

超音波伝搬映像を用いたトポロジー最適化に基づく 損傷同定手法の開発

龍園, 一樹

<https://hdl.handle.net/2324/6787615>

出版情報 : Kyushu University, 2022, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :

氏 名：龍 菌 一 樹

論 文 名：超音波伝搬映像を用いたトポロジー最適化に基づく損傷同定手法の開発

区 分：甲

論 文 内 容 の 要 旨

我々の生活に必要不可欠である輸送機器や社会インフラの安全・安心のためには、信頼性の高い非破壊検査技術が必須である。超音波は損傷に対する高い感度を有するため、非破壊検査に幅広く使用されてきたが、従来の点ベースの超音波探傷検査手法では信号波形の解釈が難しく、技術者の習熟度によって損傷の見逃しや誤認識が避けられない。そこで先行研究では超音波伝搬の映像化技術が開発され、損傷部で散乱する超音波の可視化によって損傷の検出を容易にしたが、伝搬映像のみを用いた損傷の寸法や形状の定量的な評価はいまだ困難である。一方で、この技術は検査領域内のすべての計測点での波形データを有し、適切な解析手法を用いれば、損傷を定量的に評価できる可能性がある。

この解析手法として、本研究ではトポロジー最適化に着目した。構造最適化におけるトポロジー最適化の設計変数である材料密度を「損傷パラメータ」に置き換えることで、損傷の位置、寸法、および形状を損傷パラメータの分布として推定できる可能性がある。トポロジー最適化を損傷同定に応用した研究は国際的にも数例が報告されているのみで、実際の非破壊検査への適用可能性は検討されていない。また、先行研究は大域的な振動特性にのみ着目したため、評価するデータ数が少ないうえに、局所的な損傷に対して感度が低いため、損傷同定の精度が低いという課題がある。

以上の背景から、豊富なデータを有する超音波映像化技術に、損傷の位置、寸法、および形状までを推定できるトポロジー最適化を組み合わせれば、信頼性の高い損傷同定手法を確立できると着想した。そこで本研究では、トポロジー最適化を応用して、超音波伝搬映像から損傷を定量的に評価する手法を提案し、金属板の貫通き裂と複合材積層板の層間はく離の評価に適用して、手法の実現可能性を議論した。

本論文は全6章から構成される。

第1章では、本研究の背景を述べ、超音波伝搬映像にトポロジー最適化を組み合わせる着想の経緯を述べた。

第2章では、超音波映像化技術とトポロジー最適化を組み合わせた損傷同定手法を提案した。本手法は、解析モデルを有限要素分割した各要素に損傷パラメータを割り振り、局所的な剛性を介して損傷状態を表現する。検査対象とモデルから取得した超音波特徴量の残差を目的関数として最小化することで、超音波伝搬映像を再現するような損傷パラメータの分布を推定する。金属板の貫通き裂を対象とした数値実験により、提案手法の妥当性を検証した。目的関数に最大振幅値を用いると、振幅の小さい回折波しか伝搬しないき裂に対する超音波下流側では、目的関数の感度が小さくなり、損傷の誤推定が発生した。そこで、き裂を挟む二方向から伝搬する超音波を用いたところ、目的関数の感度が改善され、き裂の推定に成功した。このように、精度の高い損傷同定のためには、設計領域全体で目的関数の感度を高めることが重要であることが分かった。

第3章では、貫通き裂を有する金属板を伝搬する超音波を実験的に映像化し、この実験結果に提案手法を適用して、手法のき裂同定性能を評価した。さらに、種々のき裂に対する超音波入射角においてき裂同定を実施し、超音波入射角とき裂同定結果の関係を調べた。目的関数に最大振幅値を用いると、き裂同定結果の精度はターゲットのき裂に対する超音波入射角に依存した。これは、第2章と同様に、推定されたき裂要素に対する超音波下流側では目的関数の感度が低くなるためであった。この知見に基づき、二方向から入射した超音波伝搬映像のデータセットを用いた場合のき裂同定メカニズムを明らかにし、実際の検査において、き裂同定結果の妥当性を評価するための2つの指標（超音波入射角の差と平均）を提案した。

第4章では、複合材積層板の層間はく離に提案手法を適用することに向け、層間はく離の存在によって大きく変化する超音波特徴量を明らかにするべく、層間はく離を有するクロスプライ積層板を伝搬する Lamb 波を、計測条件（超音波映像化システム、はく離深さ、超音波入射角）を変更した複数の条件で映像化した。はく離部における Lamb 波のモード変換と多重反射により、高振幅の定在波が発生するケースがあり、このような場合では、最大振幅値分布の高振幅領域がはく離形状と一致した。さらに、有限要素解析により、はく離領域でモード変換と多重反射が発生するメカニズムとその発生条件を明らかにした。この考察により、提案手法における超音波特徴量の選択と、実際の現場での簡易で確実なはく離評価のための指針を得た。

第5章では、第2章で提案した損傷同定手法に基づき、複合材の層間はく離を定量的に評価する手法を提案した。本手法では、層間はく離を表現する結合力要素の剛性を支配するパラメータを損傷パラメータとし、超音波伝搬映像を再現する損傷パラメータ分布を数理最適化によって求めることで、層間はく離を推定する。目的関数に最大振幅値を採用して、数値モデルと実際のクロスプライ積層板に導入した層間はく離に本手法を適用した結果、複雑なはく離形状を推定することができ、手法の妥当性を示した。しかし、超音波入射角によっては、はく離を捕捉できない場合があり、その条件は第4章の考察と一致した。入射角に依存せずに層間はく離を同定するには、振幅だけでは解の一意性を担保できず、速度変化や周波数特性など層間はく離に対して感度の高い特徴量を検討し、適切に目的関数を設定することが必要である。

最後に第6章で本論文全体を総括した。金属板の貫通き裂と複合材積層板の層間はく離を対象として、実検査への適用可能性を実証し、本論文において、超音波映像化技術とトポロジー最適化を組み合わせた損傷同定手法の基礎を確立した。