

回転貫入杭の貫入・支持力特性に関する模型実験

MODEL TESTS OF INSTALLATION AND BEARING CAPACITY OF SCREWED PILES

土屋 勉*, 大杉 富美一**, 中沢 楓太***, 島田 正夫****
Tsutomu TSUCHIYA, Fumikazu OHSUGI, Futa NAKAZAWA
and Masao SHIMADA

Installation and vertical loading tests of screwed steel pipe pile, which has helical wing on the pile edge, were executed in uniformly graded sand in a calibration chamber. The experimental factors are the relative density D_r (72, 94%), the pile diameter d_0 (48.6, 76.3, 101.6mm) and the surcharge pressure σ_0 (50, 100, 150kPa). It was proved that the residual stresses of screwed pile installed in the dense sand amounted to high ratio, and the load deflection curves of the pile top due to vertical load were different from those of the other piles such as jacked pile or bored pile. We have discussed the effect of the residual stresses upon the bearing capacity of the screwed pile.

Keywords : *screwed pile, installation test, residual stress, bearing capacity, calibration chamber*

回転貫入杭, 施工実験, 残留応力, 支持力機構, 加圧土槽

1. 序

回転貫入杭は、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。その点で、回転貫入杭は従来の分類（打込み杭、埋込み杭、場所打ち杭）とは異なる第四の杭工法と云える。

これらの杭工法の鉛直支持性能に関しては、原位置における鉛直載荷試験が蓄積されてそれらの結果に基づいた支持力式が提案され、種々の回転杭の設計が可能状態になっている。しかし、著者等が指摘した回転貫入杭特有の残留応力¹⁾の問題が十分に解明されていないため、支持力式の取り扱い方や羽根の設計方法に関して曖昧さが残っている²⁾。

回転貫入杭に関する研究としては、著者等の他に、佐伯等³⁾による貫入メカニズムの提案や国府田等⁴⁾による羽根形状を種々変化させた精力的な実験をはじめ、多くの報告^{5)~9)}がある。しかし、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）は杭の打止め管理には利用されているが、実務レベルで支持力推定に利用出来る段階までには至っていない。回転貫入杭の正しい普及を図るためには、今後も様々な切り口からの研究蓄積が必要である。

著者等は、比較的大型の加圧土槽（直径2,000mm、高さ2,500mm）を用いて、回転貫入杭施工時の残留応力に着目した支持力機構の研究を行っており、前報²⁾では比較的高い砂地盤での貫入実験を報告した。引き続き本論文では、中密度の砂地盤での貫入試験を追加して施工時挙動を検討した後、鉛直支持力に及ぼす施工時の残留応力の影響について考察を行う。なお、本論文の一部は文献¹⁰⁾に発表済みである。

2. 実験方法

2.1 実験装置

図1に実験装置の構成を示した。土槽は内径2,000mm、深さ2,500mmの円柱形であり、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～三重に貼り付けた。上載圧負荷装置はエアコンプレッサに接続したゴム製空気袋であって、直径2,000mm、厚さ50mmのドーナツ形状をしている。回転貫入装置は、重量4.3kN、回転数14rpm、回転トルク13.5kN・m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、直杭の圧入や鉛直載荷実験では、油圧ジャッキを用いている。以上の実験装置の詳細や模型地盤の作製方法については、前報²⁾を参照されたい。

* 室蘭工業大学建設システム工学科 教授・工博

** 千代田工務(株) 取締役

*** 室蘭工業大学大学院建設システム工学専攻 大学院生

**** 室蘭工業大学 技術職員

Prof., Dept. of Civil Engineering and Architecture, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng. Director, Chiyoda Geotech Co., Ltd.

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

2. 2 模型杭と地盤条件

表1は実施した施工実験と載荷実験の試験体一覧である。ただし、相対密度 $D_r=94\%$ の施工実験に関しては前報²⁾と同様である。

(1) 模型杭

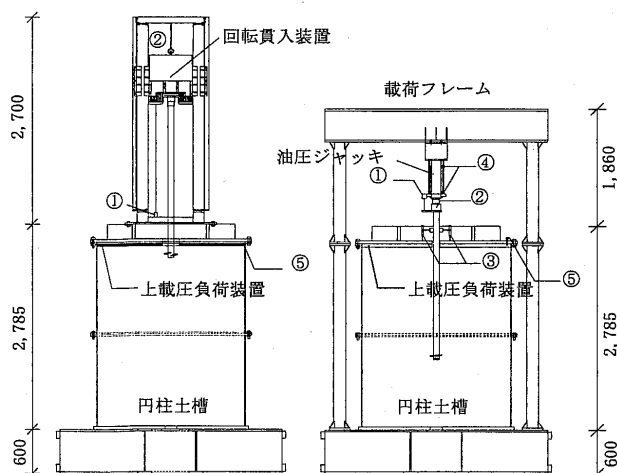
模型杭の材質はSTS410, F値=245MPa, ヤング率 $E=2.05 \times 10^5$ MPa である。模型杭の種類としては、施工法によって以下の3種類(回転杭, 圧入杭, 埋設杭)を設定した。

a) 回転杭: 回転杭は全て1周分の螺旋羽根を有するタイプであって、標準とした試験体(軸径 $d_o=76.3$ mm, 羽根径 $d_w=152.6$ mm)を図2に示す。杭体の歪は1断面あたり4枚のWSGで測定しており、杭先端面荷重と羽根面荷重は分離計測できる方式となっているが、詳細については前報²⁾を参照されたい。回転貫入中における杭頭荷重はモーター重量(4.3kN)のみであって、それ以外の押圧力は作用させていない。

b) 圧入杭: 圧入杭は回転杭の軸部径に等しい直杭であって、所定の地盤条件の下で地表面から静的に圧入した試験体である。

c) 埋設杭: 埋設杭は回転杭の軸部径に等しい直杭を予め建て込んで、地盤作製を行った試験体である。

(2) 地盤条件



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

表1 試験体一覧

実験名	杭形状					地盤条件		
	杭軸径 d_o (mm)	杭軸厚 t_o (mm)	羽根径 d_w (mm)	羽根厚 t_w (mm)	羽根ピッチ p_w (mm)	相対密度 D_r (%)	上載圧 σ_o (kPa)	換算N値
回転1	101.6	12.7	203.2	12.0	51.6	94	100	34.1
回転2	76.3	7.0	152.6	11.5	40.9		50	24.0
回転3							100	34.1
回転4							150	44.1
回転5	48.6	5.1	97.2	6.3	20.9		100	34.1
回転1'	101.6	12.7	203.2	12.0	51.6	72	100	20.0
回転2'	76.3	7.0	152.6	11.5	40.9		50	14.1
回転3'							100	20.0
回転4'							150	25.9
回転5'	48.6	5.1	97.2	6.3	20.9		100	20.0
圧入1	101.6	12.7				94	100	34.1
圧入3	76.3	7.0						
圧入5	48.6	5.1						
埋設1	101.6	12.7				94	100	34.1
埋設3	76.3	7.0						
埋設5	48.6	5.1						

模型地盤は東北珪砂6号であり、ノズルとネットを組み合わせた自由落下法で作製した。地盤の相対密度はノズルの流出口直径を変えることにより、高密度地盤として $D_r=94\%$ 、中密度地盤として $D_r=72\%$ の2種類とした。上載圧 σ_o は50, 100, 150kPaの3種類である。これらの地盤条件から、Meyerhofが導いた次式¹⁾によって求めた換算N値を表中に示してある。

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N}{0.01\sigma_o + 0.7}} \dots\dots\dots (1)$$

3. 貫入中の挙動

3. 1 貫入中の杭先端面荷重および杭体トルク

高密度地盤での実験²⁾によると、回転貫入杭の杭先端面荷重は、圧入杭の10~20%程度に過ぎず、羽根部には杭先端地盤の拘束性を低減させる作用があつて、その作用は杭径(羽根径)が大きいほど顕著であることが明らかになっている。

図3は、相対密度 D_r と上載圧 σ_o を変化させた試験体について、回転杭の杭先端面荷重と貫入深度の関係を描いたものである。 D_r が高い回転2, 3, 4の杭先端面荷重は D_r の小さい回転2', 3', 4' よりも明らかに大きい。しかし、上載圧100kPa以上となる回転3, 4のモデルでは杭先端面荷重の大きさに明確な差が見られない。これは土被り圧の大きい大深度における回転貫入杭の優れた施

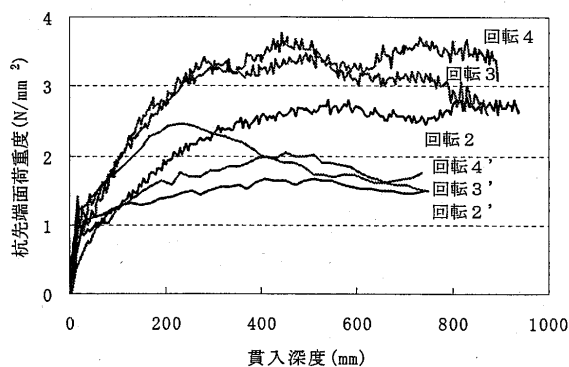


図3 杭先端面荷重~貫入深度曲線

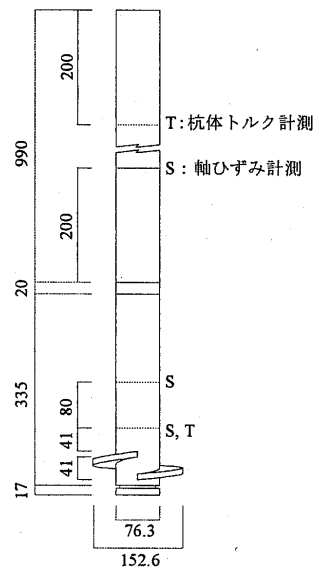


図2 模型杭の一例(回転杭: $d_o=76.3$ mm, $d_w=152.6$ mm)

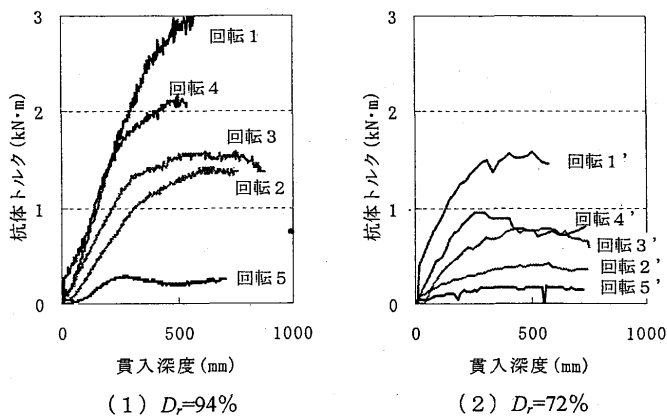
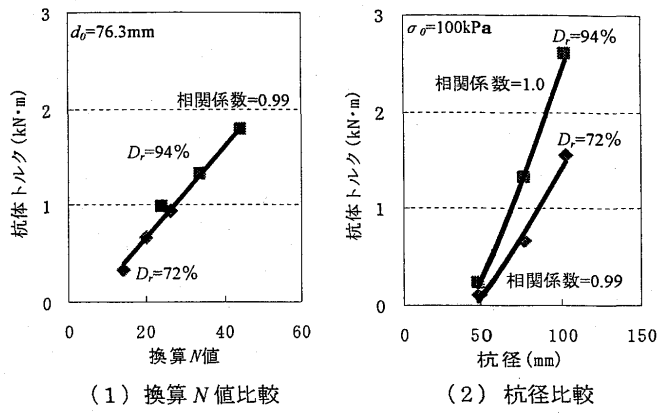


図4 杭体トルク～貫入深度曲線

表2 貫入率一覧

実験名	羽根径	羽根ピッチ	1回転の貫入量	貫入率 $\mu = \delta / p_w$
	d_w (mm)	p_w (mm)	δ (mm)	
回転1	203.2	51.6	12.9	0.25
回転2	152.6	40.9	14.3	0.35
回転3	152.6	40.9	14.3	0.35
回転4	152.6	40.9	14.7	0.36
回転5	97.2	20.9	6.7	0.32
回転1'	203.2	51.6	19.6	0.38
回転2'	152.6	40.9	17.2	0.42
回転3'	152.6	40.9	16.0	0.39
回転4'	152.6	40.9	16.8	0.41
回転5'	97.2	20.9	9.8	0.47



(1) 換算N値比較

(2) 杭径比較

図5 杭体トルクと換算N値および杭径の関係

表3 杭施工による残留応力一覧

実験名	杭先端面 R_b		羽根面 R_w		杭周面 R_f	
	(kN)	(N/mm ²)	(kN)	(N/mm ²)	(kN)	(N/mm ²)
回転1	7.3	0.9	-38.7	-1.6	31.3	0.17
回転2	10.1	2.2	-30.2	-2.2	20.1	0.07
回転3	12.0	2.6	-42.8	-3.1	30.7	0.09
回転4	11.9	2.6	-34.0	-2.5	22.1	0.06
回転5	2.9	1.5	-26.1	-4.7	23.2	0.11
回転1'	6.3	0.8	-5.7	-0.2	-0.5	0.00
回転2'	3.5	0.8	-3.2	-0.2	-0.3	0.00
回転3'	4.3	0.9	-4.2	-0.3	-0.1	0.00
回転4'	6.5	1.4	—	—	—	—
回転5'	2.4	1.3	-1.7	-0.3	-0.8	-0.01
圧入1	20.5	2.5	—	—	-20.5	-0.04
圧入3	20.6	4.5	—	—	-20.6	-0.06
圧入5	10.1	5.4	—	—	-10.1	-0.04
埋設1	7.5	0.9	—	—	-7.5	-0.02
埋設3	5.9	1.3	—	—	-5.8	-0.02
埋設5	2.8	1.5	—	—	-2.8	-0.01

工性を示唆するものである。

図4は、羽根上部の杭体トルクと貫入深度の関係である。杭径が大きく地盤の D_r が高いほど杭体トルクは大きくなる。 $D_r=94\%$ の場合は、 $2d_w$ を過ぎると貫入量の増大の割には杭体トルクの上昇は少なくなるが、杭径が大きいものでは $3d_w$ を過ぎても増加傾向にある。 $D_r=72\%$ の実験においては、貫入量が $2d_w$ 時点以降は概ね定常状態となっている。

杭貫入中における図3の杭先端面荷重と図4の杭体トルクの間には概ね比例関係が認められ、杭径や地盤条件(相対密度、上載圧)による大きな差異は見受けられなかった。このことは、回転貫入杭の杭体トルク測定値から貫入中の杭先端面荷重を一律に推定できることを意味しており、杭体トルクが施工管理の重要な指標の一つになると考える。

3.2 杭体トルクの推定式

図5は、貫入量が $2d_w$ になった時点の杭体トルクと換算N値または杭径との関係である。(1)および(2)共に実験した範囲に関する測定値はほぼ同一直線上に分布し、強い相関関係がみられる。このことから、杭体トルクに関する因子は、換算N値および杭径であることが明らかになった。表1の実験について重回帰分析を行い、杭体トルクの推定式を誘導すると以下ようになった。ただし、押圧力が一定で羽根径と杭径の比が全て2.0の場合の結果であるので、これらの因子が変化する場合には新たな関係式が必要となる。

$$T_r = 0.05N + 0.036d_o - 3.08 \quad \dots\dots\dots (2)$$

T_r : 杭体トルク(kN·m), N : 換算N値, d_o : 杭径(mm)

3.3 貫入率

表2は、杭1回転あたりの平均貫入量 δ を羽根ピッチ p_w で除した値を貫入率 μ と定義して、条件ごとにまとめたものである。相対密度が小さくなると貫入率は明らかに増大している。上載圧を $\sigma_v = 50 \sim 150 \text{kPa}$ と変化させた場合、杭径 $d_o = 76.3 \text{mm}$ の試験体の貫入率は $D_r = 72\%$ の中密度地盤で0.4程度、 $D_r = 94\%$ の高密度地盤で0.35程度となった。このことから、上載圧は貫入率にさほど影響を及ぼさないと云える。杭径を変化させた場合、高密度地盤では明確な傾向が見られなかったが、中密度地盤では杭径が小さくなると貫入率が増大した。

4. 貫入後の残留応力

4.1 施工法による残留応力の違い

表3は、杭を施工して載荷試験を始める直前(杭施工後1日経過)の杭体応力を示したものである。施工法の違いによって、以下のような特徴が見られる。

a) 回転杭: $D_r=94\%$ の密な地盤の場合、羽根面には貫入中の回転推進力(羽根上面に作用する圧縮垂直応力)の多くが引張力として残留するため、杭先端面には圧縮力および杭周面には正の摩擦力が残留する。これに対して、 $D_r=72\%$ の中密度地盤になると、杭周面

の残留応力はほとんど0で、羽根面と杭先端面にのみ残留応力が発生する傾向がある。

図6は、杭先端面と羽根面の残留応力度と換算N値との関係であるが、両者は概ね比例することが分かる。

b) 圧入杭：杭先端面では圧縮力、杭周面では負の摩擦力が残留する。D_r=94%の密な地盤の場合、杭先端面における残留応力は施工中の値の15~30%であった。杭周面では施工中に作用する正の周面摩擦力に対して、残留応力は負の周面摩擦力であり、絶対値は残留応力の方が大きい傾向が見られた。また、回転杭に発生する杭周面の残留応力の絶対値と比べると、圧入杭では1/2~2/3程度の値である。

c) 埋設杭：杭設置後に地盤を作製したが、その後の上載圧作用によって、杭周面に負の摩擦力および杭先端面には圧縮力が発生した。杭先端面の値が、概ね回転杭の残留応力に近い値を示した。

4. 2 回転杭の残留応力発生メカニズム

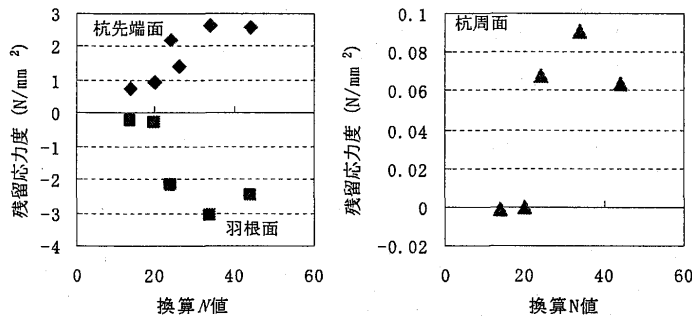
図7は、貫入中における回転杭の歪測定結果に基づいて、貫入中の軸力分布をモデル的に描いたものである。杭頭に回転力Mを与えると、螺旋形の羽根上面には推進力が発生して杭体を地盤中に引き込もうとする。杭軸部の先端抵抗力と杭周面の摩擦力がこれに抵抗するため、杭体が貫入するためには次の条件が必要となる。

$$P_w > R_b + R_f \quad \dots\dots\dots (3)$$

- P_w : 羽根部の回転推進力 (引張力)
- R_b : 先端抵抗力 (圧縮力)
- R_f : 杭周面抵抗力 (正の摩擦力)

(3)式中の杭体各部に作用する力は貫入終了後に完全に消失するわけではなく、載荷試験開始時点でも残留している。

図8は、貫入終了から貫入後12時間にわたる残留応力の測定結果

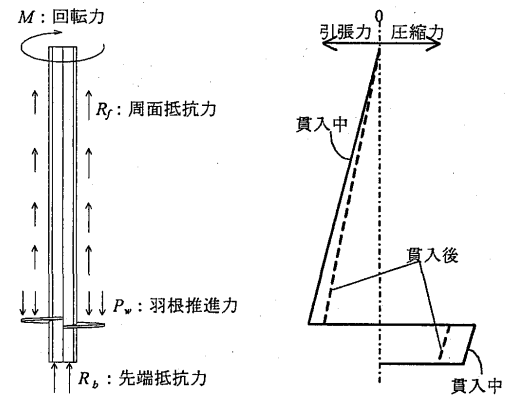


(1) 杭先端面および羽根面 (2) 杭周面
図6 残留応力と換算N値の関係 (d_c=76.3mm)

の一例 (d_c=76.3mm, D_r=72%, σ_c=100kPa) である。ここで、貫入中は杭体温度が最大で70℃程度まで上昇するので、事前に実施した較正実験によって温度の影響を除去している。時間軸の0はモーター一回転の終了時点である。貫入が停止すると、貫入中に作用していた杭周面の正の摩擦力と羽根上面の圧縮垂直応力が急激に減少した。しかし、両値は貫入停止後から2時間ほど増加傾向を示した後、徐々に減少しながら収束している。杭先端面については、貫入が停止しても幾分減少するだけである。なお、約20分経過時の段差はモーターを取り外したことの影響である。

図9は、このような残留応力の変化するメカニズムを説明するために模式的に描いたものである。回転貫入中においては、杭先端近傍の土は主に下方や側方に移動すると思われる。一方、杭周面部では羽根の推進力によって周辺土が盛り上がった後を通過するので、杭周面のごく近傍の土は相対的に下方に引き込まれる動きになると考えられる。貫入終了後においては、次のような挙動によって杭体応力が変化するものと推察している。

- ①. 貫入によって変形した地盤は、貫入を停止すると弾力的な成分によって変形以前の状態に戻ろうとする。
- ②. それによる作用は、杭周面では杭体を上部へ引き上げようとする力であるが、羽根面がアンカーの役割となって羽根上面が抵抗力を發揮する。
- ③. この結果、杭周面には正の摩擦力が作用して、羽根面には引張力が発生する。
- ④. 杭先端以深の地盤も弾性成分で上方へ変位するが、杭周面地盤の浮き上がりに相殺されるため、杭先端面の残留応力変化は小さい。



(1) 杭体各部の力 (2) 軸力分布
図7 杭体各部に作用する貫入中の力と残留応力

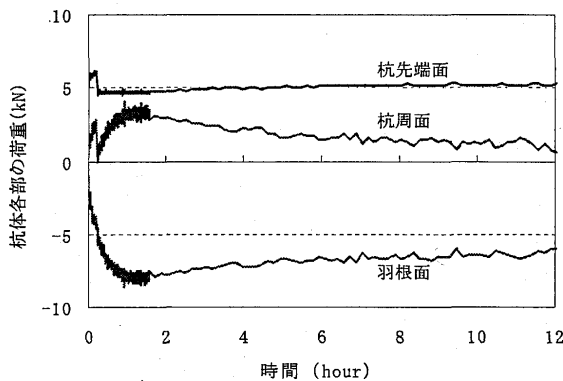


図8 残留応力と時間の関係 (回転3')

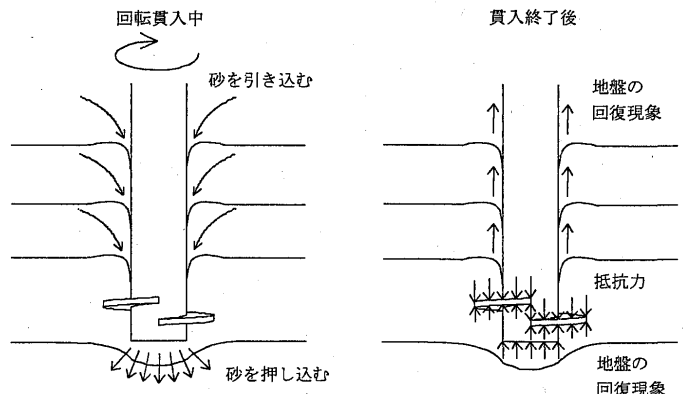


図9 地盤挙動の模式図

5. 鉛直載荷時の挙動

5.1 杭頭荷重～沈下曲線

回転貫入杭の「荷重～沈下曲線」の特徴を理解するために、施工法の異なる直杭との比較を行う。図10は、杭の軸径 $d_p=76.3\text{mm}$ 、上載圧 $\sigma_p=100\text{kPa}$ 、相対密度 $D_r=94\%$ の場合について、表1に示す3種の杭の「杭頭荷重～杭頭沈下曲線」である。

圧入杭は杭頭沈下 10mm 付近で明確に極限支持力に達している。埋設杭は沈下に伴いゆるやかに杭頭荷重が増大しているが、軸径分の沈下時点でも杭頭荷重は圧入杭の1/2程度である。これに対して、回転杭は載荷初期では圧入杭と埋設杭の中間の曲線であるが、沈下に伴って杭頭荷重が増大して 35mm 沈下で圧入杭の曲線を越えた。その後も杭頭荷重が増大して載荷を終了した羽根径程度の沈下時で、支持力は圧入杭の約 1.5 倍となった。

回転杭の載荷初期の沈下剛性が圧入杭の約 1/3 と小さいのは、前述した杭先端地盤の拘束圧低下の影響と考えられる。また、施工終了時点では羽根下面に空洞が存在すると考えられることから、羽根が支持力に十分に寄与するためには空洞を埋めるだけの沈下が必要なことが推察される。

5.2 杭体各部の支持力度

表4は、基準荷重時点（回転杭：羽根径の10%沈下時、圧入杭・埋設杭：杭径の10%沈下時）の試験結果であって、杭頭と杭体各部（杭先端面、羽根面および杭周面）の負担状況を示している。ここで、Case-1は載荷開始時点を実原点として整理した測定値であり、Case-2は杭打設開始時点を実原点として整理した測定値（前節の残留値を含む）である。これらの表から、以下のような傾向が見られる。

- ①. 杭先端面に着目すると、埋設杭では杭径の増大に伴って荷重度が明確に増大しているが、回転杭や圧入杭では必ずしもそのような傾向が認められない。残留応力が加わるCase-2の値がCase-1よりも大きくなる。
- ②. 回転杭の羽根面の荷重度は、直径が増大するとCase-1では僅かに減少するようであるが、Case-2の密な地盤では僅かに増大する

など現時点では必ずしも明確ではない。羽根面の残留応力が鉛直載荷重によって打ち消されるため、Case-2の値はCase-1よりもかなり小さくなっている。

- ③. 上載圧を 50, 100, 150kPa と増大させても、杭先端面や羽根面の負担荷重度がそれ程増大しないのが特徴といえる。特に、高密度地盤でその傾向が顕著であって、施工に伴う杭先端近傍の拘束圧の低下現象を反映したものと云える。
- ④. 杭周面摩擦力については、杭径が大きくなる程増大する傾向が見られる。圧入杭や埋設杭ではCase-2がCase-1よりも小さい。回転杭では、上載圧の上昇の割には杭周面摩擦力がそれ程増大しない。回転杭の高密度と中密度地盤での杭周面摩擦力値を比較すると、Case-1では大きな違いが見られない。しかし、Case-2になると杭周面摩擦力に及ぼす地盤密度の影響が大きく、高密度地盤の杭周面摩擦力は低密度地盤のその2倍以上にもなっている。高密度地盤においては、残留応力の影響が非常に大きいと云える。

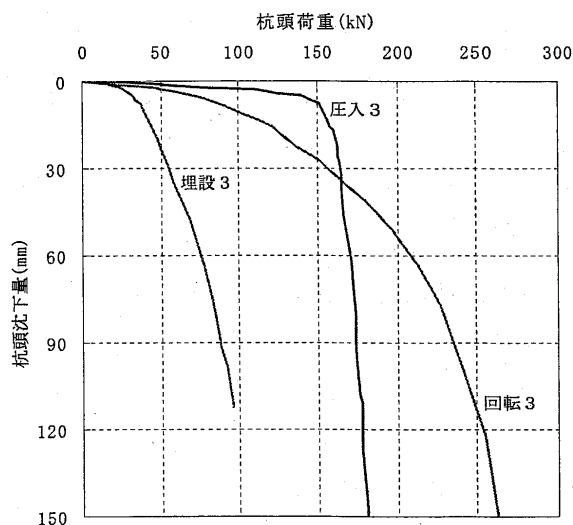


図10 施工法による杭頭荷重～沈下曲線

表4 載荷試験結果一覧

実験名	杭頭部 R_0		杭先端面 R_b				羽根面 R_r				杭周面 R_f			
			CASE-1		CASE-2		CASE-1		CASE-2		CASE-1		CASE-2	
	(kN)	(N/mm ²)	(kN)	(N/mm ²)	(kN)	(N/mm ²)	(kN)	(N/mm ²)	(kN)	(N/mm ²)	(kN)	(N/mm ²)	(kN)	(N/mm ²)
回転1	180.6	22.3	58.2	7.2	65.5	8.1	106.4	4.4	67.7	2.8	16.0	0.08	47.4	0.3
回転2	107.5	23.5	25.9	5.7	36.0	7.9	72.6	5.3	42.4	3.1	9.0	0.03	29.1	0.1
回転3	113.4	24.8	28.9	6.3	41.0	9.0	68.0	5.0	25.2	1.8	16.4	0.05	47.2	0.1
回転4	118.9	26.0	27.7	6.1	39.5	8.6	72.5	5.3	38.6	2.8	18.7	0.05	40.8	0.1
回転5	47.5	25.6	11.9	6.4	14.8	8.0	35.9	6.5	9.8	1.8	-0.4	0.00	22.9	0.1
回転1'	64.5	8.0	13.9	1.7	20.2	2.5	40.8	1.7	35.0	1.4	9.8	0.05	9.2	0.0
回転2'	31.8	7.0	7.1	1.5	10.6	2.3	16.2	1.2	13.0	0.9	8.5	0.04	8.3	0.0
回転3'	45.1	9.9	10.8	2.4	15.1	3.3	25.4	1.9	21.2	1.5	8.9	0.05	8.8	0.0
回転4'	61.1	13.4	16.1	3.5	22.6	4.9	34.7	2.5	-	-	10.3	0.05	-	-
回転5'	20.5	11.1	5.0	2.7	7.4	4.0	10.9	2.0	9.2	1.7	4.6	0.04	3.8	0.0
圧入1	225.8	27.9	153.6	18.9	174.0	21.5	-	-	-	-	72.2	0.15	51.8	0.1
圧入3	144.4	31.6	80.6	17.6	101.2	22.1	-	-	-	-	63.8	0.18	43.3	0.1
圧入5	61.0	32.9	31.1	16.8	41.3	22.2	-	-	-	-	29.9	0.12	19.8	0.1
埋設1	71.1	8.8	39.4	4.9	46.9	5.8	-	-	-	-	31.7	0.07	24.3	0.1
埋設3	35.6	7.7	18.1	4.0	24.0	5.2	-	-	-	-	17.5	0.05	11.7	0.0
埋設5	14.9	8.0	4.5	2.4	7.3	3.9	-	-	-	-	10.4	0.05	7.6	0.0

図 11 は、回転杭の全試験体について、基準荷重沈下時の杭先端面、羽根面および杭周面における支持力度と換算 N 値との関係をプロットしたものである。それによると、杭先端面の支持力度は Case-1 および Case-2 共に、 N 値との相関が良好である。羽根面については、Case-2 になると N 値との相関が低下している。杭周面については、Case-1 でバラツキが大きかったが、Case-2 になると N 値の相関が向上している。以上、杭体各部の支持力度はバラツキがあるが、 N 値を関数とした 1 次式で概ね近似できそうである。

これまでに開発されている回転貫入工法の支持力算定式は、全て Case-1 の載荷試験結果に基づいたものである。回転杭の支持力を杭体各部の支持力の和として評価する場合は、従来のような Case-1 のまとめ方で問題は無いと思われる。ただし、杭先端に大きな荷重を載荷するために、杭周面の摩擦力をカットするような載荷試験方法は、特に高密度地盤では問題と云える。

図 12 は、基準沈下時の杭先端面および羽根面における Case-1 の支持力に対する残留応力を考慮した Case-2 の支持力の比を支持力評価比と定義して、換算 N 値の関係で表している。杭先端面の支持力比は 1.1~1.5 程度、羽根面のそれは 0.3~0.8 程度である。杭先端面は N 値が小さいほど、羽根面では N 値が大きいほど、支持力評価比が 1.0 から離れることから残留応力の影響が大きいと云える。Case-2 は杭体に実際に作用している支持力であり、杭体各部の断面設計に直接関係するものである。

以上のことから、今後は残留応力を加味した載荷試験結果の蓄積を図ることが重要と考える。また、杭の支持力算定式には、従来から載荷試験資料の豊富な Case-1 の方式を採用するが、杭体の断面設計においては、残留応力を考慮した Case-2 を採用するといった使い分けも合理的である。

6. まとめ

以上、乾燥砂地盤を比較的大型の加圧土槽に作製して、回転杭の施工開始から貫入終了、そして鉛直載荷試験に至る一連の模型実験を行った。本論文から得られた主な知見を以下に示す。

1) 貫入時挙動に関して

- ①. 貫入率 μ は、地盤の相対密度が大きいと減少するが、上載圧の及ぼす影響は小さい。
- ②. 杭貫入中の杭体トルクは、杭径や地盤条件にかかわらず杭先端面荷重との間に比例関係があり、施工管理の重要な指標になる。
- 2) 貫入後の残留応力に関して
- ③. 回転杭は、圧入杭や埋設杭と異なる残留応力特性を示すことを確認し、その発生メカニズムを推定した。
- 3) 鉛直載荷時の挙動に関して
- ④. 回転杭の「荷重～沈下曲線」は圧入杭や埋設杭と異なる特徴があり、その原因は③の残留応力の影響が大きい。
- ⑤. 回転貫入杭の支持力評価は残留応力を加味した方向を目指すべきと考えるが、支持力算定については従来から実績の多い Case-1、杭体の断面設計では残留応力を考慮する Case-2 の方式を使い分けることも合理的である。

謝辞

本論文の実験においては、室蘭工業大学の卒業研究に携わった田内大紀氏（現 清水建設）、長谷部俊氏（現 西松建設）、村松宏多

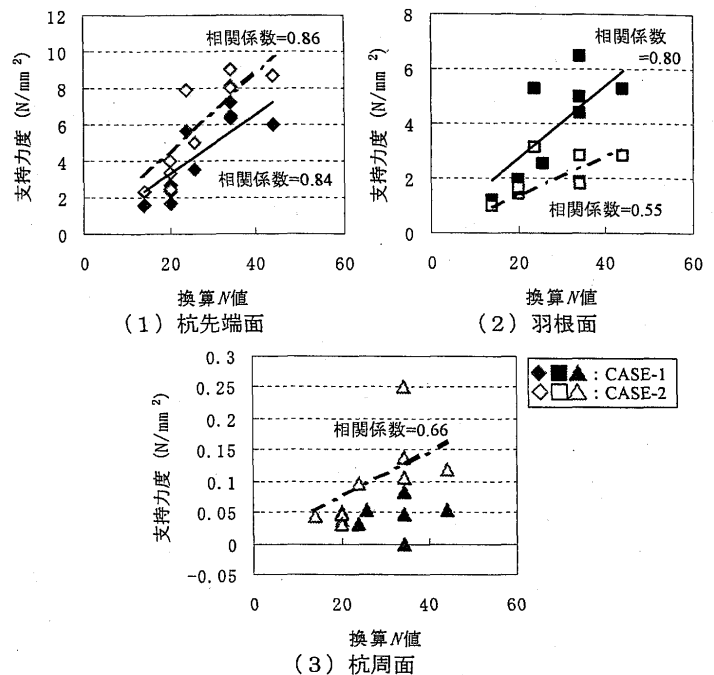


図 11 杭体各部の支持力度と換算 N 値の関係

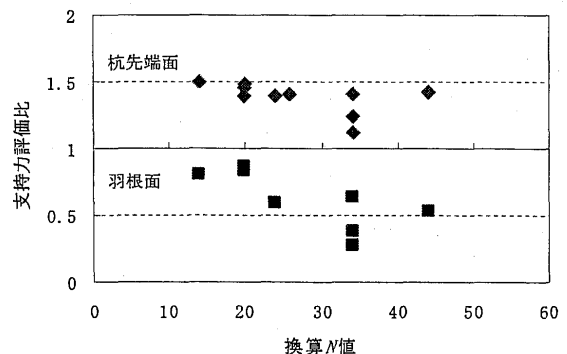


図 12 支持力評価比と換算 N 値の関係

氏（現 大成建設）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・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.
- 2) 大杉富美一・土屋勉・他：大型加圧土槽を利用した回転貫入模型杭の貫入実験、日本建築学会構造系論文集、第 591 号, pp.69-75, 2005.5.
- 3) 土屋勉：回転貫入杭工法の動向と今後の課題：基礎工、Vol.34, No.11, pp.2-6, 2006.11.
- 4) 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, 日本建築学会, 1998.
- 5) 国府田誠・佐藤秀人・他：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、日本建築学会構造系論文集、第 601 号, pp.91-98, 2006.3.
- 6) 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, 2001.9. 他一連の研究
- 7) 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, 2003.9.
- 8) 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、pp.1535-1536, 第 39 回地盤工学研究発表会講演集, 2004.6.
- 9) 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、pp.1545-1546, 第 39 回地盤工学研究発表会講演集, 2004.6.
- 10) 大杉富美一・土屋勉・他：大型加圧土槽を利用した回転貫入杭の実験的研究（その 1, その 2）、第 41 回地盤工学研究発表会講演集, 2006.7.
- 11) G. G. Meyerhof : Discussion on soil properties and their measurement, Proc. of 4th ICSMFE, Vol. 3, p. 110, 1957.

(2007年 3月 6日原稿受理, 2007年 7月 10日採用決定)