

コヤマ ヒロヒト

氏 名	小山 宏人
学位の種類	博士 (工学)
学位記番号	博第1206号
学位授与の日付	2021年3月31日
学位授与の条件	学位規則第4条第1項該当 課程博士
学位論文題目	洋上風力基礎スカートサクシヨンの沈設時の貫入抵抗機構の解明と設計法の合理化の提案 (Elucidation of Settlement-Bearing Capacity Mechanism of Suction Bucket Foundation for Offshore Wind Turbine and Proposal of Rationalization of Sinking Design)
論文審査委員	主査 教授 前田 健一 教授 張 鋒 教授 野中 哲也 教授 野田 利弘 (名古屋大学)

論文内容の要旨

日本の国土面積は約 38 万 km²であり、世界で 60 番目と比較的小さな国であるが、排他的経済水域の広さは国土面積の 12 倍もあり、それに領海を加えると世界で 6 番目の広い海が自国の海となる。また、年間を通して安定した風を得られる地域が多数あるものの、日本においては稼働している大規模な洋上風力発電所は無く、ヨーロッパ諸国に比べて 10 年遅れていると言われている。2018 年 12 月には再エネ海域利用法が公布され、国主導で洋上風力発電開発が進められる道筋が立ち、今後洋上風力発電の更なる発展が期待される。

このような中、環境面、施工面、経済面での優位性をもった発電施設建設および運営は重要な国家的な課題である。一般に、洋上風力発電施設の構造形式には、風車の自重を海底地盤まで伝達させる「着床式」と風車自体が海洋に浮いている「浮体式」がある。着床式は比較的水深が浅い場合に適し、モノパイル、ジャケット、重力式などから水深や地盤条件などによって最適な構造が選定される。モノパイルは、一本の大口径鋼管杭からなり、遠浅で広大な海域を有するヨーロッパでは主流である。構造がシンプルでコストが安いため実績が豊富であり、世界的に見ても全体の約 3/4 の割合を占めている。モノパイルに比べて実績は少ないものの、鋼管トラス構造と複数の鋼管杭からなるジャケットや、海底が岩盤など杭の打設が困難な場所に用いられるコンクリート構造物の重力式などがある。

一方で、洋上風車の適用が拡大し、風車の大型化や設置場所の水深が 30 m を超えるような大水深になるにつれ、基礎が大型化しコストがかかることが課題である。特に、実績が多いモノパイルは大型化に伴い製造・施工面から適用の限界を迎えつつあり、また、打設時の騒音や振動が極めて大きく、海洋生物への影響が懸念される。加えて、根入れ箇所に岩盤が存在する場合などは打設不能で適用できないという課題もある。一方、大水深化・風車大型化に適したジャケット形式は、年々施工実績の割合を増やしているが構造が複雑で製造コストが高く、グラウト施工が必要なため施工難易度が高い。重力式は基礎の規模が膨大のため、大水深には適さず、基礎製作施工ヤード、運搬、揚重船舶の観点から大規模ウインドファームには適さない。

このような背景から、環境面・施工面でのメリットの大きいスカートサクシオン基礎の洋上風車基礎への適用が望まれている。

第 1 章では、研究に至る背景と研究対象および目的を整理した。

第 2 章では、実海域における RC 大型試験体での各種実験結果と予測値または解析値との比較検証を行う。貫入実験の貫入性に関する結果と既往の貫入予測式との比較、水平載荷実験の結果および三次元 FEM 変形解析の結果との比較、撤去実験の結果と既往予測式との比較内容について示す。

第 3 章では、浸透による支持力低減を利用するスカートサクシオン基礎の沈下予測や制御時に重要な土-水-構造物の相互作用のメカニズムを理解するため、1g 場の簡易浸透模型実験を実施した結果について示す。現象を単純化するために飽和砂地盤に様に上向き浸透流を作用した模型実験と、スカート先端を回り込む浸透流を対象としたより実機に近い模型実験の結果および得られた知見について示す。

第 4 章では、目視観察が不可能である地盤内の浸透流による支持力低減メカニズムの理解を補うため、三次元浸透流解析および大変形問題に優れた SPH 法による数値解析の観点から基礎的な考察を示す。第 3 章で述べる模型実験を対象とし解析モデルを構築した。解析では噴砂、盤ぶくれ発達過程、貫入による基礎先端近傍の複雑な相対密度変化を再現することは不可能だが、貫入時に地盤内で発生している浸透流の基礎的な知見を得ることを目的とした。

第 5 章では、4MW (ワット) 風車を対象とした試設計スカートサクシオン基礎の各種数値シミュレーション結果について示す。数値シミュレーションは水平載荷時、貫入時および撤去時を対象とした。

第 6 章では、本研究で得られた結論について述べる。

論文審査結果の要旨

日本の国土面積は約38万km²であり、世界で60番目と比較的小さな国であるが、排他的経済水域の広さは国土面積の12倍もあり、それに領海を加えると世界で6番目の広い海が自国の海となる。また、年間を通して安定した風を得られる地域が多数あるものの、日本においては稼働している大規模な洋上風力発電所は無く、ヨーロッパ諸国に比べて10年遅れていると言われている。2018年12月には再エネ海域利用法が公布され、国主導で洋上風力発電開発が進められる道筋が立ち、今後洋上風力発電の更なる発展が期待される。このような中、環境面、施工面、経済面での優位性をもった発電施設建設および運営は重要な国家的な課題である。一方で、洋上風車の適用が拡大し、風車の大型化や設置場所の水深が30 mを超えるような大水深になるにつれ、基礎が大型化しコストがかかることが課題である。特に、実績が多いモノパイル基礎は大型化に伴い製造・施工面から適用の限界を迎えつつあり、また、打設時の騒音や振動が極めて大きく、海洋生物への影響が懸念される。加えて、根入れ箇所に岩盤が存在する場合などは打設不能で適用できないという課題もある。大水深化・風車大型化に適したジャケット形式は、年々施工実績の割合を増やしているが構造が複雑で製造コストが高く、グラウト施工が必要なため施工難易度が高い。重力式は基礎の規模が膨大のため、大水深には適さず、基礎製作施工ヤード、運搬、揚重船舶の観点から大規模ウインドファームには適さない。

このような背景から、環境面・施工面でのメリットの大きいスカートサクシオン基礎の洋上風車基礎への適用が望まれている。

第1章では、研究に至る背景と研究対象および目的を整理した。

第2章では、実海域におけるRC大型試験体での各種実験結果と予測値または解析値との比較検証を行う。貫入実験の貫入性に関する結果と既往の貫入予測式との比較、水平載荷実験の結果および三次元FEM変形解析の結果との比較、撤去実験の結果と既往予測式との比較内容について示した。

第3章では、浸透による支持力低減を利用するスカートサクシオン基礎の沈下予測や制御時に重要な土-水-構造物の相互作用のメカニズムを理解するため、1g場の簡易浸透模型実験を実施した結果、現象を単純化するために飽和砂地盤に様に上向き浸透流を作用した模型実験と、スカート先端を回り込む浸透流を対象としたより実機に近い模型実験の結果および得られた知見について示した。

第4章では、目視観察が不可能である地盤内の浸透流による支持力低減メカニズムの理解を補うため、三次元浸透流解析および大変形問題に優れたSPH法による数値解析の観点から基礎的な考察を示す。第3章で述べる模型実験を対象とし解析モデルを構築した。解析では噴砂、盤ぶくれ発達過程、貫入による基礎先端近傍の複雑な相対密度変化を再現することは不可能だが、貫入時に地盤内で発生している浸透流の基礎的な知見を得ることを目的とした。

第5章では、4MW（ワット）風車を対象とした試設計スカートサクシオン基礎の各種数値シミュレーション結果について示す。数値シミュレーションは水平載荷時、貫入時および撤去時を対象とした。

第6章では、本研究で得られた結論について述べ、成果をまとめ、課題についても整理した。