# 研究報告

令和 7 年 4 月 10 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理事長 岸 利治 殿

研究代表者

所 属 :北海道大学

氏 名 :橋本勝文

研究課題名:ファイバーレーザーの高繰返しパルス照射によるコンクリート中の弾性波励起機構

助成金額:100万円

研究実施期間:自 令和6年4月1日 ~ 至 令和7年3月31日

## 研究報告 令和6年度 土木分野 No.5

ファイバーレーザーの高繰返しパルス照射によるコンクリート中の弾 性波励起機構

Elastic Wave Excitation Mechanism in Concrete by means of High Repetition Rate Pulsed Fiber Laser

北海道大学大学院 准教授 橋本勝文

### (研究計画ないし研究手法の概略)

#### 1. はじめに

我が国において高齢化やそれに伴う人口減少によるインフラ整備,メンテナンスの担い手 不足が問題となっている.また,激甚化する災害や維持管理の問題を解決するために省人化・ 省力化を目的とした非接触あるいは遠隔での測定により、効率的で定量的なモニタリング・ 検査技術の確立をすることが強く求められている<sup>1)</sup>. コンクリート部材の内部欠陥を定量的 に検出する非破壊検査手法の一つに衝撃弾性波法がある.この手法は,対象とする部材表面 に振動センサを設置した上で、鋼球により弾性波を部材表面から入力し、得られた受信波を 周波数解析して算出した周波数スペクトルにおいて、部材表面と内部欠陥との間で生じる縦 波の多重反射による共振周波数に着目することにより、内部欠陥を検出するものである<sup>2)</sup>. 本研究では、振動の励起をビーム品質が高く繰り返し周波数を変数にすることができ、かつ レーザーの中では小型で消費電力が低いファイバーレーザー加振器で,振動の受信をレーザ ードップラー振動計で行うことによって,非接触による時間的コストを減らし効率的な内部 ひび割れの検査技術の提案を目的としている.衝撃弾性波法の高度(高速・非接触(遠隔)) 化, 安価で小型のファイバーレーザーによる超音波帯域の高周波パルスレーザーの繰返し照 射による弾性波励起手法を構築する.特に、エネルギー密度(フルエンス)に応じたアブレ ーションと断熱的な温度変化と弾性変形を伴う熱弾性効果について、コンクリートへのパル スレーザーの高繰返し照射の周波数およびパルス幅に応じた弾性波励起機構を解明する. さ らに、コンクリート表面にレーザー照射を行う局所領域における弾性波の励起と検出を模擬す るためのセメントペーストの薄片サンプルおよび弾性波の伝搬と減衰を確認するための供試体 を作製する.このとき,提案するファイバーレーザーによる弾性波(超音波)の遠隔励起技術お よび非接触検出技術がコンクリートの非破壊検査技術とするための実践的な適用範囲を明確に する.特に,模擬欠陥の観察結果と弾性波の励起機構に基づいて,コンクリート内部のひび割れ 検出に対する妥当性を示す.

#### 2. 実験概要

2.1 セメント硬化体に対する弾性波励起機構

縦 20mm,横 20mm,厚さ約 5 mm の薄片セメント硬化体の表面にファイバーレーザーによ る連続パルス波を照射した.また,レーザードップラー振動計により励起された弾性波を検 出すると同時に,赤外線カメラにより照射面の表面温度を測定した.パルスレーザーの照射 条件はパルス幅とレーザースポット径をパラメータとした.繰返し周波数は 4cm~20cm の ひび割れ深さに対応する 10kHz~50kHz に設定した.なお,レーザードップラー振動計を作 動させてから,レーザーを 3 秒間照射した.周波数解析においては 3 秒間の波形のうち 0.5 秒間隔の各時間領域の検出波形に対して FFT 解析を行った.秒間の波形を区切ることで、レ ーザー照射の時間領域における弾性波励起挙動を評価した.また、レーザー照射後の供試体 には照射痕が残るためマイクロスコープで照射痕の形状を観察した.

#### 2.2 コンクリート中のひび割れ深さの同定

高分子可溶性フィルムを敷設して内部に模擬ひび割れを導入した高さ 10cm,幅 10cm,長 さ 40cmの供試体を実験に使用した.内部ひび割れ深さを 5cm と 7cm,9cm の 3 パターン用 意し,ひび割れ面に対して垂直にファイバーレーザーとレーザードップラー振動計を照射し た.コンクリートの水セメント比は 0.5 とした.ひび割れを再現した箇所で得られた X 線 CT 撮影の画像から,実際のひび割れの深さは想定深さが 5cm の場合に 4.03~6.43cm,7cm の場 合に 6.53~8.03cm,9cm の場合に 8.55~9.19m となっていることを確認した.図-1 に上述の X 線 CT 画像を示す.



図-1 供試体内部の模擬ひび割れの様子(左から深さ 5cm, 7cm, 9cm)

### (実験調査によって得られた新しい知見)

#### 3. 実験結果および結論

3.1 セメント硬化体に対する弾性波励起機構

図-2 に周波数と振幅の関係を示す.スポット径 1mm より 3mm の方が振幅は大きく,効率 よく弾性波を励起できることがわかる. また, スポット径 3mm の中でも 33kHz より低い周 波数領域ではパルス幅 220ns の振幅が大きく、41kHz より大きい周波数領域ではパルス幅 100nsの振幅が大きい.周波数に対応するひび割れ深さは、周波数が高ければ浅いひび割れ に対応し、周波数が小さければ深いひび割れに対応する. すなわち、検出したいひび割れ深 さが深ければ 220ns, 浅ければ 100ns とした場合が, より大きな振幅を持った弾性波を励起 できるパルス照射条件であると言える.図-3 に 3 秒後の温度を 100%とした場合の各時間で の上昇率を 0.1 秒ごとに示す.スポット径 1mm で弾性波を励起する場合にはレーザー照射 直後に急激な温度上昇を示し時間の経過とともに温度上昇は緩やかになるが、スポット径 3mm の場合ではレーザー照射直後から 3 秒後まで継続的に緩やかな上昇を示している.照 射痕の形状について、マイクロスコープを用いて深度測定した結果を図-4に示す.スポット 径 1mm では深さ 1mm ほどの照射痕が確認できるが, 3mm において深い照射痕は確認でき ない.以上のことから、スポット径により弾性波を励起するメカニズムが異なり、スポット 径 1mm ではアブレーション, 3mm では熱弾性効果によって弾性波が励起されていると考え られる.また,図-5に時間領域ごとの振幅の変化を表す.すべての照射条件で時間の経過と ともに振幅が減少している.また,スポット径 1mm とした場合のアブレーションによる励 起よりも, スポット径 3mm とした場合の熱弾性効果による励起のほうが時間変化による弾 性波の振幅の減衰が少ないことがわかる.





図-5 スポット径と励起振幅の時間変化

3.2 コンクリート中のひび割れ深さの同定

上述の結果から、スポット径 3mm ではファイバーレーザーの弾性波励起メカニズムとし て、熱弾性効果が支配的である一方、スポット径 1mm はレーザーアブレーションが支配的 となることが理解できた.熱弾性効果は物体表面が熱収縮と膨張を繰り返すことによって内 部に弾性波を発生させるため、主に表面方向に弾性波を励起させる.レーザーアブレーショ ンはプラズマの発生とともに弾性波が発生するため、主に深さ方向に弾性波を励起させる. セメントペーストとコンクリートでは骨材の有無による表面の硬さの違いにより熱収縮に 影響を及ぼし、その結果、弾性波励起の周波数特性が異なることが示唆される.薄片セメン トペーストを用いた実験では、パルス幅を 100ns、スポット径を 3mm としたレーザー照射条 件が最も効率が良く弾性波を励起できていたことから、上記の条件で行った実験により得ら れた結果に基づいて、衝撃弾性波法によるひび割れ深さの検出を行った。一例として、表面 から 7cm の深さに模擬ひび割れを導入した供試体から得られた結果を図-6 に示す.これよ り、7cm±2cm の範囲でひび割れ深さを同定できていることが確認できる.

3.3 まとめと展望

コンクリート内部のひび割れを検査することを目的とした衝撃弾性波法について,弾性波 励起手法をファイバーレーザーによる非接触技術とする適用可能性について,スポット径や パルス幅といったレーザー照射条件により励起される弾性波の特性を評価した.本研究の範 囲内では,励起周波数(パルス波の繰返し周波数)と励起振幅の関係について,レーザー照 射時間内において一義的な取扱いを行ったが,実際には図-7に示すように時間領域における 励起振幅の周波数特性の変化を検出信号に対する wavelet 解析を行うことで,更に詳細な弾 性波の励起機構を明らかとする必要がある.また,作製した供試体に対してレーザー照射を 行った結果,想定の深さとは異なる深さで共振現象が得られることで,供試体厚さに対応す る周波数と供試体厚さを正確に評価出来ていない場合があることがわかった.効率よく励起 弾性波に対して振幅あるいはエネルギーを得るレーザー照射条件について,弾性波励起の周 波数特性を三軸加速度センサで観測することで,図-8 および図-9 に示すような面内あるい は面外方向の弾性波伝搬挙動を精査する必要がある.

7.156e-5

5.725e-5

4.294e-5

2.862e-5

1.431e-5

0.000

4.000

4.013

時間(sec)

4 0 2 6

4.039

4.052

4.066



図-6 ひび割れ深さの同定結果







2.000e+4

0.000

7 156e-5

6.798e-5 6.440e-5 6.083e-5

5.725e-5 5.367e-5

5.009e-5

4.651e-5 4.294e-5

3.936e-5 3.578e-5

3 220e-5

2.862e-5 2.505e-5

2.147e-5

1.789e-5

1.431e-5

1.073e-5

7.156e-6

3.578e-6

0.000

1.000e+5

8.000e+4

周波数(Hz)

6.000e+4

4.000e+4



図-9 レーザー照射面外(深さ方向)の振幅

参考文献

- 国土交通省:時代の要請にこたえた国土交通行政の展開,国土交通白書 2022, pp.118, 2022
- 内田慎哉,久保元樹,岩野聡史,山下健太郎:衝撃弾性波法によるコンクリート内部欠陥の検出に関する理論的検討,コンクリート工学年次論文集,Vol.38,No.1,pp.2121-2126,2016

### (発表論文)

- 1) 今井慧史,橋本勝文,今川遼太郎,杉山隆文:セメント硬化体表面におけるファイバー レーザーによる弾性波励起メカニズム,土木学会北海道支部論文報告集, E-4-03, 2025
- 2) 今井慧史,橋本勝文,杉山隆文:ファイバーレーザーを用いたセメント硬化体に対する 弾性波励起,土木学会年次学術講演会講演概要集,2025(発表予定)