

モノパイル式洋上風車 (IEA15MW) グラウト接合部の FEM 解析

大成建設(株) 正会員 ○森田 成人 仁井田 将人 笠井 康裕 小尾 博俊

1. 背景

日本の仮想サイトにおける、モノパイル式洋上風車に対する試設計を行った。試設計のうち TP (トランジションピース) と MP (モノパイル) の接合部に対する検討について報告する。

対象風車は、日本でも今後風車が大型化することが予想されるため、IEA Wind Task 37 15MW¹⁾とした。接合形式として、グラウト、ボルト、スリップジョイント、TP レスの4種類が考えられるが、本検討ではグラウト接合を対象とした。統一的解説²⁾の記述より、グラウト接合形式の照査は DNV 指針³⁾に基づいて照査する。DNV 式のうち、SCF (応力集中係数) の適用範囲は、鋼管半径 2250~3250mm、板厚 50~100mm となっており、15MW クラスの風車を対象とした場合、TP、MP のサイズが適用範囲外となる。本検討では FEM 解析を行い、DNV 式の適用性について確認した。なお今回の検討で用いた部材諸元等は、今後の風車大型化を踏まえ、国内の流通性が確保されるものとした。

2. FEM 解析

2.1. 解析モデル

解析には Abaqus (2018) を使用した。FEM 解析モデルは図 1 に示す様に、対称性を考慮した 1/2 モデルとした。MP、TP、グラウトは 6 面体要素でモデル化を行った。DNV 指針⁴⁾に準じ、メッシュ分割は板厚方向に 3 分割とし、アスペクト比は接合部を 1:1.5、それ以外を 1:5.0 とした。地盤バネは考慮せず、仮想固定点位置で完全固定とした。設計用外力は、別途 Bladed v4.9 での荷重連成解析により算定した。解析は自重及びタワー鉛直荷重を載荷した後、設計上の曲げが最大となる暴風波浪時のモーメントとせん断力を TP 上端位置に漸増載荷させた。鋼管およびグラウトの境界面は、接触および摩擦を考慮、付着力は考慮しないものとした。その他の解析条件は以下のように設定した。

- ・鋼材：バイリニアモデル、降伏後の剛性を 1/100

キーワード 洋上風力、モノパイル、グラウト接合、FEM、Abaqus、Bladed

連絡先 〒163-0606 東京都新宿区西新宿 1-25-1 大成建設(株)土木本部土木設計部洋上風力設計室 TEL03-6882-0792

- ・グラウト：コンクリート損傷塑性モデル³⁾
 - ・摩擦係数：0.7
- 部材諸元は以下のように設定した。
- ・鋼材種別：SM520, $E=2.05 \times 10^8 \text{kN/m}^2$, $\nu=0.3$
 - ・グラウト材： $f'_{ck}=90 \text{MPa}$, $f_t=9 \text{MPa}$ (MasterFlow 9800)
 - ・MP：外径 10.0m, 厚さ 110mm
 - ・MP 接合部外径：9.9~10.0m, 厚さ 110mm
 - ・TP：外径 10.0m, 厚さ 83mm
 - ・MP 接合部外径：10.0~10.6m, 厚さ 83mm
 - ・グラウト接合部：厚さ 195mm, テーパー角度 1°

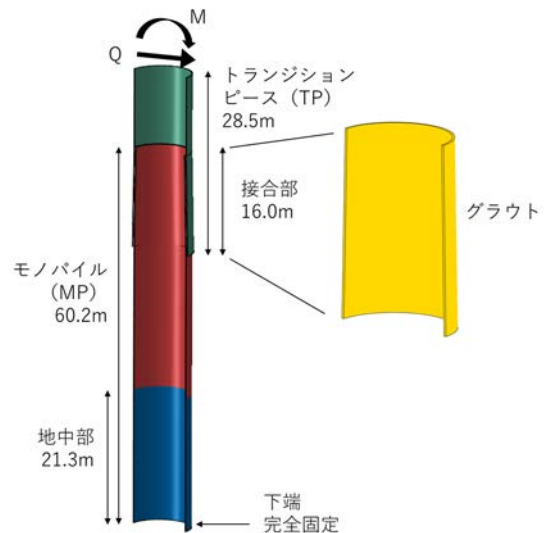


図 1 全体図・グラウト部拡大図

2.2. 解析結果

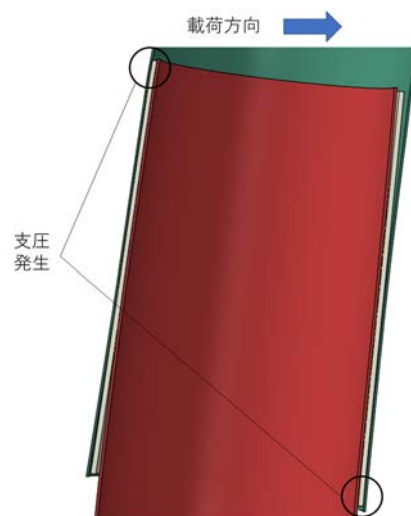


図 2 変形図 (20倍)

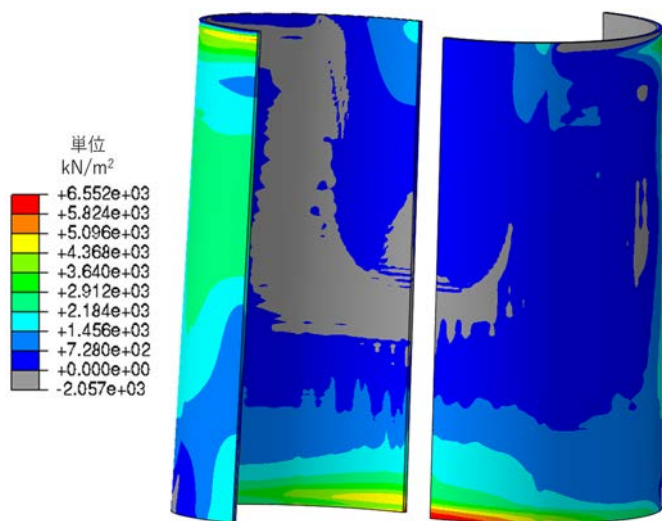


図 3 引張側最大主応力コンター

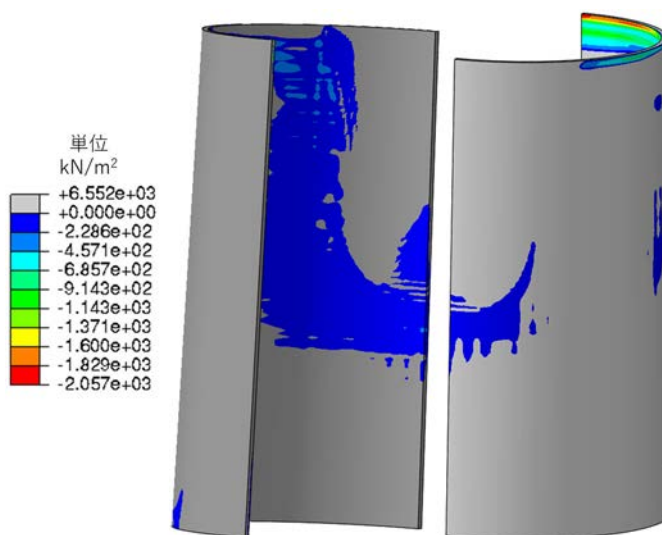


図 4 圧縮側最小主応力コンター

図 2 に変形図，図 3 に引張側最大主応力コンター図を示す．荷重方向側では上端部，荷重方向反対側では下端部において図心側に押し込まれ，ポアソン効果によって，周方向引張が生じている．図 4 に圧縮側最小主応力コンター図を示す．図 3，図 4 より本検討ではグラウトの非線形性を考慮したが，塑性域に達しなかった．

荷重側および荷重反対側端部位置における，半径方向応力度（半径方向 3 要素平均値）の高さ方向分布を図 5，図 6 に示す．本検討では既往論文⁵⁾と同様に，接合部内で伝達される支圧応力はグラウト材の半径方向応力度と対応するものとした．荷重側では上端部，荷重反対側では下端部にそれぞれ応力集中がみられる．支圧応力について，DNV 式と FEM 結果の比較を表 1 に示す．DNV 式の方が保守的な結果となることを確認した．

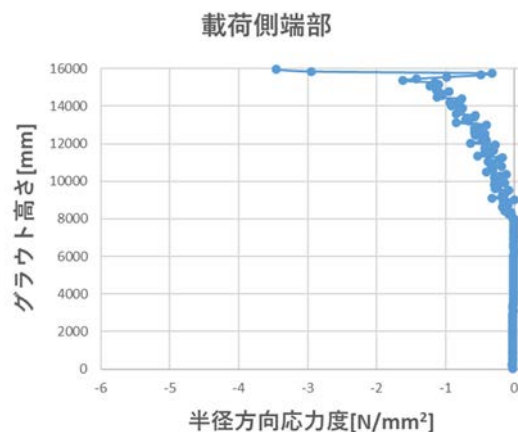


図 5 半径方向応力度の高さ方向分布（荷重側）

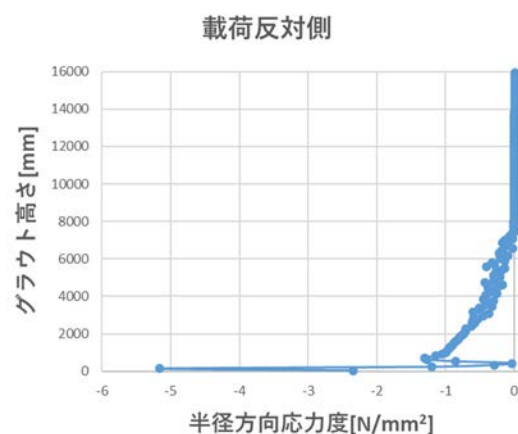


図 6 半径方向応力度の高さ方向分布（荷重反対側）

表 1 DNV 式と FEM 結果の比較

支圧応力 (N/mm ²)	DNV 式	FEM 結果 (荷重側)	FEM 結果 (荷重反対側)
		9.5	3.5

3. まとめ

本検討より概略設計であれば，杭が大型化されても DNV 式を用いて保守的に設計することが可能であることが確認できた．他の接合形式についても今後検討を行う予定である．

【参考文献】

- 1) International Energy Agency : <https://iea-wind.org/task37/>
- 2) 洋上風力発電施設検討委員会：洋上風力発電設備に関する技術基準の統一的解説（令和 2 年 3 月版）
- 3) Det Norske Veritas : Support structures for wind turbines, DNV-ST-0126, Edition : Dec, 2021
- 4) Det Norske Veritas : Analysis of grouted connections using the finite element method, DNV-RP-0419, Edition : Sep, 2016
- 5) 石井 大吾 嶋田 健司：モノパイル式洋上風車のグラウト接合部の耐力評価，平成 24 年 11 月 28 日第 34 回風力エネルギー利用シンポジウム