

京都大学	博士 (工 学)	氏名	YU YIRAN
論文題目	Application of Sound-based Hammer Test for Damage Detection of Steel Structural Elements (鋼構造部材の損傷検知への打音検査の適用)		
(論文内容の要旨)			
<p>我が国では、膨大な数の橋梁が老朽化する状況において、技術者不足・限定的な保全予算といった社会背景から、その持続的維持管理法として事後保全から予防保全へと施策変更を行い、そのために不可欠な健全性評価において近接目視点検が法制化・義務化された。その結果、実務では点検の効率化・高精度化などの技術開発が求められている。例えば、鋼構造物において高度で精度の高い探傷が可能な検査方法として、超音波探傷・磁粉探傷・X探傷・渦電流探傷・浸透探傷などが用いられているが、いずれも高度な知識、熟練度が必要で、現場環境に左右されず、あらゆる構造部位に対して近接目視と準用できる簡便な検査方法が望ましく、熟練技術者が現場で行う目診・触診・聴診の手法の高度化が望まれている。本研究では、多様な鋼構造部材の点検に対して多用されている聴診として打音検査法を改良することを目的として、現行の打音検査の低コストと操作の容易さを堅持しながら、点検者の主観的な判断を定量的・客観的な指標として再構築し、点検者の経験と勘への依存を最小限に抑える手法に関して取りまとめたものである。特に、打音検査における鋼要素から発せられる音圧波形と鋼要素のたわみ振動加速度波形を比較し、その相関関係を特定している。各種構造要素の振動を効果的に表現できる音響計測について考察し、その結果を機械学習して、構造要素の損傷検知に応用し、提案された方法の有効性が検証されている。本論文は全7章で構成されており、以下に各章の実施内容および主な成果を示す。</p> <p>第1章は序論であり、本研究の背景、関連する先行研究ならびに研究目的、本論文の構成を述べている。特に、法定目視点検に対する高度点検手法の特徴、点検結果の健全度評価に対する精度・信頼性に関して解説すると共に、本研究で解決すべき具体的な課題を挙げている。さらに、本研究で着目した打音検査について、その有用性・実用性を詳細に述べている。</p> <p>第2章では、ハンマー打撃時の薄鋼板の横たわみ振動と鋼板から発生される音圧に着目し、Rayleigh-Ritz法および有限要素解析により打撃時に得られる各種応答値の周波数特性に関して検証している。ここでは、損傷として腐食減肉、コンクリートとの剥離および貫通き裂の各種変状の位置およびその程度を仮定し、鋼板周辺の音圧分布と鋼板の振動加速度の相関を示すとともに、次章からの鋼構造要素に対する実験的な検証時の收音マイクの設置法などに関して、基礎資料を提供している。なお、腐食減肉、貫通き裂開口幅は、振動周波数ならびに振動モードへの影響は小さく、コンクリートとの剥離においてのみ音圧波形と加速度波形に一定の相関があり、変状検知の可能性を示している。</p> <p>第3章では、鋼-コンクリート合成版に対する打音試験の改良を目的として、コンクリートの砂利化部、コンクリートと鋼板の剥離部を想定して作成した試験体に対して、底鋼板に対するハンマー打撃試験を行っている。打撃時に生じる鋼板から発せられる音圧波形、鋼板のたわみ振動の加速度波形を計測して、人工欠陥の大きさおよび位置と応答量の変動を打撃位置に関して比較検討し、損傷識別のための音圧計測のマイクロフォンの位置決め、ならびに打撃法に関して取りまとめている。</p>			

京都大学	博士 (工 学)	氏名	YU YIRAN
<p>第 4 章では、第 3 章で検証した鋼-コンクリート合成版の打音実験時の音圧波形計測結果に基づき、模擬損傷に対する信号処理アルゴリズムについて検証している。ここでは、エントロピーの時間領域分析、エントロピーの周波数分析およびサポートベクターマシン (SVM) による分類分析を組み合わせることで、音圧波形の損傷識別が可能であることを示している。特に、コンクリートの砂利化部に対して本手法の有用性を実証している。</p> <p>第 5 章では、高力ボルト摩擦接合継手の健全性評価に不可欠な高力ボルトの緩み検査について検討している。ここでは、高力ボルトの打音検査の有用性を検証するため、ボルト頭および鋼部材連結板の異なる位置への打撃および鋼要素から発せられる音圧ならびに鋼要素の振動加速度の信号取得位置を組み合わせ設定し、音圧波形と加速度波形の相関関係を検証している。ボルト締め付けトルクが高い高ボルト軸力の場合、局部振動における周波数ピークにおけるスペクトル振幅は、ボルトが緩んでいる時のそのスペクトル振幅よりも大幅に大きい、連結板近傍の音圧波形特性は振動加速度波形特性とより高い相関があることを示している。なお、ボルトの緩みの度合いは、中高周波帯域で、5kHz~10kHz で分散して分布することを明らかにしている。結果として、音響ベースである打音試験によるボルトの緩み点検手法のより適切な試験設定法について取りまとめている。</p> <p>第 6 章では、第 5 章で検証した高力ボルト摩擦接合継手に対する打音実験時の音圧波形計測結果に基づき、第 4 章と同じ計測データ処理手順を用いて、打撃時の音圧波形によるボルトの緩み検査をブラインドテストとして実施している。なお、エントロピーの時間領域分析、エントロピーの周波数分析およびサポートベクターマシンによる分類分析を組み合わせている。高力ボルト摩擦接合継手では、構造体表面の形状が複雑であるため、打撃による構造体内の波動の伝達経路がより複雑になり、SVM アルゴリズムで用いるカーネルにおいて、単純な線形カーネルでは緩みの分類は不十分で、最適化する必要があることを示している。緩んだボルトを効果的に識別するために、多項式カーネルを採用した結果、本研究で提案する改良 SVM 手法により、比較的少ない見落としで緩んだボルトを識別できることを示している。なお、十分な精度を確保するためには、適切なアルゴリズムの導入が必要であり、今後の課題として提示している。</p> <p>第 7 章は結論であり、本論文の成果を総括し、今後の課題とともに取りまとめている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、膨大な数の橋梁が老朽化する状況において、その維持管理に不可欠な健全性評価で実施される近接目視点検の効率と精度を高めるために、多様な鋼構造部材に対して用いられる従来の打音検査法を改良することを目的として、現行の打音検査の低コストと操作の容易さを堅持しながら、点検者の主観的な判断を定量的で客観的な指標としてとりまとめ、点検者の経験と勘への依存を最小限に抑える手法に関して取りまとめたものである。本論文において得られた主な研究成果は以下の通りである。

- ①ハンマー打撃時の鋼板に発生する振動加速度と鋼板表面から発生する音の音圧分布を計測し、それぞれの応答波形の周波数特性を解析するとともに、打音検査における音圧発生・周辺への伝播の有限要素解析を実施し、評価結果に影響を与えるさまざまな要因のパラメトリック分析を行っている。ここでは、欠陥の種類、欠陥のサイズ、収音マイクの配置・被試験体との距離などをパラメータとして検証し、検査対象ならびに使用する機器の取り扱い方法の指針を示している。
- ②鋼コンクリート合成板における底鋼板とコンクリートの剥離、コンクリートの充填不備などの内部欠陥検知に対する音ベースの打音試験の適用性について検証している。検査機器のセットアップ、合成板の底鋼板に対する打音検査における底鋼板の振動加速度や底鋼板から発生される音圧の計測におけるデータ収集と処理方法を詳細に検証し、これらの比較分析を行っている。これらの結果に基づき、欠陥判別アルゴリズムを構築し、その有用性を応答量のコンターマップに基づき実証している。
- ③鋼部材の高力ボルト摩擦接合継手におけるボルトのゆるみ検知に対する音ベースの打音検査の適用性を検証している。ボルトヘッドの打撃時の打撃音の特徴と残存軸力の相関関係を明らかにし、打音検査によってボルト軸力の低下を評価することを試みている。残存ボルト軸力の識別アルゴリズムを提示するとともに音圧のコンターマップを示すことでその有効性を検証している。

以上より本論文は、ハンマー打撃により鋼板に発生する振動加速度と鋼板表面から発生する音の音圧分布の関連を明らかにするとともに、打音試験法の実務での信頼性向上方策を示しており、学術上、実務上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和6年2月21日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。