

長距離トンネルにおけるズリ搬出および資材搬入の自動化について AUTOMATIC TRANSPORT SYSTEM FOR LONG TUNNEL UNDER CONSTRUCTION

高橋 浩*・梅香家俊文**・村上裕二***・斎藤 悟****

Hiroshi TAKAHASHI, Toshifumi UMEGAE, Yuji MURAKAMI and Satoru SAITO

In the face of advancing ages of construction workers and avoidance of young workers from construction work, it is significant to make labor force reduced or unmanned operation possible. The system called 'GEO-SHUTTLE' has made it possible to run multiple driverless vehicles at a high speed on a long tunnel under construction, monitoring the movement of each vehicle at real time to eliminate accidents.

This paper is to report on the outline and operational conditions of the system applied to new construction work for Doshi headrace tunnel project.

Keywords: automatic transport system, long tunnel, driverless vehicle, unmanned operation

1. はじめに

近年、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も無人化技術の要請が強い。機械化施工の著しいシールド工事では、切羽作業のみならず、セグメント等の資材搬送を自動化する事例が数多く報告されている。

一方、山岳トンネルにおいては、機械化掘削の旗手たるTBM工法が一時下火となっていたものの、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の実用化によって、再び採用される機会が増えてきた。TBMの最大の利点は高速掘進性とそれに伴う長距離施工にあり、この利点を損なわないような有効な坑内搬送手法が極めて重要である。このような背景の下、筆者らは延長7km長距離小断面トンネルを対象に、5台の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^{1)~4)}。本稿では、当システムの機能と特徴および道志導水路における活用状況について報告する。

* 正会員 佐藤工業株式会社 技術本部土木技術部

** 正会員 佐藤工業株式会社 横浜支店

*** 佐藤工業株式会社 土木本部機電部

**** 佐藤工業株式会社 横浜支店

2. 工事概要

2・1 施工法概要

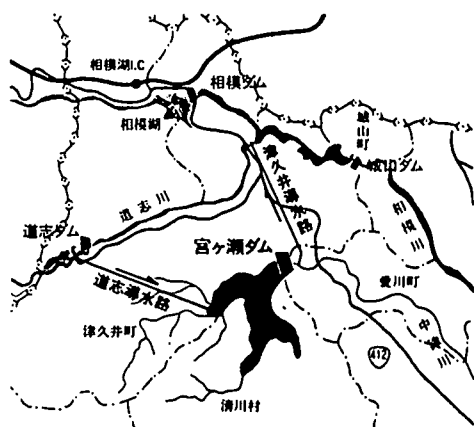
宮ヶ瀬ダムの関連事業として建設されている道志導水路（神奈川県津久井郡津久井町）は、道志川と宮ヶ瀬ダムを結ぶ延長7700mの水路トンネルである（図－1）。当システムの開発対象モデルとなった早戸工区は、このうち延長5000mの円形水路トンネルをTBM工法にて掘削する工事で、周辺の地質は丹沢層群に属する火山碎屑岩類、溶岩類および貫入岩から構成され、複雑な地質状況となっている。

このように多様に変化する地盤を効率良く掘削するために、当工事ではフルシールドタイプのTBMにて掘削し、かつ早期に完成させるために掘削後直ちにセグメントにて覆工する方法をとっている。

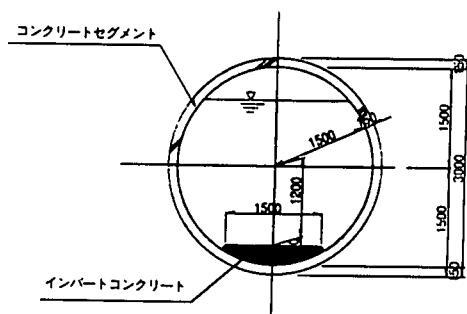
2・2 搬送条件

当工事における搬送設備を検討する上で最も重要な条件は、小断面であることと長距離輸送の2点である。

図－2に示すように、本トンネルの仕上がり内径は3000mmであり、搬送空間としては極めて狭小である。この限られた断面の中で、セグメント等各種資材の搬入およびブリの搬出を安全に行う必要があった。また、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課題とされた。



図－1 位置図



図－2 標準断面図

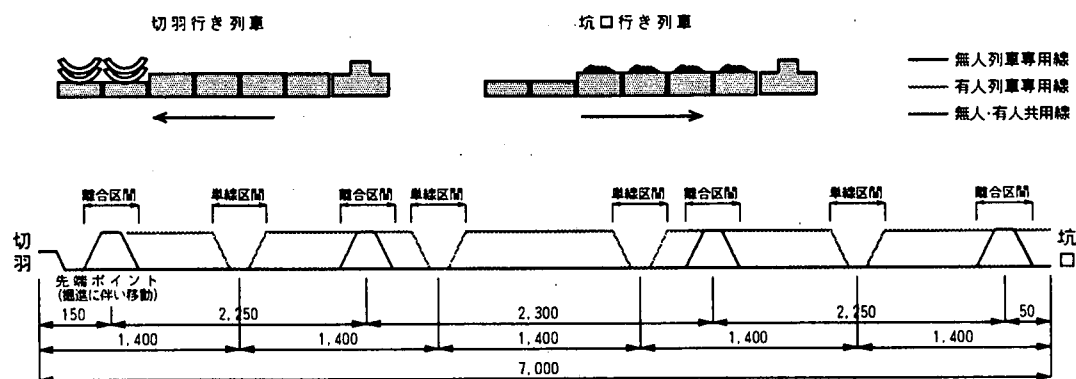
3. 搬送方法

3・1 搬送設備

セグメント覆工トンネルにおけるブリ搬出方法としては、軌条式ブリ鋼車による方法、ベルトコンベア方式、流体輸送方式などがあるが、搬送空間の制限からセグメントの搬入を兼ねる設備とせざるをえないことから軌条式ブリ鋼車による方法を採用した。すなわち、往路は1リング分のセグメントを搬入し、復路は1リング分のブリを搬出する鋼車編成を1列車として、TBM掘削サイクルタイム（30分）にあわせて複数列車を運行させる方式を用いた。

3・2 軌条計画

掘削作業に重大な影響を与える搬送はセグメント搬入とブリ搬出であり、これについては定期的に搬送される必要がある。ただし、運搬頻度は小さいものの不定期な各種資材や人員の入出坑も考慮する必要がある。セグメント搬入／ブリ搬出といった主要な物流を阻害しないためには、これとは別系統の不定期資材専用線を設置することが望ましい。しかし、当工事のような狭い坑内において、不定期資材専用線を独立して設置する余裕はなく、図－3に示すように、セグメント／ブリ搬送と不定期資材搬送が軌条を共用するスタイルの軌条計画とした。



図－３ 最大施工延長時の線路計画

3・3 無人搬送

この搬送方法を実現する場合、従来の有人運転による坑内運行方法では、多くの運転手に混乱と緊張感を与えることになり、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、すべての列車を自動運転とすることは経済的でないばかりでなく、かえってシステムを硬直させ効率の低下を招くことにもなりかねない。

そこで本システムでは、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こととした。

4. 自動搬送システム

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

(a) 自動運行規則

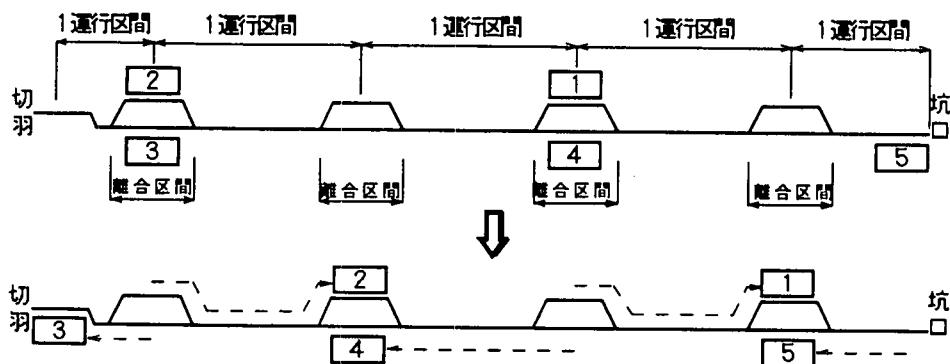
本システムでは、無人列車は単線軌道を走行し、数箇所に設置された離合区間において各列車がすれ違うことを基本に、複数列車（最大5列車）の自動運行を制御している。このため、坑口～離合区間・隣り合う離合区間・離合区間～切羽を1運行区間とし（図－4参照）、これを列車の走行単位として全列車の自動運行の制御を行う。各列車は離合区間で必ず停止し、基本的に以下に示す条件を全て満足した場合のみ、次の1運行区間を走行できる。

- 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停車している場合、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、上記の条件を満足することを確認した後、次の1運行区間を走行する。

(b) 自動運行制御方法

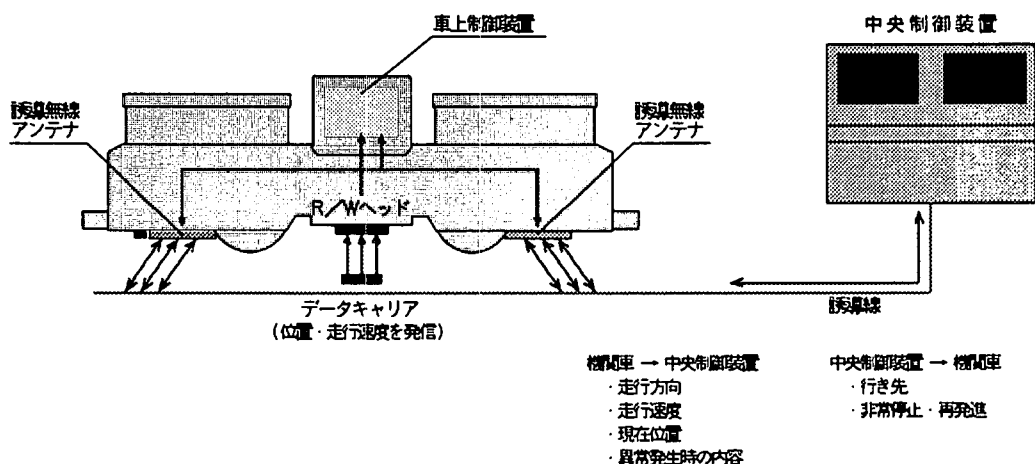
上述の自動運行規則は、自走式バッテリー機関車に搭載された車上制御装置と地上の中央制御装置との間で自動交信させるシステムを構築することによって具体化した。（図－5参照）



図－4 自動運行規則概念図

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通信は、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要所要所に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。



図－5 データ通信概念図

(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、各種センサー類を列車に設置し、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。

4・2 有人列車の安全走行管理

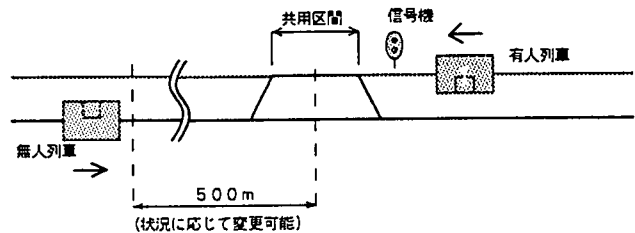
(a) 有人列車の割り込み走行

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－3に示したように、当工事で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（図－6）。

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。



図－6 有人列車進入概念図

(b) 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、安全上万全とは言えない。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－１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アグラム・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。

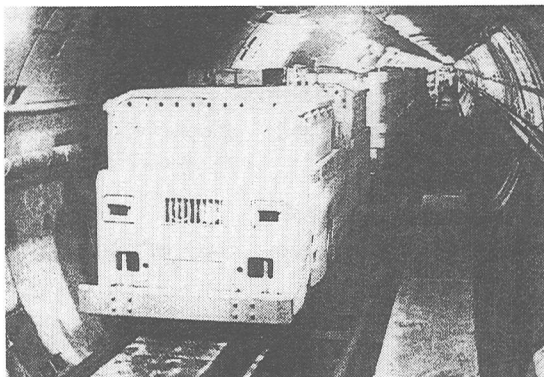


写真－１ 中央制御装置

５．おわりに

平成６年３～５月、実車を用いた実証実験によりシステムの信頼性を確認後、平成６年９月より当工事に本システムを導入した。現在、約４１００ｍまで掘削が進んでいるが（平成７年９月現在）、本システムは無事故で順調に稼働し、施工の効率化および安全向上に少なからず貢献している。とくに、掘進延長２０００ｍを越えてからのシステム導入効果は顕著であり、本システムは当初の目的通りの成果を挙げている。

ただし、導入から約１年を経過した現段階で、誘導無線等の仮設手間の軽減・無人機関車のさらなる高速化など、さらに改良すべき点もいくつか指摘されており、現在、新システムの構想を固めつつある。今後これらの点を検討し、効率の高いシステムの開発に取り組む所存である。



写真－２ 坑内自動運行状況

６．参考文献

- １） 染川・梅香家：宮ヶ瀬ダム 道志導水路新設工事における機械化施工，第３４回施工体験発表会，pp. 79～84，1994. 12.
- ２） 村上・梅香家・高橋・斎藤 他：長距離トンネルのための自動搬送システムの開発，第５回建設ロボットシンポジウム論文集，PP. 239～248，1995. 7.
- ３） 高橋・村上・鈴木・梅香家 他：長距離トンネル自動搬送システムの開発，土木学会第５０回年次学術講演会，PP. 418～421，1995. 9.
- ４） 梅香家・高橋・村上：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～，建設機械と施工法シンポジウム論文集，PP. 158～163，1995. 10 .