

風車ブレード CFRP の破壊確率評価

中央大学 学生員 ○酒井 佑樹
中央大学 正会員 佐藤 尚次

1. はじめに

近年、地球温暖化の緩和やエネルギーの安全保障、政策的な課題達成の必要性等から、持続的に利用可能とされる自然エネルギーの導入が世界中で進められている。中でも、風力発電導入に対する事業採算性の向上は、より上空の強風を利用すること及び風車の受風面積拡大に因るため、風車の大型化が進んでいる。わが国においても風力発電の導入が進む一方で、風車設置後の品質管理上の問題や、特異な気象条件に起因する諸問題等により、風車の倒壊・破損・損傷等の被害を受けることが少なくない。被害例として、2003年の台風14号の影響による風車のブレード破損が挙げられる。このような被害が生じた場合の事後的評価・調査は頻繁に行われている¹⁾。しかし、風車ブレードCFRPの破壊確率を評価している研究は少ないことが現状である。

以上のような背景より、本研究は強風に対する評価及び疲労強度解析を行うことで、2通りの側面から破壊確率を評価する。それらの結果が、今後の風力発電プロジェクトの1つの指標となることを目的とする。

2. 基本条件

本研究では、対象地点として沖縄県宮古島の北側狩俣地区に位置する宮古風力発電実証研究設備を想定する。風速に関しては気象庁の沖縄県宮古島のデータをハブ高さ80mに換算したものをを用いることとし²⁾、風車のブレード部を評価対象とする。また、対象とする風車の供用期間は20年とする。

3. 強風危険度の算出

3.1 確率分布モデルの設定

風速データの確率分布モデルを決定する方法として、Probability Weighted Moment(PWM)法を用いて一般化極値分布(GEV)の位置パラメータ μ 、尺度パラメータ σ 、形状パラメータ ξ を推定し、形状パラメータの符号により適合する極値分布を決定する。風速データの順序標本について小さい方から i 番目の値 x_i を超過する確率を F_i として、風速データとの対応関係をHosking plotにより定義する。Hosking plotを用いたPWMの不偏推定値 M_j は式(1)のように算定できる。

$$M_j = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i F_i^j \quad (1)$$

ここで、 N は風速データ数である。

式(1)によりGEVのパラメータを推定した結果を表-1に示す。表-1に示すように、 $\xi < 0$ となったため、本研究で対象とする風速データはWeibull分布に従うといえる。

3.2 強風ハザード曲線の導出

確率分布モデルの設定の結果から、年最大風速の発生頻度をWeibull分布として当てはめることで、式(2)により強風ハザード曲線 $H(x)$ を算出する。

表-1 GEVのパラメータ推定結果

M_0	M_1	M_2
33.83	19.94	14.52
位置パラメータ: μ	尺度パラメータ: σ	形状パラメータ: ξ
29.08	9.29	-0.07

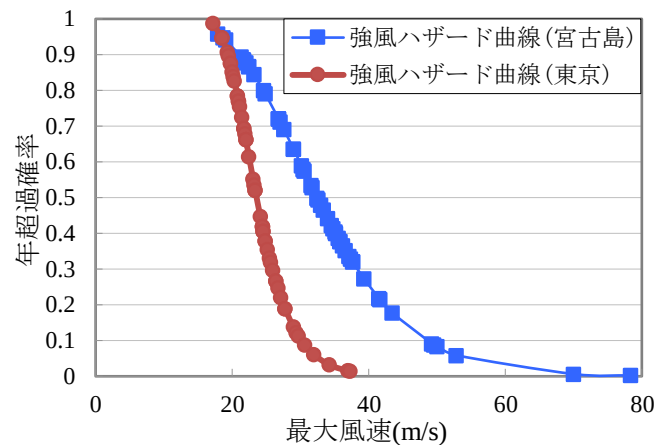


図-1 強風ハザード曲線

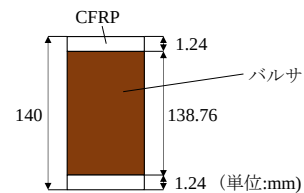
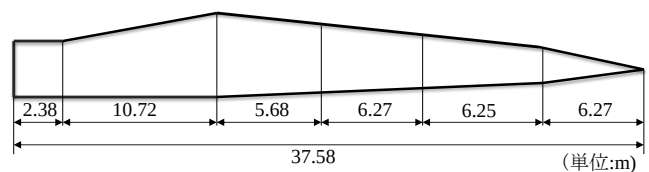


図-2 ブレード設計概要

$$H(x) = 1 - \exp \left[- \left\{ 1 + \xi \left(\frac{x - \mu}{\sigma} \right) \right\}^{-\frac{1}{\xi}} \right] \quad (2)$$

図-1に強風ハザード曲線を示す。また、参考として東京の最大風速の強風ハザード曲線を示した。図-1において、東京と宮古島の強風ハザード曲線を比較すると、東京の風速データの分布は間隔が狭いが、宮古島の風速データの分布は最大風速45m/s以上ではプロットの間隔が広いことが確認できる。

この結果から、台風の襲来が風速分布のばらつきに影響していると考えられる。

4. 強風時破壊確率評価

4.1 ブレードの設計概要

宮古風力発電実証研究設備に定格出力2,000kWの風車を設置する場合を仮定して、強風時の風車のブレード部に対する破壊確率評価を行う。対象とするブレード

キーワード：風車、一般化極値分布、CFRP、破壊確率、疲労強度解析

連絡先：〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 tel.03-3817-1816 fax.03-3817-1803

ドの設計概要を図-2 に示す。ブレードは中空構造であり、翼厚部分は CFRP とバルサのサンドイッチ構造とする。また、CFRP とバルサの曲げ弾性係数はそれぞれ 55.86kN/mm^2 , 14.70kN/mm^2 とする。CFRP は一方向炭素繊維プリプレグを 8 層(0/±45/90)s に積層したものを仮定する³⁾。CFRP の特徴として、剛性・疲労強度が高く、軽量であることが挙げられる。

4. 2 風荷重評価

風荷重は、図-2 に示すようにブレードを 6 分割して算出する。風車のブレードに関して、速度圧 q は式(3)により求めることができる。

$$q = \frac{1}{2} \rho u^2 (1 - I^2) G_D \quad (3)$$

式(4)は設計風速を最大風速に置き換えた評価式であり、 ρ は空気密度、 u は最大風速、 I はハブ高さにおける乱流強度、 G_D はガスト影響係数である。式(3)を用いることで、風速と荷重 w の関係は式(4)のようになる。

$$w = q C_b(r_k) c(r_k) \Delta r (\cos \alpha)^3 \quad (4)$$

ここで、 $C_b(r_k)$ は平均風力係数、 $c(r_k)$ は平均弦長、 Δr はブレード方向の長さ、 α はアジマス角と同じ 30° である。

式(3)及び式(4)により得られた任意の最大風速に対応する風荷重の算出結果を用いて破壊確率を求める。ただし、CFRP の曲げ強度を S-N 曲線の繰返し回数 10^6 に対応する応力を用いることとし、風荷重に対する CFRP 曲げ強度の対数をとった値の平均値 ξ_R を 6.50、標準偏差 η_R を 0.88 としている。本研究では CFRP の破壊確率を表すフラジリティ曲線 $P_f(w)$ を式(5)とする。

$$P_f = \Phi \left(\frac{\ln(w) - \xi_R}{\sqrt{\eta_S^2 + \eta_R^2}} \right) \quad (5)$$

ここで、 Φ は標準正規分布の累積分布関数、 η_S は風荷重の対数をとった値の標準偏差である。式(2)により得られた年超過確率と式(5)により算出した破壊確率の関係を図-3 に示す。

図-3 から、ブレード 2, 3 の CFRP の破壊確率はそれぞれ最大で 38.7%, 36.9% であり、対応する風速(78.4m/s)の年超過確率は 0.13% となった。また、風車の供用期間内に発生する可能性のある風速の最大値 53.9m/s に対する破壊確率は、ブレード 2 では 16.3% であり、ブレード 3 では 15.1% である。この結果から、風車の供用期間内において、ブレードの曲げによる CFRP の剥離が起こり得ることが確認できる。

5. 疲労強度解析

モンテカルロシミュレーションを用いて、過去の風速データ⁴⁾の平均値及び標準偏差から、その確率分布と同じ形状に従う風速を 20 年間発生させる。各風速発生時のブレードの曲げ応力を算出し、レインフロー法により応力振幅レベルと繰返し回数に分解する。本研究では、ブレード 2 の付根から 3m の点における曲げ応力を計算し、応力頻度分布を算出した。また、得られた応力頻度分布をもとに疲労寿命の計算を行った。ただし、寿命予測式として式(6)に示す修正マイナー則を用いた。

$$D = \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} \quad (6)$$

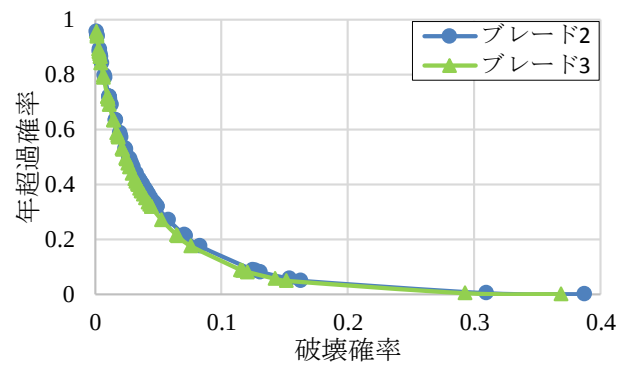


図-3 年超過確率と破壊確率の関係

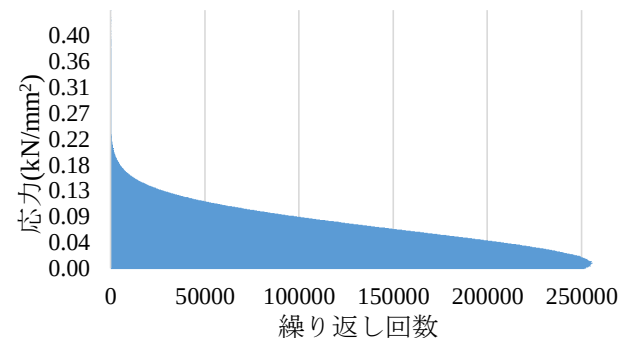


図-4 応力頻度分布

ここで、 D は累積疲労損傷度、 N_i は各応力振幅レベルが繰返されたときの疲労寿命、 n_i は各応力振幅レベルの繰返し回数である。 D が 1 以上となった場合に破壊が起こる。

ブレード 2 の付根から 3m の点の応力頻度分布を図-4 に示す。疲労強度解析の結果、3m の点における累積疲労損傷度は 0.32 となった。この結果から、繰返し風荷重による風車ブレード CFRP の疲労寿命は非常に長いことが確認できる。

6. おわりに

強風に対する破壊確率評価及び繰返し風荷重に対する疲労強度解析を行った。本研究における条件では、以下の結論を得た。

- (1) 風車の供用期間内において、ブレード CFRP の強風に対する損傷の可能性を示した。
- (2) 風車の供用期間内において、ブレード CFRP に対する繰返し風荷重の影響は非常に小さい。
- (3) CFRP の曲げ強度の面において、宮古風力発電実証研究設備における定格出力 2,000kW の風車の運用は可能であると考えられる。

今後は、使用データの検討及び再計算を行い、精度を高めていく予定である。

参考文献

- 1) 株式会社 シーテック：ウインドパーク笠取発電所 CK-19 号機風車 ナセル脱落事故について(報告書), 2013
- 2) E の数値を算出する方法並びに V_0 及び風力係数の数値を定める件, 平成 12 年 5 月 31 日建設省告示第 1454 号
- 3) 浜口泰正, 下河利行：炭素繊維複合材の切欠き試験片における疲労寿命分布, 航空宇宙技術研究所報告 658 号, 昭和 55 年 12 月 3 日受付
- 4) 気象庁 HP
<http://www.jma.go.jp/jma/index.html>