

29. セグメント施工品質を向上させるテールクリアと 真円度の連続計測システムの開発

株式会社 フジタ

○ 平野 高嗣
浅沼 廉樹

1. はじめに

シールド工事において、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、楕円状になったりすることがある。特に急曲線を施工する場合、この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）を均等に確保することは困難となる。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、その物自体が製品の為、クラックや漏水等を発生させない品質管理を求められている。しかし、実際の施工では、セグメント組立時の真円度を定量的に測る物はなく、この真円度が低くゆがみが大きいと、セグメント継手のずれが発生し、掘進中にセグメント単体に偏荷重がかかり損傷等のトラブルを生じる。

この原因として、

- ・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」
- ・セグメント組立時の真円度の管理不足

が挙げられる。

そこでフジタでは、セグメントの組み立てに必要な計測を、トンネル掘進中に連続的に行うことができる「セグメント真円度計測システム」と「テールクリアランス計測システム」の2つのシステム（以下、フジタ高品質シールド）を開発した。これにより、セグメント組立時の真円度測定とシールド掘進時のテールクリアランス計測をすることで歪みの少ないセグメント組立を可能とした。

本論では、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。

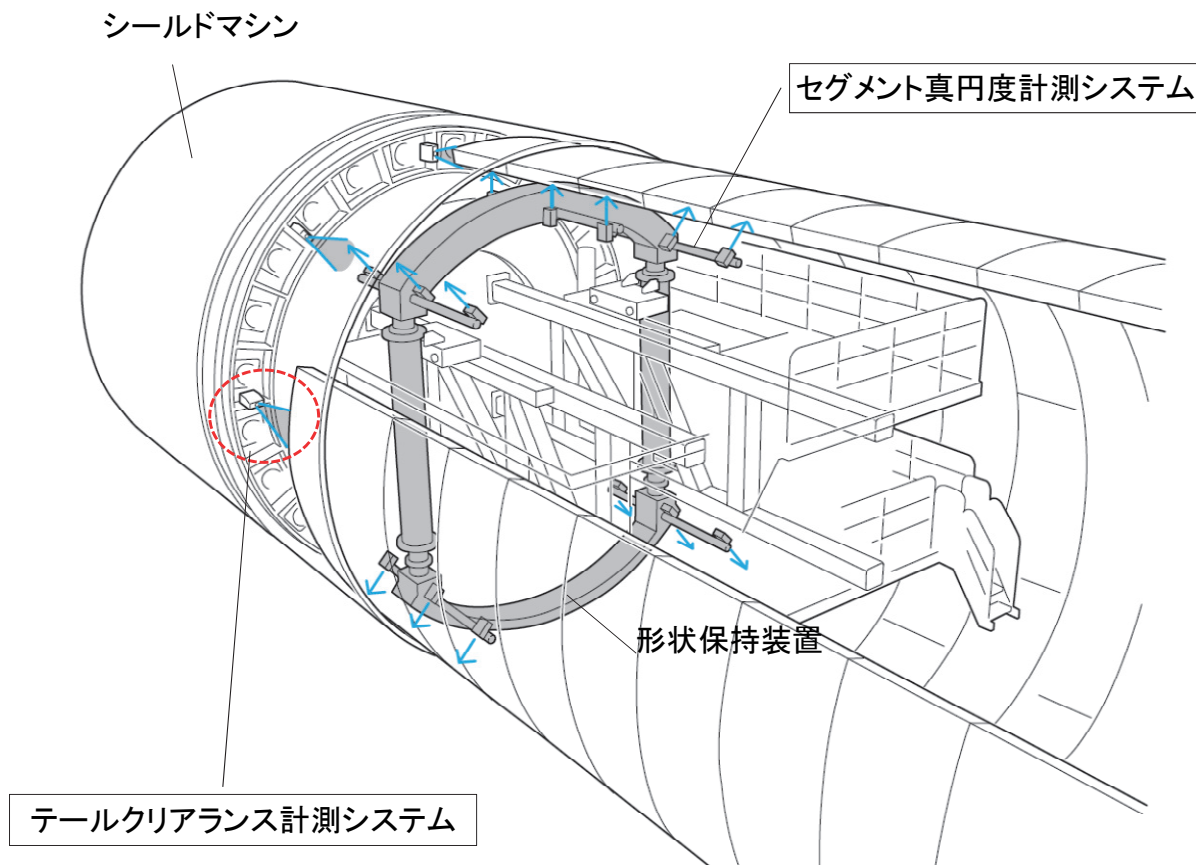


図-1 「フジタ高品質シールド」概念図

2. システム概要

2.1 セグメント真円度計測システム

従来、シールド工事におけるセグメント真円度の測定は、シールドマシン構造の問題や排土設備、油圧配管や計装線、揚荷設備等の支障物により、セグメント組立付近での計測が困難であった。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障害物がない位置のセグメントを、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時から時間が経過しており、単に出来形の形状を確認するだけでセグメントの不具合発生状況やシールドマシン後胴部から地山面通過時のセグメントへの影響を捕らえる事が出来なかった。

そこで、これらの問題の解決策として、シールドマシンに装備されている形状保持装置に注目した。この装置は、シールドマシン掘進時にマシン後部で組立られたセグメント形状を保持するものであり、セグメント組立完了毎にシールドマシン側への移動を行なう。

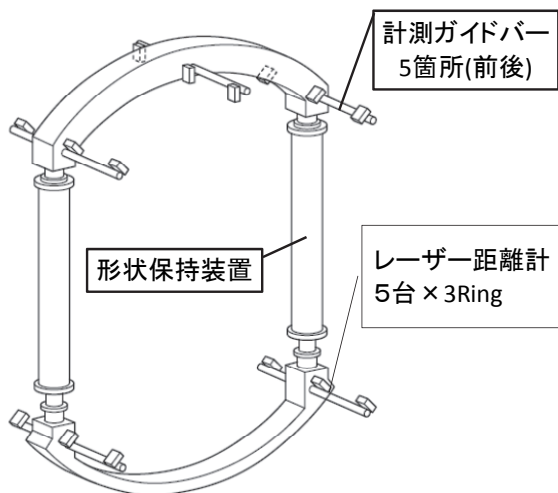


図-2 形状保持装置とセグメント真円計測システム

本システムでは、この形状保持装置の前後に計測ガイドバーを5箇所設置し、レーザー距離計を各リングに対し5台配置することで、3リング分の内空変位を同時計測可能とする。また、形状保持装置はセグメントを上下に支えるため本体が上下動することから、内空変位を求めるセンサとは別に、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)

また、今回使用するレーザー距離計は、セグメントの微小な変化より真円度を求める事から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BOX内に収納した。また、レーザー距離計の設置箇所に関しては、保持装置の形状や動作、シールド施工時のセグメント運搬や材料搬入を考慮し、セグメント底面の計測は行わずにレーザー距離計を天端・左右上45度・左右下45度の5箇所配置した。(表-1、写真2参照)

表-1 レーザー距離計緒元

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



写真-2 レーザー距離計計測状況



図-3 真円度計測表示画面

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)のディスプレイ上にセグメントの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、新しいセグメントの組み方の参考とする。(図-3、写真3参照)

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管理に反映・是正が可能となった。

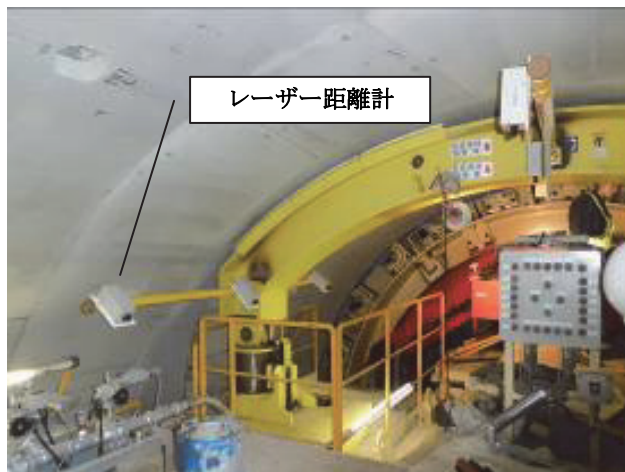


写真-3 真円計測システム稼働状況(上部側)

2.2 テールクリアランス計測システム

シールド工事において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となっている。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、楔形の測定片などを用いておこなうことが多く、その計測頻度もシールドマシン掘進に応じて行なわれていた。

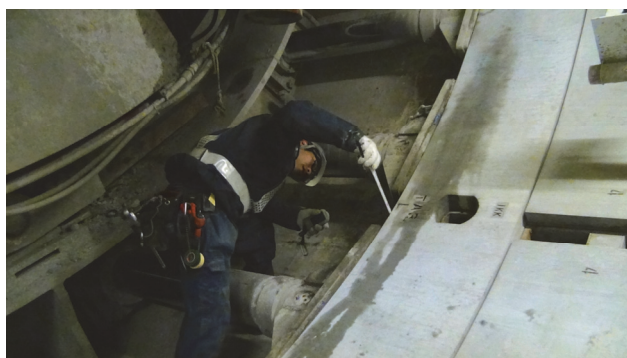


写真-4 従来のテールクリアランス計測状況

しかし、このテールクリアランス計測作業(写真-4 参照)は、シールドマシンの掘進時にシールドジャッキ付近(以下、S J)に作業員が近づいて計測することから、不安定な足場やトンネル大断面化に

伴った高所作業化など計測作業時の安全性が危惧されており、施工安全性への改善が望まれていた。

今迄にも、テールクリアランス計測装置は各社で研究開発(写真-5、-6 参照)されており、現場への導入・運用を行なっているが、計測箇所であるシールドマシンテール部は、裏込め材や地下水の流入により坑内環境が悪く、機器やセンサの故障で運用困難となる事が多く、普及しない原因となっていた。(写真-7 参照)

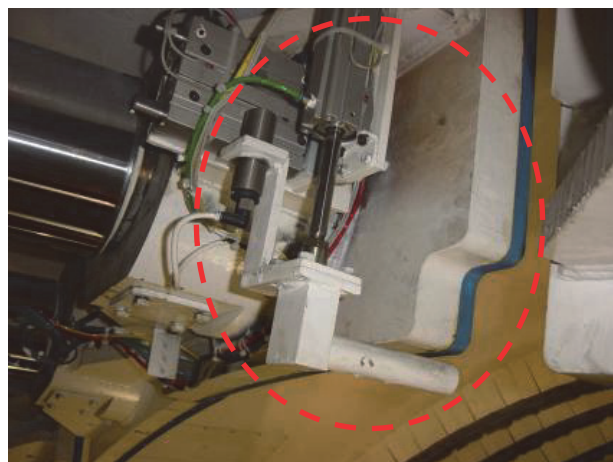


写真-5 シールドマシン組込み型テールクリアランス計測器

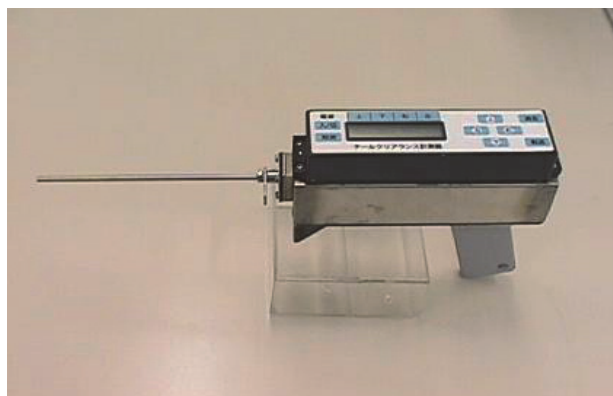


写真-6 ハンディ型テールクリアランス計測器



写真-7 シールドマシンテール部状況(地下水流入)

今回開発されたテールクリアランス計測システムは、これらの問題を解決すべく計測方法にレーザー照射を用いた画像処理方式を採用。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事で、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に計測可能とした。

(図-4、写真-8、写真-9 参照)

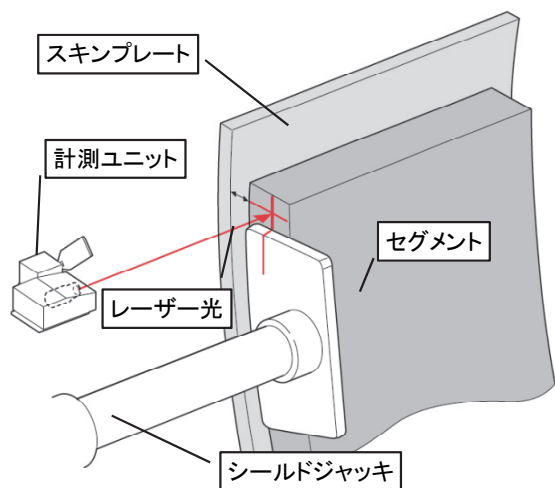


図-4 テールクリア計測システム概念図



写真-8 計測ユニット設置状況

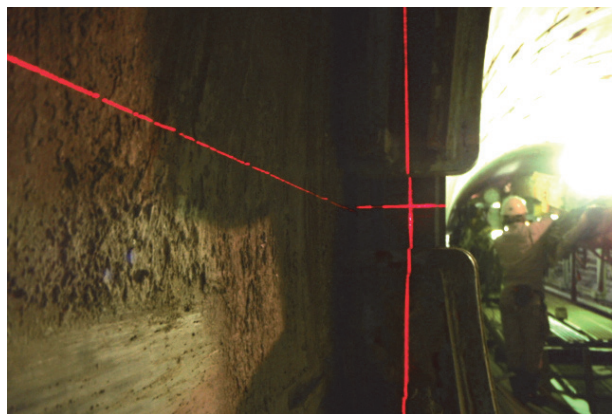
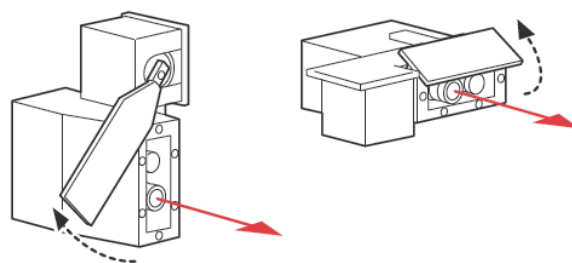


写真-9 レーザー光照射状況

この計測ユニット(表-2,図-5 参照)は、レーザー照射装置と画像認識センサ、シャッタユニットから構成されており、先に述べた様に本ユニットをS J 根元付近に配置し、テールクリアランスの計測を行う。また、本ユニットはシールドマシン取り付け方法により、2つのタイプ(縦型、横型)が設けられ、様々なシールドマシンの外径や形状にも対応可能となっている。

表-2 計測ユニット緒元

項 目	内 容
寸法(W×L×H)	195(mm)×195(mm)×65(mm)
重 量	5(kg)
レーザー出力	クラス2レーザー
供給電源	DC24V(レーザーのみDC6V)



縦型計測ユニット

横型計測ユニット

図-5 テールクリア計測ユニット

計測ユニットの設置箇所は、上部・右 90 度・左 90 度・下部の4箇所を標準とし、下部に関しては現場の施工条件により、水没などの影響がない範囲に移設を行なう。また、最大取り付け数量に制限はなく物理的に設置可能であれば綿密な計測管理も可能である。

次に本システムの計測の流れとしては、

- ①シールド掘進信号とS J ストロークをシールドマシン側の掘進管理システムから受信。
- ②任意のストローク値到達時にシャッタシステムを起動(シャッタ開)。
- ③セグメント面にレーザー照射を行い、画像認識センサにてテールクリアランスの計測を行う。(写真-10 参照)
- ④計測完了後は、シャッタシステムを閉じ、テールクリアランス値を演算し、シールド掘進監視システムに転送する。
- ⑤シールド掘進管理システムからシールド掘進信号を受信中は、②～④の動作を繰り返して行なう。
- ⑥シールド掘進信号停止後は、次リング計測開始までシステムは待機状態となる。

以上の動作をシールド掘進毎に行い。テールクリ

アランス値をリアルタイムに中央制御室(シールド操作室)のディスプレイ上(図-6 参照)に表示し、シールドマシン操作者は計測データを参考に掘進管理を行なう。



写真-10 テールクリアランス計測状況

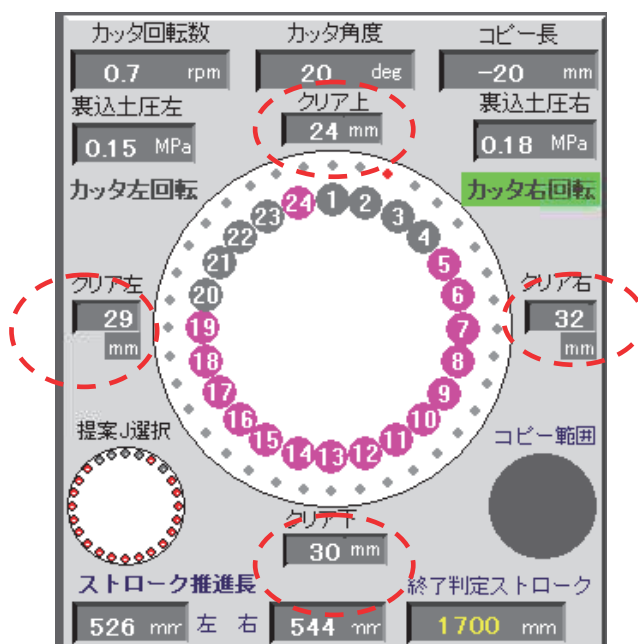


図-6 テールクリア表示画面

3. 導入結果

3.1 セグメント真円度計測システム

先ず初めに本システムの導入にあたり、システム計測精度の検証を行なった。検証方法としては、システムで計測されたセグメント内径と前章で述べた従来のレーザー距離計によって求められた内径との比較を行なった。その結果、計測誤差が $\pm 2\text{mm}$ 以内を確認が出来たため、システムの運用を開始した。(写真-11 参照)

図-7は、シールド掘進時のあるリングのセグメントの真円度の変位を表したものである。セグメントの変形は、真円度が100%を超える場合は縦つぶれ、逆に100%未満では横つぶれとなる。一般的には、この真円度が $\pm 0.4\%$ を超えるとセグメントのヒビ割れが発生すると言われている。



写真-11 真円度計測システム稼働状況(下部側)

従って、シールド掘進とセグメント組立作業では、図-3と図-7のデータを、ディスプレイに表示されたデータを基に作業の監理指導を行なった。

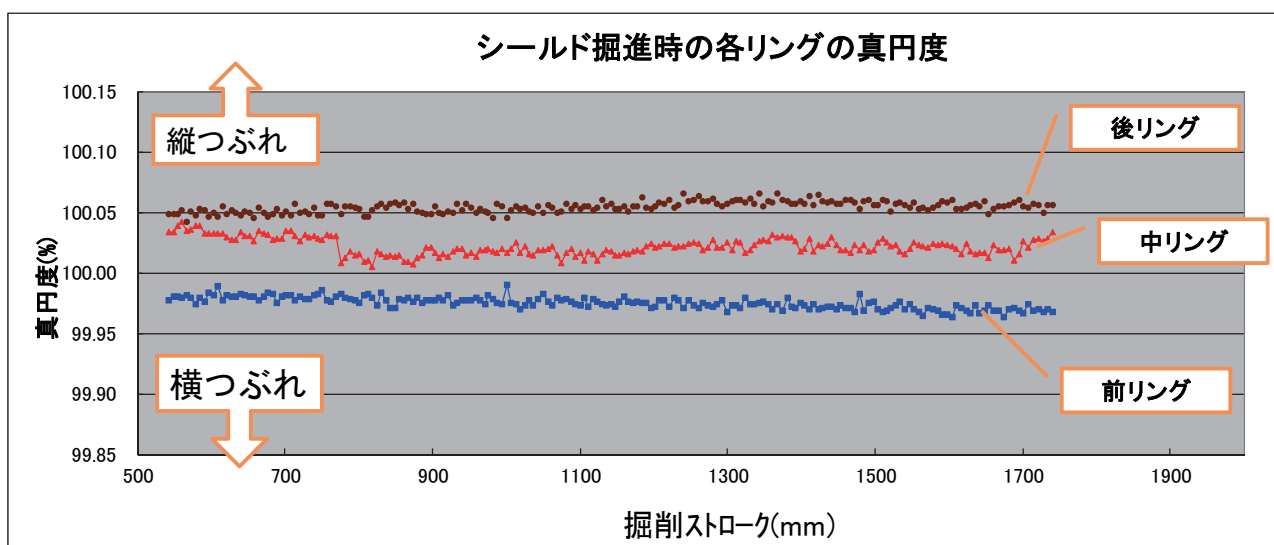


図-7 真円度計測グラフ表示画面

2.2 テールクリアランス計測システム

まず初めに本システムの導入あたり、システム計測精度の検証を行なった。検証方法としては、シールド掘進開始から終了までの1リング分を、人による計測(コンベックス使用)と同時にテールクリアランス計測を自動で行い。そのテールクリアランス値の比較を行なった。(表-3 参照)

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

表-3 より、本システムの計測精度は、人による計測と比較して数値にバラツキはあるが $\pm 2.5\text{mm}$ 以内である事が分かった。また、この計測精度はS Jストロークが伸びる毎に誤差が増大する傾向が確認された。

各現象の原因と対策を以下に述べる。

①数値のバラツキに関して

画像認識センサは、センシング対象物の位置を画面上で検出するため画面の受光素子の画素数を座標値として演算を行なう。(図-8 参照)^{*2}

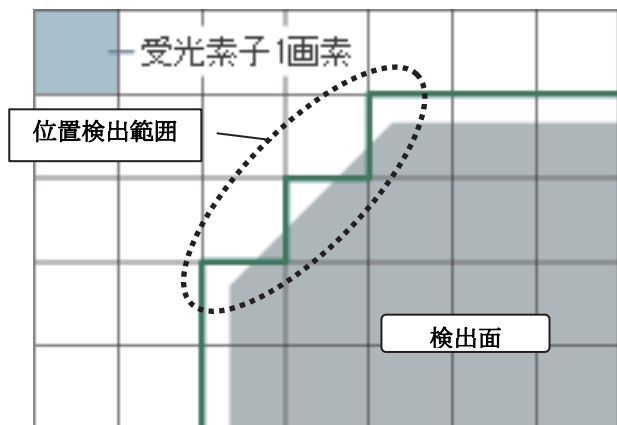


図-8 画像認識概念図

この時、図-8 から分かる様に検出面の位置が受光素子画素をまたがっている場合、検出結果(画素座標値)は変動する。これにより検出結果にバラツキを生じることが考えられる。

この対策としては、画像認識センサ自体の受光素子画素数アップを行い。検出面の細分化により安定するものと考えられる。

②S Jストローク伸びによる精度低下

テールクリアランス計測時には、シールド掘進時に対象物(テールクリアランス面)との距離が変化する。これにより、画像認識センサによる画面視野が増大する。(図-9 参照)

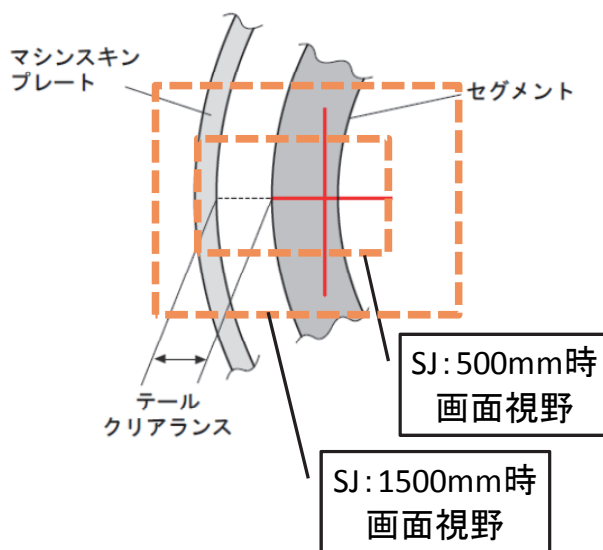


図-9 ジャッキストローク毎の画面視野

これにより、各画面視野での画素に対するスケールが変化し、画面視野が増大するほど画像センサ自体の計測精度低下を生じる。

この対策としては、計測ユニットと対象物との視野を適正なサイズに合わせることであり、

- ・画像認識センサに取り付けるレンズの変更。(望遠やオートフォーカスレンズの採用。)
- ・適正視野にあわせた画像認識センサの複数化。(適正距離に合わせてセンサを切替。)

以上の2点が対策として考えられる。

4. おわりに

技術開発が停滞する昨今、今回開発された2つの技術は、シールド工事において実現が難しいとされていたテーマであった。しかし、これらが実現出来た要因としては、開発者だけでなく現場が運用・改善を繰り返す事で様々な問題点を解決できたと考える。この2つの新技術は、大口径だけでなく小中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して頂き、その有効性を確認して頂きたい。

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位に紙面をお借りしてお礼を申し上げます。

参考文献

- 1) 土木学会：シールドトンネルの施工時荷重, pp.44~45
- 2) キーエンスHPより(<http://www.keyence.co.jp>)