

雷撃損傷を有する CFRP サンドイッチ製風車ブレードの損傷と固有振動数の関係

日大生産工 (院) ○呉 丹
日大生産工 邊 吾一, 坂田 憲泰
昭電(株) 曾根原 健夫

1. 緒言

炭素繊維強化複合材料 (Carbon Fiber Reinforced Plastics ; 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り、現在では航空宇宙分野の構造部材に多く使用されている。

近年では風力発電用ブレードの大型化に伴い従来のガラス繊維強化複合材料 (Glass Fiber Reinforced Plastics ; GFRP) から CFRP へ移行されている¹⁾。しかし、CFRP 製ブレードは運用中に雹や鳥の衝突や落雷などによって衝撃を受けることが予想されるが、厚さ方向に繊維が無く衝撃負荷に弱いこと、これらの衝撃負荷によって材料内部に表面から確認できない層間はく離、樹脂割れ、繊維破断が生じる可能性がある。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。そのため、内部損傷を検査す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。一方で、非破壊検査手法の一つである加振実験の結果を用いて検討した研究事例もある²⁻⁴⁾。

本研究では CFRP 製ブレードの内部損傷をブレードの振動特性を用いて非破壊的に評価し、ブレードの残存強度を明らかにすることを目的とする。本報告ではインパルス加振実験を用いて CFRP 製風車ブレードの固有振動数と減衰比の測定を行い、FEM 解析結果と比較した結果について報告する。

2. 実験方法

2.1 試験片

Fig.1 に実験で用いた CFRP 製風車ブレードを示す⁵⁾。本ブレードは、平織り CF クロス (東邦テナックス: W-3101 3K, 三菱レイヨン: TRK101M 12K) と、コア材 (ウレタン) エポキシ樹脂を使用し VaRTM にて成形された翼長 2168.85mm, 最大翼弦長 483.81mm, ブレード中央翼厚 45.3mm となっている。両者の繊維体積含有率は 60% で、表面層の積層構成は位置によって異なり、①では [3K((±45) / (0/90) / (0/90)) / 12K((±45) / (0/90) / (0/90) / (±45))], ②では [3K((±45) / (0/90) / (0/90)) / 12K((±45))]₄, ③では [3K((±45) / (0/90) / (0/90))]₃ となっている。①, ②, ③の表面層の板厚はそれぞれ 5.1mm, 9.44mm, 4.5mm で、コア材の厚さも位置によってそれぞれ異なり①では最大 207.0mm, 最小 66.5mm, ②では最大 66.5mm, 最小 43.3mm, ③では最大 43.3mm, 最小 29.6mm となっている。

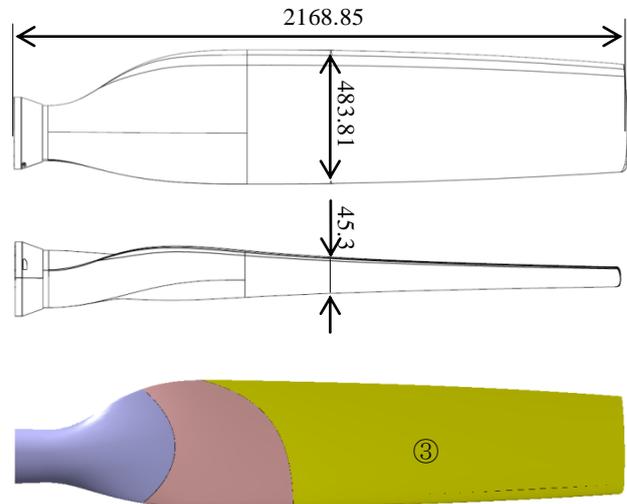


Fig.1 Dimensions and stacking sequences of wind turbine blade

2.2 インパルス加振実験

CFRP 製風車ブレードの固有振動数、減衰比を測定するためにインパルスハンマを用いた加振実験を行った。実験では 3 本のブレードを用い、試験条件はブレードの片側端部をボルトで固定した片持ち状とし、インパルスハンマでブレードに入力波を与え、2 軸の加速度計によって応答振幅を測定した。計測は測定誤差を小さくするために 1 つの応答点あたり 3 回行った。Fig.2 に加振点と加速度計の設置箇所を示すが、面内と面外のモードを確認するために加振点はブレード固定部最上部から 45° の位置に固定し、加速度計の設置箇所は翼長方向に 200mm 間隔 (中心部付近は 100mm 間隔) で合計 40 点とした。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、その伝達関数から 1 次モードの固有振動数を求めた。

2.3 実験結果

CFRP 製ブレードの模擬雷撃実験前後でのインパルス加振実験の結果、Blade 1 の模擬雷撃前の 1 次の曲げモードの固有振動数が 13.1 Hz であったのに対し、模擬雷撃後の固有振動数は大きく 13.7 Hz となり、模擬雷撃実験前後での差は 4.6% となった。2 次と 3 次の曲げモードについても、模擬雷撃実験前後での固有振動数の差はそれぞれ 4.0% と 5.4% となった。さらに、Blade 2 と Blade 3 においても模擬雷撃実験前後で、固有振動数の差は 5% 程度となったが、インパルス加振実験では、実施者を加振系の一部として行うため、

加振の良否が実施者の技能に依存する度合が他の方法よりはるかに大きくなる⁹⁾。そのため、これらの差はインパルス加振実験の測定誤差範囲内と考えられる。また、模擬雷撃実験前後で固有振動数がそれほど変わらなかったのは、本CFRP製ブレードに雷撃による局所的な損傷が生じて、CFRP製ブレード全体の剛性が模擬雷撃実験前とほとんど変化しなかったためと考えられる。

3. 模擬雷撃試験

CFRP製風車ブレードに損傷を与えるために模擬雷撃試験を行った。模擬雷撃発生には、雷インパルス電流発生装置を用いた。試験ではブレードの下面側を上向きで両端部を木製の支持台に乗せ、ブレード中心部に電流を発生させるSUS製の放電電極棒を設置した。放電電極棒先端とブレード間の距離が2.0mmとなるよう調整し、ブレード根元金属部と試験棟の接地を繋げることでブレードを通過した印加電流の導通経路を確保した。本試験では20kA～30kAの範囲になるようにインダクタ・レジスタを調整し雷撃した。

4. 空中超音波探傷試験

模擬雷撃試験後の損傷の確認、ブレードの最大損傷面積の算出のために空中超音波探傷試験を行った。探傷方法は非接触空中法で二探触子透過法とし、探傷条件はプローブの周波数が50kHz、走査ピッチは2.0mm、探傷感度30～40Dbとした。探傷結果は、透過パルス高さが送信パルスの40%以下を損傷とみなし、健全部と思われる箇所を青色とし透過パルス高さが小さくなるにつれて赤色に変化するようにした。最大損傷面積は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損傷面積を求めた。

4.1 模擬雷撃試験と空中超音波探傷試験の結果比較

着雷点近傍を詳しく外観目視検査すると、繊維破断及び樹脂が焼失した様子が確認できた。これは、雷の発生による衝撃波及びその際に発生する高温による樹脂溶解、蒸発の複合的な影響によって発生するものと考えられる。

空中超音波探傷試験を行い、さらに詳しく損傷状況を確認した。探傷結果を見ると、ブレード1、ブレード2、ブレード3とも繊維破断を含む損傷は着雷点近傍に集中していることが確認できた。また、外観で観察された損傷箇所以外で透過パルス高さがかなり低下する箇所が検出された。幅方向に透過パルス高さがかなり低下する箇所は幅方向に連続的に入っていたため、雷の影響によるものと考えにくく、ウレタンコアの繋ぎ目であると考えられる。ブレードほぼ体調に渡ってパルス高さが低くなる箇所が検出しており、これはブレードの端面の表面形状の影響で超音波がまっすぐ通れないことによる影響だと考えられ、この二つの透過パルス高さが低下した部分は雷撃による損傷とは見なさなかった。そして、外観で観察された損傷箇所を拡大した結果、透過パルス高さ40%以下の範囲は実際の傷の範囲より広い結果となり、雷撃試験によってブレード

の内部に損傷が広がっている可能性が考えられる。

5. 結 言

雷撃試験前と雷撃試験後の振動特性を比較すると、模擬雷撃実験前後で固有振動数がそれほど変わらなかった。

外観で観察された損傷箇所以外で透過パルス高さがかなり低下する箇所が検出され、幅方向に検出された箇所がまっすぐな直線で断続的に続いていたため、雷の影響が考えにくい、ウレタンの隙間の可能性が大きいと考えられる。

ブレードほぼ体調に渡ってパルス高さが低くなる箇所が検出しており、これはブレードの端面の表面形状の影響で超音波がまっすぐ通れないことによる影響だと考えられる。

外観で観察された損傷箇所を拡大した結果、透過パルス高さ40%以下の範囲は外観で観察された損傷箇所の範囲より広い結果となり、雷撃試験によってブレードの内部に損傷が広がっている可能性が考えられる。

謝 辞

末筆ながらCFRP製風車ブレードを提供して頂いた(株)ジーエイチクラフトの皆様に厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 新藤健太郎, 川節望, 黒岩隆夫, 田北勝彦, 風力発電装置用大型FRPブレードの製造技術, 日本船舶海洋工学会誌, (2009), pp.33-37.
- 2) 高橋朋哉, 邊吾一, 長瀬尚樹: 第1回日本複合材料合同会議(JCCM)講演論文集, (2010), pp.577-579.
- 3) 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.
- 4) 宮内貴史, 呉丹, 坂田憲泰, 邊吾一, 品川議夫, 振動特性によるCFRP製風車ブレードの解析と実験, 56th FRP CON-EX 2011 講演要旨集, pp.81-82.
- 5) 長松昭男: モード解析入門, コロナ社(2006), p293-323.

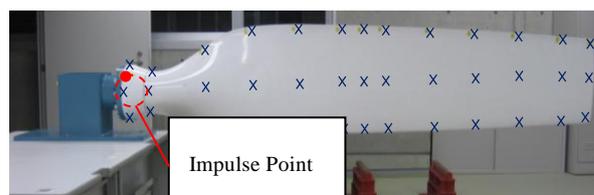


Fig.2 Impulse point and response points