

## 風荷重の歪度を考慮したピークファクター評価式の提案

○ 東京大学 学生会員 LUONG VAN BINH  
 東京大学 学生会員 PHAM VAN PHUC  
 東京大学 正会員 石原 孟

## 1. はじめに

構造物の風荷重を評価する際に等価静的法はよく用いられている。等価静的法では最大風荷重は平均風荷重、風荷重の標準偏差及びピークファクターによって求められる。風荷重は正規確率過程に従うと仮定すれば、ピークファクターの評価は Davenport<sup>1)</sup>によって提案された式を用いることができるが、風の乱れが大きい場合、変動風による風荷重の非線形成分を無視できず、ピークファクターが過小に評価される恐れがあると Kareem et al.<sup>2)</sup>により指摘されている。日本では風の乱れが大きい複雑地形に風車が設置されるケースが多く、風荷重の非線形成分を考慮できる非正規確率過程に基づくピークファクターの提案が望まれる。非正規確率過程に基づくピークファクターの評価式<sup>3)</sup>としては石川<sup>4)</sup>により提案された理論式がある。この式は送電線のような風荷重における共振成分が無視できる場合に限られ、共振成分が大きい風車の場合に適用できない。

そこで、本研究では風の乱れが大きい複雑地形でも適用できる風荷重のピークファクターの評価式を提案し、多質点風応答プログラム<sup>5)</sup>の解析結果と比較し、その妥当性を検証した。

## 2. 風車の風荷重評価

本研究は風車タワーの風方向の風荷重に着目し、図1に示すモデルを使用した。このモデルではタワーの1次モードのみを考慮し、ローターが剛であると仮定している。



図1 風車の振動モデル

タワー基部に作用する最大荷重は次のように求められる。

$$M_{\max} = M \times G = M \times (1 + g \frac{\sigma_M}{M}) \quad (1)$$

ここで、M は平均風荷重、G はガスト影響係数、g はピ

ークファクター、 $\sigma_M$  は荷重分布の標準偏差。平均荷重および標準偏差は次のように求められる。

$$M = \int_0^1 \rho C_f(r) U^2(r) (1 + I_u^2(r)) c(r) r dr \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_M}{M} = \sqrt{\frac{\sigma_{M1}^2 + \sigma_{MB}^2}{M^2}} \quad (3)$$

ここで、 $\rho$  は空気密度、 $U(r)$  は位置  $r$  の風速、 $I_u$  は乱れ強さ、 $C_f$  は空気力係数  $c(r)$  はブレードの場合には翼幅、タワーの場合には直径、ナセルの場合には代表幅である。

## 3. ピークファクターの評価式の提案

本研究では、石川<sup>4)</sup>により提案したピークファクターの評価式を採用する。

$$g = \kappa \left\{ \sqrt{2 \ln v_y' T} + h_3 (2 \ln v_y' T - 1) + h_4 \left[ (2 \ln v_y' T)^2 - 3 \sqrt{2 \ln v_y' T} \right] \right\} \quad (4)$$

$$h_3 = \frac{\alpha_3}{4 + 2 \sqrt{1 + \frac{3(\alpha_4 - 3)}{2}}}, \quad h_4 = \frac{\sqrt{1 + \frac{3(\alpha_4 - 3)}{2}} - 1}{18}$$

$$\kappa = \frac{1}{\sqrt{1 + 2h_3^2 + 6h_4^2}}, \quad v_y' = \frac{1}{\sqrt{1 + 4h_3^2 + 18h_4^2}} v_y$$

ここで、 $\alpha_3$  および  $\alpha_4$  はそれぞれ風荷重の歪度および尖度、 $v_y'$  は非正規確率過程  $y$  の時間  $T$  の間のゼロクロッシング数であり、 $h_3, h_4$  および正規確率過程における時間  $T$  の間のゼロクロッシング数  $v_y$  によって定められる。

本研究では、尖度  $\alpha_4$  のピークファクターへの寄与率が低いことから、尖度  $\alpha_4$  を 3 と仮定し、ピークファクターの評価式を次のように簡略化した。

$$g = \kappa \left\{ \sqrt{2 \ln v_y' T} + h_3 (2 \ln v_y' T - 1) \right\} \quad (5)$$

## 4. 風荷重の歪度の評価式の提案

石川<sup>4)</sup>により提案された評価式に従えば、共振成分を無視した場合の歪度は次のように求められる。

$$\alpha_3 = \frac{3I_u a_{r1} + I_u^3 a_{r2}}{(K_{SMB} + K'_{SMB})^2} \quad (6)$$

ここで  $K'_{SMB}$ ,  $K_{SMB}$ ,  $a_{r1}$ ,  $a_{r2}$  は空間相関係数である。本

キーワード: ピークファクター, 非正規確率過程, 空間相関, 複雑地形, 共振成分

連絡先: 〒113-8656 東京都文京区弥生 2-11-16 e-mail binh@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

研究では、風荷重の共振成分を考慮するために、歪度は風荷重の標準偏差における共振成分と非共振成分比  $R_D$  の関数  $f(R_D)$  として仮定し、更に  $I_u^3$  は  $I_u$  に比べ、 $K'_{SMB}$  は  $K_{SMB}$  に比べ十分に小さいことから、歪度  $\alpha_3$  の評価式(6)を次のように簡略化した。

$$\alpha_3 = f(R_D) \times \frac{3I_u a_{r1}}{(K_{SMB})^2} \quad (7)$$

式(7)にある関数  $f(R_D)$  を同定するために、減衰を変化させながら、3次元風車モデルを用いて多質点風応答プログラム<sup>5)</sup>により風車の応答を求め、図2に示した。この図から、歪度が乱れ強度に比例して増大し、構造減衰が小さくなるにつれて、反対に小さくなること分かる。風車の構造減衰は0.005から0.01まで小さく、共振成分を無視することが出来ないことが分かる。風荷重の標準偏差の共振成分は構造減衰の平方根に逆比例することから、 $f(R_D)$  は  $R_D^2$  に逆比例すると仮定し、更に共振成分がない場合に、 $f(R_D)$  は1に漸近することを考え合わせると、 $f(R_D)$  は式(8)により近似することができると仮定した。式(8)に含まれる定数  $\alpha$  は数値解析結果から1.3と同定された。

$$f(R_D) = \frac{1}{\alpha R_D^2 + 1} \quad (8)$$

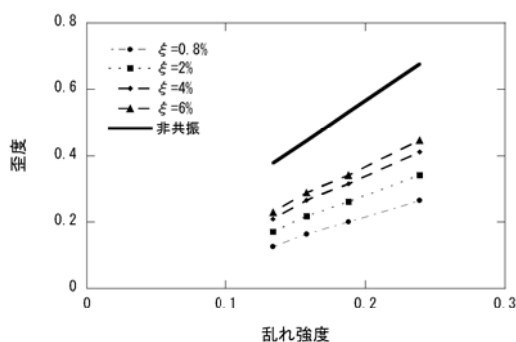


図2 歪度と乱れ強度との関係

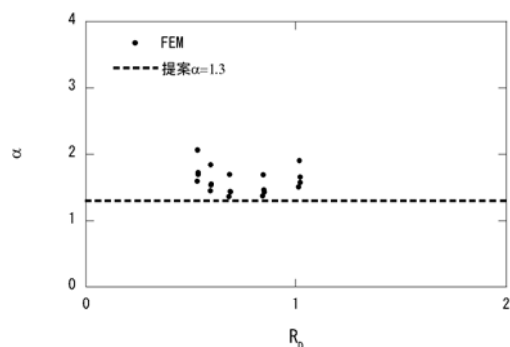


図3 共振関数の係数  $\alpha$

提案式の有効性と予測精度を評価するため、ハブ高さ36mのストール制御風車における風荷重を求めた。図4および図5には提案式により求められたピークファクターおよび風荷重を示し、数値解析とよく一致していることが分かる。

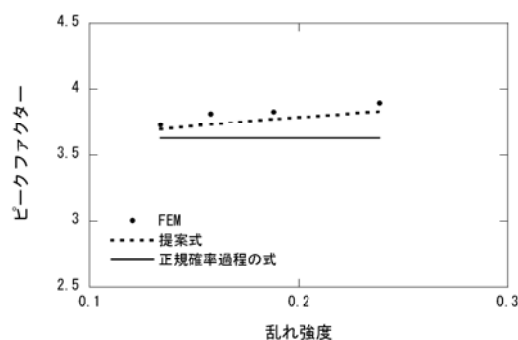


図4 ピークファクターの計算例

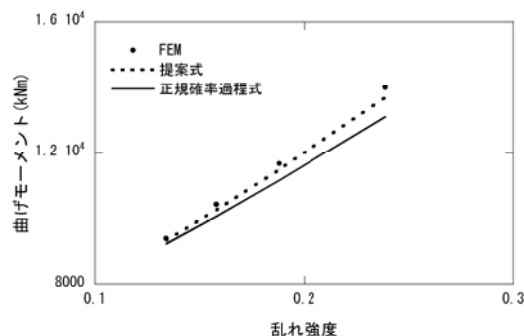


図5 曲げモーメントの計算例

## 5. まとめ

本研究は風荷重の歪度を考慮したピークファクターの評価式を提案し、以下の結論を得た。

- 1) 非正規確率過程を表すピークファクターの評価式の中では風荷重の歪度が支配的である。
- 2) 風荷重の歪度は乱れ強度に比例し、風荷重の共振成分の2乗に反比例する。また風荷重の共振成分・非共振成分比の関数  $f(R_D)$  として表すことができる。
- 3) 本研究の提案式は、ピークファクターを精度よく評価でき、乱れが大きい場合における風荷重の予測誤差は従来の8%から3%までに減少した。

## 参考文献

- 1) A.G. Davenport Note on the distribution of the largest value of a random function with application to gust loading, Proceedings of the Institute of Civil Engineering, pp.187-196, 1964.
- 2) A. Kareem, J. Zhao Analysis of Non-Gaussian Surge response of tension leg platforms under Wind Loads, Transaction of the ASME vol.116 August, 1994.
- 3) 西嶋一欽, 神田順, H. Choi 非正規を有する変動風圧のピークファクター評価式の提案, 日本建築学会構造系論文集, 第557号, 79-84, 2002.
- 4) 石川智巳 送電用鉄塔の動的効果を考慮した風荷重評価法に関する研究, 博士論文 2004
- 5) P.V. PHUC 強風時の風車の風応答に関する数値的及び理論的研究, 東京大学修士論文, 2004.