

洋上風力発電実験用浮体の設計について

(株)富士ピー・エス 正会員 ○左東 有次
 (株)富士ピー・エス 正会員 堤 忠彦
 九州大学大学院総合理工学研究院 経塚 雄策
 (株)日本港湾コンサルタント 吉田 賀一

1. はじめに

世界的なエネルギー問題、CO2削減を背景に、再生可能エネルギーの開発・有効利用に注目が集まる中、風力発電はその1つとして注目されている。一方、わが国は国土が狭く、環境条件より、風力発電に適した場所は限られている。そのため、風況条件が安定し、広大な海洋面積をもつわが国にとって、海上での風力発電は今後有望であると考えられる。

このような状況を踏まえ、九州大学では独自に開発した高効率の風レンズ風車¹⁾を核とした洋上風力発電の実用化を目的として、「風レンズを核とする革命的中型・小型風車システムの導入に関する技術開発」の研究プロジェクトの一環として、博多湾において浮体式海上風力発電の実証実験を行っている。なお、「洋上風力発電」という言い方が一般的であるが、博多湾は内湾であるため、ここでは「海上風力発電」ということにした。この浮体式の海上風力発電は、風レンズ風車と土台となるコンクリート造の六角形構造の浮体を組み合わせた、世界に例のない発電施設となっている。浮体は、全体の直径が18m、6基の円筒を内側と外側で囲むようにトラス部材が配置され、トラス部材間を連結材で連結する構造である。

本構造は六角形の浮体という特殊な構造であるが、海上部という環境条件から円筒浮体やトラス部材には耐久性に優れたコンクリート構造が採用された。本報告では、浮体構造の設計を中心に、海上風力発電の全体計画を含めてその概要について報告するものである。

2. 浮体式海上風力発電の実証実験の概要

浮体式海上風力発電の実証実験の概要を表-1に、完成図を図-1に示す。浮体には、3kw級の風レンズ風車2基と観測小屋を3か所の円筒浮体上に均等に設置し、さらに再生可能エネルギーである太陽光発電用の1.00kwと0.50kwの2種類の発電パネルをトラス部に設置している。浮体は博多湾内の海岸から約650mの沖合に設置しており、約1年間、発電量、風速、波浪などのデータを観測する予定である。浮体の固定は、円筒浮体上部に固定した鋼製の係留ボラードから6本の係留索で海底のコンクリートアンカーに係留している。

表-1 浮体式海上風力発電の実証実験の概要

事業名	平成23年度地球温暖化対策技術開発事業
事業委託者	環境省
事業責任者	九州大学
研究代表者	大屋裕二教授
実施場所	福岡県福岡市博多湾内
実験期間	平成23年12月～平成24年12月
風車	風レンズ風車3kw級 2基
太陽光パネル	1.00kw, 0.50kwの2種類

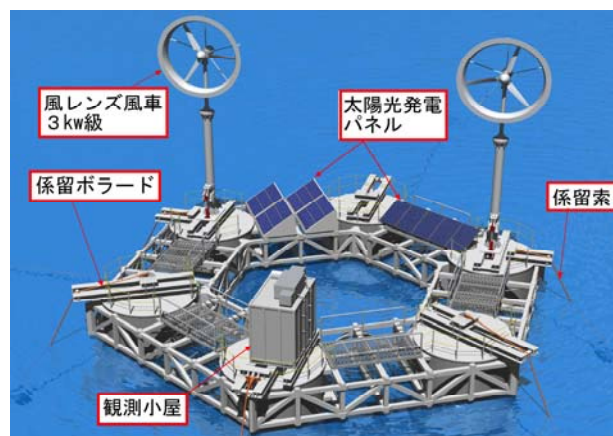


図-1 浮体式海上風力発電完成図

3. 浮体の構造概要

海上風力発電の浮体構造の概要を表-2に、浮体の全体構造図を図-2に示す。

浮体は直径18m、辺長9m、高さ4mの六角形構造であり、直径3.5m、高さ4.0mのプレキャストPC構造の円筒6函を、プレキャストPC構造のトラス部材および連結材で接合した構造である。

円筒部の天蓋は、軽量化および艀装品の設置を考慮して鋼製とし、表面を耐久性に優れた防錆材で塗装した。また、係留ボラードなどの鋼製治具も耐久性を考慮して溶融亜鉛メッキ処理した。

浮体の全体重量は、風車等の艀装品をすべて含んだ状態で約1400kNであり、喫水は約2.4mである。

表-2 海上風力発電浮体の構造概要

構造形式	コンクリート製六角形浮体
係留形式	固定式アンカー方式 (6か所)
円筒浮体	プレキャストPC構造
トラス部材	プレキャストPC構造
天 蓋	鋼 製
対角線長	18.0m
1 辺 長	9.0m
円筒浮体径	3.5m
円筒浮体高さ	4.0m
喫 水	2.4m

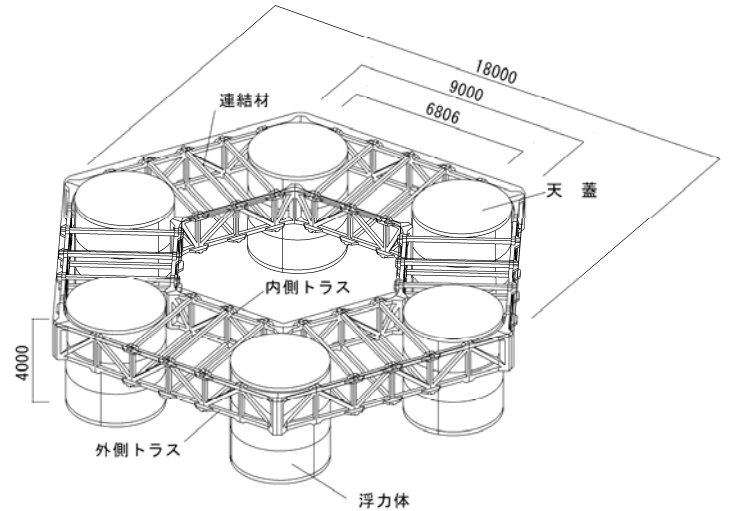


図-2 海上風力発電浮体一般図

4. 浮体の設計

4.1 浮体の設計概要

浮体の設計条件を以下に示す。

風速 30年確率風速 22m/s

波浪 30年確率波高 $H_{1/3}=0.90\text{m}$, $H_{\text{max}}=1.60\text{m}$, $T_{1/3}=2.3\text{sec}$

本浮体は実証実験用の構造物であり、計測期間も1年間と短期間であるため、以下の方針で設計を行った。

- ① 暴風時に円筒浮体やトラス部材が破壊しない構造とする。
- ② 浮体の吊上げ時、浮体の曳航時および風車の支柱を折り曲げるメンテナンス時には、円筒浮体やトラス部材にひび割れが発生しない構造とする。

浮体の主要材料を表-3、表-4に示す。浮体は基本的にPC構造とし、耐久性を考慮して、高強度のコンクリートやモルタルおよびエポキシ樹脂被覆PC鋼材など、防食性の高い材料をできるだけ使用した。

4.2 設計方法

浮体は円筒部材とトラス部材より構成された複雑な構造である。そのため、円筒部材およびトラス部材の断面力は、立体骨組解析を用いて算出した。円筒とト

表-3 主要使用材料 (コンクリート・モルタル)

部 材	種 類	設計基準強度
円筒(側壁)	モルタル	100N/mm ²
円筒(底版)	コンクリート	50N/mm ²
トラス材	コンクリート	50N/mm ²
連結材	コンクリート	50N/mm ²

表-4 主要使用材料 (PC鋼材)

使用部位	種 類	呼び名
円筒(水平方向)	アンボンドPC鋼より線	1S17.8mm
円筒(鉛直方向)	エポキシ樹脂被覆PC鋼より線	1S12.7mm
トラス材接合部		
連結材接合部	異形PC鋼より線	3φ2.9mm
トラス材		

ラス部材の接合部や風車の支柱取付け部等の局部応力については、3次元FEM解析で検討した。解析モデルを図-3に示す。

設計で考慮した荷重および組合せを表-5に示す。

荷重の組合せに対して、吊上げ時、曳航時、風車メンテ時は曲げモーメントおよび軸力に対するコンクリートの引張応力の制限値を曲げ引張強度以下とし、セグメント継目部には引張応力を発生させないこととした。

暴風時には、円筒浮体、トラス部材等が曲げ、せん断およびねじりで破壊しないことを確認した。ただし、暴風時には、風車に作用する風荷重で円筒部に過大な引張応力が発生するため、台風等の暴風時には、風車の支柱をジャッキで折り曲げ、水平に固定することとした。なお、ねじり剛性向上のため、トラス部材同士は鋼製ターンバックルで繋結した。

4.3 トラス部材の設計

トラス部材の構造図を図-4に示す。

トラス部材は、上下弦材、鉛直材、斜材で構成されたブロックをプレテンション方式で一体で製作し、ブロック同士をポストテンション方式で接合する構造とした。

トラス部材は、乾舷の確保から重量の軽減が求められていたため、部材寸法は高さ140mm×幅140mmとした。また、実験期間が1年間の短期間であるため、鋼材のかぶりは20mmとした。

ポストテンション方式のPC鋼材配置を図-5に示す。PC鋼材は海上での耐久性を考慮し、エポキシ樹脂被覆PC鋼材1S12.7mmを上下弦材に2本ずつたすき状に配置した。ブロック間の目地部は10mmの隙間を設け、スラリー状の無収縮モルタルを充填するウエットジョイント構造とした。

内側と外側のトラス部材間には、連結材を配置し、エポキシ樹脂被覆PC鋼材1S12.7mmを2本ずつ配置して、一体化させた。

4.4 円筒浮体の設計

円筒浮体の構造図を図-6に示す。

円筒浮体は、浮力を得るために軽量化が求められ、側壁厚を40mmにする必要があった。そのため、側壁部には耐久性、充填性を考慮し、シリカヒュームプレミックスセメントを使用した圧縮強度100N/mm²の超高強度モルタルを使用した。なお、このモルタルに

表-5 設計で考慮した荷重および組合せ

	①自重	②浮力	③波力	④係留力	⑤風荷重	⑥風車の転倒モーメント	⑦水平時モーメント	⑧水の抵抗力
①暴風時	○	○	○	○	○	△※		
②吊上げ時	○							
③風車メンテ時	○	○					○	
④曳航時	○	○						○

※暴風時には風車を水平に固定させているので、風車の風による転倒モーメントは考慮しないが、浮体の局所的な検討では転倒モーメントを考慮する。

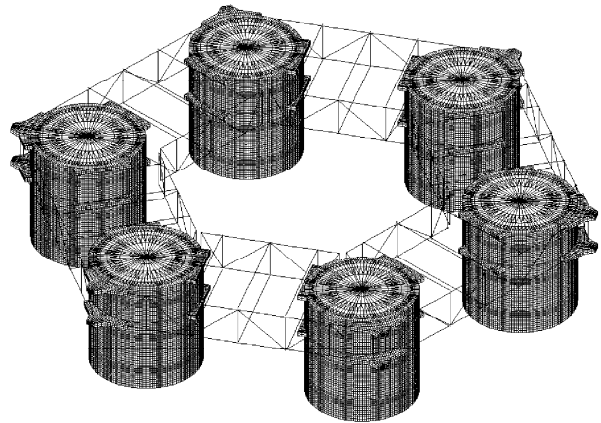


図-3 3次元 FEM 解析モデル

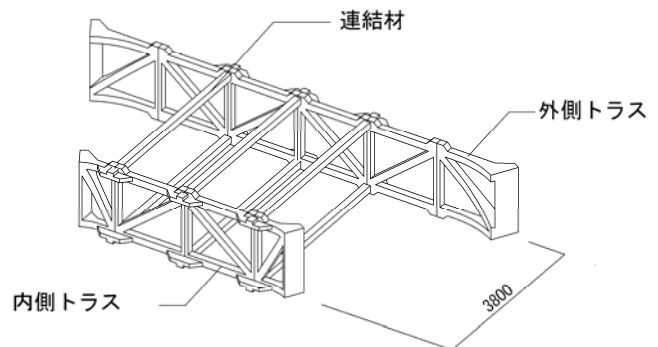


図-4 トラス部構造図

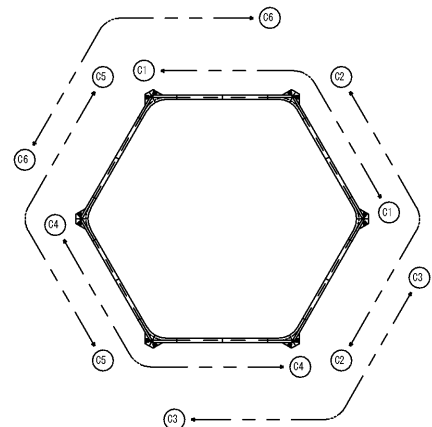


図-5 PC鋼材配置図

は充填性を考慮し、短繊維は混入しなかったため、側壁部は溶接金網 (φ3.2mm×50mm) で補強した。

円筒浮体は、運搬を考慮し、鉛直方向に3分割とし、現場でエポキシ樹脂被覆PC鋼材 1S12.7mm, 12本を鉛直方向に緊張し一体化する構造とした。また、円筒の円周方向もアンボンドPC鋼材1S17.8mmを各ブロックに1本ずつ配置した。

PC鋼材の配置や定着は厚さ200mmのリブ部で行ったが、PC鋼材緊張時の円筒浮体の安全性を確認するため、3次元FEM解析で緊張時に側壁部に発生する応力を検証した。

図-7に円筒外側のFEM解析結果を示す。海水に接する円筒外側の発生応力は、引張強度以下であることを確認した。また、海水に接しない円筒内側においてコンクリートの引張強度を超過する部分は、エポキシ樹脂塗装鉄筋で補強した。

底版はRC構造として設計し、鉄筋は耐久性を考慮して、エポキシ樹脂塗装鉄筋を使用した。

4.5 接合部の設計

円筒部とトラス部の接合部は、円筒側壁とトラス部材や連結材間にステンレス鋼棒を配置し、目地部に無収縮モルタルを打設した。外側のトラス部材および連結材と円筒部の離れは10cm程度しかないため、ステンレス鋼棒は接合部に発生するせん断力に抵抗するように設計した。また、ステンレス鋼棒には、接合部の目地が開かないように、設計時に発生する引張力相当の緊張力をトルク管理で導入した。

円筒浮体と連結材の接合部を写真-1に示す。

一方、内側のトラス部材と円筒の間は50cm程度離れているため、その接合部は曲げモーメントに抵抗するようにPC鋼棒φ26mmを配置し、プレストレスを導入した。また、PC鋼棒は防食性を考慮し、防錆材を塗布したPC鋼棒を使用した。

なお、接合部の無収縮モルタルは、耐久性を考慮し、圧縮強度100N/mm²の高強度の無収縮モルタルを使用し、ポリプロピレン短繊維を添加した。

5. おわりに

本実験用浮体は、円筒浮体とトラス構造を組み合わせた新しい構造であるため、FEM解析等の構造的検討により浮体の設計を行った。現在実験用浮体は、平成23年12月に製作、設置を完了し、海上において実証実験を行っている。なお、本実証試験は、環境省委託事業

「平成23年度地球温暖化対策技術開発事業」(研究代表者:大屋裕二教授)として実施した。

最後に、本実証実験を行うにあたりご協力いただいた関係各位に深謝するとともに、本報告が今後の浮体設計に少しでも参考になれば幸いである。

【参考文献】

- 九州大学応用力学研究所 新エネルギー力学部門 風工学分野研究室 ホームページ

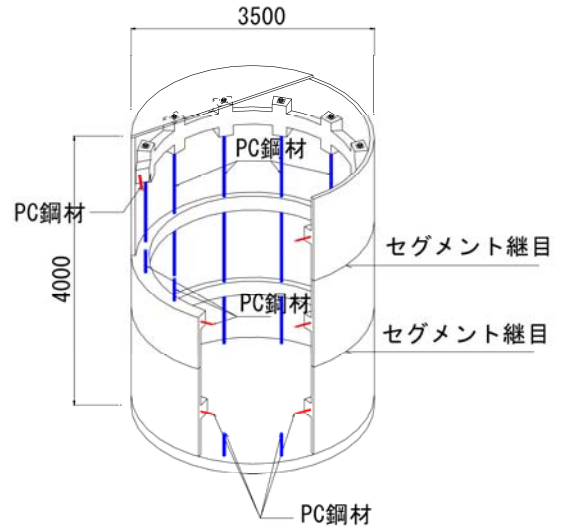


図-6 円筒浮体構造図

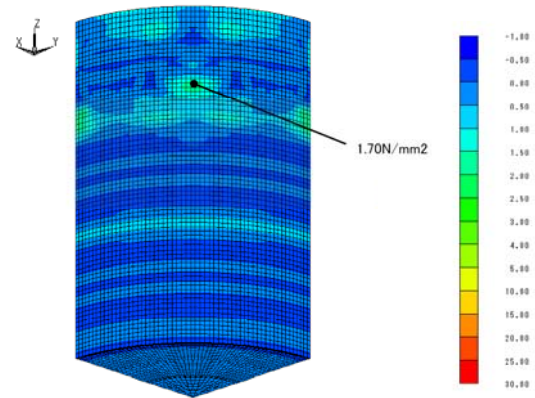


図-7 PC鋼材緊張時の円筒の応力分布



写真-1 円筒浮体・連結材接合部