

サクシオンアンカーの把駐特性に関する遠心模型実験 Centrifuge Model Tests on Holding Capacity of Suction Anchors

北 勝利¹, 関田欣治²

- 1 東海大学・海洋学部・kita@scc.u-tokai.ac.jp
- 2 東海大学・海洋学部

概 要

泥質地盤でのカテナリーまたはトート係留時におけるサクシオンアンカーの把駐特性の検討を目的として、10g 遠心力場における斜め上方単調引き抜き試験を実施した。係留索牽引速度、牽引仰角、係留索結節点位置が把駐抵抗やアンカー内外水圧およびアンカー姿勢に及ぼす影響について調べ、泥質地盤においても急速牽引時にアンカー背面での負圧作用などにより把駐力が増大しうる、牽引仰角が大きい場合に最大把駐抵抗発現時の係留索結節点変位量が大きくなる、結節点位置が浅部の場合に前傾回転を伴う引抜モードでの把駐力発現となる、などの結果を得た。

キーワード：サクシオンアンカー、把駐力、係留、泥質地盤、遠心模型実験

1. はじめに

サクシオンアンカーは、大水深域における浮体構造物の係留基礎として、メキシコ湾など海外における海底油ガス田開発基地において多くの採用実績がある¹⁾。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²⁾が実用されているが、杭や平板ドラッグ式アンカーと比較して大水深域での施工性や設置精度などの点で有利であることから、洋上風力発電や沖合海底資源開発などにおける浮体構造物の係留基礎としても有望と考えられる。

海外では粘土質地盤への適用例が多いのに対し、日本近海での洋上風力発電での利用を考える場合、砂質または泥質地盤への適用が求められる。砂質地盤中のサクシオンアンカーの挙動については、これまで主に鉛直引抜時の把駐特性に関する検討^{3,4)}が実施されており、カテナリーまたはトート係留を対象とした斜め上方引き抜き時の把駐特性に関する実験的研究は少ない。

本報告では、泥質地盤でのカテナリーまたはトート係留時におけるサクシオンアンカーの把駐挙動の把握を目的として、10g 遠心力場における斜め上方単調引き抜き試験を実施し、係留索牽引速度、牽引仰角、係留索結節点位置が把駐抵抗やアンカー内外水圧およびアンカー姿勢に及ぼす影響について検討する。

2. 実験方法

実験の概要を図 1 に示す。ステンレス製の矩形土槽(内幅 510 mm, 奥行 200 mm, 深さ 350 mm)内に注水した脱気メ

トローズ水溶液(粘度 11~12mPa・s)の上方より気乾砂を散布し、脱気後 10g 遠心力場で自重圧密することにより平均厚 143~148 mmの水平地盤模型を作成した。アンカー模型を鉛直ガイドロッドに取り付け、水平位置を固定した状態で地盤中に自重沈下させた後、負圧を用いて閉塞内部の水を天板排水口より吸い出すことにより沈設した。ガイドロッドを取り外した後、アンカー中腹部に結節したワイヤーラインの他端を土槽内壁に固定した滑車を介して電動アクチュエータに接続し、一定速度で牽引した。アンカー引抜時における計測項目は、ワイヤー張力、引張量、アンカー上方フレームをターゲットとした水平および鉛直変位、アンカー傾斜角、アンカー天板内側・アンカー背面中腹および側部下端における(間隙)水圧である。

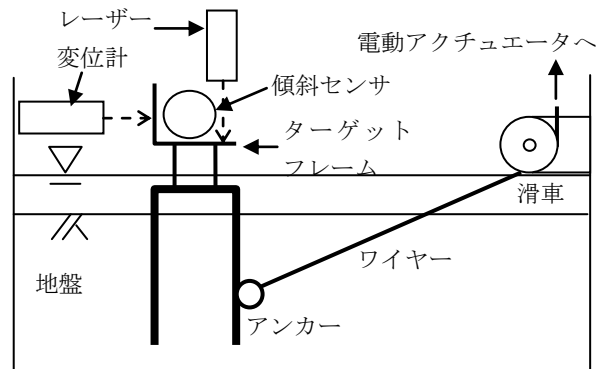


図 1 実験概要

アンカー模型を図 2 に示す。ステンレス製で、開口下端から天板上面までの高さ 113mm、円筒部の外径 50mm, 肉厚 1.2mm である。内部はステンレス製メッシュで 2 室に

分けられ、上室には内部水の吸い出し時における土粒子のフィルターとしてスポンジが挿入される。開口下端からメッシュまでの高さは 99 mm である。アンカー前面にはワイヤー結節用の U ボルトが取り付けられる。ワイヤー結節位置は開口下端より 31mm または 59mm である。背面外側および側部内側には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センサに接続されている。パイプ下端は、側部内側パイプでアンカー下端位置、背面外側パイプでアンカー下端より 40mm の高さである。天板には、水圧センサと内部水排水口が設置されているが、引抜载荷時には排水口は閉塞される。アンカー上方には、傾斜センサを取り付けたフレームを設置し、水平(前後方向)および鉛直変位計測用レーザー変位計のターゲットを兼ねる(図 1 参照)。

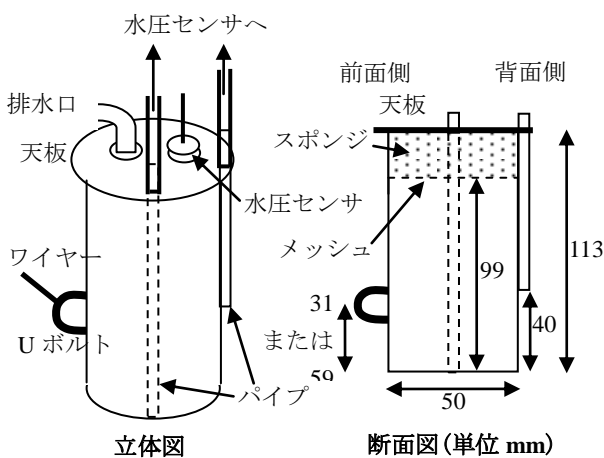


図 2 アンカー模型

地盤材料として用いた珪砂 8 号の物理特性を表 1 に、粒径加積曲線を図 3 に示す。同図より、平均粒径約 0.06mm の砂質シルトである。相対密度 53% におけるメトローズ水溶液に対する浸透係数は $1.1 \times 10^{-4} \text{cm/s}$ であった。

表 1 珪砂 8 号の物理特性

土粒子密度	2.591g/cm ³
最大間隙比	1.345
最少間隙比	0.637

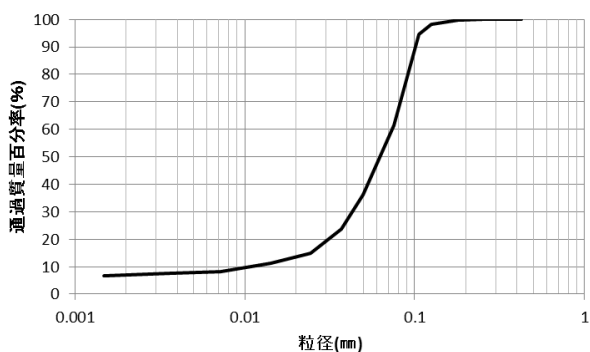


図 3 粒径加積曲線

実施した実験ケースを表 2 に示す。ケース 1 を基準として、ケース 2 ではワイヤー牽引速度を緩速に、ケース 3 ではワイヤー牽引仰角を大きく、ケース 4 ではワイヤー結節

点位置を上部に設定している。各ケースで自重圧密後における地盤の相対密度は 48~57% と中密状態である。根入は 89~99mm であり、概ねアンカー内側メッシュ位置まで沈設されている。

表 2 実験ケース

ケース	1	2	3	4
平均地盤厚(mm)	146	147	148	143
相対密度(%)	52	48	51	57
根入(mm)	89	99	96	96
引張速度(mm/s)	1.9	0.42	1.9	2.0
引張仰角(°)	24	25	37	27
結節点高さ(mm)	31	31	31	59

平均地盤厚と相対密度は自重圧密終了後の値

3. 実験結果

ケース 1 における実験結果を図 4 に示す。同図(a)は、レーザー変位計による水平および鉛直変位とアンカー傾斜角より計算したワイヤー結節点の移動量(引張量)と、ワイヤー張力、アンカー天板直下(水圧 1)、アンカー背面中腹部(水圧 2)および側部下端位置(水圧 3)における水圧の関係を示している。ただし、背面中腹部および側部下端での水圧については、パイプおよびチューブを介して土槽に固定した水圧センサで計測した値であり、それぞれのパイプ先端位置の鉛直変位に対し未補正である。一方天板直下の水圧は、天板に設置のセンサによる計測値である。同図より、引張初期において急激にワイヤー張力が増大するとともに各点の水圧(負圧)も進展している。引張量約 4mm より張力の増大傾向が緩慢になる一方、アンカー天板直下および下端部水圧は負圧のピーク(-6~-7kPa)に達し、その後負圧は緩和される。またアンカー背面中腹部では負圧ピークの発現が水圧 1, 3 よりやや遅れ、引張量約 7mm で-22kPa に達した後に緩和傾向となる。ワイヤー張力は引張量 22mm で最大値 $T_{\text{max}}=232\text{N}$ に達した直後に急減するが、この時アンカー背面中腹部の負圧も急減しており、アンカー背面において地盤からの剥離が生じているものと推察できる。天板直下やアンカー下端において、張力ピークの前後で顕著な水圧変動は見られない。

図 4(b)は、結節点での引張量と天板中心位置での水平および鉛直変位、およびアンカー傾斜角(前傾を正とする)の関係を示している。引張全過程を通じて、鉛直変位量は小さく、水平および回転変位が卓越している。ワイヤー張力のピーク発現前後で引張量に対する水平変位および傾斜角の増加率が異なり、剥離発生以前において背面土内のサクシオンが把駐抵抗に影響を及ぼしていることがわかる。

牽引前(黒細実線)、 $T_{\text{max}}/2$ 発現時(黒細破線)、 T_{max} 発現時(赤太破線)および牽引(または計測)最終段階(赤太実線)におけるアンカー変位を図 4(c)に示す。図中の●はワイヤー結節点位置を示している。同図より $T_{\text{max}}/2$ 発現時点ではアンカー変位が小さいこと、 T_{max} 発現時には水平変位とともに後傾の回転変位が生じていること、 T_{max} 発現

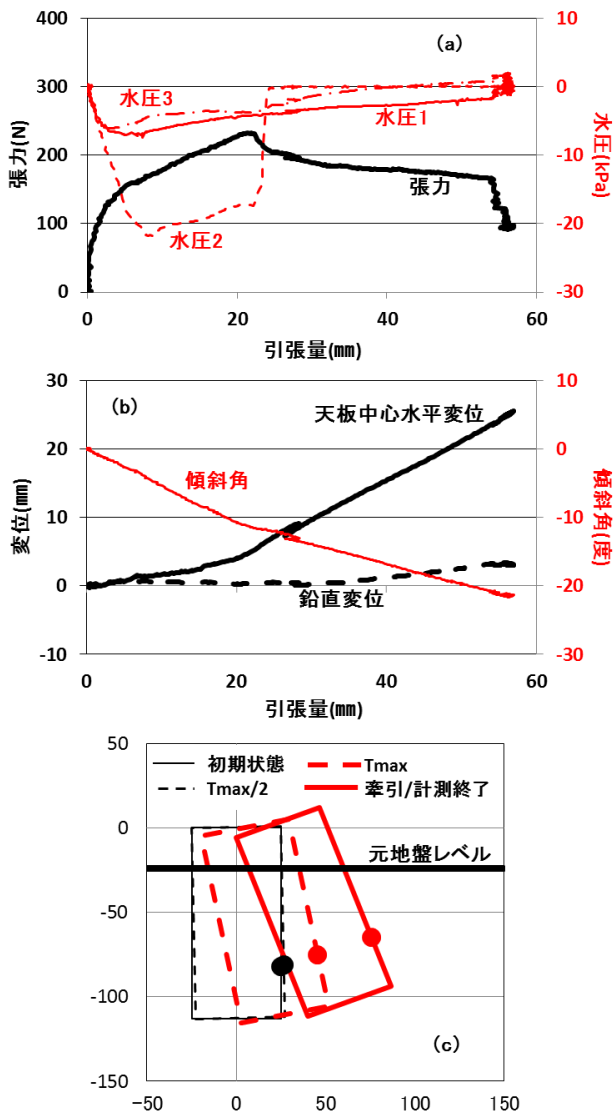


図4 実験結果(ケース1)

後は回転より斜め上方への並進モードがやや優勢となっていること、などがわかる。

ケース2における実験結果を図5に示す。本ケースではケース1に比べワイヤー牽引速度が概ね1/5である。結節点での引張量と張力および各点水圧の関係を同図(a)に示す。ケース1と同様に牽引初期において急峻な張力の増大がみられるが、引張量2~3mm以後の張力増大量は小さい。水圧の負圧ピークも天板直下(水圧1)で-3kPa、アンカー背面中腹部(水圧2)で-6kPa、側部下端(水圧3)で-1kPaでありケース1と比較して小さく、水圧2,3において間隙水圧は速やかに消散している。引張量約20mmにおいて張力のピークに至るが、最大値($T_{max}=157N$)はケース1と比較して小さく、その後の引張量の増加に伴う張力の低下は緩やかでアンカー背面における急激な負圧の開放も見られない。同図(b)より引張量と天板中心位置での水平、鉛直変位および傾斜角の関係はケース1とほぼ同様であるが、張力ピーク前後における水平変位や傾斜角の引張量に対する変動率の明確な変化は認められない。同図(c)のアンカー変位過程に注目すると、張力最大時(赤太破線)まで回転運動が卓越するのに対し、その後は並進運動が主となっている。

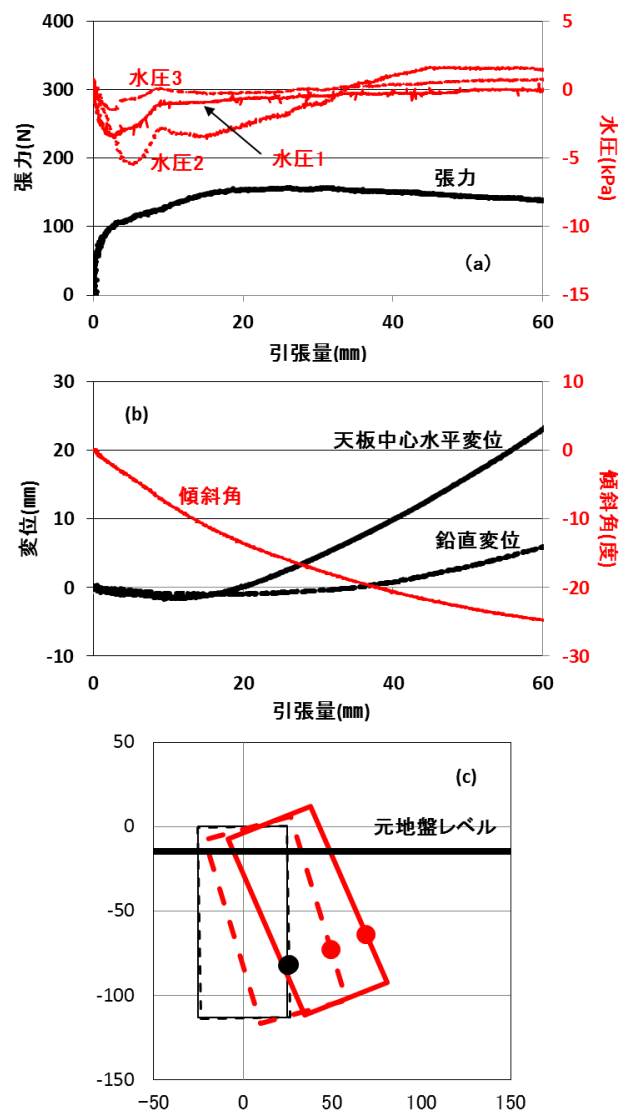


図5 実験結果(ケース2:牽引速度小)

ケース1, 2, 4では牽引時のワイヤー仰角が $24^{\circ} \sim 27^{\circ}$ であるのに対し、ケース3では 37° である。ケース3における張力と各点水圧を図6(a)に示す。本ケースでは計測上の問題で張力ピーク発現直後までを図示する。結節点の引張量33mmで張力の最大値206kPaとなっており、ケース1と比較して張力ピーク時の引張量が大きい。張力および水圧の計測結果より、ケース1と同様にピーク後に急激な張力低下が生じるとともに、アンカー背面中腹部の負圧が急速に消散した。変位および傾斜角(同図(b))挙動に注目すると、ケース1と比較して天板中心位置での水平変位は小さく、傾斜角は結節点引張量に概ね比例している。引張荷中のアンカー姿勢を同図(c)に示す。張力最大時の姿勢(赤太破線)に着目すると、これまでのケースと比べ回転運動が卓越していることがわかる。

ケース4ではワイヤー結節位置を上部に設定し、根入に対する地表から結節点までの深さの比を0.39としている(ケース1~3では0.65~0.68)。結節点引張量と張力および各点水圧の関係を図7(a)に示す。張力ピーク時における引張量は12mmであり、ケース1~3に比べ小さい。水圧挙動に着目すると、牽引早期において剥離が生じ、アンカー背

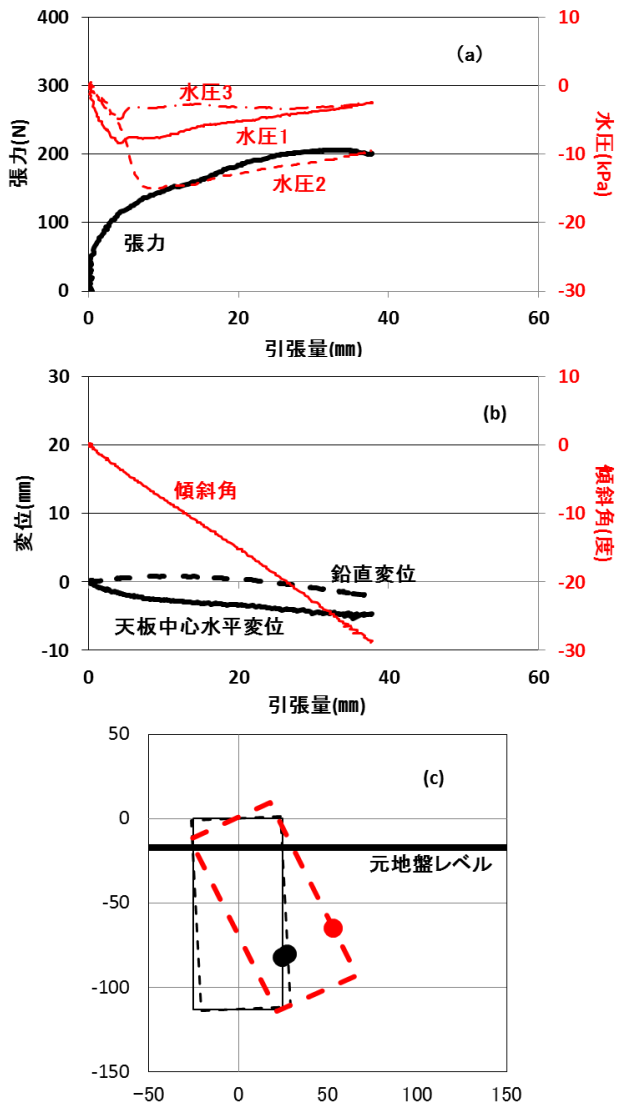


図6 実験結果(ケース3：牽引仰角大)

面中腹部(水圧 2)では負圧が解消されている。また天板直下(水圧 1)や側部下端(水圧 3)における負圧ピークはワイヤー張力のピークと位相が概ね一致し、張力急減時において側部下端では負圧が解放されていることから、引抜によるアンカー底部の剥離が生じたものと考えられる。同図(b)より、これまでの3ケースと異なり前傾回転を示すとともに、天板部で鉛直上向き変位が大きくなっている。同図(c)の引抜時のアンカー姿勢図に着目すると、張力ピーク発現(赤太破線)以後も上方への引抜変位とともに前傾回転運動も継続していることがわかる。

4. まとめ

泥質地盤におけるサクシオンアンカーの斜め上方引抜時挙動を10g遠心模型実験により調べた。得られた知見をまとめると次のとおりである。

- 1) 急速牽引の場合(実験ケース 1)、緩速牽引の場合(ケース 2)と比較して、アンカー背面での負圧作用により大きな把駐力が発現された。

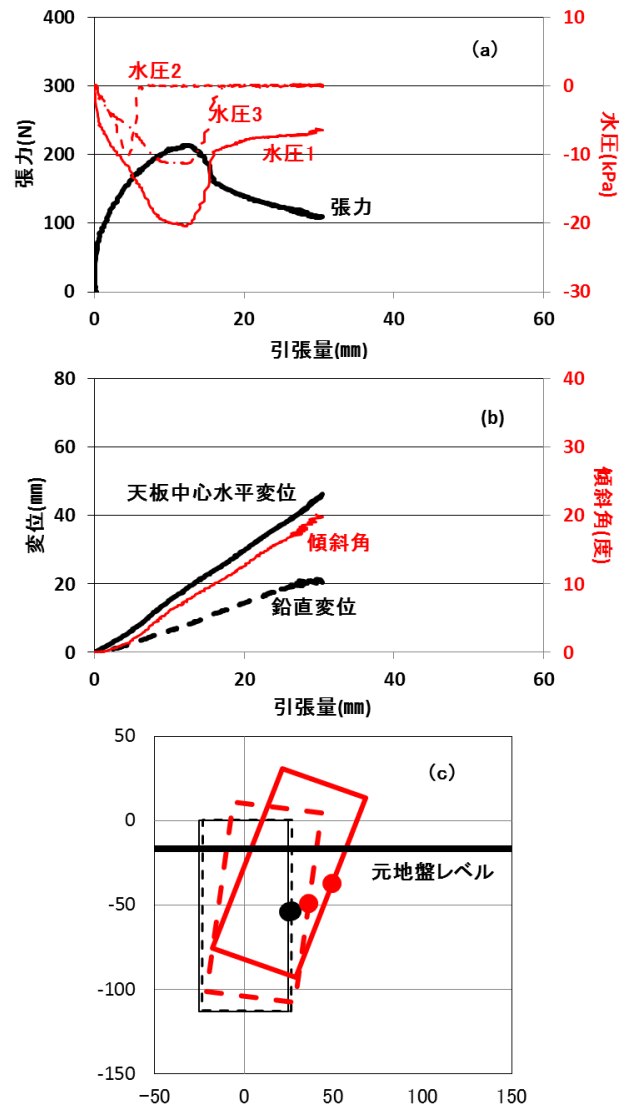


図7 実験結果(ケース4：結節点上)

- 2) 結節点位置が地盤深部で牽引仰角が25度前後のケース 1, 2 では、ワイヤー張力のピーク前で回転運動、ピーク後で斜め上方並進運動が卓越した。
- 3) ワイヤー牽引仰角の大きなケース 3 では、最大張力発現時の結節点変位量が大きくなった。
- 4) 結節点位置を浅部に配置したケース 4 では、前傾回転を伴う引抜モードでの把駐力発現となった。

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 Deepwater 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：サクシオン基礎構造物技術マニュアル, 2003, 270pp.
- 3) Jones, W., Iskander, M., Olson, R. and Goldberg, A.: Axial Capacity of Suction Piles in Sand, Proc. 7th International Conference on Behaviour of Offshore Structures, p.63-75, 1994.
- 4) Iskander, M., El-Gharbawy, S. and Olson, R.: Performance of Suction Caissons in Sand and Clay, Canadian Geotechnical Journal, Vol.39, pp.576-584, 2002.