

シールド工事における自動化技術の取り組み

Approach of the automation technology in shield tunnelling

田口 毅*

Takeshi Taguchi

坪井 広美**

Hiromi Tsuboi

田中 勉*

Tsutomu Tanaka

池田 謙一***

Kenichi Ikeda

要 約

横浜湘南道路は延長 7.5 km の片側 2 車線の自動車専用道路で、横浜湘南道路トンネル工事は 2 機のシールドを用いて、そのトンネル部（5.4 km×2 本）を築造するものである。

本トンネル工事では、大断面、長距離、急曲線、超併設近接施工等に対応した施工管理技術が重要であるため、セグメント管理、テールクリアランス自動計測、余掘り管理、線形管理の自動化技術を開発し、現場に適用した。本稿では、これら開発技術について報告する。

目 次

§ 1. はじめに

§ 2. セグメント管理システム

§ 3. テールクリアランス自動計測システム

§ 4. 余掘り管理システム

§ 5. 線形管理システム

§ 6. まとめ

§ 1. はじめに

近年のシールド工事は、施工の効率化、工期短縮、コスト削減といった背景のもと、長距離化、高速化の方向に進んでいる。このような要求に対応するとともに、更なる品質向上、生産性向上を図るためには、掘削、掘削土砂搬出、資材搬送（物流）、セグメント組立等の各工程において、現場条件に対応した施工技術の採用や施工管理の効率化が重要である。「掘削」は、シールドジャッキの長尺化、カッターモータの高速・高トルク化、ビット交換機構で対応しており、「土砂搬出」は、延伸式のベルトコンベヤ等が採用されている。「資材搬送」は、無軌道の搬送車両の採用、「セグメント」については、ワンパス型の継手やセグメント幅の幅広化等の技術で対応しており、これらの技術は、本トンネル工事においても適用されている。

これらの施工技術とともに、施工管理の効率化を図り、

生産性向上、品質向上を目指すため、①セグメント管理システム、②テールクリアランス自動計測システム、③余掘り管理システム、④線形管理システムについて開発を行い、現場に適用した。

本報告では、これらの自動化技術を横浜湘南道路トンネル工事に適用した事例を紹介する。

§ 2. セグメント管理システム

大規模シールド工事では、長距離化に伴い高速掘進が求められるため、1 日当たりの施工量（日進量）も増加し、それに伴い、使用するセグメントピース数も膨大な量となる。また、組み立て後の取外しが不可能な嵌合継手を採用したワンパス型セグメントを使用するため、様々な種類のセグメントピースを間違いなく、切羽に供給する必要がある。このような背景から、セグメントピース管理には、IC タグや QR コードなど情報のデジタル化が容易なマーカを活用した管理システムが存在し、施工時及び維持管理でのトレーサビリティ確保に活用されている。しかし、全てのセグメントピースに対してマーカの追加貼付けが必要となるため作業効率が悪く、不経済といった欠点があった。

そこで、セグメントピース製造過程で印字されている製造番号を文字認識技術（OCR）で読取る、セグメント管理システムを開発した¹⁾。

2-1 システム概要

本システムは、追加マーキング、専用読取り機を必要としない、画像による文字認識読取技術（OCR）を活用したシステムである。システム概要を図-1 に示す。各

* 技術研究所先端技術グループ

** 関東土木（支）横浜湘南道路（工）

*** 関東土木（支）横浜湘南道路（工）

（現：関東土木（支）東百合丘（工））



図ー1 セグメント管理システム概要図

各種セグメントの印字状況



写真ー1 OCRによるデジタル化



写真ー2 セグメント受入状況

セグメントピースに印字されている製造番号をOCRでデジタル化(写真ー1)し、各セグメントピースの仮置き場所や組み立て順序・位置などの情報を紐付けし、受入れから組み立てまでの一連のチェーン情報をクラウドにおいて、専用のアプリで管理するシステムである。作業プロセスに従って現状が記録されるので、作業進捗、在庫状況がリアルタイムで共有される。作業に必要な情報を提供することで省人化と効率化を図る。また、管理データがクラウドに保存されるので、セグメントに関する物流や作業工程の見える化が容易となる。

2-2 受入および検査

従来の作業では、現場でのセグメントピース管理は、製造番号等のメモ、チェックシートの記入等で行われ、確

認管理に時間と労力を要していた。セグメントピースの受入および検査作業では、従来は2人で行っていた確認管理が本システムの活用により、セグメントピースに印字される製造番号の自動認識、デジタル化で終わるので作業の省人化(職員2名→職員1名)が図れる(写真ー2)。また事務所に戻ってからの書類作成作業が省略できる。

2-3 搬入および保管

搬入および保管作業では、保管場所の指示と保管履歴の管理、検索が簡単なものとなり、職員、作業員が保管場所(位置)、シールド材の貼付け状況といったセグメント

ピースに関する情報を共有化することができる。

2-4 坑内搬送

従来の坑内搬送作業では、組立指示書に従い、該当セグメントピースを目視確認した後、搬入順番を明記していたが、本システムの活用により、組立指示書に適合するセグメントピースの保管場所、積込順番、正誤確認がシステムから教示（図-2）されるようになり、作業が自動化され、作業の迅速化、確実性が図れる。

2-5 切羽への供給

切羽への供給作業では、組立指示書に従い供給設備へ設置、情報を記録していたが、坑内カメラ（写真-3）による印字文字のデジタル化により正誤確認作業の自動化、確実性が図れる。シールドマシン内へセグメントを搬送する自動供給装置へセグメントを移設する前に、セグメントピースの搬送順序が正しいか判断することが可能となるので、セグメントの組み間違いを事前に防止することが可能となる。

2-6 セグメントピース情報の共有概要

本技術では、セグメントピース等に関する情報は、PCやタブレットのブラウザ経由でクラウド上に保存され、誰でも情報共有が可能となっている。ストックヤード内に保管されている各セグメントピースの在庫数・保管位置や、シールド材の施工状況、養生期間といった各セグメントピースの工程確認、受入検査状況・検査票の確認や進捗を管理する上での受払簿の参照が可能で、これにより、現場状況の見える化による意思疎通の迅速化が可能となる。また、クラウド上には、工程表、工事写真他の各種工事資料を保存・共有できる「ファイル共有」機能も有している。機能画面の構成（図-3）を示す。

また、従来は、シールド、セグメント測量の結果を受けて、担当職員が計画線形を基に、セグメント組立指示書（図-4）の作成を行っていたが、本システムでは、搬入セグメント情報の入力のみで、事前登録したセグメン



写真-3 坑内カメラによる確認状況



図-3 機能画面（メインメニュー）の構成例

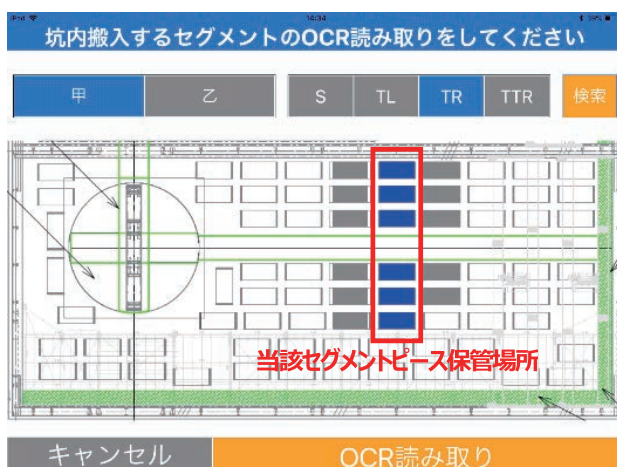
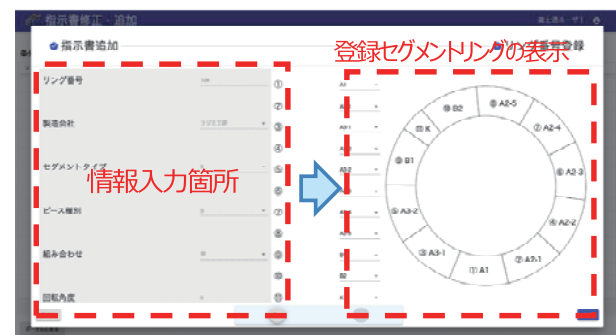


図-2 保管場所の表示例

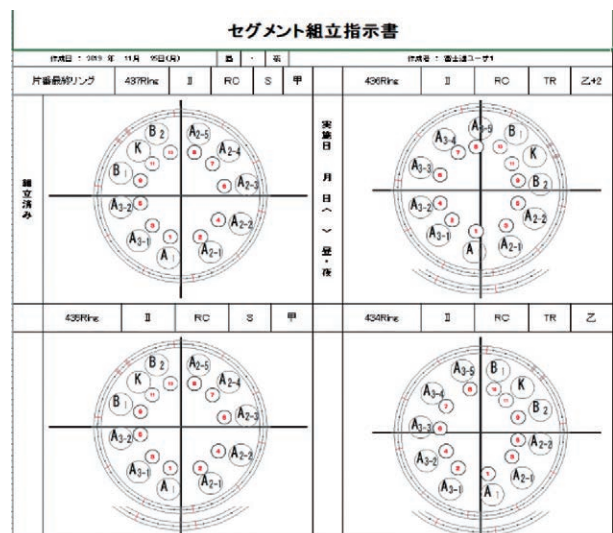


図-4 セグメント組立指示書の作成例

トリングをセグメント組立指示書に表示する。リング組立に変更があった場合には、入力項目の変更でセグメント組立指示書の表示も修正される。

2-7 運用状況

実運用での課題は、セグメントピース中の製造番号に「乙」と「S」や「1」と「I」と言った類似文字があり、誤認識するケース、印字の状態（汚れ、薄さ等）によって誤認識するケースがあった。しかし、使用する文字列を事前に辞書登録することで類似文字の誤認識は改善された。本システムを用いることにより、現場内のセグメントピースの所在がリアルタイムで把握できる。このデータをセグメント工場と共有することで、今後は工場から現場への搬入時期、搬入台数等の最適化もできる可能性がある。

なお、本システムの開発は、国土交通省「建設現場の生産性を飛躍的に向上するための革新的技術の導入・活用に関するプロジェクト」の採用、助成を受け推進したものである。

§3. テールクリアランス自動計測システム

シールド工事では、シールドのテール内でセグメントを計画線上に組み立てるため、シールドとセグメントの相対位置を正確に把握し、一定のクリアランス（隙間）を確保しておく必要がある。シールドの方向とセグメントの方向が異なると、シールドの後端部およびセグメント前方部におけるクリアランスが少なくなる。最終的にはシールドテールプレートとセグメントが競る状態となり、セグメントに損傷や変形が発生する。テールクリアランスやセグメントの真円度を計測管理することで、セグメントの組立精度を向上させ、シールドのテールプレートとセグメントが競ることによる損傷や変形および組立誤差の集積を防ぐことが可能となる。

本システムは、シールドのビーム部の2箇所（2断面：切羽側、坑口側）に、各8台のレーザ測距計（写真-4）をテールプレート円周内面に対する法線方向に取り付け、テールプレートおよびセグメント内面に向けて半径方向にレーザを照射し、レーザ距離計とセグメントの離隔を連続的に計測している。システムの概要図を図-5に、構成機器を表-1に示す。

レーザ距離計（計16台）により、連続かつリアルタイムに測距されるデータとシールド側で計測されている以下の（①～⑥）の計測データ等を基に、テールクリアランスおよびセグメントリングの真円度を計算する。

- ①シールド位置（3次元座標：先端・中折れ・テール）
- ②シールド姿勢（ピッチング、ローリング：前胴、後胴）
- ③シールド方位角（真北基準、その他）
- ④中折れ角（上下、左右）
- ⑤ジャッキストローク

⑥セグメント桁高（種類別）

テールクリアランスの計測は、掘進中からセグメントの組み上がりまでを連続して計測し、①距離計からテールプレート内面までの距離、②距離計からセグメント内面までの距離、③セグメント桁高からテールクリアランスを算出する。

切羽側及び坑口側の断面に設置された距離計の計測結果から、セグメントの方向角を算出するとともに、シールドの位置姿勢データ等を基に、テールプレート後端部でのテールクリアランスを算出している。

真円度の計測は、距離計からセグメント内面までの距

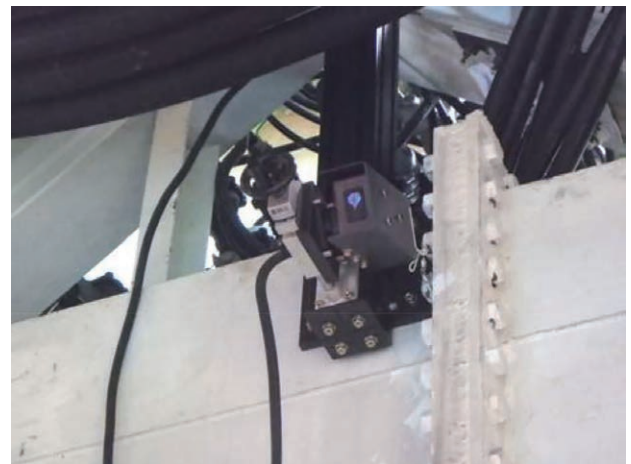


写真-4 レーザ距離計設置状況

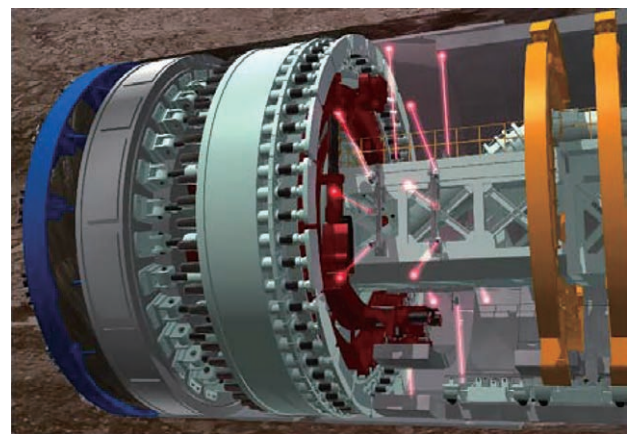


図-5 テールクリアランス自動計測システム概要図

表-1 主要構成機器

項目	主要諸元	数量	備考
レーザ距離計	レーザダイオード 測定距離：50 m 分解能：0.1 mm	16 台	前 8 台 後 8 台
アンプ	増幅、制御、電源	16 台	
固定治具	センサ固定	16 台	
PLC		1 台	
スイッチングハブ	8 ポート	2 台	
データコンバータ	LAN (Ethernet) TTL/RS232 C/422/485	8 台	信号変換

離と各距離計の取付位置からセグメントリングの円中心および真円度を算出している。真円度の評価は、半径法を用いており、評価の基となるセグメントリングの円中心は、最小二乗中心法（LSC：Least Squares Circle）を用いて設定している。

測定結果および評価結果は、3次元のヒートマップで変位状況を表示（図一6）するとともに、時系列データとしてテールクリアランスの経時変化状況をグラフ表示にてリアルタイムで確認することができる。

§ 4. 余掘り管理システム

シールドの方向制御は、シールドに装備されているシールドジャッキ、余掘り装置（コピーカッタ）、中折れ装置等を操作して行われている。

余掘り装置は、通常、カッタヘッド内に収納されているが、曲線部の施工や蛇行修正等を行う場合、油圧ジャッキを用いて外周部にコピーカッタを吐出させ、オーバーカット（余掘り）する機構になっている。曲線施工時には、コピーカッタを作動させ、必要な範囲を余掘りすることで、シールドの方向制御・姿勢変化を適切に行うことが可能となる。

前述の通り、余掘り装置は、カッタヘッドの最外周部で動作することから、余掘り装置で掘削された地山の土砂は、全量がチャンバー内に取り込まれていないと考えられ、一部の土砂が余掘りした箇所に残置していると想定される。したがって、コピーカッタの吐出量が全て余掘り量とはならないと考えられることから、適切な余掘り量を確保するため、余掘りの有効率を考慮して、余掘り量を設定している。

$$\text{余掘り量} = \text{コピーカッタストローク} \times \alpha$$

α ：有効率（％）

本システムは、コピーカッタの設定量（ジャッキストローク）、稼働範囲、地山探査装置を用いて実際の余掘り量や余掘り部の土圧、油圧データを測定した結果から余掘りを管理するものである。余掘りの状況は、3次元のヒートマップで、余掘り量の適正、過不足を表示（図一7）するとともに、シールド先端部、中折れ部、テール部における2次元の断面図で確認することができる。

コピーカッタ設定値と測定値の差異を把握することにより、コピーカッタ設定量の補正を行うとともに、地山状態（硬質・軟弱）を判断することも可能となっており、これらのデータの経時変化図（図一8）等を確認することも可能である。本システムを用いることにより、安定して確実な余掘りの施工管理が可能となる。

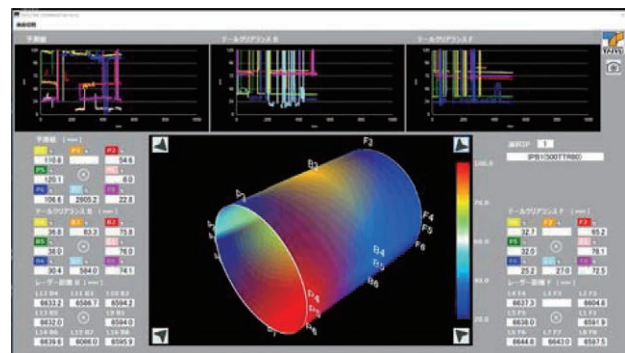
また、上記のテールクリアランス自動計測システムと合わせて、シールドと地山掘削面、シールドとセグメント外面との位置関係（競り具合）を3次元で把握しながら施工管理することで、安定した線形、セグメント組立の品質を確保することができる。

§ 5. 線形管理システム

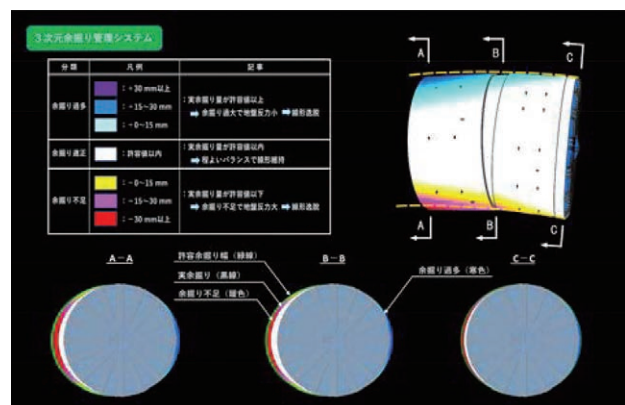
本システムは、シールドの掘進線形を管理するもので、シールドの掘削において、計画線からずれが生じた場合におけるシールドの位置および方向から、計画線にシールドを戻すための修正計画線の計算およびセグメント組立のシミュレーションを行うものである。

シミュレータは、計画線のデータと下記の計測、設定項目等のデータを基に、摺り付け位置でシールドが計画線と平行になるように計算する。

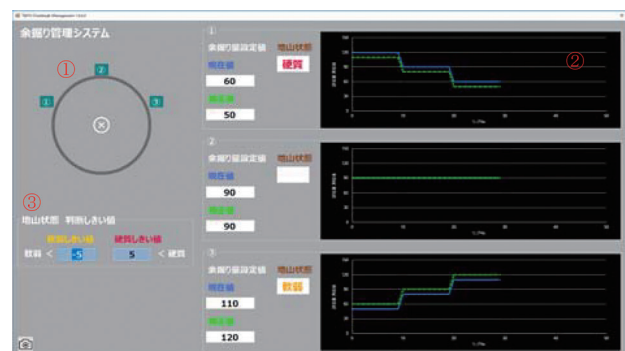
- ①シールド位置（3次元座標：先端・中折れ・テール）
- ②シールド方位角（真北基準、その他）



図一6 テールクリアランス管理システム画面



図一7 余掘り表示例（3次元）



- ①コピーカッタ稼働(角度)範囲地山探査装置
- ②グラフ表示（縦軸：設定量測定値 mm横軸：リングNo）
余掘り設定量（青色実線）地山探査装置の測定値（緑色点線）
- ③地山状況設定値

図一8 余掘り表示例（2次元）

- ③テールクリアランス値
- ④摺付け長(現在位置から計画線に戻るまでの距離設定)
- ⑤修正線の種類(直線, 単曲線, クロソイド, sin 半波長通減曲線等設定)
- ⑥セグメントの種類(使用セグメントの種別: ストレート, テーパー, 幅, テーパー量等設定)

修正線の計算結果は, 3次元で表示するとともに, 計画線に戻るまでの動きを, 2次元, 3次元でステップ表示(図-9)する。また, シミュレータで計算した修正線でセグメントを構築する場合のシミュレーションも併せて行う。現場で使用しているセグメントの情報を基に, セグメントの種別や組合せを選定し, 修正線シミュレータと同様, 2次元, 3次元で表示(図-10)する。

本システムにより, 計画線からのずれが確認された場合でも, シールドの方向制御, 蛇行修正を早期かつ的確に行うことができる。

§6. まとめ

シールド工事における品質向上, 施工管理の効率化を図るため, セグメント管理システムや各種自動計測システムを開発し, 横浜湘南道路トンネル工事に適用した結果, 管理業務における技術者の省力化, 施工管理の高度化に十分効果があることを確認できた。

今後, シールド工事で得られる各種機械データやセンサ情報等のビッグデータを収集し, これらのデータの活用²⁾を進めることで, シールド工事全体の更なる生産性向上に取り組む予定である。

参考文献

- 1) 田中勉, 田口毅 他: 文字認識読取技術を活用したセグメント管理システムの開発, 土木学会全国大会

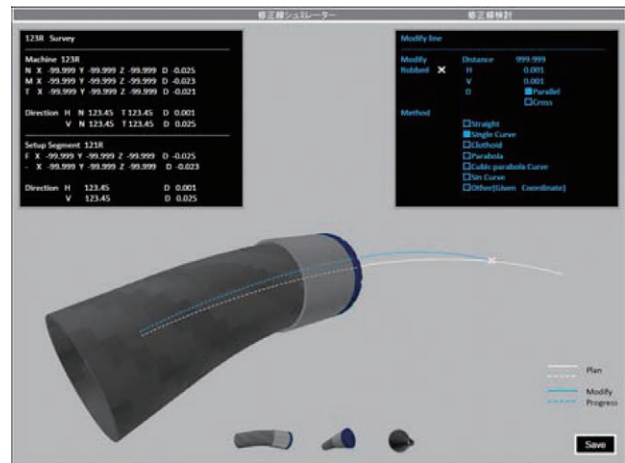


図-9 修正線表示例

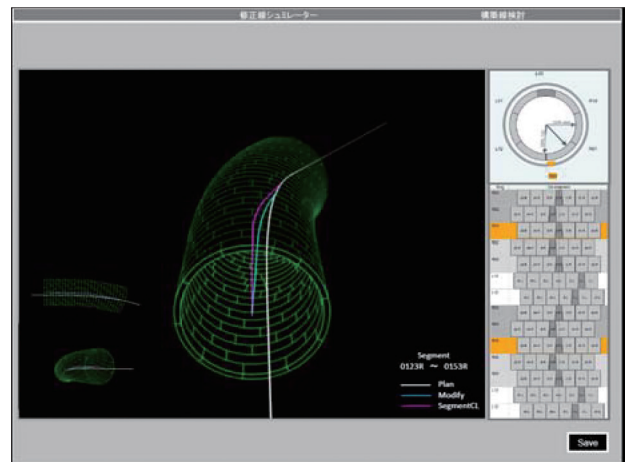


図-10 構築線表示例

- 第74回年次学術講演会論文集, pp. VI-488
- 2) 田中他: シールド自動解析診断システム「NS-BRAINS (エヌエス・ブレインズ)」の開発, 西松建設技報, VOL. 42, 2019