

セグメント自動組立システムの特長と実績

—東京湾横断道路川崎トンネル浮島南工事—

Features and Operation Achievements of Automatic Assembling Robot

—Trans-Tokyo Bay Highway Kawasaki Tunnel Ukishima South—

増田隆¹⁾・若月豊²⁾・岡崎雅好³⁾・鈴木俊夫⁴⁾・桑原紘一郎⁵⁾

Takashi MASUDA, Yutaka WAKATUKI, Masayoshi OKAZAKI, Toshio SUZUKI, Koichiro KUWAHARA

The project of Trans-Tokyo Bay Highway Kawasaki Tunnel Ukishima-South uses the world largest 14.14m diameter slurry shield machine with segment automatic assembling robot. This shield machine uses a segment assembling robot which carries out a series of segment assembly work automatically. When a segment is transported to a specified position by a carriage, segment assembly work, from lifting, transportation, storing and sending out, to nut supply, assembly and bolt tightening is carried out. This report deals with the features and operation achievements of this automatic assembling robot.

Key word: Shield machine, segment automatic assembling robot.

1. はじめに

東京湾横断道路（平成9年2月より東京湾アクアラインと命名）川崎トンネル浮島南工事は1994年9月4日の発進から19ヶ月後の1996年3月29日に1899リング2853mの掘進をもって地中接合地点に到達した。本工事は世界最大級の超大断面φ14.14m泥水式シールドによる海底下高水圧、長距離掘進、超軟弱地盤の出現、750mにおよぶ硬質の斜路部人工地盤の掘削といった厳しい条件下の施工である。また超大断面であることから、セグメント組立に自動組立ロボットが採用された。当時本格的なセグメント自動組立ロボットの施工報告¹⁾は1988年セグメント外径φ7.6m泥水式シールド（建設省神奈川通共同溝）の1例である。その施工結果は、セグメントの組立品質（目違い、欠け、割れ、真円度）の良さ、短時間組立の可能性を示していた。セグメント組立時間は施工のサイクルタイムに直接影響し、セグメント組立の高速化の効果は長距離化に伴ない大きくなる。本工事は設定されたセグメント組立時間110分を安定的に短縮する70分を達成し、自動化の有効性を示した。本稿はその概要を報告するものである。

2. セグメントの条件

セグメント自動組立ロボットは高い精度で既設のセグメントに合せて組み立てることを基本とするから、セ

-
- 1) 正会員 東京湾横断道路(株)工務部工事課長
 - 2) 東京湾横断道路(株)川崎事務所工事課長
 - 3) 正会員 清水建設・佐藤工業・竹中土木建設共同企業体所長
 - 4) 石川島播磨重工業(株)油機シールド事業部設計部課長
 - 5) 石川島播磨重工業(株)油機シールド事業部設計部

グメントの条件は自動化に大きな影響を与える。東京湾横断道路で採用されたセグメントを図1に示す。その特徴は

- ① 等分割セグメント：東京湾横断道路ではじめて採用された。セグメントはほぼ同じ大きさとなることからボルト締結器配置が共通化されロボットの構造が単純化され、自動化に対して極めて効果大きい。通常のエレクタに対してもピース間の継手位置が同一となることから単純化される。機械を製作する立場からは普及して欲しい分割方法である。
- ② 長ボルト：ボルト格納方法、ナットと座金の保持供給方法が課題であった。ボルト格納方法はOリングによるボルト保持によりセグメントに事前に格納することで解決し（図2）、ナットと座金の一体化は樹脂製の特殊リングにより対応した。
- ③ 製作精度：セグメントの製作精度は特に高い精度基準とすること（ $\pm 1\text{mm}$ 以下）を要求した。その他、把持金物4ヶ所の、位置決め基準用凹部、センシング溝、調芯ピン用三角錐形状の凹部（リング間4ヶ所、ピース間2ヶ所）等、自動組立に配慮されたセグメント設計となっている。

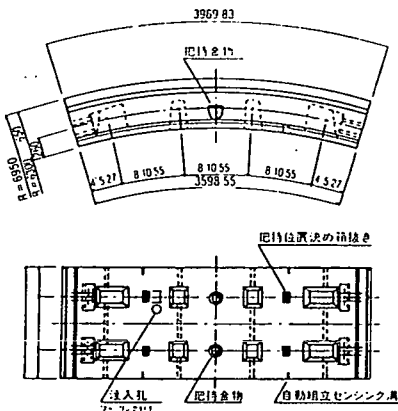


図-1 セグメント形状図（A型セグメント）

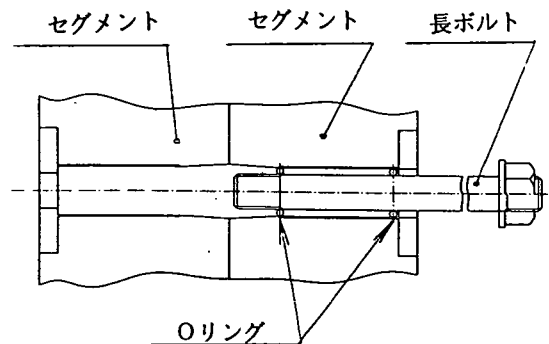


図-2 ボルト保持図

3. セグメント自動組立システム

施工は掘進、セグメント組立の繰返しであり、その単位は1リングである。自動化のシステムを組むに当って、この1リングを単位とし、セグメントの搬入、1リングストック、セグメントの1ピース毎の組立ロボットへの正確な供給、高速性能を有するロボット、ナットの供給から構成される。すなわち図3に示すように装置としては下記の構成である。なお各装置の詳細は文献2)を参照。

- ① セグメント自動搬送ホイス：セグメント台車により運搬されてきたセグメントを自動把持し、横行、旋回、巻上げ、巻下げを自動的に行なうホイスである。セグメント台車の位置を超長波距離センサーにより検知すると自動的に②の搬送装置に供給できる機能を有する。なお、セグメント台車の運行も自動化したことにより、セグメントの運搬から組み立てまでを一貫した自動化システムとした。
- ② セグメント搬送装置：1リング分11ピース搭載でき、自重移し替え方式により搭載したセグメント全体を1ピース分長移動できる搬送装置。その特徴は機械的に確実に供給装置にセグメントを供給できる。
- ③ セグメント供給装置：搬送装置から受け渡されたセグメントを機械的に正確に位置決めをし、セグメント自動組立ロボットにセグメントを供給する。セグメント自動組立ロボットは供給されるセグメントの位置が正確であることから、センシングの必要なく機械的に把持することが可能である。

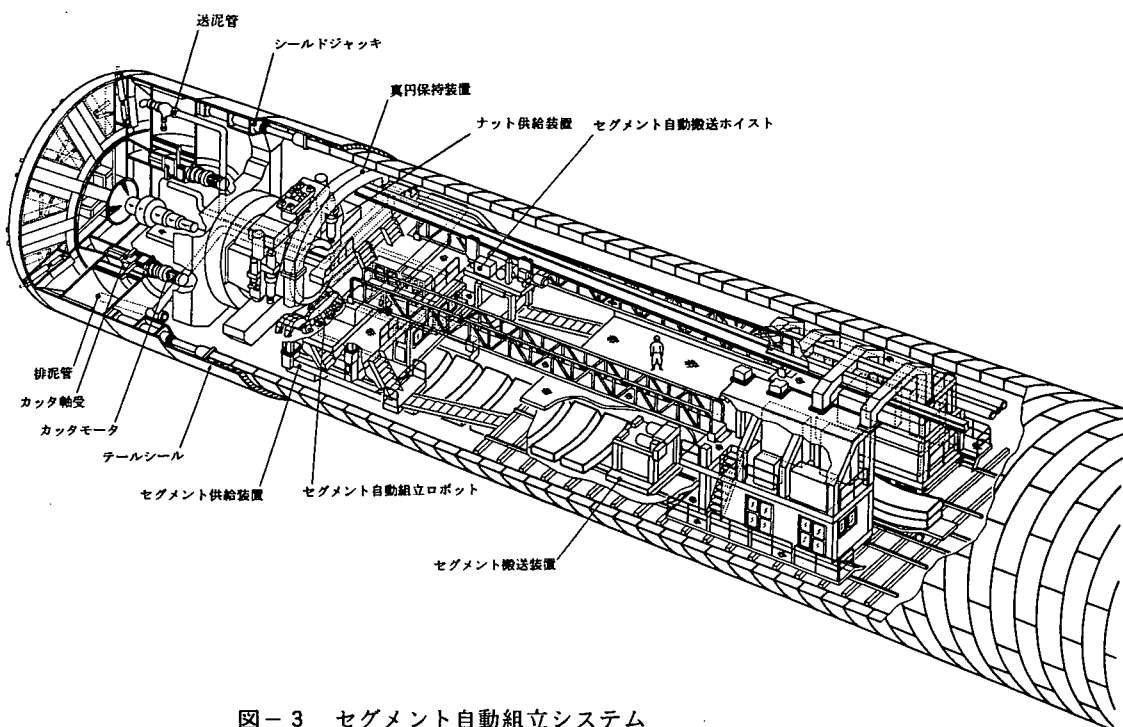


図-3 セグメント自動組立システム

- ④ セグメント自動組立ロボット：精密な位置決めはデジタルサーボシリンダによるX Y Z軸とその回転の6軸の自由度の位置決めである。超音波センサー、渦電流センサーと接触型のリニアポテンシオメーターを装備し既設セグメントに対する摺り制御を行なう。把持装置と各ボルト穴に対応したボルト締結器を装備している。(図-4)
- ⑤ ナット供給装置：ナット供給装置のセグメント組立ロボットへの搭載はボルト締結器の動きを複雑にし、配置等の問題点を発生させることから、締結器に対応したナット供給装置を後方デッキ上部にセグメントロボットと分離して設置した。この方式の利点はロボット本体に構造上の影響を与えないこと、ナットのストックは後方デッキ上で行えることにより人間がロボットに近づくことができなくなり安全上極めて有効であること、の2点である。

4. 高速化

(1) セグメント組立の基本サイクルと高速化対応

セグメント自動組立ロボットの基本的なサイクルは図-5に示すように、ナット供給、旋回、セグメント供給、位置決め、ボルト締結からなる。この間にシールドジャッキの押し、引き、とセグメント供給の事前準備が並行して入る。高速化はこの各要素の高速化の積み上げであり、下記手法を採用した。

- 1) ナット供給：ボルト締結器に対応するナット供給装置を設け、1度に供給する。
- 2) 旋回：旋回は往復で、1回転をするから、旋回速度は可能な限り時間短縮のため高速化した。その技術的前提は高速から微速に移る停止性能である。一般的に $\phi 10\text{m}$ クラスで0.5rpmが採用されていたが、ここでは1rpm以上を目標とした。
- 3) セグメント供給：セグメント供給装置に位置決め機能をもたせ、ロボットへの供給を機械的に行える方法とした。

- 4) 位置決め : 位置決めは、デジタルサーボシリンダーによる6軸制御と、センシングは非接触の渦電流センサー、超音波センサーおよび精密位置決めとして接触型のリニアポテンショメータを組合せた。
- 5) ボルト締結 : ボルトに対応する数のボルト締結器とボルト押し出し装置を装備しピース間締結、リング間締結と一度に締結した。

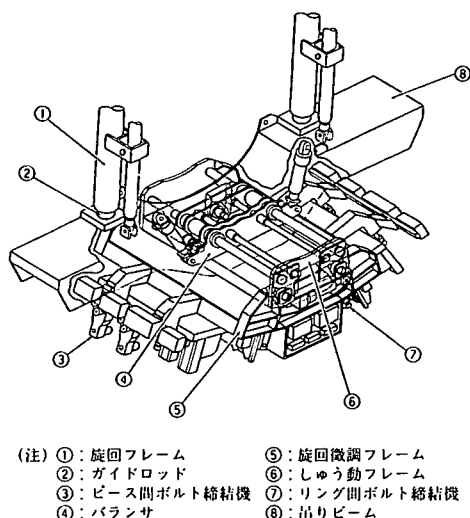


図4 セグメント自動組立ロボット

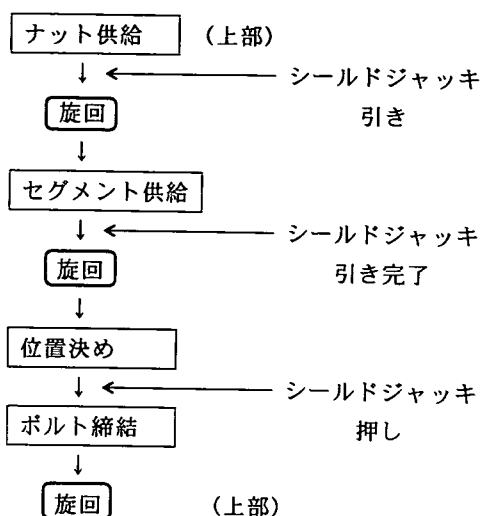
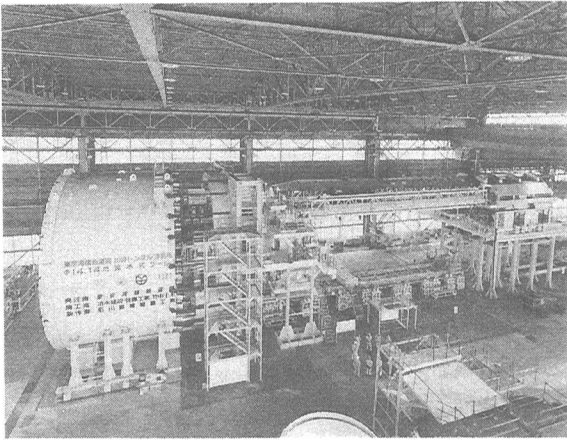


図-5 セグメント組立サイクル

以上がセグメント組立の基本サイクルであるが、これがセグメント1リング、11ピース分繰り返されて完了する。このサイクルがスムーズに動くためにはその前提はセグメント供給が事前に準備されていることである。このため、セグメント搬送装置は掘進時、セグメント組立時にもセグメントストックができるよう中央部で2分割し、それぞれ前送り後ろ送りができる機構とした。

(2) 調芯ピン

セグメント組立の高速化の前提は、セグメント組立ロボットの正確さ、安定性である。その基本は位置決めであり、その位置決めに影響を与える外的要因としてセグメントの製作精度を除くと、セグメントシールと組立変形である。セグメントシールは完全に押し潰されないと、ピース間が角変形(スキマ)をもつこととなる。ピース数が多くなると、その影響は大きい。また荷重によるセグメントの変形はセグメントが一樣なリングによる弾性変形であればその変形量は小さく組立への影響は小さい。しかしセグメントはボルト結合であるから、変形は継手部での角変形を生じても発生し、この影響は上述のセグメントシールと同じ影響を与える。これらの変形に対応するため、本工事ではセグメント各ピースにそれぞれ4ヶ所設けられたリング間の円錐形状の凹穴を利用し、金属製の調芯ピンを設けた。セグメントは千鳥に組み立てられるため、セグメントシールは完全に潰れ、弾性変形内の一樣変形でない調芯ピンは理論的にあわないこととなるため、真円が前提となる。調芯ピンはセン断力を伝達できるため、ボルト締結を十分に行うと既設セグメントの位置を正確に保持する効果をもたらす。本工事ではこの調芯ピンはセグメント組立に有効に作用したものとみられる。

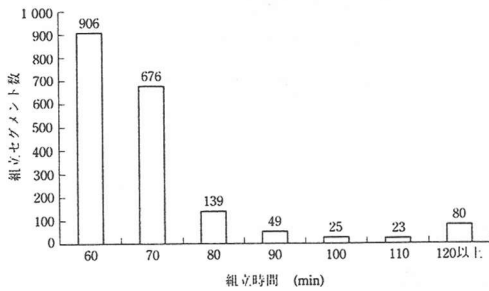


図－６ 工場組立試験

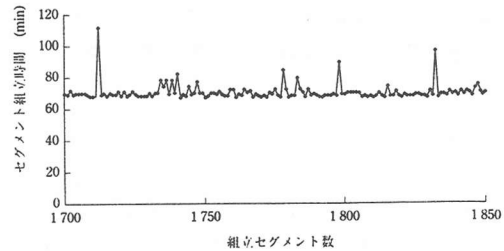
表－１ 工場セグメント自動組立時間

項目 ピース NO.	計算時間 (min)+(s)	組立時間 (min)+(s)		
		第1回	第2回	第3回
1	5:04	5:23	5:18	5:23
2	5:57	6:36	6:05	8:18
3	5:57	6:17	6:20	6:11
4	5:57	6:20	6:06	6:12
5	5:57	6:29	6:09	6:16
6	6:02	6:14	6:15	5:54
7	5:57	6:31	6:27	6:28
8	5:57	6:38	6:09	5:57
9	5:54	7:43	6:54	8:12
10	5:57	6:51	6:49	7:09
K	7:22	6:27	8:35	6:53
計	66:00	71:29	71:07	72:54

基準時間:110 min



図－７ セグメント組立時間(1)



図－８ セグメント組立時間(2)

5 施工実績

(1) 工場組立

工場組立試験はセグメント自動組立システムとして現地と同一状態に組み(図－６)，１リング連続組立を行った。その結果を表－１に示す。計算時間は各動作の時間に一定の効率を考慮して算出した。KセグメントおよびNo.6セグメントで計算値より早い時間を計測しているのも、計算精度(センシングは推定を含む)と効率の影響である。各ピースともほぼ６分前後で組み立て、目標とした70分をほぼ達成した結果となった。

(2) 現地稼働実績

現地の組立は、30リングまでがセグメント組立ロボット、供給装置および搬送装置の前半分を使い、セグメント搬入は手動ホイスを用いた。31リング以降はシステムとして完成させた。1899リングのうち可撓セグメントと到達時のスチールセグメント各１リングを除き、テーパセグメント、弾性ワッシャ区間を含め全リング自動組立ができた。その結果を図－７に示す、図－７は横軸を10分毎に区切り、その時間内で組み立てたリング数を示す。全リング数の83%が70分前後で組み立てている。最短は66分である。図－８に一定区間の組立時間を示す。組立時間の短縮は施工能率に好影響を及ぼし、最高日進は10リング・15mを記録し、14日を数えた。

組立精度としては、調芯ピンの有効性を示し、目違いはなく、変形は弾性変形内とみられる。欠けも極めて少なく、良好な結果を得た。

(3) 組立上の問題点

組立は安定した性能を発揮したが、いくつかの問題点を生じた。それらを下記に示す。

- ① セグメントのシール： セグメントの厚さが650mmと厚いため、止水シールと緩衝材の厚みの影響を受けた。位置決めが完了してもシールドジャッキで押すと微妙に位置決めがくずれ、組立誤差が累積した。また水シールと緩衝材のバランスも重要な要因であった。
- ② 製作精度：セグメント製作メーカーが異なると許容値内ではあるが微妙に精度が異なり、組立エラーが発生した。プログラムをメーカー毎に調整して対応した。
- ③ ゆるみ、断線：高速で作動させるため、ボルトのゆるみ、断線等が発生した。日々のメンテナンスで対応した。
- ④ ローリング：650リングから800リングにかけシールド機およびセグメントに若干のローリングが発生した。シールド機はシールドジャッキを傾ける機構を設けていたので、本装置で対応し、セグメントはロボットの組立調整（プログラム）で対応した。このとき調芯ピンは調整を考慮し、オス・メスのクリアランスを大きめに設定したピンを用いた。
- ⑤ 安全装置：現地においては施工の安全性を確認するため、人が監視として近づけるようにしていたが、高速組立のため、基本的に組立領域から隔離することとした。このため発進初期に安全通路、安全柵等隔離と安全な通路の確保を徹底した。ナット自動供給装置をロボットから分離したことにより、セグメントを組み立てる上で、ロボットに近づく必要がなくなり、隔離の方針を徹底させることができた。

6. おわりに

東京湾横断道路ははじめてセグメント自動組立ロボットが本格的に採用された工事である。本工事はこのセグメント自動組立ロボットの特徴をセグメント組立品質の良さと高速組立の可能性に求め、安定した高速性能を発揮するようシステムとして自動化した。その成果はセグメント組立品質、施工能率、安全性に対し、極めて厳しい施工条件下にもかかわらず達成することができた。これもひとえに関係各位の御指導と御協力によるものと、深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 中篠, 水口, 真野, 飯島, : ロボットによるセグメント自動組立
トンネルと地下, Vol. 19, No. 11, 1988
- 2) 池田, 四方, 菊池, 鈴木, 二ノ宮, : 超大口径シールドセグメント自動組立システム
第5回建設ロボットシンポジウム論文集, 1995年7月