

セグメント自動組立システムの開発（その3） Automatic Segment Assembly System (Part 3)

田中 勉*
Tsutomu Tanaka

内田 克巳**
Katsumi Uchida

桑原 資孝***
Yoshitaka Kuwabara

野本 寿****
Toshi Nomoto

藤井 利侑*****
Toshiyuki Fujii

三戸 憲二*****
Kenji Mito

吉田 貴*****
Takashi Yoshida

要 約

セグメント自動組立システムは、シールド工法の大断面施工、長距離施工、作業の効率化、省力化および安全性の向上などの面から、その必要性が次第に高まっている。

本文は、数年間にわたり開発してきた“直ボルト継手短ボルト方式”による、セグメント自動組立システムの実証実験機での実験結果および実施工への適用等について報告するものである。また、今回の実験によりこの実証実験機の実用性が検証できた。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 実験経緯
- § 3. 実験結果
- § 4. 実施工への適用
- § 5. おわりに

川崎重工業（株）と共同研究を行ってきた。

この技術の確立は、シールド工事における作業の効率化、施工精度の向上、労働環境の改善、省力化および安全性の向上、工期の短縮を可能にする。

本文は、前回報告¹⁾したセグメント自動組立システムの実験経緯、結果、改良点および実施工への適用などをまとめたものである。

§ 1. はじめに

シールドの大断面施工、長距離施工などで自動化の必要性が高まっているセグメントの組立に関して、我が社では1987年より“直ボルト継手短ボルト方式”を対象に

§ 2. 実験経緯

実験は、組立工程にもとづきセグメント組立テスト（セグメント供給～ボルト・ナット供給～セグメント位置決め～締結）の動作確認、組立時間、組立リングの段差および各装置（エレクタ装置、ボルト・ナット供給装置、締結装置）の問題点等について検証を行った。図-1に組立工程図を、また図-2に実証実験機の概要図を示す。この実験機は、 $\phi 5,300$ RCセグメントの自動組立を対象としたものである。

* 技術研究所機電課

** 機材部機械課副課長

*** 機材部副部長

**** 技術研究所土木技術課長

***** 土木設計部設計課長

***** 土木設計部設計課係長

***** 機材部電気課

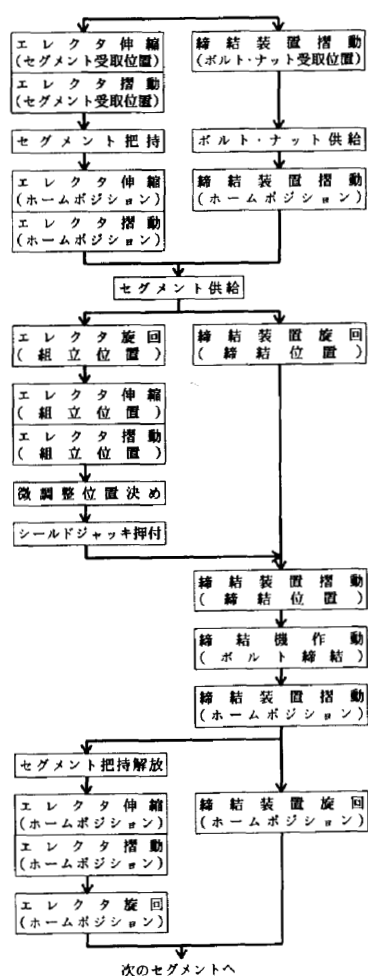


図-1 組立工程図

§ 3. 実験結果

3-1 組立工程確認結果

図-1の組立工程図をもとに実験を行い、問題となった各工程での現象と原因についてまとめたものを表-1に示す。

3-2 機械構造の問題点と対策

(1) システム構成

①基本的な考え方

a. エレクトラ装置と締結装置の分離

セグメント把持部周辺の小型化を考慮し、エレクトラ装置と締結装置を分離する。

エレクトラ装置は、手組みタイプと基本的に同じ構造とし、セグメント位置決めのため6自由度を持たせる。

締結装置は、エレクトラ旋回軸心と同一軸心をもつ固定ドラムにマウントし、3自由度（旋回、摺動、ヨーイング）を持たせる。

b. セグメント供給装置とボルト・ナット供給装置

セグメント供給は、時計の6時方向で、ボルト・ナット供給は、時計の12時方向で行う。

ボルト・ナット供給装置は、セグメント把持部と180°反対側のエレクトラ装置上にマウントし、セグメント供給と同時に締結装置に供給を行う方式とする。

c. 油圧系

エレクトラ系、締結系、それぞれ単独に動かすことができるように独自の油圧系統をとる。また、現状の口径5

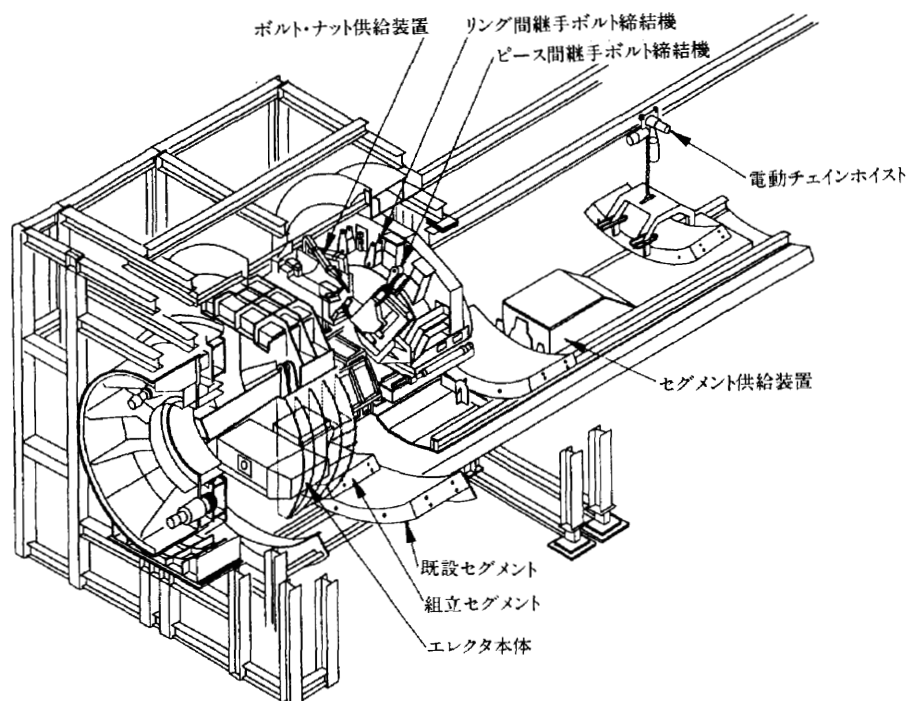


図-2 実証実験機の概要図

表一 組立工程確認表

工 程	現 象 と 原 因 な ど	工 程	現 象 と 原 因 な ど
エレクタ撓動（セグメント受取位置） エレクタ伸縮（ " ）	・特に問題はない。	締結装置撓動（ボルト・ナット受取位置）	・特に問題はない。
セグメント把持	・ドッキングによる誤差は位置偏差が大きく、その修正に時間がかかる。これを廃止し、エレクタ受取位置で対応した。	ボルト・ナット供給	・ボルトカートリッジからボルトおよびナットを取り出す時に、ナットが回転してボルトナットを受け渡し不良になることがある。 ・ピース間ハンド伸縮のストローク不足を締結装置撓動で補っている。 ・ピース間締結をフル装備した場合、ハンドの回転による干渉が生じる。 ・ボルトおよびナットのソケット挿入を確認するための装置機器がないためボルト受け渡し動作および分離動作の成否が確認できない。 ・ボルトおよびナットの脱落等を確認できない。
エレクタ伸縮（ホームポジション） エレクタ撓動（ " ）	・特に問題はない。	締結装置撓動（ホームポジション）	・特に問題はない。

セグメント供給

工 程	現 象 と 原 因 な ど	工 程	現 象 と 原 因 な ど
エレクタ旋回（組立位置）	・油圧ホースの抵抗が大きいため、エレクタ旋回用ケーブルベア装置の旋回に対する追従性が悪い。 ・旋回モータの減速比が小さいため、制御性が悪い。	締結装置旋回（締結位置）	・油圧ホースの抵抗が大きいため、締結装置旋回用ケーブルベア装置の旋回に対する追従性が悪い。 ・旋回モータの減速比が小さいため、制御性が悪い。
エレクタ伸縮（組立位置） エレクタ撓動（ " ）	・特に問題はない。		
微調整位置決め	・エレクタ旋回の減速比が小さいため、微調整が困難である。 ・旋回押し付け微い時、撓動押し付け微い時の機械変形とガタにより、セグメントの位置決めが旨く行かない。		
シールドジャッキ押し付け	・特に問題はない。		

工 程	現 象 と 原 因 な ど
締結装置撓動（締結位置）	・エレクタ装置側の位置データだけでは、締結装置の十分な位置決めができない。
締結機動作（ボルト締結）	・各リング間締結機の円周方向の位置関係が固定式であるため締結アーム挿入困難なボルトボックスがある。 ・アーム挿入時の確認装置がないため、目視確認する必要がある。 ・Y軸方向を位置するために締結機アームをセグメント側面に押付け、位置決めを行うとY軸近接センサ反応前にX軸の回転変形とX軸ジャッキの動き等によってボルト挿入が困難になる場合がある。 ・ナットアームが引寄せ時にボルトボックス継手内面に押付けられると、アームが継手面に沿って変形し、チャックしたボルトの芯ずれを引きおこし易い。その結果ナットが旨く噛み合わず締結エラーとなることがある。 ・引寄せ機構を開放した時セグメント段差に当てブロックが引っかかりアームが開放できないことがある。 ・引抜き可能であるかの確認ができない。
締結装置撓動（ホームポジション）	・特に問題はない。

工 程	現 象 と 原 因 な ど	工 程	現 象 と 原 因 な ど
セグメント把持開放	・特に問題はない。	締結装置旋回（ホームポジション）	・油圧ホースの抵抗が大きいため、締結装置旋回用ケーブルベア装置の旋回に対する追従性が悪い。 ・旋回モータの減速比が小さいため、制御性が悪い。
エレクタ伸縮（ホームポジション） エレクタ撓動（ " ）	・特に問題はない。		
エレクタ旋回（ホームポジション）	・油圧ホースの抵抗が大きいため、エレクタ旋回用ケーブルベア装置の旋回に対する追従性が悪い。 ・旋回モータの減速比が小さいため、制御性が悪い。		

次のセグメントへ

～6 m ϕ 程度ではポンプユニットを装置上に配備する事は難しいため、後方台車上にこれを配備し、旋回用ケーブルベア装置を介して、エレクトラ装置および締結装置の旋回部へ接続する方式とする（図－3 参照）。

②問題点

a. 固定ドラムのたわみ等

分離型は、固定ドラムが長くなり、後端にたわみを生じ易く締結装置の位置決めを難しくする。また、曲線施工時、後端での片寄りが生じクリアランスが少なくなる。

b. 旋回用ケーブルベア装置

汎用のケーブルベアを利用した本装置は、固定部と旋回部を接続しているため、旋回に対する追従性が悪い。

また、運転中は油圧ホースの圧力で動きにくくなることに加え、ケーブルベアリングのドラムのつばとベアが干渉し、ケーブルベアがエレクトラ旋回にうまく追従しない。特に旋回角度が大きくスピードが速い場合、この問題が顕著となる。

③対策

a. 固定ドラムの支持

固定ドラム後端に支持柱を設けることによってたわみおよびシールド側の支持柱の負担を減少させることができる。

また、シールド曲線施工に対応するため、シールド側支持柱部分に調芯機構を設置する。

b. 旋回用ケーブルベア装置

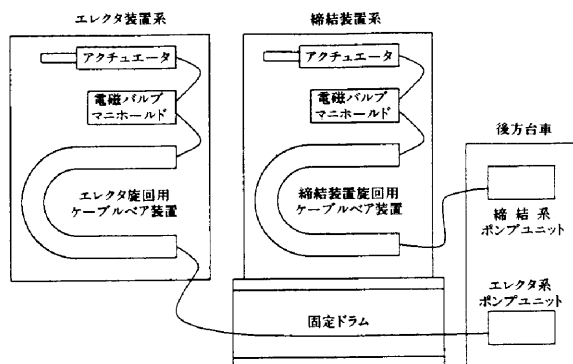
汎用のケーブルリールと新案中の方式（新旋回用ホースケーブル）が考えられる。しかし現状では、まだ新旋回用ホースケーブル方式は、検討を要する部分が多いので状況に応じて対応する。

（2）セグメント供給装置

①基本的な考え方

a. 搬送装置

セグメント搬送は、一般的なホイストレール式を採用する。また、供給台車との位置合わせ方法は、以下の仕



図－3 各装置の油圧配置図

様とする。

- ・周 方 向：搬送装置アームを供給台車のソケットに落とし込む。

- ・摺動方向：供給台車の固定ジャッキを使用。

b. 供給台車

セグメント供給は、スペースが狭隘であること、施工性等を考慮して分離型のレール式を採用する。

- ・エレクトラ側にあるドッキング装置で供給台車を把持し、供給装置側の揺動機構によって調芯する。

- ・供給台車は、レール上を走行し所定の位置で停止する。

②問題点

a. 供給台車

供給台車の調芯性能は、周方向 ± 4 mm、半径方向 ± 7 mmとなっており、大きな位置ズレには対応できない。

③対策

a. 供給台車

現状の機構で調芯性能を向上させるのは困難であるため、以下に示す調芯システムを付加する。

- ・摺動方向：エレクトラ摺動によるセンシング位置合せ。

- ・半径方向：エレクトラ伸縮によるセンシング位置合せ。

- ・周方向：ローラーによる微い。

- ・ヨーイング方向：摺動合わせによる微い。

供給装置の提案としては、表－2に示す様なものが考えられるが、中小口径では、装置のコンパクト化が条件であり、加えて施工性を考えると、レール式を採用する方が有利であると考えられる。

（3）ボルト・ナット供給装置

①基本的な考え方

a. 基本構造

1 リング分のボルト・ナット（ピース間24本、リング

表－2 供給装置の種類

	分離型		一体型	
	レール式 下部供給型	後方台車式 上部供給型	後方作業デッキ 吊り上げ型	シールド機 受取型
概 要	エレクトラとは完全に分離しており、下部より供給するタイプ。 (本実験改良タイプ)	後方台車上に供給装置を装備したもので上部より供給するタイプ。 (ドバータイプ)	支持ドラム後端の作業デッキ下に配置され下部より供給するタイプ。 (TTBタイプ)	シールド機本体側から受取り、これからエレクトラが受取るタイプ。
位置合わせの難易度	エレクトラ本体から分離しているため困難である。	シールドから牽引されているがレール式と同様の困難さがある。	供給装置とエレクトラの位置関係が大きくずれることはない。	供給装置とエレクトラの位置関係が大きくずれることはない。
装置の大きさ と適用口径	下部供給の分離タイプであるため装置単体の大きさは比較的小さくすることができ、中口径には採用しやすい。	上部供給であるため下部型に比べ装置が大きくなる。従って適用口径は中～大口径となる。	一体となっているため装置全体が大きくなり適用口径は、大口径となる。	装置を取付けるスペースの問題点があり中口径への適用は困難である。

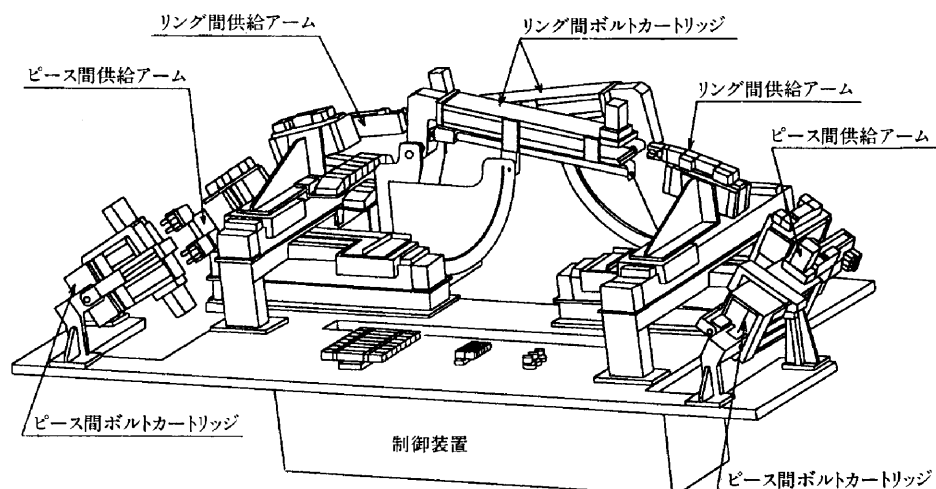


図-4 ボルト・ナット供給装置の配置図

間22本)を貯えるためのカートリッジと、これからボルト・ナットを取り出し、締結機へ差し出すアームを装備する。図-4にボルト・ナット供給装置の配置図を示す。

b. 配置と工程

セグメント供給を時計6時方向で、ボルト・ナット供給を時計12時方向で行うことで、同時作業を可能にする。

c. 各締結機への対応

締結機2台に対し、1つのカートリッジと1つのアームで対応させる。

d. 供給手順

ボルトにナットをねじ込んだ状態で締結機へ供給し、締結機はこのセットをボルトとナットに分離した後セグメント締結作業に入る。

②問題点

a. 時間

セグメント供給とボルト・ナット供給は同時工程であるが、ボルト・ナット供給工程の方が時間を要する。

現状では、設置スペースの関係上、供給アーム1本で締結機2台に対応させているため工程数が多くなっていること、本装置の設置場所が締結装置からかなり離れていることが、時間的に不利な原因となっている。

b. ナットの回転

供給アームによりカートリッジからボルト・ナットのセットを取り出す時、ナットが許容値以上に回転し、分離工程で締結機のナットソケットに挿入できない場合がある。

c. ボルト・ナット供給時の確認

供給アームから締結機のボルトソケットにボルト・ナットのセットを挿入する際の成否判定装置がない。

③対策

表-3 供給装置の実機への提案表

	エレクタ上部配置型	締結機周辺配置型	締結機内蔵型
概要	エレクタ上部に装置を配置し、締結機がこれを受け取りにくいタイプ。 (現状のタイプ) ボルト・ナット締結装置 切羽 エレクタ装置 締結機	締結装置上の締結機ごとに供給装置を配置し個別に供給するタイプ。 ボルト・ナット締結装置 切羽 エレクタ装置 締結機	各締結機ごとに供給装置を付加もしくは内蔵するタイプ。 ボルト・ナット締結装置 切羽 エレクタ装置 締結機
機構	供給装置および締結装置がそれぞれ独立しておりシンプルさとメンテナンス性で有利。	締結機と供給装置が並列する形になるのでメンテナンススペース確保が問題。	左記の発展型が考えられるがメカニズム的にはもっとも困難である。
時間	締結装置はエレクタ上の供給装置まで受け取りにくい必要があることから時間的に不利。	供給装置が締結装置の隣にあり、移送距離が少ないことから、左記よりも時間的には有利。	左記と同等かそれ以上の効果。

a. 工程の短縮

工程を短縮するためには、締結機1台につき供給アーム1本とすること、ボルト・ナット供給装置の配置を締結装置付近へ変えること等が考えられる。ボルト・ナット供給装置としては、表-3に示す3タイプが考えられるが、さらに分離工程をなくすためのボルト・ナットの個別供給方式も検討の対象となる。

実験では、機構的にシンプルでメンテナンススペースの大きいエレクタ上部配置を採用したが、将来的には時間短縮のため、締結機周辺配置型、締結機内蔵型の研究と開発も必要であると考えられる。

b. ナットの回転防止

予めパッキングしたボルト・ナットを使用することで回転防止をはかる。

c. ボルト・ナット供給時の確認装置

締結のボルトソケットおよびナットソケットに簡易センサを取付け、それぞれボルトおよびナットの挿入を確認する。

（4）エレクタ装置

①基本的な考え方

a. 機構

・ 旋回

重荷重、旋回精度に対応するため、支持柱部門に直接取り付け付けた3列ローラー式旋回ベアリングを使用し、位置決め精度を得るためリボンスケールを採用する。また、有効径を確保しながら油圧ホース、電気ケーブルを旋回部へ伝えるための旋回用ケーブルベア装置を開発する。

・ 伸縮および摺動

重荷重に対応するためにリニアガイドを並列および直列で使用し、位置決め精度を得るために磁歪センサ付油圧ジャッキを採用する。

・ ローリングおよびピッチング

狭隘な場所でローリングおよびピッチングの動きを実現するためのリンク機構を開発し、また位置決め精度を得るため、磁歪センサ付油圧ジャッキを採用する。

・ ヨーイング

スムーズな動きと精度を得るために単列ボールベアリングを使用し、位置決め精度を得るため、磁歪センサ付油圧ジャッキを採用する。

b. 位置決め

計算機による定位置プログラム制御とするが、A1セグメント組立後はその位置データによる補正をかける。また、締結装置の位置決めはエレクタのデータをもとにして、プログラム制御にて所定の位置に停止させる。

A1セグメント：センシング

A2～B2セグメント：押し付けあい

Kセグメント：B1とB2の位置データによる位置決め

②問題点

a. 位置決め方法

- ・ セグメントピース間継手面を完全に合わせると、リング間ボルト穴が合わない場合がある。
- ・ セグメント押し付け時、ジャッキにたわみが生じ、これによるボルト穴のズレが発生する（特にローリング）。

③対策

a. 位置決め方法

A1セグメントと同じようにA2～Kでもセンシングによる位置合わせを行い、ピース間継手面の影響をできるだけ除くようにする。また、旋回駆動系の減速比を大

きくして、制御性の向上をはかる。

（5）締結装置

①基本的な考え方

a. 締結装置

締結装置は、シールドの支持柱に固定されかつエレクタ内側を通過する固定ドラムの後端に配置する。

b. 締結機の配置

締結機は基本的にA型セグメントの継手ボルトボックス位置に配置する。B型セグメントのリング間については、A型セグメントと同じ配置とし、B型およびK型セグメントの締結時に生じるピース間テーパー角は、締結機にねじり軸を設け対応する。

c. 各締結機の位置決め

X軸、Y軸、引寄せ軸すべて端面当て決めで基本とする。

d. ボルト・ナット供給

ボルト・ナット供給は、締結装置がエレクタ上部のボルト・ナット供給装置まで移動し、供給装置の供給アームによって差し出されたボルト・ナットのセットを受け取り、これを分離する。

e. ボルト・ナット締結用モータ

締結のトルク管理を行うためACサーボモータによるナットランナーシステムを装備する。

f. 全体装置の位置決め

旋回、摺動、ヨーイングはエレクタ装置の位置決めデータにより行う。

②問題点

a. 締結機の配置

既設リングの各ボルトボックスの位置は、必ずしも周方向に均等で半径方向一定であるとは限らず、現状の締結機固定配置では対応できない場合がある。

b. 全体位置決め方法

旋回、摺動およびヨーイングでは、すべて、エレクタ側の位置データをもとに位置合わせする予定であるが、機械の変形や組立誤差等の影響でセグメントが合わない場合がある。

c. 締結機位置決め方法

締結機ボルトボックス挿入時の位置決めは、X軸の変形と油圧系の剛性不足によって、ボルト挿入とアーム開放に支障をきたす場合がある。さらに、締結機ボルトボックス引抜き時、確認機器がないため目視確認する必要がある。

d. ボルト・ナット保持確認

ボルト・ナット供給時の成否、ボルト・ナット保持の確認を行うことができない。

表－4 締結装置の実機への提案表

	数値位置決め方式	センシング方式	フレキシブル方式
概 要	現状のシステムに加えてたわみ等のデータを考慮していく方法。	各締結機ごとにボルトボックスのセンシングを行い、位置決めを行う方法。	ボルトボックスの形状に倣いながら位置決めを行う方法。
メカ制御等の問題点	セグメント等の誤差への対応がとりにくい。	センサの数が多くなると可動軸が増えること、位置決め時間が長くなる恐れがあること等がある。	倣い位置決めを行うための新機構を開発する必要がある。
メリット	現状の対応を改良することで対応できる。	各締結機ごとに確実な位置決めを行うことができる。	左記の確実な位置決めに加え、位置方向のセンサ等が必要なくなる。

表－5 1リング組立時のサイクルタイム

項目 セグメント	把持ボルト 供給	粗位置決め 締結機旋回	微調整	締結機摺動 ボルト締結	各装置 原点復帰	合 計 時 間
A1	2'28"	1'08"	1'35"	2'55"	1'12"	9'16"
A2	2'28"	1'12"	0'44"	3'02"	1'18"	8'44"
A3	2'28"	1'28"	0'44"	3'02"	1'34"	9'16"
B1	2'28"	1'34"	0'44"	3'09"	1'40"	9'35"
B2	2'28"	1'50"	0'44"	3'09"	1'56"	10'07"
K	2'28"	1'50"	0'34"	5'20"	1'56"	12'08"
						59'06"

③対策

a. 締結機単体の自由度の追加

各締結機ごとに周方向、ローリング角の調整機構を設け、ボルトボックスの周方向不均等に対応する。

b. 全体位置決め機能の強化

表－4に示すような3つの案があるが、フレキシブル方式はメカニズム的に実現するのが困難であり、数値位置決め方式では誤差に対する不安が残る。また、センシング方式は複雑でかつ位置決めに多大の時間を要する問題があるため、実際には粗位置まで数値位置決め方式で、微調整と確認をセンシング方式で行う方法が実用的な方法と考えられる。

c. 締結時位置決め機能の強化

・ X軸（ナットの軸方向移動）

ボルトボックス継手内面を検出して位置決めをする。

・ Y軸（ボルトボックス挿入方向）

セグメント・継手端面を検出して位置決めをする。

・ 引寄せ軸

ボルトボックス継手内面を検出して位置決めをする。

d. ボルト・ナット保持確認装置

締結装置のボルトおよびナットのソケットに図－5のようにセンサを取付け、ボルトおよびナットの有無を確認する。

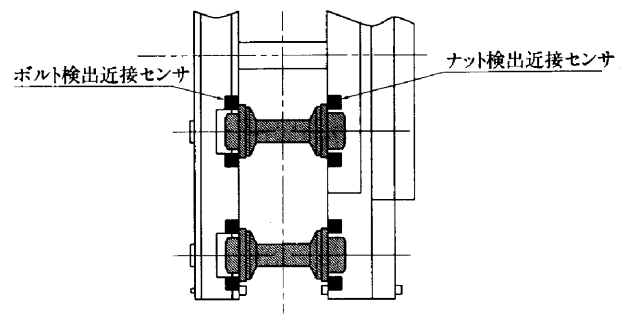
3－3 組立時間

表－5に実験機による1リング組立時のセグメントの平均サイクルタイムを示す。

§ 4. 実施工への適用

今回の実験結果を踏まえ、中口径の実機に向けた計画の概要を以下に示す。

(1) セグメント供給装置



図－5 ボルト・ナット検出センサ取付図

供給装置とエレクトラ装置の位置関係がほぼ一定である一体型が望ましいが、中口径でのコンパクト化と施工性を考慮して、レール式下部供給型を採用する。

(2) ボルト・ナット供給装置

供給装置を締結機に内蔵するタイプが望ましいが、現状の技術レベルでは実現が困難である。現状での供給時間短縮を考え、締結機周辺配置型を採用する。

(3) エレクトラ装置

旋回位置決め時の制御性を向上させるため旋回モータの減速比アップをはかる。また、ピッチング、ローリングについては、ガタとたわみを抑えるため、フレームを直接ジャッキで動かす方式を導入する。

さらに新たな旋回用の配線，配管装置を採用する。

（4）締結装置

締結位置の不規則な微少ずれに対応するためには，ボルトボックス形状に倣うフレキシブル方式が最も望ましいが，メカニズム的に困難であるため，現段階では現状の装置の小型化をはかり，最小限の微調整機構とセンサを付け加えることで対応する。

（5）機器構成

基本的な機器構成は実験装置と同様にするが，シールドマシン側の支持柱に対する負荷を軽減するため，固定ドラム後端に支持脚を設ける。

（6）位置決め方法

①セグメント位置決め

- ・旋回：合いマークによりセグメント位置合わせする。
- ・摺動・ヨーイング：押し付け倣い。
- ・伸縮・ピッチング・ローリング：段差センサによりセンシング位置合わせする。

②締結装置位置決め

- ・粗位置決め：規定位置決め。
- ・微調整位置決め：センシング位置決めあるいは，エレクタ位置データと変形考慮により位置決めする。

③セグメント供給位置合わせ

- ・摺動・ヨーイング：押し付け倣い。
- ・旋回・アクチュエータによりセンシングする。
- ・伸縮：エレクタ装置の伸縮機能を利用する。

④ボルト・ナット供給位置合わせ

- ・定位置で供給し，センシングによる微調整は行わない。

（7）セグメント，ボルトボックス

- ・セグメントの位置決めを補助するために，小さなピン・ホゾをセグメントに設ける。
- ・セグメントを等分割として，組立時間の短縮をはかる。

（8）制御システム

①制御形態

- ・実験装置と同様にする。

②監視，操作方式

- ・手動介入時に備えて現場操作箱を設置する。
- ・運転監視の効率化のため，ITVの装置，CRTの増加，ページングの設置を行う。
- ・操作性の向上のためジョイスティック等を使用する。

§ 5. おわりに

中口径トンネルにまで対応可能なセグメント自動組立システムの開発を行ってきた。本システムは，ボルト締結装置分離型エレクタを採用することで，小型化と作業の効率化・安全性を両立させ，直径5 m以上の密閉式（泥水式・土圧式）シールドへの適応が可能となった。

今後は，今回の実験結果をもとに現場対応を可能にするため改良，研究を進めていき，シールド工事における全自動化に向け，寄与していきたいと考えている。

最後に，実験にあたり，ご協力を頂いた川崎重工業（株）関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 田中 勉ほか：セグメント自動組立システムの開発（その2），西松建設技報，第16号，pp.9～16,1993.
- 2) 野本 寿ほか：セグメント自動組立システムの開発（その1），土木学会，第48回年次学術講演会，第VI部 pp.180～181,1993.
- 3) 三戸憲二ほか：セグメント自動組立システムの開発（その2），土木学会，第48回年次学術講演会，第VI部 pp.182～183,1993.