

着底式海洋構造物の地切り力

— その1 砂地盤の場合 —

井上 令作* ・岩井 勝美*

Breakout Force of Self-Elevating Platform Part 1 In Sandy Sea-Floor

By

Reisaku INOUE and Masami IWAI

Abstract

When the objects embedded in sea-floor are pulled, suction force acts on their bottom. In submersible offshore structures, it is very important to reduce the suction force acting on the spud bottom when it is about to get free from sea-floor. On the other hand, the suction force can be used to increase the holding power as hydrostatic anchors.

The suction force in cohesive sea-floor may be generally larger than in sandy one, but when sand is fine, the latter may be almost equal to the former.

In this study, we considered especially about the suction force and the skin frictional force of cylinders embedded in fine sandy sea-floor, and found the experimental formula on basis of seepage theory to estimate suction force and approximate formula to estimate skin frictional force increased by suction force.

目 次

1. まえがき	3.3 3角筒および4角筒の吸着力
2. 実験装置と実験方法	4. 周面摩擦力
3. 吸着力	4.1 摩擦係数の測定
3.1 理論的考察	4.2 杭の周面摩擦抵抗
3.1.1 理論解	4.3 吸着力による周面摩擦力の増加
3.1.2 実験値への適用範囲	5. 地切り力
3.2 実験値の考察	6. むすび

主 な 記 号

A	筒状体の底面積	F_1	静力学的公式による周面摩擦力
B	筒状体の底面の半径または半幅	F_2	吸着力の発生により増加する周面摩擦力
D	根入り深さ	d	筒状体の引き上げ変位
F	周面摩擦力	f_s	周面の単位面積あたりの摩擦力
* 海洋開発工学部		h	水位差
原稿受付：昭和51年5月7日		k	透水係数

p	単位面積あたりの吸着力
p_p	単位面積あたりの吸着力の極大値
F_p	周面摩擦力の極大値
F_t	地切り力の極大値 T_p に対応する周面摩擦力
H	水深
K_L	横力係数
L	筒状体の周長
P	吸着力の合力
P_p	吸着力の合力の極大値
P_t	地切り力の極大値 T_p に対応する吸着力の合力
Q	3次元流における流量
T	地切り力
T_p	地切り力の極大値
U	筒状体の浮力
U_t	地切り力の極大値 T_p に対応する筒状体の浮力
U_0	静止状態における筒状体の浮力
V	筒状体の引き上げ速度

W	筒状体の重量
p_t	地切り力の極大値 T_p に対応する単位面積あたりの吸着力
p_1, p_2, p_3	吸着力の実測値
q	2次元流における流量
u	筒状体の周面に作用する中立応力
Δu	吸着力の発生による中立応力の減少量
z	砂層の深さ
α	補正係数
γ_w	水の単位体積重量
γ'	砂の水中単位体積重量
μ	筒状体と砂の摩擦係数
σ	筒状体の周面に作用する全応力
σ'	筒状体の周面に作用する有効応力
$1/\Phi$	形状係数

1. まえがき

海底に着地している物体を引き上げると、海底土と物体の間には吸着力が働く。この吸着力のために、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る着底式の海洋作業台船などでは、脚の底部に作用する吸着力のために脚の引き上げが困難となる場合があり、その吸着力を減少させることが課題となっているし、また、海底からケーソンなどを引き上げる場合にも吸着力の算定が必要となってくる。一方、この吸着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では人為的に吸着力をあたえることにより、高い把駐力を持つアンカーを開発している。しかし、いずれにしても、まだ吸着力についてはまったく解明されていないのが現状である。

着底物体に働く吸着力は海底の土質により異なり、一般に粘性土の方が砂質土にくらべ大きい。しかし、砂質土の場合でも砂粒子が小さくなると、発生する吸着力も大きくなる。一般に、砂地盤に着地している物体の地切り力は次のように表わすことができる。

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

ここで、 T は地切り力、 P は吸着力、 F は摩擦力、 W 、 U はそれぞれ物体の重量と浮力である。海底に着地している物体は杭やその他の土木構造物などと異なり、物体の大きさにくらべ根入りの深さが小さ

いので、地切り力の中で吸着力のしめる割合が非常に大きく、吸着力の算定が重要な課題となってくる。

本論文では、主として、細砂地盤における筒状物体の底面に作用する吸着力に関して行った実験と解析結果について述べたものである。しかし、地切り力の算定に必要な周面摩擦力についても考察を行い、特に、吸着力の発生によっておこる有効応力の増大とそれともなう周面摩擦力の増加について言及した。この研究結果から着底式海洋構造物の砂地盤における地切り力を算定することができる。

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

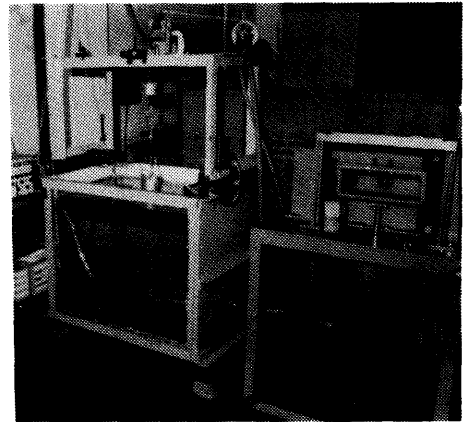


Fig. 1 Apparatus of Pulling Test

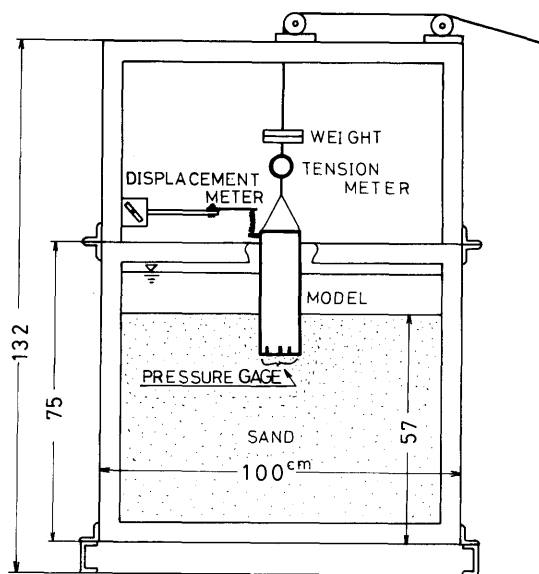


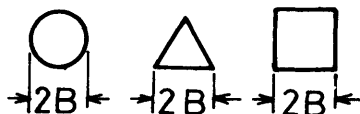
Fig. 2 Detail of Pulling Test Apparatus

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、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引き上げるためのもので、最低 0.015 cm/sec から最高 3 cm/sec の一定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 3 角筒と正 4 角筒模型の計 4 種類である。その寸法を Table 1 に示すが、 B は模型幅の 1/2、 L

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



は周長、 A は底面積である。3 角筒と 4 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。これらの砂の物理的性質を Table 2 に示した。乾燥密度と間ゲキ比は実験を行ったときの値であり、摩擦係数は模型と同一の材料の板を用い、後述するような方法で求めた値である。透水係数は、実験を行ったときの水温が異なるために (27°C ~ 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とり付けた 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 4 枚のひずみゲージを有した直径 5 cm、肉厚 2 mm のリングゲージである。変位計は板バネの先端に弱いコイルバネをとり付けた板バネ式変位計である。模型の変位は、このコイルバネを通して板バネに伝わり、板バネに生じるたわみをひずみゲージでとりだし記録できる。水圧計は豊田工機(株)の製品で PMS-5 を使用した。そのとり付け位置は模型底面の中央と端、およびそれらの中間の位置の 3 個所である。また、水圧計の受圧板が直接砂粒子に接触しないように水圧計の先端にとり付け金具をつけた。と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、金具の空間に満たしたシリコンオイルを通して水圧計の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出し、模型を所定の深さに鉛直にセットして固定する。その後、砂をうめもどすのであるが、たえず一定の間ゲキ比になるように注意してうめもどした。特に模型の底面にはまんべんなく砂がつまり空けきができないように注意してつめた。砂をつめ終ると枠を引き抜き、駆動装置で一定速度で模型を鉛直に引き上げ、模型の引き上げ張力と底面に作用する吸着力および模型の変位を計測した。引き上げ速度は約 0.07 ~ 2.3 cm/sec の広い範囲で実験を行った。計測装置による記録の一例を Fig. 3 に示す。 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。水圧および張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) および張力の極大値に対応する水圧の値 (p_t) を解析の対象とした。Table 3 に実験の種類と実験に関連する値を示してある。

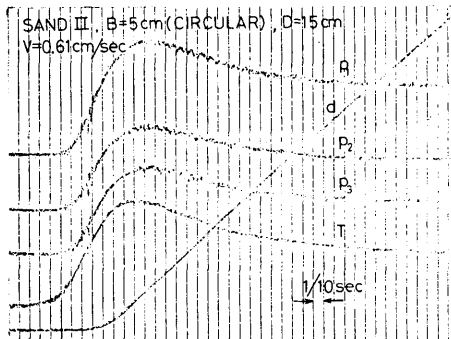
Table 2 Characteristics of Experimental Sand

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

Table 3 Data Pertaining to Tests

Sand	Model	<i>B</i> (cm)	<i>D</i> (cm)	<i>B/D</i>	Φ	<i>T</i> (°C)	<i>k</i> (cm/sec)	<i>V</i> (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
	Triangular	6.74	15	0.45		24	0.019	0.07~0.79
	Square	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
		7.5	10	0.75	0.53	16	0.023	0.11~2.08
		7.5	15	0.50	0.58	27	0.030	0.07~2.16
	Triangular	6.74	15	0.45		16	0.023	0.07~2.09
	Square	4.43	15	0.30		16	0.023	0.07~2.15

Φ ; Form Factor *K*; Permeability *T*; Temperature of Water *V*; Pulling Velocity

**Fig. 3** Record of Pulling Test

3. 吸着力

3.1 理論的考察

砂地盤における筒状体の吸着力の発生現象を考察するにあたり、Fig. 4の(a)、(b)に示すような対応を考えてみる。(a)図は筒状体を速度 *V* で引き上げたときの吸着力 *p* の発生を示すもので、(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、底部にボイリング現象が発生せず（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* が流入する現象を示したものである。(a)図に示

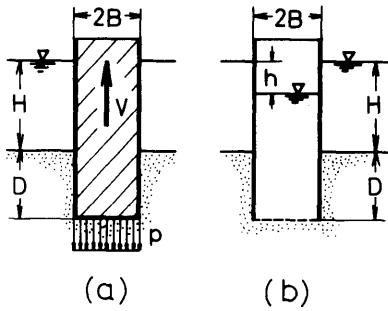


Fig. 4 Correspondence between Phenomena of Suction and Seepage

すような吸着力の発生現象が (b) 図の浸透現象で説明できるためには次のような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底面に発生する吸着力の分布は等分布であり、②底面にできる空げき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。以上のような仮定を満足した上で、(a)、(b) 図の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 $\gamma_w h$ は吸着力 p にそれぞれ対応させて表わすことができる。すなわち、

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

以上のように、もし、(1) 式の関係が成立するならば、吸着力の発生現象は (b) 図に示す浸透流の現象を理論的に解くことにより解明できるが、(1) 式の関係が成立するのは、ある限られた範囲だけであり (3.1.2 参照)、すべての吸着力の発生現象を説明することはできない。しかし、3.2 で述べるように、この対応関係を用いることにより、実験値をもとに吸着力の算定式を決定することができる。そのために、まず 3.1.1 で (b) 図に示す浸透流の理論解を出しておく。

3.1.1 理論解

Fig. 4 (b) 図の理論解を求める場合、種々の底面形状に対して直接 3 次元での解を出すことは困難である。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 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

る。Fig. 5 に示す (Z) 平面と (W) 平面を (t) 平面に写像する。まず、(Z) 平面を (t) 平面に写像すると、

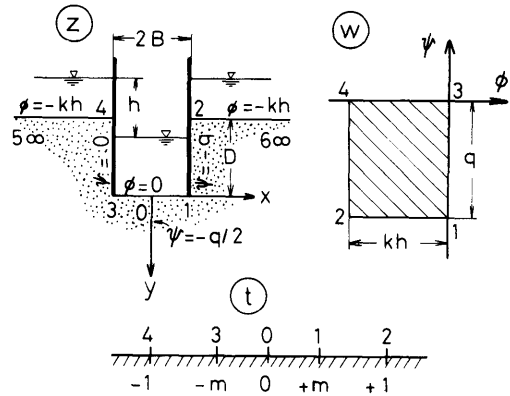


Fig. 5 Complex Planes for Mapping

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

ここで、 $\theta = \sin^{-1}(t/m)$ 、 m, m' ($m'^2 = 1 - m^2$) は母数、 K, 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、 $F(m, \theta), E(m, \theta)$ 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, K' は m, m' を母数とする第 1 種完全楕円積分、 E, E' は同じく第 2 種の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である。 $1/\Phi$ 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 によって定まり、(2) 式と (4) 式より、 Φ を計算し D/B (または B/D) について示したものが Fig. 6 である。

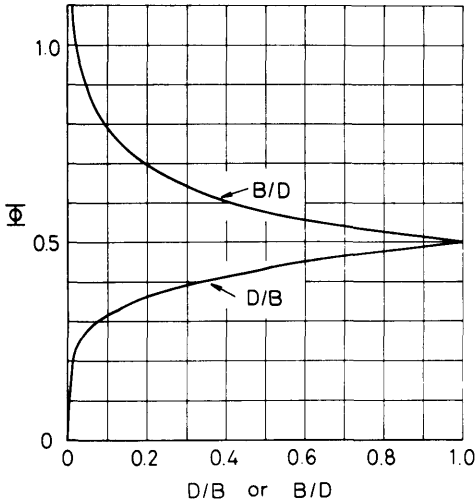


Fig.6 Calculated Values of Form Factor Φ to Depth Ratio D/B or B/D

(3) 式で表わされる 2次元の流量に補正係数 α を用いて 3次元の流量を表わすと次の式となる。

$$Q = \frac{1}{\Phi} \alpha k h L \dots\dots\dots(5)$$

ここで、 L は筒状体の底面の周長である。

補正係数 α を決定するために、Fig.7 に示す実験

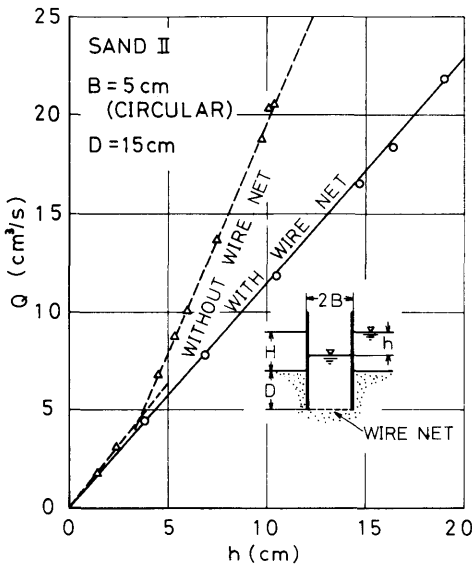


Fig.7 Seepage Test by Cylindrical Pipe

を行った。この実験は、円筒の底面に金網をはり、円筒の外部と内部に水位差 h を与え、外部から内部へ流れこむ流量 Q を計測した。 Q に対する h の実測値を丸印で示してある。この Q の実測値と(5)式を対比し、 α を求めると、

- SAND I $\alpha = 0.74$
- SAND II $\alpha = 0.76$

であった。 α の値は文献1)では円筒の場合、境界条件は幾分異なるが、約0.8であり上記の値は妥当であると考えられる。Fig.7 の中で三角印で示した値は円筒の底面に金網がないときの流量の実測値を示したもので、この結果については 3.1.2 で述べる。

(5)式に(1)式の対応関係 $Q = AV$ 、 $r_w h = p$ を導入すると吸着力 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 は筒状体の底面積、 L は底面の周長、 r_w は水の単位体積重量である。

3.1.2 実験値への適用範囲

先に述べたように、Fig.4 (a), (b) の対応が成立するためには、①と②の仮定を満足しなければならない。仮定①すなわち、「吸着力の分布が等分布

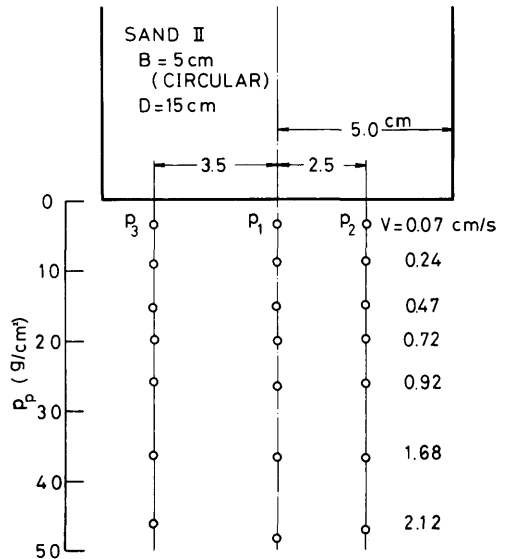


Fig.8 Distribution of Suction Pressure (CIRCULAR 1)

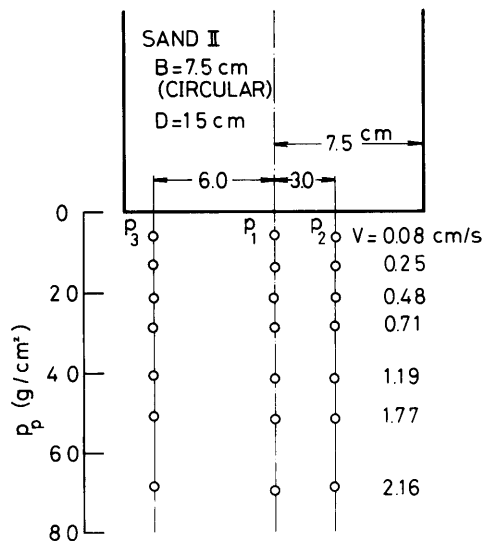


Fig. 9 Distribution of Suction Pressure (CIRCULAR 2)

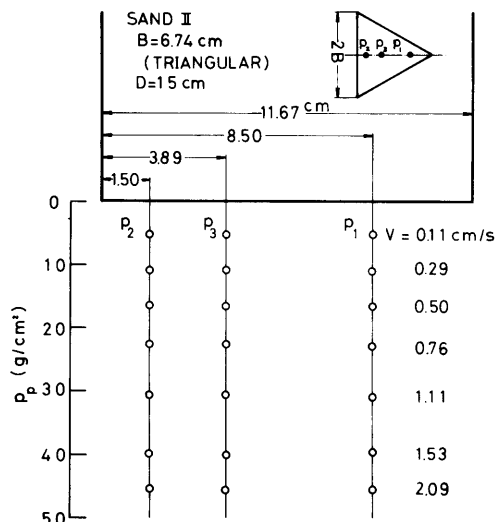


Fig. 10 Distribution of Suction Pressure (TRIANGULAR)

でなければならない」の仮定に関しては、Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 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。これらの図は模型底面にとり付けた3個の水圧計で計測した吸着力を引き上げ速度 V に応じて示したものである。 V が大きくなってもその形状は変わらずほとんど等分布である。Fig. 8, Fig. 9 は円筒模型で Fig. 10 は正三角筒模型の分布を示す。

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入が生じ、この仮定は成立しなくなると考えられる。Fig. 11 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着力 p を、底面積と引き上げ速度の積 AV に対して示したものである。実線は同径の円筒を用いた Fig. 7 の実験で底面の金網をとりのぞき砂のポ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(破線)をそのままつとった線である。両者はよく一致して、この速度の付近では吸着力の発生現象は Fig. 7 に示す浸透現象と同じであると考えられる。特に、非常に V が小さい範囲(この場合、

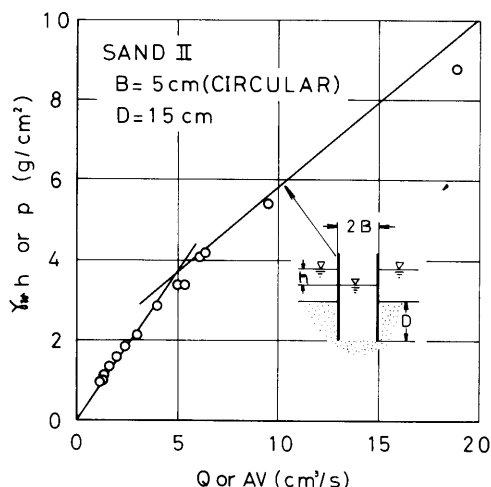


Fig. 11 Comparison between Suction Pressure p in Slow Pulling Tests and Head $r_w h$ in Seepage Tests

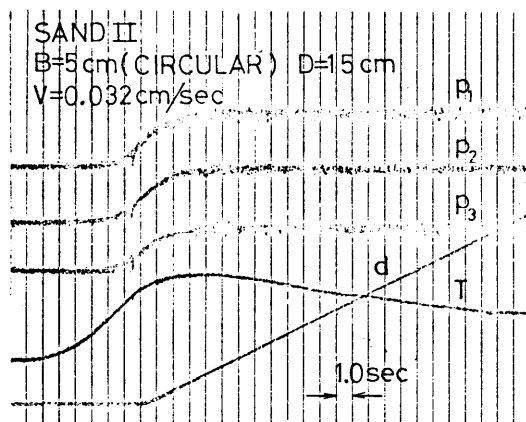


Fig. 12 Record of Slow Pulling Test

$AV = 5 \text{ cm}^3/\text{sec}$ 以下) では、 p の算定に(6)式を使用できる。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(6)式を使用できる場合の吸着力の記録は、Fig. 3に示すような砂の流入がある場合の記録と異なり、Fig. 12の記録に示すように吸着力には極大値がない。しかし、実物においては、たとえ引き上げ速度が遅くても、底面積が大きいため、 AV が大となり砂の流入は必ず発生するから、特別な場合をのぞき(6)式をそのまま使用して吸着力を算定することはできない。次節3.2においては、 AV が大きく砂の流入が発生している場合の吸着力について、(6)式を基本として実験値の考察を行う。

3.2 実験値の考察

Fig.13はFig.3の記録を読みとり、模型に作用す

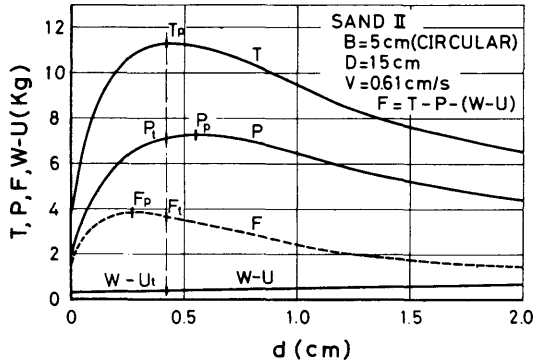


Fig.13 Variations of Pulling Force, Suction Force, Frictional Force and Buoyancy to Displacement

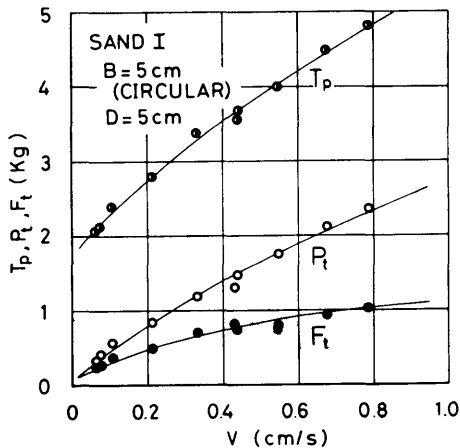


Fig.14 Measured Values of T_p , P_t and F_t (CIRCULAR 1)

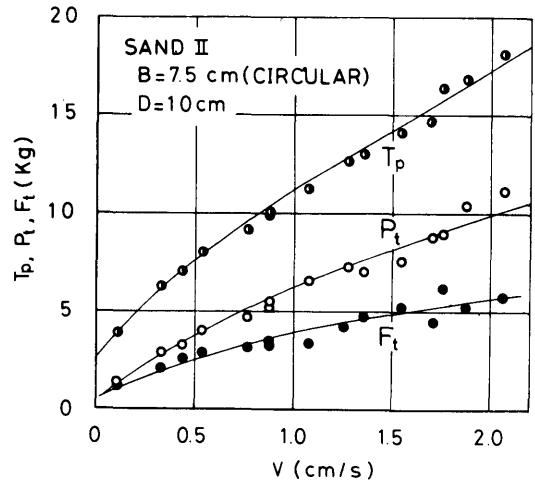


Fig.15 Measured Values of T_p , P_t and F_t (CIRCULAR 2)

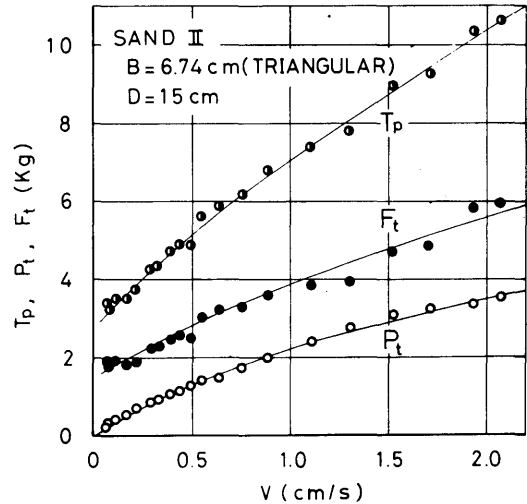


Fig.16 Measured Values of T_p , P_t , P_t and F_t (TRIANGULAR)

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 は模型に作用する張力で、地切り力に相当する力である。 P は模型底面に作用する吸着力の合力であり、底面の3個所で計測した単位面積あたりの吸着力 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 は模型の側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。 T, P, F はいずれも極大値を持っているが、それらの位置は少しずつずれている。この極大値の値には、Suffixに p の記号をつけてある。一般に、地切り力として必要な値は T の極大値 T_p 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. 13参照) である。Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16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. 13と同様に $F_t = T_p - P_t - (W - U_t)$ から計算して求めた。Fig. 14 と Fig. 15 は D/B の値が小さいために、地切り力 T_p に対する影響は吸着力の合力 P_t の方が摩擦力 F_t よりも大きい。Fig. 16 は正三角筒模型で、この場合には D/B

が大きく、また、側面積も大きいので F_t が P_t よりも大きくなっている。これらの図でわかるように摩擦力も吸着力と同様に V が速くなるにしたがって増加している。この摩擦力の増加に関しては 4. でくわしく考察する。

Fig. 17 は単位面積あたりの吸着力の極大値 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 が非常に小さい間は (6) 式で表わすことが

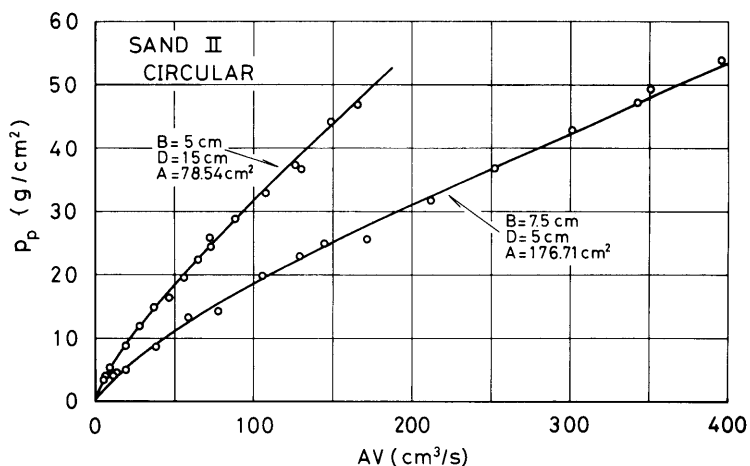


Fig. 17 Measured Values of Suction Pressure p_p

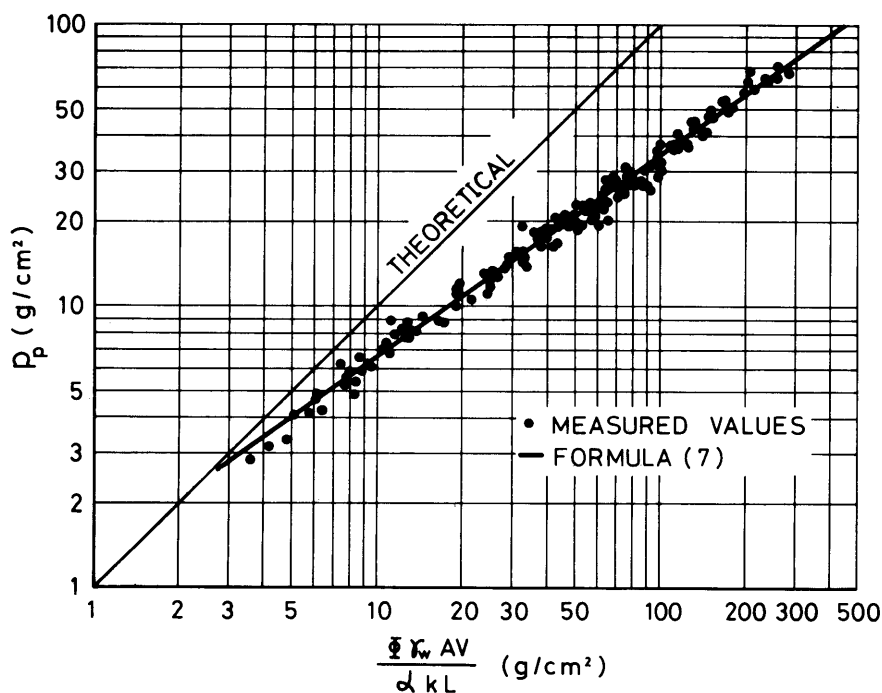


Fig. 18 Distribution of Suction Pressure p_p in All Circular Cylindrical Model Tests

できるが、 V が大きくなり砂の流入が始まると、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。これらの値は砂の種類、模型の大きさ、根入り深さによりそれぞれ異なっているが、Fig. 18に示すように横軸に(6)式の右辺、すなわち $\Phi r_w AV / \alpha k L$ をとり両対数グラフにプロットすると一本の直線の上に分布する。Fig. 18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、根入り深さおよび引き上げ速度などを変えて行ったすべての実験における値をプロットしたものである。細い直線で(6)式の理論値を示した。実験値は砂の流動があるために、理論値より小さくなる。これらの実験値に最小二乗法を適用して直線の式を求めると次のような式で吸着力を表わすことができる。

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

上式は吸着力の極大値 p_p の値を算定するための実験式であるが、地切り力の算定に必要な値 p_t (Fig. 13参照)の実験値についても同様に求めて次のような式となる。

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

(7)、(8)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、吸着力は(7)、(8)式の実験式を用い近似的に求めることができる。また、この実験においては、引き上げ速度 V が非常に大きい範囲まで実験を行ってあるので、底面積 A 、周長 L が大きい実物に対しても(7)、(8)式を適用することができる。5.において、実物へ適用した例について述べる。

3.3 三角筒および四角筒の吸着力

正三角筒および正四角筒については、円筒模型(1)と同一底面積の模型で実験を行った。これらの吸着力の分布形状はFig. 10に示したように等分布でありまた、吸着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. 19は円筒模型、正三角筒模型および正四角筒模型における p_p の実験値を横軸に AV / Lk をとり、比較して示したものである。ここで、横軸に $1/k$ を乗じたのは、実験時の水温がそれぞれ違い、透水係数の値が異なるためである。このように p_p をプロットしてみると、正三角筒および正四角筒の値はほとんど円筒の値と一致している。すなわち、正三角筒および正四角筒の吸着力を求める場

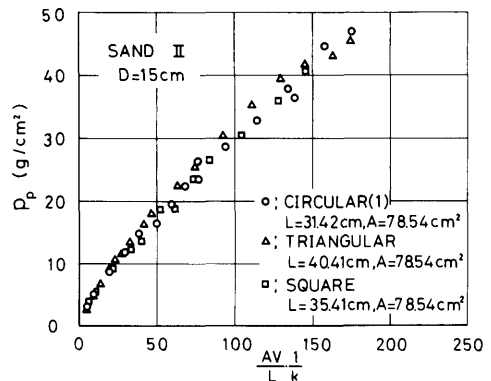


Fig. 19 Comparison of Suction Pressure p_p in Circular, Triangular and Square Cylindrical Model Tests

合には、それらと同一の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、(7)および(8)式から吸着力を算定することができる。

以上の考えを拡張すると、任意の多角筒および楕円筒などの吸着力を求める場合も、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 Φ および α を用いて(7)、(8)式から近似的に吸着力を算定できると考えられる。

4. 周面摩擦力

海底に着地している物体の地切り力を求める場合、吸着力の算定が重要であることは先に述べた。しかし、Fig. 14, 15, 16などで示したように、地切り力の中で周面摩擦力のしめる割合は比較的大きく、特に根入り深さが大きくなると周面摩擦力の影響は大きくなり、その算定が非常に重要となってくる。

Fig. 14, 15, 16に示したように周面摩擦力は引き上げ速度 V が大きくなるにしたがって増加している。すなわち、吸着力 p_t にだいたい比例して増加している。この現象は杭やピヤーの周面摩擦力の算定に一般に使用されている摩擦抵抗力の式だけでは解決できない。周面摩擦力の増加の原因でまず考えられることは、吸着力の発生によっておこる側面の応力状態の変化である。底面に吸着力が発生すると、側面付近の中立応力も減少する。したがって、有効応力が増加するために、周面摩擦力は吸着力に応じて増加すると考えられる。

この章では、周面摩擦力の増加現象を中心に考察を行う。

4.1 摩擦係数の測定

周面摩擦力の算定に必要な摩擦係数 μ の測定を Fig. 20 のような方法で行った。筒状模型と同一材料

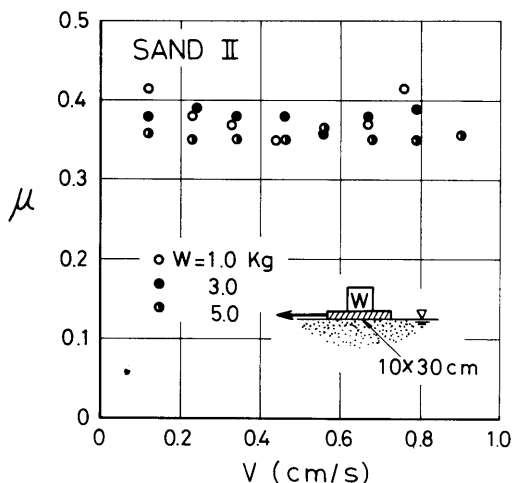


Fig. 20 Measurement of Frictional Coefficient

で作った 10×30cm の板を飽和砂の上におき、荷重を変化させたときのすべり出し抵抗力を測定した。引っぱり速度 V は 0.1~0.9 cm/sec の範囲で、変化させた荷重は 1, 3, 5kg であった。この実験から求めた摩擦係数 μ の値を V に応じて示したものが Fig. 20 の丸印である。 μ の平均値は Table 2 に示したように、SAND I で 0.40, SAND II で 0.37 であった。

Fig. 21 は乾燥砂において、引き上げ速度を速くした場合に周面摩擦力がどのように変化するかをしら

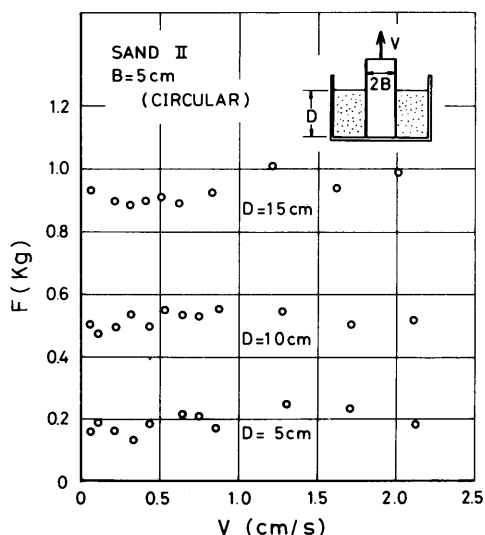


Fig. 21 Pulling Tests in Dry Sand

べるために行った実験である。実験には円筒模型(1)と同一径で底面のない円筒を用いた。砂には SAND II を用いたが、できるだけ均一につまるように砂をふりかけるようにしてつめたので、砂の単位体積重量は非常に小さい。この実験によると、乾燥砂における周面摩擦力は V に応じて変化せず、 V が大きくなっても静力学的に周面摩擦力を算定することができる。

4.2 杭の周面摩擦抵抗

海底に着地している筒状体の周面摩擦力は、引き上げ速度が非常に遅く吸着力の発生がほとんどないと考えられる場合には、杭などに用いられる算定式で計算することができる。

砂地盤における杭の周面摩擦力は、任意の単位表面積あたりに生ずる摩擦力 f_s を全表面について集めたものに等しい。 f_s は摩擦係数と有効応力との積で表わされる。有効応力とは土粒子を通じて作用する応力で、摩擦力に直接関係する応力である。

$$f_s = \mu \sigma'$$

ここで、 μ は杭と砂との摩擦係数、 σ' は周面に作用する有効応力であり、一般に、 σ' はその位置の有効鉛直応力 σ_v に横力係数 K_L を乗じて算定する。

$$\sigma' = K_L \sigma_v = K_L \gamma' z \dots\dots\dots(9)$$

横力係数 K_L については種々の値が提出されている^{6), 7)}。この実験では、 V が非常に遅く、吸着力が小さいときの周面摩擦力から推定すると $K_L = 1.0$ 付近であった。有効鉛直応力 σ_v は、 $\sigma_v = \gamma' z$ で表わされる。 γ' は砂の水中単位体積重量、 z は求める位置より上方にある砂層の深さである。 f_s を全周面積について積分すると、周面摩擦力 F_1 は次のようになる。

$$F_1 = \frac{1}{2} \mu K_L \gamma' L D^2 \dots\dots\dots(10)$$

この(10)式によって表わされる周面摩擦力の式は、筒状体を引き上げる過程で、周面に作用する有効応力に変化が生じない場合、すなわち、ここで行った実験においては引き上げ速度が遅く、発生する吸着力が非常に小さい場合の周面摩擦力の算定にかぎり適用できる。

4.3 吸着力による周面摩擦力の増加

筒状体の底面に吸着力が発生すると、周面に作用している水圧も減少するために、周面における応力

状態は変化する。いま、周面に作用する全応力を σ 、有効応力を σ' 、中立応力（水圧）を u とするならば、 σ は次のように表わされる。

$$\sigma = \sigma' + u$$

筒状体を引き上げると底面に吸着力が発生し、周面の中立応力 u は静止のときより減少する。その減少量を Δu とすると、全応力 σ は一定であるから、有効応力 σ' は Δu だけ増加する。いま、中立応力の増加分 Δu の周面における分布状態を近似的にFig. 22に示すように3角形分布と仮定すると、深さ z における有効応力 σ' は(9)式を参照して次のように書くことができる。

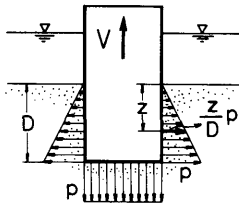


Fig.22 Distribution of Decreased Neutral Pressure on Side of Cylinder

$$\sigma' = KLr'z + \frac{z}{D} p \quad \dots\dots(11)$$

この有効応力 σ' を全周面積について積分し、周面摩擦力 F を求めると、

$$F = F_1 + F_2 = \frac{1}{2} \mu KLr'LD^2 + \frac{1}{2} \mu LDp \dots\dots(12)$$

(12)式の右辺第1項は、(10)式で示したように杭の周面摩擦力の計算などに用いられる式であり、第2項は底面に吸着力が発生し、周面の中立応力が減少することによっておこる周面摩擦力の増加を表わす。この第2項の値を F_2 とすると、全周面摩擦力は $F = F_1 + F_2$ となる。

Fig.23, 24, 25, 26は F_t (Fig. 13, 14, 15, 16 参照) について実験値 (丸印) と計算値 (実線) を比較して示した代表例である。計算値は(12)式を用いて計算したが、摩擦係数 μ の値はSAND Iで0.4, SAND IIで0.37, 横力係数 $K_L = 1.0$, 砂の水中単位体積重量(r')はSAND Iで1.0, SAND IIで0.98であり、吸着力 p_t の値は(8)式を用い計算した値で

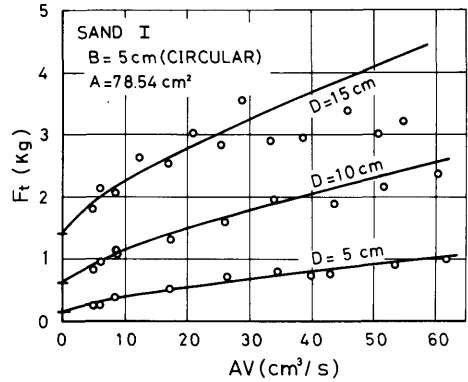


Fig.23 Comparison between Measured and Calculated Values of Frictional Force F_t (SAND I, CIRCULAR 1)

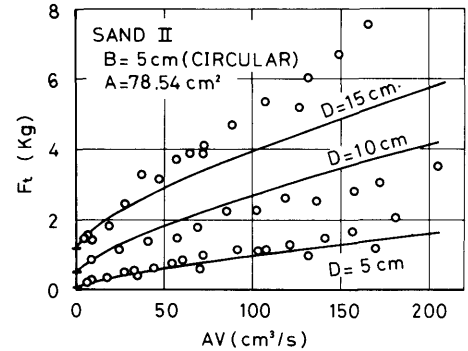


Fig.24 Comparison between Measured and Calculated Values of Frictional Force F_t (SAND II, CIRCULAR 1)

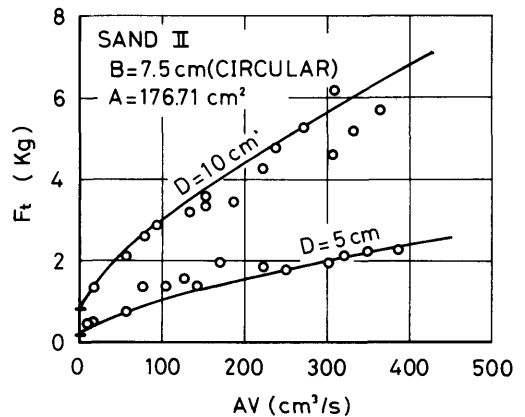


Fig.25 Comparison between Measured and Calculated Values of Frictional Force F_t (SAND II, CIRCULAR 2)

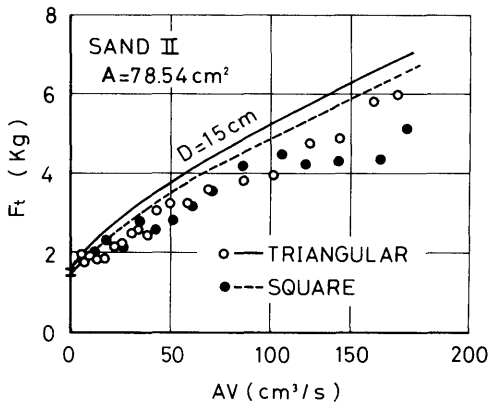


Fig. 26 Comparison between Measured and Calculated Values of Frictional Force F_t (SAND II, TRIANGULAR and SQUARE)

ある。これらの図で $AV = 0$ の所に一印で示した値は F_1 の計算値であり、いかに F_2 の値、すなわち、吸着力の発生によっておこる周面摩擦の増加分が大きいかがわかる。また、根入り深さが小さく D/B が小さい場合には、計算値と実測値は非常によく一致している。 D/B が大きくなると、Fig. 24 の $D = 15\text{cm}$ のときをのぞくと、どの場合も計算値が実測値よりも大きい。この理由は、周面の減少した中立応力の分布形状を3角形分布と仮定したことによるものと考えられる。このような場合には、周面の中立応力の変化が砂層表面まで影響していないのか、また3角形分布よりも凹型の分布形状ではないかと考えられる。しかし、いずれにしても、海底に着地している物体のように根入り深さがさほど大きくないものに関しては、(12)式で正確に周面摩擦力を算定することができると思われる。

以上述べたように、海底に着地している筒状体の周面摩擦力を静力学的な摩擦力 (F_1) と吸着力の発生により増加する摩擦力 (F_2) の和として表わすことができた。しかし、より正確に周面摩擦力を算定するためには、吸着力の発生によって減少する周面の中立応力の分布形状を把握することが必要と考えられる。

5. 地切り力

海底に着地している筒状体の最大地切り力 T_p は先に述べたように、吸着力の合力 (P_t)、周面摩擦力 (F_t) および重量と浮力の差 ($W - U_t$) の合計である。

吸着力の合力は(8)式で求められる p_t と底面積 A との積であり、周面摩擦力は(12)式で計算できる。浮力 U_t は地切り力が極大値になったときの筒状体の変位を d_t とするならば、 $U_t = A(H + D - d_t)$ で表わすことができる。しかし、地切り力の極大値は変位が小さい範囲で発生し、 $H + D$ に比較して d_t は非常に小さいために (Fig. 13 参照)、筒状体が静止しているときの浮力 $U_0 = A(H + D)$ の値を用いてもさしつかえない。

地切り力の算定式をまとめて書くと次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} T_p &= P_t + F_t + (W - U_0) \\ P_t &= A p_t \\ F_t &= \frac{1}{2} \mu K L \gamma' L D^2 + \frac{1}{2} \mu L D p_t \\ p_t &= 1.188 \left(\frac{\Phi \gamma_w AV}{\alpha k L} \right)^{0.726} \end{aligned} \right\} \dots\dots(13)$$

Fig. 27 は地切り力について、(13)式で計算した値(実

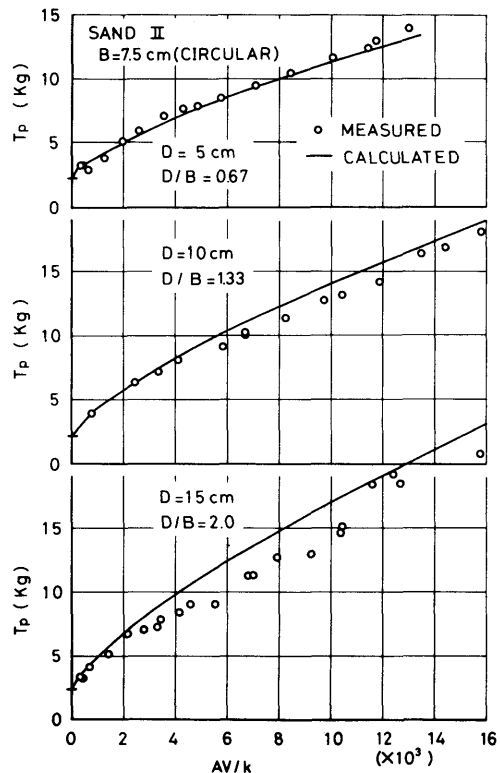


Fig. 27 Comparison between Measured and Calculated Values of Pulling Force T_p

線)と実測値(丸印)を比較して示した一例である。横軸は AV/k をとったが、これは実験時の水温が異なり k の値がちがうためである。これらの図からわかるように根入り深さ(D)が小さいときには実測値と計算値が非常によく一致するが、 D が大きくなると計算値の方が大きくなっている。これは周面摩擦力の算定の誤差がそのままあらわれているためと思われる。しかし、いずれも計算値が実測値よりも大きいために、(13)式を用いて計算しておけば安全である。

以上述べてきたことは、模型実験に対する考察であったが、ここで、例題として実物大の円筒体について吸着力、周面摩擦力および地切り力を計算してみよう。

円筒体の直径	$2B=2.0\text{ m}$
" 周長	$L=6.28\text{ m}$
" 底面積	$A=3.14\text{ m}^2$
根入り深さ	$D=1.0\text{ m}$
根入り幅比	$D/B=1.0$
重量と浮力の差	$W-U_0=0$
引き上げ速度	$V=0.2\text{ cm/sec}$
砂地盤の透水係数	$k=0.03\text{ cm/sec}$
" 水中単位重量	$\gamma'=1.0\text{ ton/m}^3$
" 横力係数	$K_L=1.5$
砂と円筒体の摩擦係数	$\mu=0.4$
補正係数	$\alpha=0.75$

以上の条件のもとに計算を行うと、Fig. 6より形状係数は $\Phi=0.5$ となるから、(8)式のカッコ内の値、すなわち、Fig.18の横軸の値は、

$$\Phi \gamma_w AV / \alpha k L = 222.2 \text{ g/cm}^2$$

となるから、(8)式から単位面積あたりの吸着力 p_i を計算すると、

$$p_i = 0.60 \text{ ton/m}^2$$

したがって、吸着力の合力は、

$$P_i = 1.89 \text{ ton}$$

周面摩擦力は(13)式より、

$$F_i = 2.64 \text{ ton}$$

したがって、最大地切り力は、

$$T_p = 4.53 \text{ ton}$$

となる。海洋構造物における吸着力については、まだ充分研究されておらず、だいたいの目安としての値しか提出されていないが、 $D/B < 1$ 付近における吸着力の値(粘性土を主体として)は約 1.0 ton/m^2 という値もみうける。上記の計算値はこの値に比較しても妥当な値で、細砂における吸着力は粘性土の吸着力に比較してだいたい同程度である。また、周面摩擦力はこの場合のように D/B が小さいときにはさほど大きな値ではないが、根入り深さが大きくなると急激に大きくなるから注意しなければならない。

6. む す び

以上、砂地盤の海底に着地している筒状体の吸着力、周面摩擦力および地切り力に関して考察を行い、それらを計算する式を誘導した。吸着力においては浸透流の理論を基礎とし、実験においては筒状模型の引き上げ速度を大きくし実験の範囲をひろげ、実物にも直接適用できる実験式を求めることができた。また、ここで述べた吸着力に関する考えは筒状体にかぎらず、他の形状の着地物体の吸着力や、サクシオンアンカーの把駐力の算定などにも応用できる。

一方、周面摩擦力は吸着力の発生によっておこる周面摩擦力(F_2)の増加について考察し、静力学的な摩擦力(F_1)との和として全周面摩擦力(F)を表わした。吸着力の発生によって増加した周面摩擦力の算定においては、減少した中立応力 Δu の周面における分布形状を3角形と仮定したが、より正確な周面摩擦力の算定式をうるためには、筒状体側面の水圧変化を実測し分布形状をきめなければならない。しかし、海底着地物体のように根入り深さが浅いものについては、3角形分布と仮定しても充分正確に周面摩擦力を求めることができる。 F_1 すなわち静力学的に求めうる周面摩擦力で最も問題となるのは、横力係数 K_L の値である。これについては、現在までに数多く提出されている値を参考にして、海底の地盤に合った値を用い計算しなければならない。

地切り力は吸着力と周面摩擦力の和として(13)式を用いて計算できる。しかし、これらは模型実験の結果をもとに実物における地切り力を推定したもので、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で確認実験を行ってみる必要もあると考えられる。

なお、本研究における計算は当研究所共用電子計算機TOSBAC 5600/120で行った。

参 考 文 献

- 1) R.N.Davidenkoff und O.L.Franke: Untersuchung der räumlichen Sickerströmung in eine umspundete Baugrube in offenen Gewässern, Die Bautechnik, pp.298~307,(1965).
- 2) M.E.Harr: Groundwater and Seepage, Mc Graw-Hill Book Company, pp.136~137, (1962).
- 3) K.Ninomiya, K.Tagaya and Y.Murase: A study on Suction Breaker and Scouring of a Submersible Offshore Structure, OTC, pp.297~304,(1972).
- 4) G.A.Brown and V.A.Nacci: Performance of Hydrostatic Anchor in Granular Soils, OTC, pp.533~537, (1972).
- 5) M.C.Wang, V.A.Nacci and K.R.Demars: Behavior of Underwater Suction Anchor in Soils, Ocean Engineering, Vol.3, pp.47~62,(1975).
- 6) H.O.Ireland: Pulling Tests on Piles in Sand, Proc. 4th.SMFE, pp.43~45,(1957).
- 7) 土質工学会編: 土質工学ハンドブック, 技報堂, pp. 424~425, (1965).