

大型加圧土槽を利用した回転貫入模型杭の貫入実験

PILE INSTALLATION TESTS OF SCREWED PILES
IN A CALIBRATION CHAMBER大杉 富美一*, 土屋 勉**, 島田 正夫***, 吉田 勝之****
*Fumikazu OHSUGI, Tsutomu TSUCHIYA, Masao SHIMADA
and Katsuyuki YOSHIDA*

Installation model tests of screwed steel pipe pile, which has helical wing on the pile edge, were executed in uniformly graded high density sand in a calibration chamber. The experimental factors are the pile diameter D_0 (48.6, 76.3, 101.6mm) and the surcharge pressure σ_v (50, 100, 150kPa). The results show the residual stresses, which remain in the screwed pile after installation, amount to high ratio for the stresses during installation. We have discussed the penetration mechanism of the screwed pile based on the stress distribution in the cross section of the pile.

Keywords : *screwed pile, installation test, calibration chamber, residual stress, penetration mechanism*

回転貫入杭, 施工実験, 加圧土槽, 残留応力, 貫入メカニズム

1. 序

騒音振動等の問題があるため, 都市部やその近郊で打込み杭を使用することはほとんど不可能であるが, 支持力的には打込み杭のように地盤を掘削することなく施工できる杭工法 (Displacement Pile) が優れていることは明らかである。そこで, 場所打ち杭や一般の埋込み杭に見られる残土処理, 更に騒音振動の問題を克服した回転貫入型の杭工法 (以下, 本論文では回転杭と呼ぶ) の開発が活発¹⁾になっている。我が国における回転杭の先駆けは, 小規模建築用に開発された羽根付き小径鋼管杭²⁾であって, 杭先端近傍の杭周に螺旋翼を付けて貫入性を上げると同時に鉛直支持性能を向上できることを載荷実験で確認している。その後, 既製杭メーカー, 基礎工事会社, 設計コンサルなどで精力的な開発が進められ, 現在では鋼管の直径が $\phi 100$ 程度の小径から $\phi 1,200$ の大径まで実用化されている。

これらの杭工法では, 鋼管の先端面または杭周面に溶接された螺旋翼や平板 (以下, 本論文ではこれらをまとめて羽根と呼ぶ) が回転推進力となって, 土を側方に押しつけて設置される。設置後にはこれらの羽根が杭の鉛直支持力を増加させる要素として機能することを基本的な特徴としている。杭の鉛直支持性能に関しては, 原位における鉛直載荷試験が蓄積され, それらの結果に基づいた支持

方式が提案され, 種々の回転杭の設計が可能な状態になっている。

回転杭の特徴である杭 1 本毎に得られる施工時の様々な情報 (回転トルク, 押圧力, 1 回転当たりの貫入量) を, 杭の打止め管理や支持力推定に利用出来れば, 回転杭の信頼性は飛躍的に向上するであろう。その点で, 杭貫入メカニズムを表現する式を構築した佐伯等³⁾の研究は高く評価できよう。しかし, 実現場への応用はなかなか難しく, 多くの工法は簡単な施工情報に基づいて, 物理的意味も不明確なまま打止め管理基準が提案されているのが実状であり, 精度的には不十分である。

そこで, より条件が明確に出来る模型実験によって, 杭施工中の挙動を解明しようとする試みがなされている。国府田等⁴⁾による羽根ピッチと貫入度に着目した精力的な研究が代表的であるが, その他にも多くの報告^{5)~8)}がある。しかし, 著者等が指摘した回転貫入杭特有の残留応力の問題⁹⁾もあり, 施工情報を鉛直支持力と関連づけることは, 現段階では精度的に満足できるものとはなっていない。

本論文では, 回転杭の貫入メカニズムを実験的に明らかにすることを目的として, 回転杭に加えて軸部寸法を同じくするストレート杭を圧入施工した杭 (圧入杭) の 2 タイプについて, 大型加圧土槽に充填した砂地盤に貫入させるときの情報を種々測定して力学的な検討を行った。なお, 本論文の一部は文献^{10), 11)}に発表済みである。

* 室蘭工業大学大学院建設工学専攻 大学院生・工修

** 室蘭工業大学建設システム工学科 教授・工博

*** 室蘭工業大学 技術職員

**** 千代田工営(株) 代表取締役

Graduate Student, Div. of Civil and Environmental Engineering, Muroran Institute of Technology, M. Eng.

Prof., Dept. of Civil Engineering and Architecture, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

Technician, Dept. of Civil Engineering and Architecture, Muroran Institute of Technology

President, Chiyoda Geotech Co., Ltd.

2. 実験の概要

2.1 実験装置

実験装置の構成を図-1に示す。

土槽は内径 2,000mm, 深さ 2,500mm の円柱形であり, 土槽の内壁面にはシリコングリスを塗布したテフロンシート (厚 0.1mm) を二重に貼り付けた。砂を充填して上載圧のみを负荷させた実験を行い, 土槽外壁面に貼付したワイヤーストレインゲージ (WSG) や土槽底面の土圧計の値から, 土槽内壁面と砂との間にはほとんど摩擦力が生じないことを確認している。

上載圧负荷装置はエアコンプレッサに接続して, 空気圧により模型砂地盤に上載圧 (容量 500kPa) を负荷するもので, 直径 2,000mm, 厚さ 50mm のドーナツ形状をしたゴム製空気袋である。上盤の開口部 (直径 114.3mm) に適合し, 砂地盤と上盤の間に装填できる。

回転貫入装置は, 重量 4.3kN, 回転数 14rpm, 回転トルク 13.5kNm を有しており, ガイドレール上を下降する。

圧入・載荷フレームは, 土台, 支柱, 反力梁で構成されており, 設計鉛直荷重は 1,000kN である。直杭の圧入や鉛直載荷実験では, 油圧ジャッキ (50kN, 200kN, 500kN) を用いている。

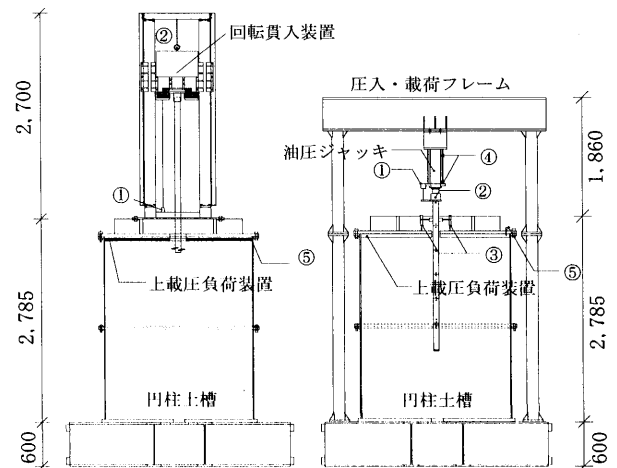
以上の実験で測定される全ての歪ゲージ, ロードセル, 変位計等の各種センサによる測定値は全て計測端末に表示・記録される。

2.2 模型地盤

使用した砂試料は珪砂 6号 (東北珪砂) であり, 表-1にその物理的性質を示す。

本実験では, 図-2のように 121 個のノズル (E-E 断面) とネット (C-C 断面) を組み合わせた空中落下法¹²⁾で地盤作製を行った。この時のノズル先端からネットまでの距離は 412mm である。ノズルは図-3に示す形状をしている。作成したノズルの流量は 45.7 ± 5.0 g/s の範囲であり, 平面内に出来るだけ流量が均一になるように各ノズルを配置した。

模型砂地盤の鉛直方向および水平方向の均一性を確認するため,



- ① 巻取型変位計
- ② ロードセル
- ③ 高感度変位計
- ④ 油圧ジャッキ
- ⑤ 空気圧

図-1 実験装置の概要

表-1 砂試料の物理的性質

試料名	東北珪砂
	6号
G_s	2.61
$\rho_{max} (g/cm^3)$	1.74
$\rho_{dmin} (g/cm^3)$	1.42
$D_{50} (mm)$	0.32
U_c	2.00

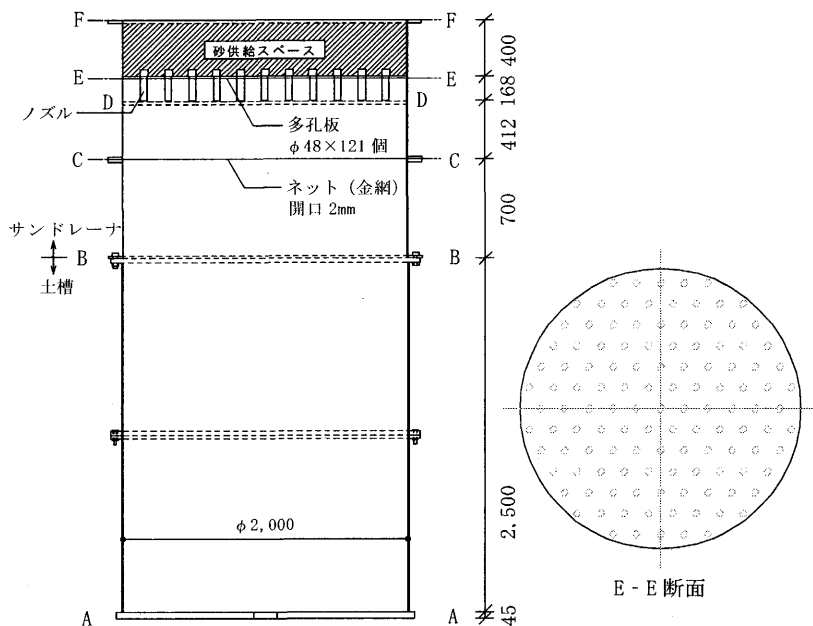


図-2 地盤作成装置

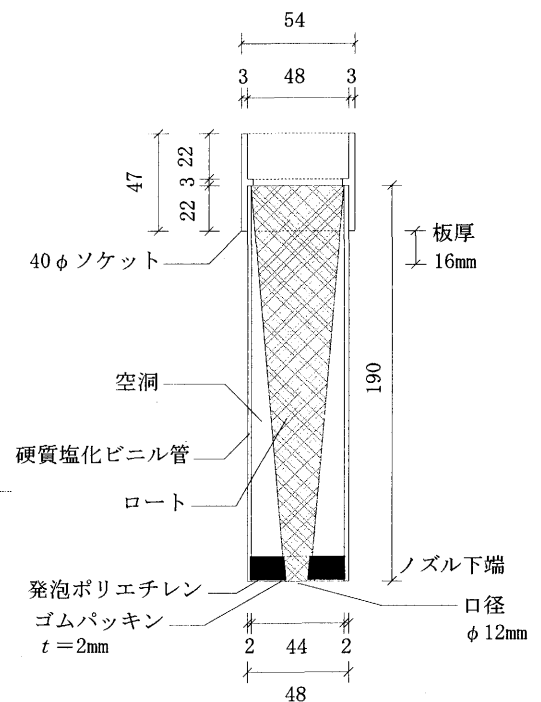


図-3 ノズル形状

土槽底部と底部+2,000 深度で、それぞれ土槽中心から半径方向に500 離れた3カ所にモールドを埋設して相対密度 D_r 分布を測定した。実測結果は D_r の平均が 93.9%であったが、標準偏差は $\sigma = 1.43\%$ で事前に行った空中落下法の性能実験¹²⁾の値 $\sigma = 0.89\%$ よりも大きかった。ただし、これらの値には地盤からのモールド回収作業に伴う振動などの外力の影響が含まれていることを考慮すると、本実験で採用した空中落下法によって、ほぼ均一な地盤が作製できるものと判断できる。

2. 3 模型杭

模型杭は、回転杭（回転1～5）および圧入杭（圧入1～3）の2タイプであって、これらの形状や寸法を表-2および図-4(a)に示す。なお、試験杭は実験装置の高さ制限から、羽根や底板などが取り付けられた下杭部とその上に継ぎ足される数本の継杭からなっている。模型杭の材質はSTS410、F値=245MPa、ヤング率 $E=2.05 \times 10^5$ MPaである。これらの杭には1断面当たり4枚のWSGを貼付しており、アムスラーを用いた圧縮試験によって較正值が得られている。

杭先端部荷重と羽根部荷重を独立して測定するために、二重管法¹³⁾を採用した。これは、図-4(b)に例示するようにWSGを貼付した棒状の荷重計（表-2の内軸径を有する）を鋼管杭に挿入することにより、杭先端近くの杭周面摩擦力が含まれない構造になっている。

表-2 模型杭一覧 (mm)

実験名	直径 D_o	軸厚 t_o	材長 L	内軸径 D_i	羽根径 D_w	羽根厚 t_w	羽根 ピッチ p
回転1	101.6	12.7	1192	30	203.2	11.6	51.6
回転2, 3, 4	76.3	7	2042	22	152.6	11.5	40.6
回転5	48.6	5.1	2007	18	97.2	6.3	20.9
圧入1	101.6	12.7	2000	30	-	-	-
圧入2	76.3	7	2022	22	-	-	-
圧入3	48.6	5.1	2007	18	-	-	-

なお、杭体の測定値は全て杭を地表面に建て込んだ状態（杭の自重のみが作用）を原点としている。

2. 4 実験手順

表-3に、回転杭と圧入杭の施工実験の実施条件をまとめた。これらの実験手順は以下の通りである。

(a) 回転杭

- ①. 空中落下法により、所定の相対密度を有する均一な模型砂地盤を作製する。
- ②. 実験土槽の中央に下杭が自立できる程度（15cm）埋め込み、蓋をする。
- ③. 上載圧付加装置により所定の上載圧（50～150kPa）を作用させる。
- ④. 回転貫入装置に杭を接続後、杭を回転貫入させる。
- ⑤. 杭を継ぎ足しながら、所定深度まで回転貫入させる。

(b) 圧入杭

- ①～③は（a）と同様。
- ④. 載荷フレームをセットして、ジャッキ（ストローク：200mm～500mm）で圧入させる。
- ⑤. 杭を継ぎ足しながら、所定深度まで圧入を繰り返す。

3. 実験結果

3. 1 施工中の先端荷重

図-5は、回転杭および圧入杭について、施工中の杭先端荷重と貫入深度の関係を示している。（b）の圧入杭をみると、杭径の小さい圧入3がそれよりも杭径の大きい圧入1や圧入2よりも大きい値を示している。ただし、貫入量が杭径の5倍程度（図中の←印）になると先端荷重は20MPa程度となり、杭径による明確な差は無さそうである。

それに対して（a）の回転杭をみると、貫入開始後250mm程度を

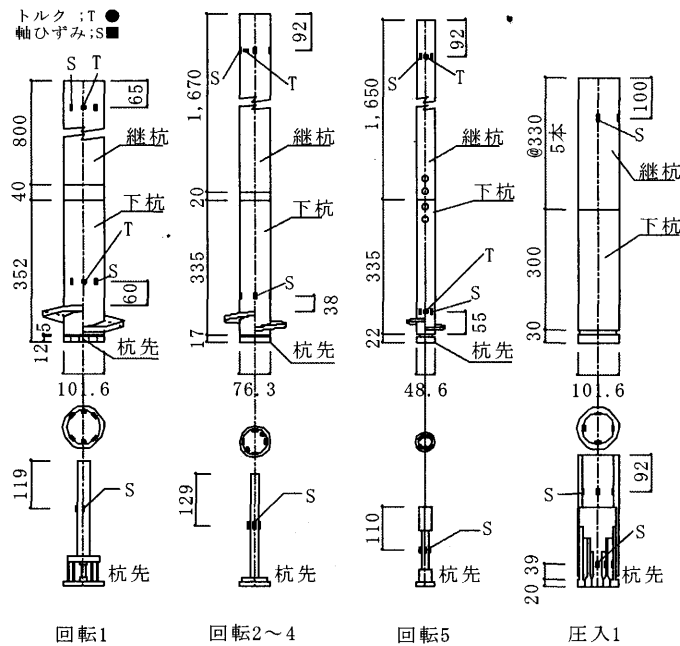


図-4(a) 模型杭の形状

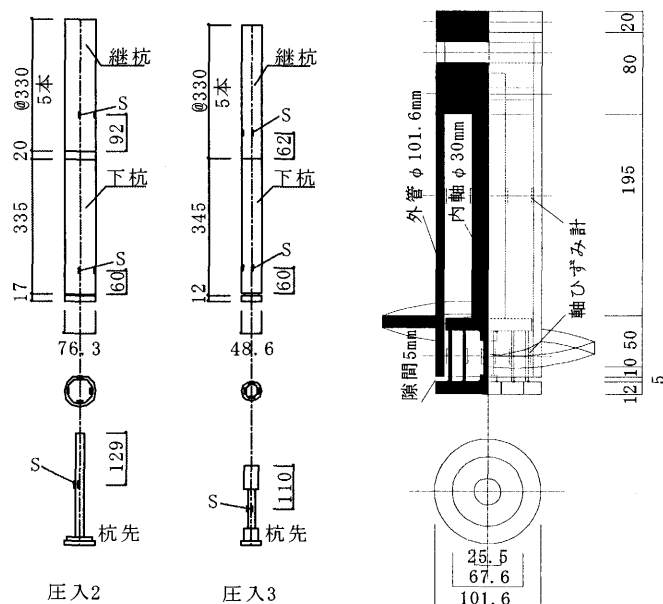


図-4(b) 模型杭の先端加工例

表-3 実験条件

実験名	施工方法	模型杭		地盤
		直径 D_o (mm)	羽根径 D_w (mm)	上載圧 σ_v (kPa)
回転1	回転貫入	76.3	152.6	100
回転2				50
回転3				100
回転4				150
回転5				100
圧入1	圧入	-	-	100
圧入2				100
圧入3				100

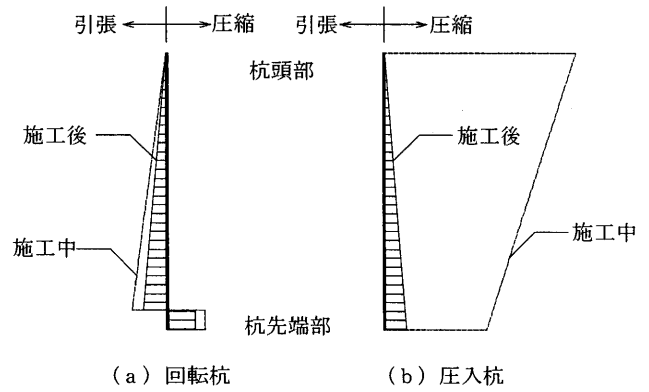


図-6 施工後の残留応力分布

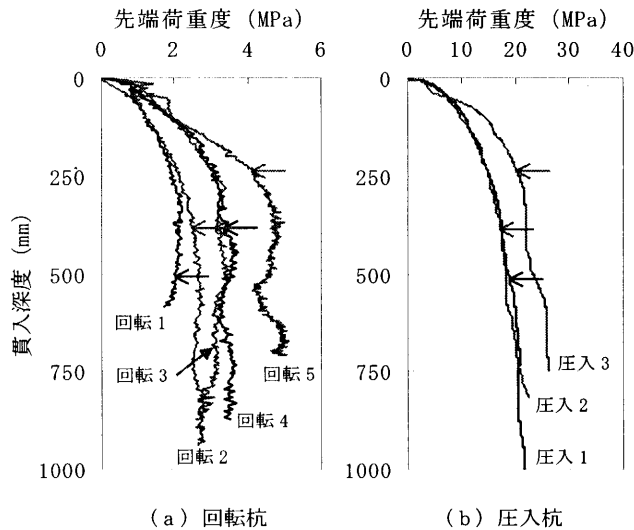


図-5 施工中の杭先端荷重

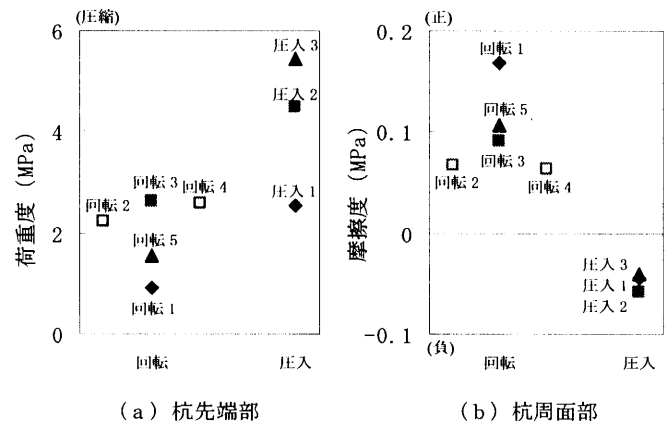


図-7 杭体各部の残留応力度

過ぎるとほとんど一定値になり、前述した圧入杭の先端荷重の約10~20%程度に過ぎないのが特徴的である。このように回転杭の先端荷重が小さいのは、羽根部が杭先端地盤の拘束圧を大幅に低減させる作用によるものと考えられる。同じ羽根径である回転2, 3, 4の杭では、上載圧が大きい場合ほど先端荷重は幾分か大きくなるもののその変化は小さい。このことは大深度における回転貫入杭の優れた施工性を示唆するものである。また、上載圧が等しい回転1, 3, 5の杭では、定常状態の先端荷重がそれぞれ2.0MPa, 3.0MPa, 5.0MPaであり、杭径(羽根径)が大きい場合ほど先端荷重が小さい傾向が明確に現れている。このことから、杭貫入中における杭先端部地盤の拘束圧が減少する領域は、杭径(羽根径)の大きいほど拡大しているものと推察される。

3.2 施工後の残留応力

図-6は、実験結果を参考にして回転杭および圧入杭の施工後に杭体に残留している軸力分布を描いた概念図である。圧入杭では杭体全てが圧縮力となるのに対して、回転杭では羽根部を境に上部で引張り力、先端部で圧縮力が杭体に残留している。

図-7は、本実験で得られた上記の残留応力(杭の施工終了から3~6時間経過した時点の値)をまとめたものである。(a)の杭先端部では、圧入杭の残留応力度が3~5MPaであって、杭径が小さいほど大きい残留応力度を示す傾向が見られる。ただし、これらの残留応力度は施工中の先端荷重が20MPa程度であったのと比較すると

かなり小さい値である。一方、回転杭の残留応力度は1~3MPaであって、圧入杭の値よりは小さいが、施工中の先端部荷重の半分以上にも達している。このように、回転杭では羽根部の存在によって杭先端荷重の多くが残留することが明らかになった。

(b)の杭周面部では、回転杭が正の周面摩擦力度を示し、圧入杭では負の周面摩擦力度を示す。野外における実大の鉛直載荷試験において、回転杭の杭周面摩擦力が比較的小さい例が多いこと的主要原因の一つとして、このような正の周面摩擦力の存在を考えている。この現象をより明確にするためには、杭周面摩擦力と変位関係を詳細に今後検討する必要がある。なお、杭周面に残留する応力度を絶対値で比較すると、回転杭は0.07~0.17MPaで圧入杭の3倍程度になっている。

3.3 施工中の杭体トルク

図-8は、羽根上部の軸部に貼付したゲージで得られる杭体トルクと貫入深度の関係を示したものである。この杭体トルクによる羽根部回転推進力が杭先端抵抗力と軸部周面抵抗力に打ち勝って杭体を貫入させることになる。杭体トルクは羽根径および上載圧が大きい程大きくなるが、図-5(a)に示した先端荷重と貫入量の関係と同様に貫入量の増大の割にはトルク値の上昇は見られない。

図-9は、上記の杭先端荷重と杭体トルクの間関係をプロットしたものである。回転貫入開始時の先端荷重は杭頭のモーター重量によるものであるが、その後の杭先端荷重と杭体トルクには概ね比例関係

が認められ、杭径による大きな差異は見受けられない。このことは、回転貫入杭の杭体トルクの測定値から杭先端荷重を一律に推定できる可能性を示しており、杭体トルクが施工管理の指標となることを示唆するものである。

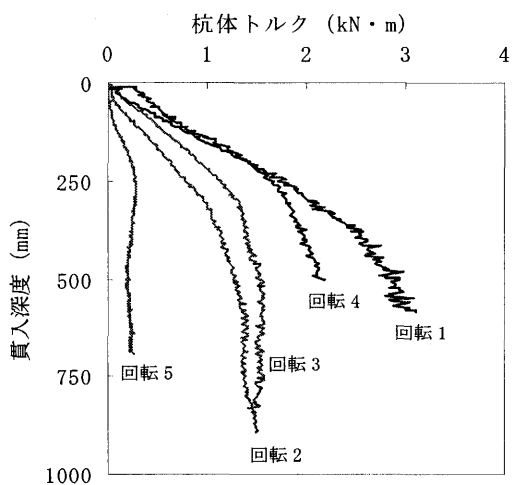


図-8 施工中の杭体トルク

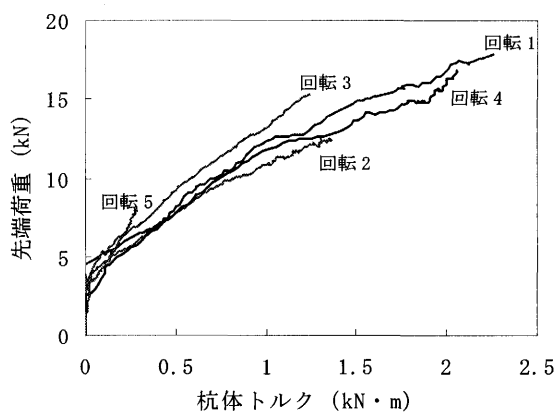


図-9 施工中の杭先端荷重と杭体トルクの関係

3. 4 羽根近傍の軸部応力度分布

図-10は、羽根付け根部の終端から上方へ $D_0/2$ 離れた軸部のひずみゲージによって鋼管の軸方向応力度を算定して、貫入深度に伴う施工中の応力度の推移を示したものである。ここで、a～dの測定位置は図-11の断面に対応している。それによると、b点およびd点の値は、それぞれ引張り力および圧縮力が貫入開始から400mm程度の貫入時点まで明確に増大して、400mm程度の貫入以降では大きな変化がない。それに対して、a点およびc点では概ね小さな引張り力を示すが、貫入深度の増加に伴って値の変動も見られる。

図-12は、a～dの測定値を基に貫入深度400mm時点における鋼管断面内の軸力分布を描いたものである。b点では最大引張り力を示すのに対して、d点では逆に比較的大きな圧縮力となるなど、測定位置によって大きく異なる傾向が明瞭に認められる。

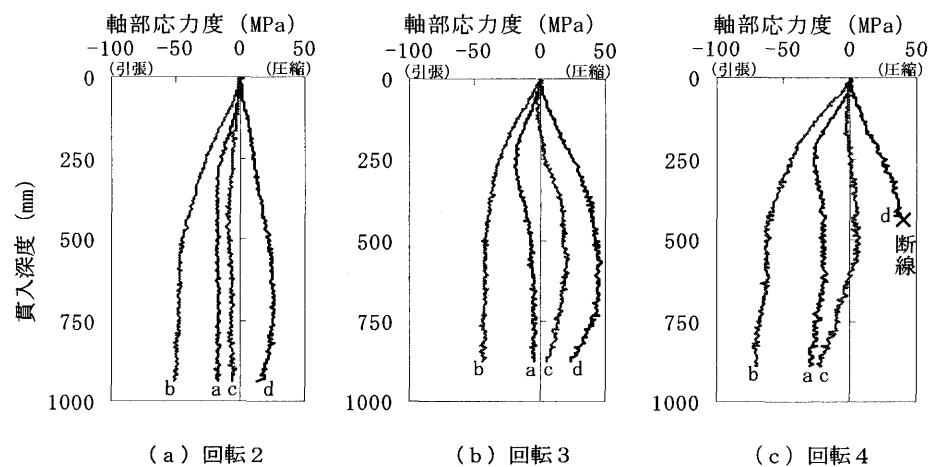


図-10 施工中の軸部応力度

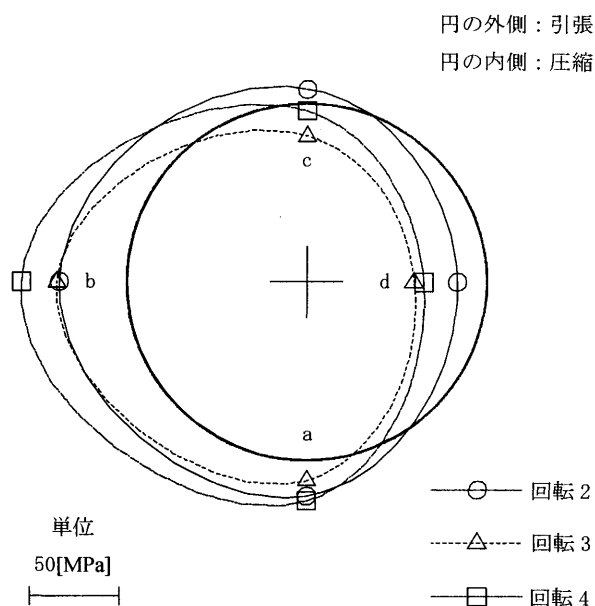


図-12 杭断面の軸力分布

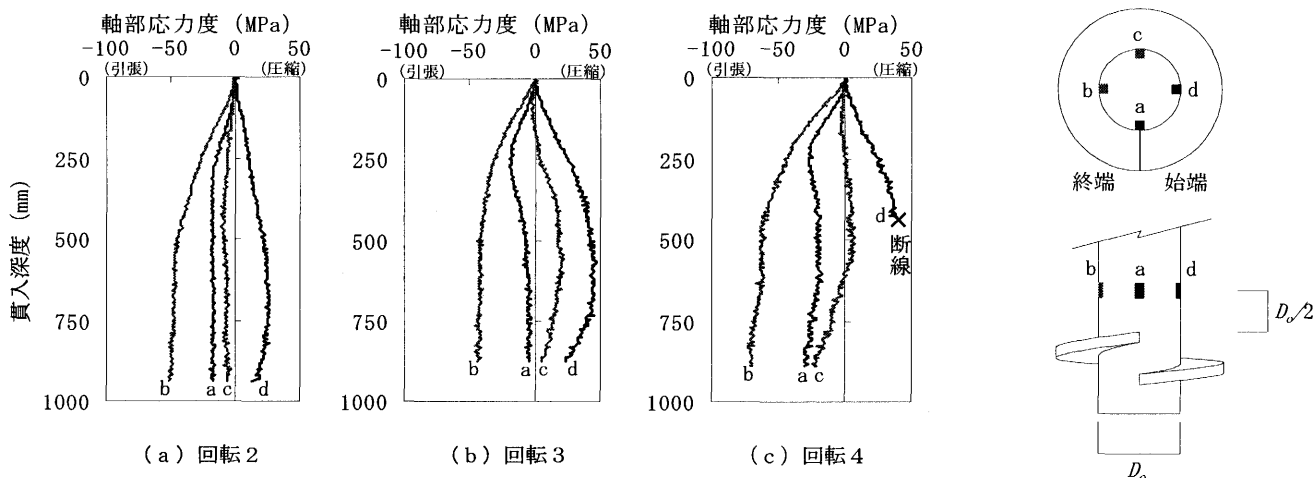


図-11 羽根形状と測定位置の関係

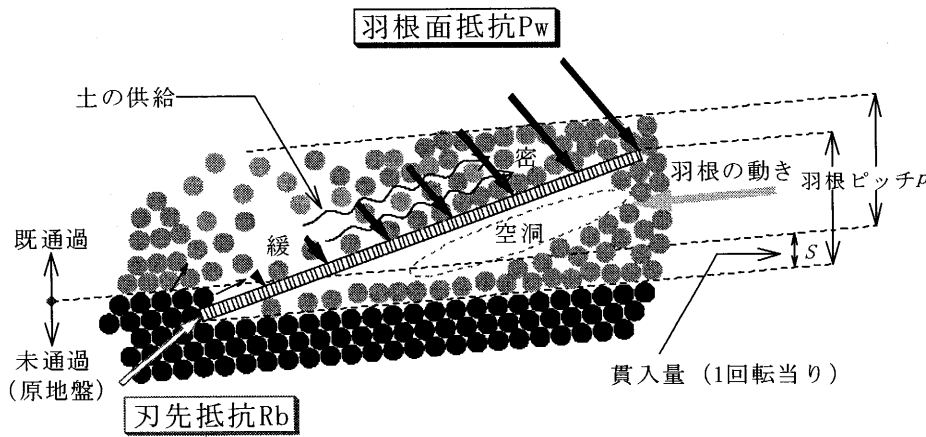


図-1 3 羽根近傍の土の挙動 (展開図)

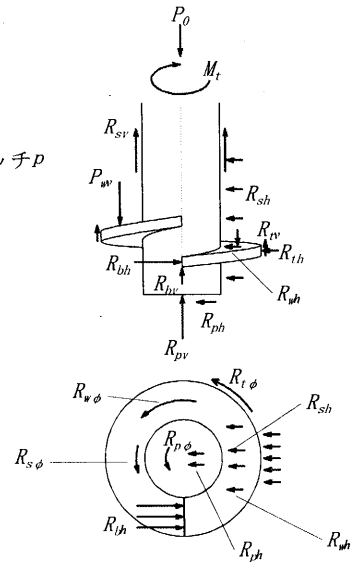


図-1 4 回転杭に作用する力

4. 杭貫入中の杭体応力に及ぼす要因

回転貫入杭の基本的なメカニズムは、全体的には杭体に作用させた回転トルクが螺旋型の羽根部に鉛直方向の推進力を引き起こすと考えられるが、これらの詳細についてはまだ明確になっていない。本論文の3. 4に示した杭体の軸方向応力度分布によると、羽根部による回転推進力作用は羽根の終端に近い領域と始端に近い領域では異なることが示唆された。そこで、回転杭の羽根近傍における土の挙動を想定して回転杭に作用する力の釣り合い式を組み立て、貫入中の杭体応力を生じさせる要因についての考察を試みる。

4. 1 羽根近傍の土の挙動

図-1 3は、このような現象を解釈するために、羽根部を展開して羽根に挟まれた土の動きを模式的に描いたものであるが、次のようなことが推察される。

- ①. 羽根の始端が比較的密な砂地盤を削り取る。
- ②. 削り取られて緩くなった砂が羽根上面に移動するが、前回の羽根の軌跡との間が徐々に狭められるため、羽根の終端近くでは徐々に密になって推進力が増大する。
- ③. 移動した砂の一部は羽根の終端からこぼれ落ち、再び羽根の始端で削られて羽根上面に移動し、杭体の推進力を生み出す。
- ④. 羽根の始端は原地盤の密な砂を削り取る際に、大きな水平抵抗力と下面からの貫入抵抗力を受ける。
- ⑤. 杭体の貫入度 S/p (S : 1回転当たりの貫入量, p : 羽根のピッチ) が1よりかなり小さい (本実験では、回転1: 0.25, 回転2~4: 0.35~0.36, 回転5: 0.32) ため、羽根下面は極めてゆるい状態になっている。文献⁴⁾⁷⁾では空洞も観察されている。

回転杭の施工では、杭頭に作用させる押し込み力は全くない若しくは非常に小さい状態で、杭体が貫入していることが多い。これは杭体に取り付けられた羽根が地盤から反力を得ているためであり、上記の土の挙動のように羽根の刃先で削り取られた土が羽根上面へスムーズに移動することが必要であることが理解できよう。杭打止め時における小さ過ぎる貫入度管理では、羽根上面へ移動する土の量が減少して羽根部下面のゆるみ領域や空洞を広げることになり、鉛直荷重が作用した時の羽根部の剛性低下を引き起こすことも懸念される。

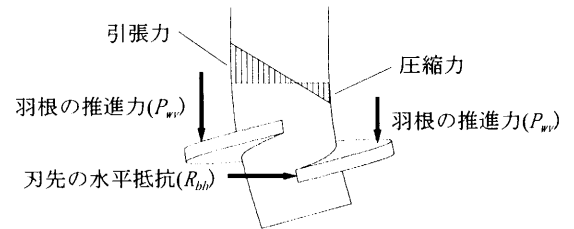


図-1 5 杭先端近傍の模式図

4. 2 杭貫入中の力の釣り合い式

図-1 4は、杭先端近傍の周面に1枚の螺旋羽根を有する場合を対象として、杭貫入中に作用する力を示したものである。a) 鉛直方向力, b) 水平方向力, c) 杭軸廻りモーメントに関する釣り合い式は、次のように表される。

a) 鉛直方向力

$$P_0 + P_{wv} = R_{pv} + R_{bv} + R_{sv} + R_{tv} \quad \dots \dots \dots (1)$$

- P_0 : 杭頭部押圧力
- P_{wv} : 羽根上面の回転推進力
- R_{pv} : 杭先端部の鉛直抵抗力
- R_{bv} : 羽根の刃先抵抗力の鉛直成分
- R_{sv} : 軸部周面の摩擦抵抗力の鉛直方向成分
- R_{tv} : 羽根外端の摩擦抵抗力の鉛直方向成分

b) 水平方向力

$$R_{bh} = R_{sh} + R_{ph} + R_{wh} + R_{th} \quad \dots \dots \dots (2)$$

- R_{bh} : 羽根の刃先抵抗力の水平成分
- R_{sh} : 軸部周面の水平抵抗力
- R_{ph} : 杭先端部の水平抵抗力
- R_{wh} : 羽根上面の摩擦抵抗力の水平方向成分
- R_{th} : 羽根外端部の水平抵抗力

c) 杭軸廻りモーメント

$$M_t = M_s + M_p + M_{wb} + M_{wp} + M_{wt} \quad \dots\dots\dots (3)$$

M_t : 杭体に作用する杭体トルク

M_s : 軸部周囲の摩擦抵抗力のフープ方向成分 $R_{\rho\phi}$ によるモーメント

M_p : 杭先端部の摩擦抵抗力のフープ方向成分 $R_{p\phi}$ によるモーメント

M_{wb} : 前述の R_{bb} によるモーメント

M_{wp} : 羽根上面の摩擦抵抗力のフープ方向成分 $R_{w\phi}$ によるモーメント

M_{wt} : 羽根外端の摩擦抵抗力のフープ方向成分 $R_{t\phi}$ によるモーメント

4. 3 軸部応力度分布の解釈

3. 4 に示した杭体軸部の応力度分布は、4. 2 にまとめた各種の荷重と抵抗力の釣り合いにおける部材断面力を反映したものと考えられる。これらを定量的に評価するには今後の詳細な検討を必要とするが、軸部応力度分布に主要な影響を及ぼした因子としては、4. 1 に示した羽根近傍の土の挙動から次の2点が挙げられよう。

①. 羽根による回転推進力の不等分布による偏心引張り力

羽根部近傍の土の挙動の考察から、回転推進力作用は羽根の終端に近づくにつれて大きくなるため、杭体には偏心した引張り力が作用する。

②. 羽根の刃先抵抗による曲げ応力

羽根の刃先抵抗力が非常に大きく、この水平成分が杭体に曲げ応力を発生させる。この応力は図-1 1 の b 点での引張り力、d 点での圧縮力に対応する。

図-1 5 は上記を模式的に表現したものであるが、回転貫入杭では引張り力と曲げを受けて杭先端の中心軸が円を描きながら貫入していくものと推察される。実験における羽根外端を観察したところ、図-1 1 の d 近傍の方が b 近傍よりも摩耗度が激しい結果であり、それを裏付けるものであった。

5. まとめ

以上、回転杭の特性を実験的に明らかにすることを目的として、大型加圧土槽による模型杭の貫入実験について考察してきたが、まとめると以下ようになる。

①. 回転杭の施工中の先端荷重度は圧入杭の 10~20% に過ぎない。これは、羽根部が先端地盤の拘束圧を低減させる作用によるものであり、回転杭の優れた施工性につながっている。

②. 圧入杭では施工中の先端荷重の多くが解放されるのに対して、回転杭では先端荷重の多くが残留する。

③. 圧入杭では杭周囲に負の摩擦力が残留するのに対して、回転杭では杭周囲に正の摩擦力が残留する。

④. 羽根上部の杭体トルクと先端荷重は、杭径によらず概ね比例関係となる。

⑤. 回転杭の推進力は羽根始端で削り取られた土が羽根上面に移動することによって発生し、羽根部の始端から終端に近づくほど大きくなると推察される。

⑥. 羽根の刃先抵抗は杭体に比較的大きな曲げ応力を発生させると推察される。

今後に残された重要な課題として、貫入中の杭体応力に影響する因子を定量的に評価するモデルや杭の打止め管理手法の開発が挙げられる。

謝辞

本論文の実験においては、卒業研究に携わった草野憲蔵氏、関沢康寛氏、田内大紀氏を始めとする多くの室蘭工業大学卒業生のご助力によるところが多いことを記して、ここに深く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 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.
- 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, B-1, pp. 1265-1266, 1986. 8.
- 3) 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, 日本建築学会, 1999. 3.
- 4) 柏木将臣・国府田誠・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,日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 611-612, 2001. 9. 他一連の研究
- 5) 永田誠・平田尚・他:回転圧入鋼管杭模型試験装置の製作,日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 609-610, 2001. 9. 他一連の研究
- 6) 小松吾郎・永田誠・他:回転貫入杭の貫入速度とその挙動に関する考察,日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1, pp. 533-534, 2003. 9.
- 7) 佐々木佳宏・荒井克彦・他:回転貫入鋼管杭の貫入メカニズムについて,第39回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1535-1536, 2004. 6.
- 8) 佐古大・時松孝次・他:模型実験に基づく回転圧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.
- 9) 土屋勉・大杉富美一・他:多翼鋼管杭の支持力機構,土と基礎,Vol. 48, No. 8, pp. 5-8, 2000. 5.
- 10) 大杉富美一・土屋勉・他:翼付き模型鋼管杭の施工実験,第38回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1491-1494, 2003. 7.
- 11) 田内大紀・土屋勉・他:大型加圧土槽を利用した鋼管杭の施工および鉛直載荷実験,日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 77, pp. 149-152, 2004. 7.
- 12) 島田正夫・土屋勉・菊地ゆかり:ノズル・ネットを用いた模型砂地盤の作製方法,日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 75, pp. 21-24, 2002. 6.
- 13) 土屋勉・大杉富美一・他: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.

(2004年9月9日原稿受理, 2005年1月21日採用決定)