

粘性土地盤における羽根付き杭の水平抵抗特性

令和3年3月

久世直哉

目次

1. はじめに.....	1
1.1. 羽根付き杭の歴史.....	1
1.2. 参考文献.....	3
2. 既往の研究報告.....	4
2.1. 既往の研究報告の概要.....	4
2.2. 第2章のまとめ.....	8
2.3. 参考文献.....	9
3. 検討課題の設定.....	11
3.1. 羽根付き杭の施工に伴う周辺地盤の土性変化.....	11
3.2. 羽根付き杭の貫入メカニズム.....	12
3.3. 杭の水平抵抗特性の評価方法.....	15
3.4. 本論文における検討課題（第3章のまとめ）.....	16
3.5. 本論文の構成.....	16
3.6. 参考文献.....	18
4. 羽根付き杭の施工に伴う杭周辺地盤の土性変化.....	20
4.1. 目的および検討方針.....	20
4.2. 検討内容.....	20
4.3. 試験条件.....	23
4.4. 密度分布の変化.....	27
4.5. 圧密特性の変化.....	29
4.6. 圧縮強度特性の変化.....	31
4.7. 第4章のまとめ.....	33
4.8. 参考文献.....	34
5. 羽根付き杭の施工に伴う杭周辺地盤の挙動.....	35
5.1. 目的および検討方針.....	35
5.2. 検討内容.....	35
5.3. 透明地盤を用いた施工試験による地盤の押拵げ状況の可視化.....	35
5.4. 掘り起こしによる杭周辺地盤における空洞発生状況の目視観察.....	47
5.5. 第5章のまとめ.....	55
6. 羽根形状が羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響.....	57
6.1. 目的および検討方針.....	57
6.2. 検討内容.....	57
6.3. 孔内水平載荷試験による地盤の水平抵抗特性.....	57
6.4. 実大杭の水平載荷試験による杭の水平抵抗特性.....	61

6.5.	第6章のまとめ	72
6.6.	参考文献	73
7.	施工条件が羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響	74
7.1.	目的および検討方針	74
7.2.	検討内容	74
7.3.	孔内水平載荷試験による地盤の水平抵抗特性	74
7.4.	実大杭の水平載荷試験による杭の水平抵抗特性	78
7.5.	歳差運動が生じた杭の水平抵抗特性	84
7.6.	第7章のまとめ	88
7.7.	参考文献	89
8.	繰り返し載荷が杭の水平抵抗特性に及ぼす影響	90
8.1.	目的および検討方針	90
8.2.	検討内容	90
8.3.	実大杭の水平載荷試験による杭の水平抵抗特性	90
8.4.	第8章のまとめ	94
8.5.	参考文献	95
9.	羽根付き杭の水平抵抗特性の評価方法に関する検討	96
9.1.	目的および検討方針	96
9.2.	検討内容	97
9.3.	数値解析モデルにおける D_w / D_p および s/p の影響	102
9.4.	第9章のまとめ	121
9.5.	参考文献	122
10.	結論	124
11.	謝辞	127

1. はじめに

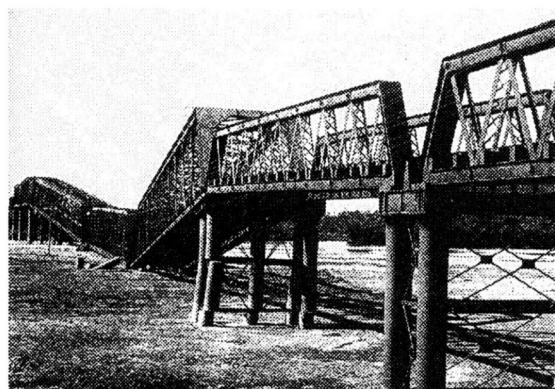
1.1. 羽根付き杭の歴史

羽根付き杭とは、主に鉄製の杭の先端付近にスクリー機能を期待する羽根を有する杭であり、スクリーパイルとも呼ばれている。

羽根付き杭は、アイルランドの技術者であったアレキサンダー・ミッチェル (Alexander Mitchell) の考案によるもので 1833 年に特許が取得された¹⁾。最初に適用されたのは、1840 年にイングランドのフリーウッドでミッチェルによって建設された灯台の基礎である。1847 年には、初めて栈橋へ適用された。アイルランドのウェックスフォード港でミッチェルによって建設されたジェットイ栈橋である。その後、橋りょうの基礎などに適用されるなど、広く使用されることとなった。

日本国内における最初の適用例は、大阪の高麗橋であった。高麗橋は、1870 年 (明治 3 年) に完成したものであり、この橋の部材は、すべてイギリスのハンディーサイド社で製作されたものが輸入された。当時、橋りょうの下部工には、パイルベントとして木杭が採用されていることが多かったが、腐食による耐用年数の短さへの対応のため、鋼製の羽根付き杭の採用が広がったと言われている。

しかし、1891 年 10 月 28 日に発生した濃尾地震により、岐阜県にある長良川鉄橋の橋脚が完全に破壊した。具体的には、地表面の直上および地中の鑄鉄管の継手部近傍で、折損が確認された。これ以降、羽根付き杭の橋りょうへの適用は減少した。



a)濃尾地震による被害状況 (1891 年)¹⁻²⁾ b)現在の様子 (ウエル基礎, 2020 年撮影)

写真 1.1 長良川鉄橋

なお、濃尾地震以降も港湾施設においては、羽根付き杭の施工上のメリットが相対的に大きいなどの理由から採用が続いていた。また、1901年（明治34年）に官営八幡製鉄所が稼働開始となり、羽根付き杭の使用材用である鋼材の一部が輸入品から国産品へと切り替えられ、国内需要への対応が図られていた。

その後、19世紀後半から20世紀半ばに、安価で大量供給可能なコンクリート杭の登場により、羽根付き杭の需要は世界的に衰退したと言われているが、日本国内では、20世紀の後半に建築分野において、住宅用の基礎として鋼管杭の先端にらせん状の羽根を取り付けた杭が開発され、油圧駆動式の施工技術の開発と共に再び需要が広まった¹⁻³⁾。

回転貫入により埋設される羽根付き杭は、小型の施工機械の開発に伴って狭隘地における施工が可能であること、無排土、低騒音・低振動であり、セメントなどの副資材が不要であるため二酸化酸素の排出量削減にも貢献することができるなど、環境負荷を低減できることなどの利点を有しており、現在、広く普及している。

1.2. 参考文献

- 1-1) 五十畑弘：鉄製杭基礎とスクリーパイルに関する歴史的調査，土木学会論文集，No.744, IV-61, pp139-150, 2003.10
- 1-2) Milne, J. and Burton, W. K.: The Great Earthquake in Japan Lane, Crawford & G, Yokohama, 1891
- 1-3) 回転杭を巡る四方山話：千代田工営, 2019

2. 既往の研究報告

2.1. 既往の研究報告の概要

(1)鉛直方向の抵抗力特性について

第 1 章で紹介した通り，日本国内で建築分野における羽根付き杭は，住宅用の基礎として軸径 100mm から 300mm 程度の杭が用いられたことがはじまりのようである。一般社団法人日本建築学会および公益社団法人地盤工学会の大会梗概集や技術報告集における羽根付き杭に関する最初の報告は，1986 年の板谷・吉田ら²⁻¹⁾による羽根付き杭の回転貫入による施工性と鉛直支持力に関する報告であった。

その後，吉田らは，中川らと共に，鉛直支持力（押し込み方向の抵抗力）および引抜き抵抗力に関する実験的および解析的な検討結果を報告している^{2-2)~2-10)}。これらの報告において用いられた杭は，らせん状の羽根が 1 枚，杭先端部に取り付けられたものであった。羽根形状を図 2.1 に示す。

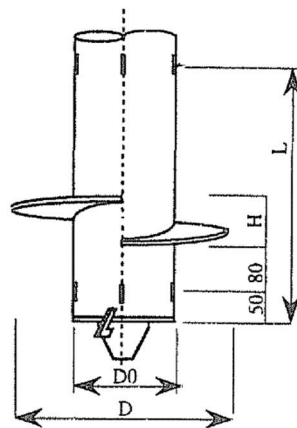


図 2.1 羽根形状（らせん状・羽根 1 枚の例）²⁻²⁾

また，佐伯ら²⁻¹¹⁾は，一般建築物への適用性を考慮して，杭軸径がやや大きい範囲（300mm から 600mm）における施工性の確認を行っている。その後，杭軸径の範囲については，1990 年代の後半から，鉛直支持力に関する旧建築基準法第 38 条の認定や建築基準法施行規則第 1 条の 3 第 1 項本文の規定に基づく認定が取得されるようになり²⁻¹²⁾，杭軸径が 600mm から 1,200mm 程度²⁻¹³⁾の範囲における施工性や支持力性能の確認が行われている。

佐伯ら²⁻¹¹⁾は、その他に、施工時に要した施工機械のトルク値と載荷試験による杭の鉛直支持力の関係より、施工時の貫入抵抗（トルク）値と地盤強度との間には相関性があることについても報告している。さらに、羽根付き杭の施工性は、羽根径などの羽根形状が影響すると指摘している。この報告において用いられた主な杭は、らせん状の羽根が2枚、杭先端部に取り付けられ、杭先端が開端状態であった。羽根形状を図2.2に示す。

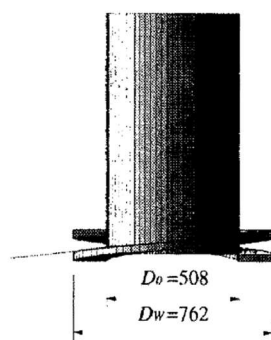


図 2.2 羽根形状（らせん状・羽根2枚の例）²⁻¹¹⁾

施工時の貫入抵抗（トルク）値と杭の鉛直支持力の関係については、土屋ら²⁻¹⁴⁾の報告もあり、杭径や地盤条件に係わらず、これらは比例関係にあることが加圧土層を用いた模型試験により確認されている。

さらに、引抜き方向の抵抗特性については、永田ら²⁻¹⁵⁾、卜部ら²⁻¹⁶⁾、和田ら²⁻¹⁷⁾、中沢ら²⁻¹⁸⁾、国府田ら²⁻¹⁹⁾により種々の検討が行われている。例えば、永田ら²⁻¹⁵⁾は、杭軸部径（ D_p ）に対する羽根径（ D_w ）の比（ D_w/D_p ）が大きくなると引抜き抵抗が大きくなることを、模型杭を用いた引抜き載荷試験により把握している。また、当該引抜き載荷試験後に、土槽を2分割して砂地盤の目視観察を行い、羽根上部に主働くさび領域（圧縮土塊域）の存在を把握するなど、羽根付き杭の引抜き抵抗メカニズムの解明に向けた検討を行っている。国府田²⁻¹⁹⁾らは、珪砂5号を用いた人工地盤中に模型杭を施工した結果、羽根上部付近の地盤の拘束圧が増大したこと、および杭周面摩擦力が圧入したストレート杭よりも大きくなったことを確認している。

以上の通り、羽根付き杭は、羽根が地盤からの反力を受けることにより鉛直支持力および引抜き抵抗力の増加効果が期待できること、および施工時の貫入抵抗による杭の打ち止め管理（支持層への到達の判断）が期待できるなどの利点があり、これらの開発・研究が進められていた。

しかし、前述の中川らの報告において、実大杭を用いた載荷試験の結果、杭周面摩擦力が一般的な埋込杭の計算値よりも小さく、わずかな変位量（約2mm程度）でピークに達したこと²⁻⁴⁾や、羽根部分の支持層への根入れ深さを深くすると、引抜き抵抗力が低下した場合

があること²⁻⁶⁾などの事例も確認されていた。これらの要因については、施工に伴う地盤の乱れによる可能性があるとは指摘されており、永田らの報告とは相反する結果であるが、その要因については未だ明らかになっていない。

(2)水平抵抗特性の検討

羽根付き杭の水平抵抗特性に関する検討については、森ら²⁻²⁰⁾や高田²⁻²¹⁾らの報告がある。

森らは、実地盤に回転貫入によって施工した杭（以下、2枚羽根杭）について水平載荷試験を実施した結果、杭頭部の水平荷重と水平変位の実測値を用い、杭を梁、地盤をばねと仮定した弾性解析モデル（いわゆる梁-ばねモデル）による微分方程式より求められた水平方向地盤反力係数（以下、逆算 k_h ）は、当時（第1版）の建築基礎構造設計指針（以下、1988年版設計指針）²⁻²²⁾に規定されている孔内水平載荷試験の結果を用いた算定式により求められる水平方向地盤反力係数（以下、 k_h ）よりも大きいことを確認している。その要因については、施工に伴う杭周辺への地盤の押し上げにより、杭周辺地盤の密度が増加したためであると推察されており、載荷試験とは別に実施された羽根付き杭施工後の周辺地盤における標準貫入試験および採取試料の一軸圧縮試験により、砂地盤では N 値、粘性土地盤では一軸圧縮強度の増加をそれぞれ確認している。なお、この報告において用いられた杭は、半円形で板状の羽根が2枚、先端に取り付けられ、杭先端は閉塞状態であった。また、これらの試験における杭施工時の1回転あたりの貫入量（ s ：以下、貫入ピッチ）や羽根1巻き当たりの間隔（ p ：以下、羽根ピッチ）に関する条件は、不明である。

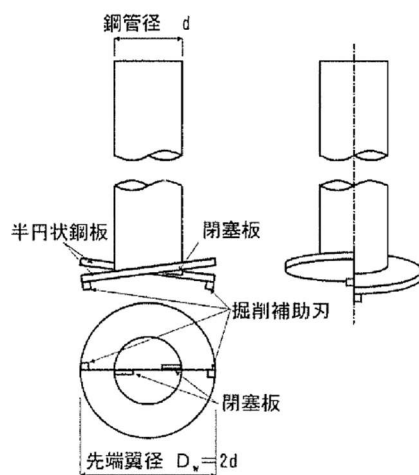


図 2.3 羽根形状（板状・2枚羽根杭の例）²⁻²⁰⁾

一方、高田ら²⁻²¹⁾の報告では、羽根付き杭の水平載荷試験により得られた杭頭水平荷重と地表面水平変位の関係について、土質試験などから得られた地盤のせん断剛性、粘着力、内部摩擦角の値を低減することで数値解析によりシミュレートできたことから、杭の水平剛性が低下している可能性があるとして指摘しており、森らの報告と相反するものとなっている。また、水平剛性低下の要因については、杭の施工による「地盤の乱れ」の影響であると推察されている。なお、当該試験における地盤条件は、表層より盛土、砂質土、粘性土の地層構成であり、羽根形状や施工条件は不明である。

(3)地盤の乱れ・緩みについて

羽根付き杭の施工に伴う「地盤の乱れ」については、田村ら²⁻²³⁾も同様の指摘していた。田村らは、羽根ピッチ (p) が羽根 1 回転当たりの貫入量 (s) よりも大きい場合には羽根部下面に緩みや空洞が形成され、周辺の地盤が緩む可能性があるとして指摘していた。

地盤の「乱れ」や「緩み」について、具体的な現象や地盤の強度特性の変化について確認された事例を以下に記す。

土屋ら²⁻²⁴⁾は、米粒を土粒子に見立てた人工地盤における模型杭の施工試験により、羽根の下面に空洞部ができること、羽根の軌跡位置にも、一旦空洞ができ、その後、米粒が供給されて空洞が埋められるような挙動を示すことを確認している。この報告により、実地盤においても空洞が生じる可能性が示唆され、その空洞部分に施工中に土が供給されずに施工後まで空洞が残存した場合は、杭周面摩擦力や杭の水平剛性が低下する要因になると考えられる。

また、新井ら²⁻²⁵⁾は、笠岡粘土と珪砂 7 号を混合して作製した模型地盤に羽根付き杭を回転貫入させた後における杭周辺地盤の貫入抵抗をペネトロメーターにより測定した結果、羽根 1 回転当たりの貫入量が大きくなると施工前の地盤に対して施工後の杭周辺地盤の貫入抵抗が低下する傾向であることを確認している。その要因については、施工に伴う地盤の乱れ（ただし、ここでの乱れとは、具体的にどのような土性変化を示すものかは不明）であると指摘している。

一方、前述した通り国府田²⁻¹⁹⁾らは、模型杭を人工砂地盤に貫入した際における杭周辺地盤の水平土圧および杭周面摩擦力が増加したことを確認している。また、その要因については、地盤の押し広げによるものであると推察されているが、この結果は、土屋らや新井らの報告とは相反する結果となっている。なお、国府田らの報告における模型杭の施工条件は、羽根 1 回転当たりの貫入量 (s) が羽根ピッチ (p) よりも小さい ($s/p < 1.0$) ことを読み取ることができる。

2.2. 第2章のまとめ

既往の研究により確認された事項と課題について整理した結果を以下に記す。

(1)確認事項

- ①住宅用の小口径から一般建物用に至るまで、種々のサイズの羽根付き杭を回転貫入により施工できることが、施工試験により確認されている。
- ②施工時のトルクや鉛直力を管理することで、打ち止め（所定の支持層への到達判断）の目安を設定できることが、施工試験と載荷試験の結果の分析により提案されている。
- ③羽根による杭先端付近における鉛直支持力や引抜き抵抗力の増加が確認された報告が複数ある一方で、杭先端付近における引抜き抵抗力や、杭軸部の周面摩擦力が低下した事例も確認されている。
- ④杭の水平剛性については、増加した事例と低下した事例が、それぞれ報告されている。
- ⑤羽根付き杭の施工に伴い杭周辺地盤においては、空洞が発生する可能性があること、貫入抵抗が低下することが確認されている。一方、水平方向の土圧が増加するという報告もある。

(2)課題

- ①杭軸部の周面摩擦力や、杭の水平剛性について、増加もしくは減少したという相反する事例が確認されているが、その要因は明らかになっていない。
- ②杭軸部の周面摩擦力や、杭の水平剛性の変化は、羽根付き杭周辺地盤の土性変化により生じたものと考えられるが、回転貫入に伴う羽根付き杭周辺地盤の物理特性および力学特性の変化については、明らかになっていない。

2.3. 参考文献

- 2-1) 板谷國夫, 吉田勝之: 小規模建築用羽根付き小径鋼管杭の施工と鉛直載荷試験, 日本建築学会学術講演梗概集, B- I , pp.1265-1266, 1986.8
- 2-2) 大和真一, 伊集院博, 中川宏人, 前嶋匡, 吉田勝之, 高木汎: 先端羽根付き鋼管杭(回転埋設工法)の先端支持力特性-鉛直載荷試験結果報告, 第 30 回土質工学研究発表会, pp1457-1458, 1995.7
- 2-3) 大和真一, 伊集院博, 前嶋匡, 中川宏人, 吉田勝之, 高木汎: 先端羽根付き鋼管杭の先端支持力特性(その2), 第 31 回地盤工学研究発表会, pp.1671-1672, 1996.7
- 2-4) 塚田義明, 大和真一, 中川宏人, 前嶋匡, 吉田勝之, 高木汎: 先端羽根付き鋼管杭の引抜き耐力に及ぼす根入れ長さの影響, 第 32 回地盤工学研究発表会, pp.1499-1500, 1997.7
- 2-5) 前嶋匡, 中川宏人, 大和真一, 伊集院博, 吉田勝之, 高木汎: 先端羽根付き鋼管杭の先端支持力特性(その3), 第 32 回地盤工学研究発表会, pp.1501-1502, 1997.7
- 2-6) 大和真一, 中川宏人, 前嶋匡, 吉田勝之, 高木汎: 先端羽根付き鋼管杭の引抜き耐力に関するシュミレーション, 第 35 回地盤工学研究発表会, pp.1801-1802, 2000.6
- 2-7) 大和真一, 中川宏人, 前嶋匡, 梅田雅芳: 羽根付き鋼管杭の引抜き耐力特性について, 第 36 回地盤工学研究発表会, pp.1567-1568, 2001.6
- 2-8) 利根賢治, 梅田雅芳, 吉田勝之: 先端羽根付き鋼管杭の引抜き耐力, 第 42 回地盤工学研究発表会, pp.1205-1206, 2007.7
- 2-9) 梅田雅芳, 前嶋匡, 國松諭, 吉田勝之: 粘土質地盤における先端羽根付き鋼管杭の引抜き耐力について, 第 43 回地盤工学研究発表会, pp.1287-1288, 2008.7
- 2-10) 前嶋匡, 梅田雅芳, 國松諭, 吉田勝之: 先端羽根付き鋼管杭の引抜き抵抗に関する一考察, 第 43 回地盤工学研究発表会, pp.1289-1290, 2008.7
- 2-11) 佐伯英一郎, 大木仁: 回転貫入鋼管杭に関する研究～施工試験及び載荷試験結果と貫入のメカニズム～, 日本建築学会構造工学論文集, Vol45B, pp.453-462, 1999.3
- 2-12) 山下久男, 平田尚, 木下雅敬: わが国における鋼管杭設計・施工技術の発展と今後の課題, 土木学会論文集, vol.66 No.3, pp.319-336, 2010.7
- 2-13) 鋼管杭・鋼矢板技術協会: 鋼管杭-その設計と施工- 改訂第 12 版 2009, p.439, 2009.4

- 2-14) 土屋勉, 大杉富美一, 中沢楓太, 島田正夫: 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
- 2-15) 永田誠, 平田尚: 回転圧入鋼管杭の引抜き抵抗の研究, 新日鉄技報第 382 号, pp.68-72, 2005
- 2-16) ト部光平, 時松孝次, 鈴木比呂子, 浅香美治: 鉛直交番荷重を受ける羽根付杭の杭径および羽根径が鉛直支持力・引抜き抵抗力に与える影響, 日本建築学会構造系論文集, 第 713 号, pp.1113-1122, 2015.1
- 2-17) 和田昇三, 平石雅一, 梅田雅芳: 回転貫入杭の鉛直交番荷重に対する引抜き抵抗に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 710 号, pp.619-626, 2015.4
- 2-18) 中沢楓太, 土屋勉, 永井宏, 島田正夫, 岡聖也: 回転貫入杭の引抜き抵抗力特性に関する模型実験-支持層に対する杭先端の根入れ効果-, 日本建築学会構造系論文集, 第 714 号, pp.1279-1286, 2015.8
- 2-19) 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, 第 601 号, pp.91-98, 2006.3
- 2-20) 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
- 2-21) 高田光真, 柏尚稔, 宮本裕司: 原位置載荷実験のシミュレーション解析に基づく羽根付き鋼管杭の水平抵抗, 日本建築学会大会学術講演梗概集(杭の水平(5)・構造 I), pp.721-722, 2014.9
- 2-22) 建築基礎構造設計指針 第 1 版: 日本建築学会, 1988
- 2-23) 田村昌仁, 国府田誠, 高野公寿, 廣瀬知治: 建築における最新の鋼管杭基礎の設計と施工, 基礎工, pp.18-24, 2000.12
- 2-24) 土屋勉, 中沢楓太, 島田正夫: 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
- 2-25) 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, Vol.45, No.2, pp.47-51, 2005

3. 検討課題の設定

3.1. 羽根付き杭の施工に伴う周辺地盤の土性変化

既往の研究報告により，羽根付き杭の周辺地盤における空隙の発生，貫入抵抗の低下や水平土圧の増加などが確認されている。これらのような土性変化は，羽根付き杭の施工方法に起因するものと考えられる。

羽根付き杭の施工方法は，杭頭部に回転力（トルク）や鉛直力を加えながら，杭をねじのように回転させながら地盤中に貫入させることが基本である。そのため，羽根付き杭の周辺地盤は，羽根の通過により杭周辺地盤が乱されるおそれがあること，セメントミルクを使用しないため埋込み杭工法とは異なり乱れや応力解放を受けた領域の地盤を改良する効果が期待できないこと，および概ね無排土で杭を貫入させることができるため杭体積分に相当する地盤が周囲に押し拡げられることにより，圧入杭（油圧力などにより杭を地盤中に静的に圧入する工法）³⁻¹⁾や静的締固め砂杭^{3-2)・3-3)}のように水平方向地盤反力の増加効果も期待できる可能性があることなど，原地盤とは異なる状態になっていると考えられる。大谷ら³⁻⁴⁾は，杭の抵抗メカニズムを解明するためには，施工に伴う地盤変化の影響を把握することが不可欠であると指摘している。

そこで，本論文における検討項目の1つとして，羽根付き杭の施工に伴う周辺地盤の土性変化について確認することとした。羽根付き杭の施工による地盤への影響に関する概念図を図3.1に示す。

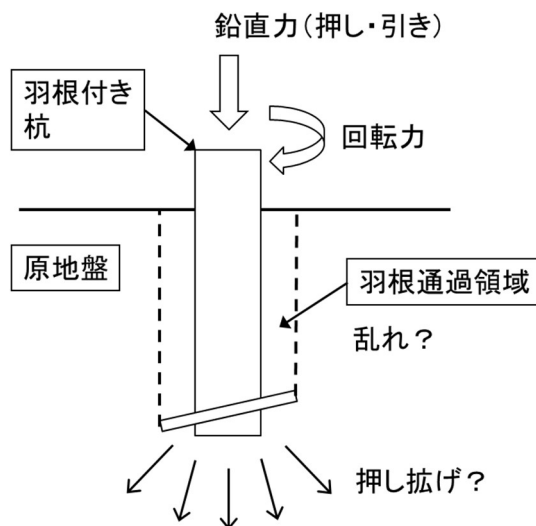


図 3.1 羽根付き杭の施工による地盤への影響

3.2. 羽根付き杭の貫入メカニズム

ここでは、施工による羽根付き杭の貫入メカニズムについて考える。

羽根付き杭は、施工時に回転力（トルク）と鉛直力を外力として杭頭部に与えることにより、地盤中に回転貫入させている。

施工時の羽根付き杭の挙動は、回転力によりねじが締め付けられるときの力の釣り合い関係 3-5)、3-6)と同じように、回転力により羽根が地盤を押し上げながら地盤中に貫入すると考えられる。また、佐伯ら 3-7)や和田ら 3-8)の報告を参考に羽根部分における力の釣り合い関係を図 3.2 に示すように仮定した。

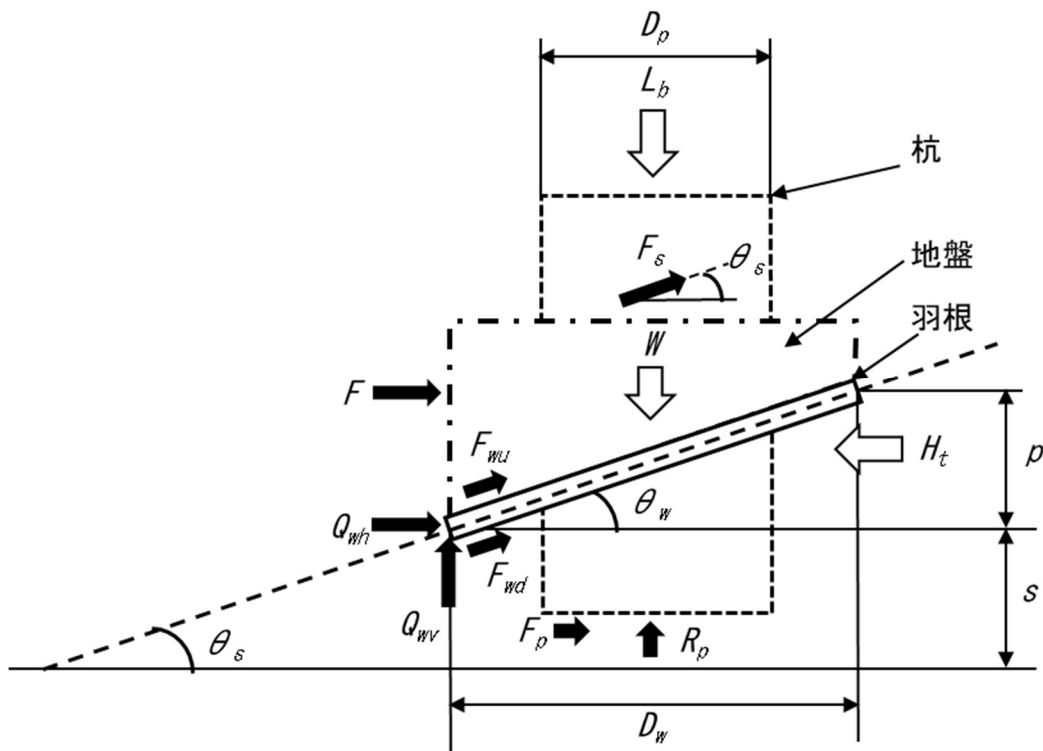


図 3.2 羽根付き杭先端部付近の力の釣り合い

- L_b : 施工時に係る鉛直力
- H_t : 施工時の回転貫入による水平方向力
- W : 羽根上部の土の自重
- R_p : 杭軸部の先端抵抗
- F_p : 杭軸部先端の摩擦抵抗
- F_s : 杭軸部の周面摩擦抵抗

F_{wu}	:	羽根上面の摩擦抵抗
F_{wd}	:	羽根下面の摩擦抵抗
Q_{wv}	:	羽根先端部に掛かる鉛直方向の抵抗力
Q_{wh}	:	羽根先端部に掛かる水平方向の抵抗力
F	:	羽根上部の土の押し上げ反力
D_w	:	羽根の直径
D_p	:	杭軸部径
P	:	羽根のピッチ
S	:	杭 1 回転当たりの貫入量
θ_w	:	羽根の傾斜角度
θ_s	:	杭の貫入角度

ここで、図 3.2 における杭軸方向および杭軸直交方向における力の釣り合い関係は、式 3.1 および式 3.2 によって表される。

$$L_b = R_p + Q_{wv} + F_{wu} \sin \theta_w + F_{wd} \sin \theta_w + F_s \sin \theta_w - W \quad (3.1)$$

$$H_t = F_p + Q_{wh} + F_{wu} \cos \theta_w + F_{wd} \cos \theta_w + F_s \cos \theta_w + F \quad (3.2)$$

式 (3.1) および式 (3.2) より、地盤強度が大きくなると R_p , F_{wu} , Q_{wh} などが変わり、羽根の角度 (θ_w) や羽根の径 (D_w) が変わると W , F , Q_{wh} などが変わることが判る。

また、施工外力 (鉛直力と回転貫入による水平方向力) のバランスが悪いと、すなわち L_b と H_t の関係によっては、羽根の貫入角度 (θ_s) が変わるため、羽根が地盤を乱す挙動を示すおそれがあると推察される。図 3.2 に示すように貫入角度 θ_s が羽根の角度 θ_w と同じ、言い換えれば s/p が 1.0 の場合は、羽根が最も地盤を乱しにくい理想的な貫入条件であると考えられる。ここで、 s/p が 1.0 より小さくなると羽根の上面が地盤を斜め下方 (やや横方向寄り) に、 s/p が 1.0 より大きくなると羽根の下面が地盤を斜め下方 (やや下方向寄り) に押し広げる挙動を示すことが、国府田²⁻¹²⁾ らにより推察されている。 s/p の違いが土の押し広げ方向に及ぼす影響を

図 3.3 に示す。

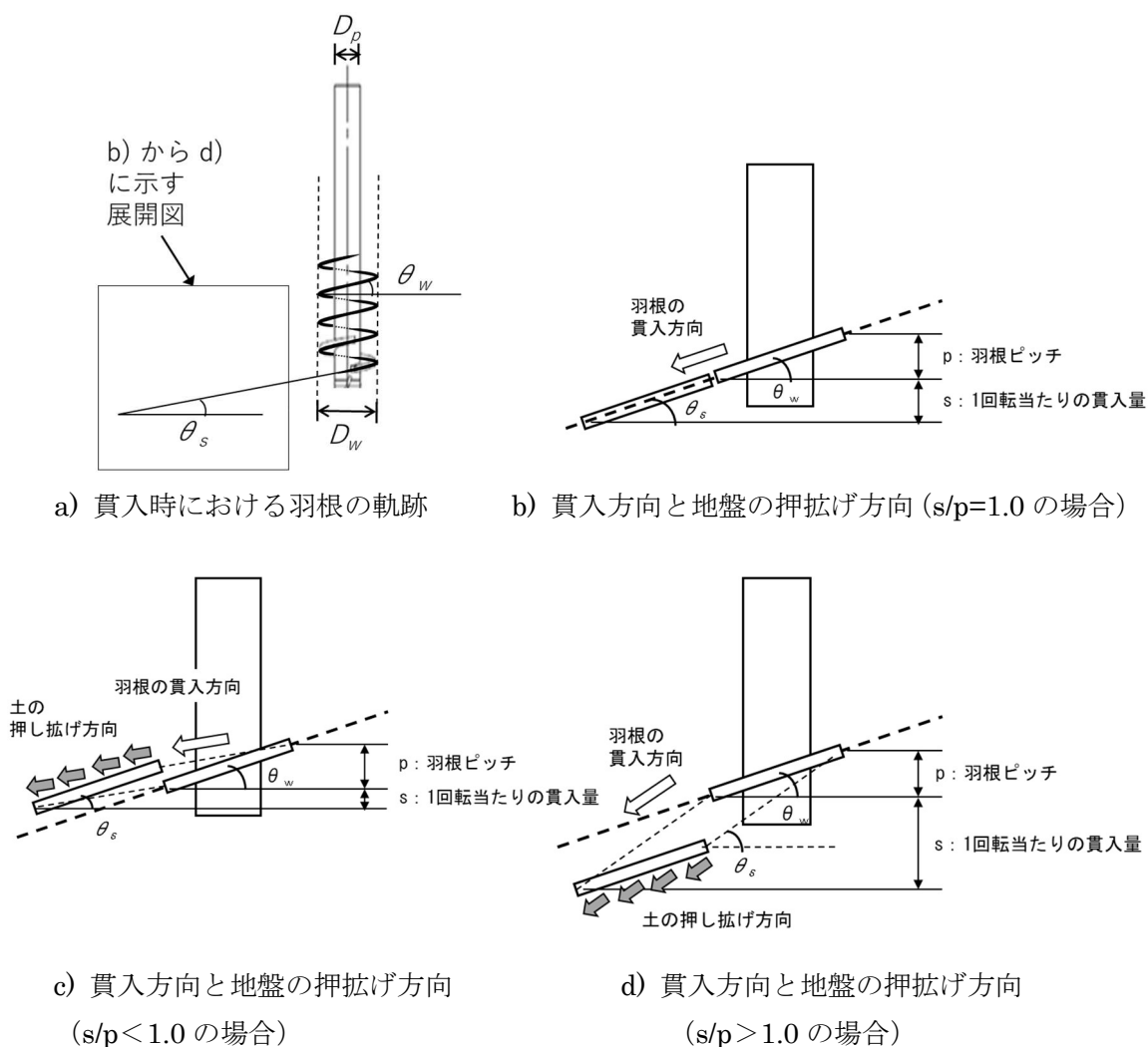


図 3.3 施工条件 (s/p) が地盤の押し広げ方向に及ぼす影響

このような貫入メカニズムを考慮すると、羽根の角度や羽根の大きさ (D_w) などの羽根形状、および s/p などの施工条件が、地盤を乱す範囲や地盤を押し広げる方向に影響すると考えられる。

また、地盤の乱れによる土粒子構造の脆弱化や空洞の発生のおそれがあることを考慮すると、これらが生じやすい土質は、砂質土よりも粘着力や土粒子構造を有する細粒土³⁻⁹⁾であり、そのうち、実務設計において杭の周面摩擦や水平抵抗などの地盤反力が期待されるものとして粘性土および火山灰質粘性土（以下、粘土質地盤）を検討対象地盤とした。

また、日本国においてこれらの地盤が堆積するのは、比較的、地表面付近であり、地表面付近の地盤が杭の構造性能に及ぼす影響が比較的大きいと考えられる杭の水平抵抗特性に着目した。

よって、本論文においては、粘性土地盤における杭の水平抵抗特性に関する検討を行うこととした。この検討においては、羽根付き杭の貫入メカニズムを鑑みて羽根形状（特に、 D_w/D_p ）と施工条件（特に、 s/p ）を試験パラメータとして、これらの条件が水平抵抗特性に及ぼす影響について把握することとした。

3.3. 杭の水平抵抗特性の評価方法

杭の水平抵抗特性の評価方法は、杭を弾性支承上にある半無限長の梁としてモデル化する方法（以下、弾性支承梁の方法）が簡便で実用的なものとして、わが国の多くの設計基準で取り入れられている。

Chang³⁻¹⁰⁾は、杭を曲げ剛性を有する梁材とし、地盤を一様な分布ばねとした解析方法を提案しており、広く知られている。Chang の提案した方法は、梁の方程式を解析的に解くことができるという特長を有するが、地盤反力と杭のたわみの間に線形の仮定をおいているため、地盤変位が十分小さいことや杭の変形に影響を及ぼす地盤の深さの範囲が均一に見なせることが適用の条件であった。

このため、久保³⁻¹¹⁾は、地盤反力と杭のたわみの間に非線形な関係を取り入れ、相似則を用いて解く方法を提案した。

その後、菊池³⁻¹²⁾により、久保の方法に改良が加えられ、地盤反力の深さ方向への変化についても考慮した方法が提案された。当該評価方法は、港湾分野における現在の設計指針にて運用されている。

さて、現在、建築分野の基礎構造設計において主に利用されている指針として、建築基礎構造設計指針 第3版³⁻¹³⁾（以下、2019年版基礎指針）が挙げられる。この指針には、レベル1荷重に対する杭の応力評価方法として、①弾性支承梁理論による方法、②梁ばねモデルによる方法、③地盤変位を考慮した方法などが掲げられている。

これらの方法は、建築基礎構造設計指針 第2版³⁻¹⁴⁾(以下、2001年版基礎指針)でも掲げられていたが、当時は水平抵抗力と水平変位の関係の評価方法として示されていたものであり、これらの方法を用いて杭の応力を算定した結果の妥当性については確認されていない。建築分野の基礎構造設計においては、許容応力度設計法による応力照査の実施が基本であり、特に曲げモーメントにより生ずる応力に対する照査が杭の断面仕様を決めるために支配的な事項であり、杭に発生する曲げモーメント分布を精度良く評価する方法の確立は課題であると考えられる。

ところで、2019年版基礎指針の最後に「くさび法」と称されている方法³⁻¹⁵⁾が紹介されている。この方法は、実験値との対応が検証されているのは沖積の粘性土地盤においてのみであるが、地盤の非線形性、および地盤反力の深度方向への変化について考慮されており、さらに、杭の地中部最大曲げモーメントの大きさと発生深度について計算値と実験値との対応が確認されている。くさび法の有効性については、光原ら³⁻¹⁶⁾によっても報告されている。くさび法においては、水平方向地盤反力と変位の関係(p - y 関係)を簡易なバイリニア型でモデル化しているが、 p - y 関係を深さ方向に変化させることで実験値とある程度対応することが確認されており、地盤の水平剛性や降伏強度が羽根形状や施工条件によって変化する可能性のある羽根付き杭の水平抵抗特性についても、評価できる可能性があると推察される。

よって、本論文では、「くさび法」の考え方を基本として、簡易な解析モデルで羽根付き杭にも適用可能な杭応力算定方法の検討を行った。

3.4. 本論文における検討課題(第3章のまとめ)

前節までの検討・考察の結果、本論文では、羽根付き杭の水平抵抗特性の把握を主題として、以下の①から③に示す課題について検討することとした。

なお、検討対象とする羽根の形状はらせん状・1枚羽根(図2.1参照)とし、地盤の種類は粘土質地盤とした。

- ①羽根付き杭の施工に伴う周辺地盤の土性変化
- ②羽根形状と施工条件が羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響
- ③羽根付き杭の荷重と変位関係および応力分布の評価方法

3.5. 本論文の構成

本論文における以降の構成は、羽根付き杭の施工に伴う杭周辺地盤の土性変化(第4章)、羽根付き杭の施工に伴う地盤の挙動(第5章)、羽根形状が羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響(第6章)、施工条件が羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響(第7章)、繰り

返し載荷が杭の水平抵抗特性に及ぼす影響（第 8 章），羽根付き杭の水平抵抗特性の評価方法に関する検討（第 9 章），結論（第 10 章）としている。

3.6. 参考文献

- 3-1) Li, Z. : Piled foundations subjected to cyclic loads or earthquakes, Ph.D. Thesis, University of Cambridge, p290, 2010
- 3-2) 北詰昌樹, 高橋英紀, 竹村慎治 : SCP 改良地盤における水平抵抗特性, 港湾空港技術研究所報告, 第 42 巻第 2 号 pp.47-71, 2003.6
- 3-3) 山本実, 山崎勉, 船原英樹, 吉富宏紀 : 締固め改良地盤の液状化及び杭基礎に対する設計方について, 「建築基礎のための地盤改良設計指針の作成にあたって」シンポジウム論文集, pp.49-59, 日本建築学会構造委員会, 2003.11
- 3-4) 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, 48-6, pp41-46, 2000.6
- 3-5) 門田和雄 : 絵とき ねじ基礎のきそ, 日刊工業新聞社, pp72-74, 2007.2
- 3-6) 福岡俊道 : 技術者のための ねじの力学—材料力学と数値解析で解き明かす—, コロナ社, pp76-83, 2015.10
- 3-7) 佐伯英一郎, 大木仁 : 回転貫入鋼管杭に関する研究～施工試験及び載荷試験結果と貫入のメカニズム～, 日本建築学会構造工学論文集, Vol45B, pp453-462, 1999.3
- 3-8) 和田昌敏, 時松孝次, 澤石正道 : スパイラル状の羽根を有する回転杭の貫入及び周面摩擦支持力に関する模型実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 706 号, pp.1825-1833, 2014.12
- 3-9) 地盤工学会基準 : 地盤材料の工学的分類方法 (JGS0051-2009)
- 3-10) Chang, Y.L. : Discussion on “Lateral Pile-Loading Test” by Feagin, Trans., ASCE, pp.272-278, 1937
- 3-11) 久保浩一 : 杭の横抵抗の新しい計算法, 港湾技術研究所報告, 第 2 巻, 第 3 号, 1964.3
- 3-12) 菊池喜昭 : 杭の軸直交方向抵抗性能を推定するための Chang のモデルに用いる地盤反力係数の新たな推定方法の提案, 港湾技術研究所報告, 第 48 巻, 第 4 号, pp.3-22, 2009.12
- 3-13) 日本建築学会 : 建築基礎構造設計指針, 2019
- 3-14) 日本建築学会 : 建築基礎構造設計指針, 2001

- 3-15) 岸田英明, 中井正一: 地盤の破壊を考慮した杭の水平抵抗: 日本建築学会論文報告集, 第 281 号, pp.41-55, 1979.7
- 3-16) 光原恵太郎, 柳下文雄, 土方勝一郎: 群杭の p-y カーブ評価法に関する研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, 構造 I, pp.617-618, 2018.9

4. 羽根付き杭の施工に伴う杭周辺地盤の土性変化

4.1. 目的および検討方針

羽根付き杭の回転貫入に伴う杭周辺地盤の土性変化を把握するため、原位置から採取した試料（土）の物理特性および力学特性に関する各種試験を行った。

4.2. 検討内容

実施した試験項目と各試験に用いた試料の採取位置を以下の(1)および(2)に示す。

(1)試験項目

回転貫入により施工された羽根付き杭の周辺地盤における土性変化を把握するため以下の①から③に示す検討を行った。

①密度分布

羽根通過領域中央部（図 4.1 参照）から採取した試料の湿潤密度を把握し、密度増加の有無を把握する。

また、羽根通過領域において水平方向（図 4.1 参照）に採取した試料について含水比試験を行い、杭周表面からの距離と含水比との関係（密度変化の領域）を把握し、密度増加の範囲を把握する。

②圧密特性

羽根通過領域中央部から採取した試料の e - $\log P$ 関係を圧密試験により把握し、構造脆弱化の有無を把握する。

③圧縮強度特性

羽根通過領域中央部から採取した試料の軸差応力と軸ひずみとの関係を非圧密非排水三軸圧縮試験（以下、UU 試験）により把握し、原地盤から採取した試料の強度、剛性、破壊ひずみなどの圧縮強度特性の違いを把握する。

(2)試料の採取位置

湿潤密度試験、圧密試験および三軸圧縮試験に供した試料は、羽根通過領域の中央部からシンウォールサンプラー（ $\phi 86\text{mm}$ ）を用いた機械ボーリングにより採取した。また、含水比試験に供した試料は、杭側面から杭の外側に向かって距離 30mm ずつ 6 区間において、アルミパイプ（ $\phi 32\text{mm}$ ）を用いて採取した。なお、杭側面には、予め孔（以下、杭横孔）を設けており、杭の施工後、蓋を外して杭横孔からアルミパイプを用いて試料を採取した。

これらの各種試験に用いた試料採取位置を図 4.1 に示す。また、羽根通過領域における試料採取状況を写真 4.1 に、杭横孔からの試料採取状況を写真 4.2 に、それぞれ示す。

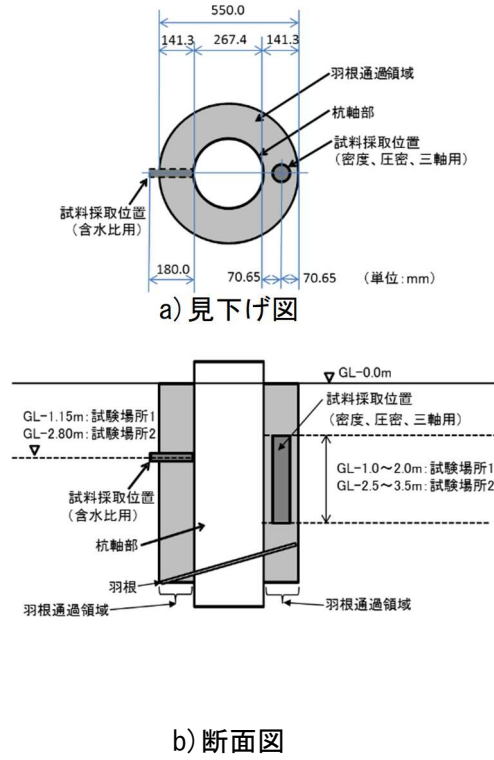


図 4.1 試料採取位置図



写真 4.1 羽根通過領域からの試料採取状況



写真 4.2 杭横孔からの試料採取状況

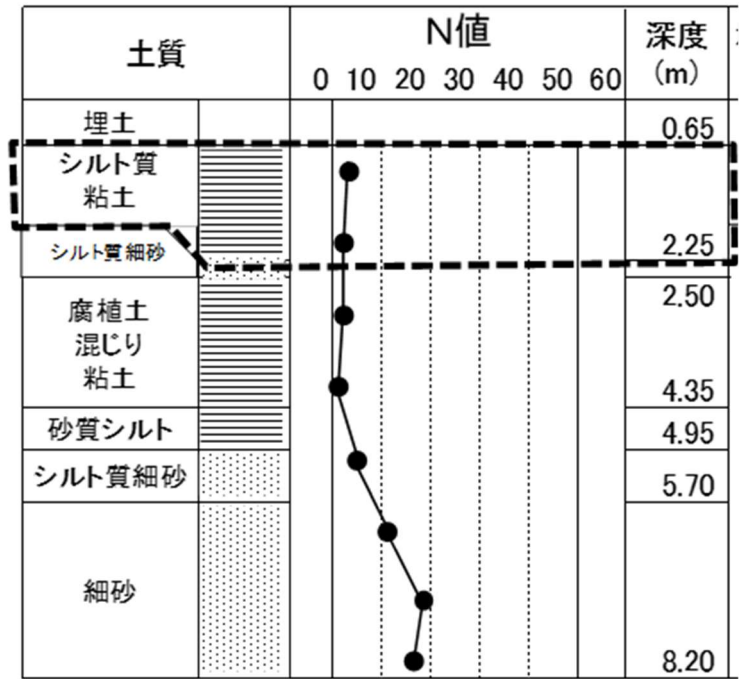
4.3. 試験条件

(1)地盤条件

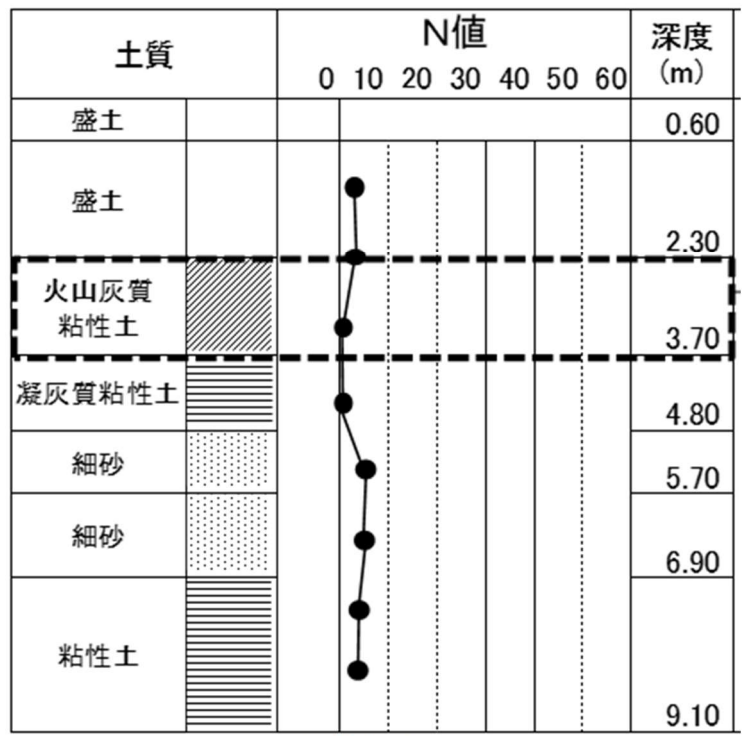
試験場所は、谷底平野⁴⁻¹⁾に位置し表層の土質が粘性土⁴⁻²⁾である試験場所1および台地⁴⁻¹⁾に位置し表層の土質が火山灰質粘性土⁴⁻²⁾である試験場所2の2箇所とした。

また、両試験場所におけるボーリング柱状図を図4.2に示す。

なお、両試験場所において地盤のばらつきを把握するためスウェーデン式サウンディング試験やボーリングを複数箇所（試験場所1：20地点，試験場所2：12地点）実施し、貫入抵抗値の分布傾向や地層構成に有意な差が無いことを確認した領域において各種試験を実施した。



(a) 試験場所 1



(b) 試験場所 2

[-] 調査対象土

図 4.2 ボーリング柱状図

(2)土の物理特性

調査対象土の基本的な物理的性質を表 4.1 に示す。なお、各物理試験の試料数は 2 体から 3 体であり、表中の数値は、その平均値である。

表 4.1 調査対象土の物理的性質

試験場所/土質		1/シルト質粘土	2/粘土質ローム
深さ		GL-1.0~2.0m	GL-2.5~3.5m
一般	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	1.665	1.306
	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	1.110	0.574
	土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.612	2.796
	含水比 w (%)	49.3	130.4
	間隙比 e	1.267	3.700
	飽和度 S_r (%)	97.5	93.6
粒度	石分 (%)	0.0	0.0
	礫分 (%)	0.0	0.0
	砂分 (%)	15.4	3.9
	シルト分 (%)	32.3	35.8
	粘土分 (%)	52.3	60.3
	最大粒径 (mm)	0.850	0.250
コンシステンシー特性	液性限界 w_L (%)	72.8	150.0
	塑性限界 w_p (%)	35.0	60.9
	塑性指数 I_p	37.8	89.1

(3)杭の諸元

各検討に使用した杭は、軸部径 267.4mm、羽根部径、550.0mm、羽根ピッチ 140mm の鋼管杭であり、杭の先端は閉塞状態である。杭形状を図 4.3 に示す。

また、これらの検討に用いた羽根付き杭は、概ね $s/p=1.0\pm 0.1$ となるように管理して施工した。

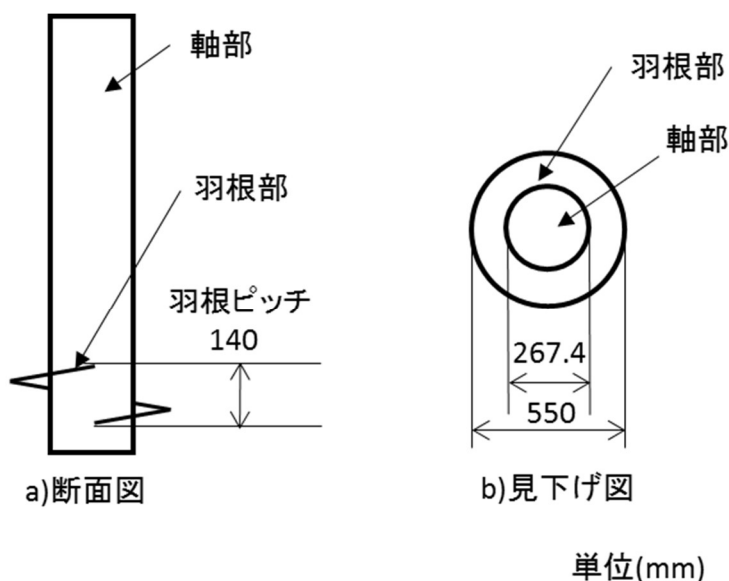


図 4.3 杭形状

(4)養生期間

練り返された粘性土は、静置すると時間の経過と共に強度が回復する場合があることが報告されている^{4-3),4-4),4-5)}。

強度回復の現象は、粘土のシキソトロピーと呼ばれる性質によるものであり、土粒子の熱運動による衝突の繰り返しにより、徐々に構造を再形成していくなど、その具体的な要因については諸説あるが、粘土固有の性質だけでなく、間隙水や気温などを含めた物理化学的な条件によってシキソトロピーの有無が決まり、そのメカニズムは単純ではないことが種々の試験結果に基づいて西田ら⁴⁻³⁾によって報告されている。

このように強度回復の要因は現時点で特定されていないが、種々の報告において、静置時間の経過に伴う力学的特性の変化について確認されている。西田ら⁴⁻³⁾は、練返し後の養生期間の増加と共に粘性土の一軸圧縮強度および変形係数 (E_{50}) が増加することを報告している。また、西田ら⁴⁻³⁾、山田⁴⁻⁴⁾、斎藤ら⁴⁻⁵⁾の報告により、養生期間が 7 日から 28 日になると一軸圧縮強度はほぼ横ばいとなることが確認できる。

さらに、杭の水平載荷試験結果に関する調査報告書⁴⁶⁾では、杭施工後の鉛直支持力の増加記録を考慮して粘性土地盤における放置時間が14日以上と設定されている。

以上により、強度回復の影響を考慮して、本試験における杭施工から試料採取までの養生期間は、28日以上とした。

4.4. 密度分布の変化

(1) 試験の目的

羽根付き杭は、ほぼ非排土の状態で行うため杭の回転貫入に伴う地盤の押し上げにより、羽根付き杭の周辺地盤の密度が増加する可能性があると考えられる。このため、原地盤に対する羽根付き杭の周辺地盤における湿潤密度および含水比の変化の把握を目的として、図4.1に示す位置から採取した試料の湿潤密度試験および含水比試験を行った。

なお、羽根付き杭の施工から土試料採取までの養生期間は、試験場所1において28日、試験場所2において41日である。

(2) 試験方法

試験方法は、土の湿潤密度試験方法（JIS A 1225:2009）⁴⁷⁾、および土の含水比試験方法（JIS A 1203:2009）⁴⁸⁾に従った。

(3) 試験結果

a) 湿潤密度試験結果

羽根通過領域における湿潤密度は、両試験場所共に原地盤に比べて増加した。また、羽根通過領域における間隙比は、両試験場所共に原地盤に比べて減少した。試験結果を表4.2に示す。

表 4.2 湿潤密度 (ρ_t) および間隙比 (e) 測定結果

土の 物理量	試験場所 1		試験場所 2	
	原地盤	羽根 通過 領域	原地盤	羽根 通過 領域
ρ_t (g/cm ³)	1.665	1.792	1.306	1.330
e	1.267	0.995	3.700	3.450

b)含水比測定結果

羽根通過領域においては，両試験場所共に原地盤に比べて含水比が低い領域が存在した。含水比と杭側面からの距離との関係を図 4.4 に示す。

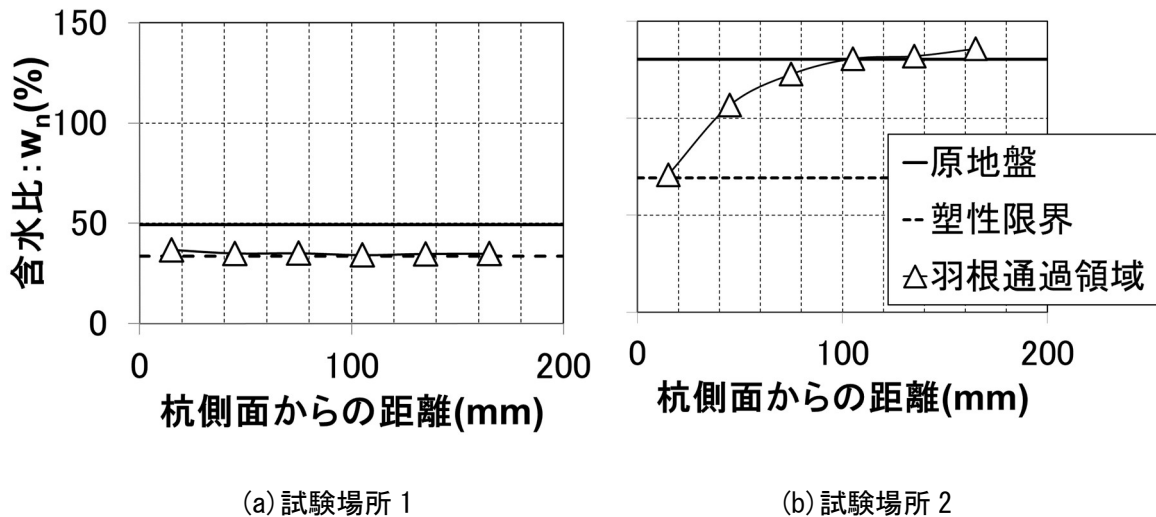


図 4.4 含水比分布

(4)考察

両試験場所共に羽根通過領域における地盤の湿潤密度増加および含水比低下が確認された。

羽根付き杭の貫入速度は粘性土の圧密速度に比べて速いと考えられるため，羽根付き杭の貫入に伴う土の移動は非排水条件下であり，土中の空気を埋めるのは水ではなく土粒子の動きが支配的であると推察される。これについては，表 4.3 に示す通り，羽根付き杭の周辺地盤においては，土中の空気体積割合の減少並びに土粒子体積割合の増加が確認されており，妥当であると考えられる。これにより，図 4.4 における含水比の低下は，土粒子体積割合の増加に伴う密度増加が大きく影響していると考えられる。

ここで，図 4.4 における含水比の低下領域が試験場所によって異なる理由について考察する。試験場所 1 は，相対的に飽和度が高く，間隙比が小さい。羽根付き杭の施工に伴い杭周辺に押し上げられる土量は杭軸部の体積分であり，かつ両試験場所において同量であると仮定すると，押し上げられた土粒子が埋める間隙の割合が少ないため，相対的に杭表面から離れた位置まで土粒子の移動が生じ，含水比の低下領域が広がったものと考えられる。試験場所 2 は，相対的に飽和度が低く，空気体積割合が高い。このため，土粒子の移動は杭表面に近い領域で収まったものと考えられる。特に，関東ロームなどの火山灰質粘性土のよう

に粘性土に比べて飽和度が低い⁴⁻⁹⁾ことが知られている地層においては、このような傾向になるものと考えられる。

表 4.3 土の物理量

土の 物理量	試験場所 1		試験場所 2	
	原地盤	羽根通過 領域	原地盤	羽根通過 領域
S_r (%) ※1	97.5	97.9	93.6	96.8
V_s (%) ※2	44.1	50.1	21.3	22.5
V_w (%) ※3	54.5	48.8	73.7	75.0
V_a (%) ※4	1.40	1.05	5.04	2.48

※1 飽和度

※2 土中の土粒子体積の占める割合

※3 土中の水体積の占める割合

※4 土中の空气体積の占める割合

4.5. 圧密特性の変化

(1)試験の目的

羽根付き杭周辺の粘性土地盤においては、杭の回転貫入に伴う地盤の押し拡げの影響および施工の際に羽根が地盤中を回転しながら貫入することの影響により、練り返しと同様の作用を受け、構造が脆弱化するおそれがあると考えられる。粘性土は練り返しにより乱されると、その構造組織が破壊されるため軟らかで不安定な状態となる（脆弱化する）⁴⁻¹⁰⁾。また、練り返し粘土の圧密特性の特徴として、不攪乱粘土に比べて間隙比が小さいこと、 e - $\log P$ 関係曲線が下方に位置すること、圧密降伏応力を超えた後の e - $\log P$ 関係曲線の勾配が緩やかであることが挙げられている^{4-11),4-12)}。このため、羽根通過領域における構造の脆弱化の有無を確認することを目的とし、図 4.1 に示す位置から採取した試料の圧密試験を実施し、原地盤の e - $\log P$ 関係に対する変化傾向を把握した。

(2)試験方法

試験方法は、土の段階載荷による圧密試験方法（JIS A 1217 : 2009）⁴⁻¹³⁾に従った。試料数は、試験条件毎に 1 試料ずつとした。

(3) 試験結果

間隙比 (e) と圧密圧力 (P) との片対数関係 (以下, e - $\log P$ 関係) を図 4.5 に示す。また, 図 4.5 から土の段階载荷による圧密試験方法 (JIS A 1217 : 2009) に示されている方法により圧密降伏応力 (p_c) を算定した結果を表 4.4 に示す。

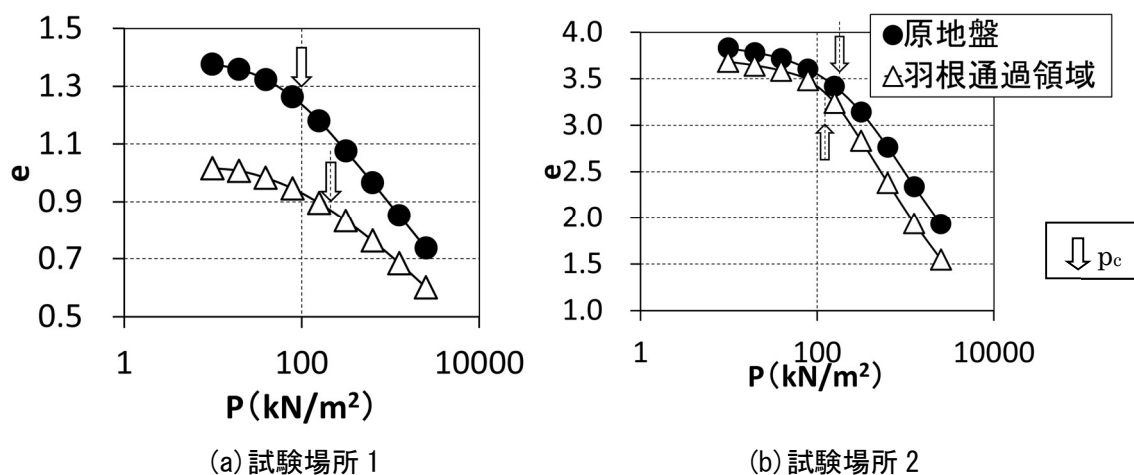


図 4.5 e - $\log P$ 関係

表 4.4 圧密降伏応力 (p_c) [kN/m^2]

	試験場所 1	試験場所 2
原地盤	98.8	180
羽根通過領域	218	123

(4) 考察

羽根通過領域における土の圧密特性は, 原地盤に比べると間隙比が小さいことおよび e - $\log P$ 関係曲線が下方に位置することなど, 練り返し粘土と同じような特徴が確認されていることから, 当該領域は乱れの影響を受け, 構造が脆弱化している可能性がある判断される。

構造脆弱化の要因は, 施工に伴う土の押し拵げと羽根の通過の 2 つが挙げられ, これらの作用により一種の練り返し効果を受けることにより生じたものと推察される。また, 構造脆弱化の程度は, 密度増加の割合が大きかった試験場所 1 の方が相対的に顕著であり, 土の押し拵げ領域が狭く試料採取位置における密度増加が僅かであった試験場所 2 においては,

相対的に小さいものであったことから羽根通過よりも土の押し広げの方が構造脆弱化に影響するものと考えられる。

なお、試験場所 1 においては、図 4.5 より構造脆弱化の傾向が明瞭に確認されたが、表 4.4 に示す通り圧密降伏応力の増加も確認されており、4.4 節で確認された密度増加の影響も受けている可能性もあると考えられる。

一方、試験場所 2 においては、試験場所 1 の結果とは反対に圧密降伏応力が低下している。これは、試料採取位置で明瞭な密度増加が確認されていなかった 4.4 節の結果と対応している。

4.6. 圧縮強度特性の変化

(1) 試験の目的

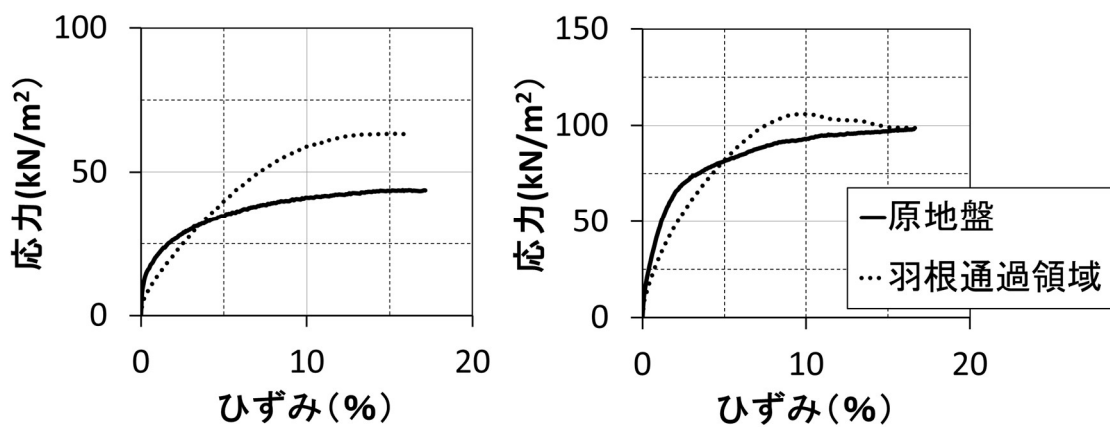
羽根通過領域における地盤の圧縮強度、剛性の変化の有無を把握することを目的とし、図 4.1 に示す領域から採取した試料について UU 試験を実施した。

(2) 試験方法

試験方法は、「土の非圧密非排水 (UU) 三軸圧縮試験方法」(JGS 0521-2009)⁴⁻¹⁴⁾に従った。なお、当該試験時における拘束圧力は、試験場所 1 では 40kN/m²、試験場所 2 では 50kN/m²とした。

(3) 試験結果

応力-ひずみ関係を図 4.6 に、UU 試験結果一覧を表 4.5 に示す。羽根付き杭の羽根通過領域から採取した試料の応力-ひずみ関係は、原地盤に比べて、初期剛性の低下、最大圧縮強さの増加が確認された。なお、ここでの応力 (σ) とは主応力差、ひずみ (ε) とは軸ひずみとしている。



(a) 試験場所 1

(b) 試験場所 2

図 4.6 応力-ひずみ関係

表 4.5 UU 試験結果一覧

土の 物理量	試験場所 1		試験場所 2	
	原地盤	羽根通過 領域	原地盤	羽根通過 領域
E_{50} (N/mm ²) ※1	192	88	458	223
E_{50-w} / E_{50-og} ※2	—	0.46	—	0.49
σ_{max} (N/mm ²) ※3	43.8	63.6	98.2	106
ϵ_u (%) ※4	15.8	15.0	16.6	9.64

※1 変形係数

※2 原地盤の E_{50} (以下, E_{50-og}) に対する羽根通過領域における E_{50} (以下, E_{50-w}) の比

※3 最大圧縮強さ

※4 破壊ひずみ

(4) 考察

試験場所 1 においては、最大圧縮強さの増加および初期剛性の低下が確認されており、これらは、4.1 節に示す密度増加および 4.2 節に示す構造脆弱化が要因である可能性が考えられる。

試験場所 2 においては、4.1 節および 4.2 節に示す通り、密度増加および構造脆弱化が試験場所 1 に比べて顕著でなかったが、UU 試験の結果においては、試験場所 1 と同様に強度増加および初期剛性の低下が確認された。

剛性の低下については、文献^{4-12)・4-15)}にて報告されている通り、練り返し粘土において現れる特長である。また、練り返し粘土は、これらの文献に記されている通り、剛性低下に加えて強度低下や破壊ひずみの増加も生じる傾向にあることが知られている。

しかし、羽根付き杭の周辺地盤においては、表 4.5 に示す通り、最大圧縮強さの増加、破壊ひずみの低下が生ずるなど、練り返し粘土の特長とは異なる挙動を示しており、高ひずみ領域においては、密度増加の影響が支配的となって応力-ひずみ関係にその特徴が現れたものと考えられる。

4.7. 第4章のまとめ

羽根付き杭の回転貫入に伴う杭周辺地盤の土性変化を把握するため、原位置から採取した試料（土）の物理特性および力学特性に関する各種試験を行った。その結果、確認された土性の変化およびその推定要因は、以下の通りである。

- ①羽根付き杭の周辺地盤においては、湿潤密度の増加、間隙比の低下、 $e-\log P$ 関係曲線の下方への移動、最大圧縮強さの増加、初期剛性の低下などが確認された。
- ②①に記す物理特性および力学特性の変化は、羽根付き杭の周辺地盤に土性変化（密度増加と構造脆弱化）が生じたことによるものと推察される。
- ③②に記す土性変化は、杭軸部の貫入による地盤の押し上げおよび羽根通過による地盤の練り返し効果によるものと推察される。

4.8. 参考文献

- 4-1) 国土交通省国土地理院ホームページ：ベクトルタイル地形分類, 2020年9月閲覧
(https://www.gsi.go.jp/bousaichiri/lfc_index.html)
- 4-2) 「地盤材料の工学的分類法」地盤工学会基準 (JGS 0051-2009)
- 4-3) 西田義親, 八木則男, 松村夏樹: 攪乱粘土の強度回復に関する物理化学的考察, 金沢大学工学部紀要, 7巻, 2号, pp.55-64, 1973
- 4-4) 山田洋右: 粘土のチクソトロピーに関する研究, 粘土科学, 第22巻, 第2号, pp68-74, 1982
- 4-5) 斎藤二郎, 木村薫, 平間邦興, 土屋幸三郎: 粘性土の強度回復に関する2,3の検討(その2), 大林組技術研究所報, No.12, pp.73-77, 1976
- 4-6) 建築業協会 基礎部会 水平耐力分科会編: 杭の水平載荷試験結果に関する調査報告書, 1978
- 4-7) 日本工業規格「土の湿潤密度試験方法」(JIS A 1225:2009)
- 4-8) 日本工業規格「土の含水比試験方法」(JIS A 1203 : 2009)
- 4-9) 吉見吉昭: 関東ローム地山の力学的性質, 土と基礎, 53-1, pp.63-65, 2005.1
- 4-10) 山口柏樹: 土質力学(講義と演習), 技報堂出版, 1969, 第3版 1984
- 4-11) 小高猛司, 板橋一雄, 三好直輔, 吉田賢史, 福沢宏樹: 不攪乱・再構成・練返し粘土供試体のせん断挙動の違い, 第46回地盤工学研究発表会(神戸), pp255-pp256, 2011.7
- 4-12) 八木則男, 矢田部龍一: 乱れを受けた飽和粘性土の力学特性, 土木学会論文集, 第352号, pp.179-186, 1984.12
- 4-13) 日本工業規格「土の段階載荷による圧密試験方法」(JIS A 1217 : 2009)
- 4-14) 「土の非圧密非排水(UU)三軸圧縮試験方法」(JGS 0521-2009)
- 4-15) 足立格一郎: 土質力学, 共立出版, 2002

5. 羽根付き杭の施工に伴う杭周辺地盤の挙動

5.1. 目的および検討方針

羽根付き杭が地盤中に回転貫入されることに伴う地盤の挙動を把握するため模型杭を用いた室内試験および原位置試験を行った。

5.2. 検討内容

実施した試験項目を以下の①および②に示す。

①地盤の押抜け状況

透明な人工地盤中に模型杭を回転貫入により施工し、施工中の撮影記録を画像解析することにより地盤の押抜け状況を把握した。

②空洞発生の有無

原地盤に模型杭を回転貫入により施工した後、杭周辺地盤を掘削して、杭周辺における空洞発生の有無および押し抜けられた地盤の範囲を目視観察により確認した。

5.3. 透明地盤を用いた施工試験による地盤の押抜け状況の可視化

(1)試験の目的

羽根付き杭の回転貫入中における地盤の押抜け状況の傾向を把握するため、人工地盤中に設置したターゲットの移動状況について撮影した記録の画像解析を行った。本試験に使用した人工地盤は、熔融石英を土粒子、砂糖水を水に見立てて作製したものであり、光の屈折率が熔融石英と合うように砂糖水の濃度と温度を調整することで、地盤の透明度を高め、地盤中に設置したカラービーズの移動状況を可視化できるようにしている。

本論文の検討対象とする地盤は、3.4節にて説明した通り粘土質地盤であるが、この5.3節においては、前述の方法により透明度の高い地盤（以下、透明地盤）を作製するため、砂質地盤を模擬した地盤を使用している。よって、本試験においては、羽根付き杭の回転貫入により土が押し抜けられる方向の傾向を把握することを主たる目的としており、粘性土地盤の場合に生じやすいと考えられる杭周辺地盤における空洞発生の有無については、5.4節にて確認することとし、本節の確認対象外としている。

(2)試験方法

1) 透明地盤

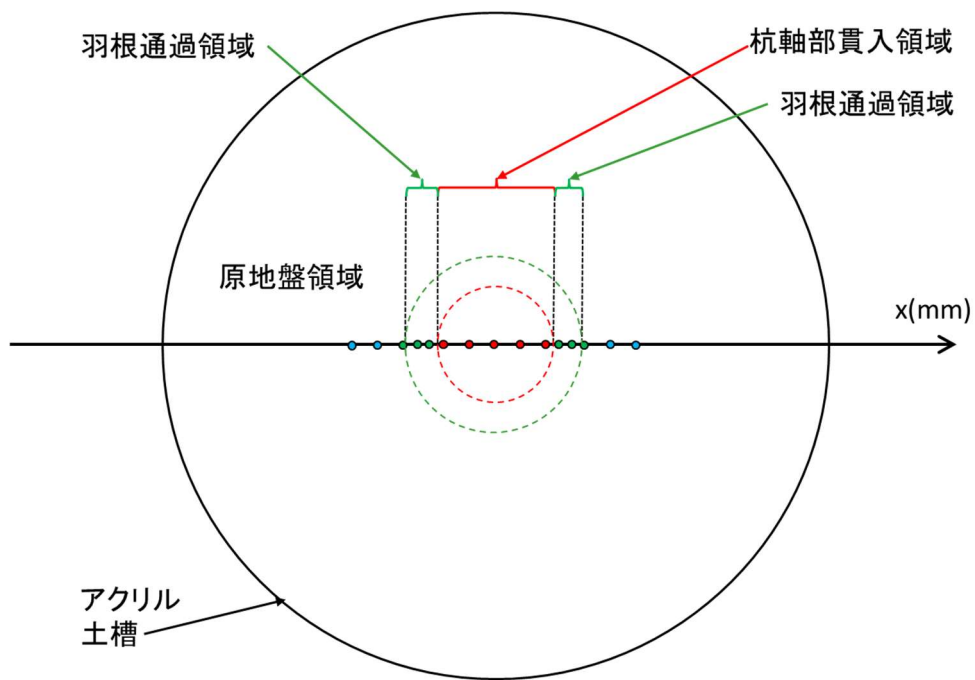
透明地盤は、アクリル製（外径：280mm，厚さ 15mm，高さ 450mm）の土槽内に熔融石英と砂糖水を注入して作製した。透明地盤の作製手順について、まず、熔融石英を空中落下法により土槽内に投入し、次に砂糖水を充填した後、最後に脱気処理を行った。透明地盤の相対密度は、再現性良く作製することができた条件である 60%程度とした。

また、透明地盤中には、カラービーズを杭軸部貫入領域、羽根通過領域および原地盤領域に概ね区分けして設置した。

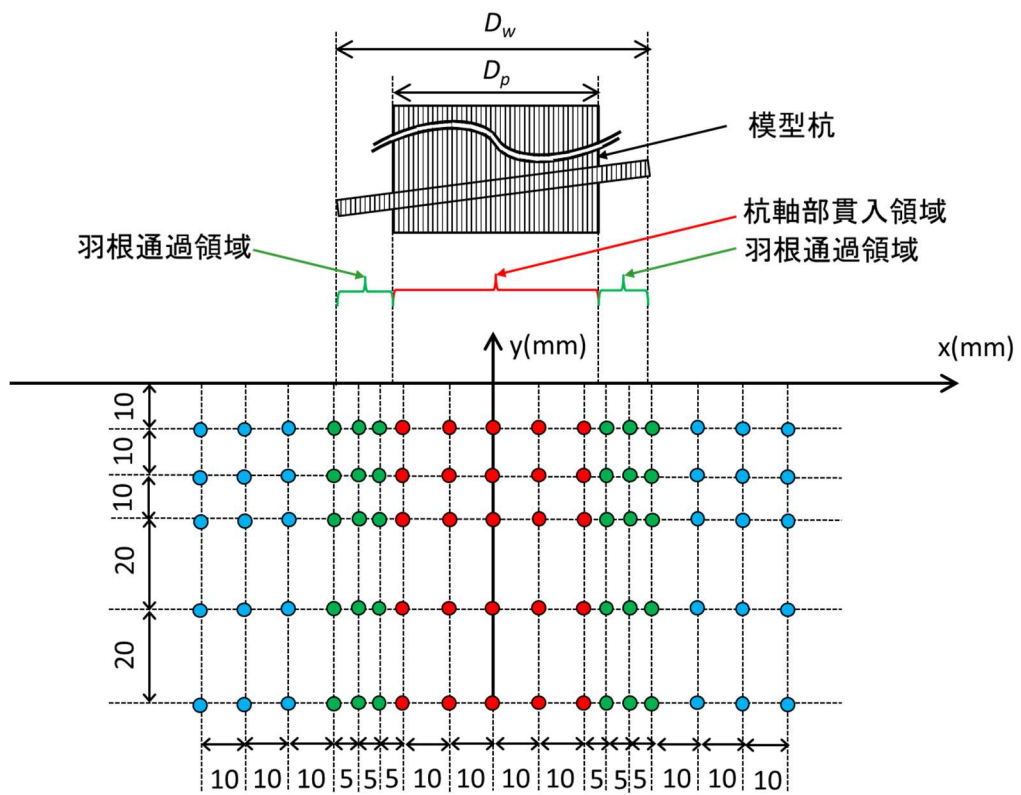
透明地盤に使用した材料諸元を表 5.1 に、カラービーズの設置位置の目安を図 5.1 に、それぞれ示す。

表 5.1 透明地盤に使用した材料の諸元

使用材料	諸元	備考
熔融石英	・粒径：0.75mm から 2.0mm ・相対密度：60%（管理目標値）	砂を模擬
砂糖水	・糖度：69%（管理目標値）	水を模擬



a) 見下げ図



b) 立面図

図 5.1 カラービーズ設置位置の目安

2) 模型杭

使用した杭は、削り出しにより製作した鋼製（材質：S50C）の模型杭であり、杭軸部径 45mm，羽根径 67.5mm とした。模型杭を写真 5.1 に示す。



写真 5.1 模型杭

3) 試験装置

使用した加力装置は、一定速度で回転を制御可能なターンテーブルと、一定速度で鉛直方向に押し込み可能な機能を有している。ターンテーブル上にアクリル製の土槽（内径 250mm、高さ 450mm）を設置し、土槽の外周部には透明地盤を撮影するためのカメラを、土槽の内側には透明地盤を、それぞれ設置している。また、加力装置の上部には、模型杭を取り付け、鉛直力により模型杭を透明地盤内に押し込み可能な機構としている。

試験装置を写真 5.2 に示す。

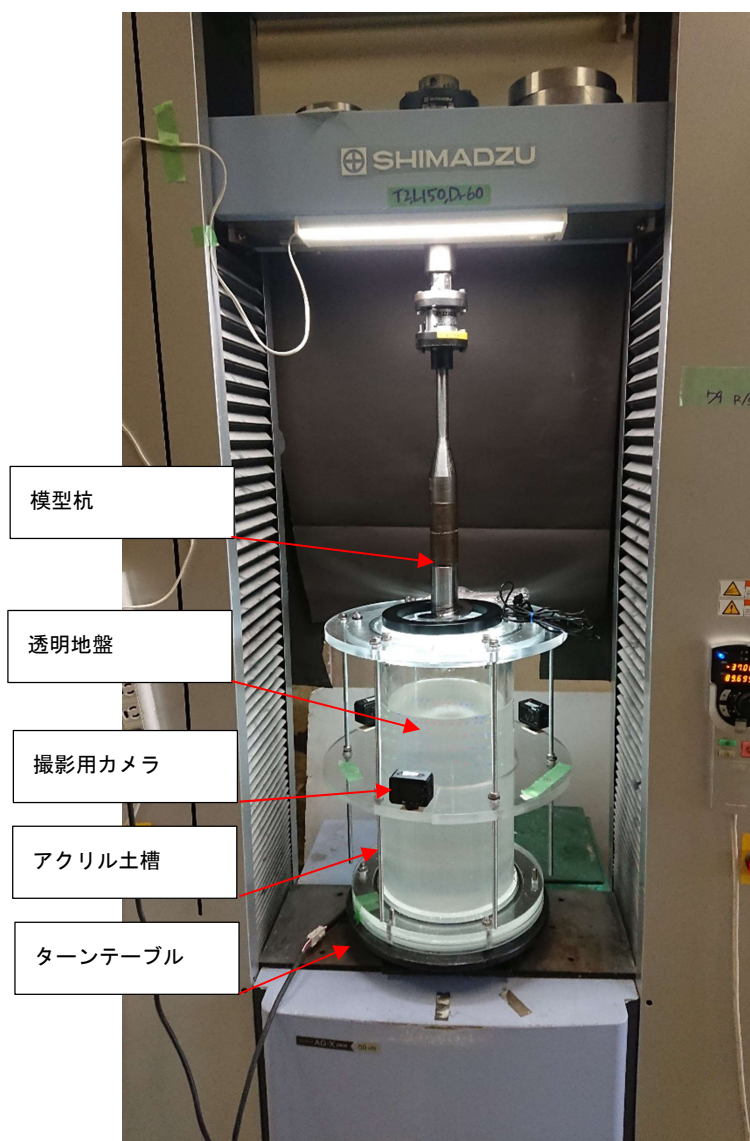


写真 5.2 試験装置

4) 模型杭の施工方法および施工状況の記録方法

透明地盤への模型杭の施工は、土槽を載せたターンテーブルを一定の速度で回転させた状態で、試験装置に取り付けた模型杭を一定の速度で透明地盤中に押し込むことにより、杭が地盤に回転貫入する状況を作り出した。

この施工時における地盤の押抜け状況の把握は、透明地盤中に設置したカラービーズの挙動により行うこととし、カラービーズの挙動は、土槽の側面に設置したカメラの撮影記録により把握した。

試験装置に土槽、透明地盤、模型杭を設置した状況を写真 5.3 に示す。

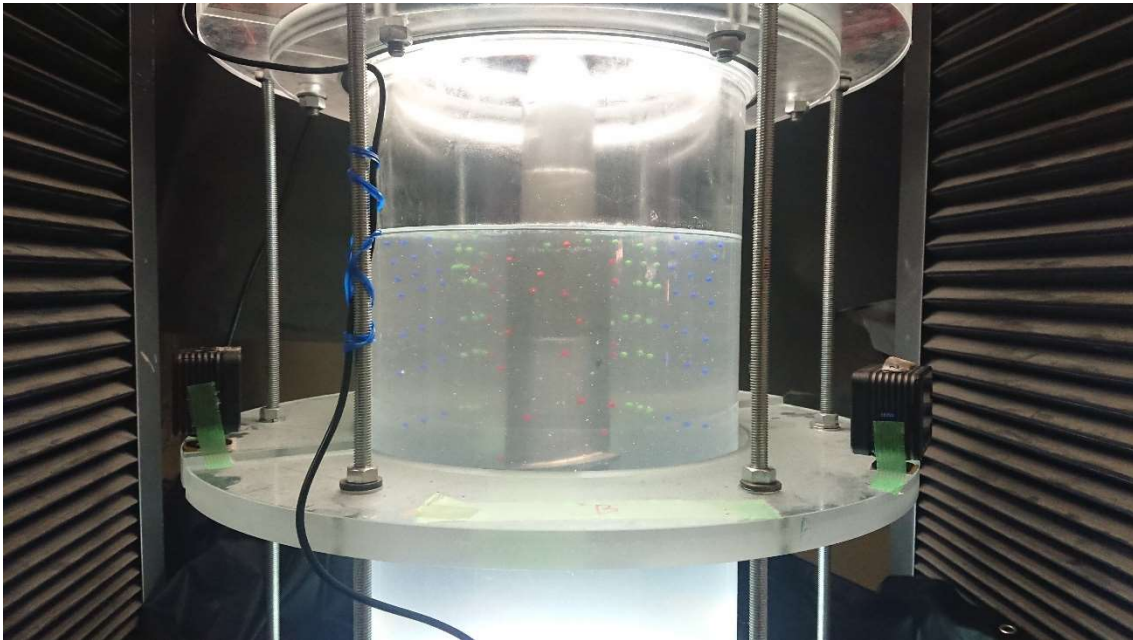


写真 5.3 模型杭の施工状況

(3)試験条件

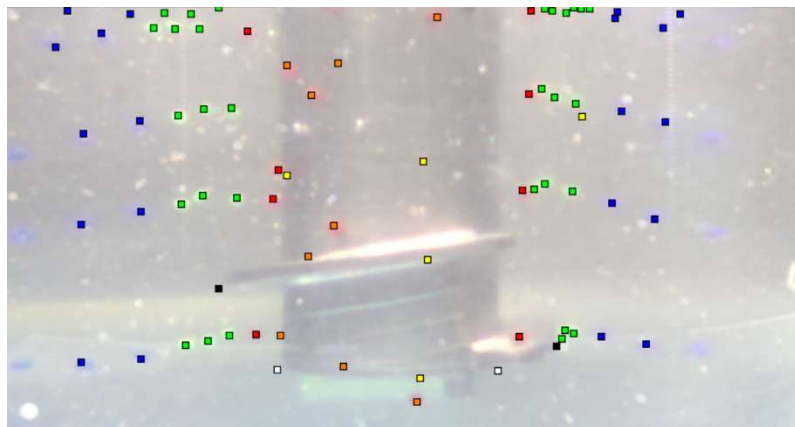
3.2 節に示す貫入メカニズムより，羽根付き杭の回転貫入により土が押し広げられる方向は，羽根付き杭の施工条件によって変化すると考えられる。このため，本試験のパラメータを slp とした。試験条件一覧を表 5.2 に示す。

表 5.2 試験条件一覧

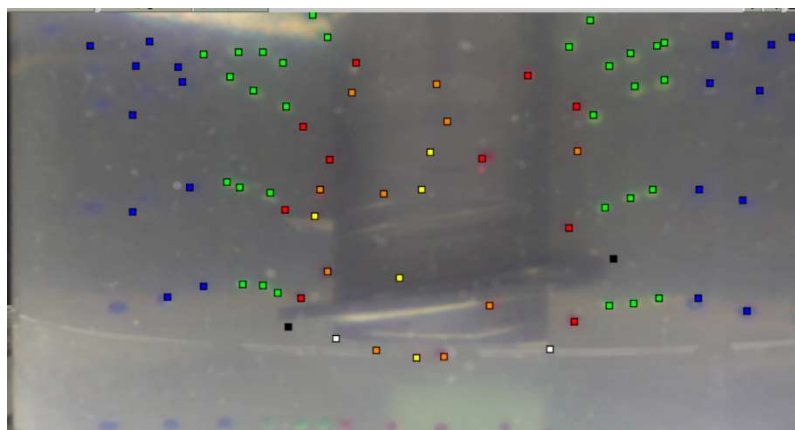
試験 No.	slp
5.3-1	0.67
5.3-2	1.0
5.3-3	1.5

(4)試験結果および考察

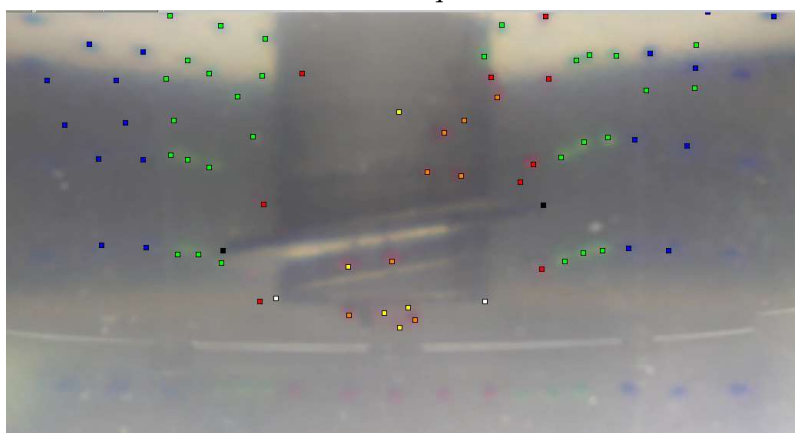
模型杭の施工後における透明地盤の様子を写真 5.4 に示す。なお、画像解析の際にカラービーズの位置を認識しやすいように、カラービーズと同系色のビットマークを画像上に添付している。



a) 試験 No.5.3-1 ($s/p=0.67$)



b) 試験 No.5.3-2 ($s/p=1.00$)

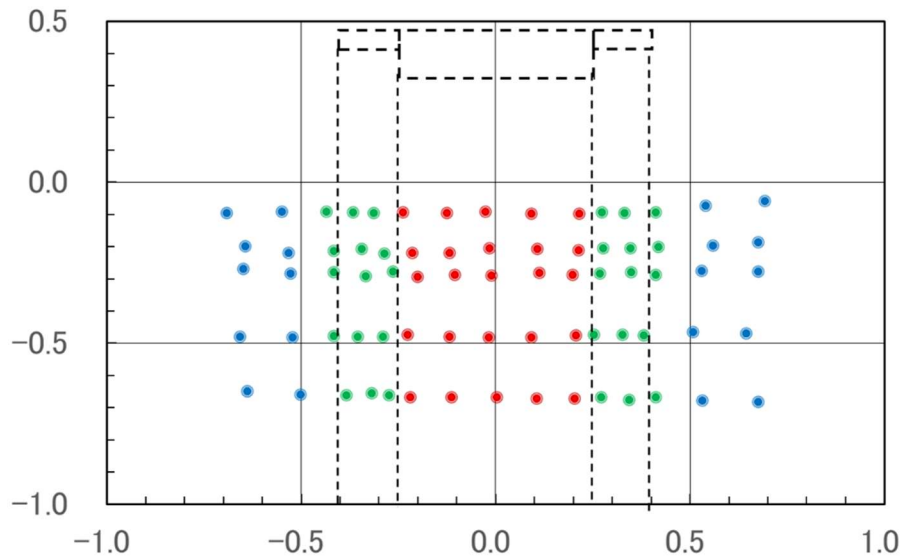


c) 試験 No.5.3-3 ($s/p=1.50$)

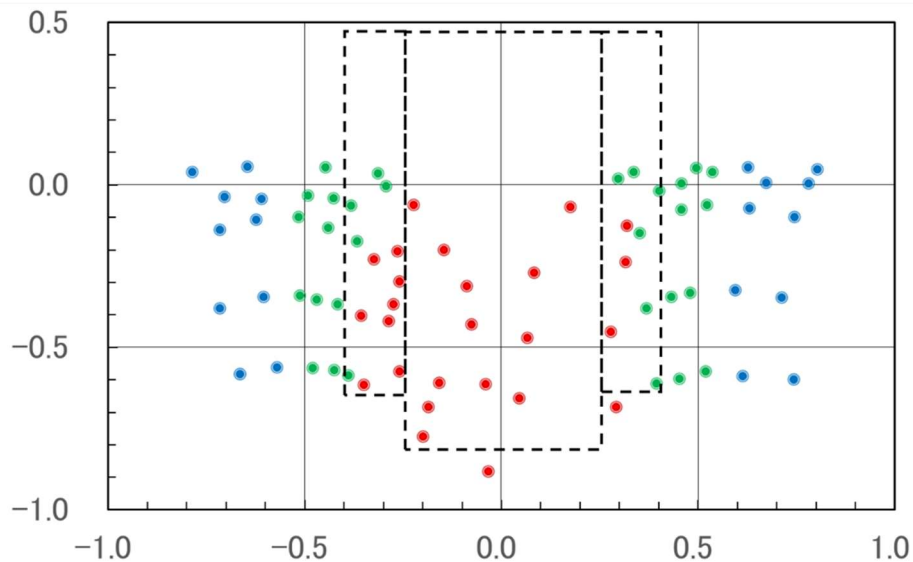
写真 5.4 模型杭施工後の透明地盤の様子

1) 杭軸部貫入領域における地盤の挙動について

杭の施工前後におけるカラービーズの配置例を図 5.2 に示す。同図より、杭軸部貫入領域に配置していた赤色のカラービーズは、杭の施工により下方および横方向（羽根通過領域）に押し広げられたことが確認された。



a) 杭施工前



b) 杭施工後

(単位：×100mm)

図 5.2 カラービーズの配置図 (試験 No. 5.3-2 : $s/p=1.00$)

また、杭軸部貫入領域におけるカラービーズ（以下、赤色系ビーズ）の移動方向と移動量を把握するため、施工前の位置を原点とした平面座標上に、杭施工に伴うカラービーズの軌跡を図 5.3 に示す。同図より、 s/p が 1.0 より小さいとき、赤色系ビーズは横方向に移動する傾向が強く、 s/p が 1.0 より大きくなると、下方向に移動する傾向が強くなることが確認された。これは、3.2 節に示した羽根付き杭の貫入メカニズムの妥当性を示唆するものであると考えられる。

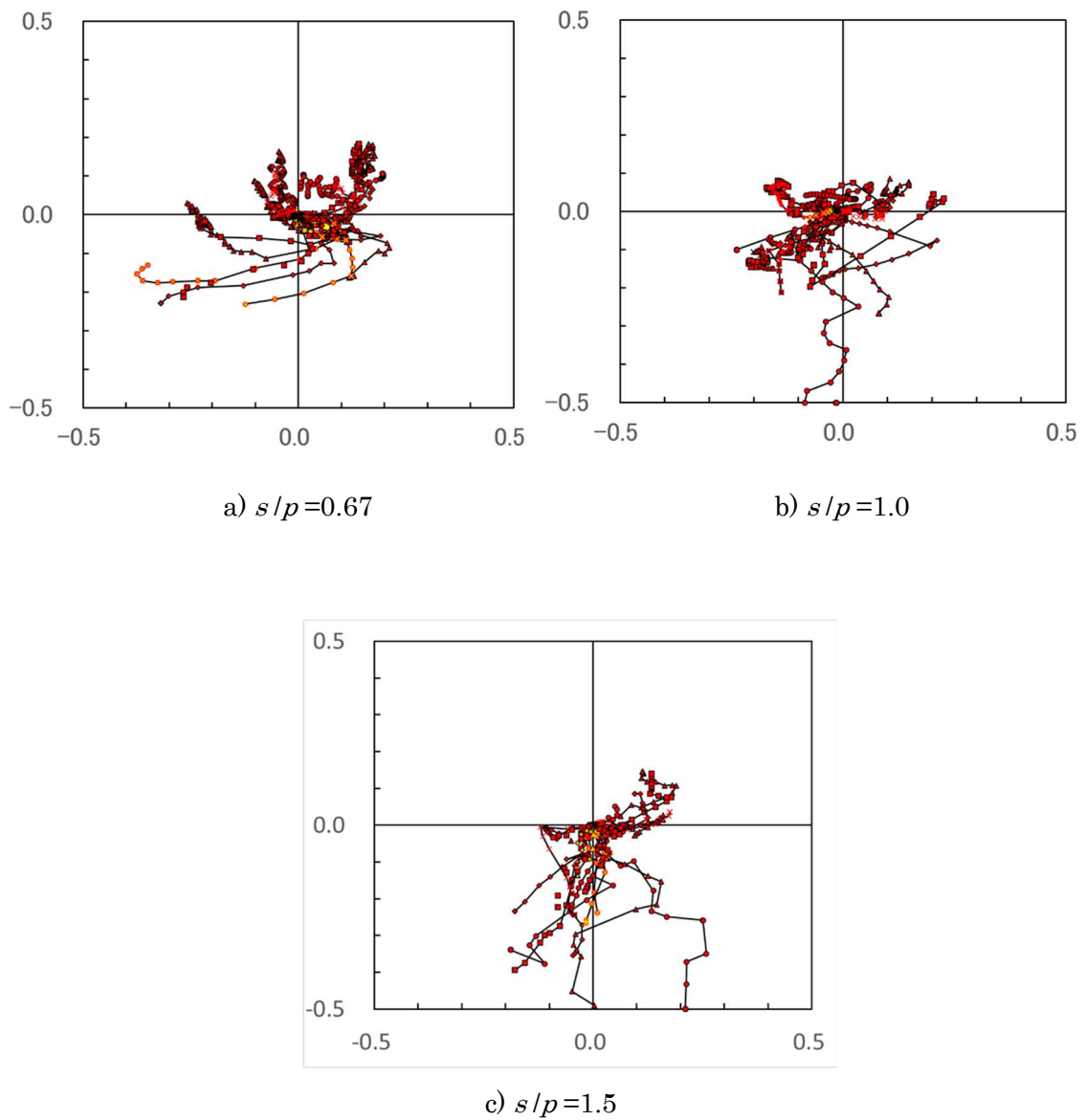


図 5.3 カラービーズの移動方向と移動量

2) 羽根通過領域における土の挙動について

杭の施工に伴う羽根通過領域におけるカラービーズ（以下、緑色カラービーズ）の軌跡を図 5.4 に示す。同図により、全体的に斜め上方向に移動している傾向であることが確認された。また、 s/p が 1.0 より大きくなると浅い位置におけるカラービーズが杭軸部貫入領域に入り込むような挙動が認められた。

本試験では、透明地盤に対して上載圧を加えていないため、浅い位置の挙動が大きくなった可能性はあるが、このような乱れを受けると、粘土質地盤においては構造の脆弱化が生じるおそれがあると考えられる。

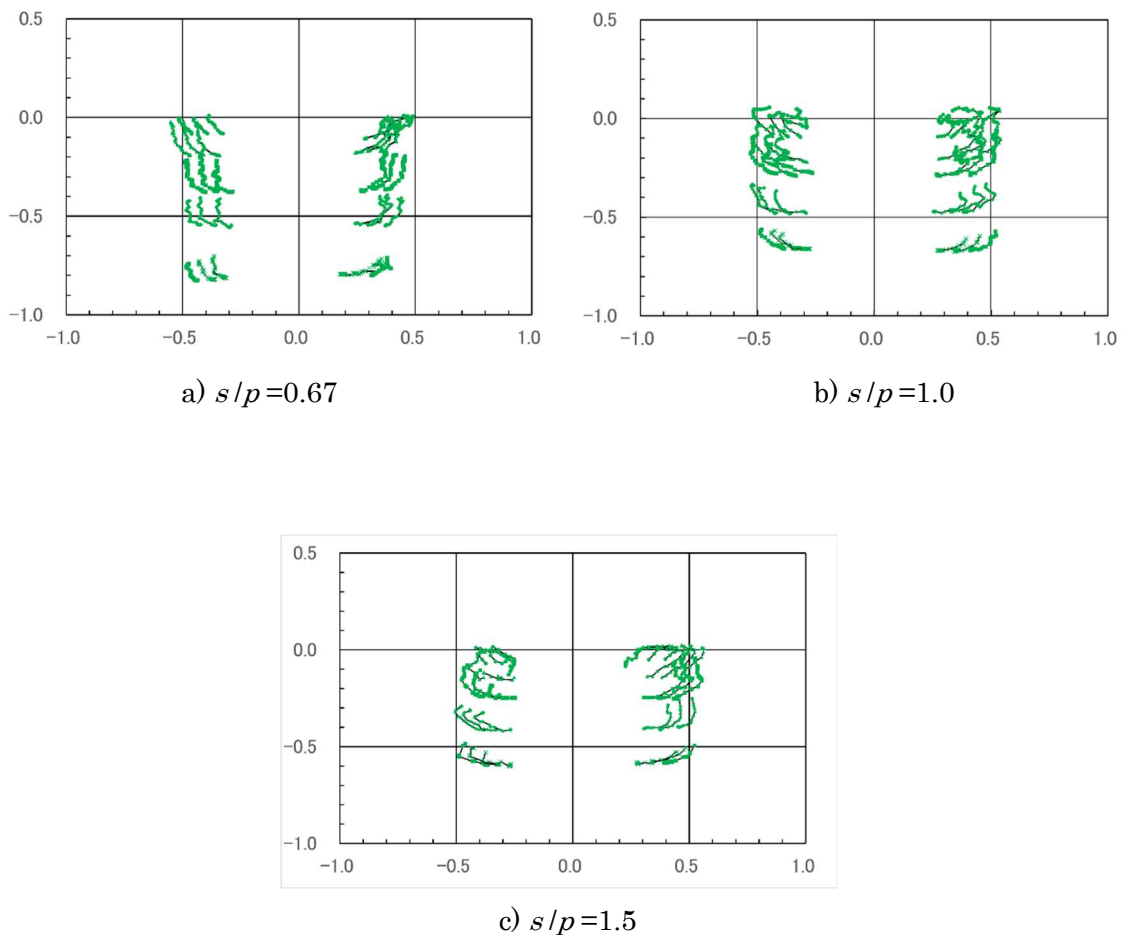


図 5.4 羽根通過領域におけるカラービーズの軌跡

3) 原地盤領域について

杭の施工に伴う原地盤領域におけるカラービーズ（以下、青色カラービーズ）の軌跡を図 5.5 に示す。同図により、全体的に斜め上方向に移動している傾向であることが確認された。

また、羽根通過領域に配置されたカラービーズ（緑色）において確認された浅い位置における軌跡の乱れは、確認されなかった。

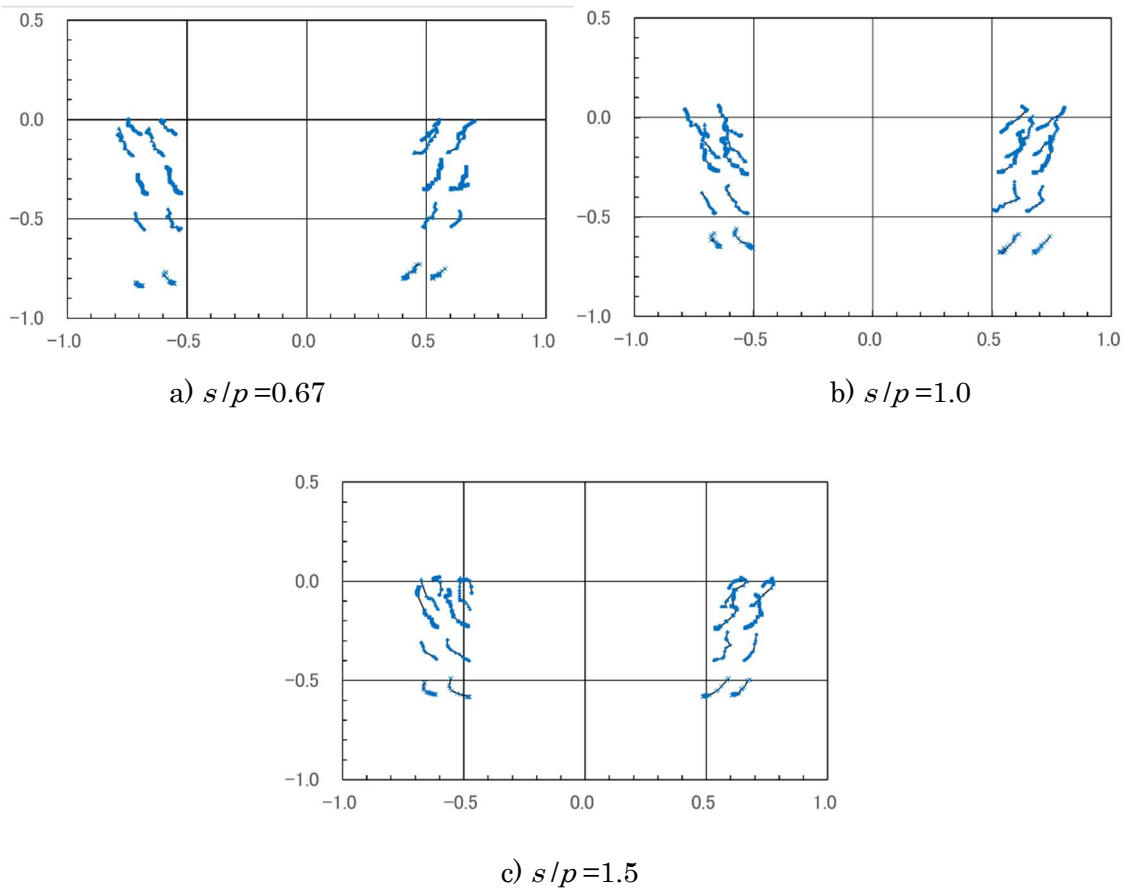


図 5.5 原地盤領域におけるカラービーズの軌跡

5.4. 掘り起こしによる杭周辺地盤における空洞発生状況の目視観察

(1) 試験の目的

羽根付き杭の回転貫入後における地盤の押し広げ状況，特に空洞の発生状況を把握するため，粘土質地盤に模型杭を施工した後，杭周辺地盤の一部を掘り起こし，地盤の目視観察を行った。また，一部の試験ケースにおいては，杭軸貫入領域の地盤が押し広げられた様子を施工後に把握できるようにするため，杭軸貫入領域の地盤を予めカラー粘土に置換した後，当該位置に模型杭の施工を行った。

(2) 試験方法

1) 地盤

本試験を実施した試験場所は，4.3節に示す試験場所2であり，試験対象とした地盤は，GL-2.3m以深の火山灰質粘性土である。当該地盤の物理的性質は，表4.1に示す通りである。

2) 模型杭の形状および施工条件

本試験に使用した模型杭は，杭軸部径19mmの鋼管杭であり，パラメータを s/p および D_w/D_p とし， s/p については0.50，1.0，1.5の3条件， D_w/D_p については2.0，3.0の2条件を試験対象とした。模型杭の諸元を表5.3に，模型杭の形状を図5.6に，それぞれ示す。なお， s/p の許容値は±0.1として，模型杭を施工した。

表 5.3 模型杭の諸元

Test-No.	Ground Type	D_p (mm)	D_w (mm)	D_w/D_p	s (mm)	p (mm)	s/p	t_w (mm)	l_{wd} (mm)
5.4-1	Original ground	19	38	2.0	4.7	9.5	0.50	1.5	1.5
5.4-2		19	38	2.0	9.5	9.5	1.0	1.5	1.5
5.4-3		19	38	2.0	14.3	9.5	1.5	1.5	1.5
5.4-4	Color clay	19	38	2.0	9.5	9.5	1.0	1.5	1.5
5.4-5		19	57	3.0	9.5	9.5	1.0	1.5	1.5

※着目したパラメータを網掛けで示す。

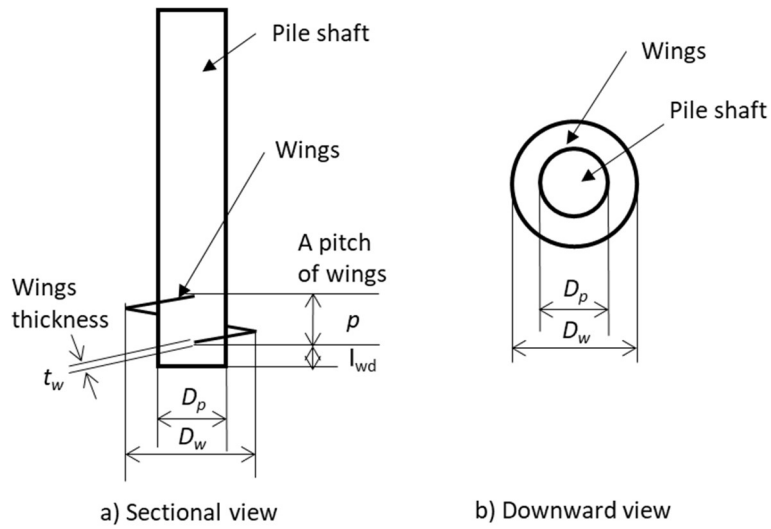


図 5.6 模型杭の形状

3) 試験方法

手動式のスウェーデン式サウンディング試験機（以下、SWS 試験機）のロッド先端に模型杭を取り付け、ロッドを回転させることにより模型杭を地盤中に貫入させた。このとき SWS 試験機に載せるおもりの重さを変えることにより、模型杭の貫入ピッチ (s) を変化させた。模型杭の施工後、杭周辺地盤を掘削することで、模型杭の周辺地盤における隙間の有無を目視観察により確認した。模型杭の施工状況を図 5.7 に示す。

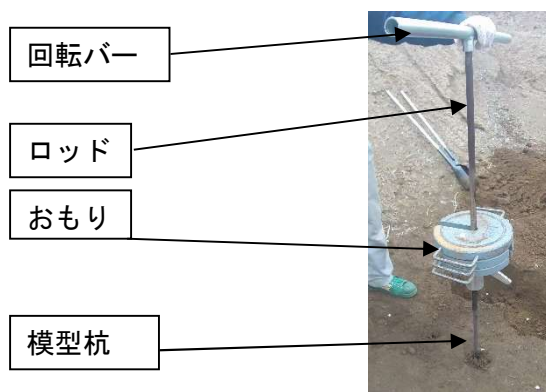


図 5.7 模型杭の施工状況

また、試験 No.5.4-4 および試験 No.5.4-5 においては、模型杭の施工に先立って、直径 18mm のアルミパイプを用いてプレボーリングにより原地盤（杭軸貫入領域）に孔を空け、当該孔にカラー粘土を挿入した。当該孔の中心位置に模型杭を回転貫入によって施工した後、杭周辺地盤を掘削することで、模型杭の施工に伴い押し広げられたカラー粘土の分布状況を目視観察した。カラー粘土および模型杭の設置手順を図 5.8 に示す。



図 5.8 カラー粘土および模型杭の設置手順

4) 模型杭の施工結果

模型杭の施工においては、 s/p について管理した。 s/p の実測値（以下、 $(s/p)'$ ）は、5.4.1式により算定し、ロッドの総貫入区間（ Σs ）における s/p の平均値が管理許容値の範囲内であることを確認した。模型杭の施工管理結果を表 5.4 に示す。

$$(s/p)' = \frac{\Sigma s}{\frac{1}{2}N_a p} \quad (5.4.1)$$

Σs : Total settlement of rod (mm)

N_a : Half rotation of rod (rev.)

表 5.4 模型杭の施工管理結果

Test No.	s/p	Σs (mm)	N_a (rev.)	p (mm)	$(s/p)'$
5.4-1	0.50	240	100	9.5	0.51
5.4-2	1.0	248	50	9.5	1.0
5.4-3	1.5	297	40	9.5	1.6
5.4-4	1.0	250	56	9.5	0.94
5.4-5	1.0	244	52	10.0	0.94

(3)試験結果および考察

1) s/p の違いが空洞発生状況に及ぼす影響



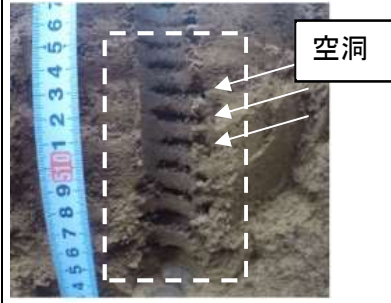
試験 No.5.4-1 から試験 No.5.4-3 における目視観察の結果を図 5.9 に、 s/p の違いが土の押拵げ方向に及ぼす影響を図 5.10 に、それぞれ示す。なお、図 5.10 a)は、回転貫入時における羽根の軌跡を立面的に見た様子と平面的に展開して見た様子との関係を示しており、同図 b)から d)は、 s/p の違いによって生じる羽根の軌跡と土の押拵げ方向の違いを平面的に表したものである。

図 5.9 b)より s/p が 1.0 の場合、羽根通過領域（同図中の破線で囲んだ範囲）には空洞が確認されなかった。これは、図 5.10 b)に示す通り羽根が横方向にも下方向にも土を押し拵げにくい条件であったことが要因であると考えられる。

また、 s/p が 0.5 の場合も羽根通過領域に空洞が確認されなかった。 s/p が 1.0 よりも小さい場合、羽根の回転貫入により土が羽根傾斜面に対してやや横方向（図 5.10 c)参照）

に押し広げられ、羽根の下方に空洞が生じる恐れがあると予想されたが、空洞が生じたとしても、その下を杭が貫入した際に押し広げられた土により埋められたものと推察される。

一方、 s/p が 1.5 の場合は、羽根通過領域に羽根の軌跡を現すように空洞が縞状に生じていた。これは、羽根の回転貫入により土が羽根傾斜面に対してやや下方（図 5.10 d)参照）に押し広げられることにより通過した羽根の上面に空洞が生じたものと考えられる。

s/p		
0.50	1.0	1.5
		
a) 空洞無し	b) 空洞無し	c) 空洞有り

(〇) : 羽根通過領域

図 5.9 目視観察の結果（試験体 No. 5. 4-1 から試験体 No. 5. 4-3）

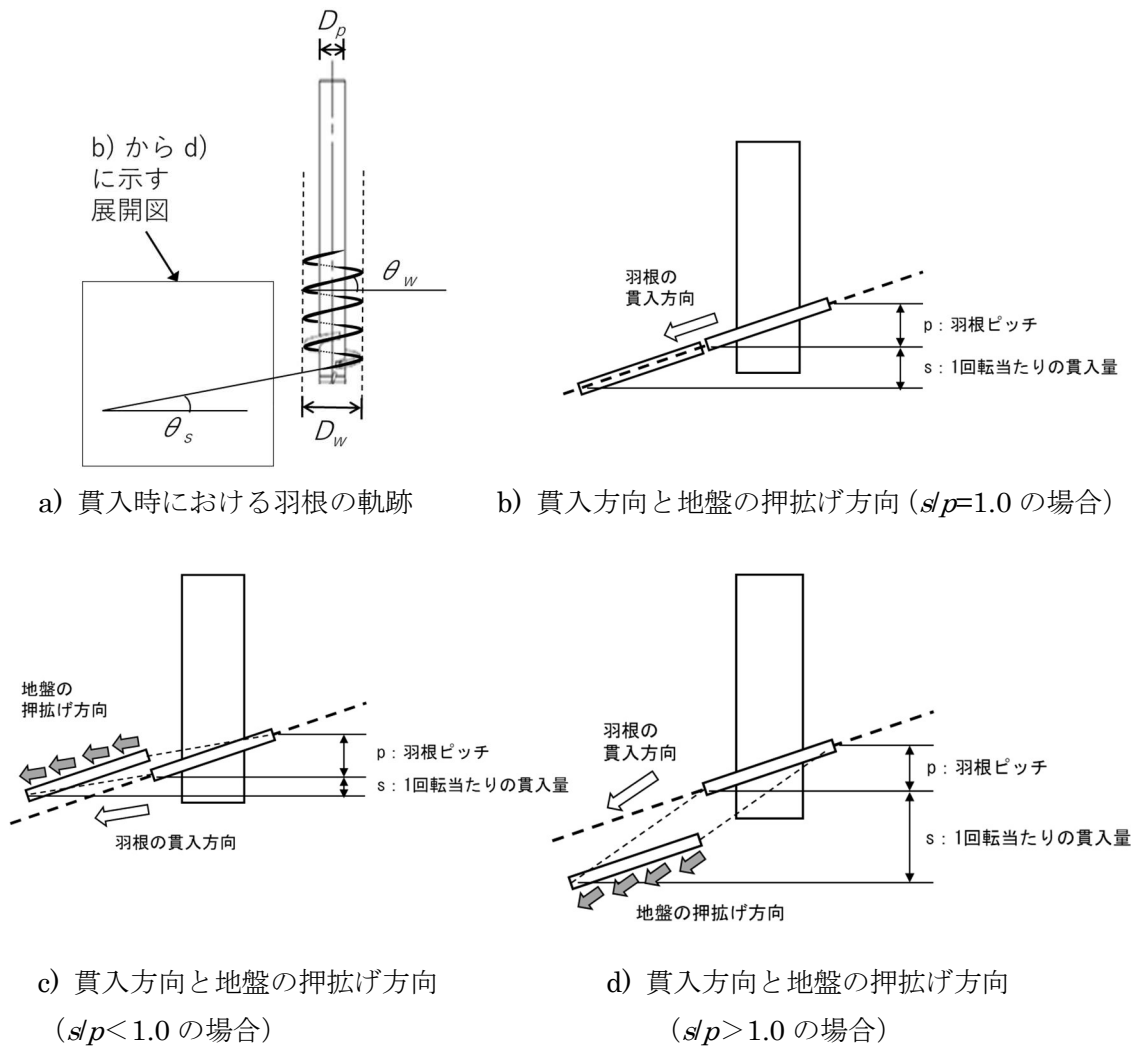



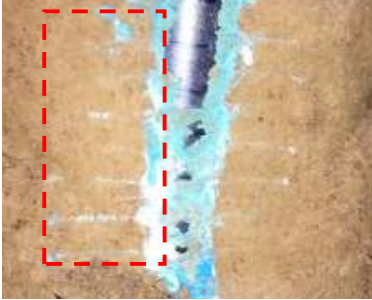

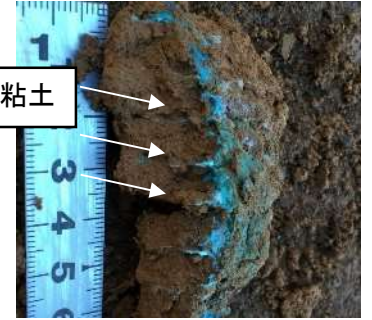

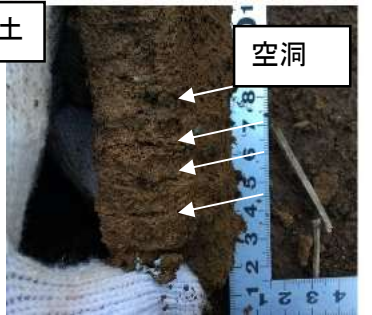
図 5.10 施工条件 (s/p) が地盤の押抜け方向に及ぼす影響 (図 3.3 の再掲)

2) D_w/D_p の違いが空洞発生状況に及ぼす影響

試験 No.5.4-4 および試験 No.5.4-5 における目視観察の結果を図 5.11 に示す。図 5.11a),c)より、 D_w/D_p が 2.0 の場合は、羽根通過領域には空洞が確認されなかった。これは、 s/p を 1.0 としたことで羽根が上下方向のどちらか一方に土を押しつけにくい条件であったことが要因であると考えられ、試験 No.5.4-2 の結果とも対応している。また、カラー粘土は、杭軸部の外周部付近に円筒状に、および羽根通過領域において施工時の羽根の軌跡を示すように縞状に広がっていることが確認できる。さらに、カラー粘土が広がっている水平方向の範囲は、概ね羽根通過領域の幅 (D_w) 程度であり、上下方向の間隔は概ね貫入ピッチ (p) と同程度であった。これらの状況から、羽根付き杭を回転貫入によって施工することにより、羽根通過部分に生じる空洞は、 s/p を 1.0 とすることで抑制することができ、たとえ空洞が生じても押し広げられた土の一部がそれを埋めるものと考えられる。

また、図 5.11 b), d)より、 D_w/D_p が 3.0 の場合も杭外周部および羽根通過領域におけるカラー粘土の押し広げ状況は、 D_w/D_p が 2.0 の場合と同様の傾向が認められた。

しかし、 D_w/D_p が 2.0 の場合には、羽根通過領域の最外縁までカラー粘土が埋まっている (図 5.11 e) 参照) が、 D_w/D_p が 3.0 の場合には、最外縁に空洞が確認された (図 5.11 f) 参照)。先端が閉塞された杭は、杭の回転貫入に伴い地盤を押し広げるが、その押し広げ圧力は杭半径方向の距離に応じて減少する。ここで D_p を一定として D_w を大きくすると、杭軸部から羽根最外縁までの距離が長くなるため、押し広げ圧力の減少により羽根外周部分に空洞が生じた (残った) ものと推察される。

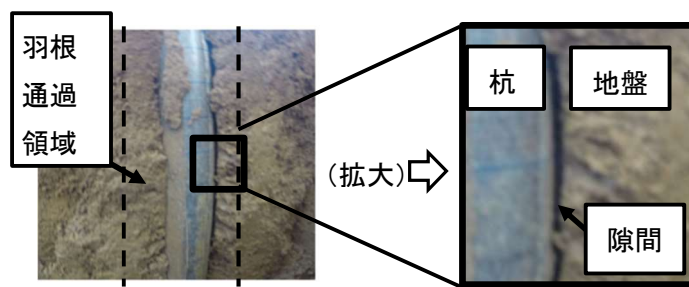
観察位置	D_w / D_p	
	2.0	3.0
羽根通過領域	 <p>a) 隙間無し</p>	 <p>b) 隙間無し</p>
羽根通過領域から採取した試料 (杭外周面側)	 <p>c) 空洞無し</p>	 <p>d) 空洞無し</p>
羽根通過領域から採取した試料 (羽根通過領域の最外縁側)	 <p>e) 空洞無し</p>	 <p>f) 空洞有り</p>

(1 2) : 試料採取位置)

図 5.11 目視観察の結果 (試験体 No. 5.4-4 および試験体 No. 5.4-5)

3) 杭軸方向の隙間

模型杭の設置方法の検討段階において、杭周面と地盤との境界部に杭軸方向の隙間が確認された場合があった。当該隙間の発生状況を写真 5.5 に示す。なお、杭軸方向の隙間発生 の要因と発生した場合における杭の水平抵抗特性については、第 7 章において詳細に検討した結果を示す。



(a) 杭周辺地盤の状況

(b) 杭—地盤境界部の状況

写真 5.5 羽根付き杭施工後の杭周辺地盤状況 (試験 No. 5. 4-2)

5.5. 第 5 章のまとめ

羽根付き杭の回転貫入に伴う杭周辺地盤の挙動を把握するため、透明地盤への模型杭の施工による可視化実験および杭施工後の地盤の掘り出し試験を行った。

その結果、確認された事項およびその推定要因は、以下の①から⑥に記載の通りである。

- ①羽根付き杭の貫入により、杭軸部貫入領域における地盤は下方向および横方向に押し 上げられた。
- ②①について、 slp が 1.0 より小さい場合は横方向に、 slp が 1.0 より大きい場合は下方向 に、それぞれ地盤を押し上げる傾向が強く認められた。
- ③ slp が 1.0 以下の場合は、杭周辺地盤に空洞は確認されなかったが、 slp が 1.5 の場合 は、羽根通過領域に羽根の軌跡を現すように空洞が縞状に生じていた。
- ④③の結果について、羽根通過部分に生じる空洞は、 slp を 1.0 以下とすることで抑制す ることができ、たとえ空洞が生じても横方向に押し上げられた土の一部がそれを埋め るものと考えられる。一方、 slp が 1.5 の場合は、羽根により下方に押し上げられる羽 根通過領域における土の体積が、杭軸貫入領域から横方向に押し上げられる土の体積 よりも大きくなることにより空洞が生じたものと推察される。
- ⑤ slp が 1.0、 D_w/D_p が 2.0 の場合は、③に示す通り杭周辺地盤に空洞は確認されなかつ

たが、 s/p が1.0であっても D_w/D_p が3.0になると羽根通過した軌跡位置の最外縁付近に空洞が生じていた。

⑥⑤の結果について、杭の回転貫入に伴い杭軸貫入領域の土は杭の周辺方向に押し広げられるが、その押し広げ圧力は杭半径方向の距離に応じて減少する。ここで D_p を一定として D_w を大きくすると、杭軸部から羽根最外縁までの距離が長くなるため、押し広げ圧力の減少により羽根外周部分に空洞が生じた（残った）ものと推察される。

6. 羽根形状が羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響

6.1. 目的および検討方針

第 6 章では、 D_w / D_p の違いが羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響を把握するため、模型杭施工後の地盤に対する孔内水平載荷試験および実大杭の水平載荷試験を行った。実大杭の水平載荷試験は、正負交番繰り返し載荷方式を採用し、各荷重ステップにおける繰り返し載荷回数を 20 回とした。

なお、繰り返し回数が羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響については、第 8 章にて報告している。

6.2. 検討内容

羽根付き杭の水平抵抗特性は、第 4 章において確認されている通り、施工に伴う土性変化の影響を受けるため、本章で報告する各種の試験は、すべて実地盤に杭（模型杭および実大杭）を施工した後の地盤や杭に対して実施した。各試験項目の目的を以下の①および②に示す。

①羽根付き杭の周辺地盤における孔内水平載荷試験

D_w / D_p が地盤の水平反力特性に及ぼす影響の把握を目的として、模型杭を施工した後の掘削孔において孔内水平載荷試験（以下、LLT）を行った。

また、比較対象としてボーリング孔における LLT も合わせて実施した。

②羽根付き杭の水平載荷試験

D_w / D_p が杭の水平抵抗特性に及ぼす影響の把握を目的として、実大杭の水平載荷試験を行った。

また、比較対象としてストレート形状の杭を用いた埋込み杭工法における水平載荷試験も合わせて実施した。

6.3. 孔内水平載荷試験による地盤の水平抵抗特性

(1)試験体

1) 地盤

本試験を実施した試験場所は、4.3 節に示す試験場所 2 であり、試験対象とした地盤は、GL-2.3m 以深の火山灰質粘性土である。当該地盤の物理的性質は、表 4.1 に示す通りである。

2) 模型杭の形状および施工条件

施工した模型杭は、軸部径が 45mm、羽根の厚さ(t_w)が 2.5mm、羽根の下端から杭先端までの距離 (I_{wd}) が 2.5mm の鋼管杭であり、 D_w/D_p をパラメータとして 1.5, 2.0, 3.0 の 3 条件で試験を行った。 s/p は 0.75(管理許容値: ± 0.1) とした。

表 6.1 模型杭の諸元

Test No.	D_p (mm)	D_w (mm)	D_w/D_p	s (mm)	p (mm)	s/p	t_w (mm)	I_{wd} (mm)
6.3-1	45	38	1.5	20.0	27.0	0.75	2.5	2.5
6.3-2	45	90	2.0	21.0	28.0	0.75	2.5	2.5
6.3-3	45	135	3.0	22.0	29.0	0.75	2.5	2.5

※着目したパラメータを網掛けで示す。

(2)試験方法

模型杭を原地盤に施工後、当該施工孔において LLT を実施した。また、比較対象としてボーリング孔における LLT も合わせて実施した。LLT は、プレッシャーメーター試験方法 (JGS 1531-2012) に準じて実施した。

原地盤における LLT は、実務において広く実施されているプレボーリング型のプレッシャーメーター試験とした。一方、羽根付き杭の周辺地盤においては、杭施工後の孔壁に対して直接的に水平方向地盤反力特性を把握するためにセルフボーリング型のプレッシャーメーター試験とし、測定管の先端に羽根を有する模型杭を取り付け、その模型杭付きの測定管を回転貫入により地盤中に埋設した。これらの LLT は、模型杭もしくはボーリング孔の施工完了直後に実施した。なお、模型杭は傾斜や杭心ずれが生じないように注意深く施工した。試験装置の概要図を図 6.1 に示す。

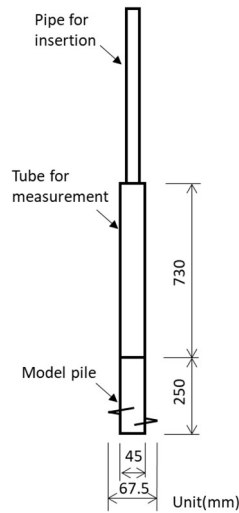


図 6.1 測定管付き模型杭の寸法および形状 (D_w/D_p が 1.5 の場合)

(3)計測項目

計測項目は、孔内圧力 (p) および孔壁ひずみ ($\Delta(r/n)$) とした。

孔内圧力 (p) は、孔内における測定管内の水圧に対して、事前のキャリブレーションにより把握した気中における水圧分を差し引いたものとしている。

孔壁ひずみ ($\Delta(r/n)$) は、測定管内に注入した水量と測定管の容積から算定される測定間の水平方向へのひずみ量としている。

(4)試験結果および考察

孔内圧力 (p) -孔壁ひずみ ($\Delta(r/n)$) 関係を図 6.2 に、試験結果一覧を表 6.2 にそれぞれ示す。なお、表 6.2 における括弧内の値は、原地盤に対する羽根付き杭周辺地盤の試験結果の比を示している。

羽根付き杭の場合は、いずれも低ひずみ領域において孔内圧力がほとんど増加しない、いわゆる「初期がた」の発生が確認された。初期がたの発生は、5.4 節に示す通り杭と周辺地盤との間に生じる杭軸方向の隙間や杭周辺地盤の構造脆弱化が影響しているものと考えられる。また、図 6.2 に示す通り、孔壁ひずみの増加に従い孔内圧力が増加する傾向を示したが、 D_w/D_p が大きくなるに従い初期剛性および最大圧力は相対的に小さくなった。

D_w/D_p が 2.0 以下の場合、最大圧力(表 6.2 ※2 参照)が原地盤よりも大きくなった。これは、第 4 章に示す通り s/p を 1.0 以下とすることで密度増加の効果が構造脆弱化や空洞

発生の影響よりも卓越したためであると考えられる。一方、 D_w/D_p を3.0とした場合は、初期剛性および最大圧力が原地盤よりも小さくなっており、これは、密度増加の効果よりも構造脆弱化や空洞発生の影響の方が卓越したためと考えられる。

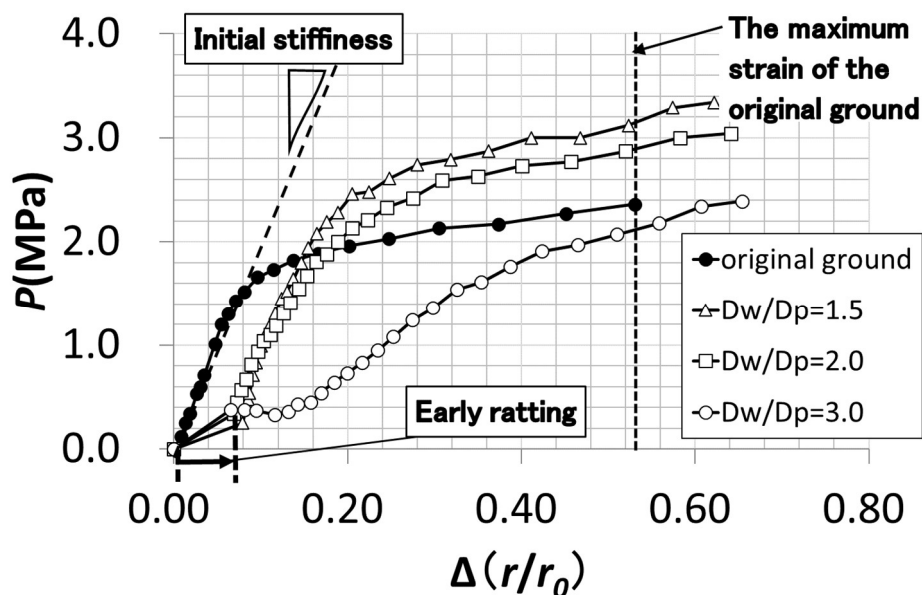


図 6.2 $p-\Delta(r/r_0)$ 関係

表 6.2 LLT の結果一覧

Survey position	D_w/D_p	Early ratting	Initial stiffness ^{※1}	Maximum Pressure ^{※2} (MPa)
Original ground	—	—	20.9(1.00)	2.36(1.00)
The ground around the pile with wings	1.5	0.06	22.1(1.06)	3.14(1.33)
	2.0	0.04	15.1(0.72)	2.89(1.22)
	3.0	0.09	6.5(0.31)	2.12(0.90)

※1 Slope after early ratting

※2 The pressures at the same strain as the maximum strain in the case of original ground

6.4. 実大杭の水平載荷試験による杭の水平抵抗特性

(1) 試験体

1) 地盤

試験場所は、茨城県つくば市の「試験場所 2」であり、調査対象層とする地盤の種類は、火山灰質粘性土である。ここで、杭の水平抵抗に支配的な地盤の影響範囲（いわゆる $1/\beta$ の範囲）は、当該層内に収まっていることを確認している。土質柱状図と杭設置深度の関係を図 6.3 に示す。なお、火山灰質粘性土の物理諸元は、表 4.1 に示す通りである。

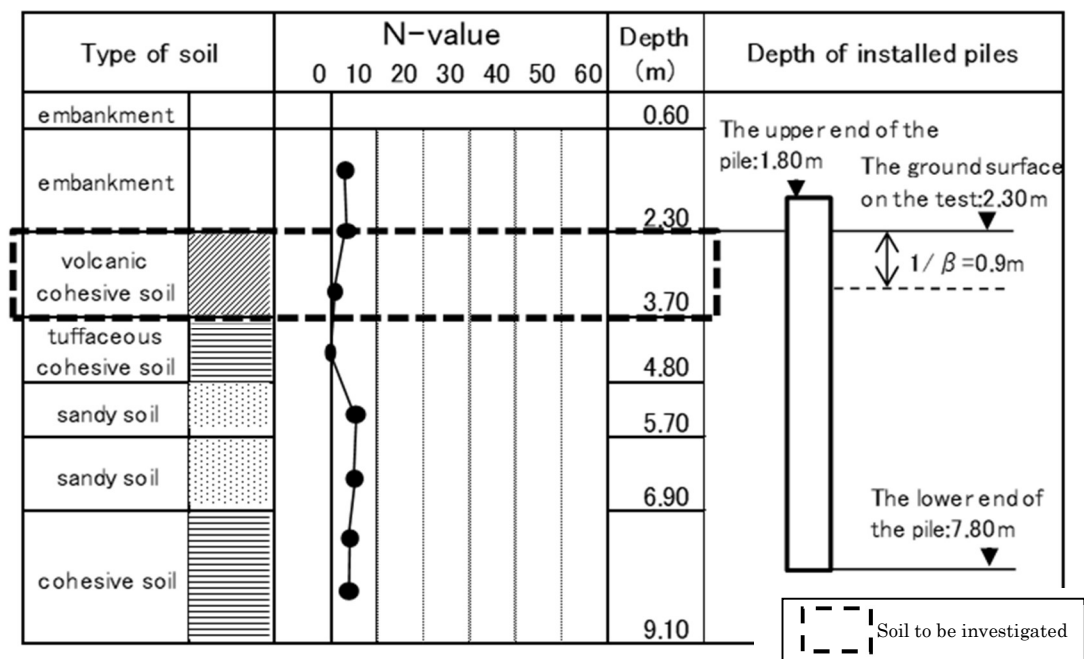


図 6.3 土質柱状図と杭の設置深さの関係

2) 杭の諸元

杭は、軸径 D_p が 165.2mm の鋼管杭であり、羽根径 D_w を種々の大きさに変化させた仕様とした。施工方法は、回転貫入とし、 s/p は 1.0（管理許容値：±0.1）で統一した。

また、比較対象のためストレート形状の杭を埋込み工法により施工した。杭長は、いずれも 6.0m とした。

杭の諸元を表 6.3 に示す。

表 6.3 杭の諸元

試験体 No.	D_p (mm)	D_w (mm)	D_w/D_p	t_w (mm)	l_{wd} (mm)	杭形状	施工方法
6.4-1	165.2	—	—	—	—	ストレート	埋込み（プレボーリング）
6.4-2	165.2	250.0	1.5	12	27	羽根付き	回転貫入
6.4-3	165.2	350.0	2.1	16	31	羽根付き	回転貫入
6.4-4	165.2	420.0	2.5	18	33	羽根付き	回転貫入
6.4-5	165.2	512.0	3.1	18	33	羽根付き	回転貫入

※着目したパラメータを網掛けで示す。

3) 材齢

試験材齢は、28 日以上とした。

(2)試験方法

杭の水平載荷試験は、地盤工学会基準⁶⁻¹⁾に従い実施した。載荷方法は、正負交番繰り返しとし、荷重ステップは 10kN、繰り返し回数は各荷重ステップ毎に 20 回とした。計画載荷サイクル図を図 6.4 に示す。また、杭頭の拘束条件は自由、試験地盤面から載荷点までの高さは+200mm とした。

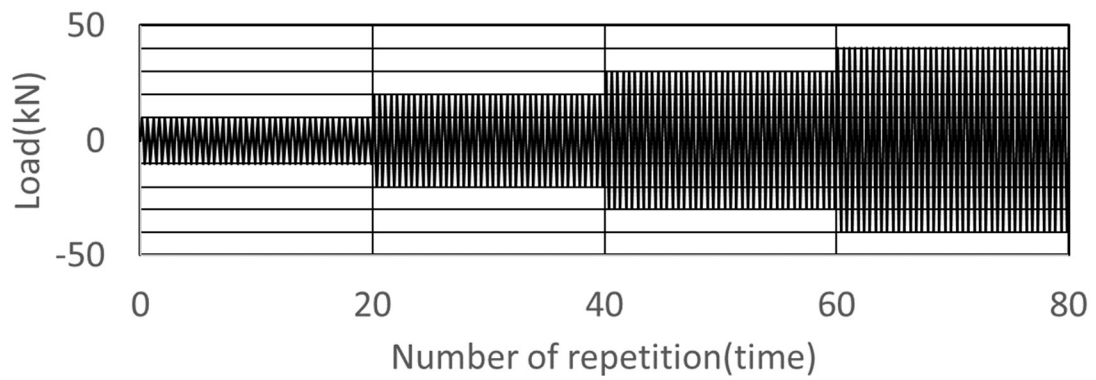


図 6.4 計画载荷サイクル

(3)試験装置および計測項目

1) 試験装置

加力は油圧ジャッキを用い、鋼製梁を介して反力杭で抵抗させる载荷機構とした。加力装置（油圧ジャッキ）設置状況を写真 6.1 に示す。



写真 6.1 加力装置設置状況

2) 計測項目

計測項目は、水平荷重、杭頭部水平変位（計測レベル：試験地盤面+50mm）、杭体ひずみとし、それぞれロードセル、高感度変位計、ひずみゲージを用いて計測した。

(4)試験結果および考察

1) H - y 関係の比較

まず、ストレート杭の水平荷重 (H) と杭頭部水平変位(y)の関係を図 6.5 に示す。なお、ここでは杭体が弾性範囲内における H - y 関係を示している。図 6.5 より、各荷重ステップの第 1 サイクル（繰り返し 1 回目）においては、載荷時に比べて除荷時は右側（負載荷時は左側）に膨らんだ経路を通過しており、いわゆる逆 S 字型の特性を示していることが確認できる。特に、第 2 荷重ステップ（載荷荷重 20kN）以降において、その傾向が顕著であった。これは、杭周辺の粘性土地盤が、荷重の増加に伴い塑性化したことで生じたものと考えられる。

次に、羽根付き杭 (No.6.4-3) の H - y 関係を図 6.6 に示す。ストレート杭と比較して同一荷重時の変位量が大きいことが確認できる。

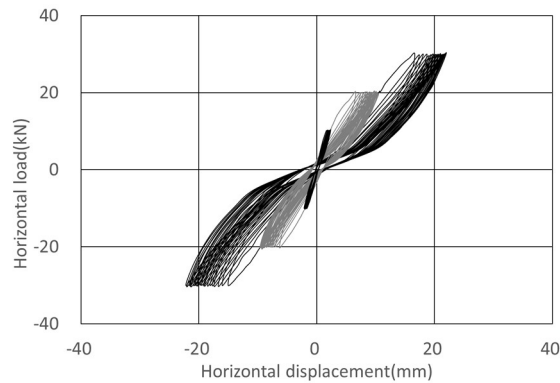


図 6.5 H - y 関係 (No. 6.4-1:ストレート杭)

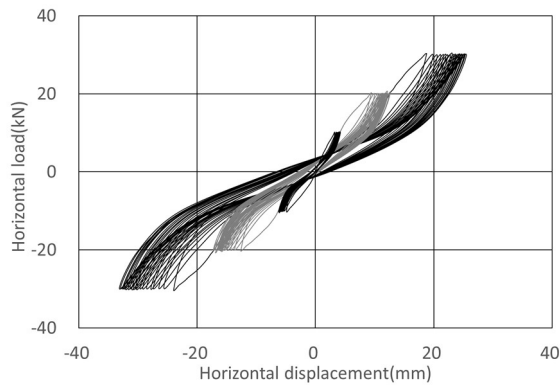


図 6.6 H - y 関係 (No. 6.4-3:羽根付き杭)

ストレート杭と羽根付き杭との H - y 関係の比較にあたっては、杭直近の地盤は土性変化が大きいこと (4.4節参照)、および LLT の結果より微小ひずみ時においては初期がたや剛性低下が確認されていること (6.3節参照) により、低荷重時における挙動に着目した。第1荷重ステップ時 (載荷荷重 10kN 時) における H - y 関係を図 6.7 に示す。

ストレート杭においては、載荷時と除荷時にほぼ同じ経路を通っており、弾性挙動を示している。これに対して、羽根付き杭のうち、 D_w/D_p が 2.0 以上の場合は、塑性挙動を示しており、 D_w/D_p が大きくなるに従い、その傾向が顕著になっている。ここで、文献⁶⁻²⁾において、繰り返しにより土粒子構造が乱されている粘性土について繰り返し圧密を実施した場合、繰り返し回数の小さい段階では、間隙比と有効応力の関係曲線における載荷と除荷過程のラインは離れていること (すなわち塑性挙動を示すこと)、特に繰り返された粘性土の方がその傾向が強く現れることが報告されている。本実験における D_w/D_p が 2.0 以上の場合における羽根付き杭の H - y 関係は、当該文献の報告と類似しており、この

ような挙動を示した要因は、羽根の通過による地盤の構造脆弱化が影響しているものと推察される。

一方、羽根付き杭のうち D_w/D_p が最も小さい 1.5 の場合は、やや逆 S 字型の挙動を示すもののストレート杭と類似の傾向を示している。これは、羽根通過による土粒子構造の乱れよりも、土の押し広げによる密度増加効果が卓越したため、杭周辺地盤に過圧密領域が形成されていることで生じたものと推察される。

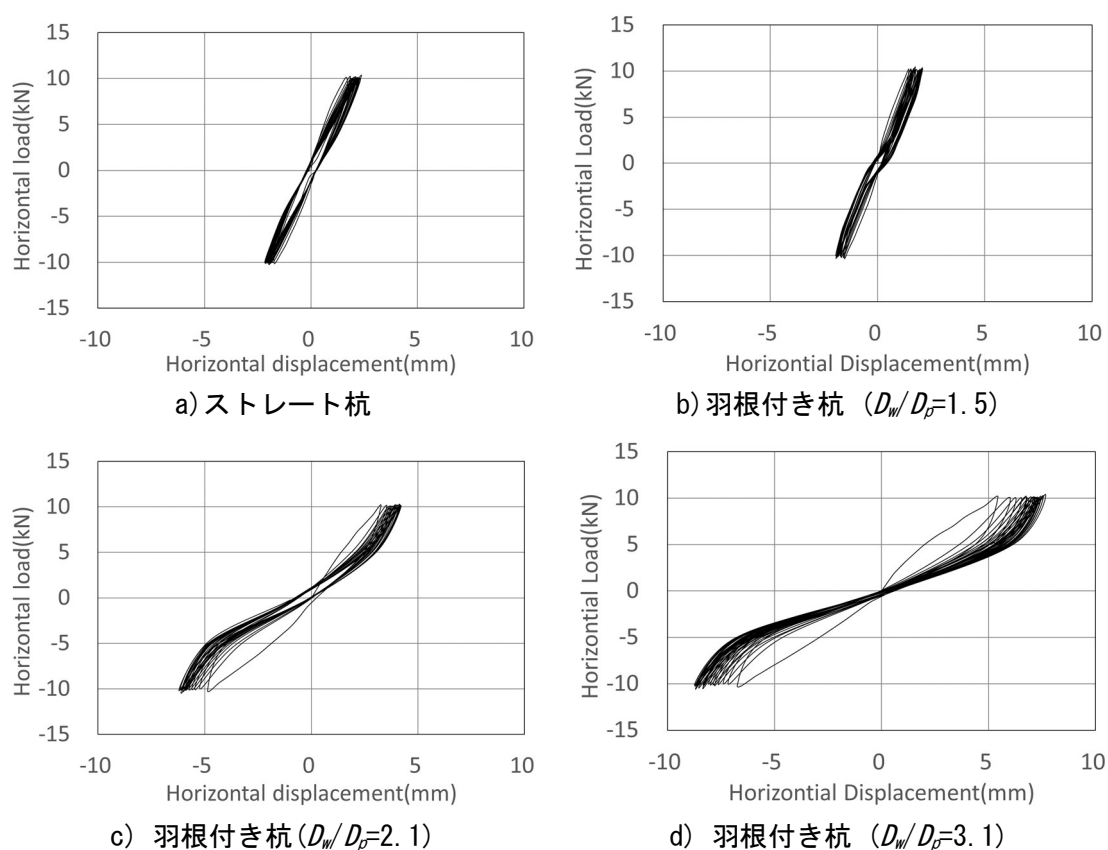


図 6.7 $H-y$ 関係 ($H=10\text{kN}$)

2) D_w/D_p が k_h に及ぼす影響

各荷重ステップにおける繰り返し回数 (n) が1回目の時の H - y 関係を図 6.8 に示す。 D_w/D_p が大きくなるに従い、同一荷重時の y は大きくなった。一方、 D_w/D_p が最も小さい(1.5) 場合には、ストレート杭よりも y が小さくなった。

これらは、 D_w/D_p が大きくなると地盤の水平剛性の低下や最大圧力の低下などが生じたという 6.3 節の結果と対応している。

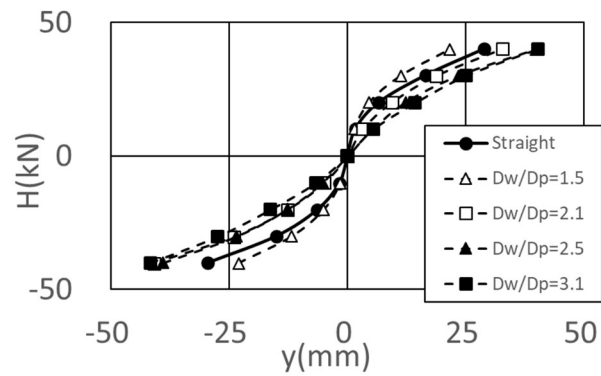


図 6.8 H - y 関係 ($r=1$)

また、建築基礎構造設計指針⁶⁻³⁾に規定されている基準変位 ($y=10\text{mm}$) 到達時におけるストレート杭に対する羽根付き杭の k_h の比と、 D_w/D_p の関係を図 6.9 に示す。 D_w/D_p が 2.0 を超えるとストレート杭に対する k_h の比は 1.0 倍を下回り、 D_w/D_p が最も大きい 3.0 の場合は 0.5 倍程度まで小さくなった。このことから羽根付き杭の k_h の設定にあたっては、 D_w/D_p などの羽根形状と施工条件 (特に s/p) に対応した k_h を設定することに留意が必要であると考えられる。一方、 D_w/D_p が 1.5 の場合は、ストレート杭に対して 1.5 倍程度大きい値を示し、これは羽根形状と施工条件を適切に設定することで k_h の増加効果を期待できる可能性があることを示唆している。

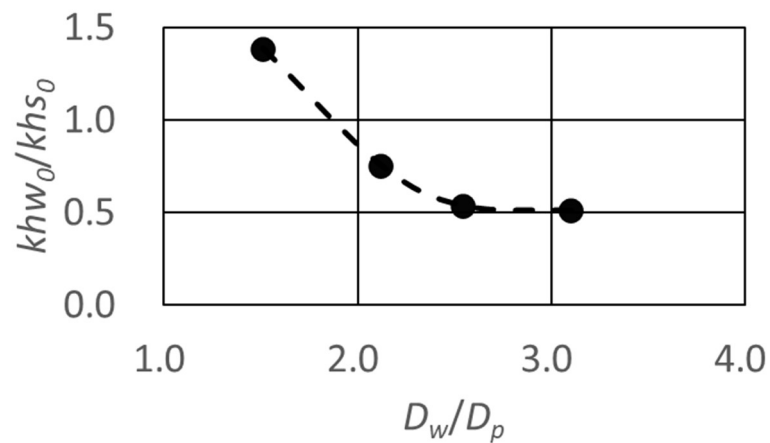


図 6.9 $k_{hw0}/k_{hs0} - D_w/D_p$ 関係

ストレート杭に対する羽根付き杭の k_h の比 (k_{hw}/k_{hs}) と y の関係を図 6.10 に示す。 k_{hw}/k_{hs} は、 y の増加に伴い大きくなる、あるいは一定値に収束する傾向を示している。これは、 y の増加に伴い水平方に抵抗する地盤の範囲が杭周辺の羽根通過領域からその外周の原地盤に移行することや地盤の密度増加の影響が卓越すること等が理由であると考えられる。

図 6.9 および図 6.10 においては、同一変位時の k_h を比較するため、各試験から得られた k_h - y 関係の近似式から求めた k_h を用いて算定した。また、 y は、杭体が弾性域の範囲としている。

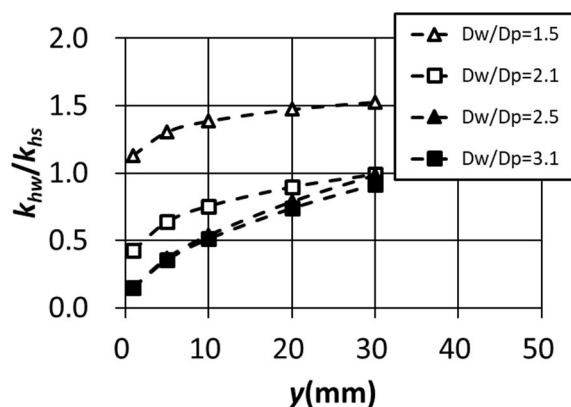


図 6.10 $k_{hw}/k_{hs} - y$ 関係 ($n=1$)

なお、建築基礎構造設計指針⁶⁻³⁾に示されている k_h の算定方法は、連続載荷方式による実大杭の水平載荷試験結果⁶⁻⁴⁾から設定されたものである。このため、図 6.9 および図 6.10 に示すプロット点は、繰り返し載荷による変位増加の影響を取り除くため、Tan の提案⁶⁻⁵⁾ および柴田の補足説明⁶⁻⁶⁾に示されている方法（以下、Tan の方法）に従い、粘性土におけるクリープ変位の影響を除去して、連続載荷した場合の荷重と変位の関係に補正した結果を示している。

H - y 関係の補正方法を以下の①から④に示す。なお、①から④の説明は、Tan の方法を詳細に説明している文献⁶⁻⁷⁾に掲載されている図（図 6.11 参照）を用いており、同図における応力 (σ)、ひずみ (ϵ) および時間 (t) を、本論文では荷重 (H)、変位 (y) および繰り返し回数 (n) に、それぞれ置き換えている。

- ①一定間隔で階段型に載荷応力を増加させた時（図 6.11(a)参照）の各載荷ステップにおける保持時間中のひずみを把握する（図 6.11(b)参照）。
- ②任意の保持時間 t における増分ひずみ ($\Delta \epsilon_1, \Delta \epsilon_2, \Delta \epsilon_3, \Delta \epsilon_4 \dots$) を 1 段階

前の荷重ステップにおけるひずみ (ϵ) と時間 (t) の近似曲線からの差分から推定する (図 6.11(b)参照)。

③第 1 荷重ステップにおける t の位置に, ②で算定した各荷重ステップにおける保持時間が t の時の増分ひずみを累加する (図 6.11(b)参照)。

④③で得られた応力とひずみの関係を, 連続荷重した場合の応力とひずみの関係 (図 6.11(c)の②) とする。

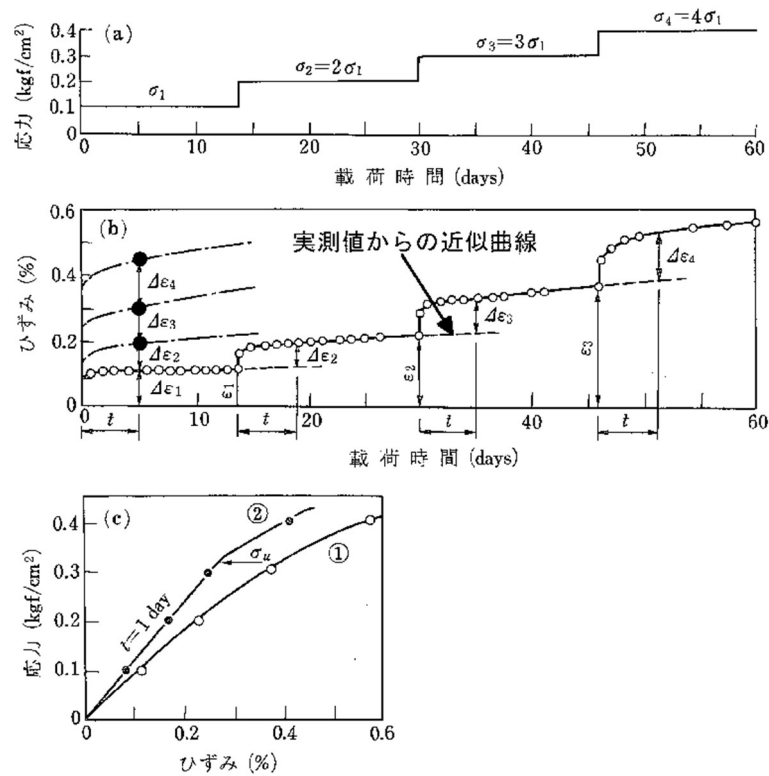


図 6.11 Tan の方法によるクリープ変位除去方法の概念図 (文献⁶⁻⁷⁾ に一部加筆)

ここで、ストレート杭について、Tanの方法により補正した $H-y$ 関係と過去に実施した連続載荷方式による載荷試験結果⁶⁻⁸⁾の比較を図 6.12 に示す。当該方法により補正することで、連続載荷方式の結果に近似した $H-y$ 関係が得られた。なお、連続載荷方式による載荷試験の試験条件(杭仕様および地盤条件)は、杭長が異なる(連続載荷における杭長:7m, 繰り返し載荷における杭長:6m)点を除き、今回の繰り返し載荷試験と同じである。詳細は、文献⁶⁻⁸⁾を参照されたい。

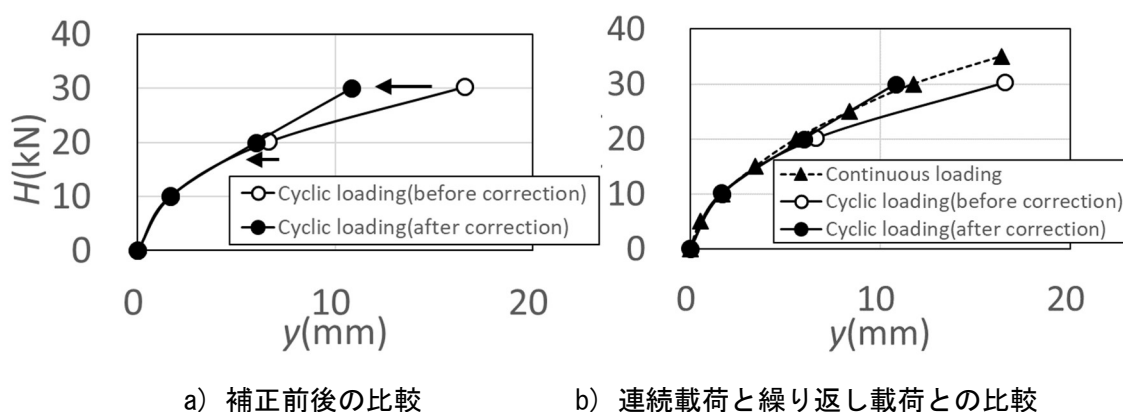


図 6.12 連続載荷試験結果との比較

3) 曲げひずみの比較

同一荷重時における杭体ひずみ分布の比較結果を図 6.13 に示す。図 6.13 より、 D_w/D_p が大きくなるに従い、ひずみの最大値が大きくなる、もしくはひずみの最大発生深度が深くなることを確認できる。また、 D_w/D_p が 2.0 以上の場合は、ストレート杭よりも杭体ひずみが大きくなった。これは、LLT の結果によって確認された通り、羽根付き杭の周辺地盤に初期がたや初期剛性の低下が生じているためであると考えられる。

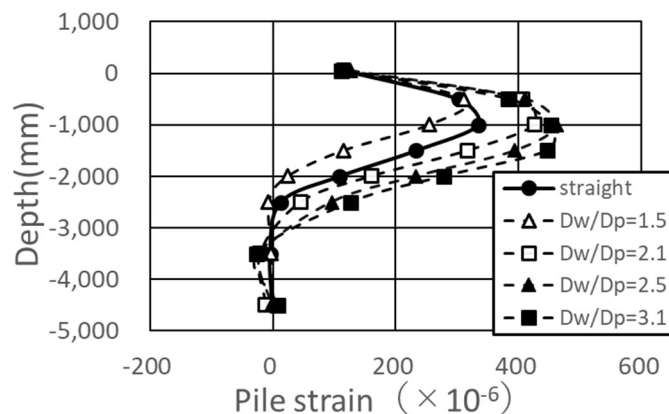


図 6.13 杭体ひずみ分布 ($H=20\text{kN}$, $n=1$)

6.5. 第6章のまとめ

D_w/D_p が羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響を把握するため、LLT および水平載荷試験を実施した。

その結果、確認された事項および考察をまとめると以下の①から⑤に記載の通りとなる。

- ①LLT において D_w/D_p が大きくなるに従い、初期がたの発生、水平剛性の低下、最大圧力の低下などが生じ、その低下割合が大きくなった。
- ②①については、 D_w/D_p が大きくなると乱される地盤の範囲が広がることにより、杭周辺地盤における密度増加の影響よりも空洞発生および構造脆弱化の影響の方が卓越することが要因であると推察される。
- ③水平載荷試験において D_w/D_p が大きくなるに従い、 k_h は低下した。すなわち、 D_w/D_p と k_h は負の相関関係にあった。また、 D_w/D_p が大きくなるに従い、最大曲げひずみの増加あるいは最大曲げひずみの発生深度が深くなった。
- ④③について、 D_w/D_p が 2.0 以上の場合、 k_h は、ストレート杭の場合よりも小さくなった。一方、 D_w/D_p が 1.5 の場合、 k_h は、ストレート杭の場合よりも大きくなった。
- ⑤④の結果は、 D_w/D_p および施工条件 (s/p) を適切に設定することで、 k_h をストレート杭よりも大きくできる可能性があることを示唆している。

6.6. 参考文献

- 6-1) 杭の水平載荷試験方法・同解説 -第一回改訂版-：地盤工学会，2010.5
- 6-2) 八木 則男，矢田部 龍一，仁神 治，向谷 光彦，矢野 勝敏，松本 洋一：練り返し粘性土の圧密特性，第29回土質工学研究発表会，pp.307-308，1994.6
- 6-3) 建築基礎構造設計指針：日本建築学会，pp.276-278，2001
- 6-4) 建設業協会編：杭の水平載荷試験結果に関する調査報告書，1979.5
- 6-5) Tan, T.K : Discussion to the problem of rheological properties of clays, Proc. 5th Int. Conf of Soil Mech and Foundation Eng, Vol. 3, p. 141, 1961
- 6-6) 柴田 徹：粘土のレオロジーとその応用，土と基礎，Vol. 13, No. 7, pp. 48-54, 1965
- 6-7) 村山 朔郎：土の力学挙動の理論，技報堂出版，pp. 461～463. 1990
- 6-8) 久世 直哉，末政 直晃，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，第727号，pp1455-1465，2016.9

7. 施工条件が羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響

7.1. 目的および検討方針

第7章では、 s/p の違いが羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響を把握するため、模型杭施工後の地盤に対する孔内水平載荷試験および実大杭の水平載荷試験を行った。実大杭の水平載荷試験は、第6章と同様に、正負交番繰り返し載荷方式を採用し、各荷重ステップにおける繰り返し載荷回数を20回とした。

なお、繰り返し回数が羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響については、第8章にて報告している。

7.2. 検討内容

羽根付き杭の水平抵抗特性は、第6章と同様に、施工に伴う土性変化の影響を考慮するため、本章で報告する各種の試験は、すべて実地盤に杭（模型杭および実大杭）を施工した後の地盤や杭に対して実施した。各試験項目の目的を以下の①および②に示す。

①羽根付き杭の周辺地盤における孔内水平載荷試験

s/p が地盤の水平反力特性に及ぼす影響の把握を目的として、模型杭を施工した後の掘削孔においてLLTを行った。

また、比較対象としてボーリング孔におけるLLTも合わせて実施した。

②羽根付き杭の水平載荷試験

s/p が杭の水平抵抗特性に及ぼす影響の把握を目的として、実大杭の水平載荷試験を行った。

また、比較対象としてストレート形状の杭を用いた埋込杭工法における水平載荷試験も合わせて実施した。

7.3. 孔内水平載荷試験による地盤の水平抵抗特性

(1)試験体

1) 地盤

本試験を実施した試験場所は、4.3節に示す試験場所2であり、試験対象とした地盤は、GL-2.3m以深の火山灰質粘性土である。当該地盤の物理的性質は、表4.1に示す通りである。これらは、いずれも6.3節と同じ条件である。

2) 模型杭の形状および施工条件

施工した模型杭は、軸部径が 45mm, D_w/D_p が 1.5, 羽根の厚さ(t_w)が 2.5mm, 羽根の下端から杭先端までの距離 (l_{wd}) が 2.5mm の鋼管杭であり, s/p を 0.50, 0.75, 1.0, 1.25 (管理許容値: ± 0.10) の 4 条件とした。模型杭の形状および施工条件を表 7.1 に示す。

表 7.1 模型杭の形状および施工条件

Test No.	D_p (mm)	D_w (mm)	D_w / D_p	s (mm)	p (mm)	s/p	t_w (mm)	l_{wd} (mm)
7.3-1	45	38	1.5	13	27	0.50	2.5	2.5
7.3-2	45	38	1.5	20	27	0.75	2.5	2.5
7.3-3	45	38	1.5	27	27	1.00	2.5	2.5
7.3-4	45	38	1.5	34	27	1.25	2.5	2.5

※着目したパラメータを網掛けで示す。

(2) 試験方法

模型杭を原地盤に施工後、当該施工孔において LLT を実施した。また、比較対象としてボーリング孔における LLT も合わせて実施した。LLT は、プレッシャーメーター試験方法 (JGS 1531-2012) に準じて実施した。

原地盤における LLT は、実務において広く実施されているプレボーリング型のプレッシャーメーター試験とした。一方、羽根付き杭の周辺地盤においては、杭施工後の孔壁に対する水平方向地盤反力特性を精度良く把握するためにセルフボーリング型のプレッシャーメーター試験とし、測定管の先端に羽根を有する模型杭を取り付け、その模型杭付きの測定管を回転貫入により地盤中に埋設した。これらの LLT は、模型杭もしくはボーリング孔の施工完了直後に実施した。なお、模型杭は傾斜や杭心ずれが生じないように注意深く施工した。

(3) 計測項目

計測項目は、孔内圧力 (p) および孔壁ひずみ ($\Delta(r/n)$) とした。

孔内圧力 (p) は、孔内における測定管内の水圧に対して、事前のキャリブレーションにより把握した気中における水圧分を差し引いたものとしている。

孔壁ひずみ ($\Delta(r/n)$) は、測定管内に注入した水量と測定管の容積から算定される測定間の水平方向へのひずみ量としている。

(4)試験結果および考察

孔内圧力 (P) と孔壁ひずみ ($\Delta(r/r_0)$) の関係を図 7.1 に、試験結果一覧を表 7.2 に、それぞれ示す。なお、表 7.2 における括弧内の値は、原地盤に対する羽根付き杭周辺地盤の試験結果の比を示している。

羽根付き杭の場合は、初期がたの発生、初期剛性の低下、最大圧力の低下が確認された(なお、ここでの「初期がた」とは、低ひずみ領域において孔内圧力がほとんど増加しない領域、「初期剛性」とは、初期がた後の $P-\Delta(r/r_0)$ の勾配、「最大圧力」とは、原地盤の最大圧力時の $\Delta(r/r_0)$ における各試験体の圧力のことをそれぞれ指している(図 7.1 参照))。本実験においても、 s/p が大きい (1.25 とした) 場合に、その挙動が顕著に確認された。

しかし、 s/p が小さくなるに従い、その挙動は小さくなり、 s/p が 1.0 の場合、最大圧力は、ストレート杭と同等であり、 s/p が 0.75 の場合は、初期剛性と最大圧力がストレート杭よりも大きくなった。さらに、 s/p が 0.50 の場合は、初期がたの発生も確認されなかった。

以上により、 s/p を小さくすると空隙発生を抑制し、構造脆弱化の影響と合わせた水平剛性低下の影響よりも、密度増加による水平剛性増加の影響の方が卓越し、 D_w/D_p と s/p の組み合わせによっては、ストレート杭よりも大きな水平剛性や最大水平圧力を得ることができるものと考えられる。

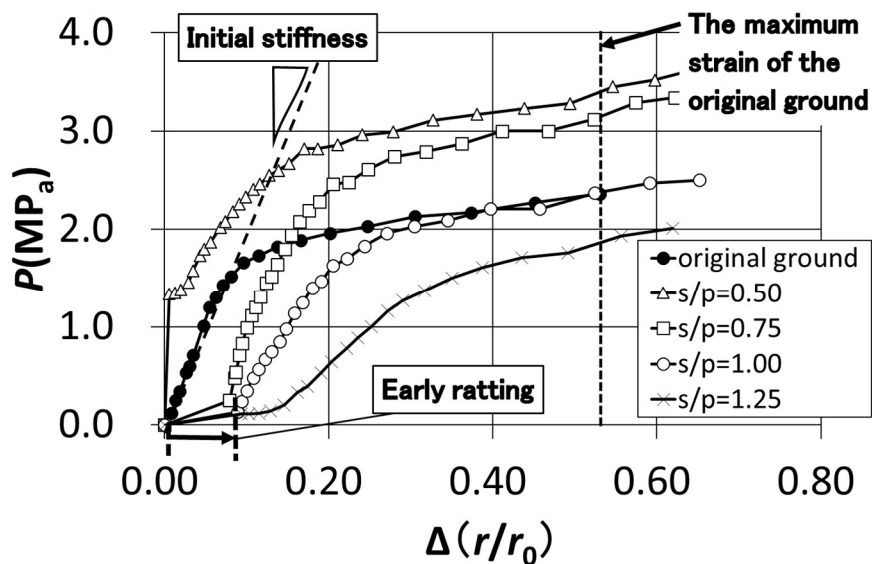


図 7.1 $P-\Delta(r/r_0)$ 関係

表 7.2 LLT の結果一覧

Survey position	s/p	Early ratching	Initial stiffness ^{※1}	Maximum Pressure ^{※2} (MP _a)
Original round	—	—	20.9(1.00)	2.36(1.00)
The ground around the pile with wings	0.50	0.00	51.2(2.45)	3.40(1.44)
	0.75	0.06	22.1(1.06)	3.14(1.33)
	1.00	0.08	13.6(0.65)	2.38(1.01)
	1.25	0.12	7.5(0.36)	1.86(0.79)

※1 Slope after early ratching,

※2 The pressures at the same strain as the maximum strain in the case of original ground

7.4. 実大杭の水平載荷試験による杭の水平抵抗特性

(1) 試験体

1) 地盤

試験場所は、茨城県つくば市の「試験場所 2」であり、調査対象層とする地盤の種類は、火山灰質粘性土である。ここで、杭の水平抵抗に支配的な地盤の影響範囲（いわゆる $1/\beta$ の範囲）は、当該層内に収まっていることを確認している。土質柱状図と杭設置深度の関係を図 7.2 に示す。これらの条件は、第 6 章に示す載荷試験と同じである。

なお、火山灰質粘性土の物理諸元は、表 4.1 に示す通りである。

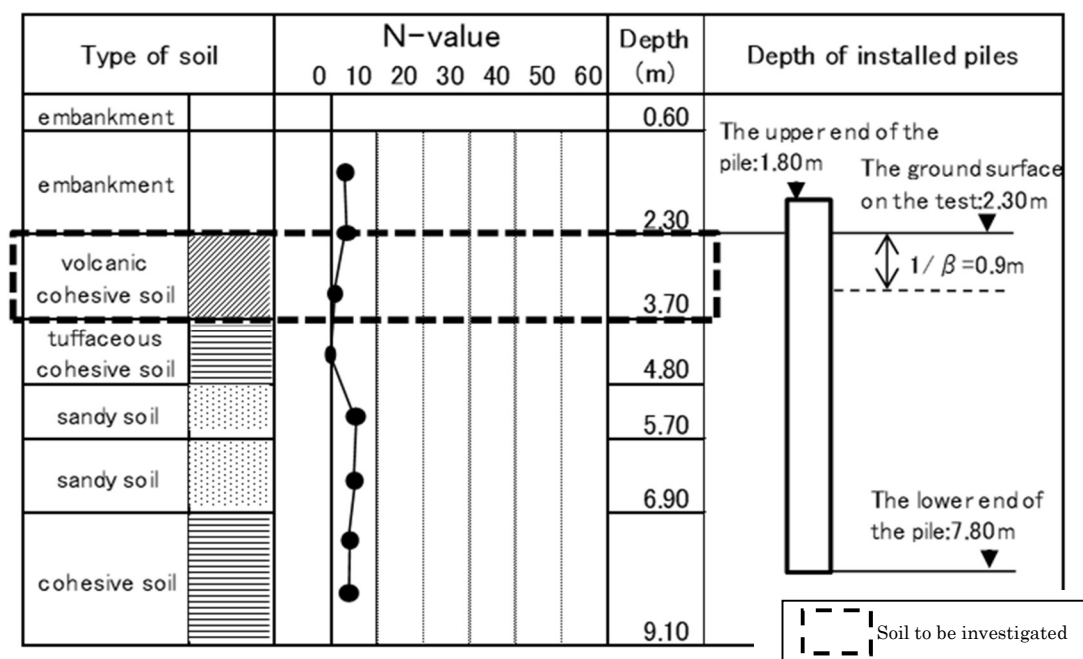


図 7.2 土質柱状図と杭の設置深さの関係（図 6.3 の再掲）

2) 杭の諸元

試験体は、羽根付き杭とし、施工方法は、回転貫入とした。試験体の寸法は、 D_p を 165.2mm, D_w を 350.0mm, D_w/D_p を 2.1, 軸部肉厚を 7.0mm, 杭長を 6.0m, 羽根の下端から杭先端までの距離 (l_{wd}) を 31mm, 各杭の羽根の厚さ (t_w) を 16mm とした。また、第 6 章で示す通り、比較対象のためプレボーリング工法によるストレート杭についても同じ試験を行っている。試験体の寸法および施工条件を表 7.3 に示す。

また、各試験体の施工管理記録を表 7.4 に示す。施工管理項目は、杭の貫入ピッチ (s)、施工中並びに施工後における傾斜の有無、および杭心ずれとした。その結果、試験体

No.7.4-2 は、施工中における杭の鉛直精度の確保が難しく、下げ振りを用いた目視観察の結果、杭心に対して円を描くような挙動（以下、歳差運動）が確認された。歳差運動の概念図を図 7.3 に示す。

なお、歳差運動は、杭の貫入が進むに従って収まり、施工後には他の試験体と同様に杭傾斜が無いことを水準器により確認しているが、杭心ずれが相対的に大きくなった。このように施工時に特異な挙動を示した試験体 No.7.4-2 については、試験結果とその要因分析を第 8 章にて示すこととし、第 7 章においては他の試験体の結果に対する考察を示す。

表 7.3 試験体の寸法および施工条件

試験体 No.	D_p (mm)	D_w (mm)	s (mm)	p (mm)	s/p	杭形状	施工方法
7.4-1	165.2	—	—	—	—	ストレート	埋込み（プレボーリング）
7.4-2	165.2	350.0	48	96	0.50	羽根付き	回転貫入
7.4-3	165.2	350.0	72	96	0.75		
7.4-4	165.2	350.0	110	110	1.0		
7.4-5	165.2	350.0	144	96	1.5		

※着目したパラメータを網掛けで示す。

表 7.4 試験体の施工管理記録

No.	s/p	s (mm)	Vertical tilt		Eccentric horizontal position (mm)
			During construction	After construction	
7.4-1	—	—	No tilt	No tilt	10
7.4-2	0.50	48	Inclined	No tilt	45
7.4-3	0.75	72	No tilt	No tilt	20
7.4-4	1.0	110	No tilt	No tilt	22
7.4-5	1.5	144	No tilt	No tilt	14

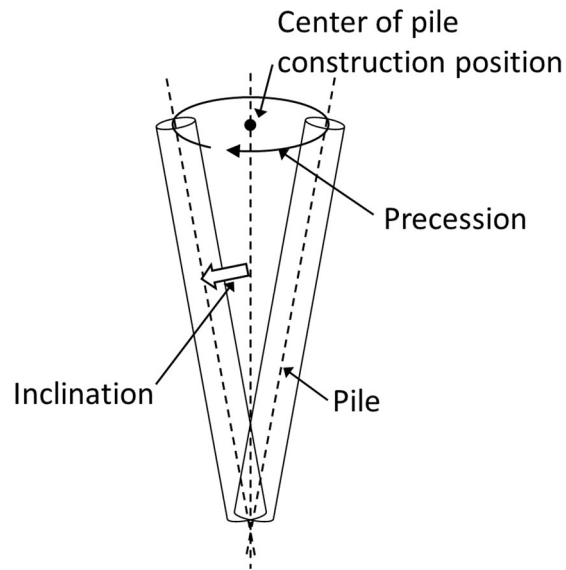


図 7.3 歳差運動の概念図

3) 材齢

試験材齢は、28 日以上としている。この条件は、第 6 章に示す載荷試験と同じである。

(2) 試験方法

杭の水平載荷試験は、地盤工学会基準 7-1) に従い実施した。載荷方法は、正負交番繰り返しとし、荷重ステップは 10kN、繰り返し回数は各荷重ステップ毎に 20 回とした。計画載荷サイクル図を図 7.4 に示す。また、杭頭の拘束条件は自由、試験地盤面から載荷点までの高さは +200mm とした。これらの条件は、第 6 章に示す載荷試験と同じである。

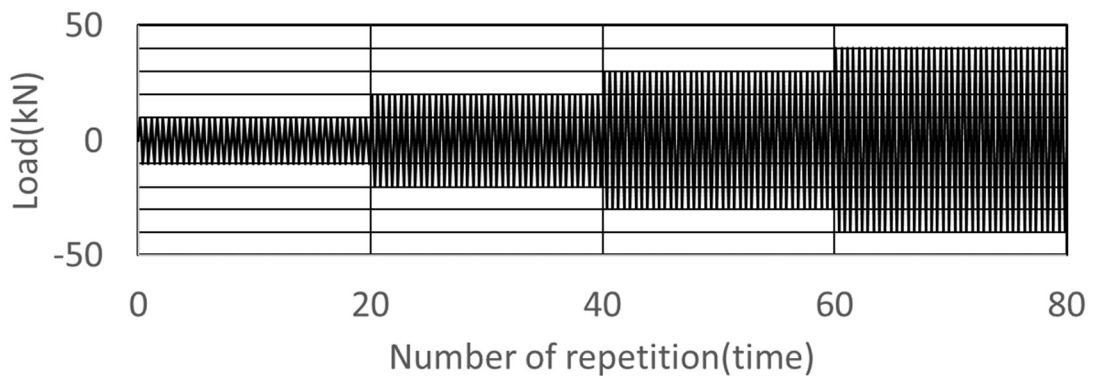


図 7.4 計画載荷サイクル (図 6.4 再掲)

(3) 試験装置および計測項目

試験装置および計測項目は、以下の 1) および 2) に示す通りであり、第 6 章に示す載荷試験と同じである。

1) 試験装置

加力は油圧ジャッキを用い、鋼製梁を介して反力杭で抵抗させる載荷機構とした。

2) 計測項目

計測項目は、水平荷重、杭頭部水平変位（計測レベル：試験地盤面+50mm）、杭体ひずみとし、それぞれロードセル、高感度変位計、ひずみゲージを用いて計測した。

(4) 試験結果および考察

1) s/p が k_h に及ぼす影響

各荷重ステップにおける繰り返し回数 (n) が 1 回目の時の H - y 関係を図 7.5 に示す。 s/p が 0.75 の場合においては、ストレート杭とほぼ同じ挙動を示したが、 s/p が大きくなるに従い、同一荷重時の y は大きくなった。これは、 s/p が大きくなると回転貫入による密度増大効果よりも、羽根の通過による粘性土の構造脆弱や空洞発生の影響が顕著になるという 7.3 節の結果と対応している。

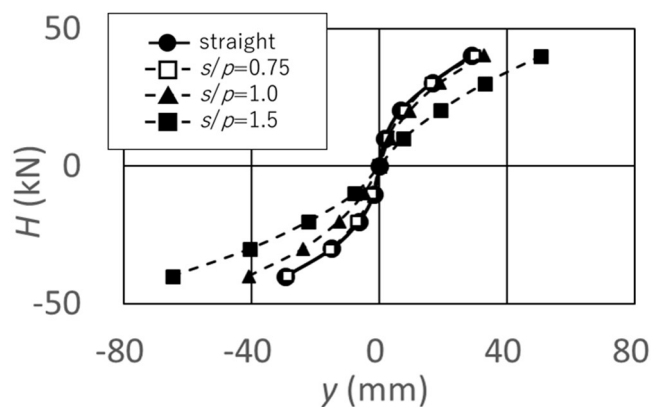


図 7.5 H - y 関係 ($r=1$)

基準変位 ($y=10\text{mm}$) 到達時におけるストレート杭に対する羽根付き杭の k_h の比（以下、 k_{hw0}/k_{hs0} ）と、 s/p の関係を図 7.6 に示す。なお、 k_h は、水平荷重と杭頭水平変位の実測値を用い、建築基礎構造設計指針 7.2) に示されている一様地盤中の弾性支承梁理論の

方法により算定した。

図 7.6 より、 k_{hs0} に対する k_{hw0} の比は、いずれも 1.0 を下回っており、 s/p が大きくなるに従い、小さくなる傾向であった。

このことから羽根付き杭の k_h の設定にあたっては、第 6 章において指摘されている D_w/D_p の影響と共に、 s/p の影響についても留意が必要であると考えられる。

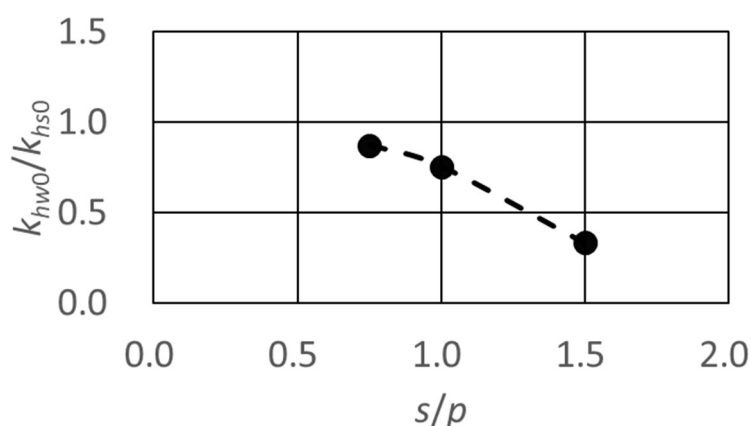


図 7.6 $k_{hw0}/k_{hs0} - s/p$ 関係

また、ストレート杭と羽根付き杭との H_y 関係の比較にあたっては、第 4 章に示す通り杭直近の地盤は土性変化が大きいこと、および 7.3 節における LLT の結果より微少ひずみ時には初期がたや剛性低下が確認されていることにより、低荷重時における挙動に着目した。第 1 荷重ステップ時（載荷荷重 10kN 時）における H_y 関係を図 7.7 に示す。

ストレート杭においては、載荷時と除荷時にほぼ同じ経路を通っており、弾性挙動を示している。

これに対して、羽根付き杭のうち、 s/p が 1.0 以上の場合は、塑性挙動を示しており、 s/p が大きくなるに従い、その傾向が顕著になっている。 s/p が 1.0 よりも大きくなると、5.4 節の杭周辺地盤における空洞発生状況の確認試験により把握されている通り、羽根が通過した位置付近に空洞が生じている可能性があること、および図 3.3 に示す通り、施工時に土が押広げられる向きが横方向から下方方向に遷移するため杭周囲の地盤における密度増加効果が小さくなることから、塑性挙動を示す要因であると推察される。

また、羽根付き杭のうち s/p が 0.75 の場合は、土が押広げられる向きが横方向に遷移するため、5.4 節の施工地盤の掘り出し結果に示すように、羽根通過領域に空洞が発生しにくいことおよび杭周囲の地盤の密度増加の影響が大きくなることが考えられる。しか

し、 s/p が小さくなると杭周囲の地盤は細かく練り返し作用を受けることになるので、構造脆弱化の影響を大きく受けることも考えられるため、杭の水平剛性が大きくなる要因と小さくなる要因の両方について、それぞれの影響が大きくなる条件であると言える。これについては、この載荷試験の結果、ストレート杭と同様に H - y 関係が弾性挙動を示していたことから、羽根通過による土粒子構造の乱れよりも、土の押拵げによる密度増加効果が卓越したため、杭周辺地盤に過圧密領域が形成されたと推察される。

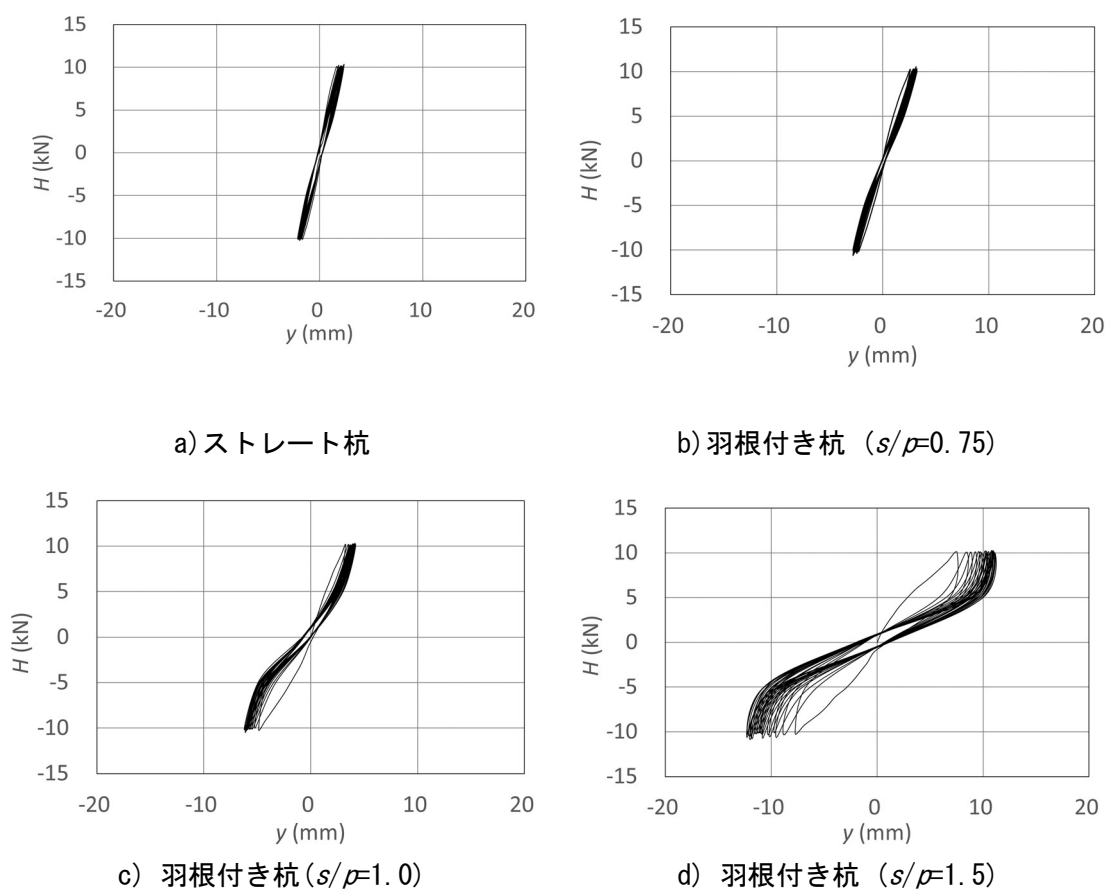


図 7.7 H - y 関係 ($H=10\text{kN}$)

2) 曲げひずみの比較

同一荷重時における杭体ひずみ分布の比較結果を図 7.8 に示す。図 7.8 より、 s/p が 0.75 から 1.5 の範囲においては、 s/p が大きくなるに従い、地中部の杭体ひずみが大きくなった。これは、LLT の結果によって確認された通り、羽根付き杭の周辺地盤に初期がたや初期剛性の低下が生じているためであると考えられる。

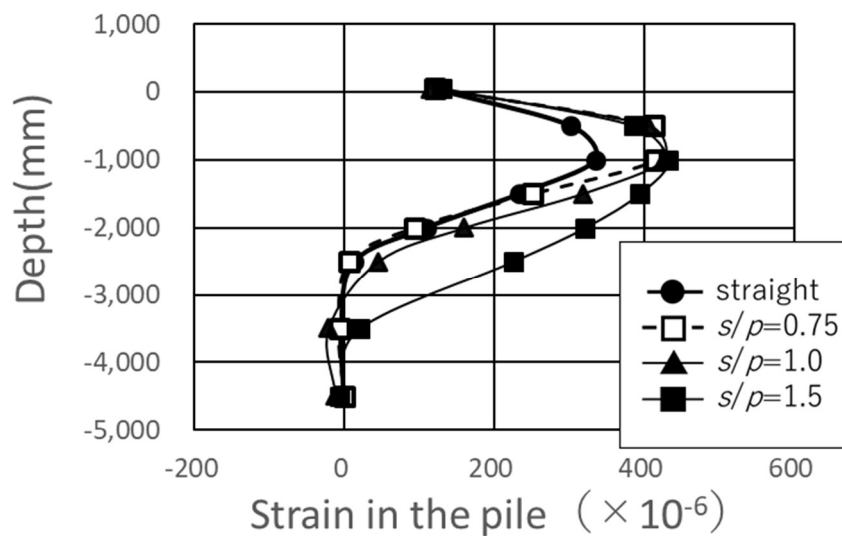


図 7.8 杭体ひずみの分布状況 ($H=20\text{kN}$, $n=1$)

7.5. 歳差運動が生じた杭の水平抵抗特性

(1) 施工時に歳差運動が生じた杭の水平抵抗特性

7.4 節に示す通り、試験体 No.7.4-2 は、施工時に歳差運動が生じ、施工中における杭の傾斜や施工後における杭心ずれの増大が確認された。歳差運動が生じた場合における杭の水平抵抗特性を把握するため当該杭においても 7.4 節の他の試験体（試験体 No.7.4-1, 試験体 No.7.4-3 から試験体 No.7.4-5）（以下、試験体 No.7.4 節シリーズ）と同じ条件で水平載荷試験を実施した。

H - y 関係を図 7.9 に、杭体ひずみの分布を図 7.10 に、それぞれ示す。なお、これらの図には、比較のため歳差運動が生じていない試験体 No.7.4 節シリーズの結果も示している。

H - y 関係については、同一荷重時における y がストレート杭よりも大きく、 k_{hw0}/k_{hs0} は 0.39 であった。また、杭体ひずみ分布については、ストレート杭に対して地中部全般において大きくなった。これらは、いずれも s/p が 1.5（試験体 No.7.4-5）の場合における挙動

と同様の傾向であった。

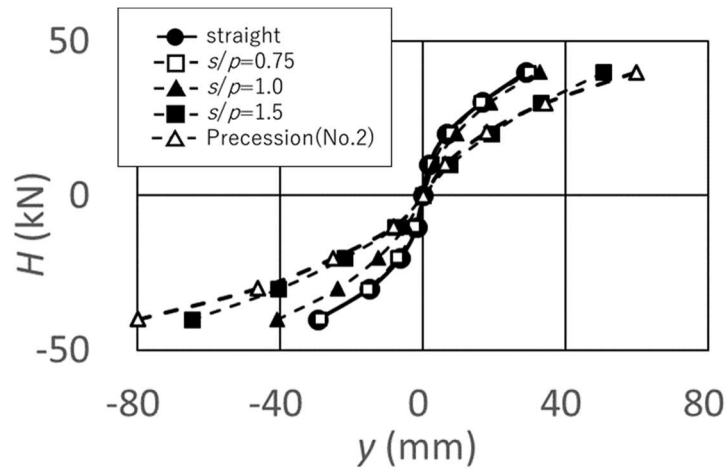


図 7.9 H - y 関係 ($r=1$)

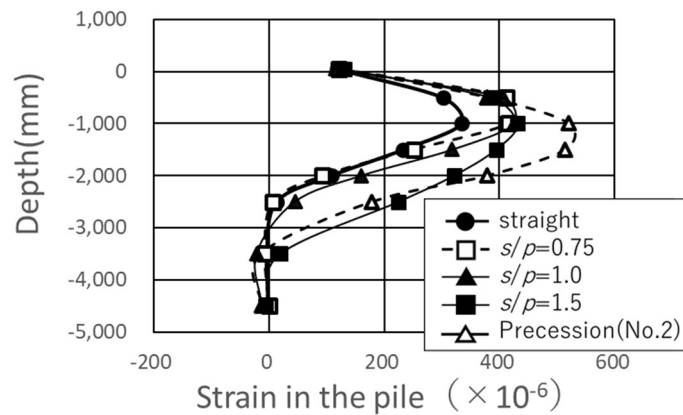


図 7.10 杭ひずみの分布状況 ($H=20\text{kN}$, $n=1$)

(2) 歳差運動発生の要因

試験体 No.7.4-2 ($s/p=0.50$) において施工時に杭体の歳差運動が確認された。ここでは、 s/p が小さくなると歳差運動が生じやすくなると考えられる要因と、(1)に示した歳差運動が生じた杭の水平載荷試験結果に対する考察を記す。

杭の回転貫入時においては、図 3.3 に示す通り s/p が小さくなると、羽根が地盤を横方向に押し広げる傾向が顕著になる。この際、杭先端の羽根部分に地盤からの抵抗力が作用する。羽根形状がらせん形状の場合、深い位置の方が、羽根が地盤から受ける抵抗が大きく、回転貫入時に杭先端付近の杭軸部に曲げひずみが生じていることが報告されている⁷⁻³⁾。この状態で杭が回転するため図 7.11 に示すような挙動、すなわち歳差運動が生じる可能性があると推察される。

また、歳差運動が生じると施工中の杭の傾斜が大きくなった。このため、地表面付近の地盤は、杭軸部により水平方向に押し広げられて隙間が生じることにより、図 7.9 および図 7.10 に示す通り水平剛性の低下や杭体ひずみの増加等、あたかも杭の突出長が長くなったような挙動を示したと推察される。杭施工中における地表面付近の地盤の状況を図 7.12 に示す。

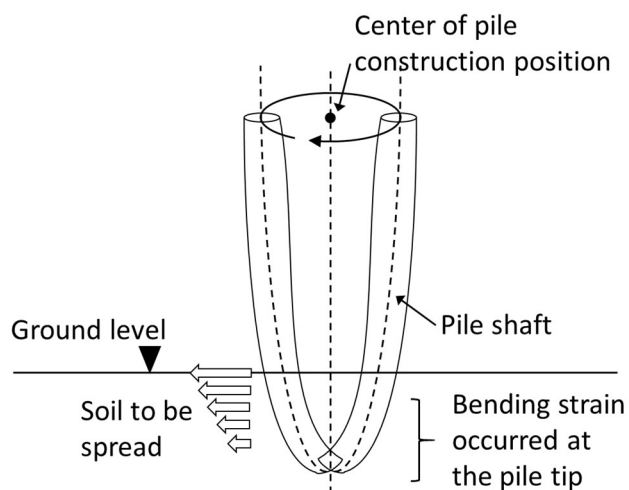


図 7.11 杭の歳差運動と地表面地盤の挙動に関する概念図



a) $s/p = 0.75$ の場合 (No. 7. 4-3)

b) $s/p = 0.50$ の場合 (No. 7. 4-2)

図 7.12 杭施工中における地表面付近の地盤の状況

(3) 歳差運動を再現施工した杭の水平載荷試験

試験体 No.7.4-2 の k_h が低下した要因について検証するため、施工中の杭を意図的に傾斜させて歳差運動の挙動を模擬して施工した杭（以下、再現施工杭）について、水平載荷試験

を行った。試験体 No.7.4-2 の施工条件を再現するため、施工地盤面 (GL-0.6m) から $1/\beta$ (GL-3.2m) の範囲 (深さ 2.6m) まで貫入させる際に、施工地盤面レベルにおける水平方向のずれが試験体 No.7.4-2 の施工中の心ずれと同等 (設定値: 40mm) になるように杭 1 回転毎に荷重方向に対して左右に $1/65$ ($=40\text{mm}/2,600\text{mm}$) ずつ強制的に傾斜させながら施工した。再現施工の方法および強制的に傾斜させた時の地表面地盤における隙間発生状況を図 7.13 に示す。この試験における試験場所、試験体寸法、施工条件 (s/p) は、試験体 No.7.4-2 と同じとした。なお、荷重初期における $H-y$ 関係の比較に着目したため、荷重ピッチを細かくし、最大荷重を 20kN までとした。当該試験の結果、試験体 No.7.4-2 ($s/p=0.50$) に類似した $H-y$ 関係を示した。 $H-y$ 関係図を図 7.14 に示す。



図 7.13 再現施工

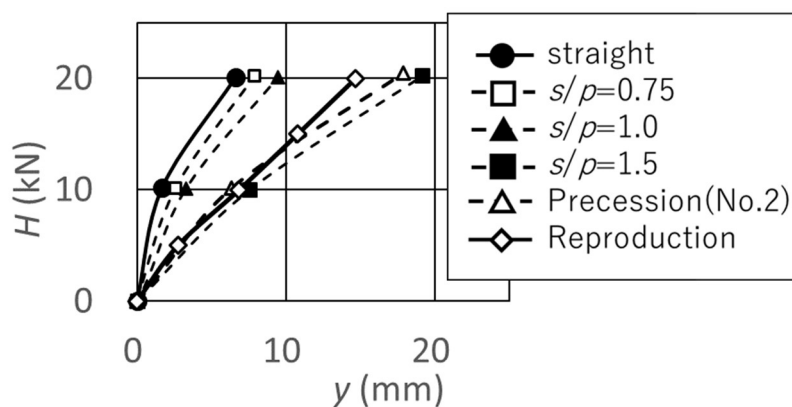


図 7.14 $H-y$ 関係

図 7.14 より、再現施工杭は、同一荷重時の変位がストレート杭に対して大きく、歳差運

動が生じた試験体 No.7.4-2 と同様の傾向を示した。歳差運動が生じると、 slp を小さくすることによる密度増加の影響よりも施工時における杭の傾斜に伴う地盤の水平方向への押し拡げによる隙間発生の影響の方が顕著となり、杭の水平抵抗が低下したと考えられる。

7.6. 第7章のまとめ

slp が羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響を把握するため、LLT および水平載荷試験を実施した。

その結果、確認された事項および考察をまとめると、以下の①から③の通りとなる。

- ①羽根付き杭の k_h は、施工時における slp や歳差運動の影響を受ける。
- ②施工時に歳差運動が生じていない場合、 slp が大きくなるに従い、羽根付き杭の k_h は低下し、曲げひずみは大きくなる。
- ③施工時に杭の歳差運動が生じた場合、 slp が小さくても羽根付き杭の k_h は低下し、曲げひずみは大きくなった。この結果より、歳差運動が k_h に及ぼす影響は、 slp を小さくすることによる密度増加効果の影響よりも顕著であったと言える。
- ④①から③の結果より、 slp を小さくすることにより、 k_h の低下を抑制することができると考えられる。一方、 slp を過度に小さくすると、歳差運動が生じやすくなり、 k_h を低下させるおそれがあることに留意が必要である。

7.7. 参考文献

- 7-1) 杭の水平載荷試験方法・同解説 -第一回改訂版-：地盤工学会，2010.5
- 7-2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2019
- 7-3) 大杉 富美一，土屋 勉，嶋田 正夫，吉田 勝之：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，pp69-75，2005.5

8. 繰り返し載荷が杭の水平抵抗特性に及ぼす影響

8.1. 目的および検討方針

第 8 章では、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を把握することを目的とし、実大杭の水平載荷試験を行った。

なお、各荷重ステップにおける繰り返し載荷回数を 20 回とし、正負交番繰り返し載荷方式を採用した。

8.2. 検討内容

第 6 章および第 7 章で報告した実大杭の水平載荷試験は、正負交番繰り返し載荷方式で実施したものである。これらの試験において、繰り返し載荷が杭の水平抵抗特性に及ぼす影響に着目し、試験結果の整理・分析を行った。

8.3. 実大杭の水平載荷試験による杭の水平抵抗特性

(1)試験体

本章の検討対象とした試験体の条件を以下の 1)および 2)に示す。

なお、試験方法および計測項目は、6.4 節および 7.4 節に示す通りである。

1) 地盤

地盤条件は、6.4 節および 7.4 節に示す通りである。

2) 杭の諸元

検討対象とした杭は、6.4 節および 7.4 節に示すもののうち、施工時に歳差運動を生じた試験体 No.7.4-2 を除く、7 体である。

これらのうち、羽根付き杭は、軸径 D_p が 165.2mm の鋼管杭であり、羽根径 D_w および s/p を種々の大きさに変化させた仕様である。施工方法は、回転貫入とし、 s/p の管理許容値、 ± 0.1 とした。また、試験体 No.6.4-1 は、ストレート形状の杭を埋込み工法により施工した。

杭長は、いずれも 6.0m である。杭の諸元を表 8.1 に示す。

表 8.1 杭の諸元

試験体 No.	D_p (mm)	D_w (mm)	D_w/D_p	s (mm)	p (mm)	s/p	杭形状	施工方法
6.4-1(7.4-1)	165.2	—	—	—	—		ストレート	埋込み (プレボーリング)
6.4-2	165.2	250.0	1.5	98	98	1.0	羽根付き	回転貫入
6.4-3(7.4-4)	165.2	350.0	2.1	110	110	1.0	羽根付き	回転貫入
6.4-4	165.2	420.0	2.5	102	102	1.0	羽根付き	回転貫入
6.4-5	165.2	512.0	3.1	112	112	1.0	羽根付き	回転貫入
7.4-3	165.2	350.0	2.1	72	96	0.75	羽根付き	回転貫入
7.4-5	165.2	350.0	2.1	144	96	1.5	羽根付き	回転貫入

※着目したパラメータを網掛けで示す。

3) 材齢

試験材齢は、28 日以上としている。

(2) 試験結果および考察

1) D_w/D_p の違いによる比較

ここでは、 D_w/D_p の違いによる水平載荷試験の結果を比較するため、試験体 No.6.4-1 から試験体 No.6.4-5 の結果について整理した結果を以下に示す。

6.4 節(4)と同様に、羽根付き杭の施工により土性変化の影響が大きく現れる低荷重時に着目し、第 1 載荷ステップ (載荷荷重 10kN) 時における変位 (y) と繰り返し回数 (n) の関係を図 8.1 に、繰り返し載荷による増分変位 (Δy) と繰り返し回数 (n) の関係を図 8.2 にそれぞれ示す。

繰り返し載荷により y の増加が確認でき、これは、既往の文献⁸⁻¹⁾と同様の結果であった。また、これらの図より、 D_w/D_p が大きいほど y および Δy が大きいことが確認できる。 D_w/D_p が大きいほど y が大きくなる理由は、6.4 節にも示す通り、杭周辺の粘性土の構造脆弱化や空洞発生の影響が密度増加の影響よりも顕著になるためであると考えられる。また、 Δy が大きくなる理由は、 D_w/D_p が大きいほど羽根通過領域に空洞が発生しやすくなることが要因であると考えられる。これは、飽和度が小さいほど (すなわち空洞が大きいほど) 圧縮沈下量が大きくなることが文献⁸⁻²⁾において確認されており、繰り返し載荷を受けた場合においてもこれと同様の挙動を示すものと推察される。

D_w/D_p が 1.5 の場合における y および Δy は、ストレート杭よりもやや小さな値を示した。これは、密度増加の影響が構造脆弱化や空洞発生よりも卓越することで、繰り返し載荷を受けた場合においても間隙が低下しにくいためであると考えられる。以上により、

D_w/D_p を施工条件に応じて適切に設定することで繰り返し荷荷による変位を抑制することができる可能性があると考えられる。

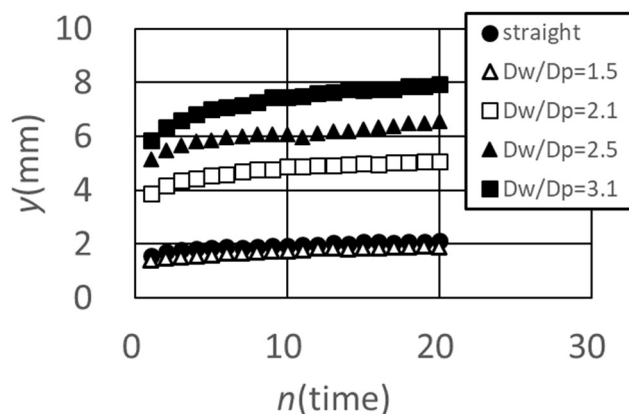


図 8.1 $y-n$ 関係 ($H=10\text{kN}$)

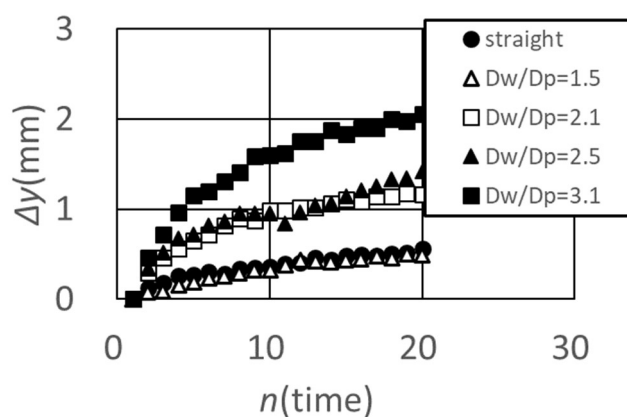


図 8.2 $\Delta y-n$ 関係 ($H=10\text{kN}$)

2) s/p の違いによる比較

ここでは、 s/p の違いによる水平荷荷試験の結果を比較するため、試験体 No.7.4-3 から試験体 No.7.4-5 の結果について整理した結果を以下に示す。

1)と同様に、羽根付き杭の施工により土性変化の影響が大きく現れる低荷重時に着目し、第1荷荷ステップ（荷荷荷重 10kN）時における変位 (y) と繰り返し回数 (n) の関係を図 8.3 に、繰り返し荷荷による増分変位 (Δy) と繰り返し回数 (n) の関係を図 8.4 にそれぞれ示す。これらの図より、 s/p が大きいほど y および Δy が大きいことが確認できる。この理由は、 s/p が大きいほど羽根通過領域に大きな空洞が発生しやすくなること

要因であると考えられる。これは、3.2節の羽根付き杭の貫入メカニズムに示す通り、 s/p が大きくなると羽根付き杭の回転貫入に伴い、羽根が杭周辺の地盤を斜め下方向へ押し拡げる傾向が強くなり、通過した羽根の上部に空洞が生じる可能性が高くなるためであると考えられる。なお、 s/p が1.0よりも小さい場合には、杭の周辺地盤は横方向へ押し拡げられる傾向が強くなり、羽根の通過した位置の下部付近に空洞が生じる可能性があるが、5.4節の模型杭を用いた地盤の押し拡げ挙動観察に関する実験結果においては羽根通過領域に空洞が確認されなかった。これは、羽根通過位置の下部に空洞が生じたとしても、その下を羽根が通過した際に押し拡げられる土によって埋められた可能性があると考えられ、本載荷試験の結果もこの可能性を示唆している。

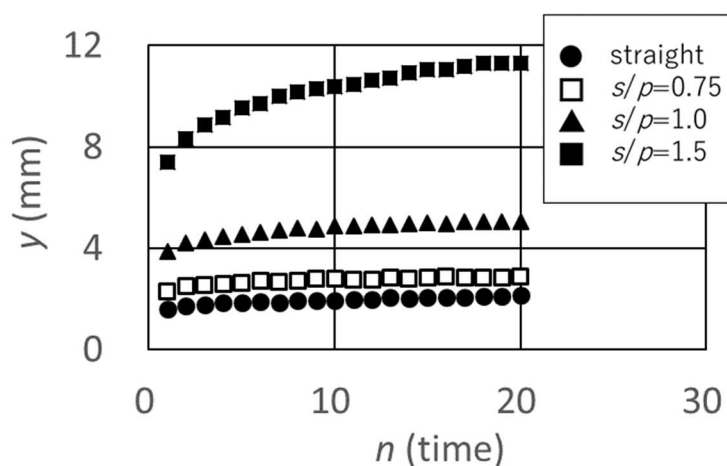


図 8.3 $y-n$ 関係 ($H=10\text{kN}$)

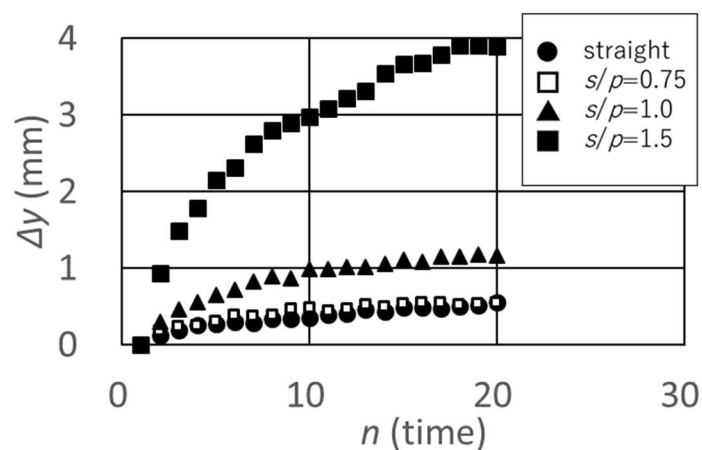


図 8.4 $\Delta y-n$ 関係 ($H=10\text{kN}$)

8.4. 第8章のまとめ

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を把握するため、水平載荷試験を実施した。

その結果、確認された事項および考察をまとめると以下の①から③に記載の通りとなる。

- ①繰り返し載荷による増分変位 (Δy) は、 D_w/D_p が大きくなること、もしくは、 s/p が大きくなることに従い大きくなる。
- ②①について、羽根付き杭の施工により羽根通過領域に空洞が生じることで、 Δy が大きくなると推察される。
- ③ D_w/D_p が 1.5、 s/p が 1.0 の場合、 y および Δy はストレート杭の場合よりも小さくなった。これは、密度増加の影響が構造脆弱化や空洞発生の影響よりも卓越したためであると考えられる。地盤条件に応じて D_w/D_p と s/p を適切に設定することで、杭の水平変位を抑制することができる可能性がある。

8.5. 参考文献

- 8-1) 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.
- 8-2) 沢田義男, 中田雅夫, 朝日秀定 : 不飽和土における圧縮性に関する 2,3 の実験的考察, 室蘭工業大学研究報告. 理工編, 1976.1

9. 羽根付き杭の水平抵抗特性の評価方法に関する検討

9.1. 目的および検討方針

(1)目的

第8章までにおける種々の試験結果により、 D_w/D_p および s/p が羽根付き杭の水平抵抗特性に影響を及ぼすことが示された。このため、羽根付き杭の水平抵抗特性を数値計算により予測する際には、 D_w/D_p および s/p による杭周辺地盤における土性変化の影響を数値解析モデルに取り入れることが望ましいと考えられる。そこで、第9章では、第6章から第8章に示す範囲における実大杭の水平載荷試験結果を分析し、 D_w/D_p と s/p の影響を考慮した羽根付き杭の数値解析モデルの設定を目的とした。

(2)検討方針

現在、建築分野の構造設計時において広く活用されている指針として、建築基礎構造設計指針⁹⁻¹⁾が挙げられる。当該指針は、建築基準法の関連告示⁹⁻²⁾において杭の短期許容応力度が（すなわち水平力に関する構造的検討の必要性が）明示された2001年に合わせて、第2版⁹⁻³⁾が発刊されている。当該指針⁹⁻³⁾における水平荷重に対する杭の応力評価方法は、杭を曲げ剛性を有する梁材とし、地盤をばねと仮定した解析モデル（以下、梁ばねモデル）において、地盤を多層に分けて各層に水平方向地盤反力（ p ）と水平変位（ y ）の関係（以下、 p - y 関係）を設定し、杭と地盤の非線形性を考慮した方法が推奨されていた。この方法は、「建築耐震設計における保有耐力と変形性能（1990）」⁹⁻⁴⁾に示されている評価方法を、水平荷重（ H ）と水平変位（ y ）の関係（以下、 H - y 関係）について安全側に評価できるように考慮されている。その後、建築基礎構造設計指針は、2019年に第3版⁹⁻¹⁾が発刊され、水平荷重に対する杭の応力評価方法については、下村ら⁹⁻⁵⁾による検討が加えられ、小口径への適用性などが確認されている。しかし、建築分野における構造設計においては、告示に許容応力度が示されていることから判る通り、杭の水平変位よりも杭応力の評価（曲げの影響が支配的な杭にとっては曲げモーメント分布の評価）が重要であると考えられるが、これについて検証されているか否かは、明らかになっていない。

曲げモーメント分布の評価の必要性については、菊池⁹⁻⁶⁾が指摘している。菊池は、港湾空港分野における技術基準（以下、港研方式）の作成時に使用された実験結果⁹⁻⁷⁾を、港研方式の梁ばねモデルを用いた数値解析により再現した結果、地表面レベルの水平変位（ y_0 ）を合わせたときと、最大曲げモーメントの大きさ（ M_{max} ）と発生深度（ L_m ）を合わせたときの水平方向地盤反力係数（ k_h ）は大きくかけ離れたものになると指摘している。

また、文献⁹⁻⁴⁾においては、13例の水平載荷試験結果が示されているが、杭種の内訳は既製コンクリート杭（PC杭およびPRC杭）が8例、鋼管杭が5例であり、施工方法の内訳は、打込み工法が10例、埋込み工法が2例、不明が1例であり、回転貫入工法により施工

された羽根付き杭は検討対象であった可能性は低い。

しかし、施工方法の違いにより杭周辺地盤に及ぼす影響は異なると考えられる。西田⁹⁻⁸⁾は、打撃工法の場合は周辺地盤を乱すこと、埋込み工法では粘性土地盤を脆弱化させることについて指摘している。また、西岡ら⁹⁻⁹⁾は、鉄道分野の設計に用いる基準改訂作業において、打撃工法、埋込み工法（プレボーリング工法および中掘り工法）、回転貫入工法などの施工方法毎に異なる鉛直地盤反力係数の算定モデルを載荷試験結果に基づいて提案している。さらに、小林⁹⁻¹⁰⁾は、羽根の有無が回転貫入された杭の水平抵抗特性に及ぼす影響を比較した結果、羽根がある場合は羽根が無い場合に比べて水平剛性が低下したことなどを確認している。

以上により、回転貫入により施工される羽根付き杭の特殊性、ここでは、羽根形状 (D_w/D_p) と施工条件 (s/p) に応じた水平抵抗特性の評価方法を示す必要があると考えた。その際、 $H-y$ 関係のみならず、 M_{max} と L_m の適合性についても着目し、載荷試験結果を再現可能な解析モデルの設定を試みた。

9.2. 検討内容

(1) 載荷試験結果の分析

羽根形状 (D_w/D_p) と施工条件 (s/p) が水平抵抗特性の算定条件に及ぼす影響を把握するにあたって、載荷試験結果の分析により解析モデルの設定を行った。

解析モデルの設定において、若井ら^{9-11), 9-12)}は、砂地盤中に建て込んだ模型杭の室内水平載荷試験と解析結果の比較により、地盤の弾性係数について深さ方向の分布特性が解析結果に強く影響すること、精度良く実験結果を予測するためには、特に、浅部および杭近傍の特性を評価することが重要であると指摘している。同様に、菊池⁹⁻⁶⁾は、杭に生じる最大曲げモーメントを適切に評価するためには、地盤反力特性の深度方向の変化と非線形性を考慮する必要性を実験結果と数値解析結果の比較に基づいて指摘している。

これらの報告で指摘されているように地盤反力特性の深さ方向の影響を考慮した評価方法として、岸田・中井の報告⁹⁻¹³⁾が挙げられる。岸田・中井は、地盤の破壊状況を考慮して、深さ方向に2つの領域に分けて、浅部は杭前面の土がくさび状に押し上げられると仮定した Reese⁹⁻¹⁴⁾の方法による極限地盤反力を、深部は2次元の支持力問題として捉えた Broms^{9-15), 9-16)}の方法により極限地盤反力を、それぞれ用いるなど、領域毎に異なる $p-y$ 関係を採用する方法（以下、くさび法）を提案している。この方法で算定した結果、 $H-y$ 関係、 M_{max} および L_m は、沖積の粘性土地盤における載荷試験結果とある程度対応していたことが報告されている。

また、Dyson⁹⁻¹⁷⁾らは、載荷試験結果を分析した結果に基づいて、深さ方向に異なる $p-y$ 関係を採用することを、Erbrich⁹⁻¹⁸⁾は、載荷試験と3次元の有限要素解析の結果に基づいて、岸田・中井が提案したくさび法と同様に深度方向に力の釣り合いモードが異なる2つ

の領域を設定した方法 (chipper 法) を、それぞれ提案している。Dyson らが把握した p - y 関係を図 9.1 に、くさび法および chipper 法における杭の水平抵抗機構の概念図を図 9.2 および図 9.3 に、それぞれ示す。

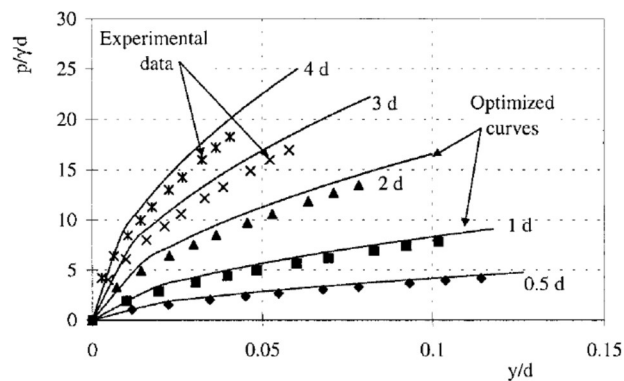


図 9.1 Dyson らにより把握された p - y 関係⁹⁻¹⁷⁾

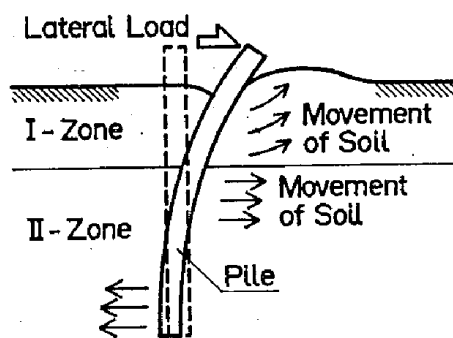


図 9.2 くさび法における杭の水平抵抗機構の概念図⁹⁻¹³⁾

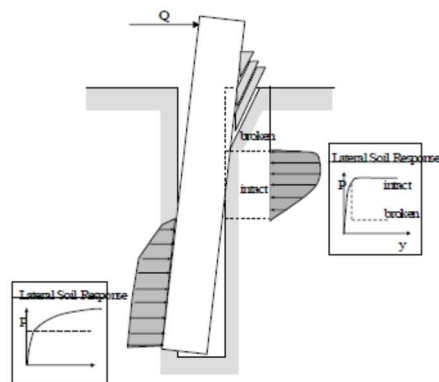


図 9.3 chipper 法における杭の水平抵抗機構の概念図⁹⁻¹⁸⁾

以上により、杭の水平抵抗特性を精度良く予測するためには、深さ方向の $p-y$ 関係を適切にすることが重要であると考えられるため、 $p-y$ 特性に基づく地盤ばねを表 9.1 に示す通り詳細に設定し、各深度区分の $p-y$ 関係を把握した。

表 9.1 $p-y$ 特性（地盤ばね）の配置間隔

深度区分 (GL-m)	ばねの配置間隔 (m)
0.0~1.0 まで	0.05
1.0 以深	0.10

載荷試験結果を用いて、各荷重段階における水平方向地盤反力 (p [kN/m²]) 分布を以下の①から⑤に示す方法で算出した。なお、今回、分析した範囲において杭は弾性範囲内であることをひずみの実測値より確認している。

- ① 曲げひずみの実測値の深度分布に対する近似曲線を 4 次もしくは 5 次の多項式により設定する。
- ② ①で設定した近似曲線を用いて各深度区分における曲げひずみを算出する。
- ③ 曲げひずみをひずみ間距離（ここでは、杭径 [m]）で除して曲率 (ϕ [1/m]) を求める。
- ④ 各深度区分の曲率に杭の $E \cdot I$ (E : 杭のヤング係数 (205,000,000 [kN/m²]), I : 杭の断面 2 次モーメント (1.0769×10^{-5} [m⁴])) を乗じて曲げモーメント (M [kN · m]) を算出する。
- ⑤ ④で算出した曲げモーメントを深度方向に 2 階微分し、さらに杭径 (D [m]) で除して、水平方向地盤反力 (p [kN/m²]) を算出する。

また、載荷試験結果を用いて、各荷重段階における杭の水平変位 (y [m]) 分布を以下の①から④に示す方法で算出した。

- ① 曲げひずみの実測値の深度分布に対する近似曲線を 4 次もしくは 5 次の多項式により設定する。
- ② ①で設定した近似曲線を用いて各深度区分における曲げひずみを算出する。
- ③ 曲げひずみをひずみ間距離（ここでは、杭径 [m]）で除して曲率 (ϕ [1/m]) を求め

る。

④③で算出した曲率分布を2階積分して、杭の水平変位 (y [m]) 分布を算出する。

以上により、各深度区分における p - y 関係を求めた。

(2)再現解析の方法

(1)で設定した p - y 関係を用いて、建築基礎構造設計指針^{9-1),9-3)}で推奨され、実務で広く使用されている梁ばねモデルで数値解析を行い、載荷試験結果をどの程度、再現することができるか確認した。確認した事項は、水平荷重と水平変位の関係 (以下、 H - y 関係)、最大曲げモーメント (以下、 M) および最大曲げモーメント発生深度 (L_m) とした。なお、 p - y 関係は、最もシンプルなバイリニアモデルとした。

杭頭および杭先端の境界条件は、自由とした。また、載荷試験時における載荷点高さ (h_t [m]) と水平荷重 (H [kN]) により杭の地表面レベルに作用する曲げモーメント (M [kN・m] ($=H \cdot (-h_t)$)) を考慮した。

また、再現解析を行う水平変位の範囲については、幸佐ら⁹⁻¹⁹⁾により、水平変位が杭径の10%程度の範囲であれば、地盤の非線形特性を簡単なバイリニアモデルでも十分に評価可能であること、同様に、土木研究所による報告⁹⁻²⁰⁾において、バイリニアモデルを用いた道路橋示方書による評価方法に準じて数値解析が行われた結果、杭径の10%変位時までは実測値と計算値の比率が同程度であること、さらに、若井ら⁹⁻¹¹⁾により、詳細な地盤物性データを用いた3次元の弾塑性有限要素法による数値解析の結果においても、実験値との対応が確認されている水平変位の範囲が杭径の10%までであることが確認されており、これらの成果を考慮して、本章における検討範囲も水平変位 (y) が杭径 (D) の10% ($y/D=10\%$) 程度までとした。

ここで、大竹ら⁹⁻²¹⁾により、地盤の軸ひずみレベル (ε_{eq}) と基礎構造物の変位率 ($y_{eq} = \delta_{eq}/D$, δ_{eq} : 基礎の変位, D : 基礎幅) の関係は、 $\varepsilon_{eq} = 0.10y_{eq}$ であることが載荷試験データの統計的な分析により報告されている。これに従うと、 $y/D=10\%$ は、地盤の軸ひずみレベル1%に相当することになり、梁ばねモデルによる数値解析における適用範囲として妥当であると判断される。

なお、本論文で示す載荷試験は、荷重制御で計測を行っており、各試験体の比較を行うためには同一荷重段階で比較する必要がある。また、試験体 No.1 の水平荷重が30kN のときの y/D が約10%であったため、検討する載荷荷重段階は水平荷重が10kN, 20kN および30kN の3段階とした。

(3)再現解析の精度

(2)項に示す再現解析による計算結果と実測値との精度を把握するため、試験体 No.1 において、 H - y 関係が実験値とほぼ同一の挙動を示すように p - y 関係をバイリニアモデルで設

定し、その際における最大曲げモーメント (M) と最大曲げモーメントの発生深度 (L_m) について比較した。実験値と解析値との比較結果一覧を表 9.2 に、 H - y 関係を図 9.4 に、それぞれ示す。

なお、これらの図表には、参考情報として、chang⁹⁻²²⁾の方法 (地盤の変形係数 E は $700N$ を採用 (N : N 値)), 多層地盤⁹⁻¹⁾ (E : LLT により得られた変形係数を採用), くさび法⁹⁻¹³⁾による計算結果も合わせて示している。

表 9.2 再現解析結果による感度分析

手法	H (kN)	y_e (mm)	y_c (mm)	y_c $/y_e$	M_e (kN·m)	M_c (kN·m)	M_c $/M_e$	L_{mc} (m)	L_{me} (m)	L_{mc} $/L_{me}$
再現 解析	10	1.66	1.88	1.13	3.55	4.63	1.30	0.50	0.40	0.80
	20	6.63	6.04	0.91	8.98	12.01	1.34	0.80	0.60	0.75
	30	16.57	15.85	0.96	16.0	21.8	1.36	1.00	0.80	0.80
Chang 700N	10	1.66	18.00	10.84	3.55	7.60	2.14	0.50	1.34	2.68
	20	6.63	53.50	8.07	8.98	17.00	1.89	0.80	1.56	1.95
	30	16.57	102.0	6.16	16.0	27.4	1.72	1.00	1.71	1.71
多層 LLT	10	1.66	4.11	2.48	3.55	5.56	1.57	0.50	0.80	1.60
	20	6.63	11.01	1.66	8.98	11.99	1.34	0.80	0.90	1.13
	30	16.57	22.10	1.33	16.0	20.5	1.28	1.00	1.00	1.00
くさび 法	10	1.66	3.27	1.97	3.55	4.99	1.41	0.50	0.60	1.20
	20	6.63	9.03	1.36	8.98	12.35	1.38	0.80	0.70	0.88
	30	16.57	22.62	1.37	16.0	23.0	1.44	1.00	1.00	1.00

y_e : 水平変位実測値

y_c : 水平変位計算値

M_e : 最大曲げモーメント実測値

M_c : 最大曲げモーメント計算値

L_{me} : 最大曲げモーメント発生深度実測値

L_{mc} : 最大曲げモーメント発生深度計算値

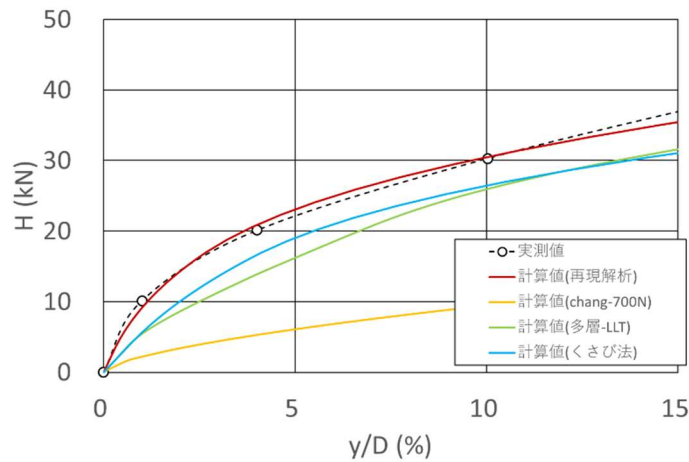


図 9.4 数値解析による計算値と実測値の比較

種々の数値解析結果のうち $H-y$ 関係が最も良く合致している再現解析の場合においても M および L_m は、20~30%程度の差が生じた。これについては、菊池の報告においても、梁ばねモデルでは、 $H-y$ 関係が合う場合と曲げモーメントの分布が合う場合の水平方向地盤反力係数 k_h (すなわち $p-y$ 関係) は大きく異なることが指摘されている。この要因は、 p から曲げモーメントを算出する際には、2階積分する必要があることなどが考えられる。よって、梁ばねモデルによる再現解析の結果には、この程度の実測値との差が生じるものとして以降の検討を行う。

9.3. 数値解析モデルにおける D_w / D_p および s/p の影響

(1) 載荷試験結果の分析

1) ストレート杭

9.2 節に示す方法により、ストレート杭 (試験体 No.1) における $p-y$ 関係を算出した。算出した各深度区分の $p-y$ 関係を図 9.5 および図 9.6 に、荷重段階毎の p の深度分布を図 9.7 に、それぞれ示す。なお、試験体 No.1 の結果については、 p の挙動を詳細に把握するため、載荷荷重が 40kN までの結果を示している。

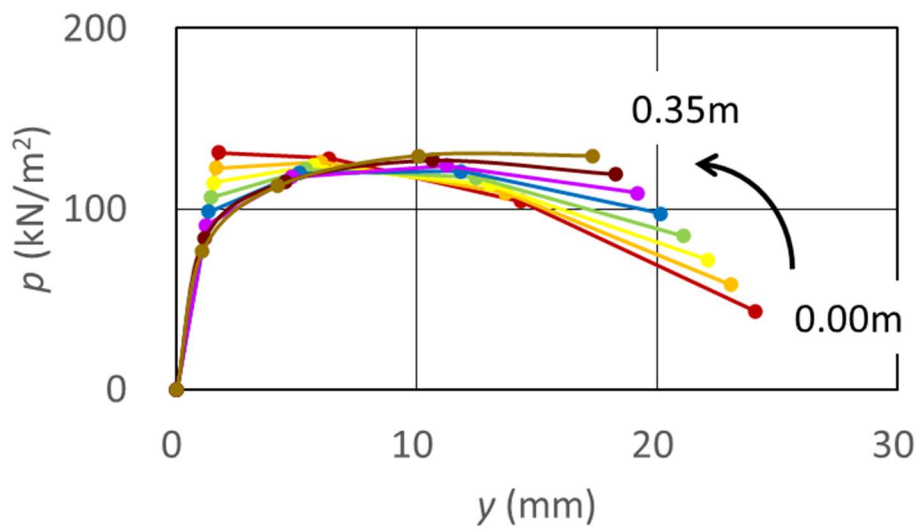


図 9.5 $p - y$ 関係 (試験体 No. 1 : 深度 0.00m~0.35m)

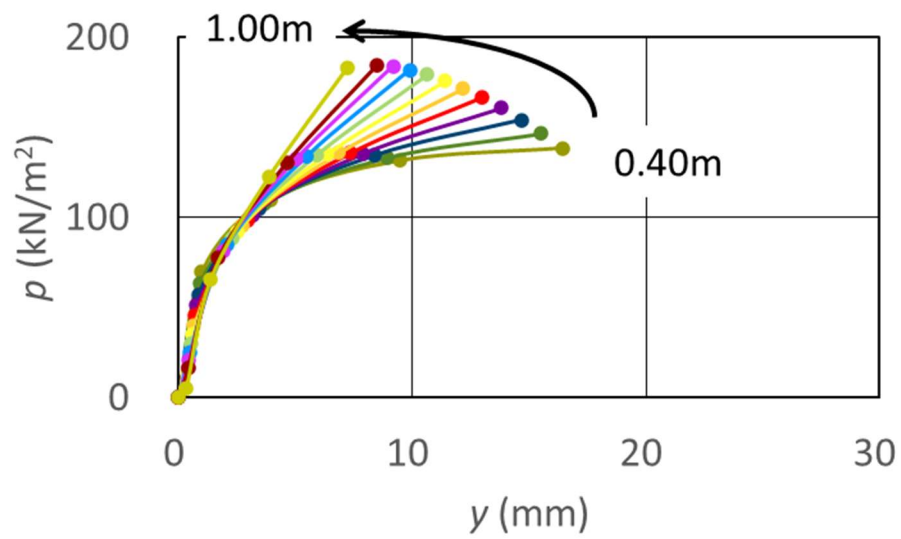


図 9.6 $p - y$ 関係 (試験体 No. 1 : 深度 0.40m~1.00m)

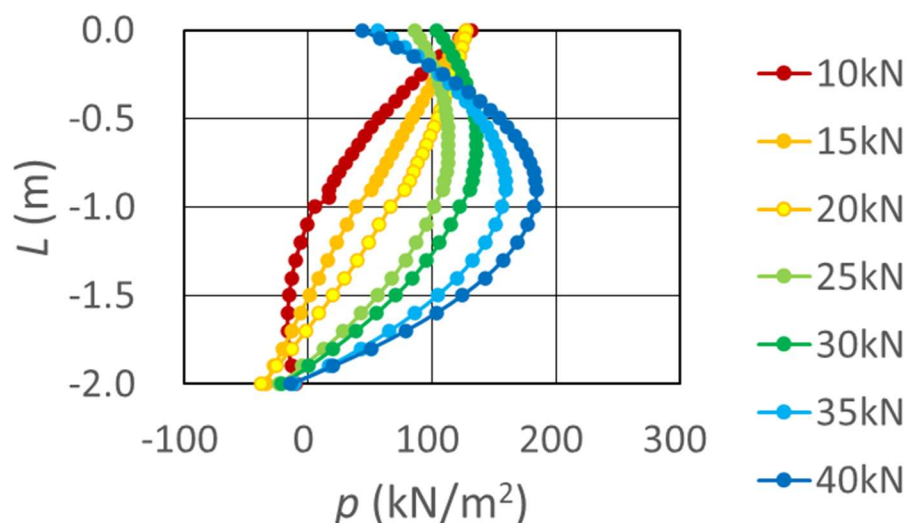


図 9.7 p の深度分布 (試験体 No. 1 : 深度 GL-0.0m~2.0m)

浅部 (GL-0.0m~0.35m 付近) は、荷重の増加と共に、 p が 130kN/m^2 付近まで増加した後、低下する挙動を示した。これは、杭近傍・地表面付近の領域において地盤の局所破壊が生じたことによる挙動であると推察され、くさび法や **chipping** 法における浅部の極限釣り合い条件に対応していると考えられる。

浅部で頭打ちとなった p の値は、 $126\text{kN/m}^2 \sim 131\text{kN/m}^2$ 程度であり、これは粘性土の非排水せん断強度 ($C_u (=23.1) [\text{kN/m}^2]$) の $5.4 \sim 5.7$ 倍であった。この関係は、地盤の粘着力に起因する Terzaghi の支持力式の関係と同等 ($p=5.1 C_u$)⁹⁻²³⁾であった。

一方、深部 (GL-0.40m 以深) の p は、漸増傾向であり、その最大値は、浅部における p の上限値を上回った。深部の p の最大値は、約 185kN/m^2 程度 (約 $8.0 C_u$) であり、Broms の報告⁹⁻¹⁶⁾における極限地盤反力である $9C_u$ までは達していなかった。

また、載荷荷重が 25kN 以降の浅部における p の分布形状は、若井ら⁹⁻¹¹⁾の報告における詳細な数値解析の結果と同様の形状 (図 9.8 参照) であり、くさび法における粘性土地盤の p - y モデルとも類似した形状 (図 9.9 参照) であった。

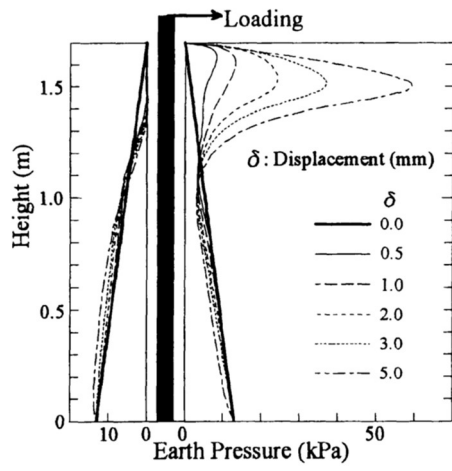


図 9.8 解析による杭前面および後面の水平土圧分布

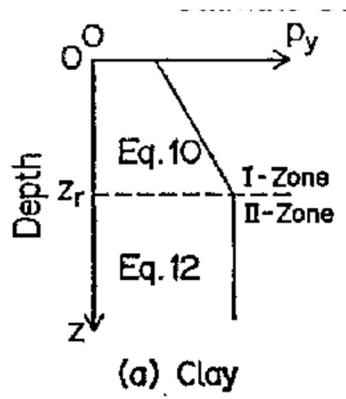


図 9.9 くさび法における降伏地盤反力 p_y の深度分布

2)羽根付き杭

9.2節に示す方法により，羽根付き杭（試験体 No.2，試験体 No.4～試験体 No.8）における p - y 関係を算出した。まず，代表例として，試験体 No.2 ($D_w/D_p=2.1$ ， $s/p=1.00$) について，各深度区分の p - y 関係を図 9.10 に，荷重段階毎の p の深度分布を図 9.11 に，それぞれ示す。

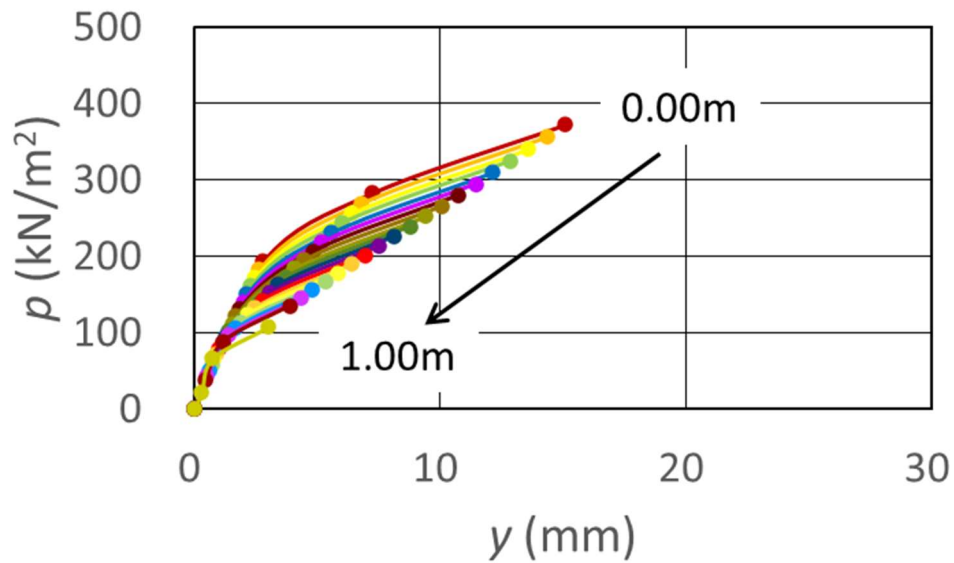


図 9.10 p - y 関係（試験体 No. 2：深度 0.00m～1.00m）

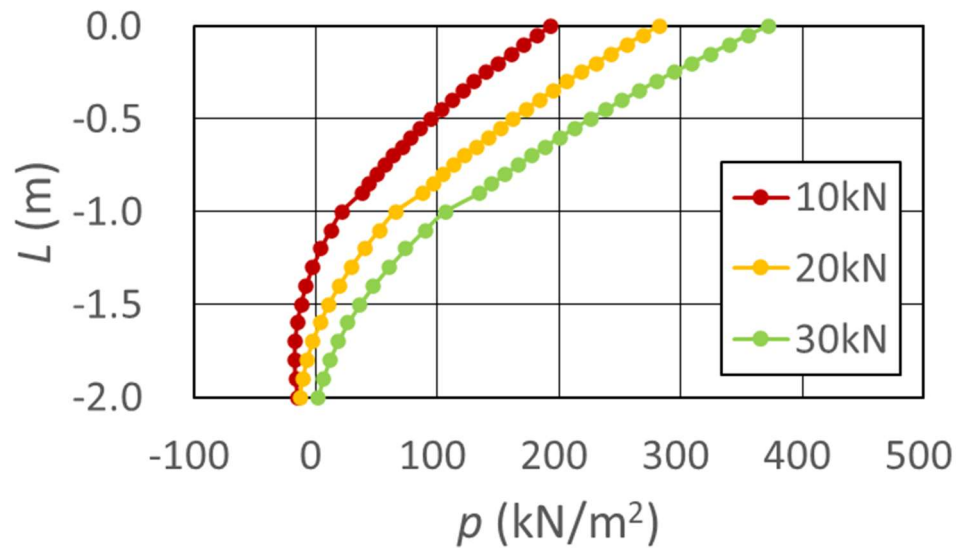
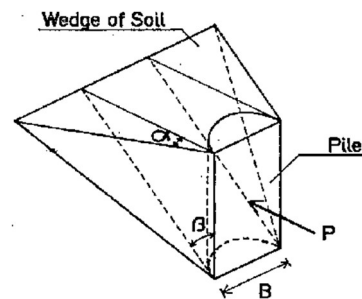


図 9.11 p の深度分布（試験体 No. 2：深度 GL-0.00m～1.00m）

羽根付き杭における p - y 関係は、ストレート杭のように浅部と深部で傾向が異なることはなく、変位の増加に伴い p は増加する傾向を示した。この傾向は、試験体 No.2, 試験体 No.4~試験体 No.8 で共通であった。

p の最大値は、 371kN/m^2 でありストレート杭の場合における浅部の最大値に対して、約 2.9 倍、深部の最大値に対して約 2.0 倍であった。 p の増加については、羽根付き杭の貫入に伴う土の押し広げによって、杭周辺地盤の密度が増加していることが要因であると考えられる。これにより、 C_u が増加すると共に、水平荷重により杭が地盤を押し広げる範囲（図 9.12 参照）が広がっていることも影響している可能性がある。



(a) I-Zone

図 9.12 くさび法における浅部の地盤の極限抵抗範囲⁹⁻¹³⁾

再現解析により求めた水平変位 (y_c)、最大曲げモーメント (M_e) と最大曲げモーメントの発生深度 (L_{mc}) について、実測値と比較した結果を表 9.3 に示す。なお、表中の水平変位計算値 (y_e)、最大曲げモーメント計算値 (M_e) と最大曲げモーメントの発生深度計算値 (L_{me}) は、杭のひずみ実測値を多項式で近似し、9.2 節に示す方法により深度 0.10m 毎の値を算出した結果を用いている。

表 9.3 梁ばねモデルによる再現解析結果と実測値との比較

No.	H (kN)	y_e (mm)	y_c (mm)	y_c $/y_e$	M_e (kN·m)	M_c (kN·m)	M_c $/M_e$	L_{mc} (m)	L_{me} (m)	L_{mc} $/L_{me}$
1	10	1.66	1.88	1.13	3.55	4.63	1.30	0.50	0.40	0.80
	20	6.63	6.04	0.91	8.98	12.01	1.34	0.80	0.60	0.75
	30	16.57	15.85	0.96	15.98	21.78	1.36	1.00	0.80	0.80
2	10	3.26	2.17	0.67	4.71	4.47	0.95	0.65	0.40	0.62
	20	9.45	6.29	0.67	11.77	10.21	0.87	0.80	0.70	0.88
	30	18.79	15.28	0.81	18.93	16.94	0.89	0.90	0.90	1.00
4	10	2.60	1.95	0.75	5.53	4.37	0.79	0.55	0.40	0.73
	20	7.88	4.66	0.59	11.85	9.56	0.81	0.70	0.50	0.71
	30	16.31	12.06	0.74	19.40	16.13	0.83	0.80	0.80	1.00
5	10	7.55	9.85	1.30	4.89	5.97	1.22	0.95	1.10	1.16
	20	19.14	19.74	1.03	11.75	12.03	1.02	0.95	1.20	1.26
	30	33.04	29.6	0.90	18.67	17.99	0.96	0.95	1.20	1.26
6	10	1.46	1.64	1.12	3.67	4.16	1.13	0.45	0.36	0.80
	20	4.58	5.03	1.10	8.09	9.87	1.22	0.55	0.60	1.09
	30	11.27	13.81	1.23	14.31	16.56	1.16	0.75	0.90	1.20
7	10	5.37	6.53	1.22	6.05	6.58	1.09	0.95	1.20	1.26
	20	12.35	14.46	1.17	12.54	13.04	1.04	0.95	1.30	1.37
	30	23.41	22.56	0.96	20.18	19.31	0.96	1.00	1.30	1.30
8	10	5.44	7.99	1.47	6.20	6.71	1.08	1.00	1.30	1.30
	20	14.32	16.42	1.15	12.65	13.54	1.07	1.10	1.30	1.18
	30	25.04	26.41	1.05	19.25	20.20	1.05	1.10	1.40	1.27

また、再現解析による算出した羽根付き杭の各試験体（試験体 No.2, 試験体 No.4～試験体 No.8）における H - y 関係, 曲げモーメントの深度分布について, 実測値と比較した結果を図 9.13 から図 9.24 に示す。さらに, 再現解析による算出した羽根付き杭の各試験体（試験体 No.2, 試験体 No.4～試験体 No.8）における p - y 関係を図 9.25 から図 9.36 に示す。

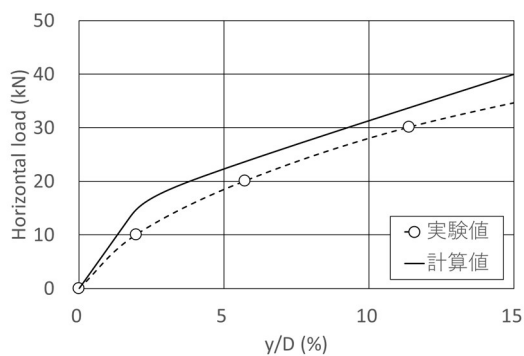


図 9.13 H - y 関係(試験体 No.2)

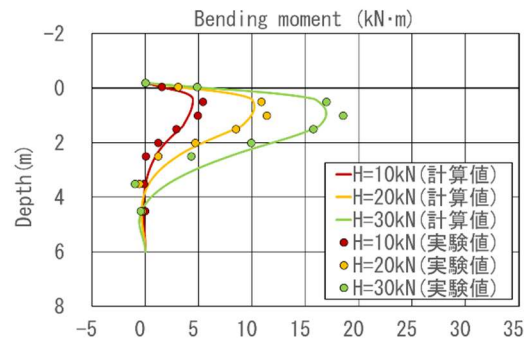


図 9.14 曲げモーメント分布(試験体 No.2)

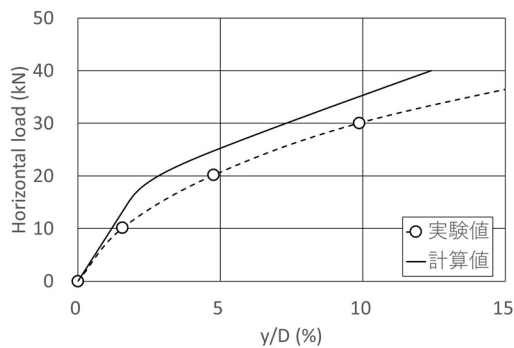


図 9.15 H - y 関係(試験体 No.4)

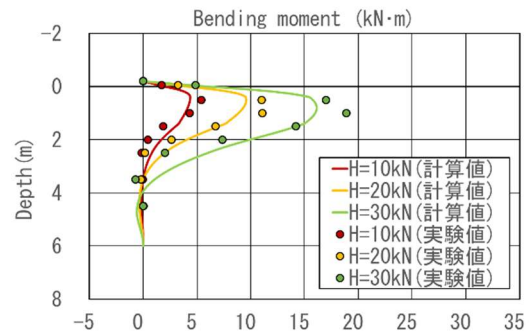


図 9.16 曲げモーメント分布(試験体 No.4)

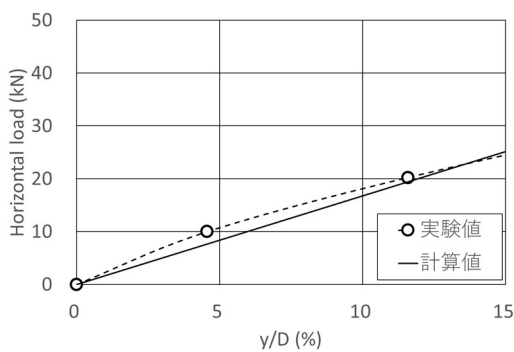


図 9.17 H - y 関係(試験体 No.5)

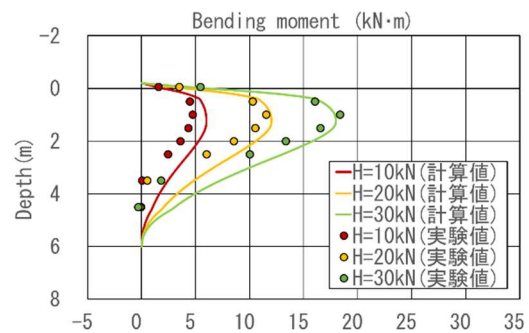


図 9.18 曲げモーメント分布(試験体 No.5)

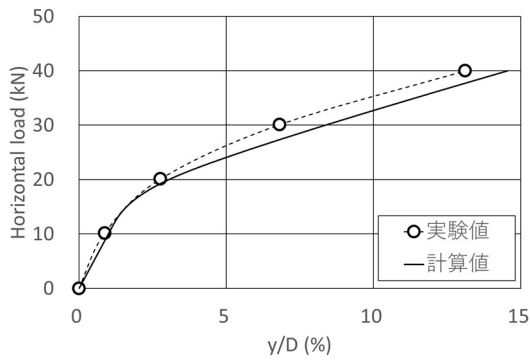


図 9.19 H - y 関係(試験体 No.6)

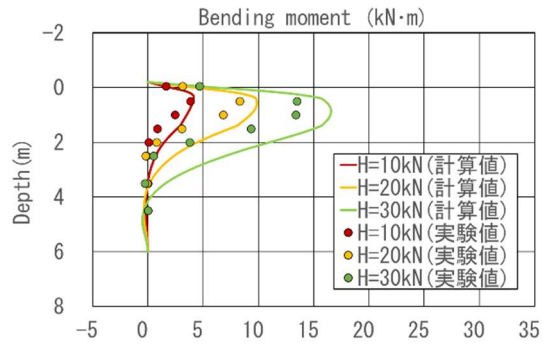


図 9.20 曲げモーメント分布(試験体 No.6)

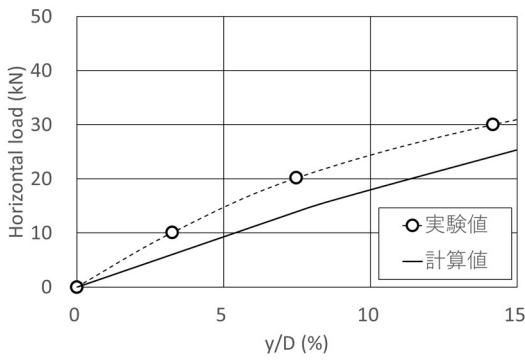


図 9.21 H - y 関係(試験体 No.7)

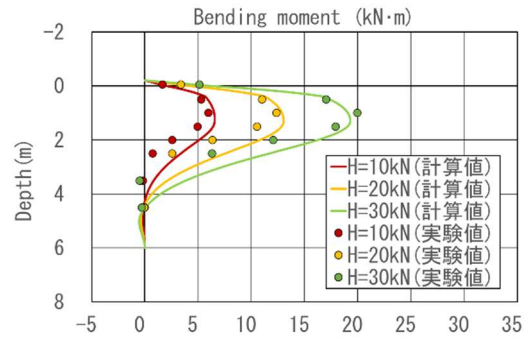


図 9.22 曲げモーメント分布(試験体 No.7)

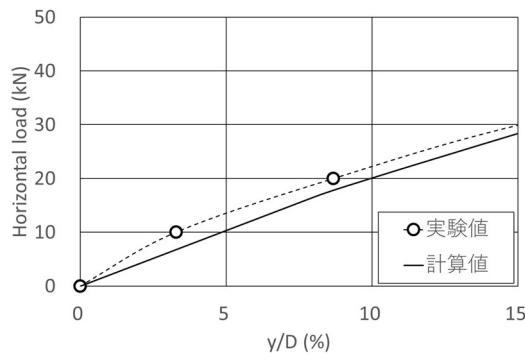


図 9.23 H - y 関係(試験体 No.8)

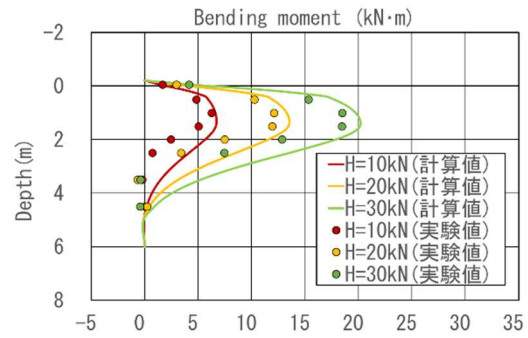


図 9.24 曲げモーメント分布(試験体 No.8)

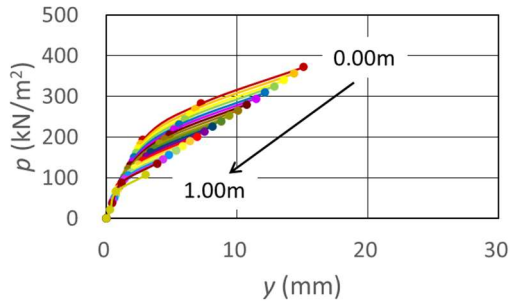


図 9.25 p - y 関係(試験体 No.2)

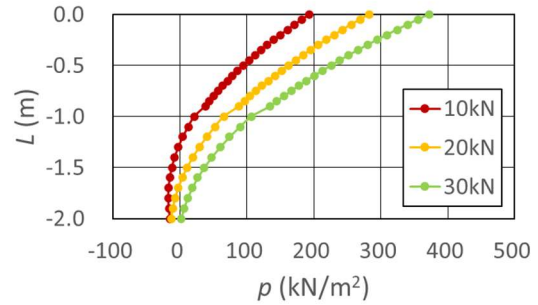


図 9.26 p 分布 (試験体 No.2)

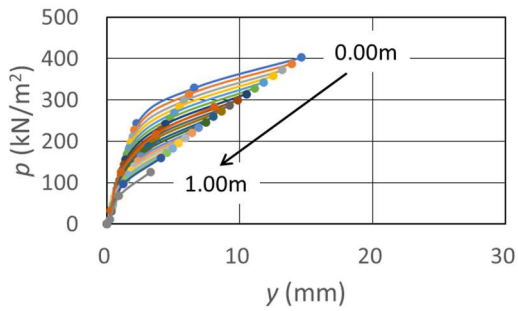


図 9.27 p - y 関係(試験体 No.4)

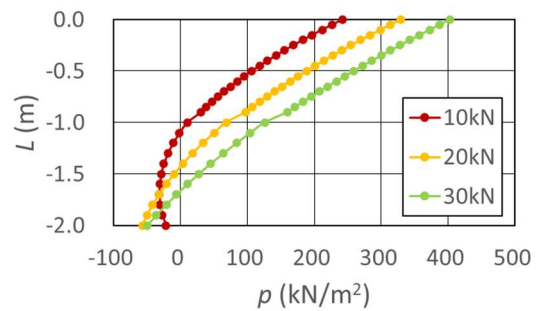


図 9.28 p 分布 (試験体 No.4)

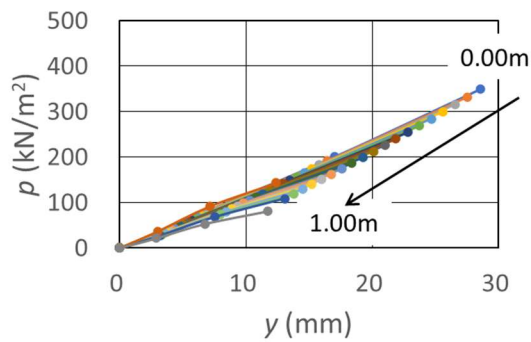


図 9.29 p - y 関係(試験体 No.5)

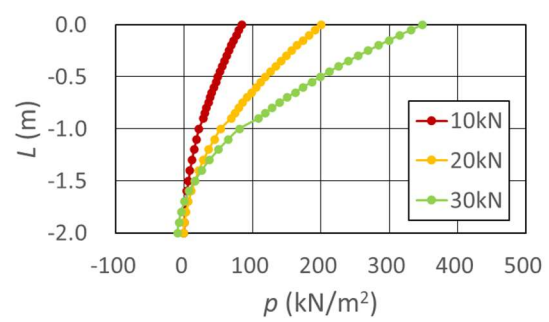


図 9.30 p 分布 (試験体 No.5)

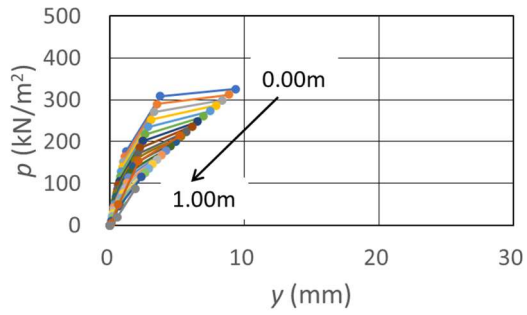


図 9.31 p - y 関係(試験体 No.6)

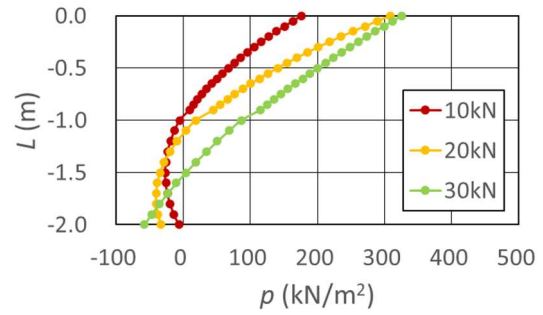


図 9.32 p 分布 (試験体 No.6)

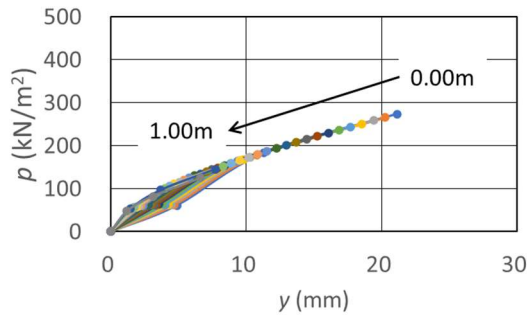


図 9.33 p - y 関係(試験体 No.7)

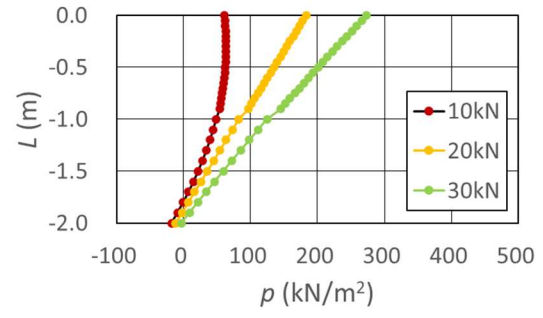


図 9.34 p 分布 (試験体 No.7)

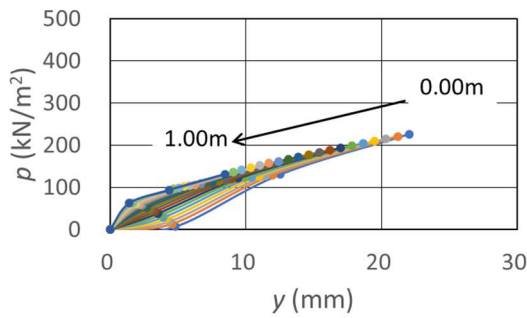


図 9.35 p - y 関係(試験体 No.8)

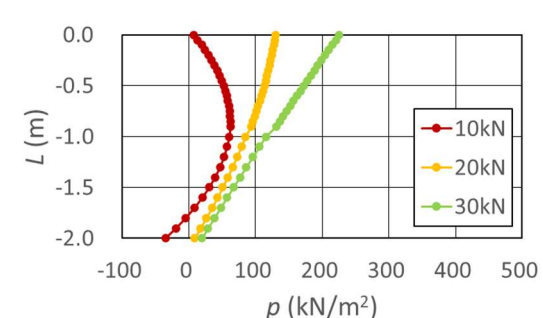


図 9.36 p 分布 (試験体 No.8)

再現解析の結果、 H - y 関係、 M および L_m は実験値に対して、概ね20~30%程度の差が生じた。今後、梁ばねモデルによる羽根付き杭の応力評価方法を設定する際には、この程度の誤差が生じることを考慮して、安全側に計算値を算出できるように解析条件を設定することが望まれる。

また、羽根付き杭の p - y 関係は、基本的には、浅部から深部に至るまで載荷荷重の増加と共に p が漸増し、 p の最大値は浅部から深部に向かって小さくなる傾向であった。ただし、 D_w/D_p が相対的に大きい試験体 No.7 ($D_w/D_p=2.5$) および試験体 No.8 ($D_w/D_p=3.1$) においては、載荷初期の段階では、浅部にほとんど p が発生しない傾向が認められ、このときの p の深度分布は、他の場合と異なり、深度 GL-1.0m 付近で膨らみを持つような分布形状であった。

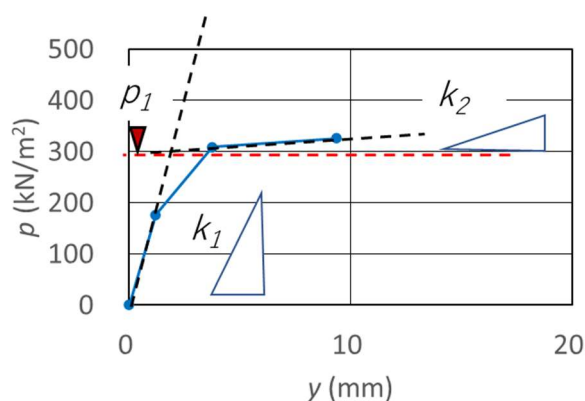
2) 数値解析モデルに D_w / D_p および s/p が及ぼす影響

1)の再現解析に用いた各試験体の p - y 関係 (バイリニアモデル) における勾配や折れ点の大きさに、 D_w / D_p および s/p が及ぼす影響について整理した。

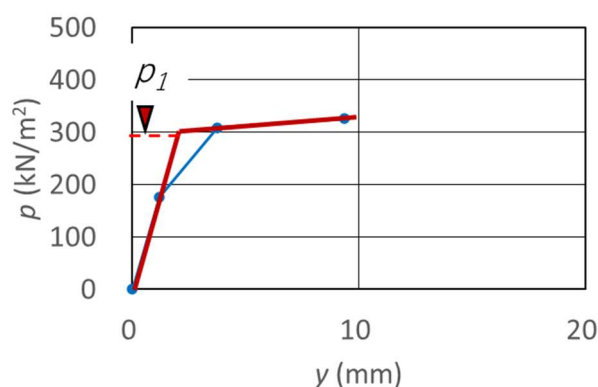
a) バイリニアモデルの設定方法

各試験体の各深度における p - y 関係は、以下の①から⑤の手順によりバイリニア型でモデル化することを基本とした (図 9.37 参照)。

- ① 載荷試験結果より、載荷荷重段階毎の p - y 関係をプロットする。
- ② 原点と載荷荷重が 10kN 時のプロットを結んだ直線の傾きを第 1 勾配 (k_1) とする。
- ③ 載荷荷重が 20kN 時と 30kN 時のプロットを結んだ直線の傾きを第 2 勾配 (k_2) とする。
- ④ ②と③の直線の交点を折れ点 (p_1) とする。
- ⑤ 原点, p_1 , 載荷荷重が 30kN 時のプロットをつないだ折れ線をバイリニアモデルとする。



(a) 勾配および折れ点



(b) 折れ線 (赤実線が採用するバイリニアモデル)

図 9.37 バイリニアモデル作成のイメージ

b) D_w / D_p が k_1 および p_1 等に及ぼす影響

D_w / D_p が p - y 関係に及ぼす影響を把握するため、各試験体における深度 GL-0.0m の p - y 関係図とそれを用いて設定したバイリニアモデルの勾配, 折れ点等を整理した。

図 9.38 に荷重試験結果から設定した p - y 関係を、表 9.4 にバイリニアモデルの第 1 勾配 (k_1), 折れ点 (p_1), 第 2 勾配 (k_2) および $\alpha_1 (=k_2/k_1)$ を示す。

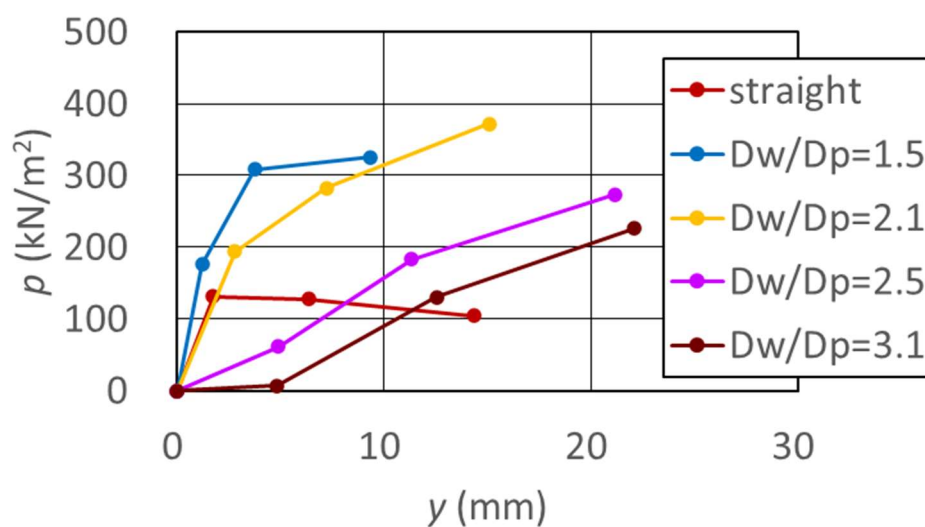


図 9.38 p - y 関係の比較

表 9.4 バイリニアモデルの比較

No.	D_w / D_p	k_1	p_1	k_2	α_1
		kN/m ³	kN/m ²	kN/m ³	
6	1.5	146,294	221	8,801	0.060
2	2.1	69,276	188	12,185	0.176
7	2.5	21,144	63	13,503	0.639
8	3.1	16,908	49	10,953	0.648
1	straight	75,547	131	1,112	0.015

これらの結果より、 D_w/D_p は、 k_I および p_I と負の相関関係（相関係数：-0.93, -0.92）にあり、 α_I とは正の相関関係（相関係数：0.91）にあることが確認できる。

また、羽根付き杭の k_I は、ストレート杭よりも小さくなる傾向であるが、 D_w/D_p が1.5の場合は、ストレート杭の場合よりも大きい値を示した。これは、 D_w/D_p を小さくすると地盤を乱す範囲が狭くなり、土の押し広げによる密度増加の影響が卓越するためであると考えられる。

一方、 D_w/D_p が2.5および3.1の場合は、ストレート杭よりも k_I が大きく低下し、特に D_w/D_p が3.1の場合は、載荷初期の時点において変位だけが增大した（初期がたの発生が確認された）。

なお、羽根付き杭は、載荷荷重の増加と共に、 p が増加し、その最大値はストレート杭の場合よりも大きい値を示した。

k_I 、 p_I 、 α_I と D_w/D_p との関係を図 9.39、図 9.40 および図 9.41 にそれぞれ示す。

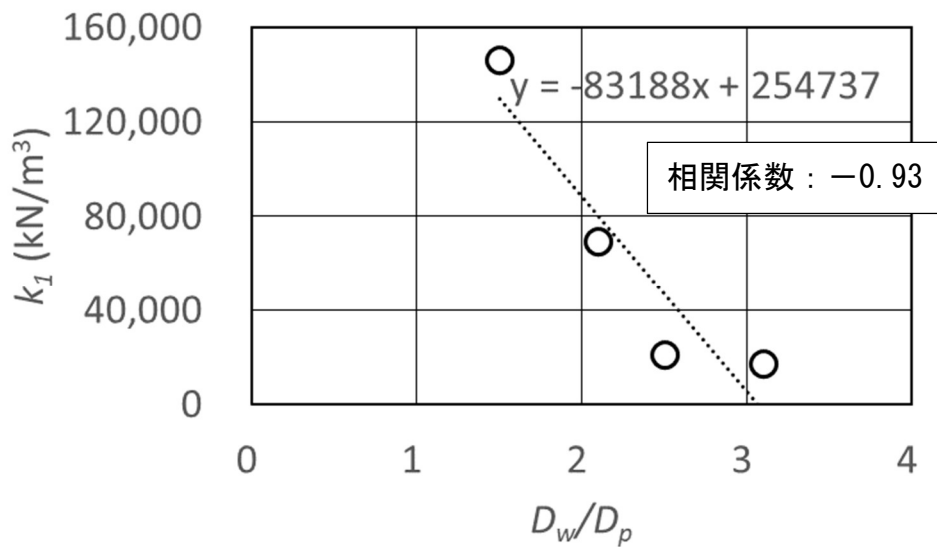


図 9.39 k_I - D_w/D_p 関係

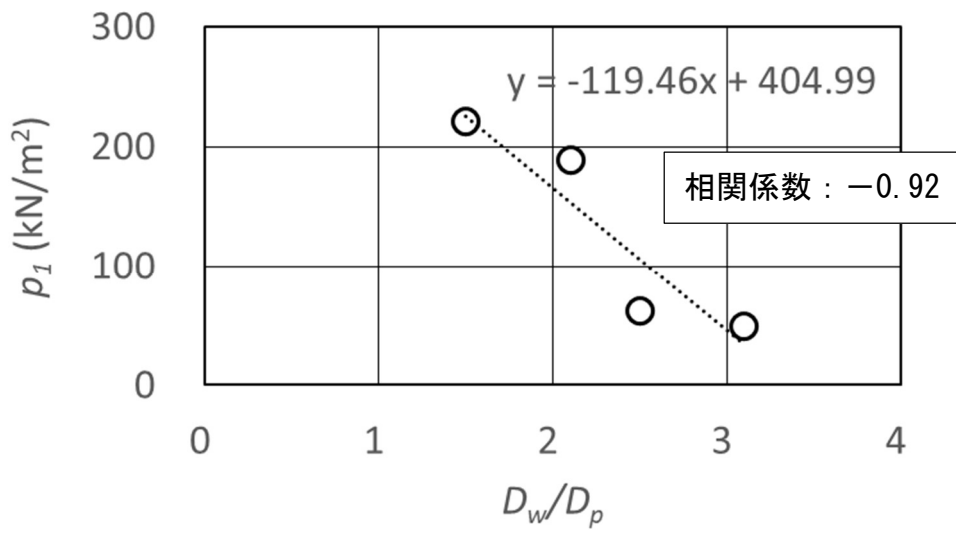


図 9.40 $p_1 - D_w/D_p$ 関係

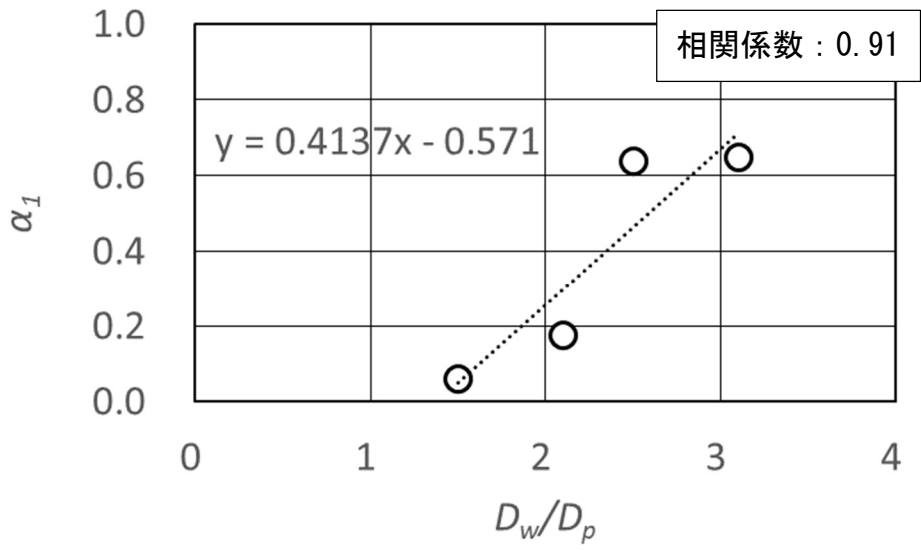


図 9.41 $\alpha_1 - D_w/D_p$ 関係

c) s/p が k_1 および p_1 等に及ぼす影響

s/p が p - y 関係に及ぼす影響を把握するため、各試験体における深度 GL-0.0m の p - y 関係図とそれを用いて設定したバイリニアモデルの勾配、折れ点等を整理した。

図 9.42 に荷重試験結果から算出した p - y 関係を、表 9.5 にバイリニアモデルの第 1 勾配 (k_1)、折れ点 (p_1)、第 2 勾配 (k_2) および $\alpha_1 (=k_2/k_1)$ を示す。

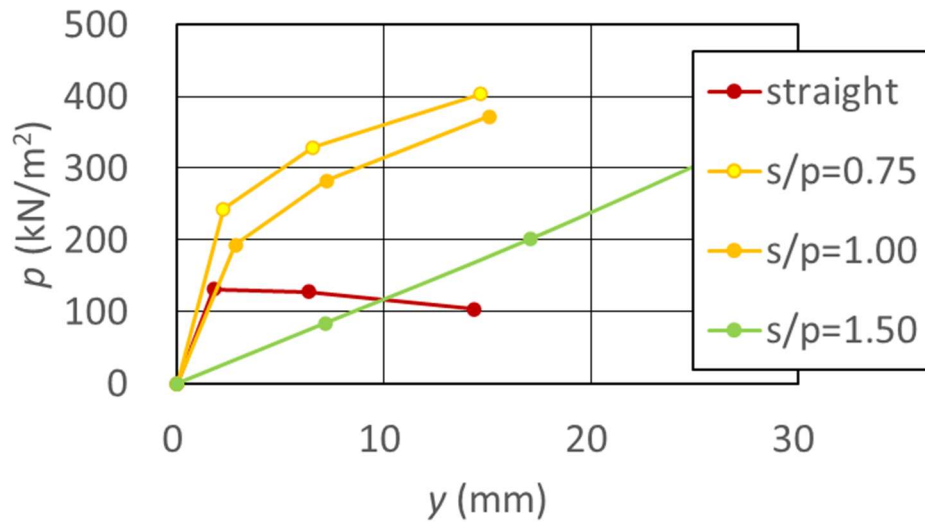


図 9.42 p - y 関係の比較

表 9.5 バイリニアモデルの比較

No.	s/p	k_1 kN/m ³	p_1 kN/m ²	k_2 kN/m ³	α_1
4	0.75	108,996	225	11,409	0.105
2	1.00	69,276	188	12,185	0.176
5	1.50	11,770	21	10,448	0.888
1	straight	75,547	131	1,112	0.015

これらの結果より、 s/p は、 D_w/D_p と同様に、 k_I および p_I と負の相関関係（相関係数：-1.00, -0.99）にあり、 α_I とは正の相関関係（相関係数：0.97）にあることが確認できる。

また、羽根付き杭の k_I は、ストレート杭よりも小さくなる傾向であるが、 s/p が0.75の場合は、ストレート杭の場合よりも大きい値を示した。これは、 s/p を小さくすると土の押し抜け方向が横方向に遷移するため密度増加の影響が大きくなるためであると考えられる。

一方、 s/p が1.5の場合は、ストレート杭よりも k_I が大きく低下した。

なお、羽根付き杭は、載荷荷重の増加と共に、 p が増加し、その最大値はストレート杭の場合よりも大きい値を示した。

k_I 、 p_I 、 α_I と s/p との関係を図 9.43、図 9.44 および図 9.45 にそれぞれ示す。

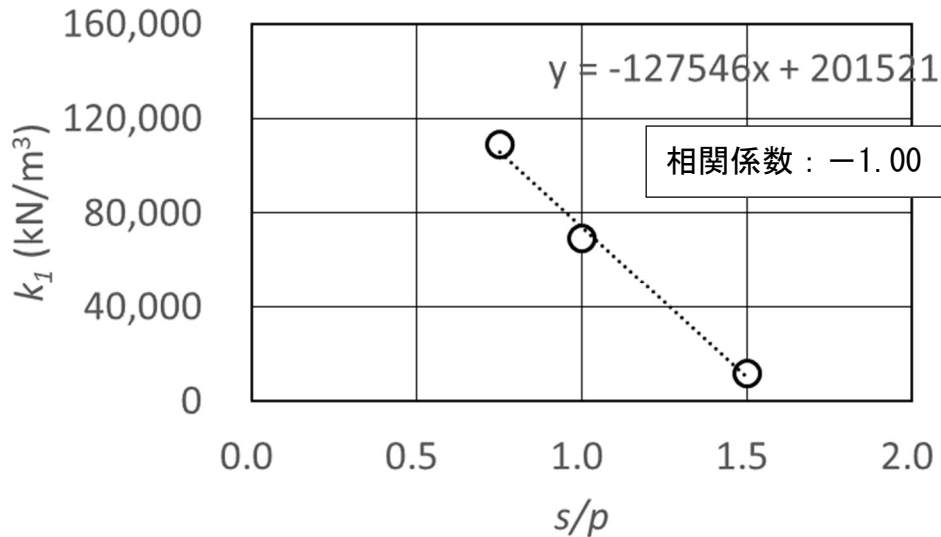


図 9.43 k_I - s/p 関係

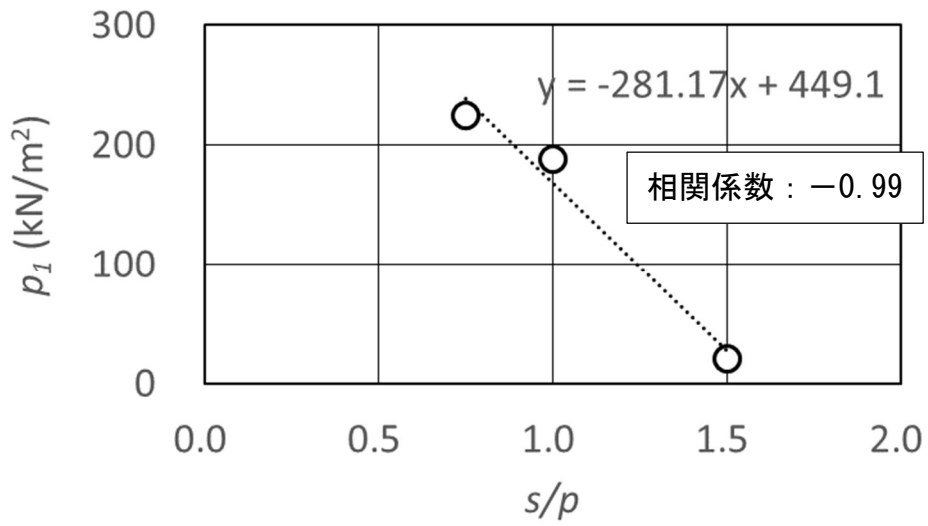


图 9.44 p_1-s/p 關係

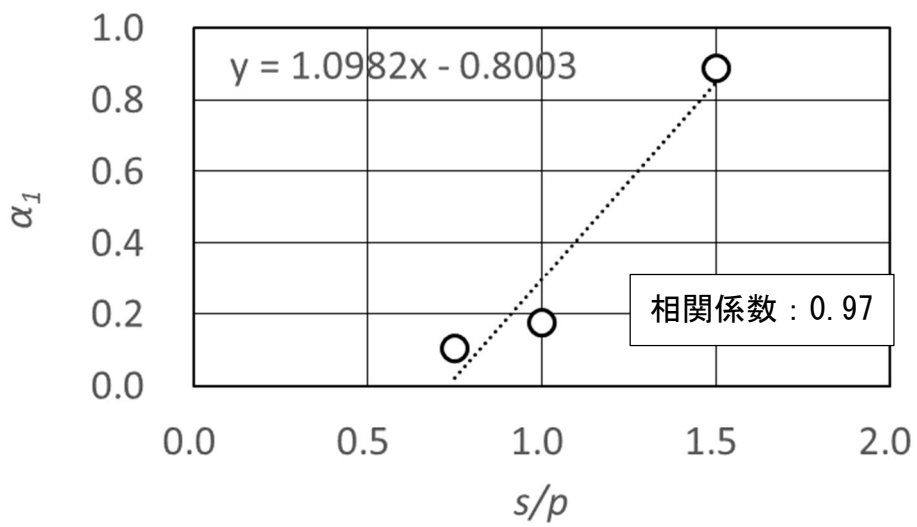


图 9.45 α_1-s/p 關係

9.4. 第9章のまとめ

载荷試験結果について分析した結果、 D_w/D_p および s/p は、 p - y 関係（バイリニアモデル）における勾配や、折れ点の大きさと相関があることが認められた。バイリニア型の p - y 関係における D_w/D_p および s/p と k_I 、 p_I および α_I との関係を表9.6から表9.8に示す。

この分析結果に基づいて、 D_w/D_p および s/p の大きさを考慮して設定したバイリニア型の p - y 関係を用いて、梁ばねモデルで数値解析を行った結果、载荷試験結果をある程度、再現することができた。

表 9.6 D_w/D_p および s/p が k_I に及ぼす影響

		D_w/D_p			
		1.5	2.1	2.5	3.1
s/p	0.75	–	108,996	–	–
	1.00	146,294	69,276	21,144	16,908
	1.50	–	11,770	–	–

表 9.7 D_w/D_p および s/p が p_I に及ぼす影響

		D_w/D_p			
		1.5	2.1	2.5	3.1
s/p	0.75	–	225	–	–
	1.00	221	188	63	49
	1.50	–	21	–	–

表 9.8 D_w/D_p および s/p が α_I に及ぼす影響

		D_w/D_p			
		1.5	2.1	2.5	3.1
s/p	0.75	–	0.10	–	–
	1.00	0.06	0.18	0.64	0.65
	1.50	–	0.89	–	–

9.5. 参考文献

- 9-1) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2019
- 9-2) 平成 13 年 7 月 2 日国土交通省告示第 1113 号
- 9-3) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001
- 9-4) 日本建築学会，建築耐震設計における保有耐力と変形性能（1990），1990
- 9-5) 下村修一，鈴木康嗣：広範囲な杭径の水平載荷試験結果に基づき粘性土地盤における単杭の水平地盤反力係数，日本建築学会技術報告集，第 23 巻，第 53 号，pp.93-98, 2017.2
- 9-6) 菊池喜昭：杭の軸直交方向抵抗性能を推定するための Chang のモデルに用いる地盤反力係数の新たな推定方法の提案，港湾技術研究所報告，第 48 巻，第 4 号，pp.3-22, 209.12
- 9-7) 久保浩一：杭の横抵抗の新しい計算法，港湾技術研究所報告，第 2 巻，3 号，1964.3
- 9-8) 西田義親：杭基礎の水平支持力ー文献資料と研究開設一，鋼管杭協会報告，第 1 号，1975.6
- 9-9) 西岡英俊，神田政幸，西村昌宏，館山勝：載荷試験データによる杭工法別の鉛直地盤反力係数算定法，鉄道総研報告，Vol.24, No.7, pp.29-34, 2010.7
- 9-10) 小林俊夫：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，大阪大学大学院工学研究科 博士学位論文，2020.6
- 9-11) 若井明彦，鶴飼恵三：単杭の水平載荷挙動に関する模型実験と解析，土木学会論文集，No.517, III-31, pp.159-168, 1995.6
- 9-12) 若井明彦，鶴飼恵三：単杭の水平挙動解析に用いる砂の 3 次元構成則の検討，土木学会論文集，No.589, III-42, pp.369-374, 1998.3
- 9-13) 岸田英明，中井正一：地盤の破壊を考慮した杭の水平抵抗，日本建築学会論文報告集，第 281 号，pp.41-55, 1979.7
- 9-14) Reese, L.C., and I. Manoliu, “Analysis of Laterally Loaded Piles by Computer”, Buletinul Stiintific al Institutului de Constructii Bucuresti, Bucharest, Rumania, Vol.16, No.1, pp.35-70, 1973
- 9-15) B.B.Broms : “Lateral Resistance of Piles in Cohesionless Soils”, ASCE, Vol.90, No.SM3, pp.123-156,1964
- 9-16) B.B.Broms : “Lateral Resistance of Piles in Cohesion Soils”, ASCE, Vol.90, No.SM2, pp.27-63,1964

- 9-17) Dyson G.J., and Randolph M. F. “Monotonic lateral loading of piles in calcareous sediments” J. Geotech Eng. Div, ASCE, 127(4), pp346-352, 2001
- 9-18) Erbrich, C. T. “A new method for the design of laterally loaded anchor piles in soft rock.” Proc. Annual Offshore Technology Conf., Houston, Paper OTC 16441, 2004
- 9-19) 幸左賢二, 鈴木直人, 木村亮, 木村嘉富, 森田悠紀雄 : 終局挙動に着目した実物大杭基礎の水平載荷試験, 土木学会論文集, No.596, III-4, pp.249-260, 1998.6
- 9-20) 土木研究所構造物メンテナンス研究センター : 性能規定体系における道路橋基礎の安定照査法に関する研究, 土木研究所資料第 4136 号, 2009.3
- 9-21) 大竹雄, 七澤利明, 本城勇介, 河野哲也, 田辺晶規 : 基礎の変位レベルと地盤のひずみレベルを考慮した設計用地盤反力係数の推定法, 土木学会論文集 C (地圏工学) , Vol.73, No.4, pp.412-428, 2017
- 9-22) Chang, Y.L. : Discussion on “Lateral Pile-Loading Test” by Feagin, Trans., ASCE, pp.272-278, 1937
- 9-23) Terzaghi, K. : Theoretical soil mechanics, John Wiley & Sons. Inc., 1963

10. 結論

羽根付き杭は、羽根部分の地盤抵抗による杭の押し込み方向や引抜き方向の抵抗力の増加、施工時の外力（鉛直力と回転力）の把握による支持層到達判断等の施工管理精度の向上、地盤を押し広げながら施工することによる発生残土の抑制、さらには、施工時と反対方向の回転力を加えることにより比較的容易に撤去することができるなど、構造上、および環境上の利点があり、現在、太陽光パネルの基礎や、橋りょう・港湾施設の基礎等、幅広い分野・規模に適用されている。

現在、建築分野における実務設計では、種々の条件下における実大実験の結果を統計的に整理し、押し込み方向の支持力や引抜き方向の抵抗力を安全側に評価した算定式が採用されていることがほとんどである。

しかし、回転貫入により施工された羽根付き杭の構造性能特性を土質力学的・地盤工学的な観点から説明している報告はほとんど無く、埋込み杭よりも周面摩擦や引抜き抵抗力が低下した事例に対する要因分析が進んでおらず、課題となっていた。

そこで、本論文では、羽根付き杭の水平抵抗特性に着目し、施工に伴う杭周辺地盤の土性変化、押し広げられる地盤の挙動を実験により把握し、羽根付き杭の貫入メカニズムを設定した。この貫入メカニズムから、羽根付き杭の水平抵抗特性に影響を及ぼす要因を抽出し、実大杭の水平載荷試験等により、その妥当性を証明した。さらに、その要因をパラメータとした簡易な計算モデルにより、羽根付き杭の水平抵抗特性をある程度表現できることを確認した。

(1)土性変化について

羽根付き杭の回転貫入に伴う杭周辺地盤の土性変化を把握するため、原位置から採取した土試料の物理特性および力学特性に関する各種試験を行った。その結果、羽根付き杭の周辺地盤においては、湿潤密度の増加、間隙比の低下、 $e-\log P$ 関係曲線の下方への移動、最大圧縮強さの増加、初期剛性の低下などが確認された。

これらの物理特性および力学特性の変化は、羽根付き杭の周辺地盤に密度増加と構造脆弱化が生じたこと、また、これらの土性変化は、杭軸部の貫入による地盤の押し広げおよび羽根通過による地盤の練り返し効果によるものと推察される。さらに、含水比の分布と三相混合割合の把握により、杭周辺の地盤は、押し広げられた地盤に間隙を埋められることで密度が増加し、塑性限界に達するとその外側（杭周面から半径方向に離れる方向）に密度増加の範囲が広がっていくものと推察される。

(2)施工に伴う杭周辺地盤の挙動について

羽根付き杭の回転貫入に伴う杭周辺地盤の挙動を把握するため、透明地盤への模型杭の施工による可視化実験および杭施工後の地盤の掘り出し試験を行った。その結果、羽根付き

杭の貫入により、杭軸部貫入領域における地盤は下方向および横方向に押し広げられたこと、押し広げられる地盤の方向は s/p が 1.0 より小さい場合は横方向、 s/p が 1.0 より大きい場合は下方向となる傾向が認められた。

また、 s/p が 1.0 より大きい場合には羽根通過部分(羽根が通過した軌跡の上側)に、 D_w/D_p が大きくなると羽根が通過した軌跡の最外縁に、それぞれ空洞が生じた。

羽根が地盤を押し広げる方向と体積、杭軸部が押し広げる土の体積との関係、すなわち D_w/D_p と s/p を適切に設定することで、空洞が発生しないように羽根付き杭を施工することができると考えられる。

(3)羽根形状および施工条件が杭の水平抵抗特性に及ぼす影響について

D_w/D_p と s/p が羽根付き杭の水平抵抗特性に及ぼす影響を把握するため、LLT および水平載荷試験を実施した。LLT の結果より、 D_w/D_p もしくは s/p が大きくなるに従い、初期がたの発生、水平剛性の低下、最大圧力の低下などが生じ、その低下割合が大きくなることが確認された。これは、 D_w/D_p が大きくなると乱される地盤の範囲が広がることおよび空洞が発生する可能性があること、 s/p が大きくなると発生する空洞が大きくなることの影響が、杭周辺地盤における密度増加の影響よりも卓越することが要因であると推察される。また、水平載荷試験の結果より、 D_w/D_p もしくは s/p が大きくなるに従い、 k_h は低下すること、すなわち、 D_w/D_p と k_h 、および s/p と k_h は負の相関関係にあること、最大曲げひずみの増加あるいは最大曲げひずみの発生深度が深くなることが判った。

なお、 D_w/D_p が 1.5、 s/p が 1.0 の場合、 k_h は、ストレート杭の場合よりも大きくなった。これは、地盤条件に応じて D_w/D_p および s/p を適切に設定することで、 k_h をストレート杭よりも大きくできる可能性があることを示唆している。

一方、 s/p を小さく設定し過ぎると施工時に歳差運動が生じる場合があり、 k_h が大きく低下した。施工時に杭の鉛直精度を担保可能な設計および施工条件を適切に設定する必要がある。

(4)繰り返し載荷が杭の水平抵抗特性に及ぼす影響について

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を把握するため、水平載荷試験を実施した。その結果、地表面水平変位 (y) および繰り返し載荷による増分変位 (Δy) は、 D_w/D_p もしくは s/p が大きくなることに従い大きくなることが確認された。これは、羽根付き杭の施工により羽根通過領域に空洞が生じることで、 y および Δy が大きくなると推察される。

なお、 D_w/D_p が 1.5、 s/p が 1.0 の場合、 y および Δy はストレート杭の場合よりも小さくなった。これは、密度増加の影響が構造脆弱化や空洞発生の影響よりも卓越したためであると考えられる。地盤条件に応じて D_w/D_p と s/p を適切に設定することで、繰り返し荷重に対しても杭の水平変位を抑制することができる可能性があることを示唆している。

(5)羽根付き杭の水平抵抗特性の評価方法について

水平載荷試験の結果に基づいて設定した $p-y$ 関係を用いることで、 D_w/D_p および s/p が羽根付き杭の水平抵抗特性 ($H-y$ 関係, M, L_m) に及ぼす影響を簡易な梁ばねモデルである程度表現することができた。

(6)課題と今後の展望

羽根付き杭の構造上・環境上の利点を鑑み、今後一層の普及が期待される一方で、建築分野においては、羽根付き杭の水平抵抗特性について杭の応力と変位を安全側に評価できる簡易で実用的な計算モデルと、精度良く評価できる詳細な計算モデルの確立が望まれる。

そのためには、学術的な考察の整理と、実験的な検証の両輪が必要であり、特に前者について更なる検討が必要であると認識している。

理屈の上では、地盤の強度や D_w/D_p などの設計条件を考慮して、 s/p や鉛直精度などの施工条件を適切に設定し、さらに、当該施工条件で施工が可能となる施工機械・機材を適切に選定することで、所定の k_h を確保することができると考えられる。これを実現するためには、設計者、工事管理者、および施工者が、目標とする構造性能・施工品質を担保するために必要な条件を理解し、与条件である地盤・地形の特性を地盤調査および施工管理により把握しながら、3者が協力して対応していく取り組みが必要である。

経験的にも理論的にも安全で、かつ合理的な基礎杭の設計・施工方法並びに運用体制の確立に向けて、これからも努める所存である。

11. 謝辞

本論文を取りまとめるに際しては、多くの方々のお力添えを賜りました。深く感謝申し上げます。

末政直晃 先生（東京都市大学 教授）には、温かく前向きな、時には熱い言葉を掛けて頂きました。研究の目的に応じて試験装置や治具を製作・改良することの楽しさは、「地盤研」の活動から学びました。末政先生のように分野の垣根を超えて、未知の世界を切り開くことができるように、これからも勉強を続けて行きます。

若井明彦 先生（群馬大学 教授）、伊藤和也 先生（東京都市大学 教授）、丸山收 先生（東京都市大学 教授）には、論文審査において様々な視点からの貴重なご意見・ご指摘を頂きました。建築の基礎構造の分野においては、数値解析的な考え方や計算手法をもっと取り入れて行く必要があると思いますので、引き続きご指導賜りますよう宜しくお願い申し上げます。

田中剛 先生（東京都市大学 技士）には、模型試験の条件設定に対する助言や、試験装置や器具の調整等の種々のことに対応して頂きました。岩井勝哉君には、透明地盤を製作して頂きました。また、石田女史、岡女史には、事務連絡や英文の査読をして頂きました。皆様がいる地盤研は、厳しくも明るい雰囲気です。いつも活気があるので、伺うのが楽しみでした。

津野将馬さん（旭化成建材株式会社）には、孔内水平載荷試験における試験装置のキャリブレーションおよび試験体の施工等の作業を手伝って頂きました。塚田義明さん（旭化成建材株式会社）には、試験治具の設計や羽根付き杭の施工管理方法について多くの助言を頂きました。成田雅章さん（システム計測株式会社）には、載荷試験の計測作業を長期間・長時間に渡って手伝って頂きました。皆様には、こちらの気が付かないことへの配慮や臨機応変な対応をしていただきました。本当にありがとうございます。

前職でお世話になった株式会社トーヨーアサノにおいて、技術開発部では工法・製品開発と共に、工場における杭体の製造や実現場における杭の施工管理、営業開発部では杭の構造計算および設計営業など、実務を幅広く経験させて頂きました。在職中には、一般社団法人コンクリートパイル建設技術協会にも出向させて頂きました。当時の上司であった桂木正雄 様、林隆浩 様、西村裕 様、浅井陽一 様らをはじめとし、他の杭メーカーの方々にも多くのことを教えて頂きました。

一般財団法人ベターリビングにおいては、基礎地盤に関連する業務を担当させて頂いております。特に、基礎地盤評定委員会では、とても貴重な経験をさせて頂いております。中井正一 委員長（千葉大学名誉教授）を筆頭に、青木功 委員、加倉井正昭 委員、梅野岳 委員、三町直志 委員、渡辺一弘 委員らによる審査は、とても緊張感がありますが、様々な観点からの指摘を頂けるため、大変勉強になります。皆様方のお陰で新しい領

域の評定にも踏み出して行くことができます。また、新井洋 様（国立研究開発法人 建築研究所）、井上波彦 様（国土交通省 国土技術政策総合研究所）、柏尚稔 様（国土交通省 国土技術政策総合研究所）には、種々の委員会や調査の際にお声を掛けて頂き、貴重な経験をさせて頂いております。もっと戦力になれるよう努力します。

また、財団内においては、井上俊之 理事長を始め役員の方々には、博士号取得についてご配慮を頂いており、感謝申し上げます。西山功 常務理事には、ふとしたときにお気遣いの声を掛けて頂くことが何度もあり、励みになりました。藤本効 所長には、報告書や評定書を何度も何度も査読して頂き、文章力を鍛えて頂きました。ありがとうございます。そして、二木幹夫 総括役からは、大きな影響を受けました。これからもご指導賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

また、これまでの人生においても、多くの方々に助けられ、教えられ、育てて頂きました。

増田純一 先生（元岐阜北高校 野球部監督）並びに野球部の仲間とは、言い表すことが難しいのですが、辛かったけれど楽しかった、濃厚な3年間を過ごさせて頂きました。皆さんがいたので、やりきることができました。

尾形素臣 先生（元愛知工業大学 教授）には、大学院生のときに実践の場を多く与えて頂きました。厳しい現実と直接触れさせて頂くことで、社会に出ることへの漠然とした不安がむしろ楽しみに変わりました。研究室や芸大の仲間からもたくさんの刺激をもらいました。ありがとうございます。

同級生の黒部成徳 君、和田将敏 君らにも感謝しています。

そして、自由に育ててくれた父。他界する前に残してくれた言葉は、今の僕の生き方の幹になっています。いつも気遣ってくれた母。ありがとう。今度、温泉でも行こう。姉にも感謝しています。

子供たちには、いつも元気づけられています。景太、吏紗、佑真。ありがとう。

最後に、妻の紋子へ。毎日、お疲れ様です。僕らも、今度、温泉でも行こう。そして、何でも無い日常を共に過ごすことができ本当に幸せです。ありがとう。

令和3年3月3日 久世直哉