

# 風力発電施設の設計・施工

奥田 裕久\*1・梶本 恵太\*2

## 1. はじめに

風力発電は二酸化炭素の排出もなく地球温暖化防止に寄与するクリーンなエネルギーとして世界中で導入が進んでいる。欧州風力エネルギー協会が2003年に発行した“WIND FORCE12”<sup>1)</sup>では2020年までに世界電力の12%を風力発電でまかなうことを目標としている。

日本では2010年までに300万kW(2000kWクラスの風車換算で1500基)導入という大きな目標<sup>2)</sup>を掲げている。2003年からは風力発電を含む新エネルギーの電力会社による買取義務化(RPS法: Renewable Portfolio Standard)が導入されたこと、また補助金等の促進策により地方自治体や民間での導入が加速されている。技術面では、風力発電の発電効率を向上させ経済性を良くするために、より上空の強風を利用すること、また受風面積を大きくすることが必要となり、風力発電機は年々大型化するとともにその技術の進歩は著しい。

これまで国内に建設された風車のタワーはすべて鋼製であったが、風力発電の大型化が進むヨーロッパでは、経済性、輸送性、耐久性などの面からすでに100mクラスのコンクリートタワーが採用されている(表-1参照)。これらはタワー上部を鋼製とし、その下側をプレストレストコンクリート構造とするハイブリッド構造である。また、ウィンドファームにおいて多数のタワーをプレキャスト工法に

表-1 コンクリート製風車タワーの事例

所在地	Lengerich(ドイツ)	Albacete(スペイン)
風力発電容量	1 800 kW	3 200 kW
タワー全体高さ	98.0 m	98.0 m
コンクリート部分の高さ	88.0 m	70.0 m
タワー外径	2.2 ~ 6.4 m	2.2 ~ 12.0 m
完成年	2000年	2001年



\*1 Hirohisa OKUDA

新潟県 名立町 建設課 主査



\*2 Keita MASUMOTO

鹿島建設(株) 土木設計本部  
プロジェクト設計部 設計長

より構築している事例もあり、コンクリート製風車タワーは風車の大規模化、大型化に適していると考えられる。

国内では新潟県名立町の風力発電施設において、主に耐久性確保の理由からプレストレストコンクリート風車タワー(以下、PC風車タワー)が採用されている。

本稿では、風力発電施設の計画概要および風車タワーの設計の留意点を示すとともに、国内で初めて採用されたPC風車タワーの設計<sup>3)</sup>について報告する。

## 2. 風力発電施設の設計

### 2.1 風力発電施設の計画概要

風力発電事業の成否は、風況、立地、系統連係および電力需要施設等に左右され、導入にあたっては立地調査、風力発電システム設計、施工方法等の検討事項がある。

図-1に風力発電導入から運転までのフローを示す。

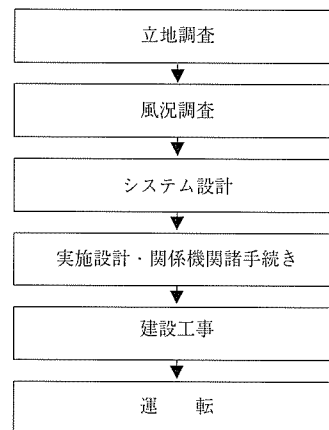


図-1 風力発電導入フロー

風力発電施設の立地は、年間平均風速が6 m/s以上あること、風向が安定していることなど、風況がよいことが第一条件であり、風況データの収集や風況シミュレーションによる有望地域の抽出が重要である。選ばれた立地点においては、事業採算性を精度よく検討するために1年間の風況精査が行なわれる。つづいて、風車規模や機種の選定および風車部の設計などシステム設計を具体化していき、電力会社との系統連係協議など関係機関との諸手続きを経て、建設工事が始まる。

### 2.2 風車タワーの設計の留意点

#### (1) 風荷重による外力

風力発電システムのうち風車部は、ナセル、ブレード、タワーから構成される(図-2参照、ナセル:発電機や制

御装置などを収めている部分、ブレード：回転翼)。

風車部は自然風により大きな動的応力を受ける構造物である。自然風は、高度による変化や3次元的な乱れがある。一方、受風側のブレードの状態は、たとえばフェザリング\*やパーキング\*\*などの運転上の制御状態や待機状態がある。これらの設計荷重、荷重状態としての取り扱い、IEC (International Electrotechnical Commission) の風力発電システム国際規格<sup>4)</sup>に示されている。

\* 暴風時において風の入力に対し回転方向の力が生じないようにブレードのピッチ角を風向きに平行にすること

\*\* プレーキあるいはピンでブレードを固定している状態

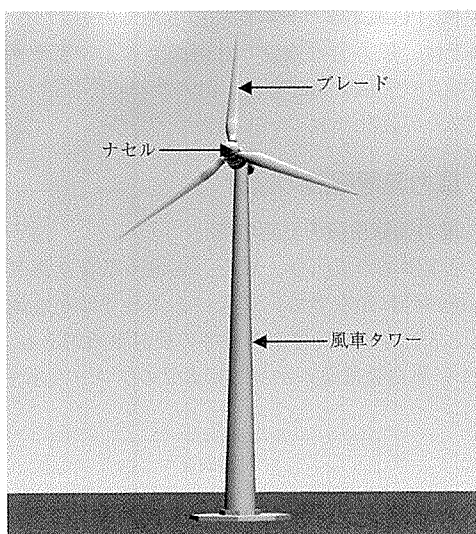


図-2 風車部の構造概要

さらに、ブレードやタワーの剛性により風荷重に対する動的応答も異なる。よって、風荷重による外力の計算にあたっては以下の要因を考慮する必要がある。

- ① 回転するブレードおよびタワー部における乱気流モデル
- ② ブレード形状など空力学的影響
- ③ 基礎、風車部から構成される全体系の動的挙動
- ④ 機械的な設備の制御、ブレードの回転数、ピッチ角(取付け角度)など

これらのすべての要因を考慮する場合には、高度なシミュレーション解析が必要となる。これまでは風力発電の国際的な認証機関(たとえば、ドイツのGL: Germanischer Lloyd)などが認める解析ソフトを用いて風車メーカーがシミュレーション解析を行なっており、供用期間中に風車タワーに作用する最大応答荷重や疲労検討荷重などの設計外力が得られる。

#### (2) 共振検討・疲労検討

風車タワーの振動特性として、ブレードが回転することによる励起振動がある。主なものは、不均等な風荷重を受けながらブレードが1回転することにより発生する振動やタワー前面をブレードが通過することにより励起される振動がある。タワーの固有振動数がこのような励起振動数に

近づくとタワーに発生する応力は大きくなる。したがって、風車タワーの設計では固有振動解析を含めた共振検討を行なう必要がある。とくに風車タワーの一次固有振動数に対する共振検討が重要である。

また、風車タワーは通常の塔状コンクリート構造物と異なり、ブレードの回転により供用期間中に数億回の繰り返し荷重が作用する。その頻度、繰り返し荷重の変動幅に対する部材の疲労検討が必要となる。

図-3に風車タワーの設計フローを示す。

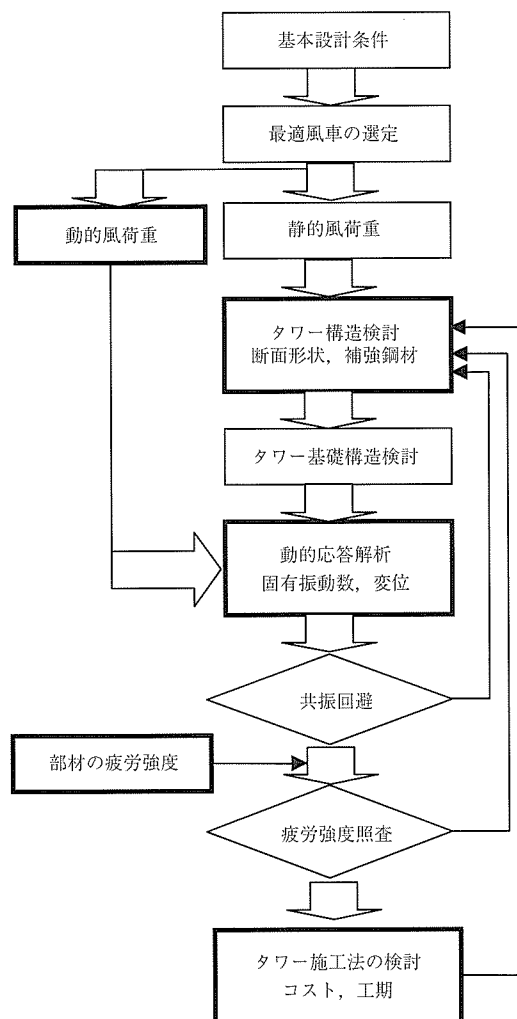


図-3 風車タワー設計フロー

タワーの固有振動数および風荷重による応答値は構造形状や部材剛性に大きく左右されるので、本稿にある「うみてらす名立」におけるPC風車タワーの設計においても初期の段階から風車設計者とタワー設計者とが連携をとりながら設計を進めた。以下に本発電施設の概要と国内で初めて採用されたPC風車タワーの設計について報告する。

### 3. うみてらす名立風力発電施設の概要

#### 3.1 計画概要

新潟県名立町では県内外の人たちとの交流を促進し、交流人口の増加による地域の活性化を図る目的で、交流拠点

施設「うみてらす名立」を平成 12 年 7 月から営業している。今回の PC 風車タワーは、「うみてらす名立」のシンボルマークとして建設されるもので、日本海側の冬の強風を逆に有効なエネルギーとして活用することで、自然エネルギーを利用した漁村における循環型社会の構築を目指している。風力発電により得られた電力は「うみてらす名立」で消費し、余剰分を東北電力へ売電する。

本発電施設は、平成 11～12 年に NEDO（独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の風況精査、平成 13 年にシステム設計が実施され、平成 14 年に PC 風車タワーの設計が行われた。施工は平成 15 年 1 月から基礎工事着工、7 月からタワーの構築に着手した。平成 15 年 10 月には風車を据付け、発電に関する各種試験により性能を確認したうえで 11 月に供用を開始した。風力設備は三菱重工業製の水平軸プロペラ式可変翼型風車を採用している。

以下に本発電施設の概要を示す。

[うみてらす名立風力発電施設の概要]



- 企業者 : 新潟県名立町
- 商用運転開始 : 平成 15 年 11 月
- 発電容量 : 600 kW × 1 基
- ハブ高さ : 50 m
- タワー構造 : プレストレストコンクリート構造
- タワー施工法 : 特殊型枠工法
- 基礎構造 : 杭基礎 (PHC 杭 φ700)
- 風車種類 : 水平軸プロペラ式可変翼型
- 回転数 : 10 ~ 34 rpm
- ローター直径 : 45 m
- 発電機種類 : 永久磁石式多極同期発電機

風況精査・システム設計 :	鹿島建設
設計・監理 :	鹿島建設
施工 :	鉄建建設
風車本体 :	三菱重工業 (タワーを除く)

### 3.2 PC 風車タワーの設計

#### (1) 設計概要

本施設の風車タワーは海岸線の立地という塩害環境において構造物が耐久性を有すること、また、「うみてらす名立」のシンボリックな構造物であるため美観性を維持すること等が求められた。そこで、厳しい環境下においても材料仕様とかぶり厚を適宜設定することによって耐久性を確保でき、自然な景観を創出できることを理由に国内で初めて PC 風車タワーが採用された。



写真-1 うみてらす名立の風車全景

図-4 に PC 風車タワーの構造概要を示す。

本構造は鉛直方向にプレストレスを導入した PC 製円筒タワーである。PC 部分の高さは 46.8 m (12 × 3.9 m/ロット) あり、断面形状は下端で外径 φ4 000 (壁厚 300 mm) から上端で外径 φ2 100 (壁厚 250 mm) まで変化する。タワー断面内には PC 鋼棒 (B 種 2 号 φ32) を 16 本配置し、各ロットで継手を設け最上部まで配置している。図-5 にタワー下端断面の PC 鋼材配置を示す。

頂部にはナセル接合のための円筒形の鋼製セグメントアダプター (φ2 100 ~ φ2 000) を設置しており、このアダ

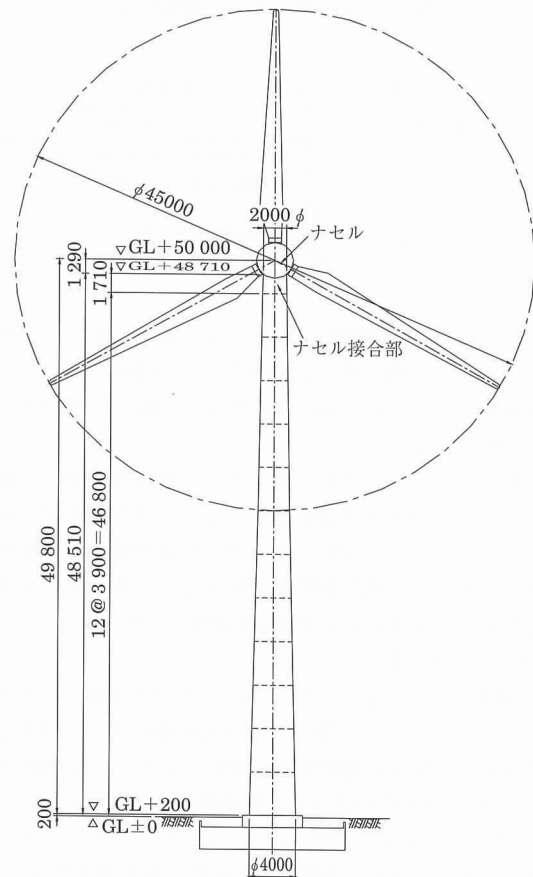


図-4 PC 風車タワー構造概要図

プターの下端フランジ上にアンカープレートを設置し、PC鋼棒を定着している（図-6参照）。

PC風車タワーの主要部材の使用材料を表-2に示す。



図-5 タワー下端断面の配置PC鋼材

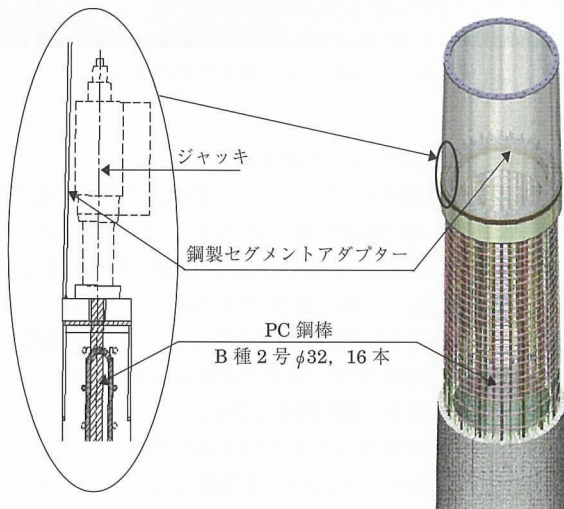


図-6 PC風車タワー頂部構造

表-2 PC風車タワーの使用材料

項目	使用材料
コンクリート	設計基準強度 $\sigma_{ck} = 36 \text{ N/mm}^2$
PC鋼材	PC鋼棒B種2号φ32
鉄筋	SD 345
鋼製セグメントアダプター	SM 400 B

本発電施設の実施設計においては、風車設計者（三菱重工業）とタワー設計者（鹿島建設）とが設備、システム、構造等について作業分担や協議事項を明確にし連携をとりながら設計を進めた。

風車タワーの設計では、まずタワー設計者が概略で基礎およびタワーの基本形状を設定する。つぎに風荷重に対するシミュレーション解析による最大応答荷重や疲労検討荷重等の外力設定を風車設計者が担当し、それを受けてタワー設計者が共振検討および強度検討等を行なった。

#### (2) 適用規準

PC風車タワーの施工では法的には工作物申請が必要となる。よって、タワーの設計は建築基準法に準じ、構造上の類似性から“煙突構造設計施工指針1982年（日本建築センター）”を主要適用基準として強度検討等を行なった。

PC構造の一般事項については、“プレストレストコンクリート設計施工規準・同解説1998年（日本建築学会）”を適用した。その他、風力発電タワー特有の疲労耐久性に関

する検討については、“コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕2002年（土木学会）”を参考としている。

#### (3) 共振に対する検討

共振検討については、タワーの支配的な振動特性である一次の固有振動とブレードの回転に起因する周期性励起との共振を回避するよう、タワーの断面形状や剛性を調整した。具体的には風車の最大回転数 =  $34 \text{ rpm} / 60 \text{ sec} = 0.56 \text{ Hz}$  に対し、タワーの一次固有振動数を大きく離すことにより、タワーに悪影響を及ぼす共振を避けている（タワー固有振動数 =  $0.78 \text{ Hz}$ ）。

なお、風車完成後に現地にてタワーの振動計測を実施し、設計で設定したタワーの振動数等の妥当性を確認している。

#### (4) 疲労に対する検討

一般的にコンクリート部材は圧縮領域において高い耐疲労性能を発揮するので、本タワーにおいても鉛直方向にPC鋼材を配置し、フルプレストレス状態とすることにより疲労耐久性を高めた。

図-7に長期のタワーの曲げ応力状態を示す。

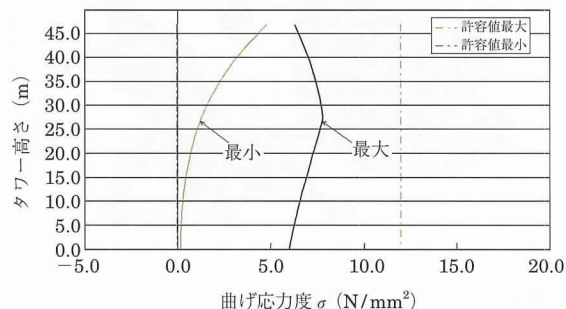


図-7 タワーの曲げ応力度（長期）

#### (5) 短期荷重に対する検討

暴風時および地震時の曲げモーメントに対する検討結果を図-8に示す。短期荷重による曲げモーメントはタワーの降伏モーメント以下であり、短期荷重が作用した後もタワーは弾性体として初期の振動特性は維持される。

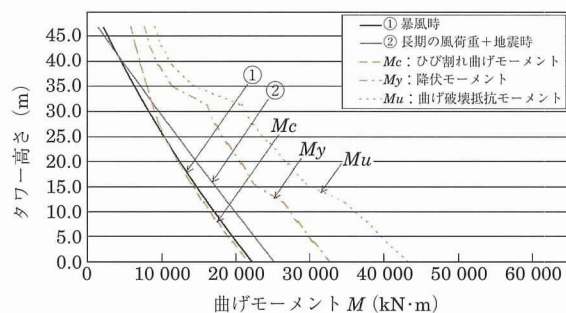


図-8 短期の曲げモーメントと断面耐力の比較図

## 4. 設計段階における施工方法の検討

本発電施設では、風車部の施工（基礎を除く）および運転までが単年度工事で計画されていたため、短工期でタワーを構築できる工法が前提となる。また、PC風車タワーの

構築においては、高所作業での安全確保も求められる。これらの要求を満たす工法として、ジャンピングフォーム等の従来工法に加え海外での工法などを比較検討した。結果、ヨーロッパで実績のある特殊型枠工法（RSB 型枠工法）を採用することにした。

この型枠システムは円筒状の鋼製の内側型枠および足場を組み込んだ鋼製の外側型枠から構成されている。内・外の鋼製型枠は剛性が大きくコンクリートの打設圧に対してセパレータが不要であり、地上にて事前に鉄筋を組立てることによりプレハブ施工できるなど、この型枠システムは急速施工に適している。また、高所での作業が減ることにより安全性が向上するなどの特長がある。

本工法の標準作業順序図を図-9に示す。

施工順序としては、まず地上にて内側型枠に鉄筋を取り付け、それをタワーの所定の場所に設置し、外側型枠を設置後にバケットにてコンクリートを打設する（写真-2参照）。コンクリートの養生後に外側型枠、内側型枠の順に取り外す。つぎに地上にて事前に調整した上部のロット用の

内側型枠、外側型枠を吊り上げ同じ作業繰り返す。施工サイクルを早めるため内側型枠は数セット準備されている。

特殊型枠工法によるコンクリート部分のタワー構築後は、最上部に鋼製セグメントアダプターを設置し、ナセル、ブレードの順で取り付ける。タワー上部のナセル、ブレードの取り付けには大型油圧クレーン（650 t）が必要であること、また、将来の維持管理や不測の事態に対処するために、地盤条件を考慮して大型油圧クレーン設置用支持杭の配置を計画した。

写真-3は、うみてらす名立風力発電施設におけるナセル、ブレードの架設の状況である。ナセルをまず取り付け、ブレードは地上にて組み立てたのち大型油圧クレーンにて一括架設された<sup>5)</sup>。

### 5. おわりに

風力発電分野においては、より効率のよい発電システムへの移行のために発電機の大型化が計られている。しかしながら、国内においては風車の架設地点は限定されてきて

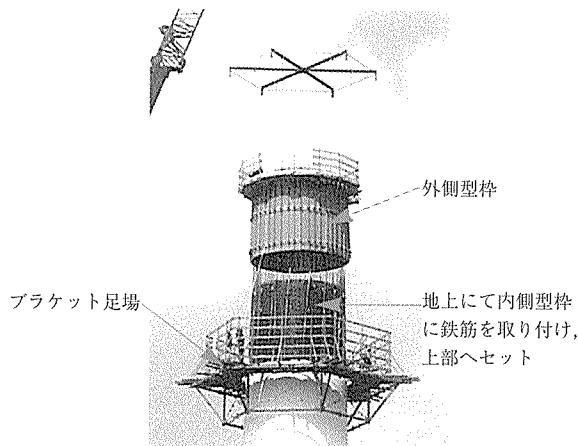


写真-2 特殊型枠工法（RSB 型枠）

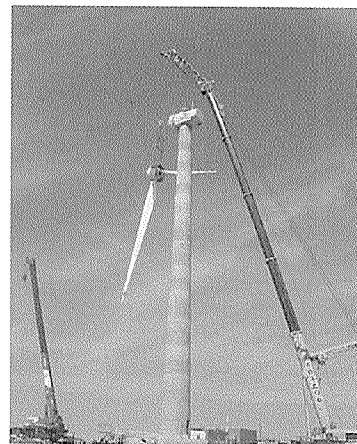


写真-3 ナセル・ブレードの一括架設（うみてらす名立風力発電施設）

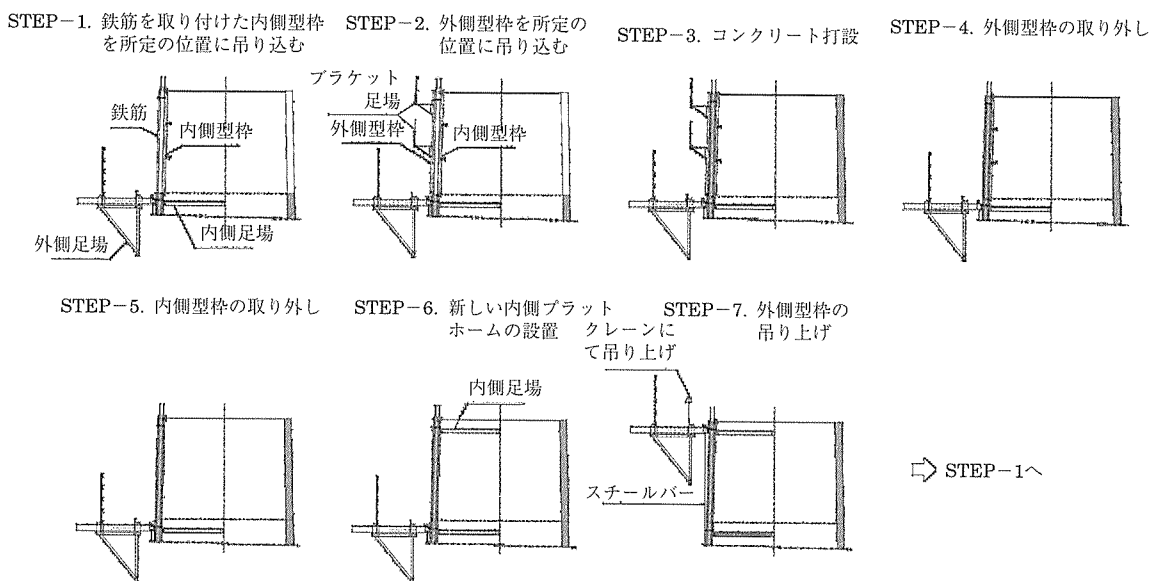


図-9 RSB 型枠工法の標準作業順序図

おり、山間部や海岸部など条件の厳しいところが多く、輸送性や耐久性の観点から今後コンクリート製風車タワーの採用が増加すると考えられる。

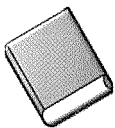
コンクリート製風車タワーの構造技術については、橋梁等の PC 技術や煙突などで培われた塔状構造技術が大いに活かされると考えられる。しかしながら、台風など日本固有の風に対する外力の設定方法や地震動の評価など課題は多く、設計の体系化が望まれる。

本稿が今後の大型風力発電施設や洋上風力発電施設の発展の一助になれば幸いである。

#### 参考文献

- 1) 欧州風力エネルギー協会／グリーンピース：WIND 12, 2003 年 9 月
- 2) 牛山：風力発電実用化時代を迎えて, Civil Engineering Journal 2004.8, pp.7～11, 平成 16 年 8 月
- 3) 齊藤, 奥田, 林, 榎本：名立町コンクリートタワー風力発電施設, 第 25 回風力エネルギー利用シンポジウム, pp.161～164, 平成 15 年 11 月
- 4) IEC 61400 - 1 WIND turbine generator systems Part1:Safety requirements
- 5) 矢野, 泰野, 奥田, 梶原：PC 風力発電タワーの施工, プレストレストコンクリート技術協会第 13 回シンポジウム論文集, pp.601～604, 平成 16 年 10 月

【2004 年 9 月 15 日受付】



刊行物案内

## プレストレストコンクリート技術の 適用拡大と世界の動向

### 第 31 回 PC 技術講習会

(平成 15 年 2 月)

頒布価格 会員特価：5 000 円 (税込み・送料別途 500 円)

非会員価格：6 000 円 (税込み・送料別途 500 円)

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会