

新しい新幹線用トンネル覆工表面撮影車の開発と導入

久保木 利明・八嶋 宏幸・滝澤 彰宏

トンネルの維持管理において、覆工表面のひび割れ等の変状位置・形状・時間的变化を把握することは重要である。そのため覆工表面の変状状況を正確かつ短時間で捕捉するため、2000年度よりトンネル覆工表面撮影車を導入し、トンネル覆工表面撮影車で撮影した覆工画像、ならびに覆工画像を基に作成するトンネル変状展開図をトンネル検査に活用することで維持管理業務の質的向上に取り組んできた。導入から20年が経過し、新型のトンネル覆工表面撮影車の開発・導入を行った。旧来型の撮影車に比べ高解像度のデータを高頻度で計測することが可能となり、トンネルの維持管理業務のさらなる質的向上が期待される。本稿では新型トンネル覆工表面撮影車の機能向上、追加した機能、導入効果等について報告する。

キーワード：トンネル，新幹線，維持管理，保守用車，ひび割れ

1. はじめに

トンネル覆工表面の変状状況を正確かつ短時間で捕捉することを目的として、レーザー計測装置によりトンネル覆工表面の変状状況を画像として記録できるトンネル覆工表面撮影車（以下、トンネル撮影車）を2000年に導入している¹⁾（写真—1）。撮影車導入以前は、目視検査時の野帳スケッチからトンネル変状展開図（以下、トンネル展開図）を作成していたため、ひび割れ等の変状の位置や形状、時間的变化を正確に押さえることが困難であった。撮影車導入後は、撮影画像から現地との整合が取れた精度の高いトンネル展開図作成が可能となり、検査の正確性や効率が向上した。

本稿では近年車両の老朽化に合わせて、取得データ解像度や計測速度等の機能向上や新たな機能を追加し

た新型のトンネル撮影車を開発・導入したため、その内容について報告する。

2. 新型のトンネル覆工表面撮影車の開発課題

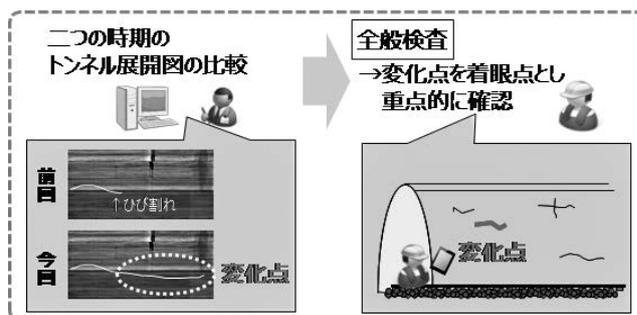
旧来型からの機能向上および新たな機能追加を検討するにあたって、旧来型の撮影車における課題を述べる。

(1) 従来車両の取得データ解像度

2つの時期に作成したトンネル展開図を比較することにより変化点を抽出し、着眼点を絞ったトンネル検査の実施に取り組んでいる（図—1）。旧来型のトンネル撮影車で撮影した画像から人の目でひび割れを判読する際は、見落としや誤りがあった。より高精度なトンネル展開図を作成するためには、取得データの解像度を向上する必要がある。



写真—1 2000年に導入した撮影車による計測状況



図—1 着眼点を絞った効率的な検査イメージ

(2) 計測速度

トンネル展開図から得られる変化点の情報を検査の基礎データとして活用していくためには、トンネル検査の周期に合わせて展開図を更新していくことが望ましい。旧来型のトンネル撮影車は最高 8.5 km/h で計測していた。しかし、計測速度向上により検測車の運用性を高め、計測作業のさらなる効率化が求められていた。

(3) 展開図作成の省力化

旧来型ではトンネル撮影車で取得した覆工画像を基に、解析者がひび割れ等の変状を抽出し、モニター上でトンネル展開図を作図しており、解析作業に多大な時間を要していた（図-2）。特にひび割れの抽出・作図に時間を要していることから、解析者を補助するひび割れ自動抽出に向けた手法の確立と、システムへの実装が課題となっていた。

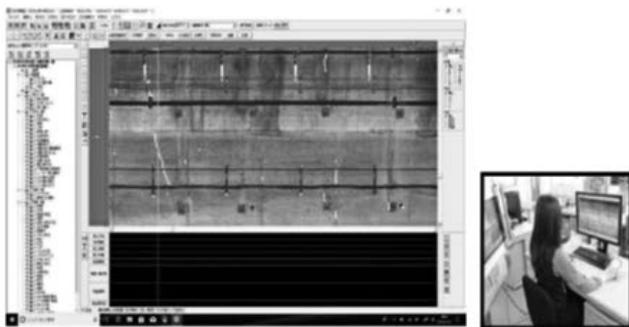


図-2 従来の変状展開図作成イメージ

3. 新型撮影車に導入した計測方式およびカメラユニットの概要

(1) 計測方式の選定

ひび割れの自動抽出は、一般的に 2次元データ（画像）の解析から行う手法と覆工表面の 3次元データ（凹凸）から行う手法の 2つに大別される。開発時点の計測技術の比較ならびに 2次元・3次元におけるひび割れ自動抽出技術の今後の進展性を考慮した結果、1度の計測で 2次元・3次元のそれぞれのデータを同時に取得可能な光切断法による計測方式を採用した²⁾。特に、3次元データからひび割れを自動抽出する手法は、打設縞やコールドジョイントによる誤抽出が少ないとされ、高精度なトンネル展開図の作成に有効と考えた。

(2) カメラユニットの概要

選定したカメラユニット（図-3）は、レーザー出

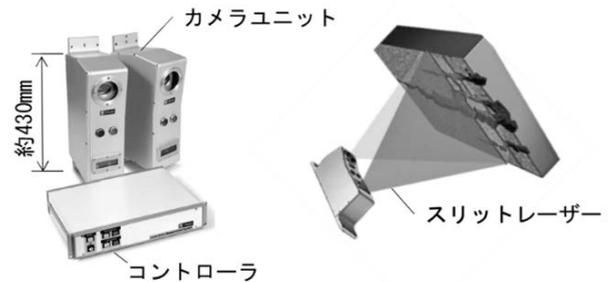


図-3 カメラユニット外観写真と取得イメージ

力装置とエリアカメラ装置を組み合わせた小型・軽量のユニット構造となっている。カメラユニット 1 台の計測範囲は周長方向に 2m で、線路方向・周長方向ともに 1mm の間隔でデータ取得が可能である。

(3) 取得データ概要

取得データの概要を図-4に示す。トンネル覆工表面に照射したレーザー光の覆工表面における反射形状をエリアカメラで取得し、3次元座標に変換する。その際、反射輝度情報も取得しており、これらの情報から光の明暗強度を捉えた反射輝度画像（2次元データ）と断面の凹凸形状を捉えた深度形状画像（3次元データ）を作成する。深度形状画像は、平滑化した覆工表面の形状と細かい凹凸の差を階調表現しており、平滑化された位置より近い点を黒、遠い点を白で表現している。

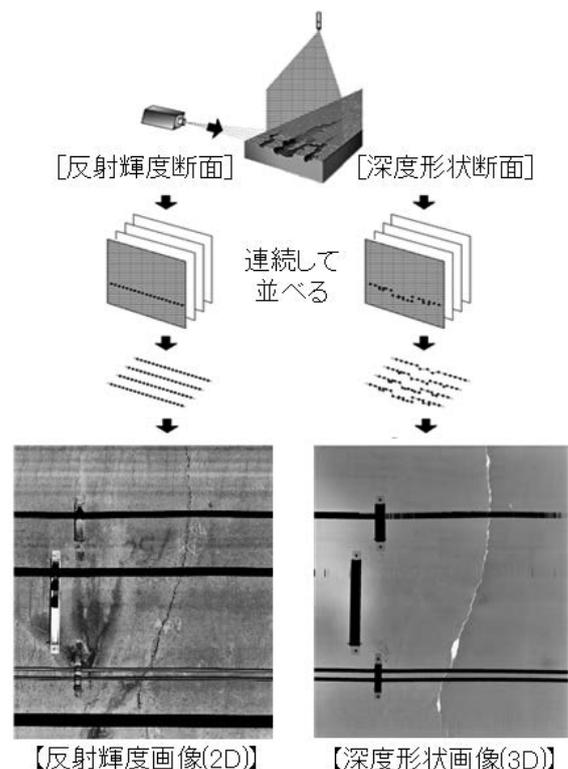
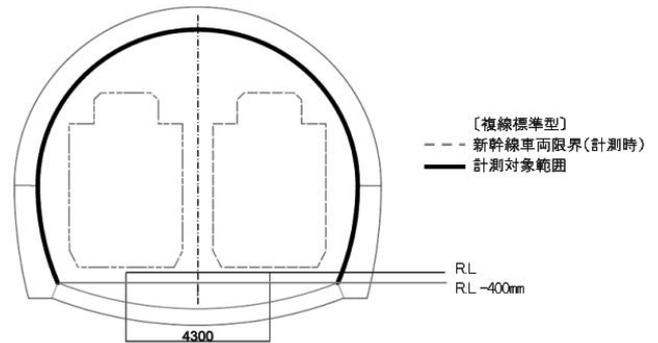


図-4 取得データの概要

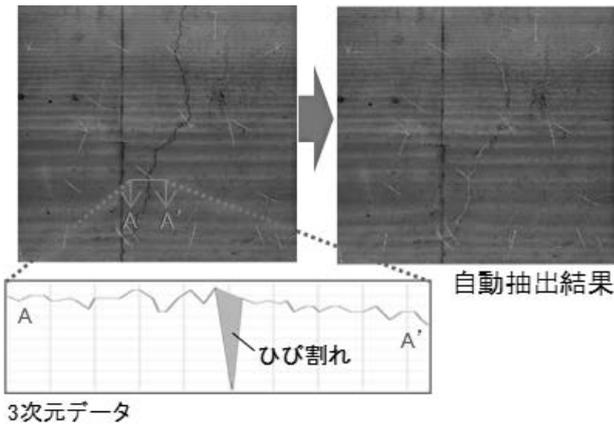
(4) ひび割れの自動抽出機能

反射輝度画像（2次元）および深度形状画像（3次元）の2種類のデータを基にひび割れの自動抽出に取り組んでいるが、本稿では3次元による手法について述べる。

深度形状画像（3次元）を基にしたひび割れ自動抽出は、ひび割れが持つ幅や深さの情報とその連続性により、形状や方向等の特性要素を統計処理して行われる（図一5）。カメラユニットのデータ取得の間隔が1mmのため、概ね幅1mm以上のひび割れ自動抽出を目標値としてシステムに実装することとした。



図一6 複線標準型における計測対象範囲



図一5 ひび割れの自動抽出例

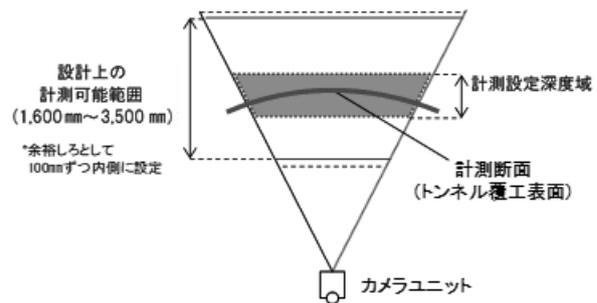
(b) カメラユニット配置検討

カメラユニットの配置を検討するためには、カメラユニットの計測可能範囲やトンネル断面までの距離や角度、カメラユニット同士の間隔等、条件を組み合わせる必要があった。以下に検討条件を示す。

①カメラユニットの計測可能範囲

カメラユニットで計測可能な奥行範囲は1,500mm～3,600mmの範囲（2,100mm幅）であるが、100mm余裕を持たせた1,600mm～3,500mmの範囲（1,900mm幅）を計測可能範囲として設定する。また、この範囲でデータ取得できる領域を計測設定深度域として設定する（図一7）が、この値は計測間隔と計測速度の組み合わせによって決定される（表一1）。これは、単位時間あたりにカメラユニットからコントローラーまで伝送可能なデータ容量の上限値があるためである。

開発目標である従来車両以上の解像度および計測速度を考慮して、計測間隔1mm（解像度：1mm



図一7 計測設定深度域

4. 車両設計

(1) カメラユニットの配置設計

(a) 実施内容および前提条件

選定した計測方式やカメラユニットの仕様・性能を踏まえて、JR 東日本管内の新幹線トンネル断面を考慮したカメラユニットの配置を検討した。以下に条件を示す。

①対象とするトンネル断面

複線標準型、円形、箱型を計測対象のトンネル断面とする。ただし、カメラユニットのレーザー出力やエリアカメラの性能を考慮し、大型箱型断面は除く。

②カメラユニットの配置

カメラユニットの配置は、下げ束や架線、付帯設備等の離隔を考慮して、新幹線車両限界内とする。線形から定まる曲線部のカント量やシフト量を考慮する。

③計測範囲

計測範囲はトンネル覆工表面（アーチ部および側壁部）として、RL-400mmから上部とする（図一6）。

表一1 走行速度および計測間隔による計測設定深度域

		計測速度 (km/h)			
		15	20	30	40
計測 間隔 (mm)	0.5	720	540	360	270
	1.0	1,510	1,280	850	690
	2.0	3,000	2,500	1,500	1,250

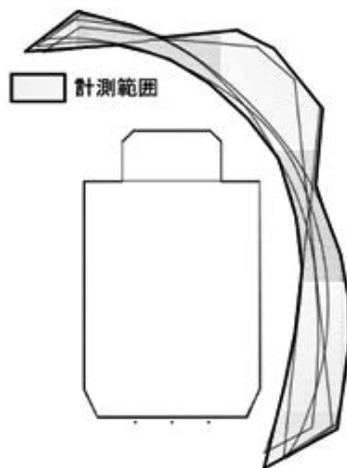
(単位：mm)

×1 mm), 計測速度 20 km/h を条件とした。ただし, 計測速度は線路勾配等により一定に保つことが難しいことから, 計測設定深度域が狭くなるより厳しい条件の計測速度 30 km/h に条件を上げて, 計測設定深度域 850 mm 以内に計測断面が収まるようカメラユニットを配置することとした。

②各トンネル断面の計測断面位置の把握

カメラユニットの配置検討では, カメラユニットを配置する車両と計測対象であるトンネル断面との位置関係が重要となる。カメラユニットが配置可能な車両限界に対し, 対象のトンネル壁面が直線部や曲線部でどのように変位するのか把握する必要がある。

このことから, 対象となる3つのトンネル断面と車両限界の位置関係を直線部および曲線部の条件で求め, 1つの車両限界位置に対する3つのトンネル断面の位置を重ね合わせることで, 計測断面位置を設定した(図一8)。



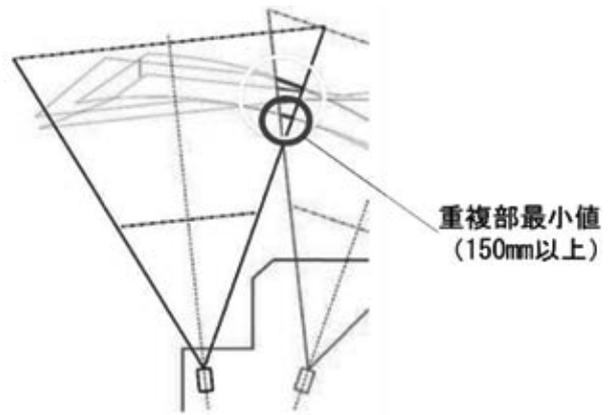
図一8 統合した計測断面による計測範囲

③カメラユニットの配置台数

カメラユニットは1台で周長方向約2mをデータ取得可能である。計測対象が複線標準型断面の直線部の場合, トンネル半断面に対して均等に配置すると6台が必要となることから, この構成を基本として, 5~7台で検討することとした。

④カメラユニットの角度と間隔

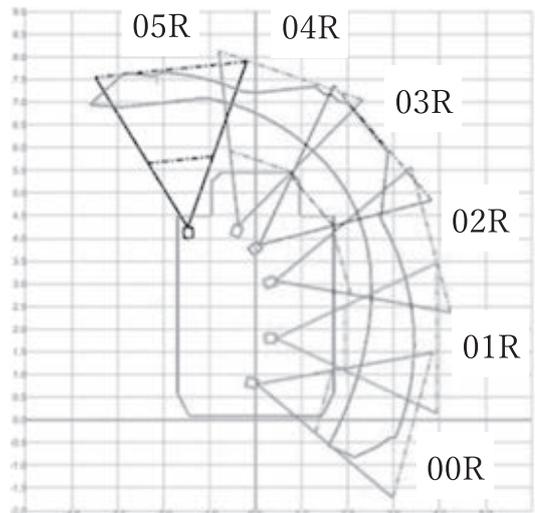
カメラユニットで広範囲のデータを取得するには, 対象物に対して垂直にカメラユニットを配置させる必要がある。また, 計測時に変化するトンネル断面において, 計測データが欠損しないよう, 隣接するカメラユニットの計測範囲を, カメラユニットから2,200 mm の位置で150 mm 以上重複するよう設定した(図一9)。



図一9 カメラユニット間の計測範囲の重複

(c) カメラユニットの配置検討結果

以上の条件を考慮し, いくつかの配置案にて比較検討を行った。その結果, カメラユニット6台で統合した計測断面が計測設定深度域内である850 mm 以内に収まり, 隣接するカメラユニットの計測範囲が150 mm 以上重複していたので, この配置案を採用した(図一10)。



図一10 採用したカメラユニットの配置案

(2) カメラユニットの支持構造

(a) 実施内容および設計条件

採用したカメラユニット配置を考慮し, 所定の位置でカメラユニットを確実に支持することが可能な支持架台ならびに, カメラユニット12台を格納することができるコンテナユニットの設計を行った。以下に条件を示す。

①設計最高速度

設計走行速度は回送で新幹線 50 km/h 以下, 在来線 30 km/h 以下とし, 計測速度は新幹線 20 km/h とする。

②車両寸法

車両寸法は在来線での回送を想定して、在来線車両限界以下とする。また、陸送を考慮して道路運送車両法等からコンテナユニットは低床トラック搭載時に高さ 3,800 mm 以下、幅 2,500 mm 以下、長さ 12,000 mm 以下になるような構造とする。

③カメラユニットの格納と展開

カメラユニット 6 セット (12 台) をすべてコンテナユニット内に格納でき、採用案のカメラユニット配置へ展開し、支持ができる構造とする。

④カメラユニット支持架台の移動構造

カメラユニット支持架台の移動構造は、コンテナユニットのスペースや計測時の振動や衝撃に対する強度を有するものとする。

(b) 支持構造の検討結果

以上の条件を考慮し、3つの支持構造案による比較検討を行った。その結果、伸縮スライドと回転移動を組み合わせたコンパクトな移動構造で、カメラユニットの格納と展開ができる構造の案を採用した (図-11)。

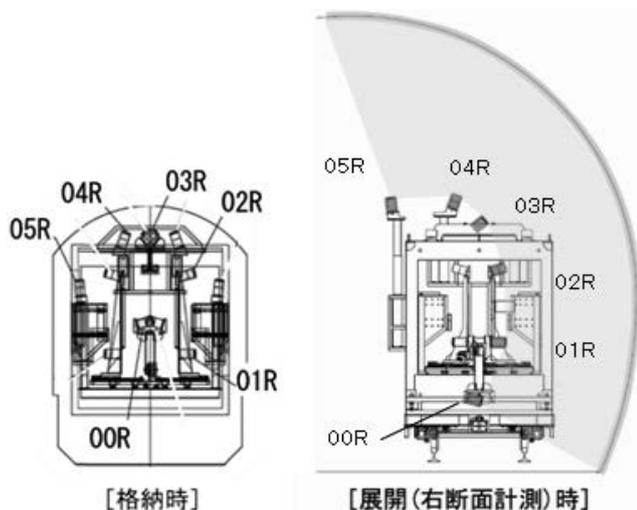
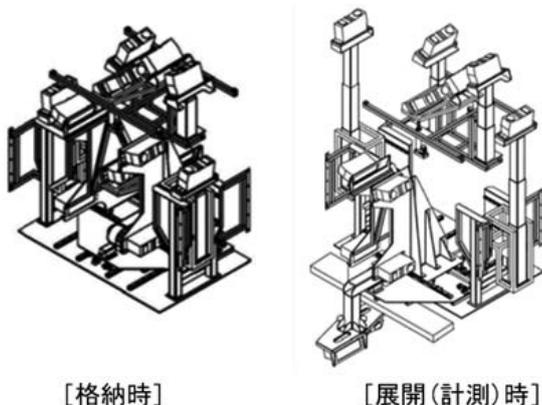


図-11 支持構造の概要 (格納時, 展開時)

5. 走行検査

(1) 走行検査の位置付け

前章までに検討した条件で車両を製作し、本線上での走行検査を実施した。この走行検査は走行性能の確認、前章で設計したカメラユニット配置によるトンネル全断面でのデータ取得の確認、3次元データを用いたひび割れ自動抽出機能の確認を実施するために行った。なお、対象のひび割れ幅は 1 mm 以上とした³⁾。

(2) 走行検査の対象トンネル選定の考え方

車両設計時の考え方に記載した通り、カメラユニットから覆工表面までの距離が遠くなると、カメラユニットの計測可能範囲を超えてしまい、逆に距離が近くなると、隣接するカメラユニットの計測範囲の重複が確保できなくなるため、計測データが欠落するおそれがある。曲線部ではカントによって車両が傾き、直線部よりも覆工表面までの距離の変化が大きいことから、曲線部の方が走行検査としての検討条件が厳しいと考えた。これより、断面形状の異なる 3 種類 (複線標準型, 円形, 箱型) に対して、直線部およびカントの大きい曲線部を選定して走行検査を実施した。

(3) 対象トンネルの選定

整備新幹線のトンネル断面形状は複線標準型断面より 50 mm 小さい。より厳しい条件で実施するために、整備新幹線区間を対象候補から除外した。整備新幹線区間を除く区間でカントが最大 (180 mm) であるトンネルを走行検査の対象トンネルとして選定した (表-2)。

表-2 走行検査対象区間の概要

	直線	曲線
複線標準断面	20 m	20 m (C=180)
円形断面	20 m	20 m (C=95)
箱型断面	20 m	20 m (C=55)

ひび割れの自動抽出機能の検証は、曲線部と直線部で行うこととし、ひび割れの発生状況を考慮して検証区間を決定した。

(4) 事前のひび割れ現地調査

3次元データを用いたひび割れの自動抽出機能の確認を行うために、高所作業車等を用いて、事前のひび割れ調査を行った (写真-2)。現地で確認したひび割れは、1 mm 未満のものも含め、近接目視で確認で



写真一2 ひび割れ調査状況

きるすべてを対象とした。調査内容は、ひび割れの端部および幅で、ひび割れ幅は変化点で計測した。

(5) 走行検査結果

選定した対象トンネルにおいて計測を行った。各項目に対する確認結果を以下に示す。

(a) 走行性能の確認

走行時の振動状況やブレーキ性能（貫通ブレーキ）の確認を行った。計測時（20 km/h）および回送時（30 km/h）のどちらにおいても顕著な振動は発生せず、ブレーキの動作も良好であった。なお、計測に問題が生じるレベルではないが、最も伸長するカメラユニット05の振動が懸念されたため、次節の対策を実施した。

(b) 全断面でのデータ取得

複線標準型断面および円形断面では、カメラユニットの設計配置通りで全断面のデータを取得できることを確認した。箱型断面の直線部では、カメラユニットから天頂部の距離が財産図から事前把握していた想定よりも小さかった。そのため、前章で検討した設計配置ではカメラユニット04とカメラユニット05の取得データが重複せず、データの欠損箇所が現れた。現地でカメラユニットの位置の調整と計測設定深度域の設定を変更した結果、当該区間で全断面のデータを取得することができた。

(c) ひび割れの自動抽出

3次元データを活用することで、1 mm以上のひび割れを自動抽出できることを確認した。一方、カメラユニットの配置位置やひび割れ形状によってはレーザー光が入射されず、形状や連続性が途切れ自動抽出できない場合も確認された。

(6) 走行検査結果を受けての変更と改良

走行検査結果を踏まえて、以下の変更と改良を行った。

(a) 計測設定深度域

走行検査の取得データを精査した結果、計測設定深度域について、850 mmの設定に対して計測値が840 mmのカメラユニットがあった。このような設定に対して余裕がない状態であると、計測時の振動等により計測断面が計測設定深度域の範囲を超えた場合、データが欠損するおそれがある。そのため、データ欠損防止を目的に計測設定深度域を850 mmから1,280 mmに変更した。変更した設定でも計測速度24 km/h程度まではデータ取得可能であることを確認している。

(b) カメラユニット05の振動防止

片持ち構造となるカメラユニット05の振動抑制を図る目的で、コンテナユニット側面から電磁式のマグネットを展開し、磁力による固定を行う機構に改良した（写真一3）。

なお、完成した車両での計測状況を写真一4に示す。



写真一3 カメラユニット05の振動防止



写真一4 完成車両による計測状況

6. 新しい車両の導入効果

(1) 計測速度の向上

計測速度を旧来型の 8.5 km/h から 20 km/h まで向上し、対象とする全新幹線トンネルにおいて 2 年毎の検査周期に合わせたデータ取得が可能となった。

(2) 取得データの解像度の向上

取得された画像上で幅 0.5 mm 程度のひび割れを視認でき、旧来型のトンネル撮影車から計測速度を向上しながら、より高精度なデータを取得できるようになった。

(3) トンネル展開図作成の省力化

新型トンネル撮影車では覆工表面の 2 次元情報に加え、光切断法により 3 次元情報が取得できる。3 次元情報を用いると覆工表面の凹凸形状からひび割れを抽出することができる。今後ひび割れ抽出の自動化に取り組むことで、トンネル展開図作成の省力化を進めていく。

7. 今後の取組み

今後はひび割れ自動抽出の機能向上を進めるとともに、2つの時期に作成されたトンネル展開図を比較することで検査の着眼点を絞る手法を検討することで、トンネル検査のさらなる質的向上に取り組んでいく。

J|C|M|A

《参考文献》

- 1) 鈴木延彰：トンネル覆工表面撮影車の導入，日本鉄道施設協会誌，pp41-43，2000年8月
- 2) 久保木利明，栗林健一：次世代トンネル覆工表面撮影車の導入に向けた現地試験の概要について，土木学会年次学術講演会，VI -116，2016年9月
- 3) 滝澤彰宏，中村大輔，齊藤岳季：トンネル覆工表面の 3D 解析によるひび割れ抽出について，土木学会年次学術講演会，VI -396，2018年8月

【筆者紹介】



久保木 利明（くぼき としあき）
東日本旅客鉄道株式会社
鉄道事業本部 設備部 大規模改修・業務革新グループ
課長



八嶋 宏幸（やしま ひろゆき）
東日本旅客鉄道株式会社
鉄道事業本部 設備部 大規模改修・業務革新グループ
課員



滝澤 彰宏（たきざわ あきひろ）
東日本旅客鉄道株式会社
JR 東日本研究開発センター
フロンティアサービス研究所
副主幹研究員