

i-Construction に向けたシールド掘進管理測量技術の開発

(株)大林組 正会員 ○西森 昭博
正会員 藤岡 大輔

正会員 上田 潤
正会員 山中 哲志
正会員 菅野 静

1. はじめに

シールド工事では、土木の工種の中では比較的早い段階から機械化施工が進められ、これまでに様々な自動化施工技術が開発されている。シールドの測量技術においても、自動化技術の開発が早くから進んでおり、様々な自動測量技術が利用されている。

シールド坑内でのマシン測量においては自動追尾測量が用いられるケースが多くなっているが、現段階では完全な自動化には至っておらず、手動測量を併用している現場も少なくない。また、小口径シールドでは自動測量器を設置するスペースがなく手動測量が必須となるケースが多いが、坑内が狭く測量作業の負担が大きい(図1)。また、セグメントの出来形を検測するセグメント測量には自動測量が対応しておらず、別途手動測量を行っているといった課題もある。そこで、これらの作業を簡略化・軽減するため、タブレット端末と自動追尾トータルステーションを利用したシールド測量支援システムを開発した。

また、シールド工事では、線形測量にくわえて、シールドマシンの姿勢やテールクリアランスを測定する必要がある。このうち、テールクリアランス測定装置に関しては、様々な装置が開発されているが、裏込め注入材や地下水の浸入および洗浄水によって計測装置が損傷を受けやすいといった課題がある(図2)。そこで、RGB 赤外線センサーを用いて、テールから離れた位置でテールクリアランスを測定可能な装置を開発した。

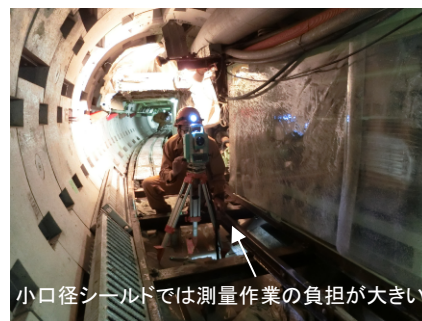


図1 坑内手動測量状況



図2 テール部湛水状況

本稿では、これら i-Construction に向けたシールド掘進管理測量技術の開発について報告する。

2. シールド測量支援システムの開発

(1) シールド測量支援システムの概要

シールド工事では、日常掘進管理として、シールド機の位置・姿勢を測定するためのマシン測量、セグメントの出来形を測定するためのセグメント測量、そしてそれらの測量のための基準点を設ける基準点測量が必要となる。今回開発したシールド測量支援システムでは、これらのシールド坑内における測量を、タブレット端末から自動視準機能付きトータルステーションを操作し1名で行うことで、日常掘進管理測量の省力化を図っている¹⁾。以下に、シールド測量支援システムの機能について説明する。

a) 使用機器および通信設備

シールド測量支援システムでは、測量器械として自動視準トータルステーションを使用している。ATR (Automatic Target Recognition) 機能により、目標ターゲットを自動で捉え、自動で認識・視準してターゲットの座標を計算することができる。本システムでは、ライ



【自動視準トータルステーション】 【タブレット端末】

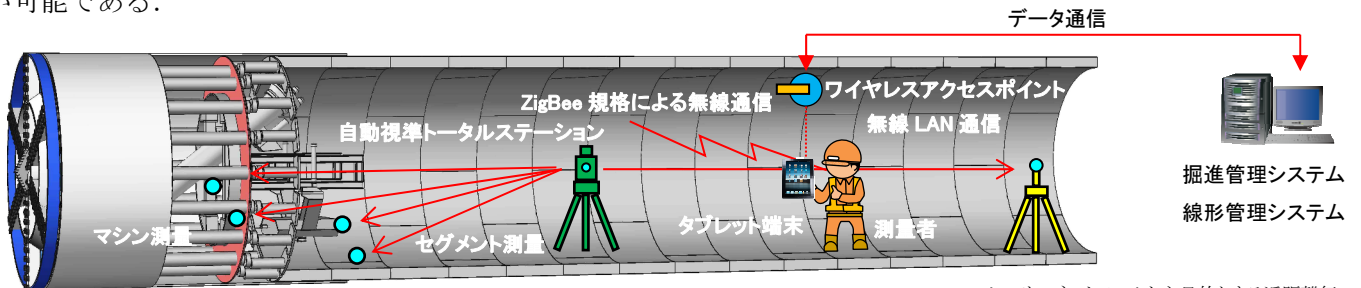
図3 測量支援システムの使用機器

キーワード シールド, 掘進管理, 測量, 自動化, 省力化, i-construction

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティB棟 (株)大林組 シールド技術部 03-5769-1318

自動視準トータルステーションの操作には、タブレット端末を使用する。タブレット端末からのコマンドにより、シールドトンネルの線形情報、シールドマシンの姿勢に関する情報、セグメントの種別および組立て情報等をシールド掘進管理システムおよび線形管理システムから取得し、測量ターゲットとなるミラーの座標を自動で算出する。そして、自動視準トータルステーションにより自動測量を行い、シールドマシンやセグメントの蛇行量を計算する。測量相番者が不要となるため、シールド工事に関連する一連の測量作業を1名で行うことができ省人化が図れるほか、視準作業を省略できるため測量作業の負担も少ない（図4）。

タブレット端末と自動視準トータルステーション間は ZigBee^{*1} 規格による無線通信を採用し、100m 以上離れた位置からの通信を可能としている。また、タブレット端末と掘進管理システム間はワイヤレスアクセスポイントと無線 LAN 通信による通信を採用し、測量結果をリアルタイムで線形管理システムに反映させることが可能である。



*1 ZigBee: センサーネットワークを主目的とする近距離無線通信規格。消費電力が少なく断続的な通信に適する。

図4 測量支援システムの概要図

b) 測量機能

シールド測量支援システムの主な測量機能は、基準点測量、水準点測量、マシン測量、セグメント測量となっている。それぞれの特徴について説明する。

1) 基準点測量および水準点測量

後方台車が通過した後に行う本基準点測量および本水準点測量と、マシン近くに一時的に設置する仮基準点測量および仮水準点測量の機能を用意している。本基準点測量および本水準点測量では精度の確保が重要となるため、毎回の測量結果を保存し測量の精度を確認するチェック機能および平均処理機能を付与することで精度の向上を図っている。

2) マシン測量

マシン測量は、シールドマシンのリングガーター部付近に取り付けられたミラーを2点視準する方式のほかに、ミラーを3点以上視準する方式、テール部のスキンプレートにスタッフを配置して行うスタッフ測量方式の機能を用意している。シールド径や現場の状況に合わせて、最適な測量方法を選定する。

3) セグメント測量

セグメント測量には、水平器及びミラーを取り付けたセンタースタッフを使用するスタッフ測量、任意の3点を測量する3点ミラー測量、左右対称の2点を測量する2点ミラー測量、ノンプリズムの8点計測による Wriggle 測量^{*2}の機能を用意した（図5）。いずれも、セグメントの中心位置の座標を計算して蛇行量を計算するものであり、シールド径やセグメントの種別、後方台車の形状に合わせて最適な測量方法を選定する。

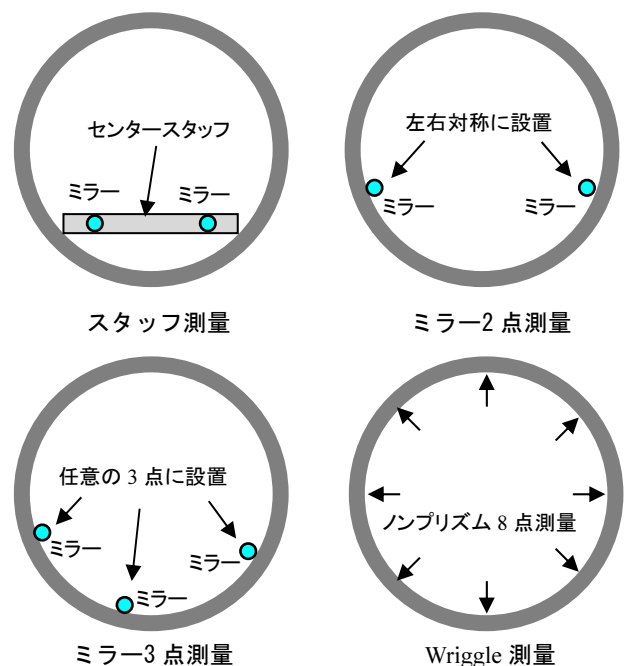


図5 セグメント測量のメニュー

*2 Wriggle 測量: セグメント内面8点の座標をレーザー距離計で計測し、セグメントの中心座標を算出する測量方法。セグメントの出来形測量に利用される。

(2) 測量支援システム開発試験

シールド測量支援システムに用いる自動測量と従来の手動測量の精度を比較するための精度確認試験および、システムの動作および使用性を確認するための動作確認試験を実施した。その結果を以下に記す。

a) 精度確認試験

シールド工事においては、自動視準トータルステーションを自動追尾測量で用いることが多いが、従来の手動測量の結果と一致しないことがある。自動追尾測量は常に移動しているシールドマシンを測量するものであるため多少の誤差が生じて問題にはならないが、本システムでは基準点測量にも使用するため高い精度が求められる。そこで、従来の手動測量との精度の差を確認するため、繰り返し測量による精度確認試験を行った。

精度確認試験には、本システムに用いる予定の2級自動視準トータルステーションを3台、従来からシールドの坑内測量で用いている2級トータルステーションを3台用意し、測量ターゲットを5個、測量作業員4名により、それぞれ正反測量を行った。この測量を3回繰り返し行い、合計720回測量を行った。測量方法を図6に示す。

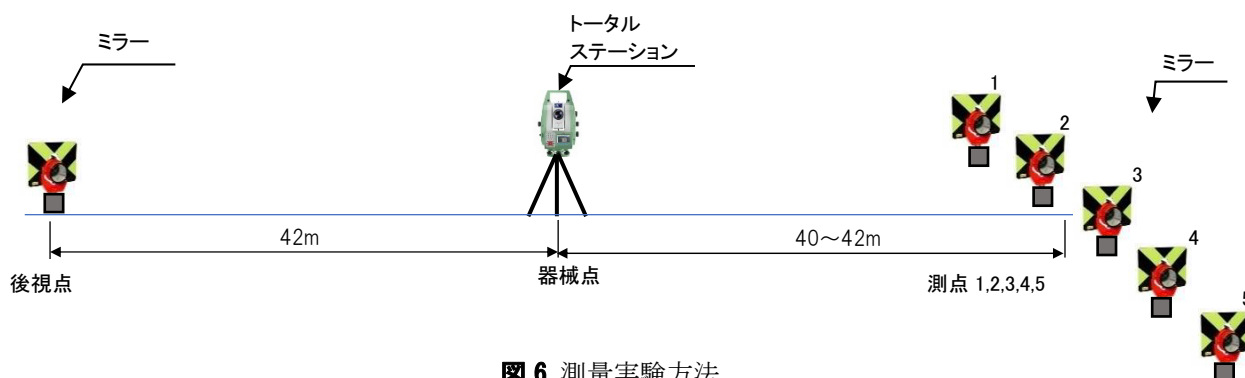


図6 測量実験方法

自動測量および手動測量の水平角の測量結果の比較を、図7に示す。測量誤差の標準偏差は、自動測量で3.8″、従来の手動測量で6.0″となり、自動測量の方がばらつきが小さい結果となった。また、全体の水平角の誤差の平均値は、自動測量で-1.4″、手動測量で1.4″であり、ほぼ同じであった。測量機械毎、および測量者毎の標準偏差と平均値の一覧を、表1、2に示す。多少の違いはあるものの、全体的に自動測量の方が、ばらつきを示す標準偏差の値が小さくなる傾向がみられた。

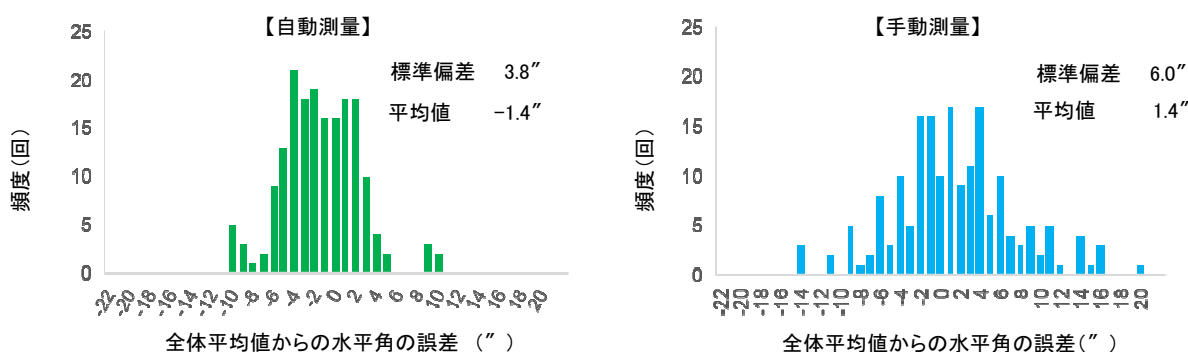


図7 自動測量と手動測量の比較（水平角）

表1 機械毎の標準偏差と平均値（水平角）

機械	自動測量		手動測量	
	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値
①	2.9″	-1.6″	5.2″	-2.5″
②	3.8″	-2.6″	5.5″	2.6″
③	4.1″	-0.1″	5.3″	4.1″

表2 測量者毎の標準偏差と平均値（水平角）

測量者	自動		手動	
	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値
A	2.9″	-1.3″	5.7″	0.1″
B	3.8″	-2.9″	5.6″	2.8″
C	4.9″	-1.1″	5.2″	1.6″
D	2.3″	-0.4″	7.1″	1.1″

次に、自動測量と手動測量の水準測量の結果を、図 8 に示す。測量誤差の標準偏差は、自動測量が 0.28mm、手動測量が 0.80mm となり、自動測量の方のばらつきが小さい結果となった。これは秒数で換算すると 0.14" と 3.9"であり、水平角の測量よりもばらつきが小さいといえる。平均値も、自動測量が-0.18mm、手動測量が 0.24mm となり、自動測量の方が小さい。測量機械毎、および測量者毎の標準偏差と平均値の一覧を、表 3、4 に示す。水平角の測量と同様に、全体的に自動測量の方が標準偏差が小さく、ばらつきが小さい傾向が見られた。

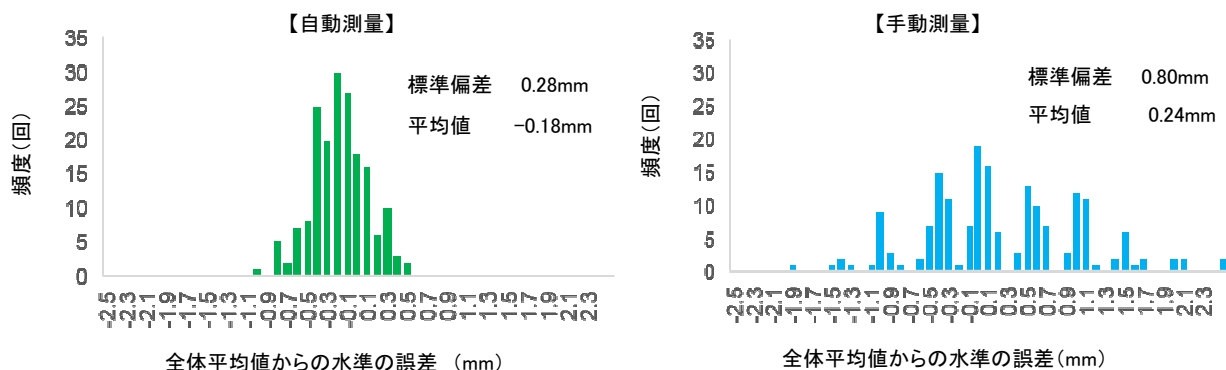


図 8 自動測量と手動測量結果の比較（水準）

表 3 機械毎の標準偏差と平均値（水準）

機械	自動測量		手動測量	
	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値
①	0.35mm	-0.20mm	0.78mm	0.16mm
②	0.22mm	-0.16mm	0.83mm	0.44mm
③	0.24mm	-0.16mm	0.74mm	0.11mm

表 4 測量者毎の標準偏差と平均値（水準）

測量者	自動測量		手動測量	
	標準偏差	平均値	標準偏差	平均値
A	0.31mm	-0.20mm	0.82mm	0.22mm
B	0.30mm	-0.15mm	0.65mm	0.34mm
C	0.25mm	-0.15mm	0.74mm	0.16mm
D	0.25mm	-0.20mm	0.94mm	0.23mm

以上の結果から、自動視準トータルステーションを使用した自動測量において、従来の手動測量器と同等以上の精度を確保できることを確認した。ただし、自動測量においても従来の手動測量と同様に 1 回ごとの測量には多少のばらつきが生じるため、従来と同じく基準点測量および水準点測量においては検測を複数回行うことが必要である。また、今回使用した測量器はいずれも検定した直後のものを使用した。現場の環境で継続的に使用する場合には誤差が少しずつ生じてくることが想定されるため、定期的にキャリブレーションを行うことも重要である。

b) 動作確認試験

所定の測量機能が正常に実施されること、測量結果が正常に通信されタブレット端末上で計算結果が正常に表示されることを確認するため、弊社機械工場敷地内において鋼製型枠による模擬シールドおよび模擬セグメントを製作して、動作確認試験を実施した（図 9）。その結果、基準点測量、マシン測量、セグメント測量のいずれにおいても所定の動作が正常に行われることを確認した。なお、自動測量に要した作業時間は 15 分であり、結果入力までを含めた従来の手動測量時間 21 分に比べ約 30%の時間短縮効果が確認された。実際のシールド工事においては、シールド坑内の移動時間も削減できるためさらなる時間の短縮が期待できる。



図 9 動作確認試験状況

3. RGB赤外線センサーを用いたテールクリアランス測定装置の開発

(1) 測定装置の概要

RGB 赤外線センサーは、カラー画像を撮影する RGB カメラと、測定装置から対象点までの深度を測定する赤外線深度センサーからなるデバイスで、撮影対象の三次元点群データを取得することができる²⁾。市販の地上型レーザースキャナーの場合、測定器の本体価格が数百万円オーダーであるのに対し、RGB 赤外線センサーは数万円オーダーの価格であるため、手軽な計測装置として各産業で利用方法の検討が行われている³⁾。

本開発では、Windows での開発環境が整っている Microsoft 社の Kinect v2 を使用した (図 10)。この装置の RGB カメラの解像度は 1920×1080 、深度センサーの解像度は 514×424 で、いずれもフレームレートは 30fps である。v1 では投光した赤外線パターンを読み取り、パターンのゆがみから深度情報を得る「Light Coding」方式が採用されていたが、v2 では投光した赤外線が反射して戻ってくる時間から深度情報を得る「Time of Flight (TOF)」方式が採用されている。これにより、測定精度が向上するとともに、測定可能範囲も従来の $0.8 \sim 4.0\text{m}$ から $0.5 \sim 8.0\text{m}$ に広がっている。

RGB 赤外線センサーを使用したテールクリアランスの測定方法を、図 11 に示す。RGB 赤外線センサーをシールドジャッキ根元のリングガード部に設置し、セグメントとスキンプレート内面の点群データを取得する。点群データの座標値を元に、セグメント内面からスキンプレート内面までの垂直距離 D を計算し、そこからセグメントの厚さ W を差し引き、テールクリアランス C を算出する。RGB 赤外線センサーは、物体の隅部などのエッジ部の検出にゆがみが生じる傾向があり精度にばらつきが生じやすいが、この方法ではエッジ部の検出が不要となるため精度を確保しやすい。また、測定装置がテール部から離れているため、テール部から浸入する裏込め注入材やそれを洗い流すための洗浄水に直接接触するリスクが少なく、損傷を受けにくい。

(2) 室内測定実験

RGB 赤外線センサーは測定精度に関して明確な規定がなく、既往の研究も少ない。そこで本開発形態での測定精度を調べるため、室内実験を行った (図 12)。塗装されたコンクリート床面をスキンプレート、木箱をセグメントと想定し、測定対象物から $0.8 \sim 3.2\text{m}$ の離隔をとり、測定装置の高さを変えることで赤外線の入射角度を変化させながら測定を行った。また、測定対象物の材質の違いによる影響を調べるため、床面の表面にホワイトボード、スタイルフォーム、薄鉄板を敷設して測定を行った。

実験の結果、コンクリート床面および薄鉄板を測定したケースでは、測定深度 3m 、入射角 10° 程度までは問題なく点群データを取得することができ、測定精度もおおむね $\pm 3\text{mm}$ 以内に収まることを確認した。一方、ホワイトボードとスタイルフォームのケースでは多少ばらつきが大きくなる傾向があること、測定装置の正面

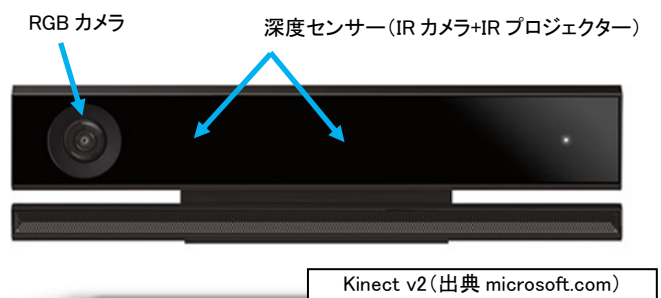


図 10 RGB 赤外線センサー

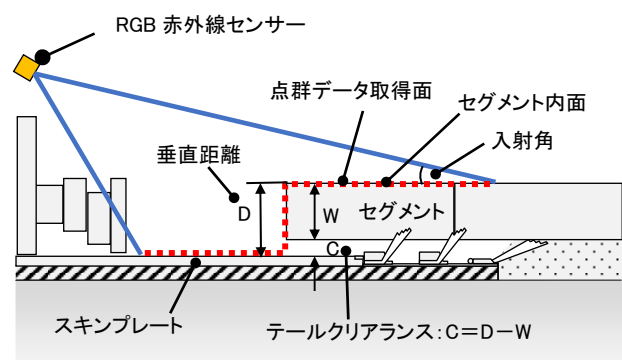


図 11 テールクリアランスの測定方法

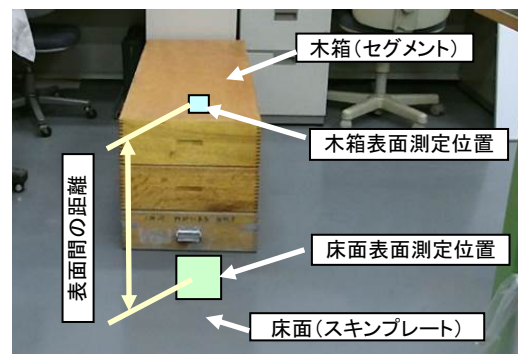


図 12 室内実験状況

において深度が測定できない範囲があることを確認した。ホワイトボードのように光沢のある材質では鏡面反射の影響が生じること、スタイルフォームのように柔らかく多孔質の材質では乱反射の影響が生じること、測定装置の正面では多重反射の影響が生じることなどが原因として考えられた。測定環境により精度に影響が生じる可能性があるものの、今回測定対象となる塗装されたスキンプレートや RC セグメントには影響が少ないと想定されたため、実際のシールドマシンのテール部において測定実験を行うこととした。

(3) 現場測定実験

a) 実験の目的と方法

実際のシールドマシンにおけるテールクリアランスの測定精度を確認するため、現場測定実験を実施した。測定実験には、外径 5.6m のシールドマシンを用い、実際の掘進中に測定した。本測定区間のセグメントは厚さ 250mm、幅 1200mm の鉄筋コンクリート製セグメントであり、スキンプレートは内面にさび止め塗装が施してある。測定装置は、リングガーダー部に設置し、掘進終了時点においても赤外線の入射角度を 10° 程度確保できる高さに固定した (図 13)。

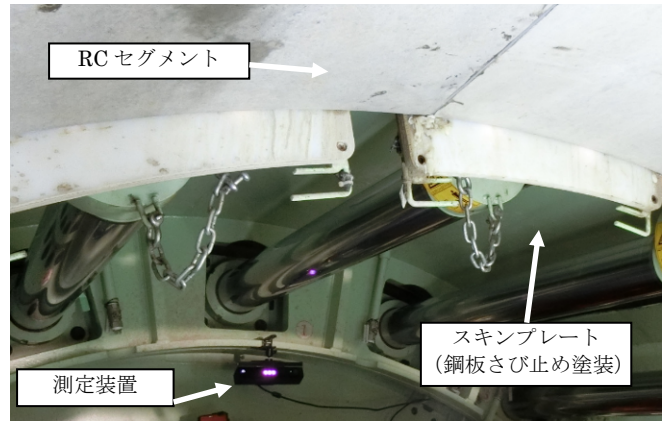
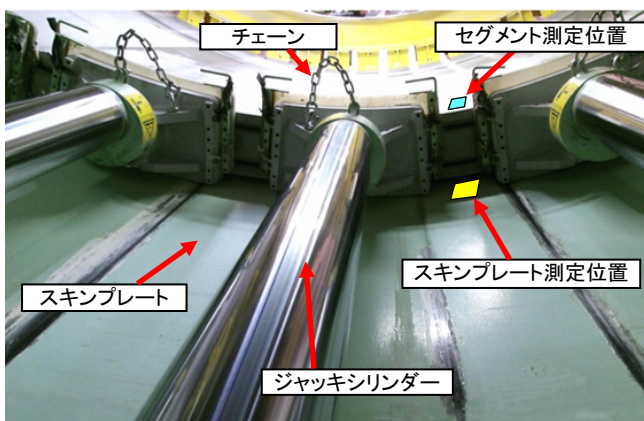


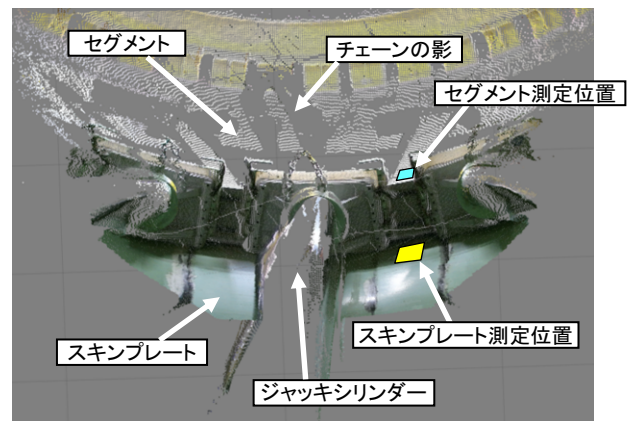
図 13 測定装置設置状況

b) 実験結果

測定実験中に取得した RGB 画像と点群データを図 14 に示す。点群データについては、見やすいように、3D モデルを回転させ視点を変えている。測定対象となる、塗装を施したスキンプレートとコンクリート製セグメントについては、点群データが鮮明にゆがみなく取得できており、赤外線の鏡面反射や多重反射の影響によるデータ異常はみられていない。一方、ジャッキシリンダーやスキンプレートの塗装がはがれた部分など光沢がある材質においては、鏡面反射の影響もあり点群データにゆがみが生じている。また、ジャッキスプレッダーや付属するチェーンの影になる部分は点群データが取得できていないことがわかる。



【RGB 画像】



【点群データ】

図 14 点群データ取得状況

ジャッキストローク（以下、JS と称す）が 800mm、1700mm の時点での実測値と測定サイクル 30 回分の測定値を図 15 に示す。本実験における測定 1 サイクルの所要時間は約 1 秒であり、約 30 秒間の測定値である。JS=800mm の時点でのテールクリアランスの実測値 28mm に対し測定値 30 回分の平均値は 30.4mm、JS=1700mm の時点では実測値 32mm に対し測定値の平均は 32.7mm であり、測定値の変動を示す標準偏差は JS=800mm の時が 0.73mm、JS=1700mm の時点で 1.21mm であった。

また、この掘進時において、ジャッキストローク 800mm、1150mm、1450mm、1700mm の時点での測定値 30 サイクル分の平均値とそれぞれの時点での実測値との比較を図 16 に示す。1 回毎の計測には多少のばらつきがあるものの、30 サイクル分の平均処理を行うことで、測定値と実測値が近似されることを確認した。

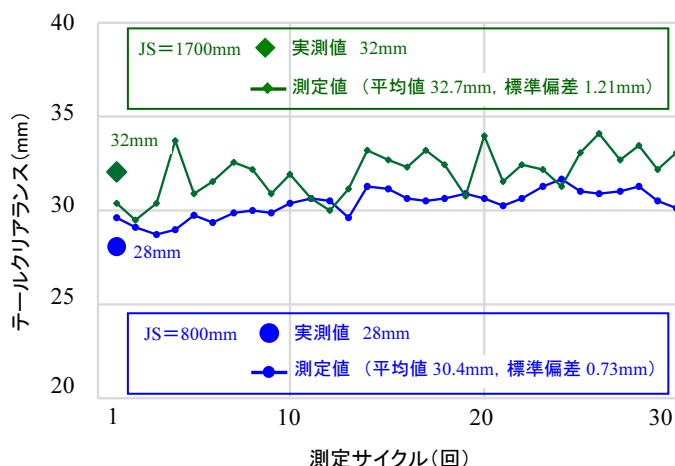


図 15 サイクル 30 回分の測定値と実測値の比較

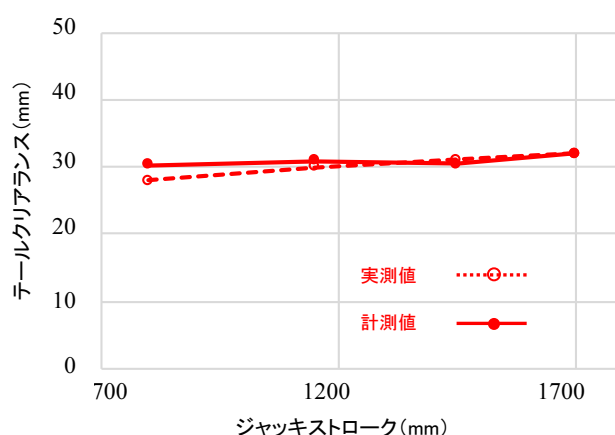


図 16 測定値の平均値と実測値の比較

測定装置の設置位置を少しずつ変えて、4 回の掘進において合計 16 回の測定を行った。1 回の測定毎に 30 サイクル分の測定を行い、合計 480 個のデータを取得した。その時の実測値と測定値との差の分布状況を示すヒストグラムを図 17 に示す。データ全体の平均値は-0.11mm、標準偏差は 2.15mm であった。1 回ごとの測定のばらつきは ± 3 mm 程度であり、個々の測定精度でもテールクリアランスの測定値としては十分に使用できる範囲である。また、測定値がほぼ正規分布しており、測定データの平均処理を行うことで、精度を向上できることを確認した。

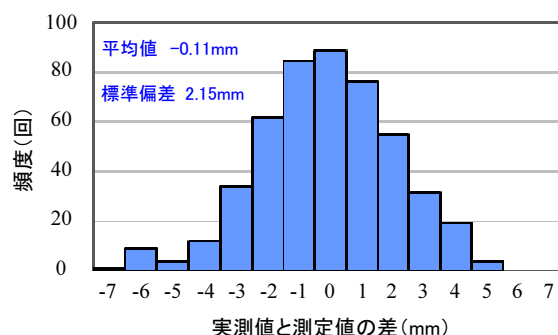


図 17 実測値と測定値の差の分布状況

4 おわりに

以上、i-Construction に向けたシールド掘進管理測量技術の開発のため実験を行った。測量支援システムにおいては、自動視準測量における精度試験と動作確認試験を実施し、実用レベルにあることを確認した。また、RGB 赤外線センサーを用いたテールクリアランス測定装置の実験を行い、十分な精度を確保できることを確認した。いずれの技術も、シールド坑内における掘進管理測量の作業の省力化に効果があり、測量精度の向上にも寄与する技術として期待される。今後は、実現場での実証施工を行って多くのデータを取得し、さらなる精度向上と自動化に向けた仕組みを構築するとともに、将来的には完全なシールド自動運転技術の実現に向けた要素技術として活用したいと考えている。

参考文献

- 菅野 静・西森 昭博・上田 潤・白坂 紀彦：シールド測量支援システムの開発，土木学会 第 73 回年次学術講演会(平成 30 年 8 月) VI-130
- 西森 昭博・藤岡 大輔・上田 潤：RGB 赤外線センサーを用いたシールドテールクリアランス測定装置の開発，土木学会 第 73 回年次学術講演会(平成 30 年 8 月) VI-129
- 中村 匠，木村 元：KinectV2 センサーを用いた現場合わせ管の計測システムの開発，日本船舶海洋工学会 講演会論文集 Vol.21, 2015