

トンネル天井用車載型乾式研掃装置の開発

－性能確認試験と現場適用－

Dry Grinding and Dust Suction System on-Board Vehicle for Tunnel Ceiling

- Performance Verification and Field Application -

石井敏之* 西山宏一** 粟津利一** 白石祐彰*

要旨

都市内高速道路における片側車線供用下でのトンネル天井面の補修・補強工事は、一般通行車両への飛散抑止を行いながら、短い規制時間内での人力作業となる。特に、塗膜等の除去を行う表面処理は、高所で無理な姿勢での作業となり、処理面仕上がり品質のばらつきや作業環境の悪さ等が問題となっている。そこで、天井面の表面処理を機械化し、かつ粉塵等の飛散防止が行える「天井用車載型乾式研掃装置」を開発した。

本研掃装置の性能確認試験を行い、トンネル剥落防止対策工事の現場に適用した。その結果、塗膜を取り残すことなく、処理面仕上がり品質の向上、粉塵等の飛散抑止による作業環境の改善、および作業の省力化と安全性の向上が図れることを確認した。

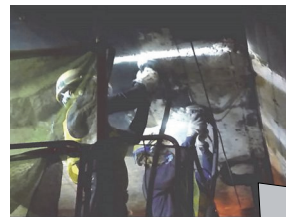
キーワード：補修工事、トンネル天井面、表面処理、機械化、飛散抑止

1. まえがき

都市内高速道路におけるボックスカルバートンネル天井面（以下、天井面と称す）の補修・補強工事は、**写真－1**に示すように、片側車線供用下で、一般通行車両へのコンクリート片や粉塵等の飛散抑止を行いながら短い規制時間内での人力作業となっている。このような補修・補強工事において、下地処理としての天井面の排気ガスで汚れた塗膜やモルタル等を薄く削り取る表面処理は、一般的に、飛散防止を行った高所作業車上で、作業員が天井を見上げた姿勢でディスクサンダー等の動力工具を使い、排気ガス由来の有害な粉塵等が飛散する環境での作業となっている。そのため、天井面の表面処理は、①作業員の技量差に起因する処理面仕上がり品質のばらつき、②発生した粉塵等による作業環境の悪化、③高所での無理な姿勢による安全性と作業効率の低下、等が問題となっている。

そこで、天井面の表面処理を、地上部から全ての操作が行えるように機械化し、同時に発生した粉塵等の飛散を抑止できる「天井用車載型乾式研掃装置」（以下、研掃装置と称す）を開発した。本報では、研掃装置の概要と、開発において実施した性能確認試験および現場適用について報告する。

2. 研掃装置の概要



写真－1 人力による天井面の表面処理

2.1 構成

研掃装置の外観を**写真－2**に、仕様を表－1に示す。

研掃装置は、機動性および施工時の設置・撤去時間短縮の観点から車載型とした。研掃装置の構成は、天井面の表面処理を自動運転で行う研掃装置本体を搭載した4t車と、集塵機、発電機、コンプレッサー等を搭載した2t車からなる。なお、4t車を選定したのは、普通自動車免許の取得者で運転が可能となるからである。

*技術研究所 **東日本支社リニューアル技術部

研掃装置本体の構成は、**図-1**に示すように、天井面の表面処理を自動運転で行うケレン機、ケレン機が走行・横行を行う架台、この架台を上下に移動・停止させる多段式リフターと天井面接触センサー、研掃装置本体を設置・支持するアウトリガー、およびこれらを操作する手元ペダントスイッチからなる。

以下、主な装置部位について説明する。

a. ケレン機

ケレン機の外観を**写真-3**に示す。ケレン機は、天井面の表面処理を行う部分と発生した粉塵等の飛散抑止を行う部分からなる。

表面処理を行う部分は、鋼製ビットを配した円盤状の研掃ヘッドを、高速回転させながら、2台のエアシリンダーで天井面に一定の力で押付け、一定速度で走行させる構造となっている。なお、押付け力（エアシリンダー圧）と走行速度は、現地の対象構造物を用いた試験施工を行い、適切な処理面の付着力等を考慮して定める。また、押付け力の制御は、レギュレータとリニアブッシュにより、処理面の凹凸に追従させながら押付け力が一定になるように行っている。

飛散抑止を行う部分は、発生した粉塵等を、研掃ヘッドの周囲に設けたウレタンとブラシによる2重の飛散防止柵による遮断と、研掃ヘッドの吸引孔から集塵機で吸引させる構造となっている。



写真-2 研掃装置の外観

表-1 研掃装置の仕様

装置部位	項目	仕様
ケレン機	走行速度	0.5~10 m/min
	押付け力	0.2~0.9 kN
	鉛直凹凸	±40 mm 追従
	研掃幅	250 mm
多段式リフター	昇降速度	0.375 m/min
	昇降高さ	1,200 mm
	施工高さ	4.3~5.0 m
全体	総重量	42.2 kN
	施工範囲	走行：2.69 m 横行：1.56 m 面積：4.2 m ²
	非常停止	装置本体：3箇所 手元ペダントスイッチ：2箇所

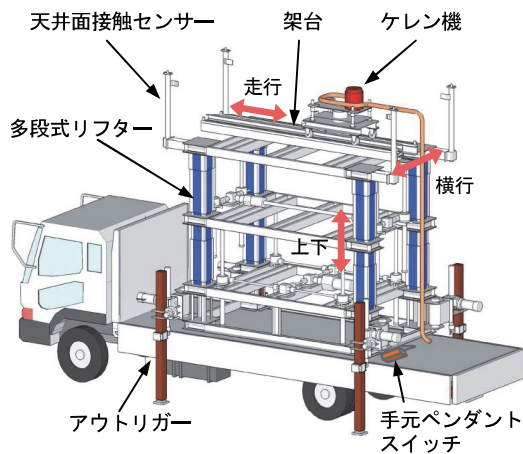


図-1 研掃装置本体の構成

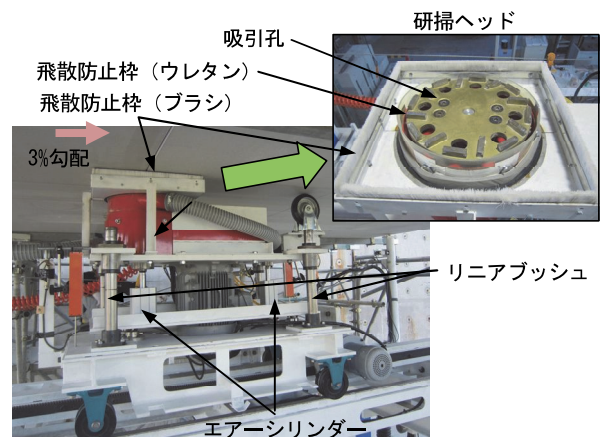


写真-3 ケレン機

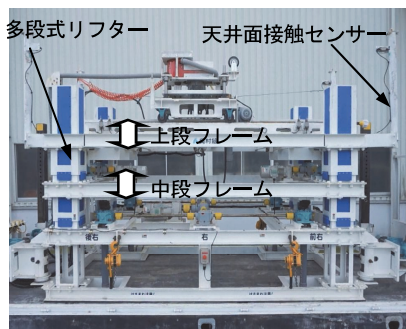


写真-4 多段式リフター

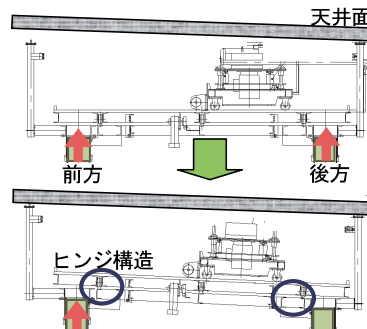


図-2 ケレン機の勾配調整

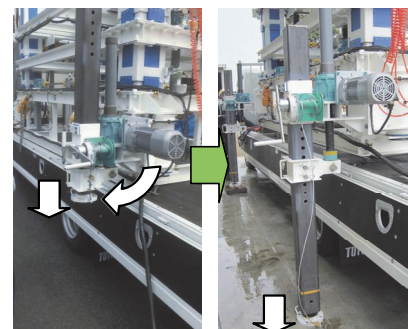


写真-5 アウトリガー

b. 多段式リフター

多段式リフターの外観を写真-4に示す。多段式リフターは、ケレン機を格納位置から天井面近傍まで上昇・下降させると共に、ケレン機と天井面との勾配調整を行うものである。ケレン機の上昇・下降は、ケレン機が走行と横行を行う架台と連結している上段フレームと中段フレームを、リフターによって上下に移動させることによって行う。また、ケレン機は、上段フレームの4隅に設置した天井面接触センサーが天井面に接触することによって、上昇時に天井面近傍で自動停止する。なお、天井面が道路縦断方向に勾配を有する場合には、図-2に示すように、ヒンジ構造を有する上段フレームの接触していない一端側を再度上昇させ、天井面とケレン機を平行にする。

c. アウトリガー

アウトリガーの外観を写真-5に示す。アウトリガーは、穴あき鋼管柱とジャッキからなる。研掃装置本体の設置・支持は、4隅に配したアウトリガーを90度回転させて道路側に配し、穴あき鋼管柱を地表面近傍でピン止め後、ジャッキを伸長させることによって行う。なお、アウトリガーにより、研掃装置本体は、道路の縦断および横断勾配に関係なく水平に設置、支持させる。

2.2 施工手順

標準的な施工フローを図-3に示す。

研掃装置を車載した4t車と2t車の規制帯への入場後、配管・配線を接続し、4本のアウトリガーで研掃装置本体を道路勾配に関係なく水平に設置する。次に、ケレン機を天井面近傍まで上昇させ、ケレン機と天井面が平行になるように勾配調整を行う。ケレン機による表面処理は、写真-6に示すように、ケレン機を開始地点に移動後、天井面に一定の力で押付けながら一定速度で走行させる自動運転で行われる。なお、ケレン機による表面処理の施工パスは、研掃装置本体を設置後、1パスの走行終了後にケレン機を研掃幅程度横行させ、再度走行させる操作の繰り返しとなる。研掃装置設置1回当たりの最大表面処理面積は4.2m²である。

3. 性能確認試験

研掃装置の性能確認試験として、要素試験と全体試験を実施した。要素試験は、表面処理を行うケレン機の性能等を確認するものである。一方、全体試験は、模擬天井を用いて、研掃装置による設置～表面処理～撤収までの一連の作業を行い、同装置の仕様および操作性等の確認を行うものである。

3.1 要素試験

a. 試験方法

要素試験は、写真-7に示すように、研掃装置を構成するケレン機と架台をH鋼に敷設し、表-2に示す試験

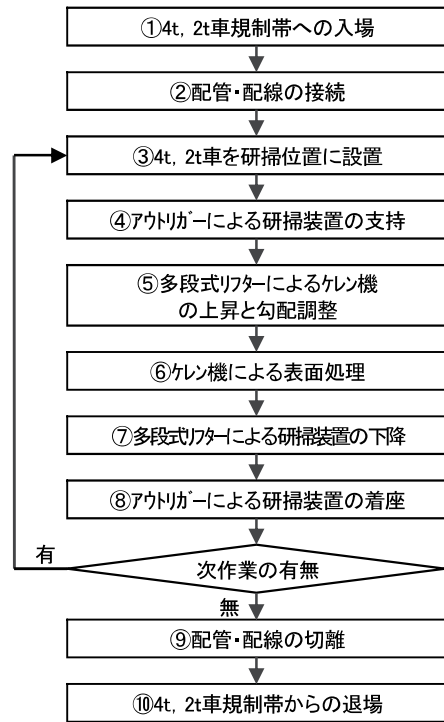


図-3 施工フロー

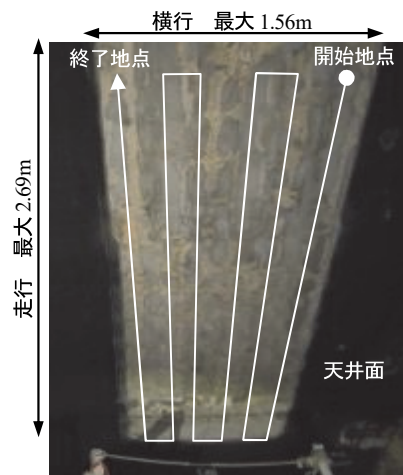


写真-6 ケレン機の施工パス

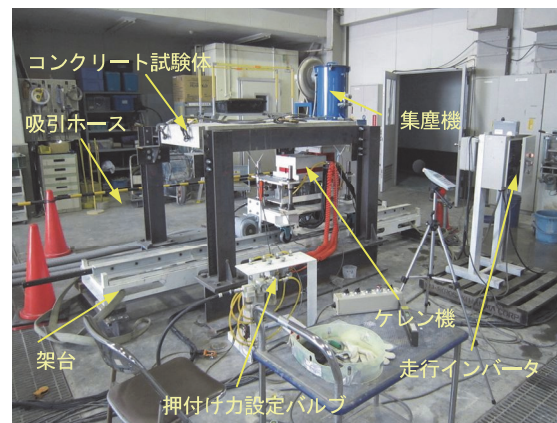


写真-7 要素試験状況

条件で、ケレン機によるコンクリート試験体の表面処理を行った。

コンクリート試験体は、形状が長さ 1700×幅 800×厚さ 150mm で、24-12-20N のコンクリートを使用して作製した。処理面の種類は、コンクリート表面とエポタール（3層塗り）を塗布した塗膜面の2種類とした。

計測項目は、図-4に示すように、ケレン機の走行速度確認用のレーザ水平変位（1台）、押付け力としての鉛直荷重（前部2台、後部2台の計4台）、ケレン機と天井面の離間距離としての鉛直変位（前部1台、後部1台の計2台）とした。

b. 試験結果

(a) 走行速度

ケレン機の走行速度は、走行モータのインバータ周波数で設定した。走行速度確認用の水平変位から、走行速度（0.5~10.0m/min）はインバータの周波数制御で設定でき、ケレン機の前進と後退との走行速度には差が見られなかった。また、ケレン機の走行では、架台両端に設けたリミットスイッチにより、逸走することなく自動停止することを確認した。

(b) 押付け力

押付け力の設定は、ケレン機を静止状態で、前後部のエアシリンダー圧を 0.28MPa（ケレン機が浮上り天井面に接触する直前の圧力）にした後、後部エアシリンダー圧のみを増加させて行った。なお、押付け力はその時に増加した荷重として定めた。

その結果、後部エアシリンダー圧を増加させても、ケレン機は前後に傾斜することなく走行することができ、押付け力（0.2~0.9kN）は後部エアシリンダー圧により設定できることを確認した。

なお、ケレン機は市販装置を改造したもので、表面処理時の押付け力は、約 0.6kN が標準的な仕様となっている。試験および施工では、押付け力を 0.6kN を中心として行った。

(c) ケレン機の凹凸追従

速度 1m/min、押付け力 0.6kN の走行条件で、天井面勾配が 0.0%（水平）、ケレン機の走行勾配が 1.8%時における、天井面とケレン機前後の離間距離の時刻歴を図-5に示す。離間距離は、移動開始時から終了まで前後共に約 17mm 低くなっている。この値は、ケレン機の走行距離から求めた離間距離の変化量 20mm（1m/min×1.1min×1.8%）とほぼ一致しており、ケレン機は天井面の高さの変化に追従している。よって、ケレン機は走行方向の天井面の凹凸に追従できることを確認した。

(d) 飛散対策

飛散防止として、研掃ヘッドの周囲に2重の飛散防止枠と吸引による集塵機を設けている。試験時の集塵用の吸引ホース長は、現場での適用を考慮して 30m とした。

目視による観察では、飛散防止枠から漏れる粉塵は見

表-2 試験条件（要素試験）

項目	水準
走行速度	5水準(0.5、1.0、2.0、3.0、5.0、7.0 m/min)
押付け力	4水準(0.2、0.4、0.6、0.9 kN)
処理面	2水準(コンクリート研掃、塗膜除去)

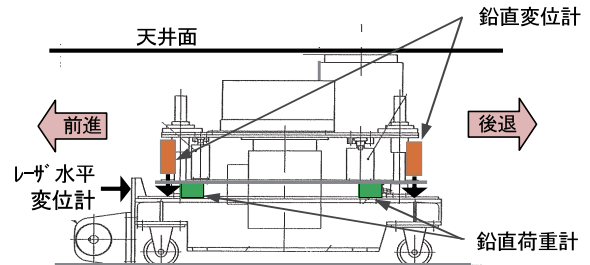


図-4 計測位置（ケレン機）

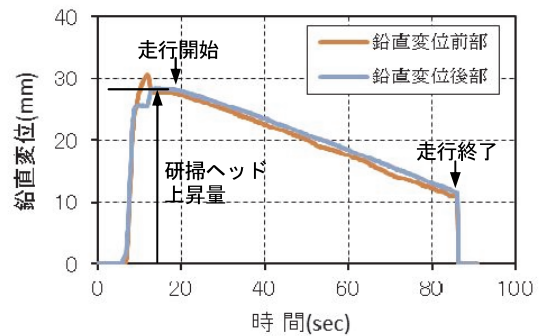


図-5 離間距離の時刻歴

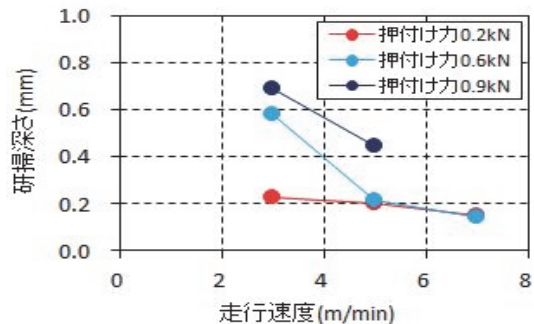


図-6 研掃深さと研掃条件の関係

られず、吸引による集塵は確実に行われた。また、吸引ホース内の残留粉塵量と集塵機のバケツ内粉塵量の重量比は約 1 : 10 であった。吸引ホース内に滞留する粉塵量は少なく、集塵機のバケツ内に確実に吸引できることを確認した。

(e) 研掃深さ

研掃深さは、ケレン機による研掃後の表面をレーザ変位計を用いて走行直角方向に3側線を計測し、両端部の深さを平均して求めた。研掃深さと研掃条件（走行速度、押付け力）の関係を図-6に示す。

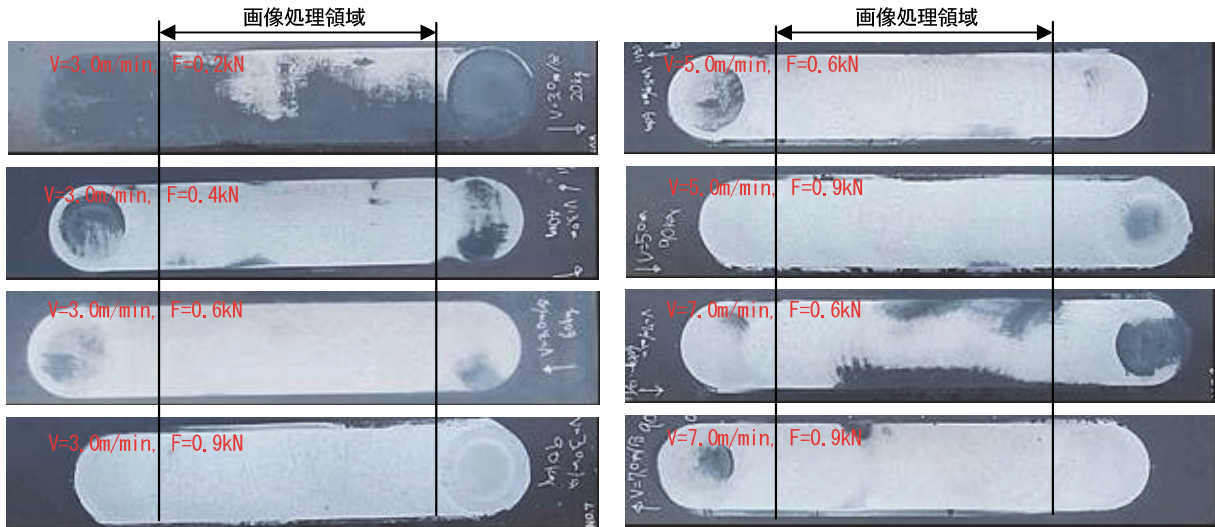


写真-8 塗膜除去状態

研掃深さは、移動速度が遅くなるほどまた押付け力が大きくなるほど、深くなっている。今回の試験での最大研掃深さは、押付け力 0.9kN、移動速度 3.0m/min の時、0.7mm 程度であった。試験体コンクリート強度は 30N/mm² (呼び強度 24N/mm²) であり、コンクリート強度等によっても研掃深さが変化すると考えられる。これらより、現場での表面処理時には、必要とする研掃深さや表面状態になるように、施工前に、ケレン機の走行速度および押付け力を設定する試験を行う必要がある。

研掃幅は、押付け力や走行速度に関係なく 240～250mm であった。ケレン機を 220～230mm 横行させれば十分な施工ラップ長が確保できることを確認した。

(f) 塗膜除去率

塗膜除去率は、ケレン機で塗膜除去された面積の、施工面積に対する比として設定し、画像処理により求めた。塗膜除去状態を写真-8に、塗膜除去率と押付け力の関係を図-7に示す。

塗膜除去率は、押付け力が大きいほど、移動速度が遅いほど大きくなる。押付け力 0.6kN 時では、移動速度が 5m/min 以下であれば塗膜除去率が 100% となり、塗膜を完全に除去することができた。

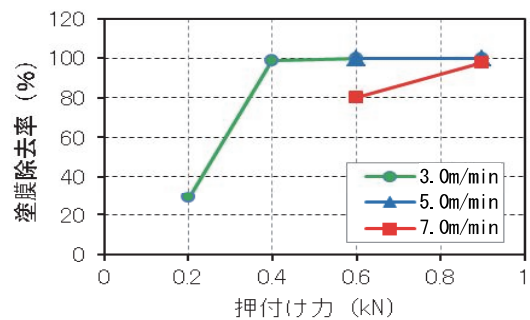


図-7 塗膜除去率と研掃条件の関係

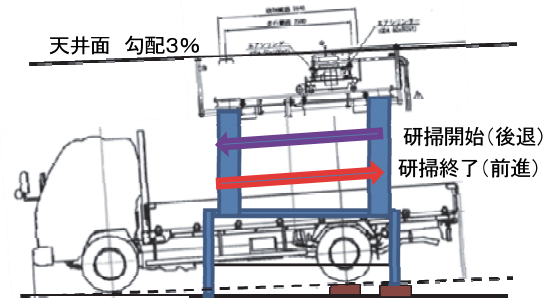


図-8 全体試験 (CASE1: 前下がり)

3.2 全体試験

a. 試験方法

試験は、図-8と写真-9に示すように、3%勾配を有する模擬天井を用いて、研掃装置による設置～表面処理～撤収までの一連の作業を行い、操作性、安全性および表面処理状況の確認を行った。試験条件として、車体勾配を 3%とした前下がり (CASE1: 図-8)、後下がり (CASE2) の 2 ケースとした。計測は、要素試験と同じ項目で行った。

b. 試験結果

図-3に示した研掃装置の施工フローに従って、研掃装置の設置～表面処理～撤収までの作業を行った。



写真-9 全体試験状況

装置の設置・撤収および表面処理については、全ての作業が地上の手元ペンダントスイッチで行うことができ、操作性に関して問題がなかった。

模擬天井表面処理時の押付け力の時刻歴を図-9に示す。

設定押付け力は 0.58kN とした。荷重計より求めた試験時の押付け力は約 0.6kN となっており、設定した押付け力で表面処理が行われたことを確認した。また、飛散防止枠からの粉塵等の漏れはなかった。

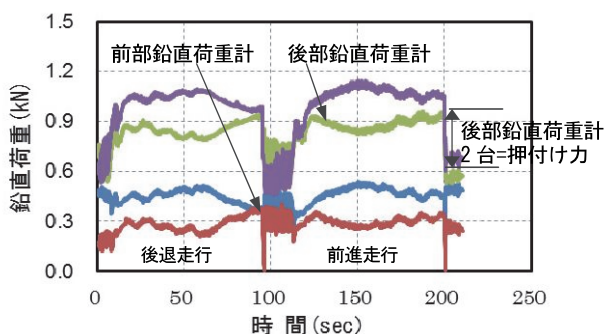


図-9 模擬天井表面処理時の押付け力の時刻歴

4. 現場適用

4.1 現場概要

適用した工事は、都市内高速道路におけるトンネル剥落防止工事である。適用したトンネルは、写真-10に示すように、中央分離帯が設けられた片側2車線ずつの4車線を有するボックスカルバートで、その内空形状は、高さ4.7m×幅16.1m×長さ100mである。



写真-10 適用トンネル外観

4.2 適用結果

a. 適用の概要

本研掃装置を適用した表面処理は、天井面の剥落防止工事において、躯体コンクリートと剥落防止材との一体化を図るために行う、排気ガスで汚れた塗膜の除去作業である。今回の研掃装置の適用日数は6日間で、その施工面積は計画施工面積2,630m²の内の150m²で、一部区間での適用となった。

施工状況を写真-11に示す。施工条件として、道路規制条件は、片側車線供用下の1車線規制帯内での夜間作業(規制時間4~6時間)である。研掃装置による表面処理条件は、現地での試験施工から、ケレン機の走行速度4.5m/min、押付け力0.6kNとした。

b. 施工性能

研掃装置による表面処理の施工時間、および施工出来高等を表-3に示す。同表において、作業時間とは規制帯への入場から研掃装置の格納までの時間、組立時間とは研掃装置の設置開始から表面処理の開始前までの時間、格納時間とは表面処理の終了後から研掃装置の格納までの時間とした。また、表面処理時間とは表面処理の開始から終了後の研掃装置移動を含めた次作業の表面処理の開始までの時間とした。

同表より、研掃装置による作業時間は約2.5~4.5時間で、規制時間の4~6時間より約1.5時間短くなった。また、研掃装置の組立時間は20~31分、格納時間は20~33分で、共に30分程度かかり、表面処理時間以外に約1時間の準備・撤収の時間を要した。表面処理時間は14~23分/回で、平均で18分/回程度であった。表面処理時間は12分/回程度を想定していたが、1.5倍程度の時間を要した。今回の研掃装置は一部区間での適用であったため、作業員の操作の習得不足等により、表面処理時間が想定していたものより長くなった。

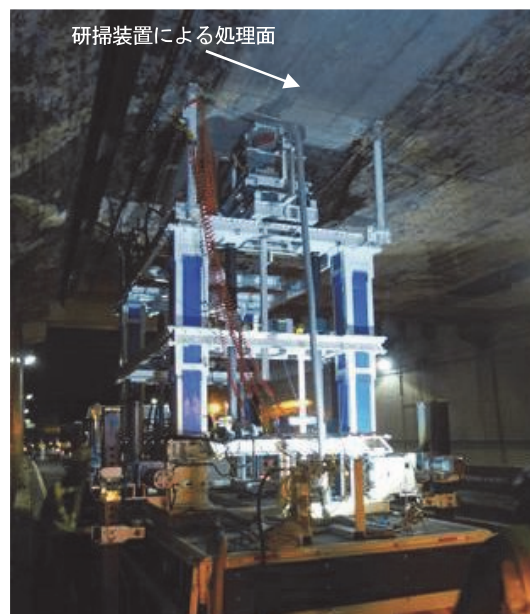


写真-11 施工状況(表面処理)

表-3 適用結果

項目		施工結果
規制時間		4~6時間
作業時間		約2.5~4.5時間
作業準備時間	組立時間	約30分
	格納時間	約30分
表面処理時間		約18分/回
施工面積(1回設置当たり)		3.0m ² /回
施工性能		約7m ² /h

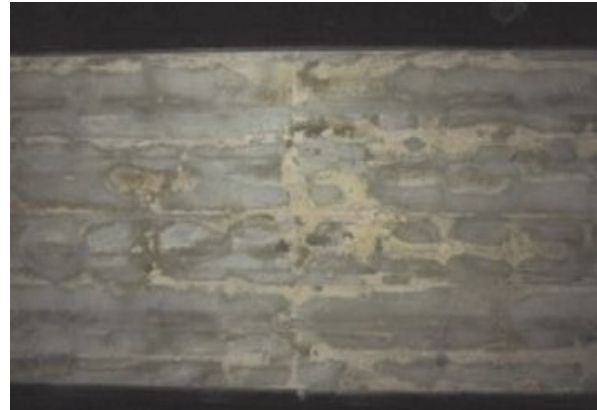
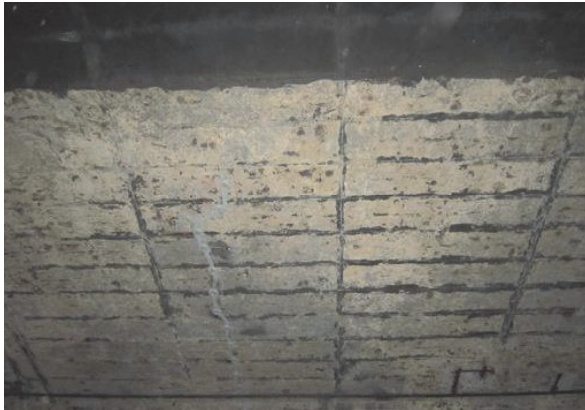


写真-12 処理面出来形の比較（左：人力による施工 右：研掃装置による施工）

作業員の人数については、研掃装置の操作者として1人、補助員としてアウトリガー設置時や配管・配線接続、および次作業への車両移動作業等に2人と、計3人が必要であった。また、今回の1回の研掃装置設置時の表面処理施工面積は、 $2.5\text{m} \times 0.2\text{m} \times 6$ パス = $3.0\text{m}^2/\text{回}$ であった。この結果、今回の本研掃装置の適用による天井面表面処理の施工性能は約 $7\text{m}^2/\text{h}$ であった。今後、研掃装置の操作者の操作技術の向上等により、組立・格納時間および表面処理時間を短縮でき、施工性能は向上するものと考えている。

c. 処理面の出来形

処理面の出来形として、ディスクサンダーによる人力施工と研掃装置による施工の比較を写真-12に示す。

研掃装置による施工の場合には、適切な一定の押付け力と一定の走行速度で表面処理が行われたため、塗膜の削り残しが見られず、確実に除去されていることがわかる。一方、ディスクサンダーによる人力施工の場合には、天井面のわずかな凹凸の影響により、塗膜を完全に除去するのに多大な時間と労力が必要となるため、型枠継ぎ目部等に塗膜の取り残しが見られた。その結果、建研式付着力試験による付着強度は、人力施工の場合で約 $1.5\text{N}/\text{mm}^2$ 、研掃装置による場合で約 $3.4\text{N}/\text{mm}^2$ となり、大きく向上した。これらのことより、研掃装置による表面処理では、天井面の一般通行車両の排気ガスにより汚れた塗膜が、一定の研掃条件下で確実に除去され、処理面仕上がり品質のばらつきが改善されたことから、付着強度が大きくなったと考えられる。

d. 作業性

本研掃装置による表面処理の作業は、写真-13に示すように、操作者の手元ペンダントスイッチ等で全ての操作が地上から行えた。これにより、高所での無理な姿勢による人力作業がなくなり、天井面の表面処理の省力化および安全性の向上が図れることを確認した。

また、表面処理時に発生した粉塵等は、確実に飛散防止枠と集塵機によって遮断・吸引された。これにより、片側車線供用下での本研掃装置による施工においては、

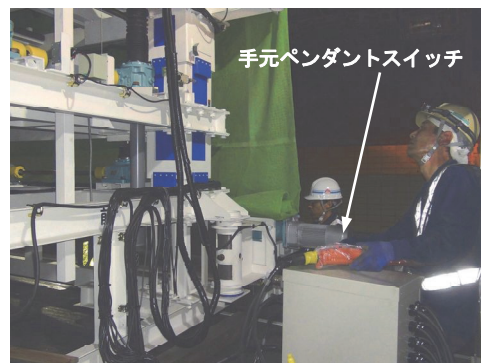


写真-13 研掃装置の操作状況

一般通行車両への粉塵等の飛散抑止および作業箇所での飛散抑止による作業環境の改善ができることを確認した。

5. あとがき

都市内高速道路におけるトンネル剥落防止対策工事において、今回開発した研掃装置を、天井面の塗膜除去作業の一部区間に適用した。本研掃装置の適用により、既設コンクリート表面の汚れや塗膜を取り残すことなく確実に除去でき、処理面仕上がり品質のばらつきも改善されたことから、付着性能が人力施工に比して向上した。また、表面処理時に発生した粉塵等の飛散が抑止され、作業環境の改善も図れた。これらより、表面処理の作業が省力化され、安全性も向上した。

今後は、コンクリート構造物の補修・補強工事において、高品質化・省力化ができる施工技術として、既に実用化している「ウォータージェットによるコンクリート表面処理機¹⁾とあわせて、発注者に積極的に提案していく所存である。

【参考文献】

- 1) 石井敏之、白石祐彰、川西健之、森本克秀、「補修・補強工事への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適用」、土木建設技術発表会 2013、pp.100-103、2013.11