

洋上風力発電所におけるモノパイル基礎の施工

— ウィンド・パワーかみす風力発電所施工報告 —

牛腸 明 * 矢嶋英明 * 吉田健治 **

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2000kW級の風力発電所7基を施工するものであり、当社は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「マックスAZ」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、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2000kW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Table. 1に示す。風車1基の重量は約200t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40mの外洋上である。地盤は沖積砂層であり、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-3.5mから-5.0mであり、DL-5m~-10m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

3.1 施工フロー

施工フロー（Fig. 1）および工程表（Fig. 2）を次頁に示す。

* 首都圏支店土木部かみす作業所
** 本社土木事業本部土木設計部

Table. 1 風車概要

名称		ウィンド・パワーかみす 風力発電所
事業主体		(株)ウィンド・パワー・いばらき
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	80m
	ハブ高さ	60m
	定格出力	2,000kW
	定格風速	13m/sec
	運転開始風速	3m/sec
	運転停止風速	25m/sec
耐風速		70m/sec

- ① 障害物探針調査
H-300 (L=22m) 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。
- ② 導杭の打設
モノパイルの周りに導棒設置のため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棧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=24.5m) 重量約100t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=8m) 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、海底面から床面（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。

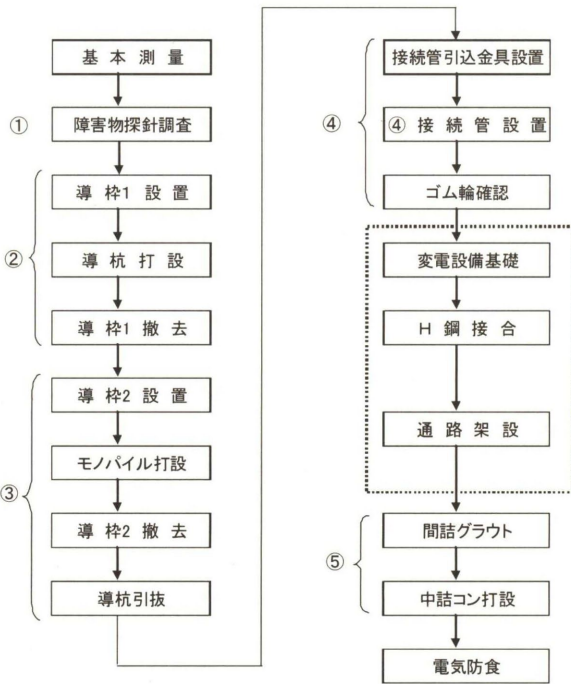


Fig. 1 施工フロー

項目	単位	数量	月											
			2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月			
準備工	式	1	[Solid line]											
風車位置調査	箇所	7	[Dashed line]											
導杭打設	箇所	7	[Dashed line]											
導杭設置	箇所	7	[Dashed line]											
基礎杭打設	基	7	[Dashed line]											
導杭撤去	箇所	7	[Dashed line]											
導杭撤去	箇所	7	[Dashed line]											
接続管設置	基	7	[Dashed line]											
間詰グラウト	箇所	7	[Dashed line]											
中詰コンクリート	m ³	892	[Dashed line]											
防食工	箇所	7	[Dashed line]											
片付工	式	1	[Dashed line]											

Fig. 2 工程表 (破線が計画, 実線が実績を示す)

3.2 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つた。

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つたことから、事前の探針作業を行った (Photo. 1)。探針とはH鋼をパ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。

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、障害物マップを作成した (Fig. 3)。図中、破線の四角形は探針作業における導杭の設置位置を示す。

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

基礎杭の施工位置は、導杭の安定と障害物の分布状態を見ながら総合的に有利な場所に決定した。



Photo. 1 障害物探針状況

3.3 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等など何種類かの比較検討を行った (Table. 2)。

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。

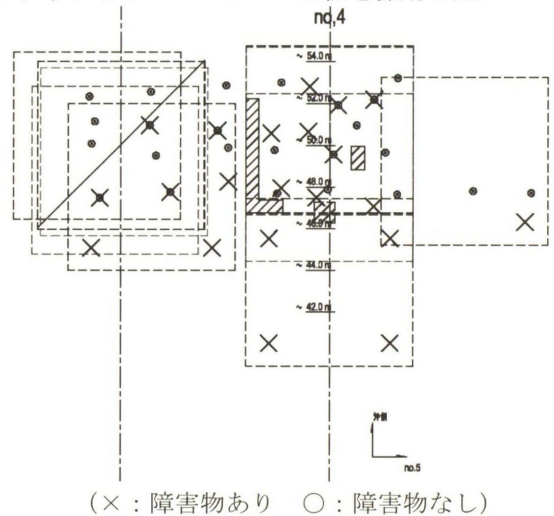


Fig. 3 障害物マップ例

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 (Photo. 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。破碎したずりはエアブローにより排出する。

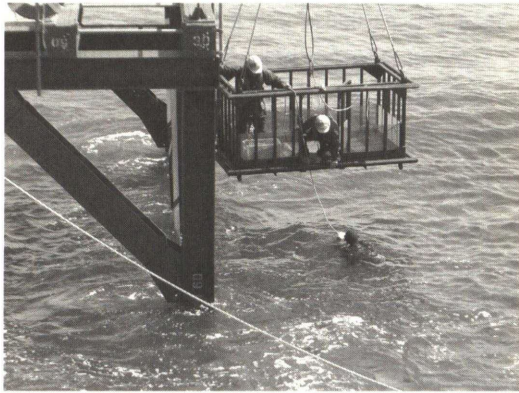


Photo. 2 潜水夫による調査状況

Table. 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	450tCC	○	○	△	△	△
砕岩棒	360tCC	○	○	△	×	×
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		△	△	△	○	△

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って破碎処理するものである。管理図の一例をFig. 4に示す。なお、グリッドの四隅はモノパイル打設に支障とならないため、破碎処理を行っていない。

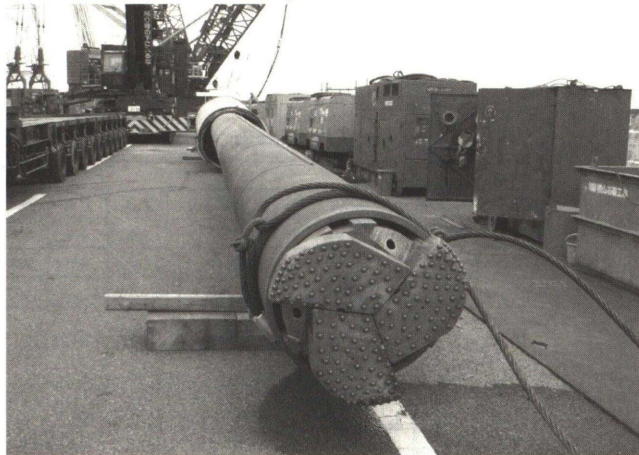


Photo. 3 ダウンザホールハンマー先端部

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、玉石類は硬質のため撤去にかなりの時間(2時間程度)を要した。

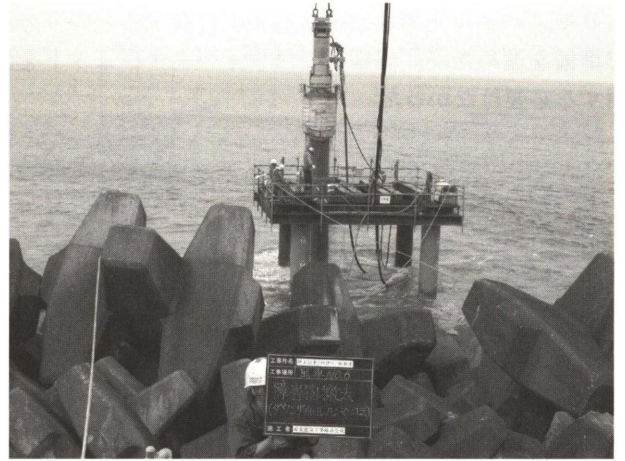
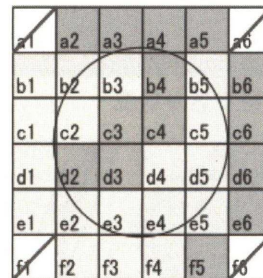


Photo. 4 ダウンザホールハンマー施工状況



凡例
 ■ 障害物なし
 □ 障害物有り撤去

Fig. 4 障害物撤去(No.5)結果例

3.4 モノパイル打設

モノパイル打設は、750tクローラークレーンを用いて500t・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=44mm、φ3500、L=24.5m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。

なお、ヤットコの落下防止対策としては、先端に止め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。

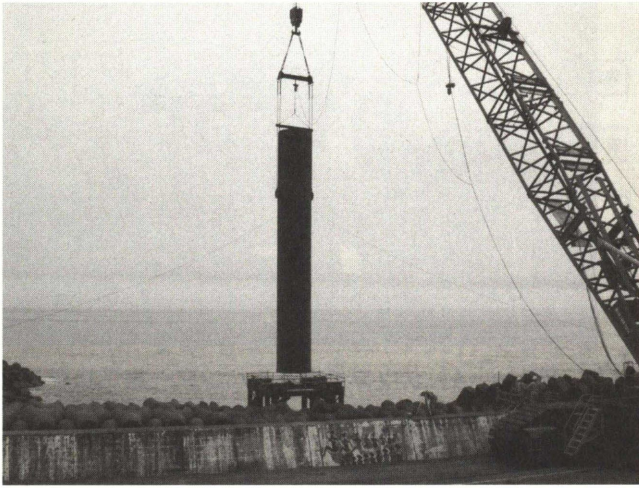


Photo. 5 モノパイル建て込み状況



Photo. 6 ヤットコ設置状況

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Photo. 6に示すように、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クレーンを補助として使用し、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 (Table. 3)。

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、モノパイル打設精度(鉛直度)は管理値±1.5°に対して最大1.2°、平均0.6°であった (Fig. 5)。

支持力を算定する式としては次の式(油圧ハンマー経験式)を採用した。

$$R_u = E_n * 1.7 * 1000 / (s + k / 2)$$

R_u: 極限支持力

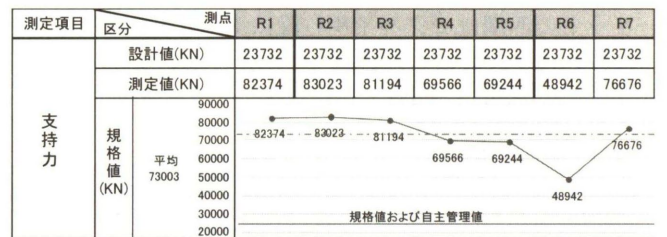
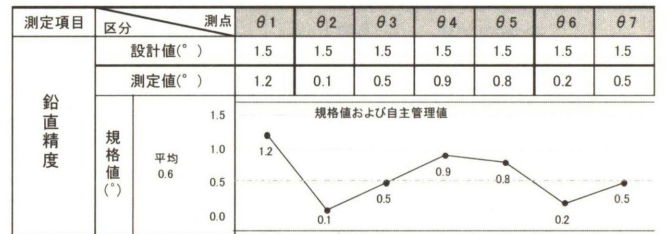
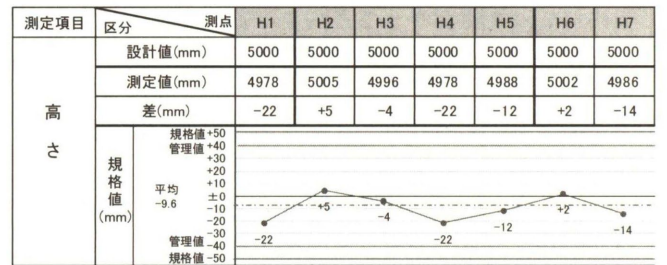
E_n: エネルギー (kJ)

s: 貫入量 (mm)

k: リバウンド量 (mm)

Table. 3 モノパイル施工管理表

杭番号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6	No.7
打設日	6月6日	6月12日	6月16日	6月23日	6月29日	7月3日	7月8日
基礎杭自沈結果(先端m)							
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
鉛直精度(°)	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



備考	項目	内容	規格値	自主管理値	最高	最低	平均
	高さ		±50	±40	+5	-22	-9.6
	傾き		1.5°以内	1.5°以内	1.2	0.1	0.60
支持力		設計値以上	設計値以上	83023	48942	73003	

Fig. 5 モノパイル出来形管理図

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。

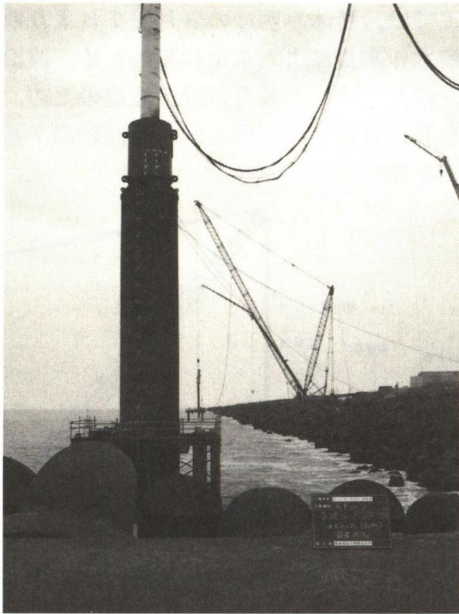


Photo. 7 S-500ハンマー設置状況

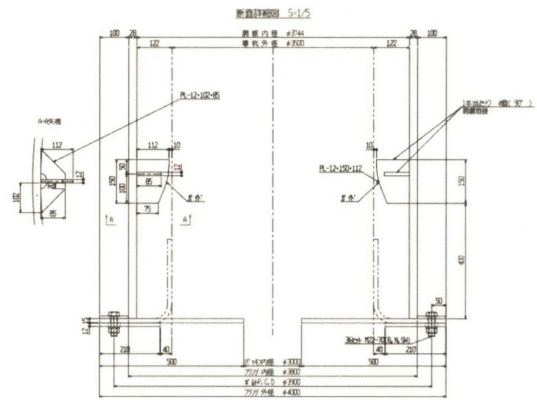


Fig. 6 グラウトストップ用ゴム輪製作図

3.5 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枠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（Fig. 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1/1000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「マックスAZ」を使用した。マックスAZは水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 6 m^3 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。

3.6 中詰めコンクリート打設

中詰めコンクリートは、配合40-18-20 BB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

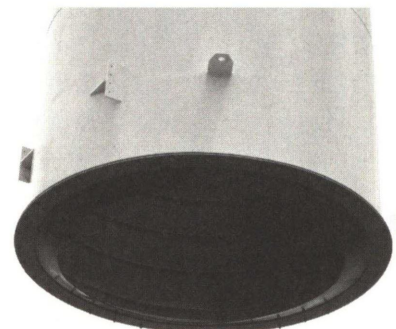


Photo. 8 ゴム輪取付状況



Photo. 9 中詰めコンクリート打設状況



Photo. 10 完成写真

リートは応力を受け持たないが、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した (Photo. 9)。

事前にモノパイル内の水をすべて排水後、打設を開始した。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 (Photo. 10)。

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。

3.6 電気防食

電気防食工は重さ 70~200 kgある陽極 (アルミインゴット; Photo. 11) 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である (Fig. 7)。

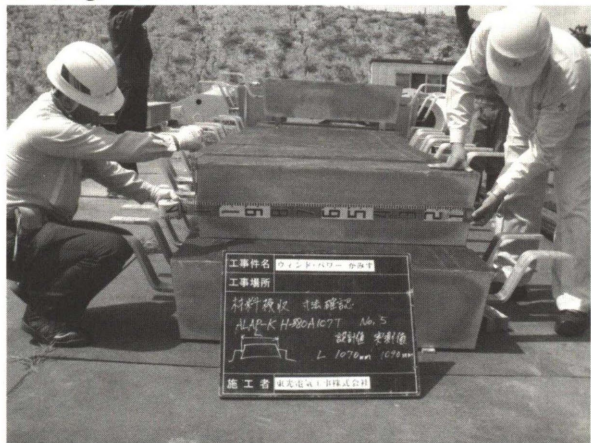


Photo. 11 陽極材料確認状況

当初計画では、ゴンドラによる作業員の移動や、陽極の吊りこみなどのクレーンを使用する作業があるため、施工時期を中詰めコンクリートの後にまとめ、約 1 週間の予定であった。

実施工では、盆休み明けの 8 月 17 日より取り掛かったが、潜水作業員による水中作業のため、波浪の影響を大きく受けた。特に、8 月以降は波浪のため、水中作業が可能な日は月に 3 日程度しかなく、結局 7 基の施工に 2 ヶ月半を費やした。

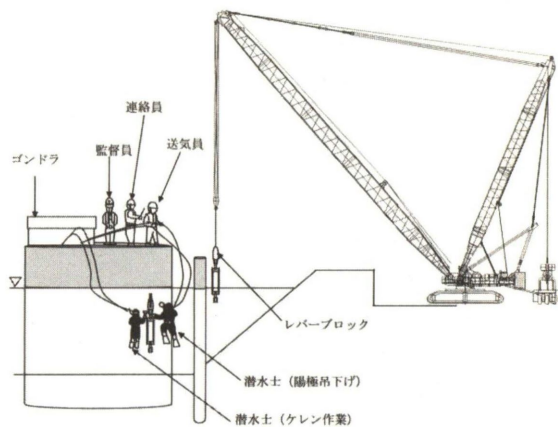


Fig. 7 電気防食施工概念図

4. まとめ

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、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考えられる。

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。

Construction of Monopile Base for the Marine Wind Power Plant - Report of Wind Power Station KAMISU -

Akira GOCHO, Hideaki YAJIMA, Kenji YOSHIDA

Abstract

The "Wind Power Station KAMISU" is a project that has constructed seven 2000KW wind power plants in Kamisu City (Ibaraki Prefecture). Kumagai Gumi took charge of its foundation work.

This is the first wind power station in Japan which faces open sea and adopted monopile method as a foundation form. We adopted steel scaffold for sea work, "Down the hole hammer" for removal of obstacles and "Max AZ (anti-washout no-shrinkage high fluidity mortar)" for grout-joint to achieve highly precise construction.

Keywords: Marine wind-power plant, Monopile, Grout joint, Max AZ