



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

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2013-11-15 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 池田, 篤則 メールアドレス: 所属:
URL	https://doi.org/10.15118/00005096

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

平成 24 年 12 月

池田篤則

博士論文題目

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

氏名 池田 篤則

論文内容の要旨

本論文は、表層地盤の下に比較的密な砂層が存在する地盤条件を対象として、大型加圧土槽による模型実験および実大杭による原位置試験を実施し、それらの施工時と載荷時の挙動の考察に基づいて、回転貫入杭の新たな支持力評価法を構築したものである。

最初に、支持層への根入れを変化させた施工実験および鉛直載荷実験を実施した。実験は模型実験および原位置試験であって、前者は模型杭(軸径 76.3mm, 羽根径 152.6mm)を大型加圧土槽に作成した二層地盤に施工した場合、後者は実杭(軸径 114.3mm, 羽根径 228.6mm)をシルト層を貫通させて細砂層に根入れさせた場合である。これらの実験を通して、回転貫入杭の支持層への根入れ効果に関する新たな知見として、①杭先端面が支持層に達する手前で杭体トルクや貫入率が変化するので、支持層への到達状況を概略知ることができること、②杭先端を支持層に根入れさせると羽根面の支持力は増加するが、杭先端面の支持力はほとんど変化しないこと等を得ている。更に、上記の大型加圧土槽を用いて、薄層の厚さを変化させた施工実験および鉛直載荷実験を実施し、③薄層の層厚を増加させると杭先端面と羽根面の荷重が増加するが、支持力に有効な層厚が存在すること、④載荷の進行に伴い杭先端部荷重に占める杭先端面および羽根面の荷重負担割合が変化することを明らかにしている。

上記の特性から、杭先端面と羽根面に地盤のN値を同様に付与することの問題点、並びに杭先端部の極限支持力に一律の安全率を課して許容支持力を評価することの問題点を指摘できる。そこで、回転貫入杭工法においては杭先端面と羽根面を分離して評価することが重要との観点から、下記の考え方を導入した回転貫入杭の新たな支持力評価式の構築を行っている。

- 1) 極限支持力の評価については、杭先端面および羽根面について、それぞれ独自の支持力係数 α_b および α_w を導入する。
- 2) 長期と短期の許容支持力の算定では、杭先端面および羽根面について、それぞれ独自の支持力発揮率 ξ_b および ξ_w を導入する。

これらの評価式の妥当性は、杭の打ち止め深度の異なる原位置載荷試験結果と比較することで検証した。

最後に、既往の回転貫入杭の原位置載荷試験結果に対して、杭先端面荷重と羽根面荷重を合わせた杭先端部荷重の計算値が実測値に概ね近似することから、本論文の評価式の適用性を確認した。

TITLE

A STUDY FOR EVALUATING THE PILE TOE RESISTANCE OF HELICAL SCREW PILES

(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)

NAME IKEDA ATSUNORI

ABSTRACT

This thesis presents a new method to evaluate the pile toe resistance of helical screw piles embedded into a relatively hard sand layer underlying soft material. Pile behavior observed during installation and loading has been examined through model tests in a large-scale calibration chamber (CC) and full-scale field tests in this study.

Firstly, the monitoring of pile installations and the followed loading tests were conducted by changing the embedment length in a bearing layer. In the model tests, the model pile of 76.3 mm with a helical plate attached on its tip of 152.6 mm in diameter was screwed into a double-layered sand deposit in the CC. For full-scale field tests, the test pile of 114.3 mm with a helical plate of 228.6 mm in diameter was screwed into a sand layer underlying silt deposit. These experiments provide with new evidence as follows: ① During installation, both torque and penetration rate change as the pile tip closes to the bearing layer, which allows us to estimate the relative position between the pile tip and the top surface of bearing layer. ② Partial embedment of the pile tip to the bearing layer contributes to the increase of load mobilizing at the helical plate, while the load sustained by the bottom plate remains almost unchanged regardless of the embedment length.

A series of model tests were also conducted by changing the thickness of bearing layer, where the afore-mentioned model pile was employed. The thickness of bearing layer influences on the pile behavior as follows: ③ Both sustained load at the bottom plate and the helical plate increase as the thickness of bearing layer increases. However, the incremental rate tends to become constant suggesting the existence of optimum thickness of the layer. ④ As applied load increases, the ratio of the sustained load among the total toe resistance changes between the bottom plate and the helical plate.

Observed features in this study demonstrate that neither taking the same SPT-N value nor the same safety factor for allowable capacity to the bottom plate and the helical plate is rational, which is common in practice. The pile toe resistance for helical screw piles should be evaluated separately to the bottom plate and the helical plate. These considerations draw the following conclusions for constructing the new formula to calculate the toe capacity of helical screw piles:

- 1) For evaluating the toe bearing capacity, respective bearing coefficients (α) are introduced to the bottom plate (α_b) and the helical plate (α_w).
- 2) For evaluating the allowable bearing capacity in long term and short term, respective coefficients of capacity mobilization (ξ) are introduced to the bottom plate (ξ_b) and the helical plate (ξ_w).

Applicability of the derived formula was confirmed in comparison with the field test results executed in the different partial embedment to the bearing layer.

Finally, the proposed formula obtained in this study was applied to previously conducted field loading test results of helical screw piles in various conditions. The calculated capacities comprising the resistance by the bottom plate and the helical plate show good agreement, which proves the applicability of this formula.

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

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、施工時には低振動・低騒音で掘削残土が発生せず、載荷時には羽根部による支持力増加が期待できることから、小径から大径まで種々のタイプが実用化されている。回転貫入杭に関する既往の研究は、主に均一地盤での模型実験を中心に進められ、貫入メカニズムと支持力特性が解明されてきた。一方、実現場の回転貫入杭は緩い地盤を打ち抜いて、支持層と判定された深度から羽根径分程度を根入れして打ち止めるのが一般的だが、支持層への根入れ効果が不明確なまま採用されているのが現状である。

本論文は、表層地盤の下に比較的密な砂層が存在する地盤条件を対象として、支持層への根入れ長さや薄層の層厚による影響に着目した大型加圧土槽による模型実験および実大杭による原位置試験を実施し、それらの施工時と載荷時の挙動の考察に基づいて、回転貫入杭の新たな支持力評価法を構築したものであり、全7章および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 大型加圧土槽による模型実験の方法

使用した機材や模型杭の諸元、地盤の作製方法、施工実験および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 模型実験に基づく先端部支持力特性

模型による施工および鉛直載荷の実験結果を整理して、回転貫入杭の支持層への根入れ効果に関して、以下の知見を得た。

①. 杭先端面が支持層に達する手前で杭体トルクや貫入率が変化するの

で、支持層への到達状況を概略知ることができる。

- ②．杭先端を支持層に根入れさせると羽根面の支持力は増加するが、杭先端面の支持力はほとんど変化しない。
- ③．薄層の層厚を増加させると杭先端面と羽根面の荷重が増加するが、支持力に有効な層厚が存在する。
- ④．載荷の進行に伴い杭先端部荷重に占める杭先端面および羽根面の荷重負担割合が変化する。

第4章 原位置地盤による先端部支持力特性の検証

第3章の模型実験で得られた支持力特性を確認するために、荒川沿いの沖積低地の実地盤において、支持層への根入れ状態を変化させた5体の原位置載荷試験を実施した。その結果、模型実験で得られた知見①～④と同様の現象を確認した。

第5章 先端部の支持力評価式の構築

前章までで得られた知見より、杭先端面と羽根面に同様の地盤の値を付与することの問題点、並びに杭先端部の極限支持力に一律の安全率を課して許容支持力を評価することの問題点を指摘できる。本章では、杭先端面と羽根面を分離して回転貫入杭工法の支持力を評価することが重要との観点から、下記の考え方を導入した新たな支持力評価式の構築を行った。

- 1) 極限支持力の評価については、杭先端面および羽根面について、それぞれ独自の支持力係数 α_b および α_w を導入する。
- 2) 長期および短期の許容支持力の評価については、杭先端面と羽根面について、それぞれ独自の支持力発揮率 ξ_b および ξ_w を導入する。

これらの評価式の妥当性は、杭の打ち止め深度の異なる2体の原位置載荷試験結果と比較することで検証した。

第6章 支持力評価式の既往の原位置載荷試験結果への適用

第5章で構築した新しい支持力評価式について、回転貫入杭工法の開

発にあたって実施した既往の回転貫入杭の原位置載荷試験結果と比較することによって、杭先端面荷重と羽根面荷重を合わせた杭先端部荷重の計算値が既往の実測値に概ね近似することから、本論文の評価式の適用性を確認した。

第7章 総括

以上の各章で明らかになったことを要約した後、今後の課題を記した。

付章として、薄層地盤における模型杭の施工データ、第3章および第5章で実施した原位置載荷試験の施工データおよび原位置載荷試験に用いる杭体の製作を示した。

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

第1章 緒論	
1.1 概説	1
1.2 既往の研究	3
1.2.1 原位置試験	5
1.2.2 室内模型実験	7
1.3 本論文の目的と範囲	15
第2章 大型加圧土槽による模型実験の方法	
2.1 実験装置	17
2.2 地盤および杭の作製	19
2.3 施工実験方法	23
2.4 載荷実験方法	24
2.5 実験条件	25
第3章 模型実験に基づく先端部支持力特性	
3.1 まえがき	27
3.2 施工時および載荷時の挙動	28
3.2.1 均一地盤の場合	28
3.2.2 二層地盤の場合	34
3.2.3 中間層地盤の場合	42
3.3 先端部支持力に及ぼす根入れの影響	49
3.4 先端部支持力に及ぼす中間層の影響	56
3.5 まとめ	61
3.5.1 施工時および載荷時の挙動について	61
3.5.2 先端部支持力の発現過程について	61
第4章 原位置地盤試験による先端部支持力特性の検証	
4.1 まえがき	63
4.2 試験方法	64
4.2.1 試験地の地盤構成	64
4.2.2 試験杭	66
4.2.3 施工方法	67
4.2.4 載荷方法	69
4.3 試験結果	71

4.3.1 施工時の挙動	71
4.3.2 載荷時の挙動	73
4.4 まとめ	79
第5章 先端部の支持力評価式の構築	
5.1 まえがき	80
5.2 支持力評価式の構築	81
5.3 原位置載荷試験での検証	90
5.4 まとめ	100
第6章 支持力評価式の既往の原位置載荷試験結果への適用	
6.1 まえがき	101
6.2 実杭による載荷試験の概要	102
6.3 先端部支持力に関する本論文の提案式と原位置試験結果の比較	121
6.4 既往の計算式と本論文の提案式の比較	125
6.5 まとめ	127
第7章 総括	128
付章	
付章1 模型実験杭の施工データ (中間層地盤)	130
付章2 原位置載荷試験杭の施工データ (西遊馬)	133
付章3 原位置載荷試験杭の施工データ (伊奈町)	136
付章4 原位置載荷試験に用いる杭体の製作	137
謝辞	139
参考文献	140
学位論文に関連する発表論文リスト	142

第 1 章 緒論

1.1 概説

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って開発¹⁾され、実用化に至っている。回転貫入杭が急速に普及した理由として、以下のような環境面と支持力面での有利さが認識されるようになったことが挙げられる。

- ①. 鋼管の先端面または杭周面に溶接された螺旋翼や平板（以下、本論文ではこれらをまとめて羽根と呼ぶ）が回転推進力となって施工されるため、低振動・低騒音で掘削残土が発生しないという環境問題に配慮されている点。
- ②. 羽根部が鉛直支持力を負担することの他に、施工方法からは排土杭（Displacement pile）に分類されるため、相応の軸部先端と軸部周面の抵抗力が期待される点。

回転貫入杭の支持力特性は、杭施工時の挙動に大きく依存すると考えられることから、杭設置による杭と近傍地盤の状態変化を含めた検討が必要である。このような観点から、杭の貫入メカニズムと支持力に関する比較的大型の模型杭による実験的研究^{2)~6)}が精力的に行われてきた。明らかになった杭の貫入メカニズムは、杭軸に傾斜して取り付けられた羽根が地盤に切り込み、羽根の刃先前方の土が羽根面を通過して羽根上方に移動するのに伴って圧縮された土で羽根を下方に押圧することになるが、その過程で杭先端近傍地盤の拘束圧が緩められるため、比較的小さな回転推進力で施工できるというものである。杭の載荷過程においては、貫入過程で生じる羽根下面の空洞域が杭先端の荷重—沈下関係の初期剛性を低下させる。その結果、支持力面からは非排土杭（Non-displacement pile）に近いとも云える。また、杭施工に伴って杭体各部には他の杭工法（場所打ち杭や埋込み杭）とは異なる軸力が残留するので、杭体各部の支持力評価や羽根部の構造設計面での配慮が必要となる。

以上のように、貫入時や鉛直載荷時における回転貫入杭の基本的特性については明らかになったが、いずれも均一地盤を対象にした模型実験

に基づく結論である。一方、実現場における回転貫入杭は、比較的緩い地盤を打ち抜いて密な支持層へ施工されるケースが多い。この時、支持層と判定された深度から羽根径分程度の根入れを行うのが一般的となっている。しかし、回転貫入杭の支持力に及ぼす支持層への根入れ長さの影響を検証した研究はほとんど見当たらないことから、支持層への根入れ効果が不明確な状態で採用されているのが現状と云える。更に、回転貫入杭の施工時には、杭1本毎に回転トルクや杭頭部の押圧力および1回転あたりの貫入量等の情報が得られる。支持層に根入れされる前後におけるこれらの情報と杭の支持力とを関連づけることができれば、回転貫入杭の信頼性は飛躍的に向上すると考えられる。

以上の状況を踏まえて、本論文では表層地盤の下に比較的密な砂層が存在する地盤条件を対象として、大型加圧土槽による模型実験および実大杭による原位置試験を実施し、それらの施工時と載荷時の挙動の考察に基づいて、回転貫入杭の新たな支持力評価法を構築する。

ここで、論文中で使用している回転貫入杭の先端部付近の荷重(抵抗力)と部位の定義を図1.1に示す。

杭先端面荷重：杭軸部先端面に作用する荷重

羽根面荷重：羽根部下面に作用する荷重

杭先端部荷重：杭先端面荷重と羽根面荷重の和

羽根ピッチ：羽根始端と終端の開き

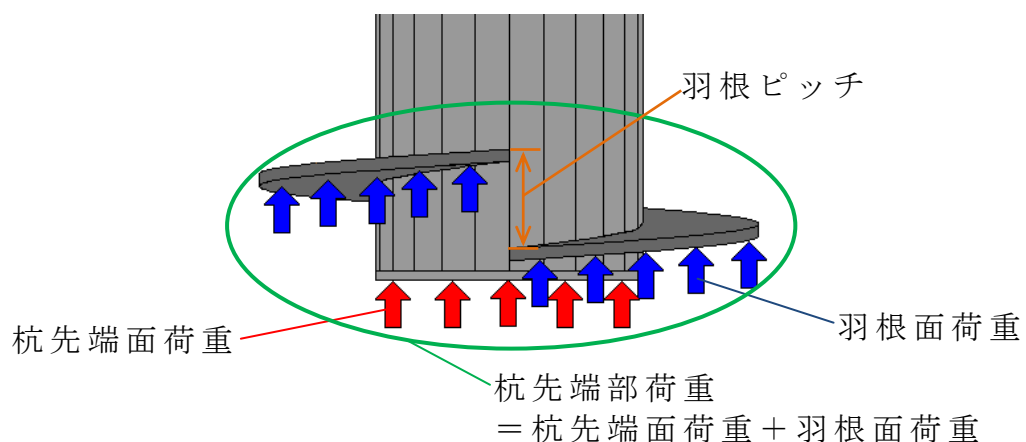


図 1.1 先端部付近の定義

1.2 既往の研究

回転貫入杭の歴史は比較的早く、文献⁷⁾によると19世紀中頃からヨーロッパで橋梁、燈台、棧橋などで使用されていた。また、日本国内でも明治の初め頃から橋梁の基礎等として使用されていた。この頃の回転貫入杭は人力で回転力を与えて施工するものであった。その後、杭の施工に蒸気エンジン動力によるドロップハンマーといった機械が登場し、コンクリート杭の施工が容易になったことで、回転貫入杭は一度姿を消すこととなった。

現在の回転貫入杭が日本国内で実用化されたのは、1986年に小規模建築物用の羽根付き小径鋼管杭⁸⁾として実用化されたのが最初であるが、1.1で示した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1200mm羽根径2400mmといった大型のものまで種々の工法が実用化¹⁾されている。

高坂⁹⁾は回転貫入杭工法を表1.1のように分類している。羽根形状は螺旋形と平面型の2種類、羽根位置は杭先端と杭周面の2種類、杭先端が閉端型と開放型の2種類であって、これらの組み合わせは $2^3=8$ 通りとなる。これらの中で2006年までに日本建築センターで公的評価を取得しているものは6タイプである。

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1.1、TH-0タイプの写真1.2、TF-Cタイプの写真1.3等がある。

表 1.1 回転貫入杭工法の分類

注：数字は件数

		羽根位置		合計
		周面 (S)	先端 (T)	
形状	螺旋 (H)	SH-C 6	TH-C 0	10 (62%)
		SH-0 2	TH-0 2	
	平面 (F)	SF-C 3	TF-C 2	6 (38%)
		SF-0 0	TF-0 1	
合計		11 (69%)	5 (31%)	16



写真 1.1 SH-C タイプ



写真 1.2 TH-0 タイプ



写真 1.3 TF-C タイプ

1.2.1 原位置試験

回転貫入杭は多くの原位置載荷試験が実施されているが、開発した工法の支持力係数 α の確認が目的で行われたものがほとんどである。

その中で杭径，羽根径，羽根角度等の因子を変化させて比較した試験としては佐伯ら¹⁰⁾の研究がある。これは杭径 ϕ 300mm～600mmの回転貫入杭の開発にあたり，羽根形状の違いによる施工性や施工時の杭頭トルクと地盤のN値の関係を調べたものである。

場所は千葉県富津市であり，図1.2に示す地盤で試験が行われた。変化した因子は本体径，羽根形状，羽根径，羽根径比，杭先端面の開端率および羽根角度であり，試験ケースごとの各因子の値を表1.2に示す。なお，羽根は杭先端に螺旋翼が取り付けられている(表1.1のTHタイプ)が，表中の羽根形状の1枚は1周の螺旋翼となっているもの，羽根形状の2枚は半周の螺旋翼2枚で構成されているもの(図1.3参照)である。試験は24本の施工試験と，標準杭である試験体番号1の載荷試験を行なっている。

これらの試験により以下のことを明らかにした。

- ・ 本体径，羽根径および羽根角度が大きいほど杭頭トルクが大きくなる。
- ・ 羽根径比が1.2の場合は中間層の手前，羽根角度が 2.5° の場合は支持層の手前で貫入がほとんど0mmとなる滑り現象が発生した。
- ・ 杭先端が開放されているものについては，管内土高さは杭先端深度に合わせ一様に上昇せず，硬質地盤に貫入する際に上昇する。
- ・ 地盤状況を杭頭トルクでほぼ把握することができることから，杭頭トルクから支持力を算定できる可能性がある。

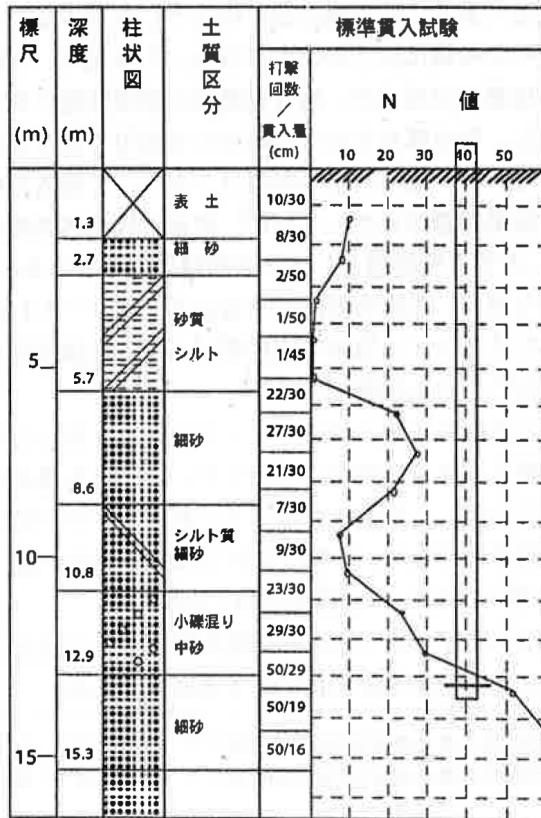


図 1.2 試験地盤と杭の関係

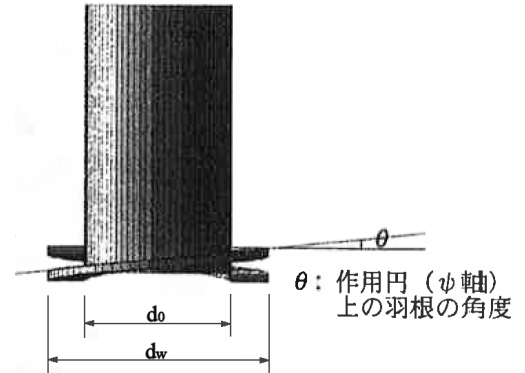


図 1.3 試験杭図

表 1.2 試験ケース一覧表

試験体番号	本体径 d_0 (mm)	羽根形状	羽根径 d_w (mm)	羽根径比 d_w/d_0	開端率 (%)	羽根角度 ($^\circ$)	杭先端深度 GL-(m)
1	508.0	2枚	762.0	1.50	90	5.0	13.7
2	508.0	1枚	762.0	1.50	90	5.0	13.7
3	508.0	2枚	609.6	1.20	90	5.0	7.6
4	508.0	2枚	1016.0	2.00	90	5.0	13.5
5	508.0	2枚	1016.0	1.50	70	5.0	11.5
6	508.0	2枚	1016.0	1.50	0	5.0	13.3
7	508.0	2枚	1016.0	1.50	90	2.5	11.7
8	508.0	2枚	1016.0	1.50	90	10.0	13.0
9	508.0	1枚	1016.0	1.50	0	5.0	13.4
10	508.0	1枚	1016.0	1.50	100	5.0	13.7
11	508.0	2枚	1016.0	1.50	100	10.0	13.1
12	508.0	2枚	1016.0	1.50	100	10.0	13.0
13	508.0	2枚	889.0	1.75	90	5.0	13.8
14	508.0	1枚	889.0	1.50	90	5.0	13.6
15	609.6	2枚	914.4	1.50	90	5.0	16.4
16	609.6	2枚	914.4	1.50	90	2.5	16.4
17	609.6	2枚	914.4	1.50	90	10.0	16.4
18	609.6	1枚	914.4	1.50	0	5.0	16.4
19	609.6	1枚	914.4	1.50	100	5.0	16.4
20	609.6	1枚	914.4	1.50	90	10.0	16.4
21	318.5	2枚	477.8	1.50	90	5.0	15.0
22	318.5	2枚	477.8	1.50	70	5.0	17.5
23	318.5	1枚	477.8	1.50	0	5.0	16.2
24	318.5	1枚	477.8	1.50	100	5.0	16.8

1.2.2 室内模型実験

室内模型実験では，羽根径や羽根ピッチ等の杭体因子や地盤の密度や拘束圧などの地盤条件を変化させた場合について，施工実験および鉛直載荷実験が行われている．比較的大型の土槽を利用して，これらの因子を系統的に研究した3機関の事例を示す．

(1) 日本大学の研究

羽根形状の因子を変化させた実験として国府田ら⁴⁾の研究がある．これは回転貫入杭の貫入メカニズムと支持力発現のメカニズムの解明を目的として行われた．

変化させた因子は杭種および羽根ピッチであり，実験ケースの一覧を表1.3に示す．使用した模型杭を図1.4に示す．本体径48mm，羽根径86mmであり，軸部先端，先端部および胴体部に分割されており，各々の軸力を計測することで杭先端面，羽根面および周面摩擦が計測できる構造となっている．なお，ストレート杭は図1.4の先端部に羽根がないものとなっている．使用した土槽および施工，載荷装置を図1.5に示す．土槽は直径1,400mmの円筒形土槽で深さは1,100mmであるが，上載圧負荷装置はなく上載圧は0である．また，土槽内に24個の土圧計を設置している．

実験は土槽上端から本体径の10倍(480mm)まで貫入実験を行い，その後，載荷実験を杭頭変位が本体径である48mmに達するまで行なっている．

この研究により得られた主な知見は以下のとおりである．

- ・ 回転貫入杭の貫入時には羽根下近傍地盤の拘束圧，剛性および強度が

表 1.3 実験ケース一覧表

試験番号	杭種	本体径 d_0 (mm)	羽根径 d_w (mm)	羽根ピッチ p_w (mm)	埋設方法
1	回転貫入杭	48	86	8	回転貫入
2				12	
3				16	
4				24	
5				36	
6	ストレート杭		-	-	無回転圧入

低下するため、圧入ストレート杭の貫入力よりも低い羽根推進力で貫入する。

- ・貫入時における軸方向の鉛直摩擦力は、羽根ピッチが大きなものほど大きくなり、羽根ピッチ 12mm に対して 24mm では約 2 倍になる。それに対し周方向の杭体周面摩擦トルクは、羽根ピッチが小さなものほど大きくなり、羽根ピッチ 32mm に対して 8mm では約 2 倍になる。
- ・回転貫入杭の载荷初期の杭頭荷重は、回転貫入によって杭先端地盤が緩められるため、圧入ストレート杭よりも低く、荷重～沈下曲線の割線係数は $0.05d_0$ 変位時に圧入ストレート杭の約 0.7～0.8 倍となる。この傾向は羽根ピッチが大きいものほど強く、初期剛性はより低下する。
- ・ $1d_0$ 変位時の杭先端面荷重は、羽根による杭先端面付近の地盤の移動を押さえる効果によって増大し、圧入ストレート杭の杭先端面荷重に対し約 1.1 倍となる。

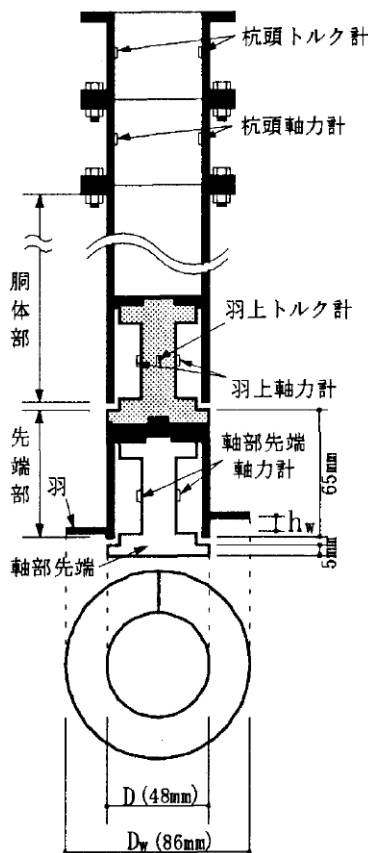


図 1.4 実験模型杭図

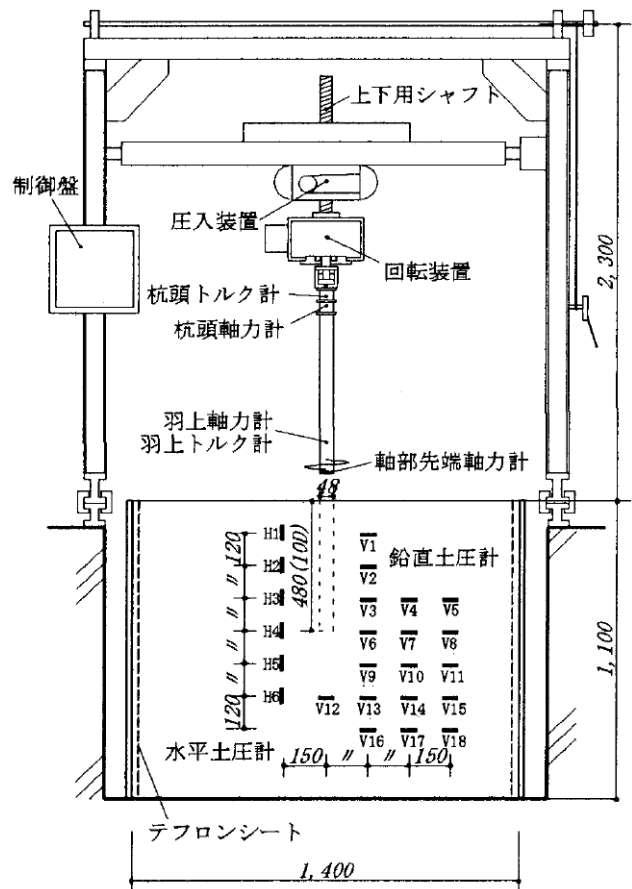


図 1.5 実験土槽図

(2) 新日本製鐵の研究

永田ら²⁾は貫入メカニズムの解明と、トルクと地盤強度の関係解明を目的として以下の研究を行なっている。

変化させた因子は、本体径、羽根径、羽根径比、拘束圧（上載圧および側方圧）、施工時の杭頭上載荷重、羽根ピッチおよび切欠角度であり、実験ケースの一覧を表 1.4 に示す。ここで切欠角度とは、図 1.6 に示すように羽根端部を一部切除した際の杭中心基準による羽根端部角度である。使用した模型杭は国府田ら⁴⁾の研究と同様であり、軸部先端、先端部および胴体部に分割されたものである。使用した土槽は、図 1.7 に示すように直径 1,200mm 高さ 1,200mm の円筒形土槽であり、上方並びに側方から加圧する装置を備えたものである。

試験は土槽上端から 600mm まで施工実験を行い、その後続けて載荷実験を行なっている。なお、1つの実験ケースにつき 3 回施工実験を行っており、実験全体では $17 \times 3 = 51$ 回施工実験を行っている。

この研究により明らかとなった主な事項は以下のとおりである。

- ・施工時の貫入量を羽根ピッチで除した貫入率は、杭径によらずほぼ一定であるが、羽根径が大きいほど、羽根ピッチが小さいほど大きくなる。
- ・切欠き角度は 45° の場合が最も貫入率が大きくなる。
- ・載荷時には羽根径比が大きいほど杭先端面の荷重度が大きくなり、羽根径比 1.5 に対し 2.0 は約 1.7~2.0 倍となる。
- ・杭先端面応力を拘束圧で除した係数は拘束圧に反比例する。
- ・切り欠き角度が支持力へ及ぼす影響は小さい。

表 1.4 実験ケース一覧表

試験 番号	本体径 d_0 (mm)	羽根径 d_w (mm)	羽根 径比 d_w/d_0	拘束圧 (kPa)		杭頭上 載荷重 (kN)	羽根 ピッチ (d_0)	切欠 角度 ($^\circ$)
				上載圧	側方圧			
1	40	60	1.5	300	150	0.0	0.3	45
2	40	60	1.5	300	150	1.0	0.3	45
3	40	60	1.5	300	150	2.0	0.3	45
4	40	60	1.5	300	150	4.0	0.3	45
5	40	60	1.5	100	50	0.0	0.3	45
6	40	60	1.5	500	250	0.0	0.3	45
7	40	80	2.0	300	150	0.0	0.3	45
8	40	80	2.0	300	150	2.0	0.3	45
9	50	75	1.5	300	150	0.0	0.3	45
10	50	100	2.0	300	150	0.0	0.3	45
11	60	90	1.5	300	150	0.0	0.3	45
12	60	120	2.0	300	150	0.0	0.3	45
13	40	60	1.5	300	150	0.0	0.5	45
14	40	60	1.5	100	50	0.0	0.5	45
15	40	60	1.5	500	250	0.0	0.5	45
16	40	60	1.5	300	150	0.0	0.3	0
17	40	60	1.5	300	150	0.0	0.3	90

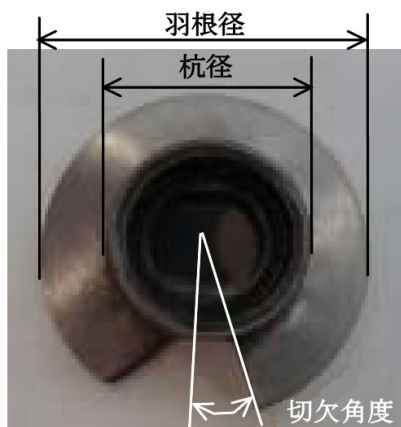


図 1.6 模型杭先端部図

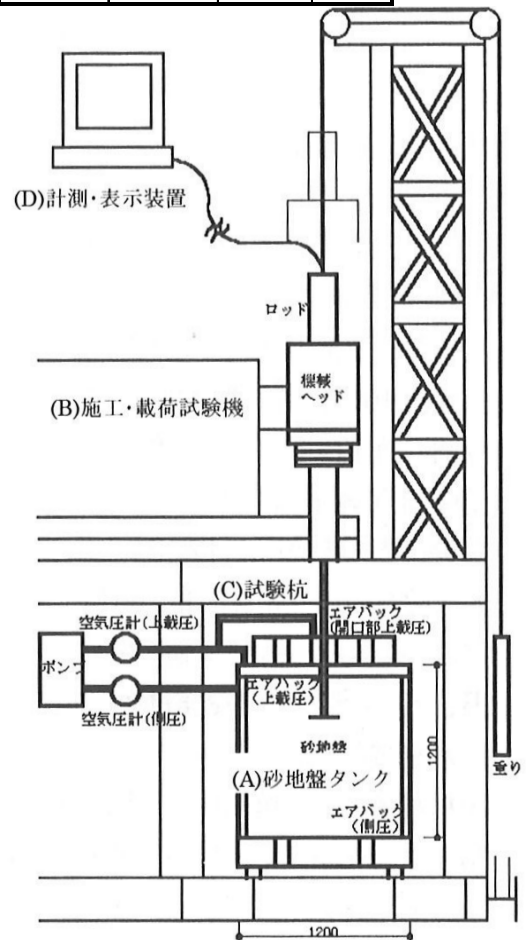


図 1.7 実験装置図

(3) 室蘭工業大学の研究

土屋ら^{3), 5), 6)}の研究は大型加圧土槽を利用した貫入メカニズムを解明する研究^{3), 6)}と、回転貫入杭を模擬した透明アクリルパイプによる羽根近傍の可視化による研究⁵⁾に分けられる。

大型加圧土槽を利用した研究^{3), 6)}では、変化させた因子は杭種、本体径、羽根径、地盤の相対密度および上載圧であり、実験ケースの一覧を表 1.5 に示す。なお、本体径に対する羽根径比は 2 で固定されている。使用した模型杭の一例を図 1.8 に示す。杭先端部は二重管構造になっており、杭先端面と羽根面の荷重を分離して計測可能になっている。使用した土槽を図 1.9 に示す。土槽は直径 2,000mm、高さ 2,500mm の円筒型の加圧土槽であり、上面に上載圧負荷装置を取り付けることが可能な構造となっている。杭の施工時には土槽上に回転貫入装置を取り付け、載荷時には載荷フレームと油圧ジャッキを取り付けている。なお、圧入杭の圧入施工も載荷フレームと油圧ジャッキにより行っている。

実験は上載圧を作用させた状態で杭を施工し、その後残留応力の計測（1 日間）を行った後、載荷実験を行っている。

表 1.5 実験(1)ケース一覧表

実験名	杭形状					地盤条件		
	本体径 d_0 (mm)	本体厚 t_0 (mm)	羽根径 d_w (mm)	羽根厚 t_w (mm)	羽根ピッチ p_w (mm)	相対密度 D_r (%)	上載圧 σ'_v (kPa)	換算 N値
回転1	76.3	7.0	152.6	11.5	40.9	94	100	34.1
回転2							50	24.0
回転3							100	34.1
回転4							150	44.1
回転5							100	34.1
回転1'	76.3	7.0	152.6	11.5	40.9	72	100	20.0
回転2'							50	14.1
回転3'							100	20.0
回転4'							150	25.9
回転5'							100	20.0
圧入1	101.6	12.7	-	-	-	94	100	34.1
圧入3	76.3	7.0						
圧入5	48.6	5.1						
埋設1	101.6	12.7	-	-	-	94	100	34.1
埋設3	76.3	7.0						
埋設5	48.6	5.1						

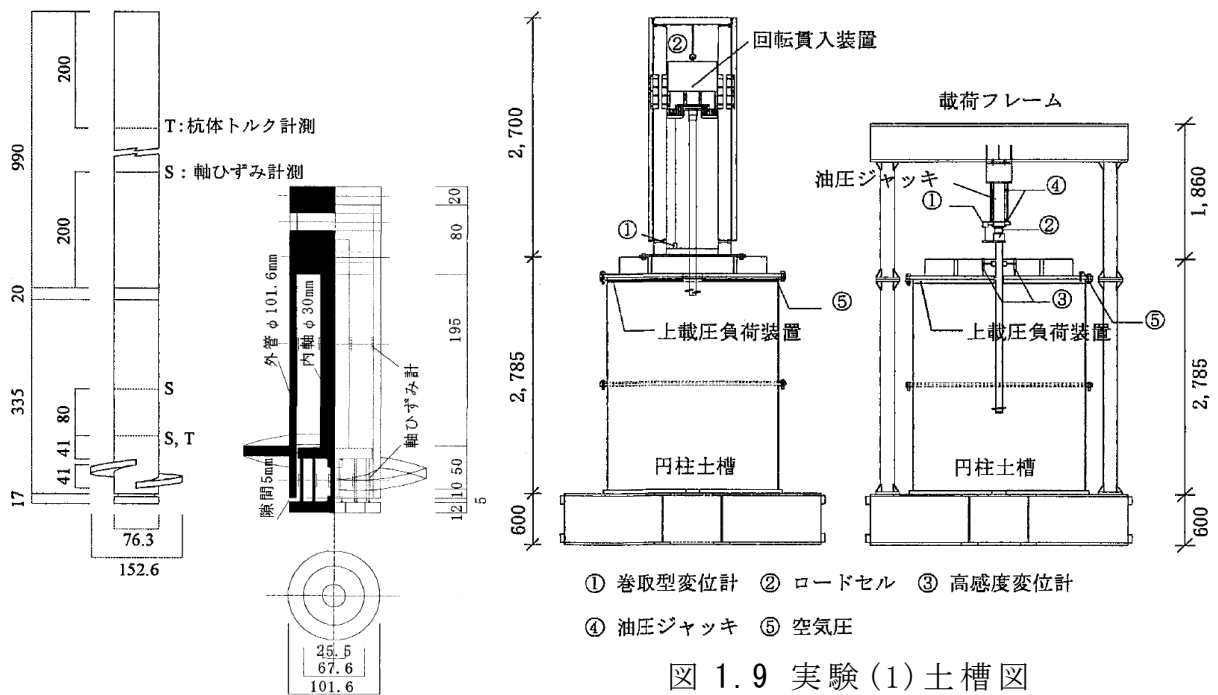


図 1.8 実験(1)模型杭図

図 1.9 実験(1)土槽図

この研究により得た主な知見は以下の通りである。

- ・ 施工中の貫入率は、地盤の相対密度が大きいと減少するが、上載圧の及ぼす影響は小さい。
- ・ 杭貫入中の杭体トルクは、杭径や地盤条件にかかわらず杭先端面荷重との間に比例関係がある。
- ・ 回転杭では、圧入杭や埋設杭とは異なり施工中の先端荷重の多くが施工後にも残留する。
- ・ 回転杭の荷重～沈下曲線は、羽根径の 10%沈下した以降も緩やかに荷重が増大する特性を示す。
- ・ 羽根の断面設計は施工後の残留応力を加味して評価するべきである。

透明アクリルパイプによる羽根近傍の可視化による研究⁵⁾では、羽根近傍の粒子挙動を杭内部から直接観察することを目的としている。

使用した土槽は図 1.10 に示すとおりであり、上部が直径 200mm、高さ 375mm の円筒形土槽、下部が直径 270mm 高さ 100mm の円筒形土槽で構成されており、これをターンテーブル上に配している。上部土槽には白米、下部土槽にはガラスビーズが充填されている。白米は異方性があるものの内部摩擦角が珪砂 6 号に比較的近似しているため使用しており、ガラスビーズは粒子間の摩擦が小さいため土槽先端の影響を低減させる目的で使用している。使用した模型杭は杭本体が透明アクリルパイプ、羽根が鋼材で作製されており、図 1.11 に示すような形状をしている。また、図 1.12 に示すように、内部にファイバースコープ、アルミホイルおよびペンライトを設置し、ファイバースコープからの映像をビデオカメラで

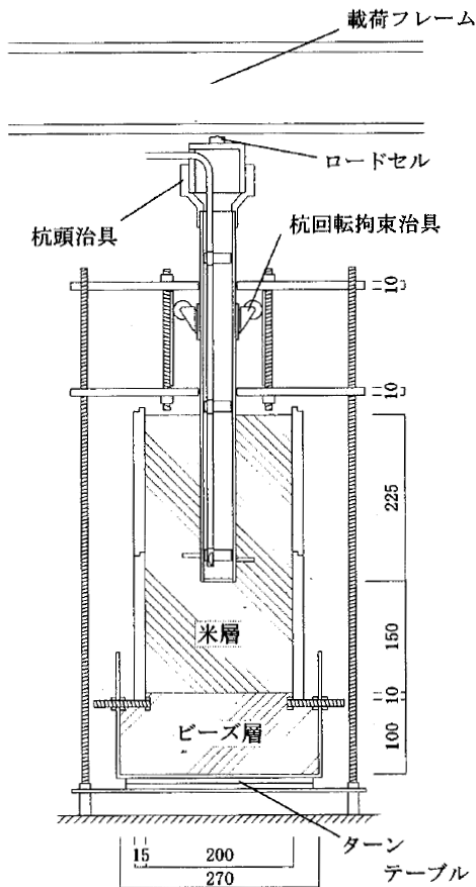


図 1.10 実験(2)土槽図

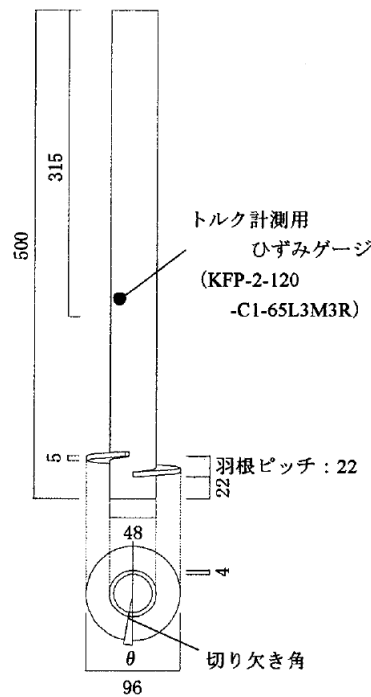


図 1.11 実験(2)
模型杭図 1

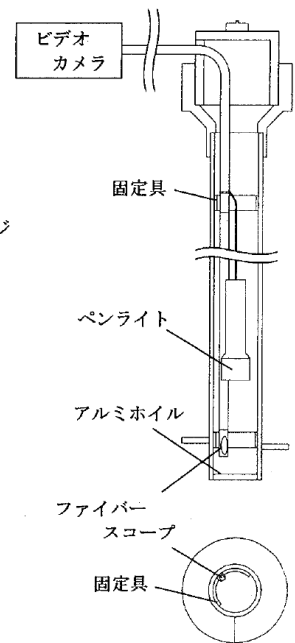


図 1.12 実験(2)
模型杭図 2

表 1.6 実験(2)ケース一覧

試験 番号	切り欠き角 θ ($^{\circ}$)	貫入率 μ
1	0	0.3
2	0	0.4
3	0	0.5
4	10	0.4
5	20	0.4

録画, 観察している. 変化させた因子は切り欠き角および貫入率であり, 実験ケースを表 1.6 に示す.

実験は載荷フレームを一定速度で降下させながら, ターンテーブルを反時計回りに回転させて行っている.

この研究により得られた主な知見は以下の通りである.

- ・羽根正面を粒子が流動する領域や羽根下面の空洞の他に, 羽根始端の刃先にコア, 羽根下面に不動部が生じる.
- ・切り欠き角を設けることで, 羽根上部への粒子の供給量が増加し, 貫入性能は向上するが, 同時に羽根下面の空洞域が増加するため鉛直支持性能が低下することが懸念される.
- ・貫入率を増加させると, 羽根下面の空洞域が減少して, 鉛直支持性能が向上することが推察される.

1.3 本論文の目的と範囲

前節に記した既往の研究によって、回転貫入杭の基本的な貫入メカニズムが明らかにされると共に、回転貫入杭の荷重～沈下曲線は、他の圧入工法や埋込み工法とは異なる特性を有することが明らかにされた。ただし、模型実験はいずれも均一地盤を対象にしたものである。実現場における回転貫入杭は、比較的緩い地盤を打ち抜いて密な支持層へ施工されるケースが多い。この時、支持層と判定された深度から羽根径分程度の根入れを行うのが一般的となっている。しかし、回転貫入杭の支持力に及ぼす支持層への根入れ長さの影響を検証した研究はほとんど見当たらないことから、支持層への根入れ効果が不明確な状態で採用されているのが現状と云える。

本論文は、これらの状況に着目し、表層地盤の下に比較的密な砂層が存在する地盤条件を対象として、回転貫入杭の合理的な支持力評価法を構築することを目的として、以下のように研究を進める。

最初に、支持層への根入れを変化させた施工実験および鉛直載荷実験を実施している。実験は模型実験および原位置試験であって、前者は模型杭(軸径 76.3mm, 羽根径 152.6mm)を大型加圧土槽に作製した二層地盤に施工した場合、後者は実大杭(軸径 114.3mm, 羽根径 228.6mm)をシルト層を貫通させて細砂層に根入れさせた場合である。以上の実験を通して、回転貫入杭の支持層への根入れ効果に関する新たな知見として、①杭先端面が支持層に達する手前(軸径の 1.3 倍程度)で杭体トルクや貫入率が変わるので、支持層への到達状況を概略知ることができること、②杭先端を根入れさせると羽根面の支持力は増加するが、杭先端面の支持力はほとんど変化しないこと等を明らかにしている。更に、前記の大型加圧土槽を用いて薄層の厚さを変化させた施工実験および鉛直載荷実験を実施し、③杭軸部先端面(以下、杭先端面と呼ぶ)と羽根面の杭先端部支持力に対する比は、薄層厚により変化すること、④薄層厚が軸径の 8 倍(羽根径の 4 倍)を超えると杭先端部支持力の増大が極めて小さくなること等を見出している。

回転貫入杭の先端支持力に関する既往の評価法のほとんど全てが、杭

先端近傍地盤のN値と羽根を含む杭先端部の有効断面積に支持力係数 α を乗ずる方式で算定されている。しかし、杭先端面と羽根面の抵抗力を分離計測した上記の実験では、両者の支持力発現の機構が異なることを明らかにしている。そこで、載荷の進行に伴う杭先端面と羽根面の支持力発現状況の考察から、N値を採用する適切な杭先端近傍地盤の範囲を杭先端面と羽根面のそれぞれに見出すことで、精度の高い支持力係数を導いた後、杭の打ち止め深度の異なる原位置載荷試験を実施して、本論文で構築した新たな支持力算定式の適用性を検証する。

最後に、回転貫入杭工法の開発にあたって実施した既往の原位置載荷試験結果に本算定式を適用して、杭先端面と羽根面を合計した杭先端部の支持力計算値は、実測値に概ね近似することを示す。

以上のように、本論文は回転貫入杭の支持層への根入れを考慮すると共に、杭先端面と羽根面の支持力とそれらの発揮割合を考慮して、合理的で新しい支持力評価方法に関するものであるが、杭先端部の地盤は砂地盤を対象としている。礫質地盤や粘土質地盤への適用性に関しては今後の課題とする。また、本論文で取り扱った回転貫入杭は、先端が閉塞で鋼管の先端付近の周面に羽根を取り付けたもので、SH-Cタイプ(表 1.1 参照)に分類され、羽根形状は羽根径/軸径=2のみである。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付けられるが、その後に開発された種々のタイプに対する本評価式の適用性についても今後の課題とする。

第2章 大型加圧土槽による模型実験の方法

本章では，実験装置の概要，模型杭の詳細および地盤作製方法について示した後，実験条件について示す．

2.1 実験装置

実験装置は，図 2.1 に示すように大型の円柱土槽，上載圧荷装置，回転貫入装置，載荷フレーム，各種センサー等で構成される．

土槽は内径 2,000mm，深さ 2,500mm の円柱型であり，内側面に土槽側面の摩擦の影響を防ぐためにテフロンシートを貼り付けている．

上載圧荷装置（写真 2.1）は，直径 2,000mm 高さ 50mm のゴム製空気袋で，中央に模型杭を通せるように直径 114.3mm の開口部を設けている．このゴム製空気袋にエアコンプレッサ（仕様を表 2.1 に示す）で空気を送り込むことで上載圧を発生させている．回転貫入装置（写真 2.2）は，ガイドレール上を下降するモーター駆動機により杭を回転貫入する装置であり，モーター総重量 4.3kN，回転速度 14rpm，回転トルク 13.5kN・m

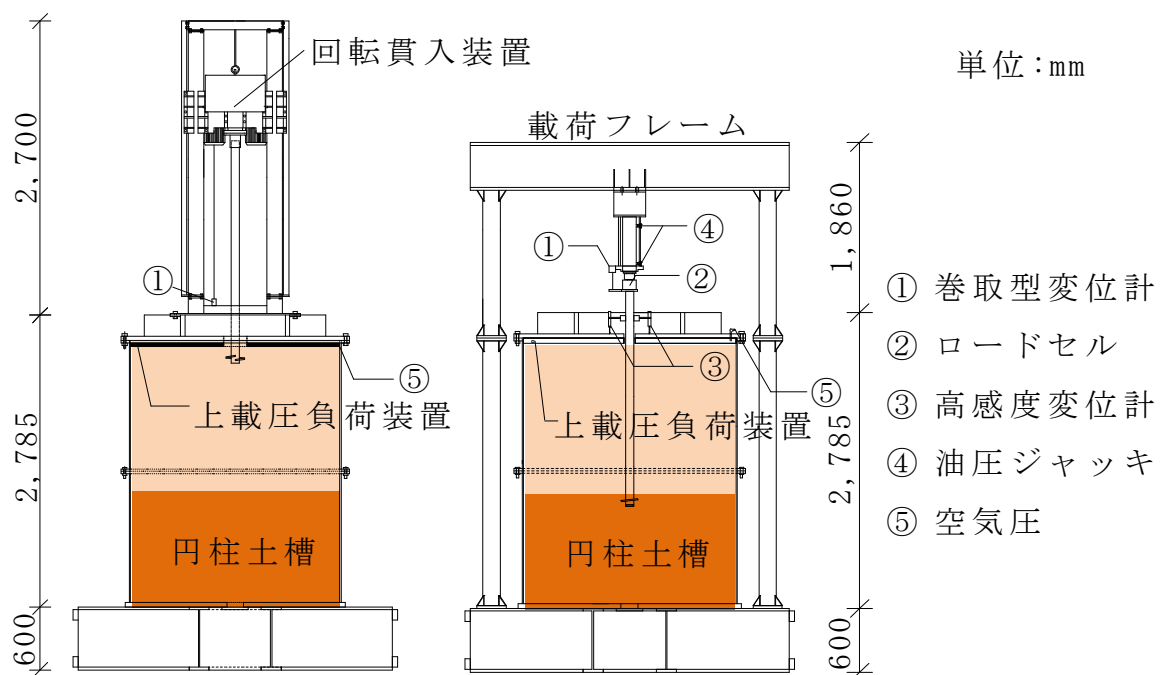


図 2.1 実験装置

を有している。

載荷フレーム（写真 2.3）は，円柱土槽の土台に固定可能な鋼製のフレームである．このフレームを反力とし，油圧ジャッキ（使用した 2 種類の仕様を表 2.2 に示す）により載荷を行う．



写真 2.1 ゴム製空気袋

表 2.1 エアコンプレッサの仕様

製造元	東芝
TYPE	SP10D-4S1
作動圧力(MPa)	0.78
復帰圧力(MPa)	0.97
吐出空気量(L/min)	36/43
充填所要時間(min)	4/3.5
空気タンク容積(L)	21
安全弁作動圧力(MPa)	1.08
概略寸法(mm)	560×286×630
幅×奥行×高さ	

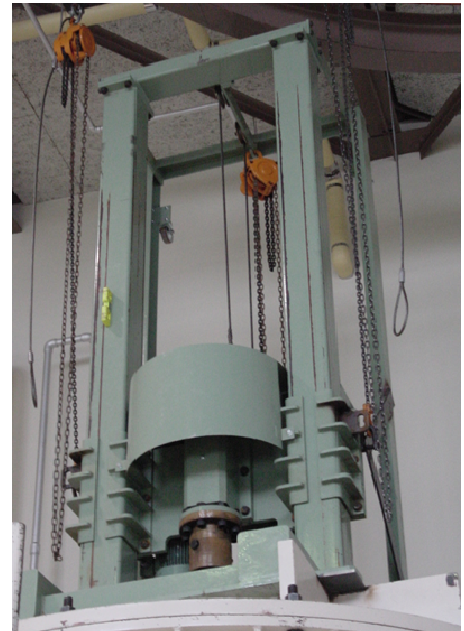


写真 2.2 回転貫入装置

表 2.2 油圧ジャッキの仕様

製造元	理研機器
TYPE	MD20-200
最高出力(kN)	200
ストローク(mm)	200
最小全長(mm)	495
外径(mm)	83
必要油量(cm ³)	575
概略質量(kg)	16.1
製造元	理研機器
TYPE	D5-300
最高出力(kN)	500
ストローク(mm)	300
最小全長(mm)	589
外径(mm)	127
必要油量(cm ³)	2149
概略質量(kg)	46



写真 2.3 載荷フレーム

2.2 地盤および杭の作製

地盤材料は東北珪砂 6 号であり気乾状態で使用している。砂試料の基本的性質を表 2.3 に、粒径加積曲線を図 2.2 に示す。

地盤の作製はノズルとネットを介した空中落下法で作製している。この時、ノズル（図 2.3）とネットを取り付けたサンドレーナー（図 2.4, 図 2.5）で砂を落下させるが、薄層や支持層等の密な地盤（D 層）には細径（ $\phi 12$ ）ノズル、薄層上下の緩い地盤（L 層）には太径（ $\phi 35$ ）ノズルを使用した。相対密度は空中落下法によるノズル径と落下高さ及びネット位置を変化させた実験¹¹⁾に基づいて算定したものである。

表 2.3 砂試料の基本的性質

試料名	東北珪砂 6 号
G_s	2.65
$\rho_{dmax} (g/cm^3)$	1.703
$\rho_{dmin} (g/cm^3)$	1.388
$D_{50} (mm)$	0.32
U_c	2.00

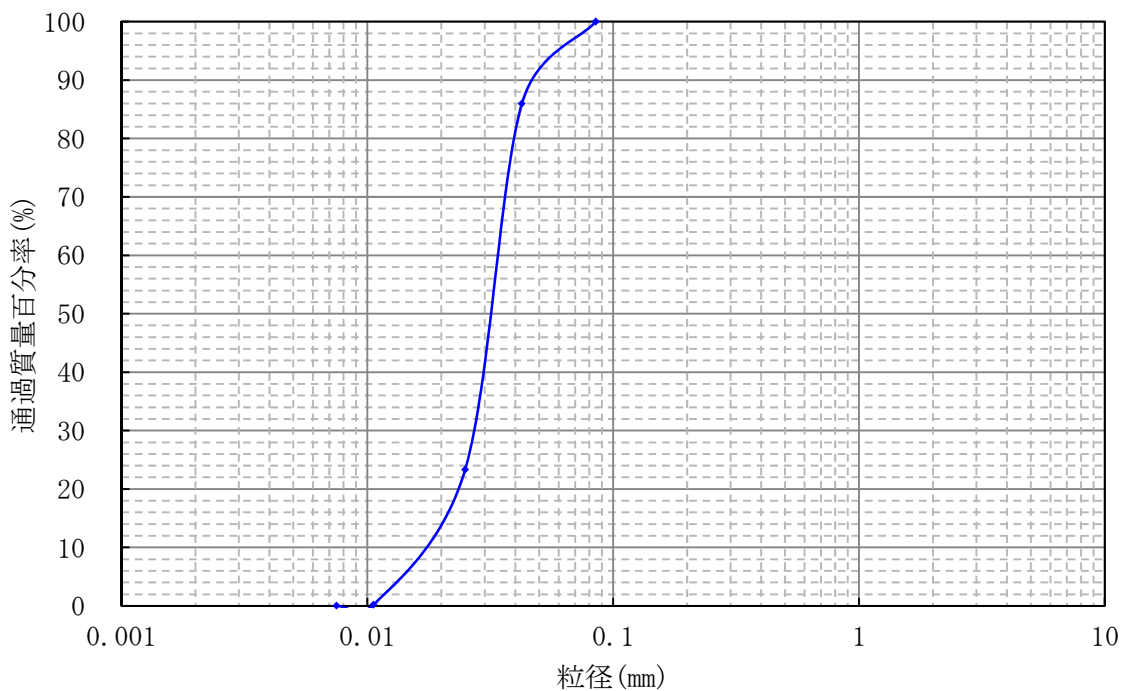
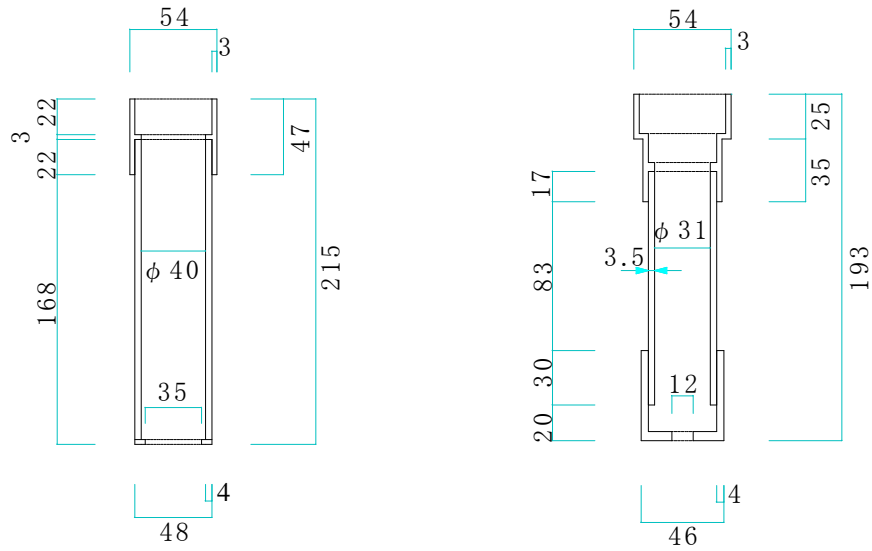


図 2.2 砂試料の粒径加積曲線



低密度地盤用ノズル（口径 35mm） 高密度地盤用ノズル（口径 12mm）

図 2.3 ノズル（単位：mm）

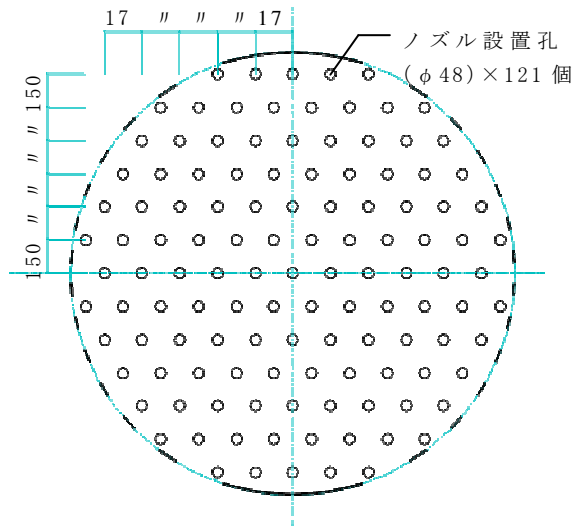


図 2.4 ノズル配置図（単位：mm）

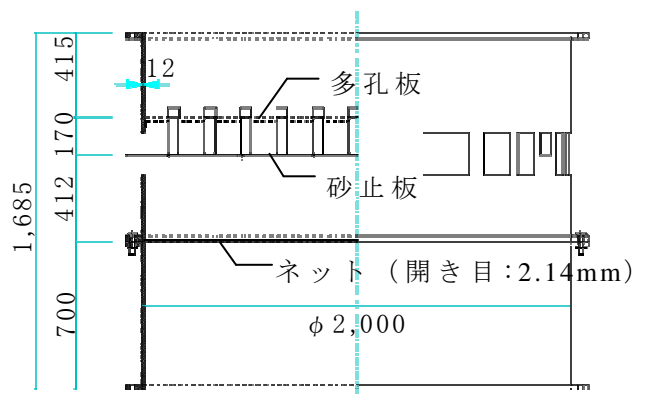


図 2.5 サンドレーナー（単位：mm）

図 2.6 は地盤作製時におけるサンドレーナーの設置状態である。

地盤作製は、まず、図 2.6 の状態で砂供給スペースに 77 リットルの砂を充填し、砂止板の位置をずらすことで砂を落下させる。砂供給スペースの砂がなくなり次第砂止板の位置を戻し、再度砂供給スペースに砂を充填する。この作業を繰り返し所定の高さまで地盤を作製する。また、密度が異なる地盤を作製する際は途中でノズルを交換して作業を行なっている。なお、堆積高さ 2,450mm で地盤作製は終了する。

図 2.7 に示すように、模型杭は杭径 $d_0=76.3\text{mm}$ 、羽根径 $d_w=152.6\text{mm}$ で下杭と継杭で構成されており、各所にひずみゲージを貼付して軸力やトルクを計測している。使用したひずみゲージは軸歪ゲージを主としているが、羽根近傍には 2006 年度はロゼットゲージ、2008 年度以降はトルクゲージと軸歪ゲージ、杭頭付近にはトルクゲージを貼付している。模型杭の先端部は、杭先端面の円盤の中心に鋼棒を付けた杭先端面部材と羽根を取り付けた鋼管を接続ピンにより固定している。この鋼棒と羽根上部の鋼管の歪みを計測することで、杭先端面荷重と羽根面荷重を独立して測定できる構造になっている。

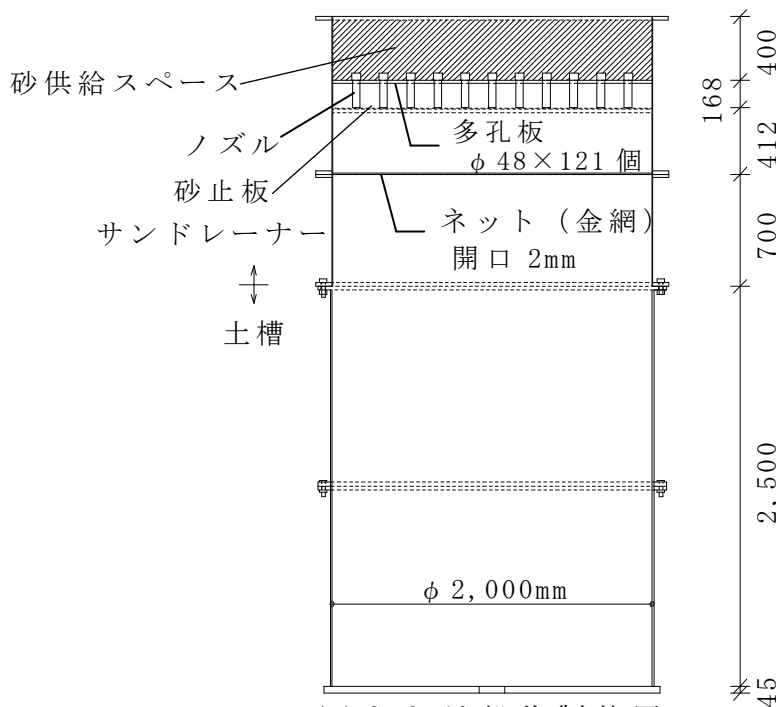


図 2.6 地盤作製装置

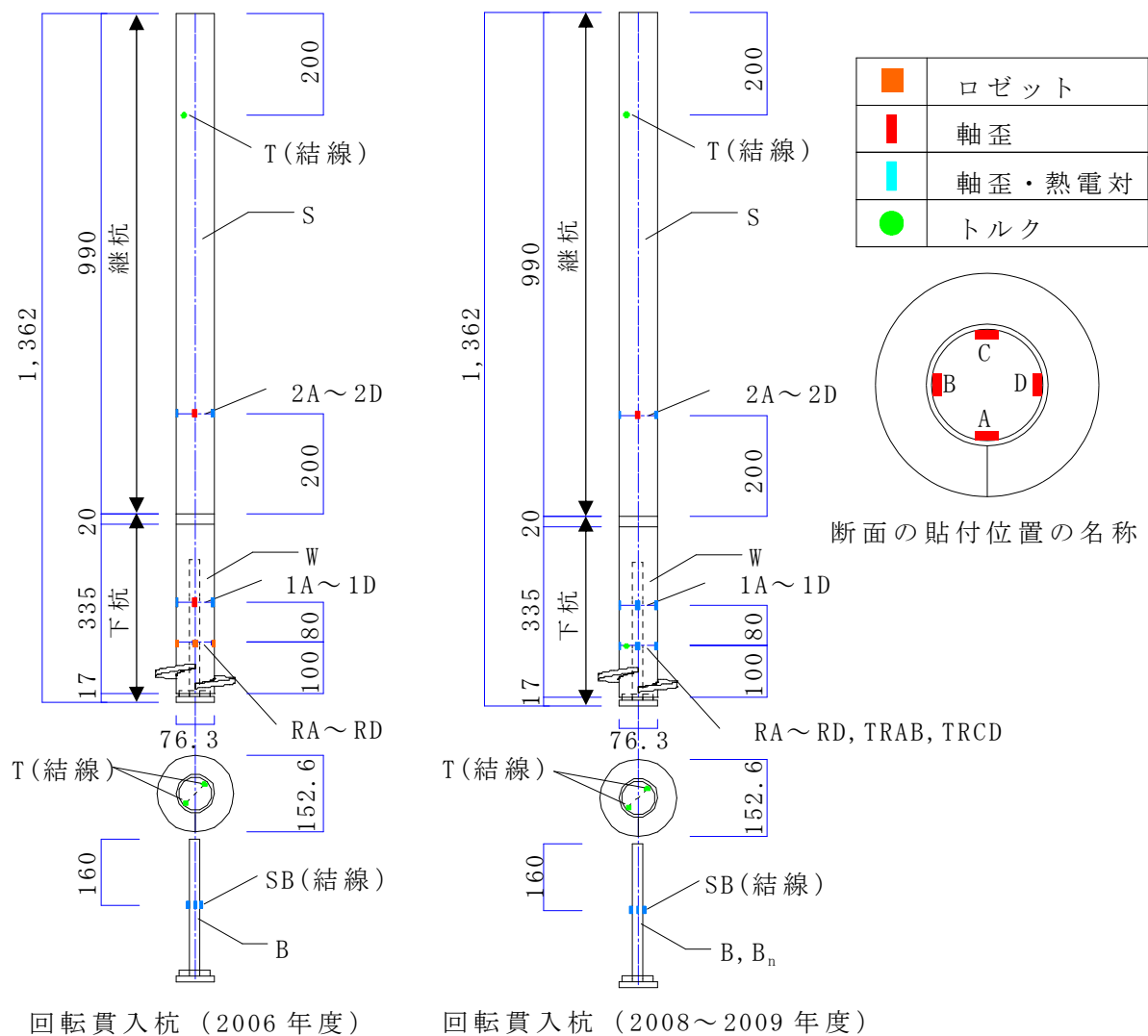


図 2.7 模型杭の諸元

2.3 施工実験方法

回転貫入杭の施工時における挙動を把握するために、トルク（杭頭および羽根近傍）および荷重（杭先端面荷重、羽根面荷重および周面摩擦）を計測しながら施工実験を行った。

施工実験の手順は以下のとおりである。

- 1) 模型杭の下杭を設置する。この際、土槽内の周辺地盤を乱さないように注意しながら深さ 150mm まで掘り、下杭を設置し埋め戻す。
- 2) 土槽上部にゴム製空気袋と上蓋を取り付ける。
- 3) 土槽上部に回転貫入装置を設置し、下杭に継杭を連結した後、施工実験を行う。
- 4) 杭先端が所定の深度に到達したら、施工を終了し、回転貫入装置を取り外す。

施工実験の際は、所定の上載圧を作用させた状態であり、圧入力はモーターの自重（4.3kN）のみである。また、杭体各部の荷重やトルクおよび杭の変位をデータロガーにより連続的（5秒間隔）に記録している。

2.4 載荷実験方法

載荷実験は、施工実験完了後、杭頭部のモーターを取り外して4時間以上経過した後に行っている。載荷時には杭頭変位、荷重（杭先端面荷重、羽根面荷重および周面摩擦）を計測している。また、これらの計測はデータロガーにより行っている。

載荷実験の手順は、以下のとおりである。

- 1) 載荷フレームに油圧ジャッキを取り付ける。
- 2) 油圧ジャッキと共に載荷フレームを土槽上部に設置する。
- 3) 油圧ジャッキの鉛直性を調整した後に載荷を開始する。

載荷実験は、荷重制御方式とし、荷重を3kNピッチもしくは5kNピッチで増加させ、各段階で2分間荷重を保持させるが、荷重の増加や保持が不可能になるまで行った。

2.5 実験条件

実験条件の一覧を表 2.4 に示す. 杭形状 (杭径: $d_0=76.3\text{mm}$, 羽根径: $d_w=152.6\text{mm}$) と上載圧 (100kPa) は全て同一条件とし, 地盤構成を変更して試験を行っている.

地盤構成は全体を低密度層または高密度層とした均一地盤タイプ, 杭先端部付近に密な支持層を有する二層地盤タイプもしくは密な薄層 (中間層) を有する中間層地盤タイプとしている. 支持層に相当する密な D 層の相対密度は $D_r=98\%$ (換算 N 値 = 37), 緩い L 層の相対密度は $D_r=32\sim 51\%$ (換算 N 値 = 4~10) である. ここでの換算 N 値は, 作製した地盤の相対密度 D_r と上載圧 σ'_v に基づいて Meyerhof の式¹²⁾で算定している.

$$D_r = 21\sqrt{N(0.01\sigma'_v + 0.7)} \quad \dots\dots(2.1)\text{式}$$

モデル名は, 地盤の相対密度の記号 (L: 低密度, D: 高密度) を用いて, 表層と支持層の順に示している. なお, 二層地盤タイプのモデル名には, 支持層への根入れ長さを羽根径で除した値 (正: 支持層境界より上で打ち止め, 負: 支持層境界より下で打ち止め) を付加している. 中間層地盤タイプのモデル名には, 薄層厚を杭径で除した値を付加している. また, 施工した杭長さは一定であることから, 支持層への根入れ長さの変化は支持層厚 (支持層境界深度) を変化させて実施している.

表 2.4 実験条件一覧

モデル名	LL	DD	LD	LD'	LD+1.0	LD+0.5	LD-0.5	LD-1.0	
杭施工法	回転貫入								
杭径 d_0 (mm)	76.3								
羽根径 d_w (mm)	152.6								
地盤	均一		二層						
上載圧 σ_v' (kPa)	100								
相対密度 D_r (%) (換算N値)	緩層	32 (4)	-	32 (4)	44 (8)	32 (4)	32 (4)	32 (4)	32 (4)
	密層	-	98 (37)	98 (37)	98 (37)	98 (37)	98 (37)	98 (37)	98 (37)
根入れ長 ($\times d_w$)	0	0	0	0	+1.0	+0.5	-0.5	-1.0	
支持層厚 ($\times d_0$)	0	0	20 ^{*1}	20 ^{*1}	18 ^{*1}	19 ^{*1}	21 ^{*1}	22 ^{*1}	
模式図									
実験実施日	06.12.6	05.10.25	06.10.04	09.11.27	06.11.08	06.12.15	06.10.20	08.03.18	

モデル名	LD1L	LD2L	LD2L'	LD4L	LD4L'	LD6L	LD8L	
杭施工法	回転貫入							
杭径 d_0 (mm)	76.3							
羽根径 d_w (mm)	152.6							
地盤	薄層 (中間層)							
上載圧 σ_v' (kPa)	100							
相対密度 D_r (%) (換算N値)	緩層	51 (10)	51 (10)	44 (8)	51 (10)	44 (8)	51 (10)	44 (8)
	密層	98 (37)	98 (37)	98 (37)	98 (37)	98 (37)	98 (37)	98 (37)
根入れ長 ($\times d_w$)	0	0	0	0	0	0	0	
薄層厚 ($\times d_0$)	1	2	2	4	4	6	8	
模式図								
実験実施日	08.11.21	08.8.26	09.10.27	08.9.28	09.10.09	08.10.24	09.11.17	

※1 二層地盤の境目(支持層境界)から土槽下盤までの深度を杭径で除した値である。

第3章 模型実験に基づく先端部支持力特性

3.1 まえがき

回転貫入杭の施工によって杭周辺地盤が変化することから，施工開始から打止め，そして杭頭への載荷終了に至る一連の過程の実験結果に基づいて，回転貫入杭の支持力特性を検討する必要がある．

本章では，第2章に記述した大型加圧土槽に作製した表2.4に示す3グループの地盤構成（均一地盤，二層地盤，中間層地盤）で実施した試験体について，施工実験および載荷実験結果について検討する．

本章の3.2では，地盤のグループ別に施工実験および載荷実験結果を示しており，施工実験においては貫入深度に伴う貫入率と杭体の回転トルクの関係，載荷実験においては載荷の進行に伴う杭先端面および羽根面の荷重分担について整理している．

以上の実験結果に基づいて，載荷重の増大に伴う杭先端面と羽根面の荷重分担の変化に着目して，3.3では支持層へ打止める根入れ深さの影響，3.4では杭先端面が載る支持層（中間層）の厚さの影響について考察する．

3.2 施工時および載荷時の挙動

3.2.1 均一地盤の場合

(1) 施工時の挙動

図 3.1 は、LL モデルおよび DD モデルの杭頭および羽根近傍の杭体トルクと貫入深度の関係である。LL モデルでは、貫入開始から 300mm 程度貫入した以降の深度における羽根近傍トルク値が $0.41\text{kN}\cdot\text{m}\sim 0.47\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度で推移するようになった。本論文ではこの様に概ね一定の値を示す状態を定常状態と定義する。定常状態での平均トルクは $0.44\text{kN}\cdot\text{m}$ である。なお、DD モデルでは、貫入開始から 500mm 程度貫入した以降の羽根近傍トルク値が $1.86\text{kN}\cdot\text{m}\sim 1.94\text{kN}\cdot\text{m}$ 程度で推移し、平均トルクは $1.89\text{kN}\cdot\text{m}$ である。地盤の硬い DD モデルは LL モデルの 4.3 倍のトルクが生じている。図 3.2 は杭頭トルクについて図 3.1 と同様に示したものである。なお、LL モデルの深度 550mm 以降については、ゲージの動作不良により計測ができていないため記載していない。LL モデルは貫入開始から 300mm 程度貫入した以降は定常状態となっている。定常状態の平均トルクは LL モデルが $0.69\text{kN}\cdot\text{m}$ である。それに対して DD モデルは定常状態とならず、

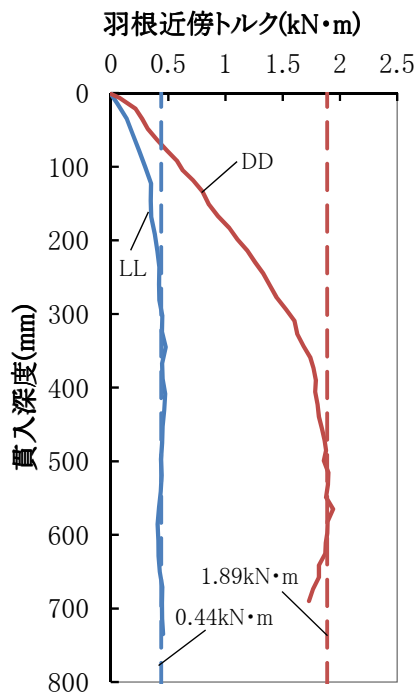


図 3.1 施工中の羽根近傍トルクの変化

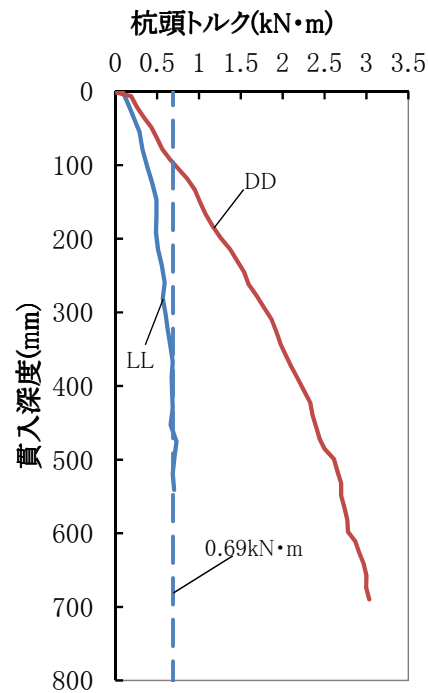


図 3.2 施工中の杭頭トルクの変化

貫入に伴い杭頭トルクは増加を続けている。これは、周辺地盤が硬いために LL モデルに比べ周面摩擦が大きく、周面摩擦が増加を続けているためと考えられる。

図 3.3 は、貫入率 μ （1 回転あたりの貫入量 / 羽根ピッチ）と貫入深度関係である。LL モデルでは貫入開始から 100mm 程度貫入した以降の深度における貫入率が 0.43~0.49 程度で推移している。貫入率が定常状態になる深度は、トルクに比べて浅い深度となっている。この定常状態での平均貫入率は 0.46 である。DD モデルでは貫入直後から 0.27~0.34 程度で推移し、定常状態での平均貫入率は 0.33 である。DD モデルの方が地盤は硬いため貫入率が低下しており、LL モデルの貫入率の 0.7 倍となっている。

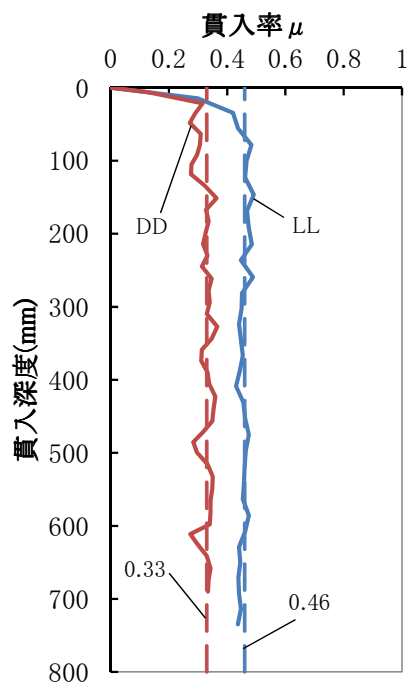


図 3.3 施工中の貫入率の変化

(2) 載荷時の挙動

載荷時のひずみ計測結果から得られた杭体各部（杭頭，杭先端部，羽根面，杭先端面）と杭頭変位量との関係を検討する．なお，本検討においては，載荷実験開始時を 0kN として整理している．

図 3.4(a) は杭頭荷重と杭頭変位の関係である．また，表 3.1(a)～(c) に $0.01d_w$ 変位時， $0.1d_w$ 変位時および $1.0d_w$ 変位時における各部の値を示している．LL モデルは杭頭変位 10mm 程度から杭頭荷重の増え方が緩やかとなっているが，DD モデルでは 100mm 程度まで大きく増加している．DD モデルが LL モデルに比べて大きな荷重を示しており， $0.01d_w$ 変位時で 2.5 倍， $0.1d_w$ 変位時で 3.7 倍， $1.0d_w$ 変位時で 4.2 倍となっている．

図 3.4(b) は杭先端部荷重（杭先端面荷重＋羽根面荷重）と杭頭変位の関係であるが，杭頭荷重と同様の傾向を示している．

図 3.4(c) は羽根面荷重と杭頭変位の関係である．DD モデルは杭頭荷重に比べて 75mm 程度までの荷重増加が大きく，その後の増加が小さい．DD モデルは LL モデルに比べて $0.01d_w$ 変位時で 2.9 倍， $0.1d_w$ 変位時で 4.1 倍， $1.0d_w$ 変位時で 4.2 倍となっている．

図 3.4(d) は杭先端面荷重と杭頭変位の関係である．DD モデルおよび LL モデル共に大変位に至るまで比較的荷重の増加が大きい．DD モデルは LL モデルに比べて $0.01d_w$ 変位時で 2.9 倍， $0.1d_w$ 変位時で 4.3 倍， $1.0d_w$ 変位時で 3.9 倍となっている．

表 3.1(a)～(c)によると，いずれのモデルも杭先端面と羽根面の荷重度は異なっており，羽根面が杭先端面よりも小さくなっている．杭先端面荷重度に対して羽根面荷重度は， $0.01d_w$ 変位時で 0.47～0.48 倍， $0.1d_w$ 変位時で 0.70～0.74 倍， $1.0d_w$ 変位時で 0.51～0.59 倍となっている．

図 3.5 は杭先端部荷重に占める羽根面荷重の割合と杭頭変位の関係である．DD モデルおよび LL モデル共に載荷の進行に伴い増加して $0.1d_w$ 変位付近で負担割合が 0.7 程度で最大を示し，その後の変位の進行に伴い負担割合が減少して 0.6 程度となる．このことから，杭先端面と羽根面の支持力発揮率が載荷の進行に伴い変化することが明らかになった．

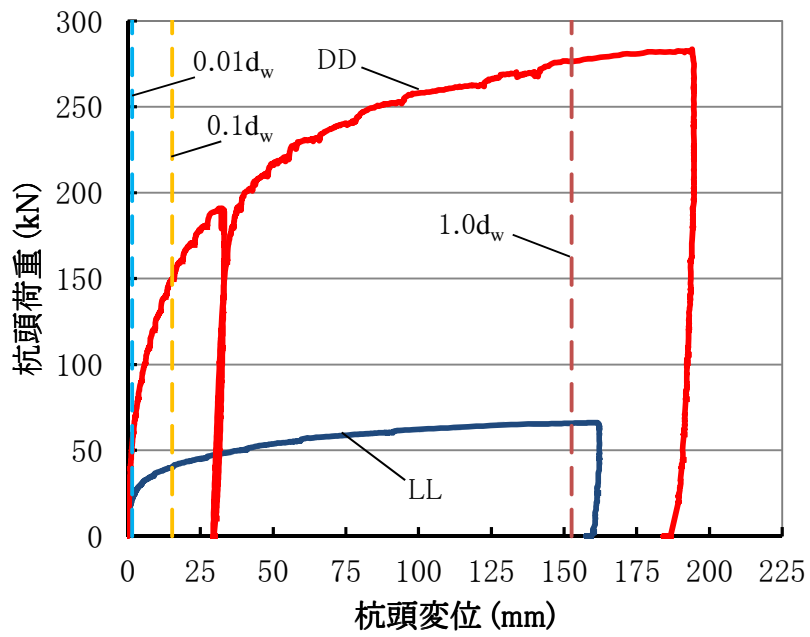


圖 3.4 (a) 杭頭荷重－杭頭變位圖

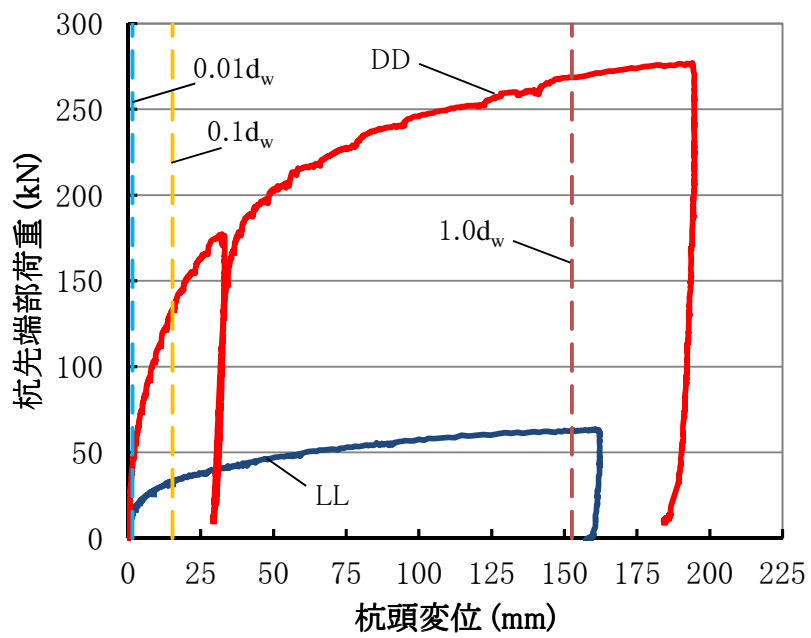


圖 3.4 (b) 杭先端部荷重－杭頭變位圖

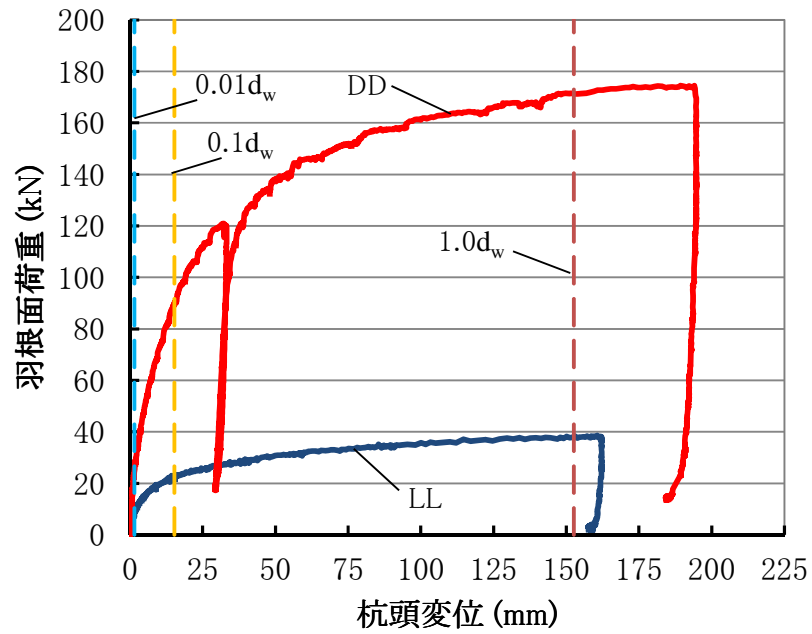


圖 3.4 (c) 羽根面荷重－杭頭變位圖

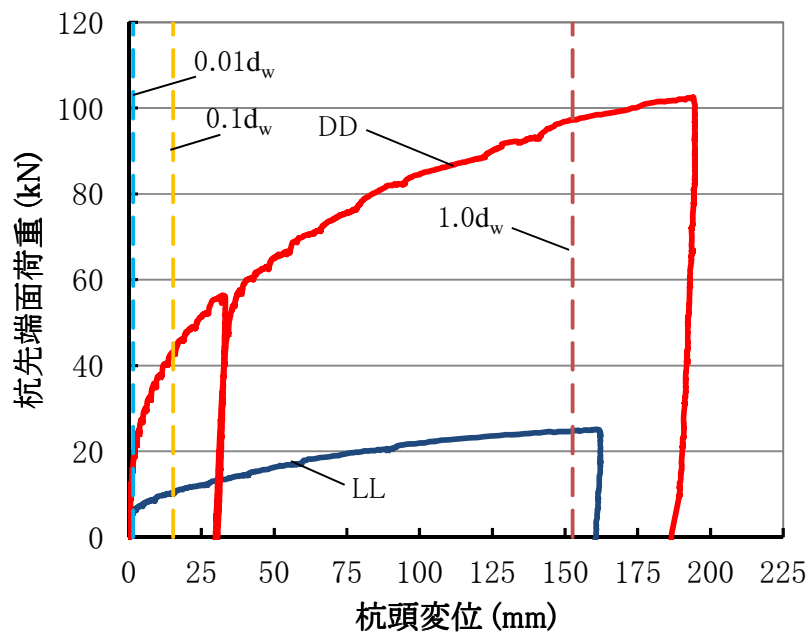


圖 3.4 (d) 杭先端面荷重－杭頭變位圖

表 3.1(a) 載荷実験結果一覧表 (0.01d_w 変位時)

モデル名	0.01d _w 変位時						
	杭頭変位 (mm)	杭先端面		羽根面		杭先端部荷重 R _{mp} (kN)	杭頭荷重 R _m (kN)
		荷重 R _{mb} (kN)	荷重度 W _{mb} (kN/m ²)	荷重 R _{mw} (kN)	荷重度 W _{mw} (kN/m ²)		
LL	1.526	6.0	1317	8.4	615	14.4	21.6
DD	1.526	17.2	3764	24.7	1803	41.9	53.4

表 3.1(b) 載荷実験結果一覧表 (0.1d_w 変位時)

モデル名	0.1d _w 変位時						
	杭頭変位 (mm)	杭先端面		羽根面		杭先端部荷重 R _{up} (kN)	杭頭荷重 R _u (kN)
		荷重 R _{ub} (kN)	荷重度 W _{ub} (kN/m ²)	荷重 R _{uw} (kN)	荷重度 W _{uw} (kN/m ²)		
LL	15.26	10.1	2209	22.3	1626	32.4	40.2
DD	15.26	43.1	9426	89.9	6551	133.0	149.7

表 3.1(c) 載荷実験結果一覧表 (1.0d_w 変位時)

モデル名	1.0d _w 変位時						
	杭頭変位 (mm)	杭先端面		羽根面		杭先端部荷重 R _{Dp} (kN)	杭頭荷重 R _D (kN)
		荷重 R _{Db} (kN)	荷重度 W _{Db} (kN/m ²)	荷重 R _{Dw} (kN)	荷重度 W _{Dw} (kN/m ²)		
LL	152.6	24.8	5417	38.1	2778	62.9	65.8
DD	152.6	97.3	21276	171.4	12492	268.6	276.5

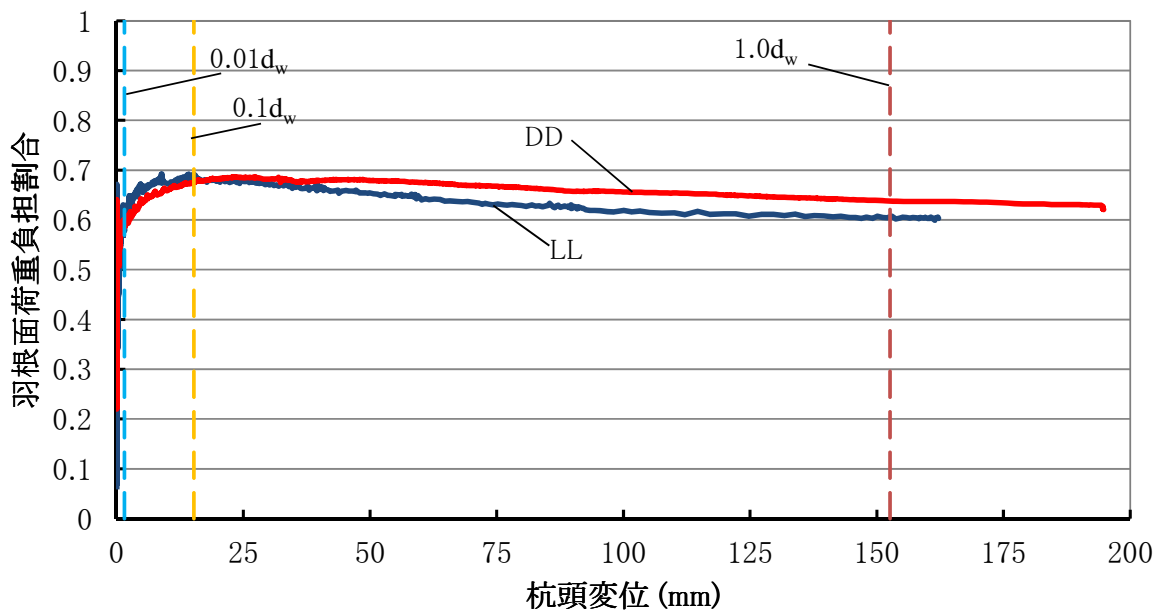


図 3.5 羽根面荷重負担割合－杭頭変位図

3.2.2 二層地盤の場合

(1) 施工時の挙動

図 3.6 は、支持層に根入れを行った実験モデル (LD, LD', LD-0.5, LD-1.0) の杭先端面荷重と支持層境界からの距離の関係である。杭先端が支持層から 100mm (杭径の 1.3 倍) 程度手前に達した段階から杭先端面荷重が増加する傾向がある。

図 3.7 は、杭頭および羽根近傍の杭体トルクと支持層境界からの距離の関係である。杭先端面荷重と同様に杭先端が支持層から 100mm (杭径の 1.3 倍) 程度手前に達した段階から杭体トルクが増加している。また、LL モデルの定常状態における羽根近傍トルクの平均値 (羽根近傍トルクは $0.44\text{kN}\cdot\text{m}$, 杭頭トルクは $0.69\text{kN}\cdot\text{m}$) を図中に破線で示した。支持層到達時の羽根近傍トルク値は、LL モデルのトルク値 (定常状態) の約 1.5 倍となった。

図 3.8 は、杭先端面荷重と羽根近傍トルクの関係である。羽根近傍トルクが $0\text{kN}\cdot\text{m}$ の時の杭先端面荷重は回転貫入装置の自重 (4.3kN) による影響で生じたものである。それ以降の杭先端面荷重と杭体トルクは、表

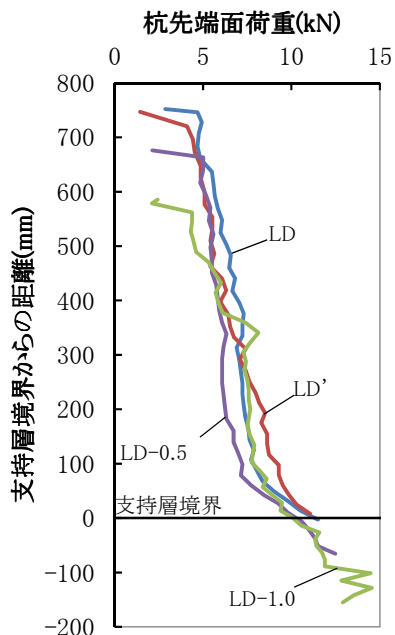
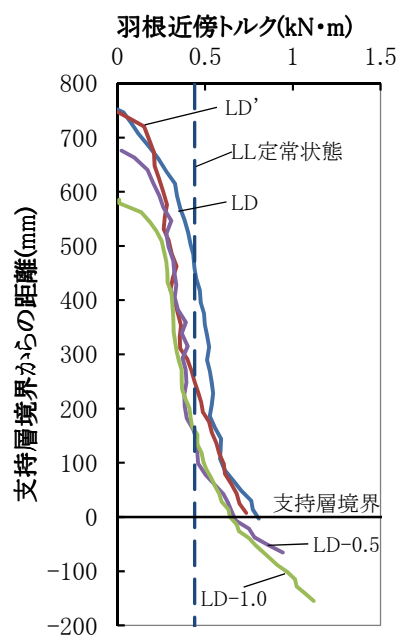
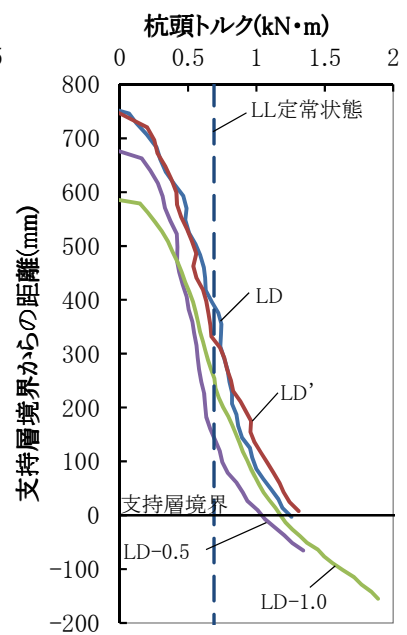


図 3.6 施工中の杭先端面荷重の変化



(a) 羽根近傍トルク



(b) 杭頭トルク

図 3.7 施工中の杭体トルクの変化

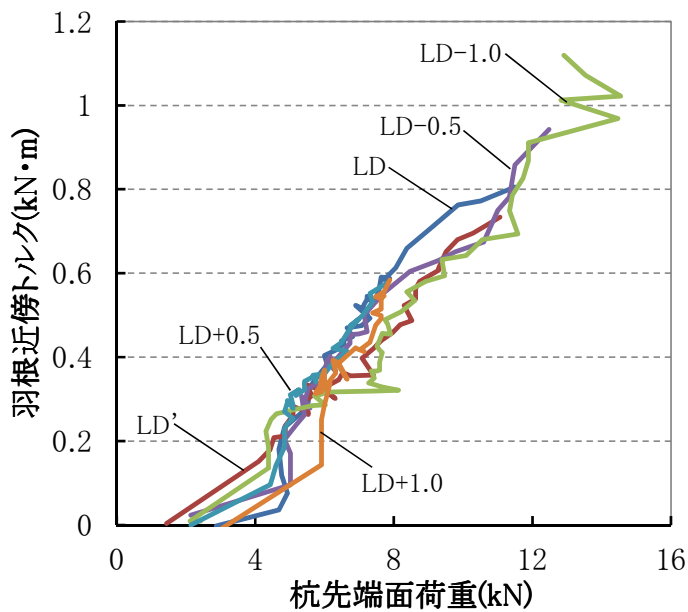


図 3.8 杭先端面荷重－羽根近傍トルク図

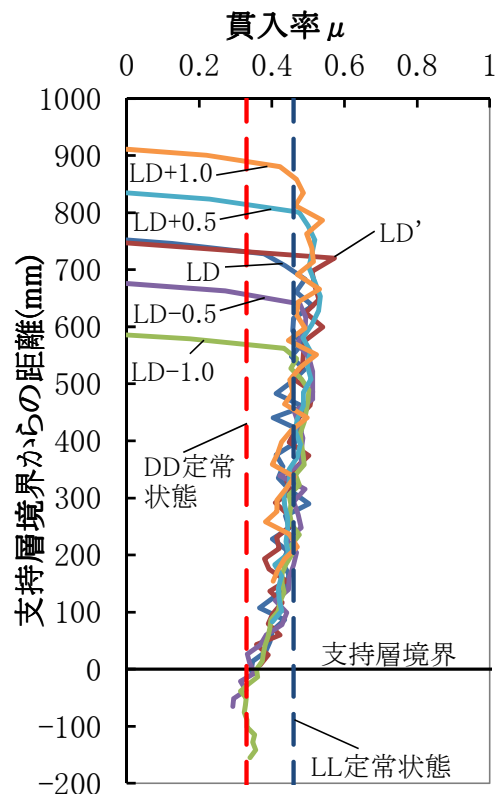


図 3.9 施工中の貫入率
の変化

層部および支持層部の施工共に概ね比例関係となっている。

図 3.9 は、貫入率 μ と支持層境界からの距離の関係である。図中には LL および DD の定常状態における貫入率を破線で示している。LL の定常状態に近い $\mu = 0.5$ 程度であった表層地盤の貫入率が支持層から 100mm (杭径の 1.3 倍) 程度手前から低下し、支持層に達した時点では $\mu = 0.4$ 程度となった。また、LD-0.5 や LD-1.0 は支持層貫入後に更に低下し、DD モデルの定常状態に近い貫入率を示している。

以上より、貫入中の杭体トルクや貫入率の変化から、支持層への杭先端の到達状況を把握できることが分かる。

(2) 載荷時の挙動

3.2.2 と同様に、杭体各部（杭頭、杭先端部、羽根面、杭先端面）と杭頭変位量との関係について検討する。

図 3.10(a)は、杭頭荷重と杭頭沈下量の関係である。支持層に到達したモデル（LD, LD-0.5, LD-1.0）を見ると、DDモデルよりもやや荷重は小さいものの、根入れ長さによらずほぼ同形状の曲線となっている。LD'モデルはLDモデルと荷重の増加傾向は同じだが、最大荷重が低い曲線となっている。支持層に到達しないモデル（LD+1.0, LD+0.5）では、明らかに杭頭荷重が小さくなる。ただし、杭頭変位が進行するのに伴い支持力の上昇する傾向が顕著である。

図 3.10(b)は、杭先端部荷重と杭頭沈下量の関係である。杭頭荷重と比べて値はやや小さくなっているが、荷重の増え方やモデル間の大小関係といった傾向は杭頭荷重と同様である。

図 3.10(c)および(d)は、それぞれ羽根面荷重および杭先端面荷重と杭頭沈下量の関係である。支持層に到達したモデルの場合、杭先端面荷重は、根入れ長さに関わらずほぼ同程度の値である。それに対して、羽根面荷重は(LD-1.0)が他のモデルよりも大きい傾向が見られた。支持層に到達しないモデルにおいては、(LD+1.0)の杭先端面荷重が杭径(76.3mm)程度沈下した時点から荷重の増加割合が上昇しており、支持層の影響が表れたものと推察される。

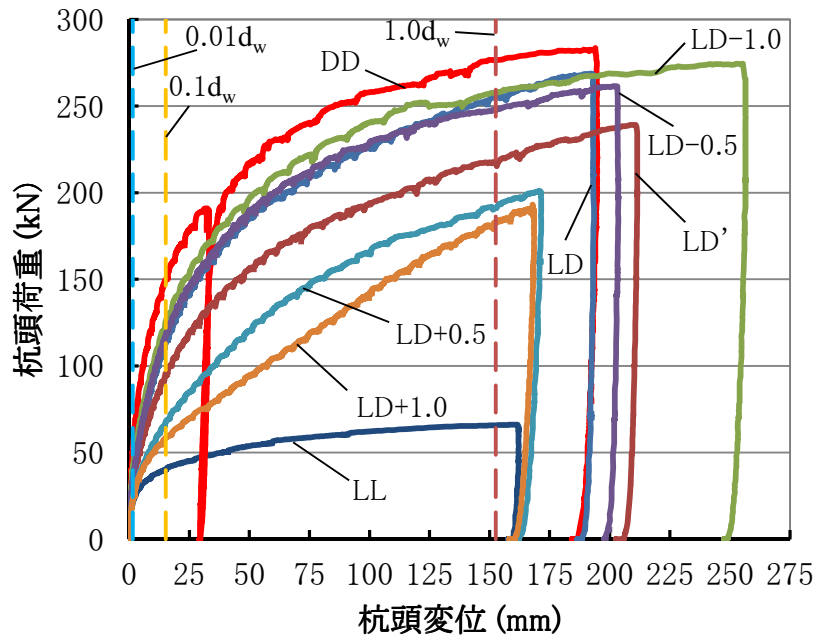


圖 3.10 (a) 杭頭荷重－杭頭變位圖

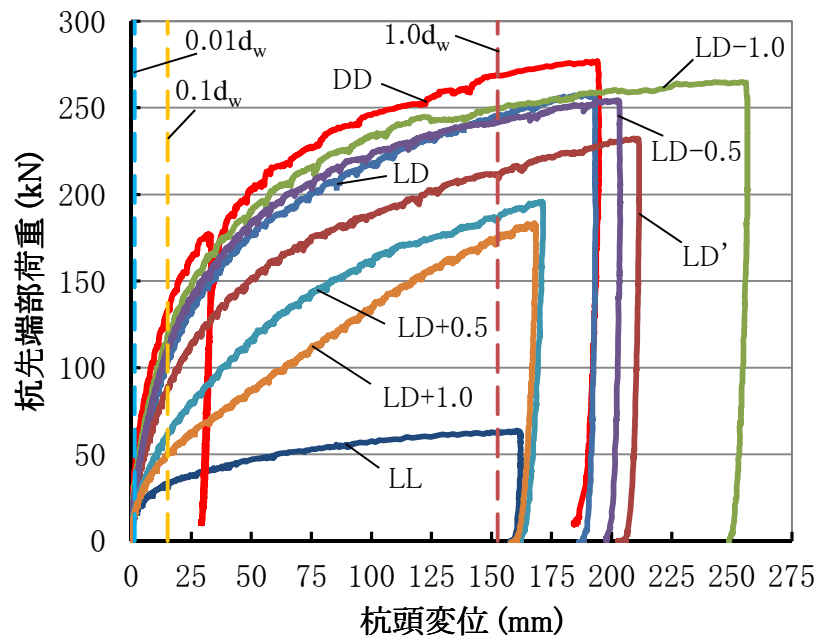


圖 3.10 (b) 杭先端部荷重－杭頭變位圖

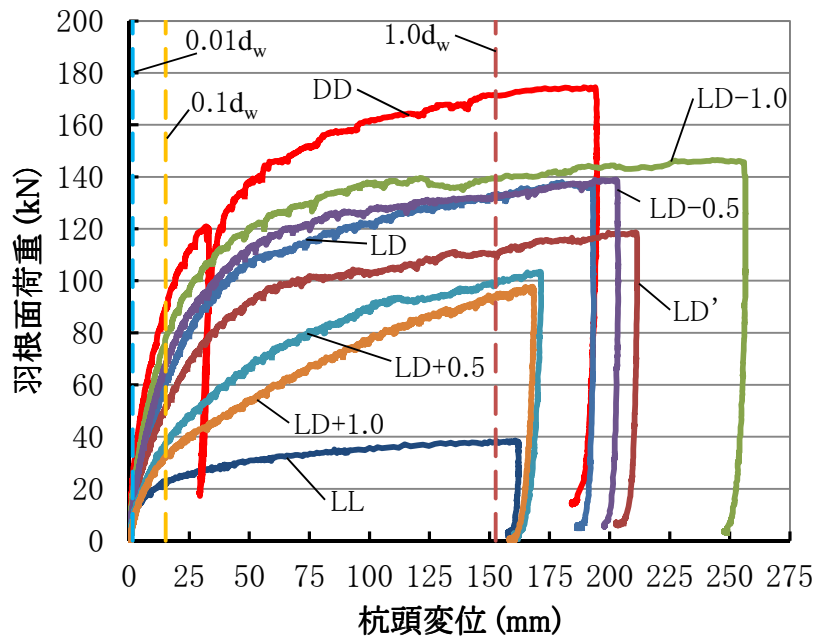


图 3.10 (c) 羽根面荷重－杭頭變位图

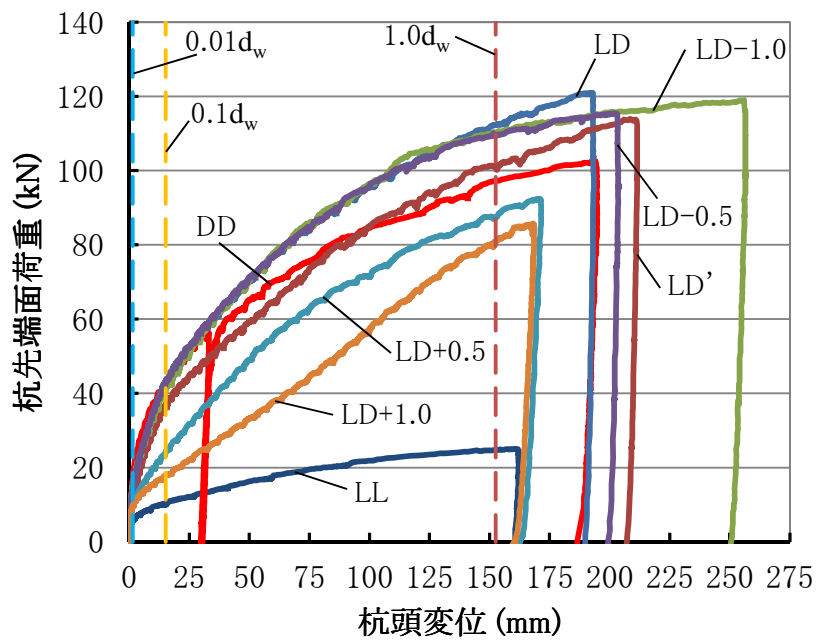


图 3.10 (d) 杭先端面荷重－杭頭變位图

載荷実験結果の一覧を表 3.2(a)～(c)に示す。表には杭頭変位（≒杭先端変位）が羽根径 d_w の 0.01 倍，0.1 倍および 1.0 倍になった時の杭体各部の荷重を示している。なお，支持層の影響がない LL モデルおよび支持層に深く根入れした DD モデルも比較の対象とする。

表 3.2(a)～(c)によると，均一地盤の結果と同様に二層地盤においてもいずれのモデルも杭先端面荷重度と羽根面荷重度は異なっている。杭先端面荷重度に対して羽根面荷重度は， $0.01d_w$ 変位時で 0.20～0.41 倍， $0.1d_w$ 変位時で 0.46～0.64 倍， $1.0d_w$ 変位時で 0.36～0.42 倍となっている。このことから，杭先端面と羽根面の支持力を同一に評価することはできない。

羽根径の 1.0 倍までの範囲における杭の荷重～変位曲線について，LD モデルを代表として図 3.11 に示す。表 3.2(a)～(c)および図 3.11 によると，杭頭荷重に対する杭先端部荷重の割合は，羽根径の $0.01d_w$ 変位時で 76%であるが羽根径の $0.1d_w$ 変位時で 92%，羽根径の $1.0d_w$ 変位時で 96%にもなっている。軸部の周面抵抗力が載荷の初期で発揮される傾向があり，載荷の進行に伴って周面摩擦力は増加せず，杭先端部の支持力が増大することが分かる。

図 3.12 は杭先端部荷重に対する羽根面荷重の負担割合を示している。 $0.01d_w$ 変位時では二層地盤のどのモデルも 0.37～0.55 であるが， $0.1d_w$ 変位時では 0.58～0.66 となり， $1.0d_w$ 変位時では 0.52～0.56 となっている。このように，均一地盤のモデルと同様に変位が増加するのに伴い，羽根面の負担割合が変化する傾向が明確である。なお，載荷の初期段階では羽根面の荷重負担が極めて小さいのは，文献⁶⁾で指摘されている図 3.13 に示すような杭打ち止め時に発生する羽根下面の空洞や緩み領域の影響と考えられる。

以上のことから，杭先端面と羽根面の支持力発揮率が載荷の進行に伴い変化することが明確になった。したがって，長期許容支持力や短期許容支持力を評価する場合，極限支持力に一律の安全率を与える従来の方式は合理的とは云えない。

表 3.2(a) 載荷実験結果一覧表(0.01d_w変位時)

モデル名	0.01d _w 変位時						
	杭頭変位 (mm)	杭先端面		羽根面		杭先端部荷重 R _{mp} (kN)	杭頭荷重 R _m (kN)
		荷重 R _{mb} (kN)	荷重度 w _{mb} (kN/m ²)	荷重 R _{mw} (kN)	荷重度 w _{mw} (kN/m ²)		
LL	1.526	6.0	1317	8.4	615	14.4	21.6
LD+1.0	1.526	9.7	2119	5.8	420	15.5	22.9
LD+0.5	1.526	9.8	2152	8.6	626	18.4	23.1
LD	1.526	13.0	2832	12.9	938	25.8	33.9
LD'	1.526	11.3	2469	13.3	967	24.6	31.7
LD-0.5	1.526	14.0	3058	13.4	978	27.4	33.6
LD-1.0	1.526	14.7	3215	18.2	1324	32.9	40.9
DD	1.526	17.2	3764	24.7	1803	41.9	53.4

表 3.2(b) 載荷実験結果一覧表(0.1d_w変位時)

モデル名	0.1d _w 変位時						
	杭頭変位 (mm)	杭先端面		羽根面		杭先端部荷重 R _{up} (kN)	杭頭荷重 R _u (kN)
		荷重 R _{ub} (kN)	荷重度 w _{ub} (kN/m ²)	荷重 R _{uw} (kN)	荷重度 w _{uw} (kN/m ²)		
LL	15.26	10.1	2209	22.3	1626	32.4	40.2
LD+1.0	15.26	18.0	3933	32.0	2333	50.0	58.7
LD+0.5	15.26	24.3	5310	37.5	2735	61.8	68.0
LD	15.26	43.4	9501	60.5	4412	104.0	113.6
LD'	15.26	37.1	8117	51.7	3769	88.8	95.6
LD-0.5	15.26	42.9	9393	68.3	4978	111.2	118.1
LD-1.0	15.26	41.0	8956	78.2	5699	119.1	126.3
DD	15.26	43.1	9426	89.9	6551	133.0	149.7

表 3.2(c) 載荷実験結果一覧表(1.0d_w変位時)

モデル名	1.0d _w 変位時						
	杭頭変位 (mm)	杭先端面		羽根面		杭先端部荷重 R _{Dp} (kN)	杭頭荷重 R _D (kN)
		荷重 R _{Db} (kN)	荷重度 w _{Db} (kN/m ²)	荷重 R _{Dw} (kN)	荷重度 w _{Dw} (kN/m ²)		
LL	152.6	24.8	5417	38.1	2778	62.9	65.8
LD+1.0	152.6	80.7	17643	93.2	6796	173.9	181.8
LD+0.5	152.6	87.4	19108	98.8	7202	186.2	191.2
LD	152.6	112.3	24565	132.8	9684	245.1	255.2
LD'	152.6	101.4	22186	110.4	8048	211.8	217.9
LD-0.5	152.6	109.5	23953	132.1	9628	241.6	247.7
LD-1.0	152.6	110.2	24106	139.4	10164	249.6	257.9
DD	152.6	97.3	21276	171.4	12492	268.6	276.5

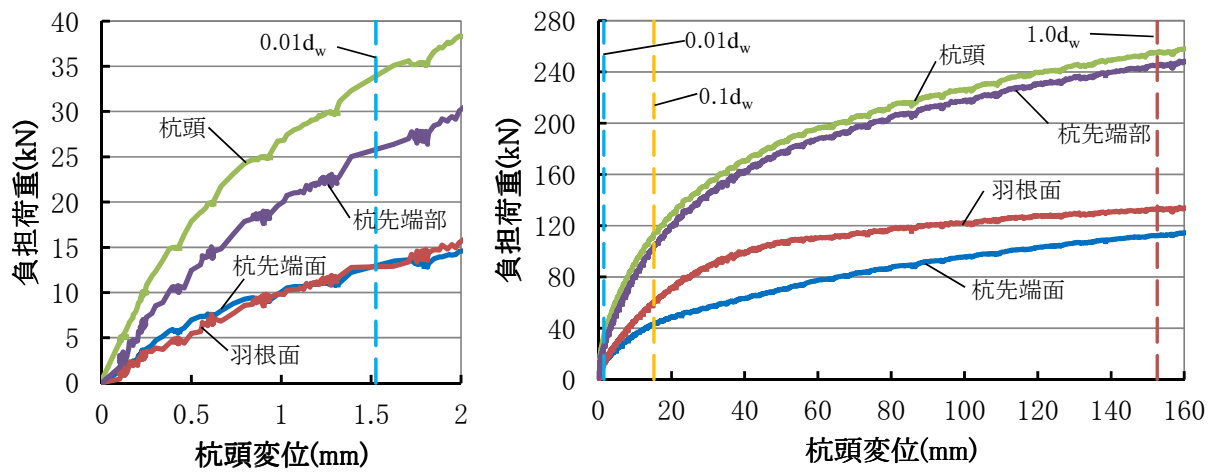


図 3.11 各部負担荷重－杭頭変位図 (LD モデル)

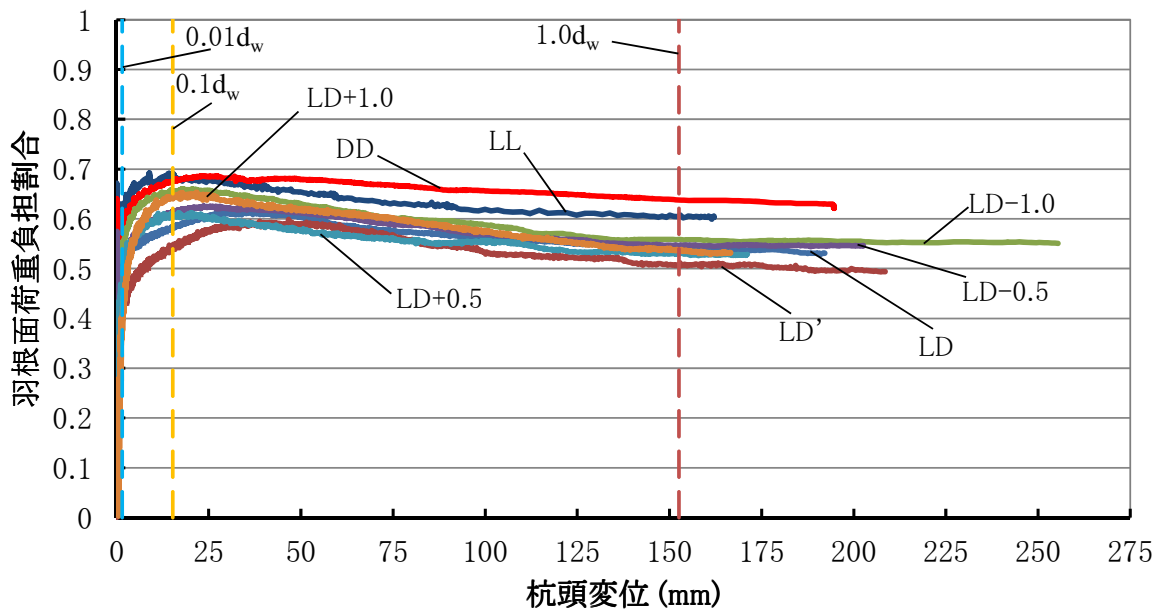


図 3.12 羽根面荷重負担割合－杭頭変位図

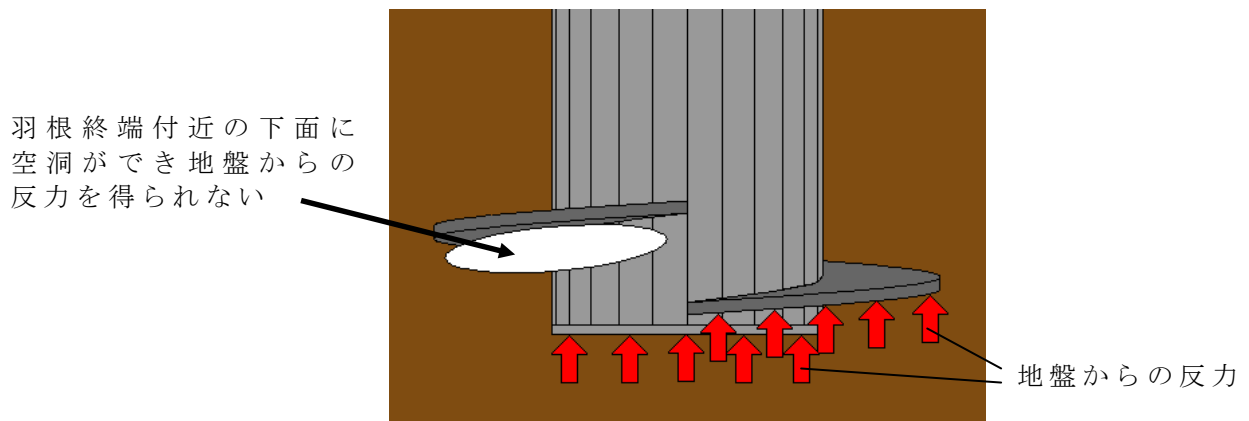


図 3.13 打ち止め時の羽根近傍状況

3.2.3 中間層地盤の場合

(1) 施工時の挙動

図 3.14 は、中間層地盤で実験をしたモデルの羽根近傍トルクおよび杭頭トルクと支持層境界からの距離の関係である。なお、二層地盤である LD および LD' の結果も比較のため記載している。3.2.2 の二層地盤での結果と同様に、杭先端が支持層から 100mm 程度手前に達した段階から杭体トルクが増加する傾向が見られる。また、支持層到達時の羽根近傍トルク値は LL モデルの定常状態の 1.25～1.66 倍となっており、二層地盤での結果とほぼ同様の傾向である。更に、杭先端面荷重は杭先端が支持層から 100mm 程度手前に達した段階から増加する現象や、杭先端面荷重と羽根近傍トルクが概ね比例関係になる傾向は、二層地盤の結果と同様であった（付章 1 を参照）。

図 3.15 は、貫入率 μ と支持層境界からの距離の関係である。表層地盤の貫入率は支持層の層厚に関係なく、LL の定常状態に近い値であるが、支持層から 100mm（杭径 d_0 の 1.3 倍）程度手前から低下し、支持層に達した時点では $\mu = 0.4$ 程度となっており、二層地盤での実験と同様の傾向となっている。

以上より、少なくとも層厚が杭径以上であれば、貫入中の杭体トルクや貫入率の変化から、支持層への杭先端の到達状況を二層地盤と同様に把握できることが分かる。

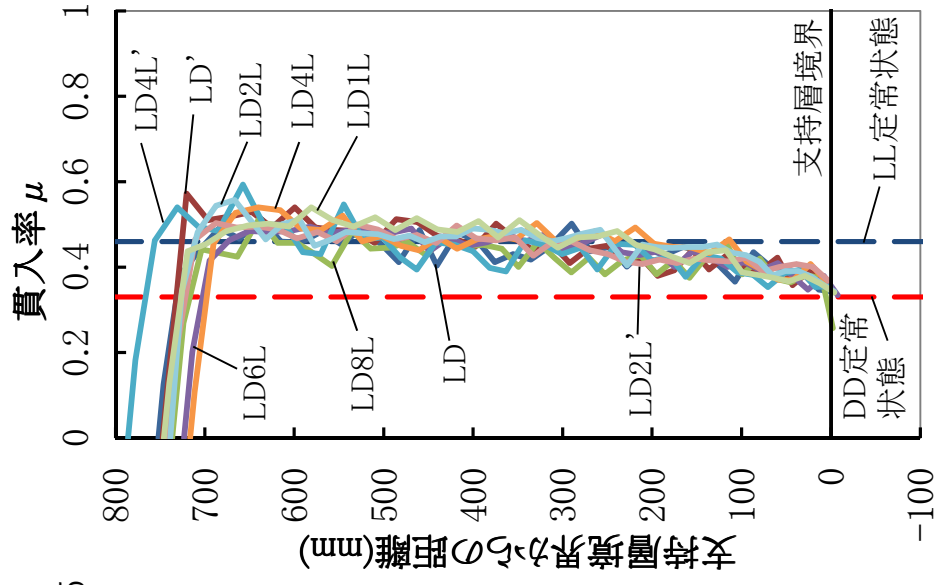
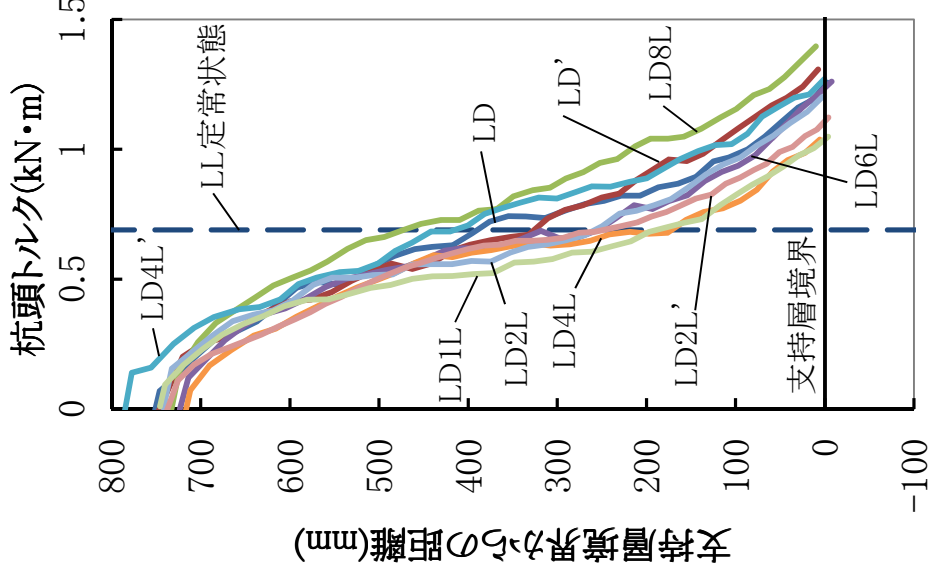
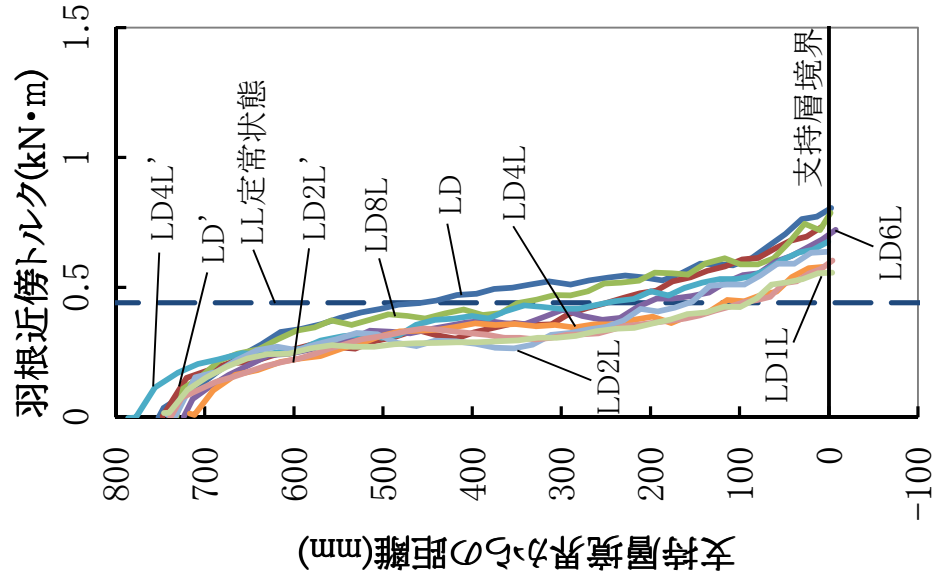


図 3.15 施工中の貫入率の変化



(b) 杭頭トルク



(a) 羽根近傍トルク

図 3.14 施工中の杭体トルクの変化

(2) 載荷時の挙動

図 3.16(a)は杭頭荷重と杭頭沈下量の関係である。中間層の層厚が増加するのに従い最大荷重が増加している。また、層厚の薄いもの程杭頭変位が小さいうちに最大荷重に達している。LD8Lでは最大荷重近くまでLD'と同じ曲線形状となっている。

図 3.16(b)は杭先端部荷重と杭頭沈下量の関係である。荷重はやや小さくなるものの、荷重の増加やモデル間の大小関係といった傾向は杭頭荷重と同様である。

図 3.16(c)は羽根面荷重と杭頭沈下量の関係である。層厚が大きい程大きな最大荷重を示すのは杭頭荷重と同様だが、層厚が大きなものでも荷重がほとんど増加しなくなり、明確に極限に達していることが分かる。

図 3.16(d)は杭先端面荷重と杭頭沈下量の関係である。層厚の厚いLD, LD', LD8LおよびLD6Lでは極限に達しているか明確ではないが、それ以外のモデルでは極限に達していることが分かる。また、極限に達する杭頭変位は羽根面荷重に比べて大きく、層厚が厚い程より大きな変位が必要となっている。

載荷実験結果(0.01 d_w 変位時, 0.1 d_w 変位時, 1.0 d_w 変位時)の一覧を表 3.3(a)～(c)に示す。

それによると、杭先端面荷重度に対して羽根面荷重度は、0.01 d_w 変位時で0.32～0.42倍, 0.1 d_w 変位時で0.44～0.53倍, 1.0 d_w 変位時で0.35～0.53倍となっている。杭先端面と羽根面の荷重度が異なっているのは、均一地盤や二層地盤の結果と同様であり、杭先端面と羽根面に同一の評価式で支持力を求める方法は合理的とは云えない。

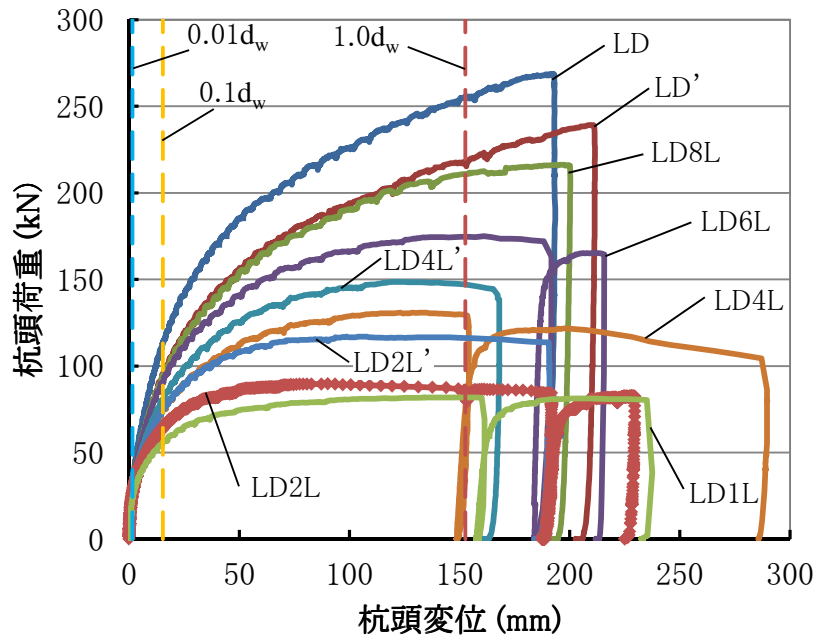


图 3.16(a) 杭頭荷重－杭頭變位图

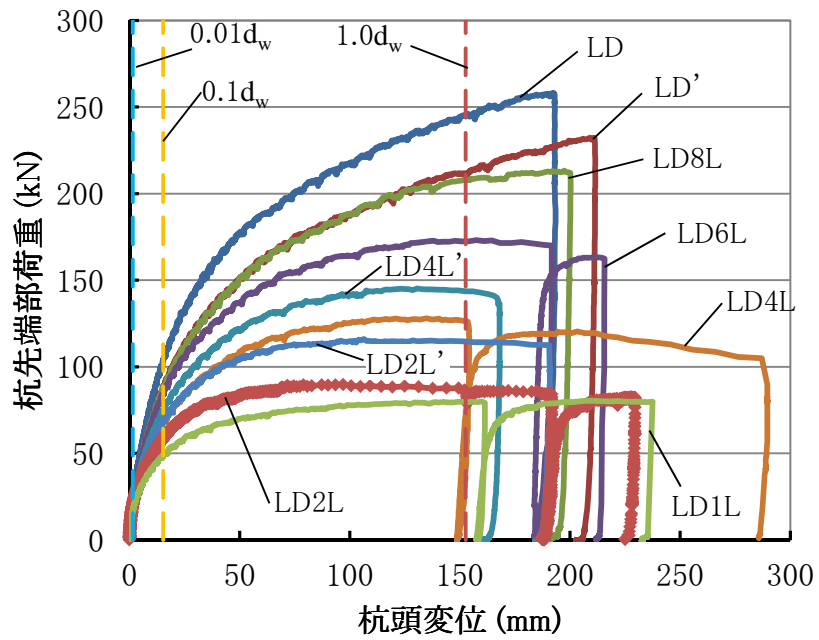


图 3.16(b) 杭先端部荷重－杭頭變位图

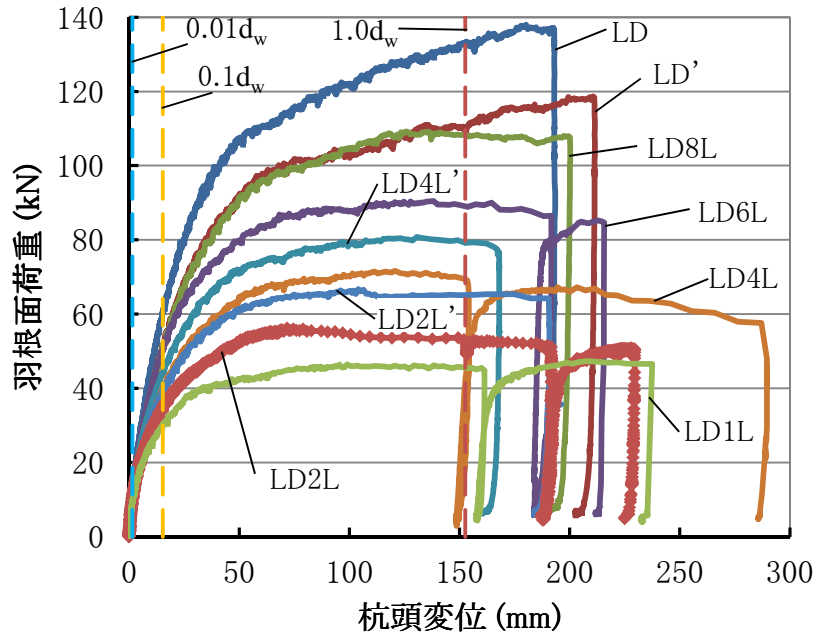


图 3.16 (c) 羽根面荷重－杭頭變位图

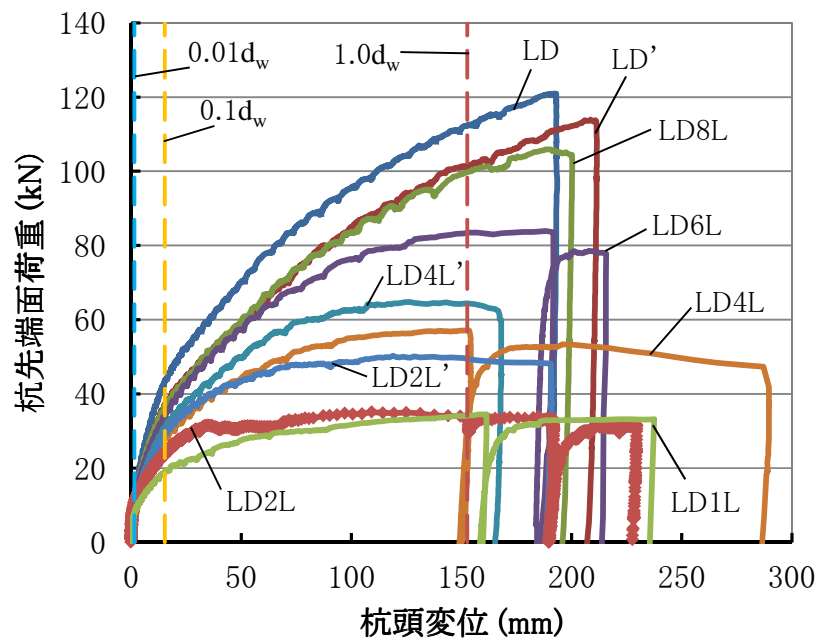


图 3.16 (d) 杭先端面荷重－杭頭變位图

表 3.3(a) 載荷実験結果一覧表(0.01d_w変位時)

モデル名	0.01d _w 変位時						
	杭頭変位 (mm)	杭先端面		羽根面		杭先端部荷重 R _{mp} (kN)	杭頭荷重 R _m (kN)
		荷重 R _{mb} (kN)	荷重度 W _{mb} (kN/m ²)	荷重 R _{mw} (kN)	荷重度 W _{mw} (kN/m ²)		
LL	1.526	6.0	1317	8.4	615	14.4	21.6
LD1L	1.526	8.0	1758	9.5	694	17.6	23.8
LD2L	1.526	10.7	2338	10.2	747	20.9	26.8
LD2L'	1.526	10.5	2305	12.2	890	22.8	29.7
LD4L	1.526	10.0	2189	10.6	773	20.6	27.0
LD4L'	1.526	10.2	2220	12.7	923	22.8	29.5
LD6L	1.526	11.4	2493	12.1	881	23.5	30.1
LD8L	1.526	11.7	2548	13.0	948	24.7	32.2
LD	1.526	13.0	2832	12.9	938	25.8	33.9
LD'	1.526	11.3	2469	13.3	967	24.6	31.7

表 3.3(b) 載荷実験結果一覧表(0.1d_w変位時)

モデル名	0.1d _w 変位時						
	杭頭変位 (mm)	杭先端面		羽根面		杭先端部荷重 R _{up} (kN)	杭頭荷重 R _u (kN)
		荷重 R _{ub} (kN)	荷重度 W _{ub} (kN/m ²)	荷重 R _{uw} (kN)	荷重度 W _{uw} (kN/m ²)		
LL	15.26	10.1	2209	22.3	1626	32.4	40.2
LD1L	15.26	19.0	4148	30.1	2192	49.0	56.0
LD2L	15.26	23.6	5171	34.4	2511	58.1	64.0
LD2L'	15.26	29.5	6451	39.2	2856	68.7	75.2
LD4L	15.26	27.9	6108	40.0	2917	67.9	74.2
LD4L'	15.26	30.7	6705	44.0	3208	74.7	80.5
LD6L	15.26	33.7	7370	50.1	3650	83.8	90.5
LD8L	15.26	36.7	8016	51.4	3747	88.1	94.6
LD	15.26	43.4	9501	60.5	4412	104.0	113.6
LD'	15.26	37.1	8117	51.7	3769	88.8	95.6

表 3.3(c) 載荷実験結果一覧表(1.0d_w変位時)

モデル名	1.0d _w 変位時						
	杭頭変位 (mm)	杭先端面		羽根面		杭先端部荷重 R _{Dp} (kN)	杭頭荷重 R _D (kN)
		荷重 R _{Db} (kN)	荷重度 W _{Db} (kN/m ²)	荷重 R _{Dw} (kN)	荷重度 W _{Dw} (kN/m ²)		
LL	152.6	24.8	5417	38.1	2778	62.9	65.8
LD1L	152.6	34.2	7471	45.5	3319	79.7	81.9
LD2L	152.6	33.0	7213	52.7	3844	85.7	85.0
LD2L'	152.6	49.5	10826	65.1	4747	114.6	116.2
LD4L	152.6	57.1	12479	69.4	5058	126.4	129.4
LD4L'	152.6	64.4	14093	79.2	5772	143.6	147.1
LD6L	152.6	83.5	18264	88.7	6469	172.2	174.7
LD8L	152.6	99.8	21816	108.3	7895	208.0	210.9
LD	152.6	112.3	24565	132.8	9684	245.1	255.2
LD'	152.6	101.4	22186	110.4	8048	211.8	217.9

図 3.17 は杭先端部荷重に占める羽根面荷重の割合と杭頭変位の関係である。 載荷初期から杭頭変位の進行に伴い急激に羽根面の負担割合が大きくなり、 $0.1d_w$ 変位付近で最大（ $0.57\sim 0.69$ ）となった後、 $0.5\sim 0.6$ 程度に低下している。 このことから、均一地盤や二層地盤と同様に載荷の進行に伴い杭先端面と羽根面の負担割合が変化していることが分かる。 このことから、極限支持力に一律の安全率を与えて長期許容支持力や短期許容支持力を評価する方式は問題と云える。

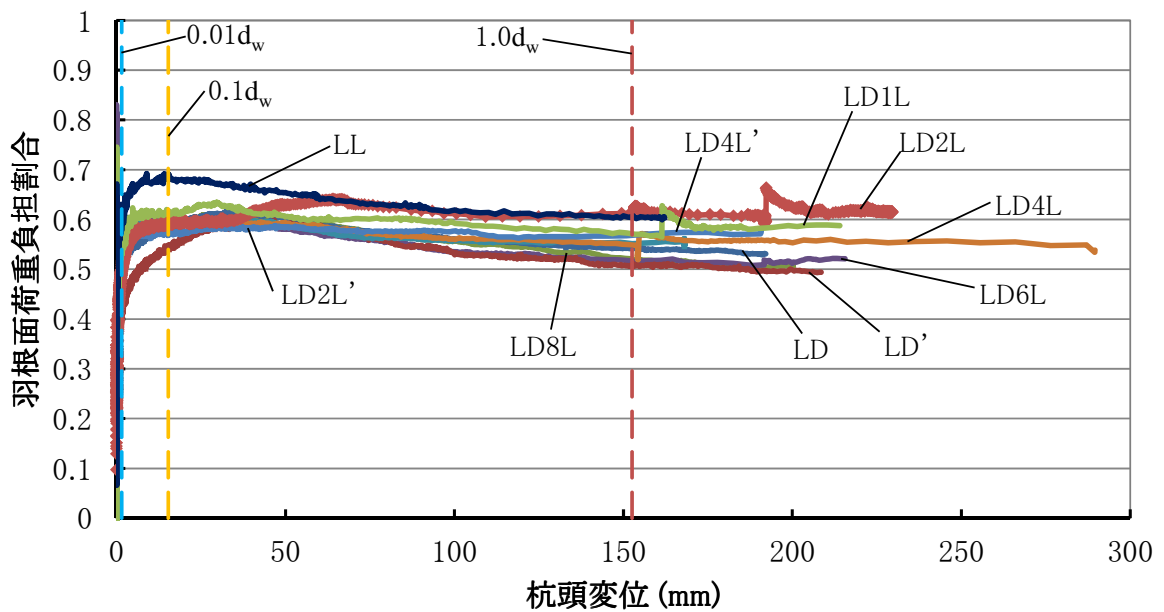


図 3.17 羽根面荷重負担割合－杭頭変位図

3.3 先端部支持力に及ぼす根入れの影響

表 3.4 は，二層地盤において支持層への根入れ量を変化させた模型実験結果であり，杭頭変位が $0.01d_w$ ， $0.1d_w$ および $1.0d_w$ の時の杭先端面，羽根面および杭先端部の荷重を示している．なお，表中の LD_{ave} は LD および LD' の平均値である．また，参考のために均一地盤である LL および DD の結果も記載している．

図 3.18 (a)～(c) は，それぞれ杭頭部が $0.01d_w$ ， $0.1d_w$ および $1.0d_w$ 沈下した時点における杭体各部の負担荷重を比較したものである．なお，図中のラインは計測部位ごとに試験結果を結んでいるが，支持層境界からの距離 l_b が 0 の点については LD_{ave} の値を用いている．

支持層へ根入れしたモデルの杭体各部の負担荷重は次のような特性が見られる．羽根面の負担荷重では， $0.01d_w$ 変位時および $0.1d_w$ 変位時において支持層への根入れが深いモデルほど増加するが， $1.0d_w$ 変位時においては根入れが深くなってもあまり増加しない．杭先端面の負担荷重は，いずれのモデルも支持層への根入れが深くなっても変化は小さく，特に $0.1d_w$ 変位時および $1.0d_w$ 変位時においてはほとんど同じである．杭先端部の負担荷重は， $0.01d_w$ 変位時および $0.1d_w$ 変位時において支持層への根入れが深いモデルほど増加するが， $1.0d_w$ 変位時においては根入れが深くなってもあまり増加しない．

次に，支持層へ根入れしないモデルの杭体各部の負担荷重を見ると，どの杭頭変位時においても根入れのあるモデルより小さい．ただし， $0.01d_w$ 変位時の羽根面荷重を除き均一地盤である LL モデルよりは大きい．なお，いずれの杭頭変位時においても，杭体各部の負担荷重は支持層に近づくとつれて 2 次関数的に急増する傾向があり， $LD+0.5$ から LD_{ave} への変化は著しい．

以上の結果から，羽根面の支持力確保の観点では $1.0d_w$ 程度の根入れが必要であるが，杭先端面の支持力確保からは支持層深度（支持層境界）に杭先端が達した時点で打ち止める方法も有効であると考えられる．

表 3.4 模型杭載荷実験結果一覽表(二層地盤・均一地盤)

モデル名	0.01d _w 変位時			0.1d _w 変位時			1.0d _w 変位時		
	杭先端 面荷重 R _{mb} (kN)	羽根面 荷重 R _{mw} (kN)	杭先端 部荷重 R _{mp} (kN)	杭先端 面荷重 R _{ub} (kN)	羽根面 荷重 R _{uw} (kN)	杭先端 部荷重 R _{up} (kN)	杭先端 面荷重 R _{Db} (kN)	羽根面 荷重 R _{Dw} (kN)	杭先端 部荷重 R _{Dp} (kN)
LL	6.0	8.4	14.4	10.1	22.3	32.4	24.8	38.1	62.9
LD+1.0	9.7	5.8	15.5	18.0	32.0	50.0	80.7	93.2	173.9
LD+0.5	9.8	8.6	18.4	24.3	37.5	61.8	87.4	98.8	186.2
LD _{ave}	12.1	13.1	25.2	40.3	56.1	96.4	106.9	121.6	228.5
LD-0.5	14.0	13.4	27.4	42.9	68.3	111.2	109.5	132.1	241.6
LD-1.0	14.7	18.2	32.9	41.0	78.2	119.1	110.2	139.4	249.6
DD	17.2	24.7	41.9	43.1	89.9	133.0	97.3	171.4	268.6
LD	13.0	12.9	25.8	43.4	60.5	104.0	112.3	132.8	245.1
LD'	11.3	13.3	24.6	37.1	51.7	88.8	101.4	110.4	211.8

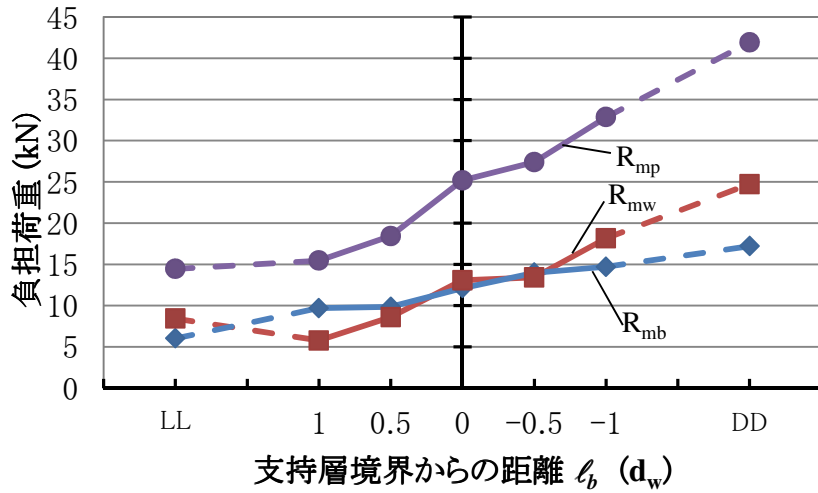


図 3.18(a) 各部負担荷重－支持層境界からの距離図（ $0.01d_w$ 変位時）

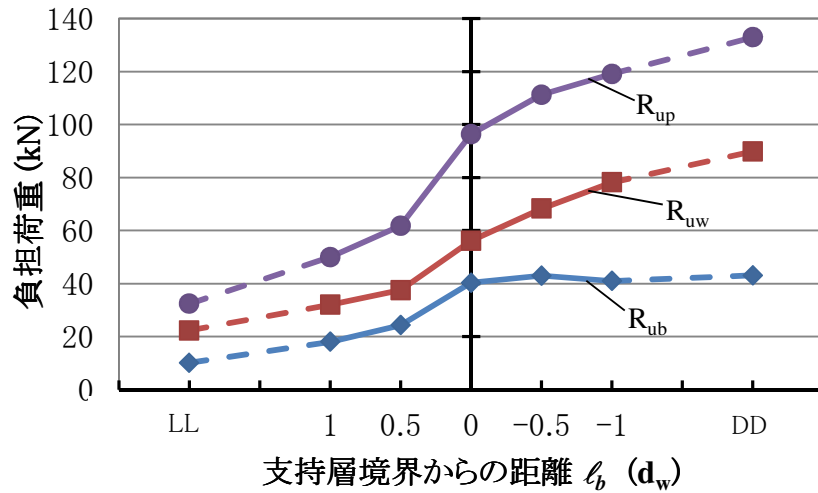


図 3.18(b) 各部負担荷重－支持層境界からの距離図（ $0.1d_w$ 変位時）

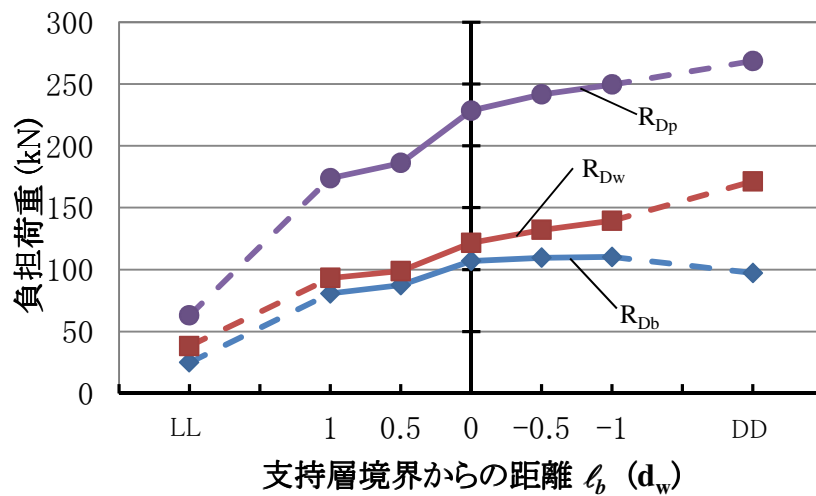


図 3.18(c) 各部負担荷重－支持層境界からの距離図（ $1.0d_w$ 変位時）

図 3.19(a)～(c)は、それぞれ杭頭が $0.01d_w$ 、 $0.1d_w$ および $1.0d_w$ 沈下した時点について、杭先端部荷重に占める杭先端面荷重および羽根面荷重の割合と支持層境界からの距離 l_b の関係を示している。

図 3.19(a)の $0.01d_w$ 変位時においては、羽根面荷重は支持層に近づく程、支持層に根入れされる程負担割合は増加している。また、支持層に到達していない状態では羽根面荷重のほうが杭先端面荷重よりも小さい割合となっている。

図 3.19(b)の $0.1d_w$ 変位時においては、羽根面荷重は杭先端が支持層境界にある $l_b=0$ の時が最も負担割合は小さい。しかし、 l_b がどのような値をとっても羽根面荷重は杭先端面荷重よりも大きな負担割合となっている。

図 3.19(c)の $1.0d_w$ 変位時においては、羽根面荷重は支持層に到達するまではほとんど負担割合は変化せず、支持層に根入する程負担割合は大きくなっている。

以上のことから、支持層に根入れする程羽根面の負担割合が増加することが分かる。また、 $0.1d_w$ 変位時や $1.0d_w$ 変位時の杭先端面の負担割合は、杭先端が支持層境界にある時が最大となるという特徴を有すると云える。

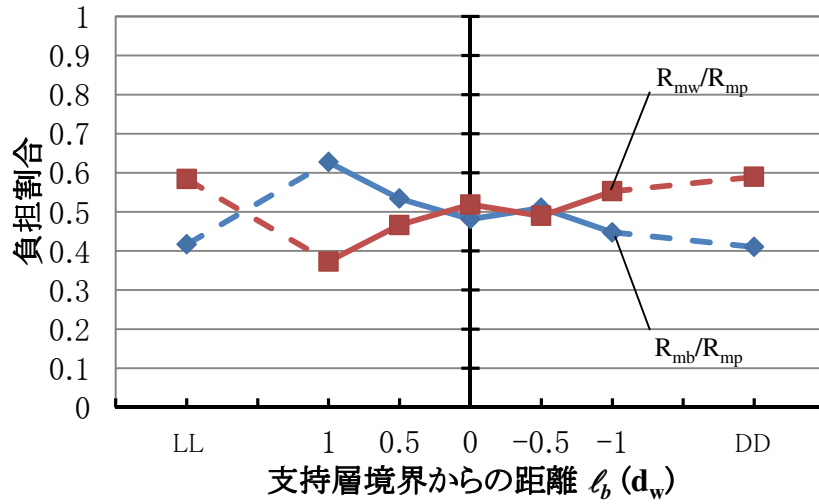


図 3.19(a) 各部負担割合－支持層境界からの距離図（ $0.01d_w$ 変位時）

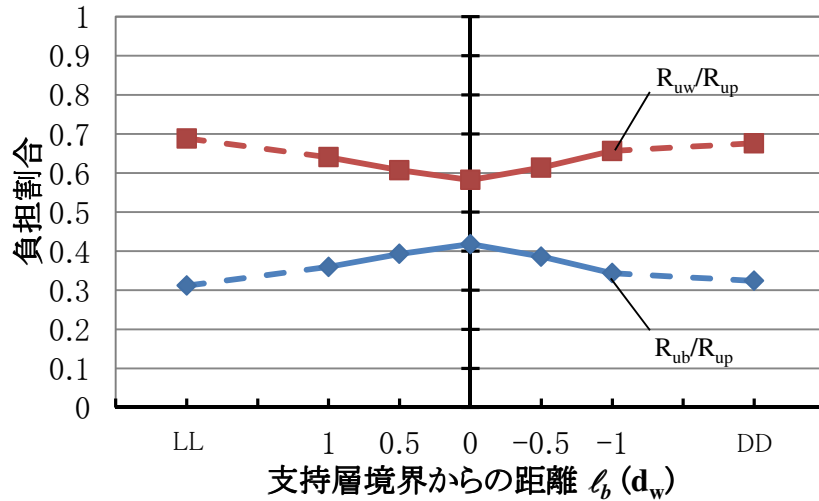


図 3.19(b) 各部負担割合－支持層境界からの距離図（ $0.1d_w$ 変位時）

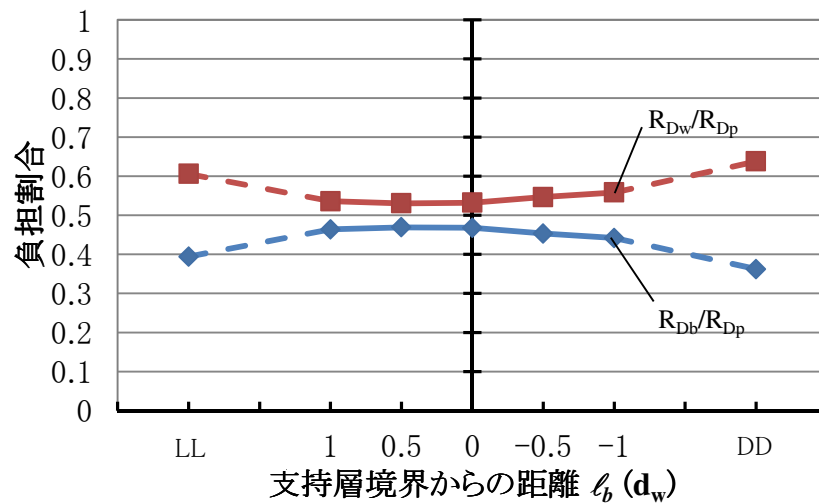


図 3.19(c) 各部負担割合－支持層境界からの距離図（ $1.0d_w$ 変位時）

図 3.20(a)～(c)は、杭体各部の負担荷重ごとに $0.01d_w$ 変位時， $0.1d_w$ 変位時および $1.0d_w$ 変位時について， LD_{ave} の値を 1 として各モデルの値をプロットしたものである．支持層に根入れしていないモデルでは，杭先端面と羽根面が支持層に近づくと急増する傾向がある．それに対して，支持層に根入れしたモデルでは，根入れが大きいほど羽根面荷重は大きくなるが，杭先端面荷重は根入れが増えてもあまり増えず，特に $0.1d_w$ 変位時には LD-0.5 モデルより LD-1.0 モデルの方が小さい．また，杭先端面，羽根面および杭先端部の荷重は，根入れの有無にかかわらず杭頭変位が異なると l_b による荷重の変化が異なる．このように l_b による負担荷重への影響は，支持層境界の前後や杭頭変位の進行により変化していることから，支持層への根入れの有無や長期や短期の許容支持力によって区分けして評価するべきである．

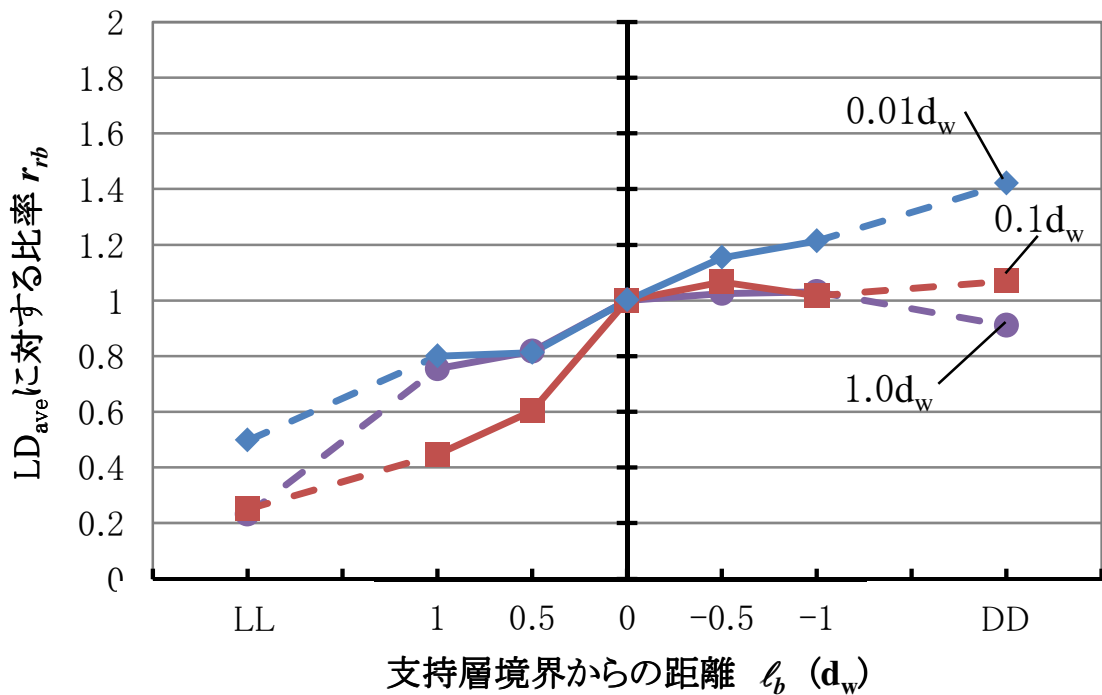


図 3.20(a) l_b による LD_{ave} に対する比率の変化（杭先端面荷重）

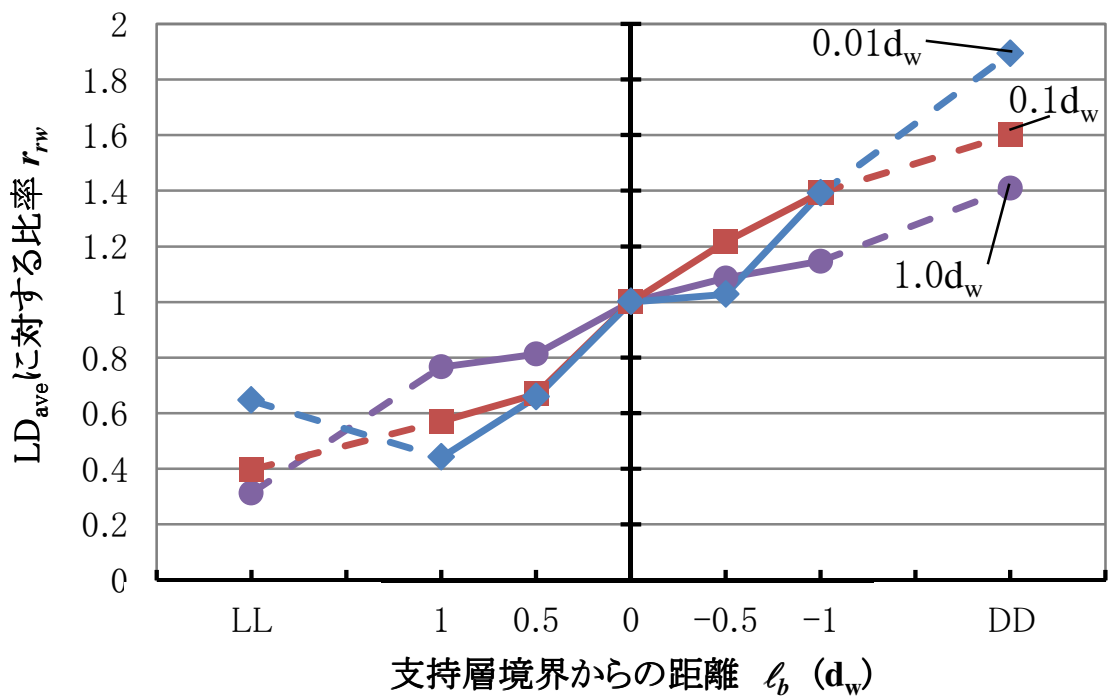


図 3.20 (b) l_b による LD_{ave} に対する比率の変化 (羽根面荷重)

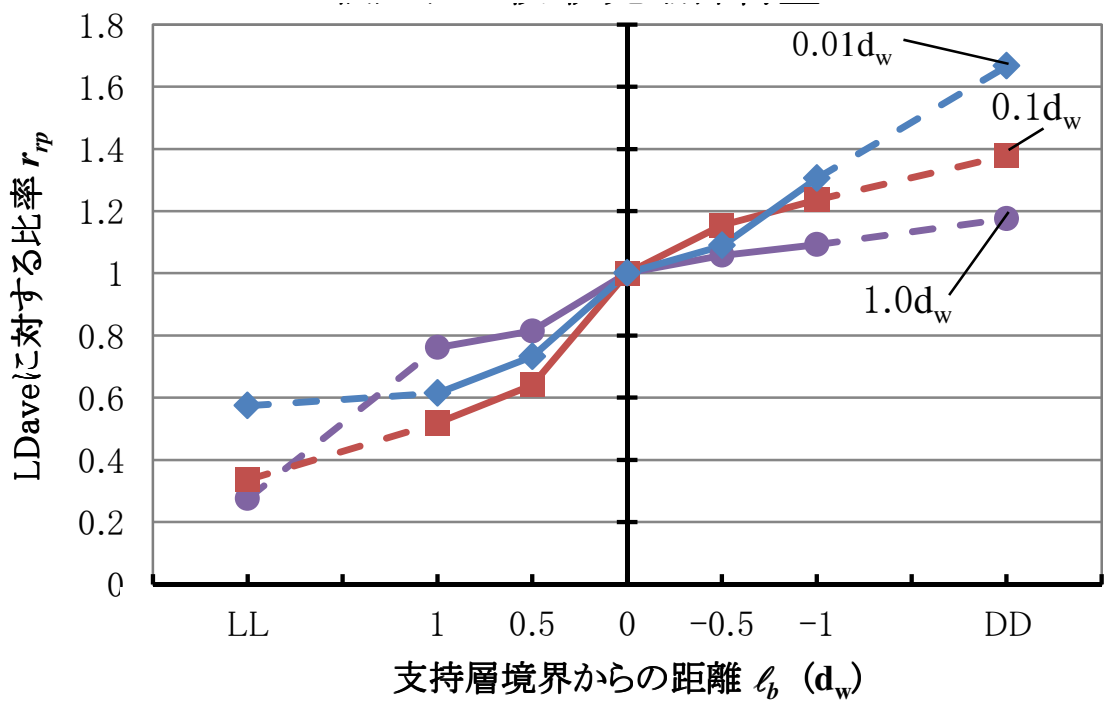


図 3.20 (c) l_b による LD_{ave} に対する比率の変化 (杭先端部荷重)

3.4 先端部支持力に及ぼす中間層の影響

表 3.5 は，中間層地盤で中間層（薄層）の層厚を変化させた模型実験結果であり，杭頭変位が $0.01d_w$ ， $0.1d_w$ および $1.0d_w$ の時の杭体各部の荷重を示している．なお，比較のために二層地盤である LD および LD' とその平均である LD_{ave} も記載している．

図 3.21 (a)～(c) は，それぞれ杭頭変位が $0.01d_w$ 変位時， $0.1d_w$ 変位時 および $1.0d_w$ 変位時における杭体各部の負担荷重を比較したものである．なお，中間層の層厚 $h_b=0$ の点は LL モデルの値をプロットしている．また，図中のラインは計測部位ごとに試験結果を結んでいるが， h_b が 2 および 4 値はそれぞれ LD2L と LD2L'，LD4L と LD4L' の平均値である． $0.01d_w$ 変位時 および $0.1d_w$ 変位時では， h_b が増加するのに従い杭体各部の負担荷重は上に凸な曲線で増加している．それに対して， $1.0d_w$ 変位時では杭体各部の負担荷重は h_b が増えるのに従い直線的に増加する傾向を示している．

表 3.5 模型杭載荷実験結果一覧表（中間層地盤）

モデル名	0.01 d_w 変位時			0.1 d_w 変位時			1.0 d_w 変位時		
	杭先端面荷重 R_{mb} (kN)	羽根面荷重 R_{mw} (kN)	杭先端部荷重 R_{mp} (kN)	杭先端面荷重 R_{ub} (kN)	羽根面荷重 R_{uw} (kN)	杭先端部荷重 R_{up} (kN)	杭先端面荷重 R_{Db} (kN)	羽根面荷重 R_{Dw} (kN)	杭先端部荷重 R_{Dp} (kN)
LL	6.0	8.4	14.4	10.1	22.3	32.4	24.8	38.1	62.9
LD1L	8.0	9.5	17.6	19.0	30.1	49.0	34.2	45.5	79.7
LD2L	10.7	10.2	20.9	23.6	34.4	58.1	33.0	52.7	85.7
LD2L'	10.5	12.2	22.8	29.5	39.2	68.7	49.5	65.1	114.6
LD4L	10.0	10.6	20.6	27.9	40.0	67.9	57.1	69.4	126.4
LD4L'	10.2	12.7	22.8	30.7	44.0	74.7	64.4	79.2	143.6
LD6L	11.4	12.1	23.5	33.7	50.1	83.8	83.5	88.7	172.2
LD8L	11.7	13.0	24.7	36.7	51.4	88.1	99.8	108.3	208.0
LD_{ave}	12.1	13.1	25.2	40.3	56.1	96.4	106.9	121.6	228.5
LD	13.0	12.9	25.8	43.4	60.5	104.0	112.3	132.8	245.1
LD'	11.3	13.3	24.6	37.1	51.7	88.8	101.4	110.4	211.8

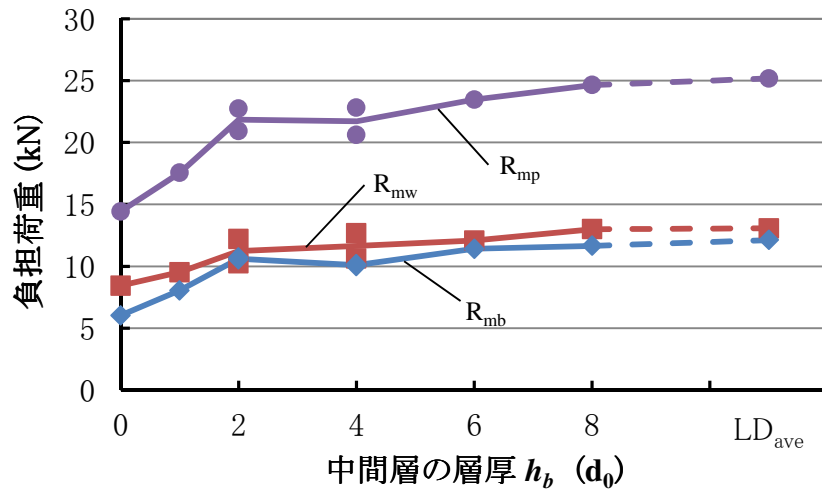


図 3.21 (a) 各部負担荷重－中間層の層厚図 (0.01 d_w 変位時)

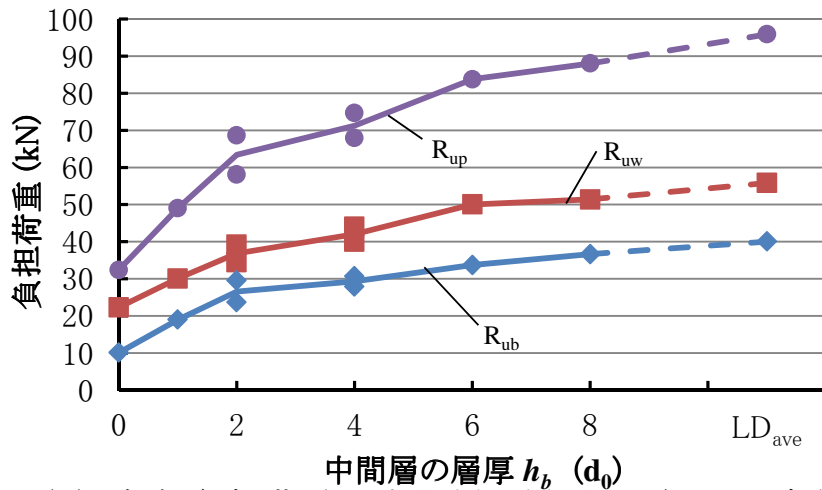


図 3.21 (b) 各部負担荷重－中間層の層厚図 (0.1 d_w 変位時)

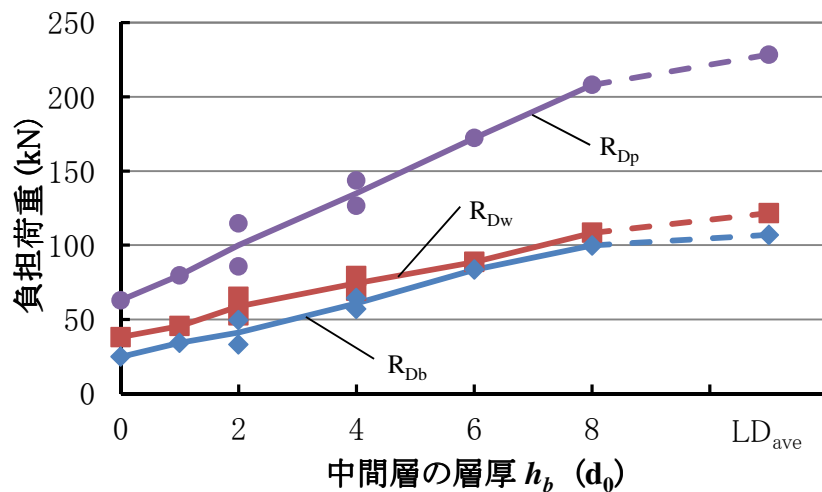


図 3.21 (c) 各部負担荷重－中間層の層厚図 (1.0 d_w 変位時)

図 3.22 (a)～(c)は、それぞれ杭頭が $0.01d_w$ 、 $0.1d_w$ および $1.0d_w$ 沈下した時点について、杭先端部荷重に占める杭先端面荷重および羽根面荷重の割合と中間層の層厚 h_b の関係を示している。

図 3.22 (a)の $0.01d_w$ 変位時においては、羽根面の荷重負担割合は $h_b=0$ で約 0.6 であるが、 $h_b=2$ で 0.5 付近となり、それ以上 h_b が増加してもほとんど変化しない。

図 3.22 (b)の $0.1d_w$ 変位時においては、羽根面の荷重負担割合は $h_b=0$ で約 0.7 であるが、 h_b の増加と共に低下し、 $h_b=2$ 以降では約 0.6 となりほとんど変化しない。

図 3.22 (c)の $1.0d_w$ 変位時においては、羽根面の荷重負担割合は $h_b=0$ ～2 では約 0.6 であるが、 $h_b=6$ 以降は約 0.5 となっている。

以上のことから、杭先端部に占める杭先端面や羽根面の負担割合は、 h_b が一定の大きさ以上になると一定になること、同じ層厚であっても杭頭変位に伴って杭体各部の負担割合が異なることが分かる。

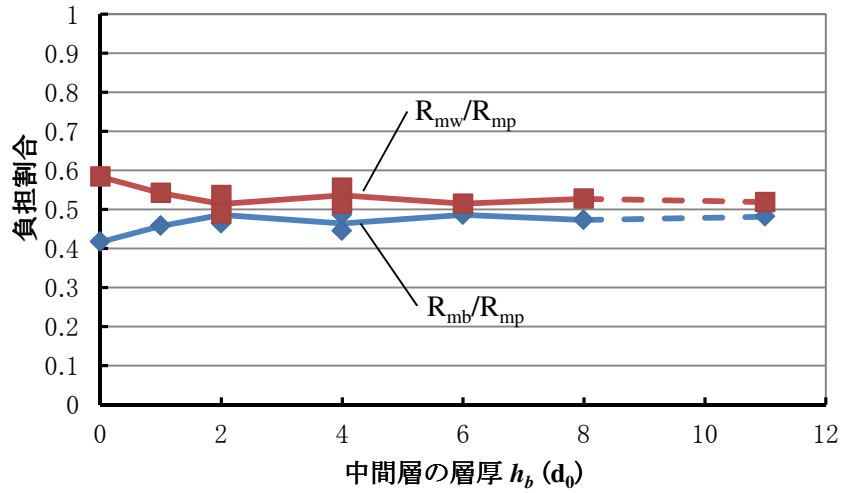


図 3.22 (a) 各部負担割合－中間層の層厚図 ($0.01d_w$ 変位時)

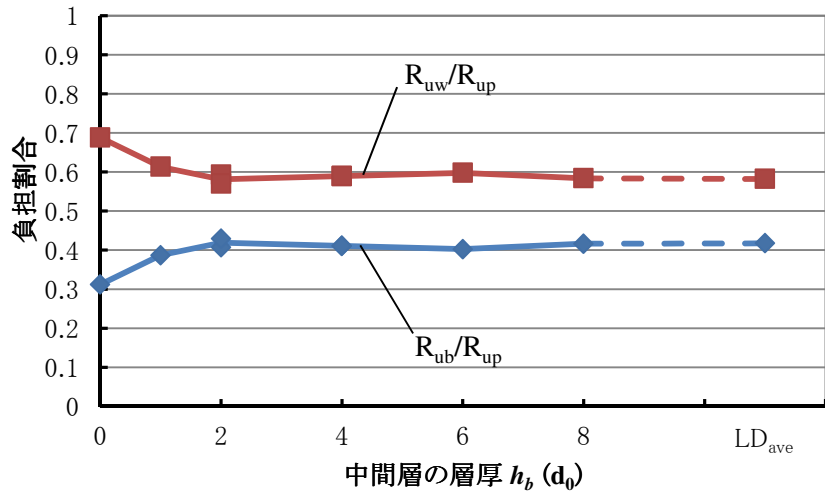


図 3.22 (b) 各部負担割合－中間層の層厚図 ($0.1d_w$ 変位時)

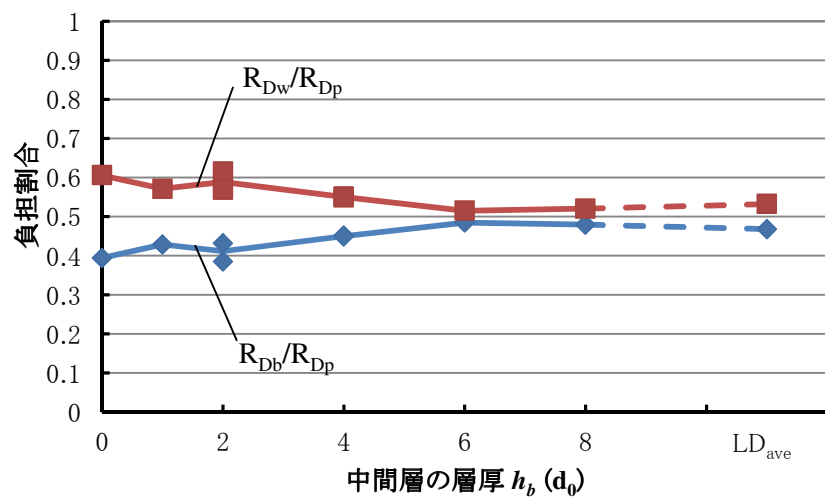


図 3.22 (c) 各部負担割合－中間層の層厚図 ($1.0d_w$ 変位時)

図 3.23 は基準荷重に相当する $0.1d_w$ 変位時の杭体各部の負担荷重に着目して、二層地盤である LD_{ave} の値に対する各モデルの値の比率 r_r をプロットしたものである。 LD_{ave} は中間層の層厚 h_b が無限大とみなせることから、 LD_{ave} に対する比率 r_r と中間層厚 h_b の関係について、 $h_b = \infty$ で 1 となる双曲線での近似を試みている。それによると、 $h_b \leq 4$ では杭体各部ごとに異なる r_r を示すが、 $h_b \geq 4$ では杭体各部が同様な r_r となり、 h_b の増大に伴う r_r の増加は極めて小さい傾向を示す。

これらのことから、中間層に支持させる場合には、二層地盤における支持力の 80% 程度を発揮する軸径の 5 倍（羽根径の 2.5 倍）以上の層厚を確保する必要があると考える。

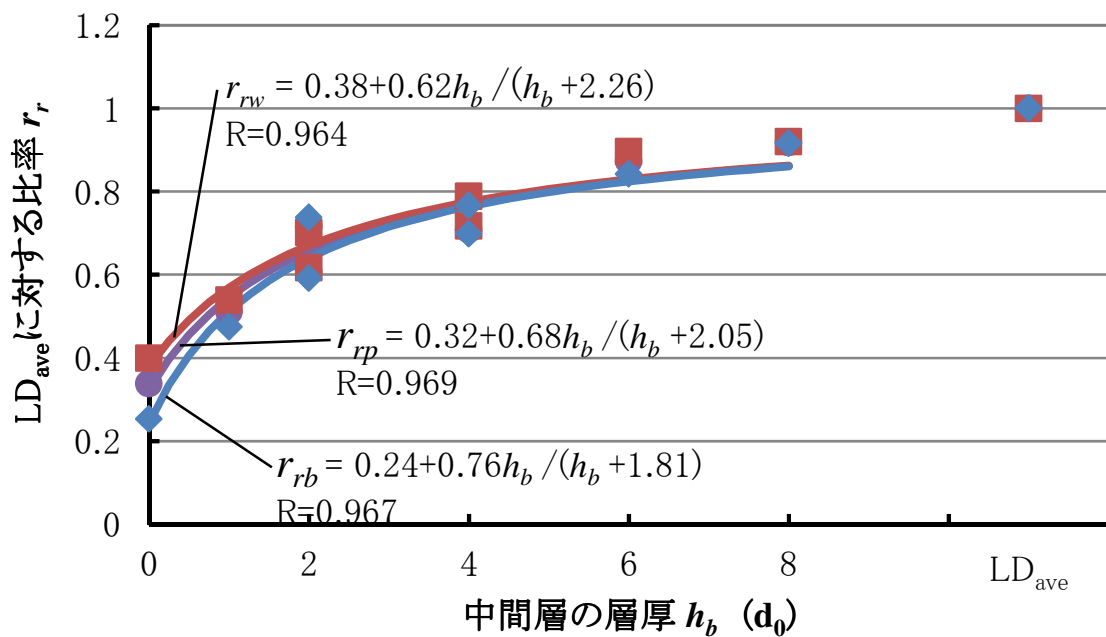


図 3.23 中間層の層厚－LD 平均に対する比率（ $0.1d_w$ 変位時）

3.5 まとめ

3.5.1 施工時および載荷時の挙動について

回転貫入杭の施工時挙動に関しては、杭先端面荷重と羽根近傍の杭体トルクは比例関係にあり、杭先端が支持層に近づくと支持層の手前（杭径の1.3倍程度）から杭体トルクの上昇が発生する。これに対応して、 $\mu \approx 0.5$ とほぼ一定で推移した貫入率が、支持層到達時には $\mu \approx 0.4$ まで低下することから、杭先端の支持層への到達状況が把握できる。

回転貫入杭の載荷時挙動に関しては、以下のような特性が確認できた。

- 1) 一般に杭径の0.1倍変位時点を基準支持力としているが、本実験では羽根径の0.1倍変位に達した以降も杭先端部荷重は増加する傾向がある。均一地盤や二層地盤では、羽根径変位時点の先端部支持力は羽根径の0.1倍変位時点の1.9~3.5倍に達している。ただし、中間層地盤では沈下の進行に伴う先端部支持力の増加が停滞する傾向があり、層厚の小さなモデルではパンチング破壊の可能性が示唆された。
- 2) 支持層への根入れの有無によって、杭先端面と羽根面の荷重分担の傾向が異なる。支持層への根入れ無しモデルに比べて、根入れ有のモデルでは、羽根面荷重は増加するが杭先端面荷重はほとんど増加しない。

3.5.2 先端部支持力の発現過程について

実務設計では羽根径の0.1倍変位時点を基準支持力として、回転貫入杭の極限支持力とみなすのが一般的である。そこで、載荷開始から0.1倍変位時点までの範囲に限定して、杭先端面や羽根面の負担荷重に着目した結果、以下の事項が明らかになった。

(1) 二層地盤への根入れの影響

根入れ無しのモデル（根入れ長さを正で表示）について、杭先端面を二層地盤の表面に近づけるにつれて、杭先端面と羽根面の負担荷重が急増する。この傾向は載荷の初期段階（羽根径の0.01倍変位時）および極限支持力段階（羽根径の0.1倍変位時）でも同様であり、杭先端以深の支持層の影響を受ける。

杭先端面を二層地盤に載せた場合（根入れ0）を基準として、そこか

ら根入れ長さを増加（根入れ長さを負で表示）させると，杭先端面と羽根面の負担荷重が増大する．ただし，極限支持力段階では杭先端面の負担荷重はほとんど変化せずに，羽根面の負担荷重のみが増加するという特性がみられる．

(2) 中間層の層厚の影響

杭先端の根入れを0としたモデルについて，中間層の層厚を増加させると杭先端面と羽根面の負担荷重が増加するものの，その増加割合は停滞することから，支持力に有効な層厚が存在することが示唆される．

杭先端部荷重に占める杭先端面や羽根面の荷重の負担割合は，中間層厚が羽根径（杭径の2倍）以上になると変化しなくなるが，その負担割合は載荷の初期段階と極限支持力段階では大きく異なる傾向がみられる．

以上，本章では回転貫入杭の先端面と羽根面の支持力度は異なること，杭頭載荷の進行に伴い杭先端部荷重に占める杭先端面荷重および羽根面荷重の負担割合が変化するなどの回転貫入杭特有の性質を明らかにした．

第4章 原位置地盤試験による先端部支持力特性の検証

4.1 まえがき

前章では大型加圧土槽を利用して，支持層への根入れを変化させた模型実験を行い，回転貫入杭の先端面と羽根面の支持力度は異なること，杭頭載荷の進行に伴い杭先端部荷重に占める杭先端面荷重および羽根面荷重の負担割合が変化するなどの回転貫入杭特有の性質を明らかにした。また，杭先端面荷重は支持層に根入れさせてもそれほど増大しないことから，回転貫入杭の打止め管理としては杭先端面が支持層に達したら根入れさせずにそこで打止める手法もあり得ることが示唆される。ただし，これらの知見は地盤構成が明確な模型実験に基づいたものであり，実地盤においても同様な現象が見出されるかは不明である。

そこで本章では，荒川の沖積低地の実地盤において，支持層への根入れ状態を変化させた5体の施工試験および鉛直載荷試験を実施して，前章の模型実験で得られた回転貫入杭の先端部支持力特性について検証する。

4.2 試験方法

4.2.1 試験地の地盤構成

試験地は，図 4.1 に示す埼玉県さいたま市西区西遊馬である．ここは荒川の氾濫低地に位置しており，非常に軟弱な沖積粘性土が厚く分布している地域である．

地盤構成は，図 4.2 に示すように GL-3.75~5.70m に細砂層を挟むものの軟弱なシルト層が続き，GL-11.60m 以深は N 値 10~20 程度の細砂層となっている．本論文ではこの GL-11.60m 以深の細砂層を支持層とみなして，表 4.1 に示す日程で施工試験と載荷試験を行った．各試験杭の施工から載荷試験まで 6 日~7 日の養生期間を設けた．

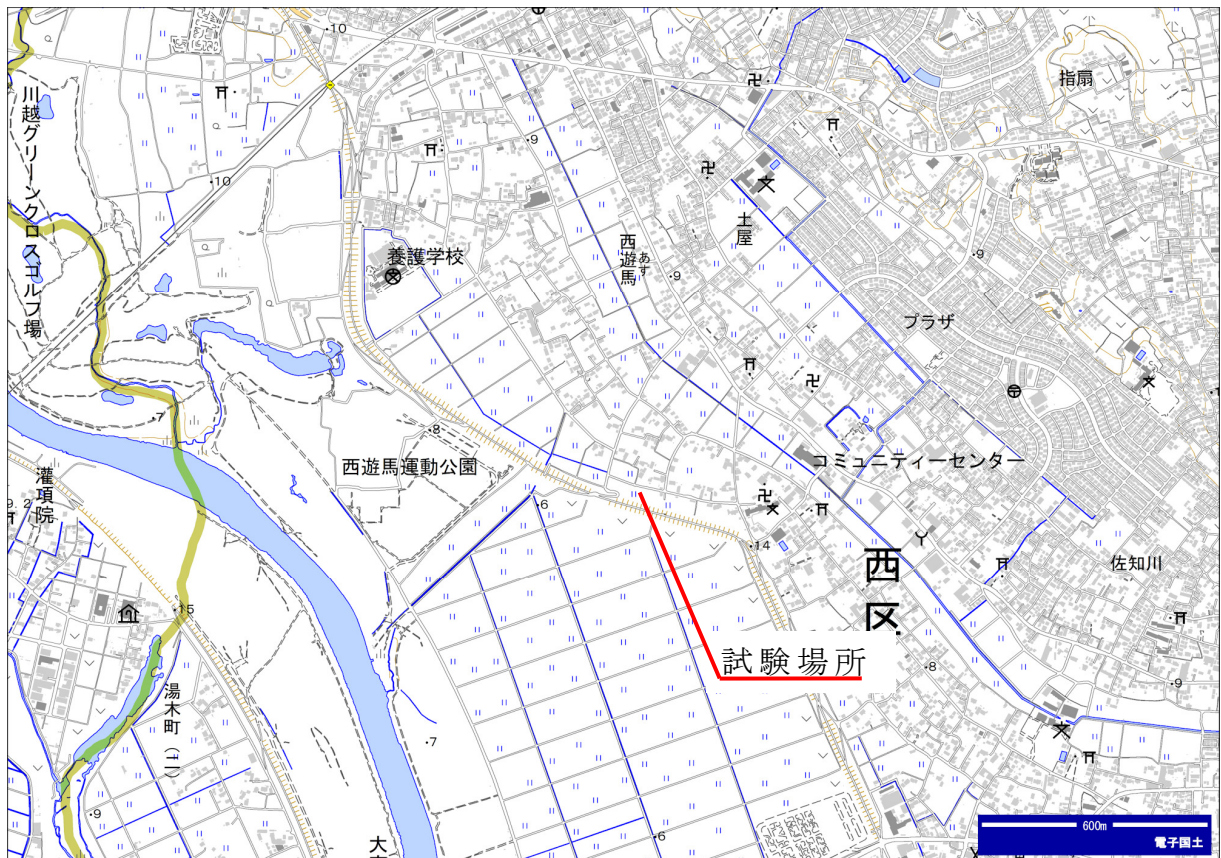


図 4.1 原位置載荷試験位置図

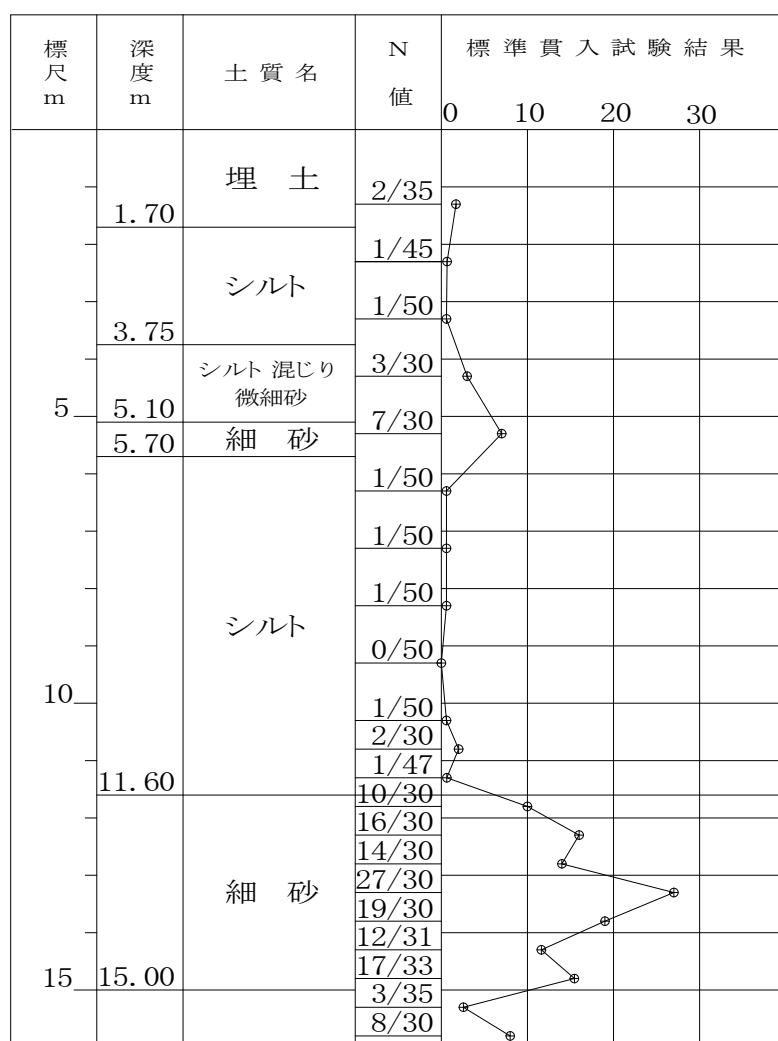


図 4.2 地盤柱状図

表 4.1 施工・載荷試験日一覧

モデル名	施工日	載荷試験日	養生日数
+1.0dw	07.11.26~27	07.12.5	7
+0.5dw	07.11.26	07.12.4	7
+0.0dw	07.11.24~26	07.12.3	6
-0.5dw	07.12.18	07.12.26	7
-1.0dw	07.12.17	07.12.25	7

4.2.2 試験杭

図 4.3 に示すように，試験杭の各所にひずみゲージを貼付している．使用したゲージは軸歪ゲージが主であるが，杭頭付近にはトルクゲージを貼付している．なお，試験杭は先端面荷重と羽根面荷重を独立して測定できる二重管構造であって，先端面に円板を取り付けた内管と周囲に羽根を取り付けた外管を接続リングを介して結合している．

試験杭の諸元を表 4.2 に示す．試験杭の断面（杭径： $d_0=114.3\text{mm}$ ，羽根径： $d_w=228.6\text{mm}$ ）は土槽実験の杭体より大きいが羽根の形状などは相似である．試験体は杭先端深度を変化させた 5 体であって，モデル名は図 4.4 に示す杭先端面と支持層境界からの距離で表現している．

表 4.2 試験杭諸元一覧

試験名	軸径 d_0 (mm)	軸厚 t_0 (mm)	羽根径 d_w (mm)	羽根 ピッチ p_w (mm)	杭長 l (m)	支持層 根入長 p_x ($\times d_w$)
+1.0dw	114.3	4.5	228.6	70	12.600	+1.0
+0.5dw					12.724	+0.5
+0.0dw					12.834	± 0
-0.5dw					12.724	-0.5
-1.0dw					12.834	-1.0

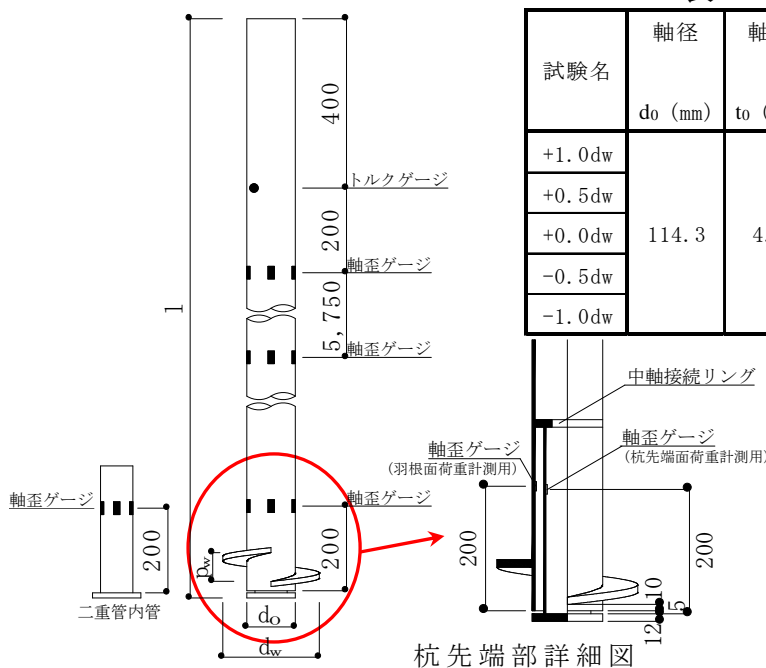


図 4.3 試験杭図

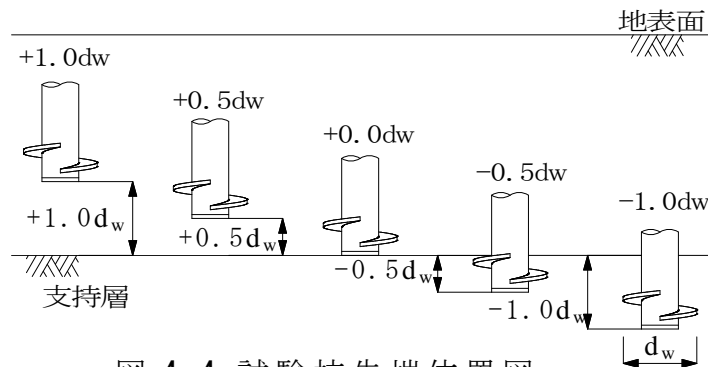


図 4.4 試験杭先端位置図

4.2.3 施工方法

杭の施工は、図 4.5 に示すとおり、杭打機に下杭を建てこみ、杭芯位置と鉛直度を確認した後に、回転用モータにより杭を回転埋設した。5.95m～6.18m の下杭埋設後に 6.5m の上杭を接続し、所定の深度で打ち止めている。

なお、施工中の杭体軸力を計測するために、施工前にひずみゲージからのケーブルを杭体に正回転でほどける方向で巻き付けておく。施工開始に伴いケーブルがほどけでいき、その後は杭体にケーブルを巻き付けながら施工を行う。ケーブルを巻き付けきった段階で施工を中断して、ケーブルを再度巻き直すことを繰り返して施工を行なっている。

5本の試験杭位置と載荷装置の関係を図 4.6 に示す。載荷は4本の反力杭を使い、載荷桁を試験杭位置に応じて組み替え油圧ジャッキにより荷重を加える方式とした。なお、装置の全景は写真 4.1、杭頭付近の状況は写真 4.2 のとおりである。

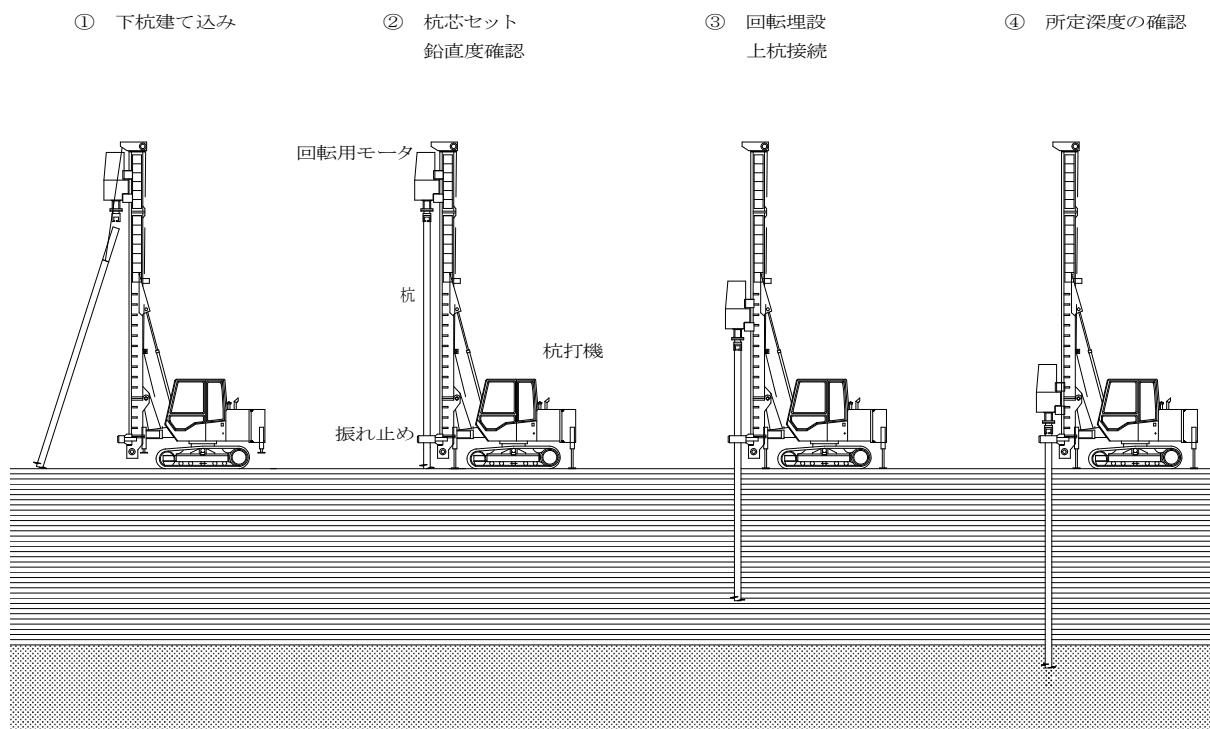


図 4.5 杭施工概要図

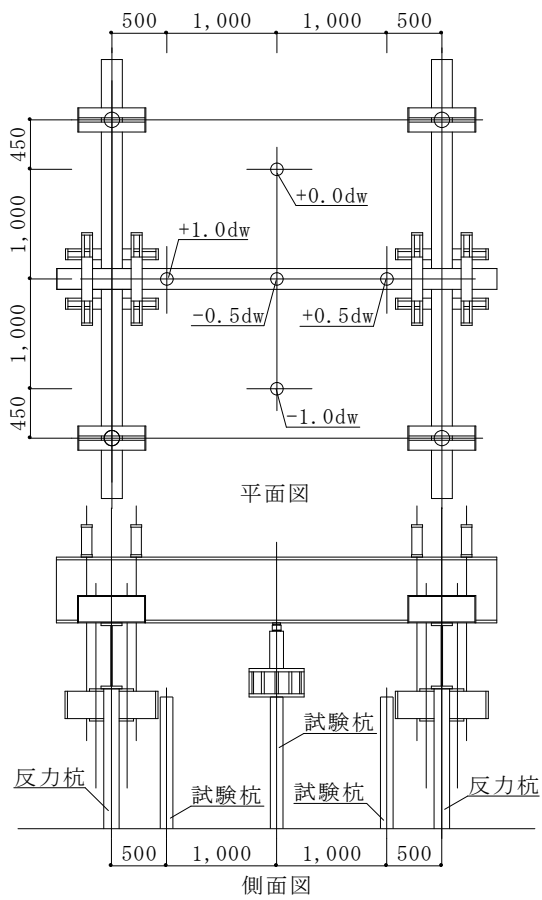


図 4.6 載荷試験装置図



写真 4.2 載荷試験装置
杭頭付近状況



写真 4.1 載荷試験装置全景

4.2.4 載荷方法

載荷試験は地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」に則して実施し，荷重階は4サイクル8段階を基本とした．載荷方法の詳細を表4.3，計測項目と測定点数を表4.4，計測時期を表4.5に示す．荷重階の例として+0.0dwモデルの荷重階を表4.6および図4.7に示す．各モデルの最大荷重は表4.7に示すとおりである．

表 4.3 載荷方法

項目	内容	
荷重段階数	8段階以上	
サイクル数	4サイクル以上	
載荷速度	増荷重時：計画最大荷重／荷重段階数 (/min)程度 減荷重時：増荷重時の2倍程度	
各荷重段階における荷重保持時間	新規荷重段階	30分
	履歴内荷重段階	2分
	0荷重段階	15分

表 4.4 計測項目と測定点数

計測項目	測定点数
時間	
荷重	1点
変位量	6点（鉛直4点，水平2点）
ひずみ	16点（1断面4点，4断面分）

表 4.5 計測時期

荷重段階	測定時期
新規荷重段階	0, 1, 2, 5, 10, 15, 30分
履歴内荷重段階	0, 1, 2分
0荷重段階	0, 1, 2, 5, 15分

表 4.6 荷重段階一覧 (+0.0dw の例)

サイクル	荷重段階 (kN)
1	0 - <u>20</u> - <u>40</u> - 0
2	0 - 40 - <u>60</u> - <u>70</u> - 40 - 0
3	0 - 40 - 70 - <u>80</u> - <u>90</u> - 70 - 40 - 0
4	0 - 40 - 70 - 90 - <u>100</u> - <u>110</u> - 90 - 70 - 40 - 0

注) _____ 新規荷重段階

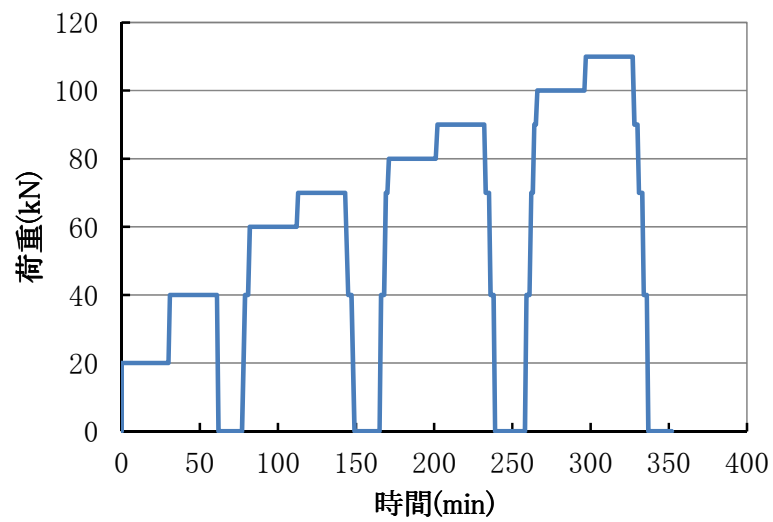


図 4.7 荷重階(+0.0dw の例)

表 4.7 最大荷重一覧

モデル名	最大荷重 (kN)
+1.0dw	72
+0.5dw	80
+0.0dw	110
-0.5dw	120
-1.0dw	120

4.3 試験結果

4.3.1 施工時の挙動

図 4.8 は、GL-10m 以深での、試験杭の杭頭における施工トルクと杭先端面および羽根面の負担荷重の関係である。ただし、杭先端面および羽根面については支持層手前での変化が分かりやすいように GL-10m を基準にした増分で示している。なお、+0.0dw モデルについては、ひずみゲージの動作不良により杭先端面および羽根面の計測ができなかったため記載していない。また、-1.0dw モデルが GL-10.8m 付近で不連続となっているのは、段取りのために施工を一時中断した影響である。

図 4.8 によると、杭先端面荷重は支持層の手前 $1.0d_w$ 付近から明確に上昇する傾向が表れているものの、羽根面の荷重（回転推進力）や杭頭トルクの変化はそれ程明確とは云えない。大型土槽実験においては杭先端面荷重と杭頭トルクが支持層の手前 100mm（軸径の 1.3 倍）程度手前から明確に増加した傾向とは幾分異なる傾向となった。これは土槽実験での地盤は硅砂 6 号であり、一般層と支持層の区別は相対密度の違いのみであるのに対し、原位置試験では支持層としたのは細砂層で上部はシルト層であり、両層の土の種類が異なるためと考えられる。このことから、原位置地盤において支持層到達の判断を行うには、杭頭トルクの他に、貫入率や杭頭部への押し込み力などの要素も考慮した、総合的な判断が必要となろう。

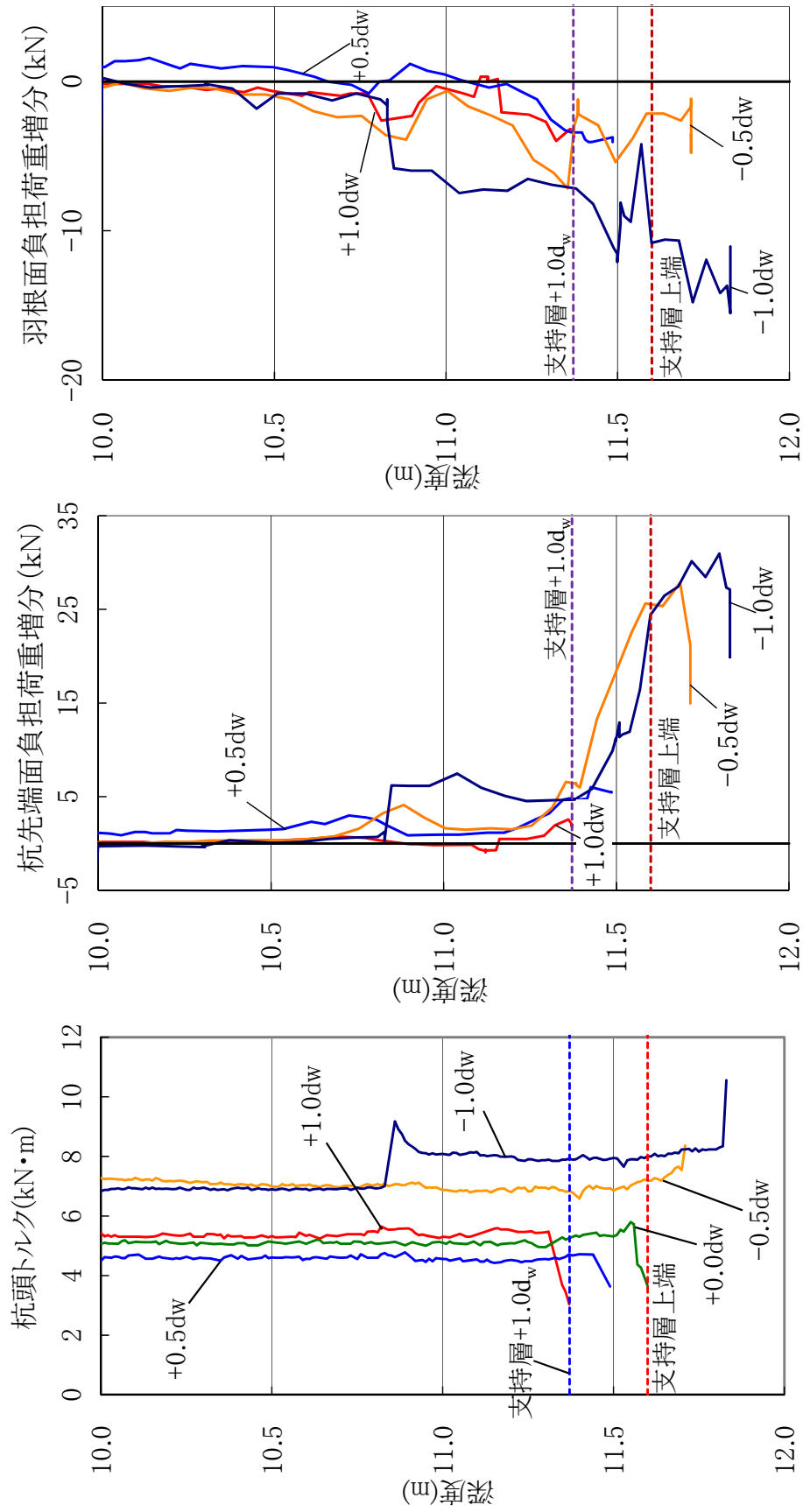


図 4.8 施工時の杭頭トルクと各部の負担荷重

4.3.2 載荷時の挙動

図 4.9(a)～(d)は、載荷試験時における杭頭変位と杭体各部の負担荷重の関係を示している。また、表 4.8(a)～(c)に、杭頭変位が $0.01d_w$ 、 $0.1d_w$ および $0.2d_w$ の時の杭体各部の値を示している。ただし、 $+1.0d_w$ モデルについては杭頭変位が $0.2d_w$ に達する前に試験が終了しているため、 $0.2d_w$ 変位時の値は最大変位時の値としている。ここで、 $-0.5d_w$ モデルについてはひずみゲージの不良から載荷試験時の測定値を得ることが出来なかったため、杭頭以外の値（杭体各部の荷重分担）を考察対象から除外している。

図 4.9(a)は杭先端面荷重を示している。これによると、 $+1.0d_w$ モデル、 $+0.5d_w$ モデルと支持層に近づくにつれて荷重が増加しているものの、支持層に到達している $+0.0d_w$ モデルと支持層に $1.0d_w$ 根入れした $-1.0d_w$ モデルを比較すると、変位が小さい荷重段階では $+0.0d_w$ モデルの方が根入れのある $-1.0d_w$ モデルと同等かむしろ大きい値を示し、土槽における模型実験の傾向と同様であった。羽根部が密な支持層に入ることによって、羽根下面のゆるみ領域が近傍の拘束圧を低下させ、杭先端面の支持力低下を引き起こす一因になっていると云えよう。

図 4.9(b)は羽根面荷重を示しているが、 $+1.0d_w$ モデルから $+0.5d_w$ モデルと支持層に近づくにつれて荷重が増加する傾向は先端面荷重と同様である。しかし、支持層に $1.0d_w$ 根入れした $-1.0d_w$ モデルは支持層に杭先端が到達した $+0.0d_w$ モデルよりもかなり大きな値となっている。羽根面の支持力を期待するには支持層へのある程度の根入れが必要と云える。

図 4.9(c)は杭先端面荷重と羽根面荷重を合わせた杭先端部荷重（通常の載荷試験における杭先端荷重）を示している。 $-1.0d_w$ モデルが最も大きな荷重を示しているものの、 $+0.0d_w$ モデルと顕著な差は見られない。

図 4.9(d)は杭頭荷重～杭頭沈下曲線である。支持層に到達している $+0.0d_w$ モデルと根入れのある $-0.5d_w$ モデルおよび $-1.0d_w$ モデルでは大きな差はない。これらの値には杭周面摩擦力も含まれているので一概には云えないが、杭周面摩擦力が同じならば杭全体の支持力に対しては、先端部での根入れの差の影響は更に小さくなると考えられる。なお、支

持層に達していない+1.0dwモデルと+0.5dwモデルを比べると、荷重初期の $0.01d_w$ 変位付近まで+0.5dwモデルの方がかなり小さな値となっており、+0.5dwモデルの杭周面摩擦力が他のモデルよりもかなり小さいことを意味している。このことは、付章2に示す施工データによると、+0.5dwモデルの施工トルクがGL-5.7m~11.6mのシルト層で他の杭に比べ低い値で施工していることに対応している。これらのことから、+0.5dwモデルと+1.0dwモデルの杭周面摩擦力の相違は、両杭で2.0m離れていることによるシルト層のバラツキが原因と考えられる。

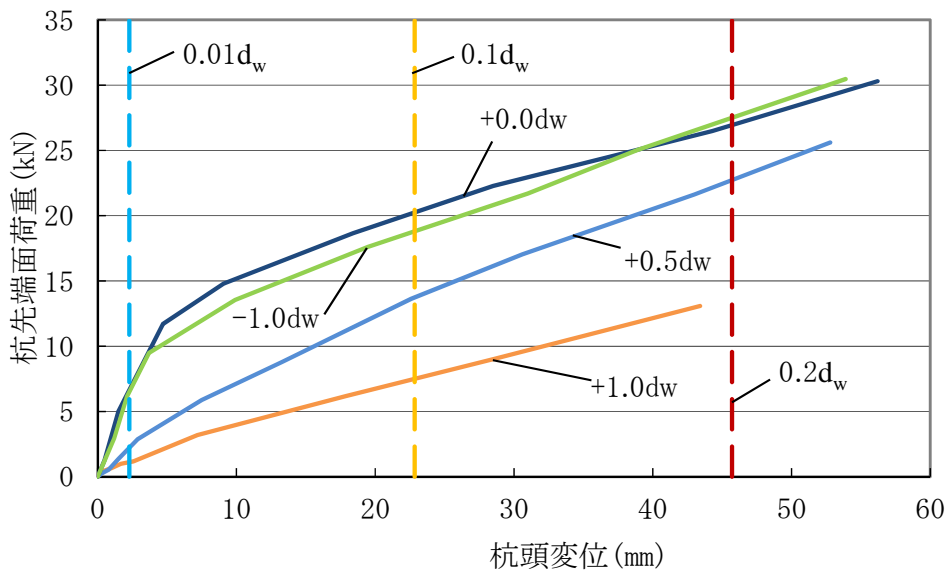


図 4.9(a) 杭先端面荷重－杭頭変位図

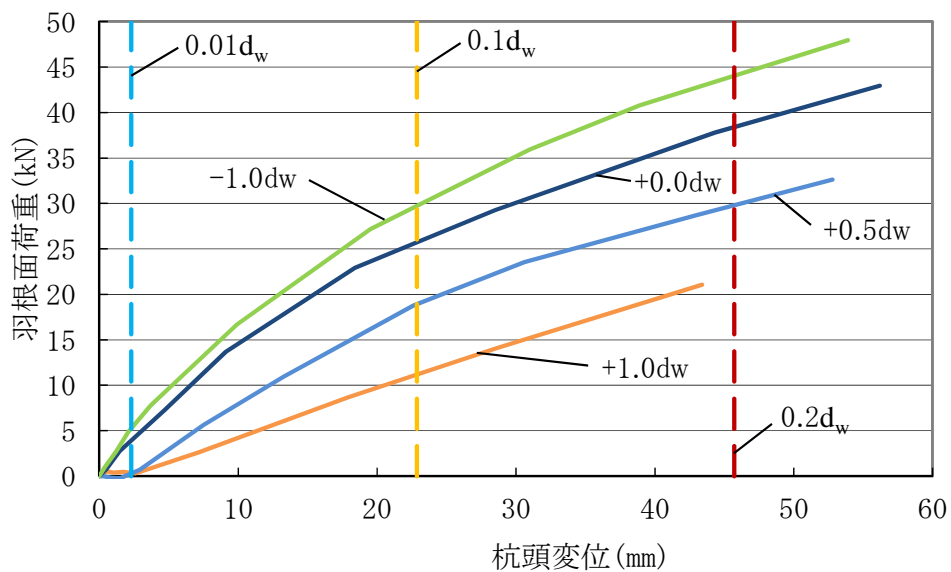


図 4.9(b) 羽根面荷重－杭頭変位図

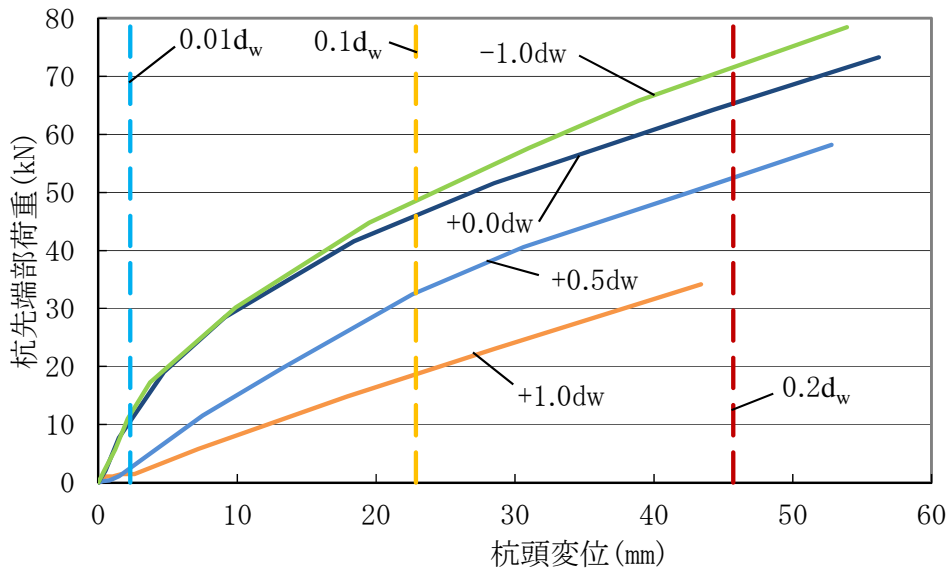


图 4.9(c) 杭先端部荷重 - 杭頭變位图

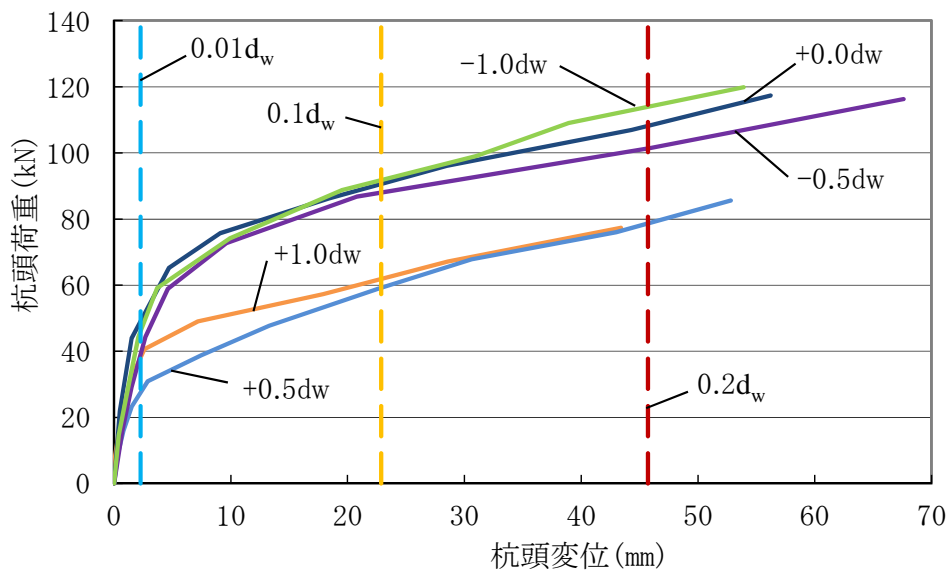


图 4.9(d) 杭頭荷重 - 杭頭變位图

表 4.8(a) 試験結果一覧 (0.01d_w 変位時)

モデル名	0.01d _w 変位時				
	杭頭変位	杭先端面荷重	羽根面荷重	杭先端部荷重	杭頭荷重
	(mm)	R _{mb} (kN)	R _{mw} (kN)	R _{mp} (kN)	R _m (kN)
+1.0dw	2.29	1.1	0.4	1.5	38.3
+0.5dw	2.29	2.2	0.3	2.5	27.5
+0.0dw	2.29	6.7	3.9	10.5	49.2
-0.5dw	2.29	—	—	—	39.2
-1.0dw	2.29	6.5	5.3	11.7	46.1

表 4.8(b) 試験結果一覧 (0.1d_w 変位時)

モデル名	0.1d _w 変位時				
	杭頭変位	杭先端面荷重	羽根面荷重	杭先端部荷重	杭頭荷重
	(mm)	R _{ub} (kN)	R _{uw} (kN)	R _{up} (kN)	R _u (kN)
+1.0dw	22.86	7.5	11.2	18.7	61.9
+0.5dw	22.86	13.7	18.9	32.7	59.2
+0.0dw	22.86	20.3	25.7	46.0	90.6
-0.5dw	22.86	—	—	—	88.0
-1.0dw	22.86	18.8	29.7	48.5	91.8

表 4.8(c) 試験結果一覧 (0.2d_w 変位時)

モデル名	0.2d _w 変位時				
	杭頭変位	杭先端面荷重	羽根面荷重	杭先端部荷重	杭頭荷重
	(mm)	R _{db} (kN)	R _{dw} (kN)	R _{dp} (kN)	R _d (kN)
+1.0dw	43.40	13.1	21.1	34.2	77.3
+0.5dw	45.72	22.7	29.8	52.5	78.7
+0.0dw	45.72	26.9	38.4	65.3	108.2
-0.5dw	45.72	—	—	—	101.4
-1.0dw	45.72	27.5	44.1	71.6	114.0

図 4.10 は、各モデルの羽根面荷重が杭先端部荷重に占める割合と杭頭変位の関係である。どのモデルも载荷初期の $0.01d_w$ 変位付近で最小値となり、その後変位の進行に伴い負担割合が増加し、杭頭変位 20mm 以降は約 0.6 となっている。杭頭変位が $0.1d_w$ 付近まで増加する傾向は土槽実験と同様と云える。

図 4.11 は、杭頭変位が $0.01d_w$ 、 $0.1d_w$ および $0.2d_w$ 時点に着目した、杭先端部荷重に占める羽根面荷重の割合と支持層までの距離 l_b との関係である。 $0.01d_w$ 変位時において、 $l_b=0.5$ が最も負担割合は小さくなっているものの、全体的には支持層に近づく程負担割合は大きくなり、支持層に根入れをすると更に増加する傾向となっている。 $0.1d_w$ 変位時では、僅かではあるが支持層に近づくると減少して支持層への根入れによって僅かに増大する傾向を示している。これらの傾向は土槽実験と概ね同様である。

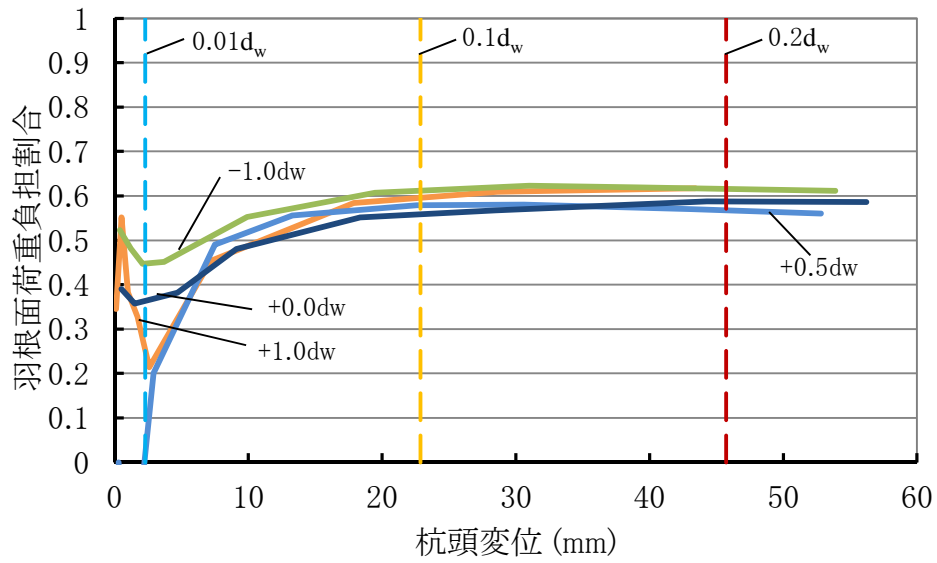


図 4.10 羽根面荷重負担割合－杭頭変位図

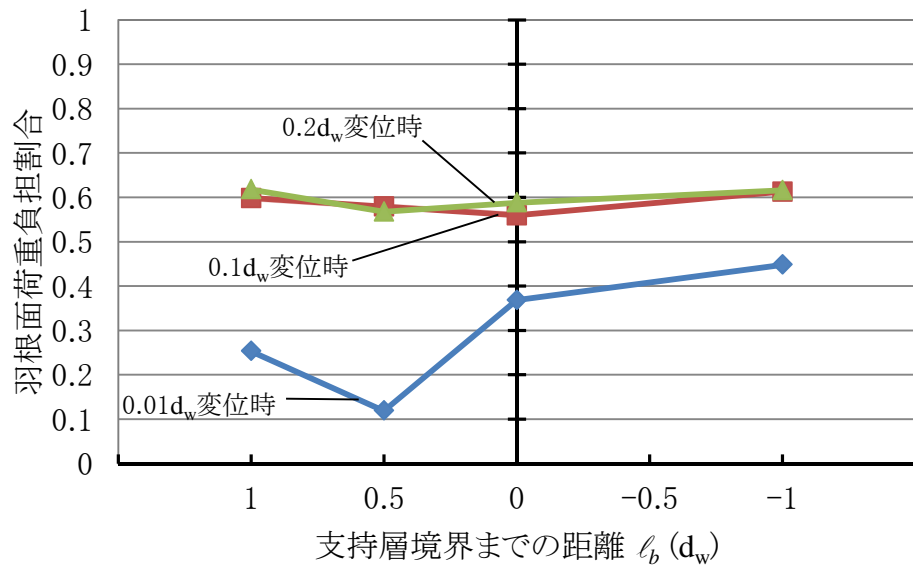


図 4.11 羽根面荷重負担割合－支持層境界までの距離図

4.4 まとめ

本章で実施した実地盤における施工試験および鉛直載荷試験においては、以下の知見が得られた。

回転貫入杭の施工時における杭先端面荷重は、支持層から羽根径分だけ手前付近から増加する傾向がみられたが、杭頭トルクや羽根面荷重は明確には変化していない。実地盤での支持層判断は、杭頭トルクの他に本実験では測定していなかった貫入率や杭頭部への押込み力も加えた総合的な判断が必要である。

載荷試験における杭先端面荷重は、支持層への根入れ長さの影響をあまり受けないことや、羽根面荷重は根入れ長さの増大につれて増加する傾向は、前章の模型実験と同様である。また、杭先端部荷重に占める羽根面荷重の負担割合は、載荷の進行に伴い模型実験と同様に変化する傾向を示した。

以上、実地盤は1か所であるものの比較的明確に支持層が存在する沖積地盤において、支持層の根入れ状態を変化させた5体の試験体から、前章の模型実験で得られた回転貫入杭の先端部支持力特性を概ね検証できた。

第 5 章 先端部の支持力評価式の構築

5.1 まえがき

前章までに，大型加圧土槽を用いた模型実験および原位置載荷試験を実施し，回転貫入杭には次のような支持力特性を有することを試験結果の考察から明らかにした．

- 1) 回転貫入杭の杭先端面と羽根面の支持力度は異なることから，同様の地盤の値で評価することはできない．
- 2) 杭頭載荷の進行に伴い杭先端部荷重に占める杭先端面荷重および羽根面荷重の負担割合が変化する特性がある．

上記の特性から，杭先端面と羽根面の支持力算定に際して，同様の地盤の値を付与することの問題点，ならびに杭先端部の極限支持力に一律の安全率を課して許容支持力を評価することの問題点が指摘できる．

そこで本章では，回転貫入杭工法については杭先端面と羽根面を分離して評価することが重要との観点から，下記の考え方を導入した回転貫入杭の新たな支持力評価式の構築を行う．

- I) 極限支持力の評価については，杭先端面および羽根面について，それぞれ独自の支持力係数 α_b および α_w を導入する．
- II) 長期および短期の許容支持力の算定では，杭先端面と羽根面について，それぞれ独自の支持力発揮率 ξ_b および ξ_w を導入する．

本章では，5.2 で模型実験結果を整理して具体的な支持力係数と支持力発揮率を設定し，5.3 で杭の打ち止め深度の異なる 2 体の原位置載荷試験を実施して新たな支持力評価式の適用性を検証している．

5.2 支持力評価式の構築

杭先端面と羽根面の支持力を分離して評価するために、採用すべき地盤のN値の深度をそれぞれ検討する。すなわち、二層地盤および中間層地盤の各モデル全ての載荷実験結果と杭先端近傍の平均N値の関係をプロットしたものに対して、原点を通る近似直線の相関係数を求める。この相関係数を平均N値の計算範囲を変化させて求めることにより、平均N値の計算範囲と近似直線の相関係数の関係を求め、それにより評価する。

図 5.1 は杭先端面支持力に関して、平均N値の計算範囲を杭先端面から下方へ変化させて、杭先端面の支持力係数 α_b との相関性を示したものである。ただし、杭先端面より杭径 (d_0) 以内のN値とは全く相関が見られないため図には記載していない。場所打ち杭では杭径程度で相関が良いとの報告¹³⁾と異なる理由として、回転貫入杭の施工終了時点で杭先端部に見られる周囲の地盤に比べ密度が大きな領域であるコアの影響が考えられる。N値の算定範囲が杭径よりも深くなるにつれて相関係数が上昇して $3d_0$ 程度で最大となり、それ以深では徐々に相関係数が低下している。なお、図中には従来の評価式で採用されることの多い杭先端面から上下に羽根径だけ離れた範囲 ($\pm 1.0d_w$) の相関係数もプロットしたが、0.3 程度の相関係数に留まっている。

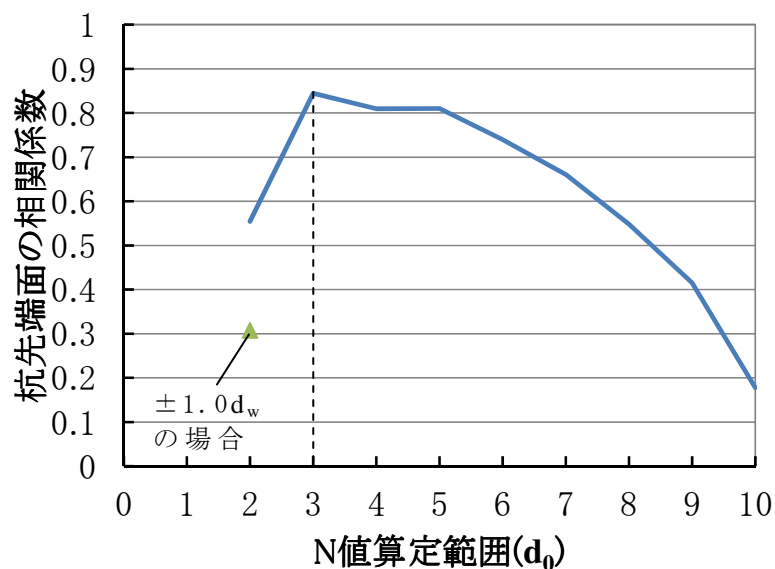


図 5.1 相関係数－N 値算定範囲図 (杭先端面)

図 5.2 は羽根面支持力に関して，平均N値の計算範囲を種々変化させて，羽根面の支持力係数 α_w との相関性を示したものである．曲線 a は平均N値の計算範囲を羽根面から下方に変化させた場合であるが， $2.5d_w$ 付近で高い相関となっている．ただし，羽根面の支持力に対しては，施工による羽根上面の地盤の締まりや，载荷に伴って羽根下部の土が羽根上面に回り込む現象等も影響すると考えられる．そこで，平均N値の算定範囲を羽根面より上を $0.5d_w$ に固定して，羽根面下方へ変化させた場合の曲線が b であるが，曲線 a よりも相関性が高くなる．更に，平均N値の算定範囲を羽根面より下を $2.5d_w$ に固定して，羽根面上方へ変化させた曲線 c では，平均N値の算定範囲が $0.5d_w$ を越えると相関性が低下する傾向がみられた．なお，図中には図 5.1 と同様に杭先端面から上下に $\pm 1.0d_w$ の結果もプロットしたが，相関係数があまり良くないことが分かる．

以上のことから，本論文では回転貫入杭の先端部支持力評価式の算定に用いる平均N値の範囲を，次のように設定することにした．

- 1) 杭先端面：杭先端面より下方へ $3d_0$
- 2) 羽根面：羽根面より下方へ $2.5d_w$ ，上方へ $0.5d_w$

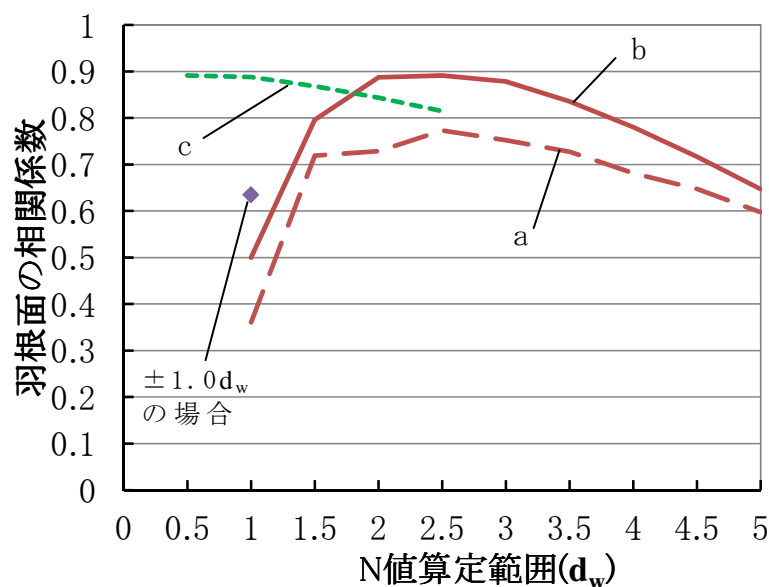


図 5.2 相関係数 - N 値算定範囲図 (羽根面)

図 5.3 は、大型土槽を用いた模型実験で得られた表 5.1 の極限支持力と上記の 1), 2) で定めた平均 N 値の関係をプロットしたものである。ここで、縦軸は杭先端面および羽根面の支持力をそれぞれの面積で除した支持力度で表示している。杭先端面および羽根面のそれぞれについて、原点を通る最小二乗法による近似直線を求め、それによる極限支持力の評価式を以下に示す。

$$\begin{aligned} \cdot \text{極限支持力 (kN)} : R_{up} &= R_{ub} + R_{uw} \\ &= \alpha_b \cdot N_b \cdot A_b + \alpha_w \cdot N_w \cdot A_w \quad \dots (5.1) \text{式} \end{aligned}$$

ここで、 R_{ub} : 杭先端面の極限支持力

R_{uw} : 羽根面の極限支持力

$\alpha_b=216$: 杭先端面の支持力係数

N_b : 杭先端面の平均 N 値

A_b : 杭先端面積 (m²)

$\alpha_w=138$: 羽根面の支持力係数

N_w : 羽根面の平均 N 値

A_w : 羽根面積 (m²)

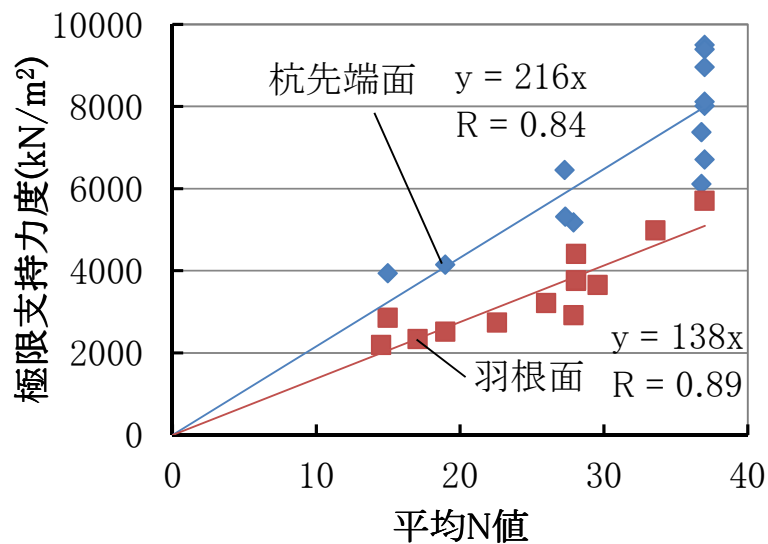


図 5.3 極限支持力度－平均 N 値の関係

表 5.1 模型実験結果一覧表

モデル名	極限支持力			短期許容支持力			長期許容支持力		
	杭先端面荷重 R_{ub} (kN)	羽根面荷重 R_{uw} (kN)	杭先端部荷重 R_{up} (kN)	杭先端面荷重 R_{sb} (kN)	羽根面荷重 R_{sw} (kN)	杭先端部荷重 R_{sp} (kN)	杭先端面荷重 R_{lb} (kN)	羽根面荷重 R_{lw} (kN)	杭先端部荷重 R_{lp} (kN)
LD1L	19.0	30.1	49.0	12.7	20.0	32.7	7.6	8.7	16.4
LD2L	23.6	34.4	58.1	16.6	22.1	38.7	10.2	9.2	19.4
LD2L'	29.5	39.2	68.7	19.7	26.1	45.8	10.6	12.3	22.9
LD4L	27.9	40.0	67.9	19.3	26.0	45.3	10.7	12.0	22.7
LD4L'	30.7	44.0	74.7	20.6	29.2	49.8	11.0	13.9	24.9
LD6L	33.7	50.1	83.8	23.1	32.7	55.9	13.3	14.6	27.9
LD8L	36.7	51.4	88.1	25.3	33.4	58.7	13.6	15.8	29.4
LD	43.4	60.5	104.0	30.3	39.0	69.3	16.5	18.2	34.7
LD'	37.1	51.7	88.8	25.5	33.7	59.2	13.5	16.1	29.6
LD+1.0	18.0	32.0	50.0	13.8	19.5	33.3	9.8	6.8	16.7
LD+0.5	24.3	37.5	61.8	17.1	24.1	41.2	10.5	10.1	20.6
LD-0.5	42.9	68.3	111.2	30.4	43.8	74.2	17.9	19.2	37.1
LD-1.0	41.0	78.2	119.1	29.2	50.2	79.4	17.5	22.2	39.7

表 5.1 の長期許容支持力（極限支持力の 1/3）および短期許容支持力（極限支持力の 2/3）について、図 5.3 と同様に整理したのが図 5.4(a), (b)である。これに基づいて、杭先端面および羽根面の許容支持力を算定するために、(5.1) 式に示す杭先端面の極限支持力 R_{ub} と羽根面の極限支持力 R_{uw} に、それぞれの支持力発揮率 ξ を乗じる方式として次式を導いた。なお、 ξ は図 5.4(a), (b) で求めた杭先端面および羽根面の係数を (5.1) 式の係数で除することで求めている。

- ・ 長期許容支持力 (kN) :

$$R_{Lp} = \xi_{Lb} \cdot R_{ub} + \xi_{Lw} \cdot R_{uw} \quad \dots (5.2) \text{ 式}$$

ここで、 $\xi_{Lb} = 0.39$, $\xi_{Lw} = 0.29$

- ・ 短期許容支持力 (kN) :

$$R_{Sp} = \xi_{Sb} \cdot R_{ub} + \xi_{Sw} \cdot R_{uw} \quad \dots (5.3) \text{ 式}$$

ここで、 $\xi_{Sb} = 0.69$, $\xi_{Sw} = 0.64$

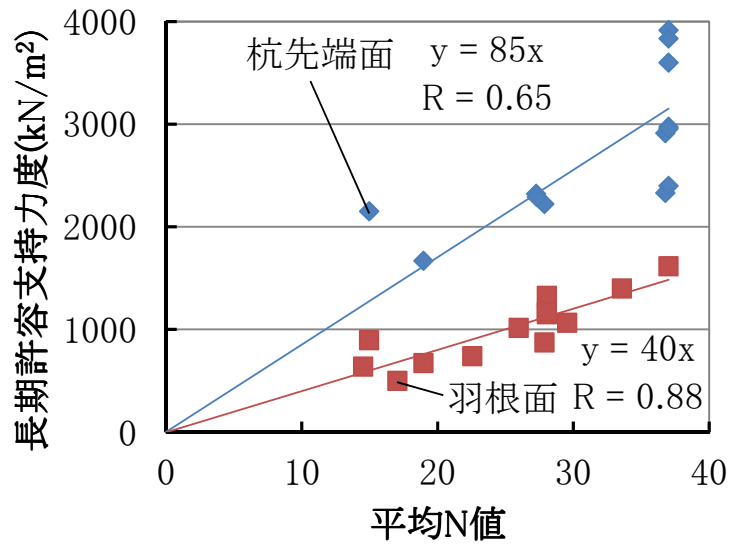


図 5.4 (a) 支持力度－平均N値の関係（長期許容荷重）

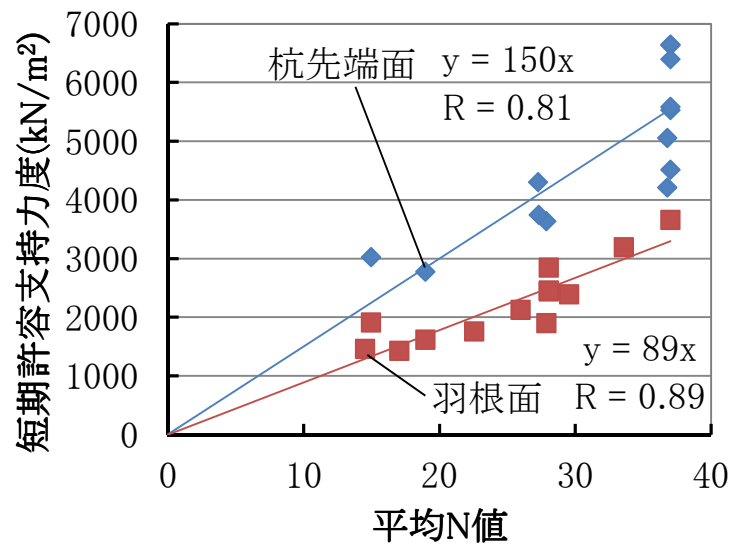


図 5.4 (b) 支持力度－平均N値の関係（短期許容荷重）

表 5.2 は，上記の支持力評価式を用いてモデルごとに算出した極限および許容支持力の計算結果一覧である．計算値と実験値の比較を示した図 5.5 によると，短期許容支持力や長期許容支持力の杭先端面荷重は，他の部位に比べて若干標準偏差 σ が大きいものの，全体としては計算値と実験値の比は 0.99~1.03， $\sigma = 0.14 \sim 0.20$ であり，計算式の回帰精度は概ね良好と云える．

表 5.2 評価式計算結果一覧表

モデル名	平均N値		極限支持力			短期許容支持力			長期許容支持力		
	杭先端面	羽根面	杭先端面 R_{ub} (kN)	羽根面 R_{uw} (kN)	杭先端部 R_{up} (kN)	杭先端面 R_{sb} (kN)	羽根面 R_{sw} (kN)	杭先端部 R_{sp} (kN)	杭先端面 R_{lb} (kN)	羽根面 R_{lw} (kN)	杭先端部 R_{lp} (kN)
LD1L	19.0	14.5	18.7	27.5	46.2	12.9	17.6	30.5	7.3	8.0	15.3
LD2L	27.9	19.0	27.5	35.9	63.4	19.0	23.0	42.0	10.7	10.4	21.1
LD2L'	27.3	15.0	26.9	28.3	55.2	18.6	18.1	36.7	10.5	8.2	18.7
LD4L	36.8	27.9	36.3	52.8	89.1	25.1	33.8	58.9	14.2	15.3	29.5
LD4L'	37.0	26.0	36.6	49.2	85.8	25.2	31.5	56.7	14.3	14.3	28.6
LD6L	36.8	29.6	36.3	56.0	92.3	25.1	35.8	60.9	14.2	16.2	30.4
LD8L	37.0	28.1	36.6	53.2	89.8	25.2	34.0	59.2	14.3	15.4	29.7
LD	37.0	28.1	36.6	53.2	89.8	25.2	34.0	59.2	14.3	15.4	29.7
LD'	37.0	28.1	36.6	53.2	89.8	25.2	34.0	59.2	14.3	15.4	29.7
LD+1.0	15.0	17.1	14.8	32.3	47.1	10.2	20.7	30.9	5.8	9.4	15.2
LD+0.5	27.3	22.6	27.0	42.7	69.7	18.6	27.3	45.9	10.5	12.4	22.9
LD-0.5	37.0	33.6	36.6	63.6	100.2	25.2	40.7	65.9	14.3	18.4	32.7
LD-1.0	37.0	37.0	36.6	70.1	106.7	25.2	44.9	70.1	14.3	20.3	34.6

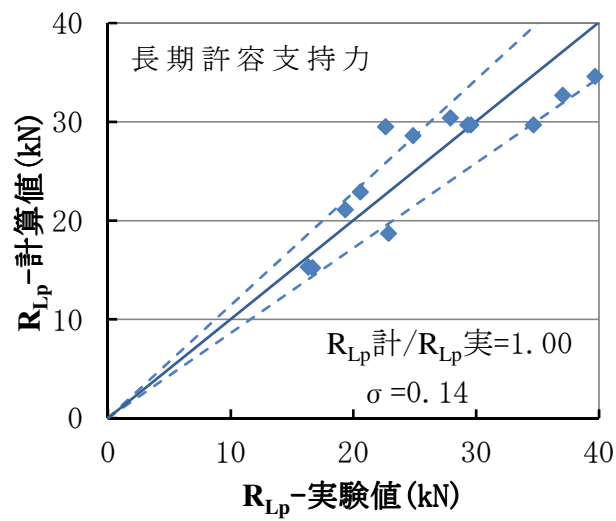
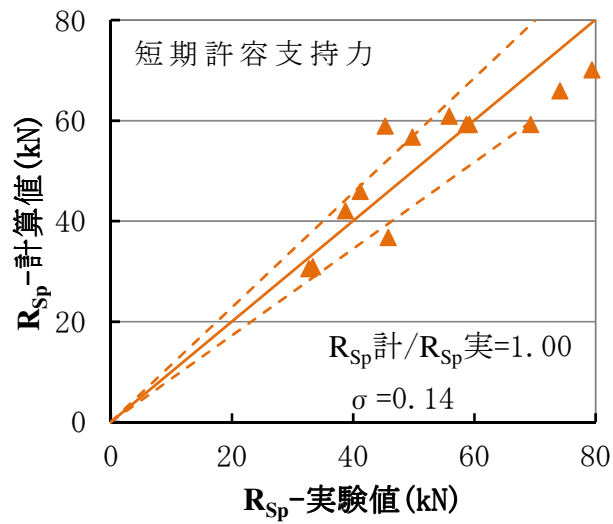
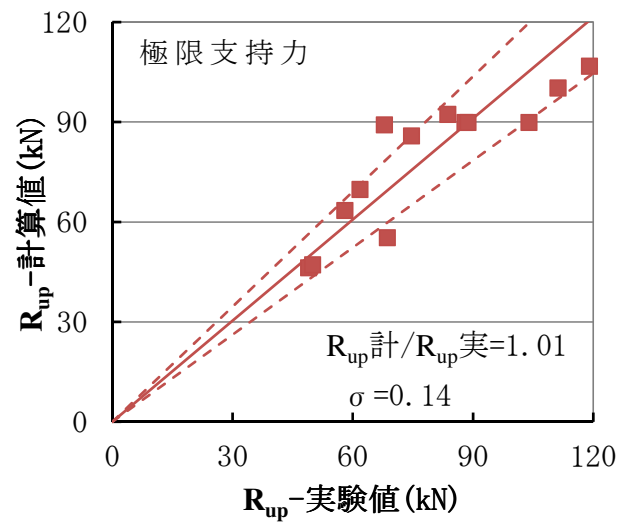


図 5.5(a) 計算値－実験値比較図(杭先端部荷重)

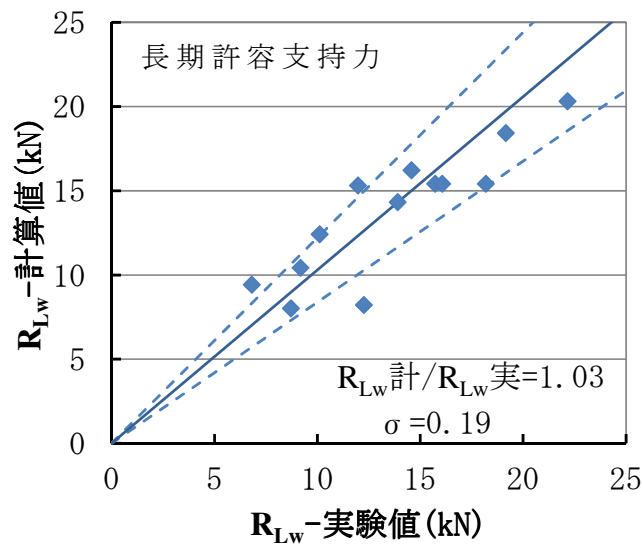
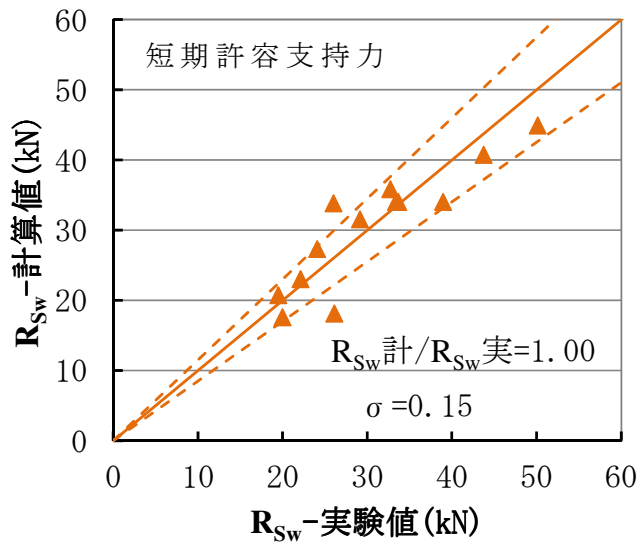
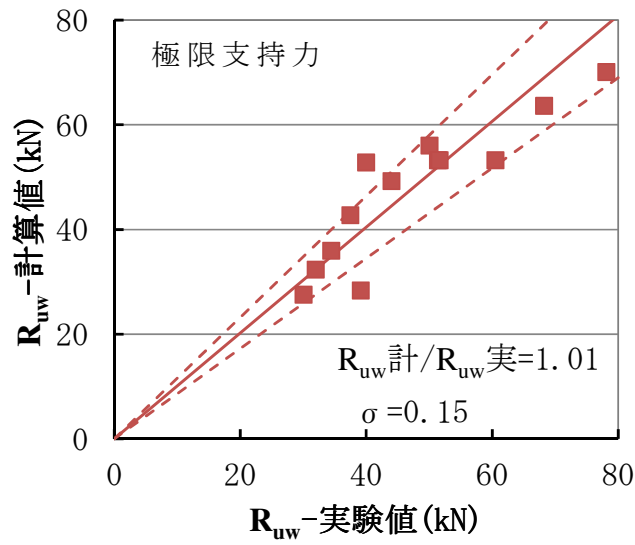


図 5.5 (b) 計算値－実験値比較図(羽根面荷重)

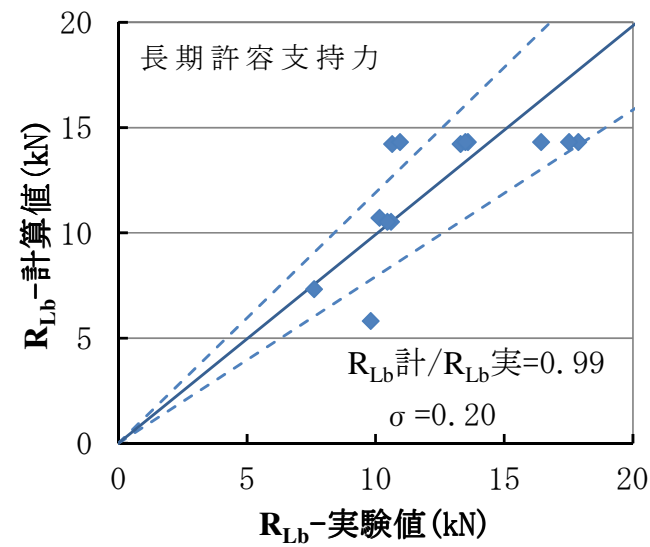
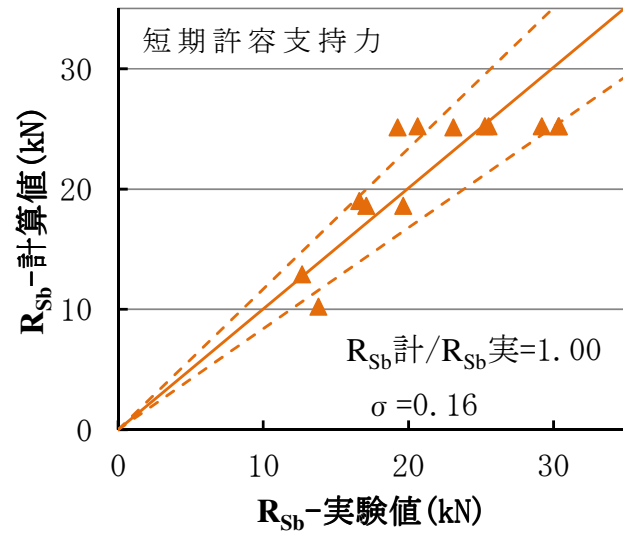
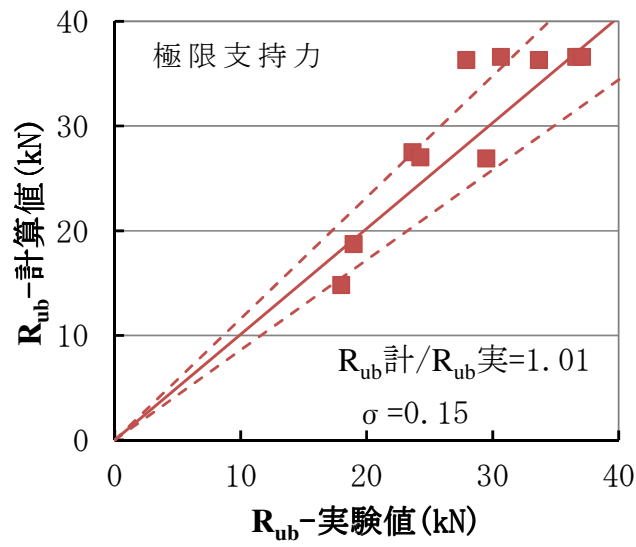


図 5.5(c) 計算値－実験値比較図(杭先端面荷重)

5.3 原位置載荷試験での検証

前節で構築した支持力評価式の実杭への適用性を検証するために、別途原位置載荷試験を行った。

試験地は、図 5.6 に示す埼玉県北足立郡伊奈町である。ここは大宮大地の合間にある谷底低地に位置しており、台地を形成していた土砂が再堆積した土や有機質土などが分布した非常に軟弱な地盤となっている。

試験現場の地盤構成および杭の打設状況を図 5.7 に示す。また、施工と載荷試験の実施日を表 5.3 に示す。

試験杭は図 5.8 および表 5.4 に示すとおりであり、杭先端面と羽根面の荷重が分離して計測できるように先端部が二重管構造となっている。

載荷試験は杭先端深度を変化させた 2 本の杭（A 杭，B 杭）に対して実施した。A 杭は杭先端が支持層上端に達した時点で打止めることを意図したケース（杭先端深度：GL-6.41m），B 杭は羽根径分を支持層に根入したケース（杭先端深度：GL-6.61m）である。なお、標準貫入試験結果



図 5.6 試験位置図

では支持層の上端深度が GL-6.20m であったが、杭施工時のトルク計測結果に基づき、本論文では支持層上端を GL-6.40m とみなした。

載荷試験は地盤工学会基準に則して実施し、荷重階は4サイクル8段階を基本とした。実施した載荷方法を表 5.5，計測項目と測定点数を表 5.6，計測時期を表 5.7，荷重階の例としてA杭の荷重階を表 5.8 および図 5.9 に示す。なお、試験最大荷重はA杭が 225kN，B杭が 250kN である。

載荷試験の装置を図 5.10 に示す。また、載荷装置の全景は写真 5.1，杭頭付近の状況は写真 5.2 に示すとおりである。

これらの試験杭は杭芯間隔で 1m 離して施工すると共に、載荷試験開始までA杭は 23 日，B杭は 21 日の養生期間を設けた。

表 5.3 施工・載荷試験日一覧

試験名	施工日	載荷試験日	養生日数
A杭	11.9.26	11.10.20	23
B杭	11.9.26	11.10.18	21

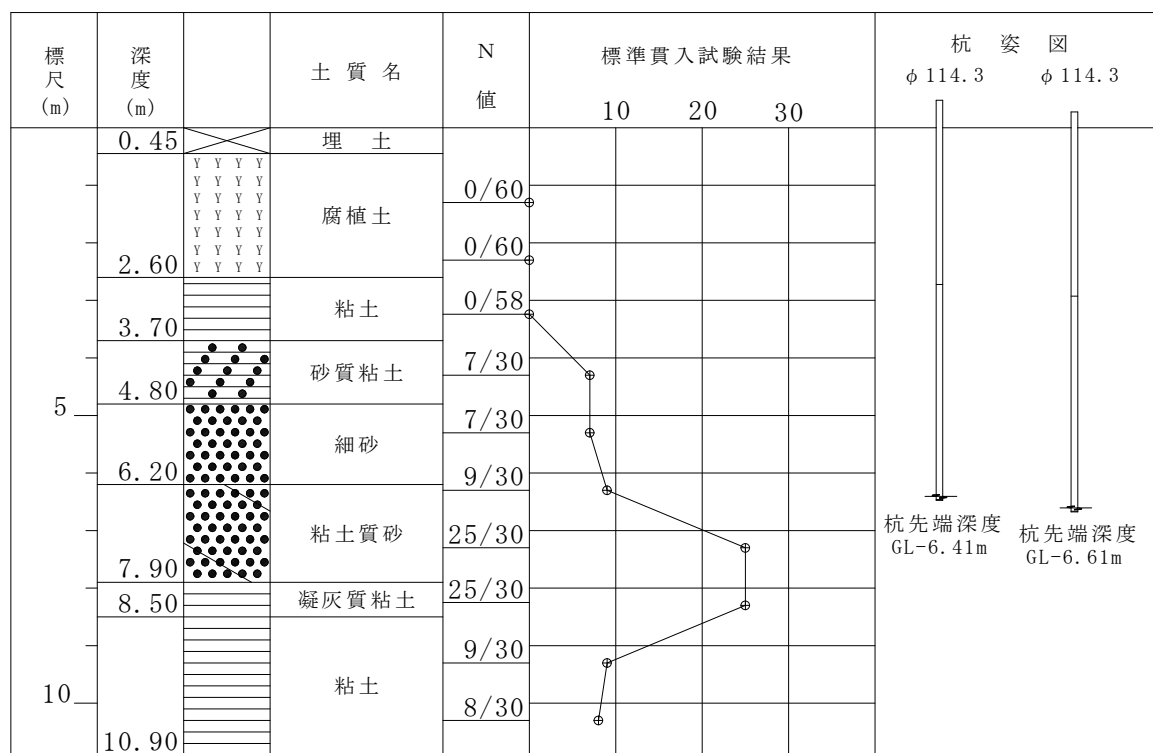


図 5.7 地盤柱状図および杭姿図

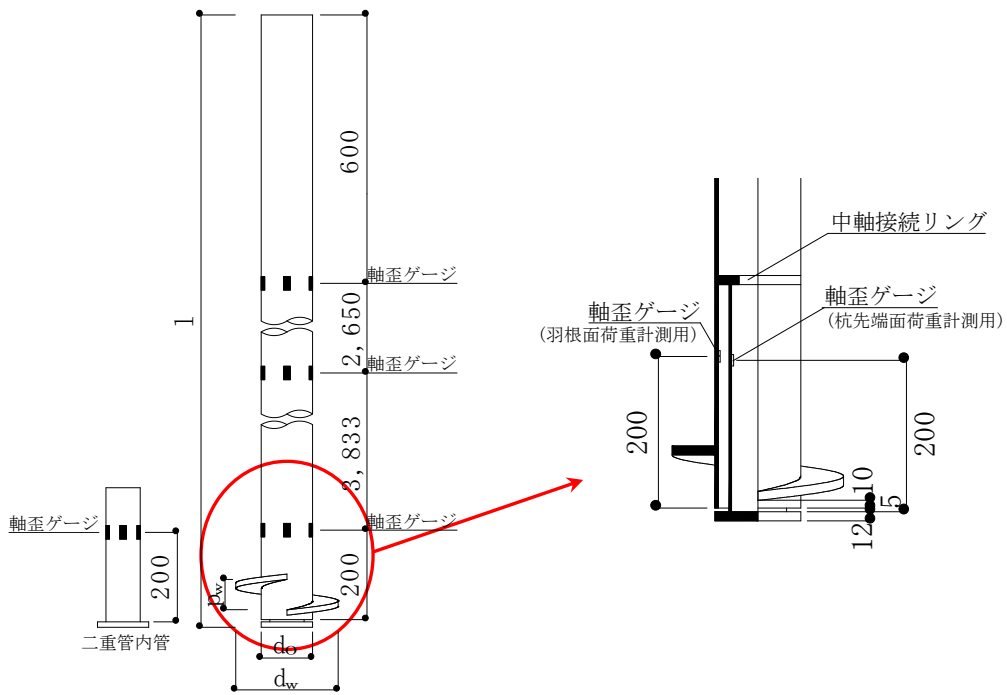


図 5.8 試験杭図

表 5.4 試験杭諸元一覧

試験名	軸径 d_0 (mm)	軸厚 t_0 (mm)	羽根径 d_w (mm)	羽根 ピッチ p_w (mm)	杭長 l (m)	支持層 根入長 p_x ($\times d_w$)
A杭	114.3	4.5	228.6	70	7.300	0
B杭						-1.0

表 5.5 載荷方法

項目	内容	
荷重段階数	8 段階以上	
サイクル数	4 サイクル以上	
載荷速度	増荷重時：計画最大荷重 / 荷重段階数 (/min) 程度 減荷重時：増荷重時の 2 倍程度	
各荷重段階における荷重保持時間	新規荷重段階	30 分
	履歴内荷重段階	2 分
	0 荷重段階	15 分

表 5.6 計測項目と測定点数

計測項目	測定点数
時間	
荷重	1 点
変位量	6 点 (鉛直 4 点, 水平 2 点)
ひずみ	16 点 (1 断面 4 点, 4 断面分)

表 5.7 計測時期

荷重段階	測定時期
新規荷重段階	0, 1, 2, 5, 10, 15, 30 分
履歴内荷重段階	0, 1, 2 分
0 荷重段階	0, 1, 2, 5, 15 分

表 5.8 荷重段階一覧 (A 杭の例)

サイクル	荷重段階 (kN)
1	0 - <u>25</u> - <u>50</u> - 0
2	0 - 50 - <u>75</u> - <u>100</u> - 50 - 0
3	0 - 50 - 100 - <u>125</u> - <u>150</u> - 100 - 50 - 0
4	0 - 50 - 100 - 150 - <u>175</u> - <u>200</u> - 150 - 100 - 50 - 0
5	0 - 50 - 100 - 150 - 200 - <u>225</u> - 200 - 150 - 100 - 50 - 0

注) _____ 新規荷重段階

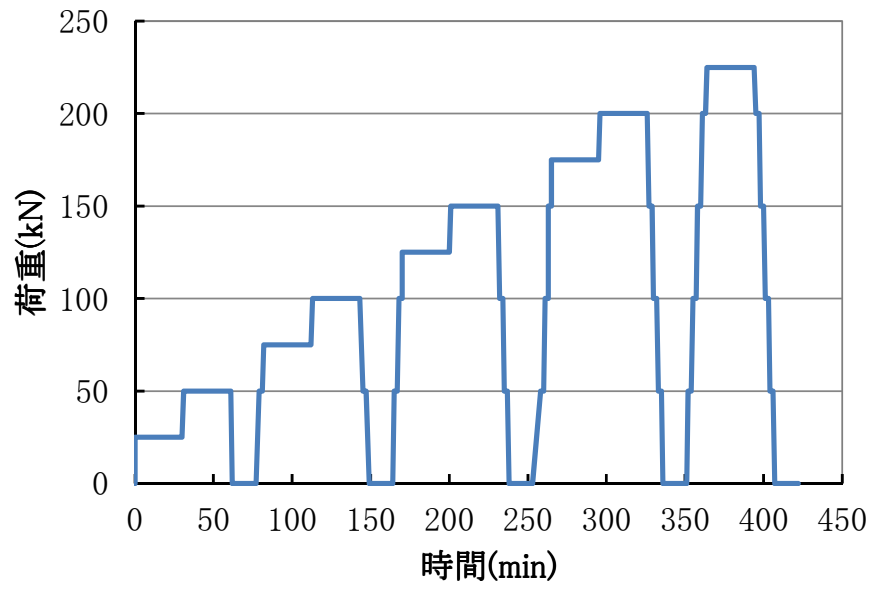


図 5.9 荷重階 (A 杭の例)

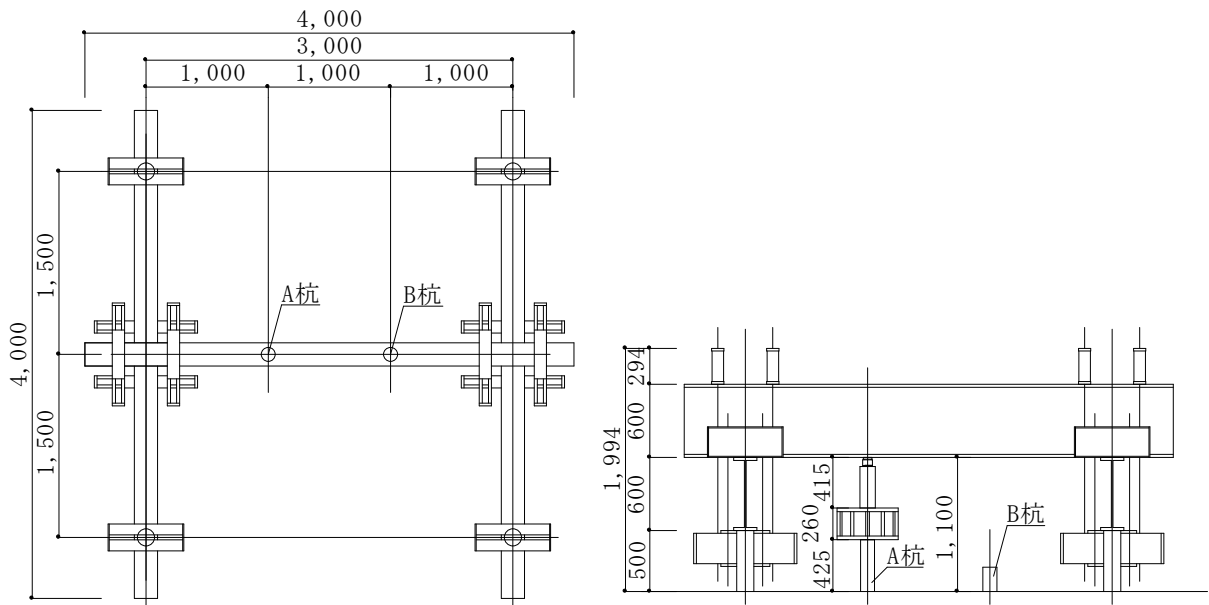


図 5.10 載荷試験装置図



写真 5.1 載荷試験装置全景



写真 5.2 杭頭付近状況

図 5.11 は A 杭と B 杭の載荷試験結果であって、各部の負担荷重～変位曲線を描いたものである。また、試験結果を表 5.9 に示す。それによると、A 杭と B 杭共に杭頭荷重に対する杭先端部荷重の割合は、長期許容支持力時で約 6 割に過ぎないが極限支持力時で約 8～9 割にもなっている。これは杭の周面抵抗力が極限支持力時点ではあまり期待できなくなることを意味している。模型実験結果よりもその傾向が顕著であるのは、杭周面地盤が腐植土や粘性土であり、模型実験の硅砂とは異なるためと思われる。

A 杭と B 杭を比べると、どの荷重時においても杭先端部荷重は、根入れをした B 杭の方が小さい値となっている。羽根面荷重は、極限荷重時では B 杭が若干小さい値を示すが、短期許容荷重時および長期許容荷重時においては B 杭が大きい値を示す。また、杭先端部荷重はどの荷重時においても B 杭が小さい値を示す。このように羽根面や杭先端部荷重の傾向は模型実験と異なっている。この理由として、支持層へ根入れ施工を行う B 杭では、正転と逆転を数回繰り返して打ち止めた影響と解釈している。すなわち、通常の正転状態では羽根下面に緩み領域が発生するが杭先端部は密な状態を維持するのに対して、逆転施工では羽根下面の緩み領域が解消する代わりに杭先端部に緩みが発生する現象¹⁴⁾である。

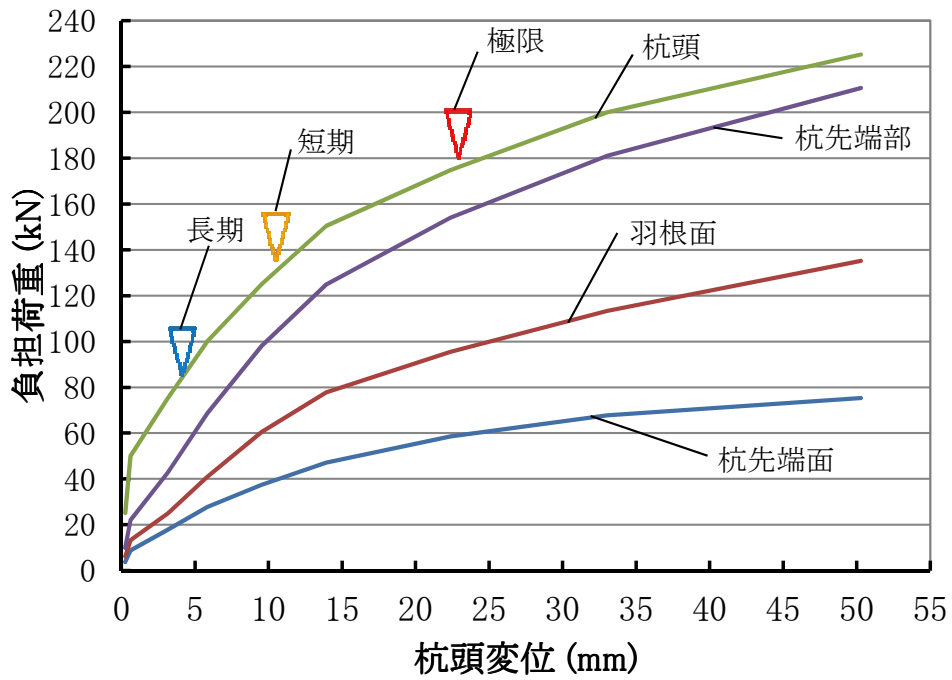


図 5.11(a) 負担荷重－杭頭変位図 A 杭(根入れ無し)

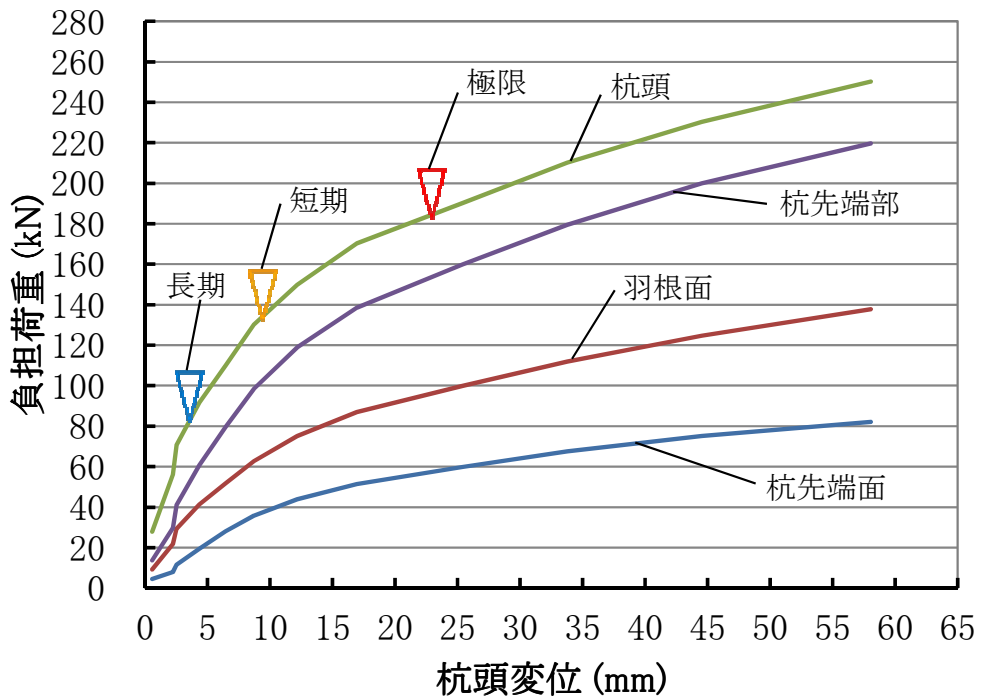


図 5.11(b) 負担荷重－杭頭変位図 B 杭(根入れ有り)

表 5.9 試驗結果一覽

試驗名	極限支持力時				
	杭頭 變位	杭先端 面荷重	羽根面 荷重	杭先端 部荷重	杭頭 荷重
	(mm)	R_{ub} (kN)	R_{uw} (kN)	R_{up} (kN)	R_u (kN)
A杭	22.86	58.9	96.3	155.2	175.9
B杭	22.86	57.4	96.1	153.5	184.3

試驗名	短期許容支持力時				
	杭頭 變位	杭先端 面荷重	羽根面 荷重	杭先端 部荷重	杭頭 荷重
	(mm)	R_{sb} (kN)	R_{sw} (kN)	R_{sp} (kN)	R_s (kN)
A杭	10.43	39.4	64.1	103.5	130.2
B杭	9.35	37.3	65.0	102.3	133.8

試驗名	長期許容支持力時				
	杭頭 變位	杭先端 面荷重	羽根面 荷重	杭先端 部荷重	杭頭 荷重
	(mm)	R_{Lb} (kN)	R_{Lw} (kN)	R_{Lp} (kN)	R_L (kN)
A杭	4.07	21.3	30.5	51.7	83.8
B杭	3.47	15.6	35.6	51.2	81.5

表 5.10 は、模型実験結果に基づいて誘導した支持力評価式による計算値と伊奈町における原位置載荷試験結果を比較したものである。計算式における現場の平均N値は、図 5.7 に示す標準貫入試験のN値分布に基づいて、GL-6.4m を境にして以浅をN=9、以深をN=25 とみなし、杭先端面および羽根面に採用するN値の範囲は5.2の1)および2)により評価した。

A杭に関しては、極限支持力および長期許容支持力の計算値が幾分安全側に評価される傾向があるものの、長期から極限に至るまでの杭先端面と羽根面の負担傾向は実測値に良く近似している。B杭に関しては、杭先端部の計算値は実測値に概ね近似しているが、杭先端面および羽根面の長期許容支持力の計算値がそれぞれ過大および過少に評価される傾向がみられる。この理由として、B杭では、正転と逆転を数回繰り返して打ち止めたことによる、羽根下面の緩み領域の解消の影響と解釈している。ただし、極限支持力状態では杭変位量が大きいことからこの影響が表れないと共に、長期許容支持力時でも杭先端面と羽根面を合計した杭先端部の計算値に関しては実測値に近似している。

表 5.10 計算値と試験値の比較

		極限支持力			短期許容支持力			長期許容支持力		
		杭先端面 R_{ub}	羽根面 R_{uw}	杭先端部 R_{up}	杭先端面 R_{sb}	羽根面 R_{sw}	杭先端部 R_{sp}	杭先端面 R_{lb}	羽根面 R_{lw}	杭先端部 R_{lp}
A杭	計算値 (平均N値)	55.4 (25)	89.2 (21)	144.6	38.2 (25)	57.1 (21)	95.3	21.6 (25)	25.9 (21)	47.5
	実測値	58.9	96.3	155.2	39.4	64.1	103.5	21.3	30.5	51.7
	計算値/実測値	0.94	0.93	0.93	0.97	0.89	0.92	1.01	0.85	0.92
B杭	計算値 (平均N値)	55.4 (25)	106.2 (25)	161.6	38.2 (25)	68.0 (25)	106.2	21.6 (25)	30.8 (25)	52.4
	実測値	57.4	96.1	153.5	37.3	65.0	102.3	15.6	35.6	51.2
	計算値/実測値	0.97	1.11	1.05	1.02	1.05	1.04	1.38	0.87	1.02

5.4 まとめ

本章で構築した回転貫入杭の支持力評価式を以下に示す.

(1) 極限支持力： R_{up} (kN)

$$R_{up}=R_{ub}+R_{uw}=\alpha_b \cdot N_b \cdot A_b+\alpha_w \cdot N_w \cdot A_w$$

ここで， R_{ub} ：杭先端面の極限支持力

R_{uw} ：羽根面の極限支持力

$\alpha_b=216$ ：杭先端面の支持力係数

N_b ：杭先端面の平均N値

(杭先端面より下方へ $3d_0$)

A_b ：杭先端面積 (m^2)

$\alpha_w=138$ ：羽根面の支持力係数

N_w ：羽根面の平均N値

(羽根面より下方へ $2.5d_w$ ，上方へ $0.5d_w$)

A_w ：羽根面積 (m^2)

(2) 長期許容支持力： R_{Lp} (kN)

$$R_{Lp}=\xi_{Lb} \cdot R_{ub}+\xi_{Lw} \cdot R_{uw}$$

ここで， $\xi_{Lb}=0.39$ ， $\xi_{Lw}=0.29$

(3) 短期許容支持力： R_{Sp} (kN)

$$R_{Sp}=\xi_{Sb} \cdot R_{ub}+\xi_{Sw} \cdot R_{uw}$$

ここで， $\xi_{Sb}=0.69$ ， $\xi_{Sw}=0.64$

上記による計算値と模型実験の値の比は $0.99 \sim 1.03$ ，標準偏差 $0.14 \sim 0.20$ であり，評価式の回帰精度は良好である．また，杭の打止め深度の異なる2体の原位置載荷試験を実施し，長期，短期，極限の支持力計算値が実測値に概ね近似することから，本論文で構築した支持力評価式の妥当性を検証した．

第6章 支持力評価式の既往の原位置載荷試験結果への適用

6.1 まえがき

前章では，回転貫入杭の新たな支持力評価式として，①極限支持力の算定には杭先端面と羽根面に独自の支持力係数，②長期および短期の許容支持力の算定には杭先端面と羽根面に独自の支持力発揮率を導入する手法を構築した．

本章では，回転貫入杭の開発に当たって実施した地盤構成の異なる種々の既往の原位置載荷試験に対して，本論文で構築した支持力評価式の適用性を検討する．なお，これらの試験結果の多くは杭先端面と羽根面の負担荷重を分離測定していないので，杭先端面と羽根面を合計した杭先端部の値を比較の対象とする．また，これらの載荷試験に基づいて実務で使用されている既往の評価式と本論文の評価式の比較を行う．

6.2 実杭による載荷試験の概要

比較対象としているのは、杭の先端に1枚の螺旋翼を取り付けた回転貫入杭の載荷試験結果9例であり、試験の概要を表6.1に示す。杭先端地盤は全て砂質土であって、杭本体径は $\phi 114.3\text{mm}$ ～ $\phi 355.6\text{mm}$ 、羽根径は $\phi 300\text{mm}$ ～ $\phi 800\text{mm}$ 、羽根径／杭本体径比は1.87～2.99である。なお、表6.1中の先端付近平均N値は、杭先端位置を基準として上下に羽根径分の範囲のN値の平均を示している。また、実杭の載荷試験結果は杭先端面と羽根面を分離せずに計測しているため、杭先端面と羽根面を合計した杭先端部についての検討を行う。

図6.1にNo.1～No.9全ての試験の杭先端変位～杭先端部荷重曲線を示す。また、図6.2に杭先端変位を羽根径で除した変位と杭先端部荷重の関係を示す。

表 6.1 実杭による載荷試験概要一覧

No	試験名	杭本体径 (mm)	羽根径 (mm)	羽根径/ 杭本体径	杭先端 面積 (m^2)	羽根 面積 (m^2)	先端 深度 (m)	根入れ 深さ (m)	先端付近 平均N値
1	指扇	190.7	400	2.10	0.0285	0.0971	16.8	1.50	22.5
2	新湊	267.4	500	1.87	0.0561	0.1401	28.0	0.70	34.7
3	鎌ヶ谷	139.8	300	2.15	0.0153	0.0553	14.5	0.20	24.7
4	小杉	267.4	500	1.87	0.0561	0.1401	28.3	1.10	36.5
5	境	267.4	580	2.17	0.0561	0.2080	12.2	0.40	27.2
6	幸手	267.4	800	2.99	0.0561	0.4464	30.0	1.20	29.1
7	猿島	355.6	800	2.25	0.0993	0.4033	41.6	0.80	57.8
8	長沼原-1	190.7	400	2.10	0.0285	0.0971	13.65	1.45	36.5
9	長沼原-2	190.7	500	2.62	0.0285	0.1677	13.45	1.25	37.8

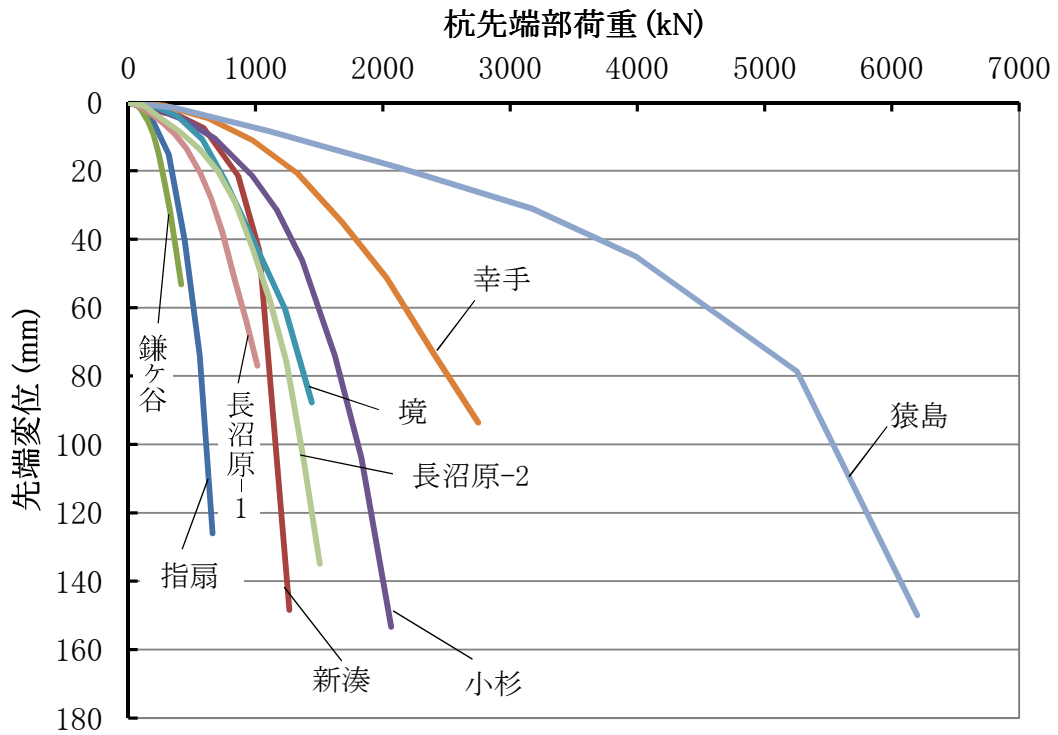


図 6.1 杭先端変位－杭先端部荷重図(全データ)

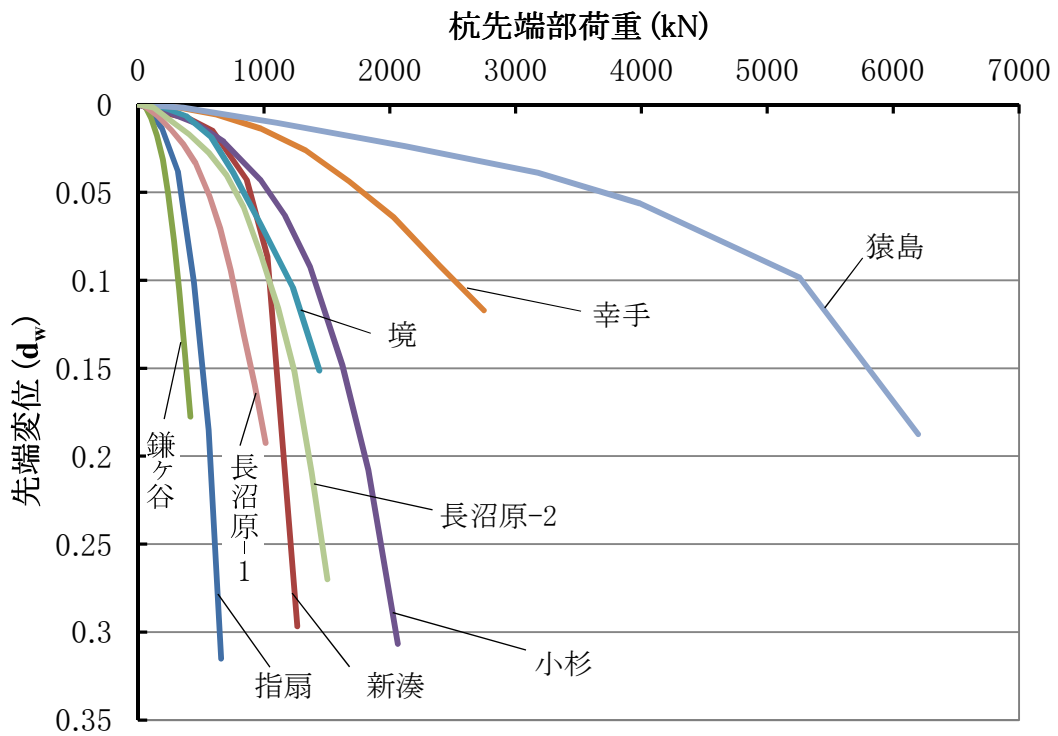


図 6.2 杭先端変位（羽根径比）－杭先端部荷重図(全データ)

各試験毎の概要を以降に示すが、杭の寸法記号は図 6.3 の通りである。

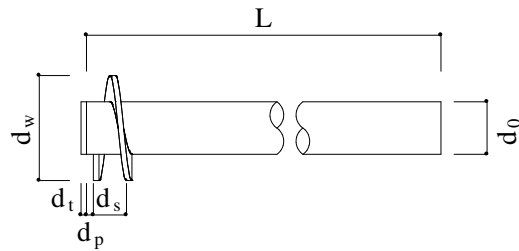


図 6.3 杭の寸法記号

(1) No. 1

No. 1 の試験条件を表 6.2, 地盤柱状図と杭姿図を図 6.4 に示す。なお、本試験は載荷試験の詳細が不明で総合図を作成できないため、荷重～変位曲線のみを図 6.5 に示す。

試験地は、埼玉県さいたま市西区（旧大宮市）であり、荒川の氾濫低地に位置している。ここは地下水位が高く、軟弱な粘土やシルトが厚く分布した地盤となっている。杭先端は、軟弱層の下にある細砂層（GL-11.9m 以深）の中で N 値 16～31 の層に根入れされている。

表 6.2 試験条件(指扇)

試験場所		埼玉県大宮市指扇	
実施時期		試験杭の施工日：平成 3 年 10 月 30 日	
		載荷試験日：平成 3 年 11 月 14 日	
試験杭	杭本体部	杭本体径 (d_0)	190.7mm
		鋼管厚 (d_{0t})	5.3mm
		先端板厚 (d_t)	9mm
		杭長 (L)	17.5m
	羽根部	翼径 (d_w)	400mm
		翼厚 (d_{wt})	9mm
		ストローク (d_s)	100mm
		突出長 (d_p)	130mm
杭先端深度		GL-16.8m	

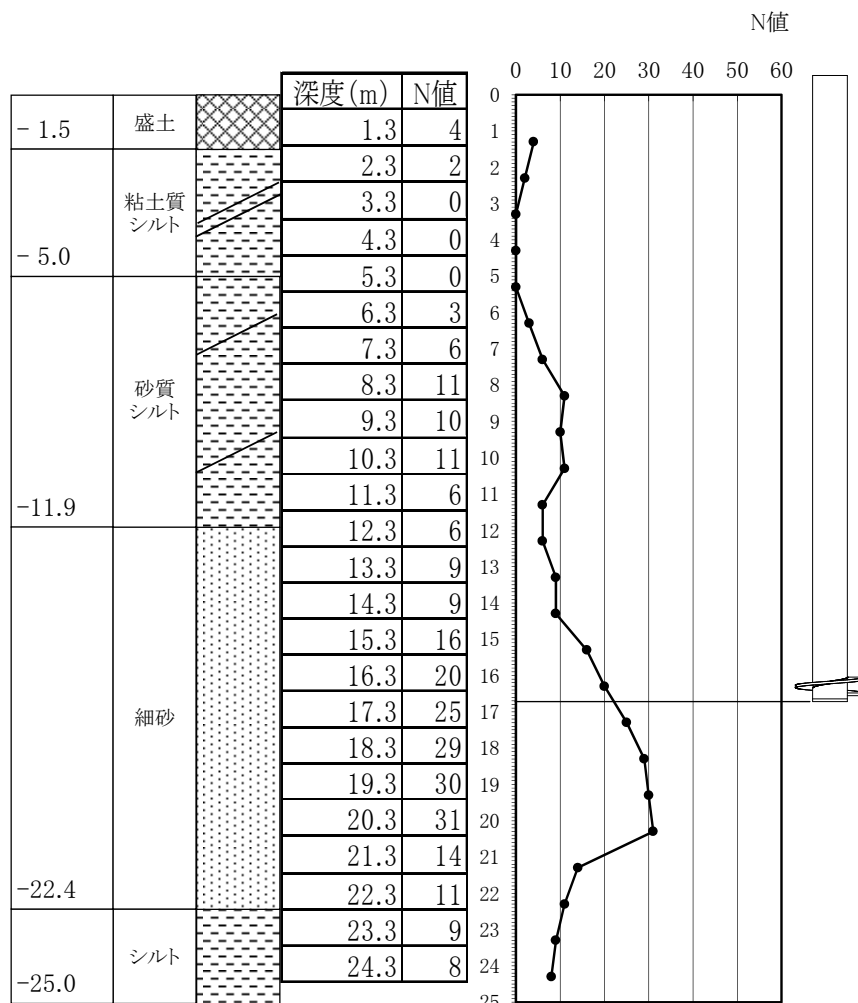


図 6.4 地盤柱状図と杭姿図(指扇)

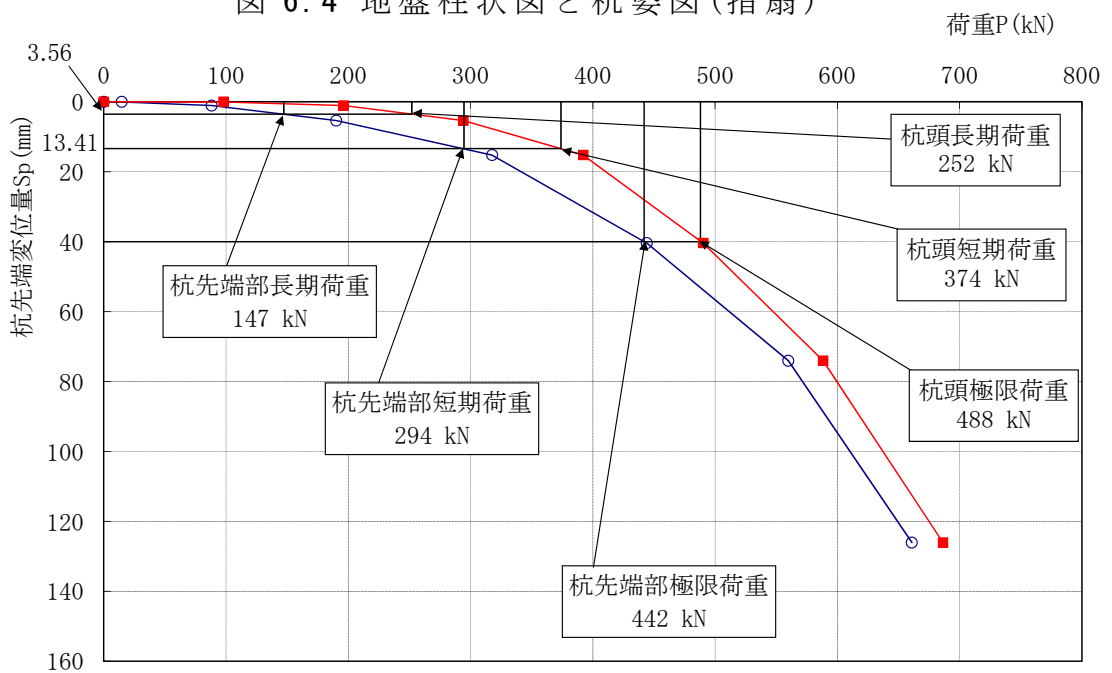


図 6.5 荷重 - 変位曲線(指扇)

(2) No. 2

No. 2 の試験条件を表 6.3, 地盤柱状図と杭姿図を図 6.6 に示す. また, 載荷試験の概要として試験総合図を図 6.7 に示す.

試験地は, 富山県射水市 (旧新湊市) であり, 射水平野に位置している. ここは潟埋積低地であり, 海岸付近では沖積層が 50~60m と厚いが砂も多く, 内陸に向かい沖積層は薄くなっている. 杭先端は, GL-27.5m~28.0m の砂層 (N 値 32) に根入れされている.

表 6.3 試験条件 (新湊)

試験場所	富山県新湊市高木 278 番地		
実施時期	試験杭の施工日 : 平成 3 年 12 月 17 日		
	載荷試験日 : 平成 4 年 1 月 8 日		
試験杭	杭本体部	杭本体径 (d_0)	267.4mm
		鋼管厚 (d_{bt})	9.3mm
		先端板厚 (d_t)	18mm
		杭長 (L)	28.5m
	羽根部	翼径 (d_w)	500mm
		翼厚 (d_{wt})	18mm
		ストローク (d_s)	120mm
		突出長 (d_p)	130mm
杭先端深度	GL-28.0m		

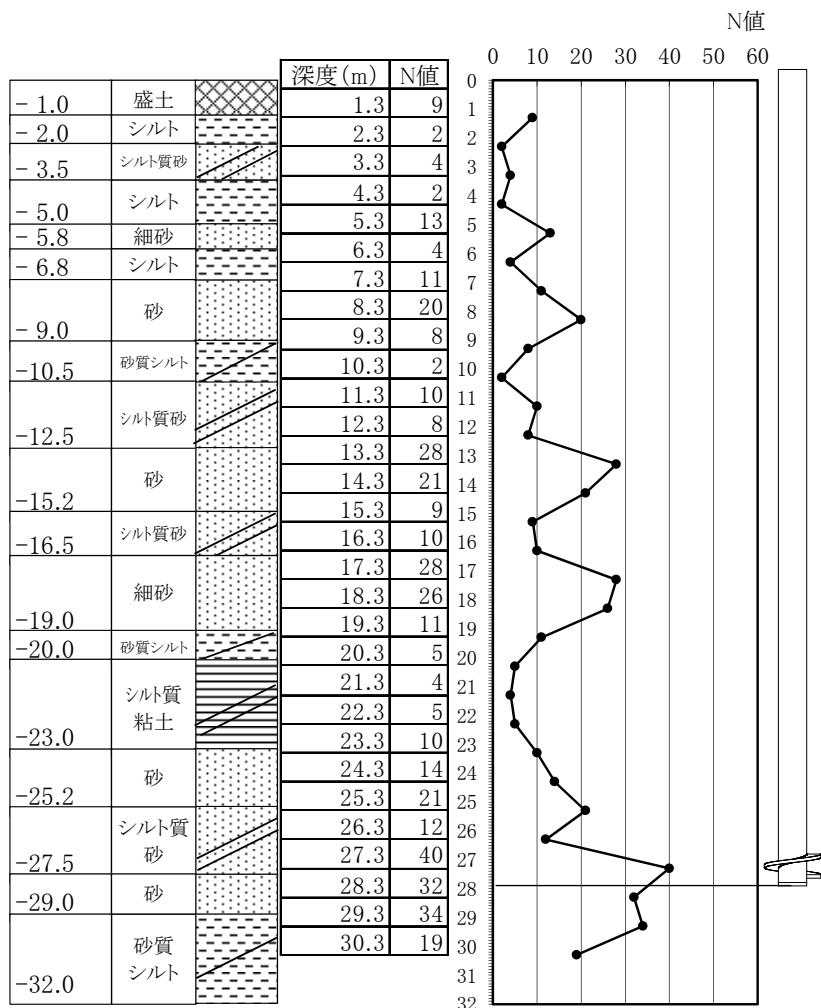


図 6.6 地盤柱状図と杭姿図(新湊)

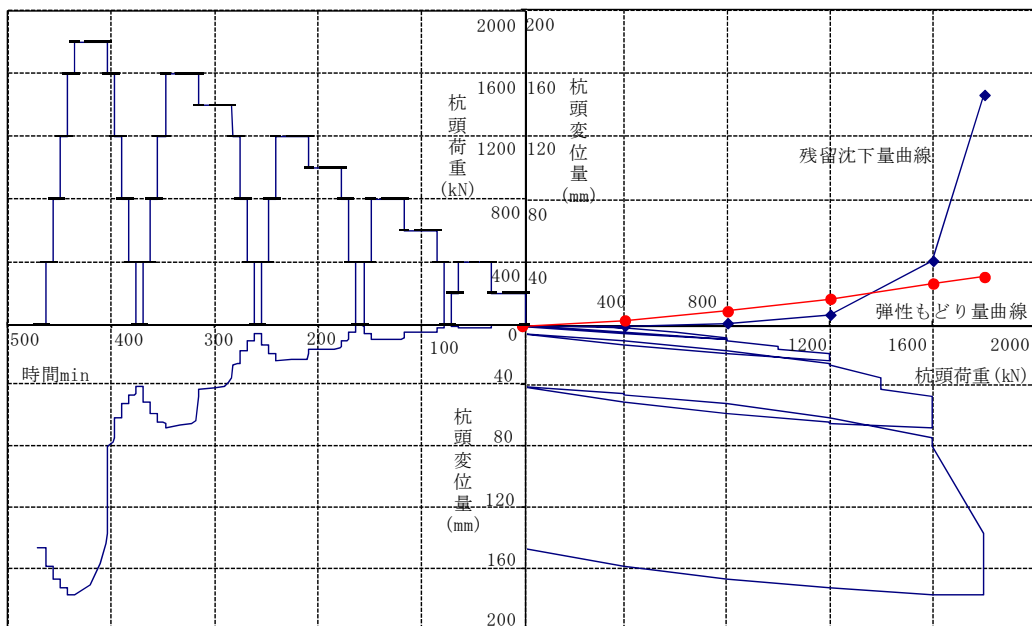


図 6.7 試験総合図(新湊)

(3) No. 3

No. 3 の試験条件を表 6.4, 地盤柱状図と杭姿図を図 6.8, 試験総合図を図 6.9 に示す.

試験地は, 千葉県鎌ヶ谷市であり, 下総台地に位置している. ここは表層が関東ローム, その下が成田層群で構成されている. 杭先端は, GL-10.6m 以深の細砂層の中でN値 25 前後の層に根入れされている.

表 6.4 試験条件(鎌ヶ谷)

試験場所	千葉県鎌ヶ谷市初富 21-43		
実施時期	試験杭の施工日：平成 4 年 10 月 22 日		
	載荷試験日：平成 4 年 11 月 11 日		
試験杭	杭本体部	杭本体径 (d_0)	139.8mm
		鋼管厚 (d_{bt})	9.5mm
		先端板厚 (d_t)	18mm
		杭長 (L)	15.0m
	羽根部	翼径 (d_w)	300mm
		翼厚 (d_{wt})	18mm
		ストローク (d_s)	70mm
		突出長 (d_p)	130mm
杭先端深度	GL-14.5m		

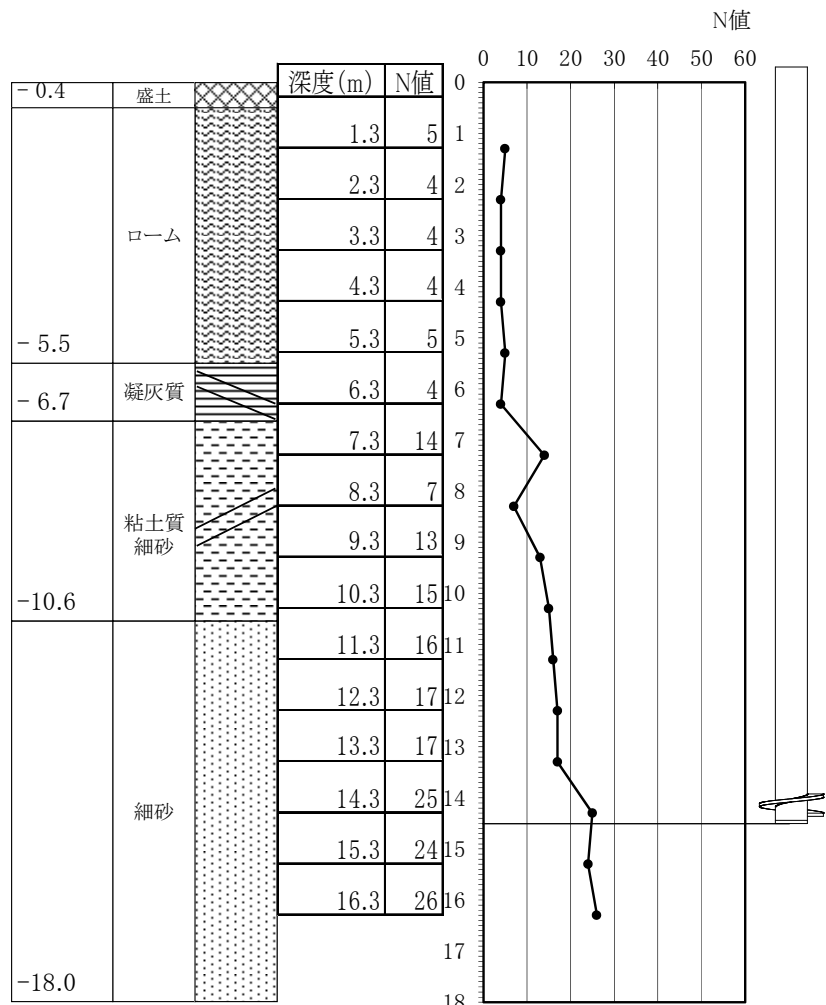


図 6.8 地盤柱状図と杭姿図(鎌ヶ谷)

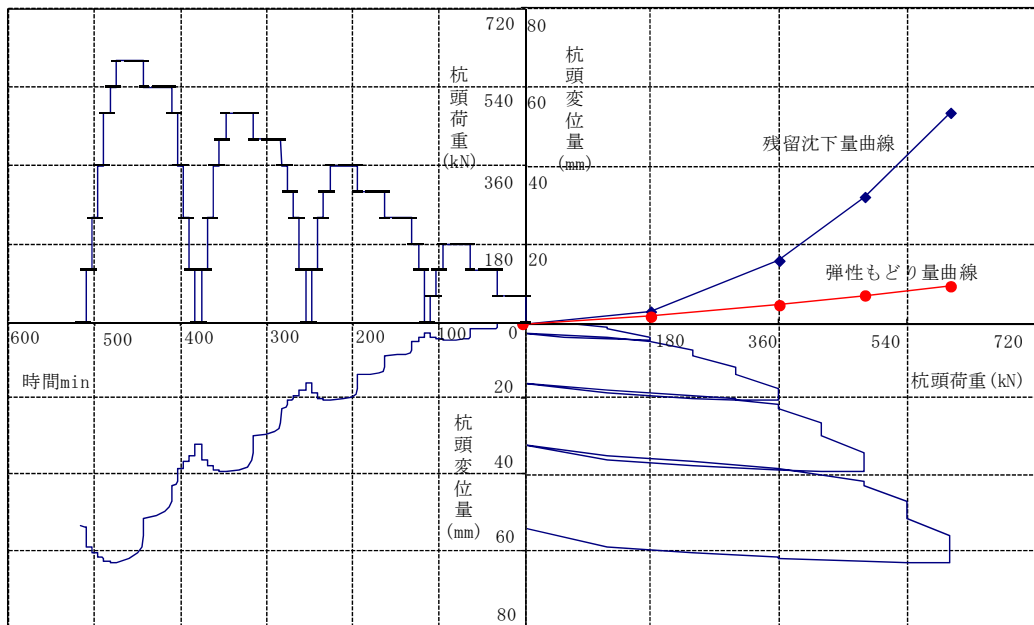


図 6.9 試験総合図(鎌ヶ谷)

(4) No. 4

No. 4 の試験条件を表 6.5, 地盤柱状図と杭姿図を図 6.10, 試験総合図を図 6.11 に示す.

試験地は, 富山県射水市 (旧射水郡小杉町) であり, 射水平野に位置している. ここは No. 2 と同様の地質地域である. 杭先端は, GL-27.8m 以深の砂礫層 (N 値 36~50) に根入れされている.

表 6.5 試験条件 (小杉)

試験場所	富山県射水郡小杉町三ヶ 1885-1		
実施時期	試験杭の施工日 : 平成 3 年 12 月 20 日		
	載荷試験日 : 平成 4 年 1 月 14 日		
試験杭	杭本体部	杭本体径 (d_0)	267.4mm
		鋼管厚 (d_{bt})	9.3mm
		先端板厚 (d_t)	24mm
		杭長 (L)	28.7m
	羽根部	翼径 (d_w)	500mm
		翼厚 (d_{wt})	24mm
		ストローク (d_s)	120mm
		突出長 (d_p)	130mm
杭先端深度	GL-28.3m		

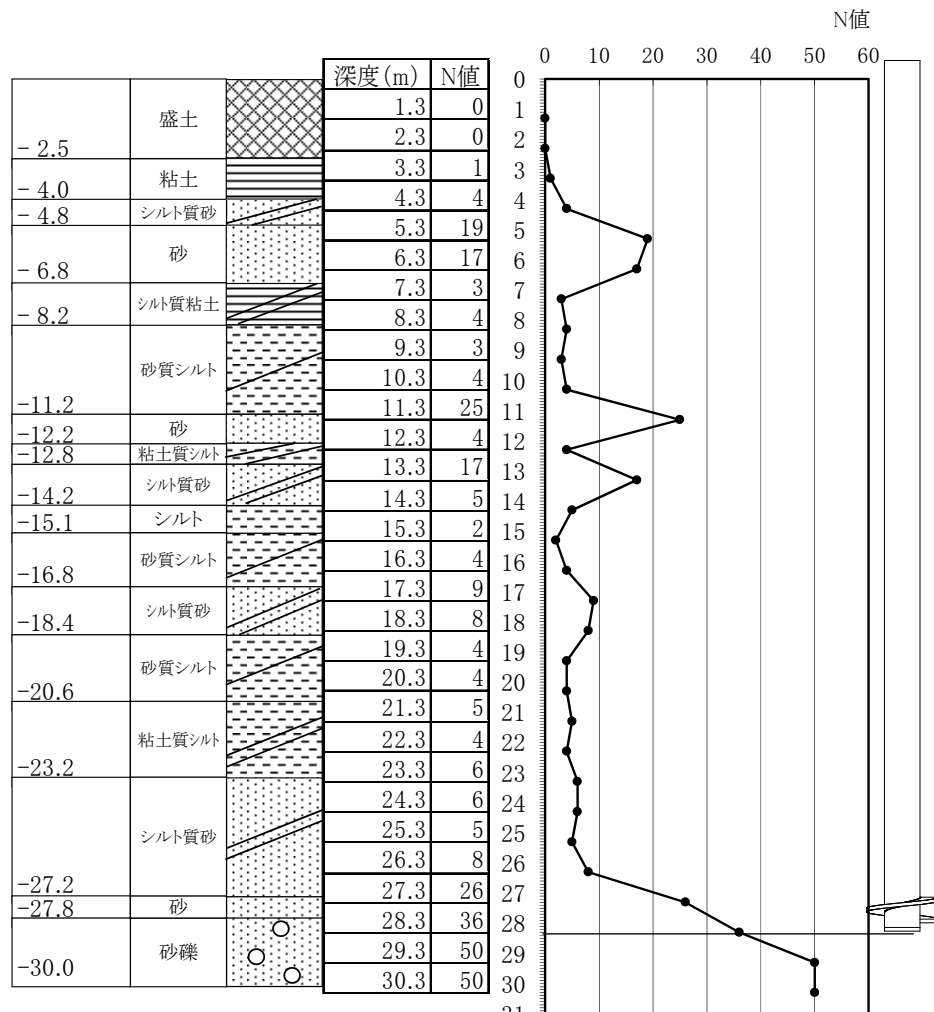


図 6.10 地盤柱状図と杭姿図(小杉)

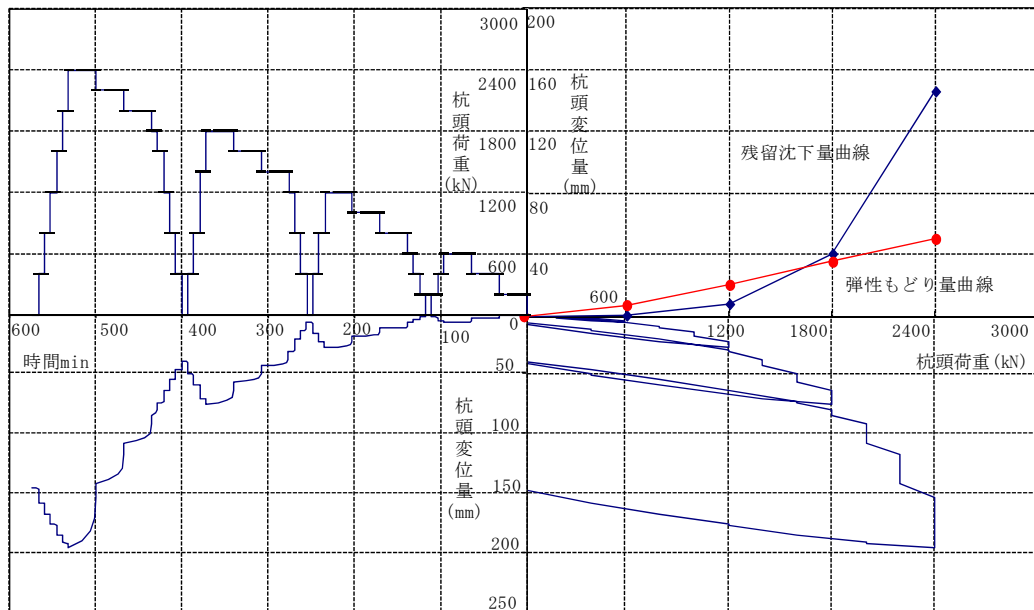


図 6.11 試験総合図(小杉)

(5) No. 5

No. 5 の試験条件を表 6. 6, 地盤柱状図と杭姿図を図 6. 12, 試験総合図を図 6. 13 に示す.

試験地は, 茨城県猿島郡境町であり, 猿島台地に位置している. ここは表層が関東ロームで覆われているほか, 比較的浅いところに強固な岩盤が存在している. 杭先端は, GL-11. 8m~12. 7m の細砂層 (N 値 30) に根入れされている.

表 6. 6 試験条件(境)

試験場所	茨城県猿島郡境町 旭化成建材株式会社境工場内		
実施時期	試験杭の施工日 : 平成 11 年 12 月 22 日		
	載荷試験日 : 平成 12 年 1 月 11 日		
試験杭	杭本体部	杭本体径 (d_0)	267. 4mm
		鋼管厚 (d_{bt})	8. 0mm
		先端板厚 (d_t)	22mm
		杭長 (L)	12. 5m
	羽根部	翼径 (d_w)	580mm
		翼厚 (d_{wt})	22mm
		ストローク (d_s)	140mm
		突出長 (d_p)	10mm
杭先端深度	GL-12. 2m		

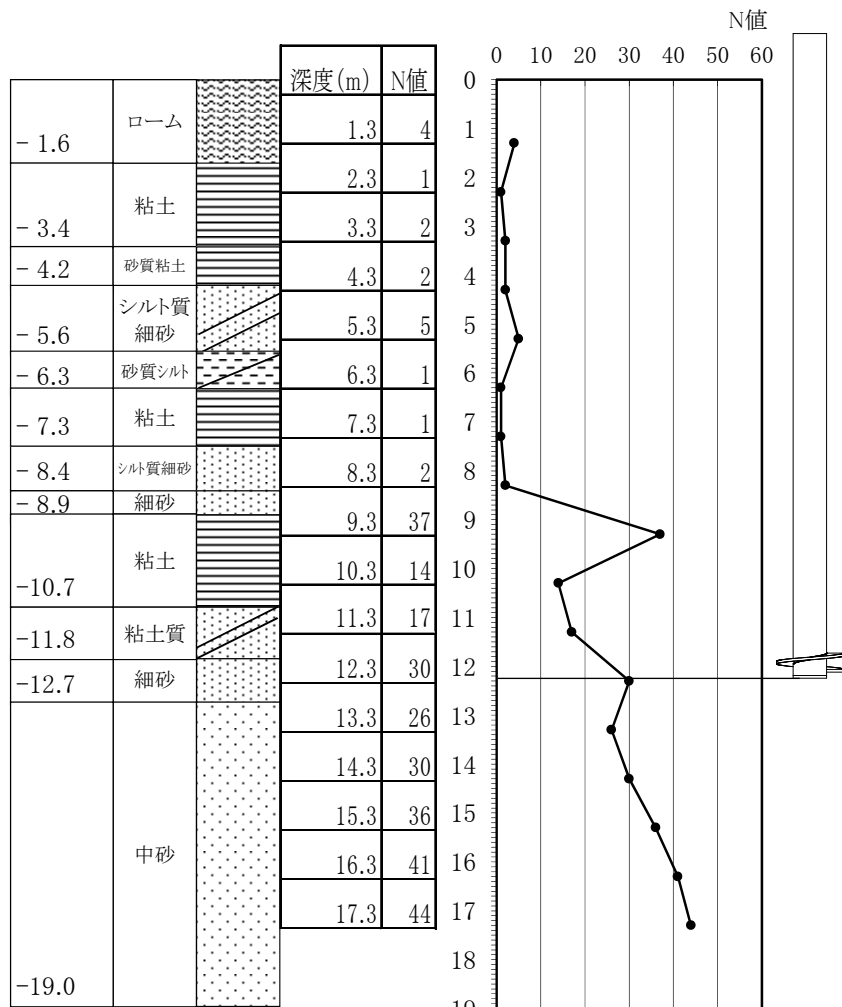


図 6.12 地盤柱状図と杭姿図(境)

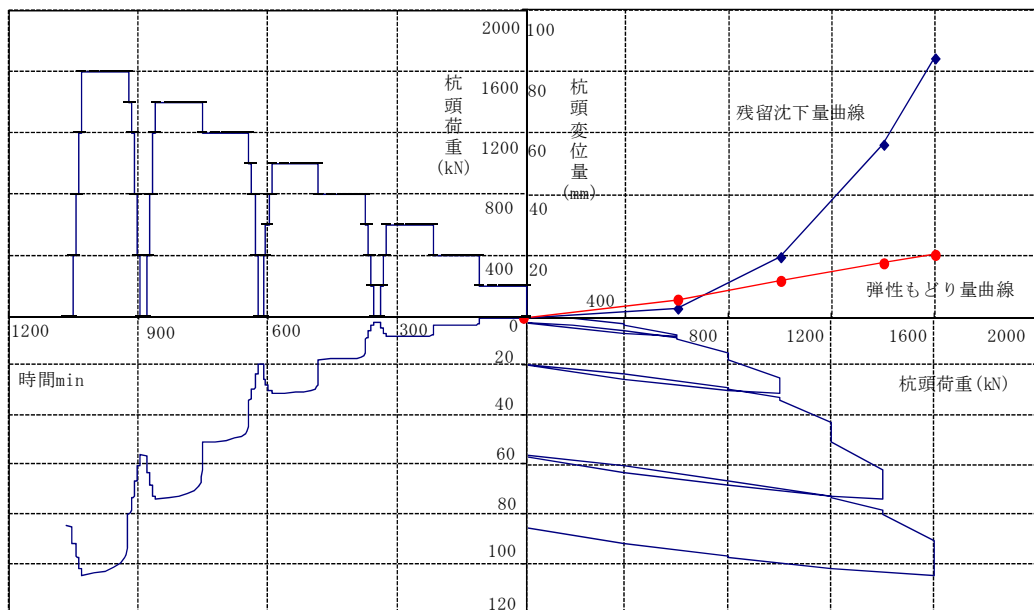


図 6.13 試験総合図(境)

(6) No. 6

No. 6 の試験条件を表 7.7, 地盤柱状図と杭姿図を図 6.14, 試験総合図を図 6.15 に示す.

試験地は, 埼玉県幸手市であり, 中川低地に位置している. ここは沖積層の上層が有楽町層, 下層が七号地層による 2 段重ね構造となっている. 杭先端は, GL-28.8m 以深の細砂・砂礫層 (N 値 30 程度) に根入れされている.

表 6.7 試験条件(幸手)

試験場所		埼玉県幸手市	
実施時期		試験杭の施工日：平成 14 年 4 月 12 日	
		載荷試験日：平成 14 年 4 月 18 日	
試験杭	杭本体部	杭本体径 (d_0)	267.4mm
		鋼管厚 (d_{bt})	27.0mm
		先端板厚 (d_t)	36mm
		杭長 (L)	32.0m
	羽根部	翼径 (d_w)	800mm
		翼厚 (d_{wt})	36mm
		ストローク (d_s)	140mm
		突出長 (d_p)	10mm
杭先端深度		GL-30.0m	

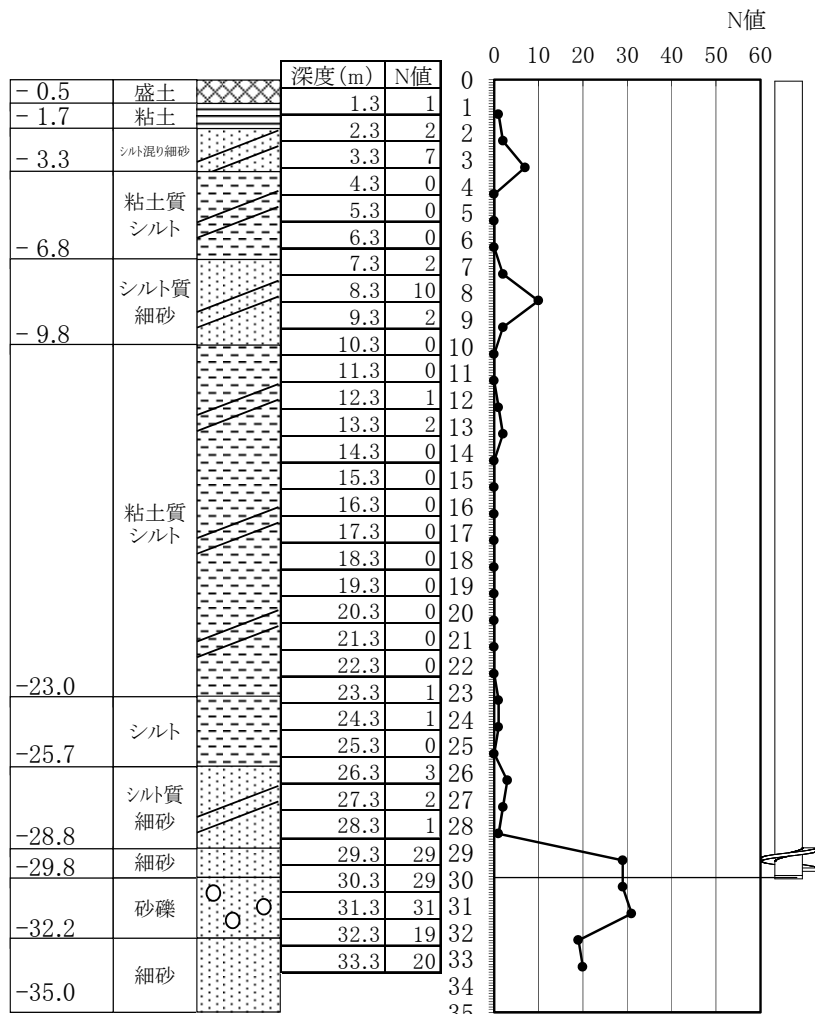


図 6.14 地盤柱状図と杭姿図(幸手)

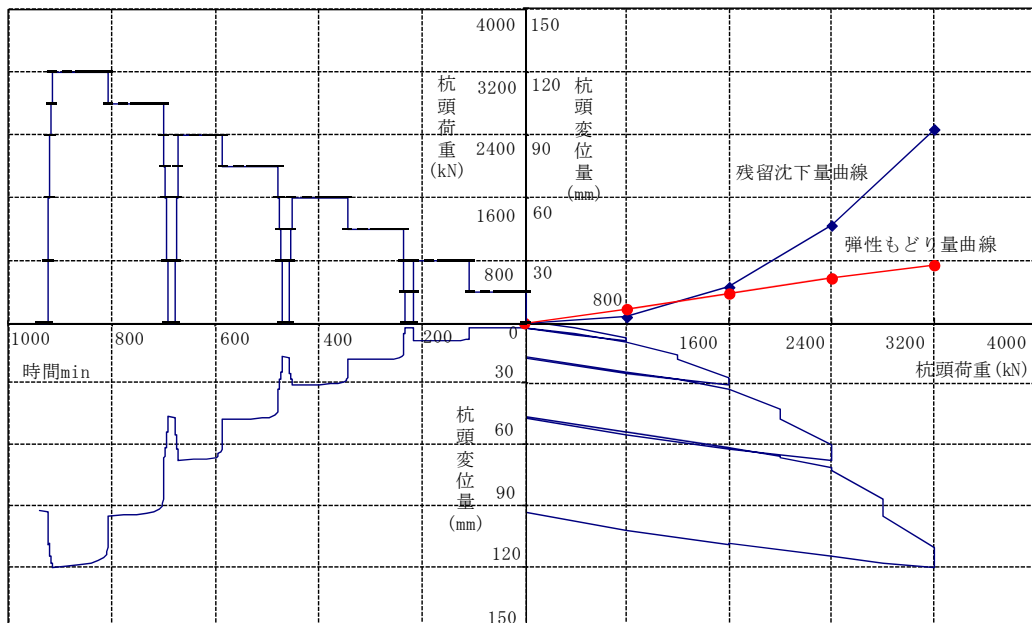


図 6.15 試験総合図(幸手)

(7) No. 7

No. 7 の試験条件を表 6. 8, 地盤柱状図と杭姿図を図 6. 16, 試験総合図を図 6. 17 に示す.

試験地は, 茨城県坂東市 (旧猿島郡猿島町) であり, 猿島台地に位置している. ここは No. 5 と同様の地質地域である. 杭先端は, GL-40. 8m ~ 43. 5m の砂礫層に根入れされている.

表 6. 8 試験条件 (猿島)

試験場所	茨城県猿島郡猿島町大字山上北 1678-1		
実施時期	試験杭の施工日 : 平成 15 年 1 月 14 日		
	載荷試験日 : 平成 15 年 2 月 24 日		
試験杭	杭本体部	杭本体径 (d_0)	355. 6mm
		鋼管厚 (d_{bt})	30. 0mm
		先端板厚 (d_t)	50mm
		杭長 (L)	46. 0m
	羽根部	翼径 (d_w)	800mm
		翼厚 (d_{wt})	50mm
		ストローク (d_s)	170mm
		突出長 (d_p)	10mm
杭先端深度	GL-41. 6m		

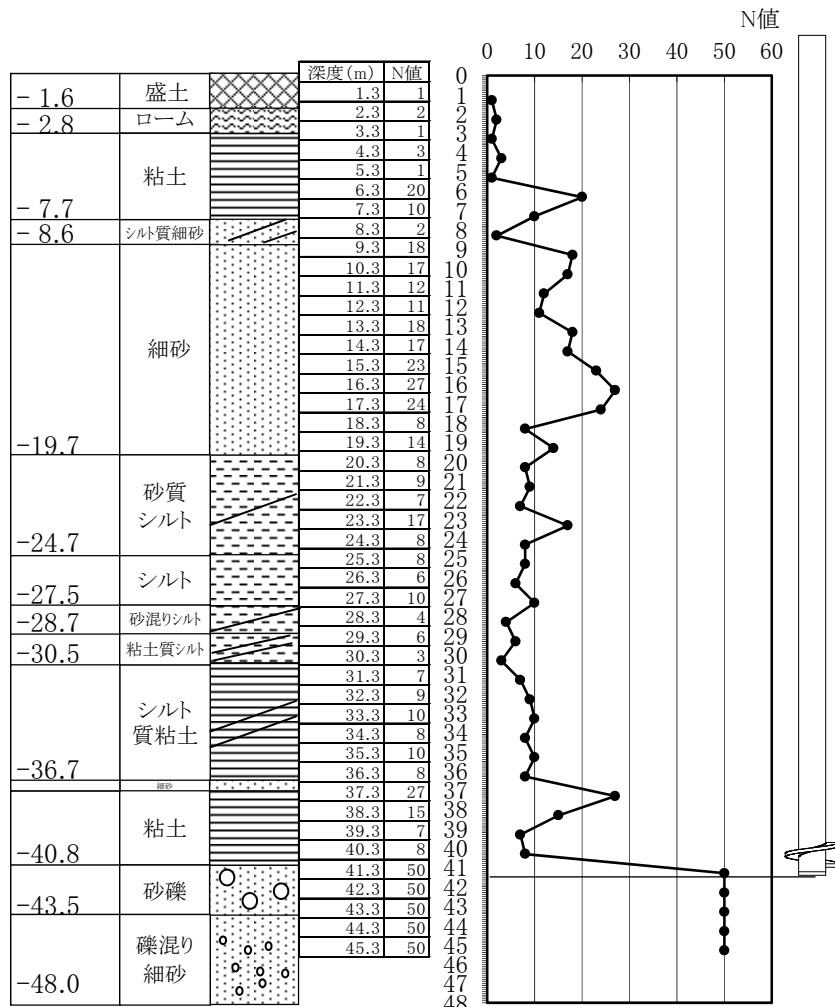


図 6.16 地盤柱状図と杭姿図(猿島)

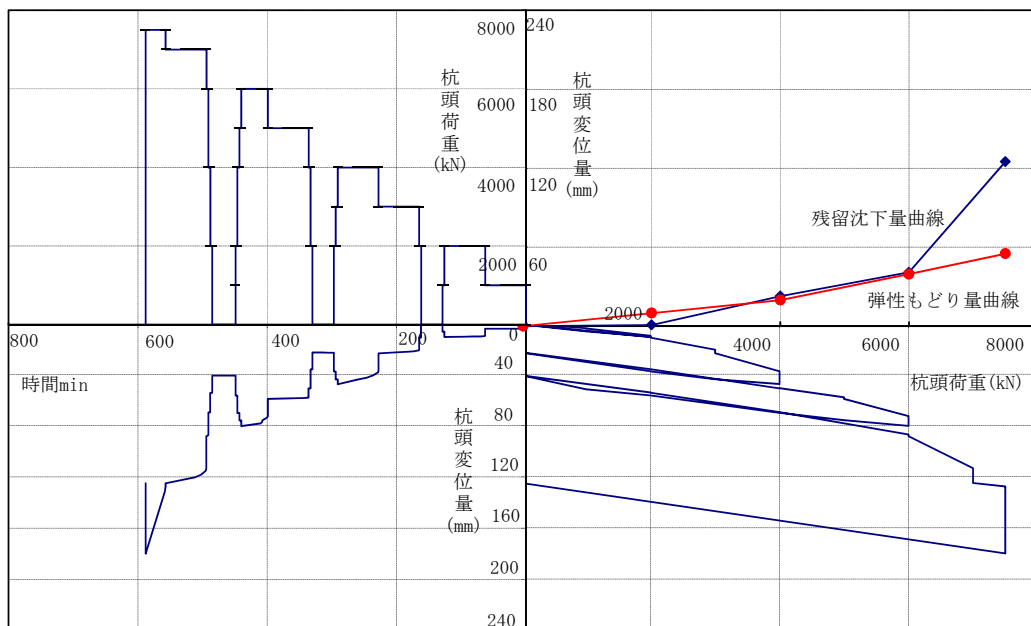


図 6.17 試験総合図(猿島)

(8) No. 8 および No. 9

No. 8 の試験条件を表 6.9, No. 8 および No. 9 の地盤柱状図と杭姿図を図 6.18, No. 8 の試験総合図を図 6.19 に示す. No. 9 の試験条件を表 6.10, 試験総合図を図 6.20 に示す.

これらの試験地は, 千葉県千葉市稲毛区であり, 下総台地の南部, 湾岸沿いに位置している. ここは No. 3 と同様の地質地域である. 杭先端は, GL-12.2m~16.8m の貝殻混じり細砂層 (N 値 30~40) に根入れされている.

表 6.9 試験条件 (長沼原-1)

試験場所		千葉県千葉市稲毛区長沼原	
実施時期		試験杭の施工日 : 平成 13 年 1 月 10 日	
		載荷試験日 : 平成 13 年 2 月 7 日	
試験杭	杭本体部	杭本体径 (d_0)	190.7mm
		鋼管厚 (d_{bt})	12.0mm
		先端板厚 (d_t)	25mm
		杭長 (L)	14.0m
	羽根部	翼径 (d_w)	400mm
		翼厚 (d_{wt})	25mm
		ストローク (d_s)	100mm
		突出長 (d_p)	10mm
杭先端深度		GL-13.65m	

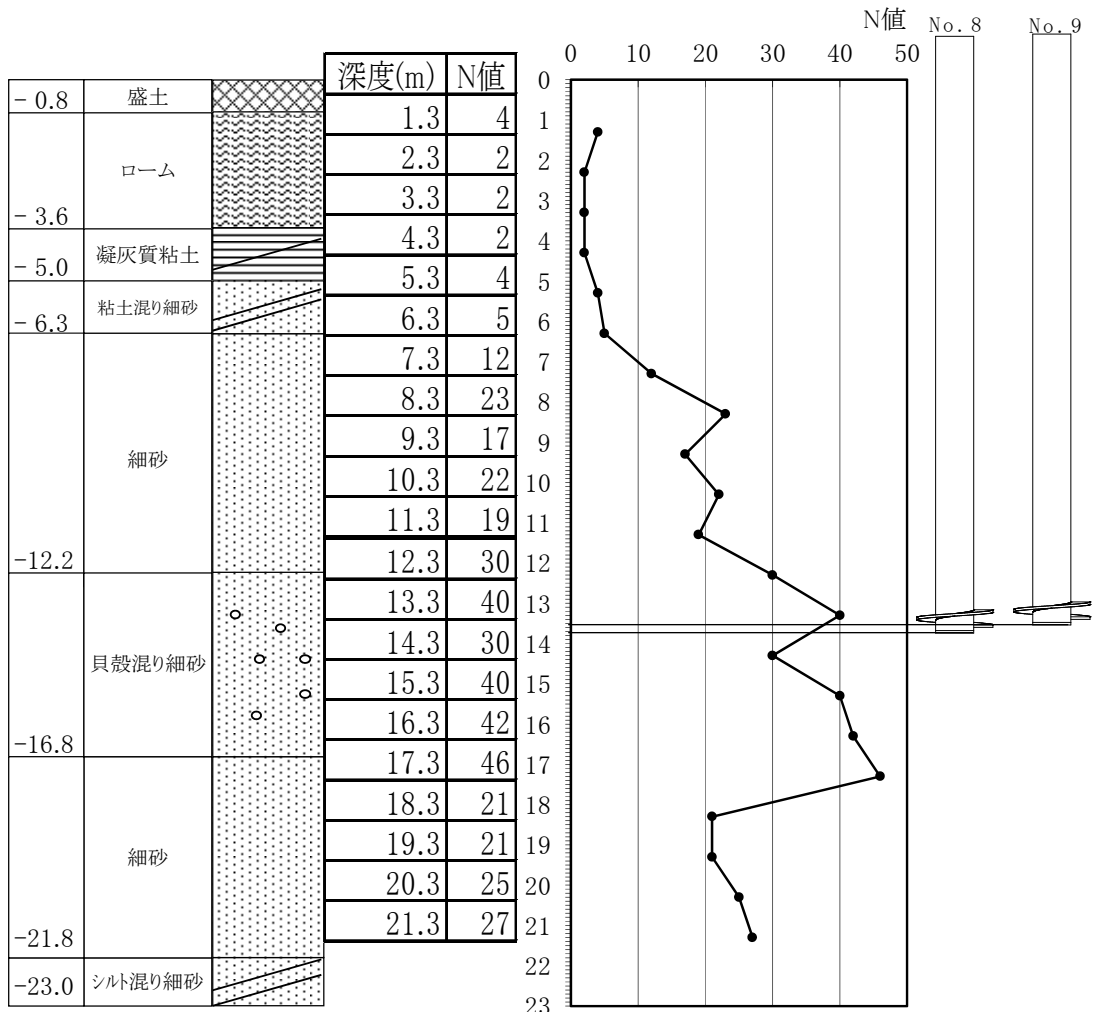


図 6.18 地盤柱状図と杭姿図(長沼原-1・2)

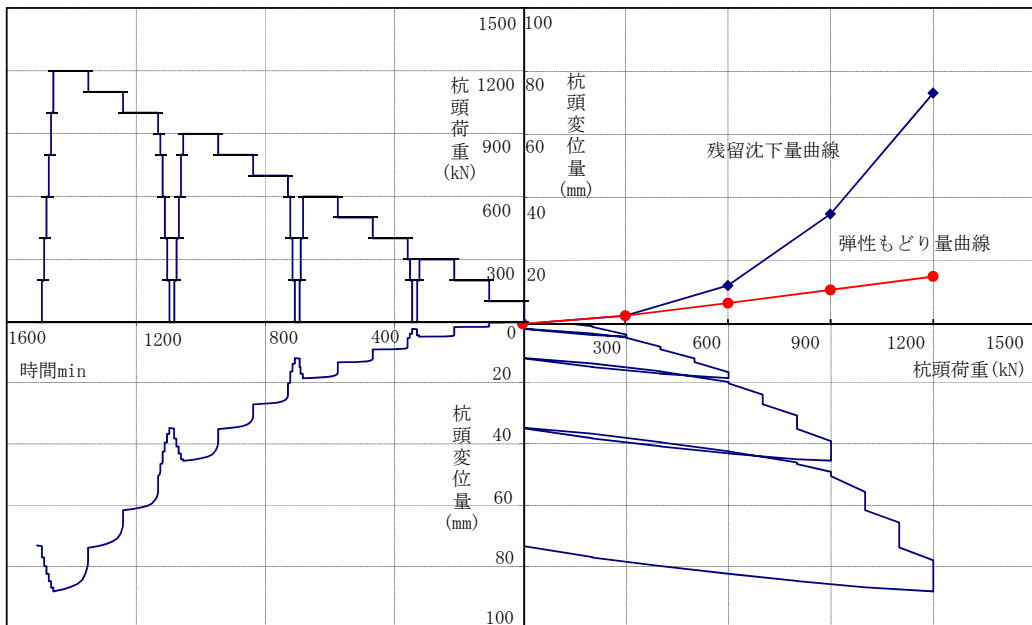


図 6.19 試験総合図(長沼原-1)

表 6.10 試験条件(長沼原-2)

試験場所		千葉県千葉市稲毛区長沼原	
実施時期		試験杭の施工日：平成13年1月10日	
		載荷試験日：平成13年2月7日	
試験杭	杭本体部	杭本体径 (d_0)	190.7mm
		鋼管厚 (d_{bt})	12.0mm
		先端板厚 (d_t)	25mm
		杭長 (L)	14.0m
	羽根部	翼径 (d_w)	500mm
		翼厚 (d_{wt})	25mm
		ストローク (d_s)	100mm
		突出長 (d_p)	10mm
杭先端深度		GL-13.45m	

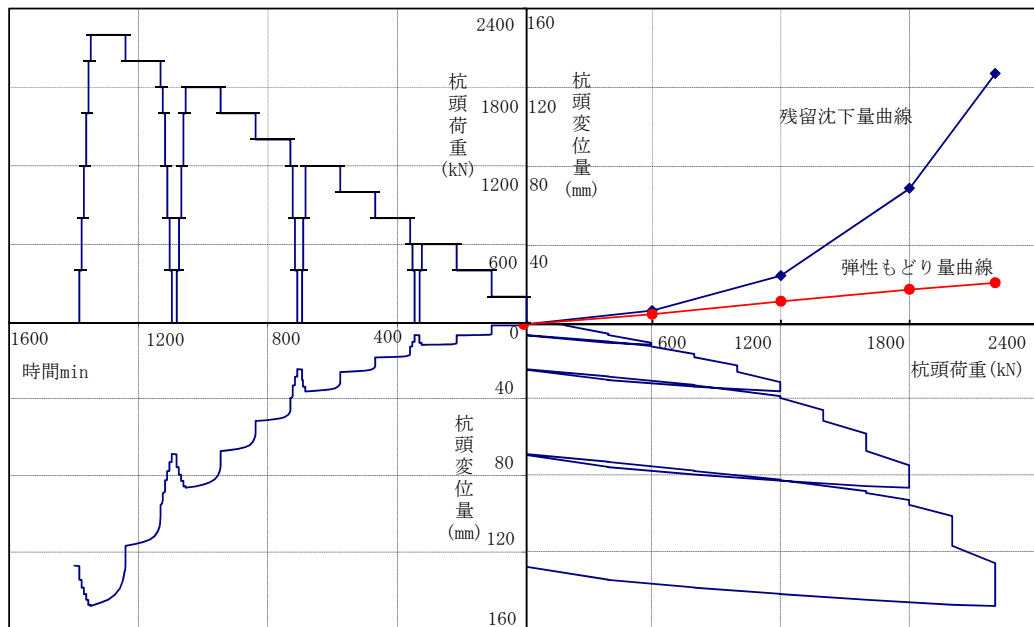


図 6.20 試験総合図(長沼原-2)

6.3 先端部支持力に関する本論文の提案式と原位置載荷試験結果の比較

表 6.1 に示した載荷試験の条件に本論文の提案式を適用する．杭先端面および羽根面を評価するための各平均 N 値（杭先端面は杭先端から下方へ $3d_0$ の範囲，羽根面は羽根中心位置を基準として下方へ $2.5d_w$ ・上方へ $0.5d_w$ の範囲の平均 N 値）を求め，杭先端部荷重の算定を極限，短期および長期について実施した．結果を表 6.11(a)～(c) に示す．また，横軸を試験値，縦軸を提案式による計算値としてプロットしたものを図 6.21(a)～(c) に示す．図中の直線は計算値＝試験値を表す．

表 6.11(a) 杭先端部の計算値と試験値の比較一覧（極限支持力）

No	試験名	平均 N 値		計算値 (kN)			試験値 (kN)	計算値 / 試験値
		杭先端 下 $3d_0$	羽根位置 下 $2.5d_w$ 上 $0.5d_w$	先端 面	羽 根 面	先端 部	先 端 部	先 端 部
1	指扇	23.9	23.5	147	312	459	442	1.04
2	新湊	32.8	33.9	395	651	1046	1044	1.00
3	鎌ヶ谷	24.6	24.6	81	186	267	318	0.84
4	小杉	41.6	40.3	502	774	1276	1401	0.91
5	境	28.7	27.4	346	782	1128	1200	0.94
6	幸手	29.3	29.1	353	1777	2130	2510	0.85
7	猿島	60.2	61.3	1285	3389	4674	5272	0.89
8	長沼原-1	33.6	33.9	207	451	658	753	0.87
9	長沼原-2	35.6	34.8	219	799	1018	1040	0.98

表 6.11(b) 杭先端部の計算値と試験値の比較一覧（短期許容支持力）

No	試験名	平均 N 値		計算値 (kN)			試験値 (kN)	計算値 / 試験値
		杭先端 下 $3d_0$	羽根位置 下 $2.5d_w$ 上 $0.5d_w$	先端 面	羽 根 面	先端 部	先端 部	先端 部
1	指扇	23.9	23.5	98	203	301	294	1.03
2	新湊	32.8	33.9	265	423	688	696	0.98
3	鎌ヶ谷	24.6	24.6	54	121	175	212	0.80
4	小杉	41.6	40.3	336	503	839	934	0.90
5	境	28.7	27.4	232	508	740	800	0.93
6	幸手	29.3	29.1	237	1155	1392	1673	0.83
7	猿島	60.2	61.3	861	2203	3064	3514	0.87
8	長沼原-1	33.6	33.9	138	293	431	502	0.86
9	長沼原-2	35.6	34.8	146	520	666	693	0.96

表 6.11(c) 杭先端部の計算値と試験値の比較一覧（長期許容支持力）

No	試験名	平均 N 値		計算値 (kN)			試験値 (kN)	計算値 / 試験値
		杭先端 下 $3d_0$	羽根位置 下 $2.5d_w$ 上 $0.5d_w$	先端 面	羽 根 面	先端 部	先端 部	先端 部
1	指扇	23.9	23.5	56	90	146	147	1.00
2	新湊	32.8	33.9	150	189	339	348	0.97
3	鎌ヶ谷	24.6	24.6	30	54	84	106	0.78
4	小杉	41.6	40.3	191	224	415	467	0.89
5	境	28.7	27.4	131	227	358	400	0.90
6	幸手	29.3	29.1	134	515	649	836	0.78
7	猿島	60.2	61.3	488	983	1471	1757	0.84
8	長沼原-1	33.6	33.9	78	131	209	251	0.84
9	長沼原-2	35.6	34.8	83	214	315	346	0.91

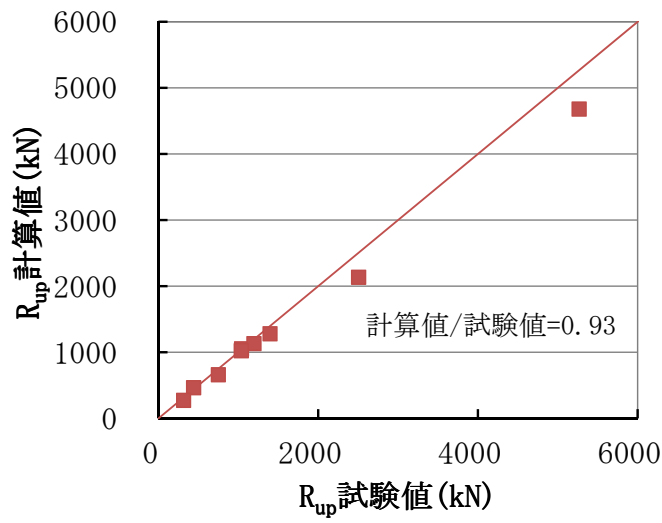


図 6.21 (a) 杭先端部の計算値と試験値の比較 (極限支持力)

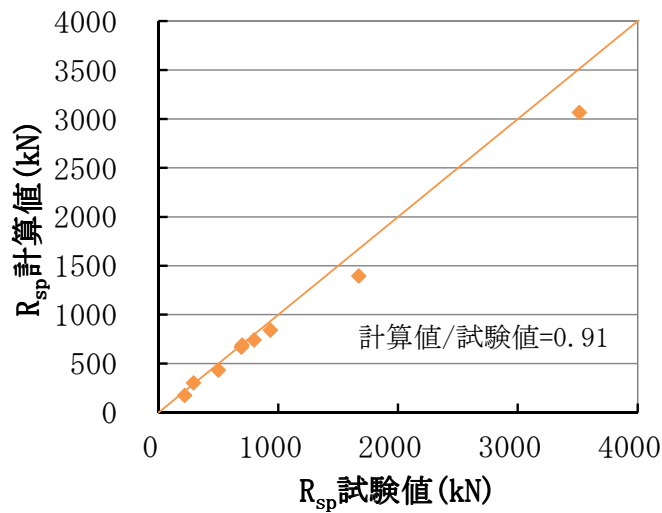


図 6.21 (b) 杭先端部の計算値と試験値の比較 (短期許容支持力)

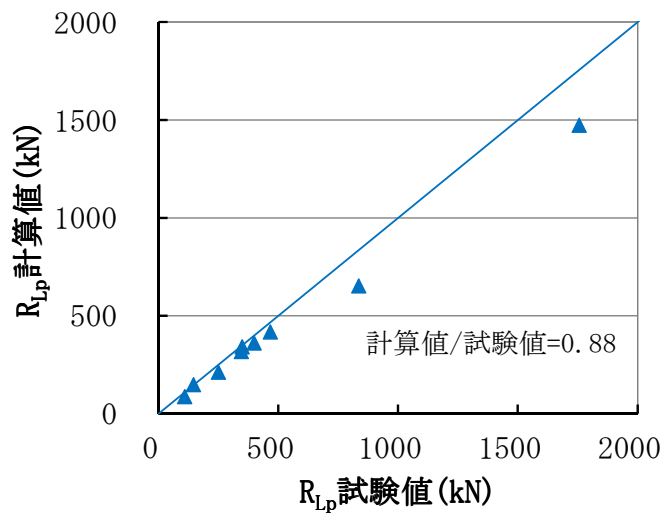


図 6.21 (c) 杭先端部の計算値と試験値の比較 (長期許容支持力)

図 6.21 によると、極限、短期、長期の各段階共に杭先端部の計算値は全体的に試験値よりも若干小さい値を示す傾向があるものの、計算値と試験値の比を見ると、極限で 0.84~1.04、短期で 0.80~1.03、長期で 0.78~1.00 となっている。本論文で構築した支持力算定式は、杭先端面と羽根面の和である杭先端部に関する限り、既往の原位置載荷試験で得られた極限、短期、長期の支持力値と近似しており適用性が認められた。

6.4 既往の計算式と本論文の提案式の比較

回転貫入杭の支持力計算式は、一般に杭先端の有効面積に支持力係数および杭先端付近の平均N値を乗じることで求められている。杭先端の有効面積は、工法ごとで異なっており、羽根の投影面積とするものや杭先端面積と羽根面積に係数を乗じるものもある。本論文では、羽根形状が SH-C タイプで支持力式の対象域を羽根の投影面積としているスクリーパイル EAZET の支持力式¹⁵⁾を従来の計算式として、本論文の提案式と比較する。

比較に用いるのは表 6.1 に示した実杭の載荷試験結果である。従来式における平均N値は、杭先端面を基準として上下に羽根径分の範囲の平均N値であって、下式による計算結果を表 6.12 に示す。

$$R_{up} = 150 \cdot N \cdot A_p \cdots (6.1) \text{式}$$

R_{up} ：杭先端部の極限支持力 (kN)

N：杭先端部平均N値

A_p ：羽根径を直径とする円の面積 (m²)

図 6.22 は、横軸に従来式、縦軸に提案式による計算結果をプロットしたものである。それによると、提案式/従来式の平均が 1.03 と若干提案式が支持力を大きく評価しているものの、提案式＝従来式となるラインの近傍に分布しており、バラツキも少なく同等の評価をしていると云える。

本論文の提案式は支持層境界や根入れの効果も考慮したものとなっているが、従来式は羽根径以上の根入れを前提としている。今回使用した試験データは支持層に深く根入されているものが多いため、こうしたケースでは従来式と提案式の差が現れにくいと思われるが、このような深い根入れの条件であっても提案式は高い精度で支持力を評価可能であると云える。

表 6.12 従来式の値と提案式の値の比較一覧

No	試験名	先端 付近 平均 N 値	従来式による値	提案式による値			提案式による値
			(kN)	(kN)			/従来式による値
			先端部	先端 面	羽 根 面	先端 部	先端部
1	指扇	22.5	424	147	312	459	1.08
2	新湊	34.7	1022	395	651	1046	1.02
3	鎌ヶ谷	24.7	261	81	186	267	1.02
4	小杉	36.5	1075	502	774	1276	1.19
5	境	27.2	1077	346	782	1128	1.05
6	幸手	29.1	2194	353	1777	2130	0.97
7	猿島	57.8	4358	1285	3389	4674	1.07
8	長沼原-1	36.5	688	207	451	658	0.96
9	長沼原-2	37.8	1113	219	799	1018	0.91

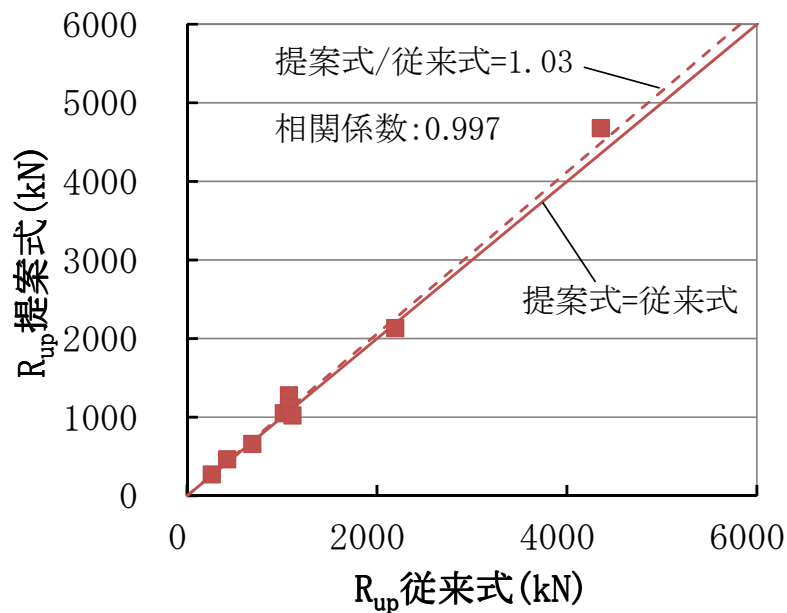


図 6.22 本論文提案式と従来式の比較

6.5 まとめ

本論文で構築した回転貫入杭の先端部支持力（杭先端面と羽根面の合計）の評価式を，地盤構成の異なる9体の既往の原位置載荷試験に適用した．

先端部の支持力実測値に対する本論文による計算値を9体の平均値で見ると，極限支持力で0.93，短期許容支持力で0.91，長期許容支持力で0.88となる．計算値は幾分安全側に評価する傾向があるものの，計算精度は良好である．また，本論文の極限支持力式で得られる杭先端部の値は，実務用に提案された従来式で得られる値に対して0.91～1.19（平均1.03）である．

以上，杭先端面と羽根面を合計して杭先端部の支持力で評価する限り，本論文で構築した回転貫入杭の支持力評価手法は，種々の地盤における既往の載荷試験で得られる実測値および既往の評価式に対しても近似しており，適用性は広いと判断できる．

第7章 総括

本論文は、表層地盤の下に比較的密な砂層が存在する地盤条件を対象として、大型加圧土槽による模型実験および実大杭による原位置試験を実施し、それらの施工時と載荷時の挙動の考察に基づいて、回転貫入杭の新たな支持力評価法を構築したものである。

最初に、支持層への根入れを変化させた施工実験および鉛直載荷実験を実施した。実験は模型実験および原位置試験であって、前者は模型杭（軸径 76.3mm，羽根径 152.6mm）を大型加圧土槽に作成した二層地盤に施工した場合、後者は実杭（軸径 114.3mm，羽根径 228.6mm）をシルト層を貫通させて細砂層に根入れさせた場合である。これらの実験を通して、回転貫入杭の支持層への根入れ効果に関する新たな知見として、①杭先端面が支持層に達する手前で杭体トルクや貫入率が変化するので、支持層への到達状況を概略知ることができること、②杭先端を支持層に根入れさせると羽根面の支持力は増加するが、杭先端面の支持力はほとんど変化しないこと等を得ている。更に、上記の大型加圧土槽を用いて、薄層の厚さを変化させた施工実験および鉛直載荷実験を実施し、③薄層の層厚を増加させると杭先端面と羽根面の荷重が増加するが、支持力に有効な層厚が存在すること、④載荷の進行に伴い杭先端部荷重に占める杭先端面および羽根面の荷重負担割合が変化することを明らかにしている。

上記の特性から、杭先端面と羽根面に同様の地盤の値を付与することの問題点、並びに杭先端部の極限支持力に一律の安全率を課して許容支持力を評価することの問題点を指摘できる。そこで、回転貫入杭工法においては杭先端面と羽根面を分離して評価することが重要との観点から、下記の考え方を導入した回転貫入杭の新たな支持力評価式の構築を行っている。

- 1) 極限支持力の評価については、杭先端面および羽根面について、それぞれ独自の支持力係数 α_b および α_w を導入する。
- 2) 長期および短期の許容支持力の算定では、杭先端面と羽根面について、それぞれ独自の支持力発揮率 ξ_b および ξ_w を導入する。

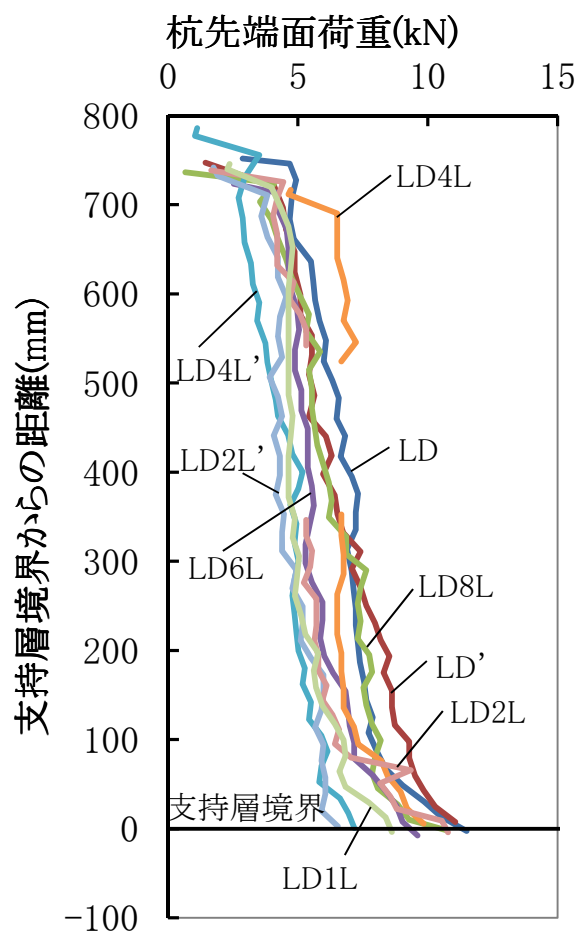
これらの評価式の妥当性は、杭の打ち止め深度の異なる原位置載荷試験結果と比較することで検証した。

最後に、既往の回転貫入杭の原位置載荷試験結果に対して、本論文の評価式を適用し、杭先端面荷重と羽根面荷重を合わせた杭先端部荷重の計算値が実測値に概ね近似することから、本論文の評価式の適用性が広いことを示した。

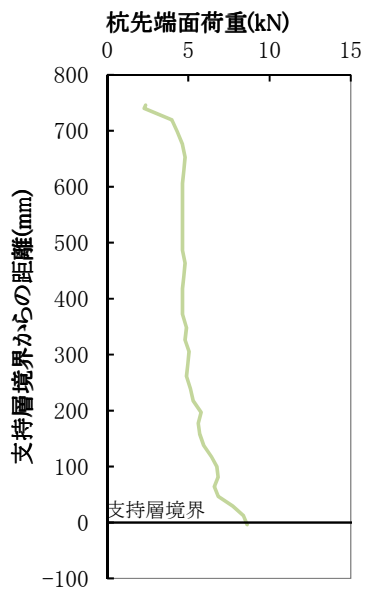
以上のように、本論文は回転貫入杭の支持層への根入れや薄層の層厚の影響を考慮すると共に、杭先端面と羽根面の支持力発現機構の違いを考慮した合理的な支持力評価方法に関するものである。ただし、対象とした地盤は砂地盤であり、砂礫地盤や粘性土地盤での適用性は今後の課題である。また、杭形状は鋼管の先端付近の周面に羽根を取り付け、鋼管先端は閉塞としたSH-Cタイプ(表 1.1 参照)に分類されるものであり、羽根径／軸径比は 2 のみである。これは回転貫入杭開発の先駆けとなった標準モデルと位置付けられるが、その後に開発された種々のタイプに対する本評価式の適用性については今後の課題とする。

付章 1 模型実験杭の施工データ（中間層地盤）

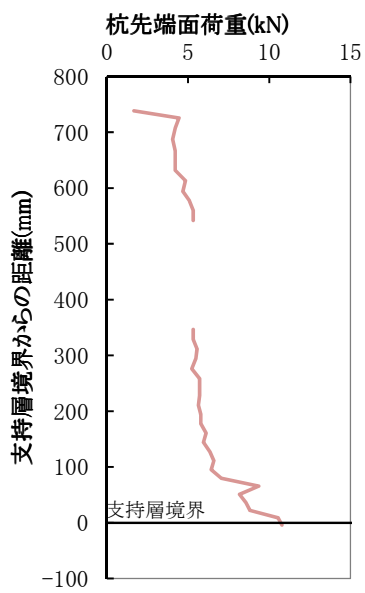
大型加圧土槽を用いた模型実験のうち，中間層地盤での施工実験における杭先端面荷重の推移を付図 1.1～1.8，杭先端面荷重と羽根近傍トルクとの関係を付図 1.9 に掲載する．



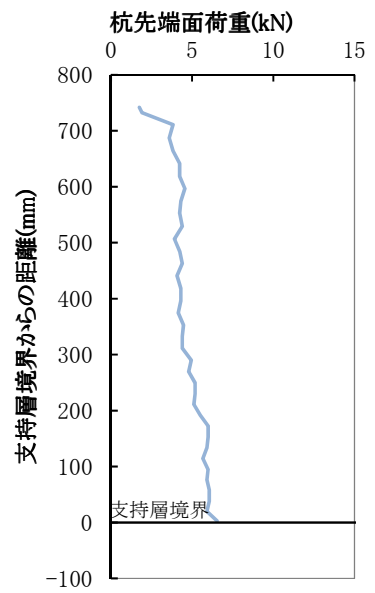
付図 1.1 深度と杭先端面荷重の関係



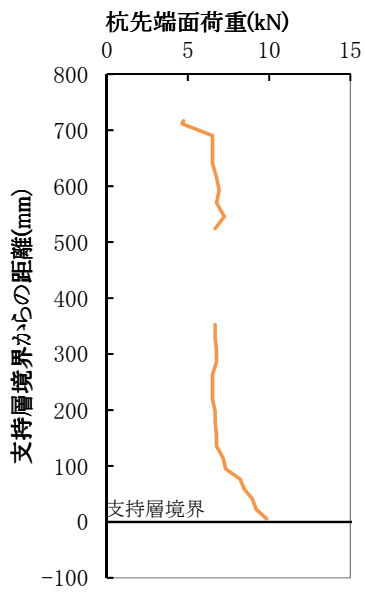
付図 1.2 LD1L



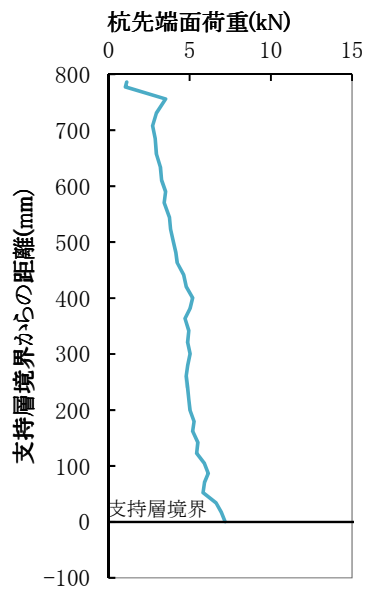
付図 1.3 LD2L



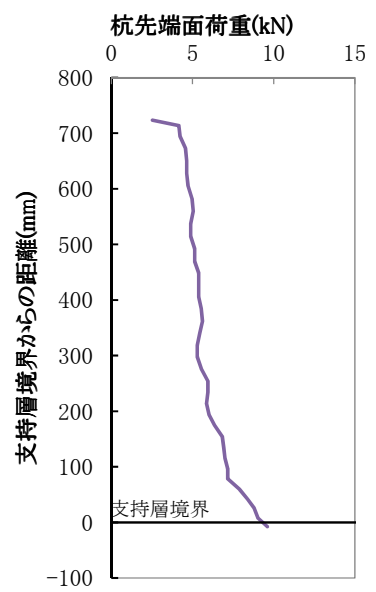
付図 1.4 LD2L'



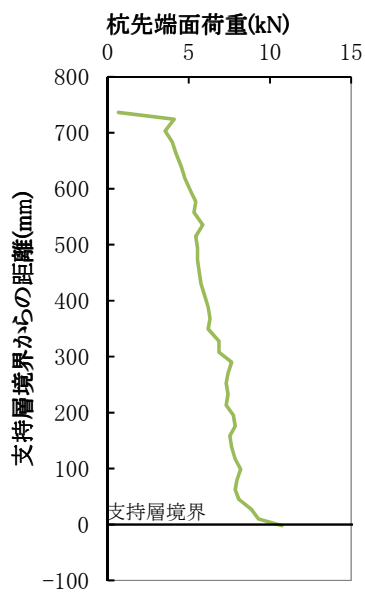
付図 1.5 LD4L



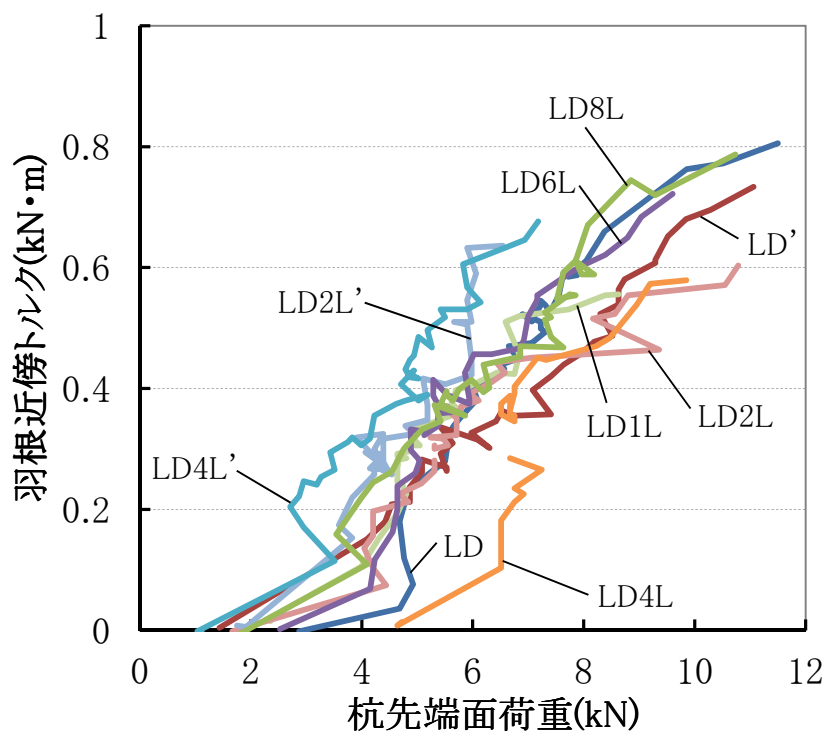
付図 1.6 LD4L'



付図 1.7 LD6L



付図 1.8 LD8L

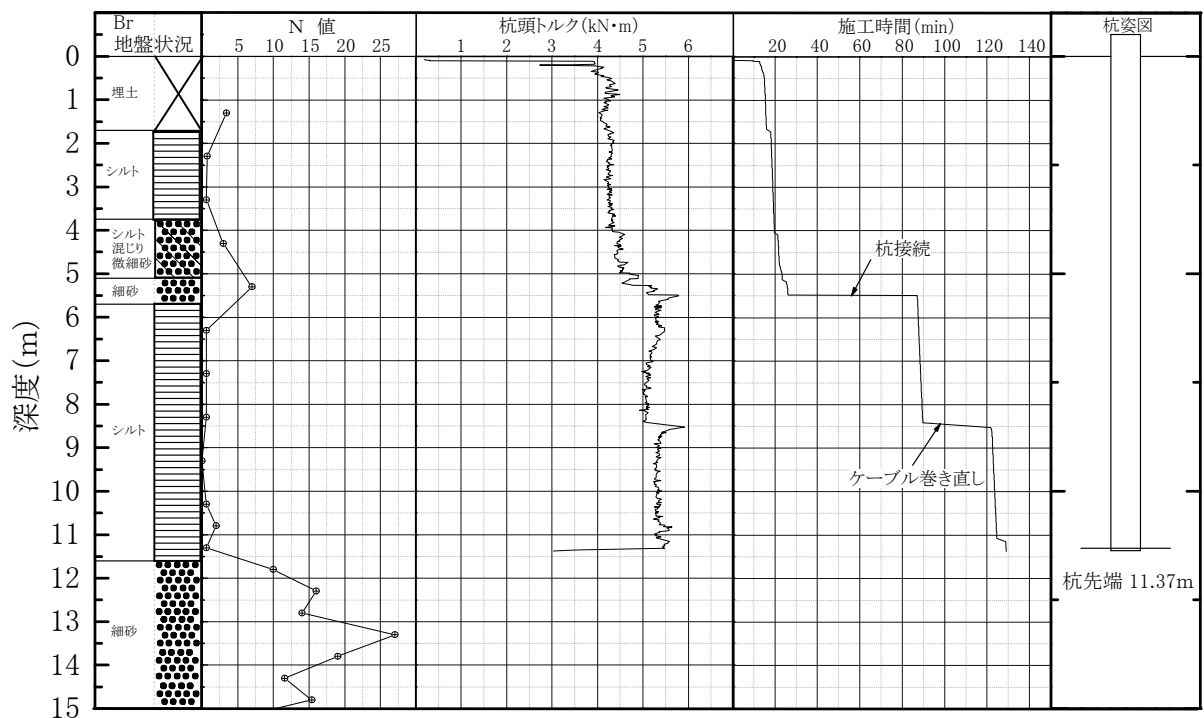


付図 1.9 杭先端面荷重と羽根近傍トルクの関係

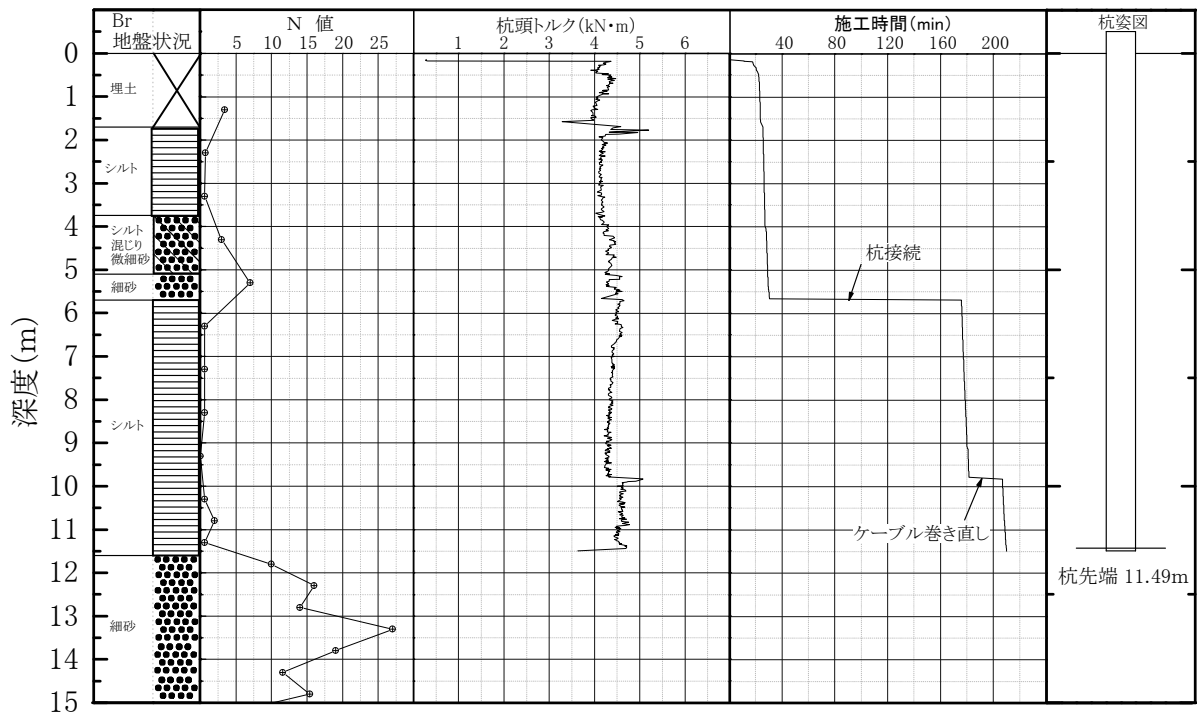
付章 2 原位置載荷試験杭の施工データ (西遊馬)

第 5 章で用いたさいたま市西区西遊馬における原位置載荷試験杭の施工データを付図 2.1~2.5 に掲載する。

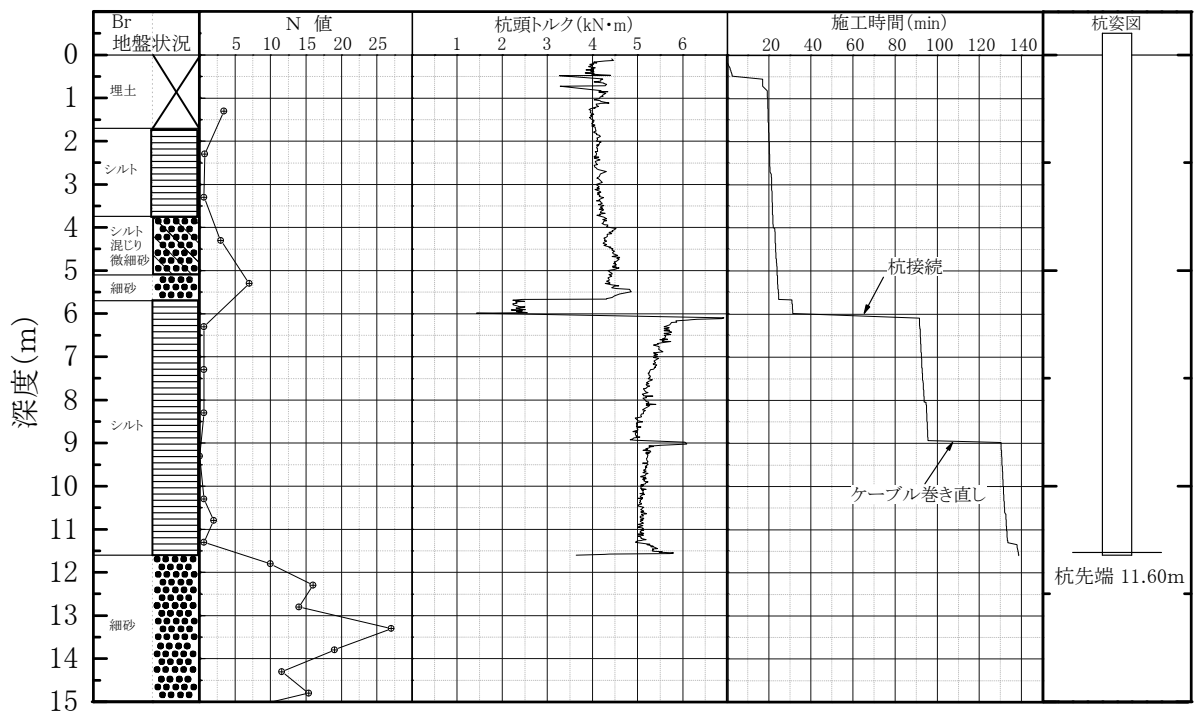
なお，施工中の杭体軸力を計測するために，ひずみゲージからのケーブルを最初は杭体に反時計回りで巻き付けた状態で施工を開始し，ケーブルがほどけきった後は，ケーブルを時計回りに巻き付けながら施工している．施工記録図中のケーブル巻き直しとは，時計回りにケーブルの巻き付けが終了した段階で施工機械と杭を一旦切り離して，ケーブルを再度反時計回りに杭体に巻き直した作業のことである．



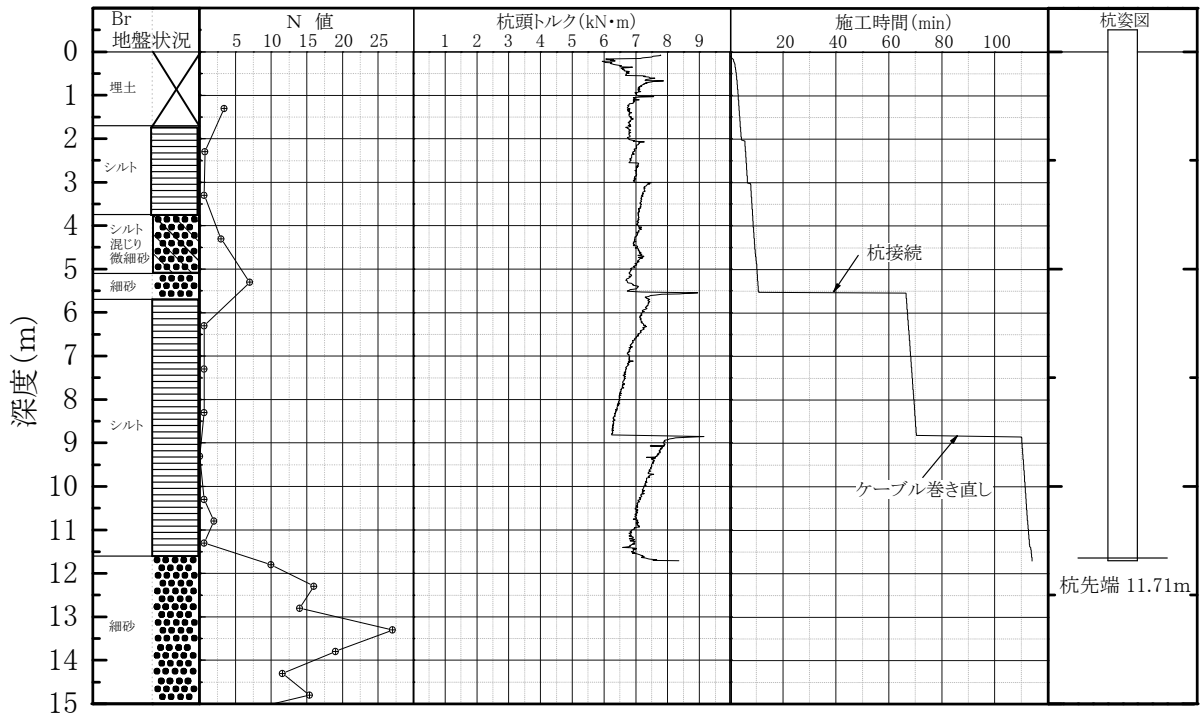
付図 2.1 施工記録図 (+1.0dw)



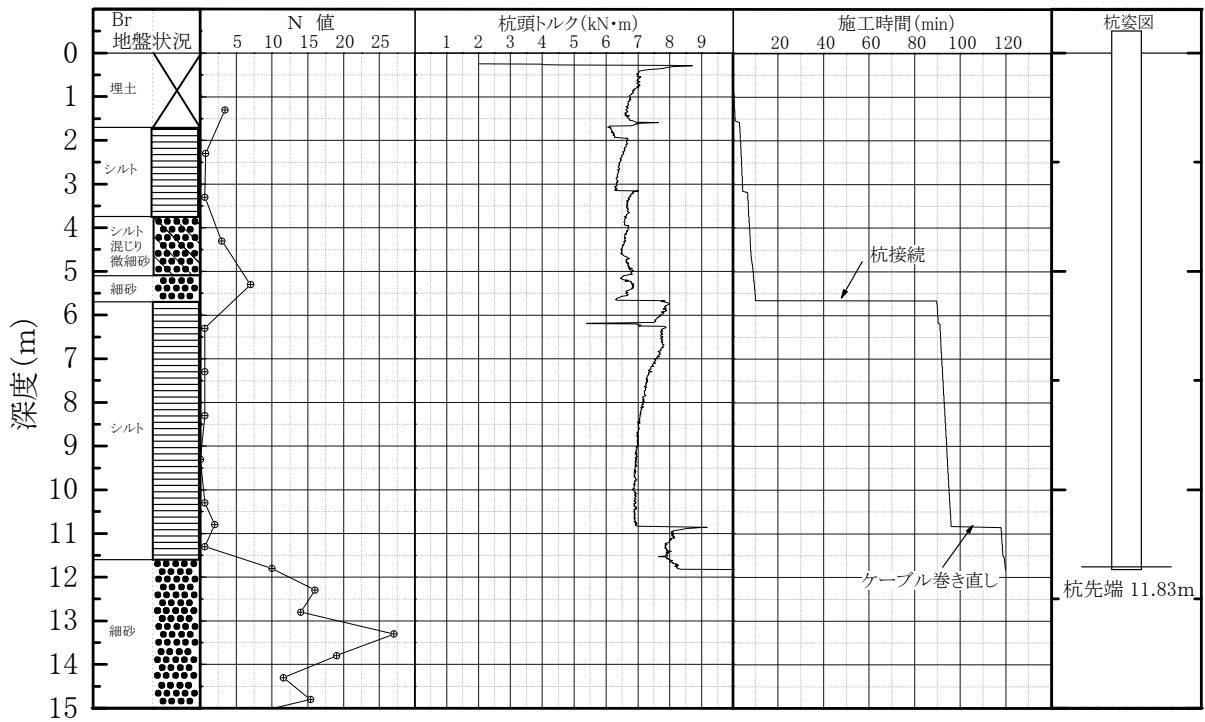
付図 2.2 施工記録図 (+0.5dw)



付図 2.3 施工記録図 (+0.0dw)



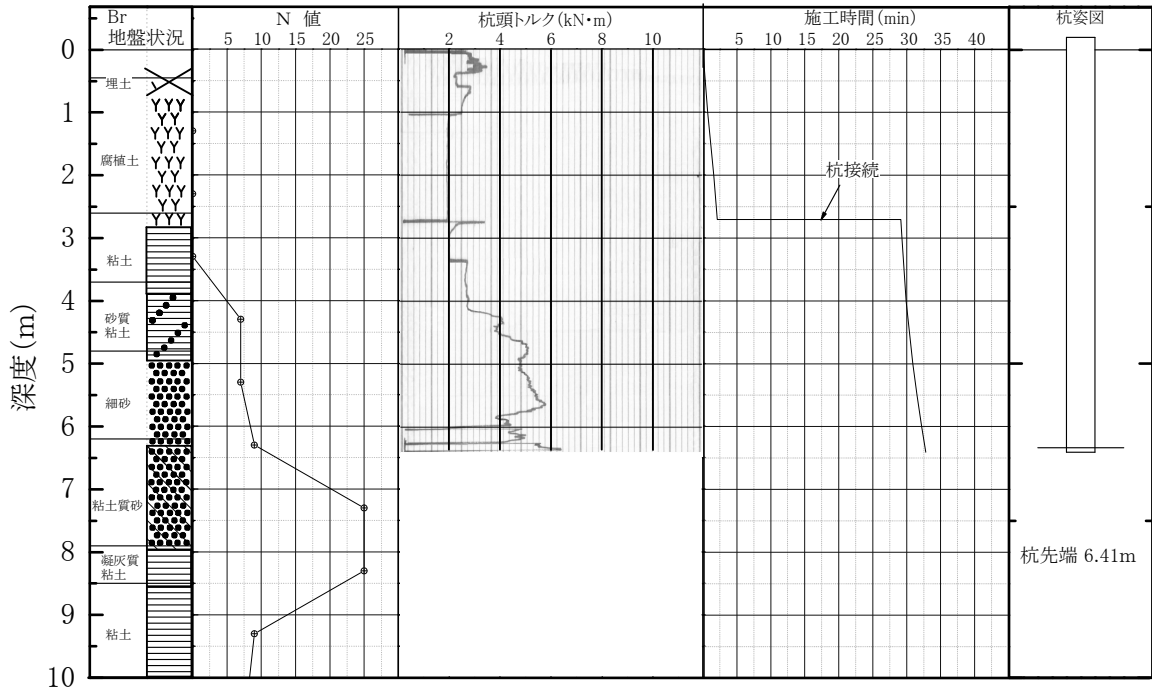
付図 2.4 施工記録図 (-0.5dw)



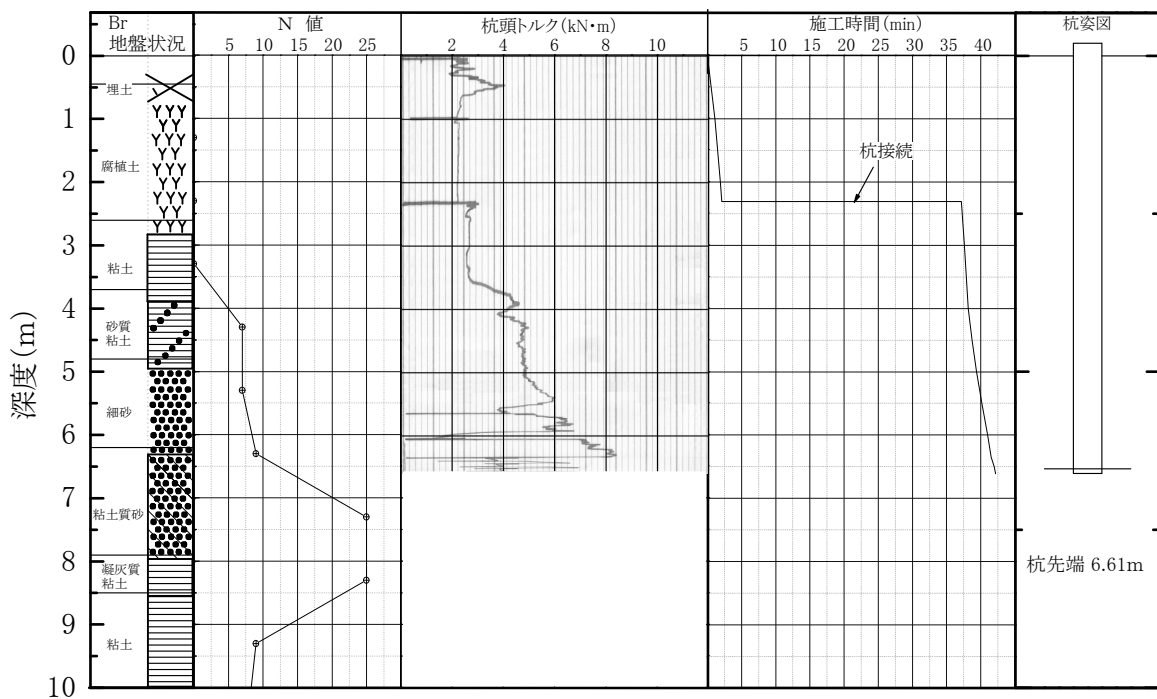
付図 2.5 施工記録図 (-1.0dw)

付章 3 原位置載荷試験杭の施工データ (伊奈町)

第 6 章で用いた埼玉県北足立郡伊奈町における原位置載荷試験杭の施工データを付図 3.1~3.2 に掲載する。



付図 3.1 施工記録図 (A 杭)



付図 3.2 施工記録図 (B 杭)

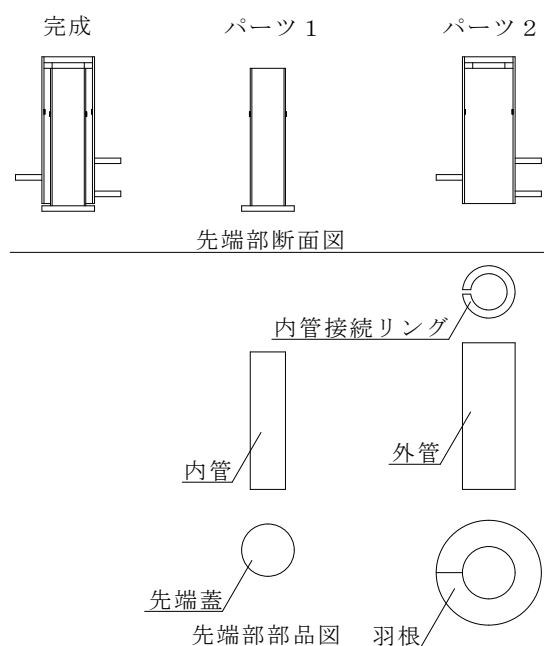
付章 4 原位置載荷試験に用いる杭体の製作

第 4 章ならびに第 5 章の原位置載荷試験に用いた試験杭の製作について記す。

杭先端の二重管部分については、溶接により部品を組み立てる。この際ひずみゲージに及ぼす溶接熱の影響を避けるために、部品を組み上げた後にゲージを貼付している。ただし、組立後では貼り付けできない位置にあるゲージについては、ゲージ貼付後に溶接を行うため、ゲージの位置を可能な限り溶接部から離れた位置としている。

二重管部の組立は、付図 4.1 に示すパーツ 1（内管と先端蓋）とパーツ 2（外管と羽根および内管接続リング）を組み立てた後、内管の外側と外管の内側にひずみゲージを貼付する。次にパーツ 1 をパーツ 2 の内部に挿入し、内管接続リングの内側とパーツ 1 の頭を溶接する。

内管、外管共にひずみゲージ貼付時にゲージの上に VM テープを貼り付け、その上にエポキシパテにて付写真 4.1 に示すように養生している。これは、パーツ 1 とパーツ 2 接続時に溶接の火花がゲージに当たり損傷するのを防ぐためである。なお、ひずみゲージを貼付した部材



付写真 4.1 外管内側ゲージ養生状況

付図 4.1 先端二重管部品図・断面図

を溶接する際は、ゲージ貼付位置の鋼管外側にタオルを巻き、タオルに散水しながら溶接することでゲージが加熱されるのを防いでいる。

先端部以外の杭中間に取り付けるひずみゲージは、鋼管内側にゲージを貼付し、VMテープを貼り、その上から溶接の火花対策でセラミック繊維のシートを貼り付けている。ただし、第4章で行った試験では、杭立て込み中にひずみゲージのケーブル引き上げに失敗し、断線したため急遽鋼管外側にゲージを張り直している。この時は付写真 4.2～4.3 に示すように、VMテープの上にエポキシパテで養生することにより、施工時の土との摩擦による鋼管外側のゲージの損傷を防止している。この場合のひずみゲージからのケーブルは、ゲージ貼付位置近傍に穴を空けて（付写真 4.2 参照）鋼管内部へと引き込み、その後穴部分までエポキシパテで養生している（付写真 4.3 参照）。



付写真 4.2 ゲージ貼付状況



付写真 4.3 ゲージ養生状況

謝辞

本論文の作成に際して、室蘭工業大学教授 土屋勉博士には数多くの指導、助言を頂きました。こうした土屋教授の多大な協力がなければこの論文はこれほどしっかりしたものとはならなかったと思います。ありがとうございました。

本論文では模型実験の結果に基づいて論じていますが、この模型実験については、実験を指揮してくださった島田技官や実験に携わった歴代の学部および大学院の学生達の努力と英知の結晶と云えます。彼らの協力がなければ、この論文は作成できなかつたでしょう。ありがとうございました。

更に、原位置載荷試験による確認を行いました。この際には千代田工営株式会社の全面協力の下、様々な社員の方が協力してくれました。この協力がなければこの論文で得た知見の現地盤での検証が行えませんでした。ありがとうございました。

また、既往の載荷試験結果での適用性を確認するために、過去の載荷試験結果の使用を許可して頂いた旭化成建材株式会社 EAZET 営業部の協力にも感謝しております。

最後に、このような機会を与えてくださり、様々な場面で惜しみなく協力をして頂いた千代田工営株式会社 吉田勝之会長および吉田耕之社長には大変感謝しております。誠にありがとうございました。

平成 24 年 12 月

池田篤則

参考文献

- 1) 土屋勉:回転貫入杭工法の動向と今後の課題,基礎工,Vol.34,No.11, pp.2-6, 2006.11.
- 2) 永田誠,佐伯英一郎,平田尚:模型試験による回転貫入鋼管杭の研究(その1:貫入特性),(その2:貫入機構),(その3:支持力特性),第38回地盤工学研究発表会, pp.1495-1500, 2003.7
- 3) 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.
- 4) 国府田誠,佐藤秀人,刑部徹,国司基,永田誠,平田尚,田村昌仁:螺旋羽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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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
- 8) 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
- 9) 高坂舞:原位置載荷試験に基づく回転貫入杭の鉛直支持力特性,室蘭工業大学卒業論文, 2007.2
- 10) 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.
- 11) 島田正夫・土屋勉・菊地ゆかり:ノズル・ネットを用いた模型砂地盤の作製方法,日本建築学会北海道支部研究報告集, No.75, pp.21-24, 2002.6.

- 12) Meyerhof, G.G. : Discussion on soil properties and their measurement, Proc. of 4th ICSMFE, Vol.3, p.110, 1957.
- 13) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，2001.10.
- 14) 若松宏輔，土屋勉，島田正夫，佐藤光，藤川雄太：回転貫入杭の打ち止め方式と支持力に関する模型実験，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.81，pp.43-46,2008.6.
- 15) 旭化成建材株式会社・千代田工営株式会社：スクリーパイルE A Z E T工法（小口径・回転杭工法），建設技術審査証明事業（一般土木工法），2007.3

学位論文に関連する発表論文リスト

■査読付き論文

- 1) 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.
- 2) 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，Vol.75，No.651，pp.951-956，2010.5.

■その他の論文

- 1) 島田正夫，土屋勉，永井宏，石川隆太，池田篤則：施工中における回転貫入杭近傍の地中応力特性，第46回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1225-1226，2011.8.
- 2) 大澤隆幸，土屋勉，永井宏，島田正夫，池田篤則：薄層地盤に施工された回転貫入杭の支持力と地中応力の検討，第46回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1227-1228，2011.8.
- 3) 池田篤則，土屋勉，永井宏：羽根面と杭先端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，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.84，pp.187-190，2011.7.
- 4) 石川隆太，土屋勉，佐藤光，池田篤則，齋藤崇人：薄層地盤における模型杭の鉛直支持力特性（その1 施工時および載荷時の地中応力），第45回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1211-1212，2010.8.
- 5) 池田篤則，土屋勉，佐藤光，島田正夫，鈴木真純：薄層地盤における模型杭の鉛直支持力特性（その2 鉛直支持力の算定法），第45回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1213-1214，2010.8.
- 6) 佐藤光，土屋勉，池田篤則，島田正夫，鈴木真純：薄層地盤における杭の鉛直支持力算定法の検討，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.83，pp.143-146，2010.7.

- 7) 佐藤光，土屋勉，若松宏輔，池田篤則，石川隆太：薄層地盤における模型杭の施工および鉛直載荷実験（その1 杭工法の比較），第44回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1147-1148，2009.8.
- 8) 池田篤則，土屋勉，若松宏輔，島田正夫，内海真理子：薄層地盤における模型杭の施工および鉛直載荷実験（その2 薄層厚の影響），第44回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1149-1150，2009.8.
- 9) 佐藤光，土屋勉，島田正夫，池田篤則，若松宏輔，内海真理子：回転貫入杭の施工時応力および鉛直支持力に及ぼす薄層厚の影響，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.82，pp.189-192，2009.7.
- 10) 石川隆太，土屋勉，島田正夫，池田篤則，若松宏輔，佐藤光：薄層地盤に施工される各種杭工法の支持力特性に関する模型実験，日本建築学会北海道支部研究報告集，No.82，pp.185-188，2009.7.
- 11) 池田篤則，土屋勉，若松宏輔：回転貫入杭の支持層への根入れ効果に関する原位置載荷試験，第43回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1277-1278，2008.6.