

奥村・丸五式引抜き抵抗杭工法 (OMR/B-2) の開発

— 実大引抜き載荷実験結果 —

Development of the Okumura-Marugo Pull-Out Resistance Pile Method (OMR/B-2)

- Results of Full-scale Pull-out Loading Tests -

林 芳尚* 武田彰文** 小谷俊二** 舟木秀尊***

要 旨

当社と丸五基礎工業株式会社が共同開発した「奥村・丸五バケット式拡底杭工法 (OMR/B)」を用いた実大杭の引抜き載荷実験を実施し、拡底部側面の傾斜による引抜き抵抗力の増加効果を確認した。

その結果をもとに、新たに「奥村・丸五式引抜き抵抗杭工法 (OMR/B-2)」として(一財)ベターリビングの評定を取得し、従来よりも大きな引抜き抵抗力を持つ杭の設計が可能となった。

キーワード：場所打ち杭、拡底部、引抜き抵抗、載荷実験、傾斜角

1. まえがき

1985年に当社と丸五基礎工業株式会社が共同開発した「奥村・丸五バケット式拡底杭工法 (OMR/B)」は、拡底径の拡大や使用するコンクリートの強度を高めるなどの改良を継続的に行いながら、2022年度までに約3,000件(杭本数10万本以上)の実績を積み重ねてきた。また、2010年には業界で初めてアースドリル工法における拡底率(有効底面積÷軸部面積)の最大値4.9(直径比約2.2倍)を実現するなど、場所打ちコンクリート拡底杭工法として高い評価と信頼を得てきた。

しかし、拡底部に大きな引抜き抵抗力を有するものの、従来のOMR/B工法で引抜き方向の抵抗力として考慮できるのは、図-1に示す杭軸部の周面抵抗力および杭自重のみに限定されていたため、設計上必要な引抜き抵抗力を確保するためには、杭の軸径を大きくしたり、杭長を長くしたりする必要があった。そこで両社は、拡底部側面の傾斜による引抜き抵抗力の増加効果を実大の杭の引抜き載荷実験により確認し、新たに「奥村・丸五式引抜き抵抗杭工法 (OMR/B-2)」(以下、「本工法」として(一財)ベターリビングの評定を取得した。

本報では、本工法の概要および引抜き載荷実験の結果概要を報告する。

2. 本工法の概要

2.1 杭の仕様

本工法における杭の仕様を以下に示す。また、杭の各部名称を図-2に示す。

- ・杭径：軸部径 700~4,500mm、拡底径 900~4,700mm
- ・コンクリートの設計基準強度 F_c ：24~80N/mm²
JIS 適合品の構造体強度補正值 ($_{28}S_{91}$)：0N/mm²以上とする(大臣認定コンクリートの場合は指定された値による)
- ・傾斜角 θ ： $6^\circ \leq \theta \leq 12^\circ$
- ・最大掘削深さ：90m
- ・支持層地盤：砂質地盤、粘土質地盤、互層地盤

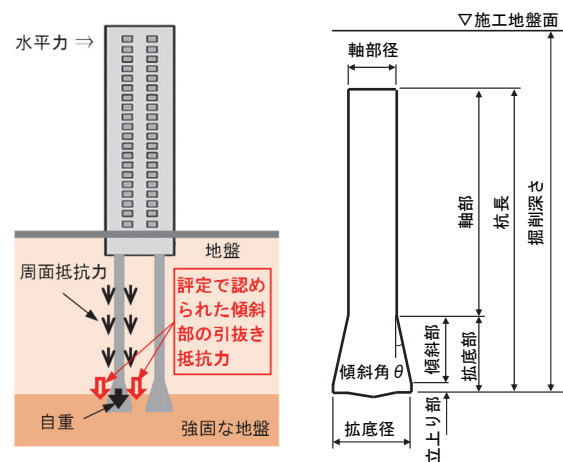


図-1 開発技術のイメージ

図-2 杭の各部名称

2.2 本工法の特長

本工法の特長は、①これまで考慮されなかった拡底部側面の傾斜による引抜き抵抗力を評価できる点、②従来工法よりも杭の軸径部をスリム化したり、杭長を短縮することが可能となり、掘削土量や打設するコンクリート量、施工時に使用する安定液量などを削減できるため、コストや地球環境への負荷低減が期待できる点、③適用地盤に互層地盤を含むので強固な地盤に拡底部を全て埋め込まなくても引抜き抵抗力を評価できる点、である。

本工法による設計上の引抜き抵抗力（短期）の一例を図-3に示す。本例では、N値60の砂質土に拡底部を

全て定着した場合は OMR/B 工法より約 3 倍の引抜き抵抗力を、拡底部の 40%程度を定着した場合でも約 2 倍の引抜き抵抗力を有している。

3. 引抜き载荷実験の概要

3.1 実験要因

実験ケース一覧を表-1に、地盤と杭の関係を図-4に示す。本実験は、傾斜部の地盤種別（砂質地盤、粘土質地盤、互層地盤）および傾斜角（5.8°、12°）をパラメータに計6体の杭で実施した。

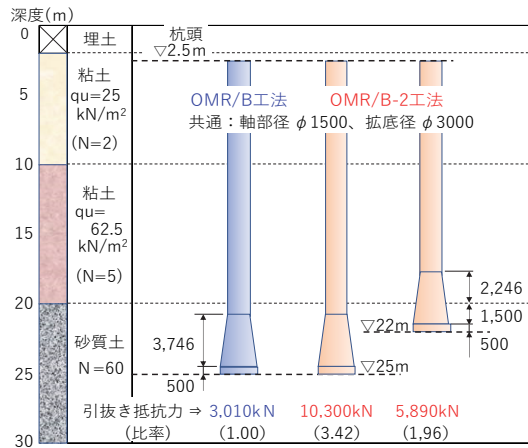


図-3 試設計例

表-1 実験ケース一覧

杭 No.	定着地盤	傾斜部平均 N 値	傾斜部平均 q_u^* (kN/m ²)	軸径 (m)	拡底径 (m)	傾斜角 (°)	杭長 (m)	杭頭深度 (GL-m)	先端深度 (GL-m)
1	砂質	34	—	1.10	1.70	5.8	15.53	0.50	16.03
2	砂質	43	—	1.10	2.50	12	15.99	0.50	16.49
3	粘土質	—	268	1.10	1.70	5.8	17.60	17.60	35.20
4	粘土質	—	422	1.10	2.50	12	17.10	17.90	35.00
5	互層	27	136	1.10	1.70	5.8	22.80	0.55	23.35
6	互層	42	213	1.10	2.50	12	22.30	0.50	22.80

※ q_u : 一軸圧縮強度

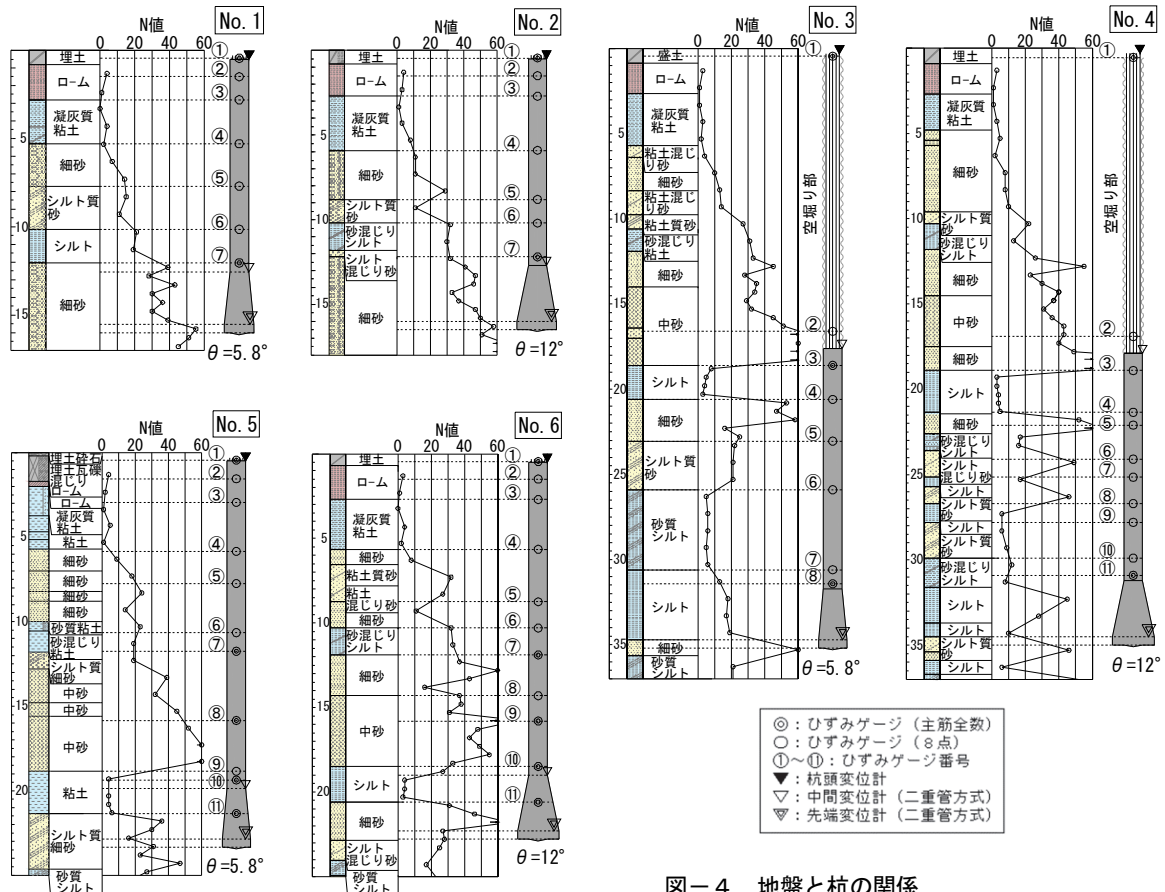


図-4 地盤と杭の関係

表-2 に鉄筋およびコンクリートの仕様を示す。主筋は全ネジ形状を有する PC 鋼棒 (D36) であり、載荷荷重に応じて 16~32 本を配置した。コンクリートの設計基準強度は 36N/mm² であり、実験当日の圧縮強度は 51~60N/mm² であった。

表-2 鉄筋およびコンクリートの仕様

杭 No.	鉄筋		コンクリート	
	主筋 (ネジボ ンC種1号)	フープ筋 (SD295)	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度※ (N/mm ²)
1	16-D36	D13@300	57.3	3.84
2	28-D36		59.8	3.94
3	20-D36		50.8	3.55
4	32-D36		57.7	3.85
5	24-D36		51.2	3.57
6	32-D36		54.6	3.72

※ 文献¹⁾の方法により圧縮強度から算出

3.2 実験方法

本実験は、地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説 第一回改訂版 (2002 年)」に基づき実施した。写真-1 に載荷装置の全景を示す。載荷装置は、油圧ジャッキにより杭に引抜き力を作用させ、鋼製桁を介して反力杭に抵抗させる機構である。

載荷方法は、一方向多サイクル方式であり、杭 No.1 を例として載荷サイクルを図-5 に示す。載荷は、杭周囲の引抜き抵抗力が極限状態となった時の最大荷重 (明確に荷重のピークが現れない場合は、杭先端変位が拮底径の 10% に達した時の荷重) で定義される第 2 限界抵抗力までを目標に行った。



写真-1 載荷装置の全景

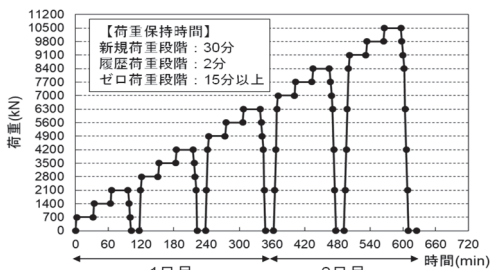


図-5 載荷サイクル (杭 No.1)

3.3 引抜き方向の軸力算定方法

各ゲージ位置の引抜き方向の軸力 (引抜き力) P は、文献^{1)~4)}を参考に式(1)で算出した。

$$P = \sigma_t \cdot A_c + E_s \cdot A_s \cdot \varepsilon \quad (1)$$

ここに、

σ_t : コンクリート引張応力度

A_c : コンクリート断面積

E_s : PC 鋼棒のヤング係数

A_s : PC 鋼棒の断面積

ε : ひずみ量

式中のコンクリートの引張応力度 σ_t は、発生するひずみの大きさに応じて以下のように算出した。

$$\sigma_t = \frac{f_t}{\varepsilon_t} \cdot \varepsilon \quad (0 < \varepsilon < \varepsilon_t)$$

$$\sigma_t = f_t \quad (\varepsilon_t \leq \varepsilon \leq \varepsilon_{tu})$$

$$\sigma_t = f_t \cdot \left(\frac{\varepsilon_{tu}}{\varepsilon} \right)^c \quad (\varepsilon_{tu} < \varepsilon)$$

ここに、

f_t : 割裂引張強度 $f_t = 0.291 \cdot \sigma_B^{0.637}$

σ_B : コンクリート圧縮強度 (試験当日の供試体の圧縮試験結果を用いる)

ε_t : コンクリート引張ひずみ ($\varepsilon_t = \varepsilon_{tu} / 2 = 100\mu$)

ε_{tu} : コンクリート引張ひずみ ($\varepsilon_{tu} = 200\mu$)

c : 付着性状を表す係数 $c = 0.9$

また、ひずみゲージ位置間の軸力差 (ある位置のひずみゲージ値から算出した P からその下位置の P を引いた値で、杭最下端の P はゼロとする) をその位置間の周面抵抗力と定義する。なお、この軸力差は、杭周囲に生じる抵抗力と杭自重分によるが、本報では自重分も含めた軸力差を便宜上その区間の周面抵抗力とする。

3.4 実験結果

a. 最大引抜き荷重

表-3 に各試験体の最大引抜き荷重を示す。地盤種類の違いに関係なく、拮底部の傾斜角の増加に伴い、最大引抜き荷重が大きくなることを確認した。なお、一例として図-6 に杭 No.1 および No.2 の杭頭荷重-杭頭変位関係を示す。

表-3 最大引抜き荷重

杭 No.	傾斜角 (°)	最大引抜き荷重(kN)	杭 No.	傾斜角 (°)	最大引抜き荷重(kN)
1	5.8	10,630	2	12	15,916
3		12,126	4		21,110
5		13,069	6		17,782

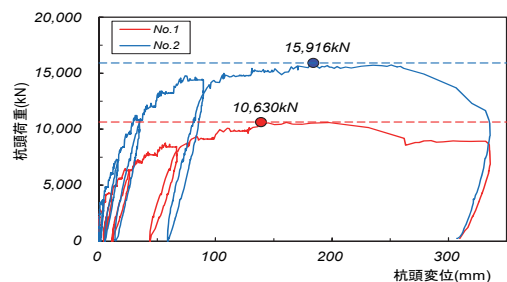


図-6 杭頭荷重-杭頭変位関係

b. 杭頭荷重－杭先端変位比関係

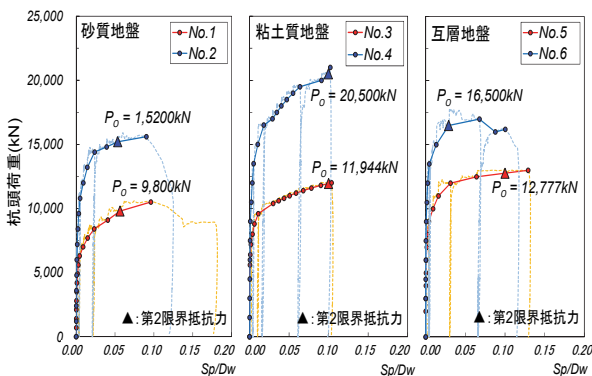
図－7 に杭頭荷重－杭先端変位比 ($Sp/Dw : Sp$; 杭先端変位, Dw ; 拡底径) 関係を示す。

杭 No.1 および杭 No.2 は、荷重保持中に杭先端変位量が拡底径の 10% を超えて荷重を保持できなくなったため、30 分荷重を保持した前段階の杭頭荷重である 9,800kN および 15,200kN を第 2 限界抵抗力 (以下、第 2 限界抵抗力時の杭頭荷重: P_o) とした。

杭 No.3 は、荷重保持中に杭先端変位量が拡底径の 10% を超えたが、そのまま 30 分荷重を保持したため、杭先端変位量が拡底径の 10% に達した時の杭頭荷重である 11,944kN を P_o とした。杭 No.4 は、荷重保持中に杭先端変位量が拡底径の 10% を超えて荷重を保持できなくなったため、30 分荷重を保持した前段階の杭頭荷重である 20,500kN を P_o とした。

杭 No.5 は、荷重保持中に杭先端変位量が拡底径の 10% を超えたが、そのまま 30 分荷重を保持したため、杭先端変位量が拡底径の 10% に達した時の杭頭荷重である 12,777kN を P_o とした。杭 No.6 は、荷重保持中に杭先端変位量が拡底径の 10% を超えて荷重を保持できなくなったため、30 分荷重を保持した前段階の杭頭荷重である 16,500kN を P_o とした。

図－7 によれば、全ての杭において杭頭荷重は Sp/Dw が小さい領域で急激に増加し、その後、杭先端変位比が 10% を超えるまで緩やかな増加傾向を示している。また、傾斜角が大きいほど P_o が増加することを確認した。



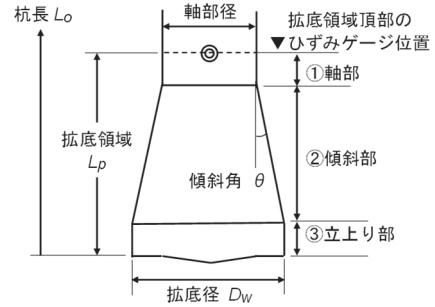
図－7 杭頭荷重－杭先端変位比関係

c. 杭頭荷重に対する拡底部直上軸力の割合

以後の載荷試験結果を整理するにあたり図－8 に示す①+②+③を拡底領域と定義する。

P_o および図－8 に示す拡底領域頂部のひずみゲージの値を用いて式(1)から算出した軸力 (以下、拡底領域頂部軸力: P_p) をまとめたものを表－4 に示す。また、表－4 に杭長 (L_o) に対する拡底領域の長さ (L_p) の割合を併記する。

P_o に対する P_p の割合は、 L_o に対する L_p に比べて約 2.2 ～3.0 倍の値となっており、拡底領域が軸部に比べて引



図－8 拡底領域

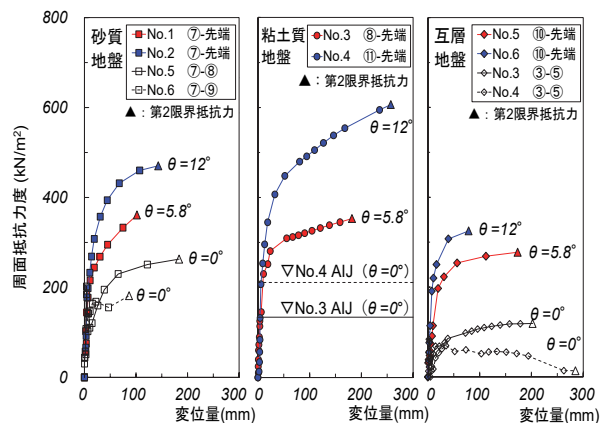
表－4 杭頭荷重および拡底領域頂部軸力

杭 No.	P_o (kN)	P_p (kN)	P_p/P_o (%)	L_p/L_o (%)
1	9,800	6,344	64.7	25.6
2	15,200	11,617	76.4	26.8
3	11,944	5,922	49.6	21.5
4	20,500	14,553	71.0	23.9
5	12,777	4,877	38.2	17.5
6	16,500	8,039	48.7	19.3

抜き抵抗力の負担割合が大きいことがわかる。さらに、 P_o に対する P_p の割合は、砂質地盤で約 65%～76%、粘土質地盤で約 50%～71%、互層地盤で約 38%～49% である。すなわち、拡底領域で全体の約 1/3～2/3 程度の引抜き抵抗力を負担しており、傾斜角が大きいほど、負担割合が大きいことがわかる。

d. 傾斜角の違いによる周面抵抗力度の比較

第 2 限界抵抗力時における傾斜角の違いによる拡底領域の周面抵抗力度 (P_p を拡底領域の側面積で除した値) と変位量の関係を図－9 に示す。なお、砂質地盤における 0° の周面抵抗力度は、図－4 に示す杭 No.1 および杭 No.2 の拡底領域と同深度における杭 No.5 および杭 No.6 の軸部の周面抵抗力度を、互層地盤における 0° の周面抵抗力度は、杭 No.5 および杭 No.6 の拡底領域と同深度における杭 No.3 および杭 No.4 の軸部の周面抵抗力度を用いた。一方、粘土質地盤では同深度に位置する直杭のデータがないため、建築基礎構造設計指針⁵⁾の式を用いて算出し図中に「No.3 AIJ」、「No.4 AIJ」として記載した。



図－9 傾斜角の違いによる周面抵抗力度の比較

図-9によれば、第2限界抵抗力時における拡底領域の周面抵抗力度は、地盤種別の違いに関係なく、傾斜角の増加に伴い大きくなるのがわかる。

例えば砂質地盤では、傾斜角 5.8° は 361kN/m²、傾斜角 12.0° は 470kN/m² で、対応する直杭の周面抵抗力度 (182kN/m²、273kN/m²) の平均値 228kN/m² と比較すれば、傾斜角 5.8° は約 1.6 倍、傾斜角 12.0° は約 2.1 倍の値を示している。また、傾斜角 12.0° は傾斜角 5.8° と比較して約 1.3 倍の値を示している。

粘土質地盤および互層地盤においても同様の傾向が見られた。

e. 傾斜部の支持力係数

(a) 傾斜部周面抵抗力度

傾斜部の引抜き方向の周面抵抗力は、 P_p から、①軸部および③立上り部の周面抵抗力を差し引いて求め、それを傾斜部の側面積で除して傾斜部周面抵抗力度を求めた(後述の「支持力係数」とともに表-5に示す)。

図-10 および図-11 に傾斜部周面抵抗力度と傾斜部区間の平均 N 値 (以下、 \bar{N}_s) および平均一軸圧縮強度 (以下、 \bar{q}_u) の関係を示す。同図には、比較のため同種の実験結果が掲載されている文献^{6)~12)}の値を併記する。

砂質地盤では、傾斜角に関係なく \bar{N}_s が増加すると傾斜部周面抵抗力度が大きくなる傾向がみられる。また粘土質地盤では、傾斜角 12°では一部ばらつきがみられるものの、 \bar{q}_u 値が増加すると同様に傾斜部周面抵抗力度が大きくなり、傾斜角が 12°未満では比較的緩やかに増加する傾向がみられる。ただし、直杭ではその傾向はみられない。

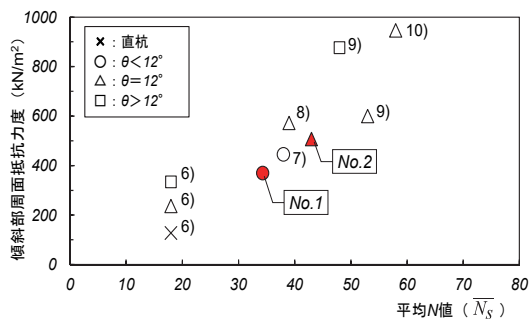


図-10 傾斜部周面抵抗力度—平均 N 値の関係

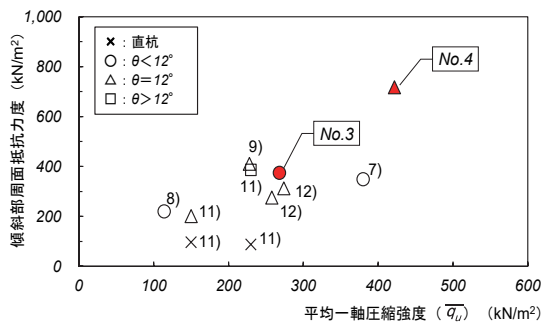


図-11 傾斜部周面抵抗力度—平均一軸圧縮強度の関係

(b) 支持力係数

傾斜部の支持力係数 (砂質地盤: λ 、粘土質地盤: μ) は、前述した傾斜部周面抵抗力度を傾斜部区間の \bar{N}_s および \bar{q}_u で除して求める。表-5に支持力係数を図-12および図-13に傾斜角と支持力係数の関係を示す。

ここで、文献¹³⁾では λ および μ に関する評価式として式(2)および式(3)を提案している。同図に式(2)、式(3)および文献^{6)~12)}の実験結果を併記する。ただし、比較のため文献¹³⁾に示される評価式中の低減係数 ξ を 1.0 としている。

$$\lambda = 4/9 \cdot \theta + 8/3 \quad (3^\circ \leq \theta \leq 12^\circ) \quad (2)$$

$$\mu = 1/120 \cdot \theta + 2/5 \quad (3^\circ \leq \theta \leq 12^\circ) \quad (3)$$

砂質地盤で傾斜角 12° の杭 No.2 の支持力係数 λ は、傾斜角 5.8° の杭 No.1 の値の 1.1 倍程度、粘土質地盤で傾斜角 12° の杭 No.4 の支持力係数 μ は、傾斜角 5.8° の杭 No.3 の値の 1.2 倍程度となり、定着地盤の種別にかかわらず傾斜角が大きくなると支持力係数は増加することが認められる。また、砂質地盤の杭 No.1 および杭 No.2、粘土質地盤の杭 No.3 および杭 No.4 において、式(2)および式(3)により求めた値を十分に上回ることが確認できる。

表-5 傾斜部の周面抵抗力度および支持力係数

杭 No.	定着地盤	傾斜角 θ (°)	傾斜部周面抵抗力度 (kN/m ²)	\bar{N}_s	\bar{q}_u (kN/m ²)	λ	μ
1	砂質	5.8	369	34	—	10.8	—
2	砂質	12	507	43	—	11.8	—
3	粘土質	5.8	384	—	268	—	1.43
4	粘土質	12	713	—	422	—	1.69

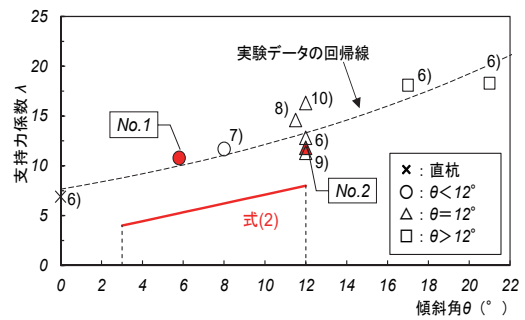


図-12 砂質地盤：傾斜角—支持力係数 λ の関係

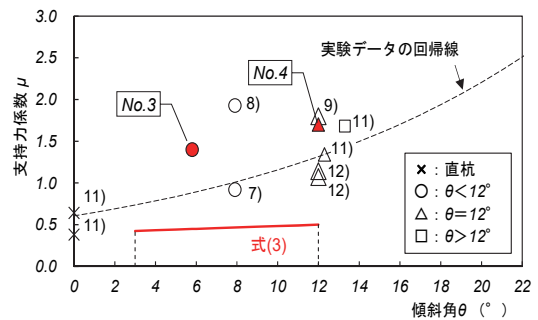


図-13 粘土質地盤：傾斜角—支持力係数 μ の関係

f. 変断面位置の軸力評価

先に示した式(1)による軸力の算出方法は、直杭の実験結果から導かれたものである。本実験では、杭 No.5 および No.6 の拡底部内にひずみゲージを設置して、変断面位置における式(1)の適用性を確認した。

図-14 に各载荷サイクルにおける深度方向のひずみおよび軸力分布を示す。どちらの杭においても深くなるほどひずみは小さくなった。一方、第2限界抵抗力付近における軸力分布を見ると、変断面位置である11断面の軸力は直上位置の10断面の軸力より大きい値となった(図中○部)。本試験は引抜き方向の载荷試験であり、拡底領域において深さ方向の軸力が逆転することは考えにくい。すなわち、変断面位置においては、ひずみから軸力を算定する時に軸部で用いた式(1)を適用するのは難しく、別途検討する必要があると考えられる。

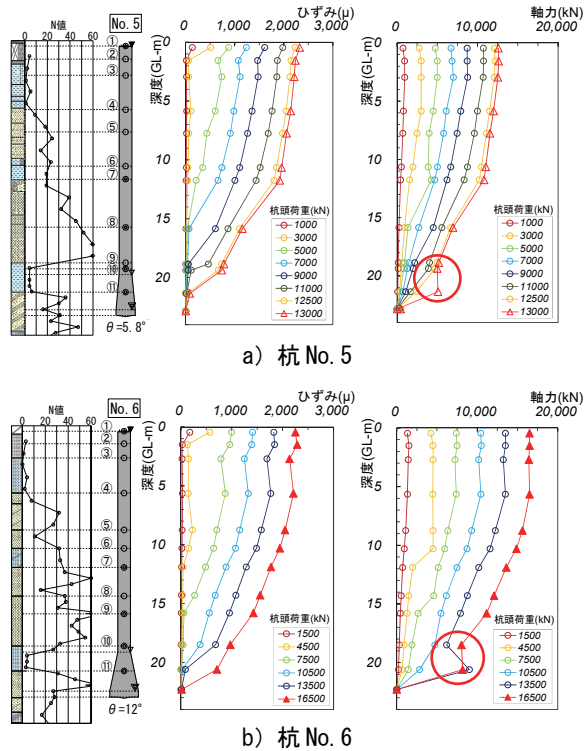


図-14 深度方向のひずみおよび軸力分布

4. まとめ

実大の場所打ち拡底杭を用いて引抜き载荷実験を行い、拡底部の引抜き抵抗性能を確認した。主な結論を以下に示す。

- i. 地盤種別の違いに関係なく、傾斜角の増加に伴い最大引抜き荷重、第2限界抵抗力、拡底領域の周面抵抗力度が大きくなる
- ii. 実験結果から算出した支持力係数(砂質地盤： λ 、粘土質地盤： μ)は、文献¹³⁾で提案される評価式を上まわる

- iii. 変断面位置では、ひずみから軸力を算定する方法として軸部と同一方法を適用するのは難しく、別途検討する必要がある

【参考文献】

- 1) 日本建築学会、「高強度コンクリートの技術の現状」、2009
- 2) 出雲淳一、島 弘、岡村 甫、「面内力を受ける鉄筋コンクリート板要素の解析モデル」、コンクリート工学、Vol.25、No.9、pp.107-120、1987
- 3) 福浦尚之、「4方向にひび割れを有する鉄筋コンクリート要素の履歴依存型構成モデル」、1998、博士論文
- 4) 中西義隆、渡邊 徹、堀井良浩、濱健太郎、村松晃次、藤田峻也、「砂質地盤に拡大部を設けた場所打ちコンクリート杭の引抜き抵抗に関する研究(その1 実験概要)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、20214、pp.427-428、2020.9
- 5) 日本建築学会、「建築基礎構造設計指針」、2019
- 6) 渡邊 徹、中西義隆、堀井良浩、濱健太郎、村松晃次、藤田峻也、「砂質地盤に拡大部を設けた場所打ちコンクリート杭の引抜き抵抗に関する研究(その2 実験結果)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、20215、pp.429-430、2020
- 7) 二川和久、内田和久、「場所打ち拡底杭の引抜き载荷試験、および引抜き力-引抜き量関係に関する考察(その1 引抜き载荷試験)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、20248、pp.495-496、2021
- 8) 太田雄介、沼本大輝、中岡章郎、「杭軸部中間に拡底部を有する杭の鉛直载荷試験」、長谷工技報 No.35、pp.1-6、2018
- 9) 佐野大作、森 利弘、矢島淳二、大久保健治、飯田努、「先端および中間部に拡径部を有する杭の支持力特性(その2 拡径間隔および拡径比の影響を考慮した支持力評価)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、20209、pp.417-418、2014
- 10) 平井芳雄、青木雅路、丸岡正夫、「場所打ち拡底杭の引抜き抵抗について」、日本建築学会大会学術講演梗概集、20278、pp.555-556、2004
- 11) 中西義隆、小座間琢也、渡邊 徹、堀井良浩、濱健太郎、「粘土質地盤に拡大部を設けた場所打ちコンクリート杭の引抜き抵抗に関する研究(その2 実験結果)」、日本建築学会大会学術講演梗概集、20251、pp.501-502、2021
- 12) 平井芳雄、若井修一、青木雅路、「拡径部を有する場所打ちコンクリート杭の原位置引抜き試験」、基礎工、Vol.39、No.11 (460)、pp.60-63、2011.11
- 13) 新井淳マウリシオ、中西義隆、久保 豊、「場所打ち拡底杭の引抜き耐力の評価」、基礎工 Vol.43、No.8 (505) pp.68-72、2015.8