

# 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

## Detection of Delamination in CFRP structure using a distributed optical fiber sensor

航空宇宙工学コース

先端機械・航空材料工学研究室 1275040 中島 星良

### 1. 緒言

炭素繊維強化プラスチック (CFRP) は、その優れた特性から近年、さまざまな製品への応用で軽量、高強度、高剛性といった特長が注目されている。しかし、衝撃や疲労による剥離を目視で発見することは困難である。そこで、CFRP 構造物にセンサを埋め込み、リアルタイムで損傷を検出する技術の開発が注目されている。本研究では、レイリー散乱を利用したセンサで測定した表面ひずみ分布を用いて層間剥離を検出する手法に着目した。積層板の厚みが表面ひずみ分布に与える影響を検証するため、厚さの異なる層間剥離が挿入された CFRP 積層板に対して 3 点曲げ試験を実施した。さらに、剥離深さが検出方法及び影響を調べるために、有限要素解析 (FEM) を実施した。

### 2. レイリー散乱型光ファイバ分布センサ

本研究では、CFRP 積層板表面のひずみ分布をレイリー散乱型光ファイバ分布センサ (ODiSI A-50 LUNA Technologies) を用いて測定した。ひずみ測定範囲は 1m~50m、最小測定ピッチ 1mm、ひずみ測定範囲  $\pm 10000 \mu \epsilon$ 、ひずみ分解能 1mm、測定サイクルは 1Hz~5Hz でひずみ分布と温度分布が取得可能なセンサである。

### 3. 実験方法および解析方法

#### 3.1 材料および試験片作成方法

本研究では CFRP プリプレグ (TR350C100S, 三菱ケミカル製) を 60 枚積層し、ホットプレスを使用して図 1 に示すように一方向材の試験片を作成した。剥離作成のため CFRP プリプレグ積層板の 50 枚目と 51 枚目の間もしくは 10 枚目と 11 枚目の間に厚さ 0.1mm のテフロンシートを挿入して剥離を導入した。テフロンシートの長さを変更し、剥離長さ 35mm の試験片を作成した。

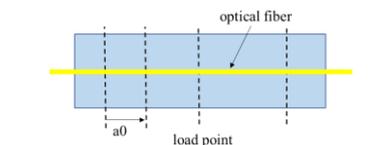
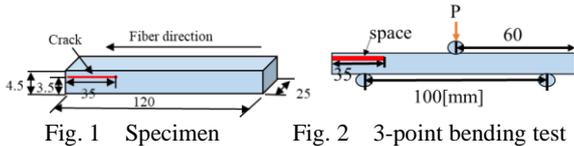


Fig. 3 Location of optical fiber sensor

#### 3.2 実験方法

図 2 に示す様に剥離を挿入した試験片を使用し、引張試験機 (島津製作所) による 3 点曲げ静的試験時の表面ひずみ測定を、レイリー散乱型光ファイバセンサを用いて行った。試験は支点間距離 100mm、図 3 に示すように光ファイバセンサ

を試験片下部中心に一直線に接着固定し、負荷が 1000N に達した際のひずみ分布を測定した。測定面から 10 層または 50 層に剥離が挿入されている場合のひずみ分布の影響を作成した試験片を使用して調べた。

#### 3.3 解析方法

有限要素法解析ソフト Abaqus を使用して、2 次元モデルを用いて 3 点曲げ試験における解析を行った。解析に用いた物性値(2)はヤング率  $E_{1,2,3}=137\text{GPa}$ ,  $E_{2,3}=9.76\text{GPa}$ , 横弾性定数  $G_{1,2,3}=51.7\text{GPa}$ ,  $G_3=3.61\text{GPa}$ , ポアソン比  $\nu_{1,2,3}=0.324$  である。実験では 2 つの深さに対して行ったが、解析では様々な深さにおいて解析を行った。また、試験片厚さを実験で使用した試験片の 2 倍の厚さの 9mm にした場合についても解析を行った。

### 4. 結果および考察

#### 4.1 剥離検出の剥離位置の影響

図 4 に、剥離長さ 35mm の場合のレイリー散乱分布センサを用いた実験結果と FEM 解析で取得した表面ひずみ分布測定結果を示す。ここは図中のデータは剥離が測定表面より 10 層または 50 層に挿入されているデータである。どちらの結果も実験結果と解析結果であまり差異がなく、センサにより表面分布を精度よく測定できていることが分かる。図 4 より、剥離長さ 35mm の場合のひずみは負荷点で最大値を示し、剥離深さ 50 層では剥離先端位置付近においてひずみ曲線が極大値をとることが分かった。しかし、剥離深さ 10 層では剥離先端位置付近において極小値が見られ、極大値は剥離先端部より少し手前で生じた。

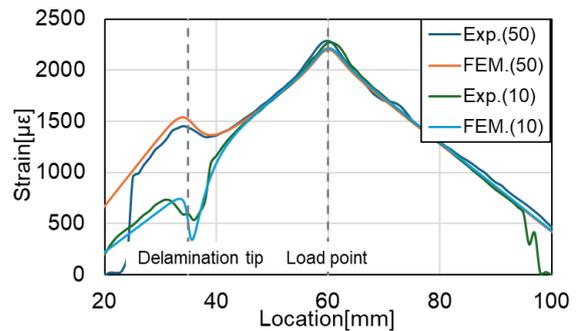


Fig. 4 Measured strain distribution on 3-point bending test and FEM analysis in 35mm delamination

#### 4.2 剥離深さの影響

剥離深さの影響を調べるために、FEM 解析を行った。図 5 に試験片厚さ 4.5mm、図 6 に試験片厚さ 9mm の試験片下面引張側のひずみ分布を示す。剥離長は 35mm、凡例の数字は下面からの剥離の深さ位置(%)である。

図 5 より、剥離深さがどの位置においても、剥離先端より 1mm 左側で極大となることが分かった。試験片下面から深

さ位置が増加して試験片の厚みの中央（深さ 50%）に近づくほど極大値は増加するが、中央（深さ 50%）以上では極大値はほとんど変わらなかった。一方で、図 6 では厚みが 4.5mm の時と同様の傾向を表しているが、図 5 と 6 を比較すると、深さ位置が極大値に与える影響は定性的に変わらないが、深さ位置が中央以上は極小値が表れにくいことがわかる。

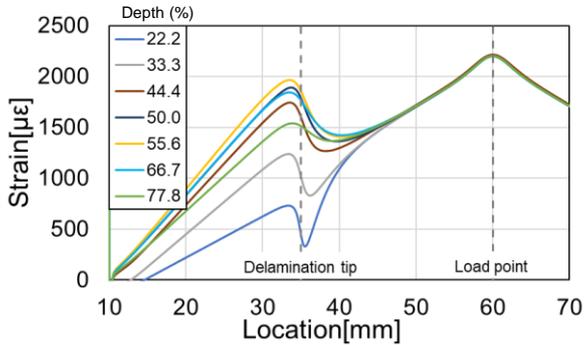


Fig. 5 Strain distribution by FEM on 3-point bending test in 4.5mm thick laminates

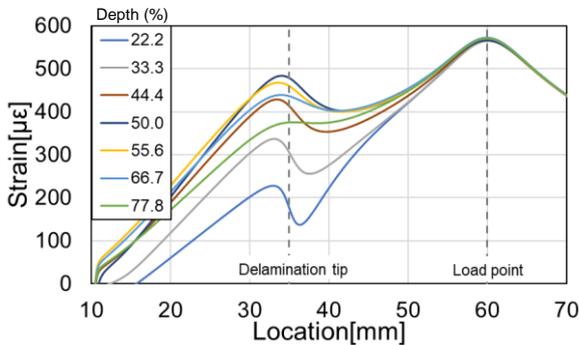


Fig. 6 Strain distribution by FEM on 3-point bending test in 9mm thick laminates

### 4.3 CFRP 積層板厚さの影響と特徴抽出

積層板厚さが表面ひずみ分布に与える影響を可視化するため、剥離が挿入されていない積層板の表面ひずみ分布を基準とし、剥離が存在する場合のひずみ分布(図 5:厚さ 4.5mm, 図 6:厚さ 9mm) から差し引くことで、剥離による摂動を得た。それを負荷点ひずみで正規化したものを、図 7、図 8 にそれぞれ示す。

図から、どちらの厚さでも、剥離が計測面から 33.3%の深さに挿入されている場合は、明確な谷が見られていることがわかる。一方で、剥離が計測面から離れると、山しか現れないことが分かった。剥離が深さ 50%の位置までは、剥離の深さに対して、山の大きさは単調的に増加することが分かった。この傾向は厚みによらず似ており、山の大きさが深さを推定するために役立つ特徴であることが分かる。一方で、厚さが増加すると、山と谷にピーク形状が鈍化することも明らかとなった。よって、板厚は剥離発生によるひずみの摂動分布に影響を及ぼすものの、測定面から中央厚さまでの範囲であれば、摂動ピークから深さを検出できる可能性が高いことが分かった。

図 9 は板厚 4.5mm と 9mm の場合についての摂動ピークの高さと剥離深さ位置の関係を示したものである。図より、厚さ 9mm の場合は深さ 50%までは単調増大しており、50%を超えるとピーク値は単調減少することがわかるが、4.5mm の場合は深さ 33.3%で一度減少していることがわかる。これは、

支点の応力集中が摂動分布に影響を与えているためだと考えられる。

以上より、板厚に関わらず、摂動ピーク高さから、剥離の深さ位置を推定する可能性が見いだせた。また剥離深さがセンサ面に近い場合は、摂動の谷の高さの方が良い指標になると思われる。

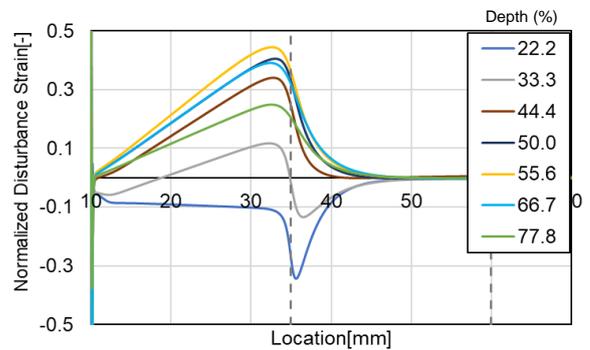


Fig. 7 Disturbance distribution of strain caused by 35mm delamination in 4.5mm thick laminates

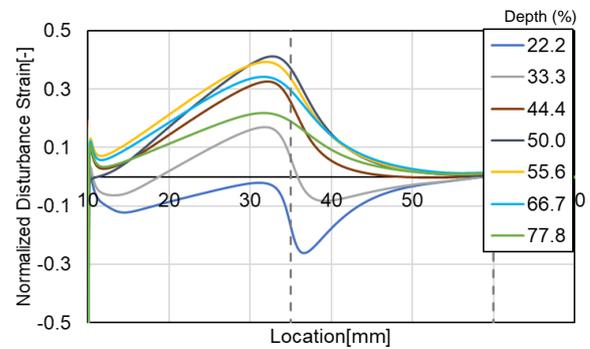


Fig. 8 Disturbance distribution of strain caused by 35mm delamination in 9mm thick laminates

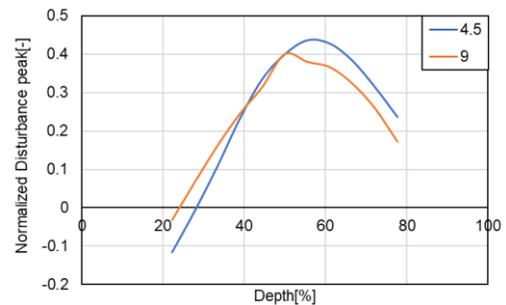


Fig. 9 Normalized disturbance peak of strain caused by 35mm delamination in 4.5mm and 9mm thick laminates

## 5. 結言

本研究ではレイリー散乱型センサを用いた CFRP 一方向積層板の剥離同定において、表面ひずみ分布測定により剥離長さと同定の同定が可能であるかどうかを調べた。その結果、以下の知見が得られた。

1. 引張側と圧縮側では、剥離深さが表面ひずみ分布に与える影響は異なり。剥離がセンサから近ければ、剥離先端付近のひずみの極値の大きさは深さ位置に対して単調的に変化する。
2. 測定物の厚みが増加してもひずみ分布にあまり影響はなく、構造物両面からのひずみ計測を行うことである厚さの構造物の剥離先端位置および深さの剥離検出が可能であると考えられる。