アンカーの安定性に関する基礎的研究 (第 3 報)

正員 浦

環* 正員 山 本 善 之**

A Basic Study on the Stability of Anchors (3rd Report)

by Tamaki Ura, Member Yoshiyuki Yamamoto, Member

Summary

The present authors investigated the characteristics of force acting on the structural elements of a mooring anchor, such as fluke, shank and stabilizer fin. On the basis of experiments, stability coefficients were proposed in the first report [1] to evaluate the in-plane and transverse stability of the dragged anchor. In this paper, the stabilizing moment of the anchor around its shank is investigated in detail for all positions.

As a result, it is shown that an anchor of absolute roll stability can be realized by attaching a pair of large plate-face stabilizer fins.

Maximum holding power, inclination and depth of anchor dragged in sand bed are measured, and are compared with the results of calculation, which was formulated in the second report [2].

1 はじめに

アンカーの力学の研究は、対象とする海底土質の多様性、不均一性、実験の再現性の悪さなど、多くの困難な障害のために、定性的にでさえも理論を進展させることは困難であった。著者らは海底土質のモデルとして実験の再現性の良い乾燥状態の珪砂を用い、アンカー各部に作用する土質力学的な力をそれぞれ独立に計測し、それらに対する実験式ならびに 3 次元に拡張したクーロン理論を導入した¹⁾。さらに、それらの力の性質が、水で飽和された状態の珪砂に対しても本質的には同じであることを実験的に示した^{2),3)}。したがって、導入された幾つかの実験式ならびに仮定を用いることにより、アンカーの砂中での挙動を静力学的に解析・研究することが可能となった。

アンカーの性能を定める問題点として、アンカーの転倒について、著者らは第 1 報で取り扱い、横安定性の判定の条件として、シャックまわりの回転に対する復元モーメント勾配を考えればよいことを示し、安定性係数 σ を導入した。これより、適当なスタビライザーを取り付ければ、アンカーの安定性が改善されることを示した。また、第 2 報では最大把駐力を取り扱い、アンカーの海底土質中での平衡方程式を解くことにより、アンカーの姿勢が得られ、最大把駐力が計算されることを示した。

本論文では、再びアンカーの姿勢安定性について述

べ、微小回転に止まらず、大回転を起した場合について考える。このとき、具体的に復元モーメント曲線を求めねばならない。復元モーメント曲線が得られれば、船舶の傾斜・動揺に関する復元性と同様な議論が行ない得る。また、回転角が 0° から 180° までの復元モーメントを検討することにより、すべての姿勢からの挙動がわかる。これを利用して、安定領域を拡大することが可能であり、さらに Bruce⁴⁾ の absolutely roll-stable なアンカー (Bruce Anchor) と同様な性質、すなわちすべての姿勢において復元モーメントが正であるアンカー「完全安定アンカー」の可能性が明らかとなる。この完全安定アンカーの一例について、実験と解析結果とを比較する。さらに、最大把駐力および、そのときのアンカーの姿勢⁵⁾を計測したので報告するとともに、前報の解析法を用いた結果と比較検討を行なう。

2 復元モーメント曲線

前報に示したアンカーのかき込み性能に関する議論は、投錨時に海底土質をかんだアンカーあるいは転倒したアンカー (Fig.1 参照) のヘッドがヒンジ・ピンのまわりに回転して、再び海底土質に貫入する条件を与えて

Fig. 1 Balled-up anchor

* 東京大学生産技術研究所

** 東京大学工学部

いる。しかし、一般に海底土質中ではヒンジ・ピンの周囲に土砂が入り込みやすく、ヘッドの滑らかな回転は防げられる⁶⁾。これを防ぐために、AC 14 型アンカーではヒンジ・ピンの周囲は土砂が入り込みにくく設計されている⁷⁾。JIS 型アンカーでは土砂が入り込みやすい。したがって、アンカーが海底土質に確実に貫入するには、文献 2) (38) 式で与えられる回転モーメントが十分に大きな値を取るよう設計されなければならない。

ここでは上記のようにヒンジ・ピンまわりにフリュークが回転して海底土質に貫入するのではなく、シャンクまわりに 180° 回転して貫入するアンカーについて述べる。なお以後、正常にかき込んだ状態、すなわち最大把駐力状態が安定であるアンカーを対象とする。

任意の姿勢にあるアンカーに作用する土質力学および重力による力の 6 成分は次式で与えられる。

$$\begin{aligned} F_x &= \int p \alpha_x dS &= -F_D \\ F_y &= \int p \alpha_y q \tan \bar{\beta}_2 dS &= -F_H \\ F_z &= \int p \alpha_z dS - W - W^* = F_L - W - W^* \quad (1) \\ M_x &= \int p (y \alpha_x - z \alpha_y q \tan \bar{\beta}_2) dS + M_x^W + M_x^{W^*} \\ M_y &= \int p (z \alpha_x - x \alpha_z) dS + M_y^W + M_y^{W^*} \\ M_z &= \int p \alpha_x (x q \tan \bar{\beta}_2 - y) dS \end{aligned}$$

ここで、 x 軸はアンカーの進行方向、乱されない状態の水平な海底土質表面に取り、 z 軸は鉛直上向きを正に取る。また、

$$p = \gamma C_N (\bar{\beta}_1) z n_x \quad (2)$$

$$\alpha_x = \sin \bar{\beta}_1 + \cos \bar{\beta}_1 \tan \delta (\bar{\beta}_1) \quad (3)$$

$$\alpha_z = -\sin \bar{\beta}_1 \tan \delta (\bar{\beta}_1) + \cos \bar{\beta}_1 \quad (4)$$

$$\tan \bar{\beta}_1 = n_x / n_z, \quad 0^\circ \leq \bar{\beta}_1 \leq 180^\circ$$

$$\tan \bar{\beta}_2 = n_y / n_x,$$

であり、 $n = (n_x, n_y, n_z)^t$ は面の単位法線ベクトルである。 γ は砂の見掛けの比重、 C_N , δ , q はそれぞれ抵抗係数、見掛けの摩擦角、横力係数で文献 1), 2) に実験式が与えられている。(1) 式の積分は乱されない状態の海底土質表面下 $n_x > 0$ の面に関して行なう。 W , W^* はそれぞれヘッドとシャンクの重量で、 M_x^W , M_y^W 等はそれらによるモーメントである。

安定性を考える上で近似的に、アンカーの貫入、砂の盛上がりを見捨て、シャンクは乱されていない海底土質表面に拘束されていると考えてよい。したがって、シャンクまわりに β だけ回転したアンカーの復元モーメント M_f は

$$M_f = M_x \quad (5)$$

で与えられる。シャンクを水平面上にあると仮定してい

Fig. 2 Stabilizing moment diagram

るので (1) 式で与えられる M_x の積分はフリュークとスタビライザーの面についてのみ行なえばよい。ここで、安定性係数 Σ はその定義より

$$\frac{1}{2} \gamma l^3 b \Sigma = \frac{dM_f}{d\beta} \Big|_{\beta=0} \quad (6)$$

であることに注意しておく。 l , b はフリュークの長さとは幅である。

最大把駐力状態が横安定なアンカーに関して、(5) 式のグラフは Fig. 2 に示す 3 種類に主に分類される。

A) $\beta = 180^\circ$ も横安定である。すなわち

$$dM_f/d\beta|_{\beta=180^\circ} > 0$$

B) $\beta = 180^\circ$ は不安定であり、 0° 以外に $0^\circ \sim 180^\circ$ に安定な平衡点 $\beta = \beta_s$ が存在する。

C) $\beta = 180^\circ$ は不安定で、 $0^\circ \sim 180^\circ$ の間に平衡点がない。すなわち

$$M_f > 0, \quad 0^\circ < \beta < 180^\circ \quad (7)$$

A) の中には AC 14 型、ストック・アンカーなどの安定性のよい通常のアンカーがあり、B) はスタビライザーの小さなアンカーである。B) のタイプのアンカーは大きな外乱により横転し $\beta = \beta_s$ の状態になりやすい。C) のタイプのアンカーはいずれの回転角においても正の復元力が作用し、かつ $\beta = 180^\circ$ が不安定であるために、容易に $\beta = 0^\circ$ の最大把駐力状態となり、先に述べた完全安定アンカーである。現在用いられている船用アンカーで安定性が良いとされているものは一般に A) あるいは B) に属している。これらは、回転角が β_{ua} あるいは β_{ub} を越えると、復元モーメントが負になり転倒する。したがって、投錨時のかき込みを別にすると、安定領域 ($-\beta_{ub}, \beta_{ua}$) が十分に広く、 $\beta = 0^\circ$ での復元モーメント勾配を表わす安定性係数 Σ が十分に大きければ、実用上には差し支えない。

スタビライザーの形を AC 14 型アンカーのものに相当する断面が二等辺三角形のデルタ型と JIS 型に相当す

る平板状のプレート型の2種について考える。ただし、第1報で報告したように、JIS型アンカーのスタビライザーは小型のために、アンカーを安定化する能力は十分でない。プレート型のスタビライザーを大きくすることは、 $\beta=0^\circ$ の安定性をよくし、 $\beta=180^\circ$ の不安定性を増す。これは、転倒した姿勢ではフリュークとスタビライザーの安定性に関する役割が逆になることによる。デルタ型のスタビライザーを大きくすることは容易に理解されるように、 $\beta=0^\circ$ と 180° の安定性を同時に増すことになる。したがって、デルタ型あるいはストック付きアンカーの転倒した姿勢($\beta=180^\circ$)は一般に安定であり、これを海底土質中に貫入させるには、文献2)(38)式を十分に大きく取って、ヒンジ・ピンまわりにヘッドを回転させなければならない。

Fig. 3 Experiment model

実験および解析

Fig. 3に示すフリュークおよびプレート型スタビライザー ($W=0.569\text{ kg}$) を x 軸のまわりに回転し、作用する力の6成分を計測した。

Fig. 4のAは実験結果ならびに(1)式を用いた計算結果を示している。ここで M_x , M_y および F_z には(1)式のようにアンカーの自重による項も含まれている。Fig. 4のB, Cはフリュークおよびスタビライザーをそれぞれ単独に実験を行なった場合の実験結果および計算値である。ここで $\beta=180^\circ$ の転倒状態のドラッグ $F_D(=-F_x)$ はきわめて小さいことに注意する。

Fig. 4のBに示されるように、フリュークのみアンカーは転倒しやすい。これにFig. 4のCの性質を持つプレート型スタビライザーを取り付けることにより、

Fig. 5 Absolutely roll-stable anchor

Fig. 4 Force and moment acting on anchor models

Fig. 6 Behaviors of initially upset "absolutely roll-stable anchor" at specific run

安定性係数 Σ が大きくなるばかりでなく, (7) 式が同時に満される。なお, このヘッドに Fig. 5 に示すシャックを取り付けることにより, いかなる姿勢で砂上にあっても, 6! 程度水平に引かれることにより容易に貫入し, 最大把駐力状態が実現する完全安定アンカーとなる。転倒状態 ($\beta=180^\circ$) からの過程を Fig. 6 に示す。

実験値と計算値とはよく一致している。ただし, Fig. 4 の A の $\beta < 90^\circ$ の領域では若干の差がある。特にリフトに対応する F_z とモーメント M_x の減少が大きく, 単純に Fig. 4 の B と C の和になっていない。これはスタビライザーがフリュークの後方にあり, フリュークの影響を大きく受けるために, それぞれを独立に考えている (1) 式を用いた解析法では差が生じることによる。ここではスタビライザーの内側 3/4 が無効であるとし, またフリュークの有効な幅が, その間隙がないとした 2.5 cm であるとして計算した結果を Fig. 4 の A に 1 点鎖線で示す。この程度の修正により実験値と計算値はよい一致を示す。このようなアンカーの各要素間の干渉の問題は数量的に計算結果を精密にする上で重要であり, 今後の研究課題である。特にこの点を考えて, 安定性係数 Σ は十分に大きな値に取られることを要する。

以上の結果より, 完全安定アンカーが実現可能であることが, 理論および実験により示された。この場合に, ヒンジ・ピンは不要であり, このときフリュークおよびクラウン部は上下対称である必要がなく, アンカーの設計に大きな自由度を与える。通常の船用アンカーについても上記と同様にスタビライザーを適当に設計することにより, 安定領域すなわち復元モーメント曲線をコントロールできることは明らかである。

3 最大把駐力とアンカーの姿勢

前報において著者らは砂中のアンカーの平衡方程式を導入し, いくつかの例について具体的に平衡方程式を解き, 最大把駐力状態のアンカーの姿勢および最大把駐力とアンカー形状との関連を明らかにした。ここでは Fig. 3 に示されるフリュークおよびスタビライザーに Fig. 5 に示すシャックを付け, フリューク開き角 β_1 を変えてアンカーの姿勢および最大把駐力を計測した。引張り速度は約 20 cm/sec である。シャック重量 W^* は 0.348 kg である。Fig. 7 に最大把駐力係数 $\lambda_0 = H_0 / (W + W^*)$, $\bar{H}_0 = 2H_0 / \gamma l^2 b$, 回転角 θ , および貫入深さの無次元量 $D = A/l$ を示す。

これらの実験値はアンカーが横安定であることにより再現性がよい。揚力およびモーメント M_y の平衡方程式を解いた結果を Fig. 7 に 1 点鎖線および破線で示す。ここで 1 点鎖線は前節 Fig. 4 の $\beta=0$ での実験結果を参考にして, フリュークに作用する力については 25/16, スタビライザーには 1/4, シャックには 1/2 をかけて,

Fig. 7 Maximum holding power ratio, inclination and depth of anchor

フリューク、スタビライザー、シャंकそれぞれの間の相互干渉を簡単に考慮した結果である。シャंकについては前報に用いたものより、アスペクト比 (l^*/b^*) の大きなものを用いている。破線は相互影響をまったく考慮しない場合の解析結果である。

1点鎖線の解析値は実験結果に対してかなりよい一致を示している。最大把駐力に対する実験と解析の差は主として、アンカー各要素の相互干渉に対する修正が必ずしも十分でないことによると考えられる。実際、解析は F_z と M_y の平衡方程式を解いているが、Fig. 4のAにおいて M_y と計算値は良く一致しており、見掛け上は干渉による影響が少ないのに対し、 F_z はかなりの影響がある。また、 $F_x (= -F_D)$ に対する影響も少ない。そのため β_1 が大きい部分では貫入深さと回転角が一致しているにもかかわらず、把駐力の計算値は実験値をやや下まわっている。相互干渉を全く考慮しない場合、計算ではスタビライザーに作用する揚力が過大に評価されてア

ンカーのヘッドが浮き上がる傾向があり、把駐力は実験値をかなり下まわる。

4 結 論

以上に示したように 0° より 180° までの復元力を考えることによって、広い安定領域を持つアンカー、さらに完全安定アンカーなど、最大把駐力状態の横安定性が良く、かつかき込み性能の優れたアンカーが実現可能であることが示された。また、アンカーの最大把駐力およびそのときの姿勢が実験により計測され、解析結果と比較して良好な一致が得られた。

著者らの一連の研究ならびにその研究方針により、アンカーの力学が経験法則のみにならず、解析可能な領域となったことが示された。

今後の課題としてさらに数量的に精密にするために、アンカー各要素に作用する力の間での相互干渉の問題を取り扱わねばならない。また、異なる土質に対する研究も行なわれる必要がある。

本研究を行なうにあたって、東京大学生産技術研究所 高橋幸伯教授ならびに高橋研究室の方々にひとかたならぬ御教示・御協力を賜った。また、実験を行なうに際して東京チェーン・アンカー株式会社 高橋操六社長、九六株式会社 小笠寺正臣部長、東京大学工学部 船舶工学科 松原典宏氏、村上貴英氏に御便宜を計っていただいた。ここに改めて感謝の意を表します。

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. 279~285.
- 2) 浦 環, 山本善之: アンカーの安定性に関する基礎的研究 (第2報), 日本造船学会論文集, 第141号, (1977), pp. 145~152.
- 3) 浦 環: 船舶工学に対する粒状体力学の応用, 東京大学博士論文, (1976).
- 4) Bruce Anchor Ltd.: Bruce Anchor, (1974).
- 5) 鞠谷宏士: アンカーの安定性に関する基礎的研究 (第2報) に対する討論, 日本造船学会論文集, 第141号, (1977), pp. 327~328.
- 6) 本田啓之輔, 片上圭四郎: JIS型ストックレス・アンカーの把駐性に関する水槽実験 (アンカーの把駐力に関する実験研究その2), 日本航海学会誌, 第24号, (1961), pp. 73~82.
- 7) H. L. Dove, and G. S. Ferris: Development of Anchors, Trans. RINA, Vol. 102, (1960), pp. 535~554.