

洋上風力研究室・確認審査所の活動について

野村 大輔*・栗山 善昭**・福永 勇介***・仁井 克明****・山本 修司*****

* (一財) 沿岸技術研究センター 企画部 研究員

** (一財) 沿岸技術研究センター 特別研究監

*** (一財) 沿岸技術研究センター 研究主幹

**** (一財) 沿岸技術研究センター 企画部 主任研究員

***** (一財) 沿岸技術研究センター 参与 確認審査所確認員

本稿では、2022年度(令和4年度)の洋上風力研究室の活動内容及び確認審査所で行った適合性確認業務について報告する。

キーワード: 防食, 洗掘, 海底地盤調査, 適合性確認

1. はじめに

地球温暖化が全世界で喫緊の課題となるなか、日本も2050年のカーボンニュートラルを目指すことを2020年10月に宣言した。カーボンニュートラルを達成するためには、二酸化炭素の排出を削減することが重要であり、再生可能エネルギーの一つである洋上風力発電への期待が高まっている。2020年12月に策定された洋上風力産業ビジョン(第1次)では、年間100万kW程度の区域指定を10年継続し、2030年までに1,000万kW、2040年までに浮体式も含む3,000万kW~4,500万kWの案件を形成する、という導入目標が設定されている。日本の風力発電の導入量は、陸上と洋上を合わせても2020年時点で440万kW程度であり、意欲的な導入目標と考えられる。

洋上風力発電の導入促進のため、2016年5月に港湾法が改正され、港湾区域で占用公募制度が導入された。また、2018年12月には、「海洋再生可能エネルギー発電設備の整備に係る海域の利用の促進に関する法律」(以下「再エネ海域利用法」という。)が成立した。再エネ海域利用法は、一般海域において洋上風力発電を実施可能な促進区域を国が指定し、発電事業者を公募によって選定して、選定された発電事業者が海域を長期に(30年間)占有することを可能とする制度である。再エネ海域利用法の施行により、一般海域にも洋上風力発電設備を設置する環境が整備され、全国各地の適地で具体的な洋上風力発電事業が計画・検討されているところである。2020年6月には長崎県五島市沖で、2020年11月には秋田県能代市・三種町及び男鹿市沖、秋田県由利本荘市(北側・南側)、千葉県銚子市沖で公募が開始され、前者は2021年6月に、後者は2021年12月に発電事業者が選定された。2022年12月には秋田県八峰町能代市沖、長崎県西海市江島沖、秋田県男鹿市・潟上市・秋田市沖、新潟県村上市・胎内市沖で公募が開始された。

沿岸技術研究センターでは、2017年に洋上風力研究室を設置し、洋上風力発電に関する各種調査研究活動を進

めている。本稿では令和4年度における洋上風力研究室の主要な活動状況について報告する。

2. 共同研究について

2.1 洋上風力発電設備支持構造物の防食工法に関する共同研究

我が国では洋上風力発電設備の導入が進められているが、港外に大規模な洋上風力発電設備を建設した事例はほとんどない。このため、先行する海外の設置事例や技術的知見、また我が国の港内における設置事例等をふまえ、洋上風力発電設備支持構造物の防食の設計と維持管理について、通常の港湾鋼構造物と異なる留意事項や参考となる技術情報を整理する必要がある。そこで、それらの情報をまとめた「洋上風力発電設備支持構造物の防食工法の手引き(素案)」を作成することを目的として、電気防食工業会(会員会社:株式会社ナカボーテック、日鉄防食株式会社、日本防蝕工業株式会社)との共同研究を2020年11月から2022年9月に実施した。

共同研究で取り扱う、洋上風力発電設備支持構造物の防食上の主な課題は以下の事項である。

(1) 洋上風力発電設備支持構造物の特徴

- ・ 外洋の厳しい環境(波浪・潮流)
- ・ 洋上風力発電設備は外洋に設置されることが多く、沿岸部の港湾施設とは異なり厳しい海気象条件にさらされる。
- ・ 内面の複雑な腐食メカニズム
洋上風力発電設備支持構造物の内部は、半密閉の状態が多く、港湾施設にはあまり見られない複雑な腐食環境となる。
- ・ 海洋生物の影響
海水や海底土の中の微生物による鋼材腐食への影響が懸念されている。
- ・ 漂砂・洗掘による摩耗や埋設部の変化
海底の漂砂や洗掘の砂による鋼材表面の摩耗や海底面の変化によ

り腐食環境（埋設土中部）も変化する。

- ・ 限定された供用期間（腐食しろの導入）
腐食しろの導入によりある程度の腐食を許容した方が、LCCの低減につながる場合がある。

(2) 先行する海外の知見の導入

- ・ 海外規格・基準との整合
DNV や ISO などの国際基準と港湾鋼構造物防食・補修マニュアルなどの国内基準との比較検証
- ・ 効率的なメンテナンス手法
遠隔監視などを活用した効率的なメンテナンス手法の導入など

本研究の成果として、2022年9月に「洋上風力発電設備支持構造物の防食工法テクニカルレポート」を発刊した。共同研究の開始直後は「洋上風力発電設備支持構造物の防食工法の手引き」という名称にする予定であったが、洋上風力発電設備の支持構造物の腐食に関する実事例のデータが現時点では乏しく、それを本書で紹介するには至らなかったため、「手引き」として発刊するには時期尚早であると判断し、テクニカルレポートという名称を取っている。弊社HPより無償でダウンロード可能なので、参照されたい。また、2023年6月9日に開催された2023年度日本海学会第74年会の研究会横断シンポジウムに招待され、「防食技術-海の利活用における課題」というタイトルの下、当該図書の内容について発表を行った。本発表に関連して、「日本海学会誌」第78巻1号の特集「研究会横断シンポジウム（仮）に向けた海水研究の最前線」の記事として、今後掲載される予定である。

2.2 洋上風力発電設備に係る洗掘防止工法の確立に関する共同研究

(1) 共同研究概要

洋上風力発電設備は、厳しい気象海象条件の外洋（一般海域）にも設置されるが、我が国では外洋に洋上風力発電設備を設置した事例はほとんどなく、洋上風力発電設備支持構造物（モノパイルなど）周りの洗掘機構及び洗掘を防止する対策工法については、必ずしも技術的知見が十分には蓄積されていない。洋上風力発電設備への洗掘の影響を図-1に示す。

網状の袋材に石材を充填した袋型根固材は、防波堤や河川堤防の侵食対策として技術開発が進められ実用化されており、安定性、施工性、維持管理性、経済性の観点から洋上風力発電設備支持構造物周りの洗掘防止工法としても優位性が期待されている。

このため、洋上風力発電設備支持構造物周りの洗掘機構を明らかにし、袋型根固材を用いた洗掘

防止工法の合理的で経済的な設計手法の確立を目的として共同研究を行うものである。

本共同研究では、以下の事項を目的として実施している。

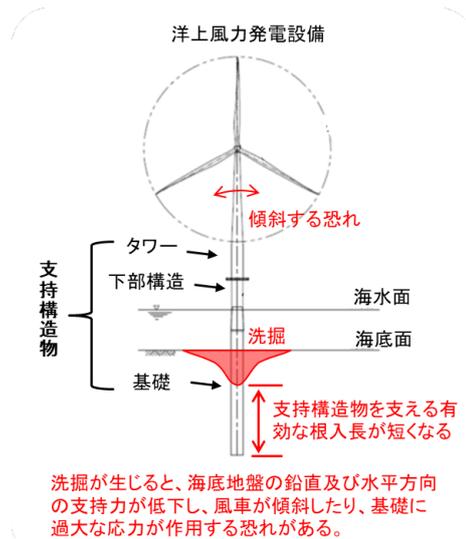


図-1 洋上風力発電設備への洗掘の影響

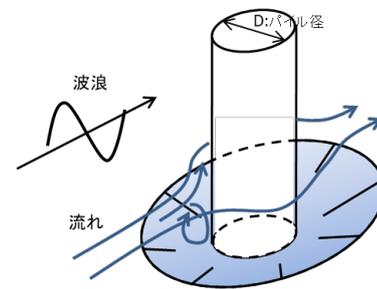


図-2 モノパイル周りの洗掘の発生状況

- ・ 洋上風力発電設備支持構造物周りの洗掘機構の解明
 - ・ 袋型根固材の安定性及び洗掘防止効果の評価
 - ・ 袋型根固材を用いた洗掘防止工法の設計手法の確立
- 共同研究の実施体制
- ・ 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 港湾空港技術研究所
 - ・ 一般財団法人 沿岸技術研究センター
 - ・ 洋上風力発電設備洗掘防止工法研究会
- 構成員：ナカダ産業株式会社、株式会社不動テトラ、前田工織株式会社

■ 共同研究期間

2020年9月30日～2023年3月31日（当初の終了年月日は2022年5月31日であったが、10か月期間延長）

■ 水理模型実験のスケジュール

- ・ 小規模実験（6 m 径のモノパイルに対する模型実験の寸法比: 1/60）：2020年9～10月
- ・ 大規模実験（6 m 径のモノパイルに対する模型実験の寸法比寸法比: 1/9）：2020年11月～2021年9月
- ・ 詳細実験: 2021年10～12月

(2) 洗掘のメカニズムと洗掘防止工

洗掘は、波浪の影響や水の流れにより海底などの土砂が洗い流される現象である（図-2参照）。海底に立設するモノパイル式の洋上風力発電設備では、波高・周期、流速、底質、水深などの要因により、パイル基部周辺に洗掘が発

生ずる。洗掘深はパイル径以上に及ぶこともあり、施設の安全性に深刻な影響を与える恐れがある(図-3 参照)。

海底に構造物を固定して設置する際は、洗掘により基部周辺の海底地盤が弛んだり流されたりしないように、洗掘防止工が必要となる。図4 は袋型根固め材を使用した洗掘防止工法の設置状況を示している。

(3) 袋型根固め材 (図-5 参照)

袋型根固め材は、国内の港湾、海岸、河川などで使用される洗掘防止対策工法の一つである。この工法は、網地や構造を強化した網状の袋材に石材を充填して根固め材として使用するもので、被覆効果により海底面の砂の洗掘を抑制するとともに、施工端部の洗掘には追従することで安定するという効果を有している。

また、製作・設置が容易で工期短縮が図れるだけでなく、維持管理の容易性も特性として有することから、施工時及び供用時に亘って経済的な洗掘対策工法である。

(4) 小規模実験の実験条件とその結果

詳細は小規模実験で得られた成果をまとめた文献 1) に記載されているので、本稿ではその内容を要約して記す。

図-6 に示した模型を対象に、袋型根固め材の種類や敷設方法を変え、表-1 に示す計 8 ケースの実験を行った。袋型根固め材の敷設方法を図-7 に示す。実験ケース間の違いとしては、CASE 1, 2 では袋型根固め材を設置せず、袋型根固め材を設置した CASE 3~8 において、CASE 3~6 では袋型根固め材を 1 層のみ、CASE 7, 8 では 2 層に亘り敷設し、CASE 6 のみフィルター層を設けている。

表-1 小規模実験の実験ケース

CASE	洗掘防止工		模型	波浪
	被覆層	フィルター層		
1	なし (無対策)	—	—	不規則波
2	なし (無対策)	—	—	規則波
3	円形 1 層 5 列配置	—	模型 A	不規則波
4	円形 1 層 5 列配置	—	模型 B	不規則波
5	六角形 1 層 5 列配置	—	模型 C	不規則波
6	円形 1 層 4 列配置	あり	模型 A	不規則波
7	円形 1 層 4 列 2 層 1 列配置	—	模型 A	不規則波
8	円形 1 層 4 列 2 層 2 列配置	—	模型 A	不規則波

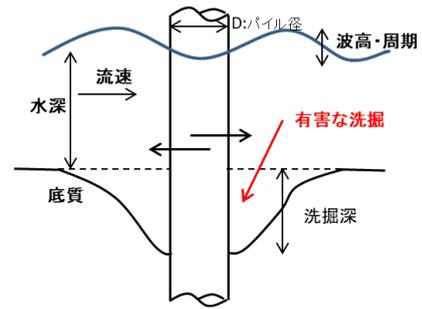


図-3 洗掘の要因

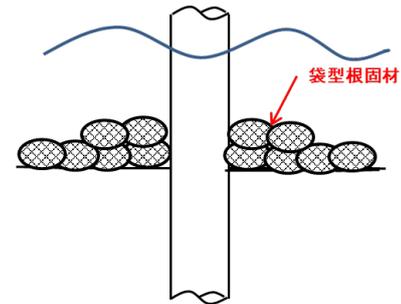


図-4 袋型根固め材による洗掘防止工法

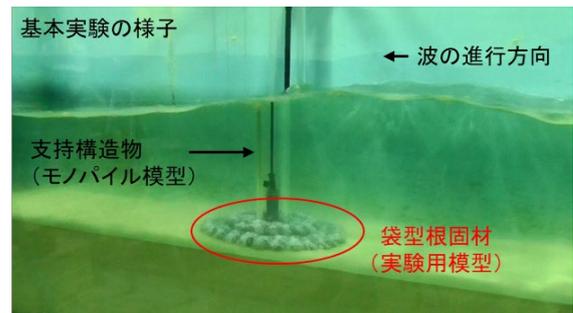


図-5 小規模実験の様子

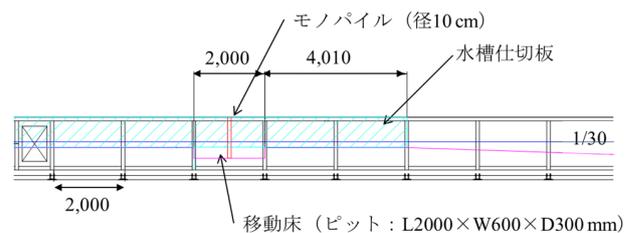


図-6 小規模実験の縦断面図

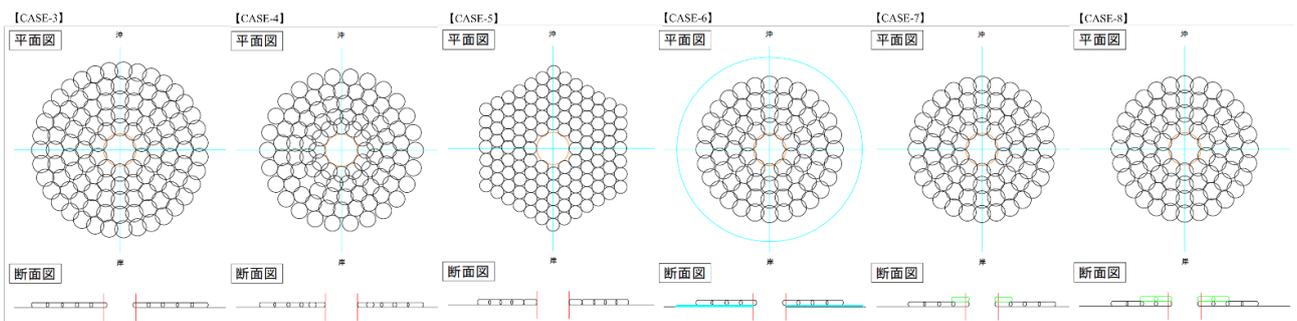


図-7 小規模実験の洗掘防止工の敷設方法

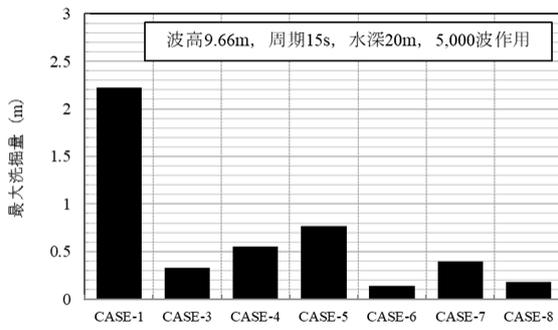


図-8 小規模実験での現地換算量としての最大洗掘量

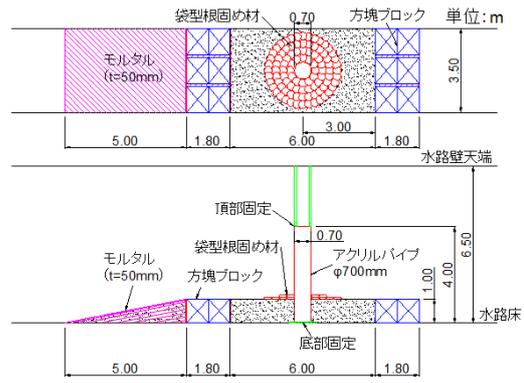


図-9 大規模実験の平面図・縦断面図

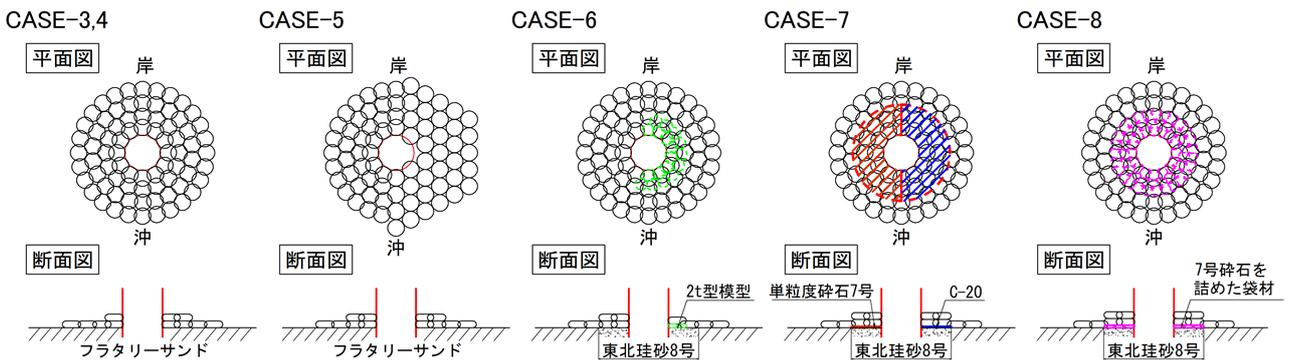


図-10 大規模実験の洗掘防止工の敷設方法

表-2 大規模実験の実験ケース

CASE	有義波高 [m]	周期 [s]	流れ [m/s]	波作用数	底質	洗掘防止工
1	1.07 (9.6)	5 (15)	-	2,000波	フラタリーサンド	無対策
2			0.46 (1.37)	1,500波		円形A
3			-	3,000波	円形B・六角形C	
4			0.46 (1.37)	1,500波	東北珪砂8号 フラタリーサンド	円形A・2t型袋材
5			円形A			
6			フィルター層A			
7			円形A			
8			フィルター層B			

注) 括弧内は現地換算量

洗掘の模型実験において、実際の洗掘における底質の挙動を模擬する上で重要となる底質材料の粒形の寸法は、Froudeの相似則に準じて決定している。波浪の条件としては、波のみによる洗掘の実験を実施するため、流れはなしとし、Sumer et al.によれば、KC数が6未満では円柱周りの洗掘は生じないため、KC数が6以上となるように波高を設定した。また、袋型根固め材の被覆範囲は、DNVGL-ST0126³⁾に準じ、0.236[m] (=2.36D (D: モノパイロ径))を採用した。

結果、最大洗掘量は図-8に示すように、CASE 6で最小となったが、フィルター層が飛散し、それに追従して袋型根固め材が移動しており、本実験の条件では洗掘防止工法の安定性として改善の余地ありと判断したため、文献1)では、CASE 6を除き最も洗掘防止の効果が高いものとして、

CASE 8の袋型根固め材を2層とも円形に敷設し、第1層は4列、第2層は2列にする敷設方法を提案している。

(5) 大規模実験の実験条件とその結果

詳細は大規模実験で得られた成果をまとめた文献4)に記載されているので、本稿ではその内容について、(4)と同様、要約して記す。

図-9に示した模型を対象に、袋型根固め材の種類や敷設方法を変え、表-2に示す計8ケースの実験を行った。袋型根固め材の敷設方法を図-10に示す。実験ケース間の違いとしては、CASE 1, 2では袋型根固め材を設置せず、袋型根固め材を設置したCASE 3~8の全ケースにおいて、袋型根固めを2層に亘り敷設し、CASE 6~8にのみフィルター層を設けている。底質材料の粒形の寸法は、小規模実験同様、Froudeの相似則に準じて決定している。小規模実験とは異なる条件として、波浪の条件については、CASE 1, 3を除き流れはありとし、袋型根固め材の被覆範囲については、1.32[m] (=1.86D)を採用した。

結果、最大洗掘量は図-11に示すように、CASE 7で最小となり、文献4)では、最も洗掘防止の効果が高いものとして、CASE 7の袋型根固め材を2層とも円形に敷設し、フィルター層を袋型根固め材ではなく直接設ける敷設方法を提案している。前述した小規模実験では、唯一フィルター層を設けたCASE 6でフィルター層が飛散してしまっただが、大規模実験のCASE 7ではフィルター層が飛散せず、袋型根固め材の安定性に影響しなかった。これは、袋型根固め材の敷設方法が前者では1層であったのに対し、後者

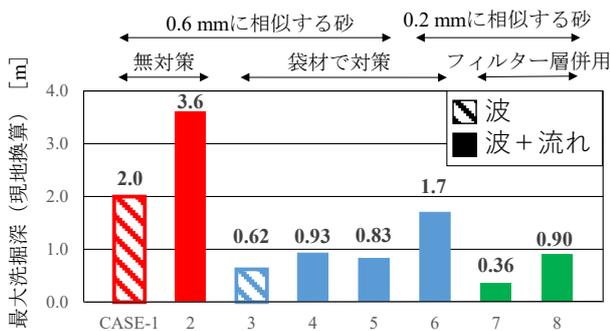


図-11 大規模実験での最大洗掘量 (現地換算済)

では2層であったためであるとしている。また、大規模実験と小規模実験の何れがより現地での洗掘を模擬しているかについて、2つの指標 ($n_v = (\text{袋材底部の流速}) / (\text{砂の移動限界流速})$, $n_D = (\text{中詰め材の粒径}) / (\text{砂の粒径})$) を用いて考察を加えている。これによれば、砂の挙動及び中詰め材が砂の移動を阻害する効果において、大規模実験の方が現地に近い条件となっていたと結論している。

(6) 今後の予定

詳細実験の成果に関しては、令和5年度の土木学会海洋開発シンポジウム (第48回) に提出した。

また、3つの実験結果を整理し、共同研究の成果としてマニュアルの発刊を検討している。

2.3 洋上風力発電設備の実施に向けた研究開発

洋上風力発電の実施に向けた研究開発として、以下の3テーマについて、海上・港湾・航空技術研究所、港湾空港総合技術研究センター及び当センターで2019年4月より共同研究を行っている。研究期間は2021年3月までであり、2022年5月に共同研究の結果が報告された。

- ・ 洋上風力発電施設の建設に用いる船舶の動揺特性及び作業稼働率の評価
- ・ 洋上風力発電施設の基礎杭の施工履歴及び変動荷重履歴を考慮した支持力評価
- ・ レグ貫入時の粘性土地盤の挙動や周辺構造物への影響と支持力特性・安定性に関する検討

令和4年度より以下の新たな2つの研究テーマについて改めて共同研究協定を締結した。研究期間は、2022年4月から2025年3月までである。

- ・ 杭の打撃施工管理手法の合理化に関する研究
- ・ 洋上風力発電施設への海底液状化土砂流動の影響評価手法に関する研究

3. 「洋上風力発電設備に係る海底地盤の調査及び評価の手引き」の作成

洋上風力発電設備はこれまで建設実績の多い港湾構造物と異なり、気象・海象条件が厳しい大水深に設置される。また、洋上風力発電設備の設置間隔は最低でも数百メートルになり、設置範囲も広範囲になるものと想定される。このため、通常の港湾構造物で採用される海底地盤調査の考

え方を、洋上風力発電設備へそのまま適用することは難しい場合がある。

このような背景を踏まえ、洋上風力発電設備に係る海底地盤の調査及び評価をより効率的に実施し、安全で経済的な設計を可能とすることを目標として、「洋上風力発電設備に係る海底地盤の調査及び評価の手引き」を作成することにした。

本手引きは、必ずしも地盤調査を専門としない洋上風力関係者に、洋上風力発電設備の設計のための海底地盤調査の全体像を説明することに主眼を置き、以下の目次からなる全4章から構成される。

また、本手引きの作成にあたり、その内容をより充実させるため、学識経験者から構成される「洋上風力発電設備に係る海底地盤調査技術検討委員会 (委員長: 菊池喜昭東京理科大教授) (以下「検討委員会」という.) を設置し、ご意見・ご指導を頂いた。

■ 目次

- 1章 はじめに
- 2章 海底地盤調査計画
- 3章 海底地盤調査手法
- 4章 地盤調査結果の取りまとめ方法
- 参考 ・ 外国船舶による我が国領海等における海洋調査及び航行に係る周知並びに法令
- ・ 設計用地盤定数の設定上の留意点

■ 実施体制

- ・ 洋上風力発電設備に係る海底地盤調査技術検討委員会
- ・ 一般財団法人 沿岸技術研究センター
- ・ 一般社団法人 海洋調査協会

■ スケジュール

- ・ 2020年9月作成作業開始
- ・ 2020年10月検討委員会 (第1回)
- ・ 2021年1月検討委員会 (第2回)
- ・ 2021年6月検討委員会 (第3回)
- ・ 2023年3月「洋上風力発電設備に係る海底地盤の調査及び評価の手引き」発刊

4. 確認審査業務

沿岸技術研究センター (CDIT) は、2007年8月24日に港湾法に基づく登録確認機関として国土交通大臣より登録され、2007年10月1日に設置した確認審査所が「港湾の施設の技術上の基準との適合性を確認する業務」を開始した。また、2020年2月に海洋再生可能エネルギー発電設備等が備える係留施設が確認対象施設 (港湾法施行規則第28条の21) に追加された。また、一般財団法人日本海事協会 (Class NK) と CDIT とは、関連法令に基づく洋上風力発電設備支持構造物の審査の効率化を図るべく、2021年4月より合同審査を開始した。

2022年度は、14件（外郭施設3件、係留施設7件、荷役機械1件、廃棄物埋立護岸1件、洋上風力発電設備2件）の確認審査申請があった。申請者の内訳は、港湾管理者10件、民間企業4件であった。

確認審査結果を審議する「適合検討委員会」で話題になった事項や確認員が指摘した事項を紹介する。

①ポンツーン連絡橋の橋台の地震時安定照査

橋台に土圧が作用しない方向の照査用震度の設定について、防波堤の照査用震度の算定法を準用する。但し、フィルター F の算定では、防波堤に適用している許容変形量の目標値 $D_{res} \leq 30\text{cm}$ ではなく係留施設に適用している 10cm とする考え方などが議論された。技術基準において適切な算定方法が示されることが望まれる。

②杭係留方式のポンツーン（偶発対応施設）

L2 地震に伴い発生する津波の作用を考慮していない事例があった。また、横梁で結合された二つの係留杭はラーメン構造となるので、杭には軸力が発生するが支持力の検討がなされていなかった。

③砂質土のせん断抵抗角 ϕ

港湾の技術基準では $\phi = 25 + 0.15Dr$ で算定するので、上限は 40° となる。

④防波堤隅角部の異形ケーソン

隅角部では、底面が台形などのケーソンが採用される。そのケーソンの安定計算は、面積が等価な矩形に換算して行われることが多い。しかし、歪な台形の場合には、矩形に比べて底面反力の値が大きくなるので注意が必要である。底面が台形の場合の安定性照査方法については本論文集 No.20 参照。

⑤栈橋及びポンツーン係留杭の部分係数

技術基準には、波浪時の支持力照査の部分係数（調整係数）はあるが、応力照査の部分係数が規定されていない。また、調整係数を用いる場合、波浪時が従来の設計で区分していた常時か異常時か不明である。

⑥防波堤ケーソンの拡幅

設計波高の増大に対処するために、既設ケーソンに場所打ちコンクリートを腹付けし堤体幅を拡幅することが行われる。その際、新旧のコンクリート躯体の接合部にケミカルアンカーが採用されることがある。このアンカーの設計については「コンクリートのあと施工アンカー工法の設計・施工・維持管理指針（案），土木学会」が参考になる。しかし、接合面にひび割れが発生した場合の水圧の考え方や押し波、引き波による底面反力の変化に伴う繰り返しせん断力の扱いなどについて未解明な事項がある。

⑦矢板岸壁の設計におけるロウの方法による補正

ロウの方法による補正とは、フリーアースサポート法で算定した矢板根入れ長や仮想梁法で算定した曲げモーメント及びタイ材張力を矢板の剛性を考慮して補正する手法である。ロウの方法は本来、一様な砂地盤にあるフィックスサポート状態の矢板に適用される手法なので、砂質

土と粘性土が互層であるような地盤に適用する場合には注意を要する。そのような地盤の場合には、たわみ曲線法や弾性地盤上の梁などによる検討で根入れ先端がフィックスサポート状態であることを確認することが必要と考える。

参考文献

- 1) 関谷勇太, 鈴木英樹, 青田徹, 久保田真一, 土橋和敬, 小林航, 鈴木高二朗, 下迫健一郎: 袋型根固め材による洋上風力発電設備の洗掘防止効果と敷設構造に関する水理模型実験, 土木学会論文集 B3 (海洋開発), Vol. 78, No. 2, 2022.
- 2) B. Mutlu Sumer, Jorgen Fredsoe, Niels Christiansen: Scour Around Vertical Pile in Waves, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, , Vol. 117, No.1, pp.15-31, 1992.
- 3) DNVGL: ST-0126 Support Structures for Wind Turbines, Appendix D, Edition July 2018.
- 4) 小林航, 関谷勇太, 鈴木英樹, 青田徹, 松田節男, 高橋武志, 下迫健一郎, 鈴木高二朗: 袋型根固め材による洋上風力発電設備の洗掘防止効果と模型の縮尺効果に関する大規模水理模型実験, 土木学会論文集 B2 (海岸工学), Vol. 78, No. 2, 2022.