

コンクリートを伝搬するレーザー励起弾性波の CNN を用いた P 波初動検出

京都大学大学院 正会員 ○橋本 勝文
京都大学大学院 正会員 塩谷 智基

1. 目的

コンクリート構造物の非破壊検査においては、レーザー技術を用いた非接触技術の適用と検査技術の開発が注目されている¹⁾。これまで、コンクリート表面へレーザーパルスを照射することで励起された弾性波の P 波初動の到達時間を AE センサにより検出することで、コンクリート中の弾性波の伝搬挙動（速度）に関する評価を行ってきた²⁾。特に、対象とするコンクリート内部の欠陥をトモグラフィ手法により弾性波速度分布を得ることで可視化してきた²⁾。一方で、P 波到達時間の読取り誤差および波形初動部の明瞭度がレーザーフルエンス（単位面積当たりのエネルギー）の影響を受けると同時に、フルエンスの増大とともにコンクリート表面の損傷が大きくなることが推察される。本研究では、コンクリート表面に生じる損傷の影響を低減するためにフルエンスを低下した場合に得られる低 S/N 比の信号に対する P 波初動検出精度の高い手法として、畳み込みニューラルネットワーク（CNN）による P 波の検出と初動の到達時間の決定方法³⁾について AIC（赤池情報量基準）に基づく上記の決定方法との精度の違いを検討した。

2. 概要

2. 1 欠陥模擬供試体

図-1 にコンクリート供試体の外観およびレーザー照射実験の様子を示す。模擬的な欠陥として、厚さ 5 mm の発泡スチロールをレーザー照射面から 10 mm となるように埋設している。供試体寸法は、300 mm×300 mm×100 mm である。図中に示すように、レーザーパルス照射とは反対面に 60 kHz 共振型の AE センサを設置し、供試体断面内の模擬欠陥部分を挟むようにレーザー照射箇所を設定した。図中には、想定される弾性波の伝搬経路（波線）を示しており、レーザー励起され AE センサで検出される P 波の初動は模擬欠陥部を避けて迂回していることを想定している。

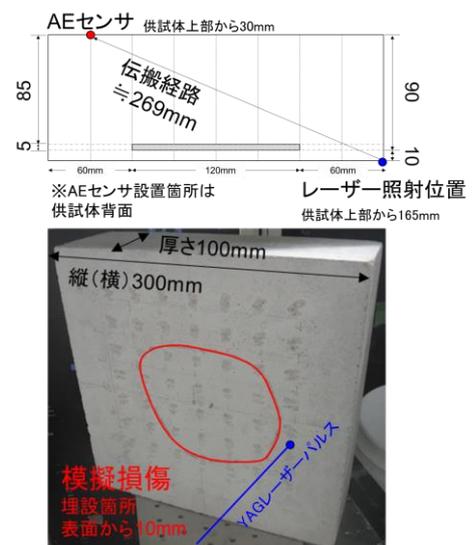


図-1 供試体およびレーザー照射の概要

2. 2 レーザーパルス照射および弾性波（P 波）初動検出

コンクリート表面におけるレーザーフルエンスは、出力エネルギーを最小で 0.11 mJ、最大で 285 mJ とし、スポット径を $2.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2 \sim 0.80 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ の間で変化させることで、 $0.11 \text{ J/cm}^2 \sim 111 \text{ J/cm}^2$ とした。レーザーパルスの照射は YAG レーザーを用いて、波長を 1064 nm、パルス幅を 6 nsec とした。

一般には、P 波の到達を検出して到達時間を読取る手法として AIC (Akaike Information Criterion, 赤池情報量基準) を利用した方法が提案されており、波形データの有意な到達時間の判定に有効であるとされている。一方で、低 S/N 比の信号検出において読み取り時間の誤差が大きくなる場合には、波形データのスタッキング処理により S/N 比を向上させる手法が採用される。

2. 3 畳み込みニューラルネットワークを用いた初動検出

上述の AE 計測条件はサンプリングレートを 10 MHz とし、10k サンプルを一つの波形（プレトリガ：2560 サンプル）として記録した。本研究で作成した畳み込みニューラルネットワークモデルは、同じ入力層と出力層

キーワード コンクリート, 非破壊試験, YAG レーザー, P 波, 畳み込みニューラルネットワーク (CNN)

連絡先 〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C3-b4S15 T E L 075-383-3496

の間に 5 層の畳み込み層を持つオートエンコーダ（自己符号化機）である。入力／出力層のユニットサイズは 1 次元の波形データ 1×100 サンプル（10 μsec ）とし、波形のプレトリガ分を正常（学習）データとして異常度を入力と再現出力との平均二乗誤差に基づいて算出した。

3. 結果

図-2 にレーザーフルエンスと AIC による P 波到達時間の読み取り誤差の関係スタッキング処理回数とともに示す。ここで、P 波到達時間の誤差は照射エネルギーを最大（285 mJ）とした場合に得られる波形を AIC により抽出した到達時間との差を表している。これより、コンクリート表面におけるレーザーフルエンスの増加とともに読み取り誤差は減少している。一方で、5.0 J/cm^2 以下のフルエンスではコンクリート表層部への物理的な損傷の程度は小さいことに加え、スタッキング処理を最大 20 回行うことで S/N 比は数倍程度向上することがわかっている。しかしながら、数 10 μsec ～100 μsec 程度の到達時間の読み取り誤差が生じていることが図-2 から確認できる。図-3 に畳み込みニューラルネットワーク（CNN）を用いた初動検出の結果を示す。照射エネルギーを最大（285 mJ=111.3 J/cm^2 ）とした場合の AIC で得られた P 波到達時間は 48.5 μsec であり、5 μsec 程度の差で初動の到達は本手法により精確に検出できている。さらに、本手法を用いることでフルエンスが低い（2.0 J/cm^2 ）場合でも十分な回数（ $n=20$ ）波形スタッキング処理を行うことで 20 μsec 以下の検出誤差まで精度が向上できることがわかった。

謝辞

本研究における実験の実施およびデータの収集において、量子科学技術研究開発機構の錦野将元氏、近畿大学生物理工学部医用工学科の三上勝大先生に多大なるご協力を賜りました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 長谷川登ほか：レーザーを利用したコンクリートの健全性検査の高速化技術の開発，検査技術，pp. 57-61, 2017.
- 2) Tomoki Shiotani, et al: Application of Non-Contact Laser Impact with AE Analysis and Tomography Technique for Damage Identification in Concrete, Journal of Acoustic Emission, Vol.36, pp.124-129, 2019.
- 3) Huang Linqi, et al: Micro-seismic event detection and location in underground mines by using Convolutional Neural Networks (CNN) and deep learning, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.81, pp.265-276, 2018.

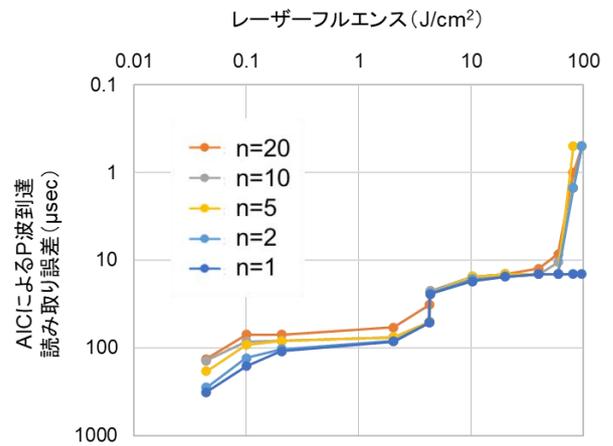


図-2 レーザーフルエンスと P 波到達時間の読み取り誤差

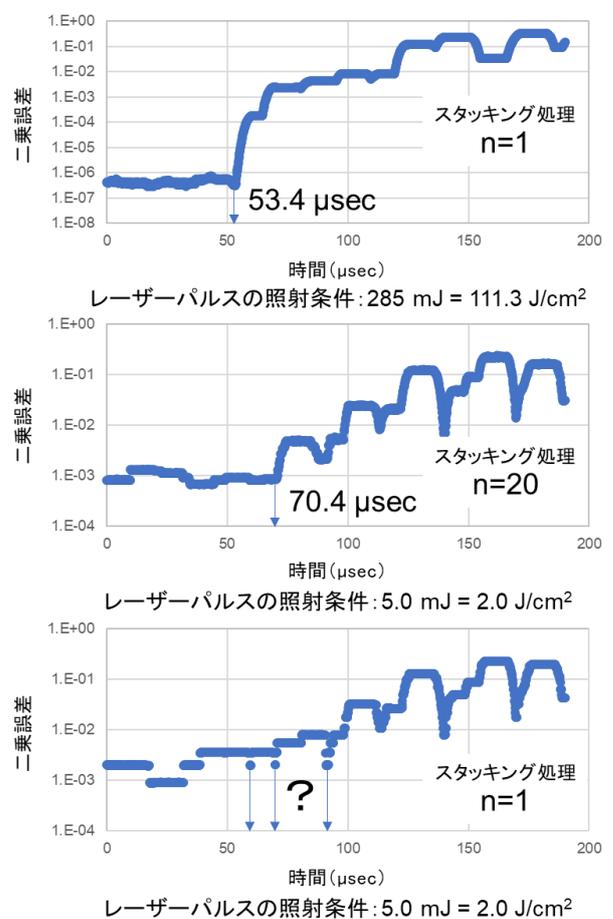


図-3 CNN を用いた初動到達検出の結果