

確率論に基づく暴風・高波荷重の組合せ方法に関する研究

電源開発(株) 水力エンジニアリング部 正会員 ○吉岡 健
同 上 正会員 鷺尾 朝昭
同 上 正会員 片山 勝

1. はじめに

わが国において今後の開発が期待される洋上風力発電¹⁾では、暴風波浪時が支持構造物の設計において最も重要な設計状態となる。一般に暴風や高波はそれぞれ極値統計解析に基づく再現期待値として設計に用いられる。暴風や高波はいずれも気象擾乱によって生成されるものであるが、わが国の気象擾乱には、台風、熱帯低気圧、日本海低気圧等さまざまな要因がある。特に波浪の場合、吹送距離によっては、沖合で生成された長周期の波が減衰することなく、うねりとして沿岸域に伝播する場合がある。このため、沿岸域のある地点で暴風と高波を観測すると、時間的位相差によって、両者の相関性が明瞭でない場合が発生し得る。一例として、全国港湾海洋波浪情報網(NOWPHAS)²⁾のうち、九州北部沿岸の藍島および玄界灘における10分平均風速と有義波高の相関出現分布を図-1に示す。図において、玄界灘の方が相関係数が小さいのは、外洋からのうねりの伝播に伴う時間的位相差に起因するものと考えられる。

このようなことから、洋上風力発電を先行する欧州では、同一の再現期間の風荷重と波荷重が同時に生起することは極めて稀であると考え、再現期間もしくは荷重係数によって一方の荷重を低減した組合せが規定されている^{例え ば 3) 4)}。しかしながら、欧州とわが国とでは気象擾乱の種類や吹送距離が異なるため、同手法をそのまま適用することは適切ではないし、日本海側と太平洋側で両荷重の相関性は大きく異なるものと考えられる。

以上のことから、本研究ではモンテカルロ法を用いて、暴風荷重 V および高波荷重 H の最適な組合せ方法について検討する。ここで再現期間については、一般に用いられる50年再現期待値を基本(超過確率 $P=1/50=0.02$ 、設計供用年数20年間の遭遇確率 $E=0.33$)とする。このとき、暴風波浪時荷重 S の組合せ方法は、荷重低減係数 γ を用いて下式のようになる。

$$S = \gamma_V V_{50} + \gamma_H H_{50} \quad (1)$$

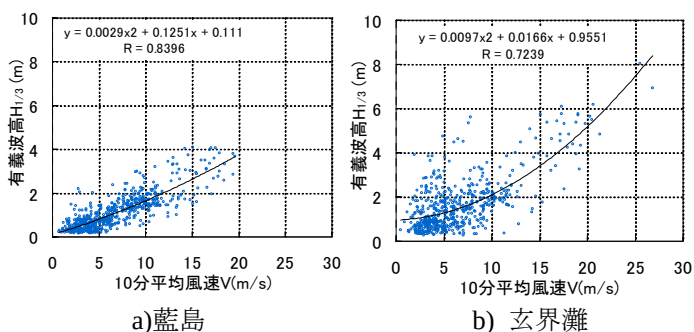


図-1 風速と波高の相関出現分布

(1996~2007年データ、国土交通省港湾局より受領)

2. 解析方法

モンテカルロ法を用いて、2つの極値変数 x_V, x_H 間の相関係数 ρ_{VH} を変化させた場合の、結合確率 $P_{VH}(1,1)=0.02$ となる最適な荷重低減係数 γ_{opt} について探索した。一様乱数の発生には高精度であるメルセンヌ・ツイスタを用い、試行回数は100万回とした。検討に用いた極値変数を表-1に示す。なお、尺度母数 A と位置母数 B は $x=1$ のとき超過確率 $P=0.02$ となるように調整している。

表-1 解析に用いた極値分布形(モデルケース)

極値変数	$x_V(x'_V)$	$x_H(x'_H)$
極値分布形	ワイブル	ワイブル
形状母数 k	1.4	2.0
尺度母数 A	0.3	0.5
位置母数 B	0.205	0.011

解析手順を以下に示す。

- ① 互いに独立な一様乱数 u_V, u_H を、表-1に示した極値変数 x'_V, x'_H に変換する(図-2)。
- ② コレスキー分解により、相関係数 $\rho_{VH}=0, 0.2, 0.5, 0.8, 1.0$ を有する極値変数 x_V, x_H に変換する(図-3)。
- ③ 各荷重低減係数 γ_V, γ_H を以下の3通りの方法で低減させた場合の、結合確率 $P_{VH}(\gamma_V, \gamma_H)$ を計算する。
方法1: $\gamma_V=1$ とし、 γ_H を1.0~0.0まで0.05刻みで低減
方法2: $\gamma_H=1$ とし、 γ_V を1.0~0.0まで0.05刻みで低減
方法3: γ_V, γ_H を1.0~0.0まで0.05刻みで等しく低減

キーワード 暴風, 高波, 結合確率, モンテカルロ法, 洋上風力発電

連絡先 〒104-8165 東京都中央区銀座 6-15-1 TEL 03-3546-3222 FAX 03-3546-9423

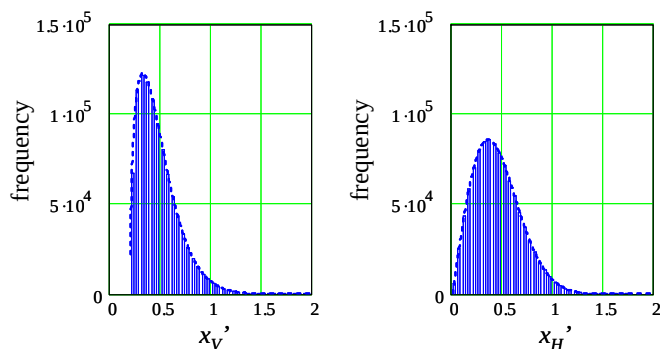
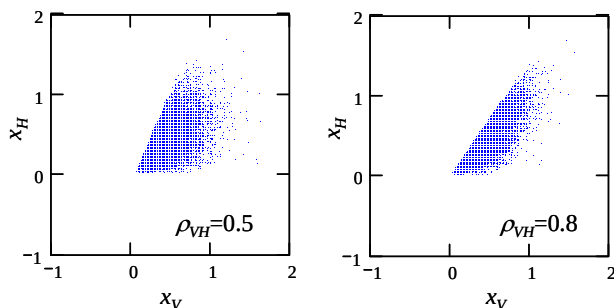


図-2 生成した極値変数の頻度分布



※100万個のうち1万個をプロット

図-3 相関を有する2つの極値変数の生成例

- ④ $P_{VH}(\gamma_{optV}, \gamma_{optH})=0.02$ となる最適荷重低減係数 γ_{opt} を算定する。これと相関係数 ρ_{VH} の関係を調べる。

3. 検討結果

図-4に手順③による結合確率 $P_{VH}(\gamma_V, \gamma_H)$ の算出結果の一部を示す。まず、方法3による図中の (a)と(b)を比較すると、相関係数 ρ_{VH} の小さい (b)の方が、最適荷重低減係数 γ_{opt} は小さくなっていることがわかる。一方の荷重を低減する方法1,2による(c)と(d)では、 γ_{opt} はさらに小さい値となるのは当然であるが、(c)と(d)で γ_{opt} の値が異なっている。このことは、極値分布形によって最適荷重低減係数が変化することを意味している。

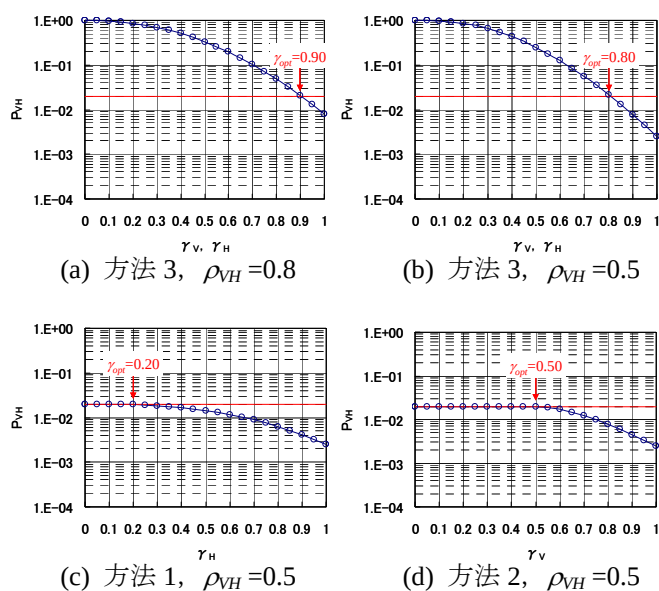
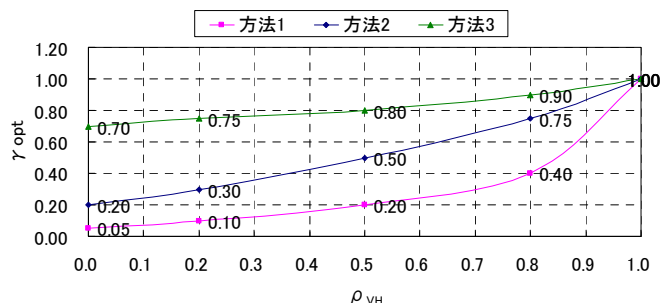
図-5は、各方法について、相関係数 ρ_{VH} と最適荷重低減係数 γ_{opt} の関係を示したものである。 γ_{opt} は ρ_{VH} に応じて大きくなるという比例関係にあり、方法1よりも安全側の設計結果を与える方法2で $\gamma_{opt}=0.20 \sim 1.0$ 、方法3で $\gamma_{opt}=0.70 \sim 1.0$ の値となる。

4. まとめ

以上の検討により、暴風荷重と高波荷重の組合せ方法について、現在以下の式形を考えている。

$$S = \gamma_V V_{50} + \gamma_H H_{50} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \text{方法1: } \gamma_V = 1.0, \gamma_H = 0.9\rho_{VH} + 0.1 \\ \text{方法2: } \gamma_V = 0.9\rho_{VH} + 0.1, \gamma_H = 1.0 \\ \text{方法3: } \gamma_V = \gamma_H = 0.4\rho_{VH} + 0.6 \end{cases}$$

図-4 結合確率 $P_{VH}(\gamma_V, \gamma_H)$ の算出結果の例図-5 相関係数 ρ_{VH} と最適荷重低減係数 γ_{opt} の関係

式(2)において例えば $\rho_{VH}=0.6$ のとき、方法1,2では荷重低減係数 $\gamma=0.64$ となり、これは本計算条件において再現期間5年程度に相当する。

今後は検討ケース数を増やした極値分布形の影響把握、対数正規分布に近似することによる結合確率の解析的検討⁵⁾、NOWPHAS観測データや「日本近海の波と風データベース」(独)海上技術安全研究所を用いた相関係数 ρ_{VH} の評価を実施する予定である。

参考文献

- 1) NEDO,「洋上風力発電導入のための技術的課題に関する調査」等, <http://www.nedo.go.jp/index.html>
- 2) 国土交通省港湾局, 全国港湾海洋波浪情報網, <http://www.mlit.go.jp/kowan/nwphas/>
- 3) Germanischer Lloyd, Guideline for the Certification of Offshore Wind Turbines, Edition 2005.
- 4) Det Norske Veritas, Design of Offshore Wind Turbine Structures, DNV-OS-J101, 2007.
- 5) Ditlevsen O., Stochastic model for joint wave and wind loads on offshore structures, structural safety, No.24, pp.139-163, 2002.