

鉄道一般
車両
施設
電気
運転・輸送
防災
環境
人間科学
浮上式鉄道

# 無線センサーを用いて トンネルの動きを把握する

トンネルにひび割れや変形といった変状が現れた場合、計測などによりその動きを把握することが重要となりますが、実際に現地へ赴き、定期的に計測をするのは多大な労力がかかります。そこで、複雑な配線をすることなく高頻度なデータを得られる自動計測技術が期待されます。ここでは、トンネル覆工背面の地中の変位を計測する地中変位計やトンネル内空変位計測用のレーザー変位計、ひび割れ幅計のデータを無線でトンネル坑口の収録装置へと送り、携帯電話回線を用いてサーバーにアップロードするリアルタイムモニタリングシステムを構築したので紹介します。



**嶋本 敬介**  
Keisuke Shimamoto  
構造物技術研究部  
トンネル研究室  
副主任研究員  
[専門分野] 山岳トンネル



**中根 利貴**  
Toshiaki Nakane  
構造物技術研究部  
トンネル研究室  
研究員  
[専門分野] 山岳トンネル



**津野 究**  
Kiwamu Tsuno  
構造物技術研究部  
トンネル研究室  
主任研究員  
[専門分野] 都市トンネル

## はじめに

トンネルでは、周辺地山の地質によっては、地圧を受け、ひび割れや内空断面の縮小といった現象が発生することがあります。この現象は長期間にわたって、緩慢に進行する場合があります。鉄道トンネルでは、2年に1度、全般検査が行われており、地圧による変状は比較的初期の段階から把握されるため、ただちに安全性に問題がある変状が発見され、緊急的に対策を行わなければならないという状況は少なく、基本的には、変状が発見されれば、まずは計測により変状の進行性を確認し、その結果に応じて対策工を検討するというのが一般的です。とくに変状規模が大きい場合には、十分な調査・計測を行い、その結果に基づき対策工を選定の方が合理的です。

鉄道トンネルで一般的に実施される計測として、テープスケールや光波測距儀による内空変位計測がありますが、これらは、実際に現地へ赴き計測するものであるため、多大な労力が必要となり、計測頻度としては年1~4回程度とするのが一般的でした。

これに対して、鉄道総研ではひび割

れ幅計のデータを無線で送信し、自動計測をする技術を実用化してきました<sup>1)</sup>。これにより、複雑な配線をすることなく、自動計測により高頻度なデータを得ることが可能となりました。ただし、既往の技術では、無線子機1台当たり1測点の計測に<sup>とど</sup>留まり、地中変位計<sup>(※)</sup>に必要とされるような多測点のモニタリングや、トンネルの計測で一般に行われる内空変位のモニタリングには対応できませんでした。

そこで、1本当たり5測点を有する地中変位計、内空変位を計測できるレーザー変位計のデータを無線で坑口部へと送り、携帯電話回線を用いて、

## ※ 地中変位計

トンネルの内空断面の縮小は、トンネル背面の地山がトンネル内空側へ押し出されることで発生します。このとき、トンネル背面の地山が何m奥から、どのような変位分布で押し出しているかを知ることは、対策工設計のための重要な情報となります。

地中変位計では、トンネル内面と地中の点(5深度程度)との相対変位を計測することで、地中の変位分布を把握できます。

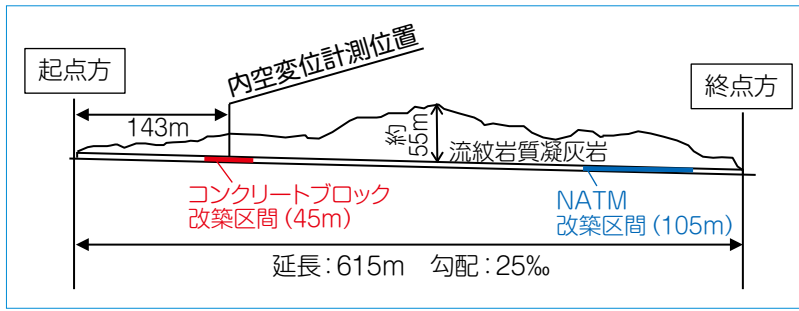


図1 トンネル縦断

表1 多測点計測用無線子機の仕様

① 形状	縦 100mm × 横 175mm × 厚さ 35mm (取り付け用治具除く)
② 耐候性	耐水性: IP65 規格準拠 稼働温度: -10 ~ 50°C
③ 電源	単 2 電池 3 本 電池寿命 2 年 (計測間隔 5 分の場合)
④ 測定性能	ひずみ 4 ゲージ式 ± 15000 $\mu$ , 5 測点計測対応
⑤ 無線規格	IEEE802.15.4, ZigBeePro 規格 無線周波数 2.4GHz 電波出力強度 3mW

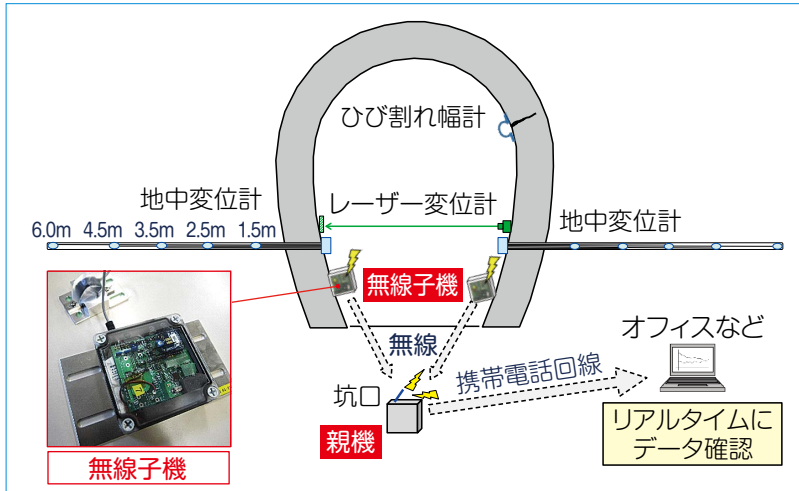


図2 モニタリング概要図

サーバーにアップロードするリアルタイムモニタリングシステムを構築しました<sup>2)</sup>。ここでは構築したシステムや実トンネルでの計測例について紹介します。

### 対象トンネル概要

今回、モニタリングの対象としたAトンネルは全長615mの単線非電化のれんが積みトンネルです。1901年のしゅん功で、トンネル周辺の地質は流紋岩質凝灰岩です。地圧による内空断面の縮小や覆工変状が発生し、図1に示す通り、1935年には入口から150m程度入った位置の45m間でコンクリートブロックへの全断面改築が実施されています。しかし、コンクリートブロックへの改築区間において再変状が発生し、年2回の手動による内空変位計測結果によると、年間1.3mm程度と緩慢ではあるものの一定速度の内空縮小

が確認されています。今回、この箇所をモニタリング対象としました。

### モニタリングシステム概要

#### (1) 使用した計測器

モニタリング概要図を図2に示します。トンネル入口から143m入った断面付近において、地中変位計2本(L=6m, 1本当たり5測点)、レーザー変位計、ひび割れ幅計を設置しました。

##### a) 地中変位計

地中変位計の設置にあたり、まず、 $\phi 66$ mmのボーリング孔を削孔し、ワイヤーと一体となったアンカーを挿入します。アンカーは挿入後、水圧で膨らませることで孔壁面に定着します。アンカーの変位はワイヤーによりトンネル内面に設置する電気信号変換部に伝達されます。アンカー、ワイヤー、変換部は深度ごとに独立しており、深さごとのアンカーと変換部の相対変位

を計測できます。地中変位計のアンカー深度は1.5m, 2.5m, 3.5m, 4.5m, 6.0mの5深度としました。

##### b) レーザー変位計

レーザー変位計としては、タイム・オブ・フライト方式のパルス伝搬法で対象との距離を計測するものを採用しました。これにより、側壁間の内空変位計測を実施します。測定データにはノイズや誤差が含まれているため平均化などの後処理が必要となります。ウォームアップ時間を長くすること、平均化の母数を増やすことでデータの精度は改善されますが、レーザー変位計の駆動時間が増えることから消費電力が増加します。そこで、事前に、室内において試験を行い、効率の良いウォームアップ時間、平均化の母数を求め、その値を採用しました。

##### c) ひび割れ幅計

ひび割れ幅計測としては、 $\pi$ 型の変位計を採用しました。これは、 $\pm 5$ mmの変位に対して、5,000 $\mu$ のひずみを発生させることができ、高感度のひび割れ幅測定が可能です。

#### (2) 計測器の無線センサー化

それぞれの計測器に無線子機を接続し、計測器を無線センサー化しました。無線子機は、地中変位計用として、1本5測点当たり一つ、レーザー変位計用として一つ、ひび割れ幅計用として一つ作成しました。

一例として、地中変位計用として作製した多測点計測用無線子機の特徴と

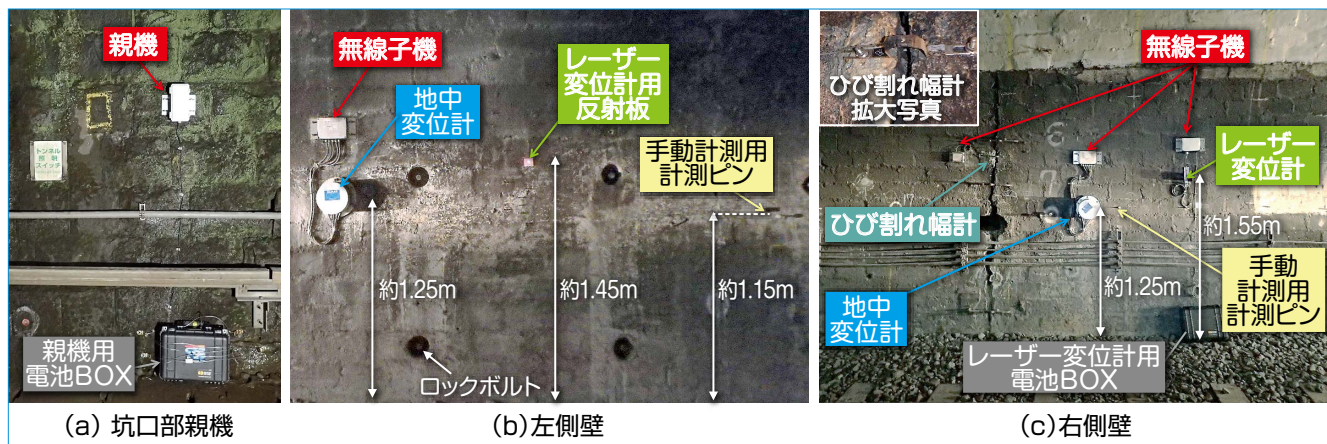


図3 モニタリング機器設置状況

仕様を表1に示します。作製した子機は、鉄道の建築限界に支障しないように小型化し、トンネル内の漏水・気温などの影響を受けないよう耐候性を有しています。また、ほかの鉄道無線設備に影響がなく、微弱な電波出力であるZigbee規格無線機を用いています。なお、レーザー変位計用の無線子機のサイズは同じく縦100mm×横175mm×厚さ35mmであり、ひび割れ幅計用は縦100mm×横100mm×厚さ35mmです。ひび割れ幅計用の無線子機には、温度センサーを内蔵しており、坑内の気温も計測しています。

四つの子機から伝送された計測データは、坑口の一つの親機で集約されます。親機は子機からのデータを受信する無線モジュール、データを収録するSDカード、携帯電話回線を用いてサーバーへアップロードするためのSIMカードが一体となったもので、サイズは縦210mm×横110mm×厚さ75mmです。

### (3) 大容量バッテリー

トンネル坑内において電源を確保することは困難であるため、本モニタリングシステムでは外部電源は不要としました。親機とレーザー変位計については、ある程度の電力を必要としますので、単1乾電池を用いた大容量バッテリーを作製しました。バッテリーと

しては、リチウムイオン電池などを用いることも考えられますが、乾電池の方が大幅に安価かつ安全であるためこれを採用しています。

作製した大容量バッテリーは、一般的な単1乾電池を6個直列する9Vの電池ボックスを、並列化基盤を用いて16組並列化させることで、低電圧大容量の電源を確保しています。

現状、1時間に1回の頻度で各無線センサーからのデータを集約し、携帯電話回線を用いてサーバーへアップロードしていますが、この動作に対して、本大容量バッテリーを用いることで、レーザー変位計用、親機用のどちらについても、4か月以上電池交換なしで稼働できることを実トンネルで確認できました。なお、モニタリングデータの中に電圧値も含まれているため、いつでも電池残量を把握できます。

### (4) 設置状況

坑口部の親機、計測箇所を左右側壁のモニタリング機器の設置状況を図3に、モニタリング箇所の全体写真を図4に示します。配線は天端や路盤下を横断する、あるいは側壁を長距離にわたっては必ず必要がなく、計測器から無線子機までの限定された長さで済んでおり、配線の手間を低減できるとともに配線に関わる動作不良を防ぐことができます。

なお、中継器を用いて長距離伝送する方法も開発していますが、今回の計測では、無線子機と親機が伝達し合う電波強度を確認したところ、中継器なしで無線伝送が可能であったため、中継器は設置していません。

### 得られたモニタリングデータ

図5上段に平成29年3月1日から約1年間のレーザー変位計による内空幅と坑内の温度の計測結果を示します。薄い色の丸印が1時間に1回の実際の計測データであり、実線は、直近24データの平均値をつないだ線（24データ移動平均線）です。これより、内空幅としては1.5mm程度、温度としては5℃程度のばらつきがありますが、移動平均を取ると、温度が高くなると内空が拡大するという関係（約1mm/10℃程度）があることが確認できます。この動きはレーザー変位計の温度特性および治具の温度特性も若干は含んでいますが、多くは温度変化にともなうトンネル自体の動きです。

図5中段に、右側壁の地中変位計の計測結果を示します。図5上段の内空幅の計測結果で1.2mm程度の内空幅縮小の急激な進行がみられたとき、地中変位計の値も同程度、大きく動いています。内空幅の縮小が大きく進行した日は、計測箇所近傍で変状対策とし

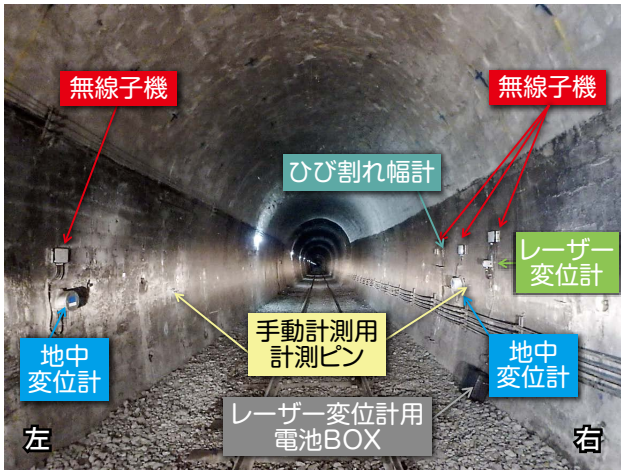


図4 モニタリング機器設置状況(全体写真)

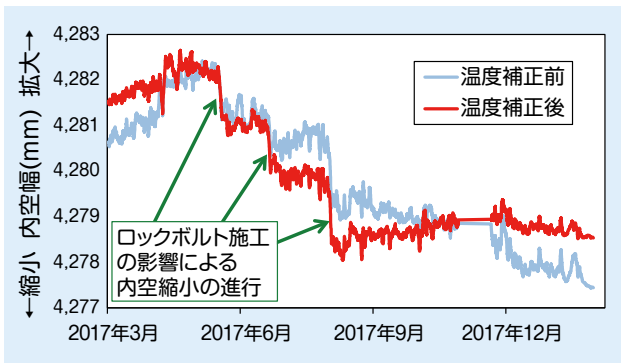


図6 内空変位の計測結果(温度補正後)

てロックボルトが施工されており、その削孔などの影響により地山が押し出したものと考えられます。なお、左側壁の地中変位計の計測結果については、計測期間中、とくに目立った動きはみられませんでした。

図5下段にひび割れ幅計によるトンネル縦目地幅の計測結果を示します。これより、温度が下がるとひび割れ幅が拡大するという温度依存性ももちながら推移していることがわかります。年数回の計測では十分把握できない進行性も、このように温度とともに多頻度に計測することで、進行性を評価しやすくなります。

なお、ロックボルト施工による縦目地幅の進行はみられませんでした。横断ひび割れであれば、内空縮小とともにひび割れ幅の拡大が確認されることが考えられますが、当該区間には横断ひび割れがみられなかったため、縦目地幅を

計測しています。

図6に、温度変化によるトンネルの動きを抑制することを目的に、内空幅の24データ移動平均のグラフに1mm/10℃の温度補正をかけた結果を示します。これより、ロックボルト施工の影響による内空縮小の進行がより明瞭に確認できるとともに、それ以外の期間では、内空縮小の進行がみられないことが確認できます。2016年度から実施しているロックボルト施工により、変位の縮小傾向が抑制されているものと考えられます。

### おわりに

構造物の老朽化、労働力人口の減少を背景として、今後ますます、維持管理の効率化が求められます。今後とも、

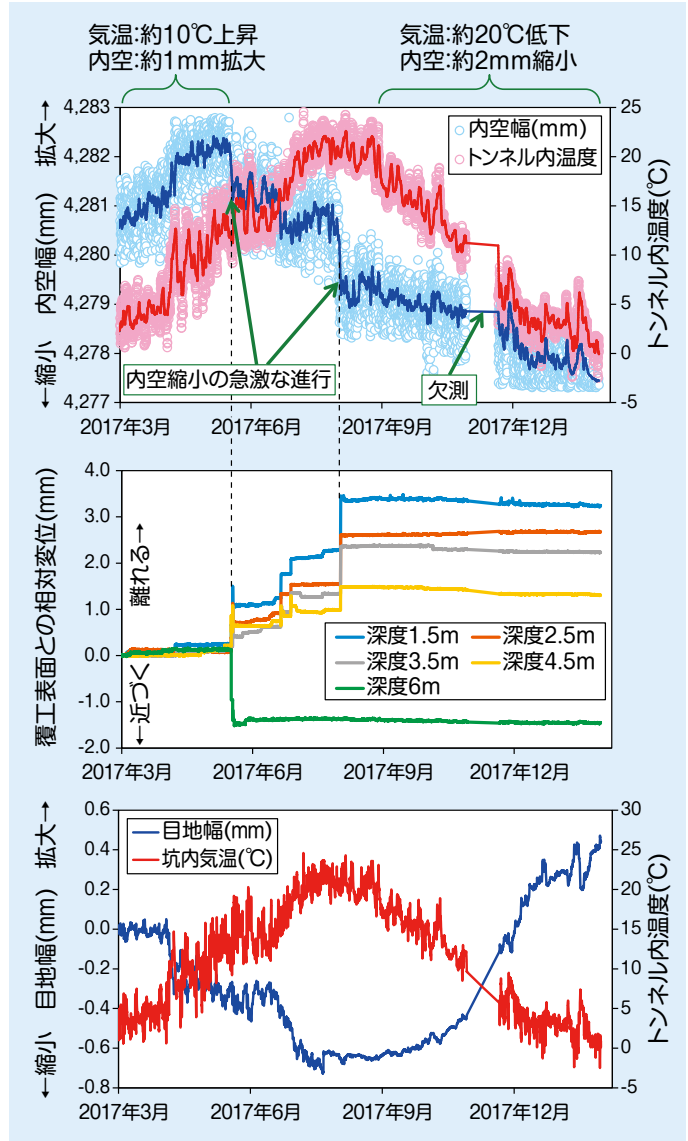


図5 レーザー変位計による内空幅計測結果(上段) 右側壁の地中変位計測結果(中段) ひび割れ幅計による縦目地幅の計測結果(下段)

ICT技術を積極的に取り入れ、安全性を確保しながらトンネルの維持管理を効率化できるよう、研究開発を進めていきます。[RRR]

### 文献

- 1) 津野究, 平田亮: 無線センサネットワークを活用したトンネルの変状監視手法の開発, 鉄道総研報告, Vol.27, No.6, pp.25-30, 2013
- 2) 中根利貴, 嶋本敬介, 川越健, 森瀬喬士, 幸田真也, 坂本寛章: 地圧を受ける供用中の山岳トンネルのモニタリング計測, トンネル工学報告集, Vol.27, I-5, 2017