

斜杭を有する群杭基礎の地震時支持力評価に関する一考察

Study for seismic bearing capacity of group piles with battered piles

小松章*, 前田良刀**, 赤司有三***, D. A. Shuttle****

Komatsu Akira, Maeda yosito, Akasi yuuzou, D. A. Shuttle

*工修, 新日本製鉄(株) (〒100-8071 東京都千代田区大手町2丁目)

**工博, 九州共立大学, 工学部土木工学教室 (〒807-8585 北九州市八幡西区自由が丘1-8)

***工修, 新日本製鉄(株) (〒100-8071 東京都千代田区大手町2丁目)

****Ph. D. The University of British Columbia (Vancouver, B.C, Canada, V6T.1Z4)

This report presents the evaluation for the design method of seismic bearing capacity of group piles. By using the model tests, it is found that the concept of effective width depending on the load eccentricity is applicable to evaluate the bearing capacity of grouped piles in the same manner of the calculation method for shallow foundation. The lateral bearing capacity equation of battered piles is derived by using admissible velocity field method, and the proposed equation gives satisfactory agreement with the results of laboratory and field tests. Moreover the trial design of group piles using the improved method as well as battered piles is compared with the conventional design.

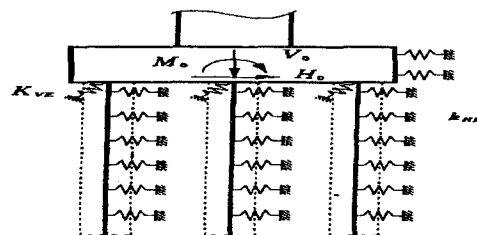
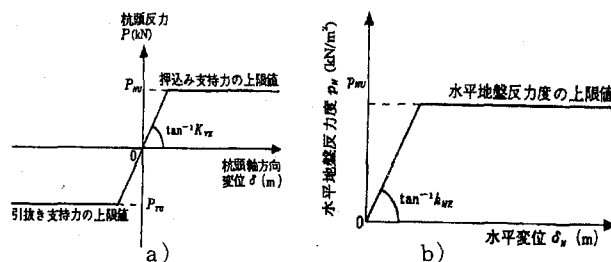
Key Words: group pile, battered pile, load eccentricity, seismic lateral bearing capacity, effective width

キーワード: 群杭, 斜杭, 偏心荷重, 地震時保有水平耐力, 有効載荷幅

1. はじめに

橋梁基礎などの耐震設計は基礎体および地盤を弾性体と仮定した簡易的なレベル1地震時の設計に加え、レベル2地震時には巨大地震を想定した慣性力を作用させ、杭基礎の各部材に生じる断面力、杭頭反力および変位を算出し、基礎が降伏状態に達しないように設計する。基礎の降伏状態を定義し、その破壊的な崩壊を防止するため、基礎体および地盤の挙動を塑性領域まで評価する保有水平耐力照査が実施されている¹⁾。特に軟弱な地盤では、保有水平耐力照査により杭基礎が決定されるため、杭基礎の降伏状態をより詳細に把握することが合理的設計に繋がる。

現行の杭基礎の保有水平耐力照査設計計算には図-1に示す杭ラメンモデルを用いる¹⁾。地盤抵抗の非線形性を考慮し地盤バネをモデル化するが、杭の軸方向の抵抗特性は図-2a)に示すように軸方向バネ定数 K_{VE} を初期勾配とし、押込み支持力、引抜き支持力を上限値とする弾塑性型(バイリニア型)とする。又、杭の軸直角方向の抵抗特性は図-2b)に示すように水平方向地盤反力係数 K_{HE} を初期勾配とし、水平地盤反力度の上限値 P_{HU} を有する弾塑性型とする。このような計算モデルで設計計算を行い、杭基礎の降伏状態の判定を行う。保有水平耐力照査における杭基礎の降伏とは一般に次のいずれかに最初に達する時としている。①全ての杭において、杭体が降伏する。②一列の杭の杭頭反力が押込み支持力の上限値に達する。このうち、押し込み支持力の安全性に関

図-1 杭基礎の解析モデル¹⁾図-2 杭の抵抗特性¹⁾

しては、押し込み抵抗力の降伏の判断を最外縁の一列の杭の支持力の上限値に達したときとしている。これは、極限状態の塑性応力というより弾性状態での要素応力の照査とみなせる。一方、直接基礎においては鉛直支持力の上限値の算定に塑性平衡状態を前提とした有効載荷幅の概念を用いている^{1), 8)}。筆者らは室内での模型試験により、偏心荷重を受ける群杭の終局状態の支持力を検

討し、群杭基礎においても有効載荷幅の概念が適用できることを確認している²⁾。この評価の導入により、より合理的な設計が可能となる。

さらに、杭体の降伏は水平地盤反力度の上限値 P_{HU} （受働抵抗）に大きく影響されるため P_{HU} をより効率的に増大させることも重要である。

斜杭は構造的に水平抵抗が大きく、耐震性に優れている基礎杭型式であるが、打撃杭工法が環境問題から採用されなくなったことと併行して現在ではほとんど適用されていない。しかし、近年回転工法などを用いて鋼管杭での斜杭の施工が可能になってきたことから、より経済的な基礎構造として見直されようとしている。筆者らは模型試験により、斜杭の水平支持力特性を考察し、地盤の破壊メカニズムをより視覚的に検討するため、画像追跡ソフトを用い地盤内の変形挙動を調べた²⁾。その結果、杭の傾斜の他に、すべり線形状に遷移領域を考慮した受働土圧で水平支持力を評価することがより正確であることを明らかにした。

本文では、以上に述べた群杭基礎の支持力評価において、より経済的、合理的となりえらとと考えられる杭基礎の鉛直支持力に対する降伏状態の新しい考え方と斜杭の効果を積極的に取り入れた設計計算方法を提案し、いくつかの試算を行い、その妥当性を検討する。特に、斜杭の水平支持力評価において、杭体の傾斜と遷移領域を考慮したすべり形状を考慮し、極限解析法の1つである速度場法により、支持力評価式を導き、室内、および原位置での載荷試験結果と比較する。さらに、斜杭を有する群杭がフーチングにより変位拘束される場合の支持力特性を検討している。

以上の、①有効載荷幅の概念の導入、②斜杭の支持力特性の反映、により群杭基礎の保有水平耐力照査による試設計を行い、その経済的効果を検討する。

2. 模型群杭の支持力特性^{2), 3), 4)}

2.1 模型群杭

(1) 模型試験の概要

載荷試験は写真-1, 2に示すように、横幅 $W=1500$ mm、深さ $H=900$ mm、奥行き $L=50$ mm、の二次元の土層に、土粒子を模したアルミ棒を積層して試験地盤として実施している。アルミ棒は径 1.6 mmと 3 mmを3対2の割合で混合しており、単位体積重量 $\gamma_d=16.7$ kN/m³、内部摩擦角はせん断試験から $\phi=21^\circ$ が得られた³⁾。

荷重はエアースリンダーにより剛な載荷ロッドを介して杭頭に伝達され、荷重と変位の測定は載荷ロッド上部の載荷点位置で、ロードセルと変位計により測定する。鉛直荷重および水平荷重はこの載荷ロッドを通して載荷される。荷重の載荷速度は、鉛直荷重では、 $n \times 25$ N/min、水平荷重では $n \times 7.5$ N/minを基準としている。ここで、 n は杭本数である。本模型杭は、板厚 $t=3$ mm、奥行き $L=50$ mmのアルミ板の柔な単杭と群杭、である。柔な杭は杭長 $l=650$ mm、根入れ長 $D_f=600$ mm、地上部の突き出し長 $h=50$ mmおよび、ある程度の先端支持力を確保するため、杭先端に幅 $b=30$ mmの板を取り付けT型形状とした。さらに、群杭の杭間隔は杭先端幅 b の5倍の 150 mmとした。地盤の受働抵抗特性を把握するため、杭の曲げ変形の影響を与えない剛な杭で水平載荷試験を行った。剛な杭は、板厚 $t=50$ mm、奥行き $L=50$ mmのアルミ角棒からなっており、杭長 $l=650$ mm、根入れ長 $D_f=325$ mm、地上部の突き出し長 $h=325$ mmであ

る。

表-1に柔な杭の模型試験のケースを示す。模型試験のパラメータは、①直杭・斜杭、②単杭・群杭、③載荷荷重ケース/鉛直荷重・水平荷重、④杭頭拘束/拘束無し・鉛直変位拘束・フーチング拘束、とした。

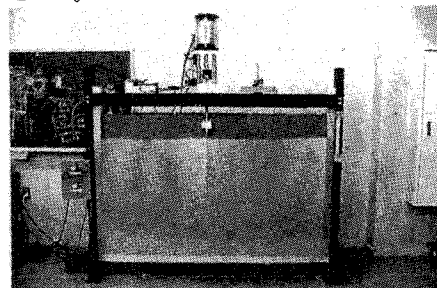


写真-1 載荷試験装置全景

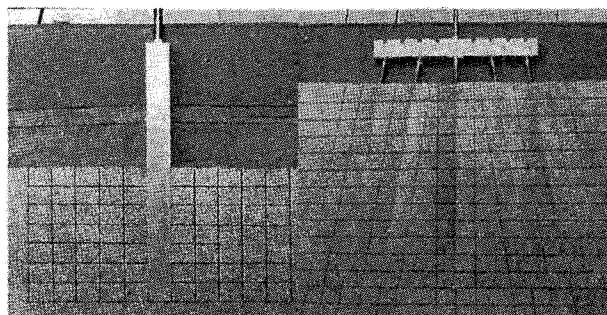


写真-2 単杭および群杭全景

表-1 模型試験モデル

杭仕様	荷重条件 (杭頭条件)	モデル	
直杭 単杭 及び 群杭	鉛直荷重 (偏心荷重) 水平荷重 杭頭フーチング (群杭)		
斜杭 単杭	水平荷重 杭頭拘束無し		
斜杭 単杭	杭頭変位拘束 (鉛直)有り		
斜杭 群杭 (5本)	杭頭フーチング		
斜杭 群杭 (片方向)	杭頭フーチング		

なお、水平荷重方向と反対方向に傾斜している杭を out-batter 杭といい、水平荷重方向に傾斜している杭を in-batter の杭という。

(2) 試験から得られる支持力特性

写真-3 は中心鉛直荷重載荷による群杭の鉛直変位量 $\delta v=50$ mm 程度のときのアルミ棒地盤の破壊状況である。群杭の杭周面での左右の地盤との相対ずれはあまり顕著でなく、地盤の破壊は、杭先端部分に集中している。本試験での群杭の場合、杭先端付近から発生するすべり面は重複しないものの、応力伝達範囲はかなり大きいと考えられ、荷重の増加に伴い先端での地盤の拘束圧が増加し、せん断抵抗が増加すると考えられる。図-3 は、鉛直荷重時の荷重・変位関係を示しており、単杭および群杭の両方の結果を示している。群杭効果に関して一般に、砂地盤では支持力が増加することが知られている⁵⁾。本試験では、砂と同様の粒状体のアルミ棒を試験地盤としていることから群杭効果は砂地盤と同じ結果が得られた。

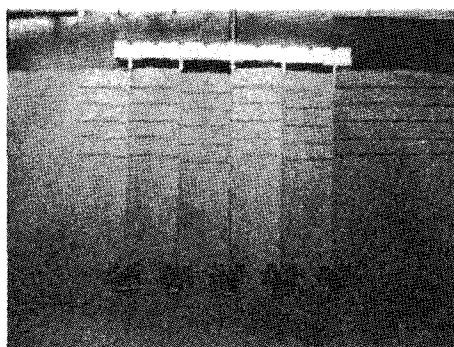


写真-3 鉛直荷重時の地盤の破壊状況 (5 本)

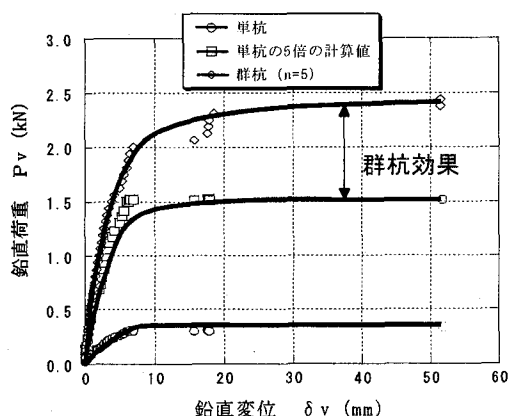


図-3 鉛直荷重と変位の関係

(3) 偏心荷重が支持力に与える影響

偏心荷重の影響の検討では、群杭の鉛直荷重の偏心量を $e=0\sim 300$ mm に変化させた試験を行った。図-4 は、荷重の偏心が鉛直支持力に与える影響を示したものである、荷重の偏心量が増大するにつれて鉛直支持力が減少することがわかる。また、図-5 は、荷重の偏心量と鉛直支持力の変化を示している。図中には、試験から得られた群杭での支持力の他に、直接基礎の支持力評価に用いる有効載荷幅の概念と同様の考え方で、荷重載荷位置を中心とした有効幅 $B' = B - 2e$ に含まれる杭本数に単杭での支持力を乗じた

場合も示してある。基本的特性で示したように鉛直支持力には群杭効果が存在し、支持力の絶対値は異なるが、荷重の偏心に対してはほぼ同様の支持力の変化を示す。このことから、杭基礎においても有効載荷幅の概念が成立することがわかる²⁾。現状の道路橋示方書では、群杭の支持力の安全性は、部材断面における縁部力度の照査と同様に群杭の最端杭の発生押込み力と許容支持力の関係で照査され、群杭全体の支持力の合力として照査されていない、一方、直接基礎での支持力照査は安全性を支持力の合力で評価しており、杭基礎でも同じ照査を行うことが合理的と判断される。

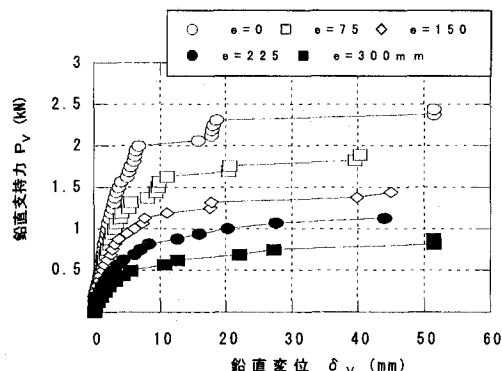


図-4 偏心鉛直荷重と変位の関係 (5 本, $D_f=600$ mm)

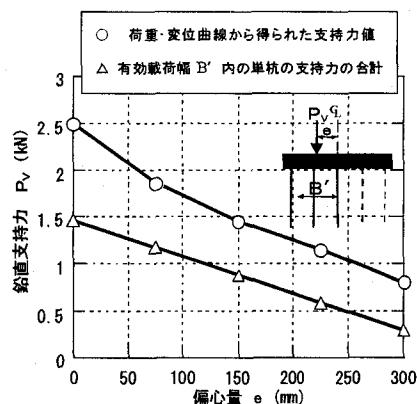


図-5 有効載荷幅の概念による支持力比較

(4) 斜杭の支持力特性

写真-4、5 は単杭の斜杭 ($\alpha=10^\circ$ 、out-batter 杭) の水平載荷試験の載荷前と載荷後 (約 50mm 程度変位後) のアルミ地盤の変位状況を示している。又、写真-6、7 は単杭の斜杭 ($\alpha=10^\circ$ 、in-batter 杭) の試験体と水平載荷試験後のアルミ地盤の変位状況を示している。図-6 は単杭の杭体の傾斜に伴う水平支持力の変化を示したものである。図では、鉛直杭 ($\alpha=0^\circ$) の水平支持力に対する斜杭の水平支持力比の変化と杭の傾斜角の関係を示している。

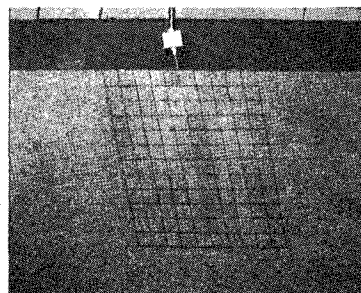


写真-4a) 斜杭 ($\alpha=10^\circ$) の水平載荷試験 (載荷前)

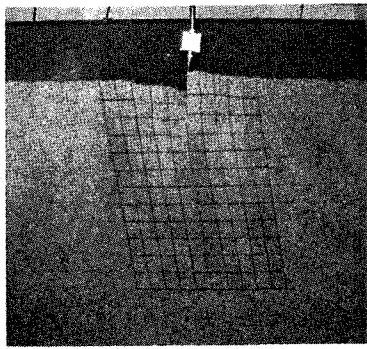


写真-4b) 斜杭 ($\alpha=-10^\circ$) の水平載荷試験 (載荷後)

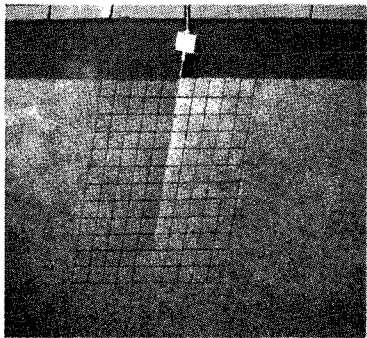


写真-5a) 斜杭 ($\alpha=+10^\circ$) の水平載荷試験 (載荷前)

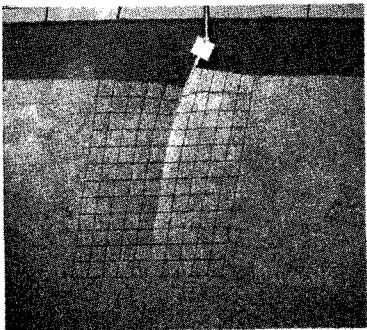


写真-5b) 斜杭 ($\alpha=+10^\circ$) の水平載荷試験 (載荷後)

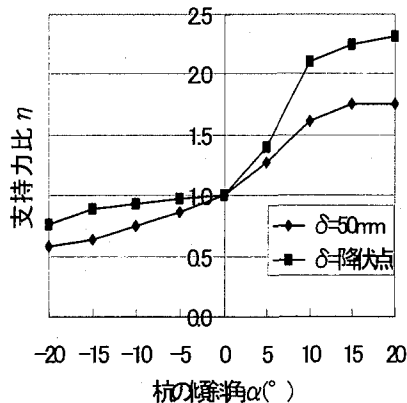


図-6 柔な単杭の水平支持力比と杭傾斜角 α

写真-4、5から、out-batter 杭は in-batter のものに比較して、せん断抵抗領域 (受働抵抗領域) が小さいこと、杭体 that 起げられていること、ならびに、杭頭の曲げによる回転変形が少ないことが分かる。上記のようなアルミ地盤の変形状況、杭体の変形状況からも、図-6に示すように、out-batter 杭は直杭よりも水平支持力は小

さく、一方 in-batter の杭は直杭に比べて傾斜が大きくなるほど水平支持力が大きくなっていることが推測できる。

写真-6 は杭本数 5 本、杭傾斜 $\alpha=20^\circ$ の鉛直載荷試験におけるアルミ地盤の変位状況である。斜杭間の地盤では上下、左右方向に変位が生じるが、鉛直杭を挟んだ一部の地盤では基本的に上下方向が卓越し、変位量と方向が大きく異なることが分かる。また、地盤破壊は杭先端部に集中している。

写真-7 は杭本数 5 本、杭傾斜 $\alpha=20^\circ$ における水平荷重載荷時のアルミ地盤の変位状況である。地盤の変形は杭先端部で小さく、地盤表層部では大きい。

図-7、8 は杭本数 5 本の場合の、それぞれ鉛直載荷試験および水平載荷試験の荷重・変位関係を示したものである。鉛直荷重下では杭傾斜角 α が増加するとともに、鉛直支持力 P_v が減少するが、水平荷重下では杭傾斜角 α の増加とともに水平荷重も大きくなっている。図-9 は群杭の支持力の増減に及ぼす杭頭傾斜角の影響について、杭本数 $n=5$ の場合についてまとめたものである。図の鉛直支持力および水平支持力として、変位量 $\delta_v=50\text{ mm}$ 程度、 $\delta_H=50\text{ mm}$ 程度の場合の場合と、荷重・変位関係から降伏点 (折れ曲り点) とみなせる場合の二つの方法による結果を示しているが、両者の傾向はほとんど同じである。杭傾斜角 α の増加により鉛直支持力は約 20% 低下するが、一方、杭傾斜角 α の増大に伴い水平支持力は増加し、鉛直杭 ($\alpha=0^\circ$) に対して約 1.5~2 倍となった。

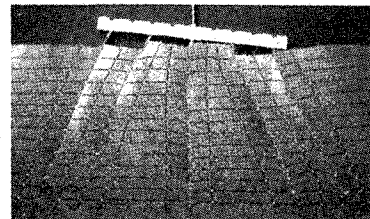


写真-6 鉛直載荷時の地盤の破壊状況

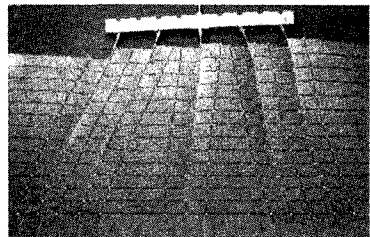


写真-7 水平載荷時の地盤の破壊状況

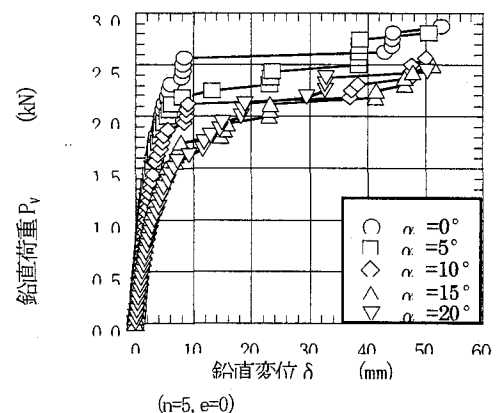


図-7 群杭の鉛直荷重と鉛直変位の関係

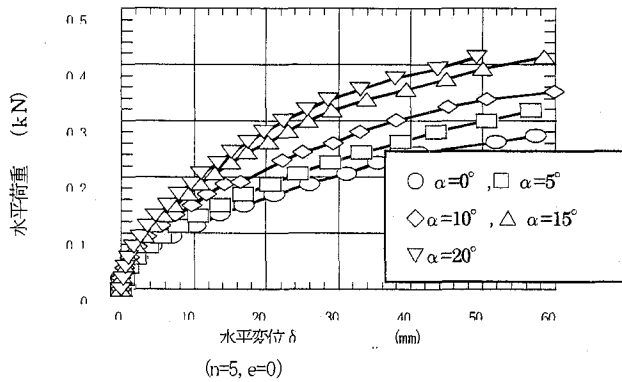


図-8 斜杭の水平荷重と水平変位の関係(5本群杭)

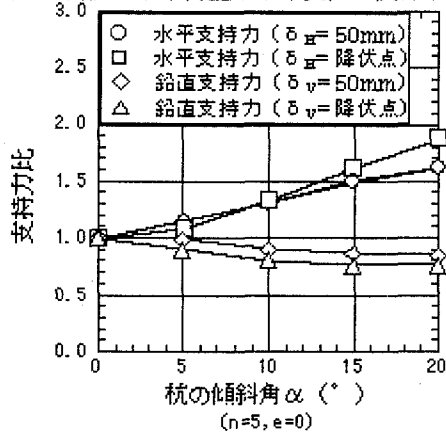


図-9 斜杭の支持力比と杭傾斜の関係 (5本群杭)

写真-8、9は、群杭を両開きの斜杭にせず、向きを変えて片方向の斜杭の群杭の水平載荷試験時のアルミ地盤の変形状況を示している。又、図-10は試験から得られた群杭の支持力比と杭傾斜の関係を示す。なお、群杭では水平抵抗に負の群杭効果(単杭の合計支持力より支持力が低下する)が生じ²⁾、図-6に示した単杭での支持力比に比較して群杭の支持力比の増減率は小さい。

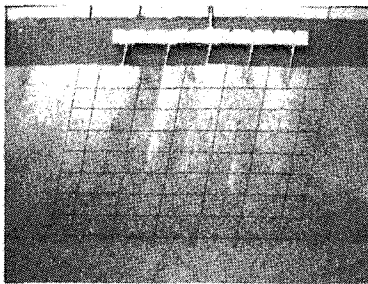


写真-8a) 片斜杭 ($\alpha=+10^\circ$) の水平載荷試験 (載荷前)

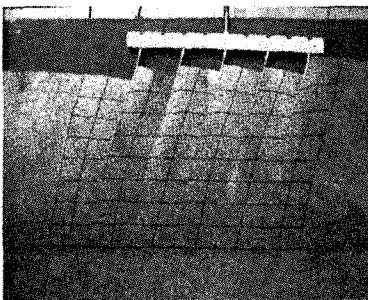


写真-8b) 片斜杭 ($\alpha=+10^\circ$) の水平載荷試験 (載荷後)

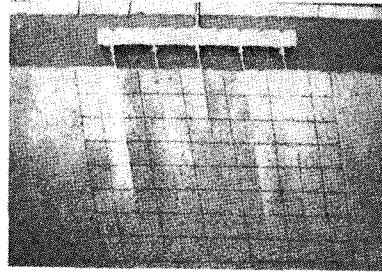


写真-9a) 片斜杭 ($\alpha=-10^\circ$) の水平載荷試験 (載荷前)

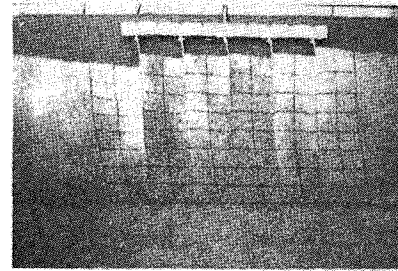


写真-9b) 片斜杭 ($\alpha=-10^\circ$) の水平載荷試験 (載荷後)

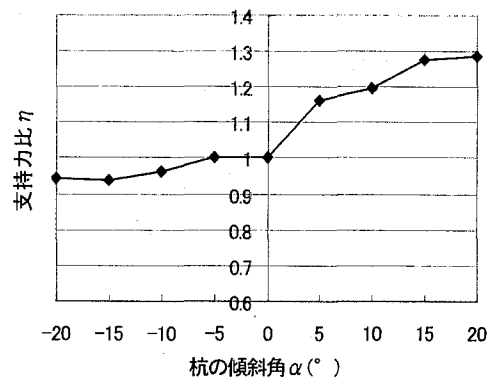


図-10 片斜杭の支持力比と杭傾斜の関係(5本群杭)

3. 斜杭の杭軸直角方向塑性地盤反力の評価法に関する考察

3.1 斜杭の水平抵抗メカニズム

(1) 斜杭の水平抵抗に関する設計法の現状

杭基礎構造の水平抵抗において、斜杭は荷重の分配により杭の曲げ剛性だけでなく構造的に軸剛性でも抵抗するため、曲げだけで抵抗する直杭と比較して有利な構造となる。例えば、液状化地盤に築造された杭基礎では、支持層からの突出構造となるため、斜杭を用いることで大幅な経済効果に寄与する可能性がある。

斜杭の設計は、一般的に直杭と同様に図-1に示すモデルで行なわれるが、斜杭角度の変化に応じた杭前面地盤の弾性係数(k_0 値)の変化については、久保らの実験的検証により港湾分野で基準化⁶⁾されているのみであり、建築分野や道路橋示方書では特に規定されていない。また、地盤の破壊メカニズムを考慮した斜杭の水平抵抗機構については解明されていないのが現状である。そこで、筆者らは斜杭の支持力特性に着

目して、速度場法により水平地盤反力を導き、そこから得られる支持力特性の評価を行なった。

(2) 仮定する斜杭前面地盤の破壊メカニズム

杭の水平抵抗における杭軸直角方向地盤反力は杭の側方変位に対応して増加し、ある値に達するとほぼ一定値となる。この状態での地盤反力が塑性地盤反力と呼ばれ、設計実務では、図-2b)に示したように、複合地盤反力法を用いた杭設計における杭軸直角方向地盤反力の上限值 P_{HU} として考慮される。

これまでの研究の成果によれば、この地盤の破壊には、図-11に示すように、浅い領域の地表面に向かって受動的に持ち上がる状態と、深いところの土被り圧の効果により杭軸直角方向の面内で生じる支持力破壊モードがあることが指摘されている⁷⁾。ここで、前者を塑性域Ⅰ、後者を塑性域Ⅱと呼ぶ。

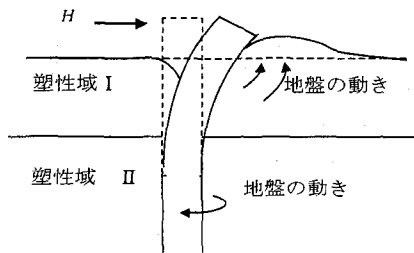


図-11 杭周辺地盤の塑性状態⁷⁾

地表面付近の塑性域Ⅰにおける杭の軸直角方向塑性地盤反力の評価法には多くの提案があるが大きく分けて二つの考え方がある。一つは、岸田ら⁷⁾、Meyerhofら⁸⁾、山肩ら⁹⁾、に代表されるように地表面付近に見られる三次元的なすべり形状を忠実に反映する方法であり、もう一つは、Broms¹⁰⁾に代表されるように二次元的な破壊メカニズムから受働土圧を求め基礎幅に関する補正係数を乗じることにより実務的な塑性地盤反力を評価する方法である。これらは、いずれも地盤の破壊線を直線と仮定して導かれている。

これに対して、筆者らは斜杭の水平抵抗のメカニズムを解明するため、アルミ棒積層体に埋め込まれた斜杭の水平載荷試験において、杭の曲げ変形を無視できる剛な杭（板厚 $t=50\text{mm}$ 、奥行き $L=50\text{mm}$ 、杭長 $l=650\text{mm}$ 、根入れ長 $Df=325\text{mm}$ ）について、杭前面地盤の挙動を分析した²⁾。試験は、斜杭角度 $\alpha=-10, 0, +10^\circ$ の3ケースについて実施した。その結果の写真と画像解析ソフトを用いた地盤の挙動を図-12に示す。これより、模型杭付近の破壊線はクーロン土圧の前提となる直線ではなく、遷移領域を有する曲線となることがわかる。これは、杭と地盤の間に摩擦が作用することが原因であると考えられる。また、地表面付近では、地盤は地表面に対して約 $34.5^\circ (= \pi/4 - \phi/2)$ のランキン受働領域として移動している。地盤の受働抵抗領域は、鉛直杭に対して out-batter 杭ではより小さく、in-batter 杭ではより大きくなる。

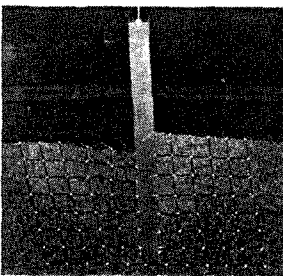


図-12a) 地盤変位状況 ($\alpha=-10^\circ$)

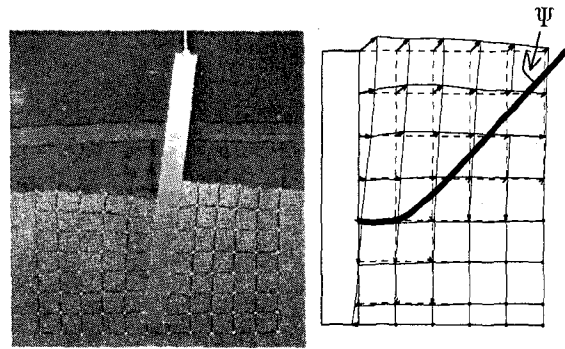
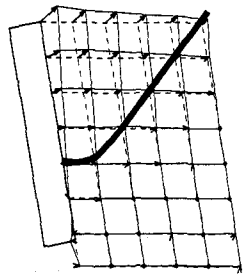


図-12b) 地盤変位状況 ($\alpha=0^\circ$)

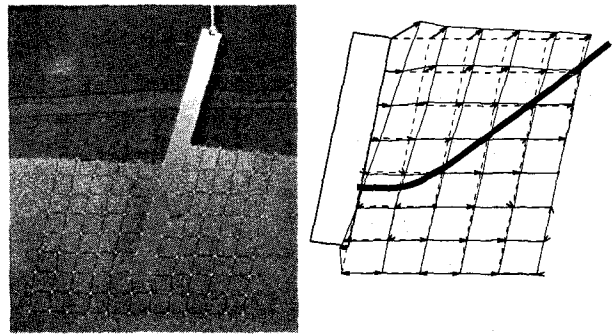


図-12c) 地盤変位状況 ($\alpha=+10^\circ$)

3.2 速度場法による斜杭軸直角方向の塑性地盤反力評価式の提案

(1) 斜杭の水平抵抗機構の破壊メカニズムと可容速度場

3.1の試験結果から、図-13に示すように、基礎と地盤の間の摩擦力を考慮した遷移領域(A)と受働くさび領域(B)の地盤抵抗領域を考慮して斜杭の水平支持力を評価する必要があると考えた。そこで、斜杭の水平支持力を以下に示す速度場法にて導いた。なお、本文での速度場法では土の降伏条件をモール・クーロンの破壊基準、塑性流れの適合性として関連流れ則 ($v=\phi$ 、ここで、 v : ダイレイタンシー角、 ϕ : 内部摩擦角) を仮定している。

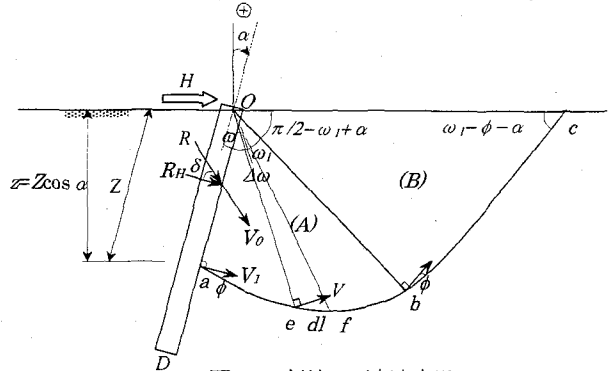


図-13 斜杭の可容速度場

(2) 連続条件

連続条件を以下に示す。

① oa 面

$$V_1 = V_0 \frac{\cos(\delta + \alpha)}{\cos \alpha} \quad (1)$$

② ab 間

$$V = V_1 \exp(\omega \tan \phi) = V_0 \frac{\cos(\delta + \alpha) \exp(\omega \tan \phi)}{\cos \alpha} \quad (2)$$

③ bc 面

$$V_2 = V_1 \exp(\omega_1 \tan \phi) = V_0 \frac{\cos(\delta + \alpha) \exp(\omega_1 \tan \phi)}{\cos \alpha} \quad (3)$$

④ 角度 ω_1

$$\omega_1 = \frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2} + \alpha \quad (4)$$

(3) 内部消散エネルギー

内部消散エネルギーは、直線すべり部においては粘着力に速度の不連続量を乗じて、遷移領域においてはさらに内部領域での消散エネルギーを加えて得られる。

① ab 間

$$\begin{aligned} E_{ab} &= 2 \int_0^{\omega_1} c dV \cos \phi \\ &= c Z V_0 \frac{\cos(\delta + \alpha)}{\cos \alpha \tan \phi} \{ \exp(2\omega_1 \tan \phi) - 1 \} \end{aligned} \quad (5)$$

② bc 間

$$\begin{aligned} E_{bc} &= c \cdot \overline{bc} \cdot V_2 \cos \phi \\ &= c Z V_0 \frac{\cos(\delta + \alpha) \cos(\omega_1 - \alpha) \cos \phi \exp(2\omega_1 \tan \phi)}{\cos \eta \sin(\omega_1 - \phi - \alpha)} \end{aligned} \quad (6)$$

③ 全内部消散エネルギー

$$E_{total} = E_{ab} + E_{bc} \quad (7)$$

$$= c Z V_0 N_c'$$

$$N_c' = \frac{\cos(\delta + \alpha)}{\cos \alpha} \left[\exp(2\omega_1 \tan \phi) \left(\frac{1}{\tan \phi} - \frac{\cos(\omega_1 - \alpha) \cos \phi}{\sin(\omega_1 - \phi - \alpha)} \right) - \frac{1}{\tan \phi} \right] \quad (8)$$

(4) 外力仕事

外力仕事は外力作用方向の仕事と地盤自身が重力方向になす仕事を合計して得られる。

① つりあい荷重による仕事

$$R V_0 \quad (9)$$

② A 領域の自重による仕事

$$\begin{aligned} W_A &= -\gamma \int_0^{\omega_1} \Delta o e f \cdot V \cos \left(\frac{\pi}{2} - \omega + \alpha \right) \\ &= -\frac{\gamma Z^2 V_0 \cos(\delta + \alpha)}{2 \cos \alpha} \cdot I_1 \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} I_1 &= \int_0^{\omega_1} \exp(3\omega \tan \phi) \sin(-\alpha + \omega) d\omega \\ &= \frac{1}{9 \tan^2 \phi + 1} \left[\exp(3\omega_1 \tan \phi) \{ 3 \tan \phi \sin(\omega_1 - \alpha) - \cos(\omega_1 - \alpha) \} + (3 \tan \phi \sin \alpha + \cos \alpha) \right] \end{aligned}$$

③ B 領域の自重による仕事

$$\begin{aligned} W_B &= -\gamma \cdot \Delta o b c \cdot \sin(\omega_1 - \alpha) V_2 \\ &= -\frac{\gamma Z^2 V_0 \cos(\delta + \alpha)}{2 \cos \alpha} I_2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$I_2 = \frac{\cos(\omega_1 - \alpha) \cos \phi \sin(\omega_1 - \alpha) \exp(3\omega_1 \tan \phi)}{\sin(\omega_1 - \phi - \alpha)}$$

④ 全外力仕事

$$W_{total} = R V_0 + W_A + W_B \quad (12)$$

$$= R V_0 - \frac{\gamma Z^2 V_0}{2} N_{\gamma}'$$

$$N_{\gamma}' = \frac{\cos(\delta + \alpha)}{\cos \alpha} (I_1 + I_2) \quad (13)$$

ここで、式(13)において、地盤自重項 N_{γ} を遷移領域において対数螺旋とその法線としての直線の二つの簡単なすべり線を仮定しているため、精度が劣る。このため、詳細な数値解に対する前田らによる補正係数 η を考慮し、 $\eta=0.5$ とする¹¹⁾。

補正係数を考慮した N_{γ}' は式(14)となる。

$$N_{\gamma}' = \eta \frac{\cos(\delta + \alpha)}{\cos \alpha} (I_1 + I_2) \quad (14)$$

(5) 支持力式

支持力式は全内部消散エネルギーと全外力仕事を等値として得られる。

$$W_{total} = E_{total} \quad (15)$$

$$R = c Z N_c' + \frac{\gamma Z^2}{2} N_{\gamma}' \quad (16)$$

ここで、杭軸直角方向力 R_H は以下となる。

$$\begin{aligned} R_H &= R \cos \delta \\ &= R \sin \delta \\ &= c Z N_c' \cos \delta + \frac{\gamma Z^2}{2} N_{\gamma}' \cos \delta \\ &= c Z N_c + \frac{\gamma Z^2}{2} N_{\gamma} \end{aligned} \quad (17)$$

$$N_c = N_c' \cos \delta$$

$$N_{\gamma} = N_{\gamma}' \cos \delta$$

(6) 受働土圧係数

二次元的な破壊メカニズムから受働土圧を求め基礎幅に関する補正係数を乗じることにより実務的な塑性地盤反力を評価する場合、水平支持力は以下で表される。

$$R_H(z) = a_p \cdot B \cdot K_{p\gamma c \delta} \cdot \gamma \cdot z \quad (18)$$

ここで、 R ：杭軸直角方向塑性地盤反力、 B ：杭径、 $K_{p\gamma c \delta}$ ：壁面摩擦角 δ のときの受働土圧係数、 γ ：土の単位体積重量、 z ：着目点の深さ、 a_p ：三次元性考慮のための係数であり、2~3 程度が一般的である。

受働土圧係数 $K_{p\gamma c \delta}$ は着目点での杭軸直角方向支持力 R を求め、これを $\gamma z^2/2$ で割ることにより求められる。

これから、受働土圧係数は $K_{p\gamma c \delta}$ 次式により求められる。

$$\begin{aligned} K_{p\gamma c \delta} &= \frac{1}{\gamma z^2} \cdot R_H \\ &= \frac{2c}{\gamma} N_c + N_{\gamma} \end{aligned} \quad (19)$$

3.3 提案式の適用性とその考察

(1) 模型試験との比較

① 試験概要

提案式の適用性を検証するために、アルミ棒積層体に模型杭を埋め込んで水平载荷した試験との比較を行なった。

模型杭として、剛な杭(板厚 $t=50\text{mm}$ 、奥行き $L=50\text{mm}$ 、杭長 $l=650\text{mm}$ 、根入れ長 $Df=325\text{mm}$)と柔な杭(板厚 $t=3\text{mm}$ 、奥行き $L=50\text{mm}$ 、杭長 $l=650\text{mm}$ 、根入れ長 $Df=600\text{mm}$)の2ケースで比較を実施した。

模型杭試験は、いずれのケースも、斜杭角度を $-20^\circ, -15^\circ, -10^\circ, -5^\circ, \pm 0^\circ, +5^\circ, +10^\circ, +15^\circ, +20^\circ$ として out-batter 杭、in-batter 杭の試験を実施している。

② 試験結果と考察

図-14 に剛な杭の水平支持力比 κ ～杭傾斜角 α 関係を、図-15 に柔な杭の水平支持力比 κ ～杭傾斜角 α 関係を示す。ここで、水平支持力比 κ は次式で定義する。

$$\kappa = (\text{傾斜角 } \alpha \text{ の杭の水平支持力}) / (\text{直杭の水平支持力})$$

なお、水平支持力比は、模型杭の荷重～変位関係の降伏時で求めており、剛な杭は水平変位 $=50\text{mm}$ 時、柔な杭は水平変位 $=20\text{mm}$ 時である。

この試験結果より、in-batter 杭(本文では $+\alpha$)は杭の傾斜と共に水平支持力 P_H が増加し、out-batter 杭(本文では $-\alpha$)では杭の傾斜と共に水平支持力 P_H が減少している。これは、斜杭の水平支持力が地盤の受働抵抗領域の大小に依存しているためであり、それを考慮した提案式を用いて解析した結果は、試験結果をほぼ表現できている。但し、剛な単杭の out-batter 杭で試験結果が解析値より大きくなっている。これは、解析では杭先端をピン固定条件としているが、実際の試験では杭先端がピン固定では無い状態となり、結果として受働抵抗が減少した可能性がある。

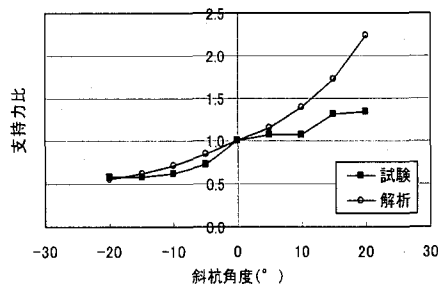


図-14 剛な単杭の支持力比～斜杭角度関係

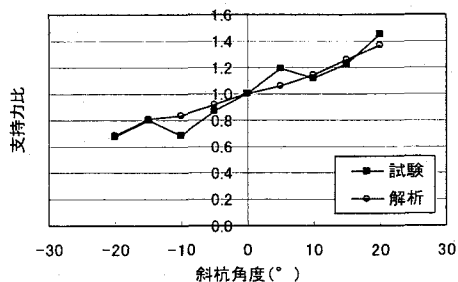


図-15 柔な単杭の支持力比～斜杭角度関係

(2) 原位置実大载荷試験から得られる支持力特性との比較

① 試験概要

提案式の妥当性を検証するために、千葉県富津市の新日本製鐵(株) 総合技術センター内にて鋼管杭の水平载荷試験を実施した。

試験は、直杭 ($\alpha=\pm 0^\circ$) と斜杭 ($\alpha=+15^\circ, -15^\circ$) の3ケースで行なった。試験杭の緒元、地盤条件、試験概要を図-16 に示す。ここで、鋼管杭の打設は、回転王入工法 (NS エコパイル工法)¹²⁾ にて実施している。

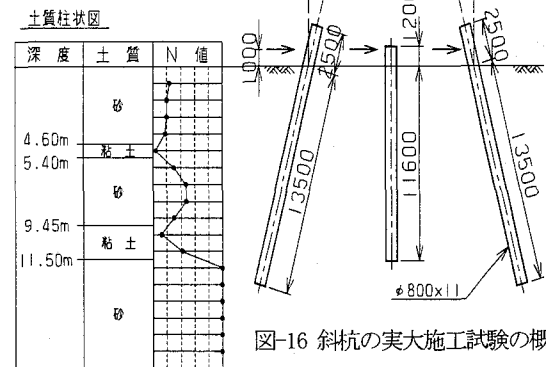


図-16 斜杭の実大施工試験の概要

② 試験結果と考察

試験における杭頭荷重～杭地表面変位関係を図-17 に示す。図-17 より、杭の水平支持力は地盤の受働抵抗領域の違いにより斜杭角度 $\alpha=+15^\circ$ が最も大きく、 $\alpha=\pm 0^\circ, -15^\circ$ の順に支持力が小さくなるのがわかる。尚、杭体 (SKK490 材) は水平荷重が 800kN 程度で地中部で降伏応力に達するが、杭地表面変位が 150mm 以上载荷を終るまで鋼管の座屈は発生していない。

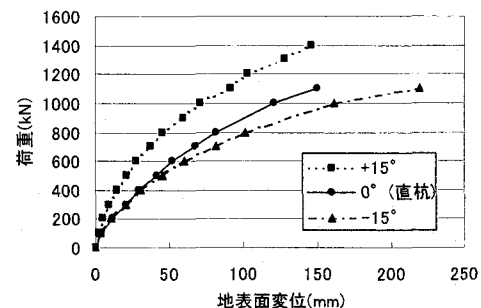


図-17 杭頭荷重～杭地表面変位関係

本試験において、斜杭の2ケース ($\alpha=+15^\circ, -15^\circ$) における杭载荷前面の地表面地盤の挙動について測定した。地表面変位の測定は、杭载荷方向に向かって杭芯から $0.8\text{m}, 1.2\text{m}, 1.6\text{m}$ の位置で実施している。図-18 は杭頭荷重～地表面変位関係の降伏時の地表面変位の挙動を示しており、杭からの離れが 0.8m の位置の地表面変位を基準とした比で地表面変位の挙動をあらわしている。

図-18 より、斜杭角度 $\alpha=-15^\circ$ では、杭前面地盤が杭からの離れが狭い領域で動いていることがわかる。一方、斜杭角度 $\alpha=+15^\circ$ では、 $\alpha=-15^\circ$ と比較して杭からの離れが遠いところまで地盤が動いていることがわかる。このことから、斜杭角度に応じて地盤の受働抵抗領域が変わることがわかる。

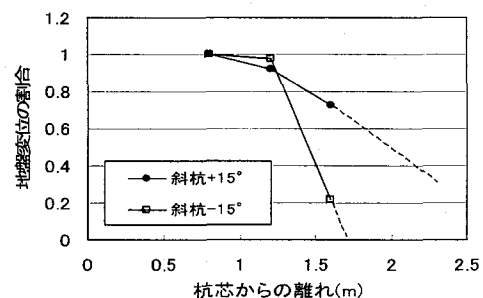


図-18 杭前面の地表面地盤の挙動

図-19 に、載荷試験結果と解析結果の比較を示す。ここでの解析は受働土圧係数を提案式で算定するとともに、道路橋示方書に準じて求めた地盤反力係数を久保らの知見⁶⁾から杭の傾斜角に応じて補正したものを用いている。

解析結果は、斜杭角度に応じた水平支持力の変化と地盤反力係数の変化を示している。なお、試験結果と解析結果の差異については、土質条件の詳細設定による差異であると考えられる。

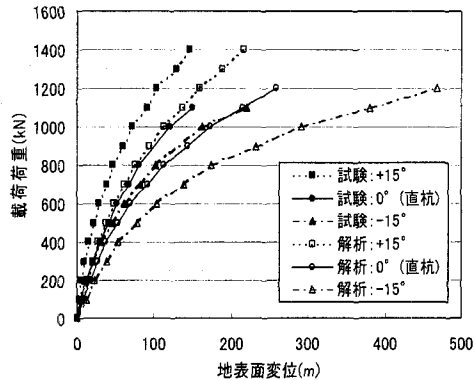


図-19 杭頭荷重～杭地表面変位関係の実測値と解析値の比較

また、地盤反力係数に着目すると、図-17 より、斜杭角度に応じて載荷荷重～杭地表面変位関係の初期接線勾配が変化し、「in-batter 杭の地盤反力係数($\alpha=+15^\circ$) > out-batter 杭の地盤反力係数($\alpha=-15^\circ$)」の関係を示している。これは、久保らの過去の試験結果¹³⁾とよく合致している。

図-20 に杭軸直角方向の荷重が500kNの時の、試験2ケース($\alpha=+15^\circ$, -15°)それぞれにおける深度～杭材発生応力関係を示す。同一荷重条件である場合、地盤反力係数が小さい $\alpha=-15^\circ$ のケースの方が杭に発生する応力が大きくなるが、図-20 の試験結果はその傾向をよく示している。また、解析結果は、前記したように土質条件の詳細設定による差異はあるが、実測値の傾向を良く示している。但し、地表面近傍の発生応力が載荷方向反対側で試験値の方が小さくなっている、これは溶接された荷重載荷板の影響と考えられる。

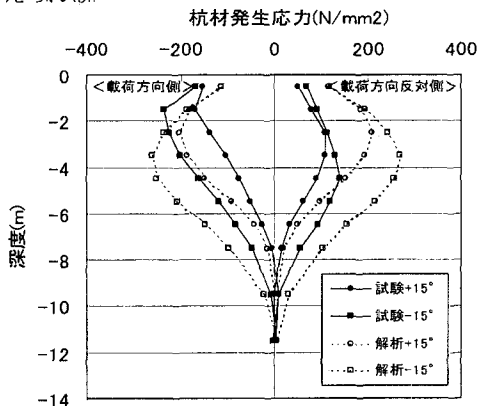


図-20 杭に作用する応力分布

③ 斜杭角度に応じた地盤反力係数の変化に関する考察

斜杭角度の変化に応じた杭前面地盤反力係数(k_{H} 値)の変化については、久保らによって実験的に検証されており、out-batter 杭では地盤反力係数は直杭と比較して小さくなり、in-batter 杭では地盤反力係数は大きくなることから明らかである。

3.3 (2) で示した原位置実大載荷試験の結果から得られる地盤

反力係数の変化を図-21 に示すが、図中に示した久保らの試験結果と同様の結果を示している。

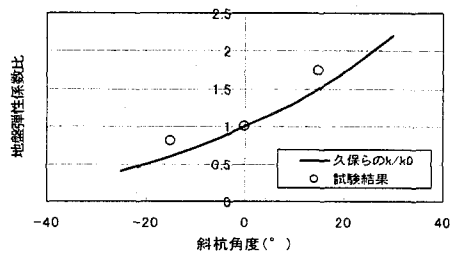


図-21 斜杭角度と地盤バネ値の関係

一方、図-21 のように斜杭角度の変化に応じた杭前面地盤反力係数の変化については、久保らにより実験的研究がなされているが¹³⁾、理論的検証はほとんどなされていない。そこで、図-22 のように杭前面地盤反力係数が杭前面地盤の反力と相関があると仮定する。

図-23 に斜杭角度に応じた地盤反力比(=斜杭の地盤反力/直杭の地盤反力)を示す。図-23 には久保らの地盤反力係数比も示しているが、両者の傾向が良く合っていることがわかる。このことから、地盤反力と地盤反力係数の間に相関関係があると考えられるが、詳細については、今後の課題である。

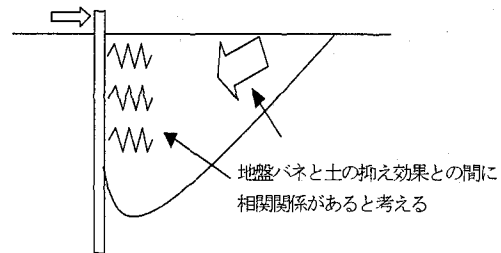


図-22 地盤バネ値と地盤抵抗の相関図

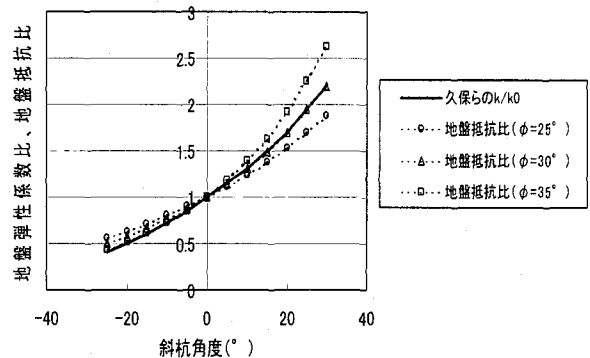


図-23 地盤バネ比と地盤抵抗比の関係

4. 向きの異なる斜杭を含む杭基礎の支持力特性

4.1 水平荷重が作用したときの斜杭の挙動

斜杭の単杭を水平載荷した場合、図-24 のように in-batter 杭は杭頭部が鉛直下方へ変位し、out-batter 杭は鉛直上方へ変位する。

一方、実構造物における杭は、図-25 に示すように水平荷重が作用したときのフーチングの回転方向と杭頭の挙動が反対方向となるため、フーチングの回転力により杭頭の動きが拘束される。

そこで、フーチングによる杭頭の拘束効果が支持力に及ぼす影響の検討を行なう。

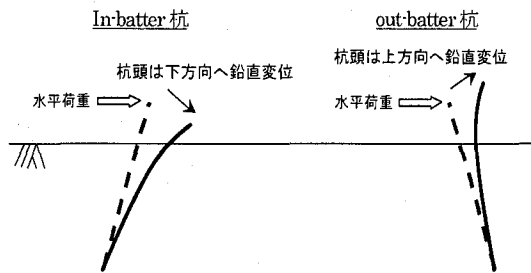


図-24 斜杭の水平挙動

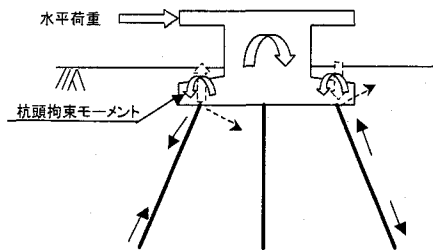


図-25 実構造物の水平挙動

4.2 杭頭が拘束された単杭の支持力特性

杭頭の拘束が水平支持力特性に与える影響を検討するため、2.1で示したアルミ丸棒を地盤とした柔な単杭（板厚 $t=3\text{mm}$ 、奥行き $L=50\text{mm}$ 、杭長 $l=650\text{mm}$ 、根入れ長 $Df=600\text{mm}$ ）において、図-26のような杭頭の鉛直変位を拘束した水平載荷試験（斜杭角度： -20° 、 -15° 、 -10° 、 -5° 、 $\pm 0^\circ$ 、 $+5^\circ$ 、 $+10^\circ$ 、 $+15^\circ$ 、 $+20^\circ$ ）を実施する。

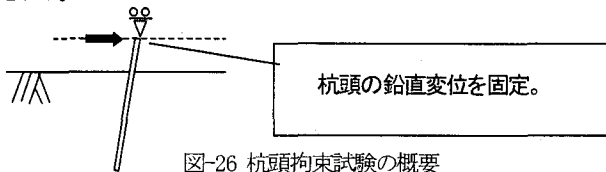


図-26 杭頭拘束試験の概要

図-27 に杭の水平支持力比～杭傾斜角関係を示す。水平支持力比は、杭頭荷重～水平変位関係の降伏時で算定する。なお、図-27中には、比較として杭頭部の変形を自由とした試験結果（図-15と同一の試験結果）を示す。この結果から、鉛直変位の拘束効果により、out-batter 杭でも杭の水平支持力が低下せず、逆に支持力が増加していることがわかる。これは、杭の水平抵抗機構として、単杭であれば水平荷重を杭前面地盤の抵抗と杭自体の曲げ抵抗で支持するのであるが、杭頭部の鉛直変位が拘束された場合、図-28に示すように、杭材を伸縮させる力が構造的な拘束効果となると考えられる。

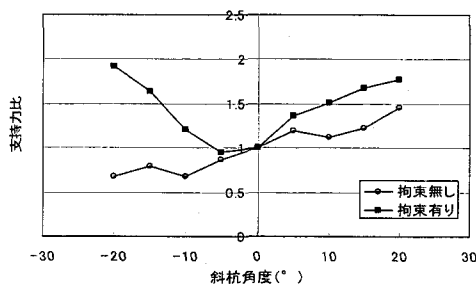


図-27 杭傾斜角度～支持力比関係

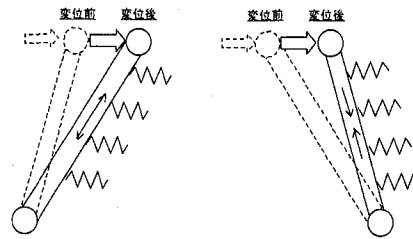


図-28 斜杭の水平載荷時の抵抗機構

4.3 フーチングにより連結された杭の支持力特性

(1) 一方向斜杭の支持力特性

フーチングにより連結された杭の支持力特性を把握するため、2.で示した一方向斜杭の試験結果の考察を行う。2.の図-10では、斜杭群杭の鉛直単杭（5本分）に対する群杭効果を示したが、図-29では、フーチングにより連結された群杭として、斜杭と鉛直杭の支持力の比較を示す。なお、グラフの縦軸の支持力比は、図-29中に示すように（各傾斜の斜杭の支持力）／（直杭の支持力）を計算したものである。

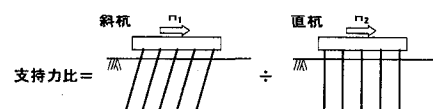
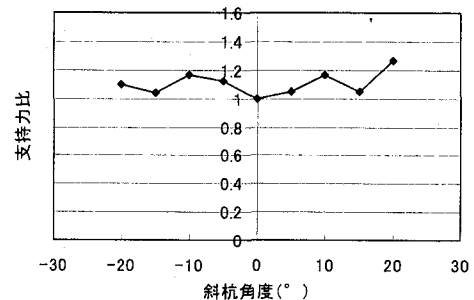


図-29 一方向斜杭の杭頭連結効果

図-29より試験結果を考察すると、図-27の試験結果と同様にout-batter 杭でも杭の水平支持力が低下せず、逆に支持力が増加していることがわかる。これは、フーチングにより連結された杭における杭頭部の変位拘束効果が原因であると考えられる。

(2) 両方向斜杭の支持力特性

次に、2.で示した両方向斜杭の試験結果の考察を行なった。図-30に、杭の傾斜角と支持力比の関係を示す。なお、この図-30は図-9と同一のグラフであり、グラフの縦軸の支持力比は、図-30中に示すように（各傾斜の斜杭の支持力）／（直杭の支持力）を計算したものである。

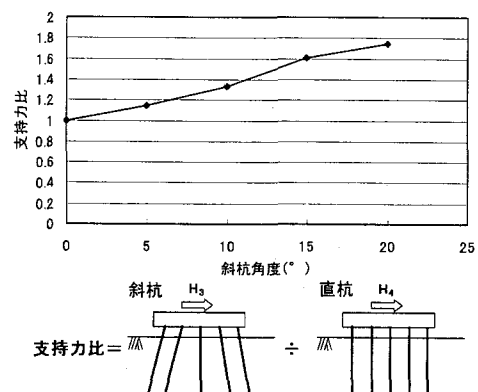


図-30 両方向斜杭の杭頭連結効果

図-30 の試験結果より、一方向斜杭と同様に斜杭の支持力は直杭の支持力より大きいことがわかる。これは、水平力の杭軸方向力変換による水平耐力増加に加え、杭頭部の拘束効果によるものであると考えられる。

5. 試設計による影響評価

本文において提案した考え方を設計に適用することにより、現行設計法による設計結果にどの程度影響するのか把握する。比較例は、道路橋脚基礎で、水平抵抗力、支持力が厳しい軟弱地盤のケースを取り上げるものとする。今後種々のケースでの比較を必要があると判断されるが、一つの例として傾向を捉えられるものと判断する。なお、斜杭の水平地盤反力度の上限値は3.で提案した傾斜に応じた受働土圧をそのまま適用し、一方、解析モデルではフーチング部での杭頭釣り合い条件を満たすように計算するため、得られる解析結果は自動的にフーチング部での杭頭拘束結果を反映したものとなる。

5.1 解析条件

設計手法は、原則として道路橋示方書に準じて行うものとする。

(1) 解析ケースと照査方法

解析ケースとその杭基礎の照査方法をそれぞれ以下に示す。

(表-2) 震度法に対する照査方法は、3 ケースとも同様とする。保有耐力照査では、橋軸直角方向に対して行い、所要の降伏震度まで杭基礎を降伏させないものとして設計する。

① ケース1 (現行設計法)

一列目の杭の発生杭頭反力が押し込み支持力以下として照査する。

② ケース2 (有効載荷幅の概念の適用)

有効載荷幅内の杭 (本設計場合1列目と2列目) の発生杭頭反力が押し込み支持力以下として照査する。

③ ケース3 (斜杭の適用)

照査方法はケース1と同じように行うものとする。斜杭の水平地盤反力度は3.2での提案式による。

(2) 設計条件

① 荷重条件

橋軸方向のみ下表の荷重で解析する。橋軸方向については杭基礎は所要の降伏震度まで杭基礎を降伏させないものとする。

荷重条件 (震度法) (kN, kN・m)

	常時	地震時(浮力無視)
鉛直力	16549	13950
水平力	0	3949
モーメント	0	32371

② 地盤条件

下表の地盤条件とする。

層No	層厚(m)	土層	平均N値
1	0.39	粘性土	0
2	1.90	粘性土	5
3	14.45	粘性土	5
4	6.15	砂質土	8
5(支持層)	1.75	砂質土	30

5.2 解析結果

表-2に設計結果を示す。

① ケース1 (現行設計法) の結果では、保有水平耐力照査法の結果、一列目の杭頭反力が極限支持力の95%程度発生しており、鋼管杭φ700×20本が必要となる。

② ケース2の結果、有効載荷幅内の一列目、二列目の杭支持力の和で降伏判定を行うと、2列(2本)の合計発生支持力は6407kN [極限支持力(2本)7954kNの81%発生]であり、鋼管杭φ700×16本で抵抗できる(約20%の低減)。一方、杭頭部の板厚は必要曲げ耐力のため、本数が減った分増厚する必要があり、ケース1の板厚17mmに対して、23mmが必要となった。

③ ケース3の斜杭(傾斜角15°)の結果では、鋼管杭φ700×16本で抵抗でき、ケース1の80%の本数となる。又、杭頭部の肉厚は、斜杭の水平抵抗に対する効果により、ケース1以下の曲げモーメントの発生で済み、15mmの板厚で抵抗できる。ケース2と比べて、さらに合理的な設計となる。

6. まとめ

本文では、群杭基礎の地震時保有水平耐力をより合理的に評価するため、有効載荷幅の概念の適用性、ならびに斜杭の支持力の把握と適用性について、試験および解析を行った。結果を以下に要約する。

① 模型試験により、群杭の鉛直支持力にも直接基礎と同じように有効載荷幅の概念が成立する。このため、群杭基礎の鉛直支持力の降伏判定において有効載荷幅内の杭の支持力の合力での照査方法が合理的である。

② 斜杭を有する群杭では、鉛直支持力は若干減少するものの、水平支持力は大幅に増大する。斜杭は傾斜角に応じて、水平力が変化するが、これは杭の傾斜に対応する地盤の受働抵抗領域が変化するためである。

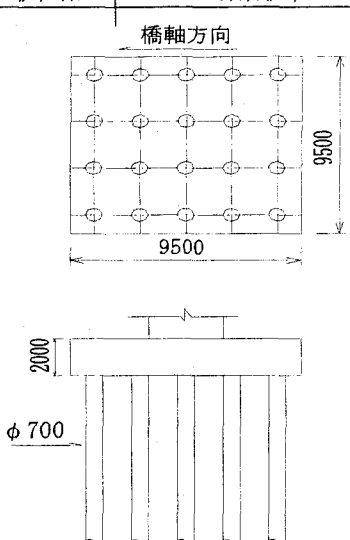
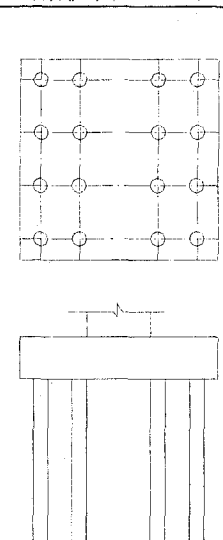
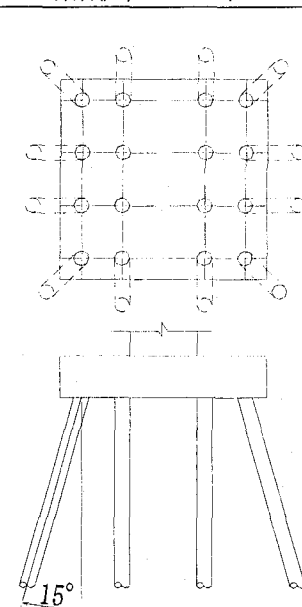
③ 剛な単杭の模型試験から斜杭の地盤の破壊メカニズムを分析し、すべり線形状に遷移領域を考慮した水平支持力の提案式を極限支持力法の一つである速度場法で導いた。その提案式で模型試験ならびに実大試験をシミュレーションした結果、よく一致することが立証された。

④ 向きの異なる斜杭の群杭の模型試験を行い、斜杭の幾何学的抵抗特性およびフーチングの杭頭拘束による抵抗特性を明らかにした。

⑤ 群杭基礎の保有水平耐力照査による現行設計に対して、有効載荷幅の概念の適用ケースと斜杭の適用ケースを比較設計を行い、経済効果を検討した。有効載荷幅の概念の適用により、1割から2割程度の経済的な設計が可能となることが分かった。また、斜杭の適用により、現行の設計の杭本数、ならびに杭断面を約2割程度削減可能であることが分かった。

なお、本研究を進めるにあたり、鋼材倶楽部の多大なる御協力をいただき、また、九州共立大学院生、北崎、杉浦の両君に大きな尽力をいただいた。ここに感謝します。

表-2 試設計結果

ケース		1 (現行設計法)		2 (有効載荷幅の概念考慮)		3 (斜杭の適用)	
杭仕様		鋼管杭 $\phi 700 \times 20$ 本		鋼管杭 $\phi 700 \times 16$ 本		鋼管杭 $\phi 700 \times 16$ 本	
							
		杭頭断面仕様: $\phi 700 \times 17 \text{ mm} \times \text{SKK490}$		杭頭断面仕様: $\phi 700 \times 23 \text{ mm} \times \text{SKK490}$		杭頭断面仕様: $\phi 700 \times 15 \text{ mm} \times \text{SKK490}$	
計算結果	震度法	杭頭変位	0.50cm	杭頭変位	0.55cm	杭頭変位	0.48cm
		許容変位	1.50 cm	許容変位	1.50cm	許容変位	1.50cm
		最大杭頭反力	1692kN	最大杭頭反力	1780kN	最大杭頭反力	1823kN
		許容支持力	1971kN	許容支持力	1962kN	許容支持力	2180kN
		最小杭頭反力	-388kN	最小杭頭反力	-149kN	最小杭頭反力	-208kN
		許容支持力	-791kN	許容支持力	-791kN	許容支持力	-791kN
	保有水平耐力照査法	杭体応力度	92.6N/mm ²	杭体応力度	88.7 N/mm ²	杭体応力度	77.1N/mm ²
		許容応力度	280.0N/mm ²	許容応力度	280.0N/mm ²	許容応力度	280.0N/mm ²
		最大曲げモーメント	1648kN・m	最大曲げモーメント	2222kN・m	最大曲げモーメント	1048kN・m
		降伏モーメント	1682kN・m	降伏モーメント	2261kN・m	降伏モーメント	1547kN・m
		最大杭頭反力(一列)	3764kN	最大杭頭反力(一列)	3977kN	最大杭頭反力(一列)	3872kN
		最大杭頭反力(二列)	2224kN	最大杭頭反力(二列)	2430kN	最大杭頭反力(二列)	866kN
		極限支持力	3977kN	極限支持力	3977kN	極限支持力	3977kN
		最小杭頭反力	-2288kN	最小杭頭反力	-2212kN	最小杭頭反力	-2109kN
		極限引抜抵抗	-2288kN	極限引抜抵抗	-2288kN	極限引抜抵抗	-2288kN

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書Ⅳ下部構造編，2002.
- 2) 小松章、前田良刀：模型杭の支持力特性に関する室内試験（荷重の偏心、傾斜および杭体の傾斜の影響）、地盤工学シンポジウム論文集、第48回地盤工学シンポジウム、2003.
- 3) 杉浦由幸、久々宮健太、前田良刀、森巖：模型群杭基礎の支持力試験，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，2002.
- 4) 北崎誠、古屋敷龍成、前田良刀、森巖：斜杭を有する群杭の支持力特性，土木学会西部支部研究発表会講演概要集，pp.358-359，2003.
- 5) Vesic, A. S. (1969) : Experiments with Instrumented pile Groups in Sand, ASTM STP 444, pp.177-222
- 6) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説 1999
- 7) 岸田英明、中井正一：地盤反力—変位関係の非線形性、土と基礎、vol. 25, No.8, pp.21-28,1977.
- 8) Meyerhof, G.G. and Ranjan, G.: The bearing capacity of rigid piles under inclined load in sand 1: vertical piles, Canadian Geotech. Journal 9, pp.430-446, 1972.
- 9) 富永幸司、山肩邦男：地盤の塑性状態を考慮した群杭の水平抵抗理論その1：塑性地盤反力について、日本建築学会論文報告集、第321号、pp.89-96, 1982.
- 10) Broms, B.B. : Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils, Proc. ASCE, Vol.90, No. SM2, pp.27-63, 1964.
- 11) 前田良刀、落合英俊、横田康行：荷重と地盤の傾斜を考慮した直接基礎の支持力式—地震時支持力特性の検討—、土木学会集 No.715 / III-60, pp.107-115, 2002.
- 12) 武川啓悟：NSエコパイル工法（回転圧入鋼管杭工法）、建設機械、11月号、2003.
- 13) 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、第2号、1962.

(2003年9月12日受付)