(昭和 52 年 5 月 日本造船学会春季講演会において講演)

アンカーの安定性に関する基礎的研究 (第 2 報)

正員 浦

環* 正員 山 本 善 之**

A Basic Study on the Stability of Anchors (2nd Report)

by Tamaki Ura, Member Yoshiyuki Yamamoto, Member

Summary

In the first report [1], the present authors investigated the stability of mooring anchors. The present paper deals with the maximum holding power of a dragged anchor.

The maximum holding power of a mooring anchor depends upon forces and moments acting on the shank, which are measured experimentally and are given in empirical formulas. A set of equilibrium equations of a mooring anchor in sea bed is formulated by considering forces acting on all the structural elements of the anchor. By solving these equations, configurations of a dragged anchor and its maximum holding power are analyzed.

Forces acting on rectangular plates in wet sand are investigated in relation to those in dry sand, and as the results, behaviors of an anchor in wet sand can be derived from those in dry sand by modifying its specific weight.

It is important from the practical point of view to ensure that the anchor will always enter into the sea bed with a required attitude; it can be achieved by choosing the position of hinge-pin properly.

1 はじめに

アンカーの性能で最も重要なのは、最大把駐力と、かき込んだ状態の姿勢の安定性である。姿勢の安定性に関して著者らは前論文で議論し、アンカーの姿勢が不安定となる力学的メカニズムを明らかにした。本論文では、もう一方の課題である把駐力について述べる。

アンカーの最大把駐力状態は、静力学的に中立な平衡状態である。左右対称な状態のみに限定すれば、このときのアンカーの姿勢は、Fig. 1 に示すように貫入深さ Δ および回転角 θ より定まる。この 2 つを未知数とする静力学的な平衡方程式を解くことにより姿勢は定まり、安定・不安定を別として、最大把駐力が得られる。このとき、シャンクに作用する力の性質が重要であり、これを

Fig. 1 Anchor performing properly

* 東京大学工学系大学院

** 東京大学工学部

無視して平衡方程式を立てることはできない。これまでなされているこの方面の研究²⁾では、フリュークの力にのみ注目しており、シャンクは海底土質の表面上にあり、貫入を考えていない。なお、姿勢の安定性に関してはシャンクの影響は少なく、貫入量が小さい範囲では貫入が無いとしてシャンクまわりの回転の静的な安定性を考えれば十分である。

本論文では、まずシャンクに働く土質力学的な力の性質を実験的に明らかにし、次に最大把駐力状態での貫入深さと回転角および最大把駐力係数について述べる。また、これまで乾燥状態の砂を用いて研究してきたが、実際の水で飽和した状態の砂の中におけるアンカーの挙動と乾燥状態の砂における挙動の関係を明らかにし、その間の相似則について述べる。さらに、アンカーの性能として重要なかき込み性能について述べ、簡単なモデルにより、かき込み性能の良否を判断する基準について述べる。

2 シャンクに作用する力

アンカーが引張られるときにシャンクに作用する土質力学的な力を推定するときに、フリュークに作用する力を推定するために導入した実験式を延長して用いることは必ずしも出来ない。その原因として、

- 1) フリューク開き角に対応する β_1 が 180° に近く、

2) アスペクト比 l^*/b^* が大きい。

ここで、 l^* 、 b^* はシャンクの長さと同幅である。ちなみに JIS 型や AC 14 型アンカーのシャンクのアスペクト比は約 10 である。1) の状態のため、フリュークとは異なり、海底土質はシャンクの進行方向にほぼ垂直な面内で左右に押出される。ここでは、これらシャンクに対応する実験を行ない実験式を導く。実験装置などの諸条件は前論文と同じであり、海底土質のモデルとして乾燥状態の三河 5 号珪砂を用いる。

沈下のない場合 長さ l^* を 20 cm、幅 b^* を 2 cm (厚さ l^* は 2 cm) とし、シャンクの回転角 θ_1 を 5° から 20° まで変えてシャンクの前端を砂表面にそって移動させたときの抵抗 $F_D (= -F_x)$ および揚力 $F_L (= F_z)$ を Fig. 2 に示す。座標系は Fig. 2 に示されるように、シャンクの進行方向に x 軸、鉛直上向きに z 軸、シャンク長手方向に ξ 軸、底面に垂直に ζ 軸を取る。ここで θ_1 は ζ 軸と yz 面とのなす角である。フリュークに作用する力と同様に、シャンク下面に垂直な力 $f_n (= f_c)$ および剪断力 $f_t (= f_s)$ は進行方向に垂直な yz 面にシャンク下面を投影したときの面積 A^* とその重心の深さ d_w^* により表わされ

$$\begin{cases} f_n = C_N^* \gamma A^* d_w^* \\ f_t = f_n \tan \delta \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} F_D = f_n (\sin \theta_1 - \tan \delta \cos \theta_1) \\ F_L = f_n (\cos \theta_1 + \tan \delta \sin \theta_1) \end{cases} \quad (2)$$

とおける。ここで γ は砂の見掛けの比重量であり、 C_N^* はシャンクの抵抗係数、 δ は見掛けの摩擦角である。シャンク端、上面あるいは側面に作用する力は無視する。(1) 式の $A^* d_w^*$ は Fig. 2 の場合では

$$A^* d_w^* = \frac{1}{2} l^* b^* \sin^2 \theta_1 \quad (3)$$

となる。Figs. 3, 4, 5 に、抵抗係数 C_N^* 、見掛けの摩擦

Fig. 2 Drag and lift acting on shank

角 δ および着力点の無次元量 λ を示す。

シャンクの抵抗係数 C_N^* に対する実験式として

$$C_N^* = \mu_4 + \exp[-\mu_5 \theta_1 + \mu_6] \quad (4)$$

が得られ、三河 5 号珪砂に対して

$$\mu_4 = 87.6, \mu_5 = 0.20 (1/\text{deg}), \mu_6 = 6.9 \quad (5)$$

となる。なお、 $\beta_1 = 180^\circ - \theta_1$ として、フリュークにする抵抗係数の実験式

$$C_N = 1070/\beta_1^2 + 8.98 + 1.35 \times 10^{-7} \beta_1^4 \quad (6)$$

を用いたときの値を Fig. 3 に鎖線で示す。このように $\theta_1 = 0$ の近くでは C_N^* は非常に大きくなり、フリュークに対して導入した (6) 式は適用できない。見掛けの摩擦角および着力点に関しては、フリュークの実験式を延長して用いることができ

$$\delta = -24^\circ, \lambda = 1/3 \quad (7)$$

が示される。

沈下がある場合 Fig. 1 に示すように、シャンクが沈下した場合にも、垂直力を (1) 式で表わすことに

Fig. 3 Normal force coefficient of shank

Fig. 4 Effective friction angle of shank

Fig. 5 Center of normal force acting on shank

より一般的に表わせる。また着力点は Fig. 6 に示すように無次元化すれば、砂表面より深さに比例した圧力が作用することを考えて

$$\lambda = \psi(3-2\psi)/3(2-\psi) \quad \psi \leq 1 \quad (8)$$

が得られる。ここで、 ψ は沈下を示す無次元量で

$$\psi = l^* \sin \theta_1 / d \quad (9)$$

である。実験結果との比較を Fig. 6 に示す。

なお、フリュークあるいはスタビライザーに関しても沈下のあるときの垂直力 f_n と着力点の無次元表示 λ は (1), (8) 式と同様に書けることに注意しておく。

3次元の力の成分 Fig. 2 と同じモデルで、シャングの回転角 $\theta_1 = 10^\circ$ のとき、さらにシャングを ζ 軸あるいは x 軸まわりに $0^\circ \sim 20^\circ$ 回転したときに作用する

Fig. 6 Center of normal force acting on shank in sand

Fig. 7 Forces and moments acting on shank rotated around ζ -axis

力の成分を Figs. 7, 8 に示す。これらの力の成分を推定するために、フリュークの場合と同様な次の仮定を導入する。

a) xz 面内の力は、シャング底面を進行方向に垂直な yz 面に投影したときの形と、 θ_1 としてシャング中心軸を xz 面に投影したときに $-x$ 軸となす角をとって (1), (2) 式で表わされる。

Fig. 8 Forces and moments acting on shank rotated around x -axis

Fig. 9 Lateral force and drag of shank

$$b) \quad F_H = q^* F_D \sin 2\bar{\theta}_2 \quad (10)$$

ここで、 $\bar{\theta}_2$ はシャンク中心軸を xy 面に投影したときの $-x$ 軸となす角である。

c) 着力点は中心軸上で (8) 式で与えられる。Fig. 9 は、b) の仮定の妥当性を示している。これより、乾燥状態の 5 号珪砂に対して

$$q^* = 0.41 \quad (11)$$

が得られる。これらの仮定による推定値を Figs. 7, 8 に実線で示す。以上により、砂中の任意の位置のシャンクに作用する力と、モーメントの 6 成分が明らかとなった。

なお、 $\theta_1 < 0$ のときに作用する力は $\beta_1 = -\theta_1$ のフリュークに作用する力と同様に考えられるが、(6) 式の抵抗係数は第 1 項が特異であるために必ずしも適当ではない。この項はクーロン理論より得られるが、以下ではシャンク長さが有限であることを考え、第 1 項を無視して用いる。

3 最大把駐力

これまで行なわれている最大把駐力の理論的な研究の多くは、シャンクが十分に大きいとして、シャンクの貫入は無視されている。しかし、実際には Fig. 1 に示すように、貫入深さ Δ および回転角 θ がある有限な値となり平衡する。アンカーに作用する鉛直方向の力およびモーメントの平衡より、平衡方程式

$$W + W^* - F_L - F_L^* - F_L' - H_L = 0 \quad (12)$$

$$\{l^* \cos \theta - \alpha l \cos (\beta_1 - \theta)\} W + l^* (1 - \alpha^*) \cos \theta W^* \\ + F_D z + F_L x + F_D^* z^* + F_L^* x^* \\ + F_D' z' + F_L' x' = 0 \quad (13)$$

が得られる。ここで W はクラウンを含めたフリュークの重量、 W^* はシャンクの重量、 α, α^* は Fig. 1 に示すようにそれぞれの重心を表わすパラメータで、 l はフリューク長さである。 $F_D, F_D^*, F_D', F_L, F_L^*, F_L'$ はフリューク、スタビライザー、シャンクに作用する抵抗と揚力、 x, x^*, x', z, z^*, z' をそれぞれの着力点の座標であり、 Δ と θ の関数である。 H_L はチェーンよりアンカーに作用する揚力である。最大把駐力 H_0 は

$$H_0 = \sqrt{H_D^2 + H_L^2} \quad (14)$$

で与えられる。 H_D はチェーンからアンカーに作用する力の水平成分であり、力の平衡より

$$H_D = F_D + F_D^* + F_D' \quad (15)$$

である。最大把駐力の無次元量 λ_0 を

$$\lambda_0 = H_0 / (W + W^*) \quad (16)$$

で定義する。 λ_0 は通常用いられている把駐力係数に対応する。

チェーンよりアンカーに作用する H_L と H_D の比は、貫入深さ Δ の小さい範囲では近似的に Δ に比例すると

考えてよい。したがって

$$H_L = \lambda_c D H_D \quad (17)$$

ここで D は貫入深さ Δ をフリューク長さ l で無次元化して

$$D = \Delta / l \quad (18)$$

である。力の平衡方程式 (12) 式は、(17)、(15) 式より

$$W + W^* - F_L - F_L^* - F_L' \\ - \lambda_c D (F_D + F_D^* + F_D') = 0 \quad (19)$$

となる。なお、アンカーが貫入するには $D = \theta = 0$ で (12)、

(13) 式の左辺が正でなくてはならない。すなわち

$$W + W^* - F_L - F_L' > 0 \quad (20)$$

$$\{l^* - \alpha l \cos \beta_1\} W + l^* (1 - \alpha^*) W^* \\ + F_D z + F_L x + F_D^* z^* + F_L^* x' > 0 \quad (21)$$

$$D = \theta = 0 \quad (22)$$

(20) 式は $F_L < 0$ であるので通常のアンカーでは満たされている。(21) 式は著者らが既に導入した、アンカーがぬけ上がり転倒する条件に対応し、ここではスタビライザーに作用する力の項も含まれている。

λ_c はチェーンのアンカーに対する相対的な大きさにより定まる量である。貫入量の小さい範囲では、チェーンからアンカーに作用する力は小さく、その影響はほぼ無視できるが、深く貫入する場合には重要となり、今後の研究が必要である。ここでは、便宜上

$$\lambda_c = 0.4 \quad (23)$$

とする。

解析例 1 JIS 型アンカーにはほぼ対応し、スタビライザーの無いアンカー

$$\left\{ \begin{array}{l} \beta_1 = 45^\circ, \alpha = 0.1, \alpha^* = 0.5 \\ \hat{l} = l/l^* = 0.4, \hat{b} = b/b^* = 2.0 \\ \bar{W} = W / \frac{1}{2} \gamma l^2 b = 5.0, \bar{W}^* = W^* / \frac{1}{2} \gamma l^2 b = 3.0 \end{array} \right. \quad (24)$$

で (12)、(13) 式を解けば

$$D = 0.075, \theta = 3.9^\circ \quad (25)$$

を得る。アンカー各部に作用する力を $(W + W^*)$ で割り無次元化して Fig. 10-A に示す。これより、把駐力係数 λ_0 として

$$\lambda_0 = 2.81 \quad (26)$$

が得られる。

フリュークおよびシャンクに作用する抵抗はそれぞれ

$$\left. \begin{array}{l} F_D / (W + W^*) = 1.88 \quad (67\%) \\ F_D^* / (W + W^*) = 0.93 \quad (33\%) \end{array} \right\} \quad (27)$$

となり、シャンクに作用する力が把駐力に占める割合は 33% と非常に大きい。一方、 $D = \theta = 0$ でフリュークに作用する力のみを計算すれば

$$\lambda_0 = 1.29 \quad (28)$$

であり、(26) 式の値の約 46% に過ぎない。これにより、アンカーの貫入が把駐力に及ぼす影響は大きく、平

Fig. 10 Analytical results of holding power

Fig. 11 Sinking and rotation of model anchor and its holding power

衡方程式を解くことにより始めて求まる。

(24) 式のアンカーに

$$\beta_1 = 135^\circ, \bar{l} = l'/l = 0.6, \bar{b} = b'/b = 0.2 \quad (29)$$

のスタビライザーを取付けたときのアンカーの状態を Fig. 10-B に示す。

解析例 2 シャングの長さ l^* および幅 b^* を変えたときの、貫入深さ D , 回転角 θ , 把駐力係数 λ_0 を Fig. 11 に示す。ただし、シャング重量の無次元量 $\bar{W}^*$ は

$$\bar{W}^* \delta \bar{l} = 2.4 \quad (30)$$

を満たしているものとし、他の量については (24) 式で与えられる。網目部は実用的な範囲に解のない領域である。

ここで示されるようにシャングの設計は把駐力の上で非常に重要である。シャングが小さい程、貫入が大きくなり、把駐力係数は上昇することを Fig. 12 は示している。

4 水で飽和した砂での挙動と相似則

すでに述べたように¹⁾、乾燥状態の砂では長方形板に作用する力について速度影響はほとんど認められない。一方、実際の海底土質に相当する水で飽和された砂で

は、剪断面でダイラタンシーが起こり見掛けの体積が増大して間隙水圧が下る。そのために、砂の有効圧縮応力が大きくなり、剪断強度が増大して速度影響が起こる。Fig. 12 はフリューク開き角 β_1 が 90° および 40° の長方形板に飽和状態の砂が及ぼす力の抵抗係数である。これより、フリュークあるいはシャングに作用する垂直力は速度を V 、速度影響係数を α^w として

Fig. 12 Normal force acting on fluke in wet sand

$$f_n = \frac{1}{2} (1 + \alpha^w V) C_N^w \gamma^w d^2 b \quad (31)$$

と書ける。ここで d および b は板の深さと幅である。 γ^w は砂の水中での見掛けの比重量で、砂の間隙比 e および水の比重量 γ^A より

$$\gamma^w = \gamma - \gamma^A / (1 + e) \quad (32)$$

と表わされる。Fig. 12 より 5号 珪砂の速度影響係数として

$$\alpha^w = 0.026 \quad (\text{sec/cm}) \quad (33)$$

が得られる。

速度影響を取除いた飽和状態の砂の抵抗係数 C_N^w は Fig. 13 に示されるように、乾燥状態の抵抗係数にほぼ等しく

$$C_N^w = C_N \quad (34)$$

とすることができる。見掛けの摩擦角 δ 、着点 λ 、横力係数 q を Figs. 14, 15, 16 に示す。これより、速度影響を考慮すれば、飽和状態の砂中でのアンカーの挙動

Fig. 13 Normal force coefficient of fluke for wet sand

Fig. 14 Effective friction angle of fluke for wet sand

を乾燥状態の砂中でのアンカーの挙動に置換えることができる。なお、飽和状態の三河5号珪砂の内部摩擦角 φ は 34.4° で、乾燥状態 ($\varphi = 35.0^\circ$) とほぼ等しいことに注意しておく。

以上の結果と、平衡方程式 (12), (13) 式、あるいは安定性係数を導いた参考文献 1), (19) 式の性質により、空中での比重量が γ^I であるアンカーの海底砂中の挙動は、同じ形のアンカーで比重量 γ_{eq} が

$$\gamma_{eq} = \left\{ 1 + \frac{\gamma^A}{(1+e)\gamma - \gamma^A} \right\} \frac{(\gamma^I - \gamma^A)}{(1 + \alpha^w V)} \quad (35)$$

の乾燥状態の砂中の挙動と同価である。ただし、力は得られた結果を $(1 + \alpha^w V) \{1 - \gamma^A / (1 + e) \gamma\}$ 倍すればよい。

解析例 (24) 式で表わされるアンカーを水で飽和した砂中で引張ったとき、把持係数 λ_0 が速度によりどのように変化するかを Fig. 17 に示す。ただし

Fig. 15 Center of normal force acting on fluke for wet sand

Fig. 16 Lateral force and drag of fluke for wet sand

Fig. 17 Holding power and velocity

$$\gamma^I = 7.8 \times 10^{-3}, \gamma^A = 1.0 \times 10^{-3} \quad (\text{kg/cm}^3) \quad (36)$$

とする。

5 かき込み性能

投錨したとき、アンカーは Fig. 18-A に示すように海底土質をかみ、フリュークが上を向いて正常に貫入しないことがある。また、転倒したアンカーも同様の状態となる。ここでは、海底土質をかんだアンカーが再び正常に貫入する条件を導く。

砂をかんだアンカーを Fig. 18-B のようにモデル化する。シャンクとクラウンとを結ぶヒンジ・ピンが海底面上にあり、シャンクは水平とする。砂の盛上がり高さ h は参考文献 1) より

$$h = \sqrt{b_c \left\{ \frac{1}{2} l' \sin(\beta_1' - 2\beta_1) - l_p \sin \beta_1 \right\} \tan \varphi} \quad (37)$$

となる。ここで l_p はクラウン前面からヒンジ・ピンまでの距離で b_c はクラウン部の幅である。アンカーに作用する力を、砂表面がもともと h だけ高い位置にあるとして近似的に考えることができる。フリュークに作用する力は Fig. 18 の網目部を死領域として見掛けのフリューク開き角 A を考えればよい。ヒンジ・ピンまわりのモーメント M は、フリューク、スタビライザー、自重に由来するモーメント M^f, M', M^w に分けて考えるこ

Fig. 18 Analytical model for balled-up anchor

とができる。これらを $(1/2)rl^3b$ で割り無次元化して一をつけて表わせば

$$\bar{M} = \bar{M}^f + \bar{M}' + \bar{M}^w > 0 \quad (38)$$

のときに、クラウンはヒンジ・ピンまわりに砂をかき込む方向に回転する。

シャンクの影響を無視し

$$\beta_1' = 90^\circ + \beta_1 \quad (39)$$

とすれば、(38)式の各項は

$$\begin{aligned} \bar{M}^f &= \frac{2}{3} C_N(A) \left(\bar{h} + \frac{1}{2} \bar{l} \cos \beta_1 - \bar{l}_p \sin \beta_1 \right)^2 \left[(\bar{l} \cos \beta_1 - 2\bar{l}_p \sin \beta_1 - \bar{h}) \{ \sin A + \cos A \tan \delta(A) \} \right. \\ &\quad \left. - (\bar{l} \sin \beta_1 + 2\bar{l}_p \cos \beta_1 + \bar{h} \cot \beta_1) \{ \sin A \tan \delta(A) - \cos A \} \right] \\ \bar{M}' &= \begin{cases} \frac{1}{3} C_N(90^\circ - \beta_1) \left(\bar{h} + \frac{1}{2} \bar{l} \cos \beta_1 - \bar{l}_p \sin \beta_1 \right)^2 (\bar{b}_c - 2) \{ \bar{l}_p \tan \beta_1 - \bar{h} \sec \beta_1 + \bar{l} - 3\bar{l}_p \tan \delta(90^\circ - \beta_1) \} \\ \quad \dots \frac{1}{2} \bar{l} \cos \beta_1 - \bar{h} + \bar{l}_p \sin \beta_1 \geq 0 \\ 2 C_N(90^\circ - \beta_1) \bar{l} \cos \beta_1 (\bar{b}_c - 2) \left\{ \frac{1}{12} \bar{l}^2 \cos \beta_1 - \bar{l}_p (\bar{h} - \bar{l}_p \sin \beta_1) \tan \delta(90^\circ - \beta_1) \right\} \\ \quad \dots \frac{1}{2} \bar{l} \cos \beta_1 - \bar{h} + \bar{l}_p \sin \beta_1 < 0 \end{cases} \\ \bar{M}^w &= \cos \beta_1 \bar{W} (\bar{l}_p + \alpha) \end{aligned} \quad (40)$$

で与えられる。ここで

$$\bar{l}_p = l_p/l, \quad \bar{h} = h/l, \quad \bar{b}_c = b_c/b$$

$$\tan A = \frac{1}{2} \bar{l} / \cos \beta_1 \left(\frac{1}{2} \bar{l} \sin \beta_1 + \bar{l}_p \cos \beta_1 - \bar{h} \cot \beta_1 \right) - \tan \beta_1 \quad (41)$$

である。ただし (40) 式ではフリューク先端を越えて砂が盛上がる場合は除いている。

解析例 JIS 型アンカーにはほぼ対応する (24) 式のアンカーで

$$l/b = 2.5, \quad \bar{b}_c = 4.5 \quad (42)$$

のとき、ピンの位置 $\bar{l}_p$ によりかき込みモーメント $\bar{M}$ が

どのように変化するかを Fig. 19 に示す。

JIS 型アンカーの $\bar{l}_p$ は 0.1~0.2 で、Fig. 19 より回転モーメントの無次元量 $\bar{M}$ は大きくなく、かき込み性能は必ずしも良いとはいえない。これを改善するにはピン位置をさらにクラウン後方へ移動するか、あるいは逆にフリューク側にピンを取付けるかである。また、クラウンの形状は (37) 式より砂の盛上がりに影響が大きく、かき込み性能上で重要であるが、(38), (40) 式を用いて検討することができる。

Fig. 19 Moment around hinge-pin

6 結 論

以上の結果より、次の結論が得られる。

1) アンカーの把駐力を考えるとき、シャンクに作用する力を無視できず、シャンクの形により把駐力は大きく変化する。シャンクに作用する力の性質は本論文より明らかとなった。

2) アンカーの貫入深さ、回転角は本論文の示す平衡方程式を解くことにより得られる。

3) かき込み性能はピンの位置より変わり、ピンまわりのモーメントの無次元量 $\bar{M}$ により評価される。

4) 水で飽和した砂中のアンカーの挙動は、速度影響を考慮した等価比重量のアンカーを考えることにより、乾燥状態の砂中のアンカーの挙動として考えることができる。しかし、一般的に適用できる結論を導くためには、さらに研究が必要である。

最後に、本研究の実施にあたり東京チェーンアンカー株式会社高橋操六社長、九六株式会社小埜寺正臣部長、東京大学工学部土木工学科助教授石原研而博士をはじめ土質研究室の方々、同産業機械工学科助教授畑村洋太郎博士、ならびに東京大学松原典宏氏、村上貴英氏に御協力、御便宜をいただいた。ここに心から御礼を申し上げます。

参 考 文 献

- 1) 浦 環, 山本善之: アンカーの安定性に関する基礎的研究, 日本造船学会論文集, 第140号, (1976) pp. 297-303.
- 2) 野村士平, 鞠谷宏士: 模型錨の把駐抵抗と姿勢の関係, 日本航海学会論文集, 52号, (1974) pp. 65-74.