

モノパイル式洋上風車グラウト接合部の挙動に関する研究
(その2 3次元 FEM 解析)

清水建設株式会社 正会員 ○古宇田剛史
清水建設株式会社 西山 恒平
清水建設株式会社 石井 大吾

1. はじめに

モノパイル式洋上風車におけるグラウト接合部の設計については、DNV-ST-0126¹⁾ (以下、DNV 基準) に簡易的な手法が示されているものの、適用範囲が限定的 (鋼管半径 2,250~3,250mm, 板厚 50~100mm) である。また、日本特有の地震時の挙動については明記されていない。風車の大型化に伴い DNV 基準の適用範囲を超える基礎を設計する場合には、実験などによる設計検証が求められるが、都度実験を行うことは現実的でない。

本報では、実験に代わる設計検証法のひとつとして 3 次元 FEM 解析を設計に適用することを目的として、既往の载荷試験²⁾の再現解析を実施し、試験結果との比較により、FEM 解析の妥当性を検証する。

2. FEM 解析モデル

2.1 試験体の形状

DNV 基準に準拠して設計された 3MW 級の洋上風車基礎 (コニカル式グラウト接合) をおよそ 1/10 スケールでモデル化した試験体を対象とした。対象とした試験体の形状を図 1 に示す。なお、グラウト厚さは DNV 基準で定められた最小厚さを考慮して 40mm とした。载荷試験では、試験体頂部に地震時相当の荷重 (軸力 N , 曲げモーメント M 及びせん断力 Q) を作用させた。

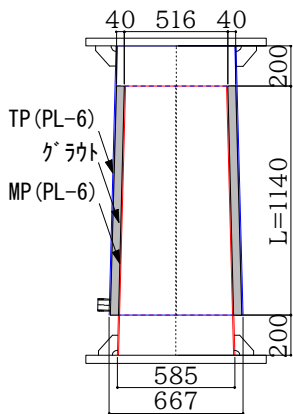


図 1 対象とした試験体

2.2 解析条件

本解析では、汎用 FEM 解析プログラム Abaqus (2022) を使用した。図 2 に示す通り、対称性を考慮した 1/2 モデルとし、鋼材及びグラウトともに 6 面体ソリッド要素でモデル化した。また、鋼材は線形モデル、グラウトはコンクリート損傷塑性モデル (Concrete Damage Plasticity) とした。鋼材及びグラウトの材料特性を表 1, 表 2 に示す。その他の解析条件は以下の通りとした。

- ・境界条件：エンドプレート下面を固定
- ・荷重条件：表 3 の地震時荷重をモデル頂部に作用
- ・鋼材 - グラウト間：摩擦係数を 0.7 とした接触条件

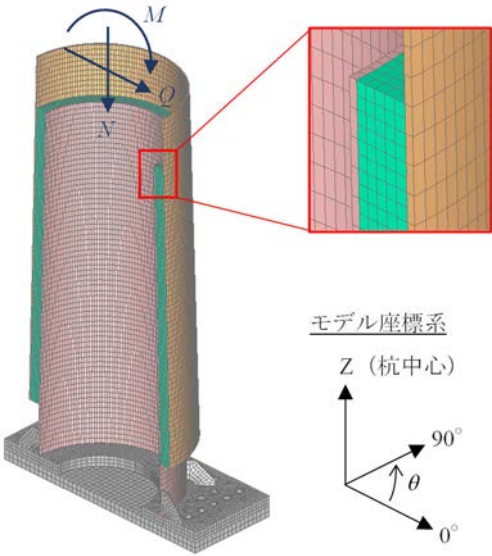


図 2 FEM 解析モデル

表 1 鋼材の材料特性

	弾性係数 [N/mm ²]	ポアソン比
MP	206,000	0.30
TP	208,000	0.30

表 2 グラウトの材料特性

圧縮強度 [N/mm ²]	割裂引張強度 [N/mm ²]	弾性係数 [N/mm ²]	ポアソン比
153	6.3	52,000	0.20

キーワード 洋上風車, モノパイル, グラウト接合, 3 次元 FEM 解析
連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋二丁目 16-1 清水建設株式会社 土木技術本部 E-mail: t.kouta@shimz.co.jp

表 3 作用荷重

ケース	軸力 [kN]	曲げ モーメント [kNm]	せん断力 [kN]
地震時	43	137.8	45

※上記荷重値は、解析上の値（試験荷重の 1/2 倍）を示す。

3. FEM 解析の妥当性

モデル頂部の荷重 - 変位関係について、解析結果と試験結果の比較を図 3 に示す。縦軸はせん断力、横軸は水平変位を示す。いずれも荷重 - 変位関係は線形的な挙動を示しており、その剛性も概ね一致している。

また、グラウト接合部の鋼材に発生する曲げモーメント及びせん断力の高さ方向分布を図 4 に示す。FEM 解析により TP から MP への荷重伝達機構が再現され、実験結果とも良く対応しており、DNV 基準に準拠して設計された基礎に対しては本 FEM 解析でその挙動を再現できると言える。

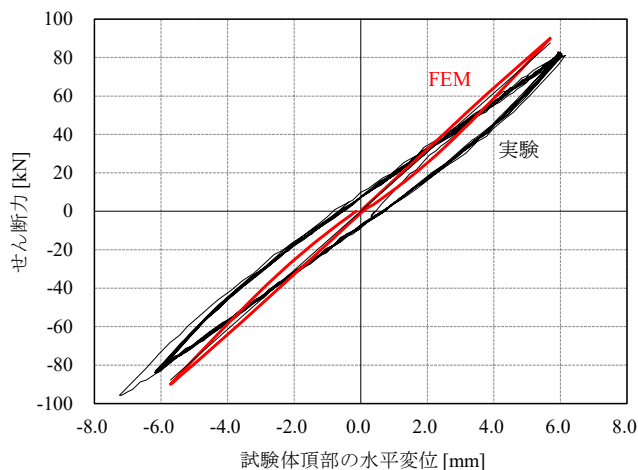


図 3 試験体頂部のせん断力 - 水平変位関係

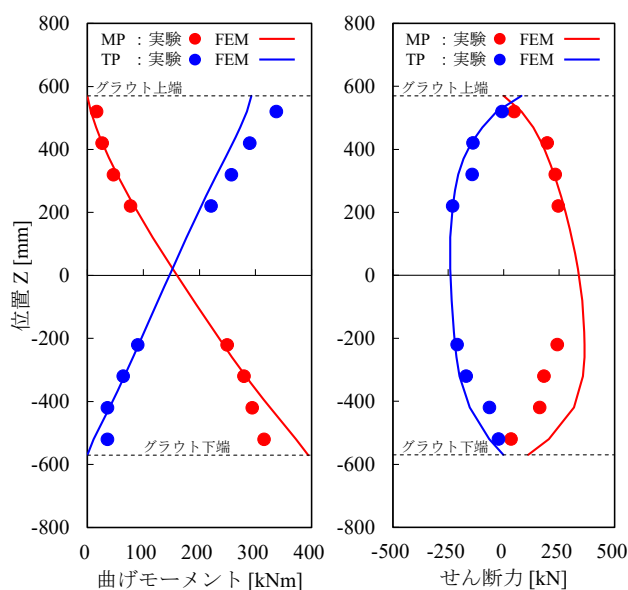


図 4 曲げモーメント及びせん断力の高さ方向分布

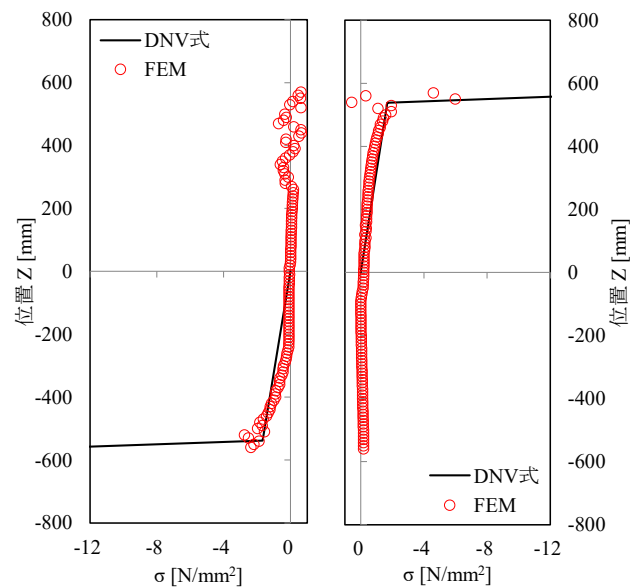


図 5 半径方向応力度の高さ方向分布

(左：加力方向+側、右：加力方向-側)

グラウトの挙動については、载荷試験における計測データがないため、DNV 基準と比較する。解析モデルの $\theta=0^\circ$ （加力方向+側）及び 180° （加力方向-側）位置における、半径方向応力の高さ分布を図 5 に示す。図中には、DNV 基準に記載の式を用いて算定した支圧応力分布を併せて示す。 0° 位置では下端側、 180° 位置では上端側に向けて応力集中していることが分かり、その範囲や応力度は概ね DNV 式と一致しており FEM 解析の妥当性が確認できた。

4. おわりに

本研究では、グラウト接合部を対象とした 3 次元 FEM 解析の妥当性を検証することを目的として、既往の载荷試験の再現解析を実施した。

試験結果との比較により、FEM 解析を用いて载荷試験を精度よく再現できることが確認された。また、DNV 基準とも整合が取れており、解析の妥当性が検証できた。

今後は、風車の大型化に向けて、DNV 基準の適用範囲外となる基礎構造物に対しても本解析が適用できることを検証する必要がある。

参考文献

- 1) Det Norske Veritas: DNV-ST-0126: Support structures for wind turbines, Edition December 2021.
- 2) 田中颯馬, 村瀬史弥, 西山恒平, 石井大吾: モノパイル式洋上風車グラウト接合部の挙動に関する研究 (その 1 静的繰返し载荷実験), 令和 5 年度土木学会年次学術講演会梗概, 2023.