

卒業論文要旨

レイリー散乱型センサによる FRP の 2 次元剥離検出

2D Delamination Detection of FRP by Rayleigh Scattering-Based Sensor

システム工学群

先端機械・航空材料工学研究室 1230113 中島 星良

1. 緒言

近年、航空機やスポーツ用品など様々な身近な製品に使用され注目されている材料炭素繊維強化プラスチック(carbon fiber reinforced plastic: CFRP)は軽量で高強度・高剛性を持つ材料である。しかし、衝撃によって目視発見することができない層間剥離を起こしやすく、航空機では運行中の事故を防ぐために非破壊検査での層間剥離発見が必須とされている。そこで、近年では CFRP 構造物の損傷をリアルタイムで検知する技術が注目されている。

本研究では 2 次元の剥離形状をレイリー散乱型分布センサで検出する方法を確立するというを目的とし、内部剥離においては温度分布測定による同定、エッジの剥離においてはひずみ分布測定による同定という剥離場所によってアプローチを変えて FEM 解析及び実験を行った。

2. レイリー散乱型光ファイバ分布センサ

本研究では、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。空中分解能は最小 1mm、ひずみ分解能は 1 μ 、温度分解能は 0.1 $^{\circ}$ C である。ひずみ計算のゲージ長は 5mm とした。

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)を使用して図 1, 2 に示す CFRP 試験片を 2 種類作成した。温度測定用の試験片 A ではプリプレグ 40 枚、曲げ試験用の試験片 B では 60 枚を積層した。剥離作成のため試験片 1 では中央の層間に、試験片 2 では 50 枚目と 51 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。剥離長さ 35mm および 55mm の試験片を作成した。

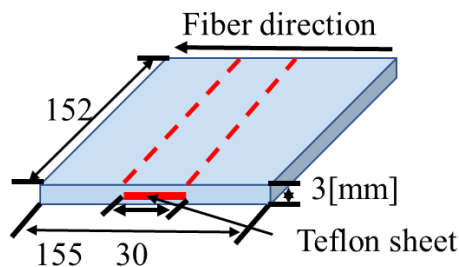


Fig. 1 Specimen A

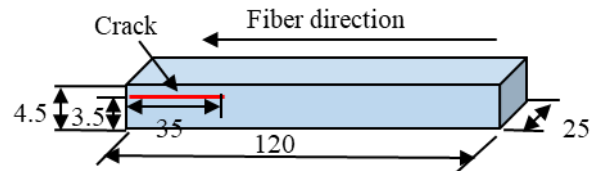


Fig. 2 Specimen B

3.2 実験方法

試験片 A を使用し、温度分布測定を行った。加熱実験方法を図 3 に示す。熱電対を 3 か所に設置し、シリコンラバーヒーターでヒーター温度が 40 $^{\circ}$ C に達するまで加熱を行った後、放置した。温度計測のため熱電対(TT-K-40 OMEGA ENGINEERING)を使用した。

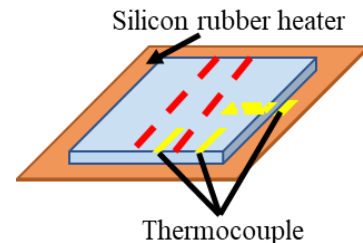


Fig. 3 Method of heating test

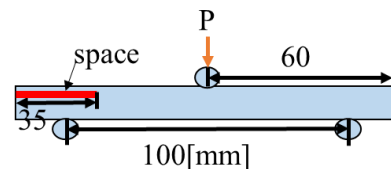


Fig. 4 Method of 3-point bending test

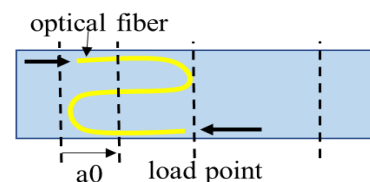


Fig. 5 Location of optical fiber sensor

図 4 に示す様に試験片 B を使用して、3 点曲げ静的試験時のひずみ測定を、光ファイバセンサを用いて行った。試験は支点間距離 100mm、変位速度 0.5mm/min で行った。図 5 に示すように光ファイバセンサを試験片下部に 2 往復させ、ひずみ分布を測定した。ファイバは表面に接着固定し、表面から

10 層または 50 層にある剥離のひずみ分布への影響を調べた。

3.3 解析方法

試験片 A と同じサイズのモデルで FEM 解析を行った。解析に用いた物性値⁽¹⁾ は密度 $1.52 \times 10^{-6} \text{ kg/mm}^3$ 、繊維および直交方向の熱伝導率をそれぞれ $609, 11800 \text{ } \mu\text{W}/(\text{mm} \cdot \text{K})$ とした。また試験片と空気間の熱伝達率は $38.8 \text{ } \mu\text{W}/(\text{mm}^2 \cdot \text{K})$ と実験で求め、剥離間は断熱とした。境界条件は片面加熱で、加熱温度を 40°C で 20 秒間保持した。

試験片 B については、ジグを剛体、剥離部の摩擦をゼロとして 3 次元 1/2 モデルを用いて FEM 解析を行った。解析に用いた物性値⁽²⁾ はヤング率 $E_1=137 \text{ GPa}$, $E_{2,3}=9.76 \text{ GPa}$, 横弾性定数 $G_{1,2,3}=5.92 \text{ GPa}$, ポアソン比 $\nu_{1,2,3}=0.324$ であった。それぞれ剥離長さ 35mm と 55mm の場合の解析を行った。

4. 結果および考察

4.1 温度測定による剥離検出の可能性

試験片 A について、FEM 解析による温度測定の結果を図 6 に示す。図より、一定温度加熱によって非加熱面の剥離部温度が 12°C 低下することが予想された。次に温度測定結果を図 7 に示す。図より、剥離面上の温度が 1.2°C 低下することが分かった。FEM 結果との差が生じた要因としては、実験では剥離部は完全に断熱されているわけではないことが考えられる。また計算では CFRP の熱伝導率に文献値を用いたため、実験で用いた試験片の熱伝導率を測定する必要があるだろう。 1.2°C の温度差は、光ファイバセンサによる測定ひずみに換算すると 12μ である。このひずみ差は温度分解能が高いレイリー散乱型センサで検出可能であると考えられる。

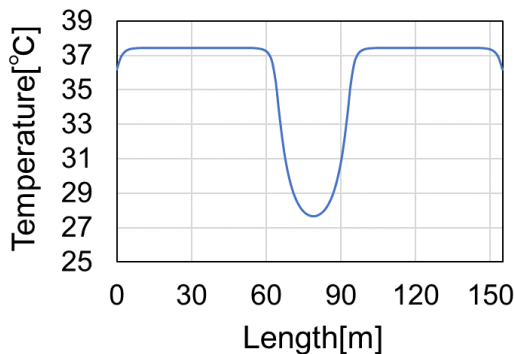


Fig. 6 Temperature distribution by FEM

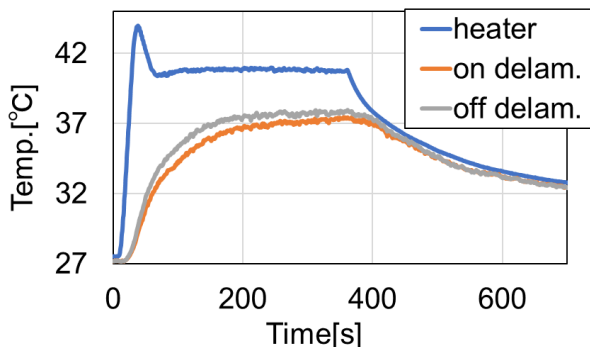


Fig. 7 Relationship between time and temperature at a heater, on delamination and off delamination.

4.2 3 点曲げ試験による剥離検出の剥離位置の影響

試験片 B について、測定表面より 10 層および 50 層の位置に剥離がある場合の FEM 解析結果を剥離長さが 35mm の場合を図 8 に、55mm の場合を図 9 に示す。図より、どちらの剥

離長さも剥離が 50 層に挿入されている場合は剥離先端でひずみが 1 度極大値を取り、10 層目に挿入されている場合は、剥離先端で極小値をとることが分かった。

図 10 に剥離長さ 35mm, 図 11 に剥離長さ 55mm のレイリー散乱分布センサを用いた、測定表面より 10 層および 50 層の位置に剥離がある場合のひずみ分布測定結果を示す。なお図中の長さは光ファイバに沿った長さである。図より、FEM による解析結果と同様に、剥離が 10 層の場合は剥離先端位置付近においてひずみ曲線が一度最大値をとることがわかる。しかし、剥離が 10 層にある場合は明確なピークは見られないが、剥離先端付近でひずみが大きく減少していた。以上から、剥離先端位置の検出にレイリー散乱分布センサを使用したひずみ計測は有用だと考えられるが、その検出精度は剥離位置の影響を受けることが分かった。

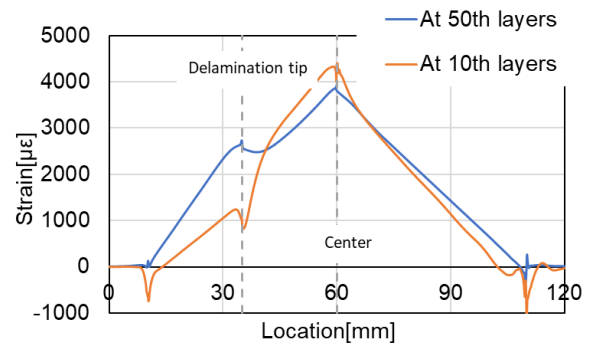


Fig. 8 Strain distribution by FEM on 3-point bending test in short delamination

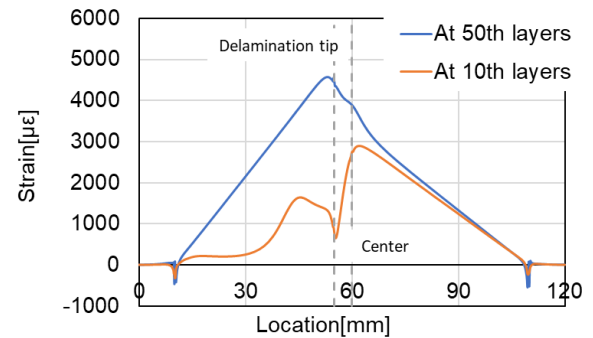


Fig. 9 Strain distribution by FEM on 3-point bending test in long delamination

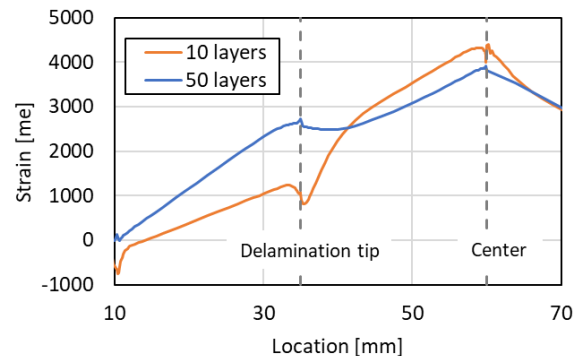


Fig. 10 Measured strain distribution on 3-point bending test in short delamination

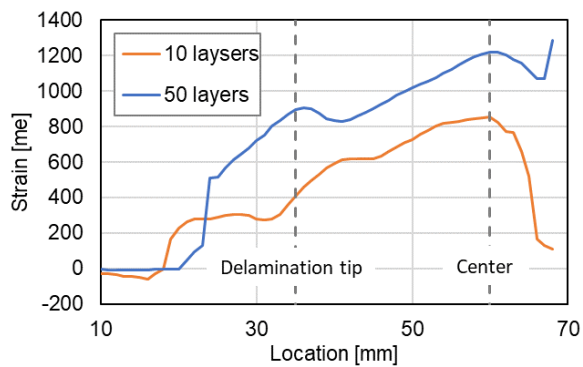


Fig. 11 Measured strain distribution on 3-point bending test in short delamination

5. 結言

本研究ではレイリー散乱型センサを用いて、内部剥離においては温度分布測定、エッジの剥離においてはひずみ分布測定により剥離位置との関係を解析および実験から調べた。

- (1) FEM 解析及び温度分布測定から剥離部分と剥離のない部分で温度差が生じるため、剥離の検出は可能であることがわかった。
- (2) FEM 解析および 3 点曲げ試験より、表面ひずみお分布は剥離の厚み方向位置が測定面から深い場合は剥離先端付近で極大になり、浅い場合は剥離先端付近で極小となることから、剥離検出方法を剥離位置によって変える必要があるが、剥離先端位置の同定が可能であると同時に剥離の深さ方向の位置も特定できる可能性があることがわかった。

謝辞

本研究は科研費（20K04182）の助成を受けたものである。

文献

- (1) 小笠原俊夫, 平野義鎮, 吉村彰記, “模擬雷撃を受ける炭素繊維複合材料の熱－電気連成解析”, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 57, No. 667 (2009), pp. 336-343.
- (2) 大西一輝, “レイリー散乱型光ファイバ分布センサによる CFRP 積層板の剥離進展モニタリング”, 高知工科大学修士論文(2021)