洋上風力発電施設の施工管理について

島谷 学¹・力石 大彦²・佐々木 慎³・中井 崇斉⁴・山口 祐一郎⁵

¹正会員 五洋建設株式会社 土木本部 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)
E-mail:Manabu.Shimaya@mail.penta-ocean.co.jp

²正会員 五洋建設株式会社 土木本部 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)
E-mail:Masahiko.Chikaraishi@mail.penta-ocean.co.jp

³正会員 五洋建設株式会社 土木本部 土木設計部 (〒112-8576 東京都文京区後楽2-2-8)
E-mail:Makoto.A.Sasaki@mail.penta-ocean.co.jp

⁴五洋建設株式会社 九州支店 土木部 (〒812-8614 福岡市博多区博多駅南1-3-11)
E-mail:Takayoshi.Nakai@mail.penta-ocean.co.jp

⁵五洋建設株式会社 九州支店 土木部 (〒812-8614 福岡市博多区博多駅南1-3-11)
E-mail:Yuuichirou.Yamaguchi@mail.penta-ocean.co.jp

再生可能エネルギーを活用した発電方法のうち、洋上風力発電はそのポテンシャルの高さから日本国内での実用化が期待されており、現在北九州市沖にて洋上風力発電施設の建設が進められている。建設においては、陸上での施工とは異なり多くの課題が存在する。本研究では、その中でも風車側の性能要求事項である鉛直精度を洋上の沖合にていかに確保するか、また限られた工期で安全に施工を行うにはどのような管理が必要かに着目し、洋上風力発電施設の建設工事を通じて施工管理方法の検討を行った。

Key Words : renewable energy, offshore wind power, safe offshore execution, verticality

1. はじめに

東日本大震災以降エネルギーの多様化が叫ばれる中、再生可能エネルギーに寄せられる期待は大きい。再生可能エネルギーには太陽光、風力、波力、潮力、海流などがあるが、このうち洋上風力発電はその潜在的なポテンシャルと発電コストの優位性から欧州を中心に導入が進んでおり、わが国でも普及が期待されている。独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構（NEDO）が取り組む「洋上風力発電システム実証研究」および「洋

上風況観測システム実証研究」（以下、実証研究）の枠組みの中で、現在、洋上風力発電施設（以下、洋上風車）および洋上風況観測施設（以下、観測塔）の建設を進めている¹⁾（図-1）。洋上での風車建設においては、陸上での施工とは異なり克服すべき多くの課題が存在する。

本研究では、その中でも風車側の性能要求事項である鉛直精度を洋上の沖合にていかに確保するか、また限られた工期で安全に施工を行うにはどのような管理が必要かに着目し、北九州沖における洋上風車と観測塔の建設工事を通じて施工管理に関する検討を進め、今後の洋上風車の施工に寄与することを目的とする。

図-1 位置図

2. 鉛直精度の管理

(1) 検討方法

洋上風車の建設に先立ち、洋上風車から西南西方向約250m離れた位置に観測塔が建設されている。洋上風車および観測塔の立面図を図-2に示す。今回の実証研究では、洋上風車、観測塔共に支持構造として、写真-1に示すような鋼管とRCを併用した「ハイブリッド重力式支持構造物」を採用している。通常、陸上の風車基礎は

図-2 洋上風車および観測塔の立面図

写真-1 ハイブリッド重力式支持構造物

RCフーチングの天端面で風車タワーとの接合面をレベル調整し、タワーと接合される。洋上では接合部が海底面よりも遥かに高い位置にありトップヘビーとなるため、RC等の重量物だとレベル2地震時の安定性に課題が生じる。そのため、支持構造物と風車タワーは軽量かつ剛な鋼構造を介した結合フランジ・ボルト接合とした。

接合部にて鉛直精度を調整するためにライナープレート等を使用する方法も考えられたが、接続部で脆弱な箇所が存在し強度上問題があるため、接合部でのレベル調整は行わないこととした。

したがって、支持構造物の鉛直精度がそのまま風車の鉛直精度に反映されるため、精度確保のための施工方法を検討し、その妥当性を評価した。

a) 基礎捨石マウンドの築造

支持構造物の鉛直精度を向上させるには、基礎捨石マウンドの築造精度の向上が必要である。通常のケーソン堤では、捨石マウンドに即時沈下が生じて上部工でのレベル調整が可能であるが、今回は接合部でのレベル調整は行わないこととしている。そこで、即時沈下への対

写真-2 重錘落下による機械式での均し作業

策として、本研究では通常の潜水士による均し作業に加え、転圧が可能な重錘落下による機械式での均し作業（以下、重錘均し）を行った（写真-2）。潜水士による人力作業を最小限にすることもでき、工期短縮や安全確保といったメリットも期待できる。

また、均し面の高さ管理については、沖合のためレベルでの視準が困難なことから、自動追尾型トータルステーションによる捨石均し管理システムを導入し管理を行った。

b) 支持構造物の据付

支持構造物の据付は、洋上風車、観測塔とも3,700t吊の大型起重機船にて行った。支持構造物の重量は洋上風車で約4,100t、観測塔で約2,900tであり、洋上風車については起重機船の吊能力より陸上ヤードからの吊り出しが困難であったため、浮力を活用できるフローティングドックにて支持構造物の製作を行った。洋上風車の支持構造物の据付状況を写真-3に示す。なお、観測塔については、観測鉄塔の下部の一部を陸上ヤードにて支持構造物へ設置した後に据え付けた。

c) 風車および観測鉄塔の設置

観測鉄塔の設置は、2,200t吊の大型起重機船にて行った。観測鉄塔（既に支持構造物に設置した下部を除く）の重量は約100tであったが、揚程を考慮して起重機船を選定した。また、洋上風車の設置については、高い精度

写真-3 支持構造物の据付状況

写真4 風車の組立状況

のクレーン作業が要求されるため、SEP船（自己昇降式台船）を2隻使用し、650t吊クローラクレーンをSEP船上に配置することで風車の組立を行った。風車の組立状況を写真-4に示す。

(2) 精度確認

a) 精度確認方法

基礎捨石マウンドの築造精度については、均し作業完了後に基礎捨石マウンド上に基準点（設計高）を設置し、その後水中水準器を使用して基準点から各測定箇所の相対高さを測定した。測定結果より、基礎捨石マウンドの最大高低差を算出し、底版コンクリートの幅で除して水平精度を算出した。

また、支持構造物の据付精度については、支持構造物の据付完了後に風車タワーや観測鉄塔との接合部のフランジ天端面に測点を設置して、レベルを使用して基準点からの相対高さを測定することにより支持構造物の水平精度を確認した。

支持構造物上に設置された洋上風車および観測塔の精度確認は以下の通りとした。洋上風車の場合は風車タワーの各接合フランジ面（計3箇所）、観測塔の場合はフロアのグレーチング面（計3箇所）での水平度をデジタル傾斜計（最小計測角は洋上風車の場合 0.05° 、観測塔の場合 0.10° ）により計測し、各位置の水平精度を評価することとした。

b) 精度の評価

基礎捨石マウンド、支持構造物のフランジ面および洋上風車、観測塔各部の水平精度をまとめたものを図-3、図-4に示す。各構造部材が所定の精度で製作されており、各位置における水平精度が確保されていれば所定の鉛直精度を満足すると判断した。なお、許容する水平精度は、基礎捨石マウンドの均し面高さの誤差範囲（ $\pm 50\text{mm}$ ）を支持構造物の底版コンクリートの幅（洋上風車 22.5m 、観測塔 19.0m ）で除したものとし、洋上風車で 0.25° 、観

図-3 洋上風車各部の水平精度

図-4 観測塔各部の水平精度

測塔で 0.30° とした。

洋上風車では、基礎捨石マウンドの天端面で 0.13° であり、支持構造物の接合フランジ面で 0.07° 、その上の風車タワーで $0.00 \sim 0.10^\circ$ と高い鉛直精度が確認され、全て許容精度の範囲内であった。また、観測塔では、基礎捨石マウンドの天端面で 0.06° であり、支持構造物（ここでは観測鉄塔下部の天端）の接合フランジ面で $0.02 \sim 0.03^\circ$ 、その上の観測鉄塔上部で $0.00 \sim 0.20^\circ$ と洋上風車同様に全て許容精度以内であった。

このように、重錘均しは転圧によって基礎捨石マウンドの即時沈下を抑制でき、高さ管理を適切に行うことで均し精度を向上させることが可能である。その結果、支持構造物やその上に設置される風車タワーなどの鉛直精度も確保でき、重錘均しが風車支持構造物の設置に有効であることを確認した。また、今回採用した自動追尾型

トータルステーションによる捨石均し管理システムについてもその妥当性を確認することができた。

なお、本手法はハイブリッド重力式の支持構造物を対象としたものであり、支持構造物と風車タワーの接合面でのレベル調整が可能な構造の場合には、レベル調整した部分の強度確保に重点をおいた検討が必要である。

3. 気海象予測システムによる施工管理

本研究の実施位置は北九州市沖であり、日本海特有の海象状況を示す。実証研究では2013年2～3月に風車建設を行うため、冬期の高波浪の合間のわずかな静穏時に施工する必要があった。精度の高い気海象予測が要求されるため、本研究では既存の気海象予測システムを高度化し、予測精度の向上を図った。また、実際の施工管理に適用し、高度化した予測システムの妥当性を検証した。

(1) 気海象予測システムの概要

海上工事を行う上で、気海象予測を適切に行うことは工程管理上および安全管理上必要不可欠である。今回の工事ではSEP船を利用する計画となっており、風車組立作業時に波浪の影響は受けにくいものの、SEP船へのアクセスは波浪の影響を強く受けるため、波高の予測精度が重要となる。また、風車組立のクレーン作業には風況の予測が重要であり、気海象予測システムの高度化が求められる。

まず海象予測について、既往の波浪予測は沖波レベルであることが多い。本研究の基となる既往の予測システムは、気象庁GPVデータ（約20km格子）をもとに第三世代波浪推算モデルWAMによって波浪推算を行っている²⁾。予測計算は約10km格子に線形補間した上で行い、複雑な地形域での予測精度の向上を図っているが、水深の影響は考慮されていない。

そこで本研究では、既往システムで予測された沖波をもとに地形や水深を考慮した波浪変形計算を行うことで施工位置ピンポイントでの海象予測を実施した。また、通常波浪変形計算を行う際の入射境界は一方向であることがほとんどであるが、洋上風車は沖合に建設されるため多方向から波が来襲する。そこで波向に合わせて入射境界を時々刻々変化させて計算することで予測精度の向上を図った。

また、風況予測については、気象庁GPVデータをもとに、観測塔で計測される風速の実測値を活用して高度補正を行い、精度向上を図った。

(2) 予測システムの高度化

a) 海象予測

図-5 沖波の予測波高と実測波高の比較

予測システムにて推算された波浪予測値と実測値との比較により、予測精度の検証を行った。予測地点は波浪観測が行われている洋上風車位置近傍のNOWPHAS藍島地点とし、検証期間は2012年7月～同年12月である。また、予測システムでは7日後までの予測が可能であるが、風車の組立は1日毎に作業が区切られるため、必要な連続稼働日は1日と考え、予測期間は24時間後とした。

図-5は既往システムで予測された沖波予測値と実測値の時系列を比較したものである。全検証期間のうち9月分だけ抜粋した。全体のトレンドは一致しているが、予測の絶対値に相違が見られる。全体的に予測値が大きくなる傾向があり、実用には適用が困難である。

そこで、予測システムで推算された沖波を入射波とし

図-6 計算領域

図-7 施工位置近傍での予測波高と実測波高の比較

図-8 予測波高と実測波高の相関

図-9 改善された予測波高と実測波高の相関

図-10 予測風速と実測風速の相関

て、エネルギー平衡方程式を用いて波浪変形計算を行い、予測精度の向上を図った。計算領域を図-6に示す。図-7は図-5と同じく9月の時系列を比較したものである。トレンドだけでなく絶対値も概ね良好であり、予測波高と実測波高の相関（図-8）も高い相関を示しているのが確認できる。しかしながら、近似直線の傾きが0.87と若干小さく、予測波高がやや大きくなる傾向が見られた。図-9はそれを改善するために沖波の波向に合わせて入射境界を変化させた結果である。近似直線の傾きが概ね1.0で相関係数も向上しており、予測システムの高度化により精度の向上が図れたことを確認した。

b) 風況予測

予測システムによる予測風速（DL+10m付近）を風車

組立作業における最大高さ（DL+80m）の風速へ高度補正を行った。高度補正は対数則にて行い、予測風速と実測風速の相関が良好となる指数を採用した。検証期間は2012年10月～2013年2月で、観測塔のDL+80m地点で観測される実測値を用いた。予測風速と実測風速の相関を図-10に示す。実測値を用いた高度補正により、概ね良好な相関を示すことを確認した。

(3) 予測システムの妥当性評価

予測システムの妥当性を検証するため、作業可否判断として使用する波高や風速を設定することで予測値的中率を評価した。稼働、不稼働の作業可否判断として使用する波高は、風車据付位置に設置してあるSEP船までのアクセス条件から $H_{1/3}=1.0\text{m}$ とし、風速については風車タワー組立の作業中止基準である $U=6.0\text{m/s}$ を採用した。

予測波高的中率の評価は、図-11に示すように予測波高が1.0m以下かつ実測波高が1.0m以下の場合は稼働としての的中、また予測波高が1.0mより大きくかつ実測波高が1.0mより大きい場合は不稼働としての的中とした。的中率は全プロット個数に対する的中プロット個数の比率で定義した。

一方、予測波高が1.0mより大きく実測波高が1.0m以下の場合は、作業ができる条件であるのに作業を中止することになるため工程リスクと評価し、逆に予測波高が1.0m以下で実測波高が1.0mより大きい場合は、作業可能の判断を行ったが実際の波高は作業限界を超えているので安全リスクと評価した。予測的中率を評価した結果、波高1.0m以下の稼働、および1.0mより大きい不稼働を合わせると的中率は約92%であった。

予測風速的中率も波高と同様に評価した。風速6m/s以下の稼働、および6m/s以上の不稼働を合わせた的中率は約81%であり、波高に比べやや低いものの高い予測精度であることを確認した。

図-11 予測波高的中率

(4) 予測システムを用いた施工管理

高度化された予測システムを実際の施工管理に適用した。本予測システムは、施工位置での気海象予測を一日に4回（3時・9時・15時・21時）という短時間で予測データが配信される。そこで、前日（15時予測）、作業日朝（3時予測）、作業日昼（9時予測）の3回の作業可否に関する判断と、実際の作業状況を比較することにより、気海象予測に基づく作業可否判断の妥当性を評価した。

予測データによる作業可否判断と実作業状況の比較結果を表-1に示す。予測波高と予測風速により作業可能と判断した場合には予測欄に○、作業不可能と判断した場合には×とした。また、実作業の状況として、実際に作業した場合には実測欄に○、中止した場合には×とした。対象期間は2013年2月28日から同年3月28日までとした。

予測が○かつ実測が○の場合には稼働中、予測が×かつ実測が×の場合には不稼働中となる。逆に、予測が○かつ実測が×の場合や予測が×かつ実測が○の場合には不的中となる。3月8日や3月16日のように予測が○であっても実際には荒天中止になった日もあったが、対象期間での作業可否判断的中率を算定すると約97%であった。

また、短期間でのデータ配信により、3月5日や3月11日のように午前中は作業不可であっても午後から作業が可能になるといった半日単位での作業可否判断ができ、より細かな工程管理も可能であった。さらに、3月13日や3月22日のように午前中に作業可能であっても午後から荒天予報であったため作業を控えるといった安全管理にも役立てることができた。

このように本予測システムが洋上風車建設の施工管理に有効であることが確認でき、本システムの適用により予定工程よりも早く風車建設を完了することができた。

4. まとめ

北九州市沖での洋上風車建設工事を通じて、洋上沖合

表-1 作業可否判断と実作業状況の比較

日付	データ	波高		風速		稼働可否		日付	データ	波高		風速		稼働可否		日付	データ	波高		風速		稼働可否	
		AM	PM	AM	PM	AM	PM			AM	PM	AM	PM	AM	PM			AM	PM	AM	PM	AM	PM
2/28	予測	0.42	0.30	4.6	3.0	○	○	3/10	予測	1.14	1.43	12.9	11.0	×	×	3/20	予測	0.63	0.65	1.9	6.0	○	○
	実測	0.50	0.33	1.4	4.5	○	○		実測	1.11	1.36	10.9	11.2	×	×		実測	0.65	0.56	1.6	1.1	○	○
	予測	0.24	0.32	1.2	9.0	○	○		実測	1.07	1.63	17.7	14.7	×	×		実測	-	-	-	-	-	-
	実測	0.47	0.87	9.2	12.1	×	×		実測	0.96	0.75	6.8	4.8	×	○		実測	1.44	1.09	6.3	5.0	○	○
3/1	予測	0.59	1.08	8.7	13.0	×	×	3/11	予測	1.05	0.62	8.0	2.9	○	○	3/21	予測	1.41	1.09	6.4	4.7	×	×
	実測	0.25	1.12	7.9	17.4	×	×		実測	-	-	-	-	×	×		実測	-	-	-	-	×	×
	予測	1.53	1.26	10.1	8.3	×	×		実測	0.55	0.44	4.1	1.7	○	○		実測	0.87	0.44	4.5	8.8	○	○
	実測	1.59	1.34	10.5	9.1	×	×		実測	0.55	0.45	3.6	2.1	○	○		実測	0.81	0.43	4.0	7.5	○	○
3/2	予測	1.67	1.49	13.2	8.8	×	×	3/12	実測	0.37	0.37	6.4	9.2	○	○	3/22	予測	-	-	-	-	-	-
	実測	0.94	0.93	3.1	3.0	×	×		実測	0.58	0.57	7.6	10.3	○	×		実測	-	-	-	-	-	-
	実測	0.96	0.93	4.1	4.1	×	×		実測	0.64	0.71	7.1	11.8	○	×		実測	0.70	0.51	6.8	4.3	×	×
	実測	1.04	1.08	4.3	1.7	×	×		実測	0.26	0.73	14.1	14.6	○	×		実測	0.72	0.52	4.5	5.2	○	○
3/3	予測	0.96	0.92	7.5	8.5	×	×	3/13	予測	1.46	1.11	11.2	10.0	×	×	3/23	予測	0.34	0.60	4.0	4.1	○	○
	実測	0.99	0.92	5.0	8.0	×	×		実測	1.53	1.17	12.8	10.4	×	×		実測	0.55	0.53	1.9	6.0	○	○
	実測	0.59	0.85	8.0	9.6	×	×		実測	1.72	1.52	10.7	9.2	×	×		実測	-	-	-	-	-	-
	実測	1.25	0.84	6.6	5.6	×	○		実測	0.52	0.41	4.0	3.0	○	○		実測	0.45	0.65	7.5	8.8	○	○
3/5	予測	1.11	0.83	5.6	4.0	×	○	3/15	実測	0.51	0.41	3.1	2.8	○	○	3/25	実測	0.75	0.82	8.2	6.5	×	×
	実測	0.72	0.55	4.5	6.9	×	○		実測	0.51	0.38	3.9	2.4	○	○		実測	-	-	-	-	-	-
	予測	0.51	0.48	5.3	6.6	○	○		実測	0.58	0.47	4.6	4.3	○	○		実測	0.69	0.41	4.7	3.0	○	○
	実測	0.81	0.45	5.0	7.2	○	○		実測	0.61	0.45	5.7	5.7	○	○		実測	0.69	0.42	5.1	4.5	○	○
3/6	予測	0.66	0.58	8.3	8.7	○	○	3/16	実測	0.53	0.54	5.0	7.9	○	×	3/26	実測	0.79	0.47	0.5	3.9	○	○
	実測	0.46	0.65	5.6	7.1	×	×		実測	0.36	0.32	5.4	5.0	○	○		実測	0.30	0.23	2.5	2.9	○	○
	実測	0.45	0.66	5.3	6.8	×	×		実測	0.35	0.30	4.5	3.5	○	○		実測	0.29	0.22	5.3	6.6	○	○
	実測	0.59	0.39	4.8	6.8	×	×		実測	0.32	0.29	6.6	8.3	○	○		実測	0.31	0.25	6.8	6.8	○	○
3/7	予測	0.55	0.64	7.7	8.7	○	○	3/17	実測	0.89	0.64	10.5	8.5	×	×	3/27	予測	0.27	0.42	1.6	4.7	○	○
	実測	0.58	0.63	8.8	8.9	○	○		実測	0.91	0.76	11.2	8.9	×	×		実測	0.31	0.37	0.6	4.5	○	○
	実測	0.96	0.62	11.3	8.1	×	×		実測	0.45	0.73	9.0	11.8	×	×		実測	0.12	0.20	1.4	5.0	○	○
	予測	0.40	0.45	4.2	4.3	○	○		実測	0.56	0.51	7.4	5.2	○	○		※「-」は欠測						
実測	0.36	0.42	4.0	3.3	○	○	実測	0.59	0.33	10.1	3.5	×	×										
3/9	実測	0.52	0.36	2.9	7.4	○	○	3/19	実測	-	-	-	-	×	×								

での精度確保や気海象予測システムの適用による施工管理に関する検討を行った結果、以下の主要な結論を得た。

- ・重錘落下による捨石均しを行い、捨石均し管理システムにて均し高さを管理した結果、所定の精度で洋上風車を建設することができた。
- ・気海象予測システムの高度化により、予測的中率を9割程度まで向上させた。また、システムの導入によって適切な施工管理ができ、予定工程より早く風車建設を完了することができた。

謝辞：本研究は、独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構が取り組む「洋上風力発電システム実証研究（北九州市沖）」の一環として、電源開発株式会社からの再委託として実施した。また、洋上風車建設に際しては北九州市漁業協同組合（脇之浦地区）にご協力いただいた。各関係者に対し、ここに感謝の意を表する。

参考文献

- 1) 中嶋周作, 中井崇斉, 山口祐一郎: 北九州市沖における洋上風況観測システムならびに洋上風力発電システム実証研究における構造物設置工事状況, 電力土木, No.364, pp.83-87, 2013.
- 2) 森屋陽一, 琴浦毅, 関本恒浩: 日本海における波浪推算モデルを用いた海上・潜水作業可否の予測精度, 海洋開発論文集, 第26巻, pp.447-452, 2010.

CONSTRUCTION MANAGEMENT FOR OFFSHORE WIND POWER FACILITIES

Manabu SHIMAYA, Masahiko CHIKARAISHI, Makoto SASAKI,
Takayoshi NAKAI and Yuuichirou YAMAGUCHI

Among utilization methods of the renewable energies, an offshore wind power is one of them expected to be in a practical use. A project to construct offshore wind power facilities is on-going off Kita-Kusyu City. Unlike the onshore construction, there are many problems to be solved in the offshore construction. In this study, examinations was made on the construction control required throughout the project period, especially by focusing on how to achieve the verticality in offshore installation to meet the requirements given by the wind turbine supplier and what sort of controls are required in order to achieve the safe offshore execution within a limited construction period.