

35. ボルト締結機分離独立型セグメント自動組立装置の開発

前田建設工業(株)：久保田五十一

1. はじめに

近年、都市トンネルの代表的構築法であるシールド工法に多大な期待がかけられ、技術開発が盛んに進められている。このシールド技術開発の大きな課題として、セグメント組立作業の自動化が挙げられており、現在、一部の大口径シールド工事で実用化されるまでに至っている。しかし、特に安全対策上から望まれるセグメント組立の自動化は大口径断面に比較して、中小口径断面では有効空間の制約などに起因してその適用が困難視され、実用化への試みもなされていない。このような状況のもと小口径断面シールドの自動化を目的として開発されたのが、ボルト締結機分離独立型セグメント自動組立システムである。このシステムは、工場内での性能確認テストの後、東京都の下水道工事（土圧式シールド、セグメント外径2950mm）で施工に供された。（小松製作所と共同開発）

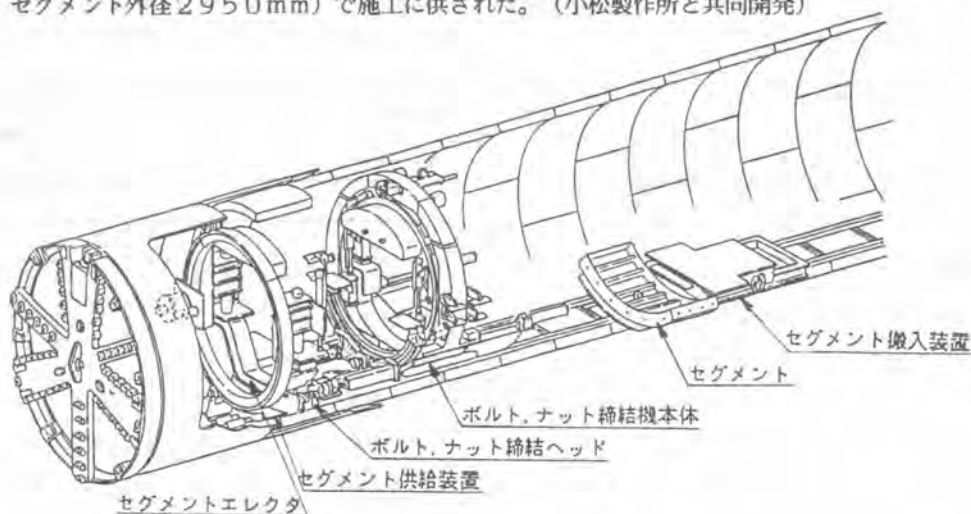


図-1. システム構成図

2. システム構成と仕様

本システムは次の4装置から構成されている。

- (1) セグメント搬入装置（独立前後走行式）：セグメントを後方からシールド機内へ搬入する装置で、レール上を台車が自動で走行し、セグメントを搬入する構造である。
- (2) セグメント供給装置：機内側のセグメント受け装置で、受け架台が自動伸縮し、搬入装置からセグメントを受け取る構造である。（シールド側に設置）
- (3) セグメントエレクタ：旋回リング方式のセグメント位置決めロボットで、旋回、昇降、前後摺動および姿勢修正機構を有する。（シールド側に設置）

(4) ボルト・ナット締結機（独立前後移動式）： 2台の締結ヘッドとボルトナット供給装置を備えた締結装置で、穴位置検出センサを用いてセグメントのリング間のボルトを自動締結する。本システムの構成図は、前頁の図-1に示す通りである。

3. 自動組立作業フロー

セグメント1ピースの自動組立手順は、概略以下の通りであり、これを順次繰返すことにより1リングの組立を行う。（図-2参照）

- ①セグメント搬入（自動スタート）： 搬入台車がレール上を走行し、セグメントを機内に搬入する。
- ②セグメント供給： 搬入台車上のジャッキにより台車側から供給装置へセグメントを受け渡す。
- ③セグメント把握： 供給装置により位置決めされたセグメントをエレクタがセンシングし、把持固定される。
- ④セグメント位置決め： 組立パターンに従い、エレクタはセグメントを位置決めし、保持する。
- ⑤締結機へのボルト・ナット供給： 締結ヘッドが所定の位置に位置決めされ、カセットからボルト・ナットが送り出され、締結ヘッドのソケットに装填される。
- ⑥ボルト締結（自動エンド）： 締結ヘッドが穴位置を検出し、ボルト締結する。ボルト締結が完了すると、隣接箇所へ移動し、再びボルトナットが供給され、順次締結する。

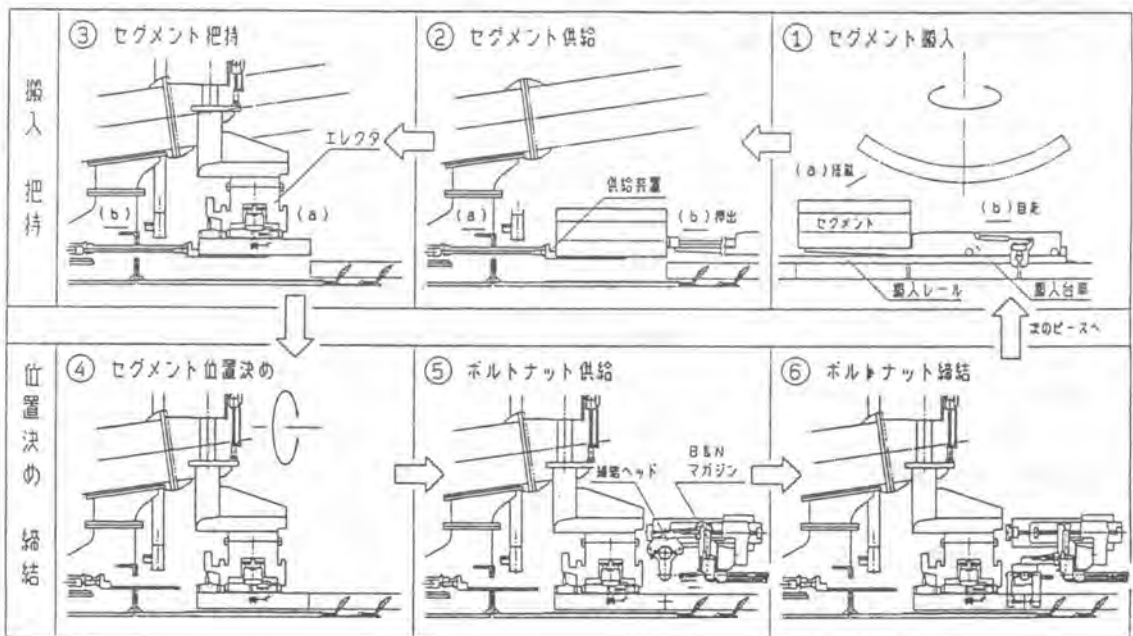


図-2. セグメント自動組立システムフロー

4. 本システムの特長

本システムの特長を以下に述べる。

- (1) ボルト・ナット締結機をセグメントエレクタから分離、独立させることにより、小口径シールドから大口径シールドまで広範囲に適用可能である。
- (2) 従来の数値制御に加え、バイラテラル制御を応用した力制御システムを付加することにより、位置管理、接触面圧管理などが確実に行える高精度で信頼性の高いシステムである。
- (3) ボルト・ナット締結機の移動範囲を拡大することによりボルト増締め作業の自動化への応用が可能である。
- (4) 標準のスチール、RCセグメントに対して適用が可能である。
- (5) 締結機が分離されているので、転用性が高い。

5. セグメントの位置決め方法

セグメントの位置決めで難しい点は、シールド本体に搭載したエレクタと既設セグメントの位置が常に変化することにある。このため、既設セグメントの位置を常に検知し、6自由度を制御する多くのセンサと演算が必要となる。

センサの数を減らして簡素化を図り、演算スピードを短縮化するには、既設セグメントまでの距離を計測して制御する「数値制御」ではなく、既設セグメントに接触させることで位置を決める「力制御」、さらに、この押付力を利用して既設セグメントに倣わせる「力制御による倣い」方式が中小口径シールドには有効であると判断した。この考えの基になったのが、図-3に示すような人がバルブスリーブにスプールをかん合させる操作方法である。



図-3. 力制御による位置決め

人は目では判らないわずかなスキマでも、微妙な力加減を知ることによって正確に位置決めし、スリーブに倣ってスプールを挿入することで早く、正確にかん合させることができる。この人間の特質をロボットに活かしたのが「バイラテラル制御式マニピュレータ」であり、この原理を応用して(本システムの)力制御機構を開発した。X軸(摺動)、Y軸(旋回)、Z軸(昇降)の3軸は「力制御」を行い、 M_x (ローリング)、 M_y (ピッチング)、 M_z (ヨーイング)は上記3軸の押付力を利用して倣わせる「力制御による倣い」を行っている。

5. 1 力制御システム

「力制御」および「力制御による倣い」を行う場合、重要なことは、押付力を敏感に検出し、さらにセグメントがどの位置にあっても、常に、軽い力で倣えるようバランス(自重バランス)させておくことにある。

このため、各ジャッキには圧力センサ、ガイドローラに力センサを設け、セグメントの押付力を正確に検出している。（力センサの最小検知力；5kg）

さらに自重バランスの必要なローリング、ピッチング、ヨーイングは、旋回リング角度、セグメントの種類を検出させ、ジャッキにかかる負荷力を計算させ、ジャッキの倣い力を設定することで、負荷の大きさ、方向が変わっても、常に軽微な力で動くようバランスさせている。（最小倣い力；10kg）

5. 2 その他の位置検出

- ①セグメントの把持穴検出：供給されたセグメントの把持穴中心を光りセンサにより直接検出し把持している。
- ②インバートセグメントの旋回位置検出：最初に組立るセグメント（インバートセグメント）の旋回方向位置検出は、既設セグメントにマークを設け、その位置を光センサにより検出している。
- ③Kセグメントの旋回位置検出：Kセグメントを隣接セグメント間との最適な位置に挿入するため、隣接セグメントの端面を光センサにより検出し、さらに挿入時は、力が片寄らないよう旋回方向を自重バランスさせている。

6. ボルト・ナット締結方法

本自動組立システムでは、ボルト・ナット締結機（以下、締結機と称す。）がエレクタおよびシールド本体から分離・独立しており、既設セグメント上を自走可能な構造としている。また、締結機の位置決めにおいて既設セグメントに対する倣い機構および力制御を適用することで、制御機構、構造の簡素化を図っている。締結手順は以下のとおりであり、1リングの組立終了後、締結機は、自走（盛替）機構により、1リング分前進する。

- ①締結機本体位置決め → ②旋回リングの旋回 → ③旋回リングフレームの昇降
→ ④基準ボルト穴位置検出 → ⑤ボルト・ナット供給 → ⑥ボルト・ナット締結

7. まとめ

今回、新しいコンセプトで外径3,08m土圧シールドのセグメント自動組立システムを開発製作し、現場実証を含め性能確認を実施した。その結果、時間短縮等課題は残ったが、実用機への確かな手応えを得ることができた。なお、本開発にあたってご指導、ご協力いただきました関係者の皆様に深く感謝致します。