

# トンネル内空変位計測システム 「T-レーザートンネルウォッチ」の開発と現場実証

磯部 将吾<sup>\*1</sup>・竹中 計行<sup>\*1</sup>・山田 紀之<sup>\*2</sup>・斎藤 功輔<sup>\*2</sup>  
宮原 宏史<sup>\*3</sup>・森本 景介<sup>\*3</sup>

Keywords : shield tunneling, tunnel convergence, tunnel deforming monitoring, laser distance meter, wireless communication  
シールド工法, 内空変位計測, トンネル変形挙動モニタリング, レーザー距離計, 無線通信

## 1. はじめに

我が国の都市部では地下構造物が輻輳し、近接工事が増加している。高度経済成長期以降、地下空間には鉄道、道路、上下水道、電力、通信といった多種多様なインフラが集中的に整備され、これらが長年にわたり累積された結果、地下構造物の密度は極めて高くなっている。そのため、都市部で新設トンネルを施工する際は、既設構造物に近接しているケースが多い。

都市トンネルの代表であるシールドトンネルでは、都市部で近接・併設工事が増えている。図-1は、併設シールドにおける内空変位の一例で、先行トンネルが後行トンネルに引き込まれる方向に変位が生じるイメージである。シールド間の離隔が1m未満となる場合は、地盤の緩みや掘進圧の変化が先行トンネルに及ぼす影響を無視できず、構造的健全性の確保には精緻な解析と施工管理、そして内空変位のモニタリングが不可欠である。

近年は、その内空変位をモニタリングするため、観測頻度や自動化の要求に応じて、広範囲を一括計測できる3次元レーザースキャナなどの計測技術が開発されている。<sup>1),2)</sup>

しかしながら、先進的な観測機器・システムの導入には、高額な初期投資が必要で、得られた大容量データの処理・解析に関する技術的課題も多い。そのため、現在でもトータルステーション(以下、TS)による内空変位計測が主流ではあるものの、掘進の進捗に応じた

TS本体・ミラーの位置替えが必要で、手間がかかるため、省力化が求められていた。また、TSは1点ずつしか計測できないため、リアルタイム性がない。

そこで、著者らは内空変位計測の省力化を目的とし、先進機器よりも安価でリアルタイムに計測できるシステム「T-レーザートンネルウォッチ」を開発した。本稿では、システムの開発経緯を解説し、続いて室内と現場における精度確認試験結果を述べた後、シールドトンネル現場での実証結果について報告する。

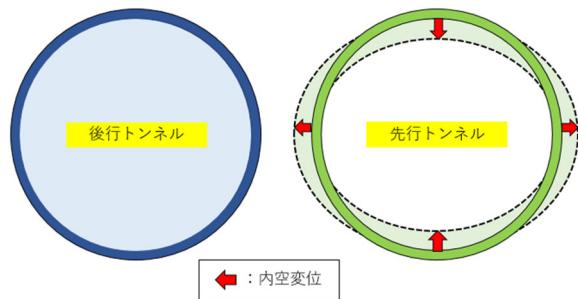


図-1 後行トンネル掘削に伴う内空変位発生の例  
Fig.1 Tunnel convergence due to the second tunnel excavation

## 2. 開発フロー

本章はT-レーザートンネルウォッチの開発工程をハード・ソフトの2視点から俯瞰し、各フェーズの役割と本研究全体の流れを示す。開発フローを図-2に示す。開発項目は、距離計の選定や現場環境に耐えうる架台の製作などのハード面の開発と、距離計などを制御・

\*1 技術センター 生産技術開発技術研究部 地下空間技術開発室

\*2 横浜支店 土木工事作業所

\*3 マック(株)

モニタリングするシステム作成をするソフト面の開発に分かれる。フロー内の“現場試験”では、実証実験に先立って動作の確認や精度確認を行った。

本開発の目標性能は、20m の計測距離において相対変位 $\pm 1\text{mm}$ を検出できることである。計測距離を 20m と設定した理由は、国内で最大のシールド外径および山岳トンネル幅員がいずれも 20m 未満であるためである。検出精度を $\pm 1\text{mm}$ とした根拠は、トータルステーション(TS)による内空変位計測が 1mm 単位で行われていることに基づく。

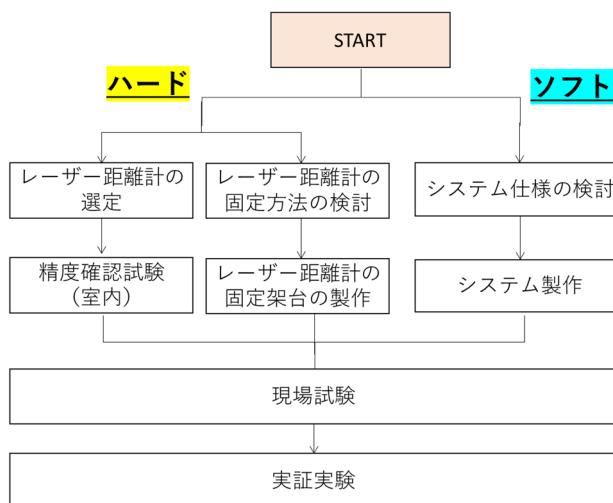


図-2 開発フロー図  
Fig.2 Development flowchart

### 3. 開発内容

本章はシステムを構成するハード選定からソフト設計までの技術的要点と室内検証結果を報告する。

#### 3.1 レーザー距離計の選定

内空変位計測においては、日々の後行トンネルの掘進の進捗に合わせて先行トンネル側の計測範囲が変わることため、その都度、計測器の盛替えをする。そのため、計測機器は高精度でありながらも軽量で、かつ容易に制御できる仕様が求められた。しかし、高精度かつ軽量なレーザー距離計は市販されているものの、照射時間や計測頻度などの細かな設定ができなかった。そのため本開発では、市販品ではなく、高精度かつ軽量のレーザー距離計モジュールを改造して使用した(写真-1)。



写真-1 レーザー距離計モジュール  
Photo.1 Laser distance meter module

#### 3.2 精度検証器具

モジュールから組み立てたレーザー距離計の精度検証のため、図-3、写真-2 に示す計測器具を製作した。この器具は、ターゲットにボルトを固定しており、回転により水平移動できる機構となっており、相対変位を再現することができる。変位量を緻密に管理するため、①マイクロメータをターゲットの背面に接するように設置し、②ターゲットをピッチ角・ヨー角方向に回転できる雲台に固定し、ターゲットの角度を正確に変更できるようにした。

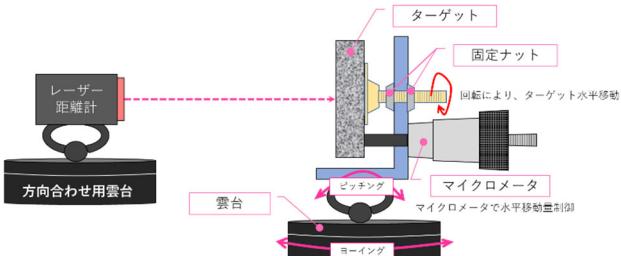


図-3 精度確認用ターゲット  
Fig.3 Calibration target



写真-2 精度確認用ターゲット  
Photo.2 Calibration target

### 3.3 精度確認試験(室内試験)

精度確認試験では、太陽光の影響がない室内で実施した。計測距離は、20mで実施した。計測手順は、①ターゲットにレーザーを照射し距離を計測、②マイクロメータや電子ノギスで確認しながら、1mmの変位を、発生させる、③再測定して①の結果と比較し、1mmの変位を±1mm以内で計測できているかを確認した。

試験は、正対(角度0°)で計測精度を検証した後、単角度(ピッチ角・ヨー角)もしくは、合成角(ピッチ角とヨー角)方向に角度を付与した状態で、①～③の手順を実施した。ここに、角度とは図-4に示すようにレーザー照射軸を0°とし、レーザー照射直角軸を±90°としている。結果を表-1に示す。正対(0°)では距離20mで相対変位を±0.5mm以下で計測できた。一方で、単角度は±70°内、合成角は±50°内であれば相対変位を±1mmで計測できることを確認された。

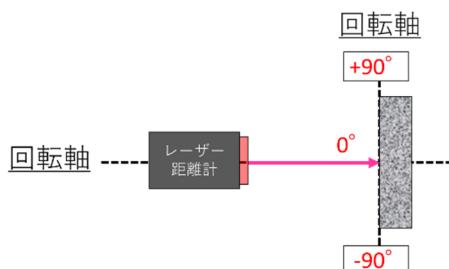


図-4 レーザー照射軸に対する角度の定義  
Fig.4 Angle definition

表-1 室内試験計測結果

Table 1 Indoor test results

| 計測距離 | 正対(0°)   | ピッチ角のみ | ヨー角のみ  | 合成角        |
|------|----------|--------|--------|------------|
| 20m  | ±0.5mm以下 | ±70°以下 | ±70°以下 | それぞれ±50°以下 |

### 3.4 レーザー距離計の固定方法

本システムは、トンネル壁面間の相対変位を計測するため、計測機器をトンネルの壁面に取り付ける必要があった。

本開発では、シールド工事や山岳トンネル工事への適用を鑑み、インサート金物を利用した四脚支持+中央ボルト固定構造とした(図-5、写真-3)。インサート金物は、シールドであればセグメントに備えられており、山岳トンネルであれば吹付面に削孔すればインサート金物を埋め込めるためである。

一方で、ベルトコンベアや車両の走行による振動により、壁面に設置したレーザー距離計の照射位置が意

図せば変化する懸念があったため、四本の脚部には防振ゴムを採用した。

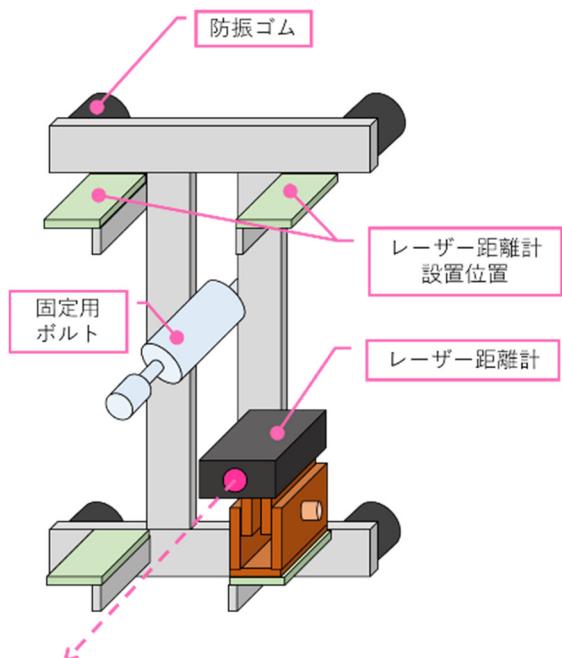


図-5 架台イメージ

Fig.5 Mounting frame



写真-3 壁面に固定した架台  
Photo.3 Mounting frame fixed on the wall

### 3.5 システム仕様の検討

システムは、併設シールドトンネルをイメージして設計した。図-6に、本システムの概要図を示す。モニタリングシステムは新設トンネル側の中央監視室で閲覧する想定である。

シールド工事や山岳トンネル工事では、坑内にWi-fiが整備されていることが多いため、データの伝送は坑内Wi-fiを使うこととした。計測データは、後述する計測機器から坑内Wi-fiに載せられ、坑内のアクセスポイント(図中のAP)に集積された後、有線LANにて中央監

視室に送られる仕様とした。

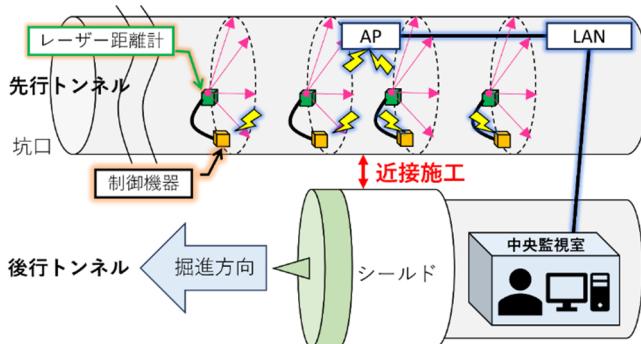


図-6 T-レーザートンネルウォッチ システム概要  
Fig.6 Overview of “T-Laser Tunnel Watch”

### 3.5.1 データの伝送方法

日々の機器替え・設定を容易にできるよう、複数のレーザー距離計を集中管理する制御機器を開発した。この制御機器は、レーザー距離計を最大6台まで一括で制御・通信・データ管理できる。

制御機器は、Wi-fiを通じて各距離計への信号を受信し、レーザー距離計へ計測開始・停止や計測間隔をまとめて指示する。計測データは制御機器内のメモリに一時保存され、数日分を保持できる。通信障害が発生しても記録は途切れず、復旧後に蓄積データが即時モニタリングシステムへ転送されるため、連続した計測ログが確保される。写真-4に現場設置状況を示す。

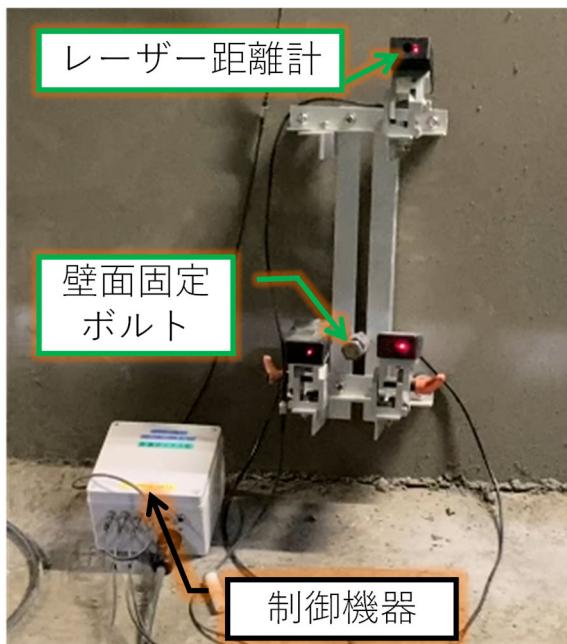


写真-4 現場設置状況  
Photo.4 Field installation overview

### 3.5.2 モニタリング画面の仕様

モニタリング画面は、メイン画面、経時変化画面、

設定画面の3画面で設計した(図-7)。

メイン画面は、設置された全レーザー距離計の最新計測値を一覧表示し、異常値を検知するとアラートで通知する。常時は、この画面が表示されており、監視対象を俯瞰できる画面として設計している。経時変化画面は、メイン画面で選んだ特定の距離計の計測値推移を折れ線グラフで表示する。微小な変位の傾向や変位のトレンドを把握するために利用する(図-8)。

設定画面では、計測周期や距離フィルタの閾値、角度補正值などのパラメータを、レーザー距離計1台ずつ設定できるよう設計している。出力周期は、精度は落ちるもの最速5秒に設定でき、1分など任意のタイミングに変更できる。角度補正是鉛直・水平・円中心方向の3パターンから選べるようになっている(図-9)。

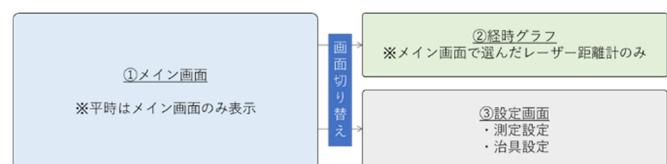


図-7 モニタリングシステムの画面構成  
Fig.7 Screen layout of the monitoring system

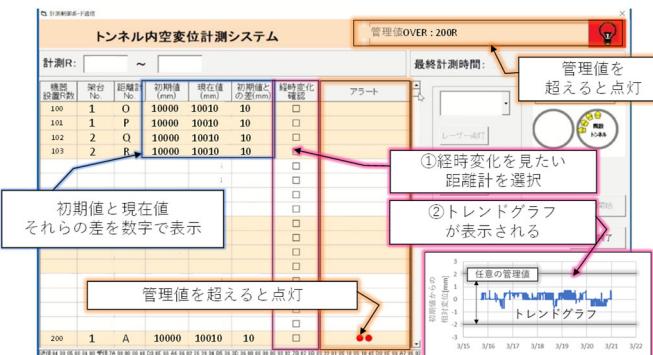


図-8 メイン画面  
Fig.8 Main screen



図-9 設定画面  
Fig.9 Configuration screen

## 4. 現場実験

本章は振動・粉塵を伴うシールド現場でシステムの計測限界と耐環境性能を検証する。

シールド工事や山岳トンネル工事では土砂を運搬するベルトコンベアや車両などによる振動が生じる。そのため、現場実験は、両者が存在しているシールド工事現場で実施した。

### 4.1.1 精度確認試験結果

表-2に現場実験の結果を示す。正対であれば、30mまでは、相対変位1mmに対して±0.5mmの範囲で計測ができる。一方で、単角度の変化(ピッチ角、もしくはヨ一角のみ)であれば、距離20mで60°以下、両者の合成角であれば30°以下であれば、相対変位を±1mmで計測できた。距離30mであれば、単角度のみでは20°以下まで相対変位を±1mmで測れるが、合成角になると計測自体は、できるものの目標精度内に収まらなかった。同じ距離であっても、精度が確保できる範囲が室内試験と比して減少している原因是、坑内照明によるレーザー光の散乱などが考えられる。一方で、距離40mになると、計測自体ができなくなるという結果であった。距離30~40mの間は、計測できる場合とできない場合があり、不安定な状態であった。

表-2 現場実験結果  
Table 2 Field experiment results

| 計測距離 | 正対(0°)  | ピッチ角のみ | ヨ一角のみ | 合成角              |
|------|---------|--------|-------|------------------|
| 20m  | 0.5mm以下 | 60°以下  | 60°以下 | それぞれ30°以下        |
| 30m  | 0.5mm以下 | 20°以下  | 20°以下 | NG<br>相対変位±1mm以上 |
| 40m  | 計測できず   | 計測できず  | 計測できず | 計測できず            |

### 4.2 振動による影響評価

振動による計測への影響を評価するため、計測機器をベルトコンベア下方の壁面に設置し、ベルトコンベアの稼働に伴う振動の影響を検証した(図-10、写真-5)。具体的には、①架台にTS用ミラーを取り付け、定期的にTSで計測して座標で変動量を測る②レーザー照射位置をマーキングして目視で変動を測る、の2点を実施した。評価期間は、ベルトコンベアの稼働を含む30時

間とし、座標の変動(TS)と、レーザー照射位置の変動(目視)を調査した。

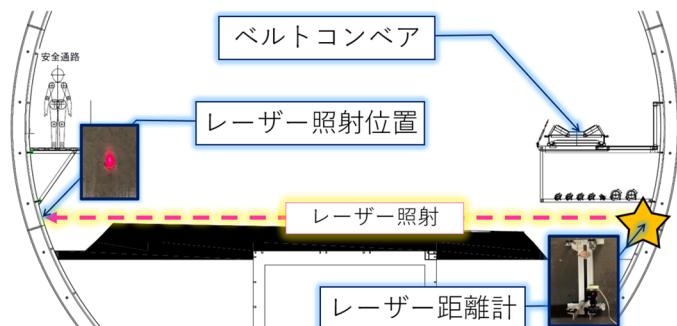


図-10 振動影響評価イメージ  
Fig.10 Evaluation of the affect of vibration

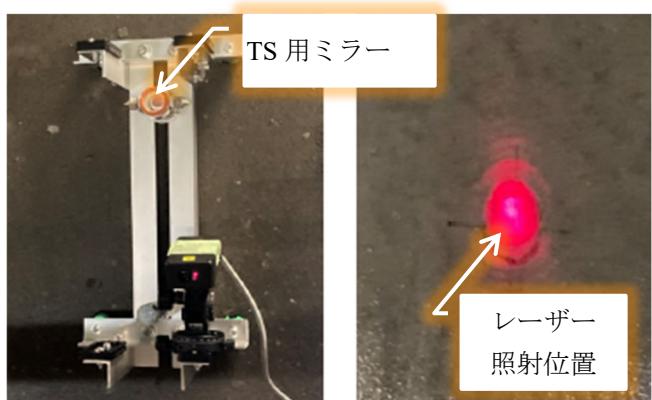


写真-5 振動評価時の状況  
Photo.5 Evaluation of the affect of vibration

結果を表-3に示す。いずれの時間においても座標の変動はなく、また目視によるレーザー照射位置の変動も確認されなかった。

表-3 TSによる架台の変動量  
Table 3 Displacement of frame measured by TS

| 変動量 [mm] | トンネル軸方向 | トンネル軸直角方向 | 鉛直方向 | 照射位置の変動 |
|----------|---------|-----------|------|---------|
| 1時間後     | 0       | 0         | 0    | 変動無し    |
| 2時間後     | -0.1    | 0.3       | -0.1 | 変動無し    |
| 3時間後     | -0.6    | -0.1      | -0.1 | 変動無し    |
| 4時間後     | 0       | -0.1      | 0.1  | 変動無し    |
| 5時間後     | -0.1    | 0         | 0    | 変動無し    |
| 25時間後    | -0.2    | 0.3       | 0    | 変動無し    |
| 30時間後    | -0.1    | -0.3      | 0.1  | 変動無し    |

## 5. 現場実証

本章は「T-レーザートンネルウォッチ」の実用性と計測精度を検証するため、実際のシールドトンネル工事現場にて現場実証試験を実施した結果を示す。

当現場は、先行(上り線)掘削後に後行(下り線)を掘削する計画である。上下線間の離隔が狭く、掘進に伴う内空変位の監視が安全管理上重要であった。

### 5.1 FEM 解析による事前予測

事前の有限要素法(FEM)解析では、下り線の掘進に伴い上り線に内空変位が発生することが予測された。図-5に結果を示す。シールド通過時に上り線が下り線側に引き込まれ、水平変位は最大9.7mm、鉛直変位は最大6.7mmの沈下が発生するとされた(図-11)。

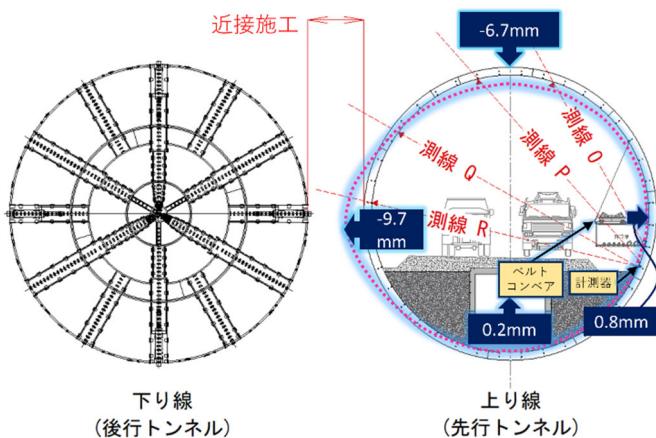


図-11 計測測線と想定された内空変位量

Fig.11 Measurement Line and assumed tunnel convergence

### 5.2 計測器の設置および盛替え

横断方向の計測点は、変位が大きいと予測される天端およびS.L.付近、さらにその間の2点の合計4点に設定した(図-11の測線O,P,Q,R)。

計測器は、内空変位が小さく、設置および撤去が容易であるベルトコンベア下方のセグメントに設置した。設置平面図では、シールド前後の計110mの範囲を、切羽離れ約±10mは2mピッチで、それ以外の範囲は10mピッチで配置した。計測器の総台数は96台(4台/断面)で、計測は1分に1回実施された。

当作業所では、レーザー距離計を設置している上り線には夜間の限られた時間しか立ち入ることができない条件であった。そのため、レーザー距離計と切羽離れの関係を常に把握し、盛替え先を誤らないよう、各距離計に名称を付け、事前に設置リング番号を決定した。(図-12, 写真-6)

図-13に解析結果と計測結果(水平変位:測線R)を示

す。切羽離れの差により計測値が凹凸しているが、その大きさは±1mm以下と微小であり、内空変位を高精度で計測できている。

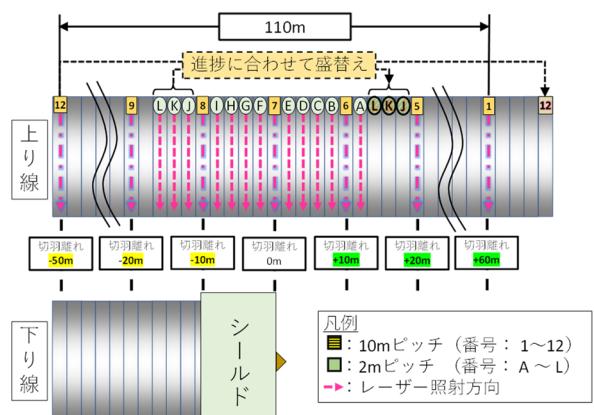


図-12 計測器設置平面図と盛替え計画  
Fig.12 Equipment layout and replacement plan



写真-6 計測機器の現場設置状況  
Photo.6 Field installation overview

計測結果と解析値を比較すると、全体の傾向は概ね解析値通りで、上り線は下り線側に引き込まれる傾向であった。この傾向は計測した全ての区間で見られた。いずれの切羽離れでも管理値内に計測値が収まっており、適正に圧力等の施工管理ができたといえる。盛替えも夜間の限られた時間の中で実施することができた。約9か月間の実証実験で、データは安定して取得できており、長期的な運用に支障がないことが確認された。

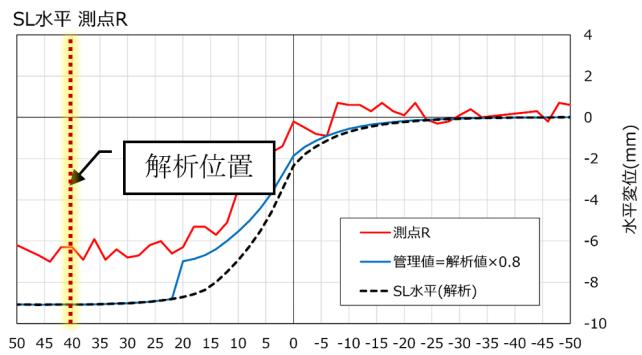


図-13 計測結果(測線 R)  
Fig.13 Measurement results (Line R)

## 6. まとめ

本研究では、内空変位を高精度かつ連続的に計測可能な「T-レーザートンネルウォッチ」を開発し、室内試験および実際のシールドトンネル工事現場においてその性能を検証した。

現場実証では、約9か月にわたって96台のレーザー距離計を用いて連続計測を行い、取得データは有限要素法解析の結果と良好に一致した。

以上より、「T-レーザートンネルウォッチ」は近接施工現場における内空変位を高精度に監視できると確認した。今後は他現場への適用を拡大し、機能を継続的に改良する。

### 謝辞

本開発の実施にあたり、現場での実証試験に多大なるご協力をいただいた関係各位に深く感謝申し上げます。また、レーザー距離計の開発および精度検証に関して多くの技術的助言をいただいたマック株式会社の皆様にも、この場を借りて厚く御礼申し上げます。

### 参考文献

- 1) 坂井一雄, 宮永隼太郎, 崔瑛, 浅羽絢介: トンネルの長期的な変位監視手法への3Dレーザスキャナの適用性検討, 大成建設技術センター報, Vol. 55, pp.44-1-44-7, 2022.
- 2) 赤木俊文, 坂井一雄: サンプリングモアレカメラによる山岳トンネル掘削環境下における変位計測, 大成建設技術センター報, Vol. 56, pp.49-1-49-6, 2023.