

Special edition paper

点検機能を有したトンネル対策工の営業線トンネルにおける実証試験



阿部 翼^{*1}



栗林 健一^{*2}



今井 勉^{*3}

Verification examination of tunnel countermeasure with inspection at real tunnel

Tsubasa ABE^{*1}, Kenichi KURIBAYASHI^{*2}, and Tsutomu IMAI^{*3}

^{*1} Assistant Chief Researcher, Civil Structure Maintenance Technology Unit of Research and Development Center of JR EAST Group

^{*2} Chief Researcher, Civil Structure Maintenance Technology Unit of Research and Development Center of JR EAST Group

^{*3} Division Senior Manager, Civil Engineering Unit of Research and Development Center of JR EAST Group

Abstract

For structures such as tunnels that are supported by the surrounding ground, it is difficult to evaluate the effects of the ground on the structure and to predict its future soundness. Amidst the need for efficient maintenance and management due to aging equipment and a declining workforce, we have developed "tunnel repair work with an inspection function (tunnel smart repair)" as a low-cost, high-frequency, quantitative monitoring method. We report the results of a demonstration experiment of "tunnel countermeasures with an inspection function" in commercial line tunnels.

●**Keywords:** Tunnel lining, Countermeasure, Axial force sensor, RFID, Bluetooth, Pointcloud

^{*1}JR東日本研究開発センター 土木技術メンテナンスユニット 副主幹研究員
^{*2}JR東日本研究開発センター 土木技術メンテナンスユニット 主幹研究員
^{*3}JR東日本研究開発センター 土木技術メンテナンスユニット ユニットリーダー

1. はじめに

トンネルなどの周辺地山に支持される構造物は、地山から構造物への作用を評価することや、将来の健全性を予測することは難しい。一方で、設備老朽化・労働人口減少を背景に効率的な維持管理が求められているため、低コスト・高頻度・定量的なモニタリング手法として「点検機能を有したトンネル対策工（トンネルスマートリペア）」の開発を実施している。営業線トンネルにおいて、「点検機能を有したトンネル対策工」の実証試験を行った結果を報告する。

2. 鉄道トンネルの維持管理の現状

地山からの作用が懸念される鉄道の山岳トンネルについて、現状の維持管理手法と課題を整理した結果を表1に示す。本表の右列に記載した課題に対して、「点検機能を有したトンネル対策工」を開発することにより、保守用車等でのデータ取得や、より少ない労力での定量的な評価を目指している。この開発の一部として、軸力センサと点群データに関する、営業線トンネルでの実証試験を実施した。

表1 現状の維持管理手法とその課題

主な手法	課題
テープスケール法による 内空断面測定（図1 参照）	測定作業の労力が大きい 線路閉鎖、停電が必要 1年に数回の計測に留まる
ひび割れ形状から地山変形を推定	個人差、経験差が生じる
ひび割れの長さ・幅等の変化から、 地山からの作用の大きさを推定	個人差、経験差が生じる



図1 テープスケール法の例

3. 地山からの作用が懸念されるトンネルにおける軸力センサを用いた健全性評価

3・1 実証トンネルの概要

実証試験を行ったトンネルの概要を示す。本トンネルにおいては、地山からの作用と思われる変状（図2）が確認されている。また、テープスケール法による内空断面測定の結果、内空断面の縮小が確認されている。

これらの変状やトンネル内空断面の挙動に対して、過去よりロックボルト工、覆工打ち直し工、コンクリート吹付け工が実施されている。今回、下記諸元でロックボルト工が実施され、その一部に軸力センサを設置した。

- ・工事延長： 線路方向1.25m間隔×24断面=30m
- ・ボルト種類： 異形棒鋼ロックボルト（ボルト長3m）自穿孔ロックボルト（ボルト長3m）
- ・ロックボルト本数： 1断面当たり上半6本（クラウン部4本は自穿孔）、下半4本の計10本
- ・施工管理： ロックボルトに初期軸力を導入するため、所定トルクによるナット緊締
- ・センサ設置断面： 全24断面のうち、内空断面の縮小傾向の違いが認められる計2断面
- ・センサ設置箇所： 1断面当たりロックボルト本数10本のうち、下側の6本（図3参照）



図2 変状（目地切れ）の例

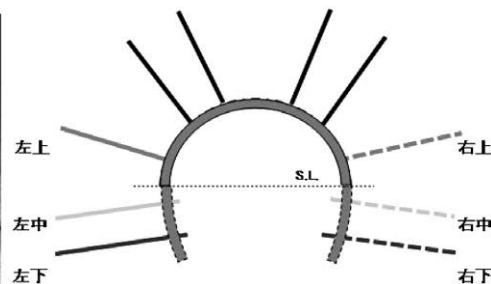


図3 ロックボルトの配置図



図4 軸力センサ取付状況

3・2 軸力センサの概要と性能

軸力センサはロックボルトのナットとワッシャーの間に設置し、ロックボルト頭部に生じる軸力の計測を行った。計測は、RFID通信方式を採用しており、RFIDリーダライタの電波を用いて、軸力センサのデータを非接触で読み取ることができる。計測作業時の外観は図5のとおりである。

RFID通信方式であるため、センサ1機当たり計測時間約10秒と計測にかかる手間が少ないこと、電源が不要であることが特徴である。

表2 軸力センサの諸元

電源	不要（リーダより給電）
計測タイミング	給電時
計測可能期間	電源上の制約無し
通信距離	1 m
計測対象	ロックボルト頭部の軸力
必要機器	RFID リーダライタ、PC
メモリ機能	不可



図5 RFID式センサの計測状況

3・3 計測結果

ロックボルト工事の工程とセンサの計測タイミングを表3に、計測結果を図6、7に示す。いずれの断面においても、仮締めから本締めでの軸力上昇が認められ、工事工程による軸力変動が確認できた。

一方、全数一定のトルク値でナット緊締を行ったが、箇所ごとに軸力が異なる結果となった。軸力が異なる要因について、下記の観点から整理を行ったが、解明には至らなかった。

- ・ロックボルトの打設位置、部位
- ・ロックボルトと覆工面の角度
- ・モルタル充填日から本締め日までの経過日数
- ・覆工材質（コンクリート、コンクリートブロック）

また、内空縮小傾向の違いによって、計測軸力の変化量が異なることを想定していたが、現時点では変化量の違いは確認されなかった。今後も継続計測を行い、トンネル内空断面の挙動とロックボルト頭部の軸力の関係について、検討を進めていく。

表3 工事工程と計測時期

時期	工事工程、軸力計測
2022 年 6 月	モルタル注入
2022 年 9 月	ナット仮締め、軸力測定①、ナット本締めにより軸力導入
2022 年 10 月～ 2023 年 11 月	軸力測定②～軸力測定⑧

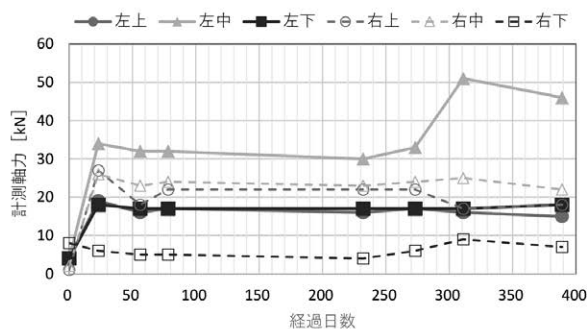


図6 内空縮小傾向が弱い断面の計測結果

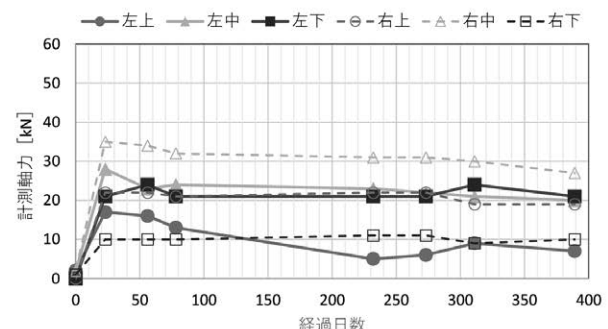


図7 内空縮小傾向が強い断面の計測結果

4. 外力性変状が懸念されるトンネルにおける点群データを用いたトンネル内空断面の変形傾向の抽出

前章で記載したテープスケール法によるトンネル内空断面測定に関して、移動式3Dスキャナーで取得した点群データによる内空断面測定の代用可否について、同一トンネルで検討を行った。

検討に使用した3Dスキャナーの諸元、計測条件は表4に示す。

また、取得した点群データに関しては、下記手順によりコンター図を作成することで評価した。

〔コンター図の作成手順〕

- 手順1：取得した3次元点群データを、断面情報のみを有する2次元データに変換
- 手順2：変換した2次元データのうち、最も内空側に位置する点群を集計し、基準断面を作成
- 手順3：取得した3次元データと基準断面の離隔（断面方向）をコンター図として表示

測定状況を図8に、検討結果を図9に示す。図9においては、テープスケール法の測定結果での内空縮小傾向が強い2断面の位置を実線の枠、縮小傾向が弱い1断面の位置を点線の枠で示した。

図9に示すように、テープスケール法で確認されている内空縮小傾向が点群データでも確認できる結果となった。また、テープスケール法では測定用ピンの設置されている測線しか計測できないのに対して、点群データでは覆工全周のデータが計測できるため、変形傾向をより面的に把握することが可能であると考えられる。

以上より、トンネル内空断面の変形を把握する手法として、上記データの活用は有効であると考えられるため、今後も実用化に向けて検討を進めていく。

表4 3Dスキャナーの諸元・計測条件

項目	諸元・条件
スキャニング速度	100 万点/s
計測速度	3 km/h
スキャナー回転数	100 Hz
計測延長	50 m



図8 3Dスキャナーによる点群データ取得状況

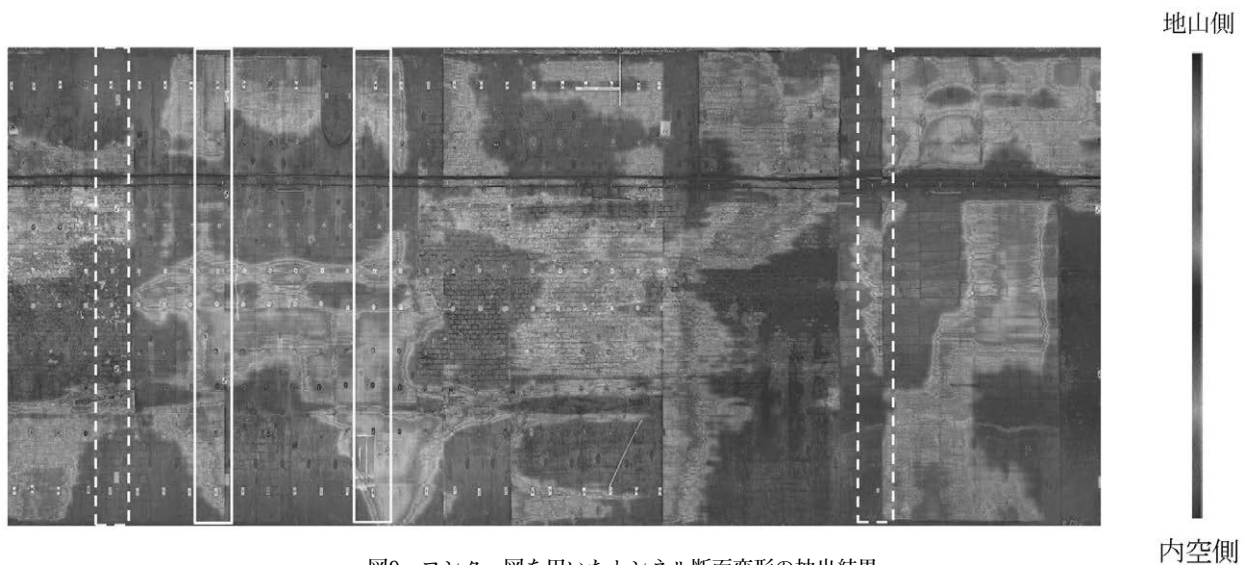


図9 コンター図を用いたトンネル断面変形の抽出結果

5. 今後の取組み

本稿で紹介した軸力センサはRFID方式であるが、Bluetooth方式を採用した場合、より高頻度で定期的な測定が可能であり、土木構造物の健全性評価に有用であると考えられる。また、Bluetooth方式センサの諸元を表5に示すが、通信距離が3mと長いことから保守用車によるデータ取得の可能性を有している。そこで、Bluetooth方式センサをトンネル路盤下対策として施工されたロックボルト工に適用を行い、今後、モニタリングを行う計画である。

表5 Bluetooth方式センサの諸元

電源	電池式
計測タイミング	一日2回
通信タイミング	一日4時間
計測可能期間	約7年
通信距離	3 m
計測対象	ロックボルト頭部の軸力
備考	計測24か月分をメモリ