

発電用大型風車のアンカーボルト式基礎の設計に関する考察

三井造船株式会社 正会員 ○松本 巧, 南 陽一, 岩崎 博

1. まえがき

現在, 日本国内で建設されている発電用大型風車は, 風車本体(ナセル, ハブ, 3枚ブレード)を鋼製円筒形状のタワー頂部, 地表面からの高さ 60m~90m 程度に設置し, タワー脚部をコンクリート基礎に固定させる要領である。タワーとコンクリート基礎の固定は, 図-1 に示すようにタワー鋼製円筒をコンクリート基礎に埋め込む形式と鋼製円筒タワーのベースプレートにアンカーボルトを用いる形式がある。アンカーボルト形式では, アンカーボルトにプレストレスを与えることで, ブレードの回転によるタワーの振動がコンクリート基礎に伝達するのを低減させて, アンカーボルトの疲労寿命を延ばす効果が期待できる。しかし, アンカーボルトにプレストレスを与えることで, 基礎コンクリートに鉛直方向の圧縮応力が入る一方, 水平方向に引張応力が入ることが危惧される。本報告では, アンカーボルト形式において, アンカーボルト近傍の応力状態を FEM 解析で求めた上で考察を加え, 基礎コンクリート部の配筋に関して補強案を提案する。

2. 風車基礎の設計

発電用風車に用いるアンカーボルト式基礎は, アンカーボルトの軸に PVC 管等を用いたさや管を取り付け, コンクリートとの付着力を無くしたアンボンドアンカー形式が用いられる。基礎のコンクリートを打ち込み, コンクリート硬化後にアンカーボルトにプレストレス力を与え固定する。国内・海外共に陸上に設置される風車では, 道路輸送上の理由で円筒形タワーの最大径は, タワーの高さに関係なく 4.5m 程度となっている。その結果, アンカーボルト相互間の水平距離は小さくなり, 密なアンカーボルト配置となる。この密な配置の中で, ボルト軸方向引張強度の 70%以上のプレストレス力を導入する。タワーが受ける風等の水平荷重により, タワー基部には転倒曲げモーメントが発生し, これを図-2 に示すように鋼製円筒縁で軸力に置き換える。外力によるタワーの転倒曲げによる圧縮力はタワーのベースプレートから基礎上面へ, 引張力は埋め込まれたアンカープレートから基礎コンクリートに伝達される。一般に鉄筋コンクリート構造の設計では, 引張力はコンクリートに負担させず鉄筋に負担させる。プレストレス力を与えたアンカーボルトの近傍における基礎コンクリートの応力を FEM 解析により調査した。

3. 解析

本解析では発電規模 1.5MW 級の風車を想定し, 図-3 に示すように, ブレード直径 70.5m, タワー高さ 60m, タワー鋼製円筒最大直径 3,750mm と設定した。この構造諸元から, 基礎コンクリートは 11m×11m×2m, ペDESTAL 高さ 1.5m とした。アンカーボルト近傍は, 図-2 に示すベースプレート厚 70mm, アンカープレート厚 40mm, アンカーボルトサイズ M36, アンカーボルト本数 60 本×2 列で, アンカーボルト 1 本当たり 343kN のプレストレス力を全アンカーボルトに導入した。

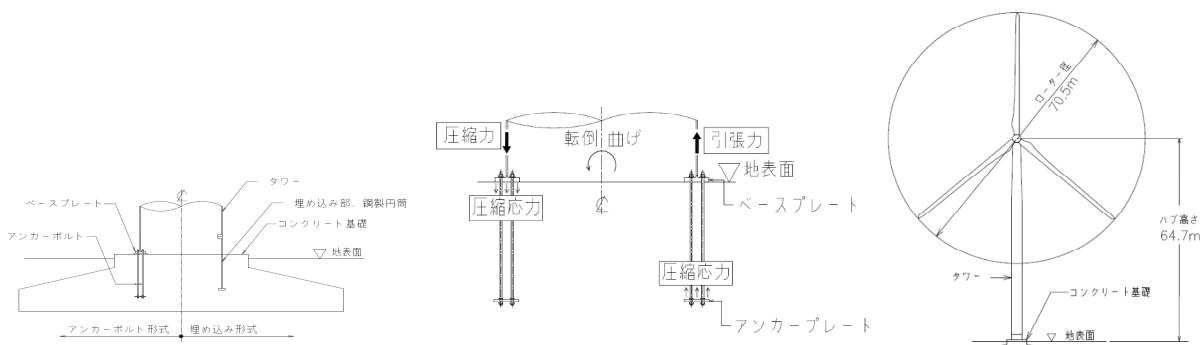


図-1 基礎の定着形式

図-2 タワー転倒曲げモーメントの伝達要領

図-3 解析対象の風車寸法

キーワード: 発電用大型風車, アンカーボルト

連絡先 (〒261-7128 千葉県千葉市美浜区中瀬 2-6-1, TEL: 043-351-9266, FAX: 043-351-9269)

FEM 解析では風車の前後 1/2 に対応する基礎コンクリートを対象とした。コンクリート部の FEM モデルを図-4 に、ベースプレート、コンクリートに埋め込まれるアンカーボルト及びアンカープレートの FEM モデルを図-5 に示す。鋼材のヤング率は $2.05 \times 10^5 \text{MPa}$ 、ポアソン比は 0.3、コンクリート部のヤング率は鋼材の 1/8、ポアソン比は 0.15 と設定した。鋼材とコンクリートの弾性域で解析し、コンクリート部には鉄筋を含んでいないものと仮定した。荷重条件としては、図-6 に示すアンカーボルトにプレストレスを導入した状態 (Case1) と図-7 に示すように更に発電時の長期荷重を加えた状態 (Case2) の 2 ケースについて、アンカーボルト近傍の応力を解析ソフト MSC/NASTRAN を用いて解析で求めた。

図-8、図-9 にそれぞれ Case1 と Case2 でのアンカーボルト近傍に発生する応力分布を示す。Case1 においてベースプレート直下とアンカープレート直下でのコンクリート部に引張応力が発生しており、ベースプレート直下ではすでに 2.5MPa を超えている。長期荷重を加えた Case2 では更に引張応力域が増大する。

4. 引張力に対する対策

図-8、図-9 に示す応力状態を、図-10 に単純化した応力線で示す。発生した引張応力からアンカーボルト近傍にひび割れが発生することが懸念される。予想されるひび割れに対する対策案として、ベースプレートとアンカープレート間に水平方向鉄筋、アンカープレート周辺に鉛直方向鉄筋を追加することを提案する。アンカーボルトに沿った放射状の水平方向鉄筋と円形フープ鉄筋とにより水平方向の引張力を負担させ、アンカープレート近傍の垂直方向の引張力にはアンカーボルト両端の鉛直方向鉄筋に負担させた配筋形態を図-11 に示す。著者らは、実際に 1.5MW の風車基礎において、図-11 で提案する配筋を設計の上、施工した。アンカーボルト近傍の配筋形態を図-12 に示す。現場において問題なく施工可能であった。アンカーボルト近傍のコンクリートに発生するひび割れが防止できると期待している。

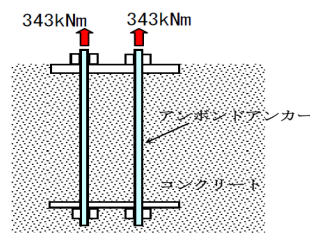
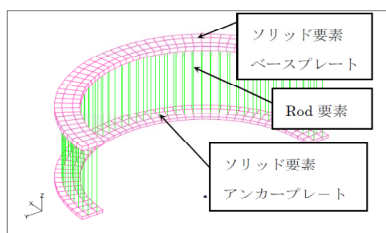
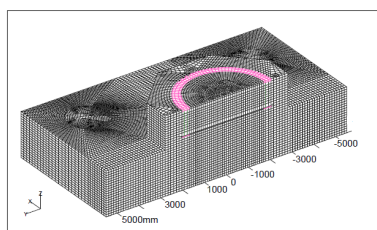


図-4 基礎コンクリートの FEM モデル 図-5 アンカーボルト周辺の FEM モデル 図-6 アンカーボルトのプレストレス

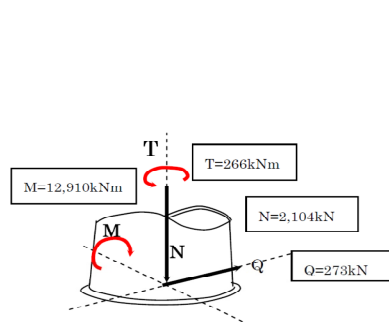


図-7 長期荷重

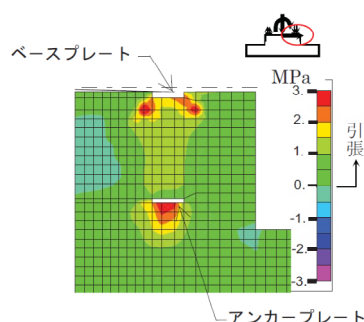


図-8 Case-1 の応力分布(MPa)

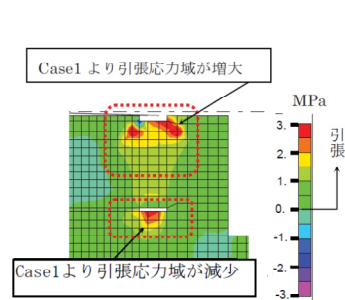


図-9 Case-2 の応力状態(MPa)

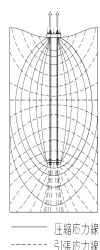


図-10 応力線図

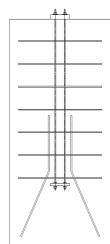


図-11 アンカーボルト近傍の補強配筋

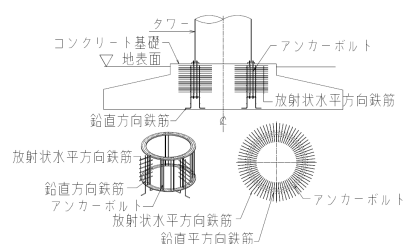


図-12 提案する配筋形態