

先端翼付き鋼管杭を用いた風力発電塔の地震応答解析

JFE エンジニアリング (株) 正会員 ○ 棚邊 隆
九州大学大学院工学研究院 フェロー 大塚 久哲
九州大学大学院工学府 学生会員 土淵 貴臣

1. はじめに

風力発電タワー・送電鉄塔などの塔状構造物においては、風荷重・地震荷重などに起因してその基部に大きな転倒モーメントが生じる。この転倒モーメントにより生じる基礎の引抜き力への抵抗要素として、その先端形状に特徴のある先端翼付き鋼管杭（以下、つばさ杭と呼称）が期待されている。しかし、つばさ杭の先端部における引抜き抵抗機構は未解明であり、動的解析に用いる鉛直支持ばねのモデル化を行い、解析に用いた例はほとんど無い。性能設計法へと移行する動きにある今日、つばさ杭の挙動を把握し、それを解析に組み込むことにより、より合理的な設計が可能であると考えられる。

このような状況を踏まえ、本研究では模型つばさ杭を用いた鉛直交番载荷試験を実施し、その結果より得られたつばさ杭の特性を用いて、風力発電塔の動的解析を行い、つばさ杭の有用性を検討した。

2. 解析概要

解析モデルは図-1に示すような2次元線形はりモデルである。通常2次元はりばねモデルの動的解析では、構造物の慣性力による相互作用と、基礎の剛性と地盤変位による相互作用を同時に考慮できるように、自然地盤を多質点系のせん断ばねにモデル化して予め地盤変位を求め、相互作用ばねを介して地盤変位を地震波と同時に入力して解析を行う。しかし、ここでは解析ソフトの都合上同時入力ができなかったため慣性力のみによる解析を行った。結果の傾向としては変わらないと考えている。

数値積分法にはNewmark β 法 ($\beta = 0.25$) による直接積分法を用いた。応答計算の積分時間間隔は0.001秒とし、減衰はレーリー減衰を使用した。

入力地震動は、道路橋示方書耐震設計編に規定されるタイプの標準波（JR 鷹取駅 図-1 解析モデル (case1) 構内地盤上南北方向波）を用いた。

地盤ばねは図-1に示すよう、杭先端の鉛直地盤抵抗、杭周囲の水平地盤抵抗、杭周囲の鉛直地盤抵抗の3種類のばねとした。ばねの骨格曲線は文献1)に倣ってモデル化し、履歴特性はバイリニアモデルを適用した。ばねでつばさ杭と直杭の違いを考慮した²⁾³⁾。図-2にその履歴を示す。ここで、つばさ杭は実験より得られた特性を用いて表わされ、除荷勾配と載荷時初期勾配が等しく、荷重が0になると原点に指向する特徴を有する。

解析は一般的に用いられている直杭とつばさ杭の比較検討を目的として、表-1に示す解析ケースで実施した。case1では先端支持杭形式を想定し、つばさ杭、直杭ともにN値=30の支持地盤に1mの根入れ長を設定した。case2では摩擦杭形式を想定し、N値=10の一樣地盤において、つばさ杭と直杭の支持力が同等となるよう直杭の杭長を長くした。

3. 解析結果および考察

まず、同一構造・地盤条件で行ったcase1について述べる。ここで、杭の応答は、図-1で左端の杭の結果について示した。

最外縁杭先端の鉛直変位およびタワー頂部の水平変位時刻歴を図-3に示す。杭先端鉛直変位に関して、直杭では引抜き方向（正側）に過大な変位が生じている。一方、つばさ杭では鉛直変位は小さく引抜き抵抗の優位性が確

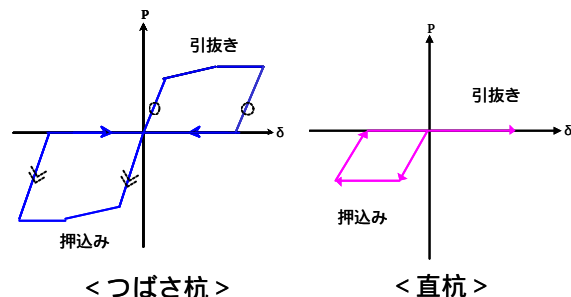
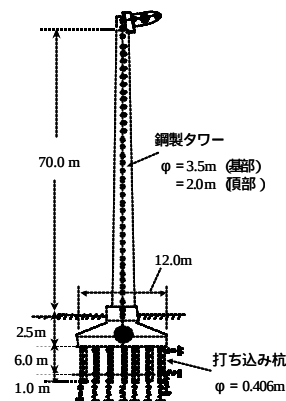


図-2 杭先端鉛直地盤ばねの履歴特性の概念図

表-1 解析ケース

	case 1		case 2	
	つばさ杭	直杭	つばさ杭	直杭
杭長(m)	7	7	7	12
根入れ長(m)	1	1	0	0
周面地盤N値	1	1	10	10
支持地盤N値	30	30	-	-

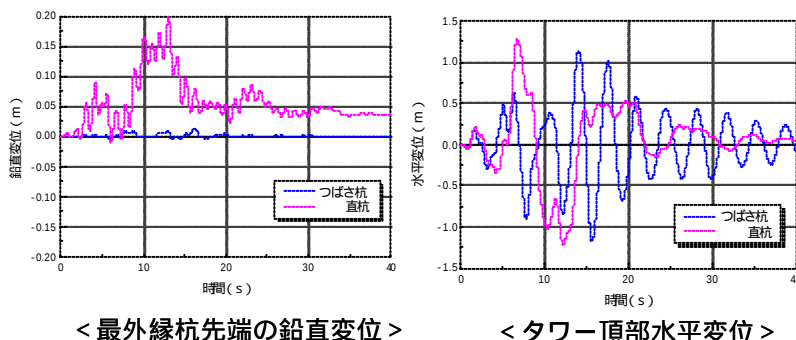


図-3 変位時刻歴 (case1)

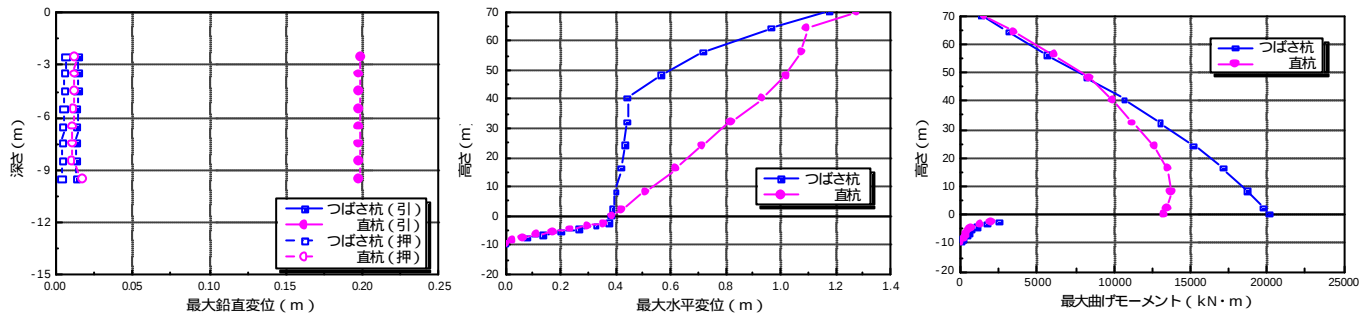


図-4 最大鉛直，水平変位および曲げモーメント分布

認できる．その時，タワー頂部の挙動として，直杭では引抜き方向の過大な変位によって基礎が浮き上がり，軟弱地盤での挙動となり，長周期化していることが分かる．図-4に杭体の最大鉛直変位およびタワー，杭体の最大水平変位，最大曲げモーメント分布を示す．鉛直変位分布より，つばさ杭の引抜き抵抗の優位性が確認できる．水平変位に関しては，直杭ではタワー部で高さ方向に様に増加しているが，つばさ杭では中間部付近から急に増大する傾向が見られた．また，つばさ杭では引抜き力に抵抗することによりタワー基部で曲げモーメントが大きくなっている．

このように，同じ条件でつばさ杭と直杭を比較した場合，つばさ杭では引抜き抵抗に有利であることが分かった．その時，曲げモーメントは引抜き力への抵抗により，つばさ杭が大きくなる．

次に，つばさ杭の支持力と同等となるよう直杭の杭長を長くしたcase2について述べる．

最外縁杭先端の鉛直変位およびタワー頂部の水平変位時刻歴を図-5に示す．直杭では，杭長が12mとつばさ杭に比べ5 m長く，周面摩擦力により，引抜き変位がつばさ杭と同程度に抑えられている．タワー頂部の水平変位に関して，応答の周期はほぼ同じであったが，直杭で残留変位が確認された．図-6に杭体の最大鉛直変位およびタワー，杭体の最大水平変位，最大曲げモーメント分布を示す．鉛直変位に関しては，つばさ杭と直杭でほぼ同程度の最大応答となっている．水平変位に関しては，タワー基部から中間付近までは差異は見られず，頂部付近でつばさ杭の応答が小さくなっている．また，曲げモーメントに関してもつばさ杭がタワー基部で若干小さくなっている．

以上より，つばさ杭と直杭の支持力が同等となるよう杭長を調整した場合，今回の条件ではつばさ杭は直杭に比べ5 m杭長を短くでき，その時の応答は同程度もしくは低減することが分かった．

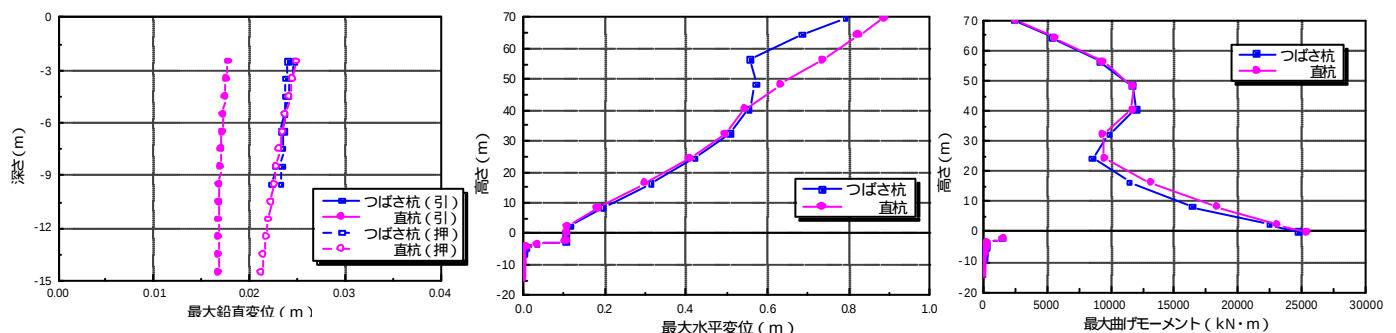


図-6 最大鉛直，水平変位および曲げモーメント分布

4. まとめ

本研究では，鉛直交番荷試験より得られたつばさ杭の特性を用いて，風力発電塔の動的解析を行い，つばさ杭の有用性を検討した．その結果以下のことが確認された．

同一条件でつばさ杭と直杭を比較した場合，つばさ杭が引抜き抵抗に優れている．その時発生する変位はつばさ杭が小さくなるが，曲げモーメントは大きくなる．

支持層が深く杭を根入れできない場合，つばさ杭では直杭に比べ杭長を短くでき，その時の応答は同程度もしくは低減され，つばさ杭を用いる優位性が示された．

参考文献 1) 大塚，久納，岩上：地盤の鉛直方向抵抗力のモデル化が杭基礎の水平抵抗力に及ぼす影響，構造工学論文集，Vol. 45A，pp.1583-1590，1999.3 2) 財団法人鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（SI単位版）-基礎構造物-，pp.201-263，2000.6 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