# 斜杭の支持力特性に関する基礎的研究

02A3703	伊賀上	和也
$0\ 2\ A\ 3\ 7\ 0\ 4$	上原	圭一
02A3737	畑 野	竜 也
指導教員	前田	良 刀

### 1. はじめに

世界有数の地震国である我が国では構造物の耐震 性能の向上が強く求められている.このうち,杭基礎 に関しては大地震に対して地震時保有水平耐力法に よりその安全性を照査しているが,これらは主に鉛直 杭が念頭に置かれている.

当研究室では斜杭の有する構造特性に着目して平 成15年度から斜杭の支持力特性に関する研究を行っ てきている.この結果,一般的に用いられるフーチン グ端から外側に向かって傾斜される両開き斜杭では 鉛直杭のみに比較して杭本数を約20%程度少なくで きるなど大幅な経済効果があることが分かった.<sup>1)</sup> しかしながら,この両開き斜杭では他の構造物との近 接施工や建設地点の用地等の面で制約が生じる場合 もあり適用性が万能ではない.

本研究では、両開き斜杭の適用上の問題を解決する ため、新たにフーチング下で互いに交差する斜杭(X 斜杭)にも着目し支持力試験によりその鉛直・水平支 持力特性を把握し、同時に試験を実施する両開き斜杭 の結果と比較しながらX斜杭に関する将来の実用化 の可能性を検討する.

## 2. 斜杭の力学的特徴と研究の背景

### 2.1 一般的な両開き斜杭の力学的特徴<sup>2)3)</sup>

図-1 に示すように一般的な斜杭基礎の両開き斜杭 ではフーチング端部から外側に傾斜した杭が用いら れ鉛直のみの直杭に比較して大幅に水平支持力が増 大する.水平支持力向上の主な要因は,①荷重と同じ 方向に傾斜する杭 (In-batter)では地盤の受働抵抗 が大きくなる受働土圧効果,②荷重と反対方向に傾斜 する杭 (Out-batter)では荷重が剛なフーチングによ り幾何学的に軸力に転化される構造効果,の2つの効 果が合成されたものであることが当研究室でのこれ までの研究で明らかとなった.しかしながら,先に述 べたように実務への適用性に制約があることがマイ ナス要因である.



写真-1 試験装置全景



写真-2 杭,フーチングと取付け金具



図-1 両開き斜杭のイメージ





#### 2.2 X斜杭の力学的特徴と研究の狙い<sup>4)</sup>

土のような摩擦性粒状材料の強度・変形特性は作用 する拘束圧の程度により変化する.このため、土の降 伏や破壊基準には拘束圧に依存したモールクーロン の破壊基準が最も多く適用されている.土の拘束圧効 果を実際問題に取り入れたものとして鋼材や不織布 などの補強材料を地盤内に設置した補強土工法や小 径の杭をランダムに配置したルートパイル工法など がある.

図-2 に示すように、X斜杭は通常の斜杭をフーチ ング内の地盤中で交差させることにより地盤中に発 生する拘束圧を効果的に増加させようとするもので ある.両開き斜杭が地盤の受働領域の増大や荷重の杭 軸力への転化など、斜杭の幾何学的・構造的な効果に 期待するのに対しX斜杭は地盤に一種の補強土的効 果を期待し地盤そのものを強くして斜杭の水平支持 力を改善しようとする狙いがある.

X斜杭では.杭間に挟まれた区間の地盤の拘束圧の 増加により地盤のせん断強度が増大し地盤の受働土 圧や杭との摩擦抵抗が増加し,結果的に杭の支持力特 性の改善が期待される.しかしながら,現在までX斜 杭に着目した研究事例は無く,その基本的な支持力特 性はほとんど分かっていない.

当研究室では,昨年度アルミ棒積層体を利用した二 次元の模型地盤においてX斜杭の支持力試験を行っ た.しかしながら二次元でアルミ棒が地盤の奥行き方 向に移動できないこと,およびX斜杭の杭が互い直接 交差せざるを得ない構造となるため,交差部がヒンジ を形成し構造的な弱点となり期待した水平支持力の 効果は得られなかった.

今年度は、岡垣砂を敷設した支持力試験用の土槽を 使用しX斜杭の杭を奥行き方向に一定の間隔で離し て配置した.これにより、それぞれの杭の変形に対応 して三次元的な地盤の拘束効果が可能となり地盤と 杭の力学的な相互作用が効果的に発揮されると期待 される.

### 3. 載荷試験とその概要

### 3.1 模型杭と試験土槽

今回,斜杭の模型支持力載荷試験に用いた載荷試験 装置は当地盤研究室で長年実績のあるもので,写真-1 に示すように,横幅 w=155cm,高さ H=75cm,奥行き L=40cm の内空部を有する土槽と荷重の載荷装置から なる.載荷装置は一本の剛なロッドを通じて,鉛直, 水平,および傾斜荷重の載荷が可能となるように工夫 してある.

また, 斜杭としての杭基礎はアルミ製の模型フーチ ング, スチール板を利用した杭材とそれらの取付け金 具からなる.写真-2 に示す模型フーチングの寸法は 幅 270mm,厚さ 50mm,奥行き 200mm であり,斜杭は杭 長 L=600mm,幅 B=50mm,厚さ t=6mm の鋼材からなり, 鉛直支持力を確保するため杭先端部に幅 b=30 mmの板 を取り付け T 型形状としている.

今回の支持力試験では,X斜杭と両開き斜杭の両方の 斜杭について載荷試験を行いお互いの支持力特性を 比較・検討することにした.

X斜杭と両開き斜杭の形状と設置状況は,図-1,図 -2 に示すように,地上部の突出し長さa=100mm,お よび杭先端地盤中で杭をα=20°~45°で交差させ杭 先端部は固定していない.

### 3.2 試験ケース

試験ケースは表-1 に示すように杭の傾斜角を組合 せ,全杭本数4本の場合でX斜杭( $\alpha$ =0°の鉛直杭含 む)および両開き斜杭を合せて26ケース,また試験 精度の確認や支持力群杭効果などの基本的特性を比 較するため,全杭本数2本で $\alpha$ =0°の鉛直杭の載荷試 験を別途行うため試験は全28ケースとなった.

杭の傾斜角 α(゜)	杭長600mm(杭4本)				
	X斜杭		両開き斜杭		
	鉛直荷重 Pv( <i>θ</i> =0)	水平荷重 PH ( <i>θ</i> =90)	鉛直荷重 Pv( <i>θ</i> =0)	水平荷重 PH ( <i>θ</i> =90)	
	地上部杭突き出し長さ 100 (mm)				
0	0	0	×	×	
20	0	0	0	0	
25	0	0	0	0	
30	0	0	0	0	
35	0	0	0	0	
40	0	0	0	0	
45	0	0	0	0	

#### 表-1 試験ケース一覧

#### 3.3 試験地盤作成方法

試験地盤には当研究室で実績のある岡垣砂を用い 多重フルイ(3重)による空中落下方式により作成した.落下高さは、h=105~45cm程度であり、これを 1分間で1往復する速度で人力により移動を繰り返 した.

また,今回の試験はいかにして均質の試験地盤を作 成するかが重要であるため,密度が一定であるために は土層底面からの各高さの単位体積重量 $\gamma_d$ も一定で なければならない. 先ず,予備試験として土層底面か らの各高さにモールドを設置して落下試験を行ない, 各高さの単位体積重量 $\gamma_d$ を測定した. その結果,単 位体積重量 $\gamma_d$ =15.8kN/m<sup>3</sup>程度のかなり密な乾燥岡 垣砂の試験地盤が作成されることとなった.この密度 に対応する岡垣砂の内部摩擦角は当研究室の研究成 果から $\phi$ =42°が得られている.

また, 地盤中への模型杭の設置方法は以下のとおり である.

①土層底面からフーチング設置時の杭先端部の高さ まで砂を落下させ、なるべく密度を変化させないよう に注意しながら表面を均した.

その後、フーチングを設置し、土層表面が一様な高 さとなるよう、ポッパーを一往復させる間隔にも注意 し、突出し長さ 100mm の高さまで砂を落下させた.

②フーチング底面下はフーチング自体が傘になり,砂 を一様な密度で落下させるのは困難である.そこで, 突出し長さ100mm付近で砂の落下を止め,手作業で杭 交差部に対して他の表面部分と同一の高さになるよ うに念入りに均した.

③試験地盤と設置したフーチングとの馴染みを良く するために,表面を均した後,取り付け具を外し,フ ーチングの自重を10分間載荷した.その後,載荷初 期の地盤の馴染みを改善する目的で圧密荷重として 鉛直載荷時には500N,水平荷重載荷時には40Nを載 荷し地盤の落ち着きを確認した後除荷し,改めて載荷 試験へと移行した.

### 3.4 荷重の載荷方法

荷重の載荷はエアシリンダーにより剛な載荷ロッ ドを介してフーチングから杭頭に伝達される.また, 荷重と変位の測定においては載荷ロッドの上部の載 荷点位置で荷重計と変位計により測定する.

荷重の載荷速度は昨年のアルミ地盤の試験と同様 に鉛直載荷試験時100 N/min(単杭25N/minの4倍), 水平載荷試験時では30 N/min(単杭7.5N/minの4倍) を基準とし,全てのケースにおいて一定とした.

### **3.5 支持力の評価**

一般に杭の極限支持力の判定は荷重-変位曲線が変 位軸に平行となったときの荷重を極限支持力とする が今回の試験では極限支持力が明確でないので鉛直 変位δ<sub>y</sub>および水平変位δ<sub>H</sub>が 15mm に達した時の荷重



をそれぞれ鉛直支持力,水平支持力としている.

斜杭での支持力特性の改善傾向を評価する指標と して(1)の式に示すように支持力比ηを用いている.

支持力比 $\eta$ は変位量 $\delta_{v}$ =15 mm,  $\delta_{H}$ =15 mmにおける 鉛直杭の鉛直支持力および水平支持力と同じ変位量 での杭傾斜角 $\alpha$ の斜杭の鉛直支持力および水平支持 力の比である.

η=(傾斜角 α の杭の鉛直支持力(水平支持力) 鉛直杭の鉛直支持力(水平支持力)

#### 4. 試験結果と考察

## 4.1 鉛直杭の支持力特性

ここでは式(1)において斜杭の支持力改善評価の 基準となる鉛直杭(α=0°)の支持力特性と支持力に 与える群杭効果について最初に考察する.図-3,4は 鉛直杭で杭本数が2本と4本の杭に関する鉛直およ び水平載荷試験による荷重・変位曲線である.両図か ら鉛直・水平抵抗ともに杭本数に比例して支持力が発 現していることが分かる.すなわち,杭の試験条件に 問題が無く,また支持力の群杭効果も生じていないこ とが分かる.特に鉛直杭における群杭効果の有無の確 認は後の斜杭における支持力改善効果を議論する時 に斜杭のみの効果か群杭効果も含むかの点で重要で ある.これから,本研究における載荷試験での結果は 斜杭の支持力特性が直接的に反映されたものとなる.

### 4.2 X斜杭の支持力特性

## (1) 鉛直支持力

図-5 にX斜杭の鉛直載荷試験による荷重・変位関 係を示す. 杭の傾斜角αが増加するにつれ, 鉛直抵抗 力は概ね減少傾向にあることがわかる. 図-6 は図-5 のデータをもとに鉛直支持力の変化について式(1) で定義した支持力比ηと杭傾斜角の関係である. 杭の 傾斜角αの増大に反比例して鉛直支持力は減少する.

また、図-7は支持力の変化傾向について昨年度実施したアルミ棒積層体地盤と今年度の砂地盤の比較を行ったものである.傾斜角 a の増大に伴う支持力の減少傾向はほぼ同じである.なお、今年度の砂地盤でのデータはかなりバラつきがあるが、これは先に述べたとおりフーチング直下で交差する斜杭周辺の地盤を均質に精度良く仕上げるには非常にデリケートで難しい作業を伴うため結果的に幾つかのケースでは試験地盤に乱れがあったものと考えられる.



図-10 アルミ地盤と砂地盤の水平支持力比の比較(X斜杭)

## (2) 水平支持力

図-8,9はX斜杭の杭傾斜角 α の変化に伴う水平支 持力特性に関する荷重・変位関係と支持力比の変化を 示したものである.試験地盤作成の難しさから試験デ ータはかなりばらついているが定性的には杭傾斜角 αの増大に伴い水平支持力も増加すると考えてよい だろう.また,図-10に昨年度の二次元でのアルミ棒 積層体地盤における支持力との比較を示すが,杭の配 置と砂地盤変位挙動条件から地盤に杭の変形に伴う 拘束圧が効果的に加わると考えられる今年度の砂地 盤では水平支持力が増加することが分かる.すなわち, X斜杭においても地盤補強土的効果により水平支持 力の向上が図れる可能性があることを示している.

### 4.3 両開き斜杭の支持力特性

### (1) 鉛直支持力

図-11,12は斜杭で一般的に用いられる両開き斜杭 の鉛直支持力特性に関する荷重・変位関係と支持力比 の関係である.ここでも,傾斜角αが増加するにつれ 鉛直支持力が減少することが分かる.また,図-13は 鉛直支持力に関してアルミ棒積層体地盤における支 持力との比較であるが,ここでも鉛直支持力は減少す る.

これまでの試験結果から,斜杭ではX斜杭,両開き 斜杭によらず,すなわち斜杭の構成形式に関係なく, また,二次元,三次元などの地盤挙動の変位挙動条件 にも依存せず傾斜角 α の増加に反比例して鉛直支持 力は減少することがわかる.この原因は杭の傾斜によ り鉛直荷重に対して杭が容易に曲げ変形を生じ易く なり鉛直変位が付加されるためと考えられる.したが って,杭傾斜角 α の増加に対応して鉛直支持力は減少 することになる.

### (2) 水平支持力

図-14,15は両開き斜杭の水平支持力特性に関する 荷重・変位関係と支持力比の変化を示したものである. 試験データはかなりばらついているがX斜杭と同様 に杭傾斜角 α の増大に伴い水平支持力も増加し,増加 の程度はX斜杭よりも著しい.また,図-16はアルミ 棒積層体地盤における支持力との比較であるが,ここ でもほぼ昨年度(二次元)と今年度(三次元)の結果 はほぼ同様の傾向を示す.

### 4.4 X斜杭と両開き斜杭の支持力特性の比較

図-17,18は鉛直,水平支持力特性に関してX斜杭



図-14 水平荷重と水平変位の関係(両開き斜杭)

と両開き斜杭の比較である. どちらの斜杭形式におい ても試験データのバラつきが大きいため定性的であ るが,概ね次のようなことがいえる.

①杭傾斜角 α の増大に伴う鉛直支持力の減少はX斜 杭が少ない.

②杭傾斜角 α の増大に伴う水平支持力の増加は両開 き斜杭が大きい.

### 5. まとめ

地盤が三次元的に挙動可能な室内での載荷試験装置を用いて斜杭の支持力試験を行い,昨年度までの二次元的な載荷試験結果との比較も含めてその支持力特性の検討を行った.その結果以下の成果が得られた.

- (1)今回行った砂地盤の三次元的な抵抗特性を反映できる土槽での斜杭の載荷試験の結果,X斜杭,両開き斜杭ともに鉛直杭に比較して水平支持力が増加する.この結果は昨年の二次元のアルミ棒積層体地盤と異なる.
- (2)水平支持力の増加は定性的には両開き斜杭の方 がX斜杭に比較して大きい結果となったが、試験 地盤作成の難しさにより測定値のバラつきが大 きく今後一層正確なデータを得る工夫が必要で ある.
- (3) 建設地点の用地等の制約が少なくて済むX斜杭 の利点を生かす杭基礎形式は経済的な設計に発 展できる可能性があり本研究の成果は貴重であ る.
- (4)斜杭では斜杭の構成形式によらず鉛直杭に比較して水平支持力は増加するものの鉛直支持力は逆に低下する.この原因は鉛直荷重に対して斜杭が容易に曲げ変形を生じるため鉛直方向の沈下を誘発するためである.

#### 6. 参考文献

- 小松章: 傾斜群杭の支持力特性と実務への適用性に 関する研究,九州共立大学博士請求論文,2005.12
- 古屋敷:斜杭を有する群杭の支持力特性,九州共立 大卒業論文,2003.3
- 3) 北崎:深い基礎の水平支持力特性に関する研究,九 州共立大学修士論文,2004.3
- 4)高良,山根:X斜杭の支持力特性に関する模型試験, 九州共立大学卒業論文,2005.3



図-18 X斜杭と両開き斜杭の水平支持力比の比較