

セグメント真円度とテールクリアランスの 自動計測システム開発

高精度な一次覆工を実現

中 村 多 聞・浅 沼 廉 樹

シールド工事中において、組立てたセグメントの真円度とテールクリアランスを計測することは、品質管理上で重要である。しかし、複雑なマシンの構造や後方設備の支障物に遮られ、セグメント組立て部付近でこれらを計測し、施工に活用する技術は少ない。特に小口径断面の場合、連続的な自動計測が難しい。

セグメントの真円度を、中大口径においてはマシンに装備した形状保持装置に計測器を設置することで、小口径においては小型化した回転式レーザー距離計を用いることで計測を可能にした。テールクリアランスの計測は、レーザー照射を用いた画像処理方式を採用した。本稿では、この2つの自動計測システムの概要と有効性について述べるものである。

キーワード：シールド、セグメント、真円度、テールクリアランス、自動化

1. はじめに

シールド工事中において、セグメントは必ずしも、シールドマシン内面と同心円状に組立てられるものではなく、偏心したり、楕円状に変形したりすることがある。そのためセグメントの真円度、およびシールドマシン内面とセグメント外面の隙間（以下、テールクリアランス）を計測することは、品質管理上で重要なことである。特に急曲線を施工する場合は、これらを把握しながらセグメントを所定の位置に組む、高い技術が要求される。また、近年用いられている二次覆工省略型のセグメントでは、クラックや漏水等を発生させない品質管理が求められている。しかし実際の施工では、これらを定量的に測ることは難しく、セグメントの真

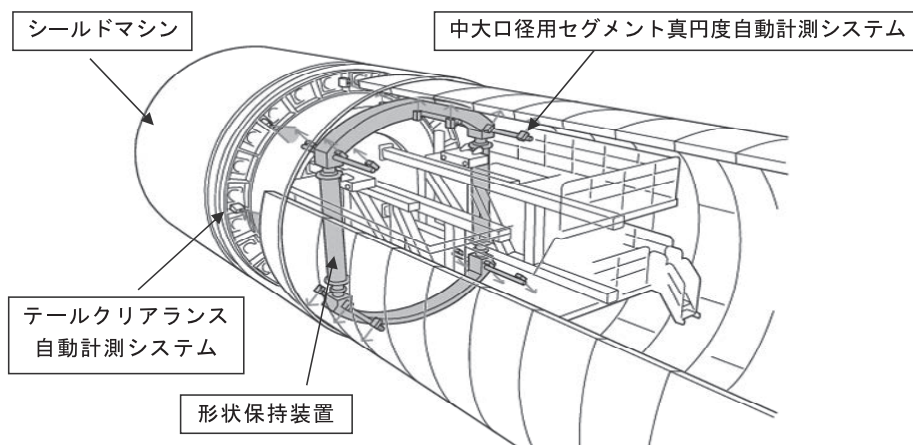
円度が低くひずみが大きくなるとセグメントの継手でズレが起こり、掘進中に偏荷重が作用して割れや欠けが発生する。この原因としては以下の2点が考えられる。

①シールドマシンとセグメントのテールクリアランス不足による「せり」

②セグメント組立て時の真円度の管理不足

そこで、トンネル掘進中であっても、セグメントの組立てに必要な計測を連続的に行うことができる「真円度自動計測システム」と、「テールクリアランス自動計測システム」の2つのシステムを開発し、ひずみの少ないセグメントの組立てを可能とした（図—1参照）。

本稿では、これら2つの計測システムの概要と現場導入実績を報告するものである。



図—1 真円度、テールクリアランス自動計測システム概念

2. システム概要

(1) 真円度自動計測システム

(a) 従来の真円度計測

シールド工事におけるセグメント真円度の測定は、従来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、セグメント組立て部付近での計測が困難であった。特に中大口径の断面と比べて、小口径の断面では、計測を狭隘なスペースで行うことになるため、精度の維持や連続的な計測の自動化が遅れていた。そのため真円度の確認は、シールドマシンと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（写真—1 参照）。



写真—1 従来のセグメント真円度計測方法

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、単に出来形の確認をするだけになってしまう。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地山部へ移り変わる時の変化を計測することは難しかった。

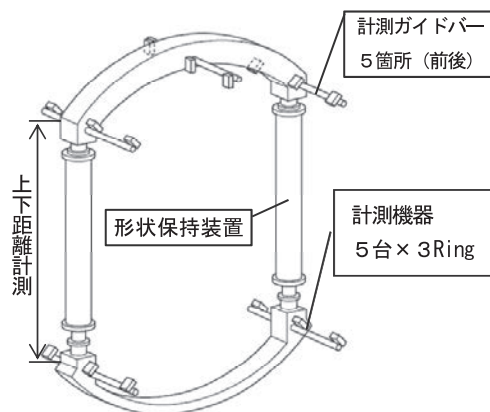
(b) 中大口径用真円度自動計測システム

中大口径用システムは、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、計測機器（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。また形状保持装置は、本体が上下動することから、内空変位を求める計測機器とは別に、上下間の計測ガイドバーの距離を計測するセンサを設けた（図—2 参照）。

使用するレーザー距離計は、セグメントの微小な変位より真円度を求めるため高精度なものを選定し、シールド工事の悪条件を考慮して専用ボックス内に収納した。レーザー距離計の仕様を表—1に示す。

レーザー距離計にて計測されたセグメント内空変位は制御ユニットにて解析され、中央制御室（シールド運転室）にセグメント真円度として表示される。シールド

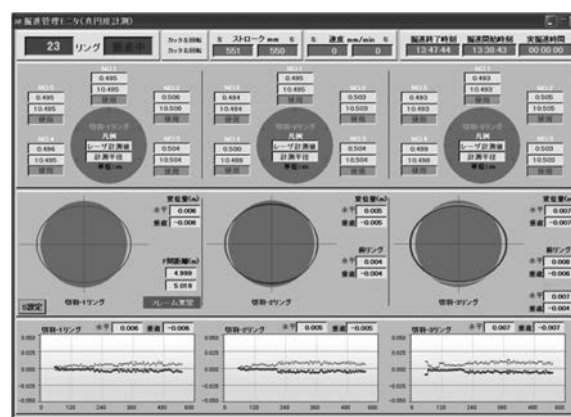
マシン操作者は、この3リング分の計測データを参考に、掘進中はジャッキ選択に留意すると共に掘進完了時のセグメントの真円度を切羽に連絡し、セグメントの組み方でひずみを修正する（図—3、写真—2 参照）。



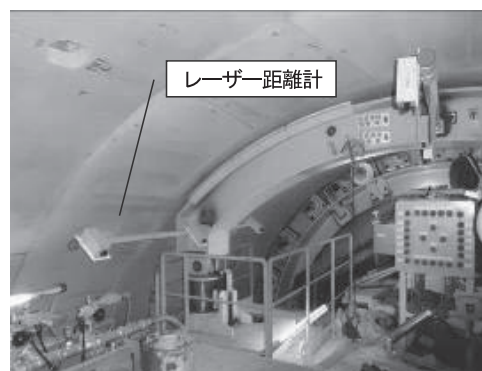
図—2 形状保持装置と真円度自動計測システム

表—1 レーザー距離計緒元

項 目	内 容
測定距離	0.05 m ～約 50 m
距離精度	± 1.5 mm
最小表示単位	0.1 mm
光源	レーザーダイオード：620 ～ 690 nm



図—3 真円度計測表示画面



写真—2 真円計測システム稼働状況（上部側）

これにより、シールド掘進にともない変位するセグメント真円度の推移を連続的に解析し、即時にシールド掘進組立て管理に反映・修正が可能となった。

(c) 小口径用真円度自動計測システム

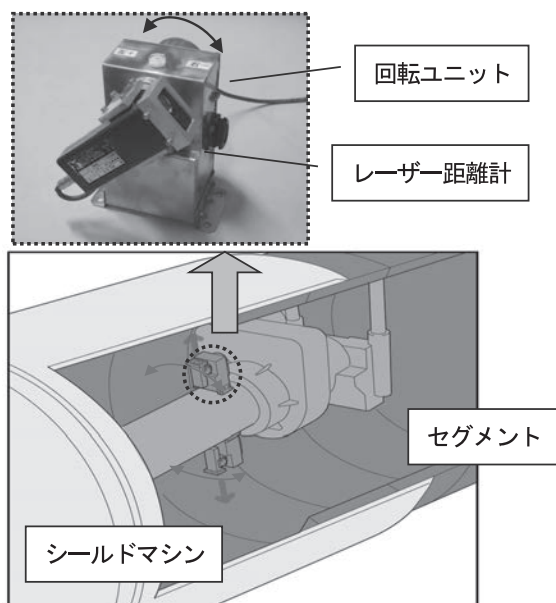
小口径用システムは、セグメント形状保持装置を有さない小口径シールドマシンを対象に開発したもので、設置スペースが限られたシールド坑内でも計測可能にするため、回転式レーザー距離計を採用した。これにより中大口径用と比較して、機器の設置台数を減らせ、計測部の小型化につながった（表—2 参照）。

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である。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・計測できるようにする（図—4）。

セグメント真円度計測は、シールドマシン掘進に合わせて連続的に計測され、計測結果を随時解析しセグメント真円度として表示される。

表—2 計測部寸法比較

項目	中大口径用	小口径用
幅	83 mm	140 mm
長手方向	200 mm	142 mm
高さ	200 mm	178 mm
機器単体の測定可能範囲	1 点	360 度 (角度設定可)
機器設置台数 (1 断面あたり)	5 台	2 台



図—4 スクリューに設置した場合の真円度計測状況

(2) テールクリアランス自動計測システム

(a) 従来のテールクリアランス計測

シールド工事におけるテールクリアランスは、シールド掘進管理だけでなく、出来形管理にも極めて重要な要素である。従来、このテールクリアランスの計測は、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（写真—3 参照）。

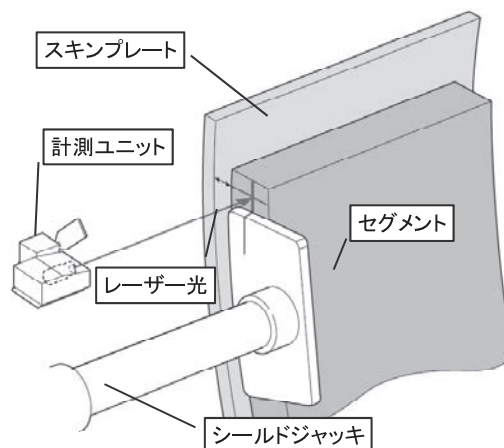


写真—3 従来のテールクリアランス計測状況

しかしこれは、掘進時にシールドジャッキ付近で作業することになり、不安定な足場での計測が余儀なくされた。また、大断面のトンネルでは高所作業も発生するため、安全面での改善が課題であった。

(b) テールクリアランス自動計測システム

これらの問題を解決するため、レーザー照射を用いた画像処理方式を採用した、テールクリアランス計測システムを開発した。切羽側に計測ユニットを設置し、テールクリアランス部にレーザー照射することで、シールドマシンテール部の環境に影響なく計測が可能となり、セグメント組立て時だけでなくシールドマシン掘進時のテールクリアランスをリアルタイムで計測可能とした（図—5、写真—4 参照）。



図—5 テールクリアランス計測システム概念



写真—4 計測ユニット設置状況

計測ユニットの設置箇所は、上部・右90度・左90度・下部の4箇所を標準とするが、現場の施工条件により、下部のユニットは水没などの影響がない範囲に移設ができる。また、最大取付け数量に制限はなく、必要に応じて増設することにより綿密な計測管理が可能である。

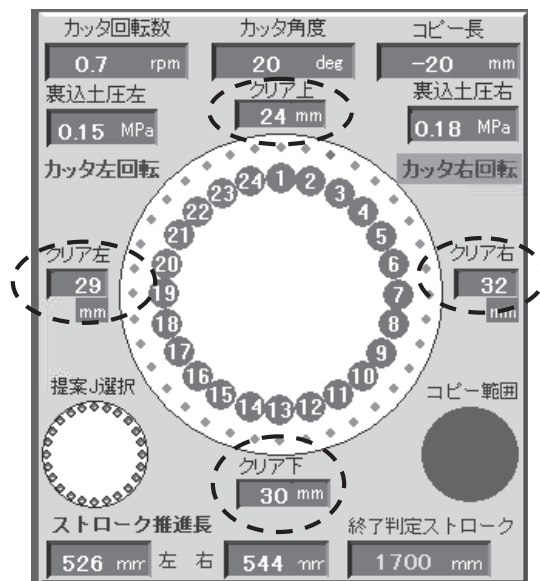
計測されたテールクリアランス値は、リアルタイムで中央制御室（シールド操作室）のディスプレイ上（図—6参照）に表示され、シールドマシン操作者の掘進管理上で重要なデータとなる。

3. 導入結果

(1) 中大口径用真円度自動計測システム

本システムの導入にあたり、計測精度の検証を行うため、従来行っていたレーザー距離計によって求めた内径と比較をした。その結果として、計測精度が $\pm 2\text{ mm}$ 以内であることが確認できたため、システムの運用を開始した。

口径8.04 mのシールド工事に本システムを導入し、組立て直後3リング分の真円度を同時に自動計測しながら掘進した結果を図—7に示す。セグメント



図—6 テールクリアランス表示画面

の変形は真円度が100%を超える場合は縦型つぶれ、逆に100%未満では横型つぶれ状態を表す。

一般にセグメントの組立て真円度の偏差量は、口径の0.4%以下で管理される。本システム導入により0.2%以下を目標とした管理が可能となり、極めて真円に近い高精度な一次覆工を構築できた。

(2) 小口径用真円度自動計測システム

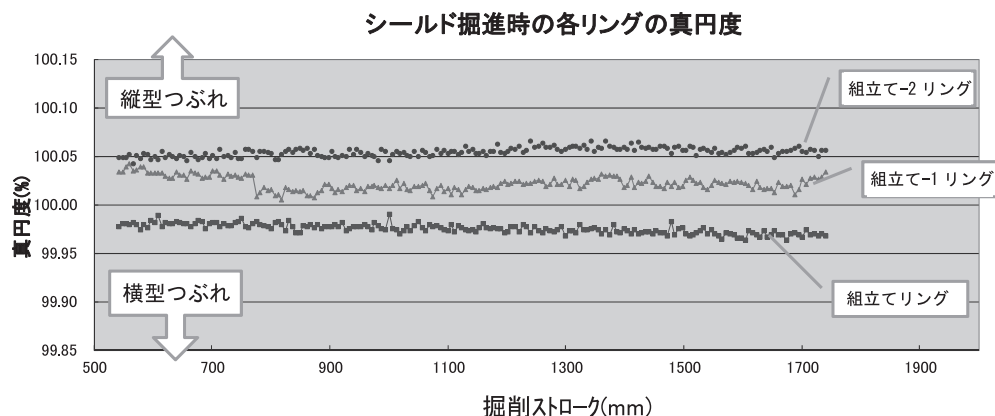
今回の現場導入で以下の3点を確認した。

① 高精度なセグメント内空計測が可能

計測精度 $\pm 1.5\text{ mm}$ を有する回転式レーザー距離計で高精度なセグメントの内空計測が可能となった（写真—5参照）。

② シールド掘進と連動して計測が可能

シールド掘進と連動したリアルタイムの計測で、掘進にともない変位するセグメント真円度の推移を解析し、次のセグメント組立て管理に即時反映することが可能となった（図—8参照）。



図—7 真円度計測グラフ（測定前）



写真-5 計測機器設置状況（上側）

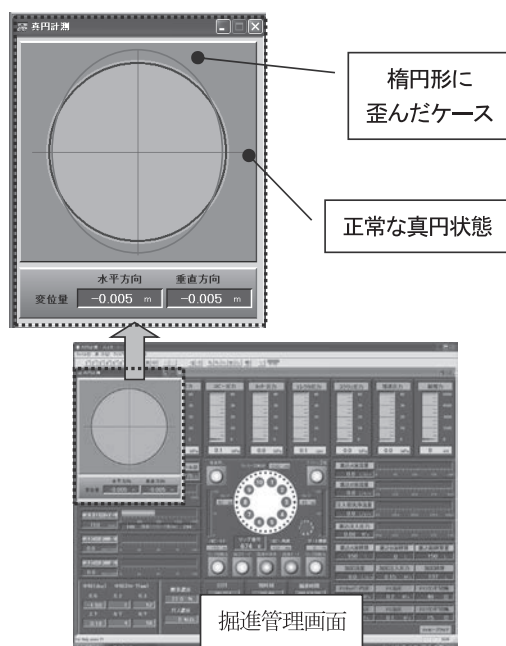


図-8 セグメント真円度モニタ

③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（直径2 m）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。

（3）テールクリアランス自動計測システム

本システムの有効性を確認するため、テールクリアランス計測をシールド掘進開始から終了までの1リング分行い、人による計測と比較した（表-3 参照）。

計測精度は、数値にバラツキはあるが ± 2.5 mm以内であることが分かった。この差は、画像センサの受光素子数に関係する。図-9に示す様に、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ため、検出結果（画素座標値）も変動する。この対策として、画像認識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-3 テールクリアランス計精度比較

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

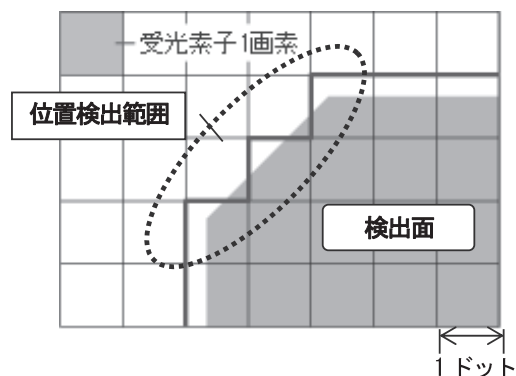


図-9 画像認識概念

4. おわりに

今回開発した2つの技術は、シールド工事において実現が難しいテーマであった。これらの新技術は中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り、今後は多くのフィールドで運用を継続し、その有効性を確認したい。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位に誌面をお借りしてお礼を申し上げます。

J C M A

【筆者紹介】

中村 多聞（なかむら たもん）

㈱フジタ

建設本部 土木エンジニアリングセンター機械部



浅沼 廉樹（あさぬま なおき）

㈱フジタ

建設本部 土木エンジニアリングセンター機械部
主席コンサルタント