

変状自動検出機能を搭載した トンネル点検システムの現場適用

中村 聡¹・井上 大輔²・鈴木 祥三³・伊藤 正憲⁴

¹ 非会員 東急建設(株) 技術研究所 メカトログループ (〒252-0244 神奈川県相模原市中央区田名 3062-1)
E-mail: nakamura.satoru@tokyu-cnst.co.jp

² 非会員 東急建設(株) 技術研究所 メカトログループ (〒252-0244 神奈川県相模原市中央区田名 3062-1)
E-mail: inoue.daisuke@tokyu-cnst.co.jp

³ 正会員 東急建設(株) 土木事業本部 技術統括部 土木技術部 トンネルグループ (〒150-8340 東京都渋谷区
渋谷 1-16-14)
E-mail: suzuki.MS0208@tokyu-cnst.co.jp

⁴ 正会員 東急建設(株) 土木事業本部 技術統括部 技術推進部 (〒150-8340 東京都渋谷区渋谷 1-16-14)
E-mail: itou.AI9184@tokyu-cnst.co.jp

トンネル覆工コンクリートの正確な劣化状態の把握や、技術者不足などのインフラ点検に関する課題に対応することを目的として、変状自動検出機能を搭載した「トンネル全断面点検システム」を開発した。適用する現場状況にあわせ、一般車両の通行を極力妨げないガントリー型や、走行しながら連続的に点検を行う高車型の点検システムの概要と現場適用について報告する。

Key Words: Tunnel lining concrete, Concrete spalls, Crack, Light-section, Machine learning

1. はじめに

高度経済成長期に建設された道路インフラの高齢化が進み2033年には全国の約1万本ある道路トンネルの約半数が50年以上経過すると言われている。2014年には道路法施行規則の一部が改正され、近接目視により5年に1回の頻度で点検が必要になった¹⁾。点検者は近接目視や打音検査を行うために点検位置に近づかななくてはならず、上向きでの長時間作業や、検査結果のばらつきが課題となっている。一方、これらのインフラの維持管理を担当する技術者不足や、点検費用の不足などの課題もあり、これらを解決するため革新的な点検技術が進められている。

これらの課題を解決すべく、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」を開発した(図-1)。本報では、開発したトンネル点検システムの概要とトンネル点検を自動化するための主要な要素技術である「打音検査ユニット」および「ひび割れ検出ユニット」に適用した変状検出手法について述べる。また、実際の道路トンネルにおいて点検システムを使用した検証実験の結果について報告する。

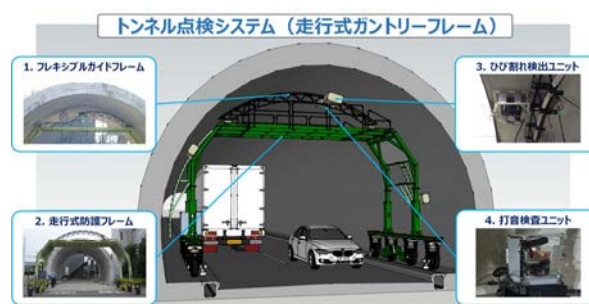


図-1 トンネル点検システム「iTOREL」(走行式ガントリーフレーム)

2. トンネル点検システムの概要

トンネル点検システムは、点検時に必要となる自動車等の交通規制を削減し、人による近接目視と打音検査の点検業務を遠隔操作ロボットによって代替する事を目指したシステムである。点検を実施する道路トンネルの条件によって走行式ガントリーフレーム²⁾や点検用アームを搭載した高所作業車を使い分け、覆工コンクリートに沿って点検用ユニットを移動させながら点検することで、これまで点検しづらかった天端部を含めたトンネル全面の点検を行う。

(1) 走行式ガントリーフレーム型

走行式ガントリーフレーム型の点検システムは地方の一般道をターゲットとして開発した。走行式ガントリーフレームは、道路種別の第3種に適合するよう仕様を設定し、全長は5m、幅は道路幅員に合わせて伸縮が可能なフレーム構造とした。ガントリーフレームはタイヤ走行によって坑内を移動するため、道路の構造規格に合わせ全体重量を4tに抑え、最小曲率半径が50mのトンネルに合わせた操舵が可能である(表-1)。この点検システムを実現するため、図-1に示したフレキシブルガイドフレーム、走行式防護フレーム、打音検査ユニット、ひび割れ検出ユニットの4つ要素技術を採用している。

トンネルの天頂部、左側壁部、右側壁部の3つに分割したガイドレールをガントリーフレーム全周に配置し、各ガイドレールに設置した打音検査ユニット、ひび割れ検出ユニットを駆動装置によって円周方向に移動させることでトンネル全周の点検を行い、ガントリーフレームの走行と交互に行うことでトンネル全体を点検する。

点検スピードは各点検用ユニットの計測能力に大きく依存するが、人による点検スピードと同程度となるよう最大130m²/hに設定した。また、点検システムによって取得した定量的な点検データを専用ソフトウェアで処理することでトンネル全体の変状展開図や写真台帳として出力可能な構成となっている。

(2) 点検用アーム搭載型

走行式ガントリーフレームの組立や解体にはクレーンを使用しなければならないため、トンネル周辺の作業場所や道路の一時的な通行止めが必要となり適用できるトンネルに制限があった。そこで、現地での組立や解体が不要な点検用アームを市販の高所作業車に搭載したトンネル点検システムを開発した(写真-1)。

点検用アームの先端に取付けられた点検ユニットには、走行式ガントリーフレームと同様に「打音検査ユニット」「ひび割れ検出ユニット」が複数台設置され(写真-2)、高所作業車の走行に合わせてトンネル縦断方向に点検を実施する。この際、打音検査と画像撮影を同時に行い、1回の走行で最大1200mmの幅が点検できる。

点検用アーム搭載型は点検時に片側交互通行規制が必要となるが、高所作業車を走行させながら点検ができる

ため点検スピードは走行式ガントリーフレーム型よりも速い最大1150m²/hである。(表-2)

(3) 点検要素技術

トンネル点検における主要な検査項目として近接目視と打音検査がある。従来は人によって行われているこれらの点検作業を自動化するため「打音検査ユニット」と「ひび割れ検出ユニット」を開発した。この2つのユニットに適用した変状検出手法について述べる。

a) 打音検査ユニット

打音による浮きの判定は、人が点検用ハンマーを使用して覆工コンクリートを叩いた音が基準になっている。打音検査ユニットは遠隔操作によって覆工コンクリートを点検用ハンマーで叩き、取得した打音データを解析し、覆工コンクリートの浮き等の変状を検出する。

打音検査ユニットは、人の腕の振りを模擬し、極めて人に近い打音が発生可能な機構を採用している(写真-3)。浮きの自動検出は状況に応じた2つの手法を使用している。1つは機械学習の一つであるアンサンブル学習を用いた浮きの自動検出手法である。アンサンブル学習は識別に寄与しない特徴量が存在し、単独の識別器で

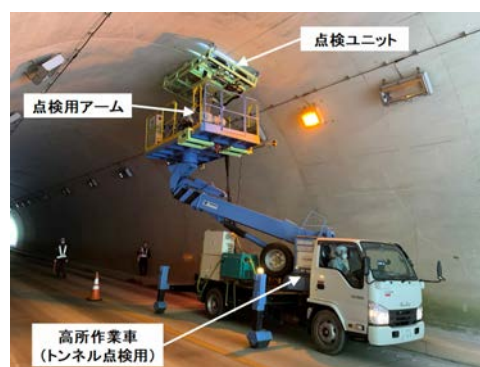


写真-1 点検用アーム搭載型トンネル点検システム

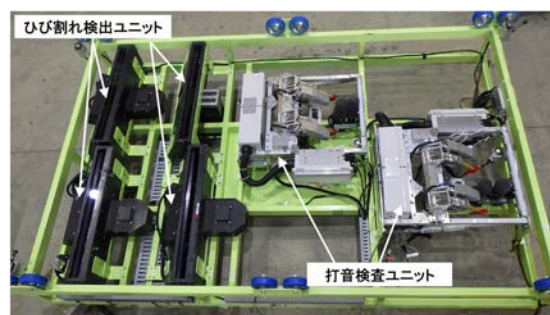


写真-2 点検ユニット

表-1 走行式ガントリーフレーム型点検システムの仕様

全長	5.0m
全幅	6.4m～9.5m (調整可能)
質量	4.0ton (500kg / 1輪, 発電機含む)
走行速度	1～10 m/min (最大勾配 10%)
点検項目	浮き, ひび割れ
点検スピード	最大 130m ² /h (トンネル全断面点検モード: 約 16m/h)

表-2 点検用アーム搭載型点検システムの仕様

計測幅	1測線あたり 800～1200 mm
点検範囲	地上高約 13 m, 作業半径約 4m
点検項目	浮き, ひび割れ
点検スピード	最大 960～1150m ² /h (車両走行速度: 1.2～1.4km/h)

は検出性能が低下する場合にも、数十個程度の異なる識別器を組み合わせることで、より性能の良い検出が可能である。アンサンブル学習の1つであるブースティングアルゴリズムを用いて打音データをもとに複数の変状識別器を逐次生成し、それらを重み付き多数決によって最終的な識別関数（強学習器）を構成する³⁾ことで、判定に寄与しない騒音などに対して頑健な浮きの検出が可能である。

しかし、この手法は打音などの学習データを保有しないトンネル点検には適応できない。そこで、もう1つの手法として、取得した打音データの特徴量ベクトルをFuzzy c-meansによって2つの集合（クラス）に分割することで、浮きと健全を判別する方法⁴⁾を採用している。この手法は、学習データを持っていない初めて点検するトンネルで打音検査する場合に有効である。

打音検査ユニットは、前述した打撃機構と浮きの自動検出装置から構成され、打音取得用マイク、動作確認用カメラ、高速フーリエ変換（FFT）と自動検出処理を行うコンピュータが組み込まれている。打音検査ユニットの検出精度はコンクリート試験体を用いた変状検出実験によって点検員と同等であることを確認している⁵⁾。

b) ひび割れ検出ユニット

現在、実用化されている画像によるひび割れ計測技術の多くは交通規制が不要であるが、ひび割れ幅の分解能が低く、コンクリートの汚れを含むノイズ除去等の後処理作業で多くの労力が必要である。そこで、光切断法を用いた3次元形状計測によってひび割れと汚れを自動識別し、点検データからひび割れをオンサイトで検出するシステムを開発した。

光切断法は、スリット光とエリアカメラの角度を一定に保ったまま点検対象物に対して相対的に移動させることにより3次元形状を取得する方法である。これは、スリット光が凹凸に応じて変形するという特性に基づいており、白色LEDのスリット光を用いることにより、3次元形状データと座標が一致するカラー画像（可視画像）を得ることができる（写真-4）。ひび割れ計測の高精度化や省力化に対応するため、3次元形状を取得することができる様々な手法から0.1mm/pixの高解像度と、数

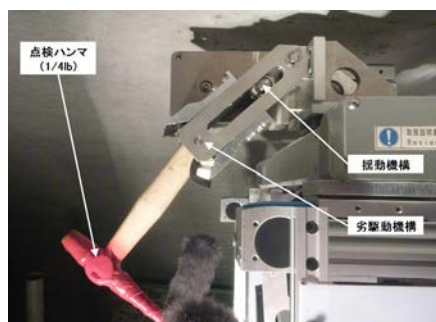


写真-3 打撃装置

kmにわたる広域点検のための携帯性の両方を考慮して光切断法をトンネル点検システムに採用した。

ひび割れ検出ユニットを移動させながらコンクリート表面をスキャンし、覆工コンクリート表面の距離画像と可視画像を取得することで、奥行のある黒線を検出し、ひび割れと汚れを区別する（図-2）。

ひび割れ検出精度を検証する実験では、幅0.5mm以上のひび割れ検出精度が90%を超え、自動検出ではないが可視画像から幅0.1mmのひび割れも視認可能であった。また、得られたデータはひび割れ長さの測定や剥落の危険性がある閉合したひび割れの調査にも使用することができる。

3. 道路トンネルでの検証実験

トンネル点検システムの性能や検出精度、点検作業効率などを確認するため、実際の道路トンネルにおける点検システムの検証実験を実施した。実験は走行式ガントリーフレーム型と点検アーム搭載型を搭載した高所作業車の2つ方式を異なるトンネルで実施し、点検データを取得する「打音検査ユニット」と「ひび割れ検出ユニット」は、2つのベースフレームともに同じユニットを使用した。

(1) ガントリーフレーム型点検システムの検証実験

走行式ガントリーフレーム型の点検システムを用いて検証実験を行ったトンネルは1983年に築造された延長130mの道路トンネルである。道路は両側に歩道がある



写真-4 コンクリートに照射した白色LEDスリット光

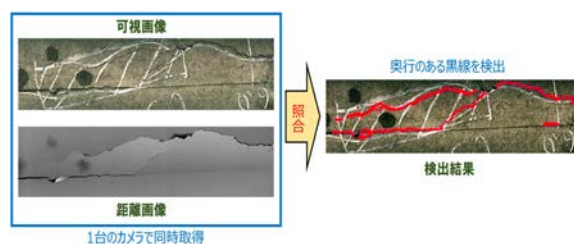


図-2 光切断法によるひび割れ検出

片側1車線で、自治体によって管理されている。トンネルは在来工法で築造されており、覆工コンクリートが上半と下半が異なるタイミングで打設されているためトンネル全線わたり縦断方向の打ち継ぎ目がある。この実験と同じタイミングで点検員によるトンネル点検が実施されている。

打音検査ユニットによる打撃間隔は200mmピッチ、ひび割れ検出ユニットの撮影幅は画像接合時のラップ量を考慮して400mmとした。ガントリーフレーム全周に配置したガイドレールの長さから、点検システムによる点検範囲は上半と下半の境目であるSLライン付近までとした。走行式ガントリーフレームは歩道上を走行するが、トンネル内は片側交互規制を行い、点検システムの下部に車両を通行させながら点検を行った(写真-5)。検証実験では、地上からガントリーフレーム操作および点検ユニットの操作を行う作業員2名、ガントリーフレームの足場上で応急措置等の対応を行う作業員1名、作業指揮者1名の合計4名で点検システムの操作を行った。

検証実験では全長130mにわたり全断面の点検を実施した。点検システムによって取得した点検データを元に自動検出された変状をトンネル点検調書の書式に合わせて出力した。図-3に検証実験で得られたデータから作成した点検調書の一部を示す。図-3に示した線がひび割れ、点が浮き、ひび割れを囲んでいる線はエフロレンスを表している。

点検システムで自動検出した変状の精度を検証するため、点検員と点検システムによるひび割れ検出結果の違いについて比較を行った。1つの展開図上にそれぞれのひび割れ検出結果を示す(図-4)。この結果から、点検員と点検システムが描画したひび割れの位置や形状は厳密には異なるが、点検員が記録したひび割れを点検システムで自動検出できていることが分かる。しかし、ひび割れの太さと長さの値を比較すると完全に一致しない。点検結果が異なる理由として以下の点が考えられる。

- ・1本のひび割れの中では幅が一定ではないため計測する位置によって太さが異なる。
- ・点検員はひび割れ長さを大まかに測ることがある。
- ・点検員は現場でのスケッチによってひび割れの位置や形状を記録するため、点検報告書に記載されるデータは大まかな位置や形状になりやすい。

トンネル全線の幅0.5mm以上のひび割れについて点検員と点検システムによる自動検出を比較した結果、点検員が記録したひび割れは12本、点検システムが検出したひび割れは12本であり、検出率は100%であった。しかし、検出したひび割れの長さで求めた検出率は92%であり、点検システムを使用した正しいひび割れの認識方法には課題があることが分かった。

また、検証実験では一般車両を通過させながら点検作



写真-5 走行式ガントリーフレーム型点検システムによる点検状況

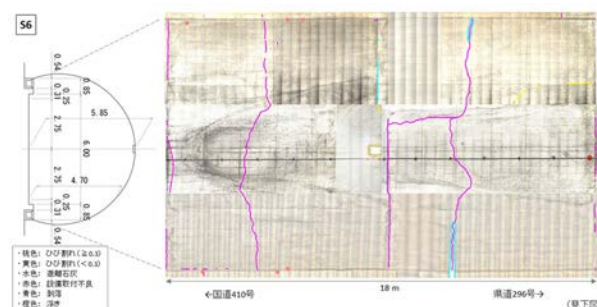


図-3 検証実験での点検調査例

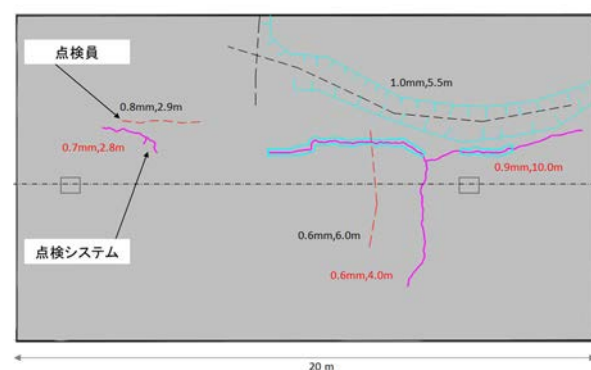


図-4 点検結果の比較

業を実施したが、交通障害となる事象は発生せず安全に点検作業を行うことができた。

(2) アーム搭載型トンネル点検システムの検証実験

トンネル点検用高所作業車に点検用アームを搭載した点検システムを用いて検証実験を行った。検証実験を行ったトンネルは1999年に築造された延長109mの道路トンネルである。トンネルの両側に歩道がある片側1車線道路で、自治体によって管理されている。

検証実験時は片側交互規制を行い、上り線、下り線の順に点検作業を実施した。アーム搭載型トンネル点検システムを使用した点検状況を写真-6に示す。点検面積は約1,745㎡として、打音検査ユニットでは点検できない照明周辺の覆工コンクリートは手作業での打音検査を行った(写真-7)。検証実験では、点検システムによっ

て自動検出した変状の数量、位置、形状などのデータについて、従来の人による点検方法で得られた点検結果と同程度の品質であるか現場実証を実施とともに、点検システムでの作業に要した時間や人員から点検作業時間の短縮や省力化についても検証した。

検証実験ではトンネル全長 109m にわたり全面のひび

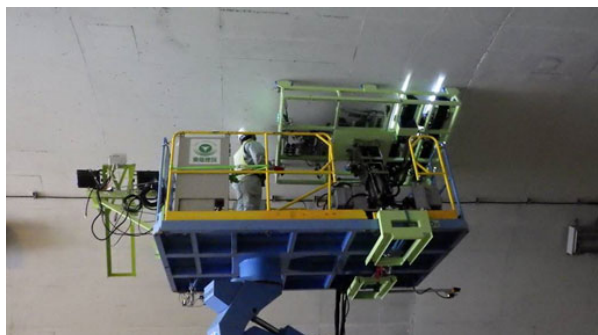


写真-6 アーム搭載型点検システムの点検状況

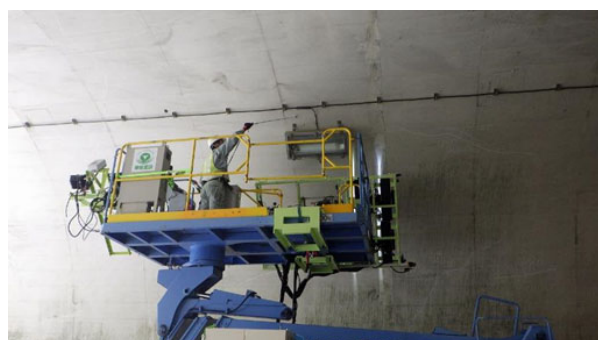


写真-7 人による設備周辺の打音検査の補完



図-5 検証実験で撮影した変状可視画像

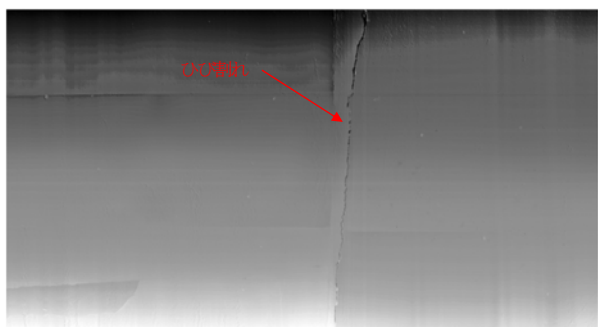


図-6 検証実験で撮影した変状距離画像

割れ検出と打音検査を点検を 1 日で行った。検証実験で撮影した変状画像として、幅 4.0 mm、長さ 6.4m のひび割れについて、可視画像を図-5 に、距離画像を図-6 に示す。図-6 に示すように、ひび割れの距離画像においても覆工表面よりも奥行きのある黒い線として検出している。検証実験で画像から検出された 0.2 mm以上のひび割れは、点検システムによって自動検出されたものである。

検証実験において点検システムで覆工コンクリートを点検した結果、ひび割れ 120 ヶ所、はく離 32 ヶ所、漏水等による変状 2 ヶ所、漏水・遊離石灰 11 ヶ所を検出した。なお、検出した 120 ヶ所のひび割れで、幅 0.5 mm以上のものは 5 ヶ所であった。

検証実験では、打音検査ユニット 1 測線あたり約 1,310~1,860 回の打撃を実施し、トンネル全体で約 18,600 回の打音データを取得した。トンネルカーブ区間の継目についてはオーバーラップを考慮し、約 100 mm 間隔で打撃するように点検を行った。しかし、打音検査ユニットによる浮きの検出は無かった。

次に、点検システムによって自動検出した変状の数量、位置、形状などのデータが、従来の人による点検方法で得られた点検結果と同程度の品質であるかを確認した。図-7 に 2020 年度の定期点検結果と点検システムによる変状検出結果を重ねて表記した変状展開図の一部を示す。図-7 では、2020 年度の定期点検結果を灰色、点検システムによる点検データは凡例に合わせて表記している。

検証実験の点検データと、2020 年度に実施した点検員による定期点検と比較した結果、ひび割れ 1 ヶ所、はく離 7 ヶ所、漏水・遊離石灰 2 ヶ所を点検システムによって新たに検出している。点検システムによる 2020 年度の定期点検結果の見落としはなかったが、変状位置の差異は延長方向に平均 14cm であった。新たに検出した変状以外は、2020 年度の定期点検結果と近い位置に検出されており、ひび割れの幅と長さについても幅 0.1 mm 程度の違いがあるが人の点検結果とほぼ同等の結果が得られている。新たに検出したはく離 7 ヶ所は、前回点検で実施した打音検査で叩き落とした箇所と考えられる。

点検作業効率を確認するため、検証実験における現地での各作業時間について計測を行った。点検ユニットのセットや高所作業車の移動も含めた 1 測線あたりの点検に要した平均時間は 17.5 分、画像撮影ユニットで行った 1 測線あたりの下半や設備周辺の画像撮影は平均 17.0 分であった。最も短い 1 測線あたりの点検時間は 12.0 分であり、点検作業後半に行った下り線の方が、環境や作業に慣れ効率的に作業ができています。また、点検作業時間のうち点検ユニットのセットや高所作業車の移動に要した時間を抜いた点検時間時間の平均は 17.5 分であり、点検システムの作業スピードに換算すると 12.7m²/min であった。この結果から、点検システムの操作に慣れていな

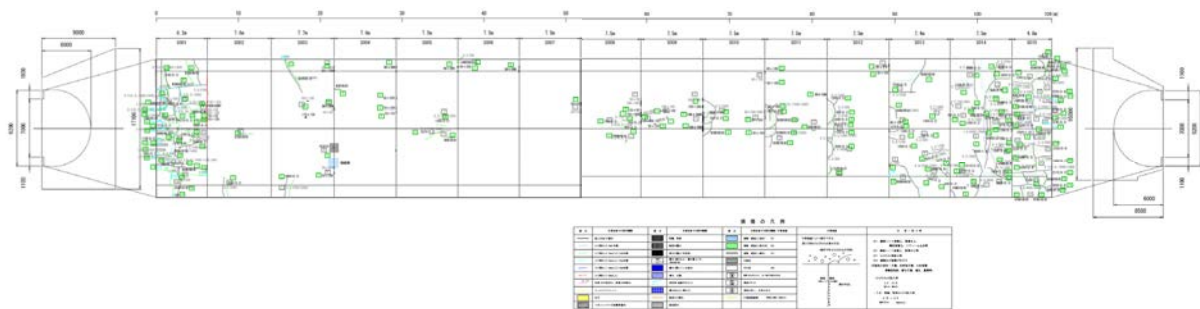


図-7 点検システムと従来点検の変状比較

くても仕様に記載している点検スピード $960 \text{ m}^2/\text{h}$ に近い効率で点検作業ができていることが確認された。

検証実験における現場の点検作業と点検調書作成に要した各作業時間と、過年度の定期点検時の人による点検工数を比較したものを表-3 に示す。なお、交通規制にかかる交通誘導員の人数は含めていない。表-3 の結果から点検システムを使用することで現地のトンネル作業では5人工、点検調書作成作業では4人工の効率化を図れることが確認された。

4. おわりに

トンネル点検システムを開発し、検証実験を通じて、点検システムが人と同程度の精度で浮きやひび割れが検出できることが確認された。今後は、様々な要求や条件に合わせた要素技術の選択が可能なシステムを構築し、機能性や点検スピードの向上を目指す。

本研究は、内閣府総合科学技術・イノベーション会議の「SIP インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」（管理法人：NEDO）によって実施したものである。

表-3 点従来点検との点検工数比較

作業内容	従来点検		点検システム		工数差 (人・日)
	作業人員	日数	作業人員	日数	
トンネル点検作業	4	2	3	1	-5
点検調書作成作業	2	6	1	8	-4

参考文献

- 1) 国土交通省：令和 2 年版国土交通白書，第 I 部 3 章 2 節，p. 142，2020.
- 2) 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.
- 3) onghoon Im, Hiromitsu Fujii, Atsushi Yamashita, and Hajime Asama: Multi-Modal Diagnostic Method for Detection of Concrete Crack Direction Using Light-Section Method and Hammering Test, *2017 14th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI)*, pp. 922 – 927, 2017.
- 4) Jun Younes Louhi Kasahara, Hiromitsu Fujii, Atsushi, Yamashita, and Hajime Asama: Unsupervised learning approach to automation of hammering test using topological information, *ROBOMECH Journal*, Vol.4 No.13, pp. 1–10, 2017.
- 5) Yusuke Takahashi, Satoshi Maehara, Yasuichi Ogawa, and Tomoya Satoh: Concrete Inspection Systems Using Hammering Robot Imitating Sounds of Workers, *35th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC2018)*, pp. 206–210, 2018.

ON-SITE TEST WITH AN AUTOMATIC INSPECTION SYSTEM FOR TUNNEL LINING CONCRETE

Satoru NAKAMURA, Daisuke INOUE, Shouzou SUZUKI and Masanori ITOU

We propose an “Inspection System” by a automatic detection a spalls and cracks for the understand accurate status of tunnel lining concrete and solving the shortage of inspection engineers.

We report developed the inspection system on the gantry type and aerial platform type, and on-site test with an automatic inspection system.