研究論文

繰り返し荷重下におけるポアソン比の変化による
CFRP の疲労損傷検知

板東 舜一*, 座古 勝**, 椎野 努**, 倉敷 哲生**, 松村 憲二***

(2001 年 6 月 5 日受付)

On the Detection of Fatigue Damage in CFRP by Measuring Poisson's Ratio

Shun-ichi BANDO*, Masaru ZAKO**, Tsutomu SHINO**, Tetsuo KURASHIKI**
and Kenji MATSUMURA***

(Received June 5, 2001)

Many fatigue damage detection system for CFRP composite structures has been developed recently, but they were not successful. In this paper, a new fatigue damage detection method by measuring Poisson's ratio change is described. The phenomena that Poisson's ratio change is more sensitive than stiffness change was discovered by a simple FEM analysis. Then more precise FEM analysis has been carried out and confirmed the phenomena. And, Poisson's ratio change on 0/90 and quasi-isotropic CFRP laminates were calculated. From the static strength test results, damages such as transverse cracks could not be detected by Poisson's ratio change, because of the non-linearity of the longitudinal stiffness of CFRP laminates. However, in case of fatigue tests, it was observed that a liner relation exists between the transverse crack density and Poisson's ratio change, for example, 0.5 crack/mm transverse crack density led to 3-5% Poisson's ratio change. This system would be useful not only for damage detection of coupon tests, but also for a health monitoring system of actual aircraft structures in the future.

1. 緒 言

一般に CFRP 多層積層材での初期疲労損傷は、負荷方向に対して 90° 方向に積層されている材料に現われる。これはトランスバースき裂と呼ばれ、その層の上下に配置されている層に達し、やがて層間剝離に成長する。そ

のき裂が最終強度の低下をもたらす原因となる。

現在の航空機構造の設計においては、このトランスバースき裂の発生を一つの基準としている。このようなトランスバースき裂の発生挙動については、Takeda and Ogihara^{1,2)} が研究しているが、トランスバースき裂を検知する方法についての研究は少ない。また、提案されても実機適用が困難な手法であった。そこで、実機レベルでトランスバースき裂を高い信頼性で検知する方法が開発されれば、安全性向上に寄与すると考えられる。

近年、疲労強度も高く、高精度で信頼性に優れた光ケーブルによるひずみセンサーが登場して、構造物に作用するひずみの測定に関しては大きな進歩が得られつつある。また、ひずみセンサーからの情報を分析して複合材料構造物の疲労損傷を検知するアルゴリズムについては、多くの課題が残されている。しかも、CFRP 材の疲労挙動に伴う実験結果は数少ない

かかる見地から、本論文ではひずみセンサーを用いた疲労荷重下における CFRP の疲労損傷を検知する方法についての検討結果を報告する。

* 川崎重工工業(株)航空宇宙カンパニー技術本部技術部 (504-8710 各務原市川崎町 1)

Aerospace Engineering Department, Aerospace Group, Kawasaki Heavy Industries, Ltd., 1, Kawasaki-cho, Kakamigahara, Gifu 504-8710, Japan

** 大阪大学大学院工学研究科生産科学専攻 (565-0871 吹田市山田丘 2-1)

Dept. of Manufacturing Science, Osaka University, 2-1 Yamada-oka, Suita, Osaka 565-0871, Japan

*** 川重テクノサービス(株)計測技術部 (673-8666 明石市川崎町 3 番 1 号)

Strength Research Department, Kawajyu Techno Service Co. Ltd., 3-1 Kawasaki-cho, Akashi 673-8666, Japan

Fig. 1 Typical failure mechanism of composite laminate.

Fig. 2 Failure mechanism of laminated composites by transverse cracks.

1.1 研究目的

Fig. 1 に示すように、トランスバースき裂は90°層を垂直に貫通するき裂であり、複合材料の典型的な初期破壊モードの一つである。このき裂と直交し、層間を水平に発達するき裂を層間剥離と呼ぶ。

Fig. 2 は最大引張りひずみが5,000 マイクロ程度の繰り返しひずみを負荷した場合のトランスバースき裂の進展状況を示す断面写真である。この写真に示すように、トランスバースき裂は低いひずみレベルで発生するが、直ちには破断に至らず、繰り返し荷重により層間剥離に発展し、最終的には各層が分離することによって座屈破壊するか、または繊維破壊を伴って引張り破断に至る³⁾。

このように、トランスバースき裂から最終破断に至るには、かなりの荷重増加が必要である。破壊過程が複雑で正確に予測し難いために、現在の航空機構造設計においては、極めて安全側にトランスバースき裂の発生が起こらないような低い許容ひずみで設計しているのが現状である⁴⁾。

実際の構造設計では、ある程度のトランスバースき裂の発生は許容されると考えられる。これはいわゆる損傷許容性設計といわれる設計手法であって、この設計概念自体は既に航空機構造の設計に適用されている。しかし、複合材料構造において、どの程度のレベルまでトランス

Fig. 3 FEM model.

バースき裂を許容するかは工学的な問題であって、幾多の研究が行われてきた。現在残された課題の一つは、信頼できるき裂センサーの開発と、そのセンサーからの情報と最終破壊に至るまでのプロセスの関係を明確にすることである。本研究は、このような課題を解決して、より高い設計許容応力を採用するとともに、航空機構造の信頼性の向上と軽量化を実現することを目的とするものである。

2. トランスバースき裂の進展とポアソン比の変化の予測

0/90 直交異方性積層板の FEM 解析を実施して、弾性軸方向の剛性変化よりも、ポアソン比の変化の方が、損傷の検知能力が高いことを、発見した。この原理を利用して、90°層の面内樹脂破壊によるトランスバースき裂を、0/90 直交積層材のポアソン比を測定することにより検知する方法を検討した。

理論予測として、まず16層からなる0/90直交積層材を仮定し、この内90°層から順次破壊すると仮定した。

有限要素モデルと境界条件を Fig. 3 に示す。積層板はその対称性から1/2領域を解析対象とする。また、Fig. 3 に示すように層ごとに要素分割を行った解析モデルを用いた。解析モデルの寸法は、幅12.5 mm、厚さ0.875 mm、長さ16.0 mmである。要素分割数は、x方向に80分割、y方向に25分割、z方向に8分割であり、この解析モデルの総要素数は14,000、総節点数は16,848である。ただし、解析モデルでは、積層板の0°方向をx方向と定義している。

解析に使用した物性値を、Table 1 に示す。これらのデータは、3.1.1 に示す材料について室温環境下で一方向材の0°, 90°, ±45°方向の引張り剛性試験を行い、6個の試験結果の平均値から求めたものである。なお、Lは繊維方向、Tは層の面内でLに直交する方向、ZはLとT

Table 1 Elastic properties of the FEM model.

E_L	130.0(GPa)	E_T	7.1(GPa)	E_Z	7.1(GPa)
G_{LT}	3.3(GPa)	G_{TZ}	2.8(GPa)	G_{ZL}	3.3(GPa)
ν_{LT}	0.314	ν_{TZ}	0.017	ν_{ZL}	0.2569

(a) Stiffness change (b) Poisson's ratio change

Fig. 4 Poisson's ratio and stiffness changing vs. number of damaged layer.

に直交する方向を示す。

積層された 90° 層が全て破壊した後、 0° 層が順次破壊するとして、積層板全体の弾性率を FEM で計算した。このとき、強度的にはばらつきが少なく、層全体が同時に破壊すると考える。すなわち、 90° 層の面内樹脂破壊により、 90° 層全体の弾性率の内、Table 1 の E_T 、 G_{TZ} 、 G_{LT} 、 ν_{TZ} が $1/100$ に変化すると仮定した。

0° 層の破壊は繊維が損傷するとし、 0° 層全体の弾性率の内、Table 1 の E_L 、 G_{LT} 、 G_{TZ} 、 ν_{LT} が $1/100$ に変化すると仮定した。

縦弾性率の変化についての解析結果を Fig. 4(a)、ポアソン比についての解析結果を Fig. 4(b) に示す。この図の横軸は、損傷を受けた層の数である。

これらの図から容易にわかるように、積層板の縦弾性率については、 90° 層が 8 層破壊するまでほとんど変化が無いが、ポアソン比の変化は早くから発生し、しかもその割合が大きい。

従って、ポアソン比の変化を計測することにより、トランスバースき裂の発生を明確に検知できる可能性があることが示唆できる。

3. トランスバースき裂の進展によるポアソン比変化の実験的検証

試験片による静強度と疲労強度試験を行って上記理論を検証するとともに、詳細 FEM の結果と比較してその妥当性を確認した。

Fig. 5 Static test specimen and strain gage location.

Fig. 6 Test fixture set-up.

3.1 静強度試験

3.1.1 材料および試験片

材料は、東邦レーヨン(株)製 CFRP 一方向材 QU135-197A であり、強化繊維は炭素繊維 UT-500、樹脂は高靱性エポキシ樹脂 #135、繊維目付け 190 g/m^2 、樹脂含有率 35% である。成形条件は、オートクレーブ 180°C で 90 分、3.5 気圧である。試験片の積層構成は $\{0/90/0/90\}_s$ で、ひずみゲージは単軸 5 素子、ゲージピッチ 2 mm、各ゲージの長さ 1 mm、幅 1.4 mm の多列ゲージ 2 枚を使用した。試験片形状、およびひずみゲージ貼付位置を Fig. 5 に示す。

3.1.2 試験方法および試験条件

試験方法は、ASTM D3039 に準拠して実施した。試験機は、島津製電気油圧サーボ式疲労試験機を使用し、試験環境は $23 \pm 5^\circ\text{C}$ で大気中で実施した。また、引張り速度はクロスヘッドスピード 0.2 mm/min で、荷重とひずみを計測するとともに、き裂個数は端面を CCD カメラ

Fig. 7 Crack observation system.

Fig. 8 Test apparatus of transverse crack test.

により観察し、90°層に発生するトランスバースき裂の数と、引張りひずみの関係を記録した。試験および装置の概要を Fig. 6～Fig. 8 に示す

トランスバースき裂は、Fig. 7 に示すように、CCD カメラで観察した。

3.1.3 試験結果

得られた荷重とひずみの試験結果の一例を Fig. 9、ひずみとポアソン比の関係を図. 10 に示す。

静強度試験では複合材料の縦方向ひずみの非線形性のために、Fig. 10 に示す結果になった。

次いで、ポアソン比とトランスバースき裂密度の関係を Fig. 11 に示す。

Fig. 9 Stress and strain relation of the static testing.

Fig. 10 Test results of the static testing.

前述の如く、縦方向ひずみの非線形性のために、負荷ひずみに対しポアソン比は一定の値を示さず、ポアソン比とトランスバースき裂密度の関係も明確に言及できない。

き裂密度とはトランスバースき裂の発生数を断面観察範囲長と90°層の数で除した値であり、単位長さ・1層当たりのトランスバースき裂数を意味する。

3.2 疲労強度試験

3.2.1 材料および試験片

試験片の材料、寸法と積層構成は、静強度試験と同じである。

3.2.2 試験方法および試験条件

試験装置は静強度試験と同じであり、試験条件を以下に示す。

荷重制御で、荷重比 $R = P_{\min}/P_{\max} = 0.1$ (片振り) で

Fig. 11 Relation between crack density versus Poisson's ratio.

Fig. 12 Test result of the fatigue testing.

実施した。また、最大荷重は $P_{\max}=26.64$ kN で、試験片ひずみ $10,000 \mu$ に相当する。最小荷重は $P_{\min}=2.64$ kN で、 $1,000 \mu$ に相当する。試験波形および試験速度は正弦波、1 Hz で実施した。荷重、ひずみ、トランスバースき裂個数の測定は、一定回数ごとに試験を一時停止して、静的に剛性データを取得するとともに、トランスバースき裂の個数を計測した。

3.2.3 試験結果

疲労荷重下で、単位長さ当たりのトランスバースき裂個数とポアソン比の変化を計測した。この結果、Fig. 12 に示すように、疲労荷重下で荷重振幅をベースに、トランスバースき裂個数とポアソン比の変化を計測すると、一定の傾向が確認できた。すなわち、0.5 個/mm のトランスバースき裂発生に対応して、約 4% のポアソン比変化が観察された。5 枚のひずみゲージについてほぼ同じ傾向が得られた。ただし、ゲージの真下にき裂が発生した場合には大きく波形が乱れた。

Fig. 13 Observations of crack distribution.

4. 解 析

本章では、有限要素解析手法を用いた引張挙動解析を行い、ポアソン比変化に及ぼすき裂密度の影響について評価する。まず、静的引張試験におけるトランスバースき裂進展状況を把握するため、ある規定のひずみごとの試験片断面図を作成した。その断面図をもとに有限要素モデルを作成し、トランスバースき裂の進展状況を考慮した有限要素解析を実施し、直交積層板における、ポアソン比変化に及ぼすトランスバースき裂密度の影響を評価した。

4.1 損傷状態観察結果と FEM モデル

静的引張試験において、トランスバースき裂の進展状況を観察するため、ある規定のひずみごとに試験機を止め、試験片側面の中心から ± 5 mm の範囲を CCD カメラで撮影した。そして、トランスバースき裂の分布状態を把握するために、そのビデオ画像より試験片断面図を作成した。

さらに、その試験片断面図をもとにモデル図を作成した。その結果を Fig. 13 に示す。Fig. 13 において数字はトランスバースき裂密度を表している。

また、本実験に使用した試験片の積層構成は $[0/90/0/90]_s$ であり、Fig. 13 において、薄黒部が 0° 層、白色部が 90° 層となる。

Fig. 13 より 90° 層のみトランスバースき裂が発生しているのが確認できる。これは、一方向繊維強化複合材料は繊維方向の引張強度は大きいものの、繊維直角方向の引張破壊ひずみが小さいという特性があるため、引張方向が繊維直角方向となる 90° 層にのみトランスバースき裂が発生するからである。また、トランスバースき裂は中心層から発生し、その後、上下層にき裂が発生して

Fig. 14 Procedure of making a mesh considered transverse cracks.

いることが確認できる。また、層によりトランスバースき裂数は若干異なるが、トランスバースき裂は各層にほぼ均等に発生していることが確認できる。

4.2 損傷を有する直交積層板におけるポアソン比変化

4.2.1 有限要素モデル

解析対象は、本実験で使用した CFRP 積層板とし、積層構成は本実験で使用した試験片と同様とする。FEM 解析モデルは Fig. 3 と同じである。ここで、静的引張試験におけるトランスバースき裂の分布状態ならびに進展状況を解析に反映させるために、前述の異方損傷力学を考慮した 3 次元有限要素解析を行う⁵⁾。まず、試験中に撮影したビデオ画像より得られた試験片断面のモデル図 (Fig. 13) をもとに、トランスバースき裂の発生している要素を決定する。そして、異方損傷力学に基づきその要素の損傷状態での剛性マトリックスを決定し、3 次元有限要素解析を行うこととする。

境界条件は Fig. 3 に示すようにモデルの右端面に x 方向の強制変位を与え、左端面は引張方向、すなわち x 方向のみ拘束する。ここで、右端面に与える強制変位量は、試験片断面観察時のひずみと同等となるように設定した。

ここで、トランスバースき裂に相当する要素の損傷モードを決定する必要がある。試験片観察より積層板の層内に発生する損傷はトランスバースき裂であることが確認されている。このトランスバースき裂は、層内繊維に平行なき裂で板厚方向に貫通したき裂である⁶⁾ため、Fig. 14 に示すように、トランスバースき裂に相当する要素の剛性を低下させた。そして、本研究室において開発

Fig. 15 Result of the FEM analysis, the effect of a crack density on Poisson's ratio for an orthotropic laminate.

した 3 次元有限要素解析ソルバー SACOM (stress analysis of composite materials)^{5,7)} を用いて、ポアソン比に及ぼすトランスバースき裂密度の影響を解析した。

ここで、本解析では、便宜的に、幅方向ひずみにはモデル全体の幅方向の変位量をモデル幅で除した値を、軸方向のひずみには強制変位量をモデルの長さで除した値を用い、その幅方向ひずみならびに軸方向ひずみよりポアソン比を算出することとした。

なお、健全部において使用した物性値は Table 1 と同じである。

4.2.2 ポアソン比に及ぼすき裂密度の影響

ポアソン比に及ぼすき裂密度の影響を Fig. 15 に示す。図の横軸は軸方向ひずみであり、図の縦軸はポアソン比の変化率ならびにトランスバースき裂密度である。

この解析結果より、ポアソン比の低下にはトランスバースき裂密度の増加が起因することが確認できた。よって、トランスバースき裂の発生ならびに進展状況をポアソン比測定により評価できると考える。

5. 試験結果と理論の比較

3. の Fig. 12 に示す試験結果と、4. の Fig. 15 に示す解析結果を比較して、Fig. 16 に示す。

Fig. 16 の縦軸はポアソン比変化率から 1 を差し引き、% で表示した値を示し、横軸はトランスバースき裂密度を示す。この結果、ポアソン比変化率とトランスバースき裂密度は、ほぼ一対一に対応することがわかった。

このように理論と実験の傾向はほぼ合致し、0/90 直交

Fig. 16 Comparison between test result and analytical result.

積層材については、トランスバースき裂密度 0.5/mm において 3~5% のポアソン比変化をすることが理論と実験の両面から確認できた。

ただし、解析結果のほうがポアソン比の低下率が小さいことに関しては、樹脂の非線形性を考慮していないためであると考えられる。

一般に、一方向繊維強化複合材では、強化繊維の種類を問わず非線形挙動を示す⁸⁾。そのため、より定量的にポアソン比の変化率を求めるには、一方向材の非線形特性を考慮した解析を行う必要があると考えられる。

6. 考 察

6.1 ポアソン比変化に及ぼすトランスバースき裂からの距離の影響

トランスバースき裂からの距離と、ポアソン比の関係を解析により求める。

解析モデルの寸法は、幅 12.5 mm、厚さ 0.875 mm、長さ 8.0 mm である。要素分割数は、 x 方向に 40 分割、 y 方向に 25 分割、 z 方向に 8 分割である。この解析モデルの総要素数は 7,000、総節点数は 8,528 である。境界条件は試験片右端面に強制変位 (x 方向) を与え、左端面の x 方向のみ拘束している。積層構成は $[0/90/0/90]_s$ である。なお、本解析においても、SACOM3D を使用し、物性値も前節で示した値を用いた。

以上の条件をもとに、中央 90° 層の左端にトランスバースき裂が発生していると想定し、その要素の剛性を異方損傷力学に基づき決定した後、3次元有限要素解析を行った。解析結果を Fig. 17 に示す。図の横軸はトランスバースき裂からの距離を 1 要素分の長さで正規化した値

Fig. 17 Effect of a distance from a crack on Poisson's ratio for cross ply.

Fig. 18 Effect of a distance from a crack on Poisson's ratio for quasi-isotropic ply.

であり、図の縦軸は、トランスバースき裂からある距離におけるポアソン比の値 (ν) を未損傷材のポアソン比の値 (ν_0) で除した値である。ここで、ポアソン比とは幅方向ひずみを軸方向ひずみで除した値なのだが、今回は便宜的にその幅方向ひずみは、モデル全体の幅方向の変位量をモデルの幅で除した値を用い、軸方向のひずみは、強制変位量をモデルの長さで除した値を用いている。

Fig. 17 より、ポアソン比低下率は、トランスバースき裂からの距離が小さいほど大きく、き裂からの距離が大きくなるにつれて 0 に近づくことが確認できた。このことから、トランスバースき裂発生によるポアソン比変化を検出するためには、幅方向のひずみゲージを、トランスバースき裂からできるだけ近い位置に貼付する必要がある。

3. の試験においては、全て多列ゲージを使用したのが、本解析結果によりその必要性が検証できた。

6.2 擬似等方性積層におけるポアソン比変化

航空機等の構造部材として一方向繊維強化複合材料の積層材を用いる場合、その異方性を緩和するために0°層、90°層のほかに±45°層を配した擬似等方性積層材が良く用いられる。そこで、4章におけるFEM解析を適用して、擬似等方性積層材におけるポアソン比に及ぼす損傷と測定範囲の影響を解析した。

その結果、擬似等方性積層材においては、Fig. 18に示すように、極めて小さなポアソン比変化しか期待できないことが判明した。

したがって、本研究成果によるトランスバースき裂の検知は、当面0/90直交積層材に限定せざるを得ないと考えられる。

7. 結 言

最近光ケーブル歪センサーを使用して構造物の損傷をモニターする技術が研究されているが、本方式によるトランスバースき裂検知技術は、疲労損傷の程度を確認する一つの手段となり得ると考えられる。

ただし、トランスバースき裂とひずみセンサーの距離が接近していなくてはならないという条件があることと、トランスバースき裂の発生数が少ない場合には感度が良くないという問題がある。

また、0/90の直交積層材には有効性が確認されたが、擬似等方性積層材については感度があまりよくないということも、解析的に確認できた。

これらの問題点に関しては、今後さらに検討を続ける必要があると考えられる。

また、静強度試験では、Fig. 11に示すように引張りひずみの非線形性のために一定のポアソン比を観測することが出来なかったのに対し、疲労強度試験では、Fig. 16に示すような線形の関係を得ることが出来た。これは、疲労試験では、繰り返し負荷ひずみが一定であり、ポアソン比の計測値も振幅で表示したため非線形性が除去されたものと考えられる。この結果、理論で予測されたような、トランスバースき裂の発生によるポアソン比変化を捉えることが出来たものと考えられる。

参 考 文 献

- 1) N. Takeda & S. Ogihara : *Composites Part A*, **29A** (1998), 1545-1552.
- 2) N. Takeda & S. Ogihara : Proc. 11th Int. Conf. Compos. Mater., Vol. 5 (1997), V-562-V-570.
- 3) 武田展雄 : 材料システム, **16** (1998), 63-71.
- 4) M.C.Y. Niu : *Composite Airframe Structures* (4th Ed.), Hong Kong Commilit Press Ltd., Hong Kong (1996), pp. 383-452.
- 5) 上辻靖智, 座古 勝 : 材料, **48**, 9 (1999), 1029-1034.
- 6) 小林訓史, 武田展雄 : 日本複合材料学会誌, **25**, 5 (1999), 179-187.
- 7) 日本機械学会編 : 複合材料用構造解析モデルに関する調査研究分科会報告書 (1994), III 33-III 46.
- 8) 石川隆司 : 日本複合材料学会誌, **22**, 2 (1996), 76-81.