

ウィンド・パワー・かみす風力発電所工事

矢 嶋 英 明

ウィンド・パワー・かみす風力発電所工事は、茨城県神栖市に2,000 kW級の風力発電所7基を施工するものであり、その基礎工事を担当した。本発電所は国内初の外洋に面した公海上に設置された風力発電施設であり、基礎形式としてモノパイル方式を採用した点にも特徴がある。

海上施工に際し、鋼製導棒の利用やダウンザホールハンマー工法による障害物撤去工、グラウト接合部における水中不分離性高流動無収縮モルタルの使用等、様々な工夫を行って高精度の施工を行ったので、その内容を報告する。

キーワード：洋上風力発電，モノパイル，グラウト接合，マックス AZ

1. はじめに

近年、持続可能な社会を実現させるため、地球温暖化対策が叫ばれている。地球温暖化対策で大きな役割を持つものの一つとして風力発電所の建設が盛んになってきているが、一方で騒音・振動による問題も発生している。洋上風力発電所は陸上に設置されるものに比較すると、環境面からも運転の安全性の面からも有利な点が多い。ただし、海外においては実例があるものの、これまで施工上の制約等から外洋に面した大規模風力発電施設は国内では建設されてこなかった。

今回、茨城県神栖市に2,000 kW級の風力発電所7基をモノパイル（大口径鋼管杭）形式の基礎にて施工したので、その工事内容について報告する。

2. 工事概要

風車の仕様を表-1に示す。風車1基の重量は約200 tであり、本工事はこの風車の基礎をモノパイル（大口径鋼管杭）形式で施工するものである。

建設地は鹿島港の南側に位置し、神栖市南浜の護岸から約40 mの外洋上である。地盤は沖積砂層であるが、杭先端部は非常に密な砂層または砂礫層となっている。建設地の水深はDL-3.5 mから-5.0 mであり、DL-5 m～-10 mはN値30以上（平均N値46）の細砂層であり、それ以深は平均N値50の砂層及び礫層で構成されている。

当初計画時は海上施工も検討したが、波浪の統計デー

表-1 風車仕様

名称	ウィンド・パワー・かみす 風力発電所	
事業地	茨城県神栖市南浜海上	
事業目的	風力発電事業	
建設基数	7基	
仕様	機種名	SUBARU 80/2.0
	ローター直径	80 m
	ハブ高さ	60 m
	定格出力	2,000 kW
	定格風速	13 m/sec
	運転開始風速	3 m/sec
	運転停止風速	25 m/sec
	耐風速	70 m/sec

タから作業台船を用いた杭打設の施工可能日数が年間9日程度しか期待できないことから、陸上施工とした。

3. 基礎杭の施工

(1) 施工フロー

施工フロー（図-1）および工程表（図-2）を次頁に示す。

①障害物探針調査

H-300（L=22 m）をバイプロハンマーを用いて海底に打設し、障害物の有無の確認を行う。

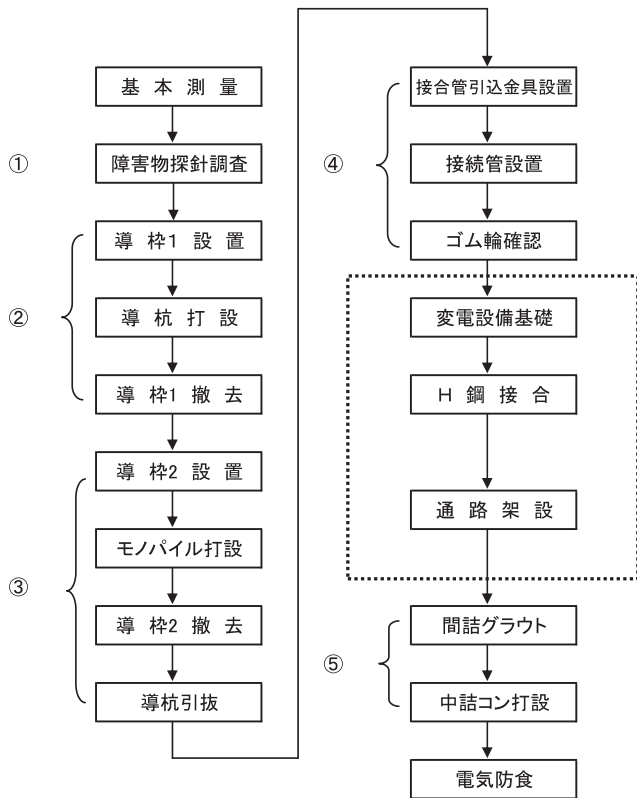


図-1 施工フロー

工程表		2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	
		10	20	25	10	20	31	10	20	31	
準備工	式	1									
風車位置調査	箇所	7									
導杭打設	箇所	7									
導杭設置	箇所	7									
基礎杭打設	基	7/8: NO.1~7全て完了									
導杭撤去	箇所	7/13: NO.1~7全て完了									
導杭撤去	箇所	7/10: NO.1~7全て完了									
接続管設置	基	8/4: NO.1~7全て完了									
接続管モルタル充填	箇所	8/5: NO.1~7全て完了									
中詰コンクリート打設	m ³	8/8: NO.1~7全て完了									
防食工	箇所	8/17開始: 10/16完了									
片付工	式	1									

図-2 工程表

②導杭の打設

モノパイルの周りに導杭設置のためφ800の鋼管を4本バイプロで打設する。なお、そのうち陸側2本はメンテナンス用栈橋の支持柱として使用する。

③基礎杭（モノパイル）の打設

φ3500（L = 24.5 m）重量約100 tのモノパイルを油圧ハンマーS-500を用いて打設する。

④接続管（ジョイントスリーブ）の設置

φ4200/3800（L = 8 m）のジョイントスリーブをモノパイルと接続する。

⑤間詰めグラウトおよび中詰めコンクリート打設

モノパイルとジョイントスリーブの間にマックスAZによるグラウトを施工。その後、海底面からジョイントスリーブの天端より-60 cmまでのコンクリート打設を行う。

(2) 障害物探針

モノパイル打設にあたっての最大の懸念は、地盤中に存在するテトラポット片や玉石などの障害物により、打設不能・鉛直精度の確保が困難になることであった。

事前ボーリングデータから深度2 m以浅に障害物がある可能性があったことから、事前の探針作業を行った(写真-1)。探針とはH鋼をバイプロハンマーで打設することで障害物の有無を確認する作業である。その結果、障害物があることが確認された。

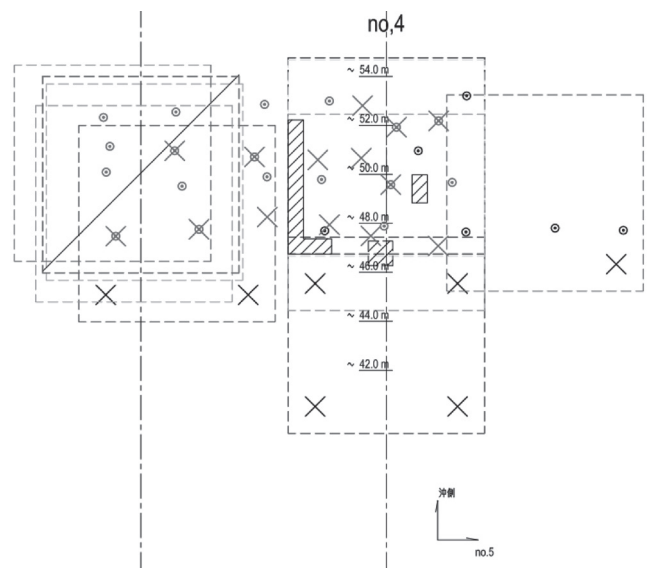


写真-1 障害物探査状況

打設位置の変更等も考慮にいれ、導杭を設置して詳細な探針、また導杭を利用しての面での確認探針を行った。各々測量しながら施工し、障害物マップ(図-3)を作成した。

海象条件の制約から二日間ではあったが、潜水夫による海底の確認作業も行った(写真-2)。

基礎杭の施工位置は、導杭の安定と障害物の分布状



(×: 障害物あり ○: 障害物なし)

図-3 障害物マップ例



写真—2 潜水夫による調査状況



写真—3 ダウンザホールハンマー先端部

態を見ながら総合的に有利な場所に決定した。

(3) 導杭打設および障害物撤去

探針の結果、ほとんどの杭で地中障害物が確認された。障害物が分散して点在していることや使用クレーンの作業能力では沖への位置変更は不可能なため、障害物を撤去することとした。

障害物撤去にあつては、海上よりバケット等で撤去する方法やダウンザホールハンマー工法など何種類かの比較検討(表—2)を行った。

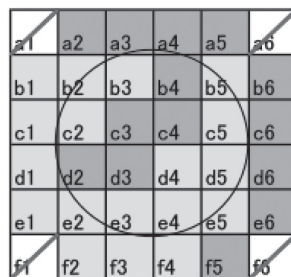
表—2 海底障害物比較検討表

工法	主要機械	工期	経済性	施工性	確実性	判定
バケット掘削	450 tCC	○	○	△	△	△
砕岩棒	360 tCC	○	○	△	×	×
グラブ浚渫	浚渫船	×	×	○	△	×
〃	起重機船	×	×	○	△	×
バックホー	台船	×	×	○	△	×
ダウンザホールハンマー工法		○	△	○	○	○
全旋回工法		△	△	△	○	△

検討の結果、最も確実性が高く工期に与える影響の少ないダウンザホールハンマー工法を採用した。

ダウンザホールハンマーにはケーシング内部のシャフト先端にビット(写真—3)がついており、この部分で回転打撃を与え障害物を破碎するものである。破碎しただけではエアブローにより排出する。

ダウンザホールハンマー工法による撤去方法は、モノパイル打設範囲を6×6のグリッドに分割し、それぞれにφ600のダウンザホールハンマーを一定深度(目安として海底より2m)まで打設することによつ



図—4 障害物撤去(No.5)結果例

て破碎処理するものである。管理図の一例を図—4に示す。

障害物としては護岸用のテトラポットやその敷石として使用していた玉石類が排出されてきた。テトラポット(コンクリート)は比較的短時間(30分以内)での撤去ができたが、玉石類は撤去にかなりの時間(2時間程度)を要した。

(4) モノパイル打設

モノパイル打設は、750tクローラクレーンを用いて500tf・m級(S-500)の油圧ハンマーにて施工した。モノパイルの仕様は、SM490, t = 44 mm, φ3500, L = 24.5 mである。

施工前に検討した事項としては、

1. モノパイル自立時の鉛直精度の確保
2. 打設中のヤットコの落下
3. モノパイルの高止まり

等があげられる。

モノパイル、ヤットコ、S-500ハンマーの重量が各々100t, 35t, 100tであり、クレーンの施工能力が最大100tであることから、個別に設置する必要がある。そのため、玉外し時にいかにモノパイルが精度良く自立するかが鉛直精度の確保に重要な役割を持つてくる。

具体的な精度確保策としては以下のように実施し

た。

- ①導棒中央部にモノパイルをセットし、開口部の脇に設置してあるガイドレールによりモノパイルを固定した。
- ②モノパイル建て込み時、モノパイルの自沈等による動きがなくなるまで鉛直度を2方向から測量器を使い確認を行って、慎重に時間をかけて設置した。



写真-4 モノパイル建て込み状況

なお、ヤットコの落下防止対策としては、先端にずり防止の金物を溶接することで対応した。

また、高止まり対策としては、ウォータージェットによりモノパイル先端地盤をゆるめて打設するという方法で準備を進めたが、実施工ではウォータージェットを使用する必要はなかった。

次にヤットコをのせ、S-500ハンマーを慎重に乗せた。ヤットコとは(写真-5)にあるように、φ3500のモノパイルの上に乗せ、上端の径をφ2500にしてS-500のスリーブ部分をセットできるような調整治具である。

S-500を吊りこむ際は200tのクレーンを合判として使用し、セットの際の合図も200tクレーンでゴンドラを吊り、横方向から行った。

打設回数は各杭によって異なるが一基あたり約1500回を数えた(表-3参照)。

打設完了時はヤットコ上で高さを確認して、所定の高さで打ち止めた。

打設完了後、モノパイル上端の測量を行い、ジョイントスリーブ用受け架台を取り付けたのち、導棒および沖側の2本の導杭の撤去を行った。

最終出来形測量を行った結果、打設精度は管理値±1.5°に対して最大1.2°、平均0.6°であった。

支持力を算定する式としては次の式を採用した。

$$R = E_n \times 1.7 \times 1000 / (s + k/2)$$

E_n : エネルギー (kJ)



写真-5 ヤットコ設置状況

表-3 モノパイル施工管理表

	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
	2009.6.6	2009.6.12	2009.6.16	2009.6.23	2009.6.29	2009.7.3	2009.7.8
基礎杭自沈結果(先端mm)							
モノパイル建て込み時	-5.2	-5.2	-6.0	-7.0	-6.4	-8.1	-6.5
ヤットコ設置時	-5.6	-5.4	-6.2	-7.1	-6.4	-8.3	-6.9
油圧ハンマー設置時 (打設開始時)	-5.7	-6.2	-6.4	-7.4	-6.5	-8.4	-7.1
打撃回数(回)	1630	1634	1789	1411	1341	1126	1555
支持力(kN)	82374	83023	81194	69566	69244	48942	76676
傾き(°)	1.2	0.1	0.5	0.9	0.8	0.2	0.5
沖合い距離(m)	46.58	46.42	45.24	46.33	46.07	47.12	44.77



写真-6 S-500ハンマー設置状況

s: 貫入量 (mm)

k: リバウンド量 (mm)

モノパイル1本あたり3~4時間の打撃時間を要し、準備・打撃・移動等のサイクルとしては1基あたり5日で行った。また騒音防止の観点から土曜・日曜は準備・移動日等に当てるように計画し、杭の打設はとりやめた。

工事番号 ウィンドパワー かみす
 及び工事名 洋上風力発電所基礎工事
 工 期 平成21年3月12日～平成22年2月28日
 工 種 基礎杭出来形

測定項目	区分	測点	測点						
			H1	H2	H3	H4	H5	H6	H7
高さ	設計値(mm)		5000	5000	5000	5000	5000	5000	5000
		測定値(mm)	4978	5005	4996	4978	4988	5002	4986
	差(mm)	-22	+5	-4	-22	-12	+2	-14	
	規格値(mm)	規格値+50							
		管理値+40							
平均+10									
規格値-50									

測定項目	区分	測点	測点						
			θ1	θ2	θ3	θ4	θ5	θ6	θ7
傾き	設計値(°)		1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
		測定値(°)	1.2	0.1	0.5	0.9	0.8	0.2	0.5
	規格値±50								
	平均0.6								
	規格値0.0								

測定項目	区分	測点	測点						
			R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7
支持力	設計値(KN)		23732	23732	23732	23732	23732	23732	23732
		測定値(KN)	82374	83023	81194	69566	69244	48942	76676
	規格値90000								
	平均73003								
	規格値30000								

項目	内容	規格値	自主管理値	最高	最低	平均
傾き	1.5°以内	1.5°以内	1.2	0.1	0.60	
支持力	設計値(23732)以上	設計値(23732)以上	83023	48942	73003	

図-5 モノパイル打設管理表

(5) ジョイントスリーブ設置

モノパイル打設に続き、ジョイントスリーブの設置を行った。モノパイル打設時の導棒の撤去前にモノパイルの内側に円形足場を設置して、事前に測量した結果を基にモノパイルに仮受鋼材を設置し、ジョイントスリーブの高さ調整を行った。

グラウト材の漏れ防止は、ジョイントスリーブ先端にゴム製のグラウトストップ（特許出願中）を設置することによって行った。

ジョイントスリーブ設置時は、先端に取り付けたゴム（図-6）がモノパイルにそって隙間等なく設置されているか目視しながら慎重に設置した。設置したゴムは途中でのめくりあがりや切れ等もなく、予定通り設置できた。方向に関してはトランシット、高さについてはレベルを使用しながら設置した結果、ジョイントスリーブの鉛直精度は1/1,000以下を確保できた。

グラウト施工は、ジョイントスリーブ上に作業架台をセットして、架台上にミキサーとグラウト材を設置して行った。

グラウト材には水中不分離性高流動無収縮モルタルを使用した。水中不分離性高流動無収縮モルタルは水

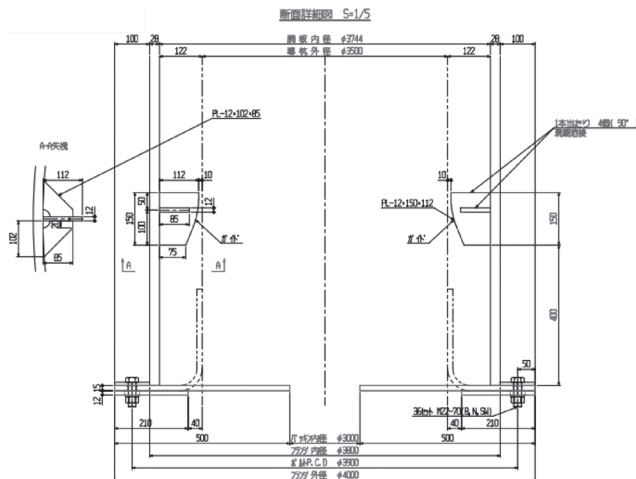


図-6 グラウトストップ用ゴム輪製作図

中施工に適しており、充填性が高く強度確保が容易であるため、本工事に最適な材料である。

1基あたり約6m³の施工であったが、ジョイントスリーブの底面からグラウト材が流出することを懸念し、2回に分けて施工した。ジョイントスリーブを設置した日に底面より約1mの高さまで注入し、翌日に前日のグラウト材が流出していないことを確認して、残り約4mのグラウトを行った。



写真-7 ゴム輪取付状況

(6) 中詰めコンクリート打設

中詰めコンクリートは、配合40-18-20BBのレディミクストコンクリートである。設計上、中詰めコンクリートの応力分担は見えていないが、長尺の構造物であるため、防振対策として打設するものである。

打設方法はコンクリートポンプ車を工事用道路に配置して、配管打設を行った。陸上部の擁壁からジョイントスリーブ上の作業架台まで、クレーンで配管架台を吊りわたして配管をセット（写真-8）した。

事前にモノパイル内の水をすべて排水後、打設を開

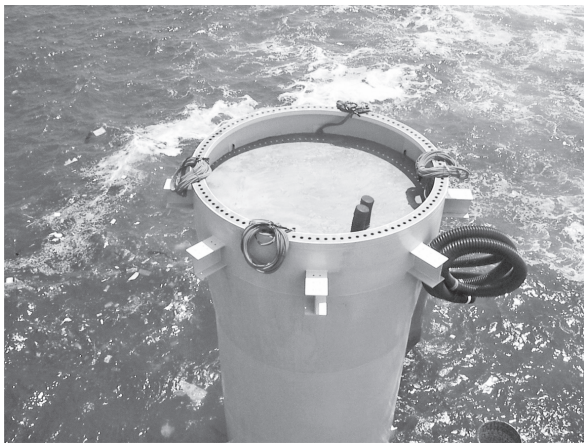


写真一8 中詰めコンクリート打設状況



写真一10 陽極材料確認状況

始した。また、打設ホース先端をコンクリートの中に挿し込み、水中コンクリート打設の要領で打設した。天端はジョイントスリーブより60cm下となるように打ち止め、配管内のコンクリートすべて圧送し、金ごてによる仕上げを行った(写真一9)。



写真一9 完成写真

打設後は湛水養生をおこない、引渡し前に排水・清掃を行った。

(7) 電気防食

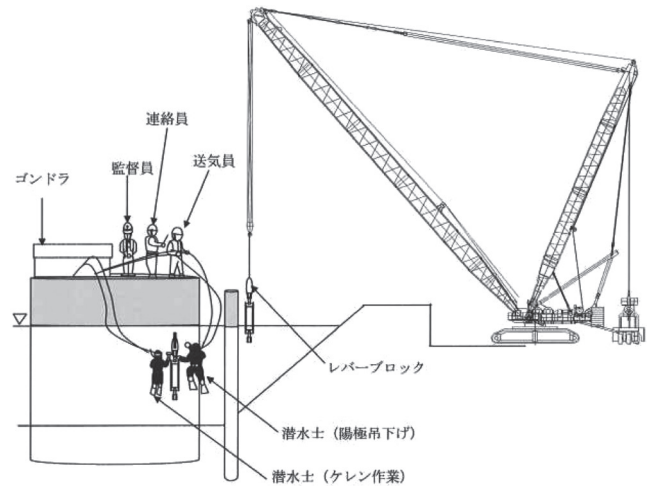
電気防食工は重さ70～200kgある陽極(アルミインゴット; 写真一10)を、モノパイル3箇所、栈橋支持柱2本に対して各1箇所の合計5箇所に水中溶接する作業(図一7)である。

4. おわりに

モノパイルは、杭の打設時間が3～4時間と基礎工事としては、非常に単純で合理的な基礎形式である。

その反面、一発勝負的な要素が大きく、モノパイル打設開始後の制御が困難なところに留意した。

今回、高精度の施工が可能になった要因としては、



図一7 電気防食施工概念図

事前の障害物探針による対策工の実施が大きかったが、同時に発注者・協力業者との情報共有と現場における創意工夫が成功したものとする。

今回グラウト接合部に使用した水中不分離性高流動無収縮モルタルは「マックスAZ」であるが、本工事に最適な材料であった。

本工事の施工にあたり、事業者の(株)ウィンド・パワー・いばらき様ならびに発注者の東光電気工事(株)様には格別のご指導をいただきました。

また、地元関係者および協力業者の協力のもとで厳しい自然環境下、無事工事を完了できたことをうれしく思い、ここに記して深く感謝の意を表します。

JCMA

[筆者紹介]

矢嶋 英明 (やじま ひであき)
 (株)熊谷組
 首都圏支店 土木事業部

