

波力および風力を受ける海洋構造物の安全性評価に関する基礎的研究

鹿児島大学大学院 学生会員 立山正秋

鹿児島大学大学院 正会員 木村至伸

1. はじめに

近年、地球温暖化や東北地方太平洋沖地震における原子力発電所の事故を契機に、再生可能エネルギーの導入に向けた検討が行われている。再生可能エネルギーの中で、風力による発電は世界的に見て最大規模の発電量を誇っており、EU 諸国や中国を中心に導入量が急増している。国土が狭く周囲を海で囲まれている我が国において風力発電の積極的な導入を図るためには、広大なポテンシャルを有する洋上風力発電の活用を検討する必要がある。そのためには、波力や塩害などの厳しい海洋環境化に対する安全性に加え、台風などの自然環境に対する検討も重要となる。そこで本研究では、洋上風力発電用タワーを有する海洋構造物を対象に、波力および風力が作用する場合の安全性について検討した。さらに、部材の経年腐食に伴う断面減少を不確定要因とし、MCS 法を用いて海洋構造物の安全性評価について検討を行った。

2. 解析概要

本研究で用いた解析モデルを図 1 に示す。タワー高さ 60m、幅 20m、水深 50m、節点数 27、要素数 48 を有する二次元モデルである。各部材は全て鋼材とし、断面は円形中空断面、単位体積重量 77.0kN/m^3 、弾性係数 $2.1 \times 10^8\text{kN/m}^2$ 、許容応力 240MPa と設定した。ブレードやナセルの重量として節点 8 に 700kN 、タワーや電源設備の重量として節点 1、14、21 に 300kN の付加荷重を載荷させた。本解析モデルの固有周期と固有振動数を表 1 に示す。

本研究の対象地点は、風況が良好で洋上風力発電所に必要な水深も十分確保できる鹿児島県名瀬沖とし、波浪条件は国土交通省港湾局のナウファスから取得した。この地点における 2013 年の有義波高と有義波周期のヒストグラムを図 2-1 および図 2-2 に示す。また図 2-3 は有義波高と有義波周期の関係を示したものである。本研究で用いた有義波高と有義波周期を表 2 に示す。表 2 における波浪条件 A,B,C はそれぞれ、有義波高の中央値、中央値から 1σ および 2σ である。有義波高に対応する有義波周期は図 2-3 より決定した。

波力は、微小振幅波理論を用いて水粒子の速度および加速度を求め、それらを慣性力項と抗力項の線形和で表される修正 Morison 式に代入することにより評価を行った。また、Bretschneider 型のパワースペクトル密度関数を用いて不規則波を表現した。また洋上による特有の環境条件として、塩害を考慮する必要がある。腐食速度を表 3 に示し、これを用いて本解析モデルにおける経年腐食の検討を行う。風力による影響は、タワートップに静的荷重を作用させており、名瀬沖における年平均風速 $7\sim 8\text{m/s}$ に相当する 100kN 、暴風時の風速約 45m/s に相当する 600kN の 2 ケースについて検討した。

信頼性評価においては、不確定要因として経年腐食による部材の断面減少を考慮し、変動係数 10% の正規分布による MCS 法を用いて解析を行った。本研究で用いた信頼性指標を以下に示す。ここで、構造物に対し信頼性指標が 3.0 以上のとき安全として外力の評価を行う。

$$\beta = \frac{\bar{R} - \bar{S}}{\sqrt{\sigma_R^2 + \sigma_S^2}}$$

表 2 波浪条件

波浪条件	A	B	C
有義波高[m]	1.20	1.82	3.62
有義波周期[s]	4.6	5.4	7.6

表 3 腐食速度

区分	腐食速度(mm/year)
空中部	0.002
飛沫部	0.3
干満部	0.3
海中部	0.2

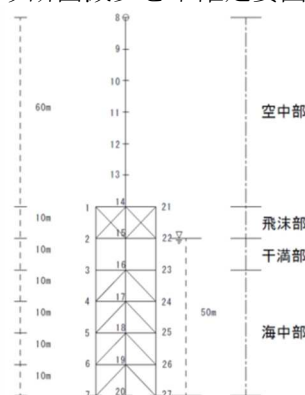


図 1 解析モデル

表 1 固有周期と固有振動数

振動モード	1次	2次	3次
固有周期(sec)	1.50	0.57	0.23
固有振動数(rad/sec)	4.18	11.07	27.92

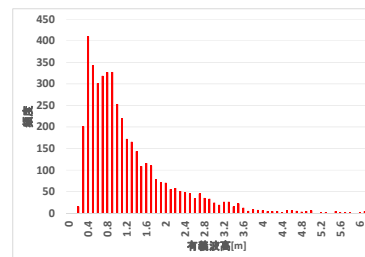


図 2-1 有義波高ヒストグラム

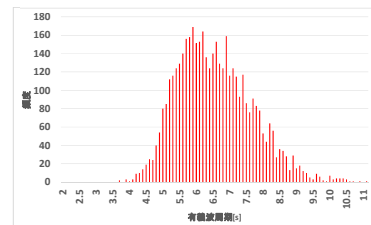


図 2-2 有義波周期ヒストグラム

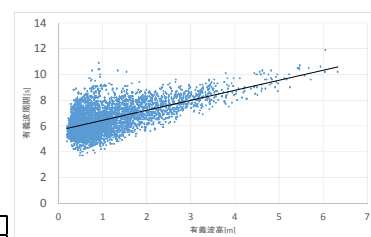


図 2-3 有義波高と有義波周期

ここで、 $\bar{R}$: 許容値、 $\bar{S}$: 最大曲げ応力の平均値、 σ_R : 許容値の標準偏差、 σ_S : 最大曲げ応力の標準偏差とする。

3. 解析結果と考察

図 3-1 および図 3-2 に波力による最大曲げ応力応答を示す。また経年腐食を考慮して建設時(0 年)、25 年後および 50 年後の応答を示している。このとき波浪条件はそれぞれ表 2 に示した A と C である。どちらも建設時(0 年)では海面部で最大応答を示し、経年腐食の影響を考慮するとタワー基部で最大を示している。

図 4-1 および図 4-2 に風力に対する最大曲げ応力応答を示す。このとき静的荷重はそれぞれ 100kN、600kN である。風力の場合はタワー基部で最大応答を示しており、暴風時における最大応答は、経年腐食を考慮した場合でも、許容応力を下回る約 120MPa を示している。このとき空中部における経年腐食の影響はほとんど見られず、飛沫部及び干満部においてもわずかな影響しか見られない。

図 5-1 および図 5-2 に、波力および風力を同時に考慮した際の最大曲げ応力応答を示す。図 5-1 は波浪条件 A とした場合の波力と、風力の静的荷重 100kN のときの結果である。図 5-2 は波浪条件 C とした場合の波力と、風力の静的荷重 600kN のときの結果である。図 5-1 および図 5-2 について 50 年後を見てみると、それぞれ最大で約 220MPa、約 350MPa と非常に大きな値であり、本研究で検討したもっとも厳しい条件である。

図 6 に、部材の断面減少を不確定要因とした場合の波力に対する信頼性指標を示す。図は波浪条件の相違として比較している。波浪条件 A および B では、50 年後で信頼性指標が 3.0 以上で安全性を確認できる。しかし波浪条件 C において、信頼性指標の減少幅は大きく、50 年後で信頼性指標 3.0 を下回り安全性を確保できていないことがわかる。

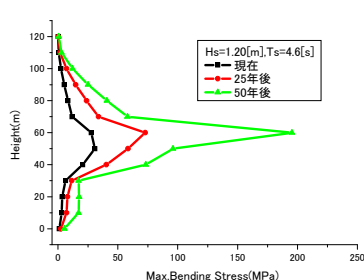


図 3-1 最大曲げ応力応答—波力

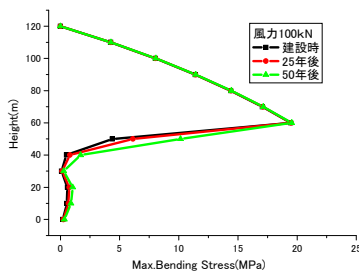


図 4-1 最大曲げ応力応答—風力

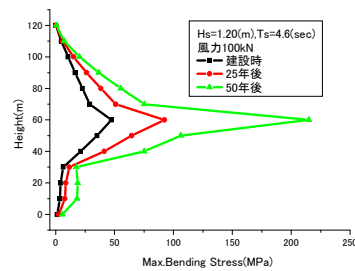


図 5-1 最大曲げ応力応答—合成力

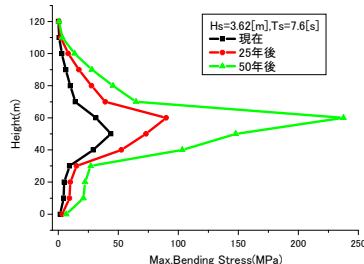


図 3-2 最大曲げ応力応答—波力

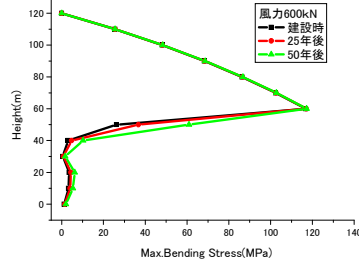


図 4-2 最大曲げ応力応答—風力

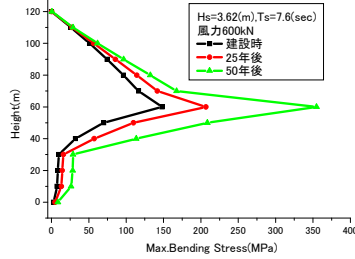


図 5-2 最大曲げ応力応答—合成力

4. まとめ

波力による応答では、厳しい腐食環境下にある飛沫部および干満部で経年腐食の影響により、最大曲げ応力応答が大きく増加した。風力による応答では経年腐食の影響はほとんどないことが確認できた。

波力と風力を同時に考慮した場合の応答は非常に大きく、波浪条件 C と風力 600kN を考慮した場合においては、許容応力を大きく上回る結果となった。これは波力を受ける場合の経年腐食の影響が大きいためと考えられる。

信頼性指標は、波浪条件が厳しくなると安全性が確保できなくなり、経年腐食の影響が表れている。これより、海洋構造物に対する安全性を確保するためには、波浪条件と部材の経年腐食の影響を考慮することが重要である。また、今後、波力および風力を同時に考慮した場合の信頼性指標の検討を行う必要がある。

【参考文献】土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 2007 年版、2007 年

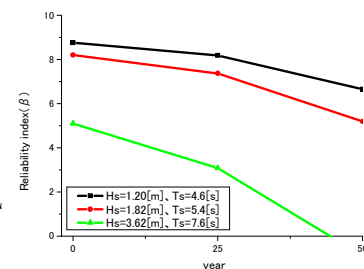


図 6 信頼性指標