

NS エコパイル DUO 工法の開発

～支持力性能に優れた回転貫入杭～

Development of NS Eco-pile DUO ～Helical pile with High Bearing Capacity～

和田 昌敏 Masatoshi WADA
建築・鋼構造事業部 設計技術部
商品技術室 シニアマネジャー

丸山 栄 Sakae MARUYAMA
建築・鋼構造事業部 プロジェクト部
製造管理室 シニアマネジャー

中澤 公博 Kimihiro NAKAZAWA
建築・鋼構造事業部 鋼構造営業部
エコパイル・橋梁商品営業室 マネジャー

抄 録

回転貫入工法は、鋼管の先端または周面にらせん状の羽根を取り付けた鋼管杭工法であり、杭に回転力を与え木ねじのようにそのまま地中に貫入させる工法である。低騒音・低振動・無排土での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・土木分野の技術者に認知されるようになった。杭先端に一枚のらせん状の羽根を取り付けた当社の回転杭(NS エコパイル)は開端杭であるため、閉端杭に比べ貫入性に優れているものの支持力が小さいという課題があった。そこで、優れた貫入性はそのままに、従来のNS エコパイル(羽根径/杭径=2.0タイプ)に対し2.2倍の大きな支持力が実現できる新たな回転杭(NS エコパイル DUO)を開発した。本稿では、このNS エコパイル DUO の先端支持力性能について報告する。

Abstract

Screw piles are a steel pile having either a helical plate attached to the end or continuous helical wing fixed around a pipe shaft, and screwed into the soil by means of rotating torque being generated by a pile driver. This screw piling method produces neither surplus soil and muddy water, nor other waste materials, providing clean and yet rapid installation technique with low noise and vibration. For these days, this technique has been widely known among civil and architectural engineers as “Eco-friendly method”. Our existing screw pile (NS ECO-PILE) with a helical blade attached near the tip has open end, and can be installed easier but has end bearing capacity lower than other screw piles with closed end. Then, we have developed new screw pile (NS ECO-PILE DUO) with high end bearing capacity which is about 2.2 times that of NS ECO-PILE ($D_w/D_p=2.0$). This paper reports on the end bearing capacity based on the model and full-scale test with NS ECO-PILE DUO.

1 緒言

回転貫入工法は、鋼管の先端または周面にらせん状の羽根を取り付けた鋼管杭工法であり、杭に回転力を与え木ねじのようにそのまま地中に貫入させる

工法である。低騒音・低振動・無排土での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・土木分野の技術者に認知され、多くのメーカーがこの回転杭を開発し商品化している。

当社では、早くから回転杭の開発に取り組み、平成12年に「NS エコパイル®」¹⁾を商品化し本格的な販売を開始した。NS エコパイルは、杭先端に一枚のらせん状の羽根を取り付けた開端の回転杭であり、杭先端が鋼製の羽根や平板などで塞がっている閉端の回転杭に比べ貫入性に優れ、N 値の大きな中間層や支持層にも無理なく施工できるといった長所を備えている。一方で、閉端の回転杭に比べ支持力が小さいため、特に支持力によって杭径や杭本数が決まる場合には、競争劣位になることが多かった。そこで、NS エコパイルの優れた貫入性はそのままに、より大きな支持力が杭先端に期待できる新たな回転杭(「NS エコパイル DUO」)を開発した。本稿では、模型実験、実大杭実験を通じて得られた NS エコパイル DUO の先端支持力性能について報告する。

2 NS エコパイル DUO の概要

2.1 NS エコパイル DUO の構造

図2.1に、NS エコパイル DUO の構造を示す。

軸部は、杭径 $\phi 101.6 \sim \phi 355.6$ の鋼管であり、必要に応じて杭頭部(上ぐい A)の鋼管厚を一般部よ

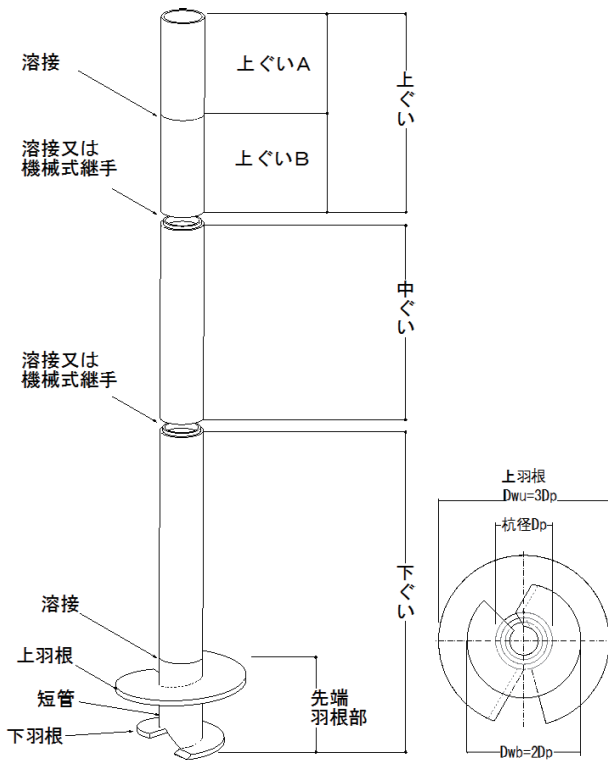


図2.1 NS エコパイル DUO の構造
Fig2.1 Structure of NS ECO-PILE DUO

り厚くすることができる。また、杭長が長い場合には、軸部を数本の鋼管に分割して現場に納入し、溶接または機械式継手によって軸部を繋ぎながら、杭の施工を行う。

杭先端部には、2枚のらせん状の羽根が取り付けられており、上羽根径 D_{wu} は軸径 D_p の3.0倍、下羽根径 D_{wb} は軸径 D_p の2.0倍である。上羽根は下羽根のらせん形状の延長線状に配置されており、2枚の羽根間隔は $1.25D_p$ である。この杭先端部は、らせん形状の2枚の羽根を鋼管に溶接して製作される場合と、鋳鋼で羽根と鋼管部を一体として製作される場合がある。

2.2 NS エコパイル DUO の特長

NS エコパイル DUO 工法は、低騒音、低振動および無排土施工といった回転貫入工法に共通する特長に加え、本工法に特有の以下の長所も備えている。

1) 大きな押し込み先端支持力(図2.2に概念図を示す。)

上羽根径が下羽根より大きいために、上羽根にも下羽根同等の支持力が期待できる。また、上羽根が下羽根周辺地盤の変形を拘束するため、下羽根の支持力も下羽根単体の時より大きくなる。この2つの効果により、杭先端部には1枚羽根より大きな支持力が期待できる。

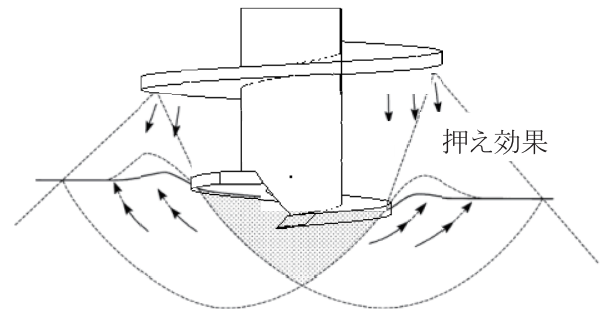


図2.2 支持力メカニズム
Fig2.2 Bearing mechanism

2) 優れた貫入性能(図2.3に概念図を示す。)

施工時に推進力を生み出す上羽根(羽根径比 $D_w/D_p=3.0$)が杭先端部に付加されているため、従来の一枚羽根の回転杭に比べ大きな推進力が得られる。よって、施工中に空回りが発生し易い地層境等でも、スムーズに杭を貫入することができる。

以下に、NS エコパイル DUO 工法の先端支持力について、検討を行った内容を紹介する。

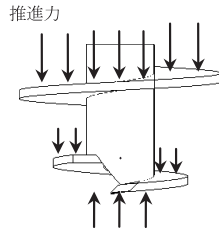


図2.3 貫入メカニズム
Fig2.3 Penetration mechanism

3 模型杭による支持力性能確認実験

NSエコパイルDUOの先端支持力性能、上羽根と下羽根の支持力比を把握するために、砂地盤タンクと模型杭を用いた鉛直載荷実験を実施した。

3.1 実験装置

図3.1に実験装置の全容を示す。実験装置は、砂地盤タンク(図3.2)、回転貫入施工・載荷装置、模型杭(図3.3)、計測・表示装置から構成されている²⁾。

砂地盤タンクは、外径・深さとも1,200mmの円筒形である。タンクの上面と側面にはそれぞれ独立に圧力をコントロールできるエアバックが内蔵されており、0~500kPaまで調整することが可能である。また、側面のエアバックの内側には砂地盤との間の摩擦力を生じさせずかつ意図した圧力が掛けられるように、厚さ3mmのテフロンシートを周方向に4分割し配置している。また、表3.1に示すように、砂地盤には珪砂6号を使い、相対密度が約

75%になるように作成した。

模型杭は、杭径φ40mmであり、先端面と下羽根、上羽根のそれぞれの部分の抵抗力を分離して計測できるような二重管構造となっている。内側の管に軸力測定用のひずみゲージを添付し、全ての試験を同一のひずみゲージで計測できるように工夫している。なお、実大杭の先端部は開塞形状であるが、施工中に閉塞し易く、相応の押し込み支持力を負担していることが想像される。よって、模型杭の先端は閉塞部としている。

3.2 試験ケースおよび実験方法

表3.2に試験ケースの一覧を示す。NSエコパイルDUO工法の二枚羽根の効果を確認するために、

表3.1 砂地盤の諸元(珪砂6号)
Table3.1 Specification of silica sand # 6

砂粒子の密度 ρ_s	2.635g/cm ³
最大密度 ρ_{max}	1.749g/cm ³
最小密度 ρ_{min}	1.412g/cm ³
50%粒径 D_{50}	0.311mm
均等係数 U_c	1.508
内部摩擦角 ϕ	39.8°
相対密度 D_r	約75%

表3.2 試験ケース
Table3.2 Test cases

試験体名称	DUO	ECO
杭径 D_p (mm)	40	40
上羽根径 D_{wu} (mm)	120	—
下羽根径 D_{wb} (mm)	80	80
施工時上載荷重(kN)	4.0	3.2

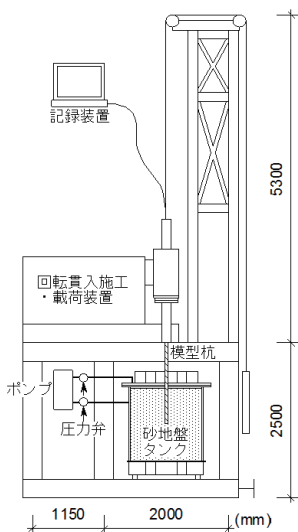


図3.1 実験装置
Fig3.1 Experimental system

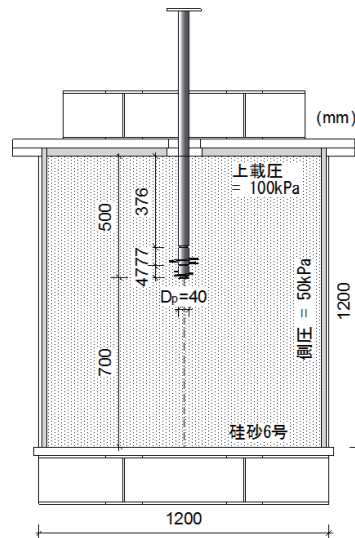


図3.2 加圧砂地盤タンク
Fig3.2 Calibration chamber

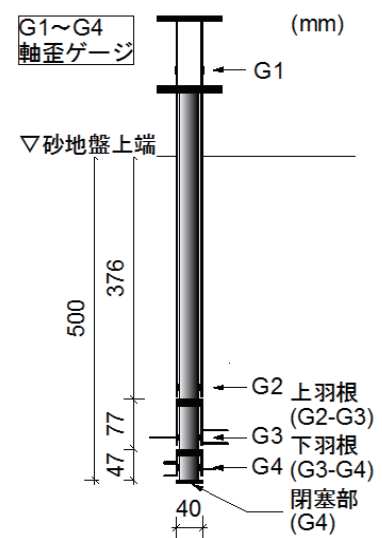


図3.3 模型杭
Fig3.3 Pile model

上羽根のない一枚羽根の回転杭についても、鉛直載荷実験を実施した。以下に模型杭の回転貫入施工および載荷の手順を示す。

- (1) タンクに砂を充填後、上載圧・側圧を作用させる。本実験では、地下水位の高い深さ15m程度の砂地盤を想定し、上載圧=100kPa、側圧=50kPaに設定する。
- (2) 一回転あたりの貫入量を羽根ピッチに合わせて、深さ500mmまで施工する。ただし、貫入初期には十分な推進力が得られず、安定した施工ができないため、杭頭に一定荷重をかけながら施工を行う。
- (3) 杭施工後に杭頭荷重を取り除き、貫入時の残留応力の変動が収まるのを待つために約15分間待機する。
- (4) 続いて一様漸増(概ね700N/分)の押し込み荷重を杭頭に作用させ、支持力確認を行う。上記の手順で同じ試験を3回繰返して実施し、その平均値を用いて支持力評価を行うこととした。

3.3 鉛直載荷実験

図3.4、3.5に二枚羽根(DUO)と一枚羽根(ECO)の各部の荷重-変位関係を示す。

表3.3に杭頭変位が羽根径の10%(DUOの場合:上羽根径 D_{wu} の10%, ECOの場合:下羽根径 D_{wb}

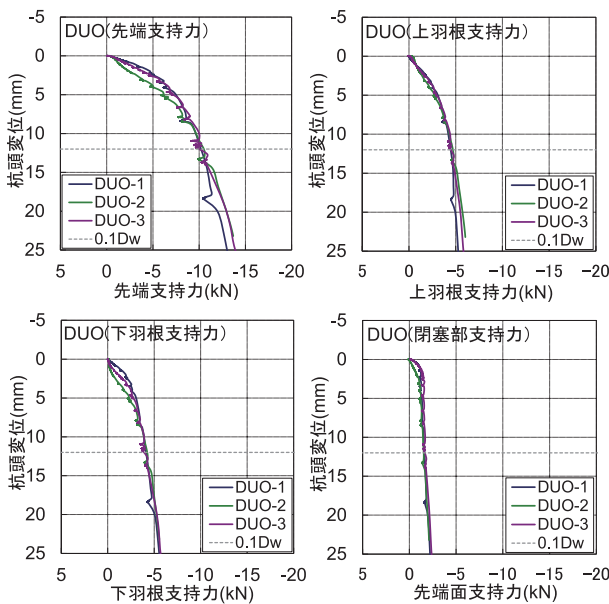


図3.4 NSエコパイルDUOの荷重-変位関係
Fig3.4 Relationship between pile displacement and axial force of the NS ECO-PILE DUO model pile

の10%)に達した時の各部の支持力と先端支持力に対する各部の負担割合を示す。この表から、DUOの先端支持力(10.2kN)は、ECOの先端支持力(4.5kN)に対し2.3倍になっていることが分かる。更に、DUOの各部の支持力負担割合より、

$$\text{上羽根} : \text{下羽根} + \text{先端面} = 45 : 55 \quad (1)$$

となっていることが分かる。

さらに、表3.4に表3.3の各部の支持力を羽根面積で除した各部の接地圧を示す。この表より、ECOの下羽根の接地圧は閉塞部より小さくなっているのに対し、DUOの下羽根の接地圧は閉塞部とほぼ同等の値になっている。すなわち、従来の一枚羽根の回転杭に上羽根を加えることにより、上羽根分の支持力が增加するだけでなく、下羽根の接地圧が大きく

表3.3 先端支持力と各部の抵抗力
Table3.3 End resistance

試験体名称	DUO	ECO
上羽根 (kN)	4.5[44%]	—
下羽根 (kN)	4.1[40%]	2.9[65%]
閉塞部 (kN)	1.6[16%]	1.6[35%]
合計 (kN)	10.2[100%]	4.5[100%]

表3.4 各部の接地圧
Table3.4 Bearing capacity

試験体名称	DUO	ECO
上羽根 (MPa)	0.49[39%]	—
下羽根 (MPa)	1.25[99%]	0.88[70%]
閉塞部 (MPa)	1.27[100%]	1.27[100%]

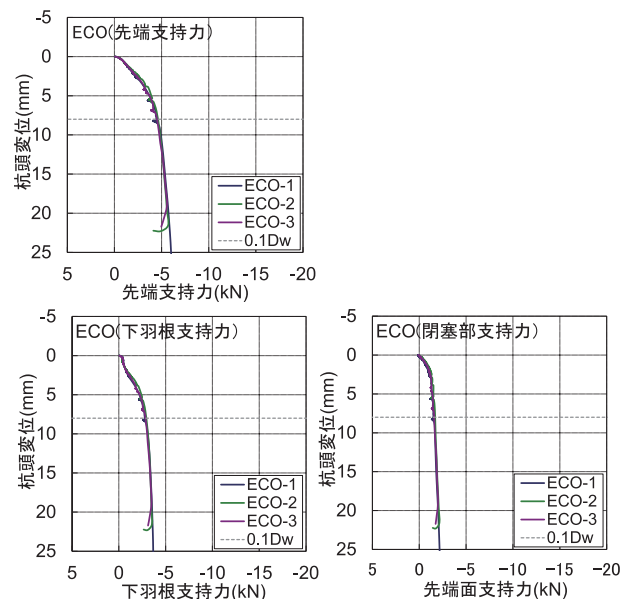


図3.5 NSエコパイルの荷重-変位関係
Fig3.5 Relationship between pile displacement and axial force of the ECO-PILE model pile

なる分だけ下羽根の支持力も増加することが分かる。

以上の模型実験から、①NS エコパイル DUO の先端支持力は、羽根径比=2.0のNS エコパイルの2.3倍相当の支持力が得られること、②この時、上羽根は先端支持力の45%の支持力を負担することが推測された。そこで、この内容を検証するために、実大のNS エコパイル DUO にて载荷実験を実施することとした。

4 実大杭による支持力性能確認実験

以下に実大のNS エコパイル DUO を用いた回転貫入施工・载荷実験の内容を報告する。

4.1 地盤概要および試験杭

図4.1に回転貫入施工・载荷実験を行った地盤概要と実大杭の姿図を示す。敷地は埼玉県比企郡川島町に位置し、表層部からGL-18.2mまでは粘性土主体の有楽町層、その下GL-29.5mまでN値9~40程度の砂層からなる七号地層で構成されている。

本実験に使用したNS エコパイル DUO の軸部は、軸径 $D_p = 355.6\text{mm}$ (板厚 $t_{11.1\text{mm}}$ 、降伏点 $\sigma_y = 325\text{MPa}$) の鋼管である。また、先端の羽根は、上羽根径が $D_{wu} = 1067\text{mm}$ (板厚 $t_{55\text{mm}}$)、下羽根径が $D_{wb} = 711\text{mm}$ (板厚 $t_{25\text{mm}}$) であり、鋼板(降伏点 $\sigma_y = 325\text{MPa}$) をプレス加工しらせん状に成形したものである。また、模型杭の先端軸力の測定位置に合わせるために、上羽根先端から $2D_p$ 上方に、杭先端軸力測定用のひずみゲージ(G1)を貼付した。更に、上羽根の支持力負担割合を把握するために、上羽根と下羽根の間にもひずみゲージ(G2)を貼付し軸力測定を行った。

図4.2に平面配置図を示す。7.0m×4.5mの長方形の短辺に3本ずつ反力杭(杭径 $\phi 355.6$ 、羽根径比=2.5のエコパイル)を配置し、6本の反力杭を用いて試験杭の鉛直载荷を行う計画とした。

4.2 試験杭の回転貫入施工および実験方法

試験杭の施工には、自走式のリーダー付き小型重機(トルク出力の最大値250kNm)を使用した。施工時に杭頭に作用させる押込み力は、地表面付近を除き、オーガーヘッドの自重38.9kNのみとした。

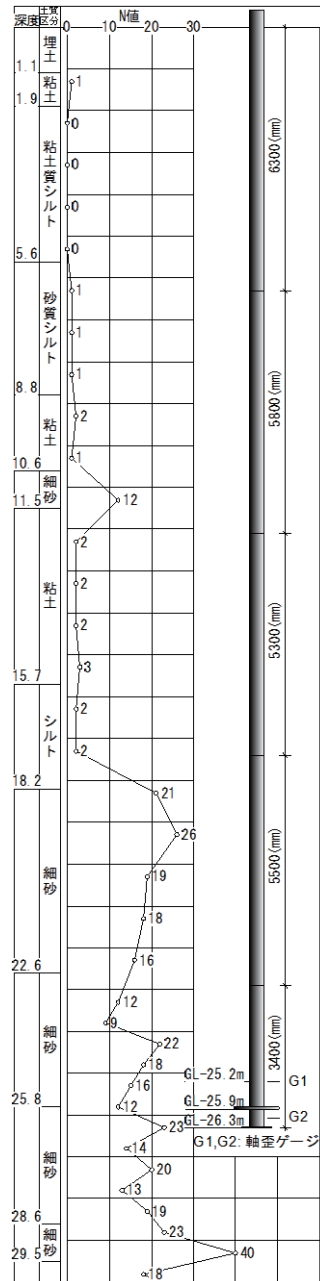


図4.1 地盤概要と実大試験杭
Fig4.1 Summary of SPT results and Full-scale test pile

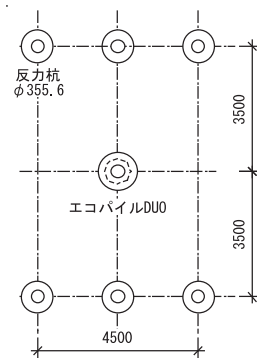


図4.2 試験杭の配置
Fig4.2 Pile load test layout

施工後およそ1.0ヵ月の養生期間を設け、試験杭の載荷を行った。載荷実験は、「杭の鉛直載荷試験方法・同解説(地盤工学会)」に基づく多サイクル方式にて実施し、新規荷重に対しては荷重を30分間保持した。図4.3に載荷サイクルを示す。

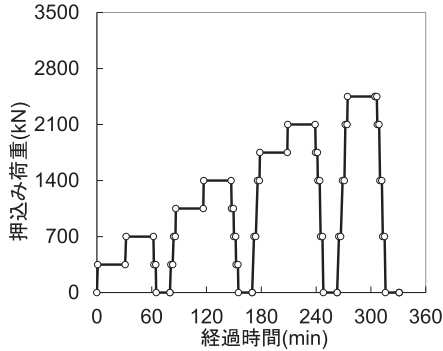


図4.3 載荷サイクル
Fig.4.3 Loading pattern

4.3 載荷実験

図4.4に実大杭の先端支持力-先端変位関係を示す。先端変位は、沈下棒を用いて直接計測することとした。図より先端変位が上羽根径 D_{wu} の10%に達した時、先端支持力は $R_u = 1,977$ (kN) となっていることが分かる。杭先端平均 N 値の算出方法は工法毎に異なるが、本工法では上羽根先端(上羽根の下端)から上下に上羽根径 D_{wu} の範囲にある N 値の平均値とした。このとき、杭先端平均 N 値は $N = 16.4$ となる。一方、この先端 N 値から求めた羽根径比 = 2.0 の同杭径の NS エコパイルの先端支持力は、既存の支持力算定式より 810 (kN) となる。よって、今回の載荷実験から得られた NS エコパイル DUO の先端支持力 R_u は、2.0 倍径 NS エコパイルの支持力算定値の 2.4 倍に相当している。

また、図4.5に上羽根支持力-先端変位の関係を示す。図より上羽根は、先端変位の大小に関わらず、先端支持力のほぼ45%の支持力を負担していることが分かる。

表4.1より、実大杭の実験結果は、模型実験の結果と整合しており、両実験とも妥当な結果が得られているものと考えられる。以上の実大杭の載荷実験から、NS エコパイル DUO の先端支持力は、2.0 倍径 NS エコパイルの 2.4 倍程度の支持力が得られ、この時の上羽根の支持力は、杭先端支持力の 45% を負担していることが確認できた。

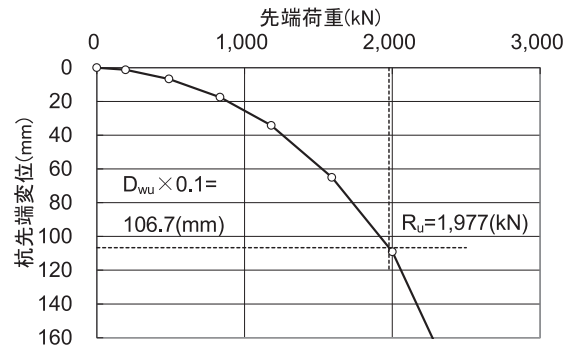


図4.4 先端支持力-先端変位関係
Fig.4.4 Relationship between pile displacement and pile end resistance

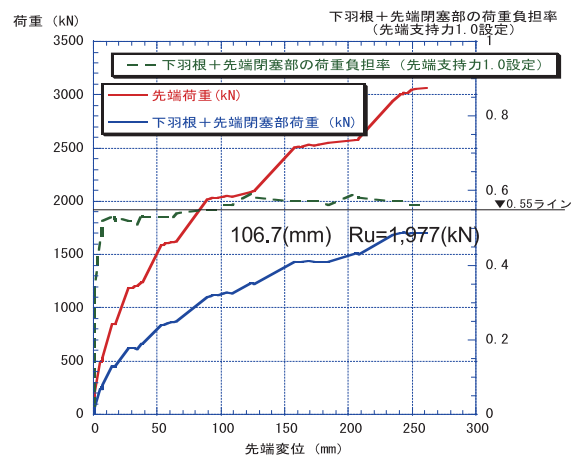


図4.5 上羽根支持力-先端変位関係
Fig.4.5 Relationship between pile displacement and upper wing resistance

表4.1 実大杭と模型杭の先端支持力
Table4.1 End resistance of full-scale pile & model pile

試験体名称	DUO 実大杭	DUO 模型杭
上羽根 (kN)	870 [44%]	4.5 [44%]
下羽根 (kN)	1,107 [56%]	4.1 [40%]
先端面 (kN)		1.6 [16%]
合計 (kN)	1,977 [100%]	4.5 [100%]

5 先端支持力算定式

第3, 4章から得られた知見を元に杭先端の有効断面積を定め、載荷実験データを元に先端支持力係数を設定する。鉛直載荷実験を、全4箇所の敷地で合計10試験体に対し実施した。

5.1 杭先端の支持力算定式

基礎杭の長期先端支持力算定式は、国土交通省告示第1113号³⁾に従い、次式のように表現される。

$$R_{al} = \frac{1}{3} \alpha \bar{N} A_p$$

ここに、 α : 先端支持力係数

N : 杭先端の平均 N 値

(本工法では、上羽根先端から上下に上羽根径の範囲の平均 N 値とする)

3章の模型実験、4章の実大杭実験から、上羽根の支持力負担は、先端支持力全体の45%を占めることが分かった。そこでこの支持力負担割合になるように、上羽根と下羽根の投影面積を元に、杭先端の有効断面積 A_p を次式で定義した。

$$A_p = A_{wb} + 0.41 \cdot A_{wou}$$

ここで、

A_{wb} : 下羽根の有効面積 (m^2)

$$A_{wb} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot D_{wb}^2$$

A_{wou} : 上羽根の有効面積 (m^2)

$$A_{wou} = \frac{1}{4} \cdot \pi \cdot (D_{wu}^2 - D_p^2)$$

D_p : 杭径(m)

D_{wb} : 下羽根の羽根径(m)

D_{wu} : 上羽根の羽根径(m)

5.2 載荷実験データ

表5.1, 図5.1に載荷実験の結果を示す。全データの内、支持力係数が極端に大きくなる YCYφ 101.6**と、杭先端地盤が砂礫地盤である KWJφ 318.5*, φ190.7*を除き、砂地盤のデータのみで支持力係数の検討を行った。砂地盤の先端支持力係数 α の最大値 = 211, 最小値 = 154, 平均値 = 176, 標準偏差 = 20.4となった。載荷実験データがまだ十分に蓄積されていないため、杭先端の支持力係数は、載荷

表5.1 載荷実験データ
Table5.1 Sample list

敷地名	杭径 (mm)	先端深さ GL-(m)	地盤種別	先端N値	支持力係数 α
KWJ	φ 355.6	26.3	砂	16.4	167
	φ 318.5*	30.2	砂礫	27.9	188*
	φ 190.7*	30.2	砂礫	25.4	209*
SKI	φ 216.3	19.4	砂	25.3	164
	φ 139.8	19.4	砂	24.1	160
YCY	φ 190.7	18.8	砂	33.9	154
	φ 101.6**	7.8	砂	11.7	370**
MIH	φ 318.5	14.2	砂	51.7	172
	φ 190.7	14.2	砂	52.2	211
	φ 114.3	14.2	砂	52.9	203

実験データの最低値を小さい方に丸めた値を採用し、

$$\alpha = 150$$

に設定した。この α は、同杭径の NS エコパイル (羽根径比 = 2.0) の先端支持力の2.2倍に相当する係数である。

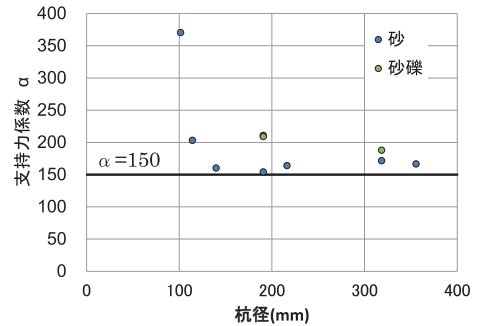


図5.1 杭径と支持力係数の関係

Fig5.1 Relationship between coefficient of bearing capacity and pile diameter

6 結言

杭先端に2枚のらせん状の羽根を取り付けた回転貫入杭 NS エコパイル DUO について、先端支持力性能を把握するために、模型杭実験および実大杭実験を実施した。その結果、羽根径比 = 2.0 の1枚羽根を取り付けた NS エコパイルに比べ約2.2倍の支持力が得られることが明らかとなった。

2016年3月に NS エコパイル DUO 工法の大径認定を取得⁴⁾し、同10月から本格的に販売を開始した。現在、本工法の施工店会が組織され、多くのプロジェクトで採用に向けた検討が進められている。現状では、適用できる支持層地盤が砂に限定されているが、今後、更に載荷実験データを蓄積し、砂礫にも対応できるよう、適用範囲を広げていく予定である。

参考文献

- 1) 新日鉄住金エンジニアリング：「回転圧入鋼管杭 (NS エコパイル工法) の許容支持力」評定資料, 2000. 3
- 2) 佐伯英一郎, 永田誠, 平田尚, 和田昌敏：回転圧入鋼管杭模型試験機の製作, 第36回地盤工学研究発表会論文梗概集, pp. 1623-1624, 2001. 7
- 3) 国土交通省告示第1113号, 2001. 7
- 4) 新日鉄住金エンジニアリング：「NS エコパイル DUO 工法」評定資料, 2016. 2

「NS エコパイル」、「NS エコパイル DUO」は、新日鉄住金エンジニアリング(株)と新日鐵住金(株)の登録商標です。