

海底における杭アンカーの固定力に関する研究 (I)

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 Anchorpile in the sea Bed (I)

Seiji TOCHIGI and Yukihiro MUNEKAGE

Laboratory of Fisheries Engineering, Faculty of Agriculture

Summary

We have used some kinds of systems which fix the equipment of cultivating fisheries, such as, anchor (steel anchor), concret anchor, sandbag and so on.

Now, we fixed our eyes upon a pile as a method of increasing preservations and stabilities, and constructing easily.

We load the anchorpile below the sea bed to increase the fixed force.

Then, we experimentally found the relations between Bending Moment which occurs on the model pile, Tension and the acting depth.

$$M'/M=f(D'/D, T'/T)$$

Consequently, most important thing is that the maximum Bending Moment is greatly decreasing when we load the pile at the point of only 20~25% of the embeded depth below the sea bed.

緒言

従来、各種筏などの浅海増殖用施設は潮流、風波などの外力から固定保持するために、イカリ(鉄錨)、コンクリートアンカー、土俵などを用いてきた。ところが現在もなお、固定係留については保安全性、安全性が高く、海中での施工が比較的容易で、しかも安価な方法が強く要望されている。

ここでは、係留方法として杭(アンカーパイル)を利用することを考えたが、これの応用に先立っては、まず杭の極限抵抗力、杭の力学的性質、地盤反力、変位量などの問題を解明する必要がある。

杭の横抵抗の問題について、Engel, Chang, 篠原・久保らにより詳しく研究されている。これらはいずれも、地表面上において杭に水平方向に外力を与えた場合の挙動である。

我々は、まず杭(Anchorpile)の固定力を増加させるため、杭にかける外力の作用点を杭の根入れ部まで下ろして実験を行った。そして外力を徐々に増加していき、杭がまさに引き抜けようとするときの外力の大きさを極限抵抗力と名付け、各種の模型杭を使って実験してきた。(極限抵抗力に関しては文献 1) 参照)

さらに、模型杭の表面にストレンゲージを張りつけ、砂質土および粘性土中で、杭が水平方向(実際は角度27°)から外力を受けた場合に起こる杭自身の変形量(歪量)を取り出し、杭の全長にわたって発生する曲げモーメント分布を計算した。ついで潮流水槽の一部に設けた砂留りに砂質土および粘性土を入れ、杭を設置し、網に加わる流水抵抗をロープにより外力として作用させ、同じく曲げモーメントを求めて比較検討した。

実 験 方 法

1 実 験 装 置

つぎの2つの装置を用い、いずれの場合も同一の砂質土および粘性土を使用した。

(A) 重錘によりロープに外力を加えた場合

Fig. 1. に示すような片面透明アクリル板張りの木製の箱 (90×62×60cm) を製作した。箱の底部にはバルブを取りつけ、自由に水の出入を調節できる。

この箱に実験砂 (砂質土および粘性土) を高さ 55cm まで入れ、砂面が常に水中に浸るまで水を入れている。したがって、この水槽での実験は一様に地盤面が水面下にある状態を仮定して行った。

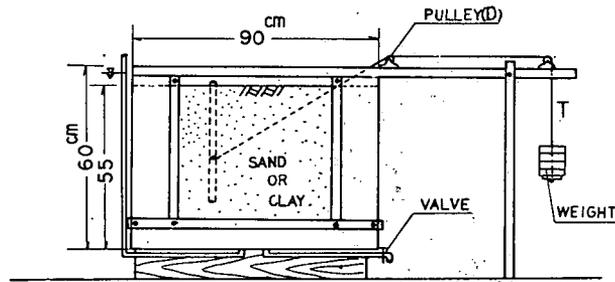


Fig. 1. Experimental equipment (A)

杭の設置とロープの引張方法は、Fig. 1. に示すとうりである。また杭の設置条件を一様にするため、砂質土の場合は砂中に穴を掘り、杭を挿入し、杭の周囲に砂を充てんして1~1.5時間後から測定を開始した。載荷用重錘は重量の分っている分銅を用い、順次増加していった。

(B) 網に加わる流水抵抗を外力として作用させた場合

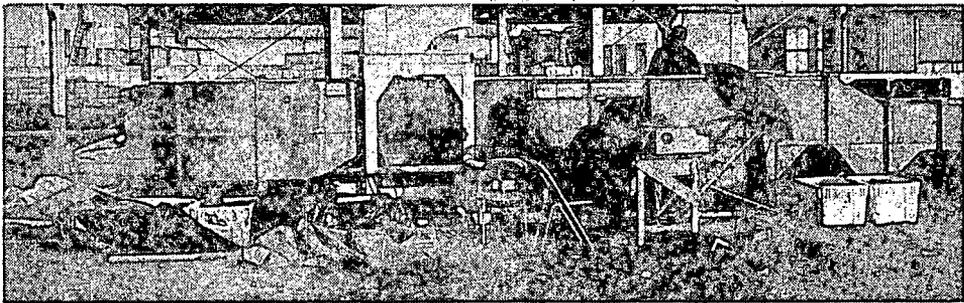


Photo 1. Experimental equipment (B)

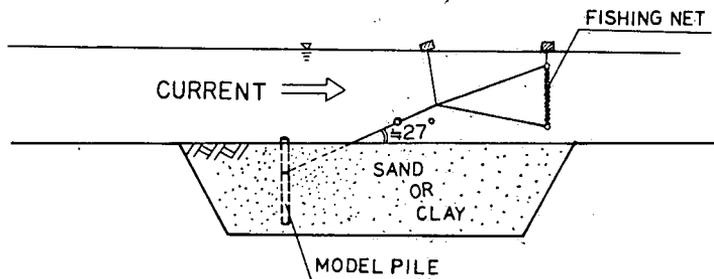


Fig. 2. Definition sketch of arrangement of the model (B)

Photo 1. に示すような潮流水槽 (全長約 8 m, 計測断面 70 × 70 cm, 設定水深 50 cm, 流速 10~100 cm/sec, 任意設定可能, 軸流ポンプ口径 400 mmφ, うず電流接手つき無段変速, モーター 5.5 Kw 使用, 中央部にガラス張り観測部を有し, 計測部全長は 4 m, その底面には, 50 cm の深さの砂留りが設けられている。) の砂留りに砂質土および粘性土を入れ, 模型杭を設置した。(Fig. 2. 参照)

流れの外力を取り出すために, Fig. 3. のように魚網 (30 × 40 cm 56 節 / 1 尺, 10 本撚りの振子網) を 5 枚重ねにして, めい合せ, 網が常に一定の大きさを保つように網の上部には細い竹を取りつけている。さらに上部には発泡スチロール製の浮子 (15 × 10 × 7 cm) を, 下部には鉄の棒 (φ 13 mm, 長さ 38 cm, 重さ約 1.7 kg) を取り付け, 常に網面が流れに対して垂直になるように工夫した。

実験を始めるにあたり, 潮流水槽の模型設置付近での流速分布を測定した。用いた流速計は, フォトトランジスター式小型流速計 (三光精密工業 K. K 社製) である。いずれもポンプ回転数を一定 (200 rpm) の状態にして測定したものである。

Fig. 4. は模型を入れない場合の, Fig. 5. は抵抗体模型を入れ, その直前での流速分布を図化したものである。Fig. 4. から抵抗体を入れない状態での水路内を流れる水の流速分布は, 水平・垂直方向にかなりの変化がみられるが, 急激なうずをともなう様な乱れは見られな

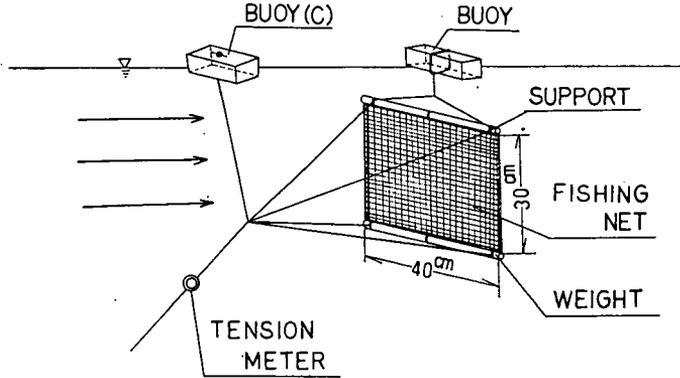


Fig. 3. Model of fishing net

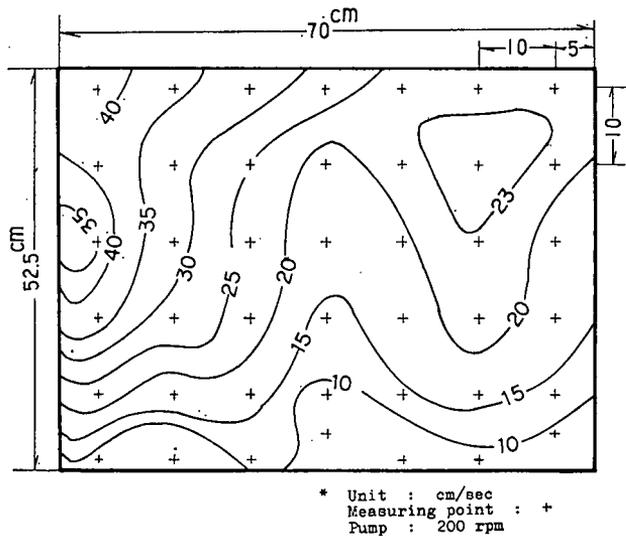


Fig. 4. Distribution of water velocity

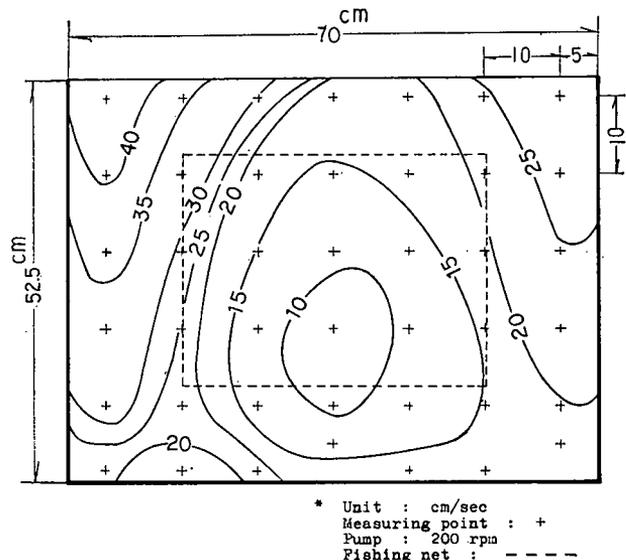


Fig. 5. Distribution of water velocity

い。さらに抵抗体を設置した場合も、抵抗体の面内では流れはほぼ一様であった。

2 模 型 杭

実験に用いた杭の模型は、硬質塩化ビニール製パイプである。その寸法および材質については Table 1. に示す3種類のものを使用した。この塩化ビニール製パイプの両面に5 cm 間隔に Strain Gage (共和製ポリエステルゲージ) を張り付け、リード線はパイプの中を通し、等間隔にあけた小孔から取り出し、ゲージに接続している。ゲージの接続方法は、2 Gage Active Dummy 法に従った。なお、防水加工としてハマタイトを塗付し、乾燥後ビニールテープを巻きつけた。

Table 1. Characteristics of model piles

Pile-No	Diameter		Length	E Kg/cm ²	I cm ⁴	EI Kg/cm ²	Z cm ³	EZ Kg/cm	Slender-ness ratio
	Outside	Inside							
Pile-1	cm 2.6	cm 2.02	cm 32	2.366×10^4	1.426	3.374×10^4	1.096	2.593×10^4	220
Pile-2	1.8	1.32	32	2.738×10^4	0.366	1.002×10^4	0.407	1.114×10^4	267
Pile-3	2.6	2.02	46	2.366×10^4	1.426	3.374×10^4	1.096	2.593×10^4	317

3 実験に用いた砂質土および粘性土の物理的性質

実験に用いた砂の土質試験結果は、上粒子の比重2.667、粒土は、レキ分0.12%、砂分99.67%、シルト0.21%といった均質な細砂で透水係数 2.0×10^{-2} cm/sce、一面セン断試験の結果は飽和状態(含水比35%~21%)で見掛けセン断抵抗角 $18 \sim 25^\circ$ 、見掛け粘着力 $0.4 \sim 0.6$ kg/cm²、乾燥状態で見掛けセン断抵抗角 37° 、見掛け粘着力 0.21 kg/cm² であった。

一方、粘性土は浦戸湾の底質土を用い、土質試験の結果は、土粒子の比重2.65、粒土は粘土分24%、シルト分54%、砂分22%といった均質な粘土質シルトで、液性限界35.4%、塑性限界21.9%、塑性指数13.5%、ユニバーサルレオメーターによって求めた粘塑性係数111poise、降伏応力値45 dyne/cm² であった。(Fig. 6. 測定例参照)

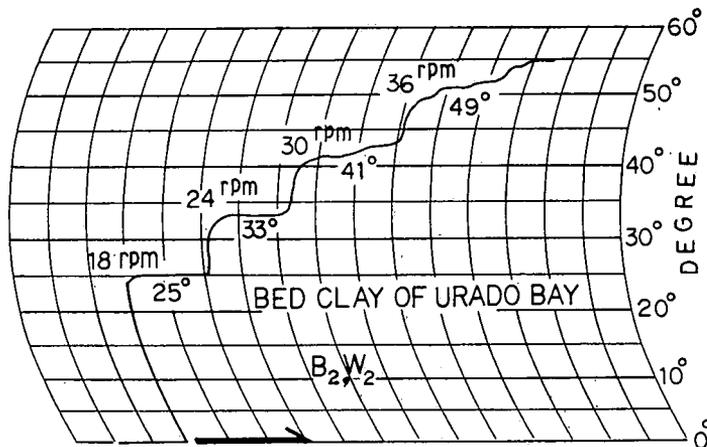


Fig. 6. An example of record of Universal Rheometer

4 実験内容

Table 1. の3種類の模型杭を使用し、各々についてロープを結ぶ位置(載荷位置)を変化させて行った。しかも実験装置(A), (B)を用い、それぞれ砂質土および粘性土中における杭の歪を取り

出し、曲げモーメントを計算した。Table 2. には実験内容を示している。なお、いずれの杭に対しても (A) の装置を使用する場合は滑車 (D) によって、(B) の装置では浮子 (C) によって張力の作用方向を水平上向約 27° の角度をもつよう調節した。

Table 2-1. Details of the experiments

Experimental No	Pile-No	Loading point	D'/D	Experimental equipment	Soil
EX-1.1	1	0.0cm	0.000	(A)	Sand
EX-1.2		3.0	0.109		
EX-1.3		10.5	0.350		
EX-1.4		15.5	0.508		
EX-1.5		18.0	0.667		
EX-1.6		26.3	0.854		
EX-2.1	2	0.0	0.000		
EX-2.2		5.0	0.167		
EX-2.3		10.0	0.339		
EX-2.4		13.8	0.483		
EX-2.5		22.0	0.746		
EX-2.9		25.5	0.850		
EX-3.1	3	0.0	0.000		
EX-3.3		8.5	0.193		
EX-3.4		15.5	0.348		
EX-3.7		29.5	0.663		
EX-3.8		34.5	0.775		
EX-3.9		45.0	0.978		

Table 2-2. -Continued

Experimental No	Pile-No	Loading point	D'/D	Experimental equipment	Soil
EX-51.1	1	0.0cm	0.000	(A)	Clay
EX-51.2		2.0	0.068		
EX-51.3		7.5	0.234		
EX-51.4		14.0	0.438		
EX-51.5		19.5	0.609		
EX-51.6		—	—		
EX-52.1	2	0.0	0.000		
EX-52.2		7.0	0.219		
EX-52.3		14.8	0.480		
EX-52.4		24.0	0.768		
EX-52.5		28.75	0.935		
EX-53.1	3	0.0	0.000		
EX-53.2		—	—		
EX-53.3		9.5	0.214		
EX-53.4		23.0	0.500		
EX-53.5		29.5	0.663		
EX-53.6		39.0	0.975		

Table 2-3. -Continued

Experimental -No	Pile-No	Loading point	D'/D	Experimental equipment	Soil
EX-101.1	1	0.0cm	0.000	(B)	Sand
EX-101.2		8.0	0.250		
EX-101.3		15.5	0.484		
EX-101.4		23.3	0.727		
EX-101.5		29.5	0.959		
EX-102.1	2	0.0	0.000		
EX-102.2		9.0	0.281		
EX-102.3		16.0	0.500		
EX-102.4		23.5	0.734		
EX-102.5		31.0	0.969		
EX-103.1	3	0.0	0.000		
EX-103.2		7.5	0.171		
EX-103.3		19.5	0.443		
EX-103.4		27.5	0.623		
EX-103.5		43.0	0.977		

Table 2-4. -Continued

Experimental -No	Pile-No	Loading point	D'/D	Experimental equipment	Soil
EX-151.1	1	0.0cm	0.000	(B)	Clay
EX-151.2		9.0	0.290		
EX-151.3		18.0	0.563		
EX-151.4		31.0	0.969		
EX-152.1	2	0.0	0.000		
EX-152.2		7.5	0.254		
EX-152.3		19.0	0.594		
EX-152.4		30.5	0.953		
EX-153.1	3	0.0	0.000		
EX-153.2		10.5	0.231		
EX-153.3		22.0	0.484		
EX-153.4		28.5	0.633		
EX-153.5		42.5	0.934		

実験装置 (A) を用いた場合は、地盤面での杭の水平変位をダイヤルゲージで測定した。水平変位は、載荷後30秒から数分にわたり変動し続けるが、だいたいその動きが停止する点をもってダイヤルゲージの値を積み取り、杭に張ったペーパーストレンゲージの歪量の測定に移った。歪量の測定には、全実験を通じ共和 SM-AT (静歪計) を使用し、中間にスイッチボックスを用いて測定に便ならしめた。なお、実験装置 (A) を用いた場合、極限抵抗力を求めるため、杭の抜け始める直前まで荷重を増加していった。

実験装置 (B) (潮流水槽) を用いた実験では、歪量および張力の測定には、最初、動歪計、電磁オシログラフを使用した。その結果 Fig. 8. に示すようにいずれも静的な変動を示した。そこで潮流水槽での歪量の測定にも静歪計を使用し、張力は動歪計、電磁オシログラフで取り出した。

実 験 結 果

1 極限抵抗力について

実験装置 (A) を用いて、砂質土および粘性土中において載荷位置を変化させた場合の杭の引き抜ける際の極限抵抗力を求め、その結果を Fig. 7. に示している。

Fig. 7. の縦軸は極限抵抗力を示し、横軸は杭の根入れ深さ D に対する載荷深度 D' の比を表わす。そして、砂質土中における極限抵抗力を、pile-1 については○印で、pile-2 については△印で、pile-3 については□印で表わし、それぞれの記号を塗りつぶしたものは粘性土中における極限抵抗力を示した。

Fig. 7. によれば■印を除き、 $D'/D < 0.45$ で極限抵抗力の増加は余りみられないが、 $D'/D > 0.45$ ではいずれもかなり急勾配で増加する傾向を示している。しかも $D'/D < 0.45$ では、粘性土中砂質土中における極限抵抗力には余り明瞭な差はみられないが、 $D'/D > 0.45$ になると土質の違いによる差がみられる。すなわち、この範囲では、砂質土の方が抵抗力が大きく表われている。

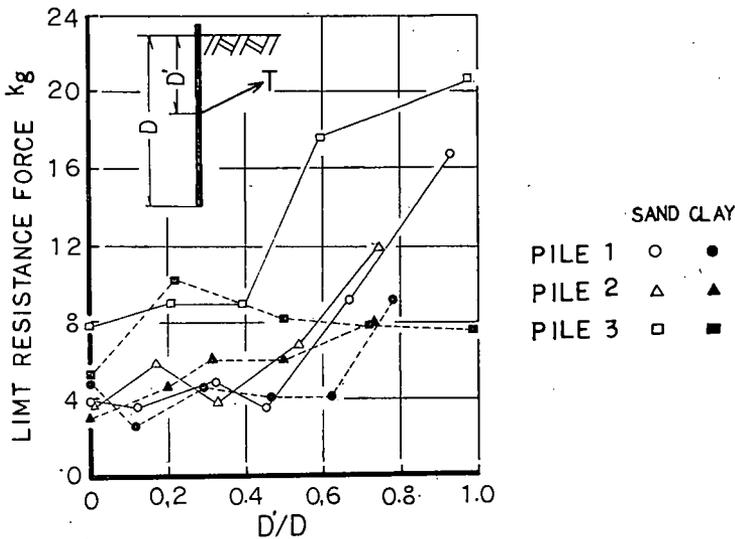


Fig. 7. Relations between D'/D and Limit resistance force of anchorpile⁹

2 流れの影響について

(B) の装置 (潮流水槽) を用いた実験、いずれも網にかかる流水抵抗を外力として杭に作用させたものである。今回は潮流水槽のポンプ回転数を $0 \sim 450 \text{rpm}$ の間で、いずれも回転数一定の状態で行っている。

模型 (抵抗体) を設置しない状態でポンプ回転数を $100, 200 \text{rpm}$ に設定して、それぞれ計測部中心の流速を連続測定し、流速の変動を知るため、自己相関々数を計算したが、ほとんど変動はみられなかった。

つぎに、ポンプ回転数を 150rpm から 200rpm に増加させた場合、張力、杭の歪および流速 (抵抗体模型の直前における流速) の変動の様子を自記させると、例えば Fig. 8. のようになる。これによれば、回転数が増加し流速が一定になるまでの間は、張力は微小な変動を示しながら増加し一定値となる。しかも一定流速に達する時間もきわめて短いことが理解される。一方、歪は張力よりもさらに短時間に一定値に達し、変動の様子もきわめてなめらかである。これは引張用にクレモナロープを使用したので、ロープの弾性の影響もかなり作用しているのであろう。

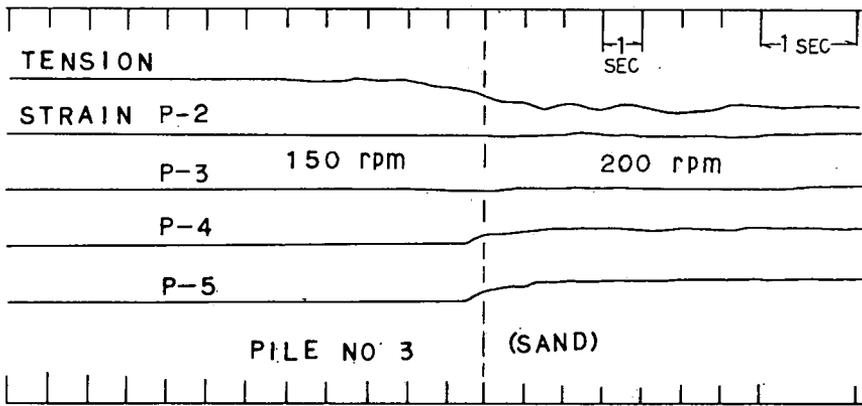


Fig. 8. An example of tension and strain variation

3 曲げモーメント分布

Tabel 2. に示す多くの実験のうちから代表的な例について、その曲げモーメント分布図を描いたものが、Fig. 9. 1.~Fig. 12. 4. である。

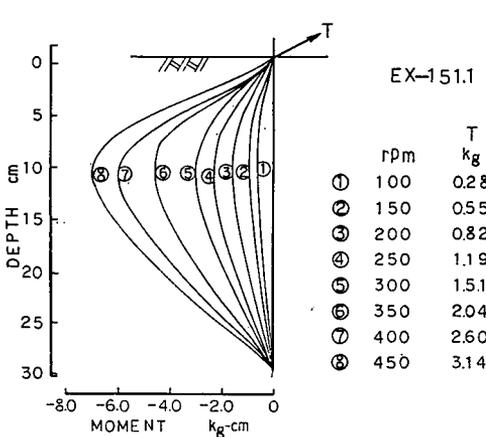


Fig. 11. 1. Bending Moment Diagram

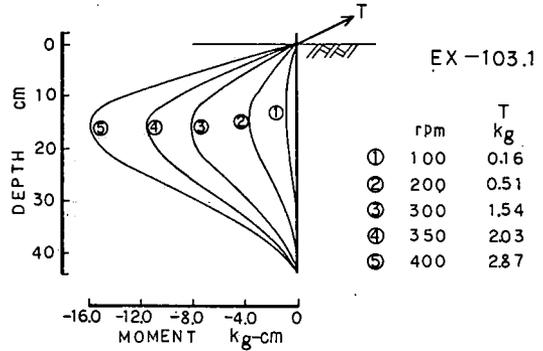


Fig. 10. 1. Bending Moment Diagram

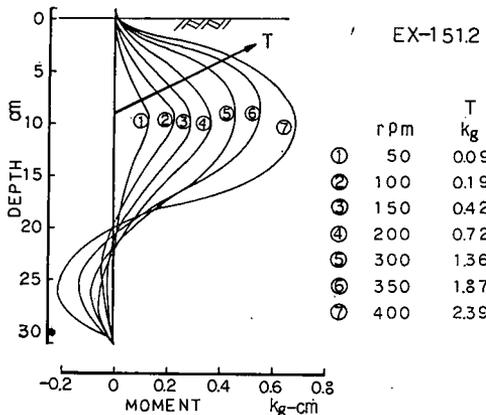


Fig. 11. 2. Bending Moment Diagram

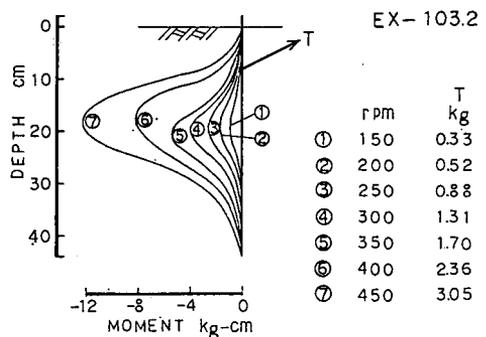


Fig. 10. 2. Bending Moment Diagram

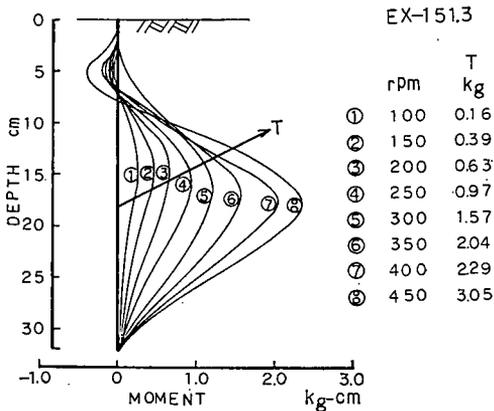


Fig. 11. 3. Bending Moment Diagram

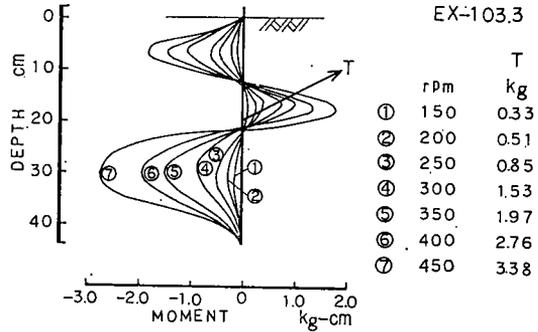


Fig. 10. 3. Bending Moment Diagram

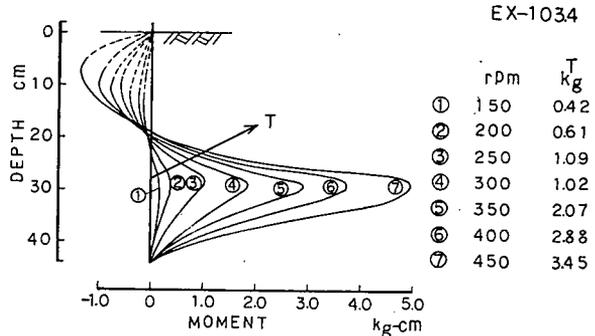


Fig. 10. 4. Bending Moment Diagram

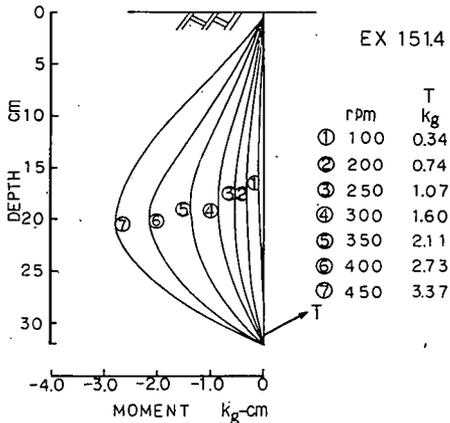


Fig. 11. 4. Bending Moment Diagram

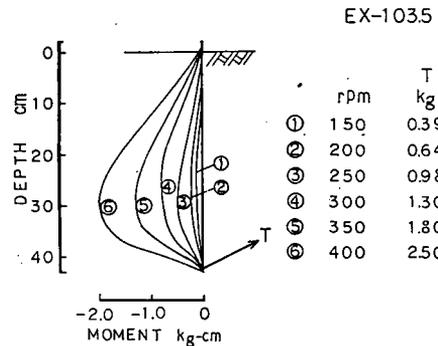


Fig. 10. 5. Bending Moment Diagram

いま、曲げ剛性が同じで杭の長さだけが異なる pile-1 および pile-3 を取り上げてみる。Fig. 11. および Fig. 10. において、それぞれ D'/D (載荷深度/根入れ深度) の値を同じくするもの、またはその値に近いものを比較してみると次のようになる。

Fig. 11. 1. (EX-151. 1) と Fig. 10. 1. (EX-103. 1)

Fig. 11. 3. (EX-151. 3) と Fig. 10. 3. (EX-103. 3)

または Fig. 10. 4. (EX-103. 4)

Fig. 11. 4. (EX-151. 4) と Fig. 10. 5. (EX-103. 5)

これらはいずれの場合の組合せでも、一様な傾向を示している。すなわち、杭の地表部において載荷した場合は、杭の全面にわたり⊖の曲げモーメントを発生するが、載荷位置を除々に地中方向に下げていくと、ある部分から⊕の曲げモーメントを発生するようになる。またこの場合、多くの実験の中には⊕のみのモーメントを示す場合もみられた。さらに載荷位置を下げ、杭の最下端で載荷した場合、地表部の場合と同じように⊖だけのモーメントを示すようになる。

つぎに、同一の杭を砂質土および粘性土中で載荷した場合、その杭に発生する曲げモーメント分布の状態をみるため、Fig. 9. および Fig. 12. を比較する。) これらはいずれも pile-2 を用いたものである。)

同じように D'/D の値の近いものどうしを組み合わせると

- Fig. 9. 1. (EX-102. 1) と Fig. 12. 1. (EX-152. 1)
- Fig. 9. 2. (EX-102. 2) と Fig. 12. 2. (EX-152. 2)
- Fig. 9. 3. (EX-102. 3) と Fig. 12. 3. (EX-152. 3)
- Fig. 9. 4. (EX-102. 4) または
- Fig. 9. 5. (EX-102. 5) と Fig. 12. 4. (EX-152. 4)

のようになり、個々の組み合わせのモーメント分布は同じような傾向を示している。しかし、前述した Pile-1, Pile-3 の場合の曲げモーメント分布とは傾向を大きく異にする。すなわち、Fig. 9. 1. (EX-102. 1), Fig. 12. 1. (EX-152. 1) では、曲げモーメントの零点が杭の下部に近い部分に存在し、その上下でモーメントの正負を異にする。一般にこのような場合、杭の下端は固定されていると仮定し、Long Pile として扱われてきた。

EX-120, EX-152 に用いられた杭 (Pile-2) は、前述した Pile-1 に比べ弾性係数 E はやや大きい、パイルの断面係数、断面二次モーメントが小さいため、結果的には、剛性率の小さい、たわみ易い杭であるといえる。従って、根入れ長さが同じでも剛性率の違いにより異なる挙動を示す。以上のことから、前述した Pile-1, Pile-3 は Short pile と考えてよいであろう。

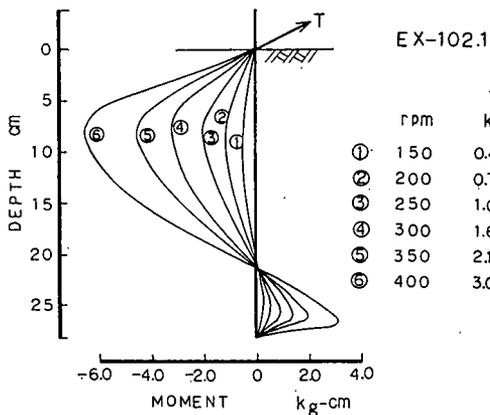


Fig. 9. 1. Bending Moment Diagram

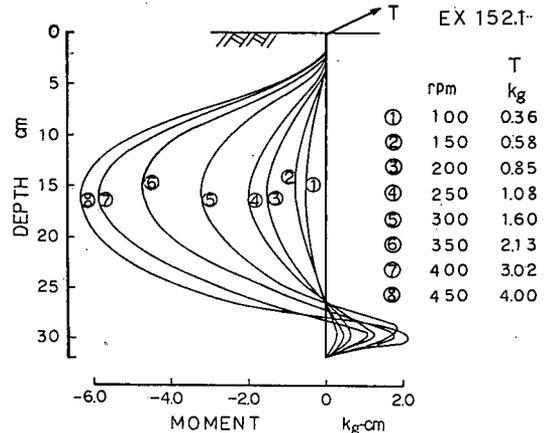


Fig. 12. 1. Bending Moment Diagram

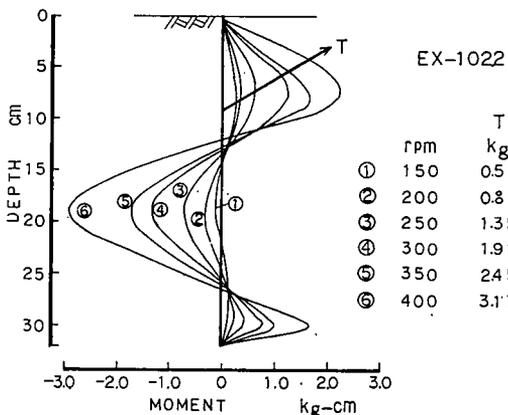


Fig. 9. 2. Bending Moment Diagram

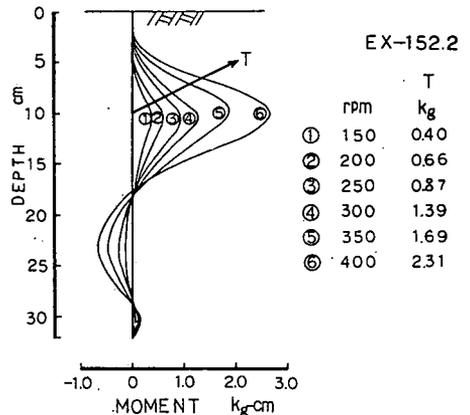


Fig. 12. 2. Bending Moment Diagram

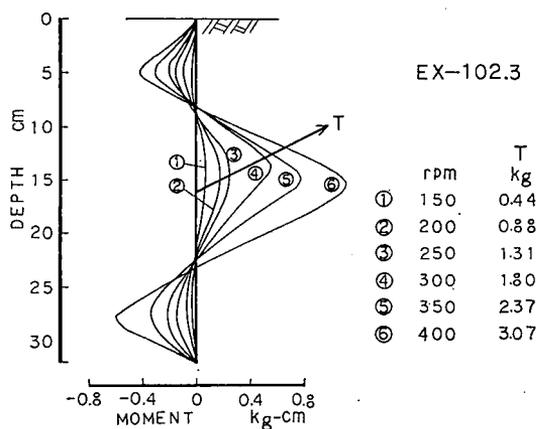


Fig. 9. 3. Bending Moment Diagram

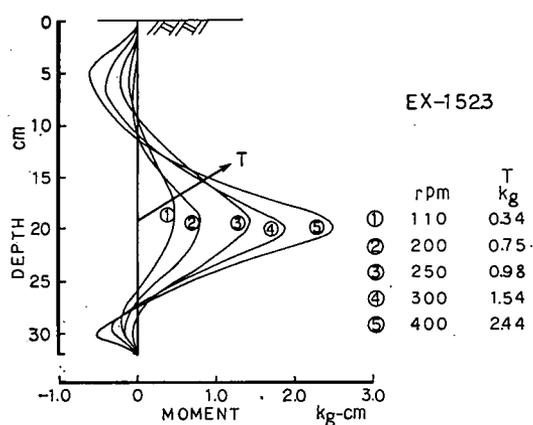


Fig. 12. 3. Bending Moment Diagram

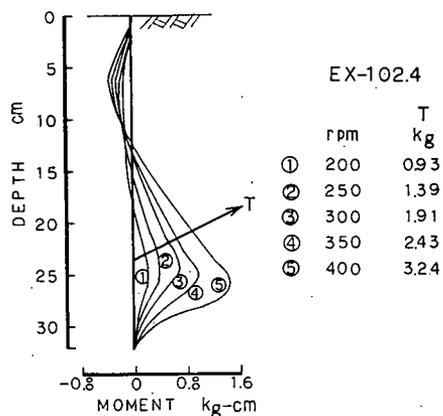


Fig. 9. 4. Bending Moment Diagram

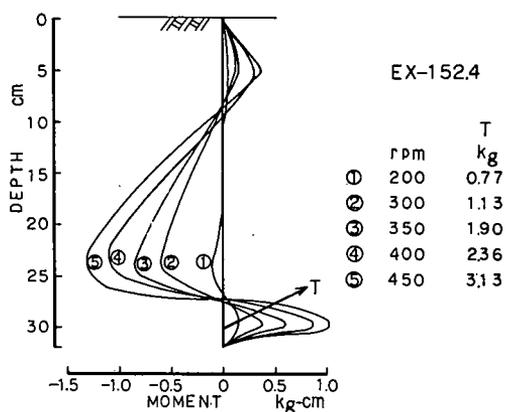


Fig. 12. 4. Bending Moment Diagram

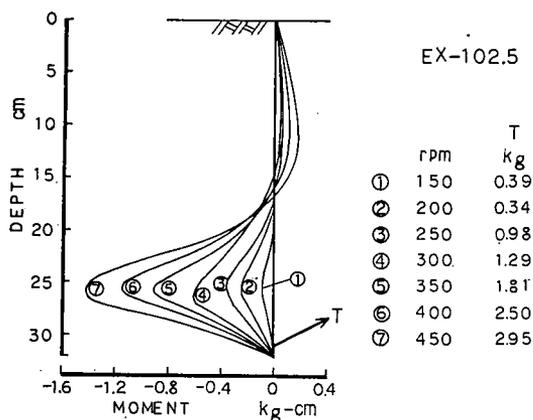


Fig. 9. 5. Bending Moment Diagram

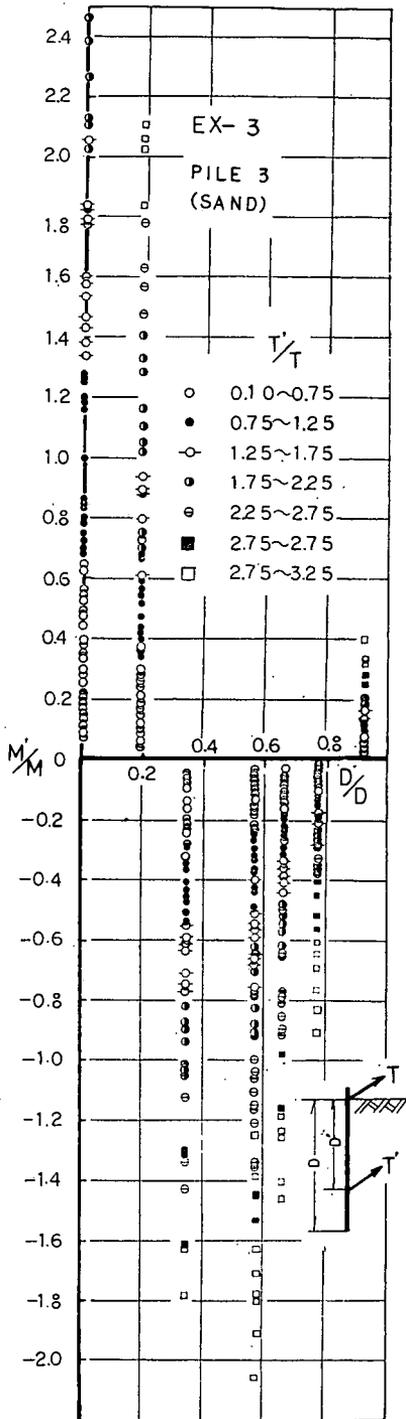


Fig. 13. Relations between M'/M , T'/T and D'/D

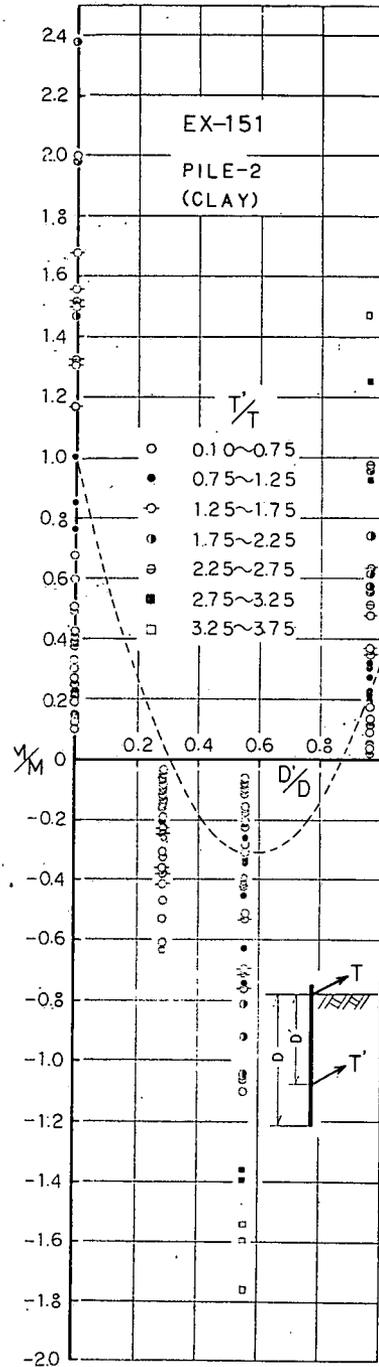


Fig. 14. Relations between M'/M , T'/T and D'/D

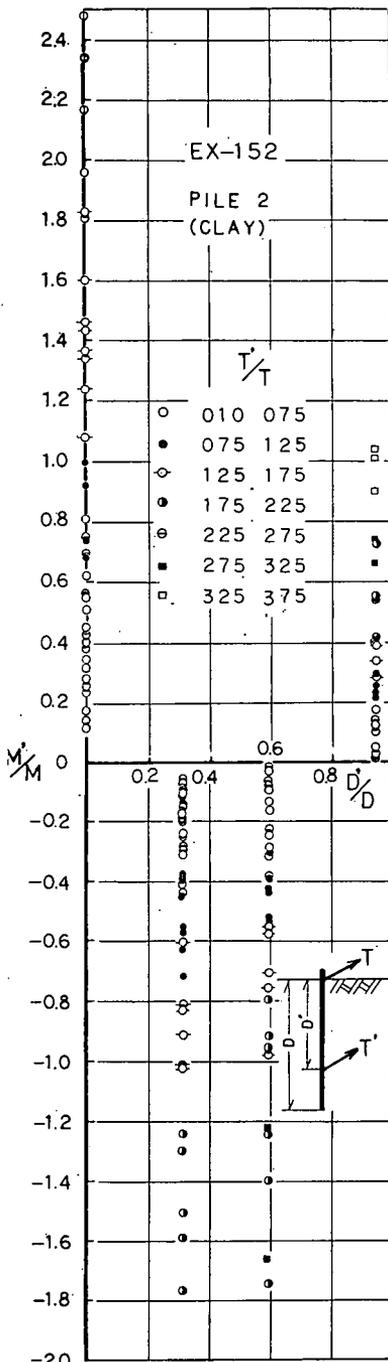


Fig 15. Relations between M'/M , T'/T and D'/D

つぎに、根入れ深さ D をもち、地表面で、外力 T を作用させた場合、発生する最大曲げモーメントを M とする。いま、任意の深さ D' において、外力 T' を作用させた時、次式が成り立つと仮定し、その結果を Fig. 13. ~ Fig. 15. に示した。

$$M'/M = f(D/D' T'/T) \dots\dots\dots (1)$$

ちなみに、Fig. 14. は EX-151 について整理したものである。例えば $T'/T = 0.75 \sim 1.25$ の場合 (●印)、点線のように放物線的な傾向を示すようである。すなわち、 $D'/D < 0.2$ および $D'/D > 0.8$ の場合は、曲げモーメントは地表面で載荷された時発生する最大曲げモーメントと同じ負の符号をもち、 $0.20 < D'/D < 0.80$ では、逆の符号をもつ。そして $D'/D = 0.2$, $D'/D = 0.8$ では曲げモーメントは 0 に近づく。しかも地中部で載荷された場合に発生する曲げモーメントの絶対値は、地表面での値に比べはるかに小さい。これらの点に関しては、他の実験についても同じ傾向を示している。そこで、ある任意の杭について、地表面で載荷された場合に発生する最大曲げモーメントが計算されるなら、地中部において外力が作用した時の最大曲げモーメントは (1) で表わされるであろう、いま、(1) 式を 2 次曲線にあてはめ、最小 2 乗法により、その係数を求めると

$$M'/M = A \times (D'/D)^2 + B \times (D'/D) + C \dots (2)$$

ここで

$$\left. \begin{aligned} A &= 5.244(T'/T) - 1.550 \\ B &= 5.938(T'/T) + 1.634 \\ C &= 1.254(T'/T) - 0.289 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

ところで、各々の実験について係数 A , B , C を計算したが、ほとんど同じような値をとり、杭間の有意の差、粘性土、砂質土の違いも、今回の実験範囲ではみられなかった。

以上の実験結果において最も重要なことは、アンカーパイプを海底地盤 (今回は均質細砂および粘土質シルトを使用) に挿入する場合、ロープを杭の地中内部に結び、外力を作用させた方が、杭に発生する曲げモーメントを減少させる意味で、きわめて有利なことが分ったことである。しかもロープを固定する位置は深いところでも、Fig. 13. Fig. 15. に示されているとおり、載荷点を地表面下にごくわずか下ろしただけでよい。(最大曲げモーメントが減少する) このことは、杭自身の破壊に対する抵抗性に余裕ができたことになり、きわめて合理的である。

結 論

本実験では、砂質土および粘性土に対する杭の極限抵抗力を測定し、新たにペーパーストレンゲージを用いて杭の力学的性質を求めるとともに、海中育成施設の模型を設置して、これに潮流を与えてアンカーパイルとの関係を研究した。以上のことに関し、結論として要約すれば次のとおりである。

1 根入れ長さ、剛性率、細長比のいかんによって、Fig. 9.~Fig. 12.のごとく、杭に発生する曲げモーメントは Long Pile, Short Pile として異った特徴ある分布を示す。

2 今回の実験では、地表面から根入れ深さの約45%までの間で、杭に外力を作用させた場合極限抵抗力は余り増加しなかったが、それ以上に地中深く載荷した場合、極限抵抗力はかなり増加する。しかも砂質土中では、粘性土中よりその増加量が大きい。

3 地中部で載荷した場合、発生する最大曲げモーメントに比較し、かなり減少する。この場合場 $M'/M=f(D'/D, T'/T)$ の関係から、任意の深さで杭に載荷した場合の最大曲げモーメントを地表面で載荷した測定値から、ある程度推定できるものと考ええる。とくに外力の作用点を地表面下ごくわずか下げただけで、曲げモーメントがきわめて大きく減少することは注目値する。

4 流水抵抗を集中荷重として杭に作用させた場合、今回の実験では、杭に発生する歪はきわめて静的な現象を示した。これは、用いた潮流水槽が定常的な流れを示していることによるものであろう。

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, 海中育成施設の固定係留に関する研究。昭和45年度別枠研究経過報告, (1971. 3)
- 2) 栃木省二・宗景志浩, 海底における杭アンカーの固定力, 水産土木, 第8巻, 第1号 (1971. 9)
- 3) 篠原登美雄・久保浩一, 杭の横抵抗に関する研究(その一), 運輸技術研究報告, 第11巻, 第6号 (1961)

(昭和47年 5月30日受理)