

非線形 FEM を用いた風車基礎接合部におけるひずみ評価指標の検討

(株)コムスエンジニアリング 正会員○米津 薫 法政大学 正会員 藤山知加子
 日本大学 正会員 子田 康弘 学生会員 前島 拓

1. はじめに

非線形有限要素解析におけるコンクリートの破壊や損傷度評価の手法として、偏差ひずみ第 2 不変量や正規化累加ひずみエネルギーを領域内で空間平均化した損傷指標が提案されている¹⁾が、これらの評価式は 2 次元平面要素により検証された評価手法である。そこで本研究では、風力発電支持物のタワー基礎の 3 次元材料非線形解析モデルを構築し、単調載荷を受ける RC 製の基礎接合部を対象に、3 次元に拡張適用したひずみ評価指標による検討を行った。

2. 解析モデルの概要

2.1. 対象構造物

本研究で対象としたのは、筆者らが前報²⁾にて振動計測を実施した日本大学工学部構内の、ハブ高さ 21m、定格出力 40kW 級の小型風力発電設備 1 基である。鋼製タワーと基礎 RC はアンカープレートを介して 30×2 本の M30 のアンカーボルトにより接合されている。

2.2. 解析モデル概要

解析モデルの概要を図-1 に示す。解析モデルはソリッド要素によりモデル化を行い、ブレードやナセルに関しては形状が複雑であることから、タワー頂部の要素にその自重分を与えた。また、アンカーボルトに関しては線要素によりモデル化を行い、周囲のコンクリートとの付着を切った状態を再現し、ボルトの締付けトルクを初期ひずみとして導入した。また、接合部のアンカー材と基礎コンクリートの異種部材間には境界面要素を設定している。本解析モデルの節点数は 40707、要素数は 36780 となった。主材料諸元を表-1 に示す。

3. 平均化ひずみ評価指標の 3 次元立方体要素への拡張

齊藤ら³⁾は 2 次元平面コンクリート要素において、偏差ひずみの第 2 不変量 $\sqrt{J'_2}$ を任意の領域内で空間平均化することで要素寸法の影響が低減された指標を提案している。本研究ではこれを 3 次元要素に適用するために、それぞれの提案式を以下に示す式(1), (2)に拡張した。

$$\sqrt{J'_2} = \sqrt{-(\varepsilon_x \varepsilon_y + \varepsilon_y \varepsilon_z + \varepsilon_z \varepsilon_x) + (\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)/4} \quad (1)$$

$$\overline{\sqrt{J'_2}} = \frac{\int_V \sqrt{J'_2} \cdot w(x) dV}{\int_V w(x) dV}, \quad w(x) = \begin{cases} 1-x/L & x \leq L \\ 0 & x > L \end{cases} \quad (2)$$

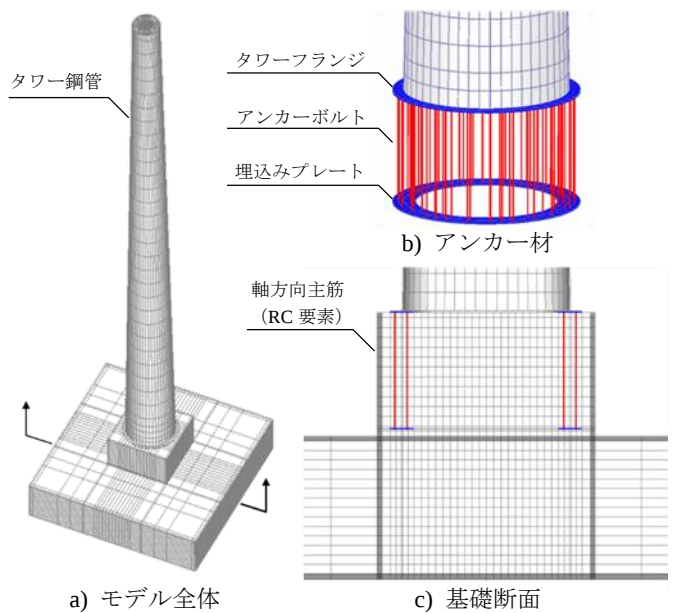


図-1 風車解析モデル

表-1 主材料諸元

	コンクリート	アンカーボルト	軸方向主筋(D25)
ヤング係数(GPa)	23.5	205	205
圧縮強度(MPa)	21	----	----
降伏強度(MPa)	----	235	345
引張強度(MPa)	8.13	400	517

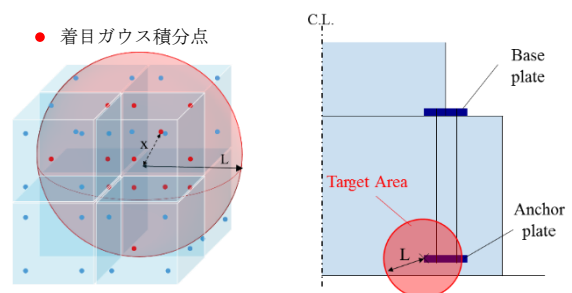


図-2 3次元要素ひずみ指標平均化概念図

キーワード 風車, 基礎 RC 接合部, 3 次元非線形有限要素解析, 損傷評価, 単調載荷解析

連絡先 113-0023 東京都文京区向丘 1-1-17 タカサキヤビル 6F TEL03-3868-0580

ここで、 $\sqrt{J_2}$ は式(2)により平均化された損傷指標であり、 $\sqrt{J_2}$ は局所的な評価指標である。また $w(x)$ は対象とするガウス点からの距離 x と平均化長さ L から算出される平均化における重みである。

4. 単調荷荷によるシミュレーション解析

4.1. 評価指標と損傷過程

タワー頂部に集中荷重として強制変位を与える単調載荷解析を実施した。図-3 に示すのは、平均化長さを 200mm とした時の平均化指標 $\sqrt{J_2}$ の変動曲線であり、同図にタワー基部の曲げモーメント M を埋込みアンカー材の回転角 θ で除することで算出した曲げ剛性 K_θ を示す。横軸はタワーの水平変位である。平均化指標 $\sqrt{J_2}$ と曲げ剛性曲線の勾配の変化点は両者で概ね一致している。さらに平均化指標 $\sqrt{J_2}$ は、1500 μ ~2000 μ 程度で値が急増しており、この時曲げ剛性はほぼ 0 であることが分かる。評価値が急増した時の風車基礎断面のひずみ分布を図-4 に示す。引張側のアンカープレートを起点に水平方向と軸方向主筋に沿った主ひずみの進展が見られ、ひずみの値からも引張側の損傷度が大きく、風車基礎の限界状態であると判断できる。

本研究における平均化指標の限界値はコンクリート標準示方書⁹⁾において、斜め引張破壊の限界値として与えられている 1000 μ よりも大きい値となった。これは、本研究のアンカーボルト方式風車接合部は梁や柱といった一般的な構造部材との配筋状況の違いや、アンカーボルトとプレートを経た荷重の伝達機構の違いによるものだと考えられる。

4.2. 平均化長さのパラメトリックスタディ

平均化領域を設定するにあたり、平均化長さ L による影響度を検証した(図-5)。平均化長さが一定以上になると、損傷指標への影響は小さいが、平均化長さが極端に小さいと、ひずみが急増する限界値が過大となる結果となった。つまり、示方書に対応した限界値による照査を行う場合、適切な平均化長さを設定しなければならないといえる。

5. まとめ

実風車基礎 RC 部を対象とし、提案されたひずみ評価指標を 3 次元に拡張適用し損傷度評価を行った。その結果、ひずみ評価指標でも風車基礎の限界状態を評価することが可能であるが、限界値は示方書の基準値よりも大きくなる傾向を示した。また、平均化長さは損傷領域を十分に包含する必要があるが、対象風車においては、200mm 程度が妥当であることが示唆された。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編]，pp. 480-482, 2012.
- 2) 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.
- 3) 齊藤ら：非線形有限要素解析による RC はり部材の損傷評価，土木学会論文集 E2, Vol. 67, No. 2, pp. 166-180, 2011.

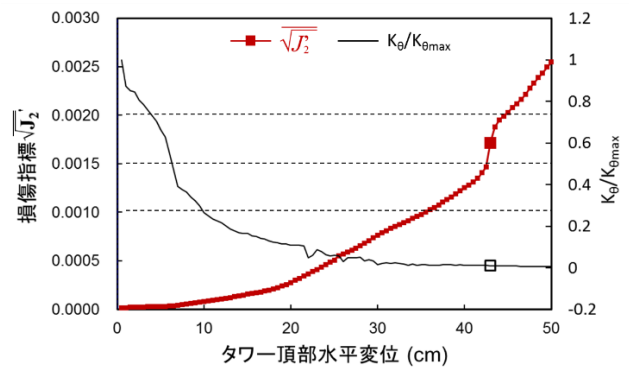
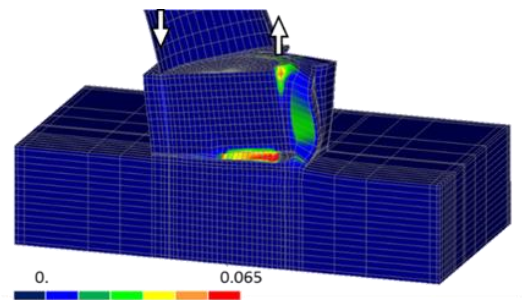
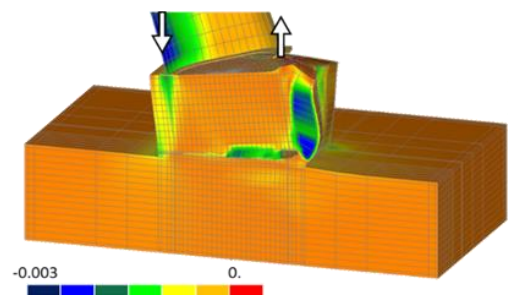


図-3 損傷指標と基礎曲げ剛性の変動



a) 最大主ひずみ分布 (変形倍率×50)



b) 最小主ひずみ分布 (変形倍率×50)

図-4 評価値急増時の基礎断面のひずみ分布

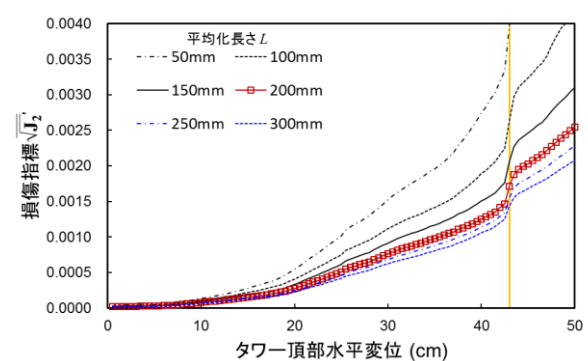


図-5 平均化長さ L による感度分析結果