

完全安定型海洋作業用アンカーの研究と開発

浦

環*・能 勢 義 昭**

1. はじめに

海岸作業や沿岸作業では、作業船の位置決めや構造物の設置のための係留作業が重要な位置を占める。長期にわたる係留のためには、コンクリートや土囊などの重量式アンカー（シンカー）を用いることが一般的におこなわれ、重量は重くなるが係留の信頼性は高い。作業用浮体の係留のためには、船舶の係留などに用いられる一時的な係留のためのアンカーを使用すれば効率が高く、実際に爪式の船用ストックレス・アンカーが広く用いられている。船用アンカーは船という特殊な形状の浮体に取り付けやすいような構造様式をもっているため、一般的な海洋作業の観点からは必ずしも満足のできるものではない。漁業用のアンカーを含めて作業用の小型アンカーは、古来よりストックつきのものが用いられる。ストックはアンカーが転倒するのを防止するためのものであるが、裏返って投錨されても効果があるように、爪の部分回転できるようにヒンジとすか、片爪ではなく爪を上下に付けた形となる。したがって、このようなアンカーは重量的に無駄が多く、かつ形が大きいため船上では取り扱いにくいものである。海洋作業・沿岸作業のために効率が良く、信頼性の高いアンカーが求められているのが現状である。

アンカーの転倒による爪の抜ける現象を防ぎ、かつ、投錨したときにかき込みの良いアンカーを設計する目安として、完全安定性が上げられる。本論では、完全安定条件について述べ、これを満たす片爪アンカーの形状の一つを提案する。また、実機規模の試作品を作り、実海域で引き、その性能を検討したので報告する。

2. 完全安定条件

左右対称なアンカーの最大把駐力状態は図-1に示されるように、貫入深さ Δ と回転角 θ とで表わされる。この状態においてアンカーの引かれる方向回りの回転に対して、静力学的に安定であることが信頼性の高い係留システムを形成する上で求められる。図-2 は船用アン

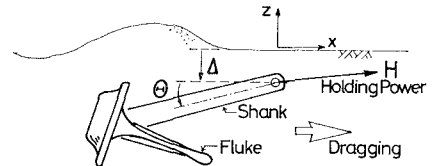


図-1 海底土中のアンカー

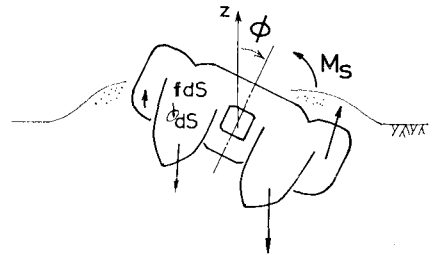


図-2 進行方向回りに回転したアンカー

カーを例として表わしているが、爪だけのアンカーは一般的に安定性が悪く、これを改善するために、ストックなどのスタビライザーを取り付ける必要がある。アンカーの引かれる方向回りの回転角 ϕ に対する、復元モーメントを M_s で表わすと安定条件は

$$dM_s/d\phi > 0: \phi = 0 \dots\dots\dots (1)$$

で与えられる。(1) 式の条件を満たす安定なアンカーの復元モーメント特性は概ね図-3の3種類に分類することができる³⁾。すなわち、

$$M_s \geq 0: 0 < \phi < 180^\circ \dots\dots\dots (A)$$

$$dM_s/d\phi > 0: \phi = 180^\circ \dots\dots\dots (B)$$

$$M_s(\phi_s) = 0: 0 < \phi_s < 180^\circ \dots\dots\dots (C)$$

であり、その意味は、

(A) 総ての回転角に対して、正の復元モーメントを発生させる機構を持つ。 $\phi = 180^\circ$ の状態は不安定。

(B) $\phi = 180^\circ$ で安定な平衡状態となる。大きな外乱を受けてアンカーは転倒し、裏返る。

(C) $\phi = \phi_s$ に安定な平衡点をもつ。大きな外乱を受けてアンカーは横転する。

ストック付きのアンカーは(B)の性質をもつ。(C)のアンカーは $\phi = 0$ における $dM_s/d\phi$ が一般に小さく、

* 正会員 工博 東京大学助教授 生産技術研究所

** 東京大学助手 生産技術研究所

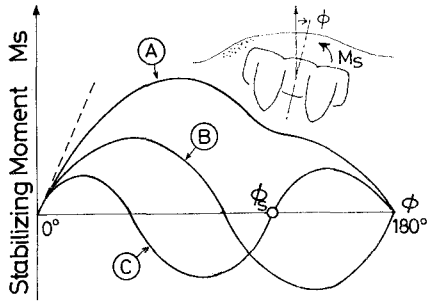


図-3 安定なアンカーの復元モーメント曲線

安定性は劣る。(A) の条件を満たすアンカーを完全安定アンカーと呼び、これは大きな外乱を受けてどのようにアンカーが傾いても、最大把駐力状態に復帰する性質をもつ。あるいは、投錨した時にたとえ裏返っても、他に安定な平衡点がないので、最大把駐力状態を実現することが容易である。

3. アンカーが受ける力の推定

アンカー表面の微小面積 dS に作用する力 $fdS=(f_x, f_y, f_z)dS$ は近似的に次式で与えられる^{1), 4)}。

$$\left. \begin{aligned} f_x &= p\alpha_x N_x \\ f_y &= pq\alpha_y N_y \\ f_z &= p\alpha_z N_z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 x, y, z 軸に関しては、 xy 面を海底面表面上に、 x 軸をアンカーの移動方向に、 z 軸を鉛直上向きにとることとする。 (N_x, N_y, N_z) は dS 面の外向き単位法線ベクトルであり、

$$\left. \begin{aligned} p &= \begin{cases} C_N(\eta)\gamma z, & N_x > 0 \text{ かつ } z < 0 \\ 0, & N_x \leq 0 \text{ あるいは } z \geq 0 \end{cases} \\ \alpha_x &= \cos \eta \tan \delta + \sin \eta \\ \alpha_y &= \alpha_x \\ \alpha_z &= -\sin \eta \tan \delta + \cos \eta \\ \tan \eta &= N_x / N_z \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

γ は浮力を除いた海底土の見掛けの比重量で、 $C_N(\eta)$ 、 $\delta(\eta)$ 、 q はそれぞれ、垂直力係数、見掛けの摩擦角、および横力係数である。 $\gamma=0.9 \text{ gf/cm}^3$ (8.8 kN/m^3) 程度の緩い砂に対して、次の実験式が提案されている。

$$\begin{aligned} C_N &= 1.07 \times 10^3 / \eta^2 + 8.98 + 1.35 \times 10^{-7} \eta^4 \\ &\dots\dots\dots \text{爪およびスタビライザー} \\ C_N &= \begin{cases} 87.6 + \exp [0.2\eta - 29.1], & 150^\circ \leq \eta < 180^\circ \\ 8.98 + \exp [3.79 - 0.34\eta], & 0^\circ < \eta \leq 10^\circ \end{cases} \\ &\dots\dots\dots \text{シャंक} \\ \delta &= \begin{cases} 24^\circ & \eta \leq 78^\circ \\ 76^\circ - \frac{2}{3}\eta & 78^\circ < \eta < 150^\circ \\ -24^\circ & 150^\circ \leq \eta \end{cases} \\ q &= 0.37 \end{aligned} \dots\dots\dots (4)$$

(2) 式をアンカーの表面全体で積分することにより、アンカーに作用する力の6成分 ($F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$) が計算される。

4. 完全安定型片爪アンカー

爪だけでアンカーを安定化させるには困難な面が多い。何らかの形でスタビライザーを取り付ける必要がある。ストックは回転角 $\phi=90^\circ$ に関して対称であり、 $\phi=0$ を安定化すると同時に $\phi=180^\circ$ の平衡点をも安定化させ、ストック付きのアンカーは (B) の型の特性をもつ。ここでは、一般のストックのような丸棒ではなく、平板型のスタビライザーについて考える。平板型では、 $\phi=0$ を安定化させ、 $\phi=180^\circ$ を不安定化させる性質をもたせることができる。図-4 はその一例であり、ARS-S 型アンカー⁵⁾と呼ばれる。以後このモデルにつ

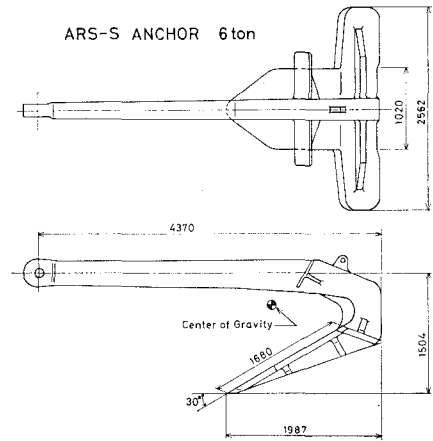


図-4 6 トンの ARS-S 型アンカーモデル

いて述べる。海底土中のアンカーの姿勢は、 Δ と θ で与えられ、これをアンカーに作用する力の平衡条件より解析的に求めることも可能であるが^{2), 4)}、簡単のために $\Delta=\theta=0$ とし、貫入量による効果を見捨てる。図-5 は

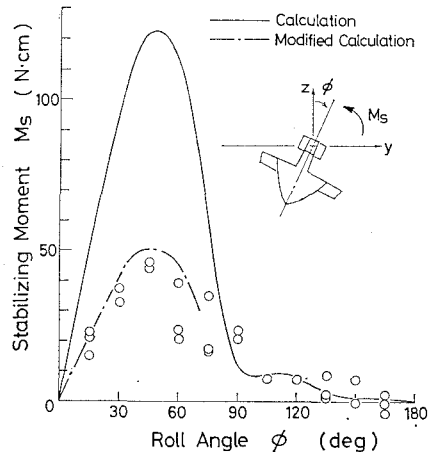


図-5 ARS-S 型アンカーの復元モーメント曲線

爪の長さ $L=100\text{mm}$ の図-4の小型モデルの復元モーメント曲線である。実験値と計算値が比較してある。平板型スタビライザーの取り付けにより完全安定性が実現されていることが示されている。図-5の計算値は ϕ が小さい範囲で復元モーメントを過大に評価している。これは、スタビライザーが爪の後方にあり、その影響を大きく受けるためである。スタビライザーの内側3/4が無効であるとして爪とスタビライザーの相互作用を考慮し、計算した結果を一点鎖線で示す。このような修正で計算値は実験値を良く説明しうる。

5. 最大把駐力実験

図-6に示す兵庫県淡路島の北東部、松帆の浦の沖合約100mの海域で昭和58年6月から7月にかけて実験をおこなった^{6),7)}。アンカーの変位 D と把駐力 H との関係をより正確に求めるために、図-7に示すように、旧松帆栈橋の橋脚にフェアリーダーを取り付け、それに約200mの鋼製の係留索を通し、起重機船で引き上げてアンカーを引いた。把駐力 H はあらかじめ検定したクレーンの荷重計で、変位は係留索の送り量をフェアリーダーの位置で読み取り、計測した。水深は約10mで、スコープ角を $5^\circ\sim7^\circ$ に制限した。使用したアンカーの

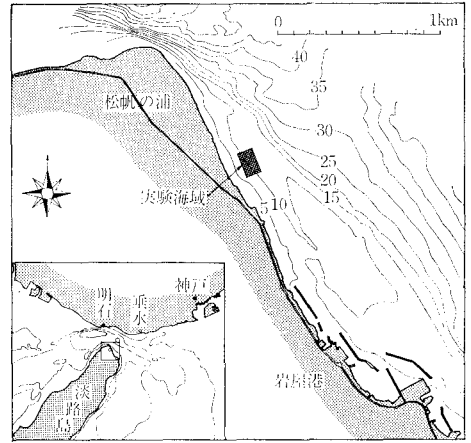


図-6 アンカー試験の実験海域、兵庫県淡路島

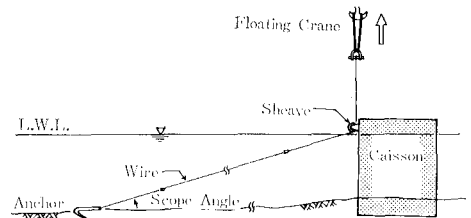


図-7 アンカーを引くための段取り

表-1 実験に使用したアンカーの寸法と試験結果

アンカー	代表長さ L (m)	重量 W (ton)	最大把駐力係数 $H_{\max}/W$	貫入までの距離 D_{80}/L	無次元最大把駐力 $H_{\max}/\gamma L^3$
ARS-S 型 6 ton	1.68	6.21	5.93	4.2	8.18
ARS-S 型 3 ton	1.33	3.10	6.34	4.3	8.79
ARS-S 型 1 ton	0.92	1.03	6.19	3.2	8.62
JIS 型 Stockless	1.51	5.61	3.51	—	6.02
〃 (転倒時)	〃	〃	1.11	—	1.90
Stocked	2.00	5.20	3.61	—	2.47

形状を図-8~10中に示す。アンカーの重量 W 、代表長さ(爪の長さ) L を表-1に示す。ここで、代表長さとは、アンカーに作用する力を表現するために効果的なアンカーの寸法を意味し、図-8~10に示されるように、ほぼ爪の長さに相当するものを取っている。3丁のARS-S型アンカーは相似形に造られているので、重量は代表長さの3乗に比例する。

投揚錨船からアンカーを静かに降ろし、アンカーの爪が下を向いた状態を初期状態とした。牽引速度は $0.3\sim1.5\text{ m/min}$ であり、この範囲では牽引速度の最大把駐力に対する影響は見られなかった。すでにアンカーが揺れた海底面上を再びアンカーが通らないように、アンカーを設置する位置に十分な注意をはらっている。また、ここでは報告しないが、最大把駐力状態のときの海底土の盛り上がり形状とアンカーの貫入姿勢の計測を行なっ

ている⁸⁾。表層土は表-2に示す性状であり、数点のボーリング・データの結果、アンカーが貫入する深さ内には堆積したほぼ様な砂層があると考えて良い。

表-2 試験海域の海底土質

土質分類	SPu	均等係数	4.1
D_{60}	0.93	曲率係数	0.9
D_{30}	0.44	塑性指数	13.4
D_{10}	0.23	比重	2.65

図-8にARS-S型、図-9にJIS型ストックレス、図-10にストックの各アンカーの変位と把駐力の関係を示す。横軸は変位をアンカーの代表長さで割って無次元化し、縦軸は把駐力をアンカーの空中重量で割って無次元化している。

ARS-S型アンカーに関する実験結果は極めて良好な

再現性と安定性を示している。また、把駐力と変位を上記のように無次元化すると、把駐力-変位曲線はアンカーの大きさに無関係になることが示されている。最大把駐力係数は約6で、ストックレス・アンカーの2倍程度である。また5L程度引けば最大把駐力状態になることが示された。表-1に最大把駐力係数 $H_{\max}/W$ の値および、最大把駐力の80%の把駐力を得るのに必要なアンカーの牽引距離 D_{80}/L を示す。1トンのARS-S型アンカーの場合には、完全安定性を確認するために、あらかじめ爪を上に向けてアンカーを海底に設置し、牽引する試験を併せておこなっている。この場合、最大把駐力状態になるまでに必要な牽引距離が増すが、爪は確実に貫入し最大把駐力に影響がないことが示されている。すなわち、ARS-S型アンカーの信頼性が極めて高く、同時に最大把駐力係数が大きいことが明らかになった。

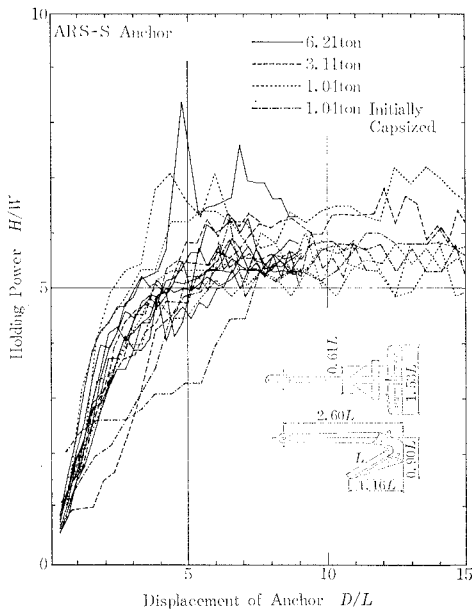


図-8 ARS-S型アンカーの把駐力と変位の関係

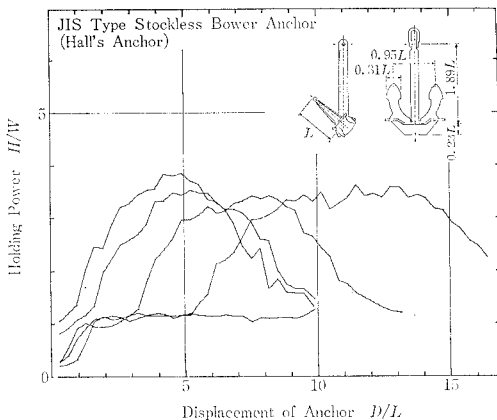


図-9 JIS型ストックレス・アンカーの把駐力と変位の関係

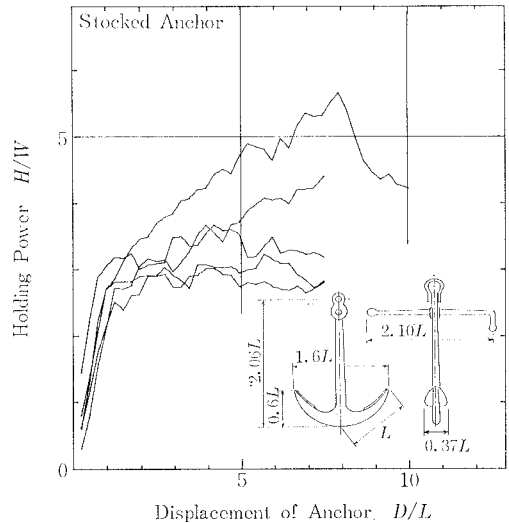


図-10 スtock・アンカーの把駐力と変位の関係

JIS型ストックレス・アンカーの最大把駐力係数は約3.5と3種のアンカーの中では最も小さい。最大把駐力状態は不安定であり、爪が貫入を開始してから6~10Lにわたって引くと総て転倒し、爪が上を向くことが示されている。爪が全く海底土に貫入しない例もある。JIS型ストックレス・アンカーは船用アンカーの特徴として爪はヒンジ式になっており、そのため爪が貫入を開始するまでに必要な牽引距離のバラツキは大きく、それを的確に推定することは困難であることも示されている。爪が海底土に貫入していないときの把駐力係数は砂質の海底において約1.1である。

ストック・アンカーは爪がシャンクに固定されているので急速に貫入し、安定した把駐力特性を示す。しかし、重量が重く、最大把駐力係数は約3.6とストックレス・アンカーと同程度である。また、爪およびシャンクの幅が狭いために、最大把駐力のバラツキは大きい。

6. 最大把駐力係数

図-11はARS-S型アンカーの最大把駐力と代表長さとの関係である。実験値は勾配が3の直線に乗ることが示されている。すなわち、砂質の海底におけるアンカーの最大把駐力は一様に

$$H_{\max} = Ca\gamma L^3 \quad \dots\dots\dots (5)$$

で表わされる。 Ca はアンカーの形状と海底土の剪断特性に関する無次元量であり、把駐力係数と区別するために無次元最大把駐力と呼んでおく。図-11には代表長さ172mmおよび137mmの縮尺模型の実験結果も同時に示す。ただし、縮尺模型は平均粒径2.5mm、均等係数1.37の比較的粒度のそろった大磯砂利の実験床において飽和状態でおこなったものである。ここで示されるように、実験室の砂床と松帆の浦の海底土とは組成

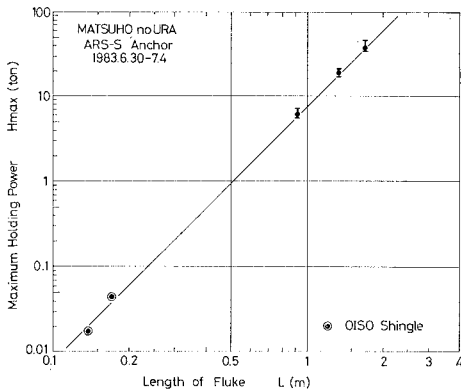


図-11 アンカーの大きさと把駐力の関係

および剪断特性に若干の差はあるものの、両者の最大把駐力はほぼ同一の直線上に乗ることが示された。

最大把駐力係数 H_{max}/W が大きい場合には、アンカーの挙動を支配する平衡方程式において海底土から受ける力が支配的になり、アンカー重量の効果を無視できる。したがって、最大把駐力は海底土より力を受ける面の形状により定まり、アンカーの重量に原理的には比例しない。 $\gamma=0.95 \text{ ton/m}^3$ と図-8~10の結果より、実験に使用した各アンカーの無次元最大把駐力の値を表-1に示す。この結果と(5)式とにより、所要の把駐力に対するアンカーの寸法 L を決めることができる。なお、アンカーの重量はアンカーの部材の厚さに大きく支配される。部材の厚さは部材に作用する力に基づいて、強度を考えて決められるべきものである。砂質土において作

用する力は L^3 に比例するので、アンカーの重量を軽くするように理想的にアンカーを設計すると、小型のアンカーでは部材の厚さを相対的に薄くてよい。

6. おわりに

以上のように、完全安定型片爪アンカーを試作し実海域で試験をおこない、良好な結果を得た。要求される把駐力に対してアンカーの大きさを定める式を導いた。これらにより、より信頼性の高く、性能の良い作業用のアンカーが開発されたものとする。

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，pp. 279~285, 1976.
- 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，pp. 145~152, 1977.
- 3) 浦 環・山本善之：アンカーの安定性に関する基礎的研究(第3報)，日本造船学会論文集，第143号，pp. 196~200, 1978.
- 4) Ura, T. and Y. Yamamoto: Stability Considerations of an Anchor Dragged in Non-Cohesive Sea Bed, Applied Ocean Research, Vol. 1-1, pp. 43~50, 1979.
- 5) Ura, T. and Y. Yamamoto: Development of Absolutely-Roll-Stable Anchors, Proc. OTC, pp. 373~379, 1981.
- 6) 浦 環：厳しい潮流のある環境での係留システムの研究(その2)，本州四国連絡橋公団報告書，1983.
- 7) 浦 環：アンカーの最大把駐力係数，日本航海学会論文集，第71号，pp. 37~46, 1984.
- 8) 本州四国連絡橋公団ほか：アンカー把駐力実験，本州四国連絡橋公団報告書，A8256, 1983.