

先端翼付き鋼管杭の先端部挙動および復元力特性に関する研究

Study on the tip behavior and the restoring force characteristics of steel pipe screw pile

大塚 久哲*, 棚邊 隆**, 土渕 貴臣***, 山崎 智彦****

Hisanori OTSUKA, Takashi TANABE, Takaomi DOBUCHI, Tomohiko YAMASAKI

*工博 九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 教授 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

**JFE エンジニアリング (株) シビルエンジニアリング部 (〒230-8611 横浜市鶴見区末広町2-1)

***九州大学大学院 工学府 建設システム工学専攻 修士課程 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

****九州大学大学院 工学研究院 建設デザイン部門 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

Recently, screw piles which are excellent for the drawing resistance are used in towering structures such as wind turbine generator systems. But, the evaluation method for drawing resistance of the screw piles have not been established. And, there are few studies examined the restoring force characteristics of the tip. This paper firstly tries to clarify the tip behavior by cyclic loading model test using the following parameters, i.e. surcharge load, tip diameter, and loading rate. Furthermore, the skeleton curves and hysteresis loops are proposed based on the experimental results. The accuracy of proposed loop is examined by comparison with the test results.

Key Words: steel pipe screw pile, tip resistance capacity, skeleton curve, hysteresis loop

1. はじめに

1995年の阪神・淡路大震災以前は、下部構造物は上部構造物に比べ比較的安全と考えられていた。しかし、阪神・淡路大震災では基礎にまで被害が及んだことが明らかになったため¹⁾、現在では大地震時における基礎の耐震設計の重要性が認識されるようになった。

このような動きに伴い、杭基礎に関しても大地震時を想定することにより今まであまり考えられていなかった押し込みと引拔きの繰返し荷重下の復元力特性についても考慮する必要が出てきた。杭の載荷試験方法の基準である地盤工学会の「杭の鉛直載荷試験方法・同解説」²⁾においても阪神・淡路大震災後の2002年に改訂され、それまでの一方荷重試験方法に加え、交番載荷試験についても記載されるようになった。

杭の鉛直交番載荷試験については実施例が少ないが、小松³⁾らは回転圧入鋼管杭の鉛直交番載荷試験を実施し、大変位領域での交番載荷試験による荷重低下について検討している。また、大塚⁴⁾らは直杭の鉛直交番載荷試験を実施し、先端抵抗、周面抵抗それぞれの履歴ループに着目し、検討を行っている。それによると先端抵抗に対してはスリップモデル、周面抵抗に対してはバイリニアモデルが妥当であると報告されている。

ところで、風力発電などの塔状構造物では、風荷重や地震荷重などにより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。つばさ杭は先端部に半円を互い違いに付けたものであり、既往の直杭に比べて大きな引抜き抵抗が得られる。また、つばさ杭の特長として回転貫入による無排土施工が可能であること、低騒音・低振動施工が可能であること、セメントミルクを使用しないため地下水汚染が無いことなどが挙げられている。

このつばさ杭の引抜き試験についていくつかの実施例が報告されており、翼の深度により破壊モードが変わること⁵⁾、拡底杭の全引抜き抵抗は、始めは周面摩擦として発揮され、引抜き荷重の増加に伴い拡底部の抵抗の寄与する割合が増大する⁶⁾といったことが報告されている。

しかしながら、つばさ杭の鉛直交番載荷試験を行い、その先端部の復元力特性について論じたものはないようである。また、実挙動に沿った復元力特性により設計を行うことは、仕様規定型から性能規定型へと設計法が移行する動きにある今日、経済的な設計につながると考えられる。

このような状況を踏まえ、本研究ではつばさ杭の先端部挙動を把握し、復元力特性の提案を行うため、模型杭による鉛直交番載荷試験を行った。その結果を上載圧、先端翼径、載荷振動数をパラメータとして比較し、これらが先端引抜き抵抗に及ぼす影響を明らかにした。さらに、その試験結果を踏まえ骨格曲線、履歴曲線のモデル化を検討し、

実験結果と比較して提案モデルの妥当性について論じた。

2. 実験概要

本実験は、著者らがこれまで行ってきた研究^{7) 8)}の一部であり、ここでは簡単に概要を示す。

2.1 実験装置

写真-1に今回用いた実験装置を示す。土槽は、内径1000mm、深さ1200mmの円柱形である。土槽の内側側面には、砂との摩擦を軽減させるためグリースを塗り、テフロンシートを貼り付けた。

本実験では、20kNハイブリッドアクチュエータを用いて鉛直載荷実験を行った。

2.2 地盤の作成

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分散させて撒きだす「ノズル・ネット法 (NN法)」⁹⁾により作成した。本実験では2層地盤を作成するため上層と下層で地盤の硬さを変えなければならない。そこで、下層地盤作成時には、ノズルの先端にロートを装着し硬い地盤が作成できるようにした。

2.3 地盤条件

砂試料は熊本砂6号を使用し、乾燥砂地盤 (気乾状態) を作成した。試料の物性値を表-1に示す。今回の実験では、上層の相対密度80%程度、下層の相対密度100%程度の地盤を作成した。求めた相対密度と上載圧よりN値の算出を以下の式により行うことができ¹⁰⁾、その算出値を表-2に示す。

$$Dr = 21 \times \sqrt{\frac{N}{\sigma'_v + 0.7}} \quad \dots \dots (1)$$

Dr : 相対密度 (%) N : N 値
 σ'_v : 上載圧 (kgf/cm²)

2.4 模型杭概要

試験杭は、半円鋼板を交角14.2°で先端に取り付けた先端翼付き鋼管杭 (以下、つばさ杭と呼称) を使用した。その形状を図-1に示す。

前述したように今回は上層300mm、下層の800mmの2層地盤とした。杭先端位置までの地盤をまず作成し、杭を所定の位置にセットしたあと、引き続いて地盤を所定の高さまで作成した。実現場で行われるように杭に回転を加えて所定の深さに打設する方法は実験室では実施困難であったため採用しなかったが、施工方法の違いが実験結果に及ぼす影響は小さいと判断した。その時の杭の設置状態を図-2に示す。下層への杭の根入れ深さは先端径程度の100mmとした。

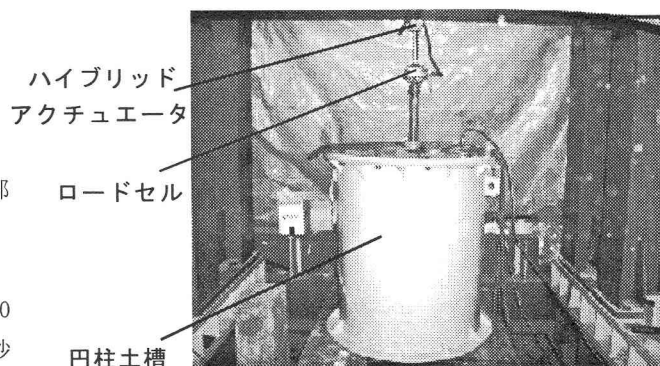


写真-1 実験装置

表-1 砂の物性試験結果

試料名	熊本砂6号	土粒子密度 G_s	2.607 g/cm ³
最大密度 $\rho_{d \max}$	1.494 g/cm ³	平均粒径 D_{50}	0.38 mm
最小密度 $\rho_{d \min}$	1.203 g/cm ³	均等係数 U_c	1.69
内部摩擦角 ϕ	36.5°		

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		50	15	30		
6	125	50	15	30	1.0	
7		100	25	45	0.5	
8		100	25	45	1.0	
9		50	15	30	2.0	
10						

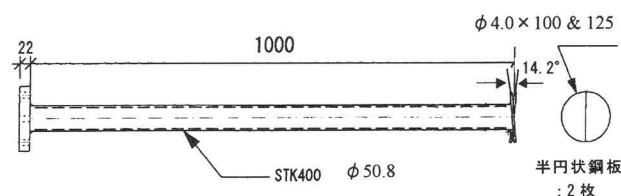


図-1 つばさ杭の形状 (単位: mm)

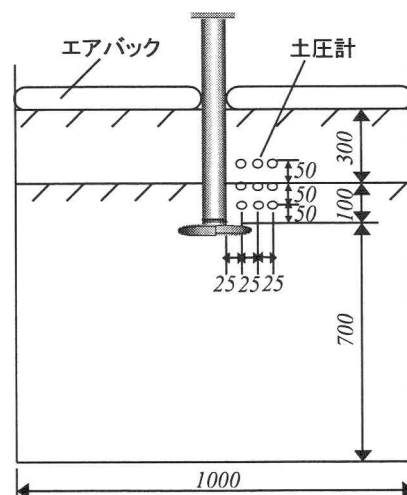


図-2 実験土槽概要 (単位: mm)

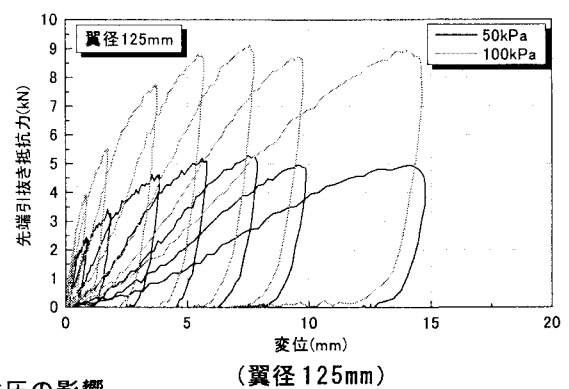
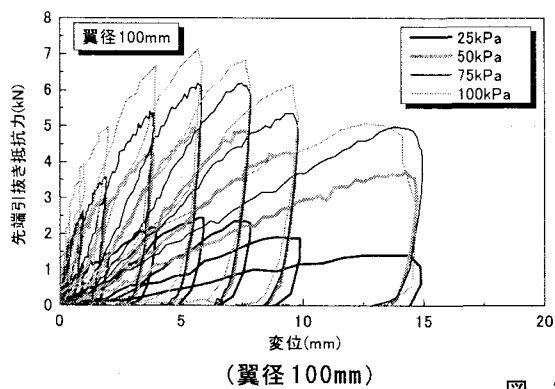


図-3 上載圧の影響

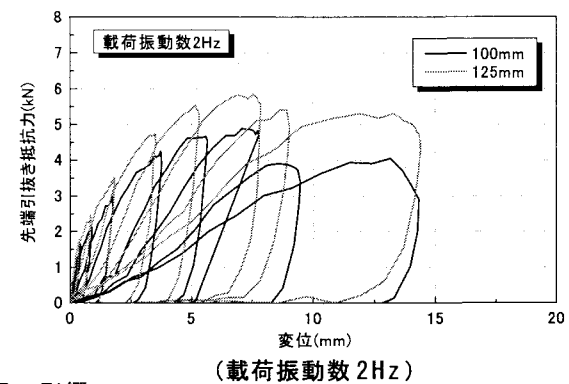
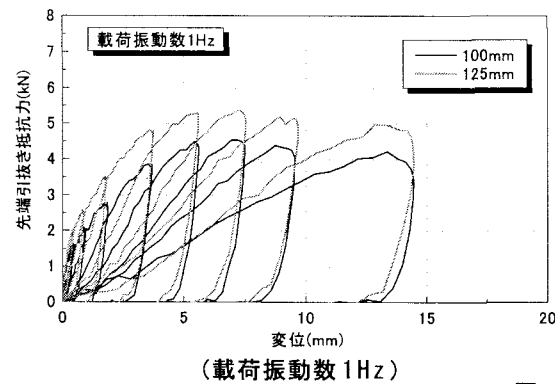


図-4 翼径の影響

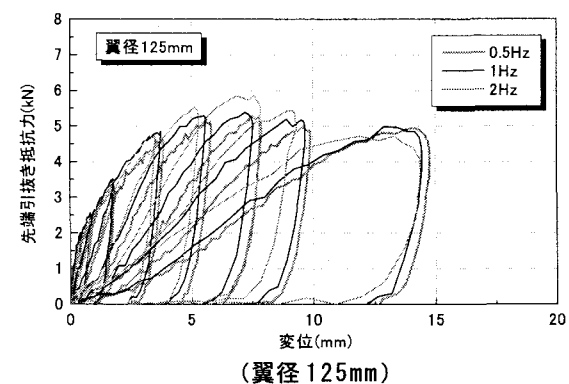
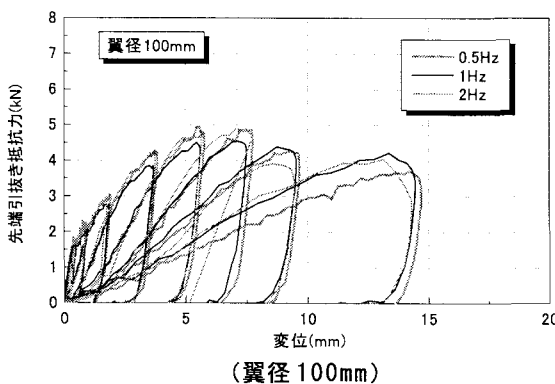


図-5 載荷振動数の影響

2.5 試験ケース

今回は「上載圧の影響」「翼径の影響」「載荷速度の影響」を検討するため、表-2に示す10ケースの実験を行った。ここで、ケース3、4、5、6は既往の研究データを用い、その結果を整理した。

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」に準拠し、連続載荷方式の変位制御による交番載荷試験を行った。ここで、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、載荷速度を振動数で設定したため、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。各変位振幅における繰返し載荷回数は、復元力特性に主眼を置き、1サイクルで行った。また、載荷は引き側から開始した。

3. 先端引抜き抵抗に関する考察

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、先端抵抗は杭に貼付したひずみゲージの値により算出した。

杭頭荷重と先端抵抗の差が周面摩擦による軸抵抗とみなされるが、本研究では文献12)の周面摩擦力算定式より求めた値の0.5～0.8倍程度と小さな値となっていた。これは上層地盤の厚さが小さかったことが原因と考えられる。

ヒステリシスの特徴の詳細な考察は文献7)を参照されたい。なお、載荷荷重のまま変位が減少していく現象については、押し込み、引抜き時に生じた空洞が原因と考えられる。

荷重・変位ともに引抜き側(図-2で上向き)を正としている。

実験は押し引きの交番載荷によって行った(ヒステリシスループの例は図-12参照)が、ここでは、つばさ杭特有の先端引抜き抵抗に着目してパラメータごとに比較検討を行った。

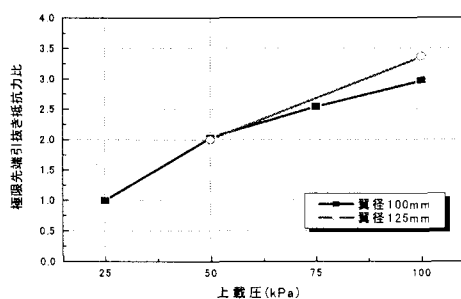


図-6 極限引抜き抵抗力比の比較

3.1 上載圧による比較

図-3は上載圧を変化させた時の先端引抜き抵抗力と変位の関係を引き側にのみ着目して示したものである。翼径が100mmのケースでは25, 50, 75, 100kPaの4パターン、125mmのケースでは50, 100kPaの2パターンについて検討を行った。図より翼径100mmの先端引抜き抵抗力はケース1 (25kPa) で最大約2kN, ケース2 (50kPa) で5kN, ケース3 (75kPa) で6.3kN, ケース4 (100kPa) で7.2kNとなっており、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いることが確認された。この傾向は翼径125mmに関しても同様の結果となった。その最大抵抗力比（極限引抜き抵抗力比）についてまとめたのが図-6および表-3である。ここでは翼径100mm及び125mmについてまとめた。これより上載圧比と極限先端引抜き抵抗力比はほぼ同程度の値となっており、上載圧が大きくなると若干その傾向は鈍くなるものの両者はほぼ比例関係にある結果となった。

3.2 翼径による比較

ここでは、翼径が先端引抜き抵抗力に及ぼす影響を検討するため先端径100mmと125mmの2種類の杭を用いて比較を行った。

図-4は翼径を変化させた時の先端引抜き抵抗力と変位の関係を示したものである。載荷振動数1Hzでは100mm時（ケース5）最大で4.5kN, 125mm時（ケース9）最大で5.4kNとなった。この極限引抜き抵抗力比についてまとめた結果を表-4に示す。これより、他のケースについても翼径が100mmから125mmに大きくなると先端引抜き抵抗力も1.2倍程度に増大している。

すなわち、先端引抜き抵抗力は翼径に依存することが分かる。

3.3 載荷振動数による比較

ここでは地震時の繰返し荷重を想定して0.5Hz, 1Hz, 2Hzの載荷振動数を設定した。

図-5は載荷振動数を変化させた時の先端引抜き抵抗力と変位の関係を示したものである。翼径100mmではいずれの載荷振動数においても最大5kN程度、125mmでは5.5～5.8kN程度となり差異はほとんど見られなかった。表-5に極限先端引抜き抵抗力比を示すが、この結果からもほぼ同程度と

表-3 極限先端引抜き抵抗力比（上載圧）

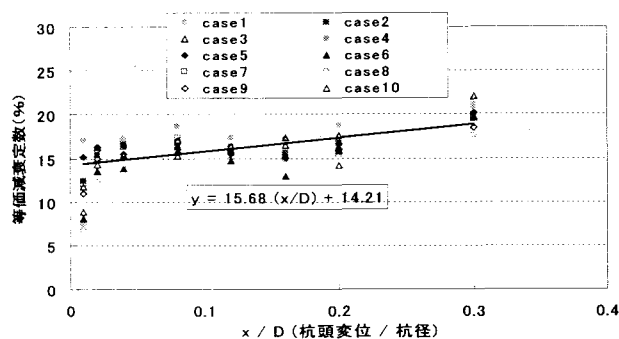
試験ケース	上載圧比	極限先端引抜き抵抗力比
1vs.2vs.3vs.4	1: 2: 3: 4	1: 2.03: 2.54: 2.97
7 vs.8	1: 2	1: 1.68

表-4 極限先端引抜き抵抗力比（翼径）

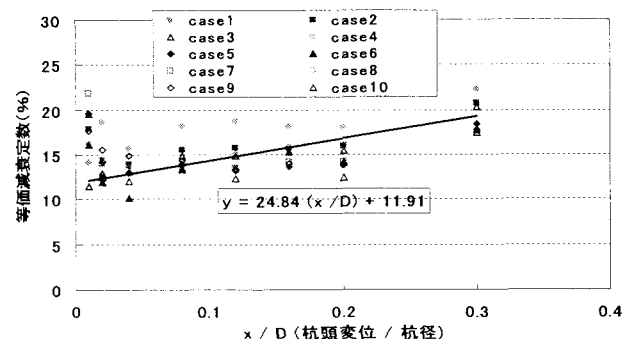
試験ケース	翼径と鋼管径の比	極限先端引抜き抵抗力比
2 vs.7	2 vs. 2.5	1: 1.09
4 vs.8	2 vs. 2.5	1: 1.25
5 vs.9	2 vs. 2.5	1: 1.19
6 vs.10	2 vs. 2.5	1: 1.21

表-5 極限先端引抜き抵抗力比（載荷振動数）

試験ケース	載荷振動数比	極限先端引抜き抵抗力比
2 vs.5vs.6	1: 2: 4	1: 0.92: 0.99
7 vs.9vs.10	1: 2: 4	1: 1: 1.09



（引き側）



（押し側）

図-7 減衰定数hの推定

なっており、載荷振動数の影響は見られなかった。

以上より、載荷速度が先端引抜き抵抗力に及ぼす影響は、0.5～2Hz程度の動的載荷を受ける今回のような砂地盤においてはほとんどないと考えられる。

4. 等価減衰定数に関する考察

ここでは、実験結果を用いて、等価減衰定数を算出した。ここで、押し側と引き側では特性が異なるため（後述）それぞれ別に算出することとした。

図-7は、全試験ケースについての実験結果およびその推

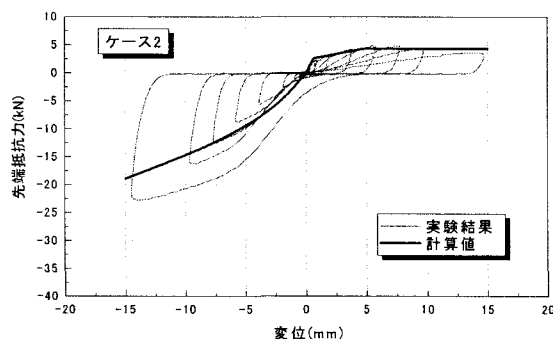


図-8 提案モデルと実験値との比較

定式を併記したものである。図より減衰定数は杭頭変位の増加とともに大きくなっており、杭頭変位/杭径=0.3までの等価減衰定数は押し引き両側で12～20%程度の値を見込むことができると考えられる。また、直線近似できるとした場合の押し、引きそれぞれの推定式は以下のようになる。

$$(\text{引き}) \quad h = 15.68 (x/D) + 14.21 \quad \dots (1)$$

$$(\text{押し}) \quad h = 24.84 (x/D) + 11.91 \quad \dots (2)$$

ここに、

h : 等価減衰定数(%) x : 杭頭変位(mm) D : 杭径(mm)

5. つばさ杭先端部骨格曲線のモデル化

5.1 履歴曲線の特徴

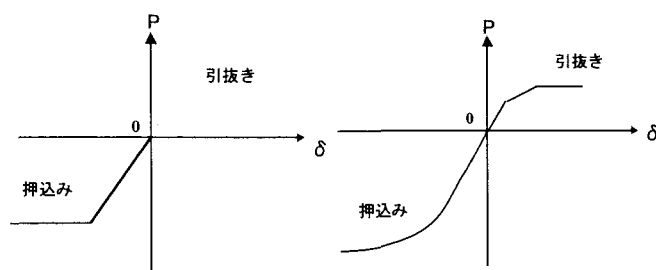
本実験で得られたつばさ杭先端抵抗の履歴曲線からその傾向を踏まえ、骨格曲線の提案を試みた。その概要をここでは述べる。

図-8に実験から得られた履歴曲線を示す。ここで、荷重変位とも引き側を正、押し側を負としている。

引き側では载荷回数の増加とともに初期勾配は小さくなっていく傾向を示した。一方、押し側では载荷がすすむとその際に初期勾配は大きくなり、押し側と引き側では異なった挙動を示すことが確認された。したがって、ここでは押し側、引き側でそれぞれ違ったモデルで表すことにした。

まず、引き側については通常の構造物の現象によく見られる挙動であり、初期勾配と2次、3次勾配を持つトリニアモデルで表すことにした。押し側については前述したように载荷がすすむと勾配が大きくなる傾向があるが、地盤の非線形特性を表す際によく使用されるR-0モデルに倣って骨格曲線を表すことにした。

図-9に杭先端の鉛直地盤抵抗特性を示す。鉄道構造物等設計標準¹¹⁾では図に示すよう押し込み側では初期勾配と先端基準支持力の上限值を持つ弾完全塑性型で与えられている。また、引抜き力が杭先端部に生じた場合は、杭先端の引抜き抵抗力を無視するものとなっている。一方、今回実験を行ったつばさ杭ではその特徴である引抜き抵抗力を有し、また、押し引きで異なる挙動を示すことが確認された。



(a) 鉄道標準モデル

(b) 本研究モデル

図-9 杭先端の鉛直地盤抵抗特性

表-6 引抜き係数 β

内部摩擦角 ϕ	引抜き係数 β
35°	2.16
36°	2.4
37°	2.65
38°	2.89
39°	3.14
40°	3.38

5.2 引抜き側の骨格曲線のモデル化

引抜き側の骨格曲線を表す際に使用した最大先端引抜き抵抗力と、勾配を決定する際に使用した式を以下に示す。

(1) 最大先端引抜き抵抗力および降伏荷重¹²⁾

$$R_p = \beta \times \pi \times D_w \times H \times (\sum \gamma_i \cdot L_i + \gamma \cdot H/2) \times \tan \phi \quad \dots (1)$$

ここに、

R_p : つばさ杭の先端引抜き抵抗力 (kN)

β : 引抜き係数

D_w : 羽根の外径 (m)

H : 支持層への根入れ長 (m)

γ_i : 支持層より上の各土層の単位体積重量 (kN/m³)

L_i : 支持層より上の各土層の層厚 (m)

γ : 支持層の土の単位体積重量 (kN/m³)

ϕ : 支持層の内部摩擦角 (°)

ここで、引抜き係数 β は内部摩擦角 ϕ の関数であり、Meyerhofらの引抜き係数算定法⁹⁾に倣って算出した。その結果を表-6に示す。

式(1)より求めた値を最大引抜き抵抗力(第2折れ点)とした。また、降伏荷重はここでは実験結果を参考にして、最大先端引抜き抵抗力の60%の値(第1折れ点時の荷重に相当)とした。

(2) 初期勾配および第2、第3勾配¹¹⁾

$$K_v = k_v \cdot A_v \quad \dots (2)$$

ここに、

K_v : 設計鉛直ばね定数 (kN/m)

k_v : 設計鉛直地盤反力係数 (kN/m³)

A_v : 杭先端の面積から鋼管部の面積を差し引いた面積 (m²)

$$k_v = \text{frk}(1.7 \cdot \alpha \cdot E_0 \cdot D^{-3/4}) \quad \dots \dots \dots (3)$$

ここに、

k_v : 杭先端の設計鉛直地盤反力係数 (kN/m³)

frk : 地盤抵抗係数 (=1)

α : E_0 の算定方法に対する補正係数 (=1)

E_0 : 地盤の変形係数 (kN/m²) ($E_0=2500\text{N}$)

N : 杭先端地盤の N 値

D : 翼径 (m)

ここに、式 (3) を用いるのは、鉛直上向きにも翼上部に載る地盤の鉛直地盤反力係数が有効に作用するものと考えたためである。

式 (2) より求めた値を初期勾配とした。また、第2勾配は実験結果より初期勾配の0.1倍とし、第3勾配は0とした。

5.3 押し側の骨格曲線のモデル化

押し側の骨格曲線は、R-0モデル式を参考にして求めた¹⁾。ここで、式中の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した。さらに、微小ひずみでのせん断弾性係数は鉄道構造物等設計標準式に倣って算出した設計鉛直ばね定数 (K_v) に、一軸圧縮強度は押し側における杭先端の極限支持力 (R_u) に読み替えて使用した。使用した算定式を以下に示す。

$$P = \frac{K_v \cdot \delta}{1 + a \left| \frac{P}{R_u} \right|^{b-1}} \quad \dots \dots \dots (4)$$

ここに、

P : 荷重 (kN)

δ : 変位 (m)

K_v : 設計鉛直ばね定数 (kN/m)

R_u : 極限支持力 (kN)

a, b : 実験定数

実際の $P-\delta$ 曲線を描く際には、式 (4) において所定の δ に対し、繰り返し計算を行って P を求めた。また、 R_u 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¹²⁾。その式を以下に示す。

$$R_u = 100 \text{ N} \cdot A_w \quad \dots \dots \dots (5)$$

ここに、

R_u : 極限支持力 (kN)

N : 杭先端地盤の N 値

A_w : 先端翼の面積 (m²)

また、 a, b の実験定数は、実験より得られた履歴をもとに決定した。すなわち、各試験ケースで最大荷重が許容支持力程度¹³⁾ となる履歴を用い、その履歴曲線より2点を抽出して、その時の荷重および変位を式(4)に代入し、2元連立方程式により a, b を決定した。ここで、2点は許容支持力時とその1/2荷重時とした。また、許容支持力は、前述の式 (5) により得られる極限支持力の1/2の値である。実験パラメータである翼径、上載圧および載荷振動数ごとに

表-7 実験定数 a, b (載荷振動数 0.5Hz)

	σ	a	b
$D_w=100$	25	2.32	1.75
	50	2.89	1.94
	75	2.05	2.13
	100	2.06	1.21
$D_w=125$	50	2.57	1.61
	100	1.35	0.66

D_w : 翼径 (mm) σ : 上載圧 (kPa)

表-8 実験定数 a, b (上載圧 50kPa)

	載荷振動数(Hz)	a	b
$D_w=100$	0.5	2.89	1.94
	1.0	1.01	1.83
	2.0	1.56	2.55
$D_w=125$	0.5	2.57	1.61
	1.0	1.50	1.76
	2.0	2.60	2.36

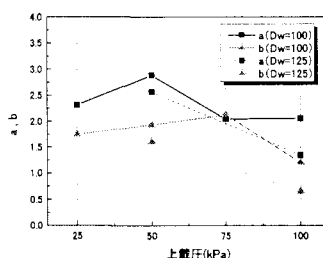


図-10 上載圧と実験定数 a, b の関係

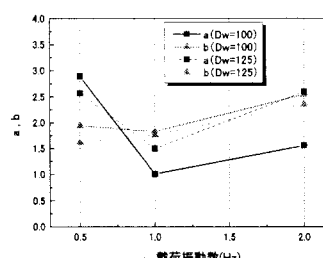


図-11 載荷振動数と実験定数 a, b の関係

a, b を算出すれば表-7および表-8を得る。表-7より載荷振動数0.5Hzでは翼径100mmで $a=2.1 \sim 2.9$, $b=1.2 \sim 2.1$ 程度となること、一方、翼径125mmでは $a=1.3 \sim 2.5$, $b=0.7 \sim 1.6$ 程度となることが分かる。上載圧50kPaについては、翼径100mm, 125mmのそれぞれで3回ずつ(載荷振動数0.5Hz, 1Hz, 2Hz)実験を行っているのそれぞれについて同様に a, b を求めた(表-8)。表より上載圧50kPaでは $a=0.9 \sim 2.9$, $b=1.6 \sim 2.4$ 程度となった。これらを図示すると図-10および図-11となる。図-10からは、上載圧50kPaの時に a, b は最大値をとり、他ではそれらより小さい、上に凸の曲線を示すこと、図-11からは、載荷振動数1Hzの時に a, b は最小値をとり、他ではそれらより大きい、下に凸の曲線を示すことが読みとれる。しかし、翼の直径も含めて、これらの実験パラメータを変数として実験定数 a, b を決定するほどの明瞭な傾向は得られていないので、ここではこれ以上の検討は行わないことにした。

6. つばさ杭先端部復元力モデルの提案

6.1 履歴曲線の特徴

ここでは、実験より得られた履歴曲線についてその特性を踏まえ、簡明な履歴曲線の提案を試みた。その概要を述べる。

まず、本研究で行ったつばさ杭の交番載荷試験より、杭径の1/5以上の変位が生じた場合を除いて、荷重が零に近

表-9 引き側除荷直線の勾配（実験値 / 初期勾配）

ケース	0.5mm	1mm	2mm	4mm	6mm	8mm	10mm	15mm	平均値
1	1.08	0.84	0.80	0.85	0.96	1.07	1.16	0.91	0.96
2	1.29	1.32	1.05	1.11	1.28	1.40	1.13	1.11	1.21
3	1.23	1.23	1.22	1.21	1.17	1.06	0.95	0.92	1.12
4	0.90	0.99	1.08	1.16	0.95	0.97	1.22	1.00	1.03
5	1.18	1.15	1.22	1.20	1.17	1.11	0.91	0.91	1.11
6	1.16	1.31	1.20	1.19	1.02	0.96	1.20	0.92	1.12
7	1.02	1.06	1.16	0.96	0.96	0.90	0.87	0.99	0.99
8	0.97	0.82	0.87	0.85	0.84	0.84	0.81	0.83	0.85
9	1.10	1.13	1.14	1.11	1.04	1.10	0.93	0.85	1.05
10	1.06	1.10	1.09	1.13	1.07	1.06	1.00	0.99	1.06
平均値	1.10	1.10	1.08	1.08	1.05	1.05	1.02	0.94	1.05

表-10 押し側除荷直線の勾配（実験値 / 初期勾配）

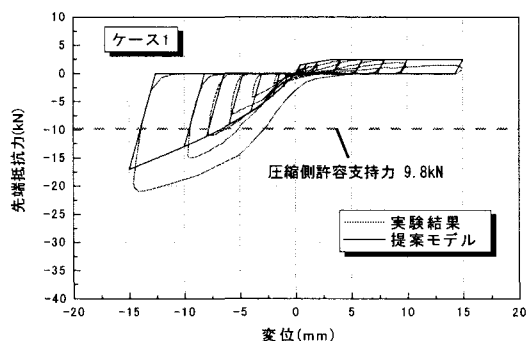
ケース	0.5mm	1mm	2mm	4mm	6mm	8mm	10mm	15mm	平均値
1	1.73	1.81	1.87	1.98	2.25	2.39	1.97	2.38	2.05
2	2.00	1.76	1.89	2.06	1.87	2.20	2.20	1.88	1.98
3	1.78	1.73	1.74	2.10	1.87	2.09	2.20	1.81	1.91
4	1.81	1.77	1.75	1.87	2.07	1.97	2.17	1.89	1.91
5	1.79	1.81	2.25	1.97	2.24	2.15	2.28	2.01	2.06
6	1.70	1.73	1.99	2.09	2.10	2.25	2.23	2.22	2.04
7	1.75	1.70	2.04	1.72	2.03	2.14	2.16	2.06	1.95
8	1.69	1.72	1.71	1.74	1.75	1.73	2.13	-	1.78
9	1.67	1.73	1.72	1.81	1.81	2.06	1.95	1.96	1.84
10	1.72	1.74	1.79	1.86	1.85	1.99	2.16	2.01	1.89
平均値	1.76	1.75	1.87	1.92	1.98	2.10	2.14	2.02	1.94

づいた段階で急激に変位が減少し、原点を指向すること、それまではほぼ一定勾配の除荷曲線となっていること等が明らかになった。

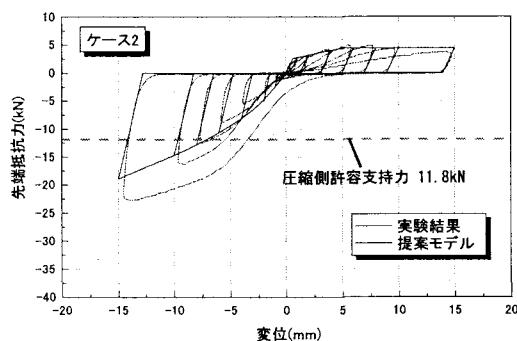
そこで、これらを踏まえ本提案モデルでは、まず、載荷時は前項で述べた骨格曲線上をたどることとした。引抜き側では載荷時の初期勾配が繰返しによって減少していくがここではこれを無視した。その影響度合いについては今後の課題と考えている。次に、除荷時は曲線を直線で表してもさしつかえないと考え、引抜き側では引抜き時初期勾

配、押し込み側では引抜き時初期勾配の2倍の傾きを持つ直線を除荷経路とすることにした。

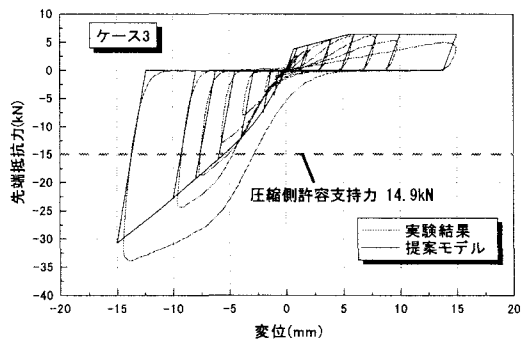
除荷時の荷重が0になると原点に戻るものとする。
以下に除荷勾配の根拠を示す。除荷直線を決定するために引抜き時初期勾配に対する実験除荷勾配の比を算出した。その結果を表-9, 10に示す。実験除荷勾配はそれぞれ変位最大時と完全除荷時の荷重と変位の値より、その間を直線と仮定して算出した。ただし、ケース8の変位15mmではアクチュエータの計測は限界荷重を超えたた



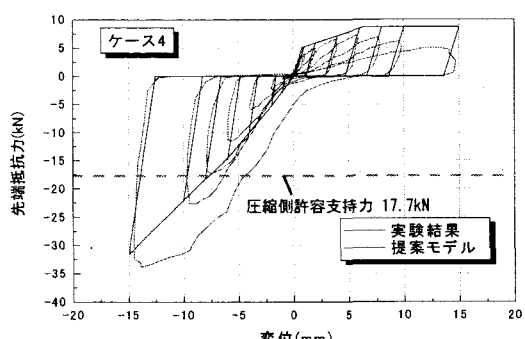
ケース 1 (Dw100-0.5Hz-25kPa)



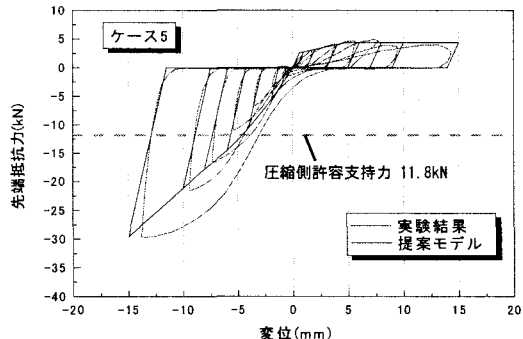
ケース 2 (Dw100-0.5Hz-50kPa)



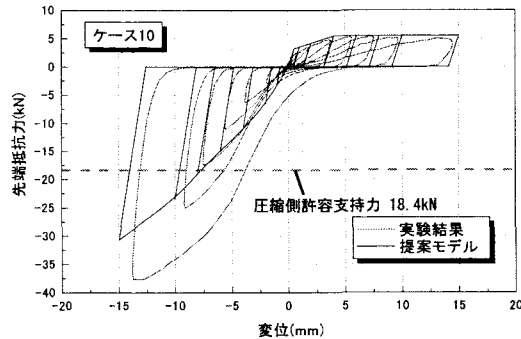
ケース 3 (Dw100-0.5Hz-75kPa)



ケース 4 (Dw100-0.5Hz-100kPa)



ケース 5 (Dw100-1.0Hz-50kPa)



ケース 10 (Dw125-2.0Hz-50kPa)

図-12 実験値と提案モデルの比較

め計測することができなかった。両表より引き側、押し側それぞれについて全ケースの平均値を求めると、引き側で1.05、押し側で1.94となった。ここで押し側の除荷勾配も引抜き時初期勾配を用いて決定したのは、押し側の骨格曲線は式(4)によっており、明確な初期勾配を定義できないためであり、むしろ引抜き時初期勾配と高い相関を示したからである。これらの結果より、前述のように除荷勾配を引き側では引抜き時初期勾配と同じ、押し側では引抜き時初期勾配の2倍とした。

6.2 実験値と提案モデルとの比較

以上のように、つばさ杭先端部における載荷時の骨格曲線は引き側についてはトリリニアモデルにより、押し側についてはR-Oモデル類似の式により表わし、除荷時は引き側では引抜き時初期勾配、押し側ではその2倍の傾きの直線をたどって、荷重が零になると原点に戻るよう履歴曲線を設定した。

この提案履歴モデルを実験結果と比較したものを図-12に示す。これより、引き側については、骨格曲線、除荷直線ともによく表現できていることが分かる。一方、押し側では変位が大きくなると実験曲線との差異が大きくなるものの、設計時に着目される許容支持力内(図-12に併記)では、提案モデルは実験結果を的確に表現しており、このモデル化の妥当性が示されたと考えられる。

7. まとめ

本研究では、まずつばさ杭の先端抵抗挙動を確認するため、乾燥砂地盤において模型杭による鉛直交番載荷試験を行った。また、その結果を踏まえ、等価減衰定数、先端部挙動のモデル化の検討を行った。これらより得られた知見を以下にまとめる。

- ①上載圧が大きくなると先端引抜き抵抗も比例して増大する。その傾向は上載圧が大きくなると若干鈍化するが最大先端引抜き抵抗の算出においてはこれを無視して、上載圧に比例するとした。
- ②先端引抜き抵抗は先端の翼径により変化する。
- ③0.5～2.0Hzの載荷振動数では、載荷速度の差異による先端引抜き抵抗への影響はほとんど見られない。
- ④実験結果より、等価減衰定数を算定し、推定式を載荷方向(押し、引き)別に設定した。これにより、杭径と杭頭変位量を与えることにより等価減衰定数を推定することができる。
- ⑤つばさ杭先端部の骨格曲線のモデル化を試み、引き側についてはトリリニアモデル、押し側についてはR-Oモデル類似式により骨格を規定した。

⑥除荷時は曲線を直線で与えても誤差は小さいと考え、直線を与えることにした。引き側では引抜き時初期勾配、押し側ではその2倍の傾きで荷重が降下するよう決定した。

⑦提案モデルと実験結果との比較により、許容支持力内では提案モデルは実験結果を的確に表現しており、このモデル化の妥当性が確認された。

今後はこの履歴モデルを用いてつばさ杭を適用した構造物の地震時応答解析を行い、つばさ杭の使用が経済的な基礎構造となることを具体的に示す予定である。

参考文献

- 1) 大塚久哲監修：最新地中・基礎構造の耐震設計，第3章杭基礎の耐震設計，九州大学出版会，pp.135-201，2001.11
- 2) 地盤工学会：地盤工学会基準，杭の鉛直載荷試験方法・同解説-第一回改訂版-，2002.5
- 3) 小松章，青木一二三，棚村史郎，西岡英俊：回転圧入鋼管杭の鉛直交番載荷試験，第38回地盤工学研究発表会，pp.1487-1490，2003.7
- 4) 大塚雅裕，秋田直樹，福井次郎，喜多直之：載荷方法の異なる杭の鉛直載荷模型実験，第37回地盤工学研究発表会，pp.1425-1428，2002.7
- 5) A. Ghaly, A. Hanna: Uplift behavior of screw anchors in sand, Journal of Geotechnical Engineering Vol. 117, No. 5, pp. 773-793, ASCE, 1991. 5
- 6) 文松霖，横山幸満，今泉繁良：砂地盤における模型杭の引抜き抵抗挙動，土木学会論文集，No. 535/III-34，pp. 127-134，1996. 3
- 7) 大塚久哲，棚邊隆，土淵貴臣，山崎智彦，武本真弓：先端翼付き鋼管杭の引抜き抵抗特性に関する実験的研究，構造工学論文集，Vol. 50A，pp. 1225-1232，2004. 3
- 8) 山崎智彦，武本真弓：先端翼付き鋼管杭の引抜き耐力に関する模型実験，土木学会第58回年次学術講演会
- 9) 島田正夫，土屋勉，菊地ゆかり：ノズル・ネットを用いた模型砂地盤の作製方法，日本建築学会北海道支部研究報告集，Vol. 75，pp. 21-24，2002
- 10) 地盤工学会：地盤調査法，1995. 9
- 11) 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
- 12) 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
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編，pp. 348-433，2002. 3

(2004年9月17日受付)