

洋上風車基礎のグラウト接合部を対象とした 3 次元 FEM 解析における
要素分割による応力集中係数への影響検討

清水建設株式会社 正会員 ○李 懿榮
清水建設株式会社 正会員 古宇田剛史
清水建設株式会社 正会員 和田 智之

1. はじめに

洋上風車基礎のグラウト接合部は、DNV-ST-0126¹⁾（以下、DNV 基準）に記載の応力集中係数（SCF）を用いた方法に基づいて設計される。一方で、DNV 基準はその適用範囲が限定されているため、今後大型化する風車に対応するためには、FEM 解析など別の手法が必要となる。ただし、SCF のように応力集中部を FEM 解析で求める場合、要素分割によって結果に大きな差が出るため、適切なモデル化を行う必要がある。

本研究では、グラウト接合部を対象とした 3 次元 FEM 解析について、要素分割の異なるモデルによる結果を比較することで、要素分割による SCF への影響を検討する。

2. FEM 解析モデル

2.1 解析条件

3MW 級の洋上風車基礎（コニカル式グラウト接合）を対象とする。対象とする基礎の主な寸法を表 1 に示す。

本解析では、汎用 FEM 解析プログラム Abaqus（2020）を使用した。図 1 に示す通り、対称性を考慮した 1/2 のモデルとし、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。グラウト部の板厚方向の分割数は、DNV-RP-0419²⁾に従い 3 分割とし、鉛直方向のモデル化範囲はグラウト下端から杭径の 3 倍程度とした。また、鋼材は線形モデル（弾性係数=205,000N/mm²、ポアソン比=0.3）、グラウトはコンクリート損傷塑性モデルとした。グラウト

の材料特性を表 2 に示す。

鋼材とグラウト間は接触条件とし、圧縮力及び摩擦力（摩擦係数 0.7）のみを伝達し、引張力作用時には剥離する条件とした。

2.2 検討ケース

解析モデルの要素分割と SCF の関係を把握するため、表 3 に示すグラウト円周方向の要素分割数の異なる 5 つのケースについて解析を行った。Case 1 は最も要素分割数が大きく（要素サイズが小さく）解析精度が高いと考えられる一方で計算コストも高くなるケースであり、Case 5 はその逆の傾向となる。なお、高さ方向の要素サイズは円周方向と同程度とする。また、ここでは基礎の形状による影響を除外するため、グ

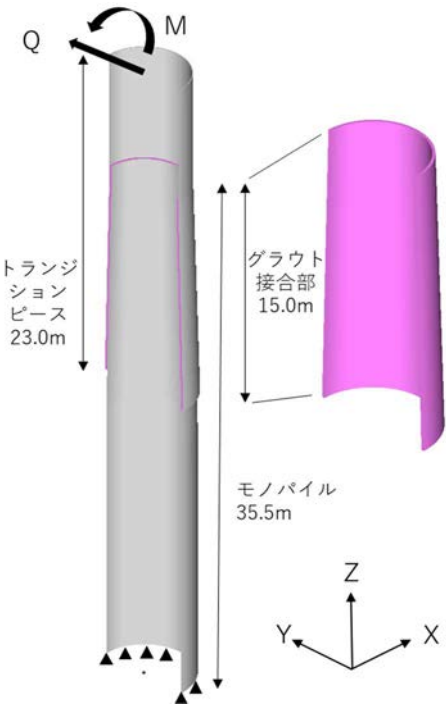


図 1 解析モデル図

表 1 対象とする基礎の寸法

	単位	値
MP 外径	m	5.1～6.0
TP 外径	m	5.5～6.27
グラウト接合長	m	15.0
グラウト厚さ	mm	140

表 2 グラウトの材料特性

圧縮強度 [N/mm ²]	引張強度 [N/mm ²]	弾性係数 [N/mm ²]	ポアソン 比
52	2.3	37,400	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, 応力集中係数
連絡先 〒104-8370 東京都中央区京橋 2 丁目 16-1 清水建設（株）土木技術本部 洋上風力統括部 E-mail: l.yr@shimz.co.jp

表 3 検討ケース

ケース	円周方向 分割数	要素長 ／グラウト外径
Case 1	96	0.0163
Case 2	48	0.0325
Case 3	32	0.0488
Case 4	24	0.0650
Case 5	16	0.0975

ラウト上端における円周方向の要素長さをグラウトの外径で除して正規化した値を要素サイズの指標とする。

3. 応力集中係数の検討

解析結果から、代表ケースとして Case 1 のグラウトのトレスカ応力分布を図 2 に示す。これより、グラウト上端(載荷方向－側)及び下端(載荷方向＋側)で局所的に応力集中していることが分かり、最大値は下端で 24.3N/mm²となる。グラウト接合部の設計において FEM 解析を適用する場合、この最大応力度発生箇所において SCF を算出することとなる。

各ケースにおいて算出した SCF を図 3 及び表 4 に示す。図 3 には、DNV 基準に記載の式から求めた SCF の値も併せて示している。なお、FEM 解析結果に基づく SCF は以下の式で算定した。

$$SCF = \frac{p_{local}}{p_{nom}}$$

ここで、 p_{local} は FEM 解析から求まる局所的な接触圧であり、 p_{nom} は DNV 基準で示されている公称接触圧を示す。要素サイズを細かくするにつれて SCF が大きくなることが分かる。これは、要素サイズを小さくすることにより、より局所的な応力集中を再現できるからと考えられる。本検討においては、要素長／グラウト外径が 0.0163（グラウト円周方向に 96 分割）程度であれば、DNV 式による設計と同程度の結果を得ることができる。

4. おわりに

本研究では、洋上風車基礎のグラウト接合部を対象とした3次元FEM解析における要素分割による応力集中係数への影響を検討した。要素分割数を増やすことによって、より局所的な応力集中が再現され、SCF も大きくなることが分かった。実設計で FEM 解析を使用する場合は、計算コストとのバランスを踏まえて適切な要素サイズを選択する必要がある。

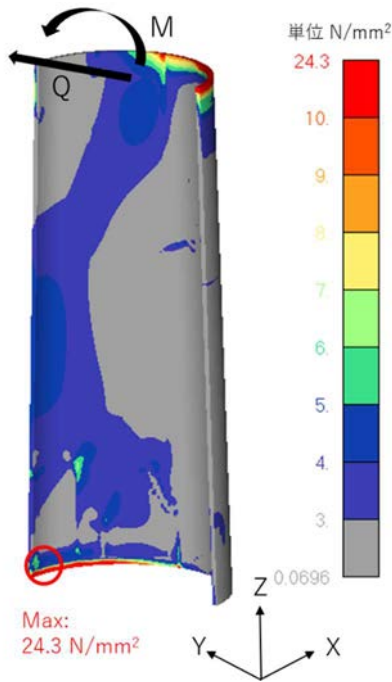


図 2 グラウトのトレスカ応力分布

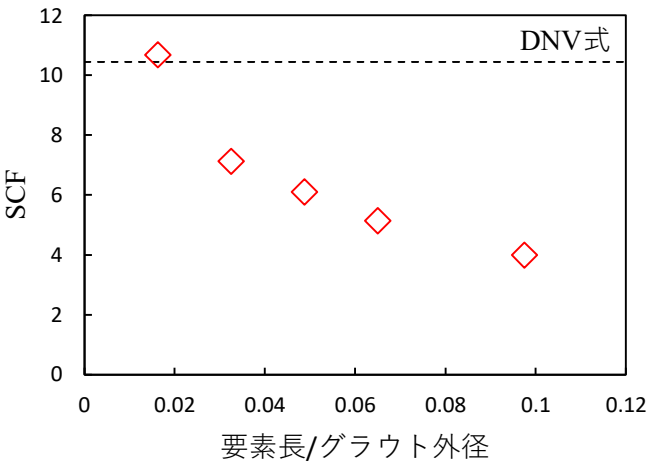


図 3 要素サイズと SCF の関係図

表 4 解析結果から算定した SCF

	SCF
Case 1	10.68
Case 2	7.13
Case 3	6.11
Case 4	5.14
Case 5	4.00

参考文献

1) Det Norske Veritas: DNV-ST-0126: Support structures for wind turbines, 2021.
2) Det Norske Veritas: DNV-RP-0419: Analysis of grouted connections using the finite element method, 2021.