

FEM 非線形解析に基づく風車基礎接合部の力学的挙動の解明

(株)コムスエンジニアリング	正会員	○土屋	智史
東京大学大学院	正会員	本庄	勇治
東京大学大学院	正会員	石原	孟

1. はじめに

風力発電設備は、鋼製アンカーボルト（またはアンカーリング）を介して、鋼製タワーとコンクリート製基礎接合部（ペデスタル）が継手構造として接続されている。トップヘビーの構造物であることから、強風や地震荷重作用時等にはペデスタルに大きな荷重が作用し、複雑な応力状態となる。ペデスタルの引抜き耐力の照査は風力発電設備支持物設計指針・同解説に提案されている設計式¹⁾が用いられているが、ペデスタルの寸法・形状、配筋位置、コンクリート強度等のパラメータが引抜き耐力に影響を与える可能性がある。本研究では、ペデスタルのアンカーボルト抜け出しを対象に FEM 解析を行い、ペデスタル荷重作用時の力学挙動について検討する。

2. 解析手法とモデル化

本研究では、既往の実績を踏まえて解析ツールとして COM3d²⁾を用いるが、ここで改めて模型実験³⁾を対象とした事後解析を行い、本解析手法の妥当性と予測精度を検証する。モデル化は、既報⁴⁾による方法を踏襲し、変位制御による単調載荷（強制変位量一定）を行った。その結果、図-1 のモーメント-回転角関係は概ね一致しており、最大耐力が精度良く評価されている。さらに、アンカープレートと同高位置での鉄筋のひずみ挙動は、外側鉄筋、内側鉄筋ともに、全体的な挙動が良く追跡できていることが確認できた。破壊モードについても、解析の主ひずみコンター図と実験のひび割れ図が良く対応していることが分かる。

以上を踏まえ、次章以降にて、本解析手法を用いた風車基礎接合部の詳細な力学的挙動の検討を行う。

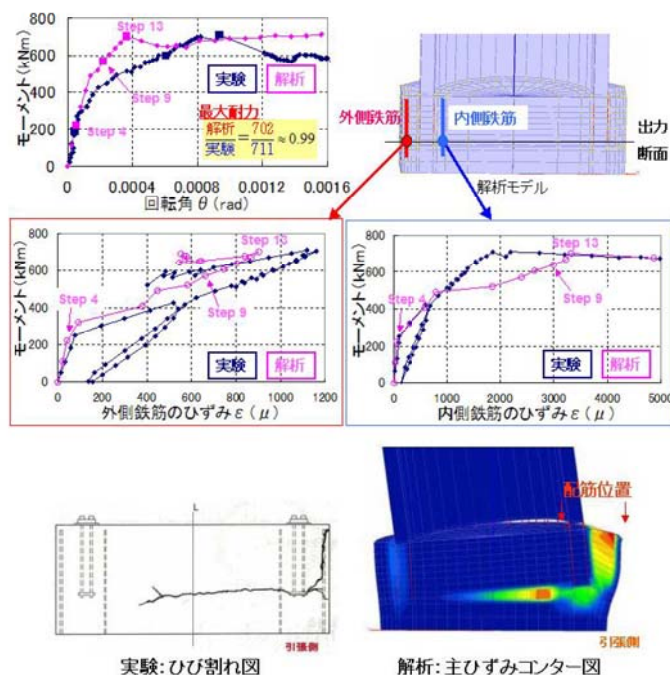


図-1 1/4 模型実験と解析結果の比

3. 無筋ペデスタルの耐荷性状

まず初めに、無筋コンクリートを対象とした解析を行うと、アンカープレート近傍から進展した水平方向の輪切り状のひび割れに伴って破壊に至る（図-2）。アンカープレート同高位置で、1/2 対称面近傍におけるコンクリートひずみ挙動を追跡すると、載荷に伴って引張側アンカープレート近傍のコンクリートから水平方向に徐々にひび割れが伝達され、ひび割れが引張側コンクリートの外縁に到達した後に耐力低下に至る。それ以降は円周状に配置されたアンカープレートに沿って応力の再配分を行って、中立軸を移動しながら外力に抵抗している。

4. 有筋ペデスタルの耐荷性状

続いて、有筋コンクリートを対象とした解析を行うと、載荷初期には無筋のケースと同様に、コンクリー

キーワード 風力発電設備支持構造物、ペデスタル、アンカーボルト、三次元 FEM 解析、引抜き破壊挙動
連絡先 〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1 E-mail: ishihara@bridge.t.u-tokyo.ac.jp

トが圧縮力と引張力を受け持ち、釣り合いを取っている。その後、水平方向の輪切り状のひび割れが進展し、円周状に配置した鉛直方向の鉄筋(せん断補強筋)が引張力を受け持つ耐荷機構を形成することを確認した。最終的な耐力と変形性能および破壊モードは、配筋量、鉄筋位置、(特に外周部の)コンクリートボリューム、アンカープレートとの埋め込み深さ等で決まる。

モーメント-回転角関係の一例を図-3に示す。同形状で鉄筋の有無だけを変化させた感度解析の結果も併記した。耐力低下に至るまでは無筋のケースと同様の結果となっており、有筋のケースでもほぼ同じ荷重時に一旦ピークがあらわれる。その後、適切な配筋がなされた場合には、鉄筋が引張力に抵抗することで再度耐力が上昇し、最終的なピーク値を取った後に、破壊に至る。ここでは、最初のピーク値を弾性耐力あるいはひび割れ耐力と定義し、最終的なピーク値を限界耐力と定義する。弾性耐力(ひび割れ耐力)は、上述のように、無筋のケースに近似できると考えられる。使用限界状態には弾性耐力(ひび割れ耐力)を、破壊に対する安全限界状態には限界耐力を設定するのが相応しいと思われる。なお、通常採用されている風車のペデスタルの構造諸元では、限界耐力が弾性耐力に大きく上回ることはない。

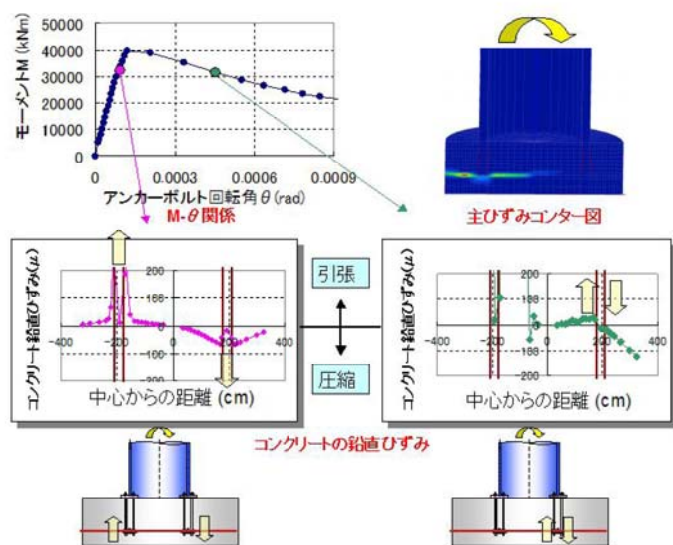


図-2 無筋ペデスタルのひずみ分布

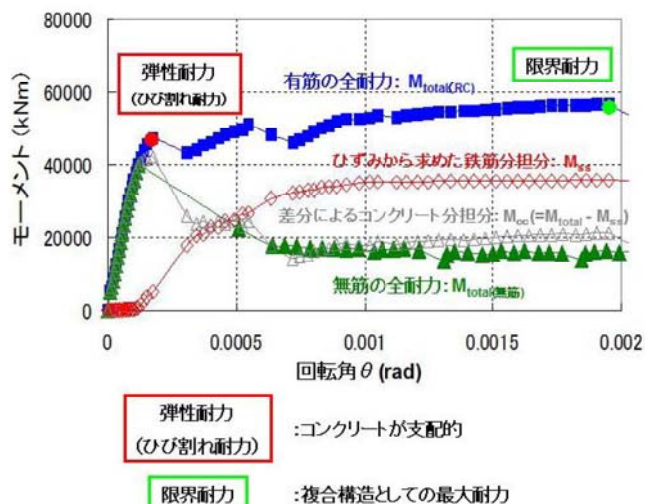


図-3 有筋ペデスタルのM-θ関係の一例

5. まとめ

本研究では、ペデスタルのアンカーボルト抜け出し時の力学挙動について、数値解析的に検討した。また、これに基づき、破壊と損傷の進展に対応付けた弾性耐力(ひび割れ耐力)と限界耐力を定義することを提案した。限界耐力については、鉄筋のペデスタルの抜け出しに対する効果が複雑であることを踏まえた耐力評価式の提案は合理的であると考えている。すなわち、単純に無筋コンクリートの耐力値に鉄筋負担分を加算するのではなく、弾性耐力(ひび割れ耐力)後のコンクリートの低下度合いと鉄筋の効果度合いを勘案することが望ましい。今後本研究により明らかにされた風車基礎接合部の力学的挙動に基づき、耐力の評価式を提案していく予定である。

謝辞 本研究に際しては東京大学大学院前川宏一教授に御助言を賜った。ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 土木学会：風力発電設備支持物構造設計指針・同解説 [2007年版]，構造工学シリーズ17，2007.11
- 2) Maekawa, K., Okamura, H. and Pimanmas, A.: Nonlinear Mechanics of Reinforced Concrete, SPON PRESS, 2003.
- 3) 小松崎勇一他：風車基礎ペデスタルの引抜きせん断耐力に関する実験的検討，土木学会第63回年次学術講演会講演概要集，土木学会，2008.9
- 4) 齋藤修一他：風車基礎ペデスタルの引抜きせん断耐力に関する解析的検討，土木学会第63回年次学術講演会講演概要集，土木学会，2008.9