

レーザーを用いたコンクリートはつり技術に関する実験的検討

Experimental investigations of concrete chipping technique by using laser irradiation

キーワード

レーザー, コンクリート, はつり, 非接触, 省力化

伴 享*, 市山 大輝**,
永井 香織***, 末竹 泰士****

研究概要

金属・医療分野で用いられているレーザー工法に着目し、はつりを模擬した実験的検討を実施した。これは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、レーザー照射によりコンクリート表面をはつり取るものである。実験では最大出力2kW（QCW：疑似連続波）のファイバーレーザーを用いて、照射距離、照射速度、周波数、照射角度等をパラメータとした実験を行った。その結果、この実験の範囲内では、照射距離、照射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ー照射では、照射回数増加に伴いはつり深さは増加したがガラス化の影響が無視できないことが分かった。

ABSTRACT

Experimental investigations were carried out to adopt chipping off concrete by laser irradiation which techniques have been applying to metal processing and medical field, etc. This technique is different from hand breaker and water jet chipping techniques. In this investigation, maximum out-put power 2kW QCW fiber laser equipment was applied. Experimental parameters were selected which are irradiation distance (Defocus), rate of laser head, frequency of laser pulse and lase head angle, etc. As result, large effect parameters were Defocus and rate of laser head in this study. In order to simulate for actual chipping work, two or more laser irradiation was conducted to concrete surface. Concrete surface chipping off depth is increased. However, vitrification was occurred due to contain silica in sand and aggregates. This vitrification level is not small, it almost is related rate of laser head speed, Defocus, irradiation times, etc.

1 はじめに

コンクリート構造物の維持管理は、予定供用期間中における構造物の性能を所定の水準以上に保持するための行為の総称であり、点検、劣化機構の推定、劣化進行あるいは性能低下の予測、構造物の性能評価および対策の要否判定からなる診断、診断結果に基づいて必要に応じて実施される対策ならびにそれらの記録から構成される¹⁾。

この維持管理における対策は、点検強化、補修・補強、供用制限、解体・撤去の中から選定される。一般に、土木構造物は一旦建設されると容易に更新などが行えず、適切な維持管理が必要となるのは言うまでもなく、維持管理段階の点検で補修・補強などの対策が必要となった場合、構造物の要求性能を所定の供用期間内で満足するように実施されている。このような状況の中で、補修・補強の材料や工法はここ20数年来進歩しており、より耐久性の高いものや施工性の良い材料などが用いられている。

補修・補強を行う場合、構造物のコンクリート表面の劣化部分の撤去や部材の接着のために表面処理を行う。これには、圧縮空気を用いたブレードやピックハンマー、ウォータージェット、ロータリービットを用いた切削による方法などコンクリート面に物理的に衝撃力を加える方法が主流である。これらの方法は、騒音、振動、作業環境の問題等、現在でも多くの課題が残されているのが現状である。以上のような背景から、レーザー技術に着目したはつり技術の開発を目的として実験的なアプローチにより、この方法の適用性の検討を行った。

レーザー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^{2~4)}。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⁵⁾。近年では、25kWの高出力レーザーを用いた厚さ1m 越えのコンクリート切断技術の開発など、原

* 技術センター 土木研究部, ** 大阪支店, *** 日本大学生産工学部

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⁹⁾。近年のレーザー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が、レーザー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り、建設現場への適用は依然としてハードルが高い。

2 概要

2.1 レーザ装置

表-1にレーザーの仕様を、図-1にレーザー照射実験状況を示す。レーザー発振器は、最大出力2kWのQCW（疑似連続波）ファイバーレーザーである。レーザー発振器はレーザー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おり、レーザーは切断ヘッド先端より照射され（図-2）、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上下左右方向に自在に動くため、照射距離、照射速度、照射角度が調整できる。

表-1 レーザ仕様

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
パルス時間	30msec
アシストガス	窒素ガス

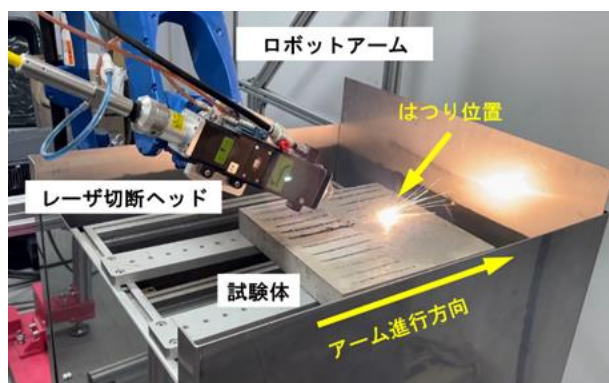


図-1 レーザ照射状況

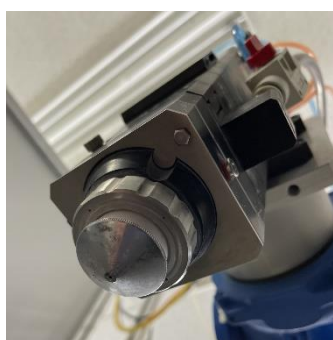


図-2 レーザヘッド先端部

2.2 試験体

レーザーによるはつり技術開発を開始するにあたり対象と条件を表-2に示すように設定した。この条件設定により、試験体は板状の形状とした。レーザー照射の予備実験・本実験の段階、レーザー装置架台の寸法や試験体の取扱い易さを考慮し、表-3に示すように3種類の大きさの試験体を作成した。試験体打込み時の状況の例を写真-1に示す。

試験体コンクリートの使用材料と配合をそれぞれ表-4、表-5に示す。コンクリートは、JIS規格のレディーミクストコンクリートを用い、呼び強度18N/mm²とした。打込み脱型後に28日間水中養生を行った場合、コンクリート強度が呼び強度を大きく上回ることが分かったため、打込み後2日で脱枠し気中養生とし強度発現を調整した。圧縮強度は、材齢28日で実施し、3回打込みの平均値で21.3 N/mm²の結果が得られ、ほぼ目標とした強度発現となった。

表-2 対象構造物とはつり条件

対象構造物	小断面水路トンネル覆工
コンクリートの圧縮強度	18~30N/mm ²
粗骨材の最大寸法	20mm
目標はつり深さ	20mm以上 (段階的に最大100mmまでを目標)

表-3 試験体形状

番号	形状・寸法	備考
1	150x150x150	鋼製型枠、カッターで2分割
2	160x135x 40	セメントの強度試験用型枠を流用
3	350x350x 50	木製型枠

表-4 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-5 コンクリートの配合 18 12 20N

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



写真-1 試験体作成状況

2.3 レーザ照射条件

2.3.1 照射条件 1

実験は、予備実験、本実験の2段階とした。第1段階の予備実験はレーザー照射のパラメータの感度調査を目的に、表-6に示す照射条件を設定した。

表に示すように、レーザー出力を一定の最大出力2kWとし、DFS、レーザーパルス周波数、ロボットアームの照射速度を変化させた。ここで、DFSはDefocus、つまりレーザー焦点からの離れ距離である。本実験では、試験体とレーザーヘッド先端との最短距離をDFSとした。また、レーザー出力は最大2kWであるが、パルスレーザーでありDutyは50%である。これは、レーザー照射がON-OFFを繰り返すため100%と0%の平均、つまり50%の出力となる。

ここで、実験ケースを、DFS_周波数_照射速度の数字で表す。よって、DFS=100mm、周波数8Hz、照射速度3mm/secでは、Case_1_100_8_3と表記する。

表-6 レーザの照射条件（その1）

最大出力 (kW)	DFS (mm)	周波数 (Hz)	照射速度 (mm/s)
2	100	8	3
			5
			8
			10
			12

2.3.2 照射条件 2

照射条件1にて実験を行った後、照射条件の感度を検討し、その実験結果から、レーザー出力、レーザーパルス幅および周波数をそれぞれ2kW、30msecおよび16.6Hzと固定し、表-7に示す条件でレーザー照射実験を行った。表に示すように、DFS、照射速度、照射回数の3項目を変化させた。実験はDFSを1つのシリーズとし、ひとつの照射速度に対して、照射回数を3ケース変化させた全27ケースの照射条件とした。なお、ここでは、試験体表面に対しレーザーヘッドは垂直（90°）とした。

表-7 照射条件（その2）

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

2.3.3 照射条件 3

照射条件2にて実験を行った結果、レーザー照射によるコンクリート面でのガラス化が必ず発生した。ガラス化が起これると、2回、3回目の照射の際にレーザーの反射によってレーザー光が吸収されにくくなり、はつり深さへの影響が大きくなる。そのため、ガラス化を低減することを目的に、表-7の照射条件を基本にレーザーの照射角度と試験体の状態の2つの条件を追加した。表-8にレーザー照射条件（その3）を示す。

表-8 照射条件（その3）

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

3 実験結果

3.1 レーザ照射条件 1の結果について

3.1.1 レーザ照射後の試験体表面状態

レーザー照射後のコンクリート表面状態の一例を図-3~5に示す。照射速度が遅い（3mm/sec）でレーザーの離れ距離DFSの違いで比較すると、DFS=100mmではDFS=150mm、200mmと比べて、ガラス化の傾向は強くなり、レーザー照射によりコンクリート表面が溝状に削られていることがわかる。DFS=150mmの方がDFS=200mmに比べてガラス化の傾向は強いが、DFS100=mmのようなガラス化にはなっていない。照射速度が早い（12mm/sec）でDFSの違いについて比較すると、照射速度が遅い（3mm/sec）ほど顕著な違いにはなっていない。コンクリート表面に見られる黒い色の物質は、骨材に含まれるケイ素（Si）がレーザーの熱によりガラス化したものである。

この現象は、照射速度が遅いと一定区間内のレーザーの照射時間が長くなり照射による熱の影響を多くの時間受け、逆に照射速度が早い場合には熱の影響を受ける時間が短くなることによるものである。DFS（レーザーの離れ距離）の違いでは、DFSが大きくなることによりレーザー照射の密度が小さくなるため、熱の影響もそれに関係して小さくなる。このガラス化の傾向は、どの試験ケースでも程度の大小の差はあるが発生した。

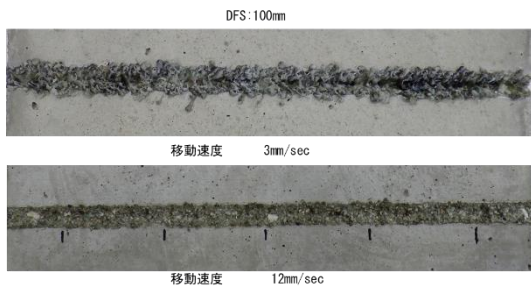


図-3 レーザ照射表面状態
(Case_1_100_8_3 と Case_1_100_8_12)

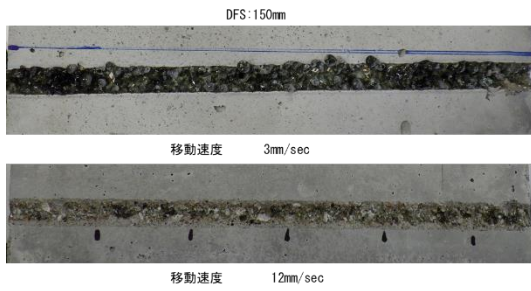


図-4 レーザ照射表面状態
(Case_1_150_8_3 と Case_1_150_8_12)

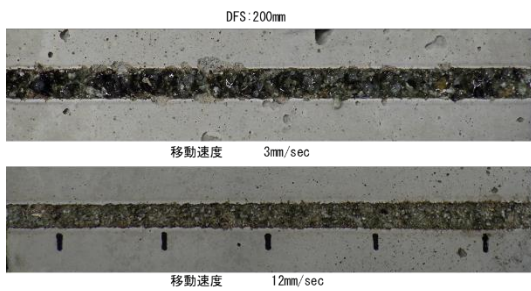


図-5 レーザ照射表面状態
(Case_1_200_8_3 と Case_1_200_8_12)

3.1.2 DFSの違いについて

図-6, 7に DFS とはつり深さならびにはつり幅の関係を示す。はつり深さとはつり幅は、レーザ照射の長さ方向に25mm 間隔で5か所測定点を設定し、その箇所でのノギスを用い測定した。その5か所の測定結果の最大、最小値を省いた3点の平均値をその照射ケースの値とした。

はつり深さは、DFS が大きくなる、つまりレーザヘッドが試験体から離れるに連れ減少する結果となった。DFS=100mm では、DFS=150mm, 200mm に比べてばらつきが大きい結果となった。これは、図-3で示したようにガラス化の影響が大きいために測定位置での変化が大きくなったものと考えられる。また、今回の測定がノギスを用いて測定したことによる誤差がばらつきの一つの要因になっていると思われる。

はつり幅は、DFS が大きくなると幅は増加した。これは、DFS の大小によりレーザスポット径が変化するためであ

る。DFS が100mm と小さい場合には、レーザ照射位置が焦点位置から近いためにスポット径は小さくなりレーザのエネルギー密度は高くなる。一方、DFS が200mm と大きくなるとその逆の状態になるためである。

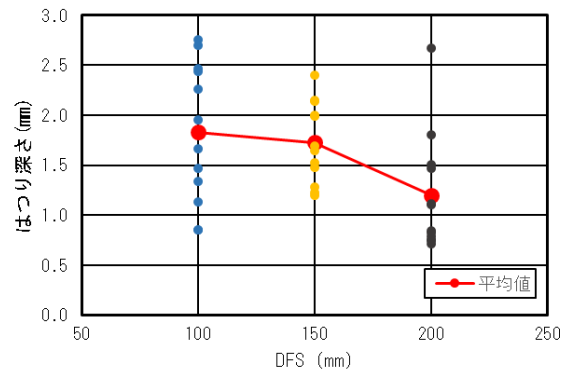


図-6 DFS とはつり深さの関係

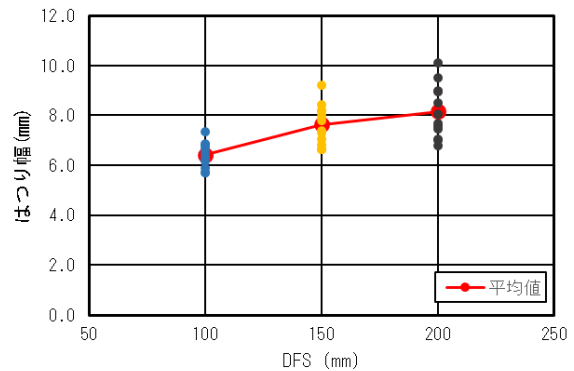


図-7 DFS とはつり幅の関係

3.1.3 総熱量とはつり深さについて

レーザ照射エネルギーとはつり深さの関係について整理する。表-1のレーザ仕様を示したように、ここで用いたレーザは最大出力2kW、パルス時間30msec のパルスレーザである。

ここで、レーザ照射による総熱量を式(1)で定義する。

$$\text{総熱量(kJ)} = 60(\text{J}) \times \text{周波数(Hz)} \times \text{照射時間(sec)} \times \text{照射回数} \quad (1)$$

ここに、60(J)：レーザ最大出力×パルス時間

$$2(\text{kW}) \times 30(\text{msec}) = 60(\text{J})$$

照射時間：レーザ照射長さ(mm)÷照射速度(mm/sec)

照射回数：照射繰返し回数

図-8に総熱量とはつり深さの関係を示す。レーザ照射実験における総熱量は、6kJ~28.8kJ の範囲になる。図は、DFS ごとに色分けし示している。

はつり深さを同じ総熱量で比べてみると、DFS=100mm,

150mm, 200mm の順にはつり深さが小さくなる傾向を示している。これは、同じエネルギー、つまり総熱量を与えても、DFS が大きいことで総熱量が同じであってもレーザーの照射幅が大きくなることでエネルギー密度が小さくなるため、はつり深さが変化することを示している。一方、総熱量が10kJ 以下の範囲では、DFS=150mm がはつり深さが大きくなる傾向を示しており、DFS の大小の関係とはならなかった。

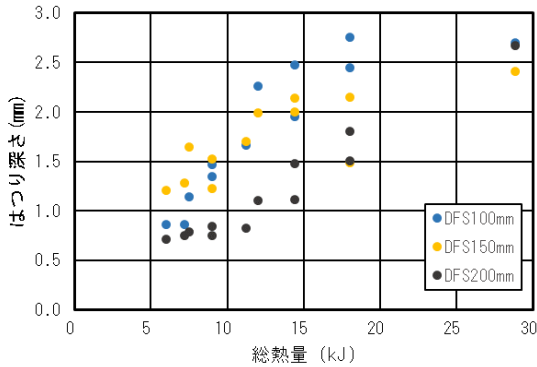


図-8 総熱量とはつり深さの関係

3.1.4 基準化した周波数について

レーザーパルス周波数を照射速度で基準化し、単位照射速度あたりの周波数（ここでは、単位周波数と称する）で整理した。単位周波数とはつり深さ、はつり幅との関係を図-9に示す。

DFS の増加に伴いはつり深さは減少し、はつり幅は増加した。これは、DFS の増加に伴い、単位照射速度あたりのレーザー密度が減少したことが要因であると考えられる。また、単位周波数の増加に伴い、はつり深さ、はつり幅ともに増加傾向が示された。これは、単位速度あたりのレーザーの照射回数の増加、つまり、周波数の増加によるレーザー照射の繰返し回数の増加により入射エネルギーが密になったことが要因であると考えられる。一方、単位周波数の値が3.0を超えるとその傾向が頭打ちとなった。これは一定の入射エネルギーを超えるとコンクリートの表面にはガラス化が生じてレーザーがガラス化した表面で反射し、熱エネルギーが深さ方向に伝達されにくくなったことが要因であると考えられる。

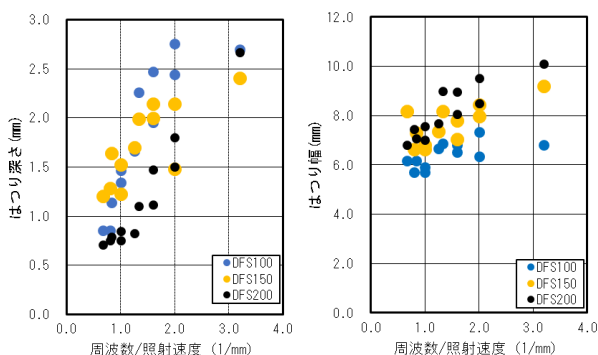


図-9 単位周波数とはつり深さ、はつり幅の関係

3.2 レーザ照射条件2の結果について

3.2.1 レーザ照射形態

3.1節の結果を踏まえ、試験体は表-2に示した寸法350×350×50mm の物を用いた。試験条件を表-7に示したように複数回の照射回数を行うこと、照射速度を変化させることから大版の試験体は試験が容易であるため、この寸法の試験体とした。

レーザー照射は線状に長さ150mm とし、図-10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ー照射回数、1, 2, 3回を1組とした2種類の照射を行った。1つの試験体で24ケースの照射条件の実験が行える。

3.2.2 はつり形状測定と表面の観察

3.1節の照射条件1の結果については、はつり幅、深さの測定をノギスで測定した。この実験ケースでは、はつり形状測定は写真-2に示す S 社製非接触形状測定機（以下、3D デジタイザ）を用いた。図-11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ー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-12）をレーザー照射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。試験体の表面、断面状態は、K 社製マイクロSCOPE（VHX-5000）を用いた。

3.2.3 DFS, 照射速度, 照射回数による比較

図-13に、照射速度とはつり深さの測定結果を示す。この照射実験でも同様に 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。

DFS=200mm のレーザー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ー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ー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-14にレーザー照射後の表面・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、これがレーザー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。以上のように、照射回数に比例してはつり深さが増加しなかったひとつの要因としては、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。これは、コンクリート表面に形成されたガラス層がレーザー光を反射するためである。

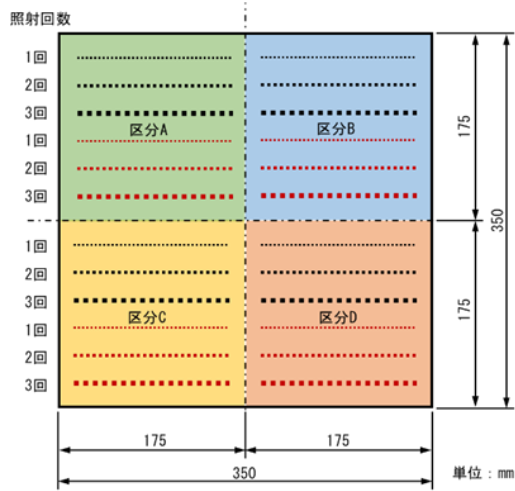


図-10 試験体に対するレーザー照射領域と区分け



写真-2 3D デジタイザによるはつり形状測定状況

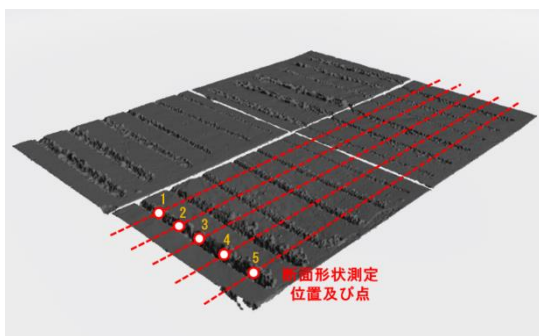


図-11 3D デジタイザによる形状測定結果

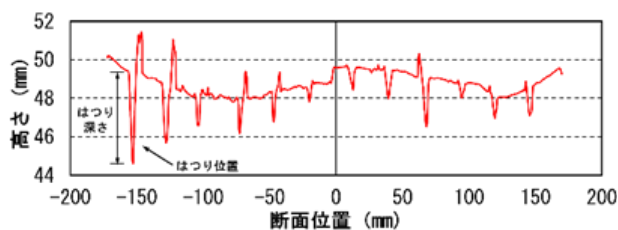
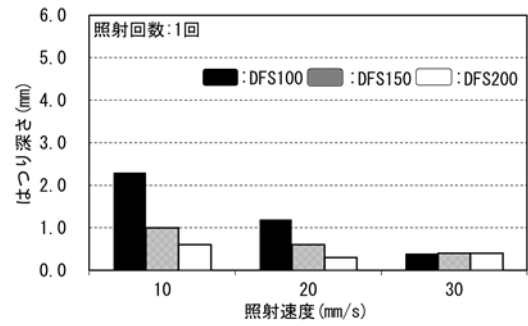
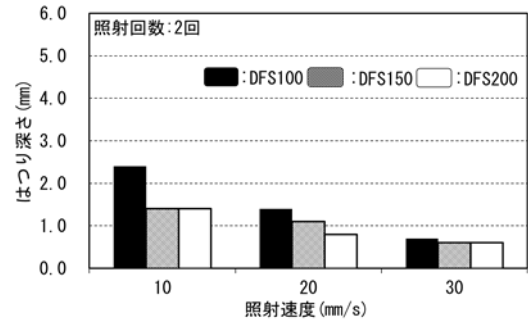


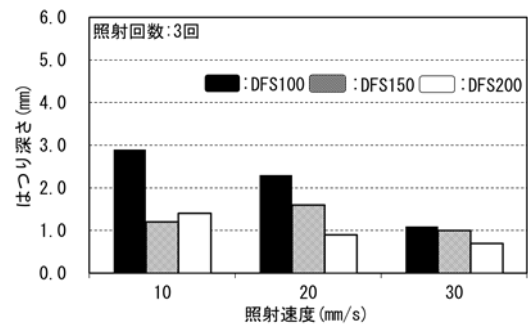
図-12 はつりの断面形状



(a) 照射回数 1回

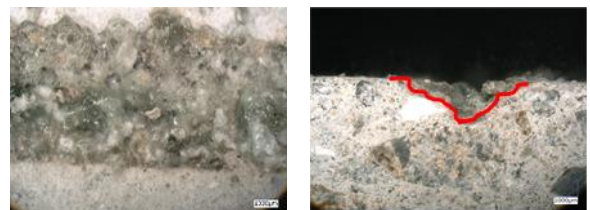


(b) 照射回数 2回



(c) 照射回数 3回

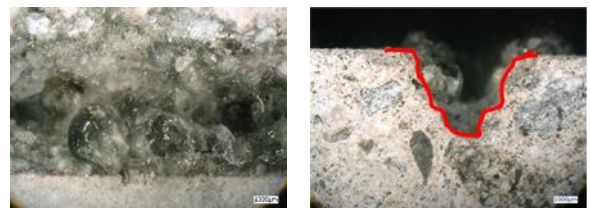
図-13 照射速度とはつり深さの測定結果



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-14 レーザ照射後の表面・断面

ここでガラス化による影響について考えてみる。レーザーによるコンクリート剥離のメカニズムを図-15に示す。コンクリートにレーザーを照射すると、レーザー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、レーザーが照射される範囲で繰り返し続くことで、ある幅と深さでコンクリートがはつり取られる。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、レーザーが反射し効率が低下する。レーザー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できるだけ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。

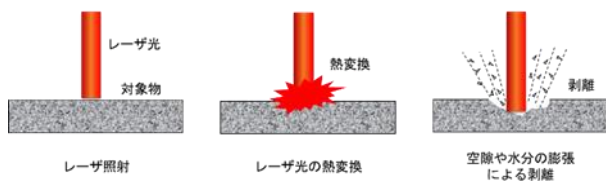


図-15 コンクリート剥離のメカニズム

3.3 レーザ照射条件3の結果について

先述の結果より、表-8に示したようにレーザーの照射角度と試験体の状態の2つを変化させ、はつり深さへの影響が大きいガラス化の低減効果について確認した。

3.3.1 レーザの照射角度

図-15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。照射角度を変えることにより、この爆裂の応力が解放面、つまり、コンクリート表面外側方向に働くかどうかを確認した。また、レーザーの照射角度を変えることで、レーザー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かどうか確認した(図-16)。

3.3.2 試験体の状態

図-15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、レーザー照射前の水散布の有無により違いが出るかどうかを確認した。

気中状態(以下、Dry)で保管していた試験体に対し、レーザー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、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。同様な状態の試験体に対し、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回程水散布を行いWetとした。水の散布量は、10ml~12ml程度である。

実験数は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。

3.3.3 照射角度、試験体状態による比較結果

図-20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、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-17)。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。つまり、レーザー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。

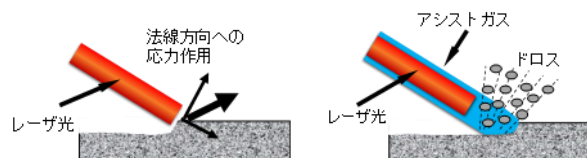
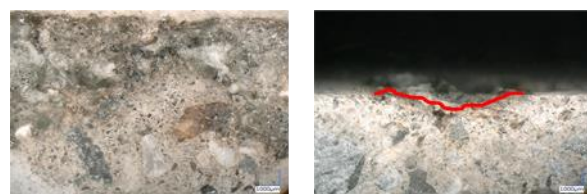


図-16 レーザ照射角度による期待効果模式図



DFS200 10mm/s 30° 照射回数1回 Dry

(a) 表面

(b) 断面



DFS100 10mm/s 90° 照射回数1回 Dry

(a) 表面

(b) 断面

図-17 レーザ照射後の表面・断面

4 考察

4.1 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員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「レーザー製品の安全基準」では、レーザー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ーはクラス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ー。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。

レーザーは光であり、レーザー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、レーザー特有の安全対策や管理が必要となる。例えば、レーザー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、レーザー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。

4.2 コンクリート照射に対する課題

レーザーによる加工とは、レーザー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、レーザー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⁷⁾。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ー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料である。そのため、レーザー照射による挙動は一様ではない。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、レーザー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。

複数回のレーザー照射を行う場合に、前の照射でガラス化した部分がレーザー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-3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、レーザー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。

4.3 施工能力について

今回実施した実験の結果から、レーザー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-18)。

図-19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、

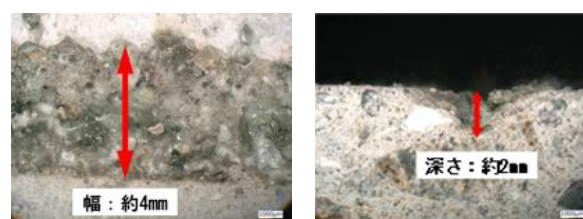
照射を1分間継続した場合、4cm³の体積をはつり取ることができる。

新井⁸⁾によると、1分当たりのはつり取り体積は、40cm³/分~57cm³/分と計算される。ここで用いられているレーザーは5kWの出力であり、本報告のレーザーは2kWのパルスレーザーであり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：4cm³/kW分

文献⁸⁾：16~23cm³/kW分

レーザー機器の仕様、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。



(a) 表面

(b) 断面

図-18 レーザ照射後の表面および断面

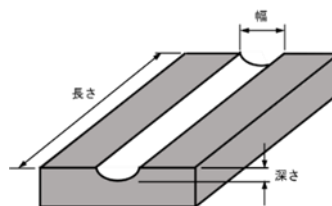


図-19 はつり取りの模式図

5 おわりに

レーザー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ーに関する基礎的な実験を行った。予備的な検討から開始し、DFS、周波数、照射速度、照射回数、照射角度や水分の違いなどをパラメータとした。これらの結果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することで効率的な作業が可能となる。

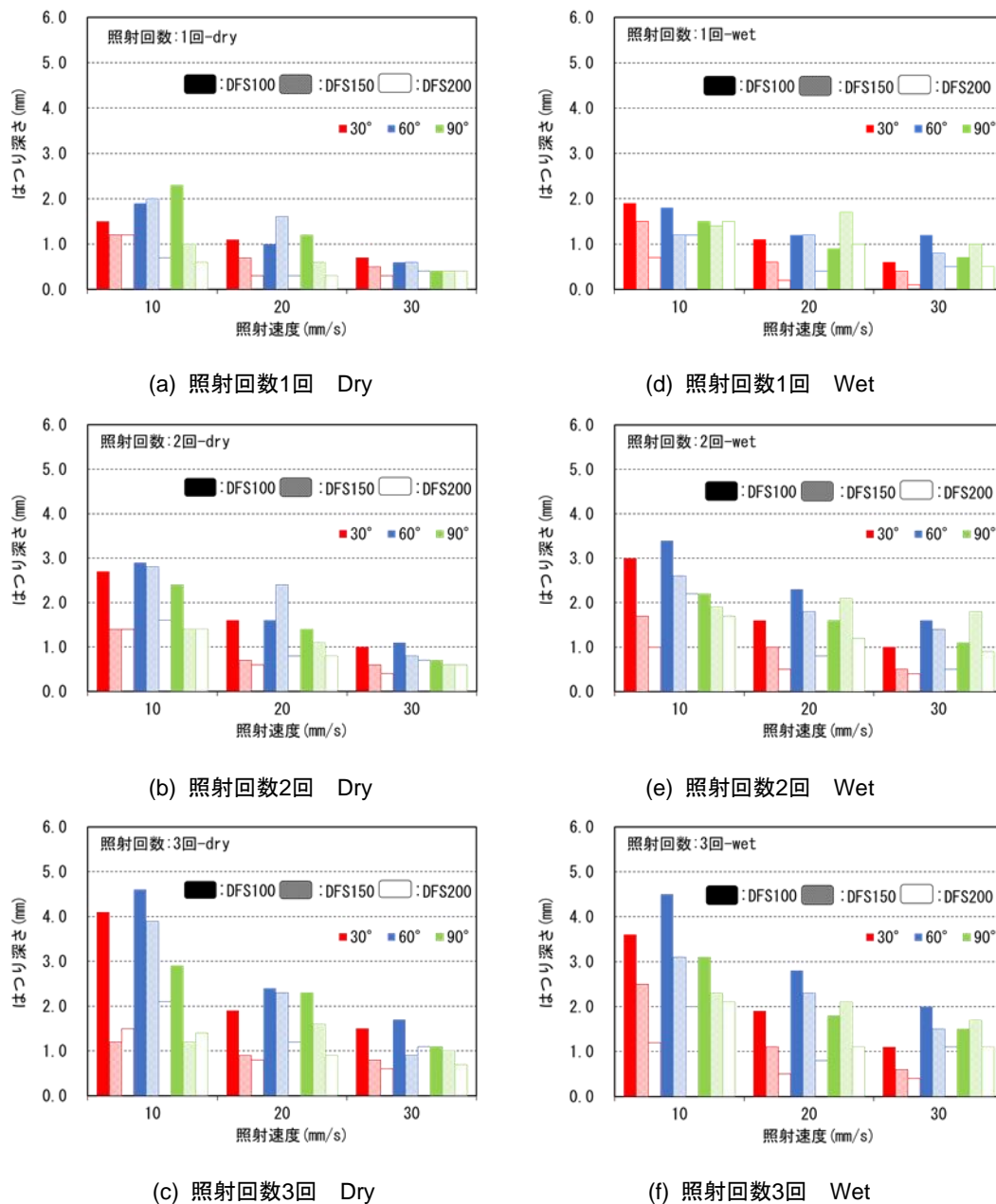


図-20 はつり深さ測定結果

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ー工法は、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、レーザー工法の現地適用に向けて研究開発を続ける予定である。

参考文献

- 1) 2018年制定 土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】
- 2) 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.

- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) Nagai,K,Beckemper,S and Poprawe,R: Laser Drilling of Small Holes in Different Kinds of Concrete, Civil Engineering Journal, Vol.4, pp.766-775,2018.
- 6) 呉屋真之, 森宏樹, 奥田剛久, 藤谷泰之, 下鍋典昭, 赤羽崇: 高出力レーザー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.
- 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