

洋上風力発電の設計施工手法について（海外調査報告）

Design and Execution Method for " Offshore Wind Energy Conversion Systems"

岡島伸行*・井上興治**・清宮理***

OKAJIMA, Nobuyuki , INOUE, Koji and KIYOMIYA, Osamu

*（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 理事長

*** 早稲田大学 理工学部 土木工学科 教授

The pioneering works for wind conversion systems in the sea have been conducted in Denmark, Sweden, the Netherlands, and the United Kingdom. The facilities have already been constructed since the early 1990's. CDIT have dispatched a mission to investigate European pioneering systems in terms of design, execution methods, maintenance and operation.

Key Words : wind energy conversion systems, design, execution, offshore wind farm

1. はじめに

デンマーク、オランダ、スウェーデン、イギリスでは、全世界に先駆け、海洋環境下における実証試験用風力発電施設を1990年代に設置しており、今後、積極的に大規模洋上風力発電を導入する計画がある。

（財）沿岸開発技術研究センターでは平成13年7月、我が国で洋上風力発電施設を実現化するために、洋上での風力発電施設の先進事例について、現地施設を視察の上、設計・施工の手法、メンテナンス及びオペレーシヨ

ンの手法等について詳細な調査を行った。

現地での調査先は研究機関（Delft University of Technology）、風車メーカー（Vests社、N・E・G MICON社）、建設コンサルタント（SEAS社、AMEC社、M&N WIND POWER社）である。

今回の調査は、我が国での洋上風力発電施設について、具体的な提案を行っていくための参考とすることを目的としたものである。

本稿では、海外調査成果の中から、設計手法及び施工方法について報告する。

図-1に今回視察した施設を○印で囲んで示す。

- ①Nogersund(SE) 1990
0.22MW WindWorld
- ②Vindeby(DK) 1991
4.95 MW Bonus
- ③Lely(NL) 1994
2MW NedWind
- ④Tunø Knob(DK) 1995
5MW Vestas
- ⑤Dronten,(NL) 1996
16.8 MW Nordtank
- ⑥Bockstigen,(SE) 1998
2.5 MW WindWorld
- ⑦Middelgrunden(DK) 2000
40 MW Bonus
- ⑧Utgrunden(SE) 2000
10 MW Enron
- ⑨Blyth (UK) 2000
4MW Vestas
- ⑩Yttre Stengrund(SE)建設中
10.5MW Micon



図-1 調査施設位置図

2. 調査結果

2. 1 洋上風力施設の構造等に関する整理

各施設における構造上の特色を以下に示す。

(1) Tuno Knob

- ・ オーフス湾にほど近い湾口の海礁に設置
- ・ 波浪は3m以下
- ・ 波力や流氷の荷重を低減させるために、斜面式の重力式円形ケーソン基礎を採用

(2) Lynetten

- ・ 港内の埋立地前面に設置
- ・ 仮設道路に併用したと考えられる捨石堤の背後側に、場所打ちコンクリート基礎を採用

(3) Middelgrunden

- ・ 港内の良質な土砂処分場に設置
- ・ 風車は市内からの景観を考慮して、円弧の線形で配置

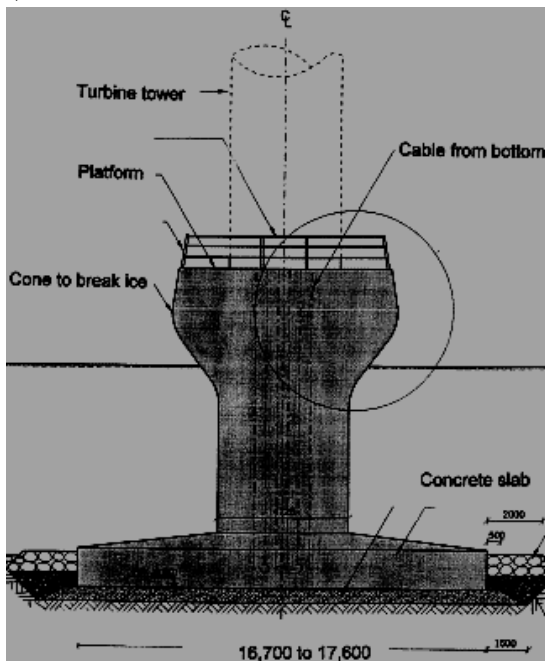


図-2 基礎構造図 (重力式)

- ・ 流氷の荷重を緩和させるために、ワイングラス形の重力式ブロック基礎を採用し、風車タワーの接合管をブロック製作時に先付

(4)Lely

- ・ 湖畔内に設置
- ・ 風車は現在では珍しい2枚ブレードで、タワーは景観的な配慮と船舶等の運行に支障がないように赤、白の横縞に塗装
- ・ メンテナンス用の鋼製プラットホームは、船舶の衝突荷重等を受けたときに本体の安定を阻害しないように一定の荷重に達すると壊れるように設計

(5)Dronton

- ・ 湖畔の護岸近傍に設置
- ・ 護岸と風車の30m間を鋼製ブリッジで連絡
- ・ 風車は、護岸にほぼ平行の線形で配置

(6)Blyth Harbour

- ・ 湾内の防波堤に設置
- ・ 防波堤の本体を削孔して基礎杭を設置 (デルフト工科大学所見) し、基部をコンクリート (幅:10m,奥:10m高:1.5m) により巻立

(7)British Offshore

- ・ 湾内の比較的浅い所に設置
- ・ 潮位差は5~6m程度で、8m程度の波高が来襲
- ・ 観測用に風速計の他に、超音波式波高計やタワーに歪みゲージをセット
- ・ モノパイルは、SEP (自己昇降式作業台船) と大口径ドリルビットによる中掘工法

(8)Yttre Stengrund

- ・ バルト海の浅瀬に設置
- ・ 潮位差は0.25m程度で、2m程度の波高が来襲
- ・ モノパイルは、SEPと大口径ドリルビットによる中掘工法

表-1 洋上風力施設の構造に関する整理

施設名	風車の仕様					立地条件			基礎の構造	
	定格出力 (kW)	ハブ高 (m)	ブレード径 (m)	回転速度 (rpm)	間隔 (m)	岸沖距離 (km)	水深 (m)	地盤	種別	規格および備考
Tuno Knob	500	40.5	39	33	400×200	6	10	砂礫	ケーソン式	W:1,000t (中詰充填時)
Lynetten	600	(50)	(44)	—	—	近傍	—	—	捨石堤式	捨石堤上に鉄筋コンクリート基礎
Middelgrunden	2000	64	76	—	182	3	2~6	砂礫・岩	ブロック式	W:1,800t (鉄筋コンクリート)
Lely	500	40	40.8	32.2	200	0.8	5~10	—	モノパイル式	φ:3.7m, L:30m, t:35mm
Dronton	600	50	43	—	—	0.3	5	—	モノパイル式	スチールによる連絡橋付き
Blyth Harbour	300	30	25	—	—	近傍	—	—	既設防波堤式	重力式で風車基礎部分を補強
British Offshore	2000	58	66	21.3	—	1	6	岩	モノパイル式	φ:3.5m, L:33m, t:40mm
Yttre Stengrund	2000	64	72	12/18	—	3	8~10	砂礫・岩	モノパイル式	φ:3.8m, L:30~40m, t:40mm

2. 2 設計条件について

設計手法の調査においては、各社の技術ノウハウであることからの確かな情報は少なかったが、知り得た事項について以下に示す。

(1) 風

- ・ 数年の現地観測と近傍の既往データを考慮して、再現期間 50～100 年の最大値を設定
- ・ IEC (国際電気標準会議) 61400-1 の 50 年間の極値風速クラス I (風車の回転中心高で風速 70.0m/s) を適用

(2) 波 浪

- ・ 数年の現地観測と近傍の既往データを考慮して、再現期間 50～100 年の最大値を設定
- ・ IEC 基準から 50 年の再現確率により最大値を設定
- ・ 再現確率 20～30 年の最大値を設定

(3) 地 震

- ・ 荷重レベルが小さいため考慮していない

(4) その他

- ・ 流氷による荷重を考慮している
- ・ 船舶の衝突荷重を考慮している

(5) 荷重の組合せについて

各荷重の遭遇確率を統計処理して、主荷重を 1 とした場合に従荷重を低減する係数 1 以下を乗じている。

(6) 疲労について

繰り返し荷重による部材の疲労に対する検証モデルは、使用期間内における風と波の時刻歴解析を電算ソフトにより解析している。ただし、時刻歴解析を滑動や転倒のような破壊モードで決定付けられる構造物へ適用する際には注意が必要である。

2. 3 施工方法について

ここでは最も代表的な基礎工法であるモノパイルを採用している、Blyth Offshore Wind Farm (イギリス) の事例を紹介する。



写真-1 Wind Farm 全景

(1) 施設の概要

Blyth Offshore Wind Farm は、イギリスのニューキャッスル北東の海岸に位置し、風力発電機は海岸から約 1km 離れた岩盤上に設置されている。

この施設は、洋上風力発電としては英国で最初に建設

された施設である。風力発電機は、出力 2MW、基数は 2 基で構成されている。

この洋上風力発電施設には、今後イギリスで建設される予定の大規模な洋上風力発電の先駆者的な役割があり、運転中の施設において各種の調査、試験や測定が行われている。

(2) 風車基礎

基礎の構造はモノパイル式であり、杭の直径は 3.5m、杭長は 33m、杭重量は 105t である。杭は岩盤上に設置されており、最小の水深は 6m で、干満の差は 5m、波高は 8m 以内である。

基礎杭の施工は、SEP を用いて、先端ボーリング方式にて行われており、岩盤削孔に使用したボーリングビットの直径は 3.7m であり杭の外径 3.5m よりも 20cm 大きい。杭と岩盤との空隙部はグラウトにより充填されている。



写真-2 ドリルビット



写真-3 基礎施工状況

(3) 風車の設置

風車の設置は、SEP に載せたクローラークレーンによって行われている。



写真-4 風車 (タワー部) 設置状況

3. 我が国への導入に向けて

3. 1 設計条件について

視察した各国に比べ、日本は地形条件が複雑で、台風や季節風等の瞬間的な風が強く、うねりのような高波浪が来襲し、頻繁に地震が起こるような独特の厳しい自然環境にある。従って、日本で洋上風力発電施設を建設するためには、これまでの海洋構造物の波浪や地震により決定付けられた破壊状態に加え、風の影響をどの程度まで考慮していくのか、また高い塔状構造に起因する作用力や振動の影響をどのように評価していくのか、これらを実験等も含めて検討していく必要がある。

そのためには、特に日本での洋上における風況調査を実施し、海面粗度の影響や風圧の鉛直分布の基礎資料等を整備することが望まれる。そして、その資料等に基づいて日本の自然環境に即した荷重モデルを研究する必要がある。

3. 2 基礎構造について

視察した洋上風力発電施設の基礎種別としては、重力式2件、モノパイル式4件、護岸等の既設構造物を利用した事例が2件である。今後の計画では、モノパイル式が主流の工法とされている。

その理由としては、以下の事項が上げられる。

- (1) 古くから洋上石油プラント等の建設に、スチールパイルの施工技術を適用し発展させてきたため、特に日本では余り施工されていない大型SEPと大口径ドリルビットが現有する。
- (2) モノパイル式の設計は、重力式の場合に比べ複雑な要素が少ない。
- (3) 今後、洋上風力発電サイトが増加するのに対して、設置水深が段々と深くなる傾向にある。この場合、重力式では水深と外力の増大に応じて大型化するばかりで不経済である。
- (4) モノパイルは工場製品であり、供給と価格が現場加工品に比べ安定している。

この様に、風力発電の先進国ではモノパイル式基礎が注目されているため、これらに関する疲労試験等の構造解析や現地実証施設の建設も進められてきている。まず設計施工の容易さから日本でも現実的な基礎構造としてはモノパイル式が主流だと考えられる。しかし、日本では地震が多いうえに、岩礁や軟弱地盤が複雑に点在しており、単一の基礎工法だけでは対応できないため、重力式、杭式の他に立地条件にあった多種多様の基礎構造についても今後の研究開発が必要である。

3. 3 洋上風車本体について

海外での洋上風車においては、その安定した風況と大規模施工が可能であることにより大型化が進められてきている。また近年では、洋上に設置する事を前提とした

大型風車の開発が進んでいる。

そのような風車メーカーのほとんどが海外メーカーである。ヨーロッパ仕様で製作された大型風車は、果たして日本の台風や季節風のような暴風に耐えることができるのだろうかとの疑問が残る。特に、疲労破壊で構造仕様が決定されている場合は、日本の風によるシミュレーションで確認しないと危険である。

風車は日本の自然環境下においても十分に信頼性のあるものを吟味して選定するべきであろう。また、日本としても風車本体への研究をもっと積極的に行うことが望まれる。

3. 4 施工方法について

作業環境として、昼の長い欧州では日本の倍以上の稼働率が確保されており、また海も日本に比べて平穏である。

日本において洋上風力発電施設を施工する場合は、高波浪域でも精度良く施工できる大型SEPを採用すべきであろう。大口径のドリルビットは、日本の陸上で使用されている立坑用のドリルビットを改良すれば十分に対応可能である。

しかし、ヨーロッパの施工技術の応用だけでなく、多種多様の基礎への対応と、建設コスト削減を積極的に考えた日本独自の工法も開発する必要がある。特に、すべてに共通する風車の組立作業については標準的なクレーンで施工できるように工夫することが望ましい。

4. あとがき

デンマークでは各種の支援政策により、風力発電機のマーケットが成立し、民間企業の投資、量産効果による価格低下、技術進歩、機器の大型化によるインフラコスト減少などの好循環により、火力発電と比較しても同レベルのコストとなっているという状況にあり、風力発電施設の約87%が個人や組合などの市民団体によって所有されている。(財)沿岸開発技術研究センターでは今回の海外調査成果も踏まえた「洋上風力発電の技術マニュアル(2001年度版)」を平成14年6月に出版した。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できることを期待したい。

最後に、調査団に参加いただいた方々、事前質問状への回答から現地での対応まで多大な協力をいただいたDelft University of Technology, Vests社, SEAS社, AMEC社, M&N WIND POWER社, N・E・G MICON社の方々、事前の計画から報告書取りまとめにまで協力をいただいた共同研究会(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WGメンバーの方々に心よりお礼申し上げます。