

高所作業車型トンネル点検システムによる 打音検査と近接目視の機械化

一般道路トンネルにおける iTOREL 高所作業車型の機能紹介

井上大輔・中村 聡

本システムはこれまで人が行っていたトンネル点検に代わり、覆工コンクリートのひび割れとうきを自動検出することで点検から帳票作成までの作業効率を向上させることを目的とする。自動車などの通行を妨げずに点検できる「ガントリー型」に加え、その8倍以上のスピードで点検可能な「高所作業車型」を開発した。打音検査と近接目視を機械化するにあたり、AIで自動判定を行う打音検査ユニットと、光切断法を使ったひび割れ検出ユニットを搭載した。同時に覆工背面空洞を探索するために電磁波レーダの搭載も可能となった。

キーワード：道路トンネル，維持管理，定期点検，地方自治体，交通規制，高所作業

1. はじめに

道路トンネル点検は原則としてトンネル全面を近接目視する必要がある。点検作業者は上向き姿勢を伴う長時間の高所作業を行っており負担が大きい。この作業は打音検査をはじめとして人の技量に頼るところが多く、検査結果のばらつきや技術者不足も懸念されている。このような課題に寄与する新技術の導入が進められている¹⁾。

著者らはロボット技術，音響解析技術，画像処理技術を組み合わせたトンネル点検システム iTOREL 高所作業車型（以下，本システムという）²⁾を開発した。2018年に開発した道路の通行を妨げずに点検できる「ガントリー型³⁾」に加え，2021年にはガントリー型の8倍以上のスピードで点検可能な「高所作業車型⁴⁾」を



写真-1 本システムの外観

開発した（写真-1）。また覆工背面空洞を探索するために電磁波レーダの搭載も可能となった。本システムを用いることで，交通規制および高所作業の時間を減らし，点検から帳票作成までの作業効率を向上できる。本稿では本システムの機器構成と操作方法を説明した後，実際の道路トンネルで取得した点検データの事例を紹介する。

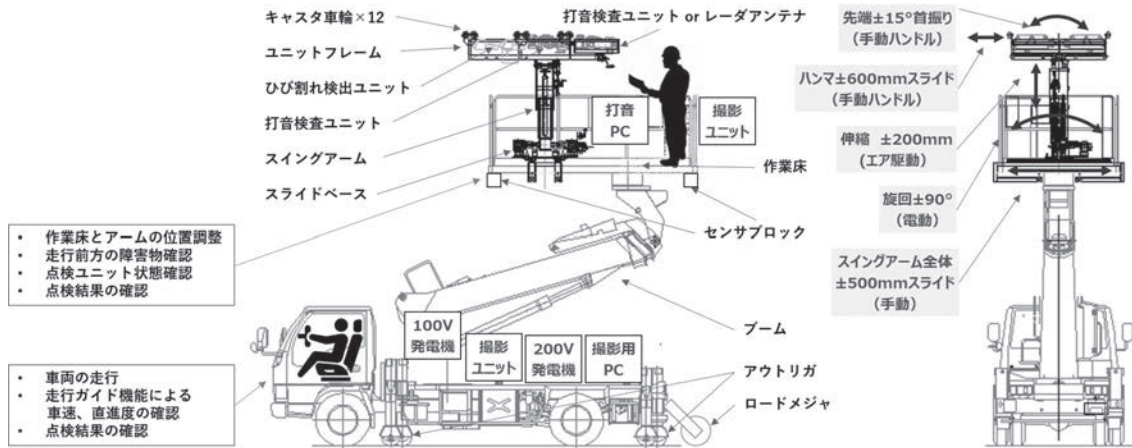
2. システム構成

(1) 全体構成

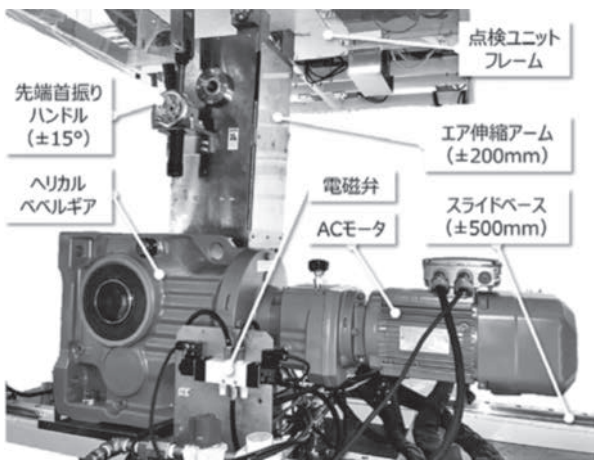
本システムの機器構成を図-1に示す。旋回と伸縮の機能をもつスイングアームを高所作業車の作業床上に搭載し，その先端に取り付けられたユニットフレームをトンネルに押し当てて道路方向に走行しながら点検作業を行う。走行速度は最大時速2kmであり，1回の点検幅は搭載する点検ユニットの構成に応じて0.3mから1.2mまでの範囲で変更できる。主な構成要素について以下に説明する。

(2) スイングアーム

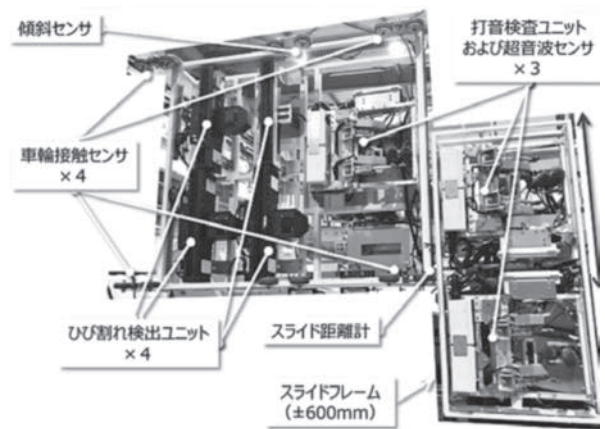
外観を写真-2に示す。最大200kgのユニットフレームを先端に搭載し，トンネル覆工コンクリートに対する位置，角度，離隔を調整する。旋回，伸縮，先端首振り，全体スライドの4自由度を持つ。旋回はACモータ，伸縮はエアシリンダ，それ以外は手動で調整する。スライドベースを介して高所作業車の作業床上に固定され，各種搭載機器の自重や反力を支える。



図一 本システムの機器構成



写真一 2 スイングアームの外観



写真一 3 大型ユニットフレームの外観

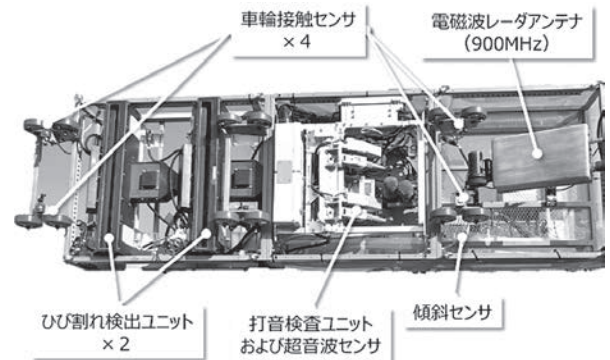
アームには傾斜計とレーザ距離計が備えられ、ユニットフレームの位置姿勢が算出される。

(3) ユニットフレーム

スイングアームの先端に装着され、点検箇所位置決めされる。打音検査ユニットやひび割れ検出ユニットを一定間隔で固定するために用いる。複数のキャスタ車輪と接触検知スイッチによってトンネル覆工との離隔を一定以上に保つ。各ユニットの点検位置は傾斜計により算出する。搭載するユニットに合わせてカスタマイズでき、現在は大型と小型の2種類を用意している。

大型の方は3台までの打音検査ユニットと4台までの光切断ユニットを搭載でき、点検幅1.2mで1,000 m²/h以上の高速点検が行える(写真一3)。打音検査ユニットのスライド機構を備え、設備近傍0.2mまで打音検査できる。スライド位置はレーザ距離計により算出する。

小型の方は点検幅が0.3mであり、点検速度は大型の1/4となるが、その代わりに電磁波レーダアンテナ



写真一 4 小型ユニットフレームの外観

の同時搭載が可能である(写真一4)。また小断面のトンネルや、照明等の坑内設備およびケーブルの多いトンネルに適する。

(4) 打音検査ユニット

写真一5に示すように、従来点検で人が用いる点検ハンマと同じ物を搭載する。劣駆動関節と揺動スライダクランク機構を組み合わせて打撃時の腕のしなりを再現し、人に極めて近い打音を取得する⁵⁾。打面との離隔を調整するステッピングモータを備え、超音波

センサで得られた離隔距離をもとにフィードバック制御される。ユニット1台につき2本のハンマを備え、ハンマ間隔を200mmピッチに設定すればユニット3台で1.2mの幅を打音検査できる。走行方向も200mmピッチで検査するには車速を20m/min以下とする。打音はガンマイクで収音され、高速フーリエ変換とFuzzy c-meansもしくはAdaBoostによりうきを判定する(図-2)。うきの検出精度はコンクリート試験体を用いた実験によって点検員と同等であることを確認している⁶⁾。

(5) ひび割れ検出ユニット

写真-6にひび割れ検出ユニットの外観を示す。白色LEDスリット照明を用いた光切断法により、1台の産業用カメラで距離画像とカラー画像を取得する。両画像にプロブ解析とガウシアンフィルタを適用

して即座にひび割れを検出する(図-3)。2種類の画像で検出処理を行うことで、一般的なひび割れ検出手法に比べて誤検出を抑えることができる⁷⁾。1台のカメラで両画像を取得しているため、検出結果を画素単位で統合しやすいことも特徴である。撮影後の後処理に数秒の時間を要するため、同じカメラを走行方向に2台並べ、後処理中はもう1台のカメラで交互に撮影することで、走行を止めずに最大30m/minで連続撮影を行う。2台で0.6mの幅を撮影し、4台のカメラで合計1.2mの幅を撮影する。4Kカメラを用いて1画素0.2mmの画質で撮影できる。

(6) 撮影ユニット

ひび割れ検出ユニットで撮影できないトンネル内照明等の設備周辺は、本ユニットを用いて撮影する(図

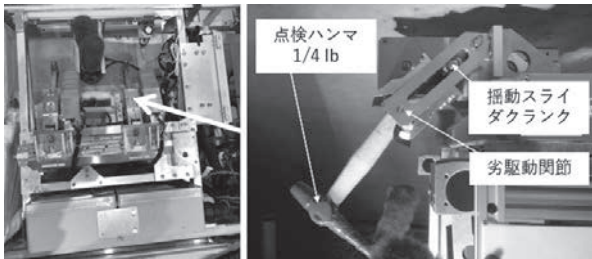


写真-5 打音検査ユニットの外観

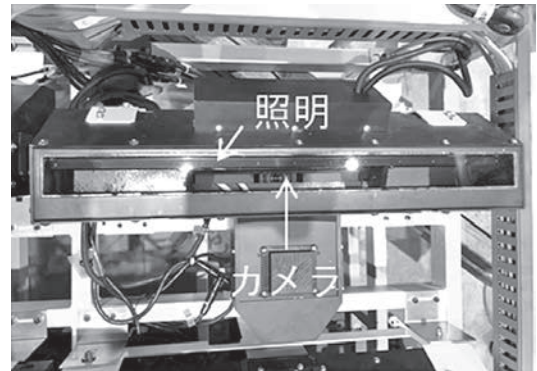


写真-6 ひび割れ検出ユニットの外観

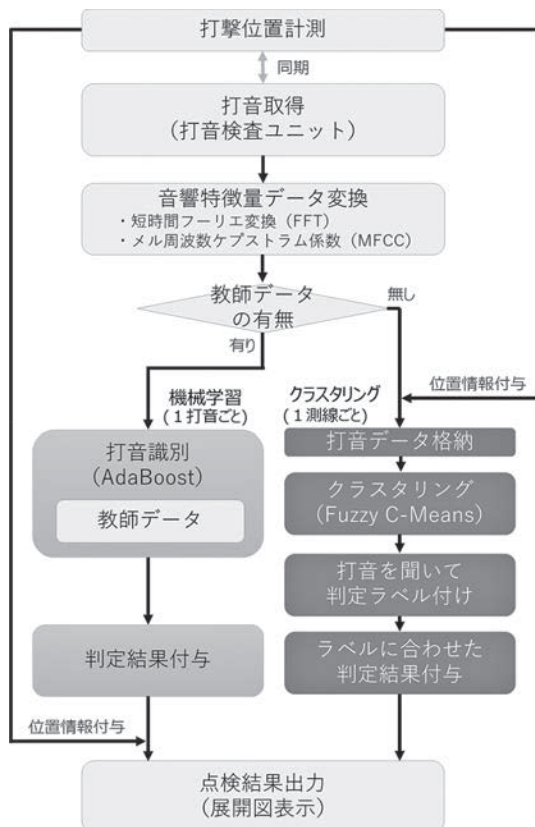


図-2 打音検査ユニットによるうき判定フロー

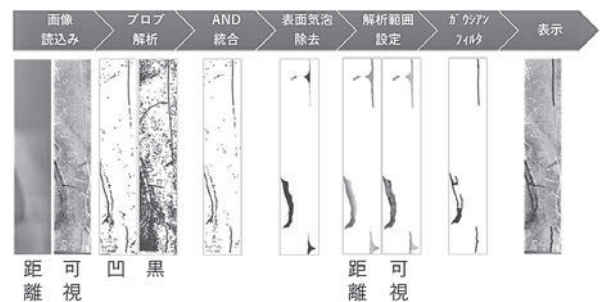


図-3 ひび割れ検出処理フロー

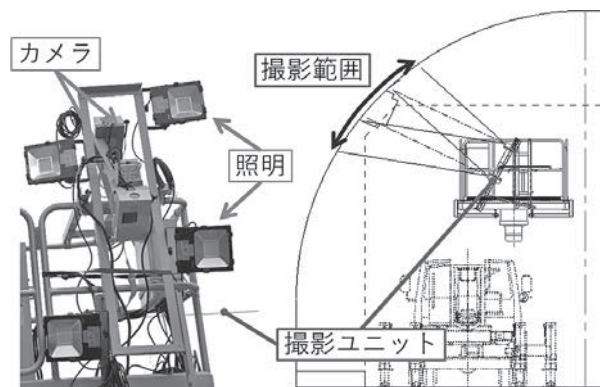


図-4 撮影ユニットの配置と撮影範囲

一4)。TDI (Time Delay Integration) 方式を用いることで、小型の照明でも光切断法と遜色ない画質の可視画像を連続的に取得する。4台のカメラを使って最大40 m/minで撮影できる。カメラにジンバルを追加して未舗装路でも使用できる。

3. システムの操作方法

(1) 操作人員

本システムを用いたトンネル点検の作業フローを図一5に示す。本システムの操作は作業床上操作者、車両運転手、地上指揮者の3人で行う。1人目は作業床の上に乗る、走行停止中の作業床とアームの位置姿勢調整、点検ユニット状態確認、点検開始停止操作を行う。2人目はベース車両の運転席に座り、適切な車速および直進度を維持しながら車両を運転する。3人目は地上から点検前の測線の開始位置指示や点検中の前方障害物確認等、点検作業全体の指揮をとる。

(2) 操作インターフェース

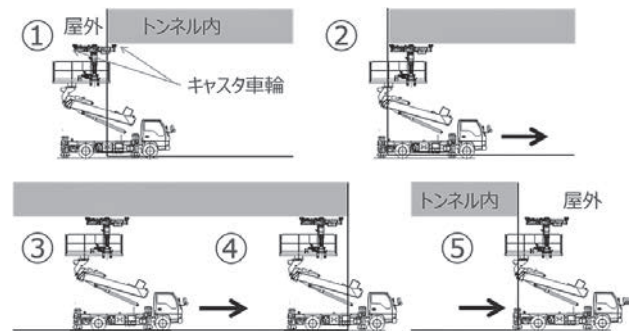
運転手はタブレット端末に表示された走行ガイド(インジケータと速度超過ブザー)を参照しながら運転することで、所定の車速を維持しながらトンネル壁面に沿って直進する。

作業床上操作者は、センサブロックで得られる作業床の位置姿勢をタッチパネル上で参照しながら、高所作業車の作業床の位置や角度、スイングアームのスライド・揺動・伸縮の量、ユニットフレームの位置姿勢、点検ユニットの開始・停止を操作する。

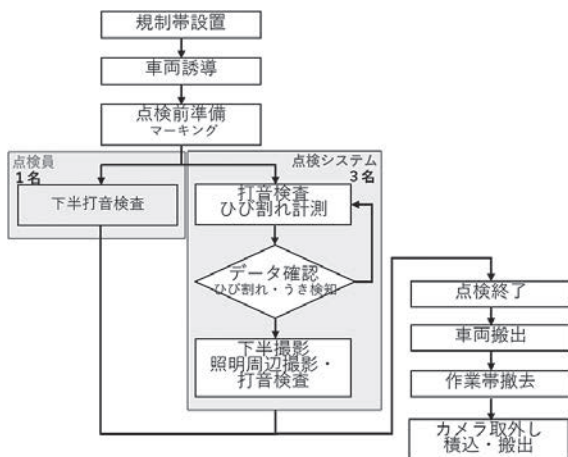
地上指揮者はWi-Fiでタブレット端末とシステムを接続し、点検データを確認する。

(3) 点検操作手順

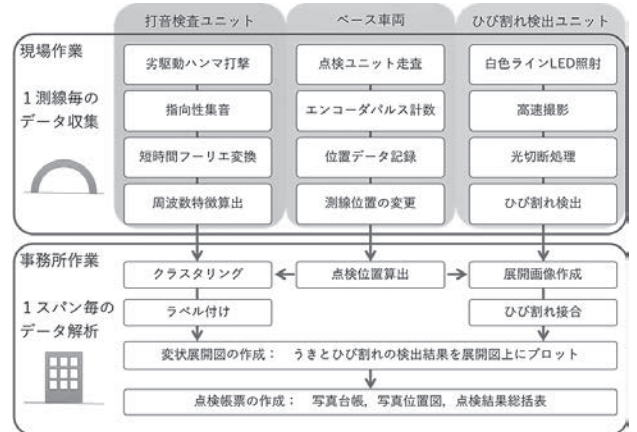
本システムを用いたトンネル点検の模式図を図一6に示す。まず①作業床とアームの位置姿勢を測線に合わせ、車両を徐行させながらトンネル入口に接近し、ユニットフレーム先頭のキャスト車輪がトンネル内に進入した時点で車両を停止させ、ユニットフレームの姿勢を覆工に合わせて微調整する。その後アームを伸ばしてユニットフレームをトンネル覆工に軽く押し当てる。次に②点検開始ボタンを押し、キャスト車輪が全て覆工に接地するまで徐行前進する。③アームを伸ばし続けてユニットフレームを覆工にしっかりと押し付けた状態で、走行ガイド機能を有効にして20 m/min以下で連続走行する。④前方のキャストがトンネル出口から出る直前に車両を停止させ、アームの押し付けを弱める。最後に、⑤ユニットフレーム全体がトンネルを出るまで徐行で前進させ、点検停止ボタンを押し、アームを格納する。以上の手順を測線ごとに繰り返すことで、打音と画像それぞれのデータが位置データに紐づけて収集される。これらのデータを専用ソフトウェアで繋ぎ合せると、トンネル1スパン毎の展開画像および変状展開図が得られる(図一7)。剥落する危険性のあるうきを検出された際には、その場で叩き落とし等の緊急措置を行う。



図一6 点検システム操作手順



図一5 点検作業フロー



図一7 点検データ処理フロー

(4) トンネル内設備近傍での点検操作手順

トンネル用照明やケーブル等の設備近傍ではユニットフレームを押し当てられない範囲がある。この範囲では撮影ユニットによる画像取得を行い、打音検査は人による従来手法で補完する。その手順はまず①車両および作業床を測線の位置に合わせ、点検開始ボタンを押す。②トンネル内に進入したら走行ガイド機能を有効にして40 m/min以下で連続走行する。同時に作業床上では設備近傍を人が打音検査する。③トンネルを出たら点検停止ボタンを押す、得られた画像を確認する。④この画像を専用ソフトウェアで繋ぎ合せると、トンネル1スパン毎の展開画像が得られる。打音検査結果はこの展開画像上に入力する。

4. システムによるデータ取得事例

本システムを用いて得られるデータの例として、実際の道路トンネルで取得したデータを、本システムに搭載した各種点検ユニット毎に紹介する。

(1) 打音検査ユニット

写真一七に示すトンネルで取得した打音検査結果の展開図例を図一八に示す。クラスタリング処理の結果、最も少ない数のクラスタとなった点を異常箇所として中実白丸で、それ以外を正常箇所として中空白丸で示す。ひび割れのチョーク跡周辺に異常箇所が表れている。

このクラスタリング処理に用いられた打音データの例を図一九に示す。上のグラフが打音波形であり、下向き矢印で打撃音のピークを示している。打撃音は高い周波数を含んでおり、他の音よりも音量が大きいことがわかる。下のグラフはスペクトル図であり、打撃音の間に他のピーク音も含まれ、隣り合う打音検査ユニットの打音が混ざっている。判定対象となる打音

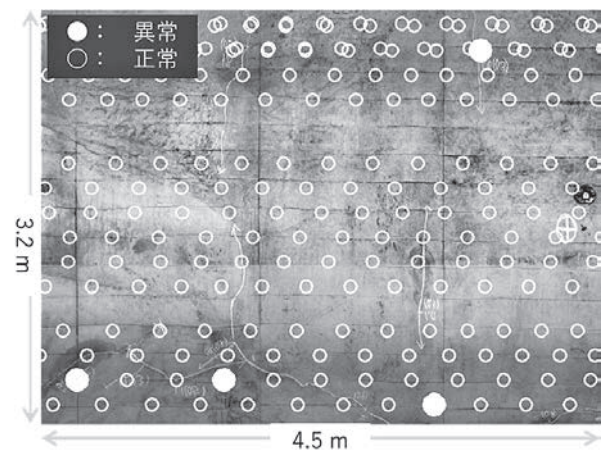


写真一七 道路トンネルでの点検状況

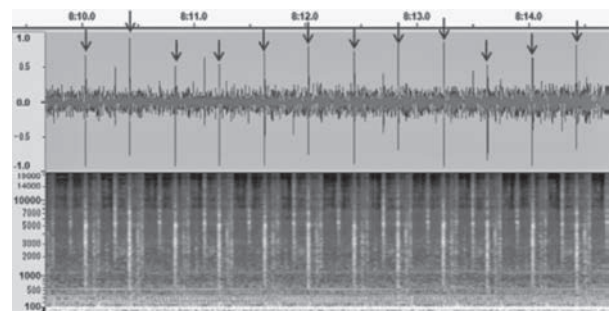
とそれ以外の音のスペクトルの比をとると図一十のようになり、全周波数の平均で13 dB程度であり、判定に問題の無い音質で収録できている。

(2) ひび割れ検出ユニット

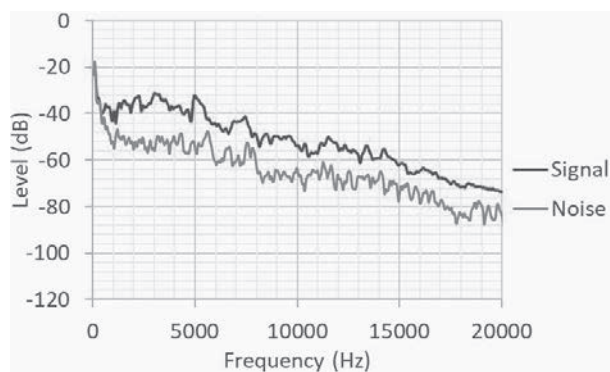
上記と同じトンネルでひび割れ検出ユニットにより撮影された可視画像の例を写真一八に示す。ひび割れのチョーク跡や緑色の苔が発生していることを確認できる。幅0.7 mmのひび割れが2本写っているが、ひび割れ幅は部分的に細い箇所があるため写り方が異なる。細い部分は周囲のひび割れとのつながりを考慮してつなぎ合わせることで検出する。



図一八 本システムによる変状展開図例



図一九 打音の波形とスペクトルの例 (矢印は打撃音のピーク箇所)

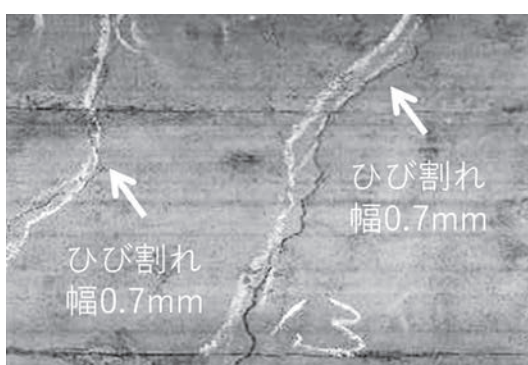


図一十 打撃音ピークとそれ以外のスペクトル比較例

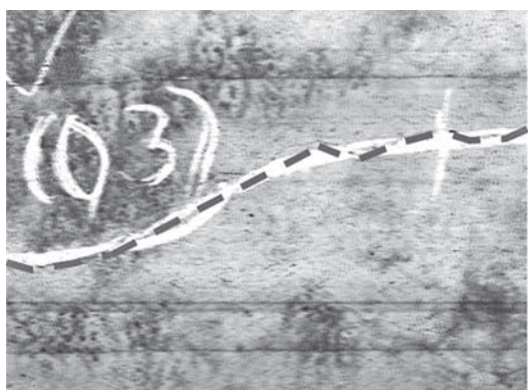
細いひび割れの例として、幅 0.3 mm のひび割れ可視画像を拡大して図一 11 に示す。ひび割れ検出結果を破線で併記している。また同じ範囲の距離画像を図一 12 に示す。ひび割れの奥行きが黒く表れており、可視画像と組み合わせてひび割れと汚れ等を区別して検出できる。

(3) 撮影ユニット

撮影ユニットを用いた撮影状況を写真一 9 に、1 スパンの展開画像例を図一 13 に示す。この画像は 3 往復 6 本の測線画像をつなぎ合わせて作成された。この画像から照明設備やケーブルの取付け状態および



写真一 8 ひび割れ幅 0.7 mm の可視画像例



図一 11 ひび割れ幅 0.3 mm の可視画像とひび割れ検出結果例



図一 12 幅 0.3 mm の距離画像

チョーク跡を確認できる。

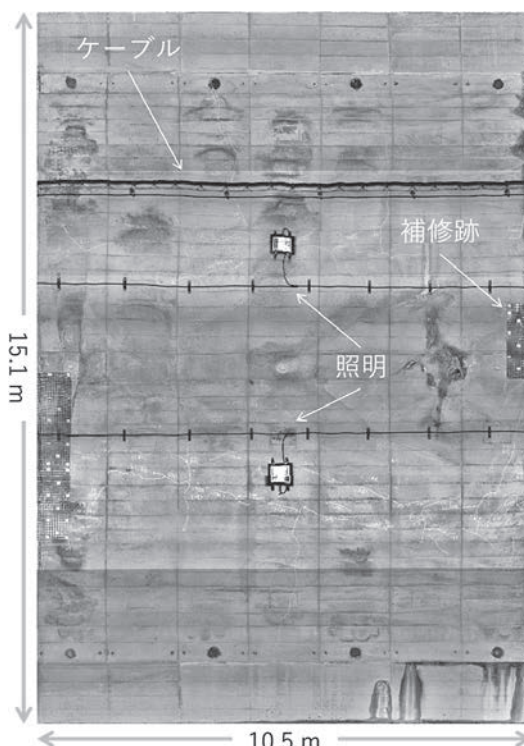
(4) 電磁波レーダユニット

背面空洞が発生しやすいトンネル天端から肩部の 5 測線を、2 m 間隔で取得した。また同時にひび割れ検出を幅 0.6 m、打音検査を幅 0.4 m で行った。そのデータ例を図一 14 に示す。0.2 mm 以上のひび割れを実線で、打音検査で異常なしと判断された箇所を薄いグレーの丸で、打音検査で異常と判定された箇所を濃い丸で示している。

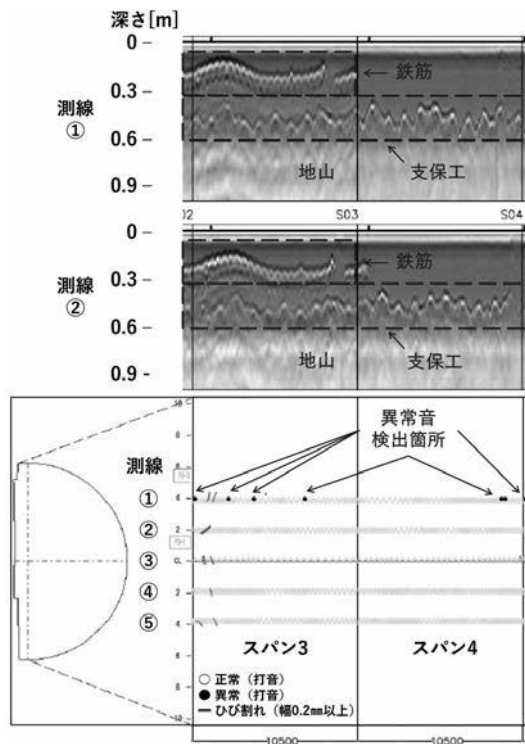
異常音を検出された測線①について取得したレーダ画像例を確認すると、トンネル覆工内部の鉄筋や支保工がはっきりと写っており、その内側の地山にも緩みなどの変状が見られない。また異常音のない測線②の



写真一 9 撮影ユニットによる撮影状況



図一 13 撮影ユニットによる展開画像例



図一 14 レーダ画像と変状図の例

レーダ画像との間に差異は見られない。異常音を人の耳で聴くと清音であったことから、誤検出であったと思われる。

5. おわりに

著者らはトンネル点検システム iTOREL 高所作業車型を開発し、打音検査と近接目視の機械化を試行した。本システムの機器構成と操作方法、および道路トンネルにおけるデータ取得事例を紹介した。各種ユニットから得られたデータを組み合わせて、トンネル点検の機械化・効率化を進めていく。

本システムは内閣府「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」における研究成果をもとに開発された。点検データ取得の一部は土木学会「新技術の地域実装促進に関わる研究助成」において実施された。

J C M A

《参考文献》

- 1) 国土交通省, 点検支援技術性能カタログ, 2023年3月.
- 2) iTOREL, アイトーレル, 登録商標第6200054号, 2019年11月.
- 3) S. Nakamura, A. Yamashita, F. Inoue, D. Inoue, Y. Takahashi, N. Kamimura and T. Ueno, Inspection Test of a Tunnel with the Inspection Vehicle for Tunnel Lining Concrete, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.31, No.6, pp.762-771, 2019/12.
- 4) 井上大輔, 上村暢一, 中村聡, アーム型トンネル覆工打音検査・撮影システムの開発, 東急建設(株)技術研究所報, No.47, pp.53-57, 2022年1月.
- 5) 高橋悠輔, 中村聡, 響きを考慮した劣駆動型打音装置の開発と性能評価, 東急建設(株)技術研究所報, No.42, pp.71-74, 2017年1月.
- 6) 高橋悠輔, 前原聡, 藤井浩光, 山下淳, 人の音に近い打音装置を使った変状検出手法, 日本ロボット学会誌, 38巻, 1号, pp.113-118, 2020年1月.
- 7) D. Inoue, T. Ueno and S. Nakamura, Robotic Inspection Tests of Tunnel Lining Concrete with Crack Light-Section Device on Variable Guide Frame, International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC), pp. 540-545, 2018/7.

【筆者紹介】

井上 大輔 (いのうえ だいすけ)
東急建設(株)
技術研究所 メカトログループ
主任研究員



中村 聡 (なかむら さとる)
東急建設(株)
技術研究所 メカトログループ
グループリーダー

