

建設発生土を利用した複合杭基礎構造の引抜き特性に関する数値解析および模型実験による評価

複合杭基礎 建設発生土 引抜き特性

芝浦工業大学大学院
(株)日新
兼松サステック(株)
(株)トーメック
芝浦工業大学

○(正)森田航平・(正)竹本隆一
荒尾公三・小枝健太
(正)水谷羊介・松尾好史弘
(正)宍戸賢一
(正)中尾晃揮・(国)稲積真哉

1. はじめに

鉄塔や電波塔などの構造物は風荷重を大きく受けるため、それらを支える杭基礎には水平方向の揺れにより発生する引抜き力への高い耐久性が求められる。一方、建設副産物実態調査結果によると、建設発生土の有効利用率は 79.8%、現場内利用率は 54.3%であると報告されている。そこで、本研究では建設発生土の有効活用を目的に、新たな複合杭基礎構造を提案し、その引抜き特性を評価することを目指した。

従来の杭基礎工法では、掘削した地盤に鋼製部材を用いて土留めを行い、孔内で鉄筋を組み立てた後土留め材を取り外しながらコンクリートを打設して杭を形成する。本研究では、掘削後の孔壁崩壊を防ぐために設置した円形鋼製部材（ライナープレート）を地盤内に残存させる方法を採用した。鋼製部材内部に羽根付き鋼管杭を挿入し、杭と鋼製部材の間に建設発生土を埋め戻すことで、複合杭を形成する。（図-1 参照）

本研究では、三次元弾塑性有限要素解析を用いて複合杭の引抜き抵抗力を評価し、解析結果の妥当性を確認するために模型試験を実施した。模型試験では、複合杭を模擬した模型を作製し、引張試験機を用いて引抜き試験を行った。複数のモデルを対象に引抜き力の最大値を測定し、解析結果と比較した。

2. 弾塑性有限要素法による引抜き抵抗特性の評価

2.1 弾塑性有限要素法の概要

有限要素法（FEM）は、特に弾塑性挙動や大変形を伴う複雑な問題に対して有効な近似解を提供する解析手法である。本手法では、地盤を細分化し、各要素について応力や変位を計算することで、解析対象全体の挙動を近似的に求める。

2.2 解析条件の設定

本研究では、鉄塔や電波塔向けの杭基礎を想定し、解析対象地盤の寸法を縦 10 m、横 10 m、深さ 30 m とした。地盤は比較的硬い砂質地盤（N 値 20）、杭内に埋め戻す建設発生土は緩い砂質地盤（N 値 2）と仮定した。これらのパラメータは表-1 に示す。また、土の材料モデルには弾塑性モデルを採用し、杭内部の材料にはコンクリート、鋼製部材には鋼を使用した（表-2 参照）。さらに、鋼管杭は変形を抑えるため剛体とした。解析では、鋼管杭の杭頭に地盤深度方向と逆向きに杭長の 1/100 の強制変位を与え、その際に発生する引抜き力を出力した。

2.3 解析モデルの設定

解析モデルは、鋼製部材の直径を 2.0 m に固定し、軸径 0.3 m、0.4 m、0.5 m の 3 種類の杭について、杭長を 10 m、15 m、20 m の 3 パターンとした。これにより、計 9 種類のモデルを作成した。また、軸径 0.3 m モデルでは拡底翼径を 0.4 m から 2.0 m まで 17 段階に変化させ、計 144 種類のモデルを作成し、解析結果を比較した。

2.4 解析結果および考察

図-2 に示す 144 モデルの解析結果から、杭長 10 m の複合杭では拡底翼径が 1.6 m または 1.7 m で引抜き力が最大となり、それ以上の拡底翼径では引抜き力が減少する傾向が確認された。これは拡底翼径が 1.6 m または 1.7 m までは拡底翼上方の局所せん断壊域が小さくなり、引抜き時のせん断が減少するためと考えられる。一方、杭長 15 m および 20 m のモデルでは異なる傾向が見られたが、いずれの杭長でも拡底翼径の増加に伴う引抜き力には極大値が存在することが

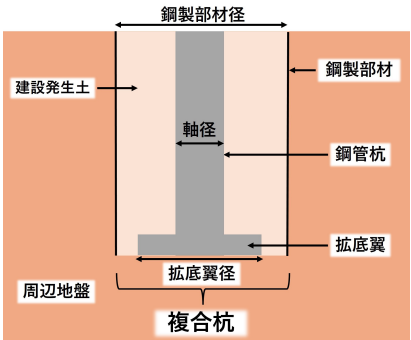


図-1 複合杭 詳細図

表-1 地盤パラメータ

	周辺地盤	建設発生土
単位体積重量 (kN/m ³)	20	10
弾性係数 (kN/m ²)	26.0×10 ⁴	5.6×10 ⁴
粘着力 (kN/m ²)	0	0
内部摩擦角 (°)	35.0	21.3

表-2 杭・鋼製部材パラメータ

	杭	鋼製部材
単位体積重量 (kN/m ³)	24	77
弾性係数 (kN/m ²)	2.0×10 ⁸	2.1×10 ⁶

明らかとなった。特に杭長 10 m のモデルでは、拡底翼径の増加に伴う引抜き力の増加が途中で収束する傾向が顕著に表れた。

これらの結果から、引抜き抵抗力の増加には拡底翼上方の局所せん断破壊域における建設発生土の強度を高めることが重要であることが示唆された。

3. 模型試験による引抜き抵抗特性の評価

3.1 試験目的および概要

本研究では、解析結果の信頼性を確認するために模型試験を実施した。試験では、開発した複合杭を模擬した羽根付き鋼管杭（以下、鋼管杭）と鋼製部材を使用し、引張試験機で引抜き試験を行った。

3.2 試験装置および条件

試験には縦 290 mm、横 390 mm、高さ 190 mm の水槽を使用し、締め固めた土に鋼管杭と鋼製部材を設置した。鋼製部材の仕様は内径 80 mm、外径 84 mm、高さ 80 mm で、拡底翼径を 32, 40, 48, 56, 64 mm の 5 種類に設定した。鋼製部材の外の土密度は 15 kN/m³ とし、以下の 4 つのケースに分類した。
Case1：鋼製部材に凹凸がなく、内外ともに密度 15 kN/m³；
Case2：鋼製部材に凹凸があり、内外ともに密度 15 kN/m³；
Case3：鋼製部材に凹凸がなく、内側密度 12 kN/m³、外側密度 15 kN/m³；
Case4：鋼製部材に凹凸があり、内側密度 12 kN/m³、外側密度 15 kN/m³である。

3.3 試験手順

試験手順は以下のとおりである：

- (1) 設定した密度に基づき水槽・鋼管杭・鋼製部材の体積から、層ごとに投入する土量を算定する。
- (2) 鋼製部材の内外を 1 層（高さ 20 mm）ずつ締め固める作業を 5 回繰り返す。
- (3) 引張試験機を用い、引抜き速度を 20 mm/s に設定の上、鋼管杭を全長（80 mm）引き抜き、引抜き力と変位量を計測する。

3.4 試験結果および考察

図-4 に拡底翼径と引抜き力の最大値の関係を示す。また、Case1 および Case3 の再現解析結果を試験結果と比較した。拡底翼径と引抜き力は比例関係にあり、解析結果の信頼性が確認された。また、凹凸のある鋼製部材（Case2 および Case4）は引抜き力が大きく、ライナープレートの凹凸構造が引抜き抵抗向上に有効であることが示された。以上の結果から、鋼製部材に凹凸を設けることで複合杭の引抜き抵抗を向上させる可能性が示唆された。

4. おわりに

本研究の成果を示す。

- (1) 拡底翼付近の建設発生土の強度を高めることで引抜き抵抗力が向上することが示唆された。この結果、鋼製部材内の全ての建設発生土の強度を高める必要はなく、必要最小限の強度改良で材料使用量を削減できる。これにより、建設発生土の利用量を増加させるという本研究の目標達成に繋がると考えられる。
- (2) 模型試験と再現解析において、拡底翼径と引抜き力の関係について同様の傾向が確認された。これは、これまでの解析結果の信頼性を裏付けるものであり、解析手法の妥当性を評価する重要な成果である。
- (3) 鋼製部材に凹凸がある場合、引抜き抵抗がより大きくなることが確認できた。これにより、複合杭にライナープレートのような凹凸のある部材を用いることが、引抜き抵抗の向上に効果的だと示された。

今後は単一の複合杭基礎の解析にとどまらず、複数の複合杭上に構造物を配置し、風荷重や地震動などの動的外力を考慮した実際の条件に近い解析が必要である。また、設計基準に基づく引抜き抵抗力を算出し適切な複合杭基礎モデルの設計指針を確立することを目指す。

参考文献

- 1) 国土交通省：平成 30 年度建設副産物実態調査結果【参考資料】，総合政策局公共事業企画調整課，pp1-10，2018。

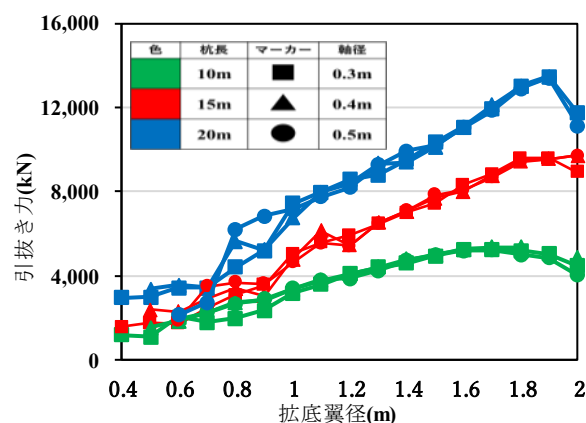


図-2 拡底翼径-引抜き力 結果まとめ

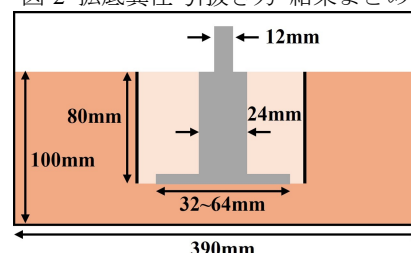


図-3 模型実験 断面図

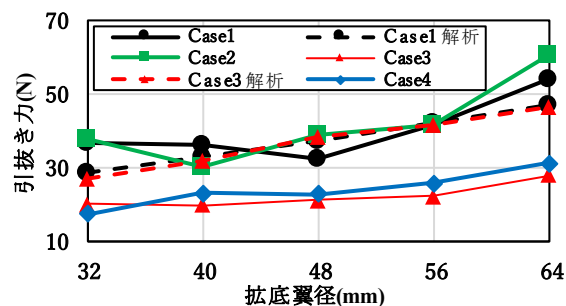


図-4 拡底翼径-引抜き力 結果まとめ(実験)