

## 22. セグメント搬送用大型天井クレーンの自動化と運用実績

### 東京外かく環状道路本線トンネル（南行）東名北工事報告

東京外かく環状道路本線トンネル（南行）東名北 J V 工事(事) 高橋 公城  
 東京外かく環状道路本線トンネル（南行）東名北 J V 工事(事) ○ 西崎 康  
 東京外かく環状道路本線トンネル（南行）東名北 J V 工事(事) 福井 崇史

#### 1. はじめに

本工事は、関越自動車道から東名高速道路まで延伸される東京外かく環状道路のうち、世田谷区大蔵の東名高速道路と野川の交差点から武蔵野市吉祥寺井の頭通りまでの本線トンネルを、泥土圧シールド工法により築造するものである（図-1）。工事の特徴は、大断面（外径 16.1m）かつ長距離（9 km）を高速掘進（月進 500m）で施工をすることである。

シールドトンネル本体の壁は、セグメントと呼ばれるパネルをリング状に組み立ててつくる。現場内でのセグメントの搬送はクレーンの使用を主体としており、迅速かつ正確な運転操作が求められる。しかし近年は、熟練作業員の高齢化により人材の確保が難しく、クレーン自動化は喫緊の課題となっている。そこで、本工事では、セグメントストックヤードにてセグメントの入庫・保管・出庫作業を行う 40t 大型天井クレーンの自動化について取り組んだ。本稿では、その計画と運用実績について報告する。



図-1 工事位置図

#### 2. 工事概要

##### 2.1 全体工事概要

工事名 : 東京外かく環状道路 本線トンネル（南行）東名北工事  
 発注者 : 東日本高速道路株式会社 関東支社 東京外環工事事務所

施工者 : 鹿島・前田・三井住友・鉄建・西武特定建設工事共同企業体

工事場所 : (自) 東京都世田谷区大蔵  
 (至) 東京都武蔵野市吉祥寺南町

工期 : 2014. 4. 10~2021. 3. 18

主要工事内容

- ・断面規模  
 トンネル外径  $\phi$  15.8m、内径  $\phi$  14.5m  
 シールドマシン外径  $\phi$  16.1m（国内最大）
- ・掘進延長 9,155m
- ・工法 泥土圧式シールド工法
- ・平面線形 R=643m（最小）
- ・土被り 38.3m（野川河床）~55.7m
- ・縦断勾配 0.3%~1.5%
- ・横連絡坑 5カ所
- ・地中接合 1カ所

##### 2.2 天井クレーン自動化採用経緯

セグメントの入出庫作業を自動化する設備として、多段棚式自動倉庫設備が挙げられる。実績も多く技術的に確立したものであるが、本工事のように大型セグメントを扱う工事においては、以下の点で優位性が低くなる。

- ① 大型セグメント用多段棚は、大掛かりなフレーム構造となり、それに応じた大きな支持杭が必要となるため、工期、コストが増大
- ② フレーム構造が大掛かりとなり、多段倉庫のメリットである敷地面積の縮小効果が小さい
- ③ 設備（スタッカークレーン）も重量物を扱うため、コストが増大（天井クレーンの約2.5倍）

多段棚式倉庫と同等の機能を持たせることができる設備として、3次元的に自由に移動させることができる天井クレーンがある。天井クレーンは、特別な構造物が不要のため、工期短縮及び費用縮減が図れ、同種工事への展開性も高い。よって、前例の無い試みではあるが、多段棚式自動倉庫設備に置き換わり、大型セグメントにも適用可能なセグメント自動入出庫設備として、天井クレーンの自動化に取り組むこととした。

### 2.3 セグメント概要

本工事では、施工する場所の目的や条件によって、材質や幅の異なるセグメントを使い分けてトンネルを構築する。トンネル全長 9,155m において全 5,676 リング、70,000 ピースを超えるセグメントを搬送する必要がある（表-1）。

表-1 セグメント概要

RC セグメント		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆鉄筋コンクリート構造</li> <li>◆剛性が大きく耐圧縮性や耐久性に優れたトンネル全体の標準部において使用</li> </ul> リング数 : 4,247リング 分割数 : 13ピース/リング 重量 : 約10t/ピース
合成 セグメント		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆鋼とコンクリートのハイブリッド構造</li> <li>◆大きな荷重がかかる高層ビル等が建設される可能性のある部分において使用</li> </ul> リング数 : 628リング 分割数 : 13ピース/リング 重量 : 約11t/ピース
鋼製 セグメント		<ul style="list-style-type: none"> <li>◆鋼板で箱型に製造された構造</li> <li>◆開口が必要な横連絡坑部や切断撤去が必要な地中拡幅部において使用</li> </ul> リング数 : 801リング 分割数 : 13~14ピース/リング 重量 : 約5t/ピース

### 2.4 セグメントストックヤード概要

セグメントストックヤードでの入庫～出庫フローを図-2、図-3に示す。

セグメントストックヤードでは、トレーラーによって搬入されるセグメントを、天井クレーンを使用して荷取りし、入庫・保管する。トレーラーによるセグメント搬入は、運搬時の荷崩れを防止するために2段積みまでとした。セグメントストックヤードでのセグメントの保管は4段積みを基本とし、3列で1リング分となるようにした。

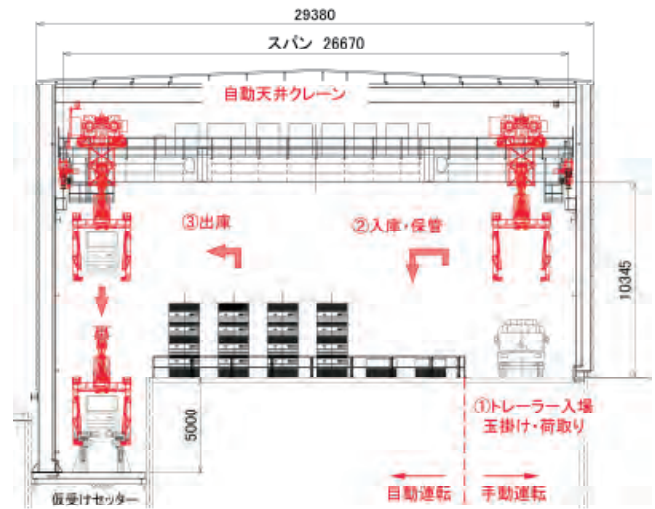


図-2 天井クレーンによる入出庫

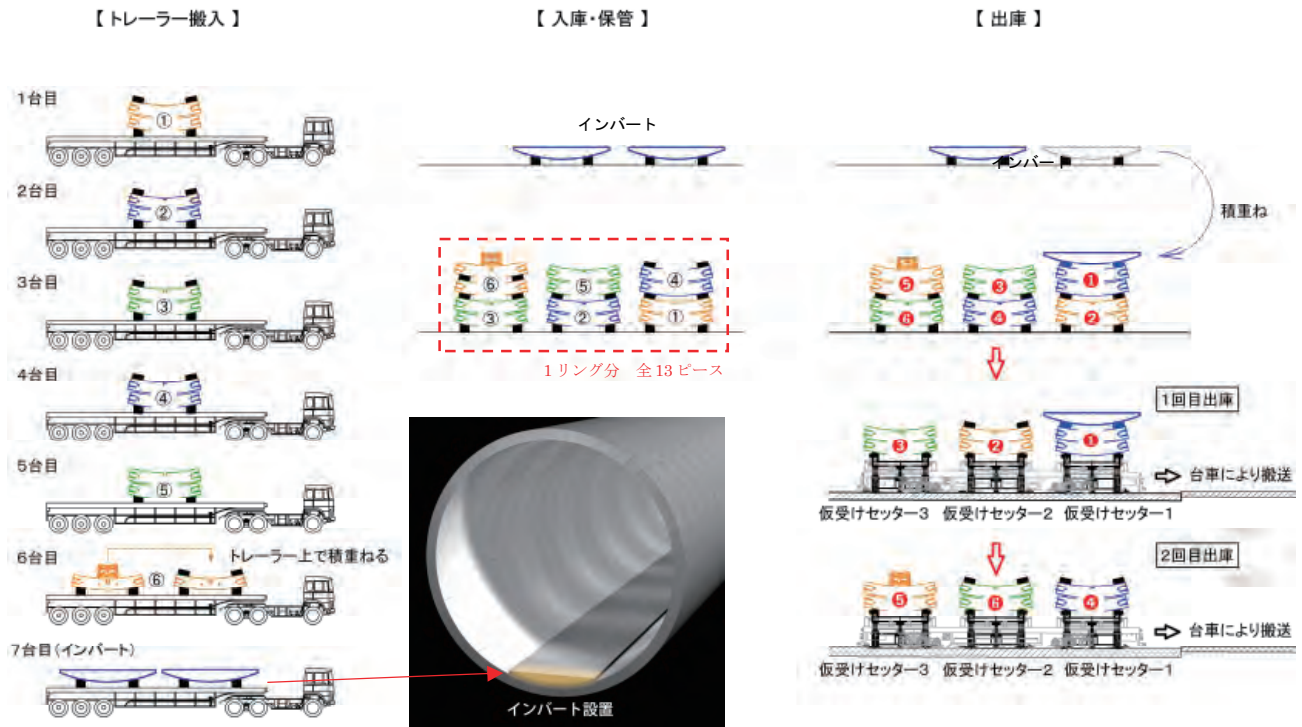


図-3 セグメントストックヤード 入出庫フロー図（1リング分）



トンネル坑内では、セグメントの組立に合わせてプレキャストインバートを設置するため、インバートについてもセグメントストックヤードに入庫・保管し、セグメントと共に在庫することが効率的な搬送となる。よって、セグメントストックヤードにはインバート保管エリアも配置し、セグメントストックヤード全体として、セグメントを10リング、インバートを8リング保管できる配置とした(図-4)。

セグメントストックヤードに保管されたセグメントは、天井クレーンを使用して荷取りし、仮受け台(以後、仮受セッター)に預けることによって出庫される。仮受セッターに預けたセグメントは、搬送台車に積替えて坑内に搬送する。セグメントストックヤードから出庫したセグメントはトンネル坑内で入れ替え作業ができないため、組立順序に従って出庫操作を行う必要がある。

天井クレーン本体の機械仕様を表-2に示す。天井クレーンは2台設置し、入庫及び出庫を交互に行うことによって、サイクルタイム短縮を図り、高速掘進に対応できる設備とした(図-5)。

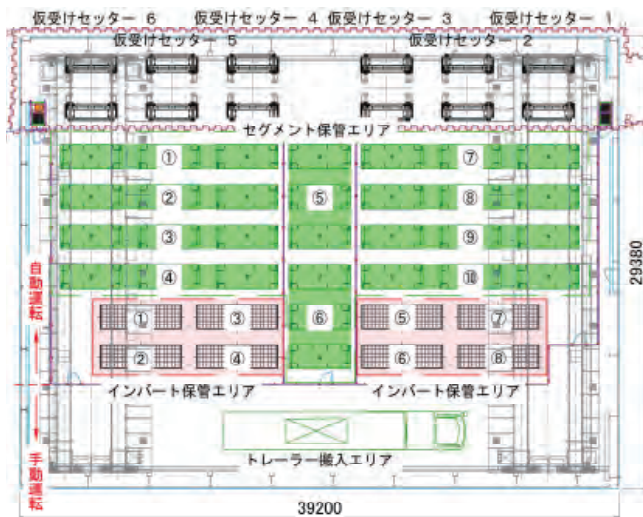


図-4 セグメントストックヤード平面図

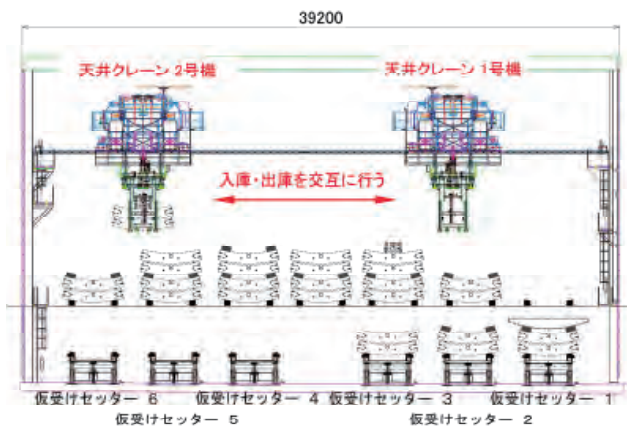


図-5 セグメントストックヤード縦断面図

表-2 40t 天井クレーン機械仕様

項目	内容	
定格	荷重	40 t
	巻上げ速度	0.172m/s
	横行速度	0.417m/s
	走行速度	0.417m/s
ワイヤーロープ		B種 IWRC 6×Fi(29) 8本掛け×20mm
構造	スパン	26.67m
	クレーンガード長さ	27.17m
	揚程	14.25m
	クレーンガード高さ	10.345m
原動機	巻上用	2×45 kW
	横行用	2×2.2 kW
	走行用	2×5.5 kW
ドラム	巻上ドラム	PCD φ 540mm
シーブ	巻上シーブ	PCD φ 558、400mm
	イコライザシーブ	PCD φ 400mm

### 3. 自動化設備

#### 3.1 自動クレーン概要

##### (1) システム構成

自動天井クレーンのシステム構成を図-6に示す。自動化に必要な各種センサー、制御機器を搭載した天井クレーン・セグメント把持装置(セグメントグラブ)、搬送指示を出す管理システム、及び各設備からの信号を入出力する地上制御盤から構成される。

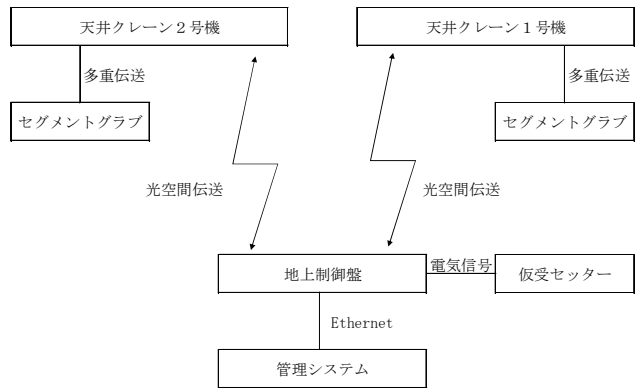


図-6 自動クレーンシステム構成図

##### (2) 自動化範囲

今回、トレーラーからのセグメント荷取り作業は手動とした。トレーラー及びセグメントの形状がそれぞれ異なり、位置決めが困難であること、トレーラーにより搬入されたセグメントは、損傷等がないかの検品作業が必要であり、そこに人が介在しなければならないことが理由である。

トレーラーから荷取りして保管エリアに移動後は、入庫・在庫管理・出庫を自動で行えるようにした。

### 3.2 天井クレーン

自動化のために天井クレーン本体に搭載したセンサー配置図を図-7に示す。

天井クレーンの位置座標は、横行・走行方向についてはレーザー距離計、巻上げ下げ方向についてはエンコーダを使用して計測することとした。

天井クレーンの停止精度は、トンネル坑内へ搬送されるセグメントと他設備との干渉を考慮すると、目標値±50mmで設定する必要がある。高精度な位置決め制御が必要となるため、電動機の制御は、低速域でも安定したトルクを出力できるPG (Pulse Generator) 付ベクトル制御を採用した(表-3)。また、ベクトル制御用PGには、PGの積算値とレーザー距離計の偏差が位置決め時に一定値以上となった場合、位置検出異常として天井クレーンを停止させるフェールセーフ機能も持たせた。

エリア監視センサーは、手動運転エリアと自動運転エリアの境界、2台の天井クレーンの作業エリアの境界及び極限センサーの手前に設置して、速度監視に使用する。レーザー距離計による位置決め異常が発生した場合等に、センサー設置箇所での過速度を検出して天井クレーンを停止させる。自動運転中の天井クレーンが手動運転エリアに入ってくることや天井クレーン同士の衝突・防音ハウスとの衝突を防ぐために設置した。

2台の天井クレーンには、衝突防止センサーをそれぞれ設置しており、手動運転中も有効であるため、ヒューマンエラーによる天井クレーンの衝突を防止できる。

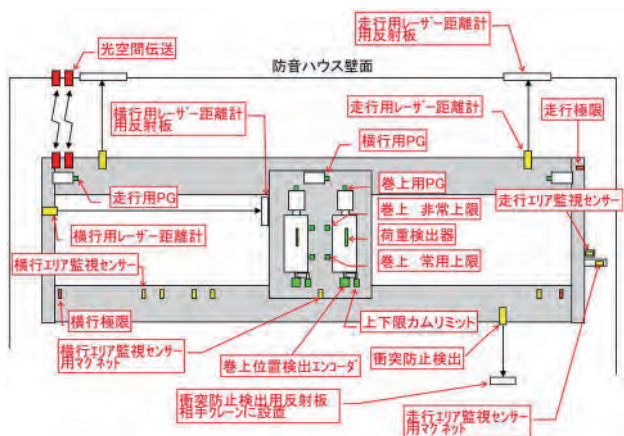


図-7 天井クレーンセンサー配置図

表-3 天井クレーン電動機仕様

用途	台数	形式	出力 (kW)	制御
巻上用電動機	2	ホイス用 180Fr	45	安川 マトリクスコンバータ U1000 80kVA PG付ベクトル制御 PG : MSK-510-1024 (1024pulse/rev)
横行用電動機	2	CNV3-6120- AP-B-21	2.2	安川 マトリクスコンバータ U1000 8kVA PG付ベクトル制御 PG : ERN1330 (1024pulse/rev)
走行用電動機	2	CNV8-6165- AP-B-25	5.5	安川 マトリクスコンバータ U1000 12kVA PG付ベクトル制御 PG : ERN1330 (1024pulse/rev)

### 3.3 セグメントグラブ

従来、クレーンによるセグメントの搬送は、人がナイロンスリング等を使用して玉掛けして行っていたが、その方法では自動搬送は困難である。よって、今回セグメント自動玉掛け装置として、セグメントグラブを新規開発した。

機械図面を図-8に、機械仕様を表-4に示す。セグメントグラブは吊具として天井クレーンのフックにぶら下げて使用する。ただし、そのままではフックが回転してしまうため、プレートで挟み込んで回転を抑えた。

異なる幅のセグメントに対してもセグメントグラブとセグメントの重心をなるべく一致するように、幅方向からアームでセグメントを挟み、爪の上に搭載する方法とした。セグメントを載せる爪部にはゴム板をはり、セグメントと接触するアーム及び把持検知バーにはMCナイロン(摩擦低減板)をはって、揚重時にセグメントを損傷させない構造とした。

セグメントグラブに振れ止め用ガイドパイプを設置し、クレーンを上限まで巻上げた際に天井クレーン側の鞅管にガイドパイプが収まることで横走行時に荷振れをおこさないで運転できる制御方式とした。横走行前に都度上限まで巻上げる必要があるが、高速横走行運転と精度の高い位置決めが可能となる。

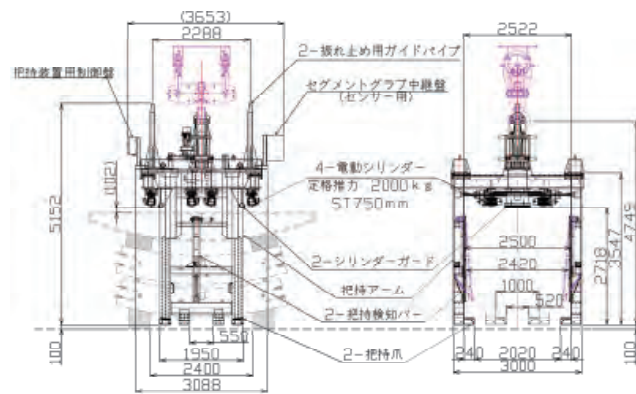


図-8 セグメントグラブ図面

表-4 セグメントグラブ機械仕様

項目	内容	
定格荷重	33t	
開閉速度	75mm/sec×2 (9.0m/min)	
アーム開度	520mm～2020mm	
アーム長	3,547mm	
アーム幅	1,950mm	
爪長さ	240mm	
自重	6,800kg	
電動シリンダー	電源	3相 400V 50Hz
	ストローク	750mm
	モーター容量	2.2kW×2台 ×2アーム
	定格推力(ノ本)	2,000kgf
付属品	推力検知 ロータリーエンコーダ ストローク調整LS	



セグメントグラブに搭載したセンサー配置図を図-9に示す。

掴みセンサーはセグメントをアームで挟み込んだことを検出し、在荷センサーはセグメントが爪に掛かっていることを検出する。両センサー共に、セグメントを確実に把持できていることを検出するために設置した。

懐衝突検出、下面衝突検出センサーは、位置決め異常時や予期せぬ障害物があった際に、セグメントグラブとセグメント・インバート又は障害物との接触を防止するためのものである。

開度検出器は、左右のアームのシリンダストロークを検出するために設置し、横行方向の位置決め補正に使用する(図-10)。特にトレーラーからの荷取りの手動運転時には、セグメントグラブの中心とセグメントの中心を厳密に合わせて把持することは不可能であり、左右のアームストロークに差が生じてしまう。その状態で搬送してしまうと、位置決めはセグメントグラブの中心を基準として行うため、セグメントの中心は目標位置からずれた状態となってしまう。これを防止するため、セグメント把持時の左右アームストロークを検出し、その差分だけ位置決め横行距離を補正できるようにした。

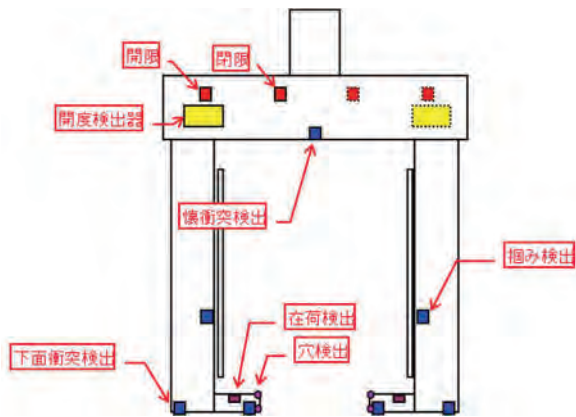


図-9 セグメントグラブセンサー配置図

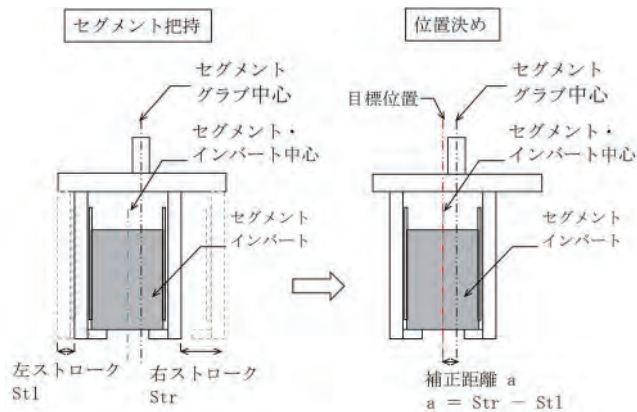


図-10 横行方向位置決め補正

### 3.4 管理システム

管理システム構成を図-11に示す。

測量システムは、トンネル線形の測量結果及び設計線形計画に基づいて、今後のセグメント割付計画を予想するものである。

測量システムから割付計画されたセグメントを工場に出荷注文することになるが、注文システムではセグメント工場への注文処理を行うことができると同時に、セグメント種類に応じたトレーラーへの積込順序を指定し、工場出荷時に順番通りにトレーラーへの積込みが行われたかどうかの確認ができる。

自動天井クレーンでは、トレーラー搬入されたセグメント情報とヤード内の在庫状況から、ヤード内の入庫場所を自動判断し保管する。また、割付計画に従って出庫すべきセグメントをヤード内から自動選定し、仮受セッターへ搬送する。

個々のセグメント及びインバートを識別するマーカーとして、図-12に示すカラーコードを採用した。工場にて製品種別を登録したカラーコードシールをセグメント本体側面に貼り付けておき、現場ではタブレット端末のカメラにてカラーコードを読み取り、搬入されたセグメント種類を自動天井クレーンに認識させる。カラーコードは、バーコードやQRコードと異なり、離れた位置から複数個同時に読み取りが可能であり、今回の段積みされた大型セグメントの識別には最適であった。

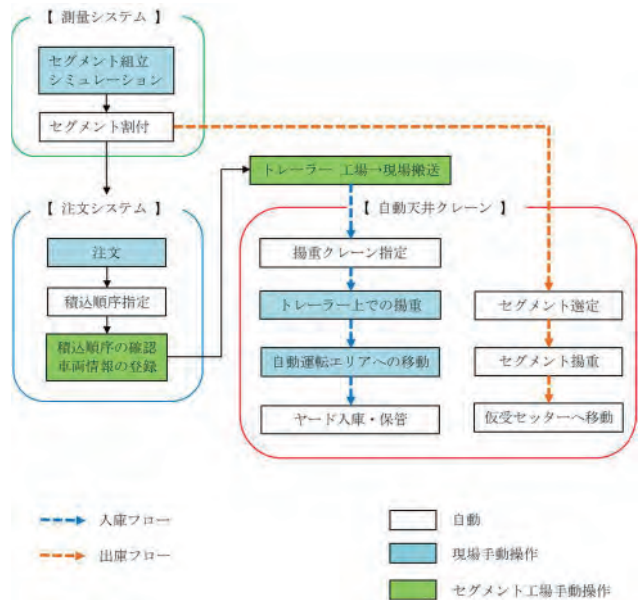


図-11 管理システム構成

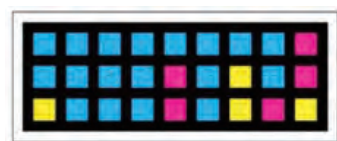


図-12 カラーコード

### 3.5 安全対策

人が自動運転中の天井クレーンに巻き込まれる等の事故を防止するために、自動運転エリアと手動運転エリアの境界には立入禁止柵を設けた。メンテナンス時等は自動運転エリアに人が入るため立入禁止柵の各所に開閉扉を設けたが、自動運転時の誤侵入を防ぐために扉には鍵付きの開閉検知センサーを設置した(図-13)。自動運転中に扉が開いた場合、天井クレーンの自動運転を停止する。さらに、自動運転エリアへの立入者は必ず開閉センサーの鍵を抜き、所有したまま自動運転エリアへ入る運用とすることで、立入者が自動運転エリアから退出するまでクレーンの自動運転を再開できないようにして安全性を高めた。

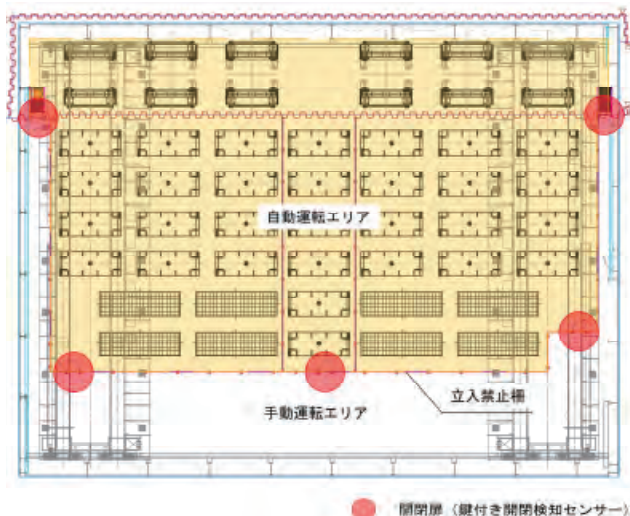


図-13 立入禁止柵及び開閉センサー付扉配置図

## 4. 運用実績

### 4.1 生産性向上

#### (1) 省人化と属人化の低減

自動天井クレーン導入の結果、セグメントストックヤード全体作業において人が行うのはトレーラーからセグメントを荷取りするのみであり、2人の作業員で行うことができた。自動天井クレーン未導入の場合、2台の天井クレーンにそれぞれ2人、仮受セッター部に2人、合計6人の作業員が必要であったと想定され、省人化による生産性向上を実現した。

また、入庫場所や出庫セグメント選定などの作業にかかる思考時間削減による労働時間短縮、専門知識や高度な操作技術を持たない者にも操作を担当させることができる属人化低減という部分でも生産性向上に大きく寄与している。

#### (2) 手戻りによるロスの削減

坑内に間違ったセグメントが運ばれてしまった場合、運搬したセグメントの入替が必要となり、その作業の間シールド掘進が停止する。それに伴い、掘進作業にかかわる人員の手待ちや材料・車両のキャンセルといったロスが発生し、本現場のよう

に規模が大きくなればその被害は甚大である。

自動天井クレーンによる出庫セグメント選定機能により、その手戻りを発生させることなく運用できている。出庫セグメント搬送ミスによる現場全体のロスを削減することができた。

### 4.2 品質確保

±50mm以内という正確な位置決め精度を確保しつつ、各種センサーによる誤動作防止・人による誤操作防止が可能な自動搬送を実現し、これまでの運用の中でセグメントに割れや欠けといった損傷を発生させていない。品質確保の面においても大きく貢献できる設備を構築することができた。

### 4.3 サイクルタイム

入出庫サイクルタイムの実績を表-5に示す。

トンネル先端部でのセグメント1リングの組立時間は45minであり、セグメントストックヤードにおいても、45min/リング以内で入出庫ができるように計画をした。運用においても、計画を上回る入出庫時間を達成し、サイクルタイムについても問題ない設備とすることができた。

表-5 入出庫サイクルタイム実績

	計画	実績
1リング入庫時間 (インバート含む)	45min	40min
1リング出庫時間 (インバート含む)	31min	30min

### 4.4 安全性向上

自動運転作業においては、天井クレーン(機械)及びセグメント・インバート(吊荷)と人が完全に分離されているため人災の可能性が無く、安全性向上にも役立っている。

## 5. 今後の課題

今回はトレーラーからの荷取り作業を手動運転としたが、近年の技術進歩は著しく、AIによる画像認識技術を用いてトレーラー上のセグメント位置を認識する等により、完全自動化及びより高度な管理システムの構築が可能であると考えられる。

## 6. おわりに

シールド工事のセグメント入出庫作業においては初事例となる天井クレーンを使用した自動搬送を導入し、現場の生産性・安全性を向上し、品質確保にもつながる設備であることを実証できた。今回開発した自動天井クレーンは異なる幅・形状のセグメントにも対応可能であり、同種工事への適用も可能であると考えられる。

今後も少子高齢化による人材不足問題に対応すべく、建設現場作業のさらなる効率化に取り組んでいく所存である。