

## 洋上風力発電施設の振動計測

五洋建設（株）	正会員	大塚 淳一
五洋建設（株）	正会員	田村 保
川崎重工業（株）	正会員	玉木 利裕
川崎重工業（株）		八木 一浩

## 1. はじめに

風力エネルギーは自然に存在する豊富なエネルギー源として注目されており、欧米を中心に風力発電の普及が進んでいる。風力発電施設の普及が進んだ地域では、風力発電に適した地点を陸上に求めることが困難になってきたことや、陸上に比べて安定的に良好な風が得られることなどから、洋上風力発電施設の建設が進められている。わが国においても、陸上部での風力発電に適した場所が限られていることから、洋上での風力発電施設の建設が今後は進むことが期待されている。わが国での今後の洋上風力発電建設を進めるにあたっては、欧米の先進事例に学ぶべき点も多いと考えられるが、わが国特有の地盤・波浪条件に加えて、地震の多い環境等を考慮した上で、独自の洋上風力発電施設の研究開発を進めることも必要と考えられる。すでに、わが国独自の洋上風力発電施設的设计・施工マニュアル<sup>1)</sup>が実施工案件が無い段階で取りまとめられているが、実施工案件での設計・施工経験による検証・改善が必要と考えられる。本報告は、わが国で初めての施工事例となる洋上風力発電施設を対象として実施した振動計測についてその概要を紹介するものである。

## 2. 風力発電施設の概要

今回の計測対象としたのは、北海道渡島半島南西部瀬棚町に建設された600kWの風力発電施設の1基である。図-1に風力発電施設の外観を示している。RC製床版を基礎部として、その上部に鋼製の円筒状のタワー構造を据えた構造となっている。RC製床版は直杭方式による栈橋形式で支持される構造となっており、それぞれの杭は岩盤中に貫入した先端支持杭となっている。本施設は防波堤の背後の港内に設置されているため、波浪による外力は支配的とならない。表-1には、当風力発電施設の主要な仕様を示している。



図-1 洋上風力発電施設外観

## 3. 風力発電施設で考慮すべき振動問題

風力発電施設の振動問題を考える場合に考慮すべき周期的強制加振力としては以下の2つがあげられる。

- ・ ブレードの回転による強制加振力
- ・ タワー構造体のカルマン渦励振

このうち、ブレードの回転による強制加振力は、ブレードがタワー構造体と重なる場合に風圧面積が減少すること、風速分布が鉛直方向に変化していること、などに起因すると考えられる。カルマン渦励振は風速とタワー構造の外径により、振動周期が定まるものである。洋上風力発電施設に限るものではないが、風力発電施設的设计にあたっては、これらの強制加振力による構造体の共振を避けるようにタワーと基礎構造体を設計することが望まれる。

本施設の固有値解析を行い表-2に示すような結果を得た。なお、固有値解析にあたって、地盤の影響を「港湾の施設の技術上の基準・同解説」を参考にした地盤バネで、水中部の基礎杭については付加質量を考慮してモデル化した。

表-1 当発電施設の主な仕様

基礎形式	鋼管杭基礎 SKK490 1,100 × 114 × 4本
設置水深	約12.0m
根入れ長	約11.0m
ハブ高さ	48.7m(フーチング天端～ハブ中心)
タワー径	基部3.0m 頭部2.0m
ローター直径	47.0m
定格回転数	28.5rpm
定格出力	600kW

表-2 本施設の固有値解析結果

モード	固有周期	固有振動数
1次	1.80s	0.55Hz
2次	1.30s	0.77Hz
3次	0.75s	1.33Hz
4次	0.16s	6.33Hz

[キーワード] 洋上風力発電, カルマン渦励振, ねじれ振動

連絡先 〒112-8576 東京都文京区後楽 2-2-8 TEL03(3817)7655 FAX03(3817)7805

#### 4. 振動計測の概要と計測結果

本施設の振動計測では加速度計を基礎床版部とタワー上部のそれぞれ2箇所において水平2成分を計測できるように配置した。計測ケースは表-3に示すように、風車の回転を止めたケースと、風車の回転させたケースの2通りの条件で実施した。計測を実施した当日の風速はナセル上部に設置された風速計の記録で約5m/secであった。

##### (1) 風車の回転を止めたケース

風速は約5m/sec程度であり、計測された振動は、風力発電施設の固有振動モードに対応していると考えられる。図-3、図-4は栈橋床版部とタワー上部での加速度の計測結果のパワースペクトルを示したものである。表-2に示した固有値解析結果と比較すると、タワーの曲げ振動モードである1次と2次および基礎部の回転を主モードとする3次の固有振動モードはほぼ再現されている。1.8Hz付近の振動モードも基礎床版部での回転が顕著なモードであるが、現状採用している解析モデルで、このモードが再現されていない。

##### (2) 風車を回転させたケース

図-5、図-6は風車回転時の栈橋床版部とタワー上部での加速度の計測結果のパワースペクトルを示したものである。本計測を実施した当時の条件では、強制加振力としては、風車の回転による周期的外力が支配的と考えられる。ローターの回転による強制加振振動数は約1.43Hzであるが、3次の回転ねじれ振動モードの周波数に比較的近い。計測結果においても、この両者の振動成分付近で卓越する振動が見られる。栈橋床版上での時刻歴波形には10秒程度の振幅変動を示すうなり状の波形が明瞭に認められることなどから、回転ねじれ振動とローターの回転による強制加振の両者の影響によるものと考えられる。1次と2次の振動モードはこれらの強制加振振動数とは十分に離れており対応する振動成分は比較的小さい。また、1.80Hz付近に見られるタワー本体の振動モードも加振振動数(1.43Hz)との間には十分な開きがあるため、計測結果にも有意な振動成分は認められない。

3次の振動モードは、直杭構造の杭基礎の曲げ振動により、構造的に発生するねじり振動であり、タワー構造自体には顕著なねじり振動は発生していない。これらの振動モードの生成要因としては、風車のブレードがタワーの重心から風向き方向に突き出た形となっていることにより偏心荷重が作用することが要因と考えられる。杭基礎構造物の応答としては曲げ振動であり、設計上は強風時においてブレードおよびタワーに作用する荷重のうち、ねじり振動に寄与する成分を明らかにして、杭基礎構造物の安全性を検証する必要がある。

#### 5. まとめ

- (1) 固有値解析結果と風車停止時の計測結果から得られた固有振動数は良好に一致しており、固有値解析にあたって採用した解析モデルの妥当性が示されている。
- (2) 風力発電施設の曲げ振動モードである1次と2次の振動モードに対しては、強制加振外力の振動数成分と有意な開きがあり、共振を避けた設計であることが確認できた。
- (3) 構造全体のねじれ振動モード(3次)の固有振動数とローター回転による強制加振振動数は比較的隣接しており、振動計測時にも両者の振動の影響が認められた。

#### 謝辞

本施設の振動計測にあたっては、瀬棚町に多大なご配慮をいただきました。深甚の謝意を表する次第です。

#### 【参考文献】

- 1) (財)沿岸開発技術研究センター：洋上風力発電の技術マニュアル(2001年度版) - 基礎工法に重点を置いて - , 平成14年6月。

表-3 計測ケース

ケース名	計測回数	サンプリング周波数	ローターの状況
case1	5回	50Hz	回転有り
case2			回転無し

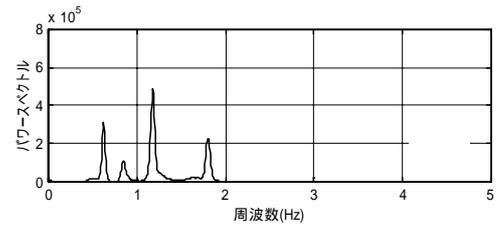


図-3 パワースペクトル(case1: 栈橋床版部)

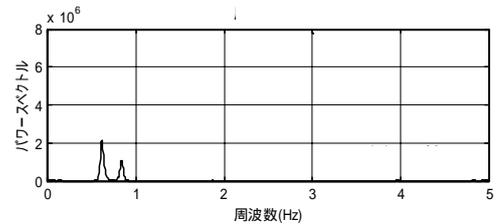


図-4 パワースペクトル(case1: タワー上部)

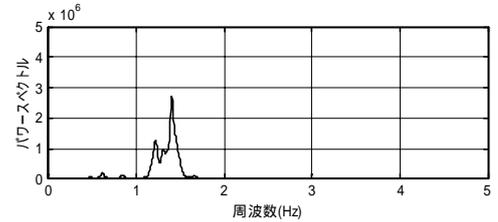


図-5 パワースペクトル(case2: 栈橋床版部)

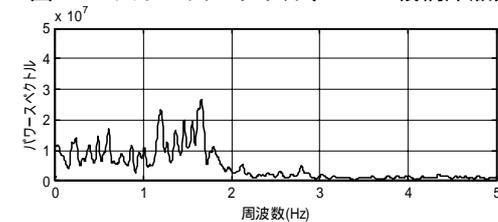


図-6 パワースペクトル(case2: タワー上部)