

9. 高品質・高精度なシールドトンネル構築技術

～6つの最新技術で実現～

株式会社フジタ

○ 中村 多聞
浅沼 廉樹

1. はじめに

近年のシールド工事は、立坑用地の確保が困難なことや、既設構造物などの障害物を避けるために、長距離化や大深度化が進む傾向がある。技術開発もセグメントの自動組立てや自動搬送など、高速化や省力化に重点を置いた動向となっている。一方、より高品質で高精度なシールド掘進管理を行うための計測・測量技術に関しては、依然として開発が遅れており、新技術導入による現場職員の負担軽減が求められていた。

これらの問題を解決する為に、弊社では平成24年度から高品質シールドの技術開発プロジェクトを発足し、現場での様々な問題を抽出するとともに、ニーズ・シーズを調査した。この結果に基づき、新たな機械装置やシステムの開発を行った。

本稿では、これらの総まとめとして開発した各シールド技術の紹介及び導入結果を述べるものである。各開発技術の名称を表-1に、概要図を図-1に示す。

表-1 6つの最新技術の名称

	高品質化の要素技術
掘進管理の高度化	①テールクリアランス計測
	②セグメント真円度計測
	③遠隔測量システム (FRS)
	④チャンバー見える化
安全の高度化	⑤FH ブラシシールド
情報化	⑥IC タグによるセグメント品質管理

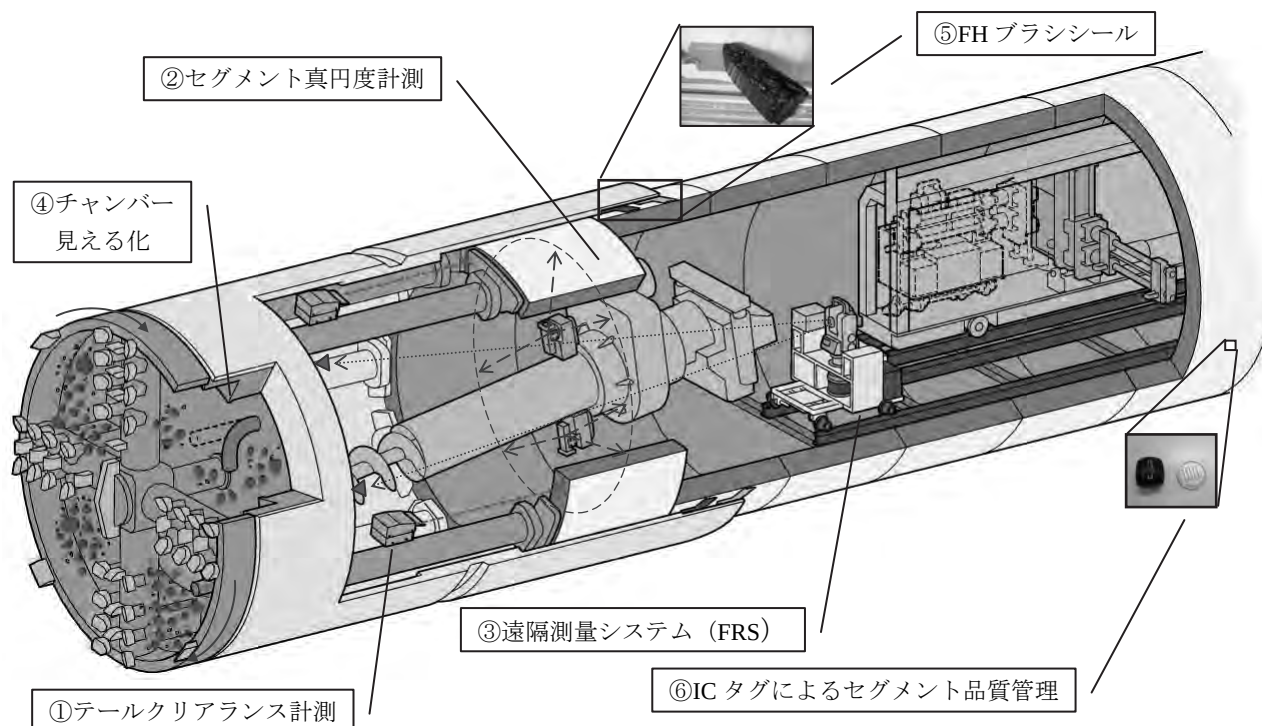


図-1 高品質シールド概要図

2. 現状の課題

今回の開発に係わる6つの計測や管理について現状の課題を以下に述べる。

(1) テールクリアランス計測

テールクリアランス計測は、作業員がコンベックスやスチールテープ、楔形の測定器などを用いて行うことが多く、計測頻度もシールドマシンの掘進前後にのみ行うだけである(図-2参照)。計測は不安定な足場で行うことが多く、大断面トンネルでは高所作業での計測も発生するため、安全面での改善が課題であった。



図-2 従来のテールクリアランス計測状況

(2) セグメント真円度計測(中大口径と小口径)

セグメント真円度の測定は、シールドマシンの構造の問題や後方設備の支障物により、後続台車通過後の支障物がない位置で、レーザー測量器や測量用スタッフで計測するのが一般的であった(図-3参照)。しかし、この手法ではセグメント組立て時から真円度確認までかなりの時間が経過しており、不具合の発生状況や、セグメントがシールドマシン後胴部から抜け出て地山部へ移り変わる時の変化を計測する事は難しかった。また小口径の断面では、計測作業自体を狭隘なスペースで行うことになり、精度の維持や連続的な計測の自動化が中大口径の断面よりも遅れていた。



図-3 従来の真円度計測状況

(3) 坑内測量

シールド工事の掘削状況や出来形を確認するために日々行う測量作業は、多くの場合、職員が二人一組で坑内作業の休憩中や交替時の限られた時間に行っており、担当者には大きな負担となっていた。各ゼネコンや測量器メーカーを中心に自動測量システムを開発・実用化していたが、多くのシステムは坑内に測量器を固定する為、他の作業に支障をきたす事という課題があった。

(4) チャンバー内の性状

泥土圧式シールド工法では、切羽の安定とスクリーコンベアからの排土のしやすさを目的に、チャンバー内で掘削土砂を塑性流動化させる必要がある。その際、添加材の注入量が少なければ、チャンバー内で土砂が固着したり閉塞したりして、排土が困難になる。一方、過度に流動化させると、スクリーコンベアから土砂が噴発し、切羽の不安定化や土砂の取り込み過多を起こす。

これまでは一般的に、チャンバー内の土圧やマシンの作動状況、スクリーコンベアからの排土状態などから、技術者の経験によって添加材の注入量を調整していた。そのため、流動性を定量的に判定して添加材の注入量と注入位置を適切に管理するニーズがあった。

(5) シールドマシンテール部の止水

シールドマシンテール部の止水は、テールブラシ本体と充填されるパテグリス(ペースト状のパテ)により行われ、止水性維持にはこのテールブラシの追従性とパテグリスの地山流出防止が重要となる。線形が複雑なシールド工事では、テール部隙間の変位によるブラシの形状変形やパテグリスの地山流出により止水性が低下し、シールドマシン内への地下水や裏込め材が流入していた。(図-4参照)

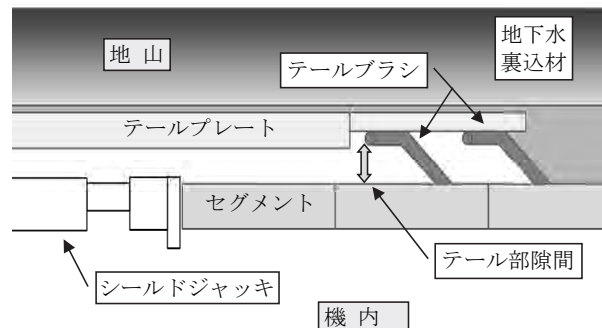


図-4 シールドテール部イメージ

(6) セグメント品質データの管理

セグメント製作時の情報や、現場での施工情報は供用後の維持管理においても重要な情報となる。しかし、シールド掘進後や工事終了後は膨大な記録から必要なデータだけを抽出することは非常に手間がかかり、維持管理における課題となっていた。

3. 各技術の概要と導入結果

3.1. テールクリアランス計測システム

(1) システム概要

本システムは、レーザー照射と画像処理方式を用いてテールクリアランスを計測する。シールドマシン後胴部に計測ユニットを設置し、シールドマシンテール部にレーザー照射しながら非接触にてテールクリアランスの計測を行う（図-5 参照）

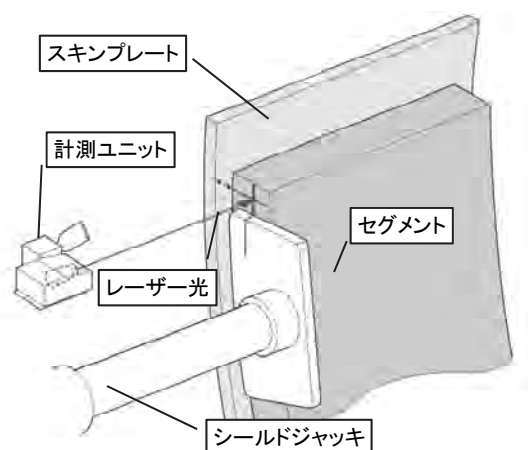


図-5 テールクリアランス計測システム概念

(2) 導入結果

本システムを大手筋シールド（京都府京都市上下水道局）で導入。テールクリアランスはセグメント組立て時だけでなくシールドマシン掘進時リアルタイムで計測が可能であることを確認した（図-6、図-7 参照）。

また、有効性を確認するためにシールド掘進開始から終了までのテールクリアランスの計測を人と本システムで行い結果を比較した。表-2 より、計測精度は $\pm 2.5\text{mm}$ 以内である事が分かった。このバラツキの原因としては、画像認識に用いられるセンサの受光素子数が関係しており、検出面の端部は場所によって受光素子の感度に変化する事から精度誤差を生じていた。この対策として、センサ自体の受光素子数を増やし、検出面を細分化させて検出結果の安定を図った。

表-2 テールクリアランス計測結果

SJ ストローク	20R押し						(単位: mm)					
	上クリア			右クリア			左クリア					
	実測	計測	誤差	実測	計測	誤差	実測	計測	誤差			
738	26	25.70	0.30	35	33.95	1.05	27	26.09	0.91			
841	25	23.64	1.36	35	35.49	-0.49	27	26.69	0.31			
949	24	22.50	1.50	36	36.80	-0.80	28	29.65	-1.65			
1,058	25	26.61	-1.61	37	37.82	-0.82	27	26.65	0.35			
1,168	24	25.60	-1.60	37	36.50	0.50	27	27.37	-0.37			
1,270	24	26.14	-2.14	37	37.86	-0.86	27	28.37	-1.37			
1,420	23	25.56	-2.56	39	37.70	1.30	26	26.89	-0.89			
1,530	20	18.61	1.39	40	38.80	1.20	26	27.24	-1.24			
1,755	21	23.56	-2.56	40	41.23	-1.23	27	27.41	-0.41			



図-6 計測ユニット設置状況

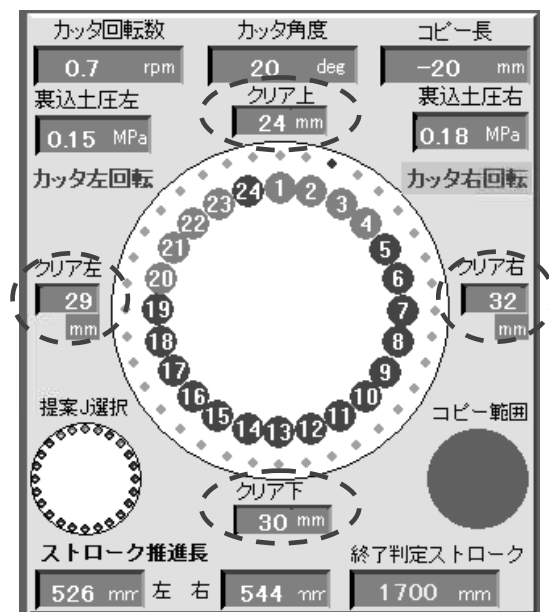


図-7 テールクリアランス表示画面

3.2. 中大口径用真円度計測システム

(1) システム概要

中大口径用真円度計測システムは、シールドマシンに装備される形状保持装置の前後に計測ガイドバーを5箇所設置し、レーザー距離計をリング毎に5台配置することで、3リング分の内空変位を同時に計測する（図-8 参照）。

また、計測されたセグメント内空変位は制御ユニットにて瞬時に解析され、シールド運転席にセグメント真円度として表示される。

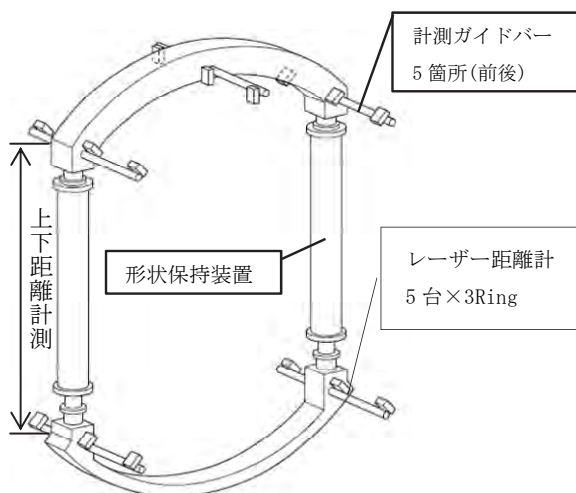


図-8 形状保持装置と真円度計測システム

(2) 導入結果

本システムを砂町シールド（日本下水道事業団）で導入した（図-9 参照）。計測結果は図-10 のように表示され、シールドマシンオペレータは、この3リング分の計測データを参考に、掘進中はジャッキ選択に留意すると共に掘進完了時のセグメントの真円度を切羽に連絡し、セグメントの組み方でひずみを修正した。



図-9 計測機器設置状況

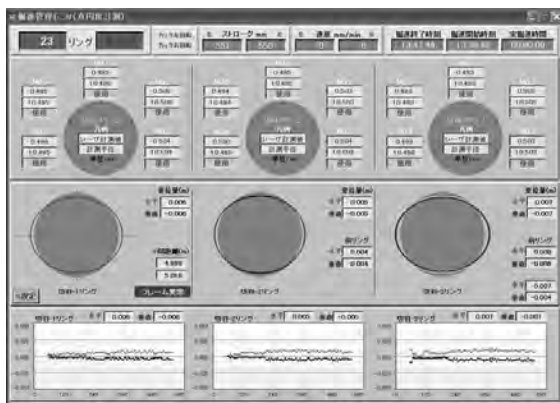


図-10 真円度計測表示画面

3.3. 小口径用真円度計測システム

(1) システム概要

小口径用真円度計測システムは、小口径シールドマシンを対象に開発したもので、設置スペースが限られたシールド坑内でも計測可能にするために、回転式レーザー距離計を採用した。システムの構成は、シールドマシン内に計測部と制御装置、中央制御室に通信表示ユニットの3つで構成される。計測部は、セグメントが見通し可能な2箇所に取り付け、レーザー距離計がセグメントに対して垂直に照射・計測できるように行った（図-11 参照）。

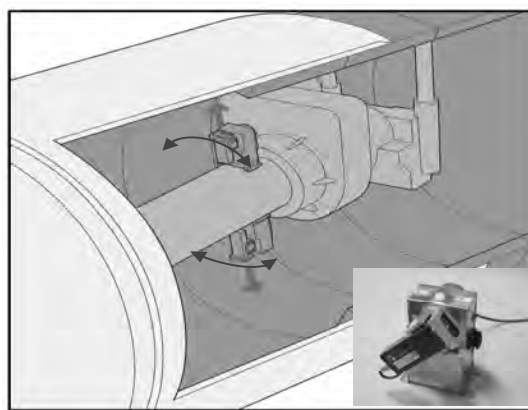


図-11 真円度計測システム概要図

(2) 導入結果

松戸幹線 501-2 工区（千葉県）に導入し以下の3点を確認した。

- ・ 高精度なセグメント内空計測が可能。
- ・ シールド掘進と連動してリアルタイム計測が可能。
- ・ 計測装置の小型化の実現。

計測部が小型化したことで、小口径断面（内径2m程度）の狭隘なシールドマシン内に後付けで設置が可能となった（図-12 参照）。



図-12 計測機器設置状況（上側）

3.4. 遠隔測量システム（FRS）

(1) システム概要

本システムは、測量器に設置した位置出しカメラにより、測量用基準点（以下ダボ点と表記）を画像認識し測量器自身の位置を算出する。坑内測量のタイミングで、測量器を搭載した測量台車をダボ点まで自走させて測量を行うことを可能とし、一連の作業すべてを作業所事務所から遠隔操作することにより、大幅な省力化と従来システムの課題解決を実現した。遠隔測量システムの概要を図-13、図-14に示す。

本システムによる測量の手順は以下のとおりである。

- ① シールドマシン近くに配備した格納台車より、測量台車を本線レール上に設置する。
- ② 測量台車をダボ点付近まで移動する。
- ③ ダボ点を画像認識することにより測量器の自己位置を算出する。
- ④ 後視点を視準後、シールドマシン内の計測点を測量する。
- ⑤ 計測データを用い、シールドマシンの挙動解析を行う。
- ⑥ 測量台車を、格納台車まで走行させ格納する。

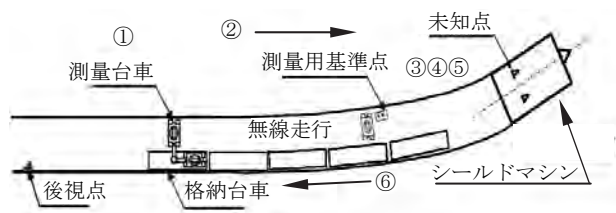


図-13 遠隔測量システムの概要（平面図）

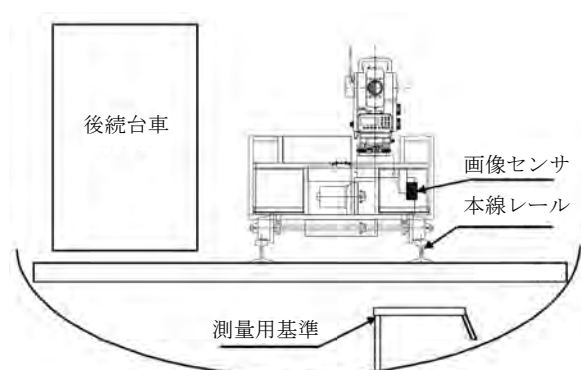


図-14 遠隔測量システムの概要（断面図）

(2) 導入結果

現場導入により、以下の2点を確認した。

- ・ 高精度なデータを有効活用
- ・ 遠隔操作による測量作業が可能

測量精度は、誤差±10mm以内だった。また、シールドマシン内に複数の計測点を設けることで、マシン本体のピッチングやローリング、方位角等が計算でき、シールドマシンの挙動解析

が可能となることがわかった。

また遠隔測量システムは、人が測量を行う場合と比べて約1/8に省力化できた。

（人：坑内で2人×約1時間⇒本システム：事務所で1人×約15分）。ネットワークの使用で作業所事務所外からの遠隔操作も可能であることを確認した。また操作が容易なため、測量未経験者でも取り扱いができる。

3.5. チャンバー見える化

(1) システム概要

チャンバー見える化は、曲げ変位と曲げ速度を計測するセンサを硬質ゴムに埋め込んだ曲げセンサを使用する（参照）。これをチャンバー内に設置して測る。土砂が適正な塑性流動状態にあるかどうかを、パソコンの画面上で即時に表示する。

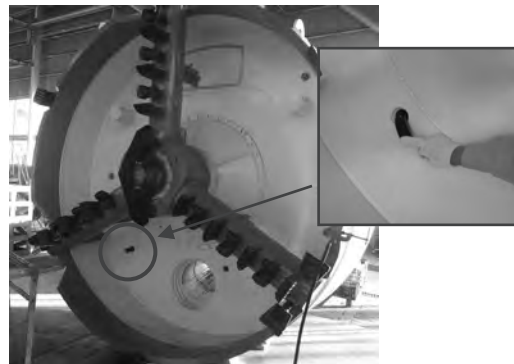


図-15 曲げセンサ設置状況

(2) 導入結果

本システムを岡崎線送水管工事（愛知県企業庁）にて導入した。曲げ変位量を緑や黄、赤などの色相で、曲げ速度を彩度で示すことによりチャンバー内の流動状態を表示した（図-16）。計測された流動性の変化に応じて添加材の注入量や注入位置を即時に変更して、高度な掘進管理が可能となった。

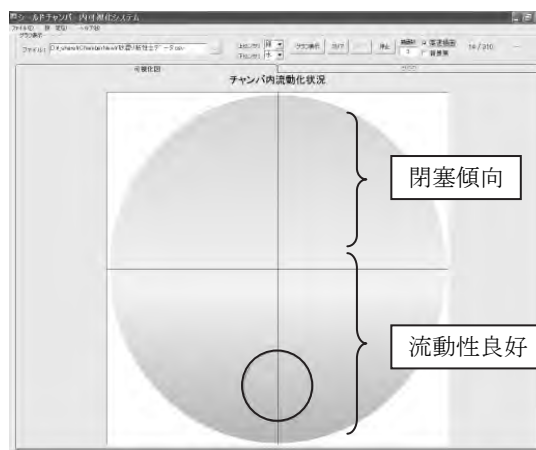


図-16 チャンバー内可視化モデル

3. 6. FH ブラシシール

(1) 製品概要

FH ブラシシールは、液性ゴムを主剤とした 2 液反応型弾性シール材をテールブラシに充填する構造で、液状ゴムがブラシと一体化するため、弾性ゴム本来の優れた伸縮性と耐久性を活かすことができ、曲線施工や高水圧の施工条件でも高い追従性と遮水性を発揮する。これにより、ブラシ内部の裏込材固着によるセグメント拘束力を軽減し、ひび割れなど不具合が発生するといった問題も解消することができる。

(2) 導入結果

FH ブラシシールの性能確認するため、同一のシールド機を 2 台使用した岡崎線送水管工事（愛知県企業庁）の片側 1 台に FH ブラシシールを導入した。従来のシール材を使った時の施工状況を図- 17 に、FH ブラシシールを使った時の施工状況を図- 18 に示す。到達時には、FH ブラシシールを採用したシールド機の方が、エレクトーリングの文字が確認できるほど漏水や裏込材の流入が少なかった。

FH ブラシシールの特長は以下の 3 点である。

- ・ 高止水性（0.3MPa の場内水圧試験）で止水性能確認（図- 19 参照）
- ・ 曲線施工で高追従性・優れた耐久性
- ・ 施工（充填）が簡単（液状ゴムで充填、常温硬化）



図- 17 従来のシール材を使用した施工状況



図- 18 FH ブラシシールを使用した施工状況

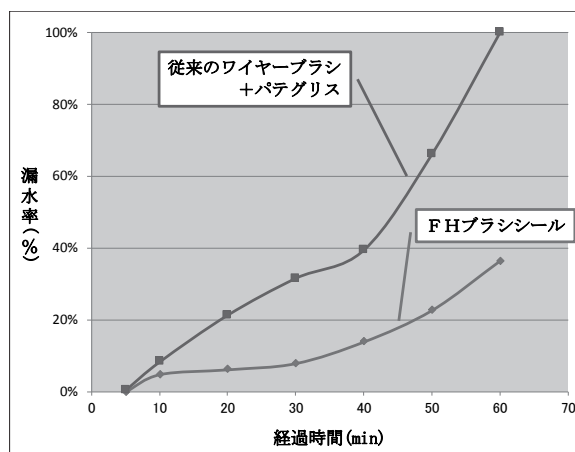


図- 19 場内水圧試験結果

3. 7. IC タグによるセグメント品質管理システム

(1) システム概要

製造工程において、セグメント型枠のスペーサーに IC タグを内蔵して、セグメントの製造情報や施工情報、トンネルの掘削情報などを書き込み、工事のトレーサビリティを図る。竣工後にもセグメントの維持管理として役立てることができる。

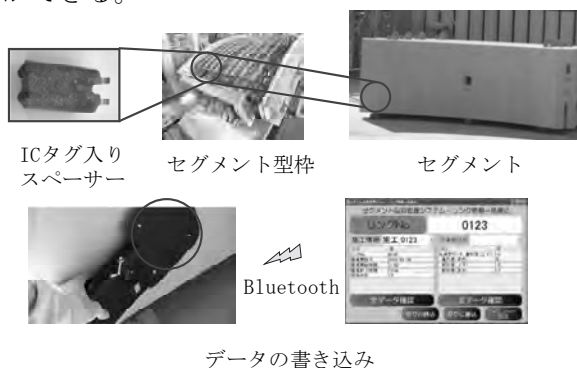


図- 20 IC タグのシステム構成

(2) 導入結果

本システムを砂町シールド（日本下水道事業団）にて導入を行い、施工後や施主へ引き渡した後、個々のセグメントのメンテナンス情報を IC タグに書き込むことで、維持管理に役立てることができた。

4. おわりに

今回開発されたこれらの技術は、シールド工事の技術指針として大口径だけでなく小口径のシールド工事にも適用可能な技術である。今後は多くのフィールドで運用し実績を増し、その有効性を確認していきたい。

最後に本技術の開発に際し、ご支援・ご協力いただいた関係各部署と各作業所に紙面をお借りしてお礼を申し上げます。