

洋上風力発電基礎の技術マニュアルについて

Technological Manual for Foundation of "Offshore Wind Energy Conversion Systems"

岡島伸行*・勝海 務**

OKAJIMA, Nobuyuki and KATSUUMI, Tsutomu

* (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 主任研究員

** (財) 沿岸開発技術研究センター 調査部 第二調査部長

It is important to promote the introduction of new energies that impose low loads on the environment. Wind energy is viewed as a promising new energy source that is pure, clean, and inexhaustible. Because of undisturbed and stable wind conditions, coastal areas are considered to be suitable for constructing wind energy conversion systems. However, there are no design standards for tall facilities constructed on offshore structures such as breakwaters. This report describes the design method of the foundation and the execution methodologies for offshore wind energy conversion systems.

Key Words :wind energy conversion system, coastal area, design standard, breakwater

1. はじめに

温暖化、酸性雨、森林破壊等の地球規模での環境破壊が進み、地球環境問題に対する国際的関心が高まる中で、環境負荷の少ない新エネルギーの導入促進が重要になってきている。風力発電は、石油代替エネルギーとしてだけでなく、二酸化炭素等の温室効果ガスを排出しない、純粋にクリーンで再生可能なエネルギーとして、有望視されている。風力発電施設は、コンスタントに強い風が吹くことが立地要件であり、港湾などの沿岸域は陸上に比べ障害物が少なく、良好で安定した風が吹いている場所が多いことから、その設置に適している。欧米での風力発電も、当初は内陸部の風況の良い場所の設置が多いが、近年は景観や騒音などの環境上の問題に加え、風車規模の大型化が進んだことなどから、洋上に風力発電施設を設置する事例が増加している。国内ではまだ洋上での設置例がないが、日本は世界有数の海岸線の長さを有する海洋国家であり、洋上への風力発電の導入を促進することが、急務である。(財) 沿岸開発技術研究センターでは、平成11年度より民間企業との共同研究により、港湾・沿岸域における風力発電システムに係わる工法の技術開発とその普及を目的として研究を進め、その研究の成果の一部を2000年11月に「洋上風力発電基礎工法の技術(設計・施工)マニュアル(案)」(以下、マニュアル案と称す)としてまとめ、また「港湾沿岸域における風力発電技術検討委員会(委員長:清宮理 早稲田大学教授)」を設置しさらに詳細な研究を進めているところである。

本稿は、マニュアル案の概要を紹介するとともに(財)沿岸開発技術研究センターでの研究内容について報告するものである。

2. 洋上風力発電の有効性

2.1 洋上風力発電のメリット

(1) 洋上は風が強い

洋上における風速は陸上と比べて強く、沿岸から離れた海域においては、20%程度の風速の増加がみこまれており、陸上部の地形によっては近接する陸上部に比べ沿岸部の風速が40%から80%程度まで大きい実測例もある。表-1に山形県酒田市、秋田県秋田市での、洋上及び陸上での観測例を示す。

表-1 洋上・陸上での実測例の比較

測定位置	観測高	江線からの距離	2地点の距離	年平均風速	比率
酒田測候所	27.6 m	約300m 陸側	約10km	4.3m/s	1.0
酒田沖観測局	19.2 m	約5km 海側		7.4m/s	1.7
運輸省 鹿島港 ケーソンヤード	10m	約200m 陸側	約5km	3.8m/s	1.0
運輸省 波崎 海軍研究施設	10m	約100m 海側		5.9m/s	1.6

地形が風に与える影響において、陸上と海上の最も大きな違いは地表面における粗度である。一般に、陸上における地表の粗度は建築物や地形の起伏により大きい。これは陸上では摩擦及び乱れによるエネルギー減衰が大きいことを意味している。一方、海上においては波による海面の起伏があるとはいえ、粗度は小さい。以上より海上では陸上に比べ風エネルギーが減衰しにくく、安定した風が吹くといえる。とくに我が国のように、国土が狭隘で、平坦な土地が少なく、山地が多いところでは、

安定した風力エネルギーを活用できる場所は内陸部では少ないのが現状である。なお、風力エネルギーは風速の3乗に比例すると言われており、例えば風速が2倍になれば、エネルギーの取得量は8倍となる計算になる。

(2) 大型風車の設置及び運搬が可能

風車は大型化するほど発電施設として経済的であるため、年々大型化傾向にある。現在国内最大規模である北海道苫前町に設置されている風車(1.65MW)は、ブレード(回転羽)1枚の長さ約33m、タワー(風車の支柱部分)高60m、タワー最大径約4mとなっている。このクラスになると、陸上での設置及び運搬が可能な場所は限定されるが、洋上または沿岸部では海上及び港を利用し、大型作業船による作業が可能のため、このような問題は少ない。

(3) 環境に関する問題が少ない

風力発電機は、ブレードが回転する際、風を切る音が発生する。また、タワー、ナセルが金属製であるため、電波障害を発生する場合もある。しかし洋上においては、このようなことが問題となることは陸上に比べて少ない。

2.2 洋上風力発電の推進にあたっての課題

洋上風力発電推進のための課題としては、①洋上風力発電の基礎の建設費及び送電費用が比較的高い、②関係機関との調整が必要、③景観・生物への影響等の環境上の問題等がある。さらに基本的な問題としては、洋上風力発電施設設置に関する、設計・施工手法が確立されていない点が挙げられる。

3. 洋上風車基礎の設計における基本事項

3.1 基本事項

これまで、洋上構造物の設計規準や設計指針の類は、国内外も含めて多くのものが提案されており数多くの実績がある。しかしながら、洋上風力発電施設のように海中の構造物に高い塔状の構造物を有し、波浪、風、地震などの影響を複雑に受ける洋上構造物の実績は数少なく、また国内においても洋上風力発電施設は現存していないのが実状である。

マニュアル案は、これまで提案された既往の設計規準や設計指針に基づいた洋上風車基礎の設計手法を系統的にとりまとめたものである。

(1) 基礎の構造種別

洋上風車基礎は、孤立した基礎と防波堤のように他に機能を持つ構造物を基礎に利用する場合とに分類できる。

構造形式としては、重力式、杭式、浮体式等が挙げられる。構造形式の選定にあたっては、安定検討に加えて、経済性、施工性等を十分考慮する必要がある。

(2) 使用期間について

洋上風車基礎における使用期間については、以下に示す場合が考えられる。

①風力発電施設として単独で使用される洋上風力発電基礎の場合は、設計段階で長期における基礎形状を推定することが困難なため、風車本体の耐用年数と同等として設定する。

②防波堤などの別途使用目的がある海洋構造物を風車基礎として使用する場合は、風車本体と基礎構造物の双方の耐用年数を考慮して設定する。

3.2 自然環境条件

洋上風車基礎の設計に際しては、海洋の自然環境条件が構造物などに与える影響を理解し、設計に必要とされる特性を事前に調査・把握しなければならない。

自然環境条件としては、以下に示すものが代表的なものである。

①風・気圧、②波浪、③潮汐および異常潮、④海流および潮流、⑤地震、⑥氷、⑦雪、⑧海底地盤、⑨その他

洋上風車基礎設計において主として影響を及ぼすものとしては、風荷重・波圧・地震荷重(地震力・動水圧)が挙げられる。

3.3 設計荷重

洋上風車基礎に作用する荷重は、陸上の構造物に比べて種類が多く、また沿岸、沖合など海域の変化による空間的な変動、気象、海象条件などが急変することによる時間的な変動が著しいため、設計荷重の設定にはこれらの特徴を十分に考慮する必要がある。

建設期における荷重については、施工途中の暫定断面での配慮すべき自然環境荷重やプレキャストの製作・据付時などに作用する施工荷重を示し、その状態に応じた設計荷重を適切に与える必要がある。

(1) 設計条件

設計条件を設定する際には、基礎構造物の機能、使用条件、立地条件、自然環境条件、社会的な条件施工条件などに加え、建設期および使用期の荷重条件、設計・施工精度、材料強度、構造物の力学的な特性、重要度、使用期間などを考慮するとともに、破損時の周辺への影響、補修方法、防災対策、将来の海域利用形態などを配慮して設定する必要がある。

(2) 荷重の組合せ

一般に、洋上風車基礎の設計荷重における組合せは、

表-2に示す通りとする。

荷重の組合せを考えると、当然ながら主たる荷重と従なる荷重が同時に最大級になることは考えられないため、後者の荷重の大きさは、種類、生起頻度、構造物の形態・状態などにより適当に低減することが考えられる。その低減率は確率論的に決められるべきものであるが、現状の段階では資料不足のため、これを一般的に定量化し基準化することはむずかしいので、設計者の判断に委ねるものとする。

表-2 荷重の組合せ

	固定荷重	上載荷重	その他の荷重	自然環境荷重				備考
				流れによる力	波	圧	風荷重	
常時	○	○	△	△	○	○	—	カット外時、共振時、定格運転時
異常時	○	○	△	△	○	○	—	激浪時・暴風時
				—	—	○	○	地震時

注1) その他の荷重：係留力、土圧、変形荷重および雪、氷などの自然環境荷重を意味する。
 注2) ○：実状に応じて適切に考慮する。
 △：必要に応じて考慮する。
 —：考慮する必要がない。

4. 洋上風車基礎の設計例

マニュアル案の新設防波堤を基礎として利用した場合の設計計算例より、風車を設置することによる加わる荷重がどのようなものかを以下に示す。

主たる設計条件

(1) 潮位

H. W. L. D. L. +0.50 (m)
 L. W. L. D. L. ±0.00 (m)

(2) 波浪

50年確率波高(推算値)を用いるものとする。
 有義波高 ($H_{1/3}$) ; 8.9 (m)
 設計波 (H_D) ; 13.1 (m)
 周期 (T) ; 13.5 (s)
 入射角度 (β) ; 40 (°)

(3) 計画天端高(上部工天端高)

計画天端高 D. L. +6.00 (m)

(4) 計画水深

D. L. -13.0 (m)

(5) 風車諸元

風車出力 ; 1.65 (MW)
 ローター直径 ; 66 (m)
 ハブ高 ; 60 (m)
 タワー径(上端) ; $\phi = 2.310$ (m) (D. L. +64.90m)
 タワー径(接合部) ; $\phi = 2.771$ (m) (D. L. +40.50m)
 タワー径(接合部) ; $\phi = 3.483$ (m) (D. L. +16.70m)
 タワー径(下端) ; $\phi = 4.025$ (m) (D. L. +6.00m)

(6) 暴風時の風荷重

設計で考える最大風速が風車に作用する場合、風車はローターの回転を止め発電を停止している。耐風速は、「建築基準法施行令第87条」での考え方に従う。

地区 区分(三)

地表面区分 区分I都市計画区域外にあつて、極めて平坦で障害物がない

風荷重の計算範囲 タワー、ブレード、ナセル

表-3及び、図-1に暴風時の検討における外力を示す。

表-3 風車基礎及び風車に作用する外力

外力	暴風時			
	水平力 H (kN/m)	鉛直力 V (kN/m)	起動モーメント M_D (kN・m/m)	抵抗モーメント M_R (kN・m/m)
風車基礎部	堤体重量	—	7,755.43	—
	波力	2,180.49	—	20,545.74
	揚圧力	—	-967.20	—
風車本体	浮力	—	-2,737.30	—
	風車自重	—	139.75	—
	波力	119.06	—	2,589.56
	風荷重	63.32	—	4,176.02
合計	$\Sigma H =$ 2,362.87	$\Sigma V =$ 4,190.68	$\Sigma M_D =$ 27,311.32	$\Sigma M_R =$ 46,046.63

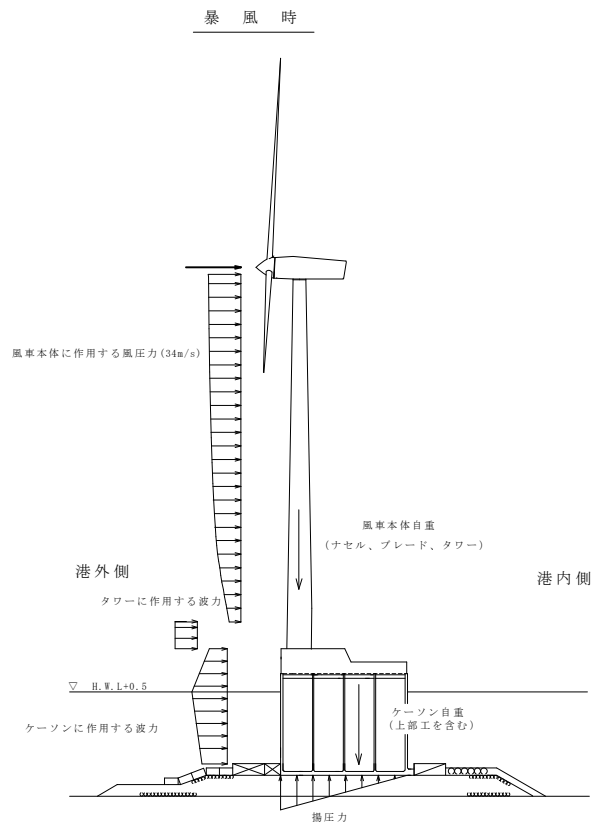


図-1 作用荷重モデル図

表-3に示すように、防波堤のように大きな波力が作用する条件においても、起動モーメントに占める風荷重の割合は15%を越える。

マニュアル案には、防波堤上に風車を設置する場合の他、孤立基礎の例として、重力(ケーソン)式、モノパ

イル式、及びジャケット式について設計手順を示している。

5. 今後の課題

今後検討すべき課題について以下に示す。

1) 合理的設計手法の確立

風車本体の耐用年数はメーカーへのヒアリングの結果によれば、20年としている例が多い。基礎の設計供用期間を風車の耐用年数と合わせるか、基礎を本体構造とした場合の設計供用期間とするかを適正に判断する必要がある。設計に用いる外力については、再現期間と構造物の耐用年数に基づいた遭遇確率から求めることが望ましい、しかし、遭遇確率をどのように設定するかは、構造物の機能、重要度、ライフサイクルコストに左右されるものであり、どのような信頼度を持つ構造物を造るかを設計時点で明確にしておく必要がある。

(2) 風荷重

風車基礎設計における風荷重の計算手法については国内基準がなく、陸上の風車基礎設計においても、メーカー、施工業者により設計方法が統一されていない。土木建築関係基準の風荷重計算は、対象物体が静止していることを前提としており、風車運転時のような、ブレードが回転している状態での外力の算定を想定していない。マニュアル案では、メーカーの提示値を用いることを原則とするとしているが、メーカーの提示値の取り扱いを含め計算手法を明確化する必要がある。

(3) 波圧

デルフト大学が中心になって行ったEUの洋上風力発電に関する最終報告書¹⁾のなかでは、最大外力を「最大波圧+最大風圧」としていない。最大波圧と最大風速の同時性は極めて少なく、作用時間も瞬間的なものになる。そのため、合理的な設計のためには設計荷重の組み合わせ時における荷重係数の導入等を考える必要がある。

(4) コストダウン

基礎部分の費用は、洋上風車が陸上よりも比較的高くなるため、コストダウンを考慮した最適構造の提案が必要となる。他の構造物との併用や、軟弱地盤でも改良を必要としないサクシオン基礎等は今後の洋上風車の基礎構造として有望であると考えられる。

(5) 工法選択フローチャートの作成

風車基礎の各種構造については地盤条件、荷重条件毎に有利不利がある。今後設計を行っていく中で知見が得られれば、最適基礎構造の選択フローが作成可能であり、設計業務の省力化も考えられる。

(6) 既設構造物への設置

基礎及び送電線に要する費用を考慮すると、既設防波堤等に風車を設置する事ができればコスト面では有利となる。しかし、底面反力が増加することにより、地盤の支持力不足や、底版の配筋量が不足する、という結果になることが多く、そのような場合の既設構造物への補強方法、対策工法について詳細な検討が求められる。

6. あとがき

今回紹介した「洋上風力発電基礎工法の技術（設計・施工）マニュアル（案）」については、「港湾沿岸域における風力発電技術検討委員会」での指導を経ながら、洋上風力発電に関する各種事項について追加記載したものを「洋上風力発電の技術マニュアル」として出版する予定である。このようなマニュアルが整備されることにより、洋上風力発電の実現に向けた検討が各所で具体化し、新エネルギーの導入促進に貢献されることを期待したい。

※(ヨーロッパにおける洋上風力発電の導入は、1990年代に実証研究施設としての設置が行われ、21世紀を向かえ、その研究成果を生かした大規模洋上風力発電施設の導入が始まっている。イギリス、オランダ、スウェーデン、デンマーク、ドイツの5カ国で2005年には、洋上だけで総計260万kWの施設が導入されるとみられている。)



写真-1 洋上施設の実例(2MW×20基) デンマーク

最後に、本研究は、五洋建設株式会社、新日本製鐵株式会社、株式会社テトラ、大旺建設株式会社の協力により、進められてきたものである。これら関係者ならびに「港湾沿岸域における風力発電技術検討委員会」において指導をいただいた、清宮委員長及び各委員の方々には、感謝の意を表したい。

参考文献

1) EU Joule III Project JOR3-CT95-0087, OPTI-OWECS FINAL REPORT volume2, Methods Assisting the Design of OWECS Part D, pp4-1~4-4, 1998.