

風力発電設備耐風設計小委員会 終了報告

東京大学大学院工学系研究科

石原 孟

平成19年11月1日

報告内容

- 小委員会の目的
- 小委員会の活動概要
- 小委員会活動内容の紹介

小委員会の目的

- 1990年代後半から風力発電設備が急速に普及
2007年3月 1314基
- 欧州の自然環境条件と日本との相違
台風、地震、複雑地形
- 台風等による暴風被害の発生

タワー



基礎



- これまでの設計方法を考えると、どちらかという
と海外で作成された規・基準類をそのまま適用し
たり、あるいは土木、建築、電気、機械等の設計
指針をそのまま適用したことが多い。
- 我が国特有な強風の考慮や風力発電設備の特性の
配慮という点では十分とは言えない。



従来各工学分野で培われていた耐風・耐震設計に
関する考え方を統一し、合理的な設計手法の提案

土木学会 構造工学委員会 風力発電設備耐風設計小委員会

- 2004年9月～2007年9月 3年間
- 委員35名, オブザーバー8名
- ワーキンググループ

風力発電システムWG

設計風速・風荷重WG

タワー・基礎WG

- 本小委員会は、従来風力発電設備支持物における構造設計の問題点を明らかにする。
- わが国特有の自然環境条件および風力発電設備固有の特性を考慮した支持物の合理的な設計手法を提案する



設計者・技術者に分かりやすく利用し易い設計指針を作成する。

大学・研究機関

東京大学
横浜国立大学
九州工業大学
(独)建築研究所

電力関係

沖縄電力(株)
関西電力(株)
東京電力(株)
(財)電力中央研究所

オブザーバー

九州大学 東海大学
(社)日本電気協会

風力発電事業者

エコ・パワー(株)
電源開発(株)
(株)ユーラスエナジー
ジャパン

メーカー

石川播磨重工業(株)
(株)荏原製作所
JFEエンジニアリング(株)
(株)日本製鋼所
富士重工業(株)
三菱重工業(株)

コンサルタント

電気興業(株)
東電設計(株)
(株)風力エネルギー研究所

建設

(株)大林組
鹿島建設(株)
清水建設(株)
三井住友建設(株)
三菱重工橋梁
エンジニアリング(株)

(財)電力中央研究所
(財)沿岸技術研究センター

(独)土木研究所
(社)日本電機工業会

風力発電設備耐風設計小委員会
Task Committee on Wind Resistant Design of Wind Turbine Generator System

- [ホーム](#)
- [設置数量](#)
- [活動予定](#)
- [履歴と記録](#)
- [委員構成](#)

Copyright (C) 2004
[風力発電設備耐風設計小委員会]
All rights reserved.
2006/8/19 Update



北海道苫前グリーンヒル(東京大学提供)

岩屋ウィンドパーク(エコパワー提供)

東京臨海風力発電所(東京大学提供)

波崎ウィンドファーム(エコパワー提供)

What's New

- 第11回風力発電設備耐風設計小委員会開催予定(2006年11月16日)
- 第10回風力発電設備耐風設計小委員会を開催しました(2006年9月11日)

<http://windeng.t.u-tokyo.ac.jp/TCWRDWT/>

小委員会の活動概要

- 2004年9月から計15回小委員会を開催
- 2005年6月3日 風力発電設備耐風設計小委員会パンフレットの作成
- 2005年9月7日 土木学会年次学術講演会 研究討論会を開催 「風車の安全性の検証と耐風安全性設計への提言」
- 2005年10月18日 建設工業新聞 本小委員会関連記事を掲載
- 2006年1月 日本風工学会誌に「国内で初めての風車の耐風設計指針策定を目指して」と題した紹介記事を掲載

- 2006年11月22日 第28回風力エネルギー利用シンポジウムにて本小委員会の研究論文を発表
- 2007年7月10日 本小委員会が作成した指針の紹介記事を「風力エネルギー」に掲載
- 2007年11月 「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」を土木学会から出版
- 2007年11月30日 「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」に関する講習会を実施

小委員会の構成

委員長 石澤 浩 (東京大学大学院工学系研究科, 助教)
副委員長 藤嶋 弘 (熊本国立大学大学院工学研究科, 助教)

ワーキンググループ(WG)一覧

風力発電システムワーキンググループ
設計風速・風荷重ワーキンググループ
タワー基礎ワーキンググループ

委員(25名)所属一覧

(25名)

大学・研究機関	電力関係	コンサルタント	メーカー	建設会社
九州工業大学	沖縄電力	エコーパワー	石川島播磨重工業	大林組
東京大学	関西電力	電気興業	西原製作所	鹿島建設
横浜国立大学	東京電力	電源開発	JFEエンジニアリング	清水建設
建築研究所	電力中央研究所	ユールズエナジージャパン	日本製鋼所	三井住友建設
			富士重工業	
			三菱重工業	

オブザーバー(8名)所属一覧

(8名)

九州大学	土木研究所
電力中央研究所	日本電気協会
東海大学	日本電機工業会
山形大学	山形大学工学部

活動状況及び今後の予定

第1回 小委員会 (2004年9月14日)

小委員会の設置説明
1998年5月のインド風車被害調査報告
台風14号による風車倒壊などの事故調査報告書
風力発電設備の耐風設計の現状と問題点

第2回 小委員会 (2004年11月30日)

IECの改定と風力発電設備の耐風設計要件の変更
風車タワー座面のメカニズムとその耐風設計手法
各WGによる報告資料のレビュー

第3回 小委員会 (2005年1月27日)

風車基礎座面のメカニズムとその耐風設計手法
設計条件と必要データの整理
耐風設計手法の提示
各WGによる報告資料の目次提示

第4回 小委員会 (2005年3月31日)

風車耐風評価に関する数値的及び理論的研究
風車ナセルの風力と風圧力に関する風洞実験
風力発電設備耐風設計指針・全体目次案
各WGによる報告資料の概要報告

第5回 小委員会 (2005年5月25日)

凍雪・冷害域における風力発電促進に関する研究
土木学会全国大会・研究討議会について
指針案を用いた設計例の報告
各WGによる報告資料の取りまとめ状況報告

第6回 小委員会 (2005年8月9日)

設計例の取りまとめ
各WGによる報告資料の報告(報告書本)
土木学会全国大会・研究討議会の事前討議

第7回 小委員会 (2005年9月9日)

土木学会全国大会・研究討議会

第8回 小委員会 (2005年10月9日)

指針案の最終報告(副本)
第1回シンポジウムの事前討議

第9回 小委員会 (2005年12月9日)

第1回シンポジウム開催

土木学会 構造工学委員会

風力発電設備耐風設計小委員会

Task Committee for Wind Resistant Design of Wind Turbine Generator System

2004年度末までに国内に設置された風車の総数は924基に達しました。その一方で、日本特有の気象や地形条件によって、風力発電設備の強風による被害が多数報告されています。

風力発電設備の耐風設計は、海外の規格や基準類をそのまま適用したもの、あるいは国内の土木・建築・電気・機械等、各分野の設計法をそのまま適用したものが多く、これらは我が国特有の強風性気候あるいは風力発電設備固有の荷重特性が十分に考慮されていないのが現状です。

本小委員会は、風力発電設備における耐風設計手法の現状や被害状況を分析するとともに、従来、各分野で個別に培われていた耐風設計に関する考え方を統一し、日本に適した風力発電設備耐風設計手法の提案を目的としています。

関連法規・指針等の整理

過去の強風被害を調査すると共に、現行風車の耐風設計法の整理と比較検討を行う

設計風速の設定

基本風速・相度区分・地形効果を考慮した設計風速評価手法の提案

風荷重の評価

ブレード・ナセルの風力係数の提案と風車の動的特性を考慮した風荷重評価

設計法の規定

建築基準法及び関連指針をもとに、タワー・ペダスタル・基礎の設計法を提示

指針案による設計例

風車タイプ別の設計例、また数値解析(CFD, FEM)による設計例を提示

風力発電設備の強風被害



ブレードの折損

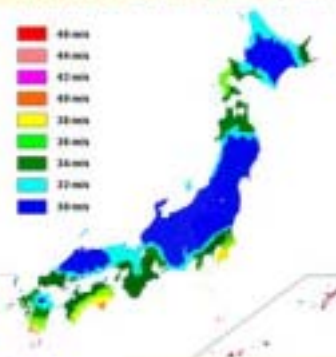
ナセルカーブの破損



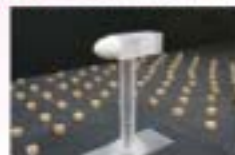
タワーの割壊

基礎の破壊

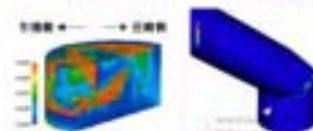
市町村別の基本風速(建築基準法)



風洞実験による風圧力係数の測定



FEMによる基礎とタワーの応力解析



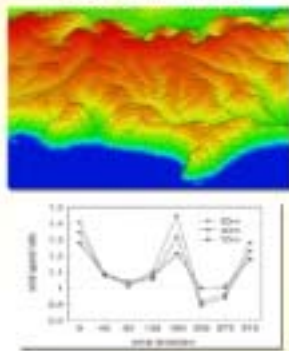
指針案の目次

- 第1章 総則
 - 概説、適用範囲、基礎知識、用語、記号
- 第2章 評価法種及び基準
 - 電気率法、建築基準法、法別規格、国内関連指針
- 第3章 耐風設計の流れ
 - 荷重の種類と組合せ、耐風設計フロー
- 第4章 設計風速の評価
 - 基本風速、相度区分、偏位分布、地利効果、地形
- 第5章 風力・風圧力の評価
 - ブレード・ナセル・タワーの風力係数、ナセルの風圧力係数
- 第6章 風荷重の評価
 - ブレード、ナセル、タワーの風荷重算定式、ガスト影響係数の算定式、風荷重の組み合わせ
- 第7章 タワーの強度計算
 - 筒身・フランジ・開口部の強度計算
- 第8章 ペダスタルの強度計算
 - 定着、基礎ボルト、アンカーリング
- 第9章 基礎強度と安定計算
 - 安定計算、構造成計、故障基礎、杭基礎
- 第10章 指針による設計例
 - スチール制塔・コンクリート制塔、適地基礎・杭基礎、平地地形、傾斜地形、海浜
- 第11章 数値解析による設計例
 - CFDによる設計風速解析、FEMによる風荷重解析、FEMによるタワーと基礎の応力解析
- 第12章 参考文献
 - 許認可手続、関連法規条文、事故事例紹介、風力発電機リスト

関連法規・規格・指針

- 法規
 - 建築基準法、電気事業法
- 国際規格
 - IEC61400-1/25 C1400-1, GL - Germanischer Lloyd
- 学会指針類
 - 土木学会及び日本建築学会等
 - 耐風設計指針
 - 耐風造物設計指針
 - 電力設備設計指針(風力版)
 - 耐風構造設計指針(風力版)
 - 建築物耐風設計・耐震指針
 - 建築物耐風設計・耐震指針
 - 建築基礎構造設計指針
 - 建築構造物等一般指針
 - コンクリート構造物等一般指針
- マニュアル等
 - 日本電気協会 風力発電規格
 - NEPCO 電力発電システムの設計マニュアル
 - 気象庁気象研究所 海上風力発電システムの概要マニュアル

地形による風速変化



耐風設計のフロー



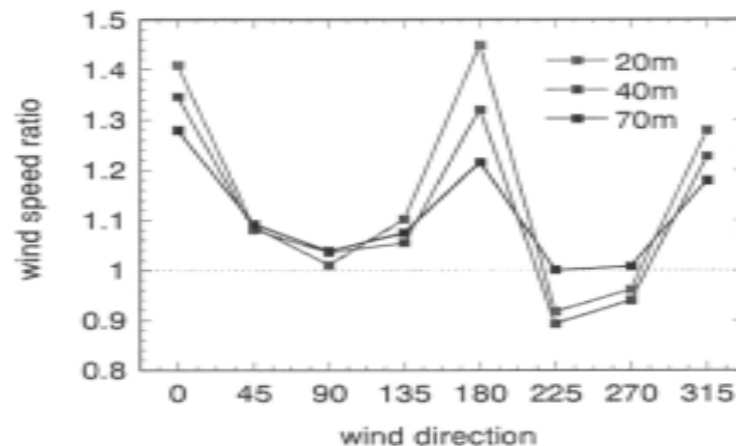
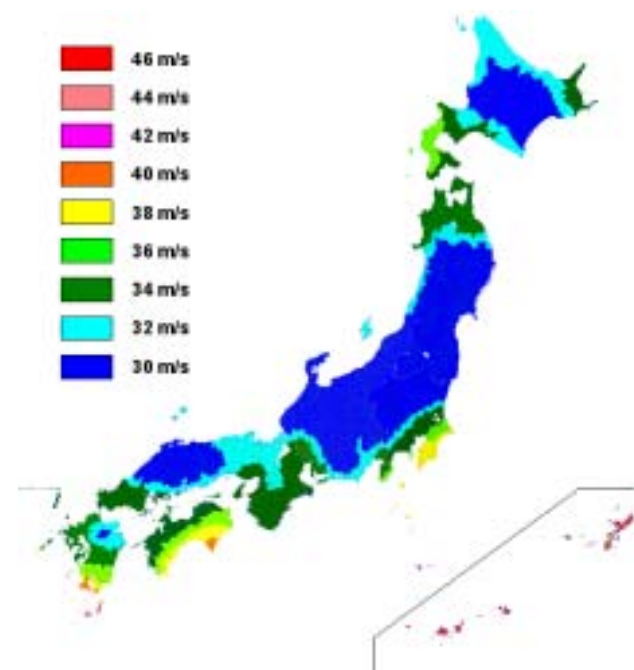
小委員会活動内容の紹介

1. 風力発電設備は一般に風況のよい地点に設置され、台風時には周辺地域より強い風が吹くことが多いことから、設置地点での設計風速の評価手法を提案する。
2. 風力発電設備支持物に作用する風荷重を評価する際に必要なブレードとナセルの風力係数を提示する。
3. 風車の制御方式(ヨー制御やピッチ制御)と振動特性を考慮し、乱れ強度の大きい山岳地帯に適用できる高精度の風荷重評価式を提案する。
4. トップヘビーの風力発電設備に適用でき、更に風車発電時の風荷重も考慮する地震荷重の評価式を提案する。

- 基準風速は50年再現期間の10分平均風速
- 平坦地上での10分平均風速の鉛直分布はべき則を採用

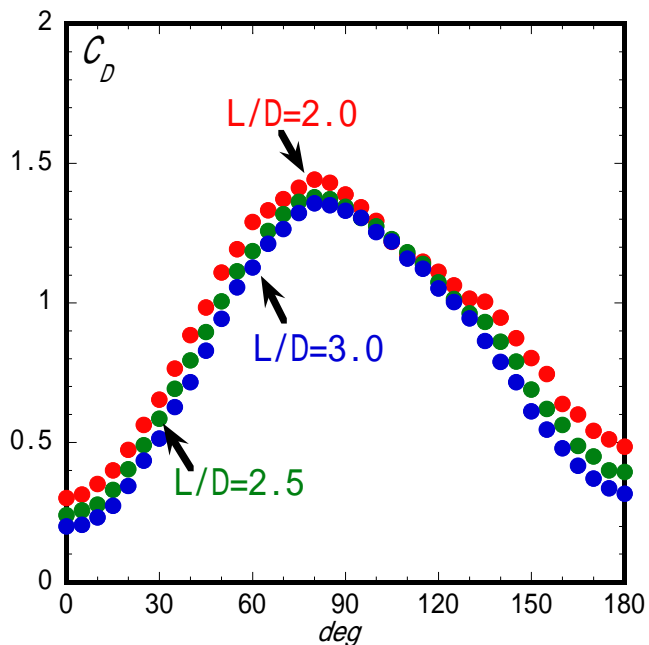
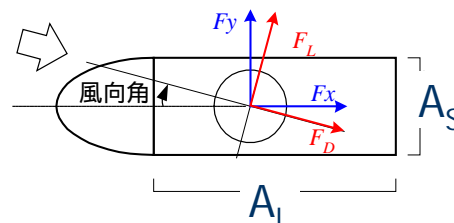
$$U_z = U_{z0} \left(\frac{z}{z_0} \right)^\alpha$$

建築基準法により基準風速として規定されている。基準風速の値は30m/s ~ 46m/sの間にあり、具体的な値は市町村別に定められている。



風洞実験や既存の文献のデータに基づき、ブレード、ナセル、タワーの風力係数を規定

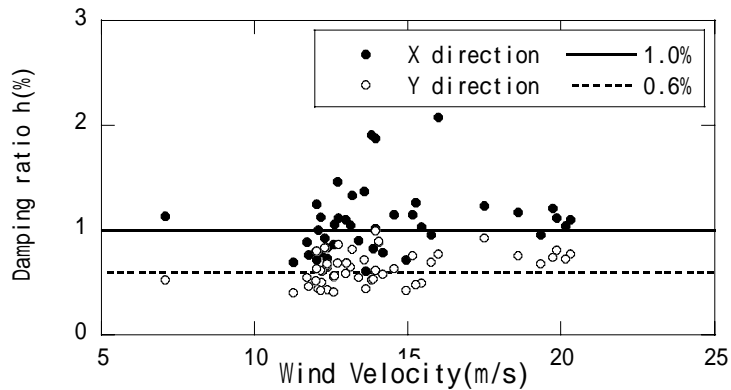
$$F_D = C_D(\alpha) A_L \frac{1}{2} \rho V^2$$



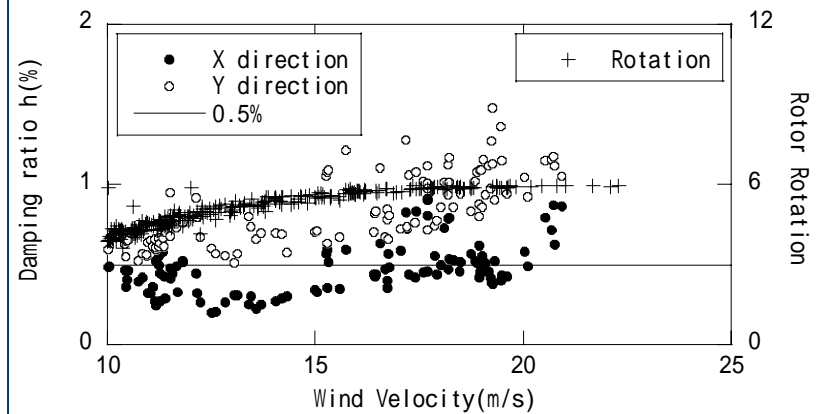
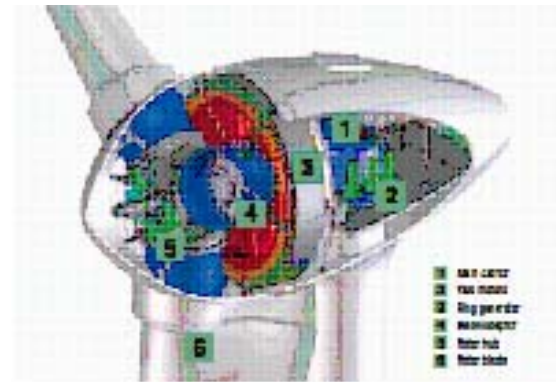
三井住友建設

風洞装置

増速機がある発電機を採用した風車タワーの減衰比



増速機がない発電機を採用した風車タワーの減衰比

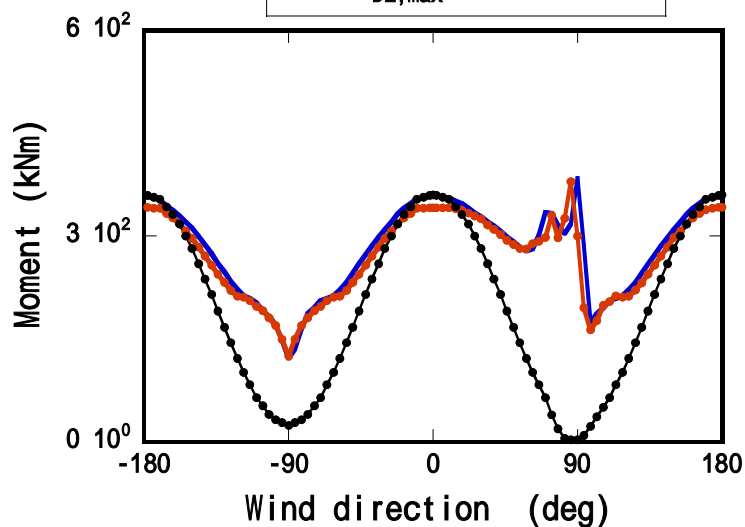


■ 風車の振動特性を反映した風荷重評価手法の提案

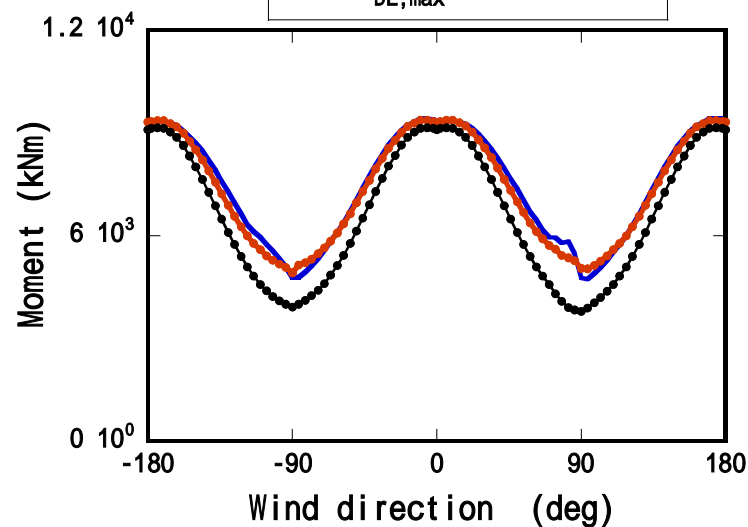
$$M_{\max} = \overline{M} \times G_f(n, \xi, \theta)$$

- 振動数(n)、構造減衰()の考慮により、構造物の振動特性を評価
- 風方向と風直交方向の風荷重の組合せにより、全方位()の風荷重を評価

ブレード



タワー

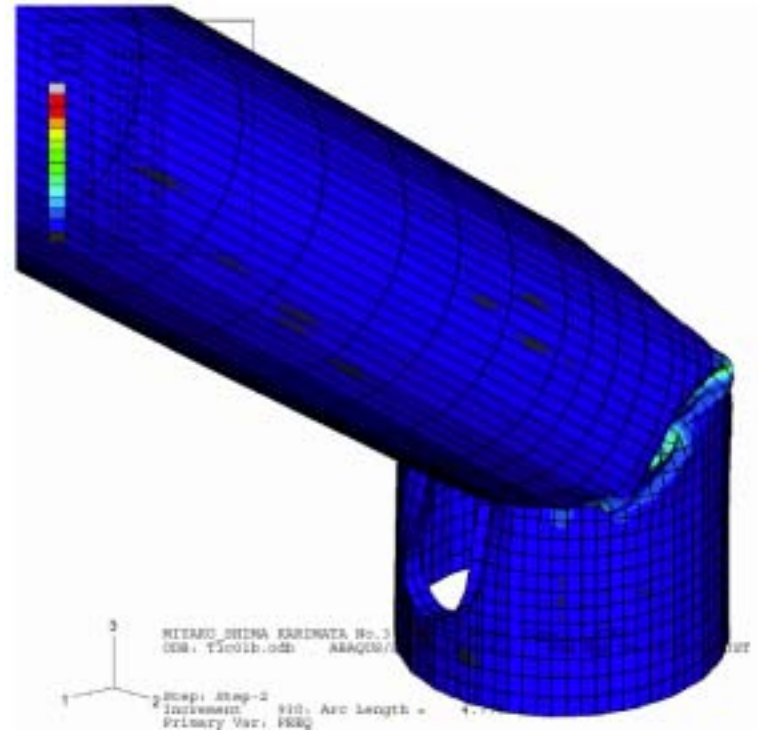


1. 風力発電設備の支持物であるタワーは静定のカンチレバー構造であり、またタワーには開口部があるため、座屈強度に対する影響を考慮する構造計算式を提案する。
2. タワーと基礎フーチングの接合部(ペDESTAL)は、鋼製アンカーボルト(またはアンカーリング)とコンクリート製基礎との接続は異種材料の継手構造になっているため、応力状態が複雑である。コンクリート強度、鉄筋の強度のみならず、ペDESTALの形状、軸力を考慮できる接合部の構造計算を提案する。

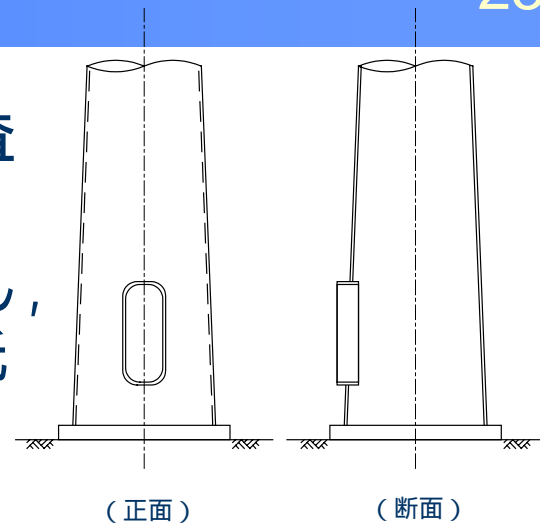
事故例



FEM解析



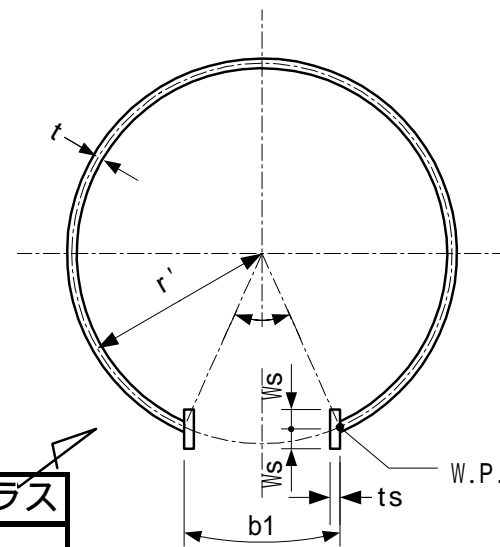
- 筒身下部の点検用開口部に対する座屈を照査する。
- 筒身の強度照査(容器構造設計指針)を準用し、許容圧縮応力度に開口部の影響を考慮した低減係数を乗じる照査式を提案。



$$\frac{\sigma_c + \sigma_b}{C \cdot f_{cr}} \leq 1 \quad \text{かつ} \quad \frac{\tau}{s f_{cr}} \leq 1$$

- 許容応力度低減係数は、GLにならない、JIS規格材を対象に筒身半径・板厚、開口角度に応じた算定式を作成。

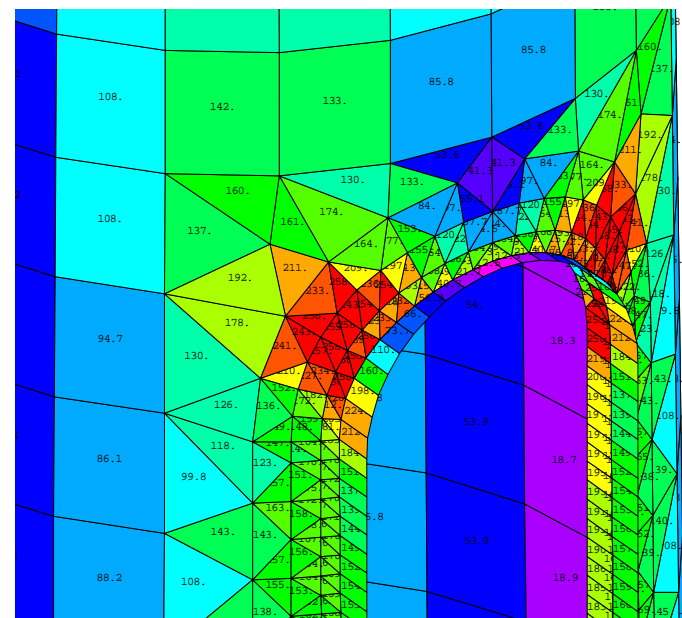
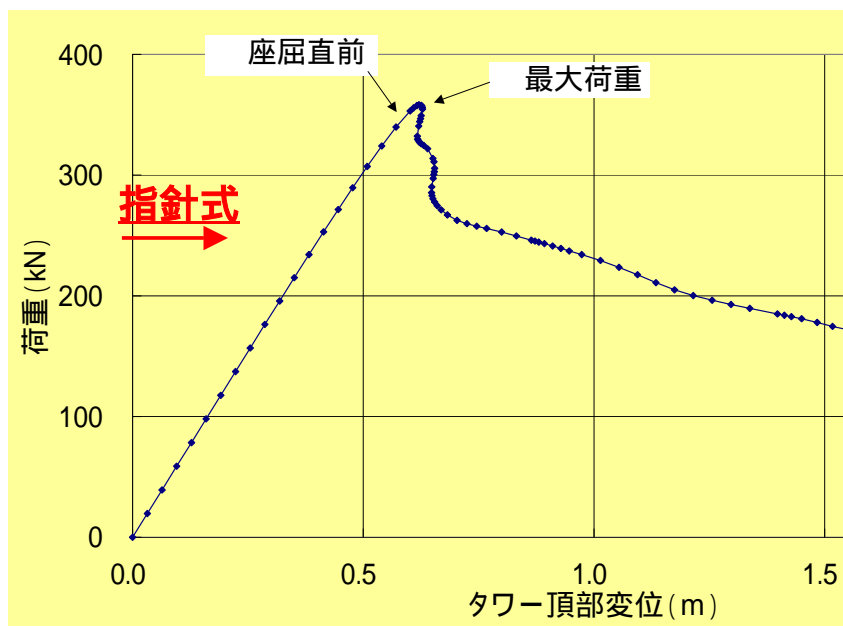
$$C = A - B \cdot (r' / t)$$



		EN S235 または JIS SM400 クラス		EN S355 または JIS SM490 クラス	
		A	B	A	B
20	30	1.2 - 0.01	1.9×10^{-3}	1.15 - 0.01	2.1×10^{-3}
30 <	60	1.05 - 0.005	$(1.6 + 0.01 \quad) \times 10^{-3}$	1.0 - 0.005	$(1.8 + 0.01 \quad) \times 10^{-3}$

- 台風によって座屈した風車タワーのFEM解析結果(タワー頂部に開口部方向に水平荷重を載荷した時の荷重と頂部水平変位との関係)

開口部近傍の応力分布

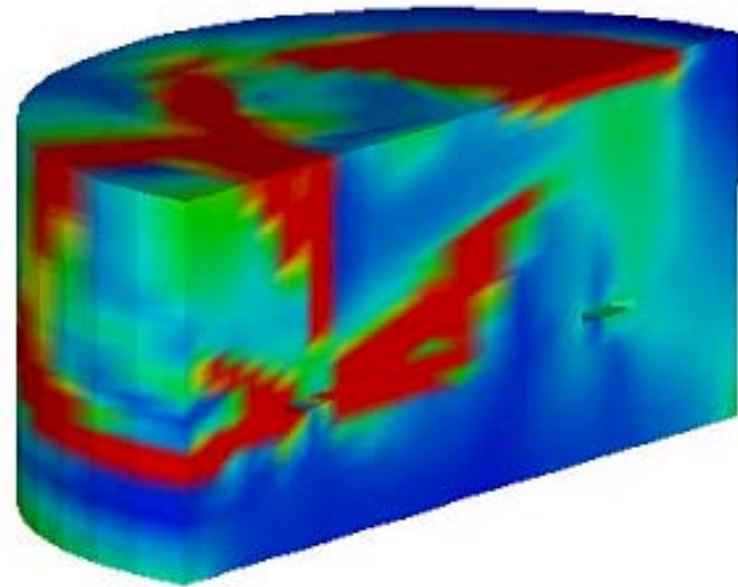


- 本指針での開口部の照査式は,タワー全体が弾性挙動範囲内で残留変位が許容値以下であることを保証する.

事故例



FEM解析

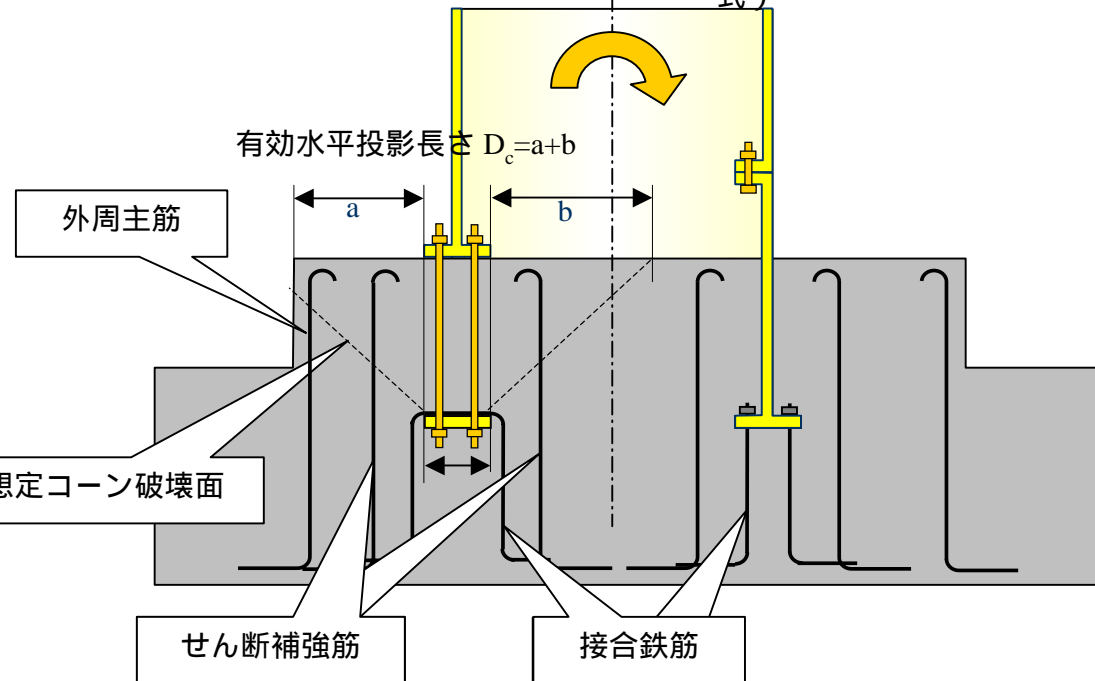


- アンカーボルトの抜け出しに対する許容引張力を次式により算出し、定着部鉄筋コンクリートは、コーン状の破壊が起こらないよう設計する。

$$P_{a1} = P_{a1c} + P_{a1s} + P_{asj}$$

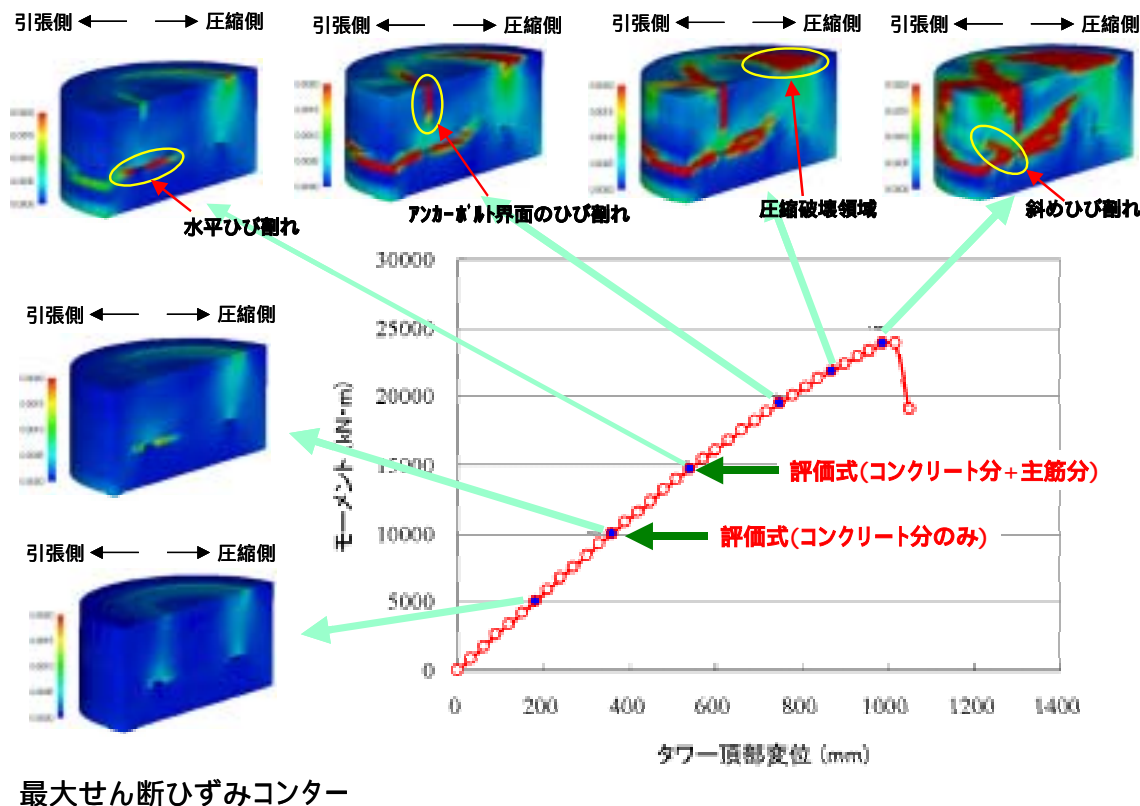
↑
↑
↑
 コンクリート分担力 外周主筋とせん断補強鉄筋の分担力 接合鉄筋の分担力

(アンカーボルト方式) ← → (アンカーリング方式)



- 1) コンクリートの分担力はコンクリートの設計基準強度の平方根とコンクリートのコーン破壊面の有効水平投影長さ に比例して増大するが、ペDESTALの寸法係数 a/b の減少に伴い小さくなる。
- 2) 鉄筋の分担力はコーン状破壊面を横切る外周鉄筋とせん断補強筋の降伏強度と円周単位長さあたりの鉄筋断面積の積に比例するが、外周鉄筋の分担を低減させる。
- 3) アンカーボルトのプレストレスがない場合とある場合の解析結果からはプレストレスがある場合はない場合に比べて、破壊曲げモーメントに対する抵抗力が減少し、小さくなる

- 台風によってコーン破壊で倒壊した基礎のFEM解析結果 (水平荷重を載荷した時の転倒モーメントと頂上水平変位との関係)



- 本指針で提案したペDESTALのコーン破壊の照査式は、ペDESTAL全体が弾性挙動範囲内で、残留変位やひび割れが許容値以下であることを保証する。

- 第1章 総則
- 第2章 設計の流れ

- 第3章 設計風速の評価
- 第4章 風力係数の評価
- 第5章 風荷重の評価
- 第6章 地震とその他の荷重の評価

- 第7章 タワーの構造計算
- 第8章 ペDESTALの構造計算
- 第9章 基礎の構造計算

- 第10章 指針による設計例
- 第11章 数値計算による解析例

- 第12章 関連法規および基準
- 第13章 参考資料

総則・設計方針

荷重評価

構造計算

設計・解析例

関連法規・参考資料

- 「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説」講習会
- 土木学会主催、6団体の協賛
 - (社)日本建築学会, 日本風力エネルギー協会, (中)日本風力発電協会, 日本風工学会, 日本太陽エネルギー学会、(社)日本電機工業会
- 平成19年11月30日(金)13:00～17:30
- 東京大学 武田先端知ビル 武田ホール(5F)
- 定員 100名の予定 現時点151名の申し込み

本小委員会の活動ならびに指針の策定にあたり
構造工学委員会から多大なご支援を頂き、また原
稿査読に多くの時間を割いて、多くの貴重な意見を
いただいた。この場を借りて厚く御礼申し上げます。