

先端翼付き鋼管杭の先端抵抗挙動に関する研究

九州大学大学院 正会員 ○山崎 智彦
九州大学大学院 フェロー 大塚 久哲
JFE エンジニアリング（株）正会員 棚邊 隆
九州大学大学院 学生会員 土淵 貴臣

1. はじめに

風力発電タワー・送電鉄塔などの搭状構造物においては、風荷重・地震荷重等に起因してその基部に大きな転倒モーメントを生じる。この転倒モーメントに対して、既往の直杭に比べ先端形状の異なる翼杭では大きな引抜き抵抗力が期待され、一翼杭や多翼杭の引抜き試験が複数報告されている。しかし、これらは一方向引抜き試験が多く、交番載荷試験の例は少ない。また、現地引抜き試験によりその耐力を確認した結果を用いている場合も多く、翼杭の先端部における引抜き抵抗機構はまだ未解明である。

このような状況を踏まえ、本研究では、翼杭の引抜き抵抗機構を解明し、合理的な翼杭の耐震設計法の開発に資するため、交番載荷試験を実施し、その履歴曲線を用いて先端抵抗機構のモデル化を試みた。

2. 実験概要

試験杭は、直杭の先端に半円を互い違いに付けた先端羽根付き鋼管杭（以下、翼杭と呼称）を使用した。ここで先端径の違いによる支持力特性の比較を行うため、翼径の異なる2種類の杭を使用した。その形状を図-1に示す。

模型砂地盤は、ノズルから投下される砂をネットに接触させ砂を分散させて撒きだす「ノズル・ネット法（NN法）」により二層地盤を作成した。事前に数回地盤を作成し、再現性を確認した。使用した砂の物理的特性を表-1に示す。

また、今回の実験では、上層の相対密度は80%程度、下層の相対密度は100%程度とした。求めた相対密度と上載圧よりN値の算出を以下の式より行うことができ、その算出値を表-2に示す。

$$Dr = 21 \times \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} \quad Dr: \text{相対密度}(\%) \quad N: N \text{ 値}$$

σ'_v : 上載圧 (kgf/cm²)

杭の設置状態を図-2に示す。

載荷方法は、地盤工学会基準「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」¹⁾に準拠し、交番載荷試験を行った。試験ケースを表-2に示す。載荷する荷重の振動数は0.5Hz、1Hz、2Hzの3種類で行った。この時、載荷速度をHzで設定したため、各変位振幅で載荷速度が異なり、変位が大きくなるにつれ載荷速度も速くなる。サイクル数は復元力特性に主眼をおき、1サイクルで行った。また、載荷は引き側から開始した。

3. 実験結果および考察

今回の実験では、杭頭荷重はアクチュエータに取り付けたロードセルによって測定し、先端抵抗力は杭に貼付したひずみゲージの値より算出した。また、荷重、変位ともに引抜き側を正としている。ここでは、まず、翼杭特有の先端引抜き抵抗力に着目して比較検討を行い、その後、押し引き両側におけるモデル化を試みた。

先端抵抗力 - 変位の関係を上載圧、翼径、載荷振動数の影響について比較したものを図-3に示す。(a) 上載圧の影響は、翼径が100mmのケース1, 2, 3, 4について比較を行ったものである。上載圧が大きくなると先端引抜き抵抗力も大きくなっており、ほぼ両者は比例する結果となった。次に、(b) 翼径の影響では、載荷振動数が1Hzのケース5, 9について比較を行った。翼径が100mmから125mmと大きくなると先端引抜き抵抗力は1.2倍程度に増大し、ほぼ翼直径に比例して先端引抜き抵抗力も増加することが確認された。(c) 載荷振動数の影響では、翼径

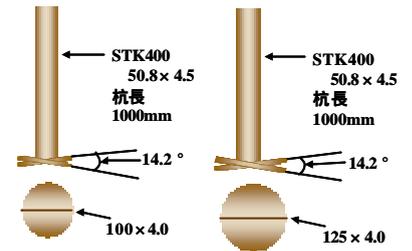


図-1 翼杭の形状 (単位: mm)

表-1 砂試料の物性

試料名	熊本硅砂 6号
土粒子密度 G_s	2.607 g/cm ³
最大密度 ρ_{dmax}	1.494 g/cm ³
最小密度 ρ_{dmin}	1.203 g/cm ³
平均粒径 D_{50}	0.38 mm
均等係数 U_c	1.69

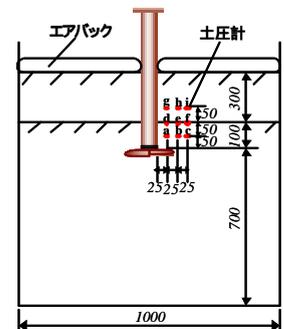


図-2 実験土槽概要 (単位: mm)

表-2 試験ケース

ケース	翼径 (mm)	上載圧 (kPa)	換算N値		載荷荷重の振動数 (Hz)	変位振幅 (mm)
			上層	支持層		
1	100	25	13	25	0.5	±0.5, 1.2, 4, 6, 8, 10, 15
2		50	15	30		
3		75	20	38		
4		100	25	45		
5	125	50	15	30	1.0	±0.5, 1.2, 4, 6, 8, 10, 15
6		50	15	30	2.0	
7		50	15	30	0.5	
8		100	25	45		
9		50	15	30		
10		100	50	15	30	
	50		15	30	2.0	

キーワード 翼杭, 交番載荷, 先端引抜き抵抗, 鉛直先端地盤抵抗, R-Oモデル
連絡先 〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1 092-642-3266

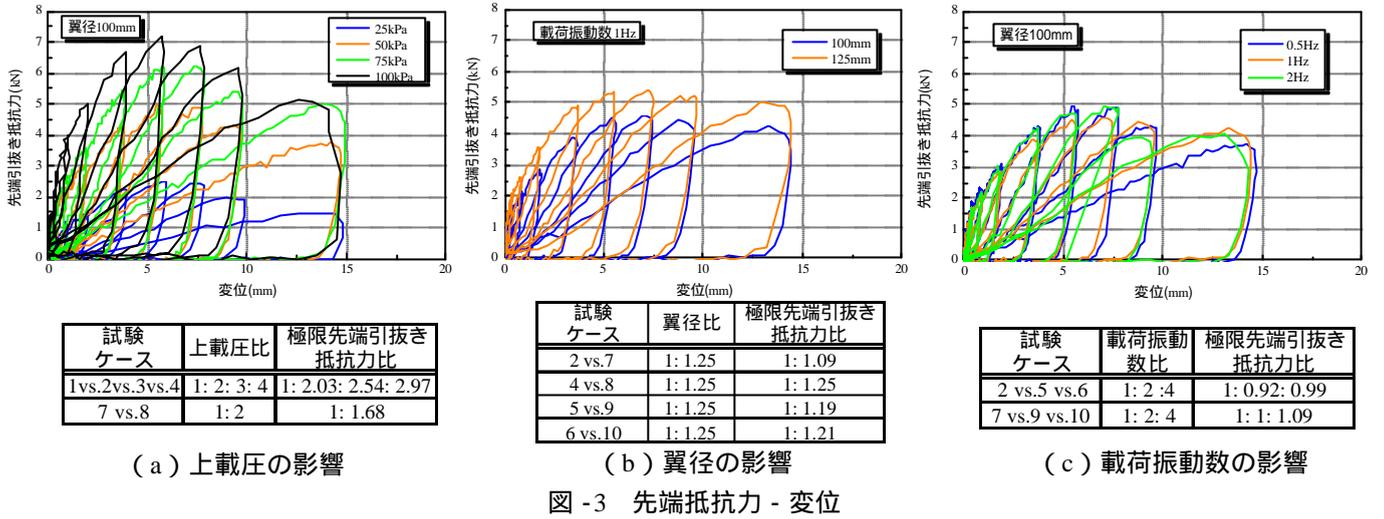


図-3 先端抵抗力 - 変位

100mmのケース2, 5, 6について比較を行った。いずれもほぼ同じ挙動を示し、それぞれ4.5 ~ 4.9kNの値をとっており、載荷振動数の影響はあまり確認されなかった。したがって、今回のような砂地盤においては載荷振動数つまり、載荷速度が先端引抜き抵抗力に及ぼす影響は、地震時を想定した0.5 ~ 2Hz程度の載荷振動数ではほとんどないと考えられる。

実験より得られた履歴曲線と今回提案を試みた鉛直先端地盤抵抗についての骨格曲線を併記したものを図-4に示す。骨格曲線は、引き側については、初期勾配は鉄道構造物等設計標準式²⁾に倣い、第1折れ点はNSエコパイル式³⁾に倣って算出した最大抵抗力の60%の値、第2折れ点は最大抵抗力とした。また、第2勾配は第1勾配の0.25倍の傾きとした。

一方、押し側については、その履歴性状から、地盤の非線形特性を表す際に使用されるR-Oモデルに倣って骨格曲線を表すことにした。使用した算定式を以下に示す。

$$t = \frac{G_0 \cdot g}{1 + a \left| \frac{t}{t_f} \right|^{b-1}}$$

- ：せん断応力
- ：せん断ひずみ
- G_0 ：微小ひずみ(10^{-6})でのせん断弾性係数
- t_f ：一軸圧縮強度
- ：実験定数

ここで、せん断応力を荷重に、せん断ひずみを変位に読み替えて使用することにした。 G_0 は鉄道構造物等設計標準式に倣って算出した初期勾配を、 t_f は押し側におけるNSエコパイル式より算出した杭先端の極限支持力を使用した。また、 a 、 b の実験定数はそれぞれ $a = 0.2$ 、 $b = 4.2$ とした。

図より、いずれも概略傾向を表現することができたと考えられる。しかし、押し込み側においてR-Oモデルを用いてモデル化した場合、実験値の各変位の最大点を連ねた曲線とは逆のふくらみを持っている。

4. まとめ

翼杭の先端引抜き抵抗力は、上載圧および翼径に比例して増加する。また、地震時を想定した0.5 ~ 2Hz程度の載荷振動数では、砂地盤において載荷振動数の影響はほとんど見られない。さらに、翼杭における鉛直先端地盤抵抗は、引き側においてはトリリニアモデルで、押し側においてはR-Oモデルによりその傾向を示すことができた。除荷曲線については押し引き両方向とも勾配が急であり、このモデル化については今後検討する予定である。また、翼先端形状の効果についても得られた履歴曲線を用いて杭構造の解析を行うことにより、検討する予定である。

参考文献

- 1) 地盤工学会，地盤工学基準 杭の鉛直載荷試験方法・同解説 - 第一回改訂版 - ，2002.5
- 2) 鉄道総合技術研究所 鉄道構造物等設計標準・同解説 基礎構造物・抗土圧構造物編（SI単位版），2000.6
- 3) 国土開発技術センター，一般土木工法・技術審査証明報告書「NSエコパイル工法」，2000.3