

5. ハニカムセグメント自動組立装置の開発

㈱奥村組：*畑山 栄一
石川島播磨重工業㈱：北山 仁志

1. はじめに

六角形のセグメント（以下、ハニカムセグメントと呼ぶ）を対象にした自動組立装置を開発した。同セグメントの特徴を活かすことで、製作コストの低減を図るとともに、従来の人手による組立よりも大幅な時間短縮を可能にした。

以下に自動組立装置の概要と工場での性能確認実験について述べる。

2. ハニカムセグメント

ハニカムセグメントは奥村組が「シールドトンネルの長距離・急速化施工法の開発」の中で実用化したセグメントで、自動化を図る上で以下の利点を備えている（図-1参照）。

- ①全ピースが同一形状で、組立位置が同じであることから、セグメントの位置決め制御手順が矩形セグメントに比べて簡単になる。
- ②凹凸状に組み立てた既設セグメントの斜辺部が位置決めガイドになる。
- ③セグメントに設けた凹凸のプラグ・ソケットが位置決め精度向上につながる。
- ④継手ボルトの本数が少なく、事前にセグメントに挿入しているので、ボルト締結機構の簡素化が図れる。

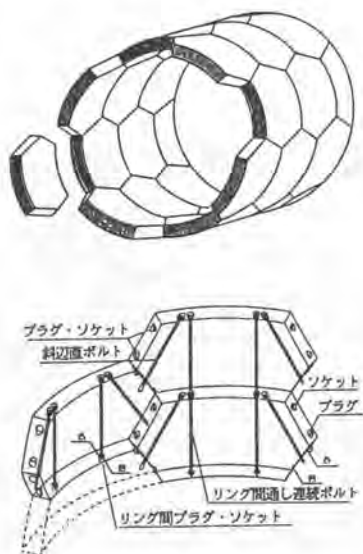


図-1 ハニカムセグメント

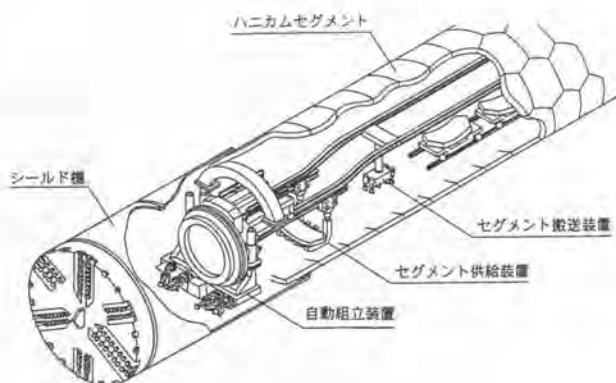


図-2 セグメント自動組立システムの概要

3. 開発目標

開発に当たって以下の目標を設定した。

- ①従来の人手による組立よりも時間短縮を図る。
- ②装置の機構を簡素化し、コストダウンを図る。
- ③装置を小型化し、中小口径シールド機への適用を図る。
- ④急速化施工を目的とする掘進とセグメント組立の同時施工用シールド機に適した構造とする。

4. 自動組立装置の概要

4.1 基本構造

セグメント自動組立システムの概要を図-2、自動組立装置（エレクタ）の基本構造を図-3に示す。セグメントの位置決めには旋回、伸縮（トンネル半径方向）、摺動（トンネル軸方向）、ローリング、ピッチング、ヨーイングの6自由度の動作が必要になる。今までのエレクタは自由度ごとに個別に動く機構を備えていたが、今回は摺動動作とヨーイング動作、およびローリング動作とピッチング動作をそれぞれ同じ機構で行えるようにした。摺動ジャッキの2本のストロークを同じにすると摺動動作ができ、ストロークに差をつけるとヨーイング動作ができる。微調ジャッキの3本のストロークを同じにすると把持したセグメントの姿勢は中立位置を保ち、前後・左右の微調ジャッキのストロークに差をつけると把持ピンを中心にピッチングとローリングの動作ができる。エレクタには高い精度の姿勢制御性能が要求されることから、各ジャッキにストローク計と圧力計を取り付け、サーボ弁を用いてジャッキのストロークと圧力を制御できようとした。

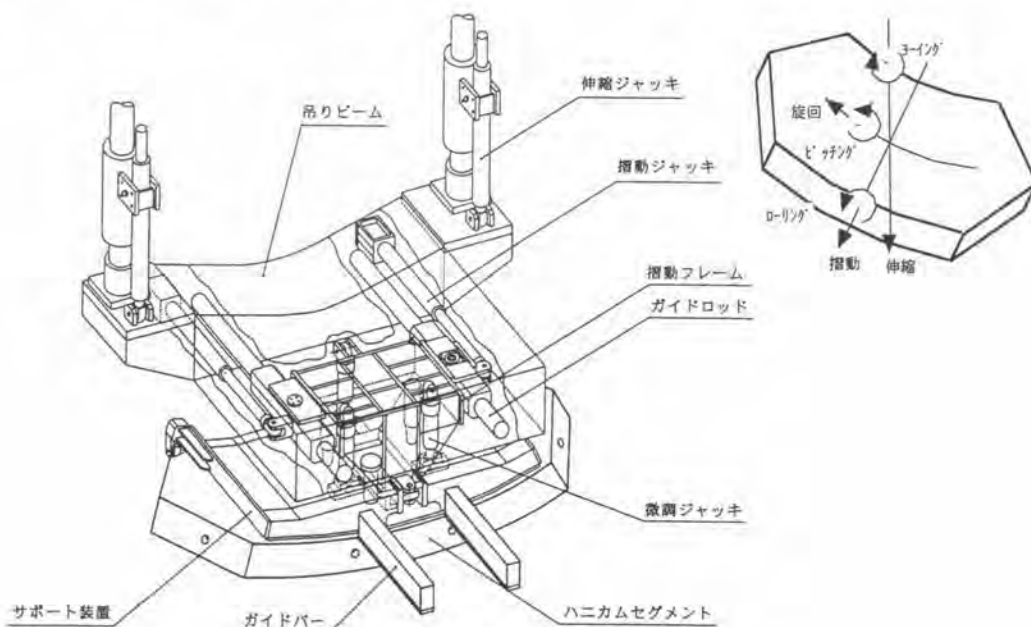


図-3 エレクタの基本構造

4.2 位置決め方法

従来の自動組立装置の位置決め方法は、エレクタに取り付けたセンサで既設セグメントとの相対距離を計測し、エレクタの姿勢を制御して位置決めを行うのが一般的である。今回開発した位置決め方法は、位置計測用のセンサをなくし、エレクタに取り付けた2本のガイドバーと既設セグメントの斜辺のガイドを利用し、新しく組み立てるセグメントを既設セグメントに沿わせて力制御ではめ込む方法である。はめ込む時に生じる反力をエレクタの各ジャッキで計測し、所定の反力になるようにジャッキのストロークを調整して位置決めする。

従来のセンサを用いる方法に比べて、センシング機構がなくなり装置を簡素化できる、連続した動きにより組立時間の短縮が図れる、センサに起因した不具合がなくなるなどの利点がある。

以下にセグメントの組立手順を示す（図-4参照）。

- ①粗位置決め終了後、伸縮ジャッキを伸ばしてエレクタに取り付けたガイドバーを既設セグメントの内面に押し当てる。
- ②組み立てるセグメントと既設セグメントの内面が同一になるようにガイドバーの傾きを微調ジャッキで制御し、ピッチングとローリングを調整する。
- ③ガイドバーが既設セグメントから離れないよう適度な力で押し当てながら、摺動ジャッキで組み立てるセグメントを既設セグメントに挿入する。
- ④挿入時に生じる反力を2本の摺動ジャッキで計測し、既設セグメントにスムーズにはまり込むように旋回位置とヨーイング方向を調整する。
- ⑤摺動ジャッキによる位置決め終了後、シールドジャッキを押し付け、ボルト締結を行い、1ピースの組み立てを終了する。

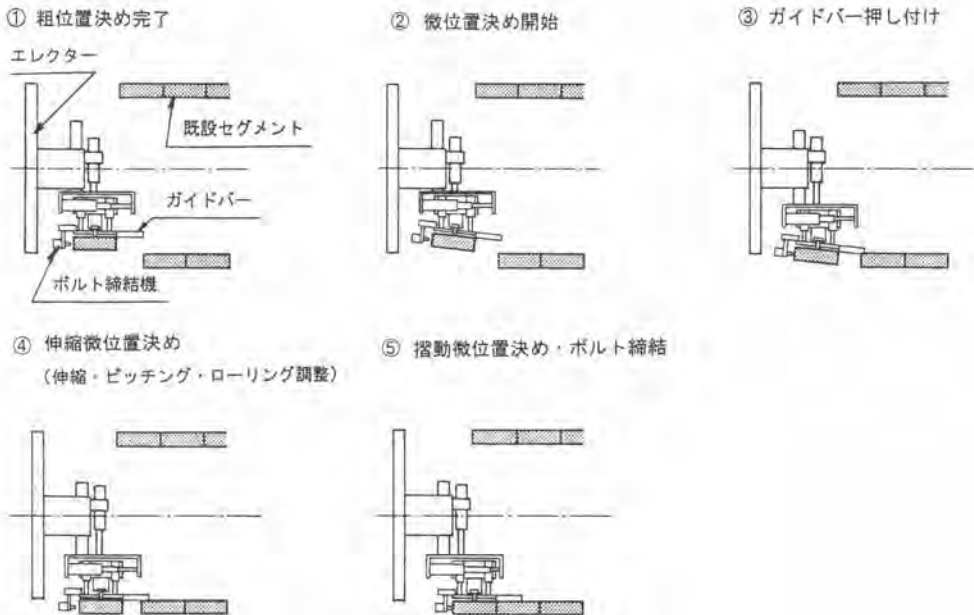


図-4 セグメント組立手順

4.3 ボルト締結機

ボルト締結機を図-5に示す。エレクタの切羽側にスライド機構を有したボルト締結機を取り付け、位置決め終了後、ボルト締結機をセグメント側に移動してボルトを締結する。

従来の矩形セグメントはボルトの本数が多く、トンネル内面側からボルトの挿入・締結を行うため、位置計測用のセンサとボルト締結機が干渉して機構が複雑になる。このため、トンネル半径方向の寸法を短くするのに限界があった。ハニカムセグメントは締結ボルトの本数が少く、トンネル軸方向からボルトを締結するので、エレクタの半径方向の機器の配置がコンパクトになり、セグメント内径3mクラスまでの適用が可能になった。

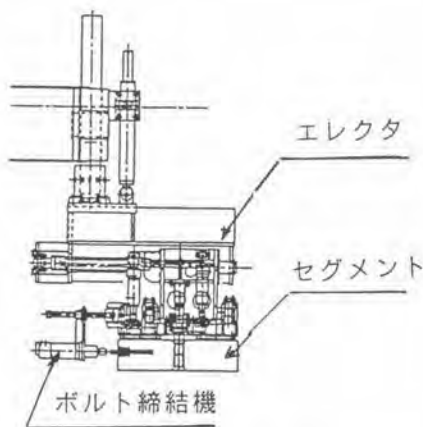


図-5 ボルト締結機

5. 性能確認実験

5.1 実験目的

エレクタの性能を確認するため、工場で大規模の組立実験を行った。なお、位置決めについては、センサを用いた方法も同時に行い、性能を比較した。

5.2 実験装置

実験装置を写真-1に示す。エレクタを取り付けた実験架台にハニカムセグメント（外径：5300mm、幅1000mm、6分割）を1.5リング分を組み付けた。実験時のセグメントの組立位置は架台に組み立てた既設セグメントの下側と斜め上方とし、下側の組立位置には、シールドジャッキに相当する油圧ジャッキを1台設置した。エレクタの仕様を表-1に示す。

表-1 エレクタの仕様



写真-1 実験装置

形式	リングギア式	
最大取扱重量	2 ton	
旋回速度	2 rpm	
旋回角度	±200 度	
旋回微調ジャッキ	8.3 t × 200 st × 1 本	
伸縮ジャッキ	6.3 t × 575 st × 2 本	
摺動ジャッキ	4.1 t × 490 st × 2 本	
微調ジャッキ	4.1 t × 70 st × 3 本	
ボルト	適用ボルト径 M24	
締結機	リング間締結機	2 台
	斜辺間締結機	2 台
	締結最大トルク	74Kgf・m

5.3 実験方法

セグメントをエレクタで把持した後、手動運転で所定の組立位置の近くまで旋回する。自動運転で、粗位置決め、微位置決め、ボルト締結、把持解除を行い、1回の実験を終了する（写真-2参照）。

5.4 実験条件

実験条件を以下に示す。セグメントの初期姿勢、組立位置、締結順序の条件を組み合わせる実験した。

a. セグメント初期姿勢

- ①各自由度中立位置の場合
- ②ローリング角 0.6度ずらした場合
- ③ピッチング角 0.6度 "
- ④ヨーイング角 0.6度 "
- ⑤旋回角 0.6度 "
- ⑥上記を複合した場合

b. 組立位置

- ①下側（天端から 180度）
- ②斜め上方（天端から 60度）

c. ボルト締結順序

- ①リング間ボルトから締結
- ②斜辺間ボルトから締結
- ③リング間、斜辺間を同時に締結

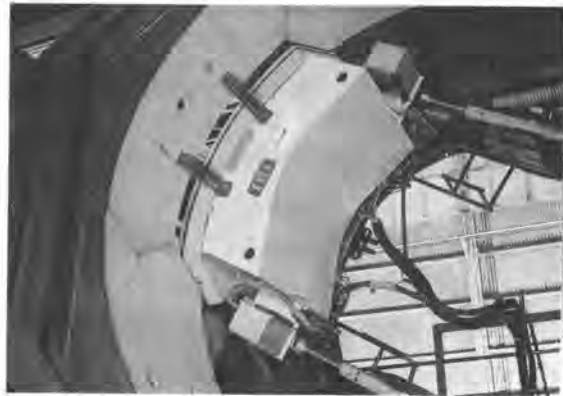


写真-2 組立実験状況

5.5 調査項目

1ピース組立ごとに、組立時間、セグメントの組立精度（既設セグメントとの目開きと段差）、ボルトの締結状態を調べた。

5.6 実験結果と考察

a. 組立時間

組立時間を表-2に示す。セグメント1ピースの測定結果をもとに1リングの組立時間を算出し、従来の手動エレクタを用いた手組の時間と比較した。1リングの組立時間は、従来の手組による方法が約40分であるのに対し、センサを用いた方法が25分、ガイド機構を用いた方法が20分であった。センシングを必要とせず、連続組立が可能なガイド機構を用いた位置決め方法が、最も組立時間が短く、従来の手組による方法に比べて大幅な時間短縮が可能であることが分かった。

表-2 組立時間

	1ピース平均組立時間（実験値）	6ピースの組立時間	1リング組立時間（粗位置決めの含）
人手による組立（実績値）	-	-	約40分
センサを用いた自動組立	2分20秒	14分	25分
ガイド機構を用いた自動組立	1分50秒	11分	20分

b. 組立精度

組立位置が下側のセグメント段差の測定結果を図-6に示す。位置決め方法に関係なく、シールドジャッキで押し付けてボルト締結した後の段差は $\pm 1\text{mm}$ 以内に納まり、実用上十分満足できる結果を得た。また、セグメントの目開きも 1mm 以内に納まった。

斜め上方の組立位置の場合はシールドジャッキによる押し付けができないため、摺動ジャッキで押し付けた時の位置決め精度を測定した。測定の結果、所定の精度内であることを確認した。

c. ボルト締結機の性能

ボルトの外径に対してセグメントのボルト挿入穴の内径が大きく、締結機とボルトに約 3mm の芯ずれが生じたが、確実にボルトを締結することができた。締結順序の違いによる締めつけトルクの差はみられず、4本同時に締結することが組立時間の短縮につながる事が分かった。

6. まとめ

開発の結果をまとめると以下のようなものである。

- ①ガイド機構を用いた位置決め方法の開発で、従来の手組に比べて組立時間を約半分に短縮できる。
- ②装置の機構を簡素化することで従来の矩形セグメントの自動組立装置に比べて製作費を30%低減できる。
- ③軸挿入式のボルト締結機を用いることでセグメント内径 3m クラスへの適用が可能である。
- ④セグメント挿入およびボルト締結がすべてトンネル軸方向のため、掘進とセグメント組立の同時施工に適している。

7. あとがき

ハニカムセグメントの特徴を活かしたエレクタを試作し、実大規模の組立実験によって所期の性能を満たすことが確認でき、実用化に目処がついた。

本開発は、前述したようにシールド工法の急速化施工を目的に取り組んでいるものである。今後は、自動組立装置の現場への適用を図るとともに、掘進とセグメント組立の同時施工法の実現に向けて開発を進めていきたい。

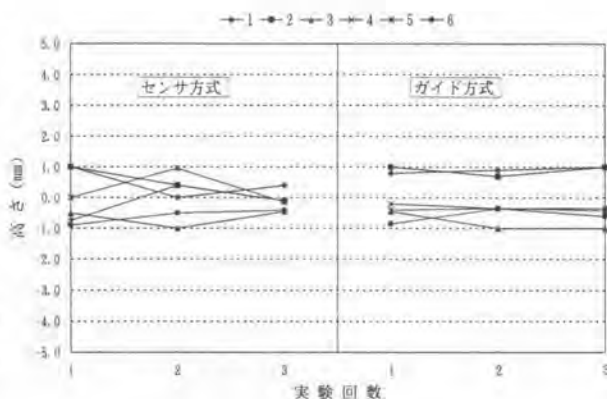
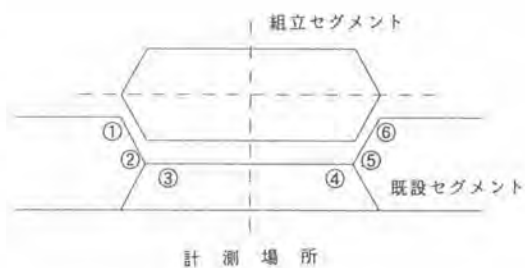


図-6 セグメント段差の測定結果