

# 港湾技術研究所報告

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

第 5 卷 2 号

Vol. 5 No. 2

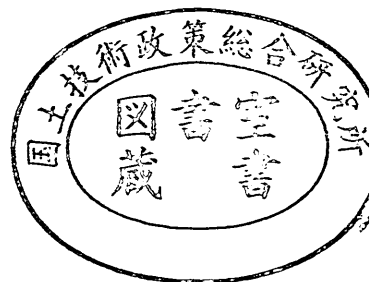
(通卷第 24 号)

斜面における鉛直単杭の横抵抗……………鈴木敦巳・久保浩一・田中芳夫

土の強さへのヒズミ速さによる影響……………沢 口 正 俊

1966年1月

運輸省港湾技術研究所



# 斜面における鉛直単杭の横抵抗

## 目 次

英文要旨 .....	1
まえがき .....	2
1. 実験方法 .....	2
1.1 実験概要 .....	2
1.2 杭の設置 .....	3
1.3 締固めおよび斜面の形成 .....	3
1.4 砂の性質 .....	4
1.5 載荷方法 .....	5
1.6 測定方法 .....	5
2. 実験結果 .....	5
2.1 予備実験 .....	5
2.2 本実験 .....	7
2.2.1 斜面の崩れ .....	7
2.2.2 杭頭の水平変位 .....	8
2.2.3 杭の曲げモーメント分布・反力分布・たわみ分布 .....	10
3. 考 察 .....	13
4. 計 算 例 .....	18
む す び .....	19
参 考 文 献 .....	20
記 号 表 .....	20

# **Lateral resistance of vertical piles embedded in sandy layer with sloping surface.**

**Atsumi Suzuki \*\***

**Koichi Kubo \***

**Yoshio Tanaka \*\***

## **Synopsis**

Lateral load tests were carried out on vertical piles embedded in sandy layer with sloping surface and the following results are obtained.

1. The lateral resistance of a vertical pile changes considerably with the change of the angle of slope. It decreases with the increase of angle of slope in the case of downslope loading, and increases in the case of upslope loading.
2. The new expression  $p = k \cdot x \cdot y^{0.5}$  for the relationship between soil reaction  $p$  and pile deflection  $y^{1),2)}$  can also be applied in the case of vertical piles in sandy layer with sloping surface provided a simple modification according to the angle of the slope is introduced.

---

\* Chief, Foundation Laboratory, Soil and Structure Division

\*\* Research Staff, Foundation Laboratory, Soil and Structure Division

# 斜面における鉛直単杭の横抵抗

鈴 木 敦 巳\*\*  
 久 保 浩 一\*  
 田 中 芳 夫\*\*

## まえがき

斜面に立てられた鉛直杭が水平力を受け持つような構造は、港湾構造物などにしばしばその例が見られる。このような構造物の設計に際しては、当然ながら杭の挙動を何らかの方法で推定しなければならないが、現在の段階ではまだ適当な方法が見いだされていない。これは、鉛直杭の挙動に対する地表面の傾斜の影響が十分に把握

されていないためである。

そこでわれわれは模型実験によって、地表面が傾斜している場合、横方向力をうける鉛直単杭がどのような挙動をするかを詳細に検討した。その結果、斜面における鉛直単杭の横抵抗は、今までわれわれが用いてきた水平地盤における鉛直単杭の横抵抗の推定法<sup>1)3)</sup>に部分的な補正を加えることによって、比較的簡単に推定し得ることが明らかになった。

## 1. 実験方法

### 1.1 実験概要

今回の模型実験は、鉛直単杭の横抵抗に及ぼす地表面の傾斜の影響を調べるために行なった鉛直単杭に対する水平載荷試験である。したがって、地表面の傾斜角のみを変化させ、その他の条件すなわち、地盤の締固め度、杭の規格、載荷方法などはできるだけ一定にした。実験はすべて基礎工研究室に所属する小型実験槽において実施したが、実験装置の全体の様子は図1.1に示す通りで

図 1.1 の部分図の①第1滑車

図 1.1 の部分図の  
②引張金具

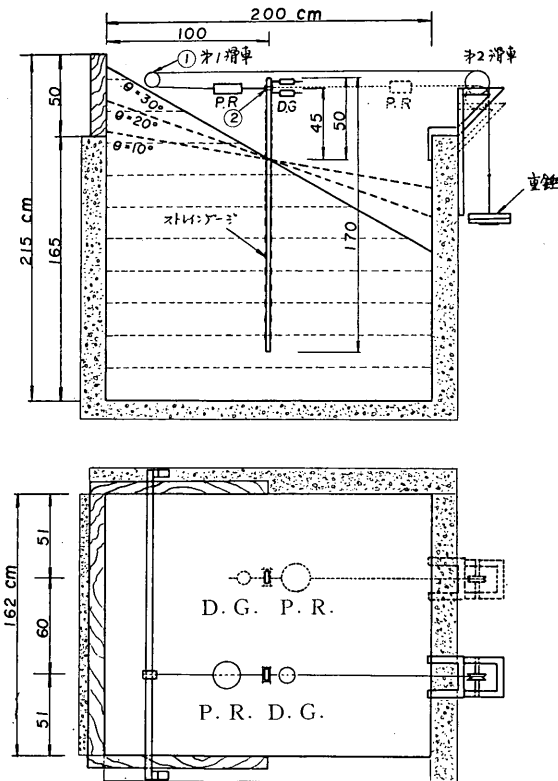
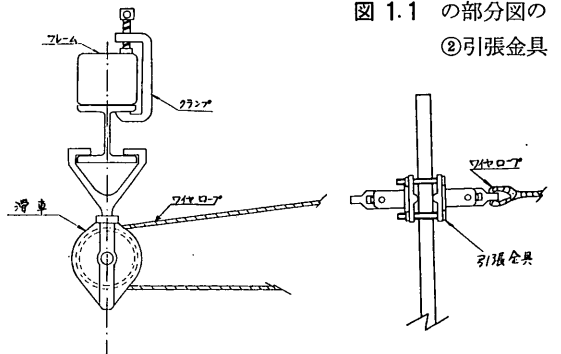


図 1.1 実験装置



ある。杭と前後の壁との間隔は 100 cm、側壁との間隔は 51 cm とした。今までの経験によれば、これだけの間隔をとれば壁体の影響はあらわれないと考えてよい<sup>4)</sup>。実験に用いた砂は高萩産の清浄砂で、条件を単純化するた

\* 構造部基礎工研究室長

\*\* 構造部基礎工研究室

め、見掛けの粘着力が発生しないように完全乾燥状態で実験を行なった。模型杭は矩形断面の鋼製杭であり、その要目は表1.1に示す通りである。

表 1.1 使用杭の要目

	使用杭	B	t	EI	h	L	$\theta$	傾斜角
予備実験	NP-13	7	1.2	2.49	35	170	0°	1.00
本試験								
NO 1	NP-5	7	1.2	2.49	45	170	-10°	1.00
NO 2	NP-13	"	"	"	45	"	9°	"
NO 3	NP-5	"	"	"	45	"	-20°	"
NO 4	NP-13	"	"	"	43	"	22°	"
NO 5	NP-5	"	"	"	45	"	-30°	"
NO 6	NP-13	"	"	"	45	"	30°	"

B: 杭幅

t: 杭厚

EI: 杭の剛性

h: 載荷高(地上部長)

L: 杭長

注: 左側方向の傾斜を正符号とし右側方向の傾斜を負符号とする。

本実験に先だて、予備実験を行なったが、これは地表面を水平とした実験であり、今回初めて使用した高萩の砂についても、杭の横抵抗に関するわれわれの考え方<sup>13)</sup>が成り立つことをたしかめ、また、われわれの基本式に含まれる地盤常数値を実験的に求めるために行なったものである。本実験では、地表面の傾斜角を6種類に変え、地表面傾斜が杭の横抵抗に及ぼす影響を調べた。

### 1.2 杭の設置

砂の填充に先だち、図1.2に示すようにフレーム、

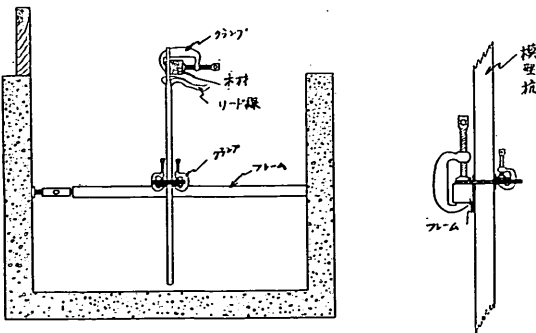


図 1.2 杭の設置

正割木材、金属板など、剛性の強い材料を用いて、杭を所定の位置に正確に設置した。これは砂の填充や締固めを行なっている途中で不当に杭が動いたり、曲がったりしないためである。杭の設置にあたっては、糸におもりをつけたものをたらし、杭の前面・側面が鉛直線と平行になるように調節し、杭の鉛直性をたしかめた上で固定した。このような杭の固定は一時的なものであって、砂の填充によって砂層表面が上昇するのにもなって、順次下部から固定材を取り外していった。砂層が完成したときの、杭の鉛直度の誤差は角度で10分以内にとどめることができた。

### 1.3 締固めおよび斜面の形成

各試験における砂の乾燥密度を一定にするために、図1.1に示すように各層の厚さを20cmとし、各層毎に縦横

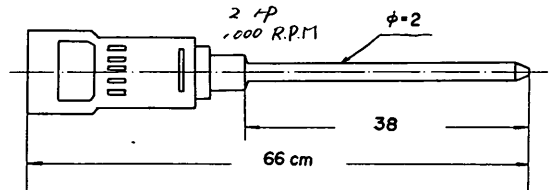


図 1.3 振動締固め機

20 cm 間隔で、図1.3に示すパイプレーターを押し入れて締固めた。しかし、締固めの際、押し入れ時間、押し入れ方法に多少の個人差があるため、各実験での平均の乾燥密度は一定とはならず、表1.2に示すようになった。

表 1.2 締固め密度

予備実験	本 実 験		
	No.1, No.2	No.3, No.4	No.5, No.6
$\gamma_d = 1.666$	$\gamma_d = 1.566$	$\gamma_d = 1.648$	$\gamma_d = 1.609$

斜面の形成は次のようにして行なった。まず両側壁に所定の傾斜の基準線を引き、前述の方法で砂を締固めながら、上述の基準線より地表面がやや高くなるようにだいたいの斜面をつくり上げる。それから基準線にあわせて余分の砂を削りとり、所定の傾斜をもつ斜面を形成した。なお、傾斜角30度の時は、締固めの際に起きる横振動のために、途中、斜面のくずれが生じた。そのため図1.4に示すように斜面の形成とともに板を敷き、その上に15kgの重錘をならべて斜面のくずれを防いだ。

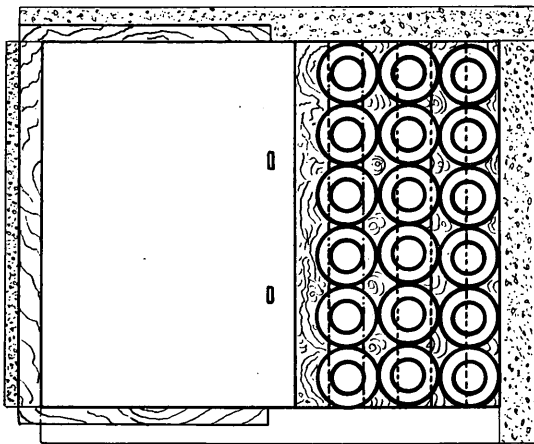
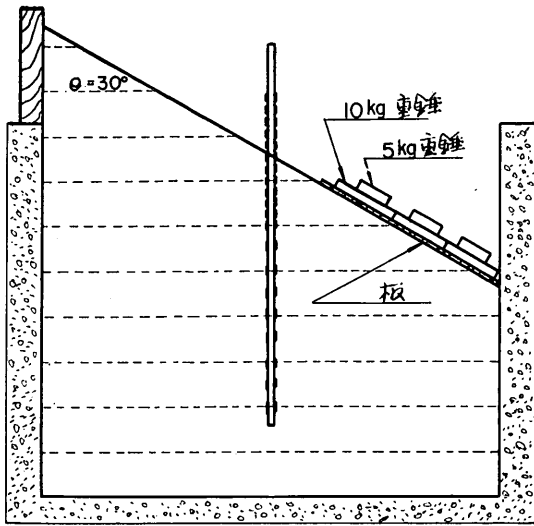


図 1.4 斜面形成

### 1.4 砂の性質

実験に用いた砂は、茨城県の高萩海岸において採取さ

$d_{10}$	$d_{50}$	約等係数	$G_s$	中粒砂	粗粒砂
0.35	0.74	2.114	2.668	25.5%	74.5%

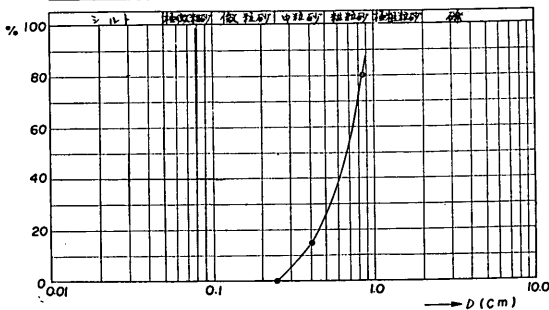


図 1.5 粒度曲線

れたものを、軟水にて洗浄したもので、上水道の緩速ろ過用の砂である。その粒径加積曲線は図1.5に示す通りで、粗砂と中砂が混合しているが、粒径は比較的そろっている。外見は茶白色であり、透明粒子の多い石英質の砂であって、粒子は比較的角ばっている。また、その真比重は2.668である。この砂の力学的性質については径2.5cm、長さ3.56cmの試料を用い、初期間隙比を変え、飽和状態において三軸排水せん断試験を行なった。図1.6(a)は初期間隙比と $(\sigma_1 - \sigma_3)_{max}$ の関係を示す。密な状態になるに従い、圧縮強さが大きくなっている。図1.6(b)は初期間隙比と砂の内部摩擦角 $\phi$ との関係を示す。密な状態においては内部摩擦角はかなり大きい。

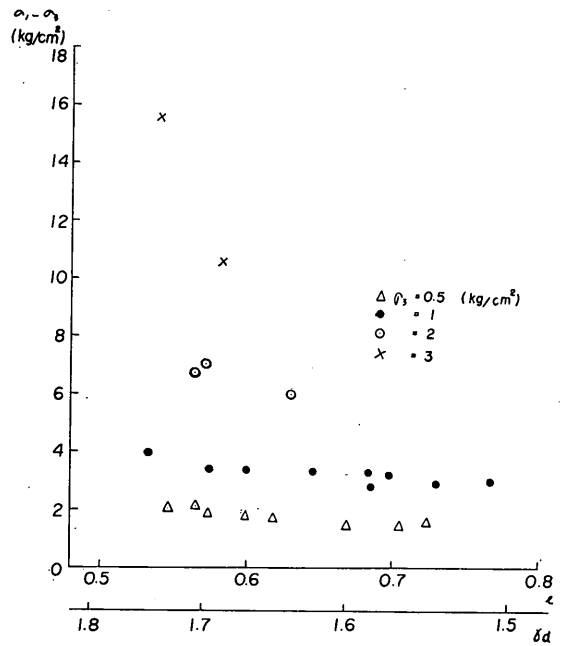


図 1.6 (a)  $e_0, \gamma_d - (\sigma_1 - \sigma_3)$

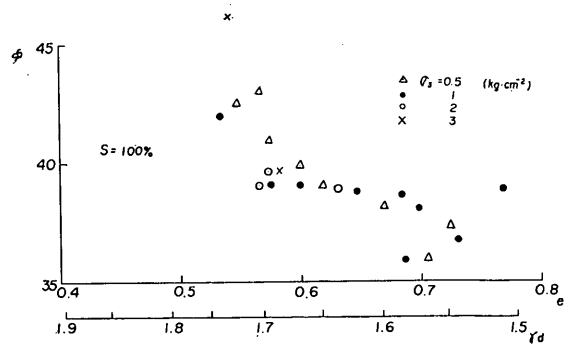


図 1.6 (b)  $e_0, \gamma_d - \phi$  関係

図 1.7 は JIS による突固め試験結果である。含水比の変化に対して突固め密度はほとんど変わらないことを示している。

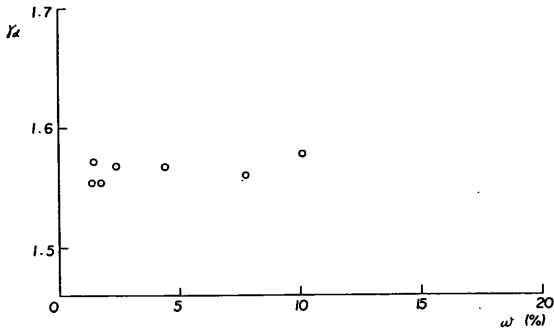


図 1.7 突固め試験結果

### 1.5 荷重方法

斜面の下側に向かって力を加える場合を谷側方向引張、斜面上側に向かって力を加える場合を山側方向引張とよぶことにする。

山側方向引張に際しては、引張り金具からきたワイヤロープの力の方向を第 1 滑車により 180 度転換し、さらにコンクリート壁に取付けられている第 2 滑車によって鉛直方向に変換して荷重を行なった。谷側方向引張の際には、第 2 滑車だけを使用した。この第 2 滑車は上下移動が可能で、自由に所要の高さに設置することができる。図 1.1 で点線が谷側方向引張、実線が山側方向引張を示す。鋼製模型杭の引張り位置部には、図 1.1 の部分図に示す引張り金具を取付け、杭に無理な応力がかからないようにした。

荷重は重錘を用い、5 kg 毎に段階的にかけた。杭の変位が停止するのを待ち、各種の測定を行ない、その終了後次の荷重段階に進むようにした。なお、変位が過大になるのを避けるため、荷重は 50 kg をもってとどめた。

### 1.6 測定方法

杭の挙動を調べるのに必要な杭頭変位および杭面の曲げひずみを次のようにして測定した。杭頭変位は、図 1.8 に示すように、ダイヤル・ゲージ 2 個を取付け、その測定値から算出した。用いたダイヤル・ゲージの測定範囲は 80 mm で最小目盛は 0.1 mm である。ダイヤル・ゲージの測定は全荷重段階について実施した。測定方法は荷重より 30 秒後と 1 分後とを読み、あとは 1 分毎に測定し、毎分 0.01 mm 以内の変位が 3 回以上続くまで測定を続行した。

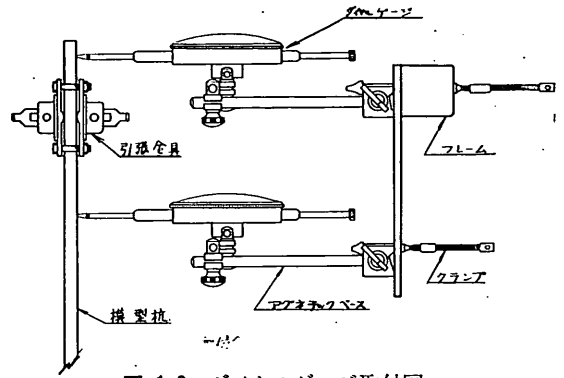


図 1.8 ダイヤルゲージ取付図

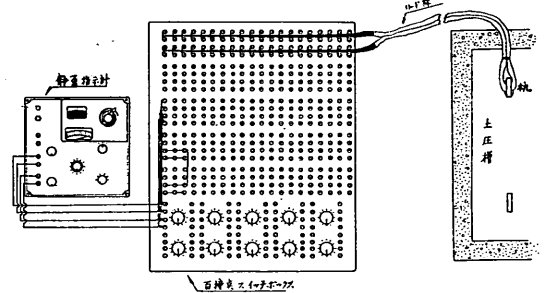


図 1.9 歪測定器配置図

杭面の曲げひずみは図 1.9 に示すように、抵抗線ひずみ計、100 接点スイッチ・ボックスおよび静歪指示計を用いて測定した。ひずみ計の貼付位置は杭の上端より 8 cm までが 5 cm 間隔で、下部が 10 cm 間隔である。結線方法は、杭からのリード線を 100 接点スイッチ・ボックス（切換装置）に接続し、スイッチ・ボックスにおいて 2 ゲージを組み、曲げひずみだけを取り出して測定するようにした。なお、曲げひずみの測定は、処女荷重の場合は、20 kg、40 kg の荷重段階と、最大荷重点とで行ない、そのあとの繰返し荷重では最大荷重点のみで行なった。ただし、予備実験では最大荷重点のみで測定した。

杭にかかる実際の荷重（真荷重）は、滑車の摩擦抵抗のため重錘の荷重とは異なる。そこで杭にかかる実際の荷重を杭直前に取付けたブルーピング・リングによって直接に測定した。

## 2. 実験結果

### 2.1 予備実験

この予備実験の目的についてはすでに 1.1 において述べた。この場合は杭は実験槽の中央に立てて、前後壁との間隔は本実験と同様 100 cm とし、側壁との間隔は約 78 cm とした。これで前にも述べたように壁の影響はまずないものと考えてよい。図 2.1 に実測した着力点の水平

変位と水平荷重の関係を示した。また 図 2.2 は (a) たわみ分布曲線, (b) たわみ角分布曲線, (c) モーメント

ものであるが, 他は (c) から数値積分あるいは数値微分によって求めたものである。また (a) と (b) に○印で示したのはダイヤル・ゲージにより測定した値であり, 比較的よい一致をしている。

次にこの予備実験の結果が, 水平地盤における鉛直単杭の横抵抗に関する基本式<sup>1)3)</sup>として今までわれわれが用いて来た次式にあてはまるか否かを検討する。

$$P = p \cdot B = k \cdot x \cdot y^{0.5} \cdot B \quad (1)$$

ただし

$x$  : 地表面からの深さ

$y$  : 地表面から  $x$  の深さでの杭のたわみ

$p$  : 地表面から  $x$  の深さで単位面積当りに生ずる地盤反力

$P$  : 地表面からの深さで杭幅全体に生ずる地盤反力

$B$  : 杭幅

$k$  : 地盤の横抵抗常数

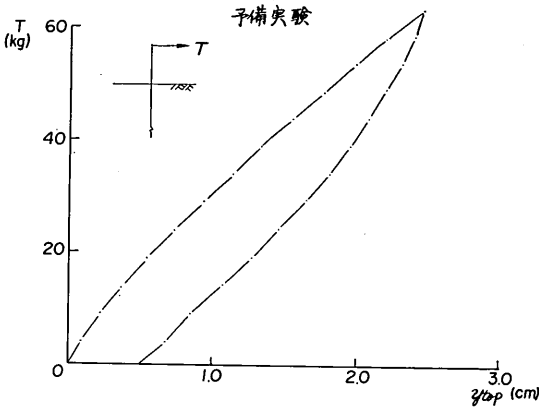


図 2.1 荷重—変位曲線

分布曲線, (d) セン断力分布曲線, (e) 反力分布曲線を示す。このうち (c) は実測値をスムーズな曲線で結んだ(ノ)

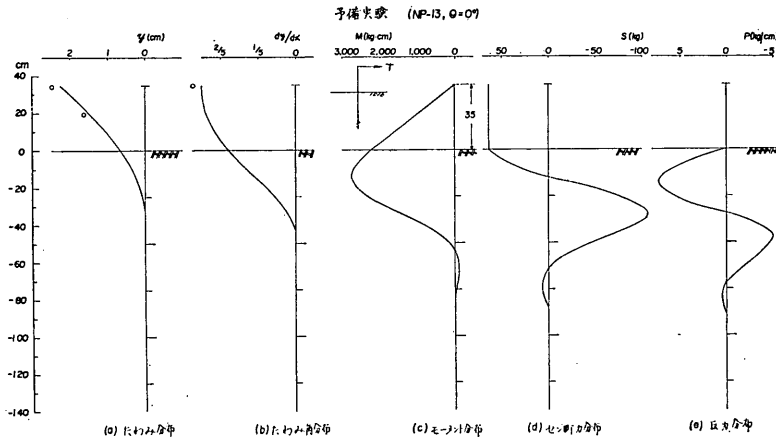


図 2.2 予 備 実 験

そこで 図 2.2 をもとにして,  $P/Bx$  と  $y$  の関係を両対数方眼紙上にプロットしてみた。図 2.3 がそれである。図中○印が実測値であるが, これらは図中に実線で描いた勾配 0.5 の直線上にほぼ乗っている。このことは実験結果が基本式(1)にあてはまることを示すに他ならない。またこの実線が  $y = 1$  の線を切る点の縦座標がこの時の(1)式の地盤常数を示している。すなわち, この時の  $k$  は  $140 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3.5}$  である。これで高萩の砂についても(1)式が成り立つことがだいたいわかったが次にさらに別の面, すなわちダイヤル・ゲージで測定した着力点の水平変位から上のことをチェックしてみる。そこで(1)式をもとにしてそれに相似則を用いて計算した  $T - y_{top}$  関

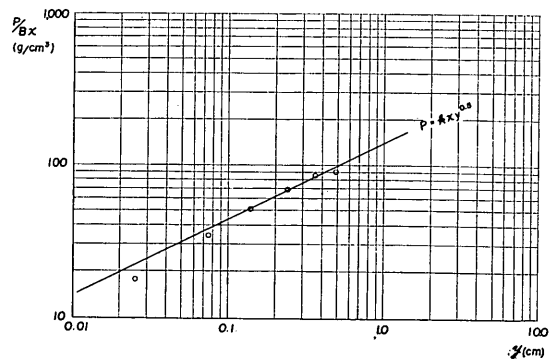


図 2.3  $P/Bx - y$  関係 (対数目盛)



係の推定曲線<sup>13)</sup>と、実測値を 図 2.4 で比較してみる。但しここで  $T$  は杭頭に加わる水平外力で、 $y_{lop}$  はこの  $T$  の着力点の水平変位を示す。この図をみると、下方ではやや推定曲線からはずれているが、全体的には、よく一致している。したがって、この下方の部分を見無視して推定曲線に一致したものと考えてさしつかえない。これで  $T$ - $y_{lop}$  関係の方からみても、実験結果が基本式(1)にあてはまることがわかった。ただしここでは実測値は  $k=160g \cdot cm^{-3.5}$  を示し、前の  $140g \cdot cm^{-3.5}$  と多少

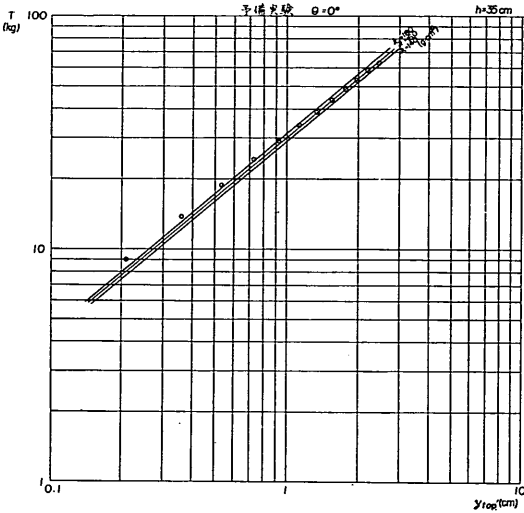


図 2.4 荷重—変位関係 (対数目盛)

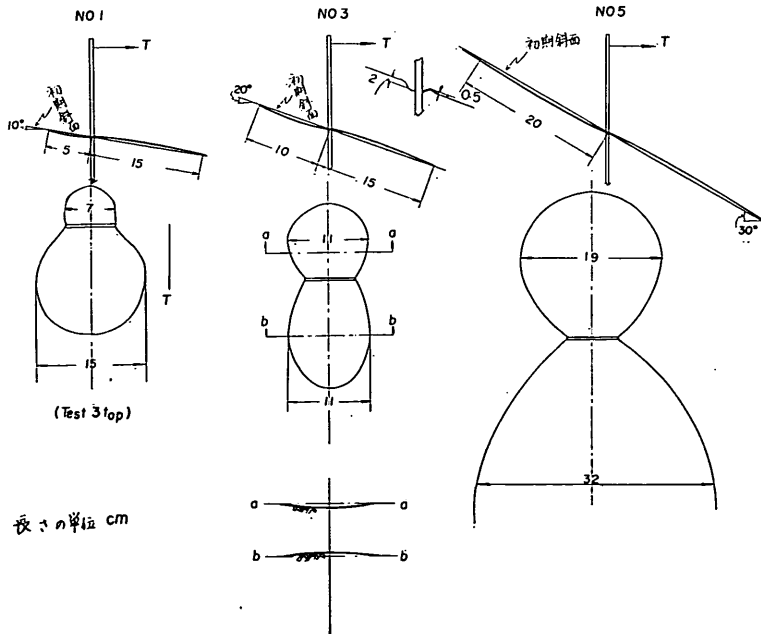


図 2.5 (a) 斜面のくずれ

違っている。これは測定手段の違い、あるいは前述の数値積分や数値微分の手続き中に生ずる誤差などが、その主な原因と考えられ、この程度のくい違いはやむを得ない。

以上、実験結果を検討した結果、高萩の砂に対しても杭の横抵抗に関して今までわれわれが用いてきた基本式(1)が成立することがたしかめられた。

## 2.2 本 実 験

### 2.2.1 斜面の崩れ

斜面に立っている杭に水平力をかければ、その斜面に何らかの崩れ現象がおり、杭の挙動に影響をあたえるのではないかと想像される。そこで、载荷中に生ずる斜面の崩れについて肉眼で観察を行なった。以下では杭の引張方向の側を杭の前方、その反対側を杭の後方と定義しておく。

谷側方向引張の場合：この場合の斜面の崩れの状況の概略を 図 2.5 (a) に示す。この図に示すように杭前方では盛り上がり、後方ではくぼみが生ずる。また杭の直後の杭面に接する部分では杭と地盤のすき間への砂の落ち込みがみられる。このような斜面の崩れの範囲は後方のくぼみ領域よりも前方の盛り上がり領域の方がかなり広く、またいずれの領域も傾斜角が大きくなるほど大きくなっている。傾斜角30度の場合の杭前方の盛り上がりは先端部ではごく自然に消えて行っているのでその境界は認められなかった。

山側方向引張の場合：斜面の崩れの状況は 図 2.5 (b) に示すが、この場合は杭の前方は変化がほとんど見られず、杭後方において図のような範囲にわたってくぼみが生じた。これは、谷側方向引張の場合にくらべてやや領域がせまくなっている。なおこの場合は、谷側方向引張の場合とは逆に傾斜角が小さいほど崩れの範囲は大きくなっている。谷側方向引張、山側方向引張のいずれの場合も上のような斜面の崩れの範囲は载荷の繰返し回数の増加とともにやや大きくなる傾向を示すが、さほど著しいものではない。

上述のように観察された斜面

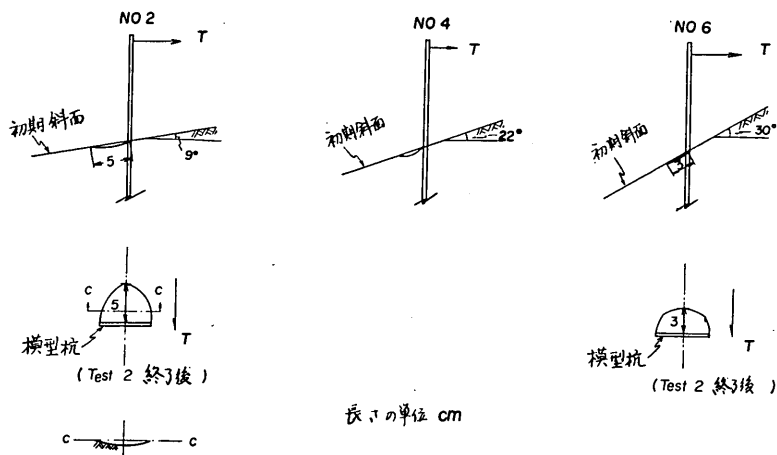


図 2.5 (b) 斜面のくずれ (山側方向引張)

の崩れの現象は、杭前方では受動崩壊、杭後方では主動崩壊の現象であると考えられる。これらの崩壊面が杭と交わる深さは比較的浅いところにあるようである。

斜面の崩れの現象が谷側方向引張の場合の方が山側方向引張の場合より著しいのは、主動崩壊領域、受動崩壊領域のいずれも谷側方向引張の場合の方が大きいためであろう。この崩壊領域の違いが地表面の傾斜の影響であることはいうまでもない。また山側方向引張の場合に杭前方に砂の盛り上がりが見られなかったのは、杭が前方の砂をおさえつけるように変形したためと思われる。

このような斜面の崩れの現象が、杭の挙動自体に影響をあたえることになるのは当然である。しかし、一方、30度というような急斜面の場合でも、杭の変位による斜面の崩れが表層だけにしか起らず、斜面全体の性格を変えるようなことにならなかったこと、および载荷を繰り返しても斜面の崩れが顕著に進行するようなことがなかった点は注目に値する。

### 2.2.2 杭頭の水平変位

ダイヤル・ゲージによって測定した杭頭変位の状況を

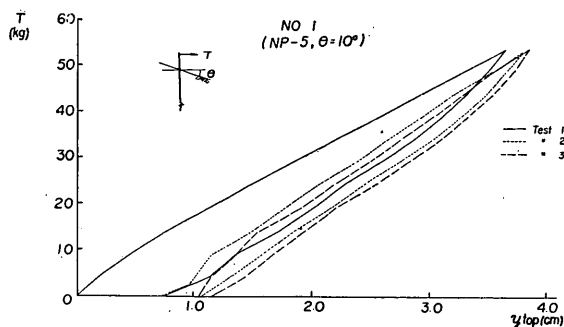


図 2.6.1 荷重—変位曲線

図 2.6.1 から 図 2.6.6 に示す。ただし、ここでいう杭頭とは杭の着力点を意味する。これらの図のうち、図 2.6.1 から 図 2.6.3 までは谷側方向引張の場合、図 2.6.4 から 図 2.6.6 までは山側方向引張の場合を示す。これらの図をみるとわかるように、谷側方向引張の場合と、山側方向引張の場合とは、変位曲線にかなり異なった性質が見られる。これらの性質を特徴づける量として考えられるのは各グループのかたむきと残留変位である。そこで各グループのか

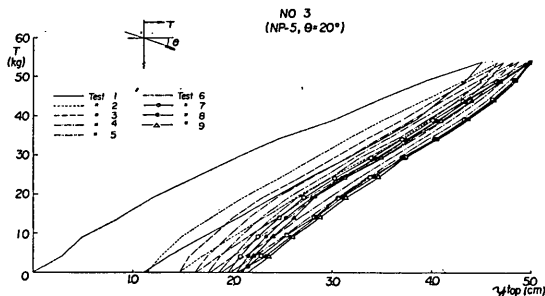


図 2.6.2 荷重—変位曲線

たむきを代表するものとして、各グループの登りカーブ平均勾配、すなわち、各グループにおける出発点と、最大荷重点の点を結ぶ直線の勾配  $K_n$  ( $n$ はグループ番号) を考え、残留変位は各グループ毎の残留変位  $(r_n - r_{n-1})$  (ただしここで  $r_n$  は第  $n$  ループまでの累積残留変位) を考えた。それらの変化の様態を 図 2.7 および 図 2.8 に示す。ただしここでは  $K_n$ ,  $r_n - r_{n-1}$  のそのままの値を採用しなかった。  $K_n$  については、斜面の傾斜角が零度すなわち水平地盤における 50kg までの処女载荷時の平均勾配を  $K_{01}$  とし、繰返し载荷回数に対する  $K_n/K_{01}$  の変化の様態を調べた。残留変位については、第  $n$  ループにおける最大荷重点での累積変位を  $t_n$  とした場合、その  $n$  ループにおける出発点から最大荷重点までの変位  $(t_n - r_{n-1})$  を考え、これに対する  $r_n - r_{n-1}$  の比、すなわち  $(r_n - r_{n-1}) / (t_n - r_{n-1})$  の、繰返し载荷回数に対する変化の様態を調べた。

これらの図をながめてみると次のようなことがいえる。

NO 5  
(NP-5,  $\theta=30^\circ$ )

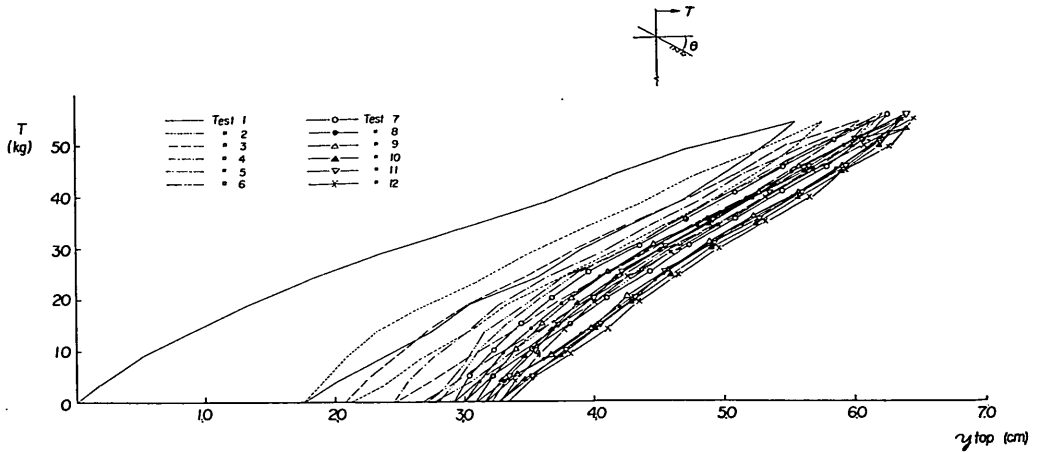


図 2.6.3 荷重—変位曲線

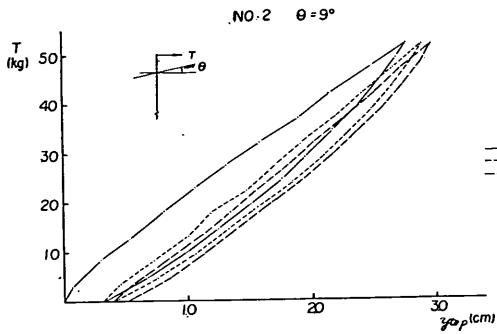


図 2.6.4 荷重—変位曲線

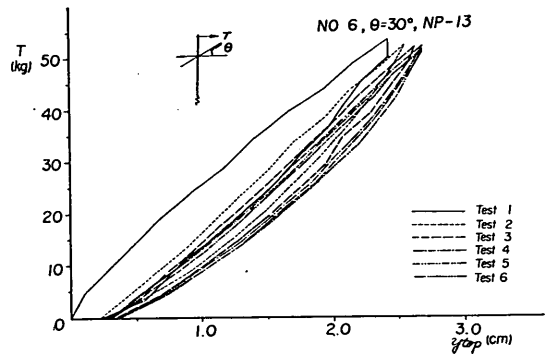


図 2.6.6 荷重—変位曲線

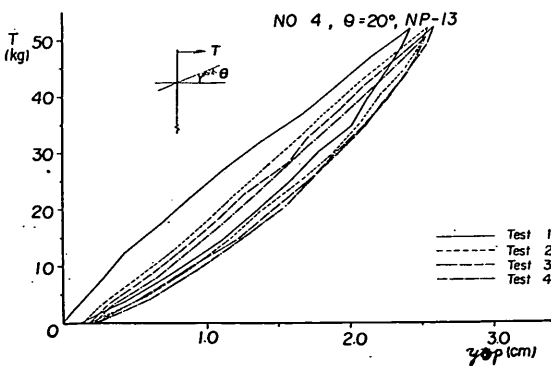


図 2.6.5 荷重—変位曲線

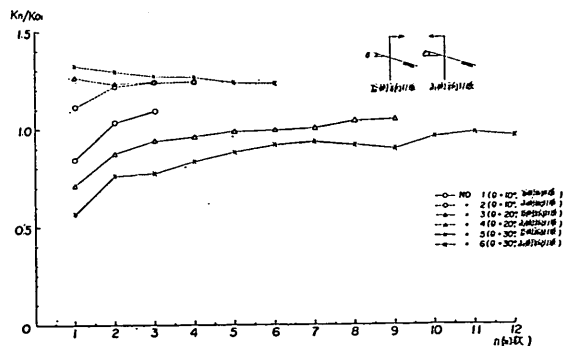


図 2.7  $K_n/K_{o1}-n$  関係

谷側方向引張：平均勾配  $K_n$  は一般に  $K_{o1}$  にくらべて小さく、一つの斜面における実験のうちでは処女載荷時の平均勾配  $K_1$  がとくに小さく、 $n$  が増加するほど  $K_n$  は大きくなり、また斜面の傾斜の異った実験の  $K_n$

をくらべてみると斜面が急なほど  $K_n$  の値は小さく、その差は  $K_1$  において最も著しく、繰返し載荷回数とともに減少している。残留変位については、最初の  $n=1$  のところでは、斜面が急な方が  $r_n - r_{n-1} / l_n - r_{n-1}$  は大きい、最終的にはどの傾斜面のものもほぼ同じ  $r_n - r_{n-1}$

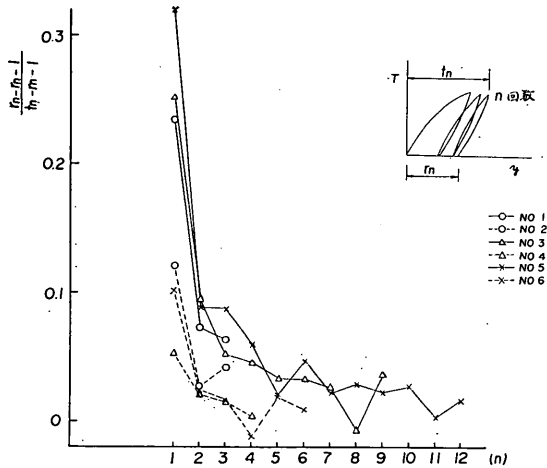


図 2.8  $(r_n - r_{n-1}) / (t_n - r_{n-1}) - n$  関係

$t_n - r_{n-1}$  の値におちつきそうである。

山側方向引張：この場合は平均勾配は一般に  $K_{01}$  にくらべて逆に大きくなり、斜面の傾斜角 9 度のもは最初の  $K_1$  は小さく、 $n$  とともに  $K_n$  は多少増加し、他の 2 つのものは逆に  $K_1$  は大きく  $n$  とともに  $K_n$  は減少している。そして最初の  $K_1$  は斜面が急なほど大きい、ここでも  $n$  がある程度以上になると  $K_n$  の三者の差はほとんどみられない。残留変位については、 $r_n - r_{n-1} / t_n - r_{n-1}$  の値は全般的に谷側方向引張の場合にくらべて小さい。また一つの斜面の実験のうちではやはり  $n=1$  のときの値が大きく、繰返し载荷回数の増加にともなうて小さくなっているが、斜面の傾斜による差はごくわずかしか見当らない。このように谷側方向引張、山側方向引張のいずれの場合においても杭の横抵抗に対する地表面の傾斜の影響は  $n=1$  のときに著しく現われ、 $n>2$  に対してはさほど著しく現われていない。ただし斜面傾斜角が 20 度の山側方向引張の場合 (No.4) には杭の着点までの地上部長が 43cm で他のものよりも 2 cm 短い、 $K_n / K_{01}$  は大きい目に、 $r_n - r_{n-1} / t_n - r_{n-1}$  は小さい目にてているので他のものと定量的な比較をすることはできない。

上のような現象を物理的にみれば、やはり谷側方向引張の場合と山側方向引張の場合とでは、前者の方は受動崩壊が著しいが、後者においてはそれがほとんど見られず、斜面傾斜角が 9 度の場合にはむしろ繰返しによって締固められているようである。また後者における斜面傾斜角が 9 度以上の場合、除荷時に杭前面でわずかに主動崩壊が生じ、そのためある程度まで  $K_n$  が落ちたもの

と思われる。一方前者の場合はかなり著しい受動崩壊によって緩んだ砂が繰返し载荷によって新たな斜面における平衡状態にむかって締固められて行く様子が明らかである。最後に杭頭の累積最大変位  $t_n$  について  $t_n / t_1$  を調べた結果、この  $t_n / t_1$  には角度による差はあまりみられず最終的には谷側方向引張の場合も山側方向引張の場合も  $t_n / t_1 \approx 1.1$  におさまる。

### 2.2.3 杭の曲げモーメント分布・反力分布・たわみ分布

杭の曲げモーメント分布、反力分布、たわみ分布を 図 2.9.1 から 図 2.9.6 までに示す。このうち 図 2.9.1 から 図 2.9.3 までが谷側方向引張の場合のもので、図 2.9.4 から 図 2.9.6 までが山側方向引張の場合である。またモーメント分布は杭に貼りつけたストレイン・ゲージによって実測したものであるが、反力分布またはたわみ分布は処女载荷の場合のみについてモーメント分布曲線を 2 度ずつそれぞれ数値微分または数値積分することによって求めたものである。したがって、その途中に多少の誤差が含まれることは止むを得なかった。なおたわみ分布曲線で杭の着点の高さのところに  $\circ$ ,  $\Delta$ ,  $\times$  の印があるが、これは前に述べたダイヤル・ゲージで測定した着点の変位を参考のためプロットしたものである。以下今までと同様に、これらの図によって谷側方向引張の場合と山側方向引張の場合を比較してみる。

谷側方向引張の場合：まず (a) のたわみ分布についてみると、斜面が急になるにしたがって全体的に大きくなり、たわみ曲線の下端も深くなっているのが目立つ。次に (b) のモーメント・カーブについてみると、斜面が急になるにつれて、全体的に大きくなり、最大点あるいは地中部での第 1 ゼロ点が深くなっている。また繰返しによってモーメントは増加しているが著しい変化は見られない。さらに注目すべきことは、地中部であるにもかかわらず、地表面の近くでは直線部分が存在していて、それが斜面が急になるにしたがって深いところまでのびてきて、10 度、20 度、30 度の場合に対して鉛直深さにして大体それぞれ 2 cm, 5 cm, 8 cm 程度の値を示している。最後に (c) の反力分布についてみると、これもモーメント・カーブ同様に斜面が急になるにしたがって全体的に大きな値を示し、最大点やゼロ点が深くなっている。そしてモーメント・カーブの直線部分に対応する部分は 2 回微分の結果ゼロになっている。このことは地表面近くの浅い部分に横抵抗に対して有効に働かない領域が生じたことを意味している。表面から観察して、斜面が崩れることによって新たに杭が露出することは確かにあ

ったが、その深さはせいぜい1 cmか2 cm程度であった。ところが、ここでは反力がゼロの部分より数センチも深いところにおよんでいる。したがって砂があっても、それが非常に緩く、実質的には横抵抗に対しては砂が存在していないのと同様な領域ができることにな(ノ)

る。このような現象をわれわれは仮想的に地表面が下がったとみなし、実際に反力が生じはじめる深さまで地表面を下げて考え、この仮想的に新たに考えた地表面を「仮想地表面」と呼ぶことにする。

山側引張の場合：前と同様にまず (a) のたわみ分布か

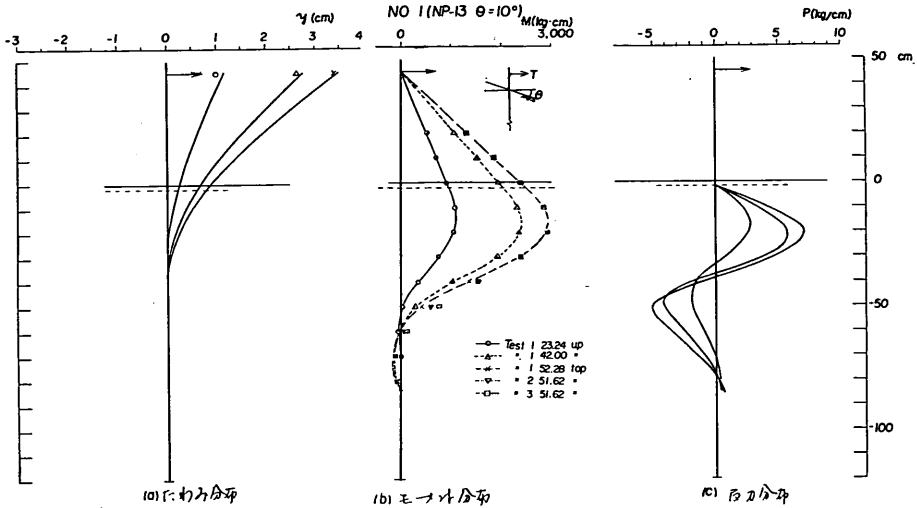


図 2.9.1 モーメント分布・反力分布・たわみ分布

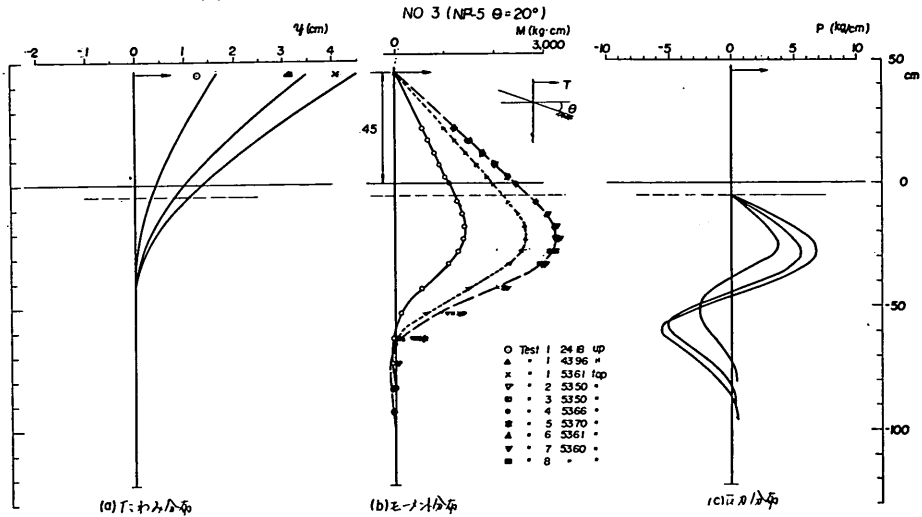


図 2.9.2 モーメント分布・反力分布・たわみ分布

ら見て行く。たわみの分布は前とは全く逆の傾向を示している。すなわち斜面が急である方が全体の値は小さく、その分布は浅くなっている。ただしここで 図2.9.5 (No.4) は前にも述べたように着力点までの地上部が他より短いので定量的に他と比較するのは必ずしも適当でないことを断っておく。次にモーメント分布曲線については、全体的の値の大きさを比較することはできない

が、斜面が急になるほど分布曲線が尖ってきて、しかも最大点あるいは地中部の第1ゼロ点は浅くなっている。ここでも繰返しによるモーメントの増加はあるが、その変化はわずかである。しかしここでは、谷側引張の場合のような地中部の地表面近くに直線部分は見られない。最後に (c) の反力分布曲線を見ると、斜面が急になるほど最大点や第1ゼロ点はわずかではあるが浅いところに

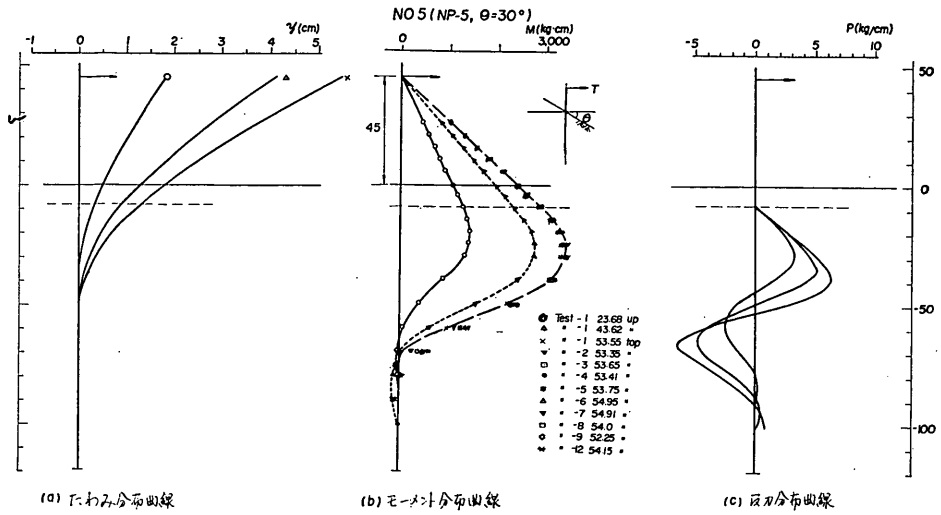


図 2.9.3 モーメント分布・反力分布・たわみ分布

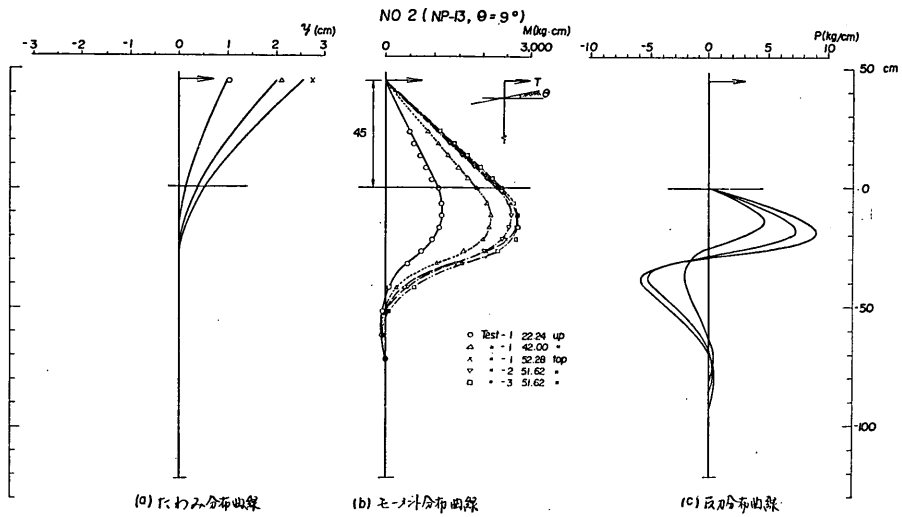


図 2.9.4 モーメント分布・反力分布・たわみ分布

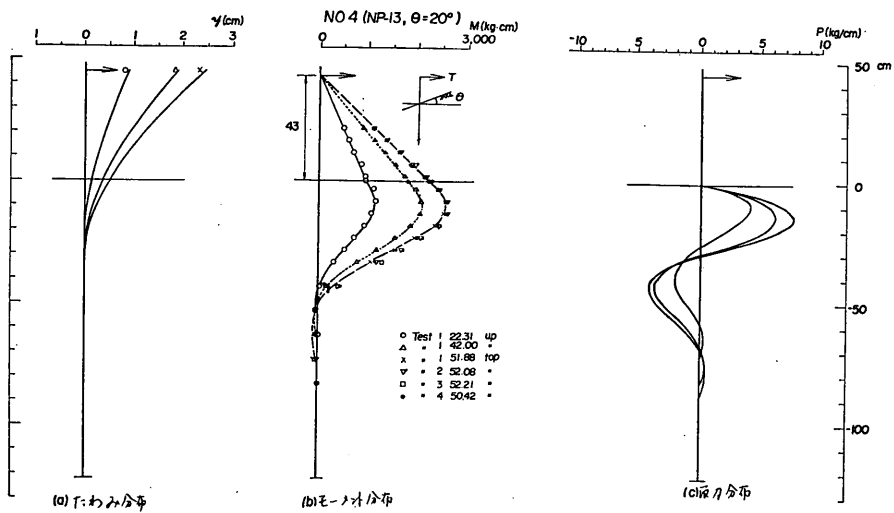


図 2.9.5 モーメント分布・反力分布・たわみ分布



ここで注意すべきことは深さのとり方であるが、山側方向引張の場合は予備実験の場合と同様に実際に斜面と杭が交わることを原点としているが、谷側方向引張の場合は、前節で述べた仮想地表が杭を切るところを原点としている。図中の点は深さ毎に印を変えてプロットしたもので、各印がそれぞれ3点ないしは2点ずつあるが、同種の印の間では、右によるほど大きい荷重に対応している。また図中の一点鎖線は  $P=k \cdot x \cdot y^{0.5} B$  の線を示す。

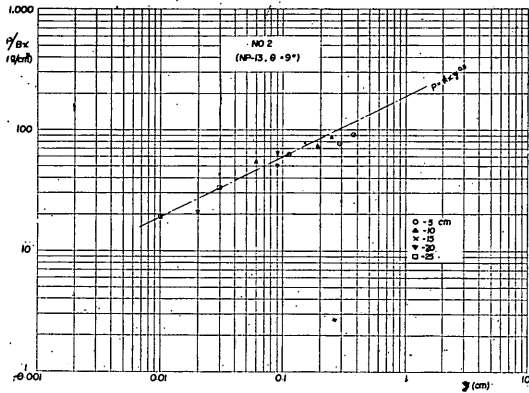


図 3.1.4  $P/Bx-y$  関係 (対数目盛)

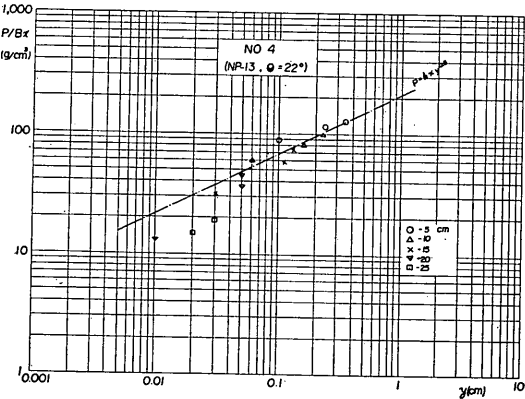


図 3.1.5  $P/Bx-y$  関係 (対数目盛)

さてそこでこれらの6つの図を全体的にながめてみると、山側方向引張、谷側方向引張のいずれも斜面が急になるほど各点の一点鎖線からのはずれが大きくなっているが、この多少のはずれをゆるせば、斜面においても基本式  $P=k \cdot x \cdot y^{0.5} \cdot B$  すなわち、 $p=k \cdot x \cdot y^{0.5}$  (ただし  $p=P/B$ ) がほぼ成立することがわかる。そして一点鎖線が  $y=1$  を切る点の縦座標が前述の式の地盤常数  $k$  の値を示すものであり、この  $k$  の値は斜面に対して杭を引張る方向および斜面の角度によって異なっていることがわか

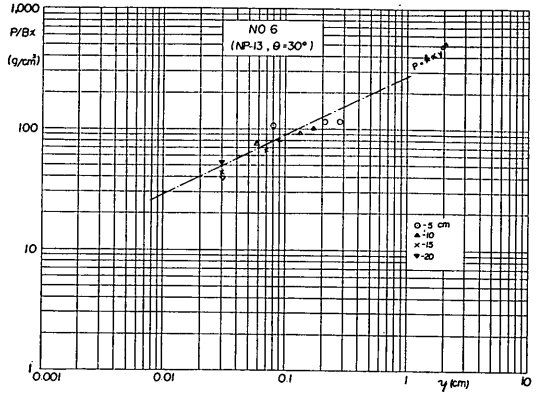


図 3.1.6  $P/Bx-y$  関係 (対数目盛)

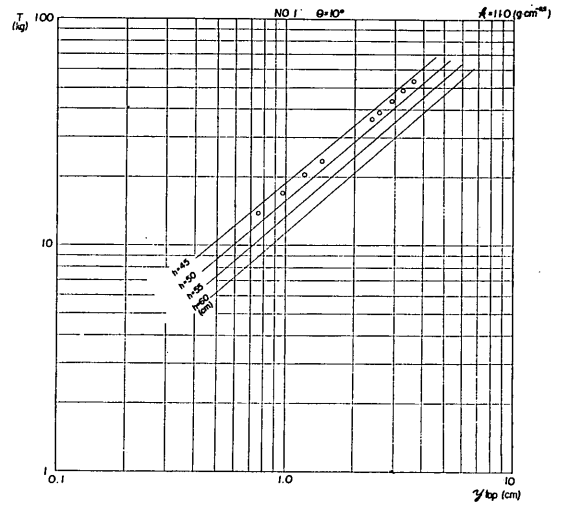


図 3.2.1 荷重一変位関係 (対数目盛)

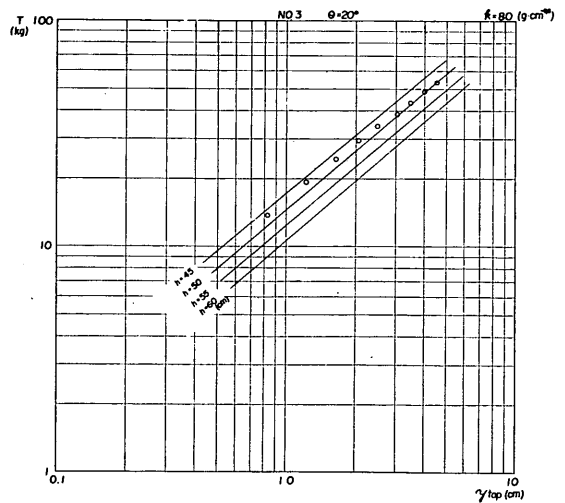


図 3.2.2 荷重一変位関係 (対数目盛)



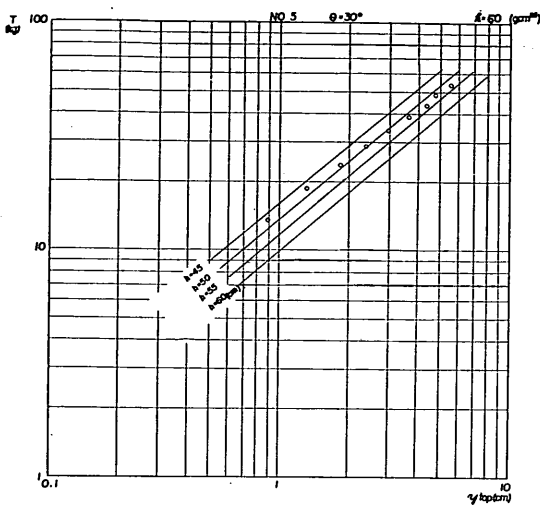


図 3.2.3 荷重—変位関係 (対数目盛)

る。

以上に述べた  $P/B \cdot x-y$  関係はひずみ計のデータすなわち杭の曲げひずみに基づいたものであるが、次にはダイヤル・ゲージのデータすなわち着力点の変位に基づいて少し考察してみる。

上述のことから斜面においても基本式がほぼ成立することがわかったので、今度はこの基本式に基づく  $T-y_{top}$  関係、すなわち荷重と着力点変位の関係と照らし合わせて実測の  $T-y_{top}$  関係を検討することになる。

まず谷側方向引張の場合においては前述のように地表面の低下が仮想されるので、この低下量を定量的に求めなければならない。したがって前述の  $P/B \cdot x-y$  関係から求めた地盤常数  $k$  を用いて、数種の地上部長  $h$  に対して  $T-y_{top}$  関係の計算曲線を求めて、それと実測値を比較して、地表面の仮想低下量すなわち地上部長の仮想増分  $\Delta h$  を求める。その計算曲線と実測値を比較した図が、図3.2.1から図3.2.3である。

これらの図をみると傾斜の緩い10度のもものでは最初から実測値は計算曲線に平行に分布しているが、20度、30度と急になると必ずしもそうではなく、荷重  $T$  の増加にしたがって地上部長  $h$  が

増加して、荷重がある点まで増加すればそれ以上は  $h$  の変化がほとんど見られない。これは地上部長の仮想増分  $\Delta h$  いかえれば地表面の仮想低下量が厳密には荷重とともに増加して、ある点で一定するもので、しかもそれは斜面が急なほど一定しにくいことを示している。しかしここではこの落ち着いてからの  $\Delta h$  を地表面の仮想

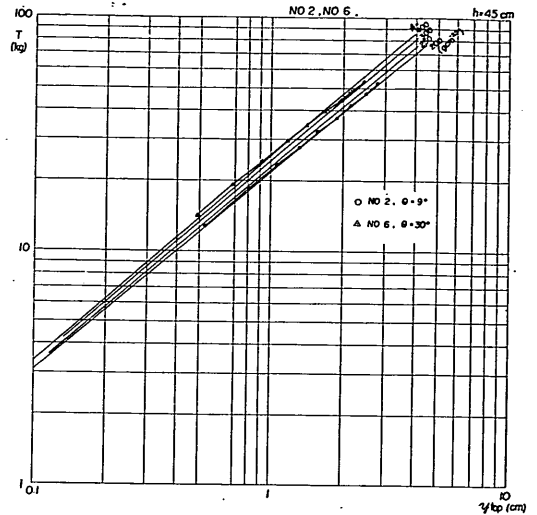


図 3.3.1 荷重—変位関係 (対数目盛)

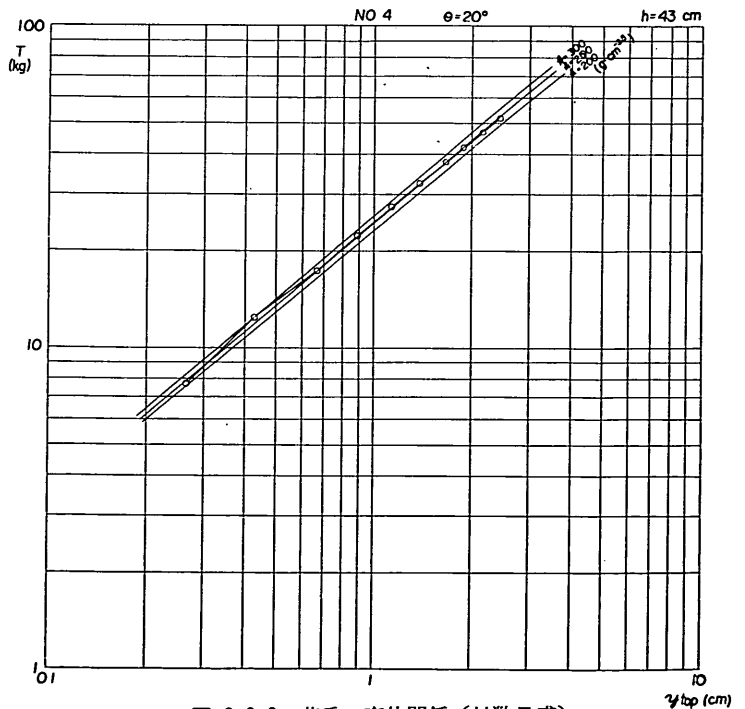


図 3.3.2 荷重—変位関係 (対数目盛)

低下量または地上部長の仮想増分と定めた。そうすると傾斜角10度、20度および30度に対してそれぞれ  $4n$  は 2 cm, 5 cm, 8 cm となる。これは 図 2.9.1, 図 2.9.2 および 図 2.9.3 と良く一致している。

一方山側方向引張の場合においては、谷側方向引張の場合のような地表面の仮想的な変化、いいかえれば地上部長の仮想的増分は見られない。したがってこの場合は  $T-y_{top}$  関係の計算曲線と、実測値の比較によって、前述の  $P/B \cdot x-y$  関係から定めた地盤常数  $k$  をチェックすることができる。この場合の  $T-y_{top}$  の計算曲線と実測値の比較は 図 3.3.1 と 図 3.3.2 に示す。

これらの図は地上部長を一定として、 $k$  を数種変えて

計算曲線を描き、それらと実測値を比較したものである。これらの図を見ても斜面が急になれば、必ずしも実測値は計算曲線と平行に分布せず、荷重の増加とともに多少の変化がみられるが、それでも最終的に落ち着いたと思われるところではほぼ計算曲線と平行になっている。したがってこのような場合はこの平行になったところの  $k$  を考えることにした。このようにして定めた  $k$  は傾斜角 9度, 20度, 30度に対してそれぞれ  $200 (g \cdot cm^{-3.5})$ ,  $230 (g \cdot cm^{-3.5})$  および  $320 (g \cdot cm^{-3.5})$  である。

次に杭の横抵抗に関する有効長<sup>1)3)</sup>を推定する基準となる点の深さ、すなわち、地中部におけるモーメント第1ゼロ点の深さ  $l_{m1}$  についてやはり前述の基本式に基

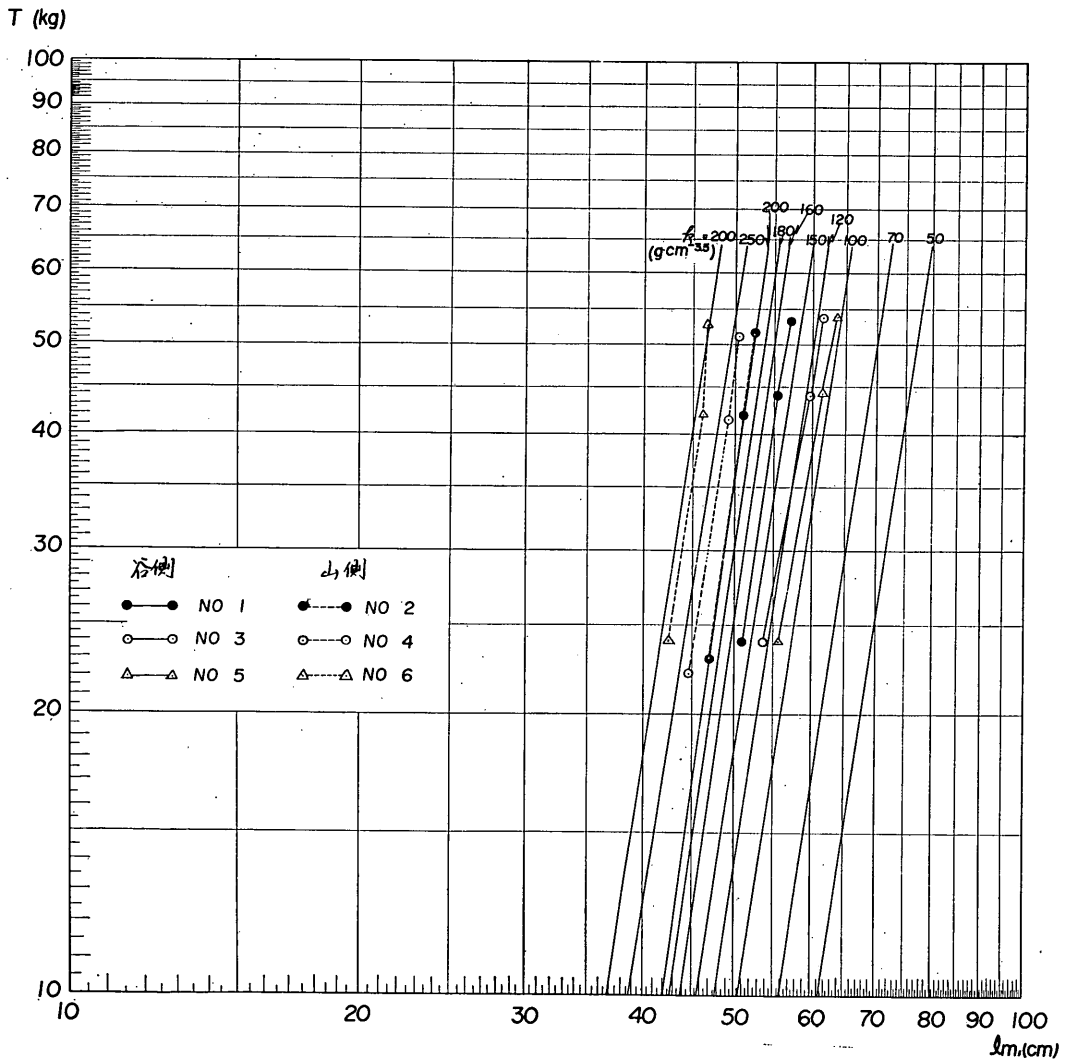


図 3.4  $\log T - \log l_{m1} - k - \theta$  関係

づいて計算された計算曲線と実測値とを比較して  
 図 3.4 にそれを示す。ここでも  $l_{m1}$  の実測値のとり方は、山側方向引張の場合には実際の斜面が杭を切るところを原点とし、谷側方向引張の場合には低下した仮想地表面が杭を切るところを原点とした。計算曲線は、 $l_{m1}$  の場合は地上部長  $h$  の影響はないと考えてよいので  $h = 45\text{cm}$  として  $k$  をいろいろ変えて計算したものである。

この図においては山側方向引張の場合は、 $P/B \cdot x-y$  関係や  $T-y_{top}$  関係から求めた  $k$  と比較的良好一致を示しているが、谷側方向引張の場合には前二者から求めた  $k$  とはあまり良好一致はしていない。しかし  $l_{m1}$  の値そのものをくらべてみると  $P/B \cdot x-y$  関係や  $T-y_{top}$  関係から求めた  $k$  に対応する  $l_{m1}$  の値(計算値)とはたいした差ではなく、しかもその差は安全側に出ていて実際上問題にならないので、いずれの場合も計算によって  $l_{m1}$  を推定してもさしつかえない。

次に今まで調べてきた斜面の影響を図にまとめてみると 図 3.5 から 図 3.7 のようになる。

図 3.5 は斜面の傾斜角に対する  $k$  の分布を示したものである。○印は前述の  $P/B \cdot x-y$  関係から求めたものであり、●印は  $T-y_{top}$  関係から求めたものである。横軸の角の正負の符号は正が山側方向引張を示し、負が谷側方向引張の場合を示す。谷側方向引張の場合に●印がないのは前にも述べたようにこの場合は  $h$  が変化する

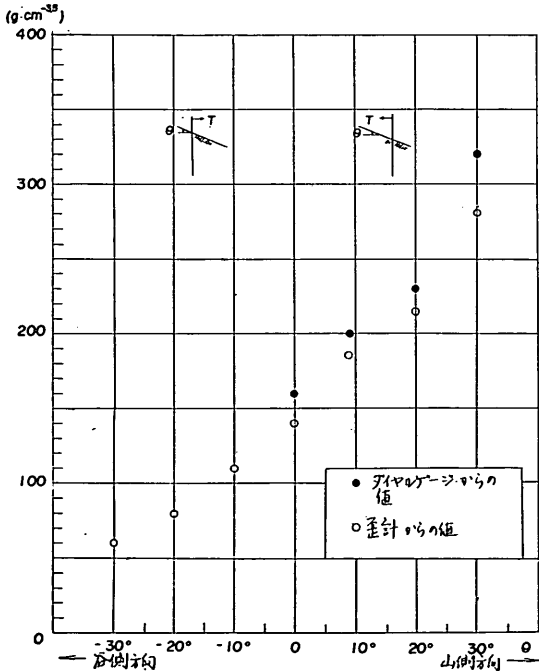


図 3.5  $k-\theta$  の関係

ため、 $h$  が影響する  $T-y_{top}$  曲線からは  $k$  は求められず、 $h$  が影響しない  $P/B \cdot x$  関係だけからしか  $k$  が求められなかったためである。

この図をみると、山側方向引張の場合は傾斜が急になるほど  $k$  が増加し、谷側方向引張の場合は逆に傾斜が急になるほど減少している。また山側方向引張の場合は●>○となって両者に差が生じているが、これは●印はダイヤル・ゲージのデータに基づくもので、○印はひずみ計のデータに基づくものであるため、これら測定手段による差が一つの原因と考えられ、その他○印の方にはモーメント曲線から  $P$  分布や  $y$  分布を出すときの手続き(数値微分および数値積分)中に入る誤差も含まれるようである。

しかし一方●印の方はダイヤル・ゲージ2個のデータに基づくものであるのに対して○印の方は多数のひずみゲージのデータに基づくものでデータ数による精度からいけば後者の方が良い。このようなわけで両者のうち厳密にどちらがより一層正しいかということはいえない。

図 3.6 は  $\theta=0$  の時の  $k$  を  $k_0$  として  $k/k_0$  を傾斜角に対してプロットしたものである。 $\theta$  の符号は 図 3.5

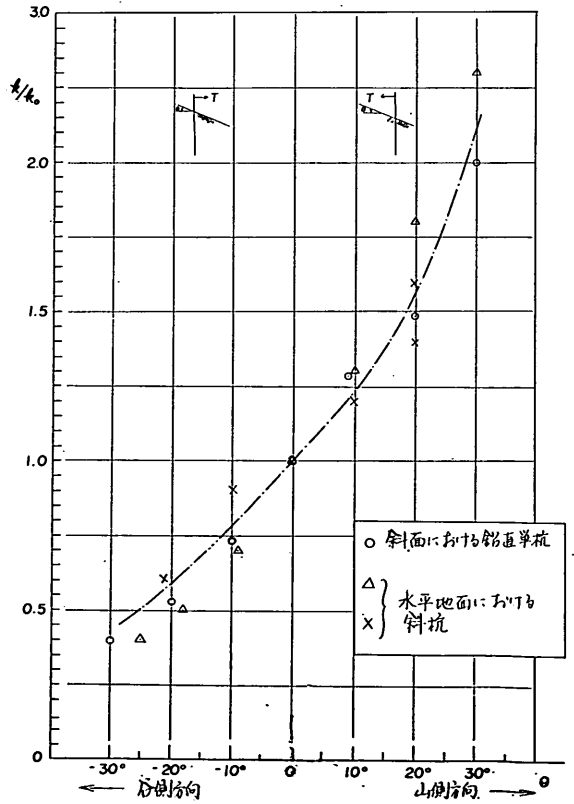


図 3.6  $(k/k_0-\theta)$  の関係

と同様なことを意味する。ここで○印が今回の実験のもの、すなわち 図 3.5 から求めたもので、 $\theta=0$  および山側方向引張の場合は前に述べた理由により●印と○印の平均値を採用している。

また△印と×印は参考のためすでに報告された斜め杭の横抵抗に関する実験データ<sup>2)</sup>を引用したもので、inbatter の場合を正の側に、outbatter の場合を負の側にプロットした。この図からみると、斜面における鉛直杭の横抵抗と水平地盤における斜め杭の横抵抗は、ほぼ同じであることがわかる。そしてこの場合前者の山側方向引張が後者の inbatter の場合に、前者の谷側方向引張が後者の outbatter の場合に対応している。そこで両者を同じ性質のものと考えて  $k/k_0-\theta$  の関係を代表して一点鎖線で表わした。

ただし斜面杭の谷側方向引張の場合はこの他に地表面が鉛直方向に  $\Delta h$  だけ下がり、その結果地上部長が仮想的に  $\Delta h$  だけ増加するという点が、斜面における鉛直杭の横抵抗が水平地盤における斜め杭の横抵抗と異なる点である。この仮想的な地表面の低下  $\Delta h$  を考えるという点は、垂直控え杭の横抵抗<sup>4)</sup>と類似している。したがって、 $k$  と  $h$  の両方が変化する今回の場合は、水平地盤における斜め杭の横抵抗<sup>2)</sup>と垂直控え杭の横抵抗との中間的な性質のものである。垂直控え杭の場合には斜面でなく、前壁の移動による主動崩壊面が問題になったが、その場合は主動崩壊面の上に土が存在してその土かぶりのために  $k$  の変化が起こりにくかったものと思われる。また斜め杭の場合は、崩壊領域の土の重量が杭にかかることになるために  $h$  の変化が見られなかったものと思われる。

さて実際に杭の横抵抗を推定するには何らかの方法で  $\Delta h$  を推定することが必要である。この  $\Delta h$  の量は斜面の角度のほか、杭の剛性および地盤の性質等によるものと思われる。ここで、杭の剛性および地盤の性質を包括的に代表する量として、前に述べたモーメント第1零点の深さ  $l_{m1}$  をとることにし、 $\Delta h/l_{m1}$  を傾斜角  $\theta$  に対してプロットしてみたのが 図 3.7 である。ここでも  $\theta$  の符号は前述の 図 3.5, 図 3.6 と同様である。なお谷側方向引張の場合の3点をスムーズな一点鎖線で結んで便宜上  $\Delta h/l_{m1}-\theta$  関係を代表するものとした。もちろん、この曲線は3つのデータだけから求めた概略のもので、もっと厳密に  $\Delta h/l_{m1}-\theta$  関係を求めようとすればさらに多くのデータの集積が必要なことはいうまでもない。

しかし  $30^\circ \geq |\theta| \geq 0^\circ$  の範囲ではここにあげた一点鎖

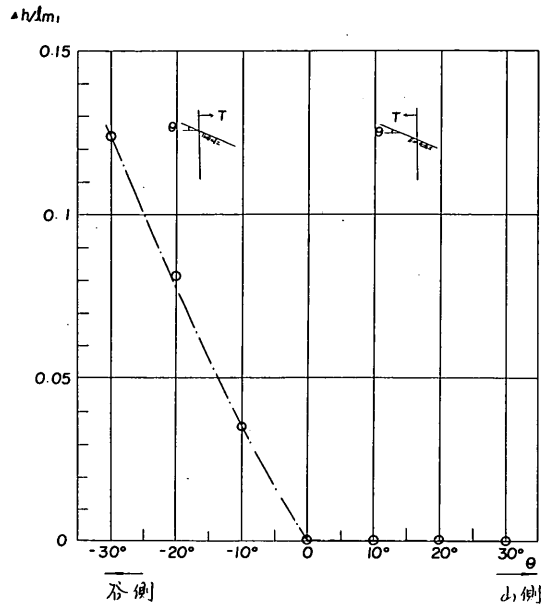


図 3.7  $\Delta h/l_{m1}-\theta$  関係

線を便宜的に  $\Delta h/l_{m1}-\theta$  関係として採用してもそう大きな間違いはないであろう。

以上述べてきたことをここでまとめてみると次のようになる。

斜面における鉛直単杭の横抵抗に対しても、水平地盤における鉛直単杭の横抵抗の基本式を、少なくとも斜面傾斜角  $30^\circ$  以内でほぼあてはめることができる。ただしこの場合地盤常数を 図 3.6 によって補正する必要がある。さらに、谷側方向引張の場合は地上部長の補正を必要とするが、その補正には目下のところでは便宜的に 図 3.7 を用いることにする。

#### 4. 計算例

本文で説明したものを、斜面で水平力を受ける鉛直単杭に応用する計算方法の手順を簡単に説明する。

図 4.1 に示す鋼杭を用いた場合、設計に必要な杭頭変位、最大曲げモーメント、有効長を計算する。ただしここでは荷重は静的にかかり、しかも処女載荷時のみを問題とする。この他の計算条件の詳細は下記の通り与えられたものとする。なお計算の細部については参考文献(3)を参照されたい。

計算条件

杭の曲げ剛性  $EI=4.50 \times 10^{10} \text{ kg} \cdot \text{cm}^2$   
 杭の外径  $\phi=30.5 \text{ cm}$

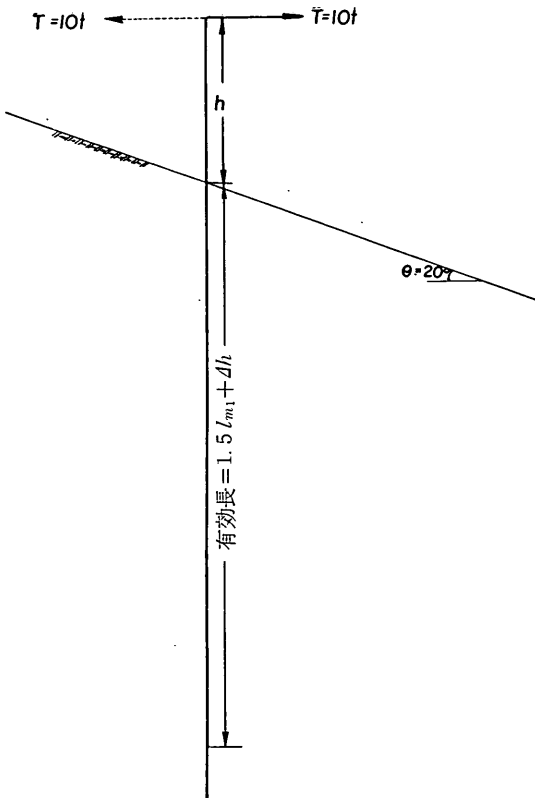


図 4.1 計算モデル

地上部長  $h=50$  cm  
 地表面が水平の場合の地盤常数  $k_0=30$   $g \cdot cm^{-3.5}$   
 斜面傾斜角  $\theta=20$  度  
 水平外力  $T=10$  ton

注： 計算例内においては水平地表面での地盤常数を  $k_0$  とおき斜面による修正地盤常数を  $k$  とおく。

1) 山側方向引張の場合

図 3.6 によってまず  $k_0$  から  $k$  を求める。

$$\theta=20\text{度では } k/k_0=1.56$$

一方、 $k_0=30g \cdot cm^{-3.5}$  であるから

$$k=1.56 \times 30=46.8 \approx 47 (g \cdot cm^{-3.5})$$

次にはこの  $k$  を用いて、参考文献(8)の計算方法によって、杭頭変位、最大曲げモーメントおよび有効長を求めればよい。途中の計算を省略して結果だけを表 4.1 に示す。

2) 谷側方向引張の場合

ここでもまず 図 3.6 によって  $k$  を求める。

$$\theta=-20\text{度では } k/k_0=0.59$$

一方、 $k_0=30g \cdot cm^{-3.5}$  であるから

$$k=0.59 \times 30=17.7 \approx 18 (g \cdot cm^{-3.5})$$

次にこの  $k$  によってやはり参考文献(8)の方法で  $l_{m1}$  を求めると、

$$l_{m1}=587\text{cm}$$

この  $l_{m1}$  と図 3.7 によって今度は  $dh$  を求めなければならない。

$$\theta=-20\text{度では } dh/l_{m1}=0.077$$

$l_{m1}=587$  であるから

$$dh=0.077 \times 587=45 \text{ (cm)}$$

よって

$$h'=h+dh=95 \text{ (cm)}$$

そこであとは  $k=18g \cdot cm^{-3.5}$ ,  $h'$  を新たに  $h$  として、文献(8)の方法により 1) と同様に杭頭変位、最大曲げモーメントおよび有効長を求めればよい。ただしこの場合の有効長は上で求めた  $l_{m1}$  の 1.5 倍に  $dh$  を加えたものとなる。計算結果は表 4.1 に示す。

表 4.1 計算結果

	杭頭変位 (cm)	最大モーメント (t.m)	有効長 (m)
山側方向引張	1.59	14.1	6.90
谷側方向引張	4.42	20.2	9.25

表 4.1 を見れば斜面における杭の横抵抗を考える場合は、荷重の方向によってかなり様子が違うことがわかる。

むすび

以上砂質土に関して、斜面における鉛直単杭の横抵抗について実験的に調べてみた。その結果、斜面における鉛直単杭の横抵抗は、加える水平荷重の方向と斜面傾斜角とによってかなり異なるものであることがわかった。

しかし、一方、基本的には、水平地盤における鉛直単杭の横抵抗の基本式が斜面における鉛直単杭に対してもあてはまることがわかった。そしてここにあげた方法によって適当な補正を行えば、水平地盤における鉛直単杭の場合と同様の方法で、斜面における鉛直単杭の横抵抗が比較的簡単に推定できることが明らかとなった。以後この方法が実際の設計に際して多少とも役に立てば幸いである。

最後に高萩砂の三軸試験をしていただいた勝野克技官をはじめ土性研究室の方々、実験および報告書の作成に協力された、基礎工研究室の中村松子技官、兼平葵技官および武田俊夫技術員に感謝の意を表す。

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 第11巻6号
- 2) 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 第12巻2号
- 3) 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 第2巻3号
- 4) 久保浩一・三枝富士男・鈴木敦巳  
“垂直控え杭の横抵抗”  
港湾技術研究所報告 第4巻2号

記号表

$e$	砂の間隙比	
$\gamma_d$	砂の乾燥密度	(g/cm <sup>3</sup> )
$\sigma_1$	最大主応力	(kg/cm <sup>2</sup> )
$\sigma_3$	最小主応力	(kg/cm <sup>2</sup> )
$\theta$	斜面の傾斜角	(度)
$EI$	杭の剛性	(kg/cm <sup>2</sup> )
$B$	杭幅	(cm)
$h$	載荷高（着力点までの地上部長）	(cm)

$k$	地盤常数	(g・cm <sup>-3.5</sup> )
$k_0$	地表面が水平の場合の地盤常数	(g・cm <sup>-3.5</sup> )
$K_n$	荷重変位曲線の第 $n$ 番目ループの載荷時の平均勾配	(kg/cm)
$K_{01}$	地表面が水平の場合の処女載荷時の荷重変位曲線の平均勾配	(kg/cm)
$l_{m1}$	モーメントの地中部における第1ゼロ点の深さ	(cm または m)
$n$	繰返し載荷回数	
$p$	単位幅あたりの地盤反力	(g/cm <sup>2</sup> )
$P$	杭幅全体の地盤反力	(g/cm)
$r_n$	杭頭の荷重変位曲線における第 $n$ 番目のループまでの累積残留変位	(cm)
$t_n$	杭頭の荷重変位曲線における第 $n$ 番目のループまでの累積水平最大変位	(cm)
$T$	杭頭にかかる水平外力	(kg)
$\Delta h$	地表面の仮想低下量	(cm)
$y$	杭のたわみ量	(cm)
$y_{top}$	杭頭（着力点）の変位量	(cm)
$x$	地表面からの深さ（ただし仮想地表面を考える場合は仮想地表面からの深さ）	(cm)

(昭和41年1月31日受付)