

洋上風力発電施設の基礎およびアンカーに適用する「スカートサクシオン」

伊藤 政人・栗本 卓・林 秀郎

「スカートサクシオン」(以下「本基礎」という)は、下部が開口した円筒形構造の海洋構造物基礎で、スカート内から排水してその水圧差により海底地盤に貫入させるため、設置時に杭打機などの大型機械が不要であり、騒音、振動など海洋環境に与える影響が少ないという特長がある。この特長を生かし、近年導入が急ピッチで進められようとしている洋上風力発電における洋上風車や洋上変電施設などの基礎あるいはアンカーとして適用させ、風力発電のコスト低減に寄与させるため、実海域においていくつかの大型模型実験を実施した。本稿は本基礎の概要と洋上風力発電施設への適用へ向けた技術開発成果について報告する。

キーワード：基礎, アンカー, 洋上風力発電施設, サクシオン, 大型模型実験

1. はじめに

海に囲まれ、かつ国土の面積も狭い我が国にとって、海洋再生可能エネルギー、特に洋上風力発電の導入は急務である。洋上風力発電はすでに欧州では政府主導の施策もあって、発電コストが大幅に低下し、主力電源の地位を確立しつつある(写真-1)。日本においても、膨大なポテンシャルが見込まれており、2017年末の導入実績は、6基(約2万kW)に留まっているものの、環境アセスメント手続中の案件は430万kWに上っており、事業者による計画の具体化

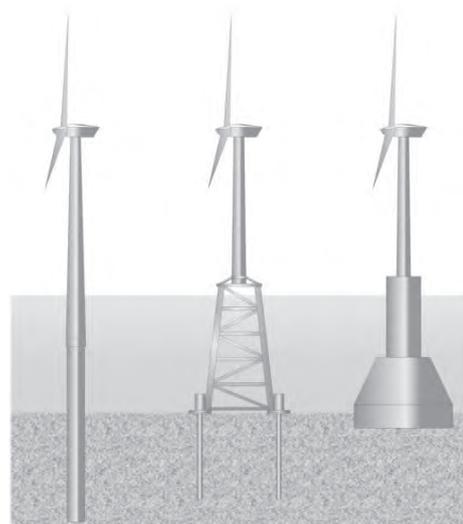
が急ピッチで進んでいる。

洋上風車の構造形式は、基礎を海底地盤に支持させる着床式と風車自体が浮いている浮体式があり、着床式は水深が比較的浅い場合に、浮体式は水深が深い場合に採用される。着床式にはモノパイル、ジャケット、重力式などの基礎形式(図-1)がある。浮体式にはセミサブ型、スパー型、TLP(テンション・レグ・プラットフォーム)型(図-2)などの型式があり、急峻な海底地形である日本において、今後の導入が予測される。

本稿ではまず海洋構造物基礎である本基礎の概要に

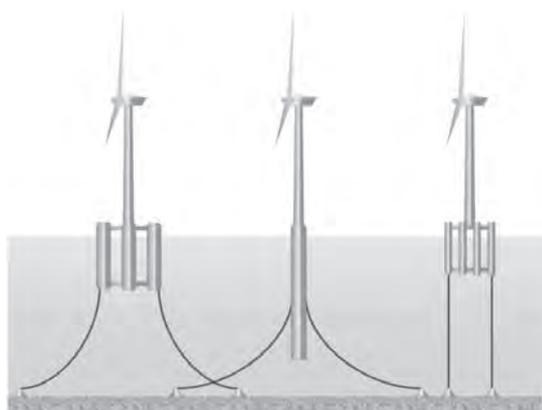


写真-1 洋上風力発電所の例



モノパイル ジャケット 重力式

図-1 着床式洋上風車の例



セミサブ型 スパー型 TLP型
(係留方式：カタナリー型)

図一 2 浮体式洋上風車の例



写真一 3 洋上風力発電施設基礎への適用例

ついて述べ、洋上風車や洋上変電施設あるいは洋上風況観測施設などの洋上風力発電関連施設の基礎あるいはアンカーとして、本基礎を適用した場合のそれぞれの構造やその特長を述べるとともに、その適用性を検証するために実海域で行ったいくつかの大型模型実験について報告する。

2. 本基礎の概要

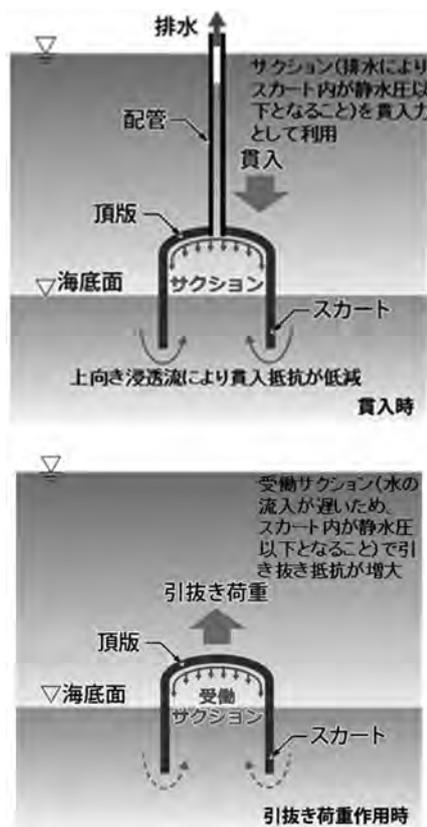
本基礎は、下部が開口した円筒形構造の海洋構造物基礎で、バケット基礎、サクシヨンバケットなどとも呼ばれ、石油・ガス採掘用重力式プラットフォームの基礎や浮体式構造物のアンカーとして世界中で広く使われている。国内では防波堤基礎¹⁾ など3つの施工実績があり、海外ではすでに洋上風力発電施設基礎へ

の適用事例²⁾ も数例報告されている(写真一 2, 3)。

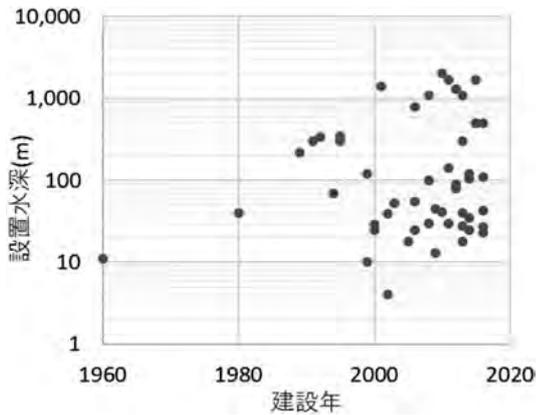
本基礎の特長を図一 3 に示す。本基礎は、スカート内の水圧を静水圧以下に低下させ、その水圧差によって海底地盤に貫入させるため、設置時に杭打機などの大型機械が不要であり、騒音、振動など海洋環境に与える影響が少ないという特長がある。設置後は根入れされたスカートの地盤抵抗によって安定を確保し、特に引抜抵抗は、受働サクシヨン効果(スカート内への水の流入が遅いためスカート内が静水圧以下となってスカート外との水圧差が生じて引抜抵抗が増え



写真一 2 栈橋防衛工への適用例



図一 3 本基礎の特長



図一4 本基礎適用水深

る効果)を抵抗に見込むことができる。また、撤去時にはスカート内に注水することで完全撤去が可能である。砂や粘土のあらゆる地盤に適用可能であるが、硬質な岩盤などは水圧差による貫入ができないため適用できない。設置に際して水圧を利用することから、数10 mから1000 m以上に至る大水深での適用事例が多い(図一4)。

3. 着床式風力発電への本基礎の適用

(1) 概要と実験目的

図一5に着床式洋上風車の基礎に本基礎を適用した場合のイメージ図を示す。着床式洋上風車の基礎は欧州では圧倒的にモノパイルの適用数が多い。しかしモノパイルは大口径鋼管杭であるため、打設時の騒音振動が極めて大きく、海洋生物への影響の懸念がある。また、1本の杭で風荷重や波浪荷重に抵抗させることから根入れ長が長くなるため、海底地盤の途中で



図一5 着床式洋上風車への適用イメージ

岩盤が存在する場合などは打設不能となり適用できない。本基礎は海洋環境への影響が少ないこと、供用終了後に撤去可能であること、径が大きいモノパイルに比べ根入れを浅くでき、海底地盤下10~20 m程度に岩盤がある場合でも対応可能であることなど、その適用性の高さが注目されている。

そこで、今回着床式の洋上風力発電施設の基礎に本基礎を適用した場合の①貫入性、②水平支持性能、③撤去性、について検証するため、実海域における大型模型実験(貫入実験、水平载荷実験、撤去実験)を行った。以下にその実験概要とその結果について示す。

(2) 貫入実験³⁾

大型模型実験に用いた試験体はRCスカート部(外径5.0 m, スカート長8.0 m, スカート厚0.25 m)と鋼製タワー部(外径2.0 m, 高さ10.9 m)からなる(図一6)。また、当該地の水深は約11.5 mであり、海底地盤はN値0~40程度の砂地盤である。貫入実験は、300 tフローティングクレーン船にて試験体を所定の場所まで吊曳航し、その後海中に吊りおろし(写真一4)、自重により貫入させた後、姿勢制御しながら、ポンプによりスカート内の圧力を下げることで所定の深さまで貫入させた。

図一7に貫入力と貫入深度の関係を示す。同図には2つの貫入抵抗予測式Houlsbyら⁴⁾、サクシオン基礎構造物技術マニュアル⁵⁾で計算した予測値も示してある。実験値は概ね予測式の範囲であり、既往の貫入抵抗予測式の妥当性を確認できた。

【鋼製タワー部】

Φ2.0m
H=10.9m
t=0.019m

【RCスカート部】

Φ5.0m
H=8.6m
t=0.25m



図一6 大型模型実験でのRC製試験体



写真-4 FC船による吊り曳航

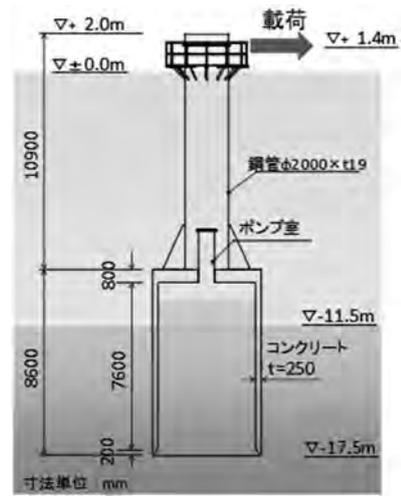


図-8 水平載荷実験模式図

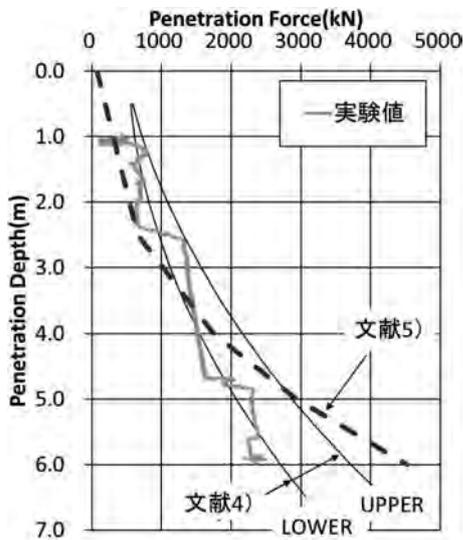


図-7 貫入力-貫入深度

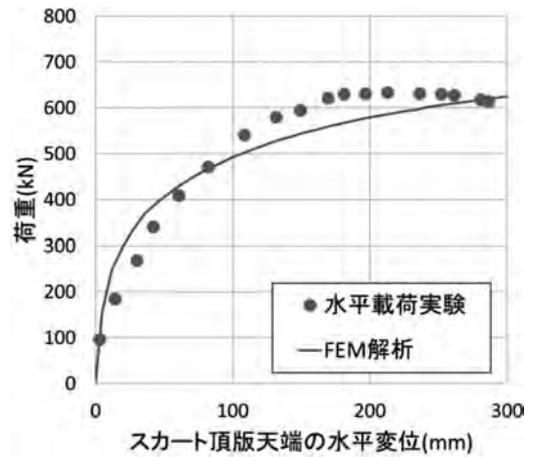


図-9 水平荷重-変位

(3) 水平載荷実験⁶⁾

水平載荷実験は貫入実験終了7日後に行った。図-8に実験の模式図を示す。試験体頭部を、約70m離れたケーソン式防波堤上部とワイヤーで接続し、油圧ジャッキにより載荷した。図-9に載荷位置での荷重-変位曲線を示す。同図には別途実施した3次元弾塑性FEM解析による解析結果⁷⁾も示してある。実験では水平荷重約600kNで地盤の抵抗力が完全に失われた。FEM解析ではそうした完全塑性状態は再現できないものの、初期の弾性変形状態から荷重の増大に合わせて徐々に変形が増大していく状況を比較的精度よく再現できている。

(4) 撤去実験⁸⁾

撤去実験は水平載荷実験終了1日後に行った。図-10に撤去実験模式図を示す。クレーンで試験体に上向き荷重を与えながら、注水ポンプにより海水をス

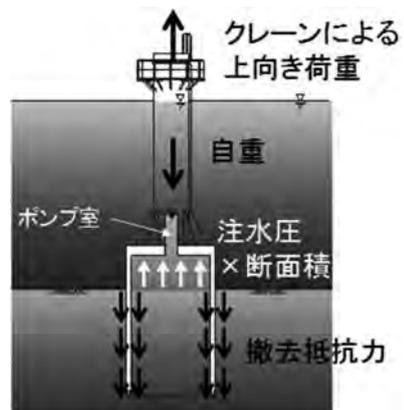
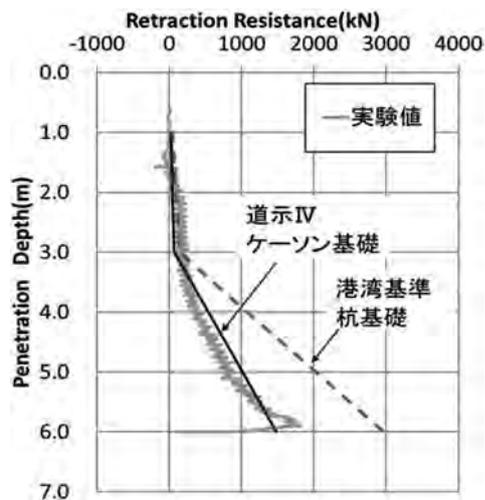


図-10 撤去実験模式図

カート内へ注水し、スカート内の圧力を上げることで試験体を持ち上げた。図-11に撤去抵抗力と貫入量の関係を示す。持ち上げ時の地盤の最大周面抵抗は約1800kNであり、これに対し約120kPaの水圧を作用させることで試験体を持ち上げることができた。同図にはスカートの周面摩擦抵抗の算定に道路橋示方書IV⁹⁾のケーソン基礎の算定式を用いた場合と港湾基準¹⁰⁾



図一 11 撤去抵抗－貫入深度

の杭基礎の算定値を用いた場合を示してある。実験値は、ケーソン基礎の周面摩擦力度を用いた場合とおおむね合致している。

これらの一連の実験により、本基礎を着床式の洋上風力発電施設の基礎に適用する場合の基本性能を検証することができた。これらの結果をもとに一般財団法人沿岸技術研究センターへ「洋上風車基礎スカートサクシオン」の港湾関連民間技術の確認審査・評価を依頼し、2018年5月に同技術に対して民間技術評価証が交付された。

4. 浮体式風力発電への本基礎の適用

(1) TLP 型浮体の概要

浮体式の洋上風力発電施設の係留方式としてカテナリー（弛緩）型とTLP（緊張）型がある（図一2）。カテナリー型は、長さが水深の数倍となる係留索を浮体周囲に数本展開する係留方法である。これまで多くの海洋構造物で利用されているが、係留索が重いこと、海底を占有する面積が広くなるという課題がある。一方、TLP型は浮体をテンドンと呼ばれる鋼管やワイヤーなどで海底と直線的に繋ぎ、浮体の浮力を利用して、テンドンに大きな張力を発生させて安定を図る係留方法である。テンドンによって、浮体が拘束されるため、波等による浮体の揺れが非常に小さく、占有面積も最小となる。ただし、大きな張力が作用しているテンドンの海底への固定方法に課題がある。

このような背景から、浮体をコンクリート製としテンドンを海底地盤へ固定するアンカーに本基礎を用いるTLP型浮体式洋上風車を提案した（図一12）。コンクリート製浮体はメンテナンスがほとんど不要で、耐用年数が長いというメリットがある。海外では浮体



図一 12 TLP 型浮体式洋上風車

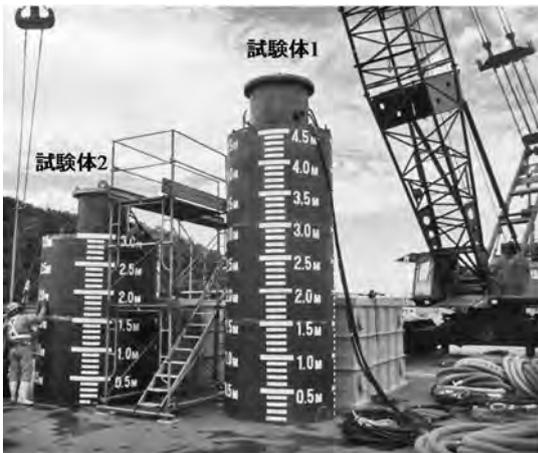
橋や石油掘削施設で実績があり、国内でも小型船舶の係留施設や浮消波堤などで実績がある。またコンクリートは比較的安価であることや、設置予定海域の地元で製作できるというメリットもあげられる。浮体形状はセンターコラム型とすることで、動揺特性に優れた構造とした。こうした構造を採用することにより、①海域の占有面積が小さく海域の生物への影響を抑えられる、②係留材が少量ですむ、③洋上風力発電施設の動揺が小さいので発電効率が高くなるというメリットを持つTLP型浮体式洋上風力発電施設を従来より安価に構築することが可能になる。

(2) 本基礎の引抜抵抗検証

本基礎の引抜抵抗における受働サクシオン効果は、地盤の透水係数が比較的大きい砂地盤でどの程度確実に見込めるかについては未解明であった。そこで砂地盤でのサクシオン効果を検証するために実海域において実大規模模型実験を実施した¹¹⁾。

写真一5に実験に用いた2つの試験体（試験体1：径1.8m、高さ4.6m、試験体2：径2.3m、高さ3.0m）を示し、写真一6に実験状況を示す。当該海域の水深は約12m、海底地盤はN値10～40程度の砂地盤である。実験は、台船上のクレーンにより試験体を海中に吊りおろし、自重貫入後、ポンプによりスカート内から排水し、スカート内の水圧を下げることによって所定の深さまで貫入させた。その後一定時間放置したのち引抜実験を行った。実験パラメータは引抜速度である。

図一13に試験体1の貫入深度－貫入抵抗関係を示す。図に同時に示す既往貫入抵抗の予測式Houlsby

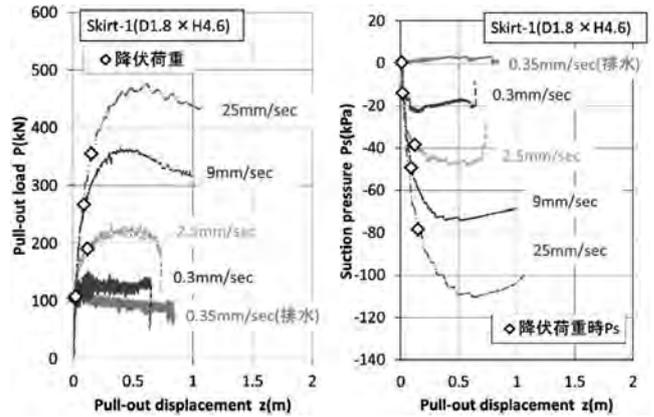


写真一五 引抜実験試験体



写真一六 引抜実験試験体設置状況

ら⁴⁾による値と概ね一致しており、RC製と同様鋼製スカートにおいても既往予測式によって貫入抵抗を予測可能であることがわかった。図一14に引抜抵抗および発生サクシオンと引抜き変位との関係を示す。引抜速度が速いほど引抜抵抗が大きく、スカート内に発生するサクシオンが大きくなった。暴風時想定される荷重速度では自重+周面抵抗よりも2~2.5倍程度



図一14 引抜変位-引抜抵抗, 受働サクシオン

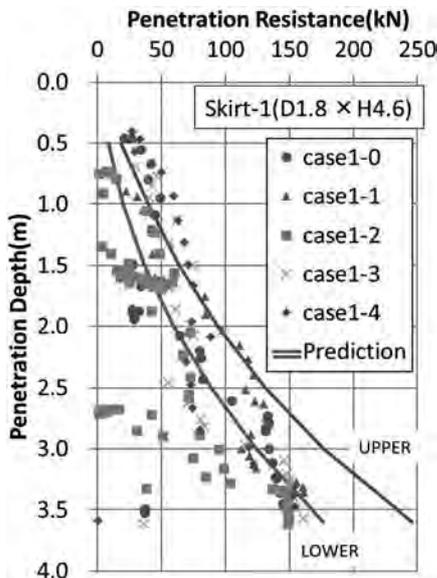
引抜抵抗が大きくなっており、砂地盤においてもサクシオン効果によって引抜抵抗が増加する現象が確かめられた。

現在 TLP 型浮体式洋上風力発電施設の設計基本承認を一般財団法人日本海事協会から取得する手続きを進めており、将来の実現に向けた浮体式洋上風力発電施設の施工法の検討も進めている。

5. おわりに

2018年3月に一般海域（港湾区域以外の海域）での洋上風力発電の導入促進のための新法が閣議決定され、国は戦略的に洋上風力発電への取り組みを加速させている。洋上風力発電には大きなポテンシャルがあり、大規模プロジェクトの計画が具現化されることにより風車の大型化や据付船などの大型化が進み、発電コストがさらに低減する可能性がある。今後、本基礎スカートサクシオンを洋上風力発電施設の基礎あるいはアンカーとして適用することで、洋上風力発電のさらなるコスト低減に貢献できるものと考えている。

JCMA



図一13 貫入深度-貫入抵抗

《参考文献》

- 1) 伊藤, 増井, 米田, 秋山: スカート基礎の棧橋先端防衛工への適用, 土と基礎 No.50-4, pp.13-15, 2002.4.
- 2) The suction bucket jacket-a new wind turbine foundation concept GEOTEKNISK FORENING Samspil mellem jord og konstruktion, 2014.11.
- 3) 伊藤, 栗本, 松元, 粕谷, 山田, 高橋: スカートサクシオン基礎の実海域実験 (その1 概要および貫入実験), 土木学会第72回年次学術講演会概要集, pp.997-998, 2017.9.
- 4) G.T. Houlsby et al.: Design procedures for installation of suction caissons in sand, Proceedings of the Institution of Civil Engineers Geotechnical Engineering 158, pp.135-144, 2005.
- 5) 財団法人沿岸開発技術センター: サクシオン基礎構造物技術マニュアル, 平成15年3月
- 6) 栗本, 伊藤, 松岡, 佐藤, 小山, 粕谷: スカートサクシオン基礎の実海域実験 (その3 水平載荷実験), 土木学会第72回年次学術講演会概要集, pp.1001-1002, 2017.9.
- 7) 小山, 栗本, 伊藤, 粕谷, 高橋, 濱地: スカートサクシオン基礎の水

平抵抗に対する解析的評価（その1 全応力解析），土木学会第72回年次学術講演会概要集，pp.1003-1004，2017.9.

- 8) 粕谷，濱地，上篠，伊藤，栗本，松元：スカートサクシオン基礎の実海域実験（その2 撤去実験），土木学会第72回年次学術講演会概要集，pp.999-1000，2017.9.
- 9) 公益社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，pp.322-376，2012.3.
- 10) 公益社団法人日本港湾協会：港湾の施設の技術上の記述・同解説（下巻），pp.567-666，2007.7.
- 11) 粕谷ら：浮体式洋上風車に用いるスカートサクシオンアンカーの引抜き抵抗に関する研究，大林組技術研究所報，No.80，2016.12.

[筆者紹介]

伊藤 政人（いとう まさと）
 ㈱大林組
 土木本部企画管理部 部長



栗本 卓（くりもと たく）
 ㈱大林組
 土木本部生産技術本部設計第二部 担当部長



林 秀郎（はやし ひでろう）
 ㈱大林組
 土木本部生産技術本部設計第三部 主席技師

