

雷撃を受けた CFRP サンドイッチ製風車ブレードの構造安全性評価

日大生産工(院) ○倉石 宗一郎, 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

炭素繊維強化プラスチック (Carbon Fiber Reinforced Plastics, CFRP) は従来の金属材料に比べて、軽量で比剛性・比強度に優れており、現在では航空機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 FRP 製ブレードに関する研究が多く行われ、従来使用されていたガラス繊維強化プラスチック (Glass Fiber Reinforced Plastics, GFRP) から CFRP へ移行されている。CFRP 製ブレードが運用中に雹や鳥の衝突や落雷などによって衝撃負荷を受けると、厚さ方向に繊維が無く衝撃負荷に弱いため、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 線探傷試験などがあり、加振実験の結果を用いて非破壊検査を検討した研究事例¹⁾もある。

風力発電施設の故障・事故の調査報告²⁾によると、日本では落雷による被害が最も多く、全体の 25.8%となっている。また、風車の総停止時間の比較では、ブレードの故障が最も長くなっており、風車の利用率を向上させるためには、雷撃を受けた後のブレードの振動特性と力学特性を把握しておく必要がある。そこで本研究では、供試体に定格風速 12.5m/s (定格出力 10kW)、カットアウト風速 25m/s、定格回転数 200rpm、最大回転数 1000rpm の小型風車用の CFRP サンドイッチ製ブレード (以下、CFRP 製ブレード) を用いて模擬雷撃実験を行い、インパルス加振実験、曲げ実験、さらに FEM 解析で CFRP 製ブレードの遠心力解析を行い、雷撃後の CFRP 製ブレードの構造安全性を評価した結果について報告する。

2 実験方法

2・1 供試体

実験に用いた CFRP 製ブレードを図 1 に示す。本 CFRP 製ブレードは、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) とエポキシ樹脂、コア材にウレタンを使用し、VaRTM にて成形された翼長 2168 mm, 最大翼弦長 483 mm, ブレード中央翼厚 45 mm のサンドイッチ構造となっている。CFRP 層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)], ③では [3K((±45) / (0/90) / (0/90))]となっている。①, ②, ③の表面層片側の板厚の設計値はそれぞれ 1.95 mm, 1.08 mm, 0.651 mm で、コア材の厚さも位置によって異なる。

2・2 模擬雷撃実験

模擬雷撃実験は(株)昭電にて行い、模擬雷撃の発生には雷インパルス電流発生装置を用いた。実験は CFRP 製ブレードの両端部を支持台に乗せ、CFRP 製ブレードの下面側を上向きにして行った。実験方法は IEC 61400-24 を参考にし行い、真鍮製の電極部の先端には絶縁体を取付けた。また、CFRP 製ブレード根元金属部と試験棟の接地を繋げることで CFRP 製ブレードを通過した印加電流の導通経路を確保した。雷電流波高値は累積頻度分布³⁾を参考に決定し、累積頻度分布の約 50%となる 20~30 kA (関東地方で通常起こる雷)と、累積頻度分布の約 15%となる 60kA (日本海側で起こる激しい雷)にした。模擬雷撃実験には 3 本の CFRP 製ブレードを用いた。Blade 1 では最も落雷する可能性が高い CFRP 製ブレードの先端に 20~30 kA, Blade 2 では多重落雷を想定し先端, 中央,

Structural safety evaluation of the CFRP wind turbine blade struck by lightning impact

Soichiro KURAIISHI and Wu DAN
Goichi BEN, Kazuhiro SAKATA and Takeo SONEHARA

根元の3箇所にて20~30 kA, Blade 3では曲げ特性, 回転時の遠心力による引張り特性に最も影響が出る根元に60 kAの模擬雷撃を行った。

2・3 インパルス加振実験

CFRP製ブレードの固有振動数の測定は, インパルスハンマを用いた加振実験で行った(図2)。試験条件はCFRP製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CFRP製ブレードに入力波を与え, 3軸の加速度計によって応答振幅を測定した。入力波と応答波はFFTアナライザ内で伝達関数に変換し, その伝達関数から3次曲げモードまでの固有値を求めた。

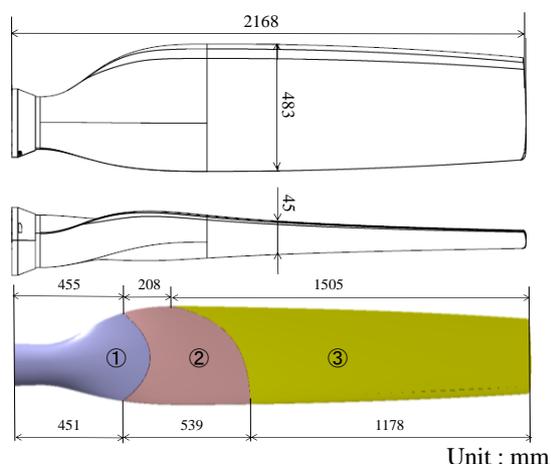


図1 CFRP製ブレードの寸法

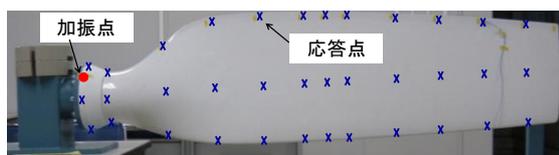


図2 加振点と加速度計の設置箇所

2・4 曲げ実験

CFRP製ブレードの片持ち曲げ実験には, 根元に60 kAの模擬雷撃実験を行ったBlade 3を用いた。実際の風車は回転しているため, 遠心力を模擬する必要があるが, 実験が困難なため考慮せず, 曲げの死荷重のみを与えて剛性試験を行った。固定条件はインパルス加振実験と同様で, 荷重は実際の風車を想定してCFRP製ブレードの下面側に掛け, 自由端側から5 mmの位置に配置したダイヤルゲージでたわみを測定した。荷重箇所は自由端側より30 mmの位置から500 mm間隔で合計4箇所とし, 1個が24.9 Nの鉛弾体を598 Nになるまで掛けていった。

3 実験結果と考察

3・1 模擬雷撃実験

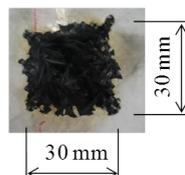
模擬雷撃損傷の代表例として, 実験後のBlade 2の全体図と着電点近傍の拡大図を図3(a), (b)に示す。図3(b)より, 長手方向と幅方向に約30 mmにわたって繊維破断及び樹脂が焼失した様子が確認できたが, これは雷の発生による衝撃波及びその際に発生する高温による樹脂溶解, 蒸発の複合的な影響⁴⁾によって発生したと考えられる。また, 模擬電撃によりCFRP製ブレードの前縁部分の塗装が一部剥がれたが, 着電点の裏側のCFRP製ブレード表面には損傷は確認されなかった。

3・2 インパルス加振実験

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を表1に示す。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いが他の方法よりはるかに大きくなる⁵⁾。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製ブレードの図3の箇所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。



(a) 全体図



(b) 拡大図

図3 模擬雷撃実験後のCFRP製ブレード

表 1 雷撃前後の固有振動数の比較

(a) Blade 1		
Natural Frequency [Hz]		
	Before lightning	After lightning
1st	13.1	13.7
2nd	52.6	50.5
3rd	112	106

(b) Blade 2		
Natural Frequency [Hz]		
	Before lightning	After lightning
1st	13.1	13.6
2nd	60.1	60.1
3rd	106	100

(c) Blade 3		
Natural Frequency [Hz]		
	Before lightning	After lightning
1st	13.4	13.9
2nd	64.6	65.1
3rd	123	125

3・3 曲げ実験

模擬雷撃前の Blade 3 の最大変位が 32.2 mm であったのに対し、模擬雷撃後の Blade 3 の最大変位は 32.8 mm となり、模擬雷撃実験前後で両者の差は僅かであった。このことから、固有振動数の結果と同様に、雷撃による局所的な損傷が本 CFRP 製ブレードの曲げたわみに与える影響はほとんどないと推察される。

4 FEM 解析

4・1 解析方法

FEM 解析には汎用有限要素法プログラム ANSYS Ver 14.5 を用いて、CFRP 製ブレードの振動解析と曲げ解析、さらに JIS C 1400-2 (風車-第 2 部：小型風車の設計要件) の荷重ケース E を参考に、模擬電撃実験後の Blade 3 が本最大回転数の設計値である 1000rpm で回転した際の応力分布を求め、本 CFRP 製ブレードの構造安全性の検証を行った。

要素には 8 節点構造ソリッド (SOLID185) を用い、固定条件は、CFRP 製ブレードの取り付け部の節点を完全拘束した。その結果、節点数は 23848、要素数は 20781 となった。表 2 に解析で用いた CFRP の材料定数を示すが、 x 軸と y 軸が面内方向、 z 軸が面外方向を示し、 E がヤング率、 G がせん断弾性率、 ν がポアソン比、 F が引張り強度を示す。図 4 に FEM モデルを示す。また、ウレタンコアの材料

定数にはカタログ値を用い、ヤング率 E を 0.025 GPa、ポアソン比 ν を 0.25 とした。模擬雷撃による損傷は、損傷部の要素の剛性をほぼゼロに定義することで表現し、損傷前の弾性率に 1×10^{-9} を掛けた。CFRP の破壊基準には最大応力説を用いた。

$$\lambda = \frac{\sigma_L}{F_{L_t}}, \quad \lambda = \frac{\sigma_T}{F_{T_t}}, \quad \lambda = \frac{|\tau_{LT}|}{F_{LT}} \quad (1)$$

$$\lambda \begin{cases} > 1 & \text{Failure} \\ = 1 & \text{Limit} \\ < 1 & \text{Safety} \end{cases}$$

σ_L : 繊維方向応力

σ_T : 繊維直角方向応力

τ_{LT} : 面内せん断応力

F_{L_t} : 繊維方向引張強度

F_{T_t} : 繊維直角方向引張強度

F_{LT} : 面内せん断強度

表 2 CFRP の材料定数

		W3101	TRK101M
$E_x=E_y$	GPa	55.4	47.5
E_z	GPa	8.80	8.50
G_{xy}	GPa	3.44	3.45
$G_{yz}=G_{zx}$	GPa	2.66	2.66
ν_{xy}		0.06	0.078
$\nu_{yz}=\nu_{zx}$		0.32	0.27
$F_x=F_y$	MPa	792	570
F_{xy}	MPa	51.3	51.1

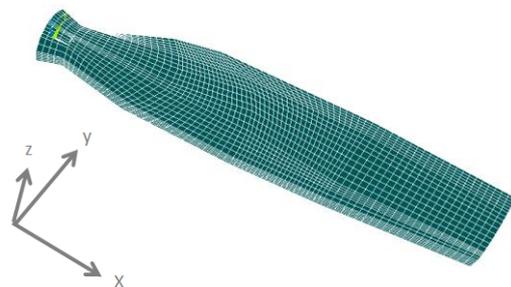


図 4 FEM モデル

4・2 雷撃前の実験結果と解析結果の比較

模擬電撃実験前の CFRP 製ブレードのインパルス加振実験の結果と FEM 解析結果の比較を表 3 に示すが、実験結果は Blade 1~3 の平均値となっている。1 次と 2 次の曲げモードの実験結果が 13.2

Hz と 59.1 Hz であったのに対し、FEM 解析結果は 13.1 Hz と 60.1 Hz となり、実験結果と FEM 解析結果はほぼ一致した。曲げ実験においても、模擬雷撃実験前の Blade 3 の最大変位が 32.2 mm であったのに対し、FEM 解析値は 34.5 mm となり、両者の値は概ね一致を示した。

4・3 雷撃後の実験結果と解析結果の比較

模擬雷撃実験後の CFRP 製ブレードのインパルス加振実験の結果と FEM 解析結果の一例として、Blade 2 の比較を表 3 に示す。3 次の曲げモードの結果はメッシュ分割数の影響で、実験結果と FEM 解析結果の誤差が大きくなったが、1 次と 2 次の実験結果と FEM 解析の誤差は 5% 程度なり、インパルス加振実験の誤差の範囲内で一致を示した。曲げ実験結果の比較においても、Blade 3 の実験結果の最大変位が 32.8 mm であったのに対し、FEM 解析値は 34.8 mm となり、両者の値はほぼ一致を示した。

表 3 雷撃実験前後の実験結果と FEM の比較

	Natural Frequency [Hz]			
	Before lightning		After lightning	
	Exp.	FEM	Exp.	FEM
1st	13.2	13.1	13.6	13.0
2nd	59.1	60.1	60.1	59.8
3rd	114	127	100	126

4・4 構造安全性の検証

模擬雷撃実験前後の Blade 3 に、最大回転数 1000 rpm を負荷した際の最大応力説によるコンター図を図 5 に示す。

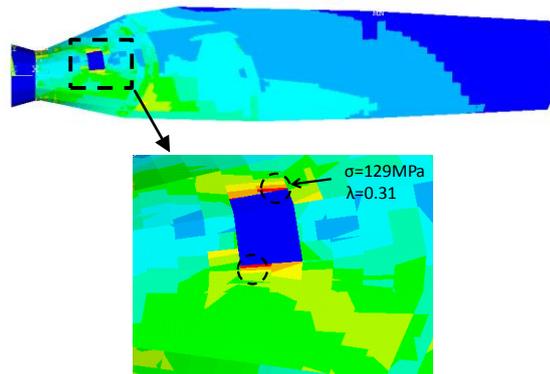


図 5 最大応力説によるコンター図

遠心力により発生した引張応力を表 2 の各方向の引張強度で割った値 λ を表し、 λ が 1 を超えた時に破壊とみなす。模擬雷撃実験前の Blade 3 では、積層構成が変わる図 1 の①と②の境界近傍で発生

し、 λ は 0.24 となった。一方、根元に 60 kA の模擬雷撃を行った後では、模擬雷撃部近傍で λ は 0.31 となり、模擬電撃実験前より λ は 29% 大きな値となったが破壊は発生しない結果となった。

5 結 言

- 1) 累積頻度分布を基に、雷電流波高値の累積頻度分布の約 50% となる 20~30 kA と、累積頻度分布の約 15% となる 60 kA の模擬雷撃を CFRP 製風車ブレードに与えた結果、着雷点近傍で樹脂溶解と蒸発、繊維破断等の複合的な損傷が発生した。しかし、損傷範囲は局所的であり、着雷側の表面層の近傍に限定されるため、振動特性と曲げ特性にほとんど影響を与えなかった。
- 2) 模擬雷撃前後で固有振動数と最大たわみの実験結果と FEM 解析結果は概ね一致し、モード形状も一致した。
- 3) CFRP 製ブレードの根元近傍に模擬雷撃による損傷を模擬し、最大回転数で運用された際の安全性を最大応力説で評価した結果、本 CFRP 製ブレードでは、累積頻度分布の約 15% となる 60 kA の雷撃を受けた後でもすぐに破壊基準に達しないことが明らかになった。また、遠心力による最大応力の値は、固有振動数と曲げたわみの場合に比べて、雷撃の影響が大きくなる。

末筆ながら CFRP 製ブレードを提供して頂いた(株)ジーエイチクラフトと、空中音波探傷試験にご協力頂いた株式会社ジーネスの皆様に厚く御礼申し上げます。

「参考文献」

- 1) 邊吾一，西恭一，黄一正，藤川由美：ニューラルネットワークと実験データによる CFRP 積層材の損傷同定，日本機械学会論文集(A 編)，62 巻，602 号(1996)，2338-2343。
- 2) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：次世代風力発電技術研究開発事業（自然環境対応技術等（故障・事故対応調査））(2009 年)，34-40
- 3) 株式会社昭電：雷撃対策(2013.02)，6。
- 4) 平野義鎮，勝俣慎吾，岩堀豊，轟章：模擬雷撃を加えた CFRP 積層板の損傷挙動，日本複合材料学会誌，35 巻，4 号(2009)，165-174。
- 5) 長松昭男：モード解析入門，コロナ社(2006)，p293-323。