

## 論文の内容の要旨

論文題目 打音検査における時間周波数パターン解析に基づく自動変状検出  
Time-Frequency Analysis Based Automated Defects Detection for Hammering Test

氏 名 藤井 浩光

本研究では、社会インフラの維持管理において継続的な点検・診断を実施するために、非破壊検査法の1つである打音検査に注目し、検査・診断を自動化するための打音信号を用いた自動診断アルゴリズムの構築を行った。

近年、社会インフラの老朽化が深刻化している。特にトンネルなど道路インフラにおけるコンクリート構造物の劣化が大きな問題となっている。安心・安全のためには継続的な点検・診断が必要不可欠である。しかし、熟練点検員が減少する中で、膨大な件数に上る点検対象を人手で検査し続けることは困難である。さらに、検査の必要性が高まっている対象には、高所や狭所など人には危険な場所に位置するインフラも含まれる。これらの背景の下で、ロボットなどを用いた点検・診断作業の自動化への要求が高まっている。

本研究では、数多く存在する非破壊検査法の中でも、特に検査対象中の変状を検出する性能の高さと簡便に実施可能であるという効率性の高さから、打音検査法に注目した。打音検査法はその特長により古くから構造物の異常検出に広く用いられてきた。さらに今後は、打音検査の適用範囲をより多くの現場へと拡大するために、変状の劣化度合いを推定するなどの詳細な検査をも打音検査法で実現することが期待されている。しかし、現在まで打音検査は主に人手での実施に留まっており、その適用範囲も変状の有無の検出に留ま

っている。

打音検査法を用いた自動検査の実現のためには、変状における多様な劣化の度合いを扱い、正確に変状を検出する手法が必要である。その上で、劣化度合いの推定など詳細な検査を実施可能で、かつ現場に適用可能な手法を確立することが必要である。特に音響的に診断を行う打音検査では、自動化法を現場に適用する際に、環境に存在する雑音の影響を十分に考慮する必要がある。しかし、打音を用いて劣化度合いの推定を実現するための方法論、環境雑音への対処法に関しては、いまだ十分な議論はなされていない。

そこで、本研究では打音検査法の自動化における課題の解決のために「打音信号を用いた変状検出法・劣化度診断法、および環境雑音が存在する現場への適用法の構築」を目的とし、以下の3つの貢献を果たした。

- (1) 特徴量の自動抽出を伴う変状検出法の提案
- (2) 打音検査法による変状の劣化度合い推定法の提案
- (3) 環境雑音に対する自動校正法の提案

本研究では、主に教師あり学習を用いて変状検出を行う手法を構築した。まず、教師データ中の健全と変状に対する打音信号は周波数領域における複数の特徴的なパターンの組み合わせで表現可能と考え、特徴量空間を部分特徴量空間に分割し、それぞれの特徴量空間で生成した性質の異なる弱識別器群を統合するという統一的なアプローチを用いた。そのアプローチにより、変状検出の性能を向上させるとともに、上で述べた課題である劣化度診断、および環境雑音に対する校正を実現した。第3章、第4章、第5章において、それぞれ提案した手法に対して実環境での変状検出を想定した検証実験を行うことで、提案手法の実環境への適用可能性を示した。

第3章においては、貢献(1)の「特徴量の自動抽出を伴う変状検出」について、健全・変状に対する複数の周波数テンプレート対を用いた変状検出法を提案した。具体的には、時間周波数解析手法である短時間フーリエ変換を用いて打音のパターン解析を行い、変状検出に有効な部分周波数帯における周波数テンプレート対を探索的に獲得する手法である。また、それぞれ異なる周波数テンプレート対を有する弱識別器群を生成、統合するために機械学習における集団学習法の1つであるブースティングを応用し、変状検出器を構築した。第3章で提案した弱識別器群の統合により診断を行う枠組みは、本研究全体を通しての基礎となる手法である。基礎理論の有効性を確認するために、複合的な材料および実際のコンクリート建造物の石膏ボード壁面を用いた実験による検証を行った。

まず、木製合板とステンレス鋼板を用いた検証実験を行い、提案手法の性質の詳細な解

析を行った。打音検査における基本動作である打叩と擦過の両方を用いた実験を行い、提案手法がいずれの動作による検査にも適用可能であることを示した。また、打音特徴量が明文化できないような複雑な場合にも、提案手法を用いた弱識別器群の統合により適切に特徴量を抽出し、異種材料の識別および変状検出が可能であることを示した。

さらに、実際のオフィスビルディングにおける検証実験では、2値識別器である提案手法を組み合わせることで多クラス識別器を構成し、打叩音を用いて実際のビル内壁のひび割れ検出を行った。また、壁面背後に存在する複数の構造推定実験を行い、提案手法を用いることで、共有壁におけるコンクリート下地や鉄骨、または背面の空間について正確かつオンラインでの推定が可能であることを確認した。

第4章においては、コンクリート構造体の点検・診断における変状検出について取り組んだ。まず、実験環境として浮き・斜めひび割れ変状を再現したコンクリート供試体の製作、および現場を想定した検証環境である実寸大の模擬トンネルについて述べた。その上で、変状検出として、訓練データの獲得が困難な場合に適用可能な教師なしクラスタリングによるアプローチと、訓練データに対してより詳細なラベル付けをすることで、第3章の手法を拡張した変状における劣化度合いの推定法を提案した。

本研究のアプローチは、主に教師あり学習により生成した複数のモデルを用いることで、変状の多様さに対応するアプローチである。しかし、あらかじめ十分な訓練データを用意できない状況では、教師なしのアプローチが有効であると考えられる。4.4節においては、訓練データを用いない変状検出法を提案した。本研究では、現場で熟練の点検員により行われている点検・診断方法から着想を得て、教師なしクラスタリング手法であるk-means法により推定した健全モデルベースでの変状検出法を提案した。周波数領域で定義した距離尺度を用いて、健全モデルとの距離が大きい打音信号が得られる箇所を変状部として検出する手法である。コンクリート供試体を用いた検証実験、および実寸大で建設された評価用の模擬トンネルでのフィールド試験を行い、提案手法の有効性を示した。

また4.5節では、貢献(2)に関して「**打音検査法による変状の劣化度合い推定**」に焦点を当て、変状の劣化度合いとして定義する劣化度を推定する手法を提案した。訓練データに付加した劣化度に関するマルチラベルを用いて変状の詳細な状態を確率的に表現し、集団学習器を用いたマルチラベル推定により劣化度を推定する手法である。実験では、現場において重要な劣化である斜めひび割れ変状を再現したコンクリート供試体を用いて、ひび割れ深さの推定の性能検証を行った。コンクリート劣化の重要な指標であるひび割れ深さ30mmを境界とし、提案手法によってひび割れの到達が浅い部分と深い部分を正確に識別可能なことを確認した。さらにRGB-Dセンサを用いた打点検出法と組み合わせることで、変状の及ぶ範囲と深さを正確に推定可能であることも示した。

第5章においては、貢献(3)の「環境雑音に対する自動校正」について、追加学習による変状検出器の更新アルゴリズムを提案した。特に、ブースティングの枠組みにおける周波数テンプレートベクトルの更新則を新規に導出した。環境雑音下で獲得した追加訓練データを用いて、提案した更新則に従い弱識別器群をそれぞれ更新することで、変状検出器全体を自動校正する手法である。変状検出器の校正を行うことで、現場ごとに環境雑音が異なった場合にも、事前の学習で生成済みの変状検出器を再利用することが可能である。

コンクリート供試体を用いた実験、および実際に供用中のトンネルにおいて打音検査の実験を行い、提案手法の有効性について確認した。特にトンネルにおける実験では、提案手法を用いることで、実際の現場においても打叩音による変状検出が可能であることを示した。その上で、検査作業を行う足場である高所作業車のエンジンを稼働させ、打音信号に対するS/N比が27 dBの環境雑音を発生させ実験を行った。エンジンノイズによる音響的な環境変化が生じた場合も、提案手法を用いて変状検出器を更新することで、変状検出の性能を維持可能であることを示した。また、周波数テンプレートベクトルの大まかな形状を維持することで、事前学習時に識別可能であった打音信号に対しても性能を維持可能であることを明らかにした。

打音検査法は、変状検出における高い性能と簡便に実施可能な高い効率性を有する極めて有効な手法である。しかし、現場における適用事例を見るに、いまだ人手に依るところが大きい。本研究の貢献は、現場での検査を担ってきた熟練点検員の聞き分けの技術を自動化するに留まらない。本研究で構築した点検のための方法論は、従来の人手による打音検査では実現困難な詳細な診断をも自動化するための変状検出法であり、打音検査による自動診断システムの実用化のための現場への適用法である。

本研究では主にコンクリート構造物の検査を扱ったが、提案手法は音響信号の時間周波数領域での変化を特徴量とした手法であり、他の構造物の検査にも利用可能である。例えば、タイルの剥離診断に関する従来研究では、打音の音圧に注目することで既に一定の成果を挙げているが、本研究における時間周波数領域に注目したアプローチと組み合わせることで、より検出精度の高い診断を行うことが可能と考えられる。また、提案手法を一般的な時系列信号に対して拡張することで、画像・映像信号処理など他の問題に応用することも大いに期待できる。