

卒業論文要旨

分布型センサを用いた FRP の層間剥離進展検出 Interlayer Peeling Progress Detection of FRP by Distributed Sensor

システム工学群

先端機械・航空材料工学研究室 1200037 大西 一輝

1. 緒言

航空機に使用されている材料の1つに繊維と樹脂の複合材料である繊維強化プラスチック(Fiber Reinforced Plastic: FRP)がある。FRPは、金属材料と比べて軽量かつ高い強度を併せ持つため機体の軽量化、燃費向上に貢献している。しかしFRP積層材に層間剥離が生じやすく、またそれを目視で発見することが難しいという欠点が存在する。

航空機の安全性は定期検査において維持されている。しかし、検査中は機体を使用できないため検査に時間がかかるとそれだけ損失が大きくなる。そこで、航空機の運用コストをおさえ、機体の信頼性を向上させるために、リアルタイム健全性モニタリング技術が注目されている。

本研究では、近年開発されたレイリー散乱型光ファイバ分布センサに注目した。従来のセンサは空間分解能が低く、小サイズの剥離進展検出には適さなかった。しかしレイリー散乱型光ファイバ分布センサは1mmという高い空間分解能を持ち、測定範囲も広いいため、航空機のCFRP構造部材に生じるミリメートルサイズの剥離進展のモニタリングを期待できる。

そこで本研究ではDCB試験とENF試験によるCFRPの層間剥離進展のモニタリングを、レイリー散乱型光ファイバひずみ分布センサを用いて行った。

2. 材料および実験方法

2.1 試験片

160×160mmに切り出したCFRPプリプレグ(TR350C100S, 三菱ケミカル製)を積層したCFRP積層板を用いて試験片を作成した。

本研究では、DCB試験片は80枚、ENF試験片は60枚積層し、どちらも繊維方向はすべて同じとした。DCBおよびENF試験片寸法を図1, 2にそれぞれ示す。ENF試験については、中央に10mm幅の予き裂を入れた試験片も用意した。(以降、マルチクラック試験片と呼ぶ)。予き裂として厚さ0.1mmのテフロンシートをDCB試験片は40枚目と41枚目、ENF試験片は30枚目と31枚目の間に挿入した。また、ホットプレス機を用いて圧力0.5MPa下で1時間かけて130°Cまで加熱し、2時間130°C保持した後に自然冷却する成型条件で加熱成型を行った。成型後、ファインカッターを用いてCFRP積層板を切り出した。



Fig.1 Dimensions of DCB specimen

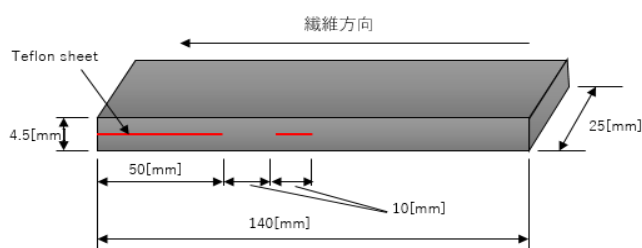


Fig.2 Dimensions of ENF specimen (multi crack)

2.2 レイリー散乱型光ファイバひずみ分布センサ

本研究で使用したセンサは、米国LUNA Technologiesが開発したODiSI A-50である。光ファイバは、光を閉じ込めるコアとそれを同心円状に囲むクラッド、ファイバ表面を保護するための被膜から構成されている。コアとクラッドの不整合によりわずかに光の照射側に散乱する後方散乱光がある。その光の一種がレイリー散乱型光である。このレイリー散乱型光強度分布がもつ空間周波数スペクトルの周波数シフトから、温度やひずみを得ることができる。

2.3 実験方法

図3と図4に試験装置の略図を示す。各試験片には、片面を白く塗装し、カッターの刃を用いてテフロンシートが挿入されている位置までき裂を入れた。光ファイバセンサはDCB試験片の上部、ENF試験片は下部に往復させるように設置した。予き裂の位置からき裂進展方向に光ファイバを配置し、ファイバ全面を接着剤で固定した。この時のひずみを0として、ひずみ測定を行った。光ファイバセンサのゲージ長、空間分解能は1mm、サンプリングタイムを2秒に設定した。

DCB試験では、精密万能引張試験機オートグラフを使用し、変位速度1.8[mm/min]の変位制御でモードIき裂進展試験を行った。き裂が進展した時に停止させ、き裂長さを目視で読み取った後試験を再開し、これを繰り返した。

ENF試験では、油圧サーボ式疲労試験機を使用し、支点間距離120mm、繰返し速度1Hzとして変位制御でモードII疲労き裂進展試験を行った。

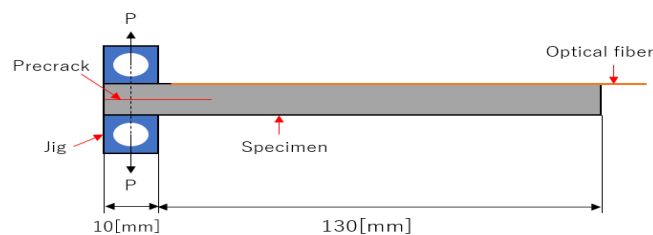


Fig.3 Experimental set-up of DCB test

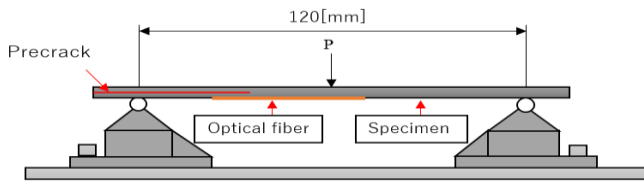


Fig.4 Experimental set-up of ENF test

3. 実験結果および考察.

3.1 DCB 試験のひずみ分布

図5に、き裂長さ $a=31.5, 42.5, 61.5\text{mm}$ に到達したときのひずみ分布を示す。実線と点線はそれぞれ測定値と ANSYS による有限要素解析結果を示している。設置したファイバの向きが往復部で逆になるため、ひずみ分布は対称となった。解析結果では、き裂先端位置でモーメントが最大となり、ひずみはモーメントに比例するため、ひずみも最大となった。き裂先端位置でひずみが不連続となっていないのは、ファイバを設置した場所がき裂から離れているからだと考えられる。測定結果も同様のひずみ分布を得ることができた。しかし、測定および解析結果で極小値をとる位置がずれている箇所があるが、これは進展するき裂が一様に進んでいかないことによるものと考えられる。

以上から、試験片の表面に設置したファイバのひずみ変化から、モード I き裂先端位置を同定することができることが分かった。

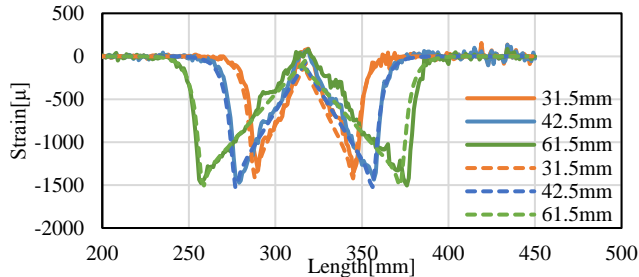


Fig.5 Measurements and analysis results of strain distribution (DCB test)

3.2 ENF 試験 (シングルクラック) のひずみ分布

図6にシングルクラック試験片を使用した ENF 試験から得られたひずみ分布の測定および解析結果を示す。 a_1, a_2 は目視で確認した進展前後のき裂先端位置である。進展前(解析)を見ると予き裂先端でひずみが極大値をとることが分かる。き裂先端からは断面係数が大きくなることで応力が小さくなり、ひずみも減少する。負荷点も荷重をかけることでモーメントが大きくなり、ひずみが大きくなるため極大値をとりそれ以降はひずみが小さくなる。進展後(解析)も同様にき裂先端付近で極大値をとる。しかし、負荷点で発生しているひずみの大ききまで急激に減少し、それ以降は緩やかに減少する。測定結果も解析結果と同様のひずみ分布を得ることができた。

以上から、負荷点位置が分かる場合、ひずみ分布からモード II き裂先端位置を同定することができることが分かった。

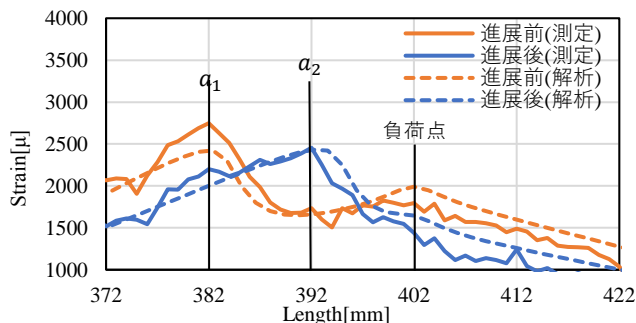


Fig.6 Measurements and analysis results of strain distribution (ENF single)

3.3 ENF 試験 (マルチクラック)

図7にマルチクラック試験片を使用した ENF 試験の測定および解析結果を示す。 a_3, a_4 は目視で確認したき裂先端位置であり、 a_4 は負荷点でもある。この試験の目的は、予き裂を徐々に進展させ閉じたき裂の位置でのひずみ変化を確認することで内部のき裂位置を同定することであったが、今回はき裂が一気に進展したため、き裂進展前後の結果から考察する。進展前の解析結果に注目すると、内部のき裂先端、つまり a_4 の位置でひずみの変化量がわずかに大きくなっていることが分かる。これが内部のき裂によって引き起こされたひずみ変化だと考えられる。しかしその変化はわずかであり、進展前の測定結果に注目すると、微小なノイズに隠れてしまっていて、今回の試験から得られたひずみ分布から直接内部のき裂先端位置を読み取ることは難しいと考えられる。

しかし、わずかでも内部のき裂によってひずみの変化量が変わるのであれば、ひずみ分布から直接読み取るのではなく、き裂が進展するたびにひずみの値の差分をとっていくことで、内部のき裂先端位置を同定できると考えられる。また、測定中に発生した微小のノイズはファイバを表面に設置するのではなく、内部に埋め込むことでその影響を抑えることができると考えられる。

進展後は予き裂と内部のき裂が連結し、き裂先端位置で極小値をとった。

以上から、ひずみ分布から直接得ることは難しいが、ひずみの差分値から内部のき裂先端位置を同定することができる

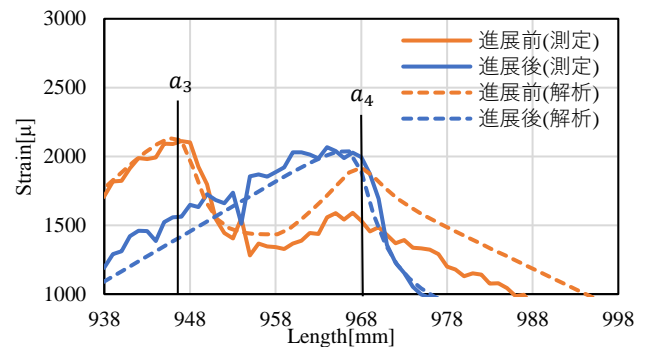


Fig.7 Measurements and analysis results of strain distribution (ENF multi)

4. 結 言

本研究では、レイリー散乱型光ファイバ分布センサを用いて CFRP 試験片のひずみ分布を測定し、層間剥離位置との関係を調べた。

- (1) 本センサを用いることで、モード I き裂先端位置で大きな圧縮ひずみが発生するため、ひずみ分布からき裂先端位置を同定することができる
- (2) モード II き裂進展(ENF)試験では、負荷点の位置が特定できればき裂先端位置で大きな引張ひずみが発生するため、ひずみ分布からき裂先端位置を同定することができる

文献

- (1) 高坂達郎, "複合材料成形技術の最前線 3.近年の FRP 成形モニタリング技術とその応用", 日本材料学会, Vol.67, No.8 (2018), pp.819-82