

30. 長距離トンネルのための自動搬送システム

～ジオ・シャトル～

佐藤工業(株)：梅香家俊文・*高橋 浩
村上 裕二

1. はじめに

建設労働者の高齢化・若年労働者の建設離れ等、建設労働者の問題が指摘される中、建設現場の無人化・省人化は重要な課題となっている。とくに、急速施工・長距離施工化が進むトンネル工事においては、作業の効率化・安全性向上の観点から無人化技術の要請が強い。このような背景の下、筆者らは延長7kmの長距離小断面トンネルを対象に、写真-1に示す無人走行列車を用いてズリ搬出および資機材搬入を自動で行うシステム「ジオ・シャトル」を開発し、TBMにて施工中の道志導水路（早戸工区）新設工事に導入した。ここにその概要を述べる。

2. 開発の背景

近年、都市トンネルでのシールドマシン、山岳トンネルでのTBMなど、高速掘進技術の進歩を背景として、トンネル工事においては1工区の施工延長が増大する傾向にある。とくに山岳トンネルにおいては、従来のオープン型TBMに加えて、切羽の自立しにくい軟岩地山の掘進にも適用できるシールド型TBMの登場によって、大断面トンネルの導坑や長大トンネルの避難坑等、今後は中小断面のトンネル工事を中心にTBMを



写真-1 無人走行列車

用いた急速施工・長距離施工が増大するものと考えられる。TBMの最大の利点はその高速掘進性であり、長距離においてもこの利点を損なわないような有効な坑内搬送手法が、この場合極めて重要である。

当システムの開発モデルとなった道志導水路（早戸工区）新設工事は、延長5000mの円形水路トンネルを上述のフルシールドタイプのTBMにて掘削し、セグメントにて仕上がり内径3000mmに覆工するものである。この坑内搬送計画においては、次の要件を満たすことが求められた。

- ①狭小な断面の中で、セグメント搬入およびズリ搬出を安全に行うこと。
- ②将来、トンネル施工延長を7000mとする計画があり、このような超長距離においても切羽作業を待たせないような迅速な搬送が行えること。

③セグメント搬入／ズリ搬出といった定期的な搬送に加えて、不定期な各種資材や人員の出入坑もあり、錯綜する坑内搬送を安全かつ効率よく制御できること。

セグメント覆工トンネルにおけるズリ搬出方法としては、軌条式ズリ鋼車による方法、ベルトコンベア方式、流体輸送方式などがあるが、搬送設備の延長工事および設備保守が簡単に行えることから軌条式ズリ鋼車による方法が現実的である。ただし、従来のある人運転による坑内運行方法では、多くの運転手に苦渋作業を強いることになり、安全面からも長距離にわたる高速度運転は不可能である。必然的に坑内搬送の無人化・高速化を目的とした自動搬送システムの導入が不可欠となるが、これほどの長距離自動搬送システムの事例はかつてなく、新たなシステム開発が必要とされた。

3. 搬送条件

本工事における搬送条件を以下に示す。

- ①限られた断面の中で安全かつ経済的に搬送を行うために、迅速な搬送を必要とするセグメント搬入及びズリ搬出は無人列車で、その他の資機材等の搬出入は有人列車を用いて行う。(図-1参照)
- ②無人列車は、往路で1リング分のセグメントを搬入し、復路で1リング分のズリを搬出する。
- ③切羽作業のサイクルタイムに合わせて、30分以下の間隔で無人列車を運行する。

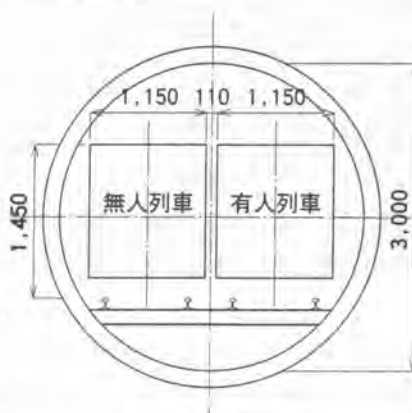


図-1 坑内断面図

以上の条件の下で、本工事の最大掘削延長(7000m)を

無人列車最長運行距離としたうえで、搬送効率・安全性・経済性を総合的に検討し、無人列車の平均速度を11km/h、最大運行列車数を5列車と定めてシステム開発を進めた。図-2に最大施工延長時の線路計画を示す。

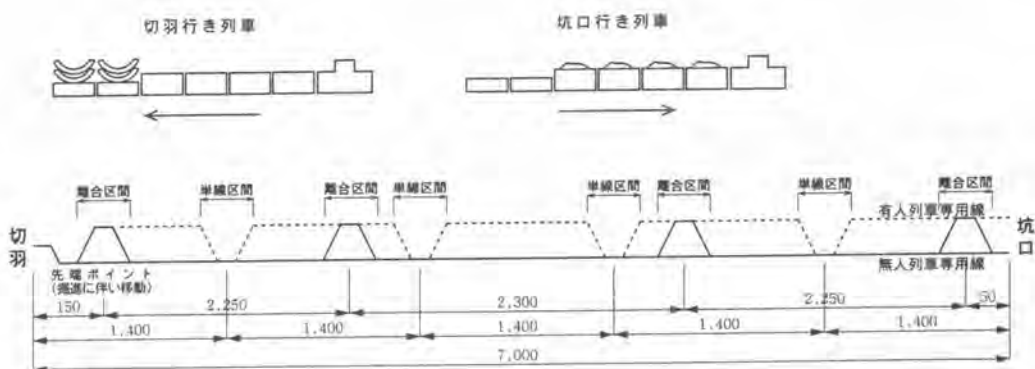


図-2 最大施工延長時の線路計画

4. システムの概要

本システムは基本的に次の三つの機能によって構成されている。

- ①セグメント搬入／ズリ搬出列車（無人列車）の自動運行制御
- ②不定期資材列車（有人列車）の安全走行管理
- ③運行状況の監視・蓄積

上記各機能について、その概要を以下に紹介する。

4-1 自動運行制御

(1) 自動運行規則

本システムでは、無人列車は単線軌道を走行し、数箇所に設置された離合区間において各列車がすれ違うことを基本に、複数列車の自動運行を制御している。このため、坑口～離合区間・隣り合う離合区間・離合区間～切羽を1運行区間とし（図-3参照）、これを列車の走行単位として全列車の自動運行の制御を行う。各列車は離合区間で必ず停止し、基本的に以下に示す条件を全て満たした場合のみ、次の1運行区間を走行できる。

- ①同方向に走行する前方の列車が、2運行区間内に存在しない。
- ②対向する列車が、前方の1運行区間に存在しない。

対向する列車が、隣り合う離合区間に同時に到着した場合、つまり2列車とも前方1運行区間内に対向する列車の存在を確認した場合は、切羽に向かう列車が優先となる。坑口に向かう列車は、到着した離合区間で待機し、上記の条件を満たすことを確認した後、次の1運行区間を走行する。

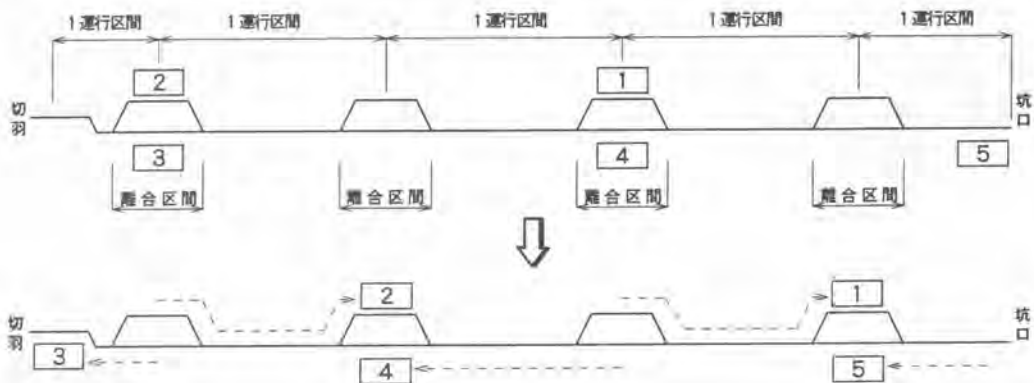


図-3 自動運行規則概念図

(2) 自動運行制御方法

上述の自動運行規則は、自走式バッテリー機関車に搭載された車上制御装置と地上の中央制御装置との間で自動交信させるシステムを構築することによって具体化した。（写真-2、図-4参照）

制御方法の概要を以下に示す。

- ①各列車と中央制御装置の交信は、レールの間に配線された誘導無線システムの誘導線とバッテリー機関車の底面に設備された誘導無線アンテナを通じて常時行われる。
- ②所要所にIDシステムのデータキャリアをレールの間に設置し、ここから、その地点の位置・それぞれの走行方向に適した走行速度・現在走行している線の種別（無人列車線・有人列車線・共用区間）が発信され、その上を通過するバッテリー機関車は、底面に設置されたR/Wヘッドを通じてこれらのデータを読みとる。
- ③バッテリー機関車は、読み取ったデータをもとに坑口からの走行距離を計算し、誘導無線システムを通じて、現在の走行位置・走行方向・走行速度などのデータが中央制御装置に送られる。
- ④中央制御装置は、複数の機関車と坑内設備からリアルタイムに送られてくるこれらのデータを受け取り、全列車の走行状況等を監視して上述の自動運行規則に従って、各列車に走行方向・発進・停止などの命令を誘導無線システムを通じて送信する。



写真-2 坑内自動運行状況

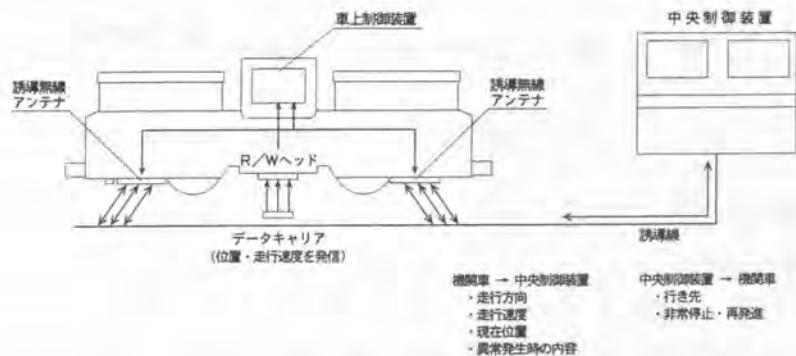


図-4 データ通信概念図

ただし、本システムにおいては以下の理由により、坑口から先端ポイントまでを自動運行区間とし（図-2参照）、切羽および坑口部分ではハンディ無線により無人列車の誘導を行うこととした。

- ・先端ポイントから切羽まではTBMの後続台車があり坑内が狭くなっている上、単線区間であり、作業員が密集している箇所であることから、誘導員の誘導により列車を進入させるため。
- ・坑外においては、セグメントの積み込み・ズリ捨て及びバッテリーの積み替え等を行うため。

(3) 無人列車の自動停止

切羽を除いて坑内は無人であるため、自動運行によって人命に関わる重大事故が生ずる可能性はほと

んどないと考えられるが、万一に備えた安全対策が必要である。また、円滑な自動運行を保証する観点からも車両の自損事故を未然に防ぐ非常停止機能が必要である。

本システムでは、図-5に示すセンサー類を無人列車の機関車および最後尾の台車に設置し、次のような場合に自動停止する設計となっている。

①線路上に障害物がある場合

- ・ 障害物センサーが前方に障害物を検知して停止。
- ・ 障害物バンパーに障害物が接触して停止。

②機関車自体に異常がある場合

- ・ 速度オーバー、油圧異常、その他電気系トラブルを自己診断して停止。

③列車が自動運行管理範囲を逸脱した場合

- ・ 磁気センサーがオーバーラン防止位置に設置した発磁体を検知して停止。

④その他、人為的に停止させたい場合

- ・ 非常停止ボタンを押して停止。

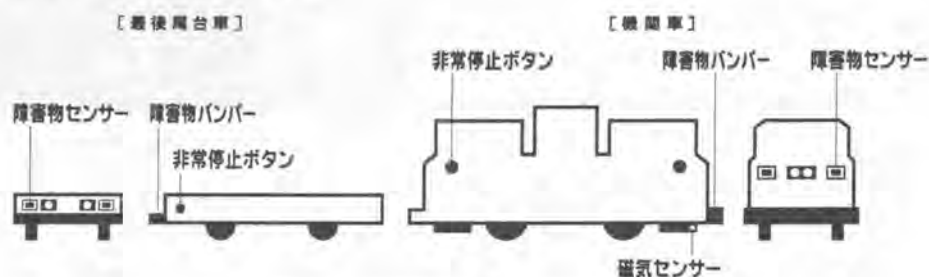


図-5 自動停止用センサー設置位置

4-2 有人列車の安全走行管理

(1) 有人列車の割り込み走行

有人列車と無人列車は基本的にそれぞれ独立した専用線を走行するが、図-2に示したように、当工事は離合区間および完全単線区間において軌条を共有する。本システムでは、秩序ある運行が要求される無人列車の走行を優先し、さほど搬送を急がない有人列車は無人列車の走行間隙をぬってこの区間を通過することを基本方針として、次のような走行方法をとっている。

- ①有人列車の運転手は、無人・有人共用区間の直前の定められた所で、必ず一旦停止する。
- ②有人列車の一旦停止を確認した中央制御装置は、全無人列車の位置・走行方向などの運行状況から共用区間への有人列車進入の可否を計算し、進入可能な場合に信号機を青色点灯する。
- ③青信号を確認した運転手は必要に応じてポイントを切り替え、速やかに共用区間を通過する。

(2) システムによる安全管理

有人列車は中央制御装置からの運行制御を離れて手動にて運転されるが、機関車そのものは無人列車と同一のものが使用されている。したがって、有人列車用のバッテリー機関車は、無人列車用と同様に

データキャリアからデータの読み込みを行い、誘導無線システムを通じて中央制御装置に自身の位置を自動送信する。また、共用区間に信号機およびポイント向き検出用リミットスイッチを設置し、同軸ケーブルを使用した通信路で中央制御装置に接続している。これらを用いて中央制御装置は信号の自動点灯を行い、上述の有人列車の割り込み走行を管理している。

以上の信号管理で通常は問題なく有人列車の割り込み走行が行えるが、有人列車の走行はあくまで手動運転であり、安全上万全とは言い難い。そこで本システムでは、中央制御装置が下記に示す状況を確認した場合、無人列車を緊急停止させることで安全運行をより確実なものにしている。

- ①有人列車の一旦停止無視および赤信号での進入
- ②有人列車の共用区間内での長期滞留
- ③ポイント向きの不正（有人列車のポイント切り替えミス）および有人・無人列車の誤車線進入

4-3 運行状況の監視・蓄積

以上、4-1、4-2に述べた無人列車の自動運行および有人列車の安全管理はすべて自動で行われており、人為的な運行管理は基本的に不要である。しかし、不測の事態に対応するため、およびシステムを柔軟に運用するために、写真-3に示すように中央制御装置に正副2画面を設置するとともに、離合区間などの運行上主要な箇所にてITVを設置し、地上の中央制御室で坑内の運行状況を監視している。

中央制御装置の主画面では、全列車の運行状況（現在位置・走行速度・走行方向）、無人・有人共用区間付近に設置された有人車両用信号機の点灯状況及びポイントの向き等がビジュアルに表示され、監視員が感覚的に運行状況を把握できるように設計されている。この画面は切羽でも表示され、切羽作業員にも運行状況が確認でき、複数の目による監視が可能となっている。

また、中央制御装置の副画面では、全列車の運行状況のダイヤグラム・非常停止時の理由・運行実績表などが表示される。これらのデータは自動蓄積され、その後の運行条件（列車速度、離合区間位置等）の見直し、およびバッテリー機関車のメンテナンス等に活用されている。



写真-3 中央制御装置

5. おわりに

当システムは平成6年9月より道志導水路（早戸工区）新設工事に導入され、平成7年7月現在、約3600mを掘進した段階まで無事故で順調に稼働している。このような長距離搬送の自動化においては、安全第一でシステム設計を行うことは論を待たないが、仮設における自動化は作業効率と経済性も重要な要素である。当システムは、安全性・作業効率・経済性のバランスを考慮して設計されたものであるが、自動化ゆえの設備費・作業手間等、さらに改善すべき点もある。今後、これらの点を検討し、汎用性の高いシステムへと昇華させたい。