

### 風力発電PCタワーの試設計

三井住友建設(株)	土木事業本部	PC設計部	正会員	○保明 淳二
	同 上		正会員	内田誠二郎
	同 上		正会員	鈴鹿 良和
	同 上		正会員	春日 昭夫

#### 1. はじめに

我が国に設置されている風力発電タワーは、現時点で700基以上になるが、そのほとんどが鋼製の円筒型である。ところが、風力発電設備が大型化した場合、鋼製タワーでは部材の大型化による運搬方法や繰返し荷重による溶接部の疲労破壊、タワー柱脚部と基礎部の結合方法、維持管理費の増大、高所作業の増大などの問題が深刻化することが予想される。そこで、これらの問題を解決する構造として、風力発電タワーにプレキャストセグメント構造（以下、PCタワーとする）を適用することを提案する。

本稿は、新しいコンクリートタワー構造として考案したPCタワーの試設計について述べるものである。

#### 2. PCタワーの概要

PCタワーは、プレキャストセグメントをPC工場で製作し、架設現場までトレーラーで運搬して、クレーンにより積み重ねてタワーを構築するものである。図-1に示すような定着突起をPCタワーの内側に設け、それにPC鋼材を定着してセグメント同士の一体化を図る。このような外ケーブル方式を採用することで、PC鋼材の緊張作業の完了を待たずに次のセグメントを積み重ねることが可能となる。

PCタワーの特徴をまとめると、次のようになる。

- (1) 工場製作プレキャスト部材とすることで、高品質化、高強度化、高耐久化が図れる。
- (2) 鋼製タワーに比べ断面剛性が大きいので、変位および振動特性上有利になる。
- (3) 外ケーブル構造とすることによりPC鋼材の取替えも含めたメンテナンスが向上する。
- (4) プレキャスト化と外ケーブル構造を組み合わせることで、工期短縮の効果と解体作業性の向上が図れる。

以下に、想定した風力発電機仕様を示す。

ロータ直径	: 70m
ハブ中心高さ	: 65m
タワー形状	: モノポール
定格出力	: 1500kW
機械重量	: 840kN
タワー構造	: PC構造 ( $\sigma_{ck}=60\text{N/mm}^2$ )

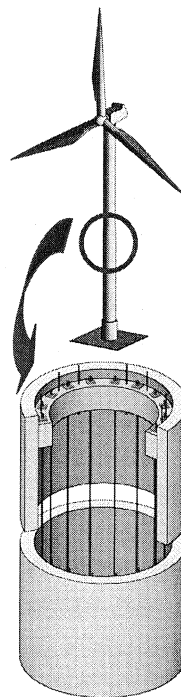


図-1 構造イメージ

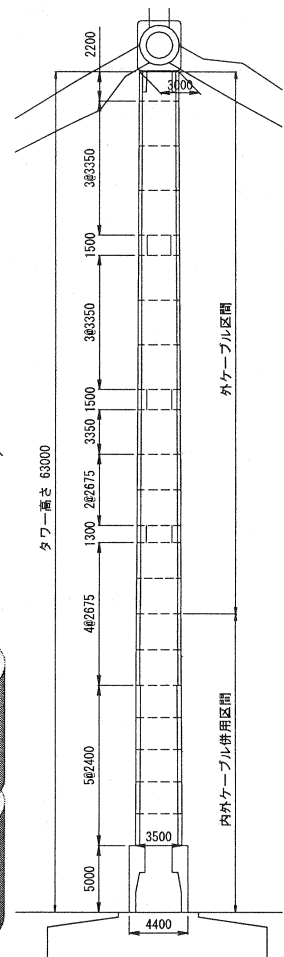


図-2 構造一般図

#### 3. PCタワーの構造

図-2, 3に構造一般図と断面図を示す。本タワーは、発

電容量 1500kW, ハブ中心高さ 65.0m (この内, 場所打ち部は 5.0m) を想定したモデルである。タワーの外径はセグメント部の下端で 3.5m, 頂部で 3.0m に変化する。

工場から架設地点へのセグメントの運搬は, 積載荷重 300kN の低床トレーラーで一般公道を使用することを想定している。1セグメントの重量は 200kN 以下とし, 1セグメントの高さは 2.40m (タワー下端部) ~ 3.35m (タワー頂部), 壁厚は 0.32m (タワー下端部) ~ 0.25m (タワー頂部) としている。これを合計 22 個積み重ねて PC タワーを構築する。タワー下端部の断面内には, 内ケーブル (PC 鋼棒  $\Phi 32\text{mm}$ ) を 18 本, 外ケーブル (SEEE F310TS) を 14 本配置する。一方, タワー頂部の断面内は, 外ケーブル (SEEE F100TS) のみを 12 本配置する。

また, ナセルは, PC 鋼材によって PC タワー頂部に固定された鋼製の接続リングで一体化する (図-4)。

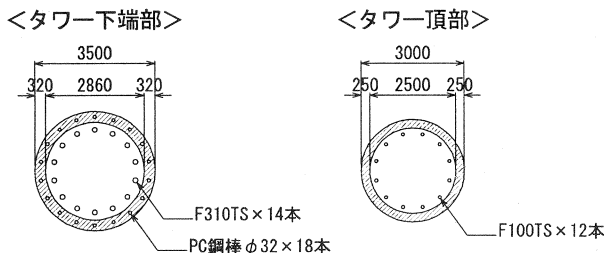


図-3 断面図

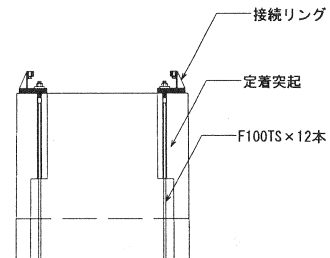


図-4 接続リング

#### 4. PCタワーの試設計

##### 4-1. 設計概要

PCタワーの設計に際して, IEC, 建築基準法および同施行令, 煙突構造設計施工指針, 鉄筋コンクリート構造計算基準, 塔状鋼構造設計指針, 風力発電規定等を準用する。

長期荷重 (定格運転時 12m/s, カットアウト時 25m/s, 共振風速時) に対する検討は, 各断面の合成応力度がフルプレストレスになるように照査する。一方, 短期荷重に対する検討は, 以下の荷重について行った。さらに, 材料非線形と幾何非線形を考慮できる非線形解析プログラム (ファイバー要素) により各部材の健全度を検証する。

暴風時... 建築基準法によって得られた基準風速 36m/s による荷重

地震時... 地震時荷重 (静的な設計水平震度  $C_B=0.3$ ) に定格運転時荷重を加えた荷重 (建築基準法)

図-5 に, タワー高さとお各荷重における曲げモーメントの関係を示す。タワー頂部付近の曲げモーメントは, 暴風時が最も大きくなっている。しかし, その荷重自体が小さいため, PC 鋼材の配置は長期荷重 (カットアウト時 25m/s) の照査で決定している。また, 煙突指針に従って共振風速時荷重を算出したが, 定格荷重に比べかなり小さい値のため, 本タワーでは断面決定の要因にはなっていない。

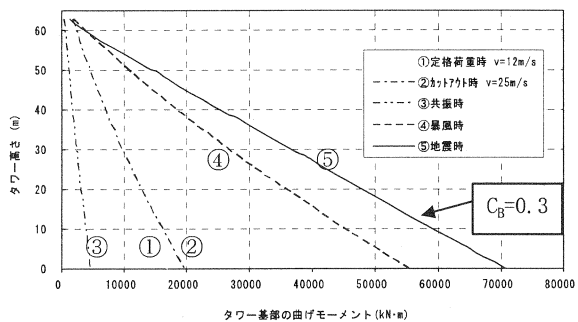


図-5 タワー高さとお各荷重における曲げモーメント

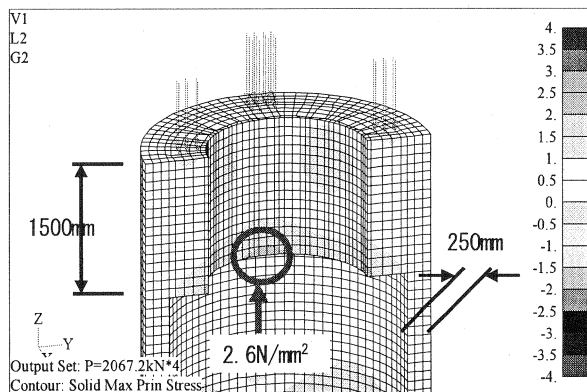


図-6 FEM 解析 (主応力)

4-2. 定着突起の検討

外ケーブルを定着するためにセグメントの内側に設けた定着突起は、PCタワーにおいて重要な部材であり、構造の決定にあたっては以下の課題があった。

- ①外ケーブルの緊張力をセグメントの壁に円滑に伝達できる構造であること。
- ②運搬時の制限 (200kN 以下) があるため、極力小さい構造寸法とすること。

緊張力によるセグメントの応力度分布を把握するため、3次元FEM解析を行った。図-6に3次元FEM解析結果を示す。解析の結果、定着突起周辺部に生じる最大引張応力度は $2.6\text{N}/\text{mm}^2$ 程度であることから、定着突起周辺部とセグメントの壁には有害なひび割れは発生しないと判断し構造寸法を決定した。

4-3. PCタワーの曲げ変形

図-7に、非線形解析モデルを示す。非線形解析は、解析モデルの下端を拘束した状態で水平荷重を漸増載荷させ、コンクリートの圧縮ひずみが終局ひずみに到達した時点における載荷荷重が、短期荷重 (地震時) を超えることを確認する。なお、材料特性 (コンクリート、鉄筋、PC鋼材) は道路橋示方書Ⅲに基づく材料曲線を使用した。

図-8, 9に、長期荷重および短期荷重におけるPCタワーの曲げ変形を示す。なお、図中の鋼製タワーは、PCタワーと同じ荷重条件で設計されたものである。

長期荷重においては、PCタワーの断面剛性が鋼製タワーと比較して約2.3倍大きいので、PCタワーの変位は小さくなっている。一方、短期荷重においては、PCタワーの変位は鋼製タワーの92%程度であった。また、PCタワーの曲げ変形は、高さ5.0m~20m付近のセグメント部の曲率が大きく、高さ20m~タワー頂部までのセグメント部の曲率はかなり小さく、ほぼ直線となっている。

図-10に、タワー基部曲げモーメントと中立軸位置の関係を示す。なお、中

立軸位置がマイナスの時は着目している断面が全圧縮状態、プラスの時は引張領域が発生またはセグメント継目部が目開きしていることを示す。これによると、セグメント部では、タワー基部曲げモーメント $M=32500\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度まで全圧縮状態となっ

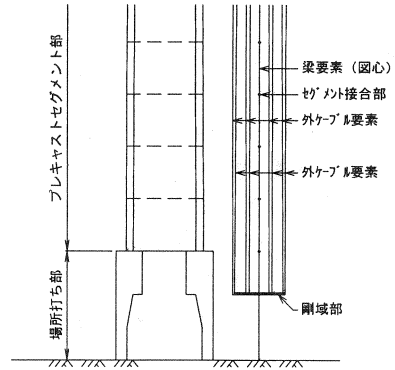


図-7 非線形モデル

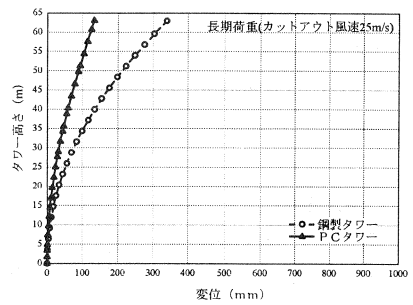


図-8 長期荷重の曲げ変形

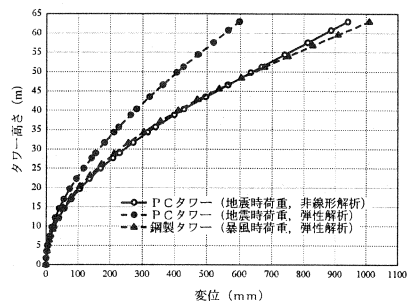


図-9 短期荷重の曲げ変形

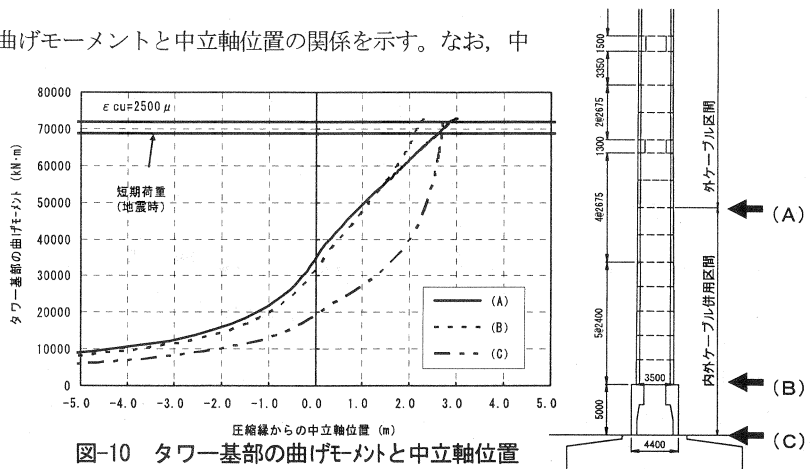


図-10 タワー基部の曲げモーメントと中立軸位置

ていることが確認できる。その後、セグメント最下段（B）から上方に向かって順番に引張領域が発生し、外ケーブルだけの配置となる断面（A）が目開きすることがわかった。また、短期荷重（地震時）において、内ケーブルと場所打ち部の鉄筋はすべて降伏していなかった。なお、本構造の破壊形態は、断面（A）付近のコンクリート圧縮破壊であった。

表-1 基礎の安定照査結果

4-4. 基礎の設計

表-1に、基礎の安定照査結果を示す。タワーの基礎形式は、想定した地盤条件より六角形の杭基礎を採用した。基礎の安全照査を行った結果、PCタワーの基礎は短期荷重（地震時）、鋼製タワーの基礎は短期荷重（暴風時）の基礎前趾位置回りのモーメントに着目した転倒照査（安全率=抵抗モーメント/転倒モーメント=2.0以上）で決定している。

	PCタワー	鋼製タワー
全鉛直力（浮力考慮）	20,123 kN	16,168 kN
転倒モーメント	78,447 kN・m	63,275 kN・m
抵抗モーメント	157,968 kN・m	126,918 kN・m
安全率（2以上）	2.01	2.01
基礎寸法	六角形（直径 15.7m）	六角形（直径 15.7m）

鋼製タワーはPCタワーと比較して自重が軽量のため、基礎の直径が15.7m程度必要となった。一方、PCタワーは自重増加分が抵抗モーメントとして有利に働くため、鋼製タワーと同じ基礎寸法になったと考えられる。

5. 施工要領

図-11に、施工要領図を示す。PCタワーは、高所での省力化施工法として開発したものであり、タワー全体を場所打ちした工法に比べ、大幅に工期短縮の効果を得ることができる。

施工方法としては、基礎部を構築した後、枠組支保工により場所打ち部（高さ5.0m、外径4.4m）を施工する。そして、工場で製作したセグメントを架設地点まで運搬し、クローラークレーンによって積み重ねてタワーを構築する。このとき、内外ケーブル併用区間においては、内ケーブルを先行して緊張し、外ケーブルはセグメントの架設と並行して緊張する。この作業をタワー頂部まで繰り返す。

タワー頂部に鋼製の接続リングを取付けた後、ナセルを設置する。最後に、ローターヘッドとブレードを取付けて、内部足場を解体し完成となる。

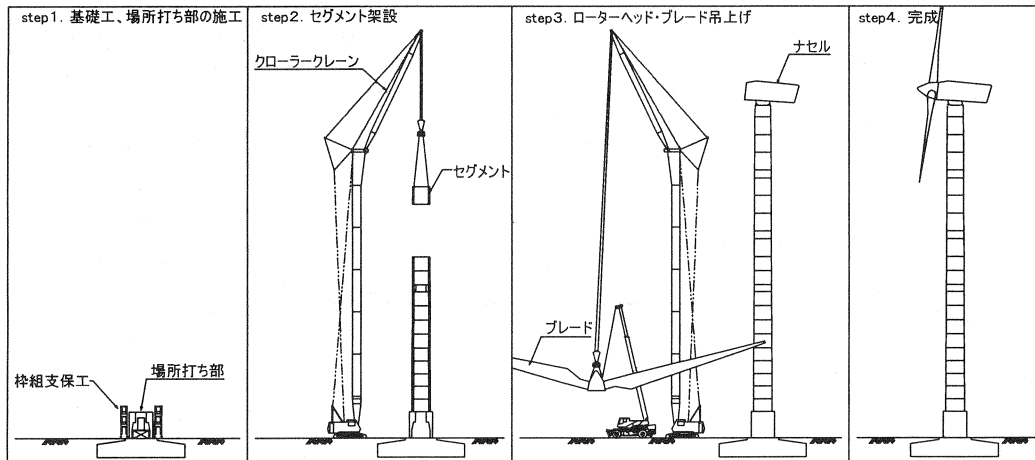


図-11 施工要領図

6. おわりに

風力発電施設は、大型化の傾向とともに、洋上発電の検討も進められている。今回提案したPCタワーは、耐久性、維持管理、施工性に優れている。今後は、実用化に向けて風車から作用する振動に対する挙動の検討、地震時の動的解析による設計などを行う予定である。