

洋上風車タワ一定着部の耐荷力解析と風車タワーの終局挙動

鹿島建設(株) 正会員 ○山沢 哲也
鹿島建設(株) 正会員 一宮 利通

鹿島建設(株) 正会員 沖見 芳秀
東京電力(株) 正会員 福本 幸成

1. はじめに

図-1 に示すように、対象とした洋上発電設備支持物構造(以下“洋上風車タワー”という)の基礎定着部は、(1)施工上の制約から中詰め材の投入のため中空構造となっていること、(2)PC 構造であることの2点から「風力発電設備支持物構造設計指針・同解説(土木学会, 2007)」¹⁾による基礎の抜出し耐力推定式の適用範囲外となっている。このため、洋上風車タワーの基礎の設計では、実物を対象として基礎定着部の抜出し耐荷挙動解析を実施し、所要の耐力を有することを確認した。

ここでは、解析手法の妥当性を確認するために実施した①洋上風車タワーの基礎定着部の抜出し挙動に着目した構造実験²⁾の再現解析、②洋上風車タワーの全体構造の耐荷挙動解析について述べる。

2. 解析モデル

図-2 に①定着部の解析モデルを、図-3 に②全体系の解析モデルを示す。解析には、コンクリート部材のひび割れを考慮できる COM3d version 2008³⁾を用いた。いずれの解析モデルも、半断面をモデル化し、RC コンクリート部は、鉄筋配置を考慮してメッシュを分割した。

ベースプレートとグラウトとの間の摩擦係数は0.50とした。アンカーボルトは線要素でモデル化し、締め付け軸力は初期ひずみで与える。基礎頂部に配置されている円周方向のPC鋼材については、定着部のモデルでは構造実験と同様に考慮していない。また、定着部の解析モデルでは、構造実験における境界条件を再現するため、モデル底面は全自由度を固定した。全体系モデルでは、実際の基礎設置状況を考慮し、接合要素を配置して剥離を表現できるようにしたケースも実施した。

材料物性は、①定着部の解析モデルでは、材料実験値またはミルシート記載の数値を用い、材料係数は鋼・コンクリート部材ともに1.0とした。②全体系モデルでは、材料規格値を用い、コンクリート部材については、材料係数 $\gamma_m=1.3$ とした。

荷重は、自重 w_g 及びプレストレス荷重 P_s をまず载荷し、続いてL2地震時設計鉛直荷重 F_z をダミータワー頂部の载荷点に作用させる。その後载荷点を水平方向に変位制御で F_H (L2地震時設計荷重=2700kN)、 F_M (L2地震時設計荷重=100.0MN・m)の比率を保って漸増载荷する。ねじりモーメントは考慮しない。

3. 定着部の抜出し挙動

①定着部の解析モデルについて、タワー最下部の部材回転角と曲げモーメント M との関係を図-4に示す。

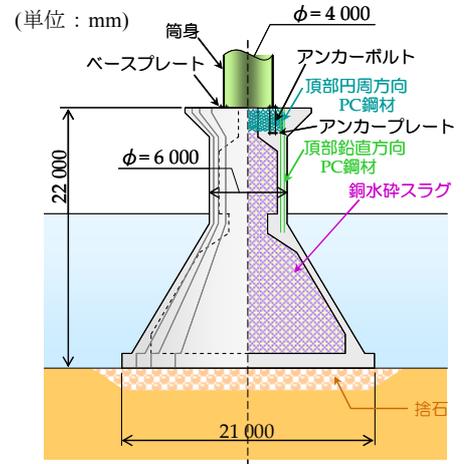


図-1 洋上風車タワーの基礎の概略図



図-2 ①定着部の解析モデル

図-3 ②全体系の解析モデル

キーワード 風車, 定着部, アンカーボルト, 抜出し耐力, ひび割れ, 風力発電設備支持物
連絡先 107-8502 東京都港区赤坂 6-5-30 鹿島建設(株)土木設計本部

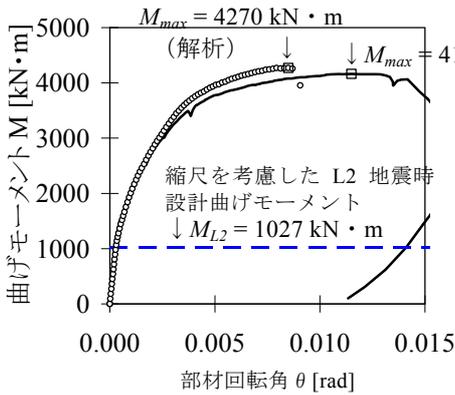


図-4 タワー最下部の曲げモーメント-回転角関係

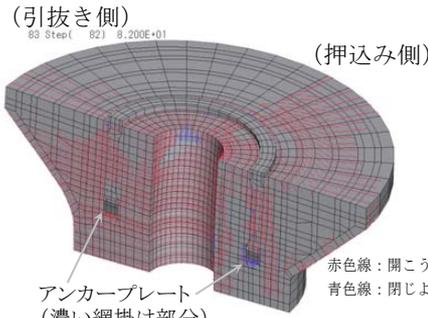


図-5 ひび割れ分布図 (最大荷重時 $M=4270\text{kN}\cdot\text{m}$)

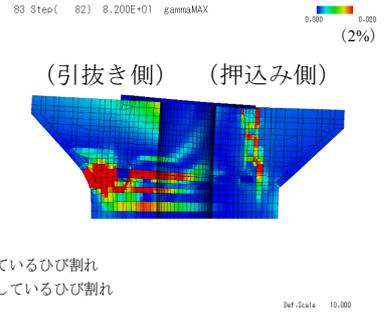


図-6 最大せん断ひずみ分布図 (最大荷重時 $M=4270\text{kN}\cdot\text{m}$)

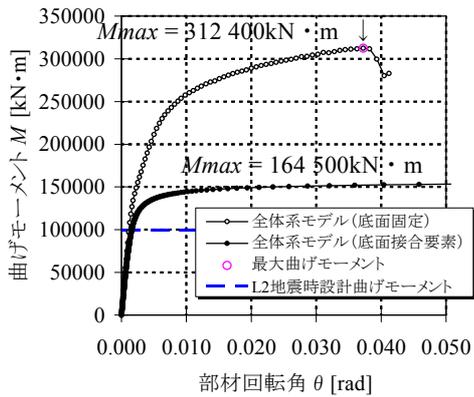


図-7 曲げモーメント-回転角関係 (θ が大きい範囲の図示を省略)

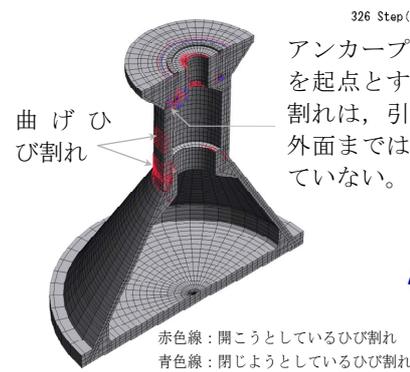


図-8 ひび割れ分布図 (L2 地震設計荷重時 $M=100.0\text{MN}\cdot\text{m}$)

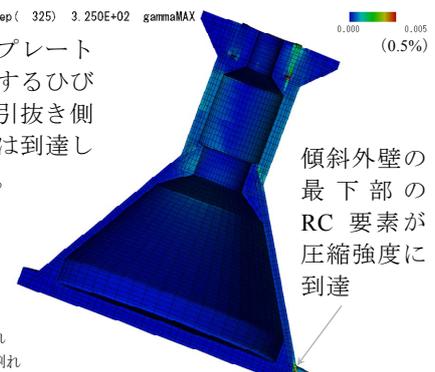


図-9 最大せん断ひずみ分布図 ($M=160.5\text{MN}\cdot\text{m}$)

解析と実験とを比較すると、両者は約 $3000\text{kN}\cdot\text{m}$ (引抜き側のせん断補強鉄筋の降伏前後) まではよく一致している。その後も、実験値の方がやや回転角が大きい挙動となっているが、最大曲げモーメントの値は、実験値の $4163\text{kN}\cdot\text{m}$ に対して解析値は $4270\text{kN}\cdot\text{m}$ とほぼ一致した。これは縮尺を考慮した L2 地震時設計曲げモーメント ($1027\text{kN}\cdot\text{m}$) に対して、いずれも 4 倍以上の値である。

図-5 に最大荷重時のひび割れ分布図を示す。引抜き側・押込み側ともにひび割れの方向は、実験とよく一致した。また図-6 に、最大荷重時の最大せん断ひずみ分布図を示す。引抜き側ではアンカープレートを起点として、内側には水平方向に、外側には水平方向だけでなく 45 度方向にもひずみが大きい領域を確認できる。曲げモーメントの増大に伴い、中立軸が移動するため引抜き側の最大せん断ひずみが大きい領域は、徐々に円周方向へ拡がり、最大荷重時には押込み側の内壁にまで達している。押込み側は、ベースプレート近傍の要素のひずみが大きい。また、放射方向鉄筋が配置されている場所ではひずみは小さいが、その間ではひずみが大きい。これは放射方向鉄筋が、ベースプレート下の圧裂ひび割れに対して抵抗していることを意味している。総じて、COM3d による解析は、構造実験をよく再現できている。

4. 全体系の崩壊挙動

②全体系の解析モデルについて、図-7 にタワー最下部の部材回転角と曲げモーメント M との関係を示す。底面に接合要素を配置し、剥離を考慮できるケースでは、基礎の転倒が崩壊挙動に支配的であった。図-9 に示すように、 $M=160.5\text{MN}\cdot\text{m}$ で傾斜外壁の最下部の RC 要素が圧縮強度に達し、 $M=164.5\text{MN}\cdot\text{m}$ で荷重が上昇しなくなった。一方、基礎底面を全自由度固定としたケースでは、鉛直外壁の曲げ降伏が終局強度に支配的で、最大曲げモーメントは $312.4\text{MN}\cdot\text{m}$ となった。尚、洋上風車タワー筒身の初降伏は、 $147.5\text{MN}\cdot\text{m}$ で生じる。

図-8 に、L2 地震設計荷重時 ($100.0\text{MN}\cdot\text{m}$) のひび割れ分布図を示す。鉛直外壁に曲げひび割れは生じているものの、アンカープレートを起点とするひび割れは、引抜き側外面までは達していない。以上のように、中空構造を有する洋上風車タワーの基礎定着部について、抜出し耐力が十分あることを確認することができた。

参考文献 1) 構造工学シリーズ 20 : 風力発電設備支持物構造設計 指針・同解説 (2007 年度版), 土木学会, 2007.
 2) 平・一宮・宇佐美・坂田・福本 : 洋上風車重力式基礎におけるタワー接合部の引抜き載荷実験, 第 68 回土木学会年次学術講演, 2013.
 3) Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A. : Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON PRESS, 2003.