

模型実験による押込・引抜双方向の複合荷重に対する小径スパイラル杭の支持力評価

Verification of evaluation method for bearing capacity of small diameter spiral pile subjected to combined load in push-in and pull-out direction

北海道大学工学院 ○学生員 中川修平 (Shuhei Nakagawa)
北海道大学工学院 正会員 磯部公一 (Koichi Isobe)

1. はじめに

現行のスパイラル杭の支持力評価方法にはいくつか課題がある。スパイラル杭の支持力の推定にはストレート杭の評価式が用いられており、スパイラル杭のらせん構造により杭の周囲の地盤と一体となって挙動する性質¹⁾が考慮されていない。また、鉛直・水平方向の荷重を組み合わせた複合荷重に対する支持力を適切に評価できていない。

本論文では先行研究²⁾において軟弱粘性土中での実大スパイラル杭による荷重試験の結果を基に FEM 解析を行い、同解析手法による複合荷重に対するスパイラル杭の支持力曲線を再現、楕円形状で評価する方法を提案した。本研究では模型実験により提案した評価法の妥当性を検証することを目的とする。

2. 模型実験の概要

2.1. 模型杭

本実験に用いた模型杭は模型作製上の都合から図-1に示すようなストレート杭の周面にらせん状の羽根（以下、スパイラル羽根）を接着剤により取り付けられた構造である。杭部分の心材は A1050、中実材料は A6063 であり、杭外径は 6 mm、杭先端は先端角度が約 60 度のテーパが取り付けられている。スパイラル羽根は材料にステンレス (SUS304) を使用し、先端を除く杭全体に羽根のピッチが $P=15\text{mm}$ で接着した。模型杭の構造のうちスパイラル羽根の支持力へ及ぼす影響を確認するために、ストレート杭（心材のみ、周面にスプレーのりで砂を付着）の荷重実験によりスパイラル杭との比較を行った。

また、スパイラル杭の羽根による曲げ剛性の影響の確

認のため、杭部全長 165 mm のスパイラル杭とストレート杭の両杭で曲げ試験を実施した。曲げ試験は杭頭部を固定し、杭周面に設置したひずみゲージにより杭先端への荷重時のひずみの計測を行った。試験の結果、両杭で差が見られなかったことから、本模型杭ではスパイラル羽根が杭の剛性に及ぼす影響はほとんどないと考える。また、曲げ試験の結果より両杭の曲げ剛性は $EI = 0.0053 \text{ (kN}\cdot\text{m}^2)$ であった。

2.2. 模型地盤、荷重試験の概要

本実験に使用する土槽は、奥行き 250 mm、幅 700 mm、高さ 500 mm の直方形構造である。模型地盤は珪砂 7 号を用いた乾燥砂地盤で、空中落下法により相対密度 $D_r = 70\%$ となるよう作製した。

水平地盤に対して鉛直に施工した杭に対して荷重試験を実施する。ストレート杭の施工は、杭頭部に荷重して杭部全体を圧入する。スパイラル杭の施工には貫入補助装置を用いる。貫入補助装置は杭の貫入方向を固定する取り外し可能なガイドを有し、貫入の方向を自由に調節できる。本実験では貫入方向を地盤に対して垂直に固定し、杭を回転させることにより回転圧入させる。なお、既往の研究³⁾⁻⁵⁾より連続して一定ピッチの羽根が取り付けられた杭などの杭部全体がらせん構造を有する杭の回転圧入では、ある程度の貫入量に達するまでは杭の自重により圧入し、それ以降は杭に与える回転力のみで羽根ピッチ通りに貫入することが確認されている。本実験においても目視による観察で同様の傾向を確認した。また、羽根ピッチ P に対する一回転当たりの貫入量 δ の比 P/δ が 1.0 の杭が杭周辺地盤の変状が最も少ないことが確認されている^{3), 5)}。模型杭では羽ピッチ/羽根径 (P/D) が $15/13=1.15$ で、和田らの実験⁵⁾で用いた杭で P/D が近い杭の貫入率は 0.9 程度であり、回転貫入による地盤の乱れの影響は最低限に抑制できると思われる。

荷重装置（図-2）は荷重角度を 0 度～90 度の範囲で設定でき、変則モーターとロードセルが取り付けられている。本実験ではモーターの荷重速度は $0.5\text{mm}/\text{min}$ と定速で荷重した。荷重方法は、地盤に設置した杭の杭頭部と荷重装置先端部をワイヤーでつなぎ、両者の間の任意の地点に滑車を設置し、荷重装置により引張力をかけて杭頭部へ任意の方向の荷重を行った。荷重角度 θ は 90 度～90 度まで 15 度ずつ (-15, 15 度を除く)、各荷重角

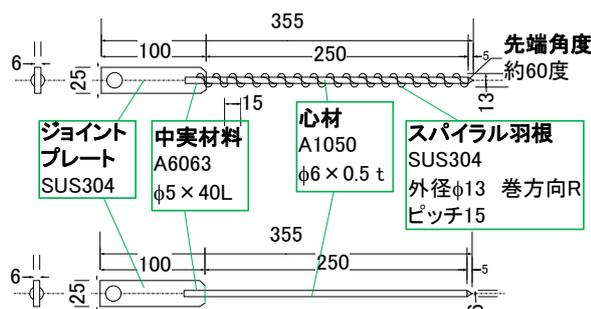


図-1 模型杭の概要

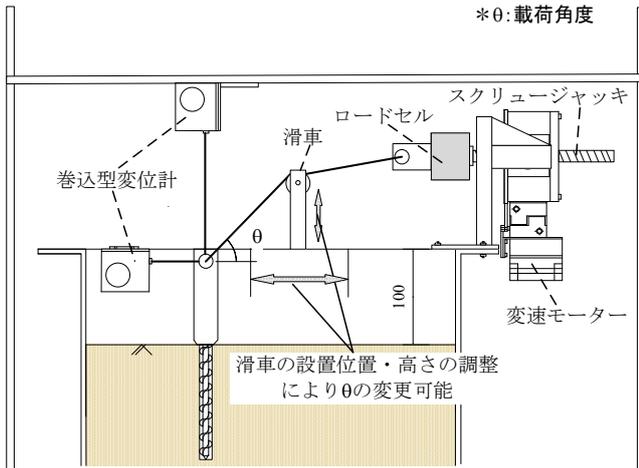


図-2 荷重試験の概要

度で3回ずつ再現性の確認を行いながら実験を実施した。なお、 θ は負値を押し込み方向、正值を引抜き方向とする。計測項目は杭頭荷重、鉛直変位、水平変位とした。

3. 実験結果

荷重の結果、荷重角度が75度と90度の極限支持力の鉛直成分に開きが見られたことから、荷重角度80度で追加試験を実施した。また、極限荷重については鉛直、水平変位のどちらかが杭外径の10%に達した時点の荷重と定義する。なお、スパイラル杭については羽根径を杭の外径とする。(判定変位：ストレート杭は0.6mm、スパイラル杭は1.3mm)

表-1 にストレート杭およびスパイラル杭の極限支持力の測定値を示す。本実験で計測する荷重値は非常に小さいため、各荷重角度で3回ずつ計測、ばらつき(偏差)が0.5以上の場合には再計測を行った。水平支持力が小さくなる荷重角度が水平に近いケースでは特にばらつきが生じやすい傾向がみられる。ストレート杭に対するスパイラル杭の鉛直極限支持力の増加率は引抜き($\theta=90$ 度)で8.0倍、押し込み($\theta=-90$ 度)で1.4倍であった。これは羽根を外径とする円筒断面に作用する摩擦抵抗力の増加が引抜きに、羽根を含む先端支持面積の拡大による先端支持力の増加が押し込みに影響するためと考える。以上より、スパイラル羽根により鉛直方向の支持力は増加し、特に引抜き方向への影響が大きい。

図-3 にストレート杭とスパイラル杭の水平荷重($\theta=0$ 度)に対する水平荷重-水平変位の関係を示す。図中の斜線で示す範囲は本実験で対象とする変位であり、この初期の変位内では両杭の支持力は概ね同値である。したがって、本模型杭についてはスパイラル羽根による水平支持力への影響は無視できる。一方、水平変位が大きくなるにつれて、ストレート杭よりもスパイラル杭の支持力が大きくなる傾向が見られる。これは荷重直後のスパイラル杭の状態では羽根の支持力への影響は微小であるが、水平方向への杭頭変位が増加するにつれて変位方向に地盤中の杭体が傾き、杭の変位方向に影響する羽根の摩擦抵抗力の作用する面積が増大するために支持力が増加すると考える。

表-1(a) ストレート杭の極限支持力(判定変位0.6mm)

荷重角度	荷重合力 (kN)			平均
	1回目	2回目	3回目	
90	0.0022	0.0028	0.0022	0.0024
80	0.0027	0.0025	0.0028	0.0027
75	0.0023	0.0027	0.0025	0.0025
60	0.0028	0.0022	0.0022	0.0024
45	0.0023	0.0013	0.0012	0.0018
30	0.0007	0.0005	0.0005	0.0006
0	0.0010	0.0010	0.0012	0.0011
-30	0.0010	0.0022	0.0017	0.0016
-45	0.0013	0.0015	0.0012	0.0013
-60	0.0026	0.0017	0.0032	0.0025
-75	0.0015	0.0015	0.0026	0.0019
-90	0.0363	0.0274	0.0343	0.0319

表-1(b) スパイラル杭の極限支持力(判定変位1.3mm)

荷重角度	荷重合力 (kN)			平均
	1回目	2回目	3回目	
90	0.0191	0.0193	0.0190	0.0191
80	0.0043	0.0067	0.0077	0.0062
75	0.0067	0.0047	0.0060	0.0058
60	0.0032	0.0032	0.0030	0.0031
45	0.0022	0.0017	0.0025	0.0021
30	0.0023	0.0015	0.0018	0.0019
0	0.0020	0.0022	0.0018	0.0021
-30	0.0020	0.0022	0.0038	0.0027
-45	0.0045	0.0030	0.0020	0.0032
-60	0.0045	0.0047	0.0047	0.0046
-75	0.0042	0.0022	0.0037	0.0033
-90	0.0563	0.0361	0.0462	0.0462

図-4 に両杭の鉛直変位-水平変位の関係、図-5 にストレート杭およびスパイラル杭の鉛直荷重、水平荷重をそれぞれの最大値により正規化した支持力曲線を示す。図-5 中の紫の破線は既往研究を基に推定した支持力値を示す。引抜き方向の複合荷重に対してストレート杭の変位に対してストレート杭の変位は $\theta=60\sim 80$ 度ではほぼ鉛直方向にのみ変位しているため、鉛直極限支持力は $\theta=90$ 度の値と同程度の支持力を発揮している。 $\theta=45$ 度では判定変位に水平変位が達した時点で鉛直変位も生じたため、極限支持力は $\theta=0$ 度の値に近く、鉛直支持力も作用しやや大きい値を發揮している。

一方、引抜き方向の複合荷重に対してスパイラル杭の変位は $\theta=30\sim 75$ 度ではほぼ水平方向にのみ変位し、 $\theta=80$ 度では鉛直変位も生じているが、水平極限支持力は $\theta=0$ の値の0.5~0.75倍に低下している。これはスパイラル杭の回転貫入時には地盤の乱し効果を最低限に抑えるようにしているが、ストレートの圧入と比べると地盤を乱し、強度の低下が生じているためと考える。したがってスパイラル杭の引抜き方向の推定値は回転貫入による地盤の乱れを考慮する必要がある。

押し込み方向の複合荷重に対して両杭ともほぼ水平方向にのみ変位し、各荷重角度の極限支持力は $\theta=0$ に近い値になった。スパイラル杭の押し込み方向の推定値は測定値をとらえている。

水平のみの载荷比較

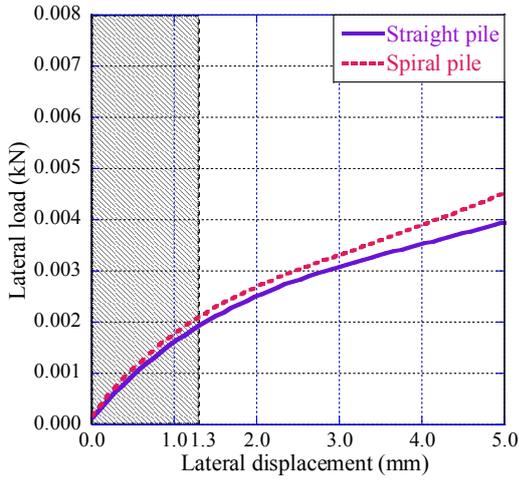


図-3 水平载荷に対する水平荷重-水平変位

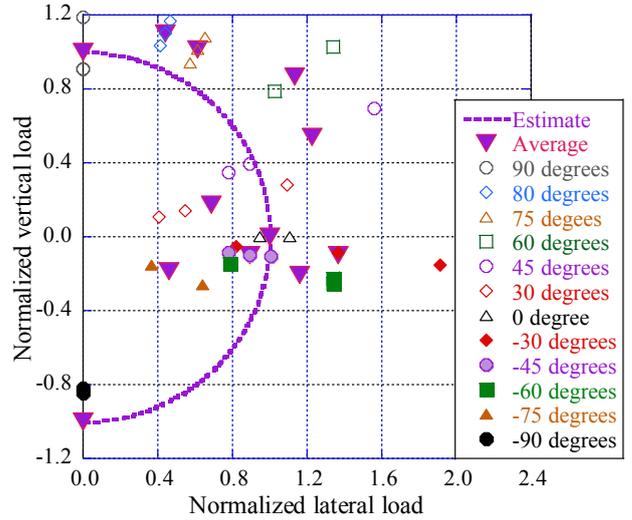


図-5(a) ストレート杭の正規化支持力曲線

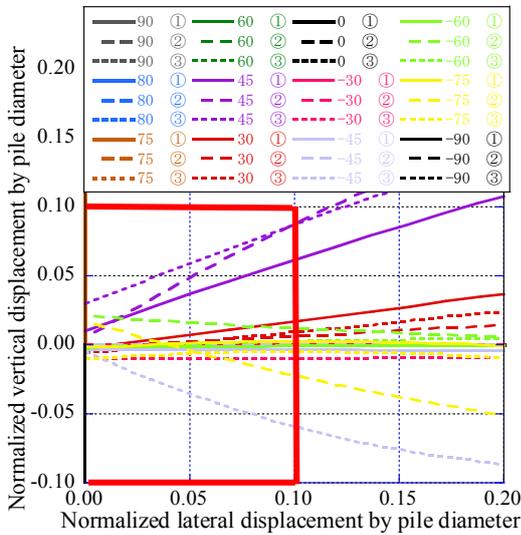


図-4(a) ストレート杭の鉛直変位-水平変位

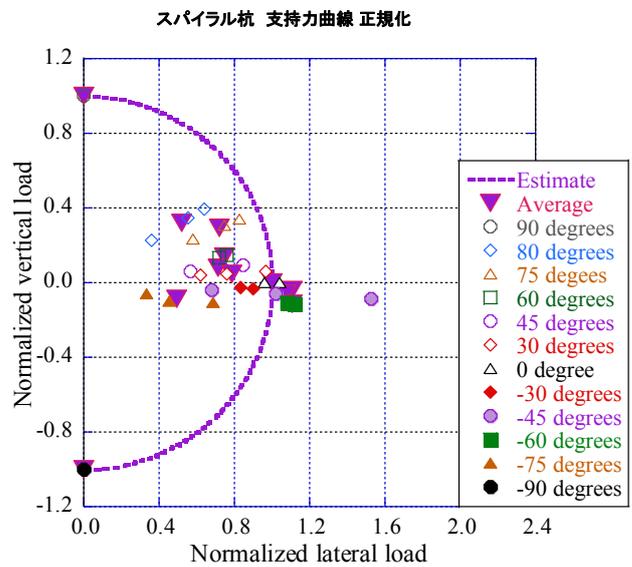


図-5(b) スパイラル杭の正規化支持力曲線

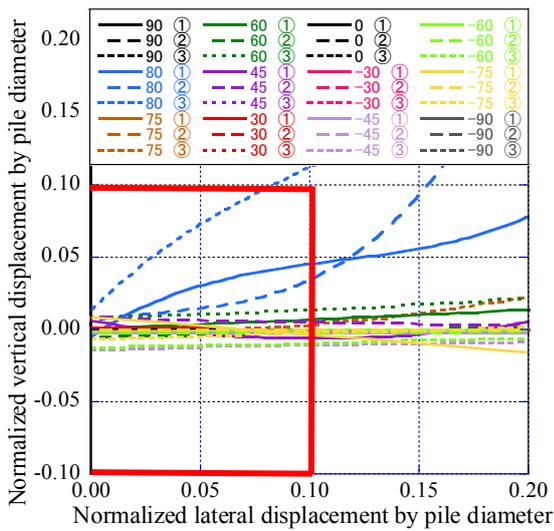


図-4(b) スパイラル杭の鉛直変位-水平変位

4. 摩擦抵抗角度の逆算

本実験より得られた両杭の鉛直引抜 ($\theta=90$ 度) の支持力より地盤と杭間の摩擦抵抗角を逆算する。なお、和田らの論文^{4),5)}よりスパイラル杭の载荷には羽根径を直径とする円筒面に滑り破壊が生じるため、支持力が円筒面のせん断強度で決まっていると考察している。そのためスパイラル杭の支持力は羽根径を外径として計算した。杭の鉛直支持力評価式は、

$$R_u = qA + \tau Lf \quad (1)$$

ここで、 R_u : 鉛直極限支持力 (kN), q : 杭先端地盤の極限支持力度 (kN/m²), A : 杭の先端面積 (m²), τ : 周面摩擦力度 (kN/m²), L : 周面摩擦力を考慮する層の層厚, ただし本実験では杭長 (m), f : 杭の周長 (m)である。引抜き抵抗を評価する場合、杭先端の支持力は関与しないため右辺の第1項は0とし、 τ について式(1)を整理する。

$$\tau = R_u / fL \quad (2)$$

また、周面摩擦力度 τ を次式にて求める。

$$\tau = 0.5 \gamma L K_0 \tan \delta \quad (3)$$

表-2 摩擦抵抗角度の逆算に関する諸元

	単位		ストレート杭	スパイラル杭
R_u	kN	鉛直極限支持力	0.0024	0.01912
A	mm ²	杭の先端面積	28.27	132.73
L	mm	杭長	255	
f	mm	杭の周長	18.84	40.84
γ	kN/m ³	地盤の 単位体積重量	13.33	
K_0		静止土圧係数	0.357	
δ	°	地盤と杭間の 摩擦抵抗角	39.4	71.7

表-3 先端支持力の算出 (kN)

	極限支持力	周面摩擦力	先端支持力
ストレート杭	-0.003	0.0024	-0.031
スパイラル杭	-0.046	0.0191	-0.065

ここで、 γ : 地盤の単位体積重量 (kN/m³)、 K_0 : 静止土圧係数 (Jaky の式、 $1 - \sin\phi$, $\phi = 38^\circ$)、 δ : 地盤と杭間の摩擦抵抗角である。式(2)、(3)を整理すると

$$\tan\delta = R_u / (0.5 \gamma (1 - \sin\phi) L^2 f) \quad (4)$$

発現し、推定値に近い値であった。式(4)および表-2 の諸元より地盤と杭間の摩擦抵抗角 δ は

$$\text{ストレート杭} : \delta = 37.4^\circ$$

$$\text{スパイラル杭} : \delta = 70.4^\circ$$

上記の値よりスパイラル羽根による δ の増加が確認できる。ただし、逆算された地盤と杭間の摩擦抵抗角は現実的な値ではないことから、乾燥砂地盤における杭の引抜きによる現実的なすべり面の仮定が必要と考える。

次に押込について周面摩擦力は引抜き時の同値と仮定して先端支持力を検討する。鉛直押込 ($\theta = -90^\circ$) の極限支持力から周面摩擦力を引いて先端支持力を算出した (表-3)。結果、スパイラル羽根により先端支持力は約2倍に増加した。また、スパイラル杭の周面摩擦力の極限支持力における負担割合が増大している。

5. 水平地盤反力係数の逆算

水平地盤反力係数 k_h を式(5)に示す Chang の式で得られる基礎の特性値 β を用いて式(9)より逆算する。

$$y_t = (c_1 + c_2) / 2EI\beta^3 \quad (5)$$

$$c_1 = H / \Delta * [(1 - \sin 2\beta) e^{-2\beta L} - e^{-4\beta L}] \quad (6)$$

$$c_2 = H / \Delta * [1 - (1 + \sin 2\beta) e^{-2\beta L}] \quad (7)$$

$$\Delta = 1 - 2(2 - \cos 2\beta) e^{-2\beta L} - e^{-4\beta L} \quad (8)$$

$$\beta = (k_h D / 4 EI)^{1/4} \quad (9)$$

ここで、 y_t : 杭頭変位 (m)、 β : 基礎の特性値 (m⁻¹)、 h : 杭の突出長 (m)、 EI : 杭の曲げ剛性 (kN-m²)、 H : 水平荷重 (kN)、 D : 杭径 (m)である。なお、杭頭変位と水平荷重はそれぞれの杭の杭径の 10%の変位と極限支持力を用いる。表-4 に示す各諸元より k_h はそれぞれ以下の値となった。

$$\text{ストレート杭} : k_h = 4841 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

$$\text{スパイラル杭} : k_h = 1977 \text{ (kN/m}^3\text{)}$$

スパイラル杭の k_h がストレート杭の場合より小さいことから、施工した杭周囲の地盤はストレート杭に比べて

スパイラル杭では強度が低下、すなわち回転貫入による杭周辺地盤の乱し効果が確認できた。

一方、先行研究では軟弱粘性土地盤上で行ったスパイ

表-4 水平地盤反力係数の逆算に関する諸元

	単位		ストレート杭	スパイラル杭
D	m	杭径	0.006	0.013
EI	kN-m ²	杭の曲げ剛性	0.006	
y_t	mm	杭頭変位	0.60	1.30
H	kN	水平荷重	0.001	0.002
L	m	杭長	0.255	
β	m ⁻¹	基礎の特性値	5.964	5.820
k_h	kN/m ³	水平地盤反力係数	4723	1977

ラル杭の実大実験の結果に対する支持力評価では見かけの杭径を拡大して評価することが可能であった。これは軟弱粘性土地盤ではスパイラル杭と杭周辺の地盤が一体化して変位していたことに起因していた。これに対し、乾燥砂地盤では、水平荷重に対してスパイラル杭は周辺地盤との一体化効果が見込めないことが確認された。

6. まとめ

- スパイラル羽根は鉛直極限支持力を増加させ、特に引抜き方向の極限支持力増加率が大きい。一方で、水平極限支持力への影響はほとんど期待できない。
- 引抜き方向の複合荷重に対するスパイラル杭の支持力曲線では推定値が実測値を過大評価し、回転貫入による杭周辺地盤の乱れを考慮する必要がある。
- 押込方向の複合荷重に対するスパイラル杭の支持力曲線では推定値が実測値を概ね評価できる。
- 粘性土地盤では杭と周辺地盤の一体化効果による支持力増加があったが、乾燥砂地盤では一体化効果は小さかった。

参考文献

- 1) 佐藤宇紘, 原田剛男, 岩佐直人, 林悟史, 大谷順: スパイラルパイル施工時の回転条件が鉛直支持力に与える影響に関する基礎的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.10, No.2, pp.253-265, 2015.
- 2) 山内稜, 磯部公一: 軟弱地盤における小径スパイラル杭の複合荷重に対する支持力特性, 地盤工学学会北海道支部技術報告書, No.56, pp.63-70, 2016
- 3) 平田篤夫, 古梶繁夫, 後藤常郎: 地盤との連成挙動に基づくスパイラルパイルの軸方向抵抗力算定法に関する研究, 資源と素材, Vol.121, pp.370-377, 2005.
- 4) 和田昌敏, 時松考司, 澤石正道: スパイラル状の羽根を有する回転杭の貫入及び周面摩擦支持力に関する模型実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.79, No.706, pp.1825-1833, 2014.
- 5) 和田昌敏, 時松考司, 澤石正道: スパイラル状の羽根を有する回転杭の貫入及び周面摩擦支持力に関する実大実験, 日本建築学会構造系論文集, Vol.80, No.714, pp.1287-1295, 2015.