

乾燥砂地盤における平板羽根付き閉端鋼管杭貫入前後の相対密度の変化に関する研究

STUDY ON CHANGES IN RELATIVE DENSITY BEFORE AND AFTER PENETRATION OF CLOSED-END STEEL PILE WITH PLATE WINGS IN DRY SAND GROUND

小林和嗣 — * 1 宮坂博信 — * 2
山岸邦彰 — * 3

Kazushi KOBAYASHI — * 1 Hironobu MIYASAKA — * 2
Kuniaki YAMAGISHI — * 3

キーワード：
平板羽根付き鋼管杭, 先端閉塞羽根, 砂質土地盤, 模型実験,
コーン貫入抵抗, 貫入率

Keywords:
Steel pile with plate wings, Closed tip pile, Sandy ground, Model experiment, Cone penetration resistance, Advancement ratio

This study shows change in the relative density of the ground calculated from the cone penetration resistance (CPR) of the ground around the pile after rotation penetration of a steel pile with flat plate wings into dry sand ground. As a result of these experiments with the relative density of original soil and wing diameter as parameters, a region occurred where the CPR decreased as the diameter of wings increased; this was particularly pronounced in high relative density soil. The complicated distribution of the CRP after pile penetration was discussed using the advancement ratio.

1. はじめに

回転貫入によって施工される鋼管杭の先端または周面に、螺旋形状や平板形状の羽根を取り付けた杭（以下、羽根付き鋼管杭）は、杭施工時に低騒音、低振動であること、掘削発生土を抑えることができること等の長所を有する理由から、多種開発されている¹⁾。特に、閉端杭の場合は杭貫入時に杭体積分の土が地盤中に押し広げられることにより、圧入杭やサンドコンパクションパイルのように周辺地盤を締め固める効果も期待できる。しかし、羽根付き鋼管杭は貫入に伴い回転する羽根が、杭近傍地盤を乱し^{例え}²⁾、水平地盤反力係数が低下することが指摘されている^{例え}^{3),4)}。しかし、これらの報告は螺旋形状の羽根（以下、螺旋羽根）を対象としたものであり、平板形状の羽根（以下、平板羽根）を対象とした報告は極めて少ない。

杭先端に平板羽根を有する鋼管杭は、杭貫入時に周辺地盤を締め固めるとする報告がある一方、周辺地盤の水平地盤反力係数を低下させるとする報告がある。森ほか⁵⁾は、砂質土および粘性土の実地盤に平板羽根を有する鋼管杭を回転貫入した場合、杭周辺地盤は密度が高まり、N値や一軸圧縮強さが増加する傾向があることを報告している。一方、小林ほか⁶⁾は、表層付近が火山灰粘性土である実地盤において平板羽根を有する鋼管杭の水平載荷試験を実施した結果、羽根のない杭と比較して羽根付き鋼管杭の水平地盤抵抗が減少したことを報告している。杭の設計、施工において、施工条件による地盤特性の変化や杭-地盤間の相互作用の把握は重要である⁷⁾。しかし、平板羽根を有する鋼管杭の貫入に伴う杭周辺地盤における相対密度やコーン貫入抵抗などの硬さを示す地盤の特性の変化、特に砂地盤を対象とした場合についての工学的知見は十分ではない。

そこで本研究では、乾燥砂地盤における平板羽根付き閉端鋼管杭の貫入に伴う地盤の相対密度の変化を明らかにすることを目的とし

て、縮小模型地盤において模型杭貫入後にコーン貫入試験を実施して、杭貫入前後における地盤の相対密度の変化、およびその考察について述べる。

2. 実験概要と実験パラメータ

2.1 実験装置と使用した砂の物理特性

Fig. 1 に実験装置の概要を示す。実験装置は、土槽、杭、ボールねじ、反力ブラケット等により構成されている。土槽は内径 568 mm、深さ 555 mm の鋼製容器であり、杭の貫入深さ 400 mm に対して 155 mm の空気が設けられている。内側表面には土と容器の摩擦力

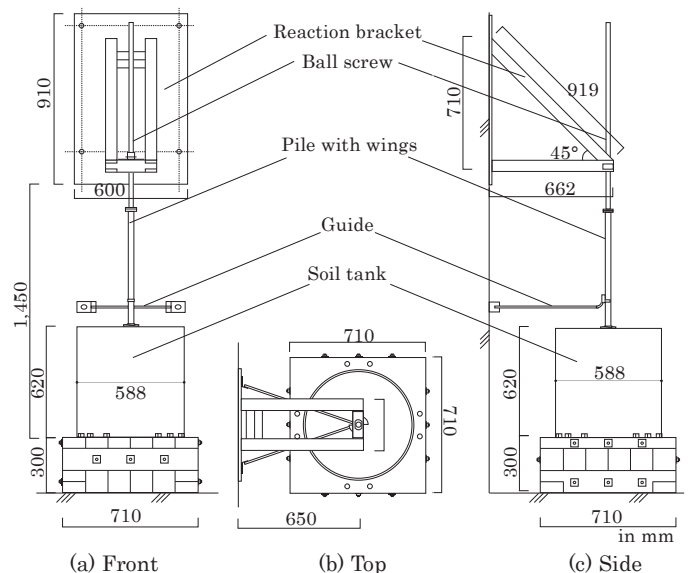


Fig. 1 Experimental device over view

* 1 金沢工業大学大学院工学研究科 大学院生
(〒 924-0838 石川県白山市八東穂 3-1)

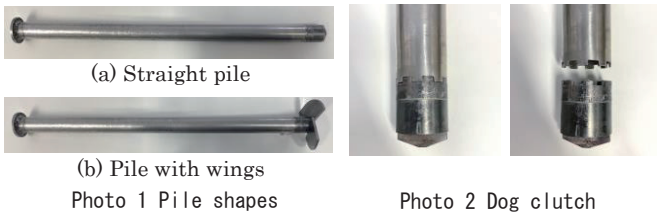
* 2 尙宮坂設計 修士 (工学)

* 3 金沢工業大学建築学科 教授・博士 (工学)

* 1 Grad. Student, Graduate School of Eng., Kanazawa Institute of Technology

* 2 Miyasaka Engineer Office Corp., M.Eng.

* 3 Prof., Dept. of Architecture, Kanazawa Institute of Technology, Dr.Eng.



(a) Straight pile
(b) Pile with wings
Photo 1 Pile shapes Photo 2 Dog clutch

Table 1 Physical properties of silica sand

Physical property	Value
Soil particle density ρ_s (g/cm ³)	2.632
Maximum density ρ_{max} (g/cm ³)	1.523
Minimum density ρ_{min} (g/cm ³)	1.184
Maximum void ratio e_{max}	1.223
Minimum void ratio e_{min}	0.728
D_{50} (μ m)	277
Uniformity coefficient U_c	1.435

を低減するため、四フッ化エチレンのシートを張り付けた。杭は、外径 34 mm、厚さ 1.65 mm、長さ 575 mm のステンレス鋼管である (Photo 1)。羽根は厚さ 4.5 mm の平鋼を扇状に切断したものを、角度 10° の傾斜をつけて杭先端に溶接した。杭先端には Photo 2 のようにドッグクラッチを施し、杭先端の形状を変更できるようにしている。杭頭部をボールねじと緊結して回転させることにより、1 回転あたりの杭の貫入量が一定となるようにした (Fig. 1)。杭の貫入に伴う鉛直方向の押し込み反力は、反力ブラケットによりとった。また、杭貫入時の歳差運動を抑制するために、ガイドを 1 ヶ所取り付けた。本実験に用いる珪砂 7 号の土質試験から得られた物理特性を Table 1 に示す。これらの結果は既往の研究結果である例えば川村ほか⁸⁾と調和的である。また、Fig. 2 に使用した珪砂をレーザ回折式粒子径分布測定装置 SALD (島津製作所) により測定した粒度分布と粒径加積曲線を示す。この曲線から推定される D_{50} は 277 μ m、均等係数は 1.435 である。

2.2 実験パラメータと杭貫入方法

実験パラメータは模型地盤の相対密度 D_r と杭先端形状である。Table 2 にパラメータの一覧を示す。相対密度 D_r の目標値は 50%、60%、70%、80% の 4 種類である。以降、本論ではこれらの目標値に対する相対密度のパラメータの呼び名を $D_r 50 \sim D_r 80$ とする。実際に作製された模型地盤の相対密度 D_r の一覧を Table 3 に示す。杭先端形状は Fig. 3 に示すように、羽根のないストレート杭 (ST 杭)、外径が杭軸径 (34 mm) の 2 倍の羽根が付いた杭 (D2 杭)、同様に外径が杭軸径の 3 倍の羽根が付いた杭 (D3 杭)、の 3 種類である。杭の貫入には、ボールねじと杭頭部を緊結した杭体を人力により回転させて貫入する方法を用いた。Table 4 に D2 杭と D3 杭貫入時における貫入率 sp をそれぞれ示す。螺旋羽根の貫入率 sp は羽根 1 巻き当たりの高さ p に対する羽根 1 回転あたりの貫入量 s の比とされているが (例えば⁹⁾、平板羽根は Fig. 3 に示すように羽根の形状が半回転毎に繰り返すため、羽根の高さ p (Fig. 3) と半回転あたりの貫入量 s から貫入率 sp を計算した。本報告は、杭貫入に伴う周辺地盤の相対密度の変化を把握することを目的とするが、模型地盤からの乱さない試料の採取が困難であるため、相対密度と相関の高いコーン貫入抵抗から相対密度を推定する。Fig. 4 に示すようにコーン貫入試験 (CPT) の測点を、杭中心から半径 32, 60, 110, 160, 210 mm の位置に、かつ各測点の間隔をできるだけ離れた位置に設定した。小林ほか

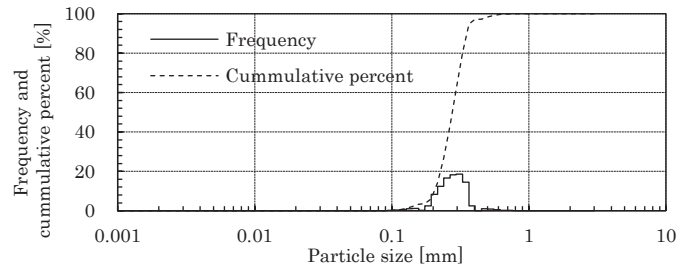


Fig. 2 Grain-size distribution and its accumulation

Table 2 Experimental parameters

Parameter	Value and item
Target relative density (%)	50, 60, 70, 80 Straight (ST)
Pile type	Wings with two times diameter of pile (D2) Wings with three times diameter of pile (D3)

Table 3 Relative densities (%) used in the experiments

Case name	Target relative density	Pile type			
		G (No pile)	ST	D2	D3
$D_r 50$	50	49.7	50.0	51.1	51.0
$D_r 60$	60	60.0	60.8	60.2	60.2
$D_r 70$	70	69.7	70.0	70.0	70.0
$D_r 80$	80	80.2	80.0	80.0	80.2

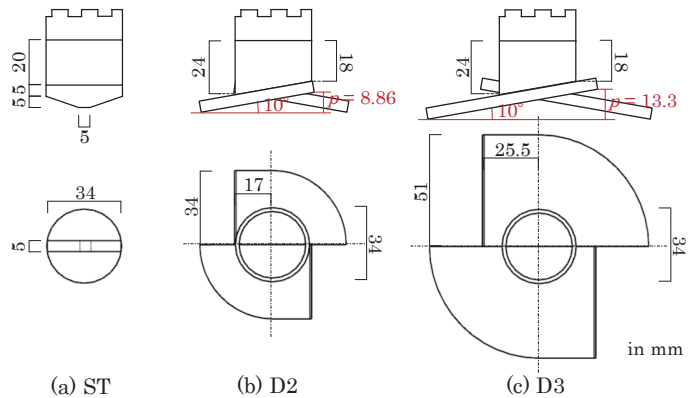


Fig. 3 Three types and size of pile tips

Table 4 Advancement ratio for pile tip types

Pile tip type	s [mm]	p [mm]	sp
D2	8.00	8.86	0.903
D3	12.5	13.3	0.941

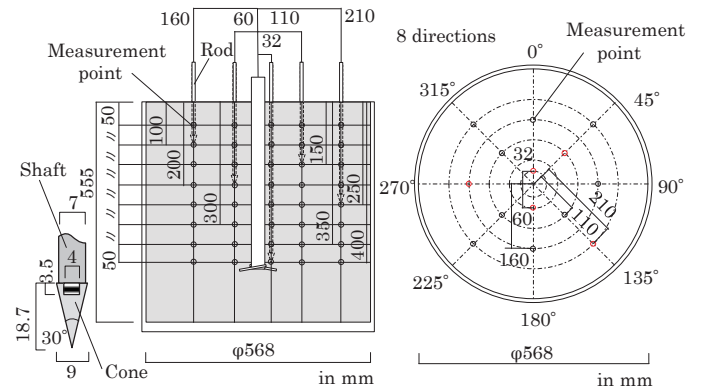


Fig. 4 Measurement points of cone penetration test (CPT)

¹⁰⁾ はコーンの先端角が鋭角であるほど周囲のひずみが小さくなる、またコーン半径の 2.5 倍程度離れた部分では土の破砕がほとんど生じないと報告しており、本報告では先端角 30° のコーンを用いて、鋼管杭からコーン半径の約 3 倍離れた地点を杭最寄りの測定点(32 mm)として CPT を行った。5 種類の半径において 4 ヶ所ずつ 90 度の角度の位置に測点を設け、これらの平均値を各半径のコーン貫入抵抗 q_c とした。しかし、半径 32, 60 mm で CPT を実施した結果、1 回目の q_c が 2 回目以降の q_c に比べて若干高くなる傾向が見られた。この 2 半径については、1 回目の CPT による地盤変状が生じたと考えられることから、CPT の実施箇所を 1 点のみとした。

2.3 模型地盤の作成方法

模型地盤の作成には、均質な地盤を作製するために考案した土槽落下法¹¹⁾を適用した。土槽落下法は、砂を緩詰めした土槽を吊り治具に設置し、5 mm の高さから治具ごと自由落下させた後に、沈下した地表面に砂を補充する作業を、所定の相対密度になるまで繰り返し行う方法である。自由落下により土槽全体にほぼ同一の上下方向加速度が生じることから、この方法により一様な地盤を構築することができる。Fig. 5 に実際に作成した D_r 50 の地盤における 4 点のコーン貫入抵抗 q_c の平均値と標準偏差を、杭中心からの半径 r_c ごとに示す。 q_c のばらつきが小さいことがわかる。

3. 実験結果

3.1 杭貫入前後の相対密度比

Table 3 に示すように、作成した模型地盤の相対密度 D_r と目標の D_r とは最大で数%の差異が生じており、完全に一致していない。 D_r がコーン貫入抵抗 q_c に及ぼす影響は大きい。杭貫入前後の q_c を比較するには、模型地盤の q_c を目標の D_r の q_c に換算した後に比較する方が適切であると考えられる。そこで、実験から得られた q_c を目標とする相対密度 D_r の地盤における q_c に換算して比較する。換算方法について以下に記す。砂地盤におけるコーン貫入抵抗と相対密度の関係として、伊藤ほか¹²⁾はコーン貫入抵抗を有効拘束圧の 2 乗根と相対密度の 2 乗で除した値が、最大間隙比と最小間隙比の差と比例関係にあるとしている。しかし、伊藤ほかの関係と本実験の結果との間に差が見られたため、杭末貫入地盤における相対密度 D_{r0} と杭末貫入地盤におけるコーン貫入抵抗 q_{c0} における関係式を導出し、この関係式から q_c を換算した。Fig. 6 (a) に、例として深さ 0.15 m における D_{r0} と q_{c0} の関係を示す。 D_{r0} に対して q_{c0} は指数関数的に増加することがわかる。そこで、 q_{c0} が D_{r0} と深さ H に関する係数 $c_1(H)$ 、 $c_2(H)$ を用いた式(1)の関係にあると仮定して $c_1(H)$ 、 $c_2(H)$ を回帰計算し、 D_{r0} と杭貫入後の相対密度 D_{r1} における q_c の比を深さ毎に算出する。

$$q_c(H) = c_1(H)10^{D_{r1}c_2(H)} \quad (1)$$

この比を測定値の q_c に乗じることにより、目標とする相対密度 D_r の地盤における q_c に換算する。Fig. 6 (a) に、 D_r に対する q_c の回帰式(赤実線)を例示する。また、Fig. 6 (b) に深さ H に対する回帰係数 $c_1(H)$ 、 $c_2(H)$ の関係を示す。式(1)の回帰式を適用した結果、目標とする相対密度 D_r の地盤に換算した q_c は、実験から得られた q_c の 0.929~1.017 倍の範囲となった。

換算した q_c から式(1)を用いて相対密度を計算し、杭貫入前後の地盤の相対密度を比較する。Fig. 7 に杭貫入前に対する貫入後の相対

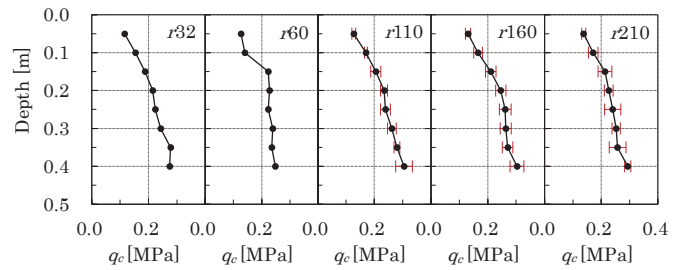


Fig. 5 Cone penetration resistance in D_r 50 ground (No Pile)

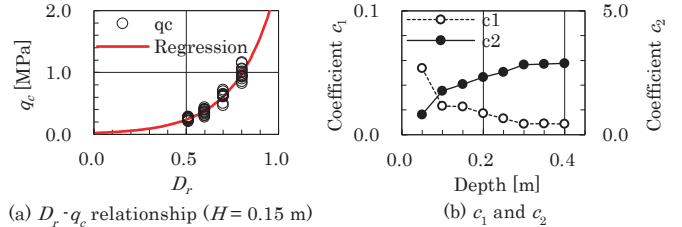


Fig. 6 D_r - q_c relation regression curve and coefficient c_1 and c_2

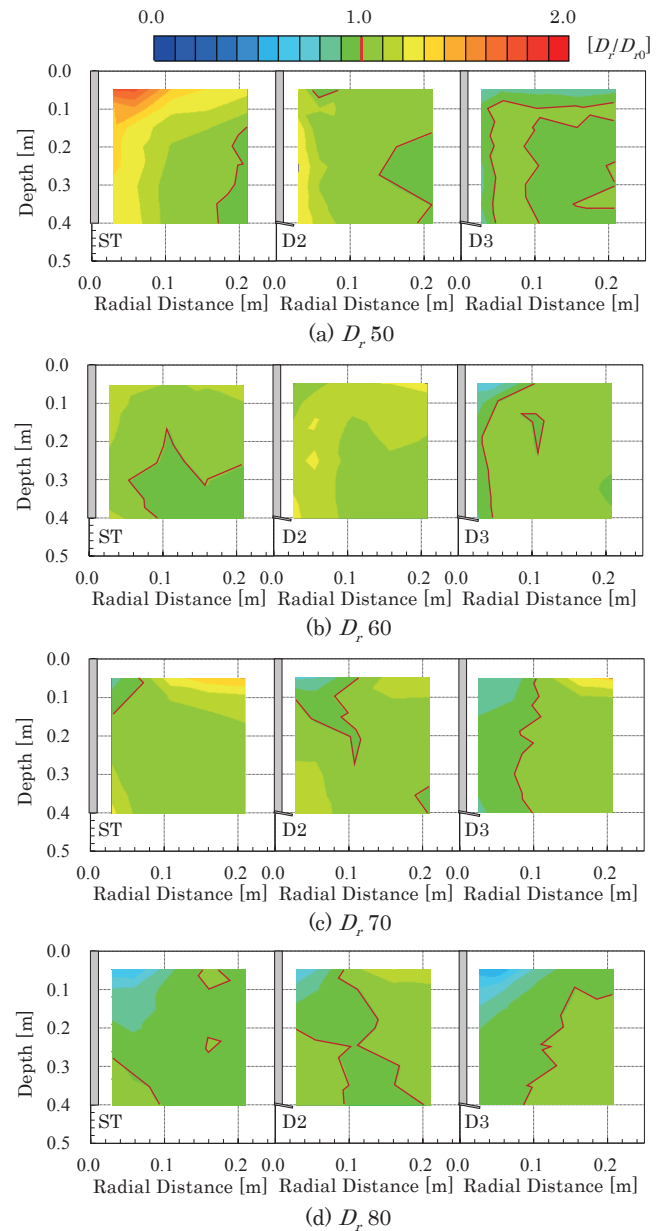


Fig. 7 Relative density ratio before and after pile penetration

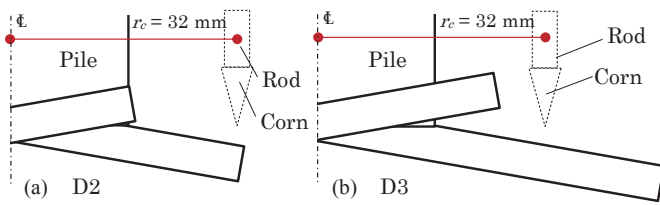


Fig. 8 Difference in relative position of CPT for different wing diameters

密度比 R_{Dr} を、杭貫入前の地盤における目標相対密度 D_r および杭先端形状毎に、それぞれ示す。コンター図内の赤線は相対密度比 $R_{Dr} = 1.0$ を示し、1.0 未満は相対密度の減少を、1.0 以上はその逆を意味する。 $D_r 50$ 、 $D_r 60$ の地盤において、ST 杭貫入後の杭周辺の R_{Dr} が増加する。特に相対密度の小さい地盤ほど杭頭付近における R_{Dr} の増加が顕著にみられる。一方、D2 杭貫入後の杭周辺地盤においても R_{Dr} が増加する領域は見られるが、杭頭部においては R_{Dr} が一部減少している。さらに羽根径の大きい D3 杭貫入時は、深さとは無関係に R_{Dr} が減少する傾向がみられる。 $D_r 50$ 、 $D_r 60$ の地盤においては D3 杭を除くと杭近傍地盤における R_{Dr} の増加が見られるが、 $D_r 70$ 、 $D_r 80$ の地盤においてはすべての杭先端形状に対して杭頭部の R_{Dr} が減少する領域がある。相対密度の大きな地盤において杭頭部の相対密度比が減少する理由は、杭貫入時の羽根の攪乱により羽根の上側にある土に体積膨張が生じ、相対密度の減少が生じると同時に、杭直下の地盤が圧縮されて羽根の上側の土が主働崩壊を起こしたことが原因であると考えられる。これは、相対密度の高い地盤に杭を貫入すると、地表面地盤の盛り上がりや杭の極近傍がすり鉢状の窪みを生じる観察結果から推察される。

3.2 杭近傍におけるコーン貫入抵抗の変化

3.1 節に示した杭貫入前後の相対密度比の結果から、D2 杭貫入時と D3 杭貫入時の相対密度比の分布傾向は杭近傍において大きく異なることがわかる。この要因の一つに、羽根径の違いにより羽根に対する測点の位置関係が異なることが考えられる。Fig. 8 に D2 と D3 に対する CPT の測点 $r_c = 32 \text{ mm}$ の位置関係を示す。D2 は羽根外周部においてコーン貫入抵抗 q_c が計測されているが、D3 は羽根上部において測定されている。そこで、羽根と測点の位置関係による q_c の変化を確認することを目的として、3.1 節に示した実験とは別に、内径 200 mm の塩化ビニル製円筒容器を用いて相対密度 50% の地盤を作成し、杭貫入前後において杭近傍の q_c を詳しく計測する実験を行った。CPT の計測位置は 10 mm 毎に $r_c = 30 \sim 80 \text{ mm}$ の位置とした (Fig. 9)。なお、測点間隔が極めて小さいため、計測毎に模型地盤を作成し直して CPT を実施した。実際に作成した模型地盤の相対密度 D_r はすべて 50.1% であった。Fig. 10 に内径 568 mm の土槽と内径 200 mm の土槽においてそれぞれ作成した地盤における D2 杭貫入時の q_c の結果を示す。これらの結果から、土槽の内径の変化に対する q_c の変化は小さいと考えた。

Fig. 11 に杭未貫入時、および D2、D3 杭貫入時における q_c の分布を示す。杭未貫入時において q_c は小さく、杭の貫入により q_c は増大する。D2 杭貫入時の q_c は羽根先端部において顕著に増加している。同様に D3 杭貫入時の羽根先端部においても q_c は増加する。この結果から、羽根の縁辺部において q_c が増加する領域があると考えられる。

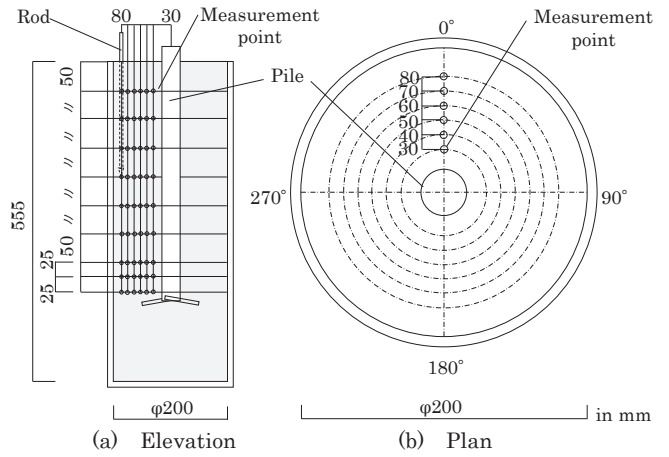


Fig. 9 Measurement points of cone penetration test (CPT)

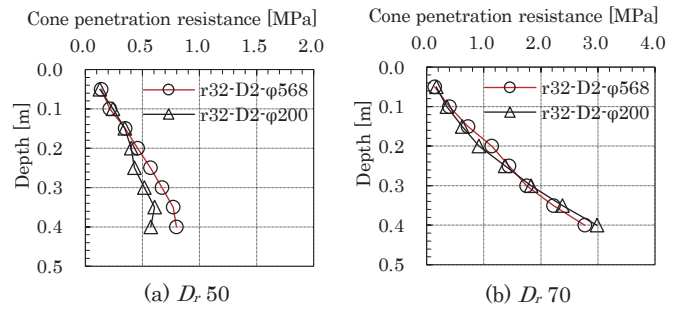


Fig. 10 Cone penetration resistance of model grounds with $D_r 50$ and $D_r 70$ in $\phi 200$ and $\phi 568$ soil tanks

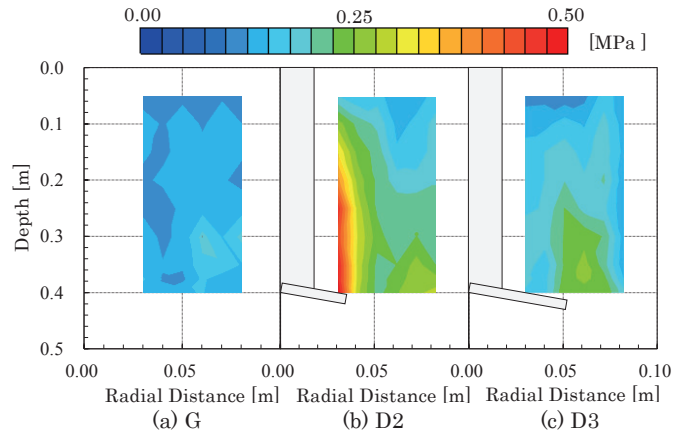


Fig. 11 Cone penetration resistance distribution around pile center

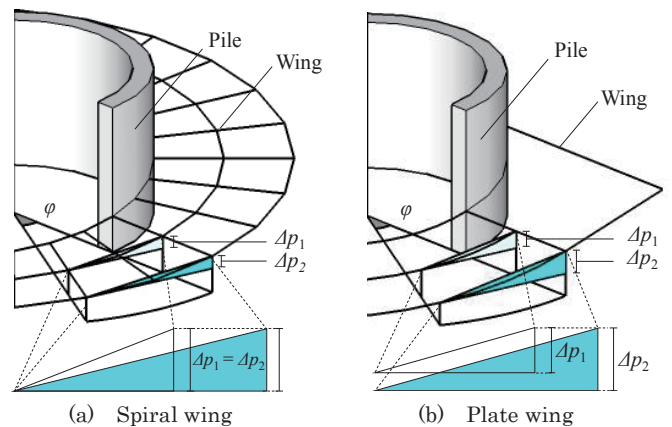


Fig. 12 Difference in Δp for wing shapes

3.3 貫入率に基づく平板羽根貫入後のコーン貫入抵抗分布の考察

次に、平板羽根の貫入率について考察する。Fig. 12 に螺旋羽根と平板羽根のピッチの概念図を示す。螺旋羽根の羽根の高さは、杭軸芯から半径方向の距離に関わらず一定であるが (Fig. 12 (a)), 平板羽根のそれは一定とはならず変化する (Fig. 12 (b)). そのため、螺旋羽根の場合、羽根 1 巻き当たりの高さ (ピッチ) p は一意に定まるが、平板羽根の場合、 p は様々な値となる。接線方向に対する平板羽根の高さは Fig. 13 に示すように曲線的に変化するため、微小回転角 $\Delta\theta$ だけ杭を回転貫入した場合における羽根の高さの差 Δp に対する貫入量 Δs の比を平板羽根の貫入率 $\Delta s/\Delta p$ と定義する。Fig. 13 を用いて $\Delta s/\Delta p$ を導出すると、 $\Delta s/\Delta p$ は結果的に式(2) によって得られる。

$$\frac{\Delta s}{\Delta p} = \frac{s}{\pi x \tan \theta_w} \quad (2)$$

ここに、 s は半回転当たりの貫入量 (貫入ピッチ)、 x は Fig. 13 における x 座標、 θ_w は平板羽根の傾斜角、である。

このように、Table 4 に示した貫入率 s/p は平板羽根の言わば代表値となるが、D2 杭と D3 杭の貫入率の分布は異なる。貫入率の影響を把握するためには異なる貫入率の分布によるコーン貫入抵抗 q_c の傾向を把握する必要がある。そこで、Table 4 の D2, D3 杭に設置した貫入ピッチ s のボールねじを付け替えて杭貫入を行った後に CPT を実施した。Table 5 に実験パラメータを示す。貫入ピッチが 8 mm のものを S2, 12.5 mm のものを S3 と呼ぶ。杭近傍のコーン貫入抵抗を把握するため、前出した小径の土槽を用いて実験を実施した。CPT を杭中心からの半径 $r_c = 32$ mm, 60 mm の位置において深さ 50 mm 毎に実施した。本実験における目標相対密度 D_r を 70% とする。

式 (2) より算出した $\Delta s/\Delta p$ の分布を Fig. 14 に示す。羽根径と貫入ピッチの組み合わせにより $\Delta s/\Delta p$ は異なる。図中赤線は $\Delta s/\Delta p = 1.0$ を示す。一点鎖線は 2.2 節で定義した貫入率 s/p を示したものである。貫入率 $\Delta s/\Delta p$ は平板の傾斜方向 (Fig. 14 に示す上下方向) に対して同一となる。杭が回転すると、ある半径の地点において貫入率が連続的に変化する状態が生じていることになる。なお、青点線で囲まれた領域は回転に関わらず常に $\Delta s/\Delta p > 1.0$ であることを意味する。

Fig. 15 にコーン貫入抵抗 q_c の分布を示す。なお、G は杭未貫入地盤における q_c である。D2 (Fig. 15 (a)) の場合、S2 より S3 の方が q_c は小さい、この傾向は杭中心からの半径 r_c が小さい方が顕著である。表層付近においては杭未貫入地盤より杭貫入後の q_c は小さくなるが、GL -200 mm 以深においてはその逆の傾向を示す。螺旋羽根の杭を貫入すると、 $s/p > 1.0$ の場合、羽根下面の土が下方へ押され、上面に空隙が生じると報告されている¹⁹⁾。同様に、平板羽根について考えると、 $\Delta s/\Delta p > 1.0$ の領域において、羽根下面は圧力増加、上面は圧力減少が生じ、 $\Delta s/\Delta p < 1.0$ の領域においてはその逆の傾向となると考えられる。Photo 3 は実際の羽根表面の摩耗の様子である。D2 上面 (a) は羽根の外側の黒皮が、D3 下面 (b) は内側の黒皮が、それぞれ直線的に摩耗している。このことは羽根の位置で異なる $\Delta s/\Delta p$ によって土に対する圧力が変化する証左と言える。D3 (Fig. 15 (b)) において、S3 の q_c が S2 より小さくなることは D2 (Fig. 15 (a)) と同じ傾向である。S2 と S3 の q_c の分布が大きく異なる理由として、 $\Delta s/\Delta p = 1.0$ の位置が異なることが考えられる。S3 の場合に $\Delta s/\Delta p = 1.0$ の位置は杭外径より外側となるため、青点線内の領域において圧力減少

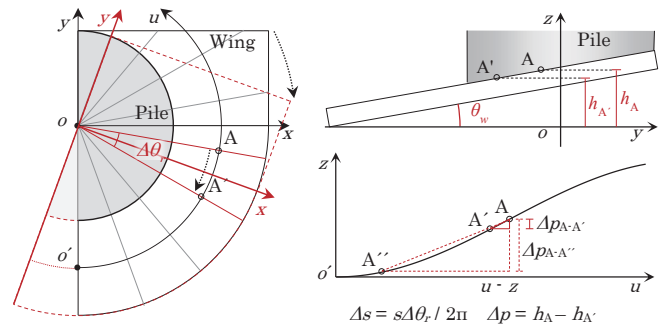
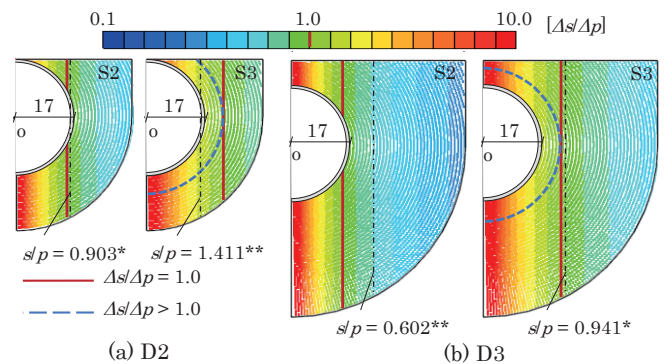


Fig. 13 Penetration pitch of plate wings

Table 5 Experimental parameters

Parameter	Value or item
Penetration pitch s (mm)	8.0 (S2), 12.5 (S3)
Pile tip type*	D2, D3



* s/p to shown in table 4

** Calculated s/p from table 4

Fig. 14 $\Delta s/\Delta p$ distribution on plate wing

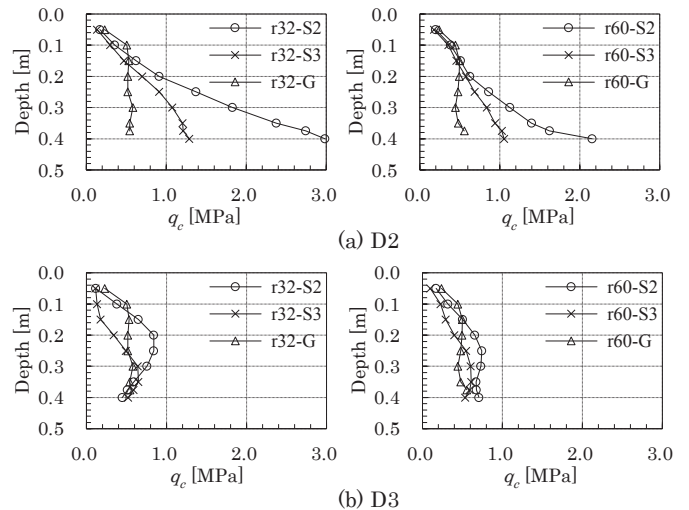
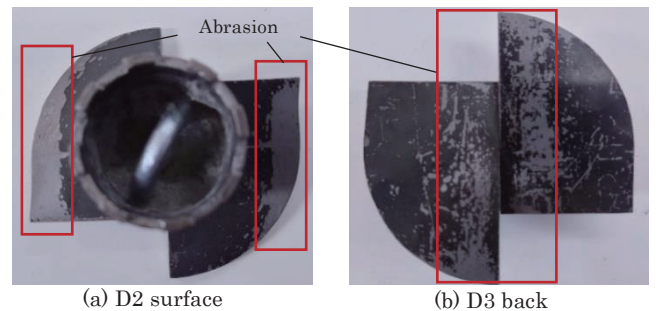


Fig. 15 Cone penetration resistance for different advancement ratio



(a) D2 surface

(b) D3 back

Photo 3 Abrasion of mill scale

が生じて、杭近傍の q_c が小さくなったと考えられる。

4. まとめ

乾燥砂地盤における平板羽根付き閉端鋼管杭の貫入に伴う地盤の相対密度の変化を明らかにすることを目的として、縮小模型地盤において模型杭貫入前後にコーン貫入試験を実施した。その結果、以下の知見が得られた。

- (1) 杭近傍地盤のコーン貫入抵抗は、原地盤の相対密度が 60%以下、かつ羽根径が杭径の 2 倍の場合に相対密度は増加するが、他のケースでは相対密度が減少する部分が見られる。特に、杭頭においてその傾向が顕著である。
- (2) 平板羽根における貫入率は羽根面内において変化し、実験後の羽根の摩耗の様子から、貫入率 1.0 を境として羽根近傍の地盤に圧力変化が生じているものと考えられる。
- (3) 平板羽根を有する鋼管杭においても羽根面内における貫入率の分布が変化することにより杭周辺地盤のコーン貫入抵抗は変化する。

謝辞

本研究を進めるにあたり、杭や先端羽根や反力治具の製作に対して、金沢工業大学プロジェクト教育センターの太田誠鉄氏、岡田勲氏から多大なご支援を頂きました。また、元学部生の松山深咲氏には、模型地盤作成から実験、データ整理に至るまで多大なご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

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) 新井マウリシオ淳，藤井衛，永田誠，小松吾郎：サーモグラフィを用いた回転貫入杭周囲の土の乱れに関する研究，東海大学紀要工学部，Vol. 45, No. 2, pp. 47-51, 2005
- 3) Kuze, N., et al.: Influence of Wings Shape and Cyclic Loading on Lateral Loading Behavior of a Rotary Press – in Pile with Wings in Volcanic Cohesive Soil, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 84, No. 758, pp. 531-539, 2019. 4 (in Japanese)
久世直哉，末政直見，二木幹夫：火山灰粘性土における羽根付き杭の水平抵抗特性に羽根形状及び繰り返し載荷が及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，Vol. 84, No. 758, pp. 531-539, 2019. 4
- 4) Kuze, N., et al.: Property Changes of Soil Around a Rotary Press—in Pile with Wings and Lateral Loading Behavior of the Pile, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 81, No. 727, pp. 1455-1465, 2016. 9 (in Japanese)
久世直哉：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) 森玄，林正弘，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) Kobayashi, T., et al.: Study on Lateral Soil Resistance around Steel Pipe Pile with Wings by Static Cyclic Loading Tests, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), Vol. 84, No. 759, pp. 639-647, 2019. 5 (in Japanese)
小林俊夫，中野尊治，柏尚稔，宮本裕司：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，日本建築学会構造系論文集，Vol. 84, No. 759, pp. 639-647, 2019. 5
- 7) 大谷順，菊池喜昭：杭基礎の鉛直荷重～変位特性の評価入門 6. 杭基礎の施工に伴う杭体および周辺地盤の応力変化，土と基礎，Vol. 48, No. 6, pp. 41-46, 2000. 6
- 8) 川村政史，織袋信明，藤井衛，田村昌仁，国府田誠：回転貫入杭を用いたサウンディングに関する実験研究 (3)，日本建築学会大会学術講演梗概集，構造 I, pp.487-488, 2001. 9
- 9) Kouda, M., et al.: Fundamental Study on Penetration And Bearing Capacity of Screw Pile with Helical Wings, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 601, pp. 91-98, 2006. 3 (in Japanese)
国府田誠，佐藤秀人，刑部徹，国司基，永田誠，平田尚，田村昌仁：螺旋羽根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，No. 601, pp. 91-98, 2006. 3
- 10) 小林泰三，深川良一，小林俊一，柿田隆弘：コーン貫入による砂地盤の変形機構，土木学会論文集，No. 757/III-66, pp. 73-87, 2004. 3
- 11) 小林和嗣，宮坂博信，山岸邦彰：乾燥砂地盤における平板羽根付き閉端鋼管杭の貫入による地盤物性の変化に関する研究，日本建築学会北陸支部研究報告集，Vol. 66, 2023. 7
- 12) 伊藤竹史，原田健二，野田洋，石原研而，塚本良道：砂地盤コーン貫入抵抗値 q_c と相対密度 D_r の関係について，土木学会第 60 回年次学術講演会講演概要集，Vol. 3, pp. 3-4, 2005. 9
- 13) Kuze, N., et al.: Influence of Construction Conditions and cyclic Loading on Lateral Loading Behavior of a Rotary Press—in Pile with Wings, Journal of Structural and Construction Engineering (Transactions of AIJ), No. 774, pp. 1045-1054, 2020. 8 (in Japanese)
久世直哉，末政直見，二木幹夫：施工条件及び繰り返し載荷が羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響，日本建築学会構造系論文集，Vol. 85, No. 774, pp. 1045-1054, 2020. 8

[2023 年 10 月 4 日原稿受理 2023 年 11 月 29 日採用決定]