

厚肉CFRPパイプにおける ライフサイクルモニタリングシステムの開発と 残留応力低減手法の提案および評価

学生証番号 47126082 氏名 高垣 和規
(指導教員 武田 展雄 教授)

Key Words : CFRP pipe, Through-thickness stress, Optical fiber sensor, Life-cycle monitoring, Stress/Strain reduction

1. 研究背景

炭素繊維強化複合材料 (Carbon fiber reinforced plastics: CFRP)は既存の材料に比べ高比剛性・高比強度を有し、加えて低熱膨張率であるため熱安定性にも優れる。そのためCFRPは高度な安定性が求められる人工衛星の支持構造として広く使用されている。近年では衛星機器の大型化に伴い、CFRPの厚肉化も進んでいるが、厚肉のCFRPパイプでは温度変化により板厚方向の残留応力が生じ、早期の破壊、特に層間はく離に結びつくことが知られている。そこで本研究ではこの板厚方向応力のメカニズムを明らかにした後、材料の内部状態をライフサイクルにわたりモニタリングする技術を構築した。更にそれらの知見・技術を統合し、応力を低減する手法を提案・実証した。

2. CFRPパイプにおける径方向応力発生メカニズム

有限要素解析および弾性力学に基づく論理的な考察を行った。それぞれにおいてパイプの1/4部分に対し、拘束を与えることでパイプ全体を再現した。さらに一方の拘束を削除したモデルとの比較から、円筒形状への幾何学的な拘束が与える影響を考察した。その結果、CFRPパイプ内部に生じる応力は円筒形状へ拘束されることによる影響が大きいことがわかった。また肉厚および内径が残留応力に与える影響を考察したところ、厚肉・小径であるほど板厚方向応力が増加することがわかった。

3. 厚肉CFRPパイプのライフサイクルモニタリング技術構築

光ファイバセンサの一種であるFBGセンサを利用し、パイプ内部に生じる板厚方向ひずみのライフサイクルにわたる計測技術を構築した。一般にFBGセンサはセンサ軸方向のひずみ計測に利用されるが、本研究では光ファイバの複屈折現象を利用し、非軸対称ひずみを計測することで板厚方向ひずみを成形試験および低温環境試験を通して定量的に評価した。成形実験では32層および48層の対称積層パイプの内部にFBGセンサを埋め込み非軸対称ひずみ量を計測した。その結果、ひずみの計測および破壊の検知が可能であるということを実証した。また平板試験片および有限要素解析との比較から計測の妥当性が示された。低温環境試験では成形試験で成形した32層試験片を液体窒素により-100°Cまで冷却した。低温環境下においても光ファイバセンサの応答からひずみの計測および破壊の検知が可能であることを実証した。

4. CFRPパイプに生じる残留応力低減手法の提案と評価

残留応力を低減させる積層構成を有限要素解析により推定し、実験によりその効果を検証した。有限要素解析より、円周方向に繊維を有する90°層を板厚方向に集中させた上で、0°層を外層に配置することで残留応力を低減可能であることがわかった。実験では初めに24層の対称・非対称のパイプをそれぞれ成形し、応力が最大となる位置付近に埋め込んだFBGセンサ応答を計測した。対称積層は非対称積層に比べ非軸対称ひずみが大きく、板厚方向応力が低減されていることが実証された。次に対称積層では成形時に破壊を生じる48層パイプを非対称積層により成形した。非対称積層で作成した48層パイプは成形時にセンサ応答に不連続な変化が見られず、また成形後の断面観測においても破壊は観測されなかった。

5. 結言

本研究では厚肉CFRPパイプで問題となる板厚方向残留応力を対象にそのメカニズムの解明、モニタリングシステムの構築、およびそれらを応用した応力低減手法の提案と評価を行った。これらの技術はCFRPをより効率的に使用するための基盤技術として、今後広く利用されるものになると考えられる。