

論文 断面修復時の鉄筋ケレンに対するレーザー照射技術の適用性検討

金子 泰明*1・今関 幹*2・永井 香織*3・河井 勇樹*4

要旨：劣化の進んだコンクリート構造物のかぶりをはつり落とし、除去した部分を修復する断面修復工法では、腐食した鉄筋をケレンする必要があるが、施工箇所を防音シートで囲うことが困難な高架橋の張り出し部では、騒音に関する配慮が必要である。筆者らは、騒音の低減を目的として、レーザー照射による鉄筋ケレンに着目した。本研究では、断面修復を模擬したモックアップ試験体を用いて、カップブラシを併用した場合の効率的なレーザー照射条件について検証し、実際の現場にて試験的にレーザーケレンを実施した。その結果、従来工法と比較して騒音および粉じんが低減されることを確認した。

キーワード：リニューアル, 断面修復, 鉄筋ケレン, レーザケレン

1. はじめに

塩害などで劣化の進んだコンクリート構造物の劣化部をはつり落とし、除去した部分を修復する断面修復工法では、鉄筋に付着したモルタルおよび錆を完全に除去した後に防錆剤を塗布する必要がある。鉄道高架橋では、固定足場を設置し、施工箇所周辺を防音シートで覆った状態で施工することが可能であるため、ケレンにはジェットタガネ、カップブラシやサンドブラストなどが用いられる。一方、張り出し部では高所作業車を用いることが多く、施工箇所を防音シートで覆うことが困難となるため、サンドブラストの使用に制限を受ける。そのため、ジェットタガネやカップブラシを用いるが、特にジェットタガネを用いる場合には施工する際の騒音が問題となり、住宅や店舗が密集する地域では作業する時間などの配慮が必要となる。

そこで、筆者らは、騒音の低減を目的としてレーザー照射によるケレン（以下、レーザーケレンと称する）に着目し、検証を進めている¹⁾。レーザーケレンは、橋梁などの鋼構造物の汚れや錆、古い塗膜を効果的に除去できることから再塗装時の素地調整方法として活用されている^例（例えば²⁾）。レーザー照射によって瞬間的に高温環境となることによるセメント水和物の強度の低下³⁾および、レーザー照射により照射箇所が生じる衝撃⁴⁾によってモルタルが除去されることを室内検証では確認⁵⁾しているが、実際の現場での検証実績はない。

コンクリートのはつりが完了した段階では、鉄筋に付着したモルタルは完全に除去されていないため、ケレンによって鉄筋に付着したモルタルおよび錆を除去する必要がある。本論では、実構造物を模擬したモックアップ試験体を用いて、カップブラシを併用した場合の効率的なレーザー照射条件を選定した後、実際の現場にて試験施

工を実施し、実構造物での適用性を確認した内容について報告する。

2. 100W レーザによる検証

使用した装置を写真-1(b)に示す。既往の研究¹⁾で使用したレーザー装置は、ファイバーを増幅装置とした200Wの装置（写真-1(a)）であったが、今回の実験では100Wの小型装置を用いた。それら装置の概要を表-1に示す。100Wの装置は200Wの装置と比較して本体およびヘッド（レーザー照射部分）の寸法が小さく、軽くなっている。現場でレーザーケレンを実施する際の取り回しを考えると、使用する装置は小型であることが望ましい。そのため、100Wの小型レーザーを用いて、カップブラシを併用した場合の効率的なレーザーの照射条件を検証した。



a) 200W レーザ b) 100W レーザ

写真-1 レーザ装置

表-1 レーザ装置の比較

200W	寸法(mm)	本体 : W510×D730×H730 ヘッド : W80.0×D440×H140
	重量(kg)	本体 : 71.5 ヘッド : 3.40
100W	寸法(mm)	本体 : 617×469×291
	重量(kg)	本体 : 28.0 ヘッド : 0.62

*1 飛島建設（株）研究開発グループ（正会員）

*2 日本大学 生産工学部建築工学科

*3 日本大学 生産工学部建築工学科 教授

*4 西日本旅客鉄道（株）（正会員）

3. 照射条件選定のための基礎試験

3.1 試験体概要

断面修復時にケレンする一般的な条件を想定した。D16の鉄筋を130mm間隔で5本ずつ交差し、モルタルを付着させたモックアップ試験体に対してレーザーケレンを実施した。モックアップ試験体の外観および照射範囲を図-1に示す。鉄筋にモルタルを付着させた後、3年気中にて養生した状態の試験体を用いた。付着させたモルタルは、有機短繊維を含まない断面修復用のモルタルであり、モルタルの厚みは1.2mm程度である。

3.2 レーザ照射条件および測定項目

(1) レーザ照射条件

レーザー照射の模式図を図-2に、照射条件を表-2に、レーザー光形を図-3に示す。丸い照射光が、レーザー光形の線に沿って照射される。照射試験は、20℃の室内環境で実施した。スポット径を30μm、周波数を70kHz、焦点距離を163mm、照射時間を180sとして、焦点移動速度



図-1 モックアップ試験体および照射範囲

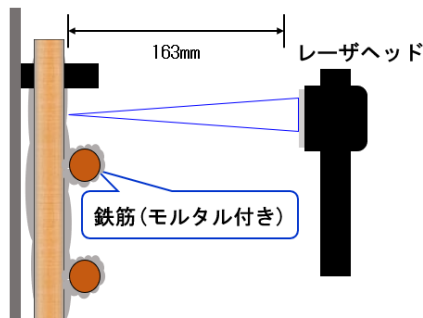
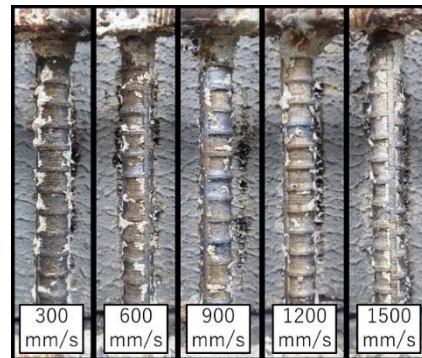


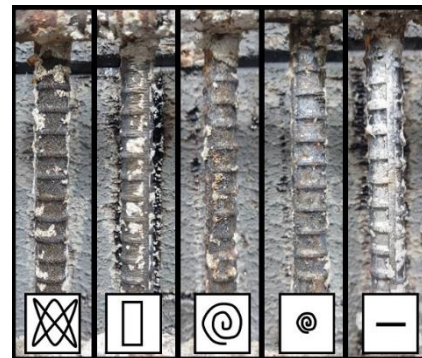
図-2 モックアップ試験体への照射模式図

およびレーザー光形を変化させてケレン効果を確認した。なお、モックアップ試験体を用いた検証では鉄筋背面はレーザー照射の対象外とした。

照射時間が同じであれば、照射面積が受ける熱の総量は同じとなるが、焦点移動速度が小さいほど、局所的に受ける熱量は大きくなる。照射の周波数が70kHzであることから、照射1回ごとの間隔は 1.43×10^{-5} sであり、照射ごとに焦点が移動する距離は、焦点移動速度300mm/sで4.29μmとなり、焦点移動速度1500mm/sで21.4μmとなる。照射光の大きさであるスポット径が30μmであるため、焦点移動速度が小さいほど照射光が重なる範囲が



(a) 焦点移動速度の影響（レーザー照射後）



(b) レーザ光形の影響（レーザー照射後）



(c) カップブラシ使用後（Lissajous）

写真-2 ケレン後の試験体状況

表-2 レーザ照射条件

出力 (W)	モード	スポット径 (μm)	周波数 (kHz)	焦点移動速度* (mm/s)	レーザー光形	照射時間 (s)	焦点距離 (mm)
100	パルス	30	70	300	Beeline	180	163
				600	Spiral-L		
				900	Spiral-S		
				1200	Lissajous		
				1500	Rectangle		

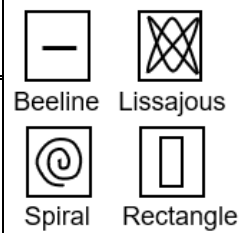


図-3 レーザ光形

*照射対象面上を走査する速度であり、スポットの移動速度

大きくなり、局所的に受ける熱量が大きくなる。

なお、焦点移動速度の影響を検証する際には、レーザー光形を Beeline とした。また、レーザー光形の影響を検証する際には、照射 1 回ごとの照射光の距離を大きくすることで局所的な熱の影響を小さくするために、焦点移動速度を 10000mm/s とした。

レーザー光形 Spiral は、照射径の大きさを変えた 2 種類について検証した。照射径を 10mm とした条件を Spiral-L、径を 3mm とした条件を Spiral-S と表記する。

また、レーザーを照射する際には、横向きの試験体に対して焦点距離を維持しながら照射した。

(2) 測定項目

レーザー照射後に、鉄筋に付着したモルタルおよび錆の除去に要したカップブラシの作業時間をストップウォッチで計測した。なお、作業時間はモルタルおよび錆を可能な限り除去した状態を目視で判断した。また、レーザー照射後およびカップブラシの作業後の試験体の画像から、除去率を算出することで、除去効果を相対的に判断した。除去率は式(1)によって算出し、残存部面積 S_R は画像解析ソフトを用いて測定した。

$$R = \frac{S_I - S_R}{S_I} \times 100 \quad (1)$$

ここで、R：除去率(%)

S_I ：照射面積(mm²)

S_R ：残存部面積(mm²)

3.3 試験結果

(1) 表面状態

ケレン後の試験体状況を写真-2 に示す。レーザー照射によってモルタルおよび錆が除去されたことが確認できた。また、焦点移動速度およびレーザー光形による、モルタル除去の状況はほぼ同程度であった。レーザー照射後は、写真-2(c)に示す状態となるまでカップブラシを用いてケレン作業を実施した。レーザー照射後に残存したモルタルはカップブラシで容易に除去することができ、光沢のある仕上がりとなった。今回対象とした、厚さが 1mm 程度のモルタルであれば、100W の小型レーザーでモルタルの除去および脆弱化³⁾が可能であることを確認した。

(2) レーザー照射条件と除去率の関係

焦点移動速度と除去率の測定結果を図-4 に、レーザー光形と除去率の関係を図-5 に示す。焦点移動速度の増加に伴って除去率が大きくなる傾向が確認された。レーザー光形の違いによる除去率を比較すると、Spiral-S で最も除去率が高くなる結果となった。本検討の範囲内では、レーザー照射のみで 70%以上の除去が可能であった。カップブラシ施工後は、いずれの条件も除去率が 90%程度と

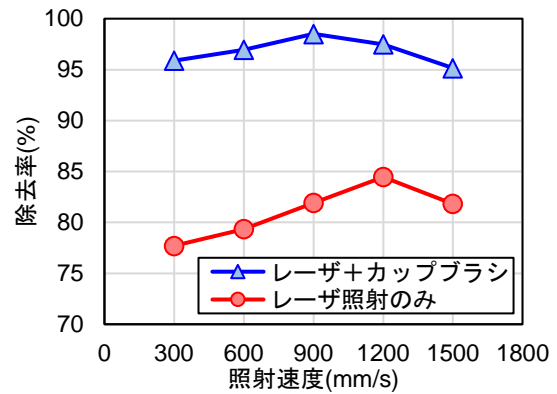


図-4 焦点移動速度と除去率の関係

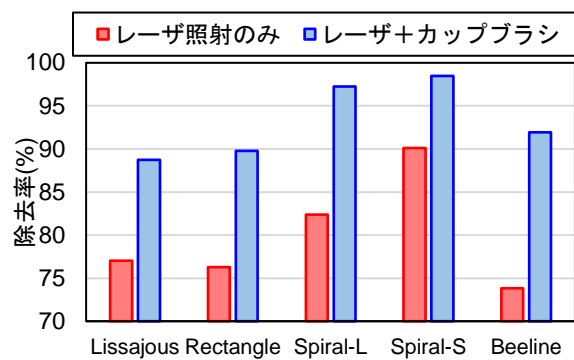


図-5 レーザー光形と除去率の関係

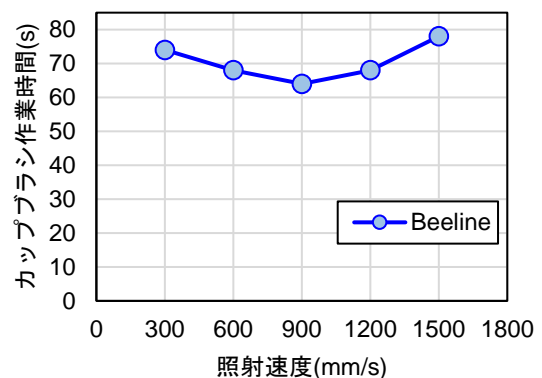


図-6 焦点移動速度とカップブラシ作業時間の関係

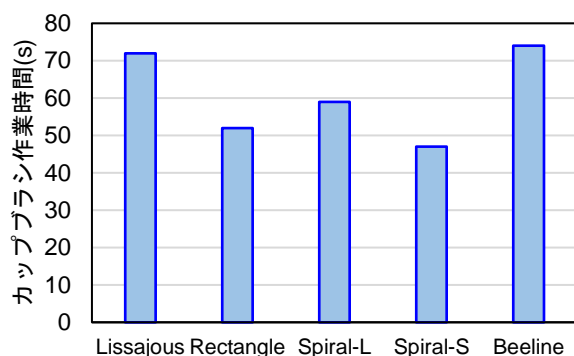


図-7 レーザー光形とカップブラシ作業時間の関係

なった。

(3) カップブラシ作業時間

焦点移動速度とカップブラシの作業時間の関係を図-6に、レーザ光形とカップブラシ作業時間の関係を図-7に示す。カップブラシ作業時間は、事前の除去率が大きいほど短くなると考えられたが、今回の実験では、焦点移動速度とカップブラシ作業時間に明確な関係は確認されず、作業時間は64~78sとなった。レーザ光形の違いによるカップブラシ作業時間は、除去率と同様にSpiral-Sで最も短くなり、全体的な傾向として、レーザ照射後の除去率が大きい条件ほどカップブラシの作業時間が短くなった。

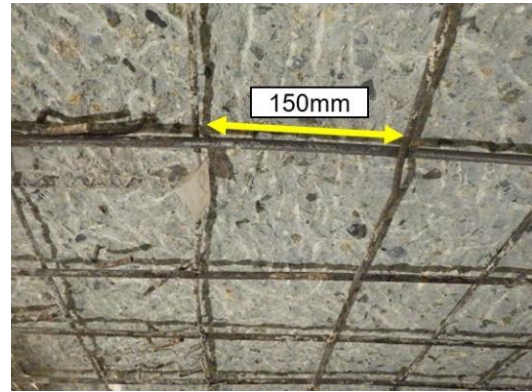


写真-3 現場鉄筋の発錆状況

4. 試験施工

4.1 概要

試験施工を実施した場所は、断面修復を施工している床版の張り出し部であり、採光型の防音シートで囲まれた空間である。現場鉄筋の発錆状況を写真-3に示す。コンクリートのはつり出しが完了し、鉄筋が完全に露出した状態でケレン作業を実施した。使用されている主な鉄筋はφ13の丸鋼であり、組まれた鉄筋の1スパン(150mm)に対して1条件を施工した。

4.2 レーザ照射条件および施工条件

使用したレーザ照射装置は、モックアップ試験体室内検証に用いた装置と同じである。室内検証の結果を受けて、レーザ照射条件は、スポット径を30μm、周波数を70kHz、焦点距離を163mm、焦点移動速度を10000mm/s、レーザ光形は照射径を変えた2種類のSpiralとした。照射時間は事前に決めずに、レーザ照射作業者の判断で実施した。

比較対象として、ジェットタガネとカップブラシを用いる従来のケレン方法についても測定した。工具の使用によるケレン作業終了のタイミングも、作業者の判断とした。また、反射板を用いた鉄筋背面のレーザ照射についても検証した。なお、背面照射では作業時間を測定せず、適用可能性の検証のみとした。

4.3 測定項目および測定方法

(1) 作業時間

レーザ照射に要した時間および工具を用いたケレン時間を、ストップウォッチにて測定した。測定は、作業時間のみを対象とし、工具の持ち替えなどの時間は含めずに比較した。

(2) 粉じん

使用した粉じん計の仕様を表-3に示す。ケレン作業前、レーザ照射、ジェットタガネおよびカップブラシ施工時の粉じん量を2分間測定した。測定した粉じん量の平均値を、施工前の粉じん量を1とした相対的な指標と

表-3 粉じん計の仕様

項目	仕様
測定原理	光散乱方式
測定範囲	0.001~10.000mg/m ³ (標準粒子に対して)
測定精度	±10% (標準粒子に対して)
測定感度	1CPM=0.001mg/m ³ (標準粒子に対して)
吸引流量	1.7L/min
動作環境	温度0~40℃ 湿度5~90%rh (結露がないこと)
寸法・質量	184(W)×68(D)×109.5(H)mm 約1.1kg (電池を含む)

表-4 騒音計の仕様

項目	仕様
測定レベル範囲	A特性 25dB~130dB C特性 33dB~130dB Z特性 38dB~130dB
寸法	約250mm(H)×76mm(D)×33mm(H)
質量	約400g(電池含む)



写真-4 レーザ照射状況



写真-5 背面照射状況

して整理した。

(3) 騒音

使用した騒音計の仕様を表-4に示す。各作業時に測定し、測定値は等価騒音レベル Leq (dB) で示した。なお、粉じんおよび騒音は、作業員の近傍で測定した。

5. 試験施工結果

5.1 ケレン後の仕上がり

現場でのレーザー照射状況を写真-4に、ケレン前後の状態を写真-5に示す。モックアップ試験体での検証と同様に、レーザー照射によって錆および薄いモルタルを除去することができたが、レーザー照射のみで全てのモルタルを除去することはできなかった。しかし、レーザー照射後にカップブラシでケレンすることで、従来工法（ジェットタガネとカップブラシの併用）と同程度の仕上がりを確保することが可能であった。また、反射板を使用した背面照射を実施した条件（写真-4(d)）で錆の除去が確認できたことから、鉄筋背面に反射板が挿入できる空間があれば、背面のケレンが可能であることを確認した。

5.2 測定結果

(1) 作業時間

単位長さあたりの作業時間を図-8に示す。レーザー照射を実施した条件は、従来工法と比較して鉄筋のケレンに要する時間が長くなった。しかし、カップブラシ作業にかかる時間は全ての条件で同程度であったことから、レーザー照射ではモルタルの除去（脆弱化）にかかる時間が、ジェットタガネと比較して長くなったと考えられる。従来工法と同程度まで作業時間を短縮するためには、安全性や鉄筋への影響を確認した上で、レーザー装置の変更による高出力化など、照射の効率化を進めていく計画である。

(2) 粉じん

粉じんの測定結果を図-9に示す。今回の検証では、作業員の近傍で粉じん量を測定しており、相対的な粉じん量低減効果の確認を目的としている。そのため、施工前の粉じん量（初期値）を1とした場合の相対的な粉じん量として整理している。レーザー照射時の粉じん量はカップブラシの約1/4、ジェットタガネの約1/10となり、従来工法と比較して粉じんを大きく低減できることが確認された。

(3) 騒音

騒音の測定結果を図-10に示す。現場作業時の等価騒音レベルの初期値は64.1dBであった。また、各作業時の騒音レベルは、レーザー照射時で66.6dB、カップブラシ作業時で92.6dB、ジェットタガネ作業時で96.3dBであり、レーザー照射単体の等価騒音レベルはカップブラシの約3/4、ジェットタガネの約2/3となった。レーザー照射時の

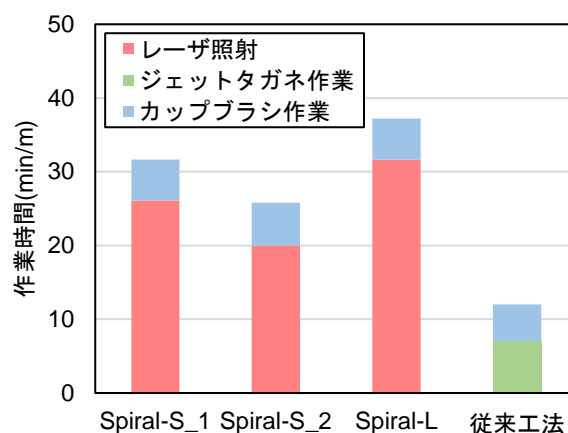
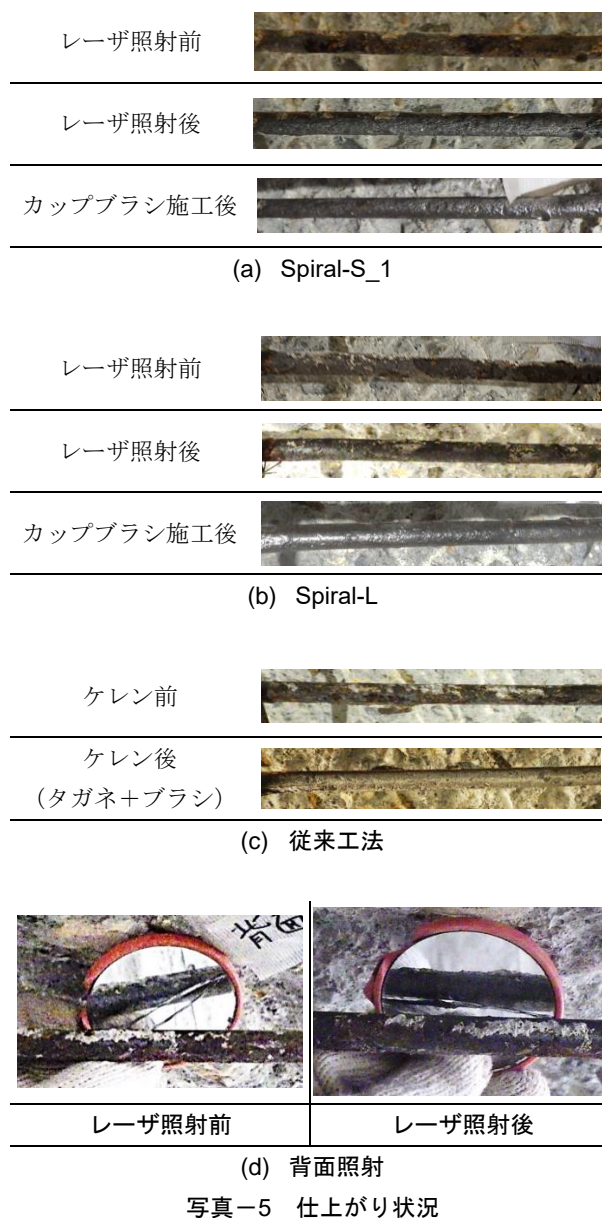


図-8 作業時間測定結果

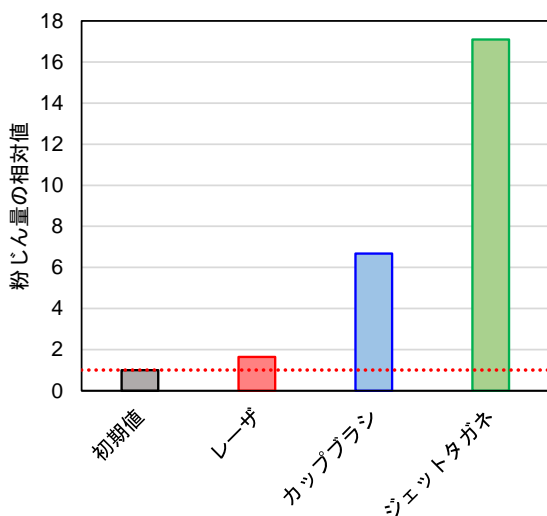


図-9 粉じん測定結果

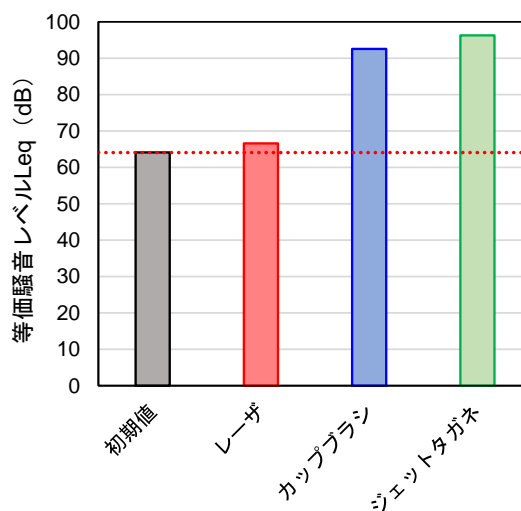


図-10 騒音測定結果

等価騒音レベルは初期値と同程度であることから、レーザー照射は騒音に対する影響が小さいことが確認された。

以上のことから、防音シートなどによる防音対策が困難な箇所に対しては、レーザー照射による鉄筋ケレンが有効である。

6. まとめ

モックアップ試験体を用いたレーザー照射条件の選定および現場での検証により、次の知見が得られた。

- (1) レーザ照射とカップブラシを併用することで、鉄筋の錆およびモルタルを除去することができる。
- (2) 今回の実験では焦点移動速度と除去率には明確な関係が確認されず、径の小さい Spiral-S のレーザー光形の除去率が高いことが確認された。
- (3) 実際の現場にて、レーザー照射とカップブラシを併用することでジェットタガネを用いる従来工法と比較して遜色のない仕上がりとなることを確認した。
- (4) レーザ照射によるケレンは、従来工法と比較して最大で約3倍の作業時間を要する結果となった。
- (5) 防音シートなどによる防音対策が困難な箇所に対しては、レーザー照射による鉄筋ケレンが有効であることを確認した。

謝辞

本研究にあたり、(株)光響および PCL(株)に多大なるご助言、ご協力をいただきました。ここに記して感謝の意を申し上げます。

参考文献

- 1) 金子泰明他：リニューアル工事におけるレーザー照射を用いた鉄筋ケレンに関する開発、とびしま技報, No55, 2022.
- 2) 藤田和久, 豊澤一晃, 沖原伸一郎, 前橋伸光, 高原和弘, 秋吉徹明：レーザークリーニングによる鋼構造物のメンテナンス, レーザー研究, 45 巻, 7 号, pp.418-422, 2017.
- 3) 今関幹他：レーザーによるケレン工法の開発に関する研究, 日本建築仕上学会 2022 年大会学術講演会, pp.147-150, 2022.
- 4) 山内良昭, 中野元博, 尾崎典雅, 田中和夫：レーザー衝撃による CFRP 積層材の超高速破壊, 材料, 第 53 巻, 3 号, pp.254-259, 2004.
- 5) 今関幹, 金子泰明, 永井香織：小型レーザーによるレーザーケレン工法の開発に関する研究, 日本建築学会大会学術講演概要集, pp.433-434, 2022.