

砂地盤の海底におけるサクシオン・アンカー*の 把駐力**に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON HOLDING FORCE OF SUCTION ANCHOR IN SANDY SEA-FLOOR

井上 令作***・岩井 勝美****
By Reisaku INOUE and Masami IWAI

1. ま え が き

アンカーは海・陸を問わず物体を定位置に固定するために使用され、種々の形式のアンカーが開発されてきた。しかし、近年、海洋開発が盛んになってくに従って、海上に浮遊する構造物、ブイ、その他もろもろの海洋開発用機器などを海上および海中の定位置に固定するために、その用途に応じて種々のアンカーが開発され利用されている。現在、海洋開発では種々の海洋開発用機器や海洋計測器具などを短期間係留するためや、サルベージ、浚渫などの海中作業において、高い把駐力を有し、しかも機動性とんだアンカーの開発が必要となっている。現在、これらの短期間係留のためには、重量式アンカーが多く使用されている。しかし、重量式アンカーでは自重に比較して、その把駐力が小さいために、非常に非能率的である。

ここで述べるサクシオン・アンカーでは人為的にアンカーに吸引力を与えることによって、自重よりもはるかに大きい把駐力を得ることができる。しかし、このアンカーはまだ開発途上にあり実用化されていない。したがって、サクシオン・アンカーに関する研究もその原理を調べる段階であり^{1),2)}、その実用性や安全性に関する研究はない。今後、研究が進むにつれて段々と実用化されてくるものと考えられる。

サクシオン・アンカーの基本的形状を **Fig. 1** に示した。このアンカーでは、アンカーの内部の水をポンプで

強制排水し、減圧室 (Anchor Cavity) の圧力を減圧することにより、海底の砂層内に浸透流を生じさせ、このときに発生する浸透水圧と砂層の有効応力の増加をおもに把駐力として利用するしくみである。

本論文は、砂地盤の海底におけるサクシオン・アンカーの把駐力について行った模型実験とその解析結果について述べたものである。模型実験ではアンカー模型の寸法、作用させる減圧力、係留力の作用方向などを変化させて実験を行った。また、実際にサクシオン・アンカーを使用するときの把駐力は、実際室で求めた値よりも低下すると考えられるが、このような実際使用時の状態を想定した考察も行った。これらの実験値をもとに、サクシオン・アンカーの把駐力特性を調べると同時に、浸透流の理論を基礎として、ポンプの排水流量と減圧力との関係を求め、また、把駐力の発生機構についても考察した。

2. 実験装置と実験方法

サクシオン・アンカーの把駐力特性を調べるために、以下に述べるような実験を実施した。この実験はアンカー模型内の水をポンプで排水することによって、模型周辺の砂層内に浸透流を発生させ、同時に模型を一定速度で引き上げ、そのときの引き上げ力を計測する実験である。この実験で求めた把駐力は通常のアンカーの把駐力の定義では静止把駐力に相当する値である³⁾。模型を一定速度で引き上げて行くと、**Fig. 6** の記録例に示すように、引き上げ力は極大値に達する。この引き上げ力の極大値をサクシオン・アンカーの把駐力として定義する。

(1) アンカー模型と実験装置

サクシオン・アンカーの基本的形状を **Fig. 1** に示す。アンカーは上部の減圧室 (Anchor Cavity) とスカート部 (Skirt) から構成されていて、両者の間にはポーラ

* その他の名称として、バキューム・アンカー、ハイドロスタチック・アンカーなどとよばれる場合もあり、その名称は一定していないが、ここではサクシオン・アンカーとよぶ。

** 船舶や海洋開発の分野では常用されている用語で、アンカーの引張り抵抗力のことをいう。

*** 正会員 運輸省船舶技術研究所 海洋開発工学部

**** 運輸省船舶技術研究所 海洋開発工学部研究官

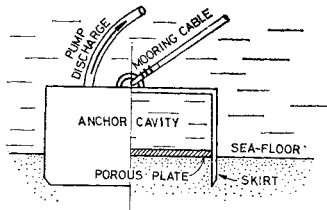


Fig. 1 Schematic View of Suction Anchor

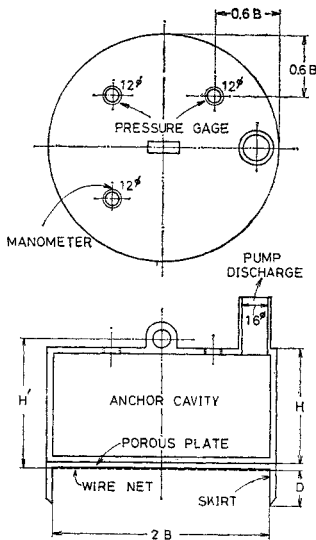


Fig. 2 Suction Anchor Model

アンカー模型の形状を Fig. 2 に示した。模型は鋼製で、その上面には内径 16 mm の排水口があり、ポンプと吸引用ホースで連結するようになっている。中央には引き上げ用金具があり、引き上げ力を模型の中央に作用させることができる。また、減圧室内の水圧を計測するために 3 個の圧力測定用の孔があり、この内 2 個は水圧計を取付けるためのものであり、残りの 1 個は直接水銀マンオメーターに連結される。減圧室の底面とスカート部の上面には径 5 mm の孔が約 100 個あけてあり (Porous Plate)、この面で両者は結合されている。また、スカート部の内側上面には網目のこまかい金網 (Wire Net) がついていて、これで砂の流入を防いでいる。

模型の寸法は Table 1 に示すように内径 ($2B$) が 10, 15, 20 cm 程度のを 3 種類用い、内径の大きさにより M_{10} , M_{15} , M_{20} の記号で表わした。スカート長 (D) は M_{10} と M_{20} の模型では 3 種類、 M_{15} の模型では 4 種類用い、Table 1 に示したように、スカート長の短い方から S, SM, M, L の記号で表わした。したがって、模型の名称としては、たとえば、 M_{15} -M は $2B = 15.6$ cm, $D = 3.90$ cm の模型を表わしている。また、

Table 1 Dimensions of Anchor Models

	$2B$ (cm)	H (cm)	$H/2B$	H' (cm)	$H'/2B$	L (cm)	A (cm ²)	D (cm)	$D/2B$	W (kg)	
M_{10}	10.6	4.9	0.46	6.1	0.58	33.3	88.3	S	0.41	0.039	1.54
								M	2.43	0.229	1.72
								L	4.40	0.415	1.96
M_{15}	15.6	7.4	0.47	8.6	0.55	49.0	191.1	S	0.92	0.059	3.72
								SM	2.20	0.140	3.75
								M	3.90	0.250	4.30
								L	6.90	0.442	4.86
M_{20}	20.6	10.0	0.49	11.2	0.54	64.7	333.3	S	1.40	0.068	7.20
								M	5.40	0.263	8.37
								L	9.40	0.459	9.50

L : Circumference, A : Cross-Section Area, W : Weight

ス板があり、ポンプで減圧室の水を排水した場合に起こる砂の流入を防いでいる。この図ではポンプを陸上や船上に設置し排水する場合を図示したが、水中ポンプをアンカーと一体として取り付け排水することも可能である。

実験に使用したサクシオン・アン

減圧室の高さ (H) は内径の約半分の寸法、すなわち、 $H/2B = 0.5$ として模型を製作した。そのほか、Table 1 で、 A は模型の底面積 (πB^2)、 L は模型内面の周長 ($2\pi B$) である。

実験装置の写真を Fig. 3 に、実験状態の概要図を Fig. 4 に示した。Fig. 3 の左側は水砂槽でその中央にアンカー模型がセットされている。右側は模型を引き上げるための駆動装置で、手前にあるのが排水用ポンプで

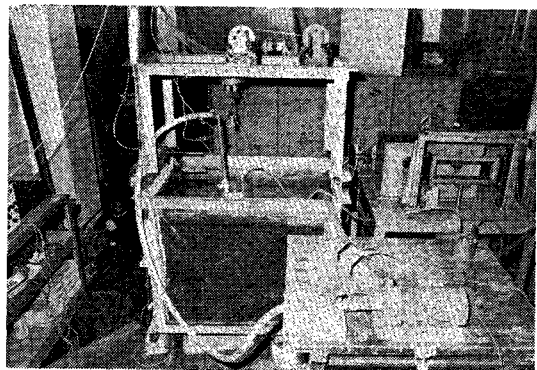


Fig. 3 Apparatus for Model Test

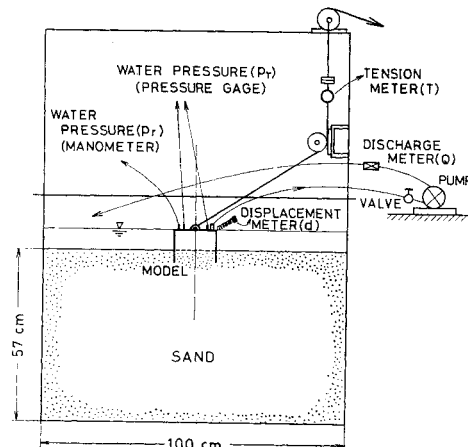


Fig. 4 Schematic View of Model Test

ある。水砂槽は幅 100 cm、高さ 75 cm、奥行 68 cm の大きさで、水砂槽の上に枠を組み、模型を任意の方向に引き上げることができるようにしてある。排水用ポンプには揚程 4 m で流量 50 l/min の容量のものを使用した。

減圧室からポンプで排水した水は水砂槽に返却し、たえず水砂槽内の水位を一定に保つようにした。減圧室の圧力はポンプの流入口にあるバルブを操作し、流量を調節することにより変化させることができる。模型の引き上げには径 2 mm のワイヤ・ロープを使用し、その途中にセットした滑車を移動させることにより、引き上げ方向を変えることができる。

計測装置は、模型の引き上げ力 T とその変位 d を計測するための張力計と変位計、減圧室の圧力 p_r を計測するための水圧計 2 台と水銀マンノメーター 1 台、およびポンプの排水流量 Q を計測するための流量計である。張力計には、ひずみゲージをはった直径 5 cm、肉厚 3 mm のリングゲージを用いた。変位計は板ばねの先端に弱いコイルばねを取り付けた板ばね式変位計である。水圧計は豊田工機(株)の製品 PMS-5-5 H を使用し、減圧室内の水の流れが実測値に影響しないように、水圧計の先端に取り付け金具をつけ、シリコンオイルを介して水圧が受圧板に作用するようにした。流量計はベンチュリー管式の流量計を使用した。細管部には径 10 mm、太管部には径 20 mm の管を用い、両者の圧力差を高さ 1.8 m の水マンノメーターで読みとった。流量計は正確に検定し、流量 (Q) と圧力差 (h) との関係は $Q=22.56 h^{0.55}$ の指数曲線で正確に表わすことができた。

実際に使用した砂は豊浦標準砂で、その物理的性質は次のとおりである。真比重：2.65、乾燥密度：1.60 g/cm³、有効径：0.13 mm、均等係数：1.3、水温 15°C の透水係数：0.015 cm/sec。

(2) 実験の種類と実験方法

実験の種類と実験に関連する値を Table 2 に示した。大多数の実験では、アンカー模型を水砂槽内にセットする場合、ポーラス板が砂表面に接するまで手で模型を圧入した後、ポンプを作動させ、引き上げ実験を行ったが、この状態での実験を Table 2 においては PRE-SSED と記入してある。また、圧入せず砂表面に着地させたままで、ポンプを作動し、引き上げ実験を行った場合を NOT PRESSED と記入してある。引き上げ方向(係留力の作用方向) θ とその作用点(砂表面から係留力の作用点までの高さ) H' は Fig. 5 に示したとおり

Table 2 Data Pertaining to Tests

SETTING OF MODEL	MODEL		$D/2B$	H' (cm)	θ (deg)	$p_h - p_r$ (g/cm ²)	T_w (°C)	V (mm/sec)
	$2B$ (cm)	D						
PRESSED	M ₁₀	S	0.039	6.1	90	0~470	18	0.055
		M	0.229		90	0~440	18	
		L	0.415		90	0~450	18	
	M ₁₅	S	0.059	8.6	90	0~440	15~16	
					60	0~450	16	
					30	0~450	17	
					0	0~400	16	
	M ₁₅	SM	0.140	8.6	90	0~490	14~15	
	M ₁₅	M	0.250	8.6	90	0~460	18~20	
					60	0~470	12	
					30	0~460	13	
					0	0~460	14~16	
	M ₁₅	L	0.442	8.6	90	0~490	17	
					60	0~480	13	
					30	0~470	14	
				0	0~470	15		
M ₁₅	S	0.059	0	0	0~400	11		
M ₁₅	S	0.059	3.4	0	0~450	13		
M ₂₀	S	0.068	11.2	90	0~440	15		
	M	0.263		90	0~460	15~16		
	L	0.459		90	0~490	15		
NOT PRESSED	M ₁₅	S	0.059	8.6	90	0~430	16	
		M	0.250		90	0~440	18~20	
		L	0.442		90	0~470	17	

である。

また、アンカーの囲りの水位(アンカーに作用する外圧、実験では水砂槽の水位を模型の上面と一致させて実験を行ったのでこの水圧は小さい) p_h と減圧室の圧力 p_r との差、すなわち、減圧力 $p_h - p_r$ の値は、0 から約 450 g/cm² の範囲で変化させて実験を行った。 $p_h - p_r = 0$ の実験はポンプを作動させないで行った引き上げ実験である。

模型の引き上げ速度 V はすべての実験において 0.055 mm/sec であった。

引き上げ実験の手順は、まず、手で締め固めて平らにした砂表面に鉛直方向より模型を降下させ静かに着地させる。次に、ポーラス板が砂表面に接するまで静かにゆっくりと手で模型を圧入する。圧入後の水砂槽の水位は模型の上面と一致させた。圧入が終了と排水ポンプを作動させ、水銀マンノメーターで減圧室の圧力を監視しながら

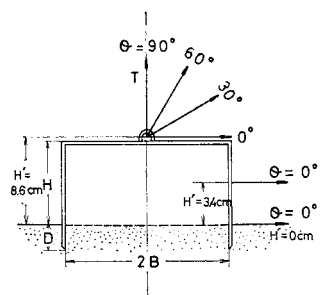


Fig. 5 Directions and Applied Points of Pulling Force in Tests

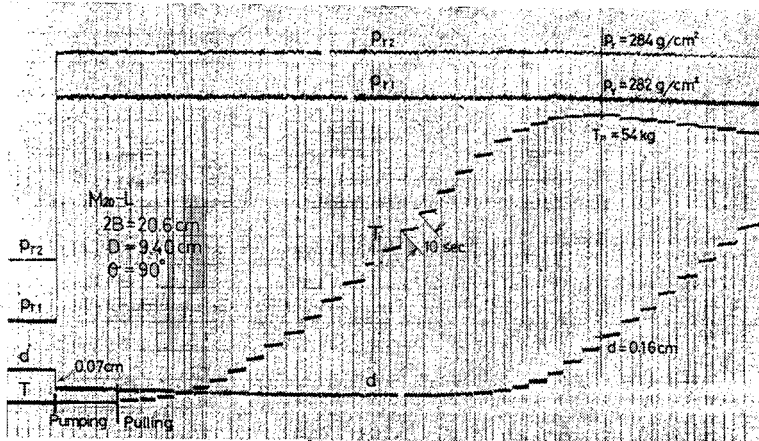


Fig. 6 Record of Pulling Test

ら、ポンプの流入口にあるバルブを開いて所定の圧力まで減圧する。この状態で放置すると1分以内で減圧室の圧力 p_r は一定となる。 p_r が一定となった所で排水流量 Q_e を計測する。その後、模型を一定速度で引き上げ、そのときの引き上げ力 T 、模型の変位 d 、2個の水圧計による減圧室の圧力 p_r を電磁オシロで記録する。

以上は圧入状態 (PRESSED) での実験手順であったが、非圧入状態 (NOT PRESSED) での実験は次の手順で行った。まず、圧入状態で実験を終了した後、ポンプのバルブをそのままの開いた状態で放置しておく。次に、平らにした砂表面に模型を静かに着地させる。模型は自重と砂の支持力が釣り合った所で停止する。この状態のまま、ポンプのスイッチを入れ急激に排水を始めると、模型はほとんど鉛直に大きく沈下する。この場合も圧入状態での実験と同様に1分以内で減圧室の圧力は安定する。それ以後の手順は圧入状態の実験とまったく同じである。この実験はサクシオン・アンカーを実際に海底で使用する場合を想定して行った実験である。後述するように、圧入状態と非圧入状態での実験値はほとんど一致することから、実験値に誤差の少ない圧入状態での実験を主として行った。以後、特に記さない限り、すべて圧入状態での実験について述べたものである。

Fig. 6 は引き上げ実験の記録例である。この記録は、 M_{20-L} の模型を使用し、引き上げ方向が鉛直 $\theta=90^\circ$ の場合である。引き上げ速度が非常に遅いために、連続して記録すると膨大な長さになる。そのため、10秒間隔で電磁オシロの紙送り装置を駆動し記録した。 p_{r1} 、 p_{r2} は2個の水圧計で計測した減圧室の圧力である。 d は模型の変位であり、ポンプで排水を始めると微量ではあるが沈下する (この記録では 0.07cm)。 T は引き上げ力である。引き上げ力は模型が動き始める前から増加しているが、これは模型と駆動装置をつないでいるワイヤ・ロープの弾性のためである。この記録例に示したよ

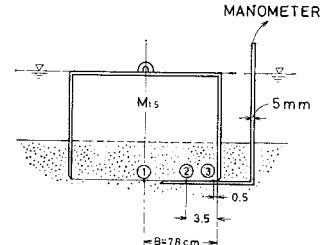


Fig. 7 Measured Points of Pore Water Pressure

うに、いずれの実験でも引き上げ力は極大値を有している。前述したように、この極大値がサクシオン・アンカーの把駐力 T_p である。

減圧室の圧力 p_r は、この記録に示したように、模型を引き上げている間ほとんど変化しない。しかし、スカート長が短い模型では、いくぶん減少する場合もあったので、減圧室の圧力 p_r としては、引き上げ力 (T) が極大値 (T_p) に達した瞬間における圧力 (この記録では、 284 g/cm^2 と 282 g/cm^2) の平均値を用いて解析を行った。

一方、アンカー模型の最下端面内の過剰間隙水圧 p_s を計測した。計測は M_{15} の模型を用い、Fig. 7 に示した①、②、③の場所で、先端に網目の細かい金網を取りつけた外径 5mm の真ちゅうパイプを用い計測した。測定方法は、模型を砂の上にセットし、パイプを所定の位置にそう入したのち、ポンプを作動させ減圧室の圧力 p_r を順次変化させて行き、それに応じる p_s を水銀マノメーターで読みとった。

3. 排水流量と減圧力との関係

サクシオン・アンカーの把駐力はアンカーの減圧力、すなわちポンプで排水する水の流量と密接に関係する。この排水流量と減圧力との関係はサクシオン・アンカーに使用するポンプの容量を決定するうえで重要である。

排水流量と減圧力の関係は砂層内の透水現象で説明できるはずである。しかし、サクシオン・アンカーでは、砂層内を浸透して流れる水量が非常に多量であるために非 Darcy 流となり、また、砂層内に発生する浸透水圧が大きいため、アンカーの底部付近では砂の圧密が起こり砂層は不均一状態となる。このような理由で、この透水現象を完全に理論的に解決することは困難である。そのため、筆者らは2次元 Darcy 流の理論解をもとにした簡単な流量計算式を求め、実験で計測した排水流量と対比することにより、サクシオン・アンカーの排水流量と減圧力の関係を求めた。

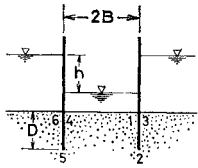


Fig. 8 Two Dimensional Seepage Phenomenon for Suction Anchor

サクシオン・アンカーにおける排水流量を2次元 Darcy 流を基本として考える場合、Fig. 8 に示すような2次元の透水現象を解き、その解を補正し3次元での解を求めればよい^(4),5)。この図で、根入れの部分、すなわち、番号 1-

2-3 と 4-5-6 の部分がアンカーのスカート部に相当し、番号 1-4 がポーラス板である。水頭差 r_{wh} はアンカーに作用する外圧 p_h と減圧室の圧力 p_r との差、すなわち、減圧力 $p_h - p_r$ に相当し、

$$r_{wh} = p_h - p_r \quad \dots\dots\dots (1)$$

と書ける。

Fig. 8 の浸透流に対する厳密解はすでに求められているので^(6),7)、くわしい説明は省略するが、2次元流量 q は写像法を用いて次の式で表わされる。

$$q = \frac{2K}{K'} kh = \frac{1}{\phi} kh \quad \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 K, K' は m および m' ($m'^2 = 1 - m^2$) を母数とする第1種完全楕円積分、 k は砂層の透水係数である。 $1/\phi$ は形状係数であり、

$$\frac{1}{\phi} = \frac{2K}{K'} \quad \dots\dots\dots (3)$$

なる式で計算できる。この形状係数は根入れ深さ D と幅 $2B$ との比 $D/2B$ の関数であり、 ϕ を計算して $D/2B$ について示したものが Fig. 9 である。

式 (2) で表わされる2次元流量 q を補正係数 α を用いて補正し、3次元流量 Q を表わすと次の式となる。

$$Q = \alpha q L = \frac{1}{\phi} \alpha kh L \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここで、 L はサクシオン・アンカーのスカート部の周長である。

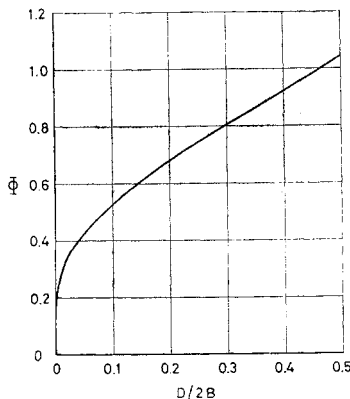


Fig. 9 Calculated Values of Shape Factor ϕ to Depth Ratio $D/2B$

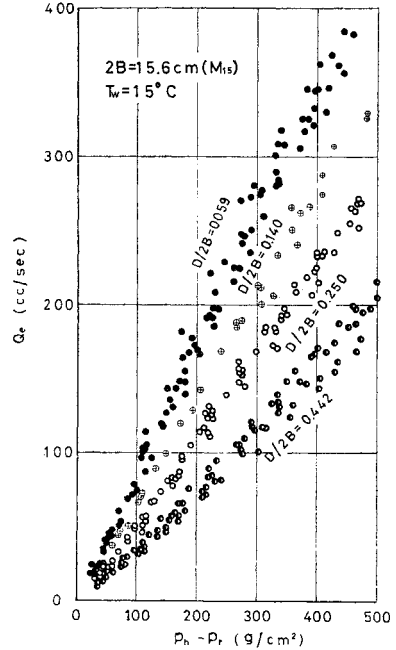


Fig. 10 Measured Values of Pumped Discharge

式 (4) に式 (1) に示した関係 $h = (p_h - p_r) / r_w$ を代入すると、Darcy 流と仮定した場合のサクシオン・アンカーの排水流量の計算値 Q_c (排水流量の実測値 Q_e と比較するために、計算流量を Q_c で表わした) は次に示す式となる。

$$Q_c = \frac{\alpha k (p_h - p_r) L}{r_w \phi} \quad \dots\dots\dots (5)$$

補正係数 α の値については文献 4), 5) など考察されているが、サクシオン・アンカーのような円筒では、 α の値はほぼ 0.8 となる。ここでは、文献 4) で求めた値 $\alpha = 0.75$ を用いて計算した。

一方、一例として M15 の模型について、排水流量の実測値 Q_e と減圧力 $p_h - p_r$ との関係を示したものが Fig. 10 である。この実測排水流量はアンカーの引き上げ実験に入る直前に実測した。実験時の水温 T_w が Table 2 に示したように 11°C から 20°C まで変化しているために、実測値を水の粘性係数で補正し 15°C の流量として、同一条件のもとで比較した。この図でわかるように Q_e は $p_h - p_r$ に対してほとんど直線的に増加しており、スカートの長さ $D/2B$ による違いもはっきり表われている。

ここで、これらの実測値の平均勾配 $Q_e / (p_h - p_r)$ の値と、式 (5) から求めた $Q_c / (p_h - p_r)$ の計算値を比較してみる。式 (5) から $Q_c / (p_h - p_r)$ を計算するにあたっては、補正係数 α は上述の値 0.75 を用いた。Table 3 にはすべての模型について、 $Q_e / (p_h - p_r)$ と

Table 3 Comparison between Calculated Discharge and Measured One

MODEL	2B (cm)	D/2B	L (cm)	ϕ	$k_{15^\circ\text{C}}$ (cm/sec)	α	Q_e/Q_c
M ₁₀ -S	10.6	0.039	33.30	0.395	0.015	0.75	0.72
M		0.229		0.715			0.69
L		0.415		0.943			0.71
M ₁₅ -S	15.6	0.059	49.01	0.442			0.70
SM		0.140		0.592			0.72
M		0.250		0.742			0.73
L		0.442		0.975			0.71
M ₃₀ -S	20.6	0.068	64.72	0.460			0.68
M		0.263		0.757			0.72
L		0.459		0.994	0.69		
MEAN							0.70

$$Q = \frac{0.7 \alpha k (p_h - p_r) L}{\gamma_w \phi} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$\alpha = 0.75$

後述するように、サクシオン・アンカーの把駐力は減圧力 $p_h - p_r$ の値で決定されるので、所定の把駐力を得るために必要な排水流量 Q 、すなわち、ポンプの容量は式 (6) から推定できる。

4. 把駐力の実測値に対する考察

サクシオン・アンカーの把駐力を調べるにあたっては、Table 2 に示した種類の引き上げ実験を実施した。この章では、これらの実測値の解析結果に基づき、サクシオン・アンカーの把駐力特性について考察する。

排水ポンプを作動させ、模型の減圧室の圧力を減じたのち、模型を一定速度で引き上げると Fig. 6 に示したように、引き上げ力 T は増加し極大値 T_p に達する。一例として、引き上げ力 T の変化を模型の引き上げ方向の変位 d に対して示したものが Fig. 12 である。図の下側に引き上げ中における減圧室の圧力 p_r の変化を示した。引き上げ力はこの図に示したようにいずれも極大値を有しているが、前述したように、この極大値がサクシオン・アンカーの把駐力 T_p として定義される。減圧室の圧力はこの図に示したように、ほとんどの実験では、引き上げを行っている間一定値を保った。しかし、スカート長が短い場合には、圧力がいくぶん下る場

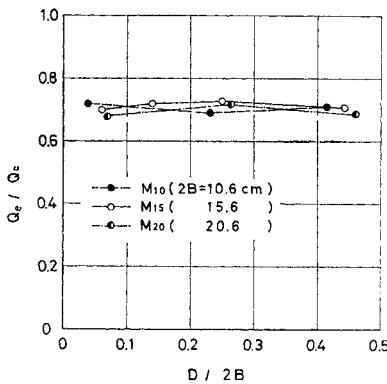


Fig. 11 Comparison between Calculated Discharge and Measured One

$Q_e/(p_h - p_r)$ との比、すなわち、 Q_e/Q_c の値と計算に関連する値を示した。この表に示すように、模型の大きさやスカート長が変わっても Q_e/Q_c の値はほとんど同程度の値であり、その平均値は 0.70 となる。

Fig. 11 は Table 3 に示した Q_e/Q_c の値を模型のスカート長 D と直径 $2B$ との比 $D/2B$ に応じてプロットしたものである。これらの値は模型の大きさやスカート長などの違いによって一定の傾向で変化せず、不規則に 0.70 付近に分布している。

この実験では透水性の異なる砂についての確認はないが、以上述べたことから、サクシオン・アンカーの排水流量は均一砂層中の Darcy 流として計算した流量 (式 (5)) のほぼ 70% に相当する。すなわち、サクシオン・アンカーにおいては、非 Darcy 流になること、およびアンカー底面付近の砂層の間隙化が減少することなどの理由で、その流量は均一砂層中の Darcy 流として求めた流量よりも約 30% 減少している。

式 (5) をもとにして、サクシオン・アンカーにおける排水流量の計算式を求めると、次のように表わすことができる。

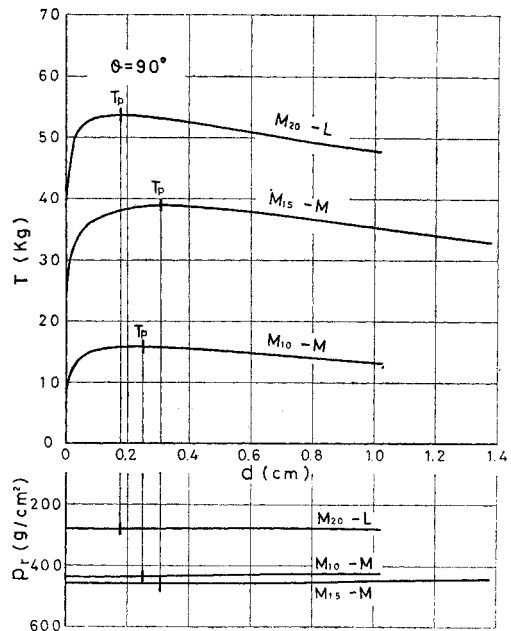


Fig. 12 Variations of Pulling Force T and Pressure of Anchor Cavity p_r According to Displacement of Models d

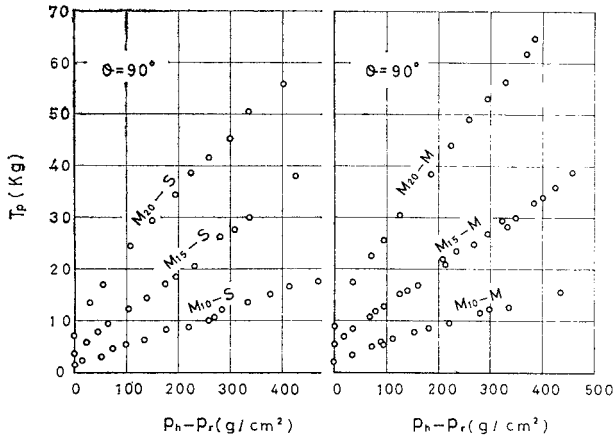


Fig. 13 Measured Values of Holding Force at $\theta=90^\circ$

合もあったので、把駐力の解析には、引き上げ力が極大値に達した瞬間の圧力を減圧室の圧力 p_r として用いた。Fig. 12 は引き上げ方向が鉛直 ($\theta=90^\circ$) の場合の例であるが、鉛直方向以外の方向に引き上げた場合でも T の変化は同じ形状となる。 $\theta=90^\circ$ の実験では T の極大値は $d=0.4$ cm 以内で発生したが、 $\theta=90^\circ$ 以外ではいくぶん大きくなり、 $d=0.6$ cm 以内で極大値は発生した。また、Fig. 12 でもわかるように、減圧力が大きくなるに従って、極大値の発生する変位は大きくなった。

Fig. 13 に一例として、引き上げ方向 $\theta=90^\circ$ の場合の引き上げ力の極大値、すなわち把駐力 T_p を外圧 p_h と減圧室の圧力 p_r との差、すなわち減圧力 $p_h - p_r$ に応じて示した。この図で、 $p_h - p_r = 0$ の軸上にある実測点は減圧室の圧力が $p_h = p_r$ 、すなわちポンプを作動しないで引き上げ実験を行った場合の把駐力の値である。

Fig. 13 に示したように、把駐力 T_p は減圧力 $p_h - p_r$ に対してほとんど直線的に増加している。したがって、 T_p と $p_h - p_r$ の関係は次式で近似して表わすことができる。

$$T_p = \lambda(p_h - p_r)A + T_0 \dots\dots\dots(7)$$

この式で、 λ は直線の勾配、 T_0 は $p_h - p_r = 0$ のときの把駐力の値である。また、 A はアンカーの底面積である。

式 (7) の両辺を底面積 A で割り、 $T_p/A = t_p$ 、 $T_0/A = t_0$ とすると上式は、

$$t_p = \lambda(p_h - p_r) + t_0 \dots\dots\dots(8)$$

と書きかえられる。式 (8) はサクシオン・アンカーの単位面積あたりの把駐力を表わしている。

また、勾配 λ は次のように書ける。

$$\lambda = \frac{t_p - t_0}{p_h - p_r} \dots\dots\dots(9)$$

この λ の大きさがサクシオン・アンカーの把駐力を左右することから、 λ の値はサクシオン・アンカーの把駐力係数と考えることができる。しかし、この λ は通常アンカーに使用される把駐力係数 T_p/W_0 (W_0 はアンカーの水中重量) とは性質が異なるので注意しなければならない。

(1) 鉛直係留力が作用する場合の把駐力

実験では引き上げ方向(係留力の作用方向)が鉛直の場合を重点とした。Fig. 14 は M_{10} と M_{15} の模型について、 $\theta=90^\circ$ の場合の $t_p - t_0$ の値をスカート長 (D) ごとに印をかえて、 $p_h - p_r$ に対してプロットしたものである。この図でわかるように、 $t_p - t_0$ の値はほとんど $p_h - p_r$ に対して直線的に増加している。したがって、この実測値を 0 点を通る直線で近似すると、この直線の勾配が式 (9) で示した λ の値を示している。

これらの図からわかるように、 $t_p - t_0$ の実測値は原点を通る直線であらわすことができるものとして、すべての実測値について、その直線の勾配 λ の値をスカート長 D ごとに求め、 $D/2B$ に対してプロットしたものが Fig. 15 である。これらの値には、ある程度のばらつきはあるが、模型の大きさやスカート長の違いに対して定まった傾向で変化しているものは特になく、 λ の値は 0.34 から 0.39 の間に不規則に分布している。これらのことから、係留力が鉛直方向から作用する場合の λ の値は、だいたい 0.37 付近にあるものと考えることができる。すなわち、把駐力 T_p は次の式で近似的に表わせる。

$$T_p = 0.37(p_h - p_r)A + T_0 \dots\dots\dots(10)$$

この式で T_0 は前述したようにポンプを作動しない場合の把駐力であり、サクシオン・アンカーの水中重量とスカートの周面摩擦力の和である。しかし、サクシオン・アンカーではスカートの根入り深さが小さいために周面摩擦力は小さいので、 T_0 の値はアンカーの水中重量と考えてもさしつかえない。

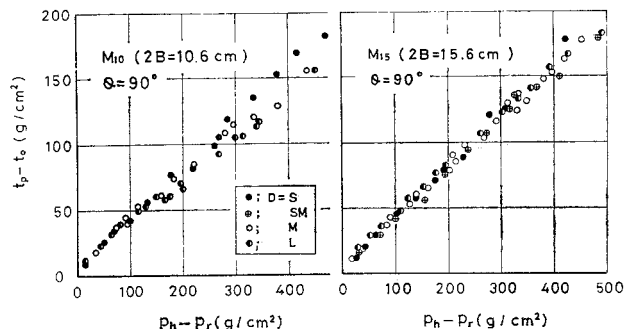


Fig. 14 Relation between $t_p - t_0$ and $p_h - p_r$ at $\theta=90^\circ$

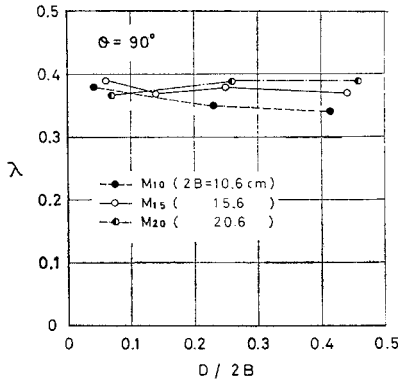


Fig. 15 Values of λ at $\theta=90^\circ$

(2) 係留力が傾斜して作用する場合の把駐力

サクシオン・アンカーに作用する係留力は前項で述べたように鉛直方向ばかりではなく、傾斜して作用する場合も多いと考えられる。そのために、 M_{15} の模型を用いて引き上げ方向 θ を変化させた場合の実験を行って (Fig. 5 参照), θ に対する把駐力の変化を調べた。

Fig. 16 は Fig. 14 と同様に、 $p_h - p_r$ に対する $t_p - t_0$ の値を引き上げ方向 θ ごとに印を変えて示した代表例である。この図でわかるように、 θ が小さくなるに

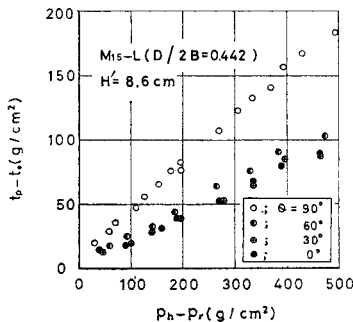


Fig. 16 Relation between $t_p - t_0$ and $p_h - p_r$ at $\theta \leq 90^\circ$

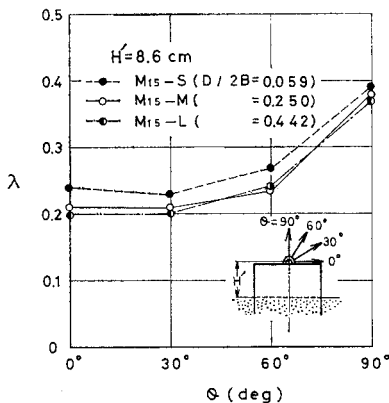


Fig. 17 Values of λ at $\theta \leq 90^\circ$

従って $t_p - t_0$ の値は減少している。これらの実測値も $\theta=90^\circ$ の場合と同様に、原点を通る直線で近似できる。

これらの直線の勾配 λ を、横軸に θ をとり、すべての実測値をプロットしたものが Fig. 17 である。 λ の値は θ が小さくなるに従って減少し、 $\theta=30^\circ \sim 0^\circ$ 付近では $\theta=90^\circ$ における λ の値に比較して約 1/2 に減少している。また、スカート長 D による影響は D が小さいといくぶん有利であるといえる。

(3) 係留力の作用点と把駐力の関係

(2) で述べたように係留力がアンカーに回転モーメントを発生させるように作用すると、その把駐力は急激に減少する。この回転モーメントの発生は係留力の作用方向だけでなく、係留力の作用点の高さ H' にも関係する。この作用点の高さが把駐力に及ぼす影響を調べるために、Fig. 18 に示すような水平引き上げ力 ($\theta=0^\circ$) の作用点を変えた実験を行った。模型は M_{15} -S を使用したが、 $H'=0$ は砂表面を作用点とした場合であり、 $H'=8.6$ cm は (2) で求めた実験結果である。

Fig. 18 はこれまでと同様に、実測値をもとにして求めた λ の値を、 H' と $2B$ との比 $H'/2B$ に対してプロットしたものである。この図でわかるように、 λ の値は作用点が高くなるに従って減少している。実測値が3点しかないので、正確な λ の変化はわからないが、近似的にこれらを直線で結ぶ。 $\theta=90^\circ$ の場合の λ の平均値は約 0.37 であったから (その値を Fig. 18 に細線で記入してある)、 $H'/2B$ の値がほぼ 0.27 以下になると、 $\theta=90^\circ$ の場合の把駐力よりも大きな把駐力を得ることができる。また、砂表面に水平係留が作用した場合 ($\theta=0^\circ, H'/2B=0$) の把駐力は行った実験の範囲では最も大きい値である。したがって、もしアンカーに水平

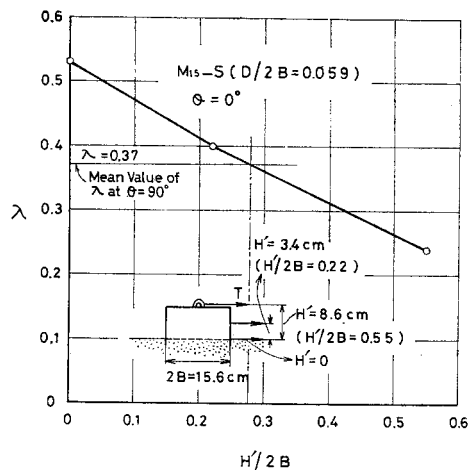


Fig. 18 Values of λ According to Applied Height of Pulling Force at $\theta=0^\circ$

係留力しか作用しないことがわかっている場合には、係留点を海底面まで下げれば、最も大きな把駐力を得ることができる。

(4) 非圧入状態における把駐力

(1) から (3) までに述べたことは、すべて圧入状態 (PRESSED) での実験結果であった。この項で述べるように模型を圧入しないで行った実験は、Table 3 で NOT PRESSED と記した実験である。実際に海底でサクシオン・アンカーを使用する場合には、アンカーを海底に着地させたままの状態 (非圧入状態) でポンプを作動し減圧を行わなければならない。ここで行った実験は、以上のように実際の海底での使用状況を想定して行ったものである。

この実験の方法は 2. (2) でくわしく述べたが、ここで簡単に述べると、まず、模型を水砂槽の砂表面に静かに着地させる。模型は自重と砂の支持力が釣り合った所で停止する。次にポンプを作動させ排水を始めると、模型はポーラス板が砂表面に接するまで、鉛直に大きく沈下する。減圧室の圧力は 1 分以内で安定するので、安定するのを待って引き上げ実験を行った。

Fig. 19 は圧入状態と非圧入状態における $t_p - t_0$ の実測値を比較して示した一例である。この両者の値を比較すると、後者は前者よりもいくぶん小さな値となっているが、ほとんど同程度とみなすことができる。したがって、(1) から (3) までに述べた実験結果は、サクシオン・アンカーを実際に海底で使用するときの状態に対応しているとみなしうる。

以上述べてきたことは、サクシオン・アンカーが最も効率よく使用できると考えられる細砂地盤の海底における把駐力についてであったが、ここで、海底土の種類が変わった場合の把駐力について簡単に推測してみよう。しかし、これらはあくまでも推測であり、正確には今後土の種類を変えた実験を行い確認したいと考えている。まず、粗砂について考えてみると、所定の減圧力を得た

めには、細砂に比較して大量の水を排水しなければならず不利ではある。しかし、いったん所定の減圧力が得られたならば、細砂の場合と同程度の把駐力が得られるのではないかと考えられる。一方、粘性土については、文献 2) に簡単な実験の結果が報告されている。この結果によると、比較的透湿度の大きいシルトでは、細砂に比べていくぶん小さいが、ある程度の把駐力は期待できる。透湿度の非常に小さい粘土では減圧による把駐力の増加はほとんどなく、 λ の値は 0 に近い。したがって、粘土における把駐力はあまり期待できないと考えられる。

(5) サクシオン・アンカーの最適寸法の考察

これまで述べてきた把駐力に関する実験結果を総合し、サクシオン・アンカーの寸法とその把駐力について考察を行ってみる。

係留力の作用方向が鉛直の場合 ($\theta = 90^\circ$) の λ の平均値は (1) で述べたように 0.37 であった。 $\theta = 90^\circ$ の場合には、アンカーの中心線上に係留力が作用している限り、 λ の値、すなわち把駐力は変化しない。しかし、係留力が傾斜して作用すると、アンカーに回転モーメントが作用し、Fig. 17 に示したように λ の値は減少する。この回転モーメントを小さくするためには、係留力の作用点の高さ H' を低くすること、すなわち、サクシオン・アンカーの減圧室の高さ H ($H \approx H'$, Fig. 5 参照) をできるだけ小さくしなければならない。しかし、減圧室の高さ H が小さくなりすぎると、ポンプで排水を行い減圧室の圧力を減圧した場合に、減圧室の圧力が均等に発生しなくなるおそれがある。そのために、減圧室の形状をあまり扁平にすることは避けなければならない。

以上のことを考慮して、いかなる方向から係留力が作用しても、少なくとも $\theta = 90^\circ$ の場合の λ の値 0.37 を保持できる減圧室の寸法をまず検討してみる。

(3) で述べたように、 $\theta = 90^\circ$ のときの λ の値 0.37 (Fig. 18 に示した細線の値) を保持できる係留力の作用点の高さは $H'/2B \approx 0.27$ であった。したがって、 $H'/2B > 0.27$ の範囲では $\theta = 90^\circ$ の場合の把駐力よりも減少する。 $\theta = 0^\circ$ の場合の λ の値は、Fig. 17 に示したように最も小さい。また、Fig. 18 の 3 個の実測値は $\theta = 0^\circ$, $D/2B = 0.059$ の場合の値であり、スカート長が最も小さい。Fig. 17 に示したように、 $D/2B$ の値が大きくなると、わずかではあるが λ の値は小さくなる。したがって、実験誤差なども考慮すると、 $H'/2B$ の値がだいたい 0.2~0.3 の範囲にあるならば、いかなる方向からの係留力が作用しても、 $\lambda = 0.37$ の値に相当する把駐力を保持できるものと考えられる。Fig. 5 に示したように、 H' と減圧室の高さ H はほぼ

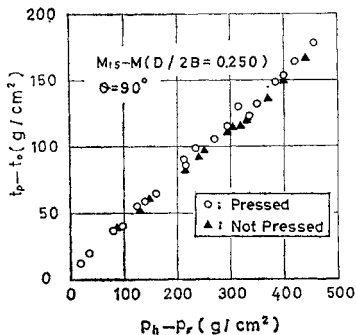


Fig. 19 Comparison between Holding Force on PRESSED Tests and NOT PRESSED Tests

等しいので、把駐力の面から考えると、 $H/2B$ の値も $0.2\sim 0.3$ の範囲にあればよいことになる。

一方、減圧室の圧力 p_r の均一性の面から考えてみる。文献 1) では、 $H/2B=0.25$ の模型を用い、 $\theta=90^\circ$ の場合の簡単な実験を行っているが、その結果、 $H/2B=0.25$ の寸法では、減圧室の圧力は微小ではあるが不均一に発生したと報告されている。筆者らの実験では $H/2B=0.5$ の模型を用いたが、減圧室の圧力は完全に均等に発生した。したがって、減圧室の圧力が不均一に発生したときの把駐力については考察できなかったが、もし、圧力が不均一に発生すると、最も減圧力の小さい部分からアンカーは傾いて引き抜かれ、おそらく把駐力は圧力が均一に発生した場合（不均一な圧力の平均値に等しいとした圧力）に比較して小さくなると考えられる。しかし、減圧室の高さ H を小さくすることは、アンカーが海底に着地したときの転倒を防ぐためには必要なことであり、減圧室の最適寸法については、減圧室の圧力の不均一性による把駐力の減少やアンカーの転倒に対する安定性などから、今後検討する必要がある。以上述べたように、減圧室の高さの最適寸法を決定することはできないが、現段階では $H/2B=0.25\sim 0.3$ 付近が適当ではないかと考えられる。

次に、スカート長 D の大きさを検討してみよう。スカート長による把駐力の大きさの違いは、行った実験の範囲 ($D/2B=0.04\sim 0.46$) では認めることはできなかった。ただ、係留力の作用方向 θ を変化させた実験では、いくぶんスカート長が短い方が有利であるといえる (Fig. 17 参照)。しかし、実際の海底では、実験のときのように海底面は平坦ではない。そのために、スカート長が短すぎると、スカートが海底土中に十分に入りこめず減圧が困難となり、所定の把駐力を得ることが不可能になる場合が生じる。また、Fig. 10 に示したように、スカート長が短くなるに従って、所定の減圧力を得るためには大量の水を排水しなければならない。したがって、容量の大きいポンプを使用する必要があり不利である。反対に、スカート長が長すぎるとアンカーの高さが高くなり、海底に着地させたときに、その姿勢が不安定となり、倒れる可能性も生じる。このような状況を考慮すると、スカート長、すなわち、 $D/2B$ の値は $0.2\sim 0.3$ 付近が最適ではないかと考えられるが、この値はあくまでも模型実験を通して推測した値であり、正確には現地での使用実績をもとに決定されなければならない。

以上の考察結果から、サクシオン・アンカーの寸法を、 $H/2B=0.25\sim 0.3$ 、 $D/2B=0.2\sim 0.3$ とするならば、いかなる方向から係留力が作用しても、少なくとも鉛直係留力が作用した場合の把駐力と同等の把駐力を保持することができると考えられる。したがって、この把

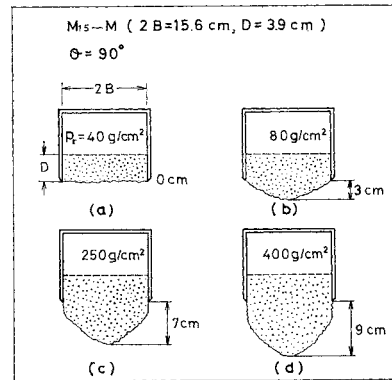


Fig. 20 Lumps of Sand Adhered to Bottom when Model is Pulled out

駐力は式 (10) で計算できる。

5. 把駐力の発生機構

4. においては、模型実験をもとにサクシオン・アンカーの把駐力について考察したが、この章では、把駐力の発生機構について定性的な考察を行ってみる。

Fig. 20 は $M_{15}=M$ の模型を用い、 $\theta=90^\circ$ の場合の引き上げ実験を行ったあと、ポンプを作動させたままアンカー模型を砂の中から引き上げ、水中で模型に付着してくる砂の塊を観察したものである。この図でわかるように、付着してくる砂塊は減圧力が高いほど大きくなる。減圧力が非常に小さいときには、砂塊は付着してこないが、約 $p_r=40 \text{ g/cm}^2$ となると、Fig. 20 (a) に示すようにほぼスカート下端面までの砂塊が付着してくる。減圧力を順次高めて行くと、(b) 図に示すように円錐形に近い形状となる。より減圧すると、(c)、(d) 図に示すように、スカート下端点でほとんど鉛直に切れこんだ砂塊が付着してくる。ここで観察した砂塊は、砂の中から模型を引き上げ水中で観察したものであり、砂層内で破壊した瞬間の砂塊の形状とはいくぶん異なるものと考えられる。しかし、砂層内においても、ここで観察した砂塊にほぼ近い形状で破壊面が発生しているものと考えられるならば、サクシオン・アンカーの把駐力は、一般に次に示すような力の要素の和として表わされる。

- (i) アンカーの水中重量
- (ii) 砂塊の水中重量
- (iii) 砂塊の破壊面に作用する間隙水圧
- (iv) スカートの周面に作用する周面摩擦力
- (v) 砂塊の破壊面に作用する内部摩擦力

これらの要素の中で、(ii)～(v) はすべて砂層内の過剰間隙水圧（負圧）と、その発生によって起こる砂の有効応力の増加に関係する要素である。Fig. 13 に示したように、把駐力は減圧力 $p_h - p_r$ に対して直線的に増

加することから、(ii)～(v)の要素はほとんど減圧力に比例して増加するものと考えられる。また、4.(1)で述べたように、把駐力の大きさはスカート長の長短に応じて、ほとんど変化しなかったが、この原因もこれらの要素の大きさがスカート長の長短に応じて、それぞれ変化するためであると考えられる。たとえば、スカート長が短い場合には、長い場合に比較して、(ii)と(iv)の要素の値は小さいが、(iii)と(v)は大きくなる。反対に、スカート長が長い場合には、(ii)と(iv)が大きくなり、(iii)と(v)が小さくなることが推測できる。

一方、水平係留力が砂表面に作用し ($\theta=0^\circ, H'=0$)、アンカーにほとんど回転モーメントが作用しない場合 (M_{15} -S) の発生機構を考察してみる。この状態での把駐力は Fig. 18 に示したように、最も大きい把駐力を得ることができるが ($\lambda=0.53$)、この把駐力はスカート最下端面におけるせん断抵抗力によるものと考えられる。これを確かめるために、Fig. 7 に示した方法で、 M_{15} の模型を用い、スカート最下端面内の過剰間隙水圧 p_s を実測し、その面における間隙水圧の分布形状を求め、それをもとに把駐力を計算した。Fig. 21 は一例として ① の場所 (アンカーの中央) の過剰間隙水圧の実測値をスカート長と直径との比 $D/2B$ に応じて印を変えて示したものである。図の横軸は減圧力 $p_h - p_r$ であり、たて軸は外圧と過剰間隙水圧の差 $p_h - p_s$ である。 $p_h - p_s$ の値は $p_h - p_r$ に対していずれも直線的に増加している。これらの図をもとに、直線の勾配 $(p_h - p_s)/(p_h - p_r)$ の値を読みとり、スカート最下端面内における過剰間隙水圧の分布形状を示した図が Fig. 22 である。

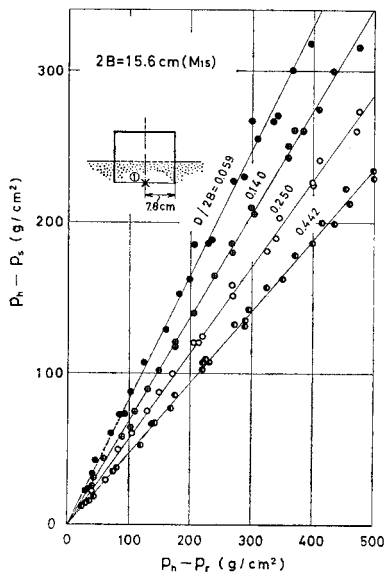


Fig. 21 Measured Values of Excess Pore Water Pressure at Point ①

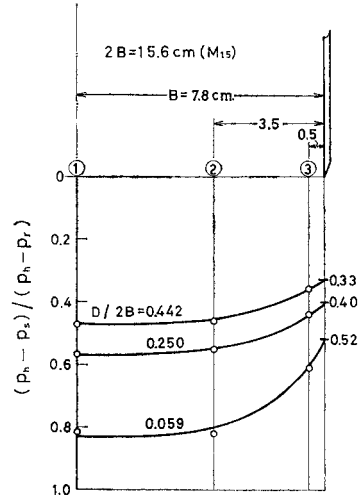


Fig. 22 Distributions of Excess Pore Water Pressure in Cross Section at Toe of Skirt

スカート最下端点の値は実測できなかったので①,②,③の場所の実測値を延長して求めた (0.33, 0.40, 0.52)。

この分布形状をもとに上記の状態 (M_{15} -S, $D/2B=0.059, \theta=0^\circ, H'/2B=0$) の把駐力をせん断抵抗力によるものとして計算してみる。いま、砂の内部摩擦角を ϕ とするならば把駐力 T_p は次式で表わすことができるはずである。

$$T_p = \left\{ \int_A (p_h - p_s) dA + W_0 \right\} \tan \phi \dots\dots(11)$$

ここで、 p_h はアンカーに作用する外圧、 p_s はスカート最下端面の過剰間隙水圧、 A はアンカーの底面積、 W_0 はアンカーの水中重量である。 $p_h - p_s$ の積分は Fig. 22 の分布形状に従って行った。この式の T_p に把駐力の実測値を代入し、内部摩擦角 ϕ を逆算すると $\phi=37^\circ$ であった。実験砂の三軸圧縮試験 (飽和状態、圧密排水試験) の結果では $\phi_d=35^\circ$ であるので、逆算した値がいくぶん大きい。しかし、この計算にはスカート前面に作用する土圧を考慮していないので、これを考慮すれば両者の値はもっと近づくものと考えられる。したがって、この場合の把駐力はスカート最下端面におけるせん断抵抗力として近似的に計算できる。

以上述べたように、 $\theta=90^\circ$ および $\theta=0^\circ, H'=0$ の場合のように、アンカーに回転モーメントが作用しない場合には、アンカーの底面の全面で係留力に抵抗できる。しかし、係留力が傾斜して作用し、回転モーメントが働く場合には、底面に圧縮側の面ができ、係留力に抵抗できる底面積が減少するために、把駐力は小さくなるものと考えられる。この場合の把駐力の発生機構は、 $\theta=90^\circ$ および $\theta=0^\circ, H'=0$ の場合の発生機構よりもはるかに複雑であると考えられるが、やはり前述の (i)～(v) の

要素が基本になるものと考えられる。

6. む す び

以上、模型実験をもとに、細砂地盤の海底にサクシオン・アンカーを使用する場合の把駐力およびアンカーの最適寸法などについて考察した。これまでに述べてきたことを結論として要約すると次のことがいえる。

(1) サクシオン・アンカーの内部の水を排水することにより砂層内に発生する浸透流は、不均一砂層内における非 Darcy 流となる。この実測流量は Fig. 10 に示したように減圧力に比例して増加し、2 次元 Darcy 流の理論解をもとにした流量計算式で求めた流量の約 70% に相当し、式 (6) で計算できる。

(2) サクシオン・アンカーの把駐力はアンカーの底部付近の砂層内に発生する過剰間隙水圧(負圧)とこの水圧のために増加する有効応力に深く関係する。アンカーを引き上げると、Fig. 20 に示したような砂塊が付着してくることから、サクシオン・アンカーの把駐力は、一般に、アンカーの水中重量、砂塊の水中重量、砂塊の破壊面に作用する間隙水圧、スカート周面に作用する周面摩擦力、砂塊の破壊面に作用する内部摩擦力の和として表わすことができる。

(3) サクシオン・アンカーの把駐力は作用させる減圧力に比例して増加する。したがって、把駐力の大きさを定める値として、アンカーの単位面積あたりの把駐力 $t_p - t_0$ と減圧力 $p_h - p_r$ との比 $\lambda (= (t_p - t_0) / (p_h - p_r))$ の値を用いるとよい。 λ はサクシオン・アンカーの把駐力係数とみなすことができる。

(4) 鉛直係留力が作用する場合の λ の値は約 0.37 であり、その把駐力は式 (10) で計算できる。

(5) 傾斜して係留力が作用するときの把駐力は、一般に鉛直係留力の場合の把駐力よりも減少し、その傾斜が大きいほど把駐力は小さい。したがって、いかなる方向から係留力が作用しても、少なくとも鉛直係留力の場合と同等の把駐力 ($\lambda = 0.37$) を得るためには、係留力の作用点の高さ H' を下げて、 $H'/2B = 0.2 \sim 0.3$ の範囲にする必要がある。

(6) しかし、 H' を小さくすることは、アンカーの減圧室の高さ H を小さくすることになる ($H' = H$)。減圧室の高さ H が小さくなると減圧室内の圧力が均一に発生しなくなり把駐力が減少するのではないかと考えられる。本実験の範囲では、減圧室の高さは $H/2B =$

$0.25 \sim 0.3$ 付近が適当ではないかと考えられるが、この不均一圧力による把駐力と、 H が小さくなった場合のアンカーの転倒に対する安定性ことから、その最適寸法を今後検討してゆく必要がある。

(7) スカート長を変化させた場合の把駐力の値は、行った実験の範囲では、ほとんど違いがなかった。しかし、実際の海底での使用状況などを考慮すると、スカートの寸法比 $D/2B$ の値は $0.2 \sim 0.3$ の範囲が適当ではないかと考えられる。

(8) 水平係留力の作用点が海底面にあり、アンカーに作用する回転モーメントが小さい場合には、最も大きい把駐力を得ることができる。したがって、アンカーに水平係留力しか作用しないことがわかっているときには、係留力の作用点を海底面まで下げればよい。このときの把駐力は、ほぼスカート下端面内のせん断抵抗力として計算できる。

(9) 実験では直径 $2B = 10, 15, 20$ cm の 3 種類の模型を使用した。これらの模型における λ の値はほとんど同等であった。また、圧入状態と非圧入状態における把駐力には差がなかった。

この論文で取り扱ったのは、サクシオン・アンカーを最も効率よく使用できると考えられる細砂地盤の海底における把駐力についてであったが、今後は、粗砂や粘性土についても研究を行っていきたいと考える。

最後に、この研究に貴重な助言をいただいた名古屋大学 市原松平教授に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Brown, G.A. and Nacci, V.A. : Performance of Hydrostatic Anchor in Granular Soils, Offshore Technology Conference, pp. II 533~542, 1972.
- 2) Wang, M.C., Nacci, V.A. and Demars, K.R. : Behavior of Underwater Suction Anchor in Soil, Ocean Engineering, Vol. 3, pp. 47~62, 1975.
- 3) 翁長一彦 : アンカーの把駐力に関する理論的考察, 船舶技術研究所報告, 4-6, pp. 1~18, 1967.
- 4) 井上令作・岩井勝美 : 砂地盤の海底から筒状基礎を引き抜く際に生じる吸引力, 土木学会論文報告集, 第 253 号, pp. 85~93, 1976.
- 5) Davidenkoff, R.N. und Franke, O.L. : Untersuchung der räumlichen Sickerströmung in eine umspundete Baugrube in offenen Gewässern, Die Bautechnik, pp. 298~307, 1965.
- 6) Harr, M.E. : Groundwater and Seepage, McGraw-Hill Book Company, pp. 136~137, 1962.
- 7) Polubarinova-Kochina, P.Ya. : Theory of Groundwater Movement, Princeton University Press, pp. 100~101, 1962.

(1977.6.23・受付)