

# 斜杭を有する群杭基礎の静的水平支持力特性

木村 亮<sup>1</sup>・牧野 洋志<sup>2</sup>・大川 賢紀<sup>3</sup>・亀井 宏之<sup>4</sup>・張 鋒<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 京都大学大学院 助教授 工学研究科土木工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

<sup>2</sup>正会員 工修 清水建設(株) 本社 (〒105-8007 東京都港区芝浦 1-2-3) (元京都大学大学院生)

<sup>3</sup>正会員 工修 三菱重工業(株) 高砂研究所 (〒676-8686 高砂市荒井町新浜 2-1-1)

<sup>4</sup>正会員 工修 三菱重工業(株) 神戸造船所 (〒652-8585 神戸市兵庫区和田崎町 1-1-1)

<sup>5</sup>正会員 工博 岐阜大学 助教授 流域圏科学研究センター (〒501-1193 岐阜市柳戸 1-1)

ジャケット式鋼管杭基礎は、従来基礎のフーチングをジャケット構造に置き換え、基礎と上部構造の一体化により、杭基礎の負担を軽減できる合理的な構造形式である。さらに、斜杭を適切に配置することにより、水平抵抗力と剛性を効率良く増強できる。本論文では、斜杭を有する群杭の水平支持性能および終局挙動を把握するため、遠心載荷装置を用いた群杭の水平載荷試験および正負交番水平載荷試験を行い、その力学挙動を詳細に調査した。また、3次元弾塑性有限要素解析コード GPILE-3D により、斜杭の角度や杭間隔が群杭の支持力特性に与える影響を解析的に評価した。

**Key Words :** steel pile foundation, pile group, lateral loading test, cyclic load test, centrifuge model test, 3-D finite element analysis

## 1. まえがき

防波堤、栈橋などの港湾構造物や海底油田掘削プラットフォームなどの海洋構造物は、波圧や係船時の衝撃等の水平外力が頻繁に作用することから、水平外力に抵抗しやすい斜杭を組み合わせた群杭が用いられることが多い。一方、海上橋基礎などの重要構造物には、実績のあるケーソン基礎や直杭の群杭で支持するフーチング基礎が採用されており、地震や風などの水平外力に抵抗するために、積極的に斜杭を利用した群杭基礎が施工された例はこれまでにない。従来の海上橋基礎は、基礎自体の自重が膨大であり、基礎幅を広げることにより安定性を確保する構造であるため、海底面の掘削や地盤改良を広範囲にわたって行う必要があり、工期、経済面で課題は多い。

これらの課題を克服し得る合理的な基礎構造として、図-1に示すジャケット式鋼管杭基礎が提案されている<sup>1)</sup>。ジャケット式鋼管杭基礎は、従来基礎のフーチングを省き、鋼管をブレースでつなぎ合わせたジャケット構造を用いて、杭基礎と上部構造を一体化することにより構造物の重量を大幅に低減する基礎形式である。したがって、地震力と自重による基礎への負担を軽減できる上、軟弱地盤上に設置する場合にも地盤改良が不要になる。さらに、基礎と地盤を固定するメインパイルに斜杭を用いることによ

り、水平外力に対して効率良く基礎の支持力と剛性を増強できる。しかし、現行の杭基礎の設計における斜杭の取り扱い、水平力を斜杭の杭軸方向と杭軸直角方向へと分解しそれぞれの方向での耐力を照査することどまっておき<sup>2)</sup>、斜杭の支持力特性を有効に活用できる設計体系が確立されていない。

斜杭に関する従来の研究は、港湾構造物への適用を目的とした組杭の挙動に関するものが主で<sup>3), 4)</sup>、斜杭の群杭基礎に関する事例は極めて少ない。その一つに、McVayらの遠心模型実験による研究<sup>5)</sup>がある。McVayらは、地盤の密度や杭間隔をパラメータとし

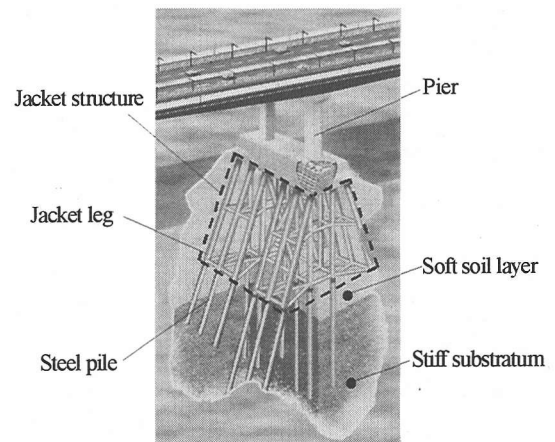


図-1 ジャケット式鋼管杭基礎

て、直杭あるいは斜杭のみで構成された3×3の9本群杭の水平支持力を比較し、水平外力に対する斜杭の優位性を示している。しかしながら、杭の設計時に重要な杭の断面力や荷重分担特性など未解明な点が多い。また、先の阪神大震災において、組杭式栈橋の被害が報告された<sup>6)</sup>ことから、斜杭を有する群杭基礎の終局メカニズムを調査することは極めて重要である。そこで、本研究では、遠心載荷装置を用いた群杭の一方向水平載荷試験および正負交番水平載荷試験を行い、斜杭を有する群杭基礎の水平支持力特性について、微小変形から終局状態まで詳細に調査した。また、斜杭の傾斜角や杭間隔が群杭の水平支持力特性に与える影響を解析的に評価するため、杭と地盤の相互作用を考慮できる3次元弾塑性有限要素解析をあわせて行った。

## 2. 検討対象

斜杭を有する群杭の力学挙動を把握するため、図-2に示すように、直杭のみで支持された群杭（以下直杭群杭と呼ぶ）と、斜杭と直杭を組み合わせた群杭（以下斜杭群杭と呼ぶ）の2種類の群杭を対象として検討した。本研究における斜杭群杭は、直杭2本を基礎の内側に、斜杭2本を外側に配置した4本群杭を基本構造とした。一方向水平載荷試験では、基本構造である4本1列の計4本の群杭、大変形域まで繰り返して群杭を載荷する正負交番水平載荷試験では、載荷途中に模型の挙動が不安定になる危険性があるため、実験時の安全性を考慮して4本2列の計8本の群杭とした。実験および解析における群杭のパラメータは、内側の杭間隔 $s_1$ 、外側の杭間隔 $s_2$ 、ならびに基礎の外側に配置する杭の傾斜角 $\theta$ とした。斜杭の傾斜角は図-2において左右同じである。なお、図-2に示す群杭は、実質的には多柱式基礎と同様の支持形態となるので、実設計にあたっては、杭の自由長、地

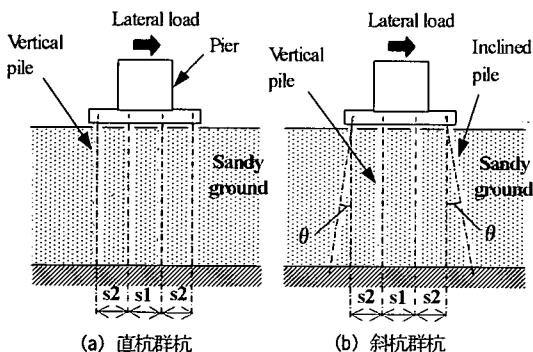


図-2 群杭の基礎形式

盤の浅層の影響を考慮すべきであるが、本論文では、斜杭を有する群杭基礎において、まだ十分解明されていない水平支持力特性における杭間隔と斜杭の傾斜角の影響を把握することに着目し、均質な砂地盤において評価した。

## 3. 遠心模型実験

### (1) 遠心載荷装置

遠心模型実験は、縮尺 $1/n$ の模型に重力加速度の $n$ 倍の遠心加速度を作用させ、模型内に実物と同様の自重応力状態を再現することで、実物大実験と等価な結果を得ることを目的とする。本手法によれば、力学的相似則と幾何学的相似則を同時に満足させることができるため、実物大での力学挙動を把握したい場合に、経済的かつ効率的にデータを取得できる点で優れている。本研究では、このような利点を生かし、実地盤に近い応力状態で、斜杭を有する群杭の力学挙動を詳細に調査した。実施した試験は、杭の変形が弾性範囲内での一方向水平載荷試験と、杭の終局状態まで載荷を続けた正負交番水平載荷試験である。これら一連の試験は、京都大学防災研究所の遠心載荷装置を利用して、遠心加速度 $60G$ 下で実施した。遠心載荷装置の主な仕様は、有効回転半径 $2.5m$ 、最大遠心加速度 $200G$ 、最大塔載重量 $120kg$ 、搭載容量 $24G \cdot ton$ である。

### (2) 一方向水平載荷試験

#### a) 供試体

遠心載荷装置に搭載する供試体を図-3に示す。実験土槽は、寸法が長さ $520mm$ 、幅 $240mm$ 、高さ $430mm$ の鋼鉄製箱形の容器である。群杭は4本直列で配置し、各杭を載荷方向に対して前方から1, 2, 3, 4と番号をつけた。以下、杭1などと表す。杭先端は十分硬い支持層に根入れしていると想定し、土槽底面に固定した鉄板に長さ $1D$  ( $D$ : 杭径、以下杭径を $D$ と記す)分杭を差し込んでいる。したがって、本実験における杭先端の支持条件は、押し込み側で拘束、引抜き側で自由となっている。杭頭部は十分剛性が大きい鋼製治具で固定（図中ではフーチングと称した）した上に橋脚模型を結合し、この橋脚模型を水平に載荷した。載荷高さは地表面から $120mm$ （実物換算値 $7.2m$ ）とした。実際には、ジャケットと海底面間の面接触はほとんどないため、地盤と直接フーチングが接しないようフーチング下部には気中部分を設けた。また、本試験では、水平力に対する群杭の挙動

を把握することに主眼を置いているため、橋脚模型の重量は、載荷点での剛性を保てる程度に軽くした。載荷方法は、モータを用いて、スライダにて動力を伝達し、載荷速度1.0mm/minで変位制御を行った。スライダにはねじが切っており、モータに取り付けたベベルギヤとかみ合っている。このため、モータの回転によりスライダが水平に押し出され、スライダ先端に取り付けられたロードセルによって載荷荷重を計測できるようになっている。

#### b) 模型地盤および模型杭

模型地盤の作成法には、スリット幅を調整できるホッパーを用いて地盤材料を実験土槽の上から一定の高さで落下させる気中落下方式を採用した。地盤材料には乾燥状態の豊浦砂（平均粒径0.16mm）を使用し、相対密度90.8%、間隙比0.638の密な地盤を作成した。模型地盤の層厚は310mmとした。模型地盤の物性値を表-1に示す。模型杭の諸元をプロトタイプ換算値とともに表-2に示す。模型杭は、実物で鋼管杭を想定し、曲げ剛性を等価なものとするに着目して、外径15mm、板厚1mmの真鍮パイプ（表面粗さ $12\mu$ 以下）を使用した。なお、既往の研究<sup>7,8</sup>により、群杭の水平挙動を評価する場合、杭と地盤の相対剛性が重要な要素であることがわかっているため、本論文では、その研究結果を十分考慮し、実物と同様の自重応力状態にある模型地盤において、実物の鋼管杭と等価な曲げ剛性をもつパイプ材料を選定して模型実験を行った。

#### c) 実験ケース

実験に使用した模型群杭を表-3に示す。模型群杭は、杭中心間隔がすべて2.5Dかつすべて直杭としたCase1、Case1の群杭の外側に配置した直杭（杭1および杭4）を傾斜角10度の斜杭に置き換えたCase2、さらにそれらの杭中心間隔 $s_1$ 、 $s_2$ をそれぞれ3.75D、6.25Dに広げたCase3、Case4の4パターンとした。なお、本実験における斜杭の傾斜角度は、実績のある杭打ち機の最大斜杭打設角度が30度<sup>9</sup>であることから、施工面において十分現実的な角度を選定した。また、直杭群杭では、杭間隔を広げることにより、杭間の干渉による地盤抵抗の低下を抑制できるため、群杭としての水平支持力を増加するのに有効であることが知られている<sup>10</sup>。本研究では、斜杭群杭においてもその有効性を確認するため、道路橋で標準的な杭間隔2.5Dとそれよりも大きな杭間隔を選定し、水平支持力における杭間隔の影響を調査した。

#### d) 実験方法および計測項目

図-3に示す供試体を遠心載荷装置のプラットフォームに搭載し、遠心加速度60Gで保持後、モータを駆動して橋脚模型に杭径の10%の変形が生じるまで

載荷し、その後除荷するようにした。計測項目は、載荷点における水平荷重、変位に加え、各杭の杭頭部に発生した軸ひずみ、せん断ひずみとした。軸ひずみ、せん断ひずみの計測には、それぞれクロスゲージ、ロゼッタゲージを使用した。

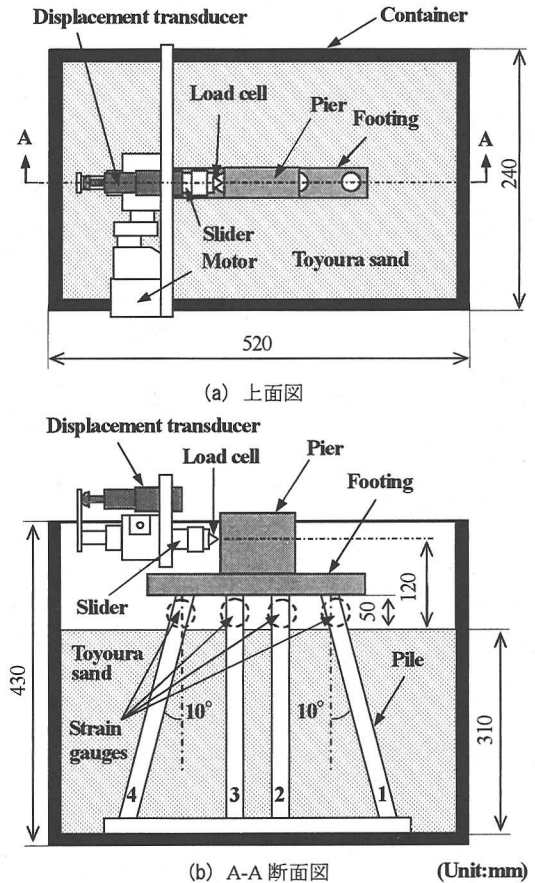


図-3 一方向水平載荷試験の供試体

表-1 模型地盤の物性

項目	諸値
土粒子の密度	25.9 kN/m <sup>3</sup>
単位体積重量	15.8 kN/m <sup>3</sup>
間隙比	0.638
相対密度	90.8 %

表-2 一方向水平載荷試験の杭の諸元

項目	模型杭	プロトタイプ換算
杭長	0.380 m (直杭)	22.80 m (直杭)
	0.404 m (斜杭)	24.24 m (斜杭)
杭径	15 mm	900 mm
板厚	1.0 mm	60 mm
ヤング率	$1.08 \times 10^8$ kN/m <sup>2</sup>	—
曲げ剛性	$1.17 \times 10^{-1}$ kNm <sup>2</sup>	$1.51 \times 10^6$ kNm <sup>2</sup>

表-3 模型群杭の種類

実験ケース	杭間隔	外側杭1,4	内側杭2,3
Case1	$s1=s2=2.5D$	直杭	直杭
Case2	$s1=s2=2.5D$	斜杭	直杭
Case3	$s1=3.75D, s2=6.25D$	直杭	直杭
Case4	$s1=3.75D, s2=6.25D$	斜杭	直杭

注) 斜杭の傾斜角はすべて10度。

(3) 正負交番水平載荷試験

a) 供試体

供試体を図-4に示す。実験土槽には、寸法が長さ480mm、幅250mm、高さ400mmの鋼鉄製箱形容器を使用した。ただし、土槽上部に嵩上げ部を設けることにより高さを445mmにした。模型群杭は、4本直列×2列の計8本の群杭とした。本実験は前述の一方向水平載荷試験と異なり、群杭の終局状態まで確認する必要がある。したがって、大変形域まで、かつ繰り返し載荷するため、載荷途中に群杭にねじれが生じるなど不安定な状態にならないよう杭を2列に配置した。なお、隣り合った列の杭中心間隔は2.5Dとした。杭先端および杭頭部の固定方法は一方向水平載荷試験時と同様である。実構造では、杭頭に死荷重によるモーメント、軸力が作用しているため、本実験においても実構造にできるだけ近い状態で群杭の水平挙動を確認できるよう、フーチング上部に橋脚模型およびウエイトを結合し、死荷重として各杭に降伏荷重の20%の軸力を導入した。載荷高さは地表面から85.4mmとし、フーチング下部には一方向水平載荷試験と同様気中部分を設けた。載荷装置は、一方向水平載荷試験でを使用したものと機構、制御方式は基本的には同じである。ただし、本実験では、群杭模型を交替載荷する必要があるため、図-4に示す載荷フレームによって模型を載荷し、載荷部に向かい合わせに取り付けた2つのロードセルで載荷荷重を交互に計測できるようにした。また、一方向水平載荷試験時よりも載荷荷重がかなり大きくなるため、フレーム部の剛性を十分確保した。なお、載荷時に群杭模型の回転を載荷フレームで制限するようないかなることもないように、図-4 (b) の紙面手前側および紙面奥側において、載荷フレームは群杭模型と接しないようにしている。

b) 模型地盤および模型杭

本実験における模型地盤の作成法、作成した模型地盤の物性は一方向水平載荷試験の場合と同様である。ただし、模型地盤の層厚は400mmとした。

模型杭は、杭の終局挙動まで調査できるように径厚比をできるだけ大きくするため、外径15.88mm、板

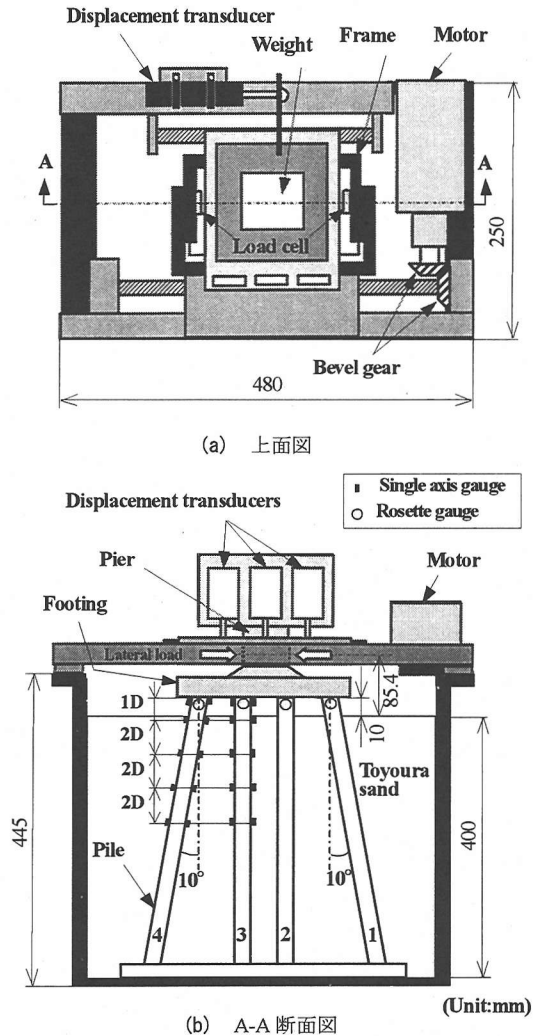


図-4 正負交番水平載荷試験の供試体

表-4 正負交番水平載荷試験の杭の諸元

項目	模型杭	プロトタイプ換算
杭長	0.440 m (直杭)	26.40 m (直杭)
	0.447 m (斜杭)	26.82 m (斜杭)
杭径	15.88 mm	952.8 mm
板厚	0.5 mm	30 mm
杭径/板厚	32	32
ヤング率	$1.08 \times 10^8 \text{ kN/m}^2$	-
曲げ剛性	$7.72 \times 10^{-2} \text{ kNm}^2$	$1.00 \times 10^6 \text{ kNm}^2$
降伏荷重	0.0067 MN	24.12 MN

厚は一方向載荷試験でを使用したものより薄い0.5mmの真鍮製パイプを使用した。模型杭の諸元をプロトタイプ換算値とともに表-4に示す。

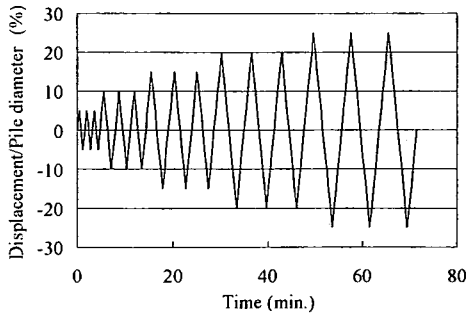


図-5 荷重パターン

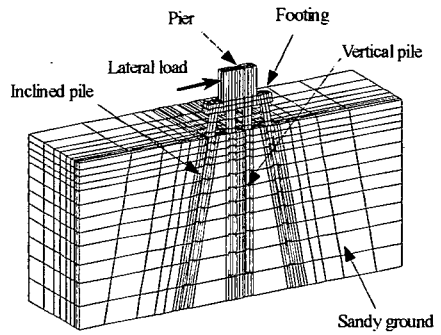


図-6 3次元弾塑性有限要素メッシュ

### c) 実験ケース

群杭は、一方向水平荷重試験の場合と同様に、表-3に示す杭配置となる2列8本群杭とし、Case1からCase4の4種類すべての形式について実験を行った。

### d) 実験方法および計測項目

本実験は、図-5に示す荷重経路に従った正負交番水平荷重試験とした。まず、杭径の5%の変位までの繰り返し荷重を3サイクル行った後、引き続いて杭径の10%の変位までの繰り返し荷重に移るといふ具合に、3サイクルの繰り返し荷重を5%刻みで変形量を増加させていき、最大杭径の25%まで荷重した。なお、荷重速度は2mm/minとした。計測項目は、荷重点における水平荷重、変位に加え、3つの変位計を用いてフーチングの回転角を計測した。杭のひずみ計測位置は図-4に示したとおりである。各杭の杭頭部に発生した軸ひずみ、せん断ひずみは、それぞれクロスゲージ、ロゼッタゲージで、杭の曲げひずみは1軸ゲージで計測した。

## 4. 解析内容

遠心模型実験における一方向水平荷重試験モデルを対象として、杭間隔および杭の傾斜角の影響を把握するため、3次元静的弾塑性有限要素解析コード(GPILE-3D)<sup>11),12)</sup>による検討を行った。本解析では、地盤を弾完全塑性体と仮定し、塑性構成式はDrucker-Pragerの破壊基準を降伏関数として、関連流れ則を適用して求めている。したがって、地盤はせん断変形すると、常に体積増加することになるが、地盤材料が密な乾燥砂であるため、今回の対象の場合は上記仮定で問題はない。杭周辺地盤の引張領域には、ある一定以上の引張応力が発生すると要素の弾性定数をゼロに近い値に低下させ、それ以上の引張応力を発生させないNo-Tension解析を行った。また、水平荷重下における群杭の挙動は、杭間の地盤と杭

表-5 解析に使用した物性値

要素	項目	諸値
杭	杭長	22.80 m (直杭) 24.24 m (斜杭)
	杭径	900 mm
	板厚	60 mm
	ヤング率	$1.08 \times 10^8$ kN/m <sup>2</sup>
	曲げ剛性	$1.51 \times 10^6$ kNm <sup>2</sup>
地盤	密度	15.8 kN/m <sup>3</sup>
	内部摩擦角	30 deg
	粘着力	0 kPa
	深さ方向のヤング率の勾配	1.47 MN/m <sup>3</sup>
	ポアソン比	0.33
	静止土圧係数	0.5

の相互作用を正しく取り扱うことが重要であるため、杭にはハイブリッド要素<sup>13)</sup>を用いて地盤中での杭の体積効果を表した。モデル化にあたっては、杭の断面は杭径と同じ長さの辺をもつ正方形として与え、既往の研究<sup>14)</sup>に示されるように、実杭の断面形状の影響を考慮してハイブリッド要素の曲げ剛性と軸剛性を調整した。なお、一方向水平荷重試験では、弾性範囲内での杭の水平挙動を調査しているため、本解析における杭は弾性要素とした。

図-6に、一例としてCase2の斜杭群杭の有限要素メッシュを示す。これは実験模型のプロトタイプにおいて、半断面領域をモデル化したものであり、節点数は7030、要素数は5832である。解析に使用した物性値を表-5に示す。なお、解析対象の地盤は砂地盤であるため、本解析における地盤のヤング率は、地表面をゼロとして深さ方向に増加するものと仮定し、あらかじめ遠心場で実施した単杭の水平荷重試験結果をもとに、その勾配を同定しその値を本研究における群杭の解析で使用した。

## 5. 一方向水平載荷時の支持力特性

### (1) 荷重－変位関係

図-7に載荷点における荷重と変位の関係を示す。変位は杭径で規準化した。杭間隔を広げると群杭の水平抵抗は増加し、同じ杭間隔でも斜杭を組み合わせるにより、水平抵抗が増加することがわかる。

図-8に杭間隔の拡大、斜杭の組み合わせによる荷重増加率を示す。なお、荷重増加率は式(1)で与えた。

$$R = \frac{H(\text{CaseB}) - H(\text{CaseA})}{H(\text{CaseA})} \times 100(\%) \quad (1)$$

ここに、 $R$ は荷重増加率、 $H(\text{Case}^*)$ はある載荷変位において、 $\text{Case}^*$ の群杭に作用する水平荷重とした。ただし、 $H(\text{CaseA}) < H(\text{CaseB})$ とする。つまり、荷重増加率 $R$ は、群杭に作用する水平荷重が小さい側を100%として、比較する2つのケース間の荷重差を表したものである。また、図-8の凡例において、Case1&Case2、Case3&Case4は斜杭を組み合わせたときの荷重増加率を、Case1&Case3、Case2&Case4は同じ基礎形式で杭間隔を広げた時の荷重増加率を表す。

これより、群杭の水平抵抗を増加させるには杭間隔を広げることよりも斜杭を組み合わせる方が効果的であることがわかる。斜杭による荷重増加率は、杭間隔が広い場合で50%弱、杭間隔が狭い場合には60~90%にもなる。過去に実施した杭頭自由条件での単杭の水平載荷試験<sup>15)</sup>において、直杭と傾斜角10度の斜杭の水平抵抗力を比較したが、その変化はさほど大きくなかったことから、斜杭を用いて水平抵抗を増加させるには、杭頭部の固定度が重要であると言える。

### (2) 水平力の荷重分担

全載荷段階において、各杭の水平力の荷重分担率

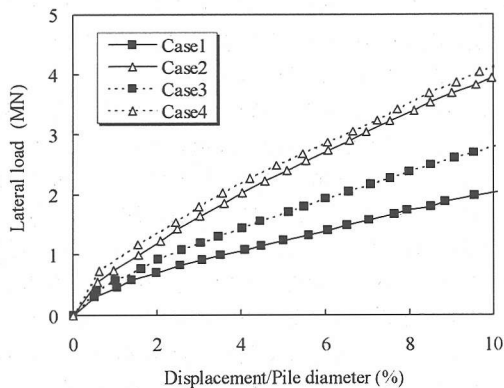


図-7 一方向載荷試験における荷重－変位関係

に大きな変化はなかったもので、ここでは、載荷点に杭径の10%の変位を与えたときの各杭の荷重分担を図-9に示す。Case1とCase3を比較すると、過去の研究<sup>11)</sup>に示されるように、いずれのケースも載荷方向に対して最前列の杭1の分担率が大きいですが、杭間隔を広げることによりその分担率が低減されるとともに、各杭の分担率が均等化する。斜杭を組み合わせた場合は、Case2に見られるように、杭間隔が狭い場合には杭1の分担率が極端に大きくなる。しかしながら、前述の直杭の場合と同様、杭間隔を広げることにより、杭1の分担は軽減される。以上より、斜杭は水平抵抗を増加させるのに有効であるが、杭間隔が狭い場合には、載荷方向最前列杭の荷重分担が極端に大きくなることもあるため、適切な杭間隔の確保が必要である。

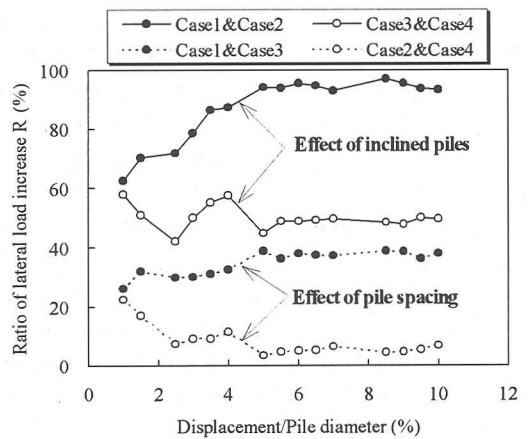


図-8 一方向載荷試験における荷重増加率

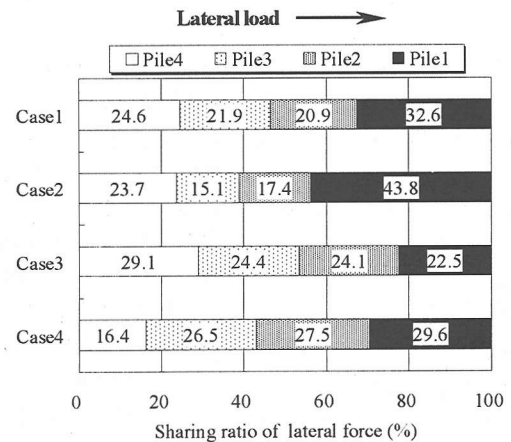


図-9 一方向載荷試験における杭径の10%変位時の各杭の水平力の荷重分担

### (3) 軸力発生パターン

図-10に杭径の1%、2.5%、5%、7.5%、10%変形時に各杭に発生した軸力を示す。軸力の符号は、圧縮側を正、引張側を負とした。各ケースとも圧縮側は杭1、引張側は杭4の軸力が大きい。直杭群杭と斜杭群杭の軸力発生パターンを比較すると、直杭群杭に比べ、斜杭群杭は両端に配置した杭1と杭4の斜杭に発生する軸力が大きく、特に杭間隔が狭いCase2は顕著である。これは、斜杭を組み合わせた場合に、群杭としての水平抵抗が増加するメカニズムを示すものである。すなわち、基礎に水平力が作用した場合に、直杭群杭は主に杭の曲げで抵抗するのに対し、斜杭群杭は両端の斜杭でトラス構造を構成できるため、斜杭の軸力で抵抗し易くなる。ただし、Case2のように、杭間隔が狭い場合には、斜杭に発生する軸力が極端に大きくなるので、Case4に示すように杭間隔を広げ、外側の斜杭の軸力を低減するような杭配置にするのが良い。

### (4) 解析によるパラメトリックスタディ

一方向水平載荷試験で実施したCase1~Case4の荷重-変位関係の解析結果を図-11に示す。杭間隔および斜杭の組み合わせによる水平抵抗の増加傾向が図-7の実験結果と良好に対応している。また、Case2およびCase4の傾斜角10度の斜杭群杭を対象に、杭間隔 $s_1=s_2=3.0D$ および $s_1=3.0D, s_2=5.0D$ の場合も加えて、杭1が分担する水平力を100%とした時の各杭の荷重分担を図-12に示す。この結果より、斜杭群杭においても杭間隔を広くとることで、分担率が均等化さ

れることが解析的にも確認された。

これまでの結果は、各群杭の支持性能を同一変位時において比較してきたが、例えば、Case1の直杭群杭とCase2の斜杭群杭を同一変位で比較すると、群杭に作用する荷重はCase2の方が約2倍大きい。群杭間で構造形式の合理性を比較するには、同一変位時の比較は妥当ではない。そこで、同一荷重作用時の群杭の支持性能を解析にて比較した。図-13に、同一荷重作用時の基礎両端に位置する杭1と杭4の傾斜角と基礎の水平変位の関係を示す。杭間隔は、 $s_1=s_2=2.5D, 3.0D$ および $s_1=3.0D, s_2=5.0D$ の計3ケースとした。載荷荷重は、本解析におけるCase1の直杭群杭が杭径の約10%変位したときの作用荷重2.94MNに統一した。同図より、傾斜角10度以上の斜杭を用いると、直杭群杭の半分以下に基礎の水平変位を低減できる。また、図-14に、杭1と杭4の傾斜角と、載荷方向最前列杭(杭1)の最大曲げ応力および最大軸応力の関係を示す。なお、各応力は杭頭で最大となる。同図より、傾斜角が大きくなると、斜杭の軸応力はある程度増えるが、断面力として支配的な曲げ応力を大幅に低減できることがわかる。

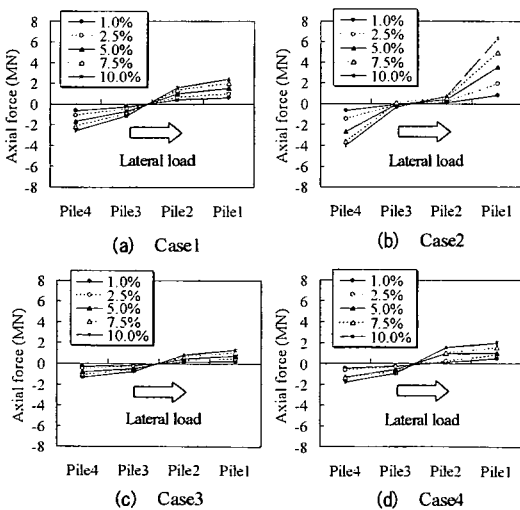


図-10 一方向載荷試験における杭径の10%変位時の各杭の軸力分布

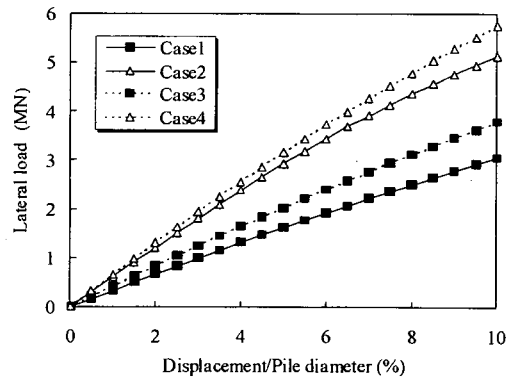


図-11 荷重-変位関係の解析結果

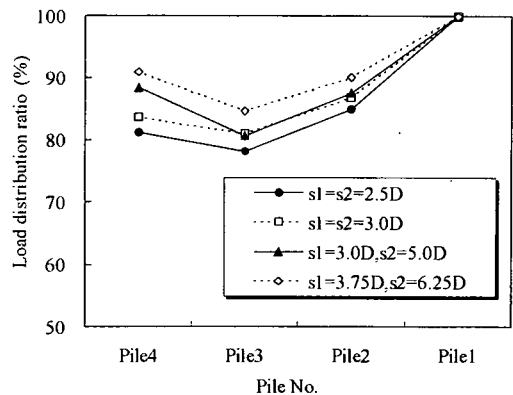


図-12 斜杭群杭における荷重分担の解析結果

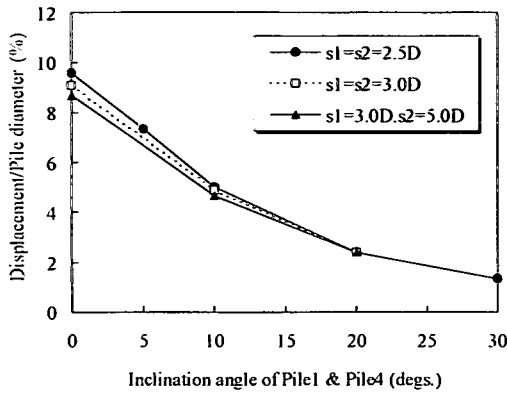


図-13 2.94 MN作用時の水平変位の解析結果

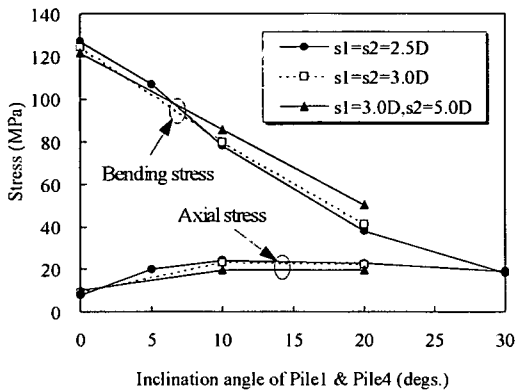


図-14 2.94MN作用時の杭断面応力の解析結果

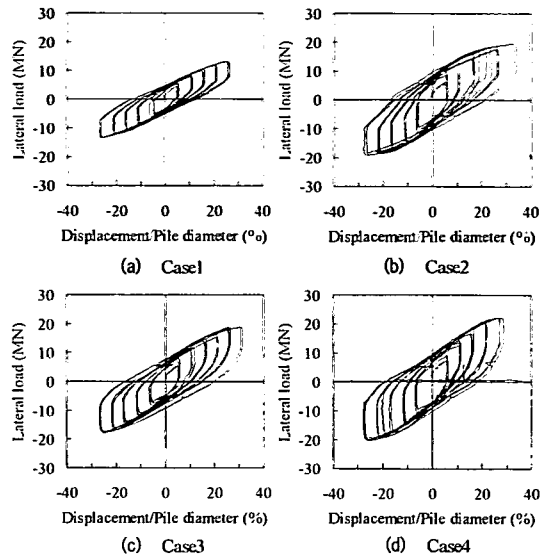


図-15 正負交番水平載荷試験における荷重-変位関係

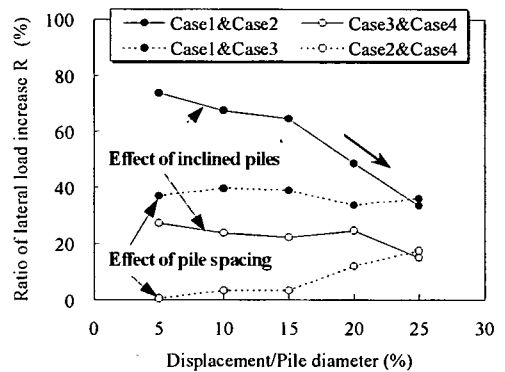


図-16 正負交番水平載荷試験における荷重増加率

## 6. 終局挙動

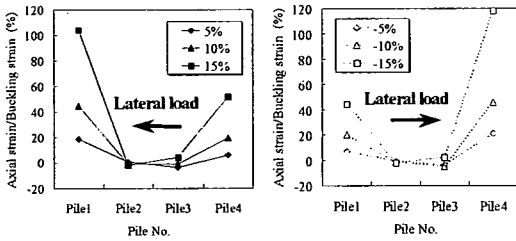
### (1) 荷重-変位関係

図-15に正負交番水平載荷試験での載荷点における荷重と変位の関係を示す。一方方向載荷試験結果と同様に、大変形時においても群杭の水平抵抗力は概ねCase4, Case2, Case3, Case1の順に大きい。

図-16に各載荷段階における荷重増加率を示す。荷重増加率は、図-15に示した荷重-変位関係を包絡する各変位段階における3サイクル目の正負での載荷荷重の絶対値を平均し、図-8の荷重増加率と同様に、比較する2つのケースのうち、群杭に作用する水平荷重が小さい側を100%として両ケース間の作用荷重の差を表したものである。各ケース間の比較の意味も図-8と同様である。斜杭の効果に着目すると、杭間隔が狭い場合には、杭径の15%変位するまでの荷重増加率は60%以上あり、斜杭が群杭としての支持性能を大幅に向上させているが、それ以降は変位の増加に伴い、荷重増加率が急激に減少する。

これは、図-17に示すCase2の各変位段階における各杭の軸ひずみからわかるように、杭径の15%変位したときには、斜杭の軸ひずみが座屈ひずみを越えており、杭頭部で座屈したためである。ただし、図-18の荷重と変位関係の包絡線に示すように、同一変位時には、Case1に対しCase2には約1.7倍の大きな荷重が作用していることに注意する必要がある。一方、杭間隔が広い場合には、荷重増加率に対する斜杭の寄与度は20%程度と小さいが、大変形時にもその増加率を安定して保っていることがわかる。また、斜杭群杭同士で杭間隔の影響を比較すると、杭間隔を広げることにより、前述の斜杭の座屈を遅らせることができ、荷重増加率の低下を抑制できることがわかる。なお、図-18の荷重刻みはCase1の変形量が5%、10%、15%、20%、25%のときの荷重に設定した。





(a) Pile4→Pile1の方向に載荷 (b) Pile1→Pile4の方向に載荷  
 図-17 Case2の正負交番水平載荷試験における各杭の軸ひずみと載荷点における変位の関係

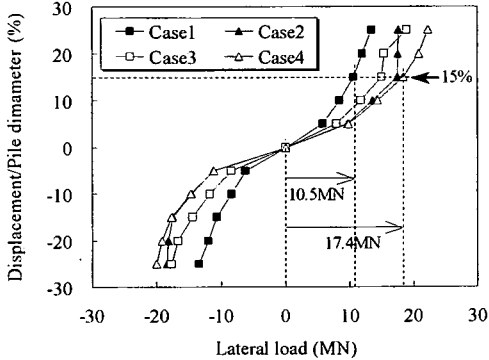


図-18 正負交番水平載荷試験における荷重-変位の包絡線

## (2) 残留変位と回転角

図-19に群杭に作用した荷重と残留変位の関係を示す。同一荷重での残留変位は、Case1, Case3, Case4, Case2の順に大きく、斜杭を組み合わせることで残留変位を低減できることがわかる。特に、斜杭群杭で杭間隔が狭いCase2は、斜杭の座屈が発生する水平荷重17.4MNまでにおいて、残留変位の抑制効果が顕著に見られる。

図-20に載荷荷重とフーチングの回転角の関係を示す。同一荷重でのフーチングの回転角は、Case1, Case2, Case3, Case4の順に大きい。杭間隔が狭い場合には、斜杭群杭の回転角は直杭群杭の半分以下であり、杭間隔が広い斜杭群杭は、ほとんど回転が生じていないことから、斜杭の回転抑制効果は大きい。直杭群杭は荷重の増加とともに、回転角が非線形に増加し、載荷荷重が10MNあたりから回転角が急増している。これは繰り返し載荷による杭周辺地盤の強度低下に伴い、杭が分担する荷重が増加し、その増分を主に杭の曲げ抵抗で分担したためと考えられる。一方、斜杭群杭の場合は、前述のとおり水平荷重を主に斜杭の軸力で抵抗し、かつ残留変位の結果でも示したように、地盤への負荷を低減できるため、杭が降伏するまではほぼ線形に増加する。

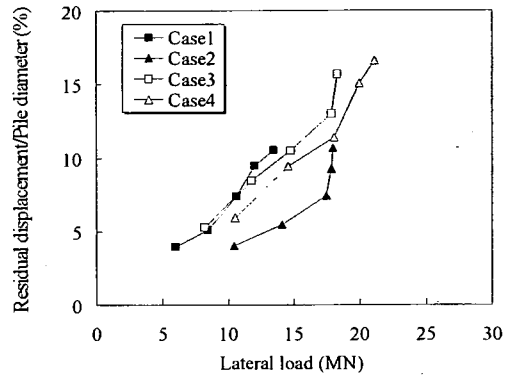


図-19 正負交番水平載荷試験における残留変位

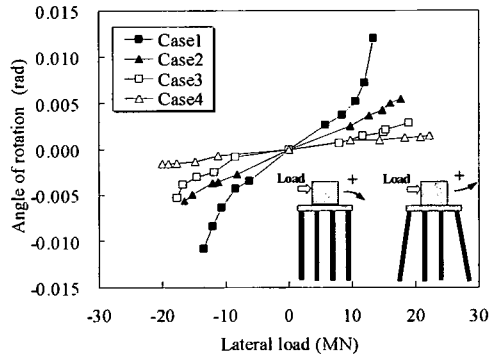


図-20 正負交番水平載荷試験における群杭の回転角

## (3) 水平力の荷重分担

Case2の斜杭の座屈が生じるまでの荷重下において、各杭の水平力の荷重分担率に大きな変化はなかったため、ここでは、正負交番水平載荷試験で群杭に与えた最大変位、すなわち杭径の25%変位時のCase1における群杭への作用荷重13.5MNが各ケースの群杭に作用したときの各杭の荷重分担率を図-21に示す。このとき、載荷方向は杭1から杭4の方向である。載荷方向最前列の杭4の分担率が大きいことや、杭間隔が狭い斜杭群杭ではその杭4の分担率が大きくなるが杭間隔を広げることで分担率は均等化されるなど、一方向水平載荷試験の場合と傾向はほぼ同じである。ただし、Case2では、斜杭が座屈した後にもう一方の側にある斜杭の分担率が急増することが確認されている。したがって、斜杭を用いる場合には、斜杭の終局状態を把握し、必要に応じて斜杭の杭頭部にコンクリートを充填するなど斜杭を座屈させないように補強をしておくことと安全である。

## (4) 杭の軸力変動

図-22に載荷荷重に対する杭頭部に発生した軸力

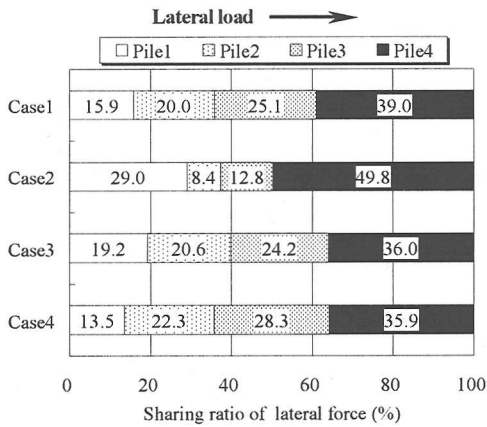


図-21 正負交番水平載荷試験における13.5MN作用時の各杭の水平力の荷重分担

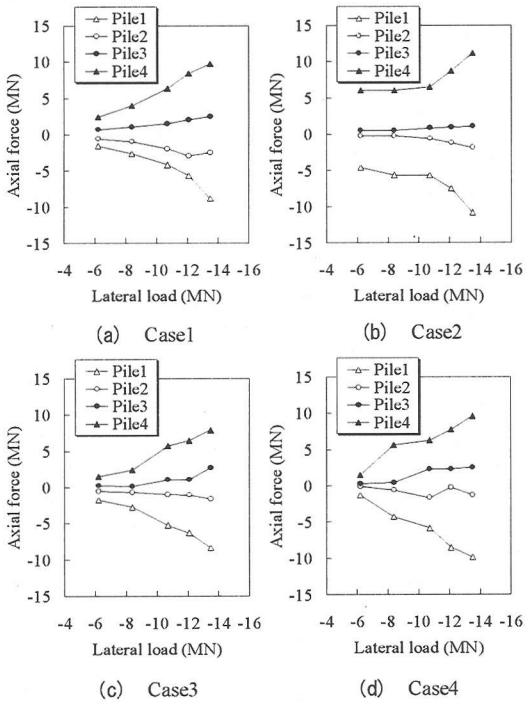


図-22 正負交番水平載荷試験における各杭頭部の軸力変動

の変動を示す。載荷方向は杭1から杭4の方向で統一した。いずれのケースも載荷荷重が増加するにつれて、外側に位置する杭1および杭4の軸力が顕著に大きくなっている。また、図中の最大荷重 (-13.5MN) が群杭に作用したときに発生する軸力の最大値は、斜杭群杭の方が幾分大きい。いずれのケースも10MN程度で大差はない。つまり、大変形時におい

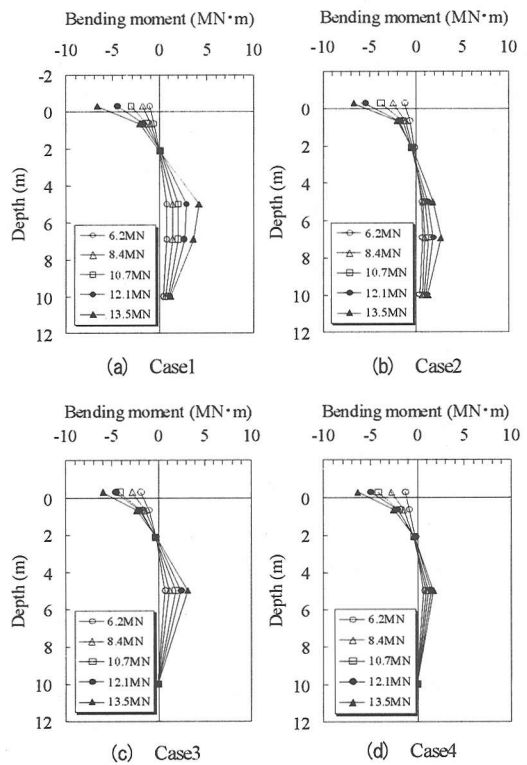


図-23 正負交番水平載荷試験における杭の曲げモーメント分布

て、同一荷重下で杭に発生する軸力は、傾斜10度以下の杭を用いた群杭と比較すると、斜杭の有無によらず同レベルになる。

### (5) 杭の曲げモーメント分布

図-23に、載荷荷重6.2, 8.4, 10.7, 12.1, 13.5MNが群杭に作用したときの杭4の曲げモーメント分布を示す。いずれのケースも杭頭部で最大曲げモーメントが発生しており、モーメントの絶対値も同程度である。地中部の最大モーメントは、杭間隔を広げることである程度低減できるが、同じ杭間隔でも斜杭を組み合わせるにより約半分程度のモーメントに低減できるため、斜杭を用いた方が有効である。

## 7. まとめ

斜杭を有する群杭の水平支持力特性を把握するため、遠心場での水平載荷試験および3次元弾塑性有限要素解析を行った。結果を以下にまとめる。

- (1) 一方向水平載荷試験により、微小変形時において、群杭は斜杭を組み合わせるにより水平抵抗

- 力が増加する。斜杭の水平抵抗力増加への寄与度は、杭間隔が狭い方が大きい。斜杭に発生する軸力も大きくなるため、載荷方向に対し最前列杭の荷重分担が大きくなる。この対策として、杭間隔を広げることが効果的であることがわかった。
- (2) 3次元弾塑性有限要素解析により、斜杭による水平抵抗力の増加や杭間隔拡大による荷重分担の均等化など、一方向水平載荷試験で得られた水平支持力特性と良好に対応した。また、同一荷重作用時には、斜杭の傾斜が大きいほど群杭の水平変位を抑制でき、軸力は増加するが断面力として支配的な曲げ応力を大幅に低減できる。したがって、同一規模の直杭群杭に対し、斜杭群杭は水平抵抗力を合理的に増加させることができる。
- (3) 遠心場で斜杭群杭の終局挙動まで把握可能な交番載荷実験システムを構築した。本実験システムにより、杭間隔が狭い斜杭群杭は、同じ杭間隔の直杭群杭より水平抵抗力の増加、残留変位の低減、基礎の回転角抑制、地中部モーメントの低減などメリットは大きい。斜杭に大きな軸力が導入されるため、大変形時には斜杭の座屈が生じる危険性がある。しかしながら、杭間隔を確保することにより、荷重分担を均等化できるため、上記斜杭の利点を確保できることを確認した。
- (4) 以上により、杭基礎の支持力を合理的に増加させ、かつ安全性を確保するには、適切な斜杭の傾斜角と杭間隔の選定が重要である。

## 参考文献

- 1) 岡部俊三：海上橋の明日を拓く—新しい基礎形式の提案—，土木学会誌，Vol.83，pp.16-18，1998。
- 2) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説，1999。
- 3) 沢口正俊：組杭の水平抵抗に関する実験的研究，港湾技術研究所報告，第9巻，第1号，pp.3-69，1970。
- 4) 菊池喜昭，大岡秀哉，田口博文：水平荷重を受ける組杭の挙動（その1，実験概要と結果），土木学会第54回年次学術講演会概要集，第Ⅲ部，pp.836-837，1999。
- 5) Michael C. McVay, Te-I Shang and Robert Casper : Centrifuge testing of fixed-head laterally loaded battered and plumb pile group in sand, Geotechnical Testing Journal, Vol.19, No.1, pp.41-50, 1998.
- 6) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会：阪神・淡路大震災調査報告—土木建造物の被害要因の分析，鋼構造物—，pp.228-239，1996。
- 7) 木村亮，柴田徹：大型土槽を用いた群杭の水平抵抗に関する模型実験，土と基礎，Vol.40, No.5, 1992, pp.41-46。
- 8) Shibata, T., Yashima, A. and Kimura, M. : Model tests and analyses of laterally loaded pile groups, Soils and Foundations, Vol.29, No.1, pp.31-44, 1989.
- 9) 内野徹：斜杭用油圧ハンマHNC125，建設機械，Vol.24, No.8, pp.89-94, 1988。
- 10) 木村亮：水平力を受ける群杭の挙動に関する基礎的研究，京都大学博士申請論文，1993。
- 11) 足立紀尚，木村亮，森本輝：水平力を受ける2本群杭の遠心模型実験と3次元FEM解析，第28回土質工学研究発表会，pp.1789-1792，1993。
- 12) Adachi, T., Kimura, M. and Zhang, F. : Analyses on ultimate behavior of lateral loading cast-in-place concrete piles by three-dimensional elasto-plastic FEM, Proc. of the 8th int. Conf. Computer Method and Advance in Geomechanics, Morgantown:Balkema, Vol.3, pp.2279-2284, 1994.
- 13) Kimura, M. and Zhang, F. : Seismic evaluations of pile foundations with three different methods based on three-dimensional elastic-plastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol.40, No.5, pp.113-132, 2000.
- 14) Zhang F., Kimura, M., Nakai, T. and Hoshikawa, T. : Mechanical behavior of pile foundations subjected to cyclic lateral loading up to the ultimate state, Vol.40, No.5, pp.1-17, 2000.
- 15) 大石善啓，大川賢紀，岡部俊三，亀井宏之，木村亮：ジャケット型鋼管杭基礎の支持力特性—斜杭の水平支持力—，第33回地盤工学研究会概要集，pp.1497-1498，1998。

(2001. 12. 17受付)

## THE BEARING CAPACITY OF A GROUP-PILE FOUNDATION WITH INCLINED PILES UNDER LATERAL LOADING

Makoto KIMURA, Hiroshi MAKINO,  
Katsunori OKAWA, Hiroyuki KAMEI and Feng ZHANG

A jacket-type steel-pile foundation has a feature that it can reduce the load acting on the piles drastically because the foundation and the superstructure are connected continuously by the jacket that is much lighter than a conventional top-heavy foundation. Moreover, if inclined piles are properly used as a pile foundation, it is possible to increase efficiently the lateral resistance and the rigidity of the foundation. In this paper, the lateral resistance and the failure mechanism of a group-pile foundation with inclined piles by centrifuge model tests, the influence of the pile spacing and the inclined angle of the piles on the lateral resistance were analyzed by 3-D finite element analysis.