

ロボットの活用によるトンネル検査の効率化・高度化

技術開発部 土木構造物技術チーム 防災システム・トンネルグループ グループリーダー 新美 利典
 技術開発部 先進メカトロチーム 将来機械1グループ グループリーダー 後藤 裕
 技術開発部 土木構造物技術チーム 防災システム・トンネルグループ 主幹研究員 前田 貴公
 技術開発部 先進メカトロチーム 将来機械1グループ 研究員 藤田 京康

1 はじめに

当社では、トンネルなどの土木構造物に対して適切な検査や修繕を行うことで健全性を維持し、鉄道の安全・安定輸送を確保しています。このうちトンネルの検査では、コンクリート表面の目視検査に加え、検査員がハンマで壁面を打撃して内部の状態を把握する打音検査を実施しています。

この打音検査は、上向き姿勢で連続して実施する高所作業であり、身体的負担が大きく、また検査員の経験に基づく技量が求められます(写真1)。



写真1 現行のトンネル打音検査の状況

そこで技術開発部では、身体的負担の軽減や作業の効率化、検査品質の維持向上を目的に、中央新幹線への導入を念頭に、コンクリート内部の検査をロボットにより自動化することを目指して開発を進めてきました。既に世の中には、カメラや3Dスキャナなどを搭載した専用車両によりコンクリート表面の状態を自動把握する技術、UAV（ドローンなどの無人航空機）や専用車両に搭載した打撃装置と集音マイクによる打音検査を機械化する技術、あるいは電磁波レーダによりコンクリート内部の空洞の有無を調査する技術などいくつもの事例があります。技術開発部ではそれらの事例を踏まえ、「熟練した検査員と同等以上の検査精度でコンクリート内部の検査を安全かつ高効率に自動化した技術」に

おいて実用化に至ったものはないと考え、当社独自に開発を手掛けることにしました。そして今回、安全性も確保したロボットによる自動制御のもと壁面を連続的に打撃し、発生する振動をセンサで直接取得する新技術を確立しました。本稿では、2023年度に完成した「トンネル検査ロボット」のプロトタイプについて紹介します。

2 トンネル検査ロボットの開発

コンクリート内部の検査を自動で行う「トンネル検査ロボット」は、「接触式検査装置」を取り付けた「ロボットアーム^{*1}」と「レーザ測量機」で構成されています。これらロボット一式をトラック上のリフトテーブル^{*2}に搭載し、トラック上で前後・左右・上下方向に移動できる構造としています(写真2)。検査箇所まで大型トラックで移動して現地に据付けさえすれば、機材などを積み卸すことなく、そのまま直ぐにトンネル検査が可能です。



写真2 トンネル検査ロボットの全景

(1) 現地状況に合わせた高精度な制御

トンネル検査ロボットは、自動でトンネル壁面に接触式検査装置を押し付けて検査を実施します。検

査は、同装置に搭載した打撃装置で壁面に一定の打撃力を与え、発生する振動をセンサで直接取得してコンクリート内部の状態を評価します（図1）。

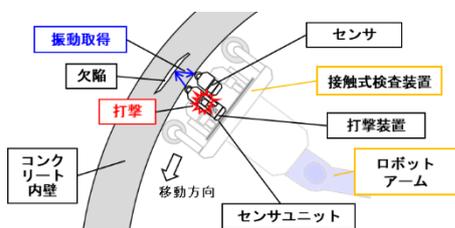


図1 トンネル検査ロボットによるコンクリート内部検査のイメージ

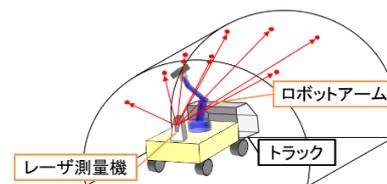
トンネルのコンクリート内壁は、設計図面を基に構築されますが、建設時に生じる誤差などにより断面形状には僅かなばらつきがあります。さらに、トラックなどの移動体に搭載したロボットはトンネルに対する停車位置にもばらつきが生じます。ロボットアームをトンネルの設計図面通りに繰り返し動作させることは、あらかじめティーチング(教示)プログラムを作成することにより可能ですが、これらのばらつきにも追従させるため、現地での測量が検査の都度必要となります。トンネル検査ロボットは、現地状況に合わせたうえで接触式検査装置を壁面に一定の力で押し付けて連続的に検査を実施できる性能が求められます。そのため、内壁と本装置の位置関係や壁面の形状をレーザ測量機で自動測定し、その結果に従ってロボットアームを高精度に自動制御する技術を開発しました。

開発当初、トンネル検査とは別日に取得したトンネル全断面の3D測量データを使用していました。事前の測量や膨大な取得データの処理に大変な労力が掛かっていたほか、トンネル検査当日の準備作業における現地状況と事前測量データとの重ね合わせの際、トンネルの内壁にリフレクタ（標的となる目印）の設置を伴うなど時間を要していました。

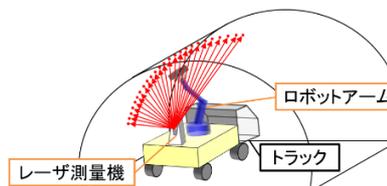
今回、その後のレーザ測量機の進歩もあり、トラックに搭載したレーザ測量機単体でロボット動作に必

要な様々な事前準備作業を検査当日の短時間のうちに行うことが可能となりました。具体的には、①トンネルの構造上の特徴点を測量することによりトンネルの内壁とロボットとの位置関係を把握し、ロボット動作の基準位置（原点）を空間上に設定、②トンネルの内壁の形状を全断面から必要最小限の代表点（50点程度）を抽出して測量し、ロボットアームによる接触式検査装置の押し付け予定箇所を確定、の2点です（図2）。

以上により、レーザ測量機とロボットアームは現地状況も付加したプログラミングに従って動作するため、オペレータによる制御盤での簡単なボタン操作だけで必要な測定と検査を開始することができます。



〈トンネル内壁を測量し、トンネルの内壁とロボットとの位置関係を把握〉



〈ロボットアームによる押し付け予定箇所を測量し確定〉

図2 レーザ測量により現地状況に合わせてロボットアームを制御するイメージ

(2) 高品質かつ効率的な検査

現在の打音検査では、コンクリート表面にひび割れなどの変状がみられる箇所や、変状が発生しやすい箇所を検査員がハンマで複数回打撃し、音や感触の違いからコンクリート内部の状態を評価しています。ロボットによって状態を評価する場合、音を用いると他の作業音などの影響を受ける可能性があります。今回採

用した接触式センサは、音を取得する一般的な集音式センサと異なり、壁面から直接振動を取得するため作業音などのノイズに強く、雑音が反響しやすいトンネル内でも十分な検査精度を確保できます¹⁾。このため、壁面を打撃して振動をセンサで直接取得して分析・評価する接触式検査装置を開発しました。接触式検査装置には、センサと打撃装置で構成されるセンサユニットが5台搭載され、1秒間に20回の打撃応答の計測が行うことができ、効率的にコンクリート内部の状態を評価できる仕様となっています(図3)。

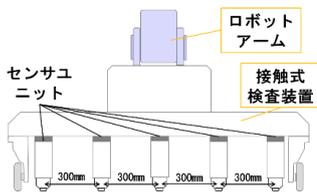
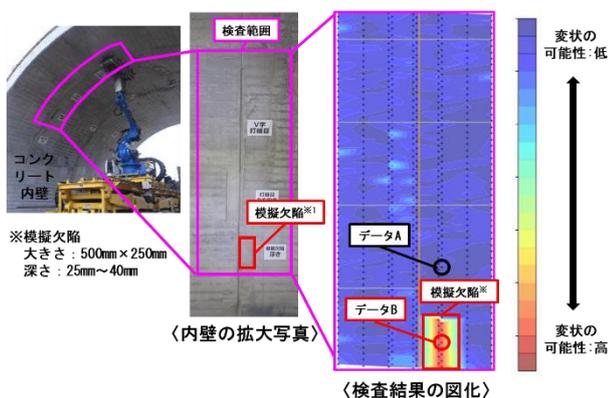
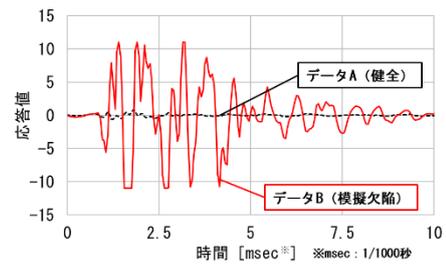


図3 接触式検査装置の構成

また、接触式検査装置では、一定の打撃力を与え、取得した振動データの振幅から、コンクリート内部の欠陥の有無を評価できます。さらに、高精度に制御されたロボットアームによって移動しながら連続的に振動データを取得することで、面的にコンクリート内部の状態を評価することができます(図4)。



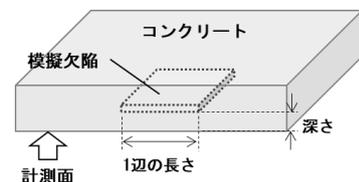
〈トンネル検査ロボットによる検査結果の図化〉



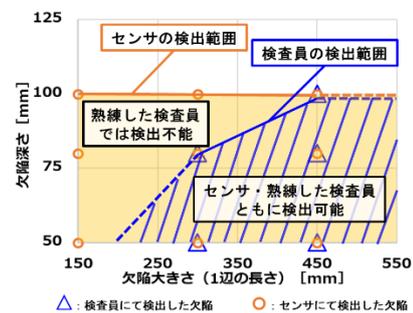
〈振動データの比較〉

図4 トンネル検査ロボットによる検査結果

コンクリート内部に深さや大きさの異なる模擬欠陥をあらかじめ仕込んだ試験体を用いて検査員と本装置でそれぞれ検査を実施し、欠陥を検出できるか比較しました。その結果、本装置では検査員が発見できなかった、例えば1辺の長さ150mm、深さ100mmのような小さく深い位置の欠陥を含むすべての欠陥を検出することができました¹⁾(図5)。したがって、本装置は、熟練した検査員が行う検査と同等以上の検査精度を有し、高品質な検査を実現できることが確認できました。



〈模擬欠陥を有する試験体〉



〈模擬欠陥を有する試験体での検証結果〉

図5 接触式検査装置と検査員との検出性能比較

(3) 検査時の安全確保

産業用ロボットの動作中は、人がロボットに接触す

るリスクを排除する措置を講じることが法律で義務付けられています。トンネル検査ロボットはトンネル内で移動と検査を繰り返すという使用環境の特性上、工場のように固定の安全柵や囲いを設けることが困難なため、ロボットの周囲にセーフティレーザスキャナ^{※3}を搭載しました。このセーフティレーザスキャナでロボットが動作中に人やモノの接近を検知すると、強制的に非常停止して検査中も周囲の安全を確保するようにしました。

なお、ロボットアームの制御ならびに検査に関連する特許については、すでに取得済みもしくは出願中です。

3 期待される効果

コンクリート内壁の検査を人による打音検査からトンネル検査ロボットによる接触式検査に置き換えることで、検査員の身体的な負担を軽減できるとともに、装置に備えた振動データの自動出力機能を活用することで、検査後の記録の整理などを含めた作業時間も短縮でき、検査の安全性と効率性を向上できます。

また、接触式検査装置による定量的かつ客観的なデータから、コンクリート内壁の状態を評価することで、検査員の経験に依存しない、正確かつ均質な検査が期待できます。

4 おわりに

本稿では、トンネル検査ロボットに関する技術開発について紹介しました。

2023年度末まで小牧研究施設や山梨実験線での検証試験を実施して、断面形状などの条件の異なるトンネルにおいて現地の状況に合わせた高精度なロボットアームの制御技術および接触式検査装置によるコンクリート内部の状態の分析・評価方法の適用性を確認してきました。

今後は、ロボットの更なる機能向上に向けた試験の実施を検討していきます。また、在来線や新幹線のトンネル検査への適用についても検討していきます。ひいては、

ロボットを全面的に活用し、これらを搭載したトラックや保守用車編成の遠隔操作によるトンネル検査の実現などにもチャレンジしていきたいと考えています（図6）。

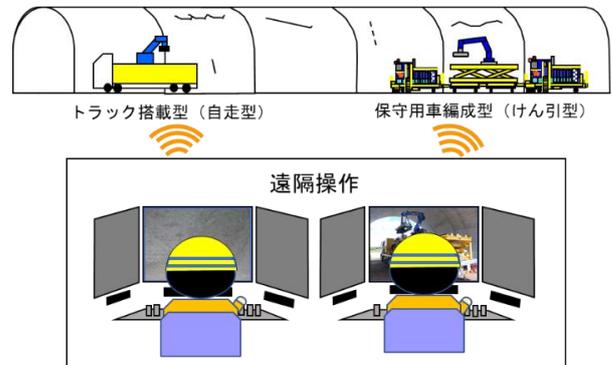


図6 トンネル検査の将来像（イメージ）

注釈

- ※1 ロボットアーム
6軸垂直多関節型の産業用ロボット
- ※2 リフトテーブル
油圧によりロボットを昇降させる装置
- ※3 セーフティレーザスキャナ
赤外線レーザにより周囲を監視して人が機械周りの危険区域内に侵入したことを検出し、機械に対して信号を出力する安全装置

参考文献

- 1) 前田貴公ら：コンクリート内部欠陥の効率的な非破壊検査方法の検討，令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会，VI-355，2021



新美 利典
土木構造物技術チーム
防災システム・トンネルグループ
技術士（建設部門）
土木学会 正会員

ICTやロボットの分野は将来的な労働力人口減少への対応のために欠かせない技術であり、今後も、同様の着目点による研究開発に力を注ぎたい。



後藤 裕
先進メカトロチーム
将来機械1グループ
土木学会 正会員

鉄道現場で過去から人が苦勞してきた作業の負担を少しでも軽減するような機械化などに全力で寄与していきたい。



前田 貴公
土木構造物技術チーム
防災システム・トンネルグループ
土木学会 正会員

構造物の維持管理の効率化・高度化に向けた研究開発を通じて、持続可能な社会の実現に貢献していきたい。



藤田 京康
先進メカトロチーム
将来機械1グループ
日本ロボット学会 正会員

鉄道分野にとらわれず世の中の技術シーズで「出来るようになったこと」を鉄道現場ニーズに落とし込めるよう、今後も幅広く挑戦していく。