

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 Centrifuge Model Tests on Holding Capacity of Suction Anchors in Sandy Seabed

北 勝利

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

概 要

サクシオンアンカーは洋上浮体構造物の係留基礎として、他のアンカーと比較して大水深における施工性や設置精度の点で有利である。本研究では日本近海における適用を念頭に、砂質地盤におけるサクシオンアンカーの把駐力特性について遠心模型実験を通じた検討を行っている。実験より把駐特性に及ぼす係留策の牽引角度および連結点位置の影響について整理した結果、牽引索をアンカー側面に連結した場合には牽引仰角が小さくなるに従い把駐力が増大するのに対し、アンカー天板中心上方に連結(天上連結)した場合には牽引仰角が小さくなると把駐力が減少した。また天上連結で鉛直引抜きの場合において、付随して実施したミニチュアコーン貫入試験より求めた摩擦角およびアンカー下端と側面における水圧測定結果を用いた把駐抵抗の評価を行い、実測値と概ね一致する結果を得た。

キーワード：サクシオンアンカー、把駐力、砂質地盤、浮体構造物、係留

1. はじめに

近年の地球温暖化に対する意識向上や震災による原発被災などを受け、再生可能エネルギーの導入推進気運が増している。再生可能エネルギーの中で洋上風力発電は、建設や送電などコストや技術上の課題が残されているものの、洋上での風況の安定性や安全面、騒音等環境面での周辺地域への影響低減の点で有力な選択肢の一つと考えられる。洋上風力発電については、土木学会風力発電設備の動的解析と構造設計小委員会¹⁾において着床式および浮体式構造の適用性について検討され、水深 60m 程度以上では経済性の点で浮体式構造が優位となり、動的特性や構造安定性に関する検討が実施されているが、浮体の係留基礎に関する詳細検討は不足している。

サクシオンアンカーは、海外の大水深域で資源掘削プラットフォーム等に利用されている係留基礎形式である²⁾。日本では同様の設置原理に基づくサクシオン基礎が沿岸構造物基礎として実用されている³⁾が、浮体係留基礎としては利用されていない。杭やドラッグ式など他の係留基礎と比較して、大水深域での施工性や設置精度、地盤工学的設計枠組の適用性の点で優れている。海外の既往研究は大水深域での粘土地盤への適用に関するものが多いのに対し、日本近海での洋上風力発電の適地利用を考える場合、日本沿岸水深約 500m 以浅で広く分布している砂質・泥質地盤⁴⁾での適用性について検討する必要がある。砂泥質地盤と粘土質地盤ではアンカーの沈設や引抜き過程における水圧の発生状況や作用に違いが生じる。

これまでに著者は、砂質地盤におけるサクシオンアンカーの把駐力特性について、遠心模型実験による検討を行ってきた⁵⁾。これらの結果を踏まえ本文では、把駐力特性に及ぼす係留策の牽引方向やアンカーへの連結位置等の影響について整理するとともに、既往の把駐力評価法による計算結果と比較する。

2. 実験概要

アンカー引抜き実験の概要を図-1 に示す⁵⁾。気乾状態の 8 号珪砂(平均粒径 $D_{50}=0.095\text{mm}$ 、土粒子密度 2637kg/m^3 、最大間隙比 1.291、最小間隙比 0.763)を、剛な矩形断面土槽(内寸幅 510mm、奥行 200mm、深さ 350mm)内のセルローズ水溶液(粘度 $12\sim 13\text{mPa}\cdot\text{s}$)中に落下させた後、脱気および 10G 遠心力場において自重圧密することによりゆる詰め状態の飽和水平模型地盤を作成した。実験では、動的遠心模型実験における粘性スケーリングを参考に、間隙圧消散を遅延させるために増粘剤水溶液を間隙流体として用いた。変水位透水試験の結果、相対密度 33%における粘度 11mPa のメトロース水溶液の浸透係数は 0.0006 cm/s であった。

形成模型地盤の強度再現性等を把握するため、ミニチュアコーン貫入試験(直径 10mm、貫入速度 1.1mm/s)を実施後、アンカー模型を鉛直ガイドロッドに取り付けた状態で、10G 遠心力場において自重およびアンカー天板部から負圧を用いてアンカー内部水を吸出すことにより、模型地盤中にアンカーを沈設した。アンカーからガイドロッドを取

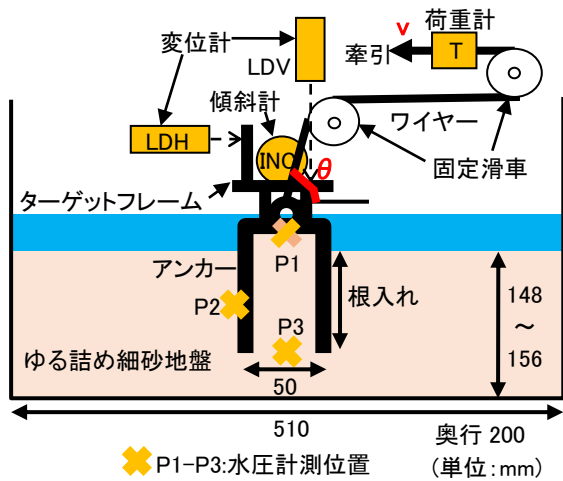


図1 引抜き実験概要(ワイヤーを天板中心上方に連結した場合)

り外し計測器材を設置した後、滑車を介してワイヤー(係留索)を牽引装置に連結し、10G 遠心力場において定速度で牽引した。引抜き実験における計測項目は、ワイヤー張力(図1中T)、アンカー内外3点での水圧(P1,P2,P3)、ワイヤー牽引量、アンカー上部ターゲットフレームの水平(LDH)および鉛直変位(LDV)と傾斜角(INC)の8項目である。

アンカー模型を図2に示す⁹⁾。胴体部は外径50mm肉厚1.2mmのステンレス製円筒で、下端から天板上面までの高さは87mmまたは115mmである。アンカー内部は金属メッシュにより上下に分かれている。上室には天板からアンカー内部水を吸引する際に砂粒子を捕捉するためのスポンジが挿入される。アンカー背面には中段(アンカー高さ87mmの場合下端より36mm、高さ115mmの場合下端より50mm)位置まで、内側面には下端位置まで細パイプが貼付されている。これら2本の細パイプの上端は、プラスチックチューブを介して水圧センサに接続される。天板には吸水口と水圧センサが設置されている。牽引用ワイヤーは、Uボルトを介して天板中心上方19mm位置または側面前方(アンカー高さ87mmのみ、下端より46mm上方、側壁面より10mm前方)でアンカー模型に連結されている。

実験ケース一覧を表1に示す。ケース1-1~3-3では高さ87mmのアンカーを、4-1~4-4では高さ115mmのアンカーをそれぞれ使用している。ケース1-1~1-3はワイヤーを天板中心上方に連結(以降、天上連結と呼ぶ)し、鉛直上方

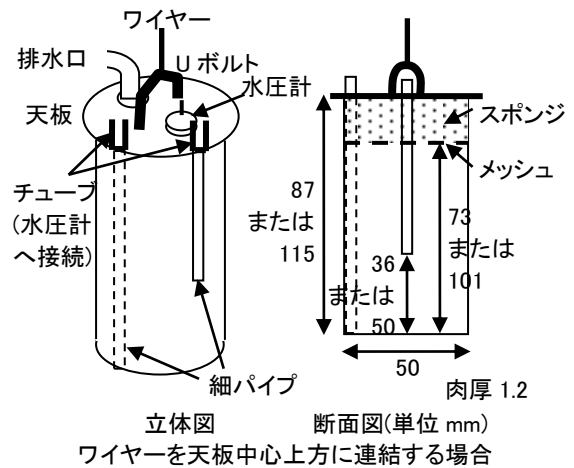
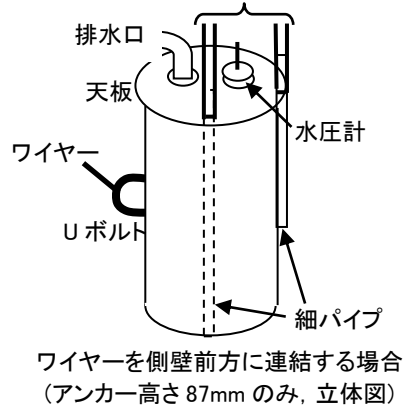


図2 アンカー模型



引抜きで牽引速度を変化させている。ケース2-1~2-3では天上連結で斜め上方に牽引している。ケース3-1~3-3ではワイヤーを側面に連結し、斜め上方に牽引している。ケース4-1~4-4では天上連結で鉛直または斜め上方に急速牽引した。

3. 実験結果と検討

10G 遠心力場において実施したミニチュアコーン貫入試験結果を図3に示す。貫入抵抗は先端部ではなく上部で計測しており、周面摩擦を含めた抵抗値となる。同図より地盤強度の再現性は概ね良好と考えられる。

表1 実験ケース一覧

ケース	1-1	1-2	1-3	2-1	2-2	2-3	2-4	3-1	3-2	3-3	3-4	4-1	4-2	4-3	4-4	
アンカー	短(高さ87mm)								長(高さ115mm)							
地盤層厚(mm)	150	148	151	155	155	155	155	150	156	156	150	150	148	148	152	
相対密度(%)	25	35	30	31	23	16	20	27	22	24	37	17	19	24	24	
根入れ(mm)	87	74	72	86	85	85	74	76	74	75	70	113	112	109	101	
ワイヤー連結	天上連結								側面連結				天上連結			
牽引仰角(度)	90	90	90	58	58	39	38	76	75	51	40	90	90	59	57	
牽引速度(mm/s)	1.9	0.71	0.32	1.9	0.52	1.9	0.54	1.9	0.56	1.9	1.9	2.0	1.9	2.0	1.9	
最大張力(N)	77	64	65	74	56	58	51	91	67	101	102	72	93	79	82	

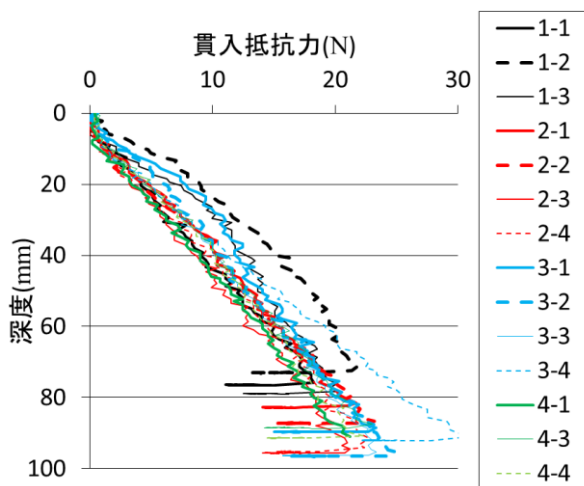


図3 ミニチュアコーン貫入試験結果

次に短アンカーを用いた実験ケース 1-1, 1-3, 2-3, 3-4 について把駐力特性を比較する⁵⁾。ケース 1-1 におけるワイヤー張力及び水圧とアンカー変位の関係を図 4 に、他ケースにおける張力～変位関係を図 5 に示す。天上連結し鉛直上方に急速牽引したケース 1-1 の張力～変位関係(図 4(a))に注目すると、変位がほぼ 0 の状態で張力が急増した後、鉛直変位 1.9 mm でピーク張力 77 N に到達する。その後張力は変位とともに微減するが、変位 15 mm 程度より急減し、20 mm 以降約 40 N で概ね安定する。一方水圧変動(同図(b))に着目すると、アンカー上端内部(P1)では牽引直後に -6 kPa まで負圧が生じた後変位とともに負圧が発達、変位 10 mm でピーク(-11 kPa)に達した後消散してゆく。負圧消散と張力急減の位相は概ね合致している。なお P2, P3 の水圧変動は、それぞれの計測位置の鉛直移動に伴う静水圧成分変化を含む値である。天上連結で鉛直上方に緩速牽引したケース 1-3 における張力～変位関係を図 5(a)に示す。ピーク張力到達後、変位増大とともに張力が漸減し、急速牽引ケースで見られたピーク後変位 15 mm 程度までの把駐抵抗の維持傾向は見られない。即ち砂質地盤においても、急速牽引時の負圧発達により、把駐抵抗のピーク値増大のみでなく、ピーク後もある程度持続して牽引抵抗の減少抑制の効果が認められる。天上連結で仰角 39 度で斜め上方に急速牽引したケース 2-3 での張力～変位関係を図 5 (b)に示す。鉛直引抜きのケース 1-1 と比較して把駐力(ワイヤー張力の最大値)が約 58N と小さく、把駐力発現時の変位が大きくなっている。側面連結で斜め 40 度上方に急速牽引したケース 3-4 における張力～変位関係を図 5(c)に示す。天上連結のケース(同図(b))と比較して大きな把駐力が発揮されている。

ワイヤー張力最大値(把駐力) T_{max} と初期牽引仰角 θ より計算した、各実験ケースにおける水平および鉛直方向の把駐力成分を図 6 に示す。図中凡例の「天上」は天板中心上部に、「側面」はアンカー側面前方に係留策(ワイヤー)を連結した実験ケースであることを示している。また×印はアンカー高さ 115mm の実験結果を表している(その他はアンカー高さ 87mm)。図中の円弧は把駐力の等値線を表し

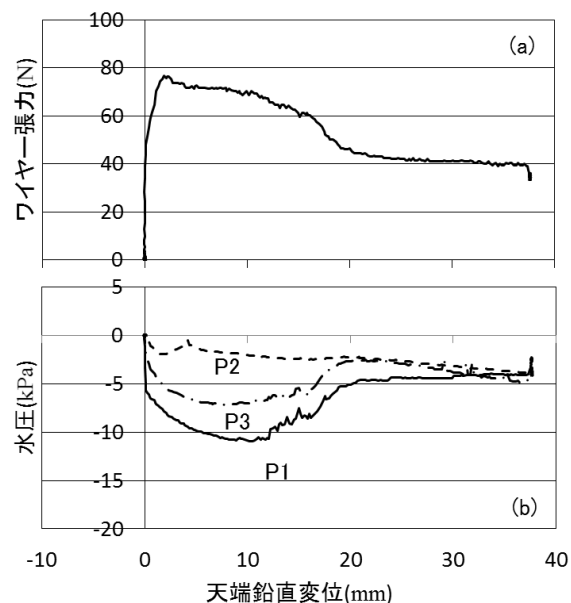


図4 実験結果(ケース 1-1)

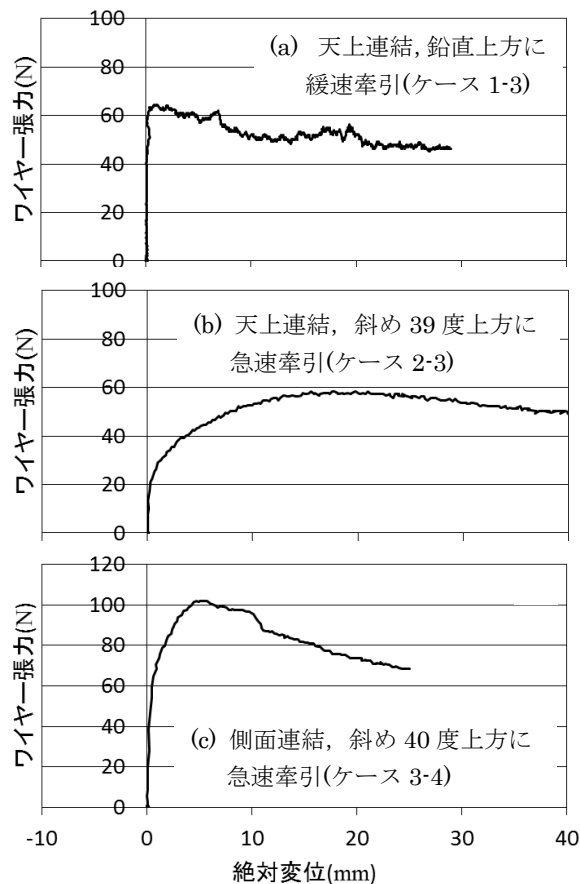


図5 実験結果

ている。天上連結では、急速牽引・緩速牽引ともに牽引仰角が小さくなると把駐力が減少する傾向にあるのに対し、側面連結(急速牽引)では牽引仰角が小さくなるに従って把駐力が大きくなり、完全排水に近い条件で実施された Kim らの実験⁶⁾と同様の傾向を得た⁵⁾。

Deng and Carter らは、密な砂地盤を対象に完全排水条件におけるアンカー-地盤系挙動の有限要素解析によるパラメトリックスタディ結果を整理し、簡便な把駐力評価法

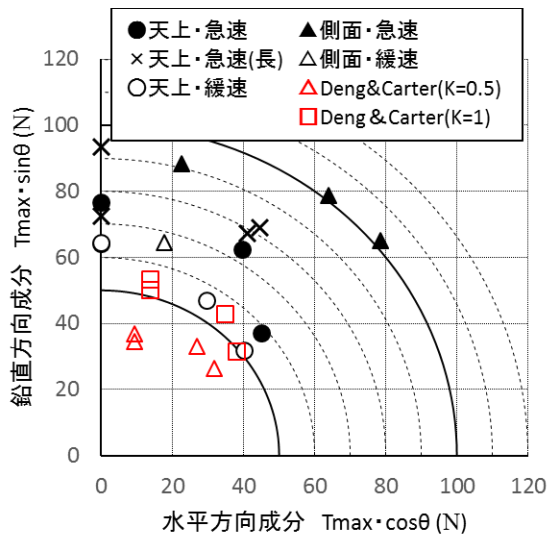


図6 牽引方向と把駐力の関係

を提案した⁷⁾。側面連結ケース 3-1~3-4 を対象に、土圧係数 K を 0.5 または 1 として Deng and Carter 法より計算した把駐抵抗を図 6 中赤△印および赤□印で示す。計算ではダイラタンシー角を 0 とし、内部摩擦角についてはミニチュアコーン引抜き時地盤抵抗より簡易的に周面摩擦力を求め全貫入抵抗から差し引いて得た先端抵抗を基に、Lunne and Christoffersen 式⁸⁾を用いて評価した。牽引仰角が同じ場合、 $K=1$ の計算結果は側面連結・緩速牽引ケースの実験結果に近い把駐力値となっている。一方側面連結・急速牽引の実験結果と比較した場合、同仰角での Deng and Carter 法による把駐力値は 1/2~1/3 となっている。

次に天上連結されたアンカーの鉛直上方引抜きケース (1-1~1-3, 4-1, 4-2) について、前野ら⁹⁾に従いアンカーと内部土塊が一体で移動する破壊モード(図 7)を仮定し、次式で把駐力 Q を評価した。

$$Q = Q_F + Q_B + W$$

ここに、 Q_F はアンカー外周摩擦抵抗、 Q_B は負圧によるアンカー先端部引抜き抵抗で、次式により計算する。 W はアンカーと内部土塊の合計水中重量である。

$$Q_F = \pi D \int_0^H K \{ \gamma' z - \Delta u \} \tan \phi_s dz$$

$$= \pi DK \tan \phi_s \times \frac{\gamma' H^2}{2} - \pi DK \tan \phi_s \left(\frac{H \Delta u_1}{2} + \frac{H_2 \Delta u_2}{2} \right)$$

$$Q_B = -\Delta u_2 A = -\frac{\pi D^2}{4} \Delta u_2$$

ここに、 D はアンカー外径、 H はアンカー根入れ、 K は土圧係数、 ϕ_s は壁面摩擦角、 γ' は土の有効単位体積重量、 Δu_1 Δu_2 はそれぞれアンカー側面と先端部での水圧の静水圧からの差分である。壁面摩擦角はミニチュアコーン貫入試験より求めた内部摩擦角の 2/3 とし、 Δu_1 Δu_2 には、ワイヤー張力最大時の P2, P3 での測定値を用いた。把駐力実測値と比較した結果を図 8 に示す。急速牽引、緩速牽引に関わらず実測値と評価値は概ね合致している。

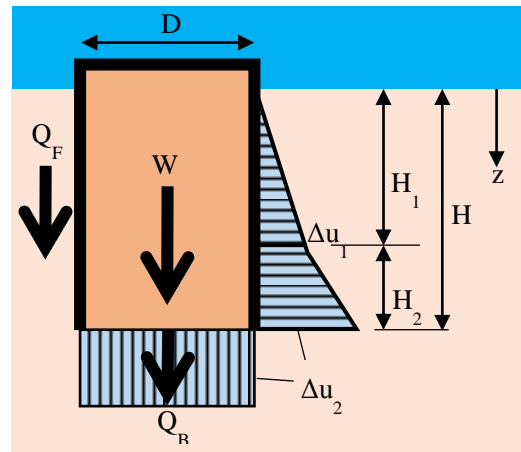


図7 鉛直引抜き抵抗評価における破壊モード

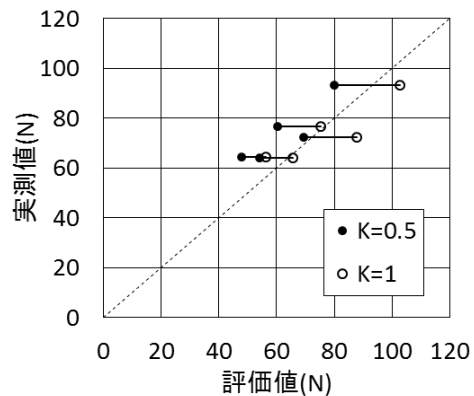


図8 把駐力の評価値と実測値の関係

参考文献

- 1) 土木学会構造工学委員会・風力発電設備の動的解析と構造設計小委員会：洋上風力発電技術の現状と将来展望，土木学会 平成 22 年度全国大会研究討論会 研-08 資料，30PP，2010.
- 2) Andersen, K.H., Murff, J.D., Randolph, M.F., Clukey, C.T., Erbrich, C.T., Jostad, H.P., Hansen, B., Aubeny, C., Sharma, P. and Supachawarote, C.: Suction Anchors for Deepwater Application, Proc. 1st International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, pp.3-30, 2005.
- 3) 財団法人沿岸開発技術研究センター：サクシオン基礎構造物技術マニュアル，270PP，2003.
- 4) 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.
- 5) 北 勝利：砂質地盤におけるサクシオンアンカーの把駐特性に関する遠心模型実験，土木学会論文集 B3(海洋開発)，Vol.70, No.2, I_852-857, 2014.
- 6) Kim, K.O., Kim, Y. S., Cho, Y., Bang, S. and Jones, K. : Centrifuge Model Tests on Suction Piles in Sand Under Inclined Loading, Proc. 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, pp.191-196, 2009.
- 7) Deng, W. and Carter, J. P. : Inclined Uplift Capacity of Suction Caissons in Sand, Proc. Offshore Technology Conference, OTC12196, pp.1-12, 2000.
- 8) Lunne, T. and Christoffersen, H. P. : Interpretation of Cone Penetrometer for Offshore Sands, Proc. Offshore Technology Conference, OTC4464, pp.181-192, 1983.
- 9) 前野賀彦, 石川元康, 熊谷裕児, 村川博：係留アンカーの把駐力特性の検討，海洋開発論文集，Vol.15, pp.255-260, 1999.