

スパイラル杭を活用した組杭の水平抵抗特性に関する実験的研究

黒川, 貴大

<https://hdl.handle.net/2324/7182462>

出版情報 : Kyushu University, 2023, 博士 (工学), 課程博士
バージョン :
権利関係 :



スパイラル杭を活用した組杭の水平抵抗特性に関する実験的研究

2024年1月



九州大学

九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻

黒川 貴大

スパイラル杭を活用した組杭の水平抵抗特性に関する実験的研究

目 次

第 1 章 序論	1
1.1 研究の背景	1
1.2 既往の研究	3
1.2.1 スパイラル杭のピッチ・幅比に着目し鉛直支持力を分析した研究	4
1.2.2 スパイラル杭の単杭と組杭の水平抵抗に着目した研究	11
1.2.3 水平力を受ける杭の弾性限界状態の評価に着目した研究	18
1.2.4 ダクタイル鑄鉄製杭基礎の活用の検討について	21
1.3 研究の目的	24
1.4 本論文の構成	25
参考文献	26
第 2 章 実験土層における斜直合成スパイラル組杭の水平抵抗特性	28
2.1 はじめに	28
2.2 実験装置と実験土層の材料	29
2.3 模型杭の作製	32
2.4 直杭と斜杭の杭長と水平抵抗力の関係	33
2.5 梁ばねモデル解析による模型実験の再現及び斜杭角度の影響	36
2.5.1 解析方法の概要	36
2.5.2 水平地盤反力係数(水平地盤ばね)と変形係数の推定	37
2.5.3 スパイラル杭の軸方向地盤ばねの推定	42
2.5.4 解析結果	44
2.6 梁ばねモデル解析による実大スパイラル斜直組杭の水平抵抗の予測	48
2.6.1 解析概要	48
2.6.2 結果と考察	50
2.7 まとめ	51
参考文献	52
第 3 章 実地盤における斜直合成スパイラル組杭の水平抵抗特性	54
3.1 はじめに	54
3.2 実験地盤及び斜直組杭構造の概要	56

3.2.1 地盤作製と地盤材料	56
3.2.2 実験地盤の物理的性質と力学的性質	58
3.2.3 実大基礎及び実験概要	62
3.2.4 実験方法	66
3.3 スパイラル杭の引抜抵抗特性	67
3.3.1 スパイラル杭の引抜抵抗の挙動	67
3.3.2 せん断破壊面のモデル化と引抜抵抗力の推定	68
3.4 スパイラル杭及び斜直組杭の水平抵抗特性	71
3.4.1 実験結果の分析	71
3.4.2 弾性限界水平荷重の推定	75
3.4.3 斜直組杭の水平抵抗における水平・鉛直変位成分の関係の考察	76
3.4.4 斜直組杭の水平抵抗力の簡易評価法	77
3.4.5 車両用防護柵基礎への実用性評価	79
3.5 まとめ	81
参考文献	82
第4章 実験土層における両斜合成スパイラル組杭の水平抵抗特性	83
4.1 はじめに	83
4.2 実験装置と実験土層の材料	85
4.3 模型杭の概要	87
4.4 単調水平載荷実験	88
4.4.1 両斜組杭における斜杭角度が水平抵抗へ及ぼす影響	89
4.4.2 杭の形状(スパイラル及び平板)の影響	95
4.5 正負交番載荷実験による両斜合成スパイラル組杭の耐久性評価	96
4.6 まとめ	99
参考文献	100
第5章 総括	101
5.1 結論	101
5.2 今後の研究課題	103
謝辞	105

第1章 序論

1.1 研究の背景

杭基礎工法の一つである回転杭工法は、鋼管杭の先端に螺旋状の羽根を溶接し回転力を付与することで地盤に貫入させる工法である¹⁾。回転杭工法自体は国内では明治初期から導入されており、歴史のある工法ではあるが、機械施工が実現していなかった時代における特殊工法としての位置付けであった^{2), 3)}。その後、2000年頃より、施工機械の技術発展もあり複数の回転杭工法が開発・実用化され、建築・土木・鉄道分野にて普及している。同工法の特長として、低振動・低騒音の施工が可能であること、掘削残土が少ないこと、先端の羽根により高い先端押込み支持力とアンカー効果による引抜抵抗力が得られること、斜杭が比較的容易に施工ができることなどが挙げられる¹⁾。

同工法に関連して、杭体に帯状の平鋼を長軸周りに螺旋状にねじり加工して製作された鋼製杭(図 1-1)は、「スパイラル杭⁴⁾」や「ねじり平鋼杭⁵⁾」，「ヘリカルバー⁶⁾」などと呼ばれている。なお，本文では国内における一般呼称と思われるスパイラル杭と呼称する。スパイラル杭の特長として，製作コストが安価， $\phi 150$ mm 程度の小径で 2 m 程度の短尺なものであれば人力施工が可能，無排土であり施工に伴う振動の発生や環境負荷の低減，大型重機を必要としないため狭隘箇所での施工や工期短縮にも期待できる。また，ねじり形状に沿って回転貫入させ周辺地盤を乱さずに貫入することで，杭体の回転が固定されている状態では鉛直方向の荷重に対して高い抵抗力を発揮することなどが挙げられる。逆に回転が自由だと容易に引き抜くことも可能であり，上部構造物が損傷した際や不要になった際の撤去時には有用である。



図 1-1 鋼製スパイラル杭(杭頭接続用フランジ及びパイプ付き)

このようなスパイラル杭の特長を活かして，標識柱の基礎，農業用ハウスの基礎，太陽光発電パネル架台用の基礎⁸⁾，ホームドア用基礎⁹⁾などの比較的小規模構造物向けの基礎として実用化されている。近年の建設人口の減少に伴う

省人化・省力化や、環境負荷を低減できる工法がより求められている状況において、スパイラル杭工法のさらなる適用範囲の拡大は、これらの課題解決に寄与することが期待される。しかしながら、既存の直接基礎や鋼管杭基礎工法などのように体系的な設計手法は未だ確立されておらず、スパイラル杭を用いた合理的な基礎構造の設計には、基本となる鉛直及び水平方向の支持力特性の把握を含めて多くの課題がある。比較的小規模構造物の場合には、鉛直支持力よりも風荷重などに対する水平抵抗力が求められるケースがある。しかしながら、スパイラル杭はその形状ゆえに同径の鋼管杭に比べて、曲げ剛性に影響する断面二次モーメントが小さくなるという課題がある。スパイラル杭の曲げ剛性の低さを改善した杭基礎として、大きな曲げモーメントが作用する杭頭部を円筒形状とし、中間部を中実形状、先端部にテーパ且つ可変肉厚のスパイラル部を有したダクティル鑄鉄製基礎杭(図 1-2)¹⁰⁾がある。省スペースな基礎工法として道路標識や横断防止柵などの基礎へ実用化されている。鋼材で同形状を製作するには削り出し加工や溶接が必須となり製作コストが増大してしまう。一方で、鑄造プロセスでは一体成形で大量生産が可能であり生産性に優れ、且つ形状自由度を活かした最適化による軽量化も図れる。

本研究ではスパイラル杭の水平抵抗特性に着目し、実験土層及び実地盤での単調及び繰返し水平載荷実験を行い、その抵抗挙動の詳細について分析する。また、水平抵抗力を向上させる手法として、ダクティル鑄鉄製杭基礎を活用した斜直合成組杭構造や、2本の鋼製スパイラル杭を斜杭とした両斜組杭構造の有用性について、単杭や実用化を想定した一般的な基礎構造と比較する。得られた実験データから、水平抵抗力の弾性限界荷重を推定し、スパイラル杭の軸方向抵抗力と関連付けて、これらの抵抗メカニズムを分析・考察する。

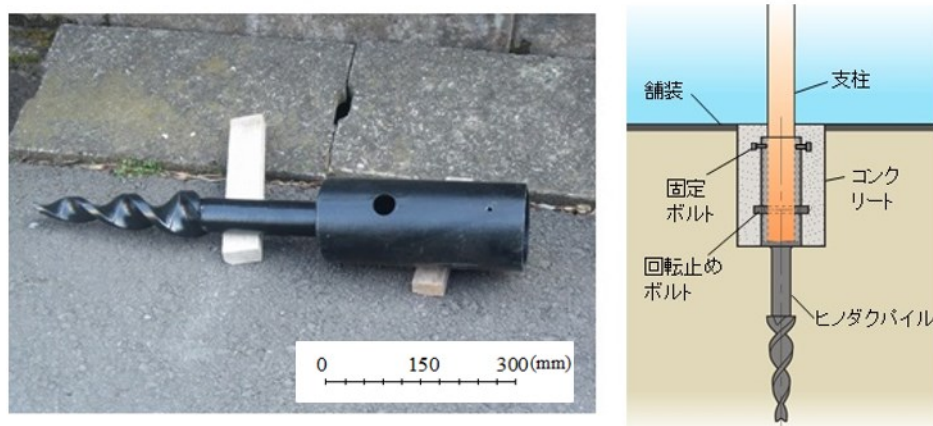


図 1-2 ダクティル鑄鉄製杭基礎 ¹⁰⁾

国土交通省新技術情報提供システム NETIS:QS-190022-A

1.2 既往の研究

スパイラル杭の支持力特性を活かした基礎工法のより合理的な設計手法を提示するために、模型土槽や現地での貫入実験や載荷実験及び有限要素法による支持力推定など多数の研究がなされている^{4)~7)}。杭に作用する外力は、主に上部構造物の自重による死荷重などの鉛直方向荷重と風や地震等による水平方向荷重に別けられる。

スパイラル杭の鉛直方向支持力に関しては、スパイラル杭のピッチと幅(外径)との比(ピッチ幅・比 p/w)に着目して、鉛直支持力と回転貫入率について検討した谷ら¹¹⁾と Wang ら¹²⁾の研究がある。両者らの実験から、従来で多く採用されているピッチ・幅比 1.5 に対して、4.5 が押込み支持力と引抜抵抗力のバランスに優れるとしている。また、同研究による成果は特許技術として我が国で権利化されている¹³⁾。

水平方向抵抗に関しては、Amarbayer ら¹⁴⁾による単調荷重下におけるスパイラル杭の単杭と、直杭と斜杭の 2 本を結合した斜直合成組杭による水平抵抗に着目した研究がある。Amarbayer らは、一方向単調水平載荷実験によって、スパイラル杭、プレート杭、パイプ杭を用いた単杭及び斜直合成組杭の極限水平抵抗力を測定し斜杭角度が及ぼす影響を示し、スパイラル杭は斜杭による補強効果が他よりも高いとしている。斜直合成組杭の実用的設計に向けては、直杭と斜杭の長さの合理化や、実地盤での検証による評価が課題である。

また、載荷試験データから杭の弾性限界点を推定する方法について、中谷ら¹⁵⁾の研究がある。数多くある杭の水平載荷試験データにおける荷重変位曲線を用い、数学的な方法で地盤抵抗の弾性限界点について評価する方法を提案した。杭の水平抵抗は比較的明瞭な杭体の弾性的挙動と、不明瞭な非線形性を示す地盤抵抗の複合によるため、実験データから数学的な方法により評価する方法は実用的である。ただし、杭先端が変位するような比較的短い杭やスパイラル杭への適用は検討されていない。

加えて、前節で紹介したダクティル鑄鉄製杭基礎について菅野ら¹⁶⁾が行った研究を紹介する。菅野らは交通安全施設用基礎への適用を目指し、実地盤での衝突実験による性能把握を行い、その実用性を評価している。スパイラル杭の曲げ剛性を改善した合理的な形状を有した鑄鉄製杭であり、組杭構造とすることで適用範囲の拡大が期待されるが、実用的な検討はされていない。

本節では、これらの既往研究について紹介する。

1.2.1 スパイラル杭のピッチ・幅比に着目し鉛直支持力を分析した研究

本項では、谷ら¹¹⁾と Wang ら¹²⁾による「ピッチ幅・比に着目した砂地盤におけるスパイラル杭の支持力実験」について、背景と目的、実験装置と模型杭の概要、実験方法、実験結果と考察に大別して紹介する。

1) 背景と目的

スパイラル杭は、帯状の平鋼を長軸周りに螺旋状にねじり加工した基礎杭であり、一般的には回転圧入による施工方法が採用される。この工法では、重機やバックホー、建柱車などによって杭に回転力を加えることで施工されるが、狭隘な施工現場などでは、重機の搬入が困難または不可能な場合もある。回転圧入工法以外にも、打撃貫入工法も存在し、これは杭に打撃力を与えて施工を行うものである。回転圧入と比較すると、打撃貫入の場合には小型の打設機も使用できるため、特に狭隘な施工現場に適している。したがって、打撃貫入に適したスパイラル杭の形状を検討し、打撃貫入工法に適用することで、杭の施工スペースを縮小できる可能性がある。従来から回転貫入を想定した施工において、ピッチ・幅比(以下、 p/w)が約 1.5 のスパイラル杭が主に使用されている。しかし、打撃貫入を考慮したピッチ・幅比に関する研究や試験は少ないため、本研究ではスパイラル杭の p/w をパラメータとして打撃貫入を想定した施工载荷実験を行い、押込み力、引抜き力、及び貫入性に関して評価する。载荷実験は均一な砂地盤タンクと载荷装置を使用し、模型杭に鉛直载荷して砂地盤に貫入させ、载荷荷重や回転貫入率などを計測している。以下では、実験装置やパラメータ、及び実験結果の例について報告する。

2) 実験装置と模型杭の概要

実験装置は図 1-3¹¹⁾に示す通り、①砂地盤タンク、②载荷装置、③模型杭、④計測装置(④-1：変位計、④-2：ロードセル、④-3：回転計測器)から構成されている。①砂地盤タンクは表 1-1¹¹⁾、②载荷装置の概要は表 1-2¹¹⁾に示す通りである。③模型杭($p/w=1.5$)は、図 1-4¹¹⁾に示す通り、鋼製のスパイラル杭であり、载荷装置との組付け部 (108mm)とスパイラル部 (200mm)で構成されている。スパイラル部の長さは、载荷装置のストローク量を考慮して設定した。④計測装置は表 1-3¹¹⁾に示す通り、ロードセルと変位計を用いて、荷重と貫入量の計測を行う。また、図 1-5¹¹⁾の回転制御・計測器は、ボルトの締付けにより杭の回転固定と自由が可能であり、10 度回転する毎に回転量

を計測する．前述した通り，回転圧入工法では $p/w=1.5$ のスパイラル杭が多く用いられており，施工時には回転力を与えるため，ピッチ通り(周辺地盤を乱さない)施工が行いやすい．しかし，打撃貫入工法においてピッチ通りの施工を行うためには，先行研究より従来の $p/w=1.5$ より大きくすることが望ましいと想定され，寸法パラメータを図 1-6 に示す通り設定する．

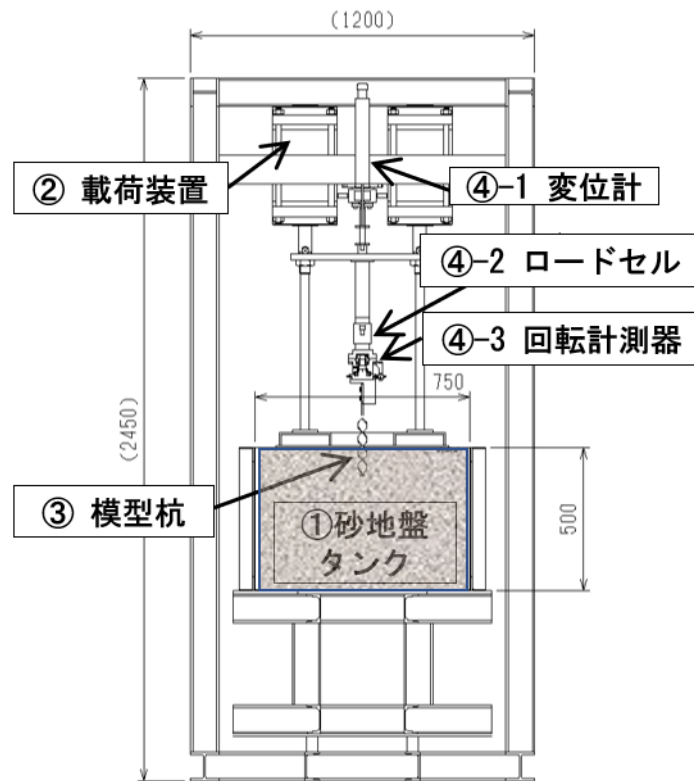


図 1-3 実験装置¹¹⁾

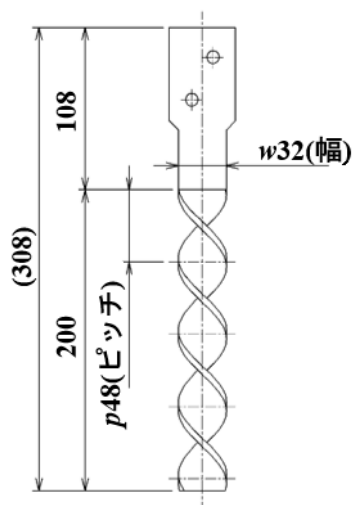


図 1-4 模型杭 ($p/w=1.5$)¹¹⁾



図 1-5 回転制御・計測器¹¹⁾

表 1-1 砂地盤タンクの各パラメータ ¹¹⁾

項目	仕様	備考
タンクサイズ	$\phi 750 \text{ mm} \times h 1000 \text{ mm}$	直径×高さ
拘束圧	0~0.13 MPa	上載圧
砂種類	珪砂 7 号	乾燥砂

表 1-2 载荷装置の概要 ¹¹⁾

項目	仕様	備考
载荷荷重	10 N	引張/圧縮
载荷速度	1.2~23 mm/min	調整可能
ストローク	300 mm	最大

表 1-3 計測器の概要 ¹¹⁾

計測器	仕様	備考
ロードセル	20 N	接触式
変位計	300 mm	
回転計測器	分解能 36 パルス	

杭名称	pw1.5	pw2.5	pw3.5	pw4.0	pw4.5
ピッチ	48	80	112	128	144
幅	32				
ピッチ幅比	1.5	2.5	3.5	4.0	4.5
概略図					

杭名称	pw5.0	pw5.5	pw6.5	pp	pt
ピッチ	160	176	208	-	
幅	32				
ピッチ幅比	5.0	5.5	6.5	-	
概略図					

図 1-6 模型杭の寸法パラメータ ¹³⁾

3) 実験方法

実験方法について、図 1-7¹¹⁾に示す 2 つのケースでそれぞれ実験を行う。貫入過程においては、杭に回転力を与えずに鉛直方向の静的荷重のみを加え、杭の回転は自由な状態として貫入を行った。実際の施工では打撃貫入が行われるが、模型実験では打撃貫入を再現することが難しいため、今回は静的荷重での貫入を採用した。押込み及び引抜き過程に関しては、杭施工後に上部構造物との連結状態を再現するため、杭の回転を固定し、押込み及び引抜きを行った。また、貫入過程から押込み及び引抜き過程に移行する際は、一旦除荷を行った後に載荷を行うこととした。

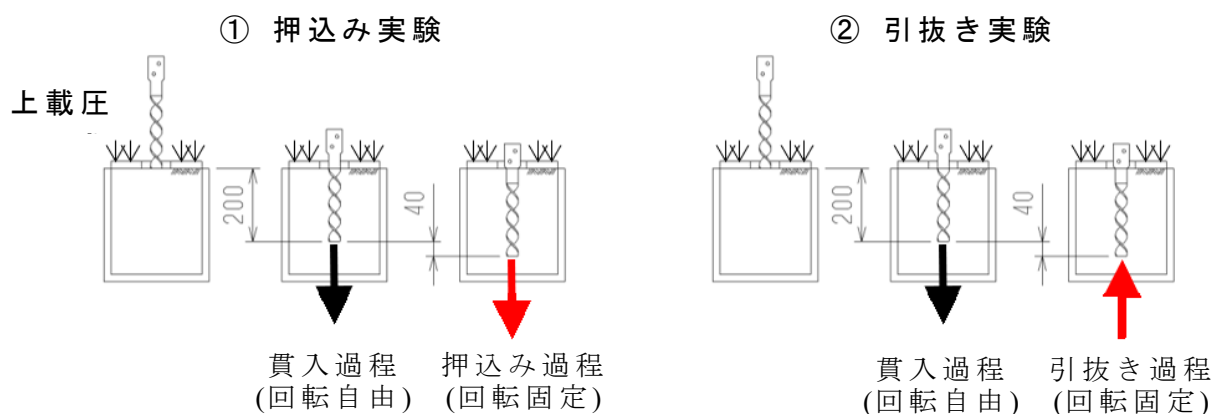


図 1-7 実験方法のイメージ¹¹⁾

4) 実験結果と考察

荷重と貫入量の関係(一例)は図 1-8¹³⁾と図 1-9¹³⁾に示されており、 p/w により試験結果の差異が見られた。特に $p/w=3.5$ 以上になると、貫入性と引抜抵抗が増加し、周辺地盤を乱さずに貫入することで引抜抵抗が向上したと考えられる。押込み力については、 $p/w=1.5$ が絶対値が最大となったが、回転固定時の荷重上昇率(押込み後/貫入後の荷重)は、 $p/w=1.5$ の1.5倍程度に対して、 $p/w=3.5$ 以上は2.0倍程度となった。回転貫入率と貫入量の関係は図 1-10¹¹⁾に示される。10°回転時の変位量を180°回転時の変位量に換算し、その値をピッチとの比率で表した。 $p/w=1.5$ の回転貫入率50%(1 ピッチ貫入した際に90°回転)に対して、 $p/w=3.5$ 以上は100%程度(1 ピッチ貫入した際に180°回転)となり、貫入性が向上していることが明らかとなった。

スパイラル杭の押込み実験では、鉛直方向の載荷過程(200～240 mm)におい

て、鉛直変位の増加に伴い杭頭荷重が増加した。なお、鉛直変位が240mmに達するときの杭頭荷重を最大押込み力として定義している。各ケースの最大押込み力を比較したところ、**図1-11(左)**¹²⁾に示すように p/w が大きくなるほど最大押込み力が小さくなる傾向が見られた。また、パイプ杭とプレート杭の最大押込み力はそれぞれ0.76 kNと2.07 kNであり、スパイラル杭の最大押込み力はその範囲内(0.76 ~ 2.07 kN)に収まっていることが明らかになった。

スパイラル杭の引抜き実験では、引張り変位量の増加に伴い引抜き力の上昇し、その値がピークを超えた後に徐々に減少し最終的に0 kNに戻る。引抜き過程で計測された最大の杭頭荷重は杭の最大引抜き力として定義される。**図1-11(右)**¹²⁾から、スパイラル杭、プレート杭、パイプ杭の最大引抜き力を比較した場合、スパイラル杭のその値は大きくなっていることがわかった。また、スパイラル杭の pw 別に最大引抜き力を比較すると、 $p/w=4.5$ の供試体は優れた引抜き力を発揮することがわかった。つまり、 $p/w=4.5$ のスパイラル杭は総じて良い押込み力と引抜き力を発揮でき、鉛直方向からの荷重に強い構造と言えることが結論された。

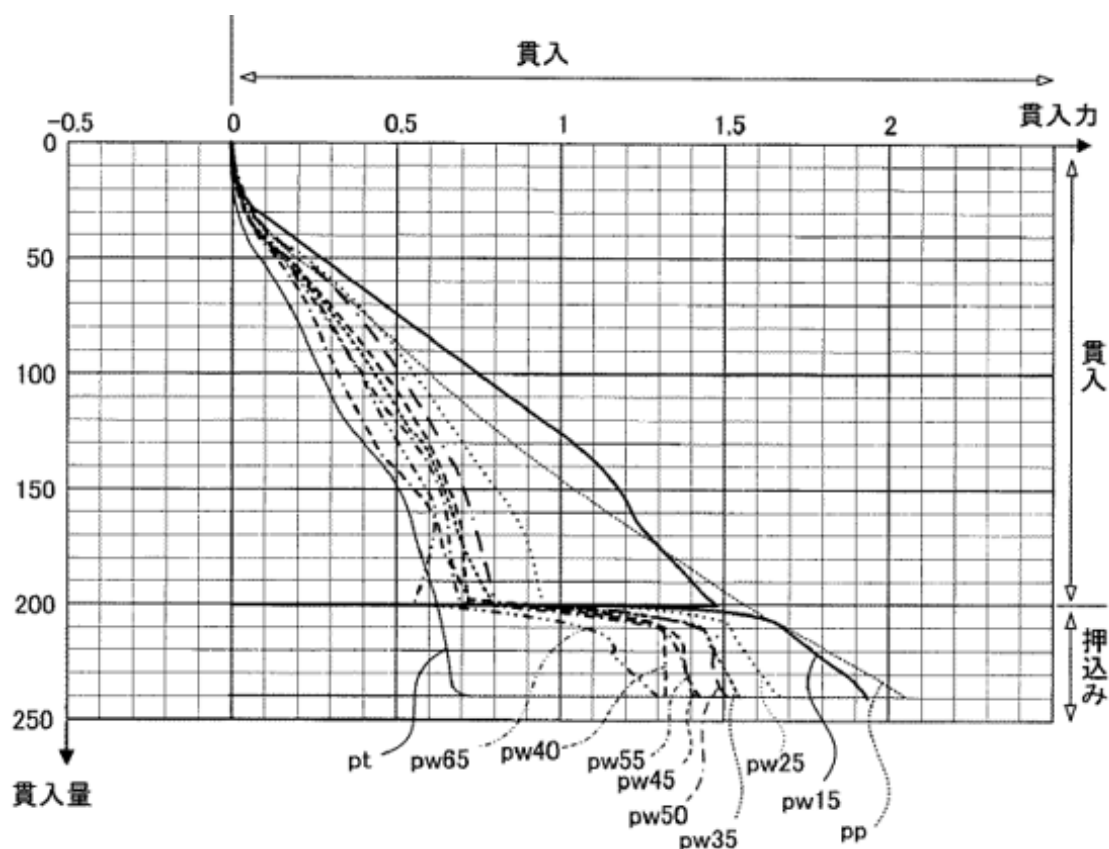


図 1-8 荷重と貫入量関係(押込み)¹³⁾

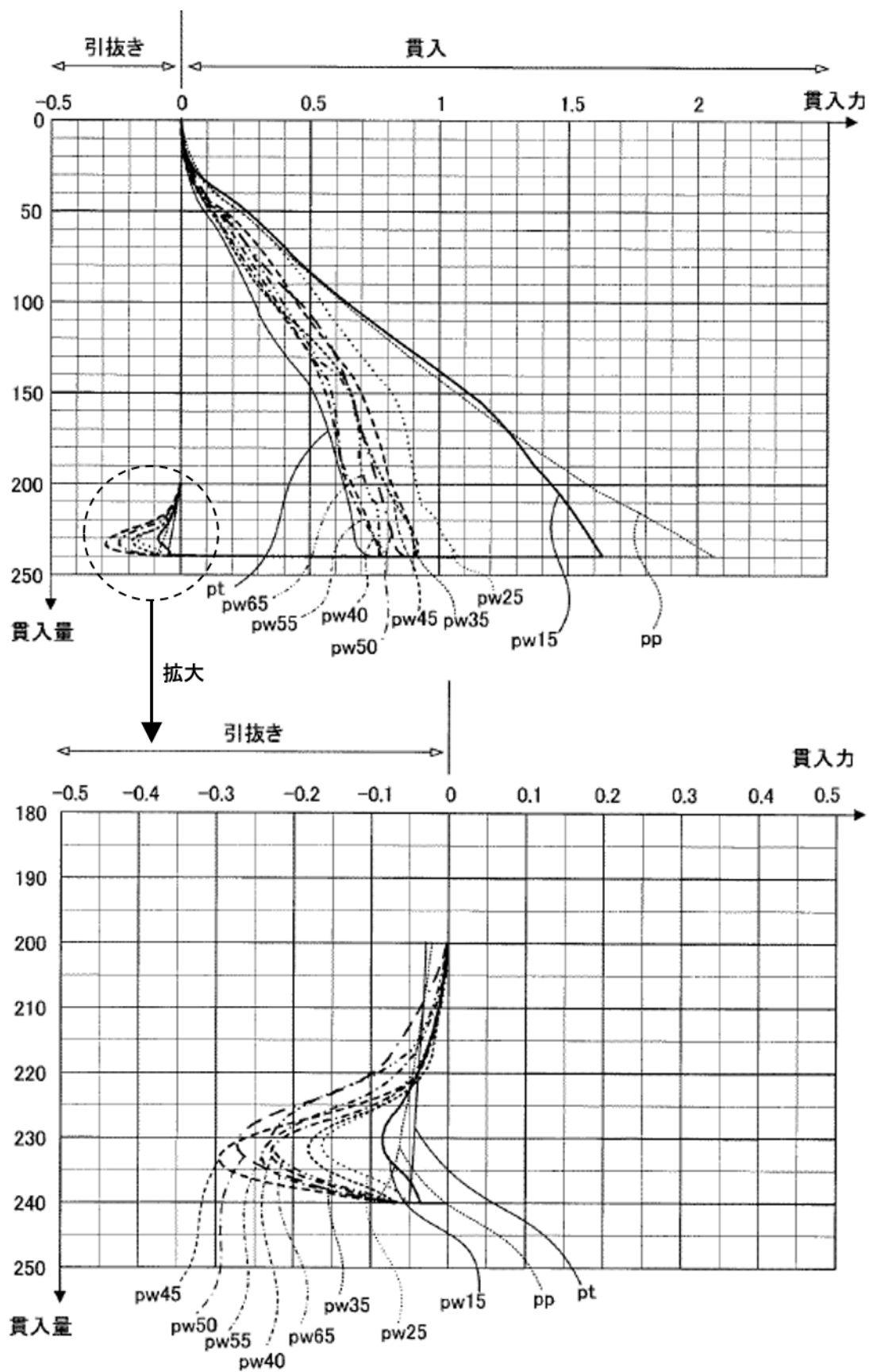


図 1-9 荷重と貫入量関係 (引抜き)¹³⁾

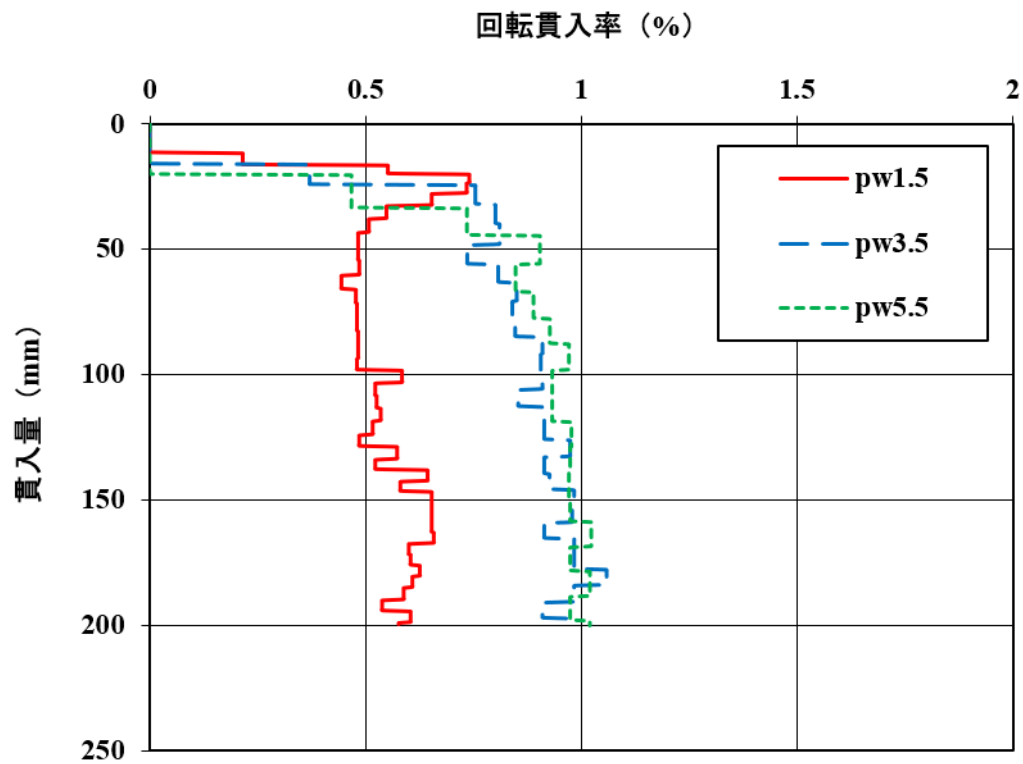


図 1-10 回転貫入率と貫入量関係(押込み)¹¹⁾

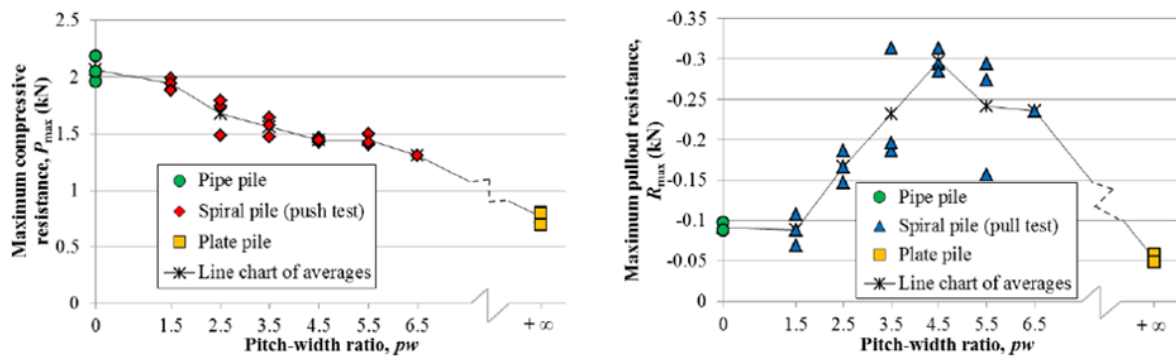


図 1-11 ピッチ幅・比と支持力の関係¹²⁾

(左：押込み力，右：引抜き力)

1.2.2 スパイラル杭の単杭と組杭の水平抵抗に着目した研究

本項では、Amarbayar ら¹⁴⁾による「単調荷重下における斜直合成スパイラル杭の極限水平抵抗力に関する実験的観察」について、背景と目的、実験装置と模型杭の概要、実験結果と考察について紹介する。

1) 背景と目的

近年、農業や土木の分野では、軟弱地盤における基礎の支持にスパイラル杭が広く利用されている。これらの杭は平鋼をねじって作られるため、断面積が小さく曲げ剛性が低い特徴がある。関連する先行研究では、スパイラル杭の支持力と引抜き抵抗についての調査が佐藤ら⁴⁾や Wang ら¹²⁾によって行われ Wang らの引抜き・押込み実験において最適なピッチ幅・比が 4.5 であることが示されている。

本研究は、自動車事故による衝撃荷重から人を保護する車両用防護柵向け基礎に焦点を当てている。従来の鋼管杭よりも前面及び側面の地盤抵抗が小さいため、一本のスパイラル杭では水平方向の許容変位を超える可能性がある。この問題を解決するためには、水平方向の性能向上が必要であり、スパイラル形状の特性も考慮する必要がある。文献によれば、水平抵抗力を向上させる方法としては、杭の寸法を大きくすることが挙げられるが、スパイラル杭には製造及び施工環境の制約がある。このため、一本の杭(直杭)を斜杭で補強した斜直合成組杭(以下、斜直組杭)が水平抵抗力の改善手段として考えられている。乾燥砂地盤におけるテーパー杭、斜杭、H 鋼杭などの従来の剛体杭の水平抵抗力については、限界平衡論や塑性論に基づく解析、弾性論に基づく解析、非線形解析などのアプローチを用いて、数十年に渡り定量的な経験的・理論的研究が行われてきている。しかし、スパイラル杭に関する研究は少ない。

本研究の目的は、一本のスパイラル杭を 1G(通常重力)模型実験で観察し、従来のプレート杭やパイプ杭と比較することである。また、スパイラル杭を補強するための最適な斜杭角度を評価するために、30°、45°、60°のケースで斜直組杭の実験を実施する。

2) 実験装置と模型杭の概要

スパイラル杭の単杭と斜直組杭の水平抵抗挙動を把握するために、マクロスケールの 1G 模型水平載荷実験を行った。図 1-12¹⁴⁾に本研究で使用した実験装置のセットアップを示す。杭頭接続部に 0.01 mm/s の載荷速度で水平方向へ 20

mm の変位を与え、杭頭変位 $0.2D$ (3.2 mm, D : 杭径) に相当する荷重を極限水平抵抗とした。本研究では、水平抵抗を比較するために、スパイラル杭、プレート杭、パイプ杭の 3 種類の模型杭を用いた。プレートとスパイラル模型杭の厚さと幅の寸法は同じであり、それぞれ厚さ 3 mm、幅 16 mm である。パイプ杭の外径は 16 mm、厚さは 3 mm である。鋼製模型杭のヤング率は $2 \times 10^{11} \text{ Nm}^{-2}$ である。模型杭のサイズは、その境界効果が最低限になるように土槽寸法に合わせて調整した。その影響範囲を杭径の 5 倍とし、杭の長さを 144 mm と 216 mm とした。模型杭の細長比は 9 と 13.5 である。各寸法を表 1-4¹⁴⁾ に示す。パイプ及びプレート模型杭の寸法は、スパイラル模型杭と同等に作製した。

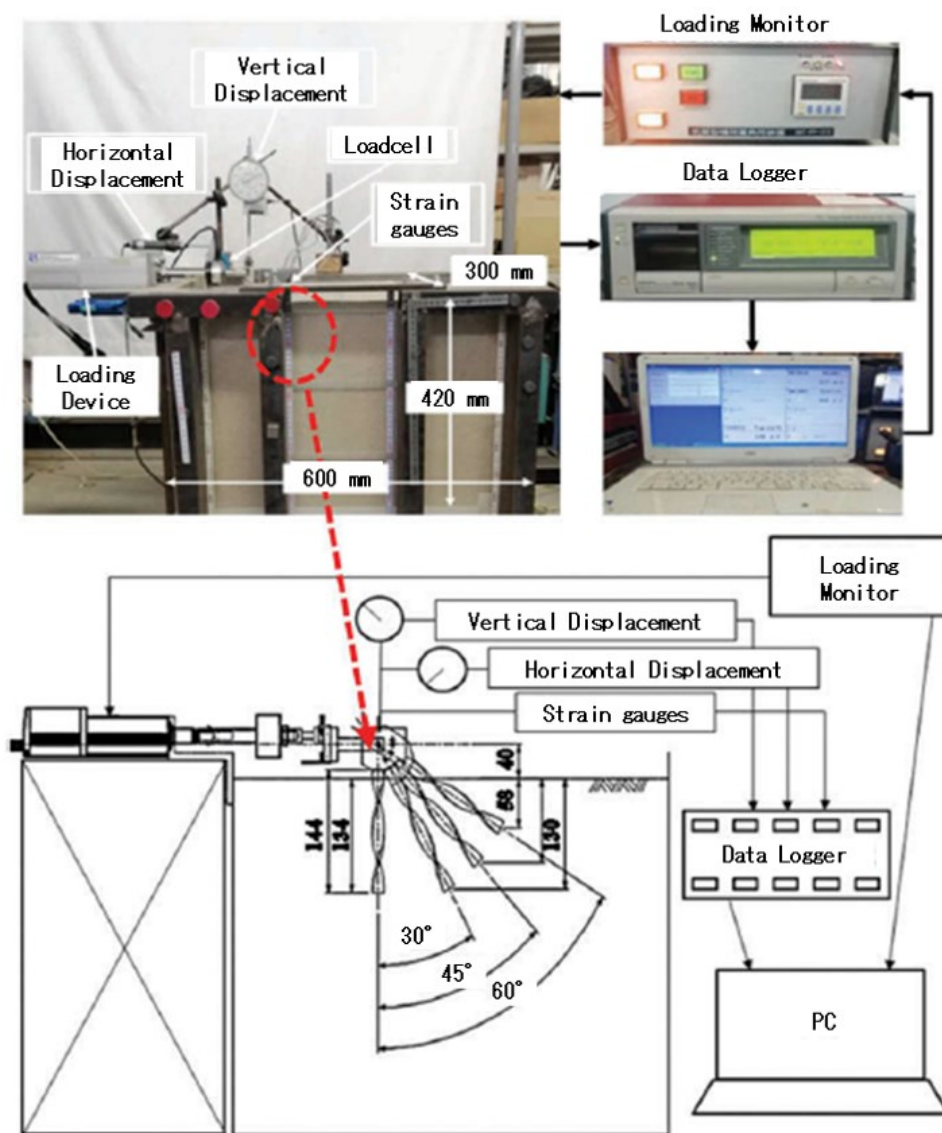


図 1-12 模型実験装置 ¹⁴⁾

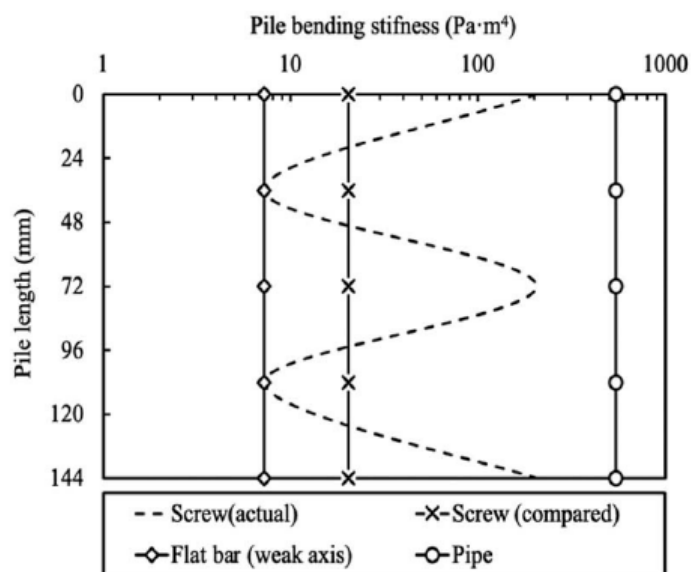
表 1-4 模型杭と実大杭の各パラメータ¹⁴⁾

	模型杭	実大杭
材 料	鋼	鋳鉄
E (GPa)	200	170
EI_x (kN・m ²)	0.01	227.68
EI_y (kN・m ²)	0.20	6476.34
長さ L (m)	0.144/0.216	2/3
幅 D (m)	0.016	0.22
肉厚 T (m)	0.003	0.04
縮尺 F	1	10

図 1-13¹⁴⁾は模型杭の曲げ剛性を示したものである．スパイラル杭の断面二次モーメントは杭長方向に応じて変化するため，4点曲げ試験を行い等価曲げ剛性を算出した．この実験結果から，スパイラル杭は 15°傾いたプレート杭の曲げ剛性($I=20.4 \text{ Pa} \cdot \text{m}^4$)に近似し，式 1-1 により求められる．

$$I = \frac{bh \cdot (h^2 \cdot \cos^2 \theta + b^2 \cdot \sin^2 \theta)}{12} \quad \text{式 1-1}$$

(ここで， θ ：プレート杭の傾き角度， b ：杭の幅， h ：杭の肉厚)

図 1-13 模型杭の曲げ剛性分布¹⁴⁾

杭の長さ方向の曲げモーメント分布を得るために，図 1-14¹⁴⁾に示すようにひずみゲージを杭の前後両面に貼付した．ひずみゲージのケーブルは杭の表面に接着して影響を抑えた．ひずみゲージを用いて杭に沿ったひずみを測定し，対応する曲げモーメントを算出した．短い斜直組杭には 16 枚，長い斜直組杭には 24 枚のひずみゲージを貼付した．

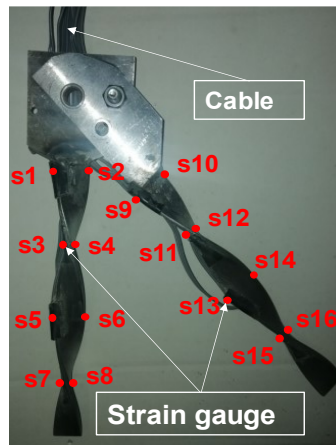


図 1-14 斜直組杭のゲージ貼付位置 ¹⁴⁾

3) 実験結果と考察

降伏ひずみ付近の 10 N と 30 N 作用時のひずみ値をもとに，杭の深さ方向と曲げモーメントの関係(一例)を杭長 144 mm と 216 mm でそれぞれ図 1-15¹⁴⁾と図 1-16¹⁴⁾に示す．正確な曲げモーメントを測定するために，それぞれの模型杭において，前後のひずみデータを考慮して純粋な曲げひずみ値を計算した．それぞれ左側の図は，直杭の曲げモーメントを表し，右側の図は，斜杭(補強杭)の曲げモーメントを表した．単杭の曲げモーメントは，斜直組杭の直杭よりも相対的に大きくなった．216 mm の単杭の曲げモーメントは，斜直組杭とすることで大幅に減少した．曲げモーメントの結果から，斜杭による補強後，曲げモーメントは直杭から斜杭に効果的に伝達されていた．

模型杭の水平載荷実験から計測された荷重変位曲線(一例)を図 1-17¹⁴⁾と図 1-18¹⁴⁾に示す．既往文献では，荷重たわみ曲線から模型杭の極限水平抵抗力を検討するための様々な基準が提案されている．Meyerhof ら ¹⁷⁾や Rao & Prasad¹⁸⁾，Georgiadis & Georgiadis¹⁹⁾，Lee ら ²⁰⁾は荷重たわみ曲線で定義され最大強度点を線形にすることを提案し，Patra & Pise²¹⁾は二重正接法を提案している．しかしながら，結果に示すように荷重の増加に伴って変位も増加するが，最大水平変位までに荷重のピーク(最大強度点)が出なかった．そのため，最大強度点で

水平極限支持力を評価するのが困難である．そこで，本実験は **Broms**²²⁾の理論より杭径 20 %変位での支持力を杭の極限水平抵抗力として評価することとした．**図 1-17**¹⁴⁾は，単杭のスパイラル，プレート，パイプの極限水平抵抗力を示している．144 mm の場合では，これらの模型杭の間で大差がない．しかし，216 mm の場合，スパイラル杭とプレート杭は同程度の極限水平抵抗力を示し，パイプ杭との間には明らかな差があることがわかる．**図 1-18**¹⁴⁾はスパイラル杭の単杭と斜直組杭の極限水平抵抗力を示している．その結果から，スパイラル杭の極限水平抵抗力は，144 mm では斜杭角度が 45°と 60°が同程度で大きく，30°ではそれよりも小さくなった．216 mm では斜杭角度が 45°が大きく，次に 60°，30°が最も小さくなった．**図 1-19**¹⁴⁾は極限水平抵抗力とそれぞれの模型杭の単杭及び斜杭角度の関係を示している．この結果から，プレート杭，パイプ杭でもスパイラル杭と同じように斜杭角度 45°が大きく，30°では小さくなる傾向を示すことが明らかとなった．

図 1-20¹⁴⁾では，単杭の極限水平抵抗力を用いて正規化された斜直組杭の極限水平抵抗力が評価され、スパイラル杭が他の杭よりも高い値を示していることが明らかになった．スパイラル杭は、補強斜杭によって水平抵抗において、他の杭よりも効率的な作業能力を有していることを示している．しかしながら，216 mm の杭の場合には，45°と 60°の場合にプレート杭では値が急増した．

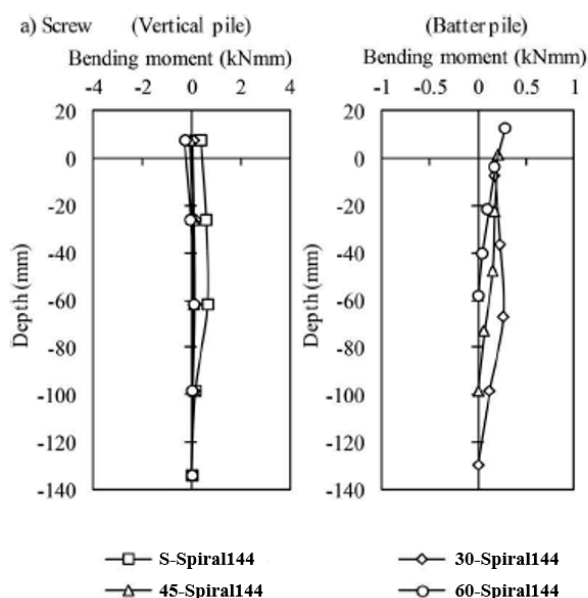


図 1-15 曲げモーメント分布 ¹⁴⁾
(杭長 144 mm)

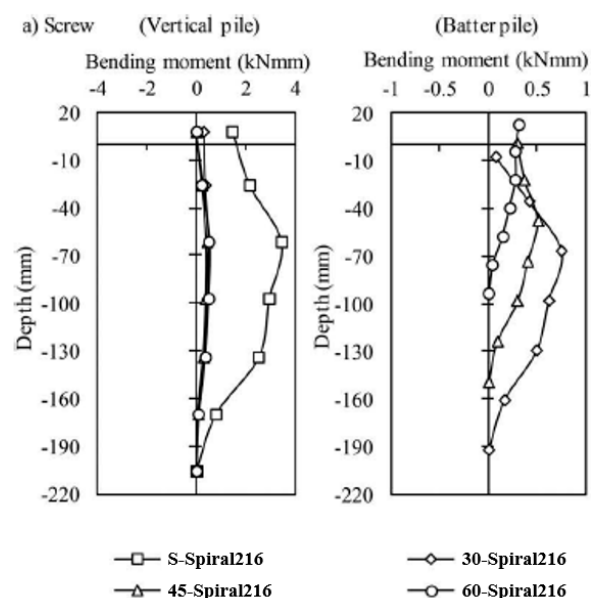


図 1-16 曲げモーメント分布 ¹⁴⁾
(杭長 216 mm)

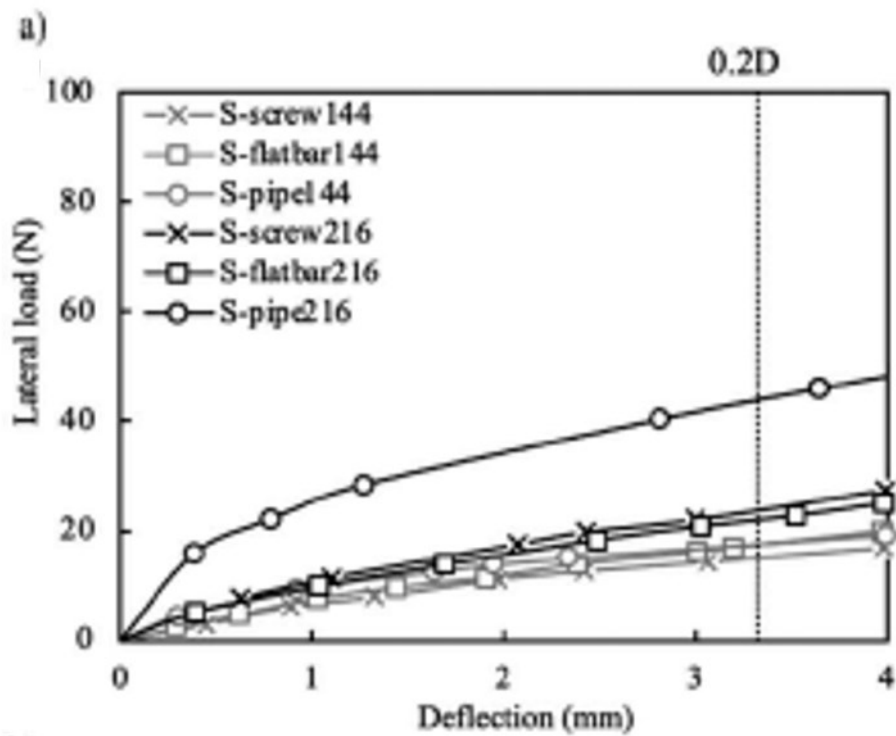


図 1-17 荷重変位曲線：単杭¹⁴⁾

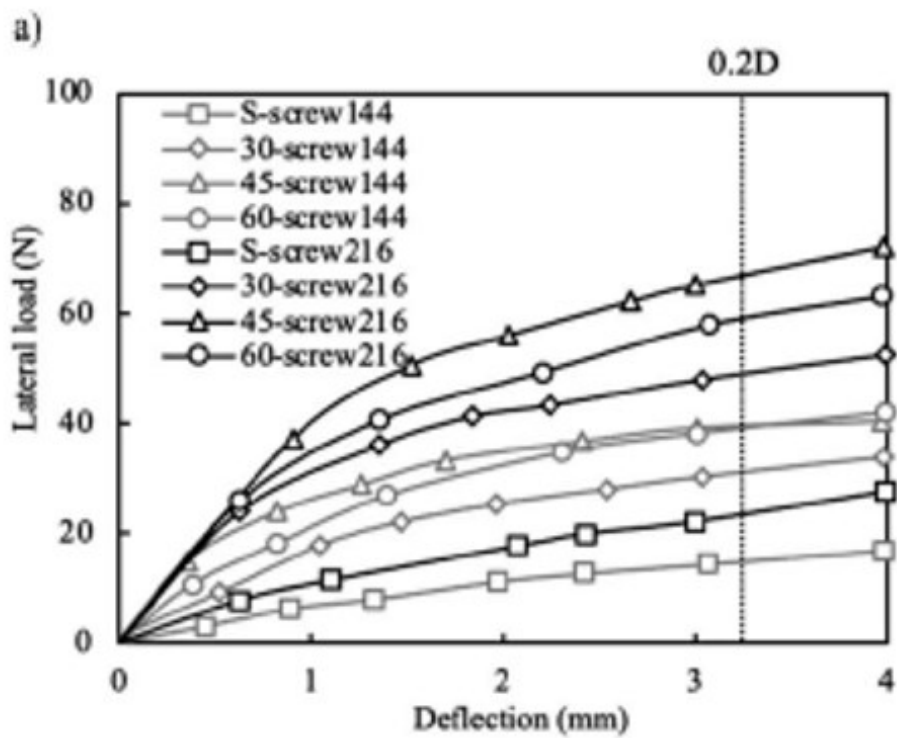


図 1-18 荷重変位曲線：スパイラル斜直組杭¹⁴⁾

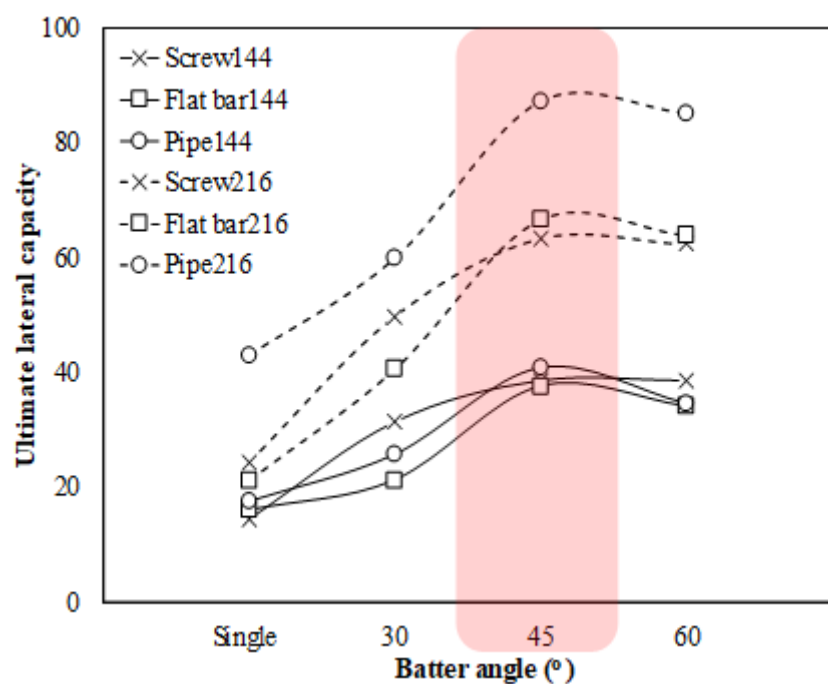


図 1-19 極限水平抵抗力と単杭及び斜杭角度の関係 ¹⁴⁾

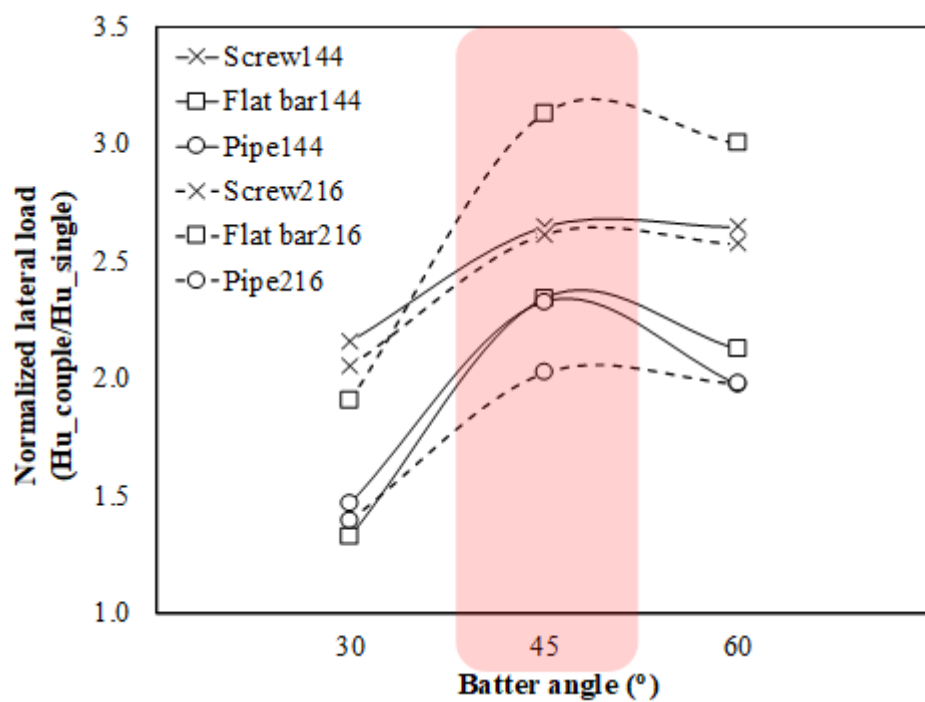


図 1-20 正規化した極限水平抵抗力と斜杭角度の関係 ¹⁴⁾

1.2.3 水平力を受ける杭の弾性限界状態の評価に着目した研究

本項では、中谷ら¹⁵⁾による「水平力を受ける杭の弾性限界状態に関する研究」から、はじめに、荷重変位曲線上の弾性限界点の評価、工学的な方法により評価される弾性限界変位との比較、の一部について紹介する。

1) はじめに

わが国の道路橋の設計基準である道路橋示方書において、橋梁に要求される性能は、設計で想定すべき荷重状態別に設定されている。また、同じく荷重状態別に、上部構造、支承、橋脚、フーチング、基礎などの部位ごとに限界状態が設定されている。杭基礎について具体的に示すと、1)杭頭部の軸方向反力が杭の許容支持力以下であること、2)部材に生じる応力度が許容応力度以下であること、3)杭頭における水平変位が許容変位以下であることについて照査されている。杭基礎の設計における上記の1)～3)の照査項目について今日日的な観点から許容値の再評価を行っている。

例として、道路橋の杭基礎で一般的である、根入れが十分に長い杭が地盤面高さで水平力を受ける時の荷重変位関係は、初期は比較的直線的に推移し、ある2点において変位が急増した後に、最大荷重を迎えながらならかな曲線を示す。杭の荷重変位曲線上に現れる2つの変位急増点は、杭体の弾性限界点(X点)及び、地盤の弾性限界点(A点)とされる。このうちA点については、上記照査項目3)により照査されていることになる。この許容値は、水平載荷試験で得られた荷重変位曲線データが多数収集・分析され^{23), 24)}、平成2年の道路橋示方書では、水平方向の弾性限界の許容値を、杭径の1%あるいは15 mmのどちらか大きい方と示された。

しかし、これらの分析では、地盤抵抗の塑性化の進展(A点)または杭材料の塑性化(X点)のいずれに起因するものであったかについて吟味されていない。本来、地盤抵抗から決定されるべき許容水平変位が過小評価されている可能性もある。近年、特に既製杭においては、大径化が進み、また剛性の割に耐力が大きい杭が適用可能な状況となっている。そこで、杭体が本来有する耐力を活かした、より合理的な設計を可能にすることも考えるため、地盤抵抗の弾性限界に対応する許容変位を評価し直し、許容値を抜本的に見直すことにした。

本論文では、水平力を受ける杭の抵抗機構が杭体と地盤の連成作用であると考えた場合に荷重変位曲線から地盤抵抗の弾性限界点を算定する方法を示す。そして、多数の試験データを分析し、その統計量を評価する。

2) 荷重変位曲線上の弾性限界点の評価

一般的に、荷重変位曲線上の弾性限界点を明確に定義することはできないが、荷重変位曲線の初期勾配から二次勾配へ移行する点として考えることができる²³⁾。この移行点を見つける手段として、1)荷重変位曲線を観察し、変位が急増する点を見つけ出し、それを弾性限界点とする工学的な方法、2)荷重変位曲線を数学的にフィッティングし、得られる降伏荷重に対応する点を弾性限界点とする数学的な方法が考えられる。しかし、1)の工学的な方法では、数学的な方法よりも人為的誤差が入りやすく、多数のデータを取り扱い際には統計データに与える影響が大きい。岡原ら²⁴⁾は、基本的にワイブル分布曲線式を用いた2)の数学的な方法を持ちいる一方で、1)、2)の双方の方法で定義した弾性限界点、ほぼ対応するとしている。以下にワイブル分布曲線式を示す。

$$\frac{R}{R_{uw}} = 1 - \exp\left[-\frac{d}{d_0}\right]^m \quad \text{or} \quad \frac{R}{R_{uw}} = 1 - \exp\left[-\frac{d/B}{d_0/B}\right]^m \quad \text{式 1-2}$$

ここで、 R_{uw} ：ワイブル分布曲線式により推定した極限支持力、 d ：変位、 d_0 ：ワイブル分布曲線式より推定した弾性限界変位、 B ：杭径、 m ：曲線の曲がり具合を示す変位指数である。弾性限界変位(降伏変位) d_0 に対応する荷重は、ワイブルフィッティングで得られた弾性限界点の荷重 R_0 であり、常に、 $R_0 = R_{nw} \times (1 - e^{-1}) = 0.63 R_{nw}$ の関係にある。この R_0 及び d_0 は、杭体が曲げにより降伏していなければ、地盤抵抗の弾性限界に対応する点であると考えられ、地盤抵抗は、変位 d_0 の時に弾性限界に至ったと解釈される。

3) 工学的な方法より評価される弾性限界変位との比較

数学的な方法で得られる弾性限界点の工学的な意味を、基礎に課題な残留変位を残さないという観点からも明らかにしておくことが望まれる。双方の方法により求めた弾性限界点を比較する。

残留変位急増点を求める方法は、以下の通りである。ある繰返し試験の荷重変位曲線について、この時の載荷ステップの最大荷重時の変位と除荷時の残留変位をそれぞれ抽出し整理する。これより、載荷変位レベル d_p が d_l に達した時、残留変位 d_r が急増し始めると判断し、これが弾性限界変位とみなすことができる。なぜなら、もし杭がこの閾値を超えなければ、地盤抵抗は可逆的と見なせ、繰返し作用する荷重に対して常に一定の地盤抵抗が期待でき、顕著な残留変位が発生しないと考えられるからである。次に、ワイブル分布曲線式を

用いて弾性限界荷重 R_0 を求める．

同様の作業を他の載荷試験データに対しても行う．ワイブル分布曲線式より算出した弾性限界荷重 R_0 と残留変位急増点に対応する荷重 R_1 の比である弾性限界荷重比 $\lambda_d(=R_1/R_0)$ の統計量は，平均値 **Mean**=0.91，変動係数 **COV**=0.21 である．以上，岡原らの研究で得られたのと同様に，ワイブル分布曲線式により求めた弾性限界点は，残留変位急増点から求まる弾性限界点とほぼ一致することが明らかとされた．

1.2.4 ダクタイル鑄鉄製杭基礎の活用の検討について

本項では、菅野ら¹⁶⁾による「生活道路向け防護柵や車止め等に対応した基礎杭の検討」から、研究背景と課題、実験方法と基礎構造、結果と評価について紹介する。

1) 球状黒鉛鑄鉄の特徴

先に、ダクタイル鑄鉄の特徴について紹介する。鉄鋼材料は炭素含有率によって、鑄鉄などの鉄と鋼に分類される。ダクタイル鑄鉄は基地組織中の黒鉛が球状を呈しており、ねずみ鑄鉄(片状黒鉛鑄鉄)に比べて、強度や延性を改良した鋼に近い機械的性質を有する鑄鉄であり、その特徴的な黒鉛の形状(図1-21²⁵⁾)から球状黒鉛鑄鉄とも呼ばれる(以下、球状黒鉛鑄鉄に統一する)。球状黒鉛鑄鉄は鑄造によって製造され、設計時の形状の自由度が高く、大量生産時の経済性に優れることから、産業用装置部品やマンホール鉄蓋などに採用されてきた。一体成形が可能な鑄鉄は溶接が不要であり、鋼材部品における溶接に起因する不具合(欠陥、疲労損傷)のリスクが少なく、近年では、その形状自由度を活かしたトポロジー最適化技術による製品開発²⁶⁾の事例もある。また、大気環境における腐食特性について、大気環境における腐食速度が、雨洗ありの環境では、炭素鋼よりも有意に小さく、耐候性鋼と同等以下であり²⁵⁾、社会インフラの構造材料として鋼製からの置き換えが期待される。

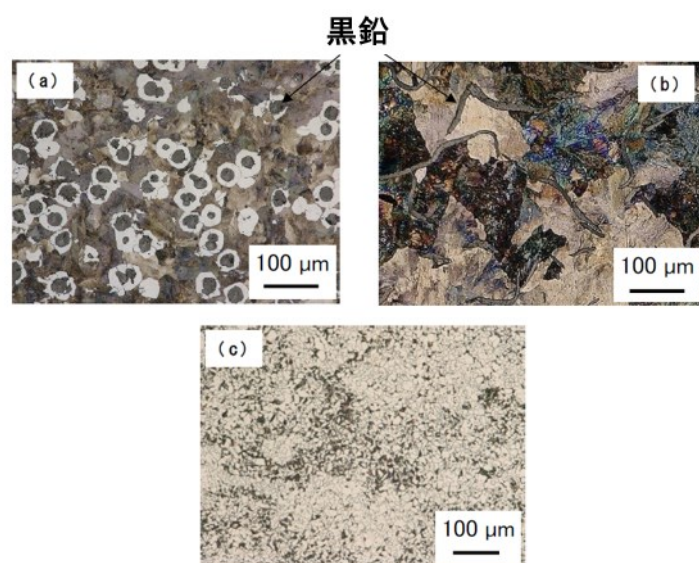


図 1-21 (a)球状黒鉛鑄鉄と(b)片状黒鉛鑄鉄，(c)炭素鋼(SM)
の代表的な組織写真²⁵⁾

2) 研究背景と課題

近年，生活道路や交差点などでの乗用車による歩行帯への侵入事故が社会問題となっている．従来の安全対策としては，安全柵などの物理的な対策と，標識や反射鏡及びカラー舗装などの視覚的な手法が採用されている．しかし，道路の狭さや設置スペースや交通環境の制約により，特に防護柵向けとしては従来からコンクリート基礎が一般的であったが，重機による施工が難しく，課題となっている．そのため，ダクトイル鋳鉄製杭基礎(以下，鋳鉄製スパイラル杭)を用いた省スペース型基礎構造(図 1-22¹⁶⁾)を考案し，実験による性能評価を行う．

3) 実験方法と基礎構造

性能評価方法は適用する上部構造物に合わせて設定した．防護柵の基礎としては，「防護柵の設置基準・同解説」²⁷⁾で示されている衝突条件 C(中型貨物車 8t，衝突速度 40 km/h，衝突角度 10°，衝撃度 15 kJ 以上)を想定して，支柱上部の変位量や基礎のエネルギー吸収両及び基礎部の外観が評価基準を満足することを明らかにするために静的水平載荷試験をコンクリート基礎と対比して評価した．地盤条件は，砂質土 N 値 10 程度，アスファルト舗装(舗装厚 40 mm，路盤厚 150 mm)とした．また，車止め等の基礎としての有効性を明らかにするために，1t 車，衝突速度 20 km/h，衝突角度 90°，衝撃度 15 kJ(衝突条件 C と同等，独自条件)による実車衝突実験を行い，衝撃に対する基礎強度を明らかにした．

施工は，鋳鉄製スパイラル杭を打設後に鋼製支柱を杭上部に建て込み，モルタルを現場施工して根固めを行った．基礎体積は従来のコンクリート基礎と比較して 75 %縮小が可能となり，施工スピードは従来比 50 %程度向上した．

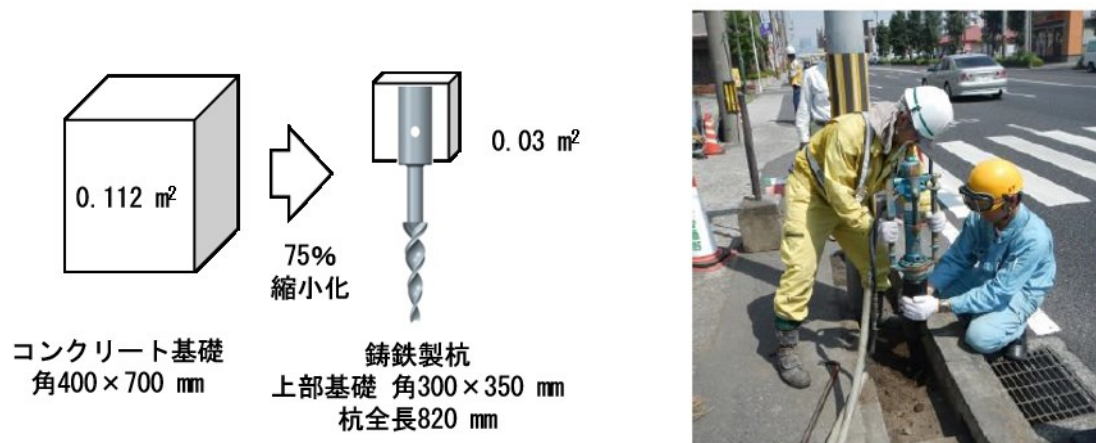


図 1-22 鋳鉄杭基礎構造と施工状況 ¹⁶⁾

4) 結果と評価

静的水平載荷試験前後の状況と荷重変位曲線を図 1-23¹⁶⁾に示す．基準想定変位量(150 mm)までのエネルギー吸収量(荷重×変位量の総和)は，コンクリート基礎が 1,629 kJ，铸铁製スパイラル杭が 1,590 kJ で，同等(-3%)の結果となった．基礎としてコンクリート基礎と同等の性能であることを明らかにした．

また，実車衝突実験の結果を図 1-24¹⁶⁾に示す．実験で使用した車止め(支柱)は $\phi 114.3 \times t 4.5$ mm の鋼管(材種 STK400)であり，支柱高さ 800 mm に対して衝突位置は 450 mm(車のバンパーの位置)としている．衝突後の支柱残留変形量は，最大 420 mm であり，衝突位置では 290 mm であった．基礎部には大きな損傷や動きは無く，支柱下部の変形量がほぼ残留変位と認められるため，基礎としての性能を有していることを明らかにした．

以上より，静的水平載荷及び実車衝突実験により，铸铁製スパイラル杭はコンクリート基礎(角 $400 \times h 700$ mm)と比較して性能は同等であることを示した．防護柵及び車止め等の安全施設向け基礎としての有効性が示された．なお，現在は基準が改訂²⁸⁾され，車止めについても，衝突条件が規定されており，基準に対応した铸铁製スパイラル杭の開発も行われている²⁹⁾．

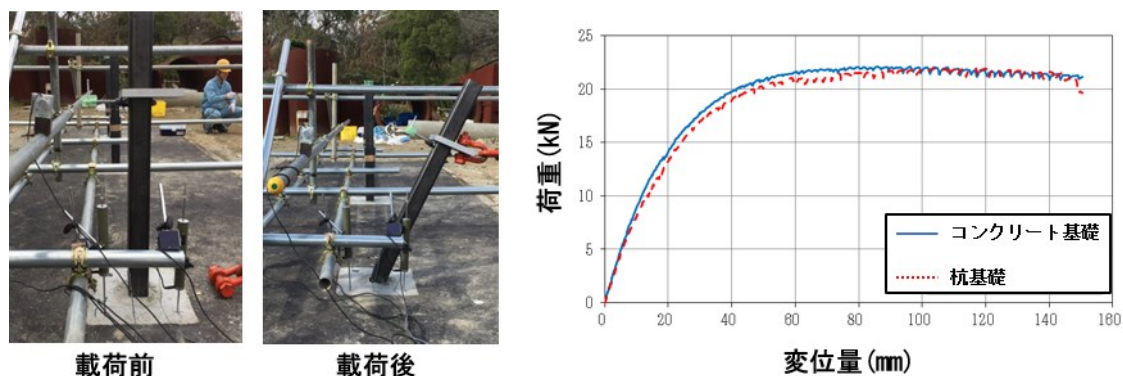


図 1-23 水平載荷試験状況と荷重変位曲線¹⁶⁾



図 1-24 実車衝突実験の結果¹⁶⁾

1.3 研究の目的

既往のスパイラル杭の研究では地盤条件の影響を把握しやすく再現性に優れる模型実験が多く、また、水平抵抗力の向上が期待できる組杭構造においては実環境での研究事例は少ない。そこで、本研究は、模型実験に加えて実地盤での実験も行い、スパイラル杭を活用した組杭の実用化に着目して、その水平抵抗特性について明らかにすることを目的とする。これにより、スパイラル杭を用いた組杭構造の設計合理化に寄与する。

まず、スパイラル杭は斜杭による補強効果が高いことが既往の研究から示唆されていることから、斜直合成組杭構造(以下、斜直組杭)に着目し、双方の杭長の変化が水平抵抗に及ぼす影響について、密な砂地盤を対象に模型での水平載荷実験にて評価した。また、梁ばねモデルによる解析にて、実験結果の再現を試みるとともに、既往の研究では $45\sim 60^\circ$ の間に最適角度が存在することが示唆されていることから、その妥当性を明らかにする。さらには得られた知見に基づいて実大斜直組杭による水平抵抗挙動について解析での予測を試みる。

そして、得られた解析結果を参考にして、車両用防護柵用向けの実用的な基礎として、新たな鑄鉄製スパイラル杭と鋼管斜杭による斜直組杭を考案し、斜直組杭の設計手法の確立に向け、直杭(鑄鉄製スパイラル杭)の引抜抵抗特性、斜直組杭の水平抵抗特性と、それらの抵抗メカニズムについて、現地実験を通して分析する。

また、既往の研究では、単調載荷実験による評価であり、繰返し荷重に対する評価はできていない。実際には大型標識や農業用ハウスには風荷重による繰返し荷重が作用し、このような外力が正負交番で作用すると想定した場合には、当然ながら対称性を有した押込支持力と引抜抵抗力のバランスに優れる 2 本の鋼製スパイラル杭の両方を斜杭とした組杭構造(以下、両斜組杭)が合理的である。まずは、両斜組杭の斜杭角度の合理化について、単杭及び 2 本の直杭を結合した垂直組杭との比較にて行う。次にスパイラル杭とプレート杭との比較により両斜組杭の有効性について、密な砂地盤を対象に模型での単調水平載荷実験にて評価する。最後に両斜組杭にて正負交番載荷実験を行い、その耐久性について評価する。

なお、スパイラル杭の模型には、既往の研究より、貫入性に優れ支持力の向上に期待できるピッチ・幅比 4.5 を基本的に採用した。

1.4 本論文の構成

本論文は第1章から第5章までの全5章で構成されている。本論文の構成として、研究フローを図1-25に示しつつ、各章の概要を以下に述べる。

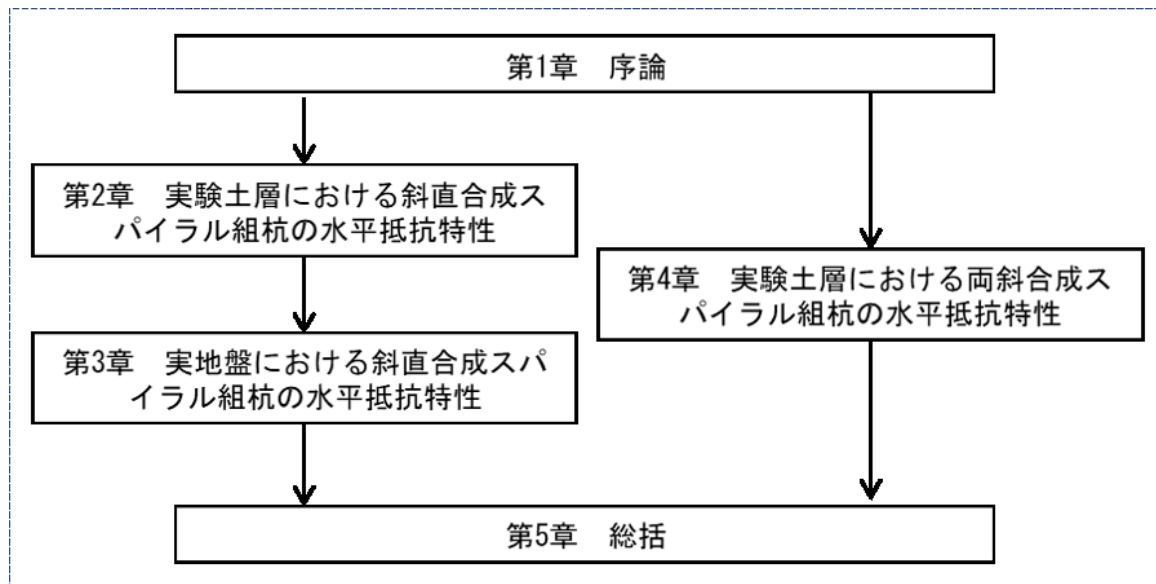


図 1-25 研究フロー

第1章では、本論文の研究の背景について述べ、本論文に関連する既往の研究として、スパイラル杭の鉛直支持力・水平抵抗力、杭の弾性限界点の推定に関する先行研究、及び鋳鉄製スパイラル杭の活用の検討などについて紹介した。そこから、本論文の目的及び研究フローを示した。

第2章では、斜直組杭の水平抵抗特性に及ぼす直杭と斜杭の杭長に着目し、実験土層での水平載荷実験を行う。実験結果から水平抵抗挙動を分析・評価するとともに、梁ばねモデルによる解析検討を行う。

第3章では、第2章の解析検討結果に基づいて、新たな鋳鉄製スパイラル杭と鋼管斜杭による実用的な斜直組杭を考案し、実地盤での鉛直引抜実験と水平載荷実験を行う。実験結果の荷重変位曲線から弾性限界水平荷重、ばね剛性を推定し、直杭の引抜抵抗力と斜直組杭の水平抵抗力との関係を明らかにする。

第4章では、2本の鋼製スパイラル斜杭を用いた両斜組杭を対象に、両斜組杭構造及びスパイラル形状の効果、斜杭角度の合理化について、実験土層と模型杭での水平載荷実験にて明らかにする。また、両斜組杭の正負交番載荷実験を行い、耐久性を評価する。

第5章では、本研究で得られた主要な知見と所見を総合的に整理し、スパイラル杭を活用した組杭の水平抵抗特性について結論と、今後の研究課題を示す。

参考文献

- 1) 一般社団法人 鋼管杭・鋼矢板技術協会：回転杭工法 施工管理要領， p.5, 2017.
- 2) 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.
- 3) 田中宏征， 日下裕貴：鋼管杭の技術の変遷と最近の技術開発動向， 新日鉄住金技報， 第 403 号， 2015.
- 4) 佐藤宇絃， 原田剛男， 岩佐直人， 林悟史， 大谷順：スパイラルパイル施工時の回転条件が鉛直支持力に与える影響に関する基礎的検討， 地盤工学ジャーナル， Vol.10, No.2, pp.253-265, 2015.
- 5) 村田重之， 後藤常郎：ねじり平鋼杭の押込み・引抜き現地試験， 土と基礎， 公益社団法人 地盤工学会， 51(11), pp.11-13, 2003.10.
- 6) 後藤宇絃：地盤工学におけるらせん帯状部材の適用に関する研究， 熊本大学大学院， 2018， p.191.
- 7) 平田篤夫， 古梶繁夫， 姜 聲承， 後藤常郎：地盤との連成挙動に基づくスパイラルバーの軸方向抵抗力算定法に関する研究， 資源と素材， 一般社団法人 資源・素材学会， Vol.121, No.8, pp.370-377, 2005.
- 8) GT スパイラル HP：<https://www.gt-spiral.com/>
- 9) 東急建設 HP：https://www.tokyu-cnst.co.jp/tokyu-tech/tech_info/blog/2022/07/tc.html
- 10) ヒノダクパイル(ダクタイル鋳鉄製基礎杭・省スペース基礎工法)， 日之出水道機器株式会社， 国土交通省新技術情報提供システムNETIS登録番号QS-190022-A, <https://www.netis.mlit.go.jp/netis/pubsearch/details?regNo=QS-190022%20> (最終検索日：2023年12月15日)
- 11) 谷陽介， 藤本宏義， 永田誠， 王坤鵬， 安福規之， 石藏良平：ピッチ幅比に着目した砂地盤におけるスパイラル杭の支持力実験， 第54回地盤工学研究発表会講演集， pp. 1251-1252, 2019.
- 12) 王坤鵬， 谷陽介， 安福規之， 石藏良平， 藤本宏義， 永田誠：Bearing capacity characteristics of spiral pile in sandy ground focused on pitch-width ratio. 第54回地盤工学研究発表会講演集， pp.1253-1254, 2019.
- 13) 日之出水道機器株式会社． 永田誠， 谷陽介：螺旋状杭， 特開2020-193516, 2020.12.3.

- 14) Amarbayar, J., Yasufuku, N., Ishikura, R., Tani, Y., Nagata, M. & Kurokawa, T :
2021. Experimental Observation on Behavior of Ultimate Lateral Capacity of
Vertical-Batter Screw Pile Under Monotonic Loading in Cohesionless Soil. The
Second International Conference on Press-in Engineering, Kochi, Japan.
- 15) 中谷昌一, 白戸真大, 井落久貴, 松井謙二 : 水平力を受ける杭の弾性限界
状態に関する研究, 土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp. 616-628, 2008.8.
- 16) 菅野泰次郎, 黒川貴大 : 生活道路向け防護柵や車止め等に対応した基礎杭
の検討, 第 33 回日本道路会議, 日本道路協会, 2019.
- 17) Meyerhof, G. G : The bearing capacity of rigid piles and pile groups under
inclined load in clay. Can. Geo-tech. J: 18(2). pp.159-170. 1981.
- 18) Rao, S. N & Prasad, Y. V. S. N : Uplift behavior of pile anchors subjected to
lateral cyclic loading. J. Geotech. Eng: pp.786-790. 1993.
- 19) Georgiadis, K & Georgiadis, M : Undrained lateral pile response in sloping
ground. J. Geotech. Geoenviron. Eng: pp.1489-1500. 2010.
- 20) Lee, J., Kim, M & Kyung, D : Estimation of lateral load capacity of rigid short
piles in sands using CPT result. J. Geotech. Geoenviron. Eng: pp.48-56. 2010.
- 21) Patra, N. R & Pise, P. J : Ultimate lateral resistance of pile groups in the sand.
J. Geotech. Geoenviron. Eng: pp.481-487. 2001.
- 22) Broms, BB : Lateral resistance of piles in cohesive soils, J. Soil Mech. Found.
Div., ASCE, 90(2), pp. 27-64, 1964.3.
- 23) 日本道路協会 : 杭基礎設計便覧, 1992.
- 24) 岡原美知夫, 高木章次, 中谷昌一, 木村嘉富 : 単杭の支持力と柱状体基礎
の設計法に関する研究, 土木研究所資料第 2919 号, 1991.
- 25) 土手一朗 : 大気環境における球状黒鉛鋳鉄の腐食特性に関する研究. 九州
大学, 2021, 博士論文.
- 26) 北田幸夫, 黒川貴大, 長崎怜, 松村寿男, 中村将章, 加藤準治 : トポロジ
ー最適化技術を用いた仮設ブラケットの設計及び評価, 構造工学論文集 A,
Vol.69A, pp. 26-34, 2023.3.
- 27) 日本道路協会 : 防護柵の設置基準・同解説, 2016.
- 28) 日本道路協会 : 防護柵の設置基準・同解説, 2021.
- 29) サンポール HP : <https://www.sunpole.co.jp/product-story/post-4862/>

第2章 実験土層における斜直合成スパイラル組杭の 水平抵抗特性

2.1 はじめに

スパイラル杭は、帯状の平鋼を長軸周りに沿って螺旋状にねじり加工した基礎杭である。このようにして製作されたスパイラル杭は、水平方向から作用する曲げ荷重に対して、ねじりピッチごとに最も抵抗が小さくなる、つまり断面二次モーメント I が最小となる弱軸断面が出現してしまう。最も I が大きくなる強軸断面も存在するため、単純な平鋼よりも全体の曲げ剛性は高くなるものの、同径の鋼管杭と比べると断面積も小さいために曲げ剛性も低くなる。そのため、杭としての水平抵抗力も低くなってしまう課題がある。杭の水平抵抗力を向上させる方法は、杭径などの寸法や杭長を拡大する事が挙げられるが、製造上の制約、地下埋設物や支持層への干渉(スパイラル杭は支持層のような堅固な地盤への施工は基本的に困難である)、施工性の悪化など、いずれもスパイラル杭の適用範囲を狭める可能性がある。その他の方法として、杭を2本使用する組杭がある。組杭は、杭を2本とも鉛直に打設し杭頭を接合する構造や、1本を直杭、もう1本をその補強として斜杭にする構造や、両方を斜杭とする構造などがある。特に直杭と斜杭を組み合わせた斜直合成組杭は、単杭と比較して、水平抵抗力の効率的な向上が期待される。

谷と Amarbayar ら^{1)~4)}は、実験土層内におけるスパイラル、プレート、パイプの単杭、及び斜直合成組杭(以下、斜直組杭とする)の水平抵抗特性を明らかにし、斜直組杭における斜杭の設置角度の影響について報告している。しかし、斜直組杭の設計合理化については未だ不明な点が多い。

本章では、スパイラル杭を活用した斜直組杭の設計合理化に向け、直杭と斜杭の杭長変化が水平抵抗力に及ぼす影響について、密な砂地盤を対象に模型での水平載荷実験にて評価する。また土質パラメータと関連付けた梁ばねモデルによる静的非線形解析にて、実験結果の再現と斜杭角度の増大による影響の予測を行う。これらから実地盤及び実大での斜直組杭の水平抵抗挙動を予測し、実用可能な構造案を得る。

2.2 実験装置と実験土層の材料

本実験に使用した実験装置を図 2-1 に示す．鋼材フレームとアクリル板で作製した砂地盤タンク(内寸：幅 300×長さ 600×深さ 450 mm)，模型杭，変位計(鉛直・水平)，ロードセル，加力装置(サーボシリンダー)，から構成されている．砂地盤タンクは図 2-2 にイメージを示す通り，載荷方向を長手方向とした長方形の箱形土槽を使用した．なお，これらの実験装置及び地盤材料は，谷と Amarbayar ら^{1)~3)}による研究で用いたものと同一である．

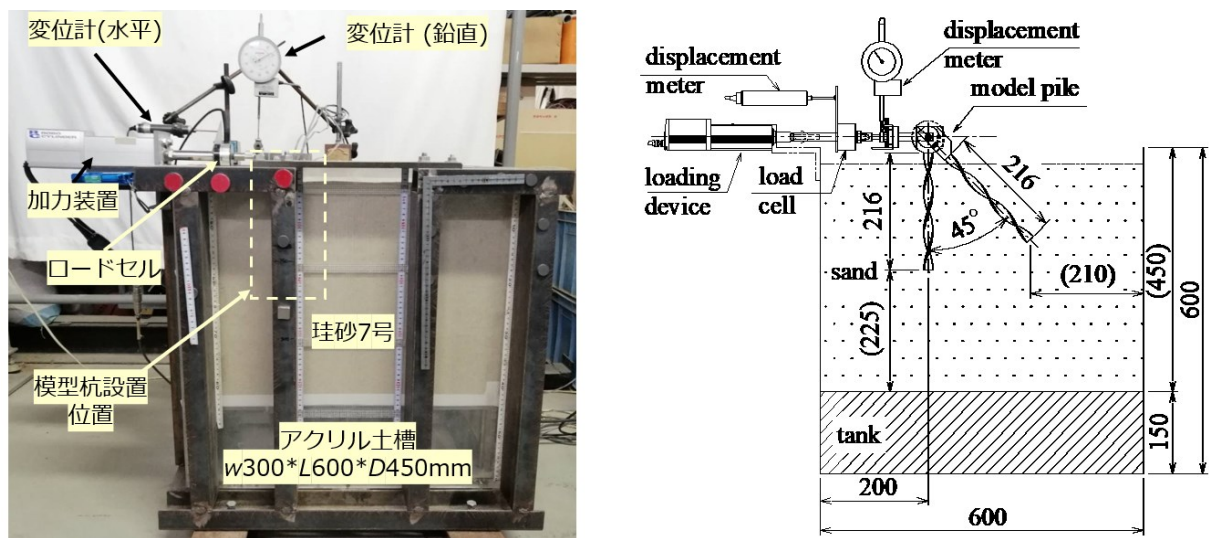


図 2-1 実験装置の概要

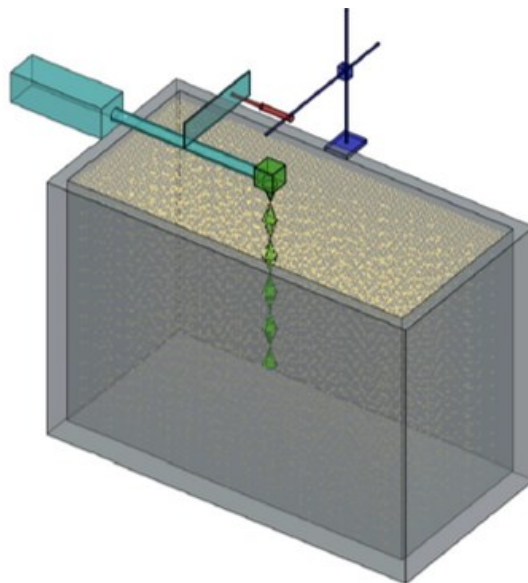


図 2-2 長方形箱形土槽のイメージ

地盤材料は熊本珪砂 7 号(K-7)を使用し，砂の基本物性を表 2-1³⁾に，粒度分布を図 2-3³⁾に示す．圧密排水三軸圧縮試験(CD)の結果から， $\gamma = 15.2\text{kN/m}^3$ ，内部摩擦角 $\phi_d = 41.9^\circ$ であった．タンク内高を 12 分割し，相対密度 90%に相当するように、各層に充填する土の重量を計算し，分割して投入した．全体が均一になるように締め固めるために，自由落下式の鋼製ランマーを使用し，人的要因によるばらつきを極力抑制できるように努めた．まず模型杭の下端にかからない層まで砂を充填し，その後に模型杭を所定の位置に設置した．その後，同じ方法でタンク上面まで砂を充填した．

本実験では，図 2-1 に示すように直杭直下方向及び斜杭先端から水平方向のタンク内壁までの距離を杭径の 10 倍以上の間隔を確保した．これは「杭の水平載荷試験方法・同解説」⁵⁾では，載荷方向に杭径の 5 倍、載荷反対方向に 2 倍以内（交番載荷の場合はどちらも 5 倍以内）を試験杭の変形が周辺地盤へ影響する範囲としていること，また，「近接基礎設計施工要領(案)」⁶⁾では，既製杭打込み工法の場合は，杭径の 10 倍以内で地盤変位の影響が既設構造物へ及ぶとしていること，を参考に設定した．また，Amarbayar ら⁴⁾は，水平載荷実験時にタンクの壁や底に作用する圧力を計測している．圧力計の設置位置と測定結果を図 2-4⁴⁾と図 2-5⁴⁾にそれぞれ示す．模型杭が荷重を受けて水平変位が進展しても，タンクの壁や底には圧縮応力(+)が計測されず，むしろマイナスの圧力が計測された．これは模型杭の変位の影響がタンク内に収まっていることを示唆している．

表 2-1 砂地盤の物性値³⁾

項目	数値
比重, G_s	2.63
最大乾燥密度, $\rho_{\max}$	1.56 g/cm ³
最小乾燥密度, $\rho_{\min}$	1.19 g/cm ³
均等係数, U_c	1.76
メディアン径, D_{50}	0.17 mm
単位体積重量, γ	1.53 g/cm ³
相対密度, D_r	90%
内部摩擦角, ϕ_d	41.9°

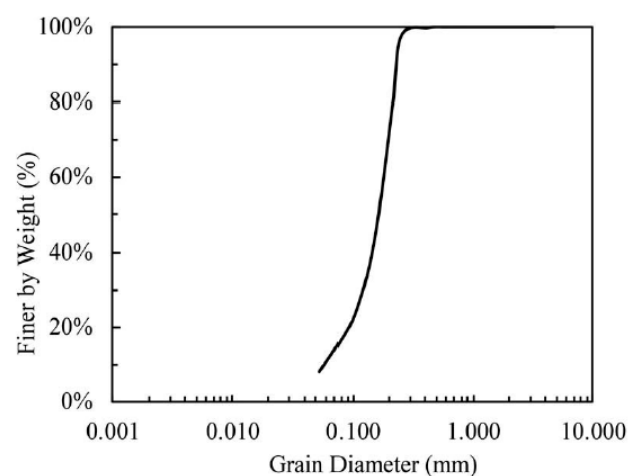


図 2-3 粒度分布³⁾

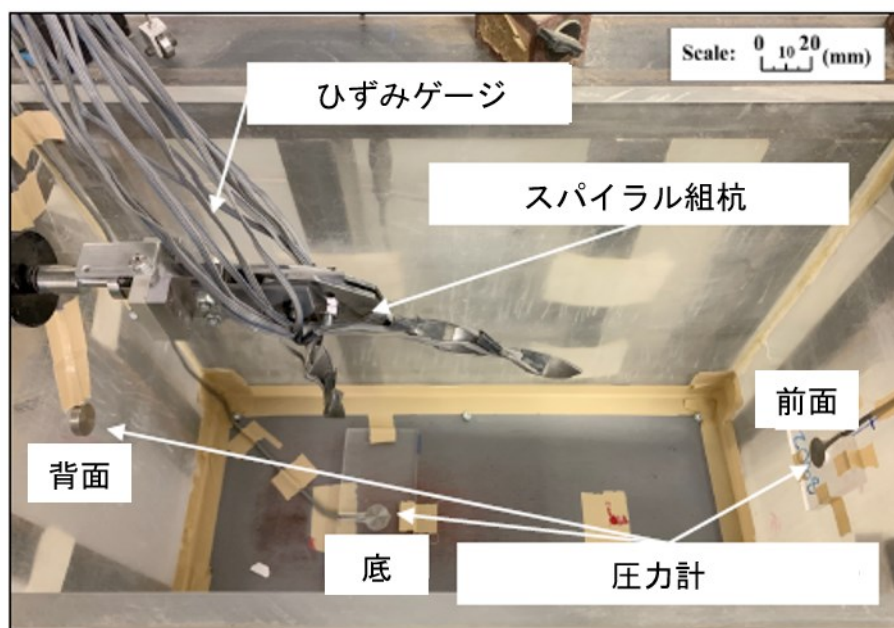


図 2-4 圧力計の位置 ⁴⁾

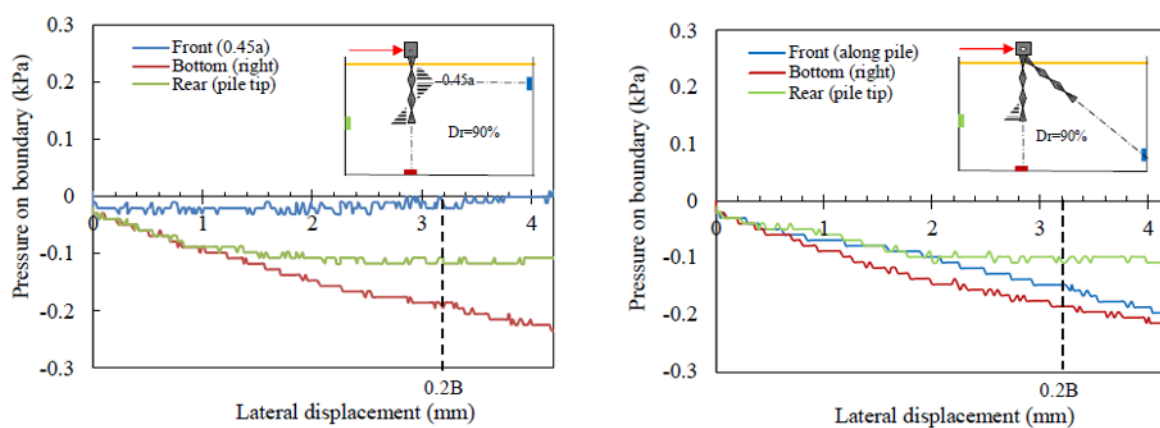


図 2-5 左) 単杭, 右) 斜直組杭の水平変位とタンク壁と底の圧力の関係 ⁴⁾

2.3 模型杭の作製

模型杭は、 $B16 \times t3$ mm の平鋼(材種：SS400)をねじり加工して製作した．斜直組杭模型の一例を図 2-6 に示す．試験体条件を表 2-2 に示す．直杭と斜杭の杭長の及ぼす水平抵抗特性への影響を明らかにするために、144 mm と 216 mm の 2 種類を用いた．スパイラル形状の効果を比較しやすくするために、スパイラルのピッチ $p = 72$ mm の整数倍の杭長に設定した．スパイラル杭のピッチ・幅比は、谷ら⁷⁾の先行研究から全て 4.5 で統一した．また、斜杭の設置角度は、Amarbayar ら³⁾の研究に基づいて 45° で統一した．

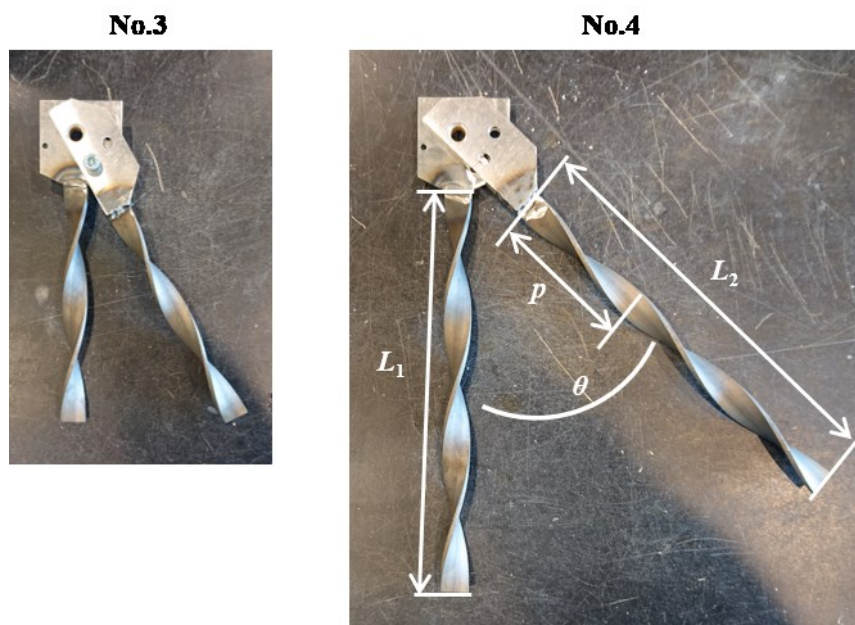


図 2-6 斜直合成スパイラル組杭の模型

表 2-2 実験ケースと模型杭のパラメータ

No.	Type	L_1 (mm)	L_2 (mm)	θ ($^\circ$)
1	単杭	144	-	-
2	単杭	216	-	-
3	斜直組杭	144	144	45
4	斜直組杭	216	216	45
5	斜直組杭	144	216	45
6	斜直組杭	216	144	45

2.4 直杭と斜杭の杭長と水平抵抗力の関係

図 2-7 に荷重変位関係を示す．破線が 144 mm の直杭を用いた No.1, 3, 5 を，実線が 216 mm の直杭を用いた No.2, 4, 6 を示す．また，青が単杭，緑が斜直組杭且つ直杭と斜杭の杭長が同じもの，赤色が斜直組杭且つ直杭と斜杭の杭長が異なるものを示す．総じて，直杭が長いと最大荷重が高い傾向にあり，斜直組杭は単杭に比べて高い剛性(=荷重/変位)を示した．No.3, 4, 5 は最大荷重を発揮した後に荷重が低下していき，No.3 と No.4 は，直杭が同じ長さの単杭 No.1 及び No.2 と同等以下まで低下し，データの推移からは変位が進展したら更に下回る可能性が予見された．No.5 は，荷重低下が一定の数値で落ち着き，以降は横ばいで推移した．No.2 と No.6 では本実験の計測範囲では，荷重低下の挙動は見られず，変位量 15 mm においては No.6 の荷重が最も大きくなった．ただし，No.6 は徐々に荷重増加が鈍化してきており，変位が更に進展すると，いずれは他の斜直組杭と同様に低下に転じることが予見された．斜杭のみを長くした No.5 では，変位が 1 mm 程度の初期において，No.6 よりも高い剛性を示したが，それ以降は剛性及び荷重ともに No.6 よりも下回った．このことから，斜直合成組杭の水平抵抗力には直杭の抵抗力がより大きく影響することが示唆された．

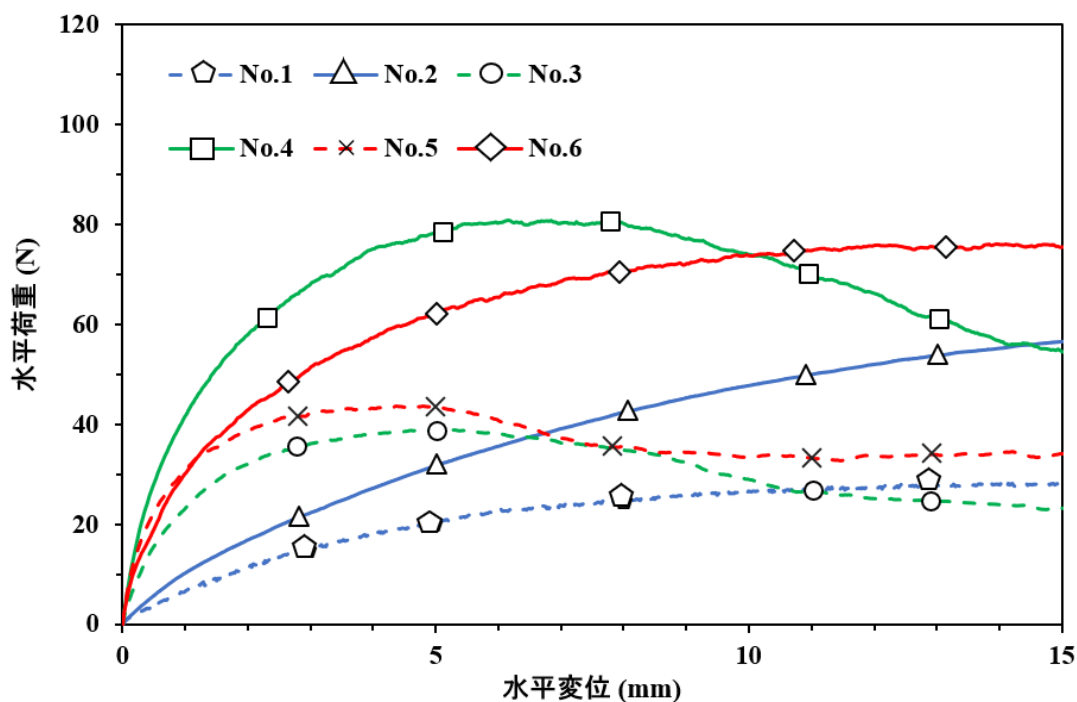


図 2-7 荷重変位関係(単杭と斜直組杭及び杭長の影響)

次に、実験結果から杭の弾性限界荷重 P_{Hy} の推定を試みた。Amarbayer ら³⁾の研究では極限支持力と表現しているが、本論文では「杭の水平載荷試験方法・同解説」⁵⁾で使われている弾性限界との表現から、弾性限界荷重に統一する。ここでは、Amarbayer らと同様に Broms⁸⁾の研究より、荷重変位曲線が杭幅の 20%(0.2B)で公差する点を弾性限界とみなした(図 2-8)。表 2-3 に、判定した弾性限界荷重 P_{Hy} (N)と、単杭(No.1)及び斜直組杭(No.3)との対比を示す。単杭から斜直組杭とすることで、弾性限界荷重は 2 倍以上に増加(No.1→No.3 : 2.26 倍, No.2→No.4 : 2.86 倍)した。単杭を 1.5 倍延長した No.2 では補強効果は約 1.5 倍であり、斜直組杭はより補強効果が大きいことがわかった。斜直組杭は、直杭と斜杭を延長することで、弾性限界荷重はいずれも増加した。その効果は、両方を同様に延長した No.4 では 1.88 倍、斜杭を 1.5 倍延長した No.5 では 1.17 倍、直杭を 1.5 倍延長した No.6 では 1.4 倍となった。直杭を延長する方が斜杭を延長するよりも 2 割以上も効果できであることが明らかとなった。これは弾性限界以降の挙動(図 2-7)からも明らかである。直杭と斜杭の杭長もしくは根入れ深さが同等の場合には、地表面に向かって作用する直杭の引抜抵抗力は、斜杭の押込支持力よりも弱くなる傾向にあると推測される。したがって、斜直組杭の水平抵抗力には直杭の引抜抵抗力の確保がより重要であることが示唆された。

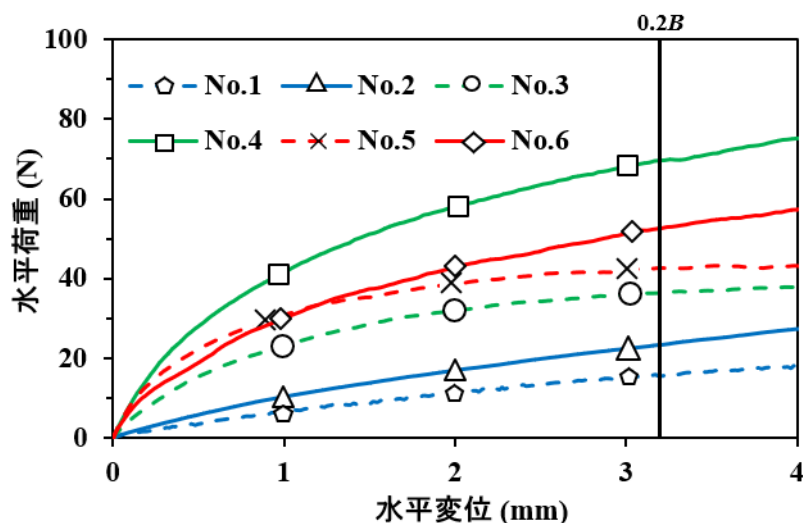


図 2-8 弾性限界荷重の判定

表 2-3 弾性限界荷重 P_{Hy} (N) と単杭及び斜直組杭との対比

No.	Type (mm)	P_{Hy} (N)	No.1 対比	No.3 対比
1	単杭, $L_I=144$	15.8	1.00	0.44
2	単杭, $L_I=216$	23.6	1.49	0.66
3	斜直組杭, $L_I=144, L_2=144$	35.8	2.26	1.00
4	斜直組杭, $L_I=216, L_2=216$	67.4	4.25	1.88
5	斜直組杭, $L_I=144, L_2=216$	41.9	2.65	1.17
6	斜直組杭, $L_I=216, L_2=144$	51.2	3.23	1.43

2.5 梁ばねモデル解析による模型実験の再現及び斜杭角度の影響

2.5.1 解析方法の概要

模型実験の再現及び斜杭角度の増大の影響を明らかにするため解析による検討を行った．解析は弾性支承梁理論を参考にしつつ，地盤を均等な弾塑性支承(非線形ばね)に置換し，杭を曲げ剛性を有する梁材でモデル化した２次元梁ばねモデルによる方法を採用した⁹⁾．谷ら¹⁾は，同解析方法によって，スパイラル杭とプレート杭について，実験結果の変位量が小さい範囲(水平変位量 1 mm まで)における割線剛性と，解析結果が概ね一致することを報告している．本解析の解析モデルイメージと拘束条件を図 2-9 と表 2-4 に示す．杭体の材料定数は一般鋼材としてヤング率 $E=200\text{ GPa}$ ，ポアソン比 $\nu=0.3$ に設定した¹⁰⁾．スパイラル形状を２次元の梁で正確に再現することは困難なため，単純な矩形断面とした．ただし，実際と曲げ剛性を合わせるために幅と厚みを調整した．幅は，くびれ部を考慮した投影面積に合わせるために 15 % 縮小した．また，スパイラル形状の断面二次モーメントは，Amarbayar が提案した式 1-1 より， $I=102\text{ mm}^4$ が得られた．これらより，解析モデルの寸法は表 2-5 に示す通り，幅 $B=12\text{ mm}$ ，厚み $t=4.68\text{ mm}$ とした．解析には，非線形ばね要素に対応可能な汎用ソフトとして「Engineer's Studio® Advanced」(株式会社フォーラムエイト)を使用した．

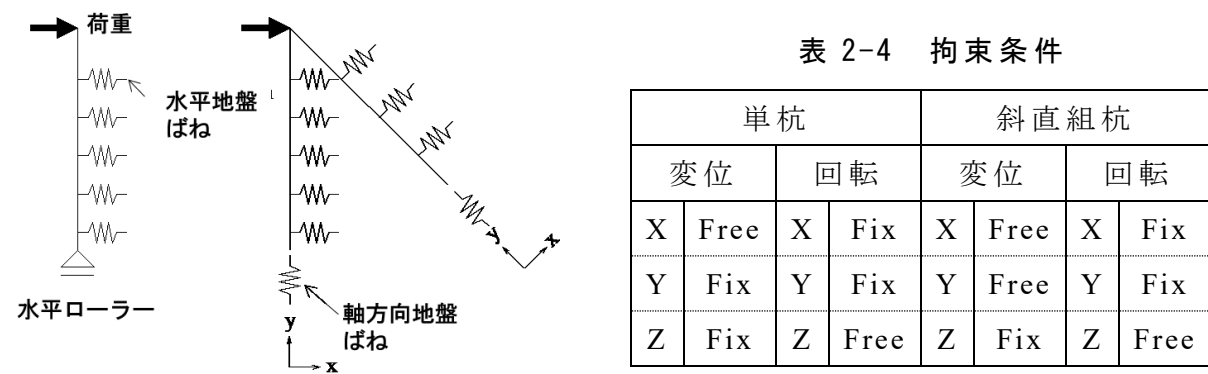


図 2-9 解析モデルイメージ

表 2-5 杭体の断面性能

項目	模型	解析モデル
杭長, L_1, L_2 (mm)	144, 216	144, 216
幅, B (mm)	16	12
厚み, t (mm)	3	4.68
断面二次モーメント, I (mm ⁴)	36	102

2.5.2 水平地盤反力係数(水平地盤ばね)と変形係数の推定

まず、杭の水平方向地盤反力係数(以下、水平地盤ばね)について設定する。本研究は新しいスパイラル杭の実用化に寄与することを背景としているため、解析検討においては極力実務上で既に活用されている方針や手法に準じて、それらが適用可能かも含めて検討した。ここでは、「鋼管杭 - その設計と施工 -」¹¹⁾及び「道路橋示方書・同解説IV下部構造編(平成24年)」¹²⁾に準じて、杭基礎における水平方向地盤反力係数 k_H を求める。これらの文献には地盤調査の結果から推定する手法が紹介されており、これより式 2-1 を用いて算出する。計算では鋼管杭自体の変形は弾性範囲を想定した曲げ剛性を用いている。今回使用したスパイラル杭においても砂地盤に対して十分に剛性が高く、弾性範囲での変形と想定されるため、同手法の適用性があると判断した。

$$k_H = k_{H0} \left(\frac{B_H}{0.3} \right)^{-3/4} \quad \text{式 2-1}$$

$$k_{H0} = \frac{1}{0.3} \alpha E_0 \quad \text{式 2-2}$$

$$B_H = \sqrt{D/\beta} \quad \text{式 2-3}$$

ここで、

k_{H0} ：直径 0.3 m の剛体円板による平板載荷試験の値に相当する水平方向の地盤反力係数(kN/m³)で、各種土質試験・調査により、求めた変形係数から推定する場合は、式 2-2 より求める。

B_H ：荷重作用方向に直交する基礎の換算載荷幅(m)で、式 2-3 より求める。

E_0 ：各試験によって測定または推定した、設計の対象とする位置での地盤の変形係数(kN/m²)。

α ：地盤反力係数の推定に用いる係数。三軸圧縮試験から推定する場合は常時で4、地震時には8とするとされている。今回は短期荷重を想定し後者を採用。

D ：荷重作用方向に直交する杭の載荷幅(m)，ここでは B ：杭幅と同一とする。

$1/\beta$ ：水平抵抗に関与する地盤の深さ(m)で、杭の有効根入れ長さ以下とする。

β ：杭の特性値 $\sqrt[4]{\frac{k_H D}{4EI}}$ (m⁻¹)。

EI ：杭の曲げ剛性(kN・m²)， E ：ヤング率(GPa)， I ：断面二次モーメント(m⁴)。

上記の通り、 β は k_H との関数となっている。したがって、一旦、 $1/\beta$ を $5D$ 程度に仮定することで k_H を算出し、図 2-10¹¹⁾にしたがって収束計算を行う。

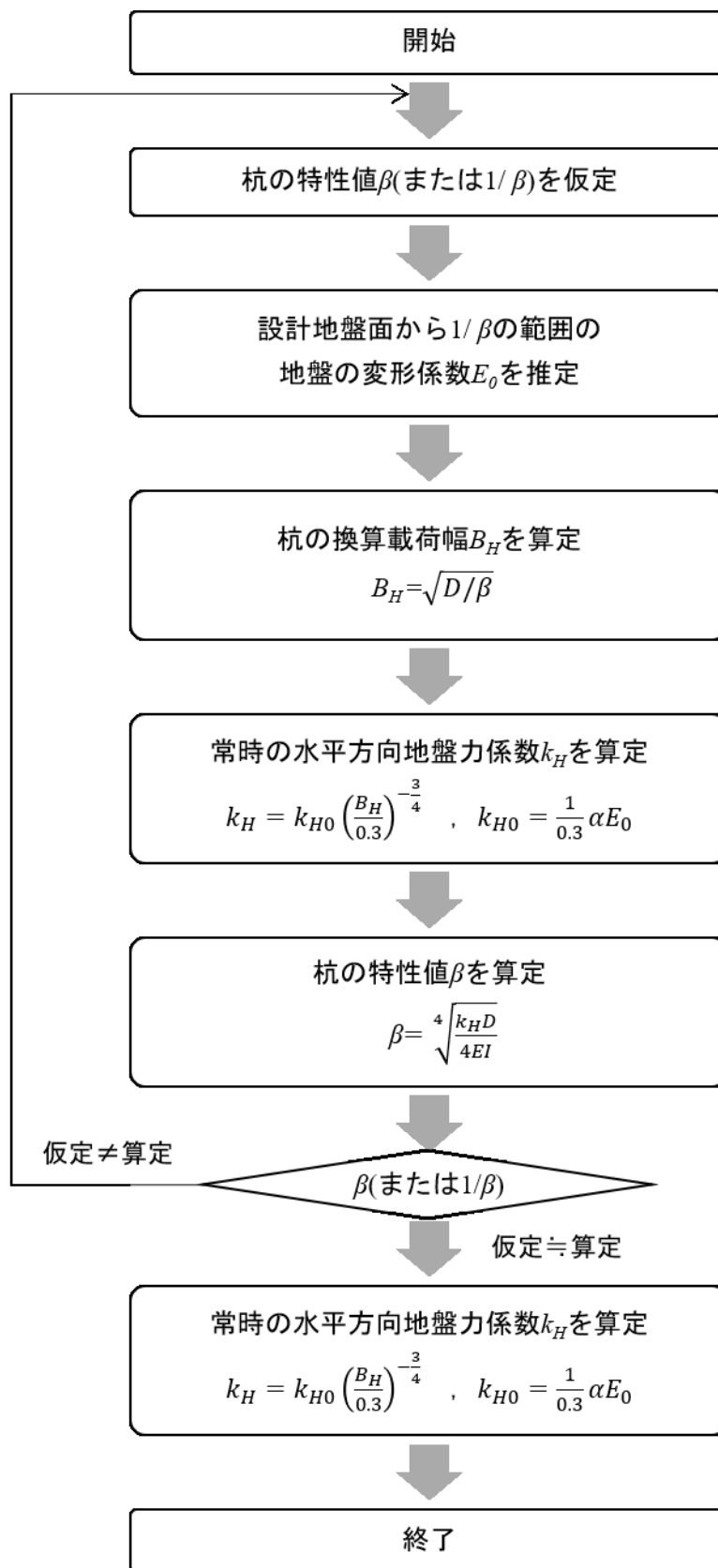


図 2-10 水平方向地盤反力係数 k_H の算定フローチャート ¹¹⁾

次に地盤の変形係数について設定する．大竹ら¹³⁾は，設計用地盤変形係数の推定法について， E_1 (軸ひずみ $\varepsilon_a = 0.01(1\%)$)の時の地盤変形係数)を基準地盤変形係数と呼び， E_{50} (土質の圧縮試験における最大主応力差の 1/2 と原点から算出される地盤変形係数)の平均的な値に相当し，これから任意の軸ひずみに対応する変形係数を推定することができると報告している．実験で使用した砂の圧密排水三軸圧縮試験結果を図 2-11a～c に示す．軸方向応力ごとに E_{50} 及び E_1 をプロットし，それぞれの近似式を得て，それから側方向応力と変形係数の関係も合わせて図 2-11 に示す． E_1 と E_{50} で大きな差はなく，今回は若干安全側となる E_{50} を用いることとする．これより，模型型実験における杭の設置深さ L 及び砂の単位体積重量 γ から，杭にかかる土圧(側方向応力)を算出し，その際の地盤変形係数を E_{50} の近似式から求めて一律に設定した．

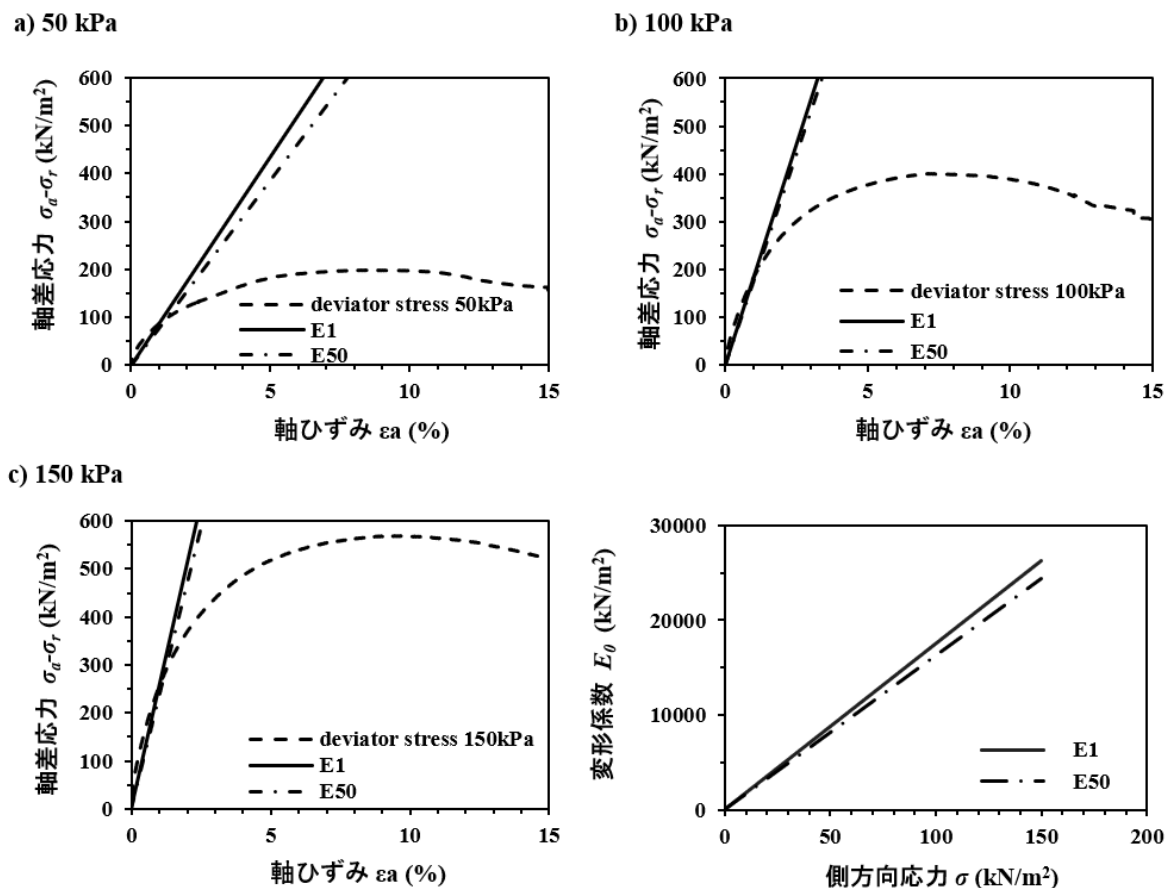


図 2-11 軸ひずみと軸差応力の関係及び側方向応力と変形係数の関係

本実験の水平抵抗挙動の再現には、地盤の非線形的な特性を水平地盤ばねに付与する必要がある。「建築基礎構造設計指針」⁹⁾では、杭水平変位が大きくなり、水平地盤反力度の上限値である塑性水平地盤反力度 P_y (kN/m²) に達すると杭周辺地盤はそれ以上の反力を負担できなくなるとしている。塑性水平地盤反力度は、杭前面地盤が塑性破壊状態となり、地表面へすべり線が向かう塑性域Ⅰと杭側方へ回り込むように地盤が塑性化する塑性域Ⅱが生じるとして(図2-12)算定するとされている。この現象を考慮した Broms^{8), 14)}の提案式を踏まえ、砂質土の場合には、式2-4での算定が推奨されており、これを適用し算出した。

$$P_y = \kappa K_p \sigma_z' \quad \text{式 2-4}$$

ここで、

K_p ：受働土圧係数($= (1 + \sin \phi_d) / (1 - \sin \phi_d) = \tan^2(45^\circ + \phi_d / 2)$)。 ϕ_d ：内部摩擦角(°)。

σ_z' ：深さ z (m)における地盤の有効上載圧($= \gamma z$) (kN/m²)。

κ ：砂質土の塑性水平地盤反力度に群杭の影響を考慮する係数。ここでは単杭及び前方杭の場合として3とした⁹⁾。

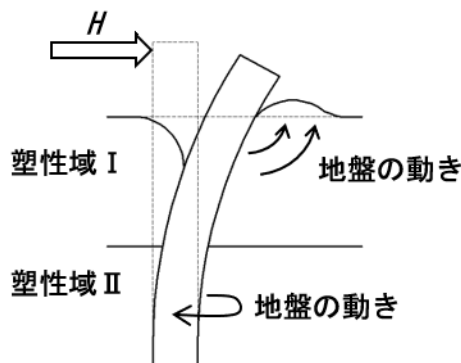


図 2-12 杭の水平抵抗における杭前面地盤の塑性化状態⁹⁾

以上より，水平地盤反力係数と塑性水平地盤反力度から、地盤の塑性領域の挙動を再現できるバイリニア型の水平地盤ばねを設定する．水平地盤ばねは，に図 2-9 に示したように，杭軸直交方向へ付与した．以下に解析モデルへの具体的な水平地盤ばねの設定手順を示す．なお，実験結果と解析結果のフィッティングを行う過程で，塑性水平地盤反力に補正係数 CF を乗じた．

- i. 水平地盤反力係数 k_H (kN/m^3) の算定
- ii. 水平地盤ばねの設置数の設定．解析モデルの要素長は，杭長 144 mm で 20 分割，杭長 216 mm で 30 分割とし，要素間の節点に水平地盤ばねを設定した．したがって，杭長 144 mm で 10 個，216 mm で 15 個である．
- iii. 塑性水平地盤反力度及び任意の深さでの塑性水平地盤反力 P_y の算定
- iv. 水平ばね剛性 k_y ($=k_H \times \text{要素面積(杭幅 } B \times \text{節点間隔 } D_s)$) (kN/m)
- v. 塑性水平地盤反力 P_y (kN) に達する際の変位量 δ_y (折れ点) の設定
塑性水平地盤反力度 P_y (kN/m^2) を水平ばね剛性 k_s (kN/m) で除して，変位量を算定し，この点を水平地盤ばねの上限値に達する折れ点とする．
- vi. 任意の深さ毎に塑性水平地盤反力及び折れ点を算定し，固有のバイリニア型水平地盤ばねを設定する．一例を図 2-13 と表 2-6 に示す．

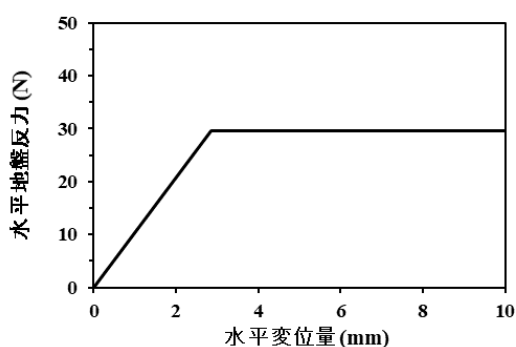


図 2-13 バイリニア型水平地盤ばね (杭長 216 mm，杭先端部 No. 15)

表 2-6 水平地盤ばね諸元 (No. 15)

E_0 (kN/m^2)	501	ϕ_d	41.9
α	8	K_P	5.01
β (m^{-1})	8.24	γ (kN/m^3)	15.0
$1/\beta$ (m)	0.12	z (m)	0.2
$D=B$ (m)	0.012	P_y^* (N)	29.5
B_H (m)	0.038	D_s (mm)	0.137
k_{H0} (kN/m^3)	6676	k_y (kN/m)	10
k_H (kN/m^3)	62679	δ_y (mm)	2.86

※ P_y は $CF=4$ を乗じた値．

2.5.3 スパイラル杭の軸方向地盤ばねの推定

次に斜直組杭において、直杭の引抜抵抗と斜杭の押込支持力を再現するために軸方向地盤ばねの設定を行った。スパイラル杭の軸方向の支持力は、杭体を円柱として、その周面積に作用する摩擦力で構成され、砂のせん断力から求められる¹⁵⁾。しかし、実際には、スパイラルのねじり部に土が入り込むことで、物理的な抵抗も加わり、これよりも大きくなると想定されるが、詳細なメカニズムは明らかになっていない。今回は、新たに鉛直載荷模型実験を行い、スパイラル杭の押込みと引抜き抵抗の推定を行うこととした。実験条件や装置などは、谷とワンら^{16), 17)}の報告を参考に同一とした(図 1-3)。砂地盤は、熊本珪砂 7 号、相対密度 $D_r=75\%$ 、内部摩擦角 $\phi=41.1^\circ$ 、上載圧 $\sigma_c=12.6 \text{ kN/m}^2$ 、砂の単位体積重量 $\gamma=14.3 \text{ kN/m}^3$ 、模型杭の長さ $z=0.7 \text{ m}$ である。模型杭には、本実験とは異なる杭幅 $B=25, 44 \text{ mm}$ のスパイラル杭を用いて、後に杭幅や砂条件が変わっても推定できるように経験式を得る(ただし、 $p/w=4.5$ で固定)。

実験結果を周面積で、変位量を杭幅で除して無次元化した結果を図 2-14 に示す。いずれも $B=25, 44 \text{ mm}$ で概ね傾向が一致し、杭の寸法に依存することが確かめられた。水平抵抗と異なり、載荷初期はほぼ変位が進まず、ある点から徐々に変位が進みだし、最大値を迎えた。引抜きにおいては、最大値を迎えた後に抵抗力が低下した。図 2-14 には式 2-5 で求めたせん断強さ τ の計算値も載せた。図中に示した赤矢印からもわかるように押込み支持力の差が大きい。引抜き抵抗についても差が認められ、いずれも実験値のほうが高い値を示した。この差が、今回のスパイラル形状による支持力に与える補強効果と考えた。ただし、スパイラル形状が支持力へ及ぼす効果を一般化するにはさらなる要素実験が必要であるが、今回は、解析モデルへ軸方向地盤ばねを設定する数値には、計算値と実験値との差をスパイラルの形状効果として乗じたものを使用した。なお、鉛直載荷実験と水平載荷実験の土層条件(熊本珪砂 7 号、相対密度 90%、内部摩擦角 $\phi=41.9^\circ$ 、上載圧 $\sigma_c=0 \text{ kN/m}^2$ 、砂の単位体積重量 $\gamma=15.0 \text{ kN/m}^3$ 、模型杭の長さ $z=0.144 \text{ or } 0.216 \text{ m}$)は異なるため、後者の条件にて、式 2-5 でせん断強さを計算した結果は図 2-15 に示す通りである。

式 2-5

$$\tau = c + \sigma \tan \phi$$

ここで、

c : 粘着力。今回は乾燥砂のため 0 とした。

σ : 静止土圧 $c+K_0 \cdot \gamma \cdot z$ (kN/m^2)。 K_0 : 静止土圧係数 0.5 である。

これらの結果から、杭先端に原点から2点の折れ点を有したトリリニア型ばねを設定した。一例を図2-16に示す。また、実験の荷重変位曲線より、マルチリニア型のばね特性を設定することで、より精度が向上すると思われる。

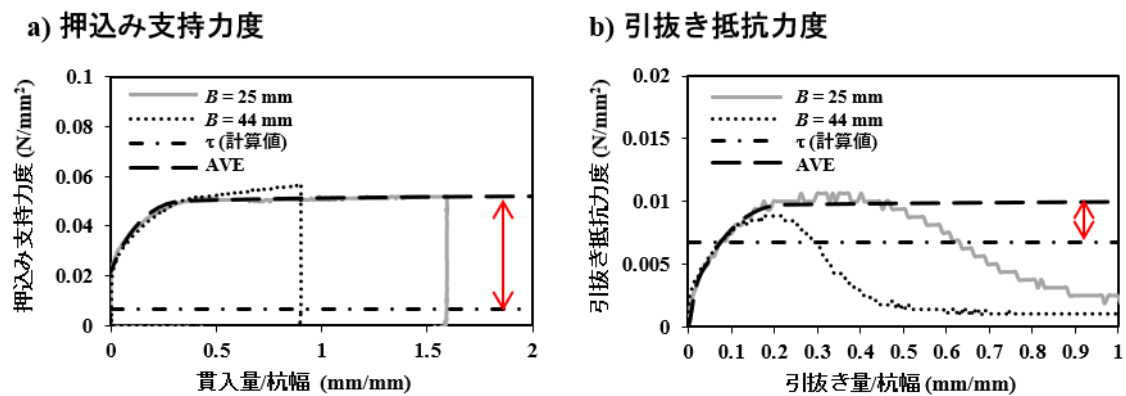


図 2-14 押し込み・引抜き模型実験結果

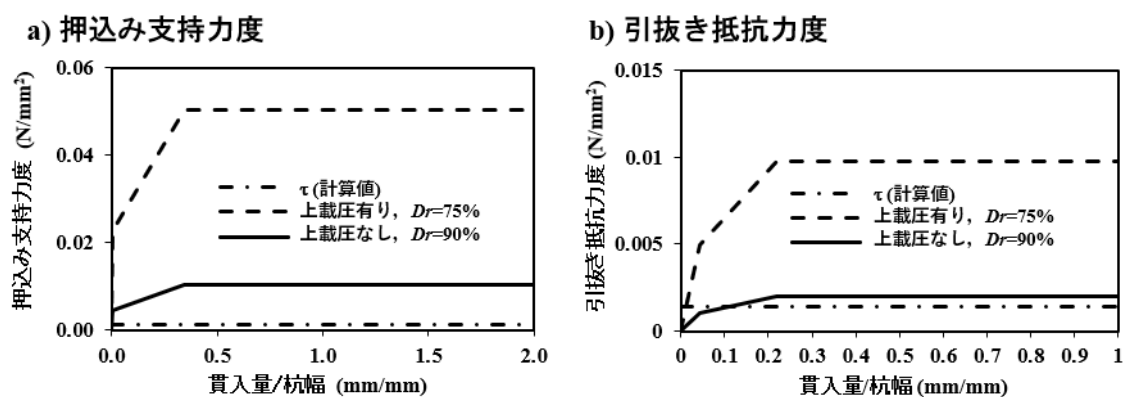


図 2-15 押し込み支持力・引抜き抵抗力の

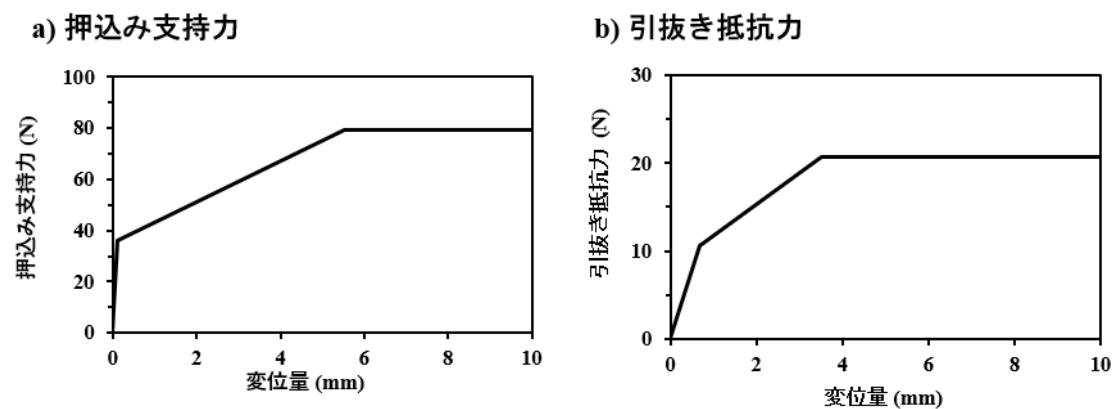


図 2-16 トリリニア型軸方向地盤ばね

(斜直組杭 45° の, a) 斜杭 216 mm, b) 直杭 216 mm)

今回の解析では模型杭は実験土層に対して短く，杭体自体のひずみの影響が少ないと考え，杭周面の摩擦力を杭先端に集約して一つのばねとして設定した．しかし，斜直組杭の場合には，軸方向地盤ばねが水平方向の外力に対しても寄与すると考えられた．そこで，ばねの設定数による解析結果への影響度を事前に検証した．水平地盤ばねの設定と同様に，軸方向地盤ばねも全長に分布させた結果，先端に集約して軸方向地盤ばねを一つとした場合と比べて，剛性が3%程度低くなった．これは地表付近のばねは，土圧が低く地盤反力も小さくなるが，水平力から作用するモーメントに対する負担がわずかながらも大きくなることが影響していると考えられる．しかし，本研究においては，組杭構造の比較検討を目的としているため，数%の差はばらつきの範囲と判断した．なお，ばねの設定数による解析結果への影響検証は，水平地盤ばねにおいても行っており，分割数及びばねの数を現状の倍にしても結果にほぼ差がないことを確認している．

2.5.4 解析結果

解析ケースを表 2-7 に示す．まずは模型実験との整合性を評価するために No.1～5 の解析を行った．Amarbayar ら³⁾は斜杭角度 45～60°で抵抗力が大きくなると報告している．水平抵抗と斜杭角度の関係を明らかにするために，斜杭角度を変化パラメータとして No.6～9 の解析を行った．

表 2-7 解析ケース

No.	Type	L_1 (mm)	L_2 (mm)	θ (°)
1	単杭	144	-	-
2	単杭	216	-	-
3	斜直組杭	144	144	45
4	斜直組杭	216	216	45
5	斜直組杭	216	144	45
6	斜直組杭	216	216	50
7	斜直組杭	216	216	55
8	斜直組杭	216	216	60
9	斜直組杭	216	216	70

解析結果を模型実験の結果と合わせて図 2-17 に示す。水平地盤ばねの塑性水平地盤反力を補正することで、ほぼ実験値に近い解析結果が得られた。補正係数 CF は模型杭の長さに応じて、杭長 144 mm は 10、杭長 216 mm は 4 とした。また、弾性限界荷重 P_{Hy} について、実験値との差、斜杭角度 45° (No.4) との差と合わせて表 2-8 に示す。弾性限界荷重の実験結果との誤差は No.1~4 で 8% 以下、No.5 で 14% の誤差となり、構造の事前検討の段階においては十分な精度が得られたと判断した。水平地盤ばねの上限値となる塑性水平地盤反力の Broms⁸⁾ の提案式では、十分に計算値が安全側(計算値が実験値を超えない)となる範囲で補正するものとして、係数を 3 としている。実際に、計算値と実験結果との最大差ではさらに 3 倍の差(合計 9 倍)があるものも報告されている。しかしながら、今回の解析値と実験結果とのフィッティングには、 L_I が 144 mm の場合にて、それを大幅に上回る補正(3→10、合計 30 倍)が必要となった。この一つの要因として、Broms の提案式では、杭先端の水平変位が十分に小さい長い杭が前提となっている点が挙げられ、杭先端が大きく変位するような短い杭における水平地盤ばねの上限値の設定方法の妥当性には課題が残った。補正係数は、杭の構造や地盤条件で変化すると想定され、補正係数を条件ごとに設定できれば解析精度が向上すると考えられる。しかし、実設計へ適用するためには、さらなる要素実験を行い、論理的・体系的に整理する必要がある。加えて塑性水平地盤反力の補正係数だけではなく、地盤の変形係数の推定や、軸方向地盤ばねの設定にもさらなる検討の余地がある。

次に、斜杭角度をパラメータとした No.4 及び No.6~9 の結果について考察する。図 2-17f に示す通り、 45° から 70° に大きくなると弾性限界荷重は 35% も低下した。これは斜杭の設置深さが浅くなったことで、水平地盤ばねの上限値である塑性水平地盤反力が低下したことが影響していると推測される。一方で、図 2-17g に示すように、変位が小さい範囲での剛性は角度が大きいほうが高いことがわかった。斜杭角度が大きくなると、軸方向地盤ばねの水平成分が大きくなるためと推察される。斜杭の設置深さを統一して角度を変化させるなどの検討によっては、最適な角度が 45° よりも大きくなる可能性がある。

以上より、スパイラル杭の断面性能を付与した単純な矩形断面による杭体のモデル化と、非線形の地盤ばねを水平(杭軸直交)方向と軸方向に付与することで、実験と同様の非線形的な荷重変位曲線を得ることができた。また、斜杭角度を増大させた場合の挙動について解析で明らかにすることができ、その結果は理論的にも妥当性を有しており、先行研究³⁾で報告されている斜杭の最適角度 45° に対しても一致した。

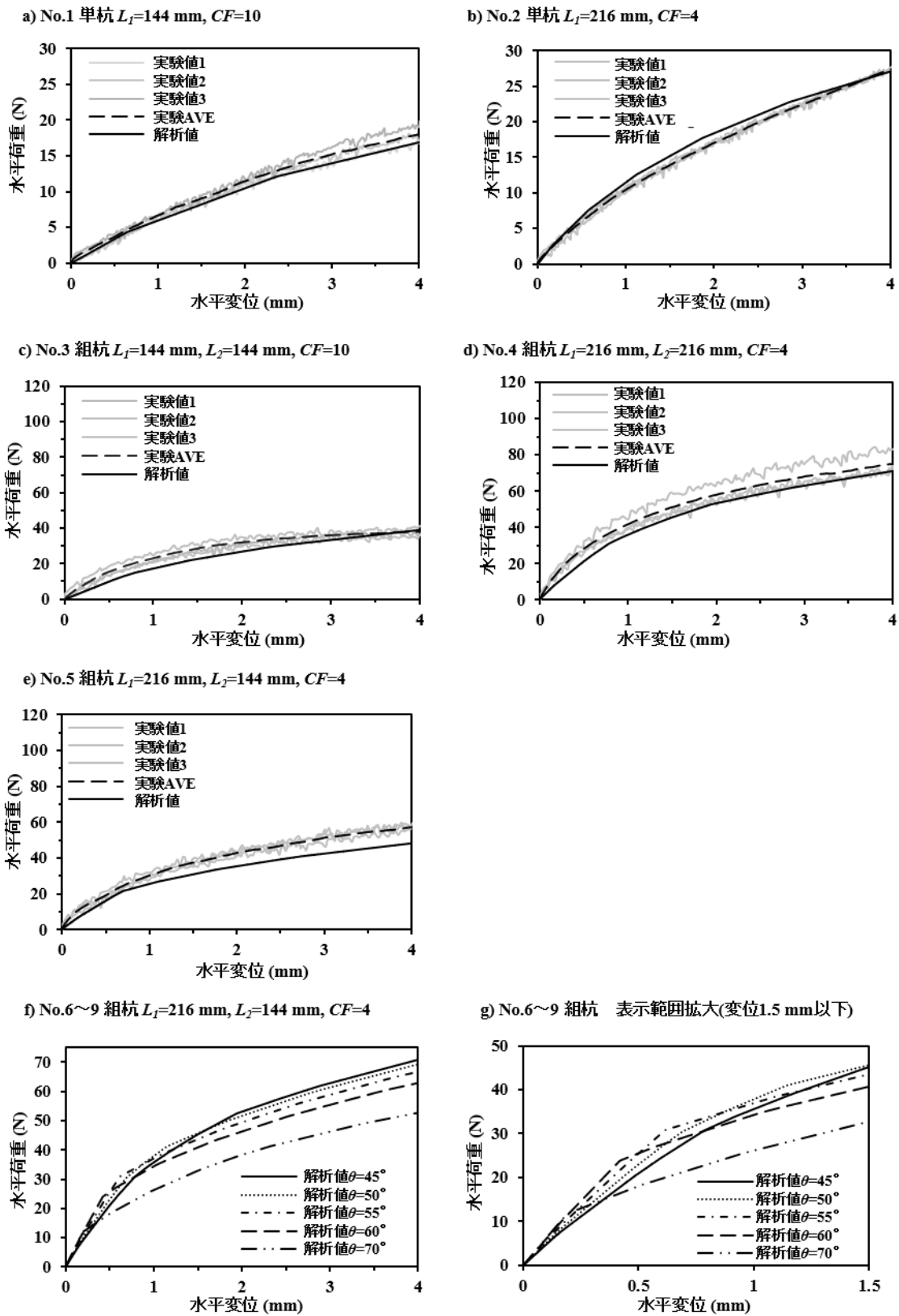


図 2-17 荷重変位関係 (解析値と実験値の比較及び斜杭角度影響)

表 2-8 実験と解析による弾性限界荷重 P_{Hy} (N)

No.	Type	斜杭角度 $\theta(^{\circ})$	P_{Hy} (N)		実験値と の差 (%)	No.4 と の差 (%)
			実験値	解析値		
1	単杭 $L_1=144$ mm	-	15.8	14.6	8	-
2	単杭 $L_1=216$ mm	-	23.6	24.1	-2	-
3	斜直組杭 ($L_1=144$, $L_2=216$ mm)	45	35.8	35.0	2	-
4	斜直組杭 ($L_1=216$, $L_2=216$ mm)	45	67.4	65.2	3	-
5	斜直組杭 ($L_1=216$, $L_2=144$ mm)	45	51.2	44.2	14	-48
6	斜直組杭 ($L_1=216$, $L_2=216$ mm)	50	-	64.0	-	-2
7	斜直組杭 ($L_1=216$, $L_2=216$ mm)	55	-	61.6	-	-6
8	斜直組杭 ($L_1=216$, $L_2=216$ mm)	60	-	58.2	-	-12
9	斜直組杭 ($L_1=216$, $L_2=216$ mm)	70	-	48.4	-	-35

2.6 梁ばねモデル解析による実大スパイラル斜直組杭の水平抵抗の予測

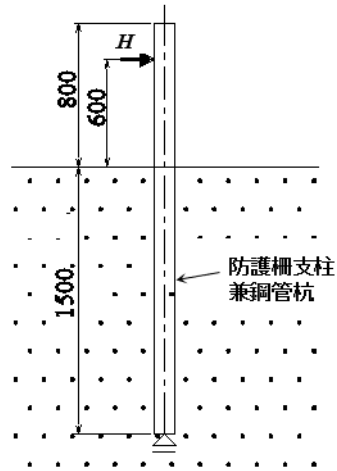
2.6.1 解析概要

これまでの実験と解析結果から、実大の斜直組杭について検討を行った。車両用防護柵向け基礎を想定して、比較対象を「車両用防護柵標準仕様・同解説」¹⁸⁾から、標準基礎の一種である直接鋼管基礎(以下、鋼管杭) $\phi 114.3 \times t 4.5 \times L 1500$ mmとした(図 2-18a)。これに対して斜直組杭の斜杭角度 45° とした基礎を考案し解析を行う。直杭には、第 1 章の図 1-2 に示した鋳鉄製杭基礎構造を参考に、図 2-18b に示すような円筒部とスパイラル部を有したパイプ付きスパイラル杭とした。具体的には、円筒部を $\phi 114.3 \times t 4.5 \times L_P 400$ mm、スパイラル部は $B 150 \times t 28 \times L_S = 350, 600, 850, 1100$ mm の矩形断面とし、全長 $L = 750, 1000, 1250, 1500$ mm として、複数のモデルを準備した。斜杭は円筒部を $\phi 114.3 \times t 4.5 \times 150$ mm、スパイラル部は $B 150 \times t 28 \times 350$ mm の矩形断面とし、全長 $L_B 500$ mm の直杭より短い杭とした。直杭の引抜抵抗力が斜直組杭の水平抵抗へより大きく寄与することから、直杭のスパイラル部の長さをパラメータとした。比較のためにパイプ付きスパイラル杭の単杭($L = 1500$ mm)の解析も行った。解析ケースを表 2-9 に、解析モデルを図 2-19 に示す。これにより、鋼管杭に対して同等性能を有する斜直組杭構造を導出する。支柱鋼管と直杭及び斜杭(一部剛体ビーム)は杭頭部で剛接合させ、支柱(杭頭 + 600 mm)に水平力を作用させた。なお、スパイラル部の解析モデルにおける断面寸法は、前項と同様に、杭長固定で投影面積を合わせるために杭幅を縮小し、断面二次モーメントはスパイラル形状の効果を考慮して厚みを増加させて調整した。

杭体に付与する水平地盤ばねの、水平地盤反力係数及び地盤の変形係数は前項で求めた砂地盤条件の数値を使用した。軸方向地盤ばねは、別途実施した鋳鉄製杭の現地実験(押込み/引抜き)結果から推定し設定した。杭は線形材料とし、鋼管杭は STK400(ヤング率：200GPa，ポアソン比 0.28)，直杭と斜杭に用いたスパイラル杭は FCD600(ヤング率：170GPa，ポアソン比 0.3)である。

実地盤を想定した地盤ばねの設定に関して、大竹ら¹³⁾は、 N 値(地層や地盤の固さを示す値、標準貫入試験などで求められる)から設計用地盤変形係数を推定する場合についても検討している。実務では N 値から地盤の変形係数を推定することも重要であると述べている。しかし、表層 2.5 m 以浅のデータがなく、本件の想定のような表層部の地盤変形係数の設定は重要な課題であると報告しており、明確にはなっていない。

a) 直接基礎(鋼管杭)



b) 斜直合成スパイラル組杭基礎

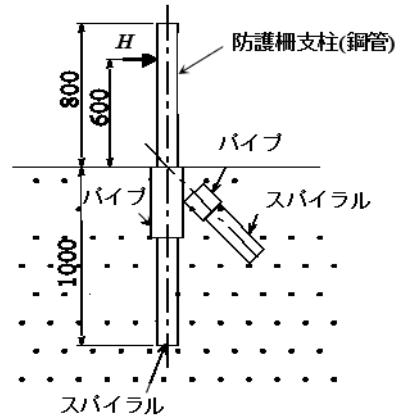


図 2-18 鋼管杭とスパイラル杭を活用した斜直組杭

表 2-9 解析モデルケース

No.	Type	形状	L (mm)	L_P (mm)	L_S (mm)
1	単杭	鋼管	1500	-	-
2	単杭	パイプ付きスパイラル	1500	400	1100
3	斜直組杭		1500	400	1100
4	斜直組杭		1250	400	850
5	斜直組杭		1000	400	600
6	斜直組杭		750	400	350

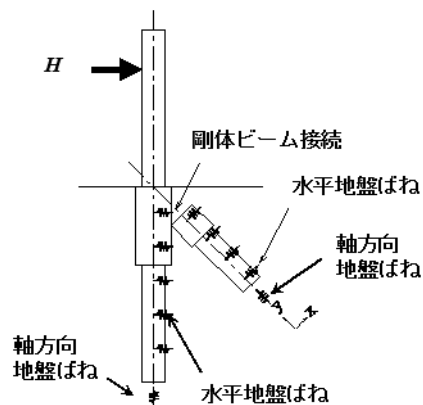


図 2-19 斜直組杭の解析モデルイメージ

2.6.2 結果と考察

荷重変位関係を図 2-20 に示す(赤色：単杭，黒色：斜直組杭). 塑性水平地盤反力の補正係数は，いずれも 4 に設定した．杭長が同等の鋼管杭(No.1)と，スパイラル杭の単杭(No.2)では，終局荷重は同程度であった．ただし，全体的に剛性は鋼管杭のほうが大きく，スパイラル部の曲げ剛性が鋼管に対して低いためと推測される．また，斜直組杭では，No.3～5 において，鋼管杭を上回る剛性と抵抗力が示された．変位量の表示範囲を変えて弾性限界荷重を比較した結果を図 2-21 に示す．基礎全長が 1000 mm の No.5 の斜直組杭は，鋼管杭と剛性がほぼ同等で，弾性限界荷重は約 1.1 倍と若干上回った．これより，鋼管杭と同等以上の強度でありながら，施工深さを 2/3 に縮小したスパイラル杭を活用した斜直組杭の基礎構造案が得られた．

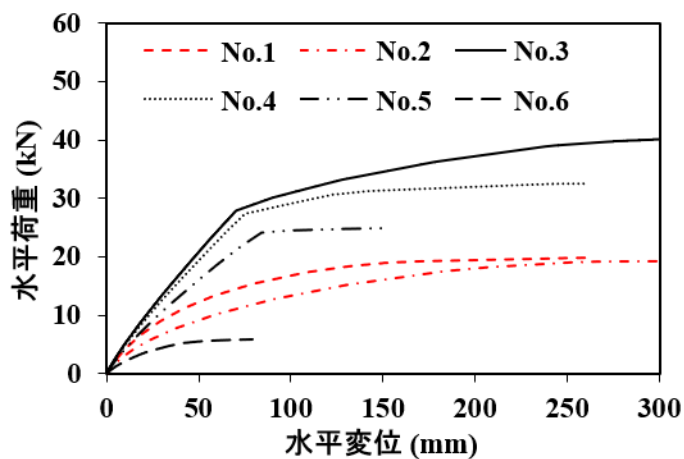


図 2-20 荷重変位関係(鋼管杭と斜直組杭)

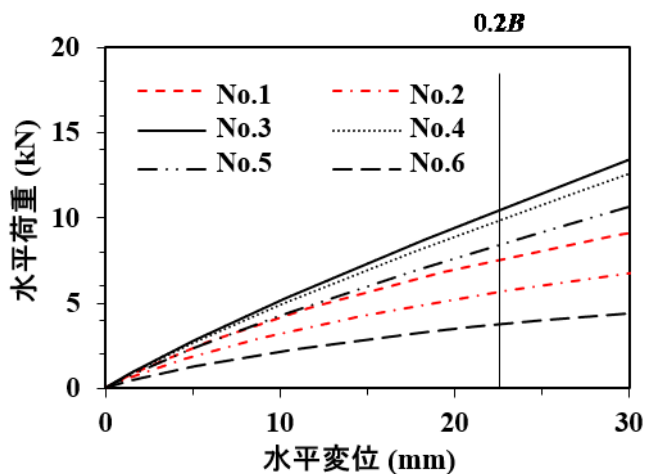


図 2-21 弾性限界荷重の判定

2.7 まとめ

本章では、斜直合成スパイラル組杭の設計合理化に向け、直杭と斜杭の杭長変化が水平抵抗力に及ぼす影響に着目して、密な砂地盤を対象に模型での水平載荷実験を行い評価した。また、梁ばねモデル解析によって、斜杭角度の影響及び実大のスパイラル杭を活用した斜直組杭の水平抵抗力について検討を行った。

本検討で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 単杭から斜直組杭とすることで、弾性限界荷重は2倍以上増加し、単杭を1.5倍に延長した場合の補強効果1.5倍よりも大きいことを示した。
- (2) 斜直組杭は、直杭と斜杭をそれぞれ1.5倍に延長することで、弾性限界荷重が1.88倍に増加し、その効果はどちらかだけを延長するよりも、両方を同様に延長した方がより高くなることを示した。斜杭のみを延長するよりも直杭を延長する方が、補強効果は2割以上も高くなることを示した。地表面に向かって作用する直杭の引抜抵抗力のほうが、斜杭の押込支持力よりも低くなりやすく、斜直組杭の水平抵抗力の向上にはより重要であることを示唆した。
- (3) スパイラル形状の断面性能を付与した単純な矩形断面梁モデルと、非線形特性値を有した地盤ばねを設定した梁ばねモデル解析によって、実験と同様の非線形的な荷重変位曲線が得られた。ただし、実設計への適用には地盤ばねの合理的な設定に向け、さらなる要素実験を行い、論理的・体系的に整理する必要がある。
- (4) 梁ばねモデル解析から、斜直組杭の斜杭角度を 45° よりも増大させると、変位量が小さい範囲では剛性が向上する。一方で、斜杭角度を 45° から増大させると、弾性限界荷重が徐々に低下し、斜杭角度 70° では、35%も低下した。斜杭の軸方向抵抗力の水平成分の大きさが剛性に影響し、斜杭の設置深さが弾性限界荷重に影響することを示唆した。
- (5) 梁ばねモデル解析から、車両用防護柵向け標準基礎である鋼管杭と同等以上の強度を有した実大のスパイラル杭を活用した斜直組杭の基礎構造案が得られた。斜直組杭は基礎の施工深さを、鋼管杭(1500 mm)に対して $2/3$ に縮小できる可能性を示した。

参考文献

- 1) 谷陽介, Amarbayar, J., 安福規之, 石藏良平, 永田誠, 黒川貴大 : 砂地盤におけるスパイラル杭の水平載荷実験について, 第55回地盤工学研究発表会講演集, 21-9-2-03, 2020.
- 2) Amarbayar, J., 安福規之, 石藏良平, 谷陽介, 永田誠, 黒川貴大 : Experimental studies on behavior of screw vertical-batter pile under lateral loading in sand, 第55回地盤工学研究発表会講演集, 21-9-2-04, 2020.
- 3) Amarbayar, J., Yasufuku, N., Ishikura, R., Tani, Y., Nagata, M. & Kurokawa, T : Experimental Observation on Behavior of Ultimate Lateral Capacity of Vertical-Batter Screw Pile Under Monotonic Loading in Cohesionless Soil. The Second International Conference on Press-in Engineering, Kochi, Japan. 2021.
- 4) Amarbayar, J. : Evaluation of the ultimate lateral capacity of rigid spiral single and coupled piles in sandy ground. 九州大学, 2021, 博士論文.
- 5) 地盤工学会 : 杭の水平載荷試験方法・同解説(第一回改訂版), 2010.
- 6) 建設省土木研究所 : 近接基礎設計施工要領(案), ISSN 0386-5878, 土研資料第 2009 号, 1983. 6.
- 7) 谷陽介, 藤本宏義, 永田誠, 王坤鵬, 安福規之, 石藏良平 : ピッチ幅比に着目した砂地盤におけるスパイラル杭の支持力実験, 第54回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1251-1252, 2019.
- 8) Broms, BB : Lateral resistance of piles in cohesive soils, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 90(2), pp.27-64, 1964.3.
- 9) 日本建築学会 : 建築基礎構造設計指針, 2019.
- 10) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説Ⅱ鋼橋・鋼部材編(平成29年11月), 2017.
- 11) 鋼管杭・鋼矢板技術協会 : 鋼管杭-その設計と施工-, 2009.
- 12) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編・Ⅳ下部構造編(平成24年3月), 2013.
- 13) 大竹雄, 七澤利明, 本城勇介, 河野哲也, 田辺晶規 : 地盤調査法とひずみレベルを考慮した設計用地盤変形係数の推定法, 土木学会論文集 C, Vol.73, No.4, pp. 396-411, 2017.
- 14) Broms, BB : Lateral resistance of piles in cohesionless soils, J. Soil Mech. Found. Div., ASCE, 90(3), pp.123-158, 1964.5.

- 15) 平田篤夫，古梶繁夫，姜 聲承，後藤常郎：地盤との連成挙動に基づくスパイラルバーの軸方向抵抗力算定法に関する研究，資源と素材，一般社団法人 資源・素材学会，Vol.121, No.8, pp.370-377, 2005.
- 16) 谷陽介，藤本宏義，永田誠，王坤鵬，安福規之，石藏良平：ピッチ幅比に着目した砂地盤におけるスパイラル杭の支持力実験，第54回地盤工学研究発表会講演集，pp. 1251-1252, 2019.
- 17) 王坤鵬，谷陽介，安福規之，石藏良平，藤本宏義，永田誠：Bearing capacity characteristics of spiral pile in sandy ground focused on pitch-width ratio. 第54回地盤工学研究発表会講演集，pp.1253-1254, 2019.
- 18) 日本道路協会：車両用防護柵標準仕様・同解説，2004.

第3章 実地盤における斜直合成スパイラル組杭の水

平抵抗特性

3.1 はじめに

車両用防護柵は、事故等により車両が対向車線や歩道等に逸脱するのを防止しつつ、乗員の安全や車両の破損を抑止することを主として設置される。日本道路協会が定める車両用防護柵におけるたわみ性防護柵路側用 B 種(以下、B 種防護柵。適用範囲：設計速度 60 km/h，一般区間)¹⁾の標準基礎には、コンクリート基礎と鋼管基礎がある。コンクリート基礎サイズは幅 0.7 m，奥行き 0.7 m，深さ 1 m，体積 0.49 m³であり，狭隘な設置環境への適用が難しく，掘削残土の処理に課題があるとされる。また，鋼管基礎は外径 $\phi 114.3$ mm，深さ 1.5 m であり，コンクリート基礎よりもコンパクトではあるが，施工時に地下埋設物(主に電気，通信，ガス，水道などのライフライン設備)と干渉する事故が課題となっている。特に交差点付近においては，狭隘かつ地下埋設物も多い環境として，よりコンパクトな車両柵用基礎の適用が期待されている。

車両柵用基礎は，車両衝突に耐える必要があるため，歩行者自転車用横断防止柵や転落防止柵などの基礎よりも高い水平抵抗力が求められる。そこで，一本の杭で対応する単杭ではなく(図 3-1a)，杭を 2 本使用する組杭による抵抗力の向上が考えられる(図 3-1b)。このような斜直組杭は，地盤に垂直に打設した直杭と斜め方向に打設した斜杭から構成され，図 3-1b のように直杭側から外力が作用する場合は，直杭は引抜抵抗を，斜杭は押込抵抗を発揮する(逆方向から作用すると押しと引きの抵抗は入れ替わる)。さらに図には示していないが，組杭全体でも抵抗するため，単杭と比較して，水平抵抗力の向上が期待される構造である。数メートルを超えるような長い杭の斜直組杭においては，抵抗力が向上することは明らかとなっており，斜面補強工法などで活用されている。しかし，これらよりも相対的に短い杭(例えば 1m 未満程度)による斜直組杭の抵抗特性を明らかにした研究は少ない。

今回，車両柵用基礎への現実的な適用を検討し，第 2 章での解析検討を参考に，新たに図 3-1c)に示すような，スパイラル杭と鋼管杭を用いて，杭頭接続をモルタル固定とした複合組杭基礎(以下，単に斜直組杭とする)を考案した。根入れが浅く上載圧があまり期待できないために引抜抵抗力に優れるスパイ

ラル杭を直杭とした．また斜杭には地表面の周面抵抗よりも杭先端支持力に期待し，傾斜施工がスパイラル杭に比べて比較的容易な鋼管とした．車両柵には道路側からの外力作用が想定され，スパイラル杭と鋼管の接続部には圧縮力が伝達すればよいと考え，施工誤差の吸収にも優れるモルタルでの固定とした．斜直組杭の実用化には設計段階で水平抵抗力を適切に推定する必要がある，実環境におけるスパイラル杭の引抜抵抗特性，斜直組杭の水平抵抗特性とそれらの抵抗メカニズムの把握が求められる．

このような背景から本章では，B 種防護柵基礎へのスパイラル杭の適用を目指し，実環境を想定した実地盤での引抜実験及び水平載荷実験の結果を取りまとめる．実験結果から，斜直組杭の水平抵抗特性について，直杭の引抜抵抗力との関係及び，弾性限界荷重や水平ばね剛性に着目した簡易評価手法を検討する．

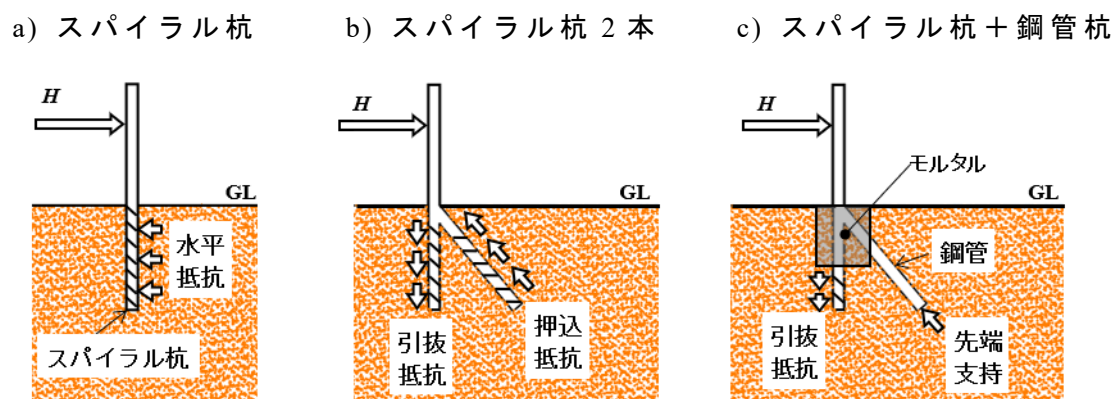


図 3-1 基礎構造と水平力に対する抵抗機構

3.2 実験地盤及び斜直組杭構造の概要

3.2.1 地盤作製と地盤材料

車両柵用基礎への適用を想定し地盤条件を設定した。実験地盤は、地盤の不確実性を少しでも排除するために、小石や不純物をふるいで除去したまさ土(地盤材料の工学的分類：細粒分まじり礫質砂)を用いて作製した。地盤と実験体の施工レイアウトを図 3-2 に、平面図と地盤の側面断面図を示す。幅 4 m、奥行き 20 m、深さ 1.2 m の範囲の原地盤を掘削し、全てをまさ土に入れ替えた(図 3-3)。まさ土は花崗岩の風化残積土であり、粒径が不均一で締め固め易く、全国に分布しており安価であることから盛土等の材料として広く利活用されている²⁾。今回は日本の一般的な道路地盤と同じ N 値 10 程度まで締め固めたいと考え、まさ土を採用した。まさ土は掘削範囲に約 300 mm の厚さ毎に 3 回以上に別けて投入し、タンピングランマーを用いて転圧を全面に行った。路床部は、層ごとに簡易動的コーン貫入試験方法(JGS 1433)による N_d 値を計測しながら、転圧の回数を調整し、平均換算 N 値($=N_d/2$)が 10 程度となるまで締め固めた。表層には、実際の車両柵の設置環境を想定して舗装を行った。文献 3)によると、一般的な歩道や自転車道における舗装は、路盤 10 cm、舗装 3~4 cm とされており、これの下限側に準拠し、路盤材(粒度調整碎石 M-40)100 mm、舗装(再生密粒 13 mm、アスファルト混合物)30 mm とした(図 3-2b)。

舗装後に、図 3-2 に示した 6 点(a~f)で、舗装と路盤を除いた路床部について、簡易動的コーン貫入試験方法にて N_d 値を計測した。図 3-2 には地盤工学会基準(JGS1814, JGS1831)にて推奨されている試験の影響範囲も示している。計測地点はこの範囲外かつ原地盤との境界部からも十分に離れた位置とした。得られた換算 N 値のばらつきを図 3-4 に箱ひげ図として示し、各点の深さ方向における平均値の分布を図 3-5 に示す。 N 値は 6 から 21 とばらつきはあるものの、各点における中央値は 8.6 から 12.5 を示し、概ね狙い通りであった。 N 値の深さ方向分布より表層付近は固め、地中部は柔らかめとなっていたが、全平均値は 11.1 であり、目標として設定した道路地盤と同程度の固さの実験地盤が得られたものと判断された。

a) 平面図

b) 断面図

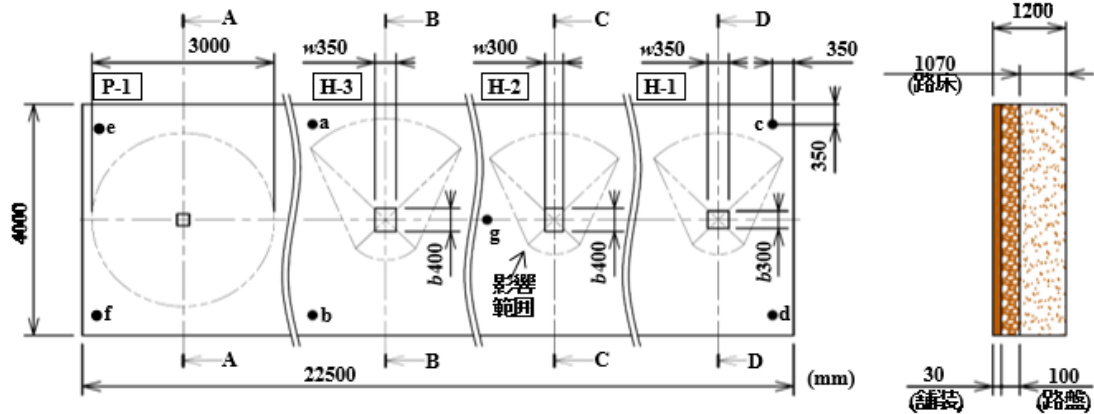


図 3-2 地盤と施工レイアウト及び影響範囲

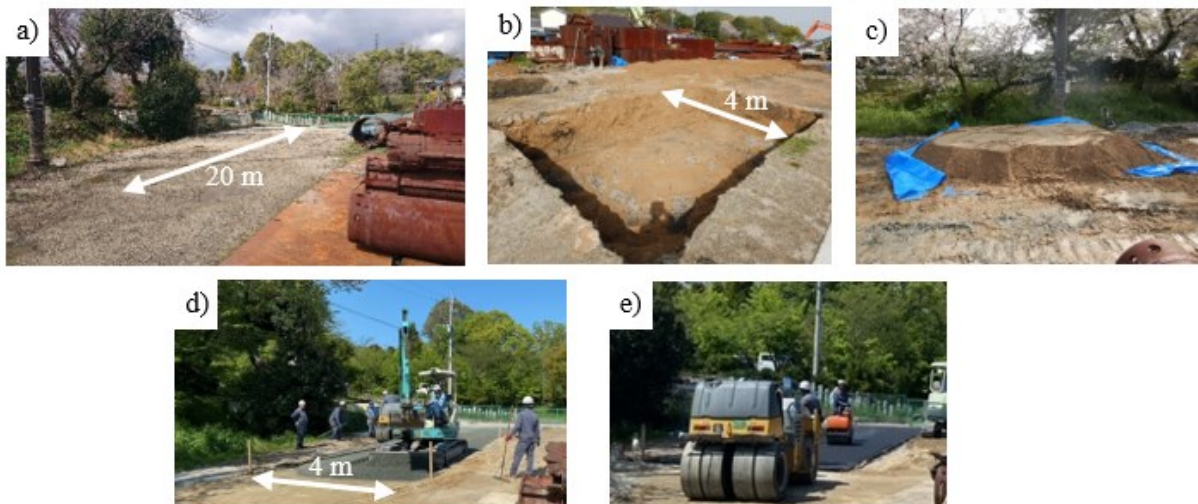


図 3-3 地盤作製フロー

a) 原地盤, b) 掘削, c) まさ土, d) 路盤施工, e) 舗装施工

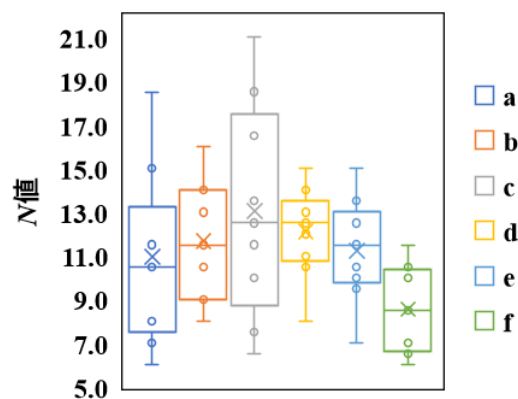


図 3-4 N 値のばらつき

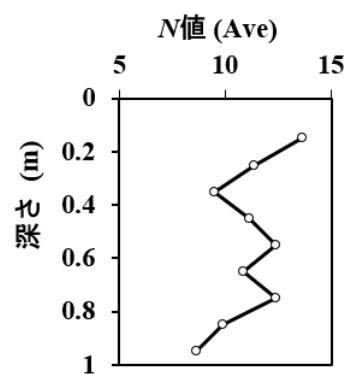


図 3-5 平均 N 値

3.2.2 実験地盤の物理的性質と力学的性質

実験後に地盤特性を把握し、引抜抵抗力の推定式等へ反映するパラメータとして用いるために、現場密度試験と室内土質試験を行った。現場密度試験は、「砂置換による土の密度試験」(JIS A 1214)に準じ、試験影響範囲外の g 点で実施した。室内土質試験は表 3-1 の通りとし、日本産業規格(JIS)に準拠して実施した。路盤については、土粒子の密度試験は実施せず、また粒度試験はふるい分析のみ実施した。

作製した地盤の土質試験結果をまとめる。地盤には、舗装を行ったため、土質試験は舗装を除去した路盤と路床について実施した。地表から深さ 1 m までの間から 3 層に分けて g 点(図 3-2 参照)で現場密度試験を実施し、試験箇所及びその近傍にて土質試験用の試料を採取した。現場密度試験による湿潤密度 ρ_t 、乾燥密度 ρ_d 、含水比 w_n を表 3-2 に示す。路盤の ρ_t は 2.178 g/cm^3 (21.34 kN/m^3) で、路床の ρ_t は平均で 2.068 g/cm^3 (20.27 kN/m^3) であった。含水比は、路盤で 6.1 %、路床の平均が 12.0 % であり、砂質土における自然含水比と同程度であった。後述する引抜抵抗力の推定式で用いる土の単位体積重量 γ (kN/m^3) は、本試験結果の湿潤密度 ρ_t から算出した。なお、いずれも道路設計に用いる一般的な盛土の土質定数⁴⁾と同程度を示した。

室内土質試験による土粒子の密度 ρ_s 、均等係数 U_c 、地盤材料の工学的分類、粒度構成、粘着力 c_d 、内部摩擦角 ϕ_d を表 3-3 に示す。三軸圧縮試験の供試体は、現場密度試験結果に合わせて試験供試体を各層ごとに作製した。その際、供試体寸法は粒径を考慮して、路盤(碎石)は直径 200 mm・高さ 400 mm 程度、路床(砂質土)は直径 50 mm・高さ 100 mm とした。また、実環境を想定し圧密排水条件とし、側方向応力 σ_r は路盤で 100, 150, 250 N/mm^2 、路床で 50, 100, 200 N/mm^2 の各 3 水準とした。路床に比べて路盤は供試体が大きく、自立性に不安があったため側方向応力は高めとした。三軸圧縮試験結果について軸差応力($\sigma_a - \sigma_r$)と体積ひずみ ε_v 、軸ひずみ ε_a の関係を図 3-6 に示す。圧縮破壊時の主応力差の値(最大圧縮強さ)からモールの応力円をそれぞれで作成し(図 3-7)、モールの応力円に共通な接線を描き、縦軸との切片から粘着力を、接線の傾き角から内部摩擦角を読み取った。路盤の粘着力は 41.1 kN/m^2 を示し、内部摩擦角は 38.1° であった。路床の粘着力は $11.5 \sim 14.1 \text{ kN/m}^2$ の範囲で分布しており、内部摩擦角は $34.2 \sim 34.3^\circ$ であった。いずれも道路設計に用いる一般的な盛土の土質定数⁴⁾と同程度を示していることを確認した。図 3-8 に粒径加積曲線を示す。路床の粒度構成では、砂分が最も多く、 U_c は 106.9 だった。一般的には

10 以上あれば良い地盤(=締固めやすい地盤)と言われており，今回の地盤は締まりやすい粒度構成だったことがわかる．路盤の粒度構成は，礫分が優勢であり，均等係数 U_c は 84.6 を示し，粒径のややばらついた土であった．総じて，作製した実験地盤は一般的な道路舗装環境と比べても特別な条件ではないと判断した．

表 3-1 室内土質試験の項目・適用基準

試験項目		規格・基準番号
物理試験	土粒子の密度試験	JIS A 1202
	土の含水比試験	JIS A 1203
	土の粒度試験(ふるい，沈降)	JIS A 1204
	土の湿潤試験	JIS A 1225

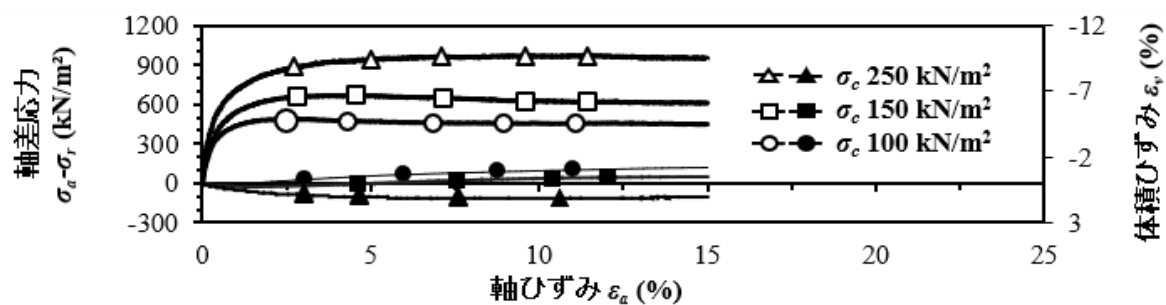
表 3-2 現場密度試験結果

対象(土質)	試験深度 (m)	湿潤密度 ρ_t (g/cm ³)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	含水比 w_n (%)
路盤(碎石)	0.05~0.15	2.178	2.052	6.1
路床(砂質土)	0.5	2.114	1.899	11.3
	0.9	2.022	1.797	12.6
	平均値	2.068	1.848	12.0

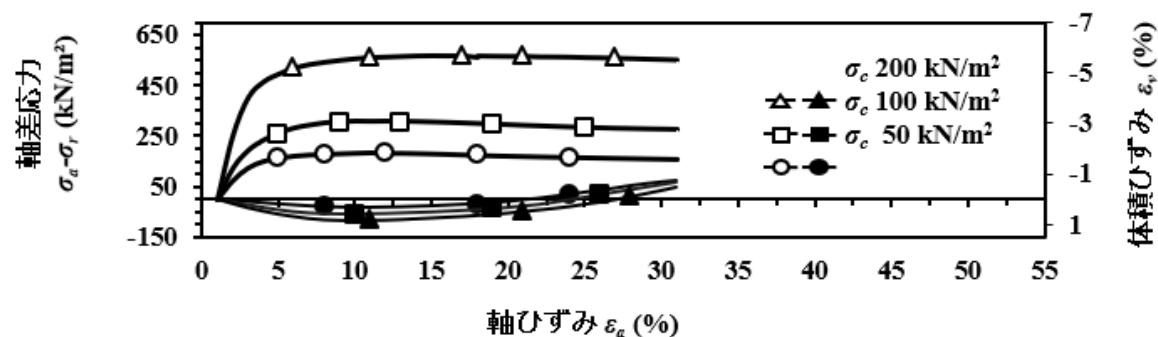
表 3-3 室内土質試験結果

対象		路盤	路床		
試験深度(m)		0.05~0.15	0.5	0.9	平均値
土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)		-	2.674	2.657	2.666
均等係数 U_c		84.6	115	98.9	106.9
粒度構成 (%)	礫分	70.8	24.3	23.1	23.7
	砂分	20.4	53.1	55.2	54.2
	細粒分	8.8	22.6	21.7	22.2
粘着力 c_d (kN/m ²)		41.1	14.1	11.5	12.8
内部摩擦角 ϕ_d (°)		38.1	34.2	34.3	34.3
地盤材料の工学的分類		細粒分まじり砂質礫(GS-F)	細粒分質礫質砂(SFG)		

a) 路盤



b) 路床 (GL-0.5m)



c) 路床 (GL-0.9m)

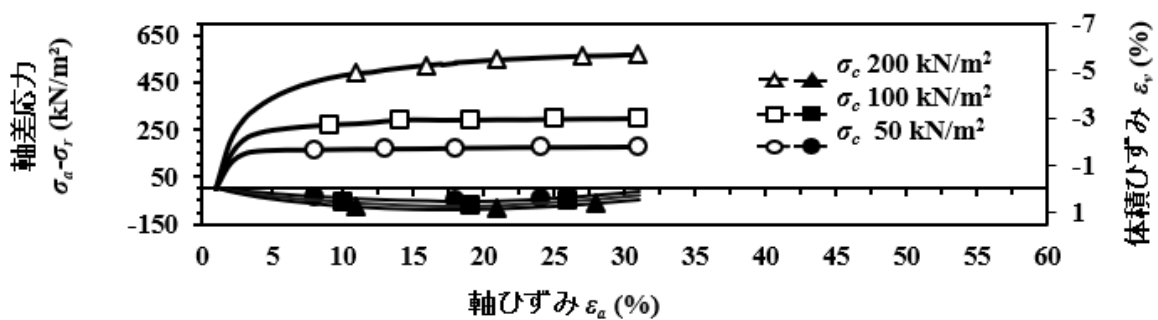
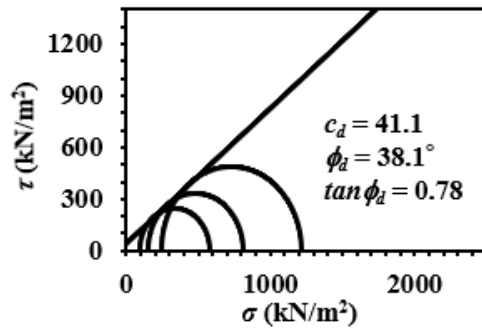


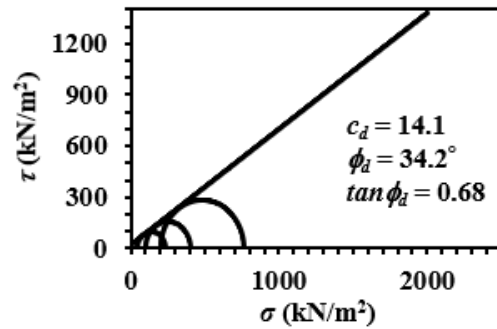
図 3-6 軸差応力と体積ひずみ，軸ひずみの関係

a) 路盤， b) 路床 (GL-0.5 m)， c) 路床 (GL-0.9 m)

a) 路盤



b) 路床 (GL-0.5 m)



c) 路床 (GL-0.9 m)

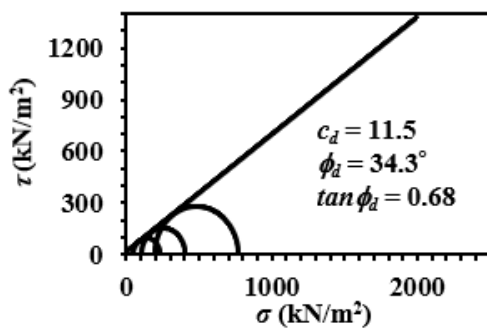


図 3-7 モールの応力円

a) 路盤, b) 路床 (GL-0.5 m), c) 路床 (GL-0.9 m)

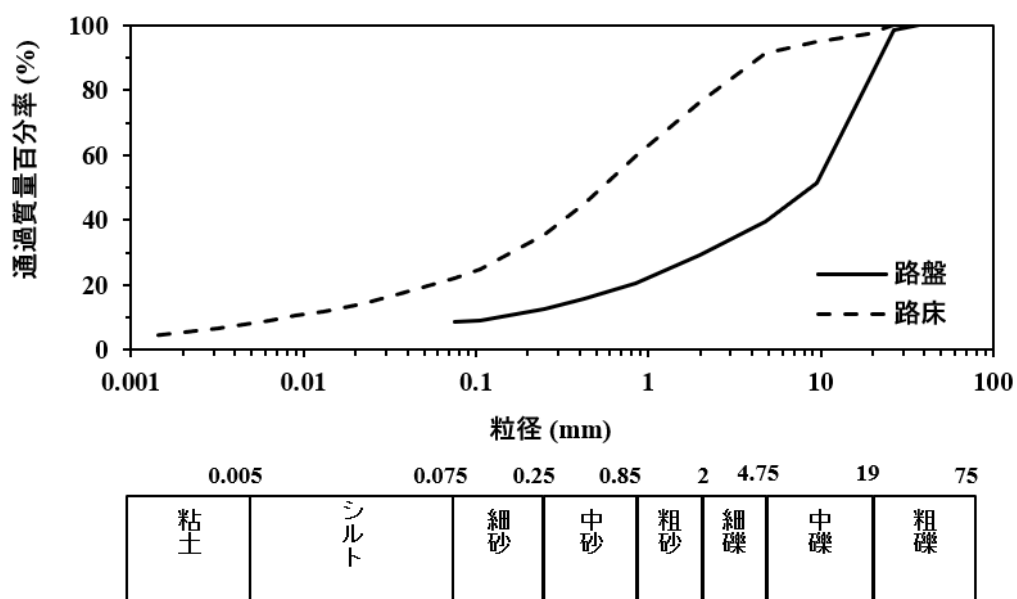


図 3-8 粒径加積曲線

3.2.3 実大基礎及び実験概要

斜直組杭の寸法は、標準基礎であるコンクリート基礎よりも省サイズとなるように設計した。具体的な設計目標値は、掘削幅 0.35 m 以下、杭の根入れ深さは同等の 1 m 未満とした。道路施工令では給水管やガス管の埋設深さは 1.2 m(工事実施上やむを得ない場合は 0.6 m)以下としないこととされており、コンクリート基礎と同等かつ同じ標準基礎である鋼管杭よりも浅くできれば優位性があると考えた。

実験に用いた杭基礎の諸元を表 3-4 に示す。No.P-1 は引抜実験用、No.H-1～3 は水平載荷実験用である。基礎構造は鑄鉄製スパイラル杭(以下、スパイラル杭)のみの「単杭」と、スパイラル杭と鋼管杭の杭頭部をモルタルで固定した基礎を「斜直組杭」とした。以下、斜直組杭におけるスパイラル杭を直杭、鋼管杭を斜杭と表現する。斜直組杭 H-3 の基礎根入れ深さ L は 900 mm (モルタル打設部分が $h450$ mm, スパイラル部分が 450mm)である。モルタル打設範囲は、載荷方向に対する幅を $w350$ mm とし、鋼管杭を傾斜施工するために必要な空間として載荷(奥行き)方向は $b400$ mm とした。杭体も含めた基礎体積は約 0.08 m³(コンクリート基礎の 16%)となった。単杭 H-1 は H-3 の直杭部と同等寸法とし、直杭のみの水平抵抗力を明らかにする。斜直組杭 H-2 はモルタル打設範囲を縮小して幅を 300 mm, 深さを 400 mm, スパイラル部は 450 mm のままとし、基礎根入れ深さを 850 mm に短縮した。これにより直杭の打設深さ(=引抜抵抗力)の影響を評価する。

直杭に使用したスパイラル杭の主要形状を図 3-9 に示す。砂型重力鑄造法で製作した耐食性に優れたダクタイル鑄鉄製スパイラル杭を用いた。スパイラル部の断面形状は鑄造による形状自由度を活かし、外接円径 150 mm, 120 度の等間隔に板部を有した Y 形とし、以降 Y 形部の外接円径を杭幅 B とする。パイプ部側から先端に従って肉厚を変化させている($t35\sim9$ mm)。第 1 章の図 1-2 で紹介した鑄鉄製スパイラル杭のスパイラル部は矩形断面であったが、本実験で用いたスパイラル杭のスパイラル部は Y 形断面としている。Y 形は中心軸に対して外力の作用方向の向きが変化しても、断面二次モーメント I が常に同一となるため、曲げに対して弱軸が存在しない。図 3-10 に示すように、同等の杭幅と断面積を有した平鋼の弱軸に対して、Y 形鋼は曲げ剛性が大きくなる利点がある⁵⁾。

各実験体の地盤中の施工状態(図 3-2 の各断面)を図 3-11 に示し、水平載荷用基礎には載荷位置と載荷方向も示す。スパイラル杭の施工は、1)幅×奥行き

の範囲の舗装を切断し，モルタル打設深さまで路盤，路床を掘削し除去する，2)掘削した穴の所定の位置にスパイラル杭を設置し，油圧杭打機(KH-240V：丸善工業製)にて打撃貫入する，3)スパイラル杭上部のパイプ部に，引抜き実験用の治具及び水平載荷実験用支柱を挿入する，4)掘削範囲とパイプ部にモルタル(無収縮タイプ)を打設し，直杭と斜杭の杭頭部及び治具，支柱を固定する，の順で行った．施工後は，地盤工学会基準(JGS 1814, JGS 1831)に準拠し5日間以上の養生期間を設けた．なお，斜直組杭は，工程2)の前に斜杭を打設した．斜杭の設置角度 θ は，設計では鉛直軸方向から 45° を想定するが，施工誤差を $\pm 5^\circ$ と仮定し，耐荷性能としてマイナス側(鋭角)の 40° とした．H-2とH-3の斜杭打設の位置寸法は同一である．杭体の各材質と機械的性質(σ_y ：降伏点及び0.2%耐力， σ_T ：引張強さ， EL ：破断伸び)のJIS規格下限値と，同一ロット品のミルシートの値を表3-5に示す．スパイラル杭の材質は球状黒鉛鑄鉄(FCD600-3)とし，水平載荷実験用の支柱には，単杭H-1と斜直組杭H-3はB種防護柵支柱の一般構造用炭素鋼鋼管(STK400 $\phi 114.3 \times t 4.5$ mm)を用い，斜直組杭H-2は基礎部の抵抗力を確実に把握するため，剛性の高い丸鋼($\phi 100$)を用いた．斜直組杭の斜杭には，杭頭付近の高い曲げモーメントが作用することが想定されたため，B種防護柵支柱よりも板厚の大きなSTK400 $\phi 114.3 \times t 6.0$ mmを用いた．なお，斜杭にスパイラル杭を利用せずに鋼管杭とした理由は，施工性と先端支持力について既に触れたが，それ以外にも曲げ剛性が高く，コスト的にも安価であることが挙げられる．

なお，スパイラル部の降伏曲げモーメント($Z_{ave} \times \sigma_y = 18.5 \text{ kN} \cdot \text{m}$)は支柱($16.0 \text{ kN} \cdot \text{m}$)よりもわずかに高く，水平力による曲げモーメントが作用しても，地中のスパイラル部よりも先に支柱が地際付近から降伏すると考えられ，地盤中のスパイラル杭はほぼ剛体とみなすことができる．

表 3-4 基礎の諸元

No.	Type	直杭 (スパイラル杭) (mm)	斜杭 (鋼管) (mm)	モルタル 打設範囲 (mm)	基礎根入 れ深さ L (mm)
P-1	単杭	パイプ部 $\phi 169 \times t 9 \times l 300$	-	$w 250 \times b 250 \times h 400$	850
H-1				$w 350 \times b 300 \times h 450$	900
H-2	斜直組杭	スパイラル部 $B 150 \times t 35 \sim$ $9 \times l 500$	$\phi 114.3 \times t 6$ $\times l 500$	$w 300 \times b 400 \times h 400$	850
H-3				$w 350 \times b 400 \times h 450$	900

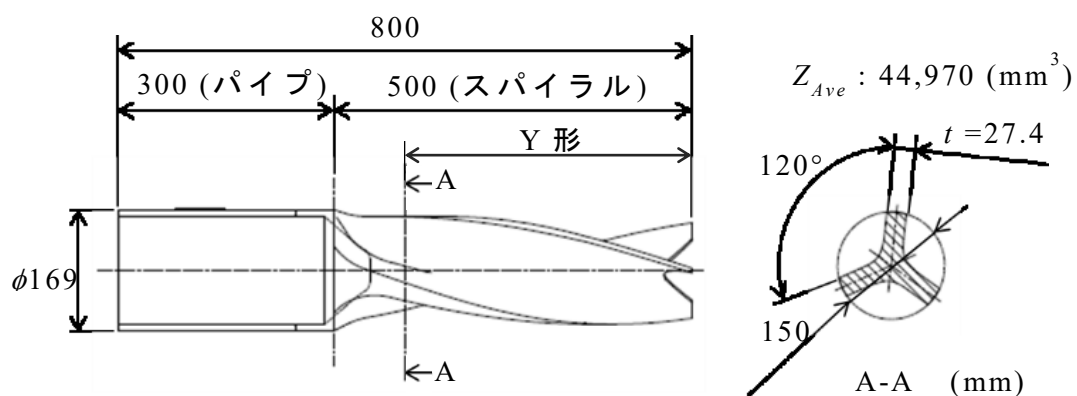


図 3-9 鋳鉄製スパイラル杭 (Y 形)

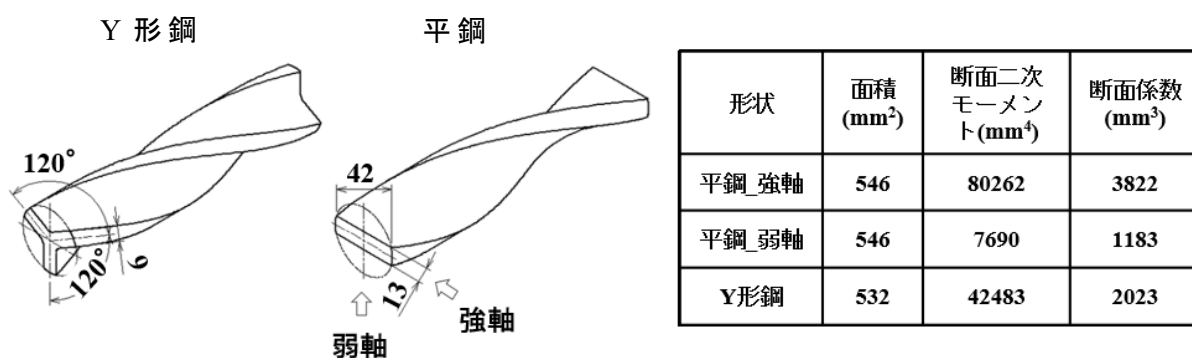


図 3-10 ねじり Y 形鋼と平鋼の形状及び断面性能 ⁵⁾

表 3-5 実験体材料の機械的性質

部材	材質	規格・基準	σ_y (N/mm ²)	σ_T (N/mm ²)	EL (%)
スパイラル杭	FCD600-3	JIS G 5502	≥370	≥600	≥3
		ミルシート	412	688	12
鋼管杭	STK400 (t6.0)	JIS G 3444	≥235	≥400	≥18
		ミルシート	427	502	28
支柱	STK400 (t4.5)	JIS G 3444	≥235	≥400	≥18
		ミルシート	390	450	36

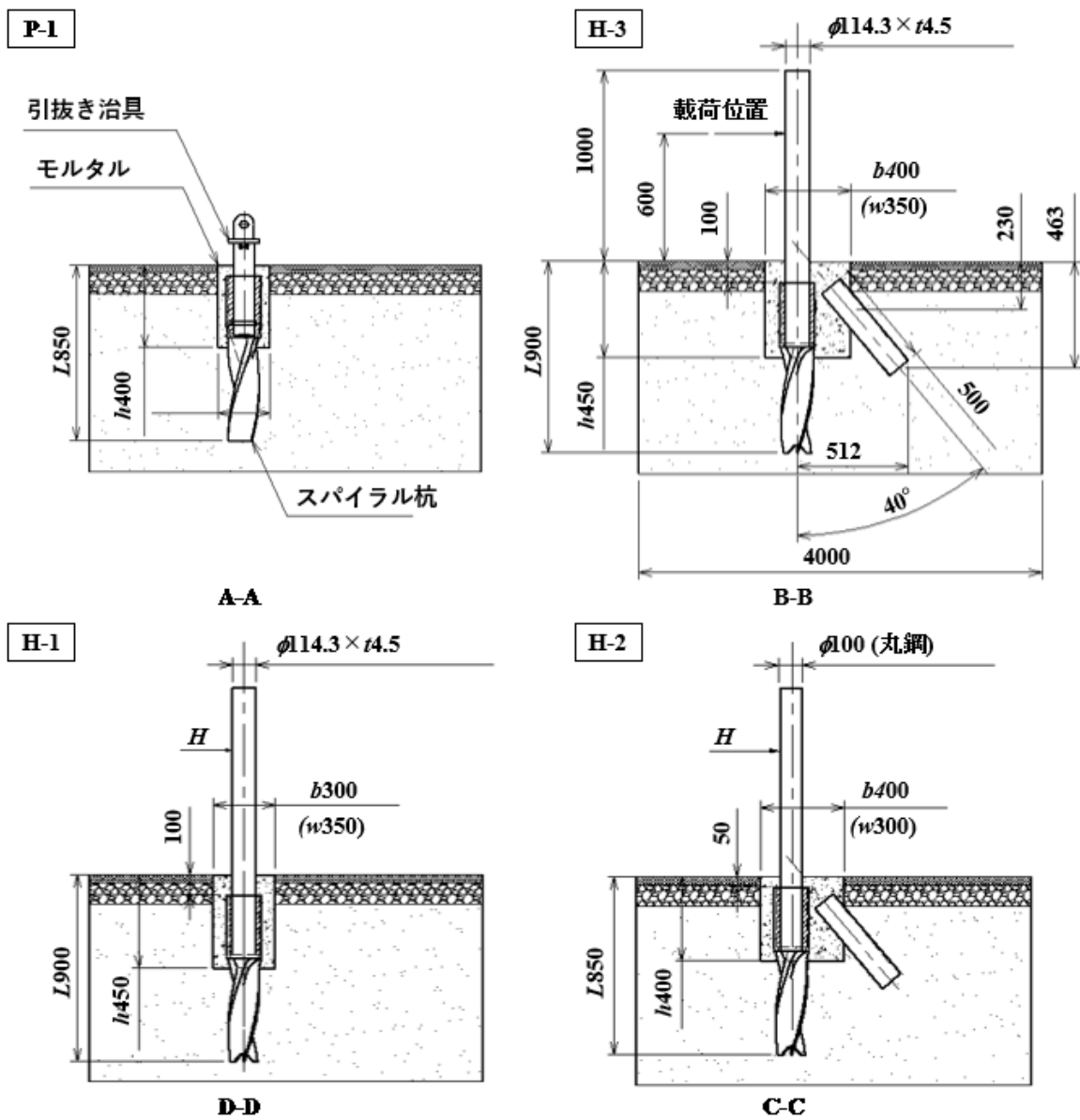


図 3-11 基礎断面図 (図 3-2)

1) 引抜き実験の概要

2) 水平載荷実験の概要

a) P-1

b) H-3

引抜治具
変位計
基準梁
回転止め
回転止め
25 ton クレーン
チェーンブロック
L850
h400
b250
>3000
4000

変位計
基準梁
支柱
ロードセル
チェーンブロック
架台
b400
モルタル
斜杭
舗装
路盤
路床
パイロ杭
L900
h450
100
100
100
100
1200
4000
(mm)

66

3.3 スパイラル杭の引抜抵抗特性

3.3.1 スパイラル杭の引抜抵抗の挙動

スパイラル杭の引抜抵抗特性を把握するために現地引抜実験を行った。結果を図 3-13 に示す。図には後述する式 3-1 から算出した最大引抜き荷重(引抜抵抗力)の計算値も示す。10 kN 程度までは変位は進まずに荷重のみが上昇した。以降は少しずつ荷重に従って変位も進んだ。おおよそ 15 mm にかけて最大荷重 28.8 kN を迎えた。ピーク以降に試験体に付着していた土が脱落し始め、その後は一気に低下した。図 3-14a～c に図 3-13 の a～c 点における地表部杭頭の外観を示す。変位量 5 mm 付近(a 点)で目視によって舗装の盛り上がりが確認できた。最大荷重発揮時(b 点)に完全に基礎が浮き上がっている状態を確認した。a 点以降から、基礎を中心として円形状のクラックと地盤の盛り上がりを確認され、その直径は 1.2～1.6 m 程度であり、基礎根入れ深さ L の 1.4～1.9 倍程度であった。試験後(c 点)の杭体には舗装と路盤に加えて、路床がスパイラル部上端に向かって円錐状に付着していた。

先端に羽根を持つ回転鋼管杭の引抜抵抗に関する既往研究^{6), 7)}においては、最大荷重以降でも比較的緩やかな荷重低下を起こしている。一方でスパイラル杭はピーク後に急激に荷重低下した。これはグラウンドアンカーの引抜抵抗挙動と類似している⁸⁾。スパイラル形状によって周辺地盤が捕捉されアンカー効果が作用し、スパイラル部を起点とした地盤内のせん断破壊面(以下、せん断面)が発生したためと推測した。一般に、 L (根入れ深さ=杭長)と B (杭幅=杭径)の比(L/B)が 10 以下の場合に短い杭と判定する方法があるが、本実験の杭基礎は $L/B=5.7$ であり、短い杭に分類される。短い杭は杭先端から地表面までの距離が近いために、せん断面が地表に達する可能性が高くなり、ピーク後の荷重低下がより顕著になると推察された。

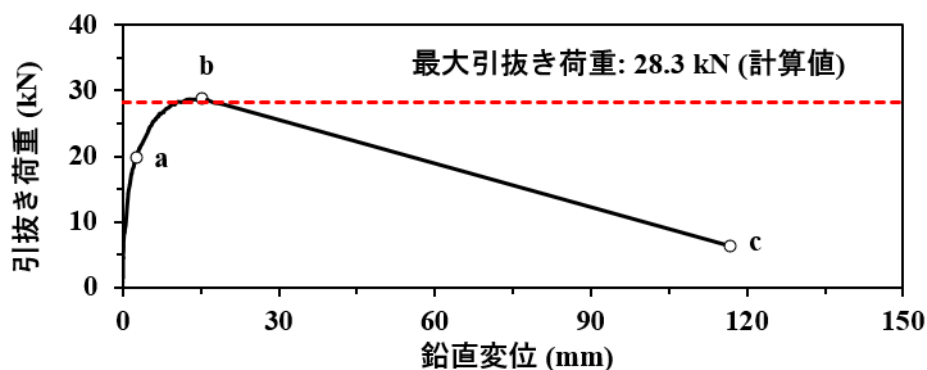
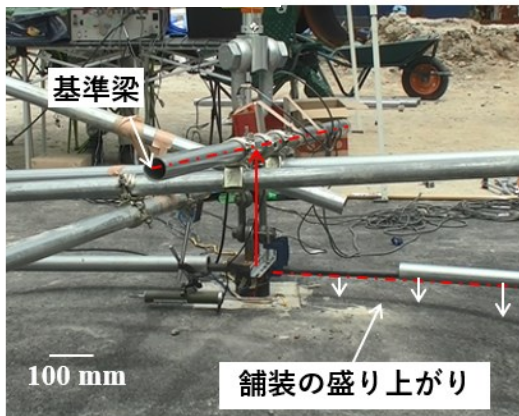
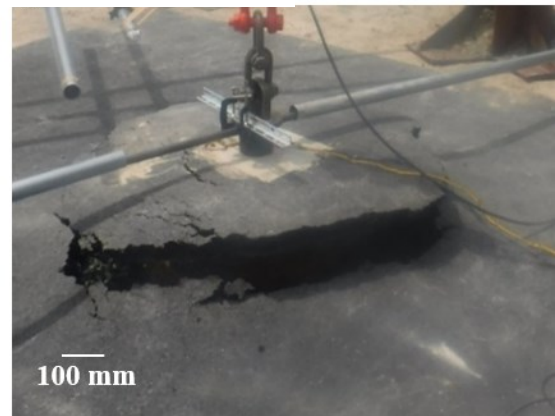


図 3-13 荷重変位関係(スパイラル杭)

a) 載荷中



b) 最大荷重時



c) 実験後

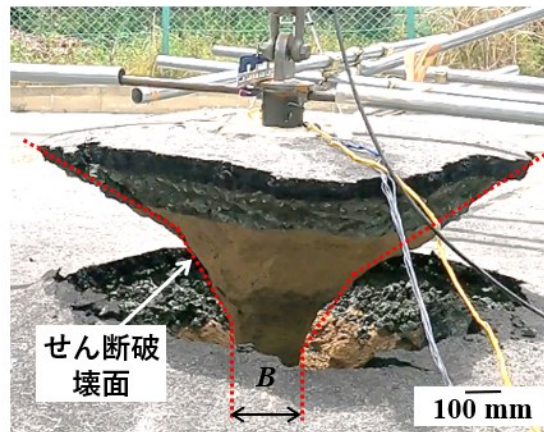


図 3-14 a) 載荷中, b) 最大荷重時, c) 実験後の地表面の状態

3.3.2 せん断破壊面のモデル化と引抜抵抗力の推定

図 3-14c に示す実験における終局状態から, せん断面の二直線の近似による円錐状のモデル化を検討した. 地盤のせん断破壊を考慮した基礎の引抜抵抗力の推定方法は、杭底杭やアンカーの既往研究において、姜ら⁹⁾や酒井ら¹⁰⁾がせん断面に作用するせん断力 T_S とせん断面に囲まれた土と杭体の重量 W の和として、最大引抜抵抗力 P_V を求める方法を提案している. これらを参考にして、さらに先端部のスパイラル部の周面抵抗力 T_{SP} を加えた式 3-1 による引抜抵抗力の推定を行った. せん断力と重量は、いずれも路盤部と路床部でそれぞれ算出した. なお、モルタルの単位体積重量は一般に 20 kN/m^3 とされており、土と大差は無いためここでは路盤及び路床の一部として扱った.

$$P_V = T_S + T_{SP} + W$$

式 3-1

図 3-15 にせん断面のモデル化を示す．せん断面の発生する方向の水平地表面に対する角度 θ_E の取り方は既往研究によって様々な提案がされている．角度 θ_E について，酒井ら¹¹⁾は地盤密度に影響するとしており，董軍ら¹²⁾は，粒径が大きくなるにつれて低下することを明らかにしている．これらはいずれも地盤の特性によって，せん断面が変化することを示唆している．また，松尾¹³⁾はせん断面は対数らせん線とランキンの受働状態における水平地表面から $(45-\phi/2)$ の角度をなす直線とを合成して表せるとしている (ϕ は内部摩擦角を示す)．これらの研究結果を参考にし，実際の破壊状況から内部摩擦角 ϕ と関連つけて，路盤部は $\theta_{EG}=(45-\phi/2)$ ，路床部は $\theta_{ES}=(90-\phi/2)$ と設定し，より簡易的な 2 直線で近似したモデル化を行った．せん断面の開始点は，スパイラル部全体がアンカーとして作用すると考え，杭先端ではなくスパイラル部の途中から始まると推測した．本実験におけるスパイラル杭基礎構造において地盤と接しているスパイラル部の長さ L_{SP} は先端の 450 mm と短く，かつ根入れ深さも浅い ($L=850$ mm) ため，スパイラル部の中間位置をせん断面の起点深さ $z_S=(L-L_{SP}/2)$ として設定した．この位置は実験結果(図 3-14c)とも概ね一致している．

計算に用いた諸量及び計算結果を表 3-6 に示す．路盤と路床の土の特性値は 3.2 章の土質試験結果を用いた．なお，舗装部は表層の一部のみであるため，ここでは路盤として計算した．引抜抵抗力の算出結果は，実験値の 28.8 kN に対して 28.3 kN と同等

を示した．以上より，スパイラル杭においてもその引抜抵抗力を，土の特性値における粘着力及び内部摩擦角と関連して，2 層の土のせん断力，せん断面に囲まれた土及び杭体の重量，スパイラル杭の周面抵抗から推定可能であることが示された．

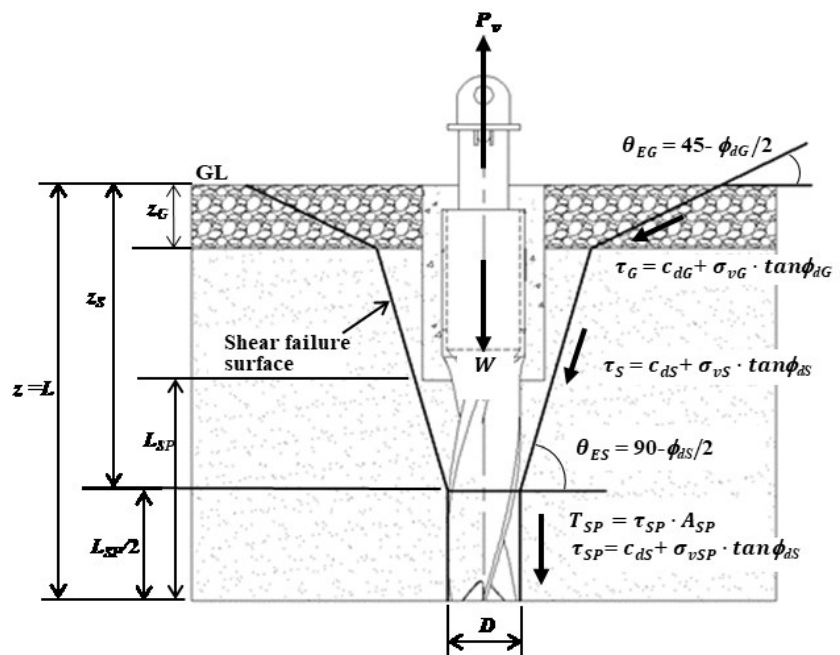


図 3-15 スパイラル杭のせん断破壊面のモデル化

表 3-6 引抜抵抗力の算出に用いる諸量と算出結果

路盤	単位体積重量, γ_G	21.37	kN/m ³
	粘着力, c_{dG}	41.1	kN/m ²
	内部摩擦角, ϕ_{dG}	38.1	°
	せん断破壊角, $\theta_{EG} = 45 - \phi_{dG}/2$	25.95	°
	重量, $W_G = \gamma_G \cdot V_G$	3.801	kN
	せん断面で囲まれた円錐状の体積, V_G	0.178	m ³
	せん断力, $T_{SG} = \tau_G \cdot A_G \cdot \sin \theta_{EG}$	14.42	kN
	せん断強さ, $\tau_G = c_{dG} + \sigma_{vG} \cdot \tan \phi_{dG}$	43.06	kN/m ²
	せん断面に作用する垂直応力, $\sigma_{vG} = \gamma_G \cdot z_G \cdot \cos \theta_{EG}$	2.498	kN/m ²
	深さ, z_G (舗装と路盤の厚さ)	0.13	m
	せん断面の面積, A_G	0.765	m ²
路床	単位体積重量, γ_S	20.29	kN/m ³
	粘着力, c_{dS}	12.8	kN/m ²
	内部摩擦角, ϕ_{dS}	34.3	°
	せん断破壊角, $\theta_{ES} = 90 - \phi_{dS}/2$	72.85	°
	重量, $W_S = \gamma_S \cdot V_S$	0.254	kN
	せん断面で囲まれた円錐状の体積, V_S	0.013	m ³
	せん断力, $T_{SS} = \tau_S \cdot A_S \cdot \sin \theta_{ES}$	7.725	kN
	せん断強さ, $\tau_S = c_{dS} + \sigma_{vS} \cdot \tan \phi_{dS}$	16.41	kN/m ²
	せん断面に作用する垂直応力, $\sigma_{vS} = \sigma_{hS} \cdot \sin \theta_{ES}$	5.288	kN/m ²
	せん断面に作用する静止土圧, $\sigma_{hS} = \gamma_S \cdot z_S \cdot K_{0S}$	5.534	kN/m ²
	深さ, $z_S = L - L_{SP}/2$	0.625	m
	静止土圧係数, $K_{0S} = 1 - \sin \phi_{dS}$	0.436	-
	せん断面の面積, A_S	0.433	m ²
スパ イ ラ ル 杭	周面抵抗力, $T_{SP} = \tau_{SP} \cdot A_{SP}$	1.902	kN
	周面抵抗力度, $\tau_{SP} = c_{dS} + \sigma_{vSP} \cdot \tan \phi_{dS}$	17.93	kN/m ²
	作用する垂直応力, $\sigma_{vSP} = \gamma_S \cdot z \cdot K_{0S}$	7.527	kN/m ²
	深さ, $z = L$ (根入れ深さ)	0.85	m
	周面積, $A_{SP} = \pi \cdot B \cdot L_{SP}/2$	0.106	m ²
	長さ, L_{SP}	0.45	m
	杭幅 B	0.15	m
算定 結果	せん断力, $T_S = T_{SG} + T_{SS}$	22.15	kN
	全重量, $W = W_G + W_S + W_{SP}$	4.284	kN
	スパイラル杭重量, W_{SP}	0.242	kN
	最大引抜抵抗力 $P_v = T_S + T_{SP} + W$	28.3	kN

3.4 スパイラル杭及び斜直組杭の水平抵抗特性

3.4.1 実験結果の分析

水平載荷実験の結果を図3-16に示す。図3-16はGL+800 mm位置の水平変位量(以下、頂部変位量)と荷重との関係である。図には支柱に使用した鋼管の実降伏強度(σ_y : 390 N/mm²)と断面係数(Z : 41,000 mm³)及び塑性断面係数(Z_P : 54,282 mm³)から求めた、降伏曲げモーメント相当荷重(26.7 kN)と全塑性曲げモーメント相当荷重(35.3 kN)を目安として示す。図3-17aは支柱材のたわみ量の影響が少ない基礎上端付近(GL+100 mm)の水平変位量(以下、単に水平変位量とする)と荷重との関係を示す。また、初期クラック発生時をa点、最大荷重時をb点、終局状態をc点として示す。図3-17bは、基礎上端の鉛直変位量の計算値(載荷後方と前方2箇所の傾きから支柱位置の変位量を算出)と荷重との関係を示す。図3-17には弾性限界水平荷重 P_{Hy} (次項で算定)もともに示す。なお、データが途中で途切れているのは、変形の増大により計測が困難となったためである。各実験体の外観を、図3-16で示したa～c点について、図3-18～20に示す。

スパイラル杭H-1(以下、単杭)の最大荷重は29.2 kN、水平変位量は60 mmであり、最大荷重は鋼管の降伏荷重を若干上回り、全塑性荷重は下回った。図3-18に外観を示す。水平変位量10 mm付近にて載荷反対側の舗装に初期クラックが発生した(図3-18a)。変位が進むに従って、舗装全体の盛り上がりとクラックの拡がりにより、載荷側へ基礎が傾きつつ引き抜かれていったが、最大荷重まで一定の粘りを見せた。なお、図3-18b, cの外観からは、全体が地表面に沈んでいるように見えるが、載荷前方側においても鉛直変位は正であり、基礎全体が浮き上がっていることがわかる。荷重がピークを迎えてからは(図3-18b)、基礎が転倒する挙動が顕著に現れ、荷重は徐々に低下していった。頂部変位量300 mm(図3-18c)において、支柱に大きな変形や損傷はなく、基礎全体が水平方向に移動しつつも最終的には舗装ごと引き抜かれ転倒していった。

斜直組杭H-2の支柱には丸鋼を用いたため、弾性たわみ量の差分を鋼管に合わせて水平変位量に加算する補正をしている。最大荷重は33.5 kN、水平変位量は0.39 mmであり、単杭よりは高いものの同じ組杭であるH-3よりはわずかに低かった。図3-19に外観を示す。水平変位量7 mm付近にて載荷反対側の舗装に初期クラックが発生した(図3-19a)。水平変位量15 mm付近から徐々に変位の増加が大きくなり、荷重ピーク以降(図3-19b)の荷重低下率は単杭よりも大きかった。既に発生していた舗装部のクラックは幅が拡大及び延びていた。頂部

変位量300 mmでの外観(図3-19c)からもわかるように、終局状態としては単杭と同様の挙動を示した。

斜直組杭H-3の最大荷重は34.6 kNであり、単杭に対して半分以下の水平変位量25 mmで達した。水平変位量6 mmにて載荷反対側の舗装に初期クラックが発生した(図3-20a)。最大荷重は鋼管の全塑性荷重を超えなかったものの、図3-20bに示すように、荷重ピーク時には鋼管が地表部から曲げ変形を起こしており、座屈による凹みとそれに伴う直角方向への外径の膨らみを確認した。頂部変位量300 mmでの外観(図3-20c)から、荷重ピーク以降は鋼管の曲げ変形及び座屈による凹みが更に進み荷重が徐々に低下していき、基礎部の水平方向への変位はほぼ増加しなかった。発生していた舗装部のクラックは、発生当初よりも幅は拡大したが斜直組杭H-2のように大きく進展することはなかった。これより、斜直組杭H-3は、標準基礎よりもコンパクト(コンクリート基礎対比：幅50%，体積80%縮小，鋼管基礎対比深さ40%縮小)，かつB種防護柵支柱以上の耐荷性能を有することが示された。

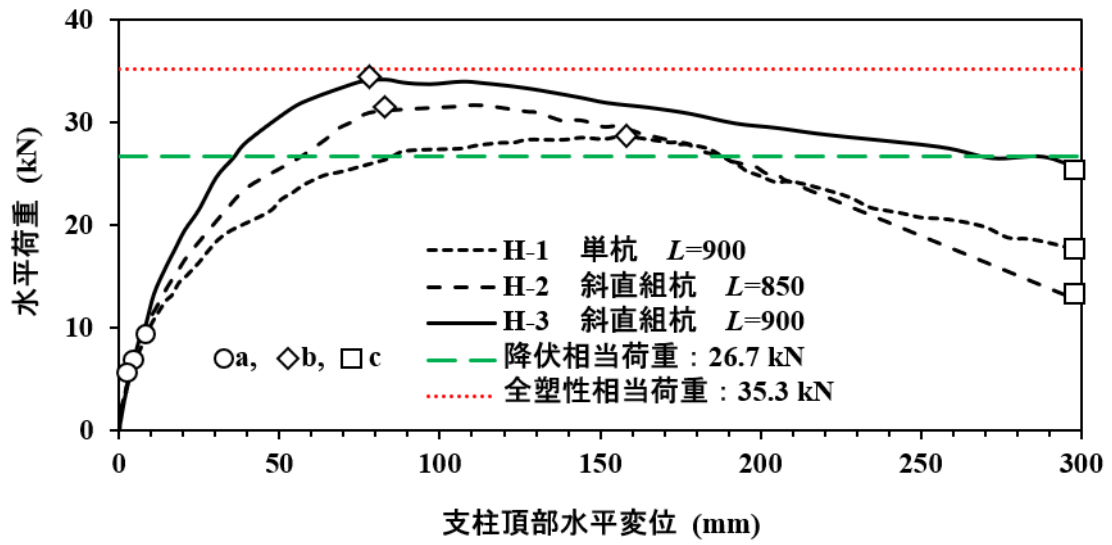


图 3-16 荷重-支柱頂部變位關係

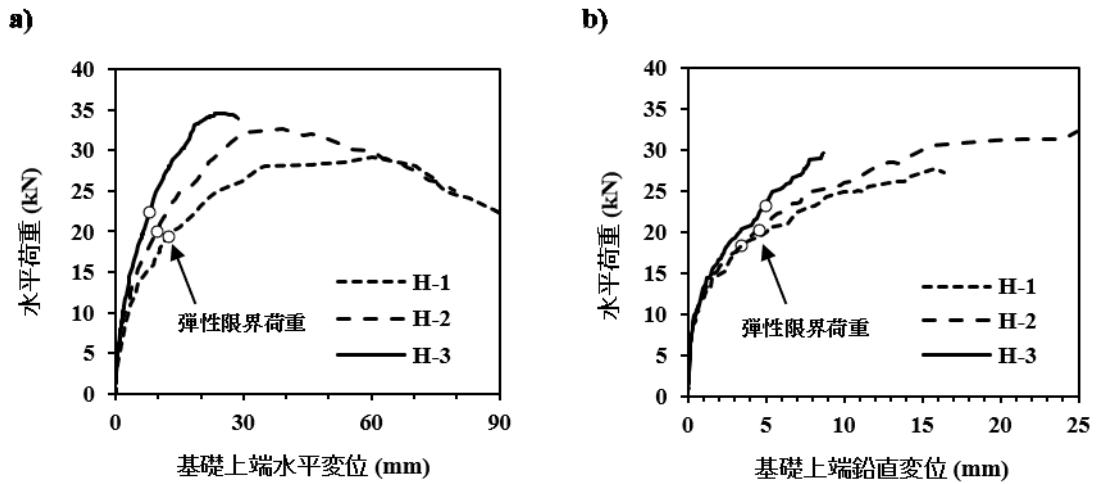


图 3-17 荷重-基礎上端變位關係

a) 水平變位, b) 鉛直變位

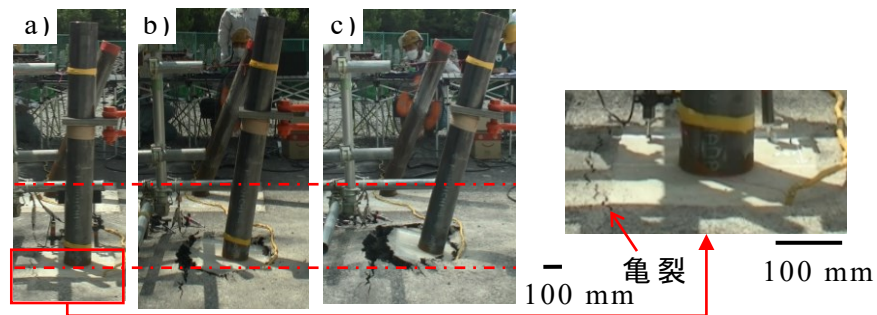


図 3-18 スパイラル杭 H-1 の外観

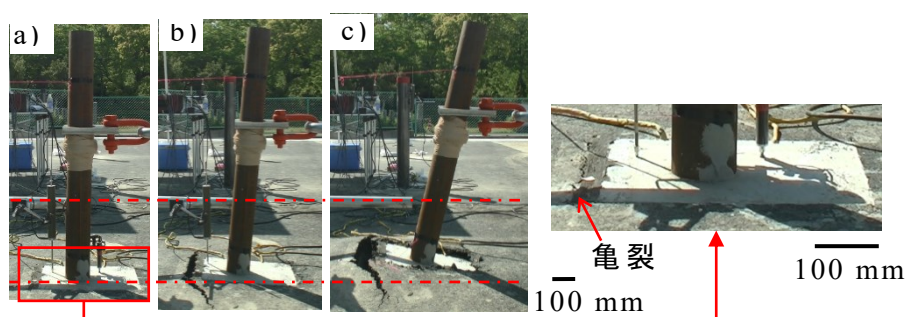


図 3-19 斜直組杭 H-2 の外観

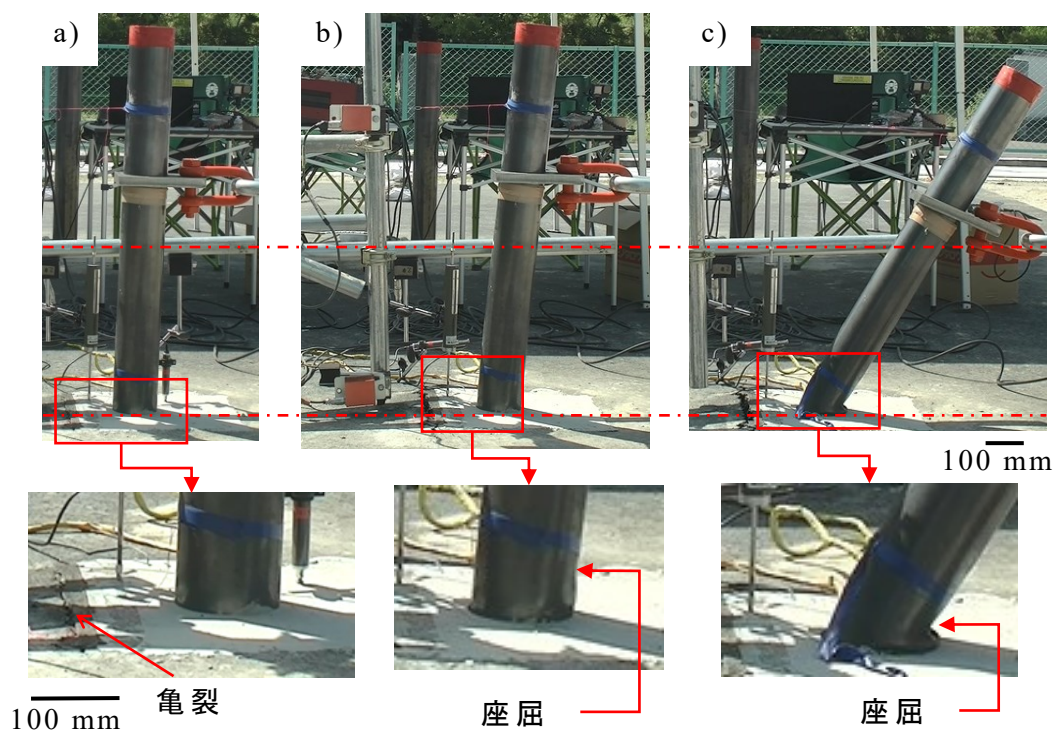


図 3-20 斜直組杭 H-3 の外観

3.4.2 弾性限界水平荷重の推定

図3-17に示した弾性限界水平荷重 P_{Hy} は、中谷ら¹⁴⁾の研究を参考にワイブル分布曲線式(式3-2¹⁵⁾)を用いた数学的な方法に準拠して求めた。第2章ではBromsの理論を参考に、水平変位量が杭径の20%に達した時の荷重としてきたが、斜直組杭は単杭に比べて高い剛性が得られ、より小さい変位量で最大荷重に達する傾向にあり、適さない場合があると考え、数学的な方法とした。

$$P = P_{max} \left\{ 1 - e^{-\left(\frac{S}{\delta_s}\right)} \right\} \quad \text{式 3-2}^{15)}$$

ここで、

P ：水平荷重， P_{max} ：推定した最大荷重， S ：変位， δ_s ：推定した弾性限界時の変位であり、これより変位量が δ_s に達した時の荷重から、弾性限界荷重 P_{Hy} が求まる。図3-21にワイブル分布曲線を示す。表3-7にワイブル分布曲線式から算定した弾性限界水平荷重 P_{Hy} (kN)，弾性限界変位量 δ_s (mm)，弾性限界ばね剛性 k_y (kN/mm)を示す。いずれにおいても斜直組杭H-3が最も高い値を示し、単杭の1.2倍以上の弾性限界水平荷重，約7割の弾性限界変位量，1.7倍以上の弾性限界ばね剛性を発揮した。

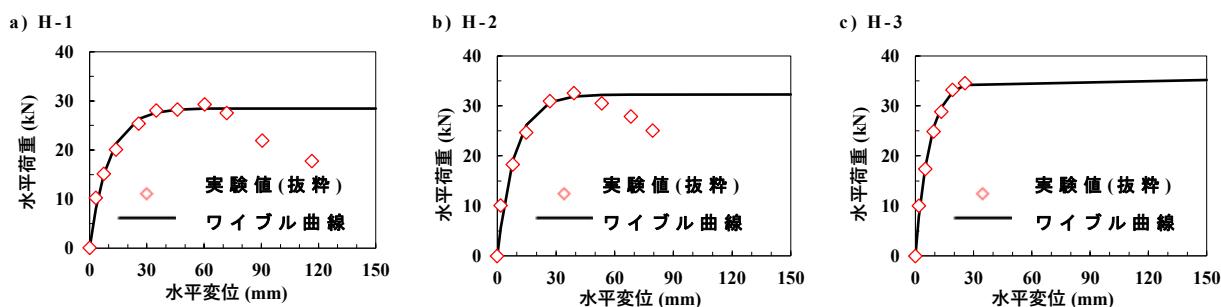


図 3-21 ワイブル分布曲線式によるフィッティング

表 3-7 弾性限界荷重，弾性限界変位量，弾性限界ばね剛性

No.	弾性限界荷重 P_{Hy} (kN)	弾性限界変位量 δ_s (mm)	弾性限界ばね剛性 k_y (kN/mm)
H-1	18.0	10.0	1.80
H-2	20.4	8.90	2.29
H-3	22.3	7.19	3.09

3.4.3 斜直組杭の水平抵抗における水平・鉛直変位成分の関係の考察

単杭と斜直組杭の水平抵抗挙動について、基礎の水平変位量と鉛直変位量の関係(図 3-22)等から考察する。

単杭は、鉛直変位に対する水平変位が大きく、基礎部周辺の地盤の降伏による杭の水平移動と転倒が起きていることが示された。終局状態としては、緩やかに荷重低下し引抜かれながら転倒した。これは第 2 章の乾燥砂土層による模型実験と同様の挙動である。地中部基礎(杭体)の剛性が地盤に対して十分に大きく、変形がほぼ起きないために、本研究のような短いスパイラル杭では地盤の降伏による基礎の転倒のリスクに留意する必要がある。

次に斜直組杭では、鉛直変位に対する水平変位の割合が単杭よりも少ない。斜直組杭は単杭に比べて、H-2 で約 25%，H-3 で約 38%も水平変位が小さいことがわかった。斜直組杭は斜杭(鋼管杭)先端付近を支点とする抵抗機構に変化し、基礎が回転によって浮き上がろうとする。これに対して直杭(スパイラル杭)の引抜抵抗力が作用するため、高い水平抵抗を発揮すると推察された。つまり、スパイラル杭の引抜抵抗力と鋼管杭の先端支持力が斜直組杭の水平抵抗力に大きく影響することを示唆している。

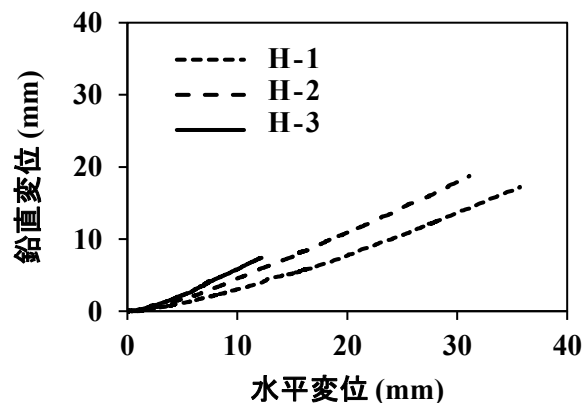


図 3-22 水平載荷実験における基礎上端の水平変位量と鉛直変位量の関係

3.4.4 斜直組杭の水平抵抗力の簡易評価法

第2章では梁ばねモデルによる非線形解析を試みた。しかし、地盤ばねの設定に関しては課題も多く、実設計への適用検討には多くの実験データによる論理的・体系的整理が必要である。そこで、実験結果に基づいて、より簡易的な斜直組杭の水平抵抗力の評価方法について検討した。斜直組杭 H-2 と H-3 では弾性限界水平荷重に約 1.1 倍、弾性限界水平ばね剛性に約 1.3 倍の差があり、終局状態に大きな差が生まれた。水平抵抗に寄与すると思われる 2 つの基礎の形状の違いは、モルタル打設範囲の大きさとスパイラル杭の打設深さである。水平外力に対するモルタル部の側面投影面積は、H-3 で $157,500 \text{ mm}^2$ 、H-2 で $120,000 \text{ mm}^2$ と約 1.3 倍である。これは弾性限界水平ばね剛性の差に近いことから、主に基礎部の水平方向の剛性には、モルタル部の側面投影面積が寄与していることが推察された。

次に式 3-1 を用いた引抜抵抗力の推定では、H-3 は H-2 に比べて約 1.1 倍となった。計算値は最大引抜抵抗力ではあるものの、弾性限界引抜荷重でも同等の差と考えられる。このことから初期の変位量が小さい領域においては、スパイラル杭の引抜抵抗力と弾性限界水平荷重に相関性があることが推察された。

以上より、水平方向作用荷重 H_i を軸方向抵抗力へ分解した力のつり合いで表せると考え、図 3-23 にそのモデル化を示す。水平抵抗力 H_i は鋼管杭の先端支持力 P_2 の水平成分と、 P_2 の鉛直成分はスパイラル杭の引抜抵抗力 P_l とそれぞれが釣り合っており、比例関係にあることが示される。これらの関係は式 3-3 と式 3-4 で表すことができる。これより、斜直組杭 H-2 と H-3 の水平抵抗力 H_i の差は、そのままスパイラル杭の引抜抵抗力 P_l の差であると言える。そこで、引抜抵抗力 P_l を実験結果から弾性限界引抜荷重 P_{ly} として推定し、これから水平抵抗力 H_i を弾性限界水平荷重 P_{Hy} として求めた。図 3-17b から H-2 の弾性限界水平荷重時の鉛直変位量が約 5 mm であることを確認し、次に図 3-13 の単杭の引抜実験の結果から、同等変位量時の荷重値を P_{ly} として 22.9 kN と推定し、これを P_l と仮定した。なお、H-2 と単杭のスパイラル杭の全長は 850 mm で同一である。次に、H-3 はスパイラル杭の打設深さがこれらと異なる (900 mm) ため、式 3-1 による最大引抜抵抗力と相関があると仮定し、1.1 倍した値 (25.2 kN) を H-3 の直杭の弾性限界引抜荷重 P_{ly} として用いた。それぞれ推定した P_{ly} を用いて、式 3-3 と式 3-4 から P_{Hy} を求めた結果と、H-2 に対する H-3 の比率を表 3-8 に示す。軸方向抵抗力から算定された P_{Hy} は、実験値(実験結果から数学的手法で推定した値)に対して、誤差 6%未満であった。これによっ

て、スパイラル杭を用いた斜直組杭の水平抵抗力について、より単純な直杭と斜杭の軸方向抵抗力(引抜抵抗力と押込支持力)から、簡易評価できる可能性が示された。つまり実務的には、より実験として簡単な直杭の引抜実験を現地地盤で行い、直杭の弾性限界引抜荷重を確認することで、これを直杭とした斜直組杭の場合に発揮される弾性限界水平荷重を大よそ推定できることになる。

$$H_i = P_2 \cdot \sin\theta \quad \text{式 3-3}$$

$$P_1 = P_2 \cdot \cos\theta \quad \text{式 3-4}$$

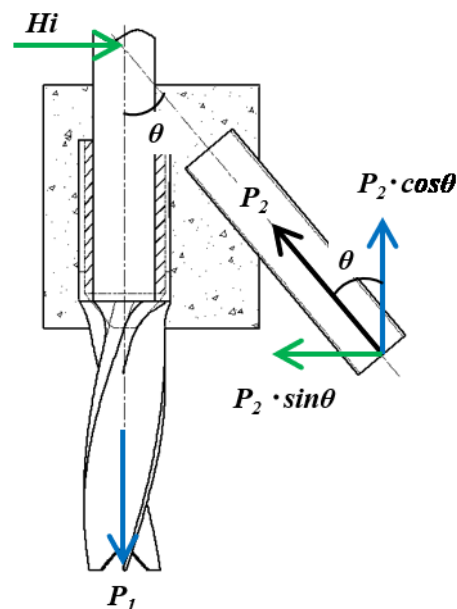


図 3-23 斜直組杭に作用する水平荷重を軸方向成分に分解するモデル

表 3-8 弾性限界引抜荷重と弾性限界水平荷重

(kN)	弾性限界引抜荷重 P_{ly}	弾性限界水平荷重 P_{Hy}	
		実験値※	計算値
H-2	22.9 (実験値)	20.4	19.2(-5.9%)
H-3	25.2 (推定値)	22.3	21.1(-5.4%)
H-3/H-2	1.10	1.09	1.10

※実験結果を元にワイブル分布曲線式より推定した値

3.4.5 車両用防護柵基礎への実用性評価

1) 実験の概要

B種防護柵の標準基礎に対して、斜直組杭との比較評価をするために、同一地盤の敷地内で追加の水平載荷実験を行った。実験に用いた基礎構造を図3-24に示す。コンクリート基礎は通常は連続式基礎だが、実験場の制約もあり、今回は同等性能を十分に発揮できると思われるサイズの独立式基礎ブロックを用いた。施工は既設道路への施工を想定して行った。まず、基礎ブロックよりも一回り大きい範囲(角800×深さ1200 mm)で、舗装と路盤を切断、路床も含めて掘削除去し、底面には碎石を敷いて設置し、水平出しを行った。この後、一般的には外周部の隙間に掘削残土を埋め戻して設置完了となる。しかし、外周部の残土の転圧が不十分だと水平抵抗力の低下を招く恐れがあるため、今回は転圧がしっかりされた状態を想定して、外周部には残土ではなくモルタルを充填した。鋼管杭は、舗装を角150 mmだけカットして、建柱車を用いて深さ1500 mmまで直接打設した。カットした部分にはモルタルを充填して固定した。

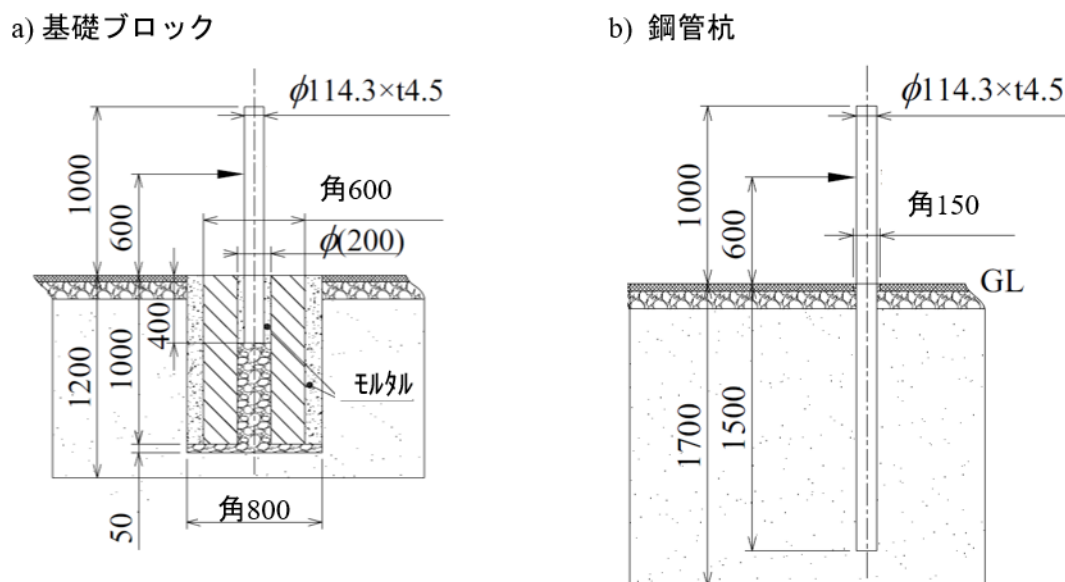


図 3-24 B種防護柵用標準基礎

a) 基礎ブロック, b) 鋼管杭

2) 標準基礎と斜直組杭の水平抵抗特性の比較

水平荷重と支柱頂部水平変位の関係を図 3-25 に示す。図には支柱に用いた鋼管の弾性たわみの理論値，鋼管の全塑性曲げモーメント相当荷重，最大荷重 P_{max} ，変位量 300 mm までの荷重変位関係から算定したエネルギー吸収量(荷重×変位量の総和)を合わせて示す。また，比較のために斜直組杭 H-3 の結果を重ねて示す。基礎ブロックは，最も剛性が高く，終局まで基礎部に変形や損傷はなかった。支柱に用いた鋼管が地表部で曲げ座屈を起こし，ピーク荷重発揮以降は荷重が低下し変位のみ進行した。初期の荷重変位は鋼管の弾性たわみの理論値に近い傾向を示しており，基礎と地盤の抵抗力が十分に大きいということが推測される。最大荷重においても鋼管の全塑性曲げモーメント相当荷重の理論値とほぼ同等であった。鋼管杭は，最も剛性が低く，鋼管の降伏や全塑性相当荷重まで荷重が増加せずに，鋼管が地盤に食い込むように変位が進んだ。実験後の杭体の外観から地中部で座屈変形していることを確認した。地表部での拘束が弱いために地中部にて曲げモーメントが最大となり，座屈変形したと判断される。

以上より，斜直組杭 H-3 は，B 種防護柵用標準基礎であるコンクリート基礎とほぼ同等の強度，かつ，鋼管杭よりも優位であることが示された。

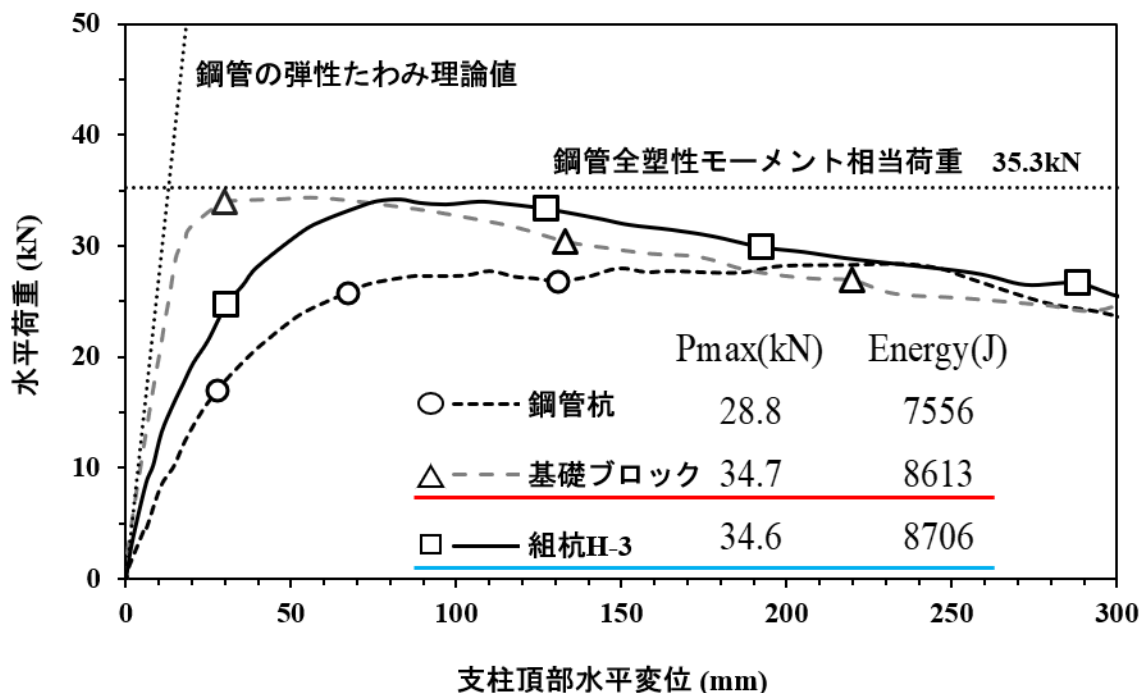


図 3-25 荷重変位関係(標準基礎と斜直組杭の比較)

3.5 まとめ

本章では、第2章で得られた解析結果を参考にして、車両用防護柵向けの実用的な基礎として、新たな鋳鉄製スパイラル杭と鋼管斜杭による斜直合成スパイラル組杭構造(斜直組杭)を考案し、同構造の設計手法の確立に向け、直杭(スパイラル杭)の引抜抵抗特性、斜直組杭の水平抵抗特性とそれらの抵抗メカニズムについて、現地試験を通して分析した。

本検討で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) スパイラル杭の最大引抜抵抗力は、土のせん断破壊面から算出した土のせん断破壊強度と、せん断面で囲まれた範囲の土及び杭体の重量、スパイラル部の周面抵抗力の合算にて推定することが可能であり、実験値 28.8 kN に対して、算定値は 28.3 kN(誤差 2%)で同等を示した。これは斜直組杭の水平抵抗力の推定に関連する重要なパラメータとなる。
- (2) スパイラル杭の引抜抵抗力及び鋼管斜杭の先端支持力から、斜直組杭の水平抵抗力の簡易評価式を得た。斜直組杭ではスパイラル杭の引抜抵抗力及び鋼管斜杭の先端支持力が水平抵抗力へ変換されることを言及し、弾性限界水平荷重の実験値に対する計算値の誤差は 6%未満であり、実務的な算定における有用性を示した。
- (3) 基礎の根入れ深さ及びスパイラル杭の設置深さをより深くし、引抜抵抗力と水平抵抗力の向上を期待した斜直組杭 H-3 において、単杭に比べて最大荷重時の水平変位量は 50%以下を発揮し、かつ B 種防護柵支柱以上の耐荷性能を有することを明らかにした。
- (4) B 種防護柵の標準基礎であるコンクリート基礎及び鋼管杭に対して、よりコンパクト(コンクリート基礎対比：幅 50%，体積 80%縮小，鋼管杭対比：深さ 40%縮小)な基礎形式として実用できる可能性を示した。

参考文献

- 1) 日本道路協会：車両用防護柵標準仕様・同解説，2004.
- 2) 古河幸雄，藤田龍之，坂田正純，村田吉晴，渡辺英彦：コンクリート用細骨材としてのまさ土の利用に関する基礎研究，土木学会論文集, No.750/III-65, pp.159-170, 2003.12.
- 3) 日本道路協会：防護柵の設置基準・同解説，2021.
- 4) 日本道路協会：舗装設計便覧，2006.
- 5) 井手裕太，黒川貴大，永田誠：スパイラル杭(ねじりY形鋼)の引張及び曲げ特性，第57回地盤工学研究発表会講演集，20-6-3-06，2022.
- 6) 永田誠，平田尚：回転圧入鋼管杭の引抜き抵抗の研究，新日鉄技報，第382号，2005.
- 7) 和田昌敏，澤石正道，加藤健，高橋章造：回転圧入鋼管杭の引抜き抵抗の研究，土木学会第71回年次学術講演会，03-0047，2016.
- 8) 森脇登美夫，大川秀雄：単一地盤に定着した地盤アンカーの引抜き抵抗，土木学会論文集，No.481. III-25, pp.155-164, 1993.
- 9) 姜正求，安福規之，石蔵良平：先端部傾斜角と杭の根入れ深さに着目した砂地盤中の拡底杭の破壊モードとその評価，地盤工学会中国支部論文報告集，地盤と建設，Vol. 37, No. 1, 2019.
- 10) 酒井俊典，田中忠次，宮内定基，竹内一生：砂地盤における浅いアンカーと深いアンカーの転移点について，農業土木学会論文集第165号，pp.33-38, 1993.
- 11) 酒井俊典，阪上最一：密詰め・緩詰め2層地盤におけるアンカー引抜き抵抗力について，第37回地盤工学研究発表会発表講演集，pp.1515-1516, 2002.
- 12) 董軍，中村和之，佐藤剛司，龍岡文夫：大型平面ひずみ圧縮試験における粒状体のせん断層と粒子寸法の影響，粒状体の力学シンポジウム，土質工学会，pp.92-94, 1993.
- 13) 松尾稔：送電用鉄塔基礎の引揚抵抗力について，土木学会論文集，Vol. 105, pp.9-19, 1964.
- 14) 中谷昌一，白戸真大，井落久貴，松井謙二：水平力を受ける杭の弾性限界状態に関する研究，土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp. 616-628, 2008.8.
- 15) 宇都一馬，冬木衛，桜井学：杭の載荷試験結果の整理方法，総合土木研究所，基礎工，Vol. 10, No, 9. pp. 21-30. 1982.9.

第4章 実験土層における両斜合成スパイラル組杭の 水平抵抗特性

4.1 はじめに

第3章では、車両用防護柵向け基礎として、スパイラル杭を活用した斜直組杭を提案した。斜直組杭は主に車道側から歩道側への一方向からの作用力に対して、狭隘な環境を想定して少しでも施工範囲を縮小することを狙っており、交差点や施工に制約がある箇所における活用が期待される。一方で、農業施設や太陽光発電設備の基礎においても、比較的鉛直支持力よりも繰返し作用する風荷重に対する水平抵抗力が求められるが、これらは広い敷地への設置が想定される。そこで、図4-1に示すような2本のスパイラル杭の両方を斜杭とした両斜合成組杭構造(以下、両斜組杭)の方が、杭軸方向抵抗力のバランスが良いと考えられ、繰返し作用する外力への耐久性にも期待できる。

桑原ら¹⁾の研究によれば、長さが一定の足場用パイプ2本用いた両斜組杭にて、傾斜角が小さいほど水平抵抗力が高くなる傾向を示唆している。水平力を受けた両斜組杭は、先端部分を中心に地盤内で回転するように動くため、両斜組杭の傾斜角が小さいほど、杭の根入れが深く地盤強度が高くなるため回転が抑制されることに起因すると考察している。そのため傾斜角が45°においては、杭の根入れ深さが浅いため、杭と地盤が一緒に抜け上がって、水平抵抗の発現が停滞するとしている。また、実際の風荷重を想定した繰返し荷重への耐久性についても検討が必要だとしている。後藤ら²⁾は、逆に斜杭角度の増大は水平抵抗力を鋭敏に増強するとした。ただし、これは杭先が有力な支持層に達している時に顕著に現れるとしている。そのため同研究の実験では、樹脂製角棒杭の先端に杭断面積の約10倍の面積を有した平板を設けた斜杭を用いている。これらより、両斜組杭における杭軸方向抵抗力は水平抵抗力を得るのに重要な要素であり、高い軸方向抵抗力を有するスパイラル杭を両斜組杭に適用することで、よりコンパクトな基礎構造が得られるのではないかと考えた。しかし、両斜組杭へスパイラル杭を適用した研究事例は少ない。

これまでに、斜直組杭にスパイラル杭を適用して、特定方向からの単調載荷による水平抵抗特性を明らかにしたが、風荷重を想定した繰返し荷重に対する耐久性は検討できていない。そこで本章では2本の鋼製スパイラル杭の両方を

斜杭とした対称性のある両斜組杭の水平抵抗特性を検討する．組杭構造の配列や杭形状による影響度を比較しやすくするために，地盤条件のばらつきを抑制しやすい実験土層による評価を行う．土層は密な乾燥砂地盤とし形状による性能差が発現しやすいと考えた．模型杭は，スパイラル杭を主として，比較対象として単杭，2本の直杭を用いた組杭(以下，垂直組杭)，斜杭角度の異なるスパイラル両斜組杭，ねじり加工を施していない平鋼を用いたプレート両斜組杭を用意する．

本章ではこれらの模型杭を用いて水平荷重への耐久性に優れる組杭構造を得るために，斜杭角度(垂直組杭含む)，杭形状(プレートとスパイラル)の水平抵抗特性への影響について明らかにする．はじめに単杭と比較しつつ，両斜組杭と垂直組杭におけるスパイラル杭の有効性を明らかにする．次に高い水平ばね剛性が得られる斜杭角度を明らかにする．そして，両斜組杭に対するスパイラル杭の有効性をプレート杭と比較する．プレート形状はスパイラル加工を施す前の形状であり，軸方向抵抗力はスパイラル杭よりも小さくなると想定され，これよりスパイラル形状の効果を明らかにする．最終的に両斜組杭を用いて交番繰返し載荷実験を行い，その耐久性を評価する．繰返し荷重に対する耐久性は，水平載荷実験の荷重変位関係における水平ばね剛性の大きさを評価できると考えた．

これにより，スパイラル杭を活用した，より合理的で耐久性にも優れる両斜組杭構造の設計に寄与する．具体的には大型道路標識や農業用ハウスなどの鉛直荷重(主に死荷重)よりも水平荷重(主に風荷重)が卓越するような比較的小規模な上部構造物向け基礎への適用が期待される．

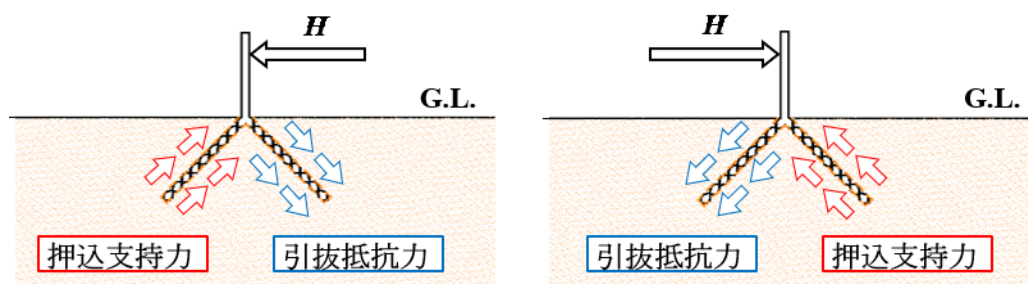


図 4-1 両斜合成スパイラル組杭構造の水平力に対する抵抗機構

4.2 実験装置と実験土層の材料

実験装置を図 4-2 に示す．载荷装置及び計測器は第 2 章の実験で用いたものと同様である．土槽は内径 750 mm，深さ 500 mm の円柱形状である．ロードセルと変位計によって，杭頭荷重と杭頭の水平変位量と鉛直変位量を計測した．使用した砂は熊本珪砂 7 号(K7)であり，基本特性と力学特性を表 4-1 に示し，圧密排水三軸圧縮試験の結果を図 4-3 に示す．三軸圧縮試験の側方向応力は 50, 100, 150 kN/m² の 3 水準とした．得られた結果からモールの応力円を描き内部摩擦角 ϕ_d を求めた．砂地盤は，バケットを使ってタンク内に砂を 7 回に分けて投入し，指定の深さ(一層が約 71mm)となるまでランマーによる締固めを行い，相対密度が 90%となるように作成した．今回はスパイラル杭とプレート杭の性能差が発現しやすいと思われる密な地盤条件とした．

模型杭は周辺地盤を乱さずに貫入した状態を想定し，図 4-4 に示すように载荷装置と杭頭を接続した状態で砂を投入した．杭頭部は治具によって，鉛直軸方向と回転を自由状態とした．タンクによる拘束影響を受けないように，いずれの模型杭においても先端から土層内壁までの距離は杭幅 B (16 mm)の 5 倍以上を確保した．斜杭の設置角度は，鉛直軸からの傾斜角度 θ で表す．

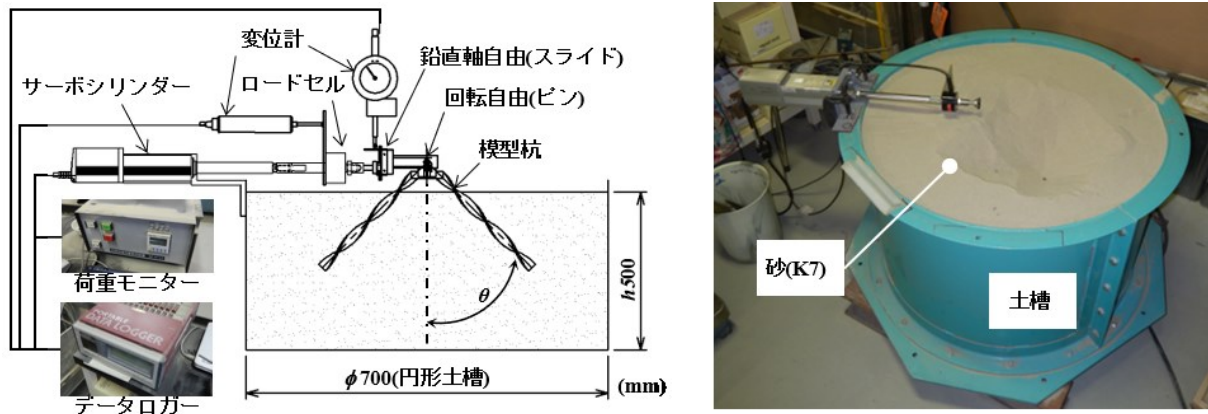


図 4-2 実験装置

表 4-1 砂地盤の物性値

項目	数値
比重, G_s	2.62
最大乾燥密度, $\rho_{\max}$	1.58 g/cm ³
最小乾燥密度, $\rho_{\min}$	1.21 g/cm ³
相対密度, Dr	90%
内部摩擦角, ϕ_d	37.9°※

※相対密度 80%での数値.

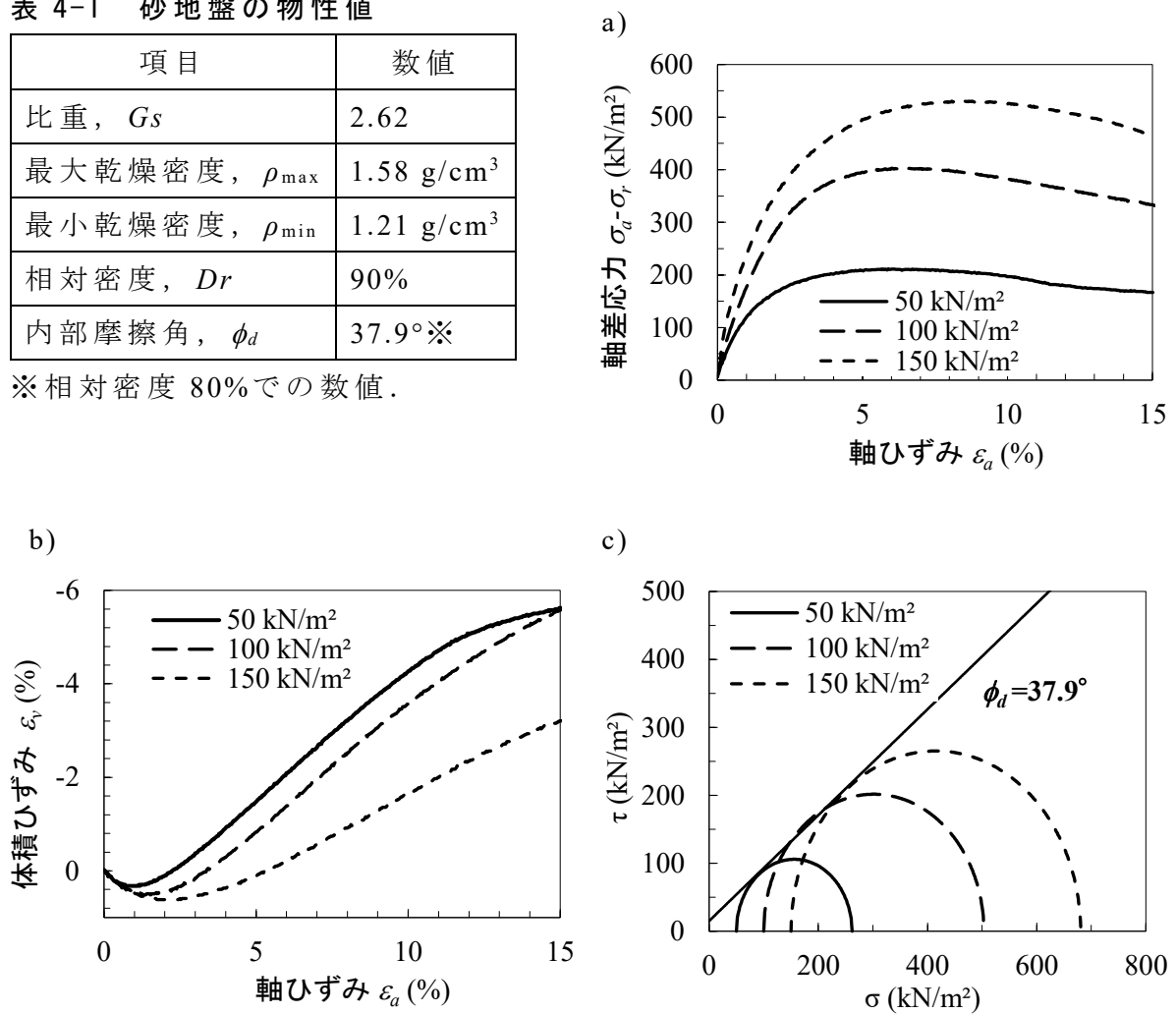


図 4-3 三軸圧縮試験結果

a) 軸差応力と軸ひずみ, b) 体積ひずみと軸ひずみ, c) モールの応力円

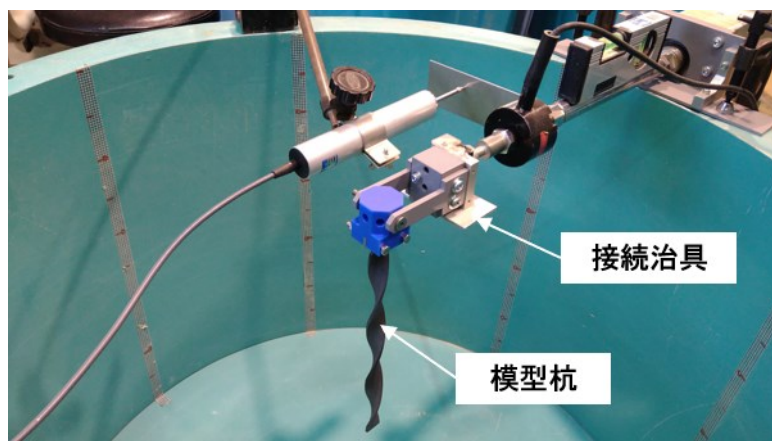


図 4-4 模型杭の設置状況

4.3 模型杭の概要

模型杭の基本情報を表 4-2 に示す．プレート杭には平鋼をそのまま用いて，スパイラル杭は平鋼を長軸周りに捻り加工して作成した．長さはスパイラルの効果을明らかにするために 3 ピッチ分の 216 mm に統一した．スパイラルはねじり加工によって一定方向から見ると断面形状が変化するため，断面 2 次モーメントを弱軸と強軸で算出した．既往研究^{3), 4)}より，スパイラルのピッチ・幅比は 4.5 とした．

模型杭の諸元を表 4-3 に，外觀を図 4-5 に示す．模型杭は載荷装置と接続する杭頭部以外の杭体の寸法は同一としている．模型杭はスパイラル杭の単杭(S-SP)，スパイラル両斜組杭(B-SP1-3)，垂直組杭(V-SP)，プレート両斜組杭(B-PL1,2)を準備した．斜杭角度は 45, 30, 15°, 及び垂直組杭では 0°である．斜杭角度 45°以上は根入れ深さが浅くなることや，実環境での打設の難しさを考慮して採用しなかった．垂直組杭は群杭効果(杭一本あたりの抵抗力が低下する影響)を考慮して，実務において一般的に用いられる杭中心間隔 $2.5B(=40\text{ mm})$ とした．模型杭の砂地盤への根入れ深さ D_P は模型杭の長さ L を統一した影響により，斜杭角度が大きいほど短くなっている．

表 4-2 模型杭の種類

No.	Type	杭形状	θ (°)	D_P (mm)
S-SP	単杭	スパイラル	-	182
B-SP1	両斜組杭	スパイラル	45	123
B-SP2	両斜組杭	スパイラル	30	162
B-SP3	両斜組杭	スパイラル	15	187
V-SP	垂直組杭	スパイラル	0	182
B-PL1	両斜組杭	プレート(弱軸)	45	123
B-PL2	両斜組杭	プレート(強軸)	45	123

表 4-3 模型杭の諸元

項目	数値等
材質	SS400
ヤング率, E	200 (GPa)
断面二次モーメント I_W, I_S	I_W , 弱軸
	36 (mm ⁴)
	I_S , 強軸
	1,024 (mm ⁴)
杭長, L	216
杭幅, B	16
厚み, t	3

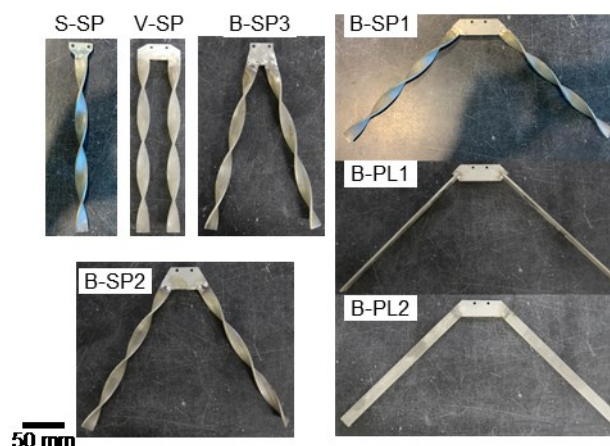


図 4-5 模型杭の外観

4.4 単調水平載荷実験

模型杭の水平抵抗特性を明らかにするために、単調水平載荷実験を行った。載荷速度は変位制御による 0.01 mm/sec とし、一方向への連続載荷とした。実験回数はそれぞれ 2 回以上実施し、模型杭の杭頭部の荷重と水平変位量を計測した。終了条件は杭頭の水平変位量が杭幅 B に達するまでとした。そして、第 3 章と同様に得られた荷重変位曲線から、ワイブル分布曲線式による数学的な方法^{5), 6)}を用いて水平抵抗を比較評価した。

先に実験結果から、実験による最大荷重 P_{max-E} 、ワイブル分布曲線式により推定した最大荷重 P_{max-W} 、弾性限界水平荷重 P_{Hy} 、弾性限界変位量 δ_S 、及び弾性限界水平ばね剛性(以下、ばね剛性とする) $k_y (=P_{Hy}/\delta_S)$ をまとめて表 4-4 に示す。中谷ら⁵⁾によれば、ワイブル分布曲線による降伏荷重の決定では、杭先端の水平変位を無視するために半無限長の杭であることや杭体が降伏していないことなどが近似精度を確保するために重要であるとしている。前者については目的が比較評価をするため問題ないと考え、後者については実験後に杭体に残留変形が無いことを確認しており、適用に問題ないと判断した。またワイブル分布曲線に用いる実験データは最大荷重までの結果とした。次項よりそれぞれの結果について詳細を述べる。

表 4-4 単調水平載荷実験及びワイブル分布曲線式による推定結果

No.	P_{max-E} (N)	P_{max-W} (N)	P_{Hy} (N)	δ_s (mm)	k_y (N/mm)
S-SP-1	63.6	63.9	40.4	7.4	5.5
S-SP-2	67.3	79.3	50.1	8.3	6.0
B-SP1-1	108.7	108.5	68.6	0.9	78.2
B-SP1-2	116.4	114.9	72.6	0.9	81.6
B-SP2-1	116.4	114.1	72.1	1.5	49.5
B-SP2-2	110.7	107.7	68.1	1.4	49.3
B-SP3-1	97.8	95.3	60.2	3.3	18.0
B-SP3-2	109.7	107.5	67.9	3.6	19.1
V-SP-1	102.5	107.2	67.8	5.5	12.3
V-SP-2	111.2	111.7	70.6	5.2	13.7
B-PL1-1	72.1	90.8	57.4	10.3	5.6
B-PL1-2	66.1	93.9	59.3	13.4	4.4
B-PL2-1	49.3	66.2	41.8	12.0	3.5
B-PL2-2	54.2	67.1	42.4	10.1	4.2

4.4.1 両斜組杭における斜杭角度が水平抵抗へ及ぼす影響

1) 単杭及び垂直組杭との比較

第2章の研究によって、斜直合成組杭の場合には斜杭角度 45° で弾性限界水平荷重が高くなることがわかっている。そこで、まずは斜杭角度 45° (B-SP1) において、単杭(S-SP)と垂直組杭(V-SP)との水平抵抗特性の比較を行った。荷重変位関係を図 4-6 に示す。また、模型杭の種類ごとのワイブル分布曲線式による判定結果を図 4-7 に示し、各模型杭の弾性限界水平荷重を図 4-6 中に矢印で示す。ワイブル分布曲線式から求めた最大荷重 P_{max-W} は、いずれも実験における最大荷重 P_{max-E} の 10%以内であり、比較評価をする上では十分な精度であると判断した。単杭における実験値とワイブル分布曲線の誤差が他よりも大きかった。荷重の増加率が一定もしくは低下する傾向が実験範囲内では確認されていないため、実際の最大荷重が実験結果よりも大きいことが予想され、これが主因であると思われる。実験範囲で最大荷重が明確に現れたのは両斜組杭のみであった。両斜組杭は最大荷重発揮後に、徐々に荷重低下を起し変位が進行した。これは桑原ら¹⁾のパイプ杭を用いた先行研究と同様の傾向である。

それぞれの弾性限界水平荷重とばね剛性を比較すると、いずれも両斜組杭が最も大きく、単杭に対して、弾性限界荷重は約 1.6 倍、ばね剛性は 10 倍以上、垂直組杭に対しては、降伏荷重は同等だが、ばね剛性は約 6 倍を発揮した。な

お、単杭と垂直組杭の 0.9 mm 時点(両斜組杭の弾性限界変位量)の抵抗力に対して、両斜組杭はそれぞれ約 9 倍と約 4 倍を示した。両斜組杭は、杭先端付近を支点にして地盤内で回転して抜け出そうとするが、スパイラル杭の軸方向の押込支持力と引抜抵抗力によって、回転が抑制され高い水平抵抗力が得られたと推察される。

一方で単杭と垂直組杭は変位の進行と共に荷重も上昇を続けていた。垂直組杭の最大荷重は、100 N 程度であり、単杭の 65 N 程度に対して 1.5 倍程度であり、単純な杭 2 本分の抵抗力よりも低かった。荷重方向に並行に配列した垂直組杭の抵抗機構は単杭と同様であるが、2 本の杭に挟まれた領域の地盤抵抗は低下することが推察される。前述した後藤ら²⁾の研究では、杭先端抵抗を確保するために平板を設けた角棒模型杭にて、斜杭角度 θ が 0° (垂直組杭)と 15° 、 30° の両斜組杭において、ばね剛性が θ の増大に応じて急増(数倍から 10 倍程度)することを明らかにしている。これは本実験でも同じ傾向を示し、スパイラル周面の摩擦抵抗が杭先端抵抗と同等の効果を発揮していることが示唆された。また、同様に前述した桑原ら¹⁾の研究では、パイプ杭を用いた傾斜角 0° の垂直組杭に対して、傾斜角 45° の両斜組杭の最大荷重はおよそ 6 割となっており、傾斜している分、根入れ深さが短い($1/\sqrt{2} \approx 0.7$)ことをその原因に挙げている。一方で、本実験においても両斜組杭の根入れ深さは垂直組杭の約 7 割と同条件であるが、2 つの最大荷重は同等だった。これはパイプ杭の軸方向抵抗力に対して、スパイラル杭は特に引抜き側で高い軸方向抵抗力を有しているため、根入れが浅くても水平抵抗力が向上したと推察される。

以上より、スパイラル杭の両斜組杭では、並行に配列した垂直組杭よりも、弾性範囲において水平抵抗力に優れた構造であることが明らかとなった。杭の根入れ深さ、つまり杭長を効率化できる可能性が示唆された。しかし、根入れ深さが一定以上短くなると、スパイラルの軸方向抵抗に影響する地盤の範囲と、水平抵抗に影響する範囲の重複領域が増え、地盤反力の低下が懸念される。今後、杭の根入れ深さをパラメータとした実験やシミュレーションによって、水平抵抗力との関係を解明する必要がある。

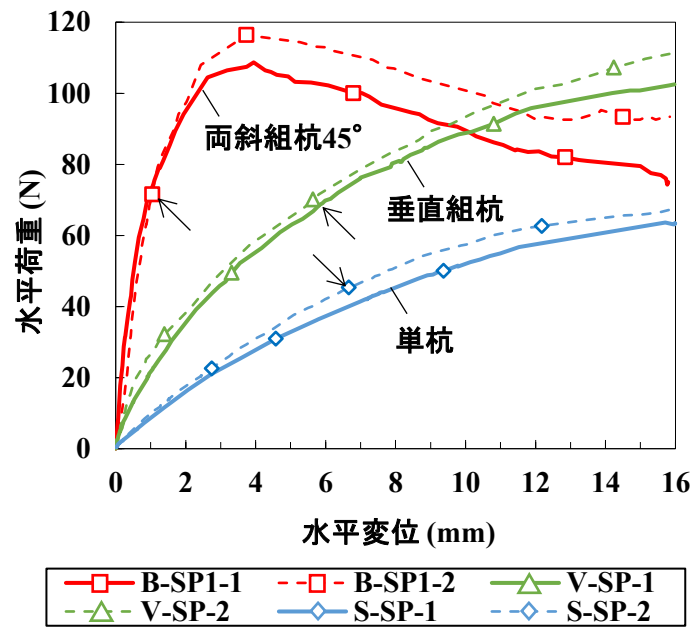


図 4-6 荷重変位曲線（単杭，垂直組杭，両斜組杭 45°の比較）

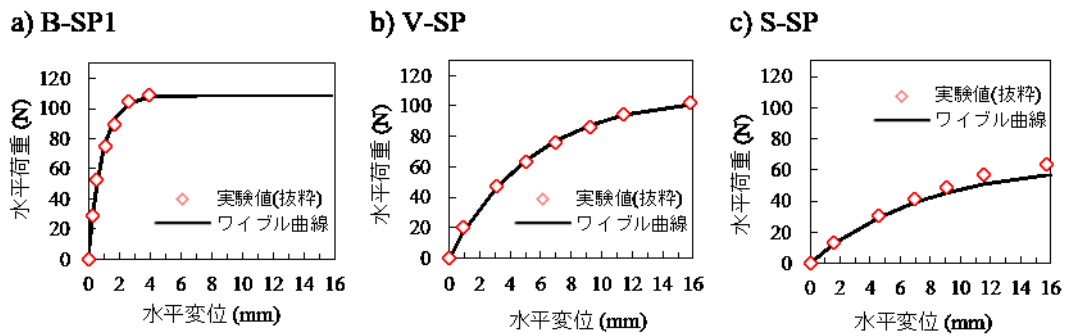


図 4-7 ワイブル分布曲線式によるフィッティング

2) 斜杭角度の影響と評価モデルの検討

斜杭角度が水平抵抗へ与える影響を明らかにするため、B-SP1～3の荷重変位曲線を図4-8に示す。図中にはワイブル分布曲線式から求めた弾性限界荷重も矢印で示す。斜杭角度が大きくなるにつれて、弾性限界荷重とばね剛性は大きくなり、最大荷重は同程度となった。斜杭角度が小さくなるにつれ、徐々に垂直組杭及び単杭の抵抗機構に近づくことが推測され、斜杭角度15°では垂直組杭に近い特性を示した。両斜組杭の水平抵抗力は、杭軸方向の抵抗力の水平成分と、杭体側面の地盤からの反力で構成されていると推測される。斜杭角度45°は、前者の軸方向抵抗力の水平成分が他より大きいために高い抵抗力を発揮するが、軸方向の抵抗力が最大値を迎えると、根入れ深さが浅いために地盤からの反力は小さくなり、変位の進行とともに水平抵抗力が低下したと推察される。

後藤ら²⁾によれば、斜杭角度 θ の増加によって両斜組杭の水平抵抗は増大し、これは斜杭の軸方向抵抗力の水平成分 $\sin\theta$ に効くとしている。これを参考に斜杭角度と水平抵抗の関係について、両斜組杭の引抜き杭に着目して分析する。引抜き杭に着目した理由は2点ある。1)松村ら⁷⁾は、アルミ製角パイプを用いて、単杭、単斜杭(引抜き杭、押込み杭)、両斜組杭の4種類でX線CTを活用した模型実験を行い、杭の周辺地盤がどのように抵抗しているかを報告している。これによれば両斜組杭の押込み杭の前面地盤が単斜杭と同等の地盤反力を発揮するのに対して、両斜組杭の引抜き杭の前面地盤は、引抜き杭の曲げに対する地盤反力として十分な抵抗を有していないことを示している。2)本実験では比較的短い杭を想定しているため、大きな上載圧が期待できないことや地表面付近の地盤状態のばらつきを考慮すると押込支持力よりも引抜抵抗力の方が低くなり支配的であると考えたためである。一方で、斜杭角度が大きくなると、杭長が同一の場合には杭の根入れ深さが浅くなり引抜抵抗は低下すると考えられる。ここで村田と後藤⁸⁾は、スパイラル杭の引抜抵抗は杭周面の摩擦抵抗に加えて、スパイラル形状による地盤とのかみあいによって発生するコーン状せん断面に作用するせん断抵抗が加わることを示唆している。そこで杭先端付近から地表に向かってコーン状のせん断破壊面が発生する様子を斜杭角度45°と15°について図4-9に模式する。せん断面の発生位置は、スパイラルの1ピッチ分を地盤とかみ合うアンカー部と考え、その中間である先端から1/2ピッチ(36mm)とした。先端部分は杭径から見かけの杭表面積を求めて、これもせん断面積に加えた。せん断面の角度 θ_E は、アンカー基礎の先行研究では地盤の内部摩擦角 ϕ と関連付けて、 ϕ 、 $90-\phi$ 、 $90-\phi/2$ などと報告され

ている⁹⁾．今回は相対比較なので特別な理由はないが最もせん断面が狭くなる $90-\phi/2(=90-37.9/2 \approx 71^\circ)$ を採用した．せん断面は，地表面に達した時に最大を迎えると考え，そこから杭軸線の直交方向で区切って求めた．表 4-5 に斜杭角度 0° から 60° までの $\sin\theta$ ，せん断面積について 45° を基準としたそれぞれの比 ($R-\sin\theta$ ， $R-A_s$) と，2 つをかけあわせた比 ($R-H$) を示し，実験結果の最大荷重 ($R-P_{max}$) の関係と比べた．またその関係を図 4-10 に示す．斜杭角度 30° と 45° において実験の最大荷重と近い傾向が得られた．斜杭角度 15° では実験値の方が 2 割ほど高い数値を示したが，杭間隔が他よりも狭くなっていることから，引抜き杭で発生するせん断面が押込み杭側の影響範囲に重なる領域が増えせん断強度が向上することなどが推測される．この関係からは，斜杭角度 35° 前後で水平抵抗の最大値が得られることが推測される．しかし，実験では弾性限界水平荷重やばね剛性は 45° が最も大きくなり， 15° のばね剛性に対して 4 倍以上を発揮した．終局状態にはせん断面積の大きさが寄与するが，弾性限界水平荷重以下の弾性領域では引抜き抵抗の水平成分の影響度が大きいことが示唆された．

以上より，斜杭角度 45° において，最も大きなばね剛性が得られることが明らかとなった．引抜き抵抗の水平成分及びせん断面積の関係から約 35° でピークを迎えることが示唆された．繰返し荷重への耐久性能を考慮すると，実験結果からは，最もばね剛性の高い 45° が優位であると推察される．

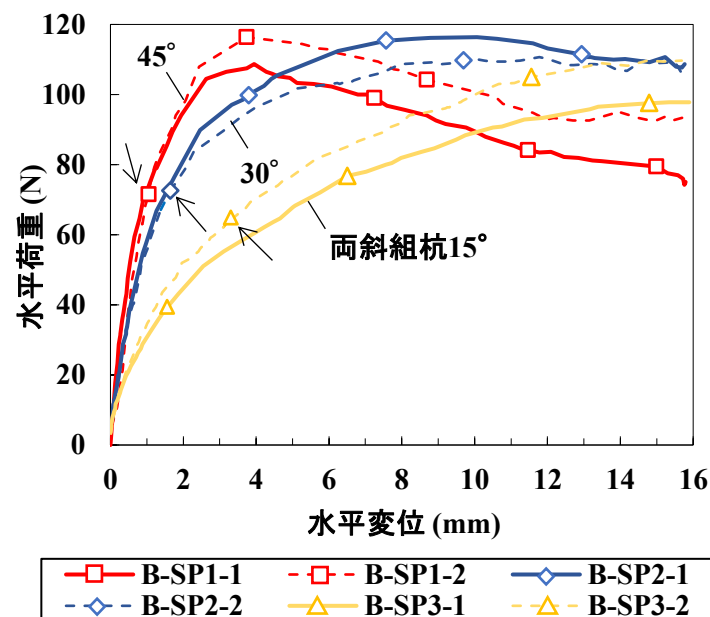


図 4-8 荷重変位曲線（斜杭角度の比較）

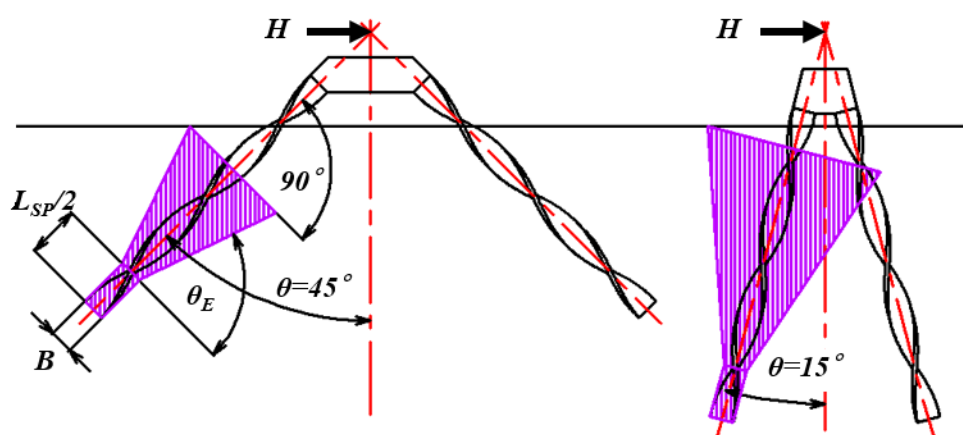


図 4-9 両斜組杭の引抜き杭のせん断破壊面のモデル化

表 4-5 引抜抵抗の水平成分 ($R \sin \theta$) とせん断面積 ($R A_s$) の斜杭角度との関係

$\theta (^{\circ})$	$R \sin \theta$	$R A_s$	$R-H$	$R-P_{max}$
0	0.00	2.32	0.00	-
5	0.12	2.17	0.27	-
10	0.25	2.03	0.50	-
15	0.37	1.88	0.69	0.92
20	0.48	1.73	0.84	-
25	0.60	1.59	0.95	-
30	0.71	1.44	1.02	1.01
35	0.81	1.29	1.05	-
40	0.91	1.15	1.04	-
45	1.00	1.00	1.00	1.00
50	1.08	0.85	0.92	-
55	1.16	0.71	0.82	-
60	1.22	0.56	0.69	-

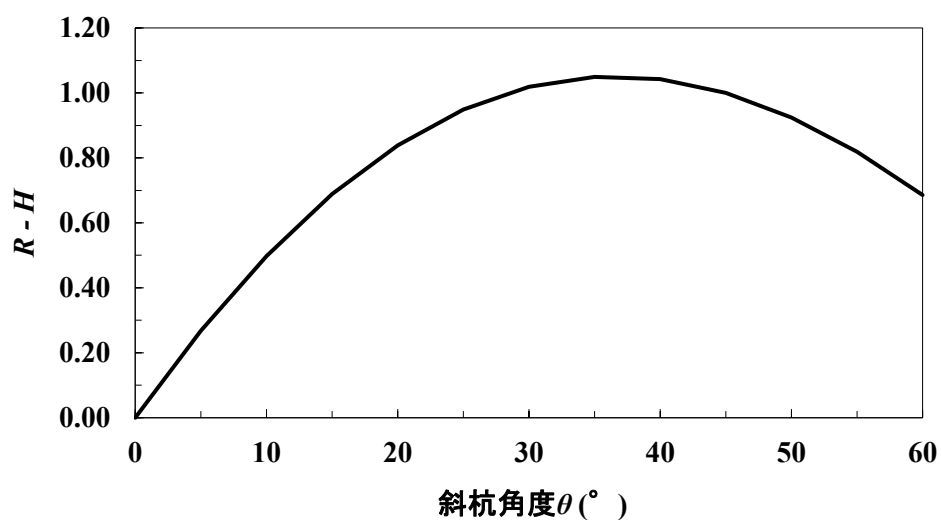


図 4-10 せん断面積に対する水平成分の比率 ($R-H$) と斜杭角度の関係

4.4.2 杭の形状(スパイラル及び平板)の影響

両斜組杭における杭形状が水平抵抗力へ与える影響を明らかにするため、スパイラル両斜組杭(B-SP1)とプレート両斜組杭(B-PL1,2)の荷重変位曲線を図4-11に示す。図中にはワイブル分布曲線式から求めた弾性限界荷重も矢印で示す。プレート両斜組杭(強軸)の水平抵抗力は、スパイラル両斜組杭に対して、弾性限界水平荷重が約60%、ばね剛性は1/20と低く、特にばね剛性は単杭と比べても約33%低かった。また弱軸(B-PL1)が強軸(B-PL2)よりも抵抗力が大きかった。これは水平力に対して、杭体の曲げ剛性よりも、杭体の側面積を介して地盤から受けられる反力の方が、影響度が大きいことを示唆している。

一方で、杭体の側面積が単杭より2倍近く大きいにも関わらず、水平抵抗力にそれほどの差がでなかったのは、両斜組杭構造により杭体が回転しながら抜け出てきてしまうためと推察される。つまり、プレート杭に対してスパイラル杭は高い軸方向抵抗力を有するため、杭体の回転が抑制され、高い水平抵抗力が発揮されたと推察できる。

以上より、両斜組杭の水平抵抗特性には、杭体の曲げ剛性や杭体の側面積の大きさよりも杭軸方向の抵抗力が重要であることが明らかとなった。

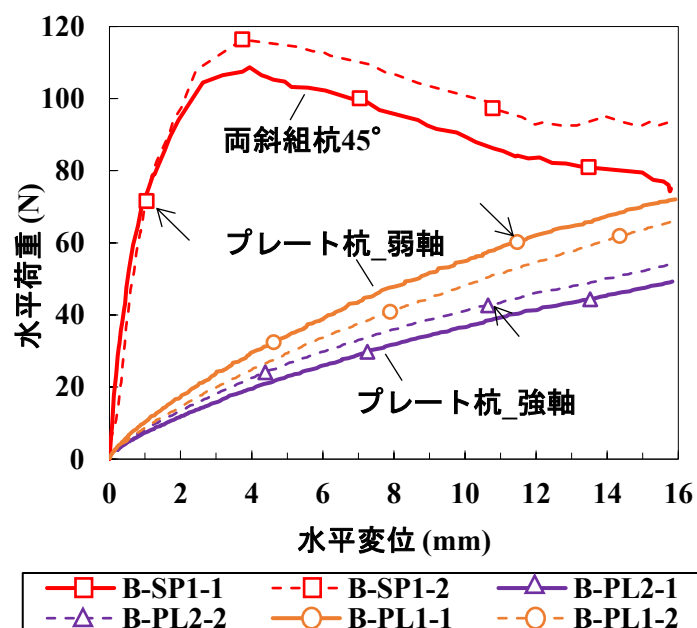


図 4-11 荷重変位曲線（杭形状の比較）

4.5 正負交番載荷実験による両斜合成スパイラル組杭の耐久性評価

次に、単調載荷実験において最も高い水平抵抗特性を発揮した斜杭角度 45° の両斜組杭の模型杭(B-SP1)を用いて、風を想定した繰返し水平荷重に対する耐久性を明らかにするために、繰返し載荷実験を行った。実験は変位制御によって載荷速度 0.05 mm/sec とし、50 サイクルを目標に正負交番載荷した。変位振幅は、弾性限界水平荷重相当の杭頭荷重が作用するように調整した。繰返し載荷の履歴の有無による水平抵抗特性の変化を明らかにするために、繰返し載荷後に単調載荷試験を行った。

荷重-サイクル数を図 4-12 に示す。載荷荷重は、弾性限界水平荷重相当(約 70 N)を目安に変位制御とし、それを 15%程度上回る 80 N (杭頭変位量 $\pm 1.4 \text{ mm}$)と、15%程度下回る 60 N (杭頭変位量 $\pm 0.8 \text{ mm}$)の2ケースとした。そして荷重水平変位曲線を図 4-13 に、鉛直変位量-サイクル数を図 4-14 に示す。図 4-13b には、60 N 時の繰返し載荷後に続けて行った単調載荷及び別途行った単調載荷のみの結果も載せる。

まず、繰返し荷重 80N の結果について述べる。図 4-12a、図 4-13a に示すように 30 回の繰返し載荷による荷重の変化は見られなかった。目標のサイクル数 50 回に対して 30 回で終了しているのは、図 4-14 に示すように、繰返しに伴って鉛直変位量が比例的に増加し、治具の移動許容量を超え実験が続行できなくなったためである。正荷重作用時に前方側杭先端を支点にして後方側の杭先端が浮き上がると同時に出来た空間に砂が流れ込み、負荷重作用時にはその逆の挙動となることで、徐々に鉛直方向に浮き上がったものと推測できる。これは粘着力などが無い乾燥砂の場合に、より顕著に現れる挙動だと考えられる。したがって、仮にサイクル数を増していたら杭体がさらに抜け出てしまうため抵抗力はいずれ低下していくものと推測される。

次に 60 N での結果について述べる。図 4-12b 中に矢印で示すように繰返し回数の増加に伴い、わずかながら正負ともに抵抗力が増加していく傾向が示された。図 4-13b の繰返し載荷の履歴の有無による単調載荷試験結果にもその影響が現れており、最大荷重はほぼ同等だが、繰返し載荷後はばね剛性が約 1.5 倍に向上した。また鉛直変位量の増加傾向は図 4-14 より、80 N と比較して 1/5 程度(-80%)であり荷重値の差(-30%)よりも大幅に減少した。繰返しに伴って抵抗力が向上した原因は、主に載荷方向の杭周辺にできるわずかな空間に砂が流れ込み、繰返し載荷によって徐々に締め固められたためと推測される。これは 80 N と比べて鉛直変位量が小さいことも関係していると思われる。

以上より，両斜組杭に弾性限界水平荷重の約 85%を正負交番载荷させても水平抵抗力は低下することではなく，弾性範囲において耐久性を有することを明らかにした．ただし，実環境の多くは不飽和土が想定され，杭体周辺に出来た空間への砂の供給がサクションや粘着力の影響によって起こりにくく，空間がより拡大し抵抗力が低下する可能性が考えられる．一方で，実環境では上部構造物の自重が死荷重として常時作用しているため，鉛直方向の変位量は抑制されることも推測される．本研究では両斜組杭の水平抵抗力について検討したが，基礎としては鉛直支持力も必要な性能である．今後は，地盤条件の影響や，鉛直支持力特性，水平力と鉛直力の複合荷重に対する抵抗特性についても研究が必要である．

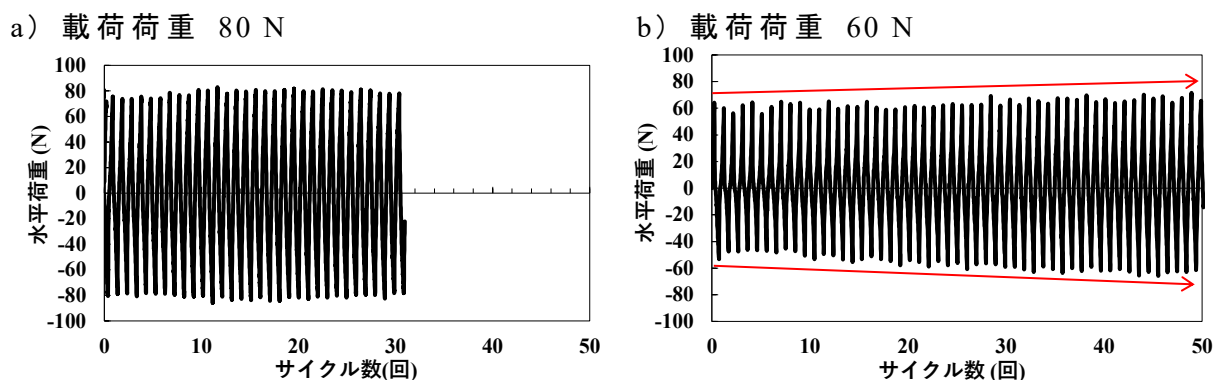
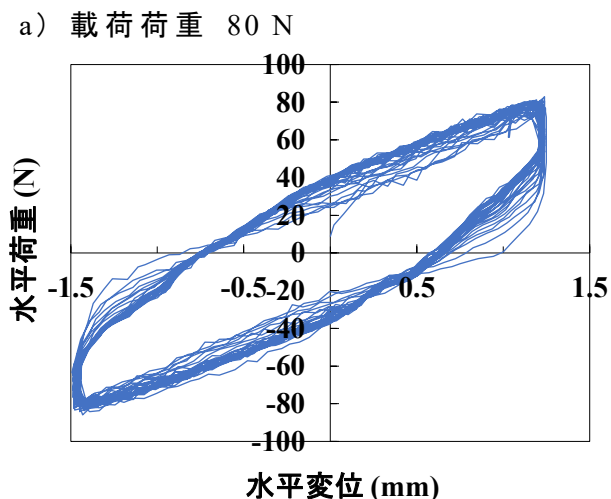


図 4-12 荷重-サイクル数

a) 載荷荷重 80 N, b) 載荷荷重 60 N



b) 載荷荷重 60 N

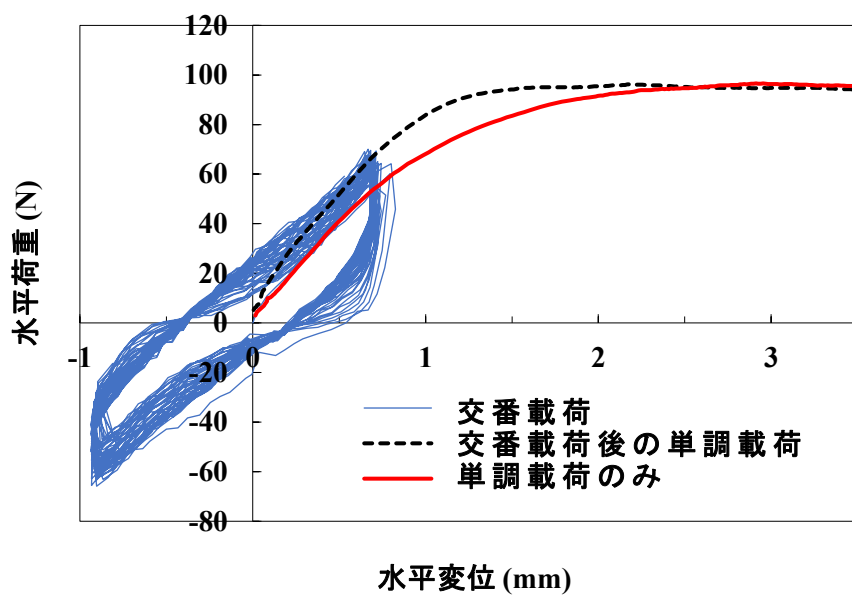


図 4-13 荷重水平変位曲線の履歴

a) 載荷荷重 80 N, b) 載荷荷重 60 N

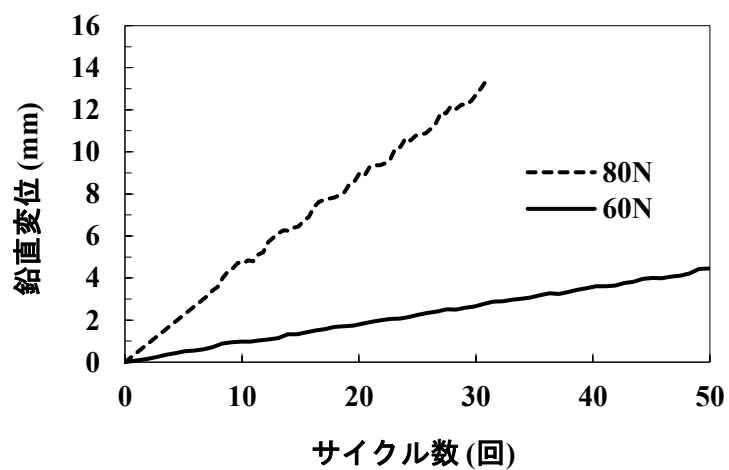


図 4-14 鉛直変位とサイクル数の関係

4.6 まとめ

本章では、繰返し荷重に対する水平抵抗に着目して、対称性を有した両斜合成スパイラル組杭(両斜組杭)について、実験土槽と模型杭による水平載荷実験を行い評価・分析した。まずは、斜杭角度の合理化を単杭や垂直組杭との比較にて行い、次にスパイラル杭とプレート杭との比較により両斜組杭の有効性について評価した。最後に両斜組杭にて正負交番載荷実験を行い、耐久性について評価・分析した。

本検討で得られた主な知見を以下に示す。

- (1) 2本のスパイラル杭を斜杭とした組杭構造(以下、両斜組杭)は、単杭及び2本の直杭を用いた垂直組杭に対して高い弾性限界荷重とばね剛性を発揮した。両斜組杭の弾性限界変位時における水平抵抗力は単杭の約9倍、垂直組杭の約4倍を示した。
- (2) 斜杭角度 45° の両斜組杭において、 15° に対して4倍以上のばね剛性を示し最も大きくなることを明らかにした。一方で、引抜き抵抗の水平成分及びせん断面積の関係からは、約 35° で水平抵抗力の最大値が得られることが示唆された。
- (3) 両斜組杭において、プレート杭(強軸)はスパイラル杭に対して、弾性限界荷重が約60%、ばね剛性は $1/20$ と低く、両斜組杭におけるスパイラル杭の有用性を明らかにした。両斜組杭の水平抵抗力は、杭体の剛性や側面積よりも、杭軸方向抵抗力がより重要であることを示した。
- (4) 斜杭角度 45° の両斜組杭において、弾性限界水平荷重85%相当の載荷荷重での交番載荷試験によって、本研究の地盤条件(高密な乾燥砂地盤)において、抵抗力の低下や変位量の急増などの大きな変化はなく、耐久性を有することを明らかにした。

参考文献

- 1) 桑原孝雄，木全卓，工藤庸介，山形俊彦，北島弘伸：温室用基礎としての斜杭の水平載荷試験に関する研究．大阪府立大学大学院農生学術報告 56, pp.23-28.2004.
- 2) 後藤尚男，芦見忠志，滝井健司：斜杭・組杭の水平抵抗に関する模型実験的考察．土木学会論文集，Vol. 79, pp.24-34. 1961.
- 3) 谷陽介，藤本宏義，永田誠，王坤鵬，安福規之，石藏良平：ピッチ幅比に着目した砂地盤におけるスパイラル杭の支持力実験，第 54 回地盤工学研究発表会講演集，pp. 1251-1252, 2019.
- 4) 王坤鵬，谷陽介，安福規之，石藏良平，藤本宏義，永田誠：Bearing capacity characteristics of spiral pile in sandy ground focused on pitch-width ratio. 第 54 回地盤工学研究発表会講演集，pp.1253-1254, 2019.
- 5) 中谷昌一，白戸真大，井落久貴，松井謙二：水平力を受ける杭の弾性限界状態に関する研究，土木学会論文集 C, Vol.64, No.3, pp. 616-628, 2008.8.
- 6) 宇都一馬，冬木衛，桜井学：杭の載荷試験結果の整理方法，総合土木研究所，基礎工，Vol. 10, No. 9. pp. 21-30. 1982.9.
- 7) 松村聡，松原宗伸，藤井愛彦，水谷崇亮，森川嘉之，佐藤真：杭間地盤をセメント固化改良した組杭の横抵抗特性．港湾空港技術研究所報告，第 56 巻，第 3 号，2017.
- 8) 村田重之，後藤常郎：ねじり平鋼杭の押込み・引抜き現地試験，土と基礎，公益社団法人 地盤工学会，51(11), pp.11-13, 2003.10.
- 9) Ilamparuthi, K., and Dickin, E. A., Muthukrisanaiah, K. : Experimental investigation of the uplift behaviour of circular plate anchors embedded in sand. Canadian Geotechnical Journal, 39 (3): 648-664. 2002.

第5章 総括

5.1 結論

本研究では、スパイラル杭を活用した組杭の実用化に着目して、その水平抵抗特性について明らかにすることを目的にした。これにより、スパイラル杭を用いた組杭構造の設計合理化に寄与する。

まず、スパイラル杭は斜杭による補強効果が高いことが既往の研究から示唆されていることから、斜直合成組杭構造に着目し、双方の杭長の変化が水平抵抗に及ぼす影響について、密な砂地盤を対象に実験土層と模型杭での水平載荷実験にて評価した。

また、梁ばねモデルによる解析にて、実験結果の再現を試みるとともに、既往の研究では $45\sim 60^\circ$ の間に最適角度が存在することが示唆されていることから、解析にてその妥当性を明らかにした。さらに得られた知見に基づいて実大構造による水平抵抗挙動について解析での予測を試みた。

そして、得られた解析結果を参考に、車両用防護柵向けの実用的な基礎として、新たな鋳鉄製スパイラル杭と鋼管斜杭による斜直合成組杭構造(斜直組杭)を考案し、直杭(スパイラル杭)の引抜抵抗特性、斜直組杭の水平抵抗特性とそれらの抵抗メカニズムについて、現地試験を通して分析した。

次に、既往の研究では、単調載荷実験による評価であり、繰返し荷重に対する評価はできていないことから、対称性を有した押込支持力と引抜抵抗力のバランスに優れる両斜合成スパイラル組杭構造(両斜組杭)の合理化を目指し、斜杭角度と杭形状に着目して、まずは実験土槽による単調載荷実験にて評価・分析を行った。最終的に繰返し載荷実験にて耐久性について評価を行った。以下に各章で検討した概要及び結論の要約を示す。

第1章では、スパイラル杭を活用した組杭の水平抵抗特性に関する研究の背景と目的を述べた。また、スパイラル杭の鉛直方向及び水平方向支持力に係わる既往研究の調査・研究結果、杭の水平抵抗の弾性限界状態の評価に係わる調査・研究結果、鋳鉄製スパイラル杭の実用に関わる調査・研究成果について述べた。

第2章では、スパイラル杭を活用した斜直組杭の設計合理化に向け、直杭と斜杭の杭長変化が及ぼす影響に着目し、実験土槽による模型での水平載荷実験を行い評価した。また、梁ばねモデル解析によって、斜杭角度の影響及び実大斜直組杭構造について検討した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 単杭から斜直組杭とすることで、弾性限界荷重は2倍以上増加し、単杭を1.5倍に延長した場合の補強効果1.5倍よりも大きいことを示した。
- (2) 斜直組杭は、直杭と斜杭をそれぞれ1.5倍に延長することで、弾性限界荷重が1.88倍に増加し、その効果はどちらかだけを延長するよりも、両方を同様に延長した方がより高くなることを示した。斜杭のみを延長するよりも直杭を延長する方が、補強効果は2割以上も高くなることを示した。地表面に向かって作用する直杭の引抜抵抗力のほうが、

斜杭の押込支持力よりも低くなりやすく、斜直組杭の水平抵抗力の向上にはより重要であることを示唆した。

- (3) スパイラル形状の断面性能を付与した単純な矩形断面梁モデルと、非線形特性値を有した地盤ばねを設定した梁ばねモデル解析によって、実験と同様の非線形的な荷重変位曲線が得られた。ただし、実設計への適用には地盤ばねの合理的な設定に向け、さらなる要素実験を行い、論理的・体系的に整理する必要がある。
- (4) 梁ばねモデル解析から、斜直組杭の斜杭角度を 45° よりも増大させると、変位量が小さい範囲では剛性が向上する。一方で、斜杭角度を 45° から増大させると、弾性限界荷重が徐々に低下し、斜杭角度 70° では、35%も低下した。斜杭の軸方向抵抗力の水平成分の大きさが剛性に影響し、斜杭の設置深さが弾性限界荷重に影響することを示唆した。
- (5) 梁ばねモデル解析から、車両用防護柵向け標準基礎である鋼管杭と同等以上の強度を有した実大のスパイラル杭を活用した斜直組杭の基礎構造案が得られた。斜直組杭は基礎の施工深さを、鋼管杭(1500 mm)に対して $2/3$ に縮小できる可能性を示した。

第3章では、第2章で得られた解析結果を参考にして、車両用防護柵用向けの実用的な基礎として、新たな鋳鉄製杭と鋼管斜杭による斜直合成組杭構造を考案し、同構造の設計手法の確立向け直杭(スパイラル杭)の引抜抵抗特性及び斜直組杭の水平抵抗特性と、それらの抵抗メカニズムについて、現地試験を通して分析した。得られた知見を以下に示す。

- (1) スパイラル杭の最大引抜抵抗力は、土のせん断破壊面から算出した土のせん断破壊強度と、せん断面で囲まれた範囲の土及び杭体の重量、スパイラル部の周面抵抗力の合算にて推定することが可能であり、実験値 28.8 kN に対して、算定値は 28.3 kN(誤差 2%)で同等を示した。これは斜直組杭の水平抵抗力の推定に関連する重要なパラメータとなる。
- (2) スパイラル杭の引抜抵抗力及び鋼管斜杭の先端支持力から、斜直組杭の水平抵抗力の簡易評価式を得た。斜直組杭ではスパイラル杭の引抜抵抗力及び鋼管斜杭の先端支持力が水平抵抗力へ変換されることを言及し、弾性限界水平荷重の実験値に対する計算値の誤差は 6%未満であり、実務的な算定における有用性を示した。
- (3) 基礎の根入れ深さ及びスパイラル杭の設置深さをより深くし、引抜抵抗力と水平抵抗力の向上を期待した斜直組杭 H-3 において、単杭に比べて最大荷重時の水平変位量は 50%以下を発揮し、かつ B 種防護柵支柱以上の耐荷性能を有することを明らかにした。
- (4) B 種防護柵の標準基礎であるコンクリート基礎及び鋼管杭に対して、よりコンパクト(コンクリート基礎対比：幅 50%，体積 80%縮小，鋼管杭対比：深さ 40%縮小)な基礎形式として実用できる可能性を示した。

第4章では、繰返し荷重に対する水平抵抗に着目して、対称性を有したスパイラル斜杭について、実験土槽と模型杭による水平載荷実験を行い評価・分析した。まずは、斜杭角度の合理化を単杭や垂直組杭との比較にて行い、次にスパイラル杭とプレート杭との比較によりスパイラル斜杭の有効性について評価した。最後にスパイラル斜杭にて正負交番載荷実験を行い、耐久性について評価・分析した。得られた知見を以下に示す。

- (1) 2本のスパイラル杭を斜杭とした組杭構造(以下、両斜組杭)は、単杭及び2本の直杭を

用いた垂直組杭に対して高い弾性限界荷重とばね剛性を発揮した。両斜組杭の弾性限界変位時における水平抵抗力は単杭の約 9 倍、垂直組杭の約 4 倍を示した。

- (2) 斜杭角度 45°の両斜組杭において、15°に対して 4 倍以上のばね剛性を示し最も大きくなることを明らかにした。一方で、引抜き抵抗の水平成分及びせん断面積の関係からは、約 35°で水平抵抗力の最大値が得られることが示唆された。
- (3) 両斜組杭において、プレート杭(強軸)はスパイラル杭に対して、弾性限界荷重が約 60%、ばね剛性は 1/20 と低く、両斜組杭におけるスパイラル杭の有用性を明らかにした。両斜組杭の水平抵抗力は、杭体の剛性や側面積よりも、杭軸方向抵抗力がより重要であることを示した。
- (4) 斜杭角度 45°の両斜組杭において、弾性限界水平荷重 85%相当の載荷荷重での交番載荷試験によって、本研究の地盤条件(高密な乾燥砂地盤)において、抵抗力の低下や変位量の急増などの大きな変化はなく、耐久性を有することを明らかにした。

以上より、今後、スパイラル杭を活用した組杭について、特に水平力が作用する上部構造物に適用を検討する際に、実環境条件を想定した実用的な構造の設計検討に役立つ知見が多く得られた。

5.2 今後の研究課題

実地盤での実験によって多くの実用的な知見が得られたが、今後の研究の課題として以下のことが挙げられる。

- 1) スパイラル杭は、地盤を乱さずに施工することによって、高い軸方向抵抗力が発揮されるという特徴がある。本研究では、実験土層での実験においては、回転貫入や打撃施工をせずに、スパイラルの周辺に砂を密に充填することで、地盤を乱していない状況を再現した。しかし、実際の環境においては、地盤の条件は様々であり、施工精度のばらつきによっては、スパイラル杭は逆に地盤を乱してしまう可能性がある。スパイラル杭の施工精度が与える影響を、実験土層を用いた模型実験で研究している例は少なからずあるものの、一般化するには実環境における様々な土質条件での統計的な検証が必要である。実用化においては、これらのばらつきを考慮した安全側の設計を行えばよいが、無駄の多い設計になってしまうため、施工精度を保証するような施工システムや品質管理方法の構築に向け、さらなる実験データの積み増しと分析が必要である。
- 2) 本研究では、梁ばねモデルによる解析検討を行った。しかし、地盤ばねの設定には課題が残った。特に根入れ深さが浅い場合には、杭軸方向の抵抗力と、杭軸直交方向に抵抗する地盤領域が重なるため、より複雑な挙動を示すことが推測される。さらにスパイラル形状特有の地盤の拘束効果なども影響するため、このような特性を一般化するには、実験データ数がまだまだ足りていない。また、スパイラル杭は本来的には 3 次元的な特徴を有しているため、2 次元でのシミュレーションでの精度向上や合理化には限界があるか

もしれない。地中の地盤の動きを可視化するなど、3次元的な解析検討も今後は必要となってくる。

- 3) 斜直合成組杭の実大実験においては、防護柵の設置環境を想定して表層が舗装された地盤を用いた。そのため、スパイラル杭が施工されている地盤は砂質土ではあるものの、表層付近の舗装や路盤の影響度について詳細に分析できていない。また、杭頭部の固定に用いたモルタル部分の水平抵抗への影響についても、直杭と斜杭とは分離して検討が必要である。
- 4) 実環境においては、不飽和や飽和状態の砂質地盤や粘性土なども想定される。繰返し荷重に対しては、地盤の粘着力やサクションが大きく影響してくると想定され、このような地盤条件におけるスパイラル杭の抵抗メカニズムを把握する必要がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門の安福規之 教授には大変ご多忙な中、博士課程入学前からたくさんのお時間を割いていただき、一つ一つが普段従事している民間企業の視点とは異なる貴重な御指導を賜りました。また、地盤工学の専門知識のみならず、学術研究の考え方や進め方、研究者として取り組むべき姿勢や持つべき思考についてもご教示いただき、多くのことを学びました。ここに深く感謝の意を表し、心より御礼申し上げます。

また、本論文の作成にあたり、九州大学大学院 工学研究院 環境社会部門の矢野真一郎 教授及び九州大学大学院 工学研究院 社会基盤部門の笠間清伸 教授には副査として、大変有意な御指摘・御指導を賜りました。心より御礼申し上げます。

スパイラルの試験体製作には、GT スパイラル株式会社の後藤 淑子 代表取締役役にご協力いただきました。貴重な設備も見学させていただき現場・現物の理解が深まり、本研究にも大きく活かされたと感じます。心よりお礼申し上げます。

勤務先であるヒノデホールディングス株式会社の ヒノデグローバルイノベーションセンター 甲斐信博 所長には、本研究に携わる機会をいただきました。これまで、鑄造技術を基本として、接合技術や機械装置設計など、地盤工学及び杭基礎領域とは異なる研究開発領域にも多く携わらせていただきました。大学では物理化学専攻だったにも関わらず、本研究を遂行できたのは、技術者としてのこれらの幅広い経験があったからだと感じます。心より御礼申し上げます。

同社 ヒノデグローバルイノベーションセンターの永田誠 課長には、地盤・杭基礎領域の専門知識の多くを御教示いただきました。地盤工学の有識者が社内や身近にほばいない中で、とても大きな支えでありました。心より御礼申し上げます。

同社 技術開発グループの土手一朗 グループリーダーには、上司部下という関係だけに留まらず、社会人博士の先輩・良き理解者として多くの御支援と励ましをいただきました。心より御礼申し上げます。

同グループの谷陽介氏(当時)、井手裕太氏には、実験の実施や解析検討・分析など、たくさんのお時間を費やしていただきました。お陰様で本研究を遂行することができました。心より御礼申し上げます。

出向元である日之出水道機器株式会社 SBU2 菅野泰次郎 ユニットリーダーには、本研究の実用に関わる部分で多くの御支援をいただき、大きなモチベーションとなりました。心より御礼申し上げます。

この他にも多くの方々に御指導、御協力をいただきましたお陰で、本論文をまとめることができました。皆様に心より御礼申し上げます。

最後に、家族には常日頃から多くの負担をかけておりますが、日々の仕事をしながら、本研究を遂行するために、更に多くのサポートを強いてしまいました。深い感謝の意を表すとともに、これからその想いに応えていくことを誓って、本論文の結びとします。ありがとうございました。

