

24. トンネル覆工コンクリートの補修工事に適用する曲面天井用研掃システム

株式会社 奥村組
株式会社 奥村組
株式会社 奥村組

○ 石井 敏之
西山 宏一
田中 寛大

1. はじめに

高度経済成長期から約 50 年が経過し、当時建設されたインフラ施設の多くに経年劣化の進行や耐震強度の不足が指摘され、補修・補強工事が行われている。そのうち、都市高速道路のトンネル等を対象とした補修・補強工事は、写真-1 に示すように、片側車線供用下で、通行車両への粉塵等の飛散抑止を行いながら限られた時間内での人力作業となっている。人力作業では、コンクリート天井面の表層脆弱部や劣化した塗膜の除去および目荒しを行う研掃作業は、高所作業車上で、ディスクサンダー等による粉塵が飛散する環境下での天井を見上げた姿勢で行われている。そのため、天井面の研掃作業は、①作業員の技量差からの研掃面のばらつきによる品質低下、②発生した粉塵による作業環境の悪化、③高所で無理な姿勢による安全性と作業効率の低下、が問題となっている。

このような状況から、筆者らは、研掃作業を自動化運転し、同時に発生した粉塵の飛散抑止ができるウォータージェットを用いた湿式の天井、壁・柱、床用の研掃装置¹⁾と、研削ビットを用いた乾式の天井用の研掃装置²⁾を開発した。写真-2 に示すように、開発した研掃装置を、道路トンネルや上下水道施設および地下鉄施設の工事に適用してきた。しかし、これらの装置の適用範囲は平面のコンクリート表面に限られ、曲面を有する表面の研掃作業には適用できなかった。

そこで、トンネル覆工コンクリート等の曲面を有する表面の研掃作業を自動化運転した「曲面天井用研掃システム」を開発した。本報では、曲面天井用研掃システムの概要と実大模擬トンネルを用いた性能確認実験の結果について報告する。

2. 曲面天井用研掃システムの概要

曲面天井用研掃システム（以下、研掃システム）の概観を図-1、仕様を表-1 に示す。

本研掃システムは、地上からの入力操作で曲面を有するコンクリート表面の研掃作業を自動化運転し、同時に発生した粉塵等の飛散を抑止するも



写真-1 人力によるトンネル天井面の研掃作業



写真-2 自動化運転によるトンネル天井面の研掃作業
(研削ビットを用いた乾式の天井用研掃装置)

のである。対象とする構造物は、道路トンネル等の曲面を有する覆工コンクリートである。なお、本研掃システムは、ボックスカルバートのような平面を有する天井面にも適用できる。運搬・移動には、作業帯のスムーズな設置・撤去が行えるように3台の車両を使用し、現地でホースやケーブル類の接続・切離のみで作業の開始・終了が行えるようにした。また、研掃方法には、曲面の研掃を対象とすることから、小型で研掃面に非接触で研掃作業が行えるバキュームブラスト工法を採用した。

本研掃システムは、次の 4 つの装置から構成される。

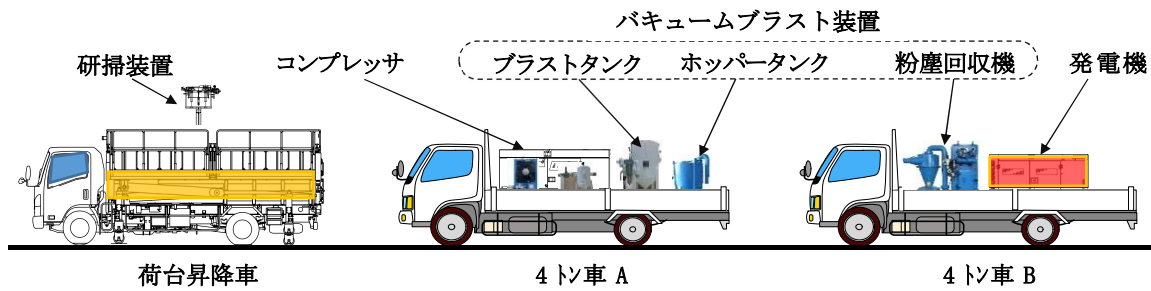


図-1 曲面天井用研掃システムの概観

- i. 噴射機を曲面の研掃面に一定圧で押し付けながら一定速度で移動させる「研掃装置」
- ii. 噴射機からブラスト材を噴射して研掃し、同時に発生した粉塵やブラスト材を吸引する「バキュームブラスト装置」
- iii. 研掃装置を運搬し、現地で昇降機として利用できる「荷台昇降車」
- iv. 発電機やコンプレッサ等の「付帯装置」

2.1 研掃装置

研掃装置の外観を写真-3、研掃ヘッドの外観を写真-4、5に示す。

研掃装置は、3層のフレーム上に、研掃ヘッドを上部に配した研掃機が配置された構造となっている。この3層のフレームは、下段に研掃装置を荷台昇降車に固定する固定フレーム、研掃面積を広くするため、中段にトンネル軸方向（以下、走行方向）と研掃機を平行にする回転フレームと、上段にトンネル軸直角方向（以下、横行方向）の研掃機の移動量を大きくするスライドフレームからなる。研掃機は、スライドフレーム上を一定速度で走行方向と横行方向に移動可能で、上部に配した研掃ヘッドをエアシリンダとボールネジで上下方向に昇降させることができる。研掃ヘッドには、写真-5に示すように、回転機構が設けられ、4隅にキャスターを取付けた荷重計（以下、キャスター付き荷重計）と、傾斜計およびロータリアクチュエータが取り付けられている。更に、曲面に一定荷重で押し付けて研掃を行う噴射機が2台設置されている。

研掃装置は、地上のタッチパネルから研掃条件を入力することによって、噴射機を研掃面に一定荷重で押し付けながら一定速度で移動させることで、研掃作業の自動化運転を行う。

a. 研掃ヘッドを曲面に接触させる方法

写真-3に示すスライドフレーム上の3隅に設置された水平・鉛直距離計（トンネル表面までの距離を測定）より研掃角度を算出し、傾斜計とロータリアクチュエータで研掃ヘッドを研掃角度に設定する。その状態で研掃ヘッドを研掃面の約10cm直下の位置に移動させ、エアシリンダとボールネジの押し上げによって研掃面に接触させる。研掃ヘッドの4隅のキャスター付き荷重計によって接触

表-1 曲面天井用研掃システムの仕様

装置名	項目	仕様
研掃装置	寸法	L 3.0×W 1.75×H 1.954 m
	重量	10.7 kN
	回転角度	0~±5 deg
	走行範囲	2.16 m
	横行範囲	1.9 m
	上昇範囲	0.8 m
	走行速度	0~10.0 m/min
	施工高さ	4.0~7.5 m
バキューム ブラスト 装置	研掃幅	90~100 mm (噴射機 2台)
	プラスタタンク	容量:330 L (研削材貯留)
	ホッパータンク	容量:300 L (研削材回収)
	回収機	サイクロン、バグフィルタ
荷台昇降車	ノズル	長方形ノズル 穴径 9.5 mm
	研削材	フェロニッケルスラグ材
付帯装置	昇降範囲	1.6~5.0m 積載荷重 12 kN
	コンプレッサ	100 馬力
	発電機	50/60 kVA

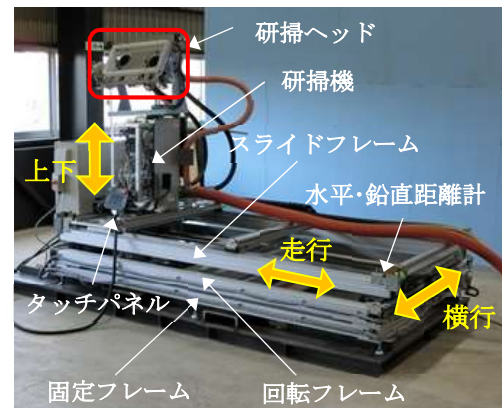


写真-3 研掃装置の外観

判定を行い、接触確認後ロータリアクチュエータのブレーキを解放する。これによって、研掃ヘッドは曲面の研掃面に接触した状態で、走行方向と周方向に自由に移動できるようになる。なお、これらの操作は、全てタッチパネルで行える。

b. 研掃面のばらつきを小さくする方法

研掃ヘッドを曲面の研掃面に接触させた後、研掃ヘッドに設けた小型エアシリンダで噴射機を研掃面に対して垂直に一定荷重で押し付け、リニ

アーブッシュによって研掃面の不陸に追従できるようにした。更に、一定荷重で押し付けた状態の噴射機を一定速度で移動させている。これらにより、研掃面と噴射機の距離が一定となり、研掃作業が常時同じ条件で行われるため、研掃面のばらつきを小さくすることができる。なお、研掃作業中は、噴射機の押付け荷重と押付け変位を測定し、研掃条件が保たれているかの制御を行っている。

2.2 バキュームブラスト装置

バキュームブラスト装置の構成を図-2に示す。同装置は、ブラスト材による研掃を行うブラスト装置（噴射機、ブラストタンク、エアータンク、アフタークーラ）と、発生した粉塵等を吸引し分別する回収装置（ホッパータンク、回収機）からなる。

バキュームブラスト装置は、ブラストタンクへ送られてきた高圧圧縮空気と同タンク内の研削材を混合させたブラスト材を、噴射機内のノズルから噴射することによってコンクリート表面を研掃し、同時に発生した粉塵や研掃後の研削材等をバキューム吸引する。なお、発生した粉塵等の飛散防止は、このバキューム吸引と、写真-4に示す研掃ヘッドの周囲のブラシ枠1と噴射機の先端に取り付けたブラシ枠2によって行われている。

2.3 荷台昇降車

荷台昇降車の外観を写真-6に示す。荷台昇降車は、12kNまでの重量物を積載して一般道路の運行が行え、現地では作業床の拡張・昇降ができ、更に移動用ローラを装備したローラジャッキにより、作業床を上げたまま車両移動が行える。

本研掃システムでは、研掃装置を積載して運搬し、現地で研掃装置の昇降機および作業床を上昇させた状態での車両移動による研掃装置の位置変更の手段として使用している。

3. 曲面天井用研掃システムの研掃作業制御手順

本研掃システムでは、任意の曲面での研掃作業の自動化運転を行うため、研掃作業の手順を設定し制御を行っている。トンネルと研掃システムの全体座標系は、図-3に示すように、トンネルのスプリングライン（以下、SL）上の円形部の中心を原点とし、走行方向をX軸（車両進行方向を正）、横行方向をY軸（壁面方向を正）、上下方向をZ軸（天井方向を正）とした。研掃作業の順序は、研掃ヘッドを研掃開始走行ラインの走行方向に、次に周方向に研掃幅だけ移動後、再度走行方向への移動の繰り返しとなる。以下に、研掃作業の制御手順を示す。

- ① 図-3に示すSLからの離れ距離を入力
- ② 研掃装置のスライドフレームの3隅に設置された水平・鉛直距離計で、コンクリート表面までの距離を計測



写真-4 研掃ヘッドの外観（研掃面側）



写真-5 研掃ヘッドの外観（研掃背面側）

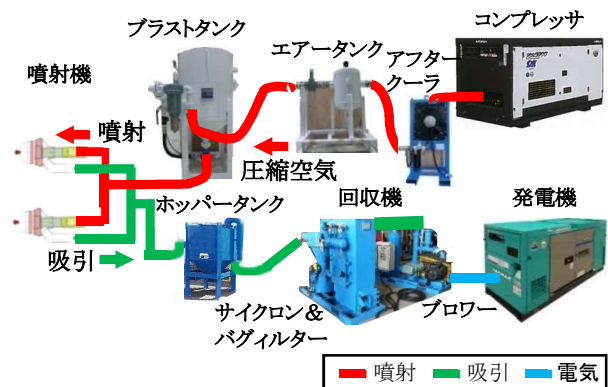


図-2 バキュームブラスト装置の構成



写真-6 荷台昇降車の外観（研掃装置積載）

- ③ 研掃装置と走行方向とのずれ角の算出と補正
- ④ トンネル形状（半径、SL高）の算出
- ⑤ 研掃装置の寸法やトンネル半径等から、現在

- の研掃装置の位置を全体座標系で算出
- ⑥ 研掃開始ラインとトンネル半径から研掃開始角度の算出
- ⑦ 研掃開始走行ラインの天井高さとの荷台昇降車の作業床（研掃装置）の上昇量の算出と操作
- ⑧ 研掃角度、研掃装置の横行範囲、上昇範囲および研掃幅から、研掃機の走行毎に研掃角度、横行移動量（横行量+スライドフレーム移動量）・上昇量の算出と自動化運転の継続判定

この研掃作業の制御手順によって、各ステップの自動化運転の継続・終了判定を行っている。また、荷台昇降車が次ステップの研掃作業域に移動しても研掃開始走行ラインが記憶されているため、次ステップにおいても、前ステップの研掃開始走行ラインとずれることなく揃った状態で研掃できる。

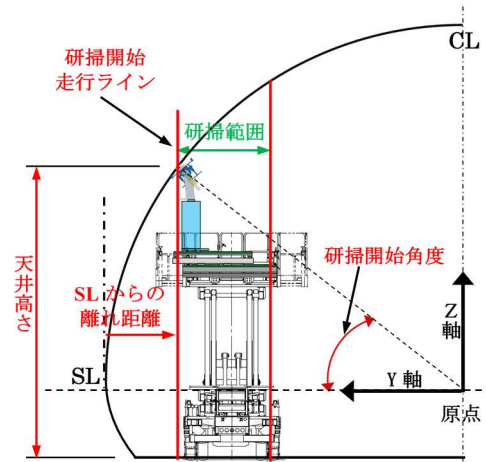


図-3 トンネルと荷台昇降車の全体座標系

4. 実大模擬トンネル用いた性能確認実験

性能確認実験は、一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所が所有する実大模擬トンネル（断面積 66m²、高さ 7.1m、最大幅 11.2m、延長 80m）において、1車線を規制し、作業帯に車載した研掃システムを設置後、走行方向に壁部から天井部までの曲面の研掃作業を行った。確認項目は、自動化運転の状況、施工能力、研掃面の状況および粉塵等の吸引状況とした。

4.1 実験手順

実験状況を写真-7、8、実験手順を図-4に示す。

手順は、写真-7に示すように、作業帯に車両を荷台昇降車から順に進ませ、所定の位置に荷台昇降車を設置し、車両間の制御・電源ケーブルやブラスト・吸引ホースを接続した。次に、発電機、コンプレッサおよび研掃装置を起動させた。タッチパネルから、図-4の着色したプロセスに示す研掃条件の入力を行い、研掃作業の自動化運転を実施した。また、研掃準備から研掃終了まで、荷重計、変位計、距離計、圧力計、傾斜計等の計測データおよび算出された研掃ヘッドの位置座標等を、自動計測（サンプリング間隔 10Hz）により保存した。

研掃条件は、予備実験より定めていた、ブラスト噴射圧 0.3MPa、研掃ヘッド押し上げ圧 0.5MPa、噴射機の押し付け荷重 200N/2台、研掃ヘッドの走行速度 6m/minとした。研掃作業は、図-5に示す走行方向に、壁部（1ライン）、肩部（2ライン）、天井部（3ライン）の3つのラインに分けて実施した。

研掃作業の人員は3名で、車両3台の運転手が、研掃作業時にタッチパネルの操作とホース類の補助や引き回しを行った。

4.2 性能確認実験の結果

a. 自動化運転の状況

(1) 自動化運転

天井部の研掃作業の自動化運転による研掃ヘッ



写真-7 性能確認実験全景



写真-8 自動化運転による研掃作業状況

ドの走行位置と横行位置の時刻歴を図-6、研掃ヘッドの上下位置と研掃角度の時刻歴を図-7に示す。

研掃ヘッドは、走行方向に 0.0～2.16m を 10 往復の計 20 回、横行方向に 0.90～-0.43m へと 1.33m 移動し、上下方向に 0.52m 上昇した。横行と上下方向の移動は走行が反転する時に行われ、反転ごとに、横行移動は 65～72mm、上昇は 21～32mm ずつであった。研掃ヘッドは、走行時には横行位置と上下位置および研掃角度に変化がなく、走行方向

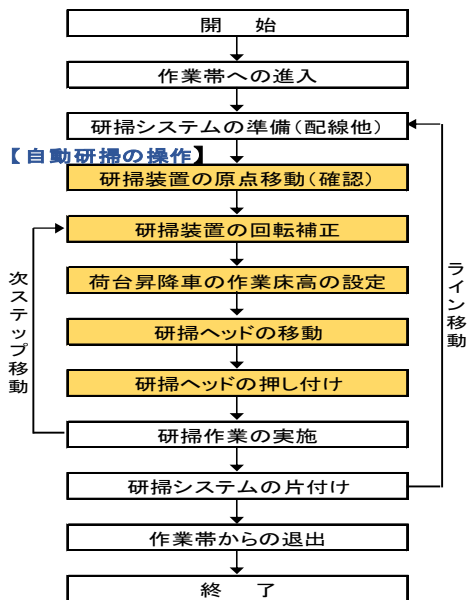


図-4 性能確認実験の手順

と平行に移動し、反転時には曲面に沿って天井部方向へ移動することを確認した。なお、上下位置は、エアシリンダ (500mm) とボールネジ (300mm) の和である。横行時の上昇はエアシリンダのみで行っているが、走行移動中に横行時の上昇量を 5 : 3 の割合でエアシリンダとボールネジに再配分し直す制御を行っている。

研掃ヘッドの 4 隅のキャスター付き荷重計の出力値を荷重 1~荷重 4、その総和を研掃ヘッドの押し付け荷重とする。自動化運転時の研掃ヘッドの押し付け荷重の変動を確認するため、天井部での研掃ヘッドの押し付け荷重の時刻歴を図-8 に示す。走行時の研掃ヘッドの押し付け荷重は約 1300N で、荷重 1~荷重 4 の平均が 200~400N であった。研掃ヘッドに作用する荷重は変動が少なく安定しており、研掃ヘッドは曲面に安定した状態で押し付けながら移動していることが確認できた。

(2) 研掃ヘッドの接触判定

研掃ヘッドの研掃面への接触判定は、荷重 1~荷重 4 を用いて、①ロータリアクチュエータによる研掃ヘッドのブレーキの開放、②研掃ヘッドの確実な曲面への接触、の 2 種類により行っている。

研掃ヘッドの曲面への接触状況を確認するため、図-8 において研掃ヘッドが接触する時間 255~260sec 間の時刻歴を図-9 に示す。初めに、荷重 1 が研掃面に接触し、0.6 秒後に荷重 2、その 0.4 秒後に荷重 3 と 4 が同時に接触している。最初にブレーキ解放条件の 5N 以上の荷重になったのは荷重 1 で、接触の 0.1 秒後に 77N と増加し、ロータリアクチュエータのブレーキが解放され、研掃ヘッドが回転できる状態になったことを示している。次に、荷重 2 と荷重 3 の対角の荷重が 1.2 秒後とともに 200N を超え、同時に押し付け荷重が 600N 以

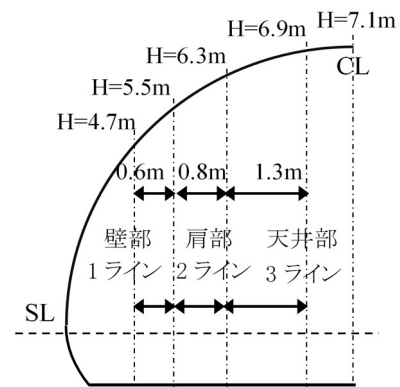


図-5 研掃作業時のライン設定

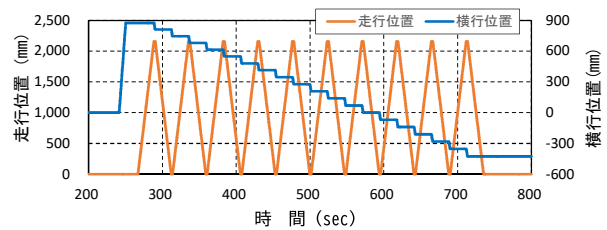


図-6 研掃ヘッドの走行位置と横行位置

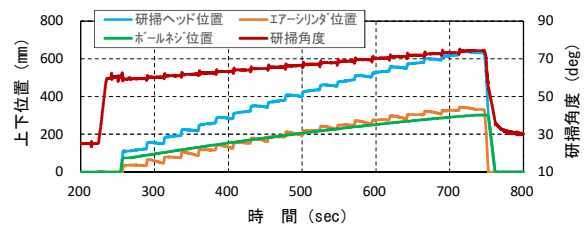


図-7 研掃ヘッドの上下位置と研掃角度

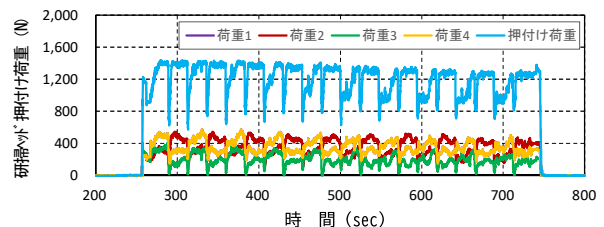


図-8 研掃ヘッドの押し付け荷重

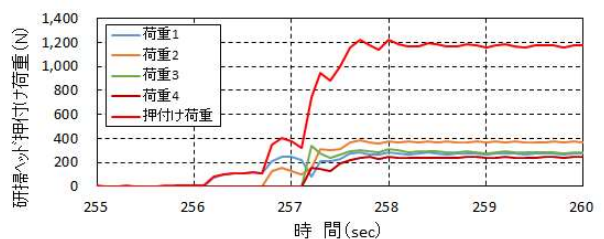


図-9 接触時の研掃ヘッドの押し付け荷重

上 (接触条件) となっている。このことから、研掃ヘッドが確実に接触したと判断できる。

(3) 噴射機と研掃面の距離 (研掃面のぼらつき)

天井部の噴射機の研掃面への押し付け荷重と押し付け変位の時刻歴を図-10 に示す。

押付け荷重は 200N としていたが、370N 程度と大きく押し付ける結果を示した。これは、噴射機を押し付ける小型エアシリンダの設定圧が 0.3MPa と高く設定したことによる。一方、押付け変位は、設定の押付け荷重で 60~70mm 程度となるが、今回の実験では押付け荷重が大きかったため、押付け変位が 80mm 程度と大きくなりブラシを少し押し潰す状態になった。しかし、押付け荷重と押付け変位ともに研掃時にはほぼ一定となっており、ノズルから研掃面までの距離が一定に保たれていることが分かる。これらより、自動化運転によって安定した研掃作業が行われていることが分かる。

b. 施工能力

研掃システムの施工能力を確認するため、時間当たりの研掃面積を求めた。研掃システムが作業帯に入り配管・配線等を行う時間を準備時間、タッチパネルによる研掃作業の自動化運転と次ステップへの車両移動を合わせた時間を研掃時間、研掃作業が終了し配管・配線の切り離しを行い作業帯から退出するまでの時間を撤去時間とした。なお、施工能力実験では、各ラインの施工長を 16m (1 ステップの施工長 2m, 研掃装置移動を 8 ステップ) として、研掃を行った。研掃作業後の次ステップへの移動は、荷台昇降車の作業床の高さを変えずに、荷台昇降車を運転しながらローラジャッキを使って前方に約 2m 移動させた。

各ラインの施工時間を表-2 に示す。研掃システムの 1 時間当たりの研掃面積は 10.9~14.3m²/時間で、平均 12.1m²/時間であった。また、施工能力は天井部が壁部に比して高い結果になった。これは、研掃ヘッドの走行回数が、壁部で 13 回、肩部で 16 回、天井部で 20 回となっており、天井部に近づくほど走行回数が多くなったためと考えられる。壁部で走行回数が少ないのは、研掃ヘッドの横行移動量が最大の 1.9m になる前に、鉛直移動量の限界値 0.8m に達するためである。

c. 処理面の状況

研掃面は、写真-9 示すように一様に研掃されているが、研掃走行間の一部には未研掃の部分が見られた。これは、研掃ヘッドに取り付けている 2 台の噴射機の間隔を少し広く設定したことが原因と考えられる。

d. 粉塵等の吸引状況

粉塵の漏れを確認するため、実験では、研掃ヘッドに取り付けてあったブラシ枠 2 を取り外し、噴射機のブラシ枠 1 からの漏れを目視で確認した。

今回実施した研掃条件のブラスト噴射圧 0.3MPa、走行速度 4~8m/min では漏れを視認できず、確実に粉塵等が吸引されることを確認した。

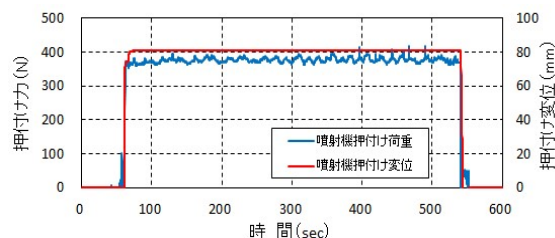


図-10 噴射機の押付け荷重と押付け変位

表-2 施工時間と施工能力

項目	1ライン	2ライン	3ライン	
施工時間 (時間)	準備	0.25	0.28	0.23
	研掃	1.27	1.27	1.55
	撤去	0.20	0.25	0.25
	合計	1.72	1.80	2.03
研掃面積 (m ²)	18.7	22.5	29.2	
単位時間当たり (m ² /時間)	10.9	12.5	14.3	
1人時間当たり (m ² /人・時間)	3.6	4.2	4.8	

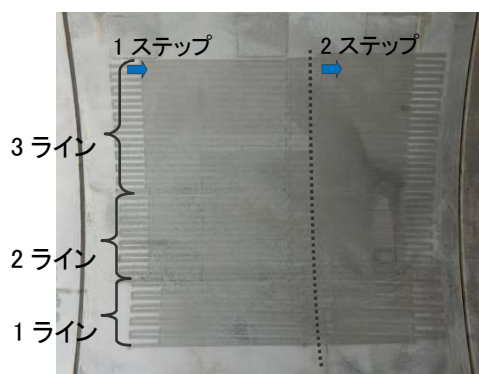


写真-9 自動化運転後の研掃面

5. あとがき

性能確認実験より、以下のことを確認し、本研掃システムを現場に適用できる見通しが得られた。

- i. 実大模擬トンネルにおける曲面コンクリート表面の研掃作業を自動化運転で行える
 - ii. 発生した粉塵の飛散を防止できる
 - iii. 処理面のばらつきを非常に少なくできる
 - iv. 研掃作業人数は一般の作業員 3 名で行える
- 今後は、現場への適用を図り、安全性の向上や操作性の向上等、システムの完成度を高めたい。

参考文献

- 1) 石井敏之：ウォータージェットを用いたコンクリート表面処理機の開発と現場適用，平成 26 年度新技術・新工法に関する講習会，pp.35~38，2015.2
- 2) 丸山八大・津村匡洋・石井敏之：天井用車載型乾式研掃装置の自動化運転による地下鉄補修工事への適用について，令和元年度建設施工と建設機械シンポジウム，pp.167~172，2019.12