

レーザーによるコンクリートはつり技術の基礎的検討

ーエア噴射によるはつり表面状態の違いと定量的評価ー

Fundamental study of concrete chipping technique by laser irradiation -Surface condition and quantitative evaluation after laser irradiation by air jet-

キーワード

レーザー, コンクリート, はつり, ガラス化,
体積, 効率

伴 享*, 大江 隆史*, 末竹 泰士**, 永井 香織**

研究概要

レーザーはつりにおけるエア噴射によるガラス化への影響度を把握するため、圧縮空気をレーザー照射位置付近に噴射した状態、噴射しない状態でレーザー照射した試験体の表面観察と 3D デジタイザを用いてはつり体積測定を行った。エア噴射ありではレーザー照射により発生するドロスが除去され、エア噴射なしではドロスが除去されず照射回数の増加により蓄積し、はつり体積の結果にもその傾向が表れた。この傾向は DFS50mm よりも DFS100mm の条件下で顕著に表れた。理由は、レーザースポット径が大きくなり照射エネルギー密度が小さくなるためである。エネルギー密度が小さいと、レーザー照射中に試験体表面温度が材料の蒸発・昇華まで上昇せず、レーザー照射後急速に温度が下がることでドロスが発生しやすいと考えられる。この実験結果からは、DFS50mm、照射速度 25mm/sec が効率的と考えられる結果となった。

1 はじめに

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、構造物の維持管理は、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ている¹⁾。対策には、点検強化、補修・補強、供用制限、解体・撤去があり、これらの項目から選定される。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。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する必要がある。補修・補強の材料ならびに工法はここ 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補修・補強工事に用いられている。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。この方法は、圧縮空気を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現在でも主流である。これらの方法は、騒音、振動、作業環境の問題等の課題がある。

一方、近年コンクリート構造物の補修分野においてコンクリートはつり後の鉄筋表面に残る付着コンクリートや錆の除去にレーザーを用いた研究や適用例が発表されている²⁾。筆者らは、レーザーによるコンクリートはつりを目的に技術開発を行っている^{3,4,5)}。これまでの実験的検討により、レーザーの離れ距離（以下、DFS:Defocus）、照射速度がはつり深さに及ぼす影響度合いが大きく、実作業を模擬した複数回のレーザー照射では、照射回数の増加に伴いはつり深さは増加するが、ガラス化の影響が大きいことが明らかとなっている。本研究では、これらの影響を定量的に把握することを目的に、圧縮空気をレーザー照射位置付近に噴射し、表面状態とガラス化低減程度の観察、はつり体積の測定、ならびにエア噴射の効果の確認を行った。ここでは、レーザー照射条件の違いによるこれらの観察ならびに測定結果について報告する。

2 実験概要

2.1 レーザ装置

表-1にレーザーの仕様を、図-1にレーザー照射状況を示す。レーザー発振器はレーザーヘッド部がロボットアームに取り付けられ、ロボットアームの制御により自在に動き、DFS、ロボットアームの移動速度や照射角度が調整できる。今回

* 技術センター 土木研究部, ** 日本大学

は、これまで課題となっていたガラス化の低減のために、レーザーヘッド横に圧縮空気を噴射するエア噴射ノズル（以下、ノズル）を設置し、ノズル先端からの圧縮空気は、レーザー照射位置よりも少し後ろ側の位置に向けて噴射するように設置している（図-1）。

圧縮空気は、コンプレッサ、サブタンク2基を並列に配置しレギュレータで圧力調整しノズル先端から噴射する。ノズルの先端径は3mm、空気圧力はレギュレータにて0.3Mpaに調整した。圧縮空気は理論上、20℃で流量が約5,480cm³/sec、流速77.6m/secで吐出される。1回の照射時間約20secの間、空気圧力が保持されていることを確認している。

表-1 レーザ仕様

項目	摘要
最大出力	2kW(Duty50%)
動作モード	パルスモード
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

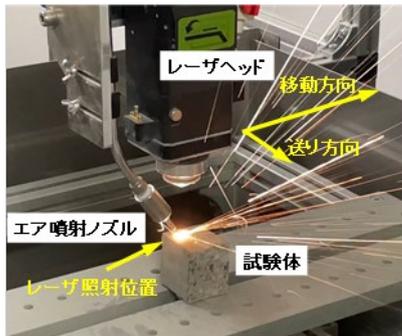


図-1 レーザ照射状況とエア噴射ノズル

2.2 試験体概要

試験体は、寸法350x350x50mmで製作したコンクリート版を50x50x50mmのブロック状にコンクリートカッターを用いて切断した（図-2）ものを用いた。元となる切断前のコンクリート版の試験体⁴⁾は JIS 規格の呼び強度18N/mm²のレディーミクストコンクリートを用い、材齢28日の圧縮強度は平均21.3N/mm²であった。

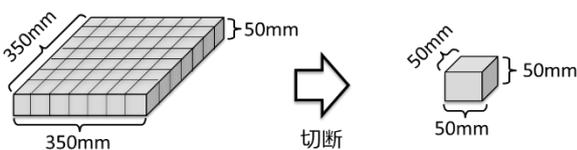


図-2 試験体の切断

2.3 レーザ照射条件

レーザー照射条件を表-2に示す。実験ケースは、エア噴

射あり・なしそれぞれで18ケースの計36ケースである。

レーザー照射を面的に行うにあたり DFS の違いによりレーザー光線のスポット径（幅）が異なるため、照射1ラインごとにレーザー光線が50%重なるようにロボットアームの動きを設定した。スポット径は DFS50mm が4.13mm、DFS100mm が7.28mm であるため、各々2.07mm、3.64mm ずつ重なるようにレーザーヘッドを送った（図-3）。なお、照射範囲は、試験体上面50x50mm 内の30x30mm とし（図-4）、レーザー照射は同じ方向ではなく、照射回数毎に90度試験体を回転させた（図-5）。これは、レーザー照射を行うと溝状にコンクリートが取り除かれるため、複数回を同一方向のみでレーザー照射を行うと、深い溝状のはつりとなってしまうことを避けるために、図-5に示す方法とした。

表-2 レーザ照射条件

エア噴射	DFS (mm)	照射速度 (mm/s)	照射回数 (回)
あり	50	20	1
なし	100	25	2
		30	3

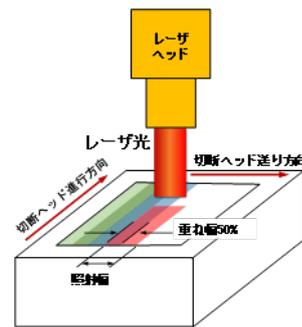


図-3 レーザ照射方法

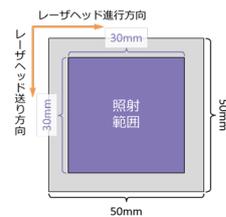


図-4 レーザ照射範囲

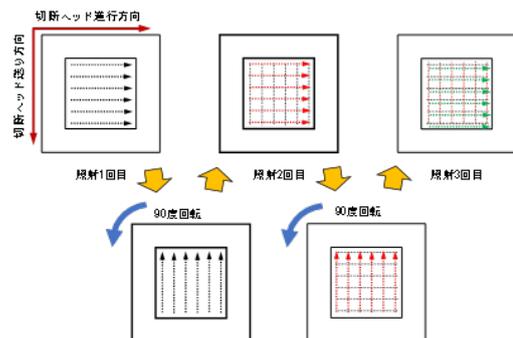


図-5 複数回照射時のレーザー照射方法

3 評価方法

レーザ照射後の評価は、試験体表面の観察とコンクリート除去体積（以下、はつり体積）の算定を行った。

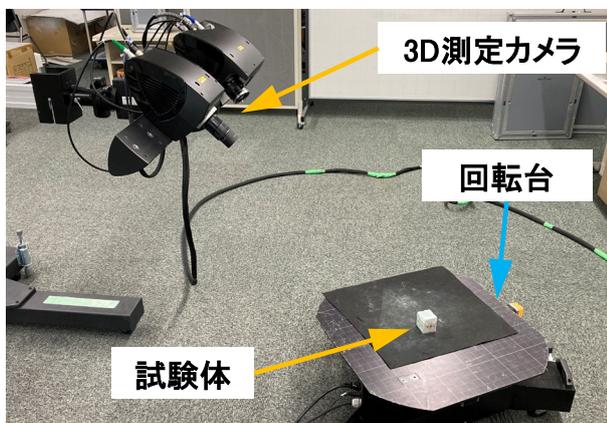
3.1 試験体観察

試験体観察は、レーザ照射後の目視観察ならびにデジタルカメラによる撮影を実施し、はつりの状態やガラス化の程度を確認した。

3.2 はつり体積測定（3D デジタイザ測定）

レーザ照射後、試験体の表面状態をデジタルカメラにて撮影し表面状態の観察後（写真－1）、3D デジタイザ測定を実施した（図－6）。測定は、埼玉県産業技術総合センター所有の非接触形状測定機（3D デジタイザ）、S 社製（測定精度5~40 μ m）を用いた。3D デジタイザによる形状測定後、測定時のデータ欠損部分を後処理ソフト上で修正し、3D 点群データへ変換した後、F 社製の3D 点群処理システムにより（図－7、8）、以下の手順にてはつり取り体積を算定した。

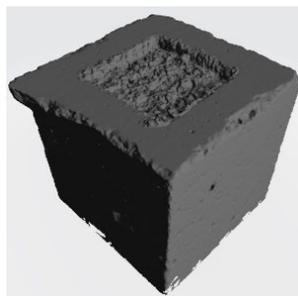
- (1) 凹状に変化した面①とレーザ照射範囲外の面②に切り分ける。
- (2) ②のデータからレーザ照射前の平面を決定し、算定の基準面とする。
- (3) (2)で決定した面と①との差分の体積を算出する。ここで、この体積をはつり体積と定義する。



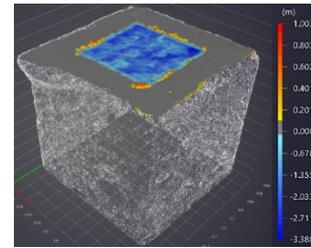
図－6 3D デジタイザ測定



写真－1 測定時



図－7 点群データ変換



図－8 3D 点群処理システム（体積測定）

4 実験結果と考察

4.1 試験体観察

4.1.1 エア噴射の効果とはつり後の表面状態

エア噴射あり・なしの大きな違いは、レーザ照射により発生するドロス（ガラス化物質）が残るかどうかである。レーザ照射全ケースの表面状態の写真を図－9～14に示す。写真は、エア噴射あり、なしを上下に示し、同じDFS、照射速度で整理している。また、照射回数1,2,3回を写真の左から順に並べている。

エア噴射あり・なしで比較を行うと、どの照射条件のケースもエア噴射ありのケースにてドロスが除去され、レーザ照射後のガラス化した物質が残っている量が違いが表れている。

DFS50mm、100mmの違いは、DFS50mmではドロスの発生が少なく、かつエア噴射によりドロスが除去されている。また、エア噴射なしのケースでは照射回数の増加によりドロスの蓄積が確認できる。

照射速度の違いは、エア噴射なしのケースで照射速度20mm/secがガラス化の程度が大きく、DFS100mmにて顕著に表れている。エア噴射ありのケースでは、ガラス化した物質が除去されるため、レーザ照射面の状態の差は大きくないものの、DFS50mmではレーザ照射範囲の縁にガラス化した物質が残っている。

エア噴射の効果は、これまでの実験^{3,4,5}で確認されていたガラス化した物質（ドロス）を0.3MPa程度の低圧のエア噴射でも除去できることが確認できた。

4.1.2 DFSの違いによる差

DFS100mmのケースでガラス化が顕著に表れた理由は、レーザ光は同一のエネルギー（2kWの出力）に対しレーザ照射のスポット径が大きくなればエネルギー密度が小さくなる。スポット径は、DFS50mm、100mmそれぞれ4.13mm、7.28mmであり1.75倍の差がある。レーザのエネルギー密度はDFS100mmの方が小さいためにレーザ照射による試験体表面温度が材料の蒸発・昇華まで上昇せずガラス質の物質がレーザ照射後に急に温度が下がることで残ったものと考えられる⁶。一方、照射速度の違いによる大きな差異は見られず、移動速度よりもDFSの違いの影響度合いが大きいと考えられる。



エア噴射あり 照射回数（左から 1, 2, 3 回）



エア噴射あり 照射回数（左から 1, 2, 3 回）



エア噴射なし 照射回数（左から 1, 2, 3 回）

図-9 はつり後の表面状態 (DFS50mm,20mm/sec)



エア噴射なし 照射回数（左から 1, 2, 3 回）

図-12 はつり後の表面状態 (DFS100mm,20mm/sec)



エア噴射あり 照射回数（左から 1, 2, 3 回）



エア噴射あり 照射回数（左から 1, 2, 3 回）



エア噴射なし 照射回数（左から 1, 2, 3 回）

図-10 はつり後の表面状態 (DFS50mm,25mm/sec)



エア噴射なし 照射回数（左から 1, 2, 3 回）

図-13 はつり後の表面状態 (DFS100mm,25mm/sec)



エア噴射あり 照射回数（左から 1, 2, 3 回）



エア噴射あり 照射回数（左から 1, 2, 3 回）



エア噴射なし 照射回数（左から 1, 2, 3 回）

図-11 はつり後の表面状態 (DFS50mm,30mm/sec)



エア噴射なし 照射回数（左から 1, 2, 3 回）

図-14 はつり後の表面状態 (DFS100mm,30mm/sec)

4.2 はつり体積算定

4.2.1 DFS の違い

図-15にエア噴射あり・なしそれぞれの全照射ケース(18ケース)のはつり体積の平均値とDFSの関係を示す。また、表-3に測定したエア噴射あり・なしのDFS50mm, 100mmにおけるはつり体積の範囲を示す。DFSの影響をみると、はつり体積は、エア噴射あり・なしともにDFSが小さい50mmの方が大きい傾向を示している。これは、レーザ照射によるエネルギー密度⁶⁾がDFS50mmの方が大きいいためこの傾向になったと考えられる。さらに、エア噴射の影響をみると、エア噴射ありの方がはつり取り体積が大きくなっており、この結果からもエア噴射の効果が確認できる。

エア噴射	DFS50mm (mm ³)	DFS100mm (mm ³)
あり	690~1,900	655~1,355
なし	370~1,250	184~675

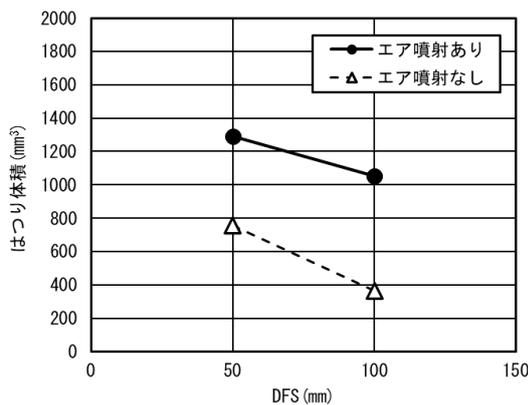


図-15 はつり体積とDFS

4.2.2 照射回数の違い

図-16,17に、エア噴射あり・なしのはつり体積と照射回数(回)の関係を示す。なお、両図ともに、照射速度条件を色分け(青, 黒, 橙), DFS条件を線種(実線, 点線)で識別, 表示している。

エア噴射あり・なしの場合ともに、照射回数の増加に伴いはつり体積は増えており、DFS50mm(実線)の方が、照射回数の増加に伴うはつり体積の増加の程度が大きくなっている。

移動速度の影響をみると、25mm/sec(黒線)は、他の条件と比べ、照射回数の増加に伴うはつり体積の増加傾向がほぼ線形となっている。これは、エア噴射の有無、DFSの条件によらず同様の傾向を示している。他の移動速度では、傾向が若干異なる場合があるものの、照射回数3回目ではつり体積の増加が頭打ちの傾向を示し、照射回数3回目で同じはつり体積になるなど体積変化の傾向がそれぞれ異なっている。この傾向は、本実験の照射条件の範囲にお

いて移動速度25mm/secが、はつり取りに対して効率的なパラメータであることを示しているものと考えられる。

4.2.3 基準面よりも上に残る部分

一部のケースでは、レーザ照射後に照射範囲の縁付近(図-8の赤色系の部分)に熔融したコンクリート材料が盛り上がったようにドロスが残った(図-18)。この傾向は、エア噴射ありのDFS50mmにて顕著に表れていた。

この現象は、レーザ照射時に材料がすべて飛び散らず、瞬時に溶けた材料の温度が下がり滞に残ったものである。本実験のレーザ照射は、照射回数ごとに試験体を90度回転させ、レーザ照射の方向が十字にクロスするようにしている。レーザヘッドはレーザ照射のラインごとに開始側へ戻り、照射を行う制御方法である。図-18に示したようにレーザ照射終点側では、一端レーザヘッドが停止するためドロスが蓄積しやすい、つまり、エア噴射を行っても飛び散らないで残ってしまうことになる。これは、レーザ照射とヘッドが止まる箇所で起こる現象であるため、この箇所のドロスを飛散させるためにエア噴射圧力を上げることや端部でのレーザ照射とエア噴射のタイミングの設定などの工夫は今後必要と考える。

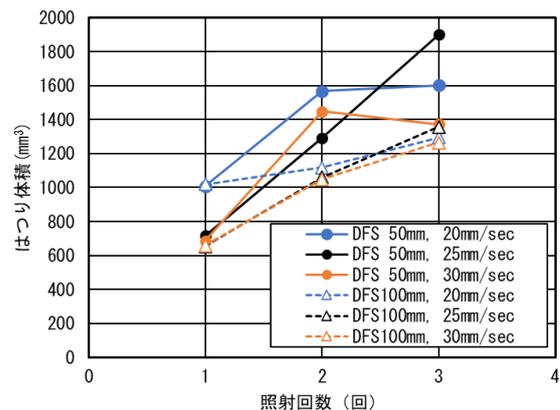


図-16 はつり体積と照射回数(エア噴射あり)

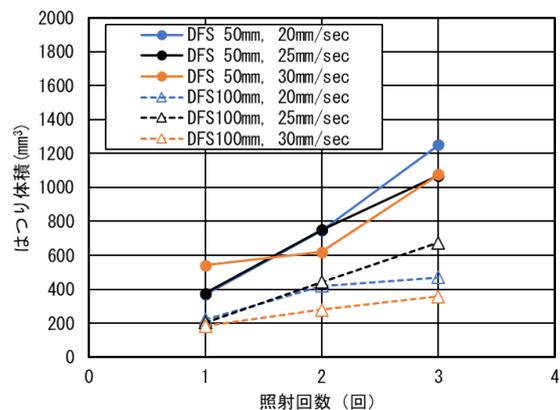


図-17 はつり体積と照射回数(エア噴射なし)



図-18 ドロスの蓄積

4.3 レーザ照射エネルギーの違いについて

4.1, 4.2節では、表-1の照射条件の結果を示した。ここでは、共同研究者である末竹らの実験結果⁶⁾も合わせてレーザー照射によるはつり深さについて比較し考察する。

ここで、二つの実験結果を考察するに当り、レーザー照射エネルギー（以下、エネルギー密度）をパラメータとして用いる。エネルギー密度は式(1)で定義する。

比較をする実験のレーザー照射条件を表-4に示す。ここで、表-1, 4それぞれのレーザー照射条件をエネルギー密度(小), (大)と呼ぶことにする。この二つのレーザー照射条件によるエネルギー密度の範囲を表-5に示す。同表に示したように、エネルギー密度(小)は、最大4.70 (kJ/cm²)、エネルギー密度(大)は、最大18.81 (kJ/cm²)となる。この違いは、DFS, 照射1回当たりの照射範囲のレーザー照射のライン数と照射時間の違いにより異なるものである。

参考文献⁶⁾の実験では、レーザー照射範囲内での深さの定量的測定を、図-19に示すようにレーザー照射範囲中の9点で行っている。さらに、複数回のレーザー照射は、図-4に示したように各照射回数で90度の回転は行っていない。

エネルギー密度(小), (大)で測定方法は異なるものの、図-20に平均はつり深さとエネルギー密度の関係を示す。図には、照射条件の違いとエア噴射あり・なしで結果をプロットしている。この図に示すように、エネルギー密度5 (kJ/cm²)程度までは、ばらつきはあるものの両照射条件ともほぼ同じ傾向を示している。一方、エネルギー密度10 (kJ/cm²)以上と大きくなると、エア噴射あり・なしで平均はつり深さが逆転する現象となっている。これは、エネルギー密度(小)が3D デジタイザで測定結果を平均したのに対し、エネルギー密度(大)では9点の測定であるため、局所的に深い箇所を測定を行っていることも関係していると思われる。図-21, 22にはつり状態の例を示すが、上面からの画像では、深さの違いはうまく表れていない。図からわかるように、エア噴射ありの場合には、ここで行ったレーザー照射の方向に溝が刻まれており複数回照射により深く形成されている。図-21に示したエネルギー密度18.81(kJ/cm²)でこの状態が顕著に表れている。一方、エア噴射なしの場合には、ガラス化の物質が試験体表面に残り、それが除去されていないことが分かる。図-21はこの状態が顕著に表れている。これらのことから、測定方法や照射

方法が異なることによる結果の解釈では注意が必要であると考える。

$$E = \frac{\bar{W} \times T}{r^2 \times \pi} \quad (1)$$

ここに、 E : エネルギー密度 (kJ/cm²)
 \bar{W} : レーザ平均出力 (kW)
 T : 照射時間 (sec)
 r : スポット半径 (cm)

表-4 レーザ照射条件⁶⁾

エア噴射	DFS (mm)	照射速度 (mm/s)	照射回数 (回)
あり	50	5	1
なし	80	10	2
	100	15	3

表-5 エネルギー密度の範囲

エネルギー密度	最小	最大
(小)	0.18	4.70
(大)	0.37	18.81

単位: (kJ/cm²)

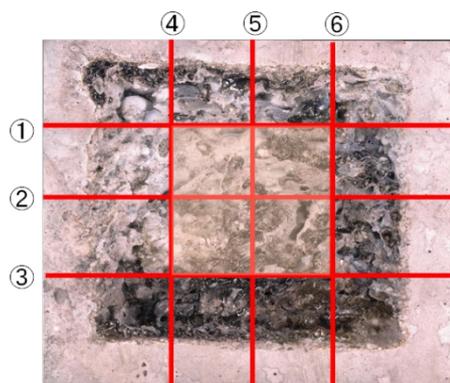


図-19 深さ測定位置図

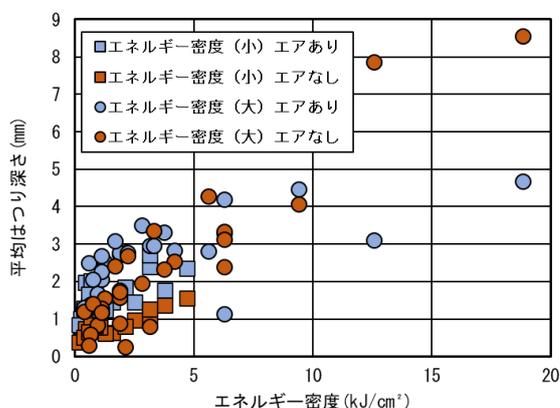
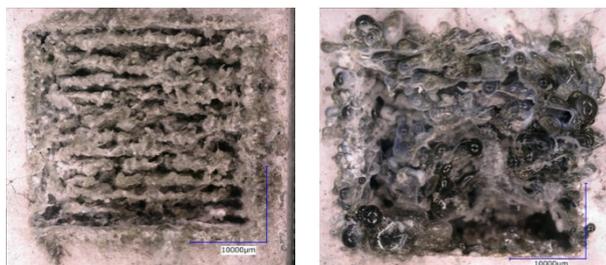


図-20 平均はつり深さとエネルギー密度の関係



エア噴射あり

エア噴射なし

図-21 レーザ照射表面状態 (18.81 kJ/cm²)



エア噴射あり

エア噴射なし

図-22 レーザ照射表面状態 (0.64 kJ/cm²)

5 おわりに

本研究で得られた知見を以下に示す。

本実験では、レーザー照射を面的、かつ複数回実施した場合の照射後の状態について比較を行った。その結果、レーザー照射時にエア噴射を同時に行うことで作業の品質や効率が向上する可能性のあることが分かった。

レーザー照射によるはつり体積を、3D デジタイザを用い算定した。その結果からエア噴射によるドロス除去ならび

に複数回照射の有効性が確認された。これは、複数回照射による効果が、はつり体積が増加する結果として表れた。また、はつり体積の変化の傾向から、本実験における効率的な照射条件は、照射速度:25cm/sec, DFS50mm であることが分かった。

末竹らの実験結果との比較では、レーザー照射のエネルギー密度が同じ範囲では、ほぼ同じはつり深さの傾向を示し、両実験とも測定のアプローチや照射方法が異なるものの、傾向を再現できていることが明らかとなった。

今回の実験においては、実験は装置等の制約条件があり、大きな寸法の試験体に対して行った結果ではないが、将来のレーザーはつり技術開発の参考になればと考える。

参考文献

- 1) 2022年制定 土木学会コンクリート標準示方書【維持管理編】
- 2) 金子泰明, 永井香織, 河井勇樹, 今関幹, 川端康夫, 平間昭信: レーザ照射による鉄筋のケレンに関する基礎的検討, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, VI-375, 2022.09.
- 3) 市山大輝, 伴享, 永井香織, 末竹泰土: レーザ照射によるコンクリートのはつり技術の開発, 令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会, VI-892, 2022.09.
- 4) 市山大輝, 伴享, 永井香織, 末竹泰土: 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, 令和5年度コンクリート工学年次論文集, 2023.07, No.1264
- 5) 伴享, 市山大輝, 永井香織, 末竹泰土: レーザを用いたコンクリートはつり技術に関する実験的検討, 佐藤工業技報, No.48, 2023
- 6) 末竹泰土, 永井香織, 大江隆史: レーザによるコンクリートはつり工法に関する基礎的研究—サイドエアーを用いた場合—, 2023年度日本建築学会関東支部研究報告集, 2024.03, Vol.94, pp.57-60