

海底における杭アンカーの固定力に関する研究

II. 砂質地盤における極限抵抗力

栃木省二・宗景志浩

(農学部水産土木学研究室)

Experimental Studies on the Fixed Force of Anchor Pile in the Sea Bed

II. Limit Resistance Force in Sandy Ground

Seiji TOCHIKI and Yukihiro MUNEKAGE

Laboratory of Fisheries Engineering, Faculty of Agriculture

Abstract: When the anchor pile is designed, the next four conditions are important factors.

- a) Hardness or strength of soil (soil conditions)
- b) Fixed force (limit resistance force)
- c) Diameter and depth of embedment
- d) Grain size of sand

Therefore, the model experiments are performed with respect to these conditions, and the results of the field experiment are compared and examined. The practical standard on a design of the anchor pile is obtained from these experiments, as is shown in Fig. 8.

In this experiment, the hardness or strength of soil shown NC values is investigated with the miniaturized handy dynamic cone penetrometer which is produced by way of experiment, as is shown in Fig. 2.

緒 言

前報 (I)¹⁾ では、主としてアンカーパイルの抵抗力とパイルに生ずる Bending Moment との関係を実験的に調べた。本報では、アンカーパイルの設計上の基本的な問題である固定力に関して、模型実験と現場実験を行い、その結果について報告する。

アンカーパイルの固定力は地盤の硬さ(強度)、杭の直径、根入れ深度など、各種の条件に支配される。ここでは、これらの条件とアンカーパイルの固定力との関係を実験的に把握しようとした。

実 験 方 法

1. 実験装置

模型実験は Fig. 1. に示す木製の箱に県下各地から採集した均質な砂を深さ約 55 cm まで自然充填し、水深が 2~3 cm になるまで水を入れ、Saturate させた状態で実験した。なお手結の砂では比較のため予備的な実験として、砂を自然乾燥させた場合についても行っている。

また杭の引張方法は Fig. 1. の方法で 100 g~

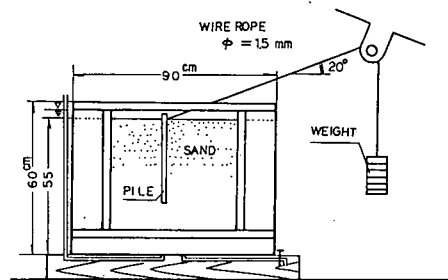


Fig. 1. Experimental equipment.

1 kg の分銅を除々に静かに載荷していった。

2. 模 型 杭

模型杭の寸法、形状などについては Table 1. に示すとおりである。室内模型実験では、長さ約 45 cm および 30 cm の 2 種類の杭を使用した。いずれの場合も、丸鋼、角鋼、異形鋼を用い、その直径または一辺の大きさ、それぞれの杭の根入れ深度も適当に変化させた。

さらに現場での実験は、太さの異なる 2 本の中空の丸杭を用い、それぞれ根入れ深度を変えた場合について引張試験を行った。

Table 1. Details of model pile

Experiment	Pile No	Diameter or Side length (cm)	Length (cm)	Shape
Model	L- 1	1.70	50.0	Circular
	2	1.40	45.0	
	3	2.50	45.0	
	4	1.65	47.0	
	5	1.24	47.0	
	6	2.00	45.0	
	7	0.86	47.0	
	8	0.93	47.0	Square
	9	1.35	46.5	Deformed
	10	2.05	47.0	
	11	0.60	46.0	Circular
	S- 1	1.40	30.0	
	2	1.70	30.0	
	3	1.60	30.0	
	4	1.20	30.0	
	5	0.80	30.0	
	6	1.00	30.0	
7	0.60	30.0	Square	
8	0.60	30.0		
9	0.80	30.0		
10	1.00	30.0		
11	1.20	30.0		
Field	F- 1	4.30	80.0	Circular
	2	4.90	100.0	

3. 模型試験用 N 値測定装置の試作

室内実験用水槽が小さいため、市販されている大型の装置は使えない。そこで小型で容易に地盤の硬さ(土の締め具合)を調べる装置を試作した。この装置は大久保²⁾らが制約条件の多い急な斜面での地盤調査を行うための一手段として試作したものであるが、ここでは文献 2) を参考にし、Fig. 2. に示すようにさらに小型化したものを用いた。杭の横方向引張り試験を行う場合は、前もってこの一簡易貫入試験機を用いて地盤の硬さ(強さ)を調べた。

模型実験では重錘は 2 kg のものを使用し、落下高さ 14.95 cm (ノッキングヘッドから重錘下端までの高さ 10 cm) で行った。また現場では重錘 4 kg、落下高さ 15.75 cm (同じく 10 cm) で

行い、いずれや場合も重錘を一回落下させるごとに、ロッドに記した目盛からその貫入深度を読み取った。その後この貫入試験機を砂が崩壊しないようにゆっくり引き抜き、同じ場所に模型杭を静かに挿入した。

4. 実験砂・実験内容

高知県内、手結海岸(A)、入野海岸(B)、仁淀河口付近(C)の3地点から比較的均質と思われる砂を採集し、模型実験に使用した。なお前もって476 mm のフルイで砂をフルイ分け、これより大きい礫を除いてある。

現地実験は浦の内湾の水深の浅い砂地で行った。干潮時水深が5~10 cm になった時、模型実験用N値測定機を用いて地盤の硬さを求め、現地実験用の杭を貫入した後、試験船に装備されているウィンチを利用して、地盤表面から約20°の角度で徐々に荷重を加えていった。

杭とウィンチの中間に引張計(坂田電機製・差動トランス型 最大圧 300 kg) を取り付け日記々録させた。なお、現地の表層約30cm までの土砂が採集できたので粒土分析を行いその結果を Fig. 3. に示している。

Table 2. には模型実験および現場実験の内容を一括して表にした。模型実験では砂の粒径を3種類まで変化させた。まず手結海岸から採集した砂(A)では、杭に働く荷重の引張方向を水平方向と、角度約20°(Diagonal)の2つの場合に分け、それぞれ砂を自然乾燥させた時と完全に Saturate させた場合について杭の極限抵抗力を求めた。入野海岸、仁淀河口付近から採集した砂では、いずれも完全に Saturate した状態でのみ実験を行った。

Table 2. にある Soil condition とは後で述べる打込み深度とN₀ 値の関係(Fig.4-1. ~4-6.) から地盤の硬さの様子を大きく2つに分類し、整理したものである。

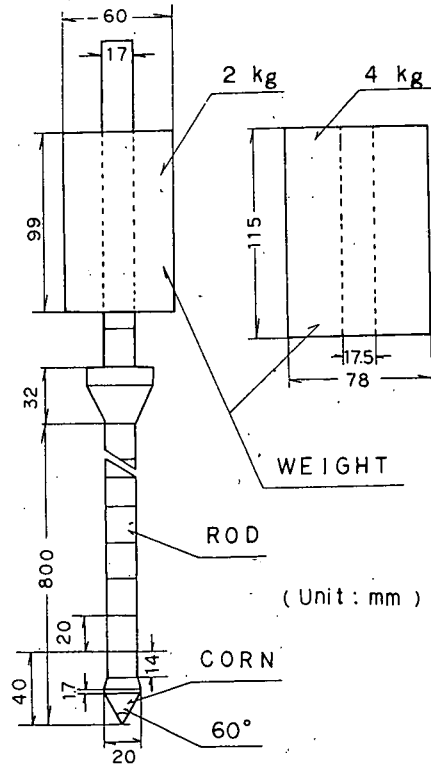


Fig. 2. Handy dynamic cone penetrometer for experiment.

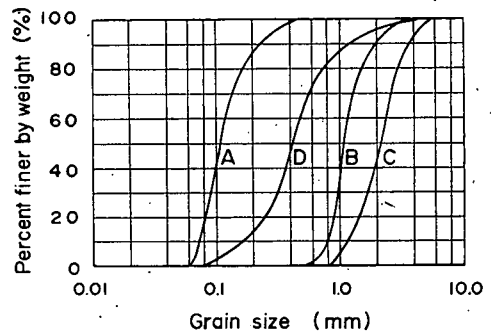


Fig. 3. Grain size distribution curve. (A: Tei, B: Irino, C: Niyodo, D: Uranouchi)

Table 2. Summary of experimental conditions

Experiment	Sand	Loading direction	Condition of Sand	Soil conditions					
				I			II		
				D	L	Fig.	D	L	Fig.
Model	Tei	Horizontal	Dry	0.86 } 2.50	37.0 } 45.0	4-1, a	0.60 } 1.70	26.7 } 29.2	4-1, b
				Diagonal	Dry		0.86 } 2.50	36.0 } 46.0	
		Diagonal	Saturated			0.86 } 2.50	35.8 } 44.7	4-3, a	0.60 } 1.70
	Irino			Diagonal	Saturated	0.86 } 2.50	36.9 } 46.0		4-4, a
		Niyodo	Diagonal			Saturated			
Field	Urano-uchi			Diagonal	Saturated		4.30 } 4.90	45.0 } 78.0	4-6

D: Diameter or section length of pile

L: Depth of embedment (Unit: cm)

Soil condition is classified into two types in the relations between depth and N_c values. In this experiment, Type-I shows that the foundation is constructed of two different layers in hardness of the soil and Type-II shows one layer.

実験結果とその考察

1. 極限抵抗力(固定力)について

浅海増養殖用施設を固定係留する手段として、一般にイカリ(鉄錨)、コンクリートアンカー、石、土俵などが用いられている。最近になって爪のついたコンクリートブロック(M式錨)などの固定力について³⁾も研究がなされている。

イカリ・土俵・定置網用錨などの固定力とは、海底で水中重量 W の物体を動かすに要する力 G であり、これは主として地盤の表層部と物体の間の摩擦力に依存し、固定係数(K)と物体の水中重量(W)の積の形で求められている。従って固定係数 K か物体の重量 W を大きくする以外にその固定力を増大させる方法はない。

我々が実験してきたアンカーパイルは上記の固定方法とは根本的に異なる点はいくつかある。最も特色のあることは、杭を垂直方向(将来は斜めにも可能と思われる)に地盤に貫入させるため、杭の表面に働く地盤の横方向の反力によって、その固定力が得られる点である。つまり、イカリ・土俵のように主としてそれ自体の重量に依存するものではなく、杭が積極的に地盤から得た固定力といえよう。しかしながら、土俵・イカリ・コンクリートブロックに比較し、アンカーパイルの製作コスト、材料の大小、あるいは施工の難易などを検討する場合、まず固定力に関して有利であることが確かめられねば、おのずからアンカーパイルの実用化は望めないであろう。

久保⁴⁾、Chang, Engel らは杭に横方向(水平方向)の力を加えた場合について、詳細な研究を

行っている。しかしながらこれらはいずれも土木建築用構造物の支持として用いられる大型の杭であり、当然杭頭の変位はきわめて微小でなければならない。

我々がここで取り扱うアンカーパイルはいわゆる土木建築用の支持材としてではなく、主として浮体構造物などの浅海養殖用施設が潮流、波等の外力によって流されないための係留手段として用いるものである。従って杭頭の変位などよりも、パイルがまさに抜けようとする極限の(最大の)固定力を求めることにより意義を見出すのである。そこで我々は、この固定力をアンカーパイルの極限抵抗力 (F : Limit resistance force) として、パイルの太さ (D)、根入れ長 (L) と地盤の硬さ (N_c 値)、地盤のタイプ、土粒子の大きさとの関係において、実験を行い、アンカーパイル設計に関する実用的な目安を求めた。

2. 地盤の強度および地盤の構造

本実験で用いたような小型の模型水模の中で土質試験法で定められた標準貫入試験を行うことは不可能である。そこで、地盤の硬さあるいは土の締め具合といったものを、小型の模型水槽の中でも比較的容易に把握するために、前述の簡易貫入試験機を使用した。

一定の高さから重錘を落下させ、その都度コーンの地表面からの貫入量を記録し、貫入深さと落下数のグラフから深さ方向に図式微分を行った。ここでは 2 kg の重錘を 14.95 cm の高さから落下させた時、任意の深さにおいて、コーンを 10 cm 貫入させるに必要な落下回数を N_c として求めた。 N_c - 深度の関係を図 4-1、4-2 に示している。

Fig. 4-1, b, 4-2, b. をみると、約 25~30 cm までの深さまではすべて N_c 値は漸次増大する傾向にある。しかしながら Fig. 4-1, a~4-2, a では、この深さから N_c 値の増大はみられない。手結、入野から採集した砂は Fig. 1. で示すような小型の水槽に入れた場合、振動によって(水槽の底部の影響と思われるが)砂は上下に 2 層に分れるようになるが、仁淀の砂を用いた場合 (Fig. 4-2, a, b.) はこのような傾向はみられなかった。

ここでは杭の根入れ深さを、この 2 層に分離する深度(約 30 cm)よりも浅い場合と、これよりも深く杭が 2 層にまたがるような場合とに分けて、それぞれについて杭の直径、または辺長および

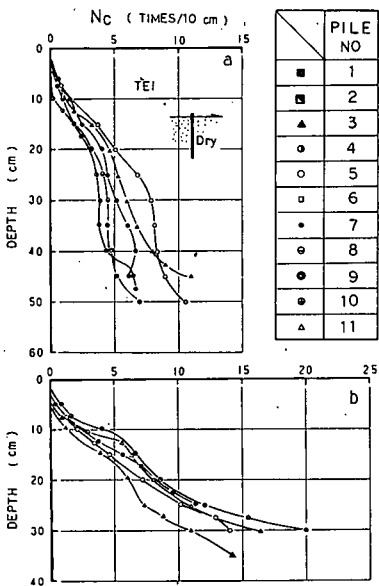


Fig. 4-1. Soil condition.

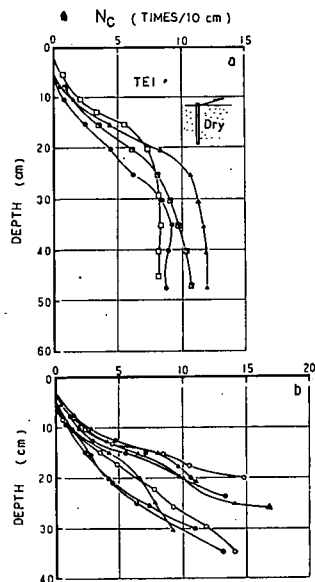


Fig. 4-2. Soil condition.

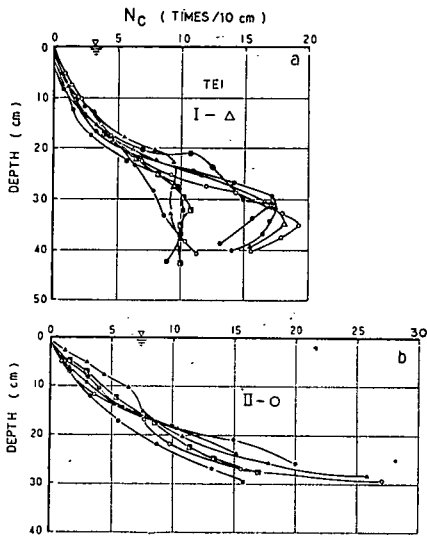


Fig. 4-3. Soil condition.

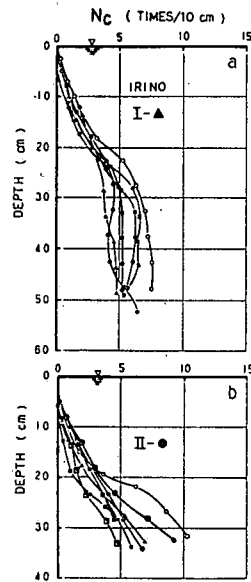


Fig. 4-4. Soil condition.

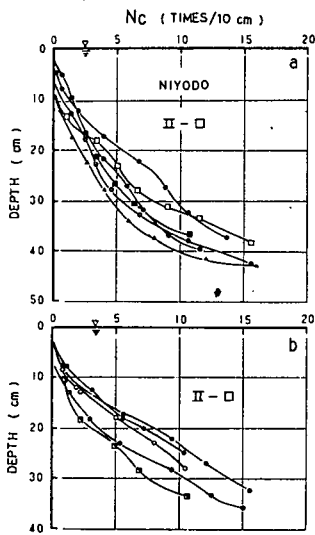


Fig. 4-5. Soil condition.

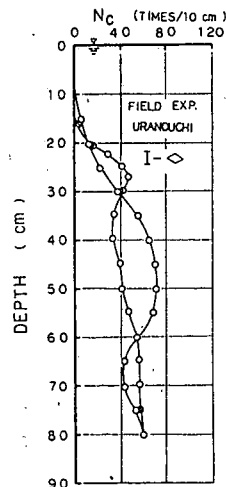


Fig. 4-6. Soil condition.

根入れ深さを变化させて実験を行った。

大久保らは試作の簡易貫入試験機によって得られる N_c 値を、大型および中型の動的円錐貫入試験（鉄研型）の結果と比較して、土質調査で一般に用いられる N 値に換算することを試みている。

本実験では、以上の点が未解決の状態、模型実験の域を脱しえないが、ここでは Fig. 2. に示すように、2 kg の重錘を 10 cm の高さから落下させ、コーンを 10 cm だけ貫入させるに要する落下回数 (N_c 値) でもって、地盤の強さに関する状態を表現することにする。

なお、Table 2. の Fig. の欄は各々の実験を行った際に求めた N_c 値と深さとの関係を示すグラフの番号である。

3. 砂質地盤におけるアンカーパイルの極限抵抗力

アンカーパイルを設計する場合の重要な条件は、

- a) 設計荷重 (F)
- b) アンカーパイルの根入れ深度 (L)
- c) アンカーパイルの太さ (直径: D)
- d) 地盤の状態 (硬さ, 粒土, 密度など地盤の強さに関するもの)

であり,これらの相互関係が得られるならば一応実用的なアンカーパイルの設計を行うことができる。

これらの中で a) は波浪, 潮流などによる外力であるから別に計算される。b), c) はいずれも杭の大きさを決定する量であり, いま, D/L なる値 (Slenderness ratio に逆比例する値) で一般的に杭の形状を表現できる。

根入れ長 (L) ; 杭幅 (D) , および重錘の総落下回数 (ΣN_c) はそれぞれアンカーパイルの極限抵抗力の増加要因である。そこで本実験によって得られたデータから, 極限抵抗力 F とこれら 3 つの増加要因から単純に乘じて得られる値を各々の砂ごとに区別して図示すれば, Fig. 5. のようになる。Fig. 5. を用いて本実験範囲内における極限抵抗力 F に関する実験式を最小二乗法によって求めると以下のようなになる。

$$F = 10^a \cdot \log(L \cdot D \cdot \Sigma N_c) + b \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで, a, b は定数で次のように計算される。

	手結砂	入野砂	仁淀砂
a	0.587	0.572	0.597
b	-0.848	-0.565	-0.609

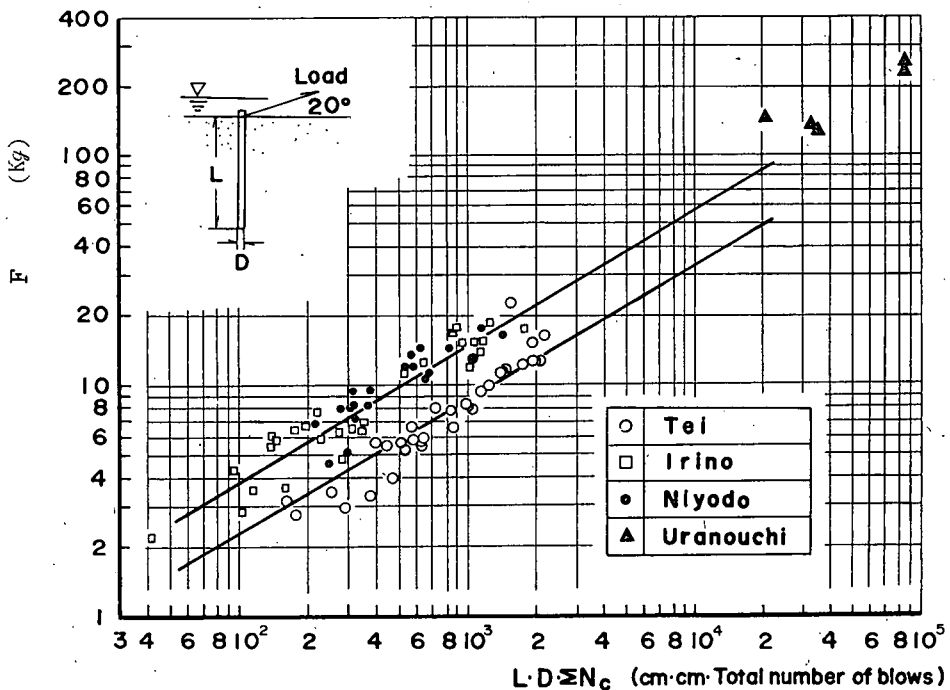


Fig. 5. Limit resistance force of anchor pile for saturated sand.
 ΣN_c : Total number of blows which are required to drive the cone the depth of embedment.

ところで c 値を求める際、打撃によってコーンに加えられるエネルギーの大小（すなわち、重錘の大きさ、落下回数）と地盤の硬さの違いにより、貫入量は異なってくる。ここでは 2 kg の重錘を 10 cm の高さから落下させ、Fig. 2. に示すコーンを任意の深さ L まで貫入させるのに必要な総落下回数を ΣN_c とする。重錘が ΣN_c 回落下することによってなされる仕事 W は $W = mgH \cdot \Sigma N_c$ となり、この値が大きい程、一般に地盤は硬く、極限抵抗力も大きくなると考えられる。また Fig. 6. に示すように 2 つのタイプの地盤で任意の深度における ΣN_c が等しい場合、モーメントの関係から Type-I の地盤の方が抵抗力に対して有利である。さらに Type-I の 2 層に分離する深さを h とすると、 h は小さい程有利であると考えられる。

本実験では、極限抵抗力 F に関して次のような物理量を選び、(2)式のように解折した。

$$f(F/W/L, L/h, D/L, D/d_{50}) = 0 \quad (2)$$

ここに F は極限抵抗力、 W は ΣN_c 回打撃した時なされる仕事、 L は杭の根入れ長、 D は杭の直径、 h は地盤が 2 層に分離する場合の深度、 d_{50} は土粒子の粒径で、ここでは通過率 50% の粒径で代表する。

重錘 1 回の落下によってなされる仕事 w_1 は $w_1 = mgH$ であるが、本実験では重錘重量 (mg)、落下高さ (H) が一定であるから、 ΣN_c 回の落下によってなされた仕事は $W = w_1 \cdot \Sigma N_c = 20 \cdot \Sigma N_c$ (kg·cm) となり(2)式第 1 項は、本実験では定数を省略して、次式を計算することにする。

$$\pi_1 = F \cdot L / W = F / 20 \cdot \Sigma N_c / L \approx F / \Sigma N_c / L \quad (3)$$

ここで $\pi_1 = F/W/L$ は、極限抵抗力 F と単位の深さだけコーンを貫入させるに必要な平均の力の比である。Fig. 6. の Type-II に示す地盤では、地盤の硬さを示す N_c 値は単純に深度 L に比例して増大する。また、地盤が 2 層に分離する場合、 N_c 値と深度の関係は実際にはもっと複雑な形になるが、一応ここでは、Fig. 6. Type-I に示すように単純に理想化して考えると次のようになる。すなわち Fig. 6. に示す記号を使うと、Type-I のような地盤では、

$$\Sigma N_c = \frac{N_{c1} \cdot h}{2} + N_{c1} \cdot (L - h) = N_{c1} \left(L - \frac{h}{2} \right) \quad (4)$$

となり、Type-II の場合は、 $h > L$ の状態にあると考え、 $h = L$ として計算すればよい。

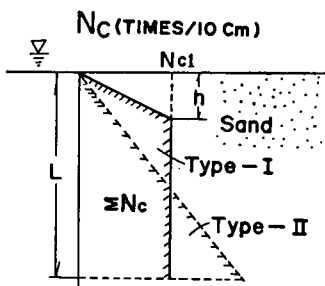


Fig. 6. Diagram illustrating the relationship between hardness of sand and limit resistance force of anchor pile.

*In case both types are equal in the number of ΣN_c , limit resistance force of anchor pile in Type-I is greater than that in Type-II.

つぎに(2)式第 3 項 $\pi_3 = D/L$ は杭の形状を表わすものであり、第 4 項 $\pi_4 = D/d_{50}$ は杭の幅と粒径の比である。さらに $\pi_2 = L/h$ 、 $\pi_3 = D/L$ から L を消去すると、

$$\pi_3 = \pi_2 \cdot \pi_4 = \frac{L}{h} \cdot \frac{D}{L} = \frac{D}{h}$$

となる。結局(2)式は次式のように整理され、Fig. 7. ~ Fig. 8. にこの結果を示している。

$$f(F/mgH \cdot \Sigma N_c / L, D/h, D/d_{50}) = 0 \quad (5)$$

Fig. 7. は手結海岸の砂を用いて、砂の湿潤状態および横方向の引張角度を変化させて行った場合の結果を示したものである。Fig.

7. では、 d_{50} が一定であるから D/d_{50} について整理していないので、杭の径に関するバラツキがみられる。しかしながら、極限抵抗力は飽和砂の場合よりも乾燥砂の場合が強くなり、水平方向から引張した場合が大きくなっている。

Fig. 8. は手結、入野、仁淀の海岸から採集した砂を、模型水槽の中で完全に飽和させた状態で実験した場合の結果と、浦の内湾での現場実験の結果を(5)式に従って図示したものである。Fig. 8. において、 $D/d_{50} < 50$ 、 \bullet 印ではバラツキはあるものの、全体的にみてかなり良い相関をみせている。 $D/d_{50} > 50$ では実験数が不足しているが、現場実験の結果と比較して、極限抵抗力に関してはほぼ(5)式で表現できよう。

本実験では荷重をかける場合、100 g ~ 1 kg の重錘を除々にゆっくりと静かに増加させたにもかかわらず、その載荷方法のわずかな違いにより、一定の荷重状態が得られなかった。これは、粒径の大きい仁淀の砂での実験でもっとも影響を受け易く、このようなことがバラツキの原因となったかも知れない。粒径の大きい砂では、前述したように徐々に荷重を増加していても、杭頭部の変位は一定の速度で変化せず、ある荷重になって急激に移動し、力の釣りが敗れる。

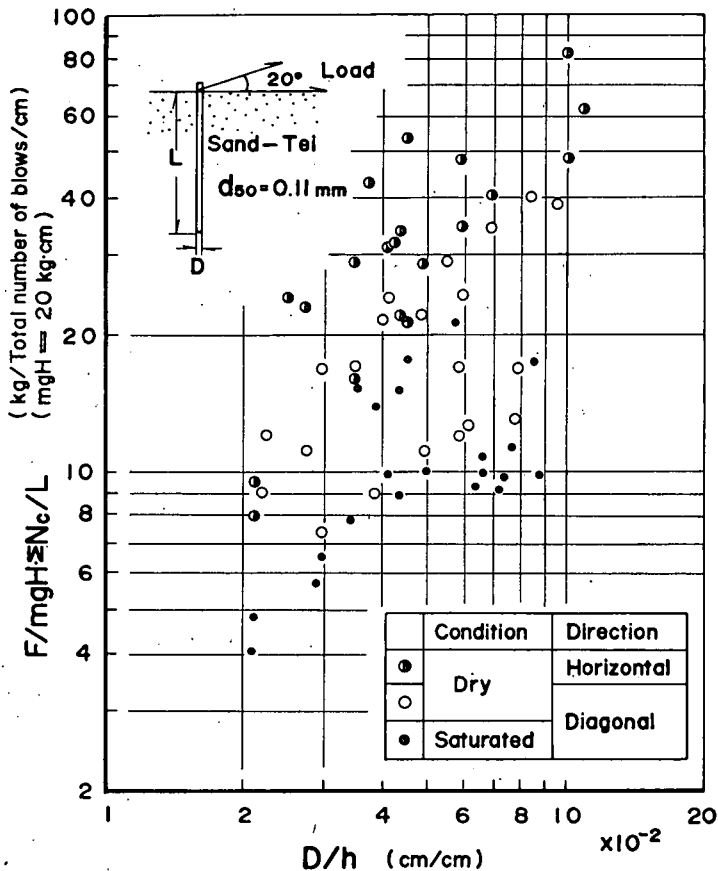


Fig. 7. Limit resistance force of anchor pile for sand (Tei).
 * ΣN_c : Total number of blows which are required to drive the core the depth of embedment.

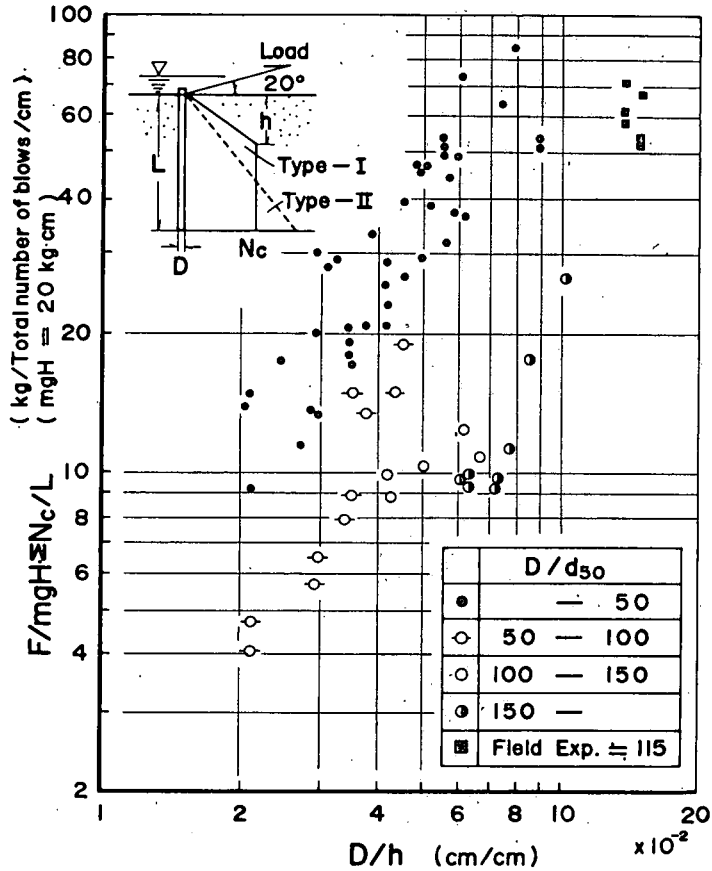


Fig. 8. Limit resistance force of anchor pile for saturated sand.
 * ΣN_c : Total number of blows which are required to drive the cone the depth of embedment.

4. 現地実験の結果

Table 3. に浦の内湾で行った現地実験の結果を示している。 ΣN_o を測定するために、本実験で試作した模型実験用の簡易貫入試験機を用いたところ、現地の地盤が硬く、2 kg の重錘では貫入させることが困難であった。そこでここでは、4 kg の重錘を15.75 cm (ノッキングヘッドと重錘下端の距離 10 cm) の高さから落下させ、しかも1回の落下で 5 mm 以下の貫入量しか得られない場合は5回に1度の割合で貫入量を読みとった。このように落下高さ、重錘の重量を変化した場合、大久保らは、 $N_o = \alpha \cdot N_o'$ で換算している。大久保らの方法によれば、 $\alpha = 3.21$ と計算され、真の N_o 値を求めることができる。しかしながら本実験で用いたコーン、径が異なるので、 $\alpha = 3.21$ の値をそのまま使用するのは早計である。

いずれにせよ以上の N_o 値の換算には考慮すべき点が残されているが、ここでは落下高および重錘の変化率を単純に貫入量の増加率と考え、次式の方法で換算した。

$$N_c = \frac{H_i}{H_s} \cdot \frac{W_i}{W_s} \cdot N_o' = \frac{15.75}{14.95} \cdot \frac{4}{2} \cdot N_o' = 2.107 \cdot N_o' \dots\dots\dots (6)$$

ここに H_s , W_s は 2 kg の重錘を 14.95 cm の高さから落下する場合である。

Table 3. Results of field experiment

pile. No	D	L	F	ΣN_o	$F/\Sigma N_o/L$	D/h
F-1	4.3	45	142	88.5	72.23	0.132
				122.2	62.26	
		60	132	155.9	50.82	58.98
		118.0	67.14			
F-2	4.9	50	132	109.6	60.25	0.151
				162.2	40.70	
		70	228	210.7	75.74	67.69
		267.6	59.64			
F-2	4.9	78	195	254.9	59.67	0.151
				307.6	49.45	
				54.56		

D : Diameter (Unit : cm)
 L : Depth of embedment
 F : Limit resistance force (Unit : kg)
 h : Thickness of the 1st layer (Unit : cm)

Table 3. は現地実験で得られた結果であり、極限抵抗力に関して模型実験と同じような方法で表現すれば、Fig. 8. の●印のようになる。Fig. 8. にみるように現地実験では $D/d_{50}=115$ で、この結果はおよそ○印の範囲に入ると思われる。

結 論

アンカーパイルの固定力を求めるために、パイルの直径、根入れ長、地盤の硬さ、粒径などの条件を変化させながら引張試験を行った。それらの実験結果を要約すると、

1. 本実験では、海底の砂質地盤の硬さ、強さを求めるために、Fig. 2. に示すような簡易貫入試験機を試作した。一定の高さから重錘を落下させたとき、コーンを任意の深さから 10 cm だけ貫入するのに必要な重錘の落下回数によって地盤の状態を知ることができる。
2. 本実験では、Fig. 4. 1. ~ Fig. 4. 6. にみられるように、地盤は垂直方向に一定の大きさで硬さが変化する Type-II の場合と、硬さの点で 2 層に分離する Type-I の場合とがみられた。
3. アンカーパイルの極限抵抗力は(5)式に示す物理量から Fig. 8. のようにグラフ化した。
4. アンカーパイルを設計する場合は、簡易貫入試験機によって、あらかじめ任意の深度までの地盤の ΣN_o 値と h (第 1 層の厚さ) を、粒土試験により粒径 d_{50} を求めておく。そして、与えられた設計外力 F に対して根入れ長 L 、杭の直径 D を任意に仮定することにより Fig. 8. からそれぞれ決定できる。

なお、本研究の一部は農林省別枠研究費を使用した。

参 考 文 献

- 1) 栃木省二・宗景志浩, 海底における杭アンカーの固定力に関する研究 (I), 高大研報告, 第21巻, 農学, 第1号, 1~14 (1972)
- 2) 大久保駿・上坂利幸・船崎昌継, 簡易貫入試験機による地盤調査, 土木技術資料, 第13巻, 第2号, 31-35 (1970)
- 3) 石田善久・大沢要一・森田正一, コンクリート製定置網用錨 (M式錨) の固定力について, 高知県水試報告, 第3号, 45~51 (1972)
- 4) 久保浩一, 杭の横抵抗に関する研究 (I), 運研報告, 第11巻, 第6号, 169-242 (1961)
- 5) Amin Awad, Consideration on the bearing capacity vertical and batter piles subjected to forces acting in different directions, Hungarian Academy of Sciences, Proceeding of the 3rd Budapest conference on soil mechanics and foundation engineering, october 15-18, 483-497 (1968)

(昭和48年9月29日受理)