

砂質地盤におけるサクシオンアンカーの把駐力に関する検討

Centrifuge Experiments on Holding Capacity of Suction Anchors in Loose Sandy Deposits

北 勝利¹, 宇都宮智昭², 関田欣治³

1 東海大学・海洋学部環境社会学科・kita@scc.u-tokai.ac.jp

2 九州大学大学院・工学研究院海洋システム工学部門

3 (株)海洋河川技術研究所

概 要

浮体式洋上風力発電の係留基礎としてサクシオンアンカーに注目し、日本近海での利用を念頭に砂質土地盤における把駐特性について遠心模型実験による検討を行った。実験では、8号珪砂または水深約100mの海底表面より採取した砂質土で形成したゆる詰め水平地盤中に下面開端の円筒形アンカーを設置し、20G遠心力場でアンカー側面に連結したワイヤーを低仰角斜め上方に一定速度で牽引し、ワイヤー張力とアンカー変位を計測した。実験における把駐力(ワイヤー最大張力)を、砂質地盤を念頭に完全排水条件における有限要素解析より構築されたDeng and Carterによる把駐力評価法などによる計算結果と比較した。把駐力計算では、模型地盤作成時に遠心力場で計測したミニチュアコーン貫入抵抗を基に評価した内部摩擦角を用いた。Deng and Carter法による評価値に対し実験による把駐力は1.6倍程度大きな値となった。

キーワード：サクシオンアンカー、浮体係留、把駐力、遠心模型実験、海底土

1. はじめに

再生可能エネルギーの中で浮体式洋上風力は日本において高い導入ポテンシャルを有しており、今後長崎や福島沖などの先導的プロジェクトに続く活発な導入・展開が期待される。日本における浮体式洋上風力プラットホームの係留アンカーとしては、これまでドラッグ(引きずり式)アンカーが多く採用されている。一方サクシオンアンカーは、海外の海底油ガス田掘削基地の係留基礎として実績が多く、大水深域での施工性に優れるとともに、ドラッグアンカーと比較して設置精度や地盤工学的設計枠組の適用性の点で有利である。日本近海において洋上風力発電の適地として考えられる離岸距離100km以内かつ水深500m以下の地域では泥質～砂質地盤が広く分布しており、これらの土質におけるサクシオンアンカーの適用性を検証する必要がある。

著者らはこれまでに、ゆる詰め砂質地盤におけるサクシオンアンカーの把駐特性に関して、牽引方向が鉛直または仰角が比較的大きいケースについて遠心模型実験より検討してきた²⁾。本報告では、根入/直径比が小さく、仰角が11～14度の水平に近い牽引方向で、地盤材料として細粒珪砂及び海底表層砂を用いた把駐力実験を実施し、Deng and Carter³⁾法による把駐力計算結果などと比較した。

2. 実験概要

2.1 実験手順とアンカー模型、地盤材料

実験の手順は次のとおりである。内寸で幅510mm、奥行200mmの矩形断面土槽内の脱気水(実験ケース2のみ脱気メトロース水溶液)中に、土槽上面より気乾砂試料を地盤面高さが所定位置に達するまで落下堆積させた後、脱気及び20G遠心力場で自重圧密することによりゆる詰め飽和水平地盤模型を作成した。遠心力場においてミニチュアコーン貫入試験(コーン底部直径10mm、貫入速度1.1mm/s)を実施後、アンカーを鉛直ガイドロッド先端に固定し、アンカー上面蓋の排水口を開放した状態で、自重で沈下させた後に所定貫入深さまで人力で押し込んだ。アンカー上面蓋の排水口を閉塞した後、アンカーをガイドロッドから取り外しアンカー上部に姿勢計測用のターゲットフレームを取り付けるとともに、アンカー側面に結節したワイヤーを滑車を介して電動アクチュエータに繋げ、20G遠心力場において定速度で牽引した。牽引実験の概要を図1に示す。牽引実験における計測項目は、ターゲットフレームの水平・鉛直変位と傾斜角、ワイヤー牽引量、ワイヤー張力、及びアンカー天端内部(図1中P1)、背面中腹部(P2)、側面下端部(P3)での(間隙)水圧である。

アンカー模型を図2に示す。アンカー模型は胴体部外径76mm、肉厚1.5mm、高さ72mmの下端開口の円筒で、前

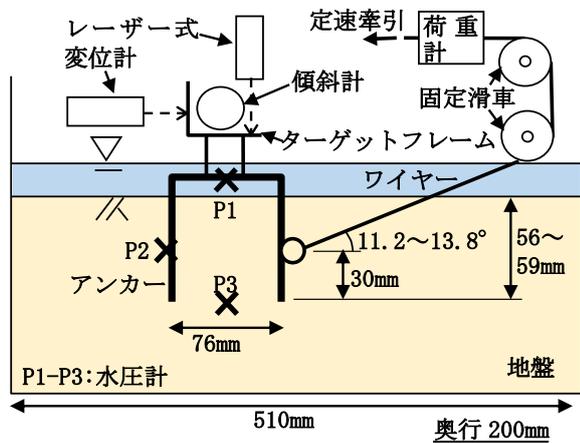


図1 実験概要

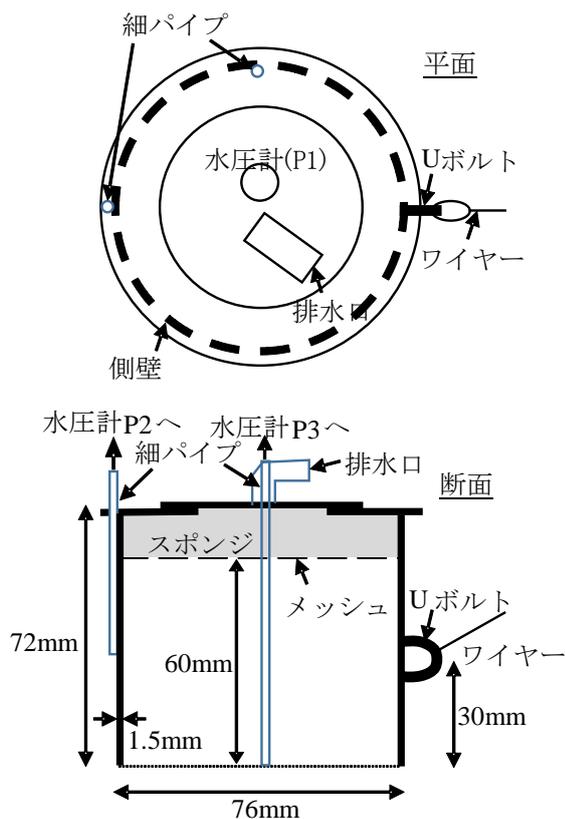


図2 アンカー模型

面中腹に牽引ワイヤーを結束するための U ボルトが取り付けられている。内部はステンレスメッシュで上下に分かれ、上部にはサクションを用いた沈設の際に土粒子を捕捉するためのスポンジフィルターを収納する(本実験ではサクションによる沈設は行わない)。アンカー背面には中腹部まで、また側面内側には下端部までそれぞれ細パイプが固定されている。これら細パイプの上端はチューブを介して水圧センサにつながっている。上面蓋には水圧センサとアンカー内部水の排水口が取り付けられている。

2.2 実験ケース

本実験では、地盤材料として 8 号珪砂(ケース 1, 2, 土粒子密度 2.637g/cm^3)、及び長崎県杵島沖の水深約 100m の

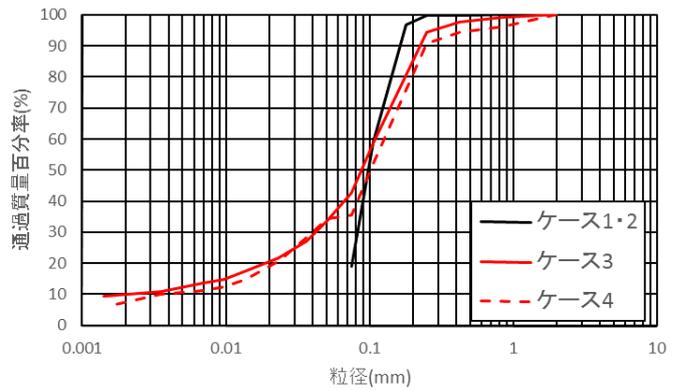


図3 粒度分布

表1 遠心実験ケースと最大張力(把駐力実験値)

ケース	1	2	3	4
地盤材料	珪砂 8 号		海底表層土	
間隙流体	水	高粘性流体	水	
地盤厚*(mm)	182	182	142	144
地盤間隙比*	1.15	1.19	1.77	1.83
内部摩擦角(°)	35.0	33.3	32.2	32.6
根入(mm)	56	58	59	59
牽引仰角(°)	11.2	12.0	13.8	12.8
牽引速度(mm/s)	0.55	1.9	0.49	1.9
最大張力(N)	222	260	184	179

*地盤厚と間隙比はミニチュアコーン試験実施後の値

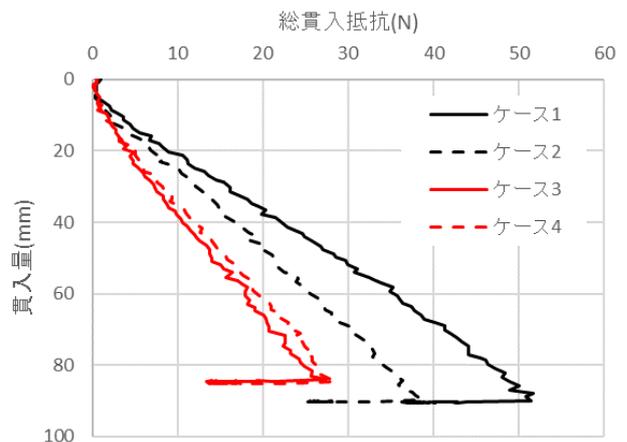


図4 ミニチュアコーン貫入試験結果(貫入抵抗の深度分布)

海底表層よりスミスマッキンタイヤ採泥器を用いて採取した砂質土(ケース 3, 4, 土粒子密度 2.689g/cm^3)を用いた。これら土試料の粒度分布を図 3 に示す。海底表層砂は、珪砂と比べ粒度分布がなだらかで、細粒含有率が 40%程度と高くなっている。

実験ケース一覧を表 1 に示す。実験ケース 2, 4 ではケース 1, 3 に比べワイヤー牽引速度が 3.5~3.9 倍となっている。さらにケース 2 では粘性係数が $20\text{mPa}\cdot\text{s}$ の高粘性間隙流体を用いることで、排水性低下すなわち更なる急速牽引の効果を模擬している。なお地盤材料として海底表層砂を用いたケース 3, 4 では、試料不足のため土槽内に金属板を置き底上げした上に地盤を形成している。

模型地盤作成後に 20G 遠心力場において実施した、ミ

ニチュアコーン貫入試験における総貫入抵抗と貫入量の関係を図4に示す。総貫入抵抗は先端抵抗と周面摩擦抵抗の合計値である。ここで、コーン引抜き時の抵抗力を地盤の周面摩擦のみによるものと考え、貫入途中の周面抵抗と総貫入抵抗の比が引抜き時抵抗の最大値と貫入時抵抗の最大値の比に等しく一定と仮定して、総貫入抵抗を定率で低減することで先端抵抗 q を評価し、次の Lunne and Christoffersen⁴⁾による式を用いて内部摩擦角 ϕ' を求めた結果を表1に示している。

$$N_q = \frac{q}{\sigma'_{v0}} = \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2}\right) \exp\left\{\left(\frac{\pi}{3} + 4\phi'\right) \tan \phi'\right\}$$

ここに、 σ'_{v0} は有効土被り圧である。内部摩擦角を計算するに当たり、支持力係数 N_q は先端コーン底部貫入時点より貫入量最大時点までの平均値を採用した。

3. 実験結果と検討

3.1 実験結果

実験で得られたワイヤー牽引量と張力、アンカー天端内部水圧(P1)、背面中腹部水圧(P2)及び側面下端部水圧(P3)の関係を図5に示す。また牽引前、最大張力の半分張力発現時、最大張力発現時及び姿勢計測終了の4時点におけるアンカー姿勢を図6に示す。なお図5において、水圧センサ P1 はアンカーに固定しており、水圧変動にアンカー鉛直移動に伴う静水圧変化分が含まれる。一方 P2, P3 ではセンサを土槽に固定しており静水圧変化は含まれない。

地盤材料として 8 号珪砂を用いアンカーを緩速牽引した実験ケース 1 におけるワイヤー張力応答に着目すると、牽引量 0 付近より張力が増大し、牽引量 18mm で最大張力 222N に達した後、牽引量の増大とともに張力が微減している。同じ地盤材料で高粘性の間隙流体を使用するとともにアンカーを急速牽引したケース 2 では、牽引量 10mm よりケース 1 と比較して張力が大きくなり、28mm で最大張力 260N に達し、以降漸減するもののケース 1 と比べ大きな張力を維持している。水圧変動に着目すると、ケース 1 では天端直下内部(P1)においてアンカーの鉛直移動(上昇)に起因して牽引量にほぼ比例した水圧変動が生じるとともに、P2, P3 で変動が見られない。一方ケース 2 では P1 ~ P3 の全てにおいて牽引に伴い負圧が顕著に発生している。アンカー背面中腹部(P2)では張力が急増する段階で負圧が急激に発生した後、張力のピーク時点では消散している。一方側面下端部(P3)では、牽引終了まで負圧が継続しており、アンカー下端部付近において緩速牽引の場合と比べ大きな地盤抵抗が維持されていることが推察される。

地盤材料として海底表層砂を用いた実験ケース 3, 4 では、ケース 1, 2 と比較して張力急増時の剛性(牽引量～張力関係の傾き)がやや小さく、急増以降(牽引量で 25mm 程度以降)張力は漸増または安定し、牽引終了まで明確なピークが見られない。またケース 3 と 4 を比較して、牽引速度による張力応答の顕著な差は認められない。水圧変動に

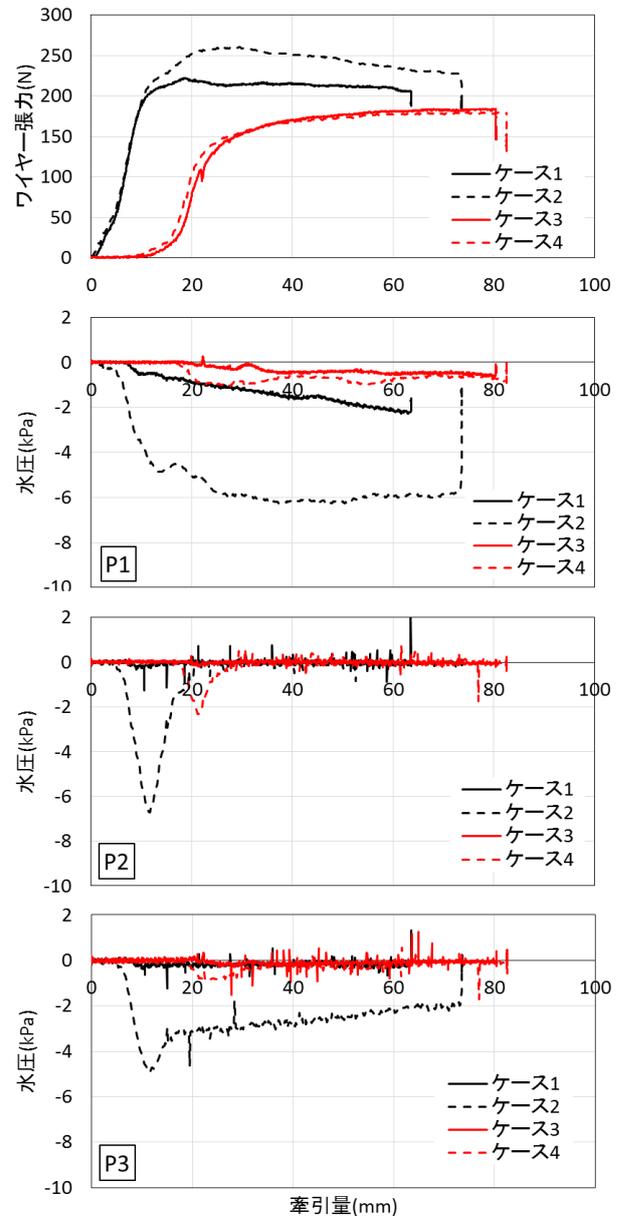


図5 実験結果(ワイヤー張力・水圧～牽引量関係)

着目すると、急速牽引のケース 4 では張力が急増している牽引量 20mm 付近で、背面中腹部(P2)及び側面下端部(P3)において負圧の発生が見られるが、ケース 2 と比べ負圧の絶対値も小さく速やかに消散している。

アンカー姿勢(図6)に注目すると、ケース 1 では直立状態を保ったまま斜め上方に移動しているのに対し、ケース 2~4 では最大張力発現時までに若干後傾している。

3.2 把駐力評価

実験で得られた把駐力(最大張力)を、極限平衡に基づく受働抵抗及び Deng and Carter 法による評価値と比較する。

Reese⁵⁾による剛な杭の水平変位に伴う地盤抵抗評価法を基に地中直立平板の水平移動による受働破壊機構(図7)を設定し、極限平衡法に基づき次の受働抵抗評価式を得た。

$$P = \frac{\gamma L^2}{\sin(\xi - \phi' - \delta)} \left\{ \frac{D}{2} \tan \xi \cos(\xi - \phi') + \frac{L}{3} (\tan \xi)^2 \tan \varepsilon \tan(\xi - \phi') + \frac{KL}{3} \tan \xi (\sin \phi' - \tan \varepsilon \sin(\xi - \phi')) \right\}$$

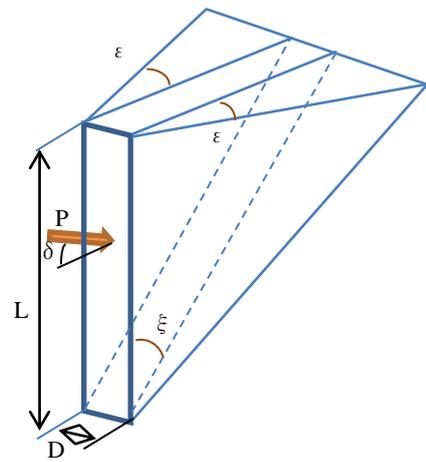
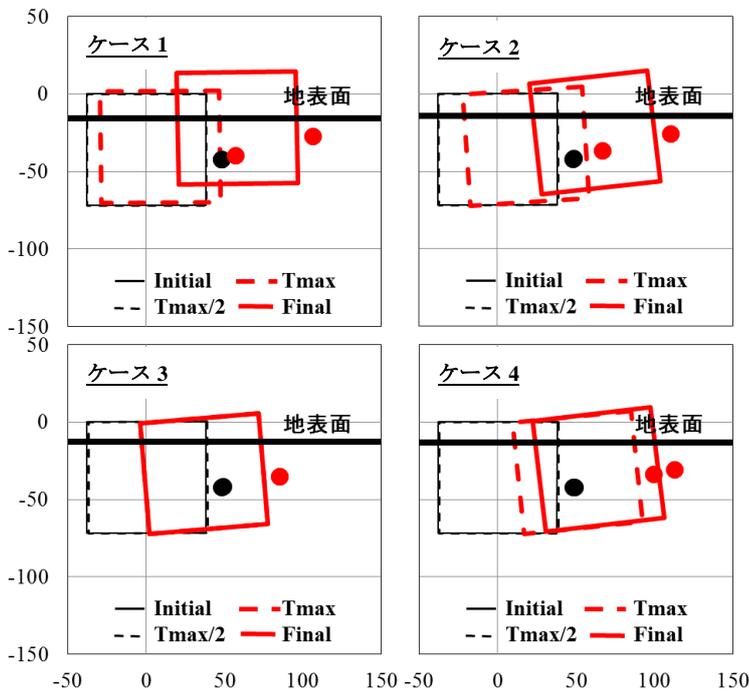


図7 受働抵抗評価における破壊領域

図6 実験結果(牽引前, 最大張力の半分時, 最大張力時, 姿勢計測終了時のアンカー姿勢; 図中の●●はワイヤー結節点位置を示す)

ここに、 P : 受働抵抗力, γ' : 土の有効単位体積重量, L : 根入, D : 土圧受圧面幅(アンカー直径), ξ : 滑り面の傾斜を規定する角度(図7参照), ε : 破壊領域の平面的広がりを規定する角度(図7参照), ϕ' : 土の内部摩擦角, δ : 壁面摩擦角, K : 破壊領域側面での土圧係数, である。ここでは、ゆる詰め地盤を考慮して $\varepsilon = \phi'/2$ とし⁵⁾, 壁面摩擦角 $\delta = \phi'/3$, 土圧係数 $K = \tan^2(\pi/4 - \phi'/2)$ (主働土圧係数)として, ξ を変化させた際の P の極小値を受働抵抗とし, その水平成分を評価した。

Deng and Carter³⁾は、密な砂地盤を想定した完全排水条件での FEM パラメトリック解析結果を整理して、係留策が側面に連結されたサクシオンアンカーの実用的な把駐力評価法を提案した。同法は本来、根入/直径比 $L/D \geq 1$ を適用範囲とするが、砂地盤ではアンカーの設置性より本実験のように $L/D < 1$ の場合も多いと考えられ、この条件での同法の適用性を検討する。なお本計算では、ダイラタンシー角を5度、土圧係数を0.5としている。

上記2法に共通して、アンカー寸法、地盤密度などは実験での実測値を用い、内部摩擦角はミニチュアコーン貫入試験結果より求めた値を採用している(表1参照)。

水圧応答で負圧発生が顕著な実験ケース2を除く3ケースで得られた把駐抵抗(張力最大値)と、受働抵抗の水平成分及び Deng and Carter 法による把駐抵抗の計算結果を表2にまとめる。実験による把駐力は、受働抵抗の水平成分に対し1.5~1.8倍程度、Deng and Carter 法による評価値の約1.6倍となり、2法の計算結果は安全側の値を与えている。

4. おわりに

根入/直径比 0.74~0.78 のサクシオンアンカーの砂質地盤における低仰角方向牽引実験を行い、受働抵抗評価式及

表2 把駐抵抗の実験値と計算値

実験ケース	1	3	4
実験による把駐力 $P_E(N)$	222	184	179
受働抵抗の水平成分 $P_{PH}(N)$	145	105	104
Deng and Carter 法による把駐力 $P_{DC}(N)$	140	114	112
P_E/P_{PH}	1.52	1.75	1.72
P_E/P_{DC}	1.59	1.61	1.60

び Deng and Carter 法による把駐力計算結果と比較したところ、実験で得られた把駐力は計算値に対し1.5~1.8倍となり、計算値は安全側の値となった。

謝辞

本研究は、環境省平成27年度CO2排出削減対策強化誘導型技術開発・実証事業「浮体式洋上風力発電施設における係留コストの低減に関する開発・実証」の一部として行われたものである。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構：平成19年度洋上風力発電実証研究 F/S に係る先行調査報告書, pp.21-22, 2008.
- 2) 北 勝利：砂質地盤中のサクシオンアンカーの把駐力特性に関する遠心模型実験, 第27回中部地盤工学シンポジウム論文集, 地盤工学会中部支部, pp.120~123, 2015.
- 3) Deng, W. and Carter, J. P. : Inclined Uplift Capacity of Suction Caissons in Sand, Proc. Offshore Technology Conference, OTC12196, pp.1-12, 2000.
- 4) Lunne, T. and Christoffersen, H. P. : Interpretation of Cone Penetrometer for Offshore Core Sands, Proc. Offshore Technology Conference, OTC4464, pp.181-192, 1983.
- 5) Reese, L.C.: Ultimate Resistance Against a Rigid Cylinder Moving Laterally in a Cohesionless Soil, Society of Petroleum Engineers Journal, Vol.2, No.4, pp.355-359, 1962.