

非破壊手法によるCFRP積層板の強度低下の評価

日大生産工(院) ○高橋 朋哉 日大生産工 邊 吾一
東葛テクノプラザ 長瀬 尚樹 (株)ジーネス 呉 丹 (株)ジーネス 品川 議夫

1. 緒言

炭素繊維強化複合材料 (CFRP: Carbon Fiber Reinforced Plastics) は従来の金属材料に比べて、軽量で比剛性・比強度に優れている材料であり、その特性を活かし航空宇宙分野の構造部材に多く使用されるようになった。しかし、CFRPの成形方法としてよく用いられているのは積層法であり、厚さ方向に繊維が無く衝撃に弱い。とくに航空機では、飛行中による雹や鳥の衝突、整備中の工具の落下、搭乗時のタラップなどの車両の接近によって衝撃を受けることが予想される。これらの衝撃によって材料内部に表面からでは確認できない層間はく離、樹脂割れ、繊維破断が生じる。さらに損傷した部分に曲げや圧縮負荷が加わると層と層がはがれ、圧縮強度が低下し、座屈や圧縮破壊が起こりやすくなる。層間はく離などは表面からでは確認できないため非破壊的に材料内部を検査する必要がある。代表的な非破壊検査方法として超音波探傷試験、X線探傷試験がある。また、非破壊検査手法の一つである加振実験の結果を用いることを開始した研究事例もある^{1),2)}。

本報告では、損傷を有するCFRP積層板の振動特性の変化に着目し、まず超音波探傷試験によって詳しい損傷状況を観察し、加振実験から固有振動数、減衰率、曲げ試験から曲げ強度を求めそれぞれの関係から非破壊的に強度低下を評価できるかどうか調査した。

2. 実験方法

2.1 試験片

試験片は炭素繊維/エポキシ樹脂プリプレグ (東レ: T700SC/2592) を積層し硬化させたものを使用し、積層構成はクロスプライ $[(0/90)_{2S}, (0/90)_{4S}]$ とした。積層板の板厚は 1.5mm, 3.1mmである。

2.2 損傷を有するビーム材の作製

はじめに成形の良し悪しの確認のために超音波探傷試験による非破壊検査を行った後に、材料内部に損傷を与えるため衝撃試験を行った。試験片寸法は100mm×100mmとし、衝撃試験後その切り出し位置によって損傷量が異なる長さ100mm, 幅15mmのビーム材を数本切り出した。

2.3 超音波探傷試験

ビーム材の損傷状況と層間はく離の大きさを測定するために超音波探傷試験を行った。探傷方法は水浸法で反射法とし、探傷条件は板厚1.5mmで探触子が15MHz、板厚3.5mmで5MHz、走査ピッチは0.1mm×0.1mmとした。探傷結果は、擬似 (テフロンフィルムを用いた) 損傷の探傷結果をもとに、健全部を青色としエコー高さが大きくなるにつれて赤色に変化するように表した。損傷面積はCスコープの投影面積をもとに色面積から損傷部分の最大面積を求めた。

Evaluation for CFRP Laminate Strength Degradation with Non-Destructive Method

Tomoya TAKAHASHI, Goichi BEN,
Naoki NAGASE, Dan WU and Yoshio SHINAGAWA

2.4 加振実験

ビーム材の固有振動数，減衰率を測定するためにインパルスハンマを用いたインパルス加振実験を行った．試験条件は，つかみ部長さ15mm，試験部長さ85mmとしてビーム材を片持ち状に固定し，インパルスハンマでビーム材に入力波を与え，自由端近傍に設置したレーザ変位計によって応答振幅を測定するインパルス加振法によって行った．固定方法はビーム材を万力ではさみ，各試験での締付けトルクが一定になるようにした．加振点は固定端側から20mmおきに4点とし，入力波と応答波はFFTアナライザ内で伝達関数に変換した．測定誤差を小さくするために一つの加振点あたり5回同じ操作を繰り返し得られた結果を平均化して最終的な伝達関数とした．そして，各ビーム材から得られた伝達関数より1次の曲げモードの固有振動数と減衰率を求めた．また，はりの減衰率を求める実験では，空気減衰や固定端の拘束による減衰の影響を考える必要があるが，本実験では損傷を与えていない健全なビーム材との相対比較を行うためこれらの影響はここでは考えないこととした．

2.5 片持ち曲げ試験

加振実験から得られる固有振動数の妥当性を確認するために，材料内部に損傷の無い健全なビーム材と加振実験の固定ジグを用いて片持ち曲げ試験を行った．片持ち曲げ試験で曲げ弾性率を測定して固有振動数を算出し，インパルス加振実験の結果と比較した．試験条件は，インパルス加振実験と同様とし自由端側から5mmのところを圧子を配置し，ビーム材に小さな荷重を与えた．固定ジグの締付けトルクは各板厚ともインパルス加振実験の条件と同じとした．

2.6 四点曲げ試験

ビーム材の曲げ強度を測定するために曲げ試験を行った．ビーム材の中央部には損傷があり損傷部分に直接圧子が接触することを防ぐために曲げ試験の方法は四点曲げとし，試験条件はJIS K 7074を参考に試験速度5mm/minとした．ビーム材と上部の圧子が接触する面は，衝撃試験で落錘子が衝突した面（圧縮側）とし各試験統一して試験を行った．試験を行ったビーム材の本数は，板厚1.5mmで13本，板厚3.1mmで18本である．

3. 実験結果及び考察

3.1 超音波探傷試験結果

板厚3.1mmのビーム材の最大損傷面積を求めるために行った超音波探傷試験の結果をFig.1に示す．Fig.1はビーム材の損傷した部分の図であり，上側はビーム材の平面（Cスコープ），下側は板厚方向（Bスコープ）を示す．Fig.1のビーム材は板厚3.1mmの実験結果の中でビーム材の最大損傷面積が最も大きいビーム材であり，最大損傷面積は658mm²である．

超音波探傷試験の場合，Fig.1の板厚方向の図の中央部のように層間はく離が多く重なっている部分の下側は層間はく離が検出されにくい問題がある．そこで，ビーム材中央部の板厚方向の層間はく離確認のため，造影剤を用いたX線透過探傷試験を行った．Fig.1と同じビーム材をX線透過探傷した結果をFig.2に示す．Fig.2では上側の図は平面，下側は板厚方向を示し16層全てを観察している．また，黒色になっているところは造影剤が浸透している部分であり，材料内部で損傷している部分である．Fig.2より，平面の図では長手方向と幅方向にいくつかクラックが入っており，板厚方向の図では全ての層間ではく離が起きていることが確認できるとともに，中央部では1層から9層まで連続的にクラックがみられる．ビーム材の中央部では超音波探傷試験で検出が難しかった部分に層間はく離が多く重なっていることも確認でき，板厚方向の観察が詳しくできる．そこで本実験では，最大損傷面積算出には超音波探傷試験の結果を使用し，板厚方向の詳しい観察にはX線透過探傷試験結果を使用した．

3.2 固有振動数の妥当性

材料内部に損傷が無い健全なビーム材を用いて，片持ち曲げ試験の曲げ弾性率から固有振動数を求めた値とインパルス加振実験で得られた固有振動数の結果を比較し固有振動数の妥当性を調査した．誤差は板厚1.5mmでは2.0%，板厚3.1mmでは1.0%となり，各板厚の誤差が小さくインパルス加振実験の妥当性が確認できた．

3.3 固有振動数・減衰率・曲げ強度

超音波探傷試験から得られた損傷面積とインパルス加振実験から得られた固有振動数（Fig.5,6）と減衰率（Fig.7）の関係，曲げ試験から得られた曲げ強度（Fig.8）の関係をそれぞれ示す．固有振動数と曲げ強度は両板厚

ともに損傷面積の増加とともに低下，減衰率は損傷面積が増加するとともに大きくなった。

固有振動数の結果に着目すると，板厚1.5mmでは最大損傷面積が112mm²のビーム材，板厚3.1mmでは最大損傷面積が430mm²のビーム材の結果が大きく低下した。板厚3.1mmのビーム材の場合は，表面にき裂は見られず，X線透過探傷試験によって板厚方向を観察すると7層目から11層目の間に層間はく離が生じ，1層から9層にかけて繊維破断を含む連続的なクラックが発生していることがわかる (Fig.3)。このビーム材と最大損傷面積が同じようなビーム材では各層間に層間はく離が生じ，板厚方向ではいくつかクラックがあるものの連続的なクラックは確認できない (Fig.4)。したがって，Fig.3とFig.4を比べると，板厚方向に繊維破断を含む連続的なクラックがあるために固有振動数が大きく低下したと考えられ，固有振動数低下には最大損傷面積の大きさだけでなく板厚方向の繊維破断を含むクラックも重要な要因の一つとなる。

減衰率の結果において，板厚1.5mmのばらつきが多い原因は損傷を有するビーム材をインパルスハンマで叩く際に最適な加振力が与えられず正確な減衰波形を取れていない問題があり，測定方法の改善が必要となる。

曲げ強度に関しては，板厚1.5mmと板厚3.1mmの健全なビーム材の曲げ強度はそれぞれ1080MPaと1072MPaとなった。健全なビーム材と比較すると，板厚1.5mmでは最大62%低下，板厚3.1mmは最大81%低下した。損傷を有するビーム材の破壊様相は全て圧縮破壊となり，材料内部の損傷によって圧縮側で破壊が起こりやすくなった。

3.4 曲げ強度と減衰率の相関性

曲げ強度の低下をインパルス加振実験から非破壊的に評価できるか検討するため，相関性を調査した。曲げ強度と減衰率の関係をFig.9に示す。両板厚ともに曲げ強度が低下するとともに減衰率が大きくなる傾向となった。相関係数とその有意性を検定すると，板厚1.5mmでは相関係数-0.51でかなり相関があるが有意性は得られず，板厚3.1mmでは相関係数-0.75で強い相関があり高度な有意性が得られた。したがって，板厚3.1mmの場合，減衰率の変化から曲げ強度の低下を推定できる可能性がある。板厚1.5mmでは，減衰率のばらつきを少なくする必要があり，今後試験方

法の改善が必要である。

4. 結 言

(1) 損傷面積の増加によって固有振動数と曲げ強度は小さくなり，減衰率は大きくなる傾向となった。(2) 固有振動数低下の要因は，層間はく離だけではなく板厚方向の繊維破断を含むクラックも要因の一つとなる。(3) 曲げ強度と減衰率の相関性を調べると，板厚1.5mmでは減衰率の測定方法の改善が必要となり，板厚3.1mmの場合では減衰率の変化から曲げ強度の低下を推定できる可能性がある。(4) 今後は，板厚1.5mmにおける減衰率の測定方法の改善と積層構成が異なる場合の影響を調査する。

「参考文献」

- 1) G.Ben, Y.Nishi, K.Mori and T.Yamaguchi, "Estimation of Bending Strength of CFRP Cross-Ply Laminates from Damping Capacity Using by Neural Network", Key Engineering Materials, Vol.145-149, 1998, pp.427-432
- 2) 高橋朋哉，呉丹，長瀬尚樹，邊吾一，品川議夫：第35回複合材料シンポジウム講演要旨集，(2010)，pp.199-200

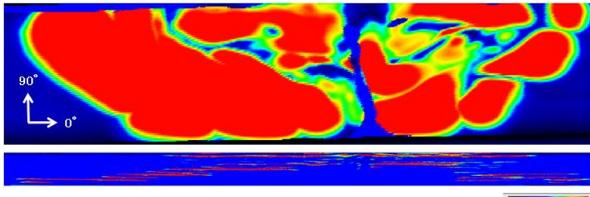


Fig.1 Ultrasonic Inspection (t=3.1mm Delamination Area 658mm²)



Fig.2 X-ray Inspection (t=3.1mm Delamination Area 658mm²)



Fig.3 X-ray Inspection (t=3.1mm Delamination Area 430mm²)



Fig.4 X-ray Inspection (t=3.1mm Delamination Area 434mm²)

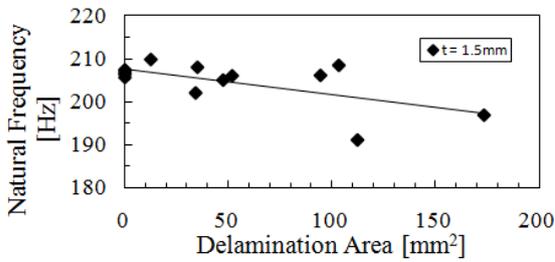


Fig.5 Relation of Natural Frequency to Delamination Area (t=1.5mm)

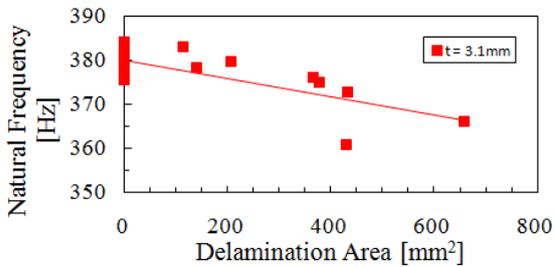


Fig.6 Relation of Natural Frequency to Delamination Area (t=3.1mm)

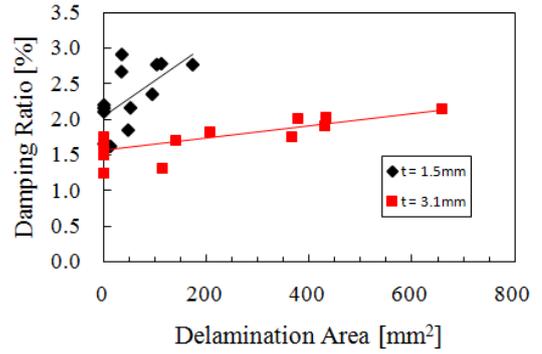


Fig.7 Relation of Damping Ratio to Delamination Area

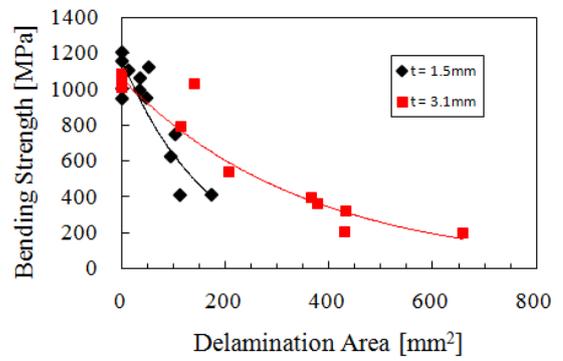


Fig.8 Relation of Bending Strength to Delamination Area

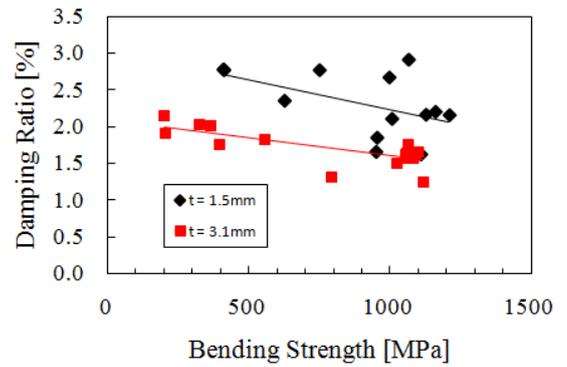


Fig.9 Relation of Damping Ratio to Bending Strength