

論文 レーザを用いたコンクリートの表面切削状況に及ぼす要因に関する検討

濱岡 祥樹^{*1}・河合 慶有^{*2}・横山 勇気^{*3}・加藤 芳樹^{*4}

要旨： 原子力発電所の廃炉時に発生する放射性廃棄物を低減させるため、コンクリートの表面除染が行われている。しかし、既往の表面除染方法を用いた場合、放射性二次廃棄物が発生することが課題であった。そこで、放射性二次廃棄物の発生を防ぐ方法として、レーザーによるコンクリート表面切削に着目し、レーザーのパラメータやセメント種類、水結合材比による切削深さ、表面粗さの違いの検討を行った。検討の結果、既往の課題であったガラス化部分のレーザー切削を可能とするのみならず、照射の経路を変化させることで、既存のコンクリート切削方法であるショットブラスト工法と比較し 1/4 の時間で最大 3.5mm の切削を実現した。

キーワード： 表面除染, レーザ切削, 切削性能, ガラス化, パワー密度, 平均切削深さ

1. はじめに

原子炉の運転期間が経過すると、運転を停止し解体する「廃炉」が行われる。廃炉によって発生する放射性廃棄物は、環境負荷が大きく廃棄コストが高価であることが問題となっている。そこで既往の研究では、廃炉を安全かつ経済的に行うため、原子炉建屋解体に先立って建屋内の放射線物質の浸透したコンクリート表面部分を取り除き、適切に処理する工法を検討しており、一般の構造物と同様に解体が可能となり、解体作業者の過大な被ばくの防止が可能となることが報告されている¹⁾。コンクリートの表面を切削して除染する方法としては、ショットブラスト工法 (SB 工法)、ウォータージェット工法 (WJ 工法)、ミーリング工法、グラインダ工法、スキャブラー工法などの工法が存在する²⁾。しかしながら、WJ 工法では、処理に用いた大量の水が新たな放射性廃棄物となり、SB 工法では、使用した研磨剤が新たな放射性廃棄物となり、放射性廃棄物の総量を減らすという本来の目的と乖離する。また、ミーリング工法やグラインダ工法、スキャブラー工法は機械により表面を切削する方法であり、切削に用いた機械の二次汚染が問題となる。そこで、使用した機械の除染がなく放射性二次廃棄物の発生しない新たな方法としてレーザーに着目した。同既往の研究³⁾では、レーザー出力の増加、照射速度の低速化、切削前の散水を行うことで、切削深さを増加させることが可能であることを明らかにした。また、上記の工法と比較した際に、骨材も同時に切削可能なため表面凹凸を抑えつつ切削が可能である。既往研究では最大の切削深さが 2mm 程度であり、SB 工法の最大切削深さである 3-4mm 程度を切削することはできなかった。コンクリート

の表面除染を行う場合は、安全余裕として放射性物質の浸透深さより任意の深さを加えた深さを切削する必要がある¹⁾。しかしながらより深く切削を行うために過剰に熱エネルギーを与えると表面が熔融しガラス化が生じる⁴⁾。ガラス化部分は、物理的なはつりにより比較的容易に取り除くことが可能であるが、ガラス化部分には放射性物質が含まれると考えられるため、はつりに用いた機械の除染作業や作業者の安全性の問題が生じ、新たな作業等が追加され負担となる。

そこで本研究では、ガラス化せずに 3-4mm 程度の切削が可能となる条件や、任意の深さの切削を行う際に留意する要因を分析することとした。加えて、実構造物への適応も想定し、セメント種類が切削性能に及ぼす影響についても検討し、SB 工法と切削効率を比較した。

2. 実験概要

2.1 使用材料および配合

コンクリートの配合を表-1 に示す。本実験で使用するコンクリートは、普通ポルトランドセメント N(密度:3.16g/cm³)、早強ポルトランドセメント H(密度:3.14g/cm³)、中庸熱ポルトランドセメント M(密度:3.21g/cm³)、細骨材(表乾密度:2.59g/cm³, 吸水率:1.89%, 粗粒率:2.86)、粗骨材(表乾密度:2.62g/cm³, 吸水率:1.20%)を用いた。また、混和材としてフライアッシュ FA(密度:2.30g/cm³)を使用した。混和剤として AE 剤、AE 減水剤を使用した。水結合材比 W/B は 45, 55, 65% の 3 種類とし、設計基準強度が 18, 24, 30N/mm² を満たすように配合設計を行った。単位水量による比較を行うため、M55-1 は H, N, FA と同様に最大単位水量を 175kg/m³ に

*1 愛媛大学大学院 理工学研究科生産環境工学専攻 修士(工学) (学生会員)

*2 愛媛大学大学院 理工学研究科准教授 Ph.D. (正会員)

*3 愛媛大学大学院 理工学研究科助教 工博 (正会員)

*4 四国電力(株) 原子力本部 原子力保安研修所 保修高度化グループ

表-1 コンクリートの配合

粗骨材の 最大寸法	ケース	W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					(g/m ³)		空気量 (%)
				W	C	FA	S	G	混和剤		
									AE減水剤	AE剤	
20	H45	45	44.8	175	389	-	767	956	5053	2332	3.0
	H55	55	46.8	175	318	-	829	953	4770	1908	3.0
	H65	65	48.8	175	269	-	884	938	3498	1614	4.0
	N45	45	44.8	175	389	-	768	958	3887	3109	4.5
	N55	55	46.8	175	318	-	830	954	3816	1908	3.5
	N65	65	48.8	175	269	-	885	939	4036	1614	5.0
	FA45	45	44.8	175	311	78	757	944	3111	3889	3.5
	FA55	55	46.8	175	255	64	820	943	2545	2864	3.0
	FA65	65	48.8	175	215	54	876	930	2154	2423	3.0
	M55-1	55	46.8	175	318	-	831	956	2545	1909	4.0
M55-2	55	46.6	185	336	-	809	938	673	2691	3.0	

設定した。M55-2 は、実際の原子力発電所で用いられている配合を使用した⁵⁾。

2.2 供試体の作製及び養生

レーザ切削に用いた供試体の寸法は、断面 15cm×15cm×高さ 3cm である。打込み後 5 日後に脱型を行い、材齢 28 日まで温度 20℃の水中養生を行った。また、上述した供試体とは別に直径 100mm の円柱供試体を作製し JISA1108 に準じて圧縮強度試験を行った。図-1 に、圧縮強度試験の結果を示す。

2.3 レーザによる切削実験

本実験では、レーザのパラメータとして、出力数(kW)、照射速度(m/min)、スポット径 Φ(mm)、ピッチ間隔(mm)、照射回数、照射軌跡を変化させ実験を行った。照射軌跡とは、レーザの照射を行うルートのことであり、回転運動（ウォブリング）を加えながら照射することで、直線照射と比較した際に同時間で広範囲の照射を行うことが可能である。本実験では 10kW ファイバーレーザを使用した。レーザの仕様はマルチモードの CW（連続波）レーザであり、焦点距離は 380mm、波長は 1070nm である。またレーザ先端に 3D ガルバノスキャナヘッドを装着し、実験を行った。ここでガルバノスキャナとは、レーザ光を反射させるガルバノミラー、反射位置を調整するガルバノモーター、モーターを制御する制御ドライバの 3 つで構成されており、反射鏡を用いてレーザ光を任意の方向に制御し、レーザ光をピンポイントで照射する制御装置である。本実験で使ったガルバノスキャナヘッドを固定した場合の最大切削面積は 250mm×240mm＝60000mm² である。これ以上の切削を行う場合は、レーザヘッドを移動することで切削可能である。本実験では、アシストガスを使用せずエアのみで加工を行った。実験は粉じん対策として囲いを行い、切削時に発生する削りかす等は吸引機により回収した。レーザによる切削状況を写真-1 に示す。切削範囲は、1 体の供試体につき 40mm×100mm＝4000mm² の加工を 3 箇所行った。切削実験は、温度 20℃、湿度 60%の屋内で実施した。

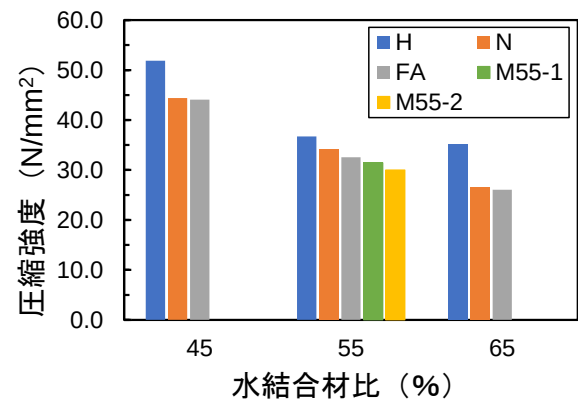


図-1 各配合の圧縮強度

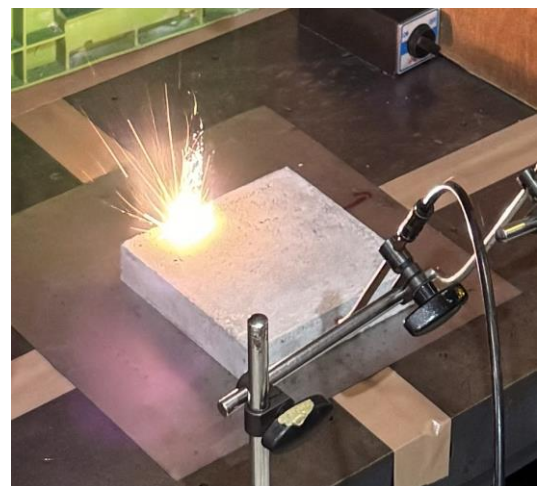


写真-1 レーザによる切削状況

2.4 表面形状の評価方法

2.4.1 平均切削深さ

表面形状の測定には、超高速インラインプロファイル測定器を使用した。この機器は、帯状のレーザを対象物表面に照射し、その反射光の変化を検出することによって対象物のプロファイル（断面形状）を測定することができる。本実験では、平均切削深さ及び算術平均粗さを算出するために使用した。測定間隔は、0.3mm とし、各供試体での 40mm×100mm の切削面において約 45000 点

の測定を行った。なお、切削端部のバラツキを考慮し、切削面の上下左右の端5mmの測定結果を除いた約30000点の測定値を使用し、式(1)より平均切削深さを算出した。切削が行われていない箇所の高さを基準高さとし、基準高さと測定値の差分の平均値が切削深さである。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i - H}{n} \quad (1)$$

ここで、 $\bar{x}$: 平均切削深さ(mm), H : 基準高さ(mm), h_i : 各測定点の高さ(mm), n : 計測点数(個)である。

2.4.2 算術平均粗さ

切削面の凹凸具合を表す指標として、本実験では算術平均粗さを用いた。本実験の最終目標は、可能な限り放射性廃棄物の発生を抑えながらコンクリート表面の切削を行う方法の確立である。そのゆえに、任意の切削深さを削り取る技術も重要であるが凹凸が少ない切削を行うことも重要である。そのため、切削深さだけでなく表面の凹凸具合も評価した。算術平均粗さの算出方法は JIS B0601:2013 で定義されているものであり、1つの凹凸が測定値に及ぼす影響が非常に小さく安定した結果が得られることが特徴である。マイクロメートル(μm)で表したものが一般的であるが、本研究ではレーザにより切削したコンクリート表面の凹凸を数値化するために、 $y=f(x)$ の値をミリメートル(mm)で表した⁶⁾。式(2)に計算式、図-2に概念図を示す。

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |f(x)| dx \quad (2)$$

ここで、 Ra : 算術平均粗さ(mm), L : 基準長さ(mm), $f(x)$: 粗さ曲線(mm)である。

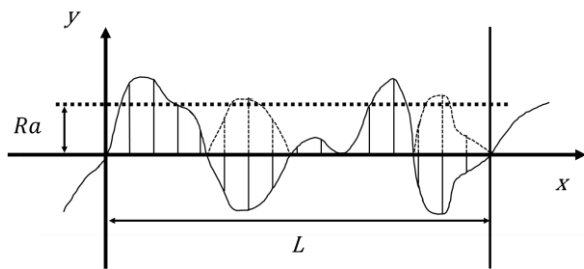


図-2 算術平均粗さの概念図

3. 実験結果及び考察

3.1 パワー密度の影響

図-3に、スポット径 Φ が0.76mm, 1mm および 2mm における平均切削深さとパワー密度の関係を示す。ここで、パワー密度(W/mm^2)とは、出力数(W)をレーザ光の照射されたスポット面積(mm^2)で除した値であり、等しい出力数のレーザ光において、照射するスポット面積を変

化させることで、局所的に与えるエネルギー量を変えることが可能である。本実験では、 $\Phi=1\text{mm}$ 及び 2mm で、出力数=1, 2, 4, 6, 8kW, $\Phi=0.76\text{mm}$ で出力数=1, 2, 3, 4, 6, 7, 8kW の条件でパワー密度を変化させた。使用した供試体は、H55 であり、照射速度は $100\text{m}/\text{min}$ とした。実験の結果より、パワー密度の増加に伴い平均切削深さが増加していることが確認できる。スポット面積が異なる場合においても、パワー密度が近い場合同様の切削が可能である。図-4に算術平均粗さとパワー密度の関係を示す。算術平均粗さは、パワー密度が比較的小さい場合($5\text{kW}/\text{mm}^2$ 以下)においては、パワー密度の増加に伴い大きくなっているが、 $5\text{kW}/\text{mm}^2$ を超えると大きな差が見られない。これらのことから、パワー密度を増加させることで、凹凸を抑えつつ、より深く切削を行うことが可能である。

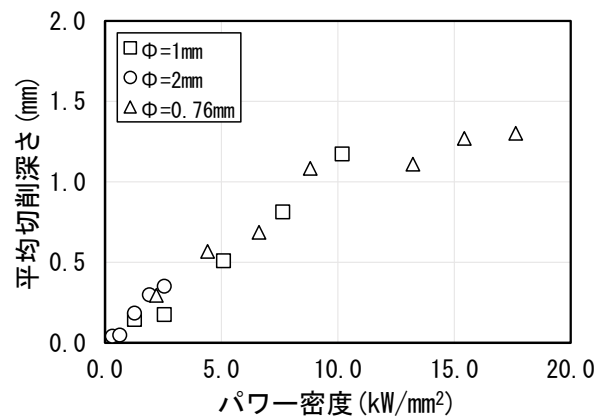


図-3 平均切削深さとパワー密度の関係

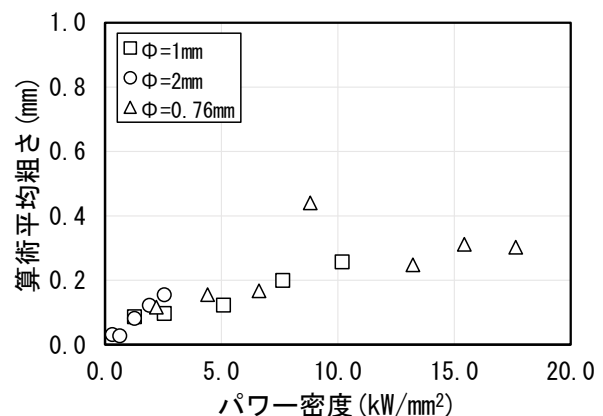


図-4 算術平均粗さとパワー密度の関係

3.2 照射軌跡による影響

次に照射の軌跡が与える影響について検討を行った。図-5に照射軌跡についての概念図を示す。過去に行ってきた切削では、図-5中の直線照射による軌跡で切削を行った。本節では回転照射による軌跡で実験を行った。回転を加えることにより、一度照射を行った箇所(図-5における青色部分)に、再度照射を行うこと(図-5に

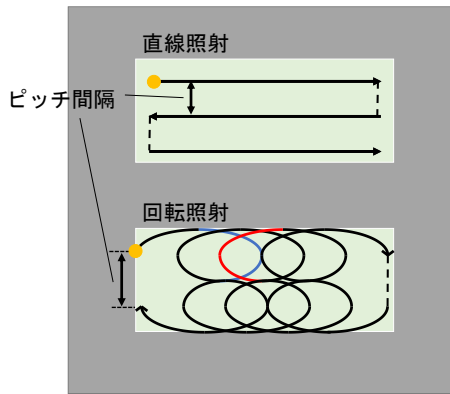


図-5 照射軌跡の概念図

おける赤色部分) が可能なため、短時間で同一箇所 に 2 倍のエネルギーを与えることが可能である。図-6 に、照射軌跡を変化させた場合の平均切削深さの結果を示す。使用した供試体は、H55 であり、パワー密度は $17.63\text{kW}/\text{mm}^2$ である。実験の結果より回転照射による切削では、3 パス目の切削で 3mm 程度の切削を行うことができています。また、直線照射の場合は $100\text{m}/\text{min}$ よりも低速にした場合 2 パス目ではガラス化したが回転照射の場合はパス数を増やしてもガラス化が生じなかった。このことから、回転照射では、直線照射では不可能であった高出力かつ低速での切削が可能ながことが分かる。図-7 に照射軌跡を変化させた場合の算術平均粗さの結果を示す。算術平均粗さは照射回数増加に伴い、わずかに増加している。しかしながら、平均切削深さの増加率と比べ増加が緩やかなため、切削面の凹凸を抑えながら切削していると考えられる。これは、レーザでの切削が比較的脆弱なセメントペースト部分のみでなく、骨材も同時に切削しているためである。これらのことから、回転照射による切削は、ガラス化を抑えつつ、より高出力かつ低速での条件の切削が可能である。

3.3 セメント種類による影響

セメント種類による表面形状の差異を確かめるためにセメント種類を変化させた配合を用いて、レーザ切削を行った。全ての供試体において、加工速度は $100\text{m}/\text{min}$ 、パワー密度は $13.23\text{kW}/\text{mm}^2$ 、照射経路は直線照射とした。図-8 に、平均切削深さとセメント種類の関係についての結果を示す。H45 及び H55 の配合の供試体において、他の供試体に比べ平均切削深さが大きくなるという結果となった。しかしながら、他の配合の供試体では、セメント種類ごとの明確な平均切削深さの違いは確認できなかった。同じセメント種類の場合、水結合材比による明確な違いは見られなかった。図-9 に算術平均粗さとセメント種類の関係についての結果を示す。算術平均粗さについても、H45 及び H55 の供試体のみ他の供試体と比較し、わずかに大きくなるという傾向が確認できる。し

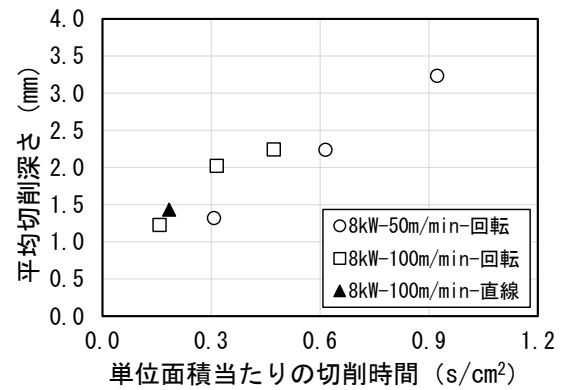


図-6 回転照射及び直線照射による

単位面積当たりの切削時間と平均切削深さの関係

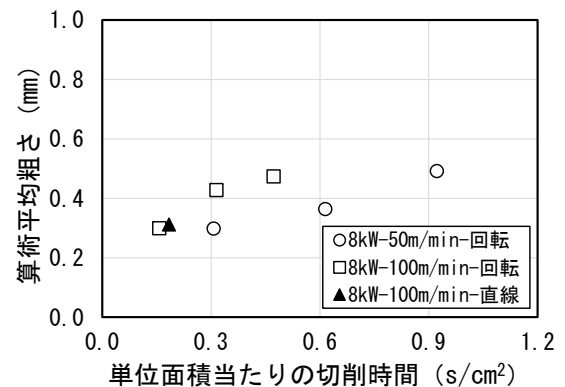


図-7 回転照射及び直線照射による

単位面積当たりの切削時間と算術平均粗さの関係

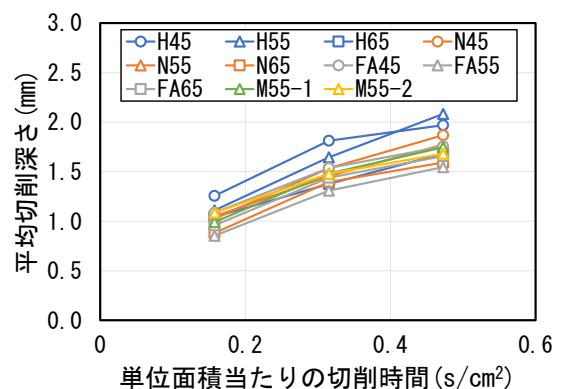


図-8 平均切削深さとセメント種類の関係

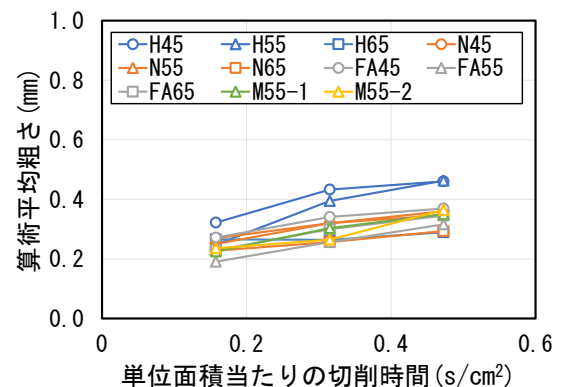


図-9 算術平均粗さとセメント種類の関係

かしながらその他の配合の供試体では、いずれも 0.3mm 程度と比較的凹凸の少ない切削となっており、セメント種類及び水結合材比の明確な差は確認できない。H45 及び H55 のみ平均切削深さ及び算術平均粗さが大きくなった要因として、供試体の水分量や骨材の分布の影響^{3), 7)}が挙げられ、レーザによる切削の原理が水蒸気爆発を起こすことや、骨材部分を含むコンクリート表層の瞬間的な昇華や瞬間膨張によって生じる圧縮応力であるため、物質の光吸収率が関係していると考えられる。上記の理由より、早強セメントでは平均切削深さが他のセメントと比較し大きくなっているが、他のセメント種類の実験結果では平均切削深さと算術平均粗さの明確な差異はないため、既往の研究³⁾の結果を含めるとセメント種類と水結合材比は、切削性能に大きな影響を与えないと考えられる。しかしながら、早強セメントに関しては、レーザ切削を行うまでの供試体の静置状態による含水率の違い等を考慮し、再検討を行う必要がある。

3.4 既存工法との比較

本項では、レーザの各種パラメータが平均切削深さに与える影響を把握したうえで、最も深く切削が可能となる条件を検討し、既存の工法との切削性能の比較を行った。SB 工法は、研磨剤をコンクリート表面にたたきつけて切削する方法であり、ここでは愛媛大学で 2018 年に行った実験結果を比較用に使用した。SB 工法を用いた検討では、3 種類の研磨剤（鉄球、鉄鋼スラグ、銅スラグ）を使用し、各研磨剤に対し 15cm×15cm の供試体を 9 体並べて切削し、平均切削深さ及び算術平均粗さを算出した。図-10 にレーザ切削と SB 工法における単位面積当たりの切削時間と平均切削深さの関係を示す。レーザ切削の条件は、パワー密度が、17.63kW/mm²、照射速度が 100m/min、照射回数が 1~6 回である。実験の結果より、レーザ切削では、約 3.5mm までの切削を行うことができる。これは、SB 工法と比較しても同等かそれ以上の平均切削深さとなっている。また、単位面積当たりの切削時間においても、SB 工法よりも早く、3mm 以上に到達している。図-11 にレーザ切削と SB 工法における単位面積当たりの切削時間と算術平均粗さの関係を示す。算術平均粗さにおいても、SB 工法と同等かそれ以上の切削ができています。これは、SB 工法では切削が不可能であった骨材部分も切削できているためである。以上の結果より、レーザ切削は、表面の凹凸を抑えつつ、SB 工法以上の切削をより短時間、かつ効率よく実施可能な工法であると考えられる。

3.5 ガラス化部分の切削について

本研究では、ガラス化が生じると機械的なはつりの必要性が発生し、作業数や負担が増加するためにガラス化が生じない条件下での切削条件を検討してきた。しかし

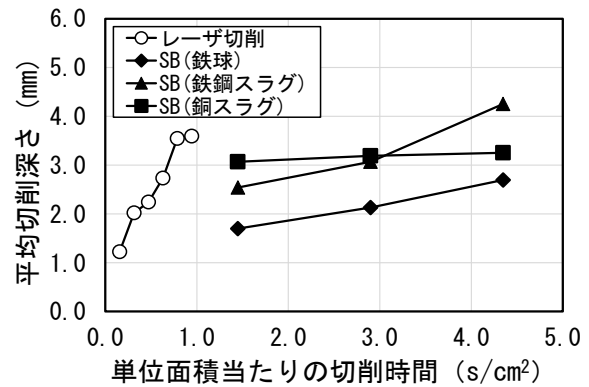


図-10 レーザ切削と SB 工法における単位面積当たりの切削時間と平均切削深さ

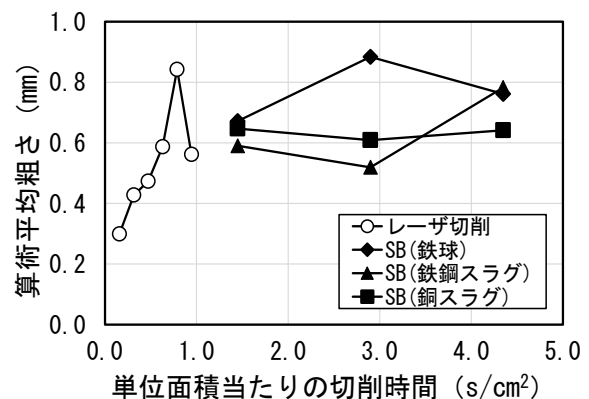


図-11 レーザ切削と SB 工法における単位面積当たりの切削時間と算術平均粗さ

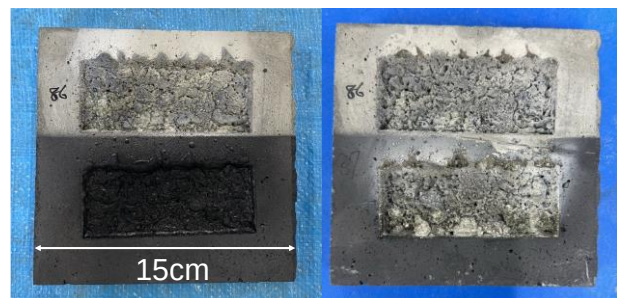


写真-2 切削前(左)及び切削後(右)の供試体

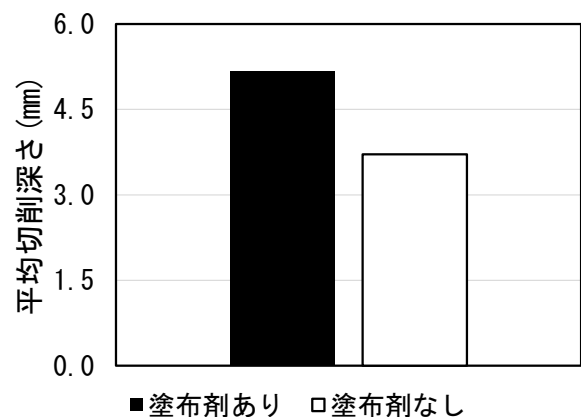


図-12 塗布剤の有無が平均切削深さに及ぼす影響

ながら、より深く切削を行うためにレーザーによってエネルギーを短時間で多く与えると容易にガラス化が発生するという課題が存在する。ガラス化部分をレーザーによって除去することができるのであれば、追加の作業や負担がかからない。そこで、ガラス化部分をレーザーによって除去することを試みたが、ガラス化部分をレーザー光が透過し、十分に熱を伝達することができず切削を行うことが不可能であった。そこで着目したものが、塗布剤を用いた切削である。レーザー加工の分野では、被加工材料の光吸収率が重要であり、レーザー光のエネルギーが高い場合でも材料の吸収率が低い場合はレーザーにより与えられる高いエネルギーを生かすことができない。本実験ではガラス化部分に光吸収率の高い黒色系の塗布剤を散布することで、レーザーのみでガラス化部分の除去が可能かを検討した。写真-2 に塗布剤を散布後の切削前後の供試体を示す。まず、同条件でガラス化するように切削を行った供試体を準備し、片側のガラス化部分にグラファイト微粉末を混ぜた塗布剤を満遍なく2秒間散布した。その後同条件で、同一箇所の切削を行った。図-12 に塗布剤の有無が平均切削深さに及ぼす影響を示す。塗布剤を散布した切削は、散布していない切削と比較し1mm以上大きくなっている。これは、ガラス化部分に塗布剤を散布することで光吸収率を上昇させることに有用であることを示している。しかしながら、ガラス化部分に重ねて照射することで深く切削を行うことが可能な一方で、塗布剤を散布した供試体もガラス化が生じており、一度目の照射で生じたガラス化部分か二度目の照射で生じたガラス化部分かどうかを目視により判別することはできていない。そのため、一度目の照射でガラス化した部分を完全切削出来ているかは不明瞭である。そのため、今後はガラス化部分の除去率についての検討も行う必要がある。

4. まとめ

本研究で得られたレーザーによるコンクリート表面の切削についての知見を以下に述べる。

- 1) レーザのパワー密度の増加に伴い、平均切削深さを増加させることが可能であることを確認した。粗さについては、平均切削深さほどの影響は見られなかった。このことから、パワー密度を増加させることで、切削深さの増加が期待できる。

- 2) 照射の軌跡を変化させることによって、より高いエネルギーを与える条件での切削を行うことが可能であった。
- 3) セメント種類及び水結合材比による切削性能については、明確な差異が確認できなかった。実際にレーザー切削を適応する際に、異なる配合の場合においても同様な切削が期待できる。
- 4) ガラス化部分に黒色系の塗布剤を散布することで、光吸収率を増加させ、平均切削深さを増加させることができる。ガラス化部分をレーザー切削のみで除去を行える可能性がある。
- 5) 既存の方法である SB 工法と比較した際に、短時間でより多くの量の切削を行うことができた。放射性廃棄物の発生が少ない新たなコンクリート除染方法として期待できる。

参考文献

- 1) 宮坂靖彦, ほか:「JPDR 解体実地試験の概要と成果」, 日本原子力学会誌, Vol.38, No.7, pp.553-576, 1996
- 2) 伊東章, 鳥居和敬:「21 世紀の原子力発電所廃止措置の技術動向 第 3 回廃止措置技術—コンクリート解体/はつり技術の技術動向」, 日本原子力学会誌 ATOMO Σ, Vol.51, No.10, pp.763-767, 2009
- 3) 濱岡祥樹, 氏家勲, 河合慶有, 山崎英樹:「レーザーを用いたコンクリート表面の効率的な切削方法の検討」, コンクリート工学年次論文集, Vol.45, No.1, pp.280-285, 2023
- 4) 新井武二, 浅野哲崇, 及川昌志:「10kW ファイバーレーザーによるコンクリート石材の剥離除去加工」, 2012 年度精密工学会春季大会, A10, pp. 17-18, 2012
- 5) 石井貴和:「四国電力伊方発電所 2 号機建設工事におけるコンクリート品質管理」, セメント・コンクリート, No.421, pp.44-55, 1982
- 6) 斎藤憲寿, 徳重英信:「算術平均粗さによる凍結融解作用を受けたかぶりコンクリートの劣化評価に関する研究」, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.796-801, 2014
- 7) 山田知典, 松村壽晴:「レーザー光と非金属との相互作用に関する基礎研究及び福島第一原子力発電所の廃止措置に向けた研究計画—コンクリートへのレーザー照射挙動の評価—」, JAEA-Research, 日本原子力研究開発機構, 2014