

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 6 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20H02234

研究課題名(和文) 深層学習した打音検査によるコンクリート剥落リスクの高精度評価

研究課題名(英文) High Accuracy Evaluation of Concrete Delamination Risk by Deep Learning of Hammering Sounds

研究代表者

園田 佳巨 (Sonoda, Yoshimi)

九州大学・工学研究院・教授

研究者番号：40304737

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,080,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人工欠陥を有する供試体に打音試験を行い、音圧-時間データに時間周波数解析を行って得たスペクトログラムを用いてCAEとCNNの2つの手法で診断を行った。得られた知見を以下に示す。1)欠陥の有無は、CAEとCNNのどちらも100%近い高精度で把握できる。2)CAEの再構成ロス値と損傷度(欠陥範囲)には相関性が認められ、損傷度の予測が可能と考えられるが、欠陥位置が深くなるほど不鮮明となり精度低下は免れない。3)CNNはCAEより損傷度(範囲・深さ)の診断精度に優れるが、学習データの質(偏り)・範囲が精度に大きな影響を与えるため、予め学習データの適切性を吟味する必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究ではCAEとCNNの2種類の手法で打音の時間周波数スペクトラムを用いた深層学習を行い、両者の診断精度について比較検討を行った。その結果を要約すると以下ようになる。

1)CAE、CNNどちらの手法も高精度でコンクリート内部の浮き・剥離の有無を把握できることが確認できた。2)CAEは欠陥の有無だけでなく損傷の程度も評価可能ではあるが、欠陥が深くなるにつれて精度が低下するだけでなく、周囲騒音の影響も受け易いことが認められた。3)CNNは適切な学習データを収集・学習させることで、CAEより精度が高い損傷程度の評価が可能であるだけでなく、周囲騒音の影響も受けにくいことが認められた。

研究成果の概要(英文)：In this study, a hammering sound test is performed on concrete specimens with artificial defects and recorded. The followings are found.1)The presence or absence of defects can be ascertained with nearly 100% accuracy for both Convolutional autoencoder and Convolutional neural network that learned the timefrequency analysis result of the tapping sound data, 2)It is possible to detect minor defects that were difficult to detect with indexes such as the Amplitude ratio. 3)There is a correlation between the reconstruction loss value of CAE and the degree of damage, and it is possible to predict the degree of damage by CAE, however deeper the defect position, the more blurry it becomes, and accuracy deterioration is inevitable. 4)CNN is superior to CAE in diagnosing the degree of damage (range and depth), but since the quality (bias) and range of the training data have a great influence on their accuracy, it is necessary to examine the appropriateness of the training data in advance.

研究分野：Structural Engineering

キーワード：打音検査 コンクリート構造物 劣化損傷(浮き・剥離) 深層学習 畳み込みオートエンコーダー 畳み込みニューラルネットワーク

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

劣化損傷したコンクリート構造物の殆どが、内部に存在するひび割れや浮き・剥離などによって、部材表面の一部が剥落する可能性を有しており、直下を通行する車両や歩行者などに危害が及び第三者被害の危険性が問題となっている。そのため、橋梁などのインフラ構造物には目視を中心とする定期点検が課されており、打音検査も簡易かつ有用な手法として幅広く活用されている。

これまで一般的に打音検査は、熟練した検査者の感覚でコンクリート内部の浮き・剥離の存在を把握することを前提に実施されてきたが、検査者の診断技術の継承性の問題や浮き・剥離等の欠陥の初期段階の発見が困難であることなどから、人間の感覚に依らない客観的な打音の評価手法の確立が望まれてきた。

2. 研究の目的

本研究は、上記の背景をもとに「客観的な打音の評価手法の構築」を目的とした研究を行うものである。特に、打音をデジタル的に計測した音圧-時間曲線データを用いて、時間周波数解析を施した結果を入力に用いて、近年著しい技術的な進歩が示されている深層学習（ディープラーニング）を行い、新たな打音データに対して打点箇所コンクリート内部の健全度を客観的に評価できる手法の開発を行う。

3. 研究の方法

本研究では、人工的な欠陥を有するコンクリート版供試体（所定の範囲・深さに打ち継ぎ目を設け、底面にクリアファイルを敷いた上からモルタルを打設することで剥離面を模擬、打ち継ぎ面の範囲や深さはパラメータとした）を製作し、各供試体別に教師データとしては十分な 1000 回以上の打音データを収録した。

その後、基本的には以下の手順で深層学習用の入力データを作成した。

- (1) 計測された打音データ（音圧-時間曲線）に短時間フーリエ変換を施し、打音の時間-周波数スペクトログラムを求める。
- (2) 1) で求めた打音の時間-周波数スペクトログラム図を画像データとして、画像識別能力に優れた診断手法を用いた打音の評価を行う。本研究では、異常診断に広く用いられる CAE（畳み込みオートエンコーダー）と画像識別の代表的な手法である CNN（畳み込みニューラルネットワーク）の 2 つの手法を用いた打音の評価を行った。
- (3) CAE と CNN の 2 種類の手法で、欠陥状況の相違（範囲や深さ）の識別能力について比較・検討を試みた。
- (4) CAE を用いて、劣化損傷した既設のコンクリート構造物を対象とした健全度診断能力の評価を行った。

4. 研究成果

本研究で得られた成果に関して 2 つの英文論文に執筆した。

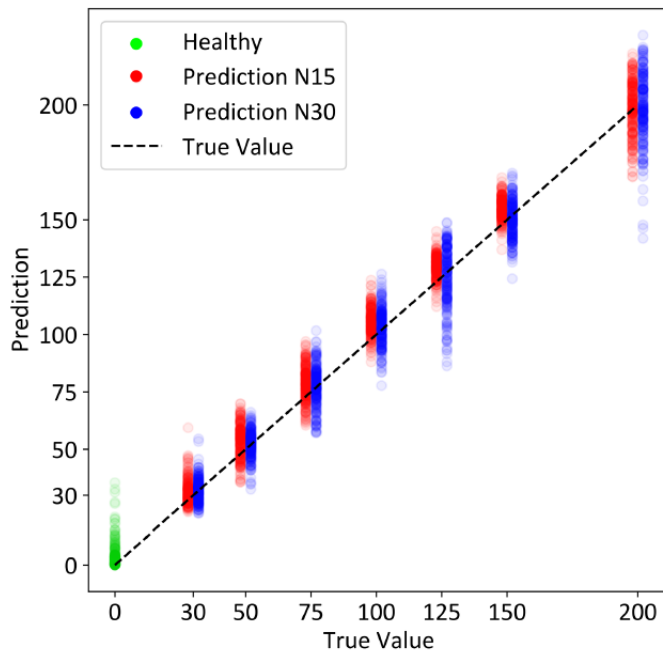
- (1) 打音の代表的な物理的特徴量である振幅比（音圧と打撃力の比）と比較した CAE の診断能力や実橋梁における CAE の診断精度について、以下の論文にて執筆した。
Structural Health Monitoring, DOI 10.1177/14759217221122296
同論文の結論部のみを以下に記載する。

- 1) 健全箇所計測された打音データを短時間フーリエ変換し、得られたスペクトル図の画像をオートエンコーダに学習させることで、浮き・剥離箇所を高精度で検出可能であることが確認できた。
- 2) 打音データの時間-周波数解析結果を学習した CAE モデルを用いることで、振幅比やスペクトル重心などの従来の指標では検出が難しかった軽微な欠陥の検出まで可能になることが認められた。
- 3) オートエンコーダーを用いて種々の欠陥条件を有する供試体を診断した結果、欠陥条件によって検出精度が異なることがわかった。具体的には、欠陥面積が小さくなるにつれて検出精度が低下するが、欠陥の中心に近い位置で打音を計測することで精度の低下を抑えることができることが明らかとなった。
- 5) 老朽化した既設橋梁を対象に実施した検証では、CAE モデルを用いてほぼ 100% の不良箇所を検出することができ、本手法が既設橋梁の調査において非常に高い有効性を持つことが確認されました。

- (2) CAE と CNN のそれぞれの診断手法の特長に関する考察と種々の欠陥状態（範囲・深さ）に対する診断能力の比較結果について執筆した。現在、投稿原稿は海外論文に投稿・査読中のため、詳細については記載できないが、当該論文の概要と CNN による評価の一例を以下に示す。

従来、老朽化したコンクリート部材内部の浮き・剥離箇所を打音法を用いて調べる場合の

診断は検査員の能力や経験に依存していた。そのため、人間の主観的な判断によらない診断ツールの構築が求められているが、近年の深層学習・AIなどの飛躍的な能力向上により、検査員の能力を上回る診断法の開発も期待される状況になってきた。本研究では、内部に種々の異なる面積・深さに人工的な欠陥（フィルムで底面を絶縁した打継目）を有するコンクリートスラブ供試体を製作し、打音データを用いて個々の欠陥条件を正確に把握可能な打音評価方法について検討を行った。具体的には、打音データに時間周波数解析を行い、得られたスペクトログラムを用いて畳み込みオートエンコーダ（CAE）と畳み込みニューラルネットワーク（CNN）の2種類の異なる手法を用いて深層学習させた後に、これら2つの方法の欠陥条件の診断精度を比較・検証した。その結果、CAEとCNNはどちらも健全箇所と欠陥箇所の区別に関してはほぼ100%に近い優れた識別性能を有することが認められた。また、打音検査時に周囲環境に存在するノイズ（騒音）は、CAEの性能を低下させるのに対し、CNNはその影響をあまり受けないことが確認できた。さらに、欠陥の深さが深くなるほどCAEの検査精度が明確に低下すること、コンクリート内部の埋め込まれた鉄筋の影響も受け易いのに対して、CNNによる検査精度は性能低下の割合が小さいことなどが認められた。



CNNによる欠陥深さ(15mm、30mm)と診断精度の関係

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Sonoda Yoshimi, Lu Chi, Yin Yifan	4. 巻 17221122296
2. 論文標題 Basic research on usefulness of convolutional autoencoders in detecting defects in concrete using hammering sound	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Structural Health Monitoring	6. 最初と最後の頁 17221122315
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1177/14759217221122296	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 金子 裕輔, 園田 佳巨
2. 発表標題 打音検査によるコンクリートの浮き剥離危険度の定量的評価に関する基礎的研究
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yin Yifan, 園田 佳巨, 玉井 宏樹
2. 発表標題 A FUNDAMENTAL STUDY ON RISK ASSESSMENT BY USING HAMMERING SOUND TEST ON CONCRETE STRUCTURE UNDER REPEATED IMPACT
3. 学会等名 令和3年度土木学会全国大会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	玉井 宏樹 (Tamai Horoki) (20509632)	九州大学・工学研究院・准教授 (17102)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	別府 万寿博 (Beppu Masuhiro) (90532797)	防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・システム工学群・教授 (82723)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関