

審査の結果の要旨

氏名 鄧培文

本論文は、「Numerical simulation of Lamb wave propagation in CFRP skin/stringer structures for ultrasonic SHM systems to detect impact damage (衝撃損傷を検知する超音波 SHM システムのための CFRP スキン/ストリング構造におけるラム波伝播の数値シミュレーション)」と題し、5 章より構成される。

第 1 章は序論であり、研究背景として、近年、航空機等のセミモノコック構造への炭素繊維強化プラスチック (CFRP) 複合材料の適用が急速に進みつつある。これにより大幅な軽量化が図れる一方で、外部から異物が衝突した場合、外観からの確認の困難な衝撃損傷が CFRP 積層板の内部に複雑に発生する。その衝撃損傷の検査実施の高効率化を図る手段として、あらかじめセンシングデバイスを構造部材に組み込んだ構造ヘルスマモニタリング (SHM) 技術が挙げられる。中でも、典型的なセミモノコック構造であるスキン/ストリング構造を対象とした場合、そのスキン材の広領域を簡便に検査するためには、超音波ラム波を能動的に送受信する超音波 SHM システムが有効となる。そこで本研究では、その超音波 SHM システムの検討に必要とされる、CFRP 製スキン/ストリング構造におけるラム波の伝播挙動を把握するための数値シミュレーション法を構築する。

まず、CFRP 構造部材におけるラム波の伝播挙動を有限要素法 (FEM) で解析するためには、多数の微小な損傷から構成される複雑な衝撃損傷を単純にモデル化して、CFRP 構造モデルに容易に導入可能にする必要がある。そこで第 2 章では、CFRP 平板に発生する複雑な衝撃損傷のシンプルなモデル化手法を構築した。具体的には、異方性平板における波動伝播理論、衝撃損傷の詳細な観察、および超音波伝播速度の実計測に基づき、衝撃損傷を、擬似等方性を保ったまま剛性の低下した円錐形状の均質領域と仮定した。そして、多重剥離を有する詳細な衝撃損傷モデルを用いた有限要素解析 (FEA)、および超音波伝播の可視化実験と比較することで、新たに提案した衝撃損傷のシンプルなモデル化が妥当であることを確認できた。

そして第 3 章では、実際の民間旅客機の胴体を模擬した CFRP スキン/ストリング構造に、前章で構築した衝撃損傷のシンプルモデルを導入し、さらにフィルム状超音波発信素子の適切なモデル化も行なった上で、FEA を実施した。そして、得られた超音波伝播挙動の計算結果を検証するため、同一の構成の CFRP スキン/ストリング構造供試体に衝撃荷重を与えて衝撃損傷を発生させ、その損傷部を通過するようにラム波を送受信する実験を行なった。その結果、FEA で得られた波形には、実験での受信波形と同様なラム波モードの発生が確認でき、衝撃損傷が存在する場合の応答も、同様の傾向を示していた。

ただし、FEA ではラム波の波形を得ることができても、その中に含まれるモードを識別することができない。そのため、第 4 章では、CFRP スキン/ストリング構造を伝播するラム波モードを明らかにするため、従来の半解析的有限要素 (SAFE) 法に、新たに周期境界条件を導入し、さらにモードの対称性を考慮した計算時間の短縮を図った上で、異方性を有する CFRP 周期断面構造に適用可能な SAFE 法の改良を試みた。その結果、CFRP スキン/ストリング構造を伝播するラム波の複雑なモード分散性を算出することが可能となり、得られた群速度分散性の妥当性は FEA でも検証できた。そして、その結果より、本研究で対象としている条件下では、縦波的モード群、横波的モード群、SH 波的モード群の、大きく 3 種類のモード群に分類されることがわかった。さらに得られたモード分散性を用いて第 3 章の実験結果および解析結果を調べたところ、衝撃損傷に対しては、速度の遅い横波的モード群が応答しやすいことがわかった。

以上を要するに、本論文では、衝撃損傷をシンプルにモデル化することで、衝撃損傷が発生した CFRP スキン/ストリング構造における超音波ラム波の伝播挙動を、FEM で解析することを可能にし、さらにその複雑形状構造に SAFE 法を適用可能にするための拡張を行なうことで、CFRP スキン/ストリング構造におけるラム波モードの分散特性を理論的に解明することを可能にした。これらの新たに確立した数値解析モデリング法および半理論的波動解析法は、CFRP スキン/ストリング構造に様々な条件で衝撃損傷を設定した場合のラム波の伝播挙動を明らかにできるため、その構造における衝撃損傷を検知するための超音波 SHM システムの適切な設計に大きく貢献し得る。

よって本論文は博士 (工学) の学位請求論文として合格と認められる。