小径スパイラル杭の複合荷重に対する支持力評価手法とその精度検証

Evaluation method on bearing capacity of a small diameter spiral pile subjected to combined load and its accuracy validation

北海道大学工学院	○学生会員	山内 稜 (Ryo Yamauchi)
北海道大学工学研究院	正会員	磯部公一 (Koichi Isobe)
北海道大学工学部	学生会員	中川修一 (Shuichi Nakagawa)

1. はじめに

再生可能エネルギーの需要増加に伴い、太陽光発電設 備の建設が増加した時期には、発電事業の成立性を確保 するために地盤条件が悪いながらも安価な土地で大規模 に施工されるケースや、最近では傾斜地上に建設される ケースが見られるなど,地盤条件,施工条件が悪い現場 での太陽光発電設備の施工事例が増加した.従来,太陽 光発電設備の基礎形式はコンクリート直接基礎が主流で あったが、上述のような地盤条件の悪い軟弱地盤での適 用を念頭に、小径で短尺な鋼管杭やスパイラル杭、斜杭 などを活用した基礎形式の開発が進んでいる 1/-3).特に, スパイラル杭は鉛直方向の荷重(押込み,引抜き)に対 する抵抗が大きいため有用な杭形式ではあるが、曲げ剛 性が小さいため同径の鋼管杭と比べると水平抵抗が小さ くなる問題がある.しかし、小径杭の場合、杭基礎の設 計で一般的に使用される杭径に抵抗が支配される弾性地 盤反力法では水平変位を過大に評価してしまい、杭径の 1% (あるいは 15 mm) を許容変位とする従来の方法では 過大設計(あるいは過小設計)となる可能性がある.ま た、スパイラル杭は回転圧入による周辺地盤との一体化 効果により鉛直方向の荷重に対する抵抗が大きくなるが, 実務設計においてはその効果を考慮しない安全側の設計 となっている例が多い. そのため, 小径杭の支持力特性 を適切に評価し、より合理的に設計することができれば、 適用範囲を拡大させることが可能である.

著者らはこれまでに軟弱地盤に施工されたスパイラル 杭に対する押込み,引抜きおよび水平載荷試験に基づき 回転圧入による周辺地盤との一体化効果を簡易的に考慮 する方法を提案している⁴⁾.本提案手法に基づき FEM 解 析におけるスパイラル杭基礎のモデル化を構築し,各種 試験結果の再現解析を行い,不足している数値解析パラ メータの同定を行うとともに,同定したパラメータを用 いた同解析手法により,複合荷重に対するスパイラル杭 の支持力特性を評価してきた⁴⁾.

本稿では、本手法の適用範囲を直杭から斜杭基礎にも 拡大し、スパイラル斜杭基礎の複合荷重に対する支持力 特性を明らかにするとともに、押込み、引抜きおよび水 平載荷に対する支持力結果より任意の載荷方向に対する 支持力特性を定量的に評価する手法を提案し、その精度 について検証する.

2. 回転圧入による周辺地盤との一体化効果

本研究でスパイラル杭と称する杭は, 平鋼にねじり加 工を施したもので, その特徴として以下のことが挙げら れる.

- ・人力により回転圧入することが可能である.
- ・回転圧入による周辺地盤との一体化効果を期待でき, その結果大きな押込みおよび引抜き支持力が得られる.
- ・逆回転させれば引抜きが容易なため再利用可能で、短 時間での施工も可能なことから、施工性が高い.

本試験では、セメント改良された軟弱粘性土地盤(平 均 N 値 3.9, 一軸圧縮強度 58.5 kPa) に杭外径が 95 mm, 板厚が 11 mm, 杭長が 1.3 m のスパイラル杭を回転圧入 させ、押込み、引抜き、水平の各種載荷試験を行った. なお、各載荷試験は突出長 h を 50,100,150 mm と変化さ せて実施した. **図-1** に引抜き試験により得られた荷重~ 変位関係を示す. これらに対し、支持力公式により算出 される押込みおよび引抜き支持力は過小評価している. これは、回転圧入による周辺地盤との一体化効果を適切 に反映できていないことに起因している. そこで、見か けの杭径の拡大、杭直下地盤の強度増加,杭の曲げ剛性 の増大に関する補正係数をそれぞれ*ξ*, η , ζ として支持力 公式および Chang の式を補正することで、簡便に回転 圧入による周辺地盤との一体化効果を考慮する.

なお、実験結果にはばらつきが認められることから安 全側を考慮して各試験結果から得られる補正係数の最小 値を代表値として用いることとする.得られた補正係数 は ξ =1.99、 η =0.73、 ζ =1.94 となり、補正後の支持力を図 -1 に併記すると、実験結果で得られた杭径の10%変位に おける荷重(第二限界抵抗荷重)を概ね表現できること がわかる.



3. FEM 解析におけるスパイラル杭基礎のモデル化⁴

本研究では、Ye et al.⁵により開発された3次元弾塑性 有限要素解析コード「DBLEAVES」を用いて、上記の各 種載荷試験の再現解析ならびにスパイラル杭の複合荷重 に対する支持力評価を行う.本解析では Zhang et al. のに より提案され、段野ら つによりその有用性が検証されて いる骨組梁型ハイブリッド要素を用いて複雑な形状のス パイラル杭を簡便にモデル化する (図-2). 本モデルの特 徴は、①実杭の曲げ剛性の9割を杭芯部梁要素に、残り の1割を杭体を構成するソリッド要素に分配するように パラメータを設定することで、杭の体積を表現し杭と地 盤との相互作用を精度良く表現できること、②道路橋示 方書に従い杭芯部の梁要素にバイリニア型弾塑性梁要素 を用い、SS400 鋼材の降伏応力度に基づき杭の全塑性モ ーメントを設定することで杭の曲げ破壊を表現できるこ と、さらに③杭芯部と構成節点の間に設定した剛な梁要 素を設けることで、鉛直荷重に対する杭の体積効果を適 切に考慮できる点にある.これにより,梁要素による杭 の変形計算の簡便さや表現の多様性を失わず、同時に杭 の体積を考慮し杭と地盤の相互作用を表現することが可 能となり、ひとつの統一モデルにより様々な載荷方向に 対する杭の変形解析を行うことができる. なお,本解析 でのモデル寸法,パラメータの決定には先述の補正係数 を考慮する.

現地地盤に関する情報が換算 N値のみと詳細情報が不 足していることも考慮し,地盤の構成則には最も単純な 弾塑性構成則のひとつである Drucker-Prager モデルを用 いた.

本研究では押込み荷重のみならず,引抜き荷重に対す る解析も行う必要があり,人為的パラメータであるジョ イント要素を設けずには引抜き試験結果を精度良く表現 することが難しいと判断し,杭周面と地盤との境界にジ ョイント要素を設けた.

解析領域は、構造物と載荷荷重の対称性を考慮し半断 面領域とした.節点数及び要素数は8892,要素数は7526 である. 幅 40m,奥行き 10m,高さ 10m の領域とする.境 界条件は、領域側面については変位を鉛直方向にのみ自 由とし、底面については全方向に変位を拘束した. さら に、地表面は変位自由境界とした.

図-3 で引抜き試験の結果とその再現解析結果を比較 する.スパイラル杭周辺地盤の一体化効果を考慮した簡 便なモデル化により実験結果を精度良く表現できている ことが確認できる.

4. スパイラル直杭の複合荷重に対する支持力特性

本章では、第3章で同定したパラメータを用い同解析 手法により、小径杭の複合荷重に対する支持力評価を行 う.複合荷重の載荷点は、図-4に示すように地表面高さ と一致させ、杭頭に曲げモーメントが発生しないように し、載荷角度*θ*は-90°から90°まで10°ごとに変化させ て解析を行った.

図-5 に全載荷方向に対する鉛直荷重〜鉛直変位の関係および水平荷重〜水平変位の関係を示す.鉛直荷重〜 鉛直変位の関係の初期勾配は載荷角度によらないが,引 抜き(正の載荷角度),押込み(負の載荷角度)のいずれ の極限支持力も載荷方向が鉛直方向に近づくほど大きく なる.

図-6 に荷重方向と杭頭の変位方向の関係を示す.同図

より、 $\theta = \pm 90^{\circ}$ のケースでは載荷方向と変位方向は一致 するものの、それ以外のケースでは載荷角度よりも変位 角度が小さく、水平変位が卓越する傾向が確認できる. これは、非常に軟弱な地盤中の小径で短尺な杭の水平抵 抗が、鉛直方向の抵抗よりも相対的に小さくなる従来の 傾向と一致する.しかしながら、杭に発生する曲げモー メントは全塑性モーメントに達しておらず、いずれのケ ースでも弾性範囲内で挙動した.

図-7 に複合荷重に対する支持力曲線を示す.ここで, 鉛直および水平方向のいずれかで先に極限状態に至る荷 重(変位が杭径の10%である10mmに到達したときの荷 重)を複合荷重に対する支持力として定義する.同図よ り,軸方向(引抜き,押込み),軸直角方向(水平)の載 荷に対する単独の支持力評価では,複合荷重が作用した 場合に危険側の評価となることが示された.



図-4 載荷点および載荷角度の定義(直杭はα=0 度)



図-6 スパイラル直杭の複合荷重に対する支持力曲線

5. スパイラル斜杭の複合荷重に対する支持力特性

前章と同様の解析手法を用いて、斜杭に対し複合荷重 の載荷解析を行った. 杭の傾斜角度αは、軽量杭であれ ば適用可能角度である 30°まで 5°毎変化させて、計6 シリーズの解析を実施した. 載荷条件や載荷点,解析パ ラメータは直杭と変更していないが、斜杭では直杭と異 なり載荷方向に対する支持力特性が左右対称とならない ことを考慮して、載荷方向(角度)を-180~180°の範囲 で変化させた.

図-7 にスパイラル斜杭の複合荷重に対する支持力曲線を示す.支持力の定義は、前章と同じく、鉛直および 水平方向のいずれかで先に極限状態に至る荷重(変位が 杭径の 10%である 10 mm に到達したときの荷重)とす



図-7 スパイラル直杭の複合荷重に対する支持力曲線



図-8 スパイラル斜杭の複合荷重に対する支持力曲線

る. 図-7 と比較すると,スパイラル斜杭の支持力曲線は, スパイラル直杭の支持力曲線を斜杭の軸方向(傾斜角度) に回転した楕円形状となることがわかる.

6. スパイラル杭の複合荷重に対する支持力推定式

前章で示したスパイラル斜杭の複合荷重に対する支持 力特性の特徴から,小径スパイラル杭の複合荷重に対す る支持力曲線は,以下の式で定式化が可能である.



ここで, H'およびV'は斜杭の傾斜角度αを用いた回転行 列による座標変換後の水平荷重, 鉛直荷重であり, (5)式 で表される.また, V'およびV'はそれぞれ杭軸方向にお ける引抜き(正)および押込み(負)支持力を表し, H', およびH'」はそれぞれ杭軸直角方向の傾斜側およびその 逆側に載荷した場合の支持力を表す.よって, (1)式は座 標変換後の第1象限に,(3)式は第3象限に載荷方向が向いている場合を表す.

図-9 で斜杭角度が 15,30 度の場合の複合荷重に対す る支持力の解析値と推定値の比較を行う.同図より,い ずれの斜杭角度のケースでも推定値が解析値を精度良く 評価できていることが確認できる.その精度を検証する ために,決定係数を求め,表-1にまとめる.いずれの斜 杭角度においても,決定係数が 0.97 以上となっており, 提案する推定式は極めて高い精度でスパイラル杭の複合 荷重を評価できることが示された.これは,杭軸および 杭軸直角方向に対する支持力を載荷試験により求められ れば,複合荷重に対する支持力推定式をそれらを元に精 度良く評価できることを示しており,その実用性は高い と考えられる.

7. まとめ

小径スパイラル杭に対する各種載荷試験および複合荷 重に対する支持力を評価するための三次元弾塑性有限要 素解析の結果より得た知見を以下にまとめる.

①スパイラル杭の回転圧入による周辺地盤との一体化効果

回転圧入による周辺地盤との一体化効果を適切に反映 するために、見かけの杭径の拡大、杭直下地盤の強度増 加、杭の曲げ剛性の増大に関する補正をすることで、簡 便に回転圧入による周辺地盤との一体化効果を考慮する ことができた.その結果、鉛直双方向において高い一体 化効果を確認した.

②各種載荷試験の再現解析結果

スパイラル杭の複雑な形状および回転圧入による周辺 地盤の締固め効果を,①の補正係数を考慮した骨組梁型 ハイブリッド要素を用いてモデル化することで,いずれ のケースでも実験結果を精度良く表現できた.

③複合荷重に対する支持力特性

複合荷重に対する支持力は、それぞれ独立で評価した 支持力を下回る載荷方向があることを示した.すなわち、 従来の設計手法では極限支持力を危険側に評価している 可能性がある.

④複合荷重に対する支持力推定式

スパイラル斜杭の支持力曲線は、スパイラル直杭の支 持力曲線を斜杭の軸方向(傾斜角度)に回転した楕円形 状となる事実に基づき、スパイラル杭の複合荷重に対す る支持力推定式を提案した.解析結果と比較することで、 提案した推定式はいずれの斜杭の傾斜角度に対しても高 い精度で解析結果を推定できることが確認された.よっ て、杭軸および杭軸直角方向に対する支持力を載荷試験 により求められれば、複合荷重に対する支持力は精度良 く評価できることになる.

参考文献

- 1) 荒木一弘:小規模構造物を対象とした簡易基礎工法 「ピンファウンデーション工法」,地盤工学会誌, Vol.61, No.8, pp.32-33, 2013.
- 佐藤宇紘,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.

- 3) 平田篤夫,古梶繁夫,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, Vol.121, pp.370-377, 2005.
- 4) 山内稜,磯部公一:軟弱地盤における小径スパイラ ル杭の複合荷重に対する支持力特性,地盤工学会北 海道支部技術報告集,第56号,pp.63-70,2016.
- Ye, B., Ye, G., Zhang, F. and Yashima, A.: Experiment and numerical simulation of repeated liquefactionconsolidation of sand, *Soils and Foundations*, Vo. 47, No. 3, pp. 547-558, 2007.
- 6) Zhang, F., Kimura, M., Nakai, T. and Hoshikawa, T.: Mechanical Behavior of Pile Foundations Subjected to Cyclic Lateral Loading Up to the Ultimate State, Soils and Foundations, Vol. 40, No. 5, pp.1-17, 2000.
- 7) 段野孝一郎,木村 亮,鈴木雄吾:土-水連成弾塑性 有限要素法 による橋梁基礎杭の長期変位予測,土木 学会論文集 C, Vol. 63, No. 4, pp. 1041-1053, 2007.

表-1 推定値の精度検証,決定係数の比較

α	0	5	10	15	20	25	30
R^2	0.99	0.97	0.99	0.99	0.99	0.99	0.98







図-9(b) 解析結果と推定値との比較(α=30 度)