

翼付き模型杭の鉛直載荷実験

正会員 ○草野 憲蔵*1 片山 茂徳*4
同 大杉富美一*2 上田 英幸*5
同 土屋 勉*3

1. はじめに

建設工事における騒音・振動や工事に伴って発生する掘削残土の処分法が社会問題となっていることから、これらを克服した基礎工法として、回転貫入型の杭工法^{1)~4)}の開発が盛んになってきた。

翼付き鋼管杭は、従来の鋼管杭の先端部や周面にスクリュー状の翼を取り付けたものであって、翼による回転推進力によって無排土で埋設され、設置後は翼に支持力増を期待する特殊杭である。鉛直載荷試験結果を整理した支持力算定式も提案されているが、杭体の設計において重要となる翼付け根部の応力チェック方法が確立されていない。その理由としては、杭設置時に伴う残留応力の存在が指摘⁵⁾されながらも、翼面の反力分布が十分に明らかにされていないことが挙げられる。

著者等は、杭設置の影響を考慮した支持力算定式と杭体の断面設計法を確立させることを最終目標にして、加圧土槽による一連の模型実験を計画している。本論文では、模型砂地盤や模型杭の較正実験を行った後、あらかじめ杭体を設置した状態（残留応力が無い）での鉛直載荷実験を行い、翼付き鋼管杭の各部（杭先端部、翼部、軸部）の基本的な支持力性状について、翼の無い直杭の結果と比較しながら検討する。

2. 実験装置の概要

図-1は実験装置であって、円柱土槽、載荷装置および計測装置から構成される。土槽は鋼製で内径φ1000mm、深さ1200mmの円柱型である。土槽の内部側面にはシリコングリスによってテフロンシートを3重に貼り付けることによって、模型地盤と土槽壁面との摩擦力を除去している。載荷フレームは、土台、支柱、反力梁で構成されており、土台は円柱土槽に固定されている。杭頭への荷重は油圧ジャッキを介して負荷される。使用した油圧ジャッキは50kNおよび200kNの容量を持つものであり、それぞれロードセルおよび油圧変換器により荷重測定を行う。計測装置はパーソナルコンピューター、データロガー、スキャナ、荷重変換器、変位計、歪ゲージから構成される。

図-2は砂地盤への上載圧負荷装置である。模型地盤に等分布の上載圧を負荷させるために製作したドーナツ形状のゴム製空気袋（直径φ1000mm、厚さ100mm）は、円柱土槽のフタに装着できる構造になっている。

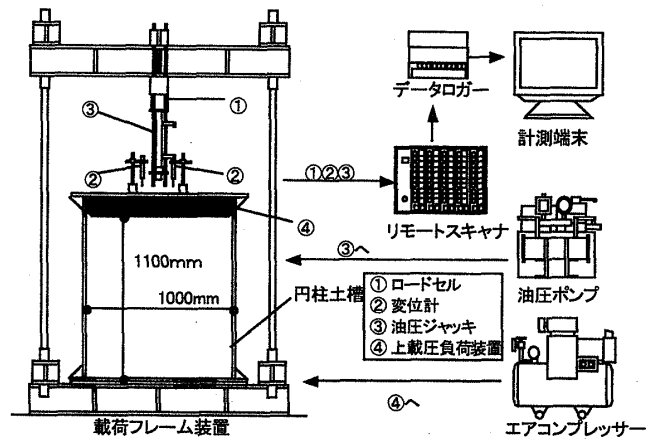


図-1 実験装置構成図

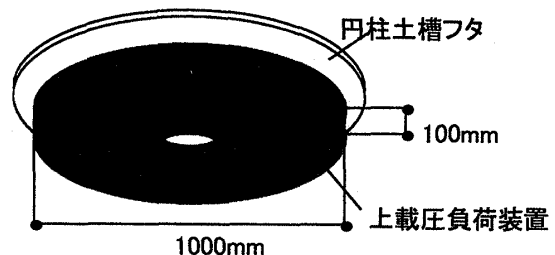


図-2 上載圧負荷装置

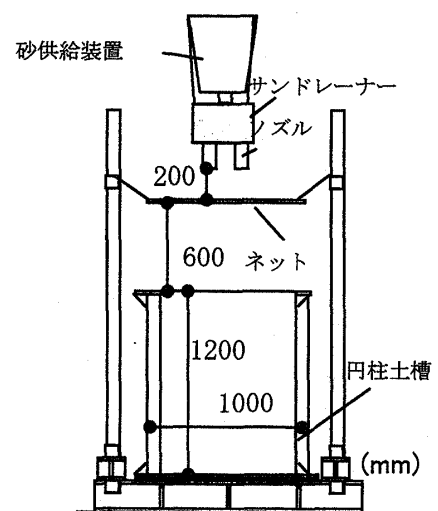


図-3 地盤作製装置

3. 模型砂地盤

3.1 砂地盤の作製方法

図-3に示すようなノズル・ネット砂投下法によって、今回は相対密度約95%という比較的密な模型砂地盤を作製した。用いた試料は珪砂6号である。ノズルとネットの間隔およびネットと堆積面の間隔を組み合わせることによって、広範囲の相対密度を再現できることが確認⁶⁾されている。

3.2 相対密度分布

模型砂地盤の均一性を確認するため、地盤中に塩ビ容器をあらかじめ埋設し、地盤作製後に回収した容器中の砂重量から模型砂地盤全体の D_r 分布を求めた。杭を設置しない場合および杭を設置した場合の水平方向および鉛直方向の相対密度分布について、以下に考察する。

(1) 水平方向および鉛直方向の均一性

サンドレーナーを用いた方法で均一な地盤が作製できることを確認するために、図-4に示す位置で相対密度測定を行った。表-1の測定結果によると、得られた地盤の D_r は92~98%の範囲にばらつくが、概ね95%の密な均一砂地盤とみなせる。

(2) 模型杭設置による影響

模型杭および模型杭固定具が D_r 分布に及ぼす影響を検討するために、図-5の位置に塩ビ容器を埋設した。測定結果を表-2に示すが、杭周辺部では杭を設置しない場合に比べて、 D_r が約8%減少していることが分かった。この原因として、砂が落下の際に杭周面に衝突することの影響等が考えられる。今後、杭を設置した場合の地盤作製方法に改良の余地が必要であろう。したがって、載荷実験を行う際には複数個の塩ビ容器を埋設し、相対密度を毎回測定することにした。

4. 模型杭の較正試験

翼付き鋼管杭の他に直杭を含めた6種類の模型杭を製作した。また、先端部の支持力のみを測定するため二重管を製作した。ここでは、各杭の杭頭部、二重管杭の内軸部、杭先端部に貼り付けた歪ゲージの較正係数について検討する。

4.1 模型杭の形状

6種類の模型杭 S0, S1, D0, D1, W0, W1 の形状を表-3ならびに図-6に示す。模型杭の材質は STK400, F 値 = 235MPa, ヤング率 $E = 2.1 \times 10^5$ MPa である。

二重管を採用する目的は、杭先端に歪ゲージに貼り付けることができない翼付き鋼管杭の先端負担力を簡便に測定すること、直杭でも内軸の歪ゲージ測定値から杭先端部のみを軸力を測定することである。

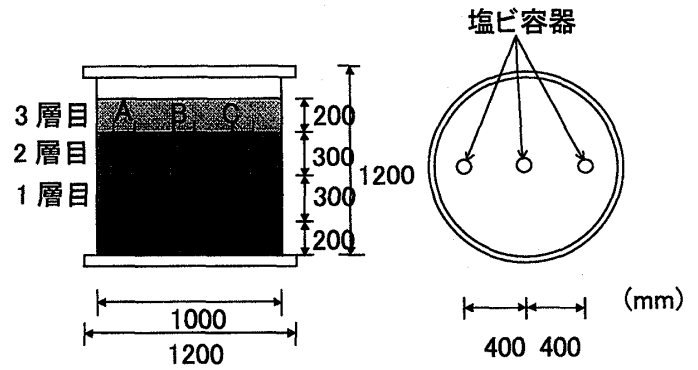


図-4 相対密度測定位置(模型杭無し)

表-1 相対密度分布(模型杭無し)

水平方向				鉛直方向			
層目	位置	D_r (%)	平均(%)	層目	位置	D_r (%)	平均(%)
1層目	A	98	97.0	A	1層目	98	95.6
	B	95			2層目	95	
	C	98			3層目	94	
2層目	A	95	93.8	B	1層目	95	93.4
	B	94			2層目	94	
	C	93			3層目	91	
3層目	A	94	92.9	C	1層目	98	94.7
	B	91			2層目	93	
	C	93			3層目	93	

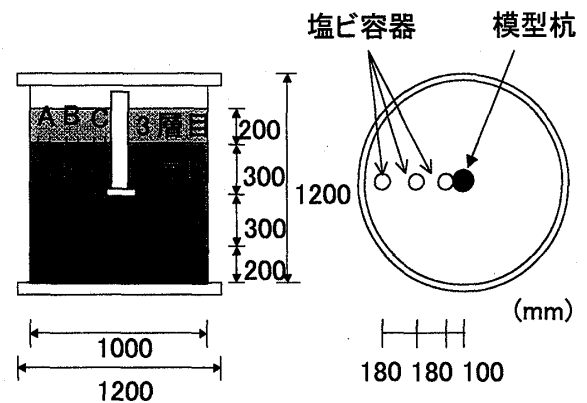


図-5 相対密度測定位置(模型杭有り)

表-2 相対密度分布(模型杭有り)

水平方向				鉛直方向			
層目	位置	D_r (%)	平均(%)	層目	位置	D_r (%)	平均(%)
1層目	A	93	92.0	A	1層目	93	91.3
	B	96			2層目	96	
	C	87			3層目	85	
2層目	A	96	95.6	B	1層目	96	96.4
	B	100			2層目	100	
	C	91			3層目	94	
3層目	A	85	86.9	C	1層目	87	86.7
	B	94			2層目	91	
	C	83			3層目	83	

表-3 模型杭の形状

名称	直径 D_o (mm)	軸厚 t_w (mm)	材長 L(mm)	二重管の有無	内軸径 D_i (mm)	翼の有無	翼径 D_w (mm)	翼厚 t_w (mm)
S0	48.6	3.5	500	無	-	無	-	-
S1	101.8	3.2						
D0	48.6	3.5						
D1				22				
W0				15.5				
W1					22			

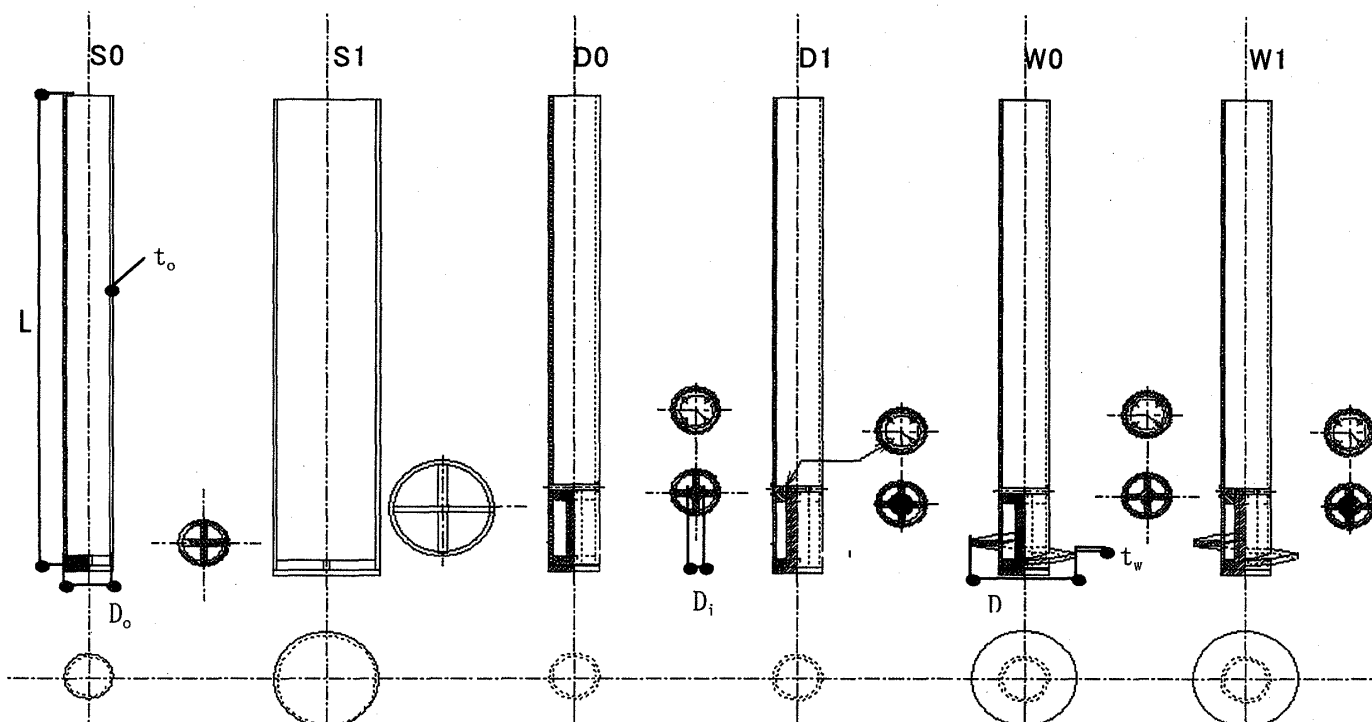


図-6 各種模型杭

4.2 試験方法

アムスラー型万能試験機に模型杭を設置して、荷重ピッチ 2.9kN または 4.9kN で、それぞれ 29kN または 49kN まで荷重した後、9.8kN ピッチで除荷した。一つの模型杭につき試験を 4 サイクル行い、サイクルごとに模型杭の設置方向を 90 度ずつ回転させ、荷重階ごとに模型杭各部の歪測定値を記録した。

模型杭の傾斜ならびに先端部面のゆがみの補正および先端部の設置状況を模型地盤の状態と同じにするために、杭先端部に砂試料を設置した。ただし、翼付き鋼管杭である W0, W1 は、設置した際に翼部が接触して、杭先端部の歪に翼の曲げ応力が加わってしまうため、アムスラー型万能試験機に直接設置した。

4.3 試験結果

表-4 は貼り付けた歪ゲージの較正試験結果であるが、JIS のヤング率 ($2.06 \times 10^5 \text{MPa}$) と一致していない。この原因として、歪ゲージ貼り付け位置の板厚の不均一性といった加工上の誤差が考えられる。なお、軸荷重の偏心の影響を除くため、基本的には 4 枚の歪ゲージの平均を当該個所の歪測定値とするが、歪ゲージの不良などによる異常値が認められた場合、それを除いた対角する 2 枚の歪ゲージの平均を採用する。

表-4 杭の種類と較正係数 (ヤング率)

種類	杭頭(MPa)	杭先端内軸部(MPa)	杭先端外管部(MPa)
S0	2.00×10^5	—	2.12×10^5
S1	1.88×10^5	—	2.88×10^5
D0	2.26×10^5	2.40×10^5	—
D1	2.16×10^5	2.17×10^5	—
W0	2.22×10^5	2.39×10^5	2.46×10^5
W1	2.49×10^5	2.73×10^5	2.61×10^5

5. 模型杭の鉛直荷重実験

5.1 実験方法

製作した 6 本の杭の実験条件を表-5 に示したが、上載圧を 0.05, 0.10, 0.15Mpa の 3 種に変化させているので、合計 18 ケースとなる。

図-7 は模型杭の設置状況であるが、杭先端以深は 800mm を確保することを原則とした。翼付き鋼管杭に関しては、翼下部と地盤を密着させるために、翼のストローク分 35mm を回転貫入させた。その後、荷重装置並びに杭頭変位量測定のための変位計および補助具、荷重測定のためのロードセルまたは油圧変換器を設置した。

試験に関係する全ての装置を設置した後、上載圧荷重前に各センサの初期化を行うための計測値を測定する。上載圧荷重による模型地盤の圧縮に起因する模型杭の沈下が収束した時点をも 0 荷重時として測定する。

荷重は多サイクル方式であり、4 サイクル目を最終サイクルとし、4 サイクル目の荷重は杭頭変位量が 50mm に達するまで行う事とする。模型杭設置の不備などにより杭頭変位量が 50mm に達することができなかった場合は、

5.2 実験結果および考察

表-6は、直杭および翼杭でそれぞれ杭径および翼径の10%、30%そして実験した最大荷重時点の各部の負担荷重と最終荷重時の沈下量を、全試験体についてまとめたものである。

(1) 荷重～沈下量特性

図-8は代表的な直杭および翼杭の荷重～沈下量曲線であって、それぞれ以下のような特徴が見られる。

a) 直杭： 図-8 (a) は直杭5の杭頭部、杭先端部および杭周面部の荷重～沈下量関係である。それによると、载荷に伴って沈下量の増分が増えてくるが、明確な極限值が得られず、このまま実験を続けるなら更に杭頭部支持力が増大すると推測される。ただし杭周面部は载荷の初期段階(沈下量1~2mm)で降伏して、その後の負担荷重の増大は極めてわずかである。沈下に伴う支持力の増大は杭先端部によるところが大きいと云える。

除荷時および再载荷時の曲線に着目すると、各サイクル共にほぼ直線的であり、その勾配も近似していることから、履歴内荷重時のもとでは弾性的な性状を示すとみなせることが分かる。なお、1サイクル目のはじめに急激な沈下が生じているが、その原因は模型杭設置段階もしくは地盤作製段階での模型杭の傾斜や模型杭先端と地盤のなじみの影響と考えられる。

b) 翼杭： 図-8 (b) は翼杭5の杭頭部、杭先端部、翼部および杭周面部の荷重～沈下量曲線関係である。それによると、载荷開始から60kNまで、杭頭部の荷重～沈下量関係はほぼ直線に近い形状であり、それ以降で徐々に沈下勾配が増大している。

杭先端部の支持力よりも翼部の方が大きい、翼部では約25mm沈下付近から沈下の急増が見られることから、その辺りで極限值に近い状態になったと推測される。それに対して、杭先端部の支持力は実験終了時点でもまだ極限に達していない。

杭周面部の支持力は極めて小さく、直杭のそれとは大きく異なっている。杭周面支持力が除荷時に一時的にわずかに大きくなった後に減少する傾向があること、表-6に掲げた他の翼杭では負の杭周面支持力を示す場合もあること等、翼部の挙動との関連性が示唆される。これらの点に関しては、測定上の問題も含めて今後の課題としたい。

(2) 支持力度と上載圧の関係

実大の载荷試験では杭径および翼径の10%沈下時を基準荷重としているが、本実験では明確な極限值が得られず、基準荷重以降も大きな支持力増が生じた。そこで沈下度が30%時点に着目して、各部の支持力度と上載圧の関係をプロットしたのが図-9である。ここで、支持力度はそれぞれの負担面積で除した値であるが、翼杭の杭頭部の負担面積は翼外径で囲まれた面積としていることに注意されたい。

それらによると、杭頭支持力度は上載圧にほぼ比例する形で増加している。直杭では径の大きいS1が径の小さいS0よりもわずかに大きくなっているに過ぎなく、寸法効果は生じていないと見なせる。更に、翼杭の杭頭支持力度は、直杭のそれよりもわずかに

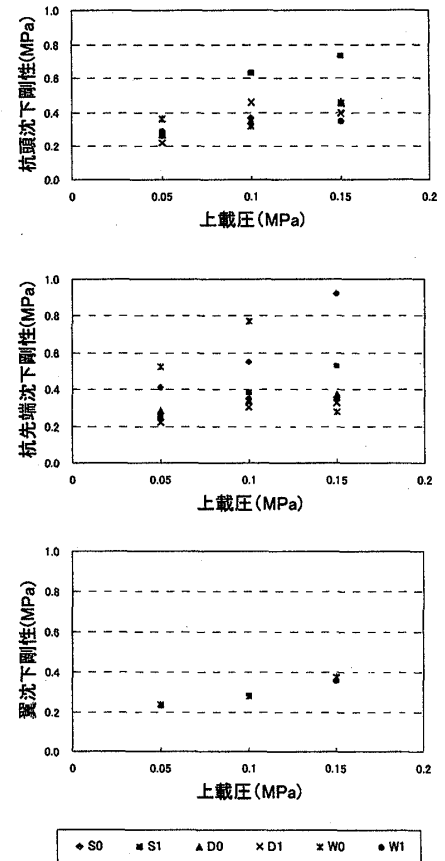


図-9 各部の沈下剛性と上載圧の関係

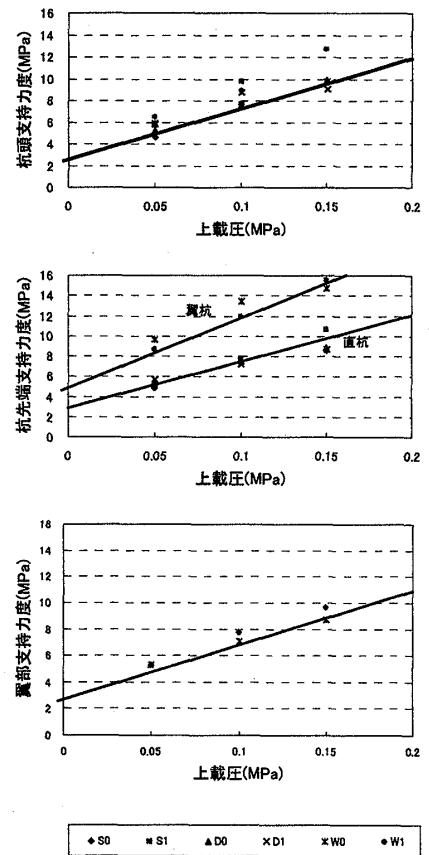
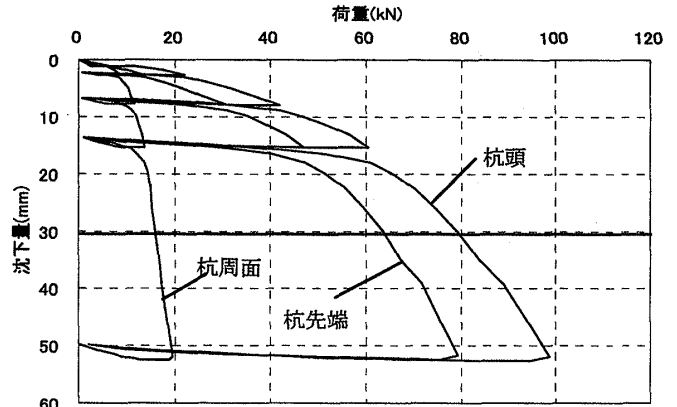


図-10 各部の支持力度と上載圧の関係

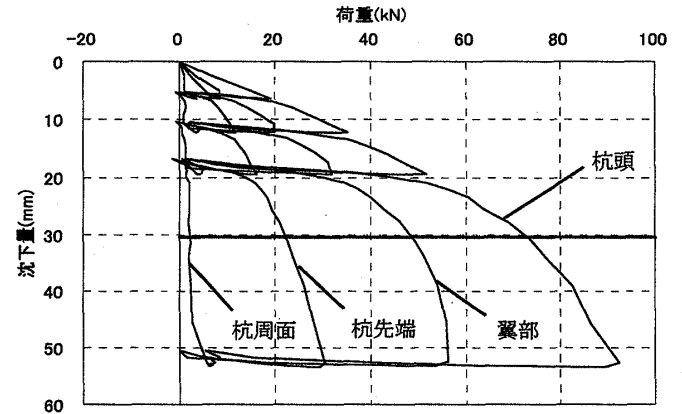
装置を損傷しない範囲で載荷を終了とする。載荷ピッチは処女載荷荷重および履歴載荷荷重について最大荷重の1/12 および 1/6 とした。処女載荷保持時間および履歴載荷保持時間はそれぞれ2分および1分とした。ただし、模型杭の沈下がまだ進行している場合には保持時間を逐次延長している。

表-5 実験の実施条件

実験名	模型杭			地盤		使用した装置			
	杭種	杭径D _o (mm)	翼径D _w (mm)	内径D _i (mm)	上載圧 (MPa)	相対密度の 測定の有無	ジャッキ容 量(kN)	荷重変換 器	変位計
直杭1	S0	48.6	なし	なし	0.05	無	50	ロードセル	巻き込み型
直杭2					0.10	有			
直杭3					0.15	無			
直杭4					0.05	有			
直杭5	0.10	200							
直杭6	0.15								
直杭7	D0	なし	なし	15.5	有	50	ロードセル	高感度型	
直杭8				0.10					
直杭9				0.15					
直杭10	D1	なし	なし	22	無	50	ロードセル	巻き込み型	
直杭11				0.05					
直杭12				0.10					
翼杭1	W0	48.6	101.8	15.5	有	200	油圧変換器	高感度型	
翼杭2									0.10
翼杭3									0.15
翼杭4	W1	48.6	101.8	22	有	50	ロードセル	高感度型	
翼杭5									0.10
翼杭6									0.15



(a) 直杭 5



(b) 翼杭 5

図-8 荷重～沈下関係

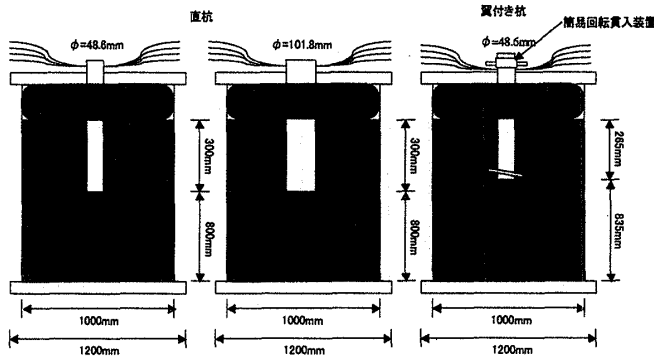


図-7 模型杭設置図

表-6 実験結果一覧

実験名	杭径 D _o (mm)	翼径 D _w (mm)	10%沈下時の荷重				30%沈下時の荷重				最大荷重			最終沈下量 (mm)
			杭頭 (kN)	杭先端 (kN)	翼 (kN)	杭周面 (kN)	杭頭 (kN)	杭先端 (kN)	翼 (kN)	杭周面 (kN)	杭頭 (kN)	杭先端 (kN)	翼 (kN)	
直杭1	48.6	なし	4.8	4.9	なし	-0.1	8.6	9.1	なし	-0.4	17.3	18.1	なし	76.4
直杭2			8.6	8.2		0.4	14.2	13.9		0.3	23.9	23.9		52.4
直杭3			10.7	9.4		1.3	18.0	16.0		2.0	34.5	31.8		71.3
直杭4			21.7	20.2		1.5	46.3	44.3		2.0	55.1	53.0		58.1
直杭5			46.8	35.1		11.7	79.8	63.9		15.9	98.7	79.2		51.9
直杭6			61.5	49.3		12.2	103.9	87.8		16.1	118.3	101.0		43.3
直杭7			5.0	4.9		0.0	9.7	9.8		-0.1	15.6	15.5		52.3
直杭8			8.7	8.4		0.3	14.2	13.9		0.3	23.6	23.4		51.9
直杭9			6.0	5.7		0.2	18.5	16.5		2.1	31.7	27.3		52.9
直杭10			5.1	4.9		0.2	10.8	10.5		0.2	16.2	16.1		51.4
直杭11			9.6	7.4		2.3	16.3	13.3		3.0	26.4	22.1		46.1
直杭12			3.3	2.4		1.0	16.9	16.1		0.8	36.3	37.0		120.2
翼杭1	48.6	101.8	23.2	9.0	15.7	-1.4	48.5	18.0	33.7	-3.2	58.4	23.3	39.0	56.9
翼杭2			30.1	12.3	20.3	-2.5	62.7	25.1	44.7	-7.0	78.2	30.0	52.0	52.1
翼杭3			27.8	10.2	19.0	-1.4	80.0	27.4	54.9	-2.4	101.0	36.2	69.2	56.6
翼杭4			25.6	7.9	16.6	1.1	52.8	16.1	33.2	3.4	56.0	17.4	34.7	35.9
翼杭5			29.3	9.9	18.7	0.8	73.0	22.2	48.7	2.1	92.4	30.4	56.4	52.7
翼杭6			41.3	15.9	32.3	-7.0	78.6	28.8	60.7	-10.9	91.8	36.9	68.3	48.0

小さいに過ぎなく、両者とも以下に示す上載圧 σ_v (MPa) に関する 1 次式で略算できる。

・直杭および翼杭の杭頭支持力度： q_0 (MPa)

$$q_0 = 4 + 40 \sigma_v \quad \dots\dots\dots(1)$$

次に、杭先端部や翼部に着目すると、翼杭の翼部は直杭の先端部よりも小さいが翼杭の先端部は逆にそれよりも大きいこと、翼杭では翼部を含む先端部の合計支持力が直杭の先端支持力よりも大きいという特徴がある。また、先端部や翼部の支持力度も上載圧にほぼ比例する形で増加しており、概ね下式で略算できる。

・直杭の先端支持力度： q_b (MPa)

$$q_b = 3 + 45 \sigma_v \quad \dots\dots\dots(2)$$

・翼杭の先端支持力度： q_b (MPa)

$$q_b = 5 + 70 \sigma_v \quad \dots\dots\dots(3)$$

・翼杭の翼部支持力度： q_w (MPa)

$$q_w = 3 + 40 \sigma_v \quad \dots\dots\dots(4)$$

(3) 各部の沈下剛性

図-10は上載圧と各部の荷重初期段階の沈下剛性をプロットしたものである。沈下剛性とは各部の支持力度を沈下度(沈下量を杭径(翼杭では翼径)で除して正規化した値)で除したものである。なお、荷重初期の問題を除去するために荷重度1MPaの点と、極限荷重の約1/3の点までの傾斜を採用している。それによると、直杭では上載圧の増加に伴って沈下剛性も概ね増加する傾向がある。それに対して、翼杭では上載圧が増大しても沈下剛性が低下する場合があるが、試験体によっては翼下面と地盤の接触が十分でなかった可能性も考えられる。

6. まとめ

本論文では、加圧土槽を利用した模型杭の鉛直荷重試験に関する基本的な事項について検討してきたが、まとめると以下のようなになる。

- ①ノズルとネットを組み合わせた手法(NN法)を用いてほぼ均一な地盤を作製することができるが、杭近傍または土槽内壁周囲の作製方法に改良の道が残されている。
- ②内軸には偏心が発生しやすいが、4枚の歪ゲージで偏心の影響を取り除ける。
- ③杭各部の支持力は、上載圧の増加に伴い一次の近似式で推定でき、杭径による寸法効果は小さい。
- ④翼杭の周面支持力は直杭よりも大幅に小さいが、翼を含む先端での支持力が大きいため、翼杭の杭頭支持力は翼径と同じ寸法を有する直杭の支持力と同程度である。
- ⑤翼杭の沈下剛性は翼部と地盤との接触状況に大きく影響を受ける。

今後、今回の実験を通して見出された課題を克服するとともに、回転貫入中の翼付き杭の挙動を含めた模型実験を進める予定である。

参考文献

- 1) 技術短信, 日経アーキテクチャー, pp. 18-19, 1999. 5.
- 2) 大和真一, 伊集院博, 他: 先端羽根付き鋼管杭(回転埋設工法)の先端支持力特性, 第30回土質工学研究発表会, pp. 1457-1458, 1995.
- 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, 1998.
- 4) 土屋 勉, 吉田勝之, 大杉富美一: 多翼部を有する小径鋼管杭工法の開発, 日本建築学会技術報告集, 第10号, pp. 57-60, 2000.
- 5) 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. 5, pp. 5-8, 2000.
- 6) 島田正夫, 土屋 勉, 菊地ゆかり: ノズル・ネット型砂投下法による模型地盤の相対密度に関する研究, 日本建築学会北海道支部研究報告集, No. 75, 2002.