

技術論文

洋上風力発電設備におけるジャケット構造の設計技術の確立 ～詳細設計における風波連成解析, 耐震設計手法及び 設計留意点について～*1

Establishment of Jacket Structure Design Technology for Offshore Wind Farms ～Coupling Analysis for Wind and Wave Loads, Seismic Design Methods and Design Considerations in Detailed Design～

大 嶽 敦 郎*
Atsuo OOTAKE

風 野 裕 明
Hiroaki KAZENO

森 下 和 帆
Kazuho MORISHITA

笹 井 綾 乃
Ayano SASAI

加賀美 暢 一
Yoichi KAGAMI

福 田 渚
Nagisa FUKUDA

中 野 雄 太
Yuta NAKANO

藤 士 尚 也
Naoya TOHSHI

抄 録

国内各地で洋上風力発電設備の計画が進む中、風車の大型化、大水深化、複雑な地盤条件への対応に優れるジャケット構造への期待が高まっている。本稿では、ジャケット構造の詳細設計に焦点をあてて、設計条件として必要となる項目や、風波荷重、地震荷重に対する設計で重要となるポイント、トランジションピースやグラウト接合部、付属物などの構造詳細で配慮すべき点を取りまとめた。現在建設が進められている石狩湾新港洋上風力発電所の紹介と併せて、これらを報告する。

Abstract

As plans for offshore wind farm are progressing in various sites in Japan, expectations are rising for jacket structures that excel in handling large wind turbines, deeper water, and complex ground conditions. This paper focuses on detailed design of jacket structures, and explains items required as design conditions, important points in designing against wind wave loads and seismic loads, and structural details such as transition pieces, grouted connections, and appendages. In addition, the Ishikari Bay New Port Wind Farm which is currently under construction is introduced.

1. 緒 言

2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略(経済産業省)¹⁾において、洋上風力は成長分野に位置付けられ、政府は洋上風力産業ビジョン(第1次)²⁾において、2030年までに10GW、2040年までに30～45GWの導入目標を掲げている。現在は、秋田能代港、石狩湾新港、北九州港などの港湾区域に続き、一般海域各地においてプロジェクト計画が進められている。

洋上風力発電設備の下部構造の形式は、図1に示すように、重力式、杭式(ジャケット構造)、杭式(モノパイル構

造)、浮体式などがあるが、風車の大型化、水深30mを超える海域の増加、岩盤を含む地盤への対応などの理由からジャケット構造の期待が高まっている。欧州では、既にジャケット構造の適用事例が多数あり、その設計手法は確立されているものの、地震や台風の影響、地盤条件など日本特有の設計条件に適合した基準は未だ確立されていない。日鉄エンジニアリング(株)は国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構(NEDO)による“洋上風力発電システム実証研究(北九州市沖)”³⁾への参画を皮切りに、複数案件の設計を担当して、ジャケット構造の設計技術を蓄積してきた⁴⁾。本稿では、ジャケット構造の詳細設計に焦点を当てて、設計上の留意点を述べる。

*1 日鉄エンジニアリング技報, Vol.14, 18-31 (2023) より、著作権者の許諾を得て転載。

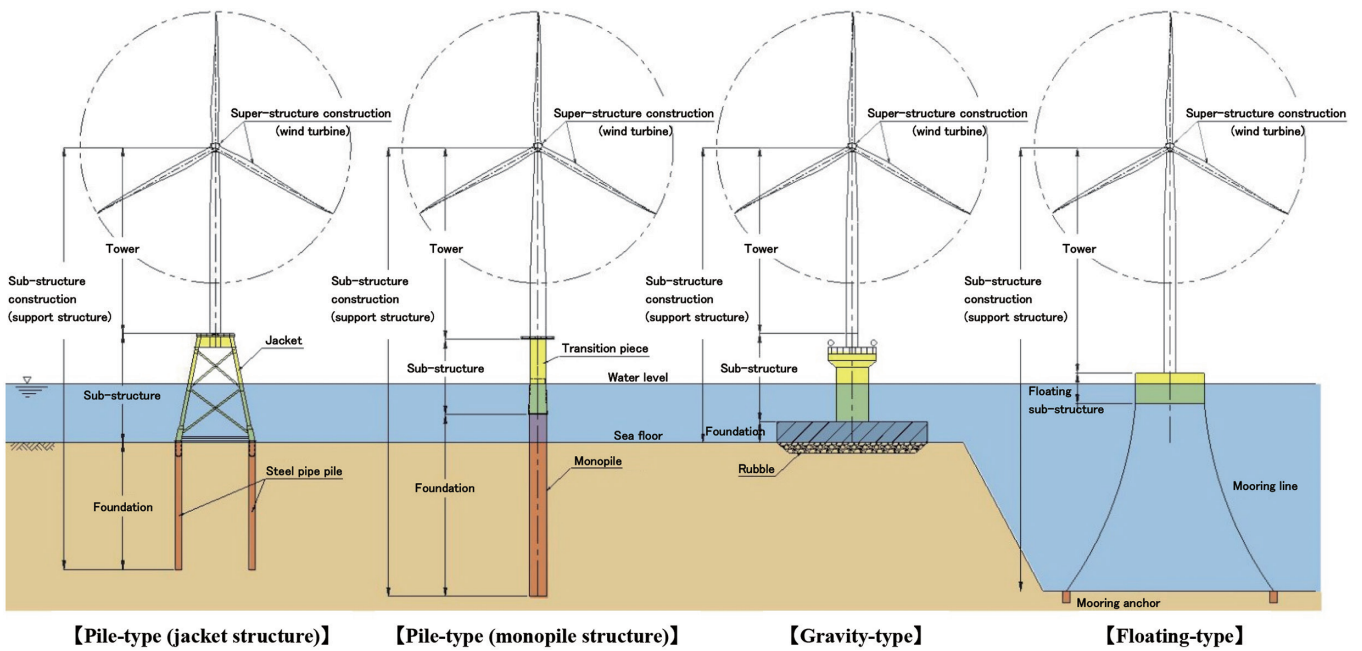


図1 洋上風力発電支持構造物の下部構造形式
Substructure type of offshore wind turbine support structure

2. 設計フロー

図2にジャケット構造の設計フローを示す。風波荷重に対する支持構造物の解析(連成解析と称す)は風車メーカーと共同で行われるが、1回につき数ヶ月の検討期間を要し、繰り返回数設計工程に大きな影響を与える。構造諸元が予め最適化されていれば1回の解析で設計は完了するが、一般的には1回目の検討結果を元に構造諸元を見直し、2回目以降で収められるプロセスが採用される。そのため、基本設計の段階でタフな構造コンセプトを定め、設計初期段階で可能な限り精度良く構造諸元を設定することが重要である。また、1回目の検討結果を元にタワー諸元が見直される可能性もあり、2回目の解析に向けて構造諸元を見直す際は、構造全体の振動特性が変わることを念頭に置いて構造諸元を設定することが重要である。

3. 構造諸元の設定

3.1 標高

図3にジャケット構造の全体イメージを、図4に構造諸元を示す。ジャケット構造の標高を設定する際、トランジションピースの下面に波荷重を作用させないことが重要であり、電気及び電子技術分野の国際規格 IEC61400-3²⁵⁾におけるエアギャップの規定を満足する必要がある。

3.2 レグ間隔

ジャケット構造のレグ(脚)間隔が広すぎると、支持構造の剛性が大きくなって許容振動数帯の制約を満足せず、レグ間隔が狭すぎると杭の必要根入れが長く杭の施工が困難となる。そのため、設計開始時点で上記2つの制約を同時

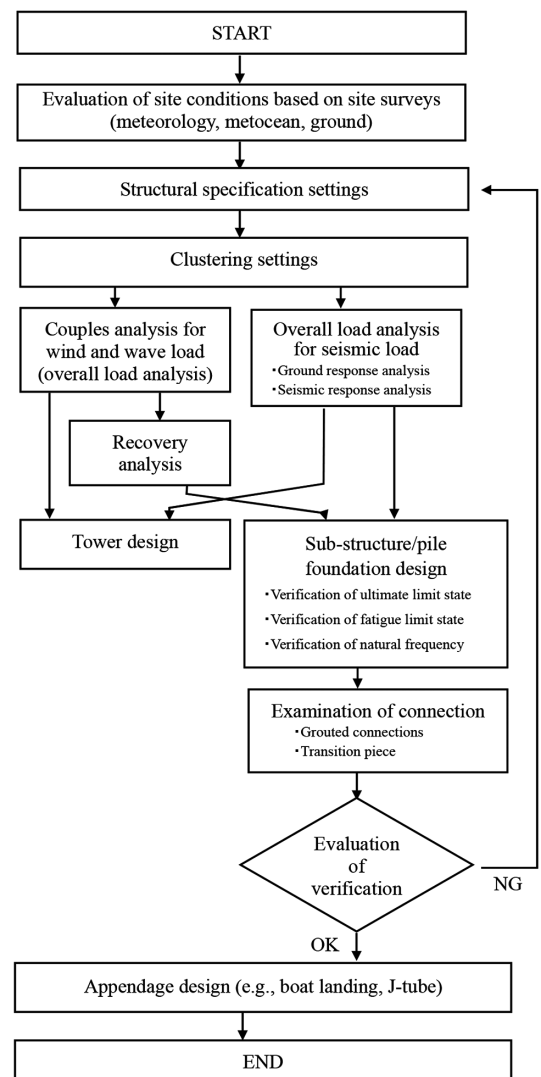


図2 ジャケット構造の設計フロー
Design flow for jacket structure

に満足するレグ間隔を設定することが重要である。

3.3 ブレース配置

図4に示すように、ジャケット構造の各構面に斜め方向のブレースが配置される。ジャケット構造を横向きに製作・輸送する場合は、製作輸送時のジャケット構造の剛性を確保するために、斜めブレースに加えて下段CANの間に水平ブレースを配置することもある。そのため、予め製作・輸送計画を定めた上で、ブレースの配置を決定することが重要となる。

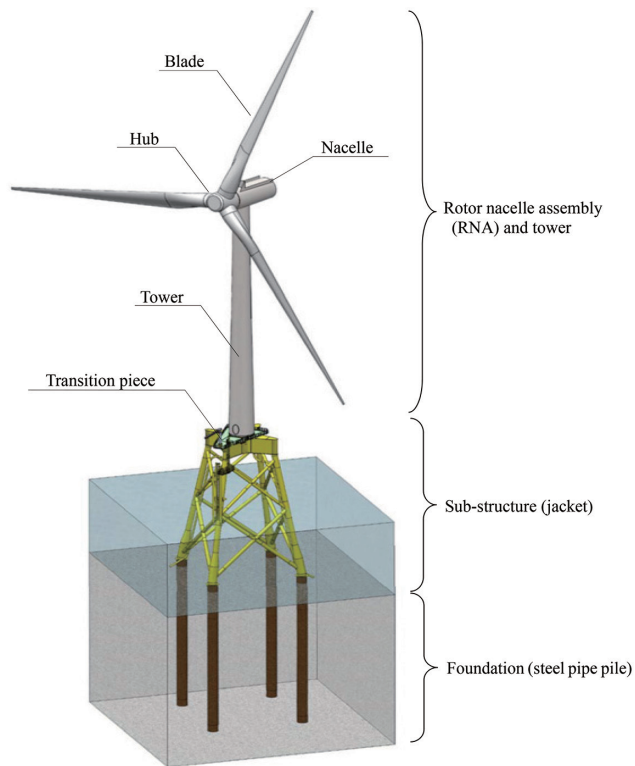


図3 風力発電設備におけるジャケット構造
Jacket structure of wind turbine support structure

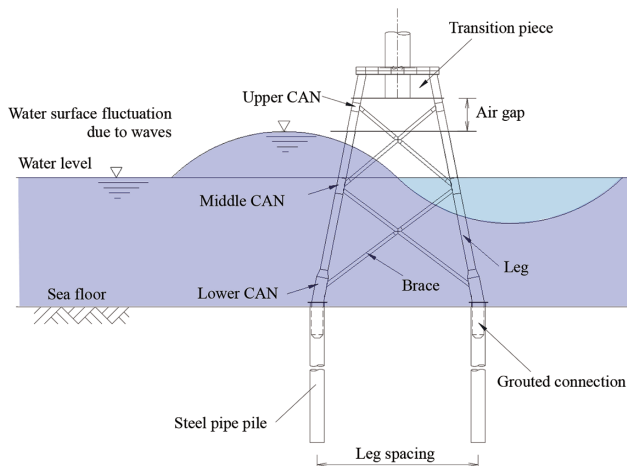


図4 ジャケット構造の構造諸元
Structural specifications of jacket structure

3.4 グラウト接合部

ジャケットと杭は、グラウト接合部により一体化される。このグラウト接合部では、部材の製作誤差や杭の施工誤差などを考慮した上で、レグと杭の間隔（つまりグラウト厚さ）が確保できるよう、レグ径や杭径を適切に設定することが重要である。グラウト接合部の構造は7.1節で詳しく説明する。

4. クラスタリング

洋上風力発電プロジェクトでは、複数基の風車を同時に設置することが一般的である。風波荷重に対する設計を行う場合、本来は風車が設置される地点全てを対象にすることが望ましいが、解析ケース数が膨大であるため全基を対象にすると設計工程やコストを増大させることとなる。そこで、水深や地盤条件の類似地点を同一クラスターとして、検討対象のクラスタリング（グループ化）を行う手法が採用される。また、同一クラスターでジャケット構造を統一することで、材料調達や製作の観点でも合理化を図ることができる。クラスタリングを適用する場合、代表モデルがクラスター内の全ての条件を網羅し、安全側の設計となっていることが重要である。なお、地震荷重に対する設計では、地点毎の水深、地盤の物理的特性の相違影響により地盤応答に有意な差が生じることがあるため、クラスタリングは行わず全地点を対象に構造解析を実施することが望ましい。

5. 風波荷重に対する設計

5.1 設計条件

(1) 荷重組合せ

風波荷重に対する設計は、IEC61400-3²⁵⁾で規定される荷重組合せに従うことが基本となる。表1に荷重組合せの概要を示す。この荷重組合せは、風車の運転状態に加えて、気象海象条件が考慮されている。DLC1, 6, 7で用いられる極値とは、主に再現期間50年の極値風速や極値波浪であり、5.4節で述べる終局限界状態の照査に用いられる。また、DLC1～5で用いられる通常時とは、主に風車の発電風速帯における風速や波高などの気象海象条件であり、主に5.5

表1 荷重組合せの概要
Overview of Design Load Case (DLC)

DLC	Design situation	Primary meteocean condition
1	Power generation	Normal time, extreme
2	Failure during power generation	Normal time
3	During start of power generation	Normal time
4	During stop of normal power generation	Normal time
5	Emergency stop	Normal time
6	During stop	Extreme
7	Failure during stop	Extreme

節で後述する疲労限界状態の照査に用いられる。したがって、気象海象条件を設定する際は、この荷重組合せで想定している風速や波浪などを全て網羅している必要がある。なお、荷重組合せの中では、風や波の作用方向や風車のヨー角の誤差の有無との組合せも考慮する必要があり、その検討ケースは支配的なものだけでも数千に及ぶので、設計工程を計画する際は注意が必要である。

(2) 気象条件

気象条件は、ハブ高における10分間平均風速やウィンドシア（異なる2つの標高における風ベクトルの差を両地点の距離で除したもの）などを、現地観測や解析シミュレーションにより設定する。例えば、再現期間50年の極値風速については、ハブ高での10分間平均風速が50m/sを超えることもある。気象条件は、主に風車設計担当が実施する連成解析で使用されるが、下部構造の設計においてもトランジションピースの側面に作用する風荷重を設定する際に用いられる。また、付属物の渦励振の検討を行う際にも用いられる。

(3) 海象条件

海象条件は、潮位、水の流れ、波条件（波高・周期）、津波波高などを観測値や既往の波浪推算情報等を元に設定する。例えば、再現期間50年の極値波浪については、設置地点の水深にもよるが波高が15mを超えることもある。

(4) 風と波の結合確率分布及び供用年数

支持構造物の疲労照査を行う際は、風車の供用期間中に、風と波が繰り返し作用する回数を設定する必要がある。一般的には、ハブ高さ風速、波高・周期と発生頻度の関係、いわゆる風と波の結合確率分布を元にその作用回数が設定される。この結合確率分布も観測結果などにより設定されるが、解析ケース数が膨大となりすぎないように、風速や波高のレンジを適切に設定して、ケース数の絞り込みを行うことが重要である。また、支持構造物の設計供用年数を定める際には、実際の風車の運用期間に加えて、ジャケット構造及び杭基礎と風車の建設から撤去までの期間を考慮することが重要である。

5.2 解析手法

(1) 解析の流れ

図5に、風波荷重に対する解析の流れを示す。はじめに下部構造設計担当が、下部構造・基礎の構造諸元や波荷重を設定して、スーパーエレメントや波荷重ファイルと呼ばれる連成解析の入力情報を準備する。これらの情報を元に、風車設計担当（風車メーカー）が連成解析を実施して、RNAとタワーの設計を行う。ここで、連成解析とは、風車の運転と、風と波の同時作用を考慮した解析であり、Coupled

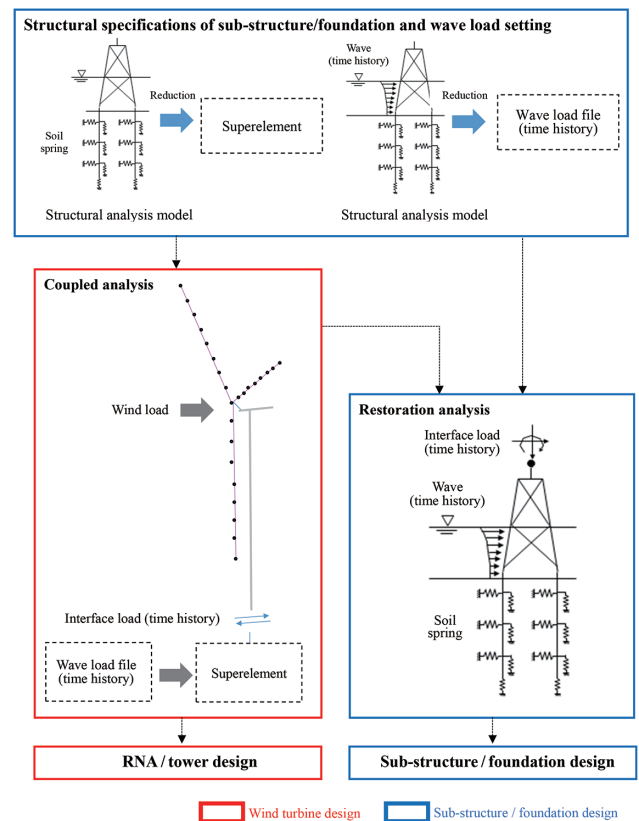


図5 風波荷重に対する解析の流れ
Analysis flow for wind wave load

analysisとも呼ばれる。次に、下部構造設計担当が、連成解析で得たインターフェース点の時刻歴断面力（インターフェースロード）と、下部構造・杭基礎・地盤バネで構成される部分解析モデルを用いた解析（復元解析）を実施して、下部構造・基礎の設計を行う。これらの詳細な内容を次に述べる。

(2) 下部構造・基礎の構造情報の作成

連成解析に組み込まれる下部構造及び基礎の構造情報は、一般的にスーパーエレメントや波荷重ファイルと呼ばれるデータ形式で風車メーカーへ提供することが求められる。ここでスーパーエレメントとは、連成解析の処理速度を向上させるために、下部構造及び杭基礎の構造諸元を示す質量・剛性マトリクスを縮約化（解析モデルの低次元化）⁹⁾したものである。ただし、縮約化の程度を誤ると、解析精度が損なわれるため、縮約化する前の解析モデルの変位や振動数と比較して、精度良く一致することを予め確認することが重要である。

(3) 波荷重情報の作成

波荷重は、5.1(3)で設定した波条件に基づき、波浪スペクトルを用いて不規則な時刻歴波形を作成し、ジャケット部材に作用する波力として評価したものである。波浪スペクトルは、そのサイト特性にあったものを設定することが

重要である。碎波が生じる場合は、その衝撃的な作用力がジャケットに与える影響を無視できないことが多く、IEC 6400-3²⁵⁾で規定されている動的特性などを参考に設定する。なお、波荷重もスーパーエレメントに合わせて縮約化する必要がある、図5ではこれを波荷重ファイル(時刻歴)と称している。

(4) 連成解析

連成解析では、風車の運転状態を表現するために、ブレードの回転運動を模擬した空力弾性解析プログラムが用いられる。この解析では、風車の制御情報なども解析プログラム内で考慮されることから、一般には風車メーカーが担当する。空力弾性解析プログラムの代表的なものとしては、Bladed, BHawC, Flex5 などがある(各種プログラムの特徴は文献6)で述べられている)。

IEC61400-3²⁵⁾では、風車の振動状態を表現するために、時刻歴応答解析を実施することを求めており、基本的に600秒のシミュレーション時間を確保する必要がある。なお、解析プログラムによっては、解析を開始してから数十秒間は解析が安定しないことがあるため、それを評価時間に含めないよう配慮する必要がある。

(5) 復元解析

復元解析は、連成解析で得られたインターフェースロードを下部構造・杭基礎・地盤バネで構成される部分解析モデルに入力することにより、下部構造設計担当サイドで連成解析を再現するものである。このとき復元解析の解析モデルは、縮約化する前の解析モデルが使用される。復元解析の実施に際して、ジャケット構造はモノパイルと比較して節点や部材の数が多く解析負荷が高いため、クラウドサービス等の活用により解析処理を高速化することは元より、入出力データの処理を省力化することが設計工程を短縮化する上でのポイントである。

5.3 解析モデル

本節では、下部構造及び基礎の解析モデルを作成する際のポイントを述べる。

(1) 全体

図6に、構造解析モデルのイメージ図を示す。構造解析モデルは、梁要素を用いてジャケットの構成部材及び杭をモデル化する。地盤剛性の影響を考慮するため、杭の周面には離散化した地盤バネを取り付ける。

(2) 地盤バネ

ジャケット構造は波や風などの水平力に対して、杭の支持力と地盤の水平反力により抵抗する。そのため、構造解析モデルでは、杭の周辺に水平地盤バネと鉛直地盤バネ、

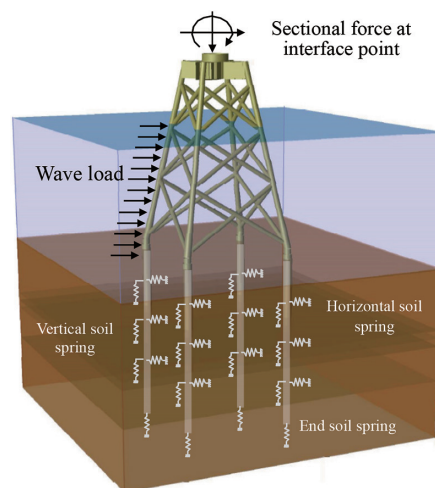


図6 構造解析モデル
Structural analysis model

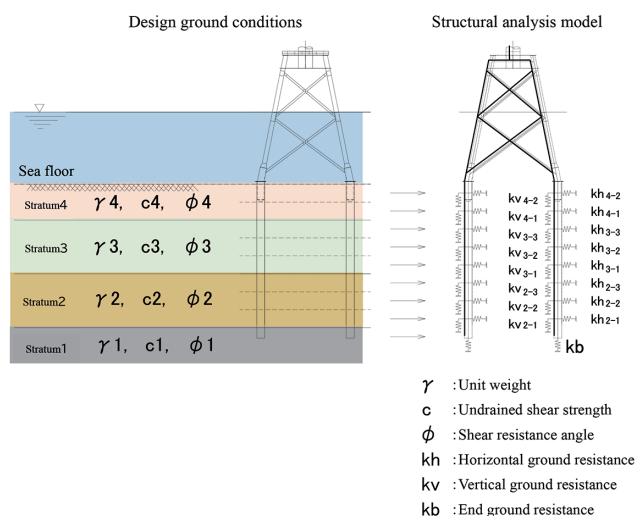


図7 設計地盤条件と地盤バネ
Soil spring modeling for ground condition

先端地盤バネを配置する。

図7に設計地盤条件と構造解析モデルにおける地盤バネの関係を示す。設計地盤条件はボーリング調査やCPT調査などによる地盤調査に基づき、単位体積重量、非排水せん断強度やせん断抵抗角などの地盤特性が地層毎に設定される。各地層は深度方向に1m程度の厚さで細分化され、それぞれに対する地盤バネが設定される。地盤バネ定数は、設計地盤条件として設定した非排水せん断強度やせん断抵抗角に基づき設定することとなるが、詳細な設定方法は石油ガス分野におけるジャケット構造設計に関する国際規格API-RP2A-GEO²⁶⁾などを参考にすることができる。

構造解析モデルを作成する際は、地盤の洗堀も考慮する必要がある。洗堀とは海底面近くの地盤が波や流れによって削り取られる現象である。図8はジャケット構造の杭周りに発生する局所洗堀の模式図を示したものである。供用期間中に局所洗堀が発生すると、基礎に対する鉛直方向及び水平方向の支持が失われるため、洗堀の影響を設計に織

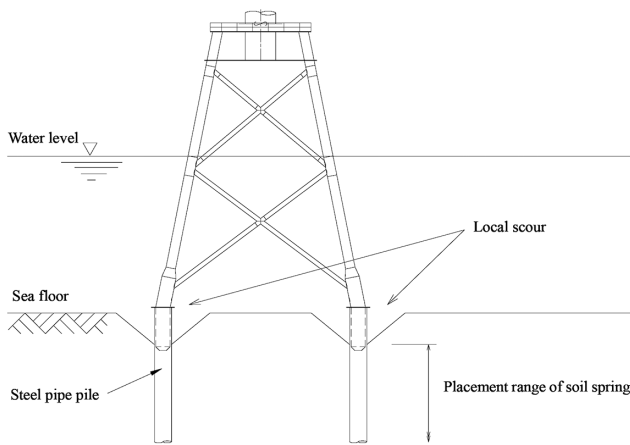


図8 杭周りの局所洗堀
Local scour around pile

り込む必要がある。ここで、洗堀深さの設定方法は、欧州における風力／電力送配電分野の第三者認証機関の設計基準である DNVGL-ST-0126²⁷⁾を参考にすることができる。構造解析において、洗堀の影響を考慮する方法としては、洗堀深さの範囲に地盤バネを配置せず、地盤抵抗を期待しない方法を採用することが多い。

(3) 減衰

連成解析や復元解析などの時刻歴解析では、空気や海水の粘性、鋼材や地盤の変形によって、構造の振動を弱める働き（減衰効果）を考慮する。構造物の振動問題における基礎運動方程式を式(1)に示す。構造物の質量 $[M]$ 、剛性 $[K]$ の影響に加えて、減衰 $[C]$ の影響が左辺第2項に考慮されている。ここで、 F は外力（時刻歴）であり、 x 、 \dot{x} 、 \ddot{x} はそれぞれ構造物の変位・速度・加速度を示している。

$$[M]\ddot{x} + [C]\dot{x} + [K]x = F \quad (1)$$

風車の設計で考慮する減衰は複数の要因に分解され、解析上での取り扱いが異なる。空気粘性による減衰は、風車の回転運動によって生じるものであるため、空力弾性解析（連成解析）の中で考慮される。復元解析の場合は、インターフェースロードの中にその影響が含まれている。海水粘性による減衰は、ジャケット構造では影響が小さいため、考慮しないことが多い。構造減衰や地盤減衰は、構造物の質量と剛性比例型の減衰（いわゆるレイリー減衰）として考慮することが多い。なお、地盤減衰を設定する際は、地盤調査を通じて取得した地点地層別の減衰定数に基づき設定することが望ましい。

5.4 終局限界状態の照査

終局限界状態の照査は、再現期間50年の暴風・波浪や津波などの設計条件に対して、下部構造や杭基礎が破壊せず、安定した状態を保つことを確認することを目的としている。洋上風力発電設備に関する技術基準の統一解説（以下、統一解説²³⁾）や IEC-61400²⁵⁾では、ジャケット構

造の照査方法は詳しく規定されていないが、信頼ある国際基準として ISO19902²⁸⁾に準拠することを推奨している。ジャケット構造のような鋼管構造に関する国内基準は少ないため、ISO19902²⁸⁾に準拠するのが基本となる。また、類似の基準として、ジャケット構造に関する国際基準 API-RP2A-LRFD³¹⁾や DNVGL-ST-0126²⁷⁾を参考にすることもできる。

5.5 疲労限界状態の照査

(1) 概要

疲労限界状態の照査は、発電時における風・波荷重の繰り返し作用に加えて、待機時、故障時にも繰り返し作用が生じるため、その疲労損傷度なども考慮して累積値として評価する。そのため、解析の実施に先立って、風車メーカーと協議して、供用期間中に故障が発生する回数などを設定しておくことが重要である。また、輸送時及び施工時に発生する疲労損傷度も加算する必要があり、製作施工法を予め設定した上で、その疲労影響を評価することが必要である。

(2) 疲労損傷度の算定方法

疲労設計は、公称応力による方法とホットスポット応力による方法の2種類があり、照査部位に応じて使い分ける必要がある。前者は復元解析により算定した公称応力度の時刻歴に、溶接部の応力集中係数 SCF を乗じてホットスポット応力度の時刻歴を求め、応力範囲と繰り返し回数を計数し、S-N 曲線と比較して疲労寿命回数を評価するものである。S-N 曲線は継手種別ごとに定められたものを使用する必要があり、例えば DNVGL-RP-C203²⁹⁾を参考にすることができる。

後者は応力集中を考慮したホットスポット応力度の変動幅に基づき、当該疲労曲線で照査するものである。ホットスポット応力度とは、溶接継手影響を除いた構造詳細により定まる対象部分の構造的集中応力度である。鋼管格点部は DNVGL-RP-C203²⁹⁾等にホットスポット応力の評価方法が規定されているが、トランジションピースのような構造複雑部では FEM 解析を実施してホットスポット応力を求める必要がある。図9に、ホットスポット応力の算出例を示す。照査対象の溶接止端部から 0.5t、1.5t (t: 板厚) 離れた地点の応力度を抽出し、2点を線形外挿して、ホットスポット応力を算出する。詳細な方法は、風力発電設備支持構造物設計指針・同解説³⁰⁾や DNVGL-RP-C203²⁹⁾などを参考にすることができる。

(3) 疲労等級の設定

ジャケット構造では、レグの長尺溶接、レグとブレースの格点部の溶接の疲労照査がその部材寸法を決定する上で重要となる。DNVGL-RP-C203²⁹⁾では、突合せ溶接を両

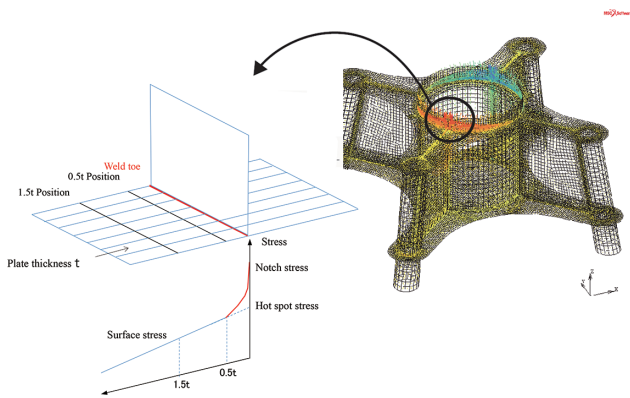


図9 FEM解析によるホットスポット応力の算出
Calculation of hot spot stress by FEM analysis

側から溶接した場合は内外面ともに D 等級を適用し、外面からのみ溶接された場合は F3 等級を適用することとしている。片面溶接を適用すると疲労損傷度が大きくなることから、両面溶接を採用することが基本となるが、その場合は接合する箇所・溶接方法、溶接作業者のアクセス方法や溶接作業環境など、設計開始時点で製作手順について製作担当とすり合わせる必要がある。片面溶接を使用する場合は疲労設計において支配的とならない場所を選定しなければならない。また、溶接止端部の疲労損傷度が厳しい箇所では、グラインダー等で仕上げアンダーカットを除去するか、ハンマーピーニングすることで疲労寿命を改善することができるが、適用する場合はその作業性について予め製作担当とすり合わせておく必要がある。将来的には、東京国際空港 D 滑走路棧橋部でも実績のある UIT (Ultrasonic Impact Treatment)⁷⁾を用いて圧縮残留応力を強制的に導入することで疲労寿命を改善する手法の適用も期待される。

疲労照査を行う際は、製作・施工誤差により板継部に目違いが生じることを想定して、疲労損傷度の評価を行うことが重要である。これは目違いによる応力集中が疲労損傷度に影響を及ぼすためであり、設計で想定した目違いと製作管理値が整合していることが重要である。そのため、詳細設計の開始時点で、造管長さや厚板の製作可能寸法を考慮した上で、溶接継手の位置を特定しておくことが重要である。

5.6 固有振動数の照査

風車の回転運動と支持構造物の共振を避けるために、風車メーカーが構造全体系の固有振動数について許容振動数帯を示す場合がある。図 10 に、許容振動数帯の設定例を示す。この場合、ロータの回転振動数 (1P) と、3 枚のブレードがタワーを通過する振動数 (3P) で挟まれた Soft-Stiff の範囲に、RNA・タワー・下部構造・基礎からなる構造全体の 1 次固有振動数が収まるように設計する。ジャケット構造はモノパイル構造と比較すると剛性が大きいため、3P 側

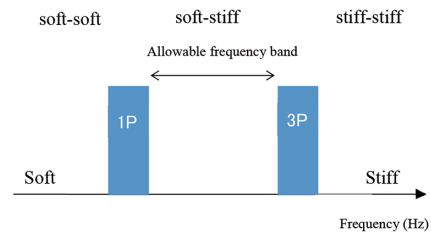


図 10 許容振動数帯^{3, 4)}
Allowable frequency band^{3, 4)}

が支配要因となる。許容振動数帯に収まらない場合は、ジャケットの構造諸元を見直し、剛性が下がるように処置する必要があるが、詳細設計の実施中に構造諸元を変更すると手戻りが大きいため、設計の初期段階で許容振動数帯に収まるような構造諸元を設定することが重要である。

6. 地震荷重に対する設計

6.1 入力地震動

統一的解説²³⁾では、設計に用いる地震動としてスペクトル適合波、観測波、サイト地震波 (港湾地震波) の 3 種類の地震動に対する照査が求められている。以下に、それぞれの概要を説明するが、詳細な設定方法は統一的解説²³⁾を参考にすることができる。

(1) スペクトル適合波

スペクトル適合波とは、電気事業法で定められた構造物の揺れの強さと構造物の固有振動数の関係を満たした時刻歴波形である。スペクトル適合波の時刻歴波形を設定する際は、複数の位相特性を考慮し、異なる 2 つの地震規模を考慮する必要がある。位相特性は、海溝型地震や直下型地震などをそれぞれ選定し、地震規模は再現期間 50 年の稀に発生する地震動と、再現期間 500 年の極めて稀に発生する地震動の 2 種類を構造物の揺れの強さの違いとして考慮する。

(2) 観測波

観測波は、過去に国内外で観測された強振動記録が用いられ、カリフォルニア地震 (1940 年 El Centro, 1952 年 Taft) や 1968 年十勝沖地震、1978 年宮城県沖地震などから複数選定する。観測波もスペクトル適合波と同様に、稀に発生する地震動と、極めて稀に発生する地震動の 2 つの地震規模を考慮する必要がある。既往の強振動記録の最大速度振幅がそれぞれ 0.25, 0.50 m/s となるように規準化されたものを使用する。

(3) サイト波 (港湾地震波)

サイト波は、建設地点の地震動の実測値に基づき設定されたものであり、国土交通省 国土技術政策総合研究所 港湾研究部 港湾施設研究室のホームページで公開されてい

る地震波を用いるのが一般的である。

6.2 荷重組合せ

地震荷重に対する支持構造物の影響評価は、RNA、タワー、下部構造、基礎、地盤パネからなる全体解析モデルを用いた時刻歴応答解析により行われる（以下、地震応答解析）。解析で考慮する荷重としては、地震荷重に加えて、風荷重、波荷重を考慮する必要がある、更には風車の運転状態も考慮する必要がある。表2は、IEC61400-3²⁹⁾及び統一的解説²⁹⁾などを参考に設定した荷重組合せの例であり、この他にも地震や風波の作用方向の組合せについても検討する必要がある。

近年は風車の大型化に伴い、極めて稀に発生する地震が支配ケースとなることがあるが、6.1節で述べたように多種類の地震波を考慮する必要がある他、上記した荷重組合せを考慮する必要がある、解析の負荷が非常に大きいため、支配的となる地震波や荷重組合せを早期に特定し、支持構造物の構造成立性を把握することが重要である。

6.3 地盤応答解析

(1) 地盤応答解析の目的

6.1節で述べた地震波のうち、スペクトル適合波とサイト波は工学的基盤に対する地震動（いわゆる基盤波）として定義されている。ここで、工学的基盤とは、“地盤の影響を大きく受けない地層”を地下のある深さに想定したものであり、統一的解説²⁹⁾では地盤中を伝播するせん断弾性波速度が400m/sを超える地層を工学的基盤として定義するように規定している。一般的に、硬質粘性土、礫混じり土・砂あるいは岩盤層などが工学的基盤層となり得る。せん断弾性速度はN値（土の締めり具合や強度を求める基準となる数値であり現地での標準貫入試験より得る）から算定することも可能とされているが、建築基礎構造設計のための地盤評価・Q&A³⁹⁾によると、両者の関係はバラツキが大きいため、地盤調査を実施する際は標準貫入試験に加えてPS検層も実施してせん断弾性速度を直接計測し、工学的基盤の位置を特定することが望ましい。

表2 地震応答解析の荷重組合せ例

Sample of load combinations for seismic response analysis

CASE	Design situation	Meteorology condition	Metoccean condition
A	During operation	Rated wind speed	Annual average wave height
B	During emergency stop	Rated wind speed	
C	Idling	No wind/cutout wind speed	

Rated wind speed: Specified wind speed at the hub height where the rated power of the wind turbine is generated
Cutout wind speed: Maximum wind speed that the wind turbine can generate electricity

この基盤波が地盤を通過して、構造物に地震作用を与えるとき、地盤の応答が地震動を増幅させる影響を示すことがある。そのため、地震応答解析に先立ち、地盤増幅の影響を評価する必要がある（以下、地盤応答解析）。地盤応答解析を実施する場合、一般的には地盤だけを対象としたモデルを構築して、時刻歴応答解析が行われる。なお、観測波は、海底面に入力することを想定した地震動（いわゆる表面波）であるため、地盤応答解析は実施せず、地震応答解析においても地盤増幅の影響は考慮しない。

(2) 地盤応答解析の方法

図11に地盤応答解析モデルを示す。5.3(2)でも述べたように、予め実施した地盤調査により、地層の単位体積重量、せん断弾性係数、せん断弾性波速度などの情報を取得して設計地盤を作成し、これに基づき地盤応答解析モデルを作成する。地層がほぼ水平に累重しているとみなされる場合は1次元自由地盤モデルが採用されるが、地層の傾斜の影響が無視できない場合は、2次元モデルを用いる必要がある。

砂層や粘土層などの地盤は、一般的に非線形性を示すため、地盤応答解析における地盤の構成則としては等価線形化手法が一般的に用いられるが、等価線形化手法の適用範囲（1%以下）を超える場合は、非線形モデルを用いて評価する必要がある。等価線形化手法の詳細な方法については、“建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計”²⁴⁾を参考にすることができる。なお、地盤応答解析の結果として、基盤に対する相対変位、相対速度を取得する。その活用方法は、次節で述べる。

(3) 液状化の扱い

地震時に地盤の液状化が発生すると、地盤剛性が大きく低下して、地盤変形が大きく、地盤反力が小さくなる傾向を得る。液状化が生じる場合と生じない場合で地盤の増幅影響が異なり、一概にどちらのケースが支配的であるかを見極めることが困難であるため、両方を対象として解析を

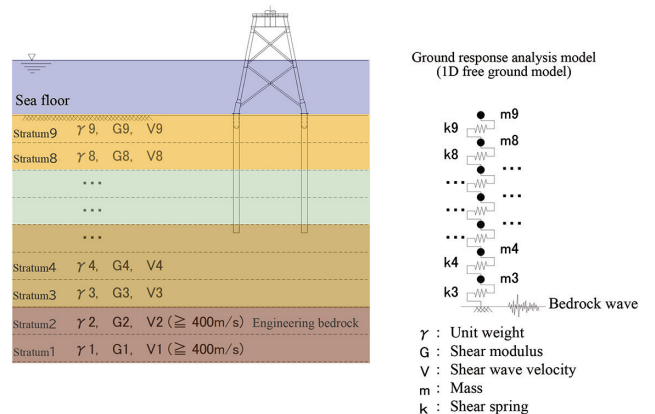


図11 地盤応答解析モデル
Ground response analysis model

実施する必要がある。液状化の影響を考慮する方法としては、地盤剛性に低減率を乗じる方法が多く用いられており、低減率の設定方法は、“建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計”²⁴⁾を参考にすることができる。

6.4 地震応答解析

(1) 解析モデル

図12に、地震応答解析の概念図を示す。構造解析モデルは、構造全体の振動性状を再現するために、下部構造や杭基礎、タワー、RNAからなる全体モデルを使用する。構造物に作用する地震力と地盤の増幅影響を同時に考慮するため、解析空間全体に基盤波の加速度(基盤加速度)による慣性力を入力し、地盤応答解析で得られた地盤との相対変位を、構造解析モデルの地盤バネに入力する。

(2) 地盤バネ

地震時解析モデルに用いる地盤バネは、地盤から支持構造物へ伝わる地震動の影響を評価するため、5章で説明した地盤の非排水せん断強度やせん断抵抗角から評価する方法ではなく、地盤のせん断弾性波速度から動的せん断剛性を評価する方法を用いることが一般的である。その設定方法として、波動論に基づき評価する方法が一般的に用いられる。なお、厳密に地盤の挙動を評価する場合は、薄層要素法を適用することも可能である。薄層要素法とは、地盤を薄い層に分割し、各薄層は一樣均質な材料物性を持つものと仮定して波動方程式の離散化を行うことにより、成層地盤の変位と荷重の関係をより厳密に表現する手法であり、洋上風力用のジャケット構造に適用した検討事例として、文献8), 9)などを参考にすることができる。

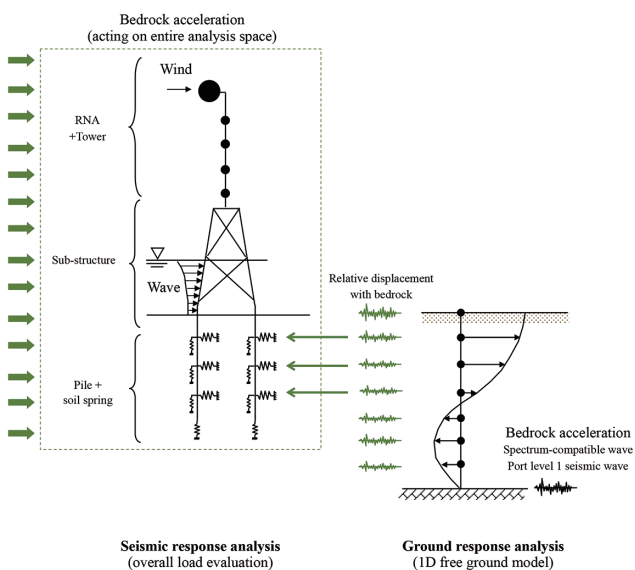


図12 地震応答解析の概念図
Concept of seismic analysis

(3) 部材応力度の照査

統一的解説²³⁾では、稀に発生する地震に対して、支持構造物が損傷せず、極めて稀に発生する地震に対して倒壊・崩壊しないことを求めている。ジャケット構造はレグとブレースの配置によりトラス構造が構成され、構造の安定性が高いため、部分的に部材の塑性化が生じたとしても、倒壊崩壊を防ぐことは可能である。しかし、地震後の即時再稼働を想定したときに、塑性化部位を特定し、その損傷度を評価することは容易ではない。そこで、安全側に設計する方法として、極めて稀に発生する地震に対しても、部材応力度を弾性範囲に収める方法が考えられる。ただし、この設計法の採否は発電施設の運用方針に照らして判断する必要がある。なお、地震時の部材応力度の照査方法としては、API-RP2A-WSD³²⁾などを参考にすることができる。

7. 構造詳細の検討

7.1 グラウト接合部の設計

(1) 構造概要

グラウト接合部は、ジャケット構造のレグに発生する軸力や曲げモーメントを杭に伝達する重要部位である。グラウト接合部の構造概要を図13に示す。鋼管とレグの100～200mm程度の隙間には、圧縮強度100MPa級のグラウト材が充填される。グラウト材の開発は欧州メーカーが先行しているが、国内でも同程度の強度を有するグラウト材¹⁰⁾の開発が進められている。なお、外管の内面及び内管の外面にシアキーが配置され、シアキー間に構築されるグラウトの圧縮ストラットにより、レグから杭へ軸力が伝達される機構となっている。

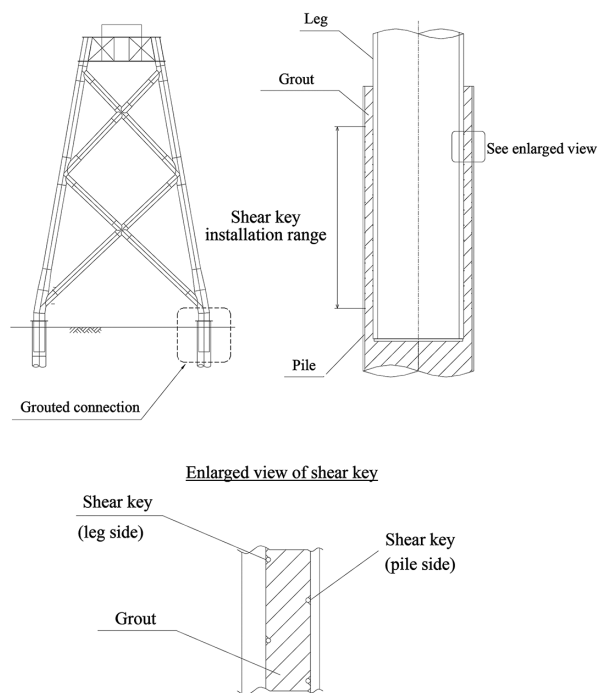


図13 グラウト接合部
Grouted connection

(2) 設計手法

グラウト接合部の構造安全性を検証する方法としては、DNVGL-ST-0126²⁷⁾で規定される“軸力に対するシアキーのせん断力の照査”、“曲げモーメント及びせん断力に対する接触圧の照査”、“繰り返し荷重に対する疲労損傷度の照査”などの簡易評価式を満足することが基本となる。欧州では、この評価式による検討に加えて、有限要素法解析を実施して、レグと杭の間に施工誤差を考慮した場合のグラウト接合部の安全性を検証することが一般的となっている。

7.2 トランジッションピースの設計

(1) 構造概要

トランジッションピースは、タワー基部の曲げモーメントをジャケットのレグに軸力で伝達するための重要部位であり、欧州においても方杖構造や箱桁構造など様々な形式が採用されている。

(2) 設計手法

トランジッションピースはタワーとの接続節点になる箇所であり、風車メーカーからタワーや接続フランジなどの情報提供を受けた上で、相互に協議しながら設計を進めることが重要である。また、トランジッションピースの構造は複雑であるため、有限要素解析を実施して、各部材の安全性を評価することが基本となる。トランジッションピースは、外部作業床や内部作業床の支持構造としての機能も担うことから、付属設備と併せて検討を進めることが重要である。

7.3 付属設備の設計

(1) 付属設備の配置

図 14 に、ジャケット構造における付属設備の配置例を

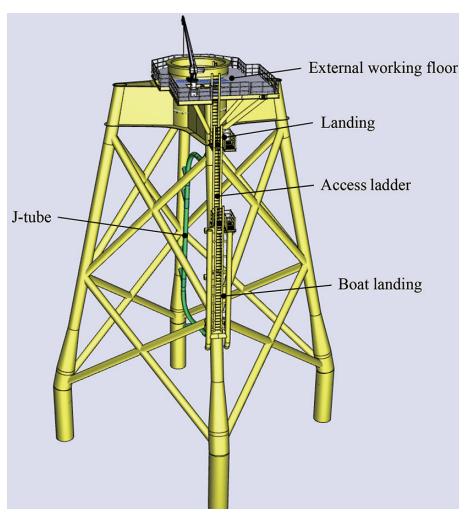


図 14 付属設備の配置例
Sample of appendages

示す。本図では、外部作業床、踊り場、アクセスラダー、J-tube、接舷設備が示されているが、この他にトランジッションピース内部の作業床、グラウト配管、仮受工など施工用付属設備も設置される。

(2) 接舷設備及びアクセス設備

接舷設備は、アクセス船の接岸時の操舵性を考慮して、主波向きと反対側に配置することが基本となる。着船位置から外部作業床までの高低差が大きい場合は、昇降時の作業員の安全性に配慮して、中間部に踊り場を設ける。接舷設備は供用中のアクセス船の接舷力と波荷重に対して設計する。踊り場に波浪が作用する場合は、上向きの波力（スラミング力）も考慮しなければならない。

(3) J-tube

ケーブルを内包する保護鋼管 (J-tube) は、1基につき1～2箇所配置する。J-tubeには風及び波荷重が作用するため、終局限界状態・疲労限界状態の照査に加えて、渦励振による損傷が生じないように、サポート材の配置方法や間隔を決定することが重要である。

(4) 外部作業床

外部作業床は、タービン内機器を交換するために必要な作業スペースと、非常時にナセル上部脱出口から退避するためのスペースを確保するように、その形状を決定する。荷揚げ用の固定式クレーンシステムは、接舷設備に接舷したアクセス船と外部作業床上の荷揚げ位置を良く考えなければならない。外部作業床には、その他にも航路標識灯、照明設備、看板、モニタリングシステムなど多くの設備が配置され、トランジッションピースの設計にも影響することから、早期に事業者や風車メーカーと調整することが重要である。

7.4 防食設計

(1) 概要

ジャケット構造の防食システムは、腐食環境、供用年数、実績、コスト、維持管理などを勘案して、仕様を決定する。一般的には、気中部及び飛沫干満帯に防食塗装を、水中部に電気防食を採用する事例が多い。

(2) 防食塗装

防食塗装は、工場製作段階で予め鋼材外面に塗布した塗料により、鋼材の腐食を防止するものである。港湾鋼構造物防食・補修マニュアル²¹⁾は、鋼構造物の防食塗装に関する国際規格 ISO12944²²⁾の外洋向けの塗装仕様を加味して防食塗装の仕様を設定しており、これを参考にすることができる。ジャケットの設計供用期間が選定した塗装の期待耐用年数を超える場合は、安全側の設計として、鋼材の板

厚に腐食代を考慮するなどの方法が考えられる。塗装の期待耐用年数は、港湾鋼構造物防食・補修マニュアルを参考に設定することもできるが、使用する塗装の実績や ISO 12944²²⁾ で規定されている促進劣化試験なども踏まえて総合的に評価することが望ましい。

(3) 電気防食

電気防食は、流電陽極方式と外部電源方式の2種類に分類される。ジャケット構造では、実績及び維持管理の観点から流電陽極方式が採用されることが多いが、欧州ではSDGsの観点で外部電源方式を採用するケースも見られる。

8. 結 言

現在、日鉄エンジニアリングは清水建設(株)と共に、石狩湾新港洋上風力発電施設の建設工事に携わっている。本プロジェクトは、ジャケット構造を採用した国内初のプロジェクトであり、本プロジェクトの完工時点では、国内最大級となる8MWの風車が採用されている。本稿公表時点

では、鋼管杭の施工(図15)が完了し、ジャケット構造の製作(図16)が進められている。2023年度には、ジャケット構造と風車の施工を行い、同年中の運転開始を目指している。

本プロジェクトは2022年2月に日本海事協会の設計認証を取得しているが、審査当時は国内におけるジャケット構造の認証事例がなく、地盤の評価法など一つひとつの技術について、入念な審査が行われた。前例のないところから積み上げてきたので多くの苦労があったが、第三者機関と協調して洋上風力発電設備の前例をつくるという貴重な経験をする事ができた。

今後の洋上風力発電は、風車の大型化、大水深化が進み、構造成立性、経済合理性の追求、製作・施工能力の強化が大きな課題となる。日鉄エンジニアリングは、NEDO実証研究、石狩湾新港洋上風力発電などで得られた経験と、日鉄エンジニアリングの50年以上にわたって培ってきた海洋設計・施工技術を組み合わせ、今後の国内洋上風力発電の拡大・普及に貢献していきたいと考えている。

謝 辞

本稿の発表にあたり、合同会社グリーンパワー石狩ならびにグリーンパワーインベストメントの関係者の皆様、Ramboll社の関係者の皆様にご協力を頂きましたことを感謝します。

参考文献

- 1) 経済産業省：2050年カーボンニュートラルに伴うグリーン成長戦略。2020
- 2) 洋上風力の産業競争力強化に向けた官民協議会：洋上風力産業ビジョン(第1次)概要。2020
- 3) 犬飼, 鈴木, 片山, 入江：洋上風力発電設備基礎の設計技術の確立。日鉄エンジニアリング技報。4, (2013)
- 4) 片山, 大嶽, 森下：洋上風力基礎設計技術の現況と展望。溶接学会誌。91(1), (2022)
- 5) Craig, R., Bampton, M.: Coupling of Substructures for Dynamic Analyses. AIAA Journal. 6(7), 1313-1319 (1968)
- 6) 今村, 植田：風車の荷重連成解析コードの開発動向。日本風力エネルギー学会誌。39(3), (2015)
- 7) 島貫：UITによる溶接部の疲労亀裂発生抑制技術。日本溶接協会溶接技術者交流会。WE-COMマガジン。(20), (2016)
- 8) 吉岡, 石尾, 正月, 内山, 石原：洋上風力発電ジャケット基礎の地震応答解析～その1逸散減衰効果の検証～。令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会。I-329, (2022)
- 9) 倉本, 正月, 内山, 國松, 吉岡, 石尾, 石原：洋上風力発電ジャケット基礎の地震応答解析～その2薄層法の適用～。令和4年度土木学会全国大会第77回年次学術講演会。I-330, (2022)
- 10) 木元, 徳永, 齋藤：着床式洋上風力発電プラント用高強度モ



図15 現地海域での鋼管杭打設状況
Installation of piles at the site



図16 日鉄鋼構造(株)で製作中のジャケット構造
Jacket structure under construction at Nippon Steel Steel Structure Co., Ltd.

ルタルの開発. 三菱マテリアルセメント研究所研究報告. (18), (2017)

参考基準類

- 21) 沿岸技術研究センター：港湾鋼構造物防食・補修マニュアル, 2009年
- 22) ISO12944：Paints and varnishes - Corrosion protection of steel structures by protective paint systems, 2018年
- 23) 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, 2020年
- 24) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計, 2006年
- 25) IEC61400-3：Wind energy generation systems Part3-1: Design requirements for fixed offshore wind turbines, 2019年
- 26) American Petroleum Institute：API-RP2A-GEO, Geotechnical and Foundation Design Considerations, 2014年
- 27) DNVGL：DNVGL-ST-0126, Support structures for wind turbines, 2018年
- 28) ISO19902：Petroleum and natural gas industries-Fixed steel offshore structures, 2007年
- 29) DNVGL：DNVGL-RP-C203, Fatigue design of offshore steel structures, 2018年
- 30) 土木学会：風力発電設備支持構造物設計指針・同解説, 2010年
- 31) American Petroleum Institute：API-RP2A-LRFD, Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms - Load and Resistance Factor Design, 2019年
- 32) American Petroleum Institute：API-RP2A-WSD, Planning, Designing, and Constructing Fixed Offshore Platforms - Working Stress Design, 2014年
- 33) 日本建築学会：建築基礎構造設計のための地盤評価・Q&A, 2015年



大嶽敦郎 Atsuo OOTAKE
日鉄エンジニアリング(株)
海洋本部 技術部 洋上風力設計室
シニアマネジャー
東京都品川区大崎1-5-1 〒141-8604



風野裕明 Hiroaki KAZENO
日鉄エンジニアリング(株)
海洋本部 技術部 洋上風力計画室
シニアマネジャー



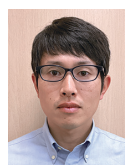
森下和帆 Kazuho MORISHITA
日鉄エンジニアリング(株)
海洋本部 プロジェクト部 プロジェクト管理室
シニアマネジャー



笹井綾乃 Ayano SASAI
日鉄エンジニアリング(株)
海洋本部 技術部 洋上風力設計室(執筆当時)
マネジャー



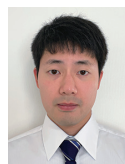
加賀美暢一 Yoichi KAGAMI
日鉄エンジニアリング(株)
海洋本部 技術部 洋上風力設計室
マネジャー



福田 渚 Nagisa FUKUDA
日鉄エンジニアリング(株)
海洋本部 技術部 洋上風力設計室



中野雄太 Yuta NAKANO
日鉄エンジニアリング(株)
海洋本部 技術部 設計・技術室



藤士尚也 Naoya TOHSHI
日鉄エンジニアリング(株)
海洋本部 技術部 設計・技術室