

## 審査の結果の要旨

氏 名 朴 相喆 (パク サンチョル)

修士 (工学) パク サンチョル 提出の論文は、「Characteristics of Drilling Process on Composite Laminates: Understanding Damage Initiation and Progression to Improve Final Hole Quality」(複合材料積層板の穿孔プロセスの評価: 最終穿孔品質改善のための損傷発生・進展の理解)と題し、6章と補遺よりなる。

炭素繊維強化プラスチック(CFRP) 積層板は高い面内比強度と比剛性を有し、航空機一次主要構造部材へ適用する動きが急速に広まっている。しかし CFRP 積層板は比較的脆性的な破壊をすること、面外強度が低いことなどが問題視されている。また、CFRP 積層板どうし、あるいは CFRP 積層板と金属構造部との接合には、強度保証や信頼性の面から、いまだにボルト・リベット結合の占める割合が多く、最新の航空機でも CFRP 積層板や CFRP 積層板/金属構造のドリルを用いた穿孔箇所は数万箇所に及ぶこともある。その際、穿孔時に発生する CFRP 積層板の損傷の軽減、穿孔用ドリルの寿命向上は航空機製造現場では最重要課題の一つである。しかしながら、これまで CFRP 積層板穿孔は、主に現場での試行錯誤や経験に依存することが多く、学問的視点からの合理的な解析や理論的研究はあまり進んでいない。本研究では、CFRP 積層板のドリル穿孔時の損傷発生・進展プロセスを再現できる効果的な数値解析法を提案し、実験結果を再現することを通して、実用的な穿孔プロセスの最適化が行える手法を提案することを目的としている。

第1章は「序論」であり、研究の背景についてまとめ、複合材穿孔に関する従来研究の課題を総括し、本研究の目的と論文構成について述べている。とくに、ドリル貫通時の面外引張り応力発生に伴う層間剥離の軽減の必要性を述べている。

第2章は「押し込み穿孔損傷の数値モデル」であり、層間剥離を含む穿孔損傷を効果的に再現するべく、穿孔部分には繊維・樹脂を考慮したミクロレベルの、かつ樹脂の塑性変形を考慮した解析を、その他の部分にはマクロ解析を行うマルチスケール二次元有限要素法(FEM)解析を提案するとともに、詳細三次元 FEM 解析とも比較し、穿孔損傷評価のための二次元 FEM 解析の有効性と注意点を明らかにしている。また、有限幅の CFRP 一方向材の穿孔実験結果との対比を行うことにより、提案した数値モデルと解析法の有効性を実証している。

第3章は「穿孔損傷の発生と進展」であり、穿孔初期損傷発生後の損傷進展プロセスの解析を可能とする、損傷部分の分離を表現する有限要素削除を逐次行う数値解析法の提案を行っている。これにより、CFRP 損傷進展を伴う簡略化した穿孔実験プロセスの再現、および、穿孔荷重の時間履歴の再現を可能としており、穿孔実験プロセスを合理的かつ定量的に説明することに成功している。

第4章は「異なるドリル先端形状の実験解析」であり、現在国内外で開発が進められている異なる形状や切削特性をもつ数種のドリルを用いた CFRP 積層板のドリル穿孔実験を行い、内部損傷発生・進展プロセスを観察するとともに、穿孔時にドリルにかかる圧縮荷重とトルクの履歴計測実験を行い、穿孔状態の相違を明らかにしている。

第5章は「穿孔損傷特性評価」であり、ドリル形状の相違による穿孔損傷発生・進展プロセ

スを再現するために、2 章、3 章の数値モデルの簡略化を行い、押込み荷重のドリル半径方向分布を考慮できるように改良している。また、本簡略化数値モデルにより、異なる先端形状のドリルを用いた、穿孔実験プロセス中の押込み荷重履歴を再現することに成功した。これにより、ドリル先端部の押込み荷重が大きな超硬ドリルに比較して、曲面ドリル側面をもち先端部押込み荷重が小さいタイプのドリルの有用性を合理的かつ定量的に説明している。さらに、最適な穿孔効率を実現できるドリル形状を求める最適化手法の提案を行っている。

第 6 章は「結論」であり、本研究で得られた結論をまとめ、今後の展望と課題を示している。

以上要約すると、本研究は、CFRP 積層板のドリル穿孔時の損傷発生・進展プロセスを再現できる効果的な数値解析法を提案し、実験結果を合理的かつ定量的に再現することに成功するとともに、ドリル形状を求める最適化手法の提案を含め、CFRP 積層板のドリル穿孔の実用にも資する研究成果を挙げており、複合材料工学および航空宇宙工学上貢献するところが大きく、当該分野の新しい発展に大いに寄与する有益な知見を与えている。

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。