

回転圧入鋼管杭に関する研究 — 施工試験及び載荷試験結果と貫入のメカニズム —

A Study of the Screwed Pile

— The Results of Installation and Loading Tests and Analysis of Penetration Mechanism —

佐伯 英一郎^{*(1)}
Eiichiro SAEKI

大木 仁^{*(2)}
Hitoshi OHKI

抄 録

回転圧入鋼管杭の実大施工試験及び鉛直載荷試験の結果から以下の結論が得られた。1) 中径の杭においても回転圧入工法でN値50~70程度の砂層に貫入することが可能であり、小径の時と同じく残土は発生せず、低騒音、低振動で施工できる。2) 施工性は羽根径、羽根角度、羽根形状の影響が大きい。3) 地盤強度はトルクとの相関が強く、提案した R_p 値より支持力の推定の可能性が確認できた。

Abstract

Installation and loading tests of mid-size screwed steel pipe piles were executed, and the following results were obtained. 1) It is possible to drive them in through sand layers having 50 to 70 STP N-values, with no discharge, noise or vibration. 2) The characteristics of pile penetration are influenced by spiral wing diameter, angle and shape. 3) There is a strong correlation between bearing capacity and torque and it is possible to estimate the capacity from the R_p -value proposed in this paper.

1. 序

軟弱地盤上の構造物の基礎工法として、“杭”は最も一般的な方法である。杭基礎は図1のように大別することができ、その特徴は以下ようになる。打撃杭は、先端支持力の信頼性は高いが、騒音振動等の環境問題が発生するために、都市部やその近郊において採用することが不可能になった。場所打杭や既製コンクリート埋込み杭は、騒音振動問題は発生しないが、泥水、残土処理が必要となり、近年産廃問題として社会問題になりつつある。又場所打ち杭は、先端を掘削した後にコンクリート打設を行うためスライム処理の問題等があり、先端支持力の確認を行うことも困難である。

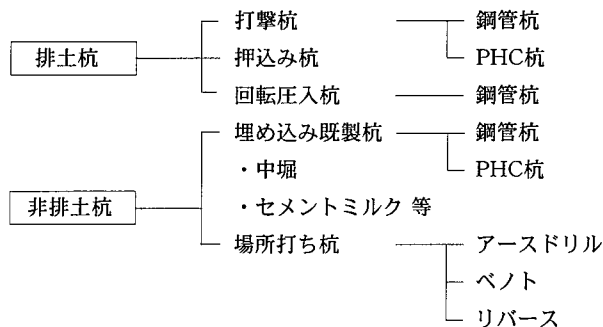


図1 杭基礎工法の分類

羽根による回転圧入工法は、モンケン打ちと並んで人力で杭を貫入させる有効な手段として、日本でも過去に用いられていた。しかしながらディーゼルハンマーの出現と共に経済性を失い、日本においては住宅用の小径¹⁾なものを除いてほとんど使用されていない。

本論文は、既存の杭工法の諸問題を解決する工法として期待できる回転圧入鋼管杭に関する研究について述べる。

2. 回転圧入鋼管杭の施工法とその特徴

回転圧入鋼管杭(以下回転杭と称す)とは、図2に示すように鋼管の先端に螺旋状の羽根を取付けたものである。施工法としては、3点支持式杭打ち機等を用いて、杭に鉛直下向き又は上向きの荷重と回転トルクを与えることにより、羽根のくさび効果を推進力として杭を貫入させる工法である。回転杭の特徴として次のようなものがあげられる。

- 1) 排土杭(Displacement pile)に分類され、かつ羽根の拡底効果により大きな支持力が期待できる。
- 2) 羽根のアンカー効果により大きな引抜耐力が期待できる。
- 3) トルク等の施工管理データにより全数の支持力確認が可能であり、打止め(回転止め)管理が容易、かつ正確に行える。
- 4) 残土、泥水等が全く出ない。
- 5) 逆回転して引き抜くことが容易である。
- 6) 変形性能及び耐力が大きく耐震性に優れる。

^{*(1)} 建築事業部 回転杭事業開発グループ グループリーダー(部長) 工博
東京都千代田区大手町2-6-3 ☎100-8071 ☎(03)3275-5346

^{*(2)} 建築事業部 回転杭事業開発グループ マネージャー

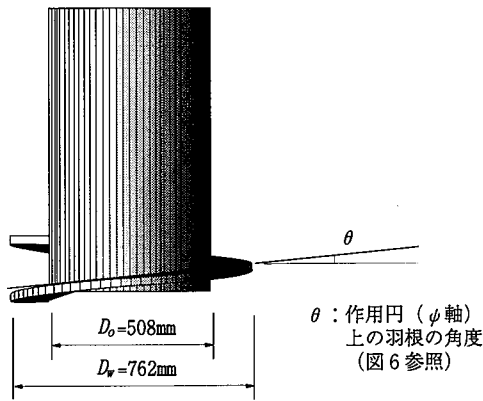


図2 試験体形状(図は1枚羽根の例)

3. 本研究の目的

本研究の目的は以下に示す通りである。

- 1) 羽根付きの回転圧入工法が存在しない300~600mm径の中径の杭を日本の通常の地盤で回転圧入することが可能か否かの確認
- 2) 回転圧入性状に影響を及ぼす羽根形状パラメータの抽出とその分析
- 3) 回転圧入杭の支持力特性の把握
- 4) 先端支持力と回転圧入性状(主にトルク)の関係を明確にすることにある。

4. 実験地盤の概要

試験地は千葉県富津市で、房総半島の中央部の東京湾沿いの埋立地に位置する。地盤調査結果を図3に示す。地層構成は表層から以

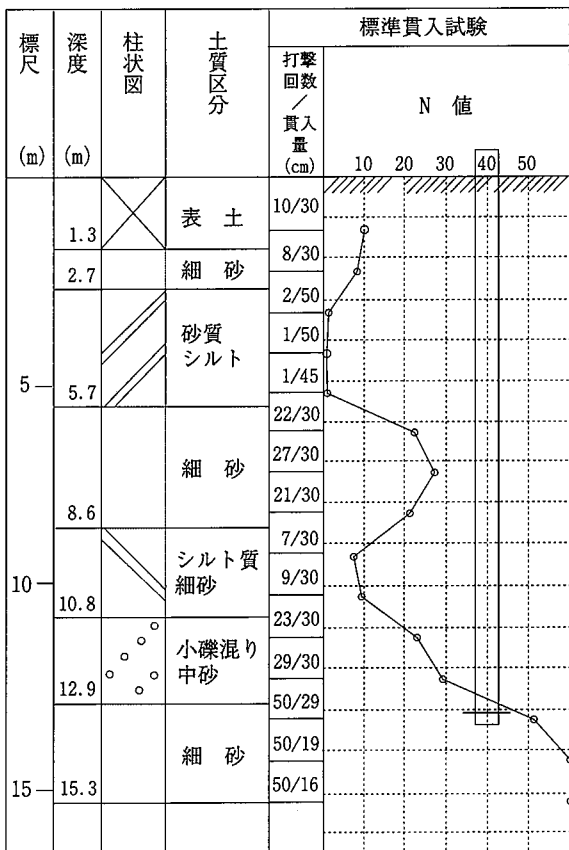


図3 ボーリングデータ

下の通りとなっている。

- (1) 0.00~1.30m 埋土層(二次堆積土層)

二次的な堆積土層に区分され、地層状況は粗砂を主体として貝殻片が多く点在する。

- (2) 1.30~2.70m 沖積砂質土層

緑灰色の細砂層であり、海成層の為に貝殻片が点在している。N値は8~10で締まり度はやや低い。

- (3) 2.70~5.70m 沖積粘性土層

黄褐色の砂質シルト層が堆積しており、N値は1~2と軟弱な状態を呈している。

- (4) 5.70~12.90m 沖積砂質土層

沖積末期から沖積初期に堆積している地層である。

- 5.70~8.60m 細砂層...N値 21~29(中間層)

- 8.60~10.80m シルト質細砂層...N値 7~9

- 10.80~12.90m 小礫混り中砂層...N値 21~29

- (5) 12.90~15.31m 洪積砂質土層

暗灰色のよく締まった細砂層が分布している。N値は50以上を示し、緊密性が高い地層となっている。支持層と見なせる。

5. 施工実験の種類と施工機械

回転圧入工法では、杭の先端形状が施工性に与える影響が大きく、以下がそのパラメータと考えられる。

- 1) 鋼管本体径
- 2) 羽根形状
- 3) 羽根径(羽根の外径)
- 4) 羽根ピッチ(羽根1回転当たり変化する高さ)
- 5) 本体底板部の開端率(用語の定義を文末に示す)

以上の5項目について、杭の施工性に与える影響を把握することを目的として実大施工試験を実施した。

表1に試験体を示す。試験体は鋼管本体径 D_o が508.0mm, 2枚羽根, 羽根径 $D_w=1.5D_o$, 羽根角度 5° , 開端率90%を基準杭とし、各パラメータの影響を全24体の試験体の結果から評価した。一部の試験体を除き、1体につき2回の試験を行っている。試験体の概要を図2に示す。施工機械は、3点式杭打ち機(日本車輻製DH-658M)をベースマシンとし、回転駆動機にアースオーガー(三和機材製SMD-150H)を使用した。

6. 測定項目と測定方法

施工データの計測項目及び計測方法は以下のとおりである。

- 1) 上載荷重

上載荷重は、施工時に杭に作用させる鉛直方向の荷重で、下向き荷重(下向)と上向き荷重(上向)がある。(上向)アースオーガーを吊るワイヤーと、リーダー頂部の間にロードセルをセットして計測する。また、(下向)アースオーガーを下向きに引込む、絞り込みワイヤーをセットし(通常中掘工法で使用)、4本掛けとなるワイヤー終端にロードセルをセットして計測する。

- 2) トルク

モーターの駆動電流値を計測し、換算する。

- 3) 貫入量

1回転当たりの貫入量を実測及び貫入速度から換算する。

- 4) 貫入速度

オーガー吊りワイヤーの送り出し速度を計測する。

表1 試験体リスト

試験体名	鋼管径 D_o (mm)	羽根形状	羽根径比 D_w/D_o	開端率 (%)	羽根角度 θ (deg)	根入れ深さ GL-(m)		備考
1 5W15M09	508	2枚	1.5	90	5	13.7	11.6	基準杭
2 5S15M09		1枚				13.7	13.7	
3 5W12M09			1.2			7.6		
4 5W20M09			2.0			13.5	13.5	
5 5W15M07				70		11.5	14.0	
6 5W15M00				0		13.3	12.0	
7 5W15S09					2.5	11.7	13.7	
8 5W15D09					10	13.0	13.7	
9 5S15M00		1枚		0		13.4	13.4	
10 5S15M10		1枚		100		13.7	13.4	
11 5W15D10				100	10	13.1		
12 5W15D10-B				100	10	13.0	13.0	掘削刃付き
13 5W17M09			1.75			13.8	13.7	
14 5S15MBL		1枚				13.6		ボトムレス
15 6W15M09	609.6	2枚	1.5	90	5	16.4	14.2	
16 6W15S09					2.5	16.4	14.0	
17 6W15D09					10	16.4	14.0	
18 6S15M00		1枚		0		16.4		
19 6S15M10		1枚		100		16.4	13.5	
20 6S15D09		1枚			10	16.4		
21 3W15M09	318.5	2枚	1.5	90	5	15.0	15.0	
22 3W15M07				70		17.5	15.5	
23 3S15M00		1枚		0		16.2		
24 3S15M10		1枚		100		16.8		

空白欄は基準杭(5W15M9)と同じ

5)管内土量

所定深度にて下げ振りで実測(杭先端深度がGL-5, 8, 10, 12m及び打止め時)する。

7. 施工実験結果

施工実験結果の一例を図4に示す。計測項目毎に図示したもので、それぞれトルク(kJ)、1回転当たりの貫入量(mm/1回転)、上載荷重(kN)、管内土高さ(m)を表している。Y軸は全て杭先端の貫入量を表している。貫入性状は羽根形状パラメーターに大きく依存し、特にN値が急増する個所における貫入性は大きな差異が生じ、試験体によっては貫入不能なものもあった。

いずれのケースも貫入時のトルクはN値と良い対応を示し、軟弱な地盤では相対的に小さいトルクで貫入し、中間層及び支持層では地盤の硬さに応じてトルクの上昇、下降が見られる。また、本体径(羽根径)が大きくなる毎にトルクは増大する傾向にあり、杭のボリューム(面積または体積)に影響されていることが分かる。先端形状の影響では、1枚羽根の方が2枚羽根に対して大きなトルクを必要とするが、1回転当たりの貫入量は大きい。また羽根径が大きい程、羽根角度が大きい程トルクは大きくなり、各々小さい程トルクは小さくなる。また、羽根径比が1.2の場合は中間層の手前で、羽根角度が2.5°のものは支持層の手前で貫入が殆ど0mmとなる滑り現象が発生することが分かった。

1回転当たりの貫入量は、上載荷重でコントロールすることができ、軟弱地盤ではほぼ羽根ピッチで貫入させることができるのに対し、硬質地盤では羽根ピッチより小さくなる。また、軟弱地盤から硬質地盤へ貫入する際、先端からの抵抗が大きくなると滑り現象が発生することもある。この時上載荷重を加えることにより、底板部が加圧され、硬質地盤への貫入が促される。上載荷重-深度関係

は、深度毎にどのように荷重を加えたかを示している。尚、上載荷重にはオーガーの自重(151.9kN)が含まれている。

管内土高さは、深度方向に一樣に増加するのでは無く、中間層や支持層のような、より先端反力の大きい硬質地盤に貫入する際に管内土の上昇が見られる。これは既に管内にある土と鋼管内壁の静止摩擦力の合力に対して、底板部への地盤反力が勝る時に管内に土が入っていきと考えられる。写真1は施工後引抜いた杭を半分に分割してみた管内土の状況である。この結果より上記の現象が確認できる。また杭径の影響は、大径ほど管内土の上昇が見られ、閉塞の状況が異なることが分かる。

以上から、貫入性の良い形状の回転杭は、施工時の先端の地盤状況をトルク管理によりほぼ把握できることが分かった。また施工性には羽根径及び羽根角度が影響することも明らかになった。



写真1 管内土状況(609.6mm径)

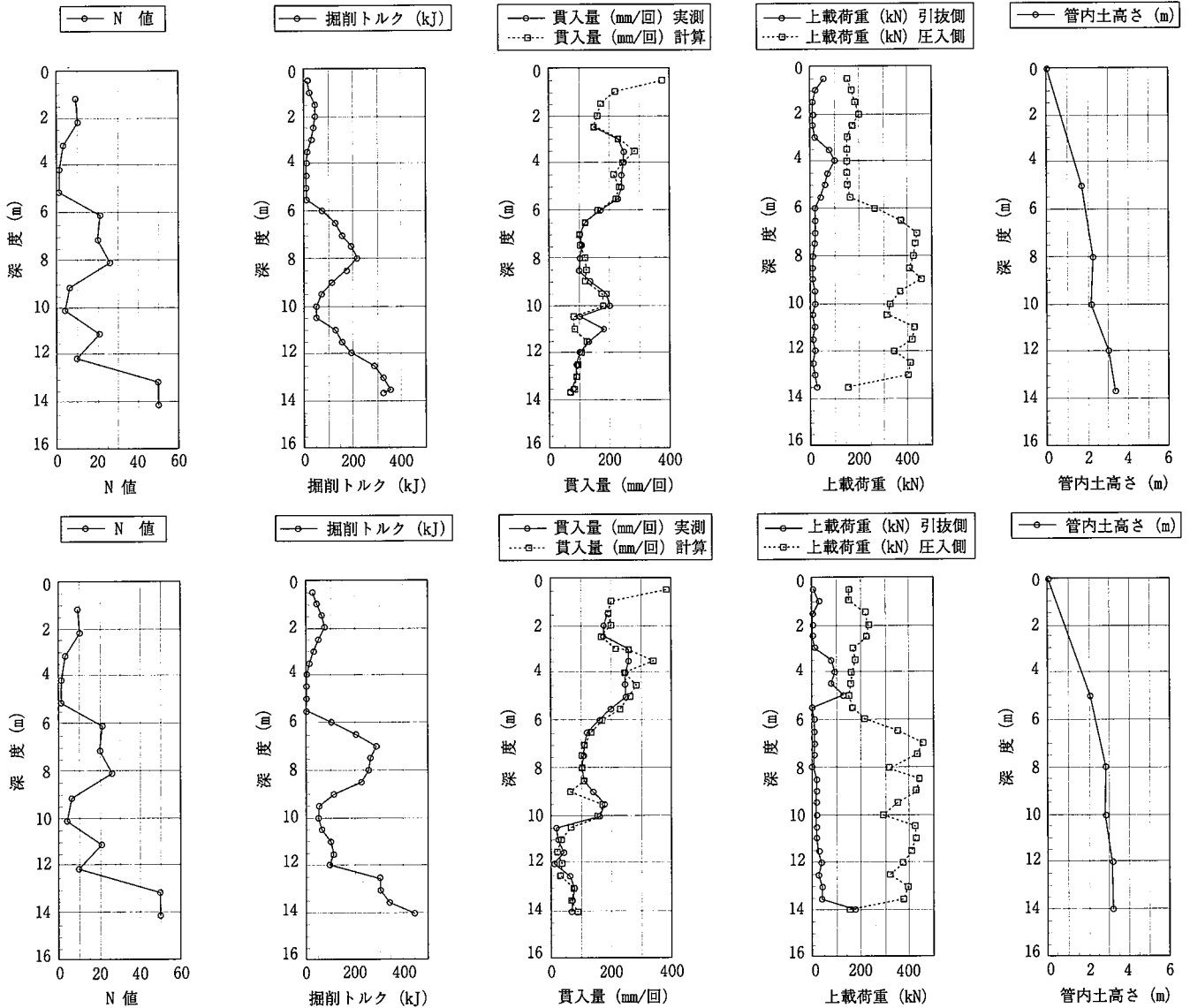


図4 施工記録(上段:5S15M10-1, 下段:6S15M10-1, N値は同一のもの)

8. 回転杭の貫入メカニズム

8.1 貫入時の杭先端の力の釣合い

回転圧入工法は、鋼管本体に回転を付与することによって羽根先端部が地盤を掘削し、土を上方へ押圧することにより羽根が推進力を得て貫入するメカニズムである。閉端杭とした場合のこの現象を力の釣り合いにより以下に説明する。

図5に示す作用円状の軸(ψ軸)を直線に展開したものが図6であり、羽根が掘削貫入していく時のモデルを表している。図で羽根角度をθ、貫入角度をηとして、杭先端部にトルク(T_p)が作用したときの、羽根及び底板の力の釣合いは図7の様に表せる(記号の説明は文末に示す。以後同じ)。これをベクトル図に表すと図8のようになり、X、Y方向の力の釣合いを数式化すると以下となる。H_tはトルクを作用円(ψ軸)上の水平力に換算した値である。

$$H_t - Q_{wh} = F_p + P_w \sin \theta + F_w \cos \theta \quad (1)$$

$$R_p - L_b + Q_{wv} = P_w \cos \theta - F_w \sin \theta \quad (2)$$

(1)(2)式よりP_wを消去すると、

$$R_p = \frac{(\cos \theta - \alpha \sin \theta)(H_t - Q_{wh}) + (\sin \theta + \alpha \cos \theta)(L_b - Q_{wv})}{\sin \theta + \alpha \cos \theta + \alpha(D_p' / D_w')(\cos \theta - \alpha \sin \theta)} \quad (3)$$

となり、R_pをトルク関数として表すことができる。但し、

$$F_p = \alpha(D_p' / D_w')R_p$$

$$F_w = \alpha P_w$$

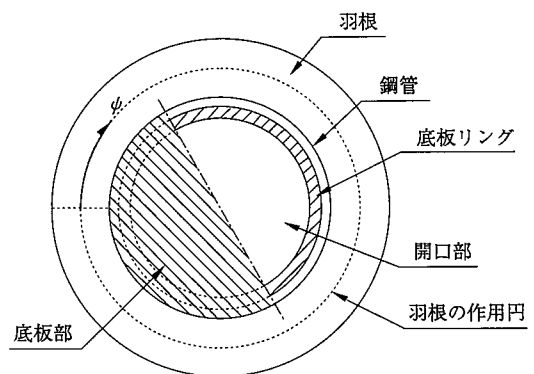


図5 回転圧入鋼管杭の伏図(ψ軸関係)

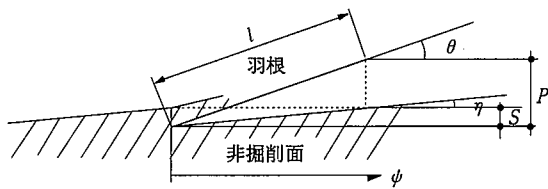


図6 定常状態の場合のpsi軸上の非掘削面と羽根の関係図

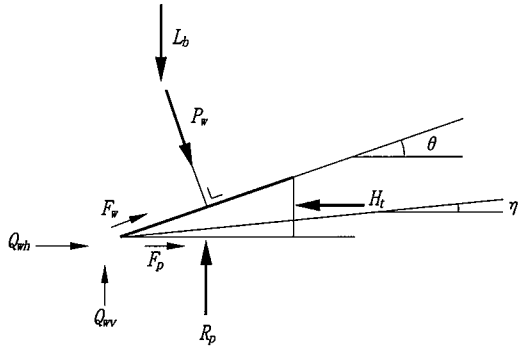


図7 羽根及び底板に作用する力学的状態図

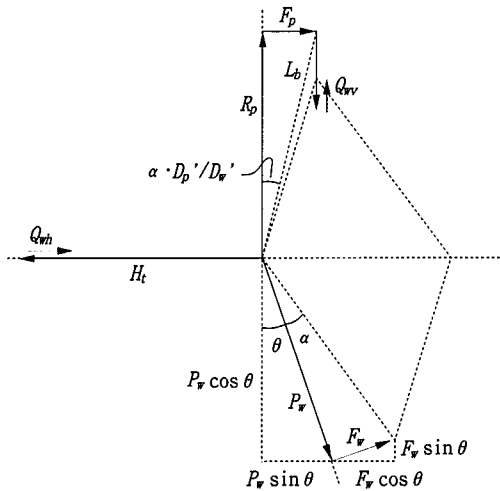


図8 力の釣合い図(ベクトル図)

8.2 貫入のメカニズム

回転圧入杭は回転により貫入していくが、ねじのように羽根のピッチ(P:羽根が一周して変化する高さ)通りに貫入するとは限らない。これは地盤が弾塑性体であり、掘削した土を上方に押圧することによって貫入力を得ているためである。この現象を表現するために一様地盤中を貫入する杭の羽根の上と底板部下の土を図9のような弾塑性ばねと仮定する。この地盤に定常状態で貫入している時の力の釣合いは図10のように表すことができる。

図11に示す力の釣合い $R_p = f_w + L_b$ より(刃先抵抗は無視)、羽根上面の土が弾性変形するとき、つまり、

$$P - S \leq \frac{Q_{ys}}{K_s} \text{ のとき羽根の釣合いは,}$$

$$A_p Q_{ys} = A_w \frac{K_s(P - S)}{2} + L_b \quad (4)$$

となり、これよりSを求めると、

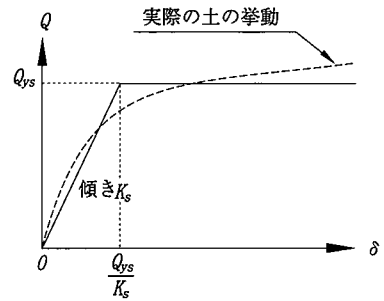


図9 地盤の力学的特性(弾塑性ばね特性)

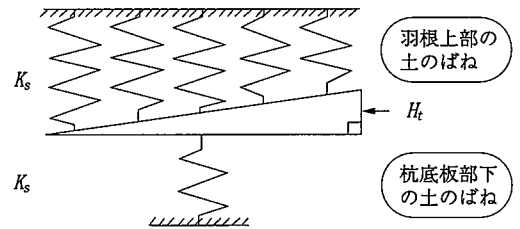


図10 羽根の釣合い状態

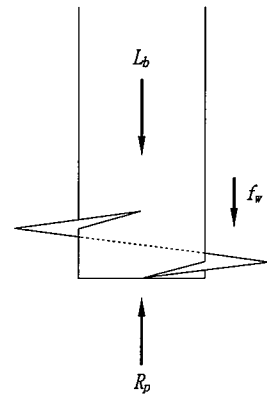


図11 先端部の釣合い状態

$$S = P - \frac{2A_p Q_{ys} - 2L_b}{A_w K_s} \quad (5)$$

となる。羽根上面の土が弾塑性変形するとき、つまり、

$$P - S > \frac{Q_{ys}}{K_s} \text{ のとき羽根の釣合いは,}$$

$$A_p Q_{ys} = \frac{Q_{ys}}{2} A_w \frac{Q_{ys}}{K_s(P - S)} + Q_{ys} A_w \left(1 - \frac{Q_{ys}}{K_s(P - S)} \right) + L_b \quad (6)$$

となり、これよりSを求めると、

$$S = P - \frac{A_w Q_{ys}^2}{2K_s(A_w Q_{ys} - A_p Q_{ys} + L_b)} \quad (7)$$

となる。従って貫入量Sは弾性、弾塑性いずれの状態においても(5)式、(7)式の第2項目が存在し、 L_b が小さい場合は羽根ピッチより小さな貫入量で貫入していくことが理論的にも明らかである。この(5)式、(7)式より弾性挙動する A_p/A_w の条件は、 $L_b = 0$ の時、 $A_p/A_w \leq 0.5$

弾塑性挙動をする A_p / A_w の条件は、 $L_b = 0$ の時、

$$A_p / A_w > 0.5$$

であることが分かる。

また(7)式より、 $A_p / A_w = 1 - Q_{ys} / 2PK_s$ の時、

$$S = 0$$

となり、 A_p / A_w がこの値より大きい時(羽根面積比 A_w / A_p がこの値の逆数より小さい時)は、 $L_b = 0$ の場合、一様地盤では貫入しなくなる事が分かる。

9. エネルギーの釣合いによる貫入抵抗の評価と先端支持力

9.1 エネルギーの釣合いによる貫入抵抗の評価

力の釣合いと同様に、入力エネルギーと消費エネルギーの釣合いからもトルクと貫入抵抗の相関が得られ、先端支持力の推定が可能となる。

図12に示すように、杭が剛体変形と仮定し、羽根形状及び貫入状況から決まる方向余弦を微小項として無視すると、1回転当たりに杭頭部に入力されるエネルギーは上載荷重による入力エネルギー($L_t S$)とトルクによる入力エネルギー($2\pi T_t$)である。一方底板部で消費されるエネルギーは、底板部における貫入による消費エネルギー($R_p S$)、底板部の摩擦による消費エネルギー($\alpha R_p \pi D_p'$)、羽根上面部の摩擦による消費エネルギー($\alpha(R_p - L_b + Q_{wv})\pi D_w'$)、羽根の上向き強制変形による地盤の消費エネルギー($(R_p - L_b + Q_{wv}) \times (P - S)$)、水平刃先抵抗による消費エネルギー($Q_{wh}\pi D_w'$)及び垂直刃先抵抗による消費エネルギー($Q_{wv} S$)である(図7参照)。

施工中の周面摩擦により消費されるエネルギーのロスを考慮した伝達率を a とすると、入力エネルギーと消費エネルギーの釣合いから、

$$\begin{aligned} a(L_t S + 2\pi T_t) &= L_t S + 2\pi T_t \\ &= R_p S + \alpha R_p \pi D_p' + \alpha(R_p - L_b + Q_{wv})\pi D_w' \\ &\quad + (R_p - L_b + Q_{wv})(F - S) + Q_{wh}\pi D_w' + Q_{wv} S \end{aligned} \quad (8)$$

となり、

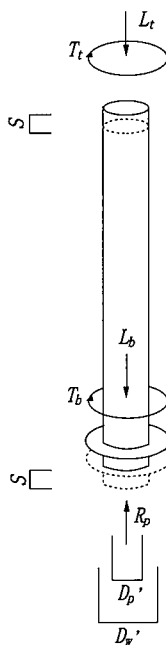


図12 エネルギーの釣合いモデル図

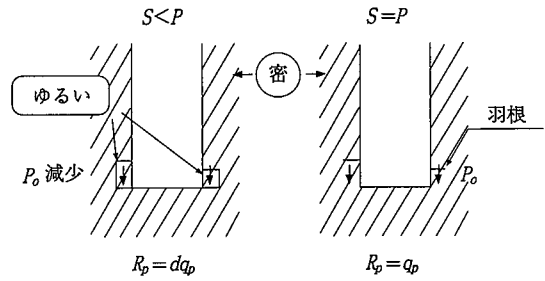


図13 貫入量と杭先端の地盤の状況

$$R_p = \frac{2\pi T_t + L_t(\alpha\pi D_w' + F) - Q_{wh}\pi D_w' - Q_{wv}(\alpha\pi D_w' + F)}{\alpha\pi(D_p' + D_w') + F} \quad (9)$$

となる。

9.2 先端支持力の推定

貫入抵抗 R_p は図13に示すように、貫入量(S)が羽根ピッチ(P)と等しい時は、杭先端部は羽根による影響を受けず杭先端部の貫入抵抗が底板部の極限支持力(q_p)に等しい。しかし $S < P$ の時は、羽根により底板部周辺が緩められ、且つ羽根下部の有効応力が減少することにより R_p が dq_p に減少することが考えられる(d は貫入抵抗低減係数)。

従って先端支持力は(10)式のように、底板部の貫入抵抗と羽根部の支持力(底板部の貫入抵抗の面積比倍に有効率(e)を掛けたもの)の和で表されるから、

$$Q_u = q_p \left(1 + e \frac{A_w}{A_p} \right) = \frac{R_p}{d} \left(1 + e \frac{A_w}{A_p} \right) \quad (10)$$

となる。

10. 鉛直載荷試験

10.1 載荷試験計画

杭の支持力特性を把握することを目的として鉛直載荷試験を実施した。試験杭は、本体径 D_o を609.6mm、羽根径 $1.5D_o$ とし、12.9m以深の細砂層に約 $1D_w$ の根入れとなるGL-13.8mで打止めた。載荷試験計画は、地盤工学会規準“杭の鉛直載荷試験方法”に準拠し、静的試験の一方多サイクル載荷、荷重制御方式で実施した。反力杭は、引抜き性能に優れた回転圧入鋼管杭を使用した。載荷試験スケジュールを表2に、測定間隔を表3に示す。

計測項目は杭頭変位量、杭頭歪み量、杭先端歪み量及び管内土の変位量とし、杭先端部の歪みゲージ位置は杭先端より上方に $1D_w$ の位置で、鋼管の内側に貼付、養生を施した。

10.2 鉛直載荷試験結果

鉛直載荷試験より得られた先端荷重-先端沈下曲線を図14に示す。曲線は初期剛性が極めて大きく、羽根径の10%沈下量までならかな弧を描くように沈下が進行する。その後はほぼ直線に近い荷重沈下挙動を示し、急激な耐力低下は見られない。

羽根径の10%沈下時の荷重を極限荷重とすると、本試験結果の極限荷重は4966kNとなっている。

11. 鉛直載荷試験結果と R_p 値

載荷試験に使用した杭の施工記録のうち、図15(a)(b)(c)にトルク、貫入量及び上載荷重を示す。これらを用いてエネルギーの釣合いより得られた R_p 値を図15(d)に示す。 R_p 値を求める前提条件としては、 L_t 、 T_t の先端への伝達率 a 、地盤と羽根の周面摩擦係数 α

表2 載荷荷重階とサイクル一覧表

サイクル	荷重階(kN), カッコ内はtf
1	490(50)-980(100)-1960(200)-980(100)-0
2	980(100)-1960(200)-2940(300)-3920(400)-2940(300)-1470(150)-0
3	1960(200)-3920(400)-4900(500)-5880(600)-4900(500)-2450(250)-0
4	1960(200)-3920(400)-5880(600)-6860(700)-7840(800)-8820(900)-7840(800)-3920(400)-0

注) は処女荷重

表3 載荷荷重階とサイクル一覧表

荷重区分	測定間隔(min)
0荷重	0-1-2-5-10-15-30
処女荷重	0-1-2-5-10-15-30-60
履歴内荷重	0-1-2-5

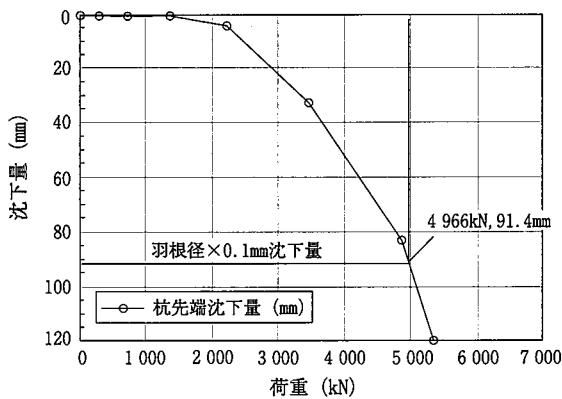


図14 杭先端荷重—杭先端沈下曲線 ($D = 609.6\text{mm}$, $D_w = 1.5D$)

は実績を踏まえた上で、

- (L_t , T_t の先端への伝達率) $a = 0.9$
- (地盤と羽根の周面摩擦係数) $\alpha = 0.5$

とする。刃先抵抗 Q_{wh} , Q_{wv} は、

$$Q_{wh}, Q_{wv} = 0$$

と見なせる。その結果、打止め時の R_p は 2 550kN であった。力の釣合いより求めた R_p 値も図15(d)中に併せて示すが、ほぼ同一の値になる。算出した R_p 値は、施工時に本体底板部が地盤から受ける抵抗であるため、 R_p は本体底板部の地盤状況を反映していると考えられる。

回転圧入工法で設置された杭の先端支持力は(10)式で表すことができ、 e , d を確定すれば、 Q_u を R_p より計算することが可能となる。

又図11の力の釣合いより、先端部引抜き耐力 Q_{up} は推進力 f_w より大きいことは明白であり、

$$Q_{up} \geq R_p - L_b = 2\ 119\text{kN}$$

であることが推定できる。

12. 結論

本実大施工試験及び鉛直載荷試験の結果から以下のことが明らかとなった。

- 1) 中径の杭においても、回転圧入工法でN値50~70程度の砂層に貫入することが可能であり、小径の時と同じく残土は発生せず、低騒音、低振動で施工できる。
- 2) 施工性については、羽根径、羽根角度、羽根形状の影響が大きい。
- 3) 地盤強度はトルクとの相関が強く、本論文で提案する R_p 値より、支持力の推定の可能性が確認できた。

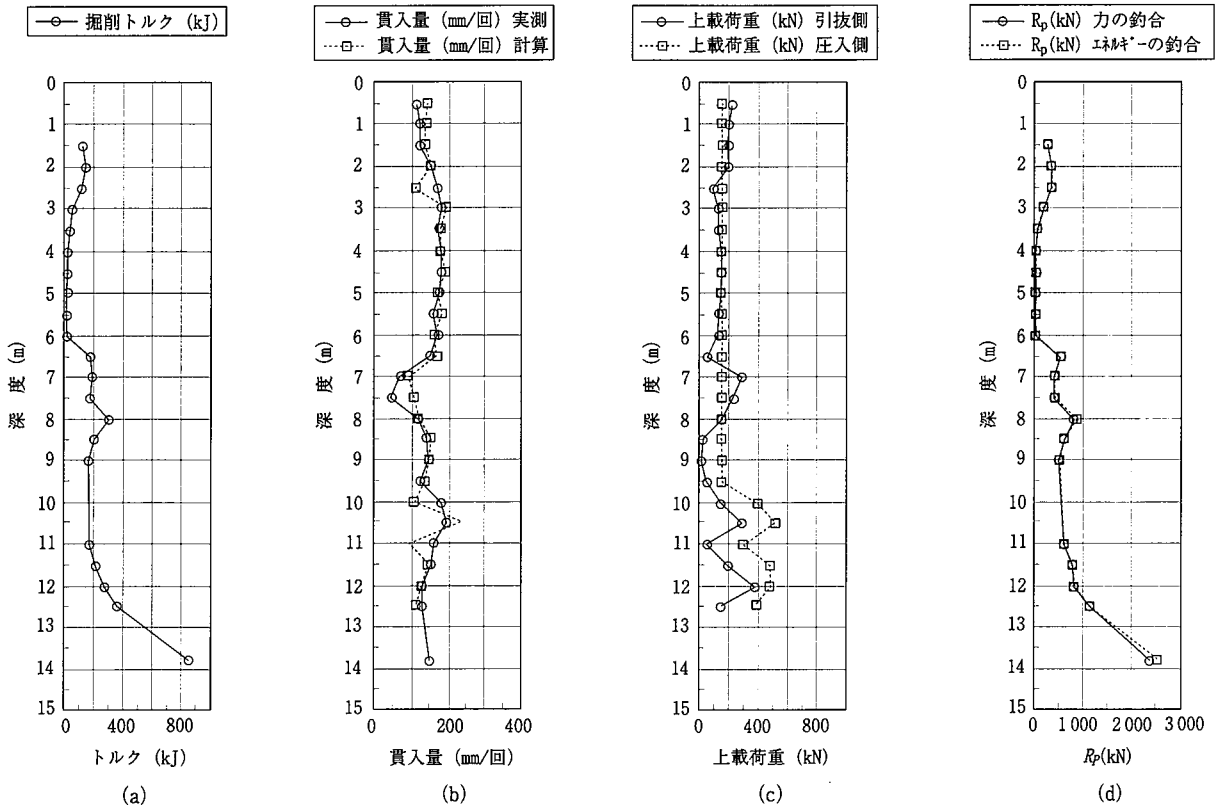


図15 載荷試験杭の施工記録と R_p 値

13. 今後の課題

今後の課題として以下の事項が挙げられる。

・貫入のメカニズムの更なる解明

杭先端部の力学的現象を更に明確にすることにより、あらゆる地盤状況においても説明ができる貫入のメカニズムを解明する。

・ R_p 値を導くための係数 α , a , Q_{wh} , Q_{wv} 及び先端支持力を推定する係数 d, e の解明

11章の試算は、上記係数を仮定して得られた数値であり、今後模型実験(加圧砂地盤タンク等)、摩擦試験、数値解析、実大の施工実験、載荷試験等のデータを蓄積することにより、係数の値を確定していくことが必要である。

・杭の先端支持力及び引抜き耐力推定式

追記

本論文は、日本建築学会構造工学論文集45B, 453-462(1999)に掲載された“回転圧入鋼管杭に関する研究”を基に、その後の検討の結果一部修正を加えた内容となっている。

謝辞

本論文の執筆にあたり、回転杭の開発に携わる皆様には多岐にわたり協力を頂きました。ここに謝意を表します。

<用語の定義(五十音順)>

押え荷重

杭打ち機の押し込み装置により杭に作用させる鉛直荷重。負の場合もある。

開口

杭先端部の開口(鋼管の開口又は底板リングの開口)。

開端率

開口面積/底板部面積。

貫入抵抗

底板部が受ける地盤の貫入抵抗。

貫入量

施工時に杭が地中に貫入する量。

貫入力

杭が埋設される際に発揮される下向きに作用する力(上載荷重+推進力)。

くさび反力

施工時に杭が回転する際、くさび効果により羽根法線方向下向きに受ける力。

掘削刃

羽根の先端部または下端部にとりつけた刃。

作用円

トルクを計算する際の摩擦力の合力作用円。

上載荷重

上載自重と押え荷重の合力。

上載自重

杭頭部にのる重機等(モーター)の自重。

推進力

くさび反力の鉛直成分。

先端支持力

底板部及び羽根部により発揮される支持力。

先端部引抜き耐力

羽根により得られる上向き引抜き抵抗力。

底板

杭先端の板。閉端杭に使用する。

底板部

鋼管が中実とした場合の先端断面部。“底板”又は“底板リング及び管内土部分”で、貫入抵抗を発揮する部分の見付面積部。

底板リング

杭先端のドーナツ円盤状の板。開端杭に使用する(羽根が管内に延長している場合の内部の羽根部分を指すこともある)。

トルク

モーターに発生する回転力。または杭本体に作用する振り力。

刃先抵抗

刃先が受ける地盤の貫入抵抗。

羽根

鋼管杭先端部についたドーナツ円盤状の鋼板。螺旋状、平板状等の形状で1枚または複数枚有する。

羽根径比

本体径に対する羽根径の比(羽根径/本体径)。

非掘削面

底板部または羽根が掘削していない地盤面。

<記号>

A_p 底板部の見付面積

A_w 羽根のみの見付面積

a L_r , T_r の先端への伝達率($0 < a < 1$)

D_0 鋼管本体径

D_p' 底板部の作用円の直径 = $2D_0/3$

※半径 r の底板上の微小幅 dr に作用するトルクは、

$$T_r = 2\pi r \cdot dr \cdot \alpha \sigma r = 2\pi \alpha \sigma r^2 dr$$

で表される。これを半径 R について積分すると

$$T_r = 2\pi \alpha \sigma \int_0^R r^2 dr = 2\pi \alpha \sigma \left[\frac{r^3}{3} \right]_0^R$$

$$= 2\pi \alpha \sigma (R^3 / 3)$$

となる。一方底板上のトルクの合力は、

$$(\text{トルク合力}) = \alpha \sigma \cdot \pi R^2$$

で表される。以上から、底板部の作用円の半径は $2R/3$ であることが得られる。

D_w 羽根径

D_w' 羽根の作用円(回転方向の合力が作用する円)の直径

$$= \frac{2(D_w^3 - D_0^3)}{3(D_w^2 - D_0^2)}$$

※上述 D_p' の説明に記述した積分式の積分範囲を

$D_0/2 \sim D_w/2$ とし、一方トルク合力は

$$(\text{トルク合力}) = \alpha \sigma \pi (D_w^2/4 - D_0^2/4)$$

であることから得られる。

d 貫入抵抗低減係数

e 羽根の支持力に及ぼす有効率

F_p 底板部に作用する摩擦力 = $\alpha (D_p'/D_w) R_p$

F_w	羽根上面に作用する摩擦力 = αP_w	R_p	底板部の貫入抵抗
f_w	推進力	S	1回転当たりの貫入量
H_t	杭先端トルクを羽根の作用円上の水平力に置き換えた値 = $T_b / (D_w' / 2)$	T_b	杭先端に作用するトルク
K_s	地盤を弾塑性ばねと仮定した時の単位面積当たりの剛性	T_t	杭頭に作用するトルク
L_b	杭先端に作用する上載荷重	α	地盤と鋼板の摩擦係数
L_t	杭頭に作用する上載荷重	η	作用円上の貫入角度
l	作用円上の羽根長 $= \pi D_w' / \cos \theta = \pi D_w' / \sqrt{(\pi D_w')^2 + P^2}$	θ	作用円上の羽根の角度
P	羽根ピッチ(羽根が1周する間に軸方向に変化する量)		
P_o	杭先端部地盤の有効応力		
P_w	くさび反力		
Q_u	杭の先端支持力		
Q_{up}	杭の先端部引抜き耐力		
Q_{wh}	水平刃先抵抗		
Q_{wv}	鉛直刃先抵抗		
Q_{ys}	地盤を弾塑性ばねと仮定した時の単位面積当たりの降伏荷重		
q_p	羽根による地盤の乱れのない場合の底板部の貫入抵抗(極限支持力)		

参考文献

- 1) 板谷國夫, 吉田勝之: 小規模建築用羽根付き小径鋼管杭の施工と鉛直載荷試験. 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1986
- 2) 板谷國夫, 渋谷和男, 吉田耕之, 萩原唯雄, 高木汎, 住義雄, 桐山伸一: 先端羽根付き鋼管杭の鉛直載荷試験(その2). 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1990
- 3) 板谷國夫, 渋谷和男, 吉田耕之, 萩原唯雄, 高木汎, 住義雄, 桐山伸一: 先端羽根付き鋼管杭の鉛直載荷試験(その3). 日本建築学会大会学術講演梗概集, 1990
- 4) 大和真一, 伊集院博, 中川宏人, 前嶋匡, 吉田勝之, 高木汎: 先端羽根付き鋼管杭(回転埋設工法)の先端支持力特性 鉛直載荷試験結果報告. 土質工学研究発表会発表講演集, 1995, p.1457-1458