

港湾技術研究所報告

REPORT OF PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

第 5 卷 13 号

Vol. 5 No. 13

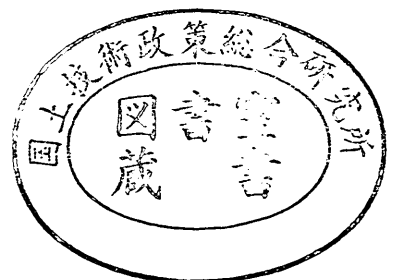
(通卷第 35 号)

資料係
文献複写
禁持出

短杭の横抵抗……………久保浩一

1966年9月

運輸省港湾技術研究所



短杭の横抵抗

目次

1. ま え が き	2
2. 長杭と短杭	2
3. 実 験 方 法	3
3.1 実 験 概 要	3
3.2 模 型 杭	3
3.3 地 盤 条 件	3
4. 長杭の横抵抗	4
4.1 地盤反力と杭面変位の関係	4
4.2 長杭の挙動の推定	5
4.3 l_{m1} の 性 格	5
5. 実 験 結 果	6
5.1 たわみ曲線および地盤反力分布曲線	6
5.2 $k-y$ 関 係	12
5.3 根入れ長の影響	17
6. 短杭の挙動に関する考察	20
6.1 根入れ比による表示	20
6.2 短杭の挙動の推定	22
6.3 遷 移 点	23
7. 短杭の転倒に関する考察	25
7.1 転倒時の地盤反力分布	25
7.2 地盤反力分布曲線の表示方法	26
7.3 破 壊 規 準	28
7.4 受働土圧係数値	29
7.5 杭の転倒と E_r 値	30
8. 結 語	30
9. あ と が き	30
付 録—1 計 算 式	31
付 録—2 計 算 例	35
記 号 表	38
文 献 表	38

Lateral Resistance of Short Piles

Koichi Kubo *

Synopsis

Lateral load tests of 33 model steel piles were performed in cohesionless soil to study the behaviour of short piles with the following results.

(1) Piles subject to lateral force are brought into the following four categories according to the ratio E_r , which is the ratio of L and l_{m1} . (L is the length of embedment of a short pile and l_{m1} is the depth of the first zero point of moment of a corresponding long pile.)

$E_r > 1.5$	long pile	} short pile
$1.5 > E_r > 1.0$	1st transition range	
$1.0 > E_r > 0.6$	2nd transition range	
$0.6 > E_r$	rigid pile	

A pile of the first transition range behaves, when laterally loaded, quite similar to the corresponding long pile, but doesn't have sufficient embedment to be completely fixed in the ground at the pile tip.

A pile of the second transition range shows quite large deflection and inclination compared with a long pile and shows fair amount of deflection at the tip.

A pile with E_r smaller than 0.6 behaves like a rigid body and the effect of the bending of the pile on pile behaviours can be neglected.

(2) Deflection, inclination and bending moment of a laterally loaded short pile can be estimated by means of comparison with those of a long pile based on the E_r ratio.

(3) The distribution of soil reaction against pile surface at the failure can be expressed by two straight lines with sufficient accuracy for practical purposes. The first straight line coincide with the line of passive earth pressure starting from the ground surface.

(4) The failure of a short pile occurs when the soil reaction reaches the value of passive earth pressure at the pile tip.

* Head of Soils Division, Dr. Eng.

短杭の横抵抗

久保浩一*

1. ま え が き

著者らはこれまでに、杭の横抵抗に関する研究の成果を、いくつか発表してきたが、⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾ いずれも、長杭、すなわち、根入れ長が十分に大きい杭だけを対象とした。このような杭では、根入れ長の大小は杭の挙動にほとんど影響をあたえない。したがって従来の報告では、根入れ長についての考察は、ある杭を長杭として働かせるに必要な最小根入れ長をどのようにとるべきか、という点だけにしぼられていた。結論だけを紹介すると、上記の必要最小根入れ長としては、 $1.5 l_{m1}$ ととればよい、⁽⁵⁾ ということにしたのである。ここに、 l_{m1} とは、その杭が十分に長い根入れを有する場合における、杭の曲げモーメント分布曲線の第1ゼロ点の地表面からの深さという。

この結論は、2.3の簡単な実験を行なった結果にもとづいてかなり大胆に導いたものであった。そこで、今回改めて、詳細な模型実験を行なって、上記の結論の妥当性を確かめ、さらに短杭の挙動そのものをも検討することにした。

今回の実験の結果、根入れ長が次第に小さくなるに従って、杭は長杭から短杭に移り変わって行き、ついには剛性杭の性質を示すようになるが、その間に2つの過渡領域がかなりはっきり認められることがわかった。そして、前述の $1.5 l_{m1}$ という長さは、長杭から第1過渡領域に入る境界の根入れ長に相当する。したがって、この長さを、ある杭を長杭とするための必要最小根入れ長とすることはきわめて妥当であることが確かめられた。さらに今回の報告では、杭が短杭となった場合、その杭頭変位量や傾斜量などを如何に推定すべきかという問題、および、短杭を転倒に至らしめる限界荷重の問題についても詳細に考察した。その結果、横方向力をうける短杭の設計に役立つ2・3の実用的な規準を示すことができた。

2. 長杭と短杭

実験の方法および結果を述べるのに先立ち、長杭と短

杭がどのように違うかについて、ごく概念的に説明しておきたい。

ある杭が横方向力をうけるとき、その挙動が根入れ長の大小によってどのように変わるかを考えてみよう。根入れ長が十分に大きい杭では、ある深さよりも下の部分は、杭頭に横方向力をうけても、何ら変位を生じない。したがって地盤反力の変位もなく、この部分の土は、横方向力に対して有効な抵抗を発揮していないわけである。これより上の部分では、杭の変位が生じ、土は横方向力に抵抗を示している。したがってこの部分の長さを有効長とよぶことにしよう。根入れ長が有効長をこえる杭では、根入れ長の大小にかかわらず、杭の挙動は同じである。このような杭が長杭であって、その根入れのうち有効長をこえる部分は、完全に地盤中に固定された形をとる。したがって、横方向力による長杭の破壊は、杭中に発生する曲げモーメントによる杭材の折損としてあらわれる。

一方、根入れ長が有効長より小さい場合には、杭の挙動は根入れ長の影響をうけるようになる。このような杭が短杭であって、根入れ長が小さいほど、横方向力による杭の変位や傾斜が大きくなる。この場合、杭の動きは曲げよりも回転に近くなり、杭の下端部においても変位がおこり、したがって、杭の全長にわたって、有効な土の抵抗をうけることになる。さらに根入れ長が小さくなると、横方向力がある限度に達した場合に、周辺の土が一挙に崩壊状態に入り、杭の転倒がおこる。

このように、根入れ長が有効長より大きいか小さいかによって、杭は長杭または短杭の性質を示す。したがって、まえがきで述べた、ある杭を長杭として働かせるための必要最小根入れ長というものは有効長と全く同じものである。

さて、短杭は長杭にくらべて、変位や傾斜が大きくなるのはもちろんであり、さらに杭の挙動が根入れ長によって影響をうけるため、変位などの予測が長杭の場合より面倒である。また、短杭は一般にクリープや繰り返し载荷に対して不利であり、極端な短杭では倒壊する危険もある。したがって、短杭で横方向力を支えようとする場合には、長杭の場合にくらべてより一層の注意が必要

* 土質部長

となるのである。

3. 実験方法

3.1 実験概要

今回の模型実験は、すべて、長さ 8 m、幅 4.5 m、深さ 4 m の大型基礎工実験槽において行なった。実験方法はすでに報告した長杭の場合⁽⁶⁾と全く同じであるのでここでは概要だけを述べる。

実験に用いた杭は、延べ33本であるが、これを数シリーズに分けて実験した。各シリーズとも、6～8本の杭を実験槽中にたてこみ、砂を填充した後、飽和状態で横方向載荷試験を行なった。載荷には重錘を用い、各載荷段階毎に、荷重の大きさ、杭頭変位および杭面の曲げヒズミを測定した。載荷および測定装置の概要を図-1に示す。

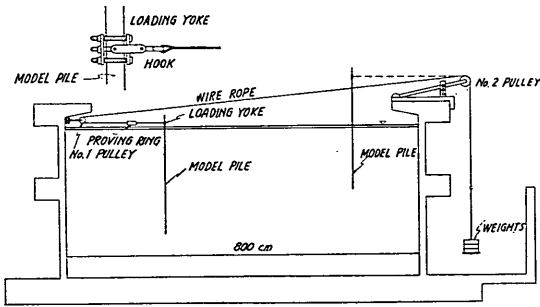


図-1 実験装置

3.2 模型杭

今回の実験に用いたすべての模型杭の要目を表-1に示した。A, B, C, D, E, Fの各群は、同一条件の杭で根入れ長だけの異なるもの数本を組み合わせたものであり、G群は、上記の各群に属さない杭を集めたものである。杭はすべて鋼製であり、その断面形状は、矩形断面のものが20本、円管断面のものが11本、角筒断面のものが2本である。各群中の個々の杭は必ずしも別の杭でなく、ある一つの杭を、各シリーズ毎に根入れ長を変えて繰り返し用いたものであるため、使用した模型杭の実数は延本数の三分の一程度になる。

表-1のうち根入れ比(E_r)とあるのは、杭の根入れ長 L と、その杭が長杭であるとしたときの l_{m1} (曲げモーメント第1ゼロ点の深さ)の比である。この値の意義については、後に詳しく説明するので、ここではこの比の値が1.5より大きいときは長杭となり、逆にこの比が1.5より小さくなるほど、短杭としての性格が強くなる

ものであるということだけを述べておこう。また、 k として示してあるのは、その杭の周辺の実験地盤の横抵抗常数の値を示す。この値が大きいほど地盤が良く締まっていると考えてよい。最後の備考の欄に崩壊と記してあるものが7本あるが、これらは、横方向力がある大きき達したときに杭の転倒が起こったものである。転倒は根入れ長の特に小さいものに限られているが、これは根入れ長の大きい杭では、転倒の起こる前に杭材の折損が生じるおそれがあるので、これをさけるため横方向力がある限度でとどめたため転倒に至らなかったのである。

模型杭は、G-8, G-9の2本を除き、すべてその前後両面に、5～10cm間隔でストレインゲージを接着し、載荷時における曲げヒズミを測定した。ゲージおよびリード線は、ガラスクロスおよびポリエステル樹脂をもって十分にコーティングしたので、飽和砂中で実験したにもかかわらず、ゲージの絶縁は良好で、同一の杭を数度の実験に重ねて使用することができた。

3.3 地盤条件

実験に用いた砂は、相模川産の建材用の川砂であり、その粒径加積曲線は、図-2に示す通りである。排水三軸圧縮試験を行なった結果、実験地盤に相当する密度では、内部摩擦角 ϕ が約45度になることがわかった。また、コーティングした模型杭の表面と砂との間の摩擦角 δ は、簡単な摩擦抵抗試験を行なった結果によると、30～35度であった。

各シリーズとも、模型杭を所定の位置にたてこんで暫定的に固定し、その周囲に砂を填充した。砂の填充にあたっては、一層の仕上がり厚さを20cmとし、重量8.3kg、底面積30cm×30cmのタンパーを用い、湿潤状態で各層8回の締め固めを行なった。現場密度を測定した結果によれば、実験地盤の平均乾燥密度は、 $\gamma_d=1.78\text{g/cm}^3$ であった。地盤条件を一定にするように極力心がけたが、各シリーズ毎に、また、同じシリーズでも各杭毎に多少の地盤条件の偏差が生ずるのは止むを得なかった。表-1中の地盤常数値 k の値にばらつきがあるのはこのためである。ただし、このような地盤条件の局所的な偏差は、現場密度測定や貫入試験などによって直接的に求めることは不可能であり、表-1に示した k 値は、すべて杭の横方向載荷試験の結果から算定したものである。

4. 長杭の横抵抗

4.1 地盤反力と杭面変位の関係

この報告は短杭の挙動を検討するのが目的であるが、短杭の挙動というものは長杭の挙動と比較してはじめて

表-1 模 型 杭 要 目 表

杭 番 号	断 面	幅, 径 (<i>B</i>) cm	刚 性 (<i>EI</i>) 10^6 kg·cm ²	载 荷 高 (<i>h</i>) cm	根 入 长 (<i>L</i>) cm	根 入 比 (<i>E_r</i>)	<i>k</i> g·cm ^{-3.5}	備考	
A	1	Plate	7	2.35	15	140.0	2.20 ~ 1.80	65	
	2	"	"	"	"	93.9	1.44 ~ 1.09	60	
	3	"	"	"	"	71.8	1.16 ~ 0.88	65	
	4	"	"	"	"	52.4	0.92 ~ 0.72	65	
	5	"	"	"	"	31.5	0.68 ~ 0.57	100	崩壊
B	1	Plate	7	2.35	10	64.0	1.07 ~ 0.81	80	
	2	"	"	"	"	54.8	0.96 ~ 0.75	90	崩壊
	3	"	"	"	"	44.8	0.76 ~ 0.65	80	崩壊
	4	"	"	"	9	35.5	0.70 ~ 0.57	80	崩壊
C	1	Plate	10	27.54	15	240.0	2.34 ~ 1.89	50	
	2	"	"	"	"	140.0	1.30 ~ 1.02	45	
D	1	Plate	7	2.35	36.5	124.8	2.25 ~ 1.80	100	
	2	"	"	"	41.7	79.6	1.37 ~ 1.26	120	
	3	"	"	"	38.5	65.0	1.10 ~ 0.89	80	
	4	"	"	"	"	36.5	0.83 ~ 0.68	120	崩壊
E	1	Pipe	5.09	20.75	15	240.0	2.40 ~ 1.94	90	
	2	"	"	"	14	171.0	1.86 ~ 1.57	90	
	3	"	"	"	"	141.0	1.65 ~ 1.29	90	
	4	"	"	"	13	92.0	0.95 ~ 0.81	80	
	5	"	"	"	15	60.0	0.73 ~ 0.58	110	
	6	"	"	"	"	48.0	0.66 ~ 0.48	90	崩壊
F	1	Pipe	5.18	13.44	15	240.0	2.55 ~ 2.18	80	
	2	"	"	"	"	140.0	1.69 ~ 1.41	100	
	3	"	"	"	"	90.0	1.10 ~ 0.87	90	
G	1	Plate	10	3.15	15	240.0	3.44 ~ 2.66	45	
	2	"	"	"	"	140.0	2.20 ~ 1.88	75	
	3	Pipe	10.16	214	15	140.0	0.92 ~ 0.73	45	
	4	"	5.08	34	"	"	1.23 ~ 1.05	80	
	5	Plate	7	2.35	13	133.0	1.85 ~ 1.60	60	
	6	"	"	"	30.5	98.0	1.69 ~ 1.34	80	
	7	"	"	"	77.8	51.2	1.15 ~ 0.90	105	
	8	Box	10.5	513	10	60.0	0.56 ~ 0.40	100	崩壊
	9	"	"	"	"	100.0	0.70 ~ 0.50	50	

GRAVEL	COARSE SAND	MEDIUM SAND	FINE SAND
3.0%	56%	34.4%	4.6%
d_{10}	d_{60}	UNIFORMITY COEFF	G_s
0.27mm	1.12mm	4.1	2675

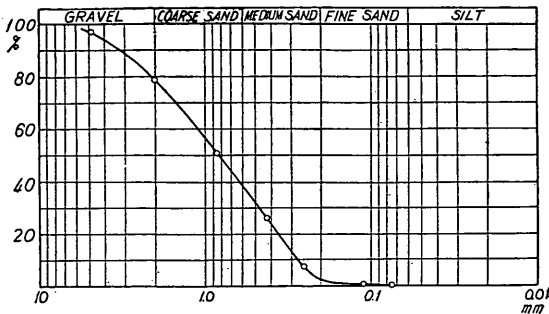


図-2 粒径加積曲線

その性格を把握することができるものである。したがって、短杭の考察に先立ち、ここで、長杭の横抵抗について、若干紹介しておくことが必要であると思われる。

横方向力をうけるときの、杭面にかかる地盤反力 p (単位面積あたり) と杭面の変位 y との関係は、一般的に次の式であらわされる。ここに k は地盤の横抵抗常数である。

$$p = k \cdot x^m \cdot y^n \dots\dots\dots (1)$$

従来は、杭の横抵抗を解析するにあたって (1) 式中の n を 1 とおくのが常であった。すなわち、杭の周辺の地盤を弾性体と考えるのである。しかし、実際の杭の挙動を観察すると、地盤は非弾性的な性質をもっていることがわかる。著者らの研究結果によれば、(1) 式中の n を 0.5 とおくときに、地盤の実際の挙動をもっとも適切に表現し得ることがわかった。そして、一様な密度分布をもつ砂地盤では、 $m=1$ となる。したがって、このような地盤では次の式が成り立つことになる。

$$p = k \cdot x \cdot y^{0.5} \dots\dots\dots (2)$$

著者らの新しい解析法は (2) 式から出発するのである。 x の指数 m を 0 とおく方がよい地盤もあるが、このようなときは $m=1$ の地盤におきかえて計算することになる。

4.2 長杭の挙動の推定

(2) 式を弾性体のたわみの方程式に代入すると、杭のたわみに関する次の微分方程式を得る。ただし B は杭幅、 EI は杭の曲げ剛性を示す。

$$EI \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} = -p \cdot B = -k \cdot x \cdot y^{0.5} \cdot B \dots\dots (3)$$

(3) 式を解けば、横方向力をうける杭の挙動が解析できるわけであるが、現在のところこの式の実用的な解法

を見出すことは非常に困難である。そこで著者らは、模型実験結果と相似則を運用することによって、実際の杭の挙動を予測する方法を考案した。

(1) まず、杭のたわみ曲線の相似の条件式に、 p と y の関係式を代入して換算係数を求める。この換算係数は、ある杭の挙動を、他の任意の杭の挙動に換算するのに用いられる。

(2) 次に、杭の変位、杭の曲げモーメントなど、設計に必要な量に対する基準曲線を求める。著者らは、各種の条件をもつ模型杭について実験を行なっているのので、これらの実験結果を上記の換算係数を用いて、所定の基準杭に換算すると、実用上十分な範囲をもつ基準曲線を得ることができる。基準曲線は、杭頭変位、地表面変位、杭頭曲げモーメント (頭部固定杭の場合)、地中部の最大曲げモーメント、 l_{m1} 、および杭の地表面における傾斜の 6 者について求めた。

(3) 換算係数と基準曲線が与えられれば、任意の杭の挙動が予測できる。すなわち対象とする杭の諸元を基準杭の諸元と比較して、換算係数の値を計算し、これを用いて基準曲線を換算すればよいのである。

上記の方法は、長杭の性格を十二分に活用したものである。すなわち、長杭では、杭の実際の根入れ長は、杭の挙動に全く影響がない。したがって、たわみ曲線の相似を考える際に、地中部の実際の長さについて考慮する必要がなく、地上部の長さについてだけ相似性を考えればよいことになるのである。

4.3 l_{m1} の性格

l_{m1} という量は元来長杭について求められる量であるが、短杭を考察するにあたってきわめて重要な意味をもつ。すなわち、すでに述べたように、ある杭の実際の根入れ長 L の値とその杭が長杭であるとした場合の l_{m1} の値を比較することによって、その杭が長杭と短杭のいずれであるかの区別、さらにそれが短杭である場合の短杭的性格の強さを判定することができるのである。したがってここで、 l_{m1} の性格について、説明を加えておきたい。

図-3 の (a) は、ある 1 つの模型杭に対して横方向載荷試験を行なったときの、曲げモーメント分布曲線を、荷重段階毎に図示したものである。曲げモーメント分布曲線は、荷重の増大と共に次第に下方にひろがって行きしたがって、曲げモーメントの第 1 ゼロ点の深さ l_{m1} の値も次第に大きくなっていることがわかる。これは地盤が弾性的挙動をしていないことを示すものである。このように l_{m1} なる量は、杭と地盤の条件をあたえても、

一義的にきまらず、荷重の大きさによってもまた変化する。これは l_{m1} の性格として非常に大切な点である。

次に、 l_{m1} に対し杭の剛性や地盤条件がどのような影響をもつかを調べてみよう。図-3 の(b)は剛性の異なる3種の杭に同じ荷重をかけたときの曲げモーメント分布曲線を示す。剛性が大きいほど、 l_{m1} が大きくなることを示している。図-3 の(c)は、同じ杭を3種の地盤条件のもとで載荷した結果を示すが、地盤常数値が大きい、すなわち、地盤がよくしまっているほど、 l_{m1} は小さくなることわかる。

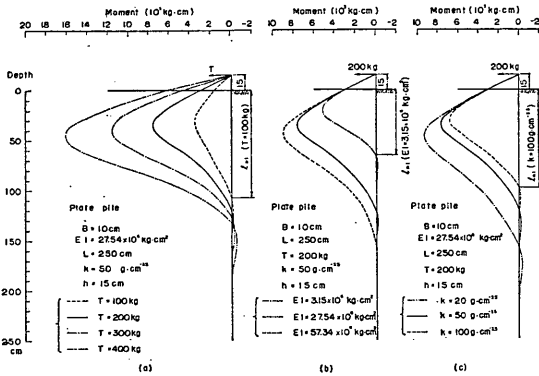


図-3 l_{m1} の性格 (1)

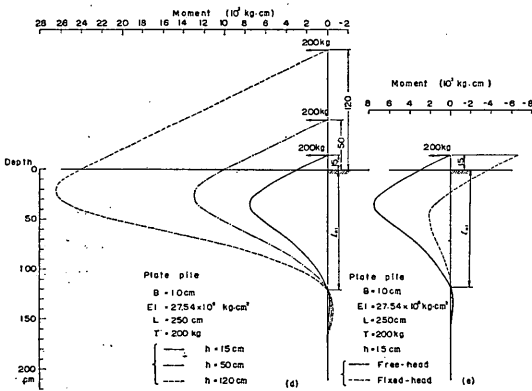


図-4 l_{m1} の性格 (2)

一方、載荷高さおよび杭頭支承条件は l_{m1} にどのような影響をあたえるであろうか。図-4 の(d)は、杭の剛性と地盤常数が同じで、載荷高さ h を3種類にかえた場合の曲げモーメント分布曲線を示す。同じ荷重でも、載荷高さの違いによって曲げモーメント分布曲線の形は異なるが、 l_{m1} の大きさは載荷高さの如何にかかわらず

定であることが注目される。また図-4 の(e)は、杭頭支承条件の影響を示したものである。実線は頭部自由杭の曲げモーメント分布曲線であり破線は頭部固定杭、すなわち杭頭部の回転を許さない杭の曲げモーメント分布曲線である。頭部固定杭の場合、分布曲線の形は頭部自由杭のものとは全く異なり、地表面の近くに曲げモーメントの第1ゼロ点があられる。しかし、第2ゼロ点に着目すると、その深さは頭部自由杭の第1ゼロ点の深さに一致する。したがって、頭部固定杭の場合には、曲げモーメントの第2ゼロ点の深さを l_{m1} ときめれば、頭部自由杭の場合と同じ扱いができることになる。この報告は元来、頭部自由の短杭だけを考察の対象としているが、

l_{m1} を上記のようにきめれば、研究の結果を頭部固定の短杭に応用することもできるのである。ただし、極端な短杭の場合を考えると、頭部自由杭では横方向力により回転を生ずるのに対し、頭部固定杭では平行移動が生ずることになり、土の抵抗の様相がかなり異なる。したがって、このような場合は別途の考慮を必要とすることになる。

さて、上に述べてきたことを要約すると、次のようになる。すなわち、 l_{m1} なる量は、杭の剛性、地盤常数および荷重の大きさの3者によって規定されるものであり、載荷高さおよび頭部支承条件の影響をうけない。

5. 実験結果

5・1 たわみ曲線および地盤反力分布曲線

模型杭に載荷すると、杭中に曲げヒズミが発生するが、これは杭の両面に接着したストレインゲージによって測定される。この測定値にもとづいて杭の曲げモーメント分布曲線をえがくことができ、さらに曲げモーメント分布曲線をそれぞれ2回、図式微分または図式積分することによって、地盤反力分布曲線またはたわみ分布曲線が得られる。図-5 から図-35までに、各模型杭について得られた曲げモーメント、地盤反力および杭のたわみの分布曲線を示す。ただし、杭G-8、および杭G-9にはストレインゲージを接着しなかったため、分布曲線は得られていない。

曲げモーメント分布曲線中に示してある丸印はストレインゲージによって測定された値を示している。いくつかの例外はあるが、全体的にみて、ストレインゲージの測定精度が非常に高かったことがわかる。しかし、このように精度の高い曲げモーメント分布曲線が得られても、これを2度微分して地盤反力分布を求める操作はかなり面倒であり、とくに根入れの小さい杭の下端付近の反

力分布をえがくにはある程度の判断が必要であった。したがって、反力分布曲線は曲げモーメント分布曲線にくらべて精度が幾分おとるのはやむを得ない。なお、ここで示した地盤反力 P は杭幅全体に対するものである。

たわみ分布曲線はモーメント分布曲線を2度積分して得られたものであり、精度はかなり高い。たわみ分布曲線の杭頭部に丸印で示してあるのは、ダイヤルゲージで測定した変位である。根入れ長の大きい杭では、曲げモーメント分布曲線の積分の際に、下部固定という条件を用いることによって、たわみ分布曲線をダイヤルゲージ測定値とは独立に求めることができる。しかし、根入れ長の小さい杭の場合、杭下端に変位が起こるから、積分にあたっては、境界条件を杭頭において、あたえる必要がある。この境界条件として、ダイヤルゲージで測定した杭頭変位およびたわみ角を利用した。

今回の実験に用いた33本の杭は、長杭から極端な短杭に至る広い範囲をカバーするように選んである。たとえば、A-群では図-5に示すA-1杭は完全な長杭である。すなわち、各分布曲線は杭の下端部においては何らの変化を示しておらず、杭の下端は地盤中に固定された形をとっていることがわかる。

図-6に示すA-2杭についてみると、最小の荷重段階では、まだ長杭に近いが、荷重の増大と共に短杭的な

性格が強くなっていくことがわかる。最大荷重の際の反力分布曲線を見ると、地盤反力が最大となる深さまでは上に凹の特異な曲線形を示している。これは、地表面近くで、地盤反力が飽和状態に達しているのに、ある程度深くなると、変位の増加にともなう反力の増加が引き続いて起こっていることを示している。この現象は、比較的根入れの大きい杭に、特に大きな変位が生ずる場合にあらわれるもので、A-3、B-1、B-2、B-3などの諸杭に顕著にみられる。

さて、A-2杭の場合、短杭とはいいながら、杭の下端の反力は小さい。しかし、図-7のA-3杭、図-8のA-4杭となると、杭の下端の反力がかなり大きくなっていく。これは、杭の下部に相当量の変位が生じたことを示しており、このことはたわみ曲線においてもはっきりあらわれている。図-9のA-5杭はA-群中でもっとも根入れ長の小さいものであるが、たわみ曲線に曲げがほとんど見られず、杭の動きは回転に近い。このような杭では、杭の下端における反力が非常に大きくなる。

B-群以下においても、同様なことが観察される。その中でD-群およびG-6杭、G-7杭は載荷高さを大きくしたものであるが、反力分布曲線の傾向は変わらないことが注目される。

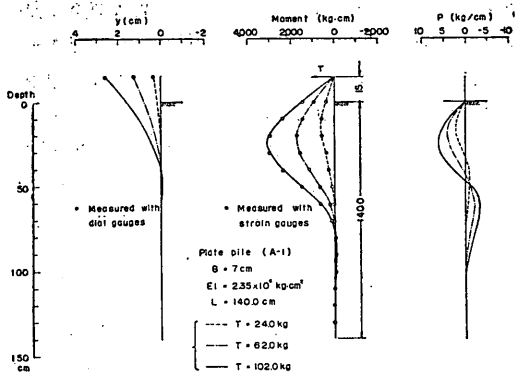


図-5 モーメント, P , および y の分布 (A-1)

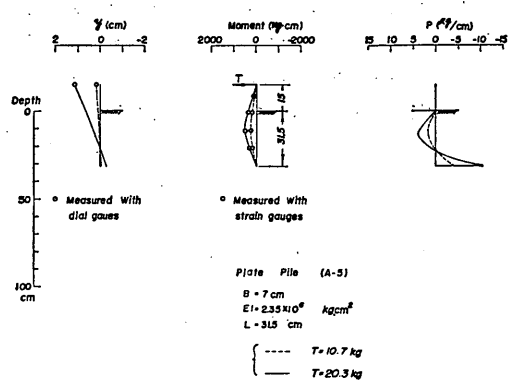


図-9 モーメント, P , および y の分布 (A-5)

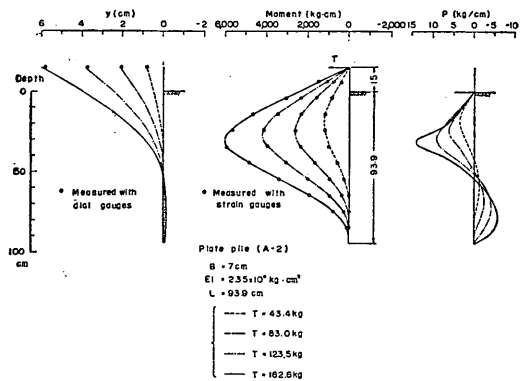


図-6 モーメント, P , および y の分布 (A-2)

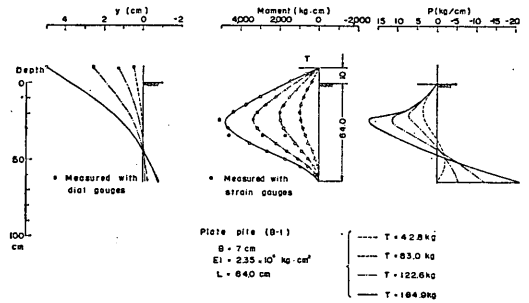


図-10 モーメント, P , および y の分布 (B-1)

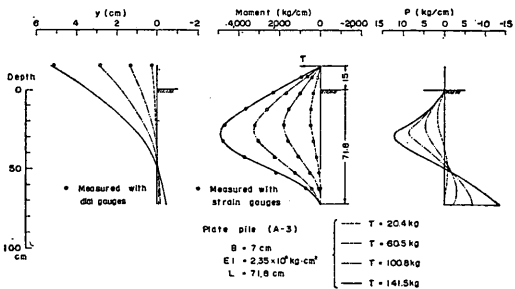


図-7 モーメント, P , および y の分布 (A-3)

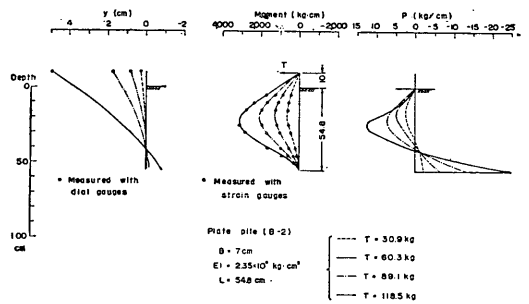


図-11 モーメント, P , および y の分布 (B-2)

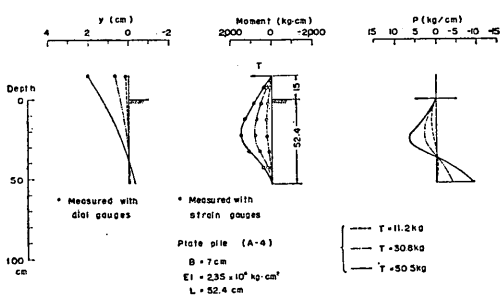


図-8 モーメント, P , および y の分布 (A-4)

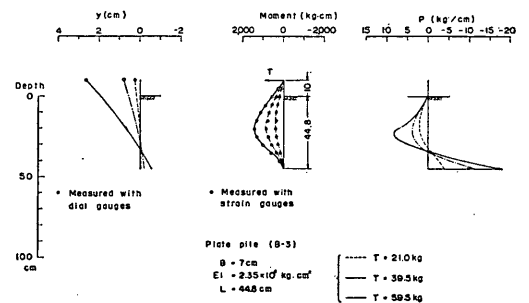


図-12 モーメント, P , および y の分布 (B-3)

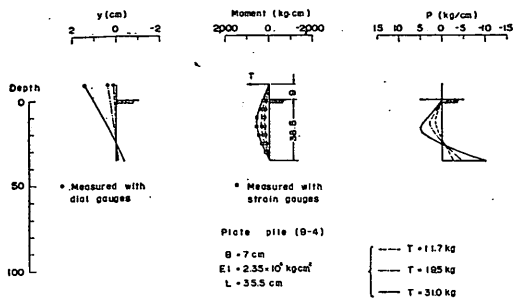


図-13 モーメント, P, および y の分布 (B-4)

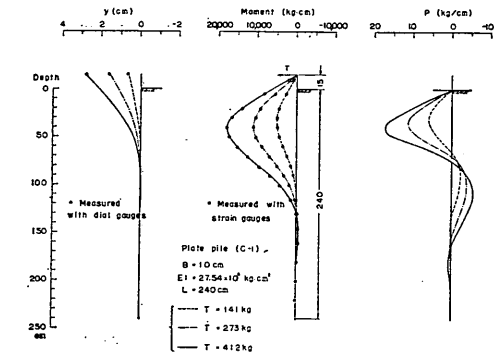


図-14 モーメント, P, および y の分布 (C-1)

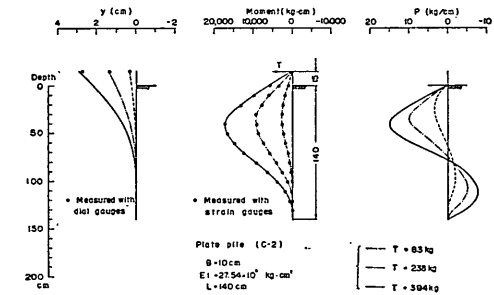


図-15 モーメント, P, および y の分布 (C-2)

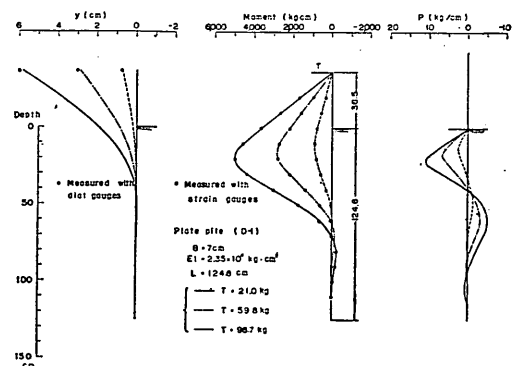


図-16 モーメント, P, および y の分布 (D-1)

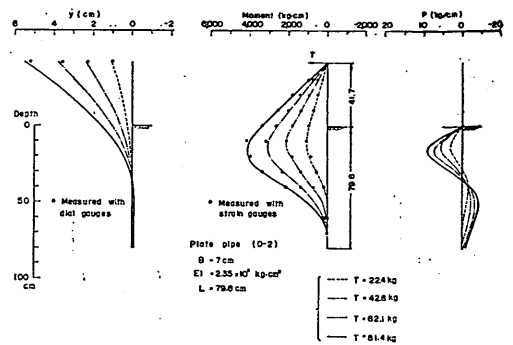


図-17 モーメント, P, および y の分布 (D-2)

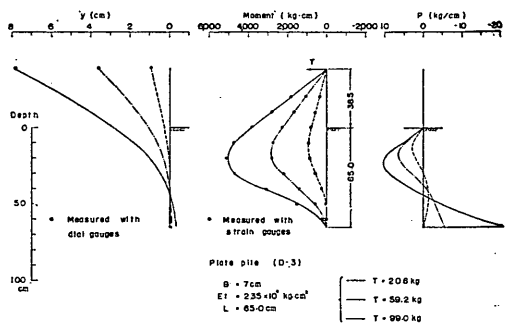


図-18 モーメント, P, および y の分布 (D-3)

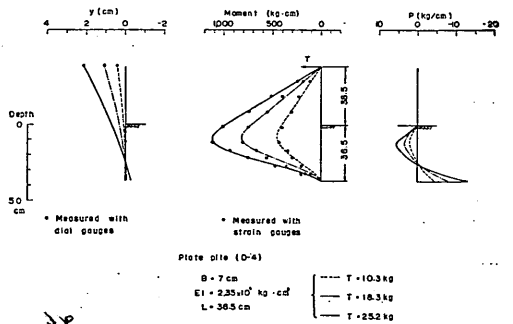


図-19 モーメント, P, および y の分布 (D-4)

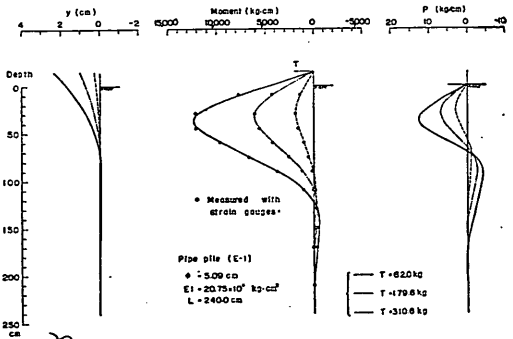


図-20 モーメント, P, および y の分布 (E-1)

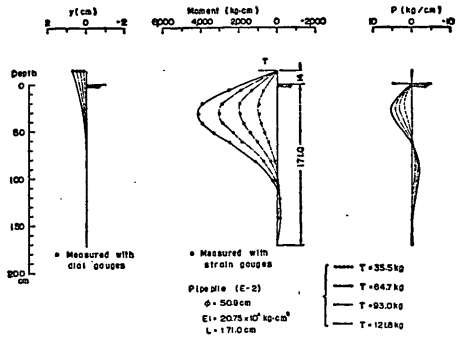


図-21 モーメント, P, および y の分布 (E-2)

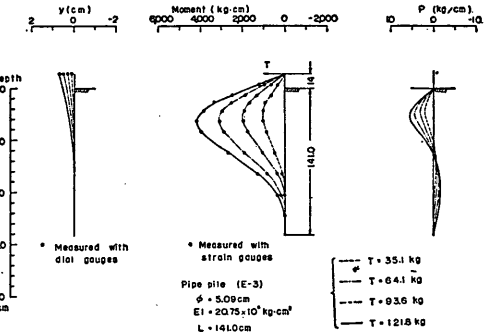


図-22 モーメント, P, および y の分布 (E-3)

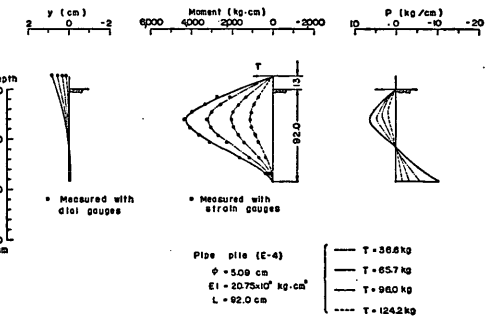


図-23 モーメント, P, および y の分布 (E-4)

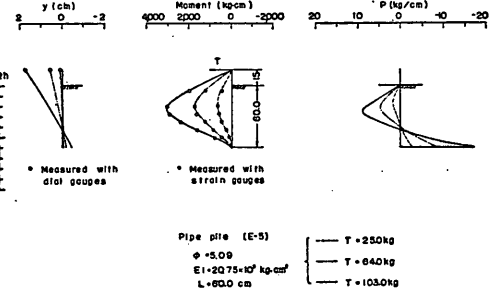


図-24 モーメント, P, および y の分布 (E-5)

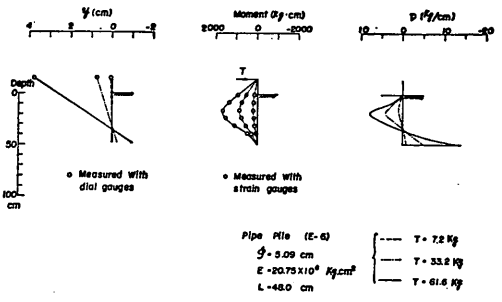


図-25 モーメント, P, および y の分布 (E-6)

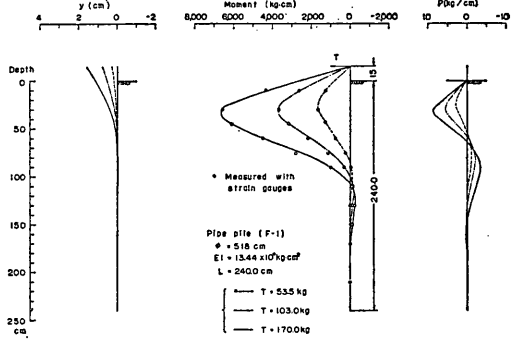


図-26 モーメント, P, および y の分布 (F-1)

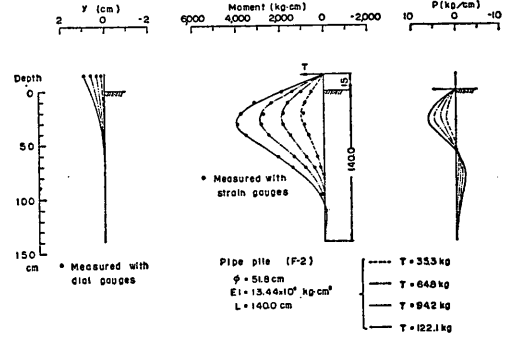


図-27 モーメント, P, および y の分布 (F-2)

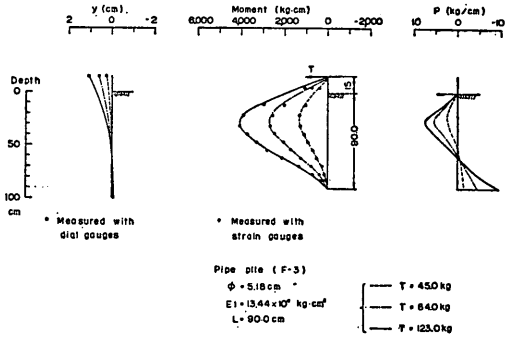


図-28 モーメント, P, および y の分布 (F-3)

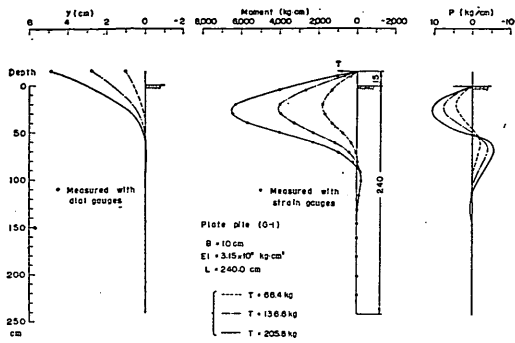


図-29 モーメント, P , および y の分布 (G-1)

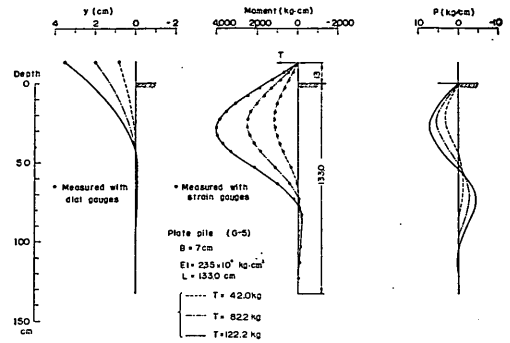


図-33 モーメント, P , および y の分布 (G-5)

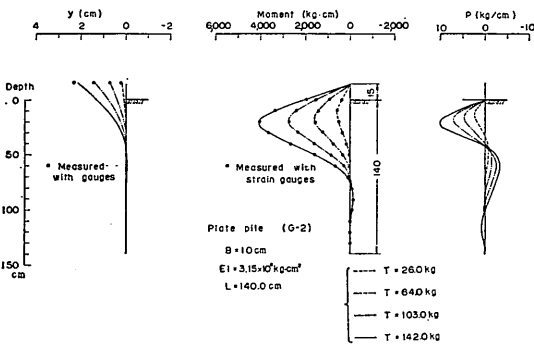


図-30 モーメント, P , および y の分布 (G-2)

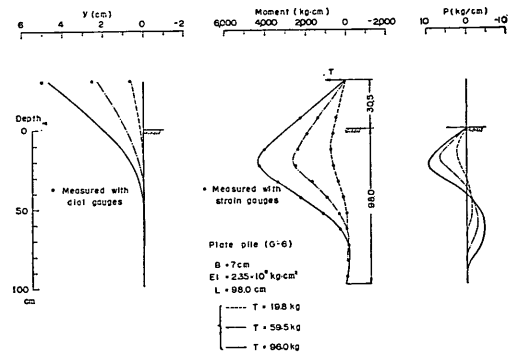


図-34 モーメント, P , および y の分布 (G-6)

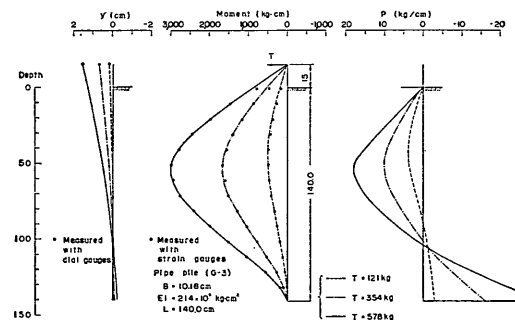


図-31 モーメント, P , および y の分布 (G-3)

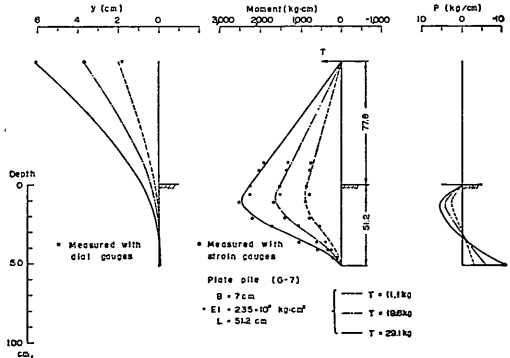


図-35 モーメント, P , および y の分布 (G-7)

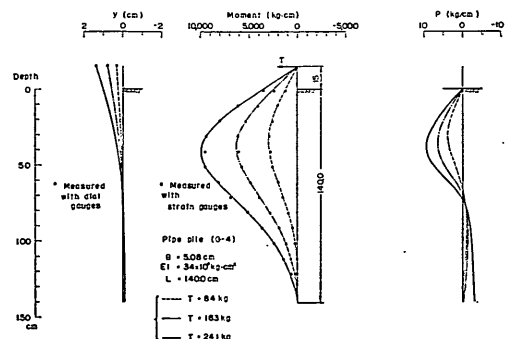


図-32 モーメント, P , および y の分布 (G-4)

5.2 p - y 関係

図-36から図-66までは、各深さにおける p/x

($=P/Bx$) と y との関係を対数目盛上に示したものである。図-36に示す A-1 杭についてみれば、各深さにおける p/x - y 曲線は、図中に太く示した勾配 0.5 の直線で代表される。このことは、 p と y の間に、4.1 で述べた $p=k \cdot x \cdot y^{0.5}$ という関係が成り立つことを示している。A-1 杭は長杭であるから、この関係が成り立つことは当然予想される所である。勾配 0.5 の代表直線上の $y=1$ cm に対応する p/x の値が、この実験における地盤常数 k の値であり、この場合 $65\text{g}\cdot\text{cm}^{-3.5}$ になることがわかる。

次に図-37に示す A-2 杭についてみると、 p/x - y 曲線は、やはり勾配 0.5 の直線によって代表されること、そして k 値は 60 になることがわかる。しかしながら、この図では、 p/x - y 曲線が右の方で代表直線からずれてくるところを見落してはならない。これは、さきに図-6 でみた地表面付近での反力の飽和現象があらわれている

のであって、A-3, B-1, B-2, B-3 などの諸杭にみられる所である。このような現象は、必ずしも短杭に限るものでなく、長杭にも起こり得るものであるが、とくに短杭の場合、杭の変位や傾斜が長杭よりもずっと大きくなるので、反力の飽和に達しやすいのである。

長杭の場合、このような飽和現象があまり顕著になると $p=k \cdot x \cdot y^{0.5}$ にもとづく相似則が適用できなくなり、著者らの方法による杭の挙動の予測がむずかしくなるわけだが、長杭では飽和現象による $p=k \cdot x \cdot y^{0.5}$ からのずれが問題になるほどの大きな変位が許されないのが普通なので、実用上、杭の挙動の予測に支障が起こる例はほとんどない。

さて、 y の大きい所で反力の飽和はあるが、 y の小さい所では、短杭でも p/x - y 関係は勾配 0.5 の直線で代表され、 $p=k \cdot x \cdot y^{0.5}$ が成り立つことがわかった。そして、求められた k の値が、その杭の周辺での地盤常数を示すことになる。表-1 中に示した k 値は、このようにして求めたものである。

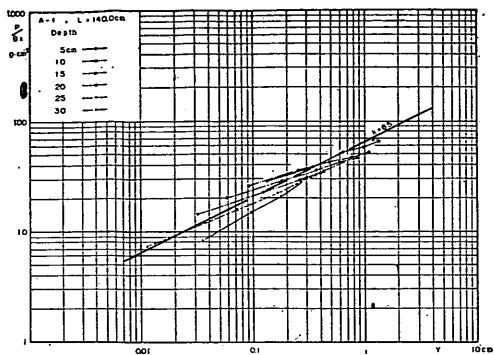


図-36 p/x と y の関係 (A-1)

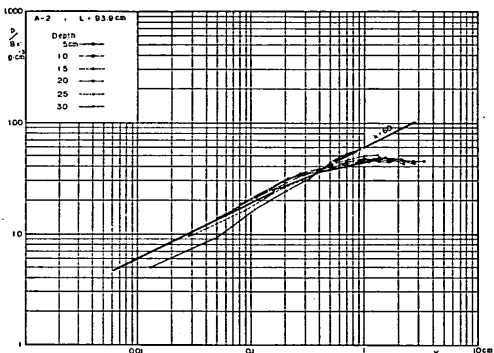


図-37 p/x と y の関係 (A-2)

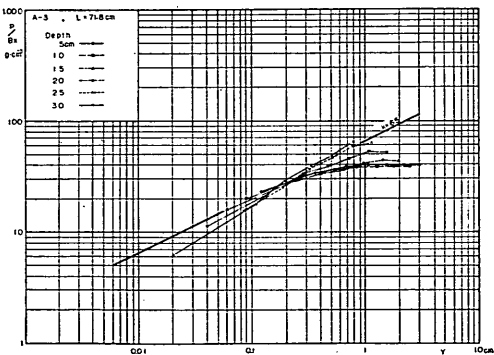


図-38 p/x と y の関係 (A-3)

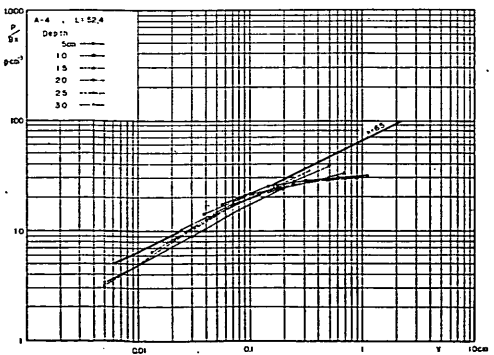


図-39 p/x と y の関係 (A-4)

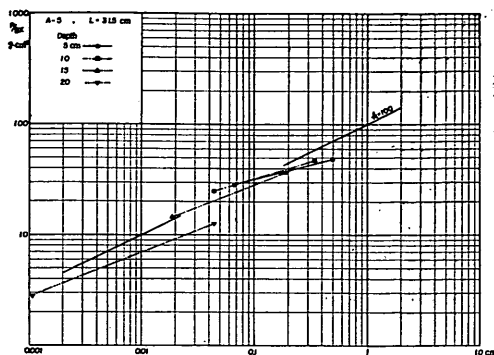


図-40 p/x と y の関係 (A-5)

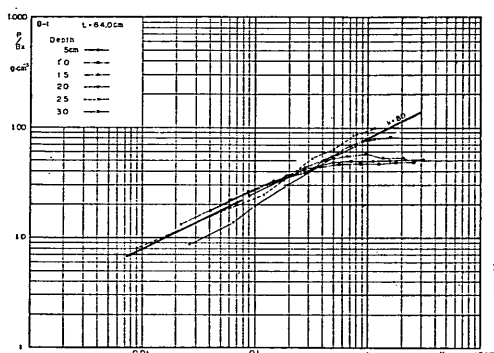


図-41 p/x と y の関係 (B-1)

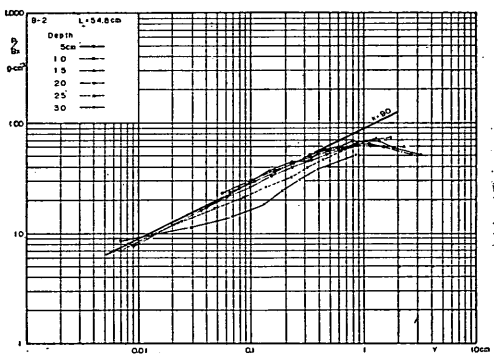


図-42 p/x と y の関係 (B-2)

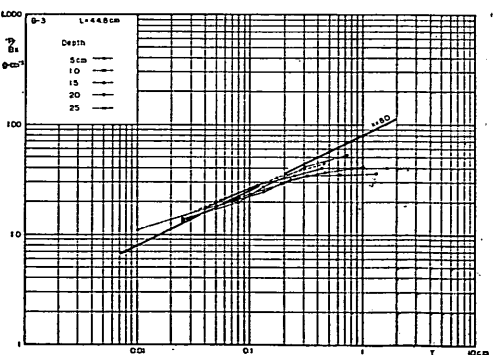


図-43 p/x と y の関係 (B-3)

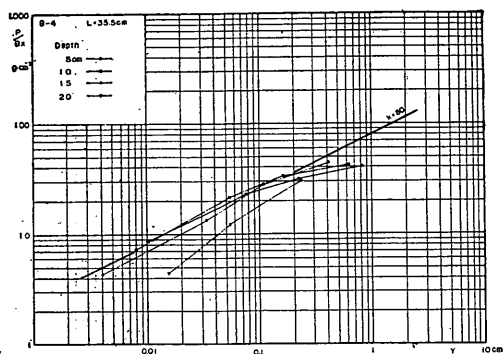


図-44 p/x と y の関係 (B-4)

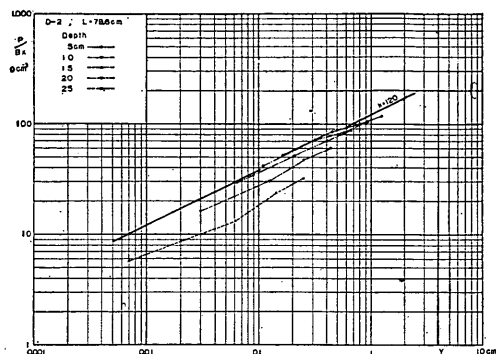


図-48 p/x と y の関係 (D-2)

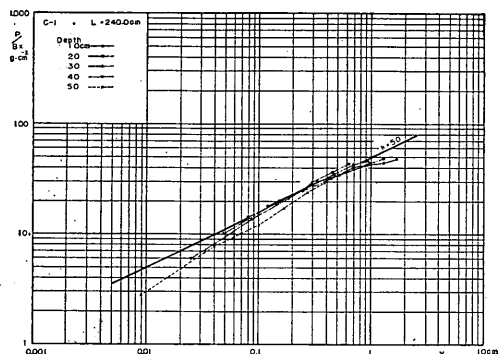


図-45 p/x と y の関係 (C-1)

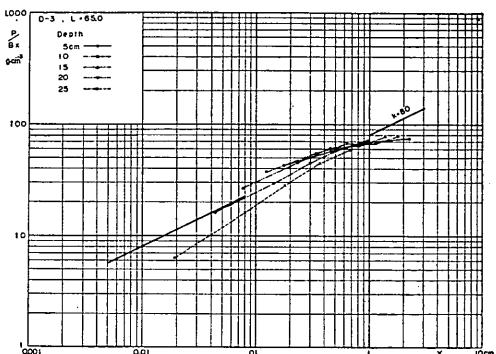


図-49 p/x と y の関係 (D-3)

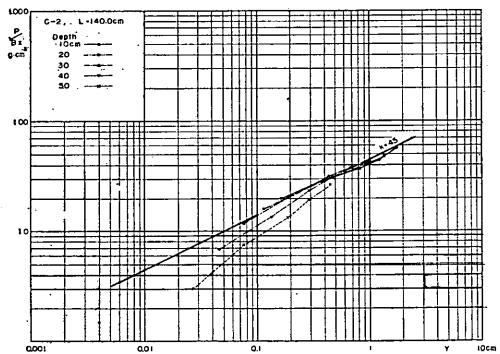


図-46 p/x と y の関係 (C-2)

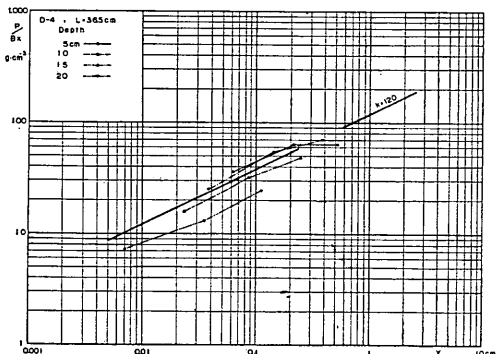


図-50 p/x と y の関係 (D-4)

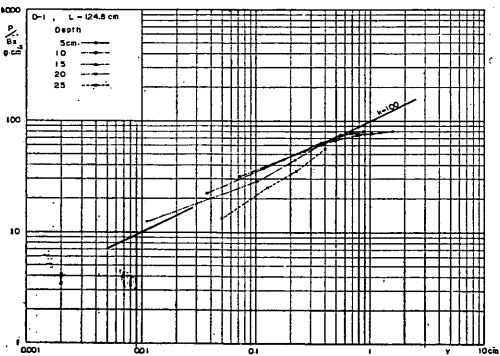


図-47 p/x と y の関係 (D-1)

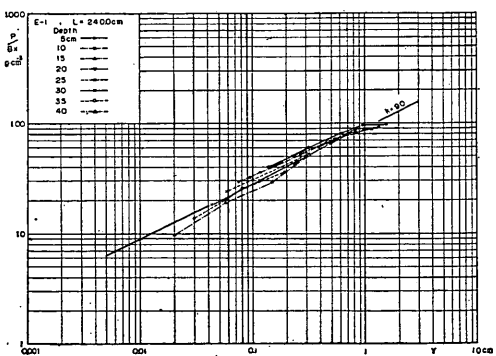


図-51 p/x と y の関係 (E-1)

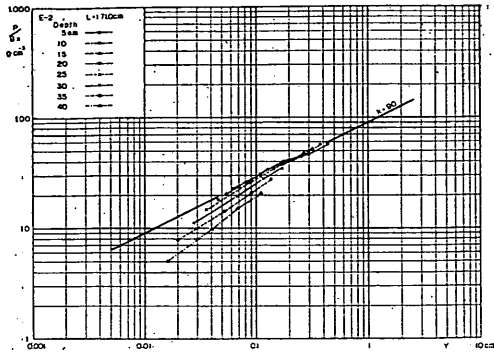


図-52 p/x と y の関係 (E-2)

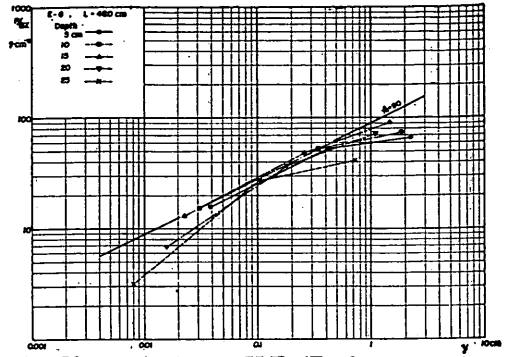


図-56 p/x と y の関係 (E-6)

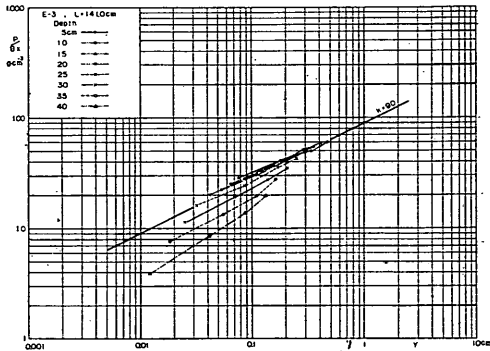


図-53 p/x と y の関係 (E-3)

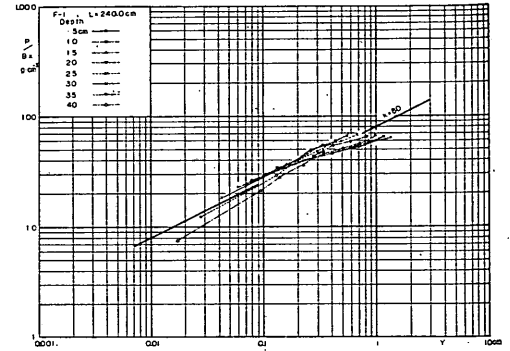


図-57 p/x と y の関係 (F-1)

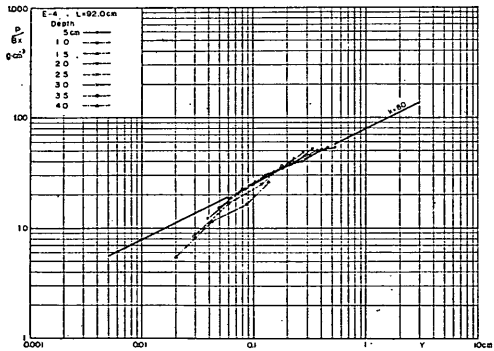


図-54 p/x と y の関係 (E-4)

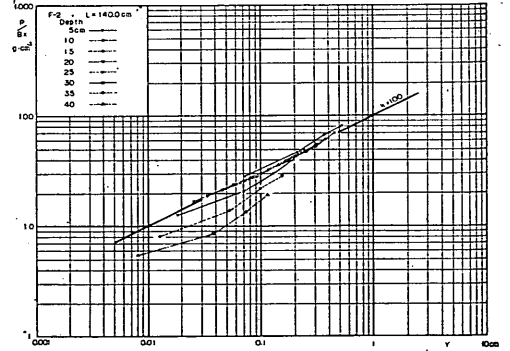


図-58 p/x と y の関係 (F-2)

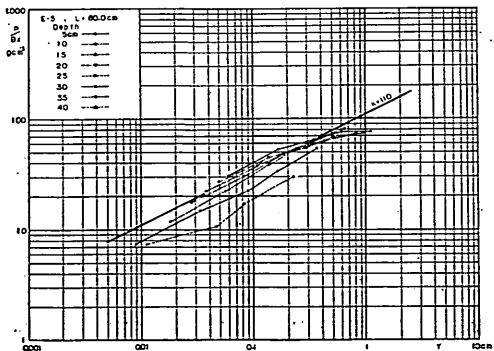


図-55 p/x と y の関係 (E-5)

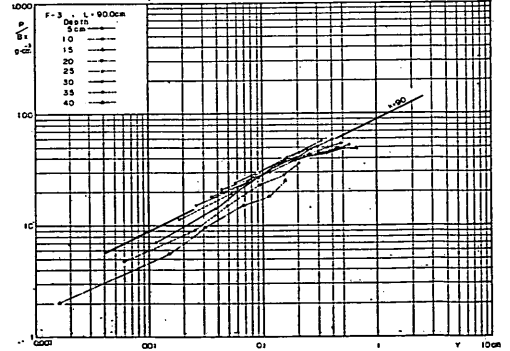


図-59 p/x と y の関係 (F-3)

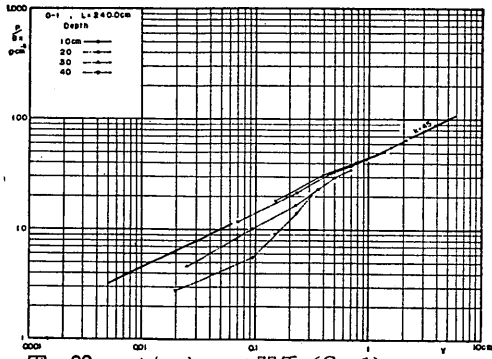


図-60 p/x と y の関係 (G-1)

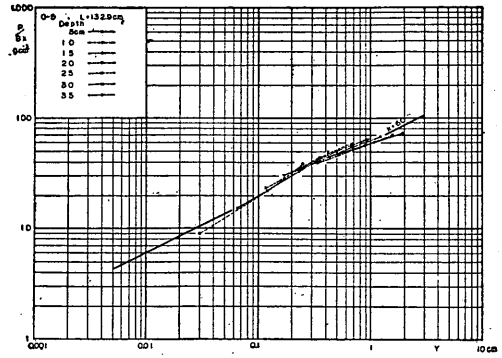


図-64 p/x と y の関係 (G-5)

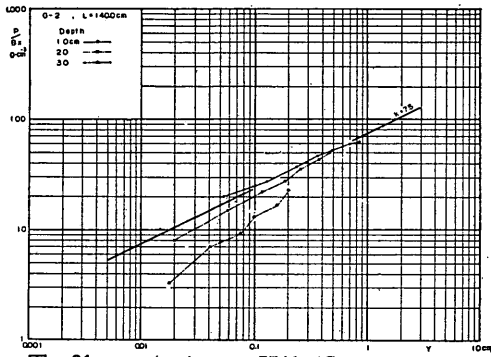


図-61 p/x と y の関係 (G-2)

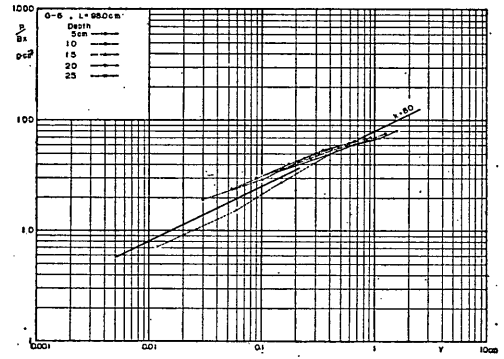


図-65 p/x と y の関係 (G-6)

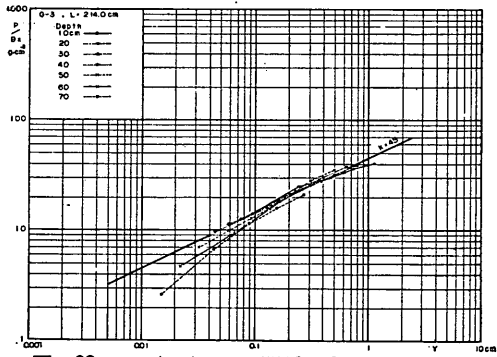


図-62 p/x と y の関係 (G-3)

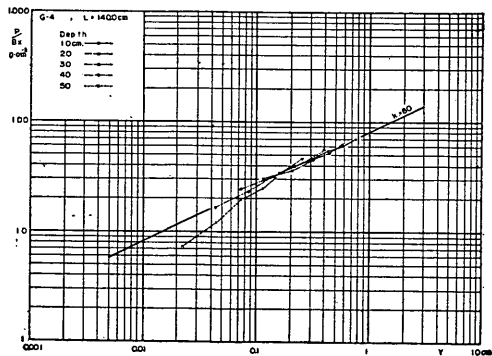


図-63 p/x と y の関係 (G-4)

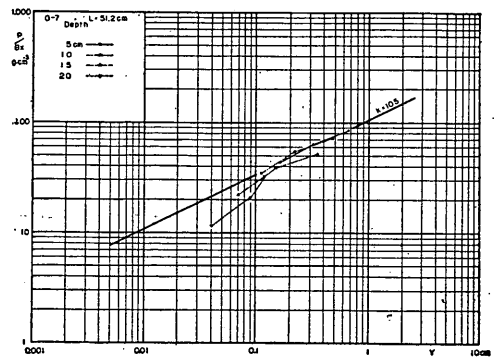


図-66 p/x と y の関係 (G-7)

5.3 根入れ長の影響

5.1において、曲げモーメント、反力、たわみの分布曲線を各杭ごとに示した。根入れ長が異なる杭では、分布曲線が異なった形状を示すのは勿論であるが、ある根入れ長を持つ杭でも荷重の増大と共に、分布曲線の形状が変わり、短杭的性格が強くなることが注目された。すなわち、ある杭が短杭である度合は、根入れ長だけでなく、荷重の大きさにもよるのである。

この節では、模型杭の挙動を、各群毎にまとめて比較検討してみることにしよう。各群中の杭は根入れ長が異なるだけで、他の条件は同じになっているから、根入れ長の影響がはっきり示されることになるはずである。もっとも、各杭について、地盤条件には多少の偏差があることは前にも述べた通りであるが、定性的な観察には何ら支障にならない程度である。

図-67はA群中の各杭が20kgの荷重をうけたときの分布曲線を重ね合わせてえがいたものである。もっとも根入れ長の大きい $L=140\text{cm}$ のA-1杭は完全な長杭である。曲げモーメント分布曲線を見ると、第1ゼロ点の深さ l_{m1} は約60cmであり、約100cmから以下は完全に地盤に固定された形をとっている。 $L=93.9\text{cm}$ のA-2杭も長杭と考えてよいであろう。しかし、 $L=71.8\text{cm}$ のA-3杭になると、長杭と短杭との過渡的な性格を示している。すなわち、曲げモーメント、反力、たわみの各分布曲線の形状は、全体的にみて、長杭であるA-1杭、A-2杭のものとはほとんど変わらないが、杭の下端部が地盤中に固定されているというには、やや根入れ長が不足している。 $L=52.4\text{cm}$ のA-4杭はもはや完全に短杭である。すなわち、曲げモーメント分布曲線に負の部分がなく、たわみ曲線では、杭の下端部にかなりの変位がみられる。とくに著しい特徴を示すのは反力分布曲線であり、杭の下端部に大きな反力が発生していることが注目される。 $L=31.5\text{cm}$ のA-5杭では、短杭の度合がますます強くなり、他の4本にくらべてはるかに大きいたわみと反力を生じている。

上記の観察から次のことがいえよう。すなわち、根入れ長 L が l_{m1} の約1.5倍をこえる場合には完全に長杭となり(A-1杭、A-2杭)、 L が $1.5 l_{m1}$ 以下になると短杭的性質を帯びてくる。しかし L が l_{m1} より大きいうちは、曲げモーメント分布、たわみ分布、反力分布が長杭のものとはあまり違わない(A-3杭)。 L が l_{m1} より小さくなるとはじめて短杭的性格が顕著になり、杭の下端に変位と大きな反力が発生するようになる(A-4杭)。そして、さらに L が小さくなると、杭は剛性杭の性質を示

すようになるのである(A-5杭)。

図-68はA群中の各杭の荷重一杭頭変位曲線($T-y_{top}$ 曲線)、荷重一地面傾斜曲線($T-i_0$ 曲線)および荷重一最大曲げモーメント曲線($T-M_{max}$ 曲線)をまとめてえがいたものである。 $T-y_{top}$ 曲線と $T-i_0$ 曲線は類似した傾向を示している。すなわち、荷重が小さいうちは各杭の曲線はほぼ一致しているが、荷重の増大と共に、根入れ長の小さい順に変位や傾斜が長杭の曲線からずれてくるのである。さきに調べた図-67は荷重20kgに対応するものであって、この場合にはA-1、A-2、A-3各杭の L は、その荷重に対する l_{m1} 値のよりも大きく、したがって、A-1、A-2、A-3各杭の挙動に差は少なかった。これを、図-68についてみると、 $T-y_{top}$ 曲線、 $T-i_0$ 曲線のいずれも、20kg付近ではほとんど一致していることがわかる。しかし、さらに荷重が大きくなるとA-2、A-3各杭の曲線はA-1杭の曲線からずれてくる。これは、 l_{m1} が荷重と共に大きくなるので、ある荷重に達すると、 L が相対的に l_{m1} より小さくなって、A-1杭の曲線からのずれがはじまるのである。A-4、A-5杭は根入れ長が非常に小さいので、初期の荷重段階においてすでにA-1杭の曲線からのずれがあらわれている。

一方、 $T-M_{max}$ 曲線を見ると、各杭の間の差があまり顕著でない。すなわち、杭の根入れ長が杭中の最大曲げモーメントの大きさにあたえる影響は、変位や傾斜に対する影響ほどは大きくないのである。

図-69、図-70はB群に対するものであるが、この群では全部の杭が最初から短杭になっている。図-69では、根入れ長の移り変わりによるたわみ曲線や反力曲線の変化がはっきり示されており、興味が深い。

C、D、E、Fの各群についてもA群について観察したと同様のことが見られる。結局、図-67から図-78までの観察の結論として次のことが云えよう。すなわち、 L が $1.5 l_{m1}$ をこえれば完全に長杭であり、 L が $1.0 l_{m1}$ より小さいときは完全な短杭になる。

$1.0 l_{m1} < L < 1.5 l_{m1}$ の間は過渡的な領域であって、杭の挙動としては長杭の場合と大差がないが、杭の下端部が地盤中に固定されていないので長杭とすることはできず、やはり短杭として取り扱うべきである。

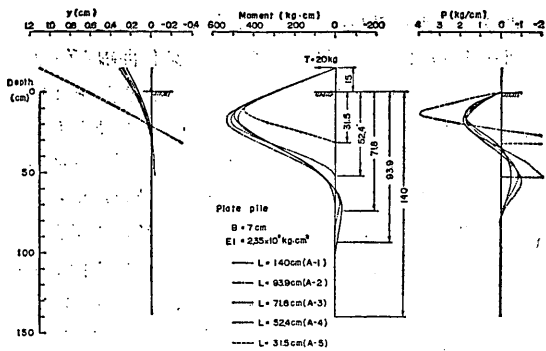


図-67 根入れ長が分布曲線に及ぼす影響 (A-群)

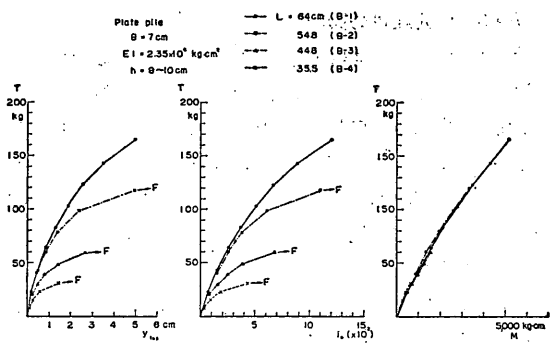


図-70 根入れ長が荷重-変位曲線などに及ぼす影響 (B-群)

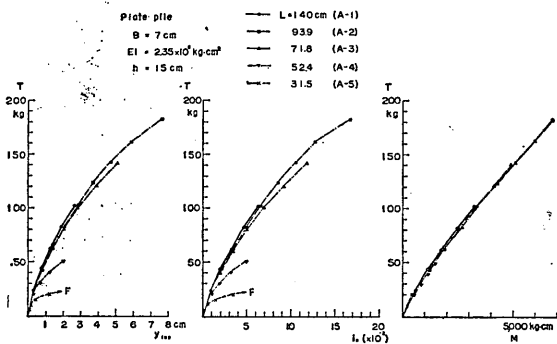


図-68 根入れ長が荷重-変位曲線などに及ぼす影響 (A-群)

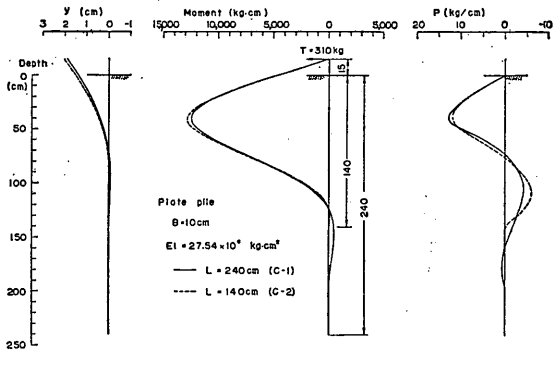


図-71 根入れ長が分布曲線に及ぼす影響 (C-群)

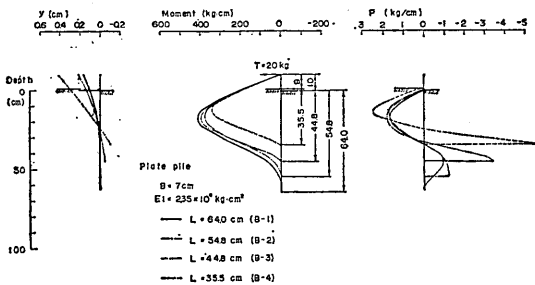


図-69 根入れ長が分布曲線に及ぼす影響 (B-群)

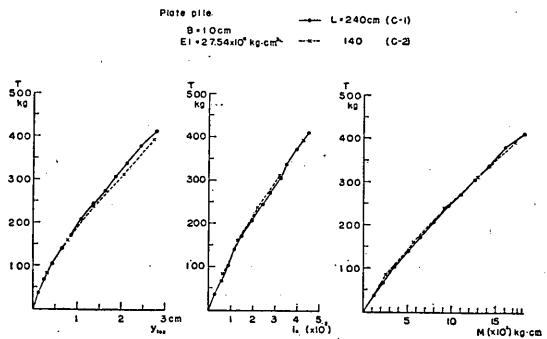


図-72 根入れ長が荷重-変位曲線などに及ぼす影響 (C-群)

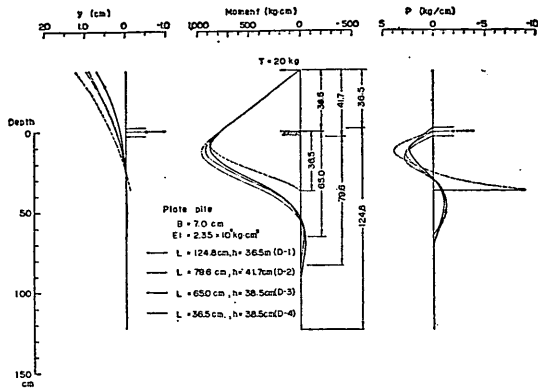


図-73 根入れ長が分布曲線に及ぼす影響 (D-群)

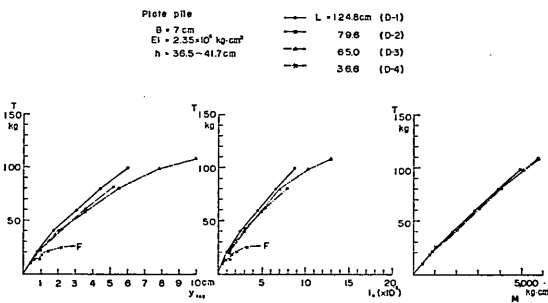


図-74 根入れ長が荷重一変位曲線などに及ぼす影響 (D-群)

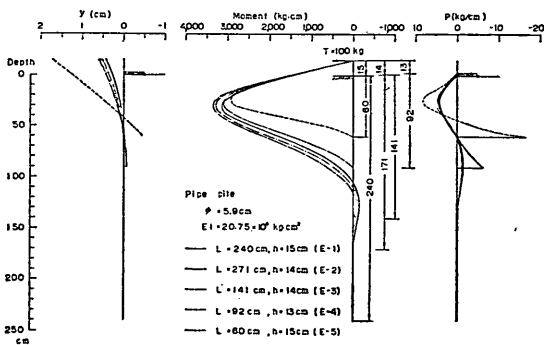


図-75 根入れ長が分布曲線に及ぼす影響 (E-群)

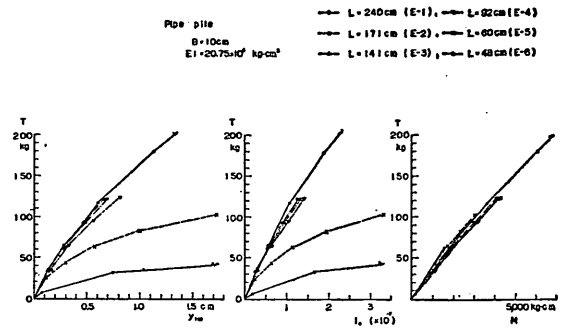


図-76 根入れ長が荷重一変位曲線などに及ぼす影響 (E-群)

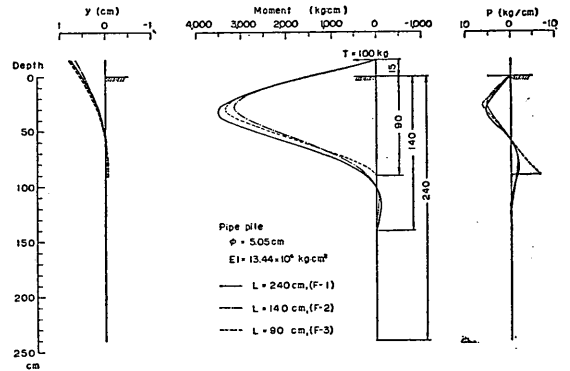


図-77 根入れ長が分布曲線に及ぼす影響 (F-群)

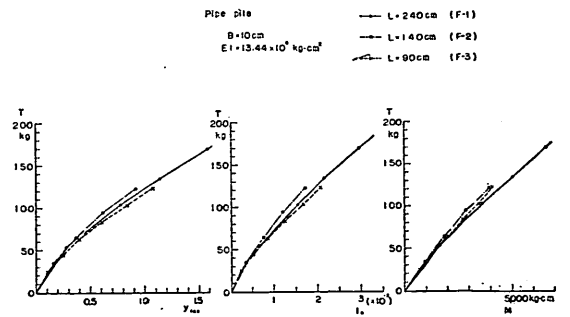


図-78 根入れ長が荷重一変位曲線などに及ぼす影響 (F-群)

6. 短杭の挙動に関する考察

6.1 根入れ比による表示

5.3において根入れ長の影響を定性的に考察したが、この節ではこれを定量的に取り扱ってみたい。

根入れ長 L と l_{m1} の比を根入れ比とよび、 E_r なる符号であらわすことにしよう。

$$E_r = L/l_{m1} \dots\dots\dots (4)$$

いうまでもないことであるが、ある短杭の E_r を計算するとき用いる l_{m1} は、その短杭の実際の曲げモーメント第1ゼロ点の深さではなく、その短杭と同じ条件の長杭の曲げモーメント第1ゼロ点の深さである。

次に、短杭の挙動を定量的に表示するため、長杭の挙動との比をとることにしよう。杭の設計に意味の深い量として、杭頭変位 y_{top} 、地表面における杭の傾斜 i_0 、および杭中の最大曲げモーメント M_{max} の3者をとることにし、次のように、杭頭変位比、地表面傾斜比および最大曲げモーメント比を定義する。

$$\left. \begin{aligned} (y_{top})_r &= (y_{top})_{short} / (y_{top})_{long} \\ (i_0)_r &= (i_0)_{short} / (i_0)_{long} \\ (M_{max})_r &= (M_{max})_{short} / (M_{max})_{long} \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

ここに、

- $(y_{top})_r$: 杭頭変位比
- $(i_0)_r$: 地表面傾斜比
- $(M_{max})_r$: 最大曲げモーメント比
- $(y_{top})_{short}$: 対象とする短杭のある荷重における杭頭変位
- $(i_0)_{short}$: 対象とする短杭のある荷重における地表面での傾斜
- $(M_{max})_{short}$: 対象とする短杭のある荷重における最大曲げモーメント
- $(y_{top})_{long}$: 対象とする短杭と同じ条件をもつ長杭の、同一荷重における杭頭変位
- $(i_0)_{long}$: 対象とする短杭と同じ条件をもつ長杭の、同一荷重における地表面での傾斜
- $(M_{max})_{long}$: 対象とする短杭と同じ条件をもつ長杭の、同一荷重における最大曲げモーメント

各模型杭の $(y_{top})_{short}$ 、 $(i_0)_{short}$ 、および $(M_{max})_{short}$ は実験によって、荷重段階毎に求められている。一方、これに対応する長杭の $(y_{top})_{long}$ 、 $(i_0)_{long}$ 、および $(M_{max})_{long}$ は、さきに4.2で説明した方法で推定す

ることができる(付録-2参照)。そこで、これらと比較すれば $(y_{top})_r$ 、 $(i_0)_r$ 、および $(M_{max})_r$ を求めることができる。

図-79は、短杭と長杭の y_{top} を対数目盛上で比較したものであり、図-80および図-81は同じく i_0 および M_{max} を比較したものである。また、図-82は短杭の L と長杭の l_{m1} を比較したものである。ただし、図示を簡明にするため、短杭の測定値も、それに対応する長杭の推定値もすべて一定の基準杭 ($EI=27.5 \times 10^6 \text{ kg}\cdot\text{cm}^2$, $h=15\text{cm}$, $B=10\text{cm}$, $k=50\text{g}\cdot\text{cm}^{-3.5}$) に換算したものを示した。したがって、長杭の推定値としては基準曲線そのものをとればよいことになる。これらの図では、実験に用いた33本の模型杭のうち、長杭や、これに近いものは基準曲線に一致してしまうので、図示することを省き、残りの18本だけを図示した。

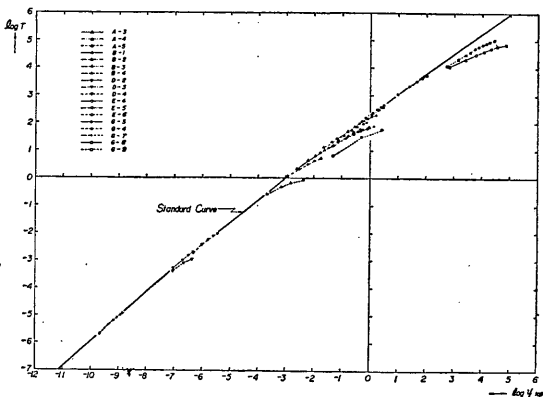


図-79 長杭と短杭の y_{top} の比較

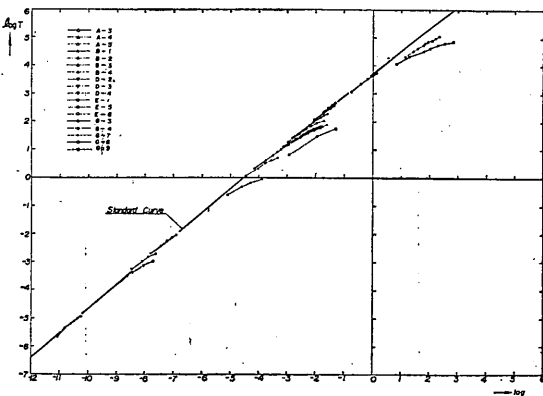


図-80 長杭と短杭の i_0 の比較

図-79、図-80をみると、短杭の y_{top} や i_o は、根入れ長が相対的に小さいものほど、基準曲線からのずれが大きくなっていることがよくわかる。しかし一方、 M_{max} については、基準曲線からのずれがきわめて少ないことが、図-81に示されている。

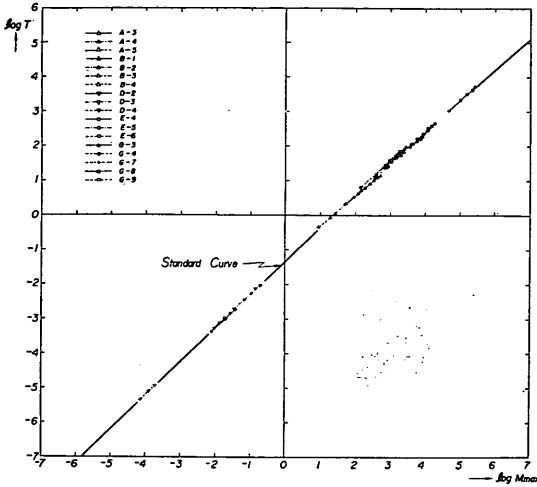


図-81 長杭と短杭の M_{max} の比較

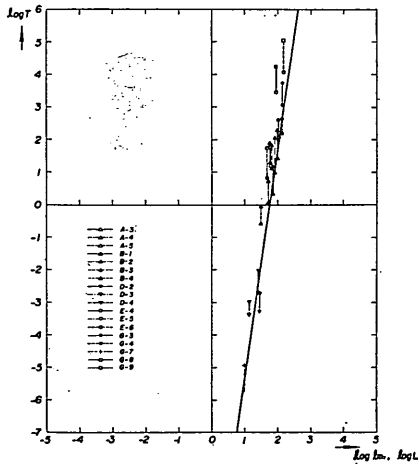


図-82 ζ_{m1} と L の比較

さて、図-79、図-80、図-81から、各杭の $(y_{top})_r$ 、 $(i_o)_r$ 、 $(M_{max})_r$ が荷重毎に計算でき、また、図-82から各杭の E_r が荷重毎に計算できる。これらを組み合わせれば、各杭について、 $E_r-(y_{top})_r$ 、 $E_r-(i_o)_r$ 、 $E_r-(M_{max})_r$ の関係を求めることができる。図-83は33本の

の模型杭全部について求めた $E_r-(y_{top})_r$ をまとめて対数目盛上に図示したものである。1本の杭についてみれば、荷重の増大と共に E_r が小さくなるから、 $E_r-(y_{top})_r$ 曲線は右から左へと進行する。これにつれて $(y_{top})_r$ も増加する傾向があるが、 E_r が1より大きいときには、この増加はさきほど大きくなく、全体的にみれば、 $(y_{top})_r$ の値はほぼ1に近い。しかし、 E_r が1より小さくなると、 $(y_{top})_r$ の増加は急に顕著になる。したがって、 $E_r=1$ という値が1つの遷移点であることが明らかである。なお、 $E_r-(y_{top})_r$ 曲線の上端部で上向き矢印がついているのは、そこで杭の転倒が起こったことを示している。 $E_r-(y_{top})_r$ 曲線と全く同じ傾向が、図-84に示す $E_r-(i_o)_r$ 曲線においてもみられる。しかし、図-85の $E_r-(M_{max})_r$ では様子がやや異なり、 E_r が1より小さくなった所で $(M_{max})_r$ が多少とも増加する傾向がみられ、さらに E_r が減少すると、今度は $(M_{max})_r$ が減少に向かうことがわかる。しかし、全体的にみて、 E_r の変化による $(M_{max})_r$ の変化はかなり小さい。

要するに、図-83、図-84、図-85は、すでに5・3で定性的に観察した事実を定量的に表示したものに他ならないが、とくに $E_r=1$ という値がはっきりした遷移点であることを示している点が重要である。

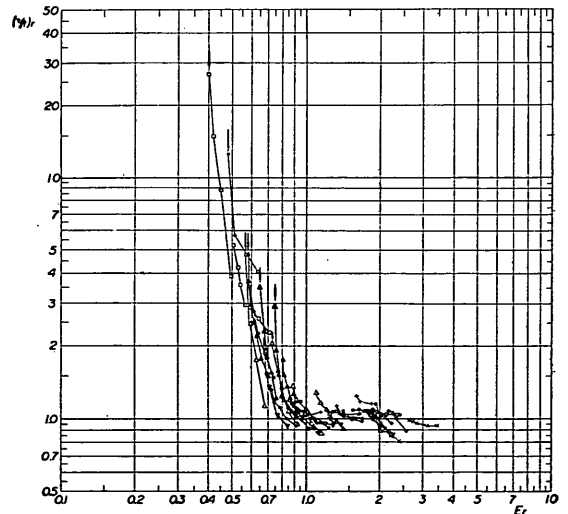


図-83 E_r と $(y_{top})_r$ の関係 (実験値)

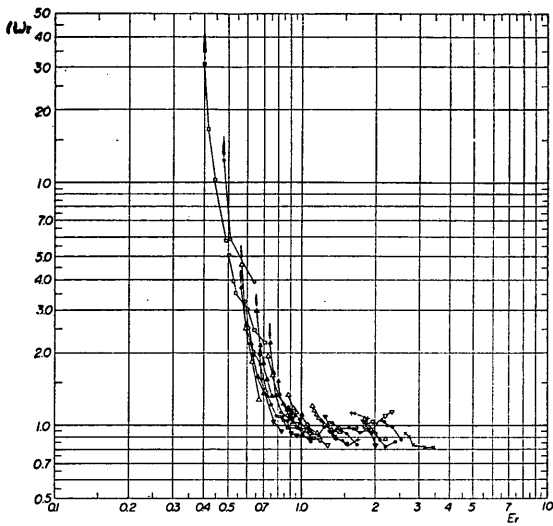


図-84 E_r と $(i_0)_r$ の関係 (実験値)

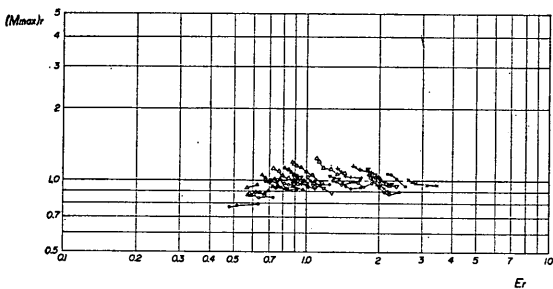


図-85 E_r と $(M_{max})_r$ の関係 (実験値)

6・2 短杭の挙動の推定

前節において、ある杭の E_r が 1 より大きい場合には、その杭の挙動は、長杭の挙動と異なることを示した。この節では、 E_r が 1 より小さくなった場合の杭の挙動をどのように推定すればよいかという問題について考察する。

今、杭の E_r が非常に小さくなった場合を考えてみると、その杭はほとんど剛性杭として働くであろう。すなわち、杭頭に横方向力が加わっても、杭の曲がりは無視できる程度であり、杭は剛体として回転運動をするはずである。

図-5 から図-35までに示した、各杭のたわみ曲線を調べて、剛性杭に近いものを選び出してみると、A-5、B-4、E-5、E-6 の各杭である。さらに、たわみ曲線は得られていないが、G-8、G-9 の 2 本も EI の大きさから判断して剛性杭とみなされる。さて、これらの杭の EI がかりに 10 倍になったと考えてみよう。もともと

と、杭の曲がりは無視できる程度であるから、 EI が 10 倍になっても杭の挙動にはほとんど変化がないはずである。そこで実際の 10 倍の EI を使い、 y_{top} 、 i_0 、 M_{max} はもとのままとして、 E_r 、 $(y_{top})_r$ 、 $(i_0)_r$ 、 $(M_{max})_r$ を計算してみる。ついで、 EI を 100 倍、1000 倍と仮定して同様の計算を行ない、えられた E_r — $(y_{top})_r$ 、 E_r — $(i_0)_r$ 、 E_r — $(M_{max})_r$ 曲線をもとの EI に対する曲線と共に図-86、図-87、図-88の上に図示した。これらのプロットは剛性杭の挙動をあらわしているものと考えてよい。勿論、ここで剛性杭というのは EI 値が無量大という意味でなく、あるきまった EI 値をもっているが、曲がりが無視できるため、剛体とみなしてよいような運動をする杭という意味である。ここに採用した 6 本の杭の E_r を調べてみると次の通りである。

- A-1 杭 0.68→0.57, B-4 杭 0.70→0.57
- E-5 杭 0.73→0.58, E-6 杭 0.66→0.48
- G-8 杭 0.56→0.40, G-9 杭 0.70→0.40

これらの値から判断して、 E_r が 0.6 以下となれば、剛性杭とみなし得るようである。0.6 < E_r < 1.0 の間は、長杭的挙動から剛性杭的挙動への過渡領域である。この過渡領域にある杭の挙動を示すため、A-4、B-3、

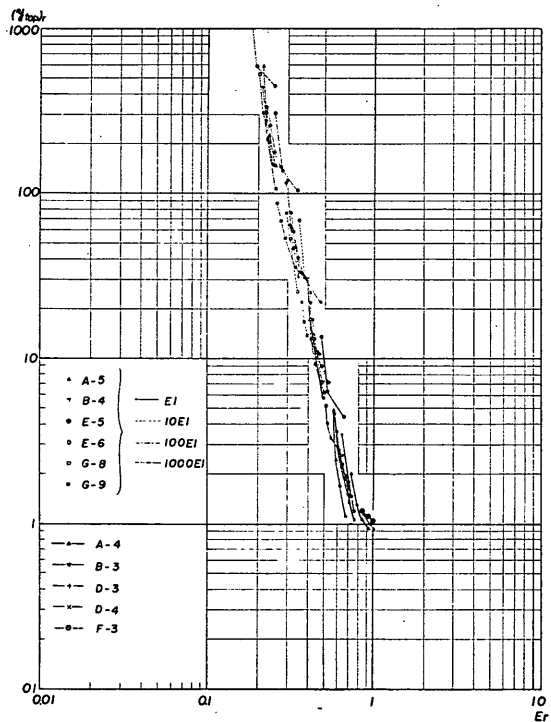


図-86 E_r と $(y_{top})_r$ の関係 (剛性杭)

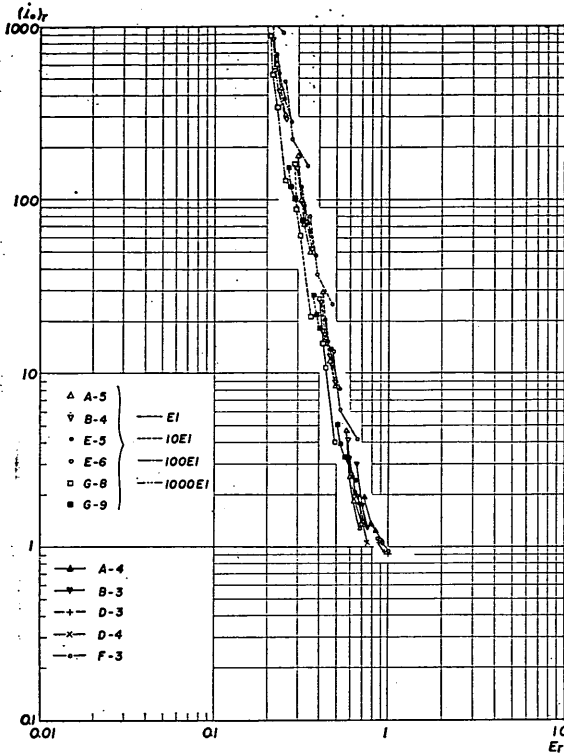


図-87 E_r と $(i_o)_r$ の関係 (剛性杭)

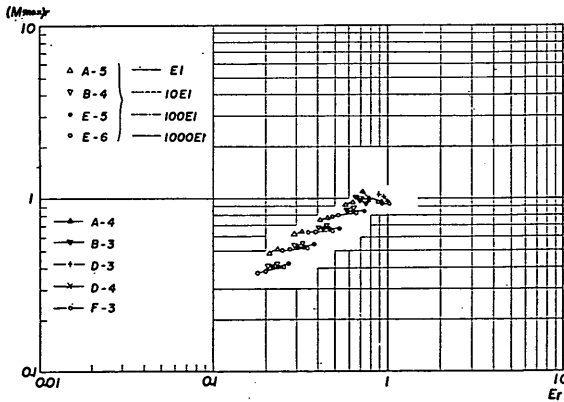


図-88 E_r と $(M_{max})_r$ の関係 (剛性杭)

D-3, D-4, F-3 の 5 本を選び、それらの挙動を、剛性杭の挙動と合わせて、図-86, 図-87, 図-88 に記入した。これによって、 E_r が 1 より小さい場合の杭の挙動を連続的に示すグラフが完成したことになる。

図-86, 図-87, 図-88 を実際の利用に便利な形にかきなおしたのが、図-89 である。この図によって短杭の

挙動が簡単に推定できることになるが、具体的な手続きについては付録-2 において例をあげて説明する。

なお、 E_r が 0.6 以下になると剛性杭と見なされるから、杭の挙動は実質的には E_r に無関係になる。この点を説明しておこう。今、 E_r が 0.52 の杭 S_1 があつたとする。 $E_r=0.52$ に対応する $(y_{top})_r$ は、図-89-A により、6 であることがわかる。次に、この杭と根入れが同一で、10 倍の EI をもつ杭 S_2 を考えてみると、 l_{m1} が S_1 杭に対するよりも大きいので、相対的に E_r の値が下がり、0.38 となる。 $E_r=0.38$ に対応する $(y_{top})_r$ は、図-89-A により 22 であり、 S_1 杭に対する値より大きい。しかし、 S_2 に対応する長杭 L_2 は、当然、 S_1 杭に対応する長杭 L_1 の 10 倍の EI をもっている。したがって L_2 杭の y_{top} は、 L_1 杭の y_{top} より小さく、その比は丁度 $6/22$ に等しくなる。 $(y_{top})_{short} = (y_{top})_{long} \times (y_{top})_r$ であるから、結局 S_1 杭の y_{top} と S_2 杭の y_{top} は同じ値になる。

6.3 遷移点

根入れ長の変化によって、長杭から短杭へと移り変わる様子を、根入れ比 E_r によって表示してみよう。

E_r	← 0.6	1.0	1.5	→
L		$0.6l_{m1}$	$1.0l_{m1}$	$1.5l_{m1}$
剛性杭	第2過渡領域		第1過渡領域	長杭
	短杭		杭	↓
				有効長

一般に横方向力をうける杭の挙動は、 $E_r=1.5, 1.0, 0.6$ を遷移点とし、4 つの領域にわかれることになる。 $E_r=1.5$ に対応する長さ、すなわち $1.5l_{m1}$ が、有効長とよんでいる量であり、これがすなわち、ある杭を長杭として働かせるための必要最小根入れ長である。4 つの領域の特徴をまとめてみると次のようになる。

長杭：杭の下端部が地盤中に固定された状態となっており、杭の挙動に対し、根入れ長の大小は無関係。

第1過渡領域：杭の下端における固定状態は不十分であるが、杭の挙動は長杭の場合と変わらない。

第2過渡領域：変位や傾斜が長杭よりも著しく大きくなる。杭の曲がりはかなり大きい。

剛性杭：杭の曲がりが無視できる程度で杭の動きは回転運動に近い。

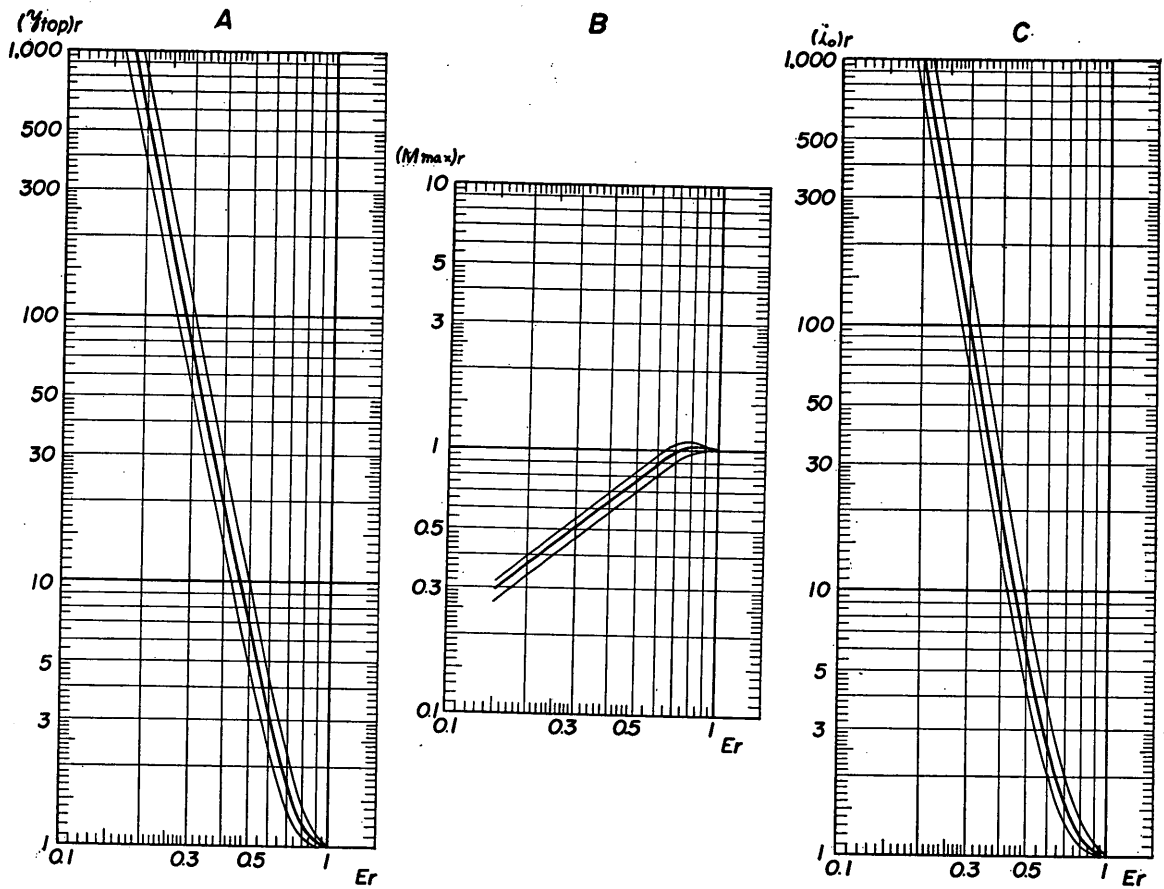


図-89 短杭の挙動の図表

たびたび注意するが、ある根入れ長をもった1つの杭であっても、それがどの領域に属するかということは、必ずしも固定したものでなく、荷重の大きさによって変わってくることを忘れてはならない。

短杭は長杭にくらべて、変位や傾斜が大きくなるのであるが、また、繰り返し荷重に対しても不利が大きい。

図-90は同一荷重を繰り返した場合の杭頭変位量(第1回荷重のときを1とする)を回数 n に対してプロットしたものである。 E_r が1より小さい杭では、杭頭変位の増加が著しく、とくに E_r が0.6以下の場合には、増加の割合が減少の傾向を示さないことが注目される。

$1.0 > E_r > 1.5$ の間の杭は、長杭と大差はないが、やや

増加が大ききようである。図-91は各サイクル毎に、杭頭変位全体に対する残留変位の割合をプロットしたものである。 E_r の大小にかかわらず、回数の増加と共に残留変位の割合は減少するが、同一回数で比較すると、 E_r が1より小さい杭の値は、長杭の値よりずっと大きくなることわかる。

一般に、杭に対して横方向荷重を繰り返す場合、周囲の地盤の挙動は、回数と共に弾性的になる傾向があるが、短杭の場合には、地盤が弾性的挙動に近づきにくく、塑性的変形が進行するのである。短杭をもって、横方向力を支えようとする場合、この点にも十分注意を要する必要がある。

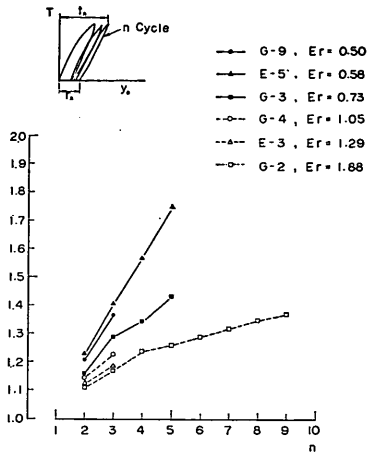


図-90 載荷回数と杭頭変位量

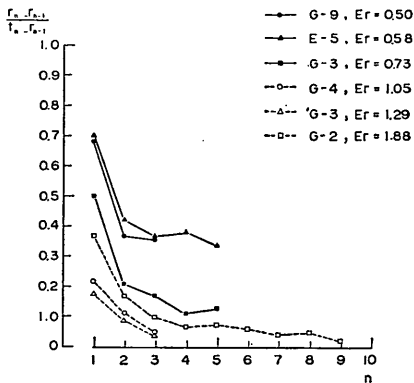


図-91 載荷回数と残留変位量

表-2 荷重段階

	途中荷重	直前荷重	最終荷重
A-5	10.7 kg	20.3 kg	直前荷重 + 5 kg
B-2	89.1 kg	118.5 kg	直前荷重 + 5 kg
B-3	39.5 kg	59.5 kg	直前荷重 + 5 kg
B-4	19.5 kg	31.0 kg	直前荷重 + 2 kg
D-4	18.3 kg	25.2 kg	直前荷重 + 5 kg
E-6	33.2 kg	61.6 kg	直前荷重 + 30 kg
G-8	/	245.9 kg	直前荷重 + 20 kg

図-92は G-8を除く各杭の、直前荷重(≒転倒荷重)に対する地盤反力分布曲線を、重ね合わせて図示したものである。また、図-93は、直前荷重のときの地盤反力分布と比較するため、各杭の荷重段階のうち適当なもの(表-2に途中荷重として示した)を選んで、地盤反力分布曲線をえがいたものである。(図-92、図-93では、図-5から図-35までとは異なり、単位面積あたりの地盤反力を示してある。)

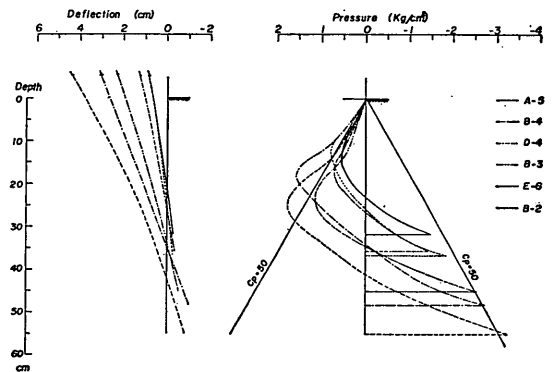


図-92 直前荷重に対する地盤反力分布

7. 短杭の転倒に関する考察

7.1 転倒時の地盤反力分布

今回の実験に用いた33本の模型杭のうち、転倒を生じたものは、A-5、B-2、B-3、B-4、D-4、E-6 およびG-8(曲げヒズミ測定せず)の7本である。荷重は段階的にかけているので、ある最終荷重で転倒が生じたとしても、それが正確に転倒荷重であるとはいえない。転倒荷重は、最終荷重とその直前の荷重との中間にあるはずである。しかし、次に示すように1段階の荷重増加量は最終荷重の大きさにくらべて比較的小さいから、直前の荷重を転倒荷重とみなして考察を行なっても、大きな間違いは起こらないであろう。

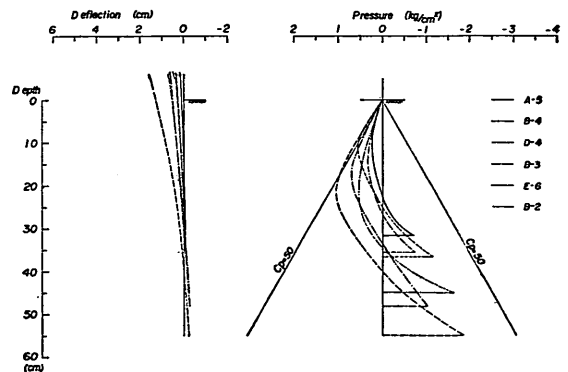


図-93 途中荷重に対する地盤反力分布

転倒直前の反力分布を示す図-92をみると、ほとんどの杭の地盤反力曲線が地表面からある深さまで飽和状態を示している。すなわち、その部分は塑性平衡の状態に達していると考えられる。B-2, B-3, E-6 杭のように比較的根入れ長の大きい杭の場合、飽和部分の下で地盤反力が急増している所がある。図-92の左側のたわみ曲線を見ると、これらの杭は変位や傾斜が特に大きいことがわかる。このような場合、杭の動きのため、塑性領域の下の部分の土は、強く拘束されたまま圧縮されることになり、大きな地盤反力を発生したものと考えられる。図-92の地盤反力曲線の中に直線で示したのは受働土圧係数 $C_p=50$ をあらわす線であり、各杭の飽和地盤反力を平均的に代表するものとしてえがいた。

図-93は、直前荷重（≒転倒荷重）の50～80%にあたる荷重のときの地盤反力分布曲線であるが、半数ほどの杭では、地表面近くで反力が飽和に近づいていることがわかる。しかし、どの杭の変位もまだ小さく、図-92でみたような飽和領域の下での反力の急増現象はみられない。

図-92, 図-93から次のようなことがわかる。すなわち、短杭に加わる荷重が大きくなるにつれて、地盤反力は地表面から次第に飽和状態に達して行く。その際、変位が非常に大きい杭では、飽和領域の下に地盤反力が急増する現象がみられることがある。一方、杭下端の地盤反力に着目すると、これは荷重の増大と共に急激に大きくなり、その値が、飽和地盤反力をあらわす $C_p=50$ の線に達したときに杭の転倒が起こるものようである。

7・2 地盤反力分布曲線の表示方法

短杭の転倒荷重の推定方法をみいだすためには、まず、転倒時の地盤反力分布曲線を、数式的取り扱いの可能な、簡単な曲線をもって表示することからはじめねばならない。

どのような曲線が適当であるかを、B-2 杭を例にとって調べてみよう。図-94の(1)(2)(3)において太い実線で示したのは直前荷重（≒転倒荷重）に対するB-2杭の地盤反力分布曲線である。この杭では飽和領域の下に地盤反力の急増部分があるが、この現象にはあまりこだわらないことにして、表示方法を検討することにする。(1)の方法は、地盤反力分布を放物線におきかえる方法であり、エンゲル(Engel)一物部の方法として知られている⁽⁹⁾。計算がもっとも簡単であるが、地表面近くでの地盤反力の飽和現象を表現できない。しかし、受働土圧線が曲線を切らないような場合は、非常によい近似をあたえる。

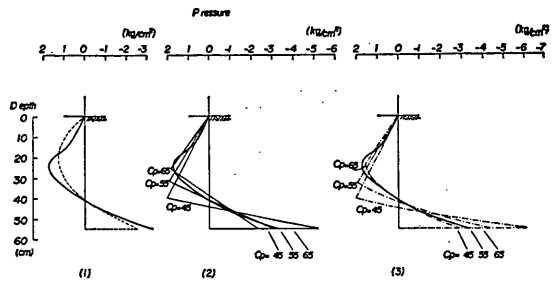


図-94 地盤反力分布の表示方法

(2)の方法は、2本の直線で表示する方法であって、テルツァギ(Terzaghi)によって提案された⁽¹⁰⁾。地表面からある深さまで受働土圧線に沿って下がり、そこから第2の直線に移るのである。この方法は、(1)にくらべると計算はやや複雑であるが、十分実用的であり、近似の程度も悪くない。しかし受働土圧線が(1)の放物線を切らないような場合には、杭前面の最大地盤反力付近の近似が(1)より劣る。

(3)の方法は、(1)と(2)を組み合わせた形であり、受働土圧線に沿って下がり、その後、放物線に移るのである。この方法は近似の程度がもっともよい。受働土圧線が(1)の放物線を切らないときには、(3)の曲線は(1)と全く同じ曲線になるので、(2)にみられたような欠点はない。ただし、計算は、大変面倒であるから、近似はよくても、実用的価値は(2)に劣る。

(1), (2), (3)の3種の曲線を計算するには、いずれも、力とモーメントの釣合条件を利用する。計算の方法は付録-1で示すことにし、ここでは省略する。

図-94に示したように、(1)の場合は受働土圧係数に無関係に一義的に曲線がきまるが、(2)と(3)では受働土圧係数のとり方によって、曲線が違ってくることが明らかである。

図-95から図-101までは、(1), (2), (3)の各方法により直前荷重（≒転倒荷重）に対する各杭の地盤反力分布を表示したものである。この場合、(2), (3)の方法ではそれぞれもっとも近似がよくなるように、受働土圧係数値を独立に選んだ。(2)と(3)による曲線は比較的实际の分布に近い形をとるが、(1)の放物線はやや実際の分布とはなれる傾向がある。すなわち、地表面近くで地盤反力が大きくなり過ぎ、反面、杭下端での地盤反力が小さくなり過ぎるのである。(2)と(3)においては、受働土圧係数値を独立に選んでいるが、一般に、(2)に対する受働土圧係数値より、(3)に対する受働土圧係数値の方が5程度高い。すなわち、(2)の方法を用いるときには、

(3)の方法にくらべて受働土圧係数を1割程度小さめに
見積る必要がある。

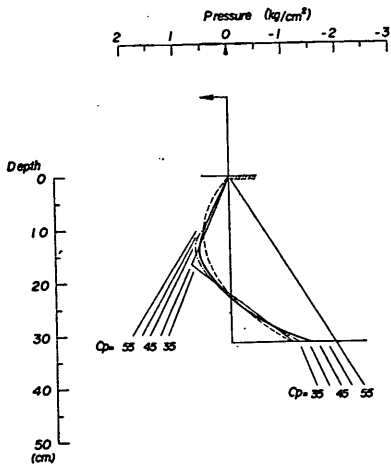


図-95 A-1 杭の地盤反力分布

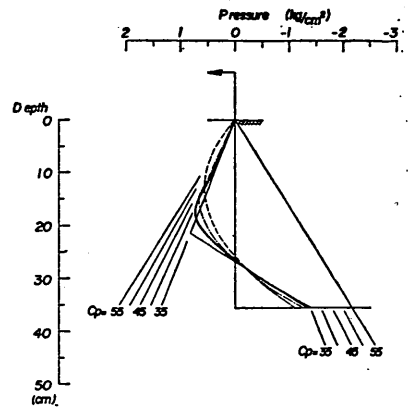


図-98 B-4 杭の地盤反力分布

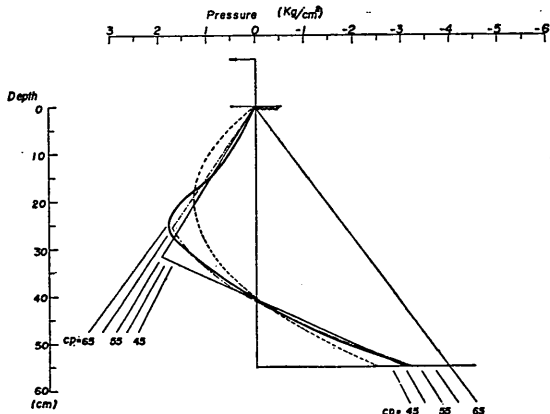


図-96 B-2 杭の地盤反力分布

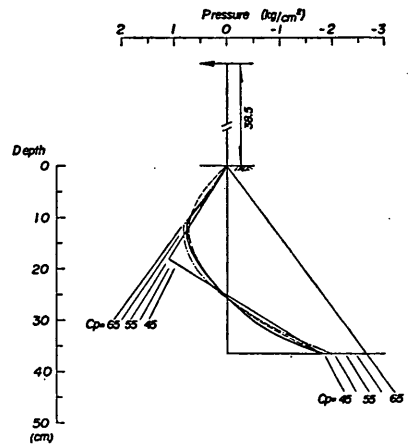


図-99 D-4 杭の地盤反力分布

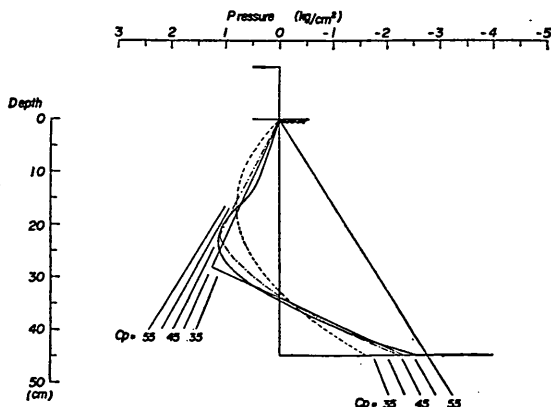


図-97 B-3 杭の地盤反力分布

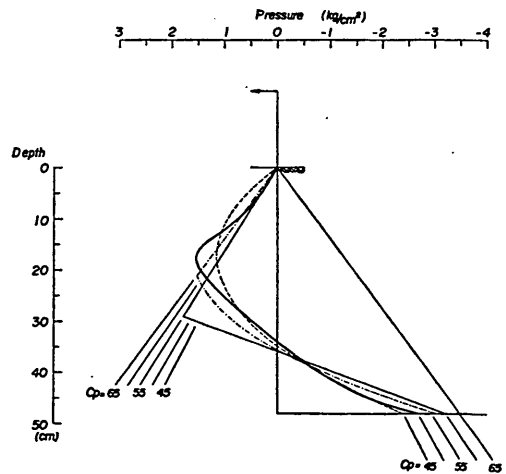


図-100 E-6 杭の地盤反力分布

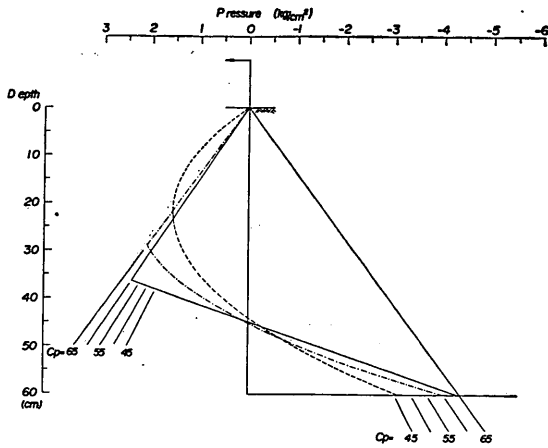


図-101 G-8 杭の地盤反力分布

7.3 破壊規準

地盤反力分布がどのようになったときに、短杭の転倒が生ずるかという破壊規準の問題を考察しよう。考え方としては、地表面に近い正の地盤反力に着目するものと、杭下端部の負の地盤反力に着目するものがある。前者はエンゲル-物部の方法で採用されているもので、普通には、正の最大地盤反力とその点における受働土圧値をこえないことを安全の条件とする。もっと条件を厳格にして、受働土圧線が地盤反力分布をしめす放物線を切ってはならないとする場合もある⁽¹¹⁾。しかし、いずれにせよこのような考え方は、すでに7.1で説明したような、地表面から次第に飽和状態が進行するという地盤反力の実態と一致しない。やはり、テルツアギその他の人々が考えるように、杭の下端部に発生する負の最大地盤反力とその点の受働土圧に達したときに、地盤の崩壊、ひいては杭の転倒が起こるとする方が実情に合っていると思われる。この点を、実験結果にもとづいて確かめてみよう。

(2)の方法によって地盤反力分布曲線を2本の直線でおきかえることにする。このおきかえは、取り扱いが簡単であって、しかも杭の下端部での近似度が高いので、破壊規準の検討には最適である。図-94の(2)図に示すように、受働土圧係数 C_p の値を仮定すれば、下端部での負の最大地盤反力 p_{max} および、杭下端における受働土圧 p_p が求められる。ここで $R = p_p/p_{max}$ を計算すると、 R は1種の安全率に相当する。この R の値は仮定した C_p の値によって異なることは勿論である。そこで、各杭について5の間隔で C_p 値を仮定して計算を行ない、 C_p と R との関係を図示してみると、図-102 のように

なり、 C_p の値によって R はかなり大幅に変わることがわかる。図中に2重丸で示したのは、直前荷重に対する実際の地盤反力分布にもっとも近い C_p の値であって、図-95から図-101で採用した値である。2重丸の C_p に対する R 値は各杭ともほとんどに1になっており、 p_{max} が p_p に達したときに転倒が起こることが確かめられるのである。

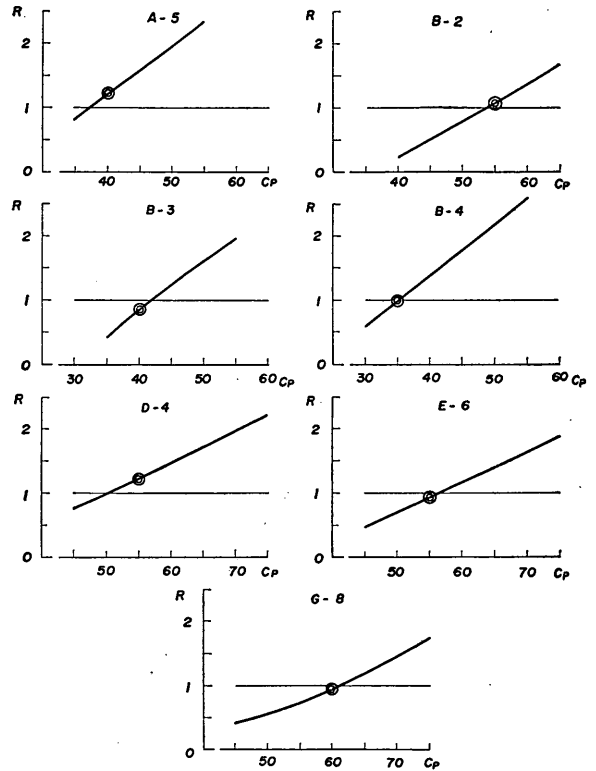


図-102 C_p と R の関係

このように、地盤反力分布を2直線で表示することによって、破壊規準を実用上十分な精度で規定することができる。一方、放物線表示をした場合には、図-95から図-101までにみられるように、 p_{max} の計算値が実際の値より小さくなるので、一般的に危険側となる。放物線表示のときの p_{max} と、2直線表示のときの p_{max} の比をとると、1.02(D-4杭)から1.44(B-3杭)の範囲にある。したがって、放物線表示で p_{max} を求めた場合には、その1.5倍の値をとって p_p と比較することにすれば安全側である。ただし、受働土圧線が放物線を切る深さが、正の最大地盤反力の深さより下にあるような場合は誤差が非常に大きくなるので、放物線表示を用いること

はよくない。一方、受働土圧線が放物線を切る深さが、浅くなるほど p_{max} の誤差は小さくなり、受働土圧線が放物線を切らないようなときには、そのままの p_{max} の値を用いてよい。

これは要するに、破壊規準を規定する際には、原則として2直線表示を用いるべきだということである。受働土圧線が放物線を切る深さが浅い場合に限り、放物線表示を用いてもよいが、切り方の程度に応じて p_{max} の割増を考える必要がある。

7.4 受働土圧係数値

図-92および図-95～図-101 でみられる通り、地盤反力の飽和値に対応する受働土圧係数は、いずれの杭でも50前後の値をとっている。杭幅と土圧係数値の関係については、よくわかっていないが、かりに杭幅と横抵抗常数 k の関係⁽¹²⁾ に準ずるものとしよう。杭幅は7cmが大部分であるが、この場合 k 値は無限幅の壁に対する値の約2倍になる。したがって、無限幅の壁に対する $(C_p)_w$ は、杭で観察された C_p 値の1/2、すなわち、25位であることになる。この値を、受働土圧係数の理論計算値と比較してみよう。(正確には $C_p - C_a$ を考えるべきであるが、 C_a は C_p に比し非常に小さいので無視する。ここに C_a は主働土圧係数である。)

すでに3.3で述べたように、実験地盤の内部摩擦角 ϕ は45°であり、杭の壁面摩擦角 δ は30～35°である。 δ を35°とすると δ/ϕ は0.78となる。曲面スベリ面を用いたカコー・ケリゼルの数値表⁽¹³⁾ から、垂直壁面、 $\phi = 45^\circ$ 、 $(-)\delta = \phi$ のときの受働土圧係数をもとめると、33.5となる。また $\delta/\phi = 0.78$ とすると、低減係数は0.82であるから、壁面に垂直な分力に対する受働土圧係数 $(C_p)_w$ を求めると次のようになる。

$$(C_p)_w = \cos 30^\circ \times 0.82 \times 33.5 = 23.8 \dots \dots (5)$$

この値は実験値から推定した $(C_p)_w$ の値25によく合っている。受働土圧の計算においては、壁面摩擦角が大きな影響もっている。かりに $\delta = 0$ とすると $(C_p)_w$ の計算値は5.1程度になる。したがって、 $(C_p)_w$ が25と推定されるということは、杭の場合に、壁面摩擦がフルに働いていることを意味する。すなわち、塑性領域の土塊が、杭の変位によって上方に押し上げられようとするのに対し、杭面がその土塊に下向きの力を及ぼしていることになる。一方、杭からみれば、塑性領域の土塊によって、上に引かれているわけであるから、それに対抗して杭を拘束する力がない限り、杭も一緒に抜け上がってしまうことになる。杭を拘束する力としては、杭の自重と杭の下部に対する地盤の摩擦以外に考えられない。模

型杭の場合、自重は10kg程度であり、拘束の大部分は地盤の摩擦からくるものと思われる。長杭の場合は根入れ部が大きいから、摩擦により十分の拘束が働くのは当然であるが、短杭の場合でもこのような拘束が働くというのは注目に値する。これは、実験地盤の相対密度がかなり高いことによるのであろう。ゆるい地盤中では拘束が小さく、 $(C_p)_w$ の値もずっと低くなる可能性が大きい。

破壊規準について考察したところによれば、杭の下端部においても、地表面近くと同じ C_p が適用されることになっている。一方、杭の下端付近では δ の値が正になる、すなわち、杭が土を上向きに引張ることになるから C_p の値は小さくなるはずである。これから考えると、杭の下端部での地盤反力発生機構は、杭前面における受働反力の発生とは異なるものであり、下端部には集中的に大きな地盤反力が発生する結果、 C_p の値がみかけ上、杭前面におけると同じ値になるものようである。

計算によって杭の転倒荷重を求めようとする場合には、杭の前後面における受働土圧係数値をどのように見積るかが大きな問題になる。図-102で示したように受働土圧係数値の違いは安全率に大きく影響するから、できるだけひかえ目な推定をすることが望ましい。それには内部摩擦角 ϕ を小さくとり、壁面摩擦角も、杭表面の状態を考慮して、 $(-)\delta = 1/2\phi$ 以下にとるのが安全であろう。

また、実際の杭では、模型杭のように杭幅が小さいことによる C_p の割増しは考えず、 $(C_p)_w$ をそのままとるべきである。

さて、 C_p 値と k 値の間に密接な関連があることは当然予想されることである。しかし、 k 値には地盤の有効単位体積重量 γ_e の影響が含まれており、 $p = k \cdot x \cdot y^{0.5} = \frac{k}{\gamma_e} \cdot \gamma_e \cdot x \cdot y^{0.5}$ と考えられるから、むしろ C_p と k/γ_e の関連を考える方がより一般的である。実験地盤では $\gamma_e = 1.114 \text{ g/cm}^3$ であったので、これから k/γ_e を計算し、 C_p との関係を探ると、図-103のようになる。しかし、実際の杭にこの関係がそのまま適用できるかどうかについては、さらに研究を必要としよう。

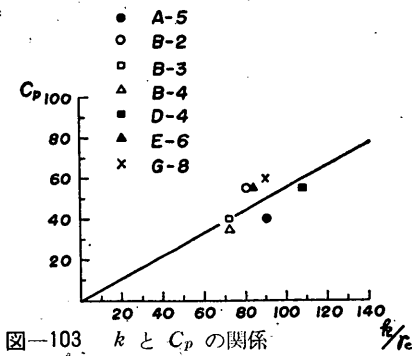


図-103

7.5 杭の転倒と E_r 値

7.3において短杭の転倒の破壊規準について論じた。しかし、これは杭の地盤反力分布が、2直線表示(または放物線表示、複合曲線表示)によって近似できる場合に限るのである。したがって、長杭またはこれに近い杭に対して、短杭の破壊規準を適用することは間違いである。図-5 から図-35に示した地盤反力分布曲線を見ると、 E_r が0.9以下になった場合には、大体2直線表示ができることがわかる。転倒破壊に対する検討はこのような場合にだけ意味をもつ。 E_r が0.9より大きい場合は、転倒破壊よりも、杭の折損の危険性の方が大きくなる。

短杭の場合も転倒荷重の検討の他に、その荷重での変位・傾斜・曲げモーメントが許容値をこえないことを確かめる必要があることは勿論である。これらの値の推定は、6章において説明した方法で行なえばよい。

8. 結 語

33本の模型杭を用いて、砂地盤中での短杭の横抵抗を検討してきた結果をとりまとめてみよう。

(1) 根入れ比による杭の分類

根入れ比 $E_r (=L/l_{m1})$ によって、横方向力をうける杭を分類すると、次のようになる。

E_r	0.6	1.0	1.5
	剛性杭	第2過渡領域	第1過渡領域
	短 杭		
	長 杭		

(2) 有効長

ある杭を長杭として働かせるに必要な最小根入れ長、すなわち有効長は $1.5 l_{m1}$ である。

(3) 短杭の挙動

短杭でも E_r が1より大きい間は、その挙動が長杭と大差がないが、 E_r が1より小さくなると、変位や傾斜

は急に増加する。繰り返し載荷したときの変位の増加度についても同様である。 E_r が0.6より小さい杭では、杭の曲げが無視でき剛性杭としての性質を示す。

(4) 短杭の挙動の推定

短杭の杭頭変位、地表面傾斜、曲げモーメントは E_r を媒介として、長杭の挙動との比較を行なうことによって簡単に求められる。

(5) 転倒時の地盤反力分布

E_r が0.9以下の杭では転倒の危険がある。転倒時の地盤反力分布曲線は、2直線によって表示することができる。この際、地表面から出発する第1の直線は受働土圧線に沿って下がるものとする。

(6) 転倒に対する破壊規準

杭の下端における負の最大地盤反力が、その点における受働土圧値に達したときに転倒が生ずる。ただし、杭の前後面における受働土圧係数は等しい値をとるものとする。

9. あとがき

この報告でとりあげた実験は、著者が基礎工研究室長在任中に行なったもので、その主要部分は昭和39年度末に終了した。実験の実施にあたっては、樋口駒男(現在・第1港湾建設局)、三枝富士男(現在・第5港湾建設局)、鈴木敦巳(現在・熊本大学)の諸氏、および現在の基礎工研究室員である田中、兼平各技官の努力に負う所がきわめて大きい。厚く感謝の意を表す。

実験が早く終了していたにも拘らず、報告の完成が遅れたのは、取りまとめの段階で著者が病に倒れて入院し、退院後も現在に至るまで、医師によって嚴重な勤務の制限を課せられているためであって、止むを得ないこととはいえ、大変申し訳なく思っている。このような事情の中にあって、この研究が今日曲がりなりに完了の域に達した除には、病弱の著者を助け、よく大量の実験データを処理し面倒な数値計算を遂行した基礎工研究室の中村松子技官の大きな努力があった。この機会をかりて心からのお礼を申し上げる。

なお、付録で示した計算式の誘導に関しては基礎工研究室長沢口正俊技官の協力を得た。記して感謝の意を表する次第である。

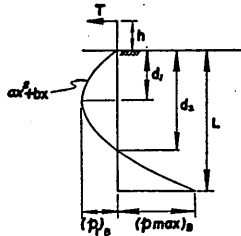
(昭和41年9月30日受付)

付録—1 計 算 式

共通符号 (図—104, 図—105, 図—106 参照)

T	: 横方向外力	, t
B	: 杭径または杭幅	, m
x	: 地表面からの深さ	, m
h	: 載荷高さ	, m
p	: 深さ x における杭の単位面積あたりの地盤反力	, t/m ²
$(p)_B$: 深さ x における杭の単位長さあたりの地盤反力 $(p)_B = p \times B$, t/m
γ_e	: 土の有効単位体積重量	, t/m ³
C_p	: 受働土圧係数	
L	: 杭の根入れ長	, m
$(p_p)_B$: 杭下端における杭の単位長さあたりの受働土圧	, t/m
$(p_{max})_B$: 杭下端における杭の単位長さあたりの地盤反力	, t/m

A. 放物線表示 (図—104参照)



図—104 放物線表示

$(p)_B$ を深さ x についての 2 次式 $(p)_B = ax^2 + bx$ と仮定すると、水平力および曲げモーメントの釣合条件から次の式が得られる。

$$(p_1)_B = \frac{T}{d_1 - \frac{1}{3}L} \cdot \left(\frac{d_1}{L}\right)^2 \quad \text{.....(A-1)}$$

$$d_1 = -\frac{b}{2a} = \frac{\frac{3}{4}L + h}{2L + 2h} \cdot L \quad \text{.....(A-2)}$$

$$(p)_B = (p_1)_B \cdot \frac{(2d_1 - x)x}{(d_1)^2} \quad \text{.....(A-3)}$$

$$(p_{max})_B = (p_1)_B \cdot \frac{(2d_1 - L)L}{L^2} \quad \text{.....(A-4)}$$

$$d_2 = -\frac{b}{a} = 2d_1 \quad \text{.....(A-5)}$$

ここに、 $(p_1)_B$: 杭前面の地盤反力の最大値, t/m
 d_1 : $(p_1)_B$ の生ずる深さ, m
 d_2 : 地盤反力が 0 になる深さ, m

上記の式によって地盤反力分布曲線を求めることができる。

B. 2直線表示 (図-105参照)

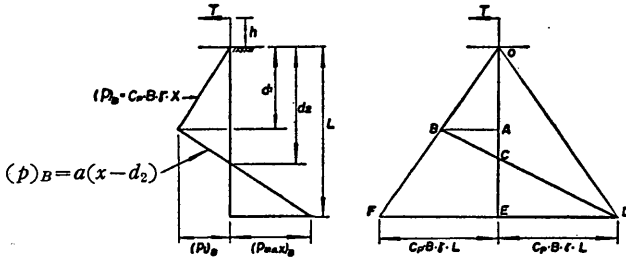


図-105 2直線表示

(i) L, T が既知で、地盤反力分布を求めるとき。

$$0 \leq x \leq d_1 : (p)_B = C_p \cdot B \cdot \gamma_e \cdot x \quad \dots\dots\dots (B-1)$$

$$d_1 \leq x \leq L : (p)_B = a(x - d_2) \quad \dots\dots\dots (B-2)$$

$x = d_1$ において

$$(p_1)_B = C_p \cdot B \cdot \gamma_e \cdot d_1 = a(d_1 - d_2) \quad \dots\dots\dots (B-3)$$

$$\therefore d_1 \frac{a(d_1 - d_2)}{C_p \cdot B \cdot \gamma_e} = a(d_1 - d_2) \quad \dots\dots\dots (B-4)$$

$$\text{ここに } \alpha = \frac{1}{C_p \cdot B \cdot \gamma_e} \quad \dots\dots\dots (B-5)$$

水平力の釣合条件から

$$T = \frac{1}{2} C_p \cdot B \cdot \gamma_e \cdot d_1 \cdot d_2 + \frac{1}{2} a(L - d_2)^2 \quad \dots\dots\dots (B-6)$$

$$\therefore \alpha T = \frac{1}{2} d_1 \cdot d_2 + \frac{1}{2} a \cdot \alpha (L - d_2)^2 \quad \dots\dots\dots (B-7)$$

モーメントの釣合条件から、

$$\begin{aligned} -T \cdot h = \frac{1}{2} C_p \cdot B \cdot \gamma_e d_1^2 \times \frac{2}{3} d_1 + \frac{1}{2} C_p \cdot B \cdot \gamma_e \cdot d_1 (d_2 - d_1) \\ \times \left\{ d_1 + \frac{1}{3} (d_2 - d_1) \right\} + \frac{1}{2} a(L - d_2)^2 \times \left\{ d + \frac{2}{3} (L - d_2) \right\} \quad \dots\dots\dots (B-9) \end{aligned}$$

$$\therefore -\alpha \cdot T \cdot h = \frac{1}{6} d_1^2 \cdot d + \frac{1}{6} d_1 \cdot d_2^2 + \frac{1}{6} a \cdot \alpha \cdot (L - d_2)^2 (2L + d_2) \quad \dots\dots\dots (B-10)$$

(B-7), (B-10) より α を消去して

$$a = \frac{-2T(3h + d_1 + d_2)}{(L - d_2)^2 (2L - d_1)} \quad \dots\dots\dots (B-11)$$

(B-11) を (B-7) に代入して

$$2\alpha \cdot T = d_1 \cdot d_2 - \frac{2\alpha \cdot T(3h + d_1 + d_2)}{2L - d_1} \quad \dots\dots\dots (B-12)$$

$$\therefore 2\alpha \cdot T(2L - d_1) = d_1 \cdot d_2 (2L - d_1) - 2\alpha \cdot T(3h + d_1 + d_2) \quad \dots\dots\dots (B-13)$$

$$(B-4) \text{ より } a = \frac{d_1}{\alpha(d_1 - d_2)} \quad \dots\dots\dots (B-14)$$

これを (B-7) に代入して

$$2\alpha \cdot T = d_1 \cdot d_2 + \frac{d_1(L - d_2)^2}{d_1 - d_2} \quad \dots\dots\dots (B-15)$$

$$\therefore 2\alpha \cdot T(d_1 - d_2) = d_1 \cdot d_2 (d_1 - d_2) + d_1(L - d_2)^2 \quad \dots\dots\dots (B-16)$$

(B-13) と (B-16) を加えると d_2 が消えて

$$d_1 = \frac{2\alpha \cdot T(3h + 2L)}{L^2 - 2\alpha \cdot T} \quad \dots\dots\dots (B-17)$$

(B-17) を (B-15) に代入して d_2 について整理すると、

$$d_2 = \frac{(L^2 - 2\alpha \cdot T)^2 (3h + 2L)}{2(3h + 2L)(L^3 - 3\alpha \cdot h \cdot T - 4\alpha \cdot L \cdot T) - (2\alpha \cdot T - L^2)^2} \quad \text{.....(B-18)}$$

(B-17) と (B-18) から,

$$d_1 - d_2 = \frac{(3h + 2L)\{L^2(L^2 - 2\alpha \cdot T)^2 - 4\alpha \cdot T(3h + 2L)(L^3 - 3\alpha \cdot h \cdot T - 4\alpha \cdot L \cdot T)\}}{(L^2 - 2\alpha \cdot T)\{(L^2 - 2\alpha \cdot T)^2 - 2(3h + 2L)(L^3 - 3\alpha \cdot h \cdot T - 4\alpha \cdot L \cdot T)\}} \quad \text{.....(B-19)}$$

(B-14) に (B-17) と (B-19) を代入して a を求めると,

$$a = \frac{2T\{(L^2 - 2\alpha \cdot T)^2 - 2(3h + 2L)(L^3 - 3\alpha \cdot h \cdot T - 4\alpha \cdot L \cdot T)\}}{L^2(L^2 - 2\alpha \cdot T)^2 - 4\alpha \cdot T(3h + 2L)(L^3 - 3\alpha \cdot h \cdot T - 4\alpha \cdot L \cdot T)} \quad \text{.....(B-20)}$$

(B-18) から

$$L - d_2 = \frac{3(L^2 - 2\alpha \cdot T)^2(h + L) - 2L(3h + 2L)(L^3 - 3\alpha \cdot h \cdot T - 4\alpha \cdot L \cdot T)}{(L^2 - 2\alpha \cdot T)^2 - 2(3h + 2L)(L^3 - 3\alpha \cdot h \cdot T - 4\alpha \cdot L \cdot T)} \quad \text{.....(B-21)}$$

(B-20) と (B-21) をかけると,

$$(p_{max})_B = a \cdot (L - d_2) = \frac{2T\{3(h + L)(L^2 - 2\alpha \cdot T)^2 - 2L(3h + 2L)(L^3 - 3\alpha \cdot h \cdot T - 4\alpha \cdot L \cdot T)\}}{L^2(L^2 - 2\alpha \cdot T)^2 - 4\alpha \cdot T(3h + 2L)(L^3 - 3\alpha \cdot h \cdot T - 4\alpha \cdot L \cdot T)} \quad \text{.....(B-22)}$$

d_1 , $(p_1)_B$, $(p_{max})_B$ が求められたので, 2直線表示による地盤反力分布曲線をえがくことができる。

(ii) L が既知で, 転倒荷重 T を求めるとき。⁽¹⁵⁾

$$(p_{max})_B = (p_p)_B = C_p \cdot \gamma_e \cdot B \cdot L = \frac{L}{\alpha} = \beta \cdot L \quad \text{.....(B-23)}$$

$\triangle OFE$ と $\triangle BFD$ を考えて, 力の釣合をとると,

$$T = \beta \cdot L \left\{ \frac{1}{2}L - (L - d_1) \right\} \quad \text{.....(B-24)}$$

$$\therefore T = \frac{\beta \cdot L}{2} (2d_1 - L) \quad \text{.....(B-25)}$$

モーメントの釣合をとると,

$$T \cdot (h + L) = \beta \cdot L \left\{ \frac{L^2}{6} - \frac{1}{3}(L - d_1)^2 \right\} \quad \text{.....(B-26)}$$

(B-25) を代入して整理すると,

$$2d_1^2 + (6h + 2L)d_1 - 3L \cdot h - 2L^2 = 0 \quad \text{.....(B-27)}$$

(B-27) を解いて d_1 を求め, (B-25) に代入すると, T を求めることができる。

(iii) T が既知で, 転倒に対する限界根入れ長 L を求めるとき。

(B-25) から,

$$d_1 = \frac{2T + \beta \cdot L^2}{2\beta \cdot L} \quad \text{.....(B-28)}$$

これを (B-27) に代入すると

$$2 \left(\frac{2T + \beta \cdot L^2}{2\beta \cdot L} \right)^2 + (6h + 2L) \frac{(2T + \beta \cdot L^2)}{2\beta \cdot L} - 3L \cdot h - 2L^2 = 0 \quad \text{.....(B-29)}$$

(B-29) を L について整理すると

$$\beta^2 \cdot L^4 - 8\beta \cdot T \cdot L^2 - 12\beta \cdot h \cdot T \cdot L - 4T^2 = 0 \quad \text{.....(B-30)}$$

(B-30) を解けば L を求めることができる。

C. 複合曲線表示 (図-106参照)

$$0 \leq x \leq d_1 : (p)_B = C_p \cdot B \cdot \gamma_e \cdot x \quad \text{.....(C-1)}$$

$$d_1 \leq x \leq L : (p)_B = a \cdot x^2 + b \cdot x \quad \text{.....(C-2)}$$

$x = d_1$ において

$$(p_1)_B = C_p \cdot B \cdot \gamma_e \cdot d_1 = a \cdot d_1^2 + b \cdot d_1 \quad \text{.....(C-3)}$$

$$\therefore d_1 = \frac{C_p \cdot B \cdot \gamma_e \cdot b}{a} \quad \text{.....(C-4)}$$

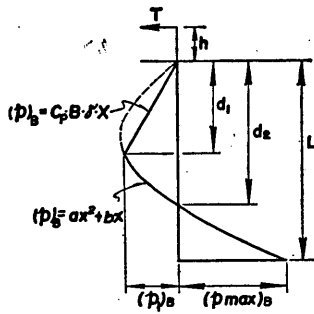


図-106 複合曲線表示

力の釣合条件から

$$T = \frac{1}{2} C_p \cdot B \cdot \gamma_e \cdot d_1^2 + \left(\frac{a}{3} L^3 + \frac{b}{2} L^2 \right) - \left(\frac{a}{3} d_1^3 + \frac{b}{2} d_1^2 \right) \quad \text{.....(C-5)}$$

(C-4) を代入して d_1 を消去すると

$$T = L^2 \left(\frac{a \cdot L}{3} + \frac{b}{2} \right) + \frac{1}{6} \frac{(C_p \cdot B \cdot \gamma_e - b)^3}{a^2} \quad \text{.....(C-6)}$$

モーメントの釣合条件から、

$$-T \cdot h = \frac{a}{4} \cdot L^4 + \frac{b}{3} L^3 - \left(\frac{a}{4} d_1^4 + \frac{b}{3} d_1^3 \right) + \frac{1}{3} C_p \cdot B \cdot \gamma_e \cdot x_1^3 \quad \text{.....(C-7)}$$

(C-4) を代入して d_1 を消去すると、

$$-T \cdot h = L^3 \left(\frac{a \cdot L}{4} + \frac{b}{3} \right) + \frac{1}{12} \frac{(C_p \cdot B \cdot \gamma_e - b)^4}{a^3} \quad \text{.....(C-8)}$$

ここで、 $\frac{C_p \cdot B \cdot \gamma_e - b}{a} = d_1$, $\frac{a}{C_p \cdot B \cdot \gamma_e} = m$, $\frac{T}{C_p \cdot B \cdot \gamma_e} = n$ (C-9)

とおくと、

(C-6), (C-8) から

$$\left\{ \begin{aligned} -n \cdot h &= \frac{L^4}{4} \cdot m + \frac{L^3}{3} (1 - d_1 \cdot m) + \frac{1}{12} d_1^4 \cdot m \quad \text{.....(C-10)} \\ n &= \frac{L^3}{3} \cdot m + \frac{L^2}{2} (1 - d_1 \cdot m) + \frac{1}{6} d_1^3 \cdot m \quad \text{.....(C-11)} \end{aligned} \right.$$

両式から m を消去すると

$$\left(n - \frac{L^2}{2} \right) \left(\frac{L^2}{4} - \frac{L^3}{3} \cdot d_1 + \frac{1}{12} d_1^4 \right) + \left(n \cdot h + \frac{L^3}{3} \right) \left(-\frac{L^3}{3} - \frac{L^2}{2} \cdot d_1 + \frac{1}{6} d_1^3 \right) = 0 \quad \text{.....(C-12)}$$

(C-12) は d_1 の4次式になる。

$$A \cdot d_1^4 + B \cdot d_1^3 + C \cdot d_1 + D = 0 \quad \text{.....(C-13)}$$

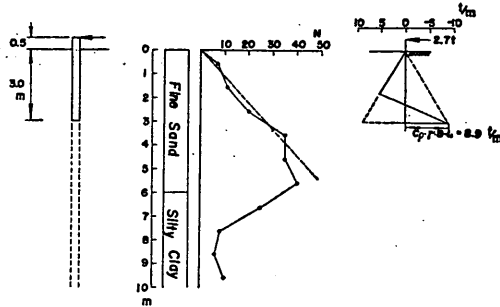
ここに、

$$\left. \begin{aligned} A &= \frac{1}{12} \left(n - \frac{L^2}{2} \right) \\ B &= \frac{1}{6} \left(n \cdot h + \frac{L^3}{3} \right) \\ C &= -\frac{L^3}{3} \left(n - \frac{L^2}{2} \right) - \frac{L^2}{2} \left(n \cdot h + \frac{L^3}{3} \right) \\ D &= \frac{L^4}{4} \left(n - \frac{L^2}{2} \right) + \frac{L^3}{3} \left(n \cdot h + \frac{L^3}{3} \right) \end{aligned} \right\} \quad \text{.....(C-14)}$$

(C-13) をといて d_1 を求め、次に (C-10) から m を求める。 d_1 , m を (C-9) に代入して、 a , b を求める。 a , b がわかれば、(C-1), (C-2) によって地盤反力分布を知ることができる。

付録—2 計算例

根入れ3 mのH鋼杭に、地表面上0.5mの所で横方向力をかけるものとする。(図—107参照)



図—107 地盤条件

1. 長杭としての挙動の推定

この場合と同様の計算例を文献(4)の25頁～28頁に詳しくかかっているため、ここではごく簡単に述べる。

(1) 地盤定数 k

N 値から判断すると、これはS型地盤であり、 \bar{N} は9である。したがって、 k は30になる。

(2) 換算係数

計算の対象とする杭(原型杭)と基準杭の諸元を比較すると次の通りである。

	基準杭 (S-pile)	原型杭 (P-pile)
EI	$27.54 \times 10^5 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$	$4.50 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$
B	10 cm	30.5 cm
h	15 cm	50 cm
k	50 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3.5}$	30 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3.5}$

$$R_{EI} = (EI)_p / (EI)_s = 1.634 \times 10^5, \quad \log R_{EI} = 3.213$$

$$R_B = B_p / B_s = 3.05, \quad \log R_B = 0.484$$

$$R_x = R_h = h_p / h_s = 3.33, \quad \log R_x = 0.523$$

$$R_k = k_p / k_s = 0.6, \quad \log R_k = -0.222$$

よって、

$$\log R_T = \log R_s = 7 \times 0.523 - 3.213 - 2 \times 0.222 + 2 \times 0.484 = 0.972$$

$$\log R_M = 8 \times 0.523 - 3.213 - 2 \times 0.222 + 2 \times 0.484 = 1.495$$

$$\log R_i = 9 \times 0.523 - 2 \times 3.213 - 2 \times 0.222 + 2 \times 0.484 = -1.195$$

$$\log R_y = 10 \times 0.523 - 2 \times 3.213 - 2 \times 0.222 + 2 \times 0.484 = -0.672$$

(3) 荷重—杭頭変位曲線の推定

$$(\log y_{top})_p = (\log y_{top})_s + \log R_y = (\log y_{top})_s - 0.672$$

$$(\log T)_p = (\log T)_s + \log R_T = (\log T)_s + 0.972$$

基準曲線		推定曲線			
$(\log y_{top})_s$	$(\log T)_s$	$(\log y_{top})_p$	$(\log T)_p$	$(y_{top})_p$ cm	$(T)_p$ kg
-1	1.541	$\bar{2}.328$	2.513	2.128×10^{-2}	3.26×10^2
0	2.300	$\bar{1}.328$	3.272	2.128×10^{-1}	1.87×10^3
0.672	1	0.328	4.021	2.128	1.05×10^4
	2	1.328	4.761	2.128×10	5.77×10^4

- (4) 荷重—最大曲げモーメント曲線の推定 省略
- (5) 荷重— l_{m1} 曲線の推定 省略
- (6) 荷重—地表面傾斜曲線の推定 省略
- (7) 計算結果

(3), (4), (5), (6)で得られた y_{top} , M_{max} , l_{m1} および i_0 を対数目盛上にプロットすると図-108のようになる。

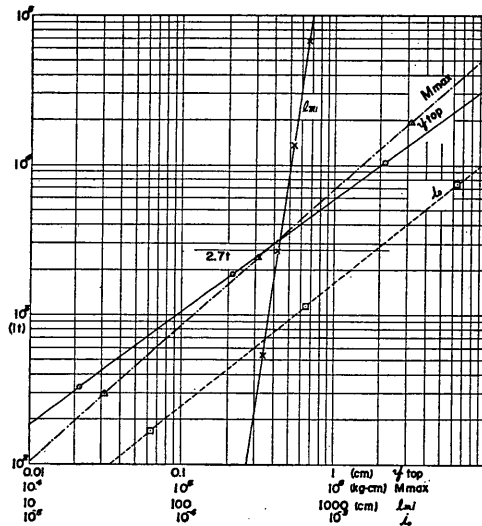


図-108 長杭としての挙動

2. 転倒荷重の推定

(1) 受働土圧係数の推定

N 値と ϕ の関係については、まだ定説がない。この地盤はかなり良く締まっていると考えられるので、 $\phi=40^\circ$ とおく。また $\delta = \frac{\phi}{2}$ と仮定する。カコー・ケリゼルの数値表から杭に垂直方向の土圧係数を計算する。 $\phi=40^\circ$, $\frac{\delta}{\phi} = \frac{1}{2}$ に対する低減係数は0.59であるから、

$$C_p = \cos 20^\circ \times 0.59 \times 17.5 = 0.94 \times 0.59 \times 17.5 = 9.7$$

模型実験における、 C_p と k/γ_e との関係を 図-103 に示したが、これによれば $k=30$, $\gamma_e=1.00\text{g/cm}^3$ (推定) に対し、 $C_p=16$ になる。上の $C_p=9.7$ はかなりひかえ目な値である。

(2) 転倒荷重の計算

$$B=0.305 \text{ m}$$

$$h=0.5 \text{ m}$$

$$L=3.0 \text{ m}$$

$$\gamma_e=1.00 \text{ t/m}^3 \text{ (推定値)}$$

$$B=C_p \cdot \gamma_e \cdot B=2.96 \text{ t/m}^2$$

(B-27) から

$$2d_1^2 + (6 \times 0.5 + 2 \times 3)d_1 - 3 \times 3 \times 0.5 - 2 \times 3^2 = 0$$

$$\therefore 2d_1^2 + 9d_1 - 22.5 = 0$$

$$\therefore d_1 = 1.8 \text{ m}$$

(B-25) に代入して

$$T = \frac{2.96 \times 3}{2} (2 \times 1.8 - 3)$$

$$= 2.7 \text{ t}$$

3. 短杭としての挙動の推定

図-108 から、 $T=2.7t$ のときの長杭の挙動を求めると

$$(y_{top})_{long} = 0.35 \text{ cm}$$

$$(M_{max})_{long} = 3.5 \times 10^5 \text{ kg}\cdot\text{cm} = 3.5 \text{ t}\cdot\text{m}$$

$$(i_o)_{long} = 1.9 \times 10^{-3}$$

$$l_{m_1} = 4.3 \text{ m}$$

E_r を計算する。

$$E_r = L/l_{m_1} = 3/4.3 = 0.70$$

$E_r = 0.70$ であるから 2 直線表示に近い地盤反力分布が期待できる。したがって、すでに示した転倒荷重の計算は妥当である。

次に図-58から

$$(y_{top})_r = 1.7$$

$$(i_o)_r = 1.7$$

$$(M_{max})_r = 1.0$$

よって、

$$(y_{top})_{short} = 1.7 \times 0.35 = 0.60 \text{ cm}$$

$$(i_o)_{short} = 1.7 \times 1.9 \times 10^{-3} = 3.2 \times 10^{-3}$$

$$(M_{max})_{short} = 1.0 \times 3.5 = 3.5 \text{ t}\cdot\text{m}$$

ただし、上記の値は転倒が生ずる前の値であり、転倒が生じたときには y_{top} , i_o は急増することはいうまでもない。

記号表 (本文中のもの)

B	杭幅	cm
C_a	主働土圧係数	
C_p	受働土圧係数 (抵抗土圧係数)	
$(C_p)_w$	無限幅の壁面に対する受働土圧係数	
EI	杭の曲げ剛性	$\text{kg}\cdot\text{cm}^2$
E_r	根入れ比, $E_r=L/l_{m_1}$	
h	载荷高さ	cm
i_0	地表面における杭の傾斜	
$(i_0)_r$	同じ条件の短杭と長杭における i_0 の比	
k	地盤の横抵抗常数	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3.5}$
L	杭の根入れ長	cm
l_{m_1}	長杭の曲げモーメント第1ゼロ点の深さ	cm
M_{max}	杭中の最大曲げモーメント	$\text{kg}\cdot\text{cm}$
$(M_{max})_r$	同じ条件の短杭と長杭における M_{max} の比	
m	$p=k\cdot x^m\cdot y^n$ における x の指数	
n	$p=k\cdot x^m\cdot y^n$ における y の指数	
n	繰り返し载荷回数	
p	杭の単位面積あたりの地盤反力	$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$
p_p	杭下端における受働土圧	$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$
p_{max}	杭下端における地盤反力	$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$
P	杭の単位長さあたりの地盤反力	$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-1}$
R	p_p と p_{max} の比	
r_n	第 n 番目の载荷までの累積残留変位	cm
T	横方向外力	kg
t_n	第 n 番目の载荷までの累積杭頭変位	cm
x	地表面からの深さ	cm
y	杭面の変位	cm
y_{top}	杭頭変位	cm
γ_d	土の乾燥密度	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
γ_e	土の有効単位体積重量	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
δ	壁面摩擦角	度
ϕ	内部摩擦角	度

文献表

- (1) 篠原登美雄・久保浩一: 杭の横抵抗に関する実験的研究 (その1) 運輸技術研究所報告 Vol. 11 No. 6, 1961
- (2) 久保浩一: 杭の横抵抗に関する実験的研究 (その2) 運輸技術研究所報告 Vol.11 No.12, 1961
- (3) 久保浩一: 杭の横抵抗に関する実験的研究 (その3) 運輸技術研究所報告 Vol.12 No.2, 1962
- (4) 久保浩一: 杭の横抵抗の新しい計算法 港湾技術研究所報告 Vol.2 No.3, 1964
- (5) 文献(4), pp. 14~15
- (6) 文献(1), pp. 2~23
- (7) 文献(4), pp. 14~22
- (8) 文献(4), pp. 25~29
- (9) 横山幸満: 鋼杭の設計と施工, 1963 pp. 112~115
- (10) K. Terzaghi: Theoretical Soil Mechanics, 1943 pp. 355~358
- (11) 文献(9), pp. 112~115
- (12) 文献(4), p. 13
- (13) 村山・大崎: 基礎工学ハンドブック, 1964 pp. 94~101
- (14) 文献(9), pp. 112~115
- (15) 文献(10), p. 358
- (16) 文献(13), pp. 94~101

(昭和41年9月30日受付)

港湾技術研究所報告 第5卷13号

1966年9月

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 柿野屋印刷所
横浜市鶴見区鶴見町394