

論文 レーザを用いたコンクリートはつり技術に関する基礎的研究

市山 大輝^{*1}・伴 享^{*2}・永井 香織^{*3}・末竹 泰士^{*4}

要旨：コンクリートに物理的な外力を加えてはつり取る方法とは異なり、レーザをコンクリートに照射してはつり取る技術の開発を行っている。ここでは出力 2kW（QCW：疑似連続波）のファイバーレーザを用い、照射距離、照射速度、照射角度等をパラメータとした実験を行った。その結果、本実験の範囲内では、照射距離、移動速度がはつり深さに及ぼす度合いが大きいことが明らかとなった。また、実際のはつり作業を模擬するための複数回のレーザ照射では、照射回数の増加に伴いはつり深さは増加した。

キーワード：レーザ、コンクリート、はつり、非接触、自動化、省力化

1. はじめに

レーザ技術の建設分野における適用例としては、鉄筋コンクリート構造物の解体を目的に、1980年代からコンクリート切断の研究が建築・土木分野にて行われてきたことが挙げられる^{1),2),3)}。その後、穿孔や微細加工などへの研究が行われてきている⁴⁾。近年では、25kWの高出力レーザを用いた厚さ 1m 越えのコンクリート切断技術の開発など、原子力発電所における遠隔解体技術を目的とした研究開発も行われている⁵⁾。

近年のレーザ装置の進歩とロボット技術の利用により、今後、非接触にて切断や加工が行える技術として発展していくと考えられる。一方、レーザ装置が高価なことや、精密機器であるため施工現場に適用する際の課題があることから、建設現場への適用は依然としてハードルが高いものとなっている。

筆者らは、補修技術内のひとつであるはつり工法に対し、従来のハンドブレイカーやウォータージェット工法の代替技術として低振動、低騒音で作業が可能であるレーザ技術に着目し、はつり工法への適用性について研究開発を行っている⁶⁾。ここでは、その適用性検討のために実施した基礎実験の結果について報告する。

2. 実験概要

2.1 試験体

レーザ照射に用いる試験体として、寸法 350×350×50mm の無筋のコンクリート版を製作した。試験体の作製のコンクリートの使用材料とその配合をそれぞれ表-1、表-2 に示す。表-2 に示すように、JIS 規格のレディミクストコンクリートを用い、呼び強度を 18N/mm² とした。打込み後 2 日で脱枠し強度発現を調整するため気中養生とした。材齢 28 日において圧縮強度試験を実施したところ、試験結果は 20.1N/mm² であった。

表-1 コンクリートの使用材料

使用材料	記号	摘要
水	W	地下水
セメント	C	普通ポルトランドセメント、 密度:3.16g/cm ³
砕砂	S1	頁岩:相模原市緑区、表乾密度:2.63g/cm ³
混合砂	S2	山砂:千葉県君津産、表乾密度:2.55g/cm ³
		石灰砕砂:高知県吾川郡産、表乾密度:2.66g/cm ³
碎石	G	頁岩:相模原市緑区、表乾密度:2.66g/cm ³
混和剤	Ad	AE 減水剤(遅延型 I 種)ポリカルボン酸ポリエーテルポリマーと変性ポリオール

表-2 コンクリートの配合 (18 12 20N)

W/C (%)	s/a (%)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					
			W	C	S1	S2	G	Ad
65	50	4.5	174	270	552	368	918	2.70

表-3 レーザの仕様

項 目	摘 要
最 大 出 力	2kW
動 作 モ ー ド	QCW
波 長	1,080nm
パルスエネルギー	60J
アシストガス	窒素ガス

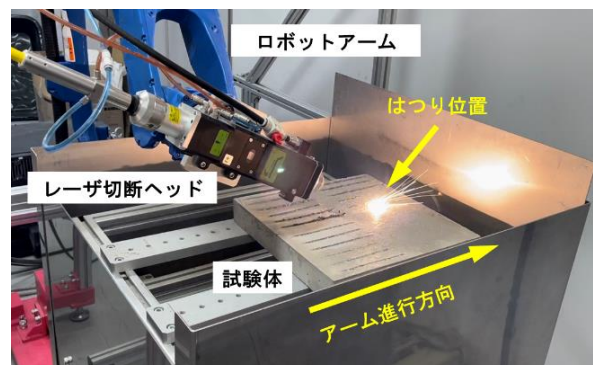


図-1 レーザ照射実験状況

*1 佐藤工業 (株) 技術センター 土木研究部 (正会員)

*2 佐藤工業 (株) 技術センター 土木研究部 上席研究員

*3 日本大学生産工学部 建築工学科 教授 博士 (工学)

*4 日本大学生産工学部 建築工学科

2.2 レーザ装置

表－3 にレーザの仕様を、図－1 にレーザ照射実験状況を示す。レーザ発振器は、最大出力 2kW の QCW（疑似連続波）ファイバーレーザである。

レーザ発振器はレーザ切断ヘッド部がロボットアームに取り付けられたものとなっている。レーザは切断ヘッド先端より照射され、同軸上からレンズ保護を目的としたアシストガスを噴射する。また、ロボットアームの制御により照射距離、照射速度、照射角度が調整できる。

2.3 照射形態

試験体は、2.1 節に示したように、寸法 350×350×50mm である。レーザ照射は線状に長さ 150mm とし、図－2 に示すように試験体を 4 つに区分した。それぞれ区分された範囲内でレーザ照射を 1, 2, 3 回の 1 組とした 2 種類の照射を行った。よって、1 つの試験体で 24 ケースの照射条件の実験が行える。

2.4 照射条件 1（DFS, 照射速度, 照射回数による比較）

レーザの照射条件（その 1）を表－4 に示す。レーザ照射条件は、これまでの実験結果により設定した。レーザ出力、レーザパルス幅および周波数はそれぞれ 2kW, 30msec および 16.6Hz と固定し、レーザの DFS, 照射速度、照射回数の 3 項目を変化させた。ここで、DFS は Defocus, つまりレーザ焦点からの離れ距離である。DFS は、試験体とレーザヘッド先端との最短距離とした。なお、試験体表面に対しレーザヘッドは垂直（90°）である。

試験は DFS を 1 つの実験条件のシリーズとし、照射速度、照射回数をそれぞれ 3 ケース、全 27 ケースの照射条件とした。

2.5 非接触形状測定機によるはつり形状測定

幅、深さのはつり形状測定は、写真－1 に示すように S 社製非接触形状測定機（以下、3D デジタイザ）を用いて行った。図－3 に 3D デジタイザによる形状測定結果を示す。図に示すように、面的に測定を行うことでレーザ照射によるはつり形状が立体的に確認できる。また、はつりの断面形状（図－4）をレーザ移動方向に対し直角方向に 5 測線抽出し、はつり深さは測線の測定箇所 5 点の平均値とした。

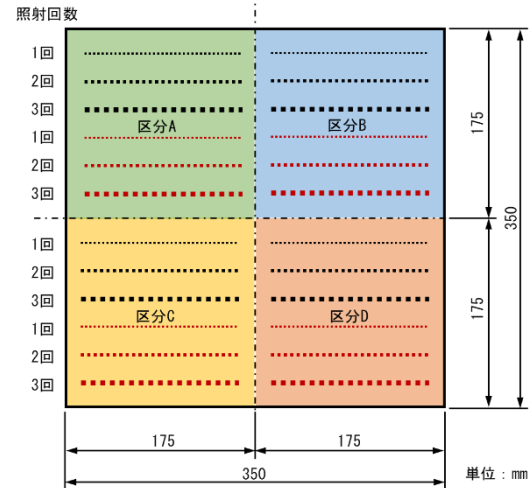
2.6 マイクロスコープによる観察

試験体の表面状態は、K 社製マイクロスコープ（VHX-5000）を用い、表面、断面状態を観察した。

3. 測定結果

3.1 DFS, 照射速度, 照射回数による比較

図－5 に、照射速度とはつり深さの測定結果を示す。DFS の増加に伴いはつり深さは減少した。3 つの DFS による結果であるが、線形に近い関係となっている。



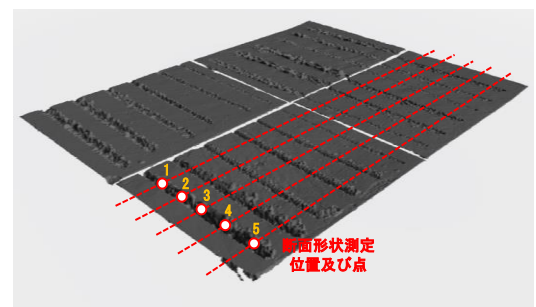
図－2 試験体に対するレーザ照射領域と区分け

表－4 レーザの照射条件（その 1）

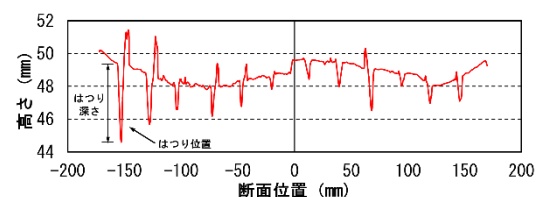
最大出力 (kW)	DFS (mm)	照射速度 (mm/s)	照射回数 (回)
2	100	10	1
	150	20	2
	200	30	3



写真－1 3D デジタイザによるはつり形状測定状況



図－3 3D デジタイザによる形状測定結果



図－4 はつりの断面形状

DFS=200mm のレーザスポット径に対する面積は、DFS=150mm と比較して約 1.7 倍、DFS=100mm と比較して約 3.2 倍であり、DFS の違いによるレーザ照射のパワー密度の大小がコンクリートのはつり深さに影響したものと考えられる。

また、照射速度の増加に伴いはつり深さは減少した。その傾向は、DFS の減少に伴い顕著に表れており、照射速度の違いによるレーザ照射の単位長さあたりのエネルギーの大小が影響したものであると考えられる。

照射回数の増加に対しては、はつり深さは増加傾向にあることが確認された。しかし、照射回数に比例した増加は見られなかった。図-6 にレーザ照射後の表面・断面の観察結果を示す。DFS、照射速度が同じで、照射回数が 1 回の場合と 3 回の場合の表面および断面の状態を比較する。照射回数 1 回で、すでにコンクリート表面にガラス化した層が形成された。コンクリートの細骨材と粗骨材に含まれるケイ素は一般的なガラスの原料であり、これがレーザ照射による熱でガラス化し、形成されたものである。さらに、照射回数 3 回では、照射回数 1 回の場合と比較してガラス化の程度が増加していることが確認された。コンクリート表面に形成されたガラス層は、レーザを反射する。今回、照射回数に比例してはつり深さが増加しなかった一要因としては、ガラス化によりコンクリートのはつりに与えるエネルギー効率が減少したことが考えられる。

レーザによるコンクリート剥離のメカニズムを図-7 に示す。コンクリートにレーザを照射すると、レーザが素材表面で吸収され、瞬時に熱変換し、コンクリート内の空隙や水分が膨張して爆裂する。このメカニズムで剥離現象が発生する。この現象が、レーザが照射される範囲で繰り返すことで、ある幅と深さではつり取られる。はつり取られた物質は小さな破片となって飛び散り、一部は昇華する。

コンクリート表面がガラス化した場合、レーザが反射し、作業効率が低下する。レーザをコンクリートのはつりに適用するには、コンクリートのガラス化を低減させることが一つの重要な事柄であると考えられる。

3.2 照射条件 2 (照射角度、試験の状態による比較)

先述の結果より、はつり深さへの影響が大きいガラス化を低減することを目的に、レーザの照射角度と試験体の状態の 2 つを変化させた。表-5 にレーザ照射条件(その 2)を示す、以下にこの条件に対して期待したことを説明する。

(1) レーザの照射角度

図-7 で説明したように、剥離はコンクリート中の水分の影響による水蒸気圧の増大や骨材の急激な熱膨張によって生じる。この爆裂の応力が、解放面すなわち、コン

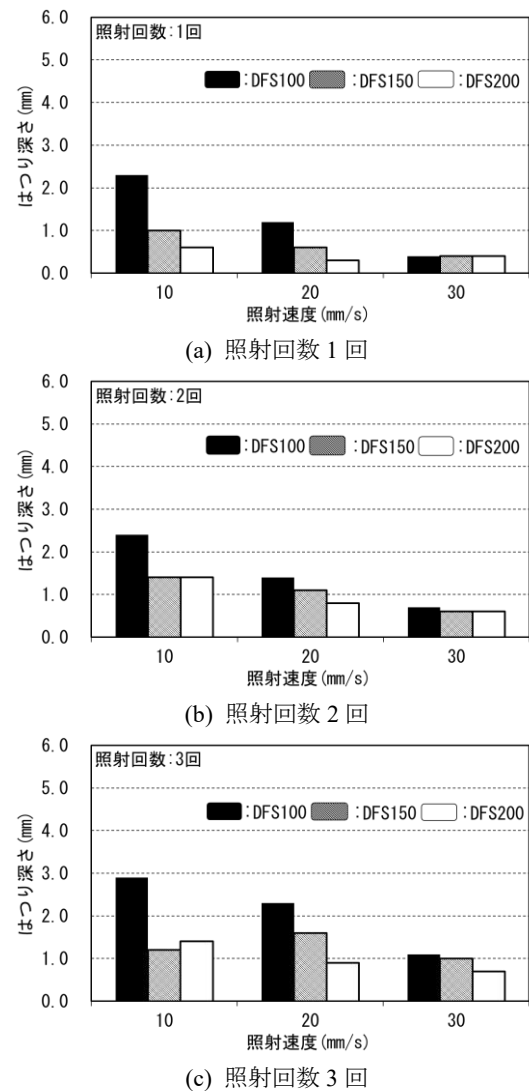


図-5 照射速度とはつり深さ測定結果



DFS100 10mm/s 90° 照射回数 1 回 dry
(a) 表面 (b) 断面



DFS100 10mm/s 90° 照射回数 3 回 dry
(a) 表面 (b) 断面

図-6 レーザ照射後の表面・断面

クリート表面外側方向に働くことを期待した。また、レーザの照射角度を変えることで、レーザヘッド先端の中心軸上から噴射されているアシストガスにより、試験体表面に発生するドロスが除去されることを期待した（図－8）。

(2) 試験体の状態

図－7 で説明したものと同様に、剥離のメカニズムにコンクリート中の水分が影響していることから、レーザ照射前の水散布の有無により違いが出ることを期待した。

気中状態（以下、dry）で保管していた試験体に対し、レーザ照射前にコンクリート表面に水散布を行った（以下、Wet）。ここで、気中状態（dry）は、室温 20℃で湿度の制御は行わない試験室に約 2 週間保管し、試験前の表面水分量は 3.5%～5.0%であった。水散布（wet）は、霧吹きにて試験体全体にコンクリート表面の色が水により変色するまで 10 回程水散布を行った。水の散布量は、10ml～12ml 程度である、

実験は DFS、照射速度、照射回数、照射角度がそれぞれ 3 ケース、試験体状態が 2 ケース、全 162 ケースの照射条件とした。

3.3 照射角度、試験体状態による比較結果

図－9 にはつり深さの測定結果を示す。照射角度で比較した場合、今回の実験では、はつり深さに明確な差は表れなかった。しかし、照射角度 30° および 60° の場合は、照射角度 90° の場合と比較して、試験体表面に生じたドロスの量が減少傾向にあることを確認した（図－10）。これは、照射角度によりドロスの飛散方向に違いが生じたためであると考えられる。今回の実験では、アシストガスの吐出圧力を 0.5Mpa としたが、アシストガスの吐出圧力を大きくすることで、作業効率が向上する可能性が示された。

また、試験体の状態で比較した場合、wet の試験体は dry の試験体と比較してはつり深さが増加傾向にあることを確認した。レーザでコンクリートのはつりを行う場合は、事前に水散布を行うことで作業効率が向上する可能性が示された。

4.考察

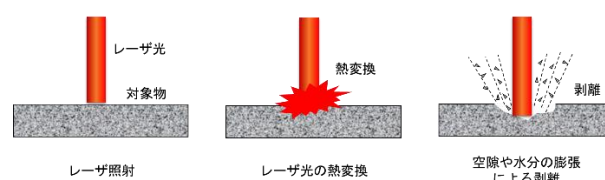
4.1 コンクリート照射に対する課題

レーザによる加 3 工とは、レーザが固体材料の表面に吸収されて始まるプロセスである。そのため、レーザに対する固体材料の吸収率が高いほど、反射や透過が低減し、加工への作用効率が上がる。主に、機械加工分野で用いられる材料は単一素材がほとんどであり、切断や穴あけなどの加工に対して適切に選択した波長のレーザや設定出力で加工が可能である。一方、コンクリートは、セメントペースト、細骨材、粗骨材からなる複合材で

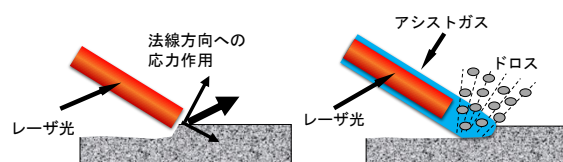
ある。そのため、レーザ照射による挙動は様々ではない。その一つが、ガラス化である。これは、骨材に含まれるケイ素(Si)が、レーザ光の熱により酸化し二酸化ケイ素(SiO₂)、いわゆるガラスとなる現象である。

複数回のレーザ照射を行う場合に、前の照射でガラス化した部分がレーザを反射することで吸収率が下がり、光のエネルギーが効率的に熱エネルギーに変換されなくなる。

実験で用いたコンクリート骨材の X 線分析を日本大学生産工学部の設備で行ったところ、表－1 の試験体使用材料に示す石灰砕砂以外は、50%程度のケイ素を含むことがわかった。この分析結果の裏付けとなる訳ではないが、レーザ照射によるガラス化は、程度の差はあるものの、ほぼすべての試験体において生じていた。



図－7 コンクリート剥離のメカニズム



図－8 レーザ照射角度による期待効果模式図

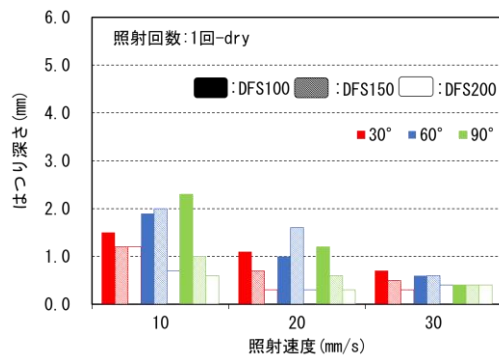
表－5 レーザ照射条件（その 2）

最大出力 (kW)	DFS (mm)	照射速度 (mm/s)	照射角度 (°)	照射回数 (回)	試験体状態
2	100	10	30	1	dry
	150	20	60	2	wet
	200	30	90	3	

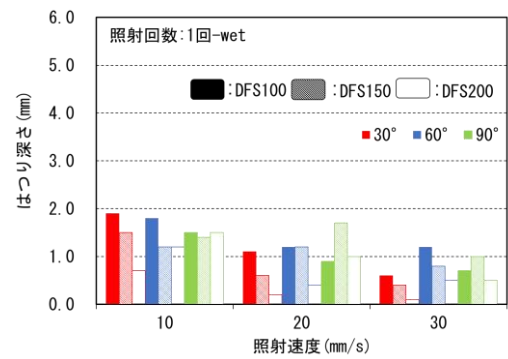
4.2 施工能力について

今回実施した実験の結果から、レーザ照射によるはつり能力を検討する。実験では、長さ 150mm に対して照射を行っている。通常実施されるような数十 mm の深さをはつり取る状態になった訳ではないものの、DFS100mm、照射角度 90°、照射速度 10mm/sec の照射回数 1 回のケースで約 2mm の深さで試験体表面を取り除くことができた（図－11）。

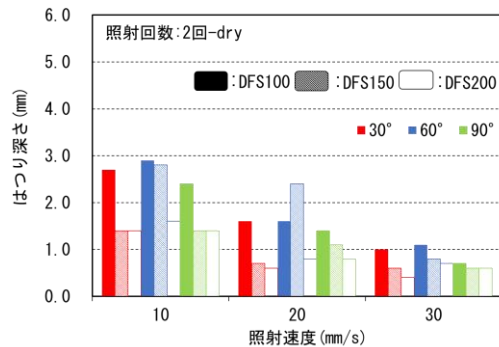
図－12 に示すように、幅 4mm、深さ 2mm の半円形と仮定して照射長さ 150mm から容積を計算すると、約 1cm³ となる。照射速度 10mm/sec より、照射時間が 15sec となるため、照射を 1 分間継続した場合、4cm³ の体積をはつ



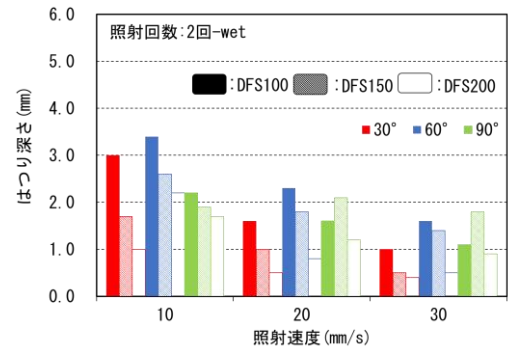
(a) 照射回数 1 回-dry



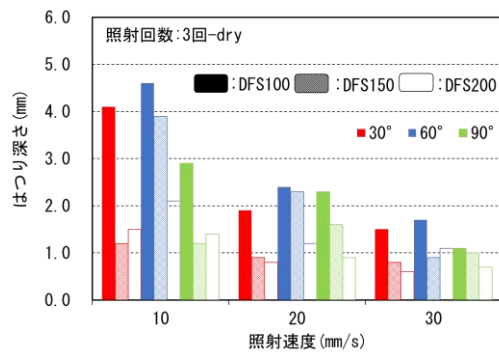
(d) 照射回数 1 回-wet



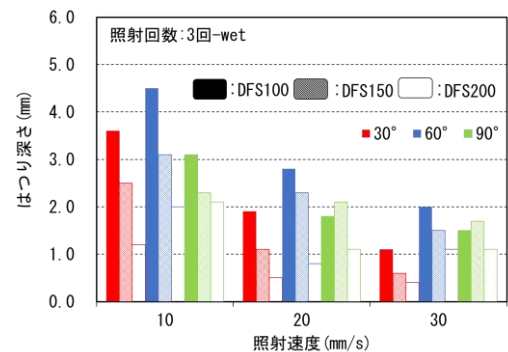
(b) 照射回数 2 回-dry



(e) 照射回数 2 回-wet

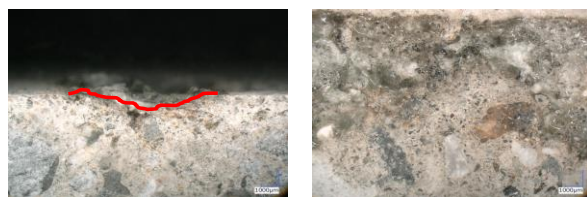


(c) 照射回数 3 回-dry

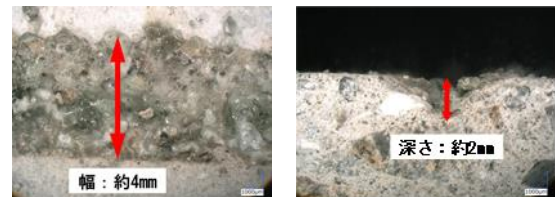


(f) 照射回数 3 回-wet

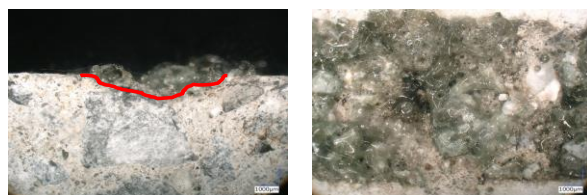
図-9 はつり深さ測定結果



DFS200 10mm/s 30° 照射回数 1 回 dry
(a) 表面 (b) 断面



(a) 表面 (b) 断面
図-11 レーザ照射後の表面および断面



DFS100 10mm/s 90° 照射回数 1 回 dry
(a) 表面 (b) 断面

図-10 レーザ照射後の表面・断面

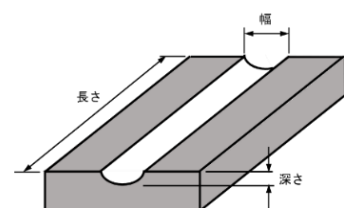


図-12 はつり取り形状の模式図

り取ることができる。

新井⁸⁾によると、1 分当たりのはつり取り体積は、 $40\text{cm}^3/\text{分} \sim 57\text{cm}^3/\text{分}$ と計算される。ここで用いられているレーザは 5kW の出力であり、本報告のレーザは 2kW のパルスレーザであり Duty 50%である。そのため両者とも Duty 50%と仮定してエネルギー 1kW 分当たりの比較を行うと以下ようになる。ここで、Duty とはパルス幅をパルス期間（周期）で割ったものである。

- ・ 本報告： $4\text{cm}^3/\text{kW}$ 分
- ・ 文献 8)： $16 \sim 23\text{cm}^3/\text{kW}$ 分

レーザ機器の仕様、照射条件、対象物の性状が異なるため単純な比較はできないものの、両者のはつり処理能力は同程度であった。また、今後の工夫によって作業効率を向上できることが確認できた。

4.3 レーザ工法の特長

コンクリート構造物の補修・補強工事における打継ぎ部の処理や劣化部位の除去に用いられるウォータージェット工法は、作業効率・能率、処理後の品質の面で優れている。一方で、高圧水を扱うため、特有の機器や施工時の作業者に対する安全対策ならびに管理が必要となる。JIS C 6802 に記載される「レーザ製品の安全基準」では、レーザ機器のクラスごとにリスク低減措置を規定している。本実験で使用しているレーザはクラス 4 であり、危険性の評価概要には、「短時間であっても、散乱光でも非常に危険なレーザ。目だけでなく皮膚障害や火災の発生の危険がある。」と記されている。

レーザは光であり、レーザ装置が取り付けられたヘッド部にはウォータージェット工法のような高水圧噴出による反力は発生しない。一方、レーザ特有の安全対策や管理が必要となる。例えば、レーザは強い光であるため、特に「目」に対しては保護眼鏡、皮膚の露出の少ない作業衣の着用や難燃性素材の使用が求められる。

また、レーザ工法は水を使わないので廃水処理が不要である。一方、はつり取った破片等の回収は必要である。

さらに、対象物が高温になるため、場合によってはフェーム対策が必要になる。なお、はつり取りにより回収された破片は、「廃棄物の処理及び清掃に関する法律」に従い適正に処理する必要がある。

5. おわりに

レーザ照射によるコンクリートはつり技術の開発を目的として、コンクリートの試験体を作製し、それに対してレーザに関する基礎実験を行った。

DFS、照射速度、照射回数による比較から得られた知見を以下に示す。

- (1) DFS の減少に伴い、はつり深さは増加する。
- (2) 照射速度の減少に伴い、はつり深さは増加する。

- (3) 照射回数の増加に伴い、はつり深さは増加する。ただし、ガラス化の影響により、照射回数に比例した関係とはならなかった。

また、照射角度、試験体状態による比較から得られた知見を以下に示す。

- (4) 照射角度の違いにより、はつり深さの変化は少ないが、ドロスの飛散状況に違いが生じる。
- (5) レーザ照射前にコンクリートに水散布をことで効率的な作業が可能となる。

最後に、今後増えることが明らかである社会インフラの維持・更新において、“はつり”は必要な作業である。一方、工事の作業上や現地の環境上の制約がある中での配慮が求められる場合もあり、現在にも増して考慮すべき事項は増えるものと推測される。

建設分野においてもカーボンニュートラルなど SDGs は避けて通れない課題であり、低振動で水を使用しないレーザ工法は、従来工法と比較して、優位になる場面もあると考えられる。これからも、レーザ工法の現地適用に向けて研究開発を続けてゆく。

参考文献

- 1) 浜崎正信、永田重幸、勝村宗英、吉田弘、山内次郎、能見正信：レーザによるコンクリート切断研究，西松建設技報，Vol.7，pp. 199-200，1984.
- 2) 杉田和直，森正人，藤岡知夫：レーザのコンクリート切断への適用，コンクリート工学，Vol.24，pp. 13-21，1986.
- 3) 永井香織：建築・土木分野における光技術の現状と将来展望，OPTRONICS，No.12，pp. 58-61，2018.
- 4) Kaori Nagai, Stefan Beckemper, Reinhart Poprawe: Laser Drilling of Small Holes in Different Kinds of Concrete, Civil Engineering Journal, Vol.4, pp. 766-775, 2018.
- 5) 呉屋真之，森宏樹，奥田剛久，藤谷泰之，下鍋典昭，赤羽崇：高出力レーザを用いたコンクリート建屋解体技術の開発，三菱重工技報，Vol.58，pp. 1-8，2021.
- 6) 市山大輝，伴享，永井香織，末竹泰士：レーザ照射によるコンクリートのはつり技術の開発，土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会，VI-892，2022.
- 7) レーザ光と材料の関係：<http://laser-ac.com/technic/tech002.php>（閲覧日：2022 年 12 月 22 日）
- 8) 新井武二：コンクリートの表面剥離と除去，<https://yab.yomiuri.co.jp/adv/chuo/research/20120329.html>，ChuoOnline，2012.3.29