

## 15MW モノパイル式洋上風車基礎ボートランディングの試設計に係る検討

大成建設(株) 正会員 ○内藤 将志 仁井田 将人 川上 喜博 小尾 博俊

## 1. はじめに

洋上風車基礎には附帯設備として、メンテナンス時のCTV (Crew Transfer Vessel) によるアクセスを目的としたボートランディングを設置する。ボートランディングの設計における照査手法に関して、統一的解説<sup>1)</sup>および港湾基準<sup>2)</sup>を始めとする国内基準に明確な規定が無い。そのため、15MW モノパイル式洋上風車基礎を想定した設計手法の設定と、検討を行った。

## 2. 設計条件の設定

ボートランディングの試設計を行うにあたり、各種設計条件を設定した。その概要を以下に示す。

## 2.1. 主構造諸元

主構造(モノパイル基礎、グラウト、TP)仕様は、国内仮想サイトにおいて15MW 風車の搭載を想定して設定した。モノパイルとTPの接合部は別途実施した試設計<sup>3)</sup>に基づきグラウト充填とする。

## 2.2. ボートランディング諸元

ボートランディングの部材配置および外径はCarbon Trust 推奨形状<sup>4)</sup>を参考に設定した。板厚は本検討における試設計結果を踏まえて設定した。

表1 ボートランディング断面仕様

| 部材                 | 部材径<br>$D(\text{mm})$ | 板厚<br>$t(\text{mm})$ |
|--------------------|-----------------------|----------------------|
| バンパー               | 406                   | 20                   |
| 主構造—バンパー<br>間スタブ   | 355                   | 30                   |
| バンパー—はしご<br>支柱間スタブ | 169                   | 36.5                 |
| はしご支柱              | 169                   | 36.5                 |



図1 全体図

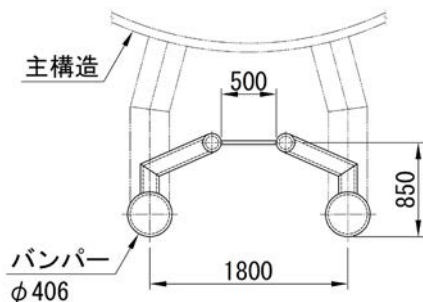


図2 ボートランディング構造図

## 2.2. 荷重条件

考慮する荷重ケースは港湾基準<sup>2)</sup>およびDNV-ST-0437<sup>5)</sup>を参考に、暴風波浪時およびCTV 通常接岸時・異常接岸時とした。

波浪荷重は、モリソン式による波力とスラミング力<sup>6)</sup>を考慮した。

CTV の接岸時に作用する荷重は、下式より算定した。

(通常接岸時)接岸荷重  $F = 2.5m$  (kN)

(異常接岸時)接岸エネルギー  $E_{kin} = 0.5a \cdot m \cdot v^2$  (kJ)

ここに、 $m$ : CTV 排水量(満載時)(t),  $a$ : 付加質量係数,  $v$ : 接岸速度(m/s)である。なお、CTV 排水量はYalcin らの研究<sup>7)</sup>を参考に145tとした。

## 3. 設計手法の検討

## 3.1. 要求性能の設定

試設計を行うにあたり、要求性能を設定した。

表2 要求性能の設定

| ケース  | 暴風波浪時                  | 通常接岸時 | 異常接岸時               |
|------|------------------------|-------|---------------------|
| DLC  | 6.X                    | 8.5   | 8.6                 |
| 要求性能 | 損傷せず、アクセス設備としての機能を満足する |       | 附帯設備が破断せず、主構造が損傷しない |

## 3.2. 暴風波浪時・通常接岸時

3次元FEM解析を実施し、部材が弾性域に留まっていることを確認する。また、ISO19902<sup>8)</sup>に基づく鋼管の照査を行い、曲げ・軸力を考慮した部材の発生応力度が許容応力度に達していないことを確認する。

## 3.3. 異常接岸時

ボートランディング部材の塑性化を許容し、港湾基準<sup>2)</sup>を参考に、下式より算定する構造物の変形によるエネルギー吸収に期待する照査を行う。

$$E_1 = \int_0^{Y_1} g(y_1) dy_1$$

反力曲線  $g(y_1)$ は、3次元FEMによるプッシュオーバー解析を実施し取得する。DNV-RP-C204<sup>9)</sup>に基づくバンパー部塑性ヒンジの引張破壊が生じる横たわみに対応した限界変位  $Y_1$ に至るまでの変形によるエネルギー吸収を吸収エネルギー  $E_1$ とし、接岸エネルギー  $E_{kin}$ を上回っていることを確認する。また、異常接岸荷重作用時における接合部の格点要素の発生断面力がリング補

キーワード 洋上風力 ボートランディング 塑性設計 3次元FEM DNV

連絡先 〒160-0023 東京都新宿区西新宿 2-3-1 大成建設(株)土木設計部洋上風力設計室 TEL 03-6882-0792

強を行わない場合のレグ耐力<sup>10)</sup>に至らないこと、および主構造の発生応力が鋼材の降伏応力に至っていないことを確認する。

#### 4. 3次元 FEM 解析

汎用 FEM 解析プログラム Abaqus による 3 次元弾塑性解析を実施した。以下に詳細を示す。

##### 4.1. 構造モデル

モデル化対象は主構造およびボートランディングとした。主構造はシェル要素とし、ボートランディングは梁要素として軸線でモデル化した。

##### 4.2. 材料モデル

主構造は線形材料として考慮する。ボートランディング部材にのみ、DNV-RP-C208<sup>11)</sup>を参考に、多点化した材料非線形モデル(応力-ひずみ関係)を考慮した。設定した材料非線形モデルを図 3 に示す。

##### 4.3. 荷重のモデル化

波浪荷重は、分布荷重として考慮した。

CTV 接岸荷重の作用位置および方向を図 4 に示す。

なお、異常接岸時は、接岸位置に漸増する強制変位を載荷した上で、解析モデルの変形に伴う吸収エネルギーが異常接岸エネルギー  $E_{kin}$  に到達した時点の反力を作用荷重として扱う。

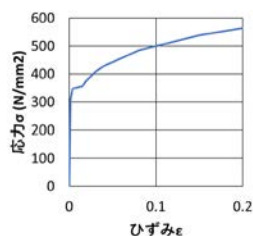


図 3 材料非線形モデル

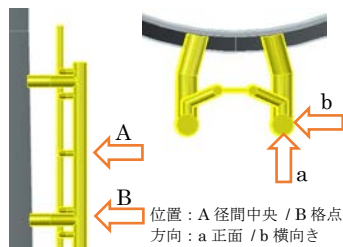


図 4 接岸荷重位置・方向

#### 5. 解析応答および照査結果

3 次元 FEM 解析の応答確認と部材照査を行った。各荷重ケースの結果を示す。

##### 5.1. 暴風波浪時・通常接岸時

部材が弾性域に留まること、および ISO19902<sup>11)</sup>に基づく照査を満足することを確認した。

##### 5.2. 異常接岸時

エネルギー吸収量および接合部のレグ耐力に関して、3.3 で設定した照査を満足することを確認した。

主構造に関して、B-a 接岸荷重によるスタブ接合部付近シェル要素発生応力最大値および主構造試設計時の風・波浪による応力を簡易に足し合わせた合計が、鋼材の降伏応力の 90%程度となることを確認した。

表 3 評価結果

| ケース | 暴風波浪時 | 通常接岸時 | 異常接岸時 |      |
|-----|-------|-------|-------|------|
| DLC | 6.X   | 8.5   | 8.6   |      |
| 部材  | スタブ   | バンパー  | バンパー  | 接合部  |
| 照査値 | 0.31  | 0.49  | 0.89  | 0.81 |

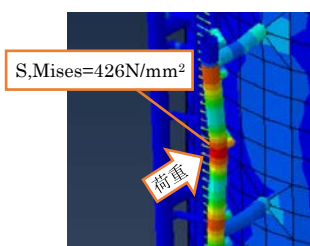


図 5 異常接岸 A-a 時応答

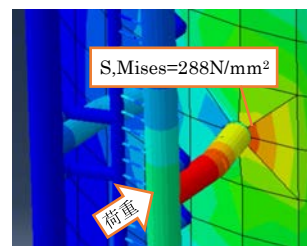


図 6 異常接岸 B-a 時応答

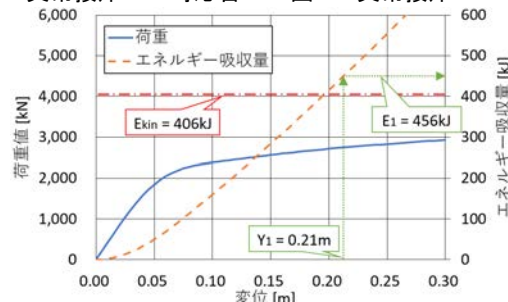


図 7 異常接岸 A-a 時 エネルギー吸収照査

#### 6. まとめ

15MW 風車の搭載を想定した洋上風力モノパイル基礎のボートランディングを対象に、国内および DNV 基準を参考に性能照査手法を検討し、3 次元 FEM による弾塑性解析および照査を行った。結果として、異常接岸時のエネルギー吸収量を決定するバンパーのたわみと、主構造の発生応力が決定ケースとなることを確認した。これらを抑制するための対応として、バンパーの曲げ剛性を大きくすることや、主構造—バンパー間スタブの剛性を低減し主構造への接岸荷重伝達を小さくすることが考えられる。また、主構造の性能照査にあたっては、スタブ接合部付近シェル要素への局所的な応力集中や、接岸荷重のほかに風・波浪による影響を考慮した耐力照査手法の設定が必要となる。

#### 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, 2020
- 2) 公益社団法人 日本港湾協会, 港湾の施設の技術上の基準・同解説, 2018
- 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, 令和 4 年度土木学会全国大会第 77 回年次学術講演会 I-165
- 4) Carbon Trust, Design for recommended boat landing geometry, 2020
- 5) DNV : Loads and site conditions for wind turbines, DNV-ST-0437, 2021
- 6) DNV : Environmental conditions and environmental loads, DNV-RP-C205, 2021
- 7) Yalcin Dalgic, Iain Dinwoodie, Iraklis Lazakis, David McMillan, Matthew Revie, Optimum CTV Fleet Selection for Offshore Wind Farm O&M Activities, 2014
- 8) ISO : Petroleum and natural gas industries - Fixed steel offshore Structures, ISO 19902, 2020
- 9) DNV : Structural design against accidental loads, DNV-RP-C204, 2021
- 10) 日本建築学会, 鋼管トラス構造設計施工指針・同解説, 2002
- 11) DNV : Determination of structural capacity by non-linear finite element analysis methods, DNV-RP-C208, 2021