

洋上風力発電設備用PCケーソン基礎の製作および外洋における輸送据付

鹿島建設(株)
 鹿島建設(株)
 鹿島建設(株)
 東京電力(株)

○林田 宏二
 一宮 利通
 坂田健一郎
 前田 修

1. はじめに

(独)新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)と東京電力(株)が実施する洋上風力発電等技術開発の実証研究プロジェクトにおいて、施工を担当した国内初の沖合洋上風力発電設備(以下、洋上風車)と風況観測タワーが千葉県銚子市沖合に完成し、2013年1月末から運転を開始した(写真-1参照)。

両構造物の基礎は、砕石によって均した海底面に着底させる着床式の重力式コンクリート基礎としており、建設地点の非常に厳しい海象条件下における構造安全性と軽量化による海上輸送・据付の施工性を確保するために、PCを用いたケーソンタイプを採用した。本報文中では洋上風車における基礎の設計・製作および外洋での運搬・据付の概要について報告する。

2. 基礎の設計および製作

洋上風車の構造図を図-1に示す。洋上風車は、洋上に建設される60m超の工作物として構造に関する国土交通大臣認定を初めて取得している。基礎の設計については、風車から伝わる風荷重やレベル2地震力といった陸上風車と同様の外力に加えて、海潮流や波力など洋上特有の外力も考慮しており、基礎の形状は波力の影響を小さくするために三角フラスコ型とした。

(図-2, 写真-2参照)

また、建設地点での施工時間短縮を図るために、中空のケーソン基礎として陸上で構築したのちに建設地点まで海上輸送・据付を実施し、据付後に高比重の中詰材を投入することで重力式基礎として機能させる施工方法を採用した。海上輸送のために基礎の各部位に多様なPC鋼材を用いることで基礎の重量軽減を図っている。

2.1 PC鋼材

表-1および写真-3に洋上風車基礎の構造仕様およびPC鋼材配置・配筋状況を示す。

基礎斜壁部は、内部充てん型エポキシ樹脂被覆PC



写真-1 洋上風車と風況観測タワー

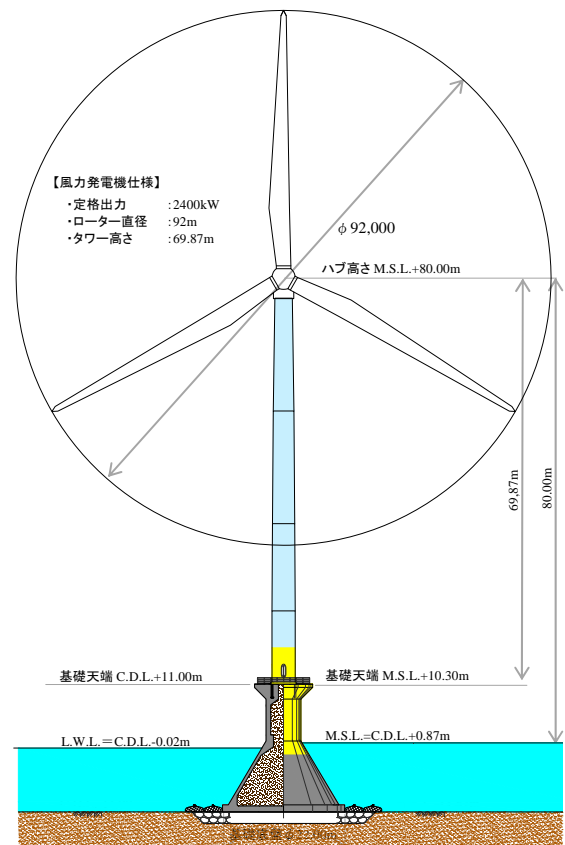


図-1 洋上風車構造概要

鋼より線 (9S15.2) を採用しているが、壁厚が 50cm と非常に薄く、上部になるほどスペースが限られるために、多数の PC 鋼材を配置することが不可能であったために、必要な緊張力を得るための PC 鋼材を螺旋 (らせん) 状に配置する卵形消化槽の設計手法を応用し、1 本の PC 鋼材で鉛直方向だけでなく水平方向にも緊張力を導入することで縦クラックの発生を抑制する設計とした。また上部定着部まわりではスペースが狭く、メーカー標準仕様の拘束筋では干渉が発生してしまうために、「緊張材の定着装置及び接合具の試験方法 (プレストレストコンクリート造 技術基準解説及び設計・計算例)」に準拠した構造実験を実施し、拘束筋を標準のスパイラル筋からグリッド筋への変更を行った。鉛直壁部については、エポキシ樹脂被覆 PC 鋼棒 (SBPR930/1180 φ32) を、さらに頂部には風車タワー基部でのコーン破壊対策として、シングルストランド工法 (プレグラウト鋼材 1S17.8) を採用した。なお、洋上という厳しい腐食環境条件から、各部にエポキシ樹脂被覆の鋼材および鉄筋を採用して耐久性の向上を図っている。

2.2 コンクリート

基礎に使用するコンクリートは、底盤部では普通コンクリートを用い、それ以外 (斜壁部、鉛直壁部、頂部) については配筋が非常に過密であるために、自己充填性を有する高流動コンクリートを使用して作業の効率化を図った。

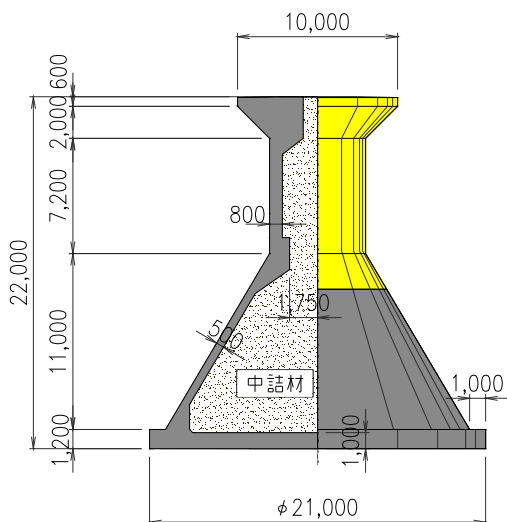


図-2 洋上風車基礎構造概要



(手前：観測タワー，奥：洋上風車)

写真-2 風車基礎外観

表-1 洋上風車基礎仕様

形状	三角フラスコ型	
	高さ：22m, 天端：φ10m, 底盤：φ21m	
基礎重量	約 2400t (中詰材投入後：約 5300t)	
使用コンクリート	高流動コンクリート (斜壁部・鉛直壁部・頂部) 普通コンクリート (底盤部)	
設計基準強度	40N/mm ²	
PC 鋼材	頂部	シングルストランド工法 (プレグラウト鋼材：1S17.8)
	鉛直壁部	エポキシ樹脂被覆 PC 鋼棒 (SBPR 930/1180, φ32)
	斜壁部	内部充てん型エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線 (9S15.2)
鉄筋	SD345 (干満帯およびせん断補強筋にはエポキシ樹脂塗装鉄筋を使用)	

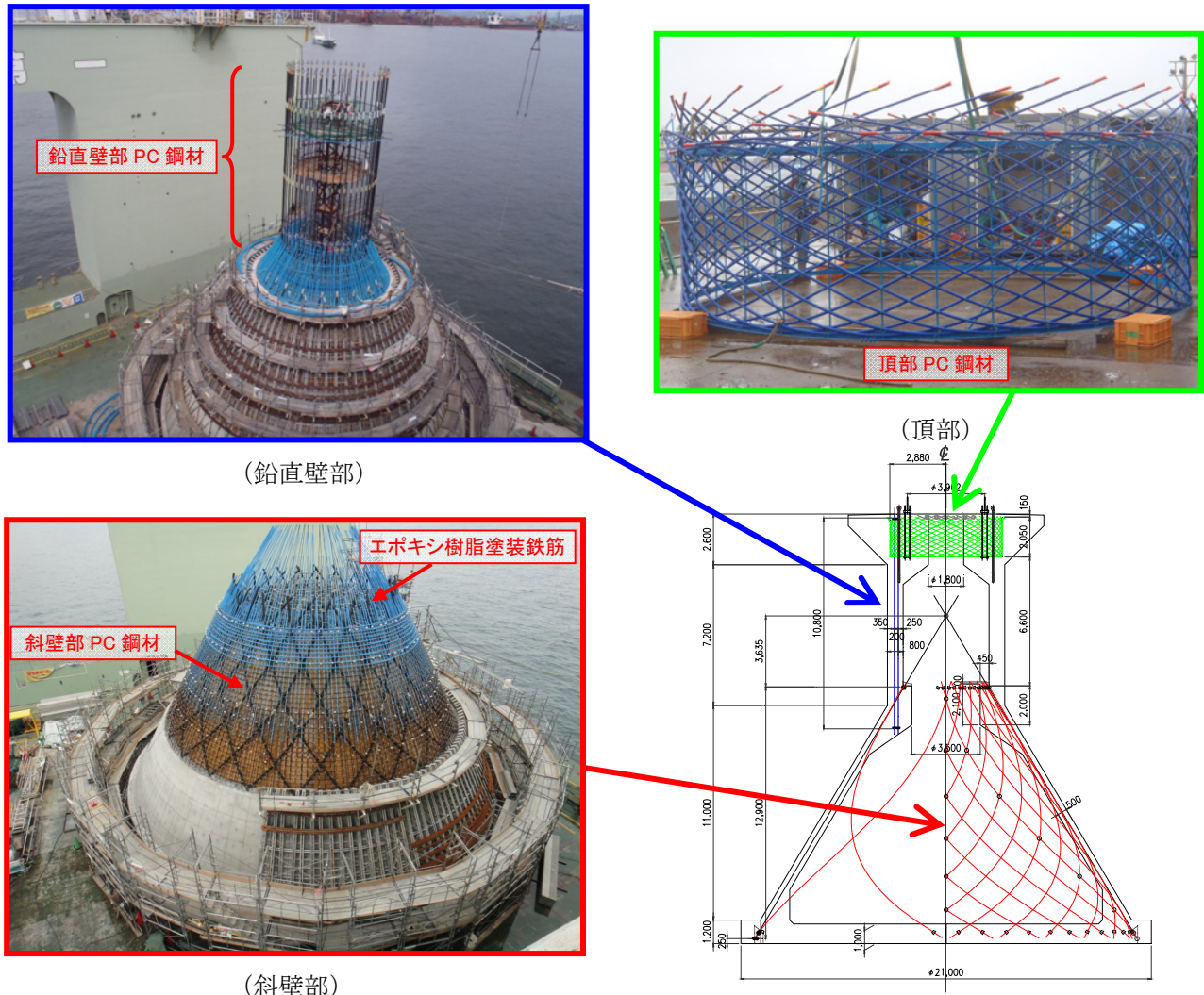


写真-3 風車基礎におけるPC配置および配筋状況

3. 基礎の運搬・据付工

3.1 水理模型実験による施工検討

基礎の運搬・据付にあたっては波浪による起重機船および基礎の動揺を出来る限り小さくすることが重要となる。そこで基礎の据付作業位置が船体正面と側面中央の2ケースについて、水理模型実験によって検討を行った。実験には縮尺1/60の起重機船およびケーソン基礎の模型を用い、施工状況を模した状態で多方向不規則波を入射させ、3次元変位をステレオビデオトラッカー装置によって計測し、動揺量を算定した。波浪条件としては、有義波高 $H_{1/3}=1.0\text{m}$, 2.0m , 3.0m (現地スケール) の3通り×有義波周期 $T_{1/3}=6\text{s}$, 8s , 10s (現地スケール) の3通りの計9通りについて、実験縮尺に合わせた波を作成し、それぞれ検討を行った。

実験状況を写真-4に、ケーソン基礎動揺の上下動成分(有義応答値)についてまとめた結果を図-3に示す。これより、基礎据付位置を船体側面中央とすることにより、基礎の上下動が約1/3に低減されていることがわかる。この結果は、船体側面中央で基礎を吊る場合、基礎の位置が起重機船の縦揺れ(ピッチ)の回転中心に近くなることで、起重機船の縦揺れに伴う基礎の上下動成分が小さくなったためと考えることができる。

これらの実験結果から、現地での基礎据付作業可能な海象条件を有義波高 $H_{1/3}=1.25\text{m}$ 以下、有義波周期 $T_{1/3}=8\text{s}$ 以下と設定した。

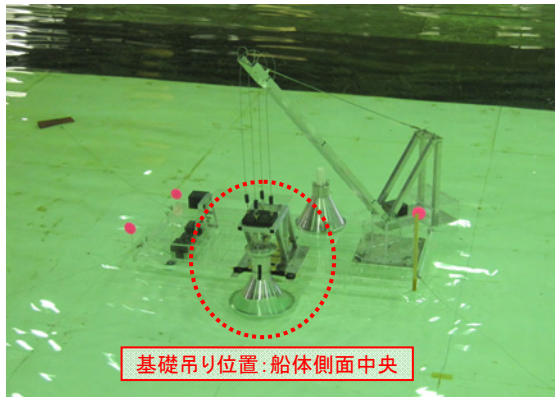


写真-4 水理模型実験状況

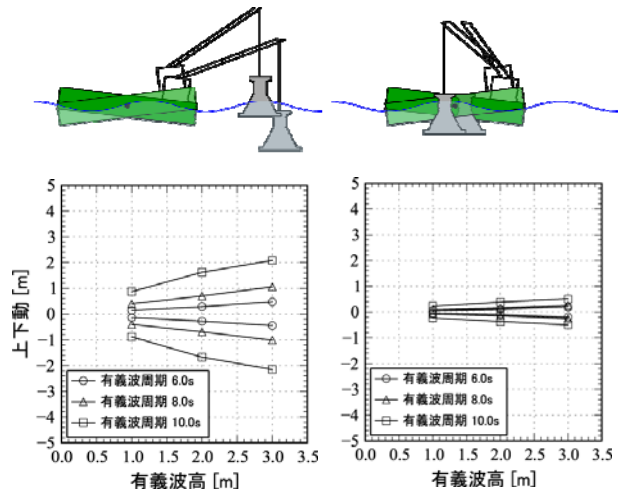


図-3 基礎吊り位置による動揺量の変化

3.2 基礎の現地据付

風車基礎の単体重量は約2400tとなり、今回使用した起重機船のクレーン（全旋回式1600t吊り）では、そのままの状態ですり上げることができない。そこで基礎の製作をフローティングドック（FD）上で実施し、起重機船への積み替える際にFDを沈下させ海底面に着底させ、基礎に浮力を与えることでクレーンの吊り能力内の荷重とした。しかし、基礎を船体デッキ上に積載することはできないために、図-4および写真-5に示すような専用の櫓フレームを動揺が小さくなる船体側面中央部に艀装し、櫓に基礎を抱き込んだ状態で基礎の浮力を利用してクレーンで吊り下げることによって建設地点までの基礎の輸送と同時に動揺量が小さくなる位置での据付作業を可能とした。

現地で実施した据付作業の許容値と実績についてまとめた結果を表-2に示す。作業当日の現場海域は有義波高 $H_{1/3}=0.6\sim 0.8\text{m}$ 、有義波周期 $T_{1/3}=7\sim 8\text{s}$ と設定した条件内であり、所定の据付許容値に対して、非常に高い精度で基礎の据付を実施することができた。

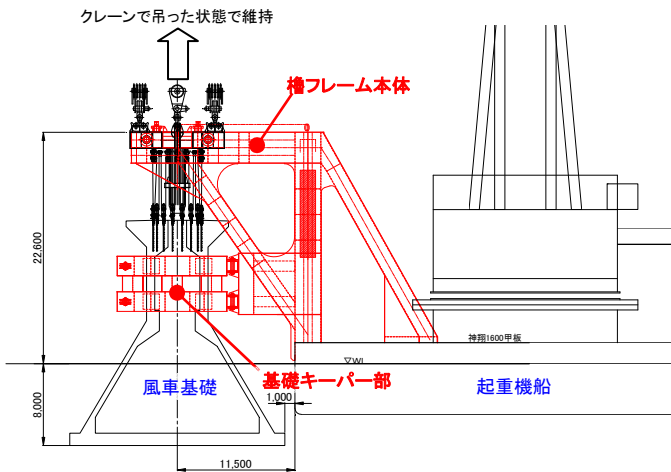


図-4 起重機船に艀装した櫓フレームと風車基礎

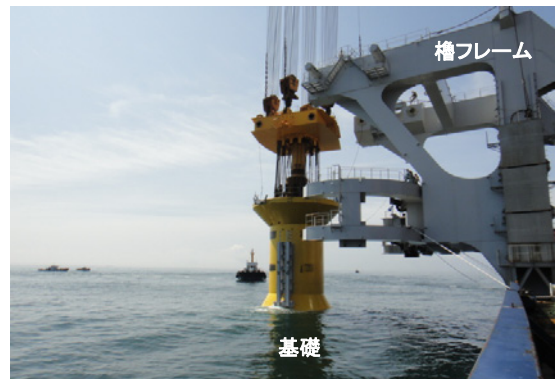


写真-5 風車基礎据付状況

表-2 据付出来形（洋上風車基礎）

	許容値		実績値
	平面位置	東西方向	
	南北方向	±3.3m 以内	南に 0.70m
水平度	東西方向	0.82 度以内	東に 0.04°
	南北方向	0.82 度以内	南に 0.01°

4. おわりに

今回、日本初の本格的洋上風力発電設備の基礎として、各種PC鋼材を用いることで構造安全性、耐久性、施工性を確保することができた。また水理実験の結果をもとに、専用の櫓フレームを開発することで起重機船の吊り能力を超える基礎の輸送と外洋での基礎据付を高精度に実施することができた。

なお、本報文で報告した内容は、NEDOと東京電力による共同研究「洋上風力発電等技術研究開発 洋上風力発電システム実証研究」の成果の一部であり、関係各位に謝意を表します。