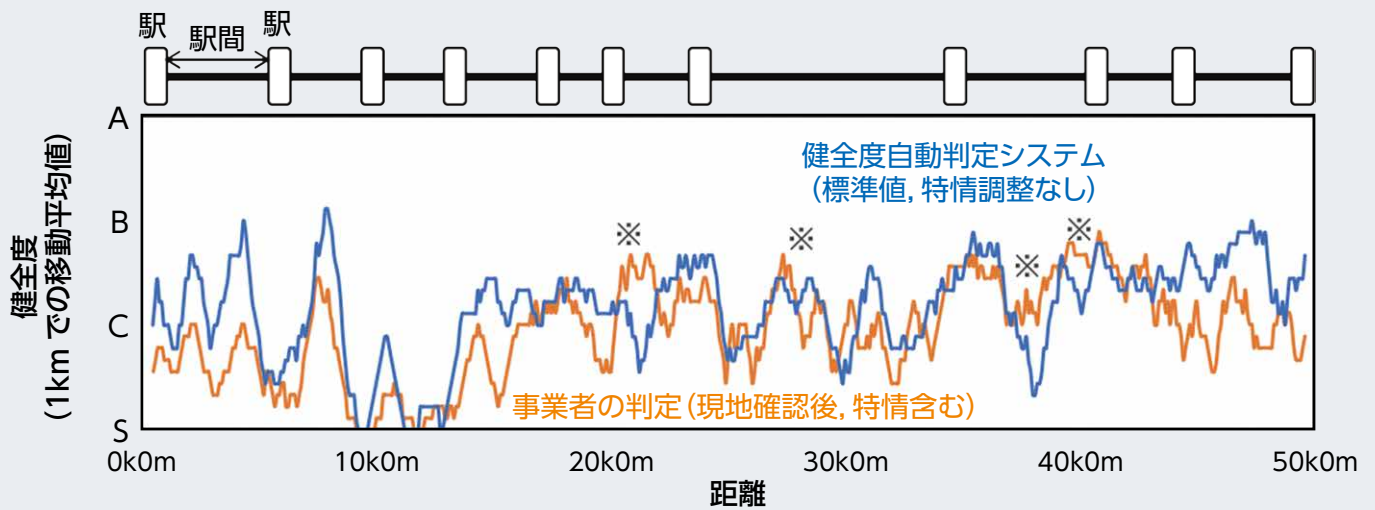
図4 変状検出結果の例

表1 構造物の状態と標準的な健全度の判定区分

健全度		構造物の状態
A	AA	運転保安、旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす、またはその恐れのある変状等があるもの
	A1	進行している変状等があり、構造物の性能が低下しつつあるもの、または、大雨、出水、地震等により、構造物の性能を失う恐れのあるもの
	A2	変状等があり、将来それが構造物の性能を低下させる恐れのあるもの
	B	将来、健全度 A になる恐れのある変状等があるもの
C	軽微な変状等があるもの	
S	健全なもの	

表2 標準的な判定例をまとめた判定マトリックス

	鉄筋露出	さび汁, 鉄バクテリア	漏水, 表黒褐色	エフロレッセンス, 遊離石灰
影響大	A	A	B	C
影響小	A	B	C	C



※実際の現地確認により修正が必要な箇所

図5 健全度判定の検証結果

設定を可能にしています。トンネルの上方に変状がある場合、抽出ボックスが画像に占める線路方向の密度が大きい場合(20%以上)は「影響大」とすること、断面修復、導水樋は健全度Cとすることを標準設定としています。図5に、実際の鉄道事業者の検査台帳との比較結果の例を示します。1kmで移動平均した健全度のトレンドを比較したものです。検査台帳の健全度は要注意箇所の現地確認後の最終判定ではある

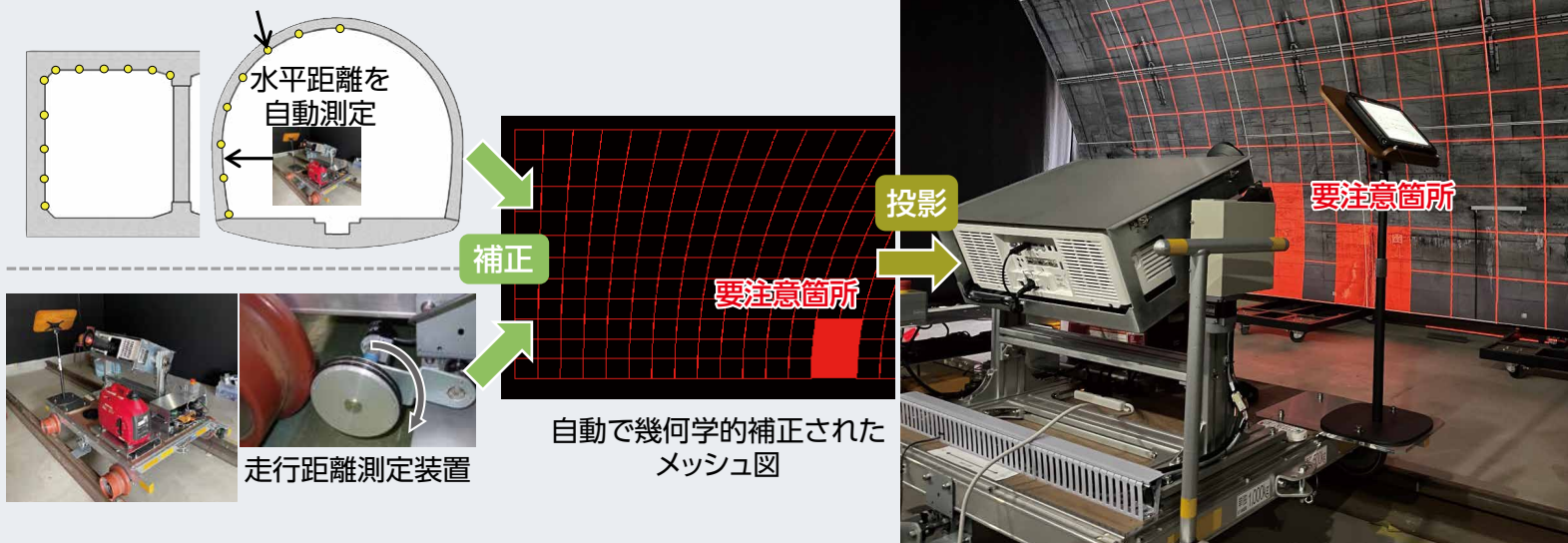
ものの、システムは事前にその傾向を捉えた結果が得られました。

要注意箇所投影システムの開発 システムの特徴

図6に投影の概念図を示します。トンネル壁面に正しく投影するためには、トンネルの形状や軌道中心から覆工面の離隔に応じて、メッシュ図を適切に形状補正する必要があります。

図6 投影の概念図

座標をあらかじめ入力



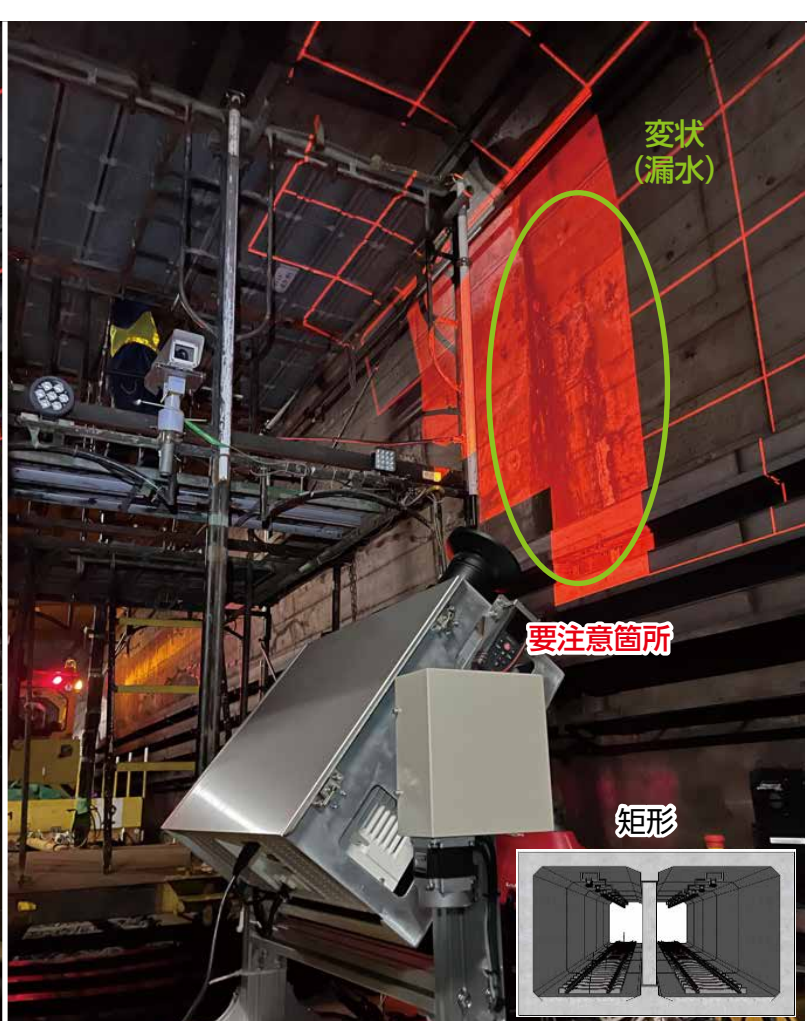
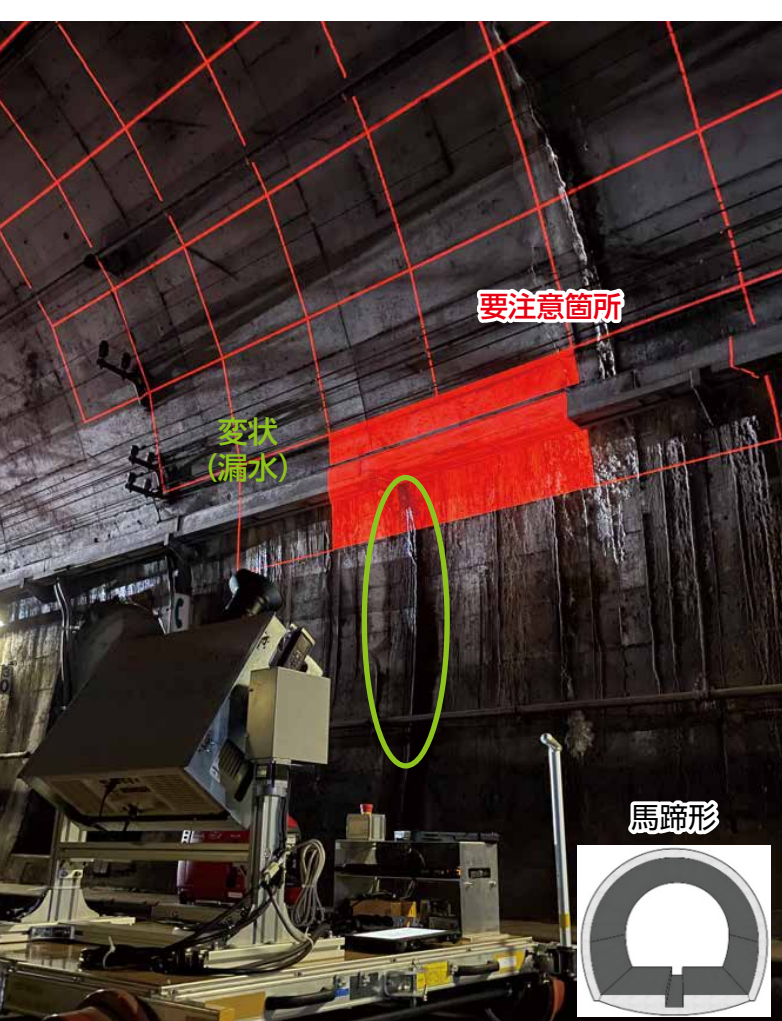


図7 現場での投影状況

図8 高所作業車台上から見た場合のメッシュ

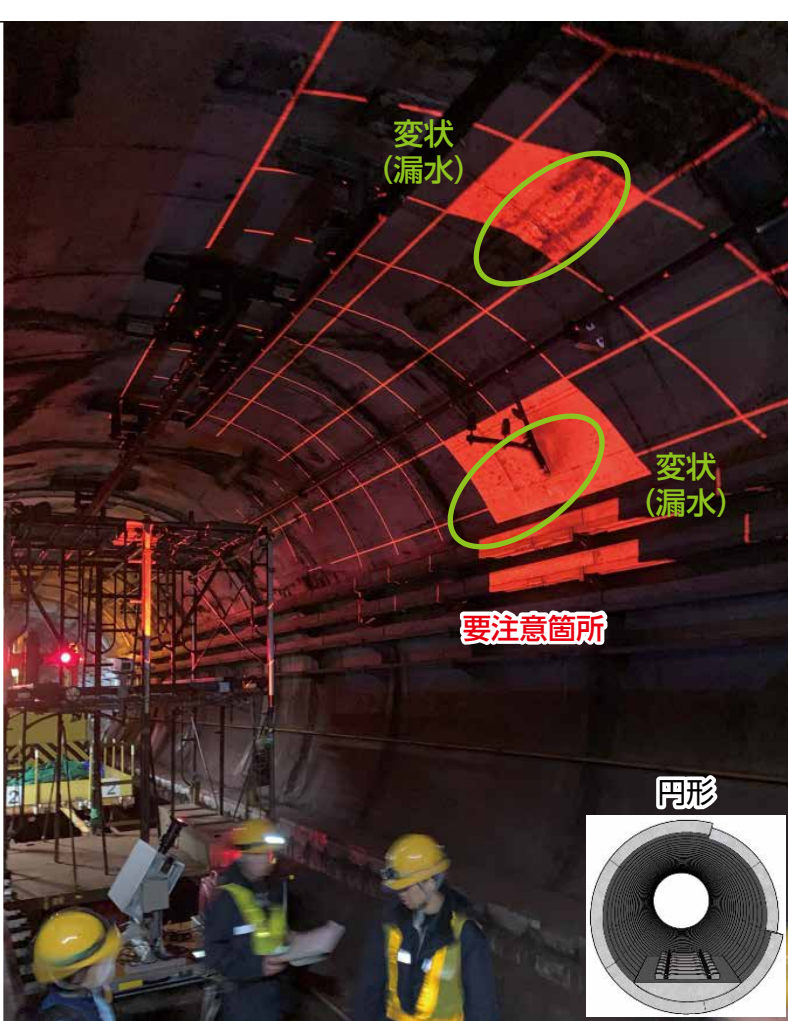


本研究では、市販のプロジェクターを使用できるように、すべての形状補正を行うことができるソフトウェアを開発しました。また、走行しながらメッシュ図を連続的に投影できるようにするため、移動距離測定装置も開発しています。

プロジェクターと移動距離測定装置を手押し台車を移動することで、線路方向の正しい位置に連続して自動投影できます。さらに、回転台座によりプロジェクターの角度を調整し、トンネル円周方向にもメッシュ図を調整して投影することが可能です。

現地検証

図7に実トンネルでの投影結



果を示します。これらの図から各断面形状に合わせてメッシュの正方形が正しく投影できていることがわかります。また、図8は高所作業車台上から見た場合のメッシュの投影状況です。適切な位置にプロジェクターを配置することで、

台車に遮られることなく投影できることを確認しています。なお、トンネル表面に凹凸がある場合でも、詳細な凹凸部の座標を入力しなくても要注意箇所を特定できることも確認しています。

図9には投影距離測定装置の精度を検証した結果を示します。100mあたりの誤差は0.18%であり、一定の走行精度を確保できていることがわかります。一般に、一晩のトンネル内の検査作業時間は3～5時間程度に限られ、検査できる範囲は数百m程度です。これを考慮すると一晩の走行距離の調整は数回程度に収まるため、実用の問題ない走行精度を有すると考えられました。

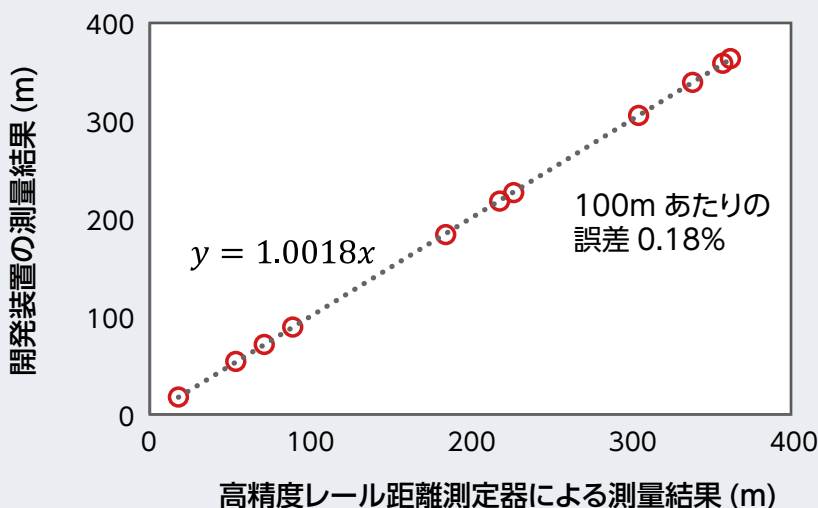
おわりに

本稿では、トンネルの維持管理の高速化と省力化を目的として開発した、「健全度自動判定システム」、「要注意箇所投影システム」を紹介しました。今後もAI精度の向上や投影装置の改良などを進めていく予定です。

RRR

※本研究は国土交通省交通運輸技術開発推進制度 (JP002223) により実施しました。

図9 走行距離測定装置の精度検証結果



文献

- 1) 国土交通省鉄道局:鉄道統計年報(令和3年度版), 2022
- 2) 全邦釘, 井後敦史:Random Forestによるコンクリート表面ひび割れの検出, 土木学会論文集F3(土木情報学), Vol.71, No.2, pp.I_1-I_8, 2015
- 3) 海瀬忍, 伊藤哲男, 前田佳克, 八木弘, 前田洗樹, 進士正人:トンネル覆工表面画像撮影技術による近接目視点検の代替の可能性, 土木学会論文集F1(トンネル工学), Vol.76, No.1, pp.62-78, 2020
- 4) (公財)鉄道総合技術研究所:鉄道構造物等維持管理標準・同解説(構造物編)トンネル, 丸善出版, 2019