

砂地盤の海底における筒状体の地切り力に対する 周面摩擦力の影響に関する実験的研究

EXPERIMENTAL STUDY ON SKIN FRICTIONAL FORCE OF CYLINDRICAL OBJECTS 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

海底から物体や基礎などを引き抜く場合、その引き抜き抵抗、すなわち、地切り力の大きさを推定することは非常に重要なことである。作業船が海中工事や海中作業に従事し、海底から物体や基礎などを引き上げるとき、その地切り力を前もって算定しておくことは、作業船の作業能率の上からも必要なことである。また、海洋開発に使用される着底式石油掘削台船や作業台船では、脚やマットに作用する地切り力が大きい場合には、脚やマットの引き上げが困難となることから、これらに作用する地切り力を推定すること、およびその地切り力を減少させることが課題となっている。

現在、海底に着地している物体や基礎の地切り力に関する研究は、そのほとんどが粘性地盤に関するものである^{1)~5)}。砂地盤における研究ではアンカーの把駐力や海底埋没体の引き上げ抵抗の研究として見うけられるものはあるが^{6)~8)}、それらはいずれも陸上における研究の延長であり、吸引力などについてくわしく考察しているものはない。また、海洋作業台船の脚の地切り力に関する研究は少なく¹⁾、これも粘性地盤に関するものである。一方、わが国における着底式海洋作業台船の脚の地切り力については、現在、基礎的な研究と並行して、実際に稼動している台船でのデータの収集を行っている段階であり、まだ、簡単な目安としての値しか提出されていない⁹⁾。これらはいずれ解決していかなければならない重要な問題である。

筆者らは、砂地盤の海底に着地している物体や基礎などを引き抜く場合の地切り力について、筒状模型を用いた実験をもとに研究を行ってきた。一般に、筒状体の地切り力はその底面に作用する吸引力 (Suction Force) と

周面に作用する摩擦力の和として表わすことができる。しかし、海底に着地しているような物体や基礎は杭などと異なり、大きさに比較して根入り深さが小さいために、地切り力のうちで吸引力のしめる割合が大きく、地切り力を求める場合には、吸引力の算定が重要である。

前報¹⁰⁾では、砂地盤の海底から筒状体を引き抜く場合、その底面に作用する吸引力について考察を行った。その結果、吸引力の発現現象を透水現象と対応させることにより、浸透流の理論を基礎とし、筒状模型を用いた実験結果をもとに吸引力の算定式を誘導することができた。

本論文では前報に引き続き、地切り力のもう一方の要素である周面摩擦力と、地切り力について述べたものである。海底に着地している物体や基礎は根入り深さが小さいために、周面摩擦力は底面に発生する吸引力の影響をうける。すなわち、吸引力の発生にともない周面の水圧が減少し、有効応力が増加するために周面摩擦力は吸引力の関数として表わされ、杭などに用いられる静力学的な周面摩擦力だけでは解決できない。そのために、実験では模型の底面の水圧を計測すると同時に周面に作用する水圧も計測し、吸引力の発生により増加する周面摩擦力についてくわしく考察した。

以上のように、吸引力および周面摩擦力を考察することにより、砂地盤の海底に着地している筒状物体や基礎の地切り力の算定式を求めることができた。

2. 周面水圧の計測

周面摩擦力を考察するために、吸引力の発生により減少する筒状体周面の水圧を計測した。しかし、周面摩擦力や地切り力のデータとしては前報¹⁰⁾で行った実験結果がそのまま使用できるので、その実験装置の簡単な概要と周面水圧の計測方法について述べる。

まず、実験装置は幅 100 cm、高さ 75 cm、奥行 68 cm の水砂槽と模型を引き上げるための駆動装置である。使

* 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

用した筒状模型は円筒模型 2 種類 (CIRCULAR (1) : 直径 $2B=10$ cm, 底面積 $A=78.54$ cm², 周長 $L=31.42$ cm, CIRCULAR (2) : $2B=15$ cm, $A=176.71$ cm², $L=47.12$ cm) および円筒模型 (1) と同一底面積を有する正三角筒模型と正四角筒模型の計 4 種類である. 実験砂は豊浦標準砂 (SAND I : 乾燥密度 $r_d=1.60$ g/cm³, 間隙比 $e=0.64$, 透水係数 $k_{20^\circ\text{C}}=0.017$ cm/sec) と鬼怒川砂 (SAND II : $r_d=1.54$ g/cm³, $e=0.77$, $k_{20^\circ\text{C}}=0.025$ cm/sec) の 2 種類を用いた. 計測装置としては, 模型の引き上げ力を計測するための張力計と模型の鉛直方向の移動量を計測するための変位計, および吸引力を計測するために模型の底面に取り付けた 3 個の水圧計である. これらは前報¹⁰⁾で述べたが, 本論文の主題である周面摩擦力を考察するために, 模型の底面の水圧と同時に周面水圧も計測する実験を追加した.

この周面水圧の計測のための実験は SAND I の砂で, CIRCULAR (2) の模型を用いて行った. 水圧計の取り付け位置は Fig. 1 に示すように底面に 3 個, 周面に 3 個の計 6 個である. 水圧計の先端には取り付け金具をつけ, 水圧計の受圧板が直接砂粒子に接触しないようにしてある. しかし, 周面では砂粒子と模型がすれ合うために, 取り付け金具の先端にある水圧取りだし孔

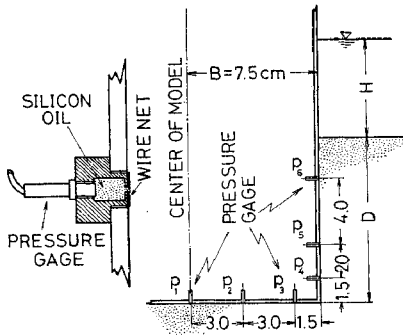


Fig. 1 Arrangement of Pressure Gage

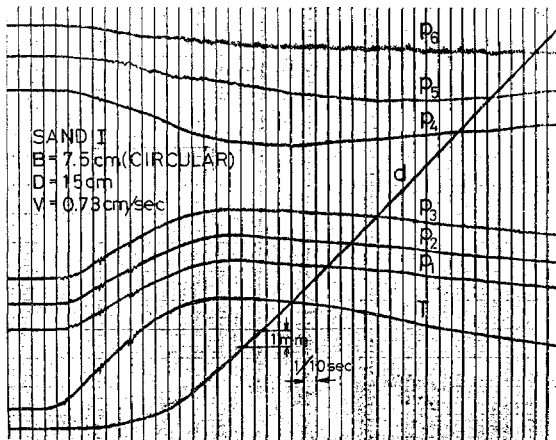


Fig. 2 Record of Pulling Test

(直径 1 mm) に入った砂粒子が, すれ合いにより微動し, 水圧計の記録が乱れる. そのために, 周面の水圧計については, Fig. 1 に示すように, 水圧取りだし孔の前面に網目の非常に小さい金網を取り付けることにより, Fig. 2 に示すように, きれいな記録 (p_4, p_5, p_6) をとることができた.

Fig. 2 は実験の記録の一例である. d は模型の鉛直変位, T は引き上げ力 (地切り力), p_1, p_2, p_3 は底面に作用する水圧 (吸引力), p_4, p_5, p_6 は周面に作用する水圧の記録である. ここで, 周面水圧 p_4, p_5, p_6 の記録と底面水圧 p_1, p_2, p_3 の記録の方向が逆になっているが, これは記録を読み取りやすいように, 両者の記録方向を逆にしたものであり, 実際の現象では両者とも減圧として作用している. また, この記録でわかるように, 地切り力, 吸引力, 周面水圧はいずれも極大値を有し, その極大値の位相はそれぞれ異なっている. この中で, 底面に取り付けた 3 個の水圧計の記録は, いずれも極大値の位相は同じで, また, その大きさや形状も同じであることから, 底面における吸引力の分布は等分布であることが推測できる¹⁰⁾. しかし, ここでは最小根入れ深さ $D=5$ cm, すなわち, 根入れ幅比 $D/2B=0.33$ までしか実験を行っていない. この範囲では, 吸引力の分布は等分布となることが実験で確認できたが, $D/2B$ が上記の値よりも小さくなっていくにしたがって, おそらく吸引力の分布は順次底面中央に凸型の形状になっていくものと考えられる. 前報¹⁰⁾およびこの論文でのすべての考察は, 吸引力の分布は等分布であることを前提としているために, この論文でとりあつかう範囲は $D/2B$ が約 0.3 よりも大きい範囲に限られる. したがって, 根入り深さが非常に小さくなり, 吸引力が等分布に発生しなくなる場合については, 今後, 研究を行い考察していきたいと考えている.

一方, 周面水圧の極大値の位置は吸引力の極大値の位置と大分ずれていて, 水圧計の取り付け位置が上方になるほど位相のずれは大きく, p_6 では極大値が現われていない.

3. 筒状体の周面摩擦力

一般に砂地盤の海底から筒状体を引き上げるときの地切り力は次のような式で表わすことができる.

$$T = P + F + (W - U) \dots \dots \dots (1)$$

ここで, T は地切り力, P は底面に作用する吸引力の合力, F は周面の摩擦力, W, U はそれぞれ筒状体の自重と浮力である. 地切り力 T は P および F をそれぞれ考察することにより求めることができる. 前報¹⁰⁾では吸引力 P について考察したが, 本報での目的は周

面摩擦力 F を考察し、筒状体の地切り力の算定式を求めることである。

Fig. 3 は Fig. 2 の記録を読みとり、模型を引き上げたとき模型に作用する力の変化を鉛直変位 d に応じて表わしたものである。 P は模型底面に作用する吸引力の合力であり、底面で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が、実験では直接計測できないので、 $F=T-P-(W-U)$ で計算し破線で記入してある。 $W-U$ は模型の重量と浮力の差であり浮力の変化を示している。この図でわかるように、鉛直変位 d に対する T, P, F の変化は、いずれも最初急激に増加し、極大値に達したのち、ゆるやかに減少している。これらの極大値の発生点はそれぞれ少しずつずれているが、この発生順位はすべての実験において Fig. 3 と同様に F, T, P の順序であった。また、地切り力 T が極大値 T_p に達するまでの鉛直変位は、底面積 A と引き上げ速度 V との積 AV の値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ている。これらの極大値にはその記号の Suffix に p をつけて表わした。しかし、われわれが地切り力として必要とする値は T の極大値 T_p であり、 T_p を算定するのに必要な値は T_p が発生した瞬間における $P, F, W-U$ の値、すなわち、 $P_t, F_t, W-U_t$ の値である。このように地切り力の極大値 T_p に対応する値にはすべてその記号の Suffix に t をつけてある。

前報¹⁰⁾では、この吸引力 P について考察し、吸引力

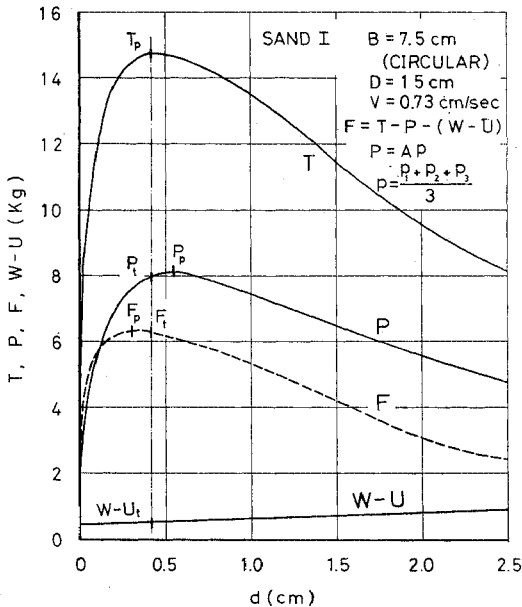


Fig. 3 Variations of Pulling Force, Suction Force, Frictional Force and Buoyancy to Displacement of Model

の発生現象を透水現象と対応させて、その計算式を導くことができた。すなわち、単位面積あたりの吸引力 p_p と p_t は次式で計算できる。

$$p_p = 1.279 \left(\frac{\phi r_w AV}{\alpha k L} \right)^{0.713} \dots\dots\dots (2)$$

$$p_t = 1.188 \left(\frac{\phi r_w AV}{\alpha k L} \right)^{0.726} \dots\dots\dots (3)$$

これらの式で、 A および L は筒状体の底面積と周長、 V は筒状体の引き上げ速度、 k は透水係数、 r_w は水の単位体積重量、 $1/\phi$ は形状係数、 α は 2次元流量を 3次元流量になおすための補正係数である。なお、これらの式を使用する場合には cm, g, sec の単位を用いなければならない。

この章では周面摩擦力、特に、吸引力の発生によって増加する周面摩擦力について考察する。そのためには、まず周面に作用する水圧の分布形状を調べ、次に、周面摩擦力に対する吸引力の影響について考察し、最後に周面摩擦力の算定式を求める。

(1) 吸引力の発生により減少する周面水圧の分布形状

筒状体の周面摩擦力を考察するにあたっては、周面に作用する水圧の変化を把握しておくことが重要である。筒状体を引き上げるとその底面に吸引力が発生し、それに応じて周面の水圧も減少する。 Fig. 4 は Fig. 2 の記録を読みとり、吸引力 p および周面に作用する水圧 p_1, p_2, p_3 の変化を模型の鉛直変位 d に応じて示したものである。 p は底面の 3 箇所計測した p_1, p_2, p_3 の平均値である。この図でわかるように、周面水圧も吸引力と同様に極大値を有している。その極大値は吸引力の極大値の発生点からかなりおくらせて発生し、深さが小さ

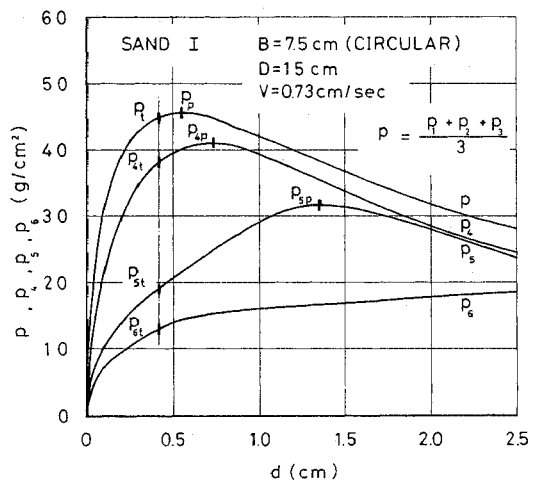


Fig. 4 Variations of Suction Pressure and Decreased Side Water Pressure to Displacement of Model

いほどそのおくれが大きい。しかし、われわれが必要とする値は、Fig. 3 のところでも述べたように、地切り力の極大値が発生した瞬間における水圧 ($p_t, p_{4t}, p_{5t}, p_{6t}$) の値であり、今後の解析においては、すべてこの水圧を対象とする。

Fig. 5 は模型を引き上げたとき、その底面に発生する吸引力 p_t と周面に作用する水圧 p_{4t}, p_{5t}, p_{6t} の実測値の分布を示したものである。底面の吸引力では3点の実測値を細線でつないでいるが、これは3点の実測値の平均値を示したものであり、いずれの場合でも吸引力の分布は等分布となっている。なお、 $D=5\text{ cm}$ の場合の p_3 の実測値は、水圧計が故障して計測できなかったために、 p_t の平均値は p_1 と p_2 の2点の実測値より求めた。これは、他の $D=5\text{ cm}$ の実験においても、 p_1, p_2, p_3 はほとんど同程度の値となり等分布になることが確認されているので、 p_1 と p_2 の平均値を p_t として用いても大差はない。周面水圧においては、それぞれ実測値を実線でつないでいるが、模型の最下端の水圧の値は吸引力の平均値 p_t の値である。このように、周面水圧は三角形分布よりもいくぶん凹型の分布形状となり、根入り深さが浅くなるにしたがって、吸引力は p_t を底

辺とする三角形分布に近づいている。しかし、この場合も 2. で述べたように、あくまでも吸引力が等分布に発生する根入り深さ、すなわち、 $D/2B$ が約 0.3 より大きい範囲での考察である。Fig. 5 の下図は $p_t, p_{4t}, p_{5t}, p_{6t}$ の実測値を引き上げ速度 V に応じて示したものであり、周面水圧も吸引力と同じ傾向で V が大きくなるにしたがって増加していることがわかる。

(2) 吸引力が周面摩擦力におよぼす影響

前項で述べたように吸引力が発生すると周面の水圧も減少する。この周面水圧の減少が周面摩擦力に影響する。Fig. 6 は引き上げ力の極大値 T_p 、吸引力の合力 P_t および周面摩擦力 F_t の実測値を引き上げ速度 V に応じて示した一例である。ここでも、周面摩擦力は実験で直接計測できないので、Fig. 3 の場合と同様に、 $F_t = T_p - P_t - (W - U_t)$ で計算した値をプロットしてある。この図でわかるように、 F_t も T_p, P_t と同様に V に応じて増加している。すなわち、 F_t の値は Fig. 7 や Fig. 8 に示すように、吸引力 p_t に比例して増加していることがわかる。このような現象は杭などの周面摩擦力の算定において一般に使用される静力学的な算定式だ

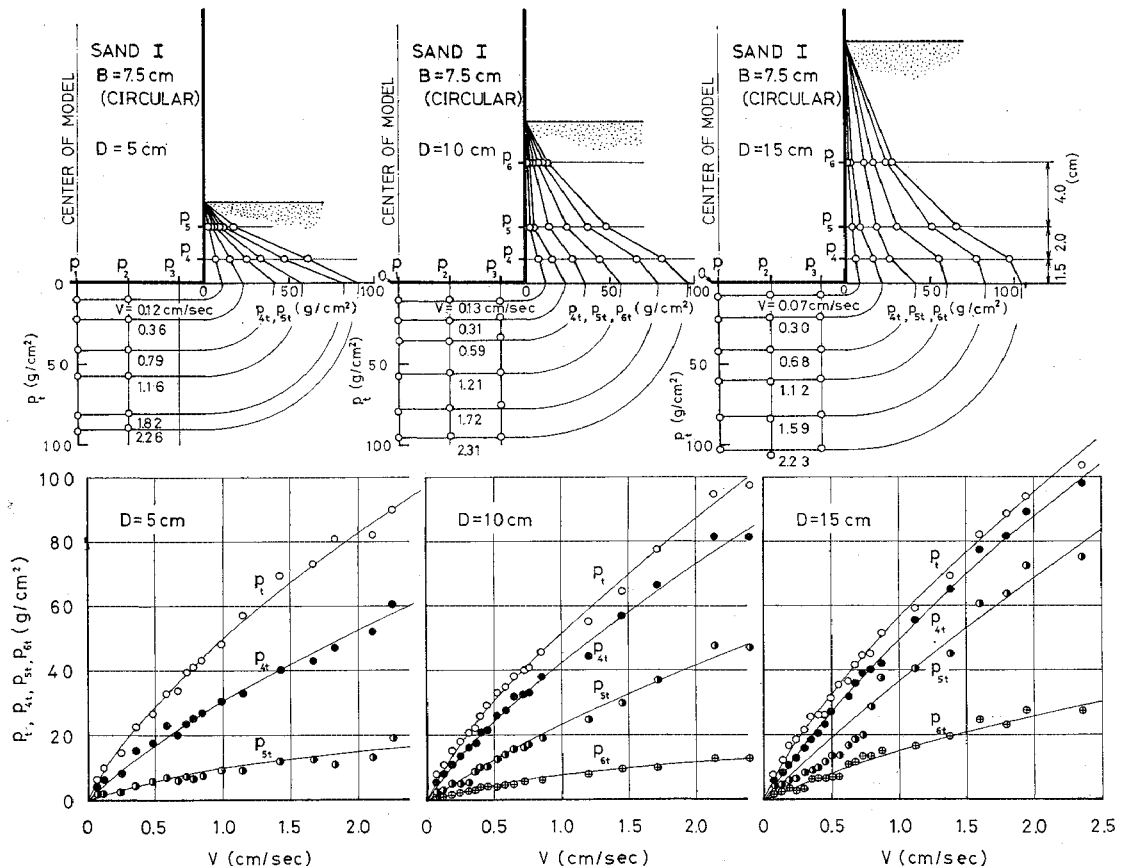


Fig. 5 Distribution of Suction Pressure and Decreased Side Water Pressure

けでは解決できない。周面摩擦力の増加の原因としてまず考えられることは、底面に発生する吸引力によって生じる周面付近の応力状態の変化である。

いま、筒状体の周面の深さ z の点に作用する全応力を

σ 、有効応力を σ' 、中立応力を u とするならば、 σ は次の式となる。

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

筒状体を引き上げ、底面に吸引力が発生すると、周面に作用する中立応力 u は静止のときよりも減少する。この減少量を Δu とすると、全応力 σ は一定であると考えることができるから、有効応力 σ' は Δu だけ増加することになる¹³⁾。この Δu が実験で計測した周面水圧の減少量にほかならない。

一方、砂地盤における杭などの周面摩擦力を静力学的に求める場合、周面の深さ z における有効応力は、一般にその位置の有効鉛直応力 σ_v' に横力係数 K_L を乗じて計算する方法がとられている¹⁴⁾。

$$\sigma' = K_L \sigma_v' = K_L r' z$$

ここで、 r' は砂の水中単位体積重量である。

以上述べたところにより、吸引力の発生をとまらう場合の周面に作用する有効応力は、静力学的に求められる有効応力と周面の中立応力の減少により増加した有効応力の和として次のように書ける。

$$\sigma' = K_L r' z + \Delta u \dots \dots \dots (4)$$

式(4)より、周面摩擦力 F_t は、

$$F_t = \mu L \int_0^D (K_L r' z + \Delta u_t) dz \dots \dots \dots (5)$$

のように表わすことができる。この式で、 μ は筒状体の周面と砂との間の摩擦係数、 L は筒状体の周長、 D は根入り深さである。 Δu_t は(1)で述べたように地切り力の極大値に対応する周面の中立応力(水圧)の減少量、すなわち、有効応力の増加量である。

横力係数 K_L については杭の支持力や引き抜き抵抗力の計算において種々の値が提出されている^{12), 14)}。本実験においては、引き上げ速度 V が非常におそく、発生する吸引力が小さいために、吸引力が周面摩擦力に影響しない場合の実測値から逆算すると $K_L = 1.0$ であった。摩擦係数 μ は、筒状模型と同一材料で作った 10×30 cm の板を用いて、すべり出し抵抗試験より求めた。その結果、SAND I で 0.4、SAND II で 0.37 であった。また、砂の水中単位体積重量 r' は SAND I で 1.0、SAND II で 0.98 である。

Fig. 9 は周面摩擦力の実測値と式(5)による計算値を比較して示したものである。丸印は Fig. 6 と同様に $F_t = T_p - P_t - (W - U_t)$ から求めた実測値である。実線は、周面の中立応力(水圧)の減少量 Δu_t を Fig. 5 に示した周面水圧の実測値の分布形状にしたがって忠実に積分し、式(5)を用いて計算した値である。計算値は、周面水圧の分布形状に実測値をそのまま用いたためにスムースカーブとはならないが、実測値と非常によく一致している。このことは、これまで述べた周面摩擦力

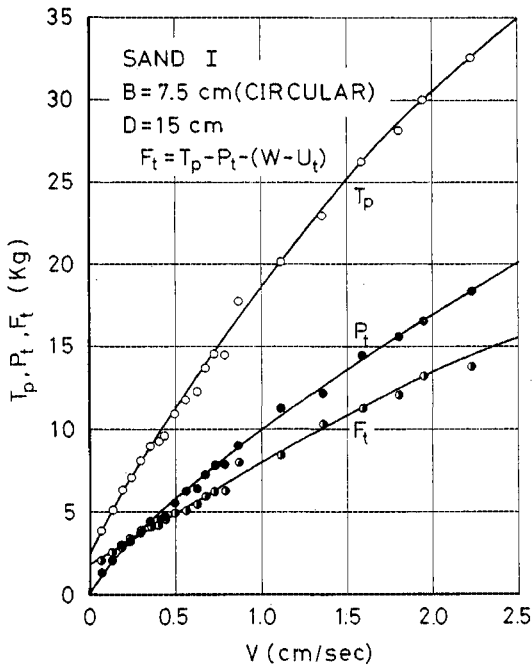


Fig. 6 Measured Values of T_p , P_t and F_t

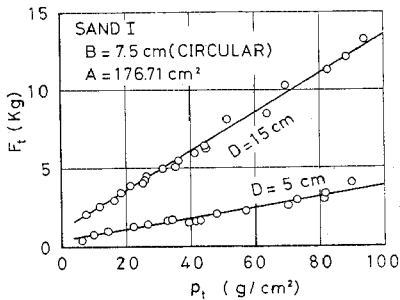


Fig. 7 Relationship between Frictional Force and Suction Pressure (SAND I, CIRCULAR(2))

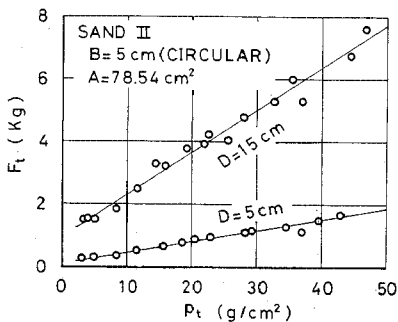


Fig. 8 Relationship between Frictional Force and Suction Pressure (SAND II, CIRCULAR(1))

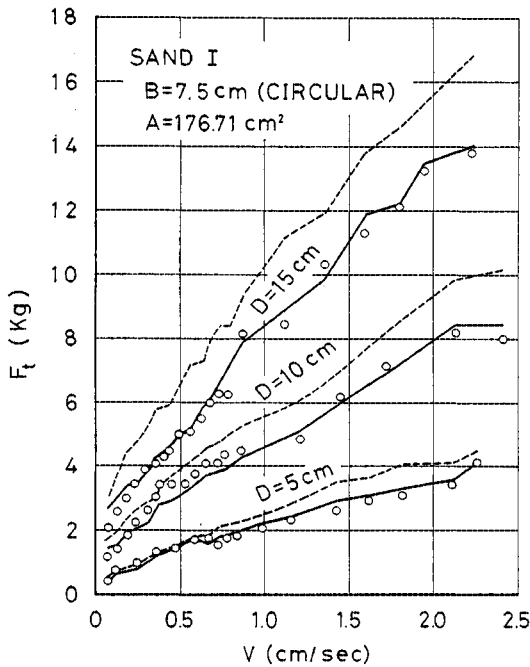


Fig. 9 Comparison between Values of F_t Calculated According to Distribution of Decreased Side Water Pressure Shown in Fig. 5 and Measured Values

に対する考え方の正しいことを示すと同時に式(5)の妥当性を示している。破線は周面水圧の分布形状を、吸引力 p_t の実測値を底辺とし砂表面を頂点とする三角形分布として、式(5)で F_t を計算した値である。当然のことではあるが、破線の値は実線の値よりも大きくなる。

以上述べてきたように、吸引力の発生をともなう場合の筒状体の周面摩擦力には、周面の水圧の減少が大きく影響するが、式(5)で十分正確に周面摩擦力を計算できる。しかし、そのためには周面水圧の減少量 Δu_t の分布

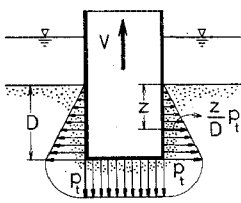


Fig. 10 Triangular Distribution of Decreased Water Pressure on Side of Cylinder

形状を把握しなければならない。

(3) 周面摩擦力の計算式

筒状体の周面摩擦力を式(5)で計算するためには、吸引力の発生により減少した周面水圧 Δu_t の分布形状を決定しなければならない。この分布形状は Fig. 5 に示したように、三角形分布よりもいくぶん凹型の分布形状であるが、いま、解析を容易にするために、近似的に Fig. 10 に示すように吸引力 p_t を底辺とし砂表面を頂点とする三角形分布と仮定する。分布形状をこのように仮定することは、有効応力 σ' を実際よりも大きめに見積ることであり、式(5)で、周面摩擦力を算定する場合、実際よりも安全側で計算することになる。Fig. 10 の分布形状で、深さ z における Δu_t は吸引力 p_t の関数として、

$$\Delta u_t = \frac{z}{D} p_t$$

で表わされ、周面摩擦力 F_t は上式を式(5)に代入して積分すると次式となる。

$$F_t = \frac{1}{2} \mu K_L r' L D^2 + \frac{1}{2} \mu L D p_t \dots \dots \dots (6)$$

上式の右辺第1項は杭などの周面摩擦力の計算に用いられる静力学的な式であり、第2項は筒状体の底面に吸引力が発生し、周面の水圧が減少することによっておこる周面摩擦力の増加量を表わす式である。この第1項を F_1 、第2項を F_2 とすると $F_t = F_1 + F_2$ となる。

Fig. 11 は周面摩擦力 F_t について、実測値(丸印)と計算値(実線および破線)を比較して示した例である。計算値は式(6)を用いて計算したが、式(6)の吸引

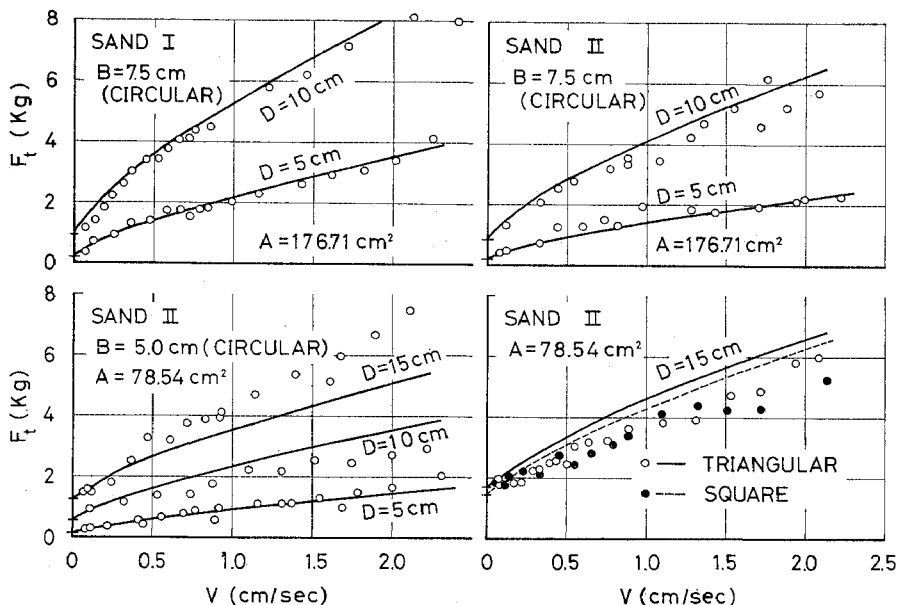


Fig. 11 Comparison between Measured and Calculated Values of Frictional Force F_t

力 p_t の値は式 (3) から計算した。 μ, K_L, r' の値には (2) で述べた値を用いた。 $V=0$ の付近では吸引力 p_t の値は非常に小さく、したがって、 $F_2=0$ であるから $F_t=F_1$ となる。この図の $V=0$ の縦軸上に一印で示した値は F_1 の計算値であり、 $V=0$ の近くにある実測値から判断して $K_L=1.0$ の値は、この実験に関しては、妥当な値であることがわかる。また、文献¹⁴⁾などに示されている K_L の値からみても一応妥当な値であるとは考えられるが、しかし、この値は模型実験より求めた値であり、また、杭などの支持力や引き抜き抵抗力に関してもまだ確定した値が出されていないことも考慮に入れると、今後 K_L の値については検討する必要があると考えられる。

Fig. 11 でわかるように、 V が大きく、吸引力が大きい場合には、 F_1 の値に比較して F_2 の値が大きくなる。このことは、海底に着地している物体のように根入り深さが小さく、吸引力の発生を伴う場合の周面摩擦力に対しては F_2 の算定が重要であることを示している。

一方、根入り深さ D の増加に応じる吸引力 p_t の増加は、前報¹⁰⁾でも述べたようにさほど大きくないために (Fig. 5 参照)、 p_t の関数である F_2 の増加もさほど大きくない。しかし、 F_1 は D の 2 乗で増加するために、根入り深さが大きくなると、 F_1 が F_2 よりも大きな値となる場合もあるので注意しなければならない。

また、 Fig. 11 で、特殊な例をのぞけば、一般に計算値が実測値よりもいくぶん大きくなっている。これは周面水圧の分布形状を三角形分布と仮定し、実際よりも水圧を大きめに見積もって計算したためと考えられる。

これらの図から判断して、砂地盤の海底から筒状体を引き上げる場合の周面摩擦力は式 (6) を用いて計算できることがわかる。

4. 筒状体の地切り力

海底から筒状体を引き上げる場合の最大地切り力 T_b は吸引力の合力 P_t 、周面摩擦力 F_t および重量と浮力の差 $W-U_t$ の和として計算することができる。 P_t は式 (3) で計算される p_t と筒状体の底面積 A との積であり、 F_t は式 (6) を用いて計算できる。浮力 U_t は地切り力が極大値に達したときの筒状体の変位を d_t とするならば、 $U_t=r_w A(H+D-$

$d_t)$ の式で表わすことができる (H は水深)。しかし、3. で述べたように地切り力の極大値は引き上げ変位 d_t が比較的小さい範囲で発生し (Fig. 3 参照)、 $H+D$ に比較して d_t は非常に小さい。そのために、筒状体が静止しているときの浮力 $U_0=r_w A(H+D)$ の値を用いてもさしつかえない。

式 (3)、(6) をもとに地切り力の算定式をまとめて書くと次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} T_b &= P_t + F_t + (W - U_0) \\ P_t &= A p_t \\ F_t &= \frac{1}{2} \mu K_L r' L D^2 + \frac{1}{2} \mu L D p_t \\ U_0 &= r_w A (H + D) \\ p_t &= 1.188 \left(\frac{\Phi r_w A V}{\alpha k L} \right)^{0.726} \end{aligned} \right\} \dots\dots (7)$$

Fig. 12 は地切り力 T_b について、式 (7) で計算した値 (実線) と実測値 (丸印) を比較して示した一例である。図に透水係数 k の値も併記したが、これは同一の砂を用いた実験でも水温が異なる場合もあり、 k の値が異なるためである (SAND II, $D=10$ cm)。この図でわかるように、実測値と計算値はよく一致していて、式 (7) の妥当性を示している。しかし、これらは模型実験の結

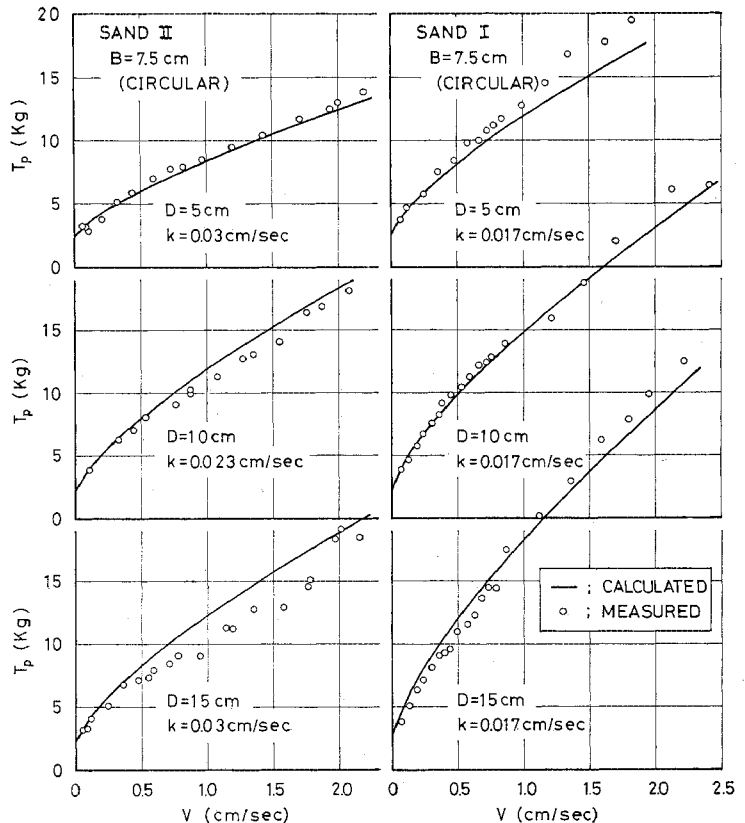


Fig. 12 Comparison between Measured and Calculated Values of Breakout Force T_b

果であり、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。

5. む す び

以上述べてきたように、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と周面に作用する摩擦力を、模型実験をもとにそれぞれ考察することにより、筒状体の地切り力を算定するための計算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) 底面に吸引力が発生すると周面の水圧も減少する。この減少した水圧 $4u_t$ の周面における分布は、吸引力が等分布に発生する根入り深さ、すなわち、 $D/2B > 0.3$ の範囲では、Fig. 5 に示したように、三角形分布よりもいくぶん凹型の分布形状となり、根入り深さが浅いほど三角形分布に近い。

(2) 地切り力の極大値に対応する周面摩擦力 F_t は静力学的な摩擦力 F_1 と吸引力の発生によっておこる周面摩擦力の増加量 F_2 との和であり、近似的に式(6)で算定することができる。

a) F_1 は杭などの周面摩擦力の算定に用いられる計算法を使用し、式(6)の第1項で表わすことができる。

b) F_2 は吸引力の発生により周面の水圧が減少し、有効応力が増加することによっておこる周面摩擦力の増加量であり、吸引力 p_t に比例して増加する。周面水圧 $4u_t$ の分布形状を近似的に、 p_t を底辺とし砂表面を頂点とする三角形分布と仮定すると、 F_2 は式(6)の第2項で表わすことができる。

(3) 地切り力の極大値 T_b は引き上げ変位が小さい範囲で発生するために、筒状体の浮力の変化量は小さい。そのために、地切り力の極大値に対応する浮力 U_t のかわりに、筒状体が静止しているときの浮力 U_0 を用いてもさしつかえない。

(4) 地切り力の極大値 T_b は吸引力の合力 P_t 、周面摩擦力 F_t および筒状体の重量と浮力の差 $W-U_0$ の和として表わすことができ、式(7)を用いて計算できる。

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、実物大の模型による実験や現地実験などにより確認をする必要もあると考えられる。

また、吸引力の発生現象や地切り力の大きさなども異なると考えられる粘性地盤についても現在実験を進めている。

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。

参 考 文 献

- 1) Ninomiya, K., Tagaya, K. and Murase, Y.: A Study on Suction Breaker and Scouring of a Submersible Offshore Structure, OTC, pp. II 297~II 304, 1972.
- 2) Lee, H.J.: Breakout of Partially Embedded Objects from Cohesive Seafloor Soils, OTC, pp. II 789~II 802, 1974.
- 3) Roderick, G.L. and Ayoub Lubbad: Effect of Objects Insitu Time on Bottom Breakout, OTC, pp. 355~362, 1975.
- 4) Muga, B.J.: Bottom Breakout Forces, Civil Engineering in the Oceans, ASCE Conference, San Francisco, pp. 569~600, 1967.
- 5) Liu, C.L.: Ocean Sediment Holding Strength against Breakout of Partially Embedded Objects, Civil Engineering in the Oceans II, ASCE Conference, Miami Beach, pp. 105~116, 1969.
- 6) Vesic, A.S.: Breakout Resistance of Objects Embedded in Ocean Bottom, Civil Engineering in the Oceans II, ASCE Conference, Miami Beach, pp. 137~165, 1969.
- 7) Colp, J.L. and Herbich, J.B.: Inclined Pullout Forces for Embedded Plate Anchors, OTC, pp. 333~342, 1975.
- 8) Bembem, S.M. and Kalajian, E.H.: The Vertical Holding Capacity of Marine Anchors in Sand, Civil Engineering in the Oceans II, ASCE Conference Miami Beach, pp. 117~136, 1969.
- 9) 運輸省船舶局:浮遊式大型海洋構造物 研究開発報告書, pp. 100~101, 1975.
- 10) 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.
- 11) Harr, M.E.: Groundwater and Seepage, McGraw-Hill Book Company, pp. 136~137, 1962.
- 12) Ireland, H.O.: Pulling Tests on Piles in Sand, Proc. 4th. SMFE, pp. 43~45, 1957.
- 13) 土質工学会編:土質工学ハンドブック, 技報堂, p. 82, 1965.
- 14) 同上, pp. 424~425.

(1978.8.20・受付)