

アンカーの把駐力に関する理論的考察

翁 長 一 彦*

Theoretical Study on the Holding Power of the Anchor

By

Kazuhiko Ohnaga

This report deals with a study on the holding power of the anchor from the view-point of soil mechanics. It is considered that the holding power of the anchor is effected by the resistance on the flukes when they shear the sea bed. To simplify the matter, the next conditions are assumed.

- 1) The pressure exerted by the soil of the sea bed follows the Coulomb's Theory.
- 2) The side effect of the fluke is not considered, the subject being treated two-dimensionally.
- 3) The anchor shank lies horizontally on the sea bed.
- 4) The sea bed is considered to be saturated by water and perfectly loose.

The author investigated theoretically the holding power H of the anchor fluke, and have got the following formula.

$$H = f(\theta, \phi, \delta) \gamma_t h^2 B$$

where, h is the fluke length, B is the fluke breadth, γ_t is the density of the sea bed, θ is the fluke angle, ϕ is the angle of repose of the sea bed, δ is the frictional angle between the fluke and the sea bed. $f(\theta, \phi, \delta)$ have been computed numerically by an electronic computer, because of complexity. The result is that the holding power increases according to the increase of θ , ϕ , and δ .

Considering the experimental results, it is not reasonable that the holding power increases simply according to the increase of θ . The author thought that it was due to the lifting force acting on the anchor fluke, so he estimated the force with regard to JIS type anchor. In the result, the theoretical value was perfectly consistent with the experimental value: i. e., when the fluke angle exceeds a certain critical angle, the assumed condition 3) becomes not to hold, then the portion of the fluke in the sea bed decreases, and the holding power decreases.

Therefore, in order to give the holding power most efficiently to the anchor, it is necessary that the anchor is made in such a way that the weight is minimum, and the fluke angle is maximum as far as the flukes are not lifted up, and the fluke length is as long as possible. The critical fluke angle decreases according to the increase of ϕ and δ .

* 鐵装部

概 要

本研究は、アンカーの把駐力を土質力学的に解明したものである。すなわち、アンカーの爪が底質を剪断するときの抵抗が、把駐力を生ずるとの考えのもとに行なわれた。問題を単純化し

- 1) 底質の土圧はクーロンの土圧理論に従う。
- 2) 二次元問題とし、爪の側面の影響は考慮しない。
- 3) アンカーシャンクは水平に底質に接する。
- 4) 底質は水で飽和し、完全にゆるい状態と考える。

の仮定の下に、把駐力の計算を行ない、把駐力は爪の長さの2乗、爪の幅、および底質の密度に比例し、さらに爪の開き角度 θ 、底質の息角 ϕ 、および底質と爪との摩擦角 δ の関数となることを認めた。把駐力を H とすれば

$$H = f(\theta, \phi, \delta) \gamma_c h^2 B$$

$f(\theta, \phi, \delta)$ は複雑な式となるため、電子計算機による数値計算を行なった。その結果、把駐力は θ が増すとともに増大し、また ϕ 、 δ が大きい程大きい。

把駐力が θ とともに増大するのみで極大値を有しないことは、経験上から不都合である。この原因は、爪と砂との摩擦により浮上る現象によるものと考え、代表的な JIS 型アンカーについて検討した結果、理論値と経験値との完全な一致をみた。すなわち、実際のアンカーでは、ある限界の θ 以上では 3) の仮定が成立たなくなる結果、爪の埋没長さが減じ、把駐力が減少することになる。

結論としては、アンカーに最も効果的に把駐力を与えるためには、爪が浮上しない限りの最小重量と最大開き角度を持たせ、爪をなるべく長くすることであり、爪の限界開き角度は ϕ 、 δ が大きい程小さい。

目 次

1. まえがき
2. アンカーとチェーンの関係
3. アンカーの把駐力
4. 理論式の仮定および記号
5. 理論式
6. 数値計算
7. 考 察
8. 結 論

1. ま え が き

アンカーの目的はいうまでもなく、外力に抗して船を係留することにあるが、一般の静的状態ではあまり問題がないように見受けられる。しかし動的条件、例えば台風下で機関に故障を生じた場合、または緊急停止用として使用された場合、等々にアンカーが走錨し思わぬ事故を発生することがある。このようにアンカーはむしろ非常用の安全装置と考えられる面が多く、従って船舶設備規程を始め、錨試験規程、錨鎖試験規程、JIS、各船級協会規則等により、詳細にその仕様が定められている。

しかし、このように規定されているためであろうか、造船者側にとってはアンカーの把駐効果について一般に関心が薄く、むしろ使用者側において問題としている例が多いように思われる。これは問題の性質上当然とも考えられるが、一方、アンカーの把駐状況はまだ不明な点が多く、その性能や操作方法も経験的に求められている面が多い。故にアンカーの把駐効果について新しい面より検討を加え、アンカーの改善、操作の改良等に役立つ基礎的な資料を得んと試みた。

2. アンカーとチェーンの関係

アンカーの把駐状態を考慮する場合には、当然アンカーチェーンの効果をも含めて考慮しなければならない。故に本論に入る前に、チェーンの効果について簡単にふれることとする。

外力に抗してチェーンおよびアンカーが把駐している状態は図1に示され、このときチェーンは懸垂線をなす。外力に対してチェーンが十分に長ければ、チェーンの海底に接する部分の切線は水平となり、チェーンの一部は水中に懸垂し、一部は海底に横たわって把駐する。問題を簡単にするために、チェーンは水面上にて船に繋がっているものとし、記号を次の如く定めれば、それらの間には下記の関係がある。

- T : チェンにかかる張力
 H : チェンにかかる張力の水平分力
 w : チェンの単位長さの重量
 h : 懸垂線のパラメーター
 d : 水 深
 l : チェン懸垂部の海底からの長さ
 θ : チェンの切線が水平となす角
 y : 垂直座標

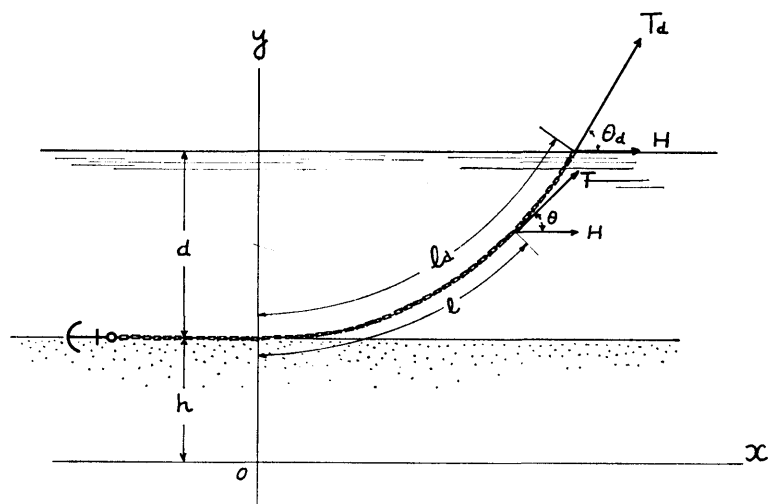


図1 アンカーおよびチェンの把駐状態

$$H = hw$$

$$T = H/\cos \theta = wy$$

$$\cos \theta = h/y$$

$$l = h \tan \theta = \sqrt{y^2 - h^2}$$

故に H が一定ならば、チェンが重い程パラメーター h は小さい。また H は水深に無関係に一定で、船にかかる外力に等しいが、張力は高い個所程大きく、ホースパイプに接する処で最高値を示す。水面上の $y=d+h$ においては、

$$T_d = w(d+h) = wd + H$$

$$\cos \theta_d = h/(d+h)$$

$$l_d = \sqrt{d(d+2h)}$$

となる。チェンの懸垂部の下端、海底に接する個所では H と T の値は一致し、アンカーおよびチェン把駐

部の抵抗と釣合う。従ってアンカーに直接かかる力は、外力からチェン把駐部の抵抗だけ差引いたものとなる。

外力が増加すればやがてチェンは全部懸垂して把駐部が無くなり、アンカーには直接外力が作用し、さらに外力が増せばアンカーシャックは斜上へ引かれ、抜錨時の姿勢と等しくなる。故にこのような条件ではむしろ把駐力が失われ、抜錨しやすいことが必要である。従ってアンカーおよびチェンの把駐効果としてはチェンが全部懸垂するまでの間確実に把駐し、且つ破損しないことが理想的だといえる。

前記諸規則によれば、船に装備すべきアンカーとチェンの諸元が定められており(表1)、且つそれらの試験荷重も与えられている。従ってアンカーにとって

表1 アンカー、チェンの諸元

Equipmt No. Q	Anchor		Chain			
	weight W (ton)	proof load H (ton)	length l (m)	weight w (kg/m)	diameter D (mm)	proof load T (ton)
2,000	2.15	39.0	225	45	47.0	63
4,000	3.75	57.0	275	78	61.0	105
6,000	5.25	69.5	300	109	72.0	138
8,000	6.55	79.5	300	139	81.5	162
10,000	7.85	87.5	300	167	89.5	181
12,000	9.20	94.5	300	190	96.5	195
14,000	10.55	101.0	325	210	105.0	207
16,000	11.90	107.0	325	229	110.0	217

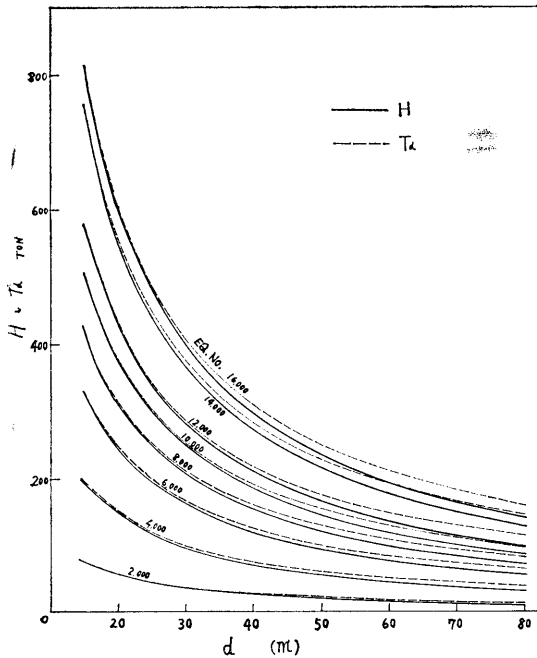


図2 限界状態における外力(1)

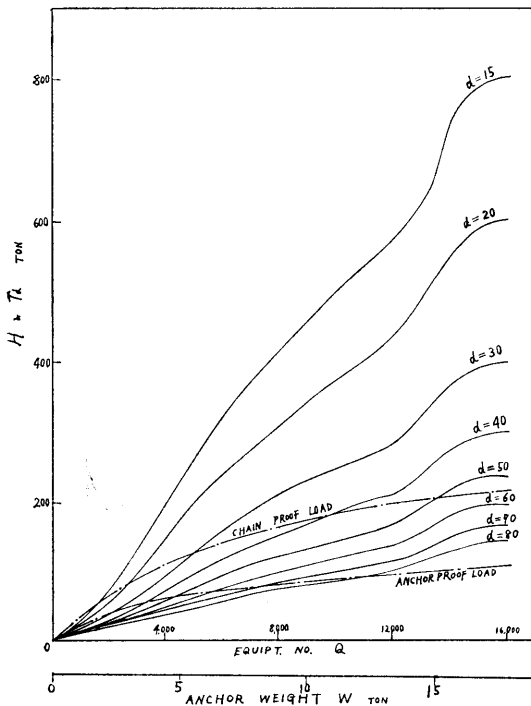


図3 限界状態における外力(2)

最も苛酷な条件、すなわちチェンを全部繰出してそれが全部懸垂してなお把駐し得たような限界状態を想定する。

外力は静的なものとして、鋼船が無桿大錨2個を備えたものとして、片舷側について計算を行なってみると図2、および3の如くなる。

すなわち水深が深い程その限界状態に必要な把駐力は低下するが、その値は極めて大きい。例えば艀装数2,000、アンカー重量2,160kgで水深50mに投錨したとき、限界状態に必要な把駐力は約23tonとなる。しかるに、普通のアンカーの把駐力係数は3~5といわれているから、把駐力は6.5~10.8tonとなり、普通の錨泊地の水深では到底把駐し得ないことが解る。すなわち、如何なる苛酷な条件下でもチェンが全部水中に懸垂することはあり得ず、必らず把駐部が存在し、アンカーは水平に曳航されて走錨する結果となる。

また図中にはアンカーとチェンの試験荷重を記してあり、上記の例ではアンカー38.3ton、チェン65.4tonである。試験荷重は使用荷重の2倍としても、アンカーは限界状態においても充分な強度を有しており、それまで走錨しないだけの把駐力を有するべきである。また把駐力係数が3~5とすれば、是非改善する余地があると考えられる。

以上問題を片舷側についてのみ考えており、両舷で双錨泊とした場合には片舷の外力は殆どとなる筈であるが、実際の外力は静的なものではなく船体は振り廻り運動を起こし、周期的に静的な外力の数倍の張力が片舷のチェンに生ずることが認められており¹⁾、走錨する危険性には大差がない。また実際にはチェンの一部は空中に懸垂し、或いは一部海底の泥の中に埋没して3つの懸垂線がつながったものとなるが、これと単一の懸垂線とした場合との差は数%に過ぎない²⁾といわれている。

要約すればアンカー、チェンとも耐力には充分余裕があり、把駐力をもっと改善されるべきものであると考えられる。またチェンには張力の少ない把駐部が必らず存在し、懸垂部の上端に最大張力が現われる。チェンはその重量によって衝撃的な外力を吸収する効果があり、重量が大きい程効果がある³⁾から、アンカーに近い把駐部のチェンは多少細くても差支えなく、かわりに懸垂部になる処を太くすれば、強度、把駐効果上とも有利になると考えられる。

3. アンカーの把駐力

アンカーの把駐力を表わすには、普通把駐力をアンカー重量で除した把駐力係数を用いる。これは把駐力はアンカーの爪にかかる土圧のモーメントに比例すると考えられるからであって、相似則が成立つ⁴⁻⁶⁾。しかし形状の異なるアンカー間の把駐力係数の関係、また海底の土質に対するその変化、等は実験や経験によって導き出されているだけであり、理論的根拠は全くないといつてよい。

アンカーが海底にあって正常な姿勢で把駐した場合、その状態は図4の如く模型化して示すことが出来る。すなわち、爪の先端Bより底質の砂は剪断されて隆起し、爪の移動につれて剪断滑り面BCが移動するとともに砂の山の高さも増し、やがて斜面AD, DCの角度が砂の息角に達すると、それ以上の砂は後方へ滑り落ち、剪断滑り面は砂山の頂C点に達して定常な把駐姿勢となる。

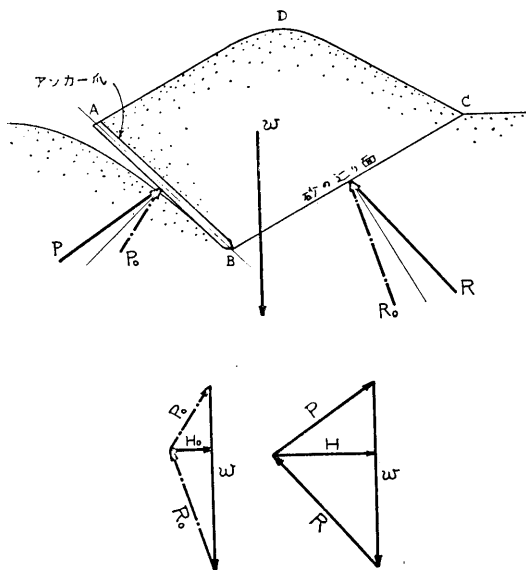


図4 アンカーの把駐状態

多くの模型実験⁷⁻¹⁰⁾ および実船実験¹¹⁻¹³⁾ では、主としてこの定常姿勢における把駐力を、各種型式のアンカーについて求めており、この姿勢に達するまでの曳航距離は、JISストックレスアンカーの模型実験では、基準寸法(アンカーヘッドの最大幅)の7~9倍を要する。

これらの実験では、広義の把駐力をさらに分類して定義することが提唱されており、それらを整理すると次の如くなる。

- 1) 走錨抵抗, 走錨把駐力, dragging pull アンカーが或る速度で走錨中に受ける全抵抗をいう。すなわち走錨せしめるのに必要にして最小の力であって、走錨中アンカーシャックルにかかる力に等しい。
- 2) 静止把駐力, 保証把駐力¹⁴⁾ 走錨速度が無限に零に接近したときの走錨抵抗であって、アンカーが走錨しない限りの最大の力をいう。
- 3) 把駐力(狭義) holding pull アンカーが把駐姿勢を保つのに必要にして最小の力であって、走錨後停止したときにアンカーシャックルに存続している力に等しい。

この中 1) および 3) は実験により測定しうる。走錨抵抗は曳航速度の関数であり、一般に速度とともに増加する傾向を持つ。静止把駐力はこの関係(図5)から、速度0の時の値として定義されるもので、直接

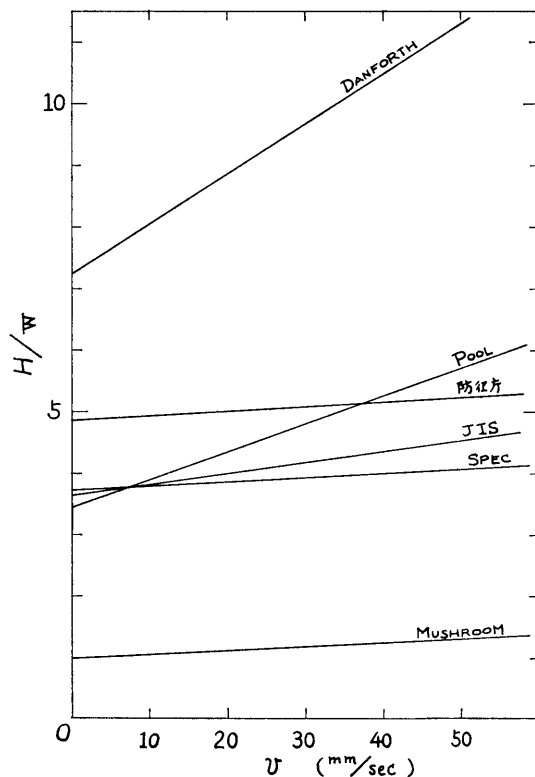


図5 各種アンカーの走錨抵抗

計測することは出来ないが、底質に対してアンカー固有の値ということが出来、外力がこれ以下ならば把駐可能と保証しうる最も重要な値である。holding pull はアンカーが図4に示すような把駐姿勢を示す下限の値であって、外力がこれ以下となれば爪は後方へ倒れるだけであり、従って把駐効果上さして重要な意味はない（故にholding pull という名称はあまり適当ではないと思われる。但し実験によれば、これと静止把駐力との値が比較的好く近似するものがある）。いうまでもなく、3者の中では1)が最大、3)が最小である。

以上3つの把駐力値を図4において考察してみると、爪と砂の剪断滑り面で囲まれる砂 $ABCD$ の重量と爪および滑り面の反力の釣合いということが出来る。すなわち、アンカーの爪が外力により図の右方へ走锚しようとするれば、砂 $ABCD$ は上方へ押し上げられ、爪および滑り面に接する砂は上方へ滑ろうとし、爪と底質の反力はそれぞれ P 、 R の如く働く。従ってこのときの爪の把駐力は P の水平分力となる。このような土圧の関係を土質力学では受動土圧と呼んでおり、静止把駐力の場合に相当する。

次に、外力が減少して或る値に達すると、砂の重量のために爪が左方へ倒れようとする釣合いの点がある。このときには砂は下方へ落ちようとし、爪および滑り面に接する砂は下方へ滑ろうとし、爪と底質の反力はそれぞれ P_0 、 R_0 の如く働く。従ってこのときの爪の把駐力は P_0 の水平分力となり、このような土圧を主動土圧と呼び、holding pull の場合に相当する。但し砂の滑り面 BC は受動土圧のときの位置より、一般に上方に生ずる。

走锚抵抗の場合は、外力が大きいため受動土圧の釣合いが失なわれて右方へ走锚する場合である。速度が大きい程砂の斜面 ADC は息角を超えて高く隆起し、また砂の剪断抵抗は剪断速度とともに増加するため、走锚抵抗は増大すると考えられる。

4. 理論式の仮定および記号

以上の考えにもとづき、アンカーの把駐力を理論的に導くため、問題を単純化して次の仮定をおいた。

1) 土圧はクーロンの土圧理論に従う。

これはかなり古典的な理論であるが、アンカーにとって都合がよいので利用した。クーロンの土圧理論によれば、底質の剪断滑り面は平面と仮定

し、主動土圧の場合、滑り面とアンカーの爪で囲まれる砂の爪に及ぼす土圧が最大になる位置に滑り面が生ずる。また受動土圧の場合は、土圧が最小になる位置に滑り面が生ずる。

1) 底質およびアンカーの爪の運動は二次元とする。

すなわちアンカーの爪幅は一定とし、爪両側の剪断面の影響は考慮しない。実際の把駐問題は勿論三次元であるが、問題を単純化するため二次元とした。

3) アンカーシャングは底質表面と一致し且つ水平とする。

この仮定はJIS型を始め一般のアンカーの定常的な把駐姿勢ではほぼ当てはまる。但し一部の或る種のアンカーでは、爪が深く埋没したり、又はシャングが斜めとなる等、この仮定が成立たないものもある。

4) 底質は水で飽和し完全にゆるい状態とする。

従って底質は流動性を有し、傾斜面は砂の内部摩擦角と等しい息角を保つ。実際の海底の条件は種々様々であり、また深さ方向にも軟硬の差があるが、模型実験の条件はこの仮定を満足するものである。

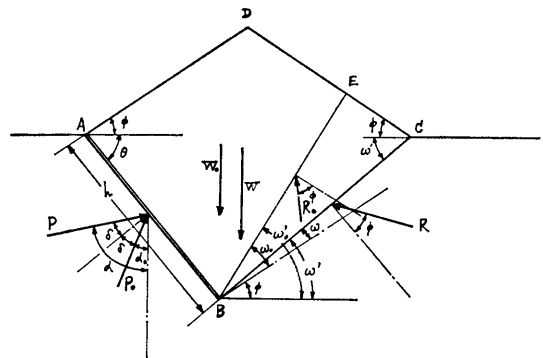


図6 仮定の把駐状態

受動土圧の場合の記号を次の如く定め、主動土圧の場合にはこれに o の添字を附すこととする。

H : アンカーヘッドピンにかかる水平外力（静止把駐力, H_o : holding pull)

R : 剪断滑り面に生ずる底質の反力

P : アンカー爪に生ずる土圧の反力

W : 爪と滑り面で囲まれる砂の重量

h : 爪の長さ

B : 爪の幅
 θ : 爪の開き角度
 ϕ : 水中における砂の息角 (内部摩擦角)
 δ : 砂と爪との摩擦角 (水中)
 α : P と垂直線のなす角
 ω' : 滑り面が水平線となす角
 ω : 滑り面が底質の息角となす角
 γ_t : 底質の湿潤密度
 w : 爪の重量
 F : 爪の面に沿って爪に作用する力

5. 理論式

図6より明らかな通り, 受動土圧の場合にはまず次の関係がなり立つ。

$$\begin{aligned}
 W &= \gamma_t \cdot \square ABCD \cdot B \\
 &= \gamma_t B (\triangle ABC + \triangle ACD) \\
 &= \frac{\gamma_t h^2 B}{2} \frac{\sin(\omega + \phi + \theta)}{\sin(\omega + \phi)} \left\{ \sin\theta + \frac{\sin(\omega + \phi + \theta)}{\sin(\omega + \phi)} \frac{\tan\phi}{2} \right\} \dots\dots(1)
 \end{aligned}$$

P および R は爪および滑り面の垂線に対し, それぞれ摩擦角だけ傾いて作用し, 仮定の 4) により滑り面の摩擦角は息角 ϕ に等しい。従って W, P, R の力の釣合いの関係より

$$\frac{P}{\sin(\omega + 2\phi)} = \frac{W}{\sin\{(\theta + \delta) + (\omega + 2\phi)\}}$$

$$\therefore P = \frac{\sin(\omega + 2\phi)}{\sin\{(\theta + \delta) + (\omega + 2\phi)\}} W \dots\dots(2)$$

仮定の 1) により, $dP/d\omega = 0$ になるような位置に滑り面 BC が定まる。 W の中, $\triangle ACD$ に相当する部分がないか, 或いは一定重量の場合は周知の関係があり, レブハンの定理, ポンスレの作図法等があるが, 本問題では $\triangle ACD$ が ω の関数となる。

(2)式より $dP/d\omega = 0$ とおけば

$$W = - \frac{\sin\{(\theta + \delta) + (\omega + 2\phi)\} \sin(\omega + 2\phi)}{\sin(\theta + \delta)} \frac{dW}{d\omega} \dots\dots(3)$$

また(1)式より

$$\frac{dW}{d\omega} = - \frac{\gamma_t h^2 B}{2} \left\{ \sin^2\theta + \frac{\sin(\omega + \phi + \theta)}{\sin^2(\omega + \phi)} \sin\theta \tan\phi \right\} / \sin^2(\omega + \phi) \dots\dots(4)$$

(3), (4)式より

$$W = - \frac{\gamma_t h^2 B}{2} \frac{\sin\{(\theta + \delta) + (\omega + 2\phi)\} \sin(\omega + 2\phi)}{\sin(\theta + \delta) \sin^2(\omega + \phi)} \left\{ \sin^2\theta + \frac{\sin(\omega + \phi + \theta)}{\sin(\omega + \phi)} \sin\theta \tan\phi \right\} \dots\dots(5)$$

(1), (5)式より W を消去すれば ω に関する 3 次式を得る。 $\omega' = \omega + \phi$, $\alpha = \theta + \delta$ の関係を用いて整理すれば

$$\begin{aligned}
 a \tan^3\omega' + b \tan^2\omega' + c \tan\omega' + d &= 0 \\
 a &= 2\sin^2\theta \cos\phi \cos(\alpha + \phi) + \sin 2\theta \sin\phi \cos(\alpha + \phi) - \sin 2\theta \sin\alpha - \cos^2\theta \sin\alpha \tan\phi \\
 b &= 2\sin^2\theta \sin(\alpha + 2\phi) + 2\sin^2\theta \sin\phi \cos(\alpha + \phi) + \sin 2\theta \sin(\alpha + 2\phi) \tan\phi - 2\sin^2\theta \sin\alpha - \sin 2\theta \sin\alpha \tan\phi \\
 c &= 2\sin^2\theta \sin\phi \sin(\alpha + \phi) + 2\sin^2\theta \tan\phi \sin(\alpha + 2\phi) + \sin 2\theta \tan\phi \sin\phi \sin(\alpha + \phi) - \sin^2\theta \sin\alpha \tan\phi \\
 d &= 2\sin^2\theta \sin(\alpha + \phi) \sin\phi \tan\phi \dots\dots(6)
 \end{aligned}$$

(6)式を解いて ω' を求めれば, (1), (2)式より W, P が求まり,

$$H = P \sin(\theta + \delta) \dots\dots(7)$$

よりアンカーの爪の静止把駐力が求まる。

次に主動土圧の場合を考える。この場合には砂は重力の作用によりアンカーの爪を押し倒そうとし, 剪断滑り面は図6の BE の位置となる。従って

$$\begin{aligned}
 W_0 &= \gamma_t \cdot \square ABED \cdot B \\
 &= \gamma_t B (\triangle ABF + \triangle ADC - \triangle EFC) \\
 &= \frac{\gamma_t h^2 B}{2} \left[\frac{\sin(\omega_0 + \phi + \theta)}{\sin(\omega_0 + \phi)} \sin\theta + \frac{1}{2} \tan\phi \frac{\sin^2(\omega + \phi + \theta)}{\sin^2(\omega + \phi)} - \frac{\sin(\omega_0 + \phi)}{\sin(\omega_0 + 2\phi)} \left\{ \frac{\sin(\omega + \phi + \theta)}{\sin(\omega + \phi)} - \frac{\sin(\omega_0 + \phi + \theta)}{\sin(\omega_0 + \phi)} \right\}^2 \sin\phi \right] \dots\dots(8)
 \end{aligned}$$

W_0, P_0, R_0 の釣合いの関係より

$$P_0 = \frac{\sin\omega_0}{\sin(\alpha_0 + \omega_0)} W_0 \dots\dots(9)$$

前回と同じく, 仮定 1) によって $dP_0/d\omega_0 = 0$ になるような位置に滑り面 BE が定まる。受動土圧の時とは砂の運動が逆となるため, P_0, R_0 の作用する方向も逆となる。 W_0 は ω_0 の関数であるばかりでなく, さきに得た ω の関数でもあるので, 理論式は一層複雑となる。

(9)式より $dPo/d\omega_0 = 0$ とおけば

$$W_0 = - \frac{\sin \omega_0 \sin (\alpha_0 + \omega_0)}{\sin \alpha_0} \cdot \frac{dW_0}{d\omega_0} \dots\dots\dots(10)$$

また(8)式より

$$\frac{dW_0}{d\omega_0} = - \frac{\gamma_t h^2 B}{2} \left[\frac{\sin \theta}{\sin (\omega_0 + \phi)} + \frac{\sin \phi}{\sin (\omega_0 + 2\phi)} \right. \\ \left. \left\{ \frac{\sin (\omega_0 + \phi + \theta)}{\sin (\omega_0 + \phi)} - \frac{\sin (\omega_0 + \phi + \theta)}{\sin (\omega_0 + \phi)} \right\} \right]^2 \dots\dots\dots(11)$$

(8), (10), (11)式より W_0 , $dW_0/d\omega_0$ を消去すれば ω_0 に関する次の4次式を得る。但し $\alpha_0 = \theta - \delta \omega'_0 = \omega_0 + \phi$ である。

$$a_0 \tan^4 \omega_0 + b_0 \tan^3 \omega_0 + c_0 \tan^2 \omega_0 + d_0 \tan \omega_0 \\ + e_0 = 0$$

$$a_0 = 2 \sin \alpha_0 \sin^2 \omega' \sin \theta \cdot \cos \phi \cos (\phi + \theta) \cos^2 2\phi \\ + \sin \alpha_0 \tan \phi \sin^2 (\omega' + \theta) \cos^2 \phi \cos^2 2\phi \\ - 2 \sin \alpha_0 \sin \phi \sin^2 (\omega' + \theta) \cos^3 \phi \cos 2\phi \\ + 4 \sin \alpha_0 \sin \omega' \sin \phi \sin (\omega' + \theta) \cos^2 \phi \\ \cos (\phi + \theta) \cos 2\phi \\ - 2 \sin \alpha_0 \sin^2 \omega' \sin \phi \cos \phi \cos^2 (\phi + \theta) \cos 2\phi \\ - 2 \sin^2 \omega' \sin^2 \theta \cos^2 2\phi \cos \alpha_0 \\ - 4 \sin \omega' \sin \phi \sin (\omega' + \theta) \sin \theta \cos \phi \cos 2\phi \\ \cos \alpha_0 \\ + 4 \sin^2 \omega' \sin \phi \sin \theta \cos (\phi + \theta) \cos 2\phi \cos \alpha_0 \\ - 2 \sin^2 \phi \sin (\omega' + \theta) \cos^2 \phi \cos \alpha_0 \\ + 4 \sin \omega' \sin^2 \phi \sin (\omega' + \theta) \cos \phi \cos (\phi + \theta) \\ \cos \alpha_0 \\ - 2 \sin^2 \omega' \sin^2 \phi \cos^2 (\phi + \theta) \cos \alpha_0$$

$$b_0 = 2 \sin \alpha_0 \sin^2 \omega' \sin \theta \{ \cos \phi \cos (\phi + \theta) \sin 4\phi \\ + \sin (2\phi + \theta) \cos^2 2\phi \} \\ + \sin \alpha_0 \tan \phi \sin^2 (\omega' + \theta) \{ \cos^2 \phi \sin 4\phi + \sin \\ 2\phi \cos^2 2\phi \} \\ - 2 \sin \alpha_0 \sin \phi \sin^2 (\omega' + \theta) \cos^2 \phi \{ 3 \sin \phi \cos \\ 2\phi + \cos \phi \sin 2\phi \} \\ + 4 \sin \alpha_0 \sin \omega' \sin \phi \sin (\omega' + \theta) \{ \cos^2 \phi \sin \\ (3\phi + \theta) + \frac{1}{2} \sin 4\phi \cos (\phi + \theta) \} \\ - 2 \sin \alpha_0 \sin^2 \omega' \sin \phi \{ \cos \phi \cos 2\phi \sin 2 \\ (\phi + \theta) + \sin 3\phi \cos^2 (\phi + \theta) \} \\ - 2 \sin^2 \omega' \sin^2 \theta \{ \sin 4\phi \cos \alpha_0 + \cos^2 2\phi \\ \sin \alpha_0 \} \\ - 4 \sin \omega' \sin \theta \sin \phi \sin (\omega' + \theta) \{ \sin 3\phi \\ \cos \alpha_0 + \cos \phi \cos 2\phi \sin \alpha_0 \} \\ + 4 \sin^2 \omega' \sin \theta \sin \phi \{ \sin (2\phi + \alpha_0) \cos$$

$$(\phi + \theta) + \cos 2\phi \cos \alpha_0 \sin (\phi + \theta) \} \\ - 2 \sin^2 \phi \sin (\omega' + \theta) \{ \sin 2\phi \cos \alpha_0 + \cos^2 \phi \\ \sin \alpha_0 \} \\ + 4 \sin \omega' \sin^2 \phi \sin (\omega' + \theta) \{ \sin (\phi + \alpha_0) \\ \cos (\phi + \theta) + \cos \phi \cos \alpha_0 \sin (\phi + \theta) \} \\ - 2 \sin^2 \omega' \sin^2 \phi \{ \cos \alpha_0 \sin 2 (\phi + \theta) + \sin \alpha_0 \\ \cos^2 (\phi + \theta) \}$$

$$c_0 = 2 \sin \alpha_0 \sin^2 \omega' \sin \theta \{ \cos \phi \cos (\phi + \theta) \sin^2 2\phi \\ + \sin (2\phi + \theta) \sin 4\phi + \sin \phi \sin (\phi + \theta) \\ \cos^2 2\phi \} \\ + \sin \alpha_0 \tan \phi \sin^2 (\omega' + \theta) \{ \cos^2 \phi \sin^2 2\phi + \\ \sin 2\phi \sin 4\phi + \sin^2 \phi \cos^2 2\phi \} \\ - 2 \sin \alpha_0 \sin \phi \sin^2 (\omega' + \theta) \cdot 3 \cos \phi \sin \phi \\ \sin 3\phi \\ + 4 \sin \alpha_0 \sin \omega' \sin \phi \sin (\omega' + \theta) \{ \cos^2 \phi \sin 2\phi \\ \sin (\phi + \theta) + \sin 2\phi \sin (3\phi + \theta) + \sin^2 \phi \\ \cos 2\phi \cos (\phi + \theta) \} \\ - 2 \sin \alpha_0 \sin^2 \omega' \sin \phi \{ \cos \phi \cos 2\phi \sin^2 (\phi + \theta) \\ + \sin 3\phi \sin 2(\phi + \theta) + \sin \phi \sin 2\phi \cos^2 (\phi \\ + \theta) \} \\ - 2 \sin^2 \omega' \sin^2 \theta \{ \sin^2 2\phi \cos \alpha_0 + \sin 4\phi \sin \alpha_0 \} \\ - 4 \sin \omega' \sin \theta \sin \phi \sin (\omega' + \theta) \{ \sin \phi \sin 2\phi \\ \cos \alpha_0 + \sin 3\phi \sin \alpha_0 \} \\ + 4 \sin^2 \omega' \sin \theta \sin \phi \{ \sin 2\phi \sin \alpha_0 \cos (\phi \\ + \theta) + \sin (2\phi + \alpha_0) \sin (\phi + \theta) \} \\ - 2 \sin^2 \phi \sin (\omega' + \theta) \{ \sin^2 \phi \cos \alpha_0 + \sin 2\phi \\ \sin \alpha_0 \} \\ + 4 \sin \omega' \sin^2 \phi \sin (\omega' + \theta) \{ \sin (\phi + \alpha_0) \\ \sin (\phi + \theta) + \sin \phi \sin \alpha_0 \cos (\phi + \theta) \} \\ - 2 \sin^2 \omega' \sin^2 \phi \{ \cos \alpha_0 \sin^2 (\phi + \theta) + \sin \\ \alpha_0 \sin 2 (\phi + \theta) \}$$

$$d_0 = 2 \sin \alpha_0 \sin^2 \omega' \sin \theta \{ \sin (2\phi + \theta) \sin^2 2\phi + \\ \sin \phi \sin (\phi + \theta) \sin 4\phi \} \\ + \sin \alpha_0 \tan \phi \sin^2 (\omega' + \theta) \{ \sin^2 2\phi + \sin^2 \phi \\ \sin 4\phi \} \\ - 2 \sin \alpha_0 \sin^3 \phi \sin^2 (\omega' + \theta) \{ \sin \phi \cos 2\phi + \\ 3 \cos \phi \sin 2\phi \} \\ + 4 \sin \alpha_0 \sin \omega' \sin \phi \sin (\omega' + \theta) \{ \sin^2 2\phi \sin \\ (\phi + \theta) + \sin^2 \phi \sin (3\phi + \theta) \} \\ - 2 \sin \alpha_0 \sin^2 \omega' \sin \phi \{ \sin 3\phi \sin^2 (\phi + \theta) \\ + \sin \phi \sin 2\phi \sin 2 (\phi + \theta) \} \\ - 2 \sin^2 \omega' \sin^2 \theta \sin^2 2\phi \sin \alpha_0$$

$$\begin{aligned}
 & -4 \sin \omega' \sin \theta \sin^2 \phi \sin (\omega' + \theta) \sin 2\phi \sin \alpha_0 \\
 & + 4 \sin^2 \omega' \sin \theta \sin \phi \sin 2\phi \sin \alpha_0 \sin (\phi + \theta) \\
 & - 2 \sin^4 \phi \sin (\omega' + \theta) \sin \alpha_0 \\
 & + 4 \sin \omega' \sin^3 \phi \sin (\omega' + \theta) \sin \alpha_0 \sin (\phi + \theta) \\
 & - 2 \sin^2 \omega' \sin^2 \phi \sin \alpha_0 \sin^2 (\phi + \theta) \\
 e_0 = & 2 \sin \alpha_0 \sin^2 \omega' \sin \theta \sin \phi \sin (\phi + \theta) \sin^2 2\phi \\
 & + \sin \alpha_0 \tan \phi \sin^2 (\omega' + \theta) \sin^2 \phi \sin^2 2\phi \\
 & - 2 \sin \alpha_0 \sin^4 \phi \sin^2 (\omega' + \theta) \sin 2\phi \\
 & + 4 \sin \alpha_0 \sin \omega' \sin^3 \phi \sin (\omega' + \theta) \sin 2\phi \sin (\phi + \theta) \\
 & - 2 \sin \alpha_0 \sin^2 \omega' \sin^2 \phi \sin 2\phi \sin^2 (\phi + \theta)
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

(12)式を解いて ω_0 を求めれば, (8), (9)式より W_0 , P_0 が求まり

$$H_0 = P_0 \sin (\theta - \delta) \tag{13}$$

より, アンカー爪の holding pull が求まる。

上記理論式より, まず把駐力は爪長さの2乗, 爪の幅及び底質の密度に比例することが認められる。従って実際の3次元問題においては

$$H = c_1 l^2 B \tag{14}$$

となり, アンカーの形状が相似ならば把駐力はその重量に比例することを立証しうる。

比例係数 c は, θ, ϕ, δ の関数であるとともに, アンカーの形状 (主として爪幅の形状) により定まる常数 C_1 , 爪の間隔により定まる常数 C_2 , その他の形状係数 C_3 の関数と考えて差支えないであろう。

すなわち

$$C = f (\theta, \phi, \delta) \cdot f' (C_1, C_2, C_3) \tag{15}$$

6. 数値計算

(6), (12)式はあまりに複雑であって, より簡単に整理したり, または近似式を求めることも困難と思われるので, 電子計算機により数値計算を行なった。

計算に使用する数値は, 一般にアンカーの模型実験で遭遇する条件を包括するように配慮し, 爪の開き角度 θ は35~55度 (5度間隔) 砂の内部摩擦角 ϕ は30~38度 (2度間隔), 砂と爪面との摩擦角 δ は24~32度 (2度間隔) とし, 計 125種の組み合わせを受動土圧, 主動土圧についてそれぞれ計算した。使用した計算機は NEAC 2206 であってフローチャートを図7に示す。

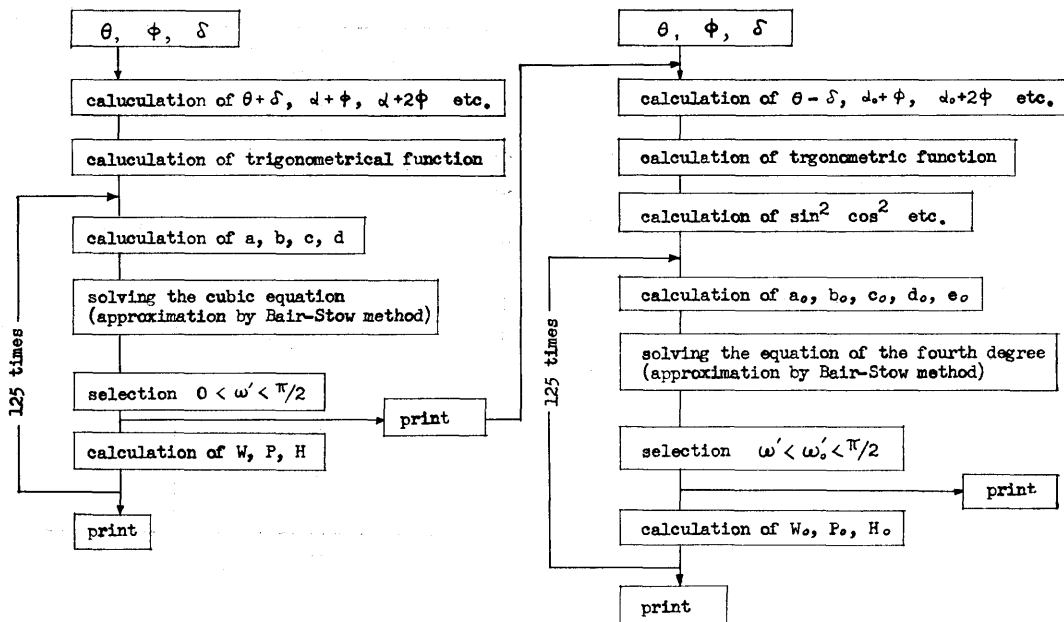


図7 数値計算フローチャート

プログラム作成上では特に問題はなかったが、高次代数方程式の根の中より適当な ω を選択するに当って一部 $\omega' < \phi$ となり(レブハンの定理に於いては常に $\omega' > \phi$ であるため、初めは $\pi/2 > \omega' > \phi$ として選択した)、その原因を見出すのに手間取った。このように ω' が小さくなる理由は、隆起した砂(図6の ΔACD)の影響と推定される。

また、 θ , ϕ , および δ がある組合せの場合の主動土圧において、 ω' の解が得られなかった。この原因は、4根の中、 ω' を除いた他の3根が重根となり、近似解法では不可能となったものである。

受動土圧の場合の計算結果を図8~19に示す。図8~12は、各々 δ を一定としたときの、 θ に対する ω' および $W/\gamma_i h^2 B$ の変化を示し、図13に $\phi=34$ としたときの変化を一例として示してある。また、図14~18は同じく δ を各々一定としたときの $H/\gamma_i h^2 B$ および $P/\gamma_i h^2 B$ の変化を示し、図19は $\phi=34$ のときの一例である。

これらの図から明らかなように、 θ が増加するとともに ω' は減少し、図6の $\square ABCD$ の面積が増加する結果、 W, P, H ともに増加する。また ϕ および δ が大となっても同一の傾向を示し、やはり静止把駐力は増大する。

主動土圧の場合は、図20~23に示すように $W/\gamma_i h^2 B, H/\gamma_i h^2 B$ および $P/\gamma_i h^2 B$ の変化が極めて少ないため、 $\delta=28$ および $\phi=34$ のときの例のみを示した。

この場合には、 θ の変化に応じて ω' は極大値を有し、その値は δ が大きい程小さく、且つ θ の大きい方に生ずる。また θ が小さい程同じ傾向となる。しかるに W_0 は殆んど変化がなく、従って H_0, P_0 ともにあまり変化がない。また ϕ, δ による影響も少ない。 ω' に極大値があるのにも抱わらず、 W_0 があまり変化せずただ増加するだけであるのは一見奇妙に思われるが、これは図24に示すごとく、 θ に応じて ω' が変化し、従って隆起している山の量が違うからである。図の各 $\square ABED$ の面積を計ってみると W_0 の正しいことが了解される。

7. 考 察

上記計算結果より、アンカーの静止把駐力 H は爪の開き角度 θ が大きい程大きく、また底質の砂の息角 ϕ ,

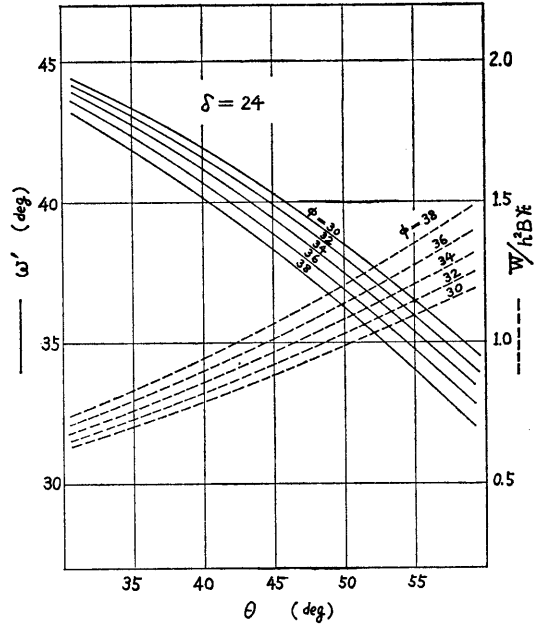


図8 受動土圧 ($\omega', W, \delta=24$)

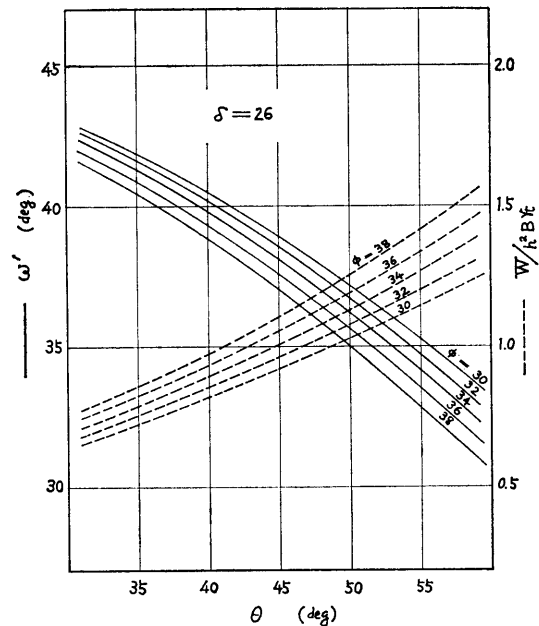


図9 受動土圧 ($\omega', W, \delta=26$)

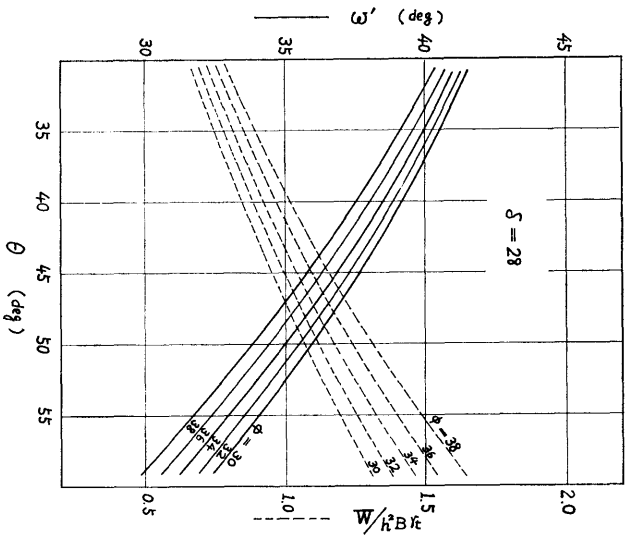


図 10 受動土圧 (ω' , W , $\delta = 28$)

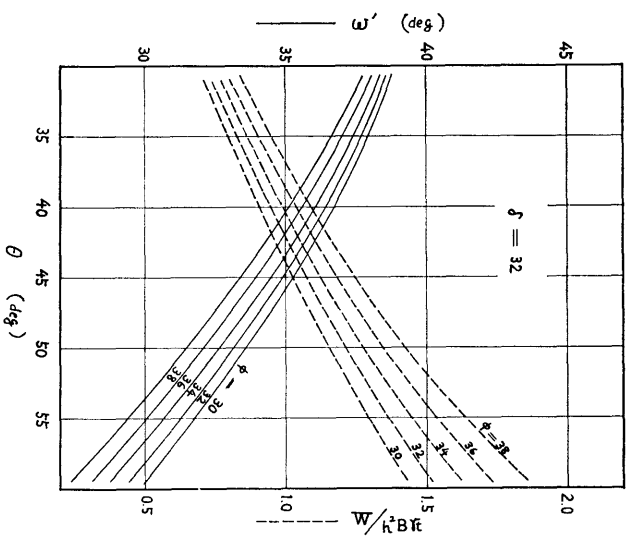


図 12 受動土圧 (ω' , W , $\delta = 32$)

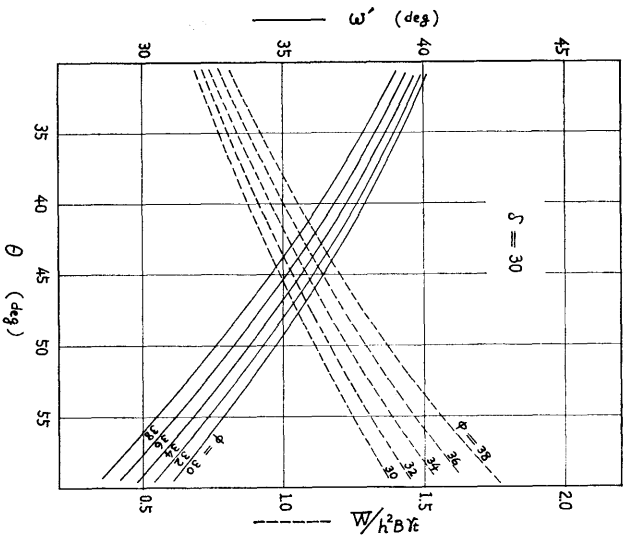


図 11 受動土圧 (ω' , W , $\delta = 30$)

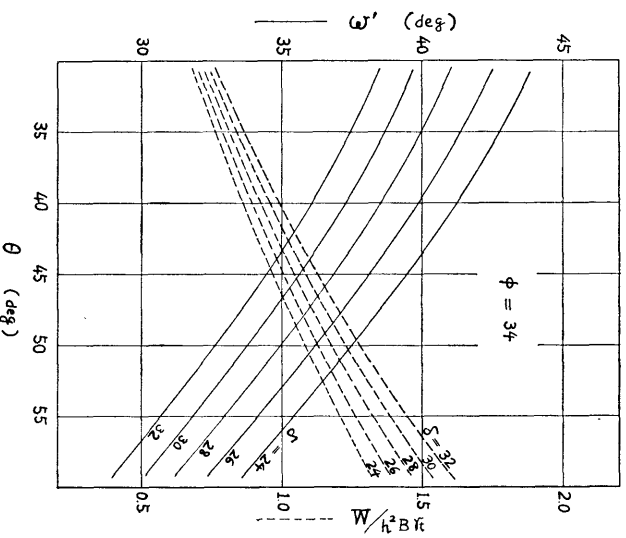


図 13 受動土圧 (ω' , W , $\phi = 34$)

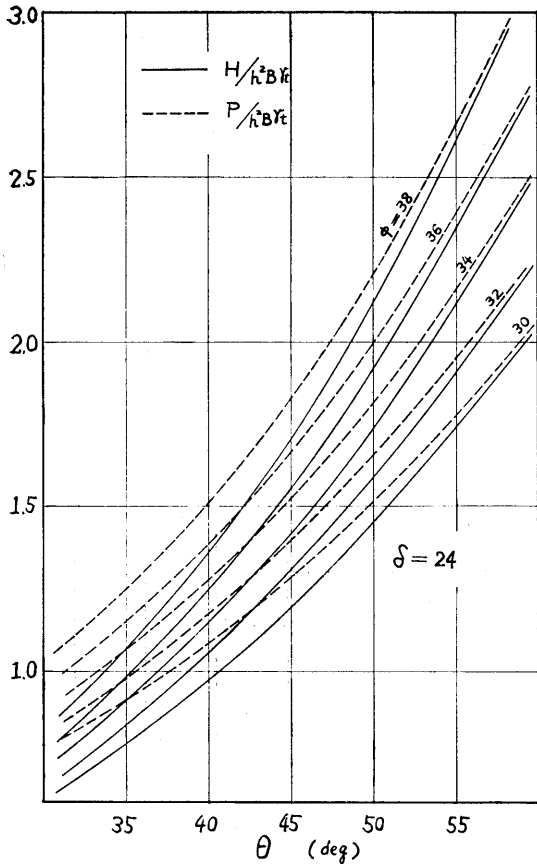


图 14 受動土圧 ($H, P, \delta=24$)

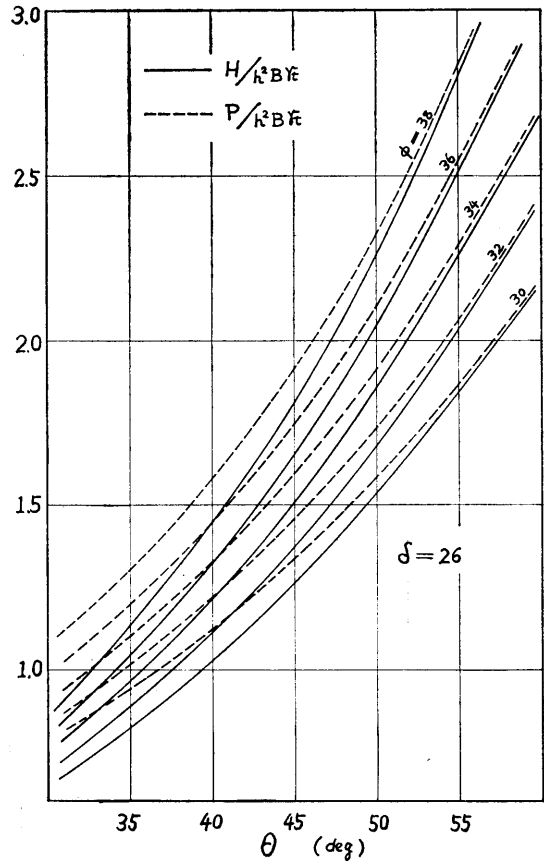


图 15 受動土圧 ($H, P, \delta=26$)

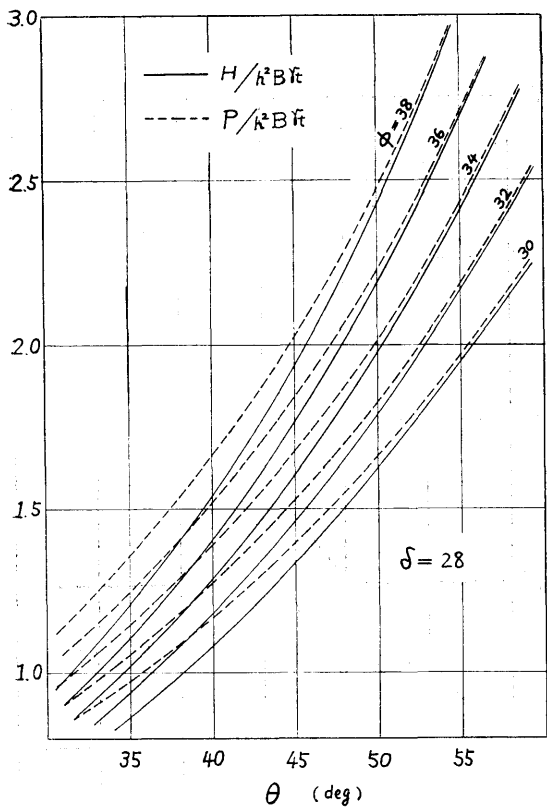


图 16 受動土圧 ($H, P, \delta=28$)

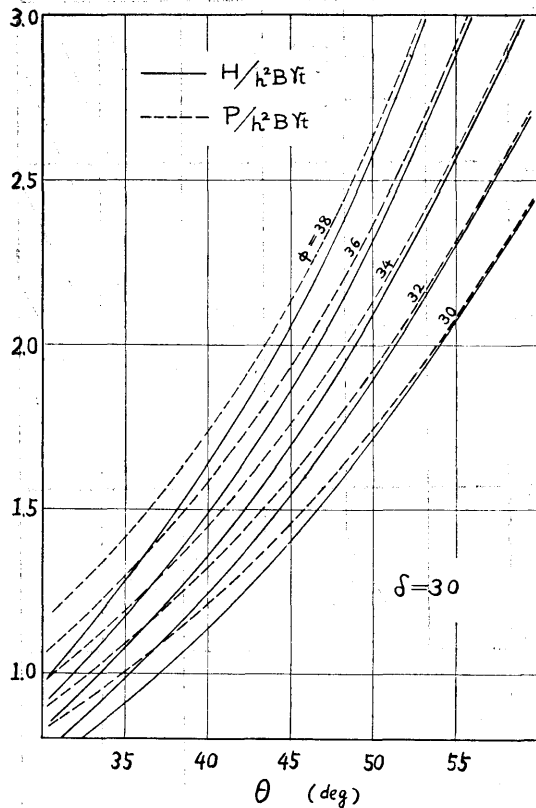


图 17 受動土圧 ($H, P, \delta=30$)

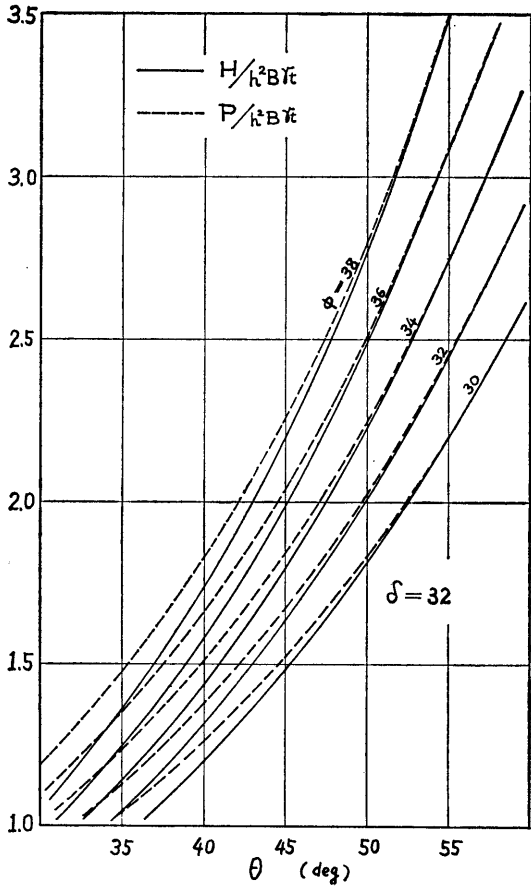


図 18 受動土圧 ($H, P, \delta = 32$)

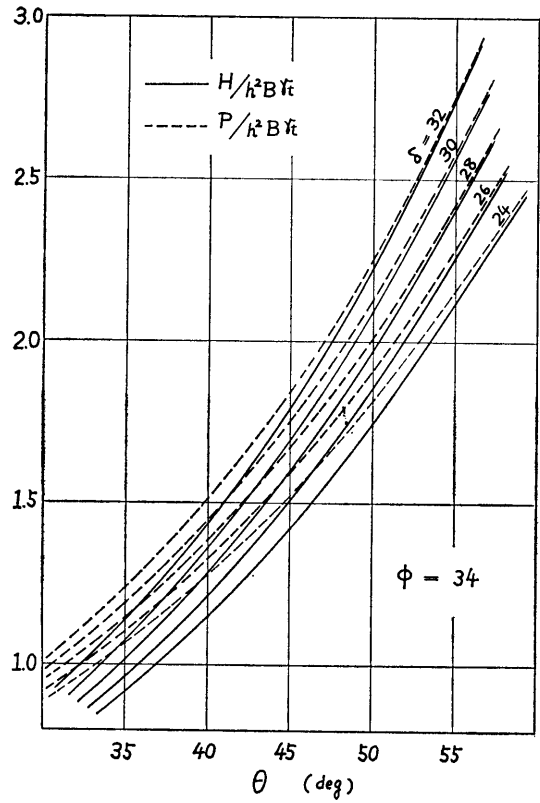


図 19 受動土圧 ($H, P, \phi = 34$)

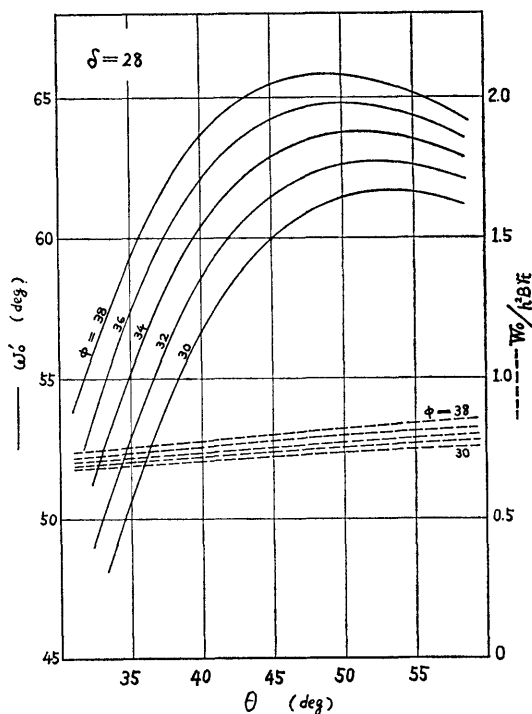


图 20 主动土压 ($\omega', W_0, \delta=28$)

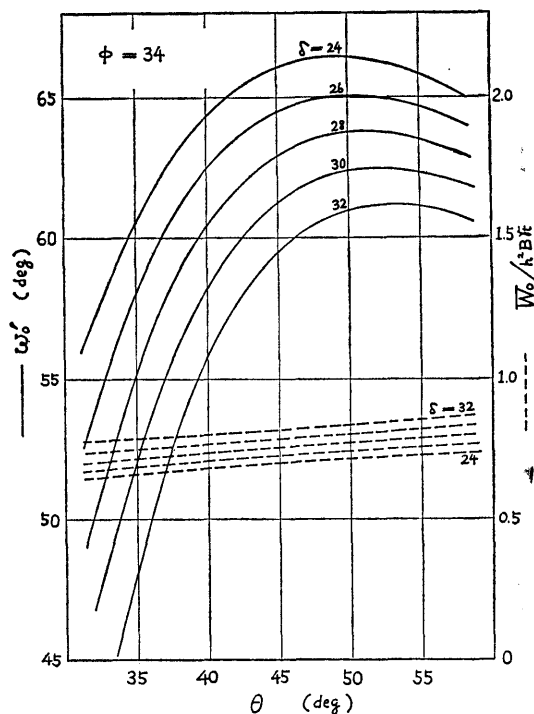


图 21 主动土压 ($\omega', W_0, \phi=34$)

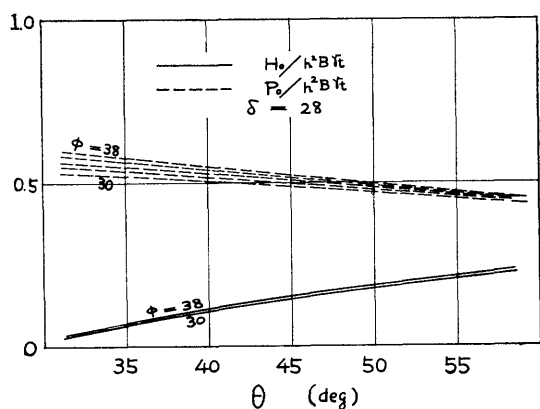


图 22 主动土压 ($H_0, P_0, \delta=28$)

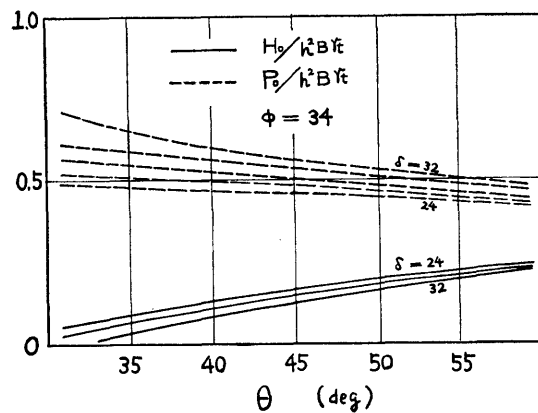


图 23 主动土压 ($H_0, P_0, \phi=34$)

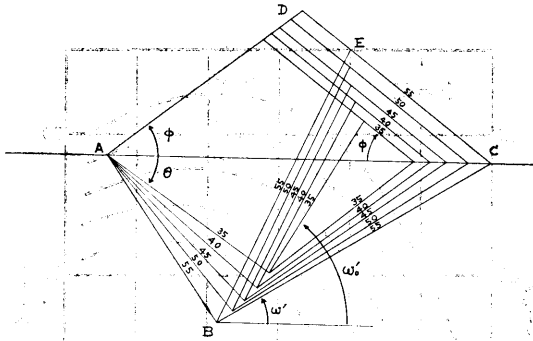


図 24 剪断滑り面 ($\phi=38, \delta=28$)

爪面との摩擦角 δ が大きい程それぞれ大となる。把駐力が砂の息角、および砂と爪面との摩擦が大きい程大となることは常識的に予想しうるが、爪の開き角度には、把駐力を最大にするある最適値があるものと考えられる。従って数値計算の範囲外の、おそらく $\theta \approx 90$ 附近において最大値が表われるものと推定せざるを得ない。

しかし、実際のアンカーにおいては、実験上からもまた経験上からも $40 < \theta < 50$ の範囲で最も大きな把駐力を示すものが多い。この理由について考察を加えてみると、土圧 P により爪を上方へ引上げようとする分力 F が存在している故と考えられる (図 25)。 F の値は P の値に応じ θ が大となる程大きくなるものであ

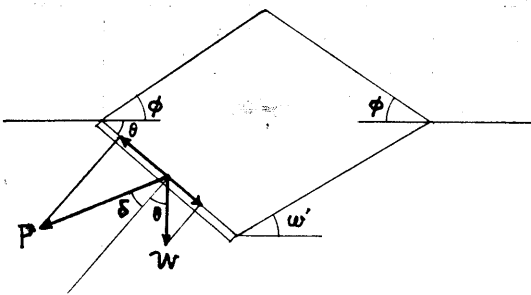


図 25 爪に生ずる浮上力

り、ある限界以上では爪が浮上りこの結果 h が減少し従って把駐力も減少する。本理論式においては、結局 3) の仮定が成立たなくなるためと考えられる。爪の背面に生ずる砂との摩擦、水中の浮力等を無視して考えれば、 F は砂との摩擦で爪が引上げられる力と、爪の自重で沈む力との差である。

$$F/\gamma h^2 B = (P/\gamma h^2 B) \sin \delta - (w/\gamma h^2 B) \sin \theta \dots (16)$$

但し w : 爪の重量

$F/\gamma h^2 B < 0$ ならば爪は底質に埋没するが、 $F/\gamma h^2 B > 0$ となれば爪は曳航されるにつれて浮上ることになる、実際にこのようなアンカーでは始めから爪が全部埋没せず、 $F = 0$ の点で定常な把駐姿勢となり、仮定の 3)、および図 6 が成立しないということになる。爪の長さ (埋没している長さ h) は把駐力に対し 2 乗で比例する故、爪長さが減れば把駐力は減少し、さらにまた埋没していない把駐効果のない部分の重量を余分に附加しているために、把駐力係数は極めて低くなり、設計の悪いアンカーといえる。

JIS 型のストックレスアンカーを例にとり、この F の値を検討してみると次の通りである。アンカー重量を M ton とすれば、シャンクを除いた部分の重量は $3M/5$ 以上となっている故⁽¹⁵⁾、片方の爪のみを考えて

$$w = 0.3M \quad (\text{ton})$$

また爪の長さはヘッドピンの中心より爪尖端までと考え

$$h = 0.738 \times 1.15 \times \sqrt[3]{M} \quad (m)$$

爪の幅は最大幅をとり

$$B = 0.23 \times 1.15 \times \sqrt[3]{M} \quad (m)$$

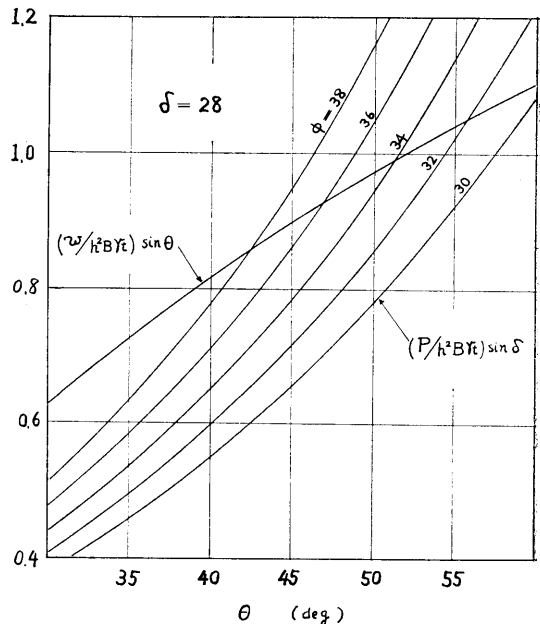


図 26 JIS型アンカーの限界開き角

γ は約 2.0 であるから、 $w/\gamma h^2 B = 1.27$ となる。図 26 は、 $\delta = 28$ の場合を例にとって、図 16 から求めた $(P/\gamma h^2 B) \sin \delta$ 、および上記の値を用いた $(w/\gamma h^2 B) \sin \theta$ の図である。両曲線の交点は $F=0$ となる点を示し、それより θ が大となれば爪が浮上り、 h は減少する。図から明らかな通り、砂の息角 ϕ が大きい程この限界開き角度 θ は小さく、また δ が大きい程やはり小さい。JIS 型アンカーの爪の開き角度は 42 度であるから、丁度図の $\delta = 28$ 、 $\phi = 38$ の場合に相当する。アンカーの設計上からは、如何なる底質に対しても $F < 0$ であることが必要であるから、想定しうる底質の最大の ϕ および δ に対して θ を決定することが望ましい。

多くのアンカーの模型実験によれば、JIS 型はそれ程爪が深く埋没する方ではなく、常にシャンクがほぼ底質上面と一致して水平となる型であり、また、 $w/\gamma h^2 B$ の値の小さい単純な鋼板単板製の爪を有するアンカーでは、 θ を増大させると容易に爪が浮上る現象が観測され、上記の考察を裏書きしている（これらの実験結果については別に報告する予定である）。

以上の考察を要約すれば、アンカーに最も効果的に静止把駐力を与えるためには、砂との摩擦により爪が浮上しない限りの爪重量のもとに、最大の爪開き角度をもたせ、爪をなるべく長くすることである。爪の限界開き角度は底質の息角および爪との摩擦が大きい程小さい。従来アンカーの爪の開き角度には、把駐力を最大とする最適値が存在すると漠然と考えられていたようであるが、その原因は爪の浮上り（不完全な埋没）に起因するということが出来る。

8. 結 論

アンカーの歴史は極めて古く、且つ重要な設備であり乍ら、その把駐機構は全然と云ってよい程解明されておらず、従ってあまり進歩改良が行なわれなかったように思われる。

しかし船舶の高速化、船舶の巨大化による操縦性の低下、あるいは航行船舶の増大による衝突の危険性の増大、等により、アンカーの重要性が新たに見直されようとしている。

しかしなお、アンカーの把駐特性については実験的研究によるものが大部分であり、対象となる底質との関連において解明せんとしたものは、寡聞にして筆者は知らない。筆者は土質力学に関しては全く素人であ

るが、敢えてこれと取組んでみた次第である。

本研究においては、アンカーの爪が底質の砂を剪断するために生ずる抵抗により、把駐力が生ずるとの考えで出発し、従ってアンカーの重量と全く関係なく理論式を展開することが出来たが、そのまゝでは仮定の一部が成立しない不都合を生じる結果となり、やはり従来の経験通りアンカーの重量も重要な要素であることを見出し、且つそれらの間の定量的な関係を導き出すことが出来た。

今後さらに、本研究に対する実験的裏付け、三次元問題への拡張、アンカーの安定性、およびアンカーとチェーンに作用する外力の推定、等の問題があり、識者各位の御指導と御批判を乞う次第である。

なお、本研究を進めるに当り、東京商船大学及川清助教授の御指導と御協力を頂き、また計算を行なうについては本間勉元技官の、図表作製については原野勝博技官の各協力を得たことを附記し、厚く感謝の意を表する。

参 考 文 献

- 1) 横田利雄他、荒天錨泊法に関する実験研究 東京商船大学 報告 13号 (37年 9月) または 航海学会誌 Vol 22~24 (35年 3月~36年 2月)
- 2) 渡辺正紀 艦装品の力学 海文堂文庫(34年11月) pp. 69, または、錨及び錨鎖の把持力に対する考察 造船協会雑纂 (17年8月) pp. 439
- 3) R. S. Danforth ケーブル及錨荷重に対するその影響について Shipbuilding and Shipping Record' July 1945 (造船協会誌229号)
- 4) D. F. Lucking The Experimental Development of Anchors for Seaplane T. I. N. A. (1963) pp. 201
- 5) K. P. Farrell Improvements in Mooring Anchors T. I. N. A. (1950)
- 6) R. C. Towne Mooring Anchor A. S. N. A. M. E. (1959) (造船協会誌374号)
- 7) 翁長一彦他 JIS 型ストックレスアンカーの把駐特性 運輸技研資料 No. 60 (38年 3月)
- 8) 本田啓之輔他 JIS 型ストックレスアンカーの把駐性に関する水槽実験 神戸商船大学紀要(36年3月)
- 9) 本田啓之輔他アンカーの把駐力に関する実験研究 (その 1~3) 日本航海学会誌 22, 24, 25号 (35

~36年)

- 10) H. L. Dove Investigations on Model Anchors
T. I. N. A. Vol. 92 No. 4 (1950)
- 11) 白石隆義 荒天錨泊に伴う外力と把駐力との関係
の研究(第1報) 鉄道技術研究所速報(33年11月)
- 12) 東京商船大学船舶運航研究所 荒天錨泊法に關す

る実験研究(37年4月)

- 13) 前掲5)
- 14) 本田啓之輔他 軽量アンカーの試作実験 神戸商
船大学紀要(40年3月)
- 15) 日本工業規格 F3301 アンカー