砂質地盤におけるサクションアンカーの 把駐特性に関する遠心模型実験

北 勝利

正会員 東海大学教授 海洋学部環境社会学科 (〒424-8610 静岡市清水区折戸3-20-1)

E-mail:kita@scc.u-tokai.ac.jp

サクションアンカーは、設置精度や大水深域での施工性に優れ、海外では海底油ガス田掘削基地など大水深域での浮体構造物係留基礎として利用されている。今後日本沿岸域での洋上風力発電や資源開発における浮体構造物での利用を考慮すると、砂質地盤における把駐特性を明らかにする必要がある。本研究では、テンションレグプラットフォームやトート係留など緊張係留を念頭に、細砂地盤中のサクションアンカーの把駐特性やアンカー挙動に及ぼす係留索牽引速度と牽引角度、連結位置の影響について、10g場遠心模型実験により検討した。その結果、鉛直上方牽引では牽引速度増大に伴いピーク把駐抵抗が大きくなる効果と、ピーク後の把駐抵抗減少抑制の効果が見られた。一方斜め上方牽引では、鉛直牽引と比較して把駐抵抗ピークに至るまでの牽引変位が大きくなるとともに、大変位域での抵抗減少が緩慢となった。

Key Words : Suction anchor, holding power, mooring, sandy deposits, centrifuge model test

1. はじめに

海底資源掘削や洋上風力発電など沖合域開発においては、浮体構造物基地が経済的に有利となる。大規模浮体構造物の係留基礎としてサクションアンカーは、平板式または杭式アンカーと比較して、設置精度や大水深域での施工性などの点で優れており、海外の油ガス田開発プラットフォームにおいて実用されている¹⁾。また日本では、同じ設置原理のサクション基礎が港湾構造物基礎として用いられている²⁾。

海外では大水深域粘土質地盤での適用例が豊富であるが、日本近海での洋上風力発電などでの利用を想定した場合、広く分布している砂質地盤³⁾における把駐特性を明らかにする必要がある。砂質土中のサクションアンカーに関する実験では、主にテンションレグプラットフォームを想定した鉛直引抜挙動に着目した研究(例えば Iskandar et al.⁴⁾)が実施されている。一方外力や利用形態など広範な条件での適用性を評価するためには、トート係留等を念頭に置いた斜め上方引抜き時における把駐特性の検討が必要であるが、砂地盤を対象とした実験研究(例えば Kim et al.⁵⁾)は少なく、サクション効果など把駐機構・挙動の解明が求められる。

本研究では、大仰角の緊張係留方式を念頭に、砂質地盤中のサクションアンカーに関して、把駐抵抗やアンカ

ー内外水圧及び変位姿勢挙動に及ぼす係留索牽引速度や牽引角度、係留索連結位置の影響について、10g遠心場における模型実験により検討する。

2. 実験方法

アンカー引抜き実験の概要を図-1に、アンカー模型を図-2にそれぞれ示す。アンカー模型は側壁部の直径50 mm、肉厚1.2 mm、天板を含めた高さ87~88 mmの下端開

図-1 アンカー引抜き実験概要(ワイヤーを天板上方に連結した場合)

図-2 アンカー模型

口の円筒形で、天板にはアンカー内の水圧計測のための水圧センサおよび排水口が設置されている。アンカー背面外側にはアンカー下端より36 mm上方まで、また側部内壁には下端位置まで細パイプが接着されており、パイプ上端よりチューブを介して水圧計に接続することでパイプ下端位置(図-1中のP2, P3)での水圧変動を計測する。アンカー内部は下端より73 mmの位置にメッシュが張られており、上室には後述する吸水沈設時に土粒子を捕捉するためのスポンジが挿入される。本研究ではUボルトを用いて、天上部(天板中心上方19 mm)または側壁前部(アンカー下端より46 mm上方、側壁面より10 mm前方)にワイヤー(係留索)を連結した。

内寸で幅510 mm、奥行き200 mm、深さ350 mmの剛な土槽に粘性係数11~13 mPa・sのメトロズ水溶液を入れ、脱気後、気乾燥状態の8号硅砂を土槽上端高さより落下することで水平土層を形成した。土層脱気後、10g遠心力場にて自重圧密することで、ゆる詰め飽和地盤を作成した。本実験では、遠心力場における動的実験で用いられる粘性スケージングと同様に、間隙水圧の急速な消散を防ぐ目的で、粘性係数を水の10倍程度に調整したメトロズ水溶液を間隙流体として用いた。

地盤作成後、各実験における模型地盤強度のばらつきの把握を目的として、直径10 mmのミニチュアコーンを速度1.1 mm/sで地盤中に定速押し、貫入中の地盤抵抗(周面および先端抵抗の合計)を計測した。

次にアンカー模型を鉛直方向に滑動するガイドロッドに固定し、アンカー天板排水口を開口した状態で1gおよび10 g遠心力場において自沈させた後、10 g遠心力場において排水口を通してアンカー内部より吸水することにより沈設した。

アンカー天板排水口を閉塞し、アンカーをガイドロッド

表-1 8号硅砂の物理特性と浸透係数

土粒子密度	2637 kg/m ³
最大間隙比	1.291
最小間隙比	0.763
平均粒径	0.095 mm
浸透係数*	0.0006 cm/s

*間隙流体粘度 11mPa・s, 相対密度 33%

図-3 非排水中空ねじりせん断試験における有効応力経路

ドから取り外した後、天板上方にレーザー変位計のターゲットフレームを設置した。ワイヤーを固定滑車および荷重計を介して牽引装置に接続し、10g遠心力場において定速で牽引した。引抜き実験における計測項目は、ワイヤー張力(T)、アンカー天板直下水圧(図-1中P1)、アンカー背面および下端位置での水圧(P2, P3)、ターゲットフレームの水平・鉛直変位(LDH, LDV)及びターゲットフレームに固定した容量式傾斜計によるアンカー回転角(INC)の7項目である。

実験において地盤材料として用いた8号硅砂の物理特性と浸透係数を表-1に示す。また同砂のゆる詰め飽和供試体を用いた、等方圧密からの非排水中空ねじりせん断

表-2 実験ケース

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
地盤層厚(mm)	150	148	151	155	155	155	155	150	156	156	150
相対密度(%)	25	35	30	31	23	16	20	27	22	24	37
アンカー根入れ(mm)	87	74	72	86	85	85	74	76	74	75	70
ワイヤー連結位置	天板中心上方							側壁前方			
牽引仰角(度)	90	90	90	58	58	39	38	76	75	51	40
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
牽引時最大張力(N)	77	64	65	74	56	58	51	91	67	101	102
張力最大時のワイヤー連結点絶対変位(mm)	1.9	2.7	0.75	8.6	5.2	15.6	23.2	15.9	10.4	5.7	4.7

図-4 ミニチュアコーン貫入試験結果

試験における有効応力経路を図-3に示す。3種類の圧密圧力について試験を行い、非排水せん断時の供試体相対密度は30~32%である。同図より、せん断応力ピーク時における有効応力比(τ/σ_m' ; 図中実直線の勾配)は0.43、変相時の有効応力比(破線の勾配)は0.66となっている。

実施実験ケースを表-2に示す。ケース1-1~1-3は天板中心上方にワイヤーを連結した鉛直引抜き実験であり、ワイヤー牽引速度を1.9 mm/sから0.32 mm/sの範囲で変化させている。ケース2-1~2-4では、ワイヤー連結位置を天板中心上方として、斜め上方に牽引している。ケース3-1~3-4では、ワイヤーをアンカー側壁前方に連結し、牽引角度を変化させている。ミニチュアコーン貫入試験実施後における地盤層厚は148~156 mm、平均相対密度は16~37%、引抜き試験時の初期アンカー根入れは70~87 mmであった。

3. 実験結果

アンカー沈設前に実施したミニチュアコーン貫入試験の結果を図-4に示す。貫入抵抗は深度にほぼ比例して増大している。各ケースの貫入抵抗の深度分布グラフは狭い範囲に重なっており、地盤強度の再現性は概ね良好と

図-5 実験結果(ケース1-1)

考えられる。

(1) 鉛直引抜き実験

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ケース1-1における、ワイヤー張力及びアンカー内外部における水压変動を図-5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の関係を示している。変位がほぼ0の状態では張力は50 Nまで増加した後、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以降に約40 Nで概ね安定する。一方水压変動(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とP3の水压値は、各計測点の鉛直移動による静水压分の変化を含む値である。

次に鉛直上方に緩速牽引したケース1-3の実験結果を図-6に示す。変位0.75 mmでピーク張力65 Nに到達後、

変位増大とともに張力が漸減し、ケース1-1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) 斜め上方牽引実験(天板中心上方に係留索連結)

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2-1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-7(a)(b)に示す。ワイヤー張力は、牽引開始直後に35 Nまで上昇した後、変位の増大とともに増大し、鉛直引抜きケース1-1と比較して大きな変位量8.6 mmで最大値74 Nに到達する。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変位姿勢を同図(c)に示す。張力ピ

図-6 実験結果(ケース 1-3)

図-7 実験結果(ケース 2-1)

図-8 実験結果(ケース 2-3)

ーク到達後もアンカーは継続して前方に回転している。

牽引初期仰角を39度としたケース2-3の実験結果を図-8に示す。ケース2-1よりさらに大きな変位域(15.6 mm)において、ワイヤー張力が最大(58 N)となっている。

(3) 斜め上方牽引実験(アンカー側壁に係留索連結)

アンカー側壁前方にワイヤーを連結し、牽引仰角76度で急速牽引したケース3-1における実験結果を、図-9に示す。連結点変位15.9 mmでワイヤー張力の最大値91 Nに達し、アンカー天上部に係留索を連結したケースより大きな把駐抵抗が發揮されている。張力ピーク時変位とアンカー内外部での水圧の負圧ピーク時変位はほぼ一致している。同図(c)より、牽引によりアンカーが後傾しつつ最大把駐抵抗が動員されている。

初期牽引仰角を40度としたケース3-4における実験結果を図-10に示す。ワイヤー張力の最大値は102 Nであり、張力と水圧(負圧)変動の位相は一致している。アンカーはほとんど傾斜せず、斜め上方に平行に変位している。

(4) 把駐特性に及ぼす牽引速度、牽引方向の影響

天上部にワイヤーを結線したケース(1-1~1-3, 2-1~2-

4)について、ワイヤー張力及び水圧の負圧ピーク値と牽引速度の関係を図-11に示す。同図(a)の実線はピーク時のワイヤー張力と牽引速度の関係、破線は連結点変位30 mmにおける張力と牽引速度の関係をそれぞれ表している。また図(b)の実線はアンカー天板内部(P1)、破線はアンカー下端部(P3)における負圧ピークの絶対値と牽引速度の関係を示している。いずれの牽引仰角 θ においても牽引速度増加に伴いワイヤー張力や負圧ピークの絶対値が大きくなっている。また牽引仰角が小さいほどピーク時と大変位時でワイヤー張力差が小さくなっている。

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、各ケースにおける水平および鉛直方向の把駐力成分を図-12に示す。図中の円弧は把駐力の等値線を表している。アンカー側壁部に係留索を連結した場合、天上連結の場合と比較して大きな把駐力(合力)が發揮されている。また天上連結の場合、本実験では急速牽引・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が、側壁連結(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、排水に近い条件で実施された既往実験⁹⁾と同じ傾向となった。

図-9 実験結果(ケース 3-1)

図-10 実験結果(ケース 3-4)

図-11 ワイヤー張力・負圧ピーク値と牽引速度

図-12 牽引方向と把駐力

4. 結論

砂質地盤におけるサクションアンカーの把駐特性評価を目的として遠心模型実験を行った。実験では粘性スケールリングを考慮して高粘性間隙流体を採用し、把駐抵抗やアンカー姿勢挙動に及ぼす係留索の牽引速度や牽引方向、係留索の連結位置の影響について検討した。

アンカー天上部に係留索を連結した鉛直引き実験より、砂質地盤においても急速牽引時の負圧発生により、把駐抵抗のピーク値の増大効果と、ピーク後もある程度持続して牽引抵抗の減少を抑制する効果がみられた。

天上部に係留索を連結し、斜め上方に急速牽引した場合、鉛直引きのケースと比較して、張力ピークに至るまでの変位量が大きくなった。

アンカー側面に係留索を連結した場合、天上部連結の場合と比較して把駐力が大きくなった。また牽引仰角が小さくなるに従い把駐力が大きくなる傾向となった。

参考文献

- 1) 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 Deep-water Application, *Proc. 1st International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics*, pp.3-30, 2005.
- 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, 270pp, 2003.
- 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, pp.21-22, 2008.
- 4) Iskandar, M., El-Gharbawy, S. and Olson, R.: Performance of Suction Caissons in Sand and Clay, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.39, pp.576-584, 2002.
- 5) 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.

CENTRIFUGE MODEL TESTS ON HOLDING CAPACITY OF SUCTION ANCHORS IN SANDY DEPOSITS

Katsutoshi KITA

Suction anchors have advantages over drag or pile anchors, in precise placement and installation feasibility at deep water locations, and have been employed in mooring systems of floating platforms for offshore gas/oil production in e.g. Gulf of Mexico. Growing attention has recently been given in Japan to offshore wind power generation utilizing floating structures, whereas sandy deposits are widely formed at seabed surfaces around the country. Centrifuge model tests have been carried out to study the holding behavior of suction anchors in saturated loose sandy ground with viscous scaling taken into consideration, focusing on effects of drawing speed, direction of the mooring line, and location of the connecting point between anchor and the line. There observed increase in peak tension force in mooring lines in both vertical and inclined rapid pullout cases, associated with negative fluid pressures developed inside the anchor and at the anchor tip, even installed in sandy deposits.