

# 水平力を受ける小径スパイラル杭の不確実性を考慮した群杭効果の評価 Evaluation of Pile Group Effect Considering the Uncertainty of Small Diameter Spiral Piles with Horizontal Load

都市人間環境学専攻 大西 奈穂  
Naho OHNISHI

**Key Words :** spiral pile, pile group effect, horizontal loading test

## 1. 研究背景

スパイラル杭は平板をねじり加工した小規模な杭で、人力（必要に応じて電動工具を補助的に使用）による回転貫入で施工が可能という特徴がある。この特徴から、鉄道のホームドア基礎<sup>1)</sup>等の小規模構造物の建設において、スパイラル杭を多数打設した群杭基礎の適用が期待されている。

通常の円柱状の杭を群杭構造とする場合については、施工上・設計上の観点から杭中心間隔の最小値を  $2.5D$  ( $D$ : 杭径) 程度とするのが実務では一般的であり、軟弱な地盤条件では基礎の抵抗力を確保するために杭の追加や杭径の拡大が必要となるためにフーチング寸法が地上設備等の配置に必要な最小寸法よりも大きくなる場合がある (図-1 (a))。しかし、ホームドア基礎等の狭隘な現場では、図-1 (b) のように杭中心間隔を  $2.5D$  よりも狭くして (密に配置して) 杭本数を増やす、または杭径を大きくする方が、基礎全体として合理的・経済的な設計となる可能性がある。また、スパイラル杭は実際に地中に入っていく体積が板厚分しかないの、施工自体も円柱状の杭より過密配置に適している。

このような過密配置での設計を行うためには、スパイラル杭の群杭効果、特に従来は円柱状の杭でも検討・設計事例が少ない過密配置領域での群杭効果について十分に把握する必要がある。そこで本研究では、水平載荷試験を実施しスパイラル杭の群杭効果の特性を把握する。また、スパイラル杭は回転貫入時の杭頭のブレや過回転が抵抗力の発現に影響を及ぼす可能性がある為、群杭効果と併せて、施工の乱れが及ぼす影響についても検討する。

## 2. 実験概要

本研究で用いたスパイラル杭の模型を写真-1に示す。

スパイラル部はリン青銅製で幅20mm、板厚2mm、長さ400mmの平板を4回転ねじったものであり、別途曲げ試験を行ったところ曲げ剛性  $EI = 2214.4 \text{ kN} \cdot \text{mm}^2$  であった。模型地盤は、乾燥豊浦標準砂を横1000mm、奥行き400mmの土槽の中に多重ふるいを用いた空中落下法によって相対密度90%程度となるように高さ600mmまで投入して作製した。なお、模型杭と模型地盤の諸元は既往研究<sup>2)</sup>と同一である。

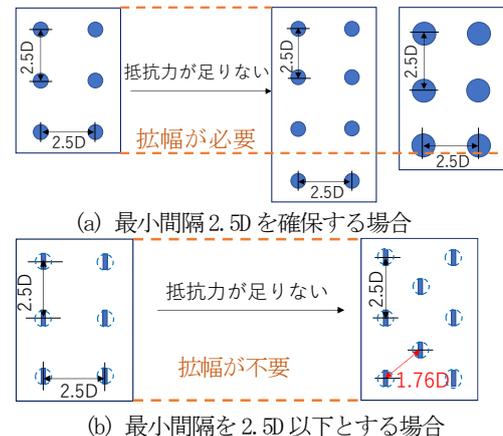


図-1 抵抗力が不足する場合の対応イメージ



写真-1 模型スパイラル杭

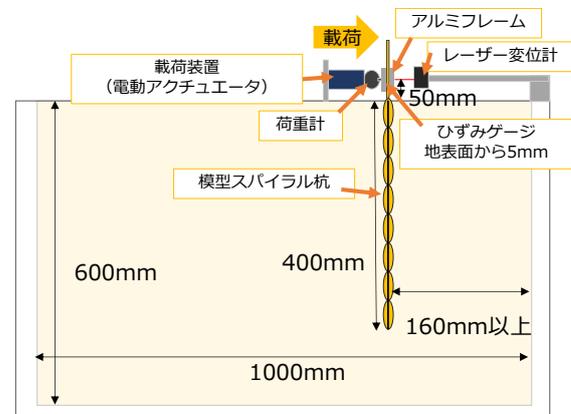


図-2 試験土槽および載荷装置の概要

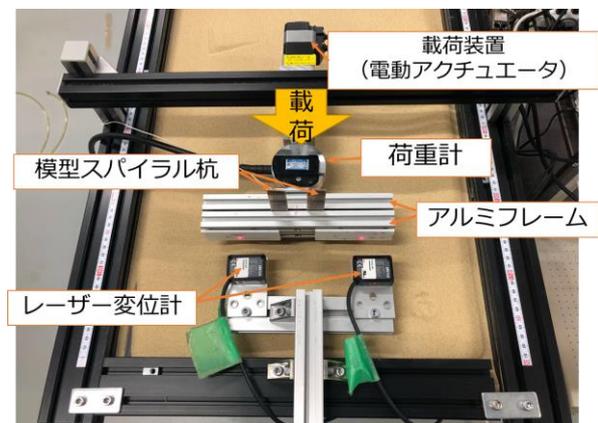


写真-2 載荷装置および計測機器の設置状況

また、この模型地盤中での単杭での水平載荷試験の結果から  $\beta l$  ( $\beta$ : 杭の特性値,  $l$ : 根入れ長) を算出すると  $\beta l = 6$  となり、一般に半無限長の杭と扱える条件である  $\beta l > 3$  を十分に満足している。

載荷は図-2 及び写真-2 に示すように、杭をフーチングで連結して地表面から 50mm の高さで電動アクチュエータによって、約 0.02mm/s の速度で一方向に押す構造とし、荷重計及びレーザー変位計によって載荷荷重と載荷点の水平変位を計測した。

スパイラル杭の施工（貫入）方法は、写真-3 に示す 2 ケースとした。Case1 では高さ方向に 3 点で固定しながら貫入することでブレを極力排除した。Case2 では直径 23mm と 25mm の 2 つの穴開きプレートを設置し、それらの円周に杭が沿うように傾けながら貫入することで、意図的に杭頭のブレを与えて施工した。また、Case1 では、杭材が通過する位置を固定するスリットを有する過回転防止プレートを施工工具の最下部に取り付けることで、余計な回転をせず杭のピッチ通りの 4 回転で貫入させている。Case2 では過回転防止プレートは取り付けずに施工を行い、杭全長の貫入に約 30~50 回転を要した。

実験ケースは、杭間隔  $L$  と杭幅  $D$  の比を主たるパラメータとした図-3 に示す一列群杭の杭配置とした。なお、同一幅のフーチング内に杭を打設することを想定して、 $L/D$  に応じて杭本数  $n$  も変化させている。Case1 及び Case2 の施工方法ともに各杭配置で 5 回ずつの実験を実施した。

また、5 章で述べる杭別の負担荷重を算出するため、模型スパイラル杭のプレート部（載荷点から 45mm 下方）にひずみゲージを貼付けて、曲げひずみの測定を実施した。なお、ひずみ測定は Case1 の単杭及び  $L=1.5D, 2D, 4D, 6D$  の実験において実施し、 $L=4D, 6D$  では全ての杭で、 $L=1.5D, 2D$  では両端と中央の 3 本の杭で測定を行った。

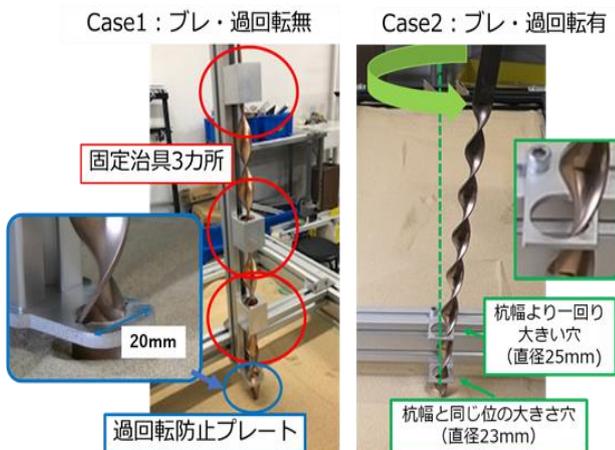


写真-3 スパイラル杭の施工方法

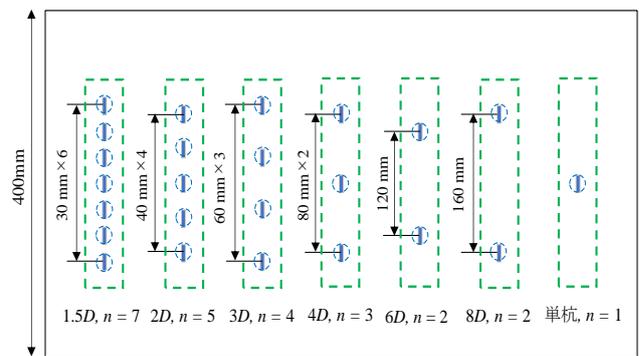
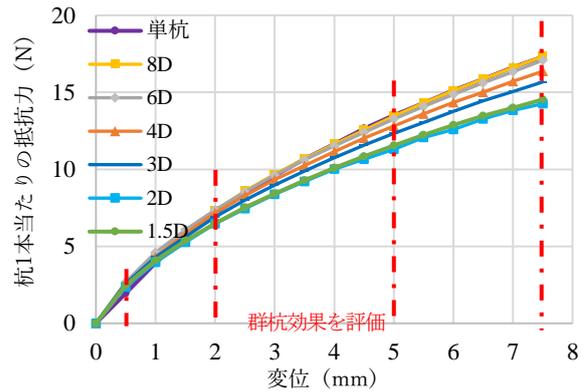
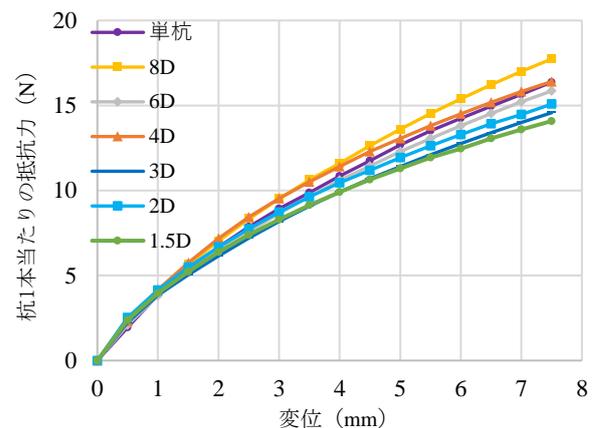


図-3 実験ケースの杭配置



(a) Case1 ブレ・過回転無



(b) Case2 ブレ・過回転有

図-4 杭頭での荷重～変位関係（平均）

### 3. 実験結果と施工の乱れの影響に関する考察

水平載荷試験の結果として、載荷点における荷重～変位関係を図-4 に示す。縦軸は全荷重を杭本数で除して杭 1 本当たりの抵抗力としている。また、このグラフは各杭配置で 5 回分のデータを、変位 0.5mm ピッチで抵抗力を平均し、プロットしたものを示している。

Case1 は図-4(a) より、杭間隔が狭くなるにつれて杭一本当たりの抵抗力が低下していく傾向が確認できる。

一方で、Case2 では図-4(b) より、杭間隔と杭一本当たりの抵抗力には明確な傾向は確認できない。

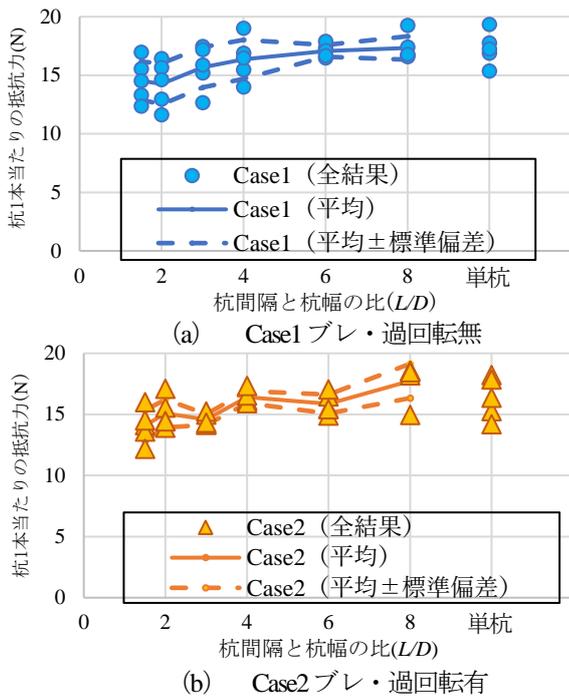


図-5 7.5mm 変位時の杭1本当たり抵抗力

載荷が十分に進んだ状態での傾向を考察するために杭間隔  $L/D$  と 7.5mm 変位時の杭1本当たりの抵抗力の関係を図-5 に示す。また、グラフには縦軸の値の平均値と標準偏差を求めた結果を実線（平均値）および破線（平均値±標準偏差）で示している。

図-5(a) より Case1 では、主に  $L=2\sim 6D$  の範囲で、杭間隔が狭くなるほど杭一本当たりの平均値が低下し、標準偏差が大きくなっていく傾向が確認できる。

一方で、図-5(b) より Case2 の杭一本当たりの抵抗力は、杭間隔に対してばらついているものの、全体としては Case1 と同程度の値となっていることがわかる。また、標準偏差の大きさに着目すると、杭間隔がある程度広い  $L=6D, 8D$  では Case2 の方が大きくなるが、杭間隔が  $L=4D$  を下回る範囲では、同等か Case1 の方が小さくなる傾向が確認できる。これは、今回の実験では施工時の乱れを統一的なブレおよび過回転の作業によって模擬したことによって、杭周辺地盤の締め固め効果が乱れによる低減効果を相殺するとともに、周辺地盤を均質化させたものと考えられる。そのため、標準偏差が小さくなるとの傾向は本実験特有の現象と考えられるものの、少なくとも各杭の抵抗の合計となる群杭基礎全体での水平抵抗自体が施工時の乱れによって低下する懸念は小さいと判断できる。なお、紙面の都合で記載を省略したが、変位レベルが 7.5mm よりも小さい場合でも同様の傾向となっている。

#### 4. 基礎全体での群杭効果

今回の実験で得られた Case1 の杭間隔  $L/D$  と群杭効果  $e$  (平均) の関係を図-6 に示す。本研究では 0.5mm (載

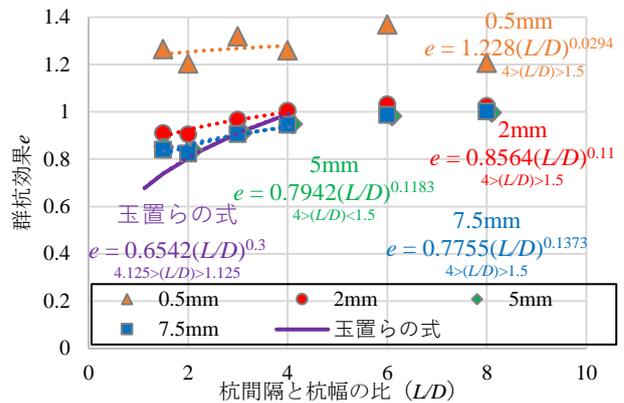


図-6 Case1 各変位時での群杭効果  $e$  の平均比較

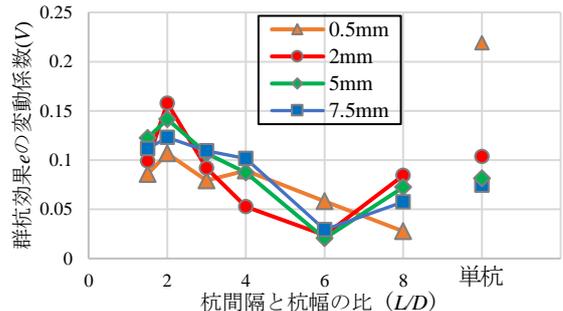


図-7 Case1 群杭効果  $e$  の変動係数

荷初期)、2mm (杭径の 10%)、5mm、7.5mm 変位時で群杭効果を評価した。縦軸の値は、同一変位時のそれぞれ群杭の抵抗力を単杭の抵抗力の平均値で除した値とした。また、図-6 には式(1)に示す玉置ら<sup>3)</sup>の杭頭自由の場合の杭間隔と群杭効果の関係式も紫実線で図示している。

$$e = 0.6(L/D)^{0.3} = 0.6542(L/D)^{0.3} \quad (1)$$

ただし、 $4.125 > (L/D) > 1.125$

ここに、 $e$  は群杭効果、 $L$  は杭間隔、 $D$  は杭径である。

なお、玉置らの式は、円柱状の杭で単杭と群杭での水平載荷試験を実施し、変位の比較から群杭効果を求めることで提案された実験式である。そのため、谷ら<sup>4)</sup>の研究を参考にスパイラル杭の投影面積を考慮して杭幅  $D$  の 75% を有効径  $D'$  とし、これを玉置らの式の杭径として扱うこととした。さらに図-6 には、 $L \leq 4D$  の範囲（玉置らの式で群杭効果が生じるとされる実験条件の範囲）での実験結果の近似式を記している。

図-6 より、載荷が進み、変位が大きくなるに従い群杭効果  $e$  の値は低下し、玉置らの式の値に近づいていく傾向が確認できる。ただし、近似式の指数の値に着目すると、どの変位時での評価においても玉置らの式より小さい値となっており、杭間隔が群杭効果に及ぼす影響は相対的に小さいといえる。

次に図-7 に Case1 の各変位時における群杭効果  $e$  の変動係数を示す。杭間隔が狭く杭本数の多いケースにおいて、変動係数が単杭よりも最大 2 倍程度大きくなっていることが分かる。

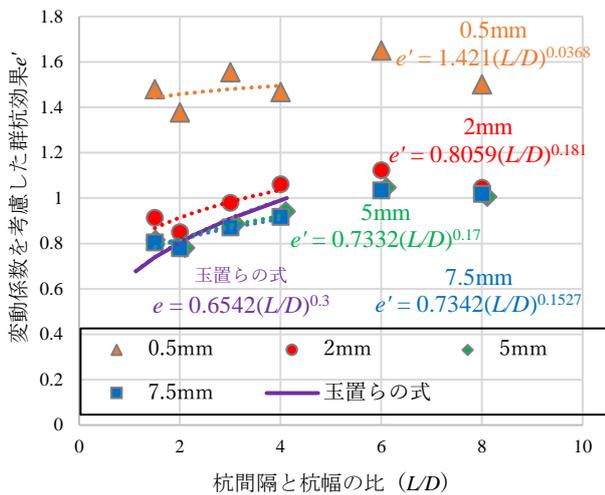


図-8 Case1 変動係数を考慮した群杭効果

そこで、図-8にCase1の変動係数 $V$ を考慮して低減を行った群杭効果 $e'$ を示す。縦軸は杭間隔毎の群杭の $1-V_g$ の値を単杭の $1-V_s$ の値で除して算出した係数を図-6で示した群杭効果 $e$ に乘じた値としている。変動係数の違いも考慮することで、一部で玉置らの式の値を僅かに下回る部分も見られるが、特に過密群杭として活用が期待される $L=1.5D$ や $L=2D$ での値は、玉置らの式と同等もしくは上回っていることがわかる。

### 5. 杭別の負担荷重

杭の肉厚等の断面設計を行うためには、基礎全体の群杭効果の他に、群杭基礎内の杭別の負担荷重の違いも評価しておく必要がある。以下では、ひずみゲージの測定結果より杭別の負担荷重について考察する。

図-9にひずみ測定の結果からChangの式を用いて推定した7.5mm変位時における、地中部の最大曲げモーメントをプロットしたグラフを示す。グラフ中の赤実線は、全荷重を杭本数で除した $P/n$ より算出した値（すなわち全杭の平均値）を示している。また、紫実線は、上述した玉置らの式から算出した値を示している。

図-9より、特に杭間隔が狭く杭本数が多い $L=1.5D, 2D$ では、同じフーチング内でも両端と中央の杭とで曲げモーメントの値に大きな差があり、中央の杭では $P/n$ （平均）の値よりも大きくなっていることがわかる。この中央の杭に対する曲げモーメントの $P/n$ からの増加率を図-10に示す。過密多数配置の群杭基礎の設計をする場合、杭の場所によっては曲げモーメントを15%程度割り増して計算し、板厚の決定等に反映させる必要があると考えられる。

### 6. まとめ

実験の結果、施工の乱れによる抵抗力の低減効果は地盤の締め固め効果によって、ある程度相殺される可能性があることが分かった。また、同一幅のフーチング内でスパイラル杭を過密多数配置した場合の群杭効

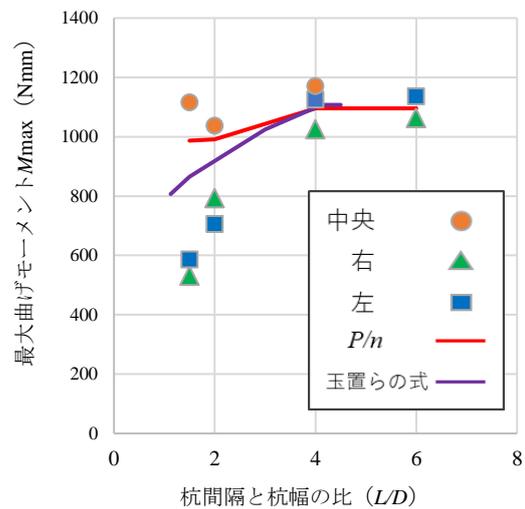


図-9 7.5mm変位時での地中部最大曲げモーメント

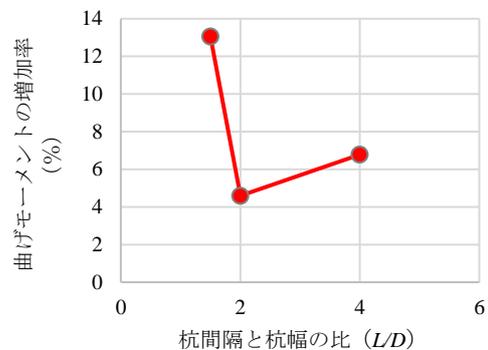


図-10  $P/n$ から中央の杭に対する曲げモーメントの増加率

果は、平均的には円柱状の杭よりも小さいものの、杭間隔が小さい場合にはばらつきが大きくなることが確認された。これらのばらつきおよび施工の乱れの影響を考慮した設計法として、玉置らの式（ただし、杭幅の75%の有効径で評価）の値を用いて基礎全体の抵抗特性を評価することを提案する。また、各杭の設計に際しては、基礎全体で算定される平均的な断面力を15%程度割り増して設計することを提案する。

### 参考文献

- 1) 大塚克也, 猪八重由之, 小田勇一, 野中隆博, 津島史人, 梅原悟, 前原聡: スパイラル杭と高強度繊維補強床版を用いたホームドア基礎構造の現場適用, 令和2年度土木学会全国大会第75回年次学術講演会, VI-186, 2020.
- 2) Naho OHNISHI, Hidetoshi NISHIOKA: Experimental study on the pile group effect in the horizontal resistance of spiral piles, The Second International Conference on Press in Engineering (ICPE), 2019.
- 3) 玉置脩, 三橋晃司, 今井常雄: 水平抵抗における群杭効果の研究, 土木学会論文報告集, Vol.192, pp79-89, 1971.
- 4) 谷陽介, 永田誠, 黒川貴大, Amarbayar Jugdemaniil, 安福規之, 石蔵良平: 砂地盤におけるスパイラル杭の水平載荷実験について, 第55回地盤工学研究発表会, 21-9-2-03, 2020.