

# 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

中根 利貴<sup>1</sup>・嶋本 敬介<sup>2</sup>・川越 健<sup>3</sup>・森瀬 喬士<sup>4</sup>・幸田 真也<sup>5</sup>・坂本 寛章<sup>6</sup>

<sup>1</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: nakane.toshiki.28@rtri.or.jp

<sup>2</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: shimamoto.keisuke.00@rtri.or.jp

<sup>3</sup>正会員 鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: kawagoe.takeshi.43@rtri.or.jp

<sup>4</sup>正会員 元 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 国分寺市光町 2-8-38)  
E-mail: t-morise@jrcc.co.jp

<sup>5</sup>正会員 西日本旅客鉄道(株) 福知山支社 (〒620-0045 福知山市駅前町 415 番地)  
E-mail: shinya-kouda@westjr.co.jp

<sup>6</sup>正会員 西日本旅客鉄道(株) 構造技術室 (〒532-0011 大阪府大阪市淀川区西中島 5-4-20)  
E-mail: hiroaki-sakamoto@westjr.co.jp

地圧を受ける供用中の山岳トンネルにおいて, 1 本当たり 5 深度の変位データ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, ひび割れ幅計を設置し, これらデータを無線センサで坑外へと送り, 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. 構築後, 約 4 か月間のモニタリングの結果を整理したところ, 期間が短く進行性は十分には確認できなかったが, 温度に依存した動き等が確認できた. また, 調査として, 地中変位計測の設置のために左右側壁にボーリングを行い, そのコアを使用した一軸圧縮試験を岩石の吸水の有無に着目して実施した. その結果, 吸水による大きな強度低下が確認された.

**Key Words:** monitoring, mountain tunnel, wireless sensor networks

## 1. はじめに

トンネルに変状が発生した場合, 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ことがある. この時, 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. よって, 特に対策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する方がより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言いがたい. そこで筆者らは, 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, 現地に行って計測ピン間の距離をメジャーで計測するものであり, 年 4 回程度の計測頻度が限度であった.

一方で既往の研究<sup>1)</sup>では, ヌゲージ(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.

そこで, 筆者らは, 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<sup>2)</sup>. なお, 調査として, 地中変位計測の設置のために左右側壁にボーリング

を行い、そのコアを使用した岩石試験も実施した。本稿ではこれらの内容について報告する。

## 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。しかし、コンクリートブロックへの改築区間においては、現状でも年間最大 1.3mm 程度の一定速度での内空縮小が確認されている。

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、地中変位計の設置、レーザー変位計の設置、ひび割れ幅計（温度センサ付き）の設置を実施した。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。

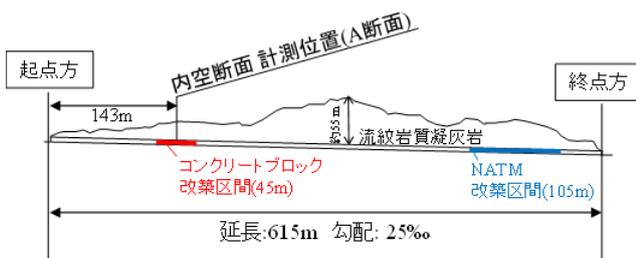


図-1 トンネル縦断面図

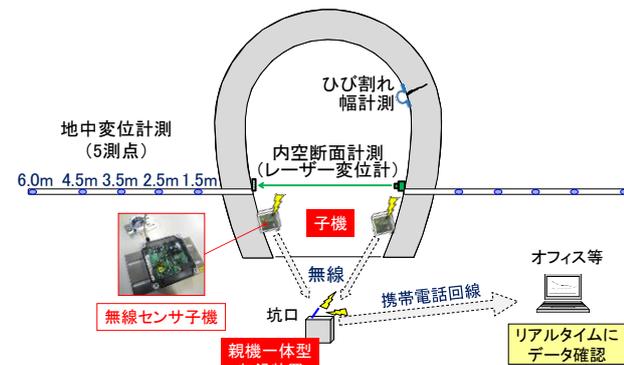


図-2 モニタリング概要図

## 3. 岩石試験

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たが、岩石試験実施時には、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。

### (1) コア観察

ボーリングマシンにより採取したコアを観察した。右左右ともに全体に変質した火山岩礫凝灰岩であった。基質は流紋岩質であり、部分的に強変質部が存在することを確認した。コアは軟質で礫混じり粘土状を呈する箇所（D 級強変質部）を挟んでいた。一例として、右側のボーリングコアを図-3 に示す。

### (2) 一軸圧縮試験結果

ボーリングで得られたコアの内、CM 級を 6 供試体、CL 級を 6 供試体作成し、水浸をした場合としなかった場合の強度低下を比較するため、一軸圧縮強度試験を実施した。試験は水浸させることを除いて、JGS2521「岩石の一軸圧縮試験」に準拠して行った。CM 級、CL 級それぞれについて、水浸した場合を 3 供試体、水浸しなかった場合を 3 供試体実施した。

水浸は、供試体が水との接触により崩れないよう、図-4 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。

供試体の水浸前、水浸後、圧縮試験終了後の写真を図-5 に示す。

図-6 に各々 3 供試体の平均の一軸圧縮強度を示す。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



図-3 右側ボーリングコア状況

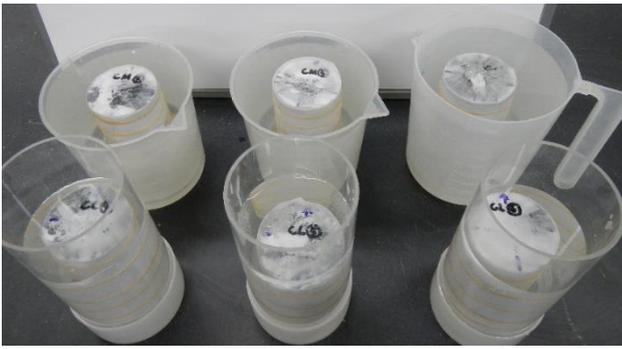
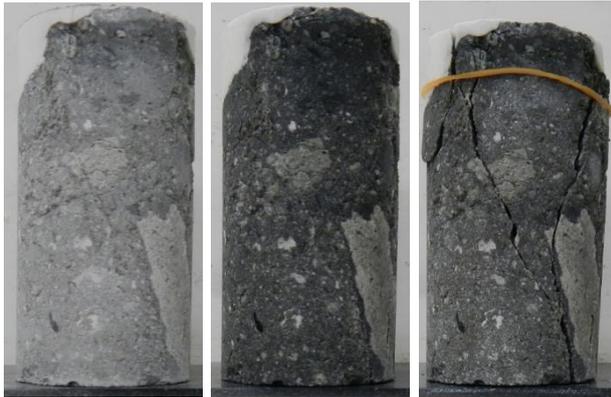
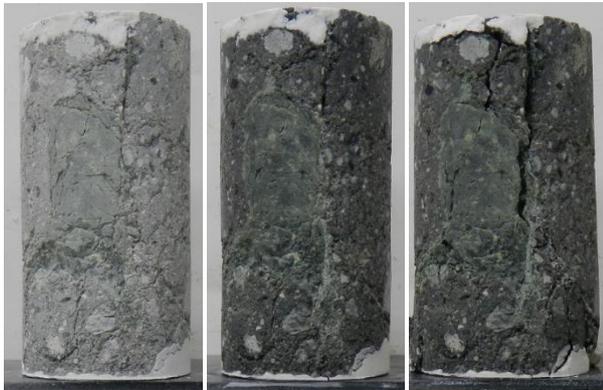


図4 一軸圧縮試験供試体の水浸状況



水浸前 水浸後 試験終了後  
a)CM級コア



水浸前 水浸後 試験終了後  
b)CL級コア

図5 供試体の水浸前後、試験終了後の状況

平均を示す。図6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。

なお、2006年に今回のコア採取位置近傍（2m程度の離れ）において、ボーリングが実施され、一軸圧縮試験がなされている。ボーリング後、今回のように乾燥させることなく適切に養生されたコアを使用して実施した一軸圧縮試験結果によると、3供試体の平均で  $0.47\text{MN/m}^2$  であった。この値は、今回の水浸有りの場合の圧縮強度と概ね同程度である。

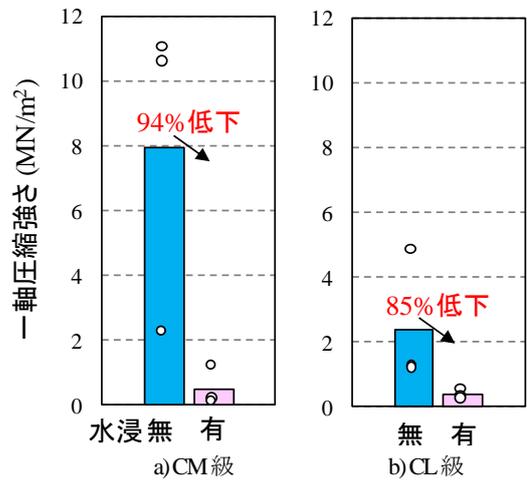


図6 水浸の有無に着目した一軸圧縮強さ



水浸前 試験後  
a)CM級コア



水浸前 試験後  
b)CL級コア



水浸前 試験後  
c)D級コア

図7 スレーキング前後の写真

### (3) スレーキング試験

スレーキング試験をCM級、CL級、D級コアそれぞれ1供試体実施した。その結果スレーキング指数はCM級=1、CL級=2、D級=3であり、D級コアは部分的に泥状化した。

スレーキング試験前後の写真を図7に示す。

### (4) 吸水膨張試験

CL級コアを使用して吸水膨張試験を実施した。吸水開始7日後の膨張応力は  $5.29\text{kN/m}^2$ 、膨張率は0.16%であった。若干の膨張は発生するものの、膨張応力、膨張率ともに、トンネルの変状に影響を与えるような値ではないと考えられる。

## (5) 岩石試験結果のまとめ

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。

当該区間は土被りが25m程度と小さい。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。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。

地山の単位体積重量 $\gamma$ は25kN/m<sup>3</sup>程度、土被り $h$ は25m程度、CM級の一軸圧縮強さ $q_u$ は8MPa程度であることから、地山強度比 $C_r$ を計算すると、 $C_r = q_u / \gamma h = 12.8$ となる。ただし、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、 $C_r = 0.48$ 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。

## 4. 無線センサによるモニタリング

### (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、

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

を設置した。

#### 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」を用いた。内部に「マルチ変位計」を測定点数個内蔵し、測定したい深度に設置された「アンカ部」と「マルチ変位計」とをステンレスワイヤーで「プーリー」を介して接続することで、ステンレスワイヤーの伸縮によって変位を計測する。地中変位計の測点アンカ深度は1.5m, 2.5m, 3.5m, 4.5m, 6.0mとした。

#### b) レーザー変位計

レーザー変位計は、「Sick社製 DL50Hi」を用いた。レーザー変位計の選定にあたり限定された鉄道トンネルの空間計測への対応、電池駆動による長期間の計測、トンネル内空計測仕様を満たす測定精度などを要求性能として製品の選定を行った。選定したレーザー変位計の仕

表-1 レーザー変位計仕様

項目	DL50Hi
奥行き	51.4mm
測定分解能	0.1mm
通信方式	RS422
電圧	DC 10V～30V
消費電力	<2.1W
ウォームアップ時間	<15分

様を表-1に示す。電源としては、後に示す単1乾電池によるバッテリーシステムで4ヶ月程度の長期間測定が可能である。

このレーザー変位計はタイム・オブ・フライト方式のパルス伝搬方で対象との距離を計測する。パルス伝搬方式は一般にタイム・オブ・フライト法で使用される位相測距方式と異なり、任意のパルス幅のレーザー光を投光し、反射されたレーザー光を受光する時間差から距離を算出する方式となるが測定結果には位相測距方式と同様にノイズ、誤差が含まれているため平均化など後処理が必要となる。ウォームアップ時間を長く、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し運用が難しくなる。本稿では割愛するが、システム駆動時間を減らすことを目的に、実際にAトンネルで取り付けるに前に、室内において試験をし、効率の良いウォームアップ時間、平均化の母数を求め、その値を採用している。

#### c) ひび割れ幅計

ひび割れ幅変位計として「東京測器研究所製 パイ型変位計」を用いて計測を行う。変位量±5mmの変位に対して、 $5,000 \times 10^6$ ものひずみを発生させることができることから高感度の測定が可能となる。

#### (2) 使用した無線センサ

上記計測機器により得られたデータは無線センサでトンネル坑口まで伝送し、サーバーへアップロードすることで、リアルタイムにデータを確認できるシステムとした。無線センサは、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、 $\pi$ ゲージ用として1つの計4つを使用した。なお、 $\pi$ ゲージ用の無線センサには、温度センサを内蔵しており、坑内の気温も計測している。

地中変位計用の無線センサについては、地中変位計がひずみ式(4ゲージ)で、5測点の計測を行うことから、5測点を長期間測定するための無線センサ子機を作成した。作成した子機の特徴を以下に示す。

- ① 鉄道トンネルの建築限界に支障しないよう小型である。
- ② 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がある。
- ③ メンテナンス回数に限りがあることからバッテリーでの長期間測定が可能である。

表-2 多測点計測用無線センサ子機の仕様

①小型	175×100×35mm (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 (5分間の間欠周期で2年の電池寿命)
④測定性能	ひずみ 4ゲージ式 $\pm 15000 \times 10^{-6}$ 感度： $30000/2^{24} \times 10^{-6}$ (24bit 分解能) 多チャンネル：5測点まで対応
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 見通し 100m 以上

- ④多測点对应であるとともに、ひずみの定格容量が大きく高感度である。
- ⑤他鉄道無線設備に影響のない無線規格であり微弱な電波出力（一般的な無線 LAN の 1/3）である Zigbee 規格無線機を用いている。

作成した多測点計測用無線センサ子機の特徴と仕様を表-2に示す、なお、レーザー変位計用の無線センサ子機のサイズは同じく 175×100×35mm であり、ひび割れ幅用は 100×100×35mm、親機のサイズは 110×210×75mm である。

### (3) 大容量バッテリーシステム

本計測では、親機とレーザー変位計の長期間計測のため、単1乾電池を用いた大容量バッテリーシステムを用いて計測を行う、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かつ安全であるため乾電池を採用した。

大容量バッテリーシステムでは一般的な単1電池を6個直列する9Vの電池ボックスを、計16組並列化基盤を用いて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、並列化基盤では整流のためダイオードを用いているが、一般的な整流ダイオードでは Vf が高いことから電力にロスが発生する、本システムでは Vf の小さいショットキーダイオードを選定することで消費電力のロスを抑え、また親機・レーザー変位計のための電圧の生成に高効率の DC-DC コンバータを用いることで、長期間の計測を実現している、

レーザー変位計は1時間に1回、15分間起動（データ安定のため、ウォームアップに15分間の起動が必要）し、データ取得をしており、親機は1時間に1回、データを子機から受信し、サーバーへアップしている。この動作に対して、本大容量バッテリーシステムで、4ヵ月程度電池交換無しでかどうできると試算している。なお、電圧値は、1時間に1度サーバーへアップされるデータの中に入っているため、電池残量の確認が可能である。

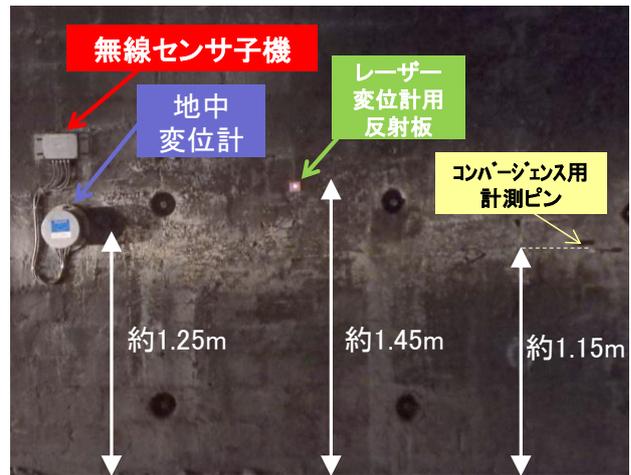


図-8 左側モニタリング機器の設置状況

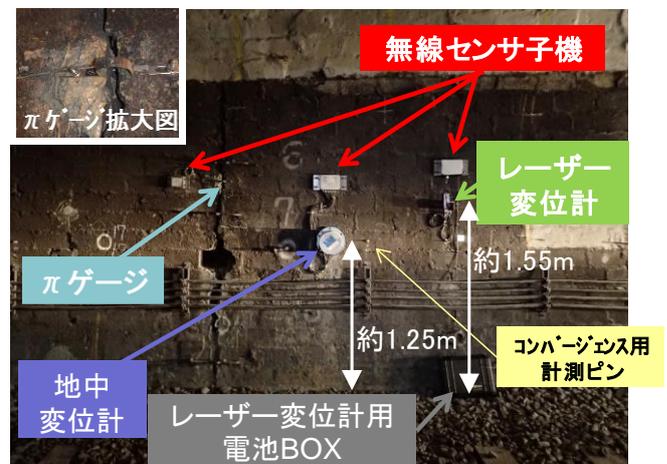


図-9 右側モニタリング機器の設置状況



図-10 モニタリング機器の設置状況 (全体写真)

### (4) モニタリングシステムの設置状況

モニタリング機器の設置状況を図-8～図-10に、計測データの集約、アップロードをする親機の設置状況を図-11に示す、

なお、今回の計測位置は、坑口付近に設置した親機か



図-11 44k081m付近左側親機設置状況

ら 140m 程度離れているが、無線センサ子機と親機が伝達し合う電波強度を確認したところ、中継器無しで無線伝送が可能と判断し、中継器は設置していない。

## 5. 計測結果

### (1) 地中変位計の計測結果の解釈

地中変位計の計測値の生データとして、図-12 のように、各深度の変位量が得られる、この値を、最深部の測点のデータを不動点と仮定して整理すると、図-13 のような結果となる、このような結果が得られた場合、概ね 3 番目と 4 番目のアンカの間までがゆるみ領域と考えられる、ただし、併せて実施されるコンバージェンスメジャーやレーザー変位計による内空変位計測結果が、地中変位計で得られる最深部を不動点と仮定したトンネル内面の変位量よりも大きい場合は、図-13 のように、地中変位計の長さよりもより深部から地山が押し出している可能性が考えられる。

A トンネルのモニタリング断面では、図-8～図-10 に示した通り、地中変位計、レーザー変位計とともに年 2 回のコンバージェンスメジャーによる内空断面計測が、いずれも路盤からの高さ 1.3m 前後と、ある程度高さを揃えて実施されているので、これらの計測結果を比較・整理することで、地山の挙動、トンネルの挙動を把握することが可能である。

### (2) 地中変位計の計測結果

右側地中変位計の計測結果を図-15 に示す。1 時間に 1 回のデータをプロットしている。これより、4 か月間で深度 1.5m のアンカと覆工表面は 2.5mm 離れたことがわかる。ただし、本トンネルの当該区間では現在、地圧対策のためのロックボルトを施工中であり、データを詳細に確認してみると、ロックボルト打設作業時間帯に急

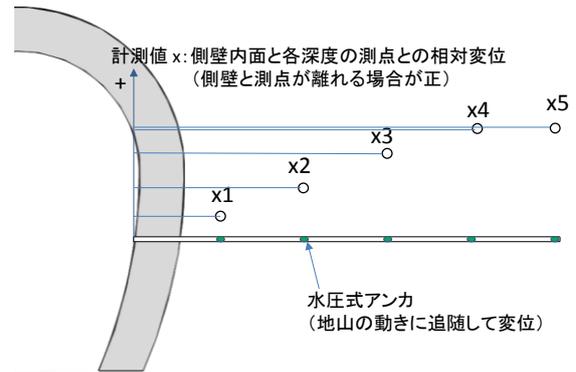


図-12 地中変位計の計測値の生データの例

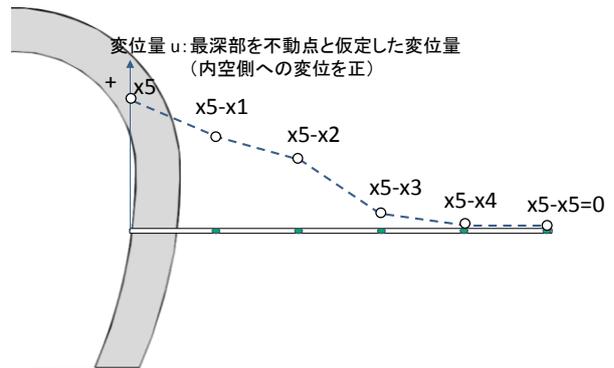


図-13 地中変位計の計測結果例（最深部の測点を不動点と仮定して整理）

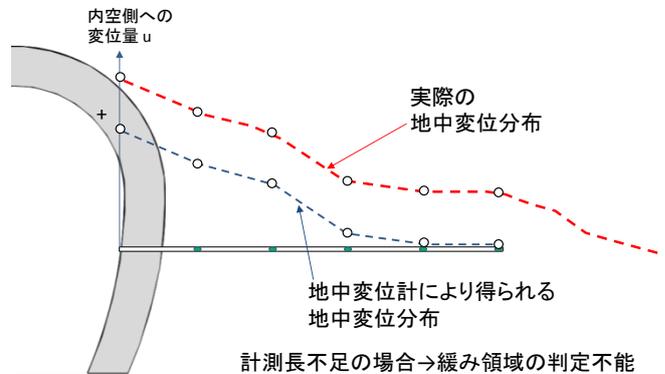


図-14 地中変位計の計測結果例（ゆるみ領域が地中変位計長よりも深い場合）

激に変位が進行していることがわかった。これは、ロックボルト打設時の振動の影響、ロックボルト定着材の注入の影響、削孔水による地山の劣化、作業員等の地中変位計頭部への接触といった様々な可能性が考えられる。

そこで、ロックボルト施工の作業中の変位の急変を排除した計測結果を図-16 に示す。この結果より、まずロックボルト施工時以外にも変位の急変はところどころにあり、急変するものの、また元の値に戻るといった動きも散見されることがわかった。全体的には、平常時の傾

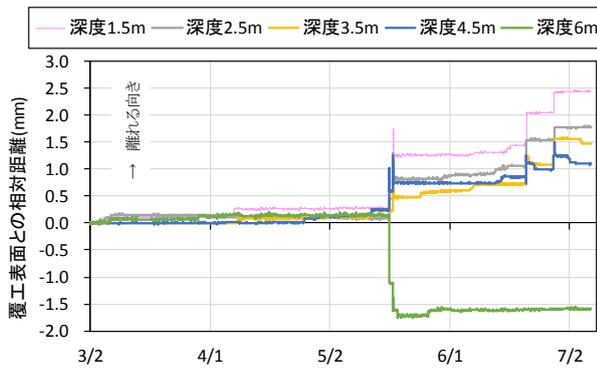


図-15 右側地中変位計の計測結果

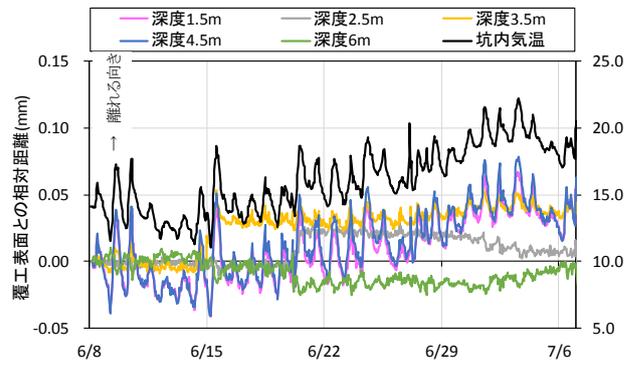


図-18 左側地中変位計の計測結果 (施工影響を除く)

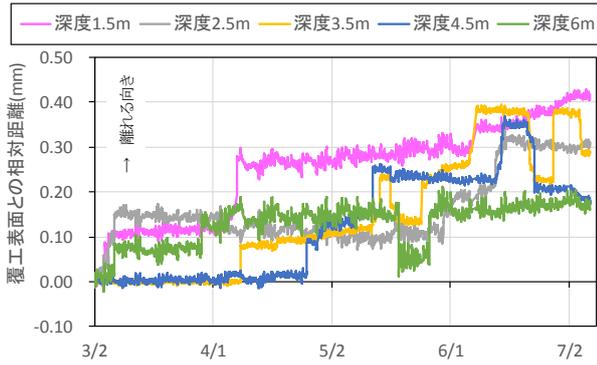


図-16 右側地中変位計の計測結果 (施工影響を除く)

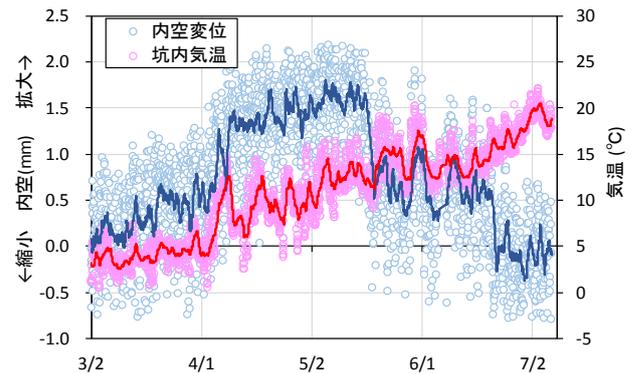


図-19 レーザー変位計の計測結果

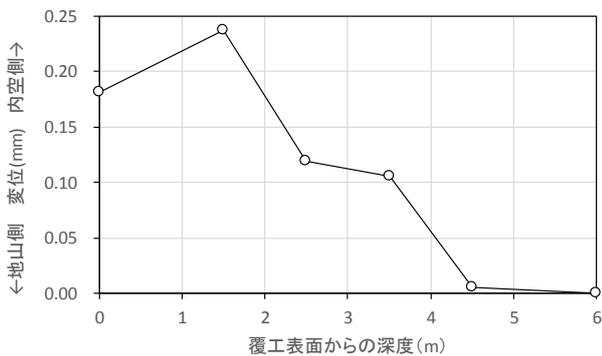


図-17 右側地中変位計の計測結果 (7月7日の計測データについて、深度6mを不動点)

きを見ると、深度1.5mと6mは徐々に側壁と離れる傾向が見られるが、深度2.5m、3.5m、4.5mは側壁に徐々に近づく傾向が見られる。ただし、変位の急変も考慮すれば、全深度において、側壁と離れる向きに変位している結果となっている。最新の7月7日のデータについて、図-13に示した方法で深度6mを不動点と考えた地中変位分布を描くと図-17のように、4.5m以浅で側壁が押し出しているような地中変位分布が得られた。

現状では、計測期間が短く、変位も小さいため、明確な緩み領域や変位の進行性を判断はできない。なお、地中変位計は今回のような電気式ではなく、ノギス等で年何回か手計りをする場合もあるが、今回の計測結果を見

る限り、施工等の影響が考えられる場合は、年何回かの計測頻度では、信頼性のあるデータは得られない場合もあることが考えられる。

図-18に左側の地中変位計の、施工時の影響を除いた計測結果を示す。左側の地中変位計は、6月8日以前は欠測期間があったため、6月8日からの約1カ月のデータについて示している。坑内気温のデータも合わせて示している。これより、1カ月で0.05mm程度の動きであり、明確な進行性は確認できない。なお、気温が大きくなると、特に深度1.5mと深度4.5mの測点と覆工との距離が大きくなっている。これは、アンカとマルチ変位計を繋ぐステンレスワイヤーが、気温が大きくなると伸びるためと考えられる。地中変位計は温度変化の小さい地中で使用されること、地中内での温度分布は一律でないことから温度補正はしていない。実際に、温度変化による地中変位の変動は微小であり、特段問題となるものではないと考える。

### (3) レーザー変位計の計測結果

レーザー変位計による内空断面の計測結果を坑内気温の計測結果とともに図-19に示す。内空は、初期値(4280.606mm)からの差分をプロットしている。1時間に1個の計測データをプロットするとともに、24データの移動平均を実線で示している。内空変位のデータは±0.8mm程度のばらつきが見られるものの、移動平均をと

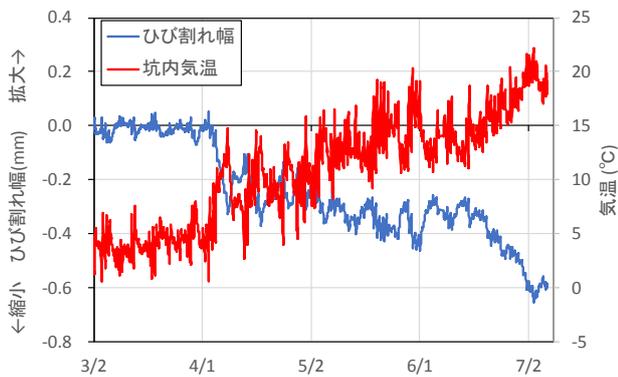


図-20 ひび割れ幅の計測結果

ることで、気温とともに変動している傾向を確認できる。気温が上昇すると内空が拡大する傾向が見られるが、5月中旬より、気温が上昇傾向にあるにも関わらず、内空が1ヵ月で1.5mm程度縮小している結果となっている。

現状では、計測期間が短く、また、ロックボルト施工の影響もあるため、評価が難しいが、今後さらに計測を継続し、トンネル挙動を評価していく必要がある。

#### (4) ひび割れ幅計の計測結果

今回モニタリング位置周辺に計測に適したひび割れがなかったため、ひび割れではないが、図-9に示したように、コンクリートブロック覆工の縦目地にϕゲージ(ひび割れ幅計)を設置した。ひび割れ幅の計測結果を図-20に示す。これより、気温上昇とともに目地の幅が縮小してきていることが確認できる。

## 5. おわりに

(2017.8.11 受付)

## MONITORING IN THE MOUNTAIN TUNNEL IN SERVICE WHICH SUFFER FROM EARTH PRESSURE

Toshiki NAKANE, Keisuke SHIMAMOTO, Takeshi KAWAGOE, Takashi MORISE, Shinya KOUDA and Hiroaki SAKAMOTO

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. As the results, the period was short and the progressiveness could not be confirmed sufficiently, but we were able to confirm the temperature-dependent movement etc. In addition, the authors carried out the uniaxial compression test using the core focusing on the presence or absence of water absorption of the rock. As a result, a large decrease in strength due to water absorption was confirmed.

地圧を受けるAトンネルにおいて、地中変位計、レーザー変位計、ひび割れ幅計を設置し、無線センサによるモニタリングを実施した。なお、調査として、地中変位計測の設置のために左右側壁にボーリングをしたため、そのコアを使用した岩石試験も実施した

成果を以下にまとめる。

- 1) 5測点のデータを伝送可能な無線センサを作成し、地中変位計の計測データを伝送した。
- 2) レーザー変位計による内空変位の計測データを無線センサにより伝送した。
- 3) トンネル坑口から140m程度入った位置の計測データを無線センサで坑外へと送り、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。
- 4) 吸水による強度低下に着目した一軸圧縮試験を実施し、吸水により強度が大きく低下する地山であることを確認した。

今後、地中変位計の計測データ、レーザー変位計の計測データ、コンバージェンスメジャーの計測結果、ロックボルト軸力の計測結果等を総合的に評価し、対策工の仕様選定に活かしていきたいと考える。

#### 参考文献

- 1) 津野究, 蒲地秀矢, 中西祐介, 仲山貴司: 無線センサを用いたトンネル変状監視, トンネルと地下, Vol.41, No.3, pp.49-53, 2010.
- 2) 森瀬喬士, 嶋本敬介, 津野究, 川越健, 幸田真也, 坂本寛章: 地圧を受ける変状トンネルにおけるモニタリングシステムの構築, 土木学会第72回年次学術講演会, III-349, 2017.