

回転圧入鋼管杭の引抜き力特性に関する研究

Study for drawing resistance of screwed steel piles

坂本洋*, 小松章**, 岩本亜理***, 豊福浩司****, 中谷登*****

Hiroshi SAKAMOTO, Akira KOMATSU, Ari IWAMOTO, Koji TOYOFUKU and Noboru NAKATANI

*東京電力(株) (〒108-0023 東京都港区芝浦4丁目)

** 新日本製鐵(株) (〒100-8071 東京都千代田区大手町2丁目)

***東電設計(株) (〒110-0015 東京都台東区上野3丁目)

****新日本製鐵(株) (〒100-8071 東京都千代田区大手町2丁目)

*****大日本土木(株) (〒160-0023 東京都新宿区西新宿6丁目)

The calculation formula for the drawing resistance force of a screwed steel pile was previously suggested in researches including the study of Meyerhof (1968). In our study, the applicability of the formula modified by us was examined with model uplift tests of loading and finite element analysis employing the subloading tij model. The results indicate that the modified formula adequately estimates the drawing resistance force of the round spiral wing on the bottom edge of the pile. It is also proved that the finite element analysis with the subloading tij model is effective for the analysis on the relationship between loading and displacement of the screwed steel pile.

Key Words: Screwed pile, Spiral wing, Drawing resistance, Model test, FEM analysis

キーワード: 回転圧入杭, 先端羽根, 引抜き支持力, 模型試験, 有限要素法解析

1. はじめに

回転圧入鋼管杭工法は、鋼管の先端にらせん状の羽根を取り付けた杭(写真-1, 図-1)を、全周回ケーシングジャッキなどで地中に木ねじのように回転させながら貫入する杭工法である。本工法の貫入メカニズムは、鋼管杭に与える回転力により羽根先端が地盤に切り込まれ、羽根がくさびとなり地盤を上方に押し上げるが、このとき反作用として羽根に作用する地盤反力が推進力となり、杭が貫入されるものである。

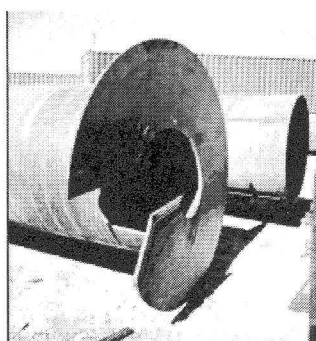


写真-1 回転圧入鋼管杭

本工法の特徴は、①杭を回転させて地盤中に貫入することで、無排土、低騒音、低振動で施工することができるこ

と、②杭先端回転トルクと地盤抵抗力には相関があるので、施工時に計測している回転トルクにより支持層への到達が確認できること、③杭を逆回転させて引抜くことができるため、杭の再利用が可能であること、④無排土施工、かつ、羽根のくさび効果による地盤の締め固めにより、打込み杭と同程度の周面摩擦力と水平支持力が得られること、そして、⑤羽根の拡底効果により大きな押込み支持力及び引抜き支持力が確保できることが挙げられる。

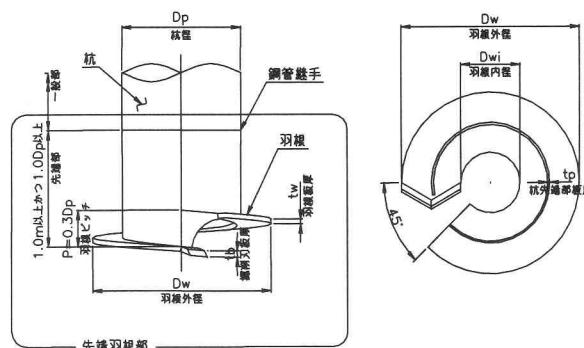


図-1 回転圧入鋼管杭の羽根部詳細図

筆者らは、本工法の引抜き支持メカニズムを把握するために、実規模の原位置載荷試験を杭径 400mm~1200mm まで 13 ケースを実施し、引抜き支持力算定式を提案した¹⁾²⁾。これにより、風荷重などで大きな引抜き力が作用する

送電鉄塔基礎等に回転圧入鋼管杭を適用し、従来の杭基礎に比べて杭径や杭本数を削減でき、またフーチングを小さくすることができるため、より経済的な基礎とすることが可能となった。しかし、回転圧入鋼管杭の羽根を支持層へ深く貫入した場合の引抜き支持力への影響評価についてはこれまで検討されていないため、Meyerhof等の過去の研究成果³⁾⁴⁾を参考に、根入れ深さに制限値を設けて適用している。

そこで、本研究では、杭の支持層への根入れ深さが羽根の拉底効果による引抜き支持力への影響を把握するため、模型砂地盤を作成し、杭の根入れ深さをパラメータとした引抜き試験を実施し、上記制限値の妥当性について評価を実施した。また、subloading tij modelを用いた有限要素法解析を行い、回転圧入鋼管杭の引抜き荷重と変位の関係を試験値と比較し、その適用可能性について検討した。本文では、これらの結果について報告する。

2. 模型試験概要

2.1 実験装置

図-2に模型地盤概要、写真-2に実験装置を示す。試験タンクは、直径1200mm×高さ1200mmの円筒形で、加圧装置によりタンク内に作成した模型地盤に上載圧及び側圧をかけることができる。加圧装置は、タンク内側側面及び上部に設置したエアバッグにポンプを接続し、空気圧により圧力(0~0.5MPa)を負荷するものである。各圧力はポンプの空気圧計により計測する。上載圧用のエアバッグの中心には、模型試験杭を施工するために、φ140mmの開口部が設けられている。引抜き試験の際には、この開口部にもエアバッグを挿入し、所定の上載圧をかけることができる。載荷試験装置は、施工時に回転力(最大6.5kN・m)及び鉛直荷重(最大7.8kN)、載荷試験時に鉛直荷重(最大39.2kN)を付与できるもので、施工時には回転数を制御可能である。

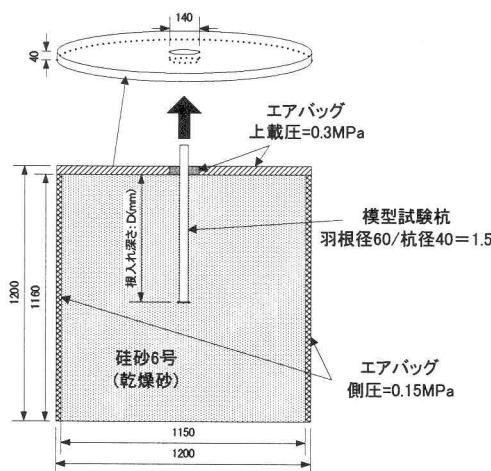


図-2 模型地盤概要

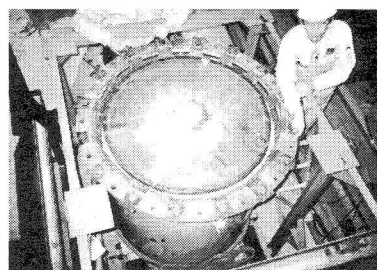


写真-2 実験装置

2.2 地盤の作成

模型地盤は図-3に示す装置を用いて次のように作成した。最初に、6号珪砂(乾燥砂)を、ホッパーの先端からタンク内の砂表面までの高さが135cmになるようにホッパーを上昇させる。同時に、ホッパーに固定したパイプレータを作動し、タンク下端から上端まで、一定位置に一定時間停止させながら、砂をタンク天端まで充填した。次に、目標N値に相当する上載圧(開口部分も含む)と側圧になるように、エアバッグに空気を送り加圧する。今回の試験では、深さ約18.7mの支持層を模擬するために、上載圧を0.3MPa、側圧を0.15MPa(側圧係数0.5)としたため、この目標拘束圧まで上載圧と側圧の比率を一定値(1:0.5)に保って加圧した。

上記手法により作成した模型砂地盤において、コーン貫入試験を3回実施した結果、図-4に示すようにタンク内の地盤がほぼ均一に作成できていることが確認された。なお、模型砂地盤の相対密度は約84%である。

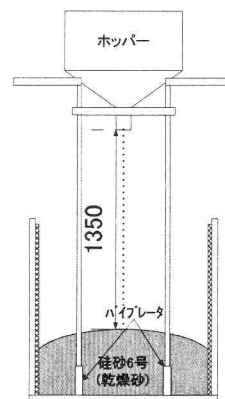


図-3 模型地盤作成装置

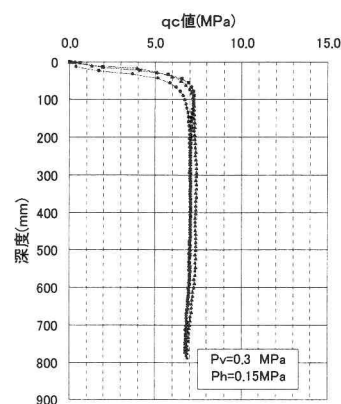


図-4 コーン貫入抵抗

2.3 模型試験杭の設置

試験杭は、実杭と同様に杭の先端にらせん状の羽根を取り付けており、写真-3に示すように、鋼管径40mm、羽根径60mm（鋼管径の1.5倍）、羽根のらせん角度は約5度（羽根のピッチ12mm（鋼管径の0.3倍））とした。杭の先端は閉塞している。

試験杭の設置は、実杭と同様に模型砂地盤中に回転圧入した。模型砂地盤の作成完了から10分後に、上載荷重1kNをかけながら毎分2回転で所定根入れ深さまで貫入した。杭体には、施工中及び引抜き試験時の軸力及びトルクを計測するために、図-5に示すように歪みゲージを貼付している。以下、図-5に示すⅡ断面を羽根部、Ⅳ断面を周面摩擦、Ⅴ断面を杭頭部とする。試験杭は二重管になっており、Ⅳ断面の外管に貼付した歪みゲージより、試験杭の周面摩擦力を計測することができる。

計測は、杭頭部にスリップリングを設置し、回転部からのデータをリアルタイムで計測装置に出力できるようにしており、1秒間隔で実施した。

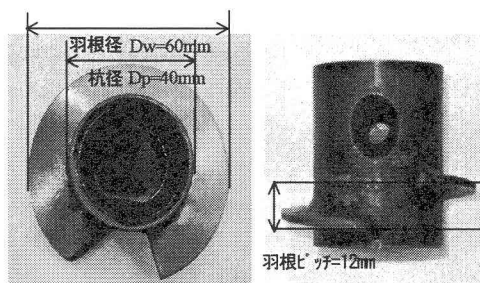


写真-3 模型試験羽根部

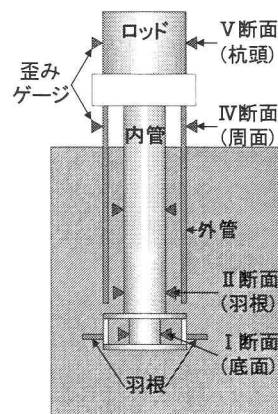


図-5 試験杭のゲージ設置位置

図-6、7に模型試験杭貫入時の貫入量と発生軸力、発生トルクの関係例（根入れ深さ300mm：ケース3）を示す。この結果より、①羽根（Ⅱ断面）の貫入トルクは60mm程度でほぼ一定となる、②周面（Ⅳ断面）のトルク及び軸力は貫入量が増す毎に徐々に増加する、③羽根（Ⅱ断面）の軸力は貫入量が増す毎に徐々に引張り側に移行する、④底面（Ⅰ断面）には約3kNの圧縮力が発生している、ことが分かった。らせん状の羽根が地盤に貫入するときのくさび効果により羽根上面に推進力が作用し、Ⅱ断面の軸力が徐々に引張り側に移行したと考えられる。

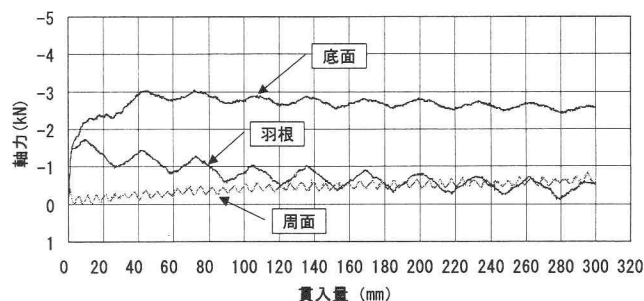


図-6 発生軸力-貫入量の関係例（ケース3）

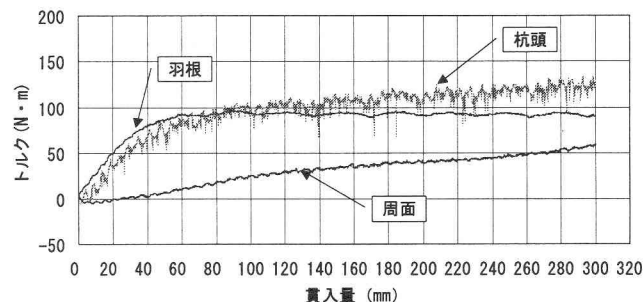


図-7 発生トルク-貫入量の関係例（ケース3）

2.4 試験ケース

杭の支持層への根入れ深さが羽根の拡底効果による引抜き支持力（アンカー力）への影響を把握するため、杭の根入れ深さをパラメータとし、表-1に示すように5ケースの引抜き試験を行った。根入れ比は $1.67D_w \sim 13.33D_w$ と、実施工で適用される範囲から施工限界まで貫入した場合を想定した。各ケースについて3体の試験を実施した。

載荷試験は試験杭施工終了の2分後に実施している。載荷試験の軸力は機械の油圧によって、杭頭部から作用させ、杭に貼付した歪みゲージによって各部の軸力を計測している（図-5）。載荷は一様漸増とし、荷重ステップ1kN毎に1分間のホールド時間を設けている。

表-1 試験ケース

ケース	試験杭形状(mm)			拘束圧(Mpa)		根入れ深さ(mm)
	杭径(Dp)	羽根径(Dw)	Dw/Dp	上載圧	側圧	
1	40	60	1.5	0.3	0.15	100
2						200
3						300
4						600
5						800

3. 試験結果

3.1 引抜き試験結果

ケース1,3,4の引抜き試験の断面軸力と杭頭変位の関係を図-8に示す。各ケースとも載荷の初期段階から羽根部の軸力が急増しており、初期剛性が大きいといえる。杭頭変位が約1.0mmとなった所で羽根部の断面軸力がピークに達している。これらの傾向はどのケースにおいても同様であった。また、ケース3と4では軸力の最大値に差がほとんどなかった。

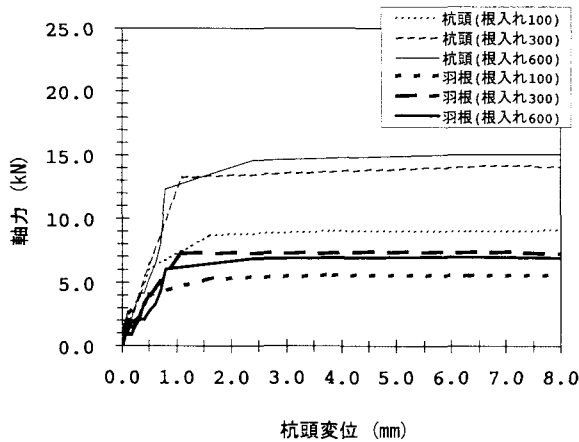


図-8 模型試験断面軸力-変位関係 (ケース 1,3,4)

3.2 引抜き支持力算定式との比較

回転圧入鋼管杭の引抜き支持力算定式は、筆者らが既往の研究^{1),2)}において、次式を提案している。

$$P_u = \pi \cdot D_w \cdot \left(\sum \gamma_i \cdot L_i + \gamma \frac{H}{2} \right) \cdot H \cdot \beta \tan \phi + U \sum L_i \cdot f_i \cdots (1)$$

P_u : 極限引抜き支持力 (kN)

D_w : 羽根外径 (m)

γ_i : 地表面から i 番目の層の土の有効単位重量 (kN/m³)

L_i : 地表面から i 番目の層の層厚 (m)

f_i : 地表面から i 番目の層の最大周面摩擦力度 (kN/m²)

γ : 支持層土の有効単位重量 (kN/m³)

β : 引抜き係数。せん断破壊面の抵抗係数を表し、支持層の内部摩擦角に応じた値を適用する。

ϕ : 支持層の内部摩擦角 (°)

U : 杭の周長 (m) $U = \pi \cdot D_p$

H : 羽根上方の局所せん断破壊域の拉がる高さで、支持層への根入れ長 (m) ただし、 $H \leq 2.5D_w$

この算定式は、Meyerhof の研究^{3),4)}における曲線状のすべり面を仮定した極限引抜き支持力式を修正したものである。Meyerhof は数多くの室内実験を行い、砂地盤内円形アンカーの極限引抜き支持力算定用換算係数を求めた。また、その換算係数は、アンカーの根入れ深さが浅いと土被り深さに比例して増加するが、ある深さを超えると一定値に近づくことを確認した。式(1)の提案の際には、引抜き係数 (1)式 β) を、Meyerhof が提案した内部摩擦角に応じた極限引抜き支持力算定用換算係数の上限値とした。また、地表面から支持層上面までの有効上載圧を支持層のせん断すべり抵抗に考慮できるようにした。さらに、羽根部の引抜き支持力を算定する際の支持層への根入れ深さは、Meyerhof の引抜き換算係数が一定値となる限界根入れ比及び実際の施工性を考慮し、羽根径 (D_w) の 2.5 倍を上限値とした。

図-9 に羽根部の引抜き支持力と根入れ深さの関係を示

す。羽根部の引抜き支持力は断面軸力の最大値 (各ケースにつき 3 体実施) を平均したものである。羽根部の引抜き支持力は、支持層への根入れを深くすれば増加するが、ある程度以上深くなると一定値に近づいている。この試験結果に対して、式(1)による算定値は安全側であり、引抜き支持力を算定する際の支持層への根入れ深さを羽根径の 2.5 倍を上限値とする筆者らが提案した(1)式は妥当であることが確認された。

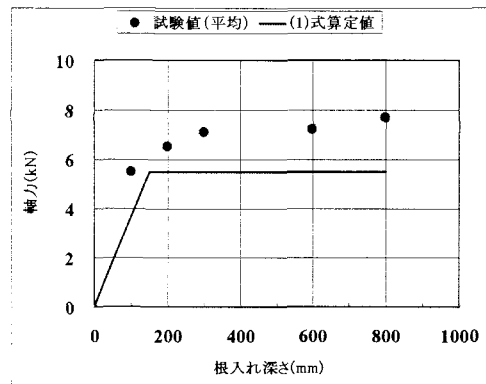


図-9 羽根部断面軸力の試験値と算定値の比較

4. 有限要素法解析

4.1 解析の概要

有限要素解析は subloading tij model⁵⁾を構成モデルとして、要素にはアイソパラメトリック要素を使用した。解析条件として微小変形理論を用い、排水条件下において軸対称条件で解析した。解析は、杭の根入れ深さをパラメータとして、表-2 に示すような 3 ケースについて実施した。それぞれ、前述の模型試験のケース 1,3,4 に対応する。

表-2 解析ケース

ケース	試験杭形状(mm)			拘束圧(MPa)		根入れ深さ(mm)
	杭径(Dp)	羽根径(Dw)	Dw/Dp	上載圧	側圧	
a	40	60	1.5	0.3	0.15	100
b						300
c						600

4.2 土質パラメータの設定

解析に使用するパラメータを同定するために、模型試験で使用した 6 号珪砂の密度を変化させた (密詰: $e_0=0.85$, 緩詰: $e_0=0.66$) ①等方圧密試験, ②三軸圧縮 (CD) 試験を実施した。解析に用いた土質パラメータを表-3 に示す。

β' については、豊浦砂と同じ値とした。また、 $N, \lambda, a_{(AF)}, a_{(C)}$ については、peak 強度時の間隙比 e から推定し、密度の異なる試料を用いて行った試験結果と間隙比の影響を考慮した理論式と合うように設定した。

図-10 に $\sigma_1/\sigma_3 \sim \varepsilon_d$ 関係、図-11 に $e \sim \ln P$ 関係を示す。プロット点がそれぞれ、三軸圧縮試験結果と等方圧密試験結果で、実線が解析結果である。これらの結果から、subloading tij model モデルは、6 号珪砂の応力-ひずみ挙動を精度良く再現可能であることがわかる。

表-3 土質パラメータ

λ	正規圧密状態の平均応力～間隙比関係の勾配 (載荷時)	0.03
κ	正規圧密状態の平均応力～間隙比関係の勾配 (除荷時)	0.006
N	正規圧密状態で平均応力が98kPa時の間隙比	0.9
Rcs	残留状態での主応力比	3.45
β'	降伏曲面の形状を表すパラメータ	2
$a_{(AF)}$	密度や拘束応力の影響を表すパラメータ (関連流動則成分)	50
$a_{(IC)}$	密度や拘束応力の影響を表すパラメータ (等方圧縮成分)	800

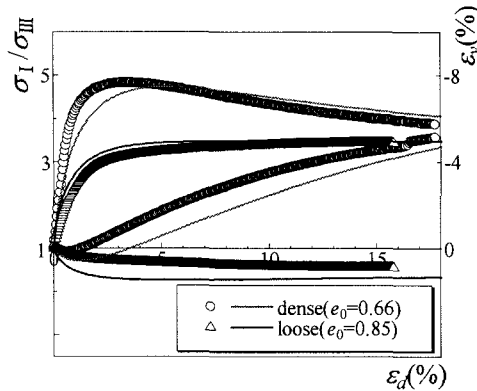


図-10 応力比とせん断ひずみの関係

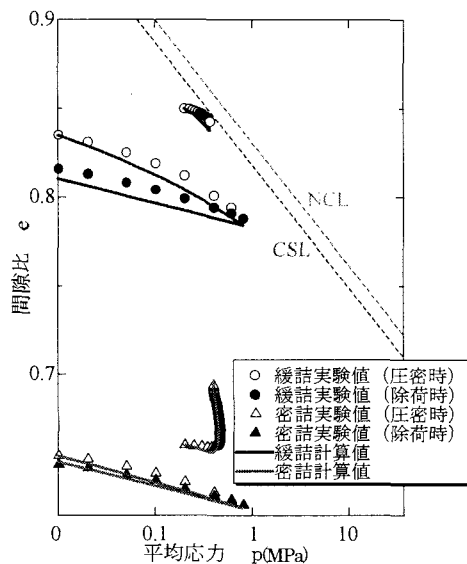


図-11 間隙比と平均応力(対数表示)の関係

4.3 解析条件

有限要素のメッシュの一例(ケースc:根入れ深さ600mm)を図-12に示す。杭の周面には弾塑性ジョイント要素⁹⁾を設けた。ジョイント要素は境界面の摩擦特性を表現できるモデルであり、ずれ発生までは変位がほとんど生じないようにし、ずれ発生後は近似的に完全塑性状態になるようにしている。杭は薄肉鋼管でモデル化しており、鋼材の剛性は $2.0 \times 10^5 \text{ MPa}$ とした。解析は、最初に自重解析を行い、その後上載圧及び側圧載荷、杭引抜き載荷の

順に実施した。地盤の間隙比は、模型砂地盤の相対密度 $Dr=84\%$ ($e=0.6626$)になるように調整した。

鋼管杭と地盤の間の摩擦角 δ が不明であるため、摩擦角 δ を変化させた解析を行い、模型試験結果(ケース4:根入れ深さ600mm)と比較した。その結果、試験値と近い挙動となる値である、摩擦角 $\delta=30^\circ$ を各解析ケースに適用することとした。また、回転圧入鋼管杭施工時の地盤への影響を考慮するために、模型試験施工終了時の杭頭部発生軸力を、各解析ケースにおいて、引抜き載荷前に杭頭部に作用させた。載荷荷重は、模型試験各ケースの杭頭部発生軸力の平均値(各ケースにつき3体実施)とし、表-4の値とした。

表-4 杭頭部載荷荷重

解析ケース	a	b	c
根入れL(mm)	100	300	600
載荷荷重(kN)	1.74	2.14	1.16

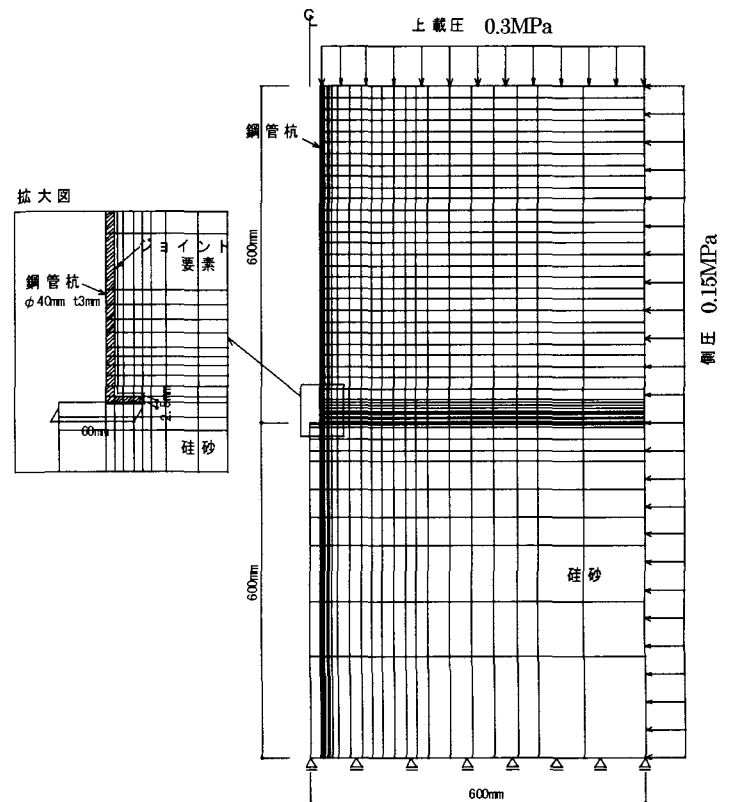


図-12 解析メッシュ図

4.4 解析結果

図-13に解析ケースa～cと模型試験による載荷荷重～杭頭変位関係を示す。

載荷初期から変位の急増点までの挙動は、各ケースとも初期剛性は解析値が試験値に対して大きく、降伏して変位が急増する点の荷重及び変位は解析値が試験値に対して小さくなっている。試験値は杭頭変位が1.0～1.5mm付近で極限荷重に達し、杭が急激に抜け出しているが、解析値は降伏以降も徐々に荷重が増加している。荷重～杭頭変位の全体の傾向を比較すると、解析は各ケースとも試験を概ね再現できているといえる。

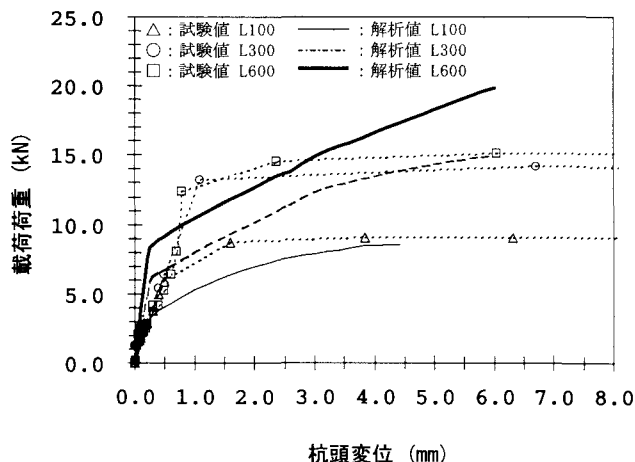


図-13 載荷荷重～杭頭変位関係

図-14 に羽根部の軸力変化を示す。載荷初期においては、ほぼ一致している。しかし、試験値の剛性が杭頭変位 1.0mm 近くまでほぼ一定であるのに対して、解析値は 0.5mm を超える付近で変位が急増し始め、試験値と乖離が生じている。これは、解析では施工時においてらせん状の羽根が地盤に貫入するときのくさび効果を考慮していないためであると考えられる。ただし、最大値については試験値と解析値は同じ程度の軸力となっている。なお、解析時に、杭頭変位が約 2.4mm に達した時点で羽根部横付近の要素に引張が発生しており、以降の値については参考とし、この時の軸力を最大値とした。

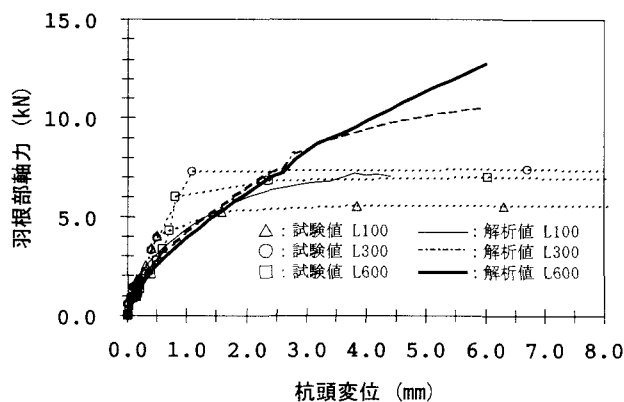


図-14 羽根部軸力～杭頭変位関係

図-15 に羽根部の引抜き支持力（軸力）と根入れ深さの関係を示す。解析値は試験値とほぼ一致し、根入れ深さが 300mm、600mm と深くなっても羽根部の軸力が増加せず、一定値に近づいており、解析により羽根部の引抜き支持力を精度良く推定できている。

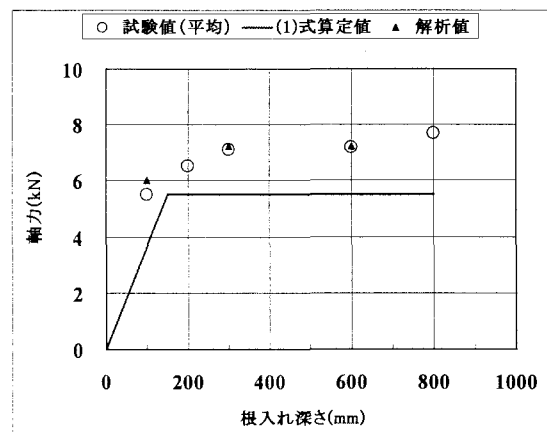


図-15 羽根部断面軸力の試験値と解析値の比較

5. まとめ

本研究により得られた成果は以下の通りである。

- ①回転圧入鋼管杭の模型試験の結果、羽根部の引抜き支持力は支持層への根入れを深くすると増加するが、ある程度以上深くなると一定値に近づくことを確認した。
- ②回転圧入鋼管杭の模型試験結果より、既往の研究において提案した引抜き支持力を算定する際の支持層への根入れ深さの上限値は妥当であることを確認した。
- ③subloading tij model を構成モデルとした有限要素法解析により、回転圧入鋼管杭の荷重～変位関係、羽根部の引抜き支持力を概ね再現できることが分かった。ただし、羽根部の初期剛性については試験値と若干差違が認められる。これは、解析では施工時に羽根が地盤に貫入するときのくさび効果を考慮していないためと考えられる。

謝辞

本研究における有限要素法解析の実施にあたって名古屋工業大学教授、中井照夫博士から有益なご指導を賜りました。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 坂本洋：回転圧入鋼管杭の実規模原位置試験，電力土木，No. 293，2001.5.
- 2) (財)国土技術研究センター：NSエコパイル工法（回転圧入鋼管杭工法），2004.1.
- 3) Meyerhof, G. G. and Adams, J. I.: The ultimate uplift capacity of foundations. Canadian Geotechnical Journal, 1968.
- 4) Meyerhof, G. G.: Uplift resistance of the inclined anchor and piles. Proceedings of the 8th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineer, 1973.
- 5) Nakai, T. and Hinokio, M.: A simple elastoplastic model for normally and over consolidated soils with unified material parameter. Soils and Foundations, Vol. 44, No. 2, 53-70, 2004.
- 6) Nakai, T.: Finite element computations for active and passive earth pressure problems of retaining wall. Soils and Foundations, Vol. 25, No.3, 98-112, 1985.

(2004 年 9 月 17 日受付)