# 風力発電タワー振動による基礎構造低サクル疲労破壊機構の解明

法政大学 学生会員 〇米津薫 法政大学 正会員 藤山知加子

### 1.はじめに

近年,我が国では風力発電エネルギーへの関心が高まっている.本研究では,風力発電タワー繰り返し一定振幅荷 重下での基礎構造の疲労破壊メカニズム解明を目的とした.十分な安全率を有した設計が行われているにも関わらず, 国内外で風車倒壊事例<sup>1)</sup>が報告されており,これまでの研究では解明されていない要因が存在する可能性がある.そ こで,RC基礎において初期に発生するひび割れに着目し,動的荷重下における破壊モードを3次元非線形FEM解析 により検討した.

#### 2.解析モデル

本研究で対象とする風車概略図<sup>2)</sup>を図-1,解析モデルを図-2に示す.対称条件を考慮し1/2モデルとした.また,モデル底部は地盤の影響を無視できるものとし,全方向拘束,1/2対称断面ではX軸拘束と設定した.

## 2.1 物性值

ペデスタル,フーチング部のコンクリート強度を28.6N/mm<sup>2</sup>,29.3N/mm<sup>2</sup> とし、タワー、アンカーボルトの降伏強度はそれぞれ、400.0N/mm<sup>2</sup>,931.6 N/mm<sup>2</sup>とした.なお、タワー、ナセル、ブレードの総自重は650kNと設定 している.ペデスタルとベースプレートの境界には付着を考慮した境界面 要素を追加し、タワーから基礎への力が直接伝達しないようにした.また、 アンカーボルトはコンクリートとビニールチューブを入れて付着を切って いることを考慮するため、線要素を用いてモデル化した.またアンカーボ ルトは2.12kNm/本のトルクで締め付けられているため、軸力に変換しプレ ストレス力として考慮した.

# 2.2 荷重条件

比較検討を行うために,静的・動的荷重での分析を行った.静的解析は, 図-2に示したようにタワー頂部に集中荷重として水平方向に30mmずつ強 制変位を与えた.動的解析は一定振幅の片振りの正弦波をタワー頂部に載 荷した.繰り返し回数は10万回としている.荷重の大きさは表-1に示す ように,静的載荷時のピーク荷重 F<sub>static</sub>に対応した値を選定した.

#### 3.静的解析結果

静的荷重下での最大耐力値は荷重 1000.3kN,回転角 0.0313rad,タワー頂 部の変位 576cm であった.また、ひび割れの進展、変形図よりコーン状破 壊が確認できた.(図-3)破壊のフローは既往の研究<sup>3)</sup>と概ね一致した.

#### 4.動的解析結果

アンカー部に着目した基礎の破壊形態に注目し詳細に分析を行った. 4.1 耐力と回転角

繰返し荷重下での基礎にかかる曲げモーメントとタワー基部のたわみ角

キーワード 風力発電支持物 疲労解析 動的載荷 低サイクル疲労 アンカーボルト 連絡先 〒162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33 TEL 03-5228-1406



図-2 解析モデル 表-1 動的荷重詳細

	荷重	繰り返し数
case1	F <sub>static30%</sub> (300kN)	
case2	F <sub>static40%</sub> (400kN)	100.000
case3	F <sub>static50%</sub> (500kN)	100,000
case4	F <sub>static60%</sub> (600kN)	



40000

30000 30000 20000

も 10000

図-4

(回転角)の関係を図-4に示す.図中に示した点は回転角が著しく 増加した点であり、タワーの倒壊と考えられる.たわみ角の増加は 400kN以上のケースでのみ確認された.このことより、静的載荷時 のピーク荷重の40%程度の大きさでも動的に繰り返し載荷される ことにより、風車タワーは破壊に至ることがわかる.一方40%に満 たない荷重では繰り返し回数を増やしても倒壊には至らなかった.

## 4.2 アンカーボルト応力変動

図-5(a)に 400kN 動的荷重下でのアンカーボルトの応力-STEP 関係を示す.引張側,中立軸位置,圧縮側の順にアンカーボルトの応力低下が見られた.ここで,引張側アンカーボルトの応力低下点と図-4 にプロットした点と一致していたことより,引張側アンカーボルトの応力挙動が風車タワーの倒壊に起因していると判断できる.また,図-5(b)に 600kN 時のアンカーボルトの応力-STEP 関係を示す.400kN 時と比較すると,すべてのアンカーボルトは同時期に応力低下が見られた.

#### 4.3 破壊機構

400kN と 600kN において, ひずみの進展と変形図より最終破壊形 態は静的載荷時と同様にコーン状破壊であると判断できる.しかし 荷重の違いによって, 破壊に至るまでの過程が異なることが分かっ た.図-6 にアンカー部の破壊時の変形図を示す.400kN では引張側 アンカーリングの引抜き後, 圧縮側アンカーリングの押し込みが生 じた.一方,600kN では除荷1回目の時点で,引張側アンカーリン グの押し込みが見られた.静的解析ではみられなかったアンカー部 の押し込みは, アンカーリング下面のコンクリートが載荷時におけ る引張力により破壊し,続く除荷時の圧縮力にアンカー部を支持す ることができなくなったためだと考えられる.つまり,動的荷重下 において, アンカーリング部界面のコンクリート要素が風車タワー の耐力に大きく影響する可能性がある.ここで異なる2つ破壊機構 を,400kN 時を破壊モードI,600kN 時を破壊モードIとした.



100 1000 繰り返し回数

荷重ー繰り返し回数曲線

10

図-7

Fstatio

0.02 たわみ角(rad)

曲げモーメントー回転角関係

Statio

600kN 500kN

400kN

300kN

100000

0.04

# 4.4 荷重一繰り返し回数関係

動的荷重と風車タワー倒壊に至るまでの載荷回数から荷重-繰り返し回数の関係を図-7に示す.この図から,近似線を引くことで破壊モードⅠ,Ⅱに対応する領域を分類することができた.本研究の検討条件では, 風車基礎の低サイクル疲労破壊は確認されたが,高サイクル疲労による破壊は確認されなかった.

# 5.結論

動的荷重下における風車タワーは,静的荷重におけるピーク荷重の4割程度の小さい荷重でも,繰り返し 載荷されることにより,低サイクル疲労の段階で風車タワーは倒壊する可能性が示唆された.

## 参考文献

1) 風車倒壞事故例:http://www.caithnesswindfarms.co.uk/fullaccidents.pdf

2) 土木学会: 風力発電設備支持物構造設計指針·同解説 2010

3) 松尾豊史,金津努,高原景滋,銘苅壮宏:台風14号による風車基礎定着部の破壊挙動に関する検討,コンクリート工学年次論文集, Vol.27,No.2,2005