



## 回転貫入杭の引抜き抵抗力特性に関する実験的研究

|       |                                                                                                    |
|-------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| メタデータ | 言語: jpn<br>出版者:<br>公開日: 2016-06-08<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: 中沢, 楓太<br>メールアドレス:<br>所属: |
| URL   | <a href="https://doi.org/10.15118/00008924">https://doi.org/10.15118/00008924</a>                  |

# 回転貫入杭の引抜き抵抗特性 に関する実験的研究

平成 27 年 12 月

中 沢 楓 太



## 博士論文題目

### 回転貫入杭の引抜き抵抗特性に関する実験的研究

氏 名 中沢 楓太

### 論文内容の要旨

本論文は、実地盤でも一般的な地層構成である密な砂層の上に緩い砂層を堆積させた地盤条件を加圧土槽（直径 1,000mm, 高さ 1,200mm）に作製し、回転貫入杭（軸径  $d_0=48.6\text{mm}$ , 羽根径  $d_w=97.2\text{mm}$ ）の施工から引抜き载荷までの一連の挙動に関する模型実験を実施し、杭体各部（羽根面、杭先端面および杭周面）の抵抗特性を明らかにした後、回転貫入杭の引抜き抵抗に関する実用的な評価方法を提示したものである。

回転貫入実験では、杭先端面が支持層に近づくと杭の貫入率が低下するが、羽根面が支持層に達した時点からの貫入率はほぼ一定になること、杭頭部の回転トルクは杭先端面の抵抗力や羽根面の推進力を反映させており、施工管理の指標になることを明らかにした。

それに引続く引抜き载荷実験で得られた主な知見は以下の通りである。

- ① 杭頭部の引抜き荷重  $P$  は羽根径  $d_w$  の 5～10% 引抜き時に最大となり、その後は減少もしくは一定に推移する傾向を示し、押込み荷重が作用する既往の研究における回転貫入杭の挙動とは大きく異なる。
- ② 杭先端面が支持層に近づくことで羽根上部の砂層がより密な状態になるため、羽根面の引抜き抵抗力  $R_w$  は支持層へ根入れさせない場合でも増大する。
- ③ 杭先端面の引抜き抵抗力  $R_b$  は、羽根径  $d_w$  の 0.5% 程度の小さな引抜き変位量で最大となり、支持層への根入れ長さにかかわらず概ね一定となる。
- ④ 羽根面の抵抗力  $R_w$  が減少を始める羽根径  $d_w$  の 5～10% 引抜き時になると杭周面の引抜き抵抗力  $R_s$  が増大して、抜け上がりに伴う羽根面抵抗力の減少を補う働きを示す。

次に、上記の引抜き抵抗特性に基づいて、a) 施工時情報（杭頭部の回転トルク）、b) 羽根近傍地盤のせん断破壊面、c) 地盤の  $N$  値を利用する 3 種類の手法について、杭体各部の引抜き抵抗の評価方法を検討した。実用的な観点から考察すると、羽根面抵抗力  $R_w$  と杭先端面抵抗力  $R_b$  を加算した杭先端部の引抜き抵抗力  $R_p$  が地盤の平均  $N$  値と相関性が高いことから、本論文では回転貫入杭の極限引抜き抵抗力  $R_{up}$  (kN) を算定する下式を提示した。

$$R_{up} = (159 \cdot \bar{N} + 264) A_w$$

ここで、 $A_w$  ( $\text{m}^2$ ) : 羽根面積  $= \pi(d_w^2 - d_0^2) / 4$

$\bar{N}$  : 羽根面の上方  $3d_w$  から杭先端面の下方  $3d_0$  区間の平均  $N$  値

最後に、上記の算定式と原位置载荷試験結果を比較し、算定精度を更に向上させるための今後の課題を指摘した。



TITLE

STUDY ON MODEL TESTS OF THE PULLING RESISTANCE OF THE HELICAL  
SCREW PILES

(回転貫入杭の引抜き抵抗特性に関する実験的研究)

NAME NAKAZAWA FUTA

ABSTRACT

In this thesis, a series of model tests for the helical screw pile with a pile diameter  $d_o$  of 48.6mm and diameter of the helical plate  $d_w$  of 97.2 mm are conducted to investigate pile behaviors during installation and uplift loading in a large-scale calibration chamber. Based on pulling resistance characteristics of three component parts (e.g. the helical plate, the bottom plate and the pile shaft), a formula is proposed to practically evaluate the pulling resistance of the helical screw pile embedded in a relatively dense sand layer underlying loose sand.

The installation test results show that the penetration rate decreases as the bottom plate closes to the bearing layer, and then keeps constant after the helical plate reaches the bearing layer. Therefore, the resistance of the bottom plate and the driving force of the helical plate can be estimated by the torque of the pile head.

The following findings have been obtained from pulling load tests:

- ① the maximum pulling load of the pile head  $P$  is located on the uplift displacement equal to 5~10% of the diameter of the helical plate  $d_w$  and then it gradually decreases or reaches constant condition. The tendency is different from the compressive load test result of previous researches.
- ② when the bottom plate closes to the surface of the bearing layer regardless of entering the bearing layer, the pulling resistance of the helical plate  $R_w$  increases against changes of compaction of the sand layer above the helical plate.
- ③ without considering the length of pile entering the bearing layer, the pulling resistance of the bottom plate  $R_b$  reaches the maximum value at a uplift displacement of 0.5% of the diameter of the helical plate.
- ④ the pulling resistance of the helical plate  $R_w$  begins to decrease on a uplift displacement equal to 5~10% of the diameter of the helical plate  $d_w$ , while the pulling resistance of the pile shaft  $R_s$  increases simultaneously. Accordingly, the decrease of the pulling resistance of the pile is compensated during the slip-up process.

Besides, on account of the above-mentioned test results, evaluation methods for three component parts of the helical screw pile are discussed by considering three cases, that is, a) the information of construction (such as the torque of the pile head  $T$ ), b) the shear fracture plane of ground surrounding

to the helical plate, and c) the SPT- $N$  value of ground. From the practical view, the pulling resistance of the pile toe  $R_p$ , which is sum of the pulling resistance of the helical plate  $R_w$  and the pulling resistance of the bottom plate  $R_b$ , has closely relationships with the SPT- $N$  value of ground. Therefore, this thesis proposes a formula for calculating the ultimate pulling resistance  $R_{up}$  (kN) as follow:

$$R_{up}=(159 \cdot \bar{N} + 264)A_w$$

where,  $A_w$  (m<sup>2</sup>): the area of the helical plate= $\pi(d_w^2-d_0^2)/4$ , and  $\bar{N}$  is the average SPT- $N$  value of grounds from upside of treble height of diameter of the helical plate ( $3d_w$ ) to downside of treble depth of the pile diameter ( $3d_0$ ).

It should be noted that comparing with in-site loading test results, it is necessary to improve the precision of the above formula as a future work.

# 回転貫入杭の引抜き抵抗特性に関する実験的研究

## 内 容 梗 概

鋼管杭の先端付近に羽根を取り付けた回転貫入型の杭工法は、低騒音・低振動で掘削残土を発生させずに、セメントも一切使用しないで施工できるといった環境面での優れた特徴を有している。更に、杭先端近傍に取付けられた羽根の支圧抵抗力（アンカー効果）を期待できることから、杭の自重やその周面摩擦力で抵抗する工法に比べて、高い引抜き抵抗力を有するものと推察される。しかし、羽根回転による杭の貫入施工は、杭体積に相当する地盤を側方へ押し出す効果と同時に、地盤の攪乱による強度低下を引き起こすことも懸念される。

このような状況下において、引抜き荷重を受ける羽根のアンカー効果と支持層への羽根の根入れ長さの関係はほとんど解明されていない。更に、杭の回転トルクや貫入率などの杭施工時に得られる情報も、支持層深度の確認としての利用に留まっており、引抜き抵抗力との関係については検討されていないのが現状である。

本論文は、実地盤でも一般的な地層構成である支持層となる比較的密な砂層の上に緩い砂層を堆積させた地盤条件（二層地盤）を加圧土槽（直径 1,000mm，高さ 1,200mm）に作製し、回転貫入杭（軸径  $d_0=48.6\text{mm}$ ，羽根径  $d_w=97.2\text{mm}$ ）の施工から引抜き載荷までの一連の挙動に関する模型実験を実施し、杭体各部（羽根面，杭先端面および杭周面）の抵抗力特性を明らかにした後、回転貫入杭の引抜き抵抗力に関する実用的な評価方法を提示したものであり、全 6 章と付章から構成されている。

## 第 1 章 緒論

回転貫入杭の既往の研究概要および問題点を略述して、本論文の目的と範囲を明らかにした。

## 第2章 実験装置および実験方法

使用した機材や模型杭の諸元、地盤の作製方法、回転貫入（施工）実験および引抜き載荷実験の方法を示した後、本論文で検討対象とした実験モデルを設定した。

## 第3章 回転貫入中の挙動

回転貫入開始から施工終了に至る実験を通して、以下の知見を得た。

- ① 杭先端面が支持層に近づくと杭の貫入率  $\mu$  が低下するが、羽根面が支持層に達した時点からの  $\mu$  はほぼ一定になる。
- ② 打止め時の貫入率  $\mu$  は  $\bar{N} < 20$  程度までは  $\bar{N}$  の増大に伴い小さくなるが、 $\bar{N} \geq 20$  では  $\mu = 0.3 \sim 0.35$  とほぼ一定である。
- ③ 二層地盤の支持層に打止めた時点における杭先端面の施工時抵抗力  $iR_b$  および羽根面の施工時推進力  $iR_w$  は、密な均一地盤の打止め時におけるそれらと同程度である。
- ④ 杭頭部の回転トルク  $T$  と杭先端面の施工時抵抗力  $iR_b$  および羽根面の施工時推進力  $iR_w$  は概ね比例関係にあることから、杭頭部の回転トルク  $T$  が施工管理の指標になる。
- ⑤ 杭打止め時や打止め後に残留する杭体各部の荷重は、地盤の  $\bar{N}$  から概ね推定できる。

## 第4章 引抜き載荷時の挙動

第3章の回転貫入実験に引続いて実施した引抜き載荷実験を通して、以下の知見を得た。

- ① 杭頭部の引抜き荷重  $P$  は羽根径  $d_w$  の 5～10% 引抜き時に最大となり、その後は減少もしくは一定に推移する傾向を示し、押込み荷重が作用する既往の研究における回転貫入杭の挙動とは大きく異なる。
- ② 羽根面の引抜き抵抗力  $R_w$  は支持層へ根入れさせない場合でも、杭先端面が支持層に近づくことで羽根上部の砂層がより密な状態になるため、緩い均一地盤の場合よりも大きくなる。
- ③ 杭先端面の引抜き抵抗力  $R_b$  は、羽根径  $d_w$  の 0.5% といった極めて小

さな引抜き量で最大となり，支持層への根入れ長さ  $H_b$  にかかわらず概ね一定となる特徴を有する．

- ④ 羽根面の抵抗力  $R_w$  が減少を始める羽根径  $d_w$  の 5～10% 引抜き時になると杭周面の引抜き抵抗力  $R_s$  が増大して，抜け上がりに伴う羽根面の抵抗力の減少を補う働きを示す．

## 第 5 章 引抜き抵抗力の評価

第 4 章で得られた杭体各部の引抜き抵抗力特性に基づいて，a) 施工時情報，b) 羽根近傍地盤のせん断破壊面，c) 杭先端近傍地盤の平均  $N$  値を利用する 3 種類の手法による引抜き抵抗力の評価方法を検討している．実用的な観点から考察すると，羽根面抵抗力  $R_w$  と杭先端面抵抗力  $R_b$  を加算した杭先端部の引抜き抵抗力  $R_p$  が地盤の平均  $N$  値との相関性が高いことから，回転貫入杭の極限引抜き抵抗力  $R_{up}$  (kN) を算定する下式を提示した．

$$R_{up} = (159 \cdot \bar{N} + 264) A_w$$

ここで， $A_w$  (m<sup>2</sup>)：羽根面の面積  $= \pi(d_w^2 - d_o^2) / 4$

$\bar{N}$ ：羽根面の上方  $3d_w$  ～ 杭先端面の下方  $3d_o$  区間の平均  $N$  値

## 第 6 章 総括

以上の各章で明らかになったことを要約した後，今後に残された課題を記した．

付章として，本工法の貫入機構の解明を目的として別途実施した回転貫入中における羽根近傍地盤の可視化実験，並びに各種指針等に規定されている引抜き抵抗力の評価方法を整理した．

# 回転貫入杭の引抜き抵抗特性に関する実験的研究

## 第1章 緒論

|               |    |
|---------------|----|
| 1.1 概説        | 1  |
| 1.2 既往の研究     | 4  |
| 1.2.1 模型実験    | 6  |
| 1.2.2 原位置試験   | 16 |
| 1.3 本論文の目的と範囲 | 18 |

## 第2章 実験装置および実験方法

|                         |    |
|-------------------------|----|
| 2.1 実験装置                | 22 |
| 2.2 模型地盤の作製             | 27 |
| 2.3 模型杭の作製              | 32 |
| 2.4 回転貫入実験および引抜き载荷実験の方法 | 35 |
| 2.5 実験条件                | 38 |

## 第3章 回転貫入中の挙動

|                      |    |
|----------------------|----|
| 3.1 まえがき             | 42 |
| 3.2 回転貫入杭の貫入機構       | 42 |
| 3.3 杭体各部の回転トルクおよび貫入率 | 44 |
| 3.4 杭先端面および羽根面の負担荷重  | 49 |
| 3.5 杭体各部の残留荷重        | 53 |
| 3.6 まとめ              | 55 |

## 第4章 引抜き载荷時の挙動

|                                  |    |
|----------------------------------|----|
| 4.1 まえがき                         | 56 |
| 4.2 杭頭荷重および杭体各部の引抜き抵抗力度と引抜き変位の関係 | 56 |
| 4.3 杭頭荷重および杭体各部の抵抗力度に及ぼす上載圧の影響   | 71 |
| 4.4 支持層への根入れ長さと杭体各部の抵抗力の関係       | 76 |
| 4.5 まとめ                          | 78 |

## 第5章 引抜き抵抗力の評価

|                        |    |
|------------------------|----|
| 5.1 まえがき               | 80 |
| 5.2 施工時情報に基づく引抜き抵抗力の算定 | 80 |

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 5.3 地盤のせん断破壊面を考慮した引抜き抵抗力の算定  | 83  |
| 5.3.1 羽根面の極限引抜き抵抗力 $R_{uw}$  | 83  |
| 5.3.2 羽根面の残留引抜き抵抗力 $R_{rw}$  | 87  |
| 5.4 地盤の平均 $N$ 値に基づく引抜き抵抗力の算定 | 90  |
| 5.5 既往の原位置引抜き載荷試験結果との比較      | 95  |
| 5.5.1 せん断破壊面に基づいた算定法         | 96  |
| 5.5.2 地盤の平均 $N$ 値に基づいた算定法    | 98  |
| 5.6 まとめ                      | 99  |
| 第6章 総括                       | 101 |
| 付章                           |     |
| 付章1 回転貫入中における羽根近傍地盤の可視化実験    | 103 |
| 付章2 指針等による引抜き抵抗力の評価方法        | 109 |
| 謝辞                           | 114 |
| 参考文献                         | 115 |
| 学位論文に関連する発表論文リスト             | 119 |

# 第 1 章

## 緒 論

### 1. 1 概説

建物基礎に引抜き荷重が作用する要因としては、図 1.1 に示すように、地下水位以深の地下室底面に作用する浮力、地震時や暴風時における建物の転倒モーメント、偏土圧の作用による転倒モーメントなどが挙げられる。これらの外力に対して、一般的な杭基礎では杭の自重やその周面摩擦力によって抵抗する。近年では、住環境や都市環境の整備が進み、アスペクト比が 4 を超える高層集合住宅や高層オフィスビルの建設が増加しているが、2000 年の建築基準法の改正によって構造設計が使用規定型から性能規定型へと変わり、アスペクト比が 4 を超える建物については杭の引抜き方向の鉛直支持力の検討が義務化された。これらの高層建物の転倒モーメントによる大きな押込み・引抜き荷重に対応するために、場所打ちコンクリート杭の分野では、軸部の中間に節部を設けた杭工法<sup>1),2)</sup>や従来は評価していなかった拡底部の抵抗力を評価できる杭工法<sup>3)~5)</sup>も開発されている。

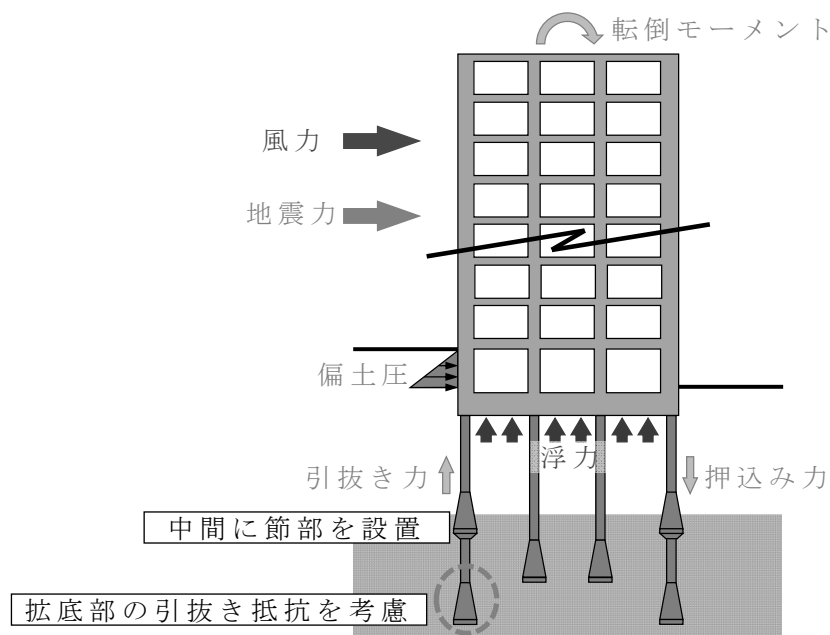


図 1.1 引抜き荷重の要因と最近の技術開発



写真 1.1 に示すような回転貫入型の杭工法（以下，回転貫入杭）は，低騒音・低振動で掘削残土を発生させずに施工できることやセメントを一切利用しないといった環境面での優れた特徴がある．更に，杭先端近傍に取付けられた羽根の支圧抵抗力（アンカー効果）を有することから，杭の自重やその周面摩擦力で抵抗する杭に比べて高い抵抗力が期待できよう．これまで，回転貫入型の杭工法は，先端支持杭形式や摩擦杭形式，小径から大径まで広い範囲にわたる種々の開発<sup>7)</sup>が行われてきた．比較的大型の模型実験<sup>8)~14)</sup>によって杭施工時の貫入機構や押込み荷重が作用する杭の支持力機構が解明されてきたが，回転貫入杭の引抜き抵抗力特性が明らかになれば，地震力や風力を受ける高層建物，地下室底面に浮力を受ける低層建物，更には吹き上りを受けるメガソーラーや地中埋設管の浮き上がり対策等を含め，種々の構造物の浮き上がり対策として回転貫入杭の利用<sup>15)</sup>が増大するものと予想される．



写真 1.1 代表的な回転貫入杭 ※参考文献 6)より引用

引抜き荷重が作用する回転貫入杭に関する研究としては、原位置試験<sup>16)~23)</sup>等が数多く実施されており、様々な地盤条件において貴重な情報を提供してきた。加圧土槽を利用した模型実験<sup>24)~27)</sup>等や遠心模型実験<sup>28),29)</sup>による研究では、杭頭部への引抜き荷重のみならず、押し込み・引抜きの繰り返し荷重が作用する問題へと進展しており、新たな知見も報告されている。ただし、回転貫入杭の施工に伴う杭周辺の地盤変化は杭体各部の引抜き抵抗に影響を与えると考えられるにもかかわらず、回転貫入杭の既往の模型実験はこの地盤変化に対する配慮が不十分である。更に、対象地盤も均一地盤に限定されており、支持層への根入れ長さの影響も検討されていない。また、一般の施工管理における施工時情報は、支持層深度の確認の利用にとどまっており、引抜き抵抗との関係性については検討されていない。施工時情報から支持層の深度や押し込み支持力・引抜き抵抗を推定することができれば、回転貫入杭の信頼性は著しく向上するであろう。

本論文では、乾燥砂を用いた均一および二層地盤（実地盤でも一般的な地層構成である支持層となる密な砂地盤の上に比較的緩い砂地盤が堆積した地盤）における貫入から引抜き載荷までの一連の過程の模型実験を実施し、各実験モデルにおける貫入時および引抜き載荷時の挙動を測定して、回転貫入杭における杭体各部の引抜き抵抗に及ぼす支持層への根入れ長さの影響について検討した。次に、杭体各部の引抜き抵抗の評価を目的として、a) 施工時情報、b) 羽根近傍地盤のせん断破壊面、c) 杭先端近傍地盤の平均  $N$  値に基づいて、杭体各部の引抜き抵抗の評価法を検討した。更に、実用的な観点から、羽根面抵抗と杭先端面抵抗を加算した杭先端部の極限引抜き抵抗について、地盤の平均  $N$  値に基づいた算定式を提示した。

## 1. 2 既往の研究

回転貫入杭の歴史は比較的早く、文献<sup>30)</sup>によると、先端に鋳鉄や鍛鉄製のスクリューを取付けた鉄製杭基礎（スクリューパイル）は、19世紀中頃からアイルランドやイギリスにおいて橋梁や燈台、栈橋などで施工がはじまった。スクリューパイルは明治初期に我が国に導入され、機械力による杭打ち施工が一般的になる以前にあって、人力で杭頭に回転力を与えることで貫入ができ、同時に大きな支持力を確保できる杭として注目された。しかし、蒸気エンジンを動力としたドロップハンマーやスチームハンマーが導入され、コンクリート杭も出現すると急激にその役目を失ったようである。

1960年代になると、海外では杭体に平面や螺旋形のプレート、更にはドリル形のプレートなどの突起物を溶接したものが出現し、送電線やパイプライン、海洋構造物などの主に引張力に抵抗するアンカーとして利用されるようになる。1980年代には、Ghalyら<sup>31)</sup>の研究をはじめ、引抜き抵抗力に関する研究が精力的に行われている。

我が国では、都市部において騒音や振動が発生することを理由に打込み杭の施工が困難になってきたことを背景として、1980年代から杭の先端部に羽根を取り付けた鋼管杭の開発が始まり、1986年に小規模建築物用の羽根付き小径鋼管杭<sup>33)</sup>の載荷試験結果が日本建築学会で報告された。現在のような形状の回転貫入杭が日本国内で実用化された最初の事例であり、その後、環境面と支持力面での有利さが次第に認識され、現在では杭本体径 1,600mm・羽根径 2,400mm といった大型のものまで種々の回転貫入型の杭工法が実用化<sup>7)</sup>されている。

土屋等<sup>33)</sup>は回転貫入型の杭工法を羽根取り付け位置（周面型：S，先端型：T），羽根形状（螺旋型：H，平面型：F）および杭先端形状（閉塞型：C，開放型：O）の組み合わせで 8 タイプに分類し、（一財）日本建築センターで 2006 年までに公的評価を取得している杭タイプ毎の工法数を表 1.1 にまとめている。実用化されている回転貫入杭のタイプ別の代表例としては、SH-C タイプの写真 1.2(a)，TH-O タイプの同写真(b)，TF-C タイプの同写真(c)の等がある。

本節では，本論文に関係すると考えられる模型実験および原位置試験に基づく回転貫入杭の引抜き抵抗に関する既往の研究概要を示す．

表 1.1 収集した杭タイプ別の载荷試験および工法数

| 羽根位置 | 羽根形状 | 先端形状 | 杭タイプ | 杭本数 | 杭工法 |
|------|------|------|------|-----|-----|
| 周面型  | 螺旋型  | 閉端型  | SH-C | 108 | 5   |
|      |      | 開端型  | SH-O | 7   | 1   |
|      | 平面型  | 閉端型  | SF-C | 51  | 3   |
| 先端型  | 螺旋型  | 開端型  | TH-O | 66  | 2   |
|      | 平面型  | 閉端型  | TF-C | 16  | 2   |
|      |      | 開端型  | TF-O | 8   | 1   |

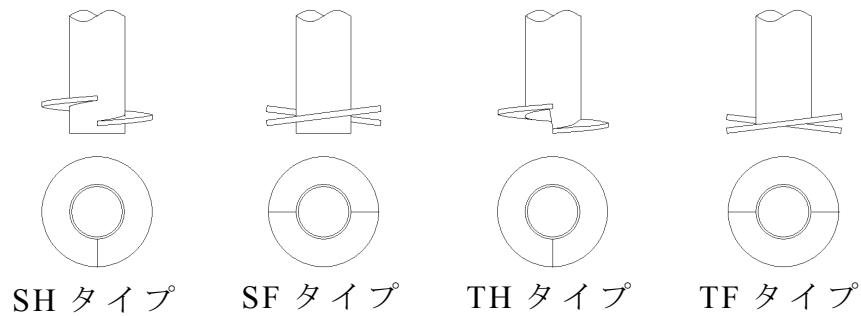


図 1.2 回転貫入杭の種別



(a)SH-C タイプ



(b)TH-O タイプ



(c)TF-C タイプ

写真 1.2 回転貫入杭の代表例 ※参考文献 6)より引用

## 1. 2. 1 模型実験

回転貫入杭の引抜き模型実験に限定して、各研究機関の取り組み状況を以下に示す。

### (1) 新日本製鐵

永田ら<sup>24)</sup>は、回転貫入杭の杭径、羽根径および杭先端深度をパラメータとした引抜き載荷実験を実施し、杭先端部の引抜き抵抗力特性について分析している。上載圧  $300\text{kN/m}^2$ ・側圧  $150\text{kN/m}^2$  の拘束圧を作用させた相対密度 84% の模型砂地盤を作製した後に、杭頭部に  $1\text{kN}$  の軸力を作用させながら回転貫入施工試験を実施し、その後続けて引抜き載荷試験を実施している。

表 1.2 に実験パラメータの一覧、図 1.3 に各パラメータと杭先端部抵抗力の関係を示す。この試験により、以下の知見を得ている。

- ・貫入深度がある程度以上に深くなると、杭先端引抜き抵抗力は一定値に収束する。これより、羽根面のアンカー効果による砂地盤の破壊面はある程度以上広がらないことを表している。
- ・杭先端引抜き抵抗力は、羽根径比(羽根径/杭径)にほぼ一次比例する。上記と併せて考えると、せん断破壊面は円筒に近い形状となっており、根入れが深い場合には円筒の高さはある値に収束するとしている。
- ・羽根径比が小さいほど、杭先端引抜き抵抗力度は大きく、アンカー効果が有効に働くとしている。

平田ら<sup>25)</sup>は、引抜き載荷後の杭近傍地盤の可視化実験や杭周辺の土圧測定実験からせん断破壊面の形状等について検討している。可視化実験は拘束圧の有無をパラメータとして、回転貫入施工後に引抜き抜き載荷を行った場合と地盤作成時に埋設設置した後に引抜き載荷を行った場合について実施している。実験では、色砂を用いて砂の動きが観察できるようにし、引抜き載荷後に土槽へ給水して、十分に水を含ませてから排水を行ない、その後土槽を縦方向に 2 分割して砂の動きを観察している。

図 1.4 に各実験ケースにおける実験結果を示す。図 1.5 には回転貫入した杭と埋設設置した杭の引抜き荷重～引抜き変位曲線を示した。また、

土圧測定実験では図 1.6 に示す位置に土圧計を設置し，水平方向土圧を計測した．更に，図 1.7 に回転貫入中における土圧の計測結果，図 1.8 に最大引抜き荷重時の土圧分布を示した．この試験により，以下の知見を得ている．

- ・放射線状の地盤の移動は見られず，羽根上部地盤の破壊面は，円筒状に発生する．
- ・回転貫入によって，引抜き抵抗力は埋設設置した杭の 5 倍となった．羽根面の推進力によって周辺地盤の締固め効果が発揮されている．羽根上面地盤を押圧することで羽根面の推進力を得ており，施工後の地盤の乱れが小さいことを観察している．
- ・回転貫入時において，羽根が土圧計の位置を通過し少し深い深度まで貫入した時に受働土圧程度の最大値となる．
- ・最大引抜き荷重時において，羽根近傍の土圧は受働土圧程度まで増加するが，羽根面から羽根径の 2 倍程度上部ではほぼ静止土圧である．
- ・永田らの研究<sup>24)</sup>と本研究の結果より，羽根面の抵抗は図 1.9 に示すようなせん断破壊面とその面に作用するほぼ台形状の土圧によって発揮するとしている．

表 1.2 実験ケース

| 試験ケース<br>No. | 試験体名称            | 杭径<br>(mm) | 羽根径比<br>$\times D_p$ | 羽根径<br>(mm) | 引抜き試験時<br>杭先端深度(mm) | 拘束圧      |         | 杭頭上載荷重 |
|--------------|------------------|------------|----------------------|-------------|---------------------|----------|---------|--------|
|              |                  |            |                      |             |                     | 上載圧(kPa) | 側圧(kPa) | (kN)   |
| 1            | 4D15W3P10L3S10H  | 40         | 1.5                  | 60          | 100                 | 300      | 150     | 1      |
| 2            | 4D15W3P10L3S30H  | 40         | 1.5                  | 60          | 300                 | 300      | 150     | 1      |
| 3            | 4D15W3P10L3S60H  | 40         | 1.5                  | 60          | 600                 | 300      | 150     | 1      |
| 4            | 4D15W3P10L3S80H  | 40         | 1.5                  | 60          | 800                 | 300      | 150     | 1      |
| 5            | 4D175W3P10L3S10H | 40         | 1.75                 | 70          | 100                 | 300      | 150     | 1      |
| 6            | 4D175W3P10L3S30H | 40         | 1.75                 | 70          | 300                 | 300      | 150     | 1      |
| 7            | 4D175W3P10L3S60H | 40         | 1.75                 | 70          | 600                 | 300      | 150     | 1      |
| 8            | 4D175W3P10L3S80H | 40         | 1.75                 | 70          | 800                 | 300      | 150     | 1      |
| 9            | 4D20W3P10L3S10H  | 40         | 2.0                  | 80          | 100                 | 300      | 150     | 1      |
| 10           | 4D20W3P10L3S30H  | 40         | 2.0                  | 80          | 300                 | 300      | 150     | 1      |
| 11           | 4D20W3P10L3S60H  | 40         | 2.0                  | 80          | 600                 | 300      | 150     | 1      |
| 12           | 4D20W3P10L3S80H  | 40         | 2.0                  | 80          | 800                 | 300      | 150     | 1      |
| 13           | 4D25W3P10L3S10H  | 40         | 2.5                  | 100         | 100                 | 300      | 150     | 1      |
| 14           | 4D25W3P10L3S30H  | 40         | 2.5                  | 100         | 300                 | 300      | 150     | 1      |
| 15           | 4D25W3P10L3S60H  | 40         | 2.5                  | 100         | 600                 | 300      | 150     | 1      |
| 16           | 4D25W3P10L3S80H  | 40         | 2.5                  | 100         | 800                 | 300      | 150     | 1      |
| 17           | 4D30W3P10L3S10H  | 40         | 3.0                  | 120         | 100                 | 300      | 150     | 1      |
| 18           | 4D30W3P10L3S30H  | 40         | 3.0                  | 120         | 300                 | 300      | 150     | 1      |
| 19           | 4D30W3P10L3S60H  | 40         | 3.0                  | 120         | 600                 | 300      | 150     | 1      |
| 20           | 4D30W3P10L3S80H  | 40         | 3.0                  | 120         | 800                 | 300      | 150     | 1      |
| 21           | 5D20W3P10L3S60H  | 50         | 2.0                  | 100         | 600                 | 300      | 150     | 1      |
| 22           | 6D167W3P10L3S60H | 60         | 1.67                 | 100         | 600                 | 300      | 150     | 1      |

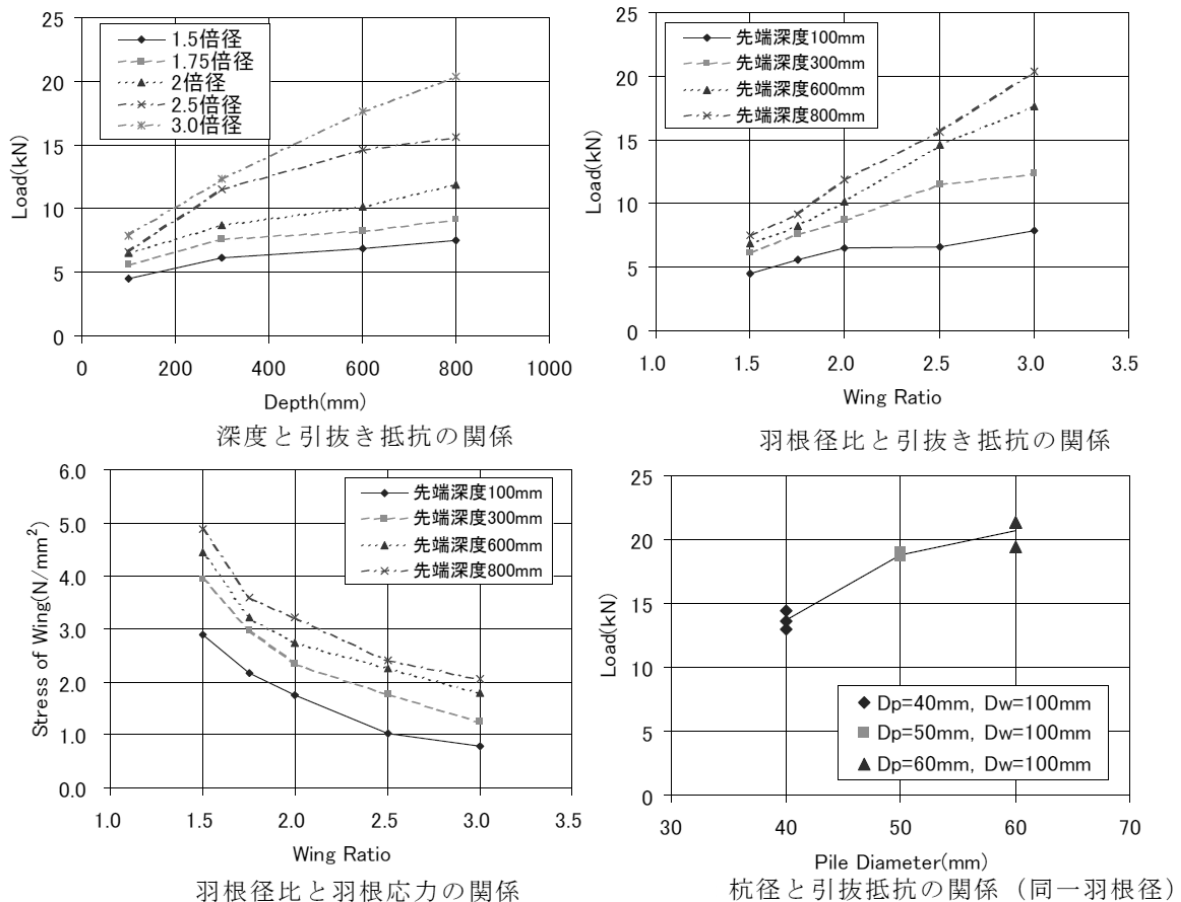


図 1.3 実験パラメータ～杭先端部抵抗力の関係

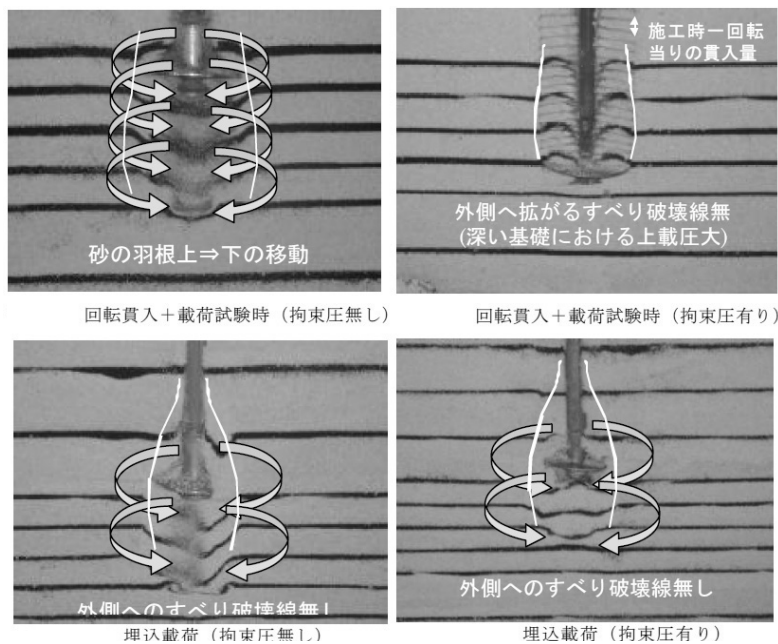


図 1.4 引抜き後の観察結果

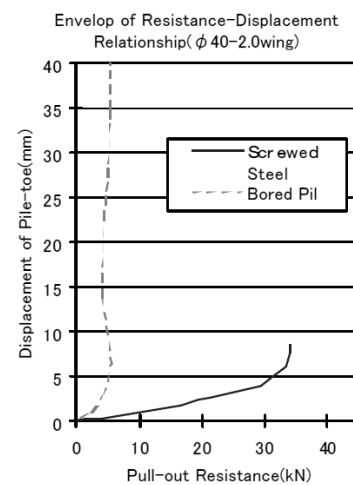


図 1.5 引抜き荷重  
～引抜き変位の関係

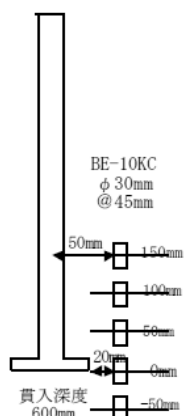


図 1.6 土圧計設置深度

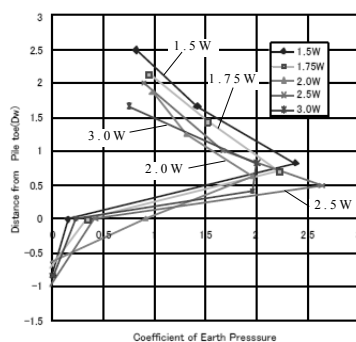


図 1.8 最大引抜き荷重時の土圧分布

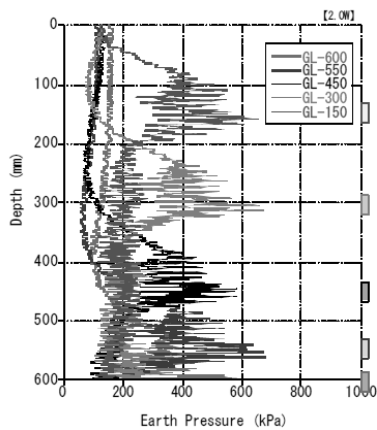
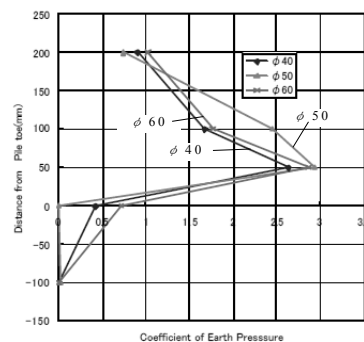


図 1.7 回転貫入時の土圧挙動

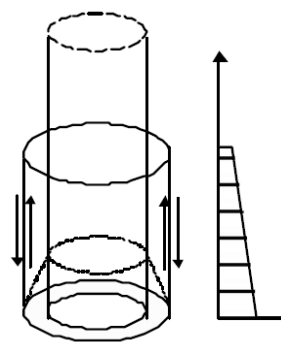


図 1.9 せん断破壊面と土圧



## （２）足利工業大学

刑部ら<sup>27)</sup>は、加圧土槽を用いて、緩い砂地盤および密な砂地盤を対象に、拘束圧（上載圧） $100\text{kN/m}^2$  下における押込みおよび引抜き載荷試験をそれぞれ実施し、支持力特性について検証している．図 1.10 および図 1.11 に杭試験体および加圧土槽を示す．ただし，拘束圧無しの状態で貫入させた後に拘束圧を作用させている点で一般的な実施工の条件とは異なることに注意が必要である．

図 1.12 には各実験条件における杭体各部の抵抗力と引抜き変位を羽根径で基準化した値の関係を示した．この試験により，以下の知見を得ている．

- ・羽根径の 10%変位時の杭頭荷重は，緩い地盤の場合には押込み時と引抜き時でほぼ等しいが，密な地盤の場合には押込み時の方が引抜き時の約 1.5 倍と大きい．
- ・羽根径の 10%変位時の杭先端支持力（羽根面+杭先端面）は，緩い地盤および密な地盤の場合には押込み時が引抜き時のそれぞれ約 0.5 倍および約 0.73 倍であり，いずれも引抜き時の方が大きい．
- ・羽根径の 10%変位時の杭周面摩擦力は，緩い地盤および密な地盤の場合には押込み時が引抜き時のそれぞれ約 2 倍および約 5.6 倍であり，いずれも押込み時の方が大きい．

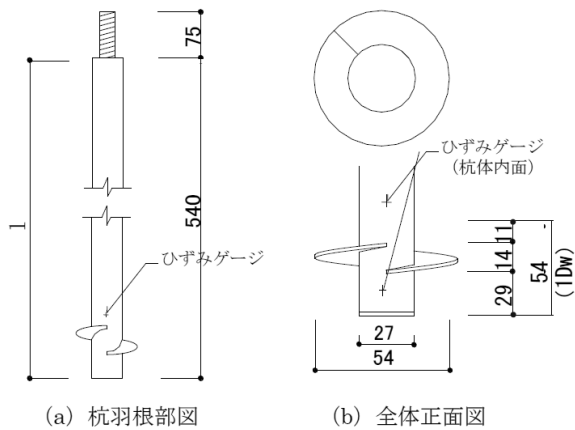


図 1.10 模型杭

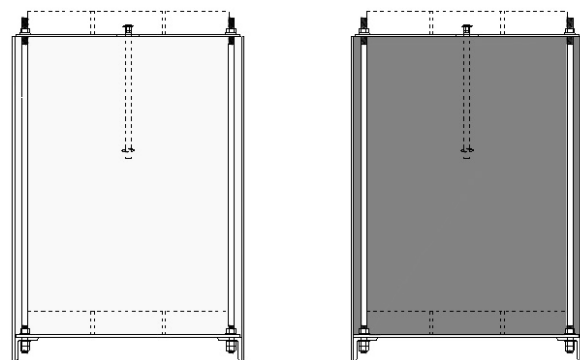


図 1.11 加圧土槽

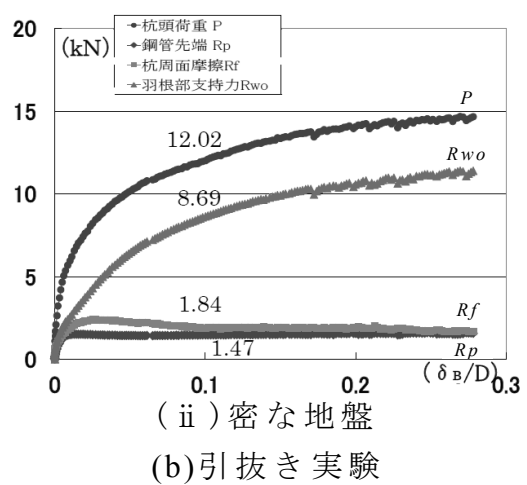
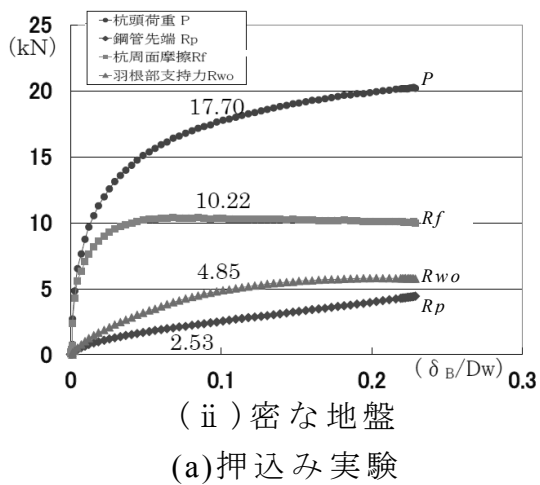
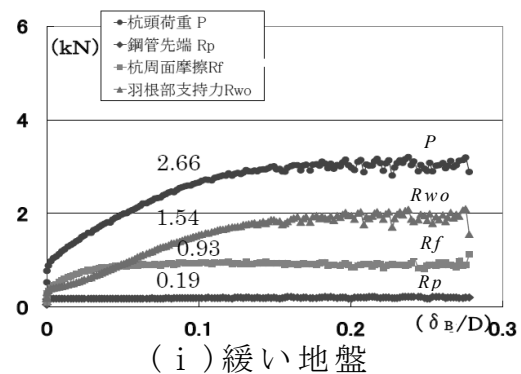
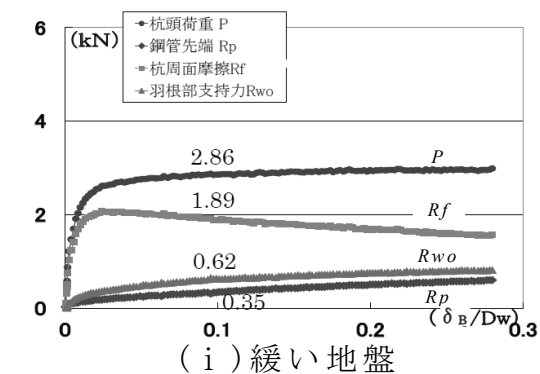


図 1.12 杭体各部の引抜き抵抗力

### (3) 東京工業大学

ト部ら<sup>29)</sup>は、遠心場における鉛直交番載荷実験を実施し、杭径や羽根径が押込み・引抜き方向の鉛直支持力に与える影響を検討している。図 1.13 に実験装置の概要を示し、図 1.14 に模型杭の仕様を示す。比較的密で均一な乾燥砂地盤において、杭径および羽根径を変化させた 4 種類の回転貫入杭およびストレート杭で実験を行っている。なお、貫入実験を行わずに、地盤作製の途中に模型杭を埋設設置している点や杭の周面摩擦力を十分に発揮させるために図 1.14 中に示す斜線範囲の杭表面にエポキシパテで豊浦砂を塗布している点に注意が必要である。また、表 1.3 には載荷ケースを示した。鉛直交番載荷に加えて、単調な押込み・引抜き載荷も行っている。

図 1.15 には、鉛直交番載荷の引抜き時における杭周面、羽根面および杭頭部の抵抗力を単調引抜き載荷試験の同一変位の各抵抗力で除して正規化したものと載荷サイクルの関係を示した。この試験により、以下の知見を得ている。

- ・鉛直交番載荷の引抜き時における杭周面摩擦力は、単調引抜き載荷時の 2 割程度であり、押込み時に比べて著しく低下する。
- ・羽根面の引抜き抵抗力は、羽根径比（羽根径/杭径）の影響を受け、羽根径比 1.5 程度では単調載荷に対して交番載荷による低下が顕著であるが、羽根径比 2.0 程度ではその低下が緩やかになる。
- ・鉛直交番載荷の引抜き時における杭頭軸力は、羽根径比および羽根面積が大きなモデルの場合、振幅  $\pm 30\text{mm}$  以降においても単調引抜き載荷時の同軸力に対して緩やかに低下する。従って、羽根径比や羽根面積の大きな回転貫入杭では周面摩擦力が低下した後の鉛直交番載荷時における引抜き抵抗力の低下を抑えることができる。

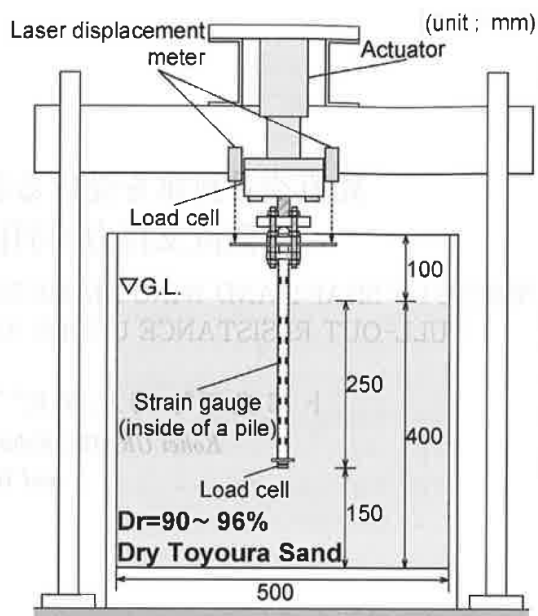


図 1.13 実験装置

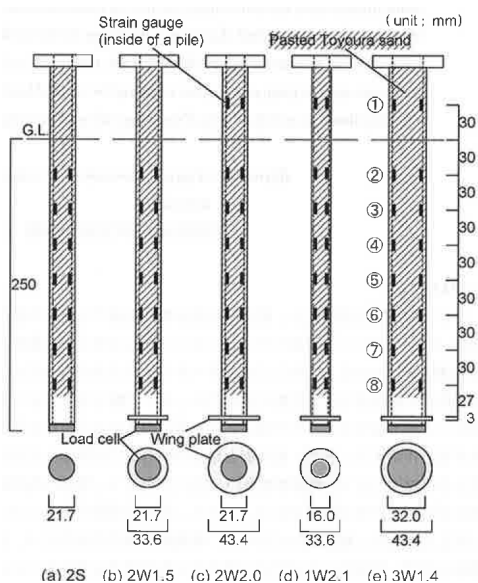
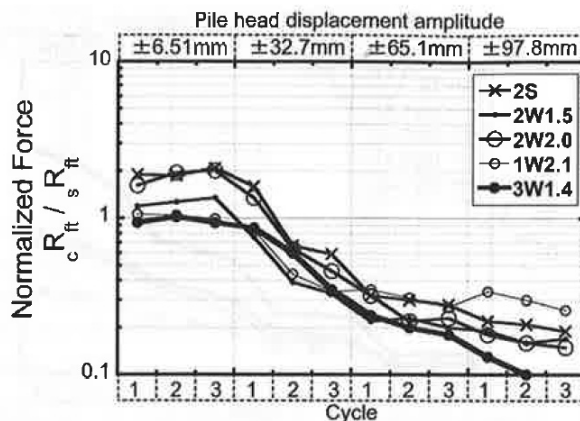


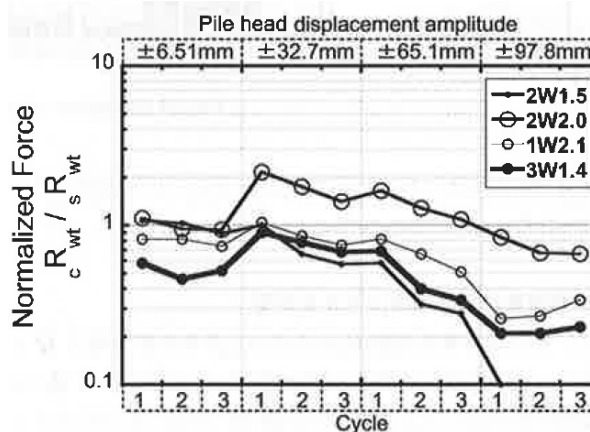
図 1.14 模型杭

表 1.3 模型杭

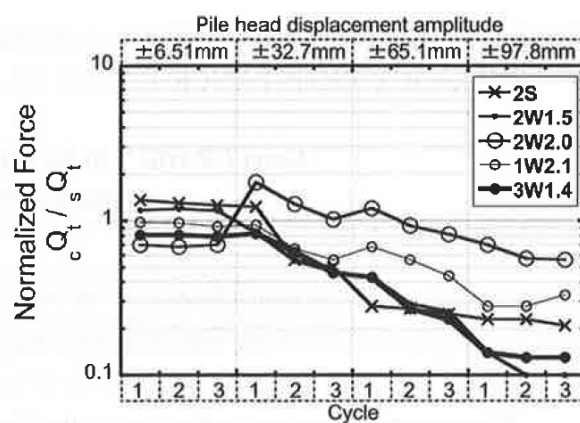
| Case ID             | Pile  | Loading                                    | Loading displacement <sup>※3</sup> |
|---------------------|-------|--------------------------------------------|------------------------------------|
| 2S <sup>※1</sup>    | 2S    | Monotonic compressive loading<br>Sc        | +21.7mm (+1.00D)                   |
| 2W1.5 <sup>※1</sup> | 2W1.5 |                                            | +33.6mm (+1.55D)                   |
| 2W2.0 <sup>※1</sup> | 2W2.0 |                                            | +17.5mm (+0.81D) <sup>※2</sup>     |
| 1W2.1 <sup>※1</sup> | 1W2.1 |                                            | +33.6mm (+2.10D)                   |
| 3W1.4 <sup>※1</sup> | 3W1.4 |                                            | +16.5mm (+0.52D) <sup>※2</sup>     |
| 2S <sup>※1</sup>    | 2S    | Monotonic tensile loading<br>St            | -21.7mm (-1.00D)                   |
| 2W1.5 <sup>※1</sup> | 2W1.5 |                                            | -5.0mm (-0.23D)                    |
| 2W2.0 <sup>※1</sup> | 2W2.0 |                                            | -21.7mm (-1.00D)                   |
| 1W2.1 <sup>※1</sup> | 1W2.1 |                                            | -16.0mm (-1.00D)                   |
| 3W1.4 <sup>※1</sup> | 3W1.4 |                                            | -16.0mm (-0.50D)                   |
| 2S <sup>※1</sup>    | 2S    | Alternately cyclic vertical loading<br>Cyc | ±0.217mm × 3                       |
| 2W1.5 <sup>※1</sup> | 2W1.5 |                                            | ⇒ ±1.09mm × 3                      |
| 2W2.0 <sup>※1</sup> | 2W2.0 |                                            | ⇒ ±2.17mm × 3                      |
| 3W1.4 <sup>※1</sup> | 3W1.4 |                                            | ⇒ ±3.26mm × 3                      |



(a)杭周面



(b)羽根面



(c)杭頭部

図 1.15 鉛直交番載荷結果と  
単調引抜き載荷結果の比

#### (4) 室蘭工業大学

大江ら<sup>34)</sup>は引抜き力を受ける回転貫入杭の支持力機構を明らかにする目的で、直杭の先端に軸径の2倍の拡張平板を取付けた模型杭を対象として、引抜き時の杭先端近傍の粒子挙動をPIV解析した結果について検討している。また、PIV解析の他に色砂を敷いてその挙動も観察している。実験は密な均一地盤(D地盤)および緩い均一地盤(L地盤)で行ない、地盤中に埋設した杭を変位制御(0.043mm/sec)により引抜き载荷している。この時の杭周面部および杭先端近傍部における粒子挙動をビデオカメラで撮影し、その画像を用いてPIV解析している。

図1.16に半円筒土槽および模型杭を示す。図1.17にはPIV解析で得られた格子点速度ベクトルとせん断ひずみ速度を合成したものを示した。この試験により、以下の知見を得ている。

- ・羽根外端から上方内側の軸部にかけて、砂粒子が杭とほとんど同じ変位速度を示す領域(コア)が観察された。
- ・最大引抜き荷重付近では、羽根外端から上側外方へ進展するせん断ひずみ速度分布が確認でき、この領域にすべり面が生じたと推察される。この領域は、D地盤の方が外側へ進展しており、地盤の密度と密接に関係していると考えられる。
- ・最大引抜き荷重から载荷が進行した時点では、羽根外端からコアに沿って内側上方に進展するせん断速度分布が確認された。

引き続き、山根ら<sup>35)</sup>は同様の試験をD地盤の上にL地盤を堆積させた二層地盤において実施している。図1.18に、杭先端から上方の広い範囲における地盤のせん断ひずみ速度分布を示した。この試験により、以下の知見を得ている。

- ・最大引抜き荷重となる第3ステージでは、L地盤とD地盤の層境界でせん断ひずみ速度が変化し、上層のL地盤のすべり面角度は下層のD地盤よりも小さい。
- ・残留荷重に相当する第4ステージでは、せん断ひずみ速度が羽根近傍に限定されており、根入れによる影響は見られない。

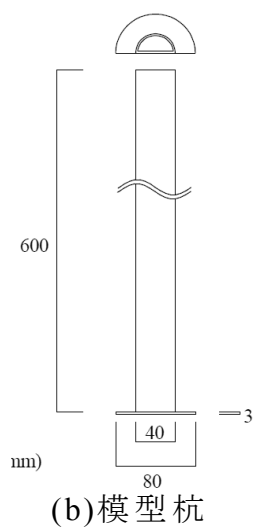
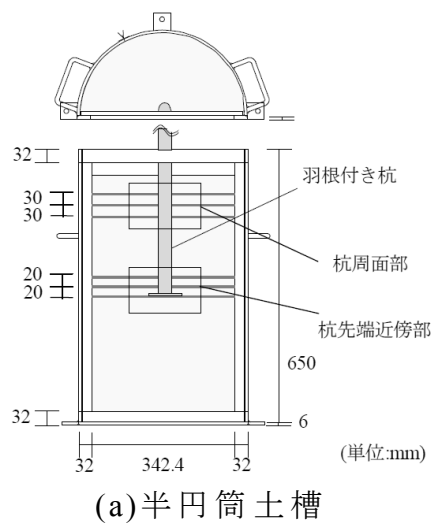


図 1.16 実験装置

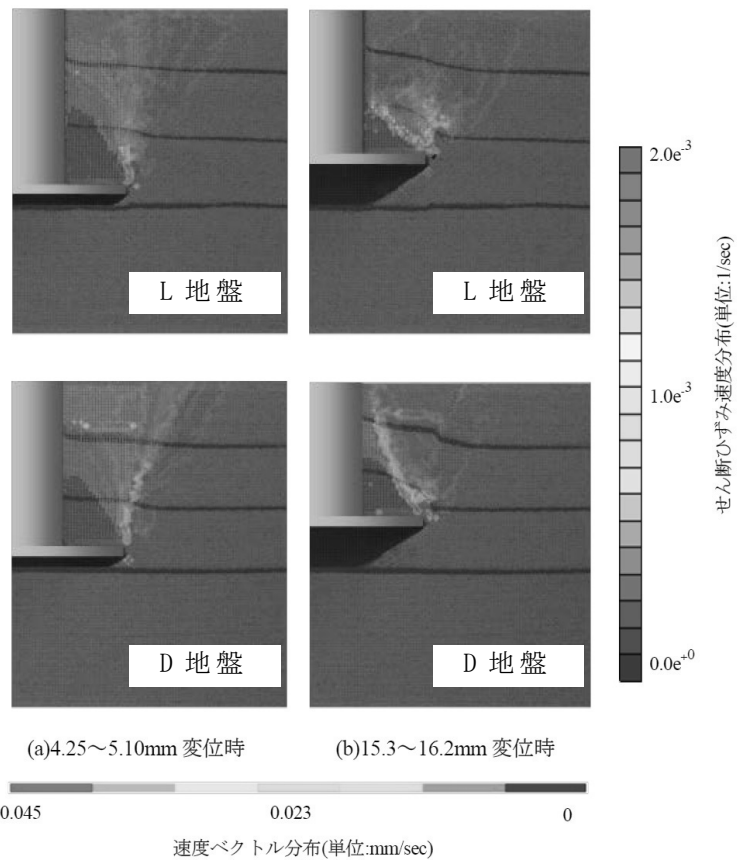


図 1.17 均一地盤における PIV 解析結果

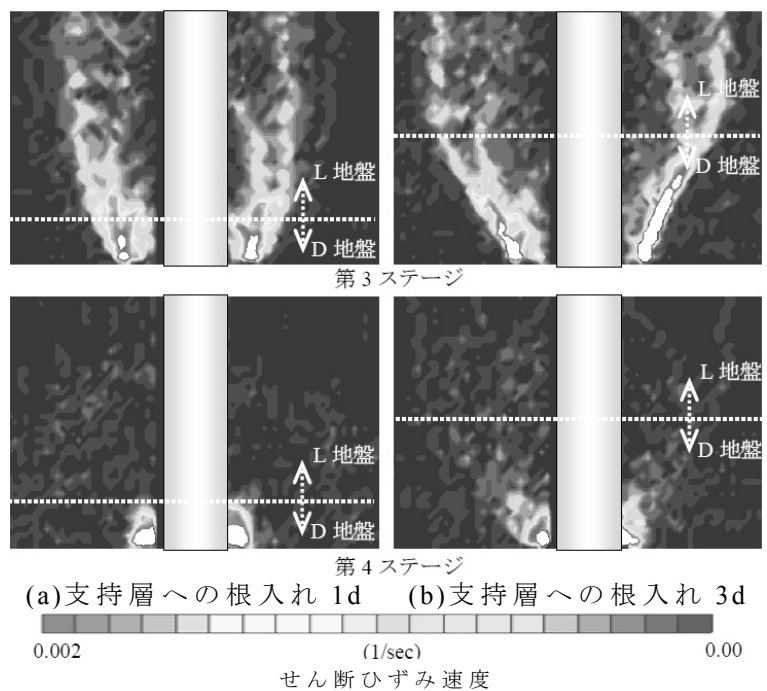


図 1.18 二層地盤における PIV 解析結果

## 1. 2. 2 原位置試験

回転貫入杭の支持力特性の解明を目的とした実大杭による代表的な研究例を以下に示す。

### (1) 國松ら<sup>20)</sup>の研究

同一敷地において、先端に取付けた螺旋羽根の直径や支持層（礫混り砂）への根入れ長さを変化させた引抜き载荷試験を実施し、支持層への根入れ長さや先端羽根径の違いによる引抜き抵抗性能を確認している。図 1.19 および表 1.4 に土質柱状図および杭仕様、図 1.20 に杭頭荷重と杭頭変位の関係を示す。この試験により、以下の知見を得ている。

- ・支持層の土質が砂質系で礫が少なく、支持層への根入れも正回転のみで施工できる地盤に対しては、根入れによる支持力の違いが明確に発揮される。
- ・羽根径が大きい場合、1 回転当りの貫入量が増加することもあり、必ずしも引抜き抵抗力は増加しない。その理由としては、広範囲で地盤を乱していることや杭が掘進する時地盤中の土を横方向に押圧することで発揮される杭周面地盤の締固め効果が羽根径が大きいために発揮されなかったとしている。

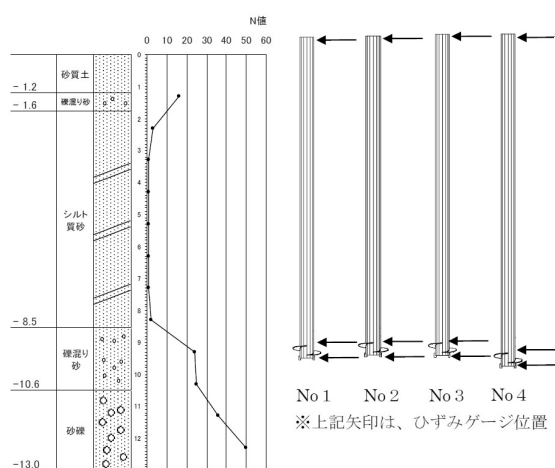


図 1.19 土質柱状図

および模型杭

表 1.4 模型杭の仕様

| No | 杭径<br>(mm) | 鋼管厚<br>(mm) | 先端羽根径<br>(mm) | 杭長<br>(m) | 材 質    | 支持層への<br>根入れ量 (mm) | 備 考        |
|----|------------|-------------|---------------|-----------|--------|--------------------|------------|
| 1  | 190.7      | 7.0         | 400           | 10.0      | STK400 | 500                | 1D 支持層根入れ  |
| 2  | 190.7      | 7.0         | 550           | 10.0      | STK400 | 500                | 羽根径の違い比較   |
| 3  | 190.7      | 7.0         | 400           | 10.0      | STK400 | 250                | 0.5D 根入れ違い |
| 4  | 190.7      | 7.0         | 400           | 10.5      | STK400 | 1000               | 2.0D 根入れ違い |

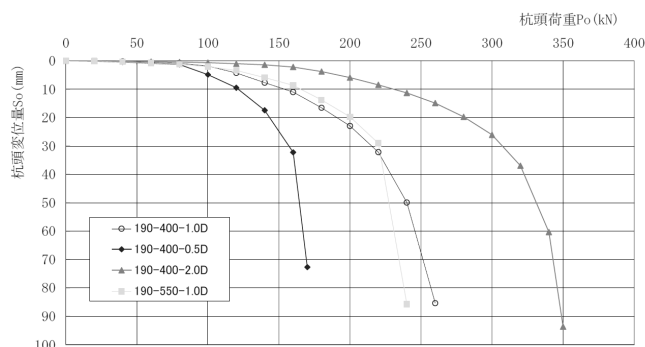


図 1.20 杭頭荷重～杭頭変位の関係

## (2) 小松ら<sup>18)</sup>の研究

砂礫層に支持した杭先端に螺旋羽根を取付けた回転貫入杭の鉛直交番載荷試験を実施している．図 1.21 および図 1.22 に土質柱状図および杭仕様を示す．図 1.23 および図 1.24 には杭頭荷重と経過時間および杭頭変位と経過時間の関係を示した．これより，引抜き側においてピーク荷重を迎えた後に杭頭荷重が低下する傾向があり，同荷重は単調載荷試験結果よりも小さいこと，この荷重低下は交番載荷による影響を表していることを示している．

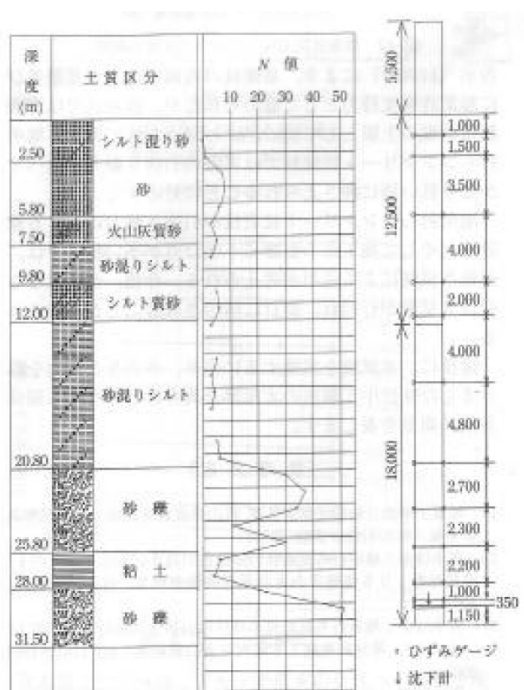


図 1.21 土質柱状図

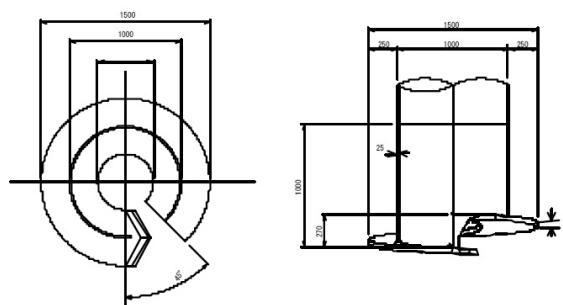


図 1.22 模型杭

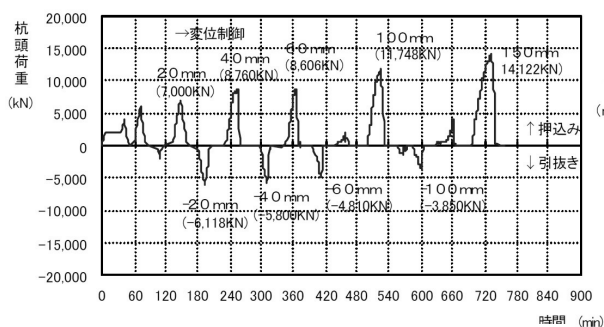


図 1.23 杭頭荷重～  
経過時間の関係

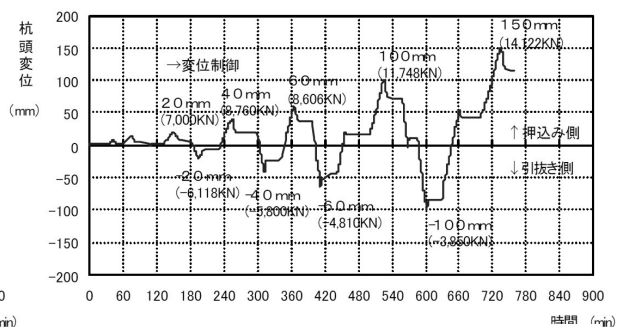


図 1.24 杭頭変位～  
経過時間の関係



### 1. 3 本研究の目的と範囲

前節に記した既往の研究では、それぞれ有益な知見が得られているものの、引抜き抵抗力の評価に関しては十分とはいえない。

模型実験では、下記の問題点を指摘できる。

- ① 回転貫入施工による杭周辺の地盤変化を無視したものが多い。
- ② 対象地盤が均一地盤に限定されており、支持層への根入れ長さの影響が十分に検討されていない。
- ③ 羽根上部にせん断破壊面が生じることは指摘されているが、その形状と羽根面抵抗力の関係が未解明である。
- ④ 施工時情報を引抜き抵抗力の推定に活用できていない。

原位置試験では、下記の問題点が指摘できる。

- ① 回転貫入施工によって地盤変化が生じるにもかかわらず、施工による残留応力が評価されていない。
- ② 杭体の羽根面と先端面が分離されずに引抜き抵抗力が評価されている。
- ③ 施工時情報を引抜き抵抗力の推定に活用できていない。

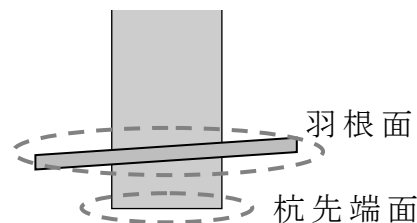


図 1.25 回転貫入杭の各部の名称

以上の状況を踏まえて、本論文は、軸径 48.6mm、羽根径 97.2mm の模型杭を用いて、杭の貫入施工から引抜き載荷までの一連の過程の模型実験を実施し、回転貫入杭における杭体各部の引抜き抵抗力特性を検討した後、実用的な引抜き抵抗力の評価法を提示することを目的としたものであり、以下のように研究を進めている。

最初に、支持層への根入れ長さを変化させた二層地盤（実地盤でも一般的な地層構成である支持層となる比較的密な砂層の上に緩い砂層を堆

積させた地盤）および均一で密な砂地盤・緩い砂地盤における回転貫入施工から引抜き载荷までの一連の過程の模型実験を実施している。

回転貫入実験では、杭先端面が支持層に到達する直前および支持層へ打止めした時点の杭体各部の荷重、回転トルクおよび貫入率（1 回転当たりの貫入量）について、均一地盤における結果と比較して支持層の影響について検討している。また、貫入打止め時の回転トルクおよび貫入率、並びに回転貫入後に杭体に残留する荷重と地盤の平均  $N$  値の関係、更には施工時情報と杭先端面や羽根面の負担荷重の関係について検討している。

施工実験に続く引抜き载荷実験では、実験で得られた荷重～引抜き変位曲線の特徴を示した後に、引抜き荷重に対する羽根面、杭先端面および杭周面の抵抗力特性について検討している。更に、杭体各部の引抜き抵抗力に及ぼす支持層への根入れ長さの影響について検討している。

次に、a) 施工時情報、b) 羽根上部のせん断破壊面、c) 地盤の平均  $N$  値を利用した手法による杭体各部の引抜き抵抗力の評価方法を検討している。最後に、実用性の観点から杭先端部（羽根面+杭先端面）の極限引抜き抵抗力の算定式を提示すると共に、原位置引抜き試験結果との比較を通して算定精度の向上を図るための今後の課題を記している。

以上のように、本論文は加圧土槽を利用した模型実験を実施して、回転貫入杭の支持層への根入れ長さを考慮した引抜き抵抗力の評価方法を検討したものである。杭先端部の地盤は砂質地盤（ $N$  値 10 未満の緩い砂質地盤から  $N$  値 30 以上で一般に支持層とる砂質地盤）を対象としており、礫質地盤や粘土質地盤は対象外である。また、本論文で取り扱った回転貫入杭は、羽根形状が羽根径/軸径=2 のみで、先端が閉塞で鋼管の先端付近の周面に羽根を取付けたもので SH-C タイプ（表 1.1 参照）に分類される。これは回転貫入杭開発の先駆けとなった標準モデルと位置づけられるが、その後に開発された種々のタイプについては未検討である。

以下に本論文で使用する主な記号を示すが、既往の文献に記載された式中の記号についてはこの限りでない。

$d_w$  : 羽根部の直径  
 $d_0$  : 杭軸部の直径  
 $A_w$  : 羽根部面の面積 ( $\pi(d_w^2 - d^2) / 4$ )  
 $A_b$  : 杭先端面の面積 ( $\pi \cdot d^2 / 4$ )  
 $A_s$  : 杭周面の面積  
 $A_p$  : 杭先端部の負担面積  
 $H$  : 打止め深度  
 (地表面から杭先端までの距離)  
 $\ell$  : 模型杭の長さ  
 $H_b$  : 羽根面の支持層への根入れ長さ  
 $p_w$  : 羽根のピッチ  
 $t$  : 軸部厚  
 $t_w$  : 羽根厚

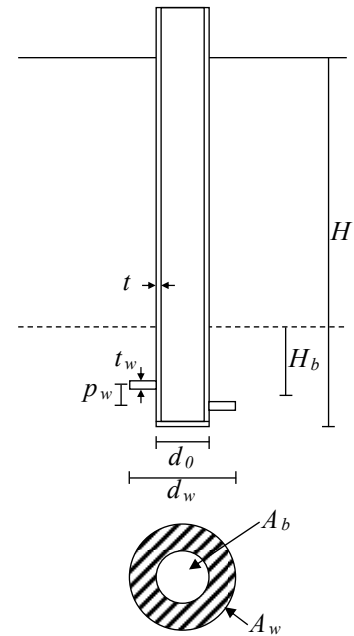


図 1.26 杭の記号

$\sigma$  : 上載圧  
 $D_r$  : 相対密度  
 $N$  : 地盤の  $N$  値  
 $\bar{N}$  : 地盤の平均  $N$  値  
 $S_d$  : 杭施工時の先端貫入量  
 $S^*$  : 杭施工時の 1 回転当たり貫入量  
 $\mu$  : 貫入率 ( $= S^* / p_w$ )  
 $Z$  : 貫入深度 (地表面からの杭先端深度)  
 $z$  : 貫入深度 (支持層天端からの杭先端深度)  
 $\delta$  : 引抜き変位量  
  
 $P$  : 杭頭部の引抜き荷重  
 $R_w$  : 羽根面の引抜き抵抗

$R_b$  : 杭先端面の引抜き抵抗力  
 $R_s$  : 杭周面の引抜き抵抗力  
 $R_p$  : 杭先端部の引抜き抵抗力 ( $= R_w + R_b$ )  
 $r_w$  : 羽根面の引抜き抵抗力度 ( $= R_w / A_w$ )  
 $r_b$  : 杭先端面の引抜き抵抗力度 ( $= R_b / A_b$ )  
 $r_s$  : 杭周面の引抜き抵抗力度 ( $= R_s / A_s$ )  
 $r_p$  : 杭先端部の引抜き抵抗力度 ( $= (R_w + R_b) / A_w$ )

$T$  : 杭頭部の回転トルク  
 $T_p$  : 杭先端部の回転トルク  
 $iR_w$  : 羽根面の施工時推進力  
 $iR_b$  : 杭先端面の施工時抵抗力  
 $iR_s$  : 杭周面の施工時抵抗力

$rR_w$  : 羽根面の残留荷重  
 $rR_b$  : 杭先端面の残留荷重  
 $rR_s$  : 杭周面の残留荷重

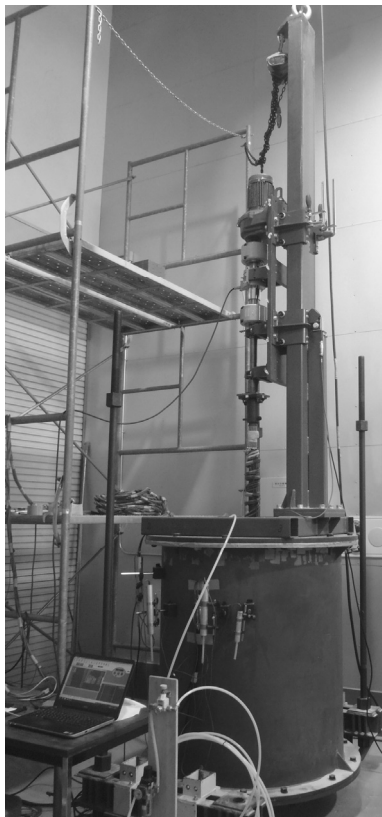
## 第 2 章

### 実験装置および実験方法

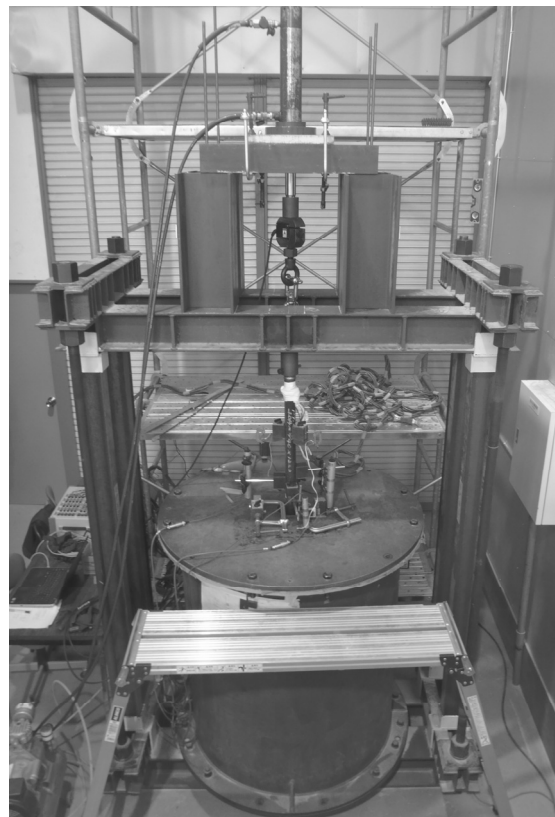
本章では，実験装置の概要，模型杭の詳細，地盤作製方法および回転貫入（施工）実験・引抜き载荷実験方法を示した後に，本論文で対象とした試験体の実験条件を示す．

#### 2. 1 実験装置

実験装置は写真 2.1 に示すように，円柱土槽，上載圧負荷装置，回転貫入（施工）装置，引抜き载荷装置，各種センサーおよび計測装置で構成される．



(a)回転貫入実験の状況



(b)引抜き载荷実験の状況

写真 2.1 実験装置の概略

### (1) 円柱土槽

図 2.1 に円柱土槽の断面図を示す. 土槽は内径 1,000mm, 深さ 1,200mm, 側面の厚さ 9mm の鋼製である. 側面の内側には摩擦の影響を防ぐためにシリコングリスを塗布したテフロンシートを 3 重に貼り付けた.

### (2) 上載圧負荷装置

本実験では, 施工開始から引抜き載荷終了の全過程で模型地盤と土槽上蓋の間にゴム製空気袋 (写真 2.2) を装填して上載圧を作用させ, 所定の深度の応力状態を再現している. ゴム製空気袋の直径は円柱土槽の内径と同様の 1,000mm, 厚みは 75mm であり, 図 2.2 に示す土槽上蓋中央の開口部 (直径 125mm) と一致する環状である. 写真 2.3 は模型地盤に上載圧を負荷させるエアコンプレッサであり, 減圧器を取付け任意の圧力供給を可能にしている.

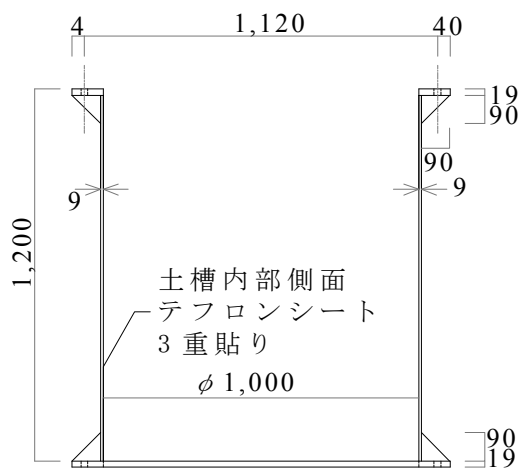


図 2.1 円柱土槽 (単位: mm)

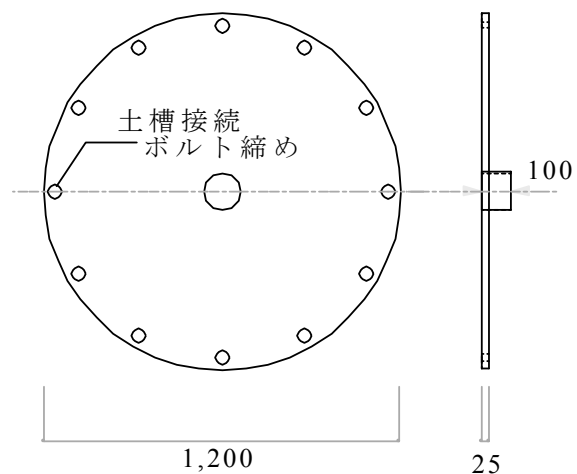


図 2.2 上蓋 (単位: mm)



写真 2.2 ゴム製空気袋



写真 2.3 エアコンプレッサ

### (3) 回転貫入装置

写真 2.4 は模型杭を地盤内に貫入させるための回転貫入装置であって、その仕様を表 2.1 に示す。モータと模型杭は図 2.3 および写真 2.5 の回転用治具および連結部材を用いてボルトにより連結させ、ガイドレール上を下降するモータ駆動機により、模型杭の頭部に時計回りの回転力（トルク）を与えて貫入させる。

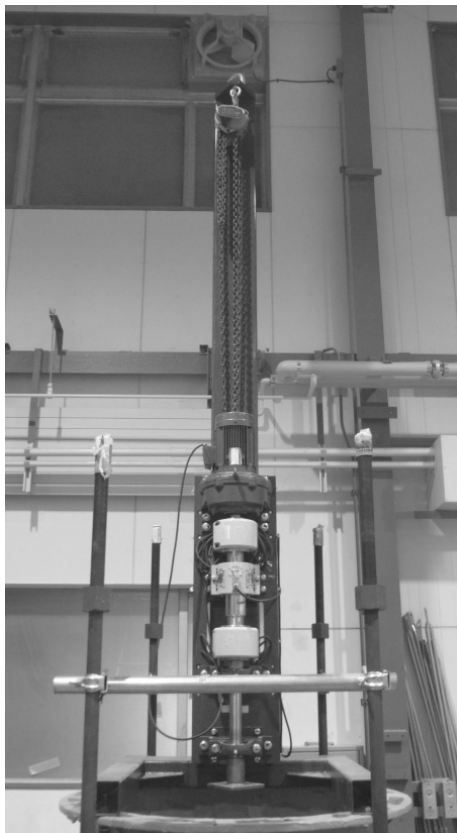


写真 2.4 回転貫入装置

表 2.1 回転貫入装置の仕様

|          |             |
|----------|-------------|
| モータ重量    | 52kg        |
| ギヤードモーター | 1.5kw       |
| 減速比      | 1/100       |
| モータ軸回転数  | 1500r. p. m |
| モータ軸トルク  | 0.9kg・m     |
| 駆動部重量    | 約160kg      |
| フレーム重量   | 約126kg      |
| 全体重量     | 約286kg      |

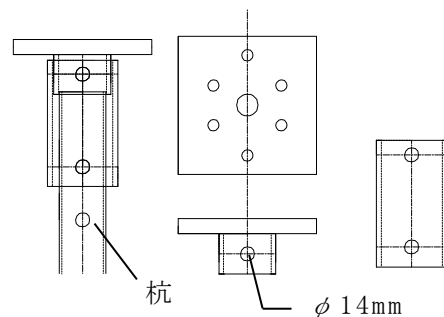


図 2.3 回転用治具および連結部



写真 2.5 回転用治具および連結部材

#### (4) 引抜き載荷装置

写真 2.6 は土台、支柱および反力梁で構成される載荷フレームであって、土台は土槽に固定されている。



(1) 全景



(2) 引抜き載荷時の状況

写真 2.6 載荷フレーム

写真 2.7 は油圧ジャッキに加圧するための電動油圧ポンプであって、高圧と低圧との自動二段切替えになっている。回路圧力が 3MPa 未満では高圧と低圧の両ポンプが働き、3MPa 以上になると高圧ポンプのみの油が送り出される。最大圧力 70MPa までは、高圧ポンプが作動して安定した圧力を供給することができ、調整ネジの操作によって任意の圧力設定が可能である。



写真 2.7 電動油圧ポンプ



引抜き载荷に使用した油圧ジャッキは複動型であり，表 2.2 にその仕様を示す．試験によって最高出力 50kN および 200kN の油圧ジャッキを使い分けた．

表 2.2 油圧ジャッキの仕様

| TYPE  | MD05-200           | MD20-200           |
|-------|--------------------|--------------------|
| 最高出力  | 50kN               | 200kN              |
| ストローク | 250mm              | 200mm              |
| 最小全長  | 429mm              | 495mm              |
| 外径    | 46mm               | 83mm               |
| 必要油量  | 179cm <sup>3</sup> | 575cm <sup>3</sup> |
| 概略質量  | 4.5kg              | 16.1kg             |

#### (5) 計測装置および各種センサー

計測装置は，パーソナルコンピューター (PC)，データロガー，荷重変換器 (ロードセル)，各種変位変換器 (変位計) から構成され，これらの仕様を表 2.3～表 2.5 に示す．

表 2.3 ロードセルの仕様

|       |            |
|-------|------------|
| 製造元   | 共和電業       |
| TYPE  | LTZ-5TA    |
| 定格容量  | 50kN       |
| 定格出力  | 6001 $\mu$ |
| 許容過負荷 | 150%       |

表 2.4 巻込み式変位計

|       |              |
|-------|--------------|
| 製造元   | 東京測器研究所      |
| TYPE  | DP-1000ES003 |
| 定格容量  | 1000mm       |
| 定格出力  | 10000 $\mu$  |
| 許容過負荷 | 120%         |

表 2.5 高感度変位計

|                |           |      |          |      |
|----------------|-----------|------|----------|------|
| 製造元            | 共和電業      |      |          |      |
| TYPE           | DTH-A-100 |      | DTH-A-50 |      |
| 定格容量 (mm)      | 100       |      | 50       |      |
| 定格出力 ( $\mu$ ) | 9992      | 9994 | 9997     | 9996 |

## 2. 2 模型地盤の作製

模型地盤の材料には乾燥した砂質土を用い、ノズルおよびネットを組み合わせた空中落下法により模型砂地盤を作製した．ここでは，模型砂地盤の作製方法およびその密度を示す．

### (1) 模型地盤の作製方法

模型砂地盤には，東北硅砂 6 号を気乾状態で用いている．図 2.4 には粒径加積曲線を示す．

模型砂地盤は写真 2.8 および図 2.5 に示すように円柱土槽の上にサンドレーナーを設置し，砂試料をノズルからネットを介して空中自由落下させて作製した．サンドレーナーの詳細は，図 2.6～図 2.8 に示す．ノズルの径を変えることで，地盤の密度を変えることができる．本実験では，図 2.8 に示すような比較的密な砂地盤（以下，D 地盤）作製用のノズル（ $\phi 12\text{mm}$ ）および緩い砂地盤（以下，L 地盤）作製用のノズル（ $\phi 35\text{mm}$ ）を利用した．

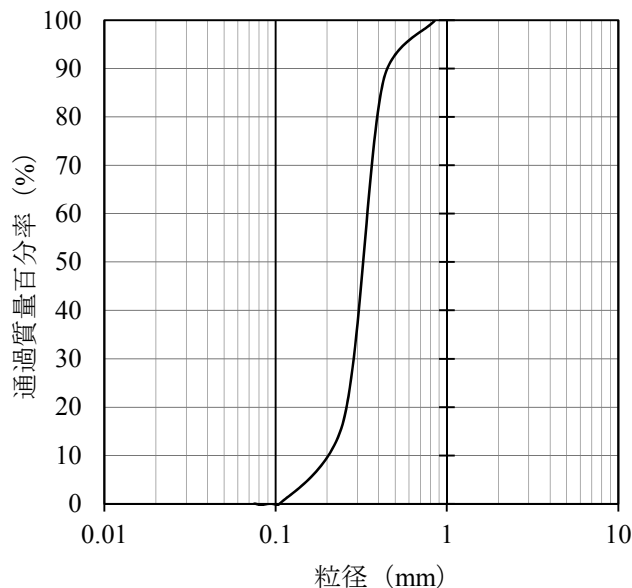


図 2.4 粒径加積曲線



写真 2.8 模型砂地盤  
の作製状況

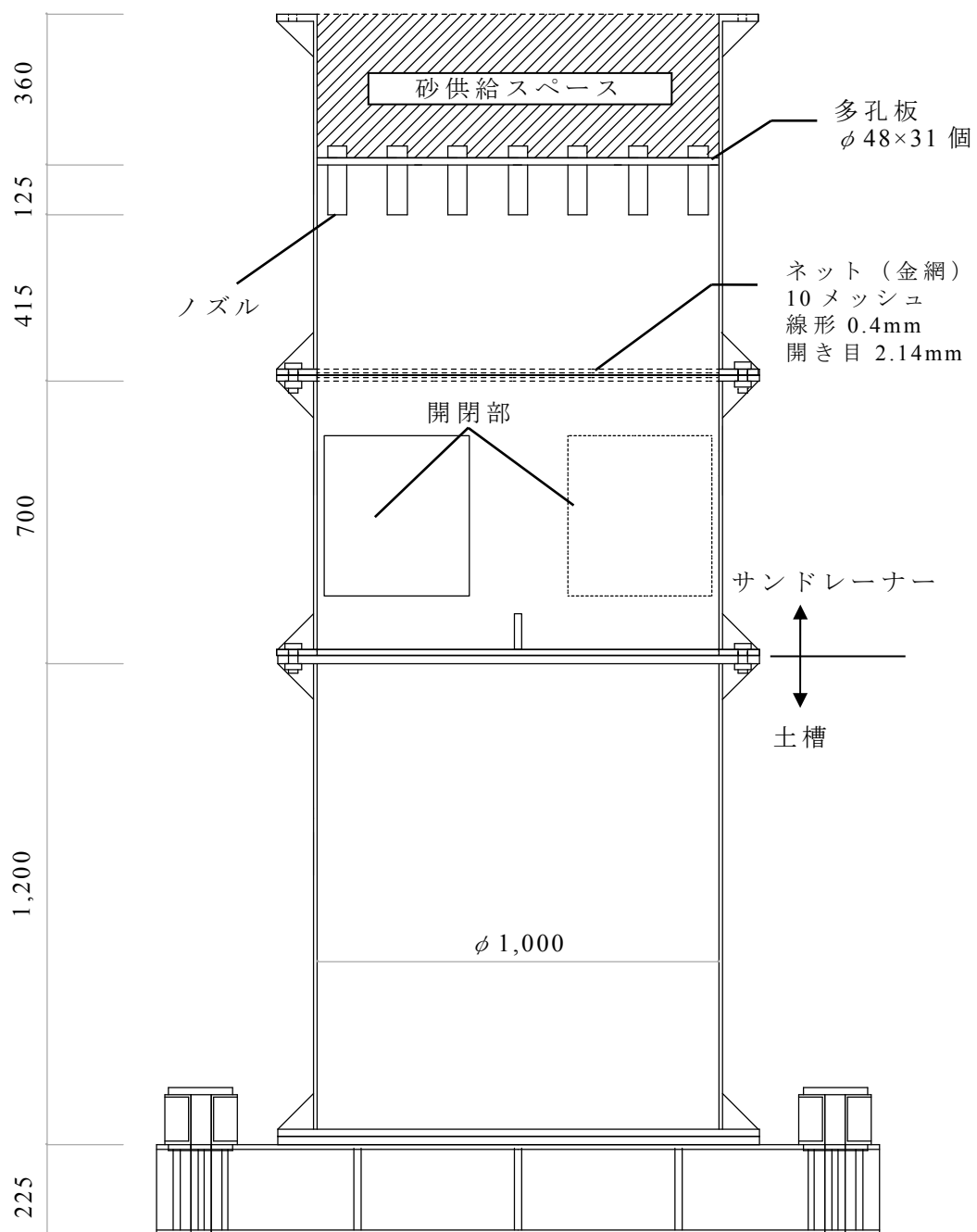


図 2.5 模型砂地盤作製時の組立図 (単位 : mm)

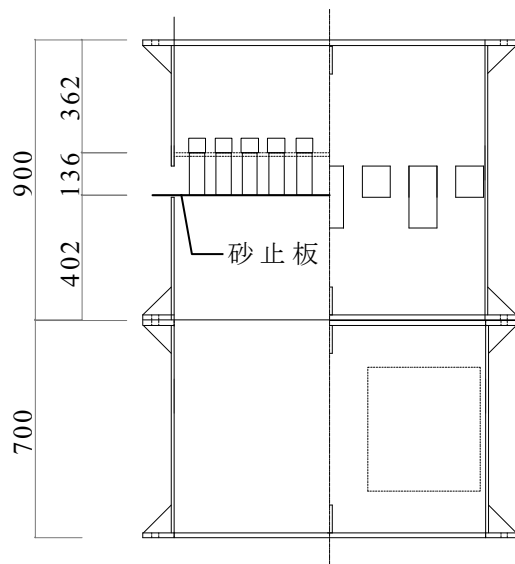


図 2.6 サンドレーナー (単位 : mm)

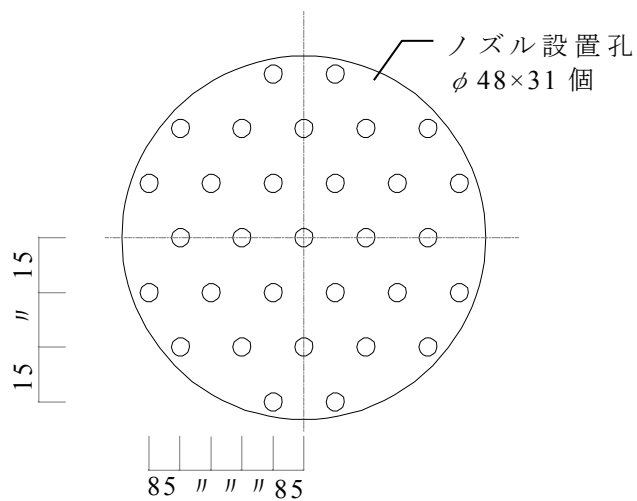
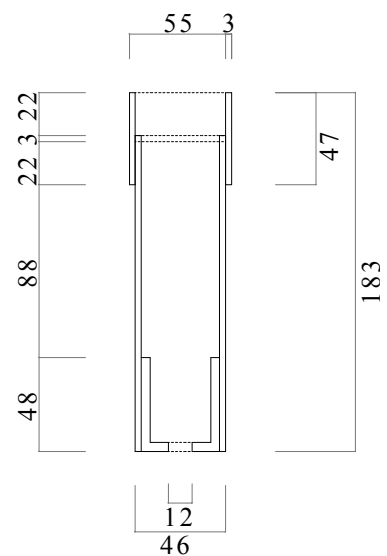
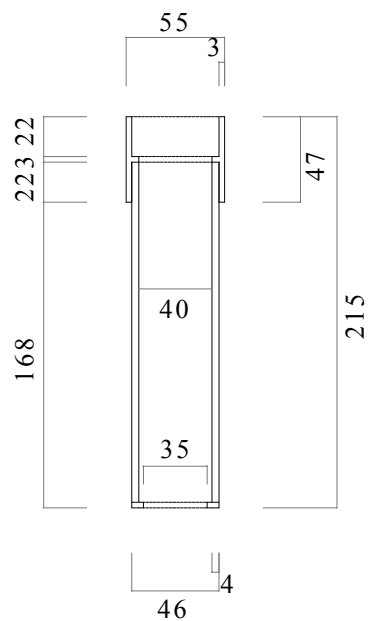


図 2.7 多孔板 (ノズル配置図)



(a)密な砂地盤用ノズル  
(口径 12mm)



(b)緩い砂地盤用ノズル  
(口径 35mm)

図 2.8 ノズル (単位 : mm)

模型地盤の作製手順は、以下の通りである。

- 手順 1 サンドレーナーにノズルを設置する。
- 手順 2 サンドレーナーを土槽上部に設置する。
- 手順 3 砂を砂供給スペースが十分に満たされるまで充填する。
- 手順 4 砂止板の位置をずらし、砂を空中自由落下させる。砂を落下させている間、同時に手順 2 を行い砂供給スペースは常に砂が充填されている状態にする。
- 手順 5 任意の地盤高さに達したら砂止板の位置を元に戻して砂の落下を止める。
- 手順 6 サンドレーナーを土槽より撤去する。
- 手順 7 砂地盤表面を均一な水平面になるように均す。

なお、土槽内で深度方向に密度を変化させた二層地盤を作製する場合には、手順 1～7 までを実施して下部の模型地盤を作製した後に、ノズルを交換して再び手順 2～7 を実施する。

## (2) 模型砂地盤の密度

表 2.6 に、密な D 地盤および緩い L 地盤の相対密度および有効上載圧  $\sigma_v' \sim 100 \text{ kN/m}^2$  における換算  $N$  値を示す。過去の同実験に伴う砂粒子の破碎状況によって最大・最小密度およびそれぞれの密度が変化するため、1 年間に 1 度の間隔で最大・最小密度試験および相対密度試験を実施した。なお、相対密度  $D_r$  は (2.1) 式より計算した。また、換算  $N$  値は、Meyerhof の考案した (2.2) 式より算出した。

$$D_r = \frac{\rho_{\max} - \frac{\rho_{mx} \times \rho_{\min}}{\rho}}{\rho_{\max} - \rho_{\min}} \times 100 \quad (2.1) \text{ 式}$$

- ここで、 $D_r$  : 相対密度 (%)
- $\rho_{\max}$  : 最大密度 ( $\text{g/cm}^3$ )
- $\rho_{\min}$  : 最小密度 ( $\text{g/cm}^3$ )
- $\rho$  : 密度 ( $\text{g/cm}^3$ )

$$N = \frac{D_r^2(0.01\sigma'_v + 0.7)}{441} \quad (2.2) \text{ 式}$$

ここで,  $N$  : 換算  $N$  値

$\sigma'_v$  : 有効上載圧 (kN/m<sup>2</sup>)

表 2.6 相対密度および換算  $N$  値

|     | 年度   | ノズル径<br>(mm) | 最大密度<br>$\rho_{max}$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 最小密度<br>$\rho_{min}$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 密度<br>$\rho$<br>(g/cm <sup>3</sup> ) | 相対密度<br>$D_r$<br>(%) | 換算 $N$ 値<br>[ $\sigma'_v=100\text{kN/m}^2$ ] |
|-----|------|--------------|----------------------------------------------|----------------------------------------------|--------------------------------------|----------------------|----------------------------------------------|
| D地盤 | 2012 | 12           | 1.71                                         | 1.40                                         | 1.69                                 | 94.8                 | 35                                           |
|     | 2013 |              | 1.69                                         | 1.38                                         | 1.68                                 | 98.4                 | 37                                           |
|     | 2014 |              | 1.69                                         | 1.41                                         | 1.68                                 | 97.6                 | 37                                           |
| L地盤 | 2012 | 35           | 1.71                                         | 1.40                                         | -                                    | -                    | -                                            |
|     | 2013 |              | 1.69                                         | 1.38                                         | 1.52                                 | 48.9                 | 9                                            |
|     | 2014 |              | 1.69                                         | 1.41                                         | 1.53                                 | 46.9                 | 8                                            |

### (3) 模型砂地盤のせん断抵抗角

表 2.7 に, 一面せん断試験から求めた密な D 地盤および緩い L 地盤のせん断抵抗角  $\phi$  を示す.

表 2.7 せん断抵抗角  $\phi$

|     | せん断抵抗角 $\phi$ (°) |
|-----|-------------------|
| D地盤 | 36.9              |
| L地盤 | 33.7              |

## 2. 3 模型杭の作製

本実験では，鋼管の内側にひずみゲージを貼付した模型杭を使用し，回転貫入杭の施工時および引抜き載荷時の杭体応力を測定する．ここでは，模型杭の特徴，形状および杭体に貼付したひずみゲージを示す．

### (1) 模型杭の特徴および形状

模型杭は中空の鋼管であり，先端に近い周面には一巻きの螺旋羽根が溶接されている．鋼管の先端部は鋼製の円盤をボルトで鋼管に固定させて，閉端杭としている．

表 2.8 に材質および各種寸法をまとめて示す．模型杭には肉厚および材質の異なる 2 種類を利用した．模型杭Ⅱは回転施工時に杭頭連結部に作用するモーメント荷重が大きいことから杭頭部の肉厚を本体部よりも厚くしている．

表 2.8 模型杭の各種寸法

|                 | 材質      | $F$ 値<br>( $\text{MN/m}^2$ ) | ヤング率<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | 杭長<br>$\ell$<br>(mm) | 杭径<br>$d_0$<br>(mm) | 羽根径<br>$d_w$<br>(mm) | 肉厚<br>$t$<br>(mm) | 羽根厚<br>$t_w$<br>(mm) | 羽根<br>ピッチ<br>$p_w$<br>(mm) | 重量<br>(kN) |
|-----------------|---------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------|----------------------|-------------------|----------------------|----------------------------|------------|
| 模型杭Ⅰ            | STS410  | 245                          | $2.05 \times 10^8$          | 1046                 | 48.6                | 97.2                 | 2.3               | 6                    | 20                         | 0.031      |
| 模型杭Ⅱ<br>(杭頭接続部) | STPG410 |                              |                             | 1340<br>(120)        |                     |                      | 3.7<br>(7.1)      |                      |                            | 0.060      |

### (2) ひずみゲージの貼付位置

図 2.9～図 2.10 および表 2.9～表 2.10 に，各杭体に貼付したひずみゲージの位置・名称を示す．ひずみゲージは杭体の軸力を計測するため 1～4 断面に，また偏心の影響を考慮して各断面 90°間隔に貼付している．各断面のひずみゲージ貼付位置は羽根の始端(切り欠き部)を A として，羽根の終端部に向かって B, C, D とした．また，杭先端部の回転トルクを計測する目的で，2 断面にトルクゲージを貼付している．

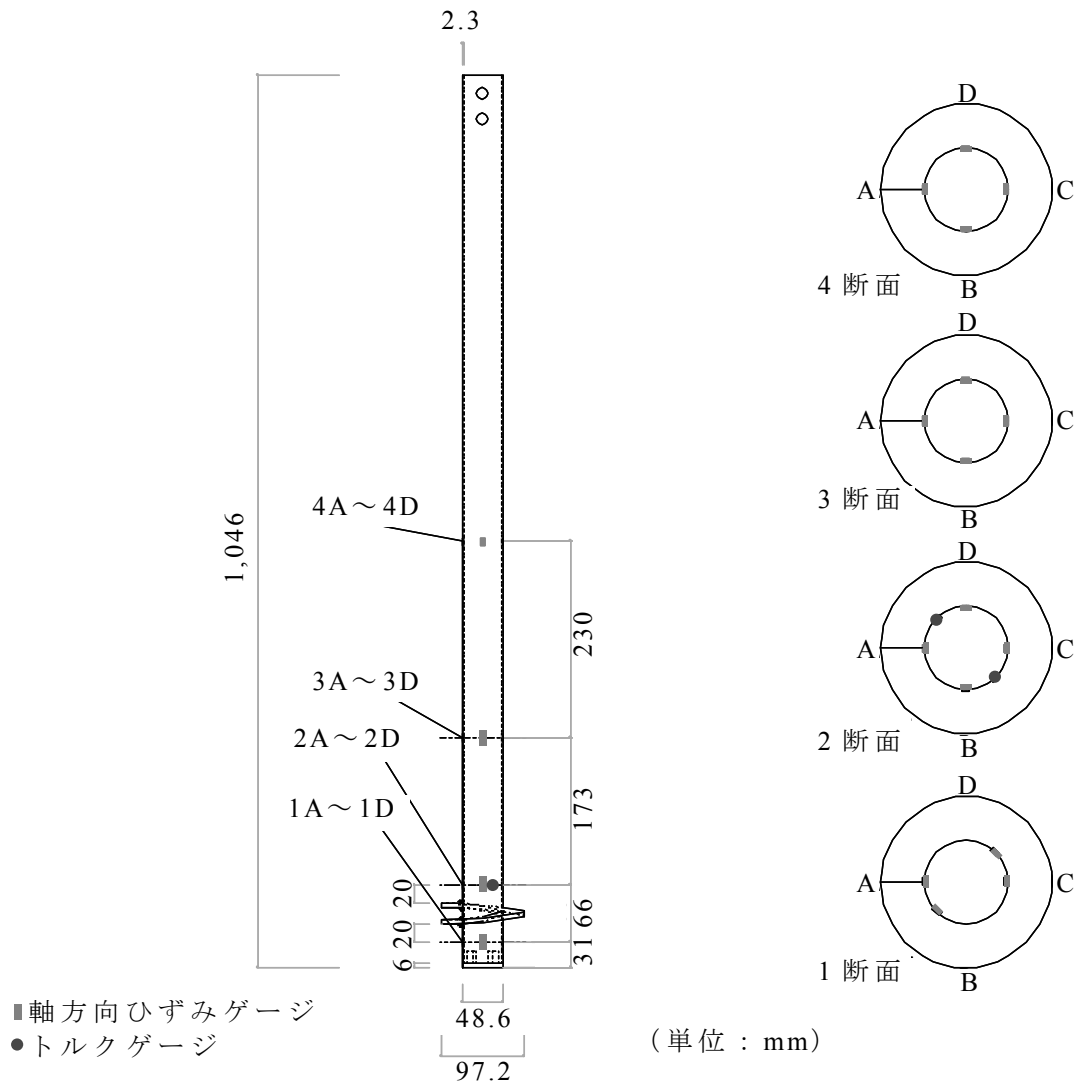


図 2.9 模型杭 I の寸法およびひずみゲージ貼付位置

表 2.9 模型杭 I のひずみゲージの名称

| 断面 | 名称    | ゲージ種類 | 詳細                      |
|----|-------|-------|-------------------------|
| 1  | 1A    | 単軸    | 軸方向ひずみゲージ               |
|    | 1AB   |       | 軸方向ひずみゲージ (熱電対付き)       |
|    | 1C    |       | 軸方向ひずみゲージ               |
|    | 1CD   |       | 軸方向ひずみゲージ (熱電対付き)       |
| 2  | 2A    | 単軸    | 軸方向ひずみゲージ               |
|    | 2B    |       | 軸方向ひずみゲージ (熱電対付き)       |
|    | 2C    |       | 軸方向ひずみゲージ               |
|    | 2D    |       | 軸方向ひずみゲージ (熱電対付き)       |
|    | TR2AD | 2軸    | トルクゲージ                  |
|    | TR2BC |       |                         |
| 3  | 3     | 単軸    | 4方向の単軸ひずみゲージ<br>を結線して使用 |
| 4  | 4     |       |                         |



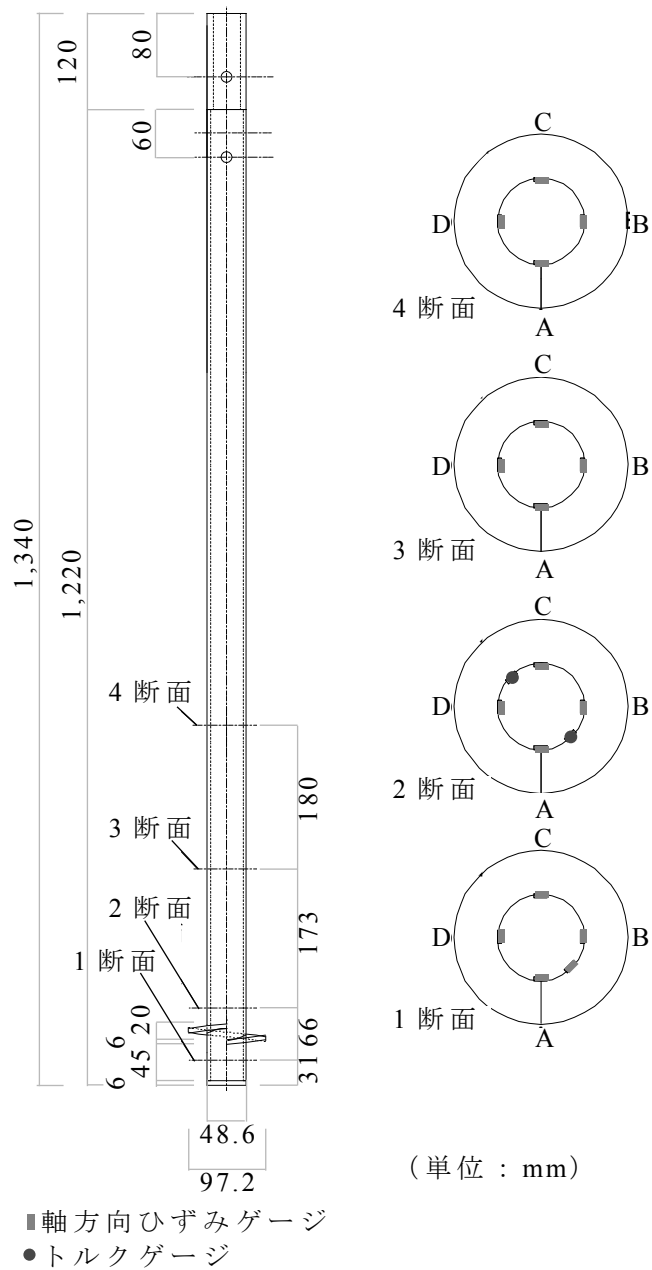


表 2.10 模型杭Ⅱの  
ひずみゲージの名称

| 断面 | 名称    | ゲージ<br>種類 | 詳細                       |
|----|-------|-----------|--------------------------|
| 1  | 1A    | 単軸        | 軸方向<br>ひずみゲージ            |
|    | 1B    |           | 軸方向<br>ひずみゲージ<br>(熱電対付き) |
|    | 1C    |           | 軸方向<br>ひずみゲージ            |
|    | 1D    |           | 軸方向<br>ひずみゲージ            |
| 2  | 2A    | 単軸        | 軸方向<br>ひずみゲージ            |
|    | 2B    |           | 軸方向<br>ひずみゲージ<br>(熱電対付き) |
|    | 2C    |           | 軸方向<br>ひずみゲージ            |
|    | 2D    |           | 軸方向<br>ひずみゲージ            |
|    | TR2AD | 2軸        | トルクゲージ                   |
|    | TR2BC |           |                          |
| 3  | 3     | 単軸        | 軸方向<br>ひずみゲージ<br>(熱電対付き) |
| 4  | 4A    |           | 軸方向<br>ひずみゲージ            |
|    | 4B    |           | 軸方向<br>ひずみゲージ<br>(熱電対付き) |
|    | 4C    |           | 軸方向<br>ひずみゲージ            |
|    | 4D    |           | 軸方向<br>ひずみゲージ            |

図 2.10 模型杭Ⅱの寸法  
およびひずみゲージ貼付位置

## 2. 4 回転貫入実験および引抜き載荷実験の方法

本実験は図 2.11 に示すように模型地盤を作成して上載圧を作用させた後に回転貫入実験を実施し、引続いて引抜き載荷実験を実施した。

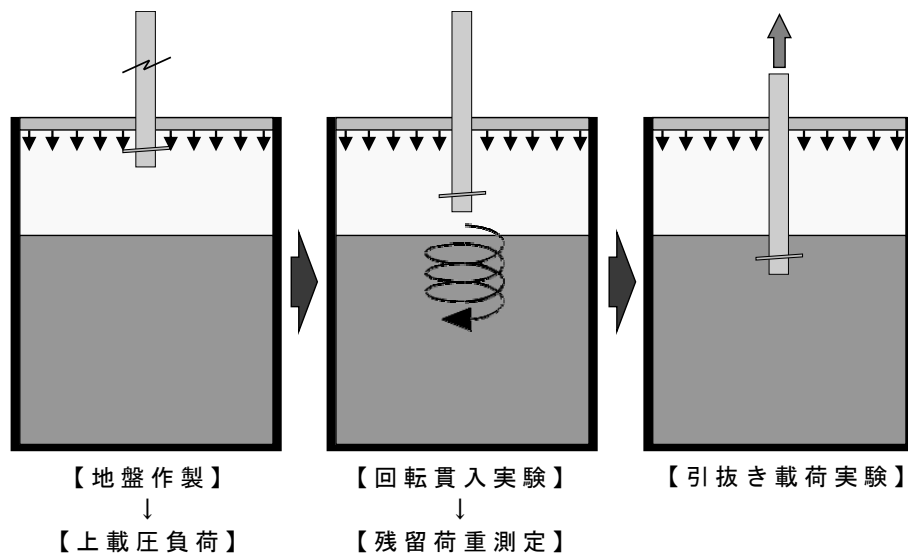


図 2.11 実験の流れ

### (1) 回転貫入実験方法

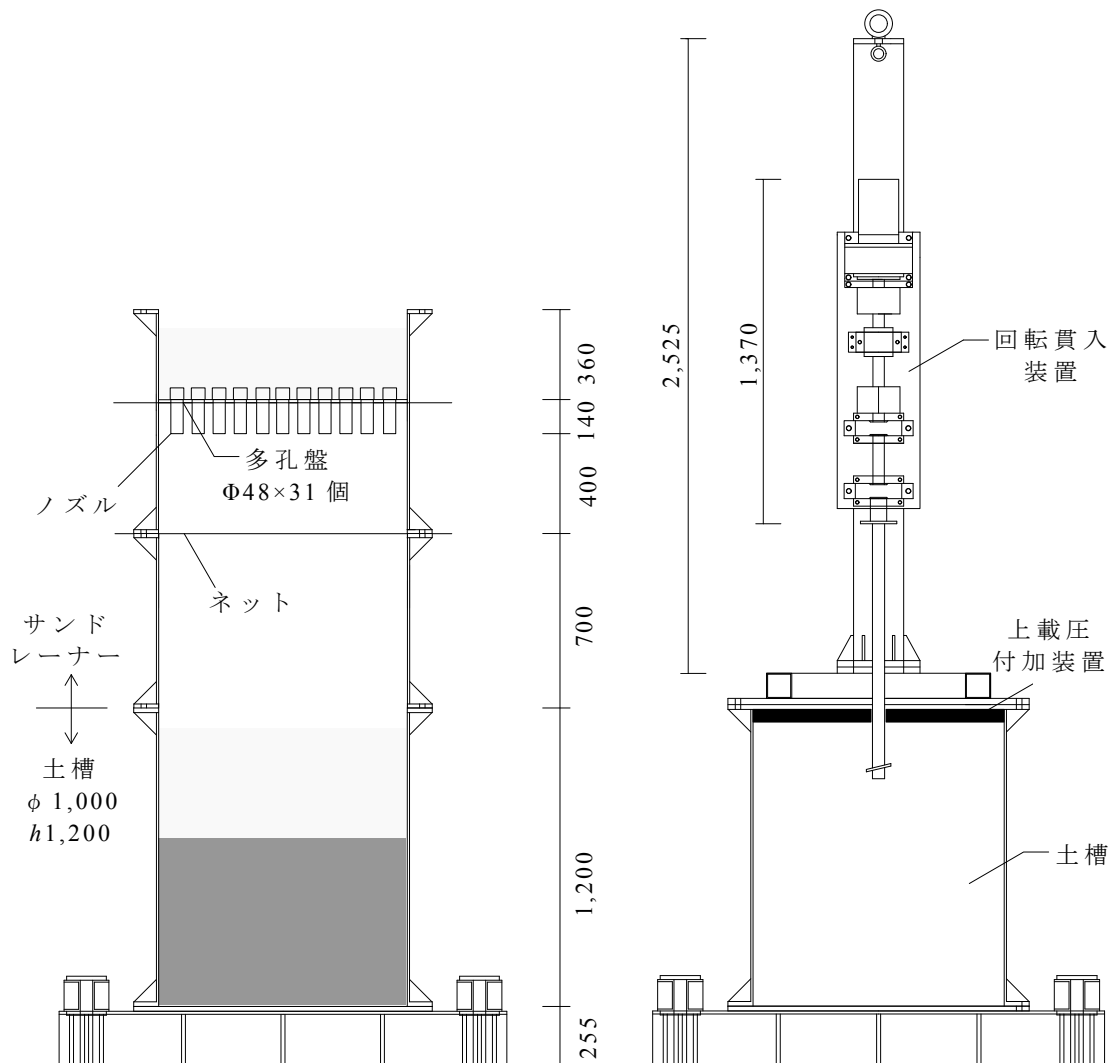
以下に、回転貫入実験の手順を示す。

- 手順 1 模型地盤を作製した後に、土槽の中心位置に杭先端面が地表面-150mm となるように模型杭を設置する。
- 手順 2 ゴム製空気袋、上蓋の順に設置する。
- 手順 3 回転貫入装置を上蓋の上に設置する。
- 手順 4 杭体に貼付したひずみゲージのリード線を杭体に巻き付ける。
- 手順 5 巻込み式変位計のワイヤー端部を施工装置モータ駆動部に取り付ける。
- 手順 6 各種センサーの初期値を測定後に、本計測を開始する。
- 手順 7 各実験における任意の上載圧を地表面に負荷させる。
- 手順 8 回転貫入装置のモータ自重を載荷し、治具により杭頭部を回転貫入装置に接続する。
- 手順 9 回転貫入施工を開始する。

手順 1 0 各実験条件に合わせて打止める。

手順 1 1 回転貫入施工完了後，数分間放置した後にモータ自重を除荷する。

手順 1 2 終了（回転貫入装置を取り外し，引抜き载荷実験の準備へ移行する）。



(a)模型地盤作製時

(b)回転貫入時

図 2.12 回転貫入実験

## (2) 引抜き載荷実験方法

以下に、引抜き載荷実験の手順を示す。

- 手順 1 載荷フレームを土槽外部の支柱に載せ、杭中心上に油圧ジャッキを取り付け固定する。
- 手順 2 ロードセルと油圧ジャッキを接続し、その後杭頭接続部品を取り付けロードセルと接続する。
- 手順 3 高感度変位計および巻込み式変位計を設置する。
- 手順 4 本計測を開始した後に引抜き載荷を開始する。
- 手順 6 所定の引抜き変位量となった時点で実験を終了する。

引抜き載荷実験は、連続載荷方式とし、載荷速度は  $1\text{kN}/\text{min}$  で手動制御した。なお、除荷過程においては、杭が滑って引抜けた時点で引抜き荷重が急激に低下するため、その時点でそのまま引抜き荷重を 0 まで除荷することとした。

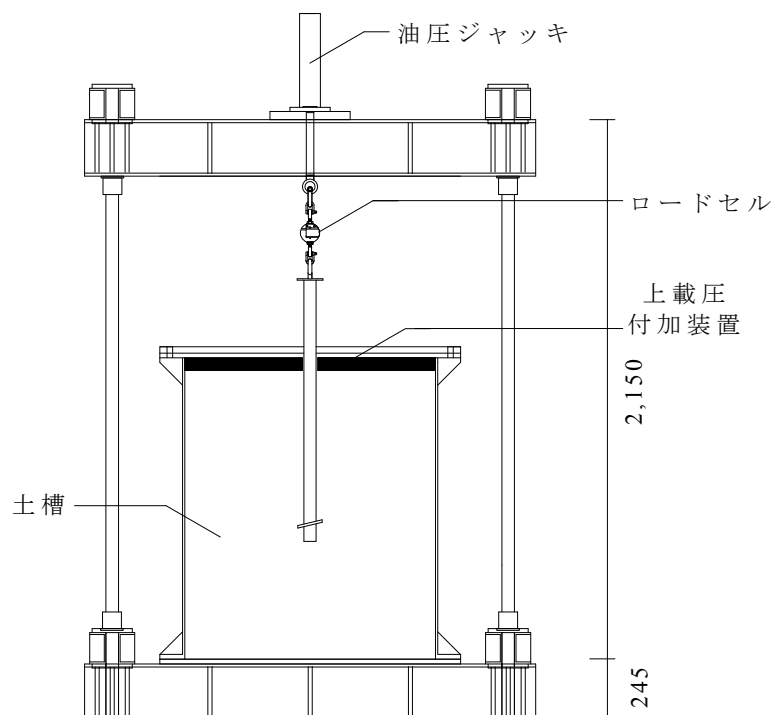


図 2.13 引抜き載荷試験

## 2. 5 実験条件

表 2.11 および表 2.12 に実験条件の一覧を示す.

実験は均一な一層地盤（以下，均一地盤）に加えて，実地盤でも一般的な地層構成である支持層となる比較的密な砂層の上に緩い砂地盤を堆積させた二層地盤で実施した．二層地盤における支持層への根入れ長さ  $H_b$  は羽根面の中央深度と地層境界の関係を表すものである．例えば， $+1.0d_w$  の場合には羽根面中央が支持層に $+1.0d_w$  貫入するように打止める．支持層へは  $1.0d_w$  程度貫入させるのが一般的であるが，本実験では支持層への根入れ長さ  $H_b$  を  $-0.5d_w \sim +1.5d_w$  と変化させ，その影響を検討した．なお，実験モデル名は，以下のように表記する．

均一地盤の場合：『地盤密度\_上載圧  $\sigma$ （打止め深度）』

※ただし，打止め深度  $H$  は  $5d_w$  以外の時のみ記載

二層地盤の場合：『LD\_上載圧  $\sigma$ \_支持層への根入れ長さ』

図 2.14 に密な D 地盤（ $\sigma=0 \sim 75\text{kN/m}^2$ ）および二層地盤（ $\sigma=100\text{kN/m}^2$ ）において回転貫入実験前に実施したスウェーデン式サウンディング試験（以下，SWS 試験）による換算  $N$  値の深度分布を示す．JIS 規格において，同試験は 25cm 貫入させるのに要する半回転数を測定することになっているが，本試験では測定間隔を細かくするために 5cm 貫入させるのに要する半回転数を測定し，(2.3) 式より換算  $N$  値を算出した．

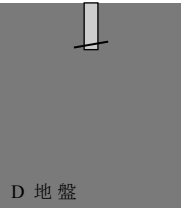
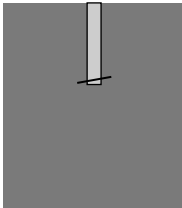
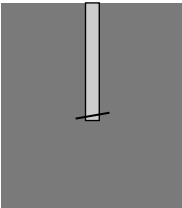
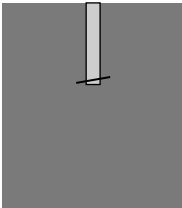
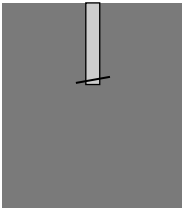
$$N = 0.002 W_{sw} + 0.067 N_{sw} \quad (2.3) \text{ 式}$$

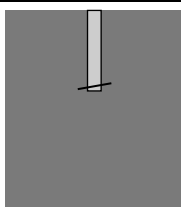
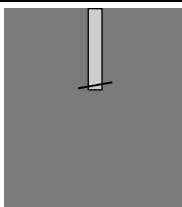
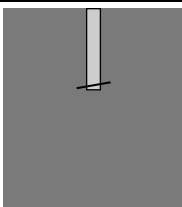
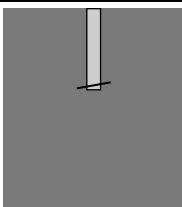
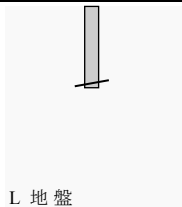
ここで， $W_{sw}$ ：1000N 以下の荷重で貫入する場合の荷重 (N)

$N_{sw}$ ：貫入量 1m 当たりの半回転数 (回)

密な D 地盤の場合，上載圧  $\sigma$  による差は見られるものの，いずれのモデルも深度 0.5m 程度で換算  $N$  値は安定している．二層地盤では，根入れの異なる実験モデルごとに試験を実施するのではなく，ひとつのモデル（LD\_100\_±0.0 $d_w$ ）について 2 度実施した．1 回目，2 回目共に，地表面から支持層に到達するまでの換算  $N$  値は 10 未満であるが，支持層に到達すると換算  $N$  値が急増して深度 0.6m 程度から 30 程度でほぼ一定値となる．いずれにおいても深度 0.8m 以深では  $N$  値が再び上昇するが，土槽底板の影響を受けた結果と考えられる．

表 2.11 実験条件の一覧（均一地盤）

|                                     |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| No.                                 | 1                                                                                 | 2                                                                                 | 3                                                                                 | 4                                                                                  | 5                                                                                   |
| 実験名称                                | D_25 (3dw)                                                                        | D_25                                                                              | D_25 (7dw)                                                                        | D_0                                                                                | D_5                                                                                 |
| 実験年度                                | 2012                                                                              |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
| 地盤条件<br>(密度)                        | 均一<br>(密 : $D_r=95\%$ )                                                           |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
| 打止め深度 $H$                           | $3d_w$                                                                            | $5d_w$                                                                            | $7d_w$                                                                            | $5d_w$                                                                             |                                                                                     |
| 上載圧 $\sigma$<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | 25                                                                                |                                                                                   |                                                                                   | 0                                                                                  | 5                                                                                   |
| 模型杭                                 | I                                                                                 | II                                                                                |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|                                     |  |  |  |  |  |
|                                     | D 地盤                                                                              |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |

|                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| No.                                 | 6                                                                                   | 7                                                                                   | 8                                                                                   | 9                                                                                    | 10                                                                                    |
| 実験名称                                | D_50                                                                                | D_75                                                                                | D_100                                                                               | D_150                                                                                | L_50                                                                                  |
| 年度                                  | 2014                                                                                | 2012                                                                                | 2013                                                                                | 2014                                                                                 |                                                                                       |
| 地盤条件<br>(密度)                        | 均一<br>(密 : $D_r=98\%$ ) (密 : $D_r=95\%$ ) (密 : $D_r=98\%$ ) (緩い : $D_r=47\%$ )      |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
| 打止め深度 $H$                           | $5d_w$                                                                              |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |                                                                                       |
| 上載圧 $\sigma$<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | 50                                                                                  | 75                                                                                  | 100                                                                                 | 150                                                                                  | 50                                                                                    |
| 模型杭                                 | II                                                                                  | I                                                                                   | II                                                                                  |                                                                                      |                                                                                       |
|                                     |  |  |  |  |  |
|                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      | L 地盤                                                                                  |

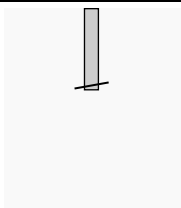
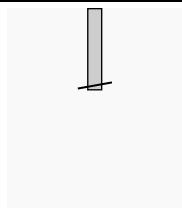
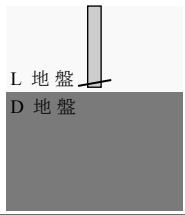
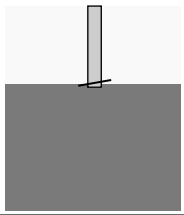
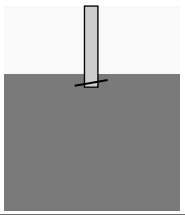
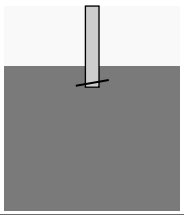
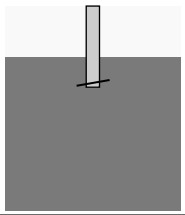
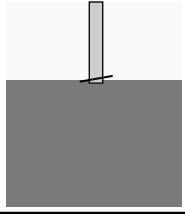
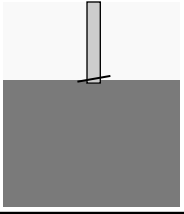
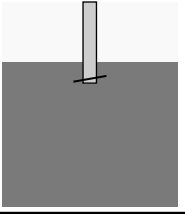
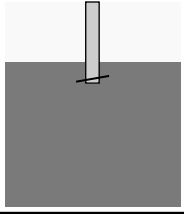
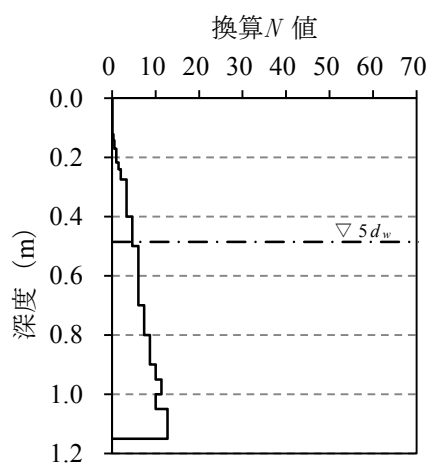
|                                     |                                                                                     |                                                                                     |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| No.                                 | 11                                                                                  | 12                                                                                  |
| 実験名称                                | L_100                                                                               | L_150                                                                               |
| 年度                                  | 2013                                                                                | 2014                                                                                |
| 地盤条件<br>(密度)                        | 均一<br>(緩い : $D_r=49\%$ ) (緩い : $D_r=47\%$ )                                         |                                                                                     |
| 打止め深度 $H$                           | $5d_w$                                                                              |                                                                                     |
| 上載圧 $\sigma$<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | 100                                                                                 | 150                                                                                 |
| 模型杭                                 | II                                                                                  |                                                                                     |
|                                     |  |  |

表 2.12 実験条件の一覧（二層地盤）

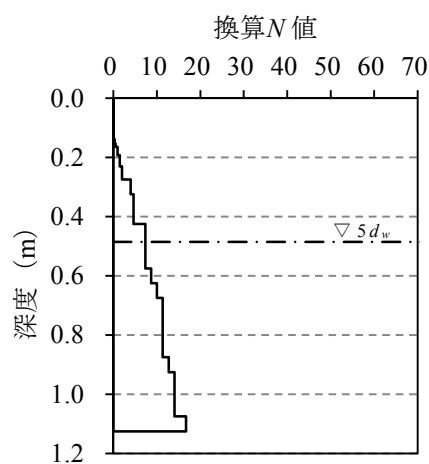
| No.                                 | 13                                                                                | 14                                                                                | 15                                                                                | 16                                                                                 | 17                                                                                  |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| 実験名称                                | LD_100_-0.5dw                                                                     | LD_100_±0.0dw                                                                     | LD_100_+0.5dw                                                                     | LD_100_+1.0dw                                                                      | LD_100_+1.5dw                                                                       |
| 年度                                  | 2013                                                                              |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
| 地盤条件                                | 二層                                                                                |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
| 打止め深度 $H$                           | $5d_w$                                                                            |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
| 根入れ深さ $H_b$                         | $-0.5d_w$                                                                         | $\pm 0.0d_w$                                                                      | $+0.5d_w$                                                                         | $+1.0d_w$                                                                          | $+1.5d_w$                                                                           |
| 上載圧 $\sigma$<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | 100                                                                               |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
| 模型杭                                 | II                                                                                |                                                                                   |                                                                                   |                                                                                    |                                                                                     |
|                                     |  |  |  |  |  |

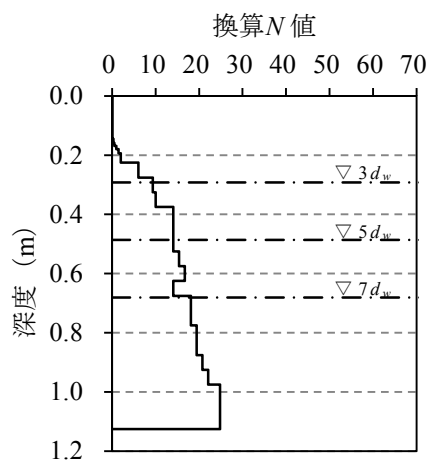
| No.                                 | 18                                                                                  | 19                                                                                  | 20                                                                                  | 21                                                                                   |
|-------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| 実験名称                                | LD_50_±0.0dw                                                                        | LD_150_±0.0dw                                                                       | LD_50_+1.0dw                                                                        | LD_150_+1.0dw                                                                        |
| 年度                                  | 2014                                                                                |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |
| 地盤条件                                | 二層                                                                                  |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |
| 打止め深度 $H$                           | $5d_w$                                                                              |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |
| 根入れ深さ $H_b$                         | $\pm 0.0d_w$                                                                        |                                                                                     | $+1.0d_w$                                                                           |                                                                                      |
| 上載圧 $\sigma$<br>( $\text{kN/m}^2$ ) | 50                                                                                  | 150                                                                                 | 50                                                                                  | 150                                                                                  |
| 模型杭                                 | II                                                                                  |                                                                                     |                                                                                     |                                                                                      |
|                                     |  |  |  |  |



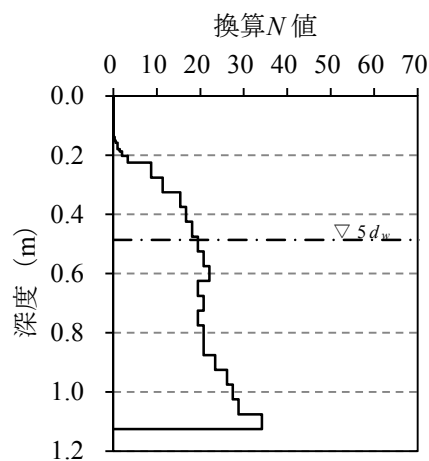
(a)D 地盤  $\sigma=0\text{kN/m}^2$



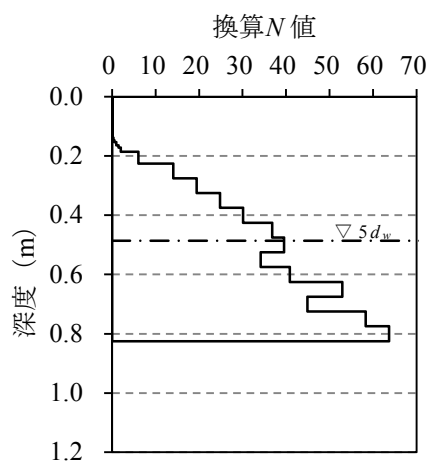
(b)D 地盤  $\sigma=5\text{kN/m}^2$



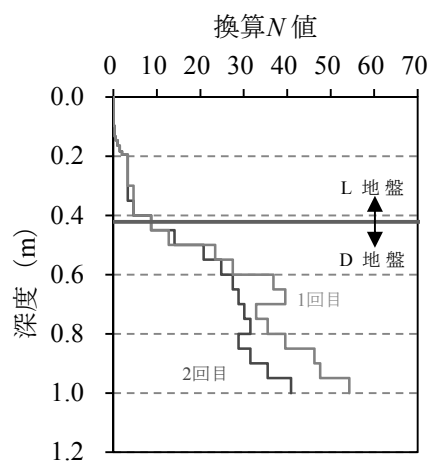
(c)D 地盤  $\sigma=25\text{kN/m}^2$



(d)D 地盤  $\sigma=50\text{kN/m}^2$



(e)D 地盤  $\sigma=75\text{kN/m}^2$



(f)二層地盤  $\sigma=100\text{kN/m}^2$

図 2.14 SWS 試験による換算  $N$  値



## 第 3 章

### 回転貫入中の挙動

#### 3. 1 まえがき

回転貫入杭は場所打ちコンクリート杭や埋込み杭と異なり，杭施工によって杭体各部に応力が残留することが指摘されている．従って，回転貫入杭の引抜き抵抗を検討するためには，模型実験においても現場と同様な施工手順を考慮することが重要である．

本章では，回転貫入杭の施工開始から貫入終了を経て，施工による杭と地盤の状態変化が微小になる時点（本論文では，残留時と呼ぶ）までの各種測定値（杭体トルク，杭体応力および貫入率）について，地盤状態（地盤構成， $N$  値および上載圧）をパラメータにして検討する．

#### 3. 2 回転貫入杭の貫入機構

図 3.1 は D\_50 モデル（上載圧  $\sigma=50\text{kN/m}^2$ ，打止め深度  $H=5d_w$ ）における貫入深度の増加に伴う杭施工中の種々の測定値を示したものである．ここで，(a)は回転貫入前に実施した SWS 試験で得られた換算  $N$  値である．

(b)の貫入率  $\mu$  は回転貫入開始直後から減少するものの，羽根径程度貫入した深度  $Z=225\text{mm}$  付近から徐々に増加して，更に羽根径程度貫入した深度  $Z=325\text{mm}$  付近から一定に推移する傾向を示している．

(c)の回転トルクは杭頭部  $T$  および杭先端部  $T_p$  共に  $Z=225\text{mm}$  付近から急増している．また， $T_p$  に比べて  $T$  の方が大きく，軸部の円周方向の摩擦力が発生していることが分かる．

(d)の杭体各部の負担荷重は  $Z=225\text{mm}$  付近までは変化がなく，杭先端面  $iR_b$  と羽根面  $iR_w$  の合計は回転貫入装置のモータ荷重（ $1.85\text{kN}$ ）と概ね一致する．その後， $iR_w$  が引張側へ増加しているのは螺旋羽根に推進力（下向きの力）が作用することを示している．この時の貫入深度  $Z$  は貫入率  $\mu$  や回転トルク  $T$  および  $T_p$  が増加し始めた深度と一致する．つまり，貫

入率や回転トルクが増加し始めると羽根面の推進力が増加して、 $iR_b$  と  $iR_s$  の抵抗に打ち勝って杭が貫入することが分かる。

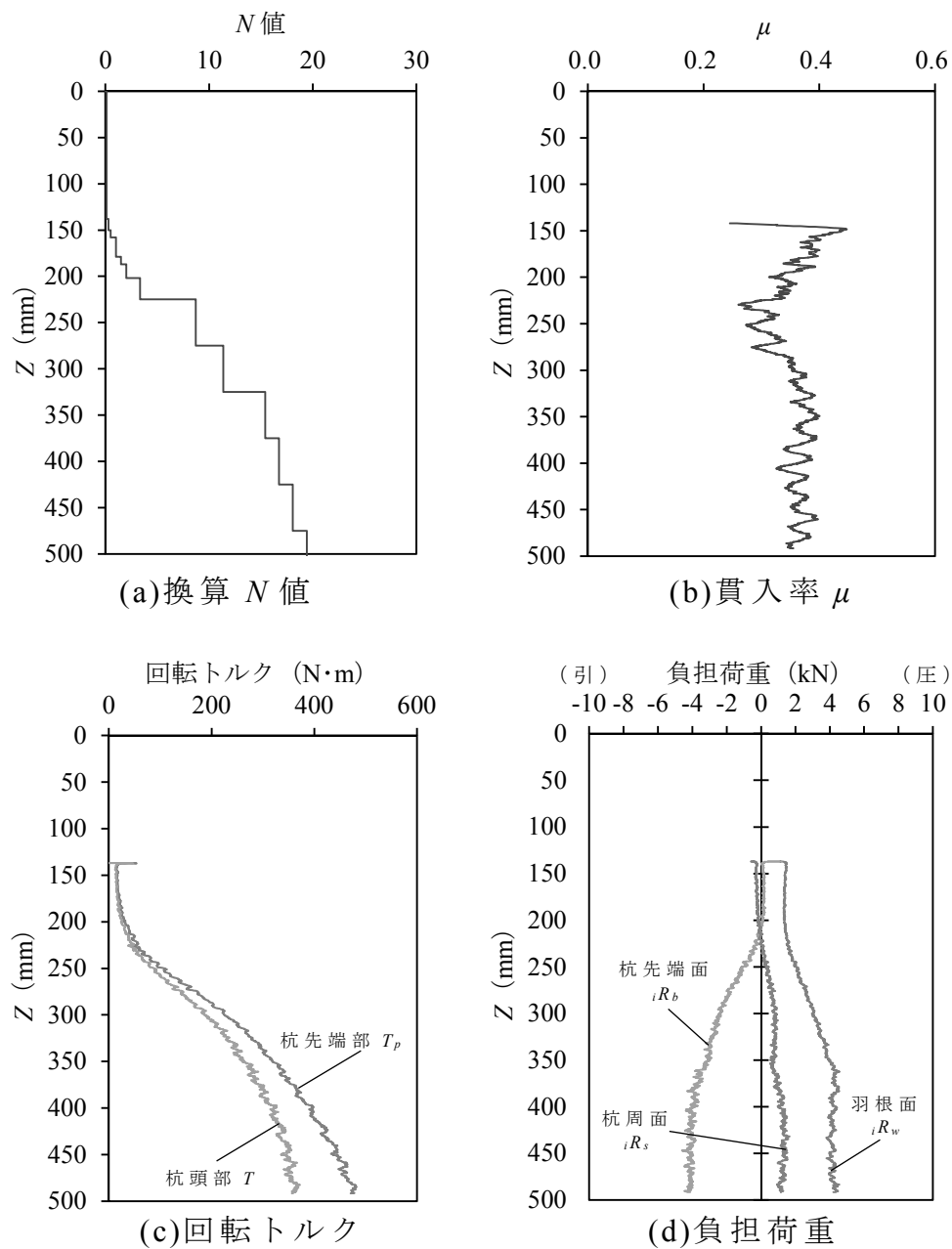


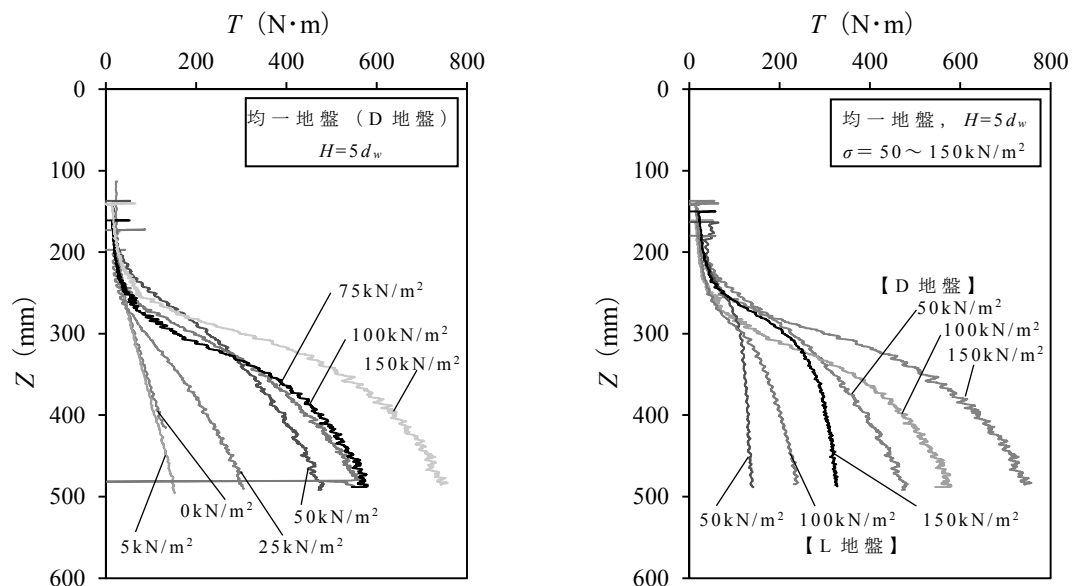
図 3.1 各種測定値～貫入深度  $Z$  の関係 (D\_50 モデル)

### 3. 3 杭体各部の回転トルクおよび貫入率

#### (1) 均一地盤の場合

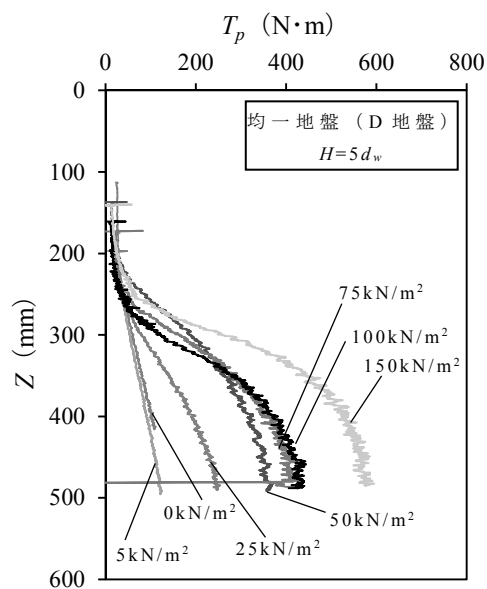
図 3.2 に杭頭部の回転トルク  $T$  と貫入深度  $Z$  の関係を示す．上載圧を  $\sigma=0\sim150\text{kN/m}^2$  と変化させた(a)を見ると，いずれも  $Z=200\sim225\text{mm}$  区間で  $T$  の増加が始まり，貫入に伴う  $T$  の増大は  $\sigma$  にほぼ比例している．地盤の密度の影響を比較した(b)を見ると，密な D 地盤における  $T$  は緩い L 地盤の 2～3.5 倍程度となっている．図 3.3 には杭先端部の回転トルク  $T_p$  について，図 3.2 と同様に示した． $T_p$  は杭頭部の  $T$  よりも小さいものの，貫入に伴う推移は  $T$  と同様の傾向である．

図 3.4 に貫入率  $\mu$  と貫入深度  $Z$  の関係を示す．上載圧  $\sigma$  を変化させた(a)を見ると， $\sigma=0\sim5\text{kN/m}^2$  と小さい場合には  $\mu$  が減少して  $Z=300\sim400\text{mm}$  を過ぎると一定値となる．それに対して  $\sigma\geq25\text{kN/m}^2$  の  $\mu$  は貫入開始後一旦減少した後に増大して  $Z=350\text{mm}$  付近から一定値になる．定常状態での  $\mu$  は  $\sigma$  が大きい程小さくなる傾向を示した．地盤の密度の影響を比較した(b)を見ると，D 地盤の  $\mu$  は L 地盤よりも小さい傾向にある．

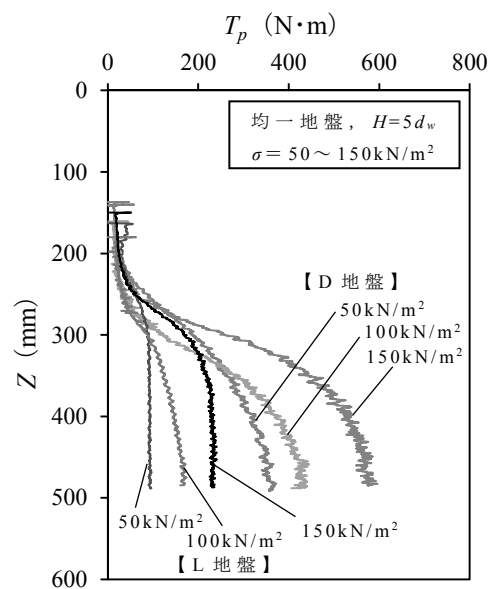


(a)上載圧 ( $\sigma=0\sim150\text{kN/m}^2$ ) の影響 (b)地盤の密度 (D 地盤・L 地盤) の影響

図 3.2 杭頭部の回転トルク  $T$ ～貫入深度  $Z$  の関係

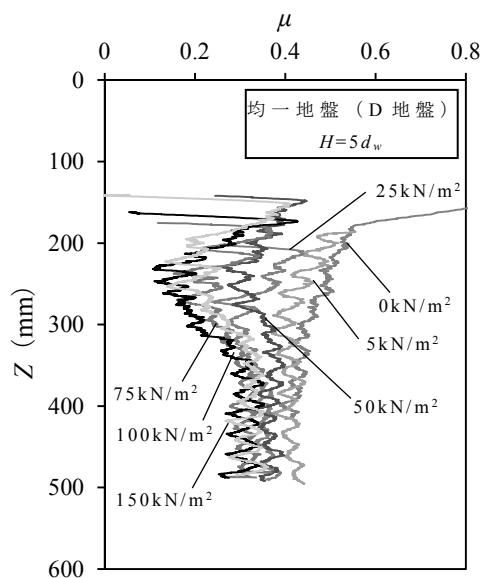


(a) 上載圧 ( $\sigma = 0 \sim 150 \text{ kN/m}^2$ ) の影響

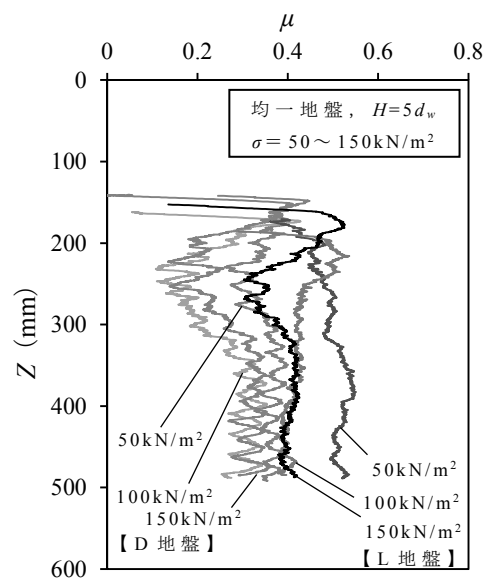


(b) 地盤の密度 (D 地盤・L 地盤) の影響

図 3.3 杭頭部の回転トルク  $T_p$  ~ 貫入深度  $Z$  の関係



(a) 上載圧 ( $\sigma = 0 \sim 150 \text{ kN/m}^2$ ) の影響



(b) 地盤の密度 (D 地盤・L 地盤) の影響

図 3.4 貫入率  $\mu$  ~ 貫入深度  $Z$  の関係

## (2) 二層地盤の場合

図 3.5 に、密な D 地盤（以下、支持層）への根入れ長さ  $H_b$  を  $-0.5d_w \sim +1.5d_w$  と変化させた実験について、杭頭部および杭先端部の回転トルクと貫入深度  $z$  の関係を示す。なお、貫入深度  $z$  は密な D 地盤と緩い L 地盤の境界を 0mm として整理した。 $H_b=+1.5d_w$  モデルの杭頭部  $T$  および杭先端部  $T_p$  は支持層に到達すると急増し、その後徐々に増加率が減少して定常状態に近づく傾向がある。

図 3.6 は貫入率  $\mu$  と貫入深度  $z$  の関係である。いずれも貫入の進行に伴い  $\mu$  が低下するが、支持層に到達した以降はほぼ一定値となる。図中に示した破線は上載圧  $\sigma=100\text{kN/m}^2$  とした密な D 地盤の 200mm 貫入以降における  $\mu$  の平均値 ( $\mu=0.31$ ) である。二層地盤における支持層到達後の  $\mu$  は D 地盤の値と同程度であり、深さ方向にほぼ一定である。

## (3) SWS 試験による平均 $\bar{N}$ 値との関係

表 3.1 は各実験における貫入打止め時の杭頭部の回転トルク  $T$ 、杭先端部の回転トルク  $T_p$  および貫入率  $\mu$  の一覧である。図 3.7 および図 3.8 にこれらと  $\bar{N}$  の関係を示す。 $T$  および  $T_p$  についての  $\bar{N}$  の算定区間は杭先端面から下方に  $2d_0$ 、 $\mu$  については杭先端面から下方に  $3d_0$  とした。これらは杭先端面から下方に杭径  $d_0$  の 1～3 倍および羽根面から下方に羽根径  $d_w$  の 1～3 倍に変化させた時の相関性が高い区間である。

図 3.6 の  $T$  および  $T_p$  は  $\bar{N}$  に対する一次式で表され、相関係数も 0.9 以上である。杭頭部  $T$  の  $\bar{N}$  に対する係数が杭先端部  $T_p$  の約 1.4 倍となるのは杭周面抵抗が加わるためである。

図 3.7 の貫入率  $\mu$  は均一地盤では  $\bar{N}$  が小さい範囲 ( $\bar{N} < 20$  程度) において  $\bar{N}$  の増大に伴って小さくなる傾向があるが、 $\bar{N}$  が大きい範囲 ( $\bar{N} \geq 20$ ) では  $\mu=0.3 \sim 0.35$  でほぼ一定値となる。それに対して、二層地盤における  $\mu$  は 0.3～0.35 程度とほぼ一定であり、均一地盤における  $\bar{N} \geq 20$  の範囲の値と概ね一致する。

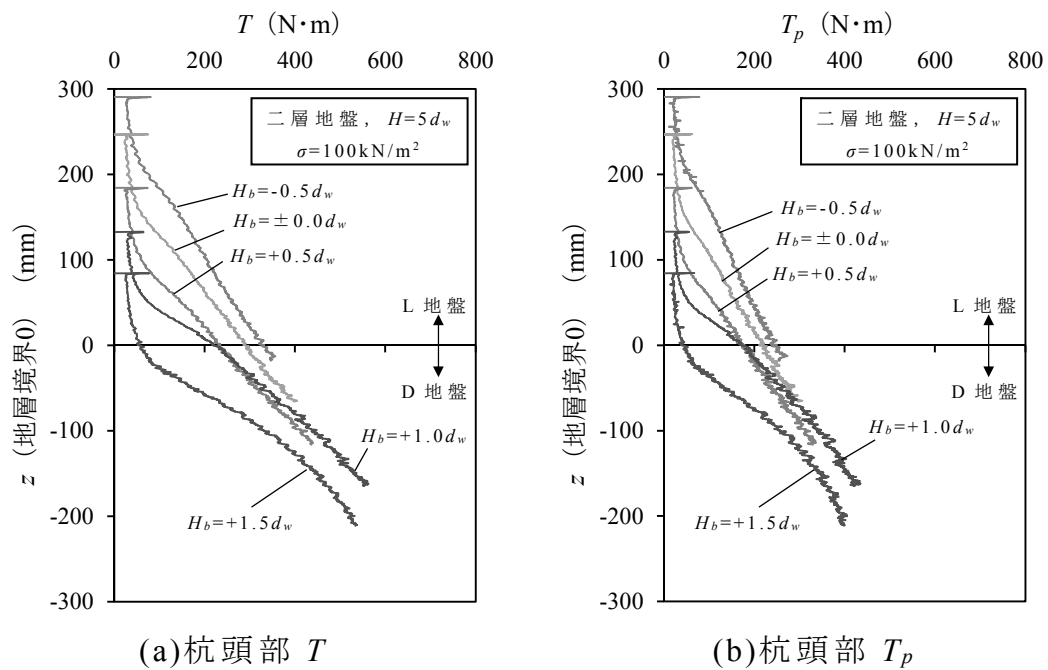


図 3.5 回転トルクに及ぼす支持層への根入れ長さ  $H_b$  の影響

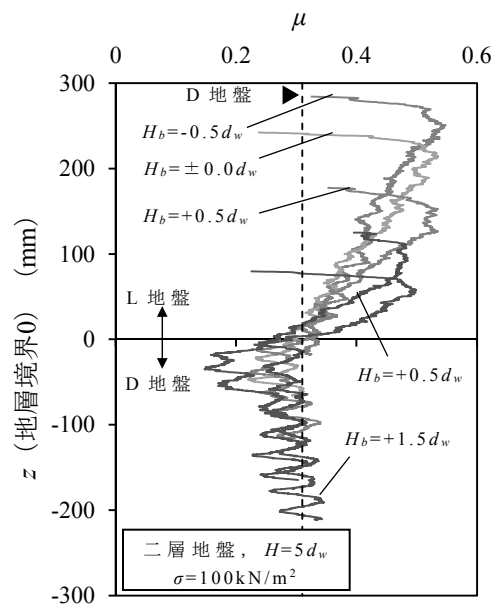


図 3.6 貫入率  $\mu$  に及ぼす支持層への根入れ長さ  $H_b$  の影響

表 3.1 打止め時の回転トルク ( $T$ ,  $T_p$ ) および貫入率  $\mu$

| No. | 実験名称                | 地盤条件 | SWS試験の有無 | 回転トルク(N・m) |            | 貫入率<br>$\mu$ |
|-----|---------------------|------|----------|------------|------------|--------------|
|     |                     |      |          | 杭頭部 $T$    | 杭先端部 $T_p$ |              |
| 1   | D_25 (3dw)          | 均一   | ○        | 126        | 107        | 0.32         |
| 2   | D_25 (5dw)          | 均一   | ○        | 304        | 248        | 0.36         |
| 3   | D_25 (7dw)          | 均一   | ○        | 377        | 277        | 0.34         |
| 4   | D_0                 | 均一   | ○        | 133        | 108        | 0.40         |
| 5   | D_5                 | 均一   | ○        | 153        | 122        | 0.44         |
| 6   | D_50                | 均一   | ○        | 471        | 356        | 0.35         |
| 7   | D_75                | 均一   | ○        | 547        | 416        | 0.34         |
| 8   | D_100               | 均一   | ×        | 545        | 406        | 0.28         |
| 9   | D_150               | 均一   | ×        | 744        | 578        | 0.30         |
| 10  | L_50                | 均一   | ×        | 141        | 95         | 0.52         |
| 11  | L_100               | 均一   | ×        | 231        | 109        | 0.39         |
| 12  | L_150               | 均一   | ×        | 327        | 231        | 0.41         |
| 13  | LD_100 -0.5dw       | 二層   | ○        | 347        | 254        | 0.32         |
| 14  | LD_100 $\pm 0.0$ dw | 二層   | ○        | 396        | 296        | 0.29         |
| 15  | LD_100 +0.5dw       | 二層   | ○        | 437        | 330        | 0.29         |
| 16  | LD_100 +1.0dw       | 二層   | ○        | 552        | 420        | 0.30         |
| 17  | LD_100 +1.5dw       | 二層   | ○        | 534        | 398        | 0.34         |
| 18  | LD_50 $\pm 0.0$ dw  | 二層   | ×        | 270        | 208        | 0.35         |
| 19  | LD_150 $\pm 0.0$ dw | 二層   | ×        | 534        | 417        | 0.31         |
| 20  | LD_50 +1.0dw        | 二層   | ×        | 343        | 264        | 0.37         |
| 21  | LD_150 +1.0dw       | 二層   | ×        | 687        | 531        | 0.30         |

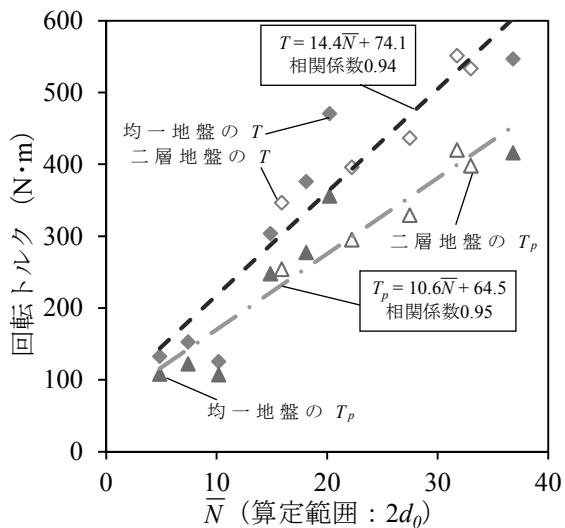


図 3.7 回転トルク  $\sim \bar{N}$  の関係

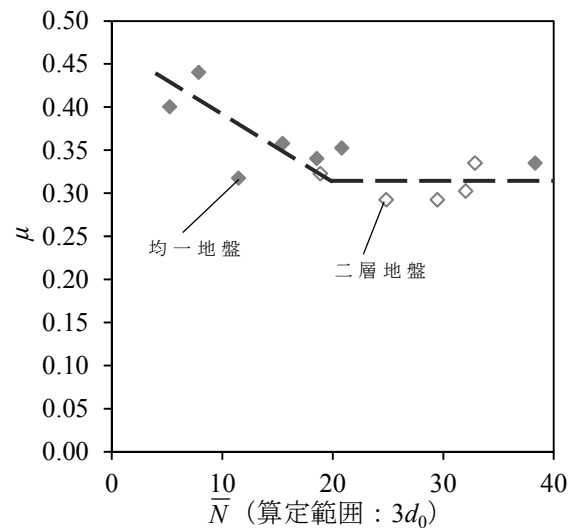


図 3.8 貫入率  $\mu \sim \bar{N}$  の関係

### 3. 4 杭先端面および羽根面の負担荷重

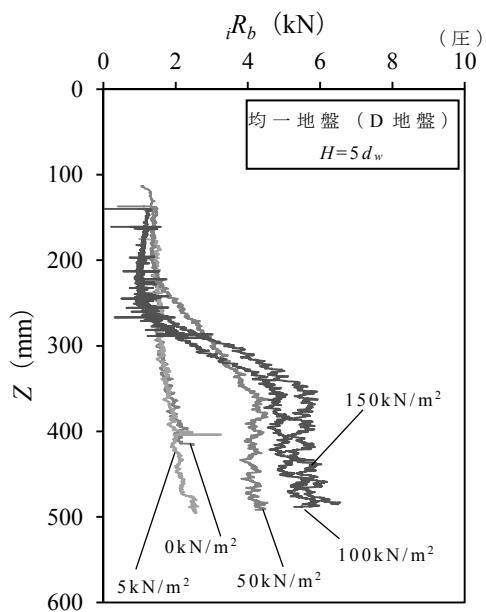
回転貫入杭の施工時には、杭周面において地盤との摩擦で杭体に大きな温度上昇があり、杭体に貼付しているひずみゲージには温度変化による見かけひずみが生じる。そのため、施工時の杭体負担荷重は事前に行った温度較正試験より得られた較正係数を用いて、見かけひずみを除去した上で算出した。なお、上記の温度校正試験が不十分な模型杭Ⅰを利用した実験で、杭体温度が温度校正を要する温度（30℃）以上に達した実験（実験モデル：D\_25, D\_25（7dw）および D\_75）は、本節での分析の対象外とした。

#### （1）均一地盤の場合

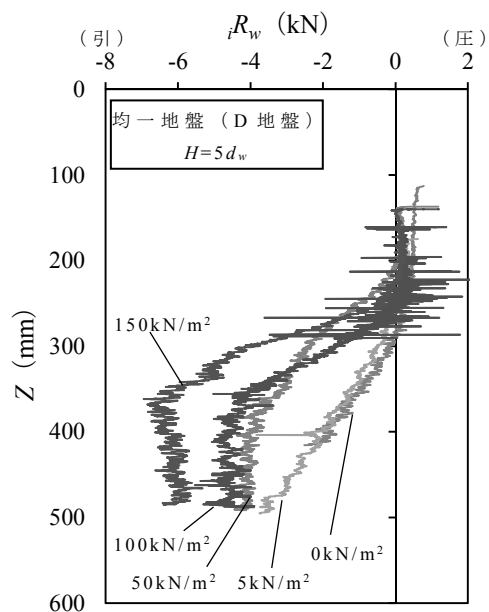
図 3.9 に上載圧を  $\sigma=0\sim150\text{kN/m}^2$  と変化させた密な D 地盤の実験について、施工時における杭先端面の抵抗力  $iR_b$  および羽根面の推進力  $iR_w$  と貫入深度  $Z$  の関係を示す。上載圧の小さい  $\sigma=0\sim5\text{kN/m}^2$  のモデルでは、 $Z$  に比例して  $iR_b$  と  $iR_w$  が増加する。それに対して、 $\sigma=50\sim150\text{kN/m}^2$  のモデルでは、 $iR_b$  と  $iR_w$  が  $Z=225\sim275\text{mm}$  以降に定常状態になっている。この状態での  $iR_b$  と  $iR_w$  は  $\sigma$  が大きい程増大する傾向がある。

図 3.10 に密な D 地盤および緩い L 地盤の実験について、 $iR_b$  および  $iR_w$  と  $Z$  の関係を示す。L 地盤では貫入に伴う  $iR_b$  や  $iR_w$  の増加が緩やかであり、定常状態に達する深度が明確に表れない傾向がある。



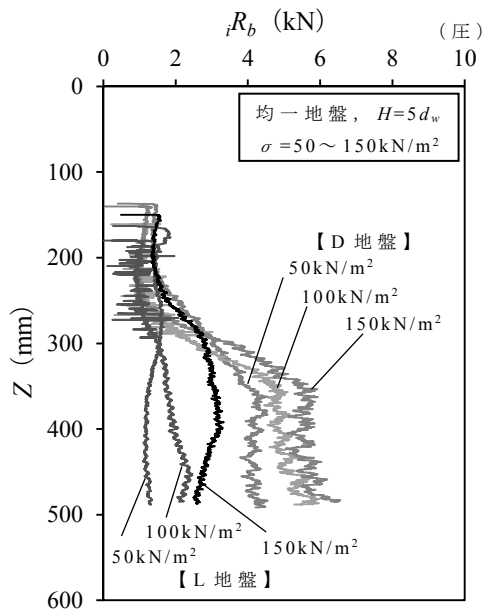


(a) 杭先端部の抵抗力  $iR_b$

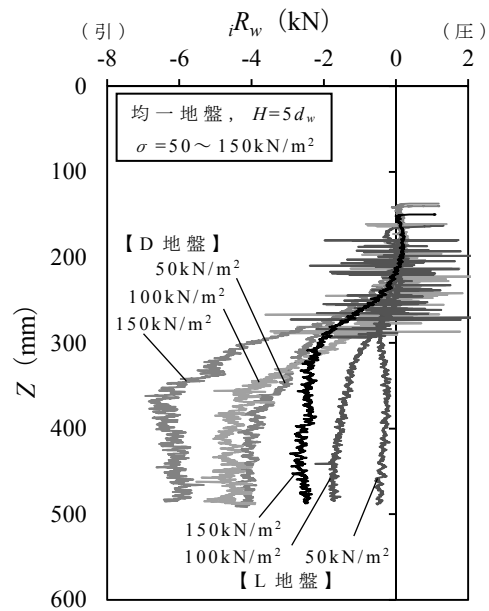


(b) 羽根面の推進力  $iR_w$

図 3.9 杭体各部の負担荷重に及ぼす上載圧  $\sigma$  の影響



(a) 杭先端部の抵抗力  $iR_b$



(b) 羽根面の推進力  $iR_w$

図 3.10 杭体各部の負担荷重に及ぼす地盤の密度の影響

## (2) 二層地盤の場合

図 3.11 に支持層への根入れ長さ  $H_b$  を  $-0.5d_w \sim +1.5d_w$  と変化させた実験について，杭先端面の抵抗力  $iR_b$  および羽根面の推進力  $iR_w$  と貫入深度  $z$  の関係を示す．図中の破線および一点鎖線は，上載圧  $\sigma=100\text{kN/m}^2$  とした密な D 地盤および緩い L 地盤の  $200\text{mm}$  貫入以降における  $iR_b$  および  $iR_w$  の平均値である． $iR_b$  および  $iR_w$  は施工開始時に支持層上端からの距離が十分に取れない  $H_b=+1.5d_w$  のモデルを除き， $100\text{mm}$  程度貫入した時点から圧縮および引張側へ増加し，支持層到達時にはいずれの実験モデルも同程度の値となる．その後は支持層への根入れの増加に伴い一定の増加割合でそれぞれ増加している．施工開始時に支持層上端からの距離が十分に取れている  $H_b=-0.5d_w \sim +1.0d_w$  のモデルに着目すると， $iR_b$  および  $iR_w$  は杭先端面が支持層よりも  $50 \sim 150\text{mm}$  上方に達した時点で L 地盤の値よりも大きく，支持層到達時には L 地盤の値の約 1.8 倍となり，下部の D 地盤（支持層）の影響を受けていることが確認された．また，打止め時の  $iR_b$  および  $iR_w$  はいずれも D 地盤の値と同程度であり，深さ方向の影響はほとんど生じないことが分かる．

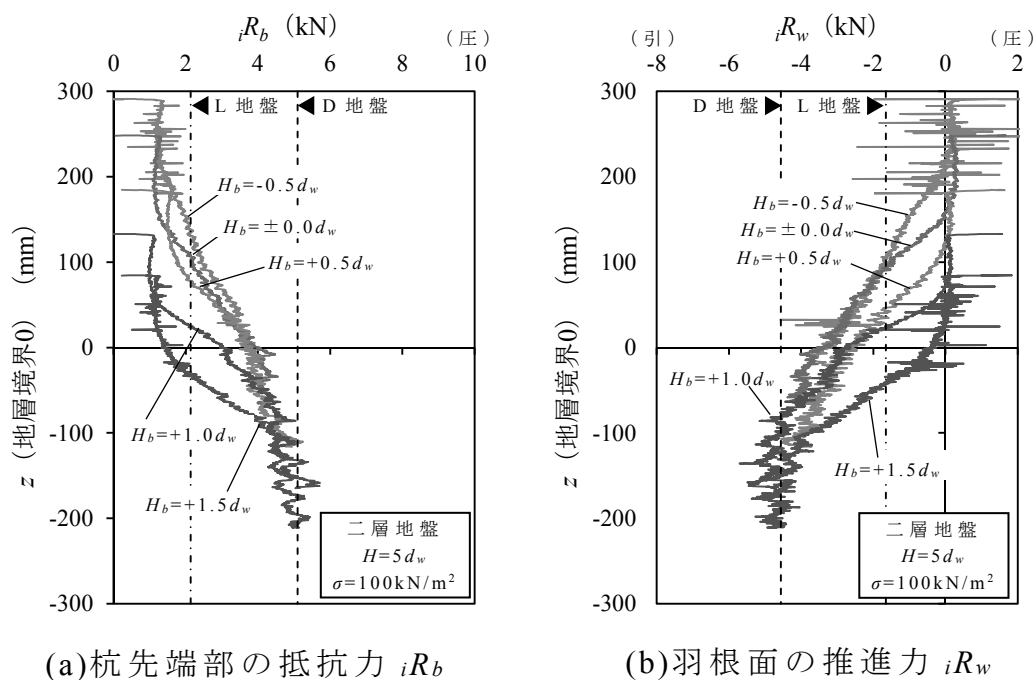


図 3.11 支持層への根入れ長さ ( $H_b=-0.5d_w \sim +1.5d_w$ ) の影響

### (3) 杭頭トルクと杭体各部の負担荷重の関係

ここでは、実現場で一般に計測管理する杭頭部の回転トルク  $T$  に着目して、施工時における杭先端面の抵抗力  $iR_b$  および羽根面の推進力  $iR_w$  との関係を図 3.12 および図 3.13 に示す。 $iR_b$  および  $iR_w$  は均一地盤および二層地盤共に  $T$  の増大に伴って線形に増加し、これらを一次式で近似した時の相関係数は 0.95 以上である。地盤条件に関わらず近似直線式の傾きや切片も概ね一致する。従って、杭頭部の回転トルク  $T$  から杭先端面の抵抗力  $iR_b$  および羽根面の推進力  $iR_w$  が推定できることが示唆された。なお、貫入初期の  $T$  が小さい領域において  $iR_w$  が安定していないのは、文献<sup>9)</sup>で指摘されている羽根刃先の水平抵抗によって杭の中心が円を描きながら貫入するためである。

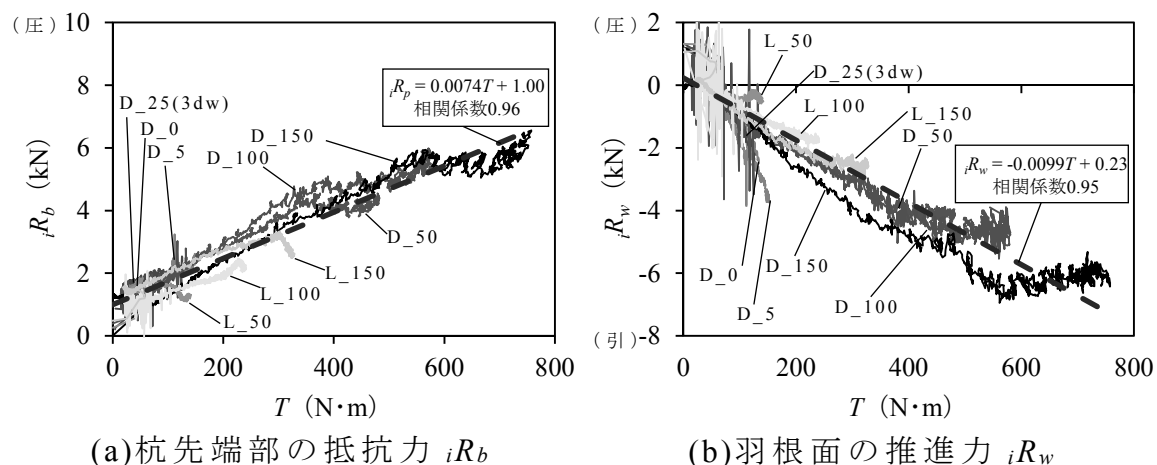


図 3.12 杭頭部の回転トルク  $T$ ～杭体各部の負担荷重（均一地盤）

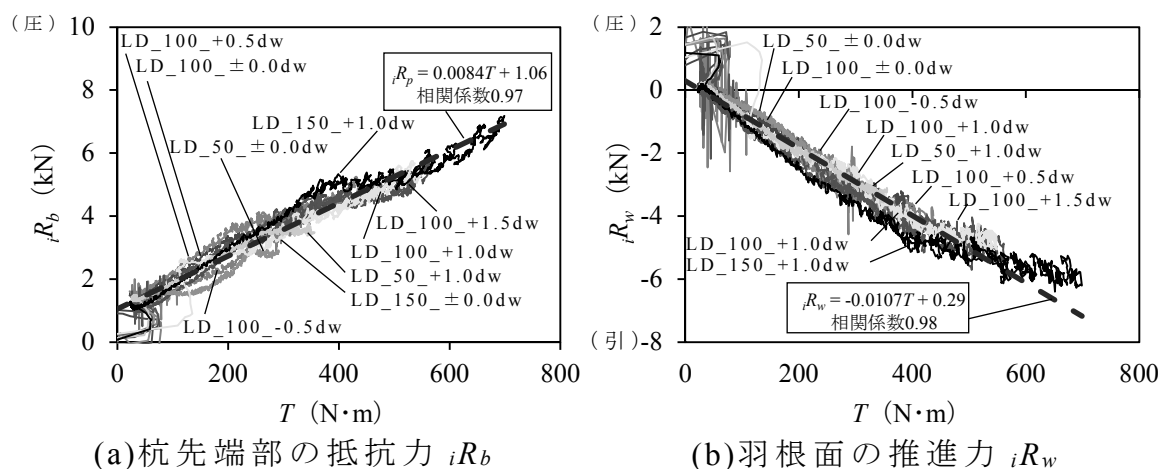
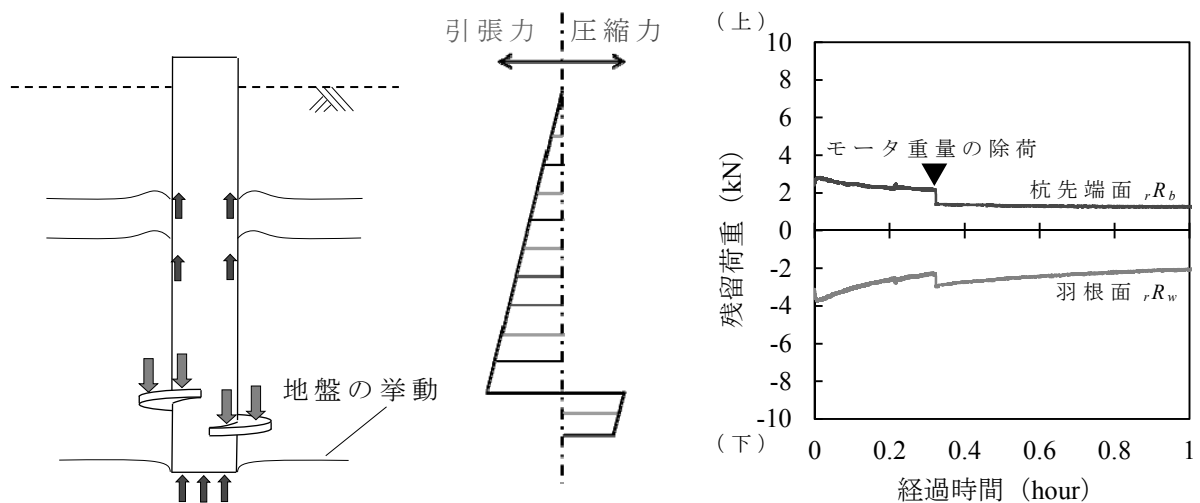


図 3.13 杭頭部の回転トルク  $T$ ～杭体各部の負担荷重（二層地盤）

### 3. 5 杭体各部の残留荷重

回転貫入杭は施工終了後に羽根がアンカーの役割を果たすことから、杭体各部に図 3.14 のような外力<sup>12)</sup>が作用する。地盤の復元力により杭先端面および杭周面に上向きの外力が作用して、それに抵抗する羽根面には下向きの外力が作用する。このような外力を本論文では残留荷重と呼ぶ。

図 3.15 に回転貫入時の結果と同様に、密な D 地盤における D\_50 モデル（上載圧  $\sigma=50\text{kN/m}^2$ ，打止め深度  $H=5d_w$ ）を例にして、杭先端面および羽根面の残留荷重（ $rR_b$  および  $rR_w$ ）と施工終了時点を中心とした経過時間の関係を示す。杭先端面  $rR_b$  は施工終了時点では  $3\text{kN}$  の上向き力が作用するが、時間経過に伴い減少し、1 時間経過時点では  $1.25\text{kN}$  となる。作用方向は異なるものの羽根面  $rR_w$  にも同様の傾向が見られる。なお、同図中の 0.3hour 付近に負担荷重が変化しているのは、モータ重量を除荷した影響である。



(a)模式図

(b)軸力分布

図 3.15 残留荷重の推移

(D\_50 モデル)

図 3.14 残留荷重の概念図

表 3.2 に各実験における杭体各部の残留荷重(杭先端面  $rR_b$  および羽根面  $rR_w$ )，図 3.16 に  $rR_b$  および  $rR_w$  と  $\bar{N}$  の関係を示す．それぞれの  $\bar{N}$  の算出区間は残留荷重の発生が杭周辺地盤の上向きへの復元力と羽根面のアンカー抵抗によることから，打止め時の杭先端面から下方向に  $3d_0$  および羽根面から上方向に  $3d_w$  とした． $rR_b$  および  $rR_w$  は，均一地盤では  $\bar{N}$  に比例して増大するのに対して，二層地盤では  $\bar{N}$  による影響が小さくほぼ一定値を示す傾向がある．

表 3.2 残留荷重の一覧

| No. | 実験名称          | 地盤条件 | SWS試験の有無 | 負担荷重 (kN)   |            |
|-----|---------------|------|----------|-------------|------------|
|     |               |      |          | 杭先端面 $rR_b$ | 羽根面 $rR_w$ |
| 1   | D 25 (3dw)    | 均一   | ○        | 2.38        | -2.24      |
| 2   | D 25 (5dw)    | 均一   | ○        | -           | -          |
| 3   | D 25 (7dw)    | 均一   | ○        | -           | -          |
| 4   | D 0           | 均一   | ○        | 2.51        | -2.51      |
| 5   | D 5           | 均一   | ○        | 2.52        | -3.71      |
| 6   | D 50          | 均一   | ○        | 4.20        | -4.12      |
| 7   | D 75          | 均一   | ○        | -           | -          |
| 8   | D 100         | 均一   | ×        | 5.28        | -3.90      |
| 9   | D 150         | 均一   | ×        | 6.49        | -6.34      |
| 10  | L 50          | 均一   | ×        | 1.31        | -0.52      |
| 11  | L 100         | 均一   | ×        | 2.09        | -1.70      |
| 12  | L 150         | 均一   | ×        | 2.60        | -2.45      |
| 13  | LD 100 -0.5dw | 二層   | ○        | 3.76        | -3.49      |
| 14  | LD 100 ±0.0dw | 二層   | ○        | 4.64        | -3.74      |
| 15  | LD 100 +0.5dw | 二層   | ○        | 4.94        | -3.99      |
| 16  | LD 100 +1.0dw | 二層   | ○        | 5.04        | -4.71      |
| 17  | LD 100 +1.5dw | 二層   | ○        | 5.08        | -4.87      |
| 18  | LD 50 ±0.0dw  | 二層   | ×        | 2.70        | -2.44      |
| 19  | LD 150 ±0.0dw | 二層   | ×        | 5.31        | -4.89      |
| 20  | LD 50 +1.0dw  | 二層   | ×        | 3.38        | -3.14      |
| 21  | LD 150 +1.0dw | 二層   | ×        | 7.01        | -5.89      |

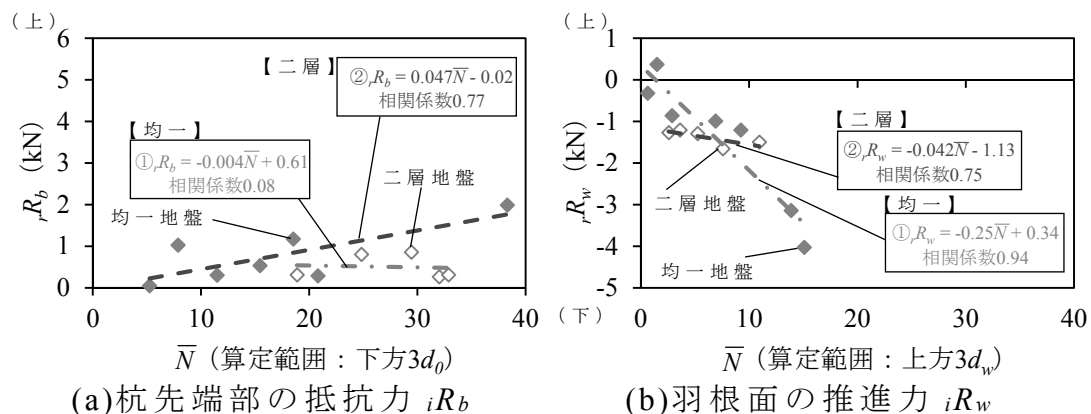


図 3.16 残留荷重～ $\bar{N}$  の関係

### 3. 6 まとめ

本章では，回転貫入杭の施工開始から貫入終了，更に打ち止めから 1～3 時間程度経過した時点の杭体挙動を計測し，以下の知見が得られた．

#### a) 杭体各部の回転トルクについて

- ① 杭頭部および杭先端部の回転トルク ( $T$  および  $T_p$ ) は，均一地盤と二層地盤共に地盤の  $\bar{N}$  との相関性があり，同様な一次式で表される．

#### b) 貫入率 $\mu$ について

- ② 貫入開始後，羽根径  $d_w$  程度貫入までの区間で低下した貫入率  $\mu$  は次の  $d_w$  程度貫入までの区間で上昇し，その後は貫入深度にかかわらず一定（定常状態）になる．
- ③ 二層地盤では，杭先端が支持層に達する  $1.5d_w$  程度手前から貫入率  $\mu$  が小さくなって，支持層に達するとほぼ一定になることから支持層の判断が可能である．
- ④ 打止め時の貫入率  $\mu$  は  $\bar{N} < 20$  程度までは  $\bar{N}$  の増大に伴い小さくなるが， $\bar{N} \geq 20$  では  $\mu = 0.3 \sim 0.35$  とほぼ一定である．

#### d) 杭体各部の負担荷重について

- ⑤ 二層地盤の場合，杭先端面の施工時抵抗  $iR_b$  および羽根面の施工時推進力  $iR_w$  は杭先端面が支持層に到達する以前から上昇し，均一地盤モデルの傾向と異なる．支持層到達時の  $iR_b$  および  $iR_w$  は緩い L 地盤モデルの約 1.8 倍であった．
- ⑥ 二層地盤における打止め時の  $iR_b$  および  $iR_w$  は根入れの影響をほとんど受けず，密な D 地盤モデルと同様の値となる．
- ⑦  $iR_b$  および  $iR_w$  は杭頭部の回転トルク  $T$  と相関性があり，均一地盤と二層地盤共に一次式で表される．

#### e) 残留荷重について

- ⑧ 杭先端面および羽根面の残留荷重 ( $rR_b$  および  $rR_w$ ) は  $\bar{N}$  との関係が均一地盤と二層地盤で異なる．均一地盤における  $rR_b$  および  $rR_w$  は  $\bar{N}$  に比例して増大するのに対して，二層地盤では  $\bar{N}$  による影響が小さくほぼ一定値を示す傾向がある．

## 第 4 章

### 引抜き載荷時の挙動

#### 4. 1 まえがき

本章では，載荷開始から杭が大きく引抜ける時点（ $\delta=0.5d_w$ ）までの回転貫入杭の挙動を記述した後，杭体各部（羽根面，杭先端面および杭周面）の引抜き抵抗力度に及ぼす上載圧  $\sigma$  および支持層への根入れ長さ  $H_b$  の考察に基づいて，回転貫入杭の引抜き抵抗機構について検討する．

#### 4. 2 杭頭荷重および杭体各部の引抜き抵抗力度と引抜き変位の関係 (1) 均一地盤の場合

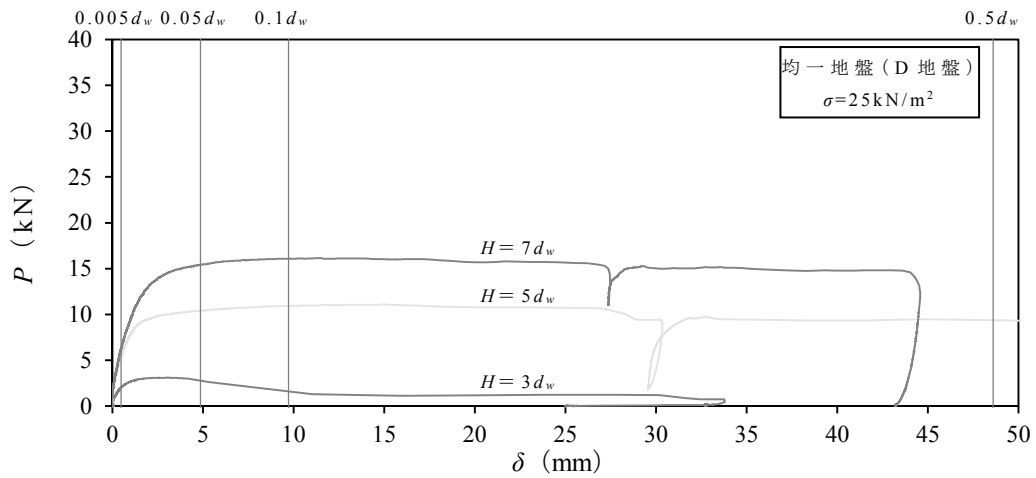
図 4.1 は杭頭部の引抜き荷重  $P$  と引抜き変位  $\delta$  の関係であり，載荷初期の  $\delta=10\text{mm}$  ( $\div 0.1d_w$ ) までを拡大したものを図 4.2 に示した．

上載圧を  $\sigma=25\text{kN/m}^2$  として打止め深度を  $H=3d_w$ ， $5d_w$ ， $7d_w$  と変化させた(a)を見ると，最大引抜き荷重は  $H$  が深いほど大きい． $H=5d_w$  および  $H=7d_w$  のモデルにおける  $P$  は  $\delta=0.05d_w \sim 0.1d_w$  時に最大となり， $\delta=0.5d_w$  時まで概ね一定に推移している． $H=3d_w$  モデルでは  $\delta=2\text{mm}$  付近で  $P$  が最大となるものの，値そのものが極めて小さい上にその後の減少が激しいことから，コーン破壊状態になったことが示唆される．

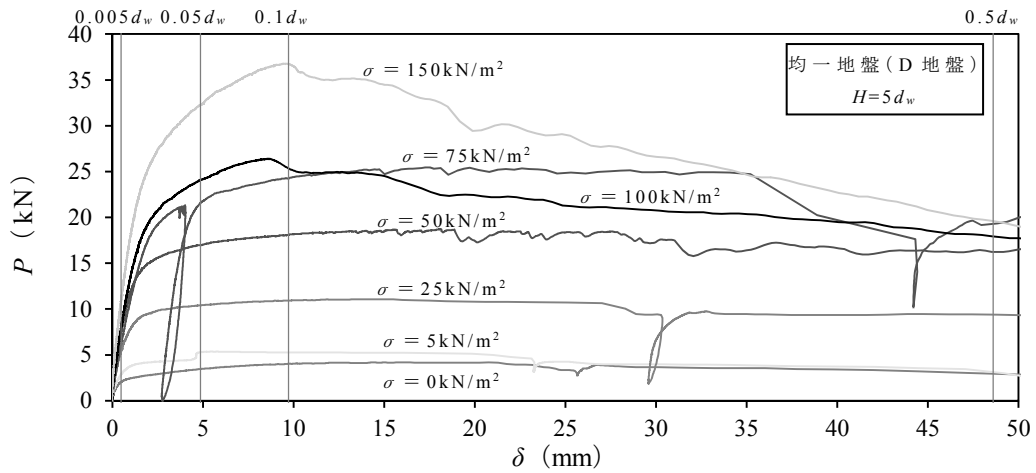
打止め深度を  $H=5d_w$  として上載圧を  $\sigma=0 \sim 150\text{kN/m}^2$  と変化させた(b)を見ると， $P$  はいずれも  $\delta=0.05d_w \sim 0.1d_w$  時に最大となっており，概ね  $\sigma$  に比例して増大している．また， $\sigma$  が大きい  $100 \sim 150\text{kN/m}^2$  のモデルの  $P$  は最大となった後に減少する傾向が顕著である．

密な D 地盤と緩い L 地盤を比較した(c)を見ると，いずれの上載圧 ( $\sigma=50$ ， $100$  および  $150\text{kN/m}^2$ ) の場合にも， $P$  は D 地盤の方が L 地盤よりも大きく，最大値を示した後の減少傾向が顕著である．

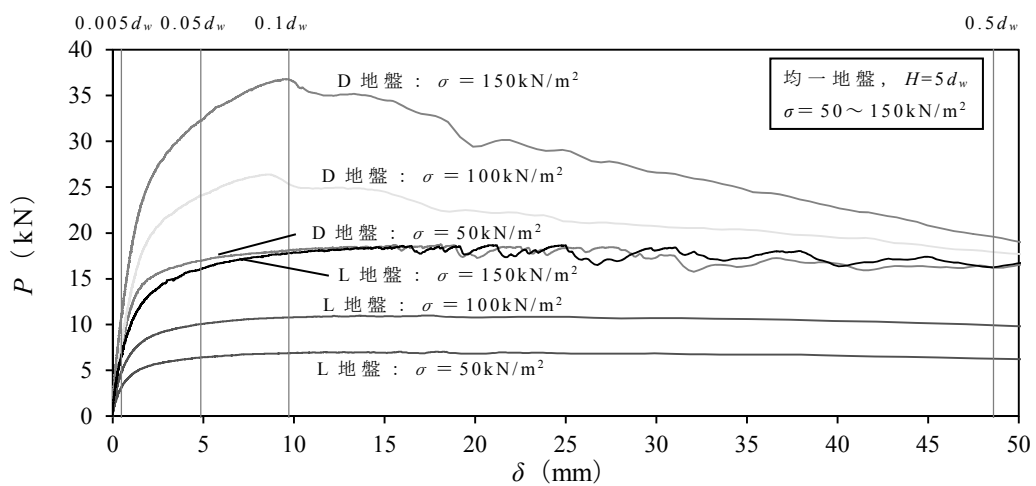
上記の杭頭部の引抜き荷重  $P$  の挙動は，変位の増大に伴って単調に増大する押込み荷重時の挙動<sup>12),13)</sup>とは大きく異なる．



(a) 打止め深度 ( $H = 3d_w, 5d_w, 7d_w$ ) の影響



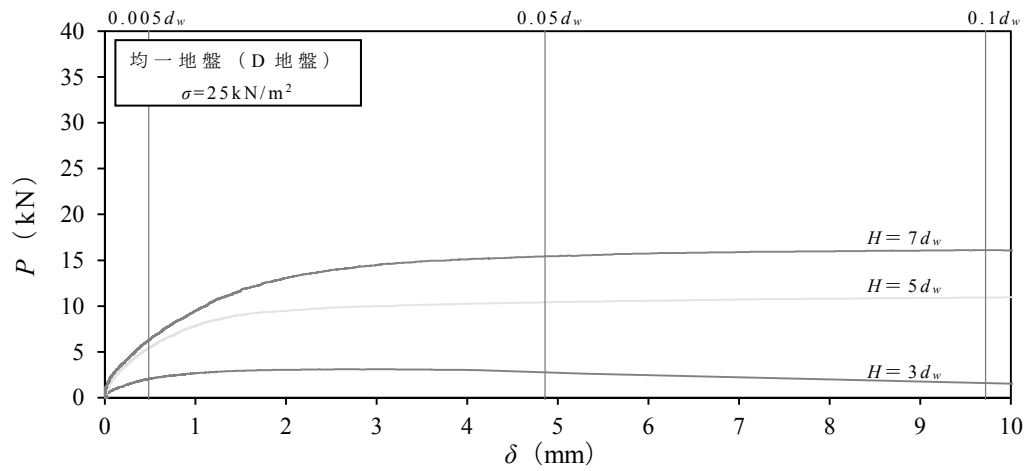
(b) 上載圧 ( $\sigma = 0 \sim 150 \text{ kN/m}^2$ ) の影響



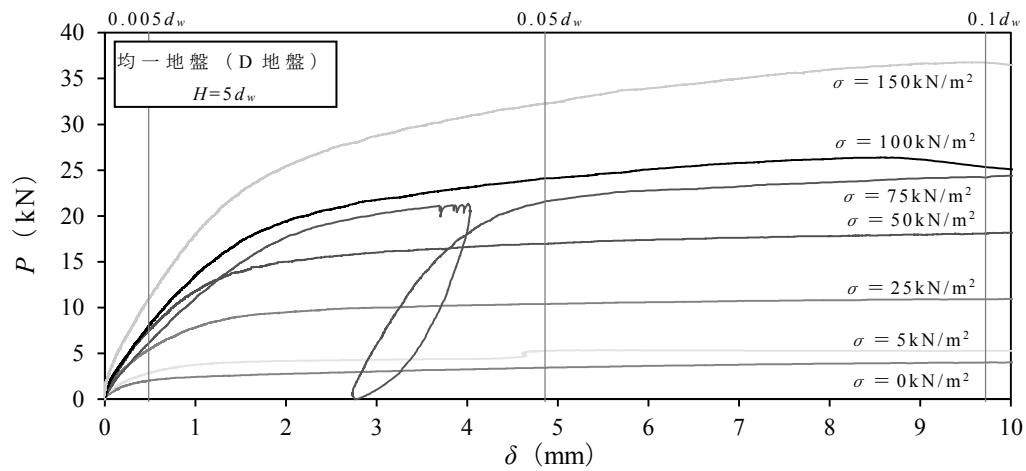
(c) 地盤の相対密度 (D 地盤・L 地盤) の影響

図 4.1 杭頭部の引抜き荷重  $P \sim$  引抜き変位  $\delta$  の関係

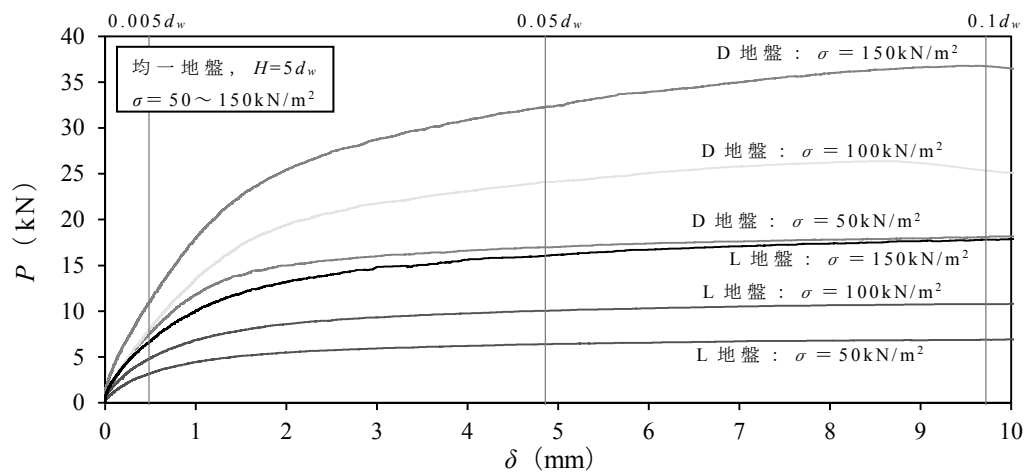




(a) 打止め深度 ( $H = 3d_w, 5d_w, 7d_w$ ) の影響



(b) 上載圧 ( $\sigma = 0 \sim 150 \text{ kN/m}^2$ ) の影響



(c) 地盤の相対密度 (D 地盤・L 地盤) の影響

図 4.2 杭頭部の引抜き荷重  $P \sim$  引抜き変位  $\delta$  の関係 (載荷初期)

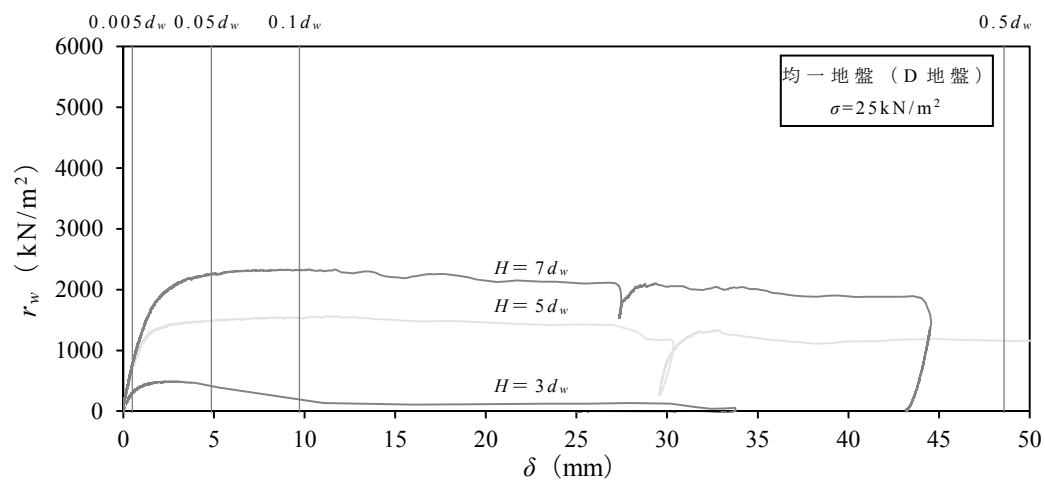
図 4.3 は羽根面の引抜き抵抗  $R_w$  を羽根面の面積  $A_w$  で除した  $r_w$  と引抜き変位  $\delta$  の関係であり， 載荷初期の  $\delta=10\text{mm}$  までを拡大したものを図 4.4 に示した． いずれも， 載荷初期においては前述の杭頭部の引抜き荷重における図 4.1～図 4.2 と同様の傾向が見られる． ただし， 上載圧  $\sigma=100\text{kN/m}^2$  および  $150\text{kN/m}^2$  とした D 地盤モデルにおいては，  $r_w$  のピーク後の減少挙動が杭頭荷重  $P$  よりも顕著である．

図 4.5 は杭先端面の引抜き抵抗  $R_b$  を杭先端面の面積  $A_b$  で除した  $r_b$  と引抜き変位  $\delta$  の関係であり， 載荷初期の  $\delta=10\text{mm}$  までを拡大したものを図 4.6 に示した．

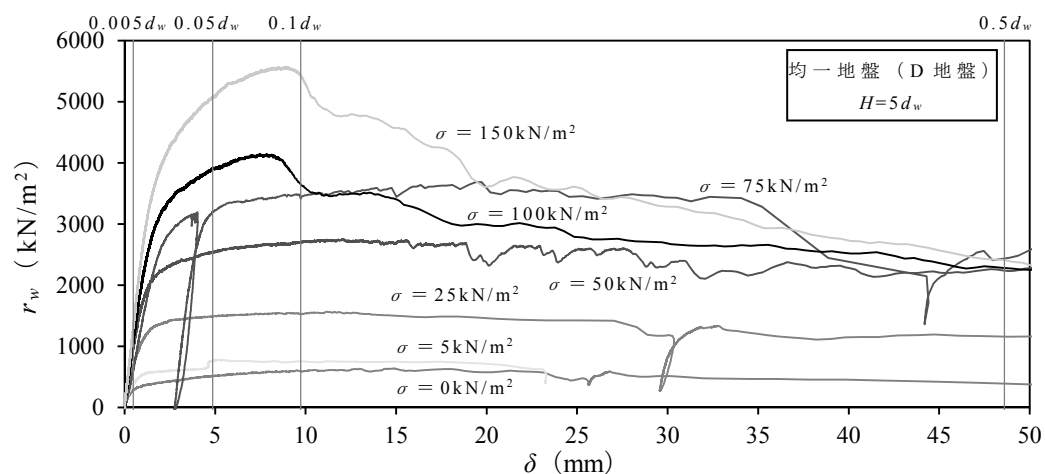
打止め深度を  $H=3d_w$ ，  $5d_w$ ，  $7d_w$  と変化させた(a)を見ると，  $r_b$  はいずれも引抜き変位が小さい  $\delta=0.005d_w$  付近で最大となっている．

上載圧を  $\sigma=0\sim150\text{kN/m}^2$  と変化させた(b)を見ると，  $\sigma=75\text{kN/m}^2$  モデルを除いて  $\delta=0.005d_w$  付近で  $r_b$  が最大となり， その後一旦減少するものの再び増加する傾向がある． この引抜き抵抗の減少は， 回転貫入後に生じた上向きの残留荷重の解放によるもので， その後の  $r_b$  の上昇は引抜き変位の増大に伴う負圧（サクション）の和の影響と推察している． なお，  $\delta=0.1d_w$  以降は多少の増減はあるものの一定に推移している．

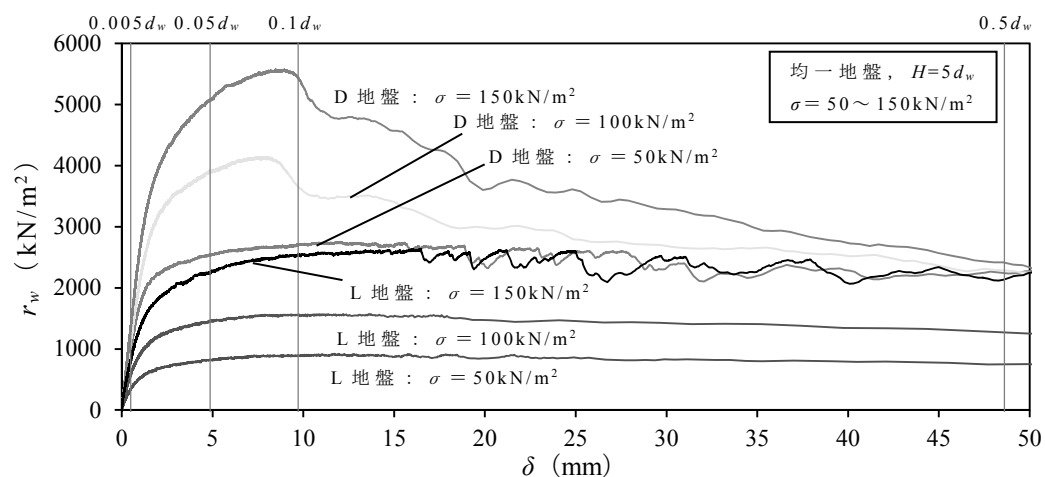
密な D 地盤と緩い L 地盤を比較した(c)を見ると， D 地盤の方が L 地盤よりも  $r_b$  が最大となった後の減少傾向が顕著である． しかし，  $\sigma=100\text{kN/m}^2$  および  $150\text{kN/m}^2$  のモデルでは， D 地盤と L 地盤による  $r_b$  の差異は小さい．



(a) 打止め深度 ( $H=3d_w, 5d_w, 7d_w$ ) の影響

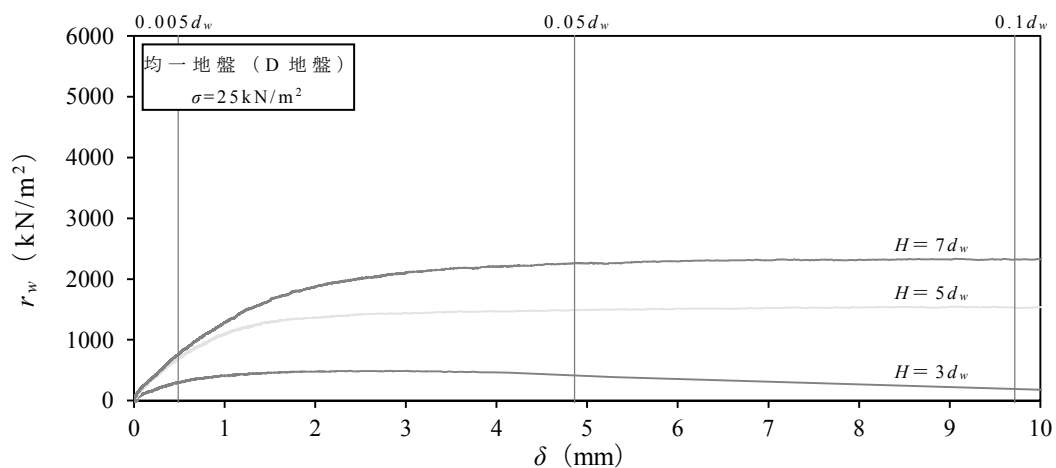


(b) 上載圧 ( $\sigma = 0 \sim 150 \text{ kN/m}^2$ ) の影響

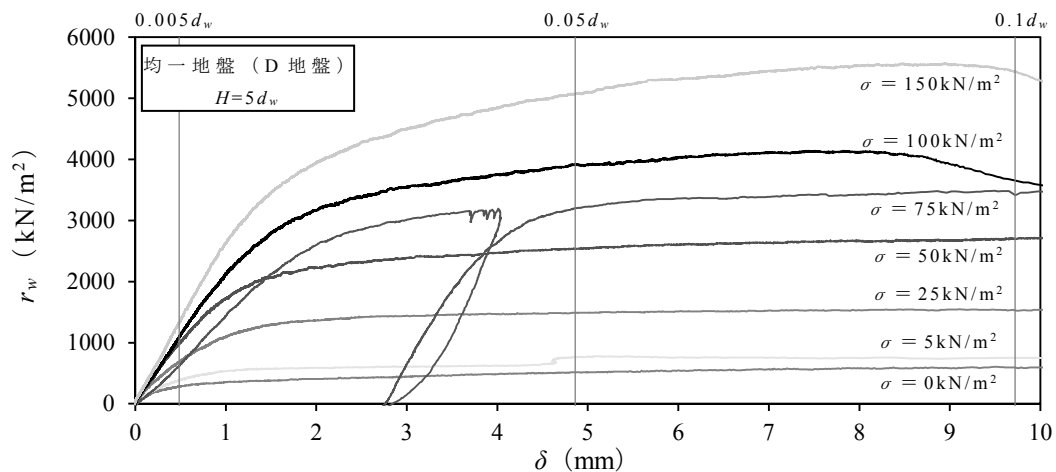


(c) 地盤の相対密度 (D 地盤・L 地盤) の影響

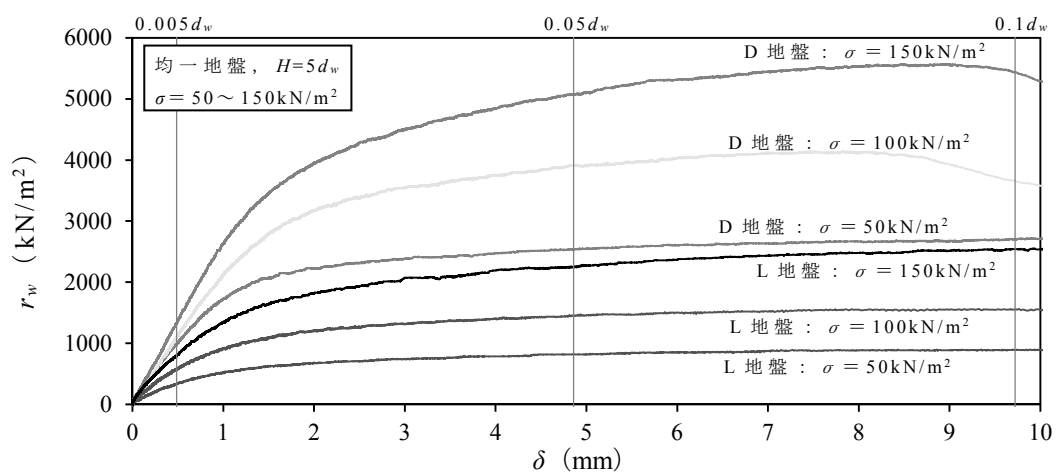
図 4.3 羽根面の引抜き抵抗力度  $r_w$  ~ 引抜き変位  $\delta$  の関係



(a) 打止め深度 ( $H = 3d_w, 5d_w, 7d_w$ ) の影響

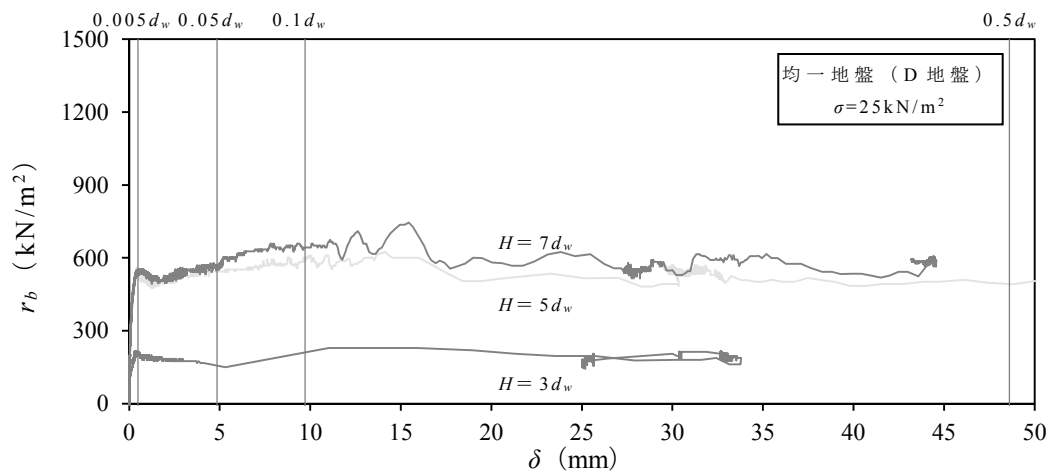


(b) 上載圧 ( $\sigma = 0 \sim 150 \text{ kN/m}^2$ ) の影響

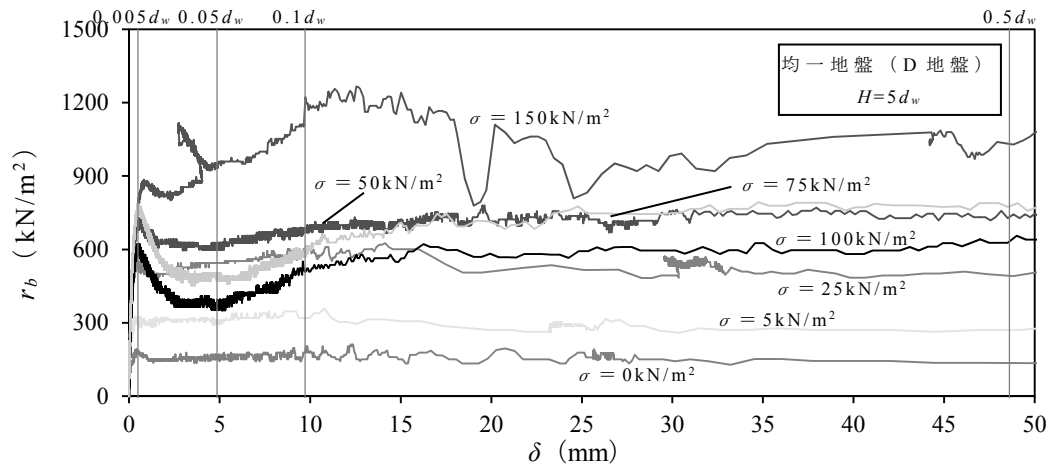


(c) 地盤の相対密度 (D 地盤・L 地盤) の影響

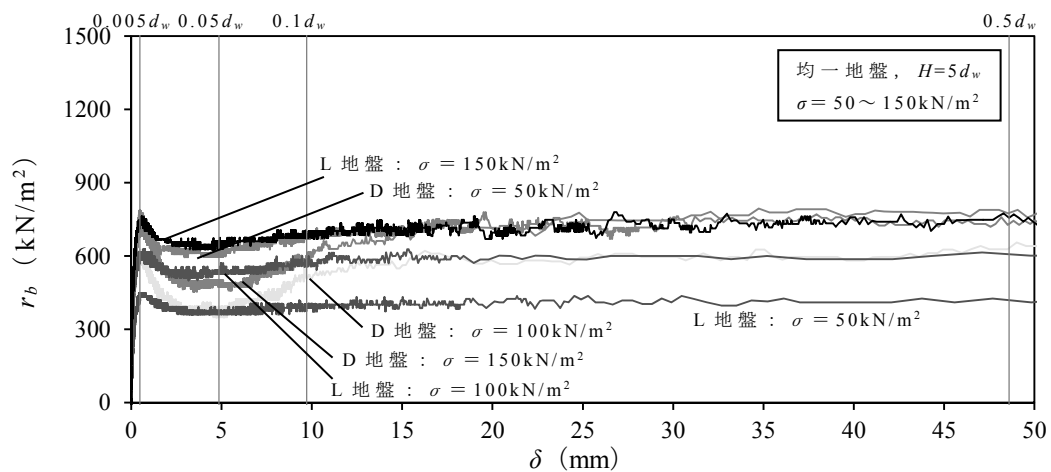
図 4.4 羽根面の引抜き抵抗力度  $r_w \sim$  引抜き変位  $\delta$  (载荷初期) の関係



(a) 打止め深度 ( $H = 3d_w, 5d_w, 7d_w$ ) の影響

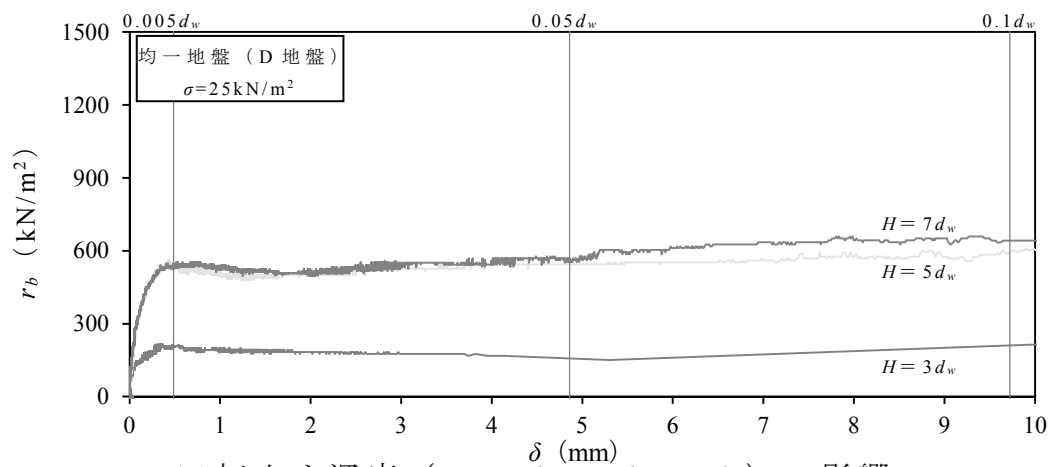


(b) 上載圧 ( $\sigma = 0 \sim 150 \text{ kN/m}^2$ ) の影響

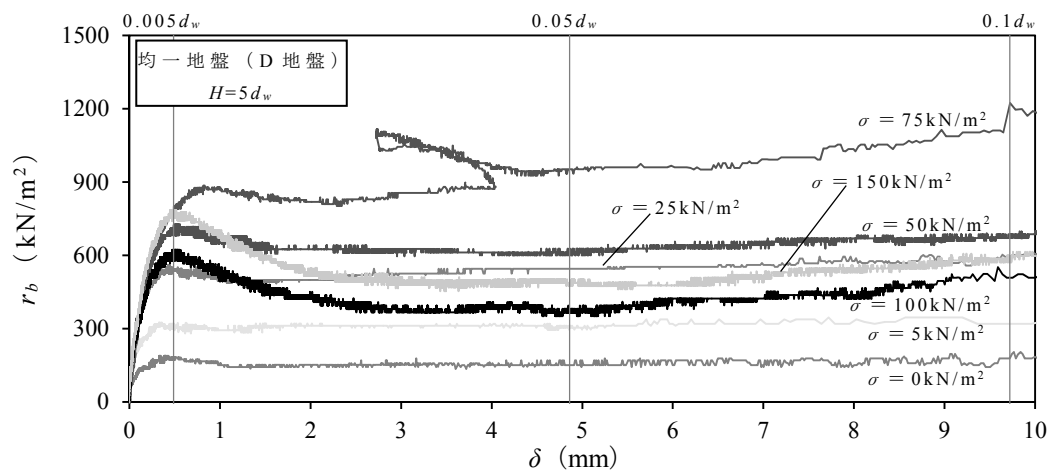


(c) 地盤の相対密度 (D 地盤・L 地盤) の影響

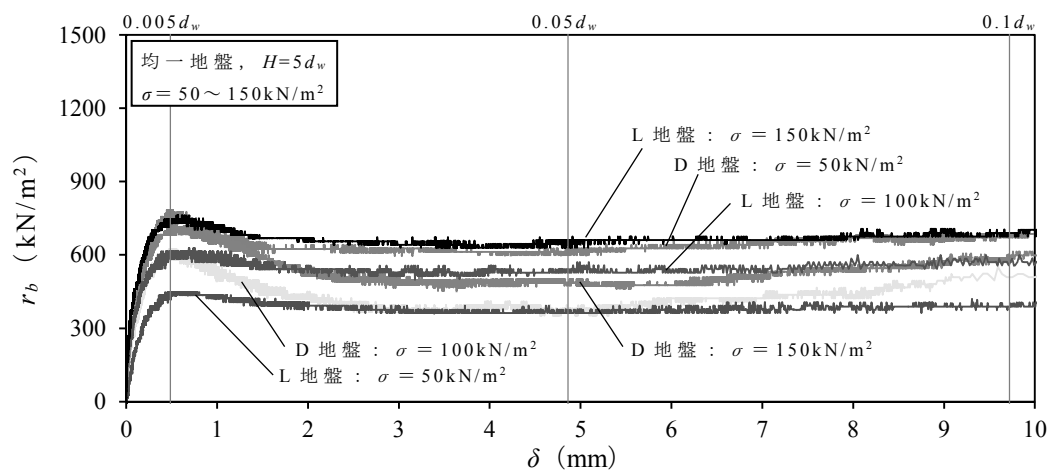
図 4.5 杭先端面の引抜き抵抗力度  $r_b \sim$  引抜き変位  $\delta$  の関係



(a) 打止め深度 ( $H = 3d_w, 5d_w, 7d_w$ ) の影響



(b) 上載圧 ( $\sigma = 0 \sim 150 \text{ kN/m}^2$ ) の影響



(c) 地盤の相対密度 (D 地盤・L 地盤) の影響

図 4.6 杭先端面の引抜き抵抗力度  $r_b \sim$  引抜き変位  $\delta$  (载荷初期) の関係

図 4.7 は杭周面の引抜き抵抗  $R_s$  を杭軸部の周面積  $A_s$  で除した  $r_s$  と引抜き変位  $\delta$  の関係であり，载荷初期の  $\delta=10\text{mm}$  までを拡大したものを図 4.8 に示した．

打止め深度  $H$  を変化させた(a)を見ると， $H=5d_w$  および  $7d_w$  の  $r_s$  はほとんど同じである．それに対して， $H=3d_w$  の  $r_s$  は極めて小さいことから，貫入初期における杭中心が円を描く挙動による杭周面地盤の緩みとコーン破壊が生じていることが推察される．

上載圧  $\sigma$  を変化させた(b)を見ると， $\sigma \leq 75\text{kN/m}^2$  のモデルの  $r_s$  は载荷開始直後に急増した後に緩やかに増加する傾向がある．それに対して， $\sigma \geq 100\text{kN/m}^2$  の  $r_s$  は  $\delta=8\sim 10\text{mm}$  付近から再上昇し，その時の  $\delta$  は羽根面の引抜き抵抗力度  $r_w$  が最大となる時と概ね一致することから，羽根面の挙動に連動したものと考えられる．図 4.1 の引抜き荷重  $P \sim$  引抜き変位  $\delta$  関係が比較的なめらかなのは，羽根面の最大荷重後の低下を杭周面荷重で補う作用が働いたためと解釈している．

密な D 地盤と緩い L 地盤を比較した(c)を見ると， $\delta=0.1d_w$  時における D 地盤の  $r_s$  は L 地盤の 2～3 倍程度である．

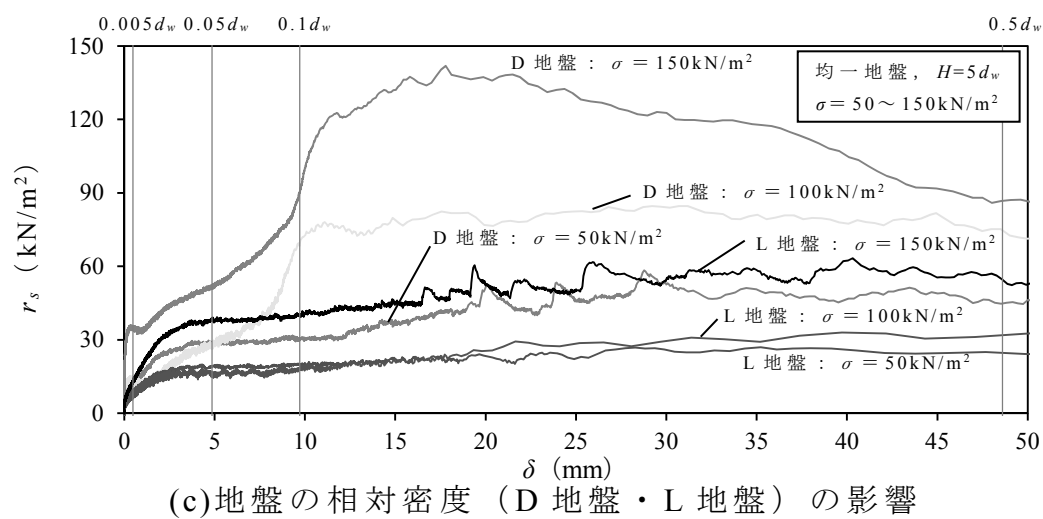
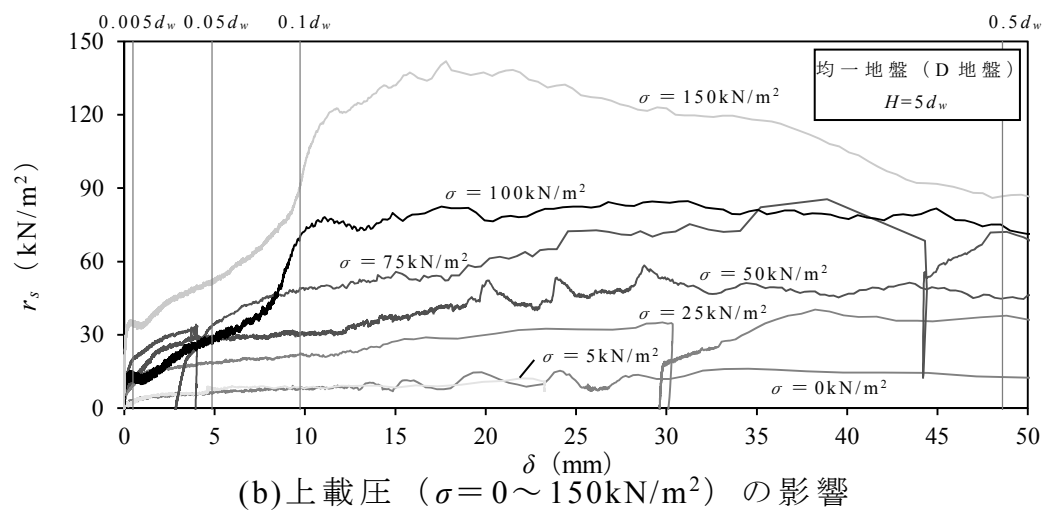
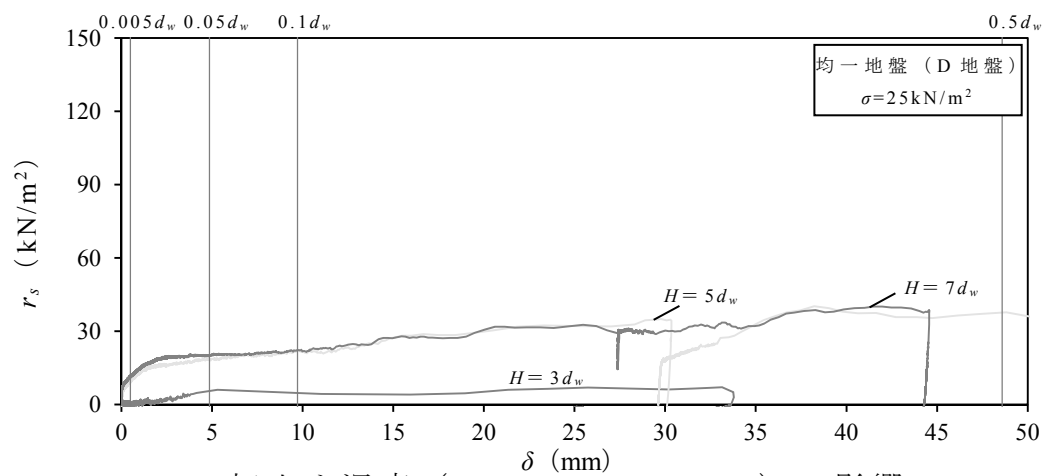
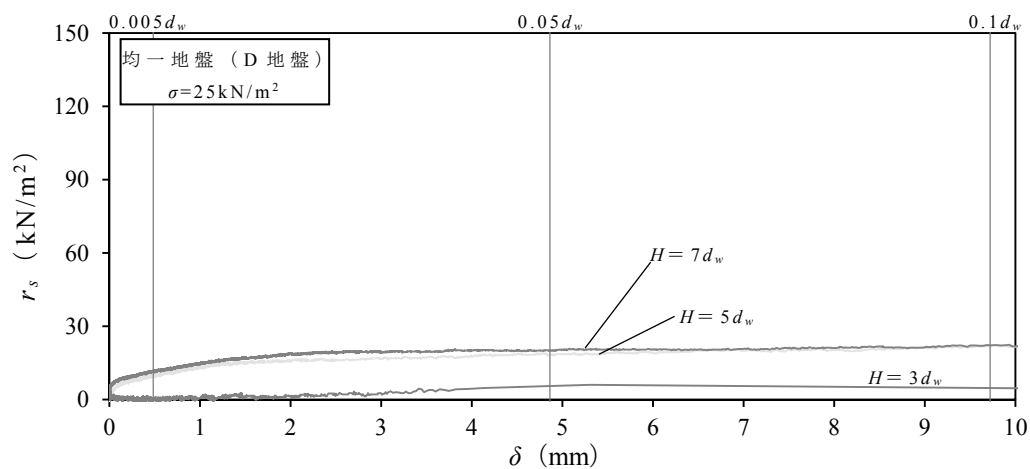
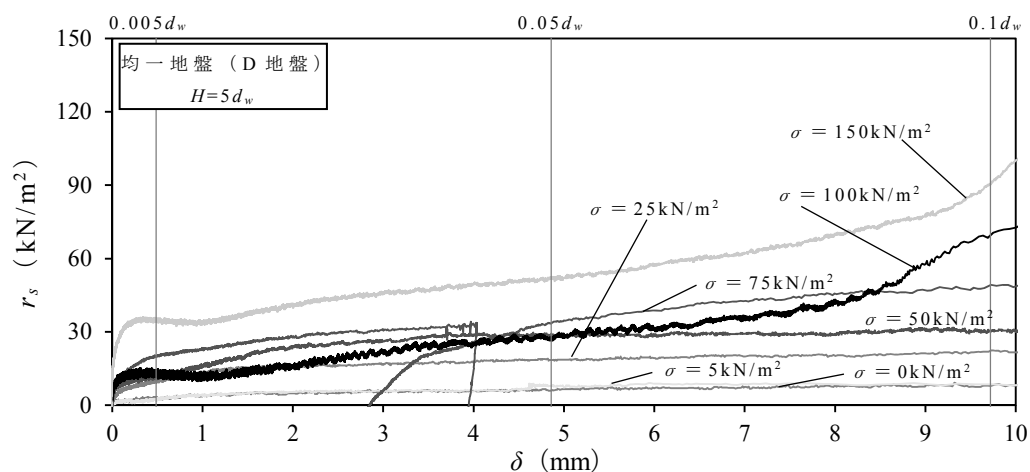


図 4.7 杭周面の引抜き抵抗力度  $r_s$ ～引抜き変位  $\delta$  の関係

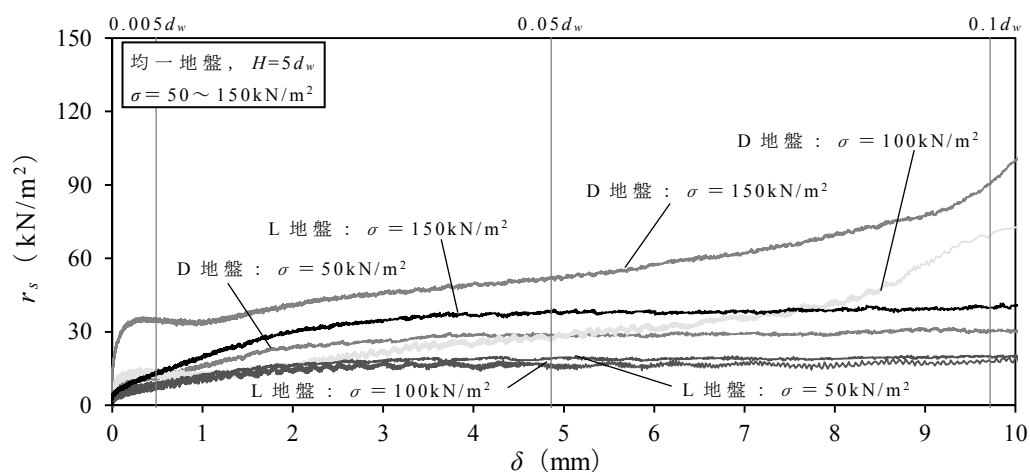




(a) 打止め深度 ( $H=3d_w, 5d_w, 7d_w$ ) の影響



(c) 上載圧 ( $\sigma=0\sim 150\text{kN/m}^2$ ) の影響



(c) 地盤の相対密度 (D 地盤・L 地盤) の影響

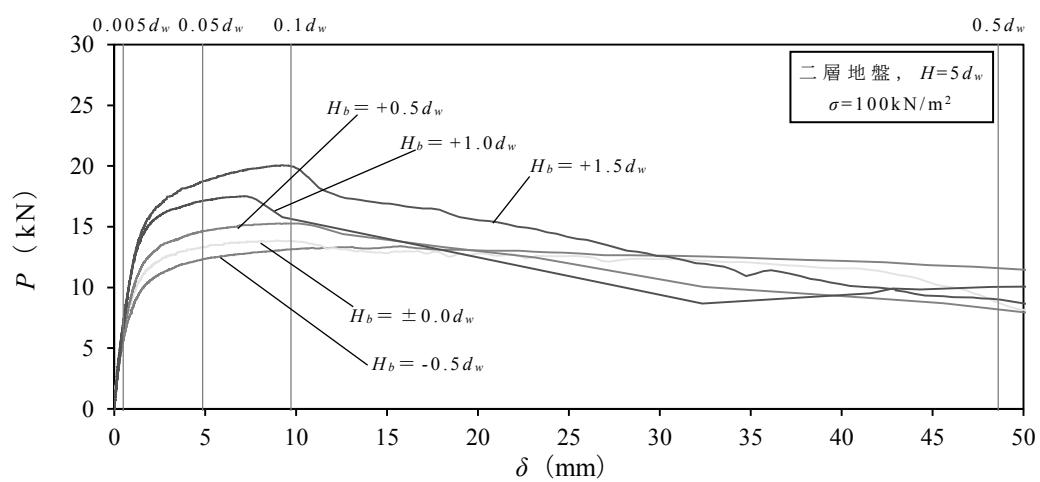
図 4.8 杭周面の引抜き抵抗力度  $r_s$ ～引抜き変位  $\delta$  (载荷初期) の関係

## (2) 二層地盤の場合

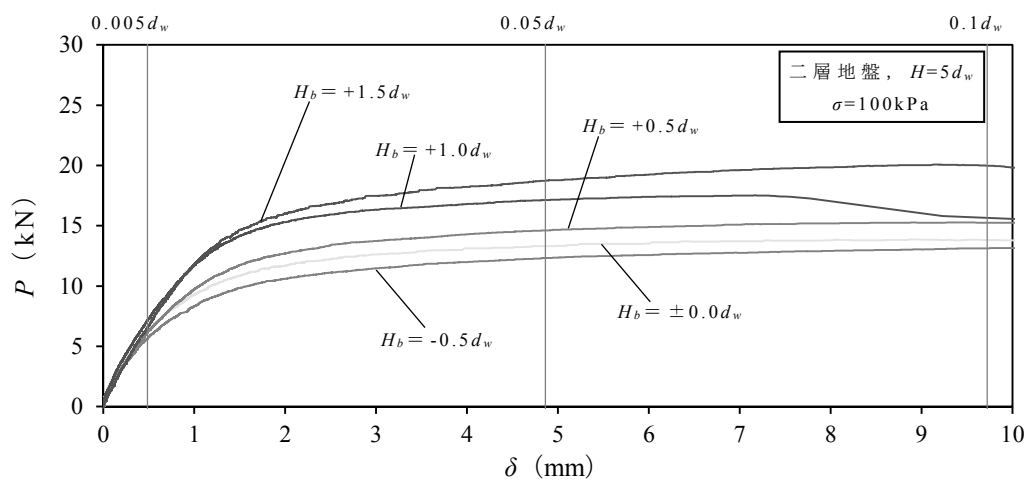
実地盤では支持層となる密な砂層の上に緩い砂層が堆積する例が多いことから，このような二層地盤を対象とした回転貫入杭の引抜き実験結果について考察する．

図 4.9 は，上載圧を  $\sigma=100\text{kN/m}^2$  として支持層への根入れ長さを  $H_b=-0.5d_w \sim +1.5d_w$  と変化させたモデルについて，杭頭部の引抜き荷重  $P$  と引抜き変位  $\delta$  の関係である．載荷開始から  $\delta$  に比例して増大した  $P$  は，最大引抜き荷重の 80% 程度付近から徐々にその増大割合が低下する．最大引抜き荷重に達すると急激に杭が抜け上がって， $P$  は半分程度まで減少する挙動となっている．なお，支持層へ根入れしていない  $H_b=-0.5d_w$  モデルでは，最大となった後も概ね一定の引抜き荷重を維持する傾向がある．これらの挙動は押込み荷重時の場合<sup>12),13)</sup>とは大きく異なる．

図 4.10 は図 4.9 と同様のモデルについて，羽根面，杭先端面および杭周面の引抜き抵抗力度 ( $r_w$ ,  $r_b$  および  $r_s$ ) と引抜き変位  $\delta$  の関係を示したものであり，載荷初期の  $\delta=10\text{mm}$  までを拡大したものを図 4.11 に示した．(a)の  $r_w$  は図 4.9 の杭頭部に比べてピーク後の減少が顕著な傾向がある．(b)の  $r_b$  は極めて小さな変位で最大となった後に一旦減少するものの再び増加している．(c)の  $r_s$  は  $\delta=0.05d_w$  以降に増加する．

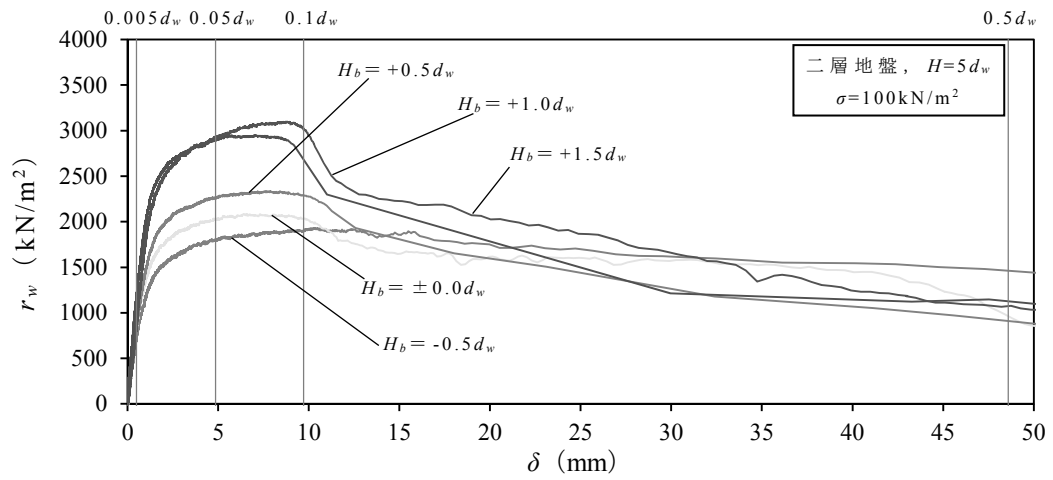


(a)  $\delta=0 \sim 50\text{mm}$  区間

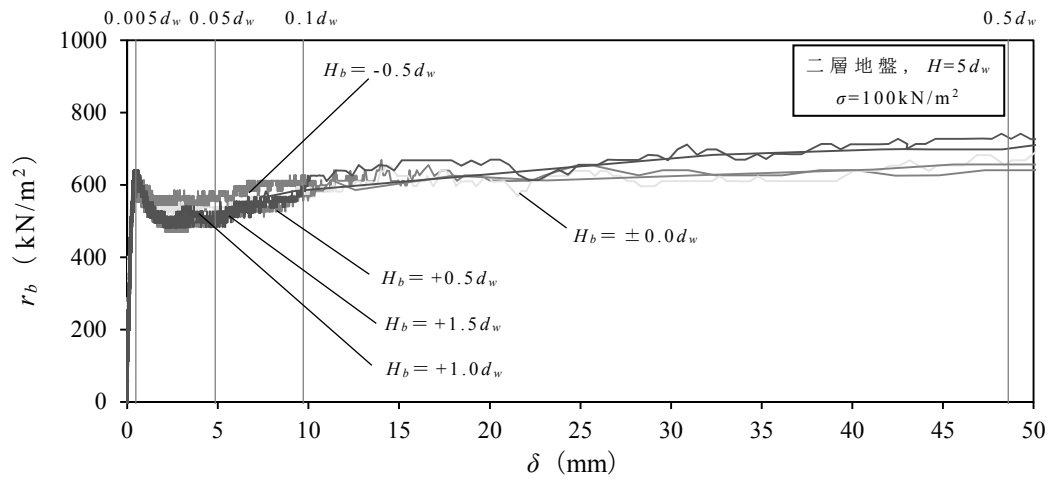


(b)  $\delta=0 \sim 10\text{mm}$  区間

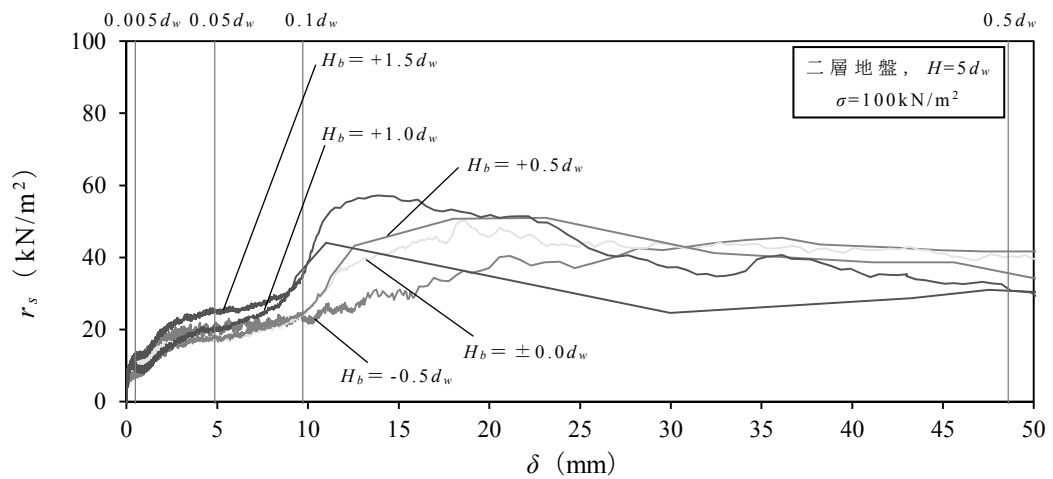
図 4.9 杭頭部の引抜き荷重  $P \sim$  引抜き変位  $\delta$  (二層地盤)



(a)羽根面  $r_w$

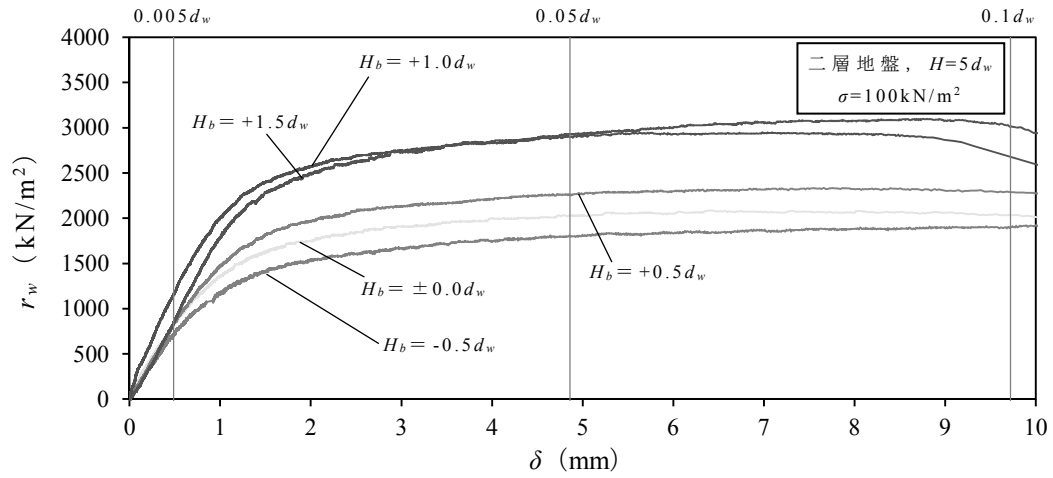


(b)杭先端面  $r_b$

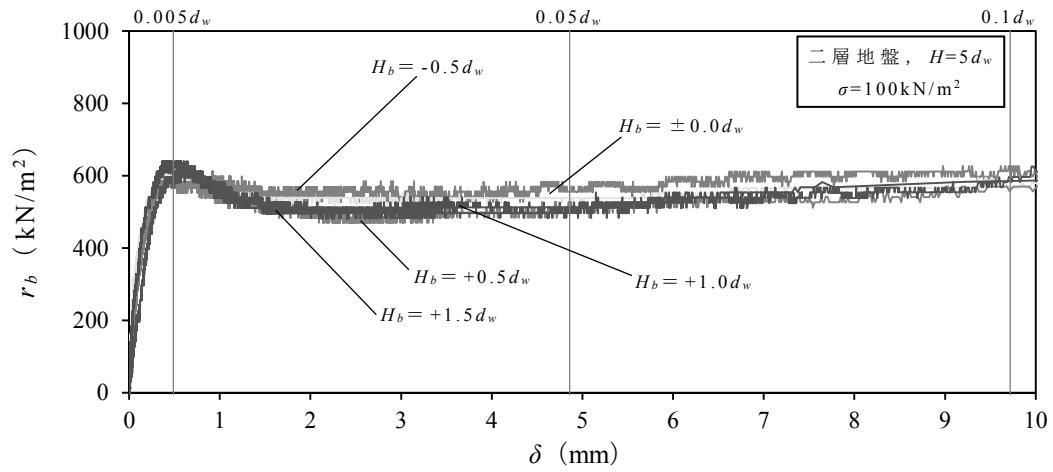


(c)杭周面  $r_s$

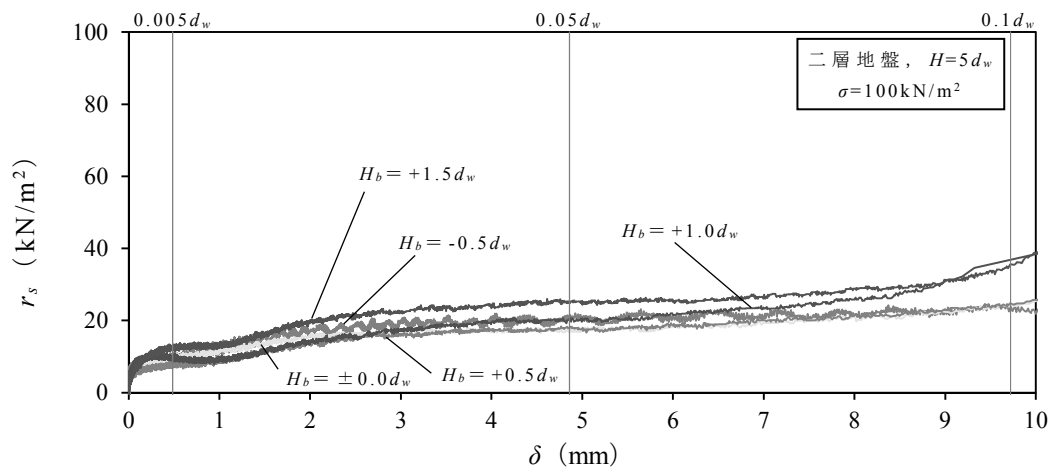
図 4.10 杭体各部の抵抗力度～引抜き変位  $\delta$  の関係（二層地盤）



(a) 羽根面  $r_w$



(b) 杭先端面  $r_b$



(c) 杭周面  $r_s$

図 4.11 杭体各部の抵抗力度～引抜き変位  $\delta$  の関係

(二層地盤, 載荷初期)

#### 4. 3 杭頭荷重および杭体各部の抵抗力度に及ぼす上載圧の影響

前節では、 $\delta=0.5d_w$  の引抜き変位に至るまでの回転貫入杭の  $P \sim \delta$  曲線を示すと共に、杭体各部の引抜き抵抗力度（羽根面  $r_w$ 、杭先端面  $r_b$  および杭周面  $r_s$ ）がそれぞれ異なる特性を有することを明らかにした。

本節では、杭体各部の抵抗力度について上載圧  $\sigma$  や地盤の密度（密な D 地盤、緩い L 地盤）に着目して検討する。この際、以下の引抜き変位時点を設定した。

##### (i) 引抜き変位 $\delta=0.005d_w$ 時

杭先端面の残留荷重  $rR_b$  が消失する時点であって、載荷初期に相当する値と位置付ける。

##### (ii) 引抜き変位 $\delta=0.05d_w$ 時

杭頭部の引抜き荷重  $P$  が最大値に達する直前付近の時点である。押込み載荷時は極限支持力が明確でないため、羽根径  $d_w$  の 10% 沈下時の荷重を基準荷重とするのが一般的である。本論文の引抜き載荷実験では羽根径  $d_w$  の 10% 未満で最大荷重に達したので、最大引抜き荷重に相当する値と位置付ける。

##### (iii) 引抜き変位 $\delta=0.5d_w$ 時

杭頭が大きく抜け上がった残留引抜き抵抗力度に相当する値と位置付ける。

表 4.1 および表 4.2 は全実験モデルの上記 (i) ~ (iii) の時点における実験結果をまとめたものである。図 4.12 ~ 図 4.15 には、上載圧  $\sigma$  を変化させた場合の杭頭部の引抜き荷重  $P$  および杭体各部の引抜き抵抗力度（羽根面  $r_w$ 、杭先端面  $r_b$  および杭周面  $r_s$ ）をそれぞれプロットした。各図共に、(a) に均一地盤、(b) に二層地盤モデルの結果を示した。これらより、以下のような傾向が読み取れる。

##### (1) 杭頭部の引抜き荷重 $P$

図 4.12 の (a) の均一地盤において、載荷初期の (i) および最大荷重付近の (ii) 時点の  $P$  は密な D 地盤および緩い L 地盤共に  $\sigma$  の増大に伴い概ね比例的に増加している。残留抵抗力度に相当する (iii) 時点においても同様の傾向が確認できるが、D 地盤の  $\sigma \geq 50 \text{ kN/m}^2$  以上の場合にはほとんど変

化がない。(b)の二層地盤において、(i)～(iii)時点の  $P$  は支持層への根入れ条件にかかわらず  $\sigma$  の増大に伴い概ね比例的に増加している。

#### (2) 羽根面の引抜き抵抗力度 $r_w$

図 4.13 の(a)の  $\sigma$  が  $r_w$  に及ぼす影響は図 4.12 の引抜き荷重  $P$  と同様の傾向である。

#### (3) 杭先端面抵抗力度 $r_b$

図 4.14 の(a)の均一地盤における L 地盤の  $r_b$  は、 $\sigma$  の増大に伴って大きくなる。D 地盤の  $r_b$  は  $\sigma=0\sim 50\text{kN/m}^2$  の範囲では増加するが、 $\sigma\geq 75\text{kN/m}^2$  では逆に減少するモデルもあり、明確な傾向を示さない。(b)の二層地盤における (i)～(iii)時点の  $r_b$  は、 $\sigma$  の増大に伴いわずかに増加している。

#### (4) 杭周面抵抗力度 $r_s$

図 4.15 の(a)の均一地盤における  $r_s$  は D 地盤の方が L 地盤よりも大きい。いずれも  $\sigma$  の増大に伴い概ね増加している。(b)の二層地盤における  $r_b$  は  $\sigma$  の増大に伴って大きくなるものの、根入れ長さ  $H_b$  の影響は小さい。

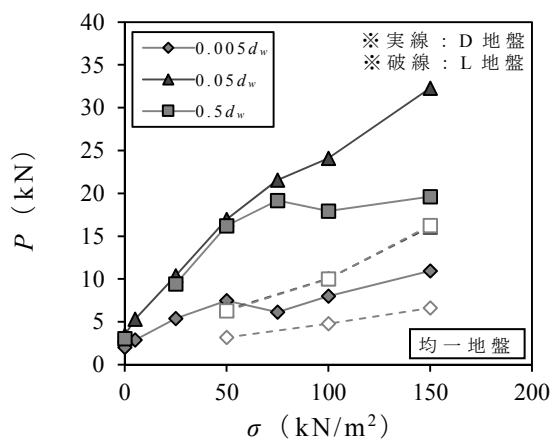
表 4.1 引抜き載荷試験結果（均一地盤）

| No. | 実験モデル      | 引抜き<br>変位<br>$\delta$ | 杭頭部           | 羽根面           |                               | 杭先端面          |                               | 杭周面           |                               |
|-----|------------|-----------------------|---------------|---------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|
|     |            |                       | $P_0$<br>(kN) | $R_w$<br>(kN) | $r_w$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | $R_b$<br>(kN) | $r_b$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | $R_s$<br>(kN) | $r_s$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) |
| 1   | D_25 (3dw) | ( i )                 | 2.06          | 1.66          | 298                           | 0.38          | 207                           | 0.01          | 0                             |
|     |            | ( ii )                | 3.00          | 2.55          | 458                           | 0.31          | 167                           | 0.14          | 5                             |
|     |            | ( iii )               | -             | -             | -                             | -             | -                             | -             | -                             |
| 2   | D_25       | ( i )                 | 5.39          | 3.78          | 679                           | 1.01          | 544                           | 0.60          | 10                            |
|     |            | ( ii )                | 10.41         | 8.29          | 1490                          | 1.01          | 545                           | 1.10          | 18                            |
|     |            | ( iii )               | 9.41          | 6.50          | 1168                          | 0.92          | 498                           | 1.99          | 37                            |
| 3   | D_25 (7dw) | ( i )                 | 6.28          | 4.25          | 763                           | 1.00          | 538                           | 1.04          | 11                            |
|     |            | ( ii )                | 15.42         | 12.56         | 2257                          | 1.04          | 562                           | 1.82          | 20                            |
|     |            | ( iii )               | -             | -             | -                             | -             | -                             | -             | -                             |
| 4   | D_0        | ( i )                 | 2.03          | 1.58          | 283                           | 0.32          | 173                           | 0.14          | 3                             |
|     |            | ( ii )                | 3.44          | 2.88          | 518                           | 0.28          | 151                           | 0.28          | 6                             |
|     |            | ( iii )               | 3.04          | 2.25          | 404                           | 0.25          | 136                           | 0.54          | 13                            |
| 5   | D_5        | ( i )                 | 2.87          | 2.13          | 384                           | 0.58          | 312                           | 0.15          | 2                             |
|     |            | ( ii )                | 5.29          | 4.27          | 767                           | 0.55          | 296                           | 0.47          | 8                             |
|     |            | ( iii )               | -             | -             | -                             | -             | -                             | -             | -                             |
| 6   | D_50       | ( i )                 | 7.49          | 5.46          | 982                           | 1.32          | 711                           | 0.71          | 12                            |
|     |            | ( ii )                | 16.96         | 14.06         | 2527                          | 1.16          | 627                           | 1.74          | 29                            |
|     |            | ( iii )               | 16.23         | 12.48         | 2242                          | 1.35          | 727                           | 2.40          | 45                            |
| 7   | D_75       | ( i )                 | 6.12          | 3.46          | 622                           | 1.45          | 781                           | 1.21          | 20                            |
|     |            | ( ii )                | 21.58         | 17.82         | 3201                          | 1.77          | 952                           | 2.00          | 33                            |
|     |            | ( iii )               | 19.15         | 13.40         | 2408                          | 1.93          | 1040                          | 3.82          | 72                            |
| 8   | D_100      | ( i )                 | 7.99          | 6.12          | 1099                          | 1.13          | 608                           | 0.74          | 12                            |
|     |            | ( ii )                | 24.10         | 21.83         | 3923                          | 0.68          | 365                           | 1.59          | 26                            |
|     |            | ( iii )               | 17.93         | 12.71         | 2283                          | 1.16          | 627                           | 4.06          | 76                            |
| 9   | D_150      | ( i )                 | 10.94         | 7.33          | 1317                          | 1.42          | 768                           | 2.19          | 36                            |
|     |            | ( ii )                | 32.28         | 28.25         | 5076                          | 0.90          | 487                           | 3.13          | 52                            |
|     |            | ( iii )               | 19.61         | 13.44         | 2414                          | 1.44          | 774                           | 4.74          | 88                            |
| 10  | L_50       | ( i )                 | 3.19          | 1.86          | 334                           | 0.83          | 448                           | 0.50          | 8                             |
|     |            | ( ii )                | 6.41          | 4.54          | 816                           | 0.70          | 376                           | 1.17          | 19                            |
|     |            | ( iii )               | 6.29          | 4.15          | 745                           | 0.79          | 426                           | 1.35          | 25                            |
| 11  | L_100      | ( i )                 | 4.80          | 3.19          | 573                           | 1.11          | 601                           | 0.49          | 8                             |
|     |            | ( ii )                | 10.05         | 8.03          | 1443                          | 0.98          | 528                           | 1.04          | 17                            |
|     |            | ( iii )               | 10.02         | 7.19          | 1293                          | 1.14          | 615                           | 1.69          | 31                            |
| 12  | L_150      | ( i )                 | 6.61          | 4.47          | 804                           | 1.35          | 730                           | 0.79          | 13                            |
|     |            | ( ii )                | 16.05         | 12.52         | 2250                          | 1.20          | 646                           | 2.33          | 38                            |
|     |            | ( iii )               | 16.26         | 11.89         | 2137                          | 1.40          | 756                           | 2.97          | 55                            |

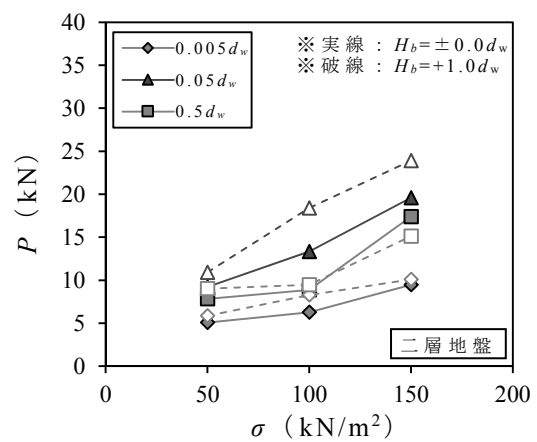


表 4.2 引抜き载荷試験結果（二層地盤）

| No. | 実験モデル         | 引抜き<br>変位<br>$\delta$ | 杭頭部           | 羽根面           |                               | 杭先端面          |                               | 杭周面           |                               |
|-----|---------------|-----------------------|---------------|---------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|---------------|-------------------------------|
|     |               |                       | $P_0$<br>(kN) | $R_w$<br>(kN) | $r_w$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | $R_b$<br>(kN) | $r_b$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) | $R_s$<br>(kN) | $r_s$<br>(kN/m <sup>2</sup> ) |
| 13  | LD_100_-0.5dw | ( i )                 | 5.65          | 3.99          | 716                           | 1.13          | 611                           | 0.53          | 9                             |
|     |               | ( ii )                | 12.34         | 10.07         | 1809                          | 1.03          | 556                           | 1.24          | 20                            |
|     |               | ( iii )               | 11.71         | 8.24          | 1481                          | 1.19          | 641                           | 2.28          | 42                            |
| 14  | LD_100_±0dw   | ( i )                 | 6.26          | 4.57          | 822                           | 1.11          | 598                           | 0.58          | 10                            |
|     |               | ( ii )                | 13.32         | 11.31         | 2032                          | 1.00          | 538                           | 1.02          | 17                            |
|     |               | ( iii )               | 8.85          | 5.49          | 987                           | 1.21          | 653                           | 2.14          | 40                            |
| 15  | LD_100_+0.5dw | ( i )                 | 6.13          | 4.62          | 829                           | 1.05          | 568                           | 0.46          | 8                             |
|     |               | ( ii )                | 14.62         | 12.62         | 2267                          | 0.92          | 497                           | 1.08          | 18                            |
|     |               | ( iii )               | 8.71          | 5.40          | 970                           | 1.22          | 657                           | 2.10          | 39                            |
| 16  | LD_100_+1.0dw | ( i )                 | 8.26          | 6.47          | 1162                          | 1.21          | 654                           | 0.58          | 9                             |
|     |               | ( ii )                | 18.41         | 16.12         | 2896                          | 1.06          | 570                           | 1.24          | 21                            |
|     |               | ( iii )               | 9.46          | 6.38          | 1147                          | 1.41          | 759                           | 1.67          | 31                            |
| 17  | LD_100_+1.5dw | ( i )                 | 6.59          | 4.76          | 855                           | 1.08          | 583                           | 0.75          | 12                            |
|     |               | ( ii )                | 18.73         | 16.31         | 2931                          | 0.92          | 497                           | 1.49          | 25                            |
|     |               | ( iii )               | 9.06          | 5.94          | 1067                          | 1.38          | 741                           | 1.75          | 33                            |
| 18  | LD_50_±0dw    | ( i )                 | 5.07          | 3.46          | 621                           | 1.13          | 612                           | 0.47          | 8                             |
|     |               | ( ii )                | 9.20          | 6.95          | 1248                          | 1.15          | 620                           | 1.10          | 18                            |
|     |               | ( iii )               | 7.81          | 5.09          | 915                           | 1.26          | 680                           | 1.45          | 27                            |
| 19  | LD_150_±0dw   | ( i )                 | 9.45          | 6.77          | 1217                          | 1.48          | 796                           | 1.20          | 20                            |
|     |               | ( ii )                | 19.59         | 15.95         | 2865                          | 1.40          | 757                           | 2.24          | 37                            |
|     |               | ( iii )               | 17.40         | 11.74         | 2109                          | 1.52          | 818                           | 4.14          | 77                            |
| 20  | LD_50_+1.0dw  | ( i )                 | 5.85          | 4.20          | 755                           | 1.10          | 595                           | 0.54          | 9                             |
|     |               | ( ii )                | 10.91         | 8.70          | 1564                          | 1.10          | 590                           | 1.11          | 18                            |
|     |               | ( iii )               | 9.02          | 5.95          | 1069                          | 1.24          | 669                           | 1.83          | 34                            |
| 21  | LD_150_+1.0dw | ( i )                 | 10.11         | 7.16          | 1286                          | 1.46          | 788                           | 1.49          | 24                            |
|     |               | ( ii )                | 23.90         | 20.49         | 3681                          | 1.30          | 702                           | 2.11          | 35                            |
|     |               | ( iii )               | 15.12         | 10.30         | 1851                          | 1.66          | 892                           | 3.16          | 59                            |

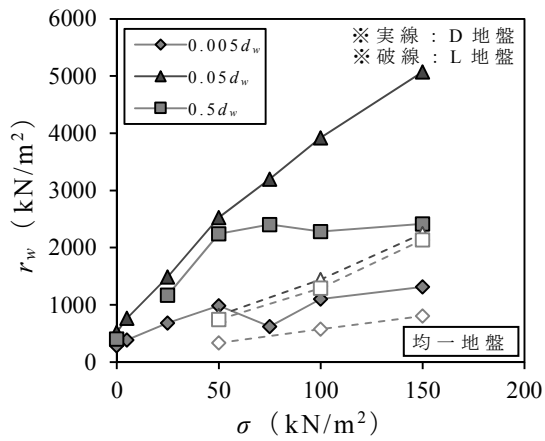


(a)均一地盤

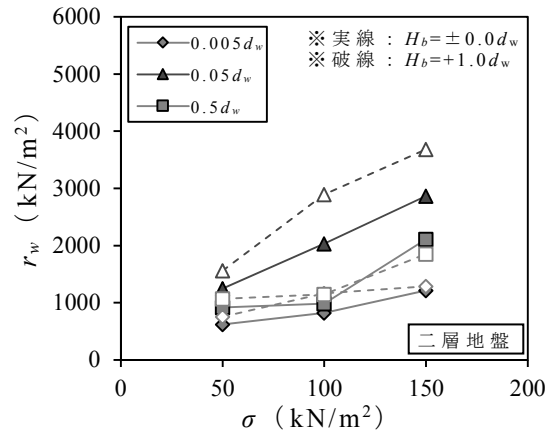


(b)二層地盤

図 4.12 杭頭部の引抜き荷重  $P \sim$  上載圧  $\sigma$  の関係

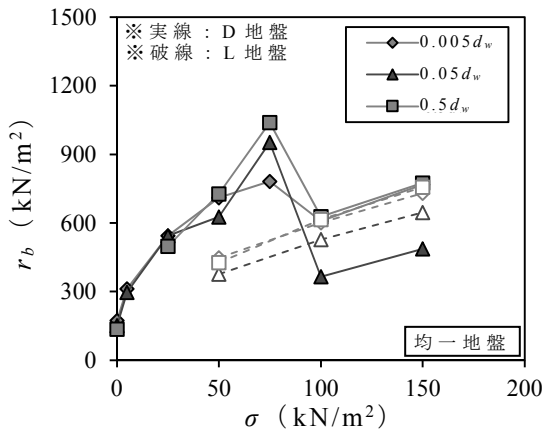


(a)均一地盤

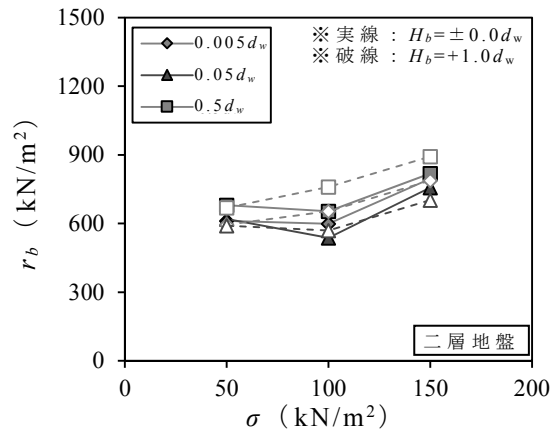


(b)二層地盤

図 4.13 羽根面の引抜き抵抗力度  $r_w \sim$  上載圧  $\sigma$  の関係

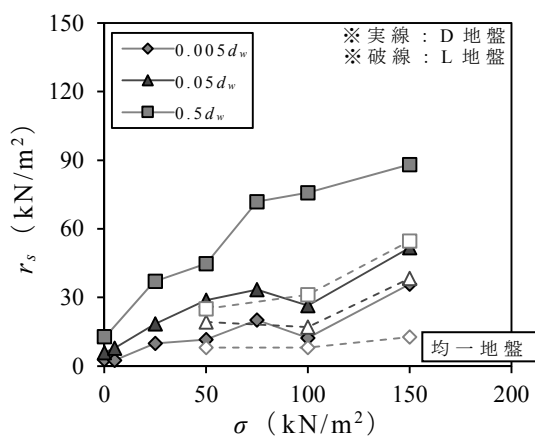


(a)均一地盤

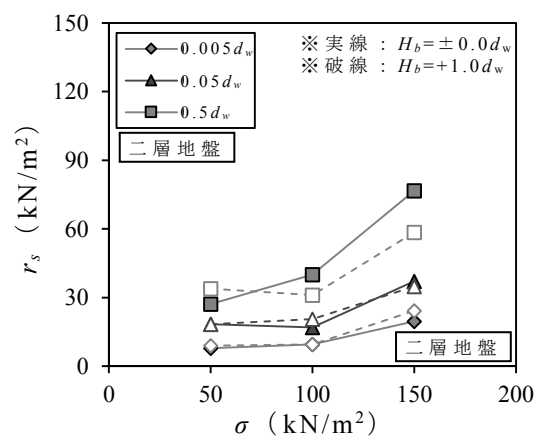


(b)二層地盤

図 4.14 杭先端面の引抜き抵抗力度  $r_b \sim$  上載圧  $\sigma$  の関係



(a)均一地盤



(b)二層地盤

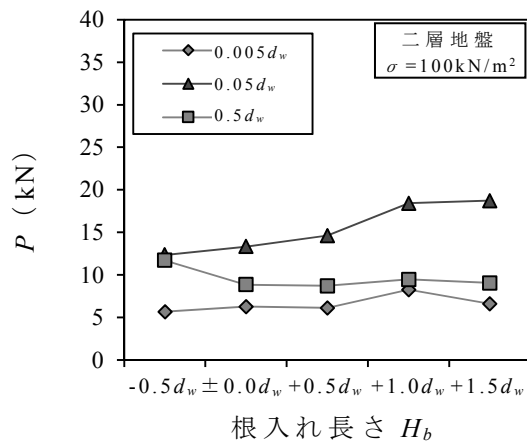
図 4.15 杭周面の引抜き抵抗力度  $r_s \sim$  上載圧  $\sigma$  の関係

#### 4. 4 支持層への根入れ長さと杭体各部の抵抗力の関係

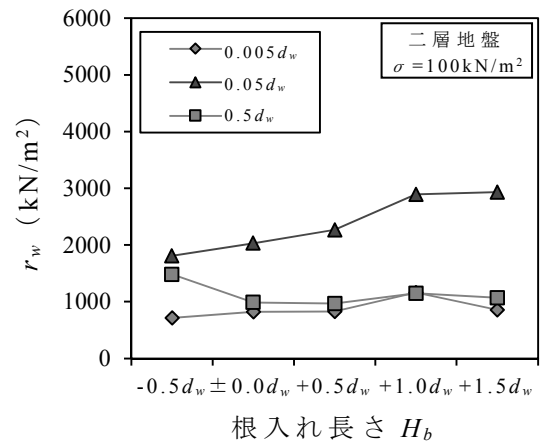
図 4.16 は支持層への根入れ長さ  $H_b$  を変化させたモデルにおける杭頭部の引抜き荷重  $P$  および杭体各部の引抜き抵抗力度（羽根面  $r_w$ 、杭先端面  $r_b$  および杭周面  $r_s$ ）をそれぞれプロットしたもので、前節と同様の引抜き変位時を設定して考察する。

(a)の  $P$  は載荷初期の(i)時点および最大荷重付近の(ii)時点では  $H_b$  の増加に伴い概ね比例的に増加しているが、残留抵抗度に相当する(iii)時点ではむしろ小さくなっている。(b)において  $H_b$  が  $r_w$  に及ぼす影響は(a)の引抜き荷重と同様の傾向であった。(c)の  $r_b$  は載荷初期の(i)時点では  $H_b$  にかかわらずほぼ一定の荷重になる。それに対して、(ii)および(iii)時点では  $H_b$  の増大に伴い、それぞれわずかであるが減少および増大する。また、残留抵抗度に相当する(iii)時点よりも(ii)時点の値の方が小さいのが特徴的である。(d)の  $r_s$  は引抜き変位が進むにつれて増大し、(i)および(ii)時点では  $H_b$  の増大に伴ってわずかに上昇する傾向が見られる。

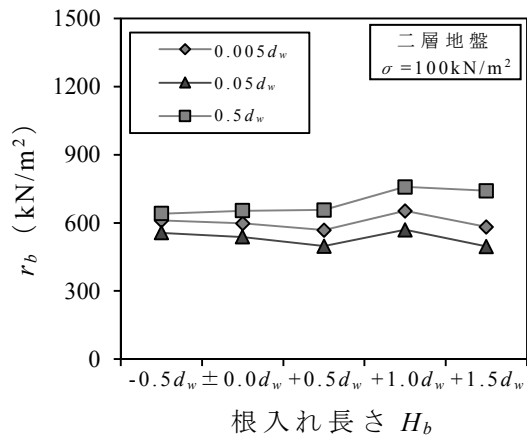
図 4.17 は各引抜き変位時における杭頭部の引抜き荷重  $P$  に対する杭体各部抵抗力の分担割合と支持層への根入れ長さ  $H_b$  の関係をプロットしたものである。羽根面の負担割合は(i)および(ii)時点では  $H_b$  の増大に伴って大きくなる傾向があり、(ii)時点においては 80%以上になっている。同時点の杭先端面および杭周面の負担割合は、羽根面に比べると小さいものの  $H_b$  の増大に伴いわずかに低下する傾向がある。(iii)時点ではそれ以前よりも羽根面の負担割合が低下しているが、その代わりに特に杭周面の負担割合が大きくなっている。また、(i)および(ii)時点の  $H_b = -0.5d_w$  モデルにおける羽根面の負担割合は支持層へ根入れしていないにもかかわらず緩い L 地盤モデルよりも大きい。これは  $H_b = -0.5d_w$  モデルにおける打止め時の杭頭部の回転トルク  $T$  および羽根面の施工時推進力  $iR_w$  が L 地盤モデルの 1.4 倍および 1.8 倍にも上昇したことから、回転貫入施工時に杭先端が支持層に近づいたことで羽根面上部の砂層をより密な状態に変化させた影響と解釈している。



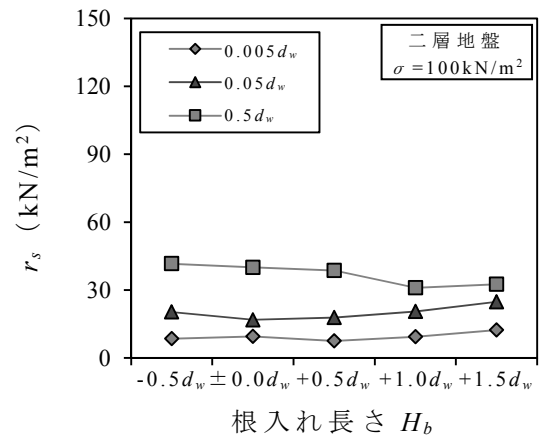
(a) 杭頭部  $P$



(b) 羽根面  $r_w$

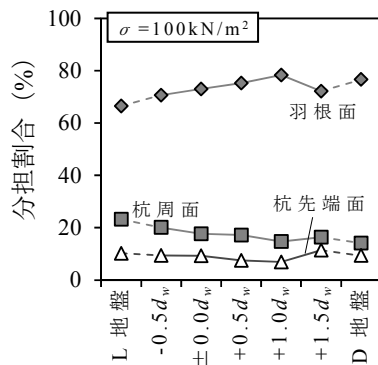


(c) 杭先端面  $r_b$

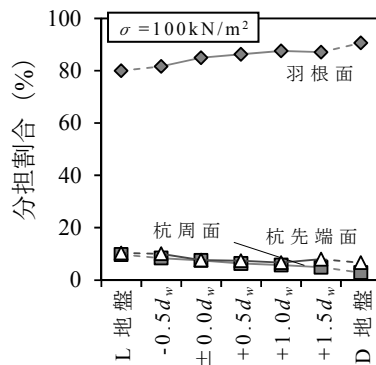


(d) 杭周面  $r_s$

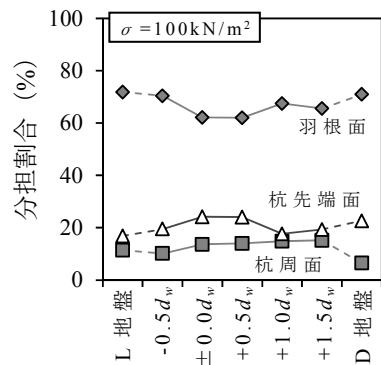
図 4.16 杭頭荷重  $P$  および杭体各部の引抜き抵抗力  
～支持層への根入れ長さ  $H_b$  の関係



(i)  $\delta=0.005d_w$



(ii)  $\delta=0.05d_w$



(iii)  $\delta=0.5d_w$

図 4.17 杭体各部の抵抗力の分担割合

## 4. 5 まとめ

本章では，回転貫入実験後に実施した引抜き载荷実験について，各実験モデルにおける杭頭部の引抜き荷重  $P$  および杭体各部の引抜き抵抗力度（羽根面  $r_w$ ，杭先端面  $r_b$  および杭周面  $r_s$ ）の関係を比較し，回転貫入杭の引抜き抵抗機構について考察すると共に，支持層への根入れ長さ  $H_b$  などの実験因子の影響について考察した．得られた知見を以下に示す．

### a) 荷重～変位曲線

- ① 杭頭部の引抜き荷重  $P$  は，引抜き変位  $\delta=0.05d_w \sim 0.1d_w$  時に最大となり，その後減少もしくは一定に推移する傾向がある．この挙動は押し込み荷重が作用する同様な回転貫入杭の挙動とは大きく異なる．
- ② 羽根面の引抜き抵抗力度  $r_w$  は， $\delta=0.05d_w \sim 0.1d_w$  引抜き時にピークを迎えた後に  $P$  よりも急激に減少する傾向があるが，ほぼ同時点に杭周面の引抜き抵抗力度  $r_s$  が増大して，抜け上がりに伴う羽根面の抵抗力度の減少を補う働きを示す．
- ③ 杭先端面の引抜き抵抗力度  $r_b$  は，引抜き変位  $\delta=0.005d_w$  付近で最大となり，その後一旦減少するものの再び増加する．この荷重は回転貫入後に生じた上向きの残留荷重の解放とわずかなサクションの和である．

### b) 上載圧 $\sigma$ の影響

- ④ 载荷初期の引抜き変位  $\delta=0.005d_w$  および最大荷重付近の  $\delta=0.05d_w$  時点における引抜き荷重  $P$  は，上載圧  $\sigma$  の増加に伴い概ね比例的に増加する．それに対して，残留抵抗力度に相当する  $\delta=0.5d_w$  時点の  $P$  は  $\sigma \geq 50\text{kN/m}^2$  の密な D 地盤の場合ではほぼ一定値となる．羽根面の引抜き抵抗力度  $r_w$  の推移も  $P$  とほぼ同様の傾向を示す．

### c) 支持層への根入れ長さ $H_b$ の影響

- ⑤ 载荷初期の引抜き変位  $\delta=0.005d_w$  および最大荷重に相当する引抜き変位  $\delta=0.05d_w$  時における杭頭部の引抜き荷重  $P$  は，支持層への根入れ長さ  $H_b$  の増加に伴い概ね比例的に増加する．
- ⑥ 羽根面の引抜き抵抗力度  $r_w$  は，概ね杭頭部の引抜き荷重  $P$  と同様の挙動を示し， $P$  に占める割合は 80%に達する．

- ⑦ 載荷初期の引抜き変位  $\delta=0.005d_w$  時における杭先端面の引抜き抵抗力度  $r_b$  は，支持層への根入れ長さ  $H_b$  にかかわらず概ね一定である．
- ⑧ 載荷初期の引抜き変位  $\delta=0.005d_w$  および最大荷重に相当する引抜き変位  $\delta=0.05d_w$  時において，支持層への根入れ長さ  $H_b$  の増加に伴う杭周面の引抜き抵抗力度  $r_s$  の増加は僅かである．
- ⑨ 二層地盤において，支持層への根入れ長さ  $H_b=-0.5d_w$  の実験モデルにおける羽根面の抵抗力度分担割合は，支持層に根入れされていないにもかかわらず緩い L 地盤モデルの値よりも大きい．これは，回転貫入時に杭先端が支持層に近づいたことで羽根面上部の砂層をより密な状態に変化させた影響と考えられる．

## 第 5 章

### 引抜き抵抗力の評価

#### 5. 1 まえがき

第 4 章では、杭体各部（羽根面，杭先端面，杭周面）の引抜き抵抗力が変位段階（初期，極限時，残留時）で異なることが明らかになった．

本章では，上記の変位段階における杭体各部の抵抗力を評価することを目的として，a) 施工終了時の杭頭トルク，b) 羽根近傍地盤のせん断破壊面，c) 地盤の  $N$  値を利用する 3 種類の方法を検討する．更に，実用的な観点からは地盤の  $N$  値の利用が便利であること，過去の原位置載荷試験の軸力測定は全て杭先端部が対象あることを踏まえ，極限時の杭先端部抵抗力  $R_{up}$ （羽根面抵抗力  $R_{uw}$ +杭先端面抵抗力  $R_{ub}$ ）の評価方法を提示する．

#### 5. 2 施工時情報に基づく引抜き抵抗力の算定

杭頭部の回転トルク  $T$  などの施工時に得られる情報は，支持層深度の確認としての利用に留まっており，押込み方向の鉛直支持力や引抜き抵抗力を確認する指標とはなっていないのが現状である．そこで，本節では貫入打止め時の杭頭部の回転トルク  $T$  と杭体各部の引抜き抵抗力（羽根面  $R_w$ ，杭先端面  $R_b$ ，杭周面  $R_s$ ，杭先端部  $R_p$ ）の関係を示し， $T$  から杭体各部の引抜き抵抗力の推定を試みる．

図 5.1 に，貫入打止め時の杭頭部の回転トルク  $T$  と全試験体の各引抜き時における杭体各部の引抜き抵抗力  $R$  の関係を示す．

##### a) 羽根面 $R_w$

(i) の引抜き変位  $\delta=0.005d_w$  および (ii) の  $\delta=0.05d_w$  時における羽根面の引抜き抵抗力  $R_w$  は杭頭部の回転トルク  $T$  との相関性が高い．残留抵抗力に相当する (iii) の  $\delta=0.5d_w$  時の  $R_w$  はばらつきが大きく  $T$  との相関性は見られない．

**b) 杭先端面  $R_b$**

いずれの引抜き変位時においても，杭先端面の引抜き抵抗  $R_b$  は  $T$  との相関性が羽根面  $R_w$  に比べて低い．貫入量  $H$  が小さい D\_25 (3dw) モデルや上載圧  $\sigma$  が小さい D\_0 モデルおよび D\_5 モデル ( $T \leq 200 \text{ N} \cdot \text{m}$ ) を除くと，いずれの引抜き変位時においても， $R_b$  は地盤条件にかかわらず 1kN 程度であって概ね一定である．

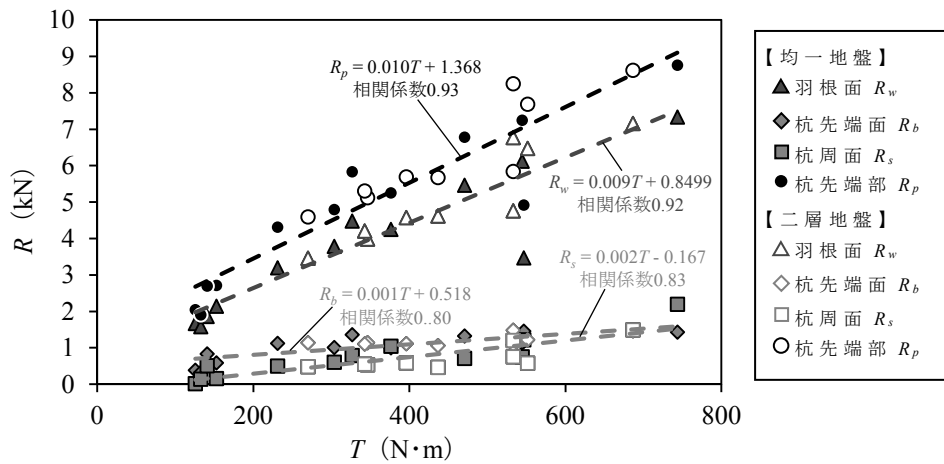
**c) 杭周面  $R_s$**

杭周面の引抜き抵抗  $R_s$  はいずれの引抜き変位時においても  $T$  との相関性は低く，打止め時の杭頭部の回転トルク  $T$  から  $R_s$  を推定することは難しい．

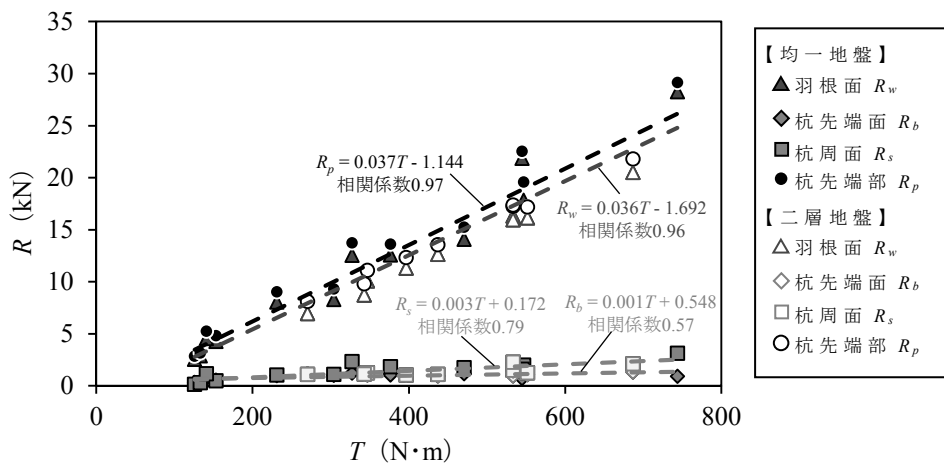
**d) 杭先端部  $R_p$**

羽根面  $R_w$  と同様に，( i ) の  $\delta=0.005d_w$  および ( ii ) の  $\delta=0.05d_w$  時における杭先端部の引抜き抵抗  $R_p$  は  $T$  との相関性が高い．つまり，载荷初期から極限までの区間においては，打止め時の  $T$  から  $R_p$  を概ね推定できる可能性が示唆された．原位置の引抜き载荷試験では，羽根面  $R_w$  と杭先端面  $R_b$  を合わせた杭先端部  $R_p$  として引抜き抵抗を評価することがほとんどであり，杭先端部  $R_p$  として評価することは有効といえる．ただし，現場ごとに校正試験が必要である点，また，羽根径や羽根径比，杭長の影響が未検討である点が今後の課題であろう．

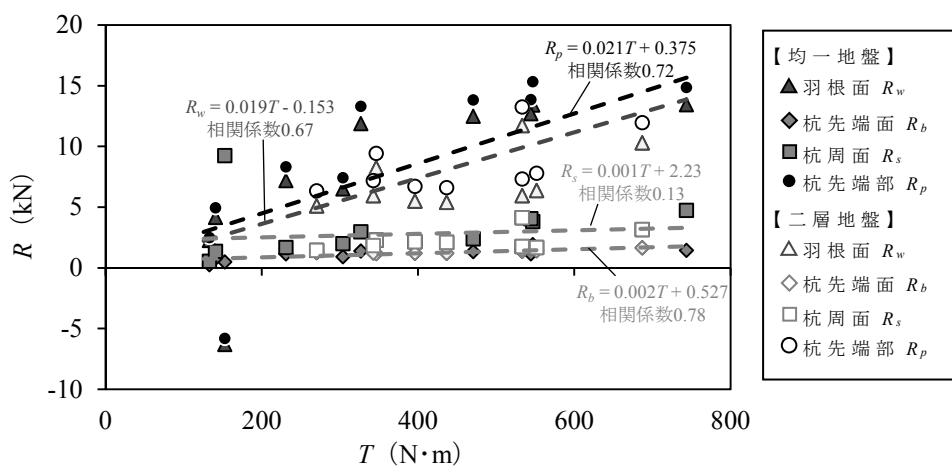




(i) 引抜き変位  $\delta = 0.005d_w$  時 (载荷初期)



(ii) 引抜き変位  $\delta = 0.05d_w$  時 (極限)



(iii) 引抜き変位  $\delta = 0.5d_w$  時 (残留)

図 5.1 打止め時の杭頭部の回転トルク  $T$   
～杭体各部の引抜き抵抗力  $R$  の関係

### 5. 3 地盤のせん断破壊面を考慮した引抜き抵抗力の算定

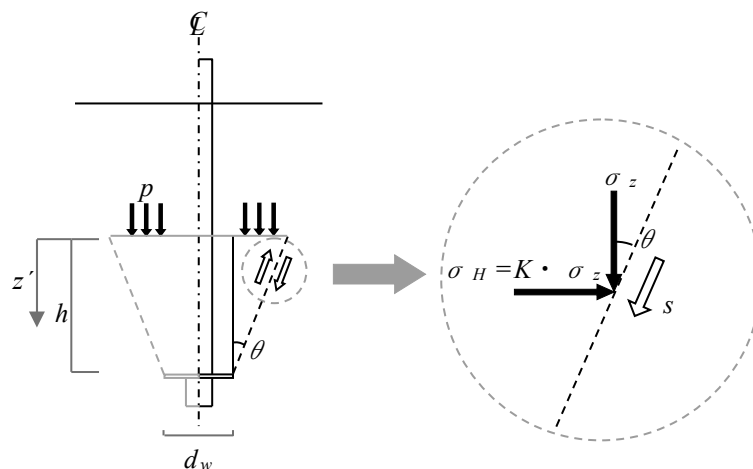
杭基礎設計便覧<sup>36)</sup>に記載されている回転貫入型の杭工法における極限引抜き抵抗力の推定式は，羽根外端から支持層上面までの円筒状のせん断抵抗力を評価するものである．しかし，当研究室における回転貫入杭の引抜き載荷時の粒子挙動の可視化実験<sup>34),35)</sup>によれば，極限抵抗力時および残留抵抗力時では異なる円錐形のせん断破壊面が確認されている．

本節では，このような回転貫入杭のせん断破壊面を考慮した羽根面の極限および残留時の引抜き抵抗力  $R_{uw}$  および  $R_{rw}$  の算定式を構築する．

#### 5. 3. 1 羽根面の極限引抜き抵抗力 $R_{uw}$

##### (1) 羽根面の極限引抜き抵抗力 $R_{uw}$ の算定式

図 5.2 は極限時のせん断破壊面を考慮した羽根面の引抜き抵抗力の算定モデルである．



ここで，

- $s$  : せん断強さ ( $\text{kN/m}^2$ )
- $\sigma_z$  : 鉛直方向の有効応力 ( $\text{kN/m}^2$ )
- $\sigma_H$  : 水平方向の有効応力 ( $\sigma_H = K \cdot \sigma_z$ ) ( $\text{kN/m}^2$ )
- $K$  : 土圧係数
- $\theta$  : せん断破壊面の角度 ( $^\circ$ )
- $h$  : せん断破壊高さ (m)
- $z'$  : せん断破壊面上端からの深度 (m)
- $p$  : せん断破壊面上端の有効応力 ( $\text{kN/m}^2$ )
- $d_w$  : 羽根径 (m)

図 5.2 均一地盤における羽根面の極限引抜き抵抗モデル

羽根外端から  $\theta$  の角度で外側上方に発生するすべり面におけるせん断強さ  $s$  は、(5.1) 式で表すことができる。

$$\begin{aligned} s &= (\sigma_z \cdot \sin \theta + K \cdot \sigma_z \cdot \cos \theta) \cdot \tan \phi \\ &= \sigma_z \cdot \tan \phi \cdot (\sin \theta + K \cdot \cos \theta) \end{aligned} \quad (5.1) \text{ 式}$$

ここで、 $\sigma_z = \gamma \cdot z' + p$

$\phi$  : せん断抵抗角 ( $^\circ$ )

$\gamma$  : 単位体積重量 ( $\text{kN/m}^3$ )

更に、 $\rho = \tan \phi \cdot (\sin \theta + K \cdot \cos \theta)$  と置くと、(5.1) 式は次式となる。

$$s = \rho \cdot (\gamma \cdot z' + p) \quad (5.2) \text{ 式}$$

次に、(5.2) 式を  $h$  区間のすべり面で積分することで、羽根面の極限引抜き抵抗  $R_{uw}$  は (5.3) 式となる。

$$R_{uw} = \int_0^h s \cdot \cos \theta \cdot \pi \cdot (d_w + 2 \tan \theta \cdot (h - z')) \frac{dz'}{\cos \theta} \quad (5.3) \text{ 式}$$

(5.3) 式に (5.2) 式を代入すると、羽根面の極限引抜き抵抗  $R_{uw}$  は (5.4) 式となる。

$$\begin{aligned} R_{uw} &= \pi \cdot \rho \int_0^h \left\{ \gamma \cdot d_w \cdot z' + 2 \cdot \gamma \cdot \tan \theta \cdot (h \cdot z' - z'^2) + p \cdot d_w + 2 \cdot p \cdot \tan \theta \cdot (h - z') \right\} dz' \\ &= \pi \cdot \rho \cdot \left\{ \frac{\gamma}{6} \cdot (3 \cdot d_w \cdot h^2 + 2 \cdot \tan \theta \cdot h^3) + p \cdot (d_w \cdot h + \tan \theta \cdot h^2) \right\} \end{aligned} \quad (5.4) \text{ 式}$$

せん断破壊面が二層に跨る場合 (二層地盤の場合) には、図 5.3 のようにせん断破壊面を仮定して支持層と一般層のせん断抵抗を足し合わせると、羽根面の極限引抜き抵抗  $R_{uw}$  の算定式は (5.5) 式となる。

$$\begin{aligned} R_{uw} &= \pi \cdot \rho_1 \cdot \left\{ \frac{\gamma_1}{6} \cdot (3 \cdot d_{w1} \cdot h_1^2 + 2 \cdot \tan \theta_1 \cdot h_1^3) + p_1 \cdot (d_{w1} \cdot h_1 + \tan \theta_1 \cdot h_1^2) \right\} \\ &\quad + \pi \cdot \rho_2 \cdot \left\{ \frac{\gamma_2}{6} \cdot (3 \cdot d_{w2} \cdot h_2^2 + 2 \cdot \tan \theta_2 \cdot h_2^3) + p_2 \cdot (d_{w2} \cdot h_2 + \tan \theta_2 \cdot h_2^2) \right\} \end{aligned} \quad (5.5) \text{ 式}$$



### c) せん断抵抗角 $\phi$

せん断抵抗角  $\phi$  は第 2 章に示した一面せん断試験から求めたせん断抵抗角であり，D 地盤で  $\theta=36.9^\circ$ ，L 地盤で  $\theta=33.7^\circ$  とする．

### d) 土圧係数 $K$

土圧係数  $K$  は，拡底場所打ちコンクリート杭における引抜き抵抗力の算定式<sup>37)</sup>を参考に，受動土圧状態として決定して，(5.6) 式より求める．

$$K_p = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\phi}{2} \right) \quad (5.6) \text{ 式}$$

ここで， $K_p$ ：受働土圧係数

$\phi$ ：せん断抵抗角 ( $^\circ$ )

## (2) 実験結果との比較

ここでは，実験より得た極限抵抗力に相当する (ii) の  $\delta=0.05d_w$  時における羽根面の引抜き抵抗力  $R_{uw}'$  (以下，実験値) と本論文の算定式による羽根面の極限引抜き抵抗力  $R_{uw}$  (以下，計算値) を比較する．

図 5.4 に，羽根面の極限引抜き抵抗力について実験値  $R_{uw}'$  と計算値  $R_{uw}$  の関係を示す．均一地盤においては多少のばらつきはあるものの，実測値と計算値は良い対応を示している．

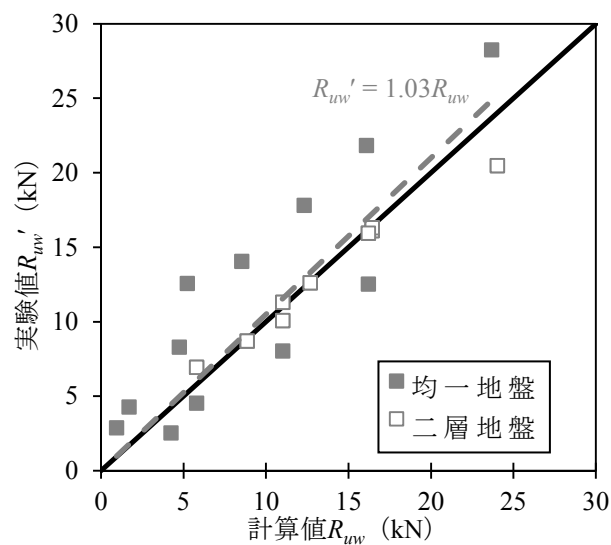
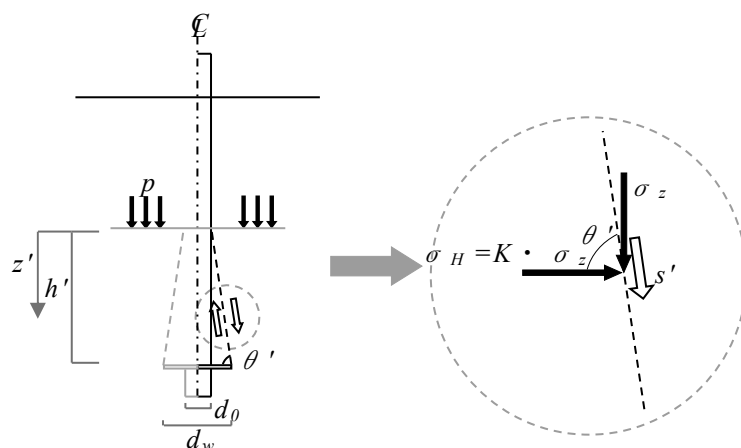


図 5.4 羽根面の極限引抜き抵抗力

### 5. 3. 2 羽根面の残留引抜き抵抗力 $R_{rw}$

#### (1) 羽根面の残留引抜き抵抗力 $R_{rw}$ の算定式

図 5.5 は、残留時のせん断破壊面を考慮した羽根面の引抜き抵抗力の算定モデルである。



ここで、

$s'$  : せん断強さ (kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma_z$  : 鉛直方向の有効応力 (kN/m<sup>2</sup>)

$\sigma_H$  : 水平方向の有効応力 ( $\sigma_H = K \cdot \sigma_z$ ) (kN/m<sup>2</sup>)

$K$  : 土圧係数

$\theta'$  : せん断破壊面の角度 [ $\theta' = \tan^{-1}(h/((d_w - d)/2))$ ] (°)

$h'$  : せん断破壊高さ (m)

$z'$  : せん断破壊面上端からの深度 (m)

$p$  : せん断破壊面上端の有効応力 (kN/m<sup>2</sup>)

$d_w$  : 羽根径 (m),  $d$  : 杭径 (m)

図 5.5 羽根面の残留引抜き抵抗力  $R_{rw}$  のモデル

羽根外端から  $\theta'$  の角度で内側上方に発生するすべり面におけるせん断強さ  $s'$  は、(5.7) 式で表すことができる。

$$\begin{aligned} s' &= (\sigma_z \cdot \sin \theta' + K \cdot \sigma_z \cdot \cos \theta') \cdot \tan \phi \\ &= \sigma_z \cdot \tan \phi \cdot (\cos \theta' + K \cdot \sin \theta') \end{aligned} \quad (5.7) \text{ 式}$$

ここで、 $\sigma_z = \gamma \cdot z' + p$

$\phi$  : せん断抵抗角 (°)

$\gamma$  : 単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)

更に、 $\rho' = \tan \phi \cdot (\cos \theta' + K \cdot \sin \theta')$  と置くと、(5.7) 式は次式となる。

$$s' = \rho' \cdot (\gamma \cdot z' + p) \quad (5.8) \text{ 式}$$

次に、(5.8) 式を  $h'$  区間のすべり面で積分することで、羽根面の極限引抜き抵抗  $R_{rw}$  は (5.9) 式となる。

$$R_{rw} = \int_0^{h'} s' \cdot \sin \theta' \cdot \pi \cdot \left( d + \frac{2 \cdot z'}{\tan \theta'} \right) \frac{dz'}{\sin \theta'} \quad (5.9) \text{ 式}$$

(5.9) 式に (5.8) 式を代入すると、羽根面の極限引抜き抵抗  $R_{rw}$  は (5.10) 式となる。

$$\begin{aligned} R_{rw} &= \pi \cdot \rho \int_0^{h'} \left\{ \gamma \cdot d_w \cdot z' + 2 \cdot \gamma \cdot \tan \theta \cdot (h' \cdot z' - z'^2) + p \cdot d_w + 2 \cdot p \cdot \tan \theta \cdot (h' - z') \right\} dz' \\ &= \pi \cdot \rho' \cdot \left\{ \frac{\gamma}{6} \cdot \left( 3 \cdot d \cdot h'^2 + \frac{4}{\tan \theta'} \cdot h'^3 \right) + p \cdot \left( d \cdot h' + \frac{h'^2}{\tan \theta'} \right) \right\} \end{aligned} \quad (5.10) \text{ 式}$$

せん断破壊面が二層に跨る場合（二層地盤の場合）には、支持層と一般層のせん断抵抗を足し合せると、羽根面の残留引抜き抵抗  $R_{rw}$  は (5.11) 式となる。

$$\begin{aligned} R_{rw} &= \pi \cdot \rho_1' \cdot \left\{ \frac{\gamma_1}{6} \cdot \left( 3 \cdot d_1 \cdot h_1'^2 + \frac{4}{\tan \theta'} \cdot h_1'^3 \right) + p_1 \cdot \left( d_1 \cdot h_1' + \frac{h_1'^2}{\tan \theta'} \right) \right\} \\ &\quad + \pi \cdot \rho_2' \cdot \left\{ \frac{\gamma_2}{6} \cdot \left( 3 \cdot d_0 \cdot h_2'^2 + \frac{4}{\tan \theta'} \cdot h_2'^3 \right) + p_2 \cdot \left( d_0 \cdot h_2' + \frac{h_2'^2}{\tan \theta'} \right) \right\} \end{aligned} \quad (5.11) \text{ 式}$$

ここで、

$$\rho_1' = \tan \phi_1 \cdot (\cos \theta' + K_1 \cdot \sin \theta') \quad , \quad \rho_2' = \tan \phi_2 \cdot (\cos \theta' + K_2 \cdot \sin \theta')$$

$K_1$  : 支持層の土圧係数,  $K_2$  : 一般層の土圧係数

$\theta_1'$  : 支持層におけるせん断破壊面の角度 (°)

$\theta_2'$  : 一般層におけるせん断破壊面の角度 (°)

$d_{w1}$  : 羽根径 (m)

$d_{w2}$  : 層境界面におけるせん断破壊面の直径 (m)

$h_1'$  : 支持層のせん断破壊面高さ (m)

$h_2'$  : 一般層のせん断破壊面高さ ( $h_2' =$  せん断破壊面高さ  $h' - h_1'$ ) (m)

$p_1$  :  $h_1'$  上端の有効応力 (kN/m<sup>2</sup>),  $p_2$  :  $h_2'$  上端の有効応力 (kN/m<sup>2</sup>)

$\gamma_1$  : 支持層の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>),  $\gamma_2$  : 一般層の単位体積重量 (kN/m<sup>3</sup>)

$\phi_1$  : 支持層のせん断抵抗角 (°) ,  $\phi_2$  : 一般層のせん断抵抗角 (°)

なお，せん断破壊面の角度  $\theta'$  は，羽根外端とせん断破壊面高さ  $h'$  の成す角度とし，地盤の相対密度に依存しないと仮定した．また，その他のせん断破壊面高さ  $h'$ ，せん断抵抗角  $\phi$  および土圧係数  $K$  は，前項の極限引抜き抵抗  $R_{uw}$  の算定式と同様とした．

## （２）実験結果との比較

ここでは，実験より得た（iii）の  $\delta=0.5d_w$  時における羽根面の残留引抜き抵抗  $R_{rw}'$ （以下，実験値）と本論文の算定式による羽根面の残留引抜き抵抗  $R_{rw}$ （以下，計算値）を比較する．

図 5.6 に羽根面の残留引抜き抵抗について実験値  $R_{rw}'$  と計算値  $R_{rw}$  の関係を示す． $R_{rw}'/R_{rw}$  は 1.3 程度であり，本論文の算定式はやや安全側の結果といえる．

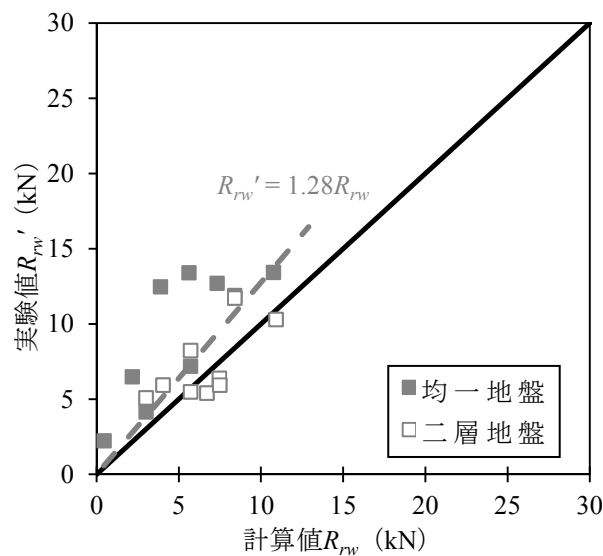


図 5.6 羽根面の残留引抜き抵抗



#### 5. 4 地盤の平均 $N$ 値に基づく引抜き抵抗力の算定

本節では，回転貫入施工前の SWS 試験結果で得られた地盤の換算  $N$  値に基づいて，杭体各部の引抜き抵抗力の評価を試みる．図 5.7 に杭体各部の抵抗力とそれぞれの平均  $N$  値の算定区間の関係を示す．

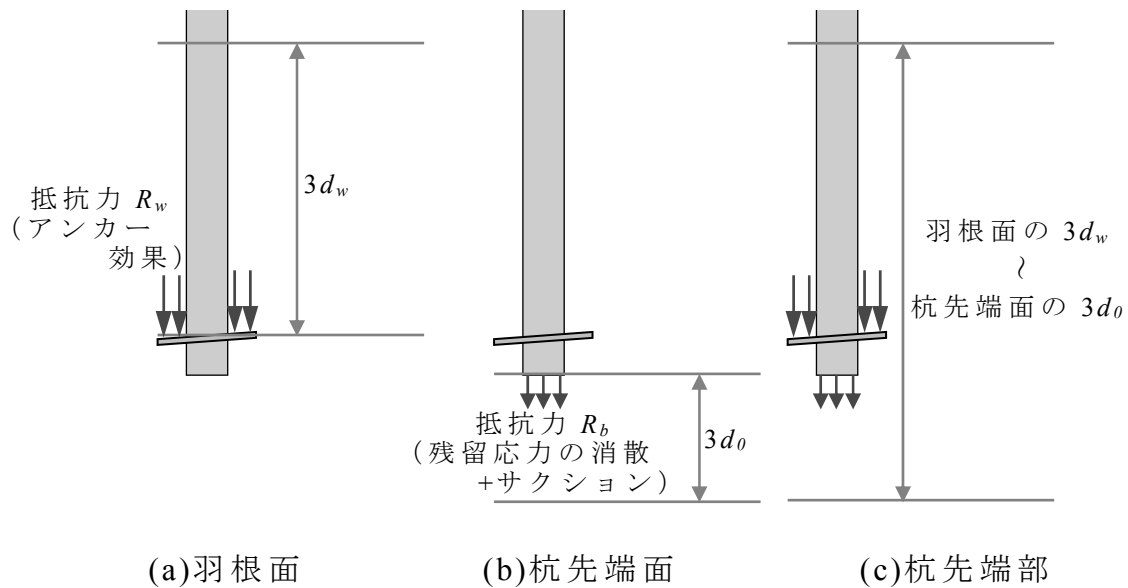


図 5.7 杭体各部の抵抗力と平均  $N$  値の算定区間の関係

##### (1) 羽根面 $R_w$

図 5.8 に各引抜き時における羽根面の引抜き抵抗力度  $r_w$  と  $\bar{N}$  の関係を示す．図 5.7(a) に示すように，羽根面の引抜き時には羽根面上方の地盤が引抜き荷重に抵抗する．そこで，羽根面に関する  $\bar{N}$  は羽根面から上方  $3d_w$  の平均値を用いた．図 5.8 には，全実験モデルを対象にした近似直線①に加えて，均一地盤および二層地盤それぞれの実験モデルを対象にした近似直線②および③も併記した．

(i) の引抜き変位  $\delta=0.005d_w$  時には，相関性が低いものの  $r_w$  は  $\bar{N}$  の増大に伴い比例的に増加する傾向にある．(iii) の残留抵抗力に相当する  $\delta=0.5d_w$  時には，均一地盤では  $\bar{N}$  に比例するのに対して，二層地盤では  $\bar{N}$  によらず概ね一定となった．このことから，引抜き変位が大きい残留時の引抜き抵抗力は，羽根近傍の密な支持層ではなく支持層より上部の緩い一般層が抵抗力を発揮することが分かる．

(ii)の極限に相当する  $\delta=0.05d_w$  時には、均一地盤および二層地盤ごとに評価するといずれも相関性が高く、 $r_w$  は  $\bar{N}$  の増大に伴い比例的に増加する。しかしながら、均一地盤と二層地盤で異なる傾向を示すため、全実験モデルを対象にして評価すると、それらと比べて相関性が低下する。均一地盤と二層地盤に差異が生じた理由としては、二層地盤の場合には杭先端が支持層に近づいたことで羽根面上部の砂層がより密な状態に変化したことが考えられる。上載圧  $\sigma$  を作用させない均一地盤における模型実験では、回転貫入施工後に地盤の  $N$  値が増加することが報告<sup>38)</sup>されており、本実験においても同様の現象が生じているものと推察される。

以上より、 $\bar{N}$  から羽根面の引抜き抵抗力度  $r_w$  を推定することは概ね可能と考えるが、現段階では均一地盤と二層地盤に区別して使い分けることが必要である。

## (2) 杭先端面 $R_b$

杭先端面の引抜き抵抗力度  $r_b$  は、回転貫入後の残留荷重の解放とわずかなサクションに起因することを第4章で考察した。よって、杭先端以深の地盤状況が影響すると考えられることから、本論文では図 5.7(b)に示すように  $\bar{N}$  は杭先端面から下方  $3d_0$  の平均値を採用した。

図 5.9 に、各引抜き時における杭先端面の引抜き抵抗力度  $r_b$  と  $\bar{N}$  の関係を示す。なお、図 4.5 で指摘した異常な杭先端面引抜き抵抗力度  $R_b$  を示した D\_75 モデルは分析の対象外として同図中から除外した。これによると、 $r_b$  は均一地盤では  $\bar{N}$  に比例して増加するのに対して、二層地盤ではいずれの引抜き変位時においても  $\bar{N}$  にかかわらず  $500 \sim 600 \text{ kN/m}^2$  と概ね一定である。

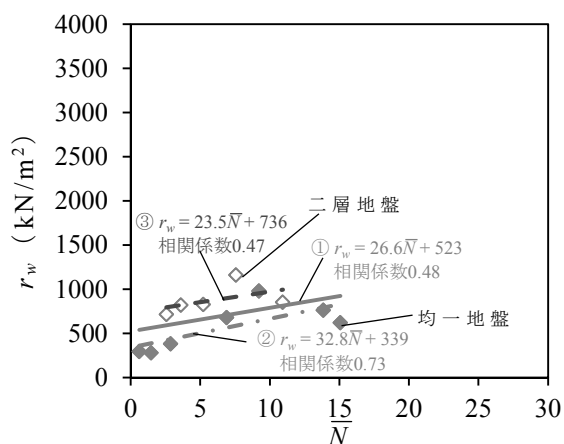
## (3) 杭周面

図 5.10 に各引抜き時における杭周面の引抜き抵抗力度  $r_s$  と  $\bar{N}$  の関係を示す。これによると、いずれの引抜き変位時においても、 $r_s$  は  $\bar{N}$  の増大に伴い増加する傾向にある。極限抵抗力度に相当する  $\delta=0.05d_w$  時に着目す

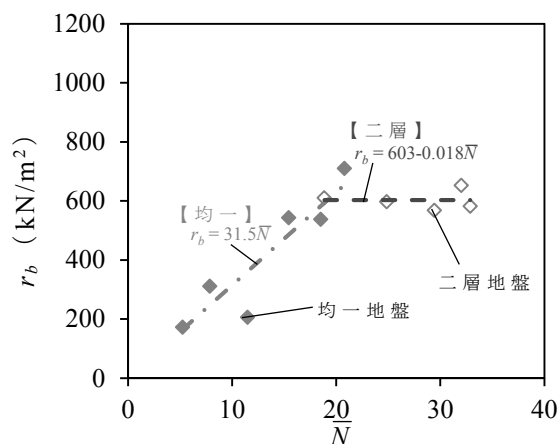
ると、 $r_s$  は文献<sup>33)</sup>に整理された回転貫入型の杭工法の押込み方向における同関係と概ね一致する．また、回転貫入杭は支持力機構の面から評価すると Non-displacement pile に近いといわれている<sup>6)</sup>が、杭周面の引抜き抵抗力度  $r_s$  は日本建築学会の建築基礎構造設計指針<sup>39)</sup>に示された同じく Non-displacement pile に分類される場所打ちコンクリート杭や埋込み杭の押込み方向の支持力係数 1.2～1.7 倍である．これは回転貫入施工によって杭周面近傍地盤の  $N$  値が増大した影響と考えられる．

#### (4) 杭先端部

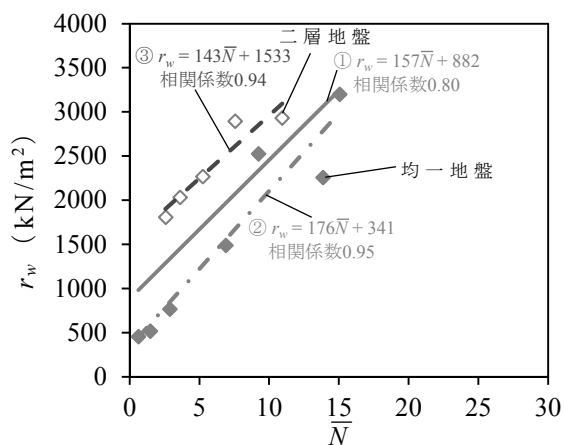
図 5.11 に各引抜き時における杭先端部の引抜き抵抗力度  $r_p$  と  $\bar{N}$  の関係を示す．回転貫入杭における既往の実用的な評価式は、羽根面と杭先端面の両者の抵抗を足し合せたこの考え方を採用しているのが一般的である．これ以降、本論文では杭先端部を同様に整理している．ここで、図 5.7(c)に示すように、杭先端部の引抜き抵抗  $R_p$  は羽根面と杭先端面の両者の抵抗であることから、 $\bar{N}$  は羽根面の上方  $3d_w$  から杭先端面の下方  $3d_o$  間の平均値を採用した．図 5.11 には全実験モデルを対象にした近似直線①に加えて、均一地盤および二層地盤それぞれの実験モデルを対象にした近似直線②および③も併記した．それによると、(i)の引抜き変位  $\delta=0.005d_w$  時および(iii)の  $\delta=0.5d_w$  時には羽根面  $r_w$  の同関係と概ね同様の傾向であるが、(ii)の  $\delta=0.05d_w$  時には羽根面  $r_w$  の同関係とは異なり、均一地盤と二層地盤の差異が小さい．つまり、羽根面  $r_w$  と杭先端面  $r_b$  の和である杭先端部の引抜き抵抗力度  $r_p$  は、(ii)中の全実験モデルを対象にした近似直線①で評価できることが確認された．



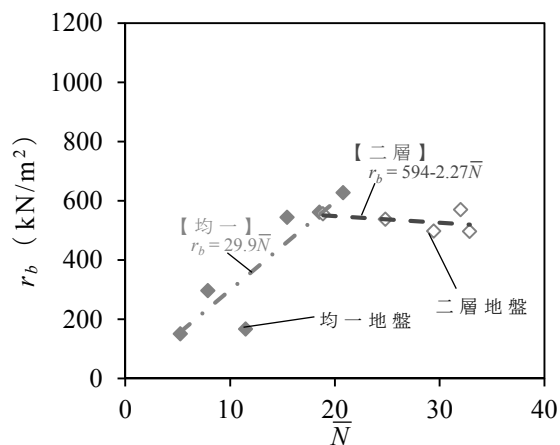
(i) 引抜き変位  $\delta=0.005d_w$  時  
(載荷初期)



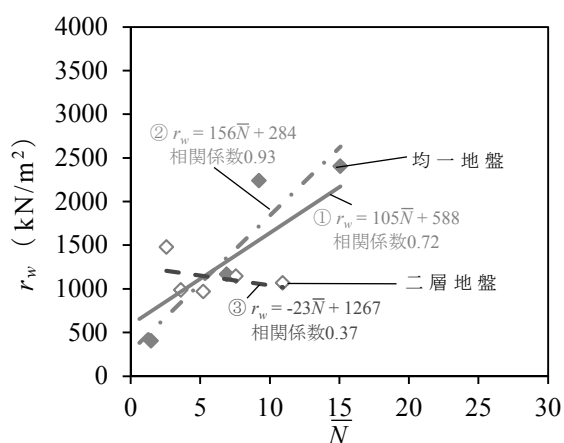
(i) 引抜き変位  $\delta=0.005d_w$  時  
(載荷初期)



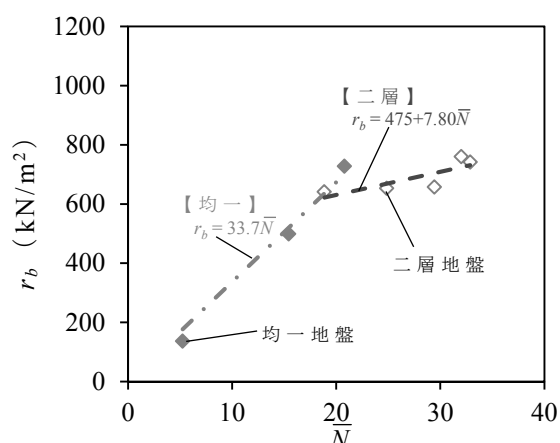
(ii) 引抜き変位  $\delta=0.05d_w$  時(極限)



(ii) 引抜き変位  $\delta=0.05d_w$  時(極限)



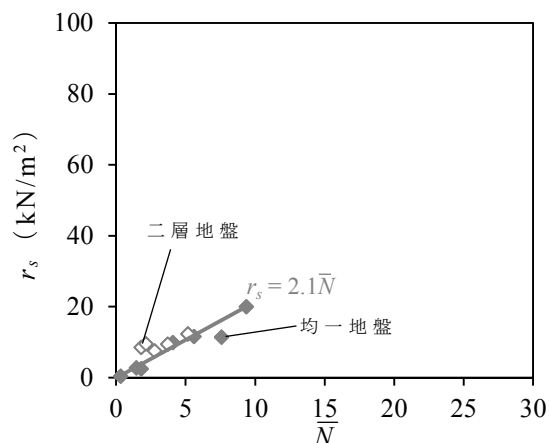
(iii) 引抜き変位  $\delta=0.05d_w$  (残留)



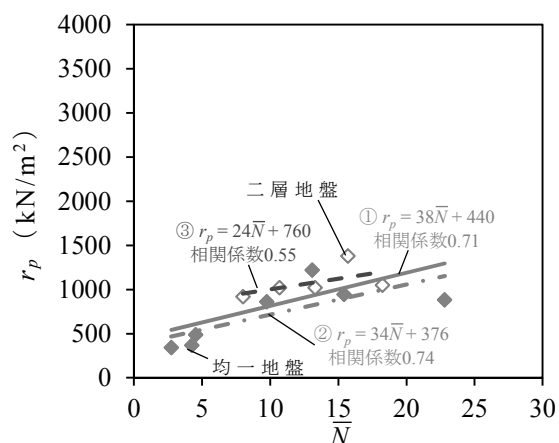
(iii) 引抜き変位  $\delta=0.05d_w$  (残留)

図 5.8 羽根面引抜き抵抗力度  $r_w$   
～  $\bar{N}$  の関係

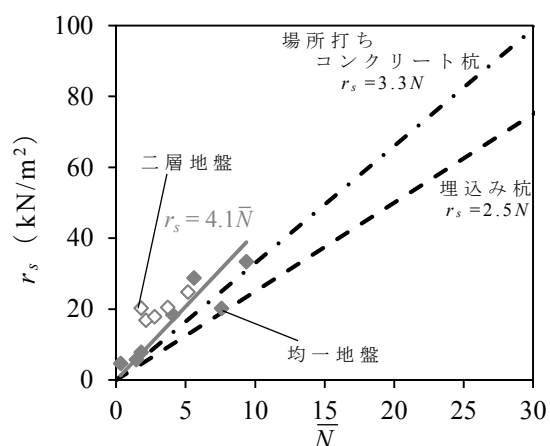
図 5.9 杭先端面引抜き抵抗力度  $r_b$   
～  $\bar{N}$  の関係



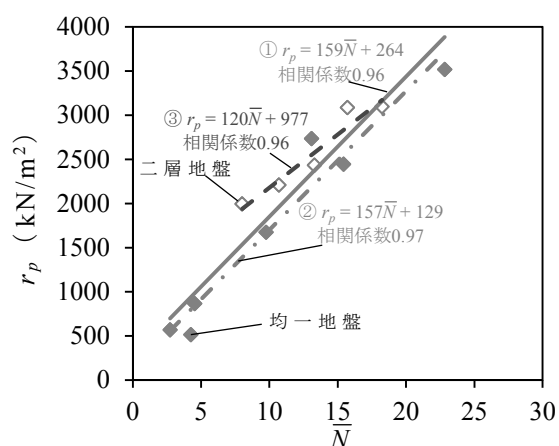
(i) 引抜き変位  $\delta=0.005d_w$  時  
(载荷初期)



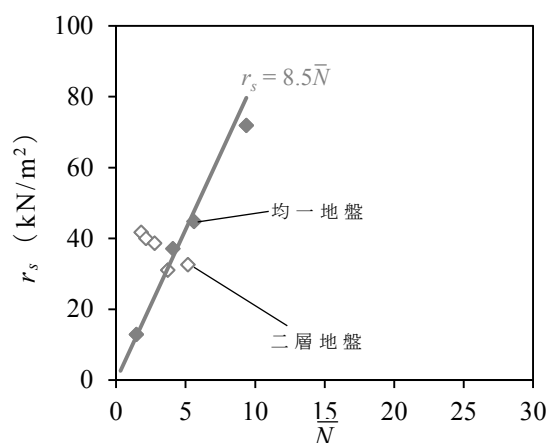
(i) 引抜き変位  $\delta=0.005d_w$  時  
(载荷初期)



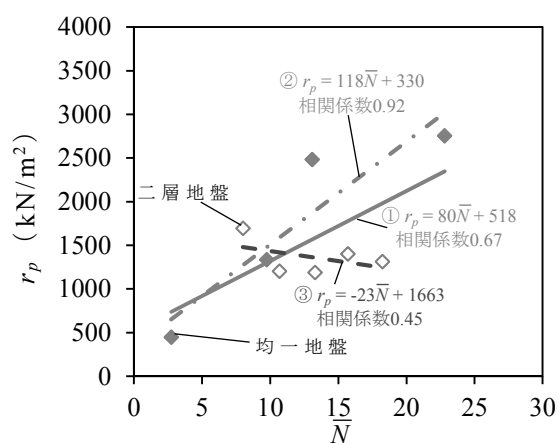
(ii) 引抜き変位  $\delta=0.05d_w$  時(極限)



(ii) 引抜き変位  $\delta=0.05d_w$  時(極限)



(iii) 引抜き変位  $\delta=0.05d_w$  (残留)



(iii) 引抜き変位  $\delta=0.05d_w$  (残留)

図 5.10 杭周面引抜き抵抗力度  $r_s$   
～  $\bar{N}$  の関係

図 5.11 杭先端部引抜き抵抗力度  $r_p$   
～  $\bar{N}$  の関係

## 5. 5 既往の原位置引抜き試験結果との比較

本節では，既往の原位置引抜き試験結果について，砂質土地盤に打止めされた回転貫入杭を対象として，せん断破壊面を考慮した羽根面の極限引抜き抵抗  $R_{uw}$  および地盤の平均  $N$  値に基づく杭先端部の極限引抜き抵抗  $R_{up}$  の算定式の適用性を検証する．既往の原位置引抜き試験結果は，過去 10 年間の日本建築学会大会学術講演梗概集，地盤工学研究発表会および基礎工を対象に調査して抽出した．

表 5.1 に，抽出した既往の原位置引抜き試験の概要および結果の一覧を示す．3 つの文献<sup>20)~22)</sup>から合計 7 本の試験結果を分析の対象とした．杭タイプは，模型実験で対象とした SH-C（杭周面に螺旋羽根が取付いた閉端杭）タイプに加えて，TF-C（杭先端面に平板が取付いた開端杭）タイプを対象とした（図 5.12 参照）．杭径  $d_o$  は 165.2~267.4mm，羽根径  $d_w$  は 373~550mm であり，羽根径比  $d_w/d_o$  は 1.9~2.9 である．杭先端近傍の  $N$  値は 16~53 であり，模型実験（ $N=3\sim23$ ）の範囲を含んでいる．

なお，載荷試験を行った地盤は，杭の支持層から地表面の区間の大部分が  $N$  値 1~5 程度と小さいことや羽根の貫入によって地盤が乱されている可能性があることから，杭頭荷重のみが計測されている試験杭では杭周面引抜き抵抗  $R_s$  を 0 と仮定した．

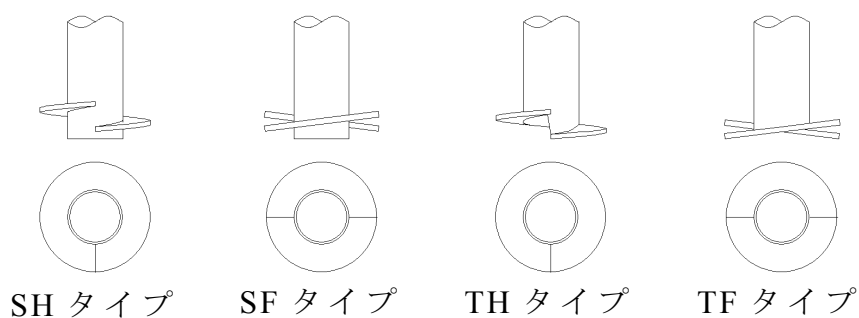


図 5.12 回転貫入杭の種別

表 5.1 既往の原位置引抜き载荷試験の概要および結果

| No. | 文献名              | 杭<br>番号 | 杭<br>タイプ | 杭径<br>$d_0$<br>(mm) | 羽根径<br>$d_w$<br>(mm) | 羽根径比<br>$d_w/d_0$ | 羽根面<br>有効断面積<br>( $\text{m}^2$ ) |
|-----|------------------|---------|----------|---------------------|----------------------|-------------------|----------------------------------|
| A-1 | A <sup>20)</sup> | 1       | SH-C     | 190.7               | 400                  | 2.1               | 0.097                            |
| A-2 |                  | 2       |          | 190.7               | 550                  | 2.9               | 0.209                            |
| A-3 |                  | 3       |          | 190.7               | 400                  | 2.1               | 0.097                            |
| A-4 |                  | 4       |          | 190.7               | 400                  | 2.1               | 0.097                            |
| B-1 | B <sup>21)</sup> | 1       | SH-C     | 267.4               | 500                  | 1.9               | 0.140                            |
| C-1 | C <sup>22)</sup> | 1       | TF-C     | 165.2               | 373                  | 2.3               | 0.088                            |
| C-2 |                  | 2       |          | 165.2               | 373                  | 2.3               | 0.088                            |

| No. | 文献名              | 杭<br>番号 | 杭先端深度<br>GL<br>(m) | 杭先端<br>支持地盤 | 杭先端部<br>$\bar{N}$ | 引抜き载荷試験結果                              |                       |
|-----|------------------|---------|--------------------|-------------|-------------------|----------------------------------------|-----------------------|
|     |                  |         |                    |             |                   | 引抜き変位 $\delta=0.05d_w$ 時<br>引抜き抵抗力（極限） |                       |
|     |                  |         |                    |             |                   | 杭頭部<br>$P_u$ (kN)                      | 杭先端部<br>$R_{up}$ (kN) |
| A-1 | A <sup>20)</sup> | 1       | -9.5               | 礫混り砂        | 19.3              | 190                                    | -                     |
| A-2 |                  | 2       | -9.5               | 礫混り砂        | 16.6              | 220                                    | -                     |
| A-3 |                  | 3       | -9                 | 礫混り砂        | 16.1              | 150                                    | -                     |
| A-4 |                  | 4       | -10                | 礫混り砂        | 25.0              | 280                                    | -                     |
| B-1 | B <sup>21)</sup> | 1       | -27.5              | 粘土混り砂       | 53.2              | 900                                    | 710                   |
| C-1 | C <sup>22)</sup> | 1       | -5.5               | 細砂          | 18.0              | -                                      | 200                   |
| C-2 |                  | 2       | -11                | 細砂          | 21.7              | -                                      | 260                   |

### 5. 5. 1 せん断破壊面に基づいた算定法

各文献より読み取れる引抜き試験結果は、引き抜き変位  $\delta=0.05d_w$  時（極限）の杭頭部の引抜き荷重  $P_u$  や杭先端部（羽根面+杭先端面）の引抜き抵抗力  $R_{up}$  である。従って、以下のように原位置引抜き試験の羽根面極限引抜き抵抗力  $R_{uw}$  を算出した。

CASE-A：杭頭部の極限引抜き荷重  $P_u$  のみ計測された場合は、羽根面の極限引抜き抵抗力  $R_{uw}$  を杭周面摩擦力を無視した下式で算定する。

$$R_{uw} = P_u - r_{ub} \cdot A_b \quad (5.12) \text{ 式}$$

CASE-B：杭先端部の極限引抜き抵抗力  $R_{up}$  の計測値がある場合は、羽根面の極限引抜き抵抗力  $R_{uw}$  を下式で算定する。

$$R_{uw} = R_{up} - r_{ub} \cdot A_b \quad (5.13) \text{ 式}$$

また，せん断破壊面角度は，5.3を参考に  $\theta=45^\circ$  を上限として設定した．なお，地下水位のレベルはいずれの文献にも記載がなかったので，最も浅い砂質土層の天端レベルと仮定した．

ここで， $R_{uw}$  ：羽根面の極限引抜き抵抗力（kN）

$P_u$  ：杭頭部の極限引抜き荷重（kN）

$R_{up}$  ：杭先端部の極限引抜き抵抗力（kN）

$r_b$  ：杭先端面の極限引抜き抵抗力度， $r_b=500 \text{ kN/m}^2$

$A_b$  ：杭先端面積（ $\text{m}^2$ ）

図 5.13 に，羽根面の極限引抜き抵抗力の算定式（5.4 式および 5.5 式）より求めた算定値  $R_{uw}$  と原位置引抜き試験結果より求めた試験値  $R_{uw}'$  の関係を示す．試験値は算定値の 0.5～2.0 倍の範囲にあり，多少ばらついているが，平均的には算定値と同程度（算定値の 1.0 倍程度）である．B-1 はその他と比べて試験値が小さい傾向があるが，粘性土が混ざった地盤に支持されていることも影響している可能性がある．

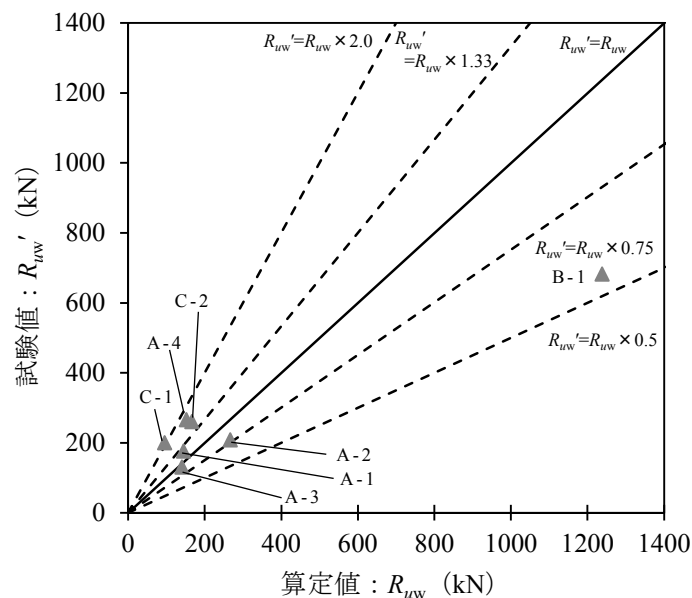


図 5.13 羽根面の極限引抜き抵抗力



## 5. 5. 2 地盤の平均 $N$ 値に基づいた算定法

$\bar{N}$  に基づく杭先端部の極限引抜き抵抗  $R_{up}$  は，図 5.10(ii) 中の近似直線式①に羽根面積  $A_w$  を乗じた下式で求める．

$$R_{up} = (159 \cdot \bar{N} + 264) \cdot A_w \quad (5.14) \text{ 式}$$

ここで， $A_w$  : 羽根面積

$\bar{N}$  : 羽根面の上方  $3d_w$  ～ 杭先端面の下方  $3d_0$  区間の平均  $N$  値

図 5.14 に，地盤の  $N$  値に基づく杭先端部の極限引抜き抵抗の算定式 (5.14 式) より求めた算定値  $R_{up}$  と原位置引抜き試験結果より求めた試験値  $R_{up}'$  の関係を示す．ここで，杭先端部の測定値がない場合には前項と同様に杭周面摩擦力を無視している．試験値  $R_{up}'$  は全体的に算定値  $R_{up}$  よりも小さい傾向があるが，概ね算定値  $R_{up}$  の 0.6 ～ 0.8 倍の範囲に分布しており，ばらつきも小さい．試験値  $R_{up}'$  が全体的に小さい主要因としては，原位置試験の場合には貫入打止め時に羽根近傍地盤が乱されていることが考えられる．すなわち，模型実験の場合には連続的に正回転した状態で打止めているのに対して，原位置試験の場合には所定の深度まで貫入させるために，特に支持層付近で正・負回転を繰返したことも想定される．この影響をどのように評価するのが今後の課題といえよう．

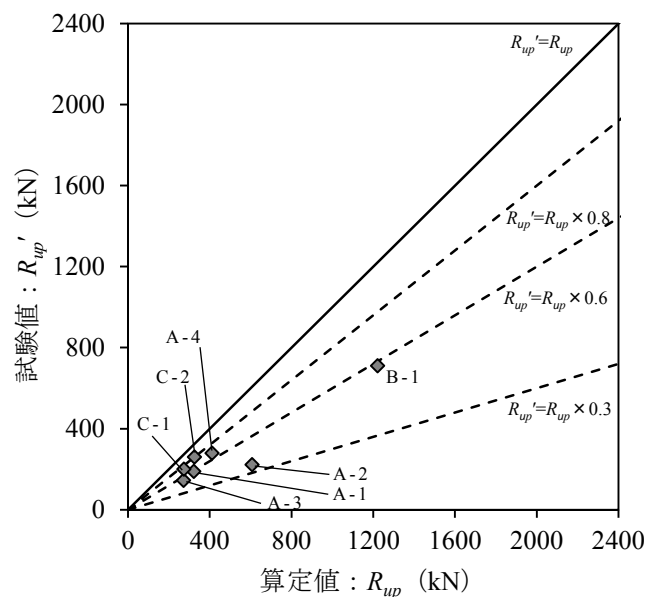


図 5.14 杭先端部の極限引抜き抵抗

## 5. 6 まとめ

第4章に示した引抜き载荷実験結果について、施工時情報、地盤のせん断破壊面および地盤の平均  $N$  値に基づいて、杭体各部の引抜き抵抗力の評価方法を検討した。更に、本論文で構築した算定式による値と既往の原位置引抜き試験結果の比較を行った。以下に得られた知見を示す。

### a) 施工時情報からの評価

- ① 载荷初期の引抜き変位  $\delta=0.005d_w$  および極限抵抗力に相当する  $\delta=0.05d_w$  時における杭先端部の引抜き抵抗力度  $r_p$  は、貫入打止め時の杭頭部の回転トルク  $T$  と比例関係にあり、 $T$  から概ね推定できる。ただし、羽根径  $d_w$  や羽根径比  $d_w/d_0$ 、杭長  $H$  が影響するので、現場ごとに校正試験が必要である。

### b) 地盤のせん断破壊面を考慮した羽根面抵抗力度の評価

- ② 羽根近傍地盤のせん断破壊面を考慮した羽根面の極限引抜き抵抗力  $R_{uw}$  の算定式は、概ね本模型実験の値と一致する。
- ③ ②と同様に考えた羽根面の残留引抜き抵抗力  $R_{rw}$  は、本模型実験の値に対して安全側の評価となる。ただし、②と共に杭先端部の抵抗力を評価する上では、杭先端面の引抜き抵抗力  $R_b$  の付加方法に課題がある。

### c) 地盤の平均 $N$ 値からの評価

- ④ 極限抵抗力に相当する引抜き変位  $\delta=0.05d_w$  時における羽根面の引抜き抵抗力度  $r_w$  と  $\bar{N}$  の関係は均一地盤と二層地盤の場合で傾向が異なるが、それぞれの相関性は高い。
- ⑤ 杭先端面の引抜き抵抗力度  $r_b$  と  $\bar{N}$  の関係は、均一地盤では  $\bar{N}$  に比例して増加するのに対して、二層地盤では  $\bar{N}$  にかかわらず一定値である。
- ⑥ 極限抵抗力に相当する引抜き変位  $\delta=0.05d_w$  時における杭先端部の引抜き抵抗力  $R_{up}$  と  $\bar{N}$  の関係は、羽根面の同関係と異なり、均一地盤と二層地盤の区別なく、下式で評価できる。

$$R_{up} = (159 \cdot \bar{N} + 264) \cdot A_w$$

ここで、 $A_w$  : 羽根面積 ( $\text{m}^2$ )

$\bar{N}$  : 羽根面の上方  $3d_w$ ～杭先端面の下方  $3d_o$  区間の平均  $N$  値

- ⑦ 杭周面の引抜き抵抗力度  $r_s$  は  $\bar{N}$  と概ね比例関係にある．極限抵抗に相当する引抜き変位  $\delta=0.05d_w$  時の  $r_s$  と  $\bar{N}$  の関係は，場所打ちコンクリートや埋込み杭の押込み時の場合と同程度もしくはそれよりも大きい傾向がある．

d) 原位置引抜き試験結果との比較

- ⑧ 原位置載荷試験の羽根面極限引抜き抵抗  $R_{uw}'$  は，本論文で構築したせん断破壊面を考慮した羽根面の極限引抜き抵抗  $R_{uw}$  の算出式より求めた値の 0.5～2.0 倍であるものの，平均的には良い対応を示す．
- ⑨ 原位置載荷試験の杭先端部極限引抜き抵抗  $R_{up}'$  は，本論文で構築した地盤の平均  $N$  値に基づく杭先端部の極限引抜き抵抗  $R_{up}$  の算定式より求めた値の 0.6～0.8 倍程度であり，杭施工中における地盤変化が模型地盤と原位置試験で異なることが示唆された．原位置試験では貫入打止め時における羽根近傍地盤の乱れなどが推察され，この影響の評価方法が今後の課題である．

## 第 6 章

### 総 括

本論文は、円柱加圧土槽に作製した乾燥砂地盤を用いて、杭の貫入から引抜き載荷までの一連の過程における杭挙動を測定して、回転貫入杭の杭体各部（羽根面、杭先端面および杭周面）の引抜き抵抗力特性を明らかにした後、支持層への根入れの影響を考慮した引抜き抵抗力の実用的な評価方法を提示したものである。

回転貫入実験で得られた主な知見は以下の通りである。

- ① 杭先端面が支持層に近づくと杭の貫入率  $\mu$  が低下するが、羽根面が支持層に達した時点からの  $\mu$  はほぼ一定になる。
- ② 打止め時の貫入率  $\mu$  は  $\bar{N} < 20$  程度までは  $\bar{N}$  の増大に伴い小さくなるが、 $\bar{N} \geq 20$  では  $\mu = 0.3 \sim 0.35$  とほぼ一定である。
- ③ 二層地盤の支持層に打止めた時点における杭先端面の施工時抵抗力  $iR_b$  および羽根面の施工時推進力  $iR_b$  は、密な D 地盤の打止め時におけるそれらと同程度である。
- ④ 杭頭部の回転トルク  $T$  と杭先端面の施工時抵抗力  $iR_b$  および羽根面の施工時推進力  $iR_w$  は概ね比例関係にあることから、 $T$  が施工管理の指標になる。
- ⑤ 打止め後に残留する杭体各部の荷重は  $\bar{N}$  から概ね推定できる。

回転貫入実験に引続いて実施した引抜き載荷実験で得られた主な知見は以下の通りである。

- ① 杭頭部の引抜き荷重  $P$  は羽根径  $d_w$  の 5～10% 引抜き時に最大となり、その後は減少もしくは一定に推移する傾向を示し、押込み荷重が作用する既往の研究における回転貫入杭の挙動とは大きく異なる。
- ② 羽根面の引抜き抵抗力  $R_w$  は支持層へ根入れさせない場合でも、杭先端面が支持層に近づくことで羽根上部の砂層がより密な状態になるため、緩い L 地盤の場合よりも大きくなる。
- ③ 杭先端面の引抜き抵抗力  $R_b$  は、羽根径  $d_w$  の 0.5% といった極めて小

さな引抜き量で最大となり，支持層への根入れ長さにかかわらず概ね一定となる特徴を有する．

- ④ 羽根面の抵抗力  $R_w$  が減少を始める羽根径  $d_w$  の 5～10% 引抜き時になると杭周面の引抜き抵抗力  $R_s$  が増大して，抜け上がりに伴う羽根面の抵抗力の減少を補う働きを示す．

次に，引抜き载荷実験で得られた杭体各部の引抜き抵抗力特性に基づいて，a) 施工時情報（杭頭部の回転トルク  $T$ ），b) 羽根近傍地盤のせん断破壊面，c) 地盤の平均  $N$  値を利用する 3 種類の手法による杭体各部の引抜き抵抗力の評価方法を検討した．その結果，a) 杭先端部（羽根面+杭先端面）の引抜き抵抗力  $R_p$  は，貫入打止め時の杭頭部の回転トルク  $T$  と比例関係にあること，b) 羽根上部のせん断破壊面を考慮した羽根面の極限引抜き抵抗力  $R_{uw}$  および羽根面の残留引抜き抵抗力  $R_{rw}$  の算定式は実験値と概ね一致すること，c) 杭先端部の引抜き抵抗力  $R_p$  は地盤の平均  $N$  値との相関性が高く，両者は簡単な一次式で表されることを明らかにした．

最後に，実用的な観点から上記の方法を考察すると，a) は現場毎に事前の校正試験が必要である点，b) は杭先端部の引抜き抵抗力  $R_p$  を評価する上で杭先端面の引抜き抵抗力  $R_b$  の付加方法に，それぞれ課題が残ることを指摘した後，本論文では c) の方法が現段階では最も実用的であるとして，下式を提示した．

$$R_{up} = (159 \cdot \bar{N} + 264) \cdot A_w$$

ここで， $R_{up}$  ：杭先端部の極限引抜き抵抗力度（kN）

$A_w$  ：羽根面積

$\bar{N}$  ：羽根面の上方  $3d_w$ ～杭先端面の下方  $3d_0$  区間の平均  $N$  値

以上のように，本論文では回転貫入杭の杭体各部の引抜き抵抗力の評価方法を検討したが，杭先端部の引抜き抵抗力算定式の精度を向上させるために，原位置における杭施工中の杭近傍の地盤変化の解明を今後の課題とする．

## 付 章 1

### 回転貫入中における羽根近傍地盤の可視化実験<sup>11), 40) ~ 45)</sup>

本付章は、杭貫入中の羽根近傍地盤の粒子挙動を杭内部から直接観察することを試みたものであって、文献<sup>11)</sup>中から本論文と関連性が強い部分を抜粋して記載したものである。

試作した実験装置は杭を一定の速度で貫入させることが可能であり、杭を模擬した透明なアクリルパイプ内に取り付けたファイバースコープによって、地盤を模擬した米の流動状況を追跡することが出来る。

#### (1) 実験装置および実験方法

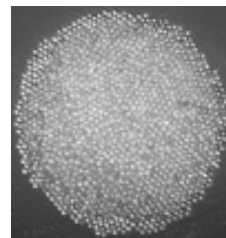
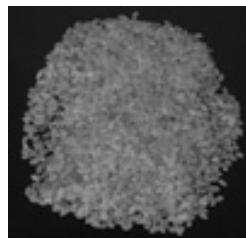
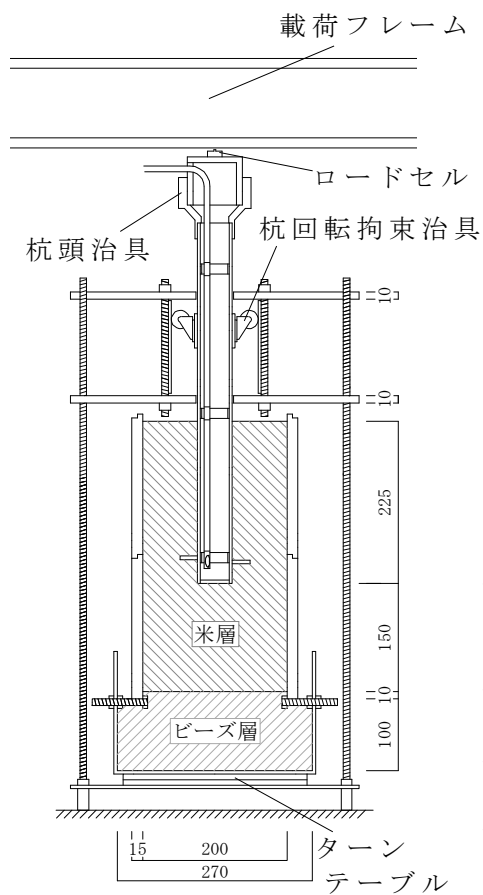
実験装置を付図 1.1 に示す。本実験の形状を有する回転杭は、通常の施工では杭頭を時計回りに回転させることによって貫入する。これに対して本実験では、載荷フレームを一定速度で降下させながら、杭の回転を拘束した状態でターンテーブルに載せた土槽を反時計回りに回転させる方式とした。また、杭の貫入を容易にするために、大きさの異なる 2 つの土槽の間に生じる隙間を利用して、杭先端より生じる力を地盤の外に逃がす構造となっている。

模型地盤は付写真 1.1 に示す白米とガラスビーズ ( $\phi 2.1\text{mm} \sim \phi 2.3\text{mm}$ ) を材料として作製した。地盤材料の性質を付表 1.1 に示す。白米の粒子はその形状から異方性が考えられるが、せん断抵抗角が硅砂 6 号に比較的近似していたので、地盤材料として採用した。ガラスビーズは粒子間の摩擦が小さく、動きやすい性質がある。これらの材料を付図 1.1 に示す位置に用いることで、杭貫入に伴う杭先端部の粒子の移動がスムーズになり、小さな土槽での模型実験が可能になった。また、杭貫入中の視覚による粒子追跡を容易にするために、食紅で着色した白米を 5% 程度混ぜている。なお、本実験では拘束圧が小さいこともあり、杭の貫入による白米の粒子破碎はほとんど観察されなかった。

模型杭は付図 1.2 に示すような軸部 ( $d_0=48\text{mm}$ ,  $t=4\text{mm}$ ) および羽根

部 ( $d_w=96\text{mm}$ ,  $t_w=5\text{mm}$ ) である。軸部は内部から地盤の様子を観察できるように透明アクリルパイプ (ヤング係数:  $E=2940\text{N/mm}^2$ , ポアソン比:  $\nu=0.36$ ) とした。羽根部は 1 枚の螺旋羽根であって, 比較的大きな曲げが作用する<sup>9)</sup>と考えられたので, 鋼材を加工したものとした。また, 付図 1.1 に示す杭頭部位置には杭頭荷重計測用のロードセル (型式: R-LMA-1KN) を設置する。

撮影用具はファイバースコープ (型式: FS-1000LR) と照明用のペンライトであって, それぞれを付図 1.3 のように配置する。ペンライトの光を杭先端内部に貼付したアルミホイルに反射させることで, 杭内部の明るさを十分に確保することができ, 撮影した映像が鮮明なものになった。ファイバースコープの固定は付図 1.3 中の固定具で行ない, 杭の内径に沿うものとなっている。この状態でファイバースコープとビデオカメラを接合し, 杭貫入中における羽根近傍地盤の粒子挙動を撮影する。なお, 貫入中の撮影は 1 回の実験につき 1 箇所とし, ファイバースコープの視野角 ( $60^\circ$ ) と画像のゆがみを考慮して模型杭に設定した 9 つの観察 Point (付図 1.4) について行なった。貫入終了後は, 羽根下面に生じる空洞部の様子を観察するために, 全 Point について撮影した。



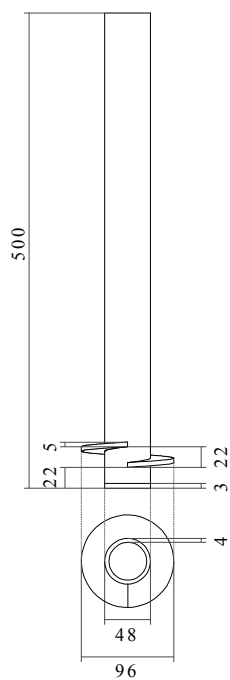
(1) 白米 (2) ガラスビーズ

付写真 1.1 地盤材料

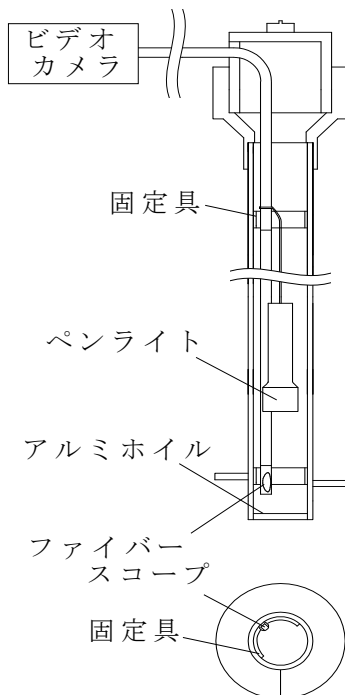
付表 1.1 地盤材料の性質

|            | 最大<br>密度<br>( $\text{g/cm}^3$ ) | 最小<br>密度<br>( $\text{g/cm}^3$ ) | 作製<br>地盤密度<br>( $\text{g/cm}^3$ ) | 安息角<br>( $^\circ$ ) | せん断<br>抵抗角<br>$\phi$ ( $^\circ$ ) |
|------------|---------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------|---------------------|-----------------------------------|
| 白米         | 0.962                           | 0.825                           | 0.862<br>( $D_r=29\%$ )           | 30                  | 33                                |
| ガラス<br>ビーズ | —                               | —                               | —                                 | 18                  | —                                 |

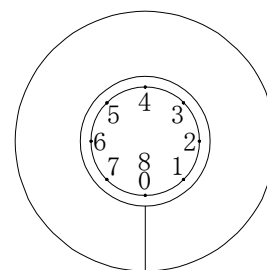
付図 1.1 実験装置



付図 1.2 模型杭



付図 1.3 撮影用具



付図 1.4 観察 Point



## (2) 基本モデルの粒子挙動

実験は貫入率  $\mu$  をパラメータ ( $\mu=0.3\sim0.5$ ) として、 $\mu$  が杭の貫入性能に及ぼす影響について検討する。なお、載荷フレームの降下速度が一定 (28.5mm/min) であるため、 $\mu=0.3, 0.4, 0.5$  に応じて土槽の回転速度をそれぞれ 4.3, 3.2, 2.6 回/min とした。この間の全回転数は貫入量が 60mm 程度に相当する 6~9 回転とした。

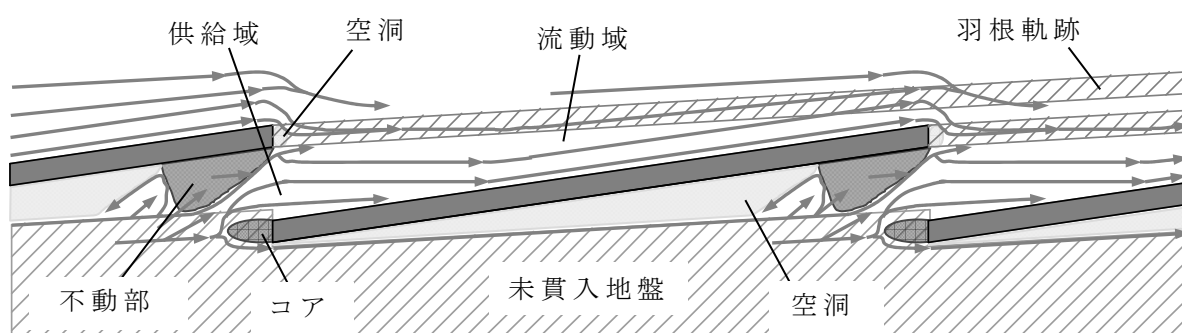
付図 1.5 は、基本モデル ( $\mu=0.4$ ) における杭貫入中の羽根近傍地盤の粒子挙動を観察した結果を平面展開して描いたものである。本実験から、羽根上面に粒子が供給される領域 (供給域) と粒子がスムーズに流動する領域 (流動域) があることを確認した。その他に羽根始端刃先には粒子が停滞する部分 (コア) と、羽根下面には空洞とほとんど粒子が動かない部分 (不動部) があり、更に、羽根終端刃先に羽根上面からこぼれ落ちる粒子との間で一時的に空洞が生じることを確認した。羽根上面の粒子の流れに着目すると、羽根始端の近くでは低速度でほぼ水平に流れているが、羽根終端に近づくにつれて速度を増し、羽根面と平行に流れている。

付図 1.6 はこれらの粒子の移動速度をポイント表示したものである。羽根始端から Point2 付近までは土槽の回転速度よりも遅いが、羽根終端付近では土槽の回転速度とほぼ同様である。このことから、羽根部と前回の羽根軌跡との間の地盤密度は Point0 から Point2 に向かって上昇し、Point3 付近以降では大きな推進力を生み出していると推察される。また、羽根上面への供給域を通過する粒子の流れは極めて遅い。これは羽根終端下部に生じる不動部と羽根始端刃先に形成されるコアによる抵抗の他に、羽根終端上面からこぼれ落ちた粒子が再び羽根面へ供給されることや、羽根下面の空洞の存在によって粒子が押し出されにくいためである。

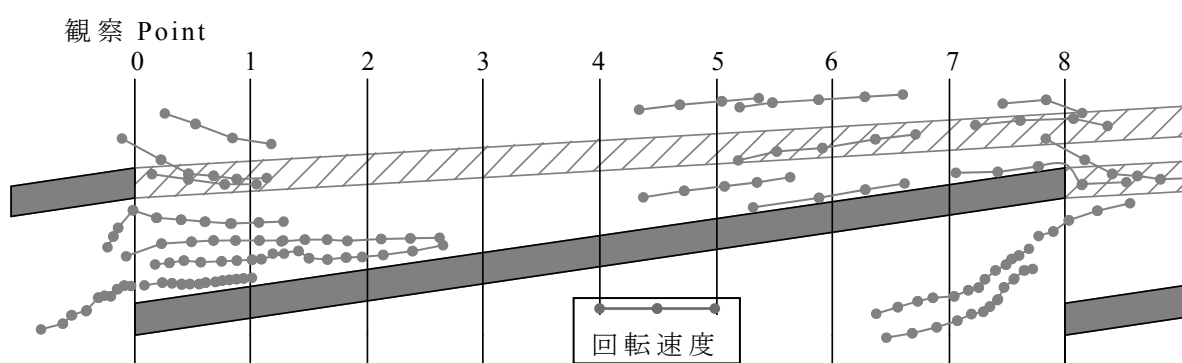
不動部は、貫入開始後すぐに形成され、その領域の大きさはその後ほとんど変化しない。この不動部は羽根始端刃先にコアが生じることで羽根の入り口に向かう粒子の流れが上向きになり、羽根終端下面の粒子の流れを妨げることや、羽根下面の空洞の存在によって粒子が押し出されないことで生じ、刃先のコアと共に貫入抵抗となると考えられる。羽根

下面の空洞は貫入開始と同時に羽根始端から形成されて徐々に拡大して、不動部の形成時に最大となり、その後はほとんど変化しない。

以上の羽根上部および下部の粒子挙動から羽根面で生み出される推進力は、羽根始端ではその上方に空洞が存在することからほとんど生じず、羽根終端に近づくにつれて大きくなるが、終端部では不動部の影響で減少することが示唆される。



付図 1.5 基本モデルの粒子挙動

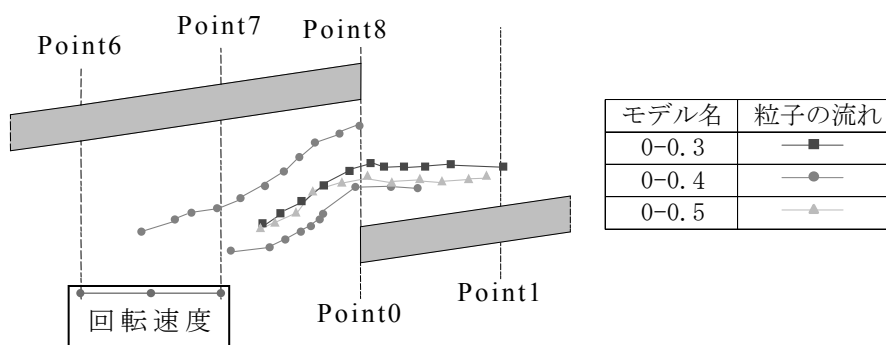


付図 1.6 基本モデルの粒子移動速度

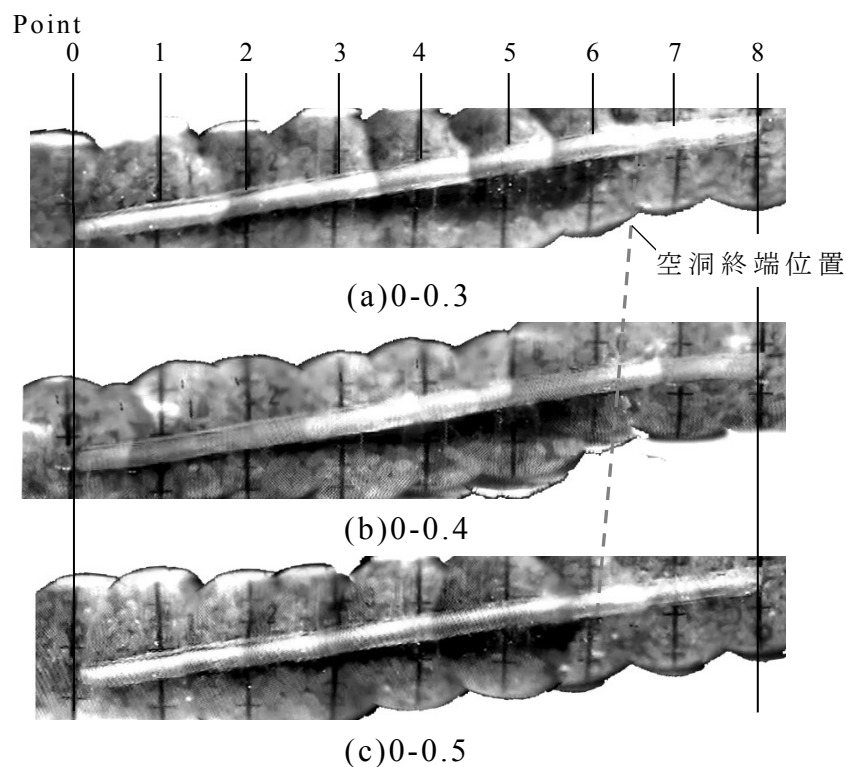
### (3) 貫入率 $\mu$ が及ぼす影響

付図 1.7 は、切り欠き部の粒子挙動について、貫入率  $\mu$  を変化させて比較したものであるが、貫入率  $\mu$  を変化させた場合には粒子挙動に大きな変化は見られなかった。

付図 1.8 は貫入終了後の羽根近傍地盤を平面展開したものである。貫入率  $\mu$  を大きくすると空洞域が狭くなっている。この現象はその後の押し込み载荷に対する鉛直支持性能に影響するものと考えられる。



付図 1.7 切り欠き部の粒子挙動



付図 1.8 貫入終了後の羽根近傍平面展開図

## 付 章 2

### 指針等による引抜き抵抗力の評価方法

杭の引抜き抵抗に関する日本建築学会の建築基礎構造設計指針<sup>39)</sup>、国土交通省告示<sup>46)</sup>および日本建築センターにおける評価式を示す。

#### (1) 日本建築学会 建築基礎構造設計指針<sup>40)</sup>

付図 2.1 は引抜き荷重を受ける単杭の設計限界値である。終局限界に対応する限界引抜き抵抗力を残留引抜き抵抗力としたのは、地震時などの繰返し荷重によって引抜き抵抗力が低下する可能性を考慮したためである。長期的に作用する引抜き荷重に対しては、降伏引抜き抵抗力より小さな荷重ではクリープ変位は小さいと考えられるが、十分な実証データがないため最大引抜き抵抗力の 1/3 を使用限界としている。

##### a) 引抜き試験による評価

引抜き試験は地盤工学会の基準に準拠して行う。ここで、残留引抜き荷重に達するまで杭を引抜かない場合は、極限荷重から杭の自重を差し引いた値の 1/1.2 に杭の自重を加えた値を残留引抜き抵抗力とする。



付図 2.1 単杭の設計用限界値

## b) 算定式による評価

杭の各限界引抜き抵抗力を下式で評価する．

- ・ 最大引抜き抵抗力：  $R_{TU} = (\sum \tau_s \cdot L_s + \sum \tau_c \cdot L_c) \cdot \phi + w$
- ・ 残留引抜き抵抗力：  $R_{TR} = \frac{1}{1.2} (\sum \tau_s \cdot L_s + \sum \tau_c \cdot L_c) \cdot \phi + w$
- ・ 降伏引抜き抵抗力：  $R_{TY} = \frac{2}{3} (\sum \tau_s \cdot L_s + \sum \tau_c \cdot L_c) \cdot \phi + w$

ここで，  $\phi$  ： 杭の周長（m）

$\tau_s$  ： 砂質土の最大周面摩擦力で押し込み時の極限周面摩擦力度の 2/3（kN/m<sup>2</sup>）

$\tau_c$  ： 粘性土の最大周面摩擦力で押し込み時の極限周面摩擦力度と同一（kN/m<sup>2</sup>）

$L_s$  ： 砂質土における杭の長さ（m）

$L_c$  ： 粘性土における杭の長さ（m）

$w$  ： 杭の自重で，地下水位以下では浮力を考慮（kN）

押し込み時の極限周面摩擦力度の算定式を付表 2.1 に示した．なお，引抜き時の砂質土の  $\tau_s$  を押し込み時の 2/3 としたのは，杭引抜き時に杭から地盤に伝播される応力が地盤の上載圧を減少させる作用（砂質土は拘束圧の影響を受ける）に配慮したことによる．

付表 2.1 極限周面摩擦力度の算定式

|             | 極限周面摩擦力度（kN/m <sup>2</sup> ）                                  |                                                                                                                                                     |
|-------------|---------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|             | 砂質土 $\tau_s$                                                  | 粘性土 $\tau_c$                                                                                                                                        |
| 打込み杭        | $\tau_s = 2.0 \cdot N$<br>$N$ ：杭周面地盤の平均 $N$ 値<br>（上限 $N=50$ ） | $\tau_c = \beta \cdot c_u$<br>$\beta = \alpha_p \cdot L_F$<br>$\alpha_p = 0.5 \sim 1.0$<br>$L_F = 0.7 \sim 1.0$<br>（上限 $c_u = 100 \text{ kN/m}^2$ ） |
| 場所打ちコンクリート杭 | $\tau_s = 3.3 \cdot N$<br>（上限 $N=50$ ）                        | $\tau_c = c_u$<br>（上限 $c_u = 100 \text{ kN/m}^2$ ）                                                                                                  |
| 埋込み杭        | $\tau_s = 2.5 \cdot N$<br>（上限 $N=50$ ）<br>ただし，杭周固定液を使用する場合に限る | $\tau_c = 0.8 \cdot c_u$<br>（上限 $c_u = 125 \text{ kN/m}^2$ ）                                                                                        |

### c) 鉛直載荷試験結果からの推定

杭の押込み試験結果を利用するもので、引抜き時の最大周面摩擦力は砂質土で押込み時の 2/3、粘性土で押込み時と同じ値とする。

### (2) 国土交通省告示（建築基準法）<sup>46)</sup>

建築物の設計で遵守する必要がある法令は、建築基準法（法律で国会が制定）、建築基準法施行令（政令で内閣が制定）、建築基準法施行規則等（省令で大臣が制定）、国土交通省告示（告示で大臣等が制定）の 4 階層からなっている。杭の引抜き抵抗力に関しては、2001 年 7 月の国土交通省告示第 1113 号に、以下の内容が記載されている。

#### a) 国土交通省告示第 1113 号 第 5 第三号

引抜き方向の許容支持力  ${}_tR_a$  は、打込み杭、セメントミルク工法による埋込み杭、場所打ち杭による区別はなく、以下の算定式が定められている。

##### a-1) 引抜き試験を実施する場合

$$\cdot \text{長期} \quad {}_tR_a = \frac{1}{3} {}_tR_u + w_p$$

$$\cdot \text{短期} \quad {}_tR_a = \frac{2}{3} {}_tR_u + w_p$$

ここで、 ${}_tR_u$  は引抜き試験より求めた極限引抜き抵抗力、 $w_p$  は実況により浮力を減じた杭の有効自重である。

##### a-2) 地盤調査結果を基に計算する場合

$$\cdot \text{長期} \quad {}_tR_a = \frac{4}{15} R_F + w_p$$

$$\cdot \text{短期} \quad {}_tR_a = \frac{8}{15} R_F + w_p$$

ここで、 $R_F$  は鉛直押込みと同様の杭の周面摩擦力式  $(10\overline{N}_s \cdot L_s / 3 + \overline{q}_u \cdot L_c / 2) \cdot \phi$  を用いるが、上記のように長期に 4/15、短期に 8/15 を乗じているので、引抜き抵抗力の許容値は鉛直押込み時の 0.8 倍にな

っている。なお、 $\overline{N}_s$  の上限値は 30、 $\overline{q}_u$  の上限値は 200kN/m<sup>2</sup> と規定されている。

#### b) 国土交通省告示第 1113 号 第 6 第二号

引抜き方向の許容支持力  ${}_tR_a$  は、以下の算定式を用いることができる。ただし、適用する地盤の種類及び基礎杭の構造方法ごとに引抜き試験に基づき求めたものとする。

- ・ 長期  ${}_tR_a = 1/3 \{ \kappa \cdot \overline{N} \cdot A_p + (\lambda \cdot \overline{N}_s \cdot L_s + \mu \cdot \overline{q}_u \cdot L_c) \cdot \phi \} + w_p$
- ・ 短期  ${}_tR_a = 2/3 \{ \kappa \cdot \overline{N} \cdot A_p + (\lambda \cdot \overline{N}_s \cdot L_s + \mu \cdot \overline{q}_u \cdot L_c) \cdot \phi \} + w_p$

ここで、 $\kappa$ 、 $\lambda$  および  $\mu$  は杭の先端付近の地盤または杭周囲の地盤の支持力係数であって、実況に応じた引抜き試験により求めた数値である。なお、 $\overline{N}$  は杭先端付近の標準貫入試験の平均打撃回数（最大は 60）、 $A_p$  は杭先端の有効断面積であるが、これらに関する先端付近の範囲などの具体的な記述は見られない。また、 $\overline{N}_s$  は杭周面の砂質地盤の標準貫入試験の平均打撃回数、 $\overline{q}_u$  は杭周面の粘土質地盤の一軸圧縮強度の平均値であるが、これらの上限値は特に規定されていない。

#### （３）基礎評定委員会（日本建築センター）

（一財）日本建築センターの基礎評定委員会は、前述した同項（２）の国土交通省告示第 1113 号第 6 第二号に対するものとして、2011 年 1 月に「既製ぐい等の引抜き方向の地盤の許容支持力に関する評定基準」<sup>47)</sup>を公表した。

評価基準は、杭先端付近の支持力係数  $\kappa$  を評価する「基準 1」と杭先端付近の支持力係数を評価せずに  $\kappa=0$  とする「基準 2」がある。ただし、長期の引抜き方向の支持力に関しては、現段階では評定基準を示す状況には至っていないとして、短期の許容支持力式のみを示している。「基準 1」の評価式を以下に示す

- ・ 短期  ${}_tR_a = 2/3 \{ \kappa \cdot \overline{N} \cdot A_p + (\lambda \cdot \overline{N}_s \cdot L_s + \mu \cdot \overline{q}_u \cdot L_c / 2) \cdot \phi \} + w_p$

ここで、 $\overline{N}$  は杭先端付近の標準貫入試験の平均打撃回数、 $A_p$  は杭先端の有効断面積である。引抜き抵抗力を高めることを目的として、特殊な

機構や先端形状を有する杭工法が種々開発されていくものと予想される。この場合、支持力係数  $\kappa$  の性質は工法毎に異なるものである。 $\bar{N}$ を採用する深度と  $A_p$  は、開発した工法の引抜き支持力機構に合致するように適切に設定することがポイントである。なお、 $\bar{N}$ 、 $\bar{N}_s$  および  $\bar{q}_u$  の上限値はそれぞれ 60、30 および 200 (kN/m<sup>2</sup>) としている。

$\kappa$ 、 $\lambda$  および  $\mu$  の支持力係数の設定方法の他に、引抜き試験、施工試験および各種性能試験の実施方法を定めている。なお、現時点の評定基準の適用においては、以下のような制限が設けられている。

- ① 引抜き方向の許容支持力を定める際に、有害はひび割れ発生の有無などの杭体の健全性・耐久性および杭体同士の継ぎ手は対象外とする。
- ② コーン破壊が生じない十分に長い単杭としての性能を前提としており、短い杭や群杭は対象外とする。
- ③ 杭の軸部径が 1200mm 以下の既製杭等（埋込み杭工法や回転貫入杭工法）であって、場所打ちコンクリート杭工法は対象外とする。



## 謝辞

本論文は、学部・博士前期課程における卒業・修士論文のテーマに引き続くものであり、その間多くのご指導、ご鞭撻を賜りました。

室蘭工業大学教授 土屋 勉 先生には、会社での業務との調整がうまくいかずに計画したように進められない中、基本的なことから多くのご指導とご助言を賜りました。在学中にあった人事異動で挫折しそうな時にも、その後の進め方などを共に考えて頂き、また励まして頂き、最後まで論文をまとめることができました。誠にありがとうございました。心より感謝申し上げます。

本論文の審査を通じ、室蘭工業大学教授 木幡 行広 先生、同教授 溝口 光男 先生には貴重なご助言を賜りました。心より感謝申し上げます。

室蘭工業大学助教 永井 宏 先生には、ご自身の経験から多くのアドバイスを賜ると共に、励ましの言葉とご支援を頂き、誠にありがとうございました。心より感謝申し上げます。

本論文中の模型実験は、これまで研究室で実験条件を変えながら継続的に行ってきたもので、室蘭工業大学技官 島田 正夫 氏をはじめ、実験に携わってきた大学院生ならびに学部生の皆様の苦心と努力の結晶だと思います。皆様の協力がなければ、本論文をまとめることはできなかったと思います。心より感謝申し上げます。

最後に、このような機会を後押しして頂いた東急建設株式会社 技術研究所 沼上 清 所長、同プロジェクト推進部 矢島 淳二 専任部長には、いつも励まして頂きありがとうございました。同技術研究所 古垣内 靖 グループリーダーには、会社内の業務を調整して論文をまとめられる環境を作って頂きありがとうございました。その他にも、日頃の業務を負担し、またご配慮頂いた数多くの社内の方々のご協力がなければ、本論文をまとめることはできませんでした。皆様に深く感謝申し上げます。

平成 27 年 12 月

中 沢 楓 太

## 参 考 文 献

- 1) 須藤敏巳, 佐藤眞弘, 西村勝尚, 石井雄輔, 西山高士, 森脇登美夫, 江村勝, 津田和明, 渡邊康司, 高橋恵美子, 長谷川智仁, 鈴木直子, 茶谷文雄, 福本義之, 笹本克紀, 和田祐介: 場所打ち節付き杭の鉛直交番載荷試験および引抜き試験 (その 1 ~ 5), 日本建築学会大会学術講演梗概集, B-1 分冊, pp.567-576, 2008.9.
- 2) 平井芳雄, 青木雅路: 拡張部を有する場所打ちコンクリート杭の引抜き正常に関する原位置引抜き試験, 日本建築学会構造工学論文集, Vol.54B, pp.59-66, 2008.3.
- 3) 宮田勝利, 宮本和徹, 佐野大作, 田中昌史, 飯田努: 先端および中間部に拡張部を有する杭の施工試験, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.477-478, 2013.8.
- 4) 森利弘, 小林公次, 市川寛, 宮本和徹, 金子治, 新井寿昭, 矢島淳二, 宮田勝利, 飯田努, 田中昌史: 先端および中間部に拡張部を有する杭の鉛直載荷試験 その 1 ~ 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.478-481, 2013.8.
- 5) 新井寿昭, 小川敦, 小林公次, 中沢楓太, 宮本和徹, 田口智也, 飯田努, 田中昌史, 高橋孝二, 松木和彦: 先端および中間部に拡張部を有する杭の支持力に関する解析的検討 その 1 ~ 2, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.482-485, 2013.8.
- 6) 池田篤則: 回転貫入杭における先端部の支持力評価法に関する研究, 室蘭工業大学博士学位論文, 2012.12.
- 7) 土屋勉: 回転貫入杭工法の動向と今後の課題, 基礎工, Vol.34, No.11, pp.2-6, 2006.11.
- 8) 佐伯英一郎, 大木仁: 回転圧入鋼管杭に関する研究, 構造工学論文集, Vol.45B, pp.453-462, 1999.3.
- 9) 大杉富美一, 土屋勉, 島田正夫, 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, pp.69-75, 2005.5.

- 10) 国府田誠，佐藤秀人，他：螺旋羽を持つ回転貫入杭の貫入および支持力に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，第 601 号，pp.91-98，2006.3.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 池田篤則，土屋勉，島田正夫，中沢楓太：回転貫入杭の支持層に対する根入れ効果に関する実験的研究，日本建築学会構造系論文集，第 75 巻，第 651 号，pp.951-956，2010.5.
- 14) 池田篤則，土屋勉，永井宏：杭先端面と羽根面の支持力機構に基づいた回転貫入杭の鉛直支持力算定式の構築，日本建築学会技術報告集，Vol.18，No.40，pp.877-882，2012.10.
- 15) 杭の引抜き抵抗，基礎工，Vol.39，No.11，2011.11.
- 16) 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.
- 17) 佐伯英一郎，平田尚，永田誠，丸山栄：羽根を有する回転圧入鋼管杭の長期引抜き試験，第 36 回地盤工学研究発表会，pp.1569-1570，2001.6.
- 18) 小松章，青木一二三，種村史郎，西岡英俊，平嶋裕：回転圧入鋼管杭の鉛直交番最荷試験(その 1，その 2)，第 38 回地盤工学研究発表会，pp.1487-1490，2003.7
- 19) 澤石正道，飛松直樹，青木一二三，山崎貴之：軟岩に支持された回転圧入鋼管杭の引抜き載荷実験，第 40 回地盤工学研究発表会，pp.1593-1594，2005.7
- 20) 國松諭，梅田雅芳，吉田勝之：先端羽根付き鋼管杭の引抜き体力特性について，第 41 回地盤工学研究発表会，pp.1463-1464，2006.7
- 21) 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体力，第 42 回地盤工学研究発表会，pp.1205-1206，2007.8.
- 22) 笠原康弘，小林俊夫，柏尚稔，宮本裕司：羽根付き鋼管杭の引抜き抵抗力に関する実験的研究，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.427-428，2012.9.

- 23) 梅田雅芳, 前嶋匡, 池田篤則: 小径回転貫入杭の引抜き試験, 基礎工, Vol. 41, No. 8, pp. 52-55, 2013. 8.
- 24) 永田誠, 平田尚: 模型実験による回転圧入鋼管杭の引抜き抵抗の研究 (その 1 : 引抜き試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 549-550, 2004. 8.
- 25) 平田尚, 永田誠: 模型実験による回転圧入鋼管杭の引抜き抵抗の研究 (その 2 : 可視化および土圧測定試験), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 551-552, 2004. 8.
- 26) 山口敏光, 国府田誠, 佐藤秀人, 永田誠, 大橋正照: 螺旋羽を有する回転貫入杭の模型杭による引抜き試験, 第 42 回地盤工学研究発表会, pp. 1207-1208, 2007. 7
- 27) 刑部徹, 和田昇三, 青山征生, 河田泰之: 回転貫入杭の支持力特性に関する実験的研究, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 433-434, 2012. 9
- 28) 時松孝次, 稲村溪, 鈴木比呂子, 和田昌敏, 眞野英之: 正負交番鉛直荷重が直杭および羽根付杭の鉛直支持力・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 77 巻, 第 681 号, pp. 1683-1689, 2012. 11.
- 29) ト部光平, 時松孝次, 鈴木比呂子, 浅香美治: 正負交番鉛直荷重を受ける羽根付き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 80 巻, 第 713 号, pp. 1113-1122, 2015. 7.
- 30) 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, pp. 139-150, 2003. 10.
- 31) A.Ghaly, A.Hanna, M.hanna: Tensile and compressive shaft capacity of piles in sand I : Dry sand, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.117, No.5, pp.773-793, 1991.5.
- 32) 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, 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp. 1265-1266, 1986. 8.
- 33) 土屋勉, 高坂舞: 回転貫入杭の鉛直支持力特性に関する統計的検討, 日本建築学会技術報告集, 第 21 巻, 第 49 号, pp. 991-994, 2015. 10.
- 34) 大江隆寛, 土屋勉, 永井宏, 島田正夫: 杭周辺地盤の PIV による可視化実験 (その 2 引抜き荷重を受ける底板付き円筒模型杭, 第 48 回地盤工学研究発表会, pp. 1279-1280, 2013. 7.

- 35) 山根純平，土屋勉，永井宏，島田正夫，大江隆寛：引抜き荷重を受ける底板付き円筒模型杭の PIV 可視化実験，第 49 回地盤工学研究発表会，pp.1205-1206，2014.7.
- 36) 日本道路協会：杭基礎設計便覧 平成 18 年度改訂版，2007.1.
- 37) 青木一二三：杭の引抜き抵抗機構と設計における考え方，基礎工，Vol.39，No.11，pp.2-11，2011.11.
- 38) 米田大希，土屋勉，永井宏，島田正夫，大澤隆幸：回転貫入杭の引抜き抵抗力に関する模型実験，第 47 回地盤工学研究発表会，pp.1081-1082，2012.7.
- 39) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.10.
- 40) 中沢楓太，土屋勉，島田正夫：回転貫入杭の打ち止め方式と支持性能に関する模型実験，第 42 回地盤工学研究発表会，pp.1213-1214，2007.7.
- 41) 中沢楓太，土屋勉，島田正夫：回転貫入杭の支持力性能に及ぼす打ち止め方式の影響，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.80，pp.129-132，2007.7.
- 42) 中沢楓太，土屋勉，山崎祐平：回転貫入杭の貫入中における羽根近傍地盤の観察(その 1 観察方法および粒状体の挙動)，第 41 回地盤工学研究発表会，pp.1469-1470，2006.7.
- 43) 島田正夫，土屋勉，中沢楓太：回転貫入杭の貫入中における羽根近傍地盤の観察(その 2 観察結果および考察)，第 41 回地盤工学研究発表会，pp.1471-1472，2006.7.
- 44) 中沢楓太，土屋勉，島田正夫，山崎裕平：回転貫入杭の貫入メカニズムに関する模型実験，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.79，pp.163-166，2006.7.
- 45) 中沢楓太，土屋勉，島田正夫，大杉富美一，田内大紀，四日市拓哉：回転貫入杭打設時における地盤挙動の可視化，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.78，pp.107-108，2005.7.
- 45) 国土交通省告示第 1113 号，第 7 項，2001.7.(最終改定，2007.9 告示第 1232 号)
- 46) (一財)日本建築センター：既製杭等の引抜き方向の地盤の許容支持力に関する評価基準について，ビルディングレター，2011.1.

## 学位論文に関連する発表論文リスト

### ■査読付き論文

- 1) 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特性に関する模型実験，日本建築学会構造系論文集，第80巻，第714号，pp.1279-1286, 2015.8.
- 2) 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.

### ■その他の論文

- 1) 峯知宏，土屋勉，永井宏，島田正夫，中沢楓太，岡聖也：回転貫入杭の引抜き抵抗に関する模型実験－Ⅳ，第49回地盤工学研究発表会，pp.1365-1366, 2015.9.
- 2) 岡聖也，土屋勉，永井宏，島田正夫，中沢楓太，峯知宏，佐藤洋，東智貴：回転貫入杭の引抜き抵抗に関する実験的研究（その4），日本建築学会北海道支部研究報告集，No.88，pp.81-84, 2015.6.
- 3) 岡聖也，土屋勉，永井宏，島田正夫，中沢楓太：回転貫入杭の引抜き抵抗に関する模型実験－Ⅲ，第49回地盤工学研究発表会，pp.1179-1180, 2014.7.
- 4) 岡聖也，土屋勉，永井宏，島田正夫，中沢楓太，岩倉栞，小塚将悟，千葉紘平：回転貫入杭の引抜き抵抗に関する実験的研究（その3），日本建築学会北海道支部研究報告集，No.87，pp.111-114, 2014.6.
- 5) 中沢楓太，土屋勉，島田正夫：回転貫入杭の打ち止め方式と支持性能に関する模型実験，第42回地盤工学研究発表会，pp.1213-1214, 2007.7.
- 6) 中沢楓太，土屋勉，島田正夫：回転貫入杭の支持力性能に及ぼす打ち止め方式の影響，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.80，pp.129-132, 2007.7.
- 7) 中沢楓太，土屋勉，山崎裕平：回転貫入杭の貫入中における羽根近傍地盤の観察（その1 観察方法および粒状体の挙動），第41回地盤工学研究発表会，pp.1469-1470, 2006.7.
- 8) 島田正夫，土屋勉，中沢楓太：回転貫入杭の貫入中における羽根近傍地盤の観察（その2 観察結果および考察），第41回地盤工学研究発表会，pp.1471-1472, 2006.7.

- 9) 中沢楓太，土屋勉，島田正夫，山崎裕平：回転貫入杭の貫入メカニズムに関する模型実験，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.79，pp.163-166，2006.7.
- 10) 中沢楓太，土屋勉，島田正夫，大杉富美一，田内大紀，四日市拓哉：回転貫入杭の引抜き抵抗に関する実験的研究（その2），日本建築学会北海道支部研究報告集，No.78，pp.107-108，2005.7.