

15MW 洋上風車 MP 基礎におけるグラウト接合部のモデル化手法に関する比較検討

大成建設(株) 正会員 ○芝村 裕人 笠井 康裕

1. 背景・目的

洋上風車の MP (モノパイル) 基礎の設計では、風荷重・波荷重等を考慮した連成解析を実施するのが一般的である。グラウト接合部を含めた構造全体系は梁要素でモデル化されるが、MP 基礎のグラウト接合部に対する剛性設定手法は基準等に明記されていない。統一的解説¹⁾では、DNV 指針²⁾等に基づき、連成解析より得られた応答を用いてグラウト接合部の照査を行うとある。しかし、梁モデルに対する剛性の設定方法に関する記述は乏しく、詳細設計ではソリッド要素等を用いた詳細モデルで照査式の適用性を検証する必要があると示されているのみである。森田ら³⁾は、DNV 照査式の適用性を確認するため、3次元 FEM (以下、3D 詳細モデルと称す) による試設計結果を報告している。

本稿では、森田らと同じ IEA 15MW 風車⁴⁾の MP 基礎に対して、梁モデルでのグラウト接合部の剛性を変えた試解析と 3D 詳細モデルの結果を比較した。

2. FEM 解析

2.1. モデル概要

解析モデルを図 1 に示す。

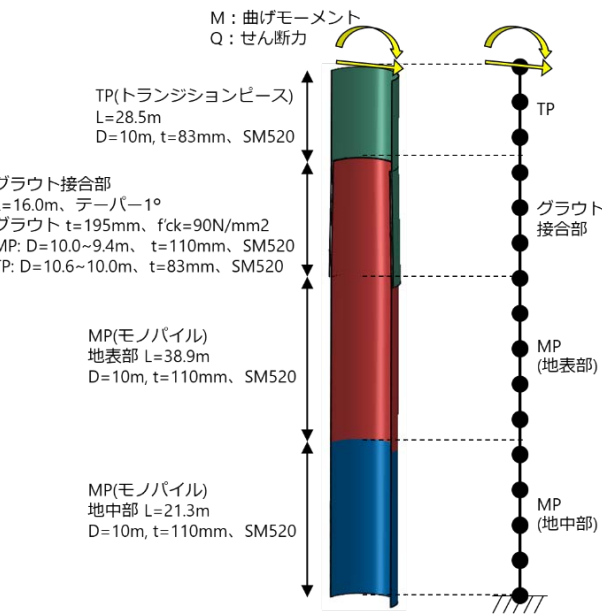


図 1 解析モデル (左:3D モデル³⁾, 右:梁モデル)

解析コードは TDAPIII を使い、線形梁要素でモデル化する。要素分割、径、板厚、ヤング係数、ポアソン比は 3D 詳細モデルと同一となるように設定した。仮想固定点を固定端とし、荷重は TP (トランジションピース) 上端に、ULS 時におけるタワー基部の断面力を設計用外力として段階的に載荷した。

2.2. 検討ケースと参照基準

検討ケース (表 1) は、国内外の基準に示される等価剛性 (等価板厚) の換算式より設定した。

ここで、I は断面二次モーメント、t は板厚、添え字にて TP 部、グラウト部、MP 部を表し、case4 における等価板厚換算式は主管を TP と考えて等価剛性を計算している。

表 1 検討ケース

	グラウト接合部 剛性	参照基準
case1	$I_{TP} + I_{MP}$	ジャケット指針
case2	$I_{TP} + I_{MP} + E_g/E_s \cdot I_{grout}$	DNV 指針
case3	$t_{eq} = (t_{TP}^2 + t_{MP})^{0.5}$	ISO
case4	$t_{eq} = 0.035D_{TP} + 0.93T_{TP}$	API 指針
case5	I_{TP}	—

ジャケット指針 (2010)⁵⁾では、「グラウト剛性を無視した二重管の断面剛性を有する 1 本の部材にモデル化する」と記述されている。DNV 指針 (2016)⁶⁾では、「グラウト接合部は、3 本梁の重ね合せ、又は、1 本の等価梁として表現する」と記述されている。ISO (2020)⁷⁾では二乗和平方根を用いた等価板厚の換算式、API 指針 (2014)⁸⁾ではグラウトの効果により管壁の剛性が増すことを考慮した等価板厚の換算式が示されている。しかしながら、ジャケット指針に示されるモデル化方法は、ジャケット構造における杭とジャケットの接合部が対象であり、DNV 指針では、具体的な換算式が示されていない。その他の基準に示される式はモデル化手法でなく、ジャケット部材を対象とした照査の考え方である。

キーワード 洋上風力, モノパイル, グラウト接合, FEM

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

そこで各基準に示される換算式や照査式を参考に、グラウト接合部の剛性をパラメータとした試解析を行い、剛性差による応答変位の違いを確認した。

2.3. 解析結果

(1) ULS 荷重レベルでの変位分布の比較

解析結果を図 2 に示す。入力荷重は $F_{xy}=8.0$ MN, $M_{xy}=600$ MNm とし、3D 詳細モデルと梁モデルでの変位分布を比較する。なお、3D 詳細モデルは、载荷反対側の変位を示している。全 case で仮想固定点からグラウト接合部下端までの変位は一致し、そこから上方では剛性差に伴い応答変位に差があることが確認できる。case1 ($I_{TP}+I_{MP}$) でのグラウト接合部の剛性を 100% とすると、各 case 間での剛性比は約 50% ~ 230% となり、3D 詳細モデルの応答に最も近いのは、剛性比が最も小さい TP のみの剛性を考慮した case5 (I_{TP}) である。その他は、全体的に応答変位が小さく、剛性として硬めの設定となっている。

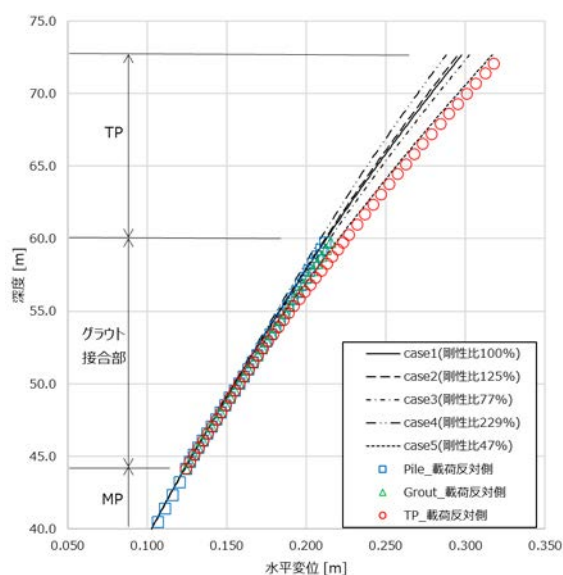


図 2 ULS 荷重レベルでの変位分布

(2) 各荷重レベルでの TP 頂部応答変位の比較

図 3 に、入力荷重レベルに応じた TP 頂部の応答変位を示す。3D 詳細モデルの結果と比較すると、SLS や FLS などの低荷重レベルでも case5 (I_{TP}) で応答変位が比較的一致している。3D 詳細モデルは、グラウトーTP 間の剥離やグラウトの材料非線形を考慮した解析であるが、荷重レベルに依らずほぼ線形的な挙動を示しており、その際の剛性としては二重管やグラウトを考慮した等価剛性ではなく、より小さな剛性と一致する傾向が見られた。

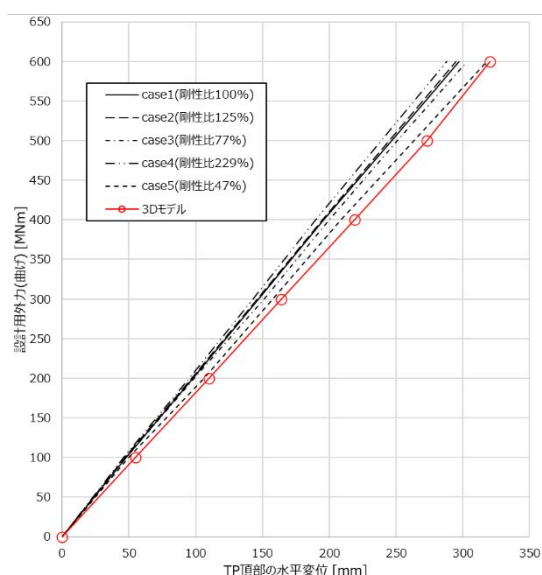


図 3 各荷重レベルでの TP 頂部の応答変位

3. まとめ

本稿では IEA 15MW 風車の MP 基礎を対象として、静的計算結果に基づき、グラウト接合部の剛性設定方法に関する比較検討を行った。荷重レベルに依らず、梁モデルにおけるグラウト接合部の剛性は case5 (I_{TP}) にて、3D 詳細モデルの応答と近くなることが分かった。今後の課題として、荷重連成解析の動的な応答や固有振動数が、剛性の違いによりどの程度の影響を受けるかを確認する必要がある。

【参考文献】

- 1) 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解説（令和 2 年 3 月版）
- 2) Det Norske Veritas : Support structures for wind turbines, DNV-ST-0126, Edition : Dec, 2021
- 3) 森田 成人, 仁井田 将人, 笠井 康裕, 小尾 博俊：モノパイル式洋上風車 (IEA15MW) グラウト接合部の FEM 解析, 第 77 回土木学会年次学術講演会公演概要集, 2022
- 4) International Energy Agency : <https://iea-wind.org/task37/>
- 5) 財団法人 沿岸技術研究センター：ジャケット工法技術マニュアル, 沿岸開発技術ライブラリー No.7, 平成 12 年 1 月
- 6) Det Norske Veritas : Analysis of grouted connections using the finite element method, DNV-RP-0419, Edition : Sep, 2016
- 7) International Organization for Standardization : Petroleum and natural gas industries - Fixed steel offshore structures, Edition : Nov, 2020
- 8) American Petroleum Institute : Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms-Working Stress Design, API RP 2A-WSD, Edition : Nov, 2014