

ワイヤレスセンサを用いた大断面シールドセグメントの挙動計測

岸下 崇裕 磯崎 智史 *1
米澤 敏行 *2 佐藤 工 *2
小幡 克実 *3 門田 俊一 *4

概 要

シールドトンネルに使用される鉄筋コンクリート製セグメントは、長期耐久性及び止水性の観点からセグメントのひび割れ、剥離や欠けなどの不具合を抑制することが必要とされている。一般的にこれらの不具合は、掘進反力の影響を強く受ける、組立て後の1～3リングまでに多く見られることが判明している。

そこで筆者らは、シールド機付近のセグメントの挙動(セグメント間の目開き量等)をリアルタイムに計測が可能で、煩わしい配線作業がなく短時間で設置可能なワイヤレスセンサを用いた計測システム(以後SRW計測システム)を現場へ適用した。

SRW計測システムを現場へ適用した結果、以下の知見が得られた。

- ① 直線・曲線区間とも、変形量の90%以上が1リング掘進時に発生することが分った。
- ② リング間は、3リング後もジャッキ推進力の影響を受け目開きおよび目違いともに変動する傾向にあることが分った。
- ③ リング間の目開きより、1リング掘進中のセグメントの挙動は、横や縦方向に潰れるのではなく、全体的に圧縮されていることが分った。

Measurement of Segment Behaviors in a Shield Tunnel Having a Large Diameter Using Wireless Sensing System

Abstract

When constructing shield tunnels with RC segments, it is vital for long-term durability and waterproofness to prevent occurrence of cracks, detachments and chippings of the concrete. Generally, these defects are found mostly between the first and third segments where jack reaction forces strongly act.

In order to understand the mechanical behaviors of segments for rational excavation control, openings and gaps between segments are measured in real time using a wireless sensing system. This system is called the "SRW system (Shield Real time Wireless measurement system)". By adopting this system, complicated and time-consuming wiring works become unnecessary, and strain gage type sensors for the measurement can be installed in quite a short time.

The SRW system has already been applied to a large-diameter shield tunnel, and the following technical findings were obtained:

- (1) 90 % of total displacements occurred within one ring both in straight and curved sections.
- (2) Openings and gaps still occurred even within three rings by the influence of jack reaction forces.
- (3) The first segment ring tended to be compressed rather than moving horizontally and perpendicularly.

キーワード: ワイヤレスセンサ, シールドセグメント, 挙動計測

*1 土木本部 技術統括部 *2 横浜支店
*3 FBS MN 事業部 *4 フジタリサーチ

§1. はじめに

鉄筋コンクリート製セグメントは、長期耐久性および止水性の観点から、施工時におけるセグメントのひび割れ、剥離、欠けなどの不具合を抑制することが必要である。土木学会シールドトンネル施工時荷重検討部会によるアンケート調査の結果によると、これらの不具合は大半が、セグメント組立て時から掘進の推力を強く受ける掘進時（テールブラシ通過後まで）に多く見られことが判明した。図1に不具合発生状況のアンケート結果を示す。

また土圧などの外部からの影響もあり、高品質の施工を行うには、各セグメントの相対的な動きをリアルタイムに計測して、シールド機の制御等の施工管理に反映させ、不具合の発生を防止することが望まれている。

従来は、ノギスや鋼尺での手動計測や、センサとパソコンとを計測ケーブルにより接続した有線計測が用いられていました。これらの方法で掘進中の時々刻々の変化を捉えるには、多大な労力と費用が必要である。さらに有線計測では計測ケーブルやセンサの盛替えに時間を要し、工事の進捗に支障を来たすため、常にシールド機付近の計測を実施することは困難でした。

そこで筆者らは、シールド機付近のセグメントの挙動（セグメント間の目開き量等）をリアルタイムに計測が可能で、煩わしい配線作業がなく短時間で設置可能なワイヤレスセンサを用いた計測システム（以後SRW計測システム）を現場へ適用した。

本報告では、SRW計測システムの概要およびシールド機付近におけるセグメントの挙動について報告する。

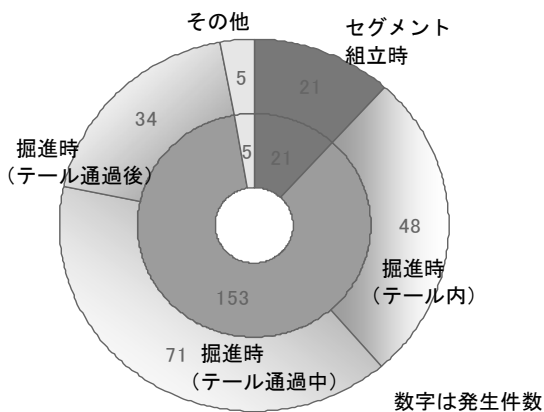


図1 不具合発生状況アンケート結果

§2. SRW計測システム

2.1 SRW計測システム概要

SRW計測システムは、セグメントの挙動を計測するた

めにセグメントのリング間およびセグメント間に設置した目開き計・目違い計、計測されたデータを転送するための2.4GHz帯のワイヤレスセンサ（発信機・受信機）と計測されたデータを管理するパソコンから構成される。SRW計測システムの概略図を図2に、セグメントに設置された目開き計・目違い計を写真1、ワイヤレス発信機を写真2に、シールドセグメントに取り付けた状況を写真3に示す。受信機は、シールド機中央に障害物があるため1台で全ワイヤレスセンサを受信することが出来ず、前方の左右2箇所を設置した。写真4に受信機の設置状況を示す。

一般的にセグメントの不具合は、図1に示されるように、反力の影響を大きく受ける、シールドから1リングないし3リング目に多く見られている。そこで本計測では、図2で示すようにセグメントを組立て設置した後、組み立てられたセグメントの所定の位置に目開き計・目違い計およびワイヤレス発信機を設置し、掘進開始からテールブラシ通過およびセグメントが地中に入り安定するまでの間実施した。煩わしい配線作業がないので掘進工程に影響を与えることなく、リアルタイムにかつ連続的に計測できた。

セグメントの目開き計測は、コーキング溝内にクリップ型変位計を取り付け、目違い計測は、セグメントの表面にカンチレバー型変位計を取り付けて実施した。計測された値は、センサ設置時を初期値（変形量 0）とし、セグメント間の相対変形量として評価した。

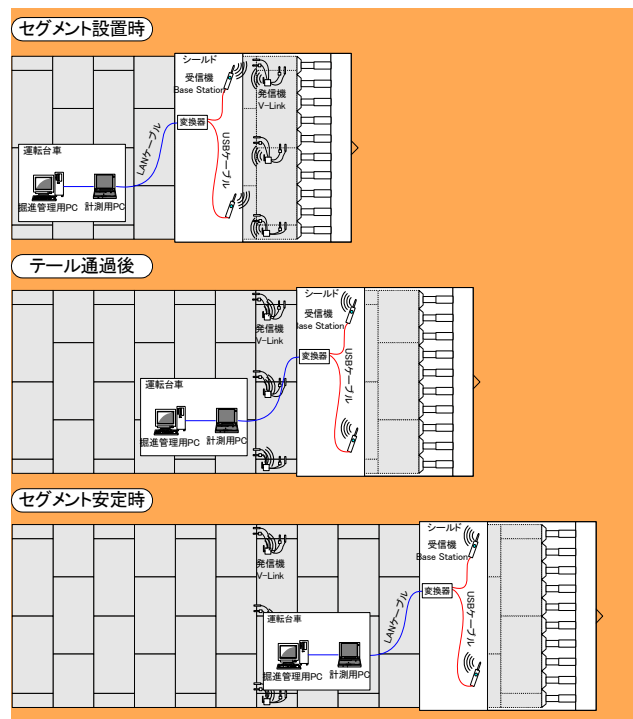


図2 SRW計測システム外略図

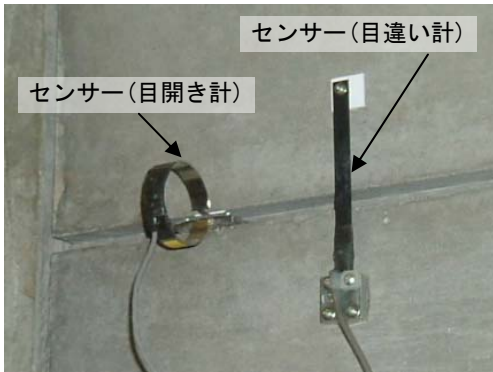


写真1 目開き・目違いセンサ



写真2 発信機



写真3 ワイヤレスセンサ設置状況

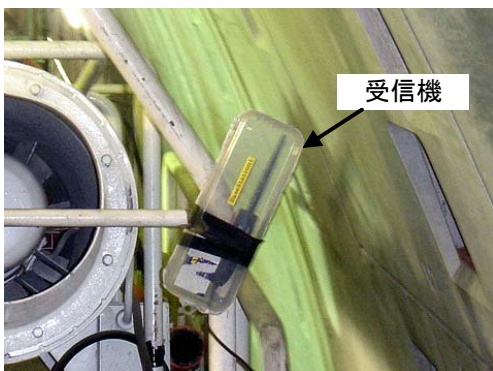


写真4 受信機設置状況

2.2 ワイヤレスセンサの概要

本計測では、以下の理由によりMicroStrain社²⁾製のワイヤレスセンサV-LinkおよびSG-Linkを採用した。

- ①日本において技術基準適合証明を取得している
- ②アンプが内蔵されているためゲージタイプの変位計を直結することができる
- ③セグメントと作業用ゴンドラとの隙間(約 10cm)に取り付け可能で小型であること
- ④電池で駆動し衝撃に強いこと
- ⑤ワイヤレス計測の実績のあること

写真5にV-Link および SG-Link の写真を示す。写真左に示すV-Linkは、ゲージタイプが4ch、シングルエンド入力が3chと内蔵温度センサを計測することが可能である。写真右のSG-Linkは、ゲージタイプが1ch、シングルエンド入力が1chと内蔵温度センサを計測することが可能である。表1にワイヤレスセンサの基本性能を示す。本計測では、V-Linkを2台、SG-Linkを2台計10chの計測を行った。シールド内には、スクリーコンベヤや金属製の機械等が存在するため、見通しや電波環境が良くなかった。そのため受信機は、2台設置し、左右半分を分担させた。なお、シールドに取り付けた受信機からのシールドトンネル内の安定した通信距離は約20mであった。



写真5 V-Link および SG-Link

表1 ワイヤレスセンサの基本性能

AD変換器	12bits	
アンプ	4ゲージタイプ(350Ωまたはそれ以上) オプションで3.2ゲージタイプに対応	
計測精度	±0.1%	
解像度	±1bit(0.024%)	
ブリッジ電源	+3V(トータルで最大50mA)	
通信規格	2.4GHzDSSS(2.450~2.490GHz) 16ch、IEEE802.15.4準拠	
計測方法	データロギング	32Hz~2048Hzで1,000,000データロギング
	リアルタイム	最大4kHz(スピードは、ch数に依存)
	LDCモード	最大500Hzをノード数で分割
データ記録容量	2MB(約1,000,000データ)	
通信距離	屋内30m、屋外70m (オプション高利得アンテナ使用時:300m)	
内部バッテリー	リチウムイオン:3.7V、600mAh	
動作温度	-20~+60℃(標準バッテリー、ケース) オプションケース+バッテリーで-40~85℃	

§3. 工事および計測概要

3.1 工事概要

ワイヤレス計測は、横浜市交通局発注の「高速鉄道4号線恩田川工区土木工事」で実施した。この工事は、横浜環状鉄道中山～日吉間のうち、中山駅～川和町駅(仮称)間の中で、中山駅北側から恩田川河川下を横断して、青砥町までシールド工法により、延長 835m の複線トンネルを構築するものである。セグメントは、外径9,260mm、内径8,460mm、幅1,500mmのRCセグメントを使用した二次覆工省略型のシールドトンネルである。図3にRCセグメントの概要を示す。

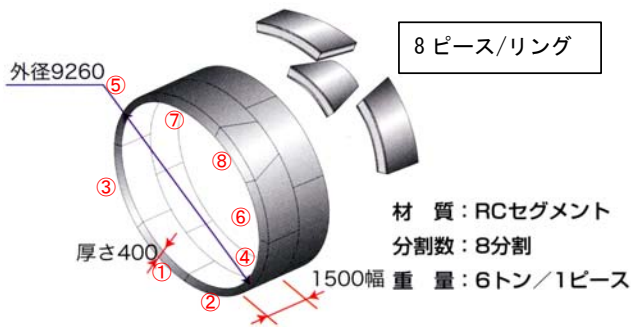


図3 RCセグメントの概要

3.2 計測位置

計測は、切羽に向かって左側セグメント、右側セグメントおよびKセグメントのセグメント間とリング間において実施した。図4に目違い・目開き計の取り付け位置図を示す。図中の上段は乙組み時(奇数リング)の取り付け位置図を、下段は甲組み時(偶数リング)の取り付け位置図を示す。図で示されるように計測は、シールド機および仮設材による見通しの悪いセグメント下部を避け、セグメントの上部および左右の水平位置に設置した。写真6にKセグメントに取り付けた状態を示す。写真で示すように計測は、リング間およびピース間の目違い・目開きの計 4ch のデータをワイヤレス発信機(V-Link)用いて行った。またセグメント組立て後、セグメント外面とシールド内面との離隔(テールクリアランス)の計測も実施した。

3.3 計測方法

計測機器は、シールド機が掘進し、セグメントを所定の位置に設置した後に、シールド機に取り付けてあるゴンドラを用いて設置した。

計測は、掘進開始から、計測器が設置されたセグメントがテールブラシを通過し、地中に入り安定するまでの期間連続し、1分間に1回間隔で行った。

計測データは、セグメントの目開き量、目違い量に加え、ハイパーシールドより得られる掘進状況、ジャッキストローク長、テールクリアランス等も収録した。

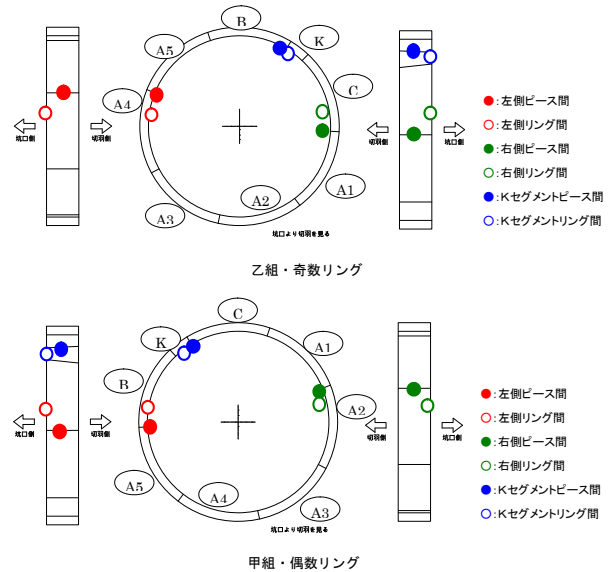


図4 目違い・目開き計取り付け位置図

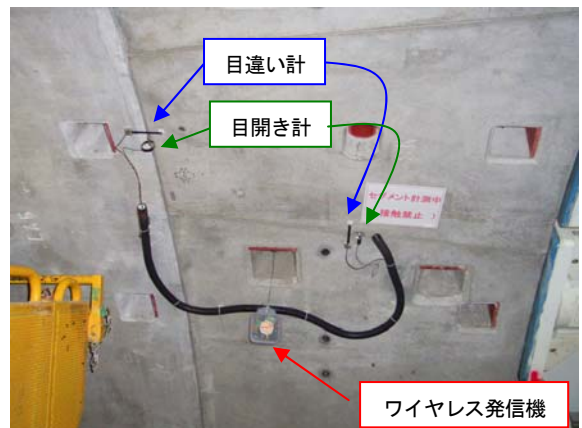


写真6 Kセグメントへの設置状況

§4. 計測結果

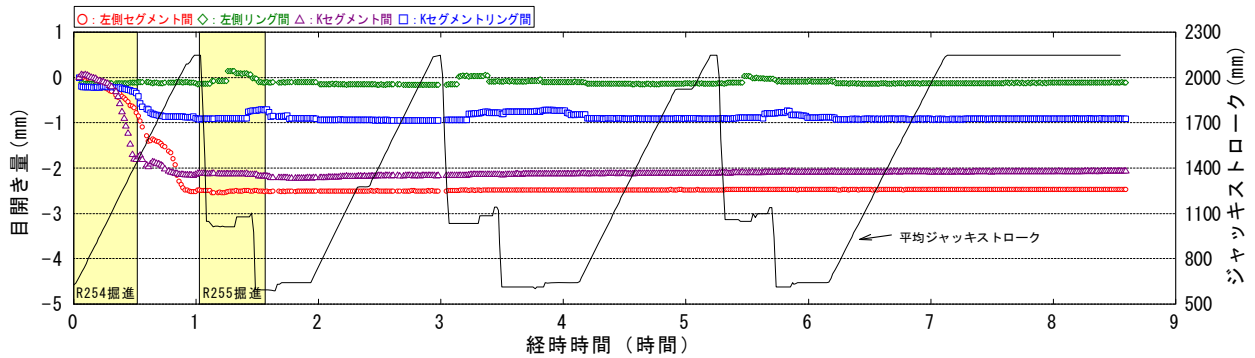
セグメントの目開き挙動を図5に、目違い挙動を図6に示す。図中の左側は直線区間(253Ring)を、右側は曲線区間(442Ring:曲線半径 410m の左カーブ)の結果を示している。目開き量は、開く方向をプラス、縮む方向をマイナスとする。目違い量は、内側への移動をプラス、外側への移動をマイナスで示している。なお図中にはシールドジャッキの平均ストローク長を記入している。

4.1 目開き挙動

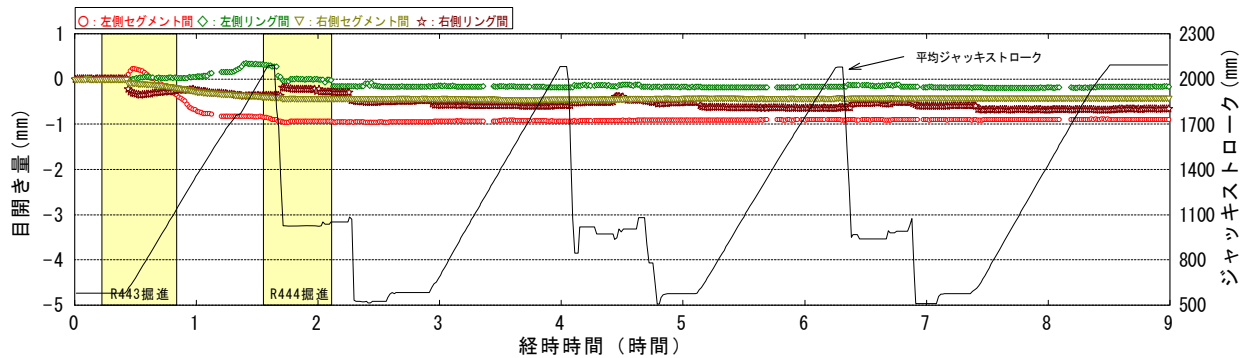
セグメント間の目開きは、左側、右側や K セグメントとも

に 1 リングの掘進時に縮む方向に変形し、その後はほとんど変動していない。横方向(左側, 右側)や縦方向(Kセグメント)ともに圧縮されていることは、セグメントが横や

縦に潰れるのではなく、セグメント全体が掘進中に圧縮されているものと考えられる。計測セグメントがマシン後端部のテールブラシを過ぎてからの変動は見られない。テー

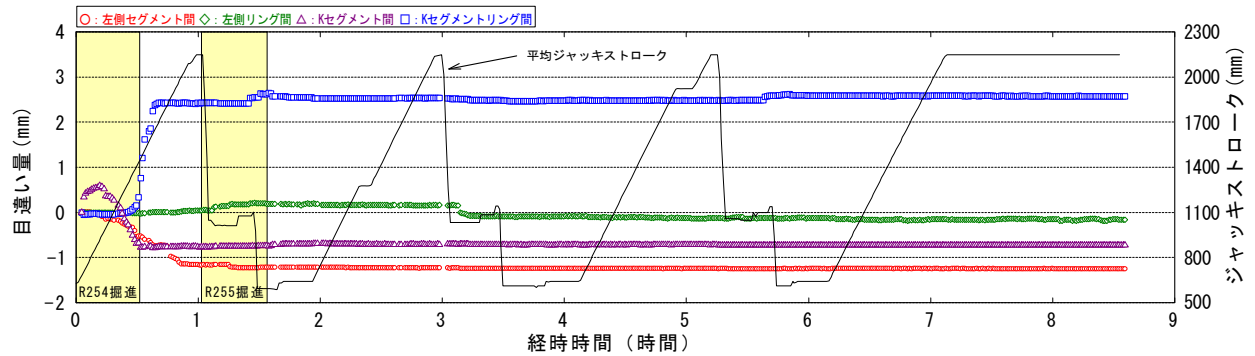


a)直線区間(253Ring)

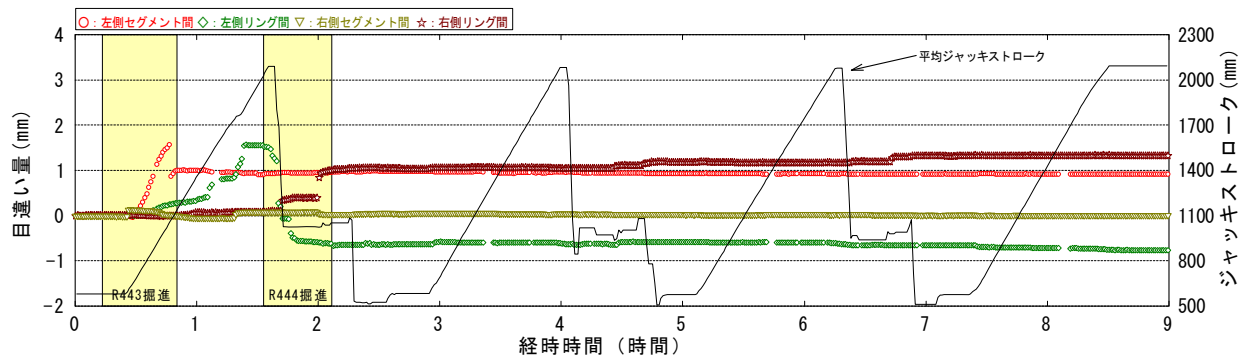


b)曲線区間(442Ring)

図5 セグメント目開きの経時変化



a)直線区間(253Ring)



b)曲線区間(442Ring)

図6 セグメント目違いの経時変化

ルブラシによる拘束圧と土水圧との差が大きくないことを示唆していると考えられる。

リング間の目開きは、セグメント間と同様に 1 リング目の掘進時に縮む方向に変形するが、その後組立て時におけるジャッキの伸縮に合わせて微小な変動を示す傾向にある。これは、3 リング掘進後においてもジャッキ推力の影響が及んでいることを意味している。K セグメントは、掘進直後から変動が確認されるものではなく、ある時点で急激な変動を示している。掘進開始時点から終了時点まで、推力は常に 35,000～40,000kN を示しており、K セグメントの急激な変動の要因ではないと考えられる。また曲線区間においては曲線内側のリング間のみ目開きが開く挙動を示すことが確認された。なおセグメント間、リング間ともに目開きは、変形量の 90%以上が 1 リング掘進中に発生している。

4.2 目違い挙動

セグメント間の目違いは、目開きと同様に 1 リング目の掘進時に変形し、その後ほとんど変動していない。またリング間の目違いは、K セグメントの内側方向への動きが大きい。これは、253 リング組立て後のテールクリアランスが少ないために拘束圧が大きく、比較的重量の軽い K セグメントが動き易かったためと考えられる。また目開きと同様掘進直後から変動が確認されるものではなく、ある時点で急激な変動を示している。一般にセグメントが急激な変動を起こす要因としては、推力の変動、テールブラシによる拘束圧の変動、等が考えられる。しかし今回はテールブラシの拘束圧を計測していないため、確認することが出来なかった。

§5. おわりに

ワイヤレスセンサを用いた、シールドセグメントのリアルタイム計測システムを開発し、現場に適用した。以下に現場計測により得られた結果とシールドセグメントの挙動について示す。

- ① 総延長の約5%に当たる30リングについてワイヤレス計測を行い、センサの設置や計測の容易さ、また施工への影響が無いことを検証し、本計測システムが有効であることが確認できた。
- ② セグメント組立てから安定するまで連続的にリアルタイムの貴重なデータを得ることが出来た。
- ③ 直線・曲線区間とも、変形量の 90%以上が 1 リング掘進時に発生することが分った。
- ④ リング間は、3 リング後もジャッキ推進力の影響を受け目開きおよび目違いともに変動する傾向にあることが

分った。

- ⑤ リング間の目開きより、1 リング掘進中のセグメントの挙動は、横や縦方向に潰れるのではなく、全体的に圧縮されていることが分った。

今後は、計測されたデータをさらに分析し、組立て後 1～3 リング間におけるセグメント挙動を解明し、施工管理手法について検討する予定である。

参考文献

- 1) 土木学会:シールドトンネルの施工時荷重,トンネル・ライブラリー第 17 号,平成 18 年 10 月
- 2) MicroStrain 社 HP <http://www.microstrain.com/>



岸下 崇裕

ひとこと

本年度は、SRW 計測システムの開発を行い、現場へ適用した。今後は、セグメント挙動を解明し、施工管理手法について検討する予定である。