

海洋開発に使用されるサクシ ョン・アンカー^{注)}の 砂地盤海底における把駐力

井上 令作*・岩井 勝美*

Holding Force of Suction Anchor on Sandy Sea-Floor in Marine Use

By

Reisaku INOUE and Masami IWAI

Abstract

The many kinds of anchors have been developed and used to moor ships, floating ocean structures, buoys etc. on the sea.

The need of anchors to be useful for salvage, construction and dredging operation on the ocean floor has been recognized. Because these anchorage systems are not permanent and require a high degree of mobility, the frequently used dead weight anchors are impractical as well as inefficient.

The suction anchor expounded in this paper is especially useful for short-term anchorage because it has a large ratio of holding force to anchor weight.

When a suction anchor is placed on a sea-floor and the pump is turned on, the water within the suction anchor is drained off and the pressure in anchor cavity is decreased below the ambient water pressure of suction anchor. Therefore, the seepage flow is caused in sand layer of sea-floor. In suction anchor, the excess pore water pressure and the effective stress in sand increased by this seepage flow are principally used for the pulling resistance.

The pulling tests using suction anchor models have been performed to study the characteristics of the holding force of suction anchor in sandy sea-floor. In this tests, the anchor diameter, the skirt length, the pressure in anchor cavity, the direction of pulling force and the kind of test sand have been varied.

As the results of the tests, we could estimate the values of the holding force of suction anchor in sandy sea-floor and consider the mechanism of its pulling resistance.

1. ま え が き

アンカーは海・陸をと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るにしたがって、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

* 海洋開発工学部 原稿受付昭和52年11月1日
注) 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・アンカーなどと呼ばれる場合
もあり、その名称は一定していないが、ここでは
サクシ ョン・アンカーと呼ぶ。

々の海洋開発用機器や海洋計測用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、しかも機動性に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ョン・アンカーでは、人為的にアンカーに吸引力¹⁾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、サクション・アンカーに関する研究もその原理をしらべる段階であり^{2),3)}、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。

サクション・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主に把駐力として利用する仕組みである。

本論文は、砂地盤の海底におけるサクション・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、実際にサクション・アンカーを使用するときの把駐力は、実験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、サクション・アンカーの把駐力特性をしらべると同時に、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もとに、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

サクション・アンカーの把駐力特性をしらべるために、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⁴⁾。模型を一定速度で引き上げて行くと、Fig. 7 の記録例に示すように、引き上げ力は極大値

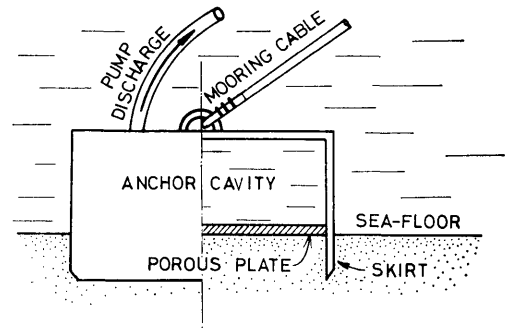


Fig. 1 Schematic View of Suction Anchor

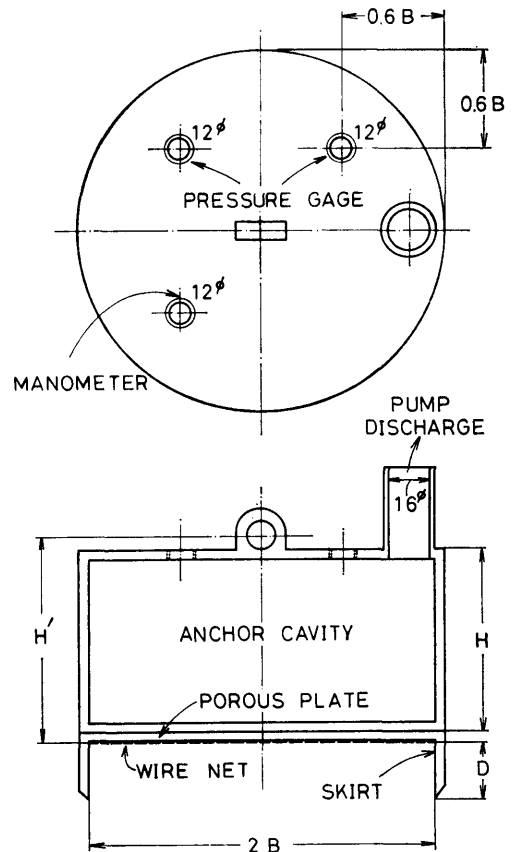


Fig. 2 Suction Anchor Model

に達する。この引き上げ力の極大値をサクション・アンカーの把駐力として定義する。

2.1 アンカー模型と実験装置

サクション・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

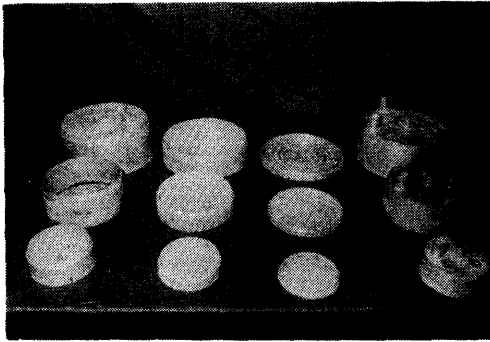


Photo 1 Suction Anchor Models

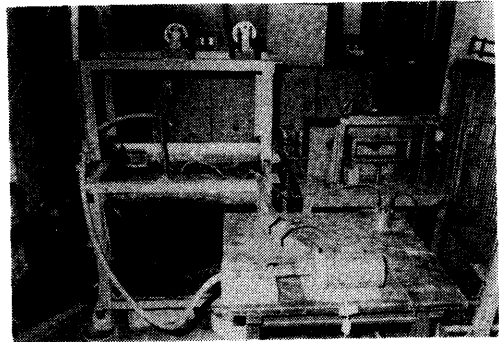


Photo 2 Apparatus of Model Test

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

カート部 (Skirt) から構成されていて、両者の間にはポーラス板があり、ポンプで減圧室の水を排水した場合におけ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。

実験に使用した模型の形状を Fig. 2 に、写真を Photo 1 に示した。写真は減圧室とスカート部に切り離れた状態である。模型は鋼製で、その上面には内径 16mm 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 個は水圧計を取り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、スカート部の内測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, 20cm 程度のものを 3 種類用い、内径の大きさにより、M₁₀, M₁₅, M₂₀ の記号とした。スカート長 (D) は M₁₀ と M₂₀ の模型では 3 種類、M₁₅ 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。また、減圧室の高さ (H) は内径の約半分の寸法、すなわち $H/2B \approx 0.5$ 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 は内面の周長 ($2\pi B$) を示している。

実験装置の写真を Photo 2 に、実験状態の概要図を Fig. 3 に示した。写真は鉛直方向の引き上げ実験であるが、図は傾斜して引き上げる場合の実験状態を図示した。写真の左側は水砂槽で、その中央にサクシ

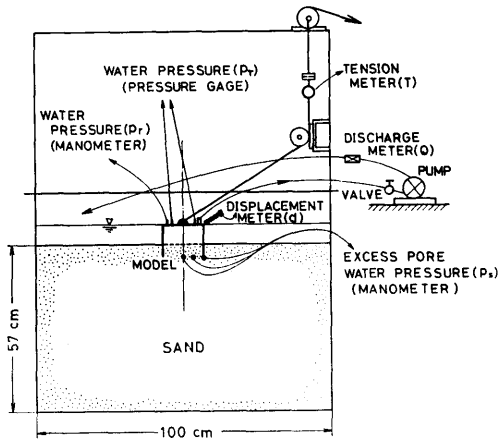


Fig. 3 Schematic View of Model Test

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、一番手前があるのが排水ポンプであって、揚程4mで流量50 l/min.の容量である。

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2mmのワイヤ・ロープを用い、滑車を移動することにより、引き上げ方向を変化させ

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台と水銀マンオメーター1台、また、ポンプの排水流量 (Q) を計測するための流量計などである。張力計は4枚のひずみゲージをはった外径5cm、肉厚3mmのリングゲージを用いた。

流量計はベンチュリー管式の手製の流量計を使用した。その概略図と検定値は Fig. 4 に示してある。検定値はすべて指数曲線上にあり、流量 (Q) と圧力差 (h) との関係は $Q=22.56h^{0.55}$ の式で表わすことができた。

実験には細砂 (SAND I : 標準砂, SAND II : 鬼怒川砂) を使用し、その物理的性質は Table 2 に示した通りである。

2.2 実験の種類と実験装置

実験は大別して、引き上げ実験 (把駐力実験) とアンカー模型下端部の間隙水圧計測とに分けられる。引き上げ実験の種類と実験に関連する値を Table 3 に示した。大多数の実験では、アンカー模型を水砂槽にセットする場合、ポーラス板が砂表面に接するまで手で模型を圧入し、その後、ポンプを作動し引き上げを行ったが、その状態での実験を Table 3 においては

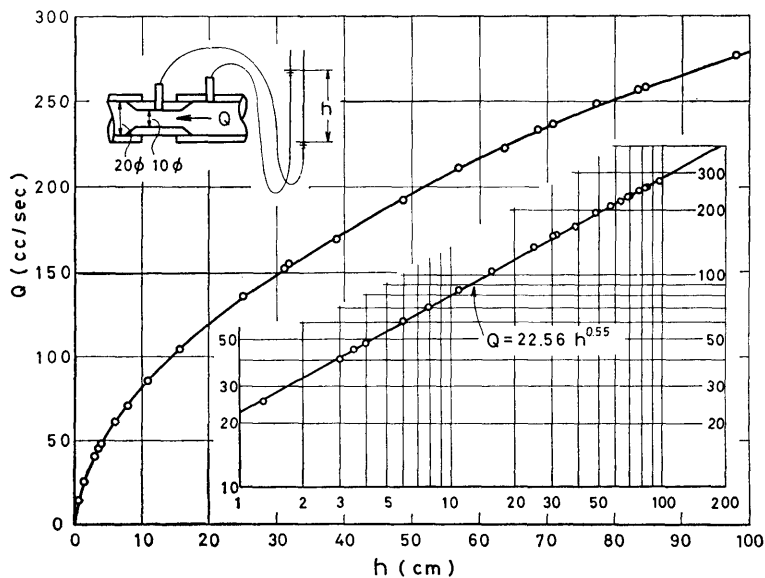


Fig. 4 Calibration of Discharge Meter

Table 2 Characteristics of Experimental Sand

SAND	SPECIFIC GRAVITY	DRY DENSITY (g/cm ³)	VOID RATIO	EFFECTIVE GRAIN SIZE (mm)	UNIFORMITY COEFFICIENT	FRIC-TIONAL COEFFICIENT	PERMEABILITY AT 20°C (cm/sec)
I	2.65	1.60	0.64	0.13	1.3	0.40	0.017
II	2.73	1.54	0.77	0.19	1.8	0.37	0.025

Table 3 Data Pertaining to Tests

SAND	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							
I	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	15.6	S	0.059	8.6	90	0~440		15~16
							60	0~450		16
							30	0~450		17
							0	0~400		16
		M ₁₅	15.6	SM	0.140	8.6	90	0~490		14~15
		M ₁₅	15.6	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	15.6	L	0.442	8.6	90	0~490		17
							60	0~480		13
							30	0~470		14
0	0~470	15								
M ₁₅	15.6	S	0.059	0	0	0~400	11			
M ₁₅	15.6	S	0.059	3.4	0	0~450	13			
M ₂₀	20.6	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			
II	PRESSED	M ₁₅	S	0.059	8.6	90	0~470	11		
			M	0.250		90	0~480	12		
			L	0.442		90	0~480	11		

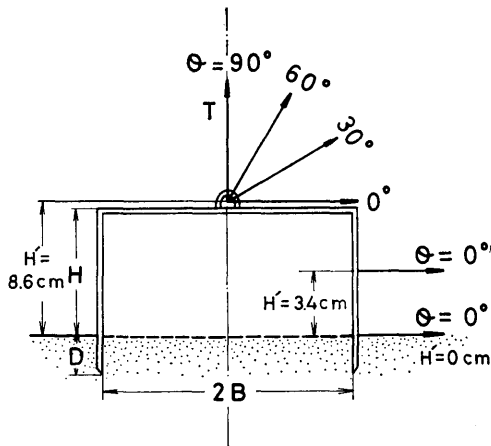


Fig. 5 Directions and Applied Points of Pulling Force in Tests

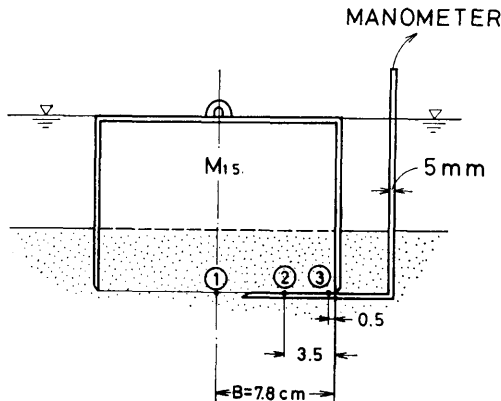


Fig. 6 Measured Points of Pore Water Pressure

PRESSED と記入してある。模型を圧入せず自然に着地させた後、ポンプを作用し引き上げた場合を 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 H' については Fig. 5 に示す通りである。引き上げ方向 θ に関しては鉛直方向 $\theta=90^\circ$ の場合を主にして実験を行ったが、実際に海底でアンカーを使用する場合には係留方向は鉛直方向だけとは限らず、むしろそれ以外の場合が多いと考えられるために、 M_{15} の模型を用いて 60° 、 30° 、 0° の実験も行い、係留力の作用方向による把駐力の変化をしらべた。また、作用点の影響をしらべるために、 M_{15} -S の模型を用い、 $H'=0$ 、 3.4 、 8.6 cm の実験も行った。

また、アンカーの囲りの水圧（外圧、実験の場合に

は水砂槽の水位を模型の上面と一致させたので、この水圧は小さい） p_h と、ポンプで排水することによって生じる減圧室の圧力 p_r との差、 $p_h - p_r$ は 0 から約 450 g/cm^2 の範囲で実験を行った。 $p_h - p_r = 0$ の実験はポンプを作用させないで行った引き上げ実験である。

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（引き上げ速度を大きくすると、模型底部に吸引力が作用するので、引き上げ速度はできるだけ遅くした）。

アンカー模型の下端部における過剰間隙水圧 p_s の計測は Fig. 6 に示すような方法で、主として M_{15} の模型を用いて計測した。測定した場所はスカート最下端面内で、Fig. 6 に示すように①、②、③の場所で計測した。間隙水圧の測定には先端に網目の細かい金網を取り付けた外径 5 mm の真鍮のパイプを用いた。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後、ポンプを作用し減圧室の圧力 p_r を順次変化させて行き、それに応じる p_s を水銀マンオメーターで読みとった。

引き上げ実験の手順は、まず、砂表面を手で締め固めて平らにし、模型のポラス板に砂表面が接するまで静かにゆっくりと手で圧入する。圧入後の水砂槽の水位は模型の上面と一致させるようにした。圧入が終了と排水ポンプを作用し、水銀マンオメーターで減圧室の圧力を監視しながら、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 が一定になった所で、排出される水の流量 Q_e を計測する。その後、駆動装置で模型を一定速度 ($V=0.05 \text{ m/sec}$) で引き上げ、そのときの張力 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。記録は引き上げ力が極大値を過ぎるまで続けた。実験が終了すると、模型を砂中より引き上げ、砂をよくかきまぜて、均一になるように手でしめ固め、次の実験にとりかかる。

以上は模型を砂中に圧入した状態 (PRESSED) での実験手順であったが、圧入を行わない場合 (NOT PRESSED) の実験は次の手順で行った。まず、圧入状態で実験が終了した後、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。次に模型を静かに着地させる。模型は自重と砂の支持力がつり合った所で停止する。この状態でポンプのスイッチを入れ排水を始めると、模型は急激に沈下する。この場合も、圧入状

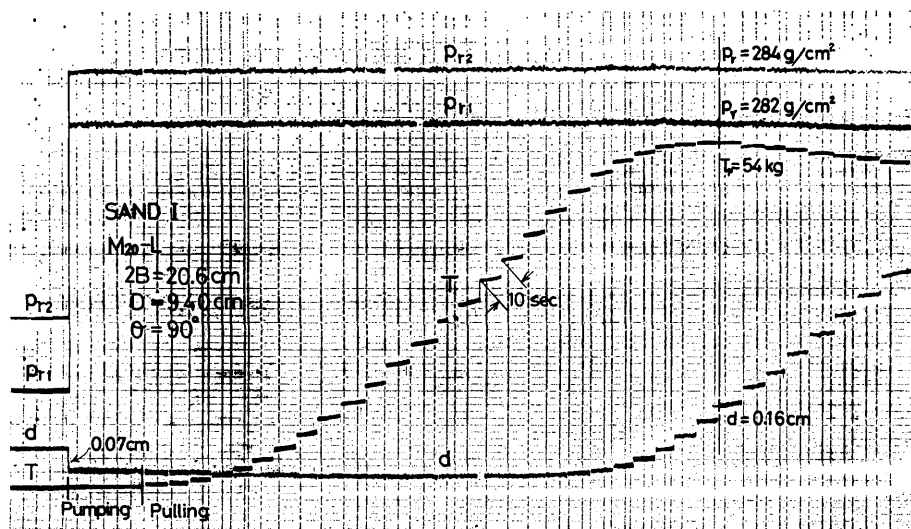


Fig. 7 Record of Pulling Test

態の実験と同様に、減圧室は1分以内で安定する。それ以後の手順は圧入状態の実験手順とまったく同じである。非圧入状態の実験は、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、特に記さないかぎり、実験はすべて圧入状態での実験である。

Fig. 7 に電磁オシロによる引き上げ実験の記録例を示した。この記録は M_{20-L} ($2B=20.6\text{cm}$, $D=9.40\text{cm}$) の模型を用いた実験で、引き上げ方向 $\theta=90^\circ$ の場合である。引き上げ速度が遅いために、紙送りを10秒間隔で行い記録した。 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、最初、ポンプで排水を始めると微量ではあるが模型は沈下する(この記録では、 0.07cm であった)。 T は引き上げ力である。引き上げ力はこの記録例に示したように、いずれの場合にも極大値を有している。サクシオン・アンカーの把駐力として必要な値は、この極大値であるから、データを解析する場合には、この極大値をサクシオン・アンカーの把駐力として用いた。

一方、減圧室の圧力は Fig. 7 の記録例に示したように均等に発生し、しかも、模型を引き上げている間、一定値を保った。しかし、スカート長が短い模型

の場合には多少減少する場合もあったので、解析には、引き上げ力 T が極大値 T_p に達した瞬間における圧力(記録例では、 284g/cm^2 と 282g/cm^2)を用いた。しかし、模型を引き上げる前に行う流量計測には、流量を計測した時点の圧力を用いた。

3. アンカー底部の間隙水圧と排水流量

サクシオン・アンカー内部の水を強制排水することにより、砂層内に浸透流が生じ、過剰間隙水圧が発生する。この砂層内の、特にアンカー底部付近の、過剰間隙水圧の状況を把握することは、アンカーの把駐力の発生機構を考察する上で非常に重要なことである。

また、ポンプで排水する流量と減圧室内の圧力との関係は、アンカーに使用するポンプの容量を決定する際に必要なことで、特に、ポンプをアンカー内に組み込む場合にはできるだけ小型のものが要求されるために、流量と圧力との関係を把握しておくことは非常に重要なことである。

この間隙水圧や排水流量に関しては、砂層内を浸透する水の透水現象として説明できるはずである。しかし、サクシオン・アンカーの場合には、砂層内を浸透する水量が非常に多量であるために非 Darcy 流となること、および砂層内の浸透水圧が大きいために、アンカー底部付近では砂の圧密が発生し砂層は不均一状態となるために、完全に理論的に解決することは困難である。そのために、筆者らは、まず2次元の Darcy

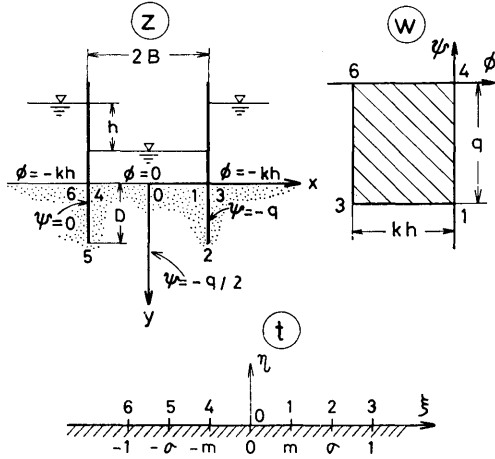


Fig. 8 Complex Planes for Mapping

流における理論解を求め、その解と実験で計測した値とを対比することにより、間隙水圧および排水流量に関する考察を行った。

3.1 2次元 Darcy 流における理論解

サクション・アンカーにおける透水現象を2次元 Darcy 流を基本として考える場合、Fig. 8 の②平面に示す現象を解けばよい。②平面で砂の中に入っている部分、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する。また、番号1-4の部分がポーラス板の部分である。水頭差 $\gamma_w h$ 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 $p_h - p_r$ に相当する。

Fig. 8 の複素平面に Schwarz-Christoffel の変換を用いて、②平面と③平面を①平面に写像すると、それらの写像関数は次のように表わすことができる^{6), 7)}。

$$z = \frac{2B}{\pi} \{ (E' - K')u + K'E(u) \} \quad (1)$$

$$w = -\frac{kh}{K'}(u + K)i \quad (2)$$

$$\text{sn}(u) = \frac{t}{m} \quad (3)$$

また流量 q は次の式で表わされる。

$$q = -\frac{2K}{K'}kh = -\frac{1}{\phi}kh \quad (4)$$

以上の式で、 m, m' は母数、 K, K', E, E' はそれぞれ m, m' を母数とする第1種および第2種の完全楕円積分、 $u, E(u)$ は m を母数とする第1種および第2種の楕円積分 (Jacobi の表示)、 $\text{sn}(u)$ は Jacobi の楕円関数、 $1/\phi (=2K/K')$ は形状係数、 k

は透水係数、 i は虚数単位をそれぞれ示す。

これらの式を実数計算できる式に書きあらためると、まず、式(3)より ξ と η は、

$$t = \xi + i\eta, \quad u = u_1 + iu_2$$

であるから

$$\left. \begin{aligned} \xi &= \frac{m \text{sn}(u_1) \text{dn}(u_2')}{\text{cn}^2(u_2') + m^2 \text{sn}^2(u_1) \text{sn}^2(u_2')} \\ \eta &= \frac{m \text{cn}(u_1) \text{dn}(u_1) \text{sn}(u_2') \text{cn}(u_2')}{\text{cn}^2(u_2') + m^2 \text{sn}^2(u_1) \text{sn}^2(u_2')} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、 $\text{sn}, \text{cn}, \text{dn}$ は Jacobi の楕円関数であり、 $\text{sn}(u_2') = \text{sn}(u_2, m')$ 、 $\text{cn}(u_2') = \text{cn}(u_2, m')$ 、 $\text{dn}(u_2') = \text{dn}(u_2, m')$ である。

また、式(1)より x と y は、

$$z = x + iy, \quad u = u_1 + iu_2$$

であるから、

$$\left. \begin{aligned} x &= \frac{2B}{\pi} \left[(E' - K')u_1 + K' \left\{ E(u_1) + \frac{m \text{sn}(u_1) \text{sn}(u_2')}{\text{cn}(u_2')} \eta \right\} \right] \\ y &= \frac{2B}{\pi} \left[E'u_2 - K' \left\{ E(u_2') - \frac{\text{sn}(u_2') (\text{dn}(u_2') - m \text{sn}(u_1) \xi)}{\text{cn}(u_2')} \right\} \right] \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

一方、式(2)からポテンシャル ϕ と流線 Ψ は、

$$w = \phi + i\Psi, \quad u = u_1 + iu_2$$

であるから、

$$\left. \begin{aligned} \phi &= -\frac{kh}{K'}u_2 \\ \Psi &= -\frac{kh}{K'}(K + u_1) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

以上の式(5)から式(7)までを用いて実測値と比較するために必要な箇所の計算式を求めておく、まず、側壁の最下点、すなわち②面の番号2の場所においては、

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= K \\ \xi &= \sigma = \frac{m}{\text{dn}(u_2')} \\ \eta &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{cases} x = B \\ y = D \end{cases}$$

であるから、側壁の半幅 B と根入れ深さ D との比 D/B は次の式で表わされる。

$$\frac{D}{B} = \frac{2}{\pi} \left[E'u_2 - K' \left\{ E(u_2') - \frac{m^2 \text{sn}(u_2') \text{cn}(u_2')}{\text{dn}(u_2')} \right\} \right] \quad (8)$$

ここで、 $E(u_2') = E(u_2, m')$ のことである。また、 ϕ と Ψ は、

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \frac{kh}{K'} u_2 \\ \psi &= -\frac{2K}{K'} kh = -q \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

また、②平面の y 軸上においては、

$$u_1 = 0 \quad \left\{ \begin{aligned} \xi &= 0 \\ \eta &= m \frac{\operatorname{sn}(u_2')}{\operatorname{cn}(u_2')} \end{aligned} \right.$$

であるから、

$$y = \frac{2B}{\pi} \left[E'(u_2) - K' \left\{ E(u_2') - \frac{dn(u_2')}{m} \eta \right\} \right] \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} \phi &= \frac{kh}{K'} u_2 \\ \psi &= -\frac{K}{K'} kh = -\frac{q}{2} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

となる。

Fig. 9 に式(10), (11)および(8)を用いて計算した ϕ の値を $D/2B$ に応じて示した。深さ y の値は側壁間隔の半幅 B の倍数で示した。

一方、式(4)で表わされる流量の式で形状係数は、

$$\frac{1}{\phi} = \frac{2K}{K'}$$

で示されるから、式(8)と上式を用いて ϕ を計算し、 $D/2B$ に応じて図示すると Fig. 10 のようになる。以上の2次元流における計算値をもとにして、間隙水圧および排水流量を考察した。

3.2 間隙水圧の実測値

2.2で述べたように、アンカー模型のスカート最下端面における過剰間隙水圧 p_s の計測を行った。計測の方法は、まず模型を水砂槽内にセットした後、測定用のパイプを Fig. 6 に示したように所定の場所までそう入する。その後、減圧室の圧力を所定の圧力まで下げて行き、圧力が一定になったときの p_s を水銀マノメーターで測定する。測定箇所は模型のスカート最下端面内の①、②、③の場所である (Fig. 6 参照)。

Fig. 11, Fig. 12 に一例として、M₁₅の模型における①および③の場所の実測値をスカート長と模型の直径との比 $D/2B$ に応じて示した。この図の横軸には、模型に作用する外圧 p_h と減圧室の圧力 p_r との差 $p_h - p_r$ の値をとってある。 $p_h - p_r$ は間隙水圧、排水流量、把駐力などに密接に関係する値であり、以後のデータの解析には $p_h - p_r$ を用いた。実験での p_h の値は小さいが、実際にアンカーを使用した場合の p_h は海底の水圧であるから、非常に大きな値となる。ア

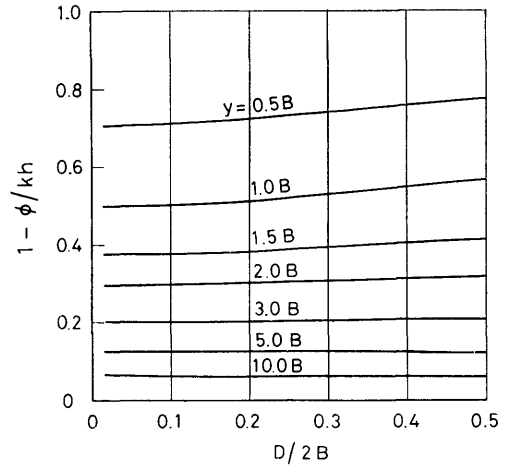


Fig. 9 Calculated Values of ϕ on y Axis of ② Plane in Fig. 8

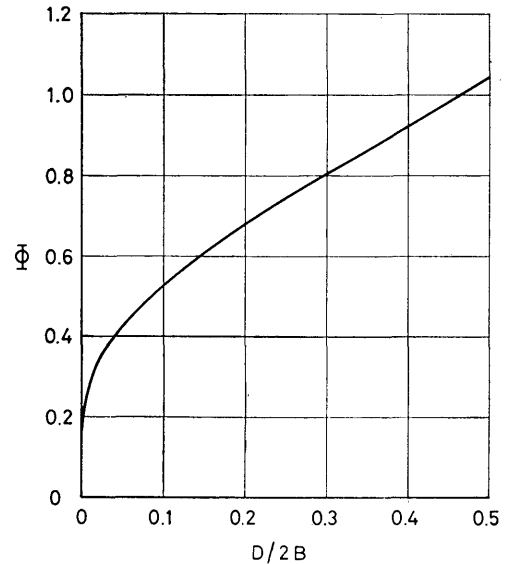


Fig. 10 Values of Shape Factor ϕ

ンカーを海底に沈めた場合、減圧室の圧力は外圧と等しいから $p_h - p_r = 0$ である。ポンプを作動し減圧を始めると減圧室の圧力は下がるが、その減圧力を Δp とすると、 $\Delta p = p_h - p_r$ と書ける。

また、2次元の理論解とは次に示すような関係で対比できる。

$$\left. \begin{aligned} \gamma \omega h &= p_h - p_r \\ 1 - \frac{\phi}{kh} &= \frac{p_h - p_s}{p_h - p_r} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Fig. 11, Fig. 12 でわかるように、外圧と過剰間

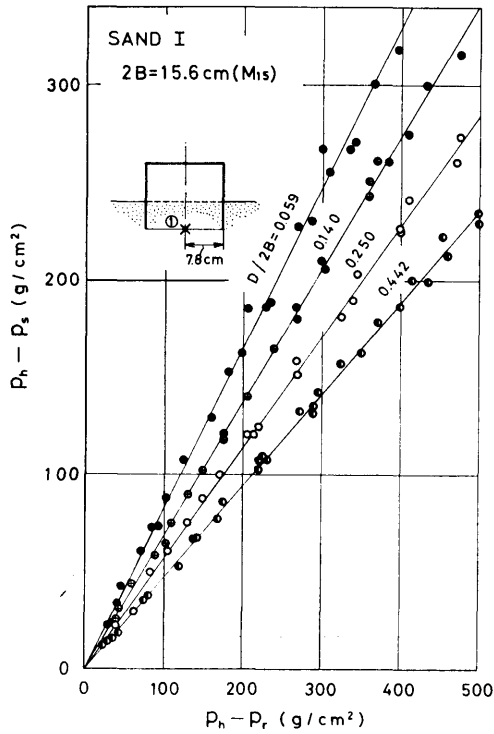


Fig. 11 Measured Values of Excess Pore Water Pressure at Position ①

隙水圧との差 $p_h - p_s$ 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。また、 $D/2B$ の値が大きくなるにしたがって、すなわちスカート長が長くなるにしたがって $p_h - p_s$ の値は減少している。両図を対比すると、同じ $D/2B$ の値に対しては、①の場所の $p_h - p_s$ の値が③の場所の値よりも大きい。これらの直線の勾配は $(p_h - p_s)/(p_h - p_r)$ であるから、式(12)に示したように2次元のポテンシャルと対比できる。

Fig. 13 はスカート最下端面における間隙水圧の分布形状をしらべるために、M15の模型について、Fig. 11, Fig. 12 などから読みとった直線の勾配 $(p_h - p_s)/(p_h - p_r)$ の値(丸印)を実測箇所に応じて示したものである。スカート最下端点の値は実測できなかったため、①, ②, ③の場所の実測値を延長して、その値を求めた(0.33, 0.40, 0.52)。

Fig. 14 はスカート最下端面における模型の中心点(①の場所)とスカート最下端点の間隙水圧について、実測値 $(p_h - p_s)/(p_h - p_r)$ と2次元理論値 $(1 - \phi/kh)$ とを比較して示したものである。太い実線と破線は理論値で、丸印、黒丸印、三角印などは実測し

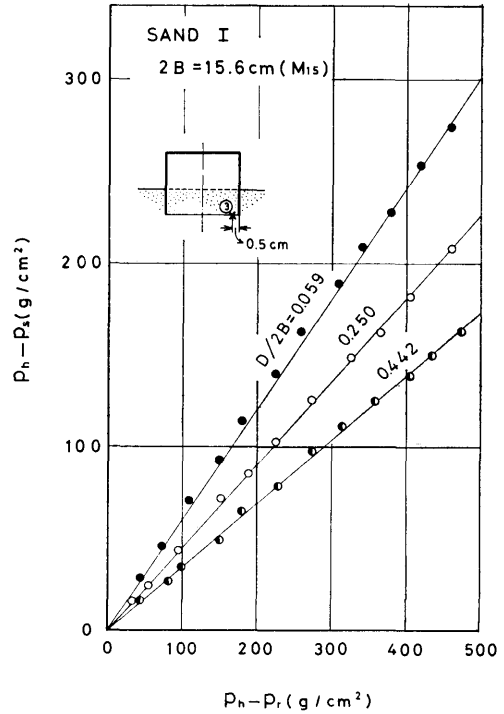


Fig. 12 Measured Values of Excess Pore Water Pressure at Position ③

た値である。しかし、⊗印で示したスカート最下端点の実測値は、Fig. 13 で実測値を延長して求めた0.33, 0.40, 0.52の値である。実測値と2次元理論値を比較すると、スカート最下端点においては、実測点数が少なく明確には判断できないが、だいたい実測値は2次元理論値に近い値を示している。しかし、アンカーの中心点においては、実測値が2次元理論値よりも大分小さな値になっている。

3.3 排水流量

ポンプで排水する流量と減圧室の圧力との関係を把握しておくことは、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上で非常に重要なことである。流量の計測は2.1で述べたようなベンチュリー管式流量計を用いた。流量は引き上げ実験を行う前には必ず計測し、また間隙水圧の計測の場合にも同時に流量計測を行ったので、多数の実測値を得ることができた。

2次元理論解における単位流量 q は式(4)で示したように、 $q = -kh/\Phi$ で表わされる。

ここで、2次元流の流量に補正係数 α を用いて3

次元流の流量 Q で表わすと、

$$Q = \alpha q L = \frac{1}{\phi} \alpha k h L$$

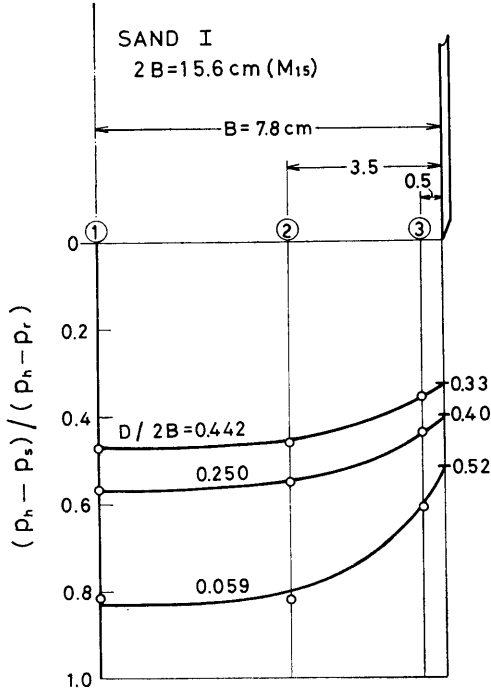


Fig. 13 Distribution of Pore Water Pressure in Cross Section at Toe of Skirt

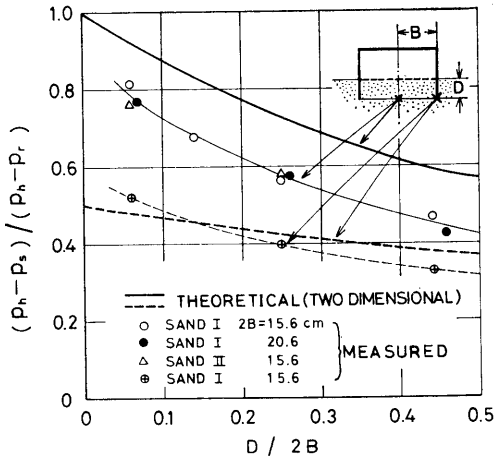


Fig. 14 Comparison between Measured Values and Calculated Ones of Two Dimensional Pore Water Pressure in Cross Section at Toe of Skirt

ここで、 L はスカート部の内面の周長である。また、補正係数 α の値については後で述べる。上式に、式(12)に示した関係 $h = (p_h - p_r) / \gamma_w$ を代入すると、Darcy 流と仮定した場合のサクシオン・アンカーにおける流量 Q_c (実験値 Q_e と比較するために、計算流量を Q_c で表わした) は次に示すような式で表わすことができる。

$$Q_c = \frac{\alpha k (p_h - p_r) L}{\gamma_w \phi} \quad (13)$$

一方、排水流量の実測値 Q_e の一例を示したものが、Fig. 15, Fig. 16 である。これらの実測流量は、実験を長期にわたって行ったために、実験時の水温が Table 3 に示したように 11°C から 20°C まで変化している。そのために、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。前にも述べたように流量の実測値は、引き上げ実験の前に計測したもの、および間隙水圧測定時に計測したものであり、特に M15 の模型では引き上げ実験の数が多いために、流量の実測値も非常に多い。これらの流量の実測値 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、これらの実測値の勾配、すなわち $Q_e / (p_h - p_r)$ の値と、式(13)から求められる、 $Q_c / (p_h - p_r)$ の値を比較してみる。計算流量 Q_c を求める場合、透水係数は水温 15°C のときの値に補正して用いた。また、2次元流量を3次元流量に変換するための補正係数 α については文献1), 5) などで考察されているが、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1) で求めた値 $\alpha = 0.75$ を用いて計算した。Table 4 にはすべての模型について、 $Q_e / (p_h - p_r)$ と $Q_c / (p_h - p_r)$ 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、模型の大きさや透水係数が変わっても 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. 17 は Table 4 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。これらの値は砂の種類、模型の大きさ、スカート長などには無関係に、ほぼ、0.7 付近に分布していることがわかる。

以上述べてきたことから、サクシオン・アンカーにおける排水流量は Darcy 流における理論解をもとにして計算した流量 (式(13)) の 70% に相当する。すなわ

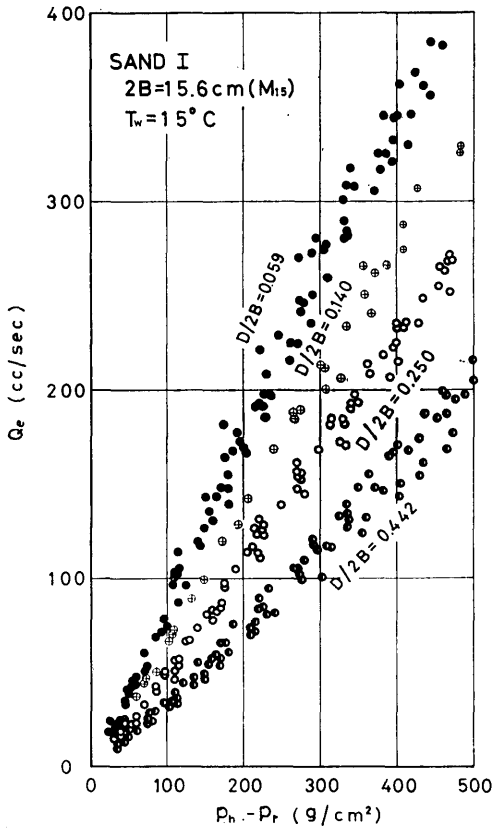


Fig. 15 Measured Values of Pumped Discharge (M_{15})

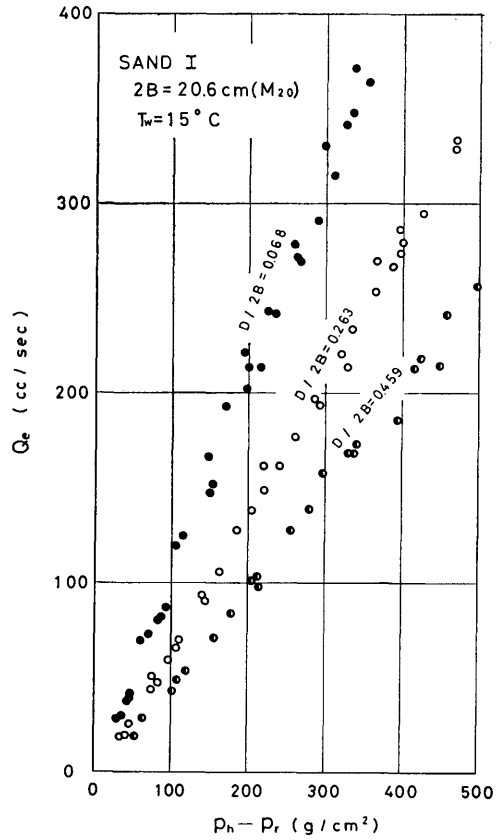


Fig. 16 Measured Values of Pumped Discharge (M_{20})

Table 4 Comparison between Calculated Discharge and Measured One

SAND	MODEL	$2B$ (cm)	$D/2B$	L (cm)	ϕ	k_{150C} (cm/sec)	α	Q_e/Q_c
I	M_{10} — S M L	10.6	0.039	33.30	0.395	0.015	0.75	0.72
			0.229		0.715			0.69
			0.415		0.943			0.71
	M_{15} — S SM M L	15.6	0.059	49.01	0.442			0.70
			0.140		0.592			0.72
			0.250		0.742			0.73
			0.442		0.975			0.71
	M_{20} — S M L	20.6	0.068	64.72	0.460			0.68
			0.263		0.757			0.72
			0.459		0.994			0.69
II	M_{15} — S M L	15.6	49.01	0.442	0.022		0.66	
				0.250			0.742	0.72
				0.442			0.975	0.67
MEAN								0.70

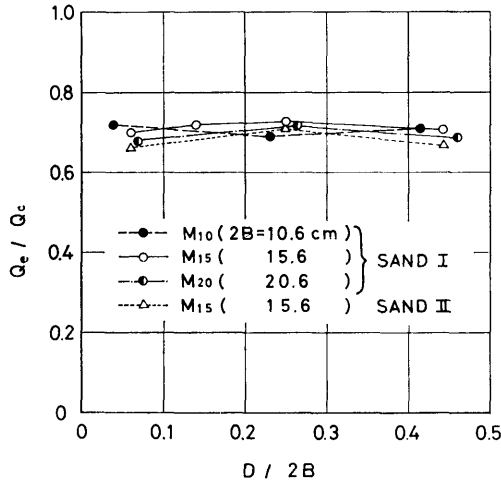


Fig. 17 Comparison between Calculated Discharge and Measured One

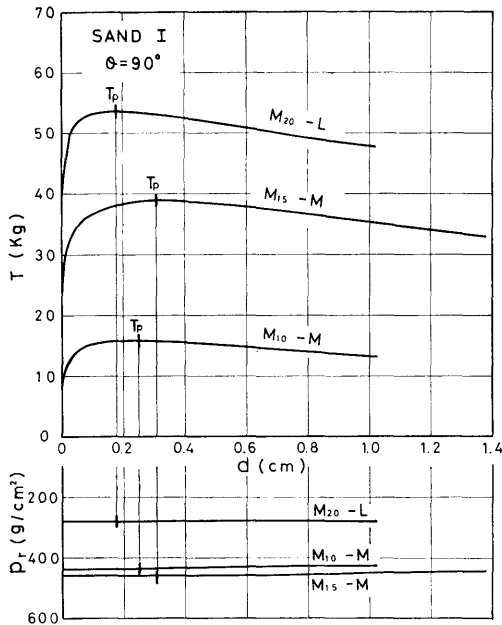


Fig. 18 Variations of Pulling Force T and Pressure of Anchor Cavity p_r According to Displacement of Model d

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比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 30% 減少している。

式(13)をもとにしてサクシオン・アンカーにおける排水流量の式を求めると次のようになる。

$$Q = \frac{0.7\alpha k(p_h - p_r)L}{\gamma_w \Phi} \quad (14)$$

$$\alpha = 0.75$$

4. 把駐力の実測値に関する考察

サクシオン・アンカーの把駐力を調べるにあたっては、Table 3 に示した状態における引き上げ実験を実施した。この章では、これらの実験値の解析結果にもとづき、サクシオン・アンカーの把駐力特性について考察し、また、把駐力の発生機構についても調べる。

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. 7 の記録に示したように、引き上げ力 T は増加し極大値に達する。この引き上げ力の変化を模型の変位（張力の作用方向の変位）に対して示したのが Fig. 18 である。図の下側に示したのは、引き上げ中における減圧室の圧力の変化である。引き上げ力はこの図に示したように極大値を有しているが、アンカーの把駐力として必要とする値はこの極大値であるから、この値を把駐力 T_p として解析に用いた。減圧室の圧力 p_r は、引き上げ力が極大値に達した瞬間の圧力を用いた。一例として、Fig. 18 に示したのは、引き上げ方向が鉛直 ($\theta=90^\circ$) の場合であるが、鉛直以外の方向に引き上げた場合でも同じ傾向となる。 $\theta=90^\circ$ の場合には、変位 $d=0.4\text{cm}$ 以下で、すべて引き上げ力の極大値は発生したが、 $\theta=90^\circ$ 以外の実験ではいくぶん大きくなり 0.6cm 以下で極大値は発生した。また Fig. 18 でもわかるように、減圧室の圧力 p_r が小さくなるにしたがって、極大値の発生する変位は大きくなる。

Fig. 19 に、引き上げ方向 $\theta=90^\circ$ の場合の把駐力 T_p を外圧と減圧室との圧力差 $p_h - p_r$ に応じて示した。この図で、 $p_h - p_r = 0$ の軸上における T_p の値は、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た場合の T_p の値である。

Fig. 19 に示したように、把駐力 T_p は $p_h - p_r$ に対してほとんど直線的に増加しているので、 T_p と $p_h - p_r$ の関係は次の式で表わすことが出来る。

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

この式で λ は直線の勾配、 T_0 は $p_h - p_r = 0$ 、すなわちポンプを作動しないで引き上げた場合の把駐力である。また、 A はアンカーの底面積である。

上式の両辺を A で割り、単位面積当りの把駐力で

表わすと, $T_p/A=t_p$, $T_0/A=t_0$ より,

$$t_p = \lambda(p_h - p_r) + t_0 \quad (15)$$

と書きかえられる。また, 勾配 λ は次の式で表わされ

る。

$$\lambda = \frac{t_p - t_0}{p_h - p_r} \quad (16)$$

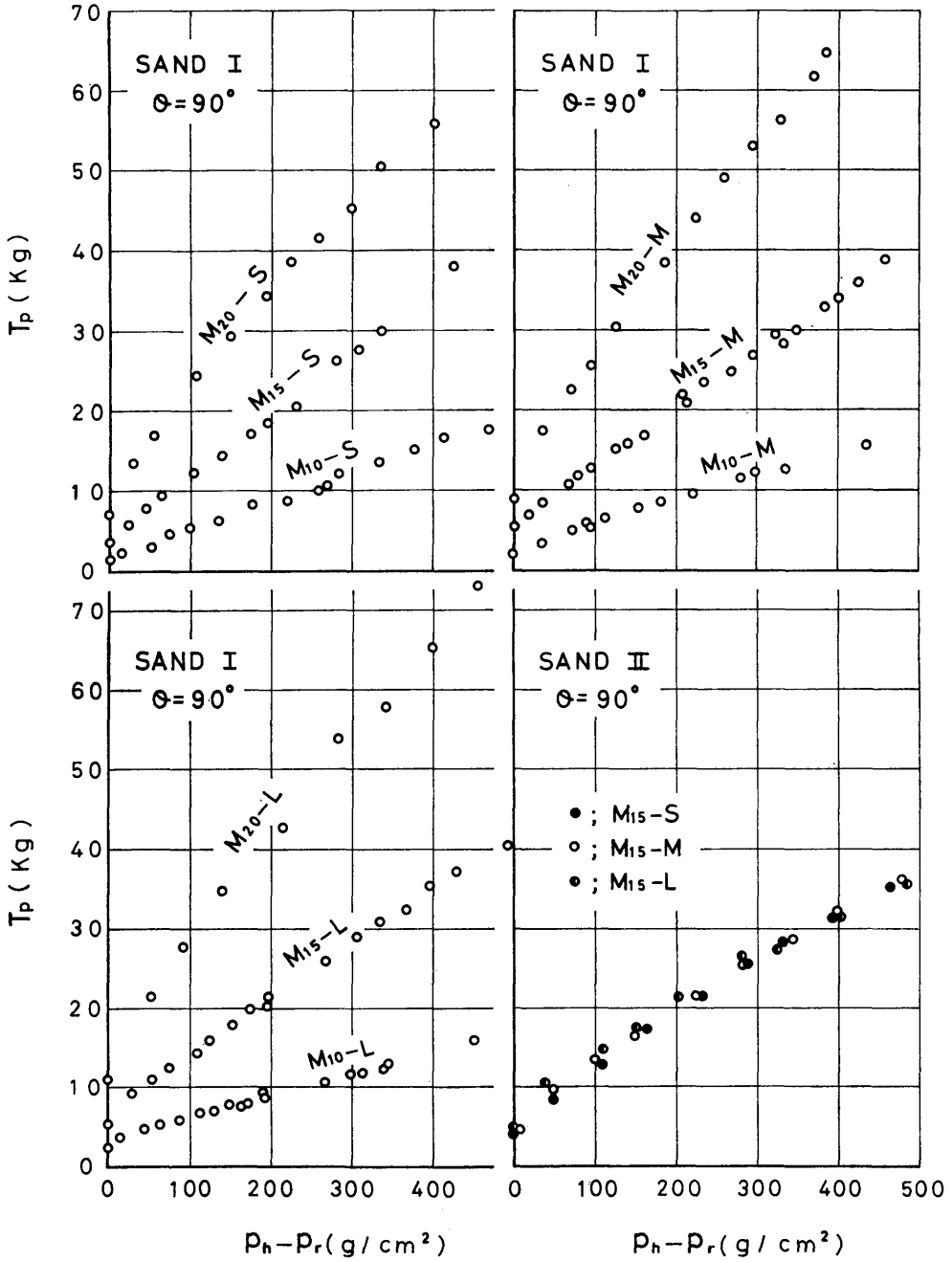


Fig. 19 Measured Values of Holding Force at $\theta=90^\circ$

λ の値はサクション・アンカーの把駐力係数と考えることもでき、 λ の大きさが把駐力を左右する。しかし、 λ は通常のアンカーに使用される把駐力係数 H/W_0 (H はアンカーの把駐力、 W_0 はアンカーの水中重量) とは性質が異なるので注意を要する。

4.1 係留力が鉛直に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 ($\theta=90^\circ$) の場合を重点とした。Fig. 20 は $\theta=90^\circ$ の場合の t_p-t_0 の値を p_h-p_r に応じてプロットしたものであり、模型の大きさ (M_{10} , M_{15} , M_{20}) で図をわけて、スカート長 D (S , SM , M , L) ごとに印をかえて示した。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がいくぶん0点からずれている。しかし、この実測値を0点を通る直線で近似すると、その勾配が式(10)に

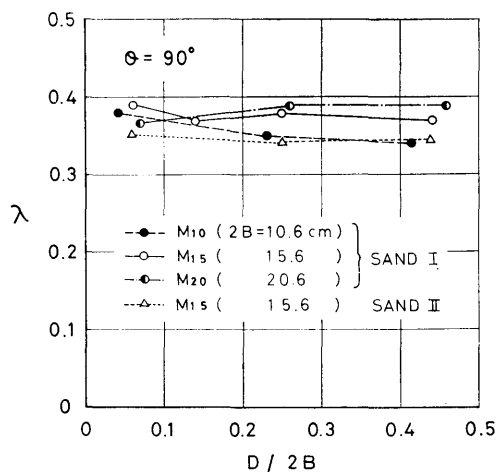


Fig. 21 Values of λ at $\theta=90^\circ$

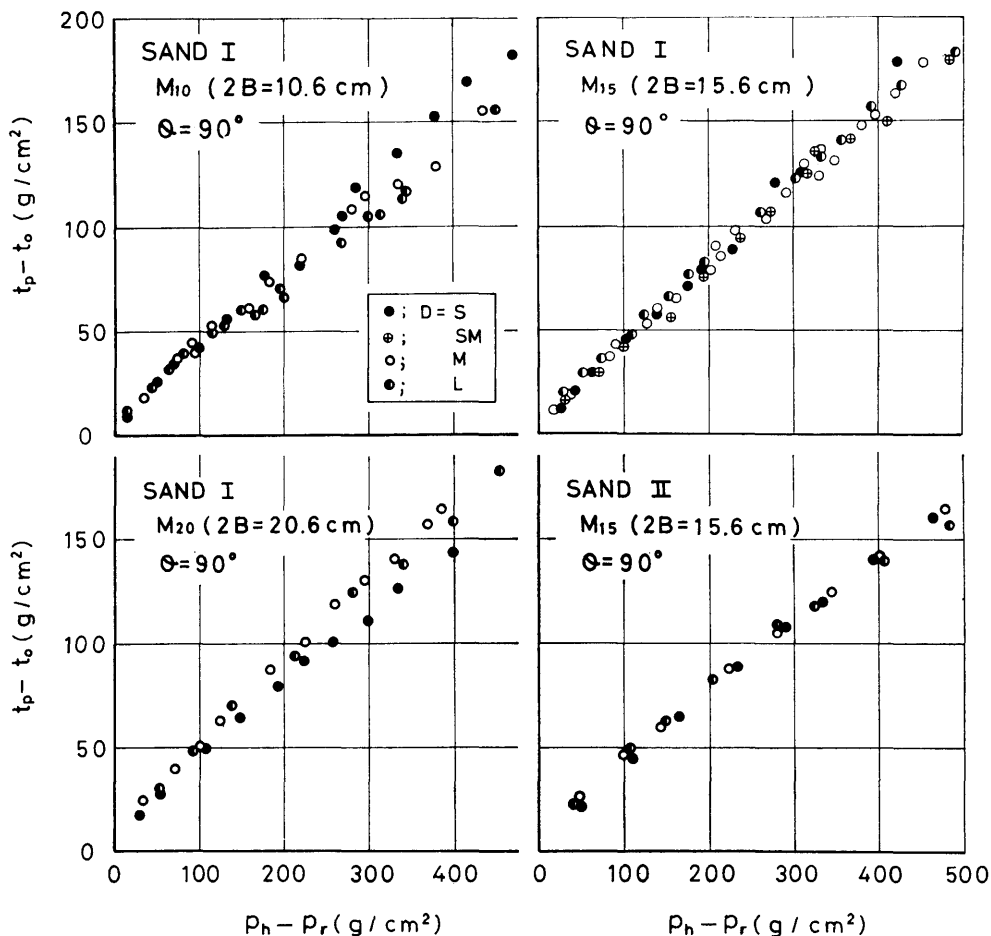


Fig. 20 Relation between t_p-t_0 and p_h-p_r at $\theta=90^\circ$

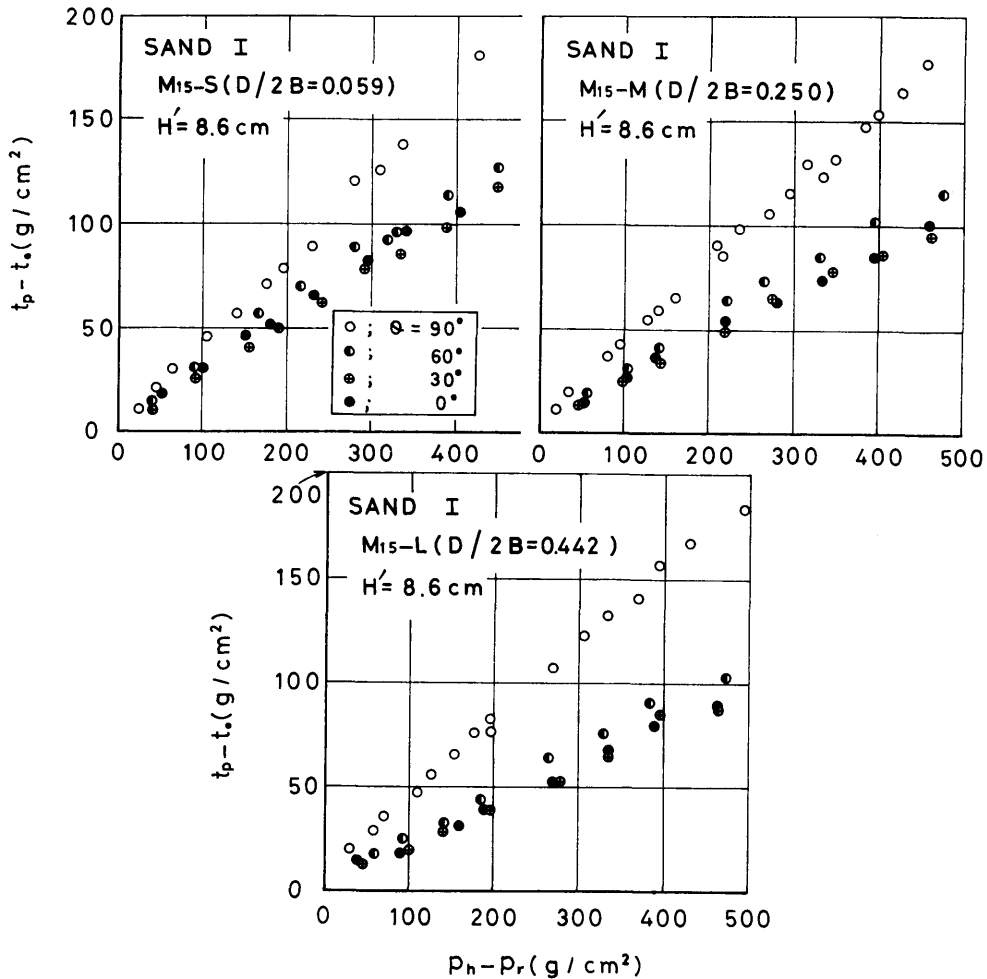


Fig. 22 Relation between $t_p - t_0$ and $p_h - p_r$ at $\theta \leq 90^\circ$

示した λ の値を表わしている。M₁₅の実測値は、模型が手ごろの大きさであり、最も実験が行いやすいという理由もあるが、一本の直線上に分布していて、スカート長による影響はまったく認められない。

これらの図から、 $t_p - t_0$ の実測値は原点を通る直線で表わすことが出来るものとして、その直線の勾配 λ の値をスカート長(D)ごとに求め、 $D/2B$ を横軸にとりプロットしたものがFig. 21である。これらの値にはある程度のばらつきはあるが、定まった傾向で変化しているものは、SAND II(三角印)を除けば特になく、 λ の値は0.34から0.39の間に不規則に分布している。SAND IIの値(三角印)はSAND Iの値にくらべいくぶん小さくなる傾向にはあるが、

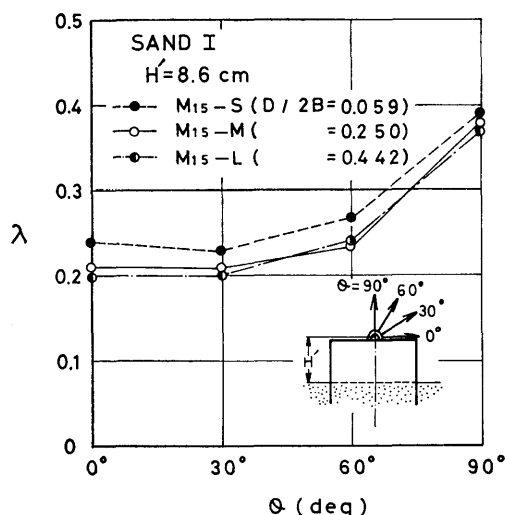
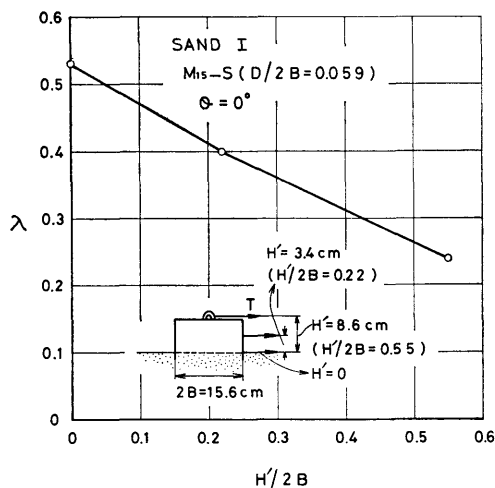
SAND IIの実験点は少なく、明確に砂の種類による違いを判定することはできない。この問題については今後の研究で解明して行きたいと考えている。

以上のように、行った実験の範囲から考えると、係留力が鉛直方向に作用するときの λ の値は、Fig. 21からだいたい0.37付近にあるものと考えられる。またFig. 20に最小二乗法を適用して λ の値を求めると、0.373となる。したがって、単位面積あたりの把駐力 t_p は近似的に次式で表わすことができる。

$$t_p = 0.37(p_h - p_r) + t_0 \quad (17)$$

4.2 係留力が傾斜して作用する場合の把駐力

サクション・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、むしろ傾斜して

Fig. 23 Values of λ at $\theta \leq 90^\circ$ Fig. 24 Values of λ According to Applied Height of Pulling Force at $\theta = 0^\circ$

作用する機会が多いと考えられる。そのために、 M_{15} の模型を用い、引き上げ角度 θ を変化させた場合の引き上げ実験を行い、 θ に対する把駐力の変化を調べた。

Fig. 22はFig. 20と同様に、 $p_h - p_r$ に対する $t_p - t_0$ の値を引き上げ角度 θ ごとに印をかえて示したものである。この場合の引き上げ力の作用点は引き上げ金具の取り付け場所 $H' = 8.6\text{ cm}$ (Fig. 5参照)の位置である。

この図で明らかなように、傾斜して引き上げた場合、鉛直の時とくらべて、その角度が小さくなるにし

たがって、 $t_p - t_0$ の値は減少しているが、これらの値も、 $\theta = 90^\circ$ の場合と同様に、原点を通る直線で近似的に表わすことができる。

これらの直線の勾配 λ を、横軸に角度 θ をとりプロットしたのがFig. 23である。 λ の値は θ を減ずるとともに減少し、 $\theta = 30^\circ \sim 0^\circ$ 付近では $\theta = 90^\circ$ における λ の値に比較して約1/2になっている。スカート長 D による影響は、 D が短いといくぶん有利であるといえる。このように、係留力が傾斜して作用し、アンカーに回転モーメントが作用すると、そのときの把駐力は減少する。この場合の把駐力の発生現象は、鉛直係留力が作用する場合の発生現象とは大いに異なるものと考えられ、現在の段階では、まだ完全に把握できていないが、この発生現象については、今後、詳細な実験をもとに検討して行きたいと考えている。

4.3 係留力の作用点と把駐力の関係

4.2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以外に係留力の作用点にも関係する。作用点の影響を調べるために、Fig. 24に示すように水平係留力の作用点を変えて実験を行った。模型には $M_{15}-S$ を使用した。 $H' = 0$ は砂表面を作用点とした場合であり、 $H' = 8.6\text{ cm}$ は4.2で求めた実験結果である。図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。 λ の値は作用点が高くなるにしたがって、ほぼ直線的に減少している。 $M_{15}-S$ の模型を鉛直方向に引き上げたときの λ の値は約0.39であるから(Fig. 21)、 $H'/2B$ がほぼ0.25以下になると、 $\theta = 90^\circ$ の場合の把駐力よりも大きい把駐力を得ることができる。また、砂表面に水平係留力が作用した場合($H' = 0$)の λ の値(=0.53)は行ったすべての実験の中で最も大きい値である。したがって、もしアンカーに水平係留力しか作用しない場合には、係留点を海底面まで下げれば、より大きな把駐力を得ることができる。

4.4 非圧入状態における把駐力

4.1から4.3までに述べた把駐力は、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、模型を着地させ、圧入を行わないで行った実験は、Table 3において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、アンカーを自然に海底に着地させ

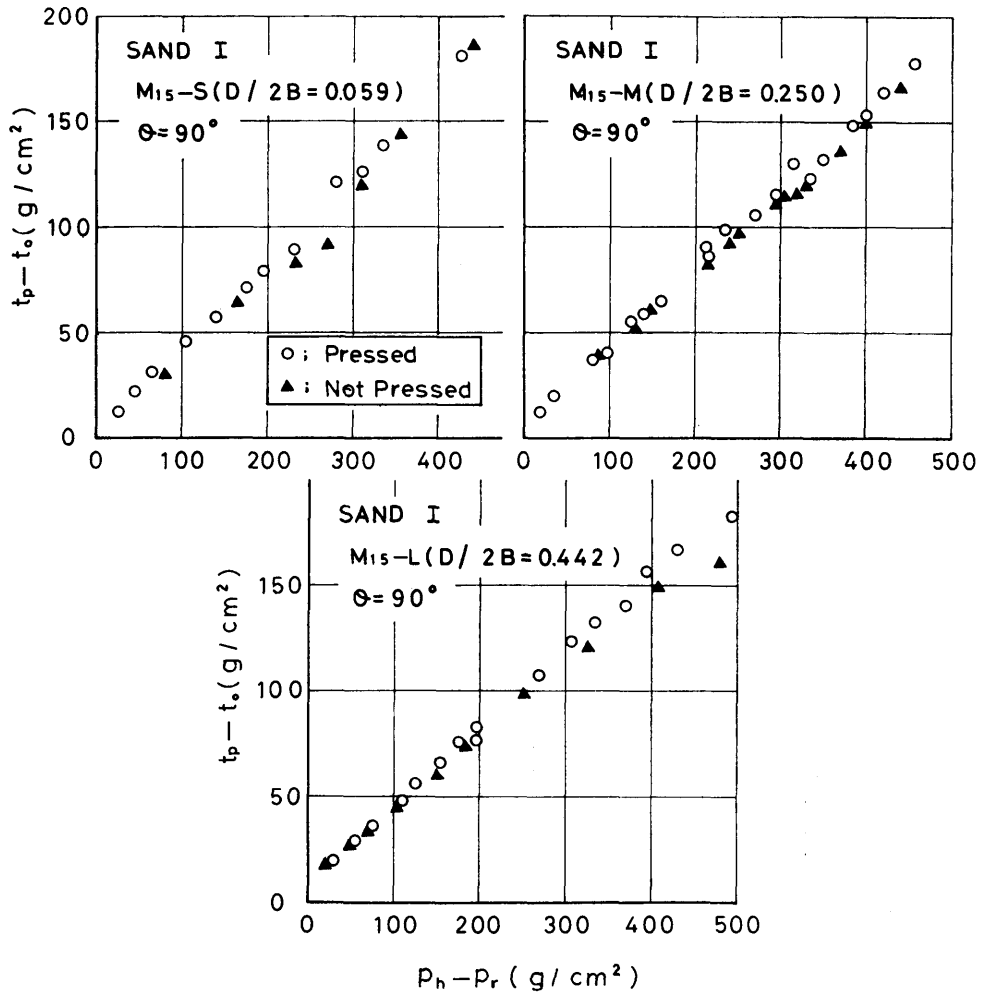


Fig. 25 Comparison between Holding Force on PRESSED Tests and NOT PRESSED Tests

た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 NOT PRESSED の実験は、以上のように実際にサクシオン・アンカーを使用する場合の状態を想定して行ったものである。

Fig. 25 は圧入状態 (PRESSED) と非圧入状態 (NOT PRESSED) における $t_p - t_o$ の実測値を比較して示したものである。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い値になっているが、ほとんど同程度とみなすことができる。したがって、実験室で求めた圧入状態における把駐力の実験結果は、サクシオン・アンカーを実際に海底で使用するときの把駐力として、そのまま使用できることを示して

いる。

4.5 把駐力の実験値に対する総合的考察

これまでに述べてきた把駐力に関する実験値を総合的にとらえ、アンカーの形状や寸法およびその把駐力などについて考察を行ってみる。

まず、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 ($D/2B = 0.04 \sim 0.46$) ではほとんど認めることはできなかった。ただ、係留力の作用方向を変化させた場合、いくぶんスカート長の短い方が有利であるといえる (Fig. 23 参照)。しかし、実際の海底では、実験時のように砂表面は平坦ではなく種々の雑物などがあると考えられる。そのために、スカ

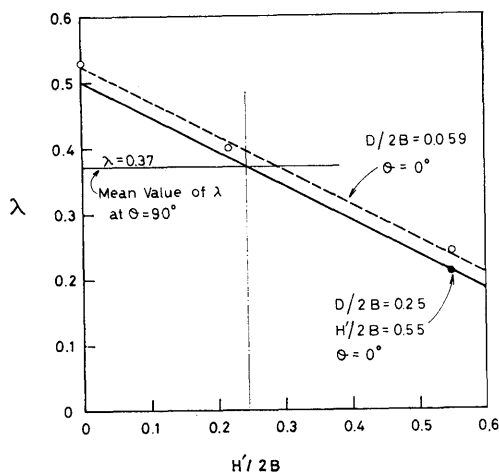


Fig. 26 Applied Height of Pulling Force to Keep Holding Force at $\theta=90^\circ$

ート長が短かすぎると海底土中にスカート部が十分にこむことができず、減圧が困難となり所定の把駐力を得ることができなくなる可能性が生じる。一方、スカート長が長くなりすぎるとアンカーの高さが高くなり、海底に着地したときに非常に不安定になる。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。

4.3で述べたように、アンカーに回転モーメントが作用すると把駐力は非常に減少する。この回転モーメントをできるだけ小さくするためには、係留力の作用点を低くすること、すなわちアンカーの減圧室の高さ H を小さくしなければならない。しかし、 H が小さくなりすぎると、ポンプで排水した場合、減圧室を流れる水の流速分布が不均一になり、減圧室の圧力が均等に発生しなくなるおそれがある。このような理由で、減圧室の形状をあまり扁平にすることはさげなければならないため、把駐力と関連して減圧室の高さ H を検討してみることにする。

係留力の作用方向 $\theta=90^\circ$ の場合の λ の平均値は 4.1で述べたように 0.37 であった。 $\theta=90^\circ$ の場合には減圧室の高さ H には関係なく、アンカーの中心に係留力が作用しているかぎり、 λ の値は変化しない。しかし、係留力が傾斜して作用すると Fig. 23 に示したように λ の値は減少する。そのために、いかなる方向から係留力が作用しても、少なくとも $\theta=90^\circ$ のときの λ の値 ($=0.37$) を保持できるような減圧室の高さ

を推測してみる必要がある。Fig. 26 は、作用点の高さが変化した場合の λ の値を図示した Fig. 24 をもとにしたものであり、Fig. 26 の破線は Fig. 24 の3個の実測値 (丸印) を直線で近似したものである。しかし、この値は、 $D/2B=0.059$ における実測値であり、さきに述べたようにスカート長は $D/2B=0.2 \sim 0.3$ が最適と考えられるので、 $D/2B=0.25$ ($H'/2B=0.55$, $\theta=0^\circ$) のときの実測値 (黒丸印) を用い、この実測点を通り破線に平行な直線 (太い実線) を引くと、この直線が $D/2B=0.25$ のときの λ の値に近似出来るはずである。この直線と、 $\theta=90^\circ$ における λ の平均値 $\lambda=0.37$ (細い実線) との交点を求める。この交点の横軸の値は $H'/2B=0.25$ であり、 $H'/2B$ の値が 0.25 よりも小さい範囲では λ の値は $\theta=90^\circ$ のときの値 0.37 よりも大きな値となる。反対に、 $H'/2B$ が 0.25 よりも大きくなると、 λ の値は 0.37 よりも小さい値となる。すなわち、いかなる方向から係留力が作用しても、作用点の高さが $H'/2B=0.25$ 付近であるならば、鉛直係留力が作用した場合の把駐力 ($\lambda=0.37$) と同等の把駐力を得ることができるといえる。

係留力の作用点の高さ H' と減圧室の高さ H はほぼ等しいので、把駐力の面から考えると、 $H/2B$ の値はほぼ 0.25 以下であればよいことになる。一方、減圧室における圧力の均一性の面から考えると、文献2) では $H/2B=0.24$ (減圧室の内面寸法比) の模型で実験を行い、その結果、減圧室の圧力には微少ではあるが不均一性が認められているので $H/2B=0.24$ 以下の寸法はあまり好ましくない。

以上の考察結果を総合してみると、サクシオン・アンカーの最適寸法は、 $D/2B=0.2 \sim 0.3$, $H/2B=0.25$ である。また、この寸法にするならば、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の場合の把駐力 $\lambda=0.37$ に相当する把駐力を得ることができる。

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. 27 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

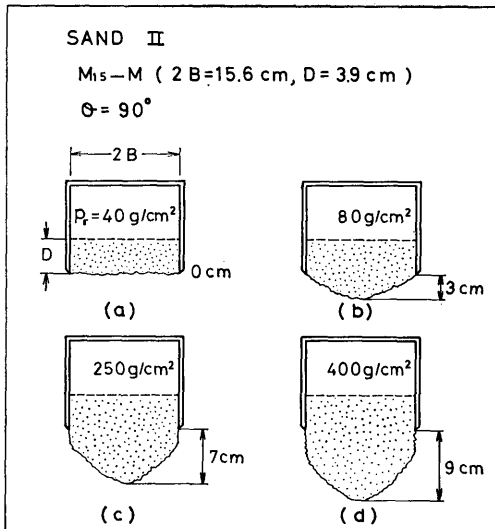


Fig. 27 Lumps of Sand Attached to Bottom When Model is Pulled out

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 $p_r=40 \text{ g/cm}^2$ になると、Fig. 27 (a)に示すようにはば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) はすべて砂層内に発生する過剰間隙水圧と、その発生によっておこる砂の有効応力の増加に関係する要素である。Fig. 19 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、

(150)

4.1 で述べたように、把駐力の大きさはスカートの長短に応じて、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。例えば、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の発生機構を考察してみる。この状態での把駐力は、Fig. 24 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、スカート長の短い $M_{15}-S$ の模型を用い、スカート最下端面内の過剰間隙水圧を実測し、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。いま、砂の内部摩擦角を φ とするならば、この場合の把駐力 T_p は次式で求めることができる。

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

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 の積分は実測した分布形状にしたがって行った。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 $\varphi=37^\circ$ となる。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 $\varphi_d=35^\circ$ 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。

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。これまで述べてきたことを結論として要約すると次のことが言える。

- (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. 15 に示したように減圧力に比例して増加し、2 次元 Darcy 流の理論解を基にした流量計算式で求めた流量の約 70% に相当し、式(14)で計算できる。

(2) サクション・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と、この水圧のために増加する砂の有効応力に深く関係する。アンカーを引き上げると、Fig. 27 に示したような砂塊が付着してくることから、サクション・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) サクション・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 はサクション・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(17)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、その傾斜が大きいく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 ($H' \leq H$)。減圧室の寸法比 $H/2B$ が 0.25 以下になると、減圧室内の圧力が均等に発生しなくなるので、(5)で述べた値とを合せて考えると、減圧室の寸法比 $H/2B$ の値は 0.25~0.3 が最適と考えられる。

(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 0.2~0.3 の範囲が最適と考えられる。

(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

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。したがって、実物のサクション・アンカーにおいても、おそらくこの実験で求めた実験値を直接使用できるものと考えられる。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。これらのことを考え合わせると、実際にサクション・アンカーを使用する場合の把駐力としては、本報で求めた実験値をそのまま適用できると考えられる。

この論文で取り扱ったのは、サクション・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ゆきたいと考える。

主な記号

A	サクション・アンカーの底面積
B	サクション・アンカーの半径
D	サクション・アンカーのスカート長
H	減圧室の高さ
H'	海底面から係留力の作用点までの高さ
L	サクション・アンカーの周長
Q	ポンプの排水流量
Q_e	ポンプの排水流量の実測値
Q_c	ポンプの排水流量の計算値
T	サクション・アンカーの引き上げ力
T_p	サクション・アンカーの把駐力
T_0	ポンプを作動しないときの把駐力
V	模型の引き上げ速度
W_0	サクション・アンカーの水中重量
d	模型の引き上げ変位
h	水位差
k	透水係数
p_h	サクション・アンカーに作用する外圧
p_r	減圧室の圧力
p_s	砂層内の過剰間隙水圧
Δp	$p_h - p_r$
q	2次元流における流量
t_p	サクション・アンカーの単位面積あたりの把駐力 (T_p/A)
t_0	ポンプを作動しないときの単位面積あたりの把駐力 (T_0/A)

α	流量の補正係数
γ_w	水の単位体積重量
θ	係留力の作用方向
λ	サクション・アンカーの把駐力係数 ($= (t_p - t_0) / (p_h - p_r)$)
ϕ	速度ポテンシャル
Ψ	ϕ に共役な流れ関数
φ	砂の内部摩擦角
$1/\Phi$	形状係数

参 考 文 献

- 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.
- Brown, G. A. and Nacci, V. A. : Performance of Hydrostatic Anchor in Granular Soils, Offshore Technology Conference, pp. II-533~542, 1971.
- Wang, M. C., Nacci, V. A. and Demars, K. R. : Behavior of Underwater Suction Anchor in Soils, Ocean Engineering, Vol. 3, pp. 47~62, 1975.
- 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.
- Davidenkoff, R. N. und Franke, O. L. : Untersuchung der räumlichen Sickerströmung in eine umspundete Baugrube in Offenen Gewässern, Die Bautechnik, pp. 298~307, 1965.
- Harr, M. E. : Groundwater and Seepage, McGraw-Hill Book Company, pp. 136~137, 1962.
- Polubarinova-Kochina, P. Ya. : Theory of Groundwater Movement, Princeton University Press, pp. 100~101, 1962.