

回転貫入杭の鉛直交番載荷に対する引抜き抵抗に関する実験的研究

—初期荷重の影響について—

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE PULLING RESISTANCE OF THE SCREWED STEEL PILE TO THE STATIC AXIAL RECIPROCAL LOAD —ON THE EFFECT OF THE INITIAL LOAD—

和田 昇三*, 平石 雅一**, 梅田 雅芳***

Shozo WADA, Masakazu HIRAIISHI and Masayoshi UMEDA

This study is designed to examine the effect of the initial load on the reciprocal load by conducting various static axial reciprocal load tests of the screwed steel pipe pile with a pile head load applied to it and obtain basic data for use in the verification of the validity of the short-term allowable bearing capacity formula which was determined in the monotonous load test. The results obtained from this study are as follows. ①The smaller is the value of the initial load, the larger is the value of the second limit resistance in the pulling direction of the ground. ②The second limit resistance in the pulling direction measured in the reciprocal load test is lower than the value measured in the monotonous load test for each test specimen.

Keywords : *Screwed Steel Pile, Static Axial Reciprocal Load Test, Pull-out resistance, Initial Load, Model tests*

回転貫入杭, 鉛直交番載荷, 引抜き抵抗力, 初期荷重, 模型実験

1. はじめに

先端に拡翼部のある回転貫入杭は、地震時の杭の引抜きに対して、大きな引抜き抵抗力を発揮するといわれている。杭の引抜きに対する地盤の引き抜き方向の許容支持力について、現在、実大の単調引き抜き試験を行い国指定性能評価機関により認定された場合は、杭独自の地盤の許容支持力式により設計することが可能となっている。

上述の実大実験により得られる引抜き方向の短期許容支持力は、杭頭荷重をゼロとして単調引き抜き試験を行った場合の値を採用している。しかし実際の杭は、杭頭に常時荷重を有し、また地震時に繰り返し荷重を受けるため、単調引き抜き試験による許容支持力式の評価が妥当であるかどうか、検討の余地を残している。

繰り返し荷重による回転貫入杭の引抜き抵抗に関する代表的な実験には、小松ら¹⁾、時松ら^{2), 3)}の研究がある。小松らは、実大の回転貫入杭に対して鉛直交番載荷実験を実施し、交番載荷の場合は大変位領域において周面摩擦の低下が著しく、この傾向は単調引き抜き試験とは大きく異なることを指摘した。当実験は初期荷重を載荷した後鉛直交番載荷実験を行っており、回転貫入杭の引抜き抵抗に対して多くの知見を与えている。しかし、実験が交番載荷の一例であり初期荷重が押込み時最大荷重の14%と小さいこと、また同一地盤において引抜き方向の単調載荷試験が行われていない。そのため、単調引き抜き載荷試験により定められた地震時の許容支持力式の妥当

性に言及することは難しいと思われる。

時松ら²⁾は遠心重力場において、直杭と羽根付き杭（羽根径が本体径の1.5倍）を対象に単調押込み引抜き試験と鉛直交番試験を変位制御にて実施し、繰り返し載荷時の周面摩擦と羽根部抵抗力の発生機構について明らかにしている。同様に文献³⁾では、羽根径を本体径の2倍とし繰り返し載荷時の引抜き抵抗に対する羽根径の影響について検証を行っている。時松らの実験は繰り返し載荷に対する羽根付き杭の引抜き抵抗に関して多くの知見を与えているが、杭の設置方法が実施工とは異なること、杭支持地盤と杭周部の地盤が同一であること、常時の杭頭荷重を考慮していないこと等の問題を有している。

以上より、初期荷重を有する回転貫入杭の鉛直交番載荷試験例は少なく、地盤の短期許容支持力式の妥当性を検証するための資料はほとんど無いと言っても過言ではない。本研究では回転貫入杭の引抜き方向の短期許容支持力式に関する基礎資料を得ることを目的として、杭頭荷重を有する回転貫入杭の鉛直交番載荷試験を同一地盤条件により種々行い、交番載荷に対する初期荷重の影響について考察を行うものである。

2. 実験概要

2. 1 杭試験体

* 足利工業大学 建築・社会基盤学系 教授・博士（工学）

** 足利工業大学 大学院工学研究科 建設・環境工学専攻 大学院生・修士（工学）

***旭化成建材

Prof., Dept. of Architecture and Civil Eng., A.I.T., Dr. Eng.
Graduate Student, Dept. of Construction and Environmental
Eng., A.I.T.
Asahi Kasei Construction Materials

杭試験体を図 1 に示す。杭本体径 (d) 27mm、杭先端部の羽根径 (Dw) 54mm、杭長 (l) 540mm であり、実大杭 (d=267mm) の 1/10 を想定している。羽根の上部にひずみゲージが 2 枚対に貼付されており、これらゲージと杭頭に取付けられるロードセルにより、杭頭荷重 P、周面摩擦 Rf、杭先端支持力 Rw が測定される。なお、杭先端支持力 Rw は羽根部支持力 Rwo と杭先端部 Rp の和としている ($R_w = R_{wo} + R_p$)。

2. 2 実験地盤および実験条件

実験状況を図 2 に示す。実験槽は、直径 1000mm (内径 976mm)、深さ 1400mm、厚さ 12mm の鋼管であり、底盤 (直径 965mm) は実験槽下部に取り付けたアングル (8 か所) に緊結されている。また、底盤と上蓋 (直径 965mm) は厚さ 12mm の円盤で鉄骨により補剛されている。また、上蓋中央部には杭を設置するための孔 (直径 100mm) が空いている。

支持地盤はサンドレイナー法により作製し (文献⁴⁾)、杭周面地盤はホッパーに取り付けた φ50mm のパイプと 5mm ピッチの金網を介して作製した。なお、実験には気乾状態の豊浦硅砂を使用した。実験槽天端まで地盤を作製した後、地盤上に上蓋を載せ、その後、杭を支持地盤に羽根上部 (羽根下端から 14mm) まで回転貫入させた (図 1b)。杭を貫入した後、杭頭と回転貫入杭装置を切り離し、杭頭荷重をゼロの状態とした。次に拘束圧を載荷した。

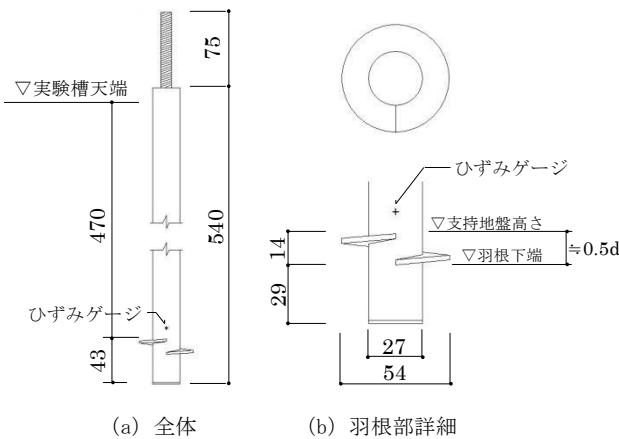


図 1 杭試験体

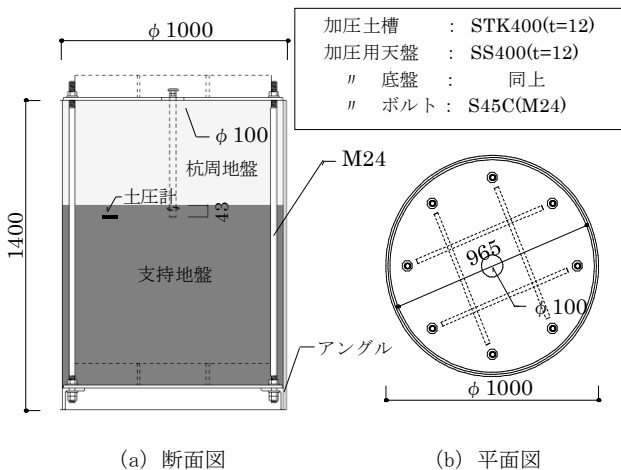


図 2 実験状況 (加圧土槽)

拘束圧の載荷は、トルクレンチにより 8 本の加圧用ボルト (M24) に均等に張力を与え、加圧土層の上盤と底盤を介して行った。単調載荷および交番載荷試験はすべて拘束圧 100kPa の条件下で行うものとし、拘束圧を測定するため杭先端と同じレベルに実験槽中心から 30cm 離れた位置に土圧計を設置した (図 2)。

拘束圧 100kPa 下における両地盤のスウェーデン式サウンディング試験結果より得られた換算 N 値を表 1 に示した。表中の深さは、実験槽天端からの距離でスクリーポイント先端の位置を示す。換算 N 値は稲田式により貫入量 10cm 毎に求めた。実験槽天端から 470mm までを杭周面地盤それ以深を支持地盤としており、地盤境界面に杭体の羽根部上面が一致するよう杭を設置した。スクリーポイント全長が 200mm であることを考えると、境界面付近の支持地盤の換算 N 値は 30 程度と推察される。

2. 3 試験体の種類および実験方法

試験体の種類を表 2 に示す。単調載荷試験は押し込み方向、引抜き方向の 2 種類、鉛直交番載荷試験は初期荷重を変えて 3 種類行った。交番載荷はサイクル数 3 回、交番載荷 1 回当たり 0.5kN ずつ押し引き方向へ増加させ、最大引抜き抵抗力を確認するまで行った (図 3)。また、いずれの試験も、拘束圧載荷直後、杭頭荷重ゼロの状態での試験を開始した。なお、交番載荷試験の初期荷重の 4kN は、単調押し込み試験結果より得られた第 2 限界抵抗力の 1/3 とした。また、初期荷重の 2kN は、長期許容支持力の 1/2 に該当し、初期荷重ゼロと 4kN の中間の荷重として設定した。

単調載荷試験は拘束圧載荷直後、杭頂部に載荷治具を取り付けスクリージャッキにより毎分約 1.8mm の速さで所定方向へ加力した。なお、載荷中の杭頭荷重は引張・圧縮型ロードセル (容量 20kN) により測定し、杭頭変位はひずみゲージ式の変位計にて測定した。また、交番載荷試験で初期荷重ゼロの場合は、拘束圧を載荷直後に

表 1 スウェーデン式サウンディング試験

深さ [cm]	18~28	28~38	38~48	48~58
N	3	3	5	19
深さ [cm]	58~68	68~78	78~88	88~98
N	26	31	33	37

表 2 試験体種類

載荷方法	載荷条件	試験体名
単調載荷	押し込み	[MC]
	引抜き	[MT]
鉛直交番載荷	初期荷重 0kN	[R・I0]
	初期荷重 2kN	[R・I2]
	初期荷重 4kN	[R・I4]

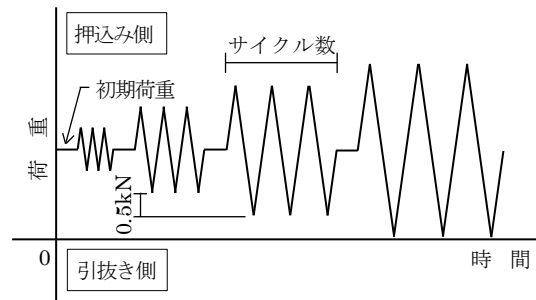


図 3 交番載荷方法

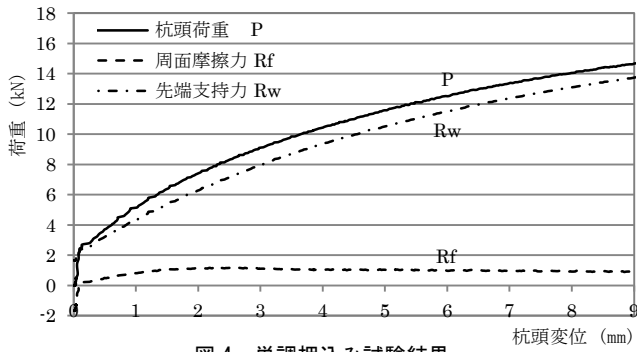


図4 単調押し込み試験結果

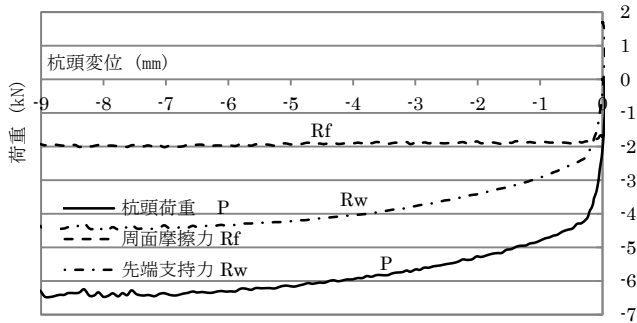
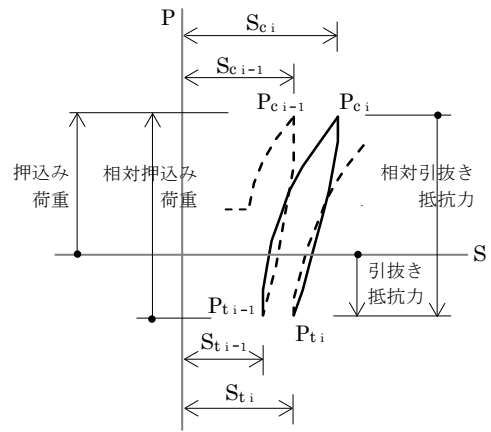


図5 単調引抜き試験結果



相対荷重	ΔP
相対押し込み荷重	$\Delta P_{c_i} = P_{c_i} - P_{c_{i-1}}$
相対引抜き抵抗力	$\Delta P_{t_i} = P_{t_i} - P_{t_{i-1}}$
相対変位	ΔS
押し込み時相対変位	$\Delta S_{c_i} = S_{c_i} - S_{c_{i-1}}$
引抜き時相対変位	$\Delta S_{t_i} = S_{t_i} - S_{t_{i-1}}$
押し込み時ばね定数	$K_{c_i} = \Delta P_{c_i} / \Delta S_{c_i}$
引抜き時ばね定数	$K_{t_i} = \Delta P_{t_i} / \Delta S_{t_i}$

図6 用語の定義

交番荷重を行った。同様に初期荷重が在る場合は、初期荷重を載荷し10分間保持した後、交番荷重を行った。交番荷重3サイクル目終了後、初期荷重に戻し2分保持した後、次のステップに移った。載荷速度は単調載荷試験と同様とした。

3. 実験結果

3.1 単調押し込み・引抜き試験

単調押し込み試験および引抜き試験結果を図4、5に示す。縦軸は杭体に作用する各荷重であり、杭頭荷重Pは下向きをプラス、周面摩擦力Rfと先端支持力Rwは上向きをプラスとした。なお、先端支持力Rwは羽根部支持力Rwoと鋼管先端支持力Rpの和としている ($Rw = Rwo + Rp$)。横軸は杭頭変位 (以下、変位という) とし、杭設置位置 (± 0) から下方をプラス上方をマイナスとした。

押し込み試験では周面摩擦力Rfは小さな値で推移しているが、これは回転貫入および拘束圧により載荷前の段階 (杭頭荷重ゼロ) で、周面摩擦力 (1.7kN) が下向きに作用しているためと考えられる。同様に杭先端には載荷前の段階で上向きの力 (1.7kN) が作用し、その分先端支持力は大きな値で推移し、第2限界荷重12.0kN (0.1Dw時=5.4mm) に対し先端支持力は11.0kNと大きな値を示した ($Rw/P = 0.92$)。

引抜き試験では周面摩擦は載荷前に下向きに1.7kN作用しており載荷に伴う増加はほとんど見られない。第2限界抵抗力6.2kN (0.1Dw時) に対する周面摩擦Rfは1.9kNであり、載荷前の段階でほぼ最大に達していることが確認された。同様に、先端支持力Rwは4.3kN (\downarrow) となり杭頭荷重に対する負担割合 ($Rw/P = 0.69$) は、押し込み時より小さいことが分かった。これらは、回転貫入の方法や拘束圧の影響により、載荷前の段階で下向きの摩擦力 (1.7kN) が作用しているためであり、これより、実験条件が杭各部の支持力

(周面摩擦、杭先端支持力) に与える影響は大きいと考えられる。

地盤の鉛直方向の短期許容支持力を第2限界荷重12.0kNの $2/3$ とし、この時の押し込み方向の杭頭の鉛直ばね定数を求めると3.4kN/mmとなった。同様の方法で引抜き方向の短期許容支持力時の鉛直ばね定数を求めると15.3kN/mmとなり、押し込み方向の鉛直ばね定数の4.5倍となることが分かった。また、押し込み方向および引抜き方向の第2限界荷重時の杭頭の鉛直ばね定数はそれぞれ、2.22kN/mm、1.15kN/mmとなり、押し込み方向のばね定数が引抜き方向の約2倍となった。

3.2 鉛直交番荷重試験

鉛直交番荷重試験結果を記すにあたり、用語・記号を図6のように定義した。図中に示した荷重(P)は杭頭に作用する荷重であり、同様に変位(S)は杭頭変位を指している。なお、3.2.2節~3.2.4節においては押し引き時共に2サイクル目の測定値 ($i=2$) をもとに検証を行っている。

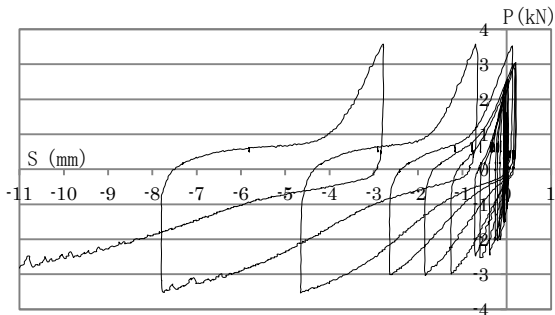
3.2.1 各試験体の終局耐力に至るまでの経緯

鉛直交番荷重 (以下、交番荷重という) により終局耐力に至るまでの杭体に作用する各荷重の推移を図7~図9に示した。図(a)~(c)の縦軸、横軸については単調載荷試験 (3.1節) と同様とした。なお、初期荷重が在る場合、杭頭変位は初期荷重載荷直前をゼロ (原位置) として測定した。

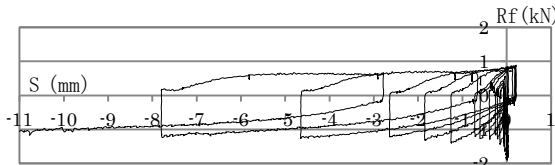
また、終局耐力に至るまでの各サイクルピーク時の杭頭変位を図(d)に示した。図中①~③は押し込み時、①'~③'は引抜き時の杭頭変位とした。なお、杭頭変位は杭設置位置 (± 0) から下方をプラス、上方をマイナスとした。

(1) 試験体 [R・I0]

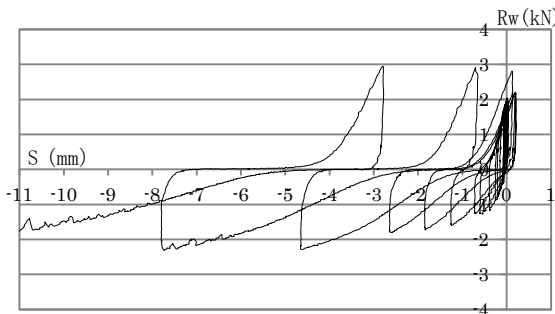
交番回数が1回 (0.5kN~-0.5kN) ~3回 (1.5kN~-1.5kN) では押し込み時と引抜き時の各サイクルの相対変位は極めて小さく、



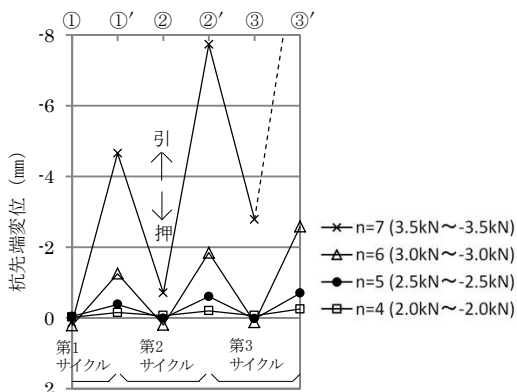
(a) 杭頭荷重 P-杭頭変位 S



(b) 周面摩擦力 Rf-杭頭変位 S



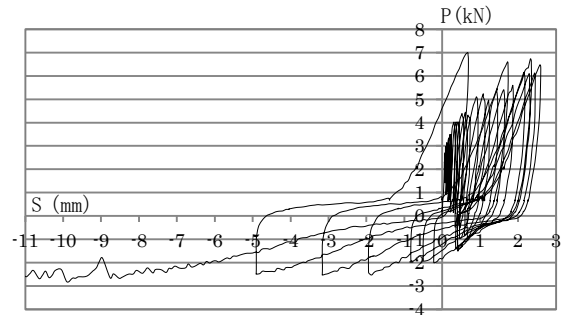
(c) 先端支持力 Rw-杭頭変位 S



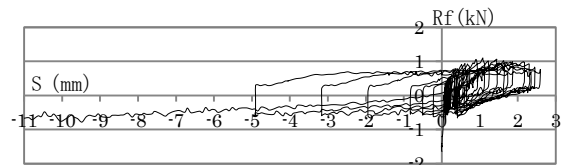
(d) 各サイクルピーク時の杭頭変位

図 7 初期荷重 0kN [R・I0]

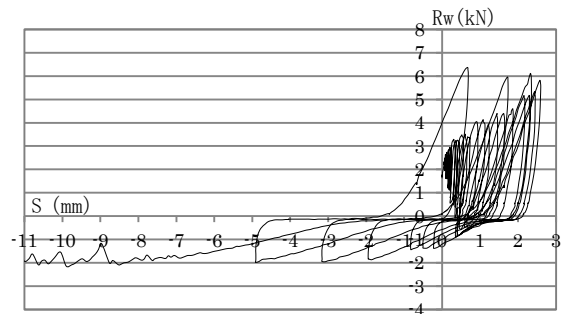
杭はほとんど変位しないことが分かった。4 回目 (2.0kN~-2.0kN) 以降、杭は上方へ変位する傾向を示した。交番 5 回目 (2.5kN~-2.5kN) では、引抜き時においてサイクルが増すごとに杭頭変位は上方へ増加する傾向を示し、同様に押し込み時は各サイクル時において原位置 (±0) に近い値を示した。これより、交番 5 回目にて羽根部周辺地盤がゆるみ始めていると推察される。6 回目 (3.0kN~-3.0kN) では押し込み時と引抜き時の相対変位はサイクル数が増えるにつれ大きく増加し、押し込み時に杭はほぼ原位置にあることが分かった。このことより、交番 6 回目において羽根部周辺地盤の崩壊はさらに進むが、砂は羽根下部に回り込んでいないと推察される。



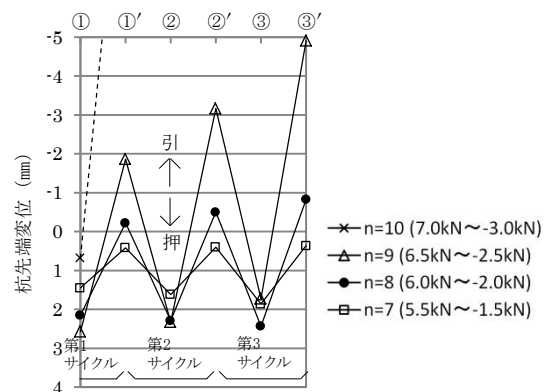
(a) 杭頭荷重 P-杭頭変位 S



(b) 周面摩擦力 Rf-杭頭変位 S



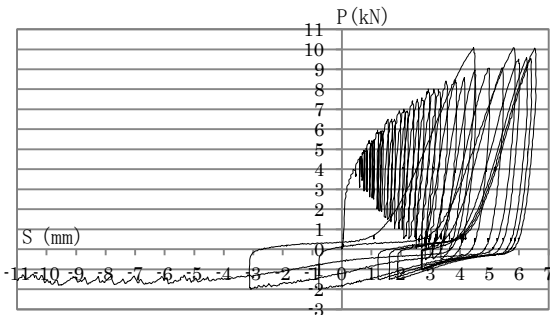
(c) 先端支持力 Rw-杭頭変位 S



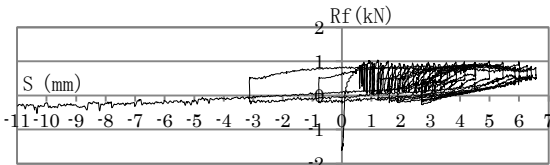
(d) 各サイクルピーク時の杭頭変位

図 8 初期荷重 2kN [R・I2]

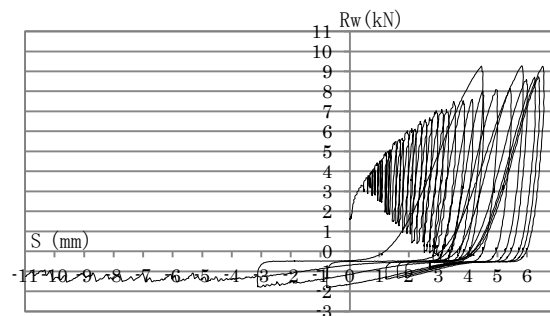
交番第 7 回 (3.5kN~-3.5kN) の 1 サイクル目押し込み時において、杭は原位置に近い位置にあり、引抜き時に杭は上方へ大きく変位した。2 サイクル目押し込み時において杭は原位置より上方に変位し 2 サイクル目引抜き時において 0.1Dw (5.4mm) に達した。これより、第 2 限界抵抗力は 3.5kN であり、この時の相対引抜き抵抗力は 7.0kN と判断される。3 サイクル目の押し込み時において杭は上方へと大きく変位し、引抜き時に変位が先行し、-3.5kN に至らず実験を終了した。これより、7 回の 1 サイクル目引抜き時において羽根部周辺の砂が羽根下部に回り込み始め、同時に羽根部周辺地盤が崩壊していると推察される。2 サイクル目の引抜き時には崩壊が



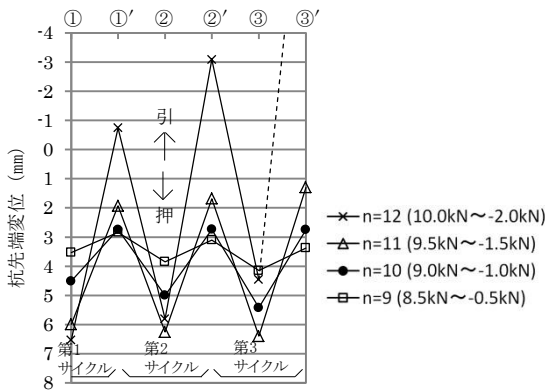
(a) 杭頭荷重 P-杭頭変位 S



(b) 周面摩擦力 Rf-杭頭変位 S



(c) 先端支持力 Rw-杭頭変位 S



(d) 各サイクルピーク時の杭頭変位

図9 初期荷重 4kN [R・I4]

顕著となり 3 回目引抜き時において終局に至ったと判断される。

以上、試験体 [R・I0] の引抜き方向の第 2 限界抵抗力は 3.5kN であり、単調荷重試験の第 2 限界抵抗力 6.2kN より小さな値となることが確認された。

(2) 試験体 [R・I2]

交番回数が小さい段階 (1 回~3 回) では押し込みと引抜き時の各サイクルの相対変位は極めて小さく、回数が増すにつれ杭は下方へ徐々に移動する傾向を示した。交番 5 回目 (4.5kN~-0.5kN) 以降は杭頭に引張り力が作用し、それ以降交番回数を重ねるごとに押し込み時と引抜き時の相対変位は徐々に増加した。交番 7 回目 (5.5kN

~-1.5kN) までは押し込み時と引抜き時共に、杭は原位置より下方にあり、各サイクルの相対変位はほぼ同じ値を示した。また 7 回目以降は、押し込み時と引抜き時の相対変位はサイクル数が増すにつれ増加する傾向を示した。その傾向は交番回数が増すにつれ顕著となった。8 回目以降は引抜き時の相対変位量が押し込み時を上回って推移する傾向を示した。同様に、交番 8 回目の押し込み時はサイクル数が増すごとに変位は下方へ若干増加するのに対し、交番 9 回目 (6.5kN~-2.5kN) の押し込み時はサイクル数が増すにつれ上方へ変位することが分かった。交番 10 回 (7.0kN~-3.0kN) の 1 サイクル目引抜き時において、変位が先行し -3.0kN に至らず実験を終了した。なお、杭は交番 10 回の 1 サイクル目の押し込み時において、9 回 3 サイクル目押し込み時よりさらに上方へ移動している。以上より、交番 7~8 回目には羽根部周辺地盤の崩壊が始まり、交番 9 回目に羽根下部に砂が回り込み、交番第 10 回には羽根周辺の地盤が崩壊し終局に至ったと考えられる。なお、交番 10 回の 1 サイクル目引抜き時において杭頭変位は 0.1Dw に達しており、これより引抜き方向の第 2 限界抵抗力は 2.5kN であり、この時の相対引抜き抵抗力は 9.0kN と判断される。

(3) 試験体 [R・I4]

交番回数が小さい段階 (第 1 回~4 回) では、各サイクルの押し込みと引抜き時変位は小さく、交番回数が増すにつれ杭は徐々に下方へ変位した。5 回 (6.5kN~-1.5kN) 以降、押し込み時と引抜き時共に交番回数が増すにつれ、杭頭の相対変位量は増加する傾向を示した。押し込み時と引抜き時の相対変位量は、交番 10 回目 (9.0kN~-1.0kN) 以降サイクル数が増すごとに増加する傾向を示し、その後交番回数が増すにつれ顕著となった。11 回目 (9.5kN~-1.5kN) 以降は、引抜き時の相対変位量が押し込み時を上回って推移する傾向を示した。また、10 回、11 回目では押し込み時においてサイクル数が増すごとに杭は下方へ変位するのに対し、交番 12 回目 (10.0kN~-2.0kN) ではサイクル数が増すにつれ杭は上方へ変位することが確認された。以上より 10 回~11 回に掛けて、徐々に羽根周辺地盤の崩壊が始まり羽根下部に砂が回り込み始めたかと推察される。最後の交番第 12 回に羽根周辺の地盤は崩壊し、終局に至ったと考えられる。なお、交番 12 回の 3 サイクル目引抜き時において杭頭変位は 0.1Dw に達しており、これより引抜き方向の第 2 限界抵抗力は 2.0kN であり、この時の相対引抜き抵抗力は 12.0kN と判断される。以上より、第 2 限界引抜き抵抗力は初期荷重が大きいほど小さく、この時の相対引抜き抵抗力は初期荷重が大きいほど大きいことが確認された。

なお、交番 10 回目の押し込み 9kN 時において変位が 0.1Dw に達しており、単調押し込み試験の 12kN を大きく下回ることが分かった。これは、交番 1 回当たり 3 回の繰り返し荷重により押し込み方向の変位が累加されるため、その結果交番荷重の方が単調荷重よりも同一変位に対する杭頭荷重が小さくなると考えられる。

3. 2. 2 杭頭変位の累計値の推移

交番荷重に伴う杭頭変位の累計値の推移を図 10 に示した。交番 1 回当たりの杭頭総変位量は、押し引き 3 サイクルの杭頭変位の総和とし、2 サイクル目の押し引き時の相対変位の絶対値を 3 倍して算定した。各交番 (n) の累計値は 3 サイクル目終了時までの総和としたが、最終交番時の累計値は、引抜き時の第 2 限界抵抗力に達した時点 (原位置より上方へ 0.1Dw) までの値とした。なお、試験体

[R・I2]、[R・I4]については、初期荷重載荷時の変位量を累計値に加算した。

交番初期 (n=1~4) では杭頭変位量の累計値 (以下、累計値という) は初期荷重が大きいほど大きくなる傾向を示した。これは、交番載荷開始時において初期荷重が大きいほど杭先端の支持力地盤の変形係数が小さくなるためと推察される。同様に、交番1回当たりの押し引き側の増加荷重が0.5kNに対し、初期荷重が2kN [R・I2]、4kN [R・I4]) と大きいこともその一因と考えられる。また、引抜き時の第2限界抵抗力に達するまでの各試験体累計値は25mm (R・I0)、66mm (R・I2)、104mm (R・I4) となり、初期荷重ゼロに対し、2kNの場合が2.6倍、4kNの場合が4.2倍の値を示した。これは、[R・I0]の場合は交番載荷中ほぼ原位置より上方で変位し少ない交番回数で第2限界抵抗力に達するのに対し (図7)、初期荷重が在る場合は交番載荷の後半から上方へ変位し0.1Dwに達するまで多くの交番回数を要するためと推察される。ことに試験体 [R・I4] の場合は、交番11回目まで原位置より下方で変位しているため顕著な値となっている (図9)。また、[R・I4] は最終交番12回目の1サイクル目引抜き時に、杭ははじめて原位置より上方に変位した後、3サイクル目に0.1Dwに達している。これより初期荷重が大きい場合、杭が原位置より上方に変位してから第2限界抵抗力に達するまでの時間が短いことが分かった。また、初期荷重2kNの場合は、交番7回目まで原位置より下方で変位し、7回以降引抜き時に上方へと変位しており (図8)、初期荷重ゼロと4kNの場合の中間的な挙動を示すことが分かった。

3. 2. 3 杭頭の鉛直ばね定数の推移

各試験体の交番回数 (n) に対する杭頭の押し込みおよび引抜き方向の鉛直ばね定数の推移を図11 (a), (b) に示した。横軸は交番回数であり、押し込み時・引抜き時ともに各交番2サイクル目の荷重と変位により杭頭の鉛直ばね定数 (以下、ばね定数という) を求めた。ただし、最終交番の引抜き時は、引抜き開始から第2限界抵抗力に達した時点 (原位置より上方へ0.1Dw) までのばね定数と、杭頭荷重ゼロ時~同0.1Dw時までのばね定数 (*印) を2種類示した。また、図中に単調載荷試験により求めた引抜き方向の短期許容支持力時のばね定数 (15.3kN/mm) および第2限界抵抗力時のばね定数 (1.15kN/mm) を示した。

各試験体の押し引き方向のばね定数は、交番回数の増加に伴い初期荷重が大きいほどゆるやかに減少する傾向を示した。また、初期荷重ゼロの場合は押し込み方向のばね定数が引抜き方向を上回る傾向を示した。同様に初期荷重が在る場合は、当初は引抜き方向のばね定数が上回って推移し、杭頭に引張り荷重が作用し始めると押し引きのばね定数は近い値となり、さらに引張り荷重が大きくなるにつれ押し込み方向のばね定数が引抜き方向を上回ることが分かった。

また、初期荷重が小さいほど引抜き方向の短期許容支持力時のばね定数に少ない交番回数で到達することが確認された。また、最終交番の引抜き開始~0.1Dw時のばね定数は、いずれの試験体も単調載荷試験の値 (1.15kN/mm) に近い値を示すことが確認された。同様に杭頭に引張り荷重が作用 (P<0) してから第2限界抵抗力に達するまでのばね定数は、初期荷重が大きいほど小さな値となり、単調載荷試験の値を大きく下回ることが分かった。

なお、交番回数の小さい段階では (1回~3回)、40kN/mm~600

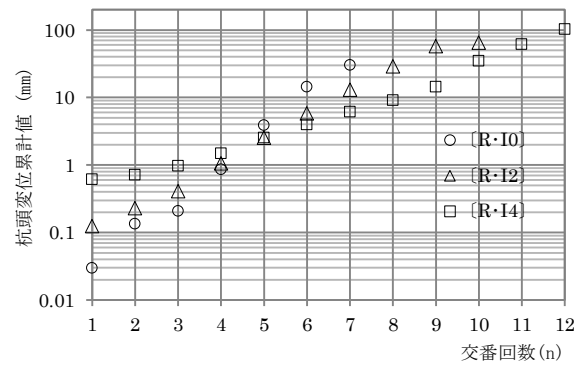
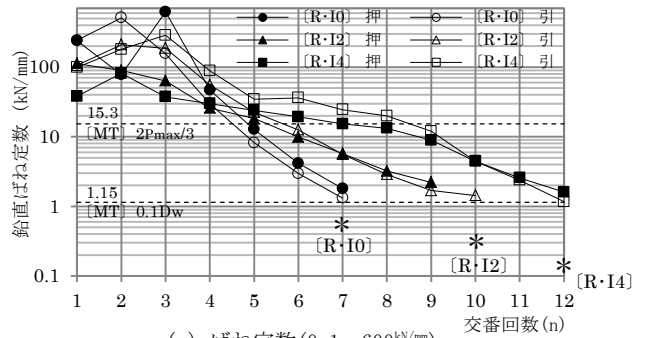
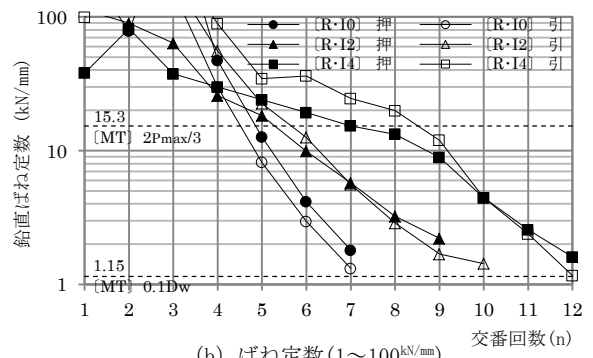


図10 杭頭変位累計値の推移



(a) ばね定数 (0.1~600kN/mm)



(b) ばね定数 (1~100kN/mm)

図11 杭頭の鉛直ばね定数の推移

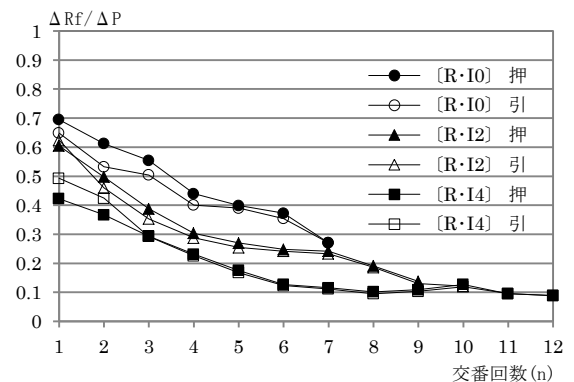


図12 ΔRf/ΔPの推移

kN/mm とばね定数のばらつきが大きい。この理由として、交番荷重が小さく相対変位が極めて小さいため、計測装置の測定精度が追い付いていかないことがその一因として考えられる。したがって、交番初期のばね定数について厳密に論ずることは困難であるが、交

番初期においてばね定数は極めて大きな値になることが確認された。

3. 2. 4 $\Delta Rf/\Delta P$ の推移

各試験体の押し引き時の相対荷重 (ΔP) に対する周面摩擦力 (ΔRf) の比率 ($\Delta Rf/\Delta P$) の推移を図 12 に示した。 ΔRf は、押し込み時は周面摩擦の上向き方向への増加量、引抜き時は下向き方向への減少量とした。横軸は交番回数 (n) であり、 $\Delta Rf/\Delta P$ は各交番 2 サイクル目の値により求めた。また、最終交番の引抜き時においては、引抜き開始～原位置より上方に 0.1Dw 間の値とした。

いずれの試験体も押し引き時において $\Delta Rf/\Delta P$ は交番回数が増すにつれ減少する傾向を示した。これは、交番回数が増すにつれ杭頭荷重 (ΔP) が増加するのに対し、周面摩擦力 (ΔRf) はほぼ一定の値で推移するためと推察される。同様に、試験体中初期荷重 4kN が最も小さな値で推移し、初期荷重ゼロの場合が最も大きな値で推移した。これは以下の理由によると考えられる。初期荷重 4kN の場合、交番載荷前の初期荷重載荷時において、杭体の変位と周面摩擦は試験体中最も大きく、周面摩擦力は押し込み時ピーク値にほぼ達している。したがって交番初期の押し引抜き時の ΔRf は試験体中最も小さい。また、杭頭に引張り荷重 ($P<0$) が作用するまで最も多くの交番回数を要し、また引張り荷重作用後も Rf (\downarrow) は試験体中最も小さい。このため押し引き時の ΔRf は試験体中最も小さな値で推移すると推察される。一方、初期荷重ゼロの場合、周面摩擦力は載荷開始と同時に押し込み時 (\uparrow)、引抜き時 (\downarrow) 共に大きく増加する。ことに各交番引抜き時の周面摩擦力 (\downarrow) は試験体中最も大きく、その分 ΔRf は試験体中最も大きな値で推移すると推察される。

各試験体の交番最終回の引抜き時の $\Delta Rf/\Delta P$ は、0.27 [$R \cdot I0$]、0.12 [$R \cdot I2$]、0.09 [$R \cdot I4$] となり初期荷重が大きいほど小さな値を示した。また、引抜き方向の単調載荷試験による第 2 限界抵抗力 (6.2kN) に対する周面摩擦力 (1.9kN) の割合は 0.31 であり、交番載荷のいずれの試験体より大きな値となった。これより最終交番の引抜き開始～0.1Dw 時の $\Delta Rf/\Delta P$ は、いずれの試験体も引抜き方向の単調載荷試験の値より小さくなることが確認された。

4. まとめ

本研究は回転貫入杭の引抜き方向の短期許容支持力式に関する基礎資料を得ることを目的として、杭頭荷重を有する(初期荷重ゼロ、2kN、4kN の 3 種類) 回転貫入杭を対象にして鉛直交番載荷試験を行ったものである。これにより交番載荷時の回転貫入杭の引抜き抵抗に対する初期荷重の影響について明らかにすることができた。本実験で得られた主な項目は以下のとおりである。

【単調載荷試験】

- ①単調載荷試験による第 2 限界抵抗力 (0.1Dw 時) は、押し込み時が引抜き時の約 2 倍を示す。
- ②地盤の短期許容支持力時の鉛直バネ定数は、引抜き時が押し込み時の 4.5 倍を示す。

【鉛直交番載荷試験】

- ③いずれの試験体も以下のような経緯で終局に至る。
 - i) 交番載荷数の増加に伴い、押し込み時と引抜き時の相対変位は徐々に増加する。
 - ii) さらに交番回数が増えると引抜き時の相対変位が押し込み時を

上回るようになり、羽根部の周辺地盤の崩壊が始まる。この時、押し込み時において、杭はサイクル数の増加に伴い、ほぼ同位置にあるか又は下方へ変位する。

- iii) 最終交番に近づくと、羽根部の周辺地盤の崩壊が進み、引抜き時に羽根下部に砂が回り込み始める。この時、押し込み時において杭はサイクル数の増加に伴い上方へ変位する。さらに繰り返すことにより羽根部周辺の地盤が崩壊し、引抜き時杭は上方へ変位し続け終局に至る。

- ④交番載荷による引抜き方向の第 2 限界抵抗力は、初期荷重が小さいほど大きい。また、いずれの値も引抜き方向の単調載荷試験の第 2 限界抵抗力より小さい。

- ⑤引抜き方向の第 2 限界抵抗力時 (上記④) の相対引抜き抵抗力は初期荷重が大きいほど大きい。

- ⑥引抜き方向の第 2 限界抵抗力に達するまでの杭頭変位の累計値は初期荷重が大きいほど大きい。

- ⑦各試験体の最終交番の [引抜き開始～0.1Dw 時] のばね定数は、引抜き方向単調載荷の第 2 限界荷重時のばね定数に近い値を示す。

- ⑧杭頭に引張り荷重が作用 ($P<0$) してから第 2 限界抵抗力に達するまでのばね定数は、初期荷重が大きいほど小さな値となり、単調載荷試験の値を大きく下回る

- ⑨いずれの試験体も押し引き時において $\Delta Rf/\Delta P$ は交番回数が増すにつれ減少する傾向を示す。同様に初期荷重が大きいほど小さな値で推移する。

- ⑩各試験体の最終交番の [引抜き開始～0.1Dw 時] の $\Delta Rf/\Delta P$ は、いずれの試験体も引抜き方向の単調載荷試験の値より小さい。

おわりに

本実験は回転貫入杭を対象に乾燥砂地盤を用い重力場において模型実験を行ったものであり、また限られた条件の中で行われているが、本研究により多くの知見が得られたものと考えている。今後、今回得られた結果をもとに同様の実大実験を実施し、回転貫入杭の引抜き方向の地盤の短期許容支持力式の妥当性を検証していきたいと考えている。

参考文献

- 1) 小松章、青木一二三、棚村史郎、西岡英俊、平島裕：回転貫入鋼管杭の鉛直交番載荷試験 (その 1)、(その 2)、第 38 回地盤工学研究発表会講演集、pp1487-1490、2003.7
- 2) 時松孝次、稲村溪、鈴木比呂子、和田昌敏、眞野英之：正負交番鉛直荷重が直杭および羽根付杭の鉛直支持力・引抜き抵抗力に与える影響、日本建築学会構造系論文集、Vol.77、No.681、pp1683-1689、2012.11
- 3) 卜部光平、鈴木比呂子、時松孝次、浅香美治：正負交番鉛直荷重を受ける羽根付杭の引抜き抵抗力に関する実験的検討、第 48 回地盤工学研究発表会講演集、pp1301-1302、2013.7
- 4) 和田昇三、及川裕章、国府田誠、佐藤秀人、田村昌人：地表面に等分布荷重を載荷した場合の L 型擁壁およびもたれ式擁壁の構造性能に関する実験的研究、日本建築学会構造系論文集、No.548、pp73-80、2001.10

AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE PULLING RESISTANCE OF THE
SCREWED STEEL PILE TO THE STATIC AXIAL RECIPROCAL LOAD
— ON THE EFFECT OF THE INITIAL LOAD —

Shozo WADA, Masakazu HIRAISHI and Masayoshi UMEDA

* Prof., Dept. of Architecture and Civil Eng., A.I.T., Dr. Eng.

** Graduate Student, Dept. of Construction and Environmental Eng., A.I.T.

*** Asahi Kasei Construction Materials

In this study, static axial reciprocal load tests were conducted of the screwed steel pipe pile with a pile head load applied to it (values of initial load: 0, 2kN, 4kN) to obtain basic data concerning the short-term allowable bearing capacity formula in the pulling direction. As a result, it was possible to clarify the effect of the initial load on the pulling resistance of the screwed steel pipe pile during reciprocal loading. The key results obtained from this study are as stated below.

[Monotonous Load Test]

- ① In the monotonous load test, the value of the second limit resistance (at $0.1D_w$) measured at the time of compressive loading of the pile is twice as large as its value measured at the time of tensile loading of the pile.
- ② The value of the vertical spring constant for the short-term allowable bearing capacity of the ground at the time of tensile loading of the pile is 4.5 times as large as its value measured at the time of compressive loading of the pile.

[Static Axial Reciprocal Load Test]

- ③ Each test specimen reaches the final state in the following sequence of events.
 - i) As the frequency of reciprocal loading increases, the value of relative displacement increases gradually both at the time of tensile loading of the pile and at the time of compressive loading of the pile
 - ii) As the frequency of reciprocal loading increases further, the value of relative displacement at the time of tensile loading of the pile begins to exceed its value measured at the time of compressive loading of the pile, causing the ground around the blade to start to collapse. At this stage, the pile remains in the same place or is displaced downward at the time of compressive loading due to the increase in the frequency of reciprocal loading.
 - iii) When reciprocal loading comes close to the final stage, the ground around the blade collapses further and the sand around the blade starts to wrap around the lower part of the blade. At this stage, the pile is displaced upward at the time of compressive loading due to the increase in the frequency of reciprocal loading. When repeated reciprocal loading is continued, the ground around the lower part of the pile collapses and the pile continues to be displaced upward at the time of tensile loading and reciprocal loading reaches the final stage.
 - ④ The smaller is the value of the initial load, the larger is the value of the second limit resistance in the pulling direction of the ground.
 - ⑤ For each test specimen, the value of the second limit resistance in the pulling direction which was measured in the reciprocal load test is smaller than its value measured in the monotonous load test.
-