

導水路トンネル補修工事における機械化・自動化施工

前田建設工業株式会社	正会員	○片桐 智浩	前田建設工業株式会社	孟 凡淞
前田建設工業株式会社		春田 克樹	前田建設工業株式会社	鶴巻 慎也
株式会社南組		南 真樹	株式会社南組	西谷内 龍司
前田製作所株式会社		太田 章一	前田製作所株式会社	丸山 達也

1. 目的

再生可能エネルギー普及拡大が求められる中、わが国の水力発電所は、半数近くが運転開始から 50 年以上経過しており、設備の老朽化による発電量の低下が懸念されている。そのため、水力発電設備のリニューアルが急務となっており、それに伴う導水路トンネルのリニューアル工事が多数計画されている。しかしながら、これらの工事は、狭小な空間での作業になるため大型機械の適用が難しく、人力による作業足場上の苦渋作業の割合が多くなり（写真-1）、労働災害リスクや工事規模に対して生産性が劣るといった問題がある。さらに近年は技能労働者不足の課題も深刻化しており、省人化や生産性向上のための技術導入が急務となっている。また、実際の工事においては工法に限らず、資機材の運搬作業も必ず発生する。運搬作業時、車両を運転するオペレータ以外に、安全管理上、先方誘導と後方確認も必要となるため、2～3 名での作業が一般的である。

筆者らは、こうした狭小な空間内での苦渋な人力作業を多く必要とする補修工事において、省人化と安全性を向上させる機械化・自動化施工の技術として、「吹付け左官自動施工台車」「パネルライニング台車」「自動搬送台車」の 3 つを開発した。本稿ではその技術について報告する。



写真-1 従来作業

2. 吹付け左官自動施工台車

(1) 技術概要

導水路トンネルの補修工法の一つに、既設の覆工コンクリートにカーボン、ガラスなどの高性能連続強化繊維を樹脂に含浸させながら一体成型した格子筋をアンカーで取付け、特殊ポリマーセメント系モルタル（以下「PCM」）を吹付け等により一体化させるものがある。

この PCM の吹付け作業とその後の吹付け面を平滑に均す作業を自動化するための機構を備えた施工台車を開発した（写真-2）。なお、本機械は施工中の安全通路、および資機材の運搬経路を確保する観点から、トンネル中央の空間を有効活用できる門型構造としている。

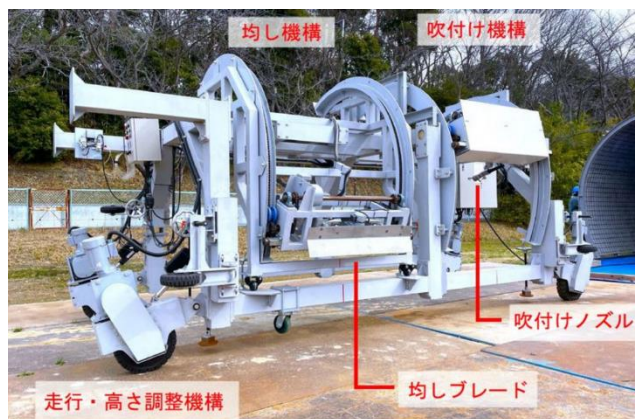


写真-2 吹付け左官自動施工台車の全景

a) 自動吹付け機構

自動吹付け機構は、トンネルのアーチ形状に合わせて加工されたレール上を移動する「横行機構」と、トンネル壁面に対して左右に移動する「往復機構」の組み合わせで構成されている。各機構の速度制御により、トンネル壁面に所定の厚さで均一な吹付けを実現する。

キーワード 導水路トンネル、省人化、吹付け左官、パネルライニング、自動搬送

連絡先 〒102-8151 東京都千代田区富士見 2-10-2 前田建設工業(株) TEL 03-3265-5551

b) 自動均し機構

自動均し機構は、「横行機構」に取り付けたブレードにより壁面を平滑に均すことが可能となる。ブレードを微動させながら吹付け面に押し当てることで、セメントペースト分を浮き上がらせながら余剰分を削ぎ落とし、吹付け面を最終仕上げに近い状態まで均すことを実現する。また、トンネル壁面に対して「前後移動機構」、および左右に首振り可能な「ヨーイング調整機構」により、壁面に合わせたブレードの位置合わせを実現した。

(2) 実証試験

施工台車の実機完成に伴い、導水路トンネルを模擬した空間内で動作確認、およびPCMを用いたトンネル内補強施工の機械化実証を行った（写真-3）。

a) 試験概要

延長約 12m、断面幅 3m の模擬トンネル空間内において、試験区間にモルタルを塗布し、高炭素繊維の格子筋を配置した。試験区間は延長 1m の 3 スパン分として、それぞれのスパン毎に異なる仕上げ厚（パターン A：15mm、パターン B：20mm、パターン C：25mm）を設定し、主に施工対象への位置合わせ、および吹付けから均しまでの一連の動作確認を実施した。今回の自動施工台車による吹付け、および均しの作業面積は、1 スパンあたり 3.64m²である。

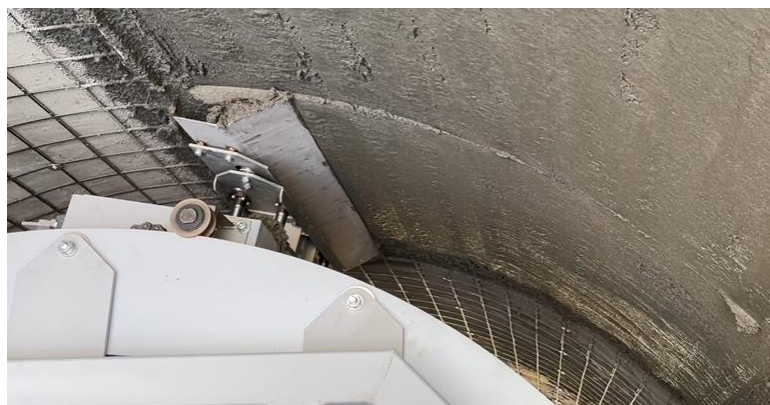


写真-3 吹付け（左）と均し（右）の試験状況

b) 吹付け試験結果

吹付けの実証試験は、設定した吹付け厚（15mm～25mm）を確保しながらも、1 スパンあたり約 10 分での吹付けを実現した。

c) 均し試験結果

均し試験によるトンネル内面の仕上がりは、最終仕上げに近い状態まで均一に均すことを実現した。

(3) 要素技術の現場適用

当社施工の久保内発電所水車発電機他更新工事のうち導水路改修工事において、本自動施工台車の極小断面タイプを導入し施工性を確認した。

a) 現場概要

ほくでんエコエナジー株式会社の久保内発電所（北海道有珠郡壮瞥町）は、1951 年に運転を開始した水力発電所であり、老朽化した導水路トンネルをかかえている。そこで導水路内において、地山の変状が顕著で早急な対策が必要と考えられる区間を対象として、鋼枠補強工、側壁コンクリート補修およびクラック補修を実施し、導水路としての機能を維持するためのリニューアル工事を実施していた。また一部区間に、モルタルの吹付け・均し工法が採用されたため、試験区間を設けた（写真-4）。



写真-4 現場実証実験

b) 試験結果

現場での本機械を用いた吹付け、均し作業において、それぞれ1名（機械操作者）で作業が可能であることを確認した。従来施工で6人/班の作業において本機械を導入することで4人/班とし、作業人員の削減を実現した。

(4) 今後の展望

導水路トンネル内の閉鎖された狭小な空間での作業負担が大きい現状に対して、当社で負担作業を削減し、作業環境を改善するとともに、機械施工による仕上げ品質の向上と、省人化施工による生産性向上をさらに促進し、安全性の確保や労働投入量の低減に引き続き取り組んでいく。

また、本機械は、導水路トンネルのリニューアル工事だけでなく、多様な小規模断面トンネルや狭小な空間においても活用、応用可能と考えており、今後も開発を進めていく。

3. パネルライニング台車

(1) 技術概要

従来の導水路トンネル補修工法の多くは、劣化した区間を取り壊して撤去した後、新たにコンクリートを内巻する工法が一般的であるが、パネルライニング工法は既設構造物を取り壊すことなく、ライニングによって再生し、長寿命化を図る工法である。表面被覆材には平滑な耐摩耗性・粗度係数に優れたレジンコンクリートパネルを用い、パネル背面には高強度の「高流動微粒子グラウト充填材」と鋼製支保工等の鋼材を組み合わせることで、既存施設の耐久性を向上させる。しかし、実際の施工において足場を使った人力によるパネル貼り付け作業は、1枚あたり約25kgのパネル揚重作業が発生し、トンネル天端付近の作業は上向きで苦渋作業という課題もあった。

そこでパネル材を吸着把持することで据え付け作業を機械化し、人力による揚重作業をなくすことができる機構を備えた施工台車を開発した（写真-5）。



写真-5 パネルライニング台車の全景

a) 吸着把持機構

パネル吸着部には、レジンコンクリートパネルへの治具取付や改造を施すことなく把持ができるように真空吸着パッドを採用した。吸着パッド（Φ300mm）の把持能力は水平方向にて100kgである。

吸着パッドは施工時の安全性向上を目的に2つ配置し、本機構の性能を確認するために吸着把持試験を実施した（写真-6）。

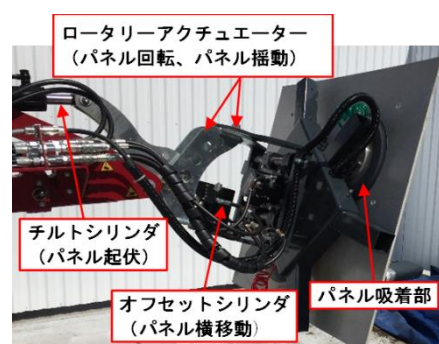


写真-6 パネル把持機構

(2) 現場実装

本台車を導水路トンネル補強工事に導入した実績を紹介する。

a) 現場概要

九州電力株式会社の夜明発電所（大分県日田市）は、1954年に運転を開始した水力発電所で、老朽化した水車・発電機および水路工作物のリニューアル工事を行っている。このうち、導水路では補強と通水能力向上を目的としたパネルライニング工法を採用した。延長約856mの補強対象区間に、約12,000枚のレジンコンクリートパネル（25kg/枚）を設置する。従来の人力作業から部分機械化施工に切替え、作業員の負担軽減と安全性向上を目指している。

b) 導入効果と課題

本工事においてパネルライニング台車の導入により、人力によるパネルの揚重作業が不要になるため、作業

員の負担やパネル取付け時の指の挟まれなどの災害リスクが軽減し、省力化と安全性向上の効果を確認できた。また、パネルの把持から位置合わせ作業までがワンオペレーション可能となるため、従来の作業人員を約 50% 削減できることも確認できた。

課題は、施工スピードが従来施工と同程度であり、ボルト固定やパネル供給作業についても従来同様に人力作業が必要なことである。解決策としては、パネルライニング台車と材料の改善によってパネル取付け、固定作業の自動化、パネルのサイズアップにより、作業効率の更なる向上を図ることができると考える。

(3) 今後の展望

今後増加するリニューアル工事において、本工事同様、施工延長の長いトンネル補強工事では狭隘な空間での作業が多く発生すると考えられる。特に本工事のような高所での揚重作業を伴う場合は本台車を導入することより安全面、施工効率面の向上が期待できる。

4. 自動搬送台車

(1) 技術概要

導水路トンネルの補修工事における資材運搬の作業は、常時坑内全域で行われており、工事全体で多くの労働投入量が求められている。労働力不足の解消や作業効率の向上を目的に、筆者らは導水路トンネル内での自律走行が可能な自動搬送台車(以下、本台車と呼ぶ)を開発することで資材搬送の自動化を実現した(写真-7)。本台車は、自律走行機能を搭載したタイヤ式の小型運搬車両で、操作は全て携帯式のパネルで行うことができ、以下のような特徴を持つ。

a) 自律走行機能

本台車は、車体の前後に 2D および 3D LiDAR を搭載しており、周囲の点群データをリアルタイムで取得できる。このデータを基に走行経路を自動的に生成し、走行中の環境変化に応じてリアルタイムで走行経路を更新する。これにより、曲線や狭隘部でもスムーズな走行を実現する。

b) 安全機能

本台車は狭い場所や障害物を自動認識し、走行不可の場合は自動停止する。走行可能な道幅や高さの閾値については任意に設定でき、本台車に人や物が近接した場合にも自動停止する。また、万が一の備えとして、本車体前後にあるバンパーが接触した瞬間、非常停止する機能も有している。

c) 自己位置把握と目的地指定

導水路トンネル内では GNSS 通信が使用できないため、本台車の位置情報や目的地を指定するための手段として RFID 技術を活用した。本台車に RFID リーダーを搭載し、坑内に RFID タグを一定間隔で設置することで、走行中に通過したタグ情報が操作パネルに送られ、現在位置を把握することができる。また、資材置場や作業場所などの目的地にも RFID タグを設置することで、本台車が指定された目的地に到達すると自動停止することが可能になる。これにより、管理側が本台車の正確な位置情報を取得し、効率的な運搬指示を実現できる。

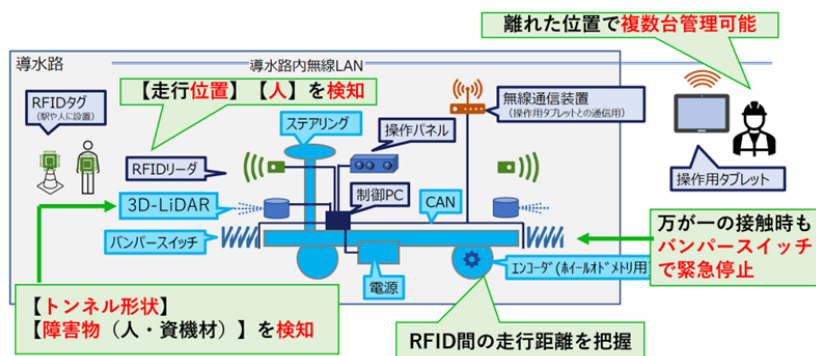


写真-7 自動搬送台車のシステム構成（左）と全景（右）

(2) 実証試験

筆者らは当社技術研究所（ICI）で、本台車の走行性と運用適応性を確認するための実証試験を実施した。

導水路トンネル壁面の下部を模擬する幅 3m の走行路で、線形は直線部と曲線部（最小半径 50m）があり、資材を模擬した障害物を適宜配置した。この環境下で、最大 200kg の積載を行い、本台車の自律走行能力を評価した。

a) 試験結果と課題

試験の結果、本台車は積載重量に影響されず、最大 5km/h の速度で自律搬送ができることを確認した。また、LiDAR による点群検知により、障害物を避けながらスムーズに走行できることも確認した。RFID による目的地到達と自動停止も成功した。

課題としては、雨天時に LiDAR 本体に雨粒が付着することでノイズ点群が発生し、本台車の挙動に影響を及ぼすことである。また、実際の現場では側壁やインバート部が曲面かつ暗所でもあるため、LiDAR による検知や RFID の通信に影響がある可能性が懸念された。そこで実際のトンネル坑内で走行試験を実施することにした。

(3) 現場実証試験

当社施工中の九州電力株式会社の夜明発電所導水路トンネルで本台車の現場実証試験を行った。内空幅が 5m、延長 500m 程度の区間で、資材置場や施工機械が多数存在する環境での走行試験を実施した（写真-8）。この試験では、実際の施工環境における本台車の走行性を評価することを目的とした。

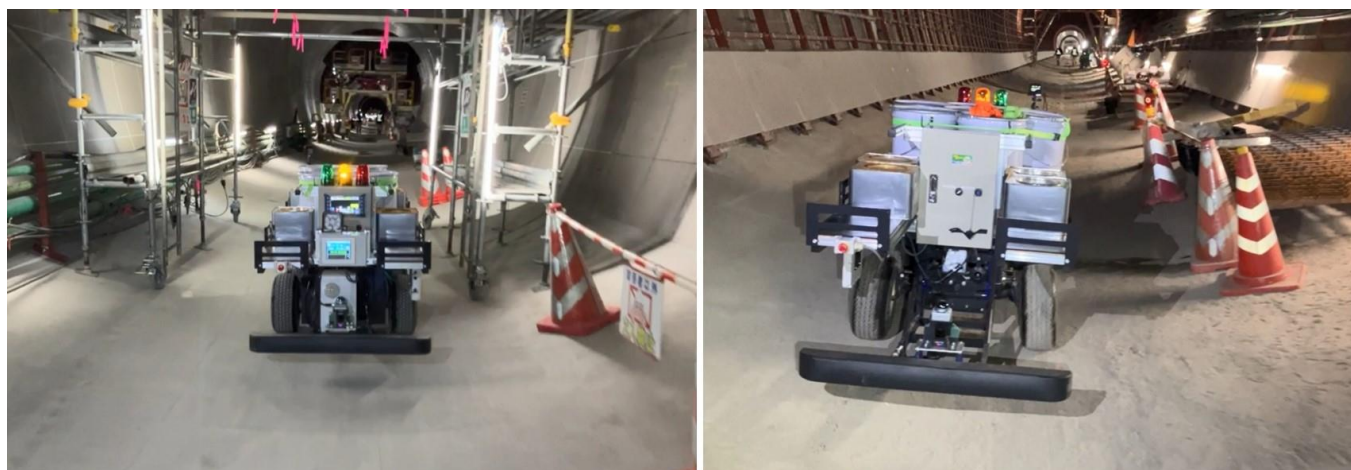


写真-8 現場実証試験

a) 試験結果

現場で計 43 回の走行テストを行った結果、本台車は曲面であるインバート路面でもスムーズに走行できることを確認した。また、LiDAR による検知や RFID の通信に特に影響がなく、作業足場などの狭い通行幅の箇所は徐行で通過でき、作業員との接触もなかった。また、坑内環境は天候に影響されず、ICI 試験の際にあった雨粒の点群ノイズも発生しなかった。

(4) 今後の展望

今回の開発と実証試験を通じて、本台車は自律走行能力や安全機能を備えており、実際の導水路トンネル現場環境における搬送作業の自動化の可能性を確認できた。今後の開発では、より多様な環境での実証試験を行い、台車の性能をさらに向上させるとともに、他の自動化技術との連携を計画している。

5. おわりに

以上、導水路トンネル補修工事における機械化・自動化施工技術の開発と適用事例について述べた。これらの技術は、技能労働者不足や安全性向上への対応として、省人化や生産性向上に寄与する可能性を示した。今後もさらに技術を進化させ、リニューアル工事における効率性と安全性を追求することで、社会インフラの維持と発展に貢献していきたいと考えている。

読者の皆様には、本稿が現場の課題解決に向けた一助となることを願っている。