

シールド工事の自動化技術 AUTOMATIZATION FOR SHIELD TUNNEL WORKS

萩原 英樹*・後藤 徹**
Hideki HAGIWARA, Toru GOTO

Due to the rapid increase of the demand for the underground developments, shield method has been widely used as one of the most important and practical method for the tunnel construction in the cities. However, construction industry recently retains the problems of the shortage and advanced ages of the skilled workers. Consequently, the automatization has been introduced into the construction industry and its successful effects have been observed in the several cases. This paper introduces the current automatized shield technologies in Japan and reports their applicabilities and efficiencies on the actual construction project sites.

Keywords: Automatization, Shield tunneling, Auto carrier SR system, F-NAVI shield, Auto reinforcement arranging, Auto pipe layer, Automatic membrane lining

1. ま え が き

最近、シールド工法は都市部の地下空間開発の手段として広く適用されてきており、道路・鉄道・ガス・電力・上下水道などのライフライン施設の建設のための重要な工法として位置づけられている。

しかし、建設業の中でも特にトンネル工事は、いわゆる3Kで象徴されるように危険・苦渋作業が多く、作業環境が悪いなどの理由から、若年層の建設業離れによる労働力不足、熟練労働者の高齢化などの深刻な問題を抱えている。この傾向は、今後予想される若年人口の減少と高齢化社会への移行を考えると、更に加速すると考えられ現時点で何らかの対策を講ずる必要に迫られている。

このような社会的背景から、シールド工事の自動化・ロボット化による生産性の向上や作業環境の改善が盛んに進められてきている。この具体的な例としては、掘削の自動化・セグメント組立ての自動化・セグメント搬送の自動化など種々のシステムが試みられており、既に実用化の域に達しているものもある。しかし、シールド工事全体を見ると今だ自動化に到っていないものもあり、今後の開発が望まれている。

本報告は今後のシールド工事の全自動化・ロボット化に必要な技術の中で、最近開発または実用化されたセグメントの自動搬送、頭胴制御式シールド、パイプの自動延伸、鉄筋組立てロボットなどの最新自動化技術とそれらを現場で適用した状況を紹介するものである。

* 正会員 清水建設(株) 土木本部 技術第1部 副部長

** 正会員 清水建設(株) 土木本部 技術第1部 課長

2. セグメント自動搬送 S R システム

2.1 システム概要

このSRシステムとは図-1のように、セグメントを立坑内のラックに収納するスーパーラックシステムの略称である。

セグメントは地上の自動入庫台車から建設用リフトで立坑内自動ストックラック内にストックされ、出庫指示によって立坑下の自動走行台車に搭載される。この台車が坑内を経て、エレクト後部のセグメント供給装置までセグメントを搬送する。自動走行台車はレール沿いに設置した数十台の光指令装置とこれを結ぶ光ケーブルにより、センター内の中央監視装置と信号通話を行いながら自動運転されている。

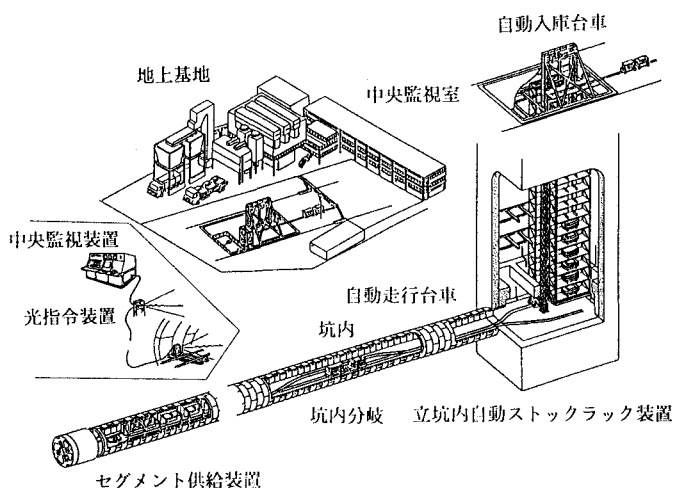


図-1 システム全体図

2.2 システム使用機器

- (a)自動入庫台車----1リング(5ピース)分のセグメントを前後2輛に分割して搭載し、建設用リフトの作動位置までこれを搬送する台車である。搭載は人力によるが、その後は全て自動運転となる。
- (b)立坑内自動ストックラック装置----この装置は、建設用リフトと左右17段(17リング分)のラックから構成される。安全装置として、荷姿異常・二重格納・空出庫を検知するセンサー、過荷重検出器、落下防止装置、過巻防止装置、出入庫口自動開閉扉などを備えている。
- (c)自動走行台車----台車は2両編成で1リング(5ピース)分のセグメントを搬送する。中央監視装置からの指令を光指令装置から受信し、発進・停止・加速・減速・前進・後退を行う。安全装置として、障害物検知センサー(超音波と光式)、安全バンパー、荷姿異常検知センサーなどを装備している。
- (d)セグメント供給装置----自動走行台車で運ばれてきた1リング分のセグメントを受取り、エレクト装置まで1ピースづつ順次供給する。リフターとトロリーホイストから構成されている。
- (e)中央監視装置、光指令装置----中央監視装置は、上記(a)~(c)の装置および自動レール分岐装置のコントロールを行う。光指令装置は光ケーブルで結ばれ、自動走行台車の制御を行う。

2.3 現場適用結果

本システムは現在2つ目の現場で稼働中であり、以下のような適用結果が得られている。

- ①省力化と安全性の向上----セグメントの立坑吊降ろし時に必要とされた玉掛け作業員やクレーンオペレーター、さらに坑内搬送時のバッテリー車の運転手が不要となった。このため、搬送作業については50%以上、シールド掘進作業全体でみれば30%程度の省力化が可能となる。

また、立坑でのセグメントと資材の揚重作業がなくなったことより、安全性が飛躍的に向上した。

- ②セグメント管理----中央監視装置のモニターでモデル化されたラック内のセグメントの在庫状況が一目で判り、セグメント搬入計画に無駄がなくなった。実績では1リングの入庫平均時間が60秒~90秒、出庫平均時間が100秒~170秒であり、従来方式に比べスムーズな荷役作業がなされた。

- ③自動走行台車の停止精度----セグメント移載場所での停止精度を確保するため、停車位置に発磁体を設置し、これに対応して自動走行台車の側面には磁気センサーを装備した。適用現場では磁気センサーのON-OFFパターンで前進・後退を行い、10mm以下の停止精度が確保できている。

今後、本システムと既に実用化されているセグメント自動組立てシステムを組み合わせることでシールド工事の全自動化が前進し、建設現場のCIC(Computer Integrated Construction)化が可能になると考える。

3. F-NAVI シールド工法

3.1 工法の概要

F-NAVIシールド工法とは、Front-Navigateシールド工法の略称であり前胴がシールドを正しい位置に誘導するシステムとの意味である。本工法は、シールドジャッキに頼らず前胴部の姿勢制御を行うまったく新しい機構と制御方式を持つシールド工法であり、急速施工を目的として開発された。

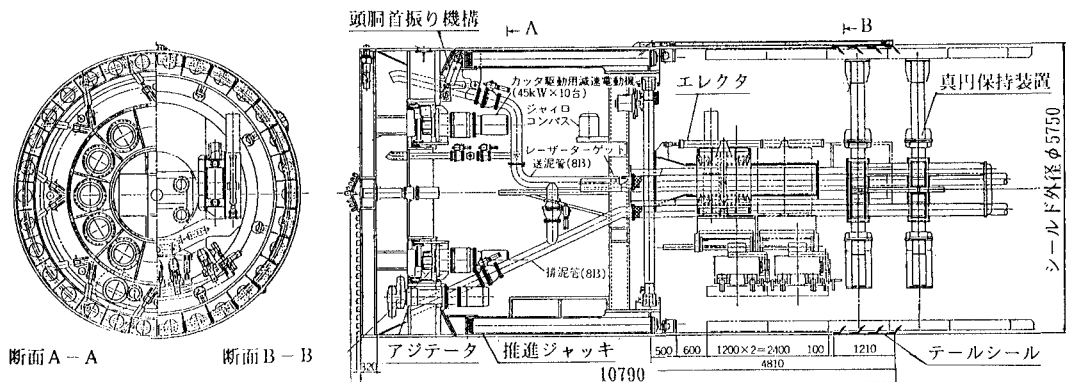


図-2 F-NAVIシールド機の概要

3.2 工法の特徴

- (a)姿勢制御にジャッキ選択が不要---前胴部で姿勢制御を行うため、前方の不均衡な土・水圧を受けても、また蛇行修正を行う場合もシールドジャッキの数やパターンを変える必要がない。
- (b)画期的な急速施工が可能---セグメント組立て部分のシールドジャッキを使用しなくてもシールド機の姿勢制御が可能のため、掘削とセグメント組立ての同時施工ができ急速施工が可能である。
- (c)高精度で迅速な姿勢制御が可能---シールド機前胴部は、アーティキュレートジャッキにより上下・左右どの方向にでも瞬時に制御が可能であり、迅速できめ細かい掘削と高精度な姿勢制御ができる。
- (d)曲線施工が有利---カーブ施工時には前胴部を曲線に沿って屈曲できるため、余掘り量が少なくなる。従って周辺地盤への影響も少ない。

3.3 姿勢制御の自動化

本シールド機の姿勢制御には、リアルタイム制御を行うべく自動姿勢制御システムを開発中である。

後胴部は前胴部に追従して移動するため、システムでは前胴部を計画線に載せるように制御することとし、ファジー推論を用いたソフトを構築している。なお、システムは誤操作や誤信号にも安全なようにフェイルセーフ機能を持っている。

3.4 現場適用結果

既に、F-NAVIシールド機は最初の現場施工（泥水式、φ3480 mm、L=664 m）を終了している。この工事には R20m を筆頭に多数の曲線区間があったが、前胴部の首振りを活用して精度良く施工でき、その効果は期待通りであった。また掘削性能は、土被りの薄い JR 並びに新京成横断部を支障無く通過しており、従来機以上の性能を確認している。また、掘進とセグメント組立ての同時施工も一部区間で模擬運転を行い、実現可能との実験結果を得た。

今後、自動姿勢制御システムと本工法との組合せにより急速施工システムを確立させたい。

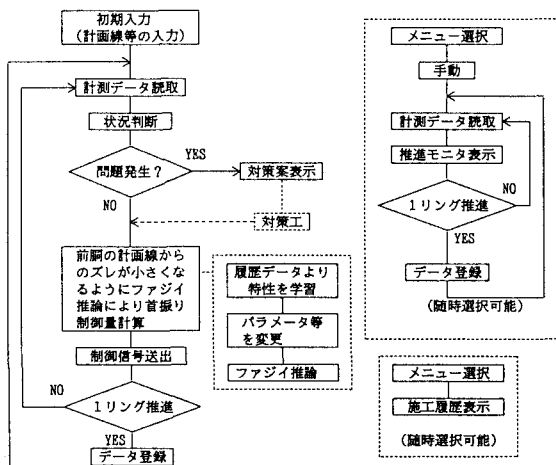


図-3 姿勢制御フローチャート

4. 鉄筋メッシュユニット自動組立てシステム

4.1 システムの概要

鉄筋組立て作業は専門技能工を多く必要とすることから人員確保が、重い鉄筋を扱うため作業条件の悪さと低い安全性が懸念されてきた。特に最近の大型鉄筋コンクリート構造物の鉄筋組立ては、人力では運搬不可能な大径鉄筋への対応が必要とされ、作業方法の改善が求められていた。

鉄筋メッシュユニット自動組立てシステムはこれらの背景を考慮し、鉄筋の配筋から結束までの一連の作業を全て自動で行うシステムとして開発された省力化工法である。現在は第1次の開発が終了し、地下タンクの側壁の鉄筋組立て作業に適用した。このシステムの特徴としては下記の項目が挙げられる。

①配筋から結束までの一連の作業が自動でおこなえる。

②直筋だけでなく、湾曲筋の配筋・結束も可能である。

③広い範囲の鉄筋径に対応可能である。

4.2 使用機器

現在のシステムの仕様を以下に示す。

・装置寸法 : W17.8m×D22.9m×H3.5m

・装置重量 : 架台部 30 t

配筋台車 2×11 t

結束台車 15 t

・対象鉄筋 : D19 ~ D41

・鉄筋長さ : 直筋 7.0 ~ 10.5m

湾曲筋 9.5 ~ 10.0m

(R32.5m)

・配筋ピッチ: 150mm, 300mm

・使用結束線: 10番線

・結束速度 : 20秒 / サイクル

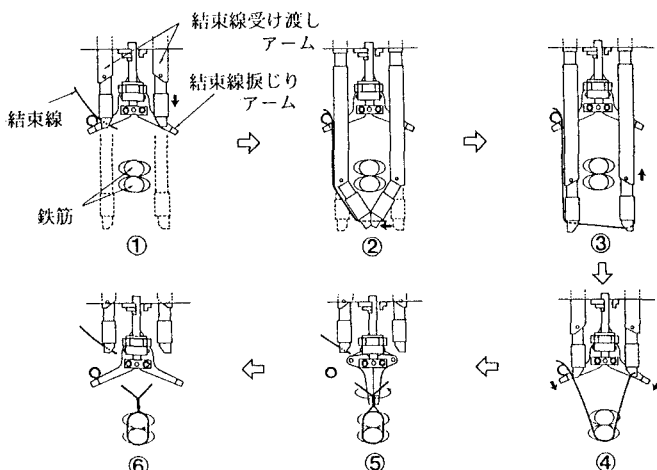


図-4 結束装置の動作概要

現場適用結果として、専門技能工でなくてもユニットを作成でき、従来の1/3 に省力化された、作業環境と安全性の向上が図れた、などの好結果が確認されている。

4.3 シールドの二次覆工への応用

シールド工事では二次覆工に鉄筋を使用する割合は少ないが、東京湾横断道シールドや内圧が作用する導水路トンネルのように鉄筋を使用するシールドトンネルも見られる。

シールドトンネルでは断面が画一で配筋も一定であることから、本システムが有効に活用できる。

図-5は、本システムをこれに応用した例で、以下に概要を示す。

システムは2台の配筋架台と1台の位置決め装置から構成され、左右の架台上でメッシュ配筋されたユニットを中央部の位置決め装置に交互に移し、架台ごとリフトアップして組立てを行う。

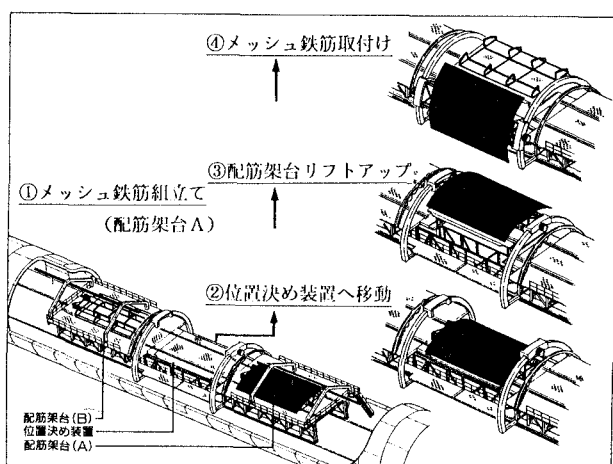


図-5 二次覆工鉄筋自動組立てシステム

鉄筋組立て作業は従来から自動化し難い作業と考えられてきたが、今回の開発システムで配筋・結束作業が自動化できたため、シールド工事の二次覆工鉄筋組立て作業の自動化への目処がついたと考えられる。

5. 送・排泥パイプ自動延伸システム

5.1 システムの概要

シールド工事の自動化への取組では、坑内の施工設備の延伸作業が最も自動化の遅れている部分である。無人化を目指すにはこの設備の延伸をも自動化する必要がある。今回、自動化の遅れている諸設備の延伸作業の中で、先ず送・排泥パイプの延伸作業に着目しこの自動化システムを開発した。

パイプ延伸の自動化で最も難しい作業は、継手の脱着と締結作業である。このため、本システムはストラブカップリングを継手のジョイント材として使用することにより、送・排泥パイプの搬送・取込み、継手の脱着・締結までの一連の延伸作業の自動化を実現している。

図-6に、本システムの坑内イメージを示す。

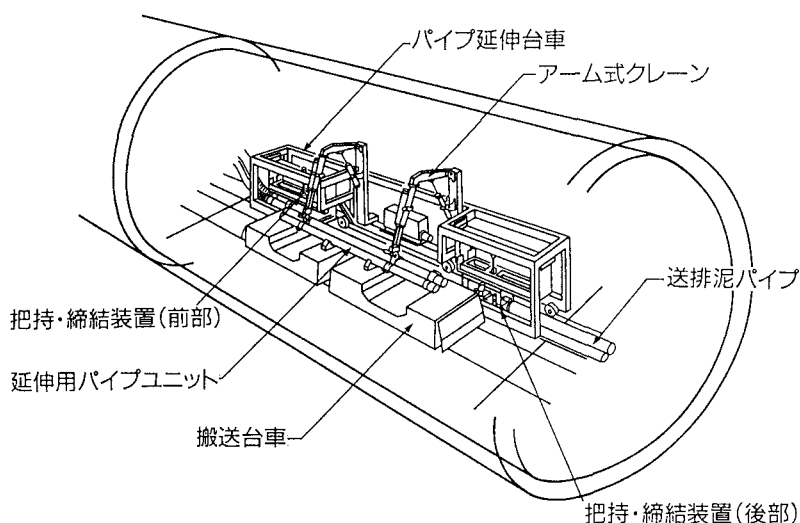


図-6 パイプ自動延伸システム

5.2 主要装置

主要装置はレール上を移動する鋼製フレームでできたパイプ延伸台車で、パイプを取込む2基のアーム式クレーン、パイプの位置合わせを行う2基の把持装置、継手のスライドと締結を行う2基の締結装置などから構成される。これらの装置の駆動にはコンピュータ制御の電動油圧モータを用いている。

なお今回製作した装置は、6インチと8インチのパイプおよび継手をセットにしたパイプユニットを使用している。

5.3 自動延伸の手順

このシステムの一連の手順は以下の通りである。

- ①シールド機の所定の掘進長(5.5～6.0m)に伴い、装置前部の締結装置が既設パイプと伸縮ホースを繋いでいる継手を外す。
- ②伸縮ホースを巻き取り、パイプ延伸台車が移動して作業位置で停止する。
- ③延伸用のパイプユニットがパイプ延伸台車の前まで自動搬入される。
- ④アーム式クレーンで搬入したパイプユニットを延伸台車内に取込み、把持装置によりパイプの位置合わせを行う。
- ⑤締結装置が継手を所定の位置にスライドし、ボルトを締め付ける。

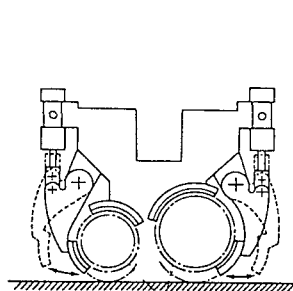


図-7 把持動作

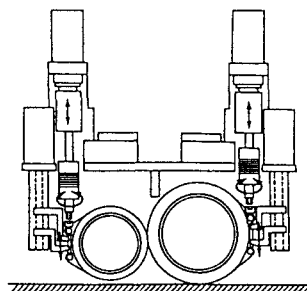


図-8 締結動作

5.4 予想される効果

このシステムでは全作業が1人のオペレータで行え、一連のパイプの脱着・締結時間は約7分である。このため、従来4～5人の作業員で行っていたことを考えると大幅な省力化が期待できる。また、重いパイプの人による移動が必要無く、苦渋作業の改善と安全性が向上する利点も期待できる。

6. 防水シート自動展張システム

6.1 展張システムの概要

シールド工事では、トンネル内への漏水防止の目的で一次覆工と二次覆工との間に防水シートの展張施工を行う場合がある。このシート施工は、今後の海底シールドや大深度シールドにおいて需要の増加が予想される。しかし、従来の防水シートの展張作業はシートの固定方法が人手に頼らざるを得ず、また、施工上の制約・品質のバラツキ・手戻りなどが目立っていた。

そこで一連の展張作業を自動化し、品質の均一性・施工能率と安全性の向上・省力化を実現するため本システムを開発した。

6.2 システム概要

このシステムは、シートの固定方法をシートの表面から行える技術を開発したことで可能となった。このことから幅広のシートにも対応でき、高速施工が可能となるなどの特徴を有している。

このシステムは、

- ①シートを溶着固定する電磁誘導溶着技術
 - ②溶着エネルギーを生成する高周波電源技術
 - ③溶着部を自動探知するセンシング技術
 - ④システムを駆動・制御するロボティクス技術
- などの最新メカトロニクス技術で構築されている。

6.3 溶着方法

溶着の仕様と方法を以下に示す。（ディスクとシートの溶着）

- ・電源周波数 : 28KHZ
- ・高周波電流 : 60A
- ・通電時間 : 5 ~ 15sec
- ・加圧力 : 10 kgf
- ・加圧時間 : 5sec
- ・溶着材 : アルミニウム ポリエステル ラミネートシート
- ・ディスク寸法: 外径85mm×45mm
- ・防水シート : 1.5mm 厚, 引張強度 140 kgf/cm²

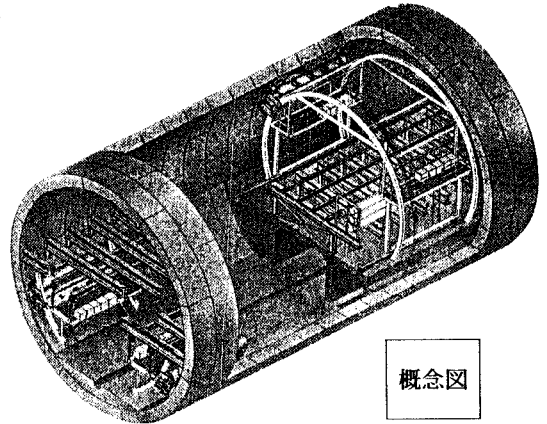


図-9 シート自動展張システム

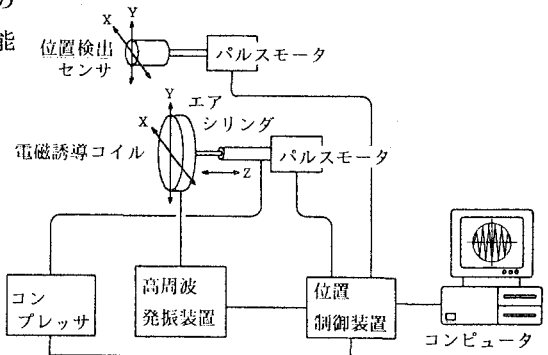


図-10 システム概要

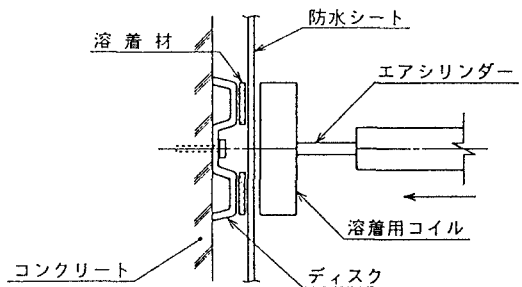


図-11 溶着方法概要

現在、モデル機を試作し溶着実験を行っているが、従来発生していた温度ムラによる穴明き、接着不完全などの不良が皆無となり、またシートのたるみもなく好結果を得た。

7. 参考文献

- 1) 菊池雄一, 鈴木康正, 小原由幸: セグメント自動搬送システムの開発, 土木学会第44回年次学術講演会
- 2) 菊池雄一, 鈴木康正, 佐藤等, 松浦幸彦: セグメント自動搬送システムの適用, 土木学会論文集, 第 427号/ VI-14, PP299 ~ 306, 1991. 3
- 3) 出口種臣: セグメント自動搬送SRシステム, 土木技術, 46-10, PP92 ~ 97, 1991. 10
- 4) 後藤 徹: F-NAVIシールド工法, 土木技術, 46-10, PP98 ~ 103, 1991. 10