

行政情報

コンクリート製浮体式洋上風力発電施設の設計施工ガイドラインの概要

国土交通省 海事局 海洋・環境政策課 技術企画室

2050年カーボンニュートラルに向け、再生可能エネルギーを最大限導入することが求められており、特に洋上風力発電は、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札とされている。

浮体式洋上風力発電の導入促進において、事業全体の低コスト化は課題の1つとなっている。支持構造物をコンクリートで製造すると安く製造できる場合があるため、支持構造物をコンクリートで製造する際の技術基準が求められていた。

こうした状況を受けて、国土交通省では、浮体式洋上風力発電の建造・設置コストの低減、技術の普及促進を目的として、「コンクリート製浮体式洋上風力発電施設の設計施工ガイドライン」の策定を行った。
キーワード：浮体式洋上風力、コンクリート、コンクリートの配合条件、設計要件、全体強度解析

1. はじめに

2050年カーボンニュートラルに向け、再生可能エネルギーを最大限導入することが求められており、特に洋上風力発電は、再生可能エネルギーの主力電源化に向けた切り札とされている。

これまで洋上風力発電は欧州を中心に拡大してきたが、2050年にかけてはアジア市場の急成長が見込まれている。特に深海域の広がる日本・アジアにおいては、浮体式の導入余地が大きい。浮体式は欧州においても開発途上である。

また、2020年には、洋上風力産業ビジョン（第1次）において「2040までに3,000万～4,500万kWの案件形成」が目標とされており、目標達成には、技術開発や量産化を通じて浮体式のコストを大幅に低減することが必要である。

こうした背景から2021年より、グリーンイノベーション基金において洋上風力発電のプロジェクトが開始されており、新技術の開発が進められている。コンクリート製浮体はその1つとして採択されている。

こうした状況を踏まえて、国土交通省では、日本特有の海象においても使用することができるコンクリート製での浮体式の設計・製造方法の検討を行い、「コンクリート製浮体式洋上風力発電施設の設計施工ガイドライン」（以下、「本ガイドライン」という。）を昨年度に取りまとめた。本ガイドラインは、洋上風力発電施設のうち、コンクリート製浮体式洋上風力発電の

設計施工に関するガイドラインを定めたもので、すでに建造されている鋼製浮体式洋上風力発電施設に共通する項目は「浮体式洋上風力発電施設技術基準安全ガイドライン」を参照している。本稿では、鋼製浮体式とコンクリート製浮体式の特徴の違いによる設計施工手法の違いを挙げながら、ガイドラインのポイントについて紹介する。浮体式洋上風力発電施設における鋼製浮体施設とコンクリート製浮体施設の特徴を表1に示す。

なお、本ガイドラインは国土交通省のホームページに掲載されているので参照されたい。
(https://www.mlit.go.jp/maritime/maritime_fr6_000006.html)

2. コンクリート製浮体施設における留意点

コンクリート製浮体施設は、波浪や海水飛沫の影響を受けるため、コンクリート自体の劣化や波による浸食により陸上施設に用いられるコンクリートよりも機能が損なわれやすい。そのための対策を含めて、コンクリート製浮体施設において特に留意すべき点を以下に記載する。

(1) ひび割れ幅の制限

コンクリート製浮体施設に過大なひび割れが発生した場合、鋼材腐食による耐久性の低下、水密性の低下に伴う浮体機能の低下等が生じる。したがって、コン

表一 鋼製浮体式とコンクリート製浮体式の特徴

項目		鋼構造	コンクリート構造
材料	材料の構成	・単一材料（鋼材）	・複合材料（セメント、練混ぜ水、骨材、混和材、混和剤、鉄筋、構造用鋼材、PC鋼材、補強繊維等）
	材料の性能	・必要に応じて材質を選定	・使用目的に応じた配合設計が必要
	材料の特性	・腐食性があるため、防食が必要。 ・一般に部材の細長比が大きく、座屈の照査や座屈防止対策が必要。	・コンクリートが圧縮、鉄筋が引張を負担する複合構造。 ・水密性が要求される箇所では、コンクリートのひび割れを防止・制御するための方策（プレストレス等）が必要。 ・鉄筋腐食の防止対策が必要。
建造	建造方法	・工場で建造する方法と、工場で製造した鋼製部材を現地で接合して建造する方法がある。 ・工場製造は天候の影響を受けない（屋外作業が必要なものを除く）。	・現地で型枠にコンクリートを流し込んで構造物を建造する方法と、工場で製造したプレキャストコンクリートを現地で接合して建造する方法がある。 ・天候の影響を受けないような施工方法および管理が必要（工場製造が可能なものは除く）。
	建造工程	・硬化時間は不要。	・コンクリートの強度発現に時間がかかるので、現地でコンクリートを打設して構造物を建造する場合は工程に影響する。
検査		・水圧試験および水密試験等 ・構造部材および溶接部の欠陥（傷、クラック等）検査（目視あるいは非破壊検査） ・塗装検査	・鉄筋かぶりの検査（非破壊検査） ・ひび割れ幅の検査 ・コンクリート打継ぎ部の検査 ・プレキャスト部材接合部の検査 ・水圧試験および水密試験

クリートのひび割れ幅を適切に制限することが必要であり、飛沫帯に置かれる部材や主構造部材においては、設計耐用期間中に鋼材の腐食を防ぐことを目的に、ひび割れ幅の限界値を0.2mmとし、高い水密性を確保する必要がある部材におけるひび割れ幅の限界値は0.1mmを目安とした。

(2) 鉄筋かぶりの確保

コンクリート製浮体施設では、水の浸透や塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食を防止するために、所定の鉄筋のかぶりを確保することが不可欠である。そこで、鉄筋の最小かぶりの標準値を飛沫帯および海上大気中では60mm、海中では50mmとした。また、配筋検査時や型枠検査時に加えて、コンクリート打設後の非破壊試験によりコンクリート中の鉄筋のかぶりが確実に確保されていることを確認することとした。

(3) アルカリシリカ反応の抑制

海洋構造物であるコンクリート製浮体式施設には、海水中に含まれるアルカリ金属（Na, K）が供給されるため、陸上の構造物の場合に比べて、骨材のアルカリシリカ反応によるコンクリートの劣化が促進する可能性がある。

そこで、コンクリート製浮体施設に用いるコンクリートには、アルカリシリカ反応に対して「無害」であることが確認された骨材を用いることを原則とし

た。また、「無害」と判定された骨材であっても、当該骨材が、港湾施設等の海洋環境下での十分な使用実績が確認できていない場合には、①コンクリート中のアルカリ総量の抑制、②アルカリシリカ抑制対策効果をもつ混合セメントの使用、③アルカリシリカ抑制対策効果をもつ表面保護材の使用の3つの対策のうち、いずれか一つあるいは複数を組み合わせて抑制対策を講じるのがよいとした。

特に、高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の結合材を適切な割合で混合すると、密実で海水の化学的作用に対する抵抗性が高いコンクリートとなるため、コンクリート内部への塩化物イオンの侵入も防ぐことができ、アルカリシリカ反応の抑制にも有効である。

(4) 適切な水セメント比の設定

コンクリートの強度、耐久性、水密性を支配する最大因子は水セメント比（W/C）であり、W/Cが小さくなるほど強度が高くなり、耐久性、水密性が高くなる。なお、セメント以外の結合材を使用する場合には、セメントにこれら結合材を含めた水結合材比を水セメント比と同義的に扱う。

コンクリート製浮体施設における水セメント比の上限は、飛沫帯及び海上大気中に供される部材の場合は40%、海中に供される場合は45%を標準とし、かつ、コンクリートに要求される強度、コンクリート劣化に対する抵抗性並びに物質の透過に対する抵抗性等を考

慮して、これらから定まる水セメント比のうちで最小の値を設定するとした。

「飛沫帯及び海上大気中」と「海中」とで標準比を区別したのは、「海中」は常時海中に没している部分のため酸素の供給量が少なく鋼材腐食の進行が穏やかなのに対し、「飛沫帯及び海上大気中」では、波しぶきや潮風によって乾湿が繰り返されることでコンクリート中の鋼材の腐食、凍害等の劣化が生じやすいからである。

3. 設計

浮体式洋上風力発電施設は、20年を超える供用期間において、継続的な稼働が前提とされており、浮体にコンクリートを使用する目的が風車を支持する構造物である浮体のコスト低減にあることから、高い頻度での点検や修繕は前提とされていない。浮体式洋上風力発電施設に重大な損傷が発生した場合、港湾での修繕費用だけでなく、係留、海底ケーブル等の再設置が必要となり、その費用が事業による収益を上回る可能性があることから、供用機間全体において十分な健全性を備えることが求められる。

(1) 設計目標と設計条件

コンクリート製浮体施設では、供用期間中において耐久性が確保されていることを前提とし、安全性、使用性などの要求性能を確保することが設計目標となる。ひび割れに関しては、バラストコンクリート等付属的な部材を除き、ひび割れが構造性能に悪影響を及ぼさない設計としなければならない。ただし、設計寿命を考慮した十分な検討と実績等による検証がなされ、かつ、設計的な余裕を十分に見込んでいる場合に

は、ひび割れの発生を許容することができるとした。

(2) 設計フロー

設計は、要求性能の設定、構造配置、構造詳細の設定、要求性能の照査という作業で構成され、これらの作業が一貫して実施されるために、適切な設計フローの設定が重要である。設計フローの例を図一に示す。

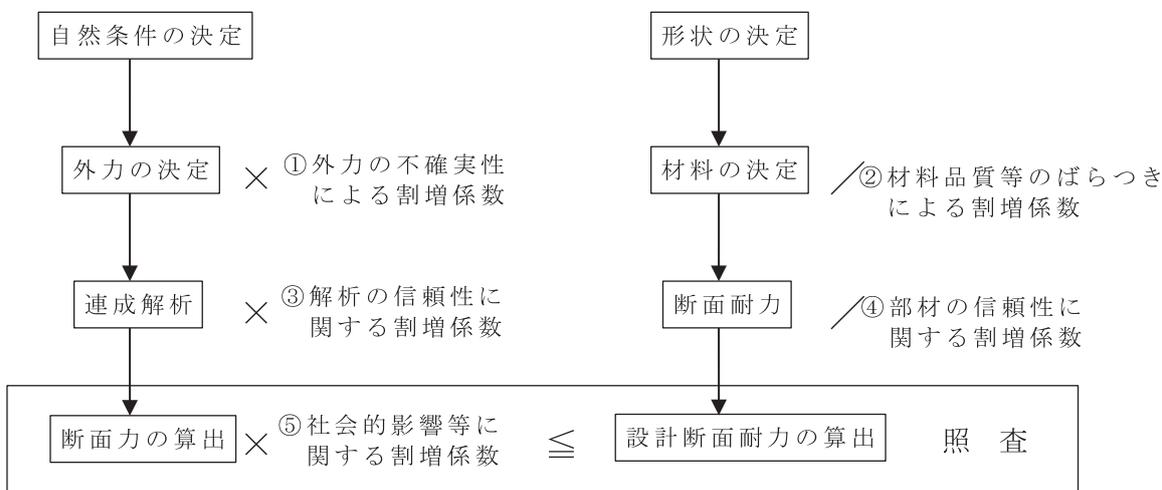
まず、自然条件を決定し、外力を算定、風車、浮体、係留系の動的連成解析によって、発生する断面力を算定する。次に浮体の形状を決定し、材料を選定、断面耐力計算により設計断面耐力を算定する。最後に、設計断面耐力が発生する断面力よりも安全側にあることを確認する。

(3) 構造配置

浮体構造においては、台風などによりコンクリートが損傷し、ひび割れなどが発生した場合、数時間から数日にわたり繰返し荷重が作用し海象条件によっては修復が困難になるため、損傷が加速的に拡大する可能性がある。そのため、タワー固定部、係留設備部など、暴風時において外力が継続的に作用する箇所については、ひび割れ後の弾塑性解析を様々な条件で実施し、加速度的な破壊に至らないことを確認するなど、慎重な設計が必要である。

タワー部は、陸上風車や着床式洋上風車と同様に、アンカーボルト方式、アンカーリング方式等によりコンクリート製浮体施設に接合するため、タワー固定部のコンクリートには引張力が作用する。また、浮体構造では、6自由度の動揺によるタワー固定部に大きな断面力が生じるため、タワー固定部周辺への影響についても考慮しなければならない。

係留部は、鋼製部材とコンクリートとの複合構造と



図一 設計フローの例

なり、アンカーボルトや埋め込み金物を利用する接合方法が想定される。コンクリートに繰返しの引張荷重が作用するため、疲労限界に対しても十分に配慮しなければならない。

(4) 全体強度解析

浮体式洋上風力発電施設では、空力的な現象と水力的な現象が連成するため、風車・タワー・浮体・係留系に作用する風および波による荷重を考慮した時間領域での連成解析を行う。ただし、時間領域における解析結果と同等以上の安全性が確保される場合には、周波数領域における解析手法を採用してもよい。

時間領域における動的応答解析手法を用いた全体構造系の動的連成解析のあと、浮体構造物を静的に解く、2段階解析法が適用できる。これにより、計算時間が短縮でき、解析が簡便となる。2段階解析フローの一例を図一2に示す。

(5) 耐久性に関する照査

本ガイドラインでは、耐久性に関する照査として、中性化と水の浸水に伴う鋼材腐食に対する照査、塩化物イオンの侵入に伴う鋼材腐食に対する照査、凍害に対する照査を規定している。

コンクリート構造物の耐久性に最も大きく寄与するのは鋼材腐食である。かぶりに過大な幅のひび割れが存在すると、局所的な鋼材腐食が生じる場合がある。そのため、コンクリート表面におけるひび割れ幅は、鋼材腐食に対するひび割れ幅の限界値以下でなければならない。

鋼材腐食の原因は塩化物イオンの侵入が主であり、コンクリート表面の塩化物イオン濃度は、構造物が供用される海域や海象条件によって異なるため、実績に基づいて設定するが、建設事例が少なく実測データが

十分でない海域に建設を行う場合は、塩化物イオン濃度を 18.0 kg/m^3 として設定する。

コンクリートの配合や設計で十分に鋼材腐食を防がない場合は、耐食性が高い補強材や防錆処置を施した補強材の使用、鋼材腐食を抑制するためのコンクリートの表面被覆、あるいは腐食の発生を防止するための電気化学的手法等を用いる等、適切な対策を施さなければならない。

4. 施工

個々の現場の条件に応じて、品質確保、工期、安全性、経済性、環境への影響を十分に考慮し、円滑な施工が実施できるように計画を立てる必要がある。

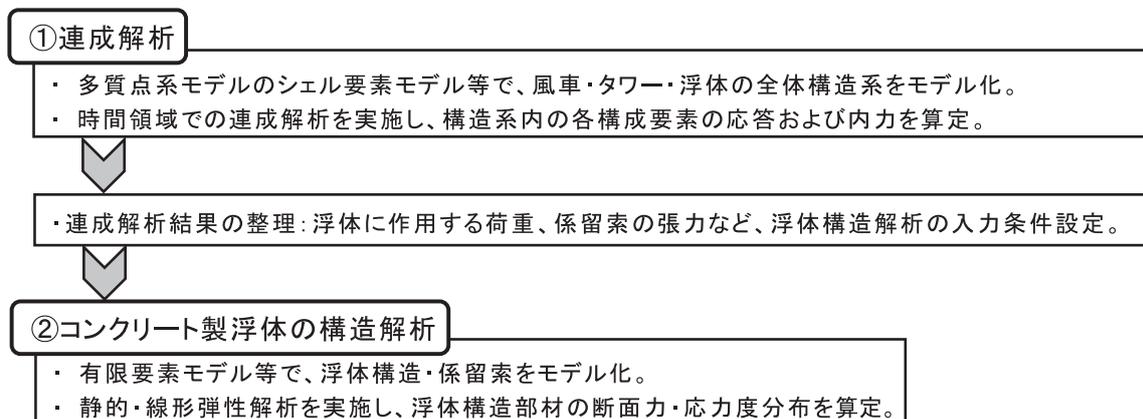
コンクリート製の施工方法は、現地で型枠にコンクリートを流し込んで建造する方法と、工場で製造したプレキャストコンクリートを現場で接合する方法がある。

(1) 現場打ちコンクリートの製造、打込み、養生

海洋の厳しい環境下で供用されるコンクリート製浮体施設は、わずかな初期欠陥の存在が、構造物の機能を早期に低下させる恐れがある。そのため、均一で欠陥のないコンクリートが得られるように、綿密な施工計画を立て、運搬、打込み、締固め、養生等、現場打ちコンクリートの全工程において入念な施工を行わなければならない。

(2) プレキャストコンクリートの運搬、接合、設置

プレキャストコンクリートは、所要の品質が得られるように製作する。また、プレキャストコンクリートは、その品質が損なわれないとともに、組み立てられた構造物の性能が確保されるよう、運搬、保管、接合、



図一2 2段階解析フローの例

架設および設置を行わなければならない。

(3) 高流動コンクリート

コンクリート製浮体施設は、鉄筋、PC 鋼材が密に配置される構造となることが多い。このような場合には、コンクリート工事における施工の省力化や合理化、信頼性の確保とこれに伴う耐久性の向上という面から、高流動コンクリートの使用を考えることが望ましい。ただし、万一の場合を想定し、施工条件や打設規模に応じた締固め装置を準備しておくのがよい。

5. おわりに

今回本ガイドラインを作成するにあたって、有識者

の方々に安全性について考慮すべき部分について検討いただき、関係機関の協力を得て安全検証や技術調査を実施した。今後、新技術の調査や運用の中での評価を引き続き行い、本ガイドラインがより適切で浮体式洋上風力発電の商業化に即したものになるよう、必要な見直しを行い、充実を図っていく。

JCMA

《執筆協力》

(国研) 海上・港湾・航空技術研究所, (一財) エンジニアリング協会

[筆者紹介]

国土交通省 海事局 海洋・環境政策課 技術企画室

