法政大学 正会員 〇藤山知加子 学生会員 米津 薫 日本大学 正会員 子田康弘 学生会員 前島 拓 日揮㈱ 正会員 門 万寿男

1. はじめに

風車支持構造物の疲労破壊に対する照査のため、3次元非線形有限要素解析(FEM)による風車タワー・ 基礎一体モデルを用いた構造解析を行うことが想定される.そこで本研究では、既存の風車を対象とした FEM モデルを作成して構造解析を行い、得られたタワーの変形と基礎のひずみについて計測データとの比較 を行うことで、モデルの妥当性の検証を行うものとした.

2. 解析モデルの概要

2.1 解析対象構造物

本研究で対象としたのは、日本大学工学部構内(福島県郡山市)にある、タワーハブ高さ21.3[m]、定格発電力40kW級の小型風車である.基礎は、フーチング寸法6500×6500×1500[mm]、ペデスタル寸法2300×2300×1300[mm]のRC構造で、基礎内部に埋め込まれたアンカープレートとタワー基部フランジとが60本のM30のアンカーボルトで接合されている.

2.2 解析モデル概要

解析モデルの概要を図-1に示す.ナセル およびブレードの形状はモデル化せず,自 重のみタワー頂部に与えた.上下部工接合 部はコンクリートと鋼の間に境界面要素を 設定した.アンカーボルトはライン要素と し,締付けトルクをライン要素の初期ひず みとして与えた.アンカーボルト以外はす ベてソリッド要素でモデル化を行った.境 界条件として地盤のバネは考慮せず,フー チング底面の鉛直方向自由度を拘束した. 節点総数は48967,要素総数は44624とな った.主要な要素の材料諸元を表-1に示す.

3. 減衰定数の検討

3.1 風車自由振動計測による振動特性の 把握

人力加振による自由振動実験(図-2)を 行い,実構造物で得られる減衰定数を解析 に設定するものとした.タワー高さの1/3 程度の位置に取り付けたロープを外部から 引き,タワー頂部および中間部に設置した 高感度加速度センサで加速度波形を記録し た(図-3).これより,対象風車の固有振動



図-1 風車 FEM モデル

表-1 材料諸元

| | コンクリート | アンカーボルト | タワー鋼管 |
|------------|--------|---------|-------|
| ヤング係数[GPa] | 23.5 | 200 | 200 |
| 圧縮強度[MPa] | 21.0 | | |
| 降伏強度[MPa] | | 235 | 3250 |
| 引張強度[MPa] | 8.13 | 400 | 500 |
| ポアソン比 | 0.17 | 0.3 | 0.3 |

キーワード 風車,FEM,自由減衰振動,接合部,アンカーボルト

連絡先 162-0843 東京都新宿区市谷田町 2-33 法政大学デザイン工学部 TEL 050-3136-4675

数 1.8[Hz],また減衰定数 0.027 が得られた.

3.2 FEM モデル減衰定数の設定

FEM モデルの減衰定数は、実験を参照して 0.03 を設定した. モ デルのタワー頂部に水平方向に適当な外力を与えた後除荷して自由 振動を再現しところ、解析モデルで得られた固有振動数は 2.1[Hz] であり、実測よりもやや大きかった. 解析モデルではタワー開口部 の構造や発電設備の重量を考慮してないための差異と考えられる.

4. 応答再現解析

4.1 タワーの変形

対象風車の実測加速度から算出された強風時(2013 年 12 月瞬間 最大風速 26.6[m/s])のタワー頂部の水平変位は、0.5[cm]程度であっ た¹⁾. このときの 各部材の応答値を調べるため、FEMモデルのタワ ー頂部に水平方向に 5.0[mm]の強制変位を静的に与えた.変形図を 図-4 に示す. タワー基部の回転角は $\Phi_{\text{FEM}} = 3.2 \times 10^{-5}$ であった.

4.2 基礎コンクリート

このとき基礎コンクリートに生じている鉛直方向応力分布を図-5 に示す.上部工下端のフランジに接する接合部は曲げによる引張り 力よりも上部工自重の影響が支配的であり,ほぼ全域が圧縮状態で あった.次に,タワーから基礎接合部にかけての断面内の最小主応 力分布図を図-6に示す.曲げによるタワーの押し込みにより,基礎 コンクリート左側では 2.0[N/mm²]程度の圧縮応力が生じていた.コ ンクリート強度の 1/10 程度であった.

4.3 アンカーボルト

同様に、曲げモーメントが最も大きいと思われる位置のアンカー ボルトのひずみを図-7に示す. 頂部の変位 5.0[mm]に対するひずみ

(初期の締め付けトルクによるひずみを除いた増分)は 3.2[μ]であった.これは、実測で得られた値¹⁾よりも幾分大きかった.

5. まとめ

非線形有限要素解析を用いて実風車のタワーから基礎までをモデ ル化し,自由振動実験で得た減衰定数を与えた.また,このモデル に実測で算出されたタワーの変位を与え,タワーおよび基礎の応答 値を求めた.解析で得られた変形とアンカーボルトのひずみはいず れも実測値よりも大きかったが,実構造物の応答をおおむね再現で きたと考えられる.

今回解析で得られた応答値はいずれも小さかったが,実構造物で は正負交番荷重であることや環境作用に伴う材料劣化の可能性も含 め,引続き計測と解析によって耐疲労性能の検討も行う予定である. 謝辞:自由振動計測にあたっては日本大学コンクリート工学研究室 の学生諸子にご尽力いただいた.謝意を表する.

参考文献:1)米津ら:風力発電タワー振動長期計測に基づく基礎疲労照査のための作用の推定,第69回土木学会年次学術講演会,2014.9 (投稿中)



図-2 人力加振の様子



