

環境性能に優れた先端翼付き回転貫入鋼管杭 「つばさ杭[®]」の支持力特性と施工性能

Bearing Capacity and Driving Efficiency of Ecological Screw Pile: “Tsubasa Pile”

市川 和臣 ICHIKAWA Kazuomi JFE スチール 建材センター 建材開発部 主任部員 (課長)
河野 謙治 KONO Kenji JFE スチール スチール研究所 土木・建築研究部 主任研究員 (課長)

要旨

JFE スチールが開発した「つばさ杭[®]」は、2種類の先端形状、鋼管径の1.5~3.0倍の先端翼、軟弱地盤に適した拡頭杭など、地盤条件に応じた杭仕様が可能な回転貫入鋼管杭である。「つばさ杭[®]」は完全無排土施工やセメントミルク不使用などの環境に優れた特性を持っているとともに、さまざまな分野において先端翼を活かした大きな支持力が認められており、着実に実績を伸ばしている。また、斜杭や地中熱の活用などの新たな技術開発も進んでいる。

Abstract:

“Tsubasa Pile” developed by JFE Steel is a steel screw pile which has the tip shape of two types, wing tip diameter of 1.5 to 3.0 times of the steel pipe, and an enlarged pile head structure for soft ground. This wide range of products makes it possible to select suitable specifications according to ground conditions. It has been increasingly used in various fields by taking advantage of large bearing capacities and environmentally-friendliness such as driving without removing any soil and non-use of cement milk. In addition, JFE Steel is developing new technologies including the use of batter piles and the utilization of geothermal heat.

1. はじめに

基礎杭が発展する中で、さまざまな工法が開発され、実際の現場で用いられてきたが、環境との関係では施工時の騒音や振動・建設残土の処理・地下水汚染などに着目されることが多かった。そのような中で、JFE スチールが開発した先端翼付き回転貫入鋼管杭「つばさ杭[®]」は大きな支持力(押し込み・引き抜き)を得られることに加え、環境に優しいことを大きなメリットとして建築基礎、道路橋基礎、鉄道橋基礎など多様な分野で採用され、実績を伸ばしてきた。ここでは、その特長を述べる。

2. 「つばさ杭[®]」の特長

2.1 一般事項

2.1.1 構造

「つばさ杭[®]」は、鋼管の先端に、2枚の半円状の平鋼板(鋼管径の1.5~3.0倍の直径を有する)を交差させて取り付け先端翼付きの鋼管杭である。先端翼の中心に孔(鋼管径の1/2)が空いており、鋼管外面で鋼板が交差しているもの

と、先端が完全に閉塞しており、鋼管中心で鋼板が交差しているものの2種類があり、それぞれ「つばさ杭[®](開端タイプ)」(図1)、「つばさ杭[®](閉端タイプ)」(図2)という名称で商品化している。

また、「つばさ杭[®]」では杭頭部側の鋼管径を先端部側の鋼管径より大きく(最大で1.6倍まで可能)し、鋼製の円盤を介して溶接接合した拡頭タイプ(写真1)が可能であり、

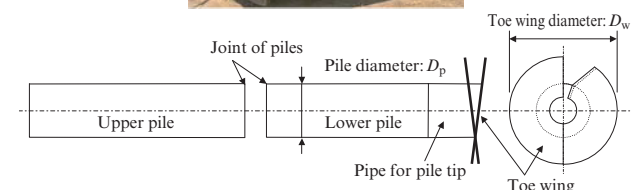


図1 「つばさ杭[®]」(開端タイプ)

Fig. 1 Composition of “Tsubasa Pile” (Open end)

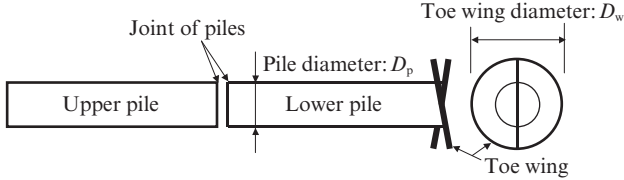


図2 「つばさ杭[®]」(閉端タイプ)

Fig. 2 Composition of "Tsubasa Pile" (Closed end)



写真1 拡頭タイプ (φ800 mm+φ1 200 mm) の例
Photo 1 Enlarged pile head (D_p : 800 mm+1 200 mm)

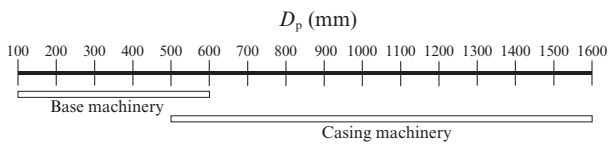


図3 杭径による施工機械の区分

Fig. 3 Machinery type according to pile diameter, D_p



クローラ式杭打ち機
(Base machinery)

全周回転機
(Casing machinery)

写真2 施工機械

Photo 2 Construction machinery

大きな水平抵抗力が必要となる軟弱地盤などで用いられる。これらの仕様は、実験およびFEM(有限要素法)解析により、杭径や先端翼倍率ごとに標準化されており、現場の条件に応じて選定することができる。

2.1.2 施工機械

「つばさ杭[®]」の施工は、特殊な施工機械ではなく、一般に用いられている施工機械で行なう。なお、使用する機械は杭径や地盤条件によって異なるが、おおよそ図3のような区分となっている。各施工機械を写真2に示す。径の小さいものは杭頭部を回転させ、径が大きいものは杭の胴体部を回転させるのが一般的である。

2.2 適用範囲

「つばさ杭[®]」は建築分野では(財)日本建築総合試験所、道路分野では(財)土木研究センター、鉄道分野では(財)鉄道総合技術研究所において性能評価を受けている¹⁻⁵⁾。各分野における適用範囲を表1に示す。分野ごとに異なった値となっているが、これは評価を受けた時期や基準が異なるためであり、この適用範囲を外れるものが適用不可という訳ではない。

2.3 開端タイプと閉端タイプの違い

「つばさ杭[®]」は開端タイプと閉端タイプの2種類を有しており、それぞれの特長を活かした利用が可能である。各タイプの概要を以下に示す。

2.3.1 開端タイプ

開端タイプは施工性の向上を目的に2007年に実用化したものである。

施工時に管内に土砂を取り込みながら施工できるため、大径(φ700 mm以上)の杭での施工性に優れており、特に硬質な中間層を有する地盤に適している。

2.3.2 閉端タイプ

閉端タイプは1999年から実用化している形状であり、非常に多くの実績を有している。シンプルで剛性の高い構造であり、低コストでの製造が可能である。主に小・中径(φ609.6 mm以下)で用いられる。

2.4 施工体制

「つばさ杭[®]」の施工は一般的な施工機械を用いて行なうが、さまざまな現場で確実な施工を行なうためには、特有のノウハウが必要である。「つばさ杭[®]」では、JFEスチールおよび杭施工会社9社(2012年5月現在)で「つばさ杭技術協会」を組織し、技術力の向上に努めている。

3. 環境に優れた施工特性

3.1 環境面への影響

3.1.1 無排土施工

「つばさ杭[®]」に地上からねじ込み力(トルク)を与えると、先端翼が木ねじのような推進効果を発揮して、杭体が地中に回転貫入していく。この際杭体積分の土砂は、以下の(1)、(2)のような動きをするため、施工中～施工完了まで地上部

表1 「つばさ杭®」の適用範囲

Table 1 Scope of application

Type	Field	Diameter		Max. depth (m)	Upper row: Pile diameter (mm) Lower row: Magnification of toe wing		
		Min. (mm)	Max. (mm)				
Open end	Building	114.3	1 200	87	114.3-609.6	700-1 200	
					1.5-3.0	1.5-2.0	
	Road bridge	318.5	1 600	77	318.5-1 200	1 300-1 600	
					1.5-2.0	1.5	
Railway bridge	400	1 600	—	400-1 600			
				1.5			
Closed end	Building	114.3	1 200	60	114.3-267.4	318.5-508.0	600-1 200
					2.0-3.0	2.0-2.5	1.5-2.0
	Road bridge	318.5	1 200	60	318.5-1 200		
					1.5-2.0		
	Railway bridge	400	800	—	400-800		
2.0							



写真3 施工完了後の地表面

Photo 3 Ground surface after construction

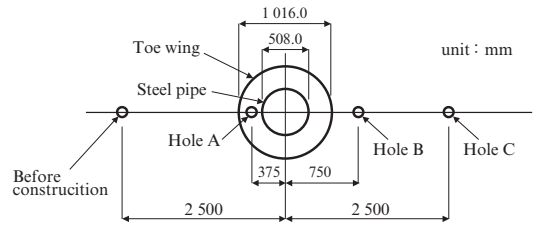


図5 調査地点

Fig. 5 Investigation points

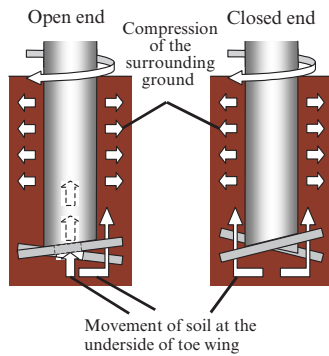


図4 施工時の土砂の動き

Fig. 4 Movement of soil during construction

には一切土砂が排出されない(写真3)。(1)先端翼の回転に伴い、先端翼下側の土砂が先端翼の上側および管内(開端タイプのみ)に移動する。(2)先端翼の上側に移動した土砂は、鋼管により側方へ圧縮される。この土砂の動きを模式的に示したものが図4である。

施工前後の杭周囲の地盤密度とN値を計測して比較した事例を図5, 6に示す。杭施工後に杭の近傍(A, B)で密度とN値は上昇しており、杭施工に伴って周囲の地盤が圧縮されていることが分かる。

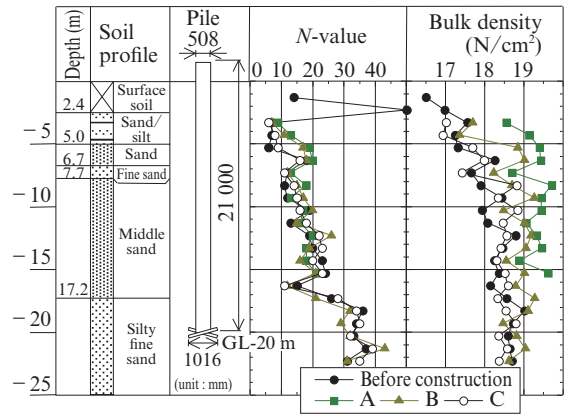


図6 施工前後の密度とN値の変化

Fig. 6 Soil investigation results

無排土施工によるメリットとしては、残土の処理費用が0になることだけでなく、処理のためのダンプが不要で周辺の交通に影響を与えないことや、工場跡地などの土壤汚染の懸念がある地盤でも施工が可能なことなどがあげられる。

3.1.2 セメントミルク不使用

大きな先端支持力を発揮するために、既製杭では支持層内で根固め球根を築造するのが一般的である。また、場所打ち杭では杭全長をコンクリートで築造する。そのため、地下水をセメントミルクで汚染することが避けられない。

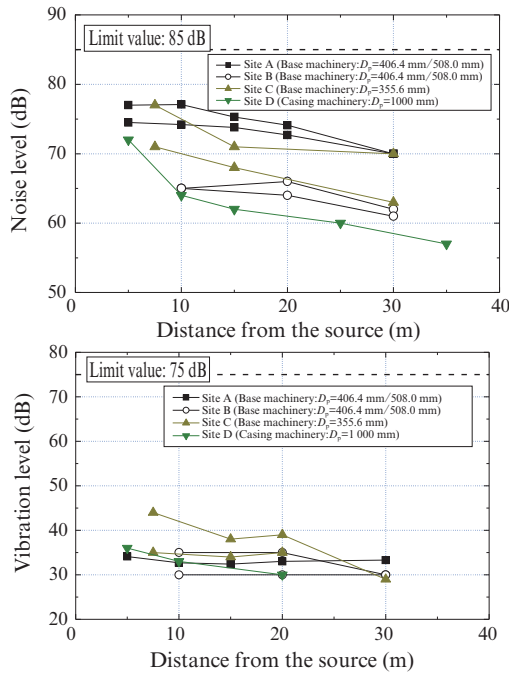


図7 騒音・振動の測定事例
Fig. 7 Measurement of noise and vibration

「つばさ杭®」の場合、先端支持力を先端翼自身の剛性で受け持つため、セメントミルクは一切使用しない。そのため、地下水を汚染することなく杭を施工でき、井戸水を利用している地区や伏流水や被圧水が存在する地区でも施工が可能である。

3.1.3 低騒音・低振動

「つばさ杭®」は鋼管をねじ込んで施工するため、大きな打撃音は発生せず、低騒音・低振動での施工が可能である。実際の杭を施工した時の騒音・振動の測定結果（4現場）を図7に示す。いずれも基準値（騒音 85 dB、振動 75 dB）と比較して十分小さな値となっていることが分かる。

3.2 新規用途への展開

閉端タイプでは、施工完了後も管内が中空であり、これを活用することにより、通常の支持杭に付加価値を持たせることが可能である。実施例としては、下記のものがある。

3.2.1 地中熱利用の空調システム

地中温度は年間を通じてほぼ一定であり、外気温に比べて夏は低く、冬は高くなっている。ヒートポンプ熱源として地中熱を活用できれば効率の良い空調が可能であるが、掘削などの設置コストが高くなってしまうという問題がある。そこで、「つばさ杭®」を基礎杭と熱交換機として兼用することにより、設置コストを大幅に削減した地中熱利用システムが可能となる。概要を図8に示す。

3.2.2 建設残土の処分

建設現場では、杭施工以外でもさまざまな建設残土が発生する可能性がある。施工後の「つばさ杭®」の内部に残土

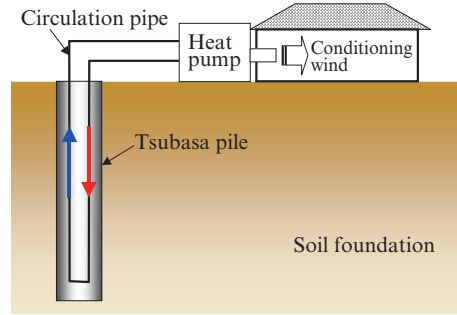


図8 地中熱利用空調システム
Fig. 8 Geothermal air-conditioning system

を投入すれば、現場外に残土を排出することなく処分が可能であり、運搬費用、処理費用を大幅に削減できる。

4. 「つばさ杭®」の支持力性能

「つばさ杭®」は杭径の1.5~3.0倍の径を持つ先端翼の面積で支持力を受け持つため、非常に大きな先端支持力を期待できる。支持力性能には、押し込みと引き抜きの2種類があり、それぞれ実大載荷試験により支持力を確認している。ただし、適用分野により基準が異なっているため、評価上の式は異なる。また、道路分野（開端タイプ、閉端タイプ）、鉄道分野（開端タイプ）では類似工法と併せて「回転杭」^{6,7)}として統一した支持力式が提案されている。

4.1 押し込み支持力

「つばさ杭®」では、開端タイプ、閉端タイプで合わせて36件の押し込み載荷試験を実施しており、この試験結果に基づき、設計押し込み支持力式を定めている。載荷試験の実施状況を図9に示す。

各分野での設計式の概要については4.1.1~4.1.3項に示すが、共通で用いる記号については以下に示す。

R_u : 杭頭極限押し込み支持力 (kN)

D_p : 杭径 (m)

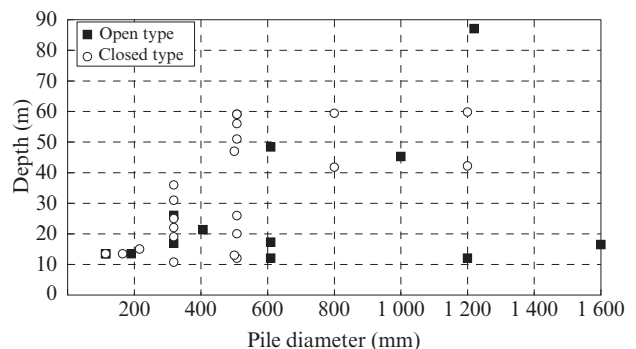


図9 載荷試験実施状況（押し込み）
Fig. 9 List of compressive load tests

D : 拡頭部外径 (m)	地盤種別 : 砂 1.5 倍翼 120N, 2.0 倍翼 100N
D_w : 先端翼径 (m)	礫 1.5 倍翼 130N, 2.0 倍翼 115N
D_{wi} : 先端翼内径 (m), $D_{wi}=0.5 D_p$	N : 杭先端地盤の N 値 ($N \leq 50$)
L_s : 砂質地盤に接する長さの合計 (m) ただし、杭先端から $1D_w$ の区間を除く。	A_w : 翼投影面積 (m^2) $A_w = \pi/4 \cdot D_w^2$
L_c : 粘土質地盤に接する長さの合計 (m) ただし、杭先端から $1D_w$ の区間を除く。	f_i : 周面摩擦力を考慮する i 番目の層の最大周面 摩擦力度 (kN/m^2) 砂質土 : $3N (\leq 150)$, 粘性土 : c または $10N (\leq 100)$
L_i : 周面摩擦力を考慮する i 番目の層の層厚 (m)	c : 粘着力 (kN/m^2)
Ψ : 杭周長 (m) $\Psi = \pi \cdot D_p$ (通常タイプ/拡頭タイプの一般部) $\Psi = \pi \cdot D$ (拡頭タイプの拡頭部)	N : 杭周面地盤の N 値

4.1.1 建築分野

押し込み支持力は下式を基準に評価する。

$$R_u = \alpha \cdot \bar{N} \cdot A_p + (\beta \cdot \bar{N}_s \cdot L_s + \gamma \cdot \bar{q}_u \cdot L_c) \cdot \Psi \quad (1)$$

- α : 先端支持力係数 (砂・礫共通)
開端タイプ ($\alpha=150$), 閉端タイプ ($\alpha=132$)
- β : 砂質地盤における杭周面摩擦係数
開端/閉端タイプ ($\beta=2.0$)
- γ : 粘土質地盤における杭周面摩擦係数
開端/閉端タイプ ($\gamma=0.5$)
- \bar{N} : 杭先端より下方に $1D_w$, 上方に $1D_w$ の範囲の地盤の標準貫入試験による打撃回数の平均値 (回)
開端タイプ : $12 \leq \bar{N} \leq 60$,
閉端タイプ : $13 \leq \bar{N} \leq 60$
- A_p : 基礎ぐいの先端の有効断面積 (m^2)
開端タイプ :
 $A_p = (1.40 - 0.25 \cdot D_w/D_p) \cdot \pi/4 \cdot (D_w^2 - D_{wi}^2)$
閉端タイプ : $A_p = \pi/4 \cdot D_w^2$
- \bar{N}_s : 砂質地盤の標準貫入試験による打撃回数の平均値 (回)
開端タイプ : $2 \leq \bar{N}_s \leq 30$,
閉端タイプ : $4 \leq \bar{N}_s \leq 30$
- \bar{q}_u : 粘土質地盤の一軸圧縮強度の平均値 (kN/m^2)
開端タイプ : $23 \leq \bar{q}_u \leq 200$,
閉端タイプ : $43 \leq \bar{q}_u \leq 200$

4.1.2 道路分野

押し込み支持力は下式を基準に評価する。この式は回転杭の式であり、開端タイプ/閉端タイプで同一である。

$$R_u = q_d \cdot A_w + \Psi \cdot \Sigma(L_i \cdot f_i) \quad (2)$$

q_d : 先端極限支持力度 (kN/m^2)

4.1.3 鉄道分野

押し込み支持力は下式を基準に評価する。なお、開端タイプについては、回転杭の式である。

$$R_u = q_{tk} \cdot A_t + \Psi \cdot \Sigma r_{tk} \cdot L_i \quad (3)$$

- q_{tk} : 基準先端支持力度 (kN/m^2)
(開端タイプ) $150N (\leq 10\,000)$ (砂・礫共通)
 N : 杭先端から上方 $1D_p$, 下方 $3D_p$ の区間の最小 N 値
(閉端タイプ) 砂 : $75N (\leq 6\,000)$,
礫 : $75N (\leq 7\,500)$
 N : 杭先端付近の N 値
- A_t : 杭先端面積 (m^2)
開端タイプ : $A_t = \pi/4 \cdot (D_w^2 - D_{wi}^2)$
閉端タイプ : $A_t = \pi/4 \cdot D_w^2$
- r_{tk} : 基準周面支持力度 (kN/m^2)
(開端タイプ) 砂質土 : $2.5N (\leq 100)$,
粘性土 : $5N (\leq 100)$ または $0.3c (\leq 100)$
(閉端タイプ) 砂質土 : $2N (\leq 100)$,
粘性土 : $4N (\leq 100)$
 N : 杭周面地盤の N 値, c : 粘着力 (kN/m^2)

4.2 引き抜き抵抗力

「つばさ杭[®]」では、開端タイプ、閉端タイプ合わせて10件の引き抜き載荷試験を実施しており、この試験結果に基づき、設計引き抜き抵抗式を定めている。載荷試験の実施状況を図10に示す。

各分野での設計式の概要については4.2.1~4.2.3項に示すが、共通で用いる記号については以下に示す。

R_t : 杭頭極限引き抜き抵抗力 (kN)

D_p : 杭径 (m)

D : 拡頭部外径 (m)

D_w : 先端翼径 (m)

L_s : 砂質地盤に接する長さの合計 (m)

ただし、杭先端から $2D_w$ の区間を除く。

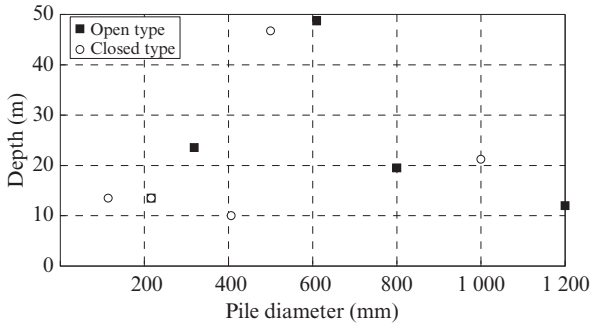


図 10 載荷試験実施状況 (引き抜き)
Fig. 10 List of tensile load tests

表 2 引抜き係数 β
Table 2 Uplift coefficient, β

内部摩擦角 ϕ	引抜き係数 β
35°	2.16
36°	2.40
37°	2.65
38°	2.89
39°	3.14
40°	3.38
41°	3.77
42°	4.16
43°	4.55
44°	4.93
45°	5.30

- L_c : 粘土質地盤に接する長さの合計 (m)
ただし、杭先端から $2D_w$ の区間を除く。
- Ψ : 杭周長 (m)
 $\Psi = \pi \cdot D_p$ (通常タイプ/拡頭タイプの一般部)
 $\Psi = \pi \cdot D$ (拡頭タイプの拡頭部)
- γ_i : 支持層より上で地表面から i 番目の層の土の有効単位体積重量 (kN/m^3)
- L_i : 支持層より上で地表面から i 番目の層の層厚 (m)
- γ : 支持層の土の有効単位体積重量 (kN/m^3)
- H : 翼上方の局所せん断破壊域の拡がる高さでの支持層への根入れ長 (m)
 $H \leq 2.5D_w$ とする (道路分野)
 $H \leq 1D_w$ とする (鉄道分野)
- β : 引抜き係数。せん断破壊面の抵抗係数を表し、支持層の内部摩擦角に応じた値を適用する (表 2)。
- ϕ : 支持層の内部摩擦角 (°)

4.2.1 建築分野

引き抜き抵抗力は下式を基準に評価する。この式は、開

端タイプ/閉端タイプで同一である。

$$R_t = \kappa \cdot \bar{N}_t \cdot A_{tp} + (\lambda \cdot \bar{N}_s \cdot L_s + \mu \cdot \bar{q}_u \cdot L_c) \cdot \Psi \dots \dots \dots (4)$$

- κ : 先端支持力係数 (砂・礫共通)
 $\kappa = 63$ ($0.1143 \leq D_p \leq 0.6096$)
 $\kappa = 44$ ($0.7 \leq D_p \leq 1.2$)
- λ : 砂質地盤における杭周面摩擦係数
 $\lambda = 1.02$ ($0.1143 \leq D_p \leq 0.6096$)
 $\lambda = 0.71$ ($0.7 \leq D_p \leq 1.2$)
- μ : 粘土質地盤における杭周面摩擦係数
 $\mu = 0.05$ ($0.1143 \leq D_p \leq 0.6096$)
 $\mu = 0.03$ ($0.7 \leq D_p \leq 1.2$)
- \bar{N}_t : 杭先端より上方に $2D_w$ の範囲の地盤の標準貫入試験による打撃回数の平均値 (回)
 $12 \leq \bar{N}_t \leq 60$
- A_{tp} : 先端翼張出面積 (m^2)
 $A_{tp} = \pi/4 \cdot (D_w^2 - D_p^2)$
- \bar{N}_s : 砂質地盤の標準貫入試験による打撃回数の平均値 (回)
 $6 \leq \bar{N}_s \leq 30$
- \bar{q}_u : 粘土質地盤の一軸圧縮強度の平均値 (kN/m^2)
 $50 \leq \bar{q}_u \leq 200$

4.2.2 道路分野

引き抜き抵抗力は下式を基準に評価する。この式は回転杭の式であり、開端タイプ/閉端タイプで同一である。

$$R_t = \pi \cdot D_w \cdot (\sum \gamma_i \cdot L_i + \gamma \cdot H/2) \cdot H \cdot \beta \cdot \tan \phi + \Psi \cdot \Sigma (L_i \cdot f_i) \dots \dots \dots (5)$$

なお、(5) 式の第 1 項は杭先端のアンカー効果を示しており、引き抜き抵抗のメカニズムを図 11 のように考えてい

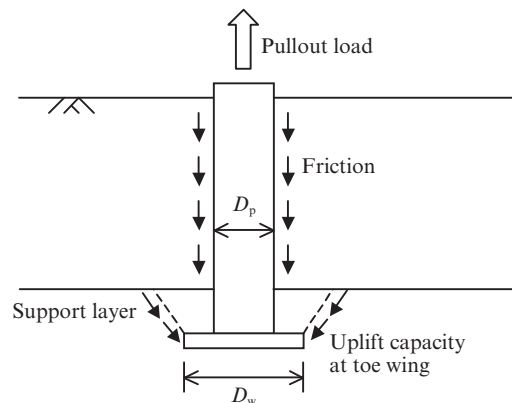


図 11 先端翼のアンカー効果
Fig. 11 Anchor effect of toe wing

表3 斜杭施工試験の諸元
Table 3 Specification of test

Type	Inclination angle (°)	Diameter (mm)	Magnification of toe wing	Depth (m)	Support layer
Open end	15	600	2.0	21.51	Gravel

表4 傾斜角度の測定結果

Table 4 Measurement of inclination angle

Depth (m)	Inclination angle (°)	
	Direction of slope	Direction of perpendicular to slope
0.0	15.0	0.4
7.25	15.0	—
9.87	15.0	0.2
9.87	15.0	0.5
15.00	15.0	0.2
21.51	15.2	0.0

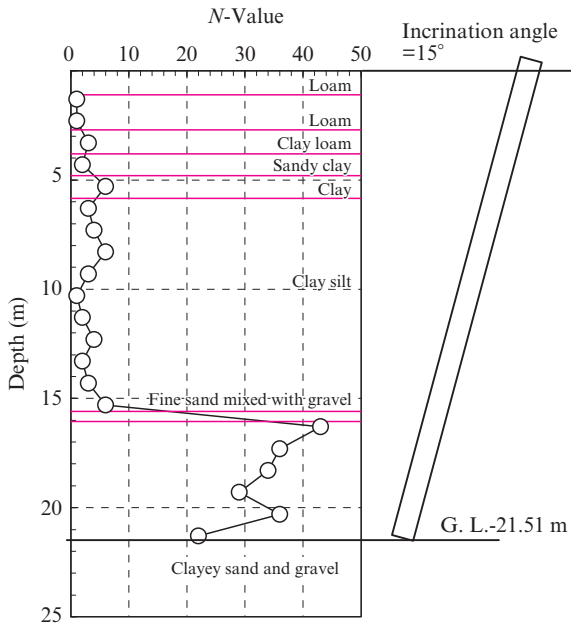


図12 地盤条件と杭姿図

Fig. 12 Soil profile and pile shape

は杭本数の削減など大幅なコスト削減が期待できる。

ここでは、φ600 mm 程度までの施工で一般的に用いられているクローラ式杭打ち機を用いて実施した施工試験の概要について述べる。試験の条件を表3、地盤柱状図と杭姿図を図12に、試験の実施状況を写真4にそれぞれ示す。

この試験では、傾斜角度の管理目標値として15°±0.5°を設定し、適宜計測を行ないながら杭を施工した。

測定結果を表4に示すが、ほぼ一定の角度を保って施工ができており、「つばさ杭[®]」を斜杭に適用できることが確認できた。なお、全周回転機においても同様の施工は可能であり、すでに実工事での適用実績がある。



写真4 斜杭施工試験実施状況

Photo 4 Construction test of batter pile

5. おわりに

本報では、環境面と支持力を中心に「つばさ杭[®]」の特長を述べた。「つばさ杭[®]」は、500件を超える施工実績を有しているが、今後もさらに実績を増やすべく、努力していく所存である。

参考文献

- 1) 国土交通大臣認定 TACP-0413 「つばさ杭 (開端タイプ)」別添資料.
- 2) 国土交通大臣認定 TACP-0395 「つばさ杭 (閉端タイプ)」別添資料.
- 3) 土木研究センター. 「つばさ杭 (開端タイプ)」建設技術審査証明報告書. 建技審証第 1013 号. 2011-03.
- 4) 土木研究センター. 「つばさ杭」建設技術審査証明報告書. 建技審証第 0104 号. 2011-08.
- 5) 鉄道総合技術研究所. 「つばさ杭」の支持力評価に関する研究報告書. 2008-08.
- 6) 日本道路協会. 道路橋示方書・同解説IV下部構造編. 2012-03.
- 7) 鉄道総合技術研究所編. 鉄道構造物等設計標準・同解説—基礎構造物. 2012-01.

る。また、第2項は押し込みと同等としている。

4.2.3 鉄道分野

引き抜き抵抗力は4.2.2項と同様に(6)式を基準に評価する。ただし、閉端タイプについては、第2項のみとする。第2項は押し込みと同等としている。

$$R_t = \pi \cdot D_w \cdot (\Sigma \gamma_i \cdot L_i + \gamma \cdot H/2) \cdot H \cdot \beta \cdot \tan \phi + \Psi \cdot \Sigma (L_i \cdot r_{ik}) \dots \dots \dots (6)$$

4.3 斜杭の適用

「つばさ杭[®]」は、杭をねじ込んで地中に貫入させるため、斜杭の施工が比較的容易である。斜杭を用いることにより水平変位量を抑制することができるため、荷重条件によって



市川 和臣



河野 謙治