

有限平面地盤における杭の水平抵抗（その2）

—— 崖近傍に設置された杭の水平抵抗の評価 ——

茶 谷 文 雄 西 山 高 士
宮 崎 祐 助

概 要

既報に示した、崖近傍に設置された杭の水平抵抗に関する模型実験結果を、FEMによって解析した。この解析結果から、適切な地盤の応力～歪み曲線を設定することによって、水平加力時における杭の挙動や杭に作用する地盤反力の性状を、FEMによって概略再現できることを確認した。また、崖近傍に設置された鋼管杭を想定し、その水平抵抗について、崖までの距離、崖の高さ、地盤の剛性等をパラメータとする、FEMによるシミュレーション解析を行った。その際、地盤の応力～歪み曲線の評価は、模型実験の解析時と同様な手法によって行った。さらに、以上の解析結果を梁～バネモデルを用いた解析によって再検討し、崖近傍の杭の水平抵抗を梁～バネモデルによって評価する際に必要となる、実用的な地盤の抵抗力の評価法を示した。

1. まえがき

既報（その1）¹⁾では、崖近傍に設置された杭を対象とした模型実験の結果、およびその解析結果を報告した。なお、解析法としては、杭を梁に、また地盤をバネに置換するいわゆる梁～バネモデルを用いて行った。この報告では、初めに、この模型実験結果のFEMによる解析を行う。次に、崖近傍に設置された実大の鋼管杭を想定し、杭から法肩までの距離（以下、崖までの距離と略記）、崖の高さ、地盤の剛性をパラメータとして、水平力に対する杭の挙動に関するシミュレーション解析を行う。さらに、これらの解析結果を検討し、崖近傍に設置された杭の実用的な水平抵抗の評価法を示す。

2. 模型実験の概要

模型実験については、既報に詳述したが、本報告の理解に必要な範囲内で、その概要を紹介する。実験に使用した土槽は、土槽底部から水を圧送して砂地盤を十分ボイリングさせた後、底部から排水して地盤を締め固める方式の水締め土槽である（Fig. 1）。使用した砂は山砂で、水締め後、単位体積重量は約1.4 tf/m³、内部摩擦角は約30度、粘着力は自立高から逆算すると約0.2 tf/m²となる。地盤の静的貫入抵抗値は、Fig. 2に示すように、ほぼ深さ方向に増大する三角形分布を示す。模型杭は、直径10 cm、肉厚3 mm、長さ1.6 mのアクリルパイプで、歪みゲージを貼付してある。

水平載荷試験は、種々の条件下で行ったが、本報告で解析の対象としたケースは、崖がない平地および加力方向に対して杭の前面に崖があり、杭から崖までの距離を変化させた計6ケースである（Table 1）。崖の勾配は75度、高さは50 cmで、この崖の高さは、杭の水平抵抗に支配的な影響を与える地盤の範囲 $1/\beta$ ($\beta = \sqrt{k_h B/4EI}$ 、 k_h : 水平地盤反力係数、 B : 杭径、 EI : 杭の曲げ剛性) の43 cmに

近い値であるとともに、模型地盤の自立高にも、ほぼ対応している。載荷方法は、急速サイクルで、各荷重段階における荷重保持時間は、3分間とした。

3. FEMによる模型実験結果の解析

3.1 解析モデル

一例として、崖がないケース、崖までの距離が最も短いケースのFEMモデルをそれぞれFig. 3に示した。これらのモデルではともに、杭および地盤の対称性を考慮し、対称面の片側半分だけをモデル化している。下記のように、杭体は弾性、地盤は非線形材料として扱った。

(1) 杭の材料定数

弾性係数 : 3.0×10^4 kgf/cm²

ポアソン比 : 0.3

(2) 地盤の応力～歪み曲線

Fig. 3の解析モデルにおいて、地表面の第1層から最下層の第13層までの各層における地盤の相当応力～相当歪み曲線をFig. 4のように与えた。相当応力 σ および相当歪み ϵ は、それぞれ弾性体内の任意点における各応力成分および各歪み成分から次式によって得られる値で、それぞれ“一般化させた応力”“一般化させた歪み”とも呼称される。

$$\sigma = (\sqrt{2}/2) \times \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \dots (1)$$

$$\epsilon = \left[\sqrt{2}/2(1+\nu) \right] \times \sqrt{(\epsilon_x - \epsilon_y)^2 + (\epsilon_y - \epsilon_z)^2 + (\epsilon_z - \epsilon_x)^2 + 3/2(\gamma_{xy}^2 + \gamma_{yz}^2 + \gamma_{zx}^2)} (2)$$

相当応力と相当歪みの関係は次式で与えられる。

$$\sigma = \epsilon E_s \dots \dots \dots (3)$$

ここに、 E_s : 地盤の弾性係数 ν : 地盤のポアソン比
(0.3と仮定)

Fig. 4に示す相当応力～相当歪み曲線は、以下の手順で求めた。

1) 各層の微小歪みレベルにおける土の初期弾性係数 E_0 をFig. 5に示すように、深さ方向に漸増する三角形分布として与える。 E_0 は、PS検層による模型地盤のS波速度99

m/sec から、次式で得られる値と、Fig. 2 に示す模型地盤における静的貫入抵抗分布を参考として決定する。

$$G_0 = \rho V_s^2 \dots\dots\dots (4)$$

$$E_0 = 2(1 + \nu) G_0 \dots\dots\dots (5)$$

$$\epsilon = \gamma(1 + \nu) \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 G_0 : 土の初期剪断剛性 (tf/m²) E_0 : 土の初期弾性係数 (tf/m²)

- ν : 土のポアソン比
- ρ : 土の密度 (tf·sec²/m⁴)
- γ : せん断歪み ϵ : 軸歪み

2) Fig. 6 に示す砂地盤の剪断剛性の歪み依存性から、各歪みレベルに対応する地盤の弾性係数 E_s を求める。各歪みレベルに対応する ϵ および E を用いて(3)式から σ を求め、 $\sigma \sim \epsilon$ 曲線を設定する。

3.2 解析方法

模型実験結果について、以下の3ステップに分けてFEMによる3次元解析を行った。

(1) 第1ステップ：初期応力解析 解析モデルの各層における弾性係数として、Fig.5の初期弾性係数を与え、また、静止土圧係数を0.5として、自重解析を行い、初期応力状態を設定する。その際、各層の初期応力状態を原点としたときの応力～歪み曲線を Fig. 4 で与える。

(2) 第2ステップ：崖面作成時の解析 崖のある実験ケースについては、水締めによって模型地盤を作成した後、これを掘削することによって崖面を作成している。したがって、第1ステップの初期応力解析後、地盤を掘削除去する過程を解析に取り入れた。

本模型地盤は非常に緩い湿潤砂であり、水締めによって模型地盤を作成した後、1日程度の放置期間で、地盤を掘削することによって崖面を形成した。したがって、崖面付近や掘削底面である崖下の地表面付近の地盤は、かなり掘削による拘束圧低下の影響を受け、剛性が低下した可能性が高い。そこで、初めに、平地の状態での地盤の初期応力解析時、および掘削による崖面形成時における各要素の中心における水平応力を求め、各要素の初期弾性係数は、各要素の水平応力の0.5乗に比例すると仮定し、崖面形成後の初期弾性係数を低減させた。各要素の平均拘束圧とせず、水平応力としたのは、杭の水平抵抗には、平均拘束圧よりむしろ杭の加力方向の水平応力が支配的な影響を与えると判断したからである。その結果、崖面および崖下の地表面付近における初期弾性係数が当初の値の2

Table 1 実験内容
Contents of Test

実験 シリーズ	杭の加力方向に 対する崖の位置	崖の高さh 杭径D	崖の 勾配	杭から崖までの水平距離L	
				杭径D	
1	杭の前面側	5 (h=50cm)	75°	2.4,6.8,10,14 (L=20,40,60,80,100,140cm ¹⁾)	

1)140cm は、杭から加力方向前方の土槽壁面までの水平距離

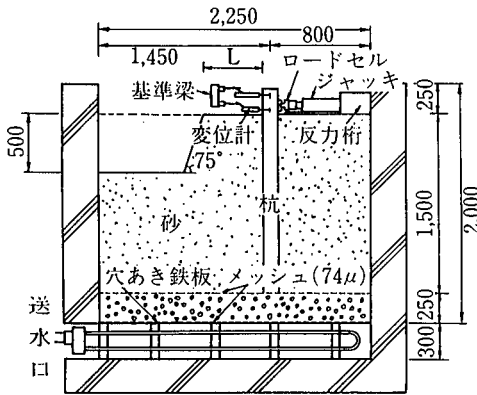


Fig. 1 実験装置
Apparatus

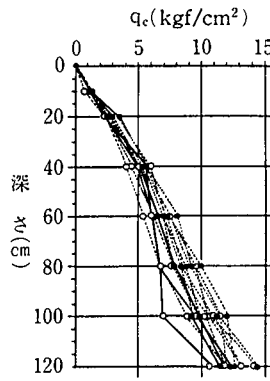


Fig. 2 模型地盤の
静的コーン貫入抵抗値
Cone Penetration Test Result
of Sand Layer

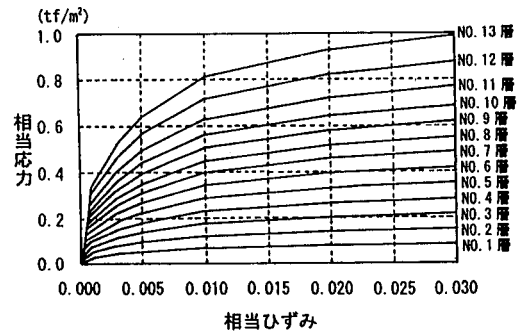


Fig. 4 地盤の応力～歪み曲線
Stress～Strain Relationship
of Sand Layer

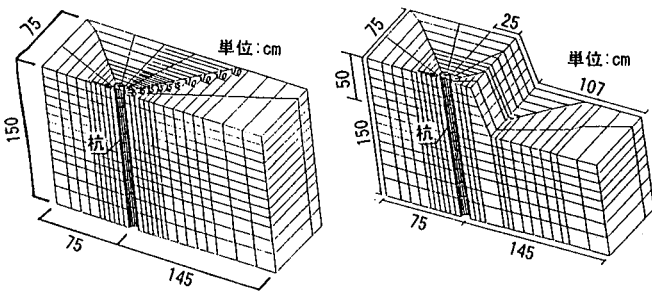


Fig. 3 解析モデル
FEM Model

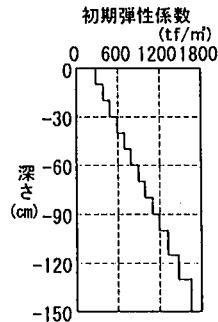


Fig. 5 地盤の初期弾性
係数の深さ方向分布
E₀ of Sand Layer

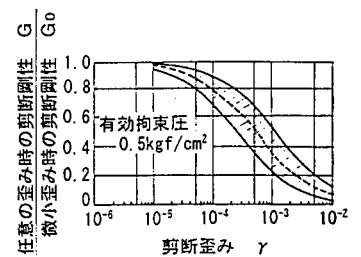


Fig. 6 $G/G_0 \sim \gamma$ 曲線
 $G/G_0 \sim \gamma$ Curve

～3割程度の値になり、低減の割合は、これらの位置から離れるほど小さくなる。

なお、平地での実験結果の解析では、このステップをスキップして第3ステップの解析を行う。

(3) 第3ステップ：水平加力時の解析 杭頭に水平荷重を作用させ、杭の挙動を求める。なお、各地盤要素に、引張り応力が発生するときは、その要素の抵抗力はゼロとする。

3.3 解析結果

各実験ケースにおける実験値と解析値の比較を以下に示した。なお、実験から明らかになった杭の水平抵抗に及ぼす崖の影響については、既報¹⁾に詳述されているので参照されたい。

3.3.1 杭頭の荷重～水平変位曲線 各実験ケースにおける杭頭の荷重～水平変位曲線について、解析値と実験値の比較をFig. 7に示した。解析値は、実験値と若干の差異はあるが、概略対応している。

3.3.2 変形曲線、曲げモーメント分布曲線 一例として、平地の実験ケース、および崖までの距離Lと杭径Dの比 (L/D) が4の実験ケースにおける杭の変形曲線、およ

び曲げモーメント分布曲線について、解析値と実験値の比較をそれぞれFig. 8,9に示した。また、水平荷重を60 kgfとしたときの各実験ケースにおける杭の変形曲線、曲げモーメント分布曲線について、実験値と解析値の比較をそれぞれFig. 10,11に示した。これらによると、変形については、解析値と実測値がほぼ良好な対応を示しているが、曲げモーメントについては、解析値は実測値より2割前後小さな値を示している。

3.3.3 杭に作用する地盤反力 一例として、Fig. 10,11と同様、平地および (L/D) が4の崖地の解析ケースについて、加力方向に対して、杭の前面側と背面側における地盤の水平応力分布を求め、それぞれFig. 12 (a),(b)に示した。これらの値は、解析モデルの対称面上において、杭に接する地盤要素の水平圧縮応力の深さ方向分布を示している。また、上記と同様な解析ケースについて、地表面から10,20,30 cmの各深さで、杭の前面側と背面側の地盤における水平応力と荷重との関係を求め、Fig. 13 (a),(b)に示した。これらの図から、加力前における地盤の自重による水平応力が、水平荷重の増加にともない、杭の前面側では増大し、また、背面側では逆に減少していく状況がわかる。さらに、深さ40cm付近において、杭に接する地盤要素

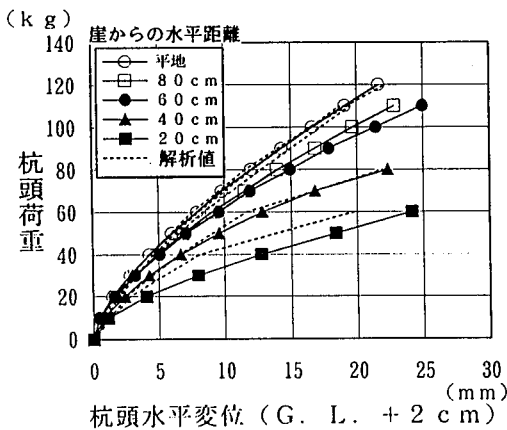


Fig. 7 杭頭の荷重～水平変位曲線
Load~Deflection Curve at Pile Top

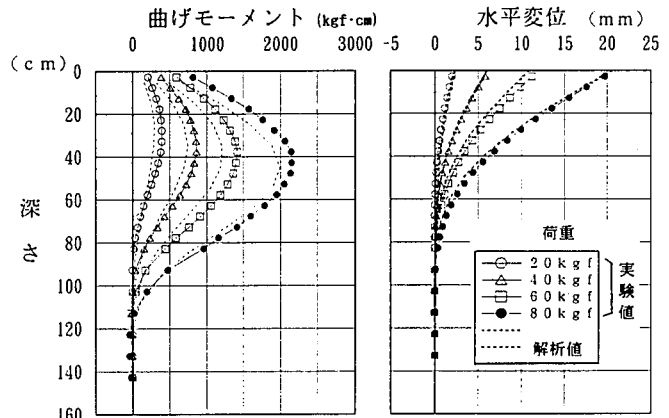


Fig. 8 変形および曲げモーメント (平地)
Bending Moment, Deflection (Plain)

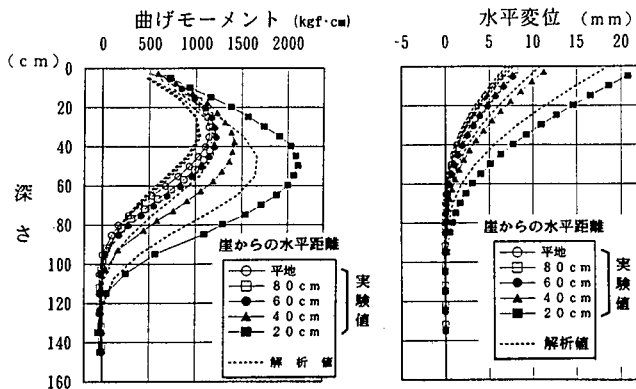


Fig. 10 各実験ケースにおける
曲げモーメント分布曲線
Bending Moment of Pile

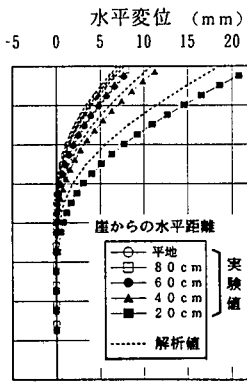


Fig. 11 各実験ケース
における変形曲線
Deflection of Pile

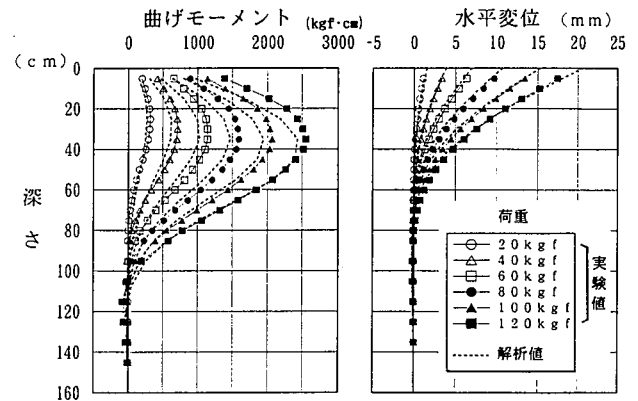


Fig. 9 変形および曲げモーメント (崖地 L/D=4)
Bending Moment, Deflection (Cliff)

の水平断面内の水平圧縮応力およびせん断応力分布を Fig.14 に示した。この図から、杭の水平断面において、杭の中央部では地盤の圧縮抵抗が、また、端部では地盤のせん断抵抗が主たる抵抗要素となる傾向があることがわかる。

以上、崖近傍に設置された杭の水平抵抗に関する模型実験結果について、FEMによる解析を試みた。その結果、曲げモーメントについては、解析値が実験値より小さな値を示すが、解析値は実験値と概略良好な対応を示し、適切な“地盤の応力～歪み曲線”を設定することによって、水平力を受ける杭の挙動をシミュレートできることがわかった。また、上記の解析では、地盤の応力～歪み曲線として、相当応力～相当歪みの関係を与え、初期応力解析を行ったが、参考として、地盤の応力～歪み曲線として、主圧縮応力～主圧縮歪みの関係を与え、初期応力解析を行わない解析も試みた²⁾。この解析においても上記の解析結果とほぼ同様な結果が得られた。そこで、4章のシミュレーション解析では、やや簡便な初期応力解析を行わない方法で、杭の水平抵抗の解析を行うこととした。

4. シミュレーション解析による崖近傍の杭の水平抵抗に関する検討

検討は、以下の手順で行った。

1) 平地での実大杭の水平載荷試験結果を用意する。この杭の挙動について、FEMによるシミュレーション解析を行い、その挙動を再現できるような地盤の応力～歪み

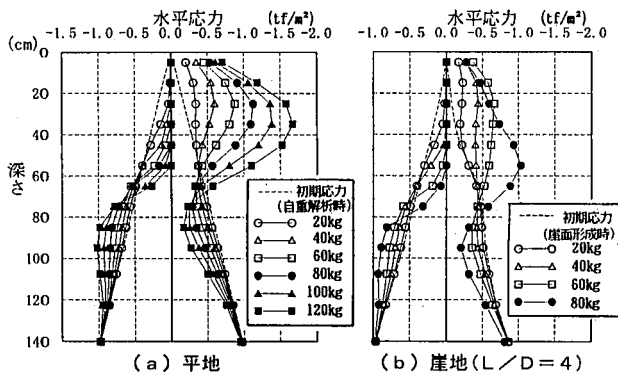


Fig. 12 杭に作用する地盤の水平応力分布
Lateral Subgrade Reaction Along Pile

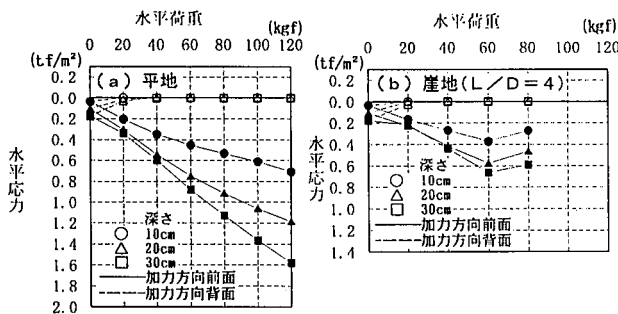


Fig. 13 杭に作用する地盤の水平応力と杭頭荷重の関係
Load ~ Lateral Subgrade Reaction Along Pile

曲線を設定する。

2) 上記と同一の地盤の応力～歪み曲線を有する崖地のモデルを想定し、その崖近傍に設置された杭の水平力に対する挙動を調査する。崖地での解析ケースは、崖までの距離、崖の高さ、地盤の剛性をパラメータとしたTable2に示すケースとする。

3) 2)の平地における杭の挙動と3)の崖地における杭の挙動を比較し、崖の存在が杭に与える影響を検討する。

4.1 実大杭の水平載荷試験結果のシミュレーション解析

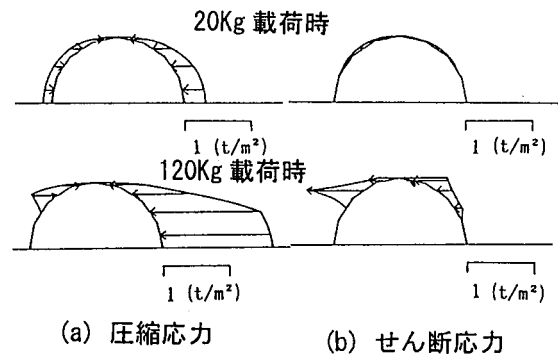
4.1.1 水平載荷試験およびその結果の概要 建築業協会基礎部会では、多数の杭の水平載荷試験結果を収集整理し、報告書として取りまとめている³⁾。その中から鋼管杭の水平載荷試験結果を一例とりあげ、シミュレーション解析を試みた。

鋼管杭は、外径609.6 mm、肉厚9.5 mm、根入れ長さ23.5mで、Fig. 15に示すような地盤中に根入れされている。載荷方法は、一方向の急速3サイクルで、各荷重段階における荷重保持時間は30分である。載荷高さは43 cmである。測定項目は、ロードセルによる荷重、杭頭水平変位、杭体の曲げ歪みである。水平載荷試験から得られた杭頭の荷重～水平変位曲線、杭の変形曲線、曲げモーメント分布曲線の実測値を Fig. 16,17 に示した。

なお、この杭を弾性支承梁として、杭頭水平変位が1 cmのときの水平地盤反力係数 k を逆算すると、1.6 kgf/cm³ となる。したがって、杭の水平抵抗に支配的な影響を与える地盤の深さは、約2.9 mとなる。以上から、この杭の水平抵抗に関与する地盤は、地表面から深さ11 mまでの範囲にある N 値が11の細砂層であると考えられる。

4.1.2 FEMによる実大杭の水平載荷試験結果のシミュレーション解析 解析モデルは、Fig. 18 (a)に示すような一様地盤中の鋼管杭である。対称性を考慮し、杭を2分割するABCD面を対称面として片側半分だけをモデル化している。杭面から境界までの距離は、加力方向および加力直角方向ともに、杭径の40倍を確保している。解析モデルの対称面を除く境界条件はすべてピンとした。

細砂層の応力～歪み曲線は、 N 値から S 波速度 V_s を推定し、さらに V_s から微小歪みレベルにおける地盤の変形



(a) 圧縮応力 (b) せん断応力

Fig. 14 杭に作用する地盤の水平応力分布
Distribution of Lateral Stress
in Soil Surrounding Pile

係数 E_0 を求め、Fig. 6の剪断剛性の歪み依存性状を考慮して、既述のように主圧縮応力～主圧縮歪みの関係として与えた(Fig. 19)。解析は、総合地盤解析プログラムSIGNASを用いて行った。

V_s , E_0 は、それぞれ140 m/sec, 約9,000 tf/m²となる。なお、砂の G_0 は、拘束圧に依存するとされており、地表面から深い位置ほど大きくなるのが一般的である。しかしながら、本地盤については、Fig. 15に示すように細砂層のN値が、深さ方向にはほぼ一定となっているため、このような拘束圧依存性を考慮しなかった。細砂層の引張り抵抗力はゼロと仮定した。また、細砂層以深の粘土質砂、礫混じり砂、シルト等の地層は、既述のように、鋼管杭の水平抵抗にほとんど影響を与えないため、解析上、本地盤を細砂層からなる一様地盤として扱った。

杭頭の荷重～水平変位曲線、杭の曲げモーメント分布曲線および変形曲線について、解析値と実測値の比較をFig. 16, 17に示した。杭頭の荷重～水平変位曲線、曲げモーメント分布曲線については、解析値が実測値と概略良好な対応を示すが、変形曲線については、解析値が杭の曲げ

歪みから求めた実測値よりやや小さな値となっている。しかしながら、Fig. 17において、実測の杭頭変位は、曲げ歪みから求めた変形曲線よりむしろ解析から求めた変形曲線の延長線上に乗っていることから、解析値はほぼ妥当であると判断した。

4.1.3 崖近傍の杭に関するシミュレーション解析 水平力の作用方向に対して、杭の前面に崖がある場合について、崖までの距離、崖の高さ、地盤の剛性等をパラメータとするTable 2に示すケースについて検討を行った。崖の高さは、杭径の約5, 10, 15倍の3, 6, 9 mとした。また、杭の水平抵抗に支配的な影響を与える深さ ($1/\beta$) を基準として考えると、($1/\beta$) は約2.9 mとなるので、崖の高さは、 $1/\beta$ の約1, 2, 3倍となる。解析モデルの例をFig. 18 (b)に示した。解析条件を単純にするため、崖は垂直としている。現実には、砂地盤で垂直な崖は存在し得ないが、この点については、解析上は砂地盤というよりむしろ、単に、Fig. 19に示すような応力～歪み関係を有する自重のない非線形弾性体を杭のモデルの周囲に配していると考えべきである。この点で杭を梁に、地盤をバネに置換する広く利

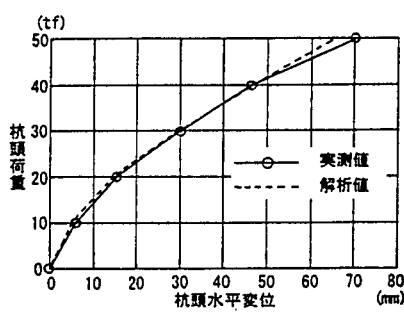
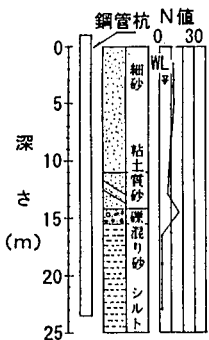


Fig. 15 土質柱状図 Soil Boring Log

Fig. 16 杭頭の荷重～水平変位曲線 Load~Deflection Curve at Pile Top

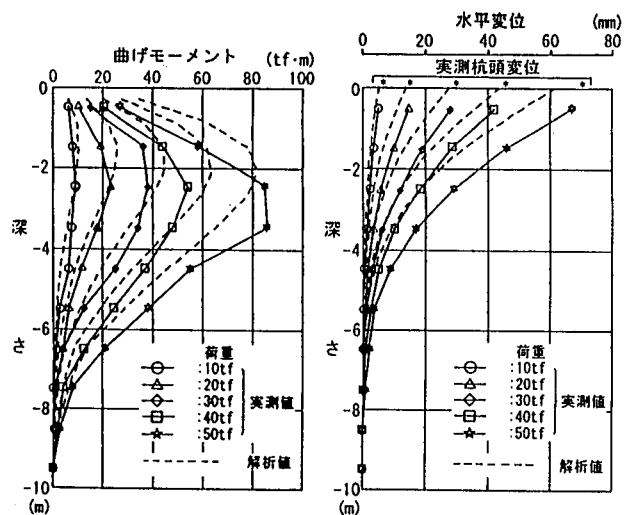


Fig. 17 杭の変形曲線および曲げモーメント分布曲線 Deflection and Bending Moment of Pile

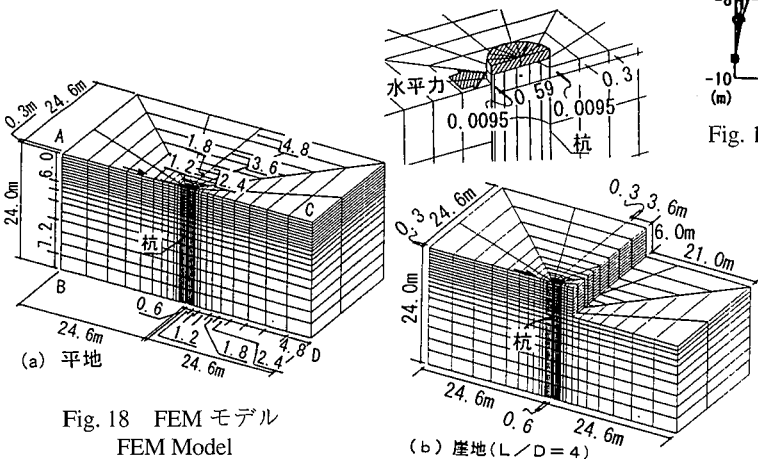


Fig. 18 FEM モデル FEM Model

Table 2 解析内容 Contents of Analysis

解析シリーズ	杭の加力方向に対する崖の位置	崖の高さ h 杭径 D	崖の勾配	地盤の初期剛性	杭から崖までの水平距離 L 杭径 D
I	杭の前面側	5, 10, 15 (h=3, 6, 9m)	垂直	E_0	2, 4, 6, 8, 41 (L=1, 2, 2, 4, 3, 6, 4, 8, 24, 6''m)
II		10 (h=6m)		$5E_0$, $1/5E_0$	

24.6m は、杭から解析モデルの境界までの水平距離で、このケースを平地での解析として扱う。

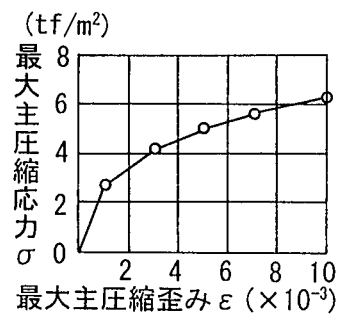


Fig. 19 圧縮応力～圧縮歪み曲線 Stress~Strain Curve of Soil

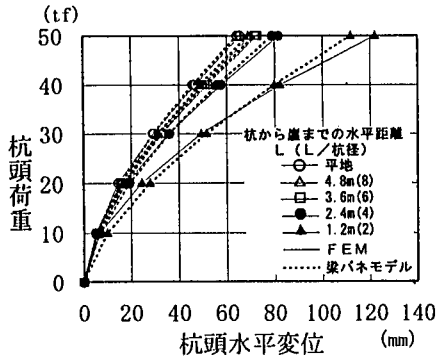


Fig. 20 杭頭の荷重～水平変位曲線の比較
(崖の高さ：3m, 地盤の変形係数： E_0)
Load~Deflection Curves
by Experiment and Analysis

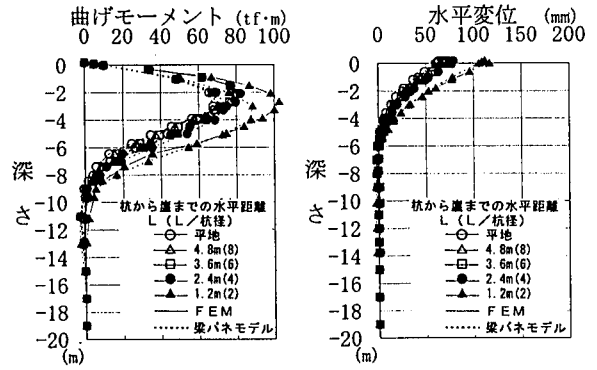


Fig. 21 杭の変形曲線および曲げモーメント分布の比較
(崖の高さ：3m, 地盤の変形係数： E_0)
Bending Moment and Deflection of Pile
by Experiment and Analysis

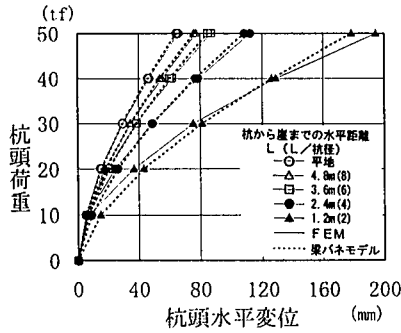


Fig. 22 杭頭の荷重～水平変位曲線の比較
(崖の高さ：6m, 地盤の変形係数： E_0)
Load~Deflection Curves
by Experiment and Analysis

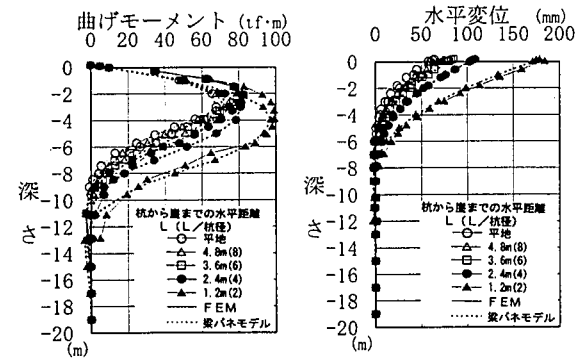


Fig. 23 杭の変形曲線および曲げモーメント分布の比較
(崖の高さ：6m, 地盤の変形係数： E_0)
Bending Moment and Deflection of Pile
by Experiment and Analysis

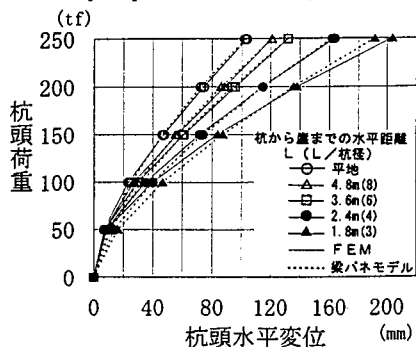


Fig. 24 杭頭の荷重～水平変位曲線の比較
(崖の高さ：6m, 地盤の変形係数： $5E_0$)
Load~Deflection Curves
by Experiment and Analysis

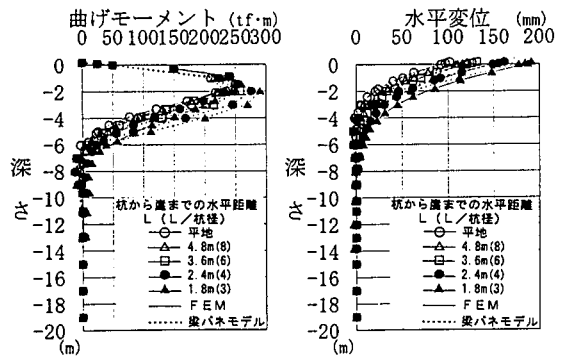


Fig. 25 杭の変形曲線および
曲げモーメント分布の比較
(崖の高さ：6m, 地盤の変形係数： $5E_0$)
Bending Moment and Deflection of Pile
by Experiment and Analysis

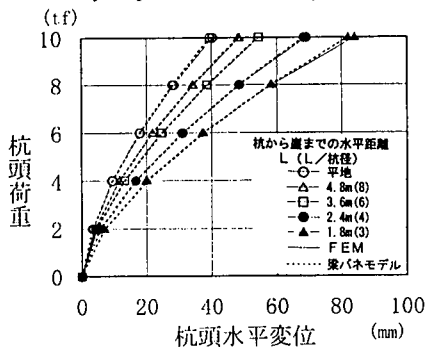


Fig. 26 杭頭の荷重～水平変位曲線の比較
(崖の高さ：6m, 地盤の変形係数： $1/5E_0$)
Load~Deflection Curves
by Experiment and Analysis

用されている杭の解析モデルと類似している。
上記の手順で求めた各解析ケースにおける杭頭の荷重～
水平変位曲線, 最大荷重時における曲げモーメント分布
曲線および変形曲線の代表例をFig. 20～27に示した。こ
れらの図中には, 後述の梁～バネモデルを用いた解析結
果も示してある。

5. 実用的な杭の水平抵抗の評価法

崖近傍に設置された杭の水平抵抗問題のように、不整形な地盤を対象とした解析法としては、FEMが有力であるが、設計法としては、やや簡易な方法が望ましい。このような観点から、既報(その1)では、杭に対する地盤の抵抗力に、次式に示すような崖の影響を考慮することによって、崖近傍の杭の挙動を“梁～バネモデル”で解析できることを示した (Fig. 28)。

$$p = k_L y^{0.5} \dots\dots\dots (7)$$

$$p \leq p_{max} \dots\dots\dots (8)$$

$$k_L = r k_0 \dots\dots\dots (9)$$

ここに、 p : 地盤反力(kgf/cm²)

y : 杭の水平変位(cm)

k_L : 崖地の地盤常数(kgf/cm^{2.5})

k_0 : 平地の地盤常数(kgf/cm^{2.5})

r : 杭から崖までの距離、および崖の高さによって決まる低減係数

p_{max} : 崖の影響を考慮にいたした
極限地盤反力 (kgf/cm²)

極限地盤反力の評価法は、既報りに示したが、低減係数

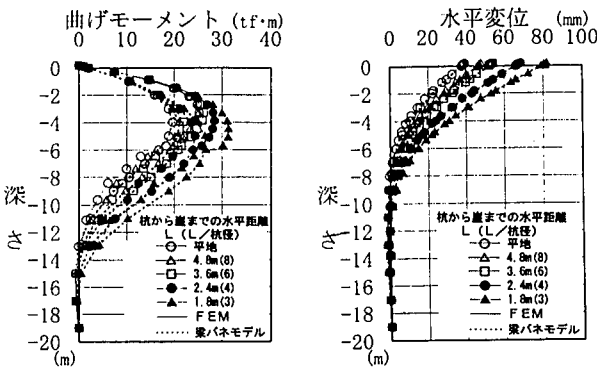


Fig. 27 杭の変形曲線および曲げモーメント分布の比較
(崖の高さ：6m, 地盤の変形係数：1/5E₀)
Bending Moment and Deflection of Pile by Experiment and Analysis

ρ は、模型実験結果から逆算した値を示したにすぎない。そこで、下記のように、4章に示したFEMによるシミュレーション解析結果を利用して、 r の提案を試みた。

1) FEMによる各解析ケースを、改めて“梁～バネモデル”によって解析し、FEMから得られた杭頭の荷重～水平変位曲線、曲げモーメント分布曲線、変形曲線等の杭の挙動を近似できる地盤定数 k を求める。その際、FEMによる解析において、地盤を深さ方向に一様として扱ったと同様、 k も深さ方向に一定とした。また、FEMでは、地盤の非線形性は考慮しているものの、地盤の破壊を考慮していないため、“梁～バネモデル”による解析においても、地盤反力は(7)式で表し、地盤の極限水平抵抗を考慮しなかった。

2) 1)で求めた平地および崖地における各地盤定数 k から(9)式の低減係数を求める。

上記の“梁～バネモデル”による解析から求めた杭頭の荷重～水平変位曲線、最大荷重時における曲げモーメント分布曲線、変形曲線を Fig. 20～27中に点線で示した。これらの図から、FEMと“梁～バネモデル”による解析結果は、ほぼ良好な対応を示すことがわかる。

上記の方法によって求めた、 k の低減係数と崖までの距離の関係を Fig. 29に示した。同図(a)では、崖までの距離を杭径で、また同図(b)では、(1/β)で規準化している。なお、(1/β)として、平地に設置された杭の頭部変位が1cm

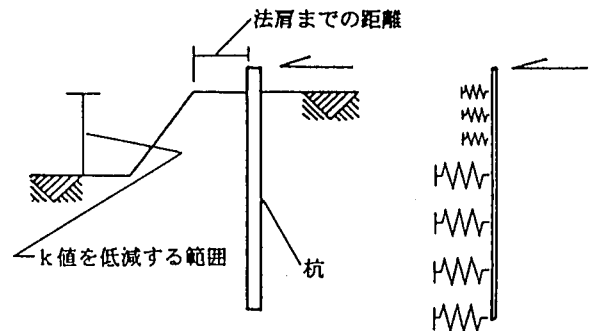


Fig. 28 解析モデル
Model for Practical Analysis

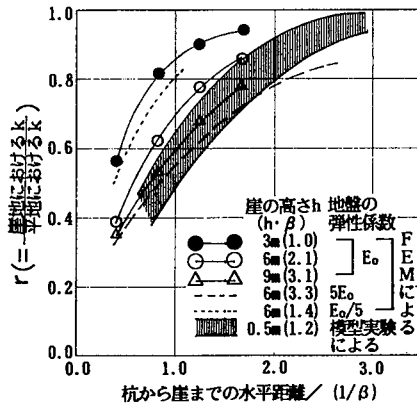
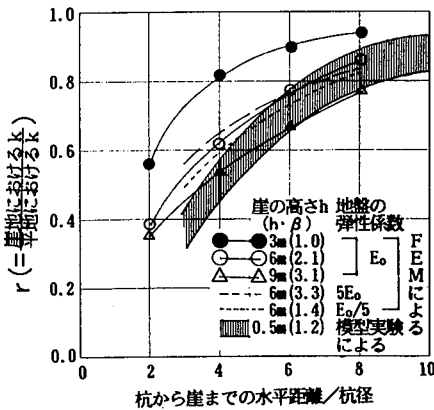


Fig. 29 Kの低減係数 r と杭から崖までの距離との関係
Reduction Factor r

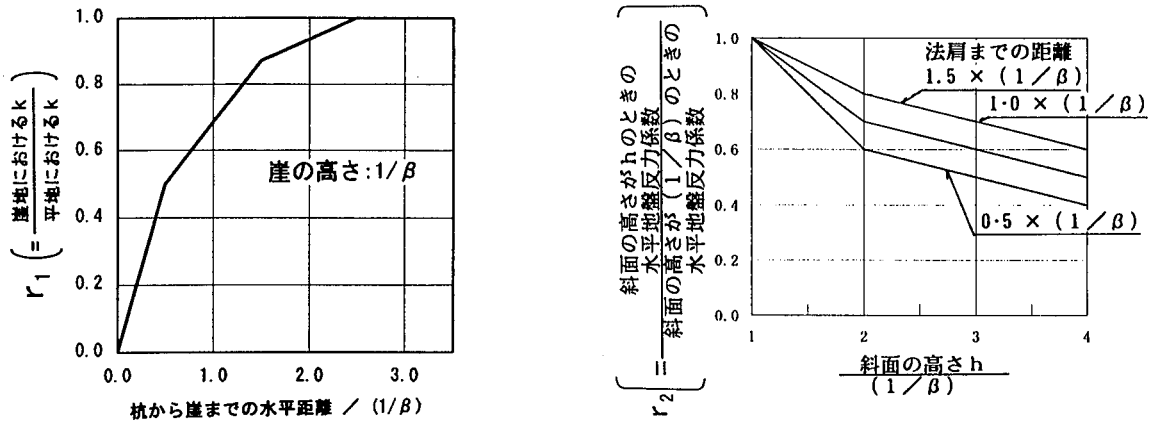


Fig. 30 Kの低減係数 r_1, r_2 と杭から崖までの距離との関係
Reduction Factor r_1 and r_2

の時の値を採用しており、この値は地盤の初期弾性係数を基準値 E_0 としたとき、2.9 m、 E_0 の5倍としたとき1.8 m、 E_0 の(1/5)倍としたとき4.4 mとなる (Table 2 参照)。

崖までの距離を杭径で規準化した Fig. 27 (a) によると、低減係数の値は、崖までの距離が短いほど、また崖が高いほど小さくなる傾向は認められるものの、地盤の剛性の影響が明確ではない。一方、崖までの距離や崖の高さを $(1/\beta)$ で規準化した Fig. 29 (b) では、地盤の剛性の大小は、 $(1/\beta)$ の大小として評価されるため、杭径で規準化するより一般性が高い表現となる。この図によると、崖までの距離が短いほど、また崖の高さを $(1/\beta)$ で除して規準化した値が大きいほど k が低下する傾向が明確に認められる。

Fig. 29 中には、模型実験結果も示した。FEM と模型実験結果を比較すると、模型実験による低減係数は、FEM による低減係数より小さくなっており、両者の差異は、崖が杭に近いほど大きくなる傾向が認められる。このような差異は、以下の原因によって生じたと考えられる。“模型実験では、地盤を水締めで作成した後、これを掘削することによって崖地を形成したため、崖近傍の地盤に対する拘束圧が低下し、これにともなって、著しく地盤の剛性が低下した。一方、FEM によるシミュレーション解析では、平地と崖地における地盤の応力～歪み関係を同一としたため、このような影響を無視した解析となっている。一般には、このような応力解放による剛性低下の影響を受けにくい過圧密粘土、固結土、軟岩等の崖地では、FEM による結果に近く、影響を受け易い砂質土や正規圧密粘土の崖地では模型実験結果に近くなると考えられる。”なお、勾配が大きな崖は、一般には、過圧密粘土、固結土、軟岩等である場合が多いと考えられる。そこで、これらの地盤からなる崖地を対象として、低減係数 ρ を次式で与

えることとし、次式中の r_1, r_2 を Fig. 29 (b) から設計上や安全になるように求め、Fig. 30 に示した。

$$r = r_1 \times r_2$$

r_1 : 崖の高さが $(1/\beta)$ のときの k の低減係数

r_2 : 崖の高さが $(1/\beta)$ より大きいときの低減係数の補正係数

Fig. 28 は、FEM によるシミュレーション解析結果に基づいており、今後さらに、実大実験あるいは遠心力载荷装置を用いた模型実験等によって、検討が継続されることが望ましい。

6. まとめ

崖近傍に設置された杭の水平抵抗について、模型実験結果の FEM によるシミュレーション解析、および鋼管杭を対象として、杭から崖までの距離、崖の高さ、地盤の剛性をパラメーターとした FEM によるケーススタディを行った。これらの検討結果および既報りに示した、模型実験結果の“梁～バネモデル”による解析結果等から、崖近傍に設置された杭の実用的な評価法の討案を示した。

参考文献

- 1) 茶谷文雄, 宮崎祐助: 有限平面地盤における杭の水平抵抗 (その1), 大林組技術研究所報, No.47, p.15 ~ 24, (1993)
- 2) 茶谷文雄, 西山高士: 水平力に対する崖近傍の杭の挙動, 日本建築学会構造系論文集, 第478号, p.115 ~ 124, (1995)
- 3) 建築業協会, 基礎部会, 水平耐力分科会編: 杭の水平载荷試験結果に関する調査報告書, p.647 ~ 652, (1978)