

持続可能な循環社会に向けたプラスチック複合材料の開発
～ 損傷を有する CFRP 積層板の曲げ強度予測手法の検討～

材料技術室 蓮見 薫, 長瀬 尚樹
生産技術室 細谷 昌裕
プロジェクト推進室 篠田 清, 花澤 明洋
日本大学生産工学部 邊 吾一, 高橋 朋哉

Development of Plastic Matrix Composite Material for Sustainable Society
～ Prediction of bending strength of damaged CFRP laminate ～

Naoki NAGASE, Kaoru HASUMI, Masahiro HOSOYA, Kiyoshi SHINODA,
Goichi BEN and Tomoya TAKAHASHI

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るため、その特性を活かし、構造部材として多くの分野での適用が進んでいる。CFRP 積層板は、繊維を積層して成形するため、厚さ方向に繊維が無く衝撃に弱い。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。損傷個所に曲げ荷重や圧縮荷重がかかると座屈や圧縮破壊が起きやすい。損傷個所の評価として非破壊検査は重要である。現在、主流となっている非破壊検査手法はコストが大きいため、より簡便に損傷状況や強度予測を簡便に行える手法があれば有効である。本研究では振動から得られるデータを基に強度予測ができないかを検討するため、損傷を有する CFRP 積層板の加振実験を行った。加振実験で得られた固有振動数や減衰能と、試験片が有する損傷面積や曲げ強度・剛性との相関性について調査した。

1. 緒言

炭素繊維強化複合材料(以下、CFRP)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るため、その特性を活かし航空宇宙分野をはじめ、構造部材として多く使用されている。近年では自動車の軽量化へ向けた活用も進んでいる。CFRP 板の多くは、繊維を積層して成形するため、厚さ方向に繊維が無く衝撃に弱い。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。機械用構造物では衝撃を受けた後の圧縮強度の低下や曲げ荷重による圧縮も負荷されるため、曲げ強度の低下を考える必要がある。層間はく離などは目視では確認できないため非破壊的に検査する必要があるが、現在、主流となっている非破壊的な検査手法では検査コストがかかるため、より簡便な損傷状況や強度

予測の調査方法が確立できれば有効である。

そこで、本研究では損傷を有するCFRP 積層板を用いて加振試験により動的評価を行った後、静的曲げ試験を行い、加振試験から得られた固有振動数と減衰能の変化と曲げ強度の関係を調査した。

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、積層構成が擬似等方性対称積層板([45/0/-45/90]_s, [45/0/-45/90]_{2s})とし、密度 $1.8 \times 10^3 \text{kg/m}^3$ 、板厚1.9mm及び3.8mmである。寸法は縦100mm、横100mmとした。

2. 2 実験概要

実験の流れを図1に示す。まず、成形した状態を確認するために超音波探傷試験による非破壊検査を行った。衝撃試験を行った後、損傷の状況

を確認するため超音波探傷試験を行い、試験片の中央部から長さ100mm、幅15mmのビーム材を4本切り出し、損傷の大きさの異なる試験片を作製した。このビーム材を用いて、インパルスハンマを用いた加振実験を行い固有振動数と減衰能を測定し、最後に4点曲げ試験を行った。

2. 3 衝撃試験

衝撃試験は落錘型の衝撃試験機を使用し、先端が直径12.7mmの半球状の落錘子を用いた。試験片の固定方法は円孔を有する鉄板の間に試験片を挟みその上から4点式のクランプによって固定した。衝撃エネルギーの値は、衝撃後圧縮試験(JIS K 7089)の単位厚さあたりの衝撃エネルギー6.67J/mmを参考にし、試験片が貫通破壊しない条件下で試験をおこなった。衝撃試験の衝撃エネルギーは1.0J/mmから6.67J/mmの間で7条件行い、さらに健全部との比較のため衝撃を与えていない無損傷の試験片も用意した。

2. 4 超音波探傷試験

超音波探傷試験では、成形後の状態確認、衝撃試験による損傷の確認、試験片切断後のビーム材としての損傷面積の算出を行った。探傷方法は水浸法とし、探触子は15MHz(板厚1.9mm)、5MHz(板厚3.8mm)、走査ピッチは各0.1mm×0.1mmとして探傷を行った。

ビーム材の損傷面積が最も大きかった場合のB・C・Dスコープの画像を図2に示す。図2では衝撃試験において落錘子が衝突した面を上面とし、繊維の配向角は画像の横方向が0°、縦方向が90°である。健全部の底面エコー高さに対してエコー高さの60%以上を損傷とし、健全部を青色、エコー高さが大きくなるにつれて赤色となるようにした。ビーム材の損傷面積の算出方法は、Cスコープの投影面積をもとに損傷部分の色面積から求めた。図2(上図)の場合、長手方向の損傷の最大長さは28.6mm、幅方向の最大長さは12.7mm、損傷面積は255mm²である。図2(下図)は、長手方向の損傷の最大長さ78.2mm、幅方向の最大長さは15.0mm、損傷面積は1185mm²である。

2. 5 加振実験

振動試験は、つかみ部長さ15mm、試験部長さ85mmとして試験片を片持ち状に固定し、インパルスハンマで試験片に入力波を与え、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

は試験片を万力ではさみ、各試験での締付けトルクが一定になるようにした。入力波と応答波はFFTアナライザー内で伝達関数に変換し、測定誤差を小さくするために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、各試験片から得られた伝達関数より固有振動数と減衰能を求めた。また、振動試験では空気減衰による影響を考える必要があるが、本実験では健全な試験片と損傷を有する試験片を比較した際の固有振動数と減衰能の変化を調べた。

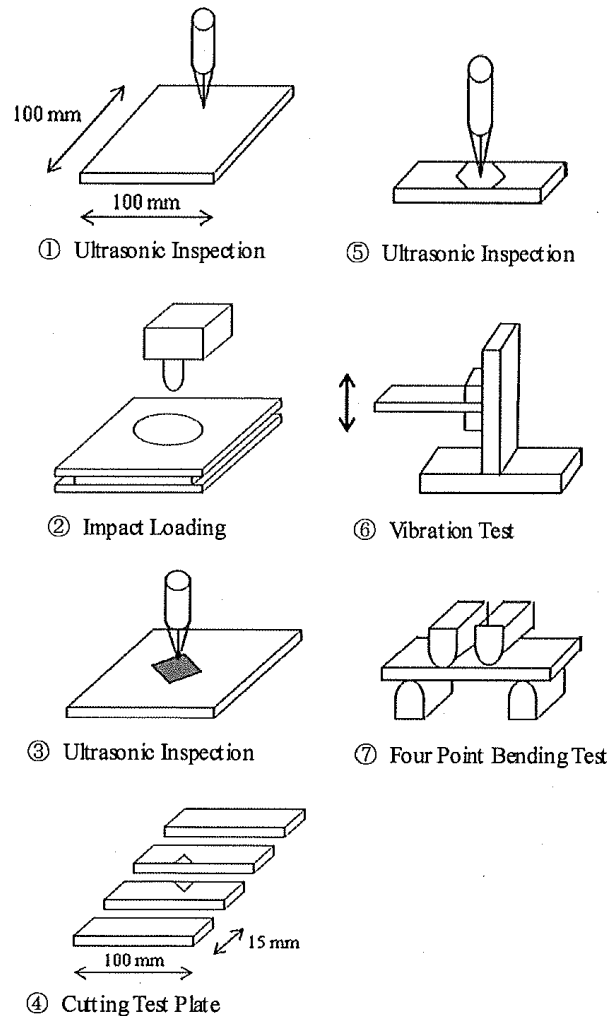


図1 実験フローチャート

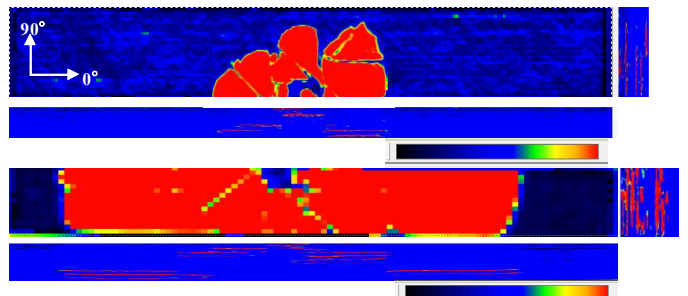


図2 超音波探傷試験結果

2. 6 曲げ試験

試験片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4点曲げ試験とした。試験条件はJIS K 7074に準拠し、試験速度5mm/minとした。試験片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。

3. 実験結果および考察

3. 1 固有振動数・減衰能

超音波探傷試験によって得られた損傷面積と1次の曲げモードにおける固有振動数の関係(図3)及び減衰能の関係(図4)をそれぞれ示す。固有振動数は損傷面積が増加するとともに無損傷の試験片よりも低下した。内部の損傷によって剛性が低下したためと考えられる。板厚1.9mmでのばらつきは大きい、板厚3.8mmの結果では損傷面積が大きくなると無損傷の場合と比べて減衰能が大きくなる傾向となった。

3. 2 曲げ強度・曲げ弾性率

図5に損傷面積と曲げ試験によって得られた曲げ強度の関係を示す。損傷を有する試験片は損傷面積が増加するとともに曲げ強度が低下した。試験片の壊れ方は損傷がある中央部の圧縮荷重を受けた方で壊れた。今回の曲げ試験では、損傷を有する試験片のほとんどが同じような壊れ方をしたことから内部に損傷を有する場合、曲げ荷重がかかると圧縮破壊が起きやすくなることがわかる。

図6に損傷面積と曲げ試験で得られた曲げ弾性率の関係を示す。損傷を有する試験片は損傷面積が増加するとともに曲げ弾性率が低下する傾向となった。先に述べた固有振動数の結果と同様に、材料内部に生じた損傷によって剛性が低下するためと考えられる。

3. 3 曲げ強度と減衰能の関連性

図7に曲げ強度と減衰能の関係を示す。曲げ強度が大きくなるにしたがって減衰率が小さくなる関係となった。板厚1.9mmでは、十分な相関が得られていないが、板厚3.8mmの試験片においては、相関が確認できることから、厚板においては、減衰能は曲げ強度を予測できる一つのパラメータとして捉えることができると考えられる。

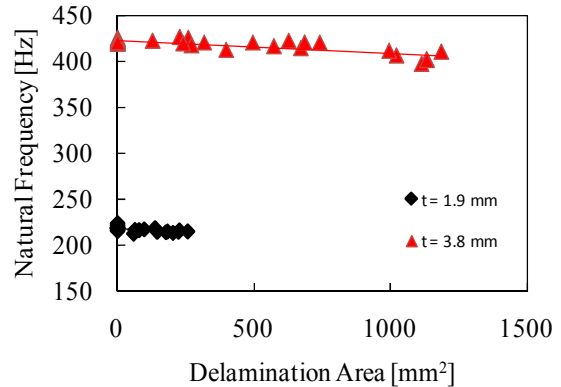


図3 損傷面積と固有振動数の関係

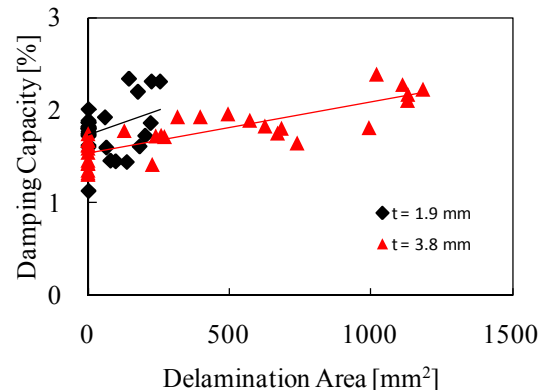


図4 損傷面積と減衰能の関係

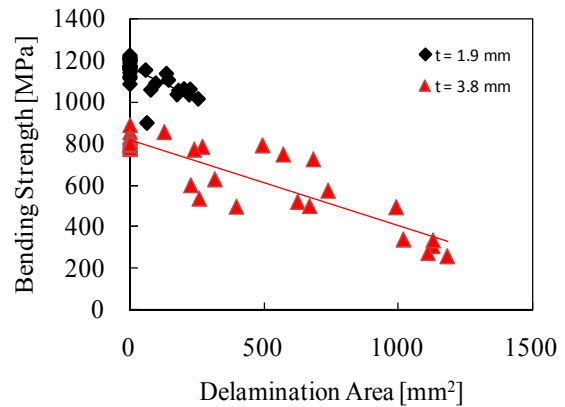


図5 損傷面積と曲げ強度の関係

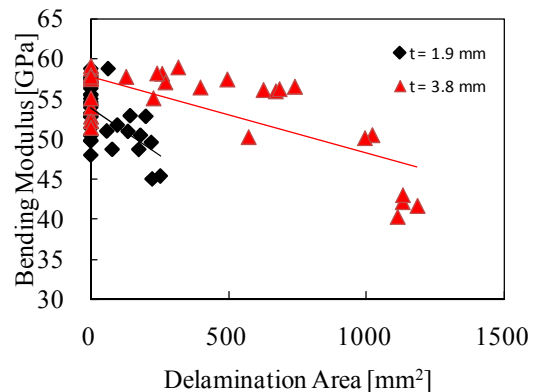


図6 損傷面積と曲げ弾性率の関係

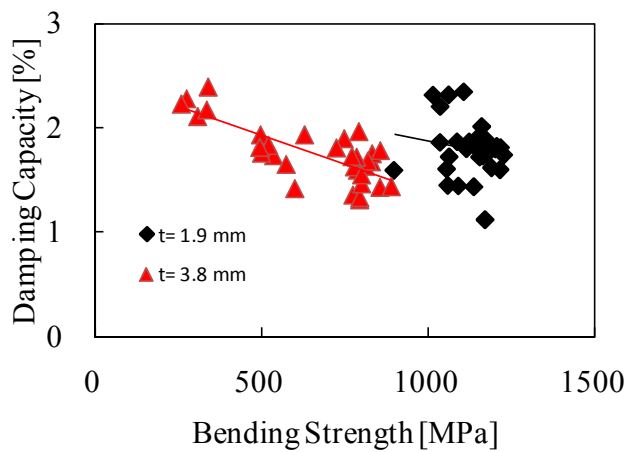


図7 曲げ強度と減衰能の関係

4. 結言

インパルスハンマを用いた振動試験の結果、損傷面積の増加によって固有振動数は低下し、減衰能は大きくなる傾向となった。曲げ強度と曲げ弾性率はともに損傷面積の増加によって低下した。

今後、さらに損傷面積を増加させた場合の試験を行うとともに、積層構成による影響を調査する。

参考文献

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