

曲面天井用研掃システムの開発

－システムの概要と性能確認実験－

Abrasive blasting Systems for Curved Concrete Surfaces

- An Overview and Performance Assessment -

田中寛大* 西山宏一* 石井敏之**

要 旨

高速道路トンネル等で行う補修・補強工事における研掃作業（表面脆弱層の除去作業等）は、片側車線供用下で通行車両への粉塵の飛散を防止しながら、人力施工で行われている。この研掃作業は、高所で無理な姿勢での繰り返し作業となるため、作業効率の低下、処理面のばらつきや作業環境の悪化が問題となっている。このため、これまでに研掃作業を自動化し、道路トンネルや鉄道施設等の工事に適用して作業の効率化や作業環境の改善を図ってきた。しかし、適用範囲は平面に限られていたことから、曲面への対応が求められたため、今回、「曲面天井用研掃システム」を開発した。システムの性能を確認するため、実大模擬トンネルを用いた実験を行った。その結果、曲面の研掃作業の自動化によって、処理面のばらつきが非常に少ない研掃が可能になった。更に、高所等の危険な場所での作業を少なくすることによる安全性の向上、及び粉塵等の吸引による作業環境の改善が確認された。

キーワード：補修工事、研掃、自動化、効率化、粉塵防止

1. まえがき

高度経済成長期に整備されたコンクリート構造物の老朽化が顕在化しており、その延命化に、剥落防止材の接着やコンクリートの増厚等の補修・補強工事が行われている。その前処理として、既設コンクリート表面の脆弱層、劣化塗膜の除去及び目荒し等の研掃作業が必要となる。この研掃作業は、写真－1に示すようにディスクサンダや高水圧のウォータージェット等を用いて人力により行われていた。しかし、高所で無理な姿勢での繰り返し作業となるため、作業効率の低下や処理面のばらつき、



写真－1 人力による壁面の研掃作業

更に、粉塵等による作業環境の悪化等の問題点が指摘されていた。

このような状況から、研掃作業を自動化するため、ウォータージェットを用いた湿式の天井、壁・柱及び床用の研掃装置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、道路トンネル、上下水道施設及び地下鉄施設の工事に適用してきた。しかし、これら装置は平面のコンクリート表面の研掃作業に限られていた。

このことから、今回、トンネル等の曲面を有するコンクリート表面の研掃作業を自動化した「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）の概要を図－1、仕様を表－1に示す。

本研掃システムは、地上からの研掃条件の入力操作で曲面の研掃作業を自動化し、同時に発生した粉塵等の飛散を防止するものである。対象となるものは、道路トンネル等のコンクリート構造物の研掃であり、図－1に示

* 東日本支社リニューアル技術部 ** 技術研究所土木研究グループ

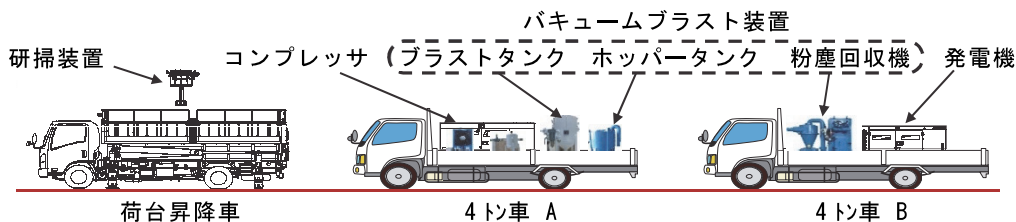


図-1 曲面天井用研掃システムの概要

すようにシステムの運搬・移動には3台の車両を使用し、現地でホース・ケーブルを接続して研掃作業が行えるようにした。また、曲面の研掃を対象にすることから、研掃方法には、小型で表面に非接触で実績のあるバキュームブラスト工法を採用した。

本システムは、以下の4つの装置から構成される。

- i. 噴射機を曲面の研掃面に押し付けながら正確に移動させる「研掃装置」
- ii. 噴射機からプラスト材を噴射して研掃し、同時に発生した粉塵等を吸引する「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-2、形状を図-2、研掃ヘッドの外観を写真-3、4に示す。

研掃装置には、写真-2、図-2に示すように、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設置されている。このフレームには、研掃面積を広くするため、トンネル軸方向に研掃装置を平行にする回転フレーム（中段）と、横行方向の移動量を大きくするスライドフレーム（上段）を設けた。研掃機は、スライドフレーム上を一定の速度での走行方向（トンネル軸方向）と横行方向（トンネル軸直角方向）に移動可能で、更に、研掃ヘッドをエアシリンダとボールネジによって鉛直方向に昇降させることができる。この研掃ヘッドには回転機構が設けられ、写真-3、4に示すように、4隅にキャスタを取り付けた荷重計、傾斜計及びロータリアクチュエータが取り付けられている。更に、曲面に一定の荷重で押し付けながら研掃を行う2台の噴射機が設置されている。

また、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り、噴射機を一定の荷重で曲面に押し付けながら、一定の速度で移動させることで、研掃作業の自動化が図られている。

以下に、研掃装置の主な特長を示す。

- a. 研掃ヘッドを曲面に接触させる方法

写真-2に示す研掃装置に設置された水平・鉛直距離計（トンネル表面までの距離を測定）より研掃面の角度を算出し、ロータリアクチュエータと傾斜計で研掃ヘッ

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 (トンネル軸方向)
	横行範囲	1.9 m (トンネル軸直角方向)
	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
バキュームプラスト装置	施工幅	90~100 mm (噴射機2台)
	プラストタンク	容量: 330 L (研削材貯留)
	アフタークーラ	エア駆動式
	ホッパータンク	容量: 300 L (研削材回収)
	回収機	バグフィルタ、サイクロン
	ノズル	長方形ノズル 穴径 9.5 mm
運搬車両	研削材	フェロニッケルスラグ材
	荷台昇降車	積載荷重 12 kN、最大高 5 m
付帯装置	コンプレッサ	100 馬力
	発電機	50/60 kVA

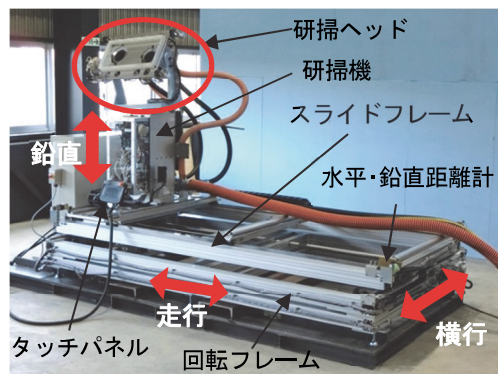


写真-2 研掃装置の外観

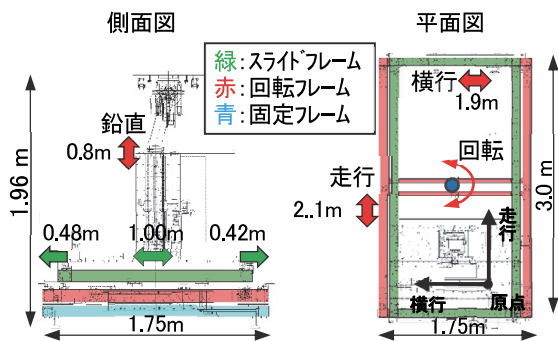


図-2 研掃装置の形状

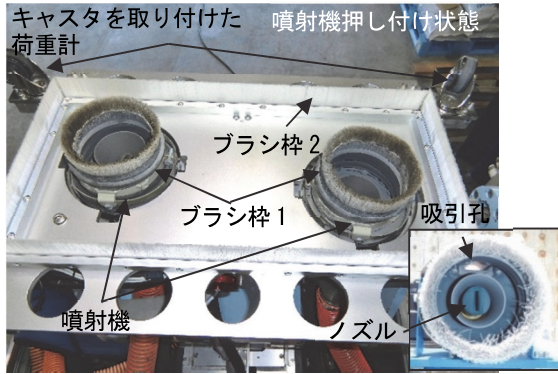


写真-3 研掃ヘッドの外観（研掃面側）

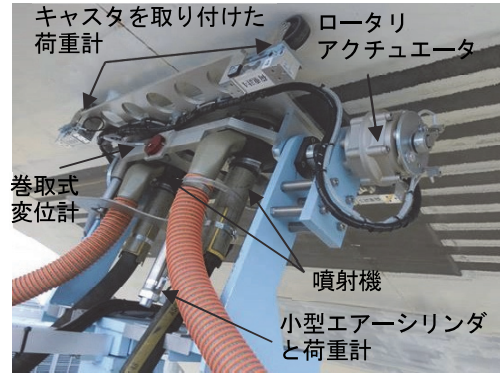


写真-4 研掃ヘッドの外観（研掃機側）

ドを研掃面の角度に設定できるようにした。これによって、研掃ヘッドは、トンネル表面に当たることなく研掃面直下へ迅速に移動でき、ボールネジとエアシリンダの押し上げによってソフトに接触させることが可能となった。また、接触後、ロータリアクチュエータのブレーキを解放することにより、走行及び横行による傾斜角の変動に対応するため自由に回転できるようになる。更に、研掃ヘッドの4隅にカキスタを取り付けた荷重計によって、研掃ヘッドと研掃面との接触が判定される。

b. 研掃処理面のばらつきを少なくする方法

研掃ヘッドを押し上げた後、研掃ヘッド内に設けた小型のエアシリンダで噴射機を曲面の法線方向の研掃面に一定の荷重で押し付け、リニア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。これらによって、研掃面と噴射機の距離が一定となり、処理面のばらつきが少なくなった。なお、研掃作業中は、噴射機の押付け荷重と押付け変位を荷重計と巻取式変位計で測定し、設定した研掃条件が保たれるように制御されている。

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-3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（ブラストタンク、エアータンク、アフタークーラ）と、発生した粉塵や微小な破片物や噴射後の研削材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でコンクリート表面を研掃し、同時に発生した粉塵や微小な破片物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-3に示す研掃ヘッドの周囲と噴射機の先端に取り付けた2つのブラシ枠で行われている。

2.3 荷台昇降車

荷台昇降車の外観を写真-5に示す。荷台昇降車は、12kN までを積載して道路上の運搬が行え、現地では作業床の拡幅・昇降、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できる。

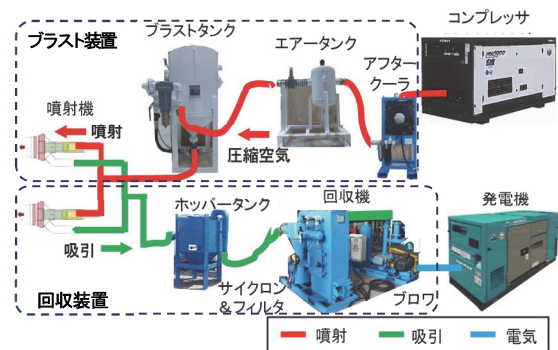


図-3 バキュームブラスト装置の構成



写真-5 荷台昇降車の外観（研掃装置積載）

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及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. 実大模擬トンネルを用いた性能確認実験

性能確認実験は、写真-6に示す、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 車線を工事規制し、車載した研掃システムを工事規制帯に設置後、トンネル軸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、自動化による運転状況、施工能力、処理面の状況及び粉塵等の吸引状況とした。



写真一六 実大模擬トンネルの外観



写真一七 性能確認実験の全景

3.1 実験手順

実験状況を写真一七、八、実験手順を図一四に示す。

手順は、写真一七に示すように、工事規制帯に車両を荷台昇降車から順に進入させ、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・吸引ホースを接続する。次に、発電機、コンプレッサ及び研掃装置を起動させ、タッチパネルから「自動研掃」を選択する。図一四において着色したプロセスに示す研掃条件の入力を行うことによって研掃作業の自動化が行われる。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及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、噴射機の押付け荷重 200kN/2 台、研掃ヘッドの走行速度 6m/min で、図一五に示すトンネル軸方向に、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研掃するものとした。

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直しを行うことにした。

3.2 性能確認実験の結果

a. 自動化による運転状況

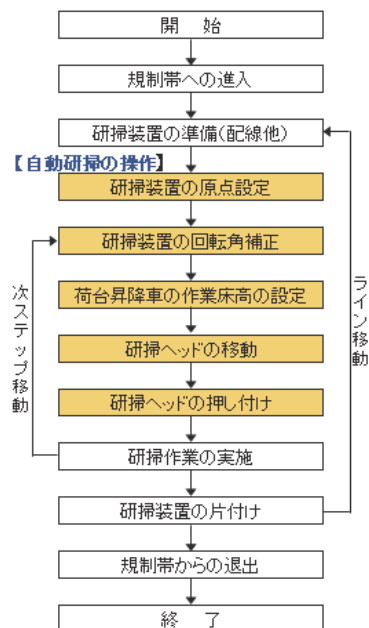
(a) 自動化運転状況

天井部の研掃作業の自動化による研掃ヘッドの走行位置と横行位置を図一六、研掃ヘッドの鉛直位置と研掃面角度を図一七に示す。

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 へ移動し、鉛直方向に 0.52m 上昇し、傾きは 58~76deg へと変化した。横行と鉛直の移動は走行が反転する時に行われ、走行の反転ごとに、横行移動は 65~72mm、鉛直上昇は 21~32mm ずつであった。これらより、研掃ヘッドは、走行時には横行位置と鉛直位置及び研掃面角度に変化がなく、トンネル軸方向と平行に移動し、反転時には曲面に沿って天井部方向、すなわち道路中央側へ移動することを確認した。なお、鉛直方向の上昇量は、エアシリンダ（500mm）



写真一八 性能確認実験の自動化運転状況



図一四 性能確認実験の手順

とボールネジ（300mm）の和である。横行時の鉛直方向の上昇はエアシリンダのみで行っているが、走行移動中にその横行時の上昇量を 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（ボールネジは伸長し、エアシリンダは収縮するが、鉛直位置は変わらない制御）を行っている。

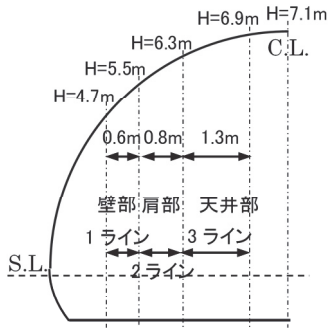


図-5 研掃作業時のライン設定

研掃ヘッドの4隅にキャスタを取り付けた荷重計の出力値を荷重1～荷重4とし、その総和を研掃ヘッドの押付け荷重とする。自動化時の研掃ヘッドの押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。また、走行反転時に荷重が低下する傾向がみられるが、これはエアシリンダの追随の影響と考えられる。

以上より、自動化における研掃ヘッドは、曲面を押し付けながら安定して滑らかに移動していることが確認できた。

(b) 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256.2sec時点で研掃面に接触し、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、接触直後(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の対角荷重の個々が1.2秒後にともに200Nを超え、同時に押付け荷重が600N以上(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。図-8と同様に、接触直後の荷重1～4は220～380Nでほぼ均等になっており、曲面にキャスタを介して研掃ヘッドが均等に接触していることが分かる。

(c) 噴射機と研掃面の距離(研掃面のばらつき)

天井部の噴射機の研掃面への押付け荷重と押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85%程度大きく押し付ける結果を示した。これは、噴射機を

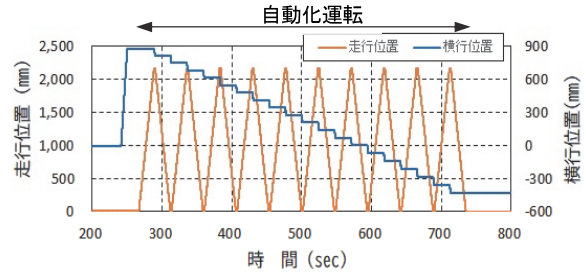


図-6 研掃ヘッドの走行位置と横行位置

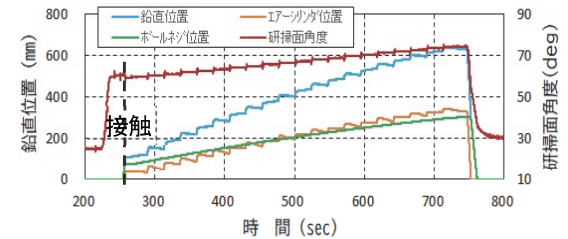


図-7 研掃ヘッドの鉛直位置と研掃面角度

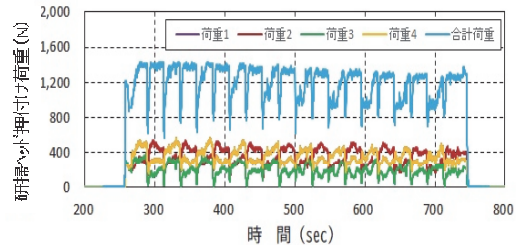


図-8 研掃ヘッドの押付け荷重

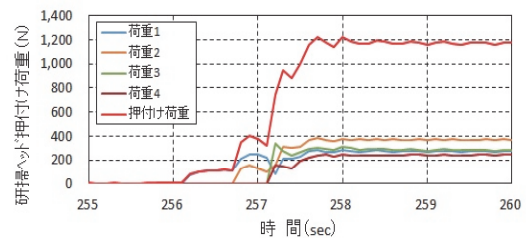


図-9 接触時の研掃ヘッドの押付け荷重

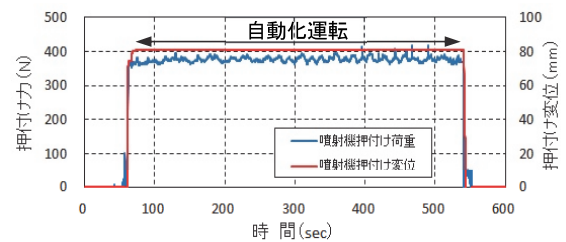


図-10 噴射機の押付け荷重と押付け変位

押し付ける小型エアシリンダ(断面積:1257mm²)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、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、自動化によって安定した研掃作業が行われており、処理面の状況は写真-9に示すように、大きなばらつきもなく施工できていることが分かる。

(d) 研掃ヘッドの走行速度

天井部の研掃ヘッド走行位置の時刻歴の一往復例を図-11に示す。自動化による研掃ヘッドの走行速度は6.0m/min (100mm/s) に設定している。図-11に示している近似式より、速度が100mm/sになっていることから、設定した速度に制御されていることを確認した。

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。研掃システムが規制帯に入り配管・配線等を行う時間を準備時間、タッチパネルによる研掃操作と次ステップへの車両移動時間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規制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

処理面は、写真-9に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。しかし、これは、研掃ヘッドの横行移動時に伴う隙間がなく、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に、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することにした。

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、確実に粉塵が吸引されることを確認した。

4. 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

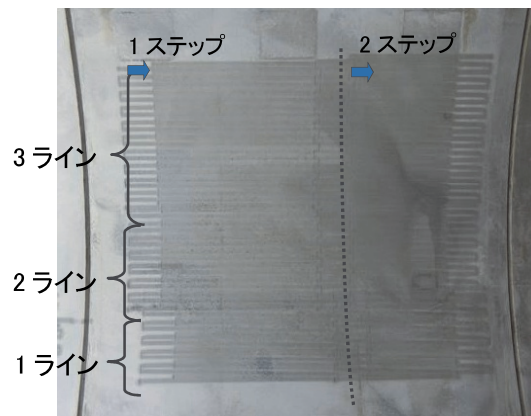


写真-9 自動化運転後の処理面の状況

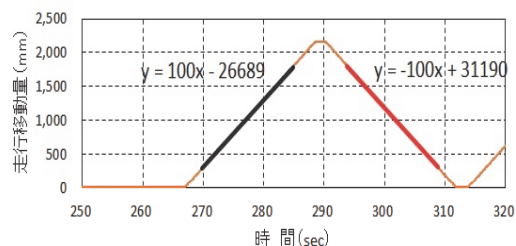


図-11 研掃ヘッドの走行位置と走行速度

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

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による運転で行えること
 - ii. 発生した粉塵の飛散を防止できること
 - iii. 処理面のばらつきを非常に少なくできること
 - iv. 研掃作業人数は一般の作業員3名で行えること
- 今後は、現場への適用を図り、安全性の向上及び操作性の向上等システムの完成度を高めていきたい。

【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