

4. ラック&ピニオン駆動モノレール式 非円形断面シールドトンネル用セグメント組立装置の開発

株式会社大林組

○曾根 大輔

株式会社大林組

久田 英貴

三菱重工メカトロシステムズ株式会社

熊尾 義光

三菱重工メカトロシステムズ株式会社

杉山 雅彦

1. はじめに

近年、近接する既設インフラや地下構造物への影響を極力少なくした上で、都市部にシールドトンネルを構築する需要が増している。限られた空間にトンネルを構築するため、また、掘削土量低減のため、所要断面形状に近い矩形や楕円形のような非円形断面シールドトンネルへの要望が高まっている。しかしながら、円形セグメントにくらべ桁高が大きくなり、コスト面で不利な矩形セグメントは実施例が少なかった。今回、新たにセグメントの各辺にアーチ構造を付けることと分割部を隅部よりずらすことにより桁高を減らし、コストを抑えた複合アーチ断面セグメントを開発した。さらなるコストダウンのために分割数を削減した結果、弧長が長く質量が最大9.4tとなった。そのため、実用化されている既存の矩形用セグメント組立装置では、その適用が困難となった。そこで今回、掘削断面形状にほぼ相似な形状のモノレール上を走行するタイプの新型セグメント組立装置を開発した。2車線道路トンネルを想定し、実物大の矩形セグメントを用いた実証実験を行い、組立装置の有用性を確認した結果について報告する。

2. セグメント組立装置の要求仕様

今回、2車線道路トンネル用セグメントの組立を想定し、組立装置に求められる要求仕様を検討した。周方向に隣り合うピース間を繋ぐコッターとトンネル軸方向に隣り合うリング間を繋ぐピンブッシュを挿入する締結方法を、セグメント組立作業時間短縮と品質確保のために採用した。そのため、従来のボルトナットにより接合するセグメント組立装置に求められるよりも、高精度の位置決めを行う必要がある。図-1にセグメント構造、図-2に継手構造を示す。また、矩形断面セグメントの特徴として、隅部ピースはL形状となる。この条件下で、所定位置に組み立てるにあたり、円形断面とは違う解決すべき課題を抽出した。第一に、既設セグメントとの位置合わせを旋回動作で

行える円形セグメントと異なり、レール上を組立装置が走行するとその位置によって走行レールの曲率が変わる。そのため、複数の動作を組み合わせ位置決めをする必要がある。第二に、上半のセグメントを組立位置まで移動させる時には、既設セグメントと排土設備との間を通過させる必要がある。すなわち、セグメントの組立が進むにつれて、セグメントの走行通過可能空間が狭くなる。そのため、単純な走行動作だけでは既設セグメントを回避できない。これらの課題を解決しなければ、セグメント組立時間が増大し、最悪は組立不可能となる。第三に、今後より多くの工事に適用するために、排土設備空間を広くすることで、シールド掘削機内に設置する排土設備選定の自由度を広げることが必要となる。

これらの課題を解決するために、①セグメントを把持した状態で組立装置が円滑に作動可能であること。②所定の速度やストロークが確保され様々な姿勢で制御できること。③セグメントを把持した際に、狭隘部を安全に走行通過できるような操作性が確保されていること。④周方向の走行位置決め精度確保ができることとした。第三の課題を解決するために⑤排土設備空間を最大化することとした。

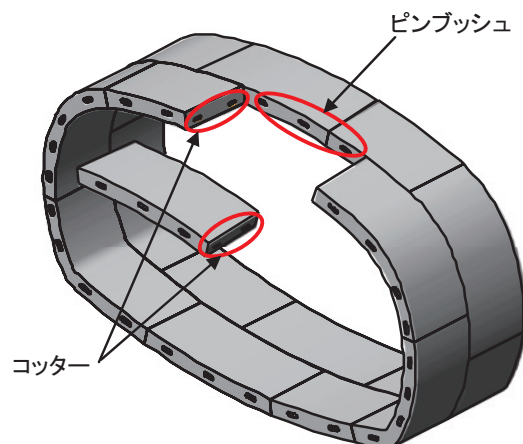


図-1 矩形セグメント構造

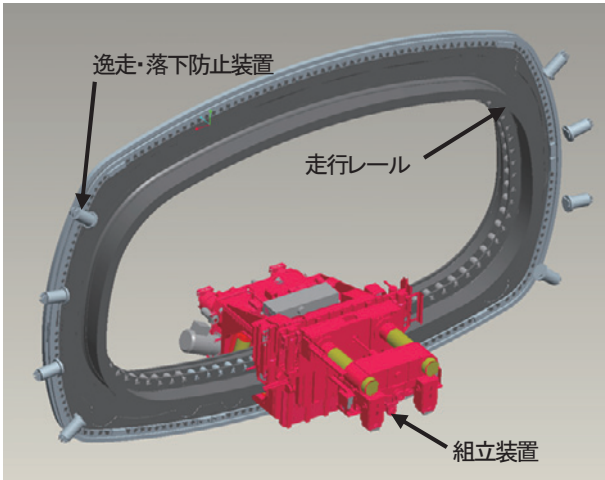


図-3 セグメント組立装置構成

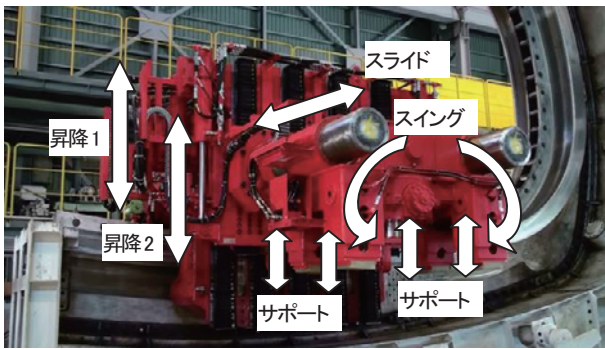


図-4 セグメント組立動作

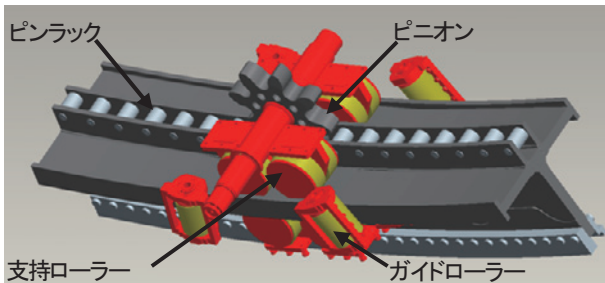


図-5 駆動部詳細

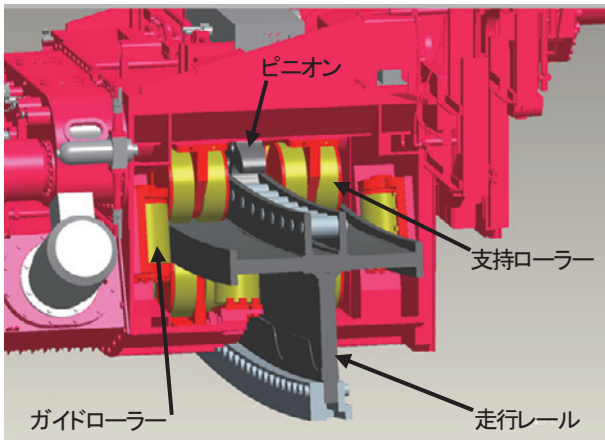


図-6 組立装置切断面

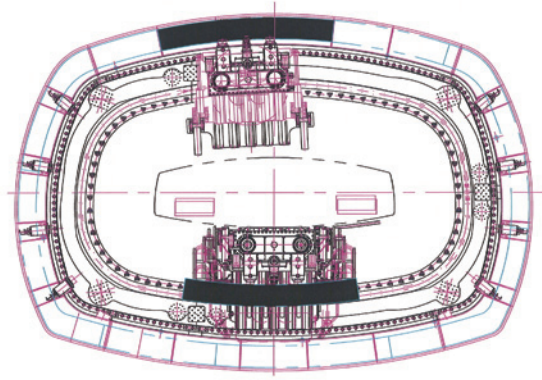
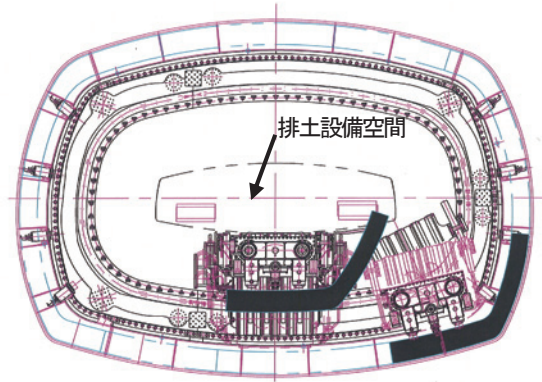


図-7 モノレール式による組立状況

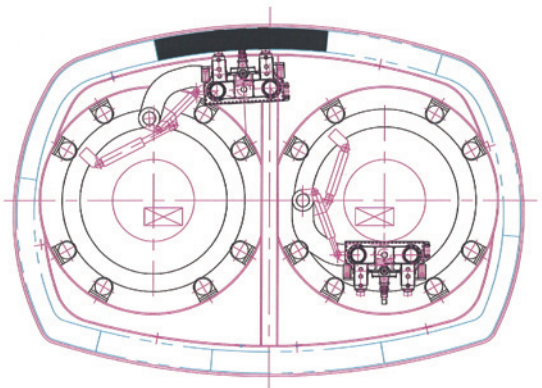
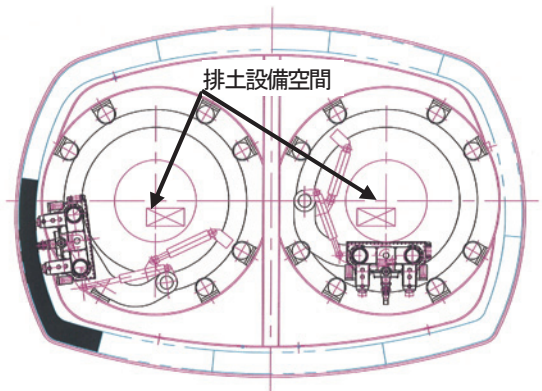


図-8 リングギア・片アーム式によるセグメント組立状況

表-1 既存技術との比較

		ラック&ピニオン駆動 モノレール式組立装置	リングギア・片アーム式組立装置×2台
組立装置 構造概要		シールド機の外形に相似な走行用モノレールを設け、油圧モーターで駆動する走行、昇降、スイング、スライド、サポートおよび把持装置から構成される。 排土設備空間最大化のため昇降装置は2段式とし、2つの昇降機構の間に把持装置を回転させるスイング機構を装備する。 パワーユニットも本体に装備し、電源のみケーブルにより供給する。	円形シールド機と同様の円形リング式セグメント組立装置を2台左右に設け、装置全体を旋回する。スライド装置、把持装置も円形シールド機と同様に装備する。昇降機構は、リンク式のアームを揺動させて行う。セグメント組立角度に対応するため把持部にスイング機構を装備する。
特徴	操作性	走行、昇降の移動軸がセグメントの法線方向と一致するため、位置決め操作は比較的容易である。	旋回、アームの昇降移動軸がセグメントの法線方向と一致しないため、操作は複雑となり位置決めが困難となる。
	安全性	セグメントを把持する機構がセグメントの法線方向と一致するため、セグメントの安定性が良い。 走行装置の落下防止対策として、油圧ブレーキと油圧ジャッキ式の2重対策を装備。	セグメントを把持する機構が片持ちとなるため、セグメントの安定性が劣る。 旋回ブレーキ機構は、一般的な円形用と同様である。組立装置の落下防止機構を別途装備することが難しい。
	適用範囲	レールを設置できる寸法に限り、断面形状に依らず適用可能。	縦と横の比が大きき形状には不向き。 縦長な断面には適用が困難。
	占有空間	装置の占有空間は小さい。 排土設備空間を中心部に大きく確保。	装置の占有空間が大きい。 排土設備空間が小さく、左右に分離。
	設計自由度	組立装置レールがシールド機リングガーター部内周にあり、シールド機内設備（例えば、排土設備）との干渉が少ない。	シールド機内設備用の空間が左右に分割されるため、シールド機内設備の設計自由度は少ない。
	転用	レールは目的の形状に応じて製作する必要があるが、走行組立装置は、断面形状によらず転用が可能である。	リングギアはシールド機の形状に左右されるため、また、それに取り付くアーム式組立装置も転用できる許容範囲が狭い。
	費用	組立装置本体の金額はリングギア・片アーム式と比較すると高い。 転用ができるため、LCC（ライフサイクルコスト）は低い。	構造は既存技術の応用であるため、1台当たりの費用は低いが2台必要となる。 一度の工事で処分されるため、LCCは高い。
	セグメント 設計	組立装置がシールド機リングガーター部内周全ての範囲で可動できるため、セグメント設計の自由度が増す。	組立装置は円周運動とアームの旋回運動のみであるため、機械の力学的な制約がセグメント設計に影響を与える。

6. 安全装置

要求仕様だけではなく、セグメント組立装置が安全に作動可能なこと、さらに装置周辺の作業員に対する安全性の確保も重要となる。例え

ば、供給電力の停電時や油圧装置等の機械的な故障で非常停止すること、特にセグメント組立装置が上昇中、または下降中において発生した場合、万一落下することが考えられる。そのような際に、

油圧が供給されないとブレーキがかかる油圧ブレーキで対応している。さらに、安全性および信頼性の確保とセグメント組立装置の落下防止のために、逸走・落下防止装置をシールド機の左右 8 箇所 に装備した。逸走・落下防止装置は周方向に所定間隔で設けており、組立装置本体の走行位置に応じて、自動的に出し入れされるシステムとなっており、組立装置下部に常に逸走・落下防止装置が突出するように制御されている。(図-3)

逸走・落下防止装置は伸びた状態であると組立装置と干渉するので、組立装置の走行方向との関連で前方の逸走・落下防止装置が縮限でないと組立装置の走行不可とするインターロックを設定した。また、非円形断面セグメントを安全に組み立てるために、逸走・落下防止装置だけではなく、以下の安全対策を実施した。

- ① セグメント形状によって排土設備空間への干渉状態が異なるため、セグメント把持を行う前に操作盤でセグメントの選択を行うようにした。
- ② 組立装置の作業位置や姿勢によっては、機内設備と接触する可能性がある。そのため、エンコーダーを用いて組立装置の位置とストローク計により姿勢を演算することで、誤操作による機械やセグメントへの破損を防ぐためのインターロックを設定した。
- ③ 組立装置操作を誤らないように高速での動作には同時に二つのボタンを押す必要があるようにインターロックを設定した。

①から③の対策により、オペレーターが不適切な動作を行うと強制的に低速操作しかできないようにした。また、インターロックが作動した時に、不適切な動作であることを認識できるように回転灯と警報音で知らせるようにした。ただし、操作盤上には適切な動作へと導くためのコメントが表示されるようになっている。

7. 実証実験

セグメント組立中の走行旋回時に、モノレールやセグメント組立装置の可動部に破損が発生しないように十分な剛性、円滑な作動性があること、組立時間を確認する必要がある。そこで、実機規模の試験装置を製作し、8分の3断面に相当するセグメントの組立試験を実施した。走行レールを組み込んだシールド機のテール部と既設セグメントを模した鋼製実証実験架台を製作した。この模擬テール内で組立実験を行った。写真-1に実証実験架台を示す。

(1) 実験項目

- ・無負荷作動確認

- ・セグメント把持状態での負荷作動確認
- ・セグメント把持状態での複合作動確認
- ・セグメント組立性能の確認
- ・セグメント位置決め精度と組立性の確認
- ・セグメント継手の締結状況
- ・セグメントシールの組立性への影響
- ・安全装置作動確認
- ・排土設備（ベルトコンベア）との干渉確認

(2) 実験方法

無負荷作動の確認を、走行、昇降、スイング、スライドおよびサポートジャッキの作動時間を計測することで、設計理論値との比較をした。

矩形セグメントの組立性の確認として、8つのピースに分割されるセグメントのうち、上部の2つを除く6つのピースに対して組立を行い、位置決め精度確認をした。位置決めに必要な時間を計測し、設計理論値と比較することで組立性の検証を行った。また、周方向ピース間には防水用シールを貼付け、セグメント組立装置が、シールをつぶすのに必要な押付力を備えているかを検証した。さらに、インバート部および側部ピースを組み立てた後、頂部ピースが円滑に通過可能であることも合わせて検証した。

安全装置作動確認は、セグメント組立装置の走行方向および位置に従って、あらかじめ定めたインターロックが機能しているかを確認した。また、排土設備空間またはシールドジャッキスプレッダーとの干渉を回避するように定めた昇降ジャッキとスイングジャッキのインターロックが適切であるかを確認した。

模擬的な排土設備として、ベルトコンベアフレームを実証実験架台の有効空間内に設置し、組立装置が走行する際のベルトコンベアフレームと組立装置とのクリアランスを確認した。

8. 実験結果および考察

L字型セグメント把持状況を写真-2に示す。このようにセグメント組立装置には、セグメント重心と把持位置が大きくずれた構造物を把持した状態での動作が求められている。

無負荷作動性能の確認により得られた設計理論値と実測値との比較の代表値として、走行に要する時間を表-2に示す。セグメント組立作業の走行に要する時間は理論値と比較すると10%以内で収まっている。図-2に示した周方向に隣り合うピース間を繋ぐコッターとトンネル軸方向に隣り合うリング間を繋ぐピンブッシュを挿入する際も、セグメントに損傷を与えることなく組み立てることができた。例えば、写真-2に示すL字型セグメントの平均組立時間は表-3の通りであった。作業時間は作業に対する熟練度が上がるに伴い短縮され、

8分の3相当断面のセグメント組立時間を2時間から40分へと向上することができた。測定値から算出した矩形断面全体の組立時間は85分程度となった。

表-2 設計理論値と実測値との比較

	速度 (mm/sec)	測定 スパン	時間 (秒)	
	理論値	(mm)	理論値	実測値
高速	142	5300	37	42
中速	80	2000	25	24
低速	40	1000	25	24



写真-1 実証実験架台



写真-2 L字型セグメント把持状況

表-3 L字型セグメント平均組立時間

把持	下降 ピン挿入 サポート伸び 上昇	140 秒
走行	粗位置決め	280 秒
微調整	締結まで	560 秒



写真-3 セグメント組立状況

8. まとめ

掘削断面形状に合ったレールさえ製作すれば、比較的自由的な断面に適用できる非円形断面用トンネルセグメント組立装置を開発した。2車線道路トンネルを想定し、実物大の矩形セグメントを用いた実証実験を実施した。組立装置の走行、昇降、スイング、スライド及びサポートジャッキの操作の安全性、信頼性、組立性を確認することができた。

ラック&ピニオン駆動モノレール式非円形断面シールドトンネル用セグメント組立装置を適用することにより、縦方向に長い矩形断面や楕円形断面に対しても、適用可能性が広がった。これにより、都市部の限定された空間に非円形断面シールドトンネル構築の可能性を広げることができる。さらに、非円形断面シールドトンネルは円形断面と比較すると、必要空間に対して掘削断面を小さくすることができる。そのため、掘削残土の削減や掘削工程の短縮など環境負荷の軽減に貢献できる。本セグメント組立装置本体は転用が可能であり、LCC（ライフサイクルコスト）を下げることも可能となった。

今後、実工事への採用とそのフィードバックを得ることで本組立装置の改善を図りたい。

最後に、本開発を進めるに当たって、多大な協力をいただいた三菱重工メカトロシステムズ株式会社および株式会社大林組の非円形断面施工設備開発スタッフに謝意を表す。

参考文献

- 1) 特願 2010-4617 トンネル掘削機のセグメント組立装置
- 2) 特願 2010-4625 トンネル掘削機のセグメント組立装置