

レーザを用いたコンクリート加工と熱影響に関する研究

日大生産工 ○松田 航 日大生産工 永井 香織

1. はじめに

レーザ加工は高効率、高速、高精度の特徴を持ち、さらに非接触加工¹⁾であるため、振動・騒音などを低減させることができる。従来の機械加工の不得意な領域をカバーすることができ、加工性能の向上により、レーザ加工法を用いた建築分野での研究が増えており、加工の対象は金属材料だけではなくコンクリートにまで及ぶ。

1955年から1973年における高度経済成長期に、鉄筋コンクリート造の建築物が多く建設され、それらの老朽化は進行し、解体工事が増加²⁾している。また、鉄筋コンクリート造解体の際に発生する事故の割合で、墜落や転落の割合が最も多く、床スラブから作業員が墜落する件数が極めて多い³⁾。このような課題の解決に対して、鉄筋コンクリート造の解体などの新しい工法の一つとしてロボット技術と併せたレーザ加工法を導入することが期待される。

コンクリートに対してレーザ加工を行った場合、レーザ光は高密度のエネルギー集光ができるため、切断⁴⁾、はつり⁵⁾などを目的とした研究が行われている。コンクリートのレーザ加工では、一定の加工面を形成することは難しく、大きな課題として挙げられる。その要因は熱影響にあると予想し、照射開始点と照射終了点の加工の差を熱影響差と定義する。

本研究は、レーザを用いたコンクリートの熱影響に関する基礎的研究としてコンクリートの表面を400℃、600℃に加熱し、レーザ照射を行うことでの熱影響差を確認した。

2. 供試体概要

実験に用いたコンクリート供試体の写真を写真1、供試体概要を表1に示す。供試体はコンクリート強度20N/mm²の普通コンクリートとコンクリート強度130N/mm²の高強度コンクリートの2種類とした。100×100×400mmのコンクリート型枠を使用し7日後に脱型、その後63か月間(2019年2月13日～2024年6月6日)封緘養生したものをコンクリートカッターで切断して供試体を作製した。各供試体寸法は100×100×50mmとした。

3. 実験方法

3.1 電気炉による加熱

加熱条件を表2に示す。普通コンクリートを約1200℃の電気炉で45分、60分加熱、高強度コンクリートは約900℃で45分、60分加熱することで、各供試体の表面温度が400℃、600℃になった。加熱された供試体を取り出した直後にレーザ照射をした。

コンクリートは受熱温度200～450℃でセメント水和物の大部分が脱水することから劣化が始まり、300℃を超えると圧縮強度が低下し始め、500℃に達すると圧縮強度は健全時の1/2まで低下すると報告されている⁶⁾。一般的なコンクリートは加熱されると、受熱した表面から内部へ温度が上昇し、表面から劣化が進行する⁶⁾。その要因として、骨材とセメント組織の熱膨張や収縮挙動の相違、石英を含む骨材の膨張、セメント水和物の科学的変化などが挙げられる。

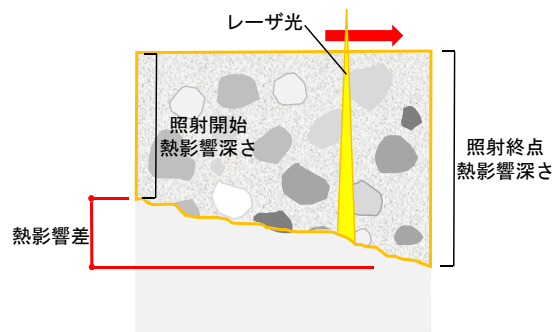


図1 熱影響差の模式図

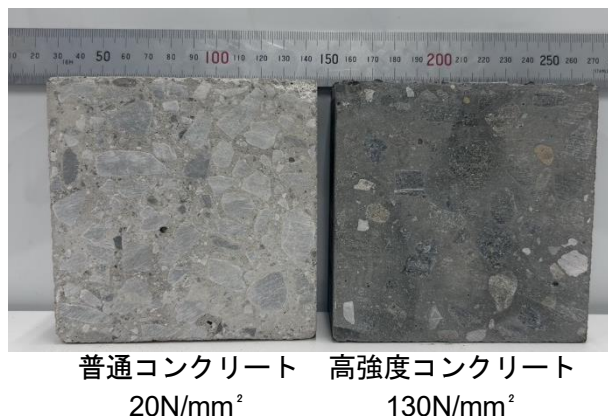


写真1 供試体

表 1 供験体概要

コンクリートの種類	強度 (N/mm ²)	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	粗骨材の最大寸法 (mm)	細骨材率 (%)
普通	20.0	18.0	4.5	40.0	20.0	35.0
高強度	130.0	6.5	2.0	14.0	20.0	31.0

表 2 加熱条件

コンクリート	表面温度 (°C)	加熱時間 (min)	加熱温度 (°C)	n数
普通	400	45	1200	3
高強度	600	60	900	

表 3 照射条件

出力 (kW)	モード	周波数 (Hz)	速度(mm/s)	アシスト ガス	ガス圧 (Mpa)
2	パルス	16.7	0.125 0.25 0.5	N ₂	0.5

3.2 供試体表面温度の測定

放射温度計の測定の模式図を図 2 に示す。電気炉から取り出した直後に放射温度計(C 社製放射温度計)を用いてレーザ照射中の供試体表面の温度を測定した。放射温度計から供試体までの距離は 1m とし、供試体の中心に予め設定した直径 5mm の範囲を測定した。

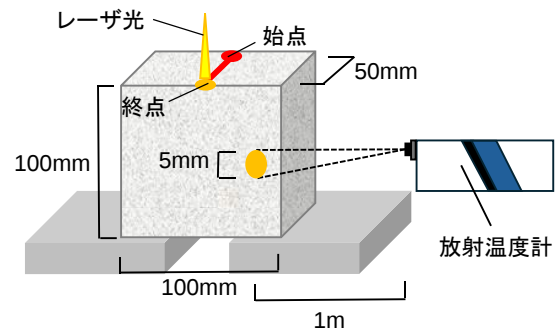


図 2 放射温度計の測定の模式図

3.3 レーザ照射方法

レーザの照射条件を表 3、照射方法の模式図を図 3 に示す。レーザ発振器は最大出力 2kW のファイバーレーザを使用した。照射開始点から照射終了点までの 50mm の距離を、レーザヘッドを 0.125, 0.25, 0.5mm/s の速度で移動させながら照射した。

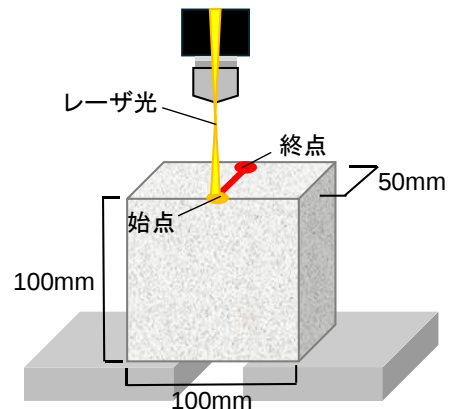


図 3 照射方法の模式図

4. 評価方法

a. 供試体観察

レーザ照射前後の各供試体の観察を行った。レーザ照射後、十分に冷却された供試体に透明エポキシ樹脂を塗布し、硬化した後にコンクリートカッターで切断して断面のガラス化を目視観察した。

b. 熱影響深さの測定

供試体断面をデジタルノギスを用いて熱影響深さの測定をした。供試体温度の最小熱影響深さと最大熱影響深さの差を求め、(I)式のように熱影響差の割合を算出した。割合が 0% に近づくほど熱影響差は小さくなり、均一な加工と評価する。

$$\angle C = (D_2 - D_1) / D_2 \times 100 \cdots (I)$$

∠C: 熱影響差(%)

D₁: 照射開始点の熱影響深さ(mm)

D₂: 照射終了点の熱影響深さ(mm)

表 4 加熱後の供試体

表面温度	普通コンクリート	高強度コンクリート
400°C		
600°C		

5. 結果及び考察

5.1 加熱後の供試体観察

普通コンクリートと高強度コンクリートの加熱後の供試体を表4に示す。普通コンクリートでは、400℃以上加熱することで供試体表面にひび割れが発生し、400℃より600℃の方がよりひび割れが多く確認された。セメントペースト硬化体は100℃以上で蒸発可能水を失い、乾燥収縮によってひび割れる⁶⁾ため、供試体温度の上昇とともにひび割れが多くなったと考えられる。また、コンクリートに含まれているの石灰石の主成分の方解石が約650℃～900℃の範囲で分解され、炭酸ガスを放出する⁷⁾。500℃からコンクリートの強度は低下するため、炭酸ガスによる内部の圧力によってひび割れを促進させていたと考えられる。

高強度コンクリートは、普通コンクリートと比較してひび割れの幅が大きくなり、爆裂¹⁰⁾によって発生する剥離や欠けはほとんどなかった。コンクリートに含まれている砂岩の主成分の石英が約575℃でα型からβ型に転移する際の急激な膨張⁶⁾が要因だと考えられる。

5.2 熱影響差

供試体断面写真を表5と表6、熱影響差と表面温度の関係を図4に示す。供試体断面観察により、表面温度20℃、400℃、600℃の普通コンクリートを比較した結果、表面温度の増加に伴い熱影響深さが大きくなることが確認できた。このことから熱影響深さは供試体温度の増加に伴い大きくなると考えられる。表面温度20℃の普通コンクリートでは、照射開始点より照射終了点の方が、熱影響深さが大きくなり、照射の進行に併せて熱影響差が大きくなる傾向にあった。表面温度400℃では、熱影響差は比較的小さく、表面温度600℃では、熱影響差が大きくなった。このような熱影響差になった要因として、表面温度20℃では、レーザ照射による熱エネルギーを蓄熱することでコンクリートは徐々に熱影響深さを増し、表面温度400℃では、照射前に加熱していたため、比較的均一な熱影響深さを形成したと考えられる。よって、表面温度を400℃程度に加熱することで均一な加工をすることができる。また、照射時間が長くなるほど熱影響差が大きくなる傾向が確認されたが、レーザ照射によってコンクリートの表面温度が最も安定する表面温度400℃に向かって、表面温度20℃では照射時間

表5 普通コンクリート断面写真

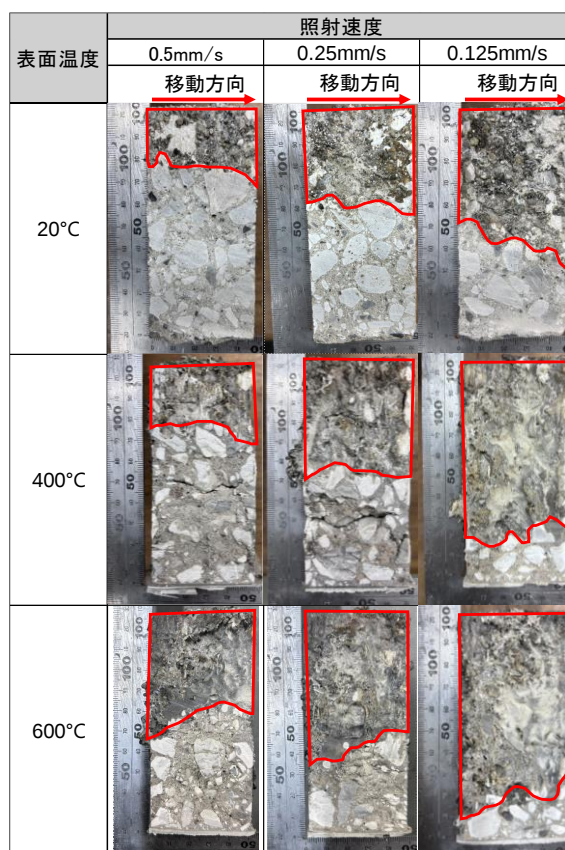
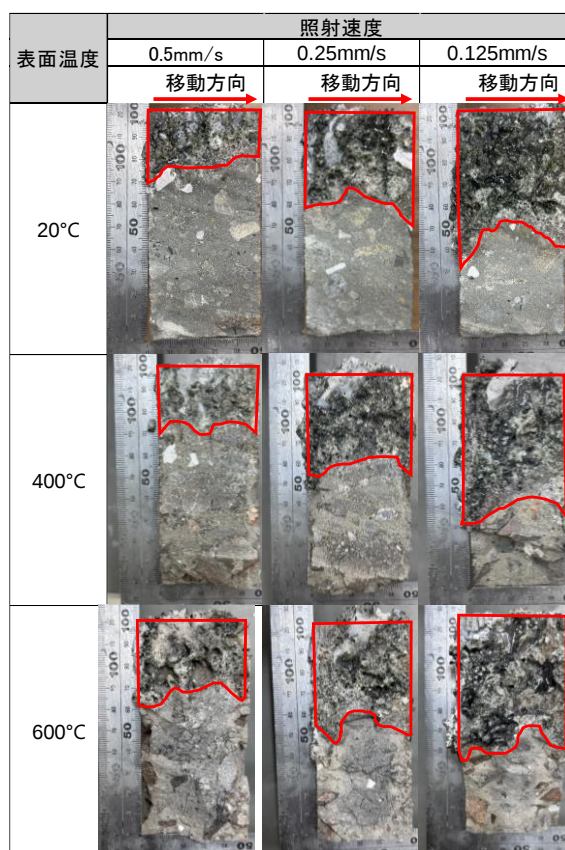


表6 高強度コンクリート断面写真

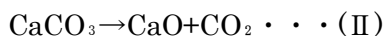


の増加とともに、より加熱されたと考えられる。

一方、高強度コンクリートは、普通コンクリートのような規則的な熱影響差はなかった。コンクリートの圧縮強度が大きいほど熱伝導率は大きくなる⁸⁾。熱伝導率と熱拡散率は骨材の熱特性に依存した変化性状を示す⁹⁾ため、熱拡散率も圧縮強度に相関している。高強度コンクリートはレーザー照射の熱エネルギーを供試体全体に拡散したが、普通コンクリートより組織が緻密であるため爆裂¹⁰⁾し、不規則な熱影響差を形成したと考えられる。

5.2 供試体観察

ガラス形状を観察すると、表面温度が増加するほどガラスが多く生成され、供試体温度600℃では20℃、400℃と比較して白や透明質なガラスが生成されていることが確認された。(Ⅱ)式のようにセメント水和物は CaCO_3 が600℃以上で分解され、 CaO が生成された¹¹⁾後、レーザー照射による高温化で SiO_2 と結合し、急冷されることで、 CaSiO_3 が生成されたと推測した。高温において安定した構造をとる¹²⁾ため、気泡状のガラス化とは異なる形状をしたと考えられる。



6. まとめ

- 1) 普通コンクリートはレーザー照射の蓄熱によって、熱影響差が大きくなった。
- 2) 高強度コンクリートはレーザー照射の熱エネルギーを供試体全体に拡散したが、爆裂したことで不規則な熱影響差を形成した。
- 3) 普通コンクリートでは、表面温度400℃の条件が最も均一な加工ができた。
- 4) 普通コンクリートは照射時間の増加とともに熱影響差も増加した。
- 5) 事前にコンクリートを加熱し、レーザー照射すると CaSiO_3 が生成された可能性がある。

参考文献

- 1) 宮本勇:レーザー加工,精密工学会誌, 2009年75 巻1号p. 66-67
- 2) 国土交通省:建築物ストック統計,クラッソーネの推計
- 3) 安全衛生総合研究所:解体工事における死亡災害の分析
- 4) 杉田和直ら:レーザーによるコンクリート切断の基礎研究,日本建築学会関東支部研究報告集,pp13~22,1986年

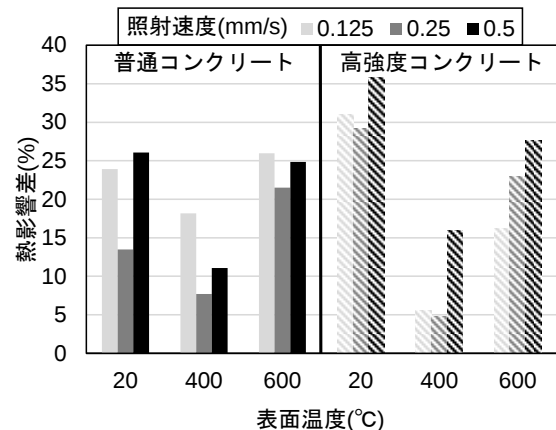


図4 熱影響差と表面温度の関係

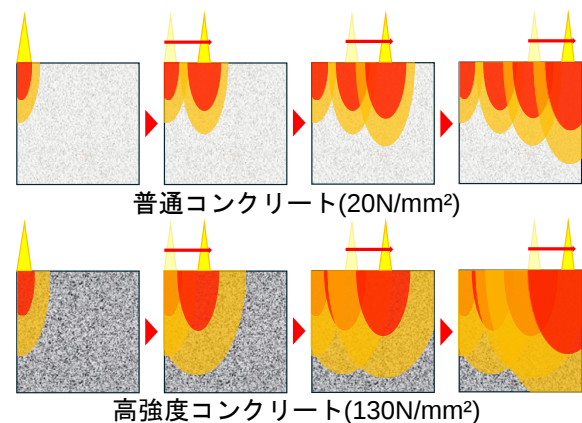


図5 圧縮強度とレーザー照射による熱拡散

- 5) 市山大輝ら:レーザーを用いたコンクリートはつり技術に関する基礎的研究,日本コンクリート工学会大会学術講演会梗概,45巻1号pp1588~1593,2023.7
- 6) 吉田夏樹ら:火災の影響を受けたコンクリートの科学的変化に関する一検討,コンクリート工学年次論文集, Vol39 No.1,2017
- 7) 山口梅太郎ら:熱による岩石の強度の変化あるいは破壊について,日本鉱物会誌,86巻986号,1970,pp346~351
- 8) 李柱国ら:コンクリートの圧縮強度と熱伝導率の関係に関する実験的考察,コンクリート学会年次論文集,Vol36,No.1,2014
- 9) 徳田弘:コンクリートの熱的特性,コンクリート工学,22巻3号,pp29-37,1984
- 10) 黒岩秀介ら:設計基準強度130N/mm²の超高強度コンクリートの適用,体制建設技術センター報,第37号,2004
- 11) 吉田夏樹ら:火災による熱を受けたコンクリートの科学的変化に関する研究,建築技術の総合情報雑誌, Vol44 No.1
- 12) 柳澤朱音ら: CaSiO_3 ガラス構造に対する冷却速度の影響,日本鉱物科学会年会講演要旨集