

分布ひずみ測定によるスキン/ストリング構造の剥離モニタリング

Delamination Monitoring of Skin-Stringer Structures Using Distributed Strain Measurement

システム工学群

先端機械・航空材料工学研究室 閑念 さき

1 緒言

近年、航空機の軽量化を目的に炭素繊維強化プラスチック (CFRP) が広く使用されている。CFRP は高強度・高剛性を有する一方、剥離が生じやすいという欠点があり、運用においては非破壊検査が必須となるため、運航コスト増加の要因となっている。このため、リアルタイムで剥離をモニタリングする技術が注目されている。

本研究では、光ファイバセンサを用いたスキン/ストリング構造の剥離モニタリングに着目した。表面貼付型センサは埋め込み型に比べて感度は低いものの、導入が容易である。そこで本研究ではレイリー散乱型センサによりストリング基部の表面ひずみを計測し、剥離検出の可能性を検討した。試験片による3点曲げ試験および有限要素解析を行い、ひずみ分布の妥当性を評価した。

2 レイリー散乱型光ファイバ型センサ

本研究では、レイリー散乱型光ファイバ分布センサ (ODiSI A-50, LUNA Technologies) を用いてひずみ測定を行った。本センサは後方散乱したレイリー散乱光の干渉信号を FFT により空間情報へ変換し、スペクトルシフト量からひずみを算出する。測定距離は1~50mm, ひずみ範囲は $\pm 5000\mu\epsilon$, 空間分解能 1mm, ゲージ長 1.5mm とした。

3 実験方法及び解析方法

3.1 材料・積層方向

本研究で使用した試験片には、CFRP プリプレグ (TR350C100S, 三菱ケミカル製) を用いた。図1に示すように、スキン部およびストリング基部はそれぞれ24枚積層し、ホットプレスにより成形した。スキン部の積層構成は $[0_3/45_3/-45_3/90_3]_s$, ストリング基部の積層構成は $[0_{10}/45/-45]_s$ とした。スキンとストリング基部の界面に厚さ 0.05 mm のテフロンシートを挿入し、エッジから 10 mm の位置に人工的に剥離を導入した。

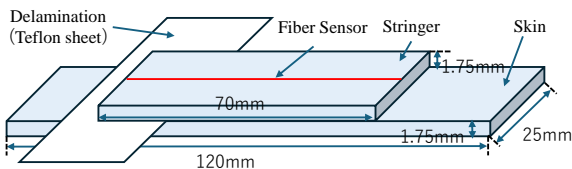


Fig.1 Model specimen of CFRP skin with stringer base

3.2 実験方法

図2に3点曲げ試験の概要を示す。試験片下部に光ファイバ分布センサを接着固定した。圧子変位が 2 mm に達した時点で光ファイバによりひずみ分布を取得し、また、ビデオマイクロスコープにより剥離長を測定した。

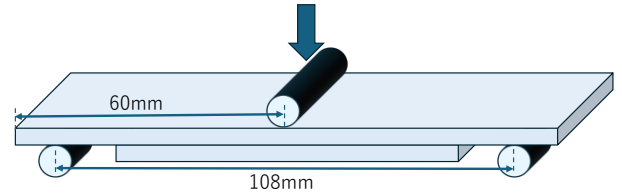


Fig.2 Experimental set-up of 3-point bending test

3.3 解析方法

汎用 FEM ソフトウェア Abaqus を用いて3点曲げ試験におけるひずみ分布の解析を行った。解析では幅方向に部分的な剥離や剥離形状を変化させたモデルも作成し、剥離形状のひずみ分布への影響を検討した。

4 結果および考察

4.1 ストリングのエッジ部分からの剥離モニタリング

剥離先端位置 10 mm, 圧子位置 35 mm で3点曲げ試験を行い、マイクロスコープで剥離位置を確認した。図3 (上下反転) に示すように、図3(a), (b)では想定通り 10 mm までの剥離に加え、20 mm 付近まで別の層間剥離が生じていた。一方、図3(c)では剥離は確認できなかった。図4にレイリー散乱型センサによるひずみ分布と、同条件での FEM 解析結果を示す。当初は 10 mm \times 25 mm の矩形剥離を想定していたが、図3より実際の剥離形状が異なることが分かったため、ストリングエッジから 10 mm \times 22.5 mm と 10 mm \times 15 mm の矩形剥離を並べた形状に変更した解析結果も併せて示す。

実験では 10 mm 付近でひずみが急増し、剥離先端位置を特定できることが確認された。また、20~35 mm 付近を除き、実験と剥離形状を反映した解析のひずみ分布が類似していることから、レイリー散乱型センサによりエッジ部の剥離を検出可能と考えられる。なお、20~35 mm 付近でひずみが一定となったのは、光ファイバセンサの一部が外れた可能性が高く、剥離進展を踏まえて曲げ速度等を変更し再試験を行う予定である。



Fig.3 State of delamination

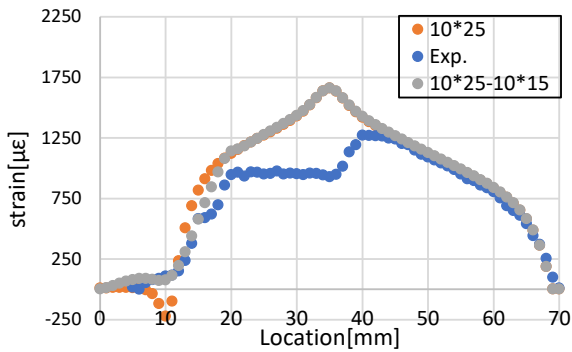


Fig.4 Measured strain distribution on 3-point bending test and FEM analysis

4.2 剥離形状の影響

剥離が幅方向に全貫通しない場合、また剥離形状の違いによる影響を調べるために、FEM 解析を行った。幅方向に長さを変更した剥離形状を図 5 に、解析結果を図 6 に示す。凡例は L_v 値とし、長さ方向の剥離先端位置は一律 10mm、センサ位置は幅方向の中央（端から 12.5mm）とした。

$L_v = 10, 15$ mm の場合、剥離先端位置では曲げひずみが生じ、ひずみ分布形状からは剥離先端位置を明確にとらえるのは難しい。一方で $L_v = 20$ mm 以上では曲げひずみが小さくなり、剥離によりストリング基部に曲げが生じなくなる影響を捉えることができた。このことから貫通剥離でない場合も、幅方向に一定以上剥離が進展すれば、表面ひずみ分布形状から剥離先端位置を捉えることが可能であると言える。

$L_v = 10, 15$ mm の表面ひずみ分布形状に再度注目すると、右側の剥離のない曲げひずみ分布形状とは明らかに異なる。そこで無剥離モデルからのひずみの差分をとり、さらに無剥離モデルの最大ひずみで正規化を行った。その結果を図 7 に示す。図 7 から、 $L_v = 10, 15$ mm の場合であっても明確な剥離先端位置を推定するほどの特徴はないものの、ひずみ分布への影響を確認できたため、剥離の存在をモニタリングすることは可能ではないかと考えられる。 $L_v = 20$ mm 以上では剥離先端位置に明確な谷を確認でき、正規化を行うことにより正確な剥離先端位置推定が可能だと考えられる。また、正規化された谷の大きさと幅方向の剥離先端位置に相関がみられると思われるため、一本のセンサで幅方向の剥離先端位置もある程度推定できる可能性がある。

次に図 8 に示すように三角形型の剥離形状でも解析を行った。結果は図 9 示す。比較のため矩形型剥離である Rec-10-20 の解析結果も併せて示す。Tri-10-20、Tri-20-20 それぞれのセンサ位置の剥離先端位置は 3.75mm、7.5mm であり、いずれの形状においても、剥離先端位置でひずみ急増することが確認できた。以上から一定以上の幅方向に剥離が進展していれば、剥離の形状に依存せず、ひずみの増加位置より長さ方向の剥離先端位置を特定できることが確認できた。

5 結言

本研究では、レイリー散乱型センサを用いた CFRP スキン・ストリング構造の剥離がひずみに与える影響を調べ、さらに剥離面積とひずみの関係を解析により検討した。実験では積層状態の影響で剥離形状の特定には至らなかったが、ひずみ分布から長さ方向の剥離位置を推定できることを確認した。また、剥離面積の増大に伴う荷重伝達の低下や局所圧縮の変化が FEM 解析で示され、幅方向の剥離規模や形状推定への応用可能性も示唆された。

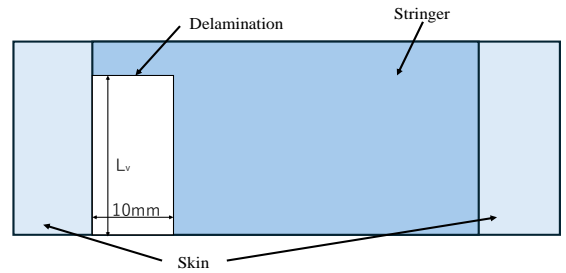


Fig.5 Rectangular-shaped delamination test specimen

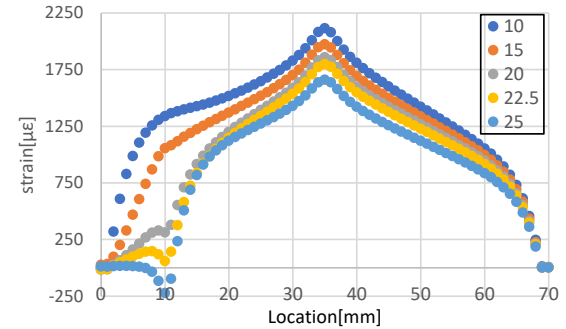


Fig.6 FEM analysis with Vertical displacement

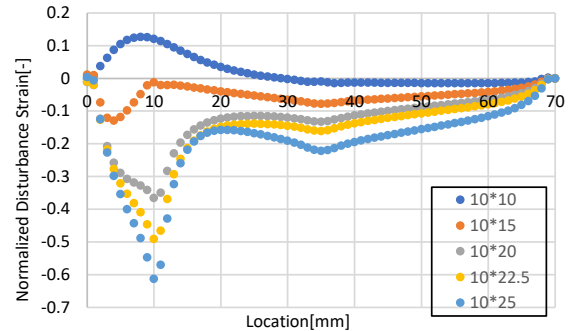


Fig.7 Normalization of Vertical Displacement

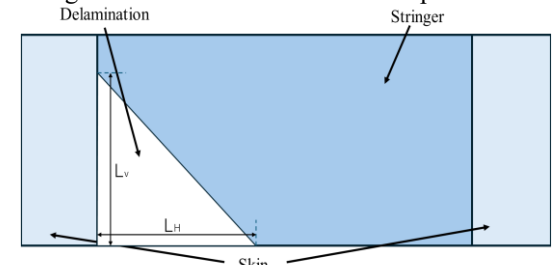


Fig.8 triangle-shaped delamination test specimen

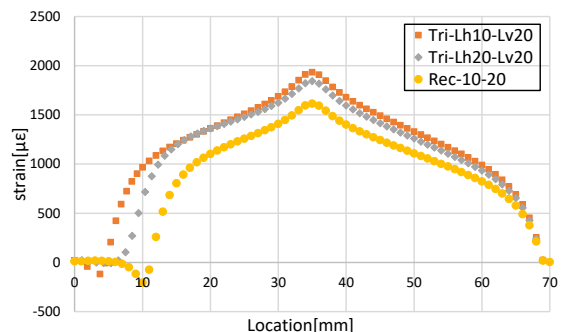


Fig.9 FEM analysis with modified Delamination shape

文献

- (1) 中島星良, (2025), "分布型光ファイバセンサを用いた CFRP 構造の層間剥離検出", 日本機械学会 中国四国支部第 63 期総会・講演会 01B2