

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：32644  
 研究種目：基盤研究(C)  
 研究期間：2012～2014  
 課題番号：24560610  
 研究課題名(和文) 日本沿岸における洋上浮体係留のためのサクシオンアンカーの適用に関する基礎的研究  
  
 研究課題名(英文) Fundamental study on behavior of suction anchors in sandy deposits for mooring system of floating structure in offshore Japan  
  
 研究代表者  
 北 勝利 (KITA, Katsutoshi)  
  
 東海大学・海洋学部・教授  
  
 研究者番号：60234225  
  
 交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 1,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、日本近海における洋上風力発電など浮体構造物の係留基礎へのサクシオンアンカーの適用を念頭に、比較的大きなスケールの地盤挙動を模擬するのに有利な遠心模型実験を通して砂質地盤における把駐力(引抜き抵抗)特性を調べるとともに、把駐力評価方法について検討した。その結果、係留策のアンカーへの連結位置や牽引方向などが把駐力に及ぼす影響について知見を得るとともに、既往の水圧変動効果を考慮しない評価法による把駐力計算値は急速牽引の実験値に対し1/2～1/3と過小評価する結果となった。一方実測の水圧変動を取り入れた鉛直引抜き抵抗評価式によると、実測値と概ね合致する結果を得た。

研究成果の概要(英文)：This study focuses on holding behavior of suction anchors in sandy deposits, in view of application to mooring system for floating structures around Japan such as offshore wind power generation. Centrifuge model tests were conducted to investigate effects of pullout direction of the mooring line and other factors on the holding capacity. As conclusions, 1. in experiments with the mooring line connected above the center of the anchor, the holding capacity increased with increasing pullout angle of elevation. While, the holding power decreased with the increasing elevation angle in cases for the line connected to the side wall of the anchor. 2. The method to calculate the holding capacity by Deng and Carter, based on numerical simulations of anchor behavior in sandy grounds without pore pressure changes, substantially underestimated the measured capacities. 3. Vertical pullout capacities evaluated by a method utilizing measured pore pressures, agreed favorably with the measured ones.

研究分野：地盤工学

キーワード：サクシオンアンカー 洋上浮体構造物 係留 把駐力 遠心模型実験

1. 研究開始当初の背景

(1) 2011年東日本大震災では原子力発電所の被災により放射性物質拡散という重篤な事態が発生し、地域住民の安全安心の確保の必要性に鑑みての国レベルのエネルギー戦略の議論につながり、太陽光や風力、波力、地熱といった再生可能エネルギーの推進気運を増強させた。その中で風力発電は、陸上設置の場合において設置場所の確保や電力供給の不安定性、暴風雨時安全性、騒音等含む環境面などで課題が残る。一方洋上設置の場合には、送電や建設におけるコストや技術上の課題が生じるものの、前述の陸上設置に係る課題をある程度解決しうる。

洋上風力発電については、着床式および浮体式構造の適用性について、土木学会の風力発電設備の動的解析と構造設計小委員会において検討が進められている。同委員会の検討会資料によると、水深 60m 程度以上で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。

(2) 大水深域における浮体係留基礎について、サクシオンアンカーは、北海やメキシコ湾など水深 100~2000m 程度の大水深域において石油等掘削基地で多用されている係留基礎形式であり、日本においては、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が、大型浮体の係留アンカーとしては利用されていない。同じく係留基礎に採用されている杭や引きずり式アンカーと比較して、大水深域での施工性や設置精度、地盤工学的な設計枠組みの適用性の点で優れている。

海外での既往研究は粘土地盤への適用に関するものが多く、設計ツールも開発されている。一方、日本近海の洋上風力発電の適地利用を考える場合、水深約 500m 以浅では砂質や泥質底質が広く分布しているが、砂泥質地盤と粘性土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うる。サクシオンアンカーの砂質地盤への適用については、沈設および鉛直単調引き抜きに関する模型実験等の研究が実施されているものの、トートやカテナリー係留など水平~斜め方向引抜きを対象とした把駐特性の研究は不足している。

2. 研究の目的

本研究では、比較的大きなスケールの地盤挙動を模擬するのに有利な遠心模型実験を用いて、サクシオンアンカーの把駐力(引抜き抵抗)特性に及ぼす係留策の牽引方向等の影響について系統的に調査するとともに、数値解析を通して把駐力の評価方法の構築を試みることを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 遠心模型実験における引抜き実験の概

要を図 1 に示す。気乾状態の細砂を剛な矩形断面土槽内の増粘剤水溶液中に落下させた後、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。形成地盤の強度の再現性等を把握するためのミニチュアコーン貫入試験を実施後、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頭部からのアンカー内部の水の吸引により模型地盤中に沈設した。アンカーをガイドロッドより取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、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、アンカー上部に取り付けた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。

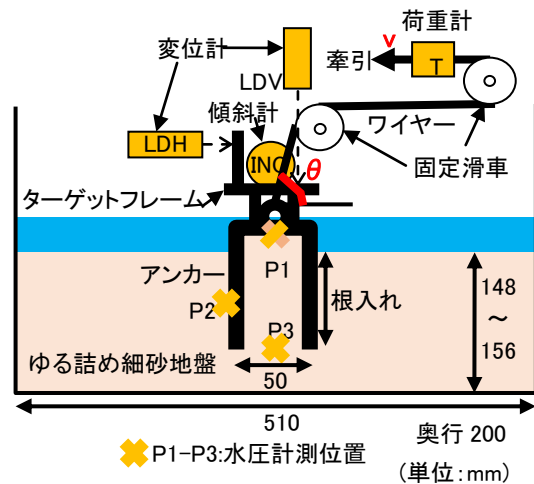
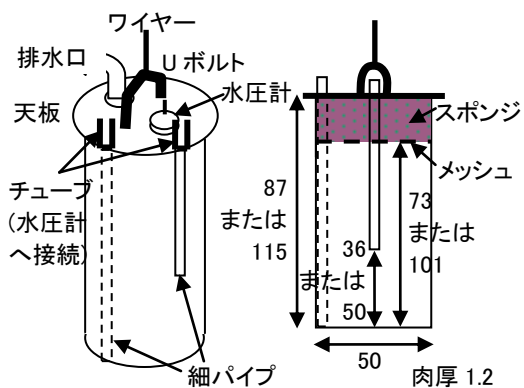


図 1 アンカー引抜き実験概要(天上連結の場合)

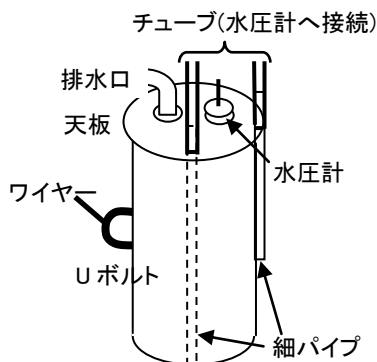
アンカー模型を図 2 に示す。胴体部はステンレス円筒で、内部は金属メッシュにより上下に分かれている。上室には天板からのアンカー内部水を吸引する際に砂粒子を捕捉するためのスポンジが挿入される。アンカー背面には中段位置まで、内側面には下端位置まで細パイプが貼付されている。これら 2 本の細パイプの上端は、プラスチックチューブを介して水圧センサに接続されている。天板には吸引口と水圧センサが設置されている。牽引用ワイヤーは、U ボルトを介して天板中心上方または側面前方でアンカー模型に連結されている。

実験は、地盤状態をゆる詰め(相対密度 16~37%)として、牽引用ワイヤーの連結位置(天板中心上方または側面前方)、牽引方向(38~90 度)、牽引速度(0.32~2mm/s)およびアンカー高さ(87mm または 115mm)をパラメータとして変化させて実施した。

(2) 鉛直上方引抜きケースについて、前野らの方法に従ってアンカー内部土とアンカーを一体とした引抜き破壊モード(図 3) を仮定し、

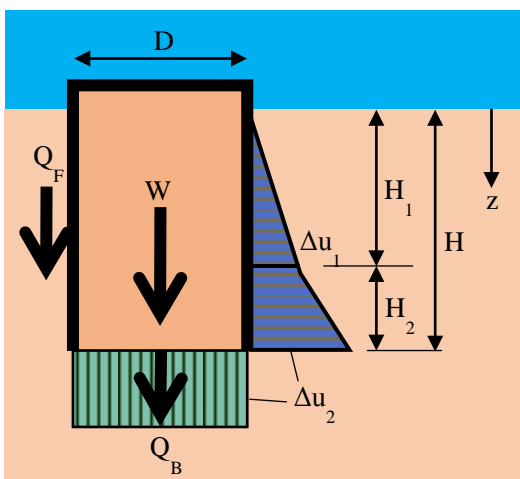


立体図 断面図(単位 mm)  
ワイヤーを天板中心上方に連結する場合



ワイヤーを側壁前方に連結する場合  
(アンカー高さ87mmのみ、立体図)

図2 アンカー模型



$$Q = Q_F + Q_B + W$$

$Q$ : 把駐抵抗,  $Q_F$ : 周面摩擦抵抗,

$Q_B$ : 先端部引抜き抵抗,

$W$ : アンカーと内部土の合計水中重量,

$\Delta u_1, \Delta u_2$ : 過剰水圧値(実験値を使用)

図3 鉛直引抜抵抗評価における破壊モード

実験で得られた把駐抵抗の評価を行った。評価にあたっては、周面摩擦抵抗およびアンカー先端部引抜き抵抗の評価に水圧実測値を用いるとともに、ミニチュアコーン貫入試験結

果を基に壁面摩擦角を設定した。

加えて Deng and Carter による砂地盤を対象に完全排水条件と仮定した有限要素解析結果に基づく把駐力評価方法を用いて、係留策を側面前方に連結したケースにおける把駐抵抗を求め、実験結果と比較した。

#### 4. 研究成果

(1) 天板中心上方にワイヤーを連結し鉛直上方に急速牽引した実験ケースにおける、ワイヤー張力及びアンカー内外部における水圧変動を図4に示す。同図(a)はワイヤー張力(把駐抵抗)とアンカー鉛直変位(引抜量)の関係を示している。変位がほぼ0の状態では張力が急増した後、鉛直変位1.9mmでピーク張力77Nに到達する。その後張力は変位とともに微減するが、変位15mm程度より急減し、20mm以降約40N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-6kPaまで負圧が生じた後変位とともに負圧が発達、変位10mmでピーク(-11kPa)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。

一方、鉛直上方に緩速牽引したケースでの実験結果を図5に示す。ピーク張力到達後、

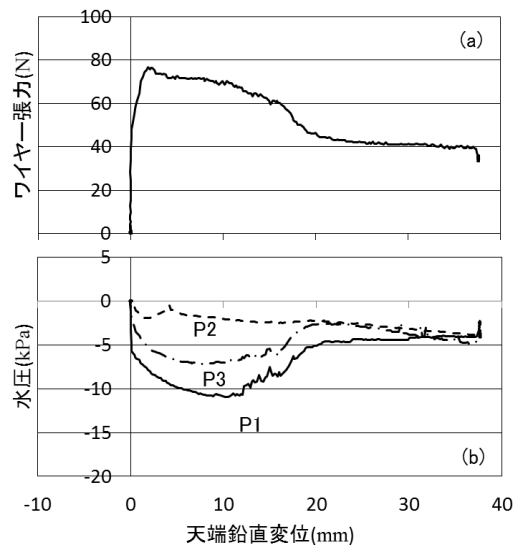


図4 実験結果(アンカー高さ87mm, 天板中心上方連結, 鉛直急速引抜)

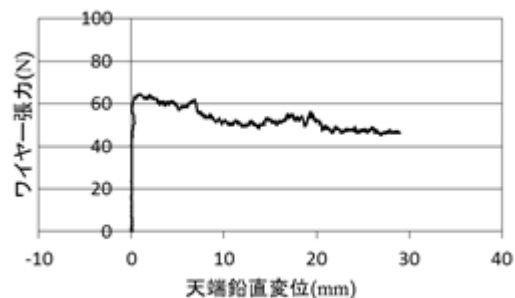


図5 実験結果(アンカー高さ87mm, 天板中心上方連結, 鉛直緩速引抜)

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。

(2) ワイヤーを天板中心上方に連結し、初期仰角 58 度の斜め上方に急速牽引したケースにおける、張力及び水圧挙動と連結点絶対変位の関係を図 6(a) (b) に示す。ワイヤー張力は牽引開始直後の急上昇後に変位の増大とともに増大し、急速鉛直引抜きケースと比較して大きな変位量で最大値に到達する。またピーク後の変位進行に対し張力の低下は緩慢である。一方アンカー天板内部や下端における水圧挙動に注目すると、張力ピーク時より変位が進行しても顕著な負圧の消散が見られない。アンカー上方に設置したターゲットフレームにおいて計測した水平および鉛直変位、容量式傾斜計によるアンカー回転角より計算した、初期(牽引前)、ワイヤー張力が最大値の 1/2 に達した時点 ( $T_{max}/2$ )、ワイヤー張力最大時 ( $T_{max}$ ) 及び計測終了時点など大変位時の 4 段階におけるアンカー姿勢を同図 (c) に示す。張力ピーク到達後もアンカーは継続して前方に回転している。

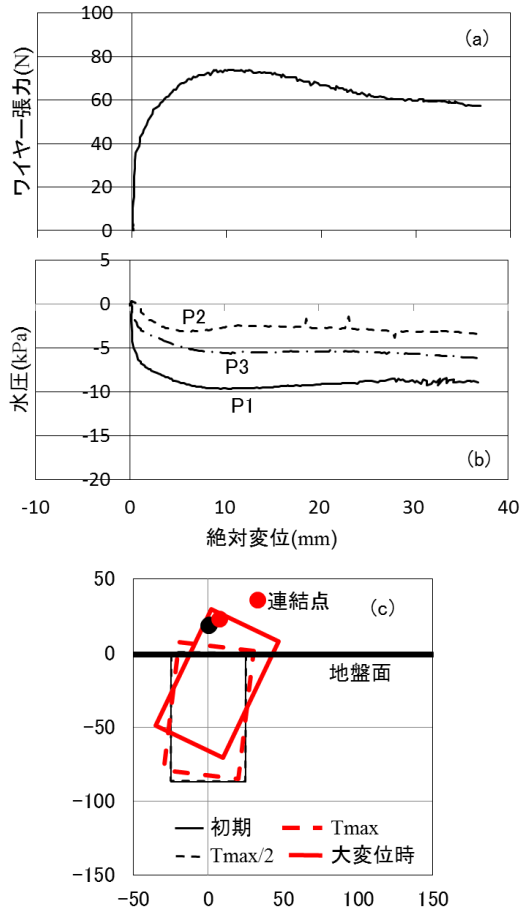


図 6 実験結果(アンカー高さ 87mm, 天板中心上方連結, 牽引仰角 58 度, 急速牽引)

(3) アンカー側面前方にワイヤーを連結し、仰角 40 度で急速牽引したケースにおける実験結果を図 7 に示す。ワイヤー張力の最大値は 102 N で、地盤相対密度の違いはあるものの天板中心上方にワイヤーを連結し同様の仰角で急速牽引したケースより大きな把駐抵抗が発揮された。また張力と水圧変動の位相はほぼ一致している。アンカーはほとんど傾斜せず斜め上方に平行に移動している。

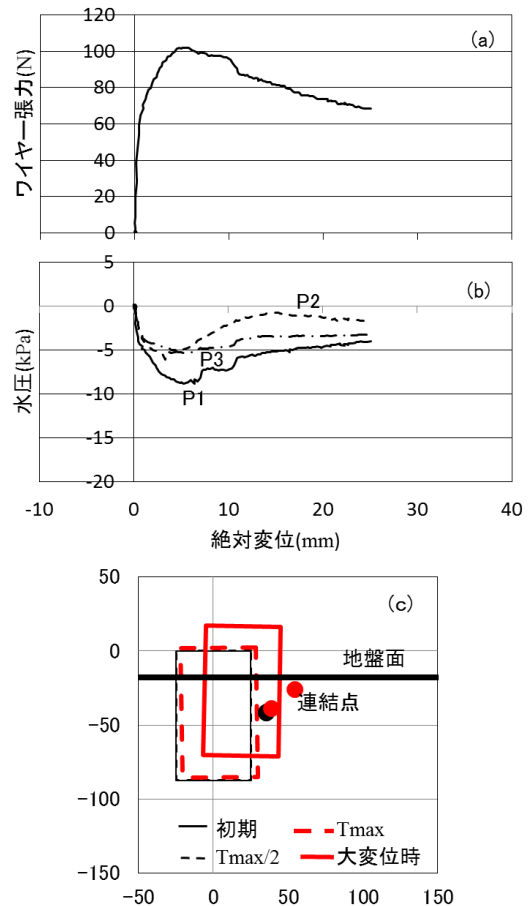


図 6 実験結果(アンカー高さ 87mm, 側面連結, 牽引仰角 40 度, 急速牽引)

(4) ワイヤー張力最大値(把駐力) $T_{max}$  と初期牽引仰角  $\theta$  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 7 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索(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  $\times$  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ている。アンカー側面に係留索を連結した場合、天板中心上方連結の場合と比較して大きな把駐力(合力)が発揮されている。また天板中心上方連結では、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。一方側面連結(急速牽引)では、牽引仰角が小さくなるに従い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 らの実験と同様の傾向を得た。



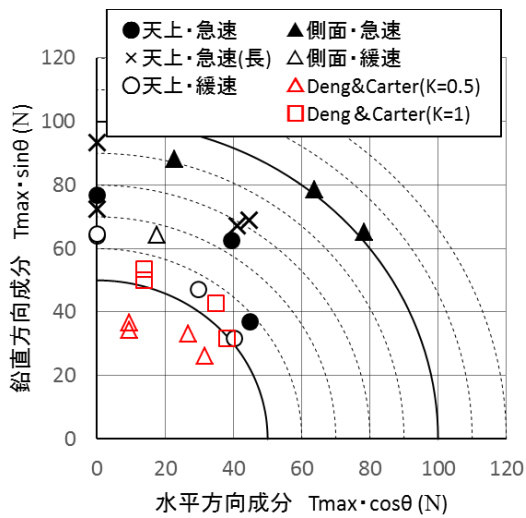


図7 牽引方向と把駐力の関係

図7には、Deng and Carterの方法において土圧係数Kを0.5および1.0として求めた把駐力を赤三角および赤四角で示している。牽引方向が同等の場合、土圧係数1.0で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となっている。一方側面連結・急速牽引ケースの実験結果と比較した場合、Deng and Carter法による把駐力は同方向で1/2~1/3となっている。

(5) 天板中心上部連結・鉛直引抜ケースにおいて、図3の破壊モードを仮定、土圧係数Kを0.5および1.0として把駐力を評価し、実測値と比較した結果を図8に示す。同図は急速牽引ケースと緩速牽引ケースの結果をもとに含んでいる。実測値と評価値は概ね等しくなっている。

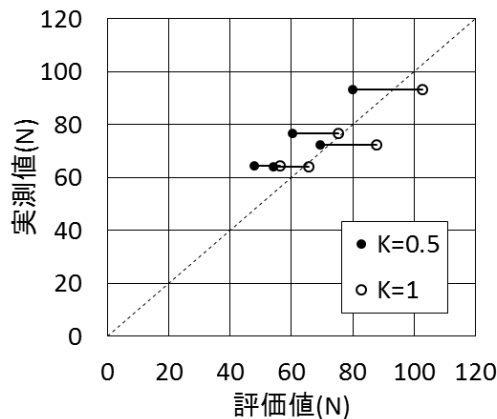


図8 把駐力の評価値と実測値の関係(天板中心上方連結、鉛直引抜)

<引用文献>

- 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, 2010, 30PP
- ② 財団法人沿岸開発技術研究センター, サクション基礎構造物技術マニュアル,

2003, 270PP

- ③ 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, 2008, pp. 21-22.
- ④ 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, 1999, pp.255-260
- ⑤ Deng, W. and J. P. Carter, Inclined Uplift Capacity of Suction Caissons in Sand, Proc. Offshore Technology Conference, 2000, OTC12196, pp.1-12
- ⑥ Kim, K.O., Y. S. Kim, Y. Cho, S. Bang and K. Jones, Centrifuge Model Tests on Suction Piles in Sand Under Inclined Loading, Proc. 19th International Offshore and Polar Engineering Conference, 2009, pp.191-196

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計1件)

- ① 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), 査読有, Vol.70, No.2, 2014, I\_852-857, [http://doi.org/10.2208/jscejoe.70.I\\_852](http://doi.org/10.2208/jscejoe.70.I_852)

[学会発表] (計5件)

- ① 北 勝利, 砂質地盤中のサクシオンアンカー引抜抵抗に関する遠心模型実験, 第50回地盤工学研究発表会, 2015年9月2日, 北海道科学大学(北海道・札幌市)
- ② 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, 第39回海洋開発シンポジウム, 2014年6月26日, 朱鷺メッセ(新潟県・新潟市)
- ③ 北 勝利, サクシオンアンカーの把駐特性に関する遠心模型実験, 第25回中部地盤工学シンポジウム, 2013年8月9日, 名古屋大学(愛知県・名古屋市)
- ④ 北 勝利, 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48回地盤工学研究発表会, 2013年7月23日, 富山国際会議場(富山県・富山市)
- ⑤ Kita, K. and K. Sekita, Inclined pullout behaviour of suction anchors in muddy sediments, The 9th International Conference on Testing and Design Methods for Deep Foundations, 2012年9月19日, 金沢文化ホール(石川県・金沢市)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

北 勝利 (KITA Katsutoshi)  
 東海大学・海洋学部・教授  
 研究者番号: 60234225