

洋上風力発電基礎の設計手法について

FOUNDATION DESIGN METHODS FOR OFFSHORE WIND ENERGY CONVERSION SYSTEMS

勝海務¹・井上博士²・岡島伸行³・小林明夫⁴・山川真⁵

Tsutomu KATSUUMI, Hiroshi INOUE, Nobuyuki OKAJIMA, Akio KOBAYASHI
and Makoto YAMAKAWA

¹正会員 工修 (財) 沿岸開発技術研究センター研究主幹 (〒102-0092千代田区隼町3-16)

²正会員 (財) 沿岸開発技術研究センター調査部主任研究員 (〒102-0092千代田区隼町3-16)

³正会員 (財) 沿岸開発技術研究センター調査部主任研究員 (〒102-0092千代田区隼町3-16)

⁴(財) 沿岸開発技術研究センター調査部主任研究員 (〒102-0092千代田区隼町3-16)

⁵(財) 沿岸開発技術研究センター波浪情報部研究員 (〒102-0092千代田区隼町3-16)

It is important to promote the introduction of new energies that impose low loads on the environment. Wind power is viewed as a promising new energy source that is pure, clean, and inexhaustible. In the coastal areas, wind is not disturbed by structures and relatively stakes. These areas therefore, are suitable for constructing wind energy conversion systems. This report describes the design method of the foundation and the execution methodologies for offshore wind energy conversion systems.

Key Words : wind, energy, wind power, offshore, port, harbor, structure, coastal development, foundation

1. はじめに

20 世紀から 21 世紀へ、引き継がれた大きな課題として「エネルギー問題」と「地球環境問題」がある。この2つの問題は、ともに緊急性を有しており、それぞれに深くかかわりあっている。この2つの問題を同時に解決に導く対策は、非化石エネルギー導入の推進であり、国際的関心のもと、化石燃料から自然エネルギー、リサイクル・エネルギーなど新しいエネルギー源への転換について様々な取り組みがなされている。この様な取り組みのなか、太古の昔からさまざまに利用されてきた無尽蔵のエネルギー「風」を利用した風力発電が注目され、さらにこの発電方法が二酸化炭素を排出しないクリーンなものであることにより、尚一層の期待が注がれている。

日本においても、1990 年代に入り、電力会社を中心に試験・実証用の大型風力発電機の設置が盛んになり、1990 年代後半からは発電事業としての設備の設置も増えてきている。しかし、これまでの風力発電設備は陸上に限られたものであったため、その設置場所の条件としては、安定的な風に恵まれていることはもちろんのこと、設置場所への搬入路や

送電線の確保が必要であり、地形の複雑な日本にとっては潜在的な制約が多くコスト高の要因になっていた。今後わが国が風力エネルギーを活用していくためには、世界有数の海岸線の長さを有する海洋国家という地理的条件を生かし、陸上に比べて障害物が少なく、安定的で良好な風が得られる港湾・沿岸域での利用を可能とすることが、我が国での新しいエネルギー源の転換の促進につながると考えられる。この様な背景のもと、財団法人 沿岸開発技術研究センターでは、平成 11 年度より民間企業との共同研究により港湾・沿岸域における風力発電システムに係わる工法の技術開発とその普及を目的として研究を進めており、その研究の成果を 2000 年 11 月に「洋上風力発電基礎工法の技術（設計・施工）マニュアル（案）」（以下、マニュアル案と称す）としてまとめるとともに、港湾沿岸域における風力発電技術検討委員会（委員長：清宮理 早稲田大学教授）を設置さらに詳細な研究を進めている。

本稿は、マニュアル案の概要を紹介するとともに（財）沿岸開発技術研究センターでの研究内容について報告するものである。

2. 洋上風力発電の有効性

(1) 何故、洋上風力発電なのか

a) 洋上は風が強い

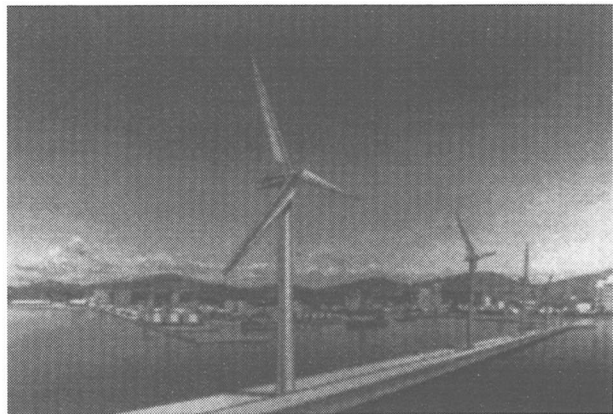
一般に洋上における風速は陸上と比べて強く、沿岸から離れた海域においては、20%程度の風速の増加がみこまれており、陸上部の地形によっては近接する陸上部にくらべ沿岸部の風速が40%から80%程度まで大きい実測例もある。また海上では障害物がないため安定的で良好な風が得られる。

b) 大型風車の設置及び運搬が可能

風車は大型化するほど経済的であるため、年々大型化している。現在国内最大規模である北海道苫前町に設置されている機種では、ブレード（回転羽）1枚の長さ約33m、タワー（風車の支柱部分）高60m、タワー最大径約4mとなっている。このクラスになると、陸上での設置及び運搬が可能な場所は限定されるが、洋上または沿岸部では海上及び港を利用し、大型作業船による作業が可能のため、この様な問題は少ない。

c) 環境に関する問題が少ない

風力発電機は、ブレードが回転する際、多少の騒音の発生がある。また、タワー、ナセルが金属製であるため、電波障害を発生する危険性もある。しかし洋上においては、このようなことが問題となることは陸上に比べて少ない。



図－1 防波堤上に風車を設置したイメージ図

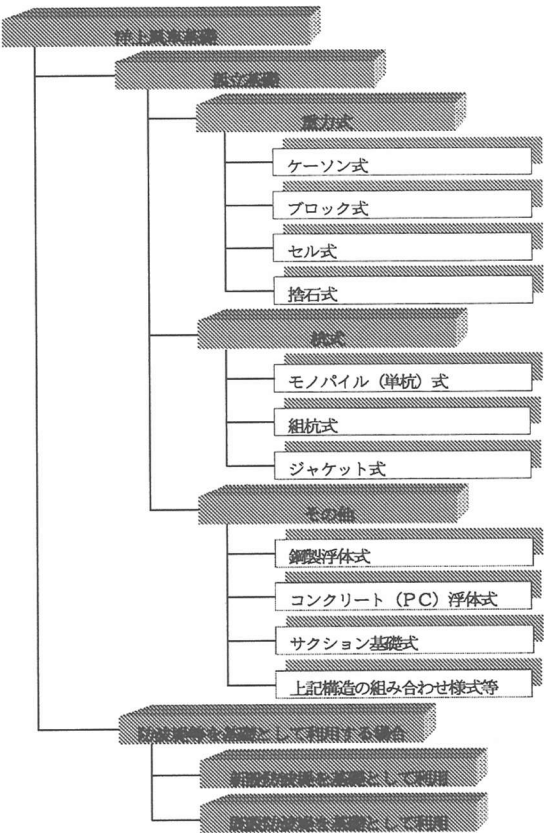
(2) 洋上風力発電の推進にあたっての課題

洋上風力発電推進のための課題としては、①洋上風力発電の基礎の建設費が高価、②送電費用が高価、③漁業との調整が必要、④景観・生物への影響等の環境上の問題等がある。さらに基本的な問題としては、洋上風力発電施設設置に関する、設計・施工手法が確立されていない点が挙げられる。

3. 基礎の構造種別

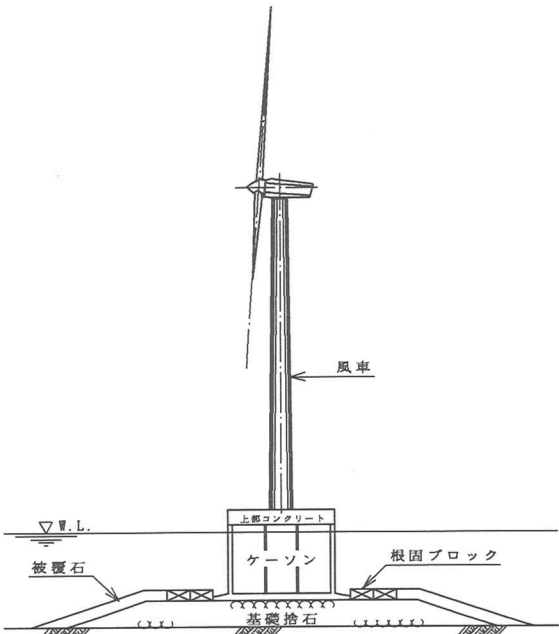
洋上風車基礎は、孤立した基礎と防波堤のように他に機能を持つ構造物を基礎に利用する場合とに分類できる。構造形式としては、図－2に示すように、

重力式、杭式、浮体式等が挙げられる。構造形式の選定にあたっては、安定検討に加えて、経済性、施工性等を十分考慮する必要がある。



図－2 洋上風車基礎構造種別

図－3～5に主な基礎構造形式の例を示す。



図－3 重力（ケーソン）式基礎の例

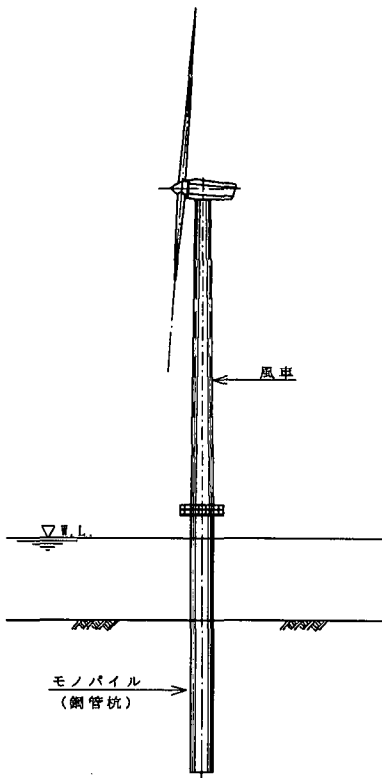


図-4 杭（モノパイル）式基礎の例

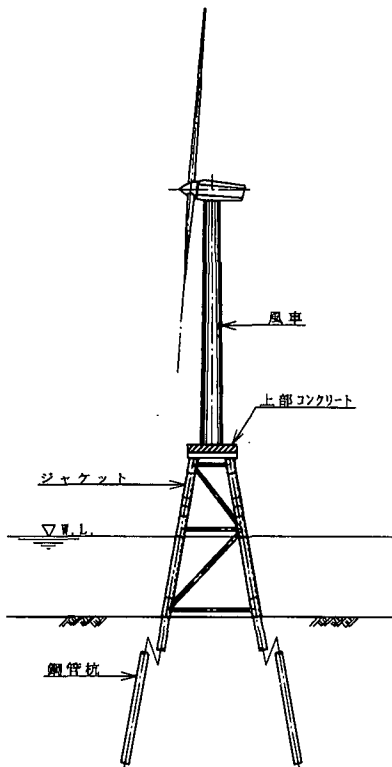


図-5 ジャケット式基礎の例

4. 設計手法

(1) 新設する防波堤を基礎として利用した場合

新設防波堤を基礎として風車を設置する場合の標

準的な設計手法を以下に示す。

a) 設計の手順

新設防波堤を基礎として風車を設置する場合の標準的な設計は、次のフローに従って実施する。

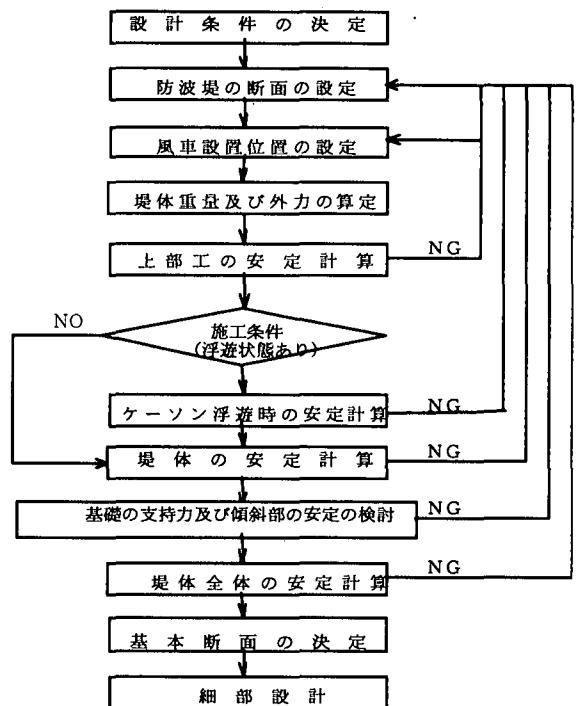


図-6 設計フロー（新設防波堤）

b) 設計条件の決定

新設防波堤を基礎とする設計条件としては、次の項目を考慮する。

自然条件 潮位、風、波浪、土質条件、地震力等
利用条件 本土工（上部工）、計画天端高、計画水深等

施工条件 ケーソン製作・据付条件等

風車条件 風車諸元

その他 摩擦係数、単位体積重量、準拠基準等

c) 防波堤の断面の設定

防波堤上に風車を設置する場合、風車設置部のケーソンの形状（天端高、堤体幅、堤体長さ等）は、一般部ケーソンの形状を考慮して設定することが望ましい。ただし、堤体安定計算結果等により風車設置部ケーソンの形状を一般部と異なるものにする必要がある場合には、ケーソン幅の変更、フーチング形状の変更などの方法により断面を適切に設定する。

d) 風車設置位置の設定

風車の設置位置は、防波堤の利用条件、風車設置に関わる施工性、及び経済性等を勘案して決定する。

e) 堤体重量及び外力の算定

ケーソンの安定計算に当たっては、以下の外力を考慮する。

自重（ケーソン、風車）

地震力（ケーソン、風車）

波力及び浮力（ケーソン、風車）

風圧力（風車）

検討は基本的には暴風時と地震時について行う。

暴風時は、港外方向から港内方向に波力及び風圧力を作用させるが、地震時は、風車設置位置により支配的な方向に地震力、風圧力を作用させて検討を行う。

風車設置部ケーソンに作用する外力の概念図を図-7に示す。なお、外力は通常、単位奥行き当たりで算定する。風車に作用する外力についても同様に、ケーソン奥行き長さで除して算定する。

f) 上部工の安定計算

風車設置部ケーソンの上部コンクリートと風車を一体として考え、上部工の安定計算を行う。安定計算は、滑り出し、転倒についてそれぞれ行う。

g) ケーソン浮遊時の安定計算

施工条件により、ケーソン浮遊時の安定計算を行う必要がある場合には、港湾の施設の技術上の基準に従う。

h) 堤体の安定計算

堤体の安定計算は、ケーソンと風車を一体として考え、全体系についての滑り出しと転倒の検討を行う。検討は暴風時と地震時について行うことを基本とする。

j) 基礎の支持力及び傾斜部の安定の検討

偏心傾斜荷重に対するすべりの検討は、港湾の施設の技術上の基準に従って算定する。

k) 堤体全体の安定計算

堤体全体の安定計算は、円弧すべり計算で行う。

以上が新設する防波堤上に風車を設置する場合の手順である。マニュアル案には、孤立基礎の例として、重力（ケーソン）式、モノパイル式、ジャケット式についても設計手順を示している。

(2) 既設の防波堤を基礎として考えた場合

既設の防波堤の上に風車を設置する場合の設計手法を以下に示す。

a) 既設防波堤を基礎として風車を設置する場合

設計は、図-8のフローに従って実施する。

設計の手順としては、通常の防波堤とほぼ同様である。

b) 既設ケーソン

既設ケーソンは風車を設置していない状態で最適な設計がなされているため、風車本体の鉛直力、タワーに作用する風荷重や波力による水平力、転倒モーメントなどの外力が増加する結果、安定計算において安全率を満たさない場合がある。このような場合は、既設ケーソンに対策工を施した上で再度安定計算等を行い、所要の安全率を満たす必要がある。

c) 細部設計

細部設計においても、底板部等の部材耐力が不足する場合があるため注意する。

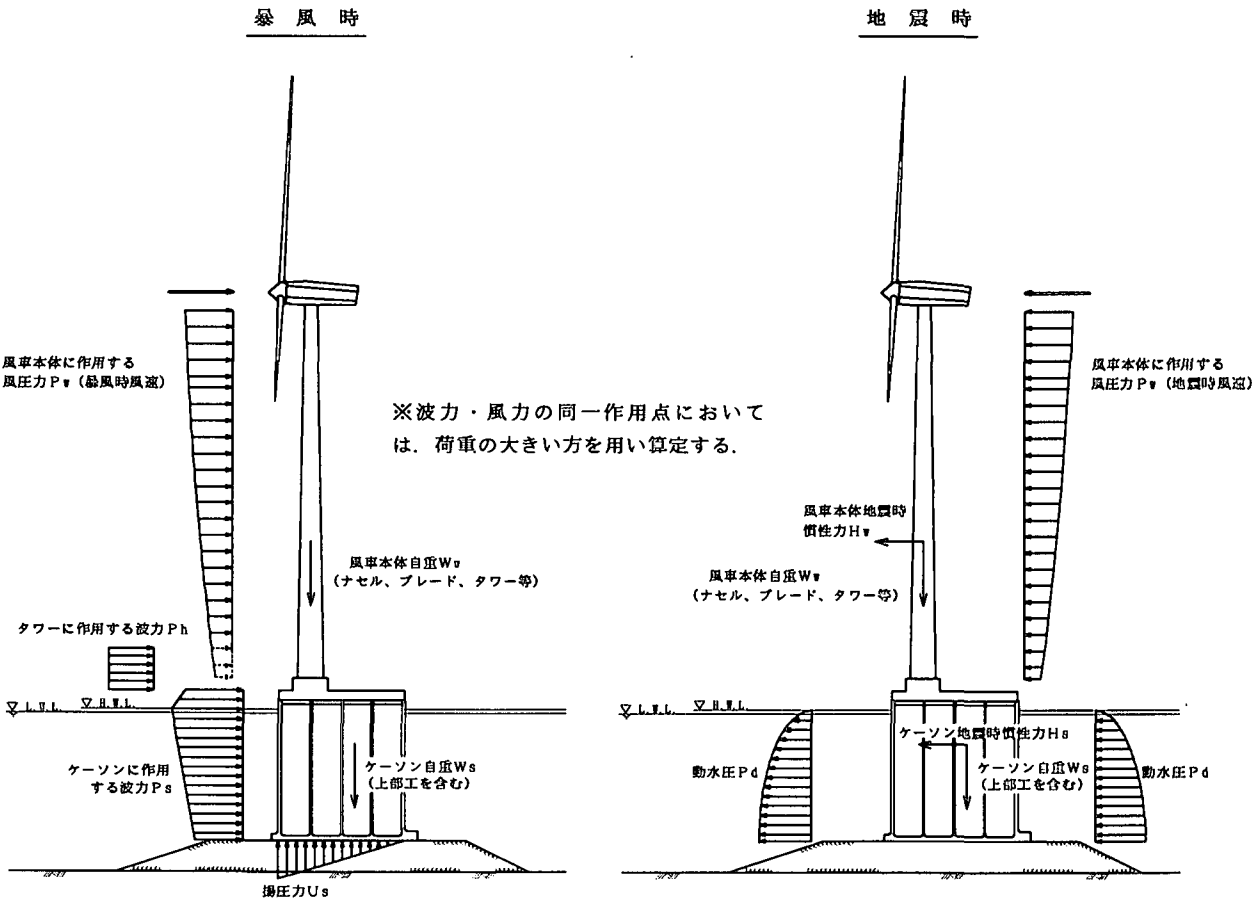


図-7 設計外力概念図

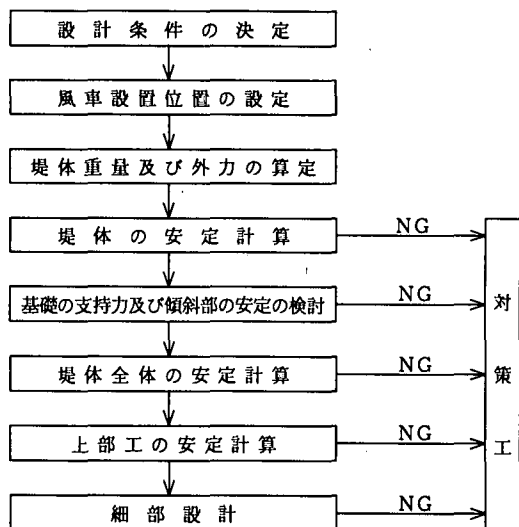


図-8 設計フロー（既設防波堤）

d) 対策工

風車を設置して安定計算、構造計算を行った結果、所要の安全率を満たさない場合には適切な対策工を施し、構造上安定させる。

対策工は、現場条件等を考慮し、適切な考え方を選定する。以下にその例を示す。

- ・ 消波ブロックを利用し、防波堤に作用する波力を低減する。
- ・ 防波堤ケーソンの拡幅、フーチングの設置（延伸）。
- ・ 設置する風車の規模を小さくする。

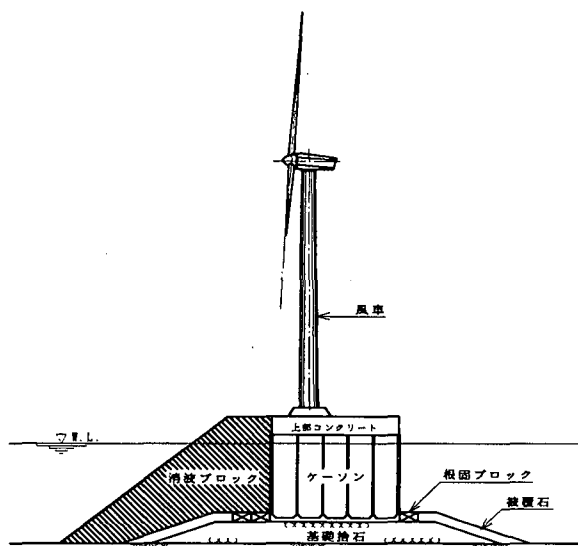


図-9 既設亜防波堤を基礎として利用する場合（消波ブロックにて波力の低減を図る形式）

5. 今後の課題

マニュアル案については、港湾沿岸域における風力発電技術検討委員会において整備中であるが今後検討すべき課題について以下に示す。

(1) 合理的設計手法の確立

風車本体の耐用年数は20年としている例が多い。基礎の設計供用期間を風車の耐用年数と合わせるか、基礎を本体構造とした場合の設計供用期間とすることを適正に判断する必要がある。設計に用いる外力については、再現期間と構造物の耐用年数に基づいた遭遇確率から求めることが望ましい。しかし、遭遇確率をどのように設定するかは、構造物の機能、重要度、ライフサイクルコストに左右されるものであり、どのような信頼度を持つ構造物を造るかを明確にする必要がある。

(2) 風荷重

風車基礎設計における風荷重の計算手法については国内基準がなく、陸上の風車基礎設計においても、メーカー、施工業者により設計方法が統一されていない。マニュアル案は、平成12年6月に改正された建築基準法をベースとしているが課題が多い。

a) 風車運転時の風荷重計算手法の明確化

土木建築関係基準の風荷重計算は、対象物体が静止していることを前提としており、風車運転時のような、ブレードが回転している状態での外力の算定を想定していない。今回はメーカーの提示値を用いることを原則とするとしているが、海外メーカーの場合は計算根拠を明示しない場合があり、メーカーの提示値の取り扱いを含め計算手法を明確化する必要がある。

b) 建築基準法を適用する場合のナセル、ブレードの形状係数の設定（風車停止時）

マニュアル案では、板状構造物の値を用いているが、本来は風洞実験に基づいた値を用いるべきである。

(3) 地震時

一般に基礎の設計では、地震時に風力、波力を考慮する事はしない。しかしながら、マニュアル案では、陸上での多くの設計例にならない地震時に定格風速（16m/s程度）が風車に作用することを考慮している。

(4) 波圧

デルフト大学が中心になって行ったEUの洋上風力発電に関する最終報告書¹⁾のなかでは、最大外力を「最大波圧+最大風圧」としていない。最大波圧と最大風速の同時性は極めて少なく、作用時間も瞬間的なものになる。そのため、合理的な設計のためには設計荷重の組み合わせ時における荷重係数の導入等を考える必要がある。

(5) コストダウンの考慮

洋上風車基礎が陸上基礎よりも高額になることを考え、コストダウンを考慮した最適構造（例えば没水型ケーソン）の提案が必要となる。また開発中の新技術であるサクシオン基礎等は風車の基礎構造として有望であると考えられる。なお、一般的な構造形式（ケーソン式、モノパイル式、ジャケット式）については、共同研究会において基礎建設コストの試算を行っている。水深 10m の条件で各構造が成立しやすい地盤条件において 2 MW クラスの風車を設置した場合、直接工事費として 5 千万円～8 千万円／基となり、陸上での施工が 2 千万円程度であることを考えるとコストダウンが大きな課題となる。

(6) 工法選択フローチャートの作成

風車基礎の各種構造については地盤条件、荷重条件毎に有利不利がある。今後設計を行っていく中で知見が得られれば、最適基礎構造の選択フローが作成可能であり、設計業務の省力化も考えられる。

(7) 既設構造物への設置

洋上での基礎が高価な事を考慮すると、既設防波堤等に風車を設置する事ができれば有利となる。しかし、底面反力が増加することにより、地盤の支持力不足や、底版の配筋量が不足する、という結果になることが多い。そのような場合の既設構造物への補強方法、対策工法について今後の詳細な検討が求められる。

7. あとがき

今回紹介した「洋上風力発電基礎工法の技術（設計・施工）マニュアル（案）」については「港湾沿岸域における風力発電技術検討委員会」での指導を経て整備し、洋上風力発電に関する各種特記事項について追加記載したものを「洋上風力発電の技術マニュアル」として出版したいと考えている。このようなマニュアルが整備されることにより、洋上風力発電の実現に向けた検討が各所で具体化し、新エネルギーの導入促進に貢献できると考えている。

謝辞：「洋上風力発電基礎工法の技術（設計・施工）マニュアル（案）」は、五洋建設株式会社、新日本製鐵株式会社、株式会社テトラ、大旺建設株式会社との共同研究の成果をまとめたものである。これら関係者ならびに「港湾沿岸域における風力発電技術検討委員会」において指導をいただいている、清宮委員長及び各委員の方々に、感謝の意を表する。

参考文献

- 1) EU Joule III Project JOR3-CT95-0087 , OPTI-OWECS FINAL REPORT volume2 , Methods Assisting the Design of OWECS Part D, pp4-1～4-4, 1998