

# 基礎構造の耐震補強工法の開発

## (その2 水平載荷試験および水平抵抗機構の評価)

金子 治<sup>\*1</sup>

佐野 大作<sup>\*1</sup> 成田 修英<sup>\*1</sup>  
田口 智也<sup>\*1</sup>

### 概 要

著者らは杭基礎の耐震補強として、比較的狭隘な敷地でも施工可能な回転貫入鋼管杭を斜めに打設して水平力を軸方向の抵抗力にも負担させることで水平抵抗を向上させ、より少ない本数で合理的に耐震性を確保できる工法の技術開発を行った。前報に引き続き、本報では実大杭を用いた原位置および室内載荷試験を行って斜杭工法の水平抵抗機構について検討した。

- 1) 水平力に対して杭軸方向の抵抗が期待できる斜杭は直杭に比べて大きな水平剛性を確保できる。
- 2) 斜杭の傾斜角が15度程度以下であれば、杭軸直交方向（水平）および杭軸方向（鉛直）の地盤反力は直杭の評価式を用いて評価可能である。
- 3) 耐震補強のための増し杭として用いる場合のように杭頭の鉛直変位が拘束される条件では、既往の直杭で用いられる設計式に組杭間の相互作用（群杭効果）を考慮した地盤反力を用いて、斜杭組杭杭頭の力の釣り合いと変位の適合条件から各杭の負担水平力・発生応力を評価可能である。

## Development of Seismic Reinforcement System for Pile Foundations

### Part2 Lateral Loading Tests and Estimation of Mechanism of Lateral Resistance

Osamu KANEKO<sup>\*1</sup> Daisaku SANO<sup>\*1</sup>  
Nobuhide NARITA<sup>\*1</sup> Tomoya TAGUCHI<sup>\*1</sup>

A series of static and seismic loading tests using a large-scale shear box were carried for investigation of performance of additional piles system as seismic reinforcement of pile foundations. Inclined piles system using screwed steel pipe piles were employed as additional piles considering their easy applicability.

- 1) A pile group with inclined piles develops higher lateral resistance compared to pile group with vertical piles only. This is because the axial forces in inclined piles contribute to lateral load component.
- 2) As far as the pile inclination remains in the range of about 15°, lateral soil resistance of a single inclined pile is not significantly different from that of a vertical pile.
- 3) Lateral response of a pile group can be simulated fairly well by a non-linear Winkler model considering hyperbolic p-y curve and taking the group effect into consideration in the analysis. Position of a pile in the pile group may be accounted for by evaluating the pile-soil-pile interaction based on the influence factors and the group effect.

<sup>\*1</sup> 技術研究所

<sup>\*1</sup> Technical Research Institute

# 基礎構造の耐震補強工法の開発

## (その2 水平載荷試験および水平抵抗機構の評価)

金子 治\*<sup>1</sup> 佐野 大作\*<sup>1</sup>  
成田 修英\*<sup>1</sup> 田口 智也\*<sup>1</sup>

### 1. はじめに

基礎構造の耐震性に関しては直接人命の安全性に影響を及ぼした事例がないことから、現行基準を満足していない建物基礎であっても耐震診断・補強される例は少ない。しかし、想定以上の大地震の発生や、特に軟弱地盤上に建設されている杭基礎の破損は建物の傾斜や転倒につながる可能性が高く、建物の長寿命化や財産保全の観点からも基礎構造の耐震性の確保が望まれる。一方、耐震補強の必要性が認識できたとしても、基礎構造の補強は施工スペースが限られているなどの制約条件が多く、コスト的な負担も大きい。

そこで、著者らは杭基礎の耐震補強として、比較的狭隘な敷地でも施工可能な回転貫入鋼管杭を斜めに打設して水平力を軸方向の抵抗力にも負担させることで水平抵抗を向上させ、より少ない本数で合理的に耐震性を確保できる工法の技術開発を行ってきた<sup>1)</sup>。

前報<sup>1)</sup>では、室内大型せん断土槽を用いた模型基礎に対する振動実験を実施し、斜杭工法の補強効果について確認した結果を示した。引き続き、本報では室内載荷試験および実大杭を用いた原位置載荷試験を行って斜杭工法の水平抵抗機構について検討した結果を示すとともに、一連の実験結果より導いた水平抵抗の評価方法について紹介する。

### 2. 基礎構造の耐震補強工法

基礎構造の耐震性について現行基準を満足していない建築物が多く存在しており、基礎構造の耐震性が直接人命の安全に影響を及ぼすことはあまりないとしても、特に軟弱地盤においては杭基礎の破損は建物の傾斜や転倒につながる可能性が高く、継続使用のためには耐震補強が必要である。建築物の基礎構造の耐震補強工法としては増し杭によるか、地盤改良が一般的であるが、施工条件の制約により適用が難しいことも多い。そこで、敷地が狭隘であったり施工可能なスペースが限定されることの多い建築物への適用を主目的に、高い品質を有しかつ施工性・耐震性に優れた回転貫入鋼管杭斜杭を補強杭として、図-1に示すように集中的に配置する工法の実用化をはかることとした。

しかしながら、一般の補強杭の設計は既往の新設建築物の設計法を準用するのが一般的で、本工法のように斜め方向に打設した杭により水平抵抗を負担させる場合の設計手法は確立されていない。また、図-2に示すように土木構造物で用いる斜杭工法<sup>2)</sup>では、支持層まで到達させて鉛直荷重も負担させる使用方法であり、本工法のように補強杭として水平抵抗のみを期待

する工法で、これらの設計手法をそのまま用いるのは限界があると考えた。

そこで、実大の回転貫入鋼管杭斜杭に対して水平載荷試験および各種解析を実施し、補強杭として斜杭を用いた場合の水平抵抗機構を把握することとした。なお、以下では図-2に示すように載荷方向の前方に位置する杭をOUT杭、後方に位置する杭をIN杭という。

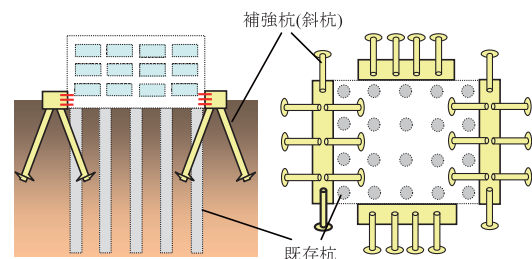
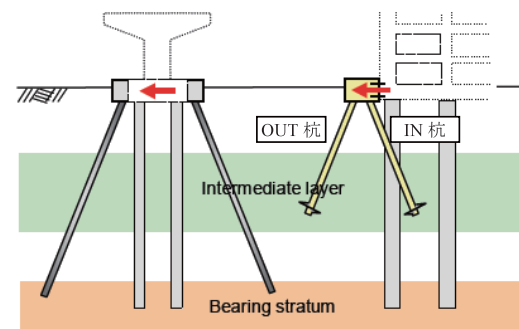


図-1 斜杭工法による耐震補強



【土木構造物】 【本工法】

図-2 斜杭工法の適用方法

### 3. 実大杭を用いた載荷試験の計画

#### (1) 原位置水平載荷試験

回転貫入鋼管杭斜杭工法による水平力の負担機構および水平地盤反力の評価のため、実地盤において実大杭を用いた載荷試験(写真-1)を実施した。表-1に試験体諸元を、図-3に試験体の平面配置を示す。試験体O1は直杭1本のみで構成され、O2およびO3は直杭1本と斜杭2本で構成される組杭となっている。O2とO3の違いは載荷方向のみである。試験杭はらせん形状の先端翼(直径550mm)を有する鋼管杭(直径216.3mm、厚さ8.2mm、材質STK490)で、実際の施工機械を用いて回転貫入により打設した。(写真-2)斜杭の傾斜角度は15度で、杭頭は鉄筋コンクリート造のフーチングで剛結されている。

図-4に試験地の土質柱状図および標準貫入試験

\*<sup>1</sup> 技術研究所

(SPT) による N 値、スウェーデン式サウンディング試験 (SWS) による換算 N 値を示す。各試験体位置における SWS 試験の結果はほぼ同様の分布を示しており、地盤条件のばらつきは比較的少ない。また、表層部で急速平板載荷試験 (RPLT) もあわせて実施したが、変形係数は 2.4~10.1MN/m<sup>2</sup> であった。各試験体の直杭、斜杭ともに杭先端は GL-6.2m の洪積シルト層に定着している。

載荷は反力壁に固定した油圧ジャッキによって行い、段階載荷方式による 1 方向単サイクル載荷とした。



写真-1 原位置水平載荷試験の状況

No.	杭の構成	フーチング・杭の仕様
O1	直杭単杭	フーチング：600 × 600 × 600 直杭：φ216.3 (t=8.2)、L=6.2m、 先端翼φ550 (t=22)
O2 (平行)	組杭 (直杭 1 本 + 斜杭 2 本)	フーチング：1800 × 600 × 600 直杭：φ216.3 (t=8.2)、L=6.2m、 先端翼φ550 (t=22) 斜杭：φ216.3 (t=8.2)、L=6.44m、 先端翼φ550 (t=22)
O3 (直交)	組杭 (O2 と同じ)	フーチング：600 × 1800 × 600 杭：O2 と同じ

(単位：特記以外は mm)

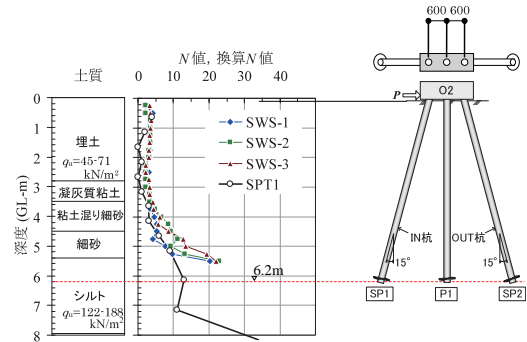


図-4 原位置水平載荷試験地盤



写真-2 試験杭の打設

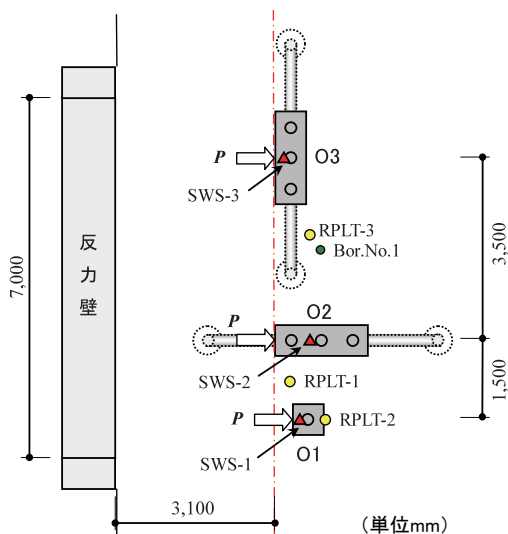


図-3 原位置水平載荷試験体配置

(2) 室内水平載荷試験

前報<sup>1)</sup>の振動載荷による補強効果の確認に引き続き、同様の模型基礎に対する静的載荷試験を行い、斜杭工法の補強効果と水平抵抗機構について確認した。

表-2 に試験体諸元、図-5 に試験体配置を示す。Is1 は斜杭単杭で、水平地盤反力が直杭よりも低下するとされている<sup>5)</sup>OUT 杭側に 15 度傾斜している。また、杭頭部の回転を抑止するため、ラフト上部に設けた反力梁から水平ローラー材を介して 2 台のジャッキによりラフト天端を回転拘束した。Is2 は既存基礎の増杭補強を想定した試験体で、既存杭としての直杭 4 本と増杭として斜杭 2 本で構成される。斜杭は簡易な施工機械を用いて回転貫入により、ラフト内側に 15 度傾斜させ打設した。

試験地盤は室内土槽に作製された低液性限界の砂質シルトで、図-6 に SWS 試験による換算 N 値を示す (試験位置は図-5 参照)。各位置の換算 N 値はほぼ同様の分布で、地盤条件のばらつきは少なかった。ただし、

No.	杭の構成	ラフト・杭の仕様
Is1	斜杭 (単杭)	ラフト：500 × 500 × 600 斜杭：傾斜角 15 度 (OUT)、 φ76.3 (t=2.8)、L=2.5m 先端翼φ200 (t=9)
Is2	増杭補強	ラフト既存部：1580 × 1300 × 600 補強部：500 × 500 × 600 既存杭：φ114.3 (t=4.5)、L=5.0m、 先端翼φ200 (t=9) 増杭：前方・後方傾斜 15 度、 φ76.3 (t=2.8)、L=2.5m 先端翼φ200 (t=9)

(単位：特記以外は mm)

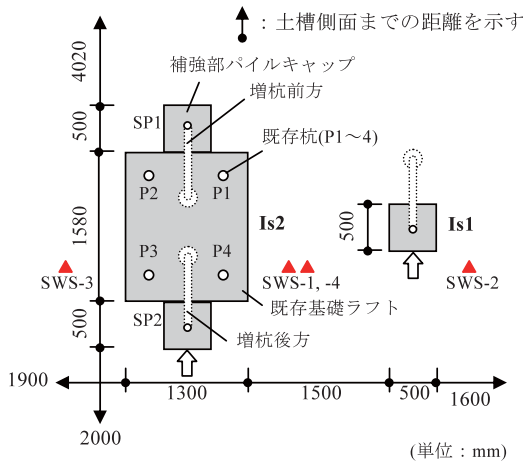


図-5 室内载荷試験体配置

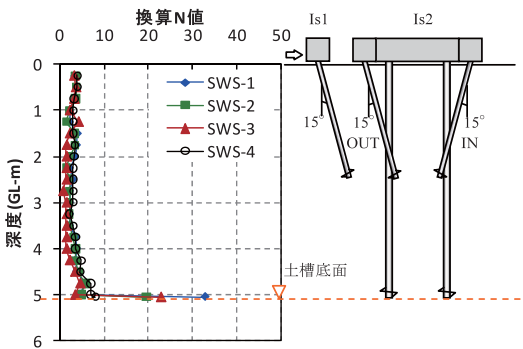


図-6 室内载荷試験地盤

表層から深さ 30~40cm の範囲は乾燥による硬化がみられ、SWS 試験位置近傍で実施した RPLT 試験より得られた変形係数  $E_{vd}$  は  $13.8\text{MN/m}^2$  (地表面)、 $2.2\text{MN/m}^2$  (GL-0.35m)、 $2.0\text{MN/m}^2$  (GL-0.50m) であった (いずれも平均値)。

#### 4. 試験結果

##### (1) 原位置水平载荷試験

図-7 に原位置水平载荷試験各試験体の水平荷重 (P) - 水平変位 ( $\delta$ ) 関係を示す。ここで示した水平変位は地表面から 100mm 上のラフト垂直面に対して測定された水平変位 2 点の平均値である。

ここで、直杭 1 本の O1 に対して斜杭 2 本を追加し

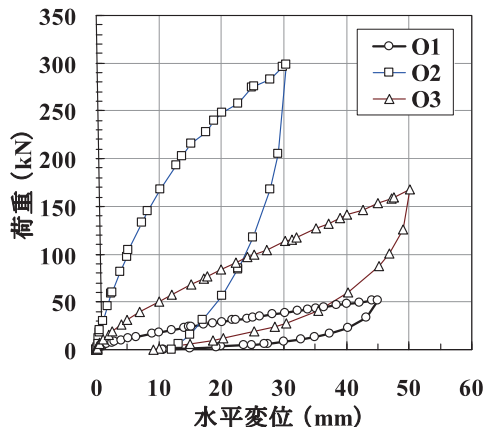


図-7 水平荷重 (P) - 水平変位 ( $\delta$ ) 関係

た O2 の同変位時の荷重は 7~9 倍で推移している。一方、O2 と同諸元で载荷方向をその直交方向とした O3 の荷重は O1 の 3 倍で推移している。残留変位は O1 で 10.5mm、O2 で 12.1mm、O3 で 9.1mm 生じている。

図-8 に O2 試験体の曲げモーメントの分布、図-9 に軸力 (圧縮をマイナスで表記) の分布を示す。杭体に生じる曲げモーメントは直杭 P1 と斜杭 SP1、SP2 でほぼ同等であるのに対し、斜杭の OUT 杭となる SP2 には圧縮軸力が、IN 杭となる SP1 および直杭 (P1) には引張軸力が生じている。なお、各杭ともに軸力は杭先端部までほぼ一定で、杭周面の摩擦抵抗は小さいことがわかる。

O2・O3 試験体について、杭のひずみ測定値から算定したせん断力  $Q$ 、軸力  $N$  (杭全長の平均値) と杭の傾斜角  $\theta$  から算定した、各杭の水平方向の荷重と変位の関係を図-10 に示す。ここで、载荷方向に傾斜した O2 試験体ではせん断力  $Q$  と軸力  $N$  の分担はほぼ同程度であるのに対し、载荷方向に直交方向に傾斜した O3 試験体では軸力の発現はごく小さく、水平抵抗に対する軸力の影響は、载荷方向と斜杭の傾斜方向との関係に依存することがわかる。

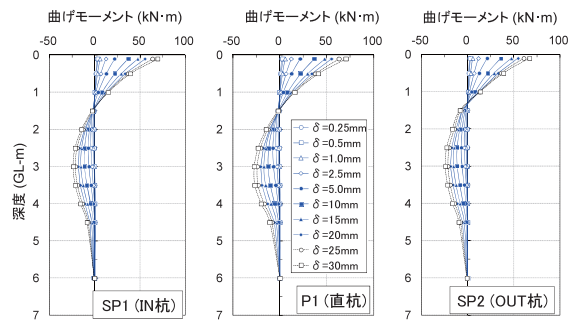


図-8 O2 試験体の曲げモーメント分布

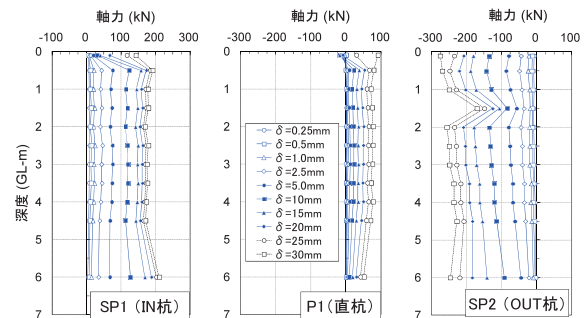


図-9 O2 試験体の軸力分布

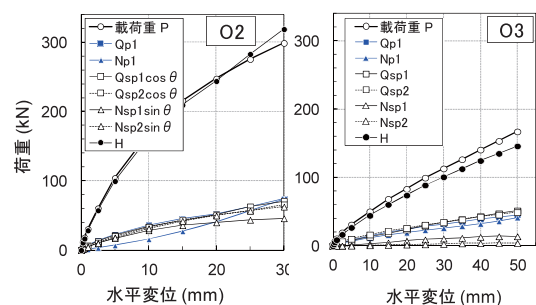


図-10 水平荷重-水平変位関係の比較

そこで、O2試験体について杭3本の水平抵抗力の和  $H$  を (1) 式として、(2) ~ (6) 式により算定した直杭の水平力負担率  $r_{p1}$ 、斜杭の水平力負担率  $r_{sp1}$ 、 $r_{sp2}$ 、および斜杭の軸力の水平成分の割合  $r_{sp1a}$ 、 $r_{sp2a}$  の推移を図-11に示す。添字 p1 は直杭、sp1 は IN 杭、sp2 は OUT 杭である。

$$H = Q_{p1} + (Q_{sp1} + Q_{sp2}) \cos \theta + (N_{sp1} + N_{sp2}) \sin \theta \quad (1)$$

$$r_{p1} = Q_{p1} / H \quad (2)$$

$$r_{sp1} = (Q_{sp1} \cdot \cos \theta + N_{sp1} \cdot \sin \theta) / H \quad (3)$$

$$r_{sp2} = (Q_{sp2} \cdot \cos \theta + N_{sp2} \cdot \sin \theta) / H \quad (4)$$

$$r_{sp1a} = N_{sp1} \cdot \sin \theta / H \quad (5)$$

$$r_{sp2a} = N_{sp2} \cdot \sin \theta / H \quad (6)$$

ここで、直杭 P1 の水平力負担率 ( $r_{p1}$ ) は全水平抵抗力の 24% 前後で推移し、斜杭 SP1 : IN 杭 ( $r_{sp1}$ ) で平均 39%、SP2 : OUT 杭 ( $r_{sp2}$ ) で平均 37% を負担している。また斜杭の負担率のうち、軸力の水平成分は IN 杭 ( $r_{sp1a}$ ) で平均 17%、OUT 杭 ( $r_{sp2a}$ ) で平均 18% を占めており、それらを合計すると全水平抵抗力の 3 割強を斜杭の軸力によって負担していた。また、斜杭の負担率は初期では IN 杭 > OUT 杭であるが、変位の増加にともなって IN 杭は低下、OUT 杭では増加し水平変位 5mm 付近で逆転する。これは、杭同士の相互作用 (群杭効果) の影響とロッキング変位による影響が水平変位量に依存して変動することが原因と考えられるが、詳細は今後の検討課題である。日本港湾協会「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>5)</sup> では IN 杭の水平地盤反力係数 > OUT 杭の水平地盤反力係数としており、本実験における小変位時の傾向と対応していると考えられる。

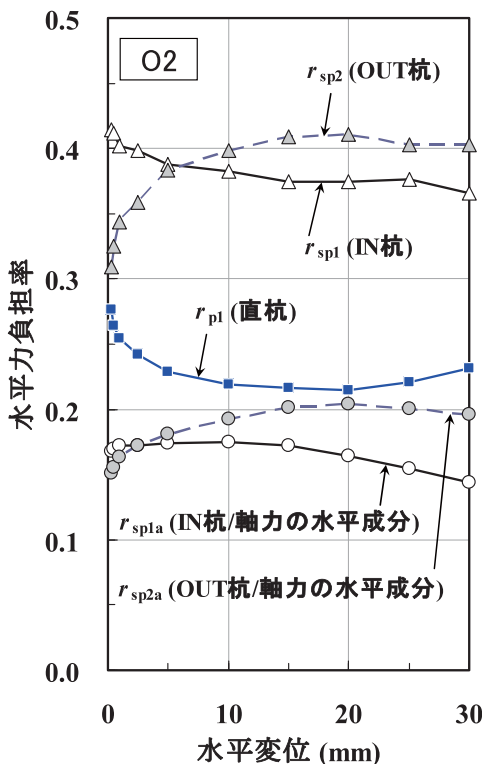


図-11 試験体 O2 の水平負担率の推移

(2) 水平地盤反力係数の評価

斜杭組杭を構成する各杭について、突出長 0.15m、O1、O3 は杭頭自由、O2 は杭頭固定、一様地盤、として、弾性支承梁の理論式により水平地盤反力係数  $k_h$  を算出した。杭頭水平力は各杭の地表面付近での負担力とし、単杭直杭は載荷重  $P$  を、組杭直杭は試験時の最上断面のひずみ量に基づいて求めたせん断力  $Q$  を、斜杭はせん断力  $Q$  と軸力  $N$  (杭長分の平均値) の水平分力の和を用いる。

図-12に各杭の逆算  $k_h$  と地表面変位  $y_0$  との関係、および水平地盤反力度  $p = k_h \cdot y_0$  として求めた各杭の  $p$ - $y_0$  関係を示す。10mm 前後の変位における  $k_h$  は大きく 2 つのグループに分けられ、直杭と O3 の斜杭は大局的には同程度の値を示すが、全般に O3 の方が小さい。一方、O2 試験体の斜杭 SP1・SP2 は  $k_h \cdot p$  は他の杭に比べて大きな値を示すが、載荷が進むにつれ OUT 杭 (SP2) が IN 杭 (SP1) よりも大きな値になる。

表-3に杭径の 1% 相当・3% 相当・10mm の変位に対応する  $k_h$  と (7) 式<sup>6)</sup> で求めた変位 10mm 相当の基準水平地盤反力係数  $k_{h0}$  とあわせて示す。O2 斜杭は全般に大きな  $k_h$  を示し、軸力による水平抵抗への寄与

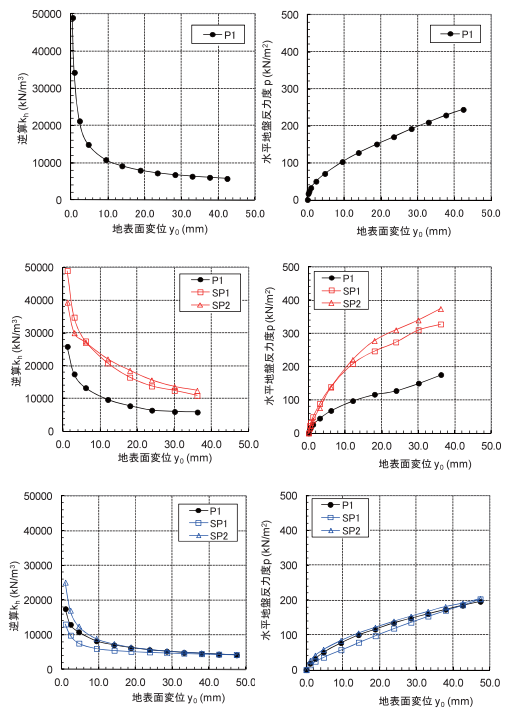


図-12 水平地盤反力係数・地盤反力度と変位の関係

表-3 水平地盤反力係数の比較

(単位: MN/m<sup>3</sup>)

対象	対象	実測値			計算値
		$k_{h1\%}$	$k_{h3\%}$	$k_{h10mm}$	
O1	P1	23.1	13.6	11.0	16.0
	P1	18.7	11.3	9.3	
O2	SP1	37.2	25.0	20.7	
	SP2	32.6	25.0	22.2	
O3	P1	13.8	9.1	7.7	
	SP1	9.9	7.3	6.4	
	SP2	17.8	10.7	8.8	

が明らかである。また、荷重直交方向に杭を傾斜 (O3) させた場合、斜杭の水平抵抗は直杭と変わらず、変位が 10mm 程度の範囲では、杭の傾斜方向 (IN・OUT) の影響は小さいことがわかる。

$$k_{h0} = \alpha \cdot E_0 \cdot D_p^{-3/4} \quad (7)$$

$\alpha$  : 調査方法と土質から決まる係数=80

$E_0$  : 地盤の変形係数=2,000kN/m<sup>2</sup>

(孔内水平荷重試験結果に基づく推定値)

$D_p$  : 無次元化杭径=21.63

また、一般に水平力を受ける杭の  $p$ - $y_0$  関係は小さな変位領域から非線形性を示し、例えば (8) 式 of 双曲線でモデル化できることが知られている<sup>7)</sup>。

$$p = \frac{k_{hi} y}{1 + \frac{k_{hi} |y|}{p_{max}}} \quad (8)$$

$p_{max}$  : 最大地盤反力度 (kN/m<sup>2</sup>)

$k_{hi}$  : 初期剛性 (kN/m<sup>3</sup>)

そこで、20 例余りの直杭の実大水平荷重試験結果から統計的に導かれた  $k_{hi}$  と  $k_{h0}$  との相関式<sup>7)</sup>  $k_{hi} = 1.49 \times k_{h0}$  と試験場所の埋土層で得られた土質試験結果 ( $q_u = 70\text{kN/m}^2$ ,  $p_{max} = 9c_u$ ) を適用して求めた双曲線モ

デルによる  $p$ - $y_0$  関係を、O1 試験体の実測値とあわせて図-13 に示す。双曲線モデルは、 $y = 10 \sim 30\text{mm}$  付近では実測値とやや異なる傾向を示すが、全体ではほぼ対応しており、同相関式を用いて  $p$ - $y$  関係を推測可能であることが本実験でも確認された。

### (3) 室内水平荷重試験

図-14 に模型基礎試験体 Is2 における直杭 P1 (既存杭を想定) および斜杭 SP2 (補強杭を想定・OUT 杭) のひずみ測定値から算定したせん断力  $Q$ ・軸力  $N$ ・曲げモーメント  $M$  分布を示す。ここで、直杭 P1、斜杭

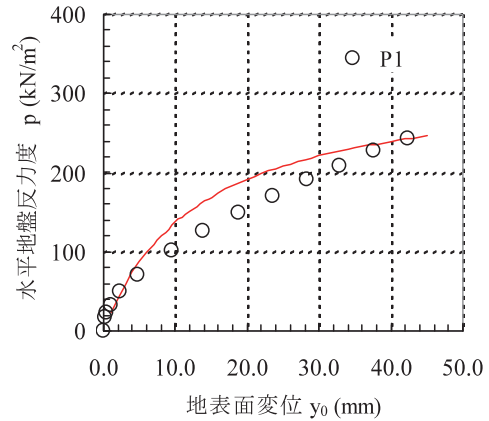


図-13 p-y 関係の比較

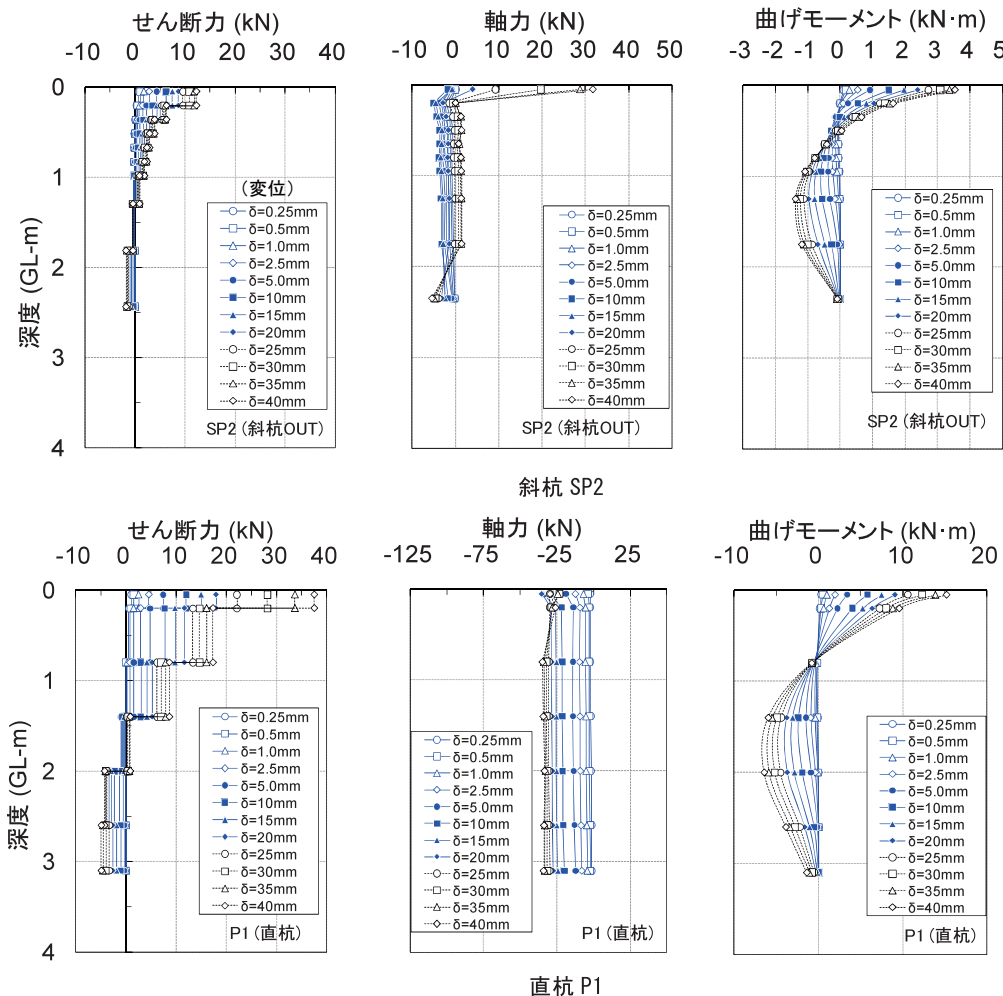


図-14 Is2 試験体の Q、N、M の分布

SP2とも曲げモーメントは杭頭で最大値を示しており、杭頭は固定に近い条件で載荷できていたと考えられる。また、いずれも軸力が杭先端までほぼ一様で、杭周囲の摩擦抵抗はほとんど発揮されていないと考えられる。これは、本実験地盤が低液性限界の砂質シルトであり、一度回転貫入で施工時に乱されると強度低下を生じやすい鋭敏な軟弱地盤であるからだと考えられる。直杭と斜杭 SP2 を比較するとせん断力および曲げモーメントは同様な傾向であるが、軸力は SP2 の方がやや大きく、基礎全体の水平抵抗の一部を軸方向力により負担していると考えられる。

図-15 に模型基礎試験体 Is2 の直杭 4 本分の水平力負担率  $r_{p1-p4}$  と斜杭各 1 本の水平力負担率  $r_{sp1}$  (IN 杭)、 $r_{sp2}$  (OUT 杭)、および斜杭の軸力の水平成分の割合  $r_{spa}$  と同せん断力の水平成分の割合  $r_{sps}$  と水平変位の関係を示す。それぞれの負担率の定義については図中を参照されたい。 $\theta$  は杭の傾斜角である。

ここで、直杭の水平力負担率  $r_{p1-p4}$  は全水平抵抗力  $H$  の 82% 前後、斜杭はともに 9% 前後であるが軸力の水平成分がこのうちの 20% 程度で推移している。直杭 ( $\phi 114.3, t=4.5$ ) の負担率を 1 本あたり 20.5% とすると、斜杭 ( $\phi 76.3, t=2.8$ ) との負担率の比は 2.27 倍と断面積比とほぼ同等かやや大きな水平力を負担しており、軸力が水平抵抗に寄与していると考えられる。

土木構造物では斜杭を支持層に根入れする使用方法が一般的で軸方向力による負担が主となるが、先端が軟弱層にある本実験結果では、せん断力の負担割合が 80% 程度と軸方向力の負担が小さい。耐震補強の場合は敷地や施工機械の制約から杭先端が支持層に達しないような使用方法になることも想定され、回転貫入杭では施工の影響により周面摩擦が低下する可能もあり、先端翼を大きくするなど先端部で軸方向の抵抗力を高くすることでより効果的な耐震補強とすることが必要と考えられる。

### 5. 斜杭工法の水平抵抗機構の評価

以上の試験結果に基づき、特に原位置水平載荷試験 O2 試験体の結果を中心に以下の手順からなる水平抵抗機構の評価手法を構築した。

- ①斜杭の杭軸直交方向剛性 ( $K_h$ ) および杭軸方向剛性 ( $K_v$ ) の評価
- ②力と変形の釣合いから杭軸直交方向力 ( $Q$ ) および杭軸方向力 ( $N$ ) の算定、
- ③単杭としてのはり-ばねモデルあるいは弾性支承ばりの式による応力解析・応力評価

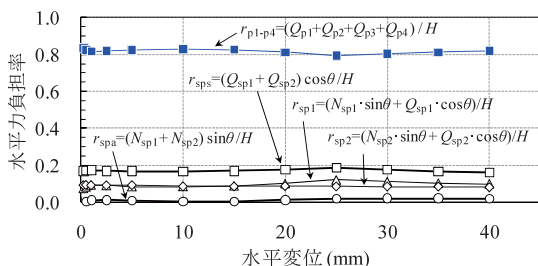


図-15 Is2 試験体各杭の水平力負担率の推移

ここで示した方法は、回転貫入杭で施工された IN 杭と OUT 杭で構成され、杭頭で拘束された 1 組の斜杭組杭を対象として、構成する杭の杭軸直交方向剛性および杭軸方向剛性に基づいて水平抵抗を評価する手法である。傾斜角は今回実験を行った 15 度以下を適用範囲とする。なお、この方法以外でも、①の地盤ばねを用いて基礎構造全体をモデル化した応力解析モデルを用いて直接算出することも可能である。

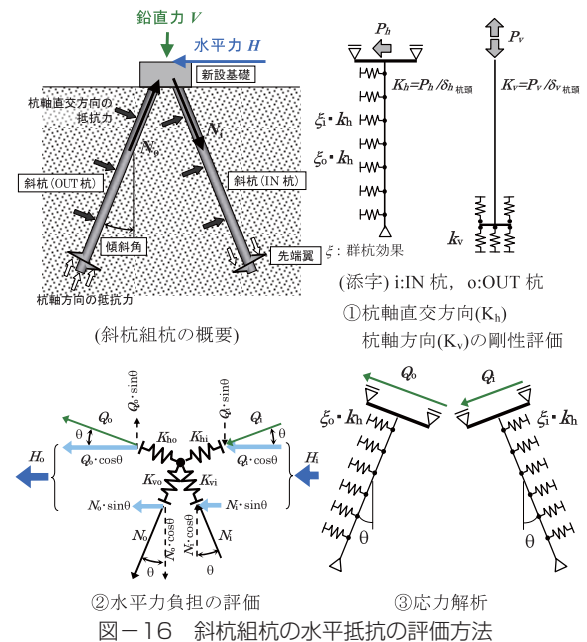
#### ①杭軸直交方向剛性 ( $K_h$ ) および杭軸方向剛性 ( $K_v$ ) の評価

斜杭の剛性を評価するための地盤ばねは、1) 載荷試験による実測値、2) 既往の基準類\* 地盤反力係数 (水平  $k_h$ ・鉛直  $k_v$ ) の設計式を用いた算定値、のいずれかを用いる。(\* 日本建築学会「建築基礎構造設計指針」、日本道路協会「道路橋示方書」、鉄道構造物等設計標準」等)

設計式を用いる場合は、傾斜角が 15 度以内であることを考慮して、直杭の式をそのまま用いてよいものとし、杭軸直交方向剛性 ( $K_h$ ) は、双曲線モデル等で  $k_h$  の非線形性を考慮した上で、弾性支承ばりの計算式もしくははり-ばねモデルを用いて算定する。杭軸方向剛性 ( $K_v$ ) は  $k_v$  と載荷面積から算定した先端地盤抵抗・杭軸剛性を集約した 1 つの線形ばねとして評価する。

#### ②組杭の杭軸直交方向力 ( $Q$ ) および杭軸方向力 ( $N$ ) の算定

組杭の荷重負担割合は、日本港湾協会「港湾の施設の技術上の基準・同解説」<sup>5)</sup> を参考に、本工法では杭頭で拘束されていることから組杭の水平変位は等しく鉛直変位は生じないとみなして評価できるものと考え、①で算定した  $K_v$  および  $K_h$  を用いて、図-16 に示すような杭頭における力の釣合いと変位の適合条件から OUT 杭・IN 杭それぞれの負担水平力  $H$  を (9) (10) 式で算定する。 $\theta$  は斜杭傾斜角、添字  $o$  は OUT 杭、 $i$  は IN 杭である。



$$H_o = Q_o \cos \theta + N_o \sin \theta = Q_o \left( \cos \theta + \frac{K_{vo}}{K_{ho}} \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \sin \theta \right) \quad (9)$$

$$H_i = Q_i \cos \theta + N_i \sin \theta = Q_i \left( \cos \theta + \frac{K_{vi}}{K_{hi}} \frac{\sin \theta}{\cos \theta} \sin \theta \right) \quad (10)$$

$H_o, H_i$  : OUT 杭・IN 杭の負担水平力  
 $Q_o, Q_i$  : OUT 杭・IN 杭の杭頭せん断力  
 $N_o, N_i$  : OUT 杭・IN 杭の杭頭軸方向力  
 $K_{vo}, K_{vi}$  : OUT 杭・IN 杭の軸方向剛性  
 $K_{ho}, K_{hi}$  : OUT 杭・IN 杭の軸直交方向剛性

なお、組杭杭頭では鉛直変位を拘束するため鉛直反力が生じることから、耐震補強工法としての設計ではこの反力に対する既存躯体との接合部の設計が必要である。

③本手法による応力解析結果と実験結果 (O2) の比較

本手法では②により得られた負担力に対してそれぞれ単杭として応力解析を行うが、検証のため O2 試験体の実験結果との比較を行った。

杭軸直交方向地盤反力係数  $k_h$  は直杭 (O2 試験体の P1) の載荷試験結果から得られた水平地盤反力  $p$ -水平変位  $y$  関係と双曲線モデルが一致するよう初期の水平地盤反力係数  $k_{hi}$  および基準変位  $y_p$  を決定し、杭軸直交方向剛性 ( $K_h$ ) を求めた。杭軸方向剛性 ( $K_v$ ) は O2 試験体の荷重-変位関係から杭軸直交方向剛性  $K_i$  との比を求めた結果、 $K_v$  と  $K_h$  の比は変位量、傾斜方向によらずほぼ 10 となったことから、OUT 杭・IN 杭とも  $K_v = 10 \cdot K_h$  とした。

図-17 に各杭の杭頭せん断力  $Q$  と杭頭水平変位  $\delta$  関係の実験値との比較、図-18 に (9)、(10) 式により算定した各杭の負担水平力  $H$  と杭頭水平変位  $\delta$  関係の実験結果との比較を、図-19 に杭頭水平変位  $\delta = 10, 20, 25\text{mm}$  時の曲げモーメントの比較を示す。結果はほぼ対応しており、ここで示した適用条件・適用範囲においては本手法によって負担水平力および発生応力の算定が可能と判断される。ただし、本検討では実験結果を参考に杭軸方向剛性 ( $K_v$ ) と杭軸直交方向剛性  $K_h$  との比を一律  $K_v = 10 \cdot K_h$  として算定したが、実設計時には組杭の設計水平力に対して地盤の非線形性を考慮した適切な  $K_v$ 、 $K_h$  の評価が必要となる。設計式による地盤反力係数の評価を行う場合、軸直交方向 (水平) 地盤反力係数は双曲線モデルでおおむね評価可能であると考えられるが、杭軸方向 (鉛直) については単杭直杭では押し込みと引抜き側で地盤反力が異なる<sup>8)</sup> のに対し、前述のように今回実施した斜杭組杭の載荷試験によればほぼ同等で杭軸直交方向と一定の比率となった。載荷試験は一例であり、特に杭軸方向の負担については、本工法の特徴を考慮して安全側となるような設定が必要である。また、本工法の適用上、IN 杭と OUT 杭、また補強杭と既存杭は近接して配置されるので、杭間距離により影響係数に基づく群杭効果<sup>9)</sup> を考慮することも考えられる。

ここで示した斜杭工法の水平抵抗機構については

AIS (Additional Inclined Screw) -Pile 工法として、一般財団法人ベターリピングの技術評定を取得している。

6. まとめ

- 杭軸方向の水平力に対する抵抗が期待できる斜杭は直杭に比べて大きな水平剛性を確保できるため、負担水平力も大きい。ただし、地盤によっては (特に軟弱地盤) 回転貫入杭の杭軸方向の抵抗はほとんど先端抵抗、すなわち先端地盤の強度・剛性に依存するため、性能と打設コストとの関係を考慮して打設深さを設定することが重要である。
- 斜杭の傾斜角が 15 度程度以下であれば、杭軸直交方向 (水平) および杭軸方向 (鉛直) の地盤反力は直杭の評価式を用いて評価可能である。ただし、杭軸方向 (鉛直) の地盤反力は単杭の場合と斜杭組杭では性状が異なる可能性があり、今後のデータの蓄積が必要であるが、設計上は安全側となる設定とす

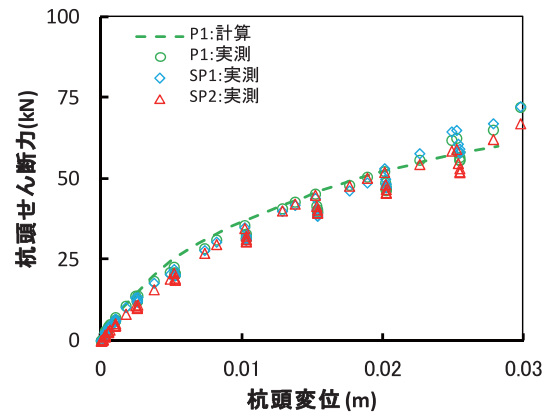


図-17 杭頭せん断力-杭頭水平変位関係の比較

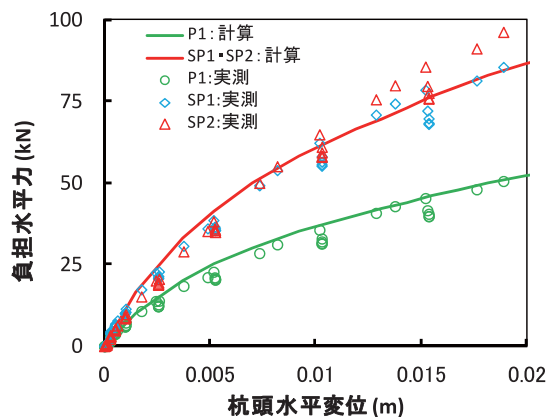


図-18 負担水平力-杭頭水平変位関係の比較

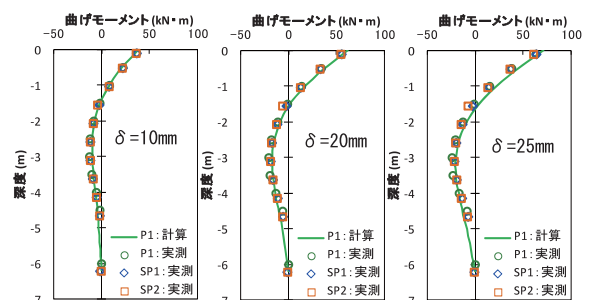


図-19 曲げモーメントの比較



る必要がある。

- ・耐震補強のための増し杭として用いる場合のように杭頭の鉛直変位が拘束される条件では、既往の直杭で用いられる設計式に組杭間の相互作用(群杭効果)を考慮した地盤反力を用いて、斜杭組杭杭頭の力の釣り合いと変位の適合条件から各杭の負担水平力・発生応力を評価可能である。
- ・今回の実験は小口径のらせん形状の先端翼を持つ回転貫入杭を用いており、斜杭の傾斜角は15度で一定である。これ以外の杭工法や異なる傾斜角の場合の適用性は今後の検討課題である。

#### 参考文献

- 1) 金子 治他：基礎構造の耐震補強工法の開発（その1 大型土槽実験）、戸田建設技術研究報告、第36号、2010
- 2) 金子 治他：杭基礎の耐震補強のための増し杭工法に関する研究（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1、pp.553-556、2010
- 3) 神永敏幸他：増し杭工法による杭基礎の耐震補強効果に関する振動実験（その1～3）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1、pp.557-562、2010
- 4) 金子 治他：杭基礎の耐震補強のための増し杭工法に関する載荷試験、第13回日本地震工学シンポジウム、2010
- 5) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2007
- 6) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、p.277、2001
- 7) 小林恒一他：既往の水平載荷試験結果に基づく単杭の水平地盤反力係数（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1、pp.563-566、2010
- 8) 建設技術審査証明事業（一般土木工法）報告書「スクリーパイル EAZET 工法（小口径・回転杭工法）」
- 9) 成田修英他：杭位置の影響を考慮した群杭の非線形水平地盤ばね簡易評価手法、日本建築学会構造系論文報告集、No.676、pp.877-882、2012

