

# 有限平面地盤における杭の水平抵抗 (その1)

——模型実験結果とその解析——

茶 谷 文 雄 宮 崎 祐 助

## Lateral Resistance of Pile Near Cliff (Part 1)

——Model Test Results and Analyses——

Fumio Chatani Yusuke Miyazaki

### Abstract

The lateral resistance of a pile near a cliff, slope, revetment, etc. is lower than that of a pile in ordinary flat land. The authors carried out a series of model lateral load tests of a pile near a cliff as a typical case and found the influences on the lateral resistance of the pile by factors such as location of pile installation in relation to the cliff, distance from pile to cliff, and height of the cliff.

Furthermore, the authors propose an evaluation method for lateral subgrade reaction to the pile near the cliff, carrying out simulation analyses of model test results, considering a pile as a beam on the nonlinear subgrade. From these analyses, the authors confirm that lateral resistance of a pile near a cliff can be evaluated by the above methods.

### 概 要

崖地、傾斜地、護岸等の近傍に設置された杭の水平抵抗力は、無限の広がりを持つと見なせる一般の平地に設置された杭と比較して、低下すると考えられる。本報では、このような杭の典型的な例として、崖地近傍に設置された杭を対象として、一連の模型水平載荷試験を実施し、杭の加力方向に対する崖の位置、杭から崖までの水平距離、崖の高さ等が杭の水平抵抗に与える影響を明らかにした。さらに、崖地近傍の杭に対する水平地盤反力係数、および極限水平地盤反力の評価法を提示し、杭を非線形地盤上の梁として模型実験結果のシミュレーション解析を行った。その結果、これらの評価法によって、崖地近傍の杭の水平抵抗力を評価できることが明らかになった。

## 1. まえがき

近年、市街地では土地の有効利用という観点から、また観光地では眺望がよいという利点から、傾斜地や崖地に建物を建設するケースが増えつつある。さらに、ウォーターフロントの護岸付近に構造物を建設する場合も少なくない。このような地盤が無限の広がりを持つとみなせない、いわゆる有限平面地盤に設置された杭の水平力に対する挙動や水平抵抗力の評価法は、必ずしも明らかではない。なお、傾斜地に設置された杭の水平力に対する設計法としては、道路橋や送電鉄塔を支持する杭を対象とした方法が実用に供されている<sup>1),2)</sup>。しかしながら、この方法が適用可能な地形条件は限られており、杭が斜面からある程度離れた位置に設置されている場合や、斜面が杭の加力方向に対して側方に位置している場合には、適用できない。

ここでは、典型的な有限平面地盤として、地形が単純な崖地を取上げ、一連の模型実験を行って、上記の場合も含めて、崖の存在が、杭の水平力に対する挙動や水平

抵抗力に与える影響について調査した。これらの模型実験結果および解析結果について報告する。

## 2. 模型実験の概要

実験に使用した土槽は、図-1に示すような平面が内法寸法で1.5 m×2.25 m、深さが1.5 mの水締め土槽で、模型地盤は砂地盤である。この土槽での地盤の作成手順は以下の通りで、ボーリングを繰り返すことによって、再現性の高い模型地盤を容易に作成することができる。

- ① 砂を投入して、水を土槽の最上部まで入れた後、土槽の底部から水を圧送して地盤をボーリングさせる。
- ② 杭をセットし、水の圧送を止めて土槽底部から排水し、地盤を水締めする。
- ③ 1日程度の放置期間を経て、地盤を掘削し、崖を形成する。

使用した砂は山砂で、粒径はほぼ0.2~2.0 mmの範囲内にあり、均等係数は2.2である。模型地盤の単位体積重量は深いほどわずかに増加する傾向があるが、約1.4 t/m<sup>3</sup>で、内部摩擦角は30°、粘着力は自立高から0.2 tf/m<sup>2</sup>程度



で、斜面肩の地盤が、奥行10cm、深さ35cmにわたってほぼ垂直に滑って崩壊したため、これらの荷重段階で、水平変位が急増している。

さらに、杭の設計上重要な、杭頭変位  $\delta$ 、最大曲げモーメント  $M_{max}$ 、および最大曲げモーメント発生深さ  $l_m$  と杭から崖までの水平距離  $L$  との関係を示した。これらの図において、縦軸の  $\delta$ 、 $M_{max}$ 、 $l_m$  は、無限平面地盤のときの値で、また、横軸の杭から崖までの水平距離は、杭径で規準化している。なお、水平距離については、参考として、杭の水平抵抗に

支配的な影響を与える地盤の深さ ( $1/\beta$ ) で規準化した値も示してある。

以上の図-4~15から以下の点を指摘できる。

① 杭の水平変位、曲げモーメント、せん断力、地盤反力等に崖の存在が与える影響は、杭から崖までの水平距離が杭径の10倍、または  $1/\beta$  の2.5倍程度あればほぼ無視できる。

② 杭の水平変位、および曲げモーメントは、崖が杭に近いほど増大する傾向がある。特に、杭頭変位  $\delta$ 、最大曲げモーメント  $M_{max}$ 、および最大曲げモーメントの発

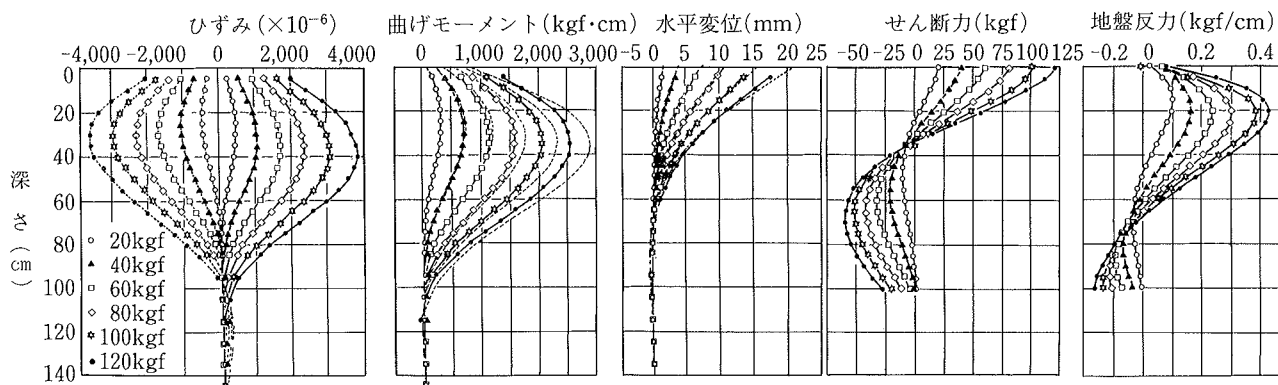


図-6 杭のひずみ、曲げモーメント、変形、せん断力、地盤反力分布曲線 (無限平面地盤)

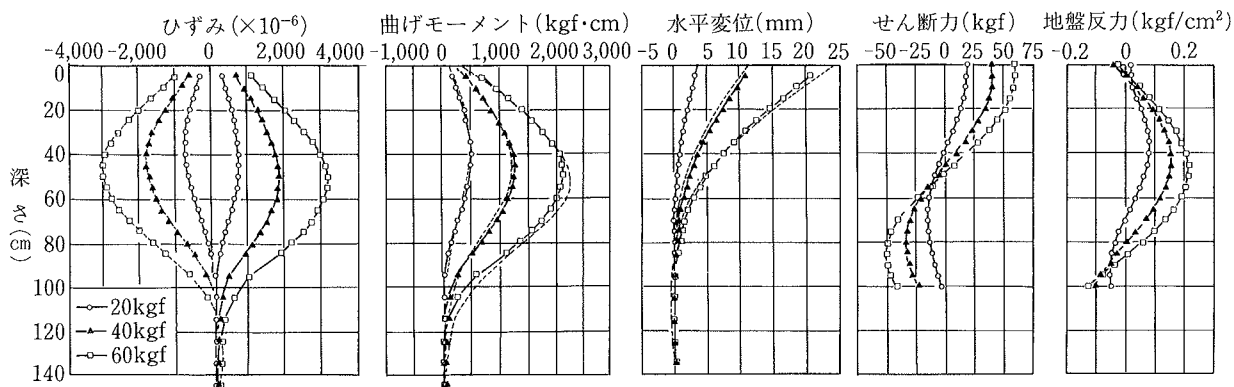


図-7 杭のひずみ、曲げモーメント、変形、せん断力、地盤反力分布曲線 (崖：杭の前面側、杭から崖までの水平距離： $L/D=2$ 、崖の高さ：50cm)

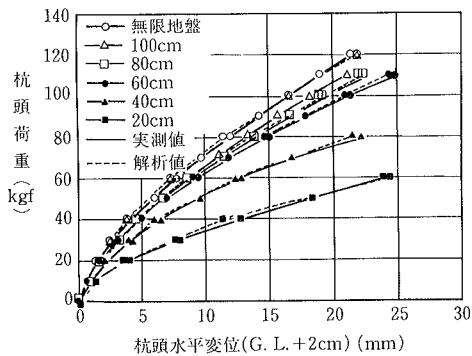


図-8 杭頭の荷重～水平変位曲線の比較 (崖：杭前面、崖の高さ：50cm)

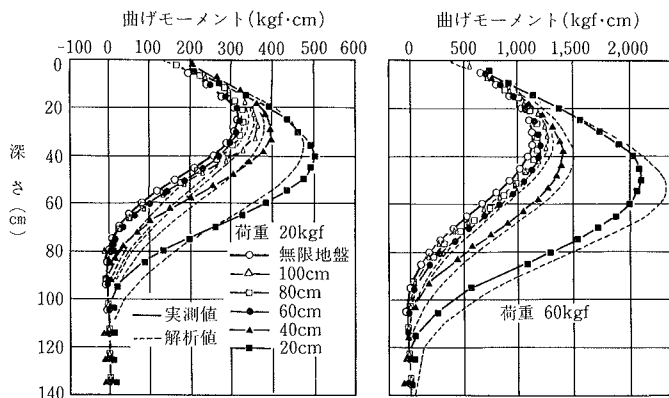


図-9 曲げモーメント分布曲線の比較 (崖：杭前面)

生深さ  $l_m$  について詳細に検討すると、上記の増大の割合は、杭から崖までの水平距離  $L$  が杭径の 6 倍、または  $1/\beta$  の 1.5 倍以上あればきわめて小さく、逆に、 $L$  がこの値以下になると、これらの値は急増する傾向がある。

また、上記の  $M_{max}$ 、 $l_m$  の増大の割合は、 $\delta$  の増大の割合と比較して小さく、 $1/2$  程度になっており、杭に発生する曲げモーメントは、変形と比較して崖の影響を受けにくいことがわかる。この原因は以下のように考えることができる。

“後述のように、崖が杭に近いほど地盤の抵抗力が小さくなり、地盤のバネ効果も低下する。しかしながら、弾性床土上の梁の理論によれば、杭頭変位は水平地盤反力係数  $k$  値の  $3/4$  乗にほぼ逆比例するが、最大曲げモーメントは  $k$  値の  $1/4$  乗に逆比例するため、上記のようなバネ効果の低下はそれほど曲げモーメントに大きな影響を与えない。”

③ 崖の高さに相当する範囲内の杭に対する地盤反力は、杭が崖に近いほど低下する。この低下の割合と杭から崖までの水平距離との関係は、杭頭変位や最大曲げモーメントについての傾向と同様である。

④ 杭の変形、曲げモーメント、せん断力、および地盤反力の各分布曲線のゼロ点は、杭が崖に近いほど深くなる傾向がある。これは、崖に近いほど、崖の高さに相

当する部分の地盤の抵抗力が低下するために、杭の水平抵抗力に關与する地盤の範囲が、より深部に及んでいくためと考えられる。

本実験では、水平力の作用方向の延長線上において、杭前面側で、地表面水平変位を測定している。無限平面地盤、および杭から崖までの水平距離が 60 cm、40 cm のときの地表面変位の測定結果を図-16に示した。これによると、崖が杭に近いほど、杭の変形に伴う崖面近傍の地表面変位は大きくなっており、崖面自体が杭から押されて水平移動を生じやすくなることわかる。このため、崖が近いほど地盤の水平抵抗力も低下することになる。

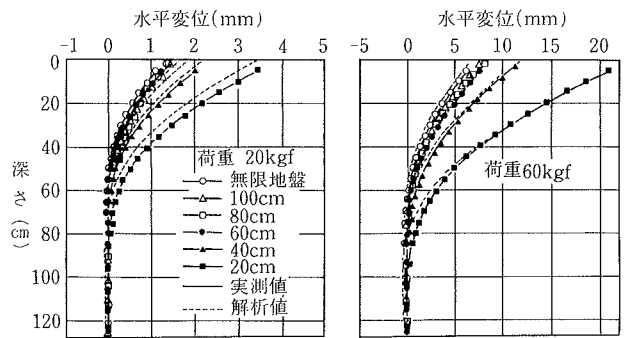


図-10 変形曲線の比較  
(崖：杭前面，崖の高さ：50 cm)

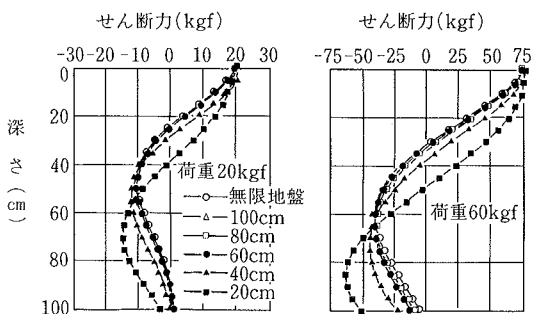


図-11 せん断力分布曲線の比較  
(崖：杭前面，崖の高さ：50 cm)

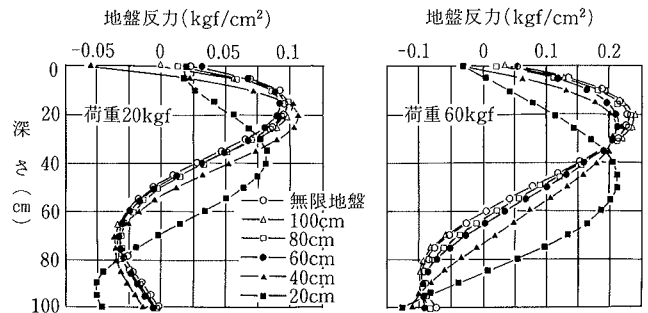


図-12 地盤反力分布曲線の比較  
(崖：杭前面，崖の高さ：50 cm)

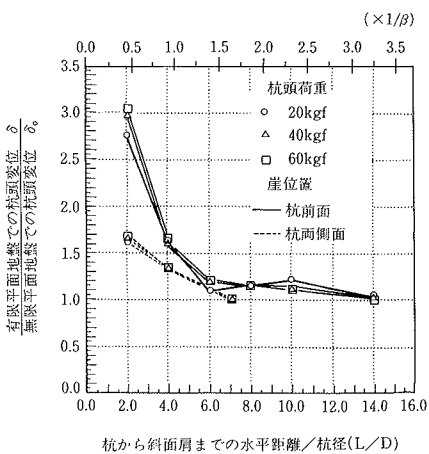


図-13  $\delta/\delta_0 \sim L/D$  の関係  
(崖の高さ：50 cm)

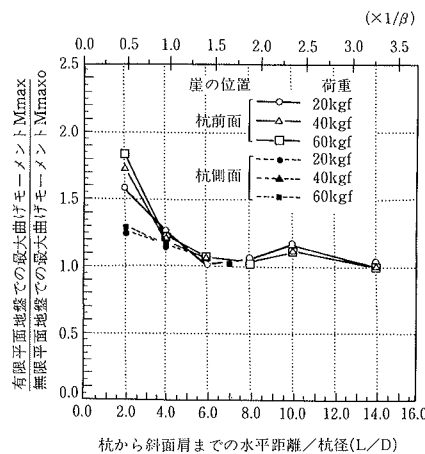


図-14  $M_{max}/M_{max0} \sim L/D$  の関係  
(崖の高さ：50 cm)

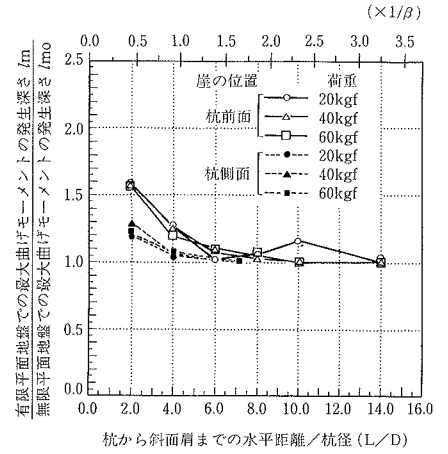


図-15  $l_m/l_{m0} \sim L/D$  の関係  
(崖の高さ：50 cm)

3.1.2 加力方向に対して杭の両側面が崖となっている場合の杭の水平抵抗 加力方向に対して杭の前面側に崖がある場合と同様、杭から崖までの水平距離を変化させた場合の杭頭荷重～水平変位曲線の比較を図-17に、また、杭の変形、曲げモーメント、せん断力、地盤反力の各分布曲線について同様の比較を図-18～21に示した。さらに、杭頭変位  $\delta$ 、最大曲げモーメント  $M_{max}$ 、最大曲げモーメントの発生深さ  $l_m$  と杭から崖までの水平距離との関係を既出の図-13～15中に点線で示した。

なお、本報で、無限平面地盤として扱っている実験ケースでは、杭から杭側方の土槽壁面までの水平距離は、

杭径の7倍としている。この値は、既往の群杭の水平抵抗に関する模型実験結果から、並列配置の群杭の場合、杭間隔が杭径の6倍程度あれば、杭相互の影響は無視できるとの見解<sup>3)</sup>を参考に決定した。従って、杭の両側面に崖があるケースについては、図-13～15の縦軸の  $\delta$ 、 $M_{max}$  は、杭から崖までの水平距離が杭径の7倍のときの値で規準化してある。

これらの図によると、杭の変形、曲げモーメントは、杭が崖に近いほど大きく、また、地盤反力は逆に小さくなっており、杭の前面側に崖がある場合と同様な傾向を示す。しかしながら、このような杭の挙動に与える崖の

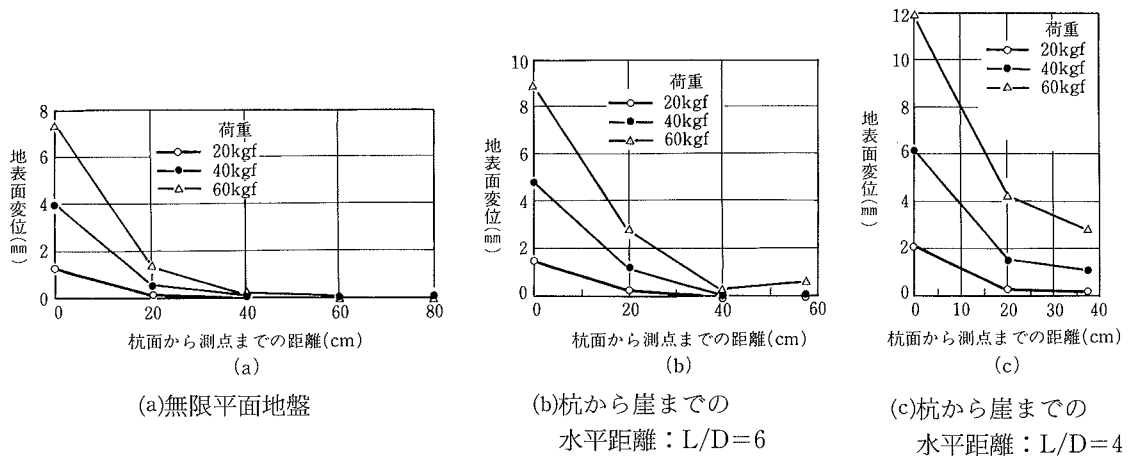


図-16 地表面水平変位 (崖：杭前面)

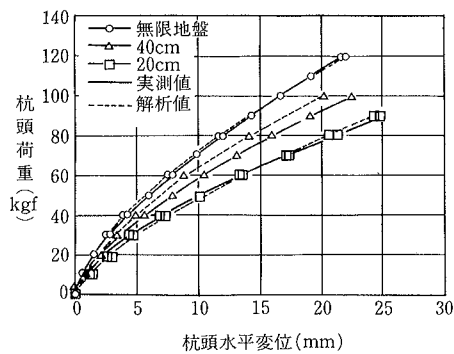


図-17 杭頭の荷重～水平変位曲線の比較 (崖：杭の両側面、崖の高さ：50 cm)

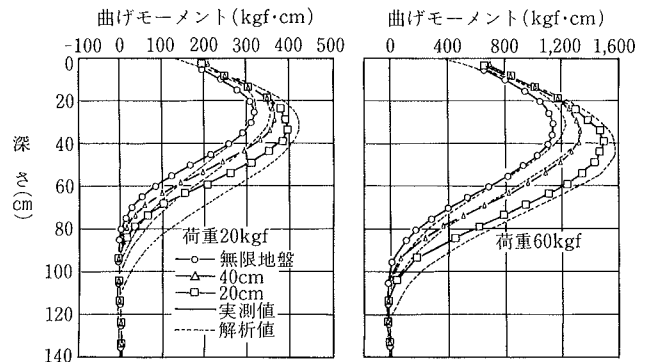


図-18 曲げモーメント分布曲線の比較 (崖：杭の両側面、崖の高さ：50 cm)

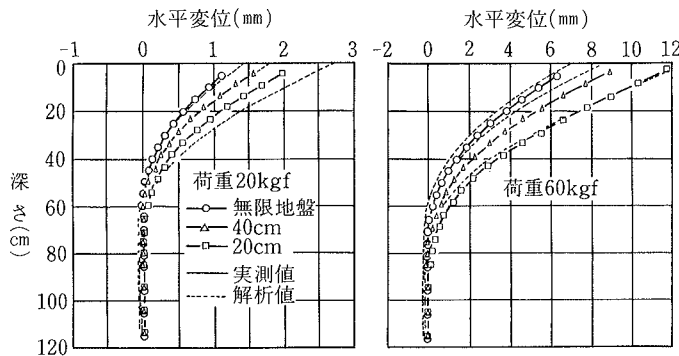


図-19 変形曲線の比較 (崖：杭の両側面、崖の高さ：50 cm)

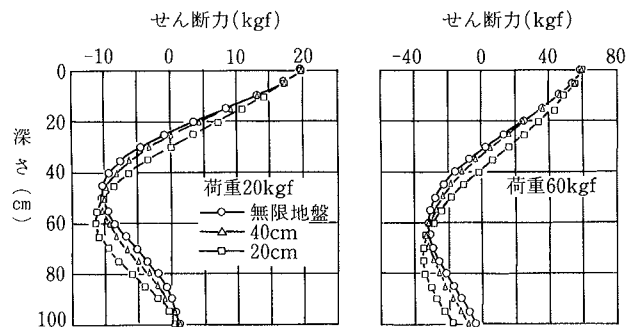


図-20 せん断力分布曲線の比較 (崖：杭の両側面、崖の高さ：50 cm)

影響の程度は、崖の位置によって異なっており、崖が杭の側方にある場合は、杭の前面側にある場合と比較して小さい。

### 3.2 杭の水平抵抗と崖の高さの関係

実験シリーズIIIでは、水平力の作用方向に対して、杭の前面側に崖がある場合について、杭から崖までの水平距離を40cmと杭径の4倍に設定し、崖の高さを25cm, 50cm, 75cmと変化させた場合の水平載荷試験を実施している。この25cm, 50cm, 75cmという値は、それぞれ $(1/\beta)$ の約0.5倍, 1.0倍, 1.5倍に対応している。

上記のように、崖の高さを変化させて実施した水平載荷試験から得られた杭頭荷重～水平変位曲線の比較を図-22に示した。なお、崖の高さが75cmの実験では、杭頭荷重が50kgf付近で、斜面肩が奥行12cm、深さ60cmにわたってほぼ垂直に滑って崩壊を生じたため、この荷重段階で、杭頭変位が急増している。

杭の変形、曲げモーメント、せん断力、地盤反力について、杭頭変位についてと同様な比較をそれぞれ図-23～26に示した。さらに、杭頭変位 $\delta$ 、最大曲げモーメント $M_{max}$ 、最大曲げモーメントの発生深さ $l_m$ と崖の高さの関係をそれぞれ図-27～29に示した。図-27～29において、縦軸の各崖の高さにおける $\delta$ 、 $M_{max}$ 、 $l_m$ は、崖のないときの値で規準化してある。また、横軸の崖の高さについては、参考として $(1/\beta)$ で規準化したときの値

も示してある。

以上の図-22～29によると、杭の挙動は、杭から崖までの水平距離が一定であっても、崖の高さの影響を受け、杭の水平変位、曲げモーメントについては、崖が高いほど大きく、地盤反力については、逆に、崖の高さに相当する部分の値が小さくなるのがわかる。また、杭の変形、曲げモーメント、せん断力、地盤反力の各分布曲線のゼロ点は、崖が高いほど深くなる傾向がある。これは、崖の高さに相当する部分の地盤の抵抗力が低下するために、杭の水平抵抗力に関与する地盤の範囲が、より深部に及んでいくためと考えられる。

## 4. 実験結果の解析

### 4.1 解析モデル

水平力を受ける杭の解析モデルとして、現在最も広く利用されているのは、図-30に示すような、杭を梁に、また地盤をバネに置換して扱う、いわゆる“梁バネモデル”である。地盤のバネについては、地盤の非線形性を考慮し、杭に作用する地盤反力 $p$ と杭の水平変位 $y$ の関係を種々の関数形で与える、いわゆる $p\sim y$ 曲線法がしばしば利用される。この $p\sim y$ 曲線法では、極限地盤反力を設定することが可能であり、杭の水平載荷時に地盤が地表面付近から極限状態に達して塑性化し、その塑性化範囲が順次深部へと及んでいく、地盤の実挙動をかなり

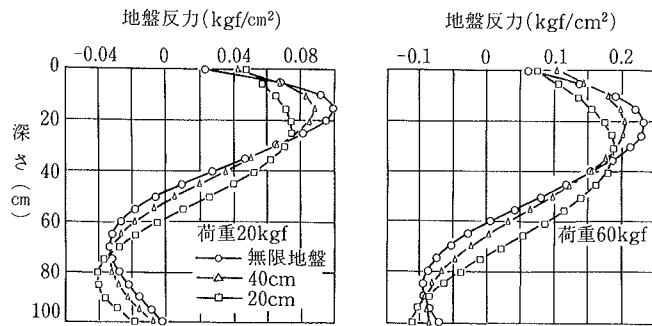


図-21 地盤反力分布曲線の比較  
(崖：杭の両側面、崖の高さ：50cm)

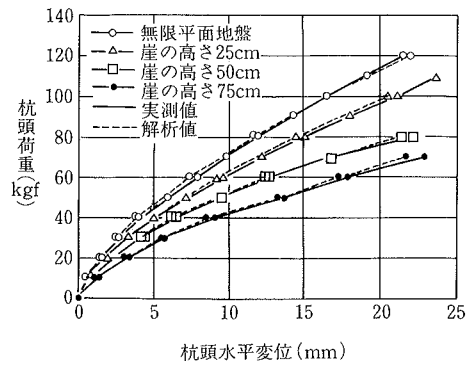


図-22 杭頭の荷重～水平変位曲線の比較  
(崖：杭前面、崖までの水平距離： $L/D=4$ )

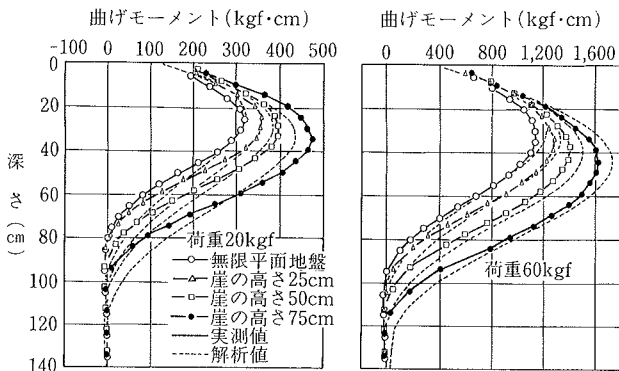


図-23 曲げモーメント分布曲線の比較  
(崖：杭前面、崖までの水平距離： $L/D=4$ )

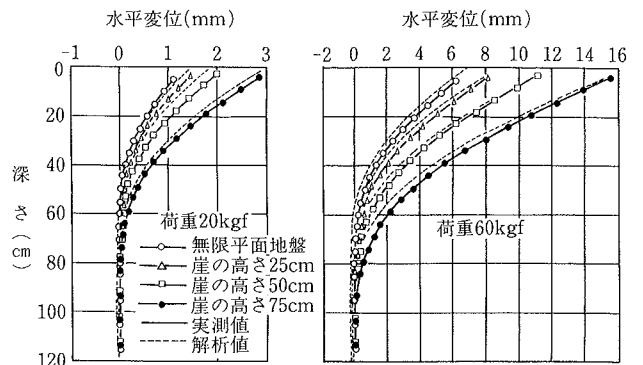


図-24 変形曲線の比較  
(崖：杭前面、崖までの水平距離： $L/D=4$ )

忠実に表現することが可能である。

以上から、本報でも、解析モデルとして図-30の梁バネモデルを、また地盤反力の評価法としてp~y曲線法を利用する。

4.2 崖の影響を考慮した水平地盤反力係数の評価

無限平面地盤の実験結果において、図-6に示す地盤反力分布曲線と杭の変形曲線から、地盤反力pと杭の水平変位yとの関係を求め、両対数紙上にプロットして図

-31(a)に示した。これによると、pとyとの間には次式の関係が認められ、地盤常数kは、深さの増加にともなうて増大する傾向がある。

$$p = ky^{0.5} \dots\dots\dots(1)$$

ここに、p：地盤反力 (kgf/cm<sup>2</sup>)

y：杭の水平変位 (cm)

k：地盤常数 (kgf/cm<sup>2.5</sup>)

なお、地盤の深さの増加にともなうk値の増加は、図

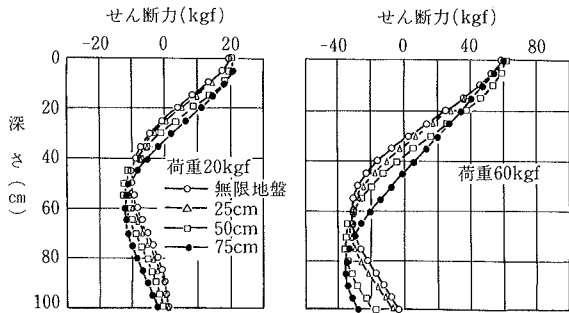


図-25 せん断力分布曲線の比較 (崖：杭前面，崖までの水平距離：L/D=4)

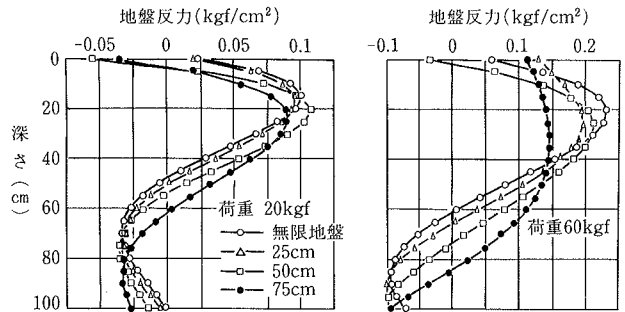


図-26 単位面積あたりの地盤反力分布曲線の比較 (崖：杭前面，崖までの水平距離：L/D=4)

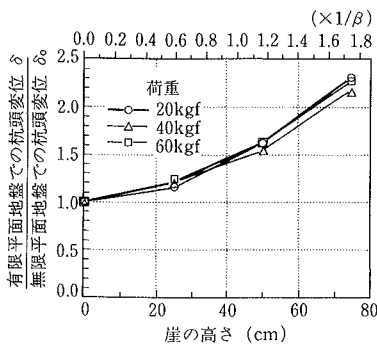


図-27  $\delta/\delta_0 \sim$  崖の高さの関係 (崖：杭前面，崖までの水平距離：L/D=4)

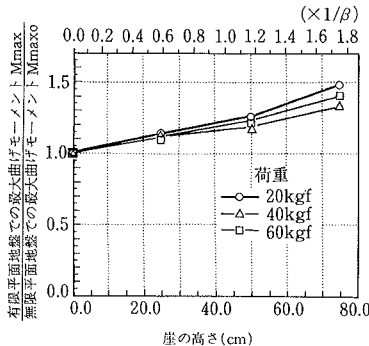


図-28  $M_{max}/M_{max0} \sim$  崖の高さの関係 (崖：杭前面，崖までの水平距離：L/D=4)

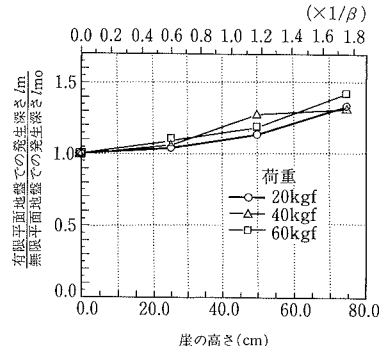


図-29  $l_m/l_{m0} \sim$  崖の高さの関係 (崖：杭前面，崖までの水平距離：L/D=4)

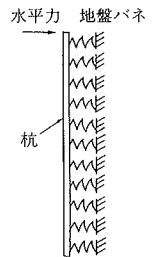
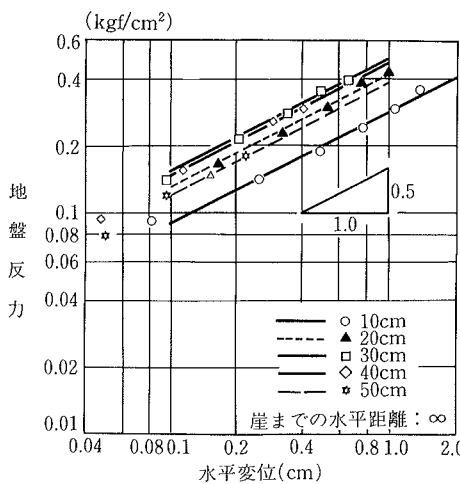
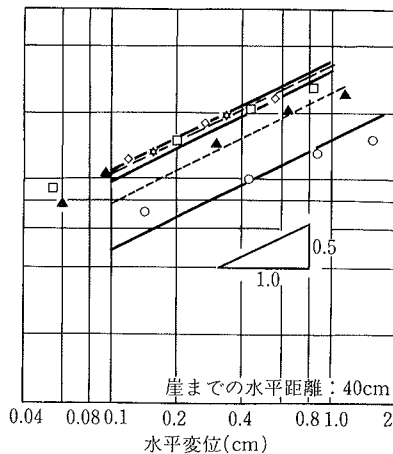


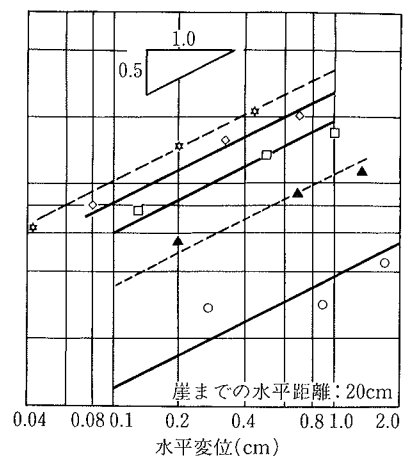
図-30 解析モデル



(a)無限平面地盤



(b)崖：杭前面，崖までの水平距離：L/D=4



(c)崖：杭前面，崖までの水平距離：L/D=2

図-31 地盤反力~杭の水平変位の関係

一3に示す静的貫入抵抗の傾向と対応している。

さらに、実験シリーズ1で、杭と杭前面にある崖の水平距離が、杭径の4倍と2倍の実験ケースについても、 $p$ と $y$ との関係を求め、それぞれ図-31(b), (c)に示した。

これらの実験ケースについても、 $p$ と $y$ の間には、(1)式の関係が成立するが、杭が崖に近いほど $k$ 値が小さくなる傾向が認められる。

実験シリーズ1および3について、 $k$ 値と杭から崖までの水平距離 $L$ との関係を地盤の深さをパラメータとして図-32に示した。なお、 $k$ 値は、無限平面地盤のときの値で、また、水平距離は杭径 $D$ または $(1/\beta)$ で規準化してある。

実験シリーズ1の結果についてみると、 $k$ 値は、杭が崖に近いほど低下する傾向があり、特に、低下の割合は、水平距離が杭径の6倍以下、または $(1/\beta)$ の1.5倍以下の範囲内で急増する。一方、実験シリーズ3の結果から、 $k$ 値の低下の割合は、崖の高さの影響を受け、杭から崖までの水平距離が一定であっても、崖が高いほど大きくなるのがわかる。また、このような $k$ 値と杭から崖までの水平距離 $L$ との関係、あるいは $k$ 値と崖の高さの関係は、それぞれ図-13に示す杭頭変位 $\delta$ と水平距離 $L$ との関係、図-27に示す杭頭変位 $\delta$ と崖の高さ $H$ の関係に対応している。これらの図の比較から、杭が崖に近いほど、また崖が高いほど杭頭変位が増大するのは、 $k$ 値の低

下に起因すると考えることができる。

実験シリーズ2の崖が杭の両側面にある場合について、 $k$ 値と杭から崖までの水平距離の関係を求め、図-33に示した。これによると、崖が杭の両側面にある場合についても、 $k$ 値は、杭が崖に近いほど低下する傾向があるが、低下の割合は、崖が杭前面側にある場合より小さくなっている。

以上から、有限平面地盤における $k$ 値を $k_L$ と表示すると、 $k_L$ は次式で表わされる。

$$k_L = \rho k_0 \quad \dots\dots\dots(2)$$

ここに、

$K_L$  : 有限平面地盤における地盤常数 (kgf/cm<sup>2.5</sup>)

$k_0$  : 無限平面地盤における地盤常数 (kgf/cm<sup>2.5</sup>)

$\rho$  : 杭の加力方向に対する崖の位置、杭から崖までの水平距離、および崖の高さによって決まる $k$ 値の低減係数

$k$ 値の低減係数 $\rho$ は、解析上、とりあえずほぼ模型実験結果に基づく図-32, 33中の実線または点線で示す推定曲線で与える。

4.3 崖の影響を考慮した極限水平地盤反力の評価

4.3.1 加力方向に対して、杭前面側に崖がある場合

初めに、地盤を一様と仮定し、杭前面に生じる地盤の塑性域が浅い場合は、図-34(a)に示す土塊ACDBHEが、また塑性域が深い場合は、同図(b)に示す土塊ACDB-

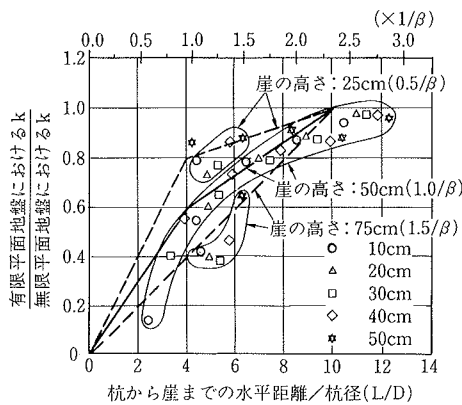


図-32 地盤常数  $k$  の低減率と崖までの水平距離の関係 (崖：杭前面)

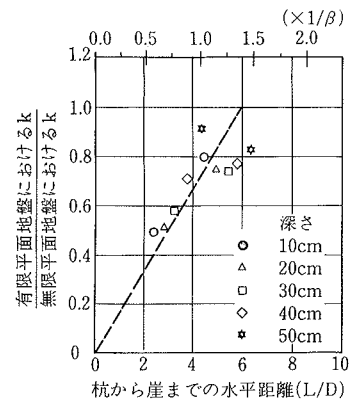


図-33 地盤常数  $k$  の低減率と崖までの水平距離の関係 (崖：杭の両側面)

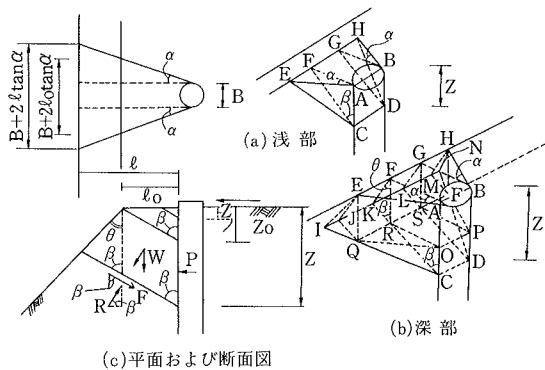


図-34 地盤の破壊様式図 (崖：杭前面)

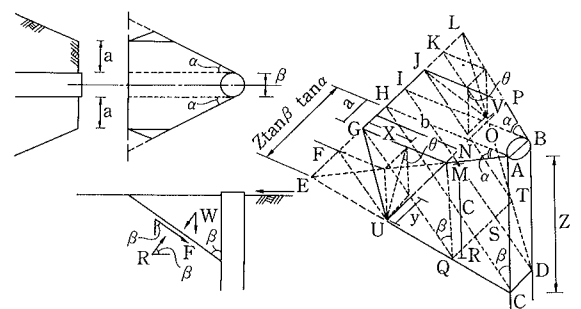


図-35 地盤の破壊様式図 (崖：杭の両側面)



HNIEが杭前方に滑り上がると考える。次に、同図(c)に示すように、土塊の重量W、杭からこの土塊に作用する水平力P、土塊の底面に作用する垂直反力Rおよびせん断抵抗力Fの釣合いから、極限水平地盤反力 $P_{max}$ を求める。なお、地盤の抵抗力として、上記のほかに土塊の両側面に作用するせん断抵抗力も考えられるが、本模型実験では、写真-1に示すように、杭両側の破壊面上の地表面位置にき裂が発生し、明確な間隙が生じたため、塑性域の形成後は有効な抵抗力とならないと判断し、解析上無視することとした。地盤を一樣と仮定して $P_{max}$ を誘導すると、 $P_{max}$ は、次式で表わされる<sup>1)</sup>。

$$P_{max} = \frac{W(\cos\beta + \sin\beta \tan\phi) + cS}{\sin\beta - \cos\beta \tan\phi} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ここに、

$P_{max}$  : 地表面から任意の深さまでの全極限水平地盤反力 (tf)

W : 土塊の全重量 (t) S : 土塊の底面積 (m<sup>2</sup>)

$\beta$  : 土塊底部の滑り面の鉛直面からの角度 (度)

c : 土の粘着力 (tf/m<sup>2</sup>)  $\phi$  : 土の内部摩擦角 (度)

任意の深さにおける単位深さ当りの極限水平地盤反力は、(3)式を深さzで微分し、次式で与えられる。

$$p_{max} = \frac{(dW/dz)(\cos\beta + \sin\beta \tan\phi) + c(dS/dz)}{\sin\beta - \cos\beta \tan\phi} \quad \dots\dots\dots(4)$$

(3)、(4)式における、土塊の重量W、土塊の底面積Sは、土塊底部の滑り面が崖面に達しない塑性域が浅い場合と、崖面に達する深い場合に分けて以下に示した。

(1) 塑性域が浅い場合 ( $z \leq l_0 \cot\beta$  のとき)

$$W = \frac{\gamma z^2}{6} \tan\beta (3D + 2z \tan\alpha \tan\beta) \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$S = \frac{z}{\cos\beta} (D + z \tan\alpha \tan\beta) \quad \dots\dots\dots(6)$$

ここに、

z : 地表面からの深さ (m) D : 杭径 (m)

$l_0$  : 杭から崖(斜面肩)までの水平距離 (m)

$\gamma$  : 土の単位体積重量 (t/m<sup>3</sup>)

$\alpha$  : 塑性域の平面的な広がり角度 (度)

(2) 塑性域が深い場合 ( $z > l_0 \cot\beta$  のとき)

$$W = \gamma(V_1 + V_2 + V_3 + V_4) \quad \dots\dots\dots(7)$$

$$V_1 = l_0(z - l_0 \cot\beta)(D + l_0 \tan\alpha) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$V_2 = \frac{1}{6} l_0^2 \cot\beta (3D + 2l_0 \tan\alpha) \quad \dots\dots\dots(9)$$

$$V_3 = \frac{(z - l_0 \cot\beta)^2}{2} \times \frac{\sin\theta \sin\beta (D + 2l_0 \tan\alpha)}{\sin(\theta + \beta)} \quad \dots\dots\dots(10)$$

$$V_4 = \frac{(z - l_0 \cot\beta)^3}{3} \left( \frac{\sin\theta \sin\beta}{\sin(\theta + \beta)} \right)^2 \tan\alpha \quad \dots\dots\dots(11)$$

$$S = \frac{l}{\sin\beta} (D + l \tan\alpha) \quad \dots\dots\dots(12)$$

$$l = \frac{l_0 [\sin(\theta + \beta) - \sin\theta \cos\beta] + z \sin\theta \sin\beta}{\sin(\theta + \beta)} \quad \dots\dots\dots(13)$$

ここに、 $\theta$  : 崖面の鉛直面からの角度 (度)

4.3.2 杭の両側面に崖がある場合 杭前面の地盤に、図-35に示すような塑性域を想定すると、地表面から任意の深さまでの全極限水平地盤反力 $P_{max}$ は、土塊AC-DBPJVUMGの重量、杭からこの土塊に作用する水平力P、土塊底面に作用する垂直反力R、およびせん断抵抗力Fの釣合いから、杭前面側に崖がある場合と同様にして(3)式で、また、任意の深さにおける単位深さ当りの極限水平地盤反力 $p_{max}$ は(4)式で与えられる。

これらの式中の土塊の重量W、および土塊の底面積Sは、土塊底部の滑り面が崖面に達しない塑性域が浅い場合と、崖面に達する深い場合に分けてそれぞれ以下のように与えられる。

(1) 塑性域が浅い場合

( $z \leq a/(\tan\beta \tan\alpha)$  のとき)

この場合は、塑性域が杭の両側面の崖に達しないので、土塊の重量W、土塊の底面積Sは、杭前面側に崖がある場合の塑性域が浅い場合と同様、それぞれ(5)、(6)式で与えられる。

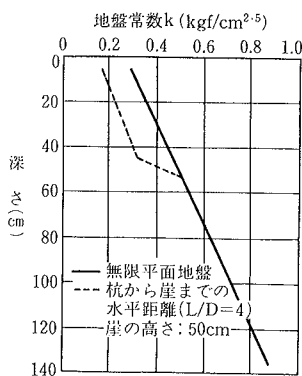


図-36 解析に使用した地盤常数k値の例

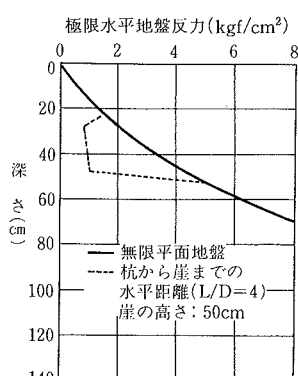


図-37 解析に使用した極限水平地盤反力 $P_{max}$

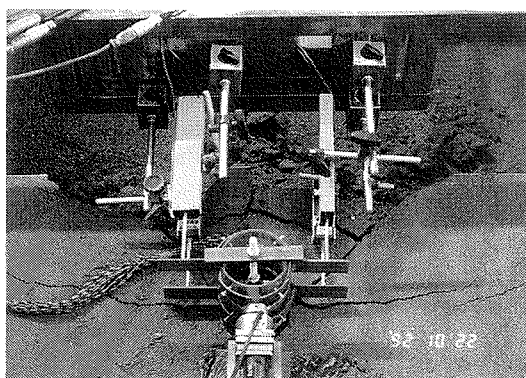


写真-1 杭前面の地盤に生じた滑り線 (崖: 杭前面, 杭から崖までの水平距離: L/D=2)

(2) 塑性域が深い場合

( $z > a / (\tan \beta \tan \alpha)$  のとき)

$$W = \frac{\gamma}{6} \left[ z^2 \tan \beta (3D + 2z \tan \beta \tan \alpha) - \frac{2(z \tan \beta \tan \alpha - a)^3}{\tan \alpha (\tan \theta + \tan \beta \tan \alpha)} \right] \dots\dots\dots(14)$$

$$S = \frac{z}{\cos \beta} (D + 2z \tan \beta \tan \alpha) - \frac{(z \tan \beta \tan \alpha - a)^2}{\cos \beta \tan \theta + \sin \beta \tan \alpha} \dots\dots\dots(15)$$

4.4 解析結果

図-29に示す解析モデルを用いて、4.2節、および4.3節に示す方法で地盤常数k値および極限水平地盤反力を評価して、模型実験結果のシミュレーション解析を行った。

参考として、無限平面地盤および杭から杭前面側の崖までの水平距離が杭径の2倍で、崖の高さが50cmのケースについて、解析に使用したk値と極限水平地盤反力の深さ方向分布をそれぞれ図-36、37に示した。図-36において、崖のあるケースのk値は、無限平面地盤のk値を(2)式で低減したものである。また、極限水平地盤反力を計算する際の土の単位体積重量、粘着力、内部摩擦角等の地盤定数は、2章に示す値を採用した。塑性域の平面的な広がり角度 $\alpha$ は、写真-1に示す地表面に発生したき裂の状況から45°、塑性域底部の滑り面の鉛直面からの角度は(45°+ $\phi/2$ )より60°とした。

崖下以深のk値、および極限水平地盤反力は、上載圧の除去によって低下することも考えられるが、解析上はとりあえず、残留応力の影響を考慮し、無限平面地盤と同様な値を設定した。なお、k値については、このような設定はほぼ妥当であると考えられる。図-32によると、崖下の地表面位置に相当する深さ50cmの位置におけるk値は、杭が崖に近づいてもほとんど低下しておらず、k値が低下するのは、崖下の地表面から上の部分になっているからである。

実験シリーズIの杭から崖までの水平距離が杭径の2倍、4倍のケース、および実験シリーズIIIの崖の高さが75cmのケースでは、高荷重段階で、斜面肩が奥行10cm、深さ約35~60cmにわたってほぼ垂直に滑って崩壊したため、杭から崖までの水平距離が当初の値より小さくなった。従って、解析においても高荷重段階については、この水平距離の低下を考慮してk値と極限地盤反力を設定している。

以上の解析から求めた各実験ケースの杭頭の荷重~水平変位曲線、変形曲線および曲げモーメント分布曲線を既出の各実測結果図中に点線で示した。これらの図によると、若干のバラツキはあるが、解析値は実測値と比較的良好な対応を示している。

5. まとめ

典型的な有限平面地盤として、崖地を取上げ、崖地近傍に設置された杭の水平抵抗について一連の模型実験を

実施した。その実験および解析結果から以下の点が明らかになった。

① 崖の近傍に設置された杭の水平抵抗力は、地盤が無限の広がりを持つとみなせる、いわゆる無限平面地盤に設置された杭と比較して低下する。このような崖の影響は、下記のように、杭の加力方向に対する崖の位置、杭から崖までの水平距離、および崖の高さによって異なる。

①a 崖の位置、および杭から崖までの水平距離Lの影響 杭の加力方向に対して杭の前面に崖がある場合、崖の影響は、水平距離Lが、杭径の10倍、または(1/ $\beta$ )の2.5倍程度あればほぼ無視できる。Lがこの値以下になると、崖面自体が杭に押されて水平移動を生じるため、崖の高さに相当する部分の地盤の水平抵抗力が低下し、杭の水平抵抗力も低下する。しかしながら、低下の割合は、Lが杭径の6倍、または(1/ $\beta$ )の1.5倍以上あればわずかであり、逆に、Lがこれらの値より小さくなると急増する。

杭の加力方向に対して、杭の側面に崖がある場合、水平距離Lが、杭径の6倍程度、または(1/ $\beta$ )程度あれば、崖の影響は無視できる。Lがこれらの値より小さくなると、杭の水平抵抗は低下する。しかしながら、水平抵抗が低下する割合は、崖が杭の前面にある場合と比較して小さい。

①b 崖の高さの影響 杭から崖までの水平距離が一定の場合、崖が高いほど杭の水平抵抗は小さくなる。

② 杭の水平変位、および曲げモーメントは、杭が崖に近いほど大きくなるが、曲げモーメントに対する影響は、水平変位に対する影響と比較してかなり小さい。

③ 杭の変形、曲げモーメント、せん断力、および地盤反力の各分布曲線のゼロ点は、崖が杭に近いほど深くなる。これは、崖の高さに相当する部分の地盤の抵抗力が低下するため、杭の水平抵抗に参与する地盤の範囲が、より深部に及んでいくためである。

④ 崖近傍の杭に対する地盤バネ、および極限水平地盤反力の評価法を提示した。さらに、杭を弾性床上の梁として、p~y曲線法に上記の地盤バネ、極限水平地盤反力の評価法を取入れて、模型実験結果のシミュレーション解析を行い、解析値が実験値と良好な対応を示すことを確認した。

参考文献

- 1) 土質工学会編：傾斜地と構造物，(1990)
- 2) 日本道路公団：設計要領第2集，(1990)
- 3) 土質工学会編：杭基礎の設計法とその解説，(1985)
- 4) 寺師，北詰：斜面近傍の杭頭自由の長杭の横抵抗，港湾技術研究所報告，Vol. 30, No. 2, p. 327~348, (1991)
- 5) M. A. Gaber, R. H. Borden: Lateral Analysis of Piers Constructed on Slopes, Journal of Geotechnical Engineering, Vol. 116, No. 12, p. 1831~1850, (1990)