

時間周波数分析とニューラルネットを活用した影響範囲推定による打音法の効率化

東京工業大学 正会員 ○竹谷 晃一, 非会員 范 書舒
正会員 佐々木 栄一, 正会員 伊藤 裕一

1. 背景

トンネルや橋梁などコンクリート構造物の空隙・剥離の非破壊検査の一つに打音検査があり、定量的評価やロボットによる自動化を目的とした研究が行われてきた。その多くが打撃時の振動応答をマイクや振動センサ等で観測・分析することで打撃点の欠陥の有無を推定しており、AIの活用も近年注目されている。検査の定量化や自動化が進む一方で、検査員による従来型の検査を代替または補助するには検査時間やコストに課題がある。本研究は打撃点の健全・欠陥の検出に加えてその検出結果が影響する範囲を推定することで打音検査の定量化と効率化を目指し、マイクによる非接触計測および時間周波数特徴量に着目したニューラルネットの活用を試みた。

2. 対象試験体および実験概要

実験対象であるコンクリート壁の試験体には円盤状の発泡スチロール(厚さ25mm)を埋設した人工的な空隙が埋設されており、深さや直径がそれぞれ異なる。三脚に固定した騒音計(LION NA-18A)を用いて打音を計測した。将来的にはウェアラブル化も検討している。データ収集のトリガおよび衝撃荷重を計測するためにインパルスハンマ(PCB-086C03)を用いた。試験体と騒音計の配置の概略を図-1に示す。例えば試験体上の座標d-2(d行2列)には直径 $\phi 200\text{mm}$ の空隙が深さ80mmの位置に埋設されている。打撃点は中心をゼロとして水平・垂直の正負4方向に25mm間隔で行い、各位置で5回ずつ打撃を行った。サンプリングは20kHzとした。例として座標d-2中心の空隙がある箇所(欠陥)と周囲の空隙が無い箇所(健全)の衝撃力と音圧の時刻歴波形を図-2に示す。

3. 特徴量の算出と選定

特徴量の算出方法は時間領域と周波数領域に大きく分けられる。例えば時間領域の特徴量である最大音圧は衝撃力の強さや打撃位置からの距離に応じた減衰の影響を受けやすい。そこで音圧データの事前処理としてドリフト除去と衝撃力の力積による標準化に加えて、衝撃力と音圧のピーク時刻差から求めた距離によって補正を行った。データ処理はMATLAB2020bで行い、時間領域7個、周波数領域43個、合計55個の特徴量を求めた。

周波数領域の特徴量として一般的に用いられるものに

卓越周波数があるが、打音データは複数の卓越周波数を持つためその評価方法が重要となる。本研究では周波数スペクトルを500Hz毎の領域に分割し、それぞれの範囲における複数のピーク振動数をピーク高さで重み付き平均した「ピーク平均周波数」を特徴量とした。また、領域毎のスペクトルの重心を用いた「面積平均周波数」も卓越振動数に相当する特徴量として扱っている。

カイ二乗検定および Minimum Redundancy Maximum Relevance (MRMR)など6つの特徴選択アルゴリズムを用

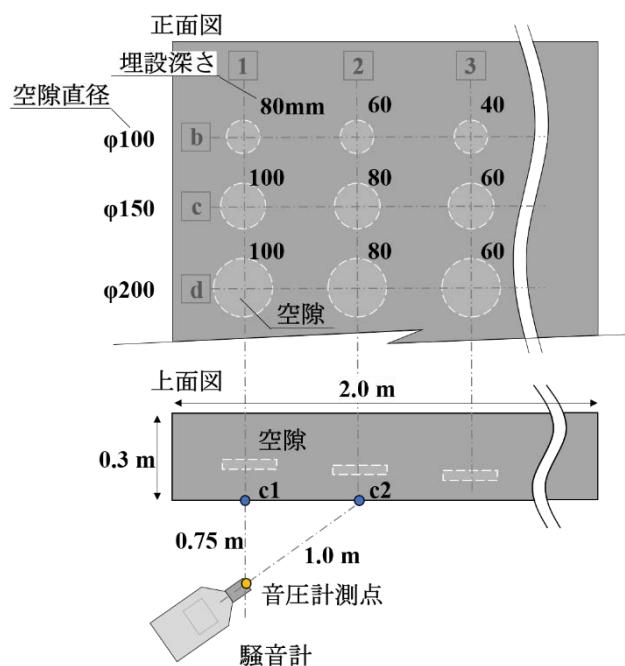


図-1 空隙を埋設した試験体の概略と騒音計の配置

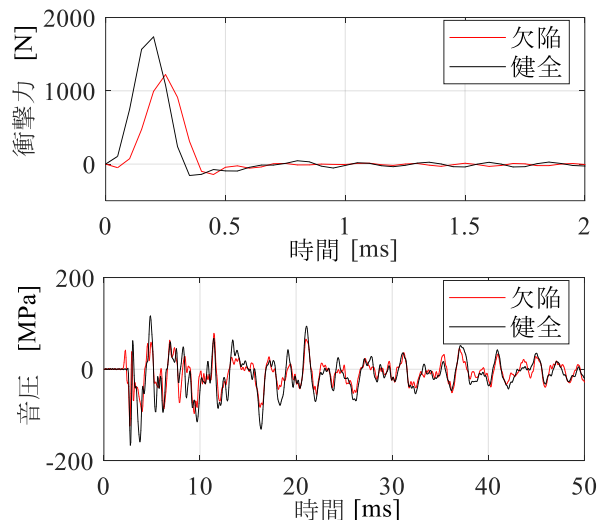


図-2 座標d-2周辺における欠陥・健全データの一例

キーワード 打音法, 時間周波数分析, ニューラルネット, 音圧, 影響範囲, 欠陥検出

連絡先 〒152-8552 東京都目黒区大岡山 2-12-1 東京工業大学 TEL : 03-5734-3426 E-mail : takeya.k.aa@titech.ac.jp

いて分類用特徴量の重要度スコアを計算した。出力されるスコアを手法毎に標準化したのち、合計スコアを用いて特徴量のランク付けを行った。その結果、最大音圧や波形面積のほか、1kHz 以下および3~4kHz 帯の卓越周波数やスペクトル面積が重要である可能性が示された。

4. ネットワークの構築および学習方法

ニューラルネット (NN) は欠陥検出用 (NN1, 図-3) と影響範囲推定用 (NN2, 図-4) の2段階に分けている。2段階としている理由は、NN1 のソフトマックス層の出力値をNN2 の入力とする事で過学習を抑えて妥当な推定精度が得られたためである。また、精度が良好な NN1 の欠陥検出結果を用いて NN2 の影響範囲推定の一部を補正することで NN2 の精度改善を図っている。図-3 に示す欠陥検出用の NN1 は、音圧データの短時間フーリエ変換 (STFT) による時間周波数行列と、特徴量ベクトルの2種類を入力としている。時間周波数行列と特徴量ベクトルは3層の畳み込み層と全結合層によってそれぞれ処理した後に連結し、全結合層とソフトマックス層を介して分類結果を出力する。図-4 に示す影響範囲推定用の NN2 は、特徴量ベクトルと NN1 のソフトマックス層の出力値を入力として、4層の全結合層で構成される。

9種類の空隙(図-1)のうち、検証対象とする空隙以外のデータで学習を行った。例えば座標 d-2 の空隙(φ200mm, 深さ80mm)が検証対象の場合、学習に用いるデータは940個(欠陥340, 健全600)である。特徴量ベクトルの大きさは NN1 が20, NN2 が30 に設定し、それぞれ求めた特徴量の重要度スコアが大きい順に選定した。

5. 推定結果と考察

学習したネットワークを用いて健全・欠陥の検出およびその影響範囲を推定した。例として座標 d-2 周辺における推定結果を図-5 に示す。25mm 間隔で規則的に打撃したすべての点について健全・欠陥の検出とその影響範囲を色と大きさで可視化している。教師データの制約と打撃力を考慮して、影響範囲は欠陥・健全共に直径0, 50, 100mm 合計5クラスの離散分類とした。影響範囲が100mm 以上と推定されたものは100mm のクラスに統合される。影響範囲の推定によって打撃点周辺を定量的に判定可能なため、実際には影響範囲が少し重なる程度に打撃点の間隔を広げることで取りこぼしなく効率的に欠陥を検出できると考えられる。今後、強い打撃力や接触式の振動センサを用いて S/N 比を改善することで、検出精度や影響範囲の最大値を大きくできる可能性がある。

6. 謝辞

実験計測は佐藤工業株式会社歌川紀之様のサポートによって実施されました。ここに記して謝意を表します。

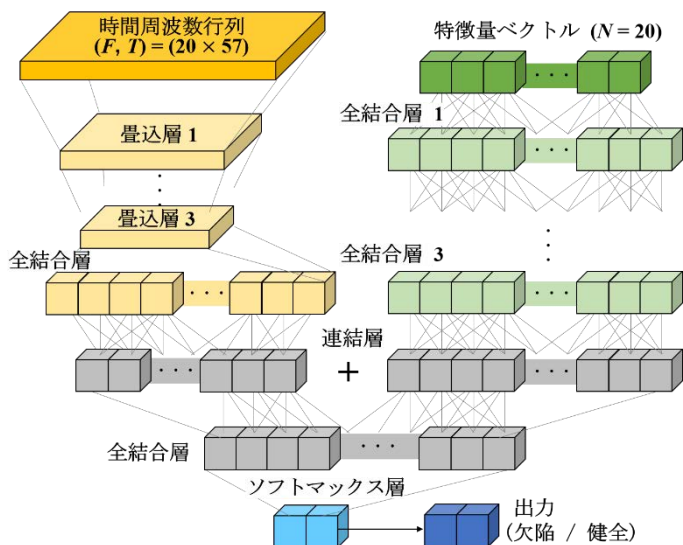


図-3 欠陥検出用ニューラルネットワーク (NN1)

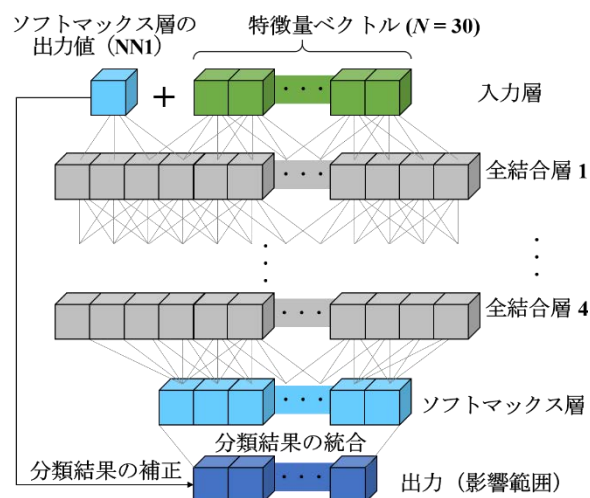


図-4 影響範囲推定用ニューラルネットワーク (NN2)

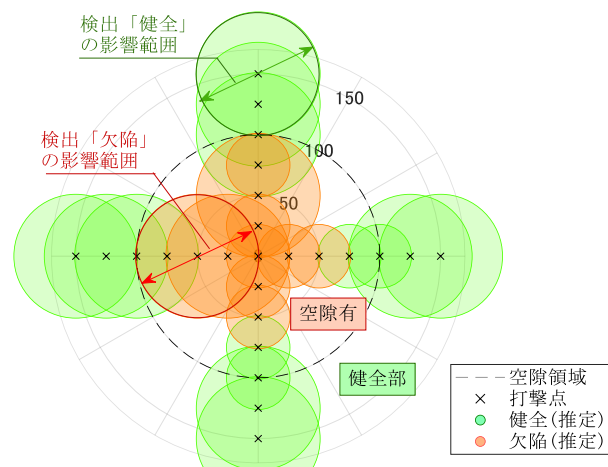


図-5 座標 d-2 の空隙(φ200, 深さ80mm)周辺の欠陥・健全の検出とその影響範囲の推定結果

参考文献

- ・磯ら, 鋼板で覆われた床版の打音法による非破壊検査に関する研究, 土木学会論文集 F4, Vol. 69, No. 2, pp. 140-150, 2013.
- ・鈴木ら, 弾性波法による健全部判定に基づくコンクリートおよび断面修復部内部の欠陥検出, コンクリート工学年次論文集, Vol. 40, No. 1, pp. 1617-1622, 2018.