羽根付き鋼管杭の水平載荷実験による杭周水平地盤抵抗に関する研究

STUDY ON LATERAL SOIL RESISTANCE AROUND STEEL PIPE PILE
WITH WINGS BY STATIC CYCLIC LOADING TESTS小林 俊夫^{*1}, 中野 尊治^{*2}, 柏 尚稔^{*3}, 宮本 裕司^{*4}Toshio KOBAYASHI, Takaharu NAKANO, Hisatoshi KASHIWA
and Yuji MIYAMOTO

This paper describes lateral soil resistance of steel pipe piles with wings by static cyclic loading tests. The wings are larger than the pile diameter, and soil around the pile shaft is loosened. These tests confirmed the influence of the wings on hysteresis curve, subgrade reaction and cracking of the ground surface around the test piles. Parameters in the tests are the presence of the wings, wing diameter, and secular change after one year from construction of piles. The experiment result was clearly difference in the lateral soil resistances between the no wing and the wings.

Keywords : Steel pipe pile with wings, Lateral soil resistance, Static cyclic loading test, Secular change

羽根付き鋼管杭, 水平地盤抵抗, 静的交番載荷実験, 経年変化

1. はじめに

鋼管杭の杭先端や杭周面に鋼製の螺旋状または平板状の羽根を溶接によって取り付けけた鋼管杭（以下、羽根付き杭）が多く開発¹⁾され、実用化に至っている。羽根付き杭は、場所打ちコンクリート杭や埋め込み杭と比較して、掘削発生土を抑えることができる等、特に環境に対する負荷軽減工法の一つである。最近では杭径の大きな羽根付き杭が普及して、大規模な建築物まで適用範囲が拡大している状況にある²⁾。羽根付き杭の施工は、杭の軸部に回転トルクを与えて地盤中に貫入する方式（以下、回転貫入）で行われることが一般的である。このとき、杭から外側に跳ね出した羽根の等価円直径は、杭の外径より大きくなるため、施工時に跳ね出し部が杭周囲の地盤を乱して、杭に対する地盤抵抗に影響を及ぼす可能性が考えられる。

羽根付き杭の施工で杭周面地盤に乱れが生じることについては新井ら^{例えば 3)}の研究がある。新井らは模型土槽を用いて回転速度を一定とした羽根付き杭の貫入量を変化させた実験を行い、杭周面地盤の乱れに貫入速度が影響を及ぼすことを示している。

しかし、羽根付き杭の杭周水平地盤抵抗に関する研究は限られている。既往の研究として、久世ら⁴⁾、森ら⁵⁾、土屋ら⁶⁾の研究がある。既往の研究は、原位置で羽根が通過した領域内の土質試料を採取して、密度増加の有無、構造脆弱化の有無および地盤材料の圧縮強度と剛性変化等の土性変化について検討を行っている。また、水平載荷実験を実施して地盤反力や杭体に発生する曲げモーメントに関して検討を行っている。しかし、いずれの研究も載荷実験は1方向単調載荷によるものであるため、地震時を想定した繰返し載荷による

杭周水平地盤抵抗について検討した研究は著者らによる研究^{7~10)}以外はほとんど見当たらない。羽根付き杭の耐震設計を合理的に行うためには、繰返し載荷時の羽根付き鋼管杭の水平抵抗特性を十分に把握しておく必要がある。

以上のような背景のもと、施工による杭周囲の地盤の乱れが杭周水平地盤抵抗に及ぼす影響を明らかにするために、本研究では羽根付き杭の正負交番繰返し水平載荷実験を実施した。実験では、施工により地盤に影響を及ぼす可能性のある杭先端の羽根に着目して、その有無と羽根径の違いをパラメータとして、杭周水平地盤抵抗への影響を検討した。また、杭施工後と施工から1年が経過した後で載荷実験を行い経時変化について検討した。さらに杭周地盤抵抗に対しては、杭先端の羽根の有無が最も影響を及ぼすとともに、地震時の杭応力評価に必要となる水平地盤反力-杭変位関係の等価剛性と履歴減衰の変位依存性についても分析を行う。

2. 原位置水平載荷実験

2.1 実験敷地

本実験は茨城県小美玉市で実施した。図1に実験敷地の地盤のN値分布と土質柱状図を示す。敷地地盤は地表面からGL-0.55mまでが黒ボク、GL-0.55mからGL-2.2mまでが風化火山灰、GL-2.2mからGL-3.2mまでが火山灰、GL-3.2m以深は砂質土となっている。

図2にボーリング調査位置と試験杭の打設位置図を示す。ボーリング調査は、実験敷地が短辺方向12m、長辺方向50mの広さである

*1 ㈱三誠技術本部 本部長

*2 大阪大学大学院工学研究科 助教・博士(工学)

*3 国土交通省国土技術政策総合研究所
主任研究官・博士(工学)

*4 大阪大学大学院工学研究科 教授・博士(工学)

General Manager of Engineering Division, SANSEI Inc.

Assist. Prof., Dept. of Architectural Eng., Osaka University, Dr.Eng.

Senior Research Officer, National Institute for Land and Infrastructure Management, Dr.Eng.

Prof., Dept. of Architectural Eng., Osaka University, Dr.Eng.

ことから、長辺方向の両端で 2 地点 (Test-1 と Test-3) と中央で 1 点 (Test-2) の計 3 地点で行った。各調査地点のボーリング結果や図 1 に示す N 値分布から各地層深度はほぼ同じであり、実験敷地は水平成層地盤とみなせる。なお、土質試験用の試料採取は調査地点 Test-2 の近傍で行った。

2.2 試験杭

試験杭は計 4 本製作した。試験杭は、JIS G 3444 一般構造用炭素鋼鋼管 (STK) の外径 $\phi 267.4\text{mm}$ の鋼管材厚 $t 9.3\text{mm}$ (鋼種 490 材) を用いた。ここで、試験杭の降伏曲げモーメント M_y は $148.1\text{kN} \cdot \text{m}$ (=公称値) となる。表 1 に実験ケースを示す。羽根の無い杭 (以下、ST と称す) は 1 本製作して基準試験杭とした。

Fig.1 Test results of the soil investigation at the experiment site

Photo1 Test pile W30 (pile with wing)

Photo2 Test pile ST (pile without wing)

羽根付き杭は、羽根径比 $Dw/Dp \approx 2.3$ (ここで、 Dw は羽根の等価円直径、すなわち羽根の形状の実面積を円に単純置換して求めた等価円の直径、 Dp は杭の外径) を 2 本、羽根径比 $Dw/Dp \approx 3.0$ を 1 本製作した。以下では、羽根付き杭 2.3 倍径と羽根付き杭 3.0 倍径を、それぞれ W23 と W30 と称する。羽根の通過領域 (羽根の最大回転直径) pDw は W23 で 760mm 、W30 で 990mm となる。ST、W23、W30 試験杭の養生期間は実験工程上の関係で違いが生じたが、後述するほぼ 1 年の養生期間の差があった W23A の杭頭荷重-地表面杭変位関係が W23 と近い履歴性状を示したことから、1 か月半の養生期間であった W23 と W30、また 14 日間と養生期間の差が小さい ST と W23 の実験結果に養生期間が与えた影響は小さいと考えられる。また W23A は経時変化を確認するための試験杭で、杭の施工から約 1 年の養生期間後に載荷実験を行った。

杭先端の羽根は、鋼管の先端を羽根の傾斜角が 10° となるように開先加工したのちに、2 枚の平板を溶接接合で取付けて製作した (Photo1)。羽根の無い杭 (ST) の先端部は、鋼管の内径に納まる大きさの三角形の掘削刃を溶接接合で取付けた (Photo2)。

試験杭は全て杭先端を閉塞とした。なお杭長は 5m であるが、鋼管内面にひずみゲージを貼付するため、長さ 1m の鋼管を 5 本、完全溶け込み溶接接合 (裏当て板厚 4.5mm) で接続して製作した。そのため 1m 毎に溶接部で杭の断面が変化する箇所があり、杭変位に

Table1 Test Case

Test number	specimen		Completion date of pile installation	Start of lateral loading test	Days between pile installation and lateral loading test
	Full name	Abbreviation			
1	Screw pile without wings	ST	18 Oct 2016	28 Dec 2016	71
2	Screw pile with wings (wing diameter ratio 2.3)	W23	17 Oct 2016	10 Dec 2016	54
3	Screw pile with wings (wing diameter ratio 3.0)	W30	17 Oct 2016	23 Jan 2017	98
4	Screw pile with wings (wing diameter ratio 2.3) at 1 year after installation	W23A	17 Oct 2016	24 Nov 2017	403

Fig.2 Location of the soil investigation and test pile

影響を及ぼす可能性がある。この影響については、 EI を一定とした場合と継手部分の曲率を 0（影響幅 20mm）とした場合で数値積分による杭変位を計算した結果から、両者にほとんど差がないことを確認している。なお杭内面のひずみゲージは、深さ方向に 100mm 間隔で荷重方向の両面に各 50 点貼付した。

2.3 各杭の施工状況

各杭の施工時の貫入速度は、GL-3.2m 以浅の火山灰質土では羽根付き杭 W23 と W30 では 2~3m/分、羽根が無い ST では 4m/分であった。各杭のトルク値は、表層から火山灰質土では同様なトルク値で推移したが、羽根付き杭は GL-3.2m の砂質土に貫入すると羽根に抵抗が発生するためトルク値が高くなった。圧入力についても、トルク値と同様に表層から火山灰質土まで各杭ともほぼ 0kN で推移したが、ST では砂質土で深から貫入不能の状態となってきたため、高い圧入力を併用しながら所定先端深度（GL-4.8m）まで打設しました。上記の各杭の施工状況から、水平抵抗性に影響を及ぼす表層から黒ボク層、風化火山灰層での施工条件はほぼ同様であり、施工条件による実験結果への影響は小さいと考えられる。

2.4 荷重方法

図 3 に実験装置概要図、Photo3 に荷重実験状況を示す。荷重装置は試験杭、反力杭と油圧ジャッキで構成している。試験杭と反力杭の施工は回転貫入で行い、杭上端面を GL+200mm として打ち止めた。試験杭と反力杭の杭頭には加力梁等の荷重治具を取り付けるため厚さ 25mm のベースプレート（溶接して取付けた。反力杭は $\phi 406.4\text{mm}$ 、鋼管材厚 $t12.7\text{mm}$ （鋼種 STK490）の鋼管を 4 本用いて、各反力杭の杭頭を H 形鋼で接続して反力体を構築した。

荷重は、試験杭の上に高力ボルトで接合した加力梁と反力杭との間に油圧ジャッキを取り付けて、試験杭の杭頭を回転自由の条件で行った。油圧ジャッキの両端はピン接合とし、押し出し側と引込み側ともに最大荷重は 1000kN、シリンダーストロークは $\pm 250\text{mm}$ である。なお荷重高さは GL+400mm とした。計測は、杭ひずみのほかに、試験杭と反力体の荷重高さ位置の変位を変位計およびレーザ変位計で計測するとともに、試験杭と反力体の傾斜角も計測した。なお、試験杭の水平変位は荷重高さと GL+100mm 高さの 2 点で計測しており、GL+100mm 位置の水平変位を以下では「地表面杭変位（Reference disp.）」と称する。

荷重の制御は、地表面杭変位による変位制御で行った。変位振幅は $\pm 1\text{mm}$ 、 $\pm 2\text{mm}$ 、 $\pm 4\text{mm}$ 、 $\pm 6\text{mm}$ 、 $\pm 10\text{mm}$ 、 $\pm 15\text{mm}$ 、 $\pm 20\text{mm}$ 、 $\pm 30\text{mm}$ 、 $\pm 40\text{mm}$ 、 $\pm 60\text{mm}$ 、 $\pm 80\text{mm}$ 、 $\pm 100\text{mm}$ 、 $\pm 150\text{mm}$ で行い、各変位振幅で 2 回繰り返した。その後は +200mm まで単調荷重して実験を終了した。また各 1 回目のピーク変位時に目視で地盤変状を確認のうえ記録した。

3. 原位置水平荷重実験結果

3.1 羽根の有無による実験結果の分析

ここでは、ST と W23 の実験結果について検討する。検討は変位振幅 20mm（杭径の 10% 程度）と、60mm（ST で杭体が弾性領域）について行う。

1) 杭頭荷重—地表面杭変位

図 4 に変位振幅 60mm までの杭頭荷重—地表面杭変位関係を示す。また、図 5 に W23 と ST の杭頭荷重—地表面杭変位から算定した割

Fig.3 Experimental apparatus and sensor locations

Photo3 Experiment condition of test pile

Fig.4 Pile head load - reference displacement relationships
(Comparison with or without wings)

線剛性 (K_{ave})、履歴減衰 (h_{eq}) を示す。ここで割線剛性と履歴減衰の算定は 4.1 節に示す式 4)、式 5) を用いている。W23 と ST に対する割線剛性は杭変位の増大とともに小さくなり非線形が確認できる。W23 の ST に対する比は変位が 1mm と小さい領域では約 0.4 倍程度、杭変位が 60mm ではほぼ同様な値となる。履歴減衰は ST では杭変位が増加するにつれ大きくなる傾向を示すが、W23 では杭変位とともに小さくなり一定値に近づく傾向を示し、後述の 5) に示す杭周面と地盤との剥離の影響が現れているものと考えられる。

2) 杭周地表面の地盤変状

図 6 に杭周の地表面の地盤変状図を示す。図は変位振幅 20mm と 60mm の 1 サイクル目の負荷荷ピーク時における地表面のひび割れ状況を示している。

変位振幅 20mm では、ST の杭近傍地盤でひび割れが多く発生しているのに対して、W23 はほとんどひび割れが発生せず、杭と周面地盤の間に隙間が生じている。変位振幅 60mm では、ST、W23 ともにひび割れの発生量が増加し、特に W23 に比べ ST のひび割れの進展が顕著となっている。地表面に生じたひび割れの差は、杭周地盤の剥離深さの差や羽根が通過して杭周地盤が緩んだ領域で生じた地盤の応力状態が異なり地盤変状に違いが生じたと考えられる。

3) 杭の曲げモーメント分布

図 7 に変位振幅 20mm と 60mm の杭体の曲げモーメント分布を示す。W23 の最大曲げモーメントの発生深さは ST に比べて深くなる傾向にある。

4) 杭周面の地盤反力ー杭変位関係

各深さによる杭周地盤反力と杭変位の関係は、杭のひずみより求めた曲げモーメントと曲率の分布から算出した。地盤反力分布は、まず、任意の杭頭変位での曲げモーメント分布を最小 2 乗法によって式 1) に示す 5 次多項式で近似し、次に微分してせん断力、2 階微分して地盤反力を算出した。このとき地表面位置の地盤反力が 0、杭頭せん断力が杭頭荷重となる条件と、杭先端位置 (GL-4.8m) は曲げモーメントが 0 となる境界条件を設定した。

$$M(z) = a_0 + \sum_{i=1}^5 a_i z^i \quad \text{式 1)}$$

ここで、

$$a_0 = M(0) = H \cdot h_t, \quad a_1 = H, \quad a_2 = 0, \quad M(-4.8) = 0$$

$a_3 \sim a_5$: 任意のパラメータ, H : 杭頭荷重, h_t : 杭の突出長

杭変位の算定は次のように行った。任意の杭頭変位における杭曲率の分布を式 2) に示す 5 次多項式で近似した。このとき杭先端での曲率が 0 となる条件とした。

$$\phi(z) = b_0 + \sum_{i=1}^5 b_i z^i \quad \text{式 2)}$$

ここで、

$$\phi(-4.8) = 0, \quad b_0 \sim b_5 : \text{任意のパラメータ}$$

次に、式 2) を 2 階積分することで変位を算出した。このとき地表面位置の変位を実測値、杭先端変位を 0 とした。すなわち、杭変位に関する近似式は式 3) となる。

$$y(z) = y_0 + \theta \cdot z + \sum_{i=0}^5 \frac{1}{(i+1)(i+2)} b_i z^{(i+2)} \quad \text{式 3)}$$

図 8 と図 9 に地表面杭変位が 20mm までと 60mm までの深度 GL-0.5m と GL-1.5m における地盤反力ー杭変位関係を示す。W23 と ST の履歴性状は深さによって異なり、GL-0.5m では深度 GL-1.5m に比べてスリップ性状は大きくなる傾向にある(図 9(a))。また、羽根の有無によって同一変位時における水平抵抗力に違いがあることが確認できる。

5) 羽根の有無による杭周面地盤の状況と剥離深さ

Photo4 は、変位振幅が最大となる 200mm 時の載荷方向の杭背面に生じた隙間から地盤内部を撮影したものである。ST と W23A の杭周地盤の違いにより、杭軸部に付着している土量と周面地盤の凹

Fig.5 Comparison of secant stiffness and hysteretic damping of W23 with those of ST, respectively, at pile head

Fig.6 Crack of the ground surface around the test piles

Fig.7 Comparison of the bending moment distributions (Comparison with or without wings)

凸に違いがあるように見える。また、載荷実験時に杭ー杭周地盤間に生じた剥離深さの実測値は、地表面変位+20mm 時では ST が 180mm に対して W23A が 920mm となり ST に比べ約 5 倍の剥離深さとなった。地表面変位+60mm 時では ST は 1430mm、W23A は 1710mm となり、W23A の方が杭周地盤との剥離が進み、剥離深さも深くなった。

このように、羽根付き杭の杭周地盤反力の性状が羽根の無い杭と異なる原因として、表層部の黒ボク層と風化火山灰層において羽根の通過によって杭周地盤が緩み水平剛性が低下したことや、剥離が深くまで進行したことで杭周地盤反力の履歴性状に差を生じたと考えられる。

3.2 羽根径比の違いによる水平抵抗

図 10 に W23 と W30 の杭頭荷重－地表面杭変位関係を、図 11 に曲げモーメント分布を示す。羽根径比の違いが水平抵抗力、割線剛性および曲げモーメント分布に及ぼす影響は小さいことがわかる。また杭周近傍の地盤変状についても同様となり、羽根径比による影響はあまり見られなかった。載荷実験時に実測した剥離深さは、地表面変位+20mm 時では W30 が 900mm に対して W23A が 920mm、地表面変位+60mm 時では W30 は 1850mm、W23A は 1710mm となり、両杭の剥離深さにも大きな差が無かった。羽根径比の差（約 1.3 倍）が水平抵抗力に与える影響が小さい原因として、2.3 節に記載した W23 と W30 の施工条件および W30 と W23A の剥離深さに大きな違いがないことから、羽根付き杭の水平抵抗は羽根が通過した杭前面近傍地盤での抵抗に支配されるため、本実験の条件では羽根径の差が杭の水平反力に及ぼす影響は小さかったと考えられる。

(a) Depth of GL-0.5m (b) Depth of GL-1.5m
Fig.8 Subgrade reaction - pile displacement relationship until 20mm of reference disp.

(a) Depth of GL-0.5m (b) Depth of GL-1.5m
Fig.9 Subgrade reaction - pile displacement relationship until 60mm of reference disp.

(a) ST

(b) W23

Photo4 The situation inside the ground due to the difference in the presence or absence of pile with wing

Fig.10 Pile head load - reference displacement relationships (Comparison with wing size)

Fig.11 Comparison of the bending moment distributions (Comparison with wing size)

3.3 杭施工後の経時変化による水平抵抗

図 12 に W23 で養生期間（養生期間差 349 日）が違う二つの杭の杭頭荷重－地表面杭変位関係を、図 13 に曲げモーメント分布を示す。施工後、約 1 年経過した W23A の水平抵抗は W23 に対して、杭変位 20mm 時では約 20%（正載荷時と負載荷時の平均）、60mm 時では約 12%（正載荷時と負載荷時の平均）とやや大きくなっているが、養生期間の違いが履歴性状や曲げモーメント分布に及ぼす影響は小さい。また W23A の地盤変状が W23 と違いは見られなかったことから、羽根付き杭の水平抵抗は、1 年程度の養生期間ではその回復は小さい。この原因として、本敷地の表層付近の風化火山灰層の鋭敏比が大きいため、羽根が通過した地盤の回復が小さいためと考えられる。今後、原地盤と羽根により緩んだ地盤での地盤調査を行いさらに検討を行う予定である。

3 章の検討から、本実験での羽根付き杭の水平抵抗力は、羽根の有無による影響が最も大きく、羽根径比の違いや養生期間による影響は極めて小さいことがわかる。

次章では、ST と W23 の杭周地盤反力の割線剛性と履歴減衰に関して検討を行う。

4. 杭周面地盤反力の割線剛性と履歴減衰

本章では、ST と W23 の杭周地盤反力－杭変位の関係から算定した割線剛性と履歴減衰について考察する。

4.1 分析方法

割線剛性と履歴減衰の算定方法を図 14、図 15 に示す。また算定式は式 4)、式 5)を用いた。本章の割線剛性と履歴減衰は、履歴ループが非対称となった場合を考えて第 1 象限と第 3 象限で各々算出した結果を平均化している。ここで割線剛性を K_{ave} 、履歴減衰を h_{eq} とし、同一変位の 2 サイクル目の履歴ループを用いて算定した。

$$K_{ave} = \frac{K_{(+)} + K_{(-)}}{2} \quad \text{式 4a)}$$

$$K_{(+)} = P_{max}/U_{max} \quad \text{式 4b)}$$

$$K_{(-)} = P_{min}/U_{min} \quad \text{式 4c)}$$

ここで、 $K_{(+)}$ ：正載荷 2 サイクル目の割線剛性、 $K_{(-)}$ ：負載荷 2 サイクル目の割線剛性、 P_{max} 、 U_{max} ：正載荷 2 サイクル目の最大地盤反力と最大変位、 P_{min} 、 U_{min} ：負載荷 2 サイクル目の最大地盤反力と最大変位

$$h_{eq} = \frac{\Delta W}{(4\pi W)} \quad \text{式 5)}$$

ここで、 ΔW は 2 サイクル目の消費エネルギー、 W は最大ポテンシャルエネルギーを示す。ただし $W = (W_{(+)} + W_{(-)}) \cdot (1/2)$

4.2 割線剛性と履歴減衰

検討は「黒ボク」で深度 GL-0.1m、0.3m、0.5m と「風化火山灰」で深度 GL-0.7m、1.0m、1.5m の地盤種別と深度の違いで行った。

図 16 に黒ボク、図 17 に風化火山灰の結果を示す。図の縦軸は実数軸、横軸は対数軸で示している。なお、W23 の履歴減衰の算定において、杭変位が 10mm 程度の小さい範囲では地表付近の杭周地盤反力－杭変位関係の履歴形状が不安定となるため誤差を含み信頼性に乏しいとして図では削除している。割線剛性は、羽根の有無と地盤種別に関係なく変位振幅の増加にともなって小さくなる。また ST の履歴減衰は、両地盤とも変位振幅の増加にともない増加傾向にあ

Fig.12 Pile head load - reference displacement relationships
(Comparison with difference of temporal change after construction)

Fig.13 Comparison of the bending moment distributions
(Comparison with difference of temporal change after construction)

Fig.14 Method of calculating the secant stiffness

Fig.15 Method of calculating the hysteresis damping

り、地盤種別による違いは小さい。一方、両地盤の W23 の履歴減衰はやや増加傾向にあるが変化は小さい。

Fig.16 Comparison of secant stiffness and hysteretic damping of W23 with those of ST, respectively, at kuroboku soil

Fig.17 Comparison of secant stiffness and hysteretic damping of W23 with those of ST, respectively, at weathered volcanic ash

図 18 に割線剛性比を、図 19 に履歴減衰比を示す。図は縦軸を ST に対する W23 の算定値の比で、横軸は対数軸で表している。W23 の割線剛性と履歴減衰は、ST の杭変位と同一値で評価できるように線形補間した。割線剛性比は概ね 0.1~0.6 の範囲にあり、土質種別に関係なく杭変位の増加にともない増加し、黒ボク層と風化火山灰層で割線剛性比に差がある。履歴減衰比は、土質種別に関係なく変位振幅の増加にともない概ね一定か減少していく傾向が確認できる。

以上の検討から、羽根無し杭に対して羽根付き杭の杭周地盤抵抗は、地盤深度および地盤種別を考慮して低減する必要がある、今後、羽根付き杭の水平抵抗を評価するうえで、羽根による杭周地盤の緩みを考慮した水平地盤ばねを用いる必要がある。

5. まとめ

羽根付き鋼管杭の各種パラメータを考慮した原位置水平載荷実験を実施した。得られた知見を、以下にまとめて示す。

1) 羽根の有無が水平地盤抵抗に及ぼす影響

羽根付き杭の杭頭水平剛性は、羽根無し杭と比較して小さくなった。また同一変位における羽根付き杭の最大曲げモーメントは羽根無し杭より小さく、発生深度も深くなる傾向を示した。杭周の地盤反力－杭変位関係は、羽根付き杭では載荷初期から羽根無し杭に比

Fig.18 Relations of secant stiffness ratio – displacement amplitude

Fig.19 Relations of hysteresis damping ratio – displacement amplitude

べ小さくなり、杭施工時の羽根の通過による杭周地盤の緩みは杭の水平抵抗に大きな影響を与える。

2) 羽根径の違いが水平地盤抵抗に及ぼす影響

羽根径が異なっても、杭頭水平剛性の骨格曲線、履歴形状および曲げモーメント分布がほぼ同様の性状を示した。また杭近傍の地表面の地盤変状や杭周地盤の剥離深さの差も小さかったことから、本実験の条件（羽根形状、施工状況、地盤構成）では、水平地盤抵抗に及ぼす羽根径比の影響は、羽根の有無に比べて小さい。

3) 経時変化が水平地盤抵抗に及ぼす影響

杭打設から約1年経過した杭の水平抵抗はやや大きくなっているが、履歴性状、曲げモーメント分布および地表面の地盤変状は同様な性状を示した。これより、本実験のような地盤条件の場合、約1年の期間では羽根が通過した杭周地盤の水平抵抗に与える影響は小さい。

4) 杭周面地盤反力の割線剛性比と履歴減衰比

羽根の無い杭に対する羽根付き杭の割線剛性は小さくなるが、割線剛性比は杭変位の増加にともない増加する傾向を示し、その大小は地盤深さと土質の影響を受ける。羽根付き杭の履歴減衰比は、杭変位の増加にともない概ね一定か減少していく傾向にある。

今後の課題として、羽根付き杭の杭周面地盤反力のシミュレーション解析を行い、羽根通過による緩み領域の地盤物性の評価について検討する。

謝辞

本論文をまとめるにあたっては、大阪大学宮本研究室の皆様にご多大なご助力を頂きました。ここに記して感謝の意を表します。なお本研究の一部は、科学研究費助成事業(基盤研究(B):課題番号JP17H03342)の助成を受けたものである

本論文は、文献8)で発表した内容に新たな分析結果を加えたものである。

参考文献

- 1) Tsuchiya Tsutomu : The Trend of a Screwed steel Pile and the Problems in the Future [in Japanese], The Foundation Engineering & Equipment, Monthly, Vol.34 No.11, 2-6, 2006. 11
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) Inoue Namihiko : Recent Trend of Small-Diameter Rotating Intrusive Steel Pipe Pile Construction Method [in Japanese], The Foundation Engineering & Equipment, Monthly, Vol.41 No.2, 36-39, 2013. 2
井上波彦: 小口径回転貫入鋼管杭工法の最近の動向, 基礎工, Vol.41, No.2, pp.36-39, 2013. 2
- 3) Arai Mauricio Jun, Fujii Mamoru, Nagata Makoto, Komatsu Gorou, Koudaira Emi, Effect of Penetration Velocity on Turbulence of Soil around the Screw Pile [in Japanese], Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures, B-I, pp. 685-686, 2004. 8
新井マウリシオ淳, 藤井衛, 永田誠, 小松吾郎, 公平絵美: 回転貫入杭の貫入速度が杭外周地盤の乱れに及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造, B-I, pp.685-686, 2004. 8
- 4) Kuze Naoya, Suemasa Naoki, Inoue Namihiko, and Futaki Mikio, Property Changes of Soil Around a Rotary Press-In Pile with Wings and Lateral Loading Behavior of the Pile [in Japanese], Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol.81, No.727, pp.1455-1465, 2016. 9
久世直哉, 末政直見, 井上波彦, 二木幹夫: 回転貫入により施工され

- る羽根付き杭の周辺地盤の土性変化と水平抵抗特性, 日本建築学会構造系論文集, Vol.81, No.727, pp.1455-1465, 2016. 9
- 5) Mori Gen, Hayashi Masahiro, Shinohara Toshio, Lateral Loading Behavior of Screw Steel Pipe Pile [in Japanese], Japan National Conference on Geotechnical Engineering, Vol.35 No.727, pp.1755-1756, 2000. 6
森玄, 林正宏, 篠原敏雄: 先端翼付き回転貫入鋼管杭の水平抵抗特性, 第35回地盤工学研究発表会, pp.1755-1756, 2000. 6
 - 6) Nagai Hiroshi, Tsuchiya Tsutomu, Ikeda Atsunori, Sato Yuta, and Shimada Masao : Lateral Resistance Characteristics of Screwed Pile with Soil Improvement around Pile Head [in Japanese], Japanese Geotechnical Journal, Vol.11, No.2, pp.127-137, 2016. 3
永井宏, 土屋勉, 池田篤則, 佐藤雄太, 島田正夫: 杭頭周囲に柱状地盤改良を併用した回転貫入杭の水平抵抗力特性, 地盤工学ジャーナル, Vol.11, No.2, pp.127-137, 2016. 3
 - 7) Kobayashi Toshio, Oda Tatsuya, Kashiwa Hisatoshi, Takada Mitsumasa, Nakano Takaharu, and Miyamoto Yuji : Effects of Disturbance around Screw Pile with Wing by Penetration on Lateral Resistance of Pile [in Japanese], Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures- I, pp.551-554, 2013. 8
小林俊夫, 小田達哉, 柏尚稔, 高田光真, 中野尊治, 宮本裕司: 羽根付き鋼管杭貫入時の地盤の乱れが杭の水平抵抗に及ぼす影響, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.551-554, 2013. 8
 - 8) Kobayashi Toshio, Miyamoto Yuji, Yamada Hiroki, Furuta Tsubasa, Nakano Takaharu, Shimamura Atsushi, and Gotou Akihiro : A Study on Lateral Resistance of Screw Pile with Wing by Lateral Load Test (Part1~3) [in Japanese], Summaries of Technical Papers of Annual Meeting, Architectural Institute of Japan, Structures- I, pp.519-524, 2017. 8
小林俊夫, 宮本裕司, 山田浩貴, 古田空翔, 中野尊治, 島村淳, 後藤彰宏: 水平載荷実験による羽根付き鋼管杭の水平抵抗に関する研究 その1~3, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.519-524, 2017. 8.
 - 9) Kashiwa Hisatoshi, Kobayashi Toshio, Miyamoto Yuji : Modeling Method of Lateral Resistance of Steel Pile with Wings in Cyclic Loading Tests [in Japanese], Proceedings of Annual Meeting of Japan Association for Earthquake Engineering 2017, pp2-16, 2017. 11
柏尚稔, 小林俊夫, 宮本裕司: 繰返し水平載荷実験における羽根付き鋼管杭の水平地盤抵抗のモデル化手法, 日本地震工学会・大会-2017 梗概集, P2-16(ポスターセッション), 2017. 11
 - 10) Kashiwa Hisatoshi, Kobayashi Toshio, Miyamoto Yuji : Evaluation of Lateral Resistance of Steel Pile with Wings in Cyclic Loading Tests [in Japanese], AIJ Journal of Technology and Design, Vol.24 No.56, 99-104, 2018. 2
柏尚稔, 小林俊夫, 宮本裕司: 繰返し水平載荷実験における羽根付き鋼管杭の水平抵抗評価, 日本建築学会技術報告集, Vol.24, No.56, pp.99-104, 2018. 2

STUDY ON LATERAL SOIL RESISTANCE AROUND STEEL PIPE PILE WITH WINGS BY STATIC CYCLIC LOADING TESTS

Toshio KOBAYASHI^{*1}, *Takaharu NAKANO*^{*2}, *Hisatoshi KASHIWA*^{*3}
and Yuji MIYAMOTO^{*4}

^{*1} General Manager of Engineering Division, SANSEI Inc.

^{*2} Assist. Prof., Dept. of Architectural Eng., Osaka University, Dr.Eng.

^{*3} Senior Research Officer, National Institute for Land and Infrastructure Management, Dr.Eng.

^{*4} Prof., Dept. of Architectural Eng., Osaka University, Dr.Eng.

1. Introduction

Many types of steel pipe piles with steel spiral or flat wings welded to the pile tip or pile shaft have been developed and put to practical use. Piles with wings are generally driven into the ground by giving torque to the pile shaft during installation. Compared to cast-in-place concrete piles and embedded piles, piles with wings can reduce construction by-products because waste soil reduces. Recently, diffusion of piles with large wings has expanded the range of applications to large buildings. However, the wings that has diameter larger than the pile diameter are known to loosen soil around the pile shaft. The loosened soil may affect the lateral subgrade reaction of the pile. In this study, a cyclic lateral loading test was conducted on a pile with two flat plate-shaped wings in order to understand the following properties for lateral resistance. 1) Effect of the presence or absence of wings, 2) Effect of differences in wing diameter ratio, 3) Effect of aging after installation, 4) Grasp the secant stiffness and hysteresis damping of the steel pipe pile with wings subgrade reaction.

2. Method

This experiment was conducted in Ibaraki Prefecture. The soil deposit at the test site consisted of weak volcanic ash soil. From the ground surface to 0.55 m below ground level (GL) is andosol, from GL-0.55m to GL-2.2m is weathered volcanic ash, from GL-2.2m to GL-3.2m is volcanic ash, and beyond GL-3.2m is sand. Four types of piles were tested. For the test pile, a JIS G 3444 general structural carbon steel (STK) pipe of outer diameter ϕ 267.4 mm $\times$ material thickness t 9.3 mm (steel grade 490) was used. The pile with wings was fabricated by welding two flat plates to the tip of the steel pipe while preparing the edge such that the inclination angle of each wing became 10°. The test piles had a shaft length of 5 m. To measure the bending strain of the pile, strain gauges were attached on the inner surface of the pile. The loading device consisted of a test pile, reaction pile, and hydraulic jack. For the reaction force, the pile heads of these four reaction piles were combined in a square form with H-shaped steel. Test piles are allowed free rotation of the pile head. The lateral displacement of the test pile was measured at two points: the load height and GL+100 mm. The lateral displacement at the position of at GL+100 mm is referred to as "reference displacement". The experiment controlled by reference displacement.

3. Conclusions

The major findings obtained from this study are summarized as follows:

- (1) The lateral resistance of the pile with wings was smaller than that of the pile without wings because of loosening soil around pile by the wings passing.
- (2) The difference in wing diameter between $2.3D_p$ and $3.0D_p$ had little effect on the lateral resistance of the piles. It is considered that the peeling depth has a more dominant influence than the passing region of wings as a factor.
- (3) Even one year after construction, the loosened soil around the pile with wings affected its lateral resistance.
- (4) The secant stiffness of the piles with wings was smaller than that of the pile without wings. Secant stiffness ratio of those piles became larger depending on the pile displacement and was influenced by ground depth and soil type. The hysteresis damping of the pile with wings had little influence by the pile displacement and soil type.

(2018年8月1日原稿受理, 2019年1月22日採用決定)