

港湾技術研究所報告

REPORT OF PORT AND HARBOUR TECHNICAL RESEARCH
INSTITUTE MINISTRY OF TRANSPORTATION, JAPAN

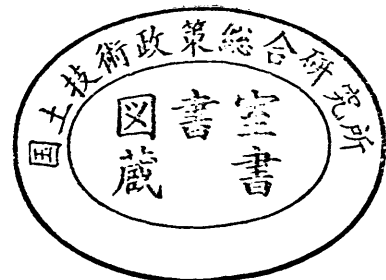
第2卷 3号

Vol. 2 No. 3

杭の横抵抗の新しい計算法…………… 久保浩一

1964年3月

運輸省港湾技術研究所



杭の横抵抗の新しい計算法

目 次

英 文 概 要	1
ま え が き	1
1. 横方向力をうける杭	2
2. 杭の横抵抗の推定法	4
2・1 指定された許容荷重値を用いる方法	4
2・2 載荷試験による方法	5
2・3 地盤反力の分布を仮定する解析法	5
2・4 弾性梁としての解析法	6
3. 篠原・久保の計算法	8
3・1 基 本 事 項	8
3・1・1 模型実験概要	8
3・1・2 地盤反力と杭の変位の関係	9
3・1・3 杭幅の影響	13
3・1・4 杭の有効長	14
3・1・5 要 約	15
3・2 計算法の原理	15
3・2・1 概 要	15
3・2・2 相 似 則	16
3・2・3 換 算 係 数	17
3・2・4 基 準 曲 線	18
3・2・5 地表面載荷の場合	21
3・3 地盤条件と地盤常数の関係	22
3・3・1 S型地盤とC型地盤	22
3・3・2 S型地盤における地盤常数	23
3・3・3 C型地盤の場合の計算法	23
3・4 計 算 例	25
3・4・1 $h > 0$ の場合	25
3・4・2 $h = 0$ の場合	29
4. 計 算 図 表	29
4・1 計算図表の作成	29
4・2 計算図表の分類と使用法	31
4・3 計算の手順	32
4・3・1 y_0 または y_{top} の計算	32
4・3・2 M_{max} , M_{max-l} または M_{max-1} の計算	33

4・3・3 l_{m1} の計算	34
4・4 計算図表の使用例	34
あ と が き	36
参 考 文 献	36
計 算 図 表 (図表-1~図表-39) 別冊	

杭の横抵抗の新しい計算法

久 保 浩 一*

A New Method for the Estimation of Lateral Resistance of Piles

Kōichi Kubo

Synopsis

1. Lateral load tests on a number of steel model piles were carried out in saturated sand layer.

Main findings are as follows:

- (1) A new expression $p=k.x.y^{0.5}$ for the relationship between soil reaction p and pile deflection y can far better explain the actual behaviours of piles than any other expression so far proposed.
- (2) Soil resistance per unit area of pile surface decreases with increasing width of pile, but it becomes almost constant when pile width is larger than 20 cm.
- (3) Effective length of embedment for a laterally loaded pile is considered to be $1.5 l_{m1}$, in which l_{m1} is the depth of the first zero point of the moment distribution curve for an infinitely long pile.

2. Conversion factors are obtained by introducing the expression $p=k.x.y^{0.5}$ into the law of similarity. Also standard curves of the pile-top deflection, maximum bending moment, effective length, and pile inclination are established on the basis of the model test results. Conversion of the standard curves by means of the conversion factors gives the estimation of behaviours of a prototype pile. The necessary computation for the above mentioned conversion can easily be made with the aid of computation charts given in this paper.

3. Many field test data are collected and analyzed to show that a unique relationship exists between soil constant k and standard penetration value N both in sandy soil and in clayey soil.

ま え が き

港湾技術研究所・構造部・基礎工研究室では、運輸技術研究所に属していた時期を含め、10年近く杭の横抵抗に関する実験的研究を行なってきた。模型実験の対象も、垂直自由端の単杭という最も基本的なものから始め、頭部固定杭、斜杭、組杭、群杭、短杭などに及んでいる。

その間、研究成果の一部を運輸技術研究所報告として発表した¹⁾²⁾³⁾、その中で筆者らは杭の横抵抗に関する一つの新しい計算法を提案した。しかし、研究の進展に応じて発表してきたため、これらの報告は必ずしも実際の利用に便利な形になつておらず、この新しい計算法のわかりやすい解説を望む声をしばしば耳にしてきた。今回発表する港研報告は、この要望にこたえるためのものである。

解説の主体は第3章以下であるが、問題の所在を明らかにするため第1章を設け、また在来の計算法の間にあつて、新しい計算法がどのような位置を占めるかを示すため第2章を加えた。第2章では在来の計算法の考え方だけにしかふれていないので、具体的な計算法を知りたい方は別の書籍を参照されたい⁴⁾⁵⁾。

第3章では、新しい計算法の原理と応用を、詳しく系統的に解説した。文中に多くの式が出てくるが、あまり気にする必要はない。殊に(12)式から(22)式までは単なる誘導で、実際の計算には関係がない。計算例を詳しく検討するのが、計算法を理解する近道であろう。

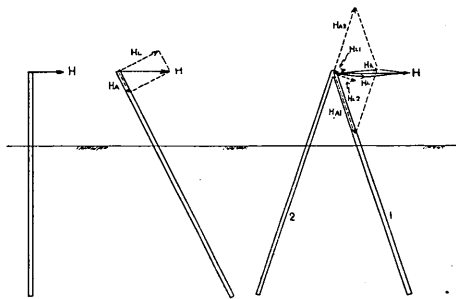
* 構造部 基礎工研究室長

第4章は新しい計算法のために今回作成した計算図表の解説である。ほとんど予備知識がなくても、この第4章を読むだけで、計算図表が十分使いこなせる筈である。しかし、この新しい計算法といえども、当然いくつかの仮定と制限のもとに成り立つものであるから、ただ無批判に計算図表を利用することは危険である。一応、第3章までに目を通し、新しい計算法の性格を良く理解した上で計算図表を活用して頂きたいと思う。

この報告で説明したのは、垂直単杭の横抵抗の計算法であるが、杭の横抵抗に関しては、まだまだ問題が残っており、われわれの研究室においても鋭意研究をすすめている。そのうち、斜杭についてはすでに報告³⁾、目下、群杭、短杭、組杭などについて報告をまとめつつある状況である。しかし、これらの問題もすべて、この報告で説明した新しい計算法の応用として扱ひ得ることがわかつてきた。したがって、今後発表されるわれわれの研究報告を十分理解して頂くためにも、この解説が役立つものと信ずる。

1. 横方向力をうける杭

横方向力を杭によつて支持しようとする場合、直杭、斜杭または組杭を用いることができる。直杭が横方向力をうけるときに示す抵抗は、曲げに対する杭の抵抗と、横方向変位に対する地盤の抵抗とが組み合わさつたものであつて、杭の軸方向支持力はこれに関与しない。したがって、これを本来の意味での杭の横抵抗と考えることができる。(以下、これを単に杭の横抵抗と記す。)



- PILES SUBJECTED TO LATERAL FORCE.

図 一 1

斜杭が横方向力をうけるときは、図一1に示すように、外力の一部は軸方向力となり、杭軸に直角な成分のみが杭の横抵抗によつて支えられていることになる。これら二成分の割合は杭の傾斜によつてほぼ一義的にきまる。

組杭とは杭軸の方向を異にする二本以上の杭を組合せたものであつて、そのもつとも簡単なものを図一1に示す。組杭においては、横方向力の大部分は各杭の軸方向支持力によつて支えられるので、設計においては各杭それぞれの横抵抗は無視するのが普通である。しかし、たとえば組杭が横方向力をうけるときの変位や曲げモーメントを知ろうとするような場合、各杭の横抵抗を無視したのでは正しい解答は得られないのである。

この報告においては、最も基本的な直杭の横抵抗の問題のみを扱うことにし、軸方向力を考慮に入れねばならぬ組杭の問題は次の機会にゆだねたい。

この報告においては、最も基本的な直杭の横抵抗の問題のみを扱うことにし、軸方向力を考慮に入れねばならぬ組杭の問題は次の機会にゆだねたい。

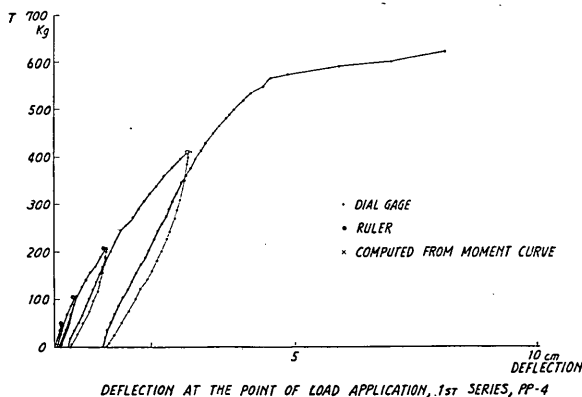


図 二

さて、杭が横方向力をうけるときどのような挙動をするであろうか。これを事例にもとづいて調べてみよう。図二はわれわれの行なつた模型実験における模型杭 PP-4 (根入れ長=240cm, 幅=10cm, 載荷高=15cm, $EI=27.45 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$) の荷重一変位曲線を示す。各載荷ループにおいて最も大切なのはバーজন領域、すなわち前回の最高荷重をこえた後の上昇部分であるから、これに着目することになると、変位は荷重の増加につれて或る曲線上をたどりながら増加して行くことが

わかる。このとき、曲げモーメント、杭面変位および地盤反力の分布がどのように変化するかを示したのが図-3、図-4および図-5であり、荷重の増加にともないこれらの値が大きくなることが明らかである。ただし、

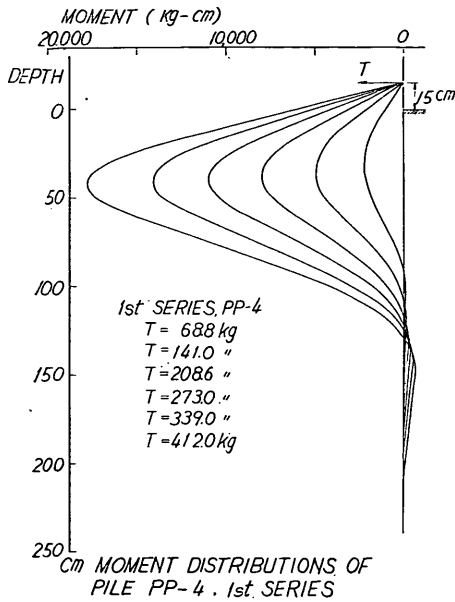


図 - 3

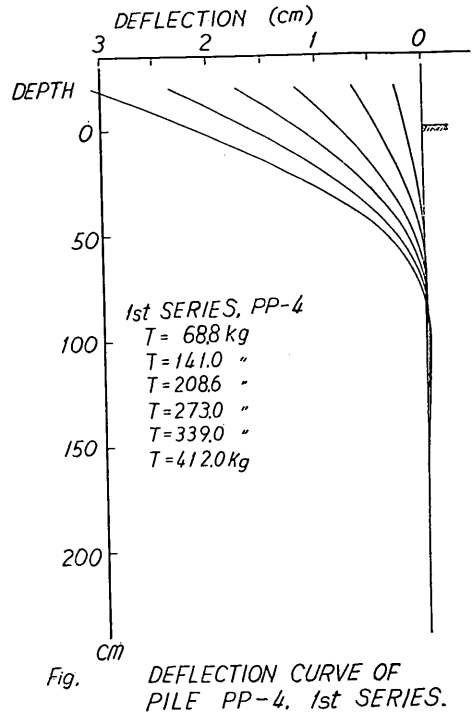


図 - 4

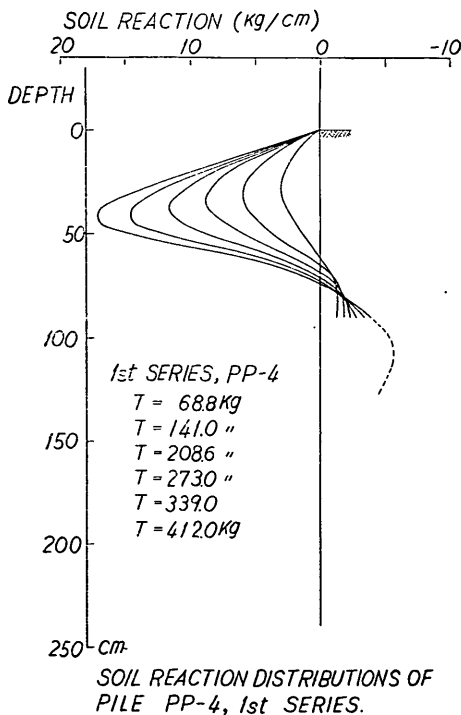


図 - 5

ここで地盤反力というのは、杭の前面および後面における土圧力の差を意味し、横方向力がかからないときはその値はゼロとなる。もつとも主働側の土圧は受働側の土圧にくらべ、たいへんに小さいから、この差をそのまま受働側の土圧と考えても大きな間違いはない。

ここで、注意しなければならないことは、土が弾性的な挙動を示していないということである。もし土が完全に弾性体であるとするならば、荷重-変位曲線は直線となり、また曲げモーメント、杭面変位および地盤反力の値も、荷重に比例して大きくなるが、その分布の形は相似を保ち、したがってその最大値やゼロ点などを与える深度は、変らない筈である。しかし実際には荷重-変位曲線は曲がりを示し、曲げモーメントなどの分布曲線は次第に下方にひろがつてゆく傾向を示している。そしてこの現象はこの杭だけでなく、すべての杭に見られる。すなわち、土は上の方から次第に破壊状態に入つて行き、横抵抗をうけもつ範囲は荷重と共に深いところまでおよんで行くものと考えられる。

このように土が非弾性的な挙動を示すということは、杭の横抵抗の基本的な性格としてきわめて大切なことである。また、上述のように土の破壊が漸進的におこるため、土に対する明確な破壊荷重を規定することができないことにも注目せねばならない。

図一1では約560kgの所に変曲点がみられ、何等かの破壊が生じたことを示しているが、これは杭の折損によるものである。すなわち杭中の最大曲げ応力が杭材料の曲げ強度をこえた結果、最大曲げモーメントを生ずる点で杭が折れ、そのためそれより上の部分で急激に変位が増加し、土が崩壊状態に達したものと見ることが出来る。このように杭としての破壊荷重に達しても、杭の下端近くでは全く変位がなく、したがって地盤反力の変化もない。すなわち、この部分では土は杭に加えられた横方向力に対して、何等有効な抵抗を発揮していないのである。このように、杭の下部が固定された状況を示すのは、杭が比較的たわみやすくまた十分な根入れを有する場合であつて、現場における杭はほとんどこれに属するものと考えてよい。

一方、杭の剛性が大きく、その割に根入れが短い場合には、杭の動きは曲げより回転に近くなり、その根入れの全長にわたつて、有効な土の抵抗をうける。そして荷重がある限度に達すると、土は一挙に崩壊状態に達し、杭が折損するより前にその転倒がおこり、引きつづき横方向力がかかれば引き抜かれてしまうことになる。この場合には、土に対する破壊荷重をかなり明確に規定することが可能である。このように剛性が高く根入れの短い杭では横方向力をうけるときの、杭の下部において固定の状態が保たれない。このような杭を以後「短杭」と呼ぶことにするが、「短杭」は一般に横方向力を支える杭としては不利な点が多い。したがつてこの報告では「短杭」そのものの性質を論ずることはやめ、杭の根入れに関しては、その杭を「短杭」にしないために必要な長さはどれだけかという点だけをとりあげることにしたい。

横方向力に対する杭の許容荷重は、上述のような折損、転倒といった破壊条件に対して杭が十分に安全であると同時に、杭頭変位量が、上部構造との関連によつて定められる許容変位量をこえないように定めなければならない。したがつて、杭の横抵抗の問題は結局、横方向力をうけるときの杭頭変位、杭中の最大曲げモーメントおよび必要根入れ長の三つの量をいかに推定するかということに帰することになる。

2. 杭の横抵抗の推定法

2.1 指定された許容荷重値を用いる方法

杭の横抵抗を推定する方法のうち、最も簡単なものは示方書等に与えられる許容荷重値を用いる方法である。この場合、設計荷重が表に示された杭の横方向許容荷重をこえないようにすればよい。しかし、このような方法は小規模な工事や杭の横抵抗に問題が少ない場合にはさしつかえないが、その他の場合には、表の値は参考にとどめ、他の方法をとるのが望ましい。なんとなれば、このような表の値は、経験にもとづいて定められたものであつて、比較的限られた条件にのみあてはまるものか、さもなければ、かなり精度の低い値しかあててくれないからである。元来、杭の横抵抗のような複雑な問題では、簡単な許容荷重値表ですべてを解決することは無理である。しかし、このような表もある程度の参考にはなる。ここでは二つの例をあげておこう。

(a) 港湾工事設計要覧(1959)⁹⁾

直杭の水平抵抗

地盤の種類	水平抵抗
粘土質地盤	5 t 以下
粘土質地盤 (杭頭部を密な砂で2 m以上置換え) た場合	7 t 以下
砂質地盤	10 t 以下

ただし港湾工事設計要覧は現地において横方向載荷試験を行なうことをすすめ、上記の値はやむを得ない場合の標準として与えている。また表の値に対する杭の変位は一般に5~10cm であるとしている。

(b) J.F McNulty (1956)¹⁰⁾

杭の種類	杭頭条件	土の種類	許容荷重 ポンド/杭
木杭 (径 12 インチ)	頭部自由	中砂	1,500 (0.7 t)
		細砂	1,500 (0.7 t)
		中粘土	1,500 (0.7 t)
	頭部固定	中砂	5,000 (2.3 t)
	細砂	4,500 (2.0 t)	
	中粘土	4,000 (1.8 t)	
コンクリート杭 (径 16 インチ)	頭部自由	中砂	7,000 (3.2 t)
		細砂	5,500 (2.5 t)
		中粘土	5,000 (2.3 t)
	頭部固定	中砂	7,000 (3.2 t)
	細砂	5,500 (2.5 t)	
	中粘土	5,000 (2.3 t)	

上記の値は1/4インチ(0.635cm)の杭頭変位を与える荷重に対し、安全率3をとつたものであり、すべて現場実験の結果にもとづいて定められたものである。

2.2 載荷試験による方法

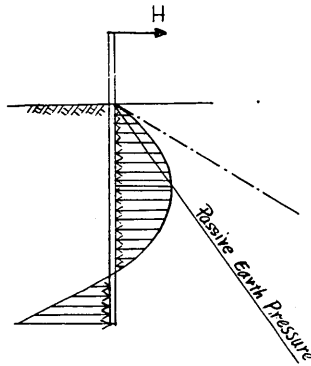
載荷試験を行なえば杭の実際の挙動に関する最も的確な知識を得ることができる。したがって、予算と時間の許す限り設計のうらづけとして載荷試験を行なうのが望ましい。ただしここで注意すべきことは、横方向載荷試験においては試験条件によつて結果が大きくかわってくるということである。たとえ同じ場所で試験しても、杭の種類、頭部支承条件、載荷高などが違えば、結果もまた違ってくる。したがって、載荷試験はできるだけ実際の構造物に近い条件で実施することが望ましいのであるが、これは必ずしも容易でない。このように考えると、たとえ横方向載荷試験を行なつても、得られた数値をそのまま使うというだけでは不十分なことが多く、かえつて間違つた結論が導かれる例もまれではない。であるから、載荷試験結果を十分に活用するためには、試験結果を適当な方法で解析し、それにもとづいて試験の際の杭の挙動を詳細に検討した上で、改めて実際の構造物に用いられた場合の個々の杭の挙動を推定するという手順をふむのが望ましいのである。この場合に用うべき解析の方法としては、その現場における杭の実際の挙動に最も適合したものを選ばねばならぬことはいうまでもない。現在までに提案されている解析法の概要を2.3 および2.4 において説明しよう。

2.3 地盤反力の分布を仮定する解析法

杭の横抵抗の解析法として比較的早く提案されているものにEngelの方法とRaesの方法がある。これらはいずれも、杭面に対する地盤反力の分布が或るきまつた形をとるものと仮定する方法である。

(a) Engelの方法

この方法においては、図一6に示すように水平方向の地盤反力の分布を放物線と仮定する。したがって力とモーメントの釣合条件から反力の大きさを計算することができる。このようにして求めた反力をその極限值と比較することによつて杭の安定性を検討するものであるが、普通には物部博士にしたがい⁷⁾、最大反力とその位置における受働土圧とを比較する方法がとられている。反力の放物線分布という仮定は、杭の剛性が非常に大きい場合には実際の状態にかなりよく合うことが確かめられている。したがつてこの方法はウエルなどの横抵抗の計算に適当で現在もひろく用いられている。しかし杭に対しては、極端な短杭、すなわち剛性が大きくて根入れが非



ENGEL'S METHOD.

図 - 6

上に杭が横方向力 H をうけると、 C 点を中心として回転しようとする。その場合、 C 点の上では杭の前面に受働土圧、後面に主働土圧が働き、 C 点の下では後面に受働土圧、前面に主働土圧が働くものとする。すると H の極限值は力およびモーメントの釣合の条件から計算でき、杭に働く横方向力がこれより小さければ杭の安定が保たれることになる。この方法では破壊時における土圧分布を考えており、Engel の方法における土圧分布とは多少ことなる。

2.4 弾性梁としての解析法

上にのべた、地盤反力の分布を仮定する方法は、いずれも非常に剛性が高く根入れが小さい杭を対象としており、しかもそのような杭の極限安定を論ずるだけで変位については何等ふれる所がない。しかるに実際の杭は比較的たわみやすいものであるから、横方向力をうけるときには弾性梁としての挙動を示し、その破壊基準としても、土の全面的崩壊よりは、杭中に発生する曲げモーメントや杭頭部の変位が問題になる場合がほとんどである。したがって横方向力をうける杭の解析にあたっては、弾性梁のたわみの問題として扱うのが最も適当と考えられ、現在行なわれている解析法のほとんどすべてが、その出発点として次に示す梁のたわみの微分方程式を用いている。

$$EI \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} = -P = -p \cdot B \dots \dots \dots (1)$$

ここに EI = 杭の曲げ剛性

x = 地表面からの深さ

y = 深さ x における杭の変位

P = 深さ x における、杭の単位長さあたりの地盤反力

p = 深さ x における、杭の単位面積あたりの地盤反力、 $p = \frac{P}{B}$

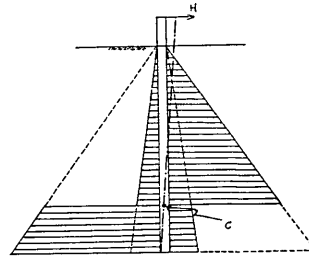
B = 杭幅

(1)式における P または p は杭の撓み y の 1 次函数とおくのが普通である。すなわち、

$$P = E_s \cdot y \dots \dots (2)$$

または $p = \frac{E_s}{B} \cdot y \dots \dots (3)$

(2)式における係数 E_s は「地盤の弾性係数 (elastic modulus of soil)」と呼ばれる。また、 E_s/B は「地盤の横方向地盤反力係数 (coefficient of horizontal subgrade reaction)」と呼ばれ、Terzaghi は k_h なる符号を用いている¹⁴⁾。



RAES'S METHOD.

図 - 7

常に小さい杭の場合を除いては用いることができない。

(b) Raes の方法¹³⁾

これは古典土圧論をそのまま用いる方法である。図-7に示すよう

さて、 E_s の性格には多くの議論があるが、主な考え方は次のようなものである。

$$(a) E_s = k \cdot B = \text{constant} \quad \dots\dots(4)$$

これは E_s が深さに無関係だという考え方で、一般に比較的かたい粘土ではこの関係がなりたつといわれている¹⁴⁾。Y.L.Chang は $E_s = \text{const.}$ とおくと、横方向力をうける杭の問題は、弾性床上の梁の問題として取り扱えると考えて、その解を示した⁹⁾。この考え方はその後多くの改良と拡張を経て、実用計算法としてひろく用いられるようになった。いわゆる「Chang の計算法」というのはこれである⁴⁾⁸⁾。

$$(b) E_s = k \cdot x \cdot B \quad \dots\dots(5)$$

これが E_s が深さと共に直線的に増加するという考え方で、砂質土にあてはまるといわれている¹⁴⁾。この関係を直接代入した場合の(1)式の解がすでに求められているが、実用化されていない。そこで(5)式の関係を用いた実用解法としては、(6)式の特別の場合として、階差法を用いるのが普通である。また、Chang の方法では、 E_s が深さと共に増加する場合には、これを平均的な様な E_s におきかえて解くことにしている。

$$(c) E_s = k_t \cdot \left(\frac{x}{L}\right)^m \cdot B \quad \dots\dots(6)$$

ここに $k_t \cdot B$ = 杭の先端における地盤の弾性係数

L = 杭の根入れ長

m = 指数 $m \geq 0$

これは(4)式と(5)式を結合し、より一般化したものに他ならない。 $m = 0$ とすれば(4)式となり、 $m = 1$ とすれば(5)式となる。そして m に適当な値を入れることにより、いろいろな E_s の分布をあらわすことができる。この関係は Palmer および Thompson によつて提案されたものであり、彼等はまた階差法を応用して、この関係を入れた場合の、(1)式の近似的な数値解析法を考案した¹¹⁾¹²⁾。その後この解法の精度を高め、計算を簡便化するため多くの努力がなされており、米国でひろく用いられている。

(d) 一般的考察

上に説明したように、 E_s にはいろいろの考え方があがるが、いずれにしても、地盤反力 P と変位 y との間に一次的比例関係があることを前提にしての議論である。しかし、すでに述べたように、杭が横方向力をうけるときの、周囲の地盤の挙動は弾性的ではない。これは P と y との間の一次的比例関係という前提が、完全には成り立たないことを示している。そこでわれわれは、 E_s を用いた(2)式や(3)式の代わりに、次の(7)式で P と y の関係をもつと一般的にあらわすことにする。

$$P = k \cdot x^m \cdot y^n \cdot B \quad \dots\dots(7)$$

簡単のために P のかわりに p を使うこと(8)にすると式が得られる。

$$p = \frac{P}{B} = k \cdot x^m \cdot y^n \quad \dots\dots(8)$$

ここに k = 地盤の横抵抗常数 $m \geq 0$

$1 \geq n \geq 0$

(8)式において $n < 1$ とすることにより、地盤の非弾性的挙動をあらわすことができる。この場合、最初には $n = 1$ で、 y がある値をこえてから $n < 1$ になる場合と、最初から $n < 1$ である場合とが考えられるが、実験によれば後者であつた。すなわち、 $p-y$ 関係は最初から直線部分をもたない。そして、 m, n の値は地盤によつてきまる一定の常数と考えて良い。

Chang の方法であれ、Palmer-Thompson の方法であれ、従来の計算法ではすべて土を弾性的に扱っている。すなわち $n = 1$ とおいている。したがつて、弾性係数の深さ方向の分布、すなわち m の値についてどのように詳細な考察をほどこしても、本来非弾性的な地盤の挙動、ひいては杭の挙動を適確に表現できなかつたのは、や

むを得ないことであつた。

次にのべようとするわれわれの新しい計算法は、 $n < 1$ であるという事実をその出発点としている。これが他の計算法との根本的な違いであつて、もしわれわれの方法が他の方法よりも多少とも適確に、杭の挙動を予測できるとすれば、その理由もまたそこにあるのである。

3. 篠原・久保の計算法

3.1 基本事項

3.1.1 模型実験概要

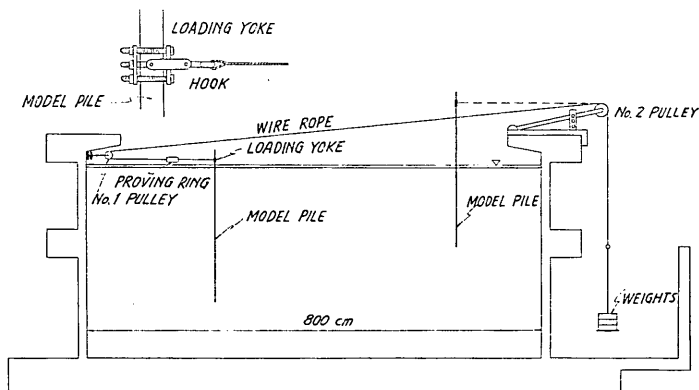
われわれの計算法は、系列模型実験の結果に基礎をおいている。すなわち、計算法の根底となる k - γ 関係式も、模型実験結果から導きだされたものであるし、また、この関係式にもとづいて実物の杭の挙動を予測する具体的手段としても、模型杭の挙動からの換算という方法がとられている。

模型実験の詳細はすでに報告されているので¹⁾²⁾³⁾、ここでは概要のみをのべる。実験はすべて長さ 8 m、幅 4.5 m、深さ 4 m の鉄筋コンクリート製実験槽において行なつた。用いた杭は、鋼製であり、本報告でとりあげた第 1 次、第 2 次実験における要目は表-1 に示す通りである。

表-1 模型杭の要目

実験	シリーズ	杭の条件	形状	本数	幅または直径 (B)	根入れ長(L)	載荷高(h)
第 1 次	No.1~	頭部自由	矩形	18	7~30 ^{cm}	140~240 ^{cm}	0~117 ^{cm}
	No.4	垂直単杭	円管	12	1.75~10.16	60~240	15
第 2 次	No.7	頭部固定 垂直単杭	矩形	4×4=16	7 ^{cm}	83~156 ^{cm}	9.5~83 ^{cm}

各シリーズとも、6~10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つた。砂は中粒の川砂で、乾燥密度が 1.78g/cm^3 程度になるように一様に締め固めを行なつた。載荷は重錘を用い、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



LOADING ARRANGEMENT

要を図-8に示す。曲げヒズミの分布から曲げモーメントがわかり、更に微分・積分の操作により地盤反力 P と杭面変位 y が求められる。図-9はその1例である。

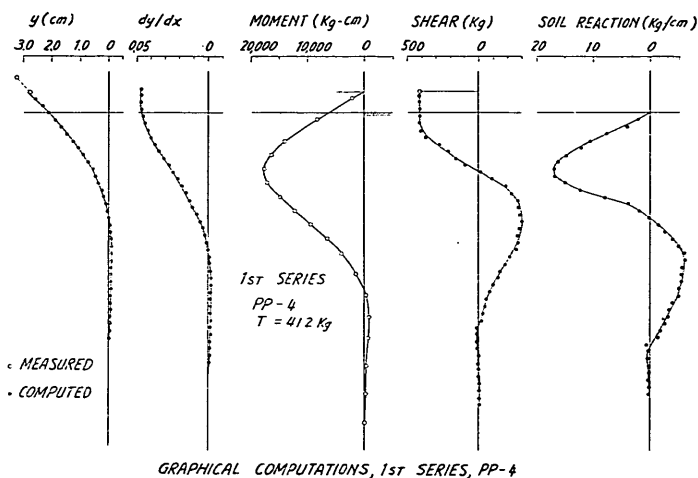


図-9

3・1・2 地盤反力と杭の変位の関係

地盤反力 p と杭面変位 y の関係は一般に次の式であらわされることをすでにのべた。

$$p = k \cdot x^m \cdot y^n \quad \dots\dots(8)$$

この式が実験結果に適合するかどうか、また m や n がどのような値になるかを調べてみよう。

曲げヒズミの測定結果から求めた、地盤反力 p と杭面変位 y の関係を、各深さ毎に図示したものの1例を図-10に示す。図中、点線で結んだのは同一載荷段階における値を示すものである。この例は模型杭PP-4について

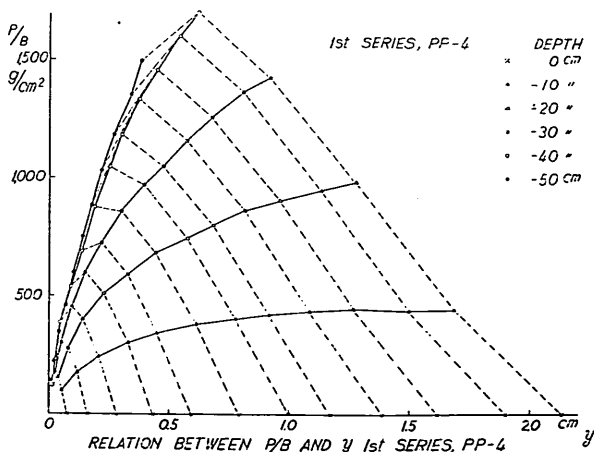


図-10

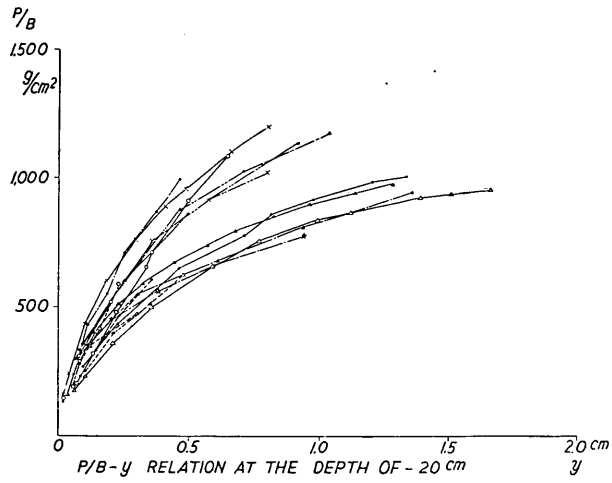


図-11

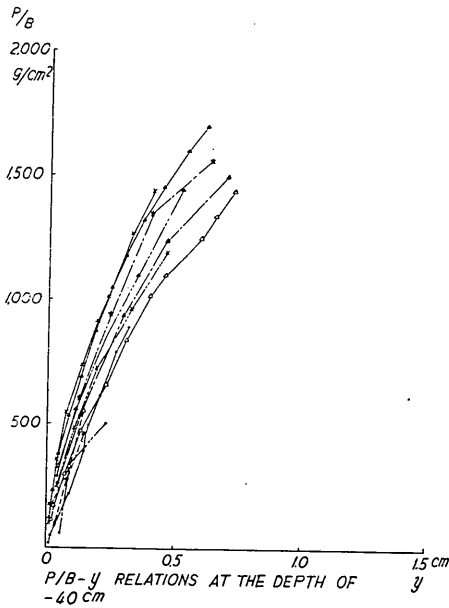


図-12

のものであるが、同様の関係が他の杭についても求められる。そこで各杭の $p-y$ 関係を各深さについてまとめると、剛性や載荷高の差異にもかかわらず、かなりよい一致を示すことがわかる。その例として深さ 20cm および 40cm の場合を、図-11 および 図-12 に示す。これを対数目盛に直すと、図-13 および 図-14 のようになり $p-y$ 関係は勾配が 0.5 である直線で表わされる。すなわち、(8) 式の n 値は 0.5 であり、或る深さについては p と y との間には $p = \beta \cdot y^{0.5}$ なる一義的關係があることがわかる。

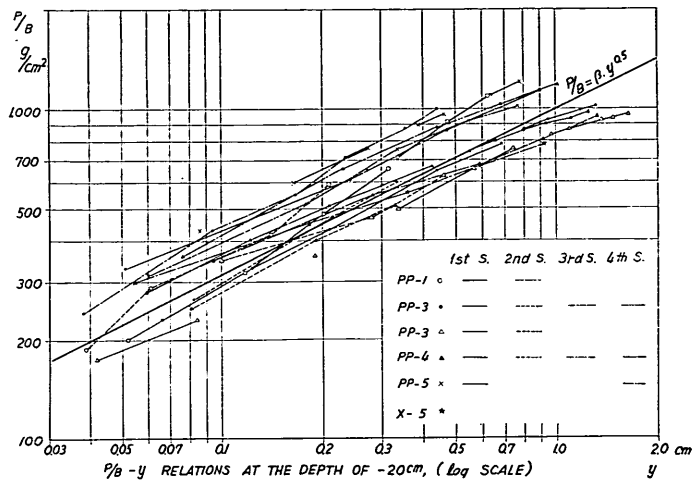


図-13

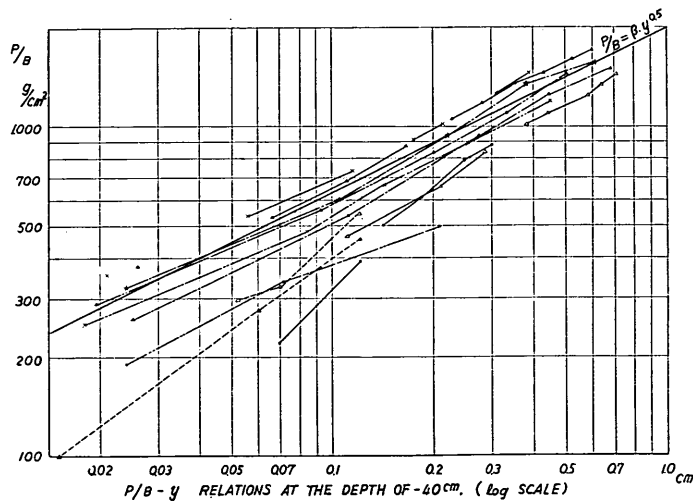


図-14

次に深さ x の影響を調べるために、同じ y の値に対する p の値を、深さ x に対して図示してみると、 p は深さに対しほぼ直線的に増加することがわかる。その例を図-15におよび図-16に示す。図-15では深い所で多少曲がりが見られるが、これは地盤自体の性格に帰因するものでなく、杭のたわみによつてあらわれてくるものと考えられる。すなわち、詳細に検討してみると p が最大値を示す深さより下で直線からのズレがみられることがわかる。したがつて、地盤自体としては反力の直線分布が成り立つものとするのが自然である。一方、杭の下部でのズレは、これを無視しても大きな影響はない程度である。このような観点から、(8)式における m 値は1とおくことにする。

このようにして、模型実験を行なつた地盤については、 p と y の関係は次の式で表わされることがわかつた。

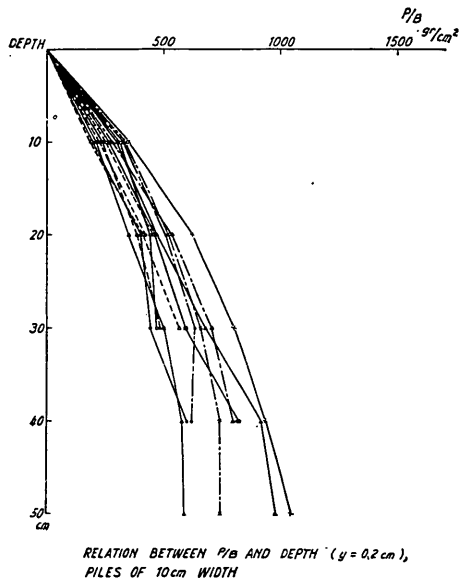


図-15

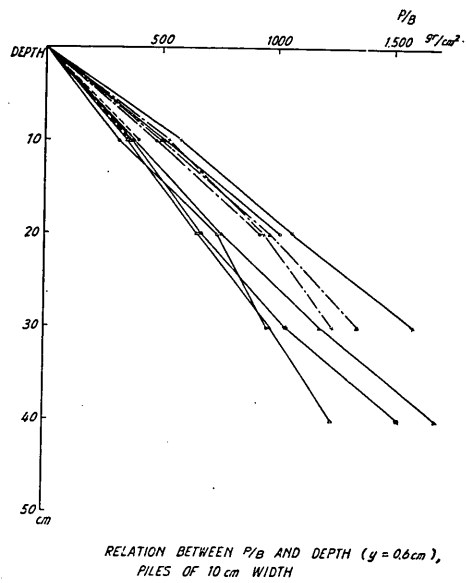


図-16

$$p = k \cdot x \cdot y^{0.5} \quad \dots\dots(9)$$

図-19は、すべての杭について p/x と y の関係を対数目盛上に示したものであるが、すべての点を、図中に示した $p/x = k \cdot y^{0.5}$ なる直線で代表することができる。もちろん点はかなりばらついているが、地

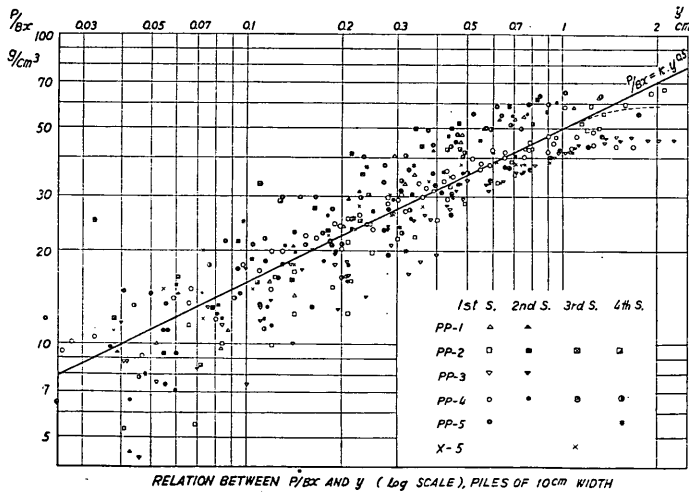


図-17

盤条件の多少の偏差や、 p や y を計算する過程で入ってくる誤差を考えると、やむを得ない程度のものであり、むしろ杭の剛性や載荷高を広範囲に変えたにもかかわらず、 p と y の関係が地盤により一義的にきまってくるという事実の方に注目すべきである。また図-17から、この地盤では k の値が $0.05 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3.5} (= 50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3.5})$ であることがわかる。

(9)式で表わされる関係は、もちろん、無制限に成り立つものでなく、 y が或る限度をこすと p の増加度がへる。これは土が破壊状態に入ったものと考えて良いが、その場合の y の限度は深さや、杭の剛性などの影響をう

けると思われる。この点は今後も検討する予定であるが、今回の実験では γ の限界は大体1.5cm程度であつた。そして実物の杭ではこの値は多少大きくなると思われる。したがつて杭の地表面変位が数cm以内の場合には、(9)式からのズレはあまり問題にしくても良い。

模型実験で求めた(9)式が、実際の地盤、実際の杭に対してあてはまるかどうかは、(9)式にもとづいて作成したわれわれの計算法が、実物杭の現地実験の結果をどの程度適確に表現しうるかという点にかかつている。多くの現地試験結果についてこれを検討した結果、一様な密度分布をもつ砂質地盤では、ほぼ(9)式が成り立つことがわかつた。ただし k 値は地盤条件によつて異なつた値を示すのはもちろんである。粘土地盤でも(9)式が成り立つものがかなりあるが、よく締まつた粘土などではむしろ次の(10)式の方が実際に近いと考えられる場合も少なくない。

$$p = \bar{k}_c \cdot y^{0.5} \dots\dots(10)$$

また当然、(9)式と(10)式との中間的な場合もあり得るわけで、(8)式中の m の値は地盤条件によつてかなり広く変化するわけである。しかし、 n の値はどのような場合も大体0.5になるようであつて、これは杭の横抵抗の問題において、非常に大切な意味をもつていられる。

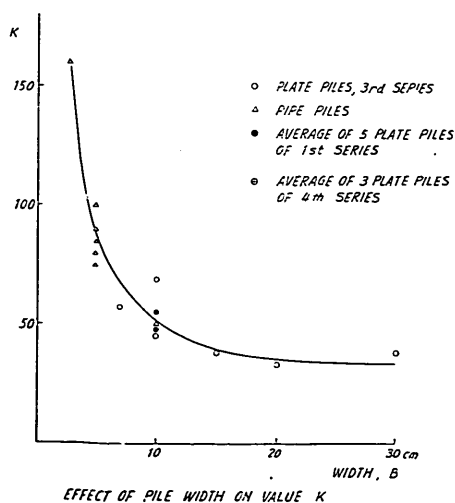
われわれの計算法では、 p と γ の関係式として(9)式を用いている。したがつて m が1以外の値をとる場合にはあてはまらないことになるが、適当なおきかえを行なうことによつて、そのような場合にも近似的な計算ができるように工夫した。

3・1・3 杭幅の影響

いままでの説明では、杭幅 B の影響についてはふれないうできた。3・1・2で p と γ の関係式を求めたが、この場合も、すべて $B=10\text{cm}$ の模型杭の実験結果だけをとりあげ、杭幅の問題には立ち入らなかつた。しかし、杭幅の影響をどう考えるかについては、従来から次の2つの見解が対立して、まだ決着をみていない状態である。

まず第1の見解は、単位面積あたりの地盤反力 p と変位 γ との関係に対し、杭幅 B は影響をもたないという考え方である。すなわち、一般式、 $p = k \cdot x^m \cdot y^n \dots\dots(8)$ において、 k 値は地盤条件のみに関係し、杭幅に無関係であると考えられるわけである。これはかなり便宜的な性格をもつが、簡単なので広く採用されている。

一方、K. Terzaghiによつて提唱された第2の見解によれば、 k 値は B に逆比例することになる¹⁴⁾。これは杭の前面に形成される pressure bulb が、 B に比例して大きくなるという考えにもとづいている。



図一18

われわれは杭幅の影響を確かめるため第3シリーズにおいて、幅を変えた杭を用いて実験を行なつた。実験結果によれば杭幅 B の大小にかかわらず、 $p = k \cdot x \cdot y^{0.5} \dots\dots(9)$ の関係が成り立つことがわかつた。しかし k の値は B によつて変わり、図一18のような関係を示す。 B が小さい場合には、 k におよぼす B の影響はかなり大きく、Terzaghiのいうような k が B に逆比例するという関係に近い。しかし B が或る程度大きくなると、 k 値はほとんど一定の値を示す。すなわち第1の見解に近い性質を示すようになる。

単純化して考えると、杭が横方向力をうける場合に生ずる土の抵抗は、杭の前面の土塊のセン断および圧縮に対する抵抗と、杭および土塊の側面における土のセン断抵抗の2つにわけられる。前者は杭幅に比例して増加するが、後者は杭幅

に無関係に一定の値をとると考えられる。したがって単位幅あたりの抵抗を考えると、杭幅の小さい場合に側面の影響が特にきいてきて、図-18に示すような傾向を示すものと解釈される。この図によれば、 B が20cmをこえると k は一定値をとる。したがって、実物の杭では、その杭幅が一般に20cm以上であるから、杭幅による k の変化を考慮する必要はないという結論になる。

図-18の関係は模型実験によつて得たものであるから、この関係が剛性の大きい実物杭にそのままあてはまるかどうか多少疑問が残る。この点については目下研究中であるが、現在までのところ、上記の結論を改めるべき必要を認めていない。

杭の断面形状の影響については矩形断面と円管断面の比較しか行なつていないが、これら2種に関する限り、ほとんど差異はみられなかつた。

3・1・4 杭の有効長

すでにのべたように、根入れ長が大きい杭では、或る深さより以下の部分は、杭が横方向力をうけても全く変位を示さず、したがつて有効な抵抗を発揮しない。この場合、杭の実際の根入れ長がどの位であるかということは、杭の挙動には全く関係がなく、大切なのは「有効長」すなわち、横方向力に対して有効な抵抗を発揮している部分の長さである。杭の根入れ長が有効長より大きいときは、杭の下部は地盤中に固定された形をとる。したがつて、有効長とは杭の下端を固定の条件に保つために必要な最小の長さであると考えても良い。

すでにのべたように、根入れ長が有効長より小さい杭を「短杭」と呼ぶが、「短杭」は十分な根入れのある杭にくらべて変位が大きくなるのはいうまでもないし、杭の挙動が根入れ長自体によつて影響をうけるので、変位や曲げモーメントの予測が非常に難しくなる。また、杭が倒壊する危険も多く、クリープや繰返し載荷に対しても不利である。このような事情から、一般に横抵抗を期待する杭としては、有効長以上の根入れを必要とするのである。

有効長の意味についてはすでに説明したが、これが実際上どのような長さであるかを調べるために、同じ杭に

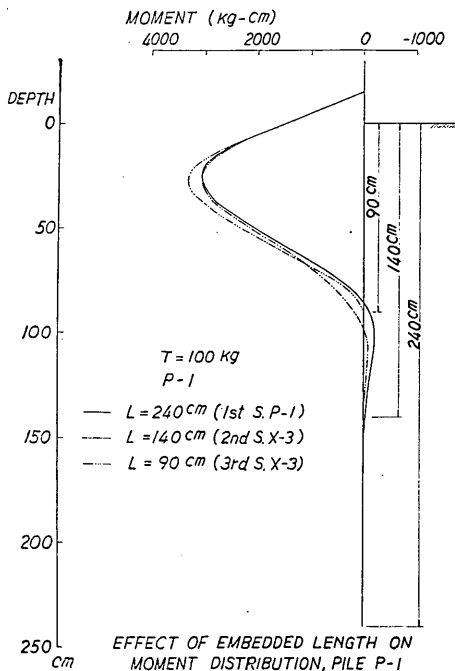


図-19

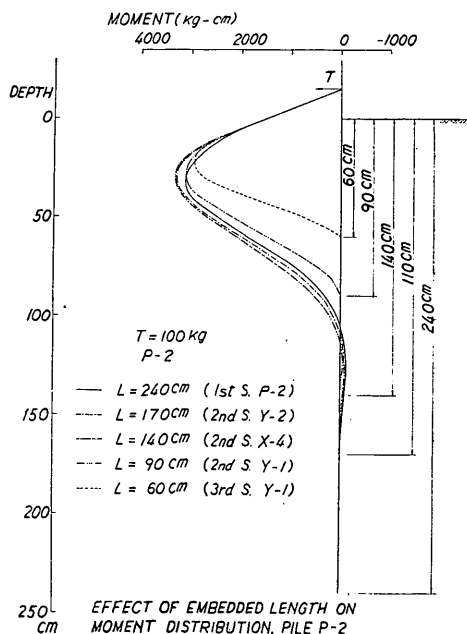


図-20

ついて、根入れ長をいろいろ変えて実験した。図-19、図-20は模型杭P-1、P-2について、曲げモーメント分布を比較したものである。これらを見ると、根入れ長 L が、根入れ無限長の杭のモーメント第1ゼロ点の深さ l_{m1} より大きい場合には、曲げモーメント分布曲線は、実際の L に無関係にほとんど同じ形をとる。そして L が $1.5 l_{m1}$ をこえれば、杭の下部は実質的に固定の状態を保っている。これらの結果によると、 $1.5 l_{m1}$ をもって有効長として良いと思われる。ちなみに、たわみの第1ゼロ点および第2ゼロ点の深さは、それぞれ、 $(1/1.5) l_{m1}$ および $1.25 l_{m1}$ に近い値をとる。

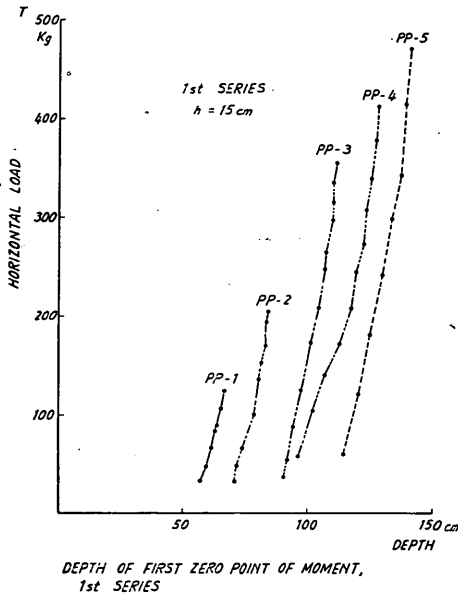


図-21

(3) 横抵抗を期待する杭では、有効長以上の根入れをとる必要がある。そして、有効長としては $1.5 l_{m1}$ をとなれば良い。ここに、 l_{m1} とは無限長の根入れをもつ杭の、モーメント第1ゼロ点の深さである。(ただし、頭部固定杭ではモーメント第2ゼロ点の深さとなる。)

3.2 計算法の原理

3.2.1 概要

(9)式で表わされる p を、(1)式に代入すると次の微分方程式を得る。

$$EI \cdot \frac{d^4 y}{dx^4} = -p \cdot B = -k \cdot x \cdot y^{0.5} \cdot B \quad \dots\dots(11)$$

(11)式を解けば、横方向力をうける杭の挙動の解析が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みいだすことは非常に困難である。電子計算機を使えば、数値解を求めることは不可能でないが、個々の問題についてこのような方法をとることは事実上できない。そこでわれわれは、(11)式を解くことなく、相似則を用いて杭の挙動を予測できる方法を考案した。

(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、或る杭の挙動を、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等、設計に必要な量に対する基準曲線を求める。われわれは、各種の条件をもつ模型杭について実験を行なったので、そ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

さて、有効長またはその指標となる l_{m1} なる長さは、杭の剛性の増大にともなうて大きくなることは容易に想像される。さらに、同じ杭であつても、横方向力が大きくなれば、次第に大きくなる性質をもつ。これらの点を示すのが、図-21である。

また、実験結果によれば、 l_{m1} は載荷高および頭部支承条件に無関係であることがわかつた。したがつて、 l_{m1} は有効長の指標としてきわめて便利である。

3.1.5 要約

模型実験の結果、基本事項として次の3点が明らかとなつた。

(1) 一様な密度分布をもつ砂地盤では、地盤反力 p と杭の横方向変位 y の間に、次の関係が成り立つ。

$$p = k \cdot x \cdot y^{0.5} \quad \dots\dots(9)$$

(2) 杭幅が20cmをこえる場合、 k 値に対して、杭幅の影響を考える必要はない。

頭曲げモーメント，地中部の最大曲げモーメント， l_{m1} および地表面傾斜の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，任意の杭の挙動が容易に予測できる。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良いのである。

3・2・2 相似則

図-22に示すように，原型杭 (prototype pile) と基準杭 (standard pile) との撓み曲線が相似であるとする

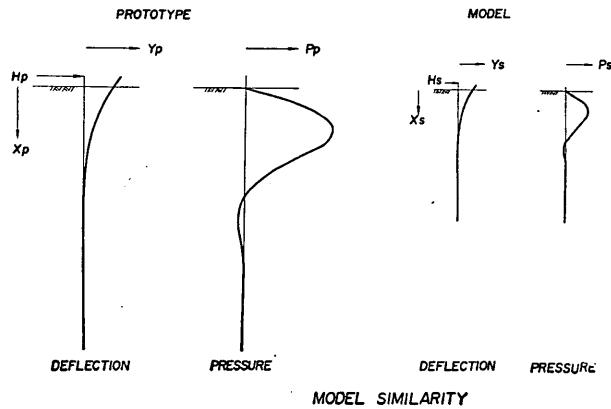


図-22

と，対応する深さ x において，次の関係が成り立つ。(以下，添字 p および s は，原型杭および基準杭を示す。

$$\left. \begin{aligned} \frac{x_p}{x_s} &= R_x = \text{const.} \\ \frac{y_p}{y_s} &= R_y = \text{const.} \end{aligned} \right\} \dots\dots(12)$$

ここに x = 対応する点までの深さ

y = 深さ x における杭の横方向変位

R = 原型杭と基準杭における対応する量の比

それゆえ，

$$\left. \begin{aligned} \frac{d y_p}{d x_p} &= \left(\frac{R_y}{R_x} \right) \cdot \frac{d y_s}{d x_s} \\ \frac{d^2 y_p}{d x_p^2} &= \left(\frac{R_y}{R_x^2} \right) \cdot \frac{d^2 y_s}{d x_s^2} \\ \frac{d^3 y_p}{d x_p^3} &= \left(\frac{R_y}{R_x^3} \right) \cdot \frac{d^3 y_s}{d x_s^3} \\ \frac{d^4 y_p}{d x_p^4} &= \left(\frac{R_y}{R_x^4} \right) \cdot \frac{d^4 y_s}{d x_s^4} \end{aligned} \right\} \dots\dots(13)$$

また梁の理論から，

$$\left. \begin{aligned} \frac{M}{EI} &= \frac{d^2 y}{d x^2} \\ \frac{S}{EI} &= \frac{d^3 y}{d x^3} \\ \frac{P}{EI} &= \frac{d^4 y}{d x^4} \end{aligned} \right\} \dots\dots(14)$$

ここに M = 曲げモーメント

S = セン断力

P = 杭の単位長さあたりの地盤反力

EI = 杭の曲げ剛性

(14)式を(13)式に代入することにより、

$$\left. \begin{aligned} \frac{M_p}{(EI)_p} &= \left(\frac{R_y}{R_x^2} \right) \frac{M_s}{(EI)_s} \\ \frac{S_p}{(EI)_p} &= \left(\frac{R_y}{R_x^3} \right) \frac{S_s}{(EI)_s} \\ \frac{P_p}{(EI)_p} &= \left(\frac{R_y}{R_x^4} \right) \frac{P_s}{(EI)_s} \end{aligned} \right\} \dots\dots(15)$$

また、

$$\frac{(EI)_p}{(EI)_s} = R_{EI} = \text{const.} \dots\dots(16)$$

(16)式を(15)式に代入して、

$$\left. \begin{aligned} \frac{M_p}{M_s} &= R_M = \left(\frac{R_y}{R_x^2} \right) R_{EI} \\ \frac{S_p}{S_s} &= R_S = \left(\frac{R_y}{R_x^3} \right) R_{EI} \\ \frac{P_p}{P_s} &= R_P = \left(\frac{R_y}{R_x^4} \right) R_{EI} \end{aligned} \right\} \dots\dots(17)$$

それゆえ、 R_M , R_S , R_P は constant でなければならない。(17)式を変形すると次の関係を得る。

$$\left. \begin{aligned} R_{EI} &= R_P \cdot R_x^4 \cdot R_y^{-1} \\ R_S &= R_P \cdot R_x \\ R_M &= R_P \cdot R_x^2 \\ R_i &= R_P \cdot R_x^{-1} \\ R_y &= R_y \end{aligned} \right\} \dots\dots(18)$$

$$\text{ここに } R_i = \frac{i_p}{i_s}, \quad i = \frac{dy}{dx}$$

3・2・3 換算係数

すでにのべたように、地盤反力の一般式は次の式で与えられる。

$$P = p \cdot B = k \cdot x^m \cdot y^n \cdot B \dots\dots(7)$$

したがって、

$$R_P = R_k \cdot (R_x)^m \cdot (R_y)^n \cdot R_B \dots\dots(19)$$

(19)式を(18)式に代入して整理すると、セン断力、曲げモーメント、たわみ角、および変位に関する換算係数として次の式を得る。

$$\left. \begin{aligned} R_S &= (R_x)^{\frac{-m-3n-1}{n-1}} \cdot (R_{EI})^{\frac{n}{n-1}} \cdot (R_k)^{\frac{-1}{n-1}} \cdot (R_B)^{\frac{-1}{n-1}} \\ R_M &= (R_x)^{\frac{-m-2n-2}{n-1}} \cdot (R_{EI})^{\frac{n}{n-1}} \cdot (R_k)^{\frac{-1}{n-1}} \cdot (R_B)^{\frac{-1}{n-1}} \\ R_i &= (R_x)^{\frac{-m-n-3}{n-1}} \cdot (R_{EI})^{\frac{1}{n-1}} \cdot (R_k)^{\frac{-1}{n-1}} \cdot (R_B)^{\frac{-1}{n-1}} \\ R_y &= (R_x)^{\frac{-m-4}{n-1}} \cdot (R_{EI})^{\frac{1}{n-1}} \cdot (R_k)^{\frac{-1}{n-1}} \cdot (R_B)^{\frac{-1}{n-1}} \end{aligned} \right\} \dots\dots(20)$$

ただし、 $1 > n > 0$

たわみ曲線の相似性を満足するためには、載荷高 h の比、すなわち R_h は R_x に等しくならねばならない。

$$R_h = R_x \quad \dots\dots(21)$$

ところで、われわれは十分な根入れを有する杭のみを考えているのであるから、実際の根入れ長 L は問題にする必要はない。したがって、(20)式によつて換算係数を計算する場合、 R_x のかわりに R_h を用いれば良い。また、せん断力 S は、地表面より上では横方向力 T に等しい。したがって $R_T = R_S$ になる。

(20)式で与える換算係数の一般式は、 m と n の任意の値に対して成り立つが、ただ $n=1$ すなわち、 p と y の一次比例という関係に対しては用いることができないことに注意せねばならない。

さて、模型実験結果によれば、

$$p = k \cdot x \cdot y^{0.5} \quad \dots\dots(9)$$

すなわち、 $m=1$ 、 $n=0.5$ であるから、これを(20)式に代入すると、換算係数は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} R_S &= (R_x)^7 \cdot (R_{EI})^{-1} \cdot (R_k)^2 \cdot (R_B)^2 \\ R_M &= (R_x)^8 \cdot (R_{EI})^{-1} \cdot (R_k)^2 \cdot (R_B)^2 \\ R_i &= (R_x)^9 \cdot (R_{EI})^{-2} \cdot (R_k)^2 \cdot (R_B)^2 \\ R_y &= (R_x)^{10} \cdot (R_{EI})^{-2} \cdot (R_k)^2 \cdot (R_B)^2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(22)$$

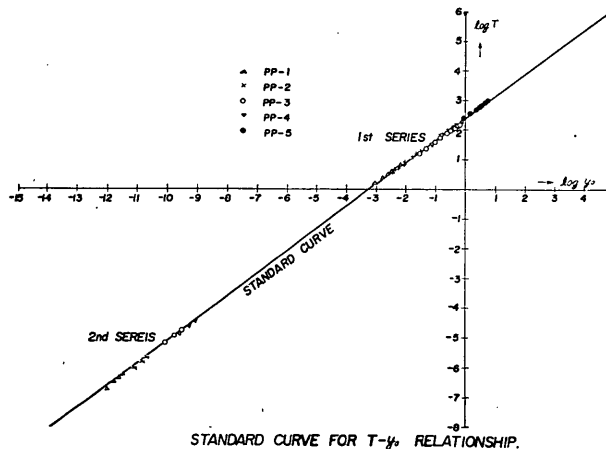
実際の計算には、(22)式を対数であらわしたものをを用いるのが便利である。

$$\left. \begin{aligned} \log R_S &= 7(\log R_x) - (\log R_{EI}) + 2(\log R_k) + 2(\log R_B) \\ \log R_M &= 8(\log R_x) - (\log R_{EI}) + 2(\log R_k) + 2(\log R_B) \\ \log R_i &= 9(\log R_x) - 2(\log R_{EI}) + 2(\log R_k) + 2(\log R_B) \\ \log R_y &= 10(\log R_x) - 2(\log R_{EI}) + 2(\log R_k) + 2(\log R_B) \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(23)$$

3・2・4 基準曲線

横方向載荷試験を行なつて、或る一つの杭、たとえばS-杭の挙動がわかれば、上に求めた換算係数を用いて他の任意の杭、たとえばp-杭、の挙動に換算することができる。しかし、個々の実験結果からの換算では、p-杭に対して必要な荷重範囲が得られないことが多い。そこで、非常に広範な荷重範囲をもつ基準曲線を作成しておくことが必要となつてくる。

例として、荷重 T と地表面変位 y_0 の関係、すなわち $T-y_0$ の基準曲線をどのようにして求めたかを説明しよ



図—23

表-2 頭部自由杭の基準曲線

Standard Curves for Free-head Pile

Ground Surface Deflection		Top Deflection		Maximum Moment		Depth of 1st Zero Point of Moment		Inclination at the Ground Surface	
$\log y_0$	$\log T$	$\log y_{top}$	$\log T$	$\log M_{max}$	$\log T$	$\log l_{m_1}$	$\log T$	$\log i_0$	$\log T$
-15	-8.906	-15	-10.668	-10	-11.187	0.0	-12.244	-16	-9.837
-14	-8.131	-14	-9.703	-9	-10.188	0.1	-11.544	-15	-8.971
-13	-7.360	-13	-8.746	-8	-9.189	0.2	-10.844	-14	-8.106
-12	-6.591	-12	-7.800	-7	-8.191	0.3	-10.144	-13	-7.242
-11	-5.826	-11	-6.866	-6	-7.194	0.4	-9.444	-12	-6.379
-10	-5.065	-10	-5.947	-5	-6.198	0.5	-8.744	-11	-5.518
-9	-4.306	-9	-5.045	-4	-5.206	0.6	-8.044	-10	-4.659
-8	-3.551	-8	-4.160	-3	-4.217	0.7	-7.344	-9	-3.803
-7	-2.799	-7	-3.294	-2	-3.234	0.8	-6.644	-8	-2.950
-6	-2.050	-6	-2.447	-1	-2.261	0.9	-5.944	-7	-2.100
-5	-1.304	-5	-1.619	0	-1.299	1.0	-5.244	-6	-1.254
-4	-0.561	-4	-0.808	1	-0.352	1.1	-4.544	-5	-0.413
-3	0.179	-3	-0.012	2	0.580	1.2	-3.844	-4	0.434
-2	0.915	-2	0.771	3	1.499	1.3	-3.144	-3	1.255
-1	1.649	-1	1.541	4	2.410	1.4	-2.444	-2	2.080
0	2.380	0	2.300	5	3.314	1.5	-1.744	-1	2.900
1	3.108	1	3.049	6	4.213	1.6	-1.044	0	3.714
2	3.833	2	3.789	7	5.108	1.7	-0.344	1	4.523
3	4.555	3	4.522	8	6.001	1.8	0.356	2	5.326
4	5.274	4	5.249	9	6.890	1.9	1.056	3	6.124
5	5.991	5	5.971	10	7.778	2.0	1.756	4	6.918
6	6.705	6	6.687	11	8.664	2.1	2.456	5	7.709
7	7.417	7	7.401	12	9.548	2.2	3.156	6	8.497
8	8.126	8	8.112	13	10.432	2.3	3.856	7	9.283
9	8.834	9	8.821			2.4	4.556	8	10.067
10	9.540	10	9.529			2.5	5.256	9	10.850
						2.6	5.956		
						2.7	6.656		
						2.8	7.356		
						2.9	8.056		
						3.0	8.756		
						3.1	9.456		
						3.2	10.156		

表一 3 頭部固定杭の基準曲線

Standard Curves for Fixed-head Pile

Ground Surface Deflection		Top Deflection		Maximum Moment (M_{max-t})		Maximum Moment (M_{max-1})		Depth of 1st Zero Point of Moment		Inclination at the Ground Surface	
$\log y_0$	$\log T$	$\log y_{top}$	$\log T$	$\log M_{max-t}$	$\log T$	$\log M_{max-1}$	$\log T$	$\log l_{m1}$	$\log T$	$\log i_0$	$\log T$
-15	-8.758	-15	-10.130	-10	-10.912	-10	-10.744	0.0	-12.244	-17	-10.509
-14	-7.951	-14	-9.166	-9	-9.920	-9	-9.748	0.1	-11.544	-16	-9.616
-13	-7.148	-13	-8.210	-8	-8.930	-8	-8.752	0.2	-10.844	-15	-8.723
-12	-6.350	-12	-7.264	-7	-7.942	-7	-7.757	0.3	-10.144	-14	-7.830
-11	-5.557	-11	-6.328	-6	-6.958	-6	-6.763	0.4	-9.444	-13	-6.937
-10	-4.772	-10	-5.407	-5	-5.979	-5	-5.770	0.5	-8.744	-12	-6.046
-9	-3.993	-9	-4.503	-4	-5.006	-4	-4.778	0.6	-8.044	-11	-5.155
-8	-3.221	-8	-3.620	-3	-4.039	-3	-3.789	0.7	-7.344	-10	-4.265
-7	-2.456	-7	-2.761	-2	-3.080	-2	-2.804	0.8	-6.644	-9	-3.377
-6	-1.697	-6	-1.927	-1	-2.130	-1	-1.827	0.9	-5.944	-8	-2.490
-5	-0.944	-5	-1.117	0	-1.192	0	-0.858	1.0	-5.244	-7	-1.606
-4	-0.195	-4	-0.325	1	-0.265	1	0.102	1.1	-4.544	-6	-0.723
-3	0.549	-3	0.452	2	0.652	2	1.051	1.2	-3.844	-5	0.155
-2	1.290	-2	1.218	3	1.558	3	1.990	1.3	-3.144	-4	1.031
-1	2.026	-1	1.973	4	2.457	4	2.920	1.4	-2.444	-3	1.904
0	2.760	0	2.720	5	3.351	5	3.840	1.5	-1.744	-2	2.774
1	3.490	1	3.460	6	4.241	6	4.753	1.6	-1.044	-1	3.642
2	4.217	2	4.193	7	5.129	7	5.659	1.7	-0.344	0	4.510
3	4.942	3	4.923	8	6.015	8	6.560	1.8	0.356	1	5.376
4	5.664	4	5.648	9	6.900	9	7.457	1.9	1.056	2	6.242
5	6.384	5	6.370	10	7.783	10	8.349	2.0	1.756	3	7.108
6	7.100	6	7.089	11	8.665	11	9.239	2.1	2.456	4	7.973
7	7.815	7	7.806	12	9.547	12	10.127	2.2	3.156	5	8.838
8	8.528	8	8.520	13	10.429	13	11.012	2.3	3.856	6	9.702
9	9.239	9	9.232					2.4	4.556	7	10.567
10	9.949	10	9.942					2.5	5.256	8	11.431
								2.6	5.956	9	12.295
								2.7	6.656		
								2.8	7.356		
								2.9	8.056		
								3.0	8.756		
								3.1	9.456		
								3.2	10.156		

う。まず、模型実験で得られたすべての $T-y_0$ 曲線を、(23)式の換算係数を用いて、特定の基準杭の $T-y_0$ 曲線に換算する。しかるのち、換算で得たすべての $T-y_0$ 曲線を対数紙上にプロットして、これらを滑らかな曲線で連結すれば、これが $T-y_0$ 関係の基準曲線である。頭部自由杭に対するものを図-23に示した。

基準杭としてはどのようなものを選んでよいが、われわれの方法では次の条件をもつものを基準杭とした。

$$EI = 27.54 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$$

$$h = 15 \text{ cm}$$

$$B = 10 \text{ cm}$$

$$k = 0.05 \text{ kg} \cdot \text{cm}^{-3.5} (= 50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3.5})$$

頭部自由杭に対しては、 y_0 , y_{top} , M_{max} , l_{m1} , および i_0 について、また頭部固定杭に対しては、 y_0 , y_{top} , M_{max-t} , M_{max-1} , l_{m1} および i_0 についての基準曲線を求めた。計算の便利のため、数値表として、表-2 および表-3に与えてある。ここで頭部固定杭というのは、頭部の回転を許さない杭であり、記号の意味は下に示す通りである。

- T = 横方向力, kg
- y_0 = 地表面変位, cm
- y_{top} = 杭頭変位 (= 載荷点変位), cm
- M_{max} = 頭部自由杭における地中部の最大曲げモーメント, kg · cm
- M_{max-t} = 頭部固定杭の杭頭曲げモーメント, kg · cm
- M_{max-1} = 頭部固定杭の地中部の最大曲げモーメント, kg · cm
- i_0 = 地表面における $\frac{dy}{dx}$
- l_{m1} = 曲げモーメント第1ゼロ点 (頭部固定杭では第2ゼロ点) の深さ, cm

3.2.5 地表面載荷の場合

基準曲線と換算係数が与えられたから、これを用いて任意の原型杭の挙動が予測できることになった。ただし、原型杭に対して地表面で載荷が行なわれる場合は、特別の手続が必要である。この場合、 $h=0$ であるから、 $R_x=R_h=0$ となり、(22)で与えられる換算係数をそのまま適用できない。そこで、 $\log T-\log y_0$, $\log T-\log M_{max}$, $\log T-\log l_{m1}$ および $\log T-\log i_0$ の曲線が、 $h=0$ の場合には、それぞれ勾配が7/10, 7/8, 7/1 および 7/9である直線になるという性質を利用する。

すなわち、

$$\left. \begin{aligned} T &= \alpha \cdot (y_0)^{\frac{7}{10}} \\ T &= \beta \cdot \left(\frac{M_{max}}{10^6} \right)^{\frac{7}{8}} \\ T &= \varepsilon \cdot \left(\frac{l_{m1}}{100} \right)^7 \\ T &= \mu \cdot \left(\frac{i_0}{0.01} \right)^{\frac{7}{9}} \end{aligned} \right\} \dots\dots(24)$$

ただし、単位は T : kg, y_0 : cm, M_{max} : kg · cm, l_{m1} : cm である。

基準杭に対し、 α , β , ε および μ は次の値をとることが、実験結果から明らかにされている。(基準杭： $EI=27.54 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$, $B=10 \text{ cm}$, $h=15 \text{ cm}$, $k=50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3.5}$)

頭部自由杭

$$\left. \begin{aligned} \alpha_s &= 360 \\ \beta_s &= 21.4 \times 10^3 \\ \varepsilon_s &= 57.0 \\ \mu_s &= 200 \end{aligned} \right\} \dots\dots(25)$$

頭部固定杭

$$\left. \begin{aligned} \alpha_s &= 880 \\ \beta_{st} &= 21.4 \times 10^3 \text{ (杭頭モーメント)} \\ \beta_{s1} &= 80.6 \times 10^3 \text{ (地中部の最大曲げモーメント)} \\ \varepsilon_s &= 57.0 \end{aligned} \right\} \dots\dots(26)$$

任意の原型杭に対する値は次の式で与えられる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha_p &= \alpha_s \times R_\alpha \\ \beta_p &= \beta_s \times R_\beta \\ \varepsilon_p &= \varepsilon_s \times R_\varepsilon \\ \mu_p &= \mu_s \times R_\mu \end{aligned} \right\} \dots\dots(27)$$

ここに、

$$\left. \begin{aligned} \log R_\alpha &= \frac{4}{10} \log R_{EI} + \frac{6}{10} \log R_k + \frac{6}{10} \log R_B \\ \log R_\beta &= -\frac{1}{8} \log R_{EI} + \frac{2}{8} \log R_k + \frac{2}{8} \log R_B \\ \log R_\varepsilon &= -\log R_{EI} + 2 \log R_k + 2 \log R_B \\ \log R_\mu &= \frac{5}{9} \log R_{EI} + \frac{4}{9} \log R_k + \frac{4}{9} \log R_B \end{aligned} \right\} \dots\dots(28)$$

3・3 地盤条件と地盤常数の関係

3・3・1 S型地盤とC型地盤

一般式 $p = k \cdot x^m \cdot y^n$ における n の値は、どのような地盤でも 0.5 に近い値をとるが、 m 値は地盤条件によつてかなり変ることをすでにのべた。多くの現場実験例を解析した結果、地盤条件は次の2つの典型に分けられることがわかつた。すなわち、S型の地盤とC型の地盤である。(13頁を参照)

S型の地盤 (1) 標準貫入値 N が深さと共に直線的に増加する。

(2) p - y 関係は次の式で表わされる。

$$p = k \cdot x \cdot y^{0.5} \quad \dots\dots(9)$$

(3) 実例：一様な密度の砂地盤、正規圧密の粘土地盤等。

C型の地盤 (1) 標準貫入値が一定である。

(2) p - y 関係は次の式で表わされる。

$$p = \bar{k}_c \cdot y^{0.5} \quad \dots\dots(10)$$

(3) 実例：表面の締まつた砂地盤、大きな先行圧密をうけた粘土地盤等。

S型かC型かをきめる際には、非常に深いところを考える必要はなく杭の横抵抗に支配的な範囲だけを考慮すれば良い。大体、地表から $(1 \sim 0.5) l_{m1}$ までの深さを考えれば十分である。

3・3・2 S型地盤における地盤常数

われわれの計算法は、一様な砂地盤、すなわちS型地盤における模型実験結果にもとづいて作成されたものであるから、S型地盤中の原型杭に対してはそのまま適用できる。この場合、地盤常数 k をどのようにしてきめるかという問題が残る。この点を現場実験例について検討した結果、S型地盤では、 \bar{N} 値と k 値との間に、図-24

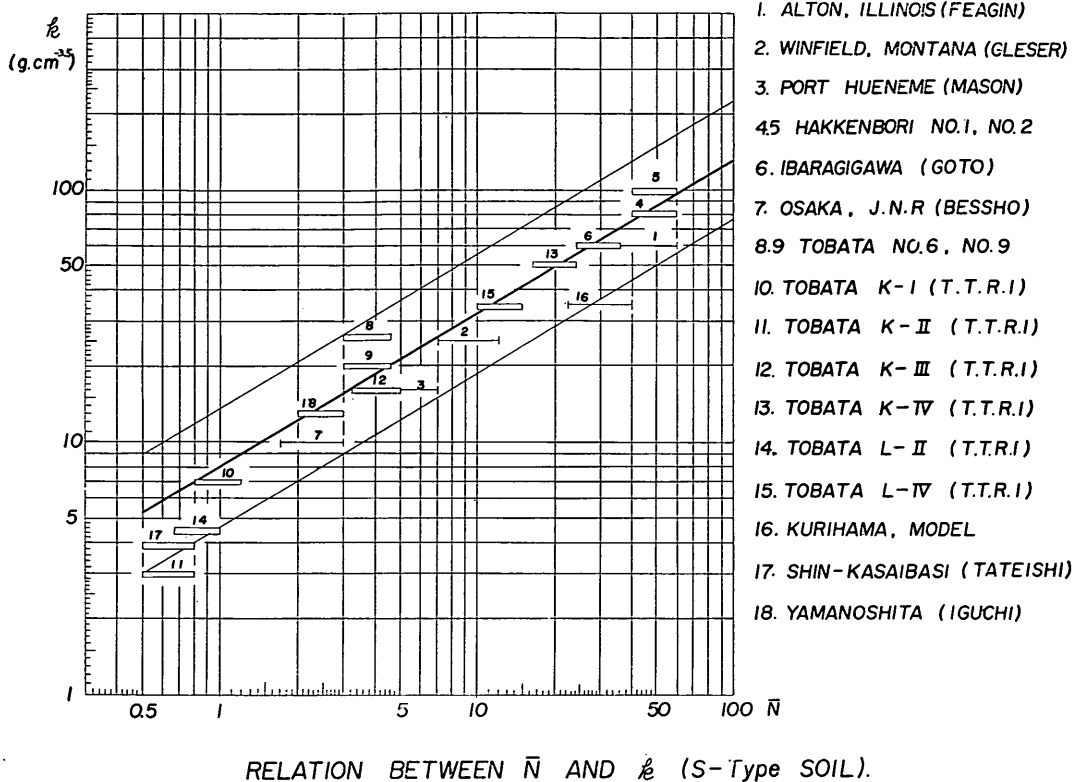


図-24

に示すような関係があることがわかった。ここに \bar{N} というのは、深さと共に直線的に増加するN値の勾配、いいかえれば、深さ1mにおけるN値を意味する。図-24を用いれば、N値の分布からS型地盤の k 値を推定することができる。

3・3・3 C型地盤の場合の計算法

C型地盤の場合でも、その換算係数は(20)式を用いて容易に誘導することができる。したがって、基準曲線が与えられれば、S型地盤におけると同じ原理を用いて計算ができるわけである。当研究所の林 聡博士らは、C型地盤で実施したH杭の実験結果を解析するにあたり、アナログ電子計算機を用いて、C型地盤に対する基準曲線を作成した⁶⁾。しかしこの報告では、この基準曲線をそのまま紹介することをやめ、すでに示したS型地盤に対する基準曲線を用い、適当なおきかえを行なうことによつて、C型地盤における杭の挙動を推定する方法を説明する。この方法によれば、後で示す計算図表をそのまま利用できるので便利である。

C型地盤の地盤常数 \bar{k}_c は、次の式を用いれば、S型地盤の地盤常数 k におきかえることができる。これは林博士のC型地盤に対する基準曲線を、われわれのS型地盤に対する基準曲線と比較することによつて求められたものである。ただし、林博士の基準曲線は頭部自由杭についてのみ与えられているので、次のおきかえも頭部自由杭に対するものである。しかし、これを頭部固定杭に用いても大きな誤差はないと考えられる。

$$k = \bar{a} \times (T_{10})^{-\frac{1}{5}} \cdot \{(EI)_{10}\}^{-\frac{1}{5}} \cdot (\bar{k}_c)^{\frac{7}{5}} \quad \dots\dots(29)$$

ここに T_{10} = 杭幅 10cm に対する横方向力, kg

$(EI)_{10}$ = 杭幅 10cm に対する EI , $\text{kg} \cdot \text{cm}^2$

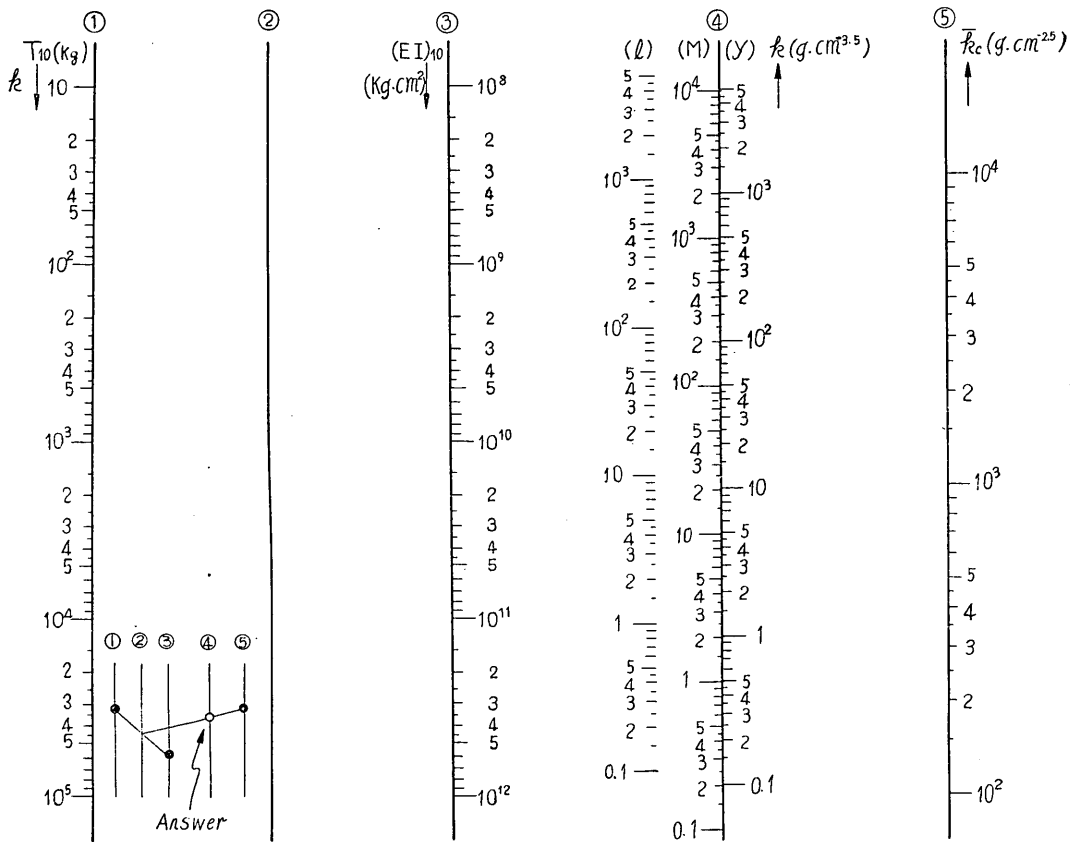
\bar{k}_c = C型地盤の地盤常数, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-2.5}$, ($p = \bar{k}_c \cdot y^{0.5}$)

k = S型地盤の地盤常数, $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3.5}$ ($p = k \cdot x \cdot y^{0.5}$)

\bar{a} は計算の対象によつてかわり, 次のような値をとる。

$$\left. \begin{array}{l} y \text{ を求める場合: } \bar{a} = 0.334 \\ M_{max} \text{ を求める場合: } \bar{a} = 0.682 \\ l_{m1} \text{ を求める場合: } \bar{a} = 0.273 \end{array} \right\} \quad \dots\dots(30)$$

(29)式, (30)式の計算は図-25を用いれば, きわめて容易に行なうことができる。



CONVERSION OF \bar{k}_c TO k

図-25

C型地盤における現場実験例は比較的少ないのであるが, それらを検討した結果, N値と \bar{k}_c 値の間には, 一応図-26に示す関係があるものと考えられる。したがつて, C型地盤の場合, 図-26を用いてN値から \bar{k}_c を推

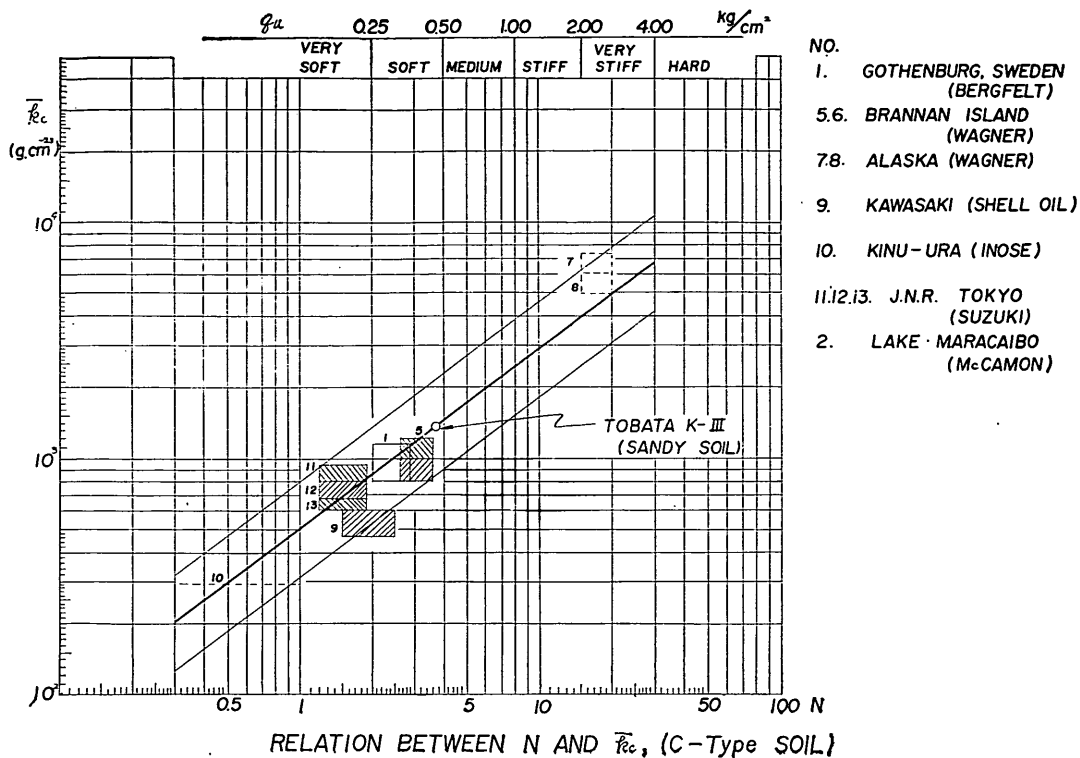


図-26

定することができ、さらに図-25によつて \bar{k}_c を k に換算すれば、S型地盤の場合と全く同様に計算ができるわけである。しかし N 値と \bar{k}_c との関係については今後とも検討を要するものであつて、C型地盤における実験例が数多く発表されることが望まれる次第である。

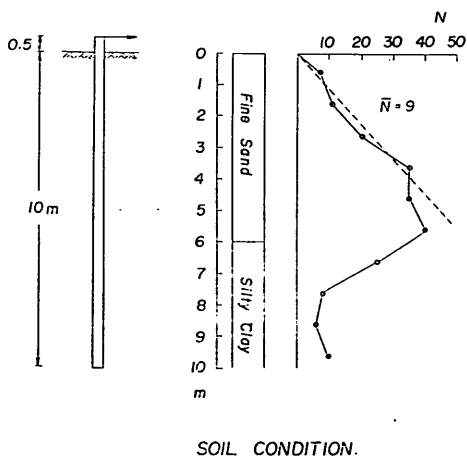


図-27

計算の対象とする杭（原型杭）と基準杭との諸元を比較すると次の通りである。

3・4 計算例

3・4・1 $h > 0$ の場合

ここでは、実際の計算の手順を実例をもつて説明しよう。図-27に示すような地盤中に打込まれた、頭部自由のH鋼杭に対し、地表面上0.5mの高さで、横方向力をかける場合を考える。頭部固定の場合も、基準曲線が違うだけで手順は全く同じである。

(1) 地盤常数 k の推定

この地盤においては、深さ5m位までは N 値は直線分布と考えて良い。したがつて、これはS型地盤であり、 \bar{N} 値は9である。図-24によれば、 $\bar{N} = 9$ に対応する k 値は30である。

(2) 換算係数の計算

	基 準 杭 (s-pile)	原 型 杭 (p-pile)
EI	$27.54 \times 10^6 \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$	$4.50 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$
B	10 cm	30.5 cm
h	15 cm	50 cm
k	50 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3.5}$	30 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3.5}$

$$R_{EI} = (EI)_p / (EI)_s = 1.634 \times 10^3, \quad \log R_{EI} = 3.213$$

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

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

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

(23)式により,

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

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

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

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

(3) 荷重—変位曲線

この例では地表面変位 y_0 を計算してみよう。基準杭の $T-y_0$ 関係、すなわち $T-y_0$ の基準曲線 (19頁、表—2) を、上に計算した換算係数を用いて、原型杭に換算すれば良い。ただし、基準曲線の全体を換算する必要はない。一般に、換算した $(y_0)_p$ が 0.1 ~ 10cm の範囲をカバーするようにとれば十分である。そのためには、下に示す通り、 $-\log R_y (=0.672)$ をはさみ、上下2点ずつ $(\log y_0)_s$ をとれば良い。また換算は次の式によつて行なう。

$$(\log y_0)_p = (\log y_0)_s + \log R_y = (\log y_0)_s - 0.672$$

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

基 準 曲 線		推 定 曲 線			
$(\log y_0)_s$	$(\log T)_s$	$(\log y_0)_p$	$(\log T)_p$	$(y_0)_p, \text{ cm}$	$(T)_p, \text{ kg}$
- 1	1.649	$\bar{2}.328$	2.621	2.128×10^{-2}	4.178×10^2
0	2.380	$\bar{1}.328$	3.352	2.128×10^{-1}	2.249×10^3
(0.672) 1	3.108	0.328	4.080	2.128	1.202×10^4
2	3.833	1.328	4.805	2.128×10	6.383×10^4

(4) 荷重—最大曲げモーメント曲線

換算の方法は全く同じである。ただし、荷重—変位曲線の場合と、荷重範囲をあわせる必要がある。そのためには、 $(\log T)_s$ の大体の範囲をあわせれば良い。

$$(\log M_{max})_p = (\log M_{max})_s + \log R_M = (\log M_{max})_s + 1.495$$

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

基 準 曲 線		推 定 曲 線			
$(\log M_{max})_s$	$(\log T)_s$	$(\log M_{max})_p$	$(\log T)_p$	$(M_{max})_p, \text{ kg}\cdot\text{cm}$	$(T)_p, \text{ kg}$
3	1.499	4.495	2.471	3.126×10^4	2.958×10^2
4	2.410	5.495	3.382	3.126×10^5	2.410×10^3
5	3.314	6.495	4.286	3.126×10^6	1.932×10^4
6	4.213	7.495	5.185	3.126×10^7	1.531×10^5

(5) 荷重— l_{m1} 曲線

この場合, $R_i = R_x$ であるから,

$$(\log l_{m1})_p = (\log l_{m1})_s + \log R_x = (\log l_{m1})_s + 0.523$$

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

基 準 曲 線		推 定 曲 線			
$(\log l_{m1})_s$	$(\log T)_s$	$(\log l_{m1})_p$	$(\log T)_p$	$(l_{m1})_p, \text{ cm}$	$(T)_p, \text{ kg}$
2.0	1.756	2.523	2.728	3.334×10^2	5.346×10^2
2.1	2.456	2.623	3.428	4.197×10^2	2.679×10^3
2.2	3.156	2.723	4.128	5.284×10^2	1.343×10^4
2.3	3.856	2.823	4.828	6.653×10^2	6.668×10^4

有効長としては $1.5 l_{m1}$ をとれば良い。

(6) 荷重—地表面傾斜曲線

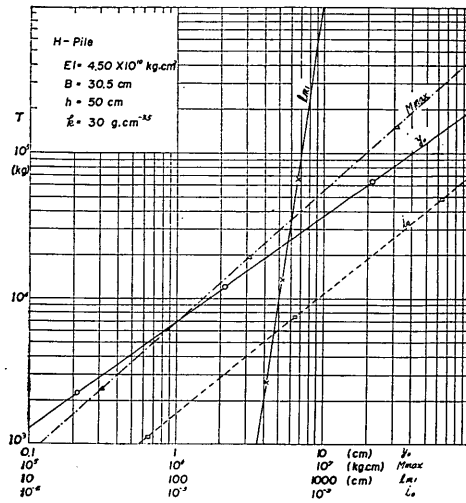
$$(\log i_0)_p = (\log i_0)_s + \log R_i = (\log i_0)_s - 1.195$$

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

基 準 曲 線		推 定 曲 線			
$(\log i_0)_s$	$(\log T)_s$	$(\log i_0)_p$	$(\log T)_p$	$(i_0)_p$	$(T)_p, \text{ kg}$
-3	1.255	$\bar{5}.805$	2.227	6.38×10^{-5}	1.687×10^2
-2	2.080	$\bar{4}.805$	3.052	6.38×10^{-4}	1.127×10^3
-1	2.900	$\bar{3}.805$	3.872	6.38×10^{-3}	7.447×10^3
0	3.714	$\bar{2}.805$	4.686	6.38×10^{-2}	4.853×10^4

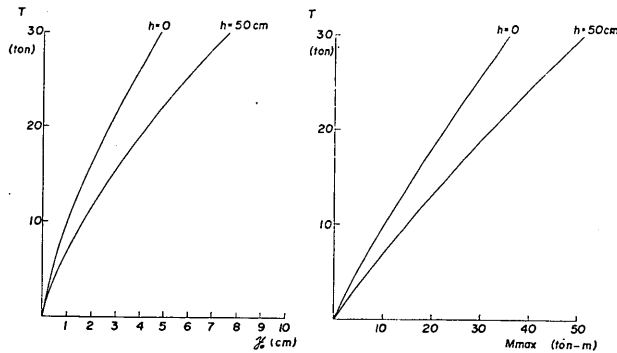
(7) 計算結果

このようにして求められた, y_0 , M_{max} , l_{m1} および i_0 を対数目盛上にプロットすると, 図-28 のようになる。さらに, これらを算術目盛に直すと, 図-29および図-30が得られる。



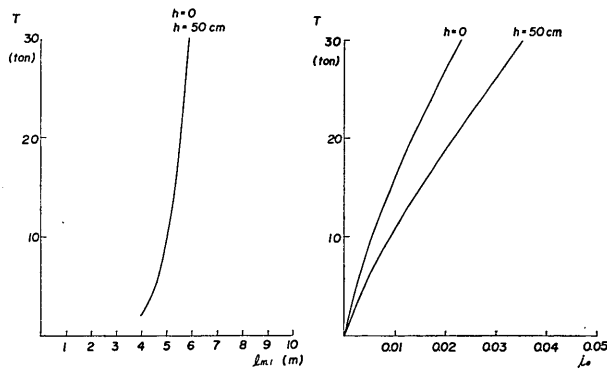
LOGARITHMIC PLOTS OF $T-y_0$, $T-M_{max}$, $T-l_{m1}$, AND $T-l_0$ RELATIONS, $h=50$ cm.

図-28



$T-y_0$ AND $T-M_{max}$ CURVES.

図-29



$T-l_{m1}$ AND $T-l_0$ CURVES.

図-30

3・4・2 $h = 0$ の場合

地表面載荷の場合は、3・2・5 に示した方法を用いる。

(28)式から、

$$\log R_\alpha = \frac{4}{10} (3.213) + \frac{6}{10} (-0.222) + \frac{6}{10} (0.484) = 1.442$$

$$\log R_\beta = -\frac{1}{8} (3.213) + \frac{2}{8} (-0.222) + \frac{2}{8} (0.484) = -0.337 = \bar{1}.663$$

$$\log R_\varepsilon = -3.213 + 2(-0.222) + 2(0.484) = -2.689 = \bar{3}.311$$

$$\log R_\mu = \frac{5}{9} (3.213) + \frac{4}{9} (-0.222) + \frac{4}{9} (0.484) = 1.901$$

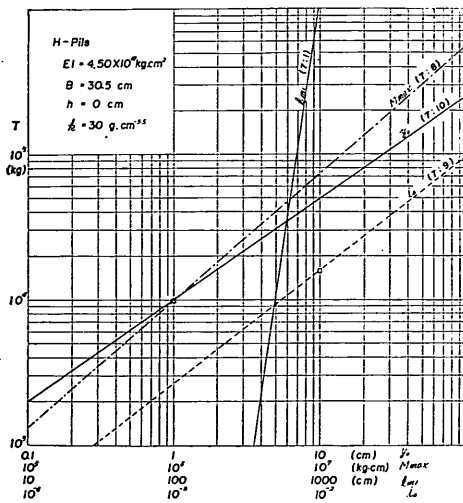
よつて、

$$R_\alpha = 2.77 \times 10$$

$$R_\beta = 4.60 \times 10^{-1}$$

$$R_\varepsilon = 2.05 \times 10^{-3}$$

$$R_\mu = 7.96 \times 10$$



LOGARITHMIC PLOTS OF $T-y$, $T-M_{max}$, $T-L_{m1}$, AND $T-L$ RELATIONS, $h=0$ cm.

図—31

(27)式ならびに(25)式から、

$$\alpha_p = \alpha_s \times R_\alpha = 360 \times 2.77 \times 10 = 9,970$$

$$\beta_p = \beta_s \times R_\beta = 21.4 \times 10^3 \times 4.60 \times 10^{-1} = 9,840$$

$$\varepsilon_p = \varepsilon_s \times R_\varepsilon = 57.0 \times 2.05 \times 10^{-3} = 0.117$$

$$\mu_p = \mu_s \times R_\mu = 200 \times 7.96 \times 10 = 15,920$$

よつて、(24)式により、

$$T = 9,970 \times (y_0)^{\frac{7}{10}}$$

$$T = 9,840 \times \left(\frac{M_{max}}{10^6} \right)^{\frac{7}{8}}$$

$$T = 0.117 \times \left(\frac{l_{m1}}{100} \right)^7$$

$$T = 15,900 \times \left(\frac{i_0}{0.01} \right)^{\frac{7}{9}}$$

これを対数目盛上にプロットすると、図—31 が得られる。これらを算術目盛に直したものは、図—29 および 図—30 に示してある。

4. 計算図表

4・1 計算図表の作成

いままで説明してきた新しい計算法は、他の方法とくらべて決して難かしいものではない。しかし手法がやや目新しいので、慣れないうちは、計算に手間をとり、また間違いをおこすおそれがある。そこでこれらの計算をすべて図表化し、表をひくという手続を繰り返すだけで、必要な数値が見出されるような方式を考案した。この方式では、われわれの新しい計算法に対する予備知識をほとんど要求しない。ただし、図表の作成にあたり、多少の簡略化を行なったので、本来の計算法で求めた数値にくらべて、数パーセントの誤差が出る場合もあるが、実用上は問題にならない。

次に示す記号表は、すでに説明した記号のうち、この章で用いるものだけをまとめたものである。カッコ内に

示した単位は、計算図表中に便宜上用いてあるもので、本来の単位ではない。

記号表

B = 杭幅, cm

EI = 杭の曲げ剛性, $\text{kg} \cdot \text{cm}^2$

$(EI)_{10}$ = 杭幅10cmあたりの EI , $(EI)_{10} = EI \times \frac{10}{B}$, $\text{kg} \cdot \text{cm}^2$

h = 載荷高, cm

k = S型地盤における横抵抗常数, $p = k \cdot x \cdot y^{0.5}$, $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-3.5}$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3.5}$)

\bar{k}_c = C型地盤における横抵抗常数, $p = \bar{k}_c \cdot y^{0.5}$, $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2.5}$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2.5}$)

l_{m1} = 曲げモーメント第1ゼロ点の深さ, 有効長=1.5 l_{m1} , cm (m)

M_{max} = 頭部自由杭における最大曲げモーメント, $\text{kg} \cdot \text{cm}$ (ton · m)

M_{max-t} = 頭部固定杭における杭頭モーメント, $\text{kg} \cdot \text{cm}$ (ton · m)

M_{max-1} = 頭部固定杭における地中部の最大曲げモーメント, $\text{kg} \cdot \text{cm}$ (ton · m)

$(M_{max})_{10}$ = 杭幅10cmあたりの M_{max} , $(M_{max})_{10} = M_{max} \times \frac{10}{B}$, $\text{kg} \cdot \text{cm}$

N = 標準貫入値

\bar{N} = S型地盤におけるN値の勾配, すなわち深さ1mにおけるN値

p = 杭面の単位面積あたりの地盤反力, $\text{kg} \cdot \text{cm}^{-2}$

T = 横方向力, kg (ton)

T_{10} = 杭幅10cmあたりの T , $T_{10} = T \times \frac{10}{B}$, kg

x = 地表面からの深さ, cm

y = 深さ x における杭の変位, cm

y_0 = 地表面における杭の変位, cm

y_{top} = 杭頭変位=載荷点における杭の変位, cm

$\alpha, \beta, \epsilon, \gamma, \delta$ = 計算用の係数

計算図表で求められる数値は、頭部自由杭の場合、 $y_0, y_{top}, M_{max}, l_{m1}$ の4者、頭部固定杭の場合、 $y_0, y_{top}, M_{max-t}, M_{max-1}, l_{m1}$ の5者である。地表面の傾斜 i_0 は計算図表から省いたので、必要なときは本来の計算法で求めて頂きたい。

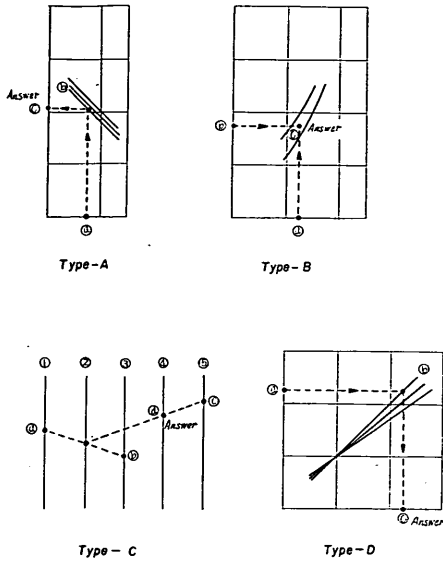
さて、上記の諸数値と、横方向力 T の関係は近似的に次の式で表わされる。(ただし、計算の便宜上すべて杭幅10cmあたりで考えることにする。)

$$T_{10} = \alpha \cdot (y_0)^{\gamma}, T_{10} = \alpha \cdot (y_{top})^{\gamma} \quad \dots\dots(31)$$

$$T_{10} = \beta \cdot \left(\frac{(M_{max})_{10}}{10^6} \right)^{\delta}, T_{10} = \beta \cdot \left(\frac{(M_{max-t})_{10}}{10^6} \right)^{\delta}, T_{10} = \beta \cdot \left(\frac{(M_{max-1})_{10}}{10^6} \right)^{\delta} \quad \dots\dots(32)$$

$$T_{10} = \epsilon \cdot \left(\frac{l_{m1}}{100} \right)^{\gamma} \quad \dots\dots(33)$$

係数、 $\alpha, \beta, \epsilon, \gamma, \delta$ は $(EI)_{10}, k$ および h の関数であり、計算図表によつて簡単に求めることができる。これらの数値がわかれば、(31)、(32)、(33)式を用いて、変位、曲げモーメント等が計算できる。この計算もすべて図表化されている。



FOUR TYPES OF COMPUTATION CHARTS.

図-32

表-4 計 算 表 の 分 類

図表番	目的とする数値	杭頭の条件	地盤条件 $k(g \cdot cm^{-3.5})$	計 算 の 内 容 既 知 量 \rightarrow 未 知 量	型
1	予備計算			$EI, B \rightarrow (EI)_{10}$	A
2	"			$T, B \rightarrow T_{10}$	"
3	y_0	頭部自由	5	$(EI)_{10}, k \rightarrow \alpha$	B
4	"	"	50	"	"
5	"	"	500	"	"
6	y_{top}	頭部自由	5	"	"
7	"	"	50	"	"
8	"	"	500	"	"
9	y_0	頭部固定	5	"	"
10	"	"	50	"	"
11	"	"	500	"	"
12	y_{top}	頭部固定	5	"	"
13	"	"	50	"	"
14	"	"	500	"	"
15	$y_0 (h=0)$	頭部自由	3~500	$(EI)_{10}, k \rightarrow \alpha$	B
16	$y_0 (h=0)$	頭部固定	3~500	"	"

なお、計算図表はすべてS型地盤について作成したものであるが、C型地盤の場合でも、地盤常数のおきかえによつて近似的な計算を行なうことができる(3・3参照)。

4・2 計算図表の分類と使用法

計算図表は表-4に示す通り、全部で39枚から成る。使用上の注意を次にかかげる。

(1) 図表の型は、A、B、C、Dの4種に分類される。各型の使用法は図-32に示した。

(2) 図表はすべて対数目盛である。

(3) 図表-3~図表-14、および図表-21~図表-29は、いずれも3枚1組で用いられる。すなわち、 $k=5, k=50, k=500$ に対する α または β の数値が与えられるから、これらを用いて任意の k に対する α または β の値を、補間法で求めることになる(計算例の図-33参照)。

図 番	表 号	目的とする数値	杭頭の条件	地盤条件 $k(g \cdot cm^{-3.5})$	計 算 の 内 容 既 知 量 \rightarrow 未 知 量	型
17		y_0, y_{top}	頭 部 自 由	3 ~ 500	$(EI)_{10}, h, k \rightarrow \gamma$	C
18		y_0, y_{top}	頭 部 固 定	3 ~ 500	"	"
19		y_0, y_{top}	頭部自由, 固定		$T_{10}, \alpha \rightarrow \frac{T_{10}}{\alpha}$	A
20		y_0, y_{top}	頭部自由, 固定		$\frac{T_{10}}{\alpha}, \gamma \rightarrow y_0, y_{top}$	D
21		M_{max}	頭 部 自 由	5	$(EI)_{10}, h \rightarrow \beta$	B
22		"	"	50	"	"
23		"	"	500	"	"
24		M_{max-1}	頭 部 固 定	5	"	"
25		"	"	50	"	"
26		"	"	500	"	"
27		M_{max-t}	頭 部 固 定	5	"	"
28		"	"	50	"	"
29		"	"	500	"	"
30		$M_{max}(h=0)$	頭 部 自 由	3 ~ 500	$(EI)_{10}, k \rightarrow \beta$	B
31		$M_{max-1}(h=0)$	頭 部 固 定	3 ~ 500	"	"
32		$M_{max-t}(h=0)$	頭 部 固 定	3 ~ 500	"	"
33		M_{max}	頭 部 自 由	3 ~ 500	$(EI)_{10}, h, k \rightarrow \delta$	C
34		M_{max-1}, M_{max-t}	頭 部 固 定	3 ~ 500	"	"
35		M_{max}	頭部自由, 固定		$T_{10}, \beta \rightarrow \frac{T_{10}}{\beta}$	A
36		M_{max}	頭部自由, 固定		$\frac{T_{10}}{\beta}, \delta \rightarrow \left(\frac{T_{10}}{\beta}\right)^{\frac{1}{\delta}}$	D
37		M_{max}	頭部自由, 固定		$\left(\frac{T_{10}}{\beta}\right)^{\frac{1}{\delta}} B \rightarrow M_{max}$	B
38		l_{m1}	頭部自由, 固定	3 ~ 500	$(EI)_{10}, k \rightarrow \epsilon$	B
39		l_{m1}	頭部自由, 固定		$T_{10}, \epsilon \rightarrow l_{m1}$	A

4・3 計算の手順

4・3・1 y_0 または y_{top} の計算

(1) $(EI)_{10}$ および T_{10} の算定

荷重 T ton における変位を計算するものとしよう。まず、杭の EI 、および荷重 T を杭幅 10cm あたりに換算する。

i. $k=5, 50, 500$ に対する β 値の算定

$(EI)_{10}, h \longrightarrow \beta \dots\dots$ 図表-21 ~ 図表-29

ii. 推定 k 値に対する β 値の算定

補間法による。(35頁, 図-33参照)

b) $h=0$ の場合

$(EI)_{10}, k \longrightarrow \beta \dots\dots$ 図表-30 ~ 図表-32

(4) δ 値の算定

a) $h > 0$ の場合

$(EI)_{10}, h, k \longrightarrow \delta \dots\dots$ 図表-33, 図表-34

b) $h=0$ の場合

$$\delta = \frac{7}{8} = 0.875$$

(5) $\frac{T_{10}}{\beta}$ の算定

$T_{10}, \beta \longrightarrow \frac{T_{10}}{\beta} \dots\dots$ 図表-35

(6) $\left(\frac{T_{10}}{\beta}\right)^{\frac{1}{\delta}}$ の算定

$\frac{T_{10}}{\beta}, \delta \longrightarrow \left(\frac{T_{10}}{\beta}\right)^{\frac{1}{\delta}} \dots\dots$ 図表-36

(7) M_{max}, M_{max-t} または M_{max-1} の算定

$\left(\frac{T_{10}}{\beta}\right)^{\frac{1}{\delta}}, B \longrightarrow M_{max}, M_{max-t}$ または $M_{max-1} \dots\dots$ 図表-37

4・3・3 l_{m1} の計算

(1) }4・3・1 の場合と同じ。
(2) }

(3) ε の算定

l_{m1} は h および頭部支承条件には無関係である。 $(EI)_{10}$ と k から直接 ε が求められる。

$(EI)_{10}, k \longrightarrow \varepsilon \dots\dots$ 図表-38

(4) l_{m1} の算定

$T_{10}, \varepsilon \longrightarrow l_{m1} \dots\dots$ 図表-39

有効長は $1.5 l_{m1}$ で与えられ, 杭の根入れ長はこれより大きくとる必要がある。

4・4 計算図表の使用例

ここでは, 実例によつて計算図表の使い方を説明しよう。ただし比較の便宜上, すでに 3・4 の計算例で用いたものと同じ杭を対象とし, 横方向荷重 10ton の場合の y_0, M_{max} および l_{m1} を求めてみる。

H-鋼杭 (頭部自由杭): $EI=4.50 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$

$B = 30.5 \quad \text{cm}$

$h = 50 \quad \text{cm}$

地盤条件 : 図-27に示す (25頁)。

A. y_0 の計算

(1) $(EI)_{10}$ および T_{10} の算定

図表-1 $(EI)_{10} = 1.48 \times 10^{10} \cdot \text{kg} \cdot \text{cm}^2$

図表-2 $T_{10} = 3.3 \times 10^3 \text{ kg}$

(2) k 値の推定

図-27によれば、これはS型地盤であり、 \bar{N} 値は9である。また図-24によれば $\bar{N}=9$ のときは k 値は30になる。

(3) α 値の算定

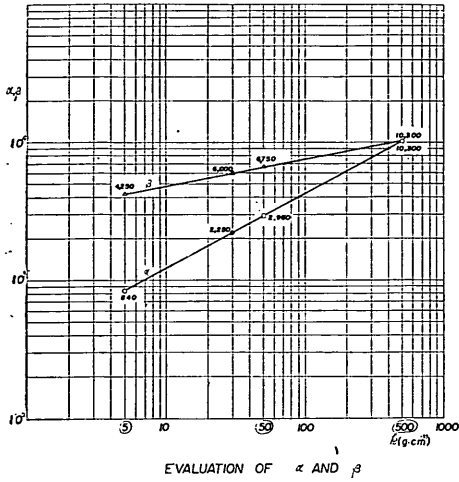


図-33

B. M_{max} の計算

- (1) } 省略
- (2) }

(3) β 値の算定

- i. 図表-21 $k=5$ の場合, $\beta = 4,250$
 図表-22 $k=50$ の場合, $\beta = 6,750$
 図表-23 $k=500$ の場合, $\beta = 10,300$
- ii. 補間法により, $k=30$ の場合, $\beta = 6,000$ (図-33参照)。

(4) δ 値の算定

図表-33 $\delta = 0.90$

(5) $\frac{T_{10}}{\beta}$ の算定

図表-35 $\frac{T_{10}}{\beta} = 5.5 \times 10^{-1}$

(6) $\left(\frac{T_{10}}{\beta}\right)^{\frac{1}{\delta}}$ の算定

図表-36 $\left(\frac{T_{10}}{\beta}\right)^{\frac{1}{\delta}} = 5.0 \times 10^{-1}$

(7) M_{max} の算定

図表-37 $M_{max} = 15.5 \text{ ton} \cdot \text{m}$

C. l_{m1} の計算

- (1) } 省略
- (2) }

i. 図表-3 $k=5$ の場合, $\alpha = 840$

図表-4 $k=50$ の場合, $\alpha = 2,960$

図表-5 $k=500$ の場合, $\alpha = 10,300$

ii. 上記の α 値を対数目盛にプロットすると、図-33 のようになり、 $k=30$ に対する α 値は 2,250 であることを知る。

(4) γ 値の算定

図表-17 $\gamma = 0.73$

(5) $\frac{T_{10}}{\alpha}$ の算定

図表-19 $\frac{T_{10}}{\alpha} = 1.46$

(6) y_0 の算定

図表-20 $y_0 = 1.65 \text{ cm}$

(3) ε の算定

図表-38 $\varepsilon = 4 \times 10^{-2}$

(4) l_{m1} の算定

図表-39 $l_{m1} = 5.0\text{m}$

あ と が き

この報告の母体となつた第1次および第2次模型実験は、篠原登美雄博士（現在港湾局建設課長）の指導のもとに計画・実行されたものである。新しい計算法はこれらの実験の結果から生まれ、また基礎工研究室のその後の研究活動の方向も、これらの実験によつて決まつたといえる。また、石井靖丸博士（現在八幡製鉄）は運輸技術研究所土質部長時代、この研究に対し特別の関心をよせられた。この研究が曲がりなりに現在の段階に進んできたかげに、石井博士の激励と指導があつたことを忘れることはできない。ここに、篠原博士、石井博士に心からの感謝の意を表する次第である。

次に、筆者は当研究所耐震構造研究室の林室長、宮島技官らの方々に厚くお礼を申し述べねばならない。同研究室では、八幡製鉄株式会社との共同研究として、H-鋼杭の横抵抗に関する現地実験を実施した。この実験は動的実験を含む大規模なものであつたが、特に静的試験の解析にあつては、筆者らの研究との間に多くの共通点を含んでいた。そこで同研究室と筆者らの研究室とは、常に情報を交換し討論を共にすることになつたが、これによつてわれわれの得るところはまことに大きかつた。この報告の中でも、地盤条件の考察の部分や、C型地盤の扱ひ方の部分など、林博士らの業績によるところがきわめて多いことを明らかにしておきたい。なお、杭の横抵抗の問題は、動的設計法その他、未解決の分野を多く含んでいる。現在も二つの研究室はそれぞれの立場で研究を進めつつあるが、近い将来に共同の責任において、杭の横抵抗に関する総合的な見解を発表する計画である。この報告は、その目標に至るまでの一里塚と考えて頂きたい。

この報告は筆者の名前で発表されるが、その中のべられている研究成果はすべて、篠原博士はじめ、かつてこの研究室に在職し、実験や解析に努力された方々と共に分かつべきものであることはいうまでもない。ここに村上守、井口弘、樋口駒男、松下英夫、光本司、福家竜男、沢口正俊の諸氏に対し、敬意と感謝をささげたい。

最後に、この報告の作成に協力された、現在の基礎工研究室員、三枝、中村、西野、田中の諸君に感謝したい。特に中村松子技官の努力なくしては、計算図表の作成は不可能であつたと思う。心からお礼申しあげる。

参 考 文 献

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. 石井靖丸・石黒健：鋼杭工法, 技報堂, 1959
5. 港湾協会：港湾工事設計要覧, 1959
6. 港湾技術研究所・八幡製鉄株式会社：Hパイルの水平抵抗に関する研究, 1963
7. 物部長穂：土木耐震学(改訂版), 理工図書, 1952
8. 横山幸満：鋼杭の設計と施工, 山海堂, 1963
9. Chang, Y. L.: Discussion on the Paper "Lateral Pile-Loading Tests" by L. B. Feagin, A. S. C. E. Vol. 102, 1937

10. Mc Nulty, J. F. : Thrust Loading on Piles, Proc. A. S. C. E. Vol.82 SM-2, 1956
11. Palmer, L. A. and Brown, P. P. : Analysis of Pressure, Deflection, Moment and Shear by the Method of Difference Equations, A. S. T. M. STP No.154-A, 1955
12. Palmer, L. A. and Thompson, J. B. : The Earth Pressure and Deflection along the Embedded Length of Piles Subjected to Lateral Thrust, Proc. 2nd Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1948
13. Raes, P. E. : Theory of Lateral Bearing Capacity of Piles, Proc. 1st. Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 1936
14. Terzaghi, K. : Evaluation of Coefficient of Subgrade Reaction, Géotechnique, Vol.5 No.4, 1955

港湾技術研究所報告 第2卷3号

1964年3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
横須賀市川間162

印刷所 中和印刷株式会社
東京都中央区入船町2の3