連続らせん形状の羽根を有する 回転貫入杭の周面支持力

SHAFT RESISTANCE OF STEEL PILES WITH CONTINUOUS HELICAL WING

和田昌敏 — * 1 時松孝次 — * 2
澤石正道 — * 3

Masatoshi WADA — * 1 Kohji TOKIMATSU — * 2
Masamichi SAWAISHI — * 3

キーワード：
回転貫入杭, 鉛直支持力, 周面抵抗力

Keywords:
Helical pile, Bearing capacity, Shaft resistance

In order to evaluate the bearing capacity of steel piles with continuous helical wing fixed around a pipe shaft, full-scale loading tests were conducted on eight piles in sand & clay deposits. The results have shown that the shaft resistance of the continuous helix piles is significantly larger than that of the driven piles and/or the steel piles with a helical plate attached near the tip and it can be determined with the frictional resistance of soil acting along the cylindrical surface of pile having a diameter of D_w (D_w = continuous helical wing diameter).

1. はじめに

回転貫入工法は、鋼管の先端または周面に螺旋状の羽根を取り付けた鋼管杭に回転力を与え木ネジのようにそのまま地中に回転貫入させる工法である。低騒音・低振動・無排土で施工が可能であることから、「環境にやさしい杭工法」として現在では広く建築・土木の技術者に認知されるようになった。

これら回転圧入杭（以下「回転杭」）の内、杭先端に一枚のらせん状の羽根を取り付けた鋼管杭（以下「先端支持型回転杭」）は、杭先端を強固な支持層まで到達させることにより、大きな支持力が期待できる。よって、これまで大型の建築物を支える回転杭として多くのプロジェクトで採用されてきた。一方、最近では小型・軽量の建築需要が増え、大きな支持力が必要とされないケースも目立ってきている。その中でも、支持層が深く建物荷重が小さい場合には、これまでの先端支持型回転杭では杭が長くなりすぎ、不経済な設計となってしまうこともあった。そこで、このような場合でもより短い杭で適切な支持力が得られるように、杭周面にも大きな支持力が期待できる回転杭（以下「摩擦支持型回転杭」）が開発され始めている。

先端支持型回転杭に関しては、貫入のメカニズムや支持力特性を扱った研究^{1)~6)}が多数あるだけでなく、実用化されている工法も多いため、各工法の載荷試験データに基づき統計的な観点から支持力式の検討を行った報告⁷⁾も行われている。一方、摩擦支持型回転杭に関しては、貫入のメカニズムや支持力特性を扱った研究^{8)~12)}が数例あるのみで、工法毎の支持力検討も十分に行われているとは言えない状況である。そこで、本報告では、杭周面に連続らせん形状の羽根を取り付けた回転杭（以下「スパイラル杭」）の砂質地盤・粘土質地盤における杭周面の支持力を、実大杭の載荷試験データを基に統計的な観点から検討する。

2. 敷地地盤と試験杭の形状

スパイラル杭の押込み方向の支持力特性を把握するために、全5箇所の敷地で合計8試験体に対し、鉛直載荷試験を実施した。Table 1に敷地の所在地、杭周囲の地盤種別、摩擦力計測区間の地表面からの平均深さ、当該区間の地盤のN値、杭径 D_p 、羽根径 D_w 、羽根径比 D_w/D_p 、羽根ピッチP、羽根ピッチ比 P/D_w を示す。また、Fig. 1に敷地地盤の1例とスパイラル杭の姿図を、Fig. 2、3に杭径、羽根径比毎の摩擦データ数を示す。全試験データの内、杭径に関しては400mm以上500mm未満のものが73%を占め、羽根径比に関しては1.0以上2.0未満のものが93%を占めていることが分かる。

3. スパイラル杭の周面摩擦力度

3.1 スパイラル杭の支持力メカニズム

加圧砂地盤と模型杭（杭径 $D_p=48.6\text{mm}$ 、羽根径比 $D_w/D_p=1.41\sim 1.71$ 、羽根ピッチ比 $P/D_w=0.8\sim 1.2$ ）を使用した室内実験¹³⁾や実大杭（杭径 $D_p=400\text{mm}$ 、羽根径比 $D_w/D_p=1.2\sim 1.5$ 、羽根ピッチ比 $P/D_w=1.0$ ）を用いたフィールド実験¹⁴⁾などの筆者らの既往の研究から、スパイラル杭の周面支持力は、羽根径を直径とする円筒面の地盤のせん断強度で評価できることが分かっている。支持力の検討に使用する載荷試験データは、上記羽根径比・羽根ピッチ比の範囲に含まれるものが87%と大部分を占めている。そこで、本報告で扱うスパイラル杭の周面支持力は、次式で与えられ得るものと仮定する。

$$R_u = (\tau_s L_s + \tau_c L_c) \psi \quad (1)$$

$$\psi = \pi D_w \quad (2)$$

ここに、 ψ はスパイラル羽根径を直径とする円の周長(m)、 D_w はスパイラル羽根径(m)、 τ_s は砂質地盤の摩擦力度(kPa)、 τ_c は粘土質地盤の摩擦力度(kPa)、 L_s は杭周囲の砂質地盤に接する長さ(m)、 L_c は杭周囲の粘土質地盤に接する長さ(m)を示す。

¹⁾ 新日鉄住金エンジニアリング(株) シニアマネジャー・修士(工学)
(〒141-8604 東京都品川区大崎一丁目5番1号)

²⁾ 東京工業大学環境・社会理工学院建築学コース 教授・工博

³⁾ 新日鉄住金エンジニアリング(株) シニアマネジャー・修士(工学)

¹⁾ Senior Manager, Building Construction & Steel Structures Division, Nippon Steel & Sumikin Engineering Corporation, M. Eng.

²⁾ Prof., Dept. of Architecture and Building Engineering, Tokyo Institute of Technology, Dr. Eng.

³⁾ Senior Manager, Building Construction & Steel Structures Division, Nippon Steel & Sumikin Engineering Corporation, M. Eng.

Table 1 Sample list

Location	Soil classification	Depth GL-(m)	N-value	Pile diameter D _p (mm)	Wing diameter D _w (mm)	D _w /D _p	Wing pitch P(mm)	P/D _w	Number of tests
Sakai	Loam	2.2	3.0	165	300	1.82	300	1.0	1
Sakai	Loam	2.2	3.0	216	300	1.39	300	1.0	1
Koga	Loam & Tuffaceous clay	3.1	1.3	400	600	1.50	600	1.0	1
Koga	Sand	5.3	4.0	400	600	1.50	600	1.0	1
Koga	Sand	7.8	23.5	400	600	1.50	600	1.0	2
Koga	Silty sand	9.5	8.5	400	600	1.50	600	1.0	2
Koga	Loam & Tuffaceous clay	3.1	1.3	400	500	1.20	500	1.0	1
Koga	Sand	5.3	4.0	400	500	1.20	500	1.0	1
Koga	Sand	7.8	23.5	400	500	1.20	500	1.0	1
Koga	Silty sand	9.5	8.5	400	500	1.20	500	1.0	1
Tokai	Solid consolidated clay	12.0	23.0	114	265	2.32	265	1.0	1
Kasuya	Sand	2.3	7.5	400	600	1.50	600	1.0	1
Nakijin	Silty clay	4.2	6.3	700	900	1.29	700	0.8	1

Fig. 1 SPT results in Koga & continuous helix pile

Fig. 2 Pile diameter

Fig. 3 Wing diameter ratio

Table 2 Coefficient of shaft friction for sand β

Location	N-value	τ_s (kPa)	β
Koga	4.0	109	27
Koga	23.5	145	6
Koga	8.5	108	13
Koga	23.5	193	8
Koga	8.5	134	16
Koga	4.0	42	11
Koga	23.5	162	7
Koga	8.5	160	19
Kasuya	7.5	47	6

Table 3 Mean value and standard deviation of β

Sample number n	Mean value a	Deviation σ	σ/a
9	12.5	6.7	0.53

Fig. 4 Relation between N_s and τ_s

3.2 砂質地盤の摩擦力度（摩擦係数 β の評価）

我が国では、砂質地盤の杭周面摩擦力度を、国土交通省告示第1113号¹³⁾に従い、次式で評価することが一般的である。

$$\tau_s = \beta N_s \quad (3)$$

ここに、 β は砂質地盤の杭周面摩擦係数、 N_s は杭周囲の砂質地盤の平均N値を示す。そこで、スパイラル杭の β についてまず評価を行うこととする。

Table 2に各試験データから得られた β を、Table 3に β の評価に使ったサンプル数n、平均値a、標準偏差 σ 、変動係数 σ/a を示す。ここで、載荷試験から得られた最大周面摩擦力度 τ_s は、杭先端変位が羽根径の10%に達するまでの最大値を採用している。表より、スパイラル杭の β の平均値は12.5であり、標準偏差 σ は6.7になることが分かる。また、Fig. 4に砂質地盤の平均N値 N_s と最大周面摩擦力度 τ_s の実測値との関係を示す。建築基礎構造設計指針¹⁴⁾では、全載荷試験データの75%が算定式による τ_s を上回るような係数(= (平均値a - 0.67 × 標準偏差 σ) : 以下「75%超過係数」)を求め、支持力を評価している。そこで、75%超過係数を用いて、周面摩擦

度を評価すると次式を得る。

$$\tau_s = (12.5 - 0.67 \times 6.7) N_s = 8 N_s \quad (4)$$

このスパイラル杭の周面摩擦力度は、打込み杭¹⁴⁾の $2N_s$ に対し4.0倍、先端支持型回転杭⁷⁾の $1N_s$ に対し8.0倍と、かなり大きいことが分かる。これは、打込み杭や先端支持型回転杭の周面支持力は、施工による地盤の乱れの影響を受けやすい杭周辺の砂地盤と鋼管表面との摩擦力で決まるのに対し、スパイラル杭の周面支持力は、施工による地盤の乱れの影響を受けにくい羽根外径面の砂のせん断強度で決まるためと思われる。

3.3 砂質地盤の摩擦力度（土圧係数 K_s の評価）

欧米諸国では、我が国と異なり次式で周面摩擦力度を評価¹⁵⁾¹⁶⁾することが多い。

$$\tau_s = K_s \sigma'_v \tan \phi \quad (5)$$

ここに、 K_s は土圧係数、 σ'_v は摩擦力算定区間の平均有効上載圧(kPa)、 ϕ は砂質地盤の内部摩擦角を示す。(5)式に従えば、杭周面に作用する直応力 $K_s \sigma'_v$ と摩擦係数 $\tan \phi$ の積として周面摩擦力度を求めることになるが、この時、土圧係数 K_s をどのような値に設定すべきかが問題となる。そこで、載荷試験の結果を基に、この土圧係数について検討を行うこととする。

Table 4 に各試験データから得られた K_s を、Table 5 に K_s の評価に使ったサンプル数 n 、平均値 a 、標準偏差 σ 、変動係数 σ/a を示す。ここで、内部摩擦角のデータがないケースでは、畑中ら¹⁴⁾¹⁷⁾が提案している(6)~(8)式を用いて、拘束圧に応じて補正した N 値= N_1 から、内部摩擦角を推定している。

$$\phi = \sqrt{20N_1} + 20 \quad (3.5 \leq N_1 \leq 20) \quad (6)$$

$$\phi = 40 \quad (20 < N_1) \quad (7)$$

ただし、

$$N_1 = N \sqrt{98/\sigma'_v} \quad (8)$$

表より、土圧係数の平均値は $K_s = 2.3$ （静止土圧係数 $K_0 = 0.5$ の 4.6 倍）であり、標準偏差 σ は 0.6 になっていることが分かる。また、この時の変動係数は 0.27 となり、 N 値比例で評価した前節の β の変動係数 0.53 よりも小さいことが分かる。よって、(5)式を用いることにより、 N 値比例の場合と同等以上の精度で、周面摩擦力度

Table 4 Coefficient of earth pressure K_s

Location	σ'_v (kPa)	ϕ (degrees)	τ_s (kPa)	K_s
Koga	58.8	30*	109	3.2
Koga	78.3	39	145	2.3
Koga	92.5	36	108	1.6
Koga	78.3	39	193	3.1
Koga	92.5	36	134	2.0
Koga	58.8	30*	42	1.2
Koga	78.3	39	162	2.6
Koga	92.5	36	160	2.4
Kasuya	31.8	36*	47	2.0

* ϕ estimated by equ. (6)

Table 5 Mean value and standard deviation K_s

Sample number n	Mean value a	Deviation σ	σ/a
9	2.3	0.6	0.27

Fig. 5 Relation between $\sigma'_v \tan \phi$ and τ_s

予測することが出来そうである。

ここで、Fig. 5 に有効上載圧と摩擦係数の積である $\sigma'_v \tan \phi$ と最大周面摩擦力度 τ_s の実測値との関係を示す。ここでも、前節と同様に 75%超過係数を用いた(9)式により最大周面摩擦力度 τ_s を評価する。

$$\tau_s = (2.3 - 0.67 \times 0.6) \sigma'_v \tan \phi = 1.8 \sigma'_v \tan \phi \quad (9)$$

(9)式の土圧係数 $K_s = 1.8$ は、静止土圧係数 $K_0 = 0.5$ の 3.6 倍に相当し、大きな土圧が杭に作用していることが分かる。これは、既往の実大スパイラル杭を用いたフィールド試験¹²⁾でも考察したように、スパイラル杭の施工時に杭先端が閉塞し、空洞になった杭体の体積分だけ周辺地盤を締め固めていることに因るものと推測される。

3.4 粘土質地盤の摩擦力度（摩擦力係数 γ の評価）

粘土質地盤の杭周面摩擦力度については、日本・欧米とも同じ考え方に基づく評価式¹³⁾¹⁵⁾¹⁶⁾を採用しており、次式のように表現することができる。

$$\tau_c = \gamma c_u \quad (10)$$

ここに、 γ は粘土質地盤の杭周面摩擦力係数、 c_u は杭周囲の粘土質地盤の粘着力(kPa)を示す。

Table 6 に、各試験データから得られた γ を、Table 7 に γ の評価に使ったサンプル数 n 、平均値 a 、標準偏差 σ 、変動係数 σ/a を示す。ここで、実験結果の評価に使用した地盤の粘着力は、室内土質試験を実施しているもののみを採用し、 N 値からの推定値などは採用していない。表より、 γ の平均値は 1.42 であり、標準偏差は 0.45 であることが分かる。また、Fig. 6 に粘着力 c_u と最大周面摩擦力度 τ_c の実測値との関係を示す。ここでも、75%超過係数を用いて最大周面摩擦力度 τ_c を評価すると次式を得る。

Table 6 Coefficient of shaft friction for clay γ

Location	c_u (kPa)	τ_c (kPa)	γ
Sakai	29	29	1.00
Sakai	29	58	2.00
Koga	24	24	1.00
Koga	24	34	1.42
Tokai	253	268	1.06
Nakijin	54	111	2.06

Table 7 Mean value and standard deviation γ

Sample number n	Mean value a	Deviation σ	σ/a
6	1.42	0.45	0.32

Fig. 6 Relation between c_u and τ_c

$$\tau_c = (1.42 - 0.67 \times 0.45) c_u \cong 1.0 c_u \quad (11)$$

粘土質地盤における杭の周面支持力は、土のせん断強さと密接な関係があることが指摘されており、軟弱粘土層や正規圧密粘土層では、杭近傍の地盤内で滑りが生じるため γ はほぼ1.0となる一方で、粘着力が大きな粘土層や過圧密粘土層では、杭と地盤との境界面で滑りが生じるだけでなく、施工の影響による強度低下も発生しやすいため、 $\gamma < 1.0$ になることが文献¹⁴⁾に示されている。そのため、打込み杭の場合には、粘土質地盤の過圧密比や杭の径長さ比に応じて変化する摩擦係数($\gamma = 0.35 \sim 1.0$)が紹介¹⁴⁾されている。一方、先端支持型回転杭の摩擦係数(75%超過の摩擦係数)を、文献⁷⁾に記載された載荷試験データから求めると、 $\gamma = 0.5$ となる。よって、スパイラル杭の周面支持力は、施工が容易な軟弱粘性土層における打込み杭と同等の、先端支持型回転杭の2.0倍の支持力に相当していることが分かる。これは、羽根ピッチ通りの回転貫入施工を行うスパイラル杭では、周面支持力の評価を行う羽根外周面に、地盤の乱れが生じにくいことに因るものと推察される。

なお、本報告の周面摩擦力度の評価式((4)(9)(11)式)は、1回転あたりの貫入量を羽根ピッチで除した値(以下「貫入率」)が0.96～1.03と羽根ピッチ通りの施工ができた試験体のデータ(羽根ピッチの大きなNakijinのみ貫入率=0.84)を元に検討されている。一方、加圧砂地盤タンクと模型杭を使用した室内実験¹¹⁾より、貫入率が0.72になった場合には、羽根ピッチ通りに施工できた場合に比べ、周面支持力が50%程度まで低下することが分かっている。よって、敷地地盤が強固で羽根ピッチ通りの施工が出来ない場合には、周面摩擦力度の評価式((4)(9)(11)式)はそのまま適用できず、施工の状況に応じて適切に支持力を低減する必要があると思われる。

また、3.3で述べた K_s は敷地毎に異なる静止土圧係数、地質年代、過圧密比などの影響を受けやすいにも関わらず、検討に使用した大半のデータが同一敷地から得られたものである。今後、多くの敷地でデータを収集し、より汎用性の高い K_s を定めていく必要がある。

4. まとめ

杭径 $D_p=114 \sim 700\text{mm}$ 、羽根径比 $D_w/D_p=1.20 \sim 2.32$ 、羽根ピッチ比 $P/D_w=0.8 \sim 1.0$ の実大スパイラル杭の載荷試験を実施し、砂質地盤・粘土質地盤における周面支持力について統計的な視点から検討を行った。スパイラル杭の周面支持力が、羽根径を直径とする円筒表面積×摩擦力度で算定できるものと仮定し、この時の杭周面摩擦力度について以下の知見を得た。

- ① 砂質地盤におけるスパイラル杭の周面摩擦力度を βN_s で評価した場合、その75%超過係数は $\beta = 8$ であり、打込み杭($\beta = 2$)に対し4.0倍、先端支持型回転杭($\beta = 1$)に対し8.0倍となる。
- ② 砂質地盤におけるスパイラル杭の周面摩擦力度を $K_s \sigma'_v \tan \phi$ で評価した場合、今回の実験範囲では、土圧係数 K_s の75%超過係数は $K_s = 1.8$ であり、静止土圧係数 $K_0 = 0.5$ の3.6倍となる。
- ③ 粘土質地盤におけるスパイラル杭の周面摩擦力度を γc_u で評価した場合、 γ の75%超過係数は $\gamma = 1.0$ であり、打込み杭($\gamma = 0.35 \sim 1.0$)に対し1.0～3.0倍、先端支持型回転杭($\gamma = 0.5$)に対し2.0倍となる。
- ④ 砂質地盤・粘土質地盤において、スパイラル杭の周面摩擦支持

力が大きくなる理由は、1)打込み杭や先端支持型回転杭と同様に、杭施工時に杭先端が閉塞し、空洞になった杭体の体積分だけ、杭周辺地盤が押し広げられ土圧係数 K_s が増加すること、2)打込み杭や先端支持型回転杭では、施工による地盤の乱れの影響を受けやすい杭周辺地盤と鋼管表面との周面摩擦力で杭周面支持力が決まるのに対し、施工による地盤の乱れの影響を受けにくい羽根外周面(スパイラル羽根径を直径とする円筒面)の地盤のせん断耐力で杭周面支持力が決まることに因るものと推察される。

- ⑤ 以上に述べたスパイラル杭の周面摩擦係数 β 、 γ のおよび土圧係数 K_s は、羽根ピッチ通りに回転貫入施工できた場合にのみ有効と考えられる。

謝辞

実験について多くの助言を頂きました(株)ジェイアール総研エンジニアリングの西村昭彦博士、現：日之出水道機器(株)の永田誠氏、新日鉄住金エンジニアリング(株)の丸山栄氏に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 佐伯英一郎、大木仁：回転圧入鋼管杭に関する研究，構造工学論文集，Vol. 45B，pp. 453-462，1999. 3
- 2) 時松孝次ほか4名：回転圧入鋼管杭の地盤貫入メカニズムに関する基礎的研究，第38回地盤工学研究発表会講演集，pp. 1485-1486，2003. 7
- 3) 佐古大ほか4名：模型実験に基づく回転貫入鋼管杭の地盤貫入メカニズムに関する研究，第39回地盤工学研究発表会講演集，pp. 1545-1546，2004. 7
- 4) 大杉富美一ほか3名：大型加圧土槽を利用した回転貫入模型杭の貫入実験，日本建築学会構造系論文集，第591号，pp. 69-75，2005. 5
- 5) 土屋勉ほか3名：回転貫入杭の貫入・支持力特性に関する模型実験，日本建築学会構造系論文集，第620号，pp. 75-80，2007. 10
- 6) 国府田誠ほか6名：螺旋羽を持つ回転貫入杭の貫入および支持力に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第601号，pp. 91-98，2006. 3
- 7) 土屋勉，高坂舞：回転貫入杭の鉛直支持力特性に関する統計的検討，日本建築学会技術報告集，第21巻，第49号，pp. 991-994，2015. 10
- 8) Rao, S.N., Prasad, Y.V.S.N. and Shetty, M.D.: The behavior of model screw piles in cohesive soils, Soils and Foundations, Vol. 31, No2, 35-50, 1991
- 9) Ben Livneh, B. and El Nagger, M.H.: Axial testing and numerical modeling of square shaft helical piles under compressive and tensile loading, Canadian Geotechnical Journal, 2008, 45(8), 1142-1155
- 10) Tsuha, C. de H.C. and Aoki, N.: Relationship between installation torque and uplift capacity of deep helical piles in sand, Canadian Geotechnical Journal, 47(6), 635-647, 2010
- 11) 和田昌敏，時松孝次，澤石正道：スパイラル状の羽根を有する回転杭の貫入トルク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，第706号，pp. 1825-1833，2014. 12
- 12) 和田昌敏，時松孝次，澤石正道：スパイラル状の羽根を有する回転杭の貫入トルク及び周面抵抗力に関する実大実験，日本建築学会構造系論文集，第714号，pp. 1287-1295，2015. 8
- 13) 国土交通省告示第1113号，2001. 7
- 14) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001
- 15) Orr, T. L. L. and Farrell, E. R.: Geotechnical Design to Eurocode 7, 1999
- 16) US Army Corps of Engineers: Design of pile foundations, 1993
- 17) 畑中宗憲ほか3名：砂質地盤の内部摩擦角 ϕ_d と標準貫入試験のN値の関係についての一考察，日本建築学会構造系論文集，第506号，pp. 125-129，1998. 4

[2016年5月20日原稿受理 2016年7月14日採用決定]