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

FUNDAMENTAL STUDY ON PENETRATION AND BEARING
CAPACITY OF SCREW PILE WITH HELICAL WING国府田 誠^{*1}, 佐藤 秀人^{*2}, 刑部 徹^{*3}, 国司 基^{*4}永田 誠^{*5}, 平田 尚^{*5}, 田村 昌仁^{*6}*Makoto KOUDA, Hideto SATO, Toru OSAKABE, Hajime KUNISHI,**Makoto NAGATA, Hisashi HIRATA and Masahito TAMURA*

In this paper, model experiment for screw pile with single helical wing is described. The experiment was performed in order to discuss behavior of the bearing capacity of the wing, the pile tip and the pile surface friction in penetration stage and in vertical loading stage. Particularly, in the penetration stage, the wing works as a device, which drives the pile body and facilitates the penetration by reducing restraint pressure in the pile tip area. In the vertical loading stage, the wing works as a part of bearing device and contributes to increase of the pile tip bearing capacity by increment of the restraint pressure in the pile tip area.

Keywords: *Screw Pile, Model Experiment, Penetration Test, Bearing Capacity*

回転貫入杭, 模型試験, 貫入機構, 支持力特性

1. 序 論

(1) 研究の背景

杭軸を回転させる貫入杭は, 杭頭圧入力を軽減させるために回転させるもの(回転圧入杭と呼ぶ), 主に杭先端あるいは杭周に取り付けたスクリューなどの回転推進力によって貫入させるもの(回転貫入杭と呼ぶ)に大別される。いずれも無振動・無騒音であり, 無排土貫入が可能である。特に, 羽推進力を主とする回転貫入杭は, 逆回転によって撤去が容易に行えるため, 建物の基礎地盤としての再生が容易に行えること, 資源としての再利用が可能なことなど, 環境問題においても優れている。また, 羽部が拡底機能を有すること, 無排土施工杭(Displacement Pile)であることなど, 支持力的にも期待されている。

回転貫入杭の歴史は, 既に 1838 年においてその存在が記述されている¹⁾。日本では 1985 年頃から戸建住宅などの小規模建物の基礎として, 小径(100~150mm 程度)のものが開発され²⁾, 載荷試験による支持力や杭体強度についての研究が行われるようになった。現在では施工例も増え, 大型建築物を対象とした軸径 1600mm(最大

羽径 2400mm)におよぶものも開発されている。回転貫入杭は, 打撃杭や圧入杭と同じ無排土施工杭に属しているが, 杭先端の形状や杭体の埋設方法において, 根本的な違いがあり, 支持力性状も大きく異なるものと思われる。しかし, その設計や施工は, 貫入試験や載荷試験に基づいて行われているのが現状であり, より適切な設計法と施工法の確立が必要と思われる。

(2) 研究の経緯

筆者ら^{3)~10)}は, 杭体の各部位(杭頭, 杭周面, 羽, 杭先端部)の荷重が測定可能な模型杭を製作し, 貫入試験, 載荷試験および崩壊地盤の可視化試験を行い, 本論文の基本となるところを形成した。

本論文が参考にした主な研究には, 佐伯らの研究¹¹⁾が挙げられる。特に, 杭先端部の釣合式や回転貫入および支持力の力学的モデルは, 教えられるところが多くあった。その他には, 土屋らの大型実験装置による杭施工法(回転貫入)に関する研究^{12)~14)}がある。特に, 杭施工管理としての杭体トルク, 施工後の残留軸力分布, 羽近傍の力学的挙動など, 本論文の作成に参考となるところが多くあった。

^{*1} 日本大学理工学部海洋建築工学科 教授・工博
^{*2} 日本大学理工学部海洋建築工学科 専任講師・工博
^{*3} 日本大学大学院理工学研究科 研究員
^{*4} 日本大学大学院理工学研究科 博士前期課程
^{*5} 新日本製鐵㈱建築事業部
^{*6} 建築研究所 上席研究員・工博

Prof., Dept. of Oceanic Architecture & Eng., Nihon Univ., Dr. Eng.
 Assist. Prof., Dept. of Oceanic Architecture & Eng., Nihon Univ., Ph. D.
 Researcher, Graduate School of Science & Tech., Nihon Univ., Ph. D.
 Graduate Student, Graduate School of Science & Tech., Nihon Univ.
 Building Construction Div., Nippon Steel Co.
 Chief Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.

(3) 研究の目的

本研究は、回転貫入杭が持つ特有の貫入メカニズムや支持力発現のメカニズムの解明と貫入および支持力の各力学モデルの構築に向けて、杭体各部位の荷重～沈下関係などの基礎的性状とその原理の把握を目的とする。

2. 実験概要

(1) 試験の種類

表1に試験の種類を示す。試験1～5は、羽ピッチをパラメータとしたもの、試験6は、回転貫入杭と軸径を同じくするストレート杭であり、回転貫入杭の試験結果の比較基準とするものである。

(2) 模型杭と荷重計

模型杭は、図1に示すように杭の胴体部、長さ65mmの先端部(写真1)および胴体部と同一径の厚さ5mmの軸部先端で構成している。図2に示すように、杭体には内蔵した軸力計およびトルク計より、杭頭鉛直荷重 P_0 、杭頭トルク T_0 、胴体部と先端部の接合部における軸力(先端部鉛直摩擦力 $\angle Q_R$ +軸部先端荷重 R_P)とトルク(先端部トルク T_w +先端部周面トルク $\angle T_f$ +軸部先端トルク T_p)および軸部先端荷重 R_P を直接的に測定する。なお、杭胴体部に作用する鉛直摩擦荷重 Q_R^* は P_0 と上記接合部軸力の差として求め、胴体部の摩擦トルク T_f^* は T_0 と接合部トルクの差として算出する。

表1 試験の諸元

試験番号	杭種	軸径 D [mm] (軸部面積)	羽径 D_w [mm] (羽部面積)	羽厚 t_w [mm]	羽ピッチ h_w [mm]	埋設方法
1 (P8)	回転貫入杭	48 (1810mm ²)	86 (3999mm ²)	4	8	回転貫入
2 (P12)					12	
3 (P16)					16	
4 (P24)					24	
5 (P36)					36	
6	ストレート杭	-	-	-	-	無回転圧入

全試験で軸部肉厚は4mm

図1 杭体の部位

写真1 模型杭先端部

写真1 模型杭先端部

写真1 模型杭先端部

表2 模型地盤の諸元

使用砂	珪砂5号(気乾状態)
作成法	空中落下(分散網1枚)
密度	1.76g/cm ³
間隙比	0.512
相対密度	87.50%

換算N値

図4 模型地盤の換算N値

図2 模型杭詳細図

図3 試験装置

5mm/min の速度で無回転圧入を行い、杭頭荷重 P_0 を除荷した後に載荷試験を実施した。

(5) 計測

軸力計とトルク計、模型地盤中に埋設した土圧計の計測は、全て貫入試験直前を原点とし、貫入試験および載荷試験を通して、それらの増減値を測定した。

3. 貫入試験結果と貫入のメカニズム

(1) 回転貫入のメカニズム

① 基礎事項

本回転貫入のメカニズムの説明は、以下の仮定に従う。

基本仮定 1：羽厚の影響を無視し、羽刃先および羽厚周面部の応力を無視する。

基本仮定 2：回転貫入時の先端地盤は破壊状態、羽部および杭周面はすべり状態にある。

図 5 に、杭体の各部位の荷重を示す。ただし、同 a は、鉛直方向荷重を示し、 P_0 は杭頭、 P_{w1} は羽上面、 P_{w2} は羽下面、 Q_{fv} は杭周面、 R_p は軸部先端面の各鉛直荷重である。同図 b はトルクを示し、 T_0 は杭頭、 T_f は杭周面、 T_{w1} は羽上面、 T_{w2} は羽下面、 T_p は軸部先端面のトルクである。同図 c は、杭周部を平面展開した図上に示した荷重であり、 Q_0 、 Q_{fH} 、 Q_{w1} および Q_{w2} の各荷重は、 T_0 、 T_f 、 T_{w1} 、 T_{w2} の換算水平力、 Q_f は杭周面摩擦力の鉛直成分 Q_{fv} と換算水平摩擦 Q_{fH} の合力である。また、 θ_w は杭胴体面における螺旋羽の角度である。図 5 の各荷重の符号は図示の方向を正とし、これらの釣合式は以下の通りである。

$$P_0 = Q_{fv} + R_p + P_w, \quad P_w = P_{w2} - P_{w1} \quad (1-a)$$

$$T_0 = T_f + T_p + T_w, \quad T_w = T_{w2} + T_{w1} \quad (1-b)$$

$$Q_0 = Q_{fH} + Q_p + Q_w, \quad Q_w = Q_{w2} + Q_{w1} \quad (1-c)$$

ここに、 $Q_0 = 2T_0/D$ 、 $Q_{fH} = 2T_f/D$ 、 $Q_{w1} = 2T_{w1}/D$ 、

$$Q_{w2} = 2T_{w2}/D, \quad Q_f = (Q_{fH}^2 + Q_{fv}^2)^{1/2}$$

② 貫入条件と貫入形態の関係

羽一回転当たりの貫入形態例を図 6 に示す。ただし、a 図は、杭一回転の変位を立体的に示したものであり、b 図は杭面で平面展開した図である。図中の h_w は羽の螺旋ピッチ（羽ピッチ）、 h_d は羽が一回転によって進む距離（貫入ピッチ）である。 θ_d は、上記平面展開図に現れる螺旋状の掘削角度である。

図 7 に、回転条件 1-b 式を満足する場合の特徴的な貫入形態を平面展開図によって示す。同図 a は貫入の無い空回り状態（ $P_0 < Q_{fv} + R_p + P_w$ ； $h_d = 0$ ）、b 図は貫入ピッチが羽ピッチ以下の半空回り状態（ $P_0 = Q_{fv} + R_p + P_w$ ； $0 < h_d < h_w$ ）、c 図は貫入ピッチが羽ピッチに一致する正規貫入状態（ $P_0 = Q_{fv} + R_p + P_w$ ； $h_d = h_w$ ）、d 図は、貫入ピッチが羽ピッチよりも大きな過圧入状態（ $P_0 = Q_{fv} + R_p + P_w$ ； $h_d > h_w$ ）である。なお、本研究のような杭頭荷重 $P_0 = 0$ の貫入は b 図の貫入形態を示す。

③ 羽近傍地盤に関する仮定

土が体積変化しないものと仮定すれば、掘削の形態は図 6 b に示したように空隙領域 $\Delta aa'b'$ が発生することになる。なお、同図の斜線で示した $a'-b'$ 上の土は、羽の前 1 回転によって掘削されたものである。実際には、この空隙領域が大きい場合には、その一部は残存するが、少ない場合には、地盤の膨張や周辺土の流れ込みにより

埋められる。しかし、何れの場合においても、羽下近傍地盤は応力の開放によって拘束圧が低下することになる。上記空隙領域 $\Delta aa'b'$ は、図示のように貫入ピッチ h_d に依存するため、以下の仮定が成立する。

仮定 1・1：回転貫入時の羽下近傍地盤は拘束圧、剛性および強度が低下し、その度合いは貫入ピッチ h_d に依存する。

図 5 荷重状態

図 6 貫入状態例

図 7 貫入の形態

図 8 羽上面の応力

また、土の体積変化が無ければ、羽沈下体積と、羽上に移動する羽下掘削土体積は同一であり、これらは互いに相殺されるが、図7に示したように、正規の羽ピッチ通りの貫入に対して、羽上地盤は貫入ピッチ h_d の距離を押圧されたことになる。また、杭体の貫入体積に相応する分の側圧が増大する。したがって、羽上地盤に関して以下の仮定が成立するものとする。

仮定1・2：回転貫入時の羽上近傍地盤は、拘束圧、剛性および強度が増大し、その度合いは貫入ピッチ h_d および杭径 D に依存する。

回転貫入杭の羽ピッチ h_w と回転のみによる貫入ピッチ h_d に関して、以下の仮定が成立するものとする。なお、本仮定の妥当性は、貫入試験結果の(3)の①によって示される。

仮定1・3：羽ピッチ h_w が大きなものほど貫入ピッチ h_d が増大する。

回転貫入中の羽上地盤は破壊状態にあり、羽の傾斜や回転運動による影響も受け、羽上面の摩擦力は、図8に示すように角度を持って作用することが考えられ、以下の仮定が成立するものとする。

仮定1・4：羽上面に作用する回転抵抗摩擦力は、回転に抵抗するように、羽外側に斜め方向に作用する。

④ 回転貫入に関する事項

上記仮定1-1～1-4により、回転貫入時の羽近傍地盤に関して以下の事項が成立する。

事項1・1：回転貫入時の羽下近傍地盤の拘束圧、剛性および強度は低下し、その低下の程度は羽ピッチ h_w が大きなものほど大きくなる。

事項1・2：回転貫入時の羽上近傍地盤の拘束圧、剛性および強度は増大し、その増大の程度は羽ピッチ h_w が大きなものほど高くなる。

事項1・3：仮定1・4の羽上面に作用する回転抵抗摩擦力の角度を θ_x とすると(図8)、羽上荷重 P_{w1} と羽上トルク T_{w1} の間には、以下の関係式が成立する。

$$T_{w1} = \frac{1}{3} \frac{D_w^3 - D^3}{D_w^2 - D^2} \frac{\tan \theta_w + \tan \phi_w \cos \theta_x}{1 - \tan \phi_w \tan \theta_w \cos \theta_x} P_{w1} \quad (2)$$

ただし、本式は図8中に示した力の関係から導かれる。なお、 ϕ_w は羽面と土の間の摩擦角である。

(2) 貫入試験結果

図9に、貫入ピッチ h_d と貫入深さの関係、図10に鉛直変動土圧分布の推移を示す。ただし、本図のa, b, cは、鉛直土圧の深さ方向の変動圧分布の推移を、貫入深さ160, 320, 480mmについて示したものである(土圧計 $V_1, V_2, V_3, V_6, V_9, V_{13}, V_{16}$)。なお、図が繁雑とな

るため、回転貫入杭については、羽ピッチP12($h_w=12\text{mm}$)およびP36($h_w=36\text{mm}$)のものだけを示す。同様に、図11に水平変動土圧分布の推移を示す(土圧計 $H_1 \sim H_6$)。図12～図18に杭頭鉛直荷重 P_0 、先端部荷重 P_w^* 、軸部先端荷重 R_p 、胴体部鉛直摩擦力 Q_{rv}^* 、杭頭トルク T_0 、胴体部摩擦トルク T_f^* 、先端部トルク T_w^* の各荷重と貫入深さとの関係を示す。

(3) 貫入試験結果の考察

① 貫入ピッチ h_d ：図9の貫入ピッチ～貫入深さ関係は、貫入初期において、何れも小さな貫入ピッチを呈しているが、貫入量が150mm程度を越えると、貫入ピッチは増大し、一定値に収束している。また、この収束値は、羽ピッチが大きなものほど大きな値を示し、上記仮定1-3が成立することを立証している。

図9 貫入ピッチ h_d

② 鉛直変動土圧分布の推移：ストレート杭の鉛直土圧変動は、杭先端下方で極大値が現れているのに対し、回転貫入杭では大きな変動が認められなかった(図10)。これは、ストレート杭において、杭頭荷重 P_0 は、外的荷重として地中に伝達されるのに対し、杭頭荷重 $P_0=0$ とする回転貫入杭は、羽上荷重(推進力)、杭周面摩擦力および軸部先端地盤反力が内的な釣合関係にあるため、杭体から離れた所への応力伝達が少ないことに対応している。

③ 水平変動土圧分布の推移：回転貫入杭の水平土圧変動分布は、羽近傍で最大値を示し、杭体側方では圧入ストレート杭よりも大きな土圧値を示している(図11)。これは事項1-2に対応している。

④ 杭頭荷重 P_0 ： P_0 は貫入打止め時までほぼゼロを示しており、計画通り、羽荷重(羽推進力)のみによって貫入したことを示している(図12)。

⑤ 羽荷重 P_w 、胴体部周面摩擦力 Q_{rv}^* 、軸部先端荷重 R_p ：図20aは、貫入打止め時における羽荷重 $P_w (=P_w^* - \angle Q_{rv})$ と圧入ストレート杭の圧入荷重の比である。ただし、 $\angle Q_{rv}$ は、図19に示すように、鉛直周面摩擦応力度 τ_{rv} を直線分布と仮定し、杭周および胴体部下端から羽取り付け上端までの積分値として求めた。図20bは Q_{rv}^* に関する比、同cに R_p に関する比を示した。貫入荷重比(図a)と軸部先端荷重比(図c)は、羽ピッチによる影響が認められなかったが、周面摩擦力比(図b)は羽ピッチが大きなものほど大きな値を示した。回転貫入杭の貫入荷重はストレート杭の30%程度、軸

図10 鉛直変動土圧分布の推移(貫入試験時)

図11 水平変動土圧分布の推移(貫入試験時)

図 12 杭頭荷重 P_0 図 13 先端部鉛直荷重 P_w^* 図 14 軸部先端荷重 R_p 図 15 胴体部鉛直摩擦力 Q_{fv}^* 図 16 杭頭トルク T_0 図 17 胴体部摩擦トルク T_f^* 図 18 先端部トルク T_w^*

図 19 周面摩擦力の補正方法

部先端荷重は 20% 程度であり、事項 1-1 に対応した。

⑥ 杭頭トルク T_0 : 貫入打止め時の T_0 は図 21a に示したように、羽ピッチが大きくなると減少傾向にある。なお、1-b 式に示したように、その力学的性状は周面摩擦トルク T_f 、軸部先端摩擦トルク T_p および羽トルク T_w に依存する。また、 T_f は胴体部摩擦トルク T_f^* と先端部摩擦トルク ΔT_f との和 ($T_f = T_f^* + \Delta T_f$)、 T_w は先端部トルク T_w^* から、先端部周面摩擦トルク ΔT_f と軸部先端トルク T_p を差し引いた値である ($T_w = T_w^* - \Delta T_f - T_p$)。ここに、 T_f^* および T_w^* の値は実験結果として図 17 および図 18 に示しており、 ΔT_f は、水平摩擦応力度 τ_{H} が深さ方向に対して直線分布と仮定することによって、上記⑤の ΔQ_{fv} を算出した方法によって求められる。また、 T_p は、軸部先端面の接地圧が等分布であり、摩擦方向の角度は図 8 の θx と同一とし、 $\theta x = \theta_w + \phi_w$ と仮定すると、次式 3 によって求められる。なお、式中の ϕ_w は軸部先端面と地盤との摩擦角である。

$$T_p = D R_p \tan \phi_w \cos(\theta_w + \phi_w) / 3 \quad (3)$$

⑦ 胴体周面摩擦トルク T_f^* : 図 17 に示したように T_f^* は、羽ピッチが小さいものほど、より大きな値を示す傾向にあることが認めら

図 20 圧入ストレート杭との比較 (貫入打止め時)

図 21 各トルク値 (貫入打止め時)

れる。これについては以下に考察する。

図 22 に、胴体部鉛直摩擦力 Q_{fv}^* (図 15) と胴体部の換算水平摩擦力 Q_{H}^* ($= 2 T_f^* \cdot D$) の合力 Q_f^* を示す。何れも、ストレート杭の Q_{fv}^* よりも大きく、事項 1-2 に対応している。図 23 は、横軸に水平摩擦力、縦軸に鉛直摩擦力とした座標上に、貫入打止め時の胴体部の摩擦力 Q_{H}^* と Q_{fv}^* をプロットし、 Q_f^* の大きさおよびその傾き

図 22 胴体部摩擦力 Q_r^* 図 23 $Q_{rv}^* \sim Q_{rh}^*$ 関係

$\theta = \tan^{-1}(Q_{rh}^*/Q_{rv}^*)$ を示したものである。これらは、羽ピッチ P8 を除いて、何れの Q_r^* もほぼ同等値であり、羽ピッチが大きくなると傾斜角 θ が大きくなる傾向を示し、 $Q_{rv}^* = Q_r^* \sin \theta$ 、 $Q_{rh}^* = Q_r^* \cos \theta$ の関係にある。これらの関係は、羽ピッチが小さな方が大きなものよりも、鉛直成分 Q_{rv}^* が小さくなり、逆に水平成分 Q_{rh}^* は大きくなることを意味する。したがって、水平成分 Q_{rh}^* と依存関係にある $T_r^* (=2Q_{rh}^*/D)$ も、羽ピッチの小さな方がより大きな値を示し、 T_r^* の実験結果 (図 17) に対応している。なお、合力 Q_r^* に対する羽ピッチの影響は認められなかった。

⑧ 羽トルク T_w および事項 1～3 式の検証

回転貫入時において、羽下に空隙が発生し得ることから、羽下荷重 $P_{w2} = T_{w2} = 0$ と仮定する。したがって、羽上荷重 P_{w1} は⑤によって得られた羽荷重 P_w に一致する ($P_{w1} = P_w$)。また、軸部先端トルク T_p は、3 式によって算出され、羽トルクは $T_w = T_w^* - \angle T_r - T_p$ によって求められる。図 24 の太線は羽面の摩擦角度 $\phi_w = 30^\circ$ と仮定し、各羽ピッチに対して求めたものである。これは羽ピッチが大きくなると T_w は増大傾向にあり、事項 1～2 に対応している。また、上記羽荷重 P_{w1} を事項 1～3 式に適用すると、理論解 T_w (細線) が実験値にほぼ対応するものとして求められる (図 24)。ただし、理論解は、羽掘削刃先および羽厚周面の応力を無視しており、また、羽および軸部先端面の摩擦の発生角度は試算によって与えたものであるため、改良の余地を多く残すものである。

4. 載荷試験結果と支持力発現のメカニズム

(1) 支持力発現のメカニズム

① 載荷進行時の仮定

載荷時の羽の沈下と羽近傍地盤に関して、以下の仮定が成立するものとする。

図 24 事項 1～3 式の検証

a. 平羽

b. 螺旋羽

c. 平面展開図

仮定 2-1: 載荷による羽の沈下は、羽下近傍地盤を押圧し、羽下近傍地盤の拘束圧、剛性および強度をより増大させる。

仮定 2-2: 載荷による羽の沈下は、羽上近傍地盤の応力を開放し、羽上近傍地盤の拘束圧、剛性および強度をより低下させる。

② 極限荷重時の仮定

仮定 2-3: 極限荷重時の羽下面の摩擦力の向きは羽角度 θ_w に依存し、羽下から見た羽下面において、杭中心を通る線と時計回りに θ_w の角度をなす (図 25)。

事項 2-3: 極限荷重時の羽下荷重 P_{w2} による羽下トルク T_{w2} は以下の関係にある。

$$T_{w2} = \frac{1}{3} \frac{D_w^3 - D^3}{D_w^2 - D^2} \frac{1 - \tan \phi_w \cos \theta_w}{\cot \theta_w + \tan \phi_w \sin \theta_w} P_{w2} \quad (4)$$

(解説) 図 25 a に示すように、羽が傾斜の無い平羽である場合、鉛直荷重が作用すると、羽下面摩擦力の作用方向は、円中心から放射状に外に向かう。螺旋羽では、同図 b に示すように、中心線を通る線に対してある角度 θ を持ち、その角度は、羽ピッチが大きくなるとほど大きくなることは容易に推測される。同図 c は、羽応力を杭周面の平面展開図上に示したものである。なお、上記仮定 2-3 はこの摩擦の傾きを羽角度 θ_w と仮定するものである。事項 2-3 式は、同図 c 中に示す力の関係から導かれる。

(2) 載荷試験結果

図 26 に鉛直変動土圧分布の推移、図 27 に水平土圧の深さ方向の変動土圧分布の推移を示す (載荷開始時、沈下 0.1D 時、1D 時)。図 28～図 34 に、杭頭鉛直荷重 P_0 、先端部荷重 P_w^* 、軸部先端荷重 R_p 、胴体部鉛直摩擦力 Q_{rv}^* 、杭頭トルク T_0 、胴体部摩擦トルク T_r^* 、先端部トルク T_w^* の各荷重と沈下との関係を示す。

(3) 載荷試験結果の考察

① 鉛直変動土圧分布の推移: 鉛直変動土圧分布の推移は羽下方で最大となる増圧分布を示し、最終荷重時において、ストレート杭よりも大きな増圧値を示している (図 26)。羽上の変動土圧は低下傾向にあり、前者は仮定 2-1 に、後者は仮定 2-2 に対応している。

② 水平変動土圧分布の推移: 杭側方の変動土圧は減圧傾向を示し、杭先端で深の変動土圧分布の最大値は、沈下が進行するとストレート杭のものよりも大きくなっている (図 27)。なお、この杭側方の土圧の減少は仮定 2-2 に対応している。

③ 杭頭荷重 P_0 、胴体部周面摩擦力 Q_{rv}^* 、軸部先端荷重 R_p : 図 36a に、杭頭荷重 $P_0 \sim$ 沈下曲線 (図 28) における 0.05D 時の割線係数、沈下 0.1D および沈下 1D 時の杭頭荷重とストレート杭の杭頭荷重との比を示した。同様に、図 36b には胴体部周面摩擦力 $Q_{rv}^* \sim$ 沈下曲線 (図 31) における関係、図 36c に軸部先端荷重 $R_p \sim$ 沈下曲線

図 25 羽下面に作用する応力

図 26 鉛直変動土圧分布の推移 (載荷試験時)

図 27 水平変動土圧分布の推移 (載荷試験時)

図 28 杭頭荷重 P_0 図 29 先端部鉛直荷重 P_w^* 図 30 軸部先端荷重 R_p 図 31 胴体部鉛直摩擦力 Q_N^* 図 32 杭頭トルク T_0 図 33 胴体部摩擦トルク T_t^* 図 34 先端部トルク T_w^*

図 35 羽部軸部荷重比

図 36 圧入ストレート杭との比較 (載荷試験時)

図 37 各トルク値 (載荷試験時)

(図 30) における関係を示した。軸部先端荷重 R_p は、羽ピッチによる影響が認められなかったが、杭頭荷重 P_0 と周面摩擦力 Q_N^* に関しては、羽ピッチが大きくなると低下傾向を示している。特に、 R_p は、ストレート杭との比較において、初期荷重が小さく (低い割線係数)、沈下 0.1D 時になって 50% 程度となり、沈下 1D になると若干大きくなっている。なお、回転貫入杭の初期荷重の低さは、貫入時に生じた羽下地盤の緩みが残存しているためであり、沈下 1D 時の荷重の増大は、羽の沈下による先端地盤の押しえ効果によるも

のと推察される。また、周面摩擦力 Q_N^* は、沈下 1D 時において P8 と P12 を除き、負の摩擦力を示している。この負の周面摩擦力は、沈下する羽上面に、羽上土砂が落ち込んだことによって生じたものと推察される。なお、沈下 0.1D 時点では負の摩擦に至っていないが、 Q_N^* ～ 沈下関係 (図 31) は、載荷の進行と共に、胴体部周面摩擦力が大きく低下することを示唆している。

注) 図 31 に見られるストレート杭における載荷開始時の負の周面摩擦力の発生は、以下によって説明される。貫入時の杭頭荷重 P_0 、

杭先端地盤反力 R_p と周面摩擦力 Q_N は $P_0 = R_p + Q_N$ の関係にあり、杭頭荷重 $P_0 = 0$ に除荷すると、 $R_p + Q_N = 0$ 、即ち、 $Q_N = -R_p$ ($R_p > 0$) となり、圧入ストレート杭の鉛直摩擦力～沈下関係は、負の摩擦力から始まることになる。

④ 杭頭トルク T_0 、胴部周面摩擦トルク T_f^* 、先端部トルク T_w^* ： T_0 、 T_f^* 、 T_w^* の各トルク～沈下曲線（図 32～34）は、貫入時のトルクが残留しているため、正のトルクから始まり、載荷が進行すると、急激な低下傾向を示している。それらの低下傾向は羽ピッチが大きなものほど大きくなっている。図 37a は沈下 0.1D および 1D 時の T_0 と羽ピッチの関係、図 37b は T_f^* の関係、図 37c は T_w^* の関係を示したものである。これらは、羽ピッチが大きなものほど大きく低下している。

⑤ 事項 2-3 式の検証：図 38 は極限荷重時の実験結果から求めた羽トルクと事項 2-3 式による羽トルクを各羽ピッチに対して示したものである。なお、実験による T_w は先端部トルク T_w^* から軸部先端トルク T_p と先端部周面摩擦トルク $\angle T_f$ を差し引いた値であるが、載荷時には周面摩擦力が急減することから $\angle T_f$ を無視し、 $T_w = T_w^* - T_p$ として計算した。ここに、 T_p は軸部先端面の接地圧が等分布と仮定し、軸部先端面に作用する摩擦力の方向が回転に抵抗する斜め角度を待ち、その角度を羽角度 θ_w と仮定することによって得た下式（5）から計算される。ただし、軸部先端面と地盤との摩擦角は $\phi_w = 30^\circ$ とした。

$$T_p = D R_p \tan \phi_w \sin \theta_w / 3 \quad (5)$$

また、事項 2-3 式による計算値は、羽上土圧が低下しているため、羽上荷重 P_{w1} および先端部鉛直摩擦力 $\angle Q_N$ を無視し、 $P_{w2} = P_w^*$ （図 29）として求めたものである。

これらの結果は良く一致しており、事項 2-3 式は、ほぼ妥当であると判断される。

⑥ 羽部軸部荷重比：載荷試験時における羽部軸部荷重比（軸部先端荷重度 [Pa] に対する羽荷重度 [Pa] の割合）と沈下の関係を図 35 に示す。これらの曲線の初期勾配は、羽ピッチが大きなものほど低くなっており、沈下 0.1D (4.8mm) 時において、羽ピッチが小さなものから順に 0.39 0.37 0.33 0.30 の比率となった。また、沈下量が 10mm 程度（軸径の 0.2 倍）となると、P8 および P12 を除いてほぼ 0.4 に収束し、一定比で推移している。なお、羽軸部径比が大きくなると、上記収束値も大きくなることを確認している⁷⁾。

5. 結論

乾燥砂地盤における回転のみによって貫入させた回転貫入模型杭に関して、以下の知見が得られた。

（1）回転貫入時

- ① 回転貫入時の羽下近傍地盤は、拘束圧、剛性および強度が低下し、圧入ストレート杭の貫入力よりも低い羽推進力で貫入する。
- ② 回転貫入時の羽上近傍地盤の拘束圧、剛性および強度は増大し、

圧入ストレート杭よりもより大きな摩擦力を発現する。

- ③ 羽ピッチが大きなものほど鉛直周面摩擦力は大きくなるが、周面摩擦トルクは、羽ピッチが小さなものよりも小さくなる。
- ④ 回転貫入時の羽荷重と羽トルクに関する関係式を導き、本実験結果にほぼ対応することを確認した。

（2）鉛直載荷時

- ① 載荷初期の杭頭荷重は、回転貫入によって杭先端地盤が緩められており、圧入ストレート杭よりも低く現れる。この傾向は、羽ピッチが大きいものほど強く現れ、初期剛性はより低下する。
- ② 極限時の軸部先端荷重は、羽の押さえ効果によって増大し、圧入ストレート杭のものよりも大きくなる。
- ③ 載荷による羽の沈下に伴って、羽上荷重、羽上トルクおよび周面摩擦力は減少する。この減少傾向は、羽ピッチが大きいものほど強く現れる。
- ④ 載荷極限時の羽下荷重と羽下トルクに関する理論式を提案し、本実験結果に良く対応することを確認した。

（3）今後の課題

本研究の成果は、直接的に実大杭に対応するものとは考えてはいないが、適切な力学モデルは模型杭および実物杭を問わず適合するものと考えている。今後の課題は、貫入時および載荷時における力学モデルを構築し、より精度の高い模型実験を行うことによって検証することを考えている。

謝辞 本研究を遂行するにあたり新日本製鐵(株)佐伯英一郎氏、日本大学理工学部海洋建築工学科大学院修了生 橋本吉朗氏、長澤剛氏、柏木将臣氏、ならびに同学科卒業研究生諸氏の多大なる協力を得ました。末筆ながらここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) Jacobu and Davis: Foundations of Bridges and Buildings., 1914
- 2) 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，pp. 1265-1266, 1986. 8
- 3) 国府田誠、佐藤秀人、田村昌仁、橋本吉朗、長澤剛：回転貫入杭に関する研究，1. 基礎試験，2. 貫入および鉛直載荷試験，第35回地盤工学研究発表会，pp. 1833-1836, 2000. 7
- 4) 田村昌仁、国府田誠、高野公寿、廣瀬智治：建築における最新の鋼管杭基礎の設計と施工，基礎工 Vol. 28，pp. 18-24, 2000. 12
- 5) 国府田誠、佐藤秀人、田村昌仁、長澤剛：回転貫入杭の貫入および支持力機構に関する基礎的研究，その1. 貫入試験および載荷試験，その2. 貫入機構および支持力機構，第36回地盤工学研究発表会，pp. 1625-1628, 2001. 6
- 6) 柏木将臣、国府田誠、佐藤秀人、田村昌仁、佐伯英一郎 他：回転貫入杭の貫入性状および支持力性状に関する研究—模型杭による貫入試験と載荷試験—，日本建築学会大会学術講演梗概集 構造 I，pp. 611-612, 2001. 9
- 7) 国府田誠、佐藤秀人、永田誠、平田尚、田村昌仁、刑部徹：羽径に着目した回転貫入杭の模型実験，その1. 貫入試験，その2. 載荷試験，第38回地盤工学研究発表会，pp. 1481-1484, 2003. 7
- 8) 国府田誠、佐藤秀人、刑部徹、永田誠 他：羽ピッチに着目した回転貫入杭の模型実験，1. 貫入試験，2. 載荷試験，第39回地盤工学研究発表会，pp. 1537-1540, 2004. 7
- 9) 国司基、国府田誠、佐藤秀人、永田誠 他：土圧に着目した回転貫入杭の貫入性状に関する模型実験，第40回地盤工学研究発表会，pp. 1579-1580, 2005. 7
- 10) 刑部徹、国府田誠、佐藤秀人、永田誠 他：土圧に着目した回転貫入杭の支持力性状に関する模型実験，第40回地盤工学研究発表会，pp. 1579-1580, 2005. 7
- 11) 佐伯英一郎、大木仁：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—，構造工学論文集 Vol. 45B，pp. 453-462, 1999. 3
- 12) 土屋勉、大杉富美一、稲国芳、吉田勝之：翼付き鋼管杭の軸力測定法，土と基礎 Vol. 48, No. 8，pp. 17-19, 2000. 8
- 13) 土屋勉：最近の埋込み杭施工法の動向と今後の展望，基礎工 Vol. 31, No. 9，pp. 11-15, 2003. 9
- 14) 大杉富美一、土屋勉、島田正夫、吉田勝之：大型加工土槽を利用した回転貫入模型杭の貫入試験，日本建築学会構造系論文集 Vol. 591，pp. 69-75, 2005. 5

(2005年7月10日原稿受理，2005年11月28日採用決定)