

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

SUCTION FORCE OF CYLINDRICAL FOUNDATION
PULLED OUT FROM SAND SEA-FLOOR

井上 令作*・岩井 勝美**

By Reisaku INOUE and Masami IWAI

1. ま え が き

海底に着地している物体を引き上げるとき、海底土と物体の間には吸引力が作用する。この吸引力のために物体の引き上げや移動は困難となる。海洋開発に使用されている海洋作業台船の多くは、その作業性能の必要性から着底機能を有している。これらの海洋作業台船が移動を行う場合、作用する吸引力のために脚やマットの引き上げが困難となり、ひいては作業台船の転覆や難破の原因となる場合もある。そのために脚やマットに作用する吸引力を減少させることが課題となっている。また、水中工事などにおいて、水底からケーソンなどの物体を引き上げる場合にも、吸引力の算定が作業能率の上からも必要である。

一方、この吸引力を利用することにより、物体を強力に海底に固定することもできる。サクシオン・アンカーやハイドロスタチック・アンカーなどの名でよばれているアンカーでは人為的に吸引力を与えることにより、高い把駐力を持つアンカーを開発している^{4),5)}。しかし、いずれにしてもまだ吸引力に関してはほとんど解明されていないのが現状である。

着底物体に働く吸引力の大きさは海底の土質により異なり、一般に粘性土における吸引力の方が砂質土の場合に比べ大きい。しかし、砂地盤の場合でも砂粒子が小さいと、発生する吸引力も大きくなる。一般に砂地盤の海底に着地している物体の引き上げ力、すなわち地切り力は次のような式で表わすことができる。

$$T = P + F + (W - U)$$

ここで、 T は地切り力、 P は吸引力、 F は摩擦力、 W 、 U はそれぞれ物体の自重と浮力である。海底に着地している物体では、杭やその他の土木構造物と異なり物

体の大きさに比べ比較的根入り深さが小さいので、地切り力のうちで吸引力のしめる割合が大きくなるために、吸引力の算定が重要となってくる。

本論文は、海底に着地している物体の地切り力について行っている研究の中で、主として細砂地盤に着地している筒状物体を引き抜くときに、その底面に作用する吸引力について行った実験と解析結果について述べたものである。吸引力の算定のためには浸透流の理論を基礎として、模型実験の結果をもとにした実験式を誘導した。しかし、砂地盤の海底に着地している筒状体の地切り力を算定するにあたっては、吸引力のほかに筒状体の周面に作用する摩擦力の算定が必要である。この周面摩擦力に対する考察と地切り力の計算法については次報で報告する予定である。また、粘性地盤における吸引力や地切り力、サクシオンプレッキングなどに関しても現在実験を進めている。

2. 実験装置と実験方法

実験装置を Fig. 1 と Fig. 2 に示す。Fig. 1 の左側は水砂槽で右側は駆動装置である。水砂槽は幅 100 cm、高さ 75 cm、奥行 68 cm の大きさである。水砂槽の上に枠を組み、筒状模型を上方に引き上げることができるようにしてある。駆動装置は模型を一定速度で鉛直に引き上げるための装置で、最低 0.015 cm/sec から最高 3 cm/sec の速度で模型を引き上げることができる。

実験に使用した筒状模型は鋼製で、円筒模型 2 種類、正三角筒模型と正四角筒模型の計 4 種類である。その寸法を Table 1 に示す。 B は模型底面の半径または半幅、 L は周長、 A は底面積である。三角筒模型と四角筒模型の底面積は円筒模型 (1) と同じである。また、模型の長さはいずれも 30 cm である。

実験砂には豊浦標準砂と鬼怒川砂を使用した。それらをそれぞれ SAND I と SAND II の記号で示す。

* 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

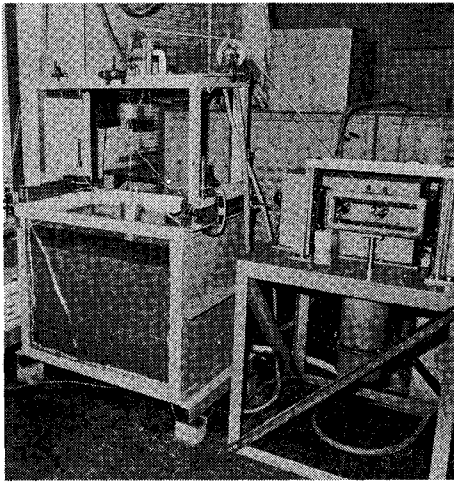


Fig. 1 Apparatus of Pulling Test

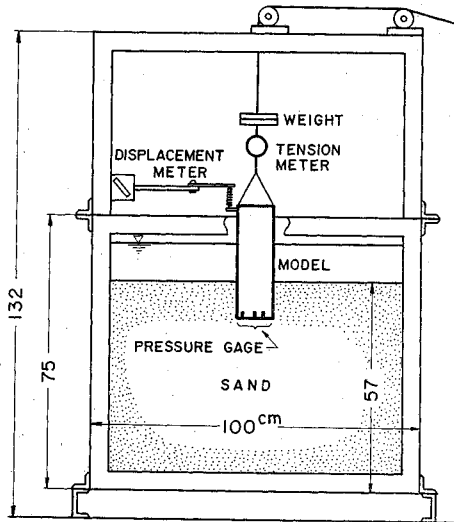
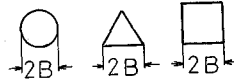


Fig. 2 Detail of Pulling Test Apparatus

Table 1 Dimension of Models

MODEL	B (cm)	L (cm)	A (cm ²)
CIRCULAR(1)	5.0	31.42	78.54
CIRCULAR(2)	7.5	47.12	176.71
TRIANGULAR	6.74	40.41	78.54
SQUARE	4.43	35.41	78.54



ばねを取り付けた板ばね変位計で、模型の変位はコイルばねを通して板ばねに伝わり、板ばねに生じるたわみを、ひずみゲージでとりだし記録できるようになっている。水圧計は豊田工機 K.K. の製品 PMS-5 を使用した。水圧計の先端には取り付け金具をつけ、受圧板が直接砂粒子に接触しないようにした。取り付け金具の先端には直径 1 mm の孔があり、この孔を通して作用する水圧は取り付け金具の空間を満たしたシリコンオイルを通して受圧板に作用するようになっている。

実験の方法は、まず水砂槽の中央に薄い鉄板で作った枠を砂の中にそう入して内部の砂を掘りだし、模型を所定の深さに鉛直にセットして固定する。その後、一定の間隙比になるようにうめもどす。特に模型の底面にはまんべんなく砂がつまり空隙ができないように注意した。砂をつめ終ると枠を取りのぞき、駆動装置で一定速度で模型を鉛直に引き上げ、そのときの模型の引き上げ力と底面に作用する吸引力および模型の変位を計測する。引き上げ速度は約 0.07~2.3 cm/sec の範囲で実験を行っ

これらの砂の物理的性質を Table 2 に示した。摩擦係数は模型と同一材料の板を用いすべり出し抵抗試験を行い求めた値である。透水係数は実験を行ったときの水温がそれぞれ異なるために (27~14°C) 20°C に補正した値を示した。

計測装置は張力計と変位計および模型の底面に取り付けた 3 個の水圧計である。これらの配置を Fig. 2 に示した。張力計は模型の引き上げ力を計測するためのもの、ひずみゲージをはった直径 5 cm, 肉厚 2 mm のリングゲージである。変位計は板ばねの先端に弱いコイル

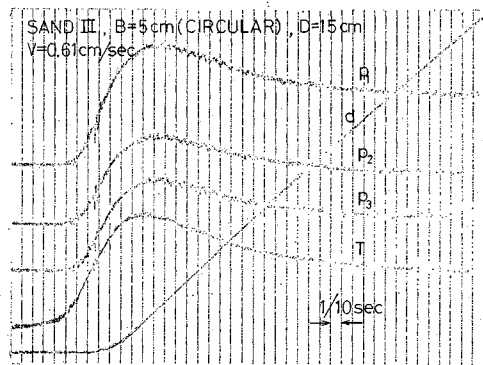


Fig. 3 Record of Pulling Test

Table 2 Characteristics of Experimental Sand

SAND	SPECIFIC GRAVITY	DRY DENSITY (g/cm ³)	VOID RATIO	EFFECTIVE GRAIN SIZE (mm)	UNIFORMITY COEFFICIENT	FRICTIONAL 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

た。これらの計測器による記録を Fig. 3 に一例として示した。 p_1, p_2, p_3 は 3 個の水圧計, T は張力計, d は変位計の記録である。この記録でわかるように水圧計 (吸引力) と引き上げ力 (地切り力) はいずれも極大値をもっている。解析においては後述するように、これらの極大値 (p_p, T_p) および引き上げ力の極大値に対応する水圧の値 (p_d) を解析の対象とした (Fig. 12 参照)。Table 3 に実験の種類と実験に関連する値を示した。

Table 3 Data Pertaining to Tests

SAND	MODEL	B (cm)	D (cm)	B/D	ϕ	T (°C)	k (cm/sec)	V (cm/sec)
I	CIRCULAR (1)	5	5	1.00	0.50	21	0.017	0.07~0.79
		5	10	0.50	0.58	21	0.017	0.07~0.77
		5	15	0.33	0.63	21	0.017	0.06~0.74
	CIRCULAR (2)	7.5	15	0.50	0.58	21	0.017	0.07~0.83
II	CIRCULAR (1)	5	5	1.00	0.50	27	0.030	0.07~2.31
		5	10	0.50	0.58	14	0.022	0.11~2.63
		5	15	0.33	0.63	27	0.030	0.02~2.11
	CIRCULAR (2)	7.5	5	1.50	0.46	27	0.030	0.07~2.21
SQUARE	6.74	15	0.45		24	0.019	0.07~0.79	
	4.43	15	0.30		23	0.018	0.07~0.75	
II	CIRCULAR (1)	5	5	1.00	0.50	27	0.030	0.07~2.31
		5	10	0.50	0.58	14	0.022	0.11~2.63
		5	15	0.33	0.63	27	0.030	0.02~2.11
	CIRCULAR (2)	7.5	5	1.50	0.46	27	0.030	0.07~2.21
SQUARE	6.74	15	0.45		16	0.023	0.11~2.08	
	4.43	15	0.30		16	0.023	0.07~2.16	
SQUARE	6.74	15	0.45		16	0.023	0.07~2.09	
	4.43	15	0.30		16	0.023	0.07~2.15	

ϕ : Shape Factor T: Temperature of Water k: Permeability V: Pulling Velocity

3. 吸引力の発生現象

筒状体を引き上げると底面に吸引力が発生する。この吸引力は前章の実験方法で述べた 3 個の水圧計で計測した圧力にほかならない。

この章では筒状体の底面に発生する吸引力の発生現象を考察するとともに、円筒体を中心とした吸引力の計算式について述べる。

砂地盤における筒状体の吸引力の発生現象を考察するにあたり、Fig. 4 の (a) 図, (b) 図に示すような対応を考えてみる。(a) 図は筒状体を一定速度 V で引き上げたときの吸引力 p の発生を示した図で、(b) 図は筒状体の外部と内部に一定水位差 h を与えた場合、底部にボーリングが発生せず (底部に金網があると考える) 外部から内部に底面を通して一定流量 Q が流入する浸透現象を表わした図である。もし、(a) 図に示す吸引力の発生現象と (b) 図の浸透現象を対応させることができ、前者を後者で完全に説明できるとするならば、次の仮定を満足しなければならない。すなわち、筒状体を一定速度で引き上げた場合、① 底面に発生する吸引力の分布は等分布であり、② 筒状体を引き上げることで底面にできる空隙は筒状体のまわりを浸透してきた水だけで満たされ砂は流入してこない。これらの仮定を満足するとして、(a) 図, (b) 図に示した現象を対応させて考えると、(b) 図における流量 Q は (a) 図における引き上げ速度 V と底面積 A との積 AV に、水頭差 $r_w h$ は吸引力 p に対応させて表わすことができる。すなわち、

$$\left. \begin{aligned} AV &= Q \\ p &= r_w h \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

となる。以上のように、もし、式 (1) の関係が成立す

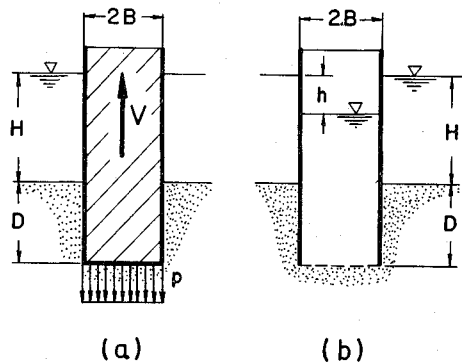


Fig. 4 Correspondence between Phenomena of Suction and Seepage

るならば、吸引力の発生現象は (b) 図の浸透流の現象を用いて説明することができるが、これはあくまでも仮定 ①, ② を満足した場合であり、一般に、 AV を定めても p は一義的には定まらず、Fig. 3 の記録に示したように p の値は AV に対して変化するが、この場合には、 p の極大値 p_p を吸引力とする。しかし、3. (2) で述べるように AV が非常に小さいときには、 p の記録は Fig. 11 に示すように極大値をもたず、 AV が一定のとき p も一定値をとることから、 AV が非常に小さいときには式 (1) の関係がほぼ成立するものと考えられる。このように、式 (1) の関係が成立するのは限られた範囲 (3. (2) 参照) だけであり、すべての吸引力の発生現象を説明することはできない。しかし、3. (3) で述べるように、この対応関係を用いることにより、実験値をもとに吸引力の算定式を決定することができる。そのために、次節で (b) 図に示した浸透流の理論解を出しておく。

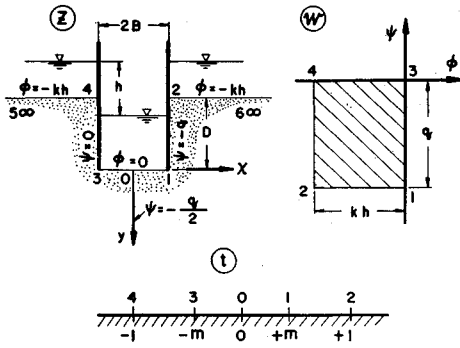


Fig. 5 Complex Planes for Mapping

(1) 浸透流の理論解

Fig. 4 (b) 図の現象に対する理論解を求める場合、筒状体の底面形状に応じて直接3次元での解を求めることは困難である。そのために、本論文では、まず2次元の解を求め、その解を補正し筒状体(3次元)での解を求める方法を採用した。

(b) 図の現象を2次元で解くにあたっては、複素平面上における Schwarz-Christoffel の変換を用いて解く。

Fig. 5 に示す (z) 平面を (t) 平面に写像すると、

$$z = \frac{B}{E - m'^2 K} \{E(m, \theta) - m'^2 F(m, \theta)\}$$

ここで、 $\theta = \sin^{-1}(t/m)$ 、 m および m' ($m'^2 = 1 - m^2$) は母数、 K および E は m を母数とする第1種および第2種の完全楕円積分、 $F(m, \theta)$ と $E(m, \theta)$ は第1種および第2種楕円積分の Legendre 表示である。

また、幅 B と根入り深さ D との比 D/B は次のように表わすことができる。

$$\frac{D}{B} = \frac{E' - m^2 K'}{E - m'^2 K} \dots\dots\dots (2)$$

ここで、 K および K' は m および m' を母数とする第1種完全楕円積分、 E および E' は同じく第2種完全楕円積分である。

一方、(w) 平面を (t) 平面に写像することにより、流量 q は次のように表わすことができる。

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

ここで、 k は透水係数、 h は外部と内部との水位差、 $1/\phi$ は形状係数である。

$$\frac{1}{\phi} = \frac{2K}{K'} \dots\dots\dots (4)$$

形状係数は D/B によって定まる。式 (2) と式 (4) より ϕ を計算し、 D/B (または B/D) について示したのが Fig. 6 である。

式 (3) で表わされる2次元における流量に補正係数 α を用いて筒状体の場合の流量 Q を表わすと次の式と

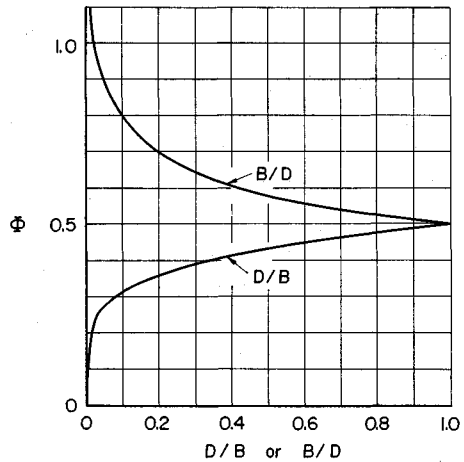


Fig. 6 Calculated Values of Shape Factor ϕ to Depth Ratio D/B or B/D

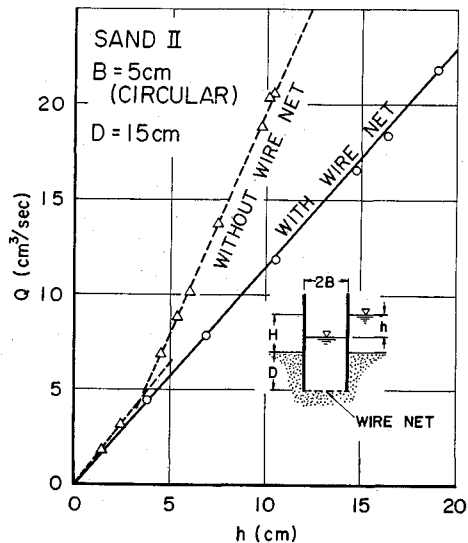


Fig. 7 Seepage Test by Cylindrical Pipe

なる。

$$Q = \alpha q L = \frac{1}{\phi} \alpha kh L \dots\dots\dots (5)$$

ここで、 α は2次元の流量から3次元の流量を求めるための補正係数、 L は筒状体の周長である。

補正係数 α を決定するために Fig. 7 に示すような実験を行った。この実験では、円筒 ($2B=10$ cm, $D=15$ cm, 底面のないもの) の底面に細目の金網をはり、砂の流入がないようにして、円筒の外部と内部に一定水位差 h を与え、外部から内部へ流入する流量 Q を計測した。 h に対する Q の実測値を丸印で示してある。この Q の実測値と式 (5) を対比し、 α の値を求めると、SAND I で $\alpha=0.74$, SAND II で 0.76 であった。文献 1) では、水中でまわりを矢板などで囲み内部を掘

削る場合、外部から底面を通して内部へ流入してくる浸透流量を算定するために、断片法による近似解析法の計算値と塩水を用いた電気相似法による実験値とを比較して補正係数 α の値を求めている。この研究では矢板の下方に不透水層があり、また、囲いの内側では矢板の最下端より上方に地盤表面がある場合で、われわれの実験のように不透水層の影響は無視できるものとし(水砂槽の砂の深さ 57 cm, 最大根入り深さ 15 cm, 模型の最大径 15 cm), また、筒状体の内側の地盤面は筒状体の最下端にある場合 (Fig. 4 (b) 参照) とは境界条件は異なる。文献 1) の実験では、不透水層の深さと囲みの幅との比、根入り深さと不透水層の深さとの比などを変えて実験を行っている。囲みが円形の場合で、行った実験の範囲では、 α の値は 0.65~0.98 の間に分布していることから、これらの平均値 0.8 を実用的な値として採用している。われわれの実験は文献 1) の場合と境界条件は異なるが、この文献の実験で、われわれの実験の条件に最も近い条件における α の値や、上記の平均値 0.8 などの値を参考にすると、先に述べた $\alpha=0.74, 0.76$ という値は妥当な値と考えることができる。しかし、本研究では α について考察するのが目的ではないので、解析に必要な α の値しか求めてないが、境界条件の変化などに応じて、系統的に考察しておく必要もあるだろう。

また、Fig. 7 において三角印で示した値は円筒の底面の金網をとり、ポイリングが生じるようにした状態における流量の実測値を示したもので、この結果については 3. (2) で述べる。

以上のように、形状係数 ϕ および補正係数 α を考察した上で、式 (1) の対応関係 $Q=AV, r_{wh}=p$ を式 (5) に代入すると、筒状体の底面に発生する吸引力 p は次のように表わすことができる。

$$p = \frac{\phi r_w AV}{\alpha k L} \dots\dots\dots (6)$$

ここで、 A および L はそれぞれ筒状体の底面積と周長、 V は引き上げ速度、 k は透水係数、 r_w は水の単位体積重量、 ϕ と α は形状係数と補正係数である。

式 (6) で吸引力を算定できるのは、前述の ①, ② の仮定を満足し、式 (1) の対応関係が成立する場合だけであり、3. で述べたように、 AV が非常に小さいときだけである。 AV が大きくなると砂の流動がおり、式 (6) を直接適用できず、式 (6) を補正して使用しなければならない。次節において、引き上げ速度が遅く、式 (6) で直接吸引力を算定できる場合について述べる。

(2) 引き上げ速度が遅い場合の吸引力

先に述べたように、式 (1) の対応が成立し、吸引力の算定に式 (6) が使用できるためには、前述の ① と ②

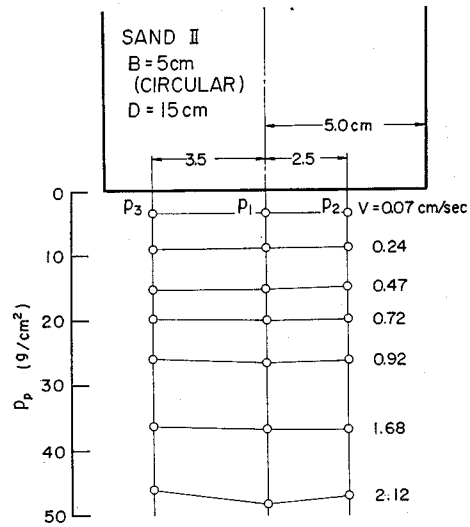


Fig. 8 Distribution of Suction Pressure (CIRCULAR 1)

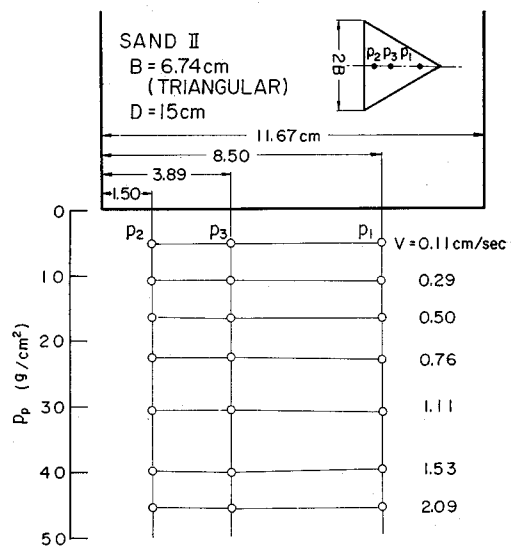


Fig. 9 Distribution of Suction Pressure (TRIANGULAR)

の仮定を満足しなければならない。仮定 ① すなわち、「吸引力の分布は等分布である」の仮定に関しては、Fig. 8 と Fig. 9 の代表例で示すようにその分布はほとんど等分布となっている。これらの図は筒状体底面に取り付けた 3 個の水圧計で計測した吸引力 p_1, p_2, p_3 の極大値を引き上げ速度 V に応じて示したものである。 V が大きくなってもその分布形状は変わらずほとんど等分布である。

一方、仮定 ② すなわち、「底面への砂の流入はない」という仮定に関しては、引き上げ速度が非常に小さいときには成立するが、速度が大きくなると砂の流動が生じ

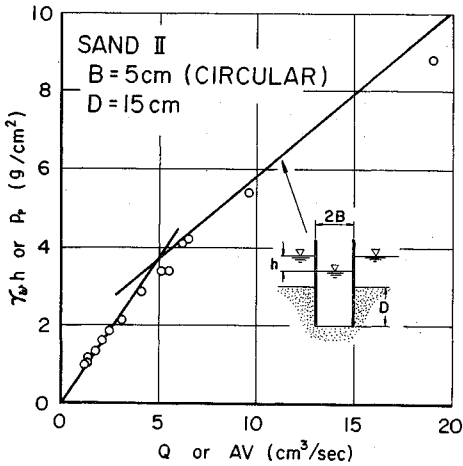


Fig. 10 Comparison between Suction Pressure p_p in Slow Pulling Test and Head $\gamma_w h$ in Seepage Test

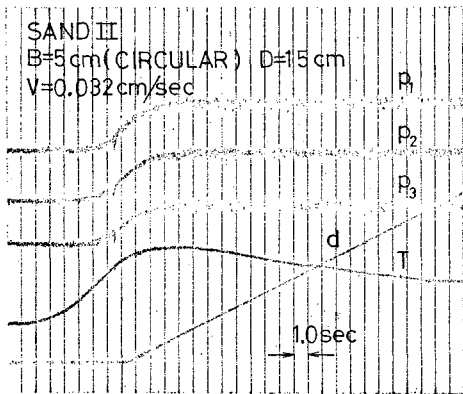


Fig. 11 Record of Slow Pulling Test

この仮定は成立しなくなると考えられる。Fig. 10の丸印は円筒模型の引き上げ速度を非常に遅くして引き上げたときに発生する吸引力 p_p の実測値を、底面積と引き上げ速度との積 AV に対して示したものである。実線は同径の円筒を用いて行った Fig. 7の浸透実験で、底面の金網をとり除き砂のボイリングが起こりうる状態で実験を行ったときの水位差 h と流量 Q との関係 (Fig. 7の破線) をそのままうつした線である。両者はよく一致していて、この速度の付近では吸引力の発生現象は Fig. 7に示す透水現象で説明できる。特に、非常に V が小さい範囲 (この場合 $AV \approx 4 \text{ cm}^2/\text{sec}$ 以下) では吸引力を算定するために式 (6) を使用できる。このように、 V が小さく砂の流入が生じない場合、すなわち式 (6) を使用できる場合の吸引力の記録は、Fig. 3に示したような砂の流入がある場合の記録と異なり、Fig. 11の記録に示すように吸引力の値には極大値がない。しかし、実物においては、たとえ引き上げ速度 V は小さくても底面積 A が大きいため、 AV の値は大とな

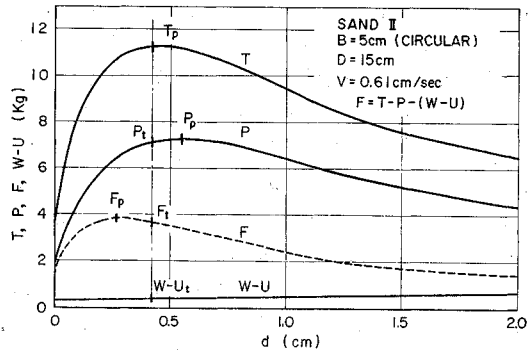


Fig. 12 Variations of Pulling Force, Suction Force, Frictional Force and Buoyancy to Displacement of Model

り砂の流入は必ず発生すると考えられるから、特別の場合をのぞき式 (6) をそのまま使用して吸引力を算定することはできない。次節 (3) においては、 AV が大きく砂の流動が生じている場合の吸引力について式 (6) を基本として実験値の考察を行い、吸引力を算定するための実験式を導く。

(3) 実験値の考察

Fig. 12は Fig. 3の記録を読みとり、筒状模型に作用する力の変化を模型の変位 d に応じて表わしたものである。 T は模型を引き上げたときの張力で、地切り力に相当する値である。 P は模型底面に作用する吸引力の合力であり、底面の3箇所計測した単位面積あたりの吸引力 p_1, p_2, p_3 の平均値 p に底面積 A を乗じた値である。 F は模型の周面に作用する摩擦力である。摩擦力は直接に計測できないので、 $F = T - P - (W - U)$ で計算して求めた。 $W - U$ は模型の重量と浮力の差である。 Fig. 12に示すように、 T, P, F はいずれも極大値を有しているが、それらの位置は少しずつずれている。こ

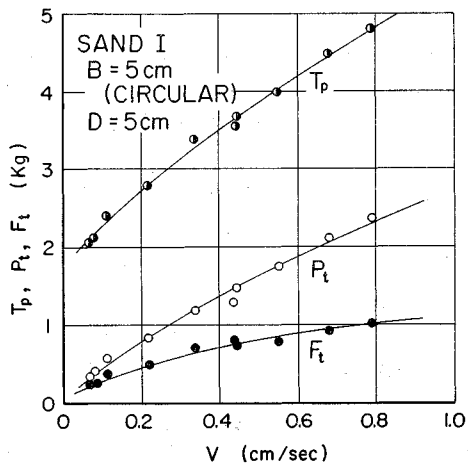


Fig. 13 Measured Values of T_p, P_t and F_t (CIRCULAR 1)

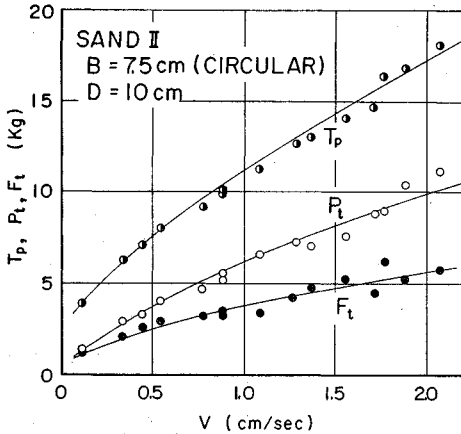


Fig. 14 Measured Values of T_p , P_t and F_t (CIRCULAR 2)

これらの極大値の記号には Suffix に p をつけてある。なお、吸引力が極大値 P_p に達するまでの筒状体の変位 d は AV が大なるほど大きく、行った実験の範囲では、 $0.1 \sim 1.0$ cm の間で極大値は発生している。

一般に、地切り力として必要な値は T の極大値 T_p の値であり、それを算定するのに必要な値は P_t , F_t , $W-U_t$ (Fig. 12 参照) である。Fig. 13, 14 は T_p , P_t , F_t の実測値を引き上げ速度 V に応じて示したものである。ここでも、 F_t は Fig. 12 の場合と同様に $F_t = T_p - P_t - (W - U_t)$ から計算した。これらの図の場合には D/B の値が小さいために、地切り力 T_p に対する影響は吸引力 P_t の方が周面摩擦力 F_t よりも大きい。が、 D/B が大きくなると F_t が P_t よりも大きくなる。

Fig. 13, 14 でもわかるように周面摩擦力も吸引力と同様に V が大きくなるにしたがって増加している。この周面摩擦力の増加に関しては次報で詳しく考察する。

Fig. 15 は単位面積あたりの吸引力の極大値 p_p の実測値を AV に対してプロットした一例である。 p_p の値は V が非常に遅い範囲では式 (6) で計算することができるが、 V が速くなり砂の流動が生じるとこの図に示すように V に応じてある曲線にそって増加する。この吸引力の値は砂の種類、模型の大きさ、根入り深さなどによりそれぞれ異なるが、Fig. 16 に示すように横軸に式 (6) の右

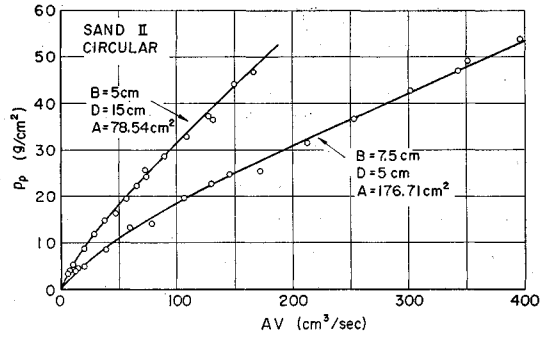


Fig. 15 Measured Values of Suction Pressure p_p

辺、すなわち $\Phi_{T_w} AV / \alpha k L$ をとり両対数グラフにプロットすると一本の直線上に分布する。Fig. 16 の p_p の実測値は円筒模型について、砂の種類、模型の寸法、根入り深さ、引き上げ速度などを変えて行ったすべての実験値をプロットしたものであり、 α の値は SAND I と SAND II の平均値 0.75 を用いた。細い直線で式 (6) の理論値を示してあるが、実験値は理論値よりも小さくなる。これらの実験値に最小二乗法を適用し直線の式を求めると、次のような式で吸引力 p_p を表わすことができる。

$$p_p = 1.279 \left(\frac{\Phi_{T_w} AV}{\alpha k L} \right)^{0.713} \dots \dots \dots (7)$$

上式は吸引力の極大値 p_p の値を算定するための実験式であるが、地切り力 T_p を算定するために必要な値 p_t (Fig. 12 参照) の実験値についても同様にして求めると次の式となる。

$$p_t = 1.188 \left(\frac{\Phi_{T_w} AV}{\alpha k L} \right)^{0.726} \dots \dots \dots (8)$$

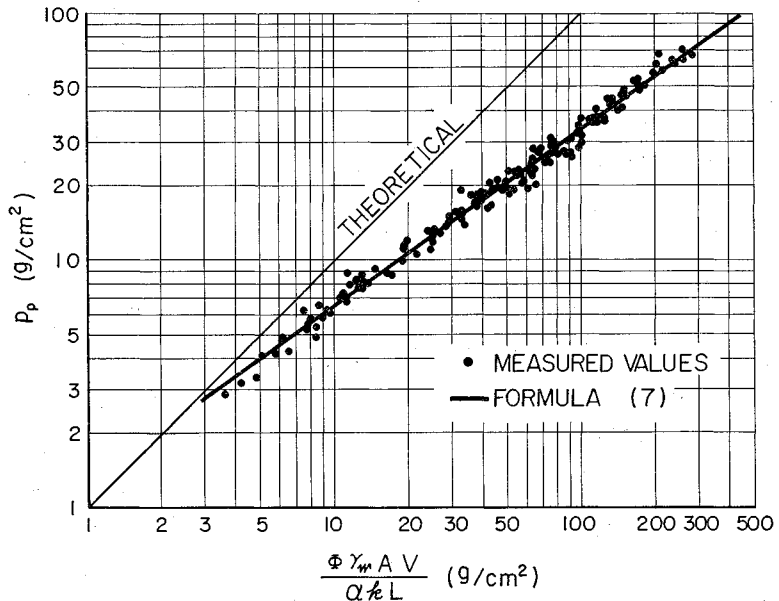


Fig. 16 Distribution of Suction Pressure p_p in All Circular Cylindrical Model Tests

ここで、これらの式を使用するにあたっては cm, g, sec の単位を用いなければならない。

以上のように、円筒物体における吸引力は式 (7)、(8) の実験式を用い近似的に計算することができる。また、3. (2) で述べたように、式 (6) が直接使用できる範囲、すなわち、 $AV < 4 \text{ cm}^3/\text{sec}$ の範囲は、Fig. 16 では $\phi r_w AV / \alpha k L < 3.4$ の範囲に相当し、この部分での実験値は式 (6) の理論値に一致する。

わが国の着底式海洋作業台船の脚の昇降速度は、最も遅いもので 0.25 cm/sec、早いもので 1 cm/sec 程度であり、0.4~0.6 cm/sec の速度の台船が最も多い。このように昇降速度は比較的遅いが、実機では脚の底面積 A が模型よりもはるかに大きいために、式 (7)、(8) のかっこ内の値は大きくなる。そのために、実験では、かっこ内の値をできるだけ実機の値に近づけるために、模型の引き上げ速度 V が大きいところまで実験を行ってある ($V \div 0.07 \sim 2.3 \text{ cm/sec}$)。

4. 三角筒および四角筒の吸引力

正三角筒および正四角筒については、円筒模型 (1) と同一底面積 ($A=78.54 \text{ cm}^2$) の模型で実験を行った。これらの吸引力の分布形状は Fig. 9 (正三角筒模型) に示したように円筒の場合と同様に等分布である。また、吸引力の発生現象も円筒模型の場合とまったく同じである。Fig. 17 は三角筒模型における T_p, P_t, F_t の実測値を引き上げ速度 V に応じて表わしたものである。Fig. 17 も、Fig. 13, 14 の円筒模型の場合と同様の傾向を示しているが、根入り深さと砂に接触している側面積が円筒の場合に比べて大きいために、周面摩擦力 F_t は吸引力の合力 P_t よりも大きくなっている。

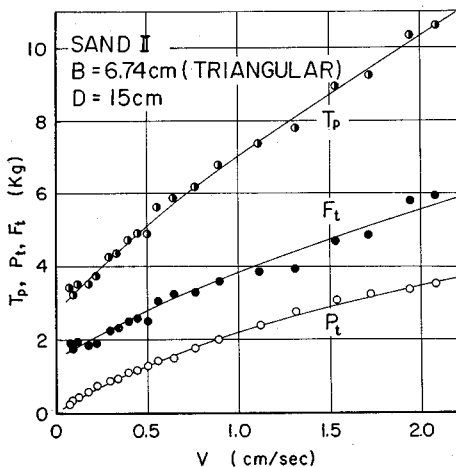


Fig. 17 Measured Values of T_p, P_t and F_t (TRIANGULAR)

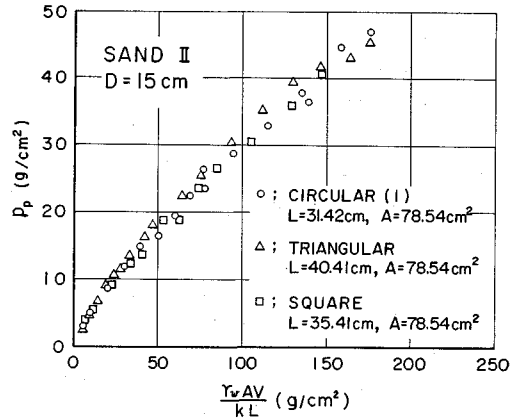


Fig. 18 Comparison of Suction Pressure p_p in Circular, Triangular and Square Cylindrical Model Tests

Fig. 18 は円筒模型 (1)、正三角筒模型および正四角筒模型における吸引力 p_p の実測値を比較して示したものであり、横軸の $r_w AV / kL$ は Fig. 16 の横軸の値から形状係数 ϕ と補正係数 α をのぞき、 ϕ と α に無関係な値を横軸にとり三者をプロットしたものである。このように p_p をプロットしてみると、円筒と同一底面積をもつ正三角筒と正四角筒の値はほとんど円筒の値に一致している。ということは、正三角筒および正四角筒における吸引力を求める場合には、それらと同一底面積を有する円筒を想定し、円筒における D/B から定まる形状係数 ϕ を用い、また補正係数 α も円筒の場合の値を用いて、式 (7) および式 (8) から吸引力を近似的に算定できるということである。しかし、周長 L の値は正三角筒および正四角筒の値を用いなければならない。

Fig. 19 は円筒模型 (1) における ϕ と α の値を正三角筒模型と正四角筒模型に使用して $\phi r_w AV / \alpha k L$ の値を計算し、3者の吸引力 p_p の実測値を式 (7) と比較して示したものである。これらの p_p は式 (7) とよ

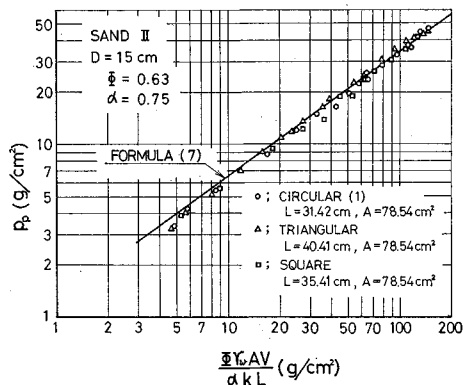


Fig. 19 Comparison of Suction Pressure p_p in Circular, Triangular and Square Cylindrical Model and Formula (7)

く一致している。

以上の考察を拡張して考えると、任意の多角筒や楕円筒などの吸引力を求める場合も、その底面形状があまり扁平でないかぎり、同一底面積の円筒における形状係数 ϕ と補正係数 α を用いて式 (7)、(8) から近似的に吸引力を算定することができると思われる。

5. む す び

以上、砂地盤の海底から筒状体を引き上げる場合、その底面に作用する吸引力を模型実験をもとに考察し、浸透流の理論を基礎とした吸引力の算定式を誘導することができた。これまでに述べてきたことを結論としてまとめると次のことがいえる。

(1) 筒状体を鉛直に等速で引き上げた場合、地切り力および吸引力は Fig. 3 に示すように、最初急激に増加し極大値に達し、それ以後は徐々に減少する。吸引力が極大値に達したときの筒状体の変位は底面積 A と引き上げ速度 V との積 AV が大なるほど大きく、行ったすべての実験では 0.1~1.0 cm の間で極大値は発生した。

(2) 吸引力の極大値 p_p および地切り力の極大値 T_p に対応する吸引力の値 p_t の筒状体底面における分布は等分布となる。

(3) 吸引力の発生現象は Fig. 4 (b) に示すような浸透流の現象に対応させて考えることができる。特に、引き上げ速度が小さく $AV < 4 \text{ cm}^3/\text{sec}$ のときには、Fig. 4 (b) の浸透流の理論式より誘導した式 (6) で吸引力を表わすことができる。しかし、 AV が大きくなると砂の流動がおこり、実測値は理論値よりも小さくなるが、 p_p と p_t の値は式 (7)、(8) の実験式を用い近似的に計算することができる。

(4) 三角筒および四角筒の吸引力は、それらと同一底面積を有する円筒における形状係数 ϕ と補正係数 α を用いて、式 (7) および式 (8) から p_p 、 p_t を近似的に計算することができる。

ここで行った実験は筒状模型を用いた基礎実験であり、今後、より研究を確実なものにするためには、実物大の筒状体による確認実験を行ってみる必要もあると考えられる。また、ここで述べた吸引力に対する考え方は筒状物体にかぎらず、他の形状の物体の吸引力の算定にも応用できるものと考えられる。

砂地盤の海底から筒状基礎や物体を引き上げる場合の地切り力を算定するためには、周面摩擦力の算定が必要である。この周面摩擦力に対する考察と地切り力の算定法に関しては次報で報告する予定である。

最後に、この研究に貴重なご助言をいただいた名古屋大学市原教授に感謝いたします。

なお、本研究における計算は船舶技術研究所共用電子計算機 TOSBAC 5600/120 を用いて行った。

参 考 文 献

- 1) Davidenkoff, R.N. und Franke, O.L.: Untersuchung der räumlichen Sickerströmung in eine umpundete Baugrube in offenen Gewässern, Die Bautechnik, pp. 298~307, 1965.
- 2) Harr, M.E.: Groundwater and Seepage, McGraw-Hill Book Company, pp. 136~137, 1962.
- 3) Ninomiya, K., Tagaya, K. and Murase, Y.: A Study on Suction Breaker and Scouring of a Submersible Offshore Structure, OTC, pp. 297~304, 1972.
- 4) Brown, G.A. and Nacci, V.A.: Performance of Hydrostatics Anchor in Granular Soils OTC, pp. 533~537, 1972.
- 5) 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.

(1976. 4. 17・受付)