

無線センサによる 地圧を受けるトンネルのモニタリング

中根 利貴^{1*}・嶋本 敬介¹・津野 究¹

¹公益財団法人 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

*E-mail: nakane.toshiki.28@rtri.or.jp

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る。そこで、地圧を受ける活線の鉄道トンネルにおいて、1本当たり5測点を有する地中変位計、内空変位を計測するレーザー変位計等を設置し、これらデータを無線センサで坑外へと送り、携帯電話回線を用いて、任意のインターネットサーバーにアップするリアルタイムモニタリングシステムを構築した。さらに、得られた計測データを整理・分析した。これより、レーザー変位計の計測データは1.5mm程度のばらつきが見られたものの、1時間に1度の計測データを24データ移動平均を取ることで、温度に依存した挙動まで精度よく把握できること等を確認した。

Key Words : monitoring, mountain tunnel, wireless sensor networks

1. はじめに

トンネルでは、周辺地山の地質やトンネル構造によっては、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る。この現象は長期間にわたって、緩慢に進行する場合が一般的である。鉄道トンネルでは、2年に1度、全般検査が行われており、変状は比較的初期の段階から把握されるため、直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把握し、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ある。対策工の検討に当たっては、調査・計測は簡略化して過去の類似事例を参考に対策工を選定する場合もあるが、地山やトンネルの状況を見誤っていた場合、対策工が期待通りの効果を発揮しないことがある。そこで、特に変状規模が大きい場合等は、十分な調査・計測を行い、その結果に基づき対策工を選定する方が合理的となることが多い。

しかし、調査・計測結果をどのように対策工の選定に繋げるかは現状では十分整理されているとはいえない。近年の計測技術、数値解析技術も取り込んで、調査・計測データに基づく対策工選定法について取りまとめ、トンネルの安全性を向上させ、維持管理コスト低減することを目的として研究を進めている。

鉄道トンネルで一般的に実施される計測として、コンバージェンスメジャーによる内空断面計測があるが、これは、現地に行き計測ピン間の距離をメジャーで計測

するものであり、計測頻度は年2~4回程度が一般的である。光波測距儀による内空断面計測についても、現地に行き計測する方法が一般的に取られており、計測頻度はやはり年2~4回程度である。

一方で既往の研究¹⁾では、 π ゲージ(ひび割れ幅計)のデータを無線センサで送信し、自動計測をする技術が開発されている。無線センサを使用すれば、複雑な配線をすることなく、高頻度なデータを自動計測することができる。ただし、既往の研究では、単一の無線センサで単測点の計測に留まり、地中変位計に必要とされるような多測点の計測や、トンネルの計測で一般に行われる内空変位の計測は実施されていなかった。

地圧を受けるAトンネル(活線)において、1本当たり5測点を有する地中変位計、内空変位が計測するレーザー変位計等を設置し、これらデータを無線センサで坑外へと送り、携帯電話回線を用いて、任意のインターネットサーバーにアップするリアルタイムモニタリングシステムを構築した²⁾。

本稿では、構築したモニタリングシステムおよびモニタリングにより得られたデータを示す。

2. 対象トンネルの概要

今回、モニタリングの対象としたAトンネルは全長615mの単線甲型れんが積み覆工のトンネルである。

トンネルの周辺の地質はデイサイト質火砕岩、含角礫

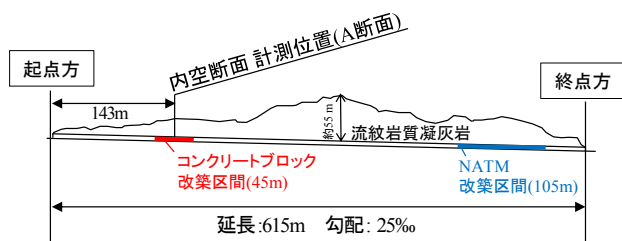


図-1 トンネル縦断面図

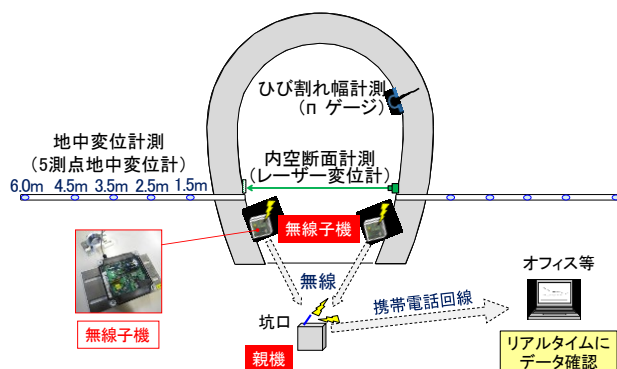


図-2 モニタリング概要図

凝灰岩、角礫凝灰岩が構成している。A トンネルは 1901 年にしゅん功しているが、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、1987 年には終点方 105m 間で NATM による全断面改築が実施されている。

今回、このコンクリートブロック改築区間である入口から 143m 入った断面をモニタリング対象とした。なお、同断面近傍ではコンバージェンスメジャーによる内空変位計測が年 2 回（2 月、8 月）に長期にわたって実施されており、モニタリング実施前の時点で年間 13mm 程度と緩慢ながら一定速度での内空縮小が確認されている。この位置における土被りは 25m 程度である。モニタリングは図-2 に示すように、地中変位計、レーザー変位計、ひび割れ幅計（温度センサ付き）を設置した。また、同断面の近くに無線センサの子機、トンネル坑口部に無線センサの親機一体型の収録装置を設置し、携帯電話回線によるリアルタイム計測を実施した。

L=6m の地中変位計の設置のため、左右側壁においてオールコアのボーリングを実施した。作業時間内において、できる範囲で長く削孔したため、右側は L=7.55m、左側は L=6.85m の削孔をした。

得られたボーリングコアを使用して、一軸圧縮試験、スレーキング試験、吸水膨張試験を実施した。コアを採取したのが 2016 年 8 月、試験実施は 2017 年 1 月であり、その間は、ラッピング等はせずにコア箱に入れた状態で実験棟内において保存していた。コアは採取してすぐの時は、D 級範囲では指圧にて容易に変形する状態であっ

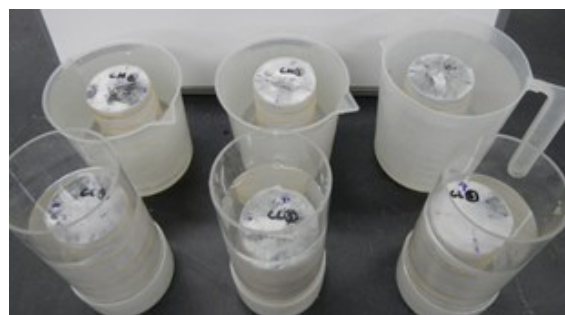


図-3 一軸圧縮試験供試体の水浸状況

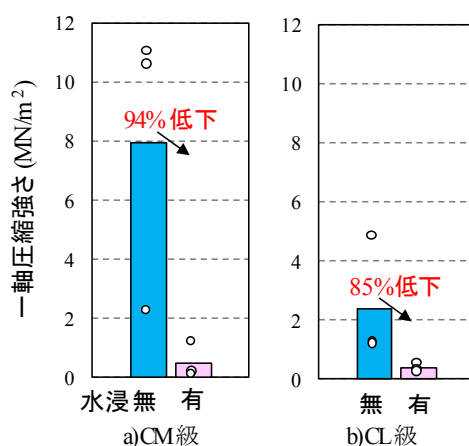


図-4 水浸の有無に着目した一軸圧縮強さ

たが、岩石試験実施時に水分が抜けコア細りし、硬くなっていた。そこで、一軸圧縮試験については、吸水させた状態での試験も実施した。吸水は、供試体が水との接触により崩れないよう、図-3 に示すように、プラスチックシートで巻き、輪ゴムを巻いた上で水浸した。

図-4 に各々 3 供試体の平均の一軸圧縮強さを示す。小さい白丸は各供試体の一軸圧縮強さを、棒グラフはその平均を示す。図-4 より、CM 級、CL 級ともに、水浸による大きな強度低下が確認され、水により強度低下しやすい地山であることが確認された。

岩石試験の結果、吸水膨張性は軽微であるものの、含水によって劣化する性質は確認できた。コアの状況から、強変質部がところどころに存在している。また、変質の程度が軽度な CM 級のコアにおいても吸水により大きく強度低下することが確認された。

一般的に塑性圧による変状が発生しているトンネルは、土被りが 50~100m 以上の場合が多いが、当該区間は土被りが 25m 程度と小さい。塑性圧とは、トンネル周辺地山の塑性化により受け持てなくなった土被り圧が応力再配分によりトンネルに作用する現象であるため、潜在的な土被り圧が小さい場合は塑性圧も一定以上大きく成り得ないことが考えられる。しかし、A トンネルの変状現象としては、側壁のひび割れ、長期にわたる側壁の押出しによる断面縮小という塑性圧で一般的に見られる変状現象が確認されている。含水による強度低下後の一軸圧縮

強さが 0.3MPa 程度であることを用いれば、地山強度比 $C_f=0.48$ となる。一般的に地山強度比が2を下回ると塑性圧の作用が疑われる。A トンネルにおいても、土被りが小さいものの、塑性圧が作用して変状が発生している可能性も考えられる。

3. モニタリングの概要

(1) 使用した計測器

トンネル入口から 143m 入った断面付近において、以下の計測器を設置した。

- ・地中変位計 (L=6m×2本, 1本当たり5測点)
- ・内空断面計測 (レーザー変位計)
- ・ひび割れ幅計測 (π ゲージ)

a) 地中変位計

地中変位計は、「東横エルメス社製ワイヤー式変位計 (防水型) PM-100G-5」を採用した。

地中変位計の設置にあたり、まず、 $\phi 66\text{mm}$ 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する。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する。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る。アンカー、ワイヤー、変換部は深度毎に独立しており、深度毎のアンカーと変換部の相対変位を計測できる。

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 深度とした。

b) レーザー変位計

内空断面計測としては、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レーザー変位計である「Sick 社製 DL50Hi」を採用した。

測定結果にはノイズ、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る。ウォームアップ時間を長くすることで、平均化の母数を増やすことでデータの精度は改善されるが、システムの駆動時間が増えることから消費電力が増加する。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、平均化の母数を検討し、ウォームアップ時間を 15 分、平均化母数を 6420 回と設定した。

すなわち、レーザー変位計は1時間に1回起動させ、起動後は、計測データが安定するまでに 15 分のウォームアップ時間を設け、その後、30 秒間計測をする。30 秒間に 6420 データが得られるため、その平均値を内空の距離の計測値として無線センサー子機に渡す。その後、次の周期まで約 45 分間、レーザー変位計の電源を切るというサイクルとした。

c) π ゲージ

ひび割れ幅計測としては、 π 型の変位計 (π ゲージ) を採用した。これは、 $\pm 5\text{mm}$ 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、高感度の測定が可能である。

(2) 計測器の無線センサー化

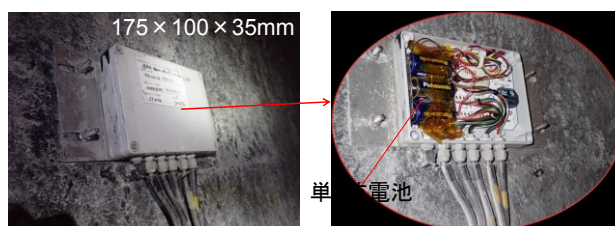
それぞれの計測器に無線子機を接続し、計測器を無線センサー化した。無線子機は、地中変位計用として、1本 5 測点当たり 1 つ、レーザー変位計用として 1 つ、 π ゲージ用として 1 つの計 4 つを作成した。

一例として、地中変位計用として作成した多測点計測用無線子機の特徴と仕様を表-1 に、外観を図-5 に示す。作製した子機は、鉄道トンネル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る。また、他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る。なお、レーザー変位計用の無線子機のサイズは同じく $175 \times 100 \times 35\text{mm}$ であり、 π ゲージ用は $100 \times 100 \times 35\text{mm}$ である。 π ゲージ用の無線子機には、温度センサーを内蔵しており、坑内の気温も計測している。

4 つの子機から伝送された計測データは、坑口の 1 つの親機で集約される。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 $110 \times 210 \times 75\text{mm}$ である。

表-1 多測点計測用無線子機の仕様

①形状	175×100×35mm (取付け用治具除く)
②耐候性	耐水性：IP65 規格準拠 稼働温度：-10～50℃
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 $\pm 15000\mu$ 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



a) 外観

b) 蓋を開けた状態

図-5 多測点計測用無線子機の外観

(3) 電池 BOX

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するので、単1乾電池を用いた電池 BOX を作製した。バッテリーとしては、リチウムイオン電池等を用いることも考えられるが、乾電池の方が大幅に安価であるためこれを採用した。

作製した電池 BOX は、一般的な単1乾電池を6個直列したものを、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る。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るが、この動作に対して、本大容量バッテリーシステムを用いることで、レーザー変位計用、親機用のどちらについても、4ヵ月以上電池交換無しで稼働できることを実トンネルで確認できた。現在、24組並列化した電池 BOX も作成しており、今後、これに交換することでさらに電池交換の周期を伸ばせると考えている。

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る。

(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-6に、レーザー変位計設置状況を図-7に、モニタリング箇所を全体写真を図-8に示す。レーザー変位計は、80mm程度の内空スペースがあれば設置できる。配線は天端や路盤下を横断させたり側壁を長距離にわたって這わせる必要がなく、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る。なお、中継機を用いて長距離伝送する方法も開発しているが、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、中継機なしで無線伝送が可能であったため、中継機は設置していない。

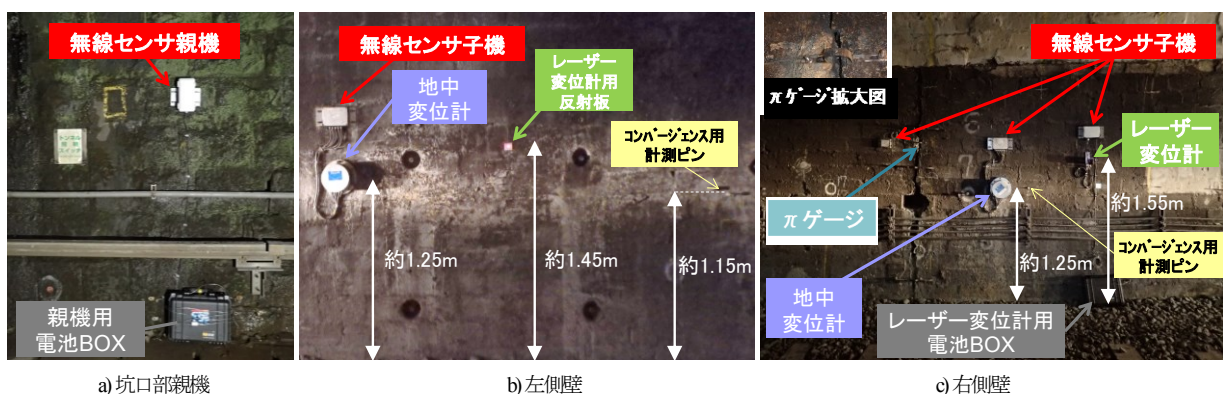


図-6 モニタリング機器設置状況

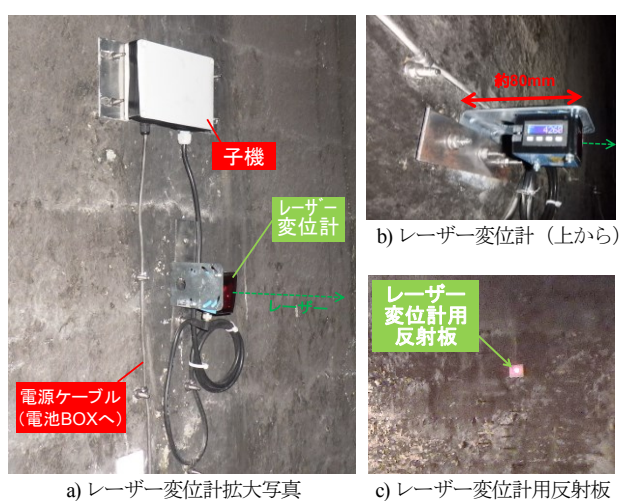


図-7 レーザー変位計設置状況 (全体写真)



図-8 モニタリング機器設置状況 (全体写真)

4. 得られたデータ

図-9 に平成 29 年 3 月の 1 か月間のレーザー変位計による内空と坑内の温度の計測結果を示す。薄い色の丸印が実際の計測データであり、実線は、直近 24 データの平均値を繋いだ線（24 データ移動平均線）である。これより、温度については 5°C 程度の日変動が見られ、内空距離は 1.5mm 程度のばらつきがあるが、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顕著な相関があることが確認できる。ただし、この動きはトンネル自体の動きとともに、レーザー変位計の温度特性および治具の温度特性も含んだ動きである。

図-10 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と坑内の温度の計測結果を示す。内空と温度の移動平均結果を比較すると、温度が高くなると内空が拡大するという関係（約 $1\text{mm}/10^{\circ}\text{C}$ 程度）があることが確認できる。

図-10 中段に、右側壁の地中変位計測結果を示す。図-10 上段の内空変位の計測結果で 1.2mm 程度の内空縮小の急激な進行が見られた時、図-10 中段の地中変位計の値も同程度、大きく動いている。

文献 3)では、下向きロックボルト施工により、路盤隆起が約 30mm 進行したことが示されている。今回のモニタリングにおける変位進行もロックボルト施工の影響が表れていることが考えられる。変位が大きく進行した日は、計測箇所近傍で変状対策としてロックボルトが施工されていた。変位が進行したタイミングとしては午前 1 時～4 時頃にかけてであり、まさにロックボルトが施工されているタイミングである。内空変位だけでなく、地中変位まで同時期に進行しているということから、単純に変位計に作業員が接触したといったことではなく、ロックボルトの施工により、地山が深部から乱され、側壁が押し出したと考えられる。今回のモニタリングから、ロックボルトの施工影響による変位進行は、本トンネルにおいては、地山深部から短時間で一気に進行する現象であることが把握できた。

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、特に目立った動きは見られなかった。

図-10 下段にπゲージによるトンネル縦断目地幅の計測結果を示す。これより、 $0.3\text{mm}/10^{\circ}\text{C}$ 程度の温度依存性を持ちながら推移していることが分かる。年数回の計測では十分把握できない進行性も、このように温度と共に多頻度で計測することで、進行性を評価しやすくなる。なお、ロックボルト施工による目地幅の進行は見られなかった。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と考えられるが、当該区間には横断ひび割れが見られなかったため、縦目地幅を計測している。

図-11 に深度 6m を不動点とみなした時の右側壁背面の

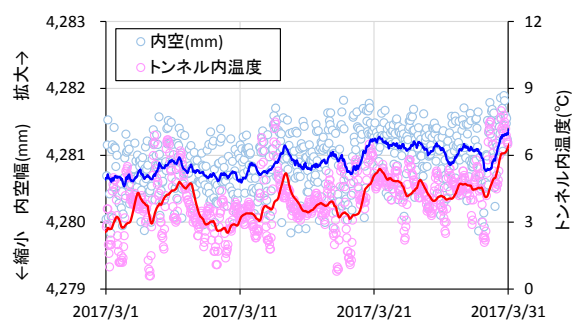


図-9 レーザー変位計による内空計測結果（2017年3月）

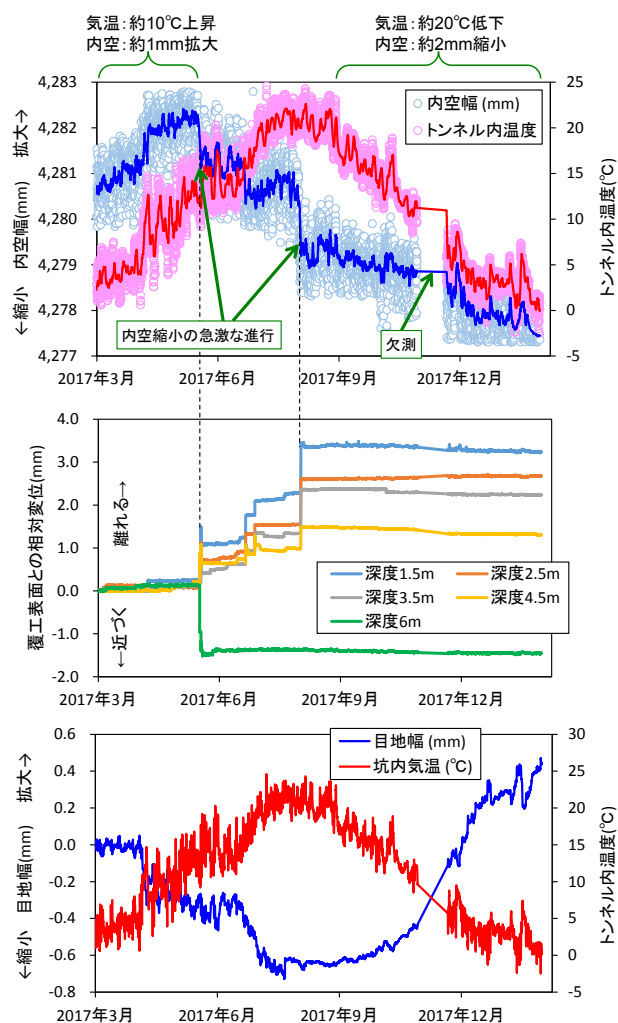


図-10 レーザー変位計による内空幅計測結果（上段）
右側壁の地中変位計測結果（中段）
ひび割れ幅計による縦目地幅の計測結果（下段）

地中変位分布を示す。これより、深度 1.5～4.5m については内空側に変位している一方、覆工表面は地山側に 1.5mm 変位している結果となった。すなわち、内空が拡大側に変位しているという計測結果となっている。地中変位計の左側はほとんど変位が見られないため、レーザー変位計での計測結果とは整合が取れない結果となっている。地中変位計の計測結果については、ロックボルト施工の影響を受けて複雑な動きをしていると考えられるが、今後はロックボルトの施工がないため、計測を継続

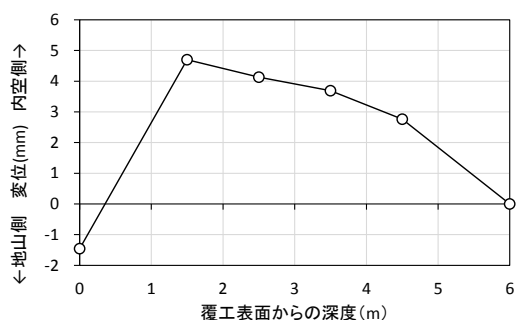


図-11 右側壁背面の地中変位分布 (2018年2月時点)

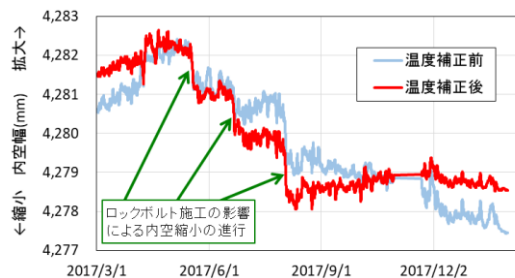


図-12 内空変位の計測結果 (温度補正後)

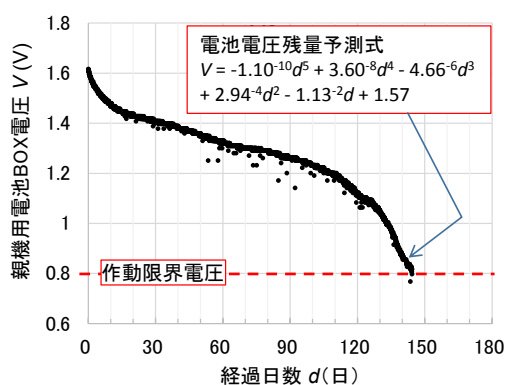


図-13 親機用電池BOX電圧

し、改めて地中挙動を評価したいと考えている。

図-12に、レーザー変位計による内空変位計測について、温度変化によるトンネルの動きを控除することを目的に、内空幅の24データ移動平均のグラフに1mm/10°Cの温度補正を掛けた結果を示す。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、内空縮小の進行性が見られないことが確認できる。ロックボルト補強施工前は年間

13mm/年程度の内空変位速度であったが、2016～2018年度にかけて実施されたロックボルト補強により、ロックボルト施工に伴う一時的な内空縮小の進行はあるものの、持続的な変位の縮小傾向は抑制されているものと考えられる。図-13に親機用電池BOXの電圧値を示す。3章(3)で示した電池BOXにより、144日間のモニタリングができた。なお、図-13に示す通り、電圧値は常にモニタリングできるとともに電池電圧残量は多項式近似により予測できる。

5. おわりに

地圧を受ける活線の鉄道トンネルにおいて、1本当たり5測点を有する地中変位計、内空変位を計測するレーザー変位計等を設置し、これらデータを無線センサで坑外へと送り、携帯電話回線を用いて、任意のインターネットサーバーにアップするリアルタイムモニタリングシステムを構築した。さらに、得られた計測データを整理・分析した。今後は得られた計測データを用いて将来予測をする手法、効果を予測して対策工を選定する手法の開発に取り組みたいと考えている。

謝辞：モニタリングの実施に当たっては、ジェイアール総研情報システムの蒲地秀矢氏にご協力いただいた。ここに謝意を表す。

参考文献

- 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.
- 3) 木村武広: 新登川トンネルにおける補強, 新線路, Vol.65, No.5, pp.53-55, 2011.

MONITORING USING WIRELESS SENSOR IN THE TUNNEL WHICH SUFFER FROM EARTH PRESSURE

Toshiki NAKANE, Keisuke SHIMAMOTO and Kiwamu TSUNO

A multi-extensometer measuring with 5 depth displacement, a laser displacement gauge capable of measuring the inner cross section of tunnel, and a crack width meter are installed in the mountain tunnel which suffer from earth pressure. These data are transmitted to tunnel entrance by the wireless sensor network and uploads to the server. After establishing this real-time monitoring system, 4 months measurement were carried out. By analyzing the monitoring data, though the data of a laser displacement gauge has the difference about 1.5mm, it is confirmed that by taking 24 data moving average, we can get accurate inner displacement which depends on temperature.