

回転貫入杭の支持層に対する根入れ効果に関する実験的研究

THE EFFECTS OF PARTIAL EMBEDMENT OF A HELICAL SCREW PILE INTO A BEARING LAYER ON ITS PENETRABILITY AND LOAD-SETTLEMENT BEHAVIOR

池田篤則*, 土屋 勉**, 島田正夫***, 中沢楓太****

*Atsunori IKEDA, Tsutomu TSUCHIYA, Masao SHIMADA
and Futa NAKAZAWA*

The authors examine how partial embedment of a helical screw pile into a bearing layer affects on its penetrability and load-settlement behavior. Both large-scale model tests and field tests had been conducted taking embedment length into account. For model tests, two layered sand deposits with different relative densities were prepared in a calibration chamber.

The test results show the following regardless of the test scale: a torque profile and a penetration rate start change just before reaching a pile toe into a bearing layer. Embedment length equal to a screw diameter, which is commonly required in practice, yields effective mobilize of the end-bearing resistance beneath the helical screw, while less resistance tends to mobilize beneath the pile shaft as embedment length increases. As far as the bearing capacity of a pile is concerned, however, no significant influence can be observed in terms of embedment length into a bearing layer.

Keywords : *screw pile, installation test, loading test, calibration chamber, field test, effect of partial embedment*

回転貫入杭, 施工実験, 載荷試験, 加圧土槽, 原位置試験, 根入れ効果

1. 序

回転貫入型の杭工法は, 先端支持杭形式や摩擦杭形式, 小径から大径まで広い範囲にわたって開発¹⁾され, 実用化に至っている. 回転貫入杭が急速に普及した理由として, 以下のような環境面と支持力面での有利さが認識されたものと思われる.

①. 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施工されるため, 低振動・低騒音で掘削残土が発生しないという環境問題に配慮されている点.

②. 新たな羽根部による鉛直支持力が寄与することの他に, 施工方法からは排土杭(Displacement pile)に分類されるため, 相応の軸部先端と軸部周面の抵抗力が期待される点.

回転貫入杭の支持力特性は, 杭施工時の挙動に大きく依存すると考えられることから, 杭設置による杭と近傍地盤の状態変化を含めた検討が必要である. このような観点から, 杭の貫入メカニズムと支持力に関する比較的大型の模型杭による実験的研究^{2)~6)}が精力的に行われてきた. 明らかになった杭の貫入メカニズムは, 杭軸に傾斜して取り付けられた羽根が地盤に切り込み, 羽根前面の土が羽

根面を通過して羽根上方に移動するのに伴って圧縮された土で羽根を下方に押圧することになるが, その過程で杭先端近傍地盤の拘束圧が緩められるため, 比較的小さな回転推進力で施工できるというものである. 杭の載荷過程においては, 貫入過程で生じる羽根下面の空洞域が杭先端の荷重—沈下関係の初期剛性を低下させる. その結果, 支持力面からは非排土杭(Non-displacement pile)に近いとも云える. また, 杭施工に伴って杭体各部には他の杭工法(場所打ち杭や埋込み杭)とは異なる軸力が残留するので, 杭体各部の支持力評価や羽根部の構造設計面での配慮が必要となる.

以上のように, 貫入時や鉛直載荷時における回転貫入杭の基本的特性については明らかになったが, いずれも均一地盤を対象にした模型実験に基づく結論である. 一方, 実現場における回転貫入杭は, 比較的緩い地盤を打ち抜いて密な支持層へ施工されるケースが多い. この時, 支持層と判定された深度から羽根径分程度の根入れを行うのが一般的となっている. しかし, 回転貫入杭の支持力に及ぼす支持層への根入れ長の影響を検証した研究はほとんど見当たらないことから, 支持層への根入れ効果が不明確な状態で運用されているのが現状と云える. 更に, 回転貫入杭の施工時には, 杭1本毎に回転

* 室蘭工業大学大学院工学研究科建設工学専攻
大学院生・修士(工学)

** 室蘭工業大学大学院工学研究科 教授・工博

*** 室蘭工業大学 技術職員

**** 東急建設(株) 修士(工学)

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

Prof., Graduate School of Engineering, Muroran Institute of Technology, Dr. Eng.

Technician, Muroran Institute of Technology

Tokyu Construction Co., Ltd., M. Eng.

トルクや押圧力および1回転あたりの貫入量等の情報が得られる。支持層に根入れされる前後における種々の情報と杭の支持力とを関連づけることができれば、回転貫入杭の信頼性は飛躍的に向上するであろう。

本論文では、表層地盤の下に比較的密な砂層が存在する場合における回転貫入杭の支持力特性を明らかにすることを目的として、支持層への根入れを変化させた施工実験および鉛直載荷実験を行った。実験は模型実験および原位置試験であって、前者は模型杭(軸径76.3mm, 羽根径152.6mm)を大型加圧土槽に作成した二層地盤に施工した場合であり、後者は実杭(軸径114.3mm, 羽根径228.6mm)を埼玉県さいたま市の現場で、シルト層を貫通したGL-11.6mの細砂層に根入れさせた場合である。

なお、本論文は文献^{7)~8)}に発表した結果に考察を加えて再整理したものである。

2. 大型土槽実験装置および実験条件

実験装置³⁾は、図1に示すように大型の円柱土槽、上載圧負荷装置、回転貫入装置、載荷フレーム、各種センサー等で構成される。土槽は内径2,000mm, 高さ2,500mmの円柱型であり、内側面に土槽側面の摩擦の影響を防ぐためにテフロンシートを貼り付けている。上載圧負荷装置は、直径2,000mm高さ50mmのゴム製空気袋で、中央に模型杭を通せるように直径114.3mmの開口部を設けている。このゴム製空気袋にエアコンプレッサで空気を送り込むことで上載圧を

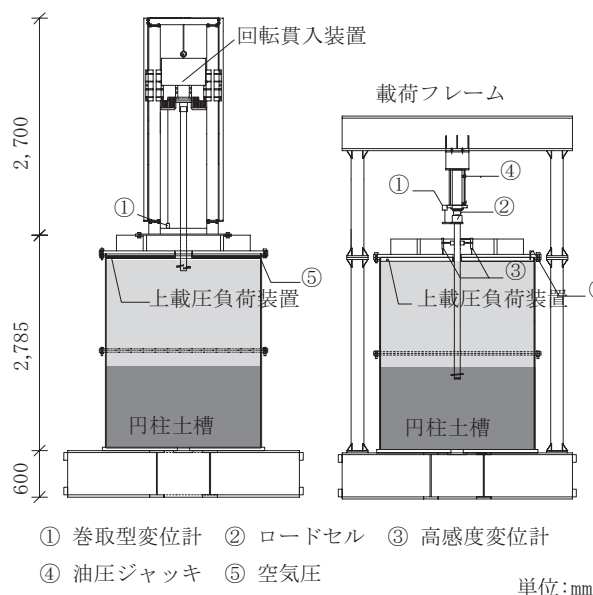


図1 実験装置

表1 模型杭の諸元および実験条件一覧

実験名	地盤構成	軸径 d_o (mm)	羽根径 d_r (mm)	羽根ピッチ p_r (mm)	杭長 l (mm)	相対密度		上載圧 σ_o (kPa)	換算N値 ($\times d_w$)		根入長 H ($\times d_w$)	実験日
						上部	下部		上部	下部		
DD	均質	76.3	152.6	41	1362	98		100	37		—	2005.10.25
LL						32			4		—	2006.12.06
LD-1.0	二層	76.3	152.6	41	1362	32	98	100	4	37	+1.0	2006.09.06
LD-0.5											+0.5	2006.10.20
LD+0.0											+0.0	2006.10.04
LD+0.5											-0.5	2006.11.08
LD+1.0											-1.0	2006.12.15

発生させている。回転貫入装置は、ガイドレール上を下降するモーター駆動機により杭を回転貫入する装置であり、モーター総重量4.3kN, 回転速度14rpm, 回転トルク13.5kN・mを有している。載荷フレームは、円柱土槽の土台に固定可能な鋼製のフレームである。このフレームを反力とし、油圧ジャッキにより載荷を行う。地盤材料は珪砂6号であり、ノズルとネットを介した空中落下法で作成している。この時、密な支持地盤には細径($\phi 12$)ノズル、緩い表層地盤には太径($\phi 35$)ノズルを使用した。

図2に示すように、模型杭の各所にはひずみゲージを貼付して軸力やトルクを計測している。使用したひずみゲージは軸歪ゲージを主としているが、羽根近傍にはロゼットゲージ、杭頭付近にはトルクゲージを貼付している。模型杭の先端部は、杭先端面の円盤の中心に鋼棒を付けた杭先端面部材と羽根を取り付けた鋼管を接続ピンにより固定している。この鋼棒と羽根上部の鋼管の歪みを計測することで、杭先端面荷重と羽根面荷重を独立して測定できる構造になっている。

杭の設置手順については、杭の羽根部を表層地盤に埋め込んだ後、土槽に蓋をして所定の上載圧を作用させた状態で、回転貫入装置により所定の深度まで杭を貫入させた。次に、杭頭部のモーターを取り外してから、残留応力の推移を測定して4時間以上経過した後、各段階で2分間の荷重時間を保持し、小刻みに荷重を増加(5kNピッチ)させながら極限支持力になるまで鉛直載荷を行った。

実験条件の一覧を表1に示す。杭形状(軸径76.3mm, 羽根径152.6mm)と上載圧(100kPa)は全て同一条件とし、地盤構成を変更して試験を行っている。地盤構成は均一地盤もしくは二層地盤とし、

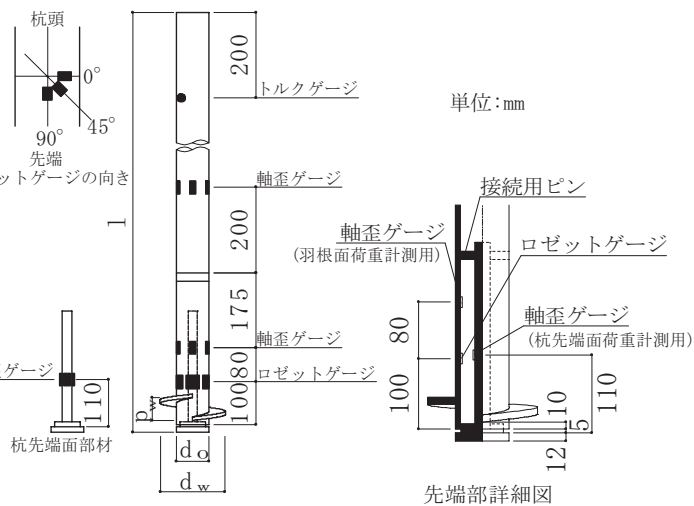


図2 模型杭

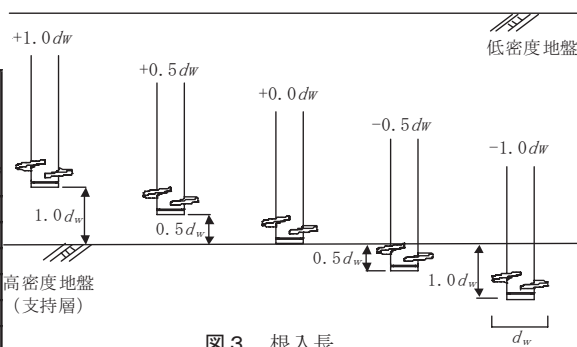


図3 根入長

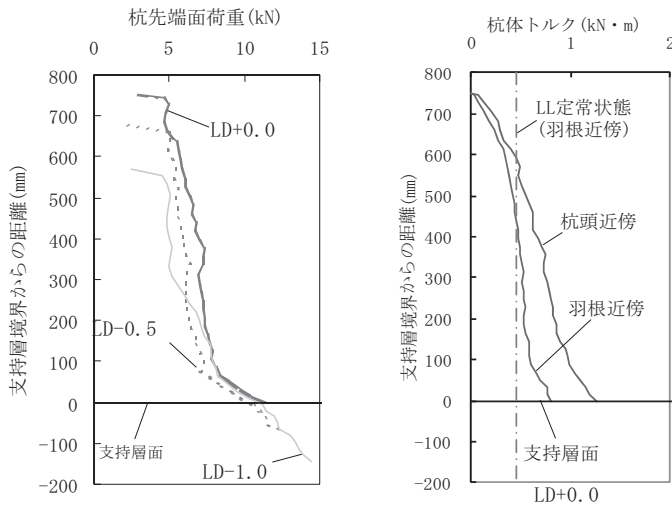


図4 杭先端面荷重と貫入深度

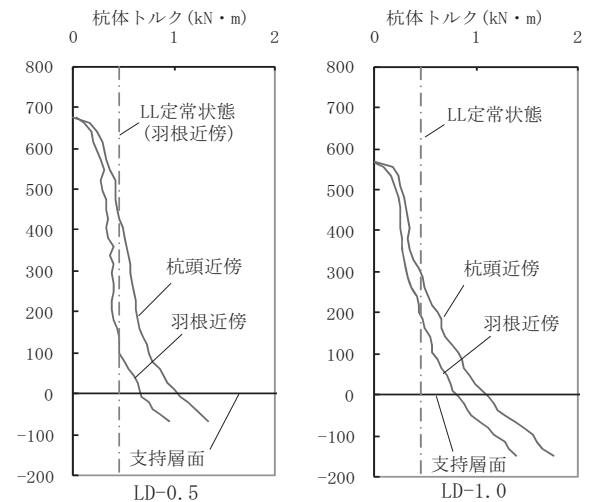


図5 杭体トルクと貫入深度

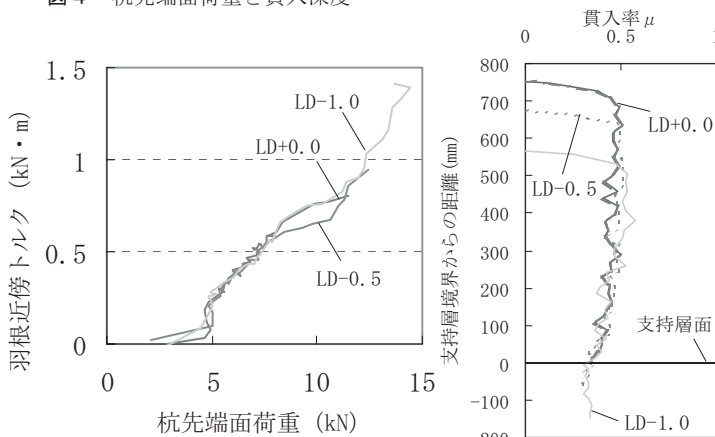


図6 杭先端面荷重と羽根近傍トルク

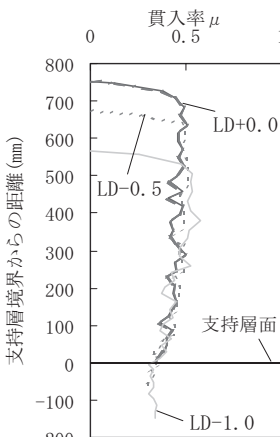
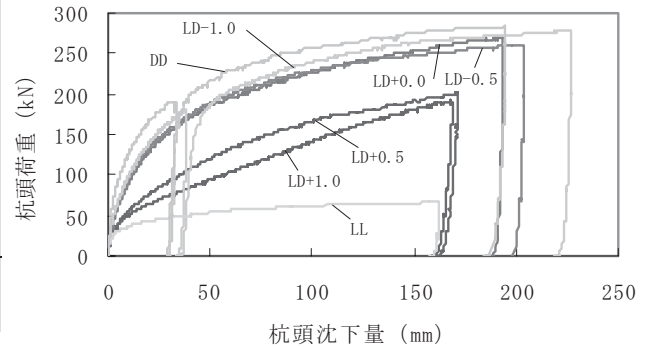
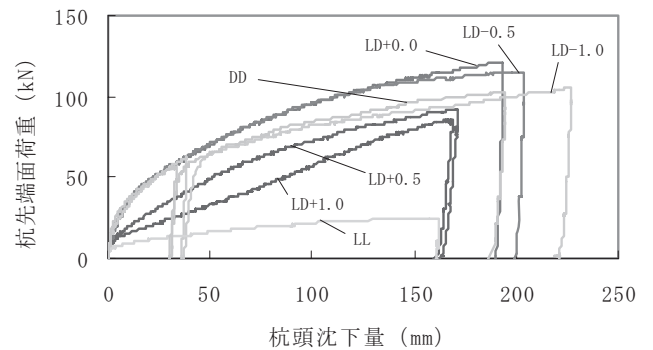


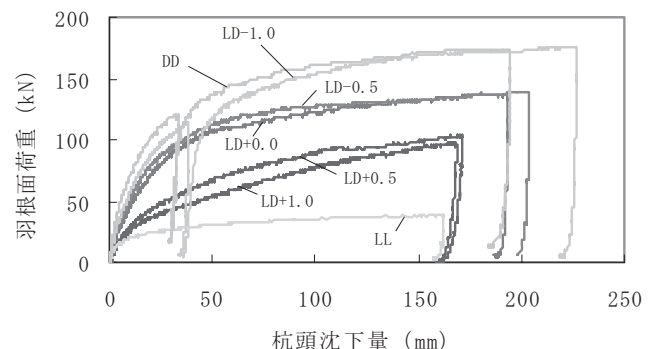
図7 貫入率μと貫入深度



(a) 杭頭荷重



(b) 杭先端面荷重



(c) 羽根面荷重

図8 各部負担荷重のモデル比較

均一地盤は低密度と高密度の2種類を作成している。モデル名は、地盤の相対密度の記号(L:低密度, D:高密度)を用いて、表層と支持層の順に示している。二層地盤の場合は、図3に示すように支持層への根入れ長を羽根径で除した値(正:支持層より上で打ち止め, 負:支持層より下で打ち止め)を付加した。なお、施工した杭長さは一定であることから、支持層への根入れ長の変化は支持層厚(支持層上端深度)を変化させて実施している。地盤の換算N値は前報⁶⁾と同様に相対密度と上載圧を基に算定した。

3. 大型土槽実験結果および考察

3.1 貫入時の挙動

図4は、支持層に根入れを行った実験モデル(LD+0.0, LD-0.5, LD-1.0)の杭先端面荷重と貫入深度関係である。杭先端が支持層から100mm(軸径の1.3倍)程度手前に達した段階から杭先端面荷重が増加している。

図5は、杭頭および羽根近傍の杭体トルクと貫入深度関係である。杭先端面荷重と同様に杭先端が支持層から100mm(軸径の1.3倍)程度手前に達した段階から杭体トルクが増加している。また、全層が緩い均一地盤であるモデル(LL)では、貫入開始から300mm程度貫入した以降の深度における羽根近傍トルク値が $0.42\text{kN}\cdot\text{m}$ ~ $0.47\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度で推移するようになった。本論文ではこの状態を定常状態と定義して、羽根近傍トルクの平均値 $0.45\text{kN}\cdot\text{m}$ を図中の一

点鎖線で示した. 支持層到達時の羽根近傍トルク値はLLモデルのトルク値(定常状態)の約1.5倍となった.

図6は, 杭先端面荷重と羽根近傍トルクの関係である. 羽根近傍トルクが0の時の杭先端面荷重は回転貫入装置の自重(4.3kN)の影響である. それ以降の杭先端面荷重と杭体トルクは, 表層部および支持層部の施工共におおむね比例関係となっている.

図7は, 貫入率 μ (1回転あたりの貫入量/羽根ピッチ)と貫入深度関係である. $\mu=0.5$ 程度であった表層地盤の貫入率が支持層か

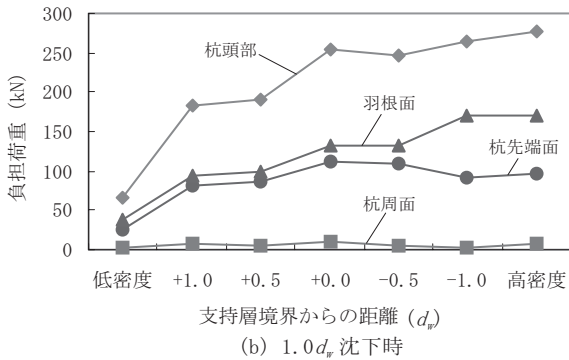
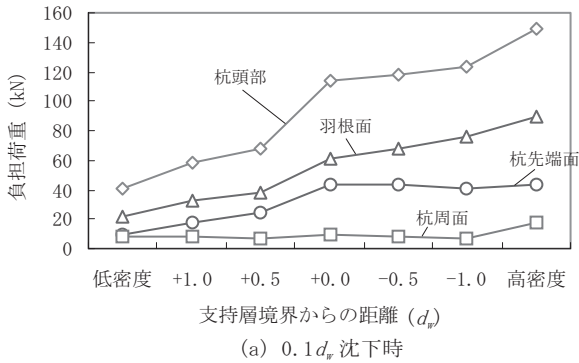


図9 0.1 d_w および1.0 d_w 沈下時の各部負担荷重

標尺 m	深度 m	土質名	N 値	標準貫入試験結果		
				10	20	30
	1.70	埋土	2/35			
			1/45			
	3.75	シルト	1/50			
			3/30			
5	5.10	シルト混じり 微細砂	7/30			
			1/50			
	5.70	細砂	1/50			
			1/50			
		シルト	1/50			
			0/50			
	10		1/50			
			2/30			
	11.60		1/47			
			10/30			
		細砂	16/30			
			14/30			
	15		27/30			
			19/30			
	15.00		12/31			
			17/33			
			3/35			
			8/30			

図10 地盤柱状図

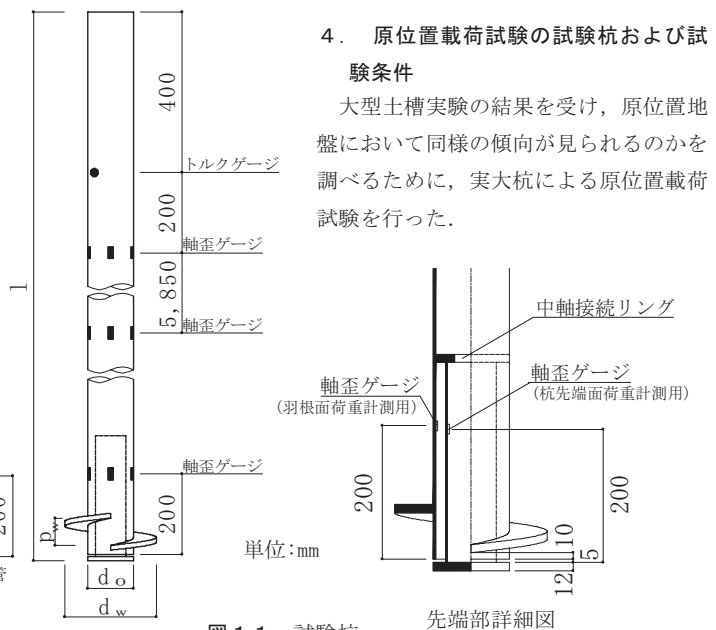
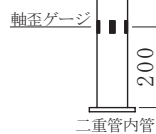


図11 試験杭

4. 原位置載荷試験の試験杭および試験条件

大型土槽実験の結果を受け, 原位置地盤において同様の傾向が見られるのかを調べるために, 実大杭による原位置載荷試験を行った.

ら100mm(軸径の1.3倍)程度手前から低下し, 支持層に達した時点では $\mu=0.4$ 程度となった.

以上より, 貫入中の杭体トルクや貫入率の変化から, 支持層への杭先端の到達状況を把握できることがわかる.

3. 2 鉛直載荷時の挙動

図8(a)は杭頭荷重と杭頭沈下量の関係である. 支持層へ根入れしたモデル(LD+0.0, LD-0.5, LD-1.0)を見ると, 全層高密度のモデル(DD)よりもやや荷重は小さいものの, 根入れ長によらずほぼ同形状の曲線となっている. 支持層へ根入れしないモデル(LD+1.0, LD+0.5)では, 明らかに杭頭荷重が小さくなる. ただし, 沈下が進むにつれて支持力の上昇する傾向が顕著である.

図8(b)および(c)は, それぞれ杭先端面および羽根面荷重と杭頭沈下量の関係である. 支持層へ根入れしたモデルの場合, 杭先端面荷重は(LD+0.0)と(LD-0.5)がほぼ同程度の値であり, それより根入れの大きい(LD-1.0)よりも大きい. それに対して, 羽根面荷重は(LD-1.0)が他の二つのモデルよりも大きい傾向が見られた. 支持層に根入れしないモデルにおいては, (LD+1.0)の杭先端面荷重が軸径(76.3mm)程度沈下した時点から荷重の増加割合が上昇しており, 支持層の影響が表れたものと推察される.

図9(a)および(b)は, それぞれ杭頭部が羽根径の10%(0.1 d_w)および羽根径分(1.0 d_w)沈下した時点での杭体各部の負担荷重を比較したものである. 支持層へ根入れしたモデルの場合, 0.1 d_w 沈下時には支持層への根入れが深いモデルほど羽根面荷重と杭頭荷重は大きくなるが, 杭先端面荷重と杭周面荷重は小さくなる傾向がある. しかし, 1.0 d_w 沈下時には, いずれの部位においても根入れ-0.5と+0.0のモデルの差はほとんど見られない. 支持層へ根入れしないモデルの値は根入れのあるモデルより小さいが, 全層低密度モデルより大きい. また, 1.0 d_w 沈下時には根入れのない+1.0と+0.5のモデルに大きな差は見られない.

以上の結果から, 羽根面の支持力確保の観点では1.0 d_w 程度の根入れが必要であるが, 杭先端面の支持力確保からは支持層深度に杭先端が達した時点で打ち止める方法も有効である.

試験地の地盤構成は、図10に示すようにGL-3.75~5.70mに細砂層を挟むものの軟弱なシルト層が続き、GL-11.60m以深はN値10~20程度の細砂層となっている。本論文ではこのGL-11.60m以深の細砂層を支持層と見なして、施工実験と載荷試験を行った。

図11に示すように、試験杭の各所にひずみゲージを貼付している。使用したゲージは軸歪ゲージが主であるが、杭頭付近にはトルクゲージを貼付している。なお、試験杭は先端面荷重と羽根面荷重を独立して測定できるような二重管構造であって、杭先端面の円盤を取り付けた内管と羽根を取り付けた外管を接続リングを介して結合している。

表2 試験杭の諸元一覧

試験名	軸径 d_0 (mm)	軸厚 t_0 (mm)	羽根径 d_w (mm)	羽根 ピッチ p_w (mm)	杭長 l (m)	境界から の距離 H ($\times d_0$)	施工日	試験日
+1.0dw	114.3	4.5	228.6	70	12.600	+1.0	2007.11.27	2007.12.05
+0.5dw					12.724	+0.5	2007.11.26	2007.12.04
+0.0dw					12.834	± 0	2007.11.26	2007.12.03
-0.5dw					12.724	-0.5	2007.12.18	2007.12.26
-1.0dw					12.834	-1.0	2007.12.17	2007.12.25

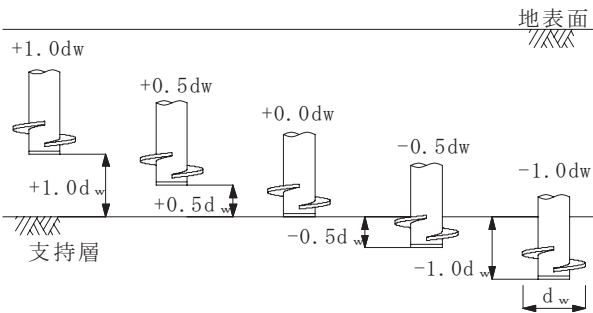


図12 試験杭先端面と支持層の位置関係

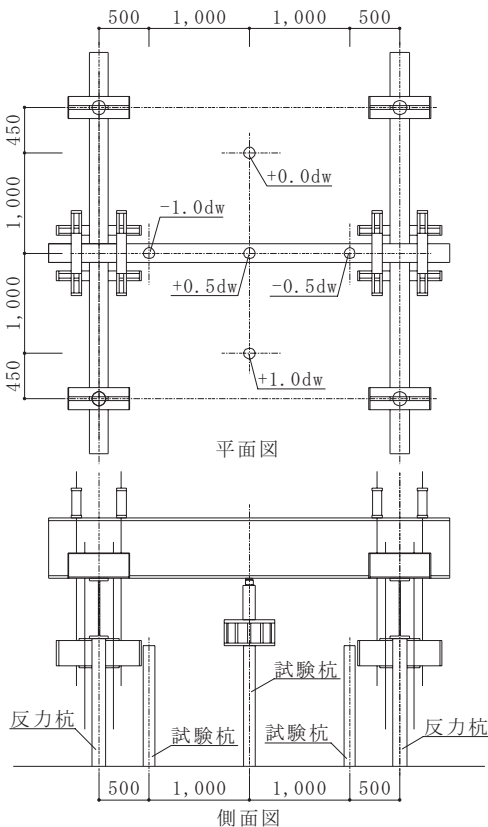


図13 載荷装置図

試験杭の諸元を表2に示す。杭の軸径(114.3mm)と羽根径(228.6mm)等の杭形状を同一とし、試験名は図12に示す杭先端面と支持層境界からの距離で表現している。

載荷試験は地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」に則して実施し、荷重階は4サイクル8段階を基本とした。5本の試験杭と載荷装置の関係を図13に示す。載荷は4本の反力杭を使い、載荷桁を試験杭位置に応じて組み替え、油圧ジャッキにより荷重を加える方式とした。

5. 原位置載荷試験結果および考察

5.1 施工時の挙動

図14は、GL-10m以深について試験杭の杭頭における施工トルクと杭先端面および羽根面の負担荷重の関係である。ただし、杭先端面および羽根面については支持層手前での変化が分かりやすいようにGL-10mを基準にした増分で示している。なお、-1.0dwモデルがGL-10.8m付近で不連続となっているのは、段取りのために施工を一時中断した影響である。

それによると、杭先端面荷重は支持層の手前+dw付近から明確に上昇する傾向が表れているものの、羽根面の荷重(回転推進力)や杭頭トルクの変化はそれ程明確とは云えない。大型土槽実験においては杭先端面荷重と杭頭トルクが支持層の手前100mm(軸径の1.3倍)程度手前から明確に増加した傾向とは幾分異なる傾向となった。これは土槽実験では同種の砂で密度の違いのみで支持層としていたのに対し、原位置試験では支持層とした層とそれ以外の層では密度だけでなく土の種類も異なるため、単純な杭頭トルクの上昇として現れなかったことが考えられる。このことから、原位置地盤において支持層到達の判断を行うには、杭頭トルクのみでは判断が難しいケースがあるため、貫入率や押し込み力など他の要因も考慮し、総合的に判断する必要があると考えられる。

5.2 鉛直載荷時の挙動

図15は、載荷試験時における杭頭変位と杭体各部の負担荷重(杭頭荷重=杭先端面荷重+羽根面荷重+杭周面荷重)の関係を示している。ここで、-0.5dwモデルについてはひずみゲージの不良から載荷試験時の測定値を得ることが出来なかったため、杭頭以外の値(杭体各部の分担)を考察対象から除外している。

(a)は杭先端面荷重を示している。これによると、+1.0dw,+0.5dw

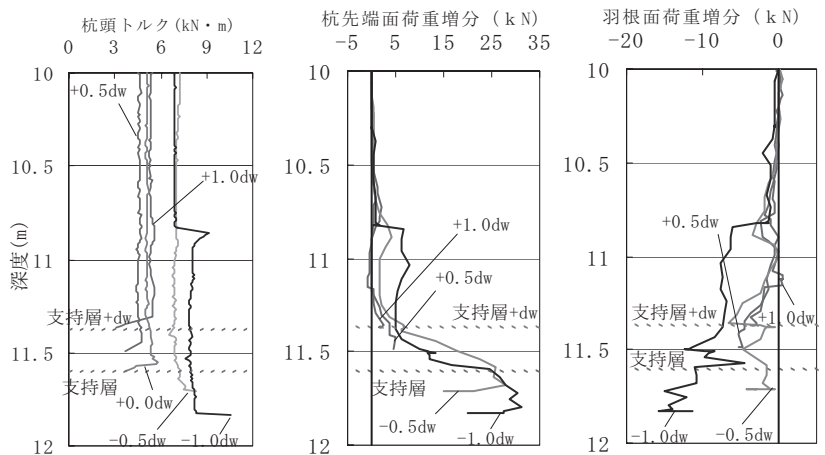


図14 施工時の杭頭トルクと各部の負担荷重

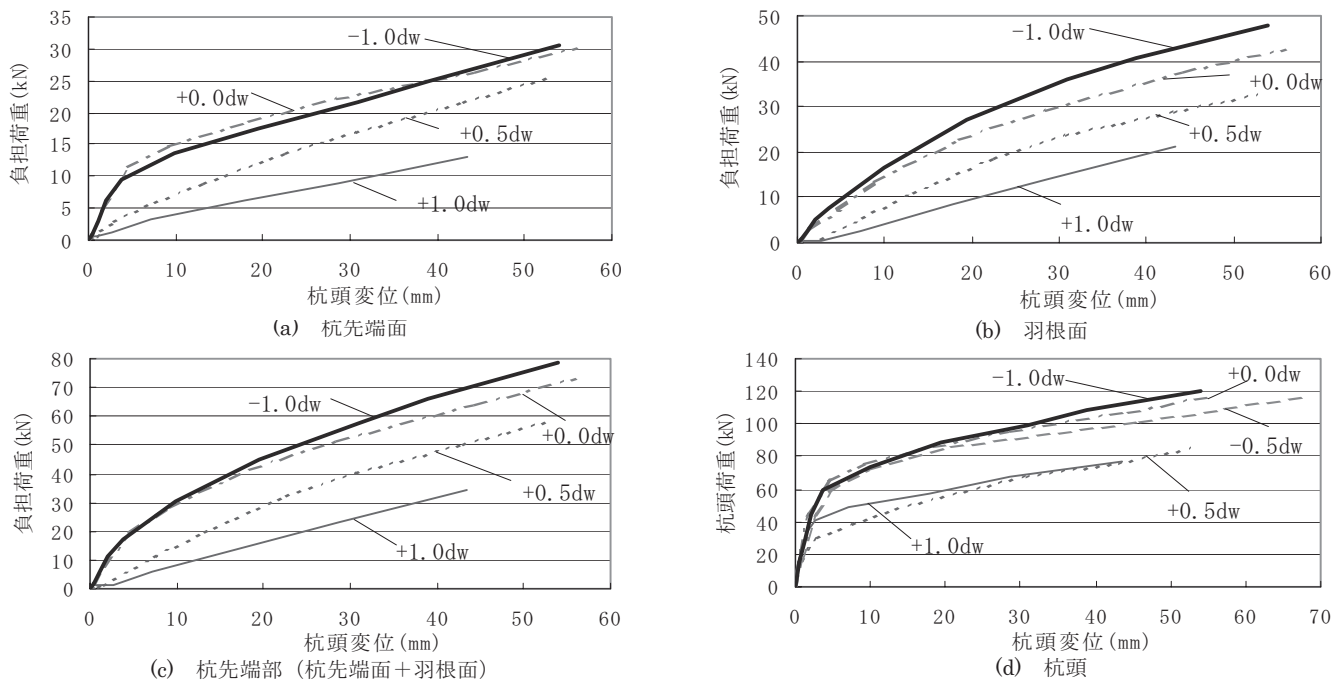


図 15 杭端各部及び杭頭荷重と杭頭変位の関係

と支持層に近づくにつれて荷重が増加しているものの、支持層に到達している±0と支持層に1.0dw根入れした-1.0dwモデルを比較すると、変位が小さい荷重段階では+0.0dwモデルの方が根入れのある-1.0dwモデルと同等かむしろ大きい値を示し、土槽における模型実験の傾向とほぼ同様であった。羽根面が密な支持層に入ること、羽根下面のゆるみ領域が近傍の拘束圧を低下させ、杭先端面の支持力低下を引き起こす一因になっていると云えよう。

(b)は羽根面荷重を示しているが、+1.0dwから+0.5dwと支持層に近づくにつれて荷重が増加する傾向は先端面荷重と同様である。しかし、支持層に1.0dw根入れした-1.0dwモデルは支持層に杭先端が到達した+0.0dwモデルよりもかなり大きな値となっている。羽根面の支持力を期待するには、支持層へのある程度の根入れが必要と云える。

(c)は杭先端面荷重と羽根面荷重を合わせた杭先端部荷重（通常の載荷試験における杭先端荷重）を示している。-1.0dwが最も大きな荷重を示しているものの、+0.0dwモデルと顕著な差は見られない。

(d)は杭頭荷重～杭頭沈下曲線である。支持層に到達している+0.0dwと根入れのある-0.5dwおよび-1.0dwのモデル同士では大きな差はない。これらの値には杭周面摩擦力も含まれているので一概には云えないが、杭周面摩擦力が同じならば杭全体の支持力に対しては、先端部での根入れの差の影響は更に小さく考えられる。なお、支持層に達していない+1.0dwと+0.5dwがほぼ同様な値となっているのは、+0.5dwが他の杭に比べ摩擦が小さかった可能性がある。すなわち、+0.5dwモデルの施工トルクが他の杭に比べ低い値で施工を終了しているため、地盤の乱れが大きかったことが考えられる。

6. 結論

以上、大型加圧土槽による模型実験および原位置試験を実施して、回転貫入杭の支持層への根入れ効果に関する検討を行い、以下の結

論を得た。

杭先端面が支持層に達する手前（軸径の1.3倍程度）で杭体トルクや貫入率が変化するので、支持層への到達状況を概略知ることができる。

羽根径程度まで杭先端を根入れさせることで、羽根面の支持力は増加するが、杭先端面の支持力はむしろ低下する。その結果、通常の前支持力（杭先端面と羽根面の支持力の和）は、杭先端の根入れが異なってもさほど変化しない。したがって、回転貫入杭の施工にあたっては支持層へ杭先端を到達させることは必要だが、羽根部分を支持層に根入れさせない手法も有効であると云える。

今後の課題として、回転貫入杭の先端を支持層境界とするための確実な施工管理指標の構築、並びに支持力を発揮するのに必要な支持層厚の検討があげられる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.453-462，1999.3.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 土屋勉，中沢楓太，他：回転貫入杭の羽根近傍地盤の観察に基づく貫入メカニズムの検討，日本建築学会技術報告集，第13巻，第25号，pp.73-76，2007.6.
- 6) 土屋勉，大杉富美一，他：回転貫入杭の貫入・支持力特性に関する模型実験，日本建築学会構造系論文集，第620号，pp.75-80，2007.10.
- 7) 島田正夫，土屋勉，他：回転貫入杭の貫入・支持力に関する二層地盤での模型実験，第42回地盤工学研究発表会講演集，pp.1215-1216，2007.7.
- 8) 池田篤則，土屋勉，他：回転貫入杭の支持層への根入れ効果に関する原位置載荷試験，第43回地盤工学研究発表会講演集，pp.1277-1278，2008.7.

(2009年10月2日原稿受理，2010年1月18日採用決定)