

洋上風力発電施設における疲労解析例

EXPERIMENTAL FATIGUE ANALYSIS OF OFFSHORE WIND POWER GENERATION FACILITY

成瀬英治¹・関田欣治²・西和宏³・岡俊蔵⁴・原基久⁵・横山茂生⁶
Eiji NARUSE, Kinji SEKITA, Kazuhiro NISHI, Shunzo OKA, Motohisa HARA
and Shigeo YOKOYAMA

¹正会員 財団法人 沿岸技術研究センター 研究主幹(〒102-0092東京都千代田区隼町3-16)

²正会員 工博 東海大学 海洋学部 海洋建設工学科 教授(〒424-8610静岡県静岡市清水区折戸3-20-1)

³非会員 前財団法人 沿岸技術研究センター 調査部 主任研究員

⁴正会員 三菱重工業(株) 鉄構建設事業本部 橋梁部 技術グループ 部長代理
(〒108-8215東京都港区港南2-16-5)

⁵正会員 五洋建設(株) 土木本部 土木設計部 課長(〒112-8576東京都文京区後楽2-2-8)

⁶正会員 (株) ニュージェック 港湾・海岸グループ 港湾・空港チーム チームマネジャー
(〒531-0074大阪市北区本庄東2-3-20)

This thesis reports about the case study of fatigue analysis based on the observed oceanographic data. Presumed wind power generation facility for analysis consists of the tower which has a 2400kW generator, and mono-pile foundation constructed on the bottom of the sea depth 10m outside the breakwater. Fatigue analysis was executed by zero-upcrossing method and rain-flow method.

It was concluded that a fatigue life of offshore wind power generation facility could be analyzed by those methods, and it was proved that the facility with the mono-pile foundation has a long enough fatigue life even when it couldn't be repaired with the inspection prescribed by DNV.

Key Words: *Offshore wind power generation, fatigue analysis, mono-pile, zero-upcrossing method, rain-flow method*

1. はじめに

洋上の風力発電施設は、陸上の当該施設と比較して、騒音等環境上の問題が少ないこと、施設の大型化が可能なこと、風速が大きいかつ風の乱れが少なく安定した電力を得る環境にあることなどの利点を有することから、既に欧州では大規模な洋上風力発電施設が建設されている。しかしながら、洋上への風力発電施設導入には、風と波浪を同時に受ける際の耐力や疲労損傷の問題など陸上にはない課題を抱えている。

これらの課題への取り組みの一環として、財団法人沿岸技術研究センター、東海大学、三菱重工業株式会社、五洋建設株式会社、株式会社ニュージェックによる「洋上風力発電施設 疲労解析に関する共同研究」を行うこ

ととした。本論文は、観測された海象データをもとに、防波堤外の水深10mの洋上において極値統計解析により設定された有義波高と最大風速により設計された2400kWの発電機を搭載するタワーとモノパイル基礎からなる洋上風力発電施設を想定して行った疲労解析のケーススタディについて報告するものである。

2. 海象条件

対象海域に近い測候所における観測データより作成された風速と波高の出現頻度を表-1に示す。

表-1 解析ケース(海象条件)

海象 j	波高 H _{1/3j} (m)	周期 T _{1/3j} (s)	風速(z=10m) V _{10j} (m/s)	出現確率 P _j (%)
1	0.40	4.05	2.11	28.64
2	0.40	4.05	5.56	22.99
3	0.65	4.78	9.36	31.44
4	0.90	5.27	5.64	5.53
5	0.91	5.29	1.96	7.91
6	1.09	5.54	15.46	2.67
7	1.93	6.27	6.87	0.173
8	1.95	6.28	11.52	0.512
9	2.90	6.69	27.41	0.005
10	3.17	6.77	19.30	0.119
全計				100.000

この観測データのうち波高は沖合水深約20mの海底に設置されている波高計による10年間の波浪観測データを整理したものである。また、風速は超音波式風向風速計により観測された同期間の風速データを用いた。

解析ケースは、観測データより作成された風速と波高の同時発生頻度を10ランクの海象に集約した。実際の出現確率には、観測データの欠損などが含まれるが、本論文では全体で100%となるように設定し、波高に対応する周期は現地観測データの波高・周期の関係を用いて決定した。なお、解析は、風荷重と波荷重が同方向から作用する一番厳しい条件で行うこととした。

3. 解析モデル

解析に用いた風力発電施設、基礎のモデル及び減衰定数の設定は次の通りである。

(1) 風力発電施設のモデル化

洋上風車施設の基礎は、モノパイル基礎とした。モデル化にあたっては、タワートップからモノパイル基礎との接合部までを9要素、モノパイル基礎接合部から基礎底部(海底部)までを8要素に分割し、集中質量とそれらをつなぐ弾性梁で近似した。また、ローター、ナセルについても集中質量にてモデル化し、タワーのモデルの先端にすえつけた。基礎に関しては、杭と地盤の相互作用を考慮するため横方向地盤ばねにより基礎を含めてモデル化した。図-1にモデル図を示す。

タワーは基部で外径4.0m(板厚40mm)、タワートップで外径3.0m(板厚13mm)とし、高さ方向に直線のテーパを仮定した鋼管(SKK490)とした。

基礎のモデル化に関しては、杭と地盤の相互作用を考慮するため横方向地盤ばねにより基礎を含めてモデル化した(図-2)。なお、線形の横方向地盤ばねの算定は「港湾の施設の技術上の基準・同解説」¹⁾に従った。本来は、海象10に相当する暴風時等の条件では、横方向地盤ばねは非線形とし、繰り返しによる土の強度低下を考慮すべ

きであるが、発生回数が少ないこと、また、繰り返し回数が多い海象1から5の条件で疲労損傷の大半が発生することから線形で取り扱った。

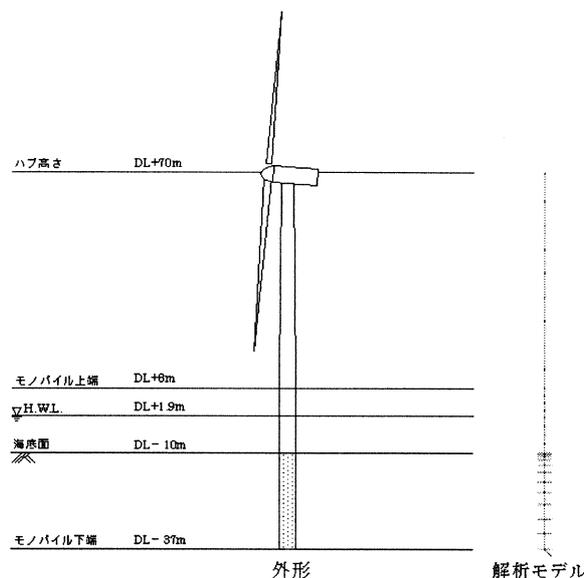


図-1 モデル図

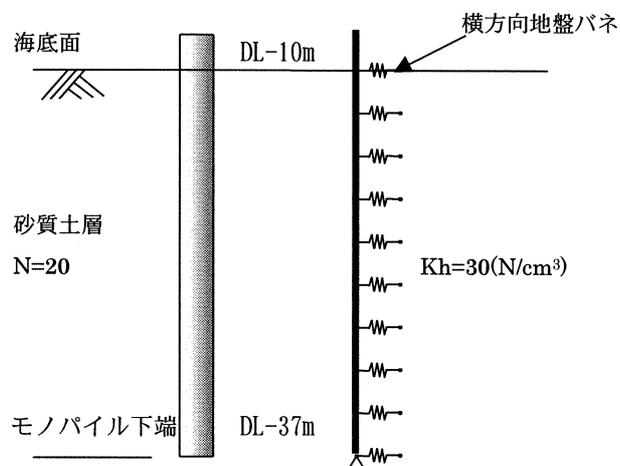


図-2 基礎のモデル化

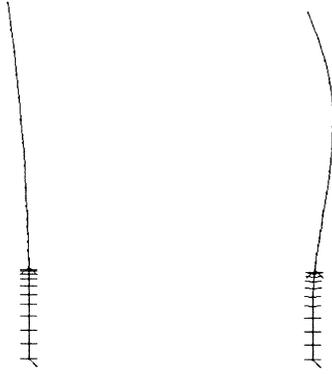
(2) 減衰定数の設定

モード解析による固有値の解析結果を、図-3に示す。

固有値解析結果より応答解析で使用するレーリー減衰定数を式(1)により算定した。

ここではディスクモデルを使用して動的解析を行うため、空力減衰を考慮する必要性から模型実験より得られた結果²⁾(1次の減衰h=0.07)を参考に、レーリー減衰を設定した。

$$2h(2\pi/T) = \alpha + \beta(2\pi/T)^2 \quad (1)$$



1次モード T=3.355sec 2次モード T=0.497sec

図-3 固有値の解析結果

4. 時刻歴応答解析

時刻歴応答解析を実施するに当たり、風及び波浪の時刻歴は次のように算出した。

(1) 変動風速時刻歴

各質点位置高さの風速は、観測風速分布を1/7乗則で補正した。変動風速時刻歴は式(3)に示すOchi-Shinのスペクトル³⁾を用いて作成した。図-4には、定格風速時のナセル高さでの変動風の時刻歴を示す。

a) 高さzでの平均風速：U_z(m/s)

$$U_z = U_{z_r} \left(\frac{z}{z_r} \right)^{\frac{1}{7}} \quad (2)$$

ただし、

U_z : 高さzでの平均風速(m/s)

U_{z_r} : 観測高さの観測風速(m/s)

z : 海面からの高さ(m)

z_r : 観測高さ(m)

b) Ochi-Shinのスペクトル密度関数：Su(f_{*}) (m²/s)

$$\left. \begin{aligned} Su(f_*) &= 583 f_* & (0 \leq f_* < 0.003) \\ Su(f_*) &= \frac{420 f_*^{0.70}}{(1 + f_*^{0.35})^{11.5}} & (0.003 \leq f_* < 0.1) \\ Su(f_*) &= \frac{838 f_*}{(1 + f_*^{0.35})^{11.5}} & (0.1 \leq f_*) \end{aligned} \right\} (3)$$

ここで、

$$f_* = \frac{fz}{U_z} \quad (4)$$

$$Su(f_*) = \frac{f Su(f)}{u_*^2} \quad (5)$$

u_{*} : 摩擦速度(m/s) (=√C₁₀U₁₀)

f_{*} : 無次元化周波数

U₁₀ : 高さ10mでの平均風速(m/s)

C₁₀ : 高さ10mの風速により評価された摩擦係数
 [= (0.65 + 0.067U₁₀) × 10⁻³]

c) 変動風速の時刻歴：u(t)(m/s)

$$u(t) = \sum_{i=1}^N \sqrt{2Su(f_i)\Delta f_i} \cos(2\pi f_i t + \varepsilon_i) \quad (6)$$

Δf_i : スペクトルをN個に分割するときの分割幅

f_i : 各分割の中心周波数

ε_i : 0~2πまでの間でIに対してランダムに与える位相差

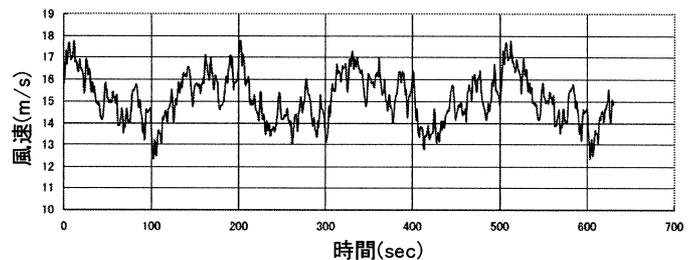


図-4 定格風速時のナセル高さでの変動風の時刻歴

(2) ブレード等に作用する風荷重

本解析はタワーと基礎に限って検討するため、運転時のブレードとナセルに作用する荷重は回転する3枚のブレードを円盤とするディスクモデルに近似し算定した。風速に対応した抗力係数を設定し、これをディスクの2/3の高さに作用させた。したがって、ブレードの回転による影響や空間的な風速分布の影響は厳密に考慮していない。

(3) 不規則波荷重時刻歴

不規則波の波浪スペクトルは、式(7)に示す修正Pierson-Moskowitzのスペクトルを用い、式(8)に示す時刻歴波形を作成した。

$$S_w(f : H_{1/3}, T_{1/3}) = 0.11 H_{1/3}^2 \left(\frac{1}{T_{av}} \right)^4 f^{-5} \exp(-0.44(T_{av} f)^{-4}) \quad (7)$$

T_{av} : 平均周期 $T_{av} = 0.9T_{1/3}$

$$\eta(t) = \sum_{i=1}^{Nf} \sqrt{2S_w(f : H_{1/3}, T_{1/3}) \Delta f_i} \sin(2\pi f_i t + \phi) \\ = \sum_{i=1}^{Nf} \frac{H_i}{2} \sin(2\pi f_i t + \phi) \quad (8)$$

また、波力はモリソン式により算出した。

5. 疲労解析

(1) 応力範囲の計数

洋上風力発電施設では、風と波浪を同時に受けると両者の応力波形が重畳する形状になることから、適切な応力範囲の計数法の選定が重要である。本研究では、レインフロー計数法とゼロアップクロス計数法を用いて疲労寿命を算定する。両計数法の特徴を示す。

a) レインフロー計数法

レインフロー計数法は、応力、時間波形の時間軸を鉛直方向にとり、応力の大きさを多重の塔の屋根からの雨だれにたとえ、雨だれの流れたレンジをもって応力範囲をカウントするものである。このカウント法は実働荷重波形の計数法としてよく用いられるものであるが、もともとはレンジペアカウント計数法をもとにして考え出された方法であり、初めの半波の定義を除いてはレンジペア計数法と同じ方法になる。したがって、十分長い期間にわたる大部分の応力波形に対しては計数結果がレンジペア計数法と一致する。

もともと、レインフロー計数法は低サイクル疲労やヒステリシスを描くような応力波形に対しては適しており、風と波浪による応力変動が重畳する洋上風力発電施設のような場合には、適切な計数方法の一つと考えられる(図-5)。

b) ゼロアップクロス計数法

ゼロアップクロス計数法は、波の峰と谷の応力幅を順次カウントしていく計数法である。しかし小さな波が重畳した場合には大きな波のレンジだけをカウントし、小さい波を読まないことになる。つまりゼロアップクロス計数法は、非常に周期が短く振幅の小さい、いわゆるさざ波が重なっていると、周期成分として検出されない特徴がある(図-6)。

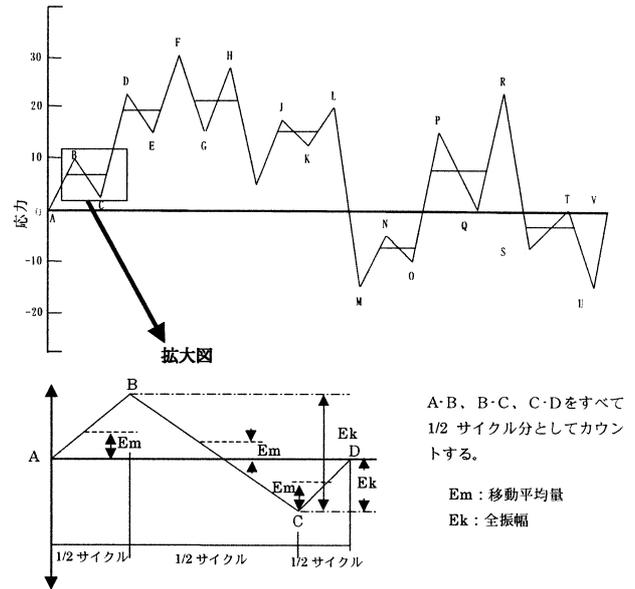


図-5 レインフロー計数法の平均値と応力振幅

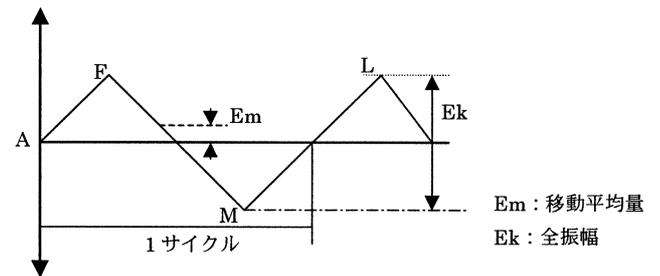


図-6 ゼロアップクロス計数法の平均値と応力振幅

(2) 疲労曲線と安全率

疲労評価にはDNV(OS-J101)の基準⁴⁾に従い、板厚効果や防食等の環境条件を考慮しマイナー則を適用した。適用した疲労曲線(S-N線図)を式(9)に示す。

S-N 線図

$$\log_{10} N = \log_{10} a - m \log_{10} \left(\Delta \sigma \left(\frac{t}{t_{ref}} \right)^k \right) \quad (9)$$

N : 応力範囲 $\Delta \sigma$ に対する許容繰返し回数

$\Delta \sigma$: 応力範囲 (MPa)

$\log_{10} a$: \log_{10} 軸における切片

m : 傾きを示す係数

t_{ref} : 参照板厚

t : 板厚 (参照板厚未満の板厚では $t = t_{ref}$ とする)

k : 指数

$$\text{疲労損傷度 } D_D = \sum_{i=1}^l \frac{n_{C,i}}{N_{D,i}} \quad (10)$$

$$\text{寿命} \quad Y = \frac{1}{D_D} \quad (11)$$

具体的な設定値を以下に示す。

a) 疲労評価対象箇所と板厚効果の条件

- ・タワーとモノパイル基礎の突合せ溶接部
- ・突合せ溶接部の板厚効果は $t_{ref} = 25\text{mm}$ 以上に適用

b) 気中条件

- ・ $\log_{10} a = 12.164, m=3, k=0.20$ ($N < 10^7$: Curve 'D')
- ・ $\log_{10} a = 15.606, m=5, k=0.20$ ($N > 10^7$: Curve '90')
- ・ 材料係数 $\gamma_m = 1.00$ (Above splash zone)

c) 海中中条件 (電気防食あり)

- ・ $\log_{10} a = 11.764, m=3, k=0.20$ ($N < 10^6$: Curve 'D')
- ・ $\log_{10} a = 15.606, m=5, k=0.20$ ($N > 10^6$: Curve '90')
- ・ 材料係数 $\gamma_m = 1.25$

なお、材料係数の適用方法は、応力範囲 $\Delta\sigma$ を γ_m 倍し、S-N線図を修正するものである。

d) 応力集中

直径や肉厚が徐々に変化するタワーの結合部や、換気口や開閉扉等の周辺では応力集中が発生するが、ここでは一般部の検討として応力集中は1.0と仮定している。

e) 評価点

以下の3箇所とする。各点に適用したS-N線図を図-7に示す。タワートップはハブ高さ相当まであるものとして評価した。

- ・ タワートップ (DL+70m, $t=13\text{mm}$)
- ・ モノパイル基礎・上部 (DL+8.0m, $t=40\text{mm}$)
- ・ モノパイル基礎・海底部 (DL-10.0m, $t=40\text{mm}$)

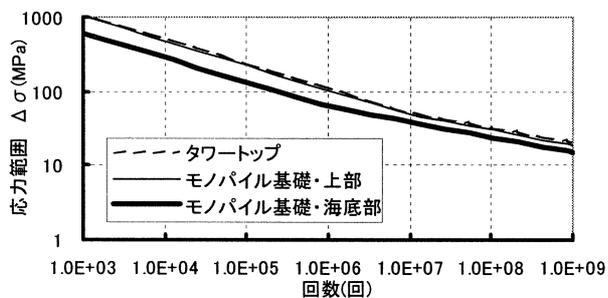


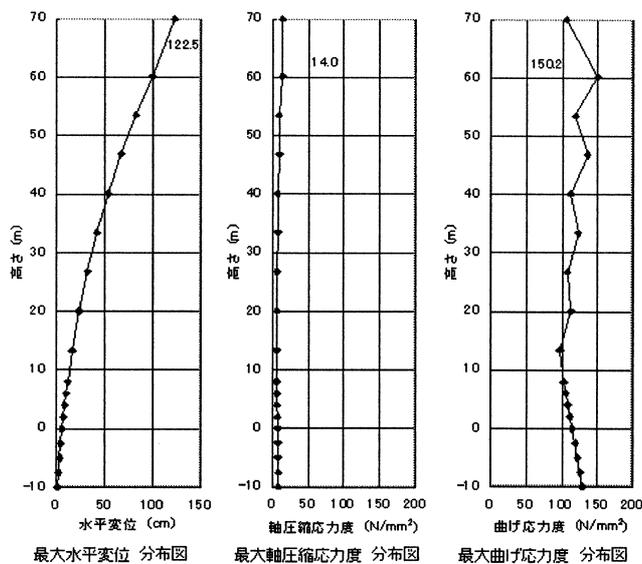
図-7 S-N線図

(3) 最大変位と最大応力

応答解析結果を表-2に示す。また、発生変位と発生応力の大きい海象(表-1の海象6と10)の最大変位と最大応力の鉛直分布図を図-8及び図-9に示す。

表-2 各海象の応答解析結果

海象	最大水平変位 (cm)	曲げによる最大応力 (N/mm ²)
1	0.7	1.1
2	12.9	16.0
3	82.9	102.8
4	14.0	16.7
5	1.2	2.1
6	122.5	150.2
7	28.3	34.7
8	109.7	135.2
9	23.2	30.0
10	89.3	143.8



までタワーがあるものとして評価した。

図-8 最大変位と最大応力(海象6)

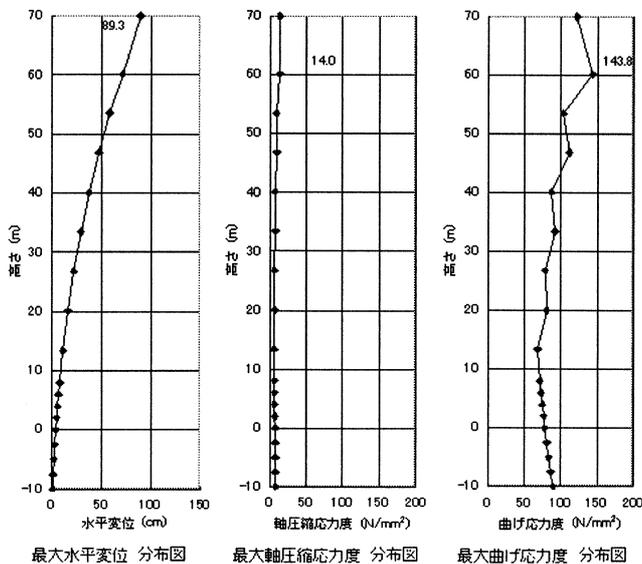


図-9 最大変位と最大応力(海象10)

(4) 疲労寿命

レインフロー計数法とゼロアップクロス計数法による計数結果より得られた、疲労損傷度と寿命を表-3及び表-4に示す。

表-3 レインフロー法による疲労損傷度と寿命

位置		領域	疲労損傷度 (年間)	疲労寿命 (年)
タワートップ		気中	0.00065	1546
モノ パイル 基礎	上部	気中	0.00094	1062
	海底 部	海水中	0.01043	96

表-4 ゼロアップクロス法による疲労損傷度と寿命

位置		領域	疲労損傷度 (年間)	疲労寿命 (年)
タワートップ		気中	0.00043	2338
モノ パイル 基礎	上部	気中	0.00070	1434
	海底 部	海水中	0.00570	176

この結果から次のことが明らかとなった。

a) 疲労寿命

風と波が同時に作用する場合の疲労寿命は「設計寿命は少なくとも20年とする」と記載されたJIS C1400-1の規定と比較して、本施設は十分な寿命がある算出結果となった。

b) 補修期間

レインフロー計数法の結果から、モノパイル基礎海底部が一番寿命が短いものの、DNVの規定する検査と補修が不可能な場合においても十分長い寿命を有することが判明した。

c) 計数法による相違

両計数法による相違は2倍程度であり、長周期と短周期の応答が重畳する応力波形であるためレインフロー計数法による解析が必要であると思われる。

6. おわりに

本研究におけるケーススタディを通じて、洋上風力発電施設において風と波浪による疲労特性がタワーやモノパイル・基礎等構造設計の断面決定の重要な要素であることがわかった。また、防波堤外に設置された洋上風

力発電施設における疲労性能を検証することができた。

今後、わが国で洋上設置型風力発電施設の実用化を図っていくための、疲労解析上の検討項目として以下が上げられる。

(1) シミュレーションの差異

本研究ではナセル・ローターからなる風車をディスクモデルとして風荷重を算定し、また風車を1質点とする簡略なモデル化によりシミュレーションしたが、実機の特性をより厳密に反映させるため、今後、ブレード、ハブ、ナセルに作用する風荷重等を詳細に勘案し、ブレード、ナセルを多質点としモデルする等の詳細な検討を行うことが必要と考えられる。

(2) 設計法の確立

本研究では詳細な時間領域の解析を行なったが、今後は実証試験などシミュレーションの妥当性を別途確認し、簡便な疲労解析法の確立のため、洋上での波浪と風に関する周波数領域の設計法を確立する必要がある。

(3) タワーと風車の固有周期

一般的には、タワーの固有周期を風車の回転数から離す設計が行われているが、水深や地盤の一定でないわが国の洋上において、この方法が有効性であるか検討の余地がある。

(4) 開口部等の疲労照査

本検討は主に風車とタワー及び基礎の一般部に関わる照査であり、開口部等の詳細構造に対する疲労照査については別途慎重な配慮が必要である。

(5) 翼形状や制御による特性

風車に作用する荷重の特性は風車の翼形状や制御によって異なるため、詳細な検討の際には考慮する必要がある。

参考文献

- 1) 社団法人 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，pp739，1999
- 2) 関田欣治，石川裕和，林辰樹，山下篤，矢後清和：洋上風力発電施設に作用する風抗力及び減衰定数に関する風洞装置を用いた基礎的実験，海洋開発論文集，Vol.18，pp725-730，2002
- 3) M. K. Ochi & Y. S. Shin: Wind Turbulent Spectra for Design Consideration of Offshore Structures, Pro. 12th of Offshore Technology Conference, OTC5736, pp. 461-467, 1988
- 4) DNV : Design of Offshore Wind Turbine Structures, Offshore Standard DNV-OS-J101, June 2004