

運輸省港湾技術研究所

# 港湾技術研究所 報告

---

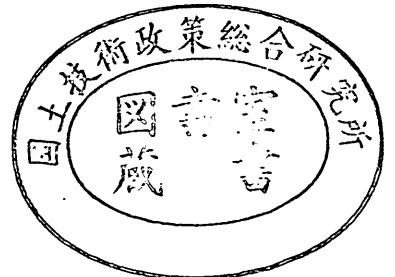
---

REPORT OF  
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH  
INSTITUTE  
MINISTRY OF TRANSPORT

---

VOL. 30      NO. 2(1)    JUNE 1991

NAGASE, YOKOSUKA, JAPAN



# 港湾技術研究所報告 (REPORT OF P. H. R. I)

第30巻 第2号 (Vol. 30, No. 2) 1991年6月 (June, 1991)

## 目 次 (CONTENTS)

1. Investigation of Cross-shore Sediment Transport Rates and Flow Parameters  
in the Surf Zone using Field Data ..... Yoshiaki KURIYAMA ..... 13  
(現地データによる砕波帯内の岸沖漂砂量と流速特性の検討  
..... 栗山 善昭)
2. 避泊フェリーの係留張力と振れ回り運動に関する検討  
..... 平石 哲也・本城 智 ..... 59  
(Characteristics of the motion and tension of a ferry moored in a storm  
..... Tetsuya HIRAISHI and Satoshi HONJO)
3. 離散渦法による構造物周りの流れシミュレーション  
..... 細川 恭史・古川 恵太 ..... 155  
(Modeling of Discrete Vortices Induced by an Inclined Flat Plate  
Yasushi HOSOKAWA and Keita FURUKAWA)
4. プラスティックボードドレーンで改良された不均一地盤の沈下特性  
..... 田中 洋行・太田 一己・丸山 隆英 ..... 211  
(Performance of Vertical Drains for Soft and Ununiform Soils  
..... Hiroyuki TANAKA, Kazumi OHTA and Takahide MARUYAMA)
5. 杭の横抵抗における捨石層の評価  
..... 高橋 邦夫・壹岐 幸史 ..... 229  
(Lateral Resistance of a Pile in Rubble Mound  
..... Kunio TAKAHASHI and Yukifumi IKKI)
6. サンドドレーンの効果に関する有限要素解析  
..... 小林 正樹 ..... 275  
(Finite Element Analysis of the Effectiveness of Sand Drains  
..... Masaki KOBAYASHI)
7. 接円式深層混合処理地盤の挙動  
..... 北誥 昌樹・中村 健・寺師 昌明 ..... 305  
(Reliability of Clay Ground Improved by the Group Column Type DMM with  
High Replacement)  
..... Masaki KITAZUME, Takeshi NAKAMURA and Masaaki TERASHI)

8. 斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗	寺師 昌明・北誥 昌樹	327
(Influence of a slope on the Lateral Resistance of a Long Pile	Masaaki TERASHI and Masaki KITAZUME)	
9. 液状化による矢板岸壁の変形の数値解析	井合 進・亀岡 知弘	349
(Analysis of Deformation in Sheet Pile Quaywall due to Liquefaction	Susumu IAI and Tomohiro KAMEOKA)	
10. 盛土の地震被災事例に基づく円形すべり安定解析手法の検討	上部 達生・長田 信	381
(Circular Arc Analysis of Earthquake Damage of Embankments on Saturated Sand Layers	Tatsuo UWABE and Makoto OSADA)	
11. ねじりを受ける長大ケーソンの力学特性	清宮 理・山田 昌郎	445
(Mechanical Properties of Long Caisson Subjected to Torsion	Osamu KIYOMIYA and Masao YAMADA)	
12. 歩行式水中調査ロボットの開発		
— (第2報) 軽量防水型実験機の設計 —	朝倉 修・秋園 純一・岩崎 峯夫・根本 孝志	483
(Development on Aquatic Walking Robot for Underwater Inspection	— (Second Report) Design of the Light-weight Type Aquatic Walking Robot —	
Osamu ASAKURA, Jun-ichi AKIZONO, Mineo IWASAKI	and Takashi NEMOTO)	
13. 水平管における空気混入軟泥の流動特性	岡山 義邦・鮎貝 基和・鈴木 誠・福本 裕哉	533
(Fluidity Characteristics of Muddy Slurry with Compressed Air in	Horizontal Pipe	
Yoshikuni OKAYAMA, Motokazu AYUGAI, Makoto SUZUKI	and Hiroya FUKUMOTO)	

## 斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗

寺 師 昌 明\*

北 詰 昌 樹\*\*

### 要 旨

本研究は斜面の近傍あるいは斜面中の杭の横抵抗を、応力の相似則を満足する遠心模型実験手法によって実証的に検討したものである。港湾では捨石マウンド中の長杭のようにこの種の長い杭は良く見られる。

複雑な地盤条件や境界条件の下での杭の横抵抗については未解明の問題が多い。従来、この種の複雑な問題の解明は大変な労力を費やして大型の土槽実験で検討することが多かった。これは、扱いやすい1G場の縮小模型実験では実物規模の現象を再現できる保証がなく、かといって実物実験では現象を浮彫りにするためのパラメトリックな実験が絶望的なためである。本研究では、まず、仮想の実物を複数の異なる縮尺でモデル化して、縮尺の異なる模型間で生じる現象が相互に一致することを確認し (Modelling of Models)、遠心模型実験によって縮尺1 (実物) の現象を再現する可能性を示した。次いで、数多くの実物の事例で良く理解されている現象を、模型で再現して実物との一致を確認した。

長杭の横抵抗に及ぼす斜面の影響は、上述のアプローチで妥当性の確認された遠心模型実験で密な豊浦標準砂の斜面を対象に検討した。検討に際してはパラメーターとして、杭と斜面の相対的な位置関係、斜面勾配、斜面高さ、杭の剛性、杭幅を選定した。実験の結果、斜面近傍や斜面中の杭についても、杭の横抵抗に関する港研方式の  $p-y$  関係 (反力が深さならびに撓み量の  $1/2$  乗に比例するとする関係) が成立することを確認した。これを踏まえて、 $p-y$  関係の比例定数である横抵抗係数  $k_n$  の低減という形で斜面の影響を吟味し報告する。

なお、得られた低減の考え方の妥当性については、簡便な土圧のバランス計算と弾塑性有限要素解析結果を用いて考察を加えている。

キーワード：杭，砂，斜面，水平荷重，載荷試験，模型実験（遠心模型実験）

\* 土質部 地盤改良研究室長  
\*\* 土質部 主任研究官 (地盤安定解析担当)

## Influence of a slope on the Lateral Resistance of a Long Pile

Masaaki TERASHI\*

Masaki KITAZUME\*\*

### Synopsis

Long piles are often used in or near the crest of the slope of the sand mound in the port constructions. The influence of the slope on the lateral resistance of a long pile is investigated by a series of centrifuge model tests.

In order to avoid obtaining misleading conclusions from the model tests, the authors started with a fairly simple situation of a long pile embedded in a uniform horizontal layer, in which the validity of centrifuge modelling is confirmed by the modelling of models changing the acceleration from 20g to 75g. Then a series of model tests are carried out changing the slope angle, slope height, flexural rigidity of piles, pile width and position of a pile relative to the crest of the slope. The influence of slope on the lateral resistance of a long pile is determined and presented in a simple diagram.

**Key Words** : Pile, Sand, Slope, Horizontal Load, Load Test, Model Test (Centrifuge Model Test)

---

\* Chief of the Soil Stabilization Laboratory, Geotechnical Engineering Division  
\*\* Senior Research Engineer, Geotechnical Engineering Division

## 目 次

要 旨 .....	327
1. ま え が き .....	331
2. 遠心模型型実験 .....	331
3. 模型実験結果の妥当性の検証 .....	331
3.1 妥当性検証のためのアプローチ .....	331
3.2 実験方法 .....	332
3.3 実験結果と考察 .....	333
4. 斜面近傍の杭の横抵抗実験 .....	337
4.1 実験方法 .....	337
4.2 実験結果と考察 .....	338
5. 斜面近傍の杭の横抵抗に関する考察 .....	342
5.1 杭前背面の土圧変化による検討 .....	342
5.2 有限要素法による検討 .....	344
6. 結 論 .....	345
7. あとがき .....	346
参 考 文 献 .....	347
記 号 表 .....	347

## 1. まえがき

複雑な地盤条件や境界条件の下での杭の挙動については未解明の問題が多い。棧橋等の構造物の建設に際して斜面の近傍や斜面内に打設される長杭の横抵抗もこの一つである。斜面は自然斜面の場合もあれば、捨石マウンド等で人為的に形成される場合もある。このような斜面の影響下にある長杭の横抵抗の評価に関しては鈴木、久保、田中<sup>1)</sup>の報告があるが、港湾の施設の技術上の基準・同解説<sup>2)</sup>にも明確な記載はないのが現状である。

従来、この種の複雑な問題の解明は大変な労力を費やして大型の土槽実験で検討を加えることが多かった。これは、扱いやすいミニチュアの模型実験では実物規模の現象を再現できる保証がなく、かといって実物を用いる現地実験では現象を浮彫りにするためのパラメトリックな検討が絶望的となるためである。最近、脚光を浴びている遠心模型実験手法（大加速度場の小型模型実験）は応力の相似性を満足させるもので、この種の検討の精度を高め、かつ検討作業を大きく省力化する可能性を持っている。筆者らは鉛直に設置された長杭の横抵抗の問題に対してここ数年間一連の遠心模型実験で取組んできた。なお、杭の研究には、筆者らの他にも Scott<sup>3)</sup>、Ko et al.<sup>4)</sup>、Craig<sup>5)</sup>等が同様に遠心模型実験手法を用いて取組んでいる。

本研究には2つの目的がある。まず、杭の挙動の検討に関する遠心模型実験手法の妥当性を確認し、今後の研究（例えば、複雑な改良地盤中の杭の挙動の解明）のための手法として確立することが第1の目的である。第2の目的は、杭頭自由の長杭の横抵抗に及ぼすマウンド等の斜面の影響を解明することである。なお、本研究の成果は、研究の進捗に応じてこれまで部分的に発表している（Terashi, et al.<sup>6), 7)</sup>）。

## 2. 遠心模型実験

遠心模型実験は、模型縮尺の逆数に相当する加速度を模型に作用させることで、模型地盤中の実物と幾何学的に相似な任意の位置の応力を実物と全く同じ値にすることができる。すなわち模型地盤中の応力の絶対値を実物と等しくし、かつ応力の分布を相似なものにすることができる。一連の遠心模型実験は港湾技術研究所の大型遠心模型実験装置を用いて実施した。同装置の模型地盤を搭載するスイングプラットフォーム表面までの回転半径は3.8m、最大搭載質量は2.7t、最大遠心加速度は115gである。遠心模型実験手法の意義と実験に用いた装置ならびに周辺機器の詳細については寺師<sup>8)</sup>を参照されたい。

れたい。

## 3. 模型実験結果の妥当性の検証

### 3.1 妥当性検証のためのアプローチ

縮小模型で観察される挙動が実物規模での挙動を再現することが保証されなければ、縮小模型で観察される現象はミニチュアの実物（模型）にとって妥当なものとしてしか取扱えない。模型が実物と等価に挙動することを確認する最善の方法は、縮小模型による実験と実物規模の実験の両者を実施して、両者で生じるあらゆる物理的現象（応力、変位、ひずみ、時間など）が一定のルールで関連付けられることを確認することである。しかし、一般に現象を支配する要因は極めて多いため、とりわけ実物規模での条件の設定や確認は難しく、かつ、実物規模の実験のコストは膨大となるため、このような1:1の対比を積み重ねて模型の有意性を確認することは容易ではない。今回の杭の横抵抗に関して模型の妥当性を検証するためにとった方法は次の2つのアプローチである。

まず第1は、仮想の実物を設定してこれを複数の異なる縮尺、 $1/n$ でモデル化して縮尺の逆数の加速度場、 $ng$ で実験し、観察されるそれぞれの挙動を相互に対比する方法である。これは Modelling of Models と呼ばれる方法で、Fuglsang and Ovesen<sup>9)</sup>による図-1がこれを図式的に示している。同図は対数で表示しており、横軸は検討対象とするものの代表的な寸法、 $D$ （例えば、杭の幅）であり、縦軸は縮尺の逆数である。この方法で  $n = 1$  までの検討を行えば前述の実物との対比になる訳

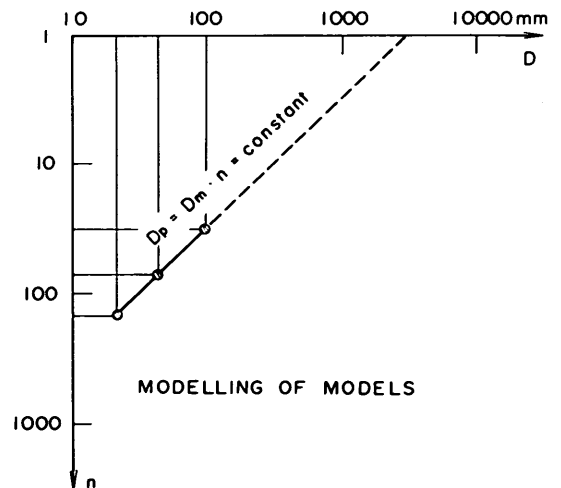


図-1 Modelling of Modelsの説明<sup>4)</sup>

で、問題となるのは検討を行える  $n$  の値の範囲が自ずと限定されることにある。しかし、複数の縮尺  $1/n$  で得られる現象が全く同一であれば、外挿にはよるもの、実物 ( $n = 1$ ) の現象が縮尺された模型で再現されると考える根拠の一つとなる。

今回の実験で用いた第2の方法は、数多くの実物の事例で良く理解されている物理法則や現象間の関係を模型を用いて検討し、模型と実物で両者に整合性のあることを確認する方法である。今回の杭の問題に関しては、実物規模で実証されている地盤反力、 $p$  と杭の撓み、 $y$  の関係 ( $p$ - $y$  関係) ならびに  $p$ - $y$  関係に及ぼす杭幅や剛性の影響を模型で再現し対比することとした。

### 3. 2 実験方法

模型実験の妥当性の確認のために実施した一連の実験で用いた試料容器と模型の状況を模式的に図-2に示す。試料容器は内寸で、深さ46cm、幅50cm、奥行20cmの剛な容器である。水平砂地盤中に鉛直に自立する杭頭自由の長杭が模型の妥当性を確認するために行った実験の対象である。長杭の条件として挙動することを確認するための実験(後述の実験シリーズI)では杭は砂地盤中に浮いている形としたが、長杭としての条件を十分に満足する場合の一連の実験では、模型杭を図示のようにその下端でクランプしている。

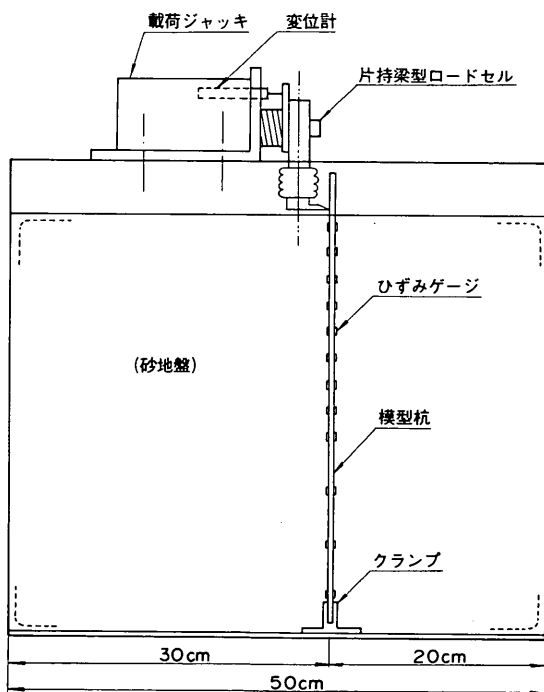


図-2 妥当性確認のための実験-模型地盤の概要

模型杭には板状のものを用いている。模型杭材料としては曲げ剛性を調整するために弾性係数 ( $E$ ) の異なる鉄 ( $E = 2.1 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ ), アルミニウム ( $E = 7 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$ ), アクリル樹脂 ( $E = 3.1 \times 10^4 \text{ kgf/cm}^2$ ) の3種類を用いた。杭全長の平均して12の深度で模型杭の前後面にひずみゲージを貼付してある(図-3)。個々の模型杭の曲げ剛性は、このゲージ、コーティング、ワイヤーの貼付された状態で単純梁として曲げ試験を行って確認している。

模型実験に用いた砂は豊浦標準砂である。標準砂の物性は、均等係数  $U_c = 1.38$ , 有効径  $D_{10} = 0.13 \text{ mm}$ , 最大間隙比  $e_{max} = 0.979$ , 最小間隙比  $e_{min} = 0.623$  である。砂地盤の作製にあたっては、有効長を検討する実験(後述のシリーズI)では杭を所定の深さに吊り下げておき杭周辺に後述の方法で砂を充填した。その他の実験では図-2に示すように下端でクランプすることで杭を自立させておき、周辺に砂を充填した。砂地盤の充填方法は、気乾状態の豊浦標準砂を多重ふるいを通して試料容器中に自由落下させる方式で、砂ホッパー-下端の開口部の間隙調節で密度の調整が可能である。密度調整方法の詳細については寺師、他<sup>10)</sup>を参照されたい。今回の一連の実験で、このようにして作製された砂の平均的な相対密度は  $D_r = 87\%$  である。砂の充填終了後に、地表面を真空で吸引することによって所定の層厚の水平地盤を作製した。

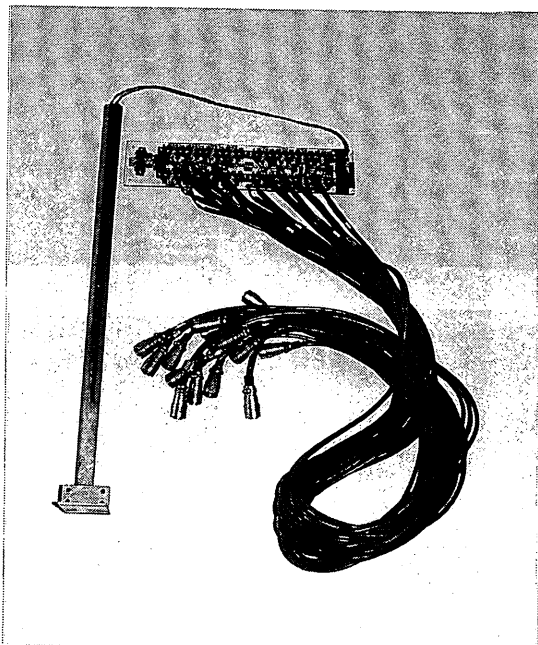


図-3 ひずみゲージ付き模型杭



斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗

模型地盤の作製が完了すると、試料容器は遠心模型実験装置のスイングプラットフォームに搭載され、所定の加速度場で杭に水平方向の载荷を行う。载荷は図-2に示すように片持ち梁型のロードセルを介して载荷ジャッキで行い、载荷点の水平荷重と水平変位を計測する。なお、本文中ではこの载荷点の水平荷重と変位を杭頭荷重、杭頭変位と呼んでいる。载荷時の変位速度は0.6mm/minである。なお、载荷中には杭に貼付したひずみゲージの読みも連続的に計測する。

3.3 実験結果と考察

3章の一連の実験で想定した標準的な実物杭は曲げ剛性  $EI = 3.88 \times 10^{10} \text{kgf} \cdot \text{cm}^2$  で幅  $B = 80 \text{cm}$  の板状の杭である。実験条件を表-1に示す。杭の根入れ長、杭幅、杭の厚さ、杭の曲げ剛性、地表面からの杭の载荷高さ、遠心加速度をそれぞれ、 $L, B, t, EI, h, n$  で表わしている。遠心加速度は模型地盤中で深さ方向に変化する。水平地盤を対象とした本章の実験では砂層の重心（層厚の1/2の深さ）での遠心加速度を用いて結果を整理している。ただし、前述のように半径の大きな遠心模型実

験装置を用いているため模型地盤中の加速度の変化は無視しえるものである。なお、表中の下付き  $m$  は模型における諸量を、 $p$  は実物規模に換算した諸量を示すものである。

実験シリーズIは長杭として必要十分な杭長を検討するための予備実験。シリーズIIは前述の Modelling of Models, シリーズIIIは剛性の、IVは杭幅の影響を検討するために実施したもので、III, IVシリーズについては仮想の実物が前述の標準の値から相違することとなる。

(1) 長杭としての有効長の検討 (シリーズI)

今回の研究で対象とする“長杭”は、杭頭での载荷条件や杭周辺での反力の発揮状況が杭の下端には影響を及ぼさないほどに十分な根入れを有する杭である。シリーズIでは“長杭”の条件を確認するために、前述の標準的な実物杭を1/40に縮尺した同一材料かつ同一断面の杭に対して、同一の载荷高さで根入れ長のみを3通りに変化させた実験を行った。40gの加速度場で40, 20, 10cmの根入れ長の実験を行っているため、それぞれが実

表-1 実験条件 (シリーズ I から IV)

シリーズ番号	模型実験条件						実物換算の条件		
	根入れ長 $I_m$ (cm)	杭幅 $B_m$ (cm)	杭の厚さ $t_m$ (cm)	曲げ剛性 $EI_m$ (kgf.cm <sup>2</sup> )	载荷高さ $h_m$ (cm)	加速度 $n$ (g)	根入れ長 $L_p$ (cm)	杭幅 $B_p$ (cm)	曲げ剛性 $EI_p$ (kgf.cm <sup>2</sup> )
I	40.0	2.0	0.5	15,200	0.4	40.0	1,600	80.0	$3.88 \times 10^{10}$
	20.0	2.0	0.5	15,200	0.5	39.9	798	80.0	$3.86 \times 10^{10}$
	10.0	2.0	0.5	15,200	0.4	40.1	401	80.1	$3.91 \times 10^{10}$
II	40.3	3.2	0.8	88,200	0.6	25.7	1,036	82.2	$3.85 \times 10^{10}$
	39.5	2.8	0.7	51,500	0.65	28.6	1,129	80.1	$3.45 \times 10^{10}$
	40.7	2.0	0.5	15,200	0.4	40.2	1,636	80.4	$3.97 \times 10^{10}$
	36.0	1.6	0.4	6,000	0.3	49.2	1,771	78.7	$3.51 \times 10^{10}$
	31.8	1.2	0.3	2,000	0.35	66.4	2,112	79.7	$3.89 \times 10^{10}$
	30.1	1.0	0.25	1,030	0.15	77.2	2,323	77.2	$3.67 \times 10^{10}$
III	25.7	2.0	0.2	1,030	0.4	39.9	1,025	79.8	$2.61 \times 10^9$
	40.2	2.0	0.23	5,830	0.5	39.8	1,600	79.6	$1.46 \times 10^{10}$
	40.7	2.0	0.5	15,200	0.4	40.2	1,636	80.4	$3.97 \times 10^{10}$
	40.7	2.0	0.8	59,000	0.45	40.9	1,665	81.8	$1.65 \times 10^{11}$
	40.7	2.0	0.8	202,000	0.35	39.9	1,624	79.8	$5.11 \times 10^{11}$
IV	40.5	0.52	0.5	3,900	0.3	40.9	1,656	21.3	$1.09 \times 10^{10}$
	40.8	1.11	0.8	33,900	0.4	41.0	1,673	45.5	$9.57 \times 10^{10}$
	40.7	2.0	0.5	15,200	0.4	40.2	1,636	80.4	$3.97 \times 10^{10}$
	40.1	2.8	0.7	51,500	0.25	40.1	1,608	112.3	$1.33 \times 10^{11}$

物規模では16, 8, 4 m の根入れの杭に相当する。

ほぼ同一の水平荷重レベルでの実測モーメントの深さ方向の分布を図-4に示す。根入れ長40cm の場合は第1モーメント零点の深さ ( $l_{m1}$ ) に比べて杭長は3倍以上あり、十分に“長杭”として挙動している。根入れ長が10cm では根入れ長40cm の長杭に比べると最大曲げモーメントも小さく長杭とは異なる挙動を示している。根入れ長20cm の場合は根入れ長が第1モーメント零点の深さのおよそ1.5倍となっており、40cm の場合とモーメント分布にも有意な差は認められない。これは篠原、久保<sup>1)</sup>の提案する長杭としての有効長と一致する条件のものである。また、港湾の施設の技術上の基準<sup>2)</sup>でも実用的には根入れ長が  $l_{m1}$  を超えれば長杭として挙動すると考えてよいとされている。

しかし、20cm の杭の杭頭水平荷重と杭頭変位の関係を見ると、全般的には40cm の杭の場合とほとんど変わらないものの、荷重が増大するにつれてやや撓みが大きくなる傾向を示している。今回のような実験研究では不必要な要因の影響を排除するために、限界の根入れ長を  $1.5 l_{m1}$  以上としておくことが妥当と考えられる。

$l_{m1}$  は荷重レベルや杭の曲げ剛性によっても当然変化する。本章で述べる一連の実験で最大の  $l_{m1}$  を示した実験は最大曲げ剛性の材料を用いた実験の場合であったが、この場合も  $l_{m1}$  は20cm 程度であった。模型の妥当性を検証するための以下の実験では杭の根入れ長をいずれも40cm としているため、全ての実験で長杭の条件を満足

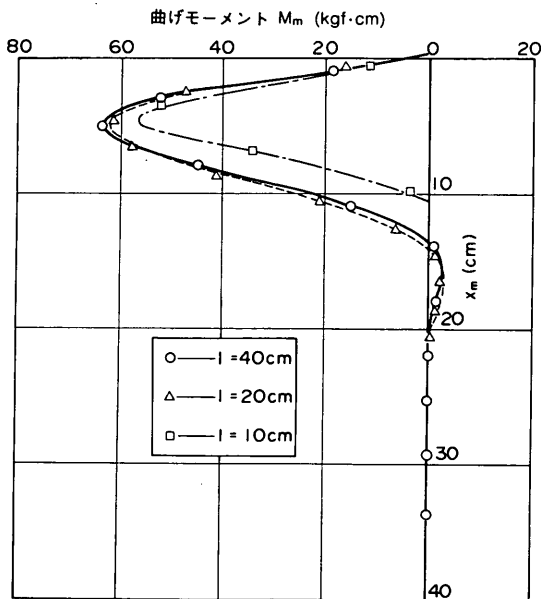


図-4 長杭としての有効長の検討

しているものと考えてよい。

また、このように有効長を遙かに超える根入れ長の杭を用いていることから、模型杭の下端をクランプしたことは杭の挙動になんら影響を与えていないものと考えてよい。

(2) Modelling of Models (シリーズII)

シリーズIIでは表-1に示すように、標準の杭を6種類のスケールでモデル化して対比した。図-5に実測の杭頭水平荷重、 $H_m$  と杭頭変位、 $y_{top,m}$  を対比して示す。荷重が増加するに連れて地盤が局部的に塑性化していくため、荷重～変位曲線は非線形であり、かつ模型寸法が異なるため個々の曲線は相違している。

遠心模型実験の相似則を用いて実測値を実物の諸量に換算すると図-6が得られる。Modelling of Modelsの結果は、杭頭水平荷重、 $H_p$  と杭頭水平変位、 $y_{top,p}$  の関係(図-6a)) に関して見事に一致している。また、実物換算ではほぼ同一の荷重レベルで対比した杭の曲げモーメント、 $M_p$  の深さ、 $x_p$  に関する分布を同図b)に示すが、これも完全な一致を示している。1/25.7～1/77.2の範囲での実験結果ではあるが、これを外挿して縮尺1の実物の挙動も遠心場の縮尺模型で再現可能であると推定する根拠の一つとなるものである。

また、観点を変えると、この実験結果の一致は実験研究のキーポイントの一つとなる地盤の密度コントロールの確かさなどを含めた実験の再現性を強調する結果でもある。

(3) 模型による既知の挙動の再現性の検討

前項で示したシリーズIIとシリーズIII, IVの実験結果を用いて、既知の現象が再現されているか否かを検討してみる。

・  $p-y$  関係

杭を弾性梁とし、また地盤からは水平方向の地盤反力、

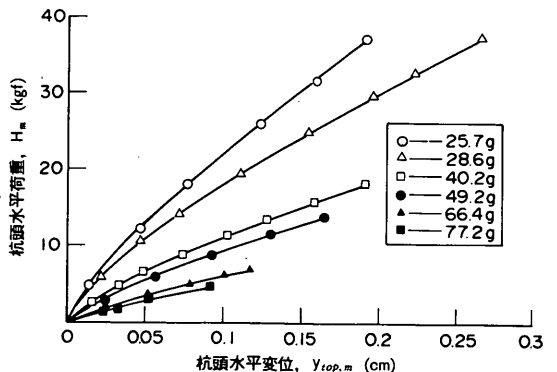
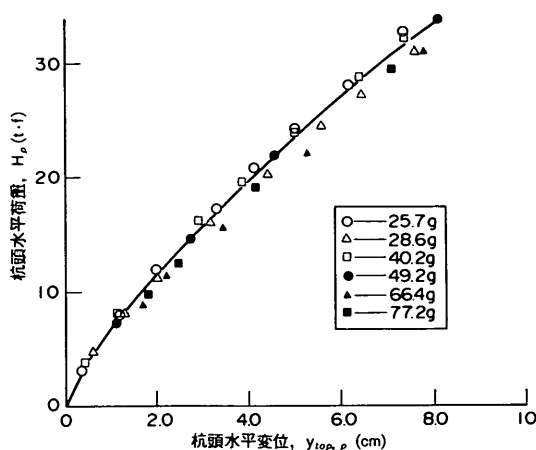
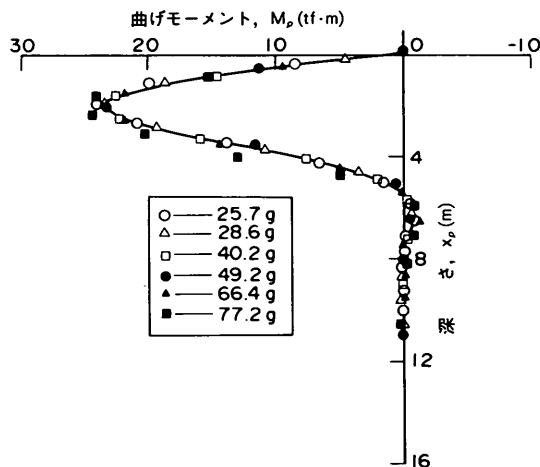


図-5 杭頭荷重と杭頭変位の関係(模型スケール)

斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗



(a) 杭頭荷重と杭頭変位の関係 (実物スケール)



(b) 杭体の曲げモーメント分布 (実物スケール)

図-6 実物スケールに換算した実験結果

$p$ のみが作用すると仮定すれば、杭の挙動は良く知られている弾性梁の基本式で表現される。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = -pB \quad (1)$$

ここに、 $EI$ は杭の曲げ剛性、 $B$ は杭幅である。

港湾の施設の技術上の基準<sup>2)</sup>では、軸直角方向力を受ける杭の挙動を港研方式によって推定することを基本としている。また、港湾で蓄積された既往の知見はこれをサポートするものである。ちなみに港研方式の特徴はこの $p$ を後述の(2)式で $x, y$ の関数として表現するところにある。

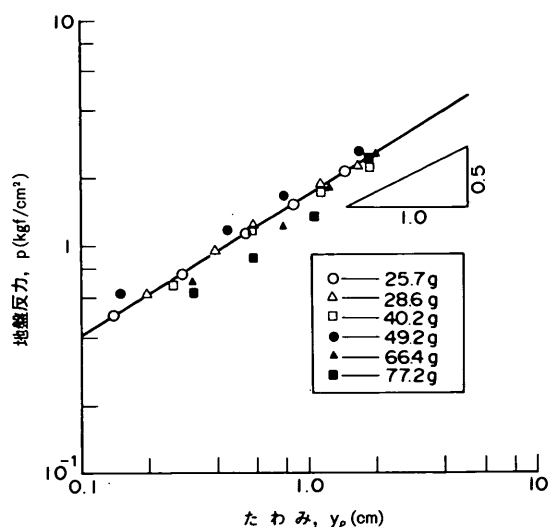


図-7 杭の反力と撓みの関係 ( $x_p = 2$  m)

それぞれの実験で杭の全長にわたって実測されている曲げモーメントを深さ、 $x_p$ の多項式で近似し、これを2回微分、また2回積分して杭に作用する反力、 $p$ と杭の撓み、 $y_p$ の深さ方向分布を求める。これを各荷重レベルで行い、実物としての同一深さで $x_p$ を固定すると $p-y$ 関係を求めることができる。図-7はシリーズIIの一連の実験の $x_p = 2$  mでの $p-y$ 関係を両対数で示すものである。図示のように、地盤反力 $p$ は撓み $y$ の平方根に比例している。この関係はその他の深度、その他の実験シリーズでも同様に得られている。

次に、シリーズIIIの実験結果を用いて、個々の杭について撓み $y_p$ を固定して地盤反力と深さの関係を整理したのが図-8である。杭の剛性にかかわらず、同一の撓み量に対する地盤反力は深さに比例して増加することが分かる。

図-7, 8より、杭の横方向載荷時の地盤反力は、

$$p = k_s x y^{0.5} \quad (2)$$

として $x, y$ の関数で与えられることが分かる。これは、1960年代に砂を用いた大型模型実験で見出され港研方式の基礎となったものであるが(久保<sup>10)</sup>、遠心模型実験によっても再確認することができた。なお、式中の比例定数 $k_s$ は地盤の横抵抗係数と定義されている。

・ 杭の剛性の影響 (シリーズIII)

シリーズIIIの実験では、砂地盤の相対密度、杭幅、載荷高さは一定とし杭材料と杭の厚さを変化させることで、杭の剛性を変化させた一連の実験を実施している。当然

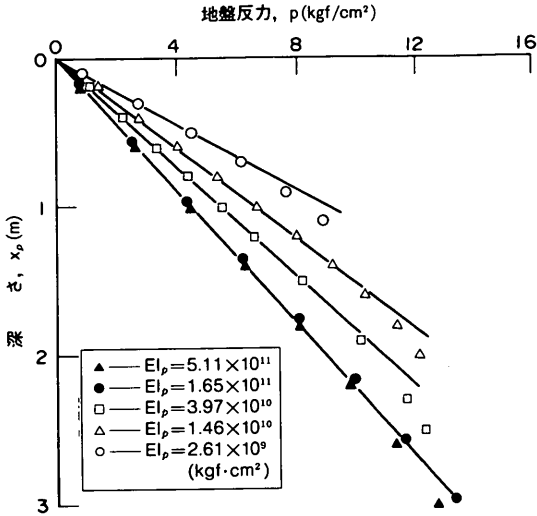


図-8 同一撓みでの杭の反力と深さの関係

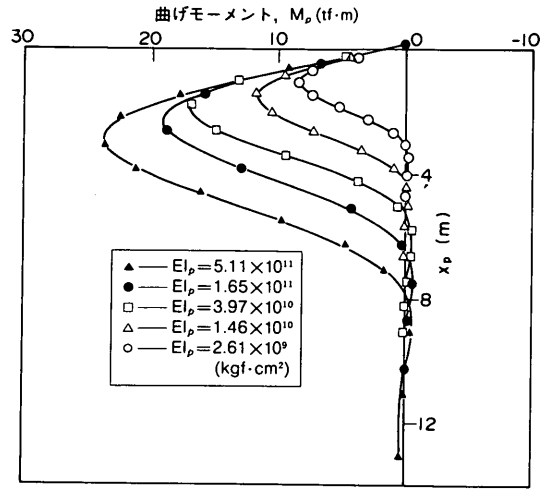


図-9 曲げモーメント分布に及ぼす剛性の影響

であるが、杭の剛性が変化すると杭の横抵抗、撓み量、曲げモーメント分布などは大きく変化する。すなわち、杭の剛性が高くなるほど同一の杭頭水平荷重での杭頭変位は小さくなる。一方、杭の撓み分布の曲率は剛性が高いほど小さいため深部での撓み量の大小関係はこれと逆転する。図-9には、同一杭頭荷重時の杭の曲げモーメント分布を対比して示すが、剛性の影響が顕著に見える。

同一換算深さ ( $x_p = 2\text{ m}$ ) での  $p-y$  関係を図-10に示す。前出の図-8と併せて考えると、杭の剛性の変化は式(2)の關係に基本的に影響を与えるものではないことが分かる。しかし、図-10を仔細にみると曲げ剛性が低下するに連れて横抵抗係数  $k_s$  が少し増加する傾向が認められる。しかし、この変動幅を解析に反映させても、実用上は杭の挙動の予測値に影響を及ぼすものではなく、無視しえるものである。

・ 杭幅の影響 (シリーズIV)

最近、提案されている  $p-y$  關係には杭幅の影響を無視しているものも見られる。一方、篠原、久保<sup>11)</sup>や沢口<sup>12)</sup>は模型実験の結果を踏まえて、杭幅  $B$  が小さい場合は  $B$  の増加に対して  $B$  の平方根に逆比例して  $k_s$  が低下すること、杭幅が20~30cm以上になると  $k_s$  が一定となることを指摘している。 $k_s$  が一定となる限界の杭幅については諸説があり50cmあるいはそれ以上の値を限界とする現場データもある(宮島<sup>10)</sup>)。

シリーズIVでは、他の条件をほぼ一定に保ちつつ、換算杭幅  $B_p$  のみを21.3~112.3cmまで4通りに変化させ

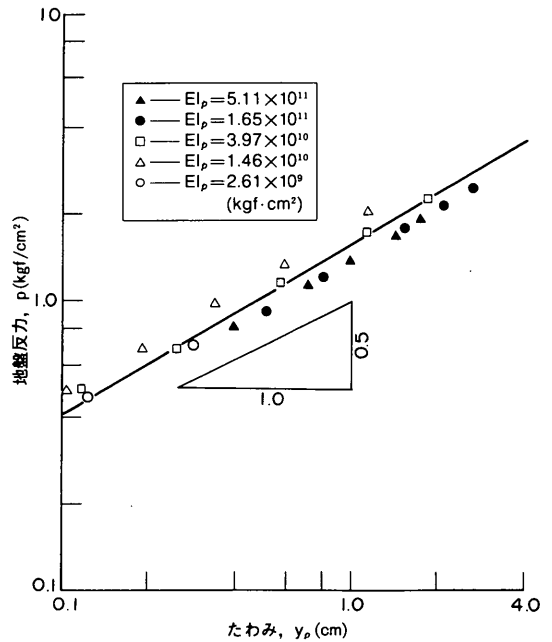


図-10 剛性の異なる杭の  $p-y$  關係

て一連の実験を実施した。杭幅を変化させると曲げ剛性も変化するが、本シリーズでの曲げ剛性の変化は  $p-y$  關係に大きな影響を与えないことを既にシリーズIIIで確認している。図-11に同一深さ  $x_p = 2\text{ m}$  における  $p-y$  關係を示す。同図で  $y_p$  が0.2cm以下の範囲は計測ならびに計算誤差が大きくなる部分であるが、それ以上では地盤反力が撓み量の1/2乗に比例している。この結

果は既往の知見と定性的に良く対応しており、杭幅の増加にともなう地盤反力の減少を示している。

図-12は横抵抗係数 $k_s$ と換算杭幅の関係を整理したものであるが、杭幅の小さい間の $k_s$ の減少傾向は杭幅の平方根の逆数に比例しており、杭幅80cm程度で一定となる傾向を示している。なお、これは最近、高橋、春日井<sup>19)</sup>が杭体に土圧計を組込んで実施した一連の実験で得た $k_s$ と杭幅の関係は本実験結果と良く一致している。

(4) 模型の妥当性に関する知見の要約

本章で杭の横抵抗の問題に関する遠心模型実験の妥当性について得られた知見を要約すると以下の通りである。

密な砂地盤中に設置された杭頭自由の長杭の横抵抗に

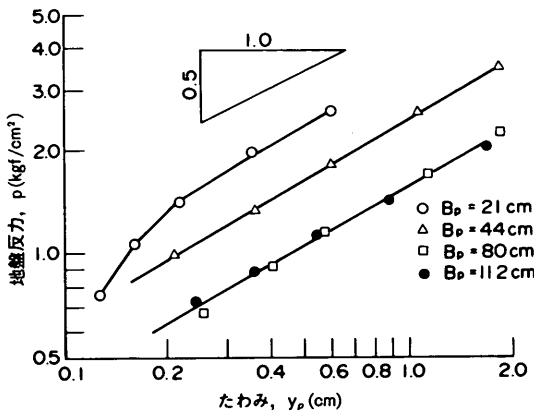


図-11 x-y関係に及ぼす杭幅の影響

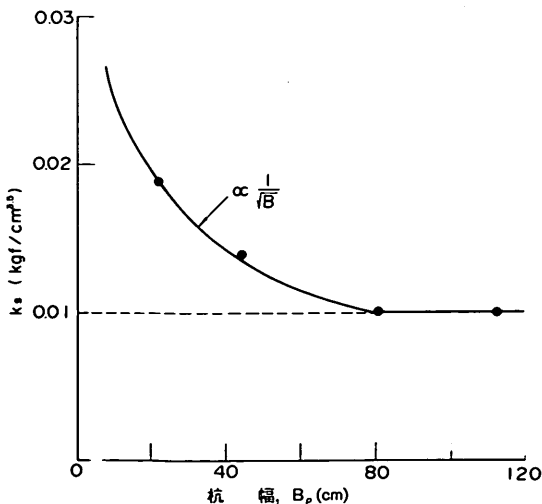


図-12 横抵抗定数 $k_s$ と杭幅の関係

ついて、一連の遠心模型実験を実施した。長杭としての有効長を十分に満たす条件下に仮想の実物に対する縮尺を変化させて行った Modelling of Models の結果は、ほぼ完全な一致を示し、遠心模型実験で実物の代用が可能であることを示すものであった。さらに、条件を変化させて実施した一連の実験結果は、信頼に足る既往の知見を精度良く再現するもので、この点からも遠心模型実験の有用性を確認することができた。

4. 斜面近傍の杭の横抵抗実験

斜面近傍の杭の横抵抗は、地盤材料とその相対密度が同一であったとしても多くの要因、例えば杭と斜面の相対的な位置関係、斜面勾配、斜面高さ、杭の剛性、杭幅などに影響支配されると考えられる。このため、一連の遠心模型実験でこれらの要因の影響を吟味することとした。

なお、斜面の影響は荷重の方向によって異なる。例えば、斜面中で上り斜面方向に荷重すれば水平地盤より大きな横抵抗が、下り方向に荷重すれば小さな横抵抗が期待される。今回の一連の実験では横抵抗の低減割合が興味の対象であるため、後述の図-13に示すように下り斜面方向への一方向の荷重のみとしている。

4.1 実験方法

杭の横抵抗に及ぼす斜面の影響を検討するための一連の実験では、前章の実験より大きめの剛な容器（内寸深さ46cm、幅70cm、奥行20cm）を用いた。模型地盤の概要を、杭が斜面の肩にある場合を例にして模式的に図-13に示す。模型地盤材料とその相対密度、杭の地盤中

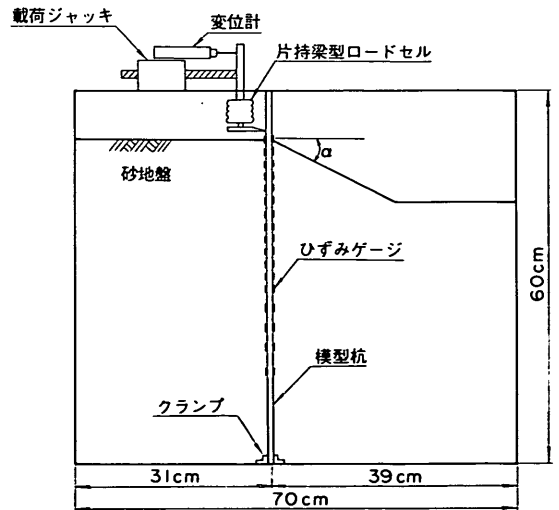


図-13 斜面近傍の杭の水平荷重—模型地盤の概要

へのセット方法、杭の載荷方法、等は前章の実験と同様であるため説明は省略する。本章の実験でも板状の模型杭を用いており、シリーズV～VIIでは杭の全長にわたって17深度で杭の前後面にひずみゲージを貼付して杭の曲げモーメントを丁寧に計測し、逆に、シリーズVIIIではひずみゲージを省略している。斜面の作製は、水平地盤の作製と同様に密度調整のされた模型地盤表面を真空で吸引する方法で行っている。

#### 4.2 実験結果と考察

一連の実験で想定した標準的な実物杭は曲げ剛性  $EI = 3.77 \times 10^{10} \text{kgf} \cdot \text{cm}^2$  で幅  $B = 80 \text{cm}$  の板状の杭である。一連の実験条件は表-2～表-4に示す。本章の実験はすべて40gの加速度場で実施しているので以下の記述はすべて実物規模に換算した諸量で説明する。なお、加速度はいつれのシリーズでも斜面天端から-2mの換算深さの位置で算定している。これは、標準的な斜面(高さ4m)では斜面高さの1/2に相当する。

実験シリーズVは杭と斜面の相対的な位置関係が杭の横抵抗に及ぼす影響を吟味する基本的な実験で、水平2に対して鉛直1の斜面勾配の条件下に実施した。シリーズVI以下の実験は、その他の要因の影響を検討するために実施したもので、シリーズVIは斜面高さ、シリーズVIIは斜面勾配と杭の剛性、シリーズVIIIは杭幅の影響を吟味するために実施した。このため、シリーズVII, VIIIの模型杭については仮想の実物が前述の標準的な値から相違することとなる。

##### (1) 杭と斜面の相対的な位置関係(シリーズV)

杭と斜面の相対的な位置関係の横抵抗に及ぼす影響を吟味するシリーズVでは前述の標準的な杭を対象に実験を実施している。斜面に対する杭の位置関係を図-14

と表-2に示す。図中では斜面からの距離、 $L$ を実物換算の距離で示すと同時に杭幅、 $B$ で無次元化した $L/B$ でも示してある。本実験シリーズでの斜面は、前述のように水平2に対して鉛直1の勾配( $\alpha = 26.6^\circ$ )で、斜面高さは400cmである。

Case 1～Case 4は図示のように斜面左上の水平面上にある。Case 1は斜面から十分に離れた位置にあり、番号の順に斜面の肩に近づきCase 4が斜面の肩に位置する。Case 5, 6は斜面内で、Case 7が法尻に位置し、Case 8は斜面右下の水平面上で斜面より十分に離れた位置にある。載荷位置は図示のように杭に対して一定の高さに保たれているため、個々の杭位置の地表面からの載荷高さは天端面、斜面、斜面下の水平面で異なることとなる。

杭頭(載荷点)での水平荷重と変位の関係を図-15に示す。Case 1～4の曲線を比較すると、斜面の肩に近づくほど同一変位での水平荷重が低下している。これは明らかに斜面の影響である。Case 4～7にも同様に顕著な水平荷重の低下が認められるが、この低下には斜面の影響と地表面からの杭の載荷高さの相違の影響が含まれている。したがって、これらのケースについては、このままでは斜面の影響のみを分離して議論することができない。

前述のように実測モーメント分布を多項式近似し、2回微分、2回積分によって任意の深さでの $p-y$ 関係を求める。この結果を整理すると、杭の位置に関わらず $p$ は撓みの1/2乗に比例しており、かつ、同一撓みでの $p$ は深さに比例していることが認められ、港研方式で前提とする $p-x-y$ の関係が斜面近傍や斜面中の杭にも適用可能であることが確認された。このため、以下の

表-2 実験条件と横抵抗定数 $k_s$ 値(シリーズV～VI,  $\alpha = 26.6^\circ$ )

シリーズ番号	Case番号	杭幅 $B_p$ (cm)	杭の剛性 $EI_p$ (kgf.cm <sup>2</sup> )	斜面高さ (cm)	際高さ $h_p$ (cm)	杭と斜面の相対的な位置関係	横抵抗定数 $k_s$	相対密度 $D$ (%)
V	1	79.2	$3.62 \times 10^{10}$	396	51.5	斜面肩から十分離れた天端水平地盤	$7.13 \times 10^{-3}$	84.4
	2	78.6	$3.52 \times 10^{10}$	393	55.0	斜面肩から197cm離れた天端水平地盤	$7.33 \times 10^{-3}$	83.8
	3	80.8	$3.93 \times 10^{10}$	404	56.6	斜面肩から81cm離れた天端水平地盤	$5.58 \times 10^{-3}$	88.8
	4	80.8	$3.93 \times 10^{10}$	404	56.6	斜面肩	$4.93 \times 10^{-3}$	82.5
	5	81.0	$3.97 \times 10^{10}$	405	178.2	斜面肩から263cm離れた斜面内	$4.13 \times 10^{-3}$	87.4
	6	81.0	$3.97 \times 10^{10}$	405	352.4	斜面肩から567cm離れた斜面内	$4.32 \times 10^{-3}$	83.6
	7	80.4	$3.85 \times 10^{10}$	402	458.3	法尻(斜面肩から804cm)	$6.45 \times 10^{-3}$	89.6
	8	79.8	$3.74 \times 10^{10}$	399	454.9	法尻から十分離れた下部水平地盤	$6.96 \times 10^{-3}$	89.0
VI	9	80.4	$3.85 \times 10^{10}$	201	60.1	斜面肩	$4.99 \times 10^{-3}$	84.9
	10	80.0	$3.77 \times 10^{10}$	200	159.6	斜面肩から200cm離れた斜面中央	$4.78 \times 10^{-3}$	85.5
	11	79.9	$3.74 \times 10^{10}$	599	59.9	斜面肩	$4.83 \times 10^{-3}$	81.6
	12	78.8	$3.55 \times 10^{10}$	591	362.5	斜面肩から591cm離れた斜面中央	$4.59 \times 10^{-3}$	84.1

斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗

表-3 実験条件と横抵抗定数 $k_s$ 値(シリーズVII: 斜面勾配 $\alpha$ と曲げ剛性の影響)

シリーズ番号	Case番号	杭幅 $B_p$ (cm)	杭の剛性 $EI_p$ (kgf.cm <sup>2</sup> )	斜面勾配 $\alpha^\circ$	載荷高さ $h_p$ (cm)	横抵抗定数 $k_s$ (kgf/cm <sup>3.5</sup> )	相対密度 $D_r$ (%)
VII	1	79.7	$4.48 \times 10^{11}$	0	59.9	$7.6 \times 10^{-3}$	87.1
	2	80.6	$4.66 \times 10^{11}$	18.4	64.5	$5.8 \times 10^{-3}$	83.0
	3	79.3	$4.35 \times 10^{11}$	26.6	63.4	$5.4 \times 10^{-3}$	86.3
	4	80.0	$4.53 \times 10^{11}$	33.7	60.0	$3.2 \times 10^{-3}$	86.0
	5	79.2	$3.65 \times 10^{10}$	0	47.5	$7.1 \times 10^{-3}$	84.4
	6	79.9	$3.66 \times 10^{10}$	18.4	55.9	$4.6 \times 10^{-3}$	77.3
	7	80.8	$3.85 \times 10^{11}$	26.6	56.6	$4.5 \times 10^{-3}$	82.5
	8	79.4	$3.55 \times 10^{10}$	33.7	63.4	$3.2 \times 10^{-3}$	79.5
	9	80.1	$1.04 \times 10^{10}$	0	65.1	$7.6 \times 10^{-3}$	85.8
	10	80.4	$0.99 \times 10^{10}$	18.4	56.3	$4.8 \times 10^{-3}$	83.7
	11	78.8	$1.07 \times 10^{10}$	26.6	65.4	$4.5 \times 10^{-3}$	84.1
	12	79.7	$0.96 \times 10^{10}$	33.7	59.7	$4.0 \times 10^{-3}$	84.7

表-4 実験条件と横抵抗定数 $k_s$ 値(シリーズV, VII: 杭幅の影響)

シリーズ番号	Case番号	杭幅 $B_p$ (cm)	杭の剛性 $EI_p$ (kgf.cm <sup>2</sup> )	斜面高さ(cm)	載荷高さ $h_p$ (cm)	斜面肩と $L$ (cm)	横抵抗定数 $k_s$ (kgf.cm <sup>3.5</sup> ) (モーメントより)	横抵抗定数 $k_s$ (kgf.cm <sup>3.5</sup> ) (フィッティング)	横抵抗低減係数 $k_{sr}$ (フィッティング)
I	1	79.2	$3.62 \times 10^{10}$	396	51.5	$\infty$	$7.13 \times 10^{-3}$	$8.5 \times 10^{-3}$	1.00
	2	78.6	$3.52 \times 10^{10}$	393	55.0	197	$7.33 \times 10^{-3}$	$8.0 \times 10^{-3}$	0.94
	3	80.8	$3.93 \times 10^{10}$	404	56.6	81	$5.58 \times 10^{-3}$	$7.0 \times 10^{-3}$	0.82
	4	80.8	$3.93 \times 10^{10}$	404	56.6	0	$4.49 \times 10^{-3}$	$4.5 \times 10^{-3}$	0.52
	5	81.0	$3.97 \times 10^{10}$	405	178.2	-263	$4.13 \times 10^{-3}$	$4.0 \times 10^{-3}$	0.47
	6	81.0	$3.97 \times 10^{10}$	405	352.4	-567	$4.32 \times 10^{-3}$	$5.0 \times 10^{-3}$	0.59
	7	80.4	$3.85 \times 10^{10}$	402	458.3	-804	$6.45 \times 10^{-3}$	$8.0 \times 10^{-3}$	0.94
	8	79.8	$3.74 \times 10^{10}$	399	454.9	$\infty$	$6.96 \times 10^{-3}$	$8.0 \times 10^{-3}$	0.94
II	1	161	$2.77 \times 10^{10}$	403	56.4	$\infty$		$6.0 \times 10^{-3}$	1.00
	2	161	$2.74 \times 10^{10}$	402	52.2	201		$6.5 \times 10^{-3}$	1.08
	3	159	$2.66 \times 10^{10}$	399	63.8	159		$5.0 \times 10^{-3}$	0.83
	4	158	$2.56 \times 10^{10}$	395	47.4	79		$2.0 \times 10^{-3}$	0.33
	5	160	$2.66 \times 10^{10}$	399	51.9	0		$2.0 \times 10^{-3}$	0.33

議論は横抵抗係数 $k_s$ への斜面の影響に置き換えて進めることとする。

図-16に各位置の杭について求められた $k_s$ を示す。図より容易に理解されるように斜面より十分に離れた水平地盤中に設置された杭(Case 1とCase 8)の $k_s$ は斜面天端の水平地盤中でも下面でも同一の値を示しており斜面の影響のないことがわかる。また、同時に $k_s$ の値が載荷高さに無関係であることがわかり、この定数が斜面の影響を議論するための特性値として有用であることがわかる。

斜面肩の杭(Case 4)と斜面中の杭(Case 5, 6)に対する $k_s$ はほとんど同じ値を示し、シリーズVの条件下では水平地盤中の杭の $k_s$ 値の約60%に低下している。一方、斜面法尻に設置された杭(Case 7)の横抵抗係数は水平地盤中の杭の横抵抗係数とほとんど同一の値を示しており、杭の横抵抗は前面(受働側)の地盤条件に大きく影響され、背面側(主働側)の条件にはあまり影響されないことが分かる。

Case 2~Case 4の杭に着目すると、杭の打設位置が斜面の肩に近づくに連れて $k_s$ 値が低減される様子が明

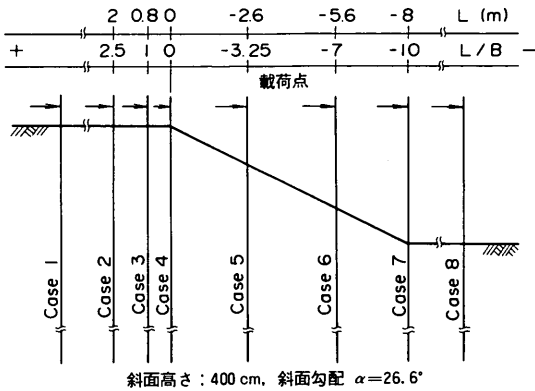


図-14 斜面と杭の相対的な位置関係 (シリーズV)

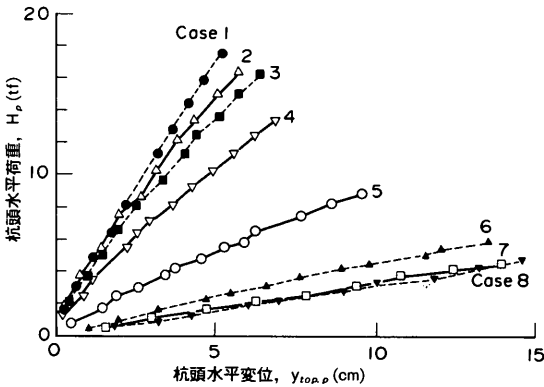


図-15 杭頭荷重と杭頭変位曲線 (シリーズV)

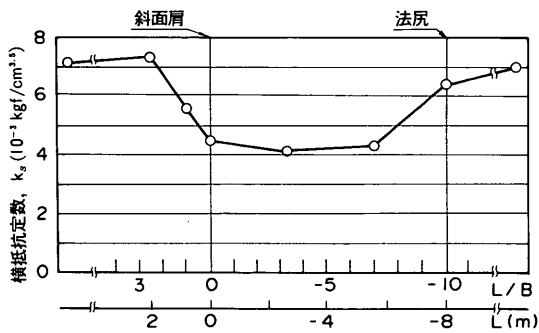
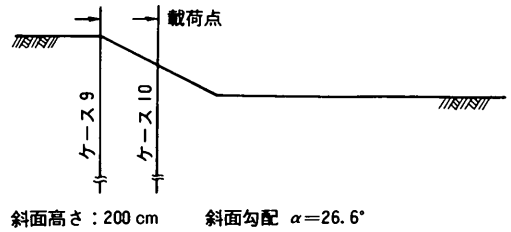
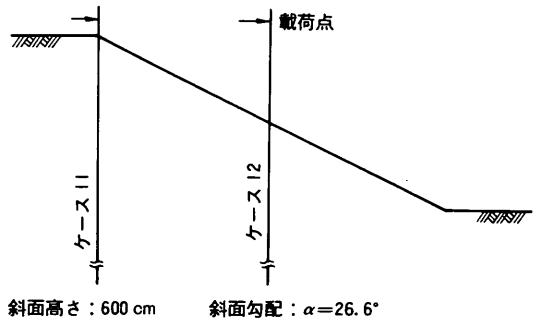


図-16 斜面との位置関係による  $k_s$  の変化

隙に伺える。本シリーズの実験条件では  $2.5B \sim 1B$  ( $2m \sim 0.8m$ ) の間で斜面の影響が現れ始めている。同様に斜面中の杭について法尻からの距離に着目すると、Case 6 が法尻から  $3B$  ( $2.4m$ ) の距離にあるが、 $k_s$  の回復の兆しは見えていない。このように、杭の前面地盤条件が杭の横抵抗に及ぼす影響は、杭の設置位置が地盤条件の変化する箇所に相当近接しなければ現れないこと



斜面高さ：200 cm 斜面勾配  $\alpha = 26.6^\circ$



斜面高さ：600 cm 斜面勾配  $\alpha = 26.6^\circ$

図-17 杭の設置位置 (シリーズVI)

がわかる。なお、この、この杭設置位置と  $k_s$  の関係については再度、(2)項、(4)項と次章で検討を加える。

(2) 斜面高さの影響 (シリーズVI)

シリーズVと条件を統一して斜面高さのみを変化させた実験をシリーズVIで実施した。シリーズVの換算斜面高さが400cmであったのに対して斜面高さをその半分の200cmとした場合 (Case 9, 10) と斜面高さを5割増しの600cmとした場合 (Case 11, 12) である。斜面と杭の相対的な位置関係は図-17 に示すように斜面の肩と斜面中央である。

それぞれに対する  $k_s$  値は実験条件と併せて既に表-2 に示してある。本シリーズの実験結果もシリーズVの場合と同様で、斜面の肩の杭と斜面中の杭の  $k_s$  値には有意な差が認められない。また、低減された  $k_s$  値はシリーズVの斜面中の杭とほぼ同程度でこの程度の斜面高さの相違は今回のシリーズV, VI で用いた杭の横抵抗の低減割合に対しては影響を与えないことがわかる。

Case 10 の杭は法尻から  $2.5B$  ( $2m$ ) の位置にあるにも関わらず同一勾配の他の斜面中の杭と同様に横抵抗係数が小さく、前項の最後に述べたように杭の横抵抗が、地盤条件の変化する箇所に相当近接しなければその影響が生じないことを再確認させる結果である。

(3) 斜面勾配と杭の剛性の影響 (シリーズVII)

シリーズV, VIの実験では同一勾配の斜面中の同一曲



げ剛性の杭に対する斜面の影響を吟味した。シリーズVIIでは斜面勾配、 $\alpha$ と杭の剛性、 $EI$ を変化させて杭の横抵抗への影響を検討する。なお、斜面による横抵抗係数の低減は斜面肩で代表されることから、水平地盤( $\alpha = 0^\circ$ )を対象としたケース以外の本シリーズの実験はすべて斜面の肩に設置された杭を対象にしている。

表-3に示すように斜面勾配 $\alpha$ はシリーズVIまでの検討で用いてきた鉛直1水平2の斜面勾配(26.6°)に加えて0°, 18.4°, 33.7°を対象とし、さらに剛性を標準杭の剛性の1/3~12倍に変化させている。

図-18がこの実験結果で、縦軸が $k_s$ 値、横軸が斜面勾配である。前章でも述べたように斜面勾配が0°, すなわち水平地盤での杭の横抵抗係数は杭の剛性に無関係にほぼ同じ値を示している。斜面勾配が大きくなるほど勾配に比例する形で杭の横抵抗係数は減少する。杭の剛性を変化させたことによってこの減少傾向にはばらつきが認められるが、この影響は勾配による影響に比べて小さく、かつ剛性に対する一定の傾向を認めることはできない。本実験条件程度の杭の剛性変化は斜面近傍の杭の横抵抗係数に実用上は影響しないものと考えられる。

(4) 杭幅の影響(シリーズVIII)

横方向載荷時の杭の挙動について3章で水平地盤中の杭について検討した。ここで杭幅の影響が現れたことは既に図-11, 12に示した。杭の挙動は3次元的であり、斜面の近傍等では杭幅の影響がより顕著に現れる可能性も想像される。シリーズVIIIでは杭幅の影響についても若干の検討を試みた。シリーズVIIIでは斜面の条件はシリーズVと同一にし、杭幅を変化させている。杭幅の変化にもなって杭の曲げ剛性も若干変化しているが、この曲げ剛性の変化はここまでの検討で杭の挙動に大きくは影響しない程度のものである。シリーズVIIIの実験の着眼点は二つあり得る。一つは幅の異なる杭に対する横抵抗係数そのものの値であり、二つめは斜面の影響が現れ始め

る杭と斜面の位置関係(シリーズVの再検討)である。

ただし、残念ながら本シリーズの実験では経費と時間の制約があったため、ここまでの3章、4章の実験で結果を整理する際の主なよりどころとなった杭体の曲げモーメントの計測用のひずみゲージを模型杭に貼付する余裕がなかった。このため、実験に際しては杭頭の水平荷重と水平変位の計測のみを実施してこのデータから $k_s$ を推定することを試みた。推定の手順は以下の通りである。まず、実験条件(杭の載荷高さ、杭幅、曲げ剛性)を実物規模に換算する。この換算された杭に対して、複数の $k_s$ を想定して杭頭荷重~変位関係を計算で求めておく。そして、実験で得られた杭頭荷重~変位関係を計算で得られた曲線でフィッティングして最適の $k_s$ 値を求める方法である。このフィッティングによる $k_s$ の精度を確かめるために実験に先立ってシリーズVの8ケースをこの方法で解析した結果が図-19である。フィッティングで求めた $k_s$ と実測モーメント分布に基づいて算定した $k_s$ の間には推定誤差があり、本項の第一の目的とした横抵抗係数そのものの定量的な比較に本実験結果を用いることには疑問が残る。しかし、杭と斜面の相対的な位置関係の判定には参考になるものと考えられる。

表-4に前出のシリーズVとの対比でシリーズVIIIの実験条件とフィッティングで得られた $k_s$ 値を示す。シリーズVIIIは標準の杭幅の2倍として杭幅160cmで実験を実施した。図-20がシリーズVIIIの実験で得られた杭頭の荷重~変位関係である。Case 1は斜面の肩から十分に離れた位置、Case 2, 3, 4はそれぞれ斜面の肩から2.0m, 1.6m, 0.8m離れた位置、Case 5は斜面の肩である。

各位置の杭について推定された $k_s$ 値と斜面の肩から十分に離れた距離の杭の $k_s$ 値との比を $k_r$ と定義して位置との関係で図-21に示す。同図にはシリーズVの結果も併示してある。図でみられるように杭の横抵抗に

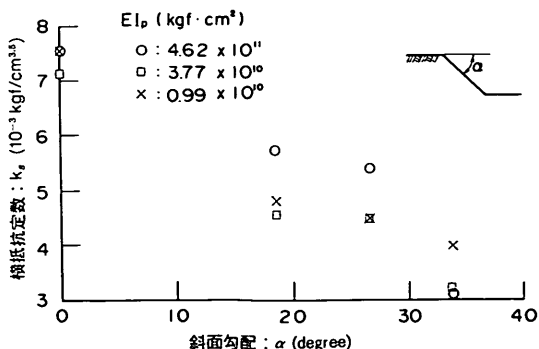


図-18 斜面勾配による $k_s$ の変化

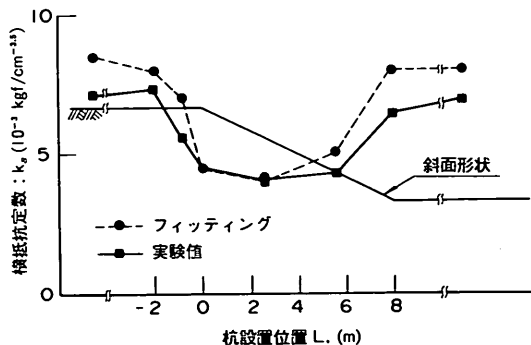


図-19 杭頭荷重—変位関係から推定した $k_s$ の精度

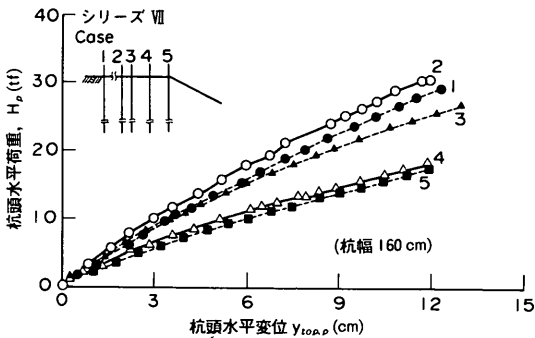


図-20 杭頭荷重—杭頭変位関係(杭幅160cm)

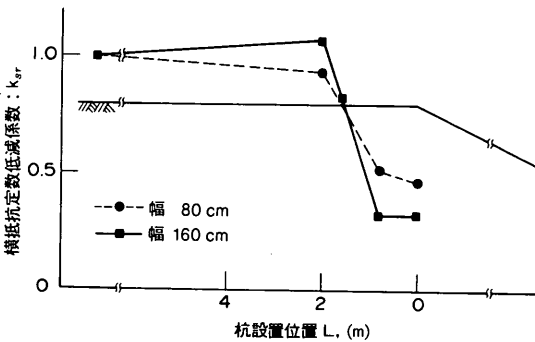


図-21 斜面近傍での $k_{sr}$ 杭幅の及ぼす影響

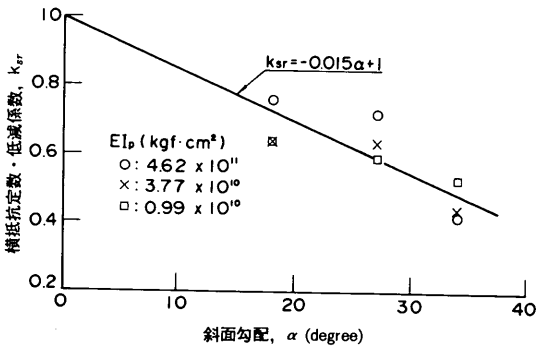


図-22 斜面勾配による横抵抗定数の低減率 $k_{sr}$

斜面の存在が影響し始める距離は杭幅80cmと160cmでほとんど有意差がない。表-4に示したようにシリーズVとⅧの模型杭の曲げ剛性はほぼ同程度であった。曲げ剛性が変化しなければ、この程度の杭幅の相違は斜面への距離の影響を評価する時には実用上は無視して差し支えないものと考えられる。この点については再度、次章で考察する。

- (5) 斜面中の杭の横抵抗の低減率のとりまとめ  
 斜面中の杭の横抵抗に関して遠心模型実験で得られた

知見を要約すると以下の通りである。

密な砂で形成された斜面の近傍または斜面中の杭の横抵抗も港研方式の  $p-x-y$  関係式でよく説明できた。このため、横抵抗係数  $k_s$  を介して、斜面近傍の杭の横抵抗に影響すると考えられる各種の要因についても実験的に検討を加えた。

図-22は図-18を整理し直したもので、斜面の肩に位置する杭の横抵抗係数と斜面勾配の関係である。ただし、縦軸は  $k_{sr}$  である。これは斜面の影響下の杭の  $k_s$  値を斜面の肩から十分に離れた距離(水平地盤中)の杭の  $k_s$  値で正規化したもので、斜面の影響による  $k_s$  の低減係数である。実験データを直線回帰すると図中に示すように斜面中の杭の  $k_s$  の低減係数を斜面勾配の関数として表わすことができる。図-22は厳密には斜面の肩でのデータであるが、既に述べたように斜面中の杭へも適用可能である。

$$k_{sr} = 1 - 0.015\alpha \quad (3)$$

横抵抗係数は実測モーメントの深度方向分布を多項式近似し、それを2回微分、2回積分して求めた  $p-x-y$  関係に基づいている。このため、計算誤差の累積があり得る。斜面中の杭の挙動予測に対する推定誤差の程度をみるために、斜面中の杭についてモーメント分布から得られた  $k_s$  を用いて杭頭の荷重～変位関係、杭頭荷重と最大曲げモーメントの関係を計算で求め実測データと対比して図-23に示す。計算の対象とした実験ケースはシリーズVのCase4, 5, 6である。図示のように実用上十分な精度での計算が可能である。

以上、要約すると、本章で対象とした条件の範囲内では、斜面中の杭の水平載荷時の挙動は杭と斜面の交点を仮想の地表面として低減された  $k_s$  を用いることで実用的には説明できるものと考えられる。

### 5. 斜面近傍の杭の横抵抗に関する考察

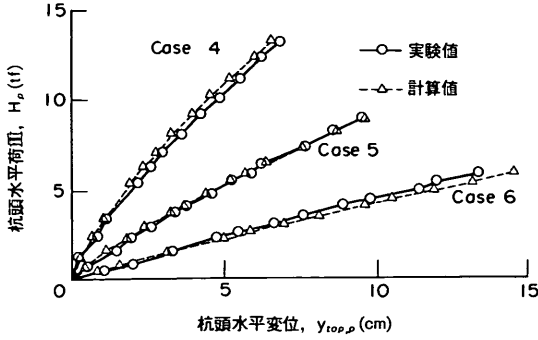
4章では遠心模型実験結果に基づいて斜面近傍の杭の横抵抗を議論した。本来は、この実験結果と解析的な検討結果を対比して実験で得られた知見をさらに一般化することが望まれる。しかし、杭の挙動は極めて3次元的であり、かつ、杭と地盤の境界面の解析的なモデル化は難しく、現状では実験以上に信頼性のある結論を解析的に求めることは困難といわざるを得ない。

本章では簡便な解析的手法で実験結果の妥当性を検討し、実験結果に考察を加えてみる。

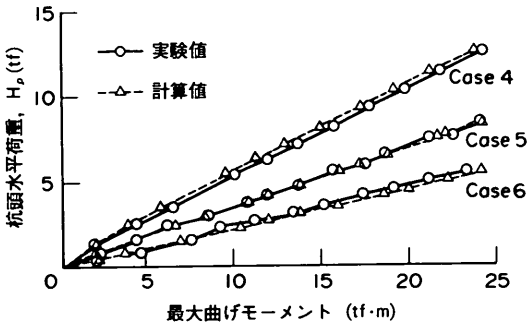
#### 5.1 杭前背面の土圧変化による検討

- (1) 斜面の影響の生じる距離について

斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗



(a) 杭頭荷重—杭頭変位関係



(b) 杭頭荷重—最大曲げモーメントの関係

図-23 実測値と $k_s$ を用いた計算値の対比

水平地盤中の杭との対比で斜面中の杭の横抵抗の低下を考える場合には、しばしば杭の前面と背面で発揮される二次元の極限の土圧の変化として定性的に説明される。例えば、Diaz, et al.<sup>16)</sup>は斜面中の杭の横抵抗をこの単純な考え方で設計することを試みている。彼等は次式に示すように横抵抗の低減係数を単純な形で示した。なお、前章で実験値に基づいて求めた低減係数、 $k_{ps}$ と区別するため本章では計算上の低減係数を $\eta$ と定義する。

$$\eta = (k_{ps} - k_{as}) / (k_p - k_a) \quad (4)$$

ここに、 $k_p$ 、 $k_a$ は鉛直壁体に水平の裏埋め土が作用する場合を対象とするクーロンの受働、主働土圧係数であり、 $k_{ps}$ 、 $k_{as}$ は裏埋め土が傾斜している場合の受働、主働土圧係数である。この $\eta$ は無窮斜面中の杭に対応するものであるため、地中の壁体の深さを規定しなくても決定出来る。

同様の考え方で簡易に斜面の近傍であることの影響を考慮するためには上式を以下のように修正する必要がある。

$$\eta' = (E_{ps} - E_{as}) / (E_p - E_a) \quad (5)$$

ここに、 $E_p$ 、 $E_a$ は(4)式の場合と同様に水平の裏埋め土を対象とした受働、主働土圧合力であり、 $E_{ps}$ 、 $E_{as}$ は裏埋め土の形状が斜面、斜面の肩、法尻を含むように折れ曲った形状を有する場合の受働、主働土圧合力であって、杭の位置と仮定の壁体の深さによって変化するものである。

仮定の壁体（この議論では杭に相当）の位置が斜面から十分に離れた水平面上にあれば、 $\eta'$ は壁体の深さに無関係で1となる。壁体の位置が斜面に近づくにつれて、 $\eta'$ の値は仮定の壁体の深さに依存することとなり、1より小さくなる。一方、斜面が十分に長い場合に斜面の中央では $\eta$ と $\eta'$ は一致することになる。

もし、(5)式の計算に際して仮定の壁体の深さを適切に決定出来れば、この低減係数で斜面近傍での杭の位置による横抵抗の変化が定性的に説明できることとなる。ここで斜面の上面の水平地盤中の杭について、仮定の深さを $H$ とし、斜面の肩からの距離を $L$ とおいて $\eta'$ を試算すると図-24が得られる。計算の対象とした斜面は実験シリーズVの条件( $\alpha = 26.6^\circ$ )で、砂の内部摩擦角は $30^\circ \sim 40^\circ$ と変化させている。他の斜面勾配についても同様の試算を行ったが、図示のように $\eta'$ の $L/H$ に対する変化は斜面勾配には依存するものの内部摩擦角には大きくは影響されない。試算結果では $L/H = 1.7 \sim 1.8$ で斜面の影響が現れている。一方、シリーズVの実験では斜面の影響が現れ始める $L$ の値が杭幅 $B$ の2.5~1倍であった。したがって、シリーズVの条件について(5)式で斜面の影響の現れ始める位置を安全側で予測するためには仮定の壁体深さをおよそ $1.5B$ と設定すれば良いこととなる。

上述の仮定の深さの意味を考えるために、図-25にシリーズVの斜面上面の杭の撓みとモーメントの深さ方向の分布を示す。同図では深さを杭幅で無次元化して示している。図に示す通り、前述の仮定の深さ $1.5B$ は、

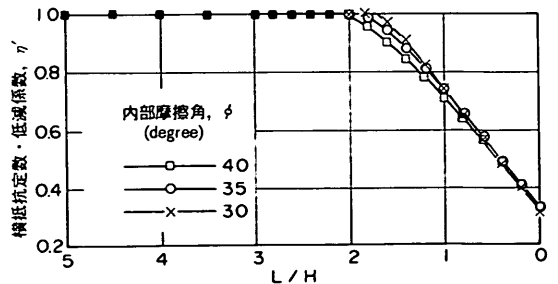


図-24 法肩からの距離による低減係数 $\eta'$ の変化

概略であるが杭の変位の第1零点の深さの約1/2に相当しており、かつ、最大曲げモーメントの発生する深さの60%に相当している。Chang<sup>17)</sup>は、杭の横抵抗は地表部の地盤条件に左右されるもので、その影響を与える深さは変位の第1零点の約2/3の深さあるいは最大曲げモーメントの発生する深さであることを暗に指摘している。今回の実験結果と土圧の考え方を対比して得られた適切と考えられる仮想壁体の深さをChangの指摘と比べると、Changの指摘は安全側ではあるものの、今回の結果とある程度符合するもので興味深い。

杭の撓みが大きくなると横抵抗に対して杭の前・背面の土圧が影響してくることは直感的に理解できることである。また、その深さは杭の変形に密接に関連するもので、図-24と図-25の対比に必要となる仮想の深さが不自然でないことも理解できた。 $k_r$ が変化し始める位置を考える場合には(5)式に杭の変形状態と関連付けた仮想壁体の深さを導入すればよいことが分かる。

前章でシリーズVとⅧとを対比としても、 $k_r$ が変化

し始める位置に杭幅の影響が認められなかった。杭幅は2倍とはなっていたものの杭の剛性にほとんど有意な差がなかったため、両シリーズの杭の変形挙動に大きな差が生じなかったことが理由として考えられる。

(2) 低減係数の大きさについて

土圧に基づいた考え方を定量的に検討するため、計算で得られた低減係数 $\eta'$ と実験で得られた低減係数 $k_{sr}$ を対比して図-26に示す。図中の曲線が計算値 $\eta'$ である。今回の一連の実験での杭の剛性や斜面形状のもとでは斜面の肩と斜面中の杭の横抵抗の低減係数が一致していることは既に述べた通りである。 $\eta'$ は実測 $k_{sr}$ の斜面勾配に対する変化の傾向を定性的には説明することができるが、定量的には最大で50%程度の相違がある。ただし、この $\eta'$ と $k_{sr}$ の相違は試算によると変位量を30%、最大曲げモーメントを15%程度安全側に評価するものであり、さらに研究が進められるまでの間は便宜的に実務に使用しても差し支えない程度の相違である。

横抵抗の低減割合を計算値の方が過大に評価する理由としては幾つかのことが考えられるが、その一つとして、4章で述べたように実験的には杭の横抵抗に主動側の条件がほとんど影響しないにも関わらず、計算上は既往の事例にならって低減係数を水平地盤と傾斜地盤の受働、主動土圧の差の比率として算定したことにあるものと考えられる。実験結果を尊重すれば、(5)式の分子、分母から主動側の土圧を除去して、横抵抗の低減係数を以下のように考えることもできる。

$$\eta'' = E_p / E_p$$

記号の意味は(5)式と同様である。杭の設置位置が斜面上の天端水平面上で斜面肩に近付く際に斜面の影響が現れ始める距離に関して(1)項で議論した関係は、(6)式を用いても何等変わらない。

図-26に既に併示したように、斜面肩での対比では、この $\eta''$ が $\eta'$ よりも実測値に近い結果を与えるものの実測値との差は依然残っている。二次元の簡便な土圧式を用いていることの限界であろう。

5.2 有限要素法による検討

土圧の考え方をベースとした検討と同様に杭を二次元近似して有限要素法で斜面近傍の杭の挙動を検討してみる。計算には小林<sup>18)</sup>による港湾技術研究所の地盤解析汎用プログラムを用いた。

有限要素法による検討では、杭を弾性体の3節点の梁要素としてモデル化している。杭の曲げ剛性は、基本を $EI = 36,000\text{tf/m}^2$ とし、曲げ剛性の変化に関する検討では $1,000\text{tf/m}^2$ と $46,000\text{tf/m}^2$ の計算も付加えた。砂地

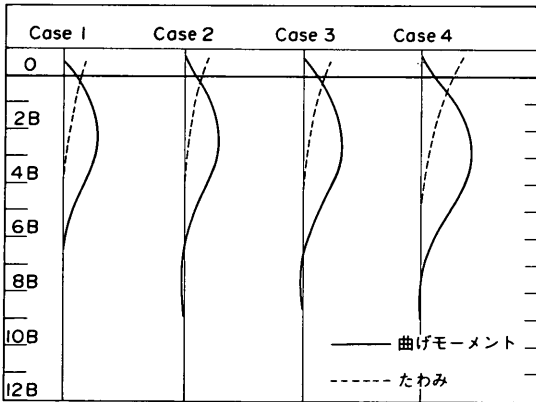


図-25 撓みとモーメント分布 (シリーズV)

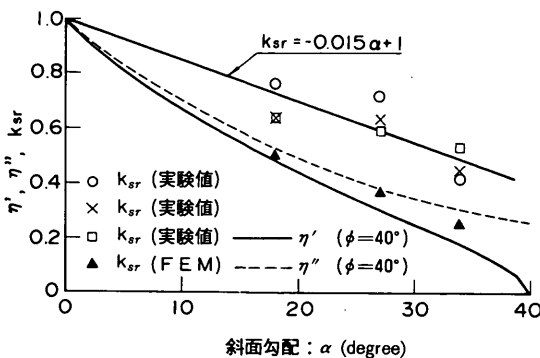


図-26 低減係数の実測値と計算値の対比

## 斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗

盤はモールクーロンの弾塑性体として8節点のアイソパラメトリック要素でモデル化している。砂地盤は深さ方向への変化は無視し一様な材料で単純化している。計算に用いた砂の定数は弾性係数  $E = 1,000 \text{tf/m}^2$ 、ポアソン比  $\nu = 0.3$ 、内部摩擦角  $\phi = 38^\circ$ 、単位体積重量  $\gamma = 1.9 \text{tf/m}^3$  とした。要素分割の一例を図-27に示す。斜面勾配は実験と同様に  $\alpha = 0^\circ \sim 34^\circ$  に4通りに変化させて計算した。また、杭体と地盤間に特殊な境界要素等は一切用いていない。

計算で得られた杭頭荷重と杭頭変位の関係を図-28に示す。この計算では杭の設置位置を斜面の肩に固定して斜面勾配の影響を見ている。計算で得られた杭頭荷重と杭頭変位の関係を用いて4章で述べたようにフィッティングによって  $k_s$  を求めた。各斜面勾配での横抵抗係数  $k_s$  を水平地盤での横抵抗係数（同様に有限要素計算結果）で無次元化して前述の図-26に併せて示した。有限要素計算の結果は土圧による計算結果  $\eta'$  と  $\eta''$  のほぼ中間にあり、実験結果と比べると横抵抗の低減割合を過大に評価するものの斜面傾斜角に対しては定性的に良い一致を示している。 $\eta'$  の問題点として杭背後の取扱

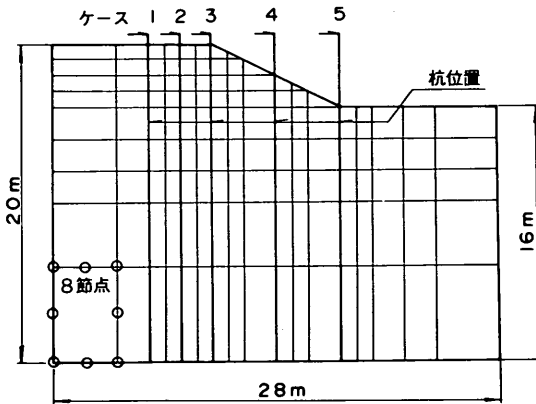


図-27 有限要素分割例

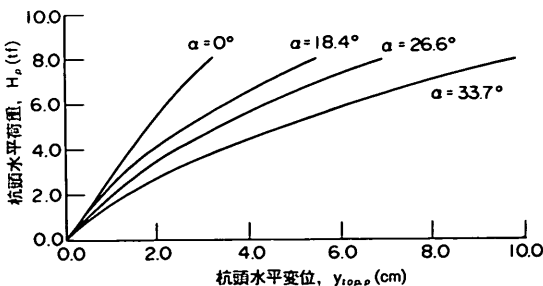


図-28 有限要素計算による杭頭荷重と杭頭変位関係

いを述べたが、有限要素法解析でも杭周辺の境界要素の工夫（ことに背面側）が必要である。

斜面との距離の関係を検討するために同様の計算を実施した結果を図-29に示す。横軸は斜面の肩から杭の設置位置までの距離を示し、縦軸は横抵抗係数の低減係数である。白抜きの記号が実験で得られた低減係数で、前述のように曲げ剛性には大きな差がないため、杭幅の異なるデータがほぼ同一の位置にある。曲線は前述の土圧に基づく計算で求めた  $\eta'$  である。この計算ではChangの指摘にならって影響深度、すなわち土圧を算定する際の仮定の壁体深さを斜面の影響のない水平地盤中の杭が最大曲げモーメントを示す深さに設定している。前述のように、この実験条件では仮定の壁体深さを最大曲げモーメント深さの60%に設定すれば、実験結果と一致することとなるものである。図中の黒字の記号で示した値が有限要素法で得られる杭頭荷重～杭頭変位関係からフィッティングで推定される  $k_s$  に基づく低減係数である。杭の曲げ剛性を変化させて計算した結果から、 $EI$  が小さいほど杭の変形が地表面の近くであらわれるため斜面の肩に近接しなければ斜面の影響が表われてこないが、 $EI$  が大きくなると斜面の肩から離れた位置から影響が現われ始める傾向が明瞭に出ている。杭の位置と低減係数の関係を考える場合に、(5)式、(6)式に杭の変形条件を積極的に取込む必要性が再認識される。

以上のように、単純な有限要素法解析で得られた杭の横抵抗に関する検討結果は4章で述べた実験結果ならびにその考察の妥当性を支持するものである。

前節と本節の検討で、実験結果を定性的に説明できる計算結果が得られた。定量的にも妥当な評価を極力簡便な土圧のバランスに基づいて行うためには、一般性のある形で仮定の壁体深さ  $H$  を杭の変形状態と関連付けて（例えば、変位の第1零点の深さを媒介に）決定することが必要であろう。また、あわせて土圧を3次元で評価することも必要であろう。しかし、このような提案を行うためには実証データが必要であり、今回の一連の実験（データ蓄積）の継続が望まれる。

## 6. 結論

水平砂地盤中の杭頭自由の長杭を対象にして実施した一連の基礎実験の結果、以下のように、遠心模型実験の有意性が確認された。

- (1) 同一の実物を想定して複数の縮尺で実施した一連の遠心模型実験（Modelling of models）で得られた杭頭の荷重～水平変位関係、杭体のモーメント分

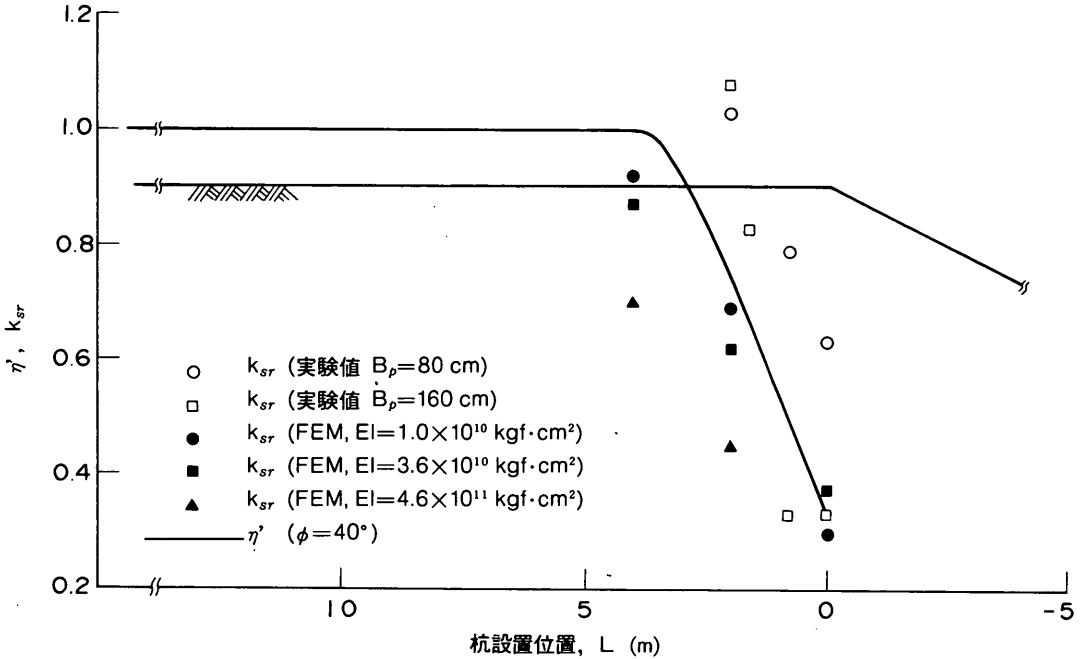


図-29 斜面勾配による横抵抗定数の低減率 $\eta'$ に及ぼす剛性の影響

布は模型の縮尺によらず完全な一致を示し、この問題に対して遠心模型実験が実物の代用を果し得ることが確認できた。

- (2) 深さ、 $x$ と実測モーメント分布から算定される地盤反力、 $p$ ならびに撓み、 $y$ の関係は $p = k_s \cdot xy^{0.5}$ で良く説明できる。これは、砂地盤に対して実施された既往の実験研究や数多くの現場データで確認されている港研方式の基本となっている関係そのものである。
- (3) 模型実験で得られた地盤反力係数と杭幅、杭の剛性の関係も、水平地盤で蓄積された既往の知見と矛盾しないものであることが確認された。

杭の横抵抗に及ぼす斜面の影響について得られた結論を要約すると以下の通りである。

- (4) 斜面近傍や斜面中の杭についても杭と斜面の交点を仮想的な水平地表面と考えて整理すると、 $p = k_s \cdot xy^{0.5}$ の関係が成立する。
- (5) 地盤反力係数に対する斜面の影響は杭が斜面肩の極めて近傍に接近するまで現れない。これは、深部で支持される長杭の横抵抗が地表面近傍の条件に大きく支配されることを示すものと理解できる。
- (6) 斜面中の杭に対する地盤反力係数を水平地盤中のそ

れと対比して斜面の影響に関する低減係数を定義し、実測に基づく低減係数を斜面勾配に対して図化した。実務設計の資料として活用されよう。なお、杭の剛性はこの低減係数の値に対しては殆ど影響を与えない。

- (7) この低減係数の杭の設置位置に対する変化の傾向は杭体に作用する土圧に基づく簡便な式で定性的に説明可能であるが杭の剛性（変形挙動）に影響されるものと考えられる。本研究で検討の方向は示唆されているため、検証のために条件を大きく変化した実験や現場データの蓄積が必要である。

## 7. あとがき

斜面中ならびに斜面近傍の杭の横抵抗を水平地盤の場合の地盤反力係数 $k_s$ を低減することで、実用的に十分な精度で説明できることが判明した。この結果を現場で実証することが望ましいが、それまでの間も斜面近傍ならびに斜面中の杭の横抵抗算定に際する地盤反力係数の推定に本研究の結果が役立てられるものと期待している。また、本研究を通して、複雑な地層構成、境界条件、あるいは改良地盤中の杭の問題など多くの未解明の問題への遠心模型実験手法の適用の可能性が確認された。

(1991年3月31日 受付)

謝 辞

本研究の実施にあたっては運輸省港湾局から5年間にわたって港湾事業調査費の援助を受けた。遠心模型実験の実施と結果の解析にあたっては、昭和63年度から平成2年度までの港湾技術研究所土質部地盤改良研究室研修生、川端浩二氏、佐藤 毅氏、丸山敦司氏、山本芳生氏の熱心な協力を得た。また、基礎工研究室長高橋邦夫氏からは研究の節目、節目に適切な助言を得た。論文の末尾をかりて感謝の意を呈する。

参 考 文 献

- 1) 鈴木敦巳, 久保浩一, 田中芳夫: 斜面における鉛直単杭の横抵抗, 港湾技術研究所報告, 第5巻第2号, pp. 1~20, 1966.
- 2) 日本港湾協会: 港湾の施設の技術上の基準・同解説(改訂版), 1979.
- 3) Scott, R.F.: Pile Testing in a Centrifuge, *Proc. 10th ICSMFE*, Vol. 2, pp. 839~842, 1981.
- 4) Ko, H.Y. et al.: Centrifuge Modeling of Pile Foundations, *Analysis and Design of Pile Foundations*, Edited by Meyer, J.R., ASCE, pp. 21~40, 1984.
- 5) Craig, W.H.: Modeling of Pile Installation in Centrifuge Experiments, *Proc. 11th ICSMFE*, Vol. 2, pp. 1101~1104, 1985.
- 6) Terashi, M., Kitazume, M. and Kawabata, K.: Centrifuge Modeling of a Laterally Loaded Pile, *Proc. 12th ICSMFE*, Vol. 2, pp. 991~994, 1989.
- 7) Terashi, M., Kitazume, M. Maruyama, A. and Yamamoto, Y.: Lateral Resistance of a Long Pile in or near the Slope, *Proc. International Conference, Centrifuge 1991*, Boulder, Colorado, 1991.
- 8) 寺師昌明: 遠心力載荷実験手法とその適用例-深層混合処理改良地盤の挙動-, 昭和60年度港湾技術研究所講演会, pp. 119~184, 1985.
- 9) Fuglsang, L.D. and Ovesen, N.K.: The Application of the Theory of Modelling to Centrifuge Studies, *Centrifuges in Soil Mechanics* edited by Craig, et al., BALKEMA, pp. 119~138, 1988.
- 10) 寺師昌明, 遠藤敏雄, 北詰昌樹: 遠心模型実験の計画と結果の信頼性-支持力に関する国際比較実験例-, 港湾技術研究所報告 Vol. 28, No. 3, pp. 59~79, 1989.
- 11) 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, pp. 46-50, 1961.
- 12) 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.

- 13) 沢口正俊: くい横抵抗における地盤常数に関する研究, 港湾技術研究所報告, Vol. 7, No. 2, 1968.
- 14) 宮島信雄: 鋼杭, 土質工学ライブラリー6, 第2章 3.1, p. 149, 1969.
- 15) 高橋邦夫, 春日井康夫: 砂地盤の横方向反力に対する杭幅の影響, 港湾技術研究所報告, Vol. 26, No. 2, 1987.
- 16) Diaz, G.M., Patton, B.W., Armstrong, G.L. and Joolazadeh, M.: Lateral Load Tests of Piles in Sloping Rock Fill, *Analysis and Design of Pile Foundations*, Edited by Meyer, J.R., ASCE, 1984.
- 17) Chang, Y.L.: Discussion on "Lateral Pile-Loading Tests" by Feagin, *Trans., ASCE*, 1937.
- 18) 小林正樹: Stability Analysis of Geotechnical Structures by Adaptive Finite Element Procedure, 港湾技術研究所報告, 第27巻第2号, pp. 3~22, 1988.

記号表

$B_m, B_p$	: 杭の幅
$D_{10}$	: 有効径
$D_r$	: 相対密度
$E_o$	: 水平裏埋め土を有する鉛直壁体の主働土圧合力
$E_p$	: 水平裏埋め土を有する鉛直壁体の受働土圧合力
$E_{oa}$	: 傾斜裏埋め土を有する鉛直壁体の主働土圧合力
$E_{pa}$	: 傾斜裏埋め土を有する鉛直壁体の受働土圧合力
$E_s$	: 砂の弾性係数
$EI$	: 杭の曲げ剛性
$e_{max}$	: 最大間隙比
$e_{min}$	: 最小間隙比
$g$	: 地球の重力加速度
$H$	: 仮想の壁体深さ
$H_m, H_p$	: 杭頭の水平荷重
$h_m, h_p$	: 地表面からの杭の載荷高さ
$k_s$	: 杭の横抵抗係数 ( $p = k_s x y^{1.5}$ )
$k_{sr}$	: 実測による横抵抗係数の低減係数
$k_o$	: 水平裏埋め土を有する鉛直壁体の主働土圧係数
$k_p$	: 水平裏埋め土を有する鉛直壁体の受働土圧係数
$k_{oa}$	: 傾斜裏埋め土を有する鉛直壁体の主働土圧係数
$k_{pa}$	: 傾斜裏埋め土を有する鉛直壁体の受働土圧係数
$L$	: 斜面の肩からの距離
$L_m, L_p$	: 杭の根入れ長
$l_{m1}$	: 第1モーメント零点の深さ
$M_m, M_p$	: 杭体の曲げモーメント
$m$	: 下付き m は模型の諸量
$n$	: 模型の縮尺の逆数 (遠心実験の加速度/地球の重力加速度)
$p$	: 地盤反力
$p$	: 下付き p は模型の諸量
$t$	: 杭の厚さ
$x$	: 深さ(杭の軸方向座標)
$y$	: 杭の撓み量
$U_c$	: 均等係数
$y_{top}$	: 杭頭の水平変位

- $\alpha$  : 斜面勾配
- $\eta$  : 計算による横抵抗係数の低減係数 (無限斜面)
- $\eta'$  : 計算による横抵抗係数の低減係数 (有限斜面)
- $\eta''$  : 計算による横抵抗係数の低減係数 (有限斜面)
- $\gamma$  : 砂の単位体積重量
- $\nu$  : ポアソン比
- $\phi$  : 砂の内部摩擦角