

CFRP製風車ブレードの振動及び曲げ実験と解析

日大生産工(院) ○宮内 貴史 日大生産工(院) 呉 丹
日大生産工 坂田 憲泰 日大生産工 邊 吾一 (株)ジーネス 品川 議夫

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、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。また、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プラスチック (Glass Fiber Reinforced Plastics ; GFRP) からCFRPへ移行されている。しかし、CFRP製ブレードは運用中に雹や鳥の衝突、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では確認できない層間にはく離、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、内部損傷を非破壊検査する方法として超音波探傷試験、X線探傷試験、または非破壊検査手法の一つである加振実験の結果を用いる方法^{1,2)}などがある。

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が、本報告では第一報として、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を測定した結果、片持ち曲げ実験でたわみとひずみを測定した結果をFEM解析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。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, ブレード中央厚さ45.3mmのブレードとなっている。両者の体積含有率は60%で、CFRP表面層の積層構成は位置によって異なり、

Fig.1の(A)が $[3K((\pm 45) / (0/90) / (0/90)) / 12K((\pm 45) / (0/90) / (0/90) / (\pm 45))]$, (B)が $[3K((\pm 45) / (0/90) / (0/90)) / 12K(0/90)]_4$, (C)が $[3K((\pm 45) / (0/90) / (0/90))]_3$ となっている。また、表面層の板厚は(A), (B), (C)それぞれ2.47mm, 4.72mm, 2.25mmで、コア材の厚さも位置によってそれぞれ異なり(A)では最大209.5mm, 最小58.8mm, (B)では最大52.3mm, 最小29.1mm, (C)では最大36.6mm, 最小31.9mmとなっている。

2.2 インパルス加振実験

風車ブレードの固有振動数と減衰比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。実験では3本のブレードを使用し、試験条件はブレード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、3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個所を示すが、面内と面外、振り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、加速度計の設置個所は翼長方向に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アナライザ内で伝達関数に変換し、その伝達関数から固有振動数と減衰比を求めた。また、振動モードはモード解析ソフトME'scopeVESを用いて求めた。

2.3 片持ち曲げ実験

風車ブレードのたわみとひずみを評価するために片持ち曲げ実験を行った。試験では、実際の風車を想定してブレードの下面側に荷重を掛けた。Fig.3に示すように荷重個所は自由端側より30mmの位置から500mm間隔で合計4個所とし、錘を各点に9.81N, 19.6N, 29.4N, 39.2N, 58.8Nの順番で4個所同時に掛けた。たわみとひずみの計測個所をFig.3, Fig.4に示す。たわみはブレード中心部(a)と自由端側最端部(b)で計測し、ひずみは積層構成の変わり目を含めたFig.4の8個所 (①～⑧) にひずみゲージを長手方向に貼り付けた。

Vibration and Bending Test and Analysis of CFRP Wind Turbine Blade

Takahiro MIYAUCHI, Dan WU,
Kazuhiro SAKATA, Goichi BEN, Yoshio SHINAGAWA

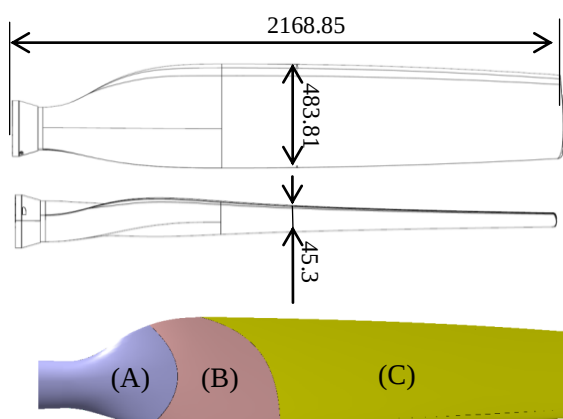


Fig.1 Dimensions of CFRP wind turbine blade

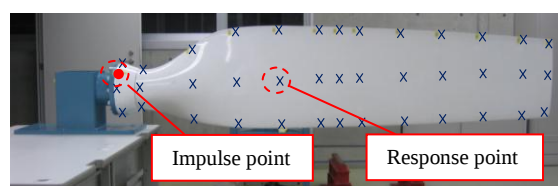


Fig.2 Impulse and response points

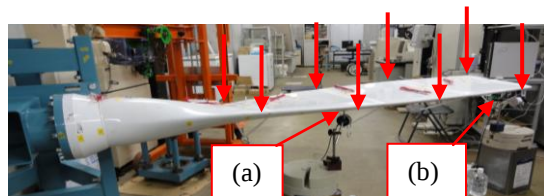


Fig.3 Positions of loads and displacement measurements

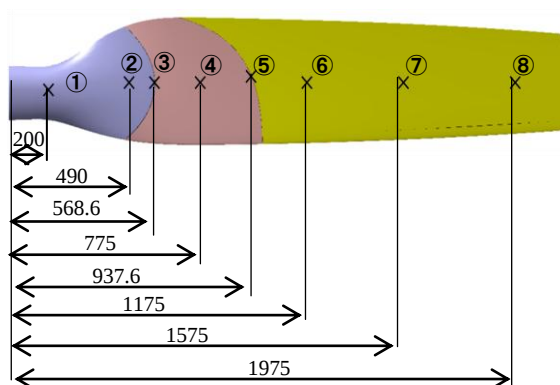


Fig.4 Positions of strain gages

3. 実験結果

3.1 インパルス加振実験

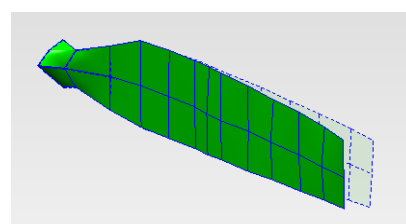
インパルス加振実験より得られたCFRP製風車ブレードの固有振動数と減衰比をTable 1とTable 2に示し、モデル解析ソフトME'scopeVESより求めた振動モードをFig.5に示す。1次固有振動数と減衰比の平均値は14.6Hzと0.278%となり、振動モードは1次曲げモードを示した。2次固有振動数と減衰比は27.1Hzと1.018%となり、振動モードは面内方向のモードを示した。3次固有振動数と減衰比は54.4Hzと0.724%となり、振動モードは2次曲げモードを示した。

Table 1 Natural frequencies

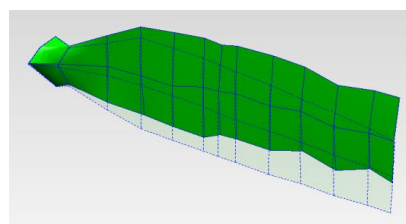
	Natural Frequency [Hz]			
	Blade 1	Blade 2	Blade 3	Ave.
1st	14.5	14.5	14.7	14.6
2nd	26.9	27.1	27.2	27.1
3rd	50.4	60.1	52.7	54.4

Table 2 Damping ratios

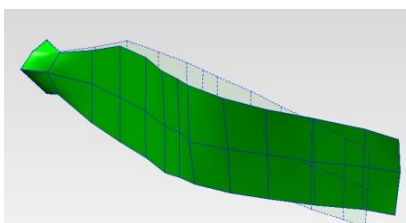
	Damping Ratio [%]			
	Blade 1	Blade 2	Blade 3	Ave.
1st	0.299	0.384	0.151	0.278
2nd	0.911	1.210	0.933	1.018
3rd	0.645	0.778	0.748	0.724



(a) First vibration mode shape, 14.6Hz



(b) Second vibration mode shape, 27.1Hz



(c) Third vibration mode shape, 54.4Hz

Fig.5 Vibration mode shapes obtained from experiments

3.2 片持ち曲げ実験

Fig.3の(a)と(b)のたわみの結果をFig.6に示す。最大たわみは(a)で2.76mm, (b)で12.7mmとなった。また、ひずみの実験結果をFig.7とFig.8に示す。最大ひずみは積層構成が変化するFig.4の⑤と⑥で発生した。

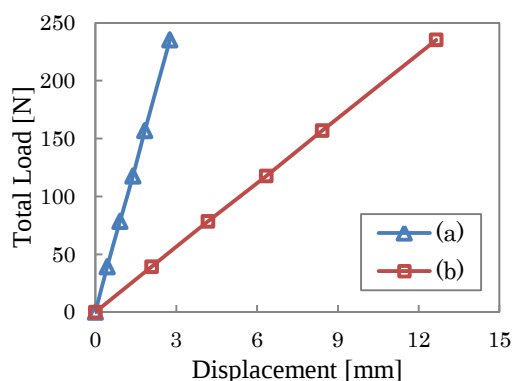


Fig.6 Results of displacement

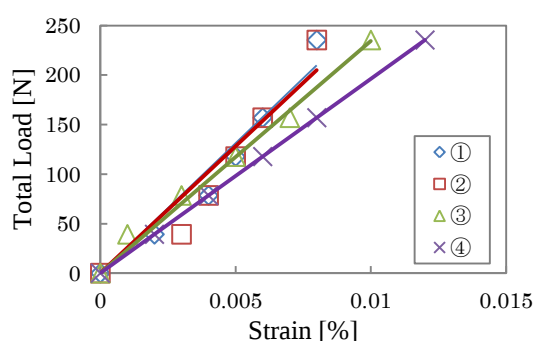


Fig.7 Results of strain (①-④)

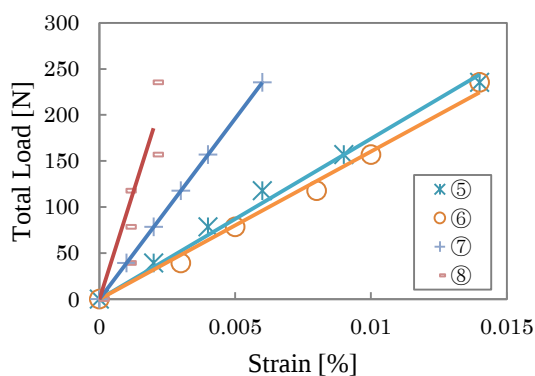


Fig.8 Results of strain (⑤-⑧)

4. FEM解析

4.1 解析方法

実験結果の検証を行うために、汎用有限要素法プログラムANSYSver.14.0を用いてCFRP製風車ブレードの振動解析および静解析を行った。境界条件はボルト固定部拘束の片持ち状とし、要素は、CFRP表面層とコア材に8節点積層ソリッド (SOLID185) を用いた。その結果、節点数は9,348、要素数は7,084となっている。Table 3に解析で用いた材料定数を示す。

4.2 加振実験結果と振動解析結果の比較

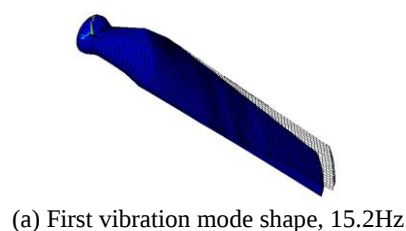
Table 4にインパルス加振実験で求めた固有振動数とFEM解析結果の比較を示す。また、FEM解析より求められた振動モードをFig.9に示す。実験結果の1次固有振動数は14.6Hzに対し、FEM解析結果は15.2Hzで誤差4.2%と良好な一致を示した。また、FEM解析で求められた振動モードも1次の曲げモードを示し、実験結果と良好な一致を示した。2次固有振動数、3次固有振動数はそれぞれ誤差が34.9%と16.1%と大きくなった。しかし、振動モードは2次と3次共に良好な一致を示した。

Table 3 Material properties

CFRP	W-3101 3K	TRK101M 12K
Modulus of elasticity		
Longitudinal	50.4 GPa	52.6 GPa
Transverse	7.1 GPa	7.4 GPa
Shear	3.44 GPa	3.84 GPa
Poisson's ratio		
Longitudinal	0.34	0.34
Transverse	0.02	0.02
Urethane Core		
Young's modulus	12 MPa	
Poisson's ratio	0.25	

Table 4 Comparison between experimental and FEM results

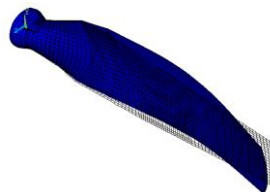
	Natural Frequency		
	Experiment [Hz]	FEM [Hz]	Difference [%]
1st	14.6	15.2	4.2
2nd	27.1	41.6	34.9
3rd	54.4	64.8	16.1



(a) First vibration mode shape, 15.2Hz



(b) Second vibration mode shape, 41.6Hz



(c) Third vibration mode shape, 64.8Hz

Fig.9 Vibration mode shapes calculated from FEM

4.3 片持ち曲げ実験結果と静解析結果の比較

たわみの実験結果とFEM解析結果の比較をFig.10に示す。(a), (b)共に実験値よりもFEM解析値の方が小さい結果となった。

ひずみの実験結果とFEM解析結果の比較の一例をFig.11に示す。たわみの結果と同様にFEM解析値よりも実験値の方が大きくなった。

5. 結 言

CFRP製風車ブレードのインパルス加振実験及び片持ち曲げ実験を行い，FEMにて振動解析及び静解析を行い，実験結果とFEM解析結果を比較した。

実験結果の1次固有振動数は14.6Hzに対し，FEM解析結果は15.2Hzで誤差4.2%と良好な一致を示した。また，FEM解析で求められた振動モードも1次の曲げモードを示し，実験結果と良好な一致を示した。しかし，2次と3次では，振動モードは一致しているものの固有振動数の誤差が大きくなる結果となった。

ひずみの実験値はFEM解析値のほうが大きくなった。ひずみ⑤，⑦はFEM解析値よりも実験値の方が大きくなった。そのため，今後はFEM解析の材料定数の見直しを行う。

「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) T.Miyauchi, D.Wu, G.Ben, K.Sakata, Y.Shinagawa, "Evaluation for Vibrational Characteristics of CFRP Wind Turbine Blade", 9th Canada-Japan Workshop on Composites Full Paper, J10 (2012)

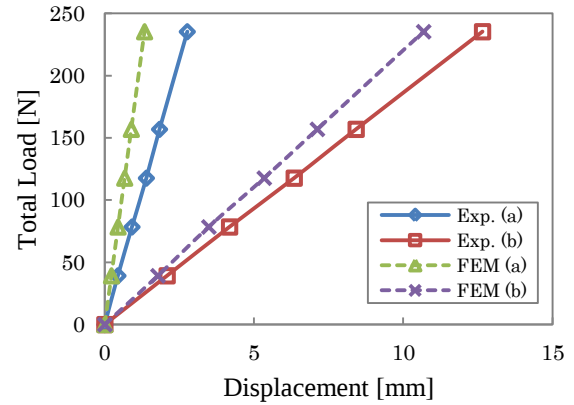


Fig.10 Comparison of displacement between experimental and FEM results

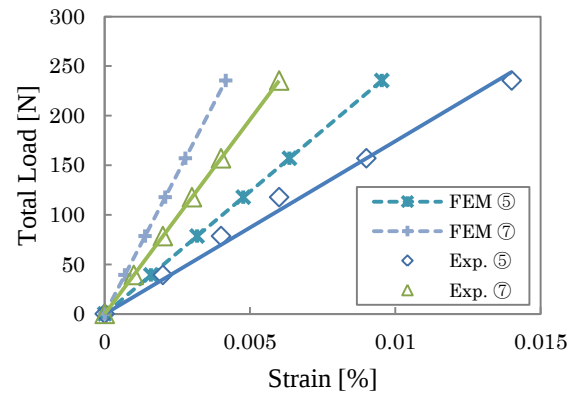


Fig.11 Comparison of strain between experimental and FEM results