

風車発電時最大風荷重の統計的外挿係数評価式の提案

東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 学生会員 ○石井 秀和
 東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 正会員 石原 孟

1. はじめに

風車はその特性上、発電時の風荷重が暴風時のそれを上回ることがあり、風車の健全性評価においては、正常発電時や暴風時などの様々な荷重ケースを想定し、最大風荷重を評価する必要がある。また、風車の供用期間は約20年で、その期間の大半が発電中であるため、国際規格IEC61400-1の第3版では、正常発電時の最大風荷重の50年再現期待値が新しい荷重ケースとして追加された¹⁾。暴風時最大風荷重に関しては精度の良い評価式が提案されている²⁾。一方で、発電時最大風荷重の50年再現期待値に関しては、シミュレーションが困難であるため、10分間最大値の期待値に統計的外挿係数を掛けて算出する方法が一般的である。その統計的外挿係数として1.5という値が提案されているが³⁾、この値はある環境条件のもとで、限られたシミュレーションの結果から外挿によって導き出された値であり、外挿方法に左右される上、環境条件によって値が変わる可能性がある。そのため、あらゆる環境に適用できる統計的外挿係数の評価式の提案が望まれている。

そこで、本研究では発電時最大風荷重の50年再現期待値を算出するため、安定的な外挿手法について考察し、外挿を用いて算出した50年再現期待値を基にして環境条件によって変化する統計的外挿係数の評価式を提案することを目的とする。

2. 時刻歴応答解析の概要

本研究では土木学会構造工学委員会・風力発電設備支持物の動的解析と構造設計小委員会が作成した標準風車モデルを用いた。詳細なパラメータに関しては参考文献4)を参照されたい。また、風の乱流強度 I_{ref} 、風速出現頻度分布の形状を考え、それらを変化させることである環境条件を想定する。乱流強度は国際規格IEC61400-1の標準乱流モデルを採用し、 I_{ref} は0.10, 0.13, 0.16, 0.19, 0.22の5通りを考えた。各ケースに関して、平均風速を5m/sから25m/sまで2m/s刻みで、11通りの10分間時刻歴応答解析を35回ずつ行った。また、風速出現頻度分布に関してはワイブル分布に従うと仮定した。ワイブル分布の形状は年平均風速 V_a と形状パラメータ k によって決定され、本研究では、年平均風速 V_a に関しては6, 7, 8, 9, 10(m/s)の5通り、形状パラメータ k に関しては1.5, 2, 2.5の3通りを考えた。

3. 統計的外挿係数評価式の提案

発電時最大風荷重の50年再現期待値は、時刻歴応答解析から求めることが可能であるが、数百ケースの時刻歴応答解析を行わなければならない、解析に時間を要する上、風車の制御を含む時刻歴応答解析用のプログラムも必要である。そこで、発電時の風車に作用する最大風荷重の10分間期待値 $M_{D_{max}}$ に、統計的外挿係数 γ_e および風荷重の部分係数 γ_f (1.25)を乗じて、発電時最大風荷重の50年再現期待値 $M_{D_{50}}$ を次式により求めることを想定した。

$$M_{D_{50}} = M_{D_{max}} \times \gamma_e \times \gamma_f \quad (1)$$

最大風荷重の10分間期待値 $M_{D_{max}}$ に関する評価式は参考文献4)を参照されたい。したがって、最大風荷重の50年再現期待値を算定するために、式(1)に示す最大風荷重の統計的外挿係数 γ_e を求める必要がある。以下では限られたデータからの外挿により50年再現期待値を求め、それに基づいて統計的外挿係数の評価式を提案する。

期間 T における発電時最大風荷重が s を超える確率 $F_{ext}(s; T)$ は次式により表せる⁵⁾。

$$F_{ext}(s; T) = \int_{V_{in}}^{V_{out}} F_{ext}(s|V; T) f(V) dV \quad (2)$$

ここで、 $F_{ext}(s|V; T)$ は平均風速 V の時に期間 T における発電時最大風荷重が s を超える確率であり、 $f(V)$ は平均風速 V の出現頻度分布である。超過確率 $F_{ext}(s|V; T)$ は、各平均風速階級 V_{Hi} に対して実施した35回の時刻歴応答解析の時系列データから求めた最大値を用いて推定した。35個のデータを昇順に並べ、 s_1, s_2, \dots, s_{35} とすると、平均風速階級 V の時の超過確率 $F_{ext}(s|V; T)$ は次式を用いて推定できる。なお、 n はデータ数である。フィッティングには3パラメータワイブル分布を用い、3つのパラメータはモーメント法により推定した。

$$F_{ext}(s_i|V; T) = 1 - \frac{i}{n+1} \quad (3)$$

しかしながら、このように限られたデータから推定する際には、選ばれたデータセットによって外挿曲線が異なる場合がある。特に、データセット内に極端に大きな値があると、その値に影響され、超過確率分布が過大評価されてしまう。そこで、本研究では、大きな値の影響を除去するために、外れ値検定を導入した。

外れ値検定の検証として、各風速階級35回の時刻歴応答解析とは別に、1000回の時刻歴応答解析を行った。乱流強度は $I_{ref}=0.16$ 、風速階級は $V_{Hi}=17\text{m/s}$ とした。得られた1000

キーワード 発電時最大風荷重、50年再現期待値、統計的外挿係数

連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1 東京大学大学院工学系研究科社会基盤学専攻 橋梁研究室 03-5841-1146

個の10分間の時系列データから最大値を抽出し、それを使用して検証する。

まずは1000個のデータを重複がないように35個ずつ28組のセットに分けた。それぞれのセットに対して先ほど示した手順に従って超過確率分布を推定した。なお、フィッティングにはガンベル分布を採用した。それぞれのセットにおける超過確率分布において、超過確率が1/1000になる時の値を算出し、その結果を以下の図1に示す。今回は1000個のデータを用いて外挿した超過確率分布において、超過確率1/1000となる時の値を真値と仮定し、比較した。

次にそれぞれのデータセット内において外れ値検定を行い、大きな値を除いた。具体的には、35個のデータの平均値 μ と標準偏差 σ を用い、 $\mu + 2\sigma$ 以下の範囲に収まる n 個のデータのみを用いた。 n 個のデータを昇順に並べ、 s_1, s_2, \dots, s_n とする。この新しいデータセットを用い、35個の場合と同じ手順に従って超過確率分布を推定し、超過確率1/1000になる時の値を算出した。その結果を同じく図1に示す。

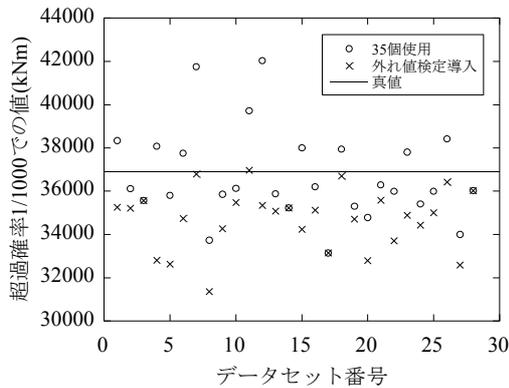


図1 外れ値検定を行なう前と後の比較

詳細な値として、真値は36897kNm、35個データを使った場合の平均値は36687kNm、外れ値検定を導入した後は34718.2kNmとなる。しかしながら、データセット内のばらつきを考えると、35個データを使った場合の標準偏差は2072.11kNm、外れ値検定を導入した場合の標準偏差は1376.939kNmとなる。図1を見ると、外れ値検定を行なうことにより非常に大きな値(7番目と12番目)を低く抑えることに成功している。外れ値検定を行なった後の平均値が真値からは過小評価になっているものの、本研究ではデータセットを1組しか用いないことを考えると、データセットによるばらつきが少ないほうが良い。そこで、このような外れ値検定を導入することにした。なお、この外れ値は、プログラムのミス等ではなく、十分に起こり得る値であることは確認済みである。

以上で述べた外れ値検定を導入し、 $F_{ext}(s; T)$ を推定した。 $f(V)$ は2章で述べたワイブル分布に従うと仮定し、超過確率が50年再現期間(3.8×10^7)となる値を50年再現期待値とした。

本研究では、このようにして算出した発電時最大風荷重の50年再現期待値と参考文献4)の提案式により算定した発電時の最大風荷重の10分間期待値との比を統計的外挿係数 γ_e とする。図2には例として形状パラメータ $k=2$ の時の、統計的外挿係数の乱流強度 I_{ref} と年平均風速 V_a による変化を示す。統計的外挿係数は、年平均風速および乱流強度の増加とともに増大することが分かる。そして、統計的外挿係数の評価式を乱流強度、年平均風速と形状パラメータの関数として次式で表した。

$$r_e = A \ln(V_a) + K_e \quad (4)$$

ただし、

$$A = (2.45k - 2.9)I_{ref} - 0.2k + 0.24 \quad (5)$$

$$K_e = (-5.85k + 8.9)I_{ref} + 0.5k + 0.4 \quad (6)$$

である。図中の線はこれらの評価式により求めた統計的外挿係数であり、時刻歴応答解析結果をよく表していることがわかる。

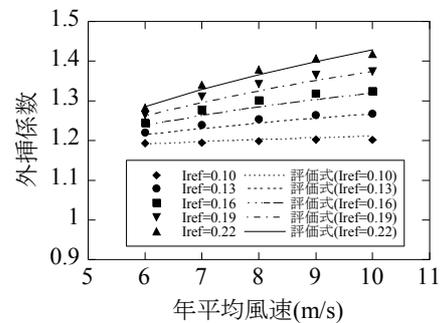


図2 統計的外挿係数($k=2$)

4. まとめ

本研究では安定的な外挿方法を提案し、あらゆる環境条件に適用できる統計的外挿係数の評価式を提案した。この評価式により、発電時最大風荷重の50年再現期待値の評価を可能にした。

謝辞

本研究を行うに当たり、貴重なデータ等を提供していただいた前田建設工業株式会社の丸山勇祐さん、富士重工業株式会社の吉田茂雄さんをはじめ土木学会構造工学委員会・風力発電設備支持物の動的解析と構造設計小委員会の皆様に感謝の意を表したいと思います。

参考文献

- 1) IEC 61400-1: Wind turbines-Part1: Design requirements, Ed.3, 2005
- 2) ファンフックパン, 石原孟, ビンルウンヴァン, 藤野陽三: 風力発電設備の風応答評価式の提案, 第19回風工学シンポジウム論文集, pp.181-186, 2006
- 3) Amendment 1 to IEC 61400-1 Ed.3: Wind Turbines Part 1: Design Requirements
- 4) 土木学会: 風力発電設備支持物構造設計指針・同解説[2010年度版], 2010
- 5) P.J. Moriarty, W.E.Holley, S.P. Butterfield: Extrapolation of Extreme and Fatigue Loads Using Probabilistic Methods, NREL-NWTC, 2004