係留アンカーの把駐力特性の検討

A CONSIDERATION ON HOLDING POWER OF MOORING ANCHORS

前野賀彦¹・石川 元康²・熊谷 裕児³・村川 博³

Yoshihiko MAENO, Motoyasu ISHIKAWA, Yuji KUMAGAI and Hiroshi MURAKAWA

¹ 正会員 農博 日本大学短期大学部 建設学科 (〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1)

² 正会員 工修 日本大学短期大学部 建設学科 (同 上)

³ 海洋工事汚濁防止協会 (〒153-0043 東京都目黒区東山3-22-1)

The holding power of the mooring anchors were verified by comparing the estimation with the results by the field test. The field tests on the silty sand seabed were carried out for the holding power of two different types of anchor, the concrete block anchor and the suction anchor. The pressure distributions were measured at the bottom of the concrete block anchors and inside the suction anchor by varying the drawing angles of the anchor line, the drawing speed. The holding power of both anchors for the drawing angle of $\theta = 90^\circ$ increases with the drawing speed, and approaches to the constant value. The holding power for the drawing angle of $\theta < 45^\circ$ approaches to the constant value independently of the drawing speed. The concrete block anchor shows a peak of the largest holding power when the drawing speed is large. The suction anchor always shows a peak of the largest holding power independently of the drawing speed. It was also confirmed that the internal pressure inside the suction anchor changes in proportion to the holding power.

Key Words : Holding power, concrete anchor, suction anchor

1. はじめに

海洋に囲まれた日本においては, その地理的特性上, 空港等の開発に際しては沿岸域の利用がまず考えられるところである. 近年は沿岸域での干潟・藻場・砂浜・珊瑚礁等の環境に対する重要性が以前より増して認識されるようになっており, 埋立てや浚渫を伴う海洋工事の可否は慎重に検討される必要がある. 他方, 沖合・大水深海域での浮遊式構造物の展開が埋立に代わるものとして検討されている. このような海域では, 激しい波・流れの影響によって浮体への外力が増加するため, 浮体係留のアンカーは重量化・大型化することが想定される. このため, 大きな漂流力に耐えうる係留技術の開発が求められる. 海洋工事の際に用いられる汚濁防止膜, 浮防波堤, ポンツーン等の浮遊式海洋構造物の係留は一般的には, 係留索・係留鎖によってコンクリートブロックアンカーに接続する方法が採られている. 特に, 比較的浅い水深ではこのような方法が経済的であり, 多く用

いられている. 従来, ブロック型アンカーの把駐力の算定に関しては, 土木学会¹⁾ や日本港湾協会²⁾ の提案式が採用されているが, 把駐力への影響が大きいと考えられるアンカーの引抜き角, 引抜き速度, アンカー形状, 土被り量等が考慮されていないのが現状である. 前野等³⁾は浮体係留へのサクションアンカーの適用性を検討し, さらに, 汚濁防止膜の各種係留アンカーの実測張力を用いて各種浮体係留アンカーの応答特性を検討した⁴⁾. それらの一連の研究の中でサクションの効果がサクションアンカーのみならず重力式のコンクリートブロックアンカーにおいても顕著であることが認められた⁵⁾. そこで, 本研究では, 係留アンカーの把駐力についての諸特性を把握することを目的として, 一般に海洋工事で用いられているコンクリートブロックアンカー, およびアンカーの大型化・重量化に対処するための係留方法として小型軽量で把駐効果が大いと考えられる円筒形鋼管のサクションアンカーの2種類について実海域で把駐力試験を行い, 把駐力に対する係留索の引抜き

図－１ 試験地点の概要

角の影響、引抜き速度の影響を検討し、さらに、コンクリートブロックアンカーの底面圧力分布特性およびサクシオンアンカー内の圧力特性を検討した。

2. 現地試験の概要

現地試験は、海底地盤の調査が事前に行われており、波の影響が少ないと考えられる京都府舞鶴市千歳地区（図－１）において行った。調査日時は1997年11月22日～11月24日で、当日は波浪の影響はほとんど認められなかった。アンカーを設置した水深は12.2m～13.1mである。隣接する防波堤の施工前のボーリングデータより調査地点周辺海域の海底地盤はシルト質砂であり、表層1mまでのN値は0～3であることが推定される。なお、調査地点の海底地盤表層の底質を試料採取し、土の物理試験を行った結果からも海底地盤がシルト質砂であることが確認された。現地試験で用いたアンカーは、図－２および表－１に示すように、一般に汚濁防止膜等の浮体構造物の係留で用いられているコンクリートブロックアンカー（Anchor A, Anchor B）と、円筒形鋼管の上部を閉じ、底面のみを開いた構造のサクシオンアンカー（Anchor C）の二種類を使用した。ここで言うところのサクシオンアンカーとは円筒セル内を閉じた構造とすることにより、引抜き時にサクシオン力が発生し易く、大きな把駐力を発揮することが期待されるものである。図－２(a)～(c)に示す

(a) Anchor A

(b) Anchor B

(c) Anchor C

図－２ アンカーの概略図

表－１ アンカーの概要

	Anchor A	Anchor B	Anchor C
材 質	Concrete	Concrete	Steel
幅(直径D) B (m)	1.600	1.200	0.800
奥行 L (m)	1.600	1.200	—
高さ H (m)	1.245	1.213	1.000
水中重量 W_s (kN)	41.75 (4.26 tf)	24.50 (2.50 tf)	2.25 (0.23 tf)
空中重量 W_A (kN)	75.36 (7.69 tf)	43.12 (4.40 tf)	2.65 (0.27 tf)

図-3 クレーン付き台船によるアンカー把駐力測定の概略図

ようにコンクリートブロック底面の圧力分布を測定するために、Anchor Aについてはブロック底面の5カ所、Anchor Bについてはブロック底面の3カ所、Anchor Cについてはアンカー内側の上端2カ所に圧力計（共和電業，BP-5KB）を設置した。把駐力の測定は，図-3に示すように，係留索張力の作用方向の測定も必要であることから係留索の途中2カ所にシャックルで取り付けた張力傾斜計（共和電業：BLTK-30T）により係留索張力，およびその作用方向を測定した。アンカー把駐力の計測は，水平面とアンカーワイヤーとのなす角 θ が $90^\circ \sim 20^\circ$ 範囲で測定を行った。引き抜き速度は係留ワイヤーに目印を付け，目視およびビデオ撮影を同時に行い，ワイヤーの引き上げ量と時間から引抜き速度を測定した。アンカーの土被り量は，コンクリートブロックでは側方4面，サクシオンアンカーでは対角の2カ所をアンカーの引抜き開始前にダイバーがスケールで測定した。

3. 結果と考察

(1) 引抜き速度と引抜き角度の影響

最大把駐力 T_{max} をアンカーの水中重量 W_A で除した無次元把駐力と引抜き速度との関係を図-4(a)，(b)に示す。コンクリートブロックアンカーの場合，図-4(a)に示されるように引抜き角度 $\theta = 90^\circ$ では，引抜き速度が増加するにしたがって無次元把駐力は増加する傾向を示すが，アンカー引抜き角度が 45° 以下では引抜き速度に関わらず無次元把駐力はほぼ一定値を示す傾向が認められる。また，引抜き速度が一定のもとでは $\theta = 90^\circ$ で把駐力は最大値を示

(a) Anchor A, Anchor B

(b) Anchor C

図-4 無次元把駐力と引抜き速度との関係

し， θ の減少に伴って把駐力は減少するが， $\theta = 45^\circ$ 以下では把駐力の変化は顕著でなくほぼ同じ値となっている。さらに， $\theta = 90^\circ$ の場合を除いて把駐力はアンカー水中重量よりも小さい値を示している。斜めに引抜き力が作用した場合は，アンカーに転倒モーメントが大きく働くことによって把駐力はアンカー水中重量以下の値を示すものと考えられる。サクシオンアンカーの場合，図-4(b)に示されるよ

(a) Anchor A ($V=4.5$ cm/s)

(c) Anchor C ($V=3.0$ cm/s)

(b) Anchor A ($V=14.0$ cm/s)

(d) Anchor C ($V=9.3$ cm/s)

図-5 把駐力と底面圧力の時系列 ($\theta=90^\circ$)

うに、 $\theta=90^\circ$ ではコンクリートブロックアンカーの場合と同様に引抜き速度が増加するにしたがって無次元把駐力は増加する傾向が見られ、引抜き速度が一定のもとではコンクリートブロックアンカーの場合と同様に $\theta=90^\circ$ で最大を示し、 $\theta=45^\circ$ 以下では把駐力はほぼ同じ値となっている。

以上のように、引抜き速度と引抜き角度の変化に対する把駐力の傾向は、コンクリートブロックと円筒形鋼管共に同様の傾向を示すことが確かめられた。

(2) アンカー底面圧力の特性

アンカー引抜き角度 $\theta=90^\circ$ の場合における把駐力 T およびアンカー底面圧力 P の時系列変化の一例を図-5(a)~(d)に示す。なお、圧力の値はアンカーが着底したときの値を初期値零として示している。Anchor Bについては圧力計の故障のためにデータを得ることができなかった。

Anchor Aの場合、図-5(a),(b)に示されるように、把駐力の時系列波形は引抜き速度によって異なり、引抜き速度が大きい場合には顕著な最大把駐力のピークが認められる。また、コンクリートブロック底面の圧力分布形状は、引抜き速度が小さい場合、

アンカー端部から中央部に向かって圧力(負圧)が増加する傾向を示し、引抜き速度が大きい場合、アンカー端部から中央部までほぼ一様な圧力分布を示すことが分かる。このことから、引抜き速度が大きい場合にはアンカー底面のサクシジョン力(負圧による抵抗力)が大きくなることによって把駐力が大きい値を示すものと考えられる。

次に、Anchor Cの場合、図-5(c),(d)に示されるように、引抜き速度に関わらず同様の把駐力の時系列波形を示し、把駐力に対応してアンカー内部の圧力が変化している。また、引抜き速度が大きいほど、引き抜き抵抗力、アンカー内部の圧力(負圧)は共に大きくなっていることが認められる。

アンカー引抜き角度 $\theta<90^\circ$ の場合における T 、 P および引抜き角度の時系列変化の一例を図-6(a),(b)に示す。なお、アンカーの引抜き方向に圧力計P1が設置してある。これによると、コンクリートブロックの場合、 $\theta<90^\circ$ の場合とは異なり、ブロック底面の圧力分布は引張りによってブロックが回転するため、底質を押す正の圧力がP1~P3にかけて作用し、P4、P5はその逆となっている。 T が最大値を示した後にアンカーは転倒することによって、底面

図-6 把駐力と底面圧力の時系列 ($\theta < 45^\circ$)

は底質から抜け上がる。この時、 T は急激に減少し、アンカーブロックの転倒軸付近であるP1, P2の底面圧力は減少し、逆にP3~P5は底質からアンカーが抜け上がることで圧力が増加する。サクシオンアンカーの場合、 $\theta < 90^\circ$ の場合とは異なり、アンカーが回転することによって内部圧力が抜けてしまい、顕著なサクシオン力のピークは認められない。

(3) サクシオンアンカーの把駐力の試算

$\theta=90^\circ$ の場合におけるサクシオンアンカーの把駐力は、底面圧力、土被り部の周面摩擦抵抗力、アンカーの水中重量、アンカー内部の土の水中重量の和に

図-7 サクシオンアンカーのモデル

よって与えられるものと考えられる。ここでは、実験結果に基づき、サクシオンアンカーの垂直方向の最大把駐力発生時における把駐力を図-7のように単純化し、算出を試みる。

最大把駐力発生時にはアンカー内部の土塊がアンカー本体と一体となって抜け上がり、アンカー内部と底面の圧力は等しいものとする。現地実験での観測状況から、サクシオンアンカー内部の底質は抜け落ちることなくサクシオン力によって持ち上がっていると見なせる。また、底面圧力は一様に分布し、鋼管の厚さを無視すると、 T は次式で示される。

$$T = \int p_s dA_s + \int p_{fo} dA_o + W' + W_s' \quad (1)$$

ここに、 A_o は土被り部のアンカー外周面の表面積、 A_s はアンカー断面積、 p_s はアンカー底面に作用するサクシオン（負の圧力）、 p_{fo} はアンカー外周面摩擦力、 W' はアンカー水中重量、 W_s' はアンカー内部の土の水中重量である。

周面摩擦力は、山崎ら⁶⁾による砂地盤におけるサクシオン基礎の引抜き抵抗力の算出に基づき、クーロンの破壊規準と土圧係数を用いて表し、有効鉛直応力をアンカー底面圧力が地盤表面で0となる直線分布すると仮定すると、次式が得られる。

$$p_{fo} = c + K(\gamma'z + p_s z/d) \tan \delta \quad (2)$$

ここに、 c は粘着力、 K は土圧係数、 δ はアンカーと土との間の摩擦角、 γ' は土の有効単位体積重量、 z はアンカー外部の地盤表面からの深さである。

以上より、式(2)を式(1)へ代入すると次式が得られる。

$$T = \frac{\pi D^2}{4} p_s + \pi D c d + \pi D K \left(\gamma' + \frac{p_s}{d} \right) \frac{d^2}{2} \tan \delta + W' + \frac{\pi D^2}{4} d \gamma' \quad (3)$$

図-8 把駐力の計算値と実験値の比較

ここに、 D はサクシオンアンカーの直径、 d はアンカー埋設深さである。

式(3)中に現地試験結果による最大内部圧力 p_s を与え、他の入力するパラメータを次のように与えて把駐力 T の算出を行い、その結果を図-8に示す。なお、 ϕ (せん断抵抗角)と K は把駐力に対する感度を見るためにそれぞれ2種類の値を与えた。

$$W = 2.25 \text{ kN}$$

$$c = 0$$

$$\gamma' = 0.7 \text{ tf/m}^3 \quad (6.86 \text{ kN/m}^3)$$

$$\delta = 2/3\phi$$

$$\phi = 25^\circ, 30^\circ$$

$$K = 0.3, 0.5$$

図-8に示されるように、全体的に計算値が大きい値を示しているが、 $\phi = 25^\circ$ 、 $K = 0.3$ のとき、実験値と計算値は良い対応を示している。実験においては、設計上安全側となるよう考慮して、アンカーは海底面に設置後すみやかに把駐力の測定を行ったために、周辺の地盤は乱され、流動化しているため、周面摩擦抵抗力の計算値は実際よりも大きく見積もっているものと考えられる。

4. おわりに

本研究により得られた結論を以下に示す。

- 1) 引抜き速度に対する把駐力の発達特性として、引抜き角度が $\theta = 90^\circ$ の場合、コンクリートブロックアンカー、サクシオンアンカー共に引抜き速度

の増加に伴って把駐力は増加し、ある一定値に漸近する傾向を示す。また、引抜き角度が $\theta = 45^\circ$ 以下の場合、コンクリートブロックアンカー、サクシオンアンカー共に引抜き速度に関わらず、把駐力はある一定値に漸近する傾向を示す。

- 2) 引抜き角度に対する把駐力の発達特性として、引抜き速度が一定のもとでは、 $\theta = 90^\circ$ で把駐力は最大値を示し、 θ の減少に伴って把駐力は減少するが、 $\theta = 45^\circ$ 以下ではその傾向は顕著ではない。このことは、斜めに引抜き力が作用した場合には、転倒モーメントの影響が大きいことによるものと考えられる。

- 3) 引抜き角度が $\theta = 90^\circ$ の場合におけるコンクリートブロックアンカーの底面の圧力分布特性としては、引抜き速度が大きい場合には顕著な最大把駐力のピークが認められ、この時アンカーの底面全体に渡ってサクシオン力が作用していることが確かめられた。また、同じ条件でサクシオンアンカーは、引抜き速度に関わらず常に顕著な最大把駐力のピークが認められ、この時アンカー内部の圧力は把駐力に対応して変化することが確かめられた。

- 4) サクシオンアンカーの把駐力の時系列波形は、引抜き速度に関わらず同様の波形を示し、アンカー内部の圧力は把駐力に対応して変化することが確かめられた。

参考文献

- 1) 土木学会：海洋鋼構造物設計指針（案），1973。
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1989。
- 3) 前野賀彦・高谷富也・平石哲也・高山知司：浮体係留へのサクシオンアンカーの適用について，海岸工学論文集，第40巻，pp.906-910，1993。
- 4) 前野賀彦・高谷富也・西野好生・安井章雄：汚濁防止膜の各種係留アンカーの実測張力による変位応答特性，海岸工学論文集，第42巻，No.2，pp.971-975，1995。
- 5) 前野賀彦・高谷富也・村川 博・川本博文：汚濁防止膜の重力式係留アンカーの応答特性，海洋開発論文集，Vol.11，pp.217-222，1995。
- 6) 山崎浩之・善 功企・館下 徹：サクシオン基礎の引き抜き抵抗のメカニズムに関する研究，第39回土質工学シンポジウム，pp.73-80，1994。

(1999.4.19 受付)