

洋上風力発電所建設案件 基礎工事において使用される各種施工機器の開発

和 泉 伸 明

脱炭素社会の実現に大きく貢献することが期待される洋上風力発電は、デンマークにおける世界初の洋上風力発電所建設から31年を数える。その歴史は、基礎工事の観点から言えば、風車の大型化・杭の大口径化への対応という課題克服の歴史でもある。欧州の建機メーカーは、かかる課題の克服を目指し、様々な施工機器の研究・開発に取り組んでいる。大型油圧ハンマーや特殊ハンドリング機器、気中・水中騒音低減装置等はその好例である。本稿ではかかる機器の技術特性について俯瞰的にふれると共に、近年開発された最新の据付技術についてもふれる。

キーワード：洋上風力、大口径杭、杭打ちハンマー、ハンドリング機器

1. はじめに

世界の洋上風力発電の歴史は、1991年にデンマークの Vindeby 沖 2 km 程、水深 4 m の洋上において、発電容量 0.45 MW という風力発電機 11 基によって産声をあげた¹⁾。日本では2004年に、北海道瀬棚町 (0.6 MW×2 基) と山形県酒田市 (2.0 MW×8 基) において建設されたものが先駆けである²⁾。31年を経た今日、洋上風力発電業界は、欧州と中国のメーカーにより 14~16 MW の風力発電機試作機を稼働せしむるに至った。31年間で実に 36 倍近い発電容量の増加である。

洋上風力発電所の建設初期において重要な作業となるのが、基礎施工である。基礎構造には大きく分けて着床式と浮体式の二種類があり、世界の洋上風力発電所の9割以上が前者である。浮体式については、2021年よりスコットランド Hywind 洋上風力発電所で初の商業規模建設工事が開始された。

着床式基礎にはモノパイル式、ジャケット式、サクシオンバケット式、重力式といった種類がある。欧州のみの例となるが、全洋上風力発電所における基礎構造は、モノパイル式とジャケット式だけでそれぞれ 80%、13% を占める³⁾。特にモノパイル式は、水深 30~40 m 程度であれば比較的容易に据付が可能であるため、今後欧州域外でも同方式が主たる工法となることが予想される。

着床式基礎は、現在は主に SEP (Self-Elevating Platform) 船と呼ばれるクレーンおよび昇降用脚付き

作業船により据付作業が行われている。同作業船は、甲板の四隅に件の昇降用脚 (Spudcan) を有し、これらを海底に着床させ、本船自体を海面から嵩上げすることで安定した状態を形成し、クレーンによる揚重作業等を行うことが可能となる。

洋上風力発電所建設の歴史は、基礎工事の観点から言えば、風車の大型化・杭の大口径化への対応という課題克服の歴史でもある。欧州の建機メーカーは、かかる課題の克服を目指し、様々な施工機器の研究・開発に取り組んできた。本稿では、その中でも基礎工事に焦点を絞り、かかる機器の技術特性について俯瞰的にふれる。

なお、日本の洋上風力発電業界が初期の成長期にあること、報文の文字制限があることを鑑み、現在最もひろく用いられている着床式基礎のみを扱い、浮体式基礎については今回は割愛し、将来機会があれば扱うものとした。

2. 杭の大口径化

洋上風力発電機のタワーを単一の杭で支持するモノパイル構造が初めて導入されたのは、1994年にオランダで建設された Lely 洋上風力発電所 (0.5 MW×4 基) である⁴⁾。杭径はわずか 3.7 m、使用された油圧ハンマーは打設エネルギーも 150 kJ であった。その後、発電機は大型化の一途をたどり、今年7月に基礎の打設を終えた独 Arcadis Ost I 洋上風力発電所 (9.2 MW×28 基) においては、杭頭径 7 m、底部径

9.5 m, 長さ 100 m, 重量は 2,000 トンを超えた⁵⁾。

表一1は、既述の Lely 洋上風力発電所案件から約 5 年毎の区切りで、杭仕様と、使用された油圧ハンマーの種類を推移をまとめたものである。油圧ハンマーの選定基準は、杭の仕様と土質条件という二つの要素に大きく影響を受ける。杭が大型化すれば、据付場所の地層におけるその先端抵抗と周面摩擦は増加し、貫入に必要なエネルギーも増加する。90 年代の案件と直近の案件の間に 36 倍の打設エネルギーの開きがあることは、各ハンマー・メーカーの研究・開発努力の賜物であることは言うまでもないが、特筆すべきは過去 10 年間における風力発電機の発電容量の大型化と、それに伴う使用ハンマーの打設エネルギー増加のペースが著しいことである。

表一1 杭頭径とハンマーの打設エネルギーの推移⁶⁾

施工年	国・案件名・発電容量	杭頭径	使用機器打設エネルギー
1994	蘭 Lely (0.5 MW×4 基)	3.7 m	150 kJ
2006	蘭 Egmond aan Zee (3.0 MW×36 基)	4.7 m	1,200 kJ
2009	英 Thanet (3.0 MW×100 基)	4.9 m	1,400 kJ
2014	独 Borkom Rifgund I (4.0 MW×78 基)	4.8 m	2,000 kJ
2019	独 Borkom Rifgund I (8.0 MW×56 基)	6.5 m	3,000 kJ
2022	独 Arcadis Ost I (9.2 MW×28 基)	7.0 m	4,000 kJ
2024	英 Dogger Bank (13.0 MW×190 基)	8.0 m	5,500 kJ (推定値)

今後も風力発電機の大型化は 20 MW 程度までは進むと予想され、当然これを支える杭も大口径化し、これを打設するのに必要なハンマーの打設エネルギーも増加することになる。上記の数値を超える次世代型ハンマーが市場に登場するのは、時間の問題である。

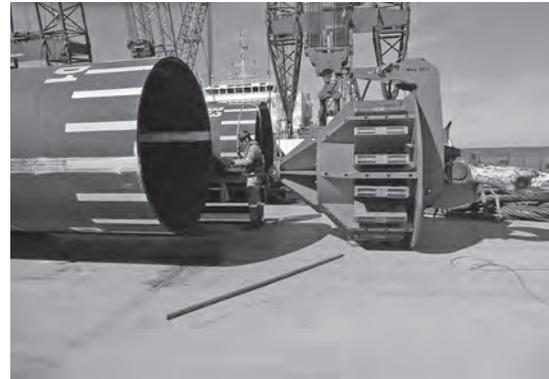
3. 基礎施工

本章では、洋上風力発電所の基礎工事において主に使用される建機、そしてその技術特性について概説する。洋上で作業船が据付工事を行う際の、物理的な作業順序になるべく合わせるかたちで説明する。

(1) 杭専用吊り具 (一般名称: Up-ending Tool)

作業船が据付場所に到着して作業可能状態 (昇降式の着床) となってから先ず行うのは、杭の揚重である。洋上風力発電機向けであるか否かによらず、基礎杭というものには、トラニオンやトップラグ、パッドアイといった吊りポイントが準備されているわけではなく、単

なる筒状の大型構造物である。従い、吊り具に特殊な設計を行うことで揚重する (写真一1~3, 図一1, 2)。



写真一1 ジャケット向けピンバイル用吊り具
杭の重量 1,200 トン程度まで対応可能



写真二2 グラウト式モノバイル用吊り具
既述のピンバイル用吊り具と設計原理は同じ。現在は 2,000 トンを超える杭の重量に対応可能

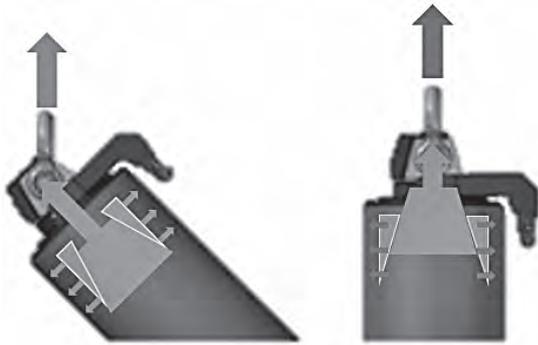


写真三3 フランジ式モノバイル用吊り具
こちらも 2,400 トンを超えるフランジ式杭の重量に対応可能



図一1 杭専用吊り具の稼働原理 (1)

手順1: 吊り具を機器に挿入
手順2: 油圧装置により、吊り具内のセンターピンを引っ張ることで、平板状の「楔」が押し出され、これらが杭を内部から押す力で杭と密着する



図一 杭専用吊り具の稼働原理 (2)

手順3：作業船のクレーンで揚重し、吊り具先端の可動部が立ち上がる
 手順4：立ち上がった状態。センターピンはこの間、上方向に引っ張られることとなり、下がることは無い。楔も外に押されたまま、内部に戻ることは無い。すなわち、油圧装置が万一故障したとしても、重力により物理的に杭を放さない構造をしているため、事故を防止する設計となっている

(2) 杭立て起こし装置 (Up-ending Frame)

杭頭を専用吊り具で揚重する間、杭の底部を安定的に立て起こす必要があるが、これに対応するのがヒンジ構造を有する立て起こし装置である。主に二種類あり、作業船の甲板に設置し、クレーンが巻き上げ・旋回をしながら杭を立て起こすものと、装置自体を自走式多軸台車 (Self-propelled Module Transporter : SPMT) に積載し、クレーンは巻き上げのみを行い SPMT が前進することで立て起こすものがある (写真一4, 5)。



写真一4 作業船甲板に据え付けられた Up-ending Frame 集中荷重となるため、甲板強度の詳細な安全性検討が肝要

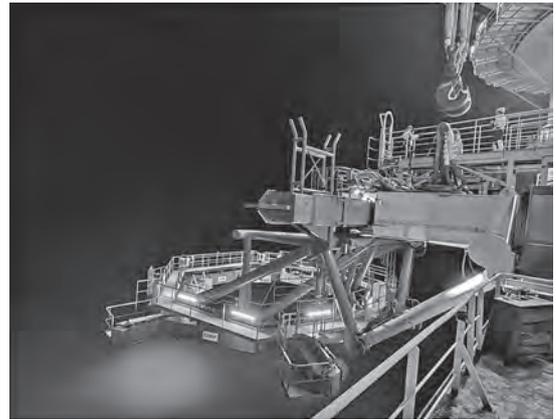


写真一5 SPMTに積載された Up-ending Hinge 荷重は SPMT により甲板に均等に分散される点の特長

(3) 杭鉛直度維持装置 (Pile Gripper)

立て起こした杭を多方向から加重しつつ文字通りグリップし、杭の鉛直度を維持しながら打設を行う機器である。建設時に必要となる杭の鉛直度誤差の許容範囲は、一般的に 0.25 度とされている。長さ 70 m の杭があった場合、根入れ深さから杭頭までのズレが 305 mm までという精度である。鉛直度の維持は、精度を担保するために複数の機器を組み合わせで行う。

内部には杭を押さえつける油圧式ローラーを複数装備し、杭径の変化にも対応している。これは、杭径が頭部と底部で異なるもの (Tapered pile) を意図した機能である。グリッパーのローラーは先ず最大径に当たる底部径を複数の角度から同時に押さえつける。ハンマーによる打設作業が進むにつれ、杭径は小さくなり、これに合わせてローラーも内部に迫り出し、杭頭近くの小さい径を複数の角度から継続的に押さえる (写真一6)。



写真一6 作業船甲板に据え付けられた Gripper

(4) 杭打ちハンマー (Hammer)

ラムを油圧で持ち上げ、ガスで加速した状態で落とし、下部アンビルを打撃することで杭にエネルギーを伝達するという基本構造は、陸上用杭打ちハンマーと同じである。やはり特筆すべきは、洋上工事仕様の規模である。本邦で製造された最大の杭打ちハンマーの打撃エネルギーは、150 kJ。現在、海外の洋上風力発電所建設の現場では、4,400 kJ の製品が存在し、来年には 5,500 kJ を超える機種が稼働開始予定である。本邦案件、特に 15 MW 級の風力発電機の採用が予想されるラウンド2以降の案件では、日本製最大機器の 36 倍以上の打撃エネルギーを有する機器が稼働することが見込まれる (写真一7)。



写真一七 打撃エネルギー 4,000 kJ の杭打ちハンマー

底部の平たい円柱状の部分が、杭に実際にエネルギーを伝達する Anvil を内蔵したスリーブと呼ばれる部位（直径 7m）。次世代型機器ともなると、ハンマー（5,500 kJ 級）とスリーブ（直径 8m）を併せた総重量は、900 トン近くになる

(5) 気中騒音・水中騒音低減装置（Airborne Noise Reduction System/Underwater Noise Mitigation System）

欧州では 2008 年以降、海洋生物の生態系保護の観点から、工事中（特に杭打ち作業中）に発生する水中騒音を規制する法整備が進んでいる。各メーカーもこれらに対応し、水中騒音低減装置も、商品化から既に 10 年以上の実績がある。

同装置は、筒状の構造物で杭の海面下の部分をすべて覆うことで、杭の海中部分における騒音の発生を 98% 以上低減する機能を有する。但し、杭が海底に既に貫入した部分からは、地中を通じて海中に振動が伝わり、それが水中騒音に変容するため、追加の水中騒音低減装置（気泡発生装置 = Big Bubble Curtain）が別途必要となることが多い。

一方で、海洋工事中の気中騒音に関する法整備は、欧州でもほぼ皆無である。これは、欧州の洋上風力発電所のほとんどが沖合十数キロから数十キロの場所で建設されており、陸側で気中騒音が問題化する事例がほぼ無いことに関係している。本邦では、洋上風力発電所はそのほとんどが沖合 1 km 以下から 4 km 程度以内であることから、近隣住民の間で気中騒音が問題化する可能性が高い。本邦初の商業規模洋上風力発電所建設案件となった秋田港・能代港案件に関する昨年の報道は記憶に新しいところである。これに対応するため、欧州メーカーの間では、気中騒音低減装置の開

発が進められている。ちなみに、本邦における海洋工事に関する騒音規制法令は、気中・水中の如何によらず未整備である。

気中騒音低減装置も、構造や仕組みは水中騒音低減装置と似ており、杭の海面上の表面を覆うことで気中騒音を低減するもの。杭径 1.5m 程度までのいわゆる沿岸土木工事案件においては、既に製品化はされており、実績も多い。しかしながら、洋上風力案件で用いられるような大口径杭に対応した製品は未だ開発段階を超えておらず、製品化には数年を要する見込みである（写真一八、九）。



写真一八 水中騒音低減装置

当該機器には、筒の内側に複数の油圧式ローラーが配置されており、杭を継続的に押さえつける鉛直度維持機能や、海底ケーブルの接続角度を正確に維持するための方向調整（回転）機能も有する



写真一九 気中騒音低減装置

蛇腹状の硬質ゴムを、カーテンのように下して杭を覆う洋上風力工用の杭径に対応した製品は、現在も開発段階にある

(6) アノード専用吊り具（Anode Cage Lifting Tool）

杭の防蝕装置であるアノードは、軽量ながらも構造上専用の吊り具を要する。吊り位置を多くすることで、集中荷重を防ぎ、且つ杭に吊り具が接触することも防ぐ設計となっている（写真一十）。

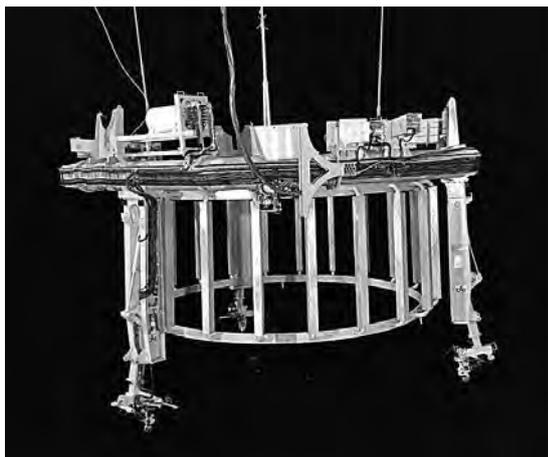


写真-10 アノード・ケージ据付治具

(7) トランジション・ピース専用吊り具 (TP Piece Lifting Tool)

杭とアノードの設置後に設置するのが、基礎と上部構造をつなぐトランジション・ピース (TP) である。これには、TP 上部の内部構造に楔を引っ掛けるかたちで吊り上げを行う油圧式吊り具が用いられる (写真-11)。



写真-11 トランジション・ピース専用吊り具

(8) ジャケット用据付テンプレート (Jacket Positioning Template)

ジャケット式の基礎構造物の場合、既述の機器に加えて、予めピンパイルを特定のジャケットの寸法に合わせて打設しておく (Pre-piling) ために、テンプレートと呼ばれる機器が用いられる。底部に設置された油圧装置が海底の地形に合わせて水平度を調整し、次に個々のピンパイルの差込部に設置された油圧装置がピンパイルの鉛直度を維持する機構を有している。通常、特定の案件のために専用のテンプレートが設計される (写真-12)。



写真-12 ジャケット用据付テンプレート

4. 最新技術

基礎施工機器のメーカーは、風力発電機器の大型化に加えて、据付作業可能時間 (Operational Window) の最大化と据付作業時間の短縮化を目指し、様々な技術革新に取り組んでいる。工期の短縮はそのまま建設費の低減に結びつき、電力事業者にとっては運転開始時期や売電利益のキャッシュフロー早期化に直結する、重要な要素である。ここでは、実用化が始まった最新技術を三例紹介する。

(1) 汎用型吊り具 (Combi Lifting Tool)

既述の主な基礎施工機器において、クレーンによる揚重を要するもの (第3章の機器 (3) を除くすべて) を、単一の吊り具で吊れるよう設計したもの。クレーンのフックそのものを、すべての機器に共通して挿入可能なソケット (オス: 図-3 左上の機器) に交換し、残りの機器にはすべてメスの構造を持たせている。従来はすべての吊り作業に個別の吊り具の段取りを要し、8名近くの玉掛け作業員がクレーン、高所作業車等を駆使して甲板上で作業をしていたものが、単一の吊り具のみで足り、遠隔操作により、作業開始・終了時を除き玉掛け作業員も不要となる。クレーンの巻上・巻下、旋回範囲も大幅に削減されることから、工期は従来と比して20%程度の短縮が可能となった実例も

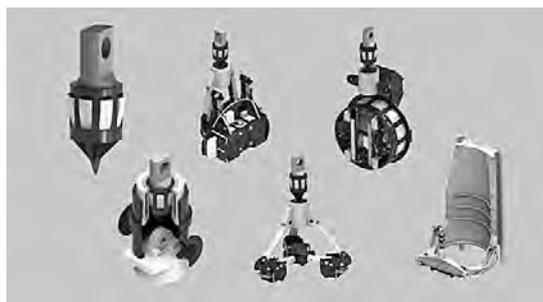


図-3 汎用型吊り具 一例

左上が共通ソケット (オス)。残りの機器にはすべてメスの構造を有しており、基礎施工に必要なすべての機器に対応している

ある。これは、従来工法であれば例えば約50日を要した杭打ち作業が、40日以下で完了することを意味する。SEP船の備船料が一日当たり数千万円を超える現在の市場において、大きな費用対効果を発揮する機器と言える（図—3、写真—13）。



写真—13 汎用型吊り具 作業風景
船上では、玉掛け作業員やその他機器は不要となる

(2) 自動船位保持装置（DPS）付き杭鉛直度維持装置

第3章の(3)にて既述の杭鉛直度維持装置（Pile Gripper）に、自動船位保持装置（Dynamic Positioning System：DPS）を内蔵させたもの。既にDP機能を有するクレーン船に設置することで、本船を海底に固定することなく動的に浮いたままの杭打ち作業が可能となる。独 Arcadis Ost I 洋上風力発電所案件においては、M/V “Orion”（5,000トン吊り容量のクレーンを有する浮体式据付作業船）が、今年7月、商業規模案件としては初めて、当該技術を用いた杭打ち作業を成功裡に完遂した。当該技術は製品化されつつあり、SEP船に依存しない基礎施工を行う時代の幕開けを象徴する案件となった（写真—14）。



写真—14 M/V “ORION” 作業風景
DPS 付き杭鉛直度維持装置（Dynamic Outrigger）を搭載

(3) 水塊充填式騒音低減装置

既存の杭打ちハンマーに着脱可能なアタッチメントであり、筐体内部に1トン余りの水塊を充填したものの。ハンマーで水塊を叩くことで、打撃のインパクト時間を30ミリ秒程度まで延ばし（通常の杭打ち作業のインパクト時間は8～12ミリ秒）、瞬間最大荷重（ピーク・フォース）を、装置無しの状態と比して45%程度押さえる。杭の振動回数（周波数）は低くなり、人間の聴覚は低周波数の音を低音と感じる性質があることから、これを利用して6～10dB程度の騒音低減を実現する装置である。

従前の騒音低減装置としては、衝撃吸収板（ショックプレート）を多層で重ねたアタッチメントが存在する。ハンマーの打撃エネルギーを吸収することでピーク・フォースを押さえる仕組みであるが、打撃エネルギーが一部失われているため、固い地盤に到達すると、同装置を一旦取り外し、本来の打撃エネルギーで打設を行い、軟らかい地盤に再度到達した時点で同装置を再取付する、といった作業が必要であった。一回の作業は数時間であるが、杭を数十本据え付ける案件であれば十数日分の時間を要することになり、コスト増につながる。

件の水塊充填式装置は、水塊の量を調節できる点が特長である。水塊により打撃エネルギーを一部失うことにおいては同じだが、固い地盤に到達した時点で、筐体内に充填していた水を排し、本来の打撃エネルギーで打設を行い、軟らかい地盤に再度到達した時点で水を再度注入する、といった作業が可能となる。これは数十分で実施可能な作業であり、工期を長期化することなく気中・水中騒音の低減を実現できる新技術である。奇しくも、同装置も既述の独 Arcadis Ost I 洋上風力発電所において初めて実用化され、意図していた騒音低減効果を得られたことが確認されている（写真—15）。



写真—15 水塊充填式騒音低減装置
写真中央にあり、ハンマーとスリーブの間に装着されている

5. おわりに

成長の初期にある日本の洋上風力発電業界において、建設に関わる方々に対して、そもそも基礎工事においてはどのような機器が使用されるのかということにつき概説した。単一の製品について掘り下げるのではなく、最低でもこの程度の機器が使用され、その稼働原理といった基本的技術特性に的を絞った内容とした。実のところ、杭の滑落防止やクレーン保護装置、浮体式風力設備用機器等、洋上構造物の基礎工事に使用される機器だけでも40種類をゆうに上回る。今後機会があれば、幾つかの機器を深掘りした報文もご紹介したい。

J|C|M|A

《参考文献》

- 1) Siemens Gamesa Renewable Energy. 2021. "Celebrating 30 years of offshore adventure".
<https://www.siemensgamesa.com/en-int/explore/journal/2021/08/>

vindeby-30-anniversary-offshore, (参照 2022-08-12)

- 2) 川崎重工業. 「日本初の洋上風力発電所が完成」. Kawasaki News, Vol.134. 2004. 18-19 ページ
- 3) Reuter Events. 2019. "Offshore wind foundation shift hinges on serial build gains" (Reproduced from WindEurope).
<https://www.reutersevents.com/renewables/wind-energy-update/offshore-wind-foundation-shift-hinges-serial-build-gains> (参照 2022-08-12)
- 4) reNEWS. biz. 2016. "Nuon says bye to Lely".
<https://renews.biz/40655/nuon-says-bye-to-lely/> (参照 2022-08-12)
- 5) DEME. 2022. "Monopile installation completed at Arcadis Ost 1 offshore wind".
<https://www.deme-group.com/news/monopile-installation-completed-arcadis-ost-1-offshore-wind-farm> (参照 2022-08-12)
- 6) 各種案件の仕様や情報は、公開されている情報および洋上風力発電に関する市場情報サービス 4C Offshore (有償) より抜粋

【筆者紹介】

和泉 伸明 (いずみ のぶあき)
IQIP Japan (株)
ゼネラルマネージャー

