

打音診断支援のための集団学習器を用いた打音特徴量の可視化

Feature Visualization of Hammering Sound Using Ensemble Algorithm

○ 藤井浩光（東京大学） 正 山下 淳（東京大学） 正 浅間 一（東京大学）

Hiromitsu FUJII, The University of Tokyo, fujii@robot.t.u-tokyo.ac.jp

Atsushi YAMASHITA, The University of Tokyo

Hajime ASAMA, The University of Tokyo

Aged deterioration of social infrastructures such as concrete tunnels has become a serious problem. For safety and security, reliable inspection of them is highly demanded. Hammering test is one of efficient inspection methods. However, the inspection task needs a lot of expert workers. In this paper, a methodology of constructing a hammering-inspection-based defect detector that can be applicable to concrete structures is proposed. Furthermore, the diagnosis process based on a new boosting algorithm is visualized for the purpose of supporting reliable inspection. The proposed defect detector was applied to signals obtained in a real inspection site of a concrete tunnel.

Key Words: Visualization for hammering test, Concrete tunnel inspection, Ensemble algorithm

1 緒言

コンクリートトンネルをはじめとする社会インフラの老朽化は深刻化しており、それらの点検作業を継続的かつ正確に行うことが極めて重要な課題となっている。非破壊検査法の一つである打音検査法（図1）は、実施の簡便性と高い点検精度を理由に、一時点検におけるスクリーニング技術として古くから実務で用いられている。打音による点検では、主に検査対象に対するハンマー音の違いを用いて変状を診断するが、正確な診断のためには作業に対する習熟が必要とされる。例えば、トンネル内を通過する風の音や車両の駆動音などの様々な環境ノイズが存在する中で打音の違いを聞き分けることは、極めて高度な作業である。高齢化により熟練した点検工の減少が始まっている中で、打音検査において正しい診断を支援するための技術が必要とされている。

打音検査を用いたコンクリート構造物の健全性評価指標に対して、数多くの研究がなされている [1, 2]。特に文献 [2] では打診時に発生する弾性波を用いているため、上述のような環境ノイズの影響に強いと考えられる。しかし、事前に検査対象に数メートル単位で受信装置を取り付ける必要があるために、打音検査が担うスクリーニング技術としての利便性は損なわれてしまう。

筆者らもこれまでに打音検査のための変状検出器を提案し、ハンマーと非接触のマイクロフォンのみを用いた手法で、コンクリート試験体中の変状位置の検出が可能であることを確認した [3]。本研究では、実トンネルに適用可能な変状検出器、および診断支援のための健全性評価指標を提案する。具体的には、まず実トンネル環境下での打音から変状を検出するための、打音特徴量の抽出手法を提案する。さらに、抽出した打音特徴量を用いて検査対象の健全性を示す評価値を導入し、その変化を打診中に提示することで打音検査における正しい診断を支援する手法を提案する。

2 打音診断支援のための提案手法

2.1 トンネル内環境を考慮した変状検出器

本研究では、短時間フーリエ変換を用いて打音の時間・周波数解析を行い、得られた周波数スペクトルから打音の特徴量を抽出する。検査対象の健全性は、あらかじめ測定した変状および健状サンプルを用いて周波数テンプレートを生成し、それらテンプレートとの類似性により評価する。

打診の強度やマイクの感度による影響を低減するため、スペクトルの分布形状の類似性を用いる。スペクトルの分布形状同士の類似度は、以下の周波数スペクトルに対する重み付き正規化相互



Fig.1 Hammering test and a inspection hammer

相関 $S(\mathbf{A}, \mathbf{u}, \mathbf{x})$ で評価する。

$$S(\mathbf{A}, \mathbf{u}, \mathbf{x}) = \frac{\sum_{k \in \mathcal{K}} u_k (A_k - \bar{A})(x_k - \bar{x})}{\sqrt{\sum_{k \in \mathcal{K}} u_k (A_k - \bar{A})^2} \sqrt{\sum_{k \in \mathcal{K}} u_k (x_k - \bar{x})^2}}, \quad (1)$$

ここで、 $\mathbf{A}$ は周波数テンプレートである。 $\mathcal{K}$ は周波数テンプレートの生成および評価信号 $\mathbf{x}$ との比較を行う周波数成分のインデックスからなる集合であり、 $\mathbf{u}$ は各成分の重みベクトルである。 $\bar{A}$ および $\bar{x}$ はそれぞれ周波数テンプレートおよび評価信号の平均値である。インデックス集合 $\mathcal{K}$ および成分重みベクトル $\mathbf{u}$ が打音特徴量となる。 $S(\mathbf{A}, \mathbf{u}, \mathbf{x})$ の値域は、通常の正規化相互相関係数と同様に $[-1, 1]$ である。

変状検出器は、事前に収集したラベル付き訓練サンプルを用いて生成する。その評価関数は以下の式 (2) で表される。

$$h(\mathbf{x}) = (S(\mathbf{A}, \mathbf{u}, \mathbf{x}) - S(\mathbf{A}, \mathbf{u}, \mathbf{x})) / \theta - 1, \quad (2)$$

ここで、 $\mathbf{A}$ および $\mathbf{A}$ はそれぞれ変状および健状サンプルからなる周波数テンプレートベクトルであり、同様に $\mathbf{u}$ および $\mathbf{u}$ はそれぞれ変状および健状サンプルに対する周波数成分の重みベクトルである。 θ は判定のための閾値である。評価値 $h(\mathbf{x})$ の符号関数 $\text{sign}[h(\mathbf{x})] \in \{-1, 1\}$ により、変状・健状の2値判別が可能である。すなわち $\text{sign}[h(\mathbf{x})] = 1$ の時に、対象は変状と判定される。

評価を行う周波数帯に環境ノイズなどの外的な要因で変化する成分が混入し検出低能が低下することを避けるために、変状検出に有効な特徴量を抽出する必要がある。特徴量抽出は $\mathcal{K}$, $\mathbf{u}$, および θ に対して探索的に行う。特徴量抽出の手順を図2に示す。まず環境における定常ノイズの影響を低減するために、スペクト

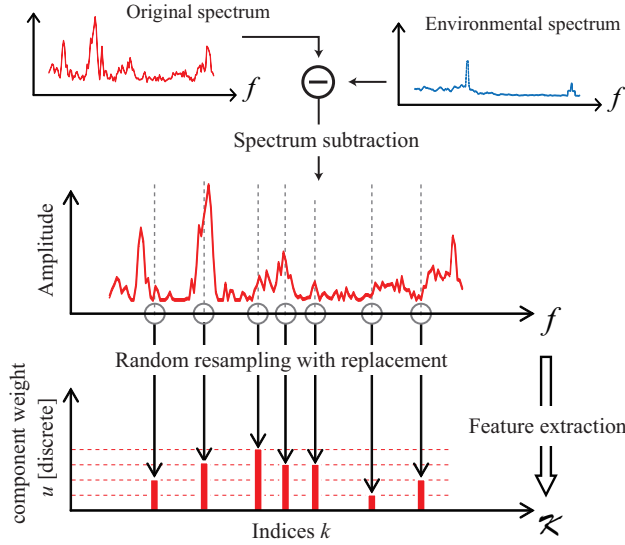


Fig.2 Feature extraction of proposed method

ル差分法を用いて背景ノイズのスペクトルを排除する。背景ノイズは打診直前の環境音を用いてテンプレート化する。次に、復元抽出法を用いて全周波数成分から重複を許した周波数成分の選択を行う。選択の重複回数を各周波数の重みとし、ランダムに用意した多数の候補を用いてラベル付き訓練サンプルを繰り返し評価する。訓練サンプルを最も正しく分類可能な識別器を採用することで、変状検出に有効な周波数成分とその重み付けを獲得できる。

2.2 集団学習による識別器の統合と打音特徴量の可視化

実トンネル内における計測される信号は極めて多様である。本研究では、評価を行う周波数帯が異なる複数の識別器を生成し、統合することで診断を行う。識別器の統合の枠組みには、アンサンブル学習の一つであるブースティングを用いる。

最終的な健全性の評価指標として、変状スコア $D(\mathbf{x})$ を以下のように定義する。

$$D(\mathbf{x}) = \sum_{n=1}^N \alpha_n \text{sign}[h_n(\mathbf{x})] / \sum_{n=1}^N \alpha_n. \quad (3)$$

ここで、 N は統合する識別器の個数であり、 α_n は訓練サンプルに対する誤り率から求まる n 番目の識別器の信頼度である。変状スコアは各識別器の信頼度を重みとした投票の結果であり、値域は $[-1, 1]$ に正規化されている。すなわち、 $D(\mathbf{x})$ の値が大きいほど変状サンプルと相関が高く、健全性が低いと判定されたことを示す。式 (2) と同様に $D(\mathbf{x})$ の正負で変状・健状が2値判別できる。

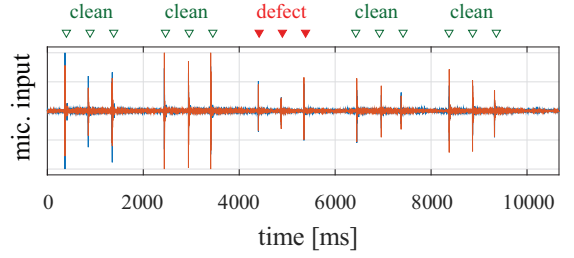
3 実トンネルにおける健全性の可視化実験

3.1 実トンネルにおける打音検査実験

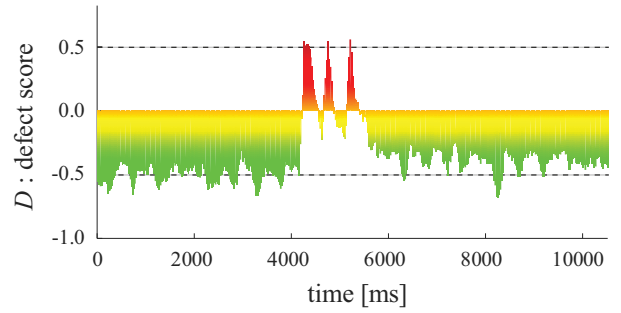
提案した変状検出器が実トンネルの健全性評価指標として適用可能であることを示すために、実トンネルにおいて打音の測定実験を行った。実験は、現在も供用中のトンネルを一時的に車両規制して行った。打診時の音響信号は、2 台のコンデンサマイクを用いて計測し、計測のサンプリングレートおよび解像度は 48kHz/24bit とした。解析および変状検出器の生成時の FFT には 1,024 サンプルのデータを用いた。識別器の生成には、変状部に対して 892 サンプル、健状部に対して 4,825 サンプルを用い、ブースティング学習においては 1,024 個の識別器を統合した。

3.2 打音特徴量の可視化結果

剥離変状を検出対象とした打音信号の例を図 3(a) に示す。横軸は時間であり、縦軸がマイク入力値である。図 3(a) の評価に用いた打音は、検出器を生成した訓練データとは異なる場所・時間



(a) An example of hammering sounds for detecting delamination.



(b) A visualization of hammering sound using defect score D .

Fig.3 An soundness visualization result of a part in a concrete tunnel

帯で測定した信号である。信号のピークからも確認できるように約 10 秒間の間に計 15 回打診し、2 か所の健状部、1 か所の変状部、2 か所の健状部の順にそれぞれ 3 回ずつ打診した。グラフ上部の緑色および赤色のマークは、それぞれ健状部および変状部の打音信号が立ち上がる瞬間を示す。

図 3(a) の打音信号に対して、提案手法の変状検出器が出力する変状スコア D の時系列変化を図 3(b) に示す。横軸は時間を示し、縦軸は変状スコア D の値を示している。剥離変状部に対する打診音 (約 4,000ms–6,000ms) に対して D の値が大きくなっており、健全性が低いと正しく評価されていることが確認できる。

4 結言

本研究では、打音検査のための環境ノイズを考慮した変状検出器、および診断支援を目的とした健全性の評価指標を提案した。実トンネル内で打音測定実験を行い、実環境での打音を用いて剥離変状の健全性評価を正しく行えることを確認した。

本手法を発展させることで、多種の変状検出、変状の進行程度の診断、および非定常のノイズへの対応を行うことなどが今後の課題である。

謝辞

本研究の一部は、総合科学技術・イノベーション会議の SIP (戦略的イノベーション創造プログラム)「インフラ維持管理・更新・マネジメント技術」(管理法人：独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構)によって実施されたものであり、JSPS 特別研究員奨励費 269039 の助成、およびに東急建設 (株) 技術研究所の支援を受けたものである。

References

- [1] 園田 佳巨, 渡邊 達郎, “回転式打音検査の欠陥検出能力に関する定量的評価”, 構造工学論文集 A, Vol. 59A, pp. 682–692, 2013.
- [2] 桃木 昌平, 塩谷 智基, 小林, 義和, ““打音検査” 応答形式の弾性波トモグラフィ計測技術の開発”, とびしま技報, No. 63, pp. 1–6, 2014.
- [3] 藤井 浩光, 山下 淳, 浅間 一, “打音検査に基づく変状検出手法における環境適応性能の向上”, 第 20 回ロボティクスシンポジウム講演予稿集, pp.354–361, 2015.