

シールド・トンネル工事に用いた磁石ベルト式 搬送システムの開発

— マグネットドライブ —

中山正夫・上田尚輝

近年、シールド工事は長距離化しており、急速施工を求められてきている。また、大断面、大深度での施工も増加すると思われる。

株式会社大林組と三和テッキ株式会社は共同で、急勾配を含むトンネルにおいて人員、資機材等を安全に高速搬送できるシステムを開発した。本システムは、従来のレールと車輪の摩擦抵抗を利用する代わりに、磁石が鉄片に吸着するときに発生する磁気摩擦力を使用するので車体の重量に関係なく一定の走行力が得られ、急勾配部でも補助装置なしで運行可能である。

本システムの作動原理、概要、工場内走行実験及び実工事に適用した結果について報告する。

キーワード：シールド、急勾配、搬送システム、磁石

1. はじめに

近年、シールド工事の発注は長距離化しており、さらに急速施工を求められてきている。また、大断面、大深度での施工も増加すると思われる。今後、長距離、急速施工、大断面、大深度でのシールド施工を検討するうえで、坑内の人員、資機材等の輸送方法の見直しが急務となっている。

一般的には、シールド工事では軌条を敷設しバッテリー機関車を動力車として資機材等を運搬するが、軌道の場合には勾配を5%以下とするように法規で定められている。したがって、5%を超える勾配で軌道設備を敷設する場合、ラック&ピニオン等の補助装置が必要となるが、このような方式では構造上走行速度が遅く、勾配部の距離が長くなると搬送のサイクルに支障をきたすことが考えられる。高価なラックを敷設する必要もあり、距離が長くなると費用も増加する。

このような状況から、従来の急勾配対応装置に変わるシステムとして、磁石ベルト式搬送システムの開発を行った。本システムでは、小型で高性能の永久磁石を数十個組込んだベルト（磁石式ベルト）を、鋼製のガイドレールに押付けて正逆に回転することで前後の推進力が得られる。機構

上、5%以上の急勾配でも安全かつ高速で資機材を運搬できることがわかった。

以下に、磁石式ベルトの原理、仕様、工場内走行実験、実工事での施工結果について述べる。

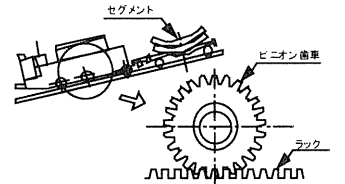
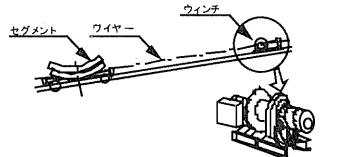
2. 動作原理及び特長

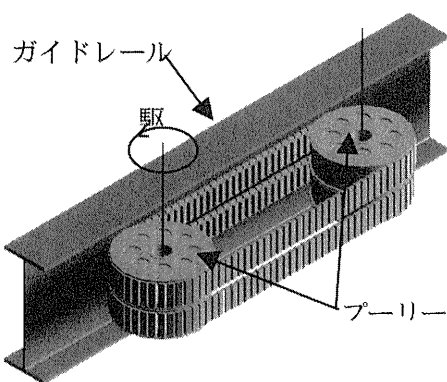
(1) 動作原理

従来の軌道設備は、車輪とレールの間の摩擦力を利用して走行力を得ている。摩擦力は車輪にかかる荷重に摩擦係数を掛けたもので、強い推進力を得るためには重い荷重が必要である。しかし急勾配では、荷重を大きくすると下方向の分力が大きくなるため車輪の回転力が摩擦力よりも大きくなり登坂不能となったり、制動距離が長くなるため安全性を確保することが困難となる。表—1に従来使用されてきた補助装置を示すが、ラック&ピニオン等の補助装置が必要であった。

本システムでは、車輪・レール間の摩擦力の代わりに磁石が鉄片に吸着するときに発生する磁気摩擦力を使うことにより推進力や制動力を得る。図—1に示すように、数十個の永久磁石を組込んだ磁石ベルトをプーリにキャタピラ状に取付け、その内約3分の1の永久磁石が常にガイドレールに吸着するため、車両重量に係わらず一定の磁気

表一 急勾配走行用補助装置

搬送方式	構造概要	概要図
ラック&ピニオン式 (バッテリー 機関車式 外部電源 台車式)	・鋼製のラックをセグメント上部に布設しピニオン歯車がラック部に噛み込みながら走行する。 ・ピニオン歯車の駆動は、機関車内のモータが回転することにより作動する。モーター回転のための電源供給はバッテリーが内蔵されているバッテリー電源方式と、電線リールに必要ケーブル長を巻き付けておきリールの回転により行う外部電源方式がある。	
ウィンチ式	・ウィンチモーターの駆動によりワイヤーを巻き上げ下げすることで台車が走行する。 ・台車は通常セグメント上部に設置された軌道レール上を走行するのが一般的である。	



図一 概念図

摩擦力を得られる。

実際にはガイドレールを挟みこむように反対側にも磁石ベルトが装備されている。磁石ベルトの本数は必要な磁気摩擦力によって決められるが、図一では上下2段となっている。

(2) 特 長

磁石ベルト式搬送システムの特徴を以下に記す。

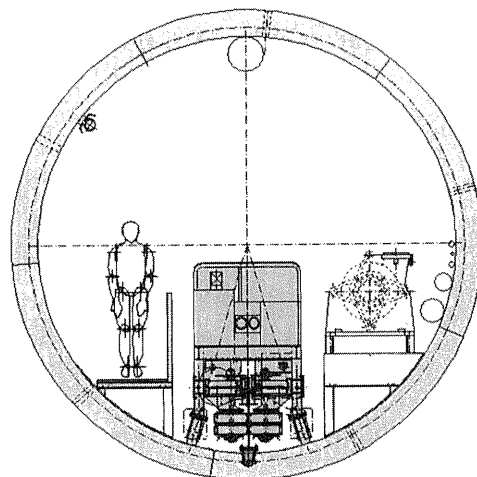
- ① 登坂能力が大きい(車両重量に関係なく一定の推進力が得られる)。
- ② 車両が小型軽量で牽引力が大きいため、長距離、急勾配に適する。
- ③ 急曲線走行が可能(15 mR)
- ④ 永久磁石の摩擦力を利用するため安全性、信頼性が高く、走行面の環境に左右されにくい。

3. システム構成

今回、工場内走行実験及び現場実証実験の実施にあたり、磁石ベルト式搬送車両1台、セグメント台車2台を製作した。図一、図二にセグメント内径φ4,700 mmの泥水式シールド工事に適用した場合の例を示す。搬送車両及びセグメント台車はいずれもタイヤ走行式であり、シールドセンター下部に布設されたガイドレールに沿って走行する。

また、搬送装置の推力・制動力の反力もこのガイドレールより得られる。枕木を布設する代わりに、左右にブラケットを配置して安全通路、排泥ポンプ設置場所を確保している。

駆動力としてはサーボモータを使用しており、



図二 坑内断面図

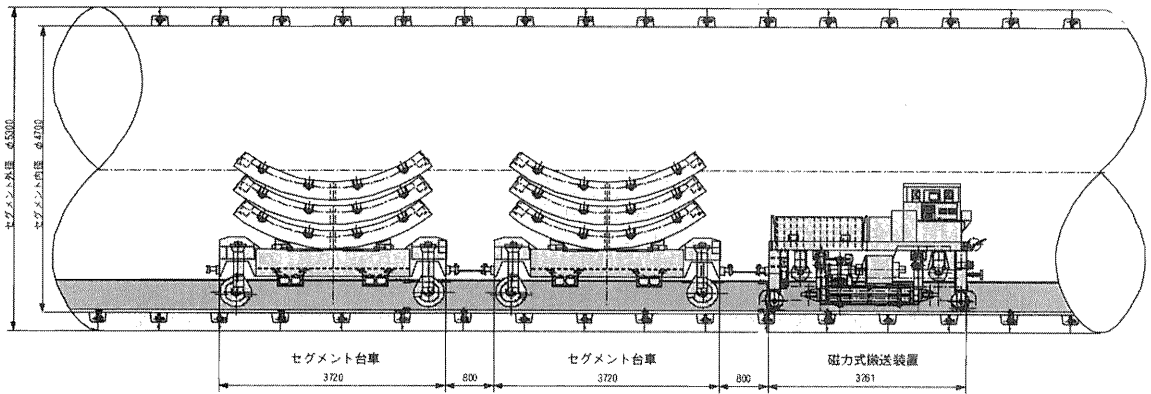


図-3 坑内縦断図

定格トルク内であれば任意の回転数を設定することが可能であるため、通常の運行ではディスクブレーキ等の機械制動装置を使う必要はない。そのため、制動装置の故障・摩耗も少なくメンテナンスが容易であり安全性が高い。また、急勾配で使用することを考慮して、非常時や停車時に使用する負作動の電磁ブレーキ、大容量ディスクブレーキ、トラックブレーキ等も装備されており安全性に十分配慮されている。

4. 機器主要仕様

写真-1 に設備の全体を示す。先頭が磁石ベルト式搬送車両で、その後方にセグメント台車が2台連結されている。黒丸で囲まれた部分に駆動装置が格納されており、その詳細を写真-2 に示す。この駆動装置は車両の左右に対称に設備されており、写真中央部に示されているサーボモータの出力が減速機を経て、磁石ベルトを支持している

プーリに伝達される機構となっている。

表-2、表-3 に磁石ベルト式搬送車両とセグメント台車の主要仕様を示す。牽引力としては従来の12トンクラスのバッテリー機関車とほぼ同等で

表-2 搬送車両仕様

通行速度	最大	10 km/hr
定格牽引力		10.78 kN
質量	車体 バッテリー	5,000 kg 2,200 kg
寸法	全長 全幅 全高	3,900 mm 1,200 mm 2,315 mm
最小旋回半径		15 m
サーボモータ	台数 定格出力	2台 22 kW
磁石ベルト	使用本数	4
安全装置	非常停止ボタン 障害物検出バンパ 障害物センサ 前方監視カメラ 排障器	5個 前後2個 前後各2個 1セット
運転方式	運転席での操作 無線操作	

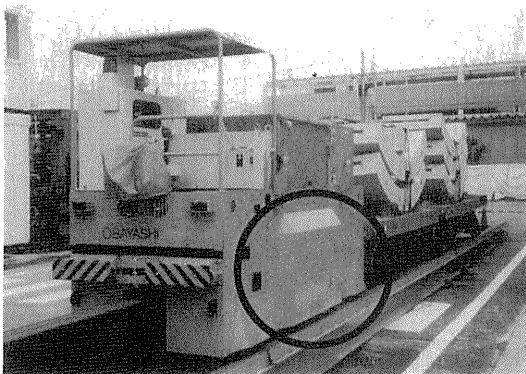


写真-1 設備全体図

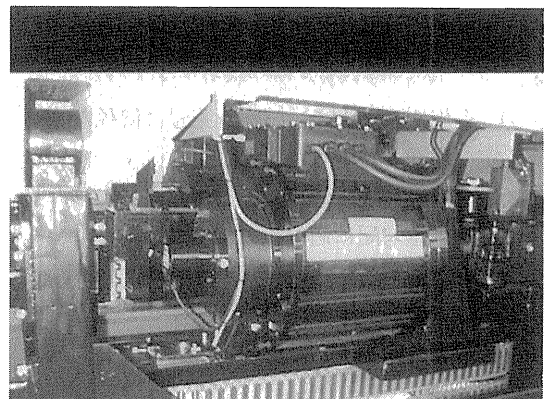


写真-2 駆動装置

表—3 セグメント台車仕様

質量	自重 最大積荷重	2.6 t 8 t
寸法	全長 全幅	4,030 mm 1,473 mm
走行装置	ウレタンタイヤ 旋回方式	4 個 1 軸旋回式

あり、勾配部分でも一定の推進力が得られる。したがって、被牽引質量にもよるが、5%を超える勾配でも運行可能である。

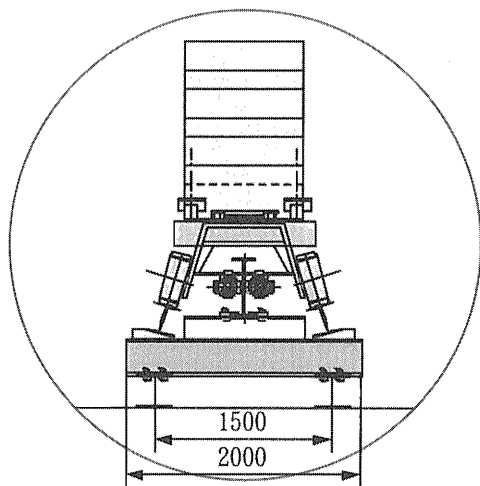
運行可能な最小曲率半径は 15 mR であるが、シールド工事の実績より大半のシールド工事に適用可能である。

5. 工場内走行実験

(1) 実験条件

図—4 に走行実験に使用した試験軌道の断面図を示す。

円形のトンネル内を走行するため、車輪はセグメント内面と直角に接するように「ハ」の字に開いている。試験軌道では H 鋼を傾けてセグメント内面を模擬しており、その上を車輪が走行する。



図—4 試験軌道断面図（セグメント台車）

今回は、セグメント内径 $\phi 4,700$ mm のトンネル内を走行するように車輪の角度は調整されているが、角度を変更すると異なった径のトンネルにも適用可能である。

セグメントは 1 リングあたり 6 分割で、写真—1 に示すようにセグメント台車 2 台にそれぞれ 3 ピース筒搭載して 1 リング分を 1 度に運搬することができる。セグメントの質量は約 12.3 t、セグメント台車の質量は 2.6 t/台で、被牽引質量は約 17.5 t となる。

試験軌道には全長約 120 m で、直線部、急曲線部、勾配部が設置されている。直線部では前後に加減速区間が設けられている。急曲線部はシステムの最小適用半径である 15 mR である。また、勾配部は 2.2% で加速区間及び制動距離を計測できる区間を設けている。

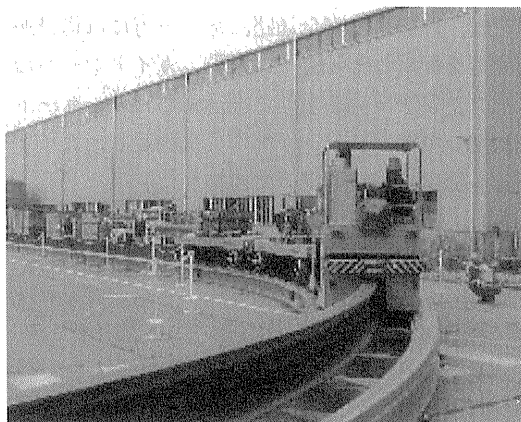
(2) 実験目的

以下の項目の検証及びデータ計測等を行った。

- ① 始動抵抗、転がり摩擦抵抗、曲線走行抵抗
- ② 走行時の安定性（一定速度、加減速時）
- ③ エネルギー効率
- ④ 急曲線走行時の方向制御性能
- ⑤ 制動距離
- ⑥ サーボモータの制動特性

(3) 実験結果

概ね当初計画どおり性能を確認することが出来た。始動抵抗、転がり摩擦抵抗は設計値の半分程度であり、それにともないエネルギー効率も高かった。今回、車輪と接触する走行面が鋼製でかつ平滑であったためだと考察されるが、セグメント上を走行する場合多少抵抗が増えると思われる（写真—3）。



写真—3 急曲線走行試験

急曲線部の曲線走行抵抗も設計値より少なかったが、これはセグメント台車の走行車輪をボギー式として案内輪で曲線に沿って車輪を操舵する機構としたことに起因すると考えられる。

サーボモータの制御特性を調整してスムーズな加速、減速が行えるようになった。また、下り勾配部分で高速走行時からでも設計制動距離内で停止できることを確認した。

6. 工事概要及び施工工事

(1) 工事概要

工事概要に示すように、本工事は泥水式シールドであるため掘削土砂を坑外に搬出する必要がなく、主にセグメント、配管等を搬入するために使用された。

- ・工事名称：八潮共同溝Ⅰ期工事
- ・発注者：国土交通省関東地方整備局東京
国道工事事務所
- ・施工場所：東京都品川区
- ・泥水式シールド工法
- ・施工延長：約 650 m
- ・縦断勾配：2.175%（下り）
- ・曲線半径：100 m, 150 m, 200 m
- ・セグメント： $\phi 4,700$ mm（内径）
 $\phi 5,300$ mm（外径）
12.3 t/ring（質量）

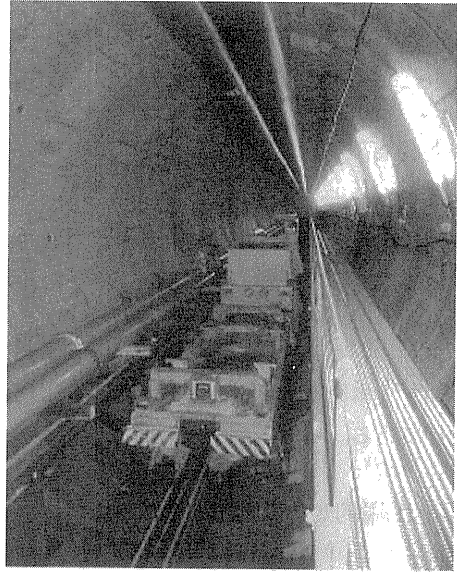
(2) 施工方法

当初の計画どおり写真—4に示すように、枕木を敷設しないで、セグメント左右にブラケットを取付け、片側には安全通路、もう一方には送排泥設備等を配置した（図—2参照）。ガイドレールの下部フランジ部分を事前に埋込まれたインサートを利用してセグメント下部中央に固定し、ガイドレール間はウェブの上下で連結した。

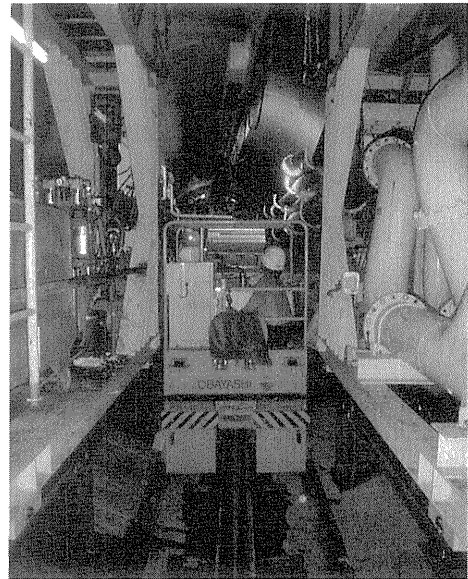
また、後方台車の区間では、左右のブラケット上にレールを敷設して門型の台車を走行させた。写真—5に左右の台車間を走行して切羽にセグメントを運搬してきた状況を示す。

(3) 施工結果

搬送システムの基本性能は工場内走行実験で確



写真—4 坑内走行状況



写真—5 切羽での資材搬入状況

認しているため、実工事で施工するうえで、次の項目に留意した。

(a) 耐久性、信頼性

磁石ベルトは開発中に長期間の耐久テストを行っているが、現場での施工中に金属片等の異物を噛込んだり、ガイドレール表面の錆が磁石に付着して性能が劣化することなどが懸念された。ベルトの前後に排障器を設備するとともに周辺の環境を整備することで、施工中故障や性能低下等は

発生しなかった。

また、セグメント間の段差を通過するときウレタタイヤに亀裂が生じることも懸念されたが、同様に異常は発生しなかった。

(b) 周辺設備の施工性

枕木、レールに代わるブラケット・ガイドレールは切羽で設置したが、従来方式と比較して作業性は同等で、設置誤差も許容範囲内で収まった。

また、ガイドレールは直線区間では4m、曲線部分では2mのレールを切羽で延長したが、曲線にあわせて曲げ加工を行う必要はなかった。

(c) 操作性

操作は運転席、もしくは無線装置を使用しての遠隔操作とした。従来のバッテリーロコと同様の操作方法にしたため、作業員が熟練するまでの期間は短かった。

7. 終わりに

今回、本システムを適用した工事は勾配が約2%であり、従来のバッテリー機関車で施工可能であった。しかし、実工事に適用することで耐久性、信頼性の検証及び周辺付帯設備の施工方法を確立

することができた。工場内走行実験の結果も踏まえ、5%以上の勾配があるトンネル工事に本システムを適用するための技術は確立されたと考えている。また、本システムは労働安全衛生規則の軌道装置に該当しないため、法的に問題がない。

今後は、駆動部の設計を見直すことで、車両の軽量化、製作費のコストダウンを目指したい。また、急勾配のある工事に積極的に導入を計画して、本システムの普及を図るつもりである。

J C M A

[筆者紹介]

中山 正夫 (なかやま まさお)
大林・日産特定建設工事共同企業体
現場代理人



上田 尚輝 (うえだ ひさてる)
株式会社大林組
東京本社
機械部
課長



建設機械用語集

(建設機械関係業務者一人一冊必携の辞典)

- 建設機械関係基本用語約2000語(和・英)を集録。
- 建設機械の設計・製造・運転・整備・工事・営業等業務担当者用辞書として好適。

B5判 約200頁 定価2,100円(消費税込)：送料600円

会員1,890円(")： "

社団法人 日本建設機械化協会

東京都港区芝公園3-5-8(機械振興会館) TEL03-3433-1501 FAX03-3432-0289