

回転圧入鋼管杭の引抜き抵抗の研究

A Study of Uplift Resistance of Screwed Steel Pile

永 田 誠^{*(1)}
Makoto NAGATA

平 田 尚^{*(2)}
Hisashi HIRATA

抄 録

回転圧入鋼管杭は、杭先端に付いた羽根のアンカー効果により大きな先端引抜き抵抗を發揮する。まず専用の模型杭試験装置を用いた縮小模型杭の引抜き試験を行い、杭径、羽根径、先端深度と先端引抜き抵抗の関係を明らかにした。次に模型杭による可視化試験と土圧測定試験によって施工時及び引抜き試験時の杭先端付近の土砂の動きと土圧変化特性を明らかにした。更にこれらの結果を総合的に判断することで、先端引抜き抵抗を發揮する際の土砂のせん断破壊面形状についての推測を行った。

Abstract

Screwed steel pile with wing anchor effect exercise huge uplift resistance. We used model test system carried out uplift test and disclosed relationships between pile diameter, wing diameter, pile toe depth and uplift resistance. After that disclosed movement of sand near pile toe under construction through visible test and measurement of earth presser test. At last put together the above test results, consider uplift resistance mechanism.

1. はじめに

回転圧入鋼管杭(以下、回転杭)は、鋼管先端に地盤中を掘削推進するための螺旋状の羽根を設けた杭であり(図1参照)、杭体に回転力を付与することによって、無排土で地盤に貫入できる杭工法である。地盤中に貫入した先端の羽根がアンカー効果を發揮することにより、回転杭は大きな先端引抜き抵抗を有することが実大杭の載荷試験でも明らかになっている^{1,2)}。しかし回転杭の先端引抜き抵抗についての研究はまだ少なく、その性状については不明な部分も多い。本報では専用の模型杭試験装置³⁾を用いた縮小模型杭の引抜き試験(以下、引抜き試験)による先端引抜き抵抗特性の分析を報告する。更に砂の移動によりせん断破壊面の発生範囲を調べるとともに(以下、可視化試験)、回転杭の貫入時、引抜き試験時の先端土圧を測定(以下、土圧測定試験)することにより、せん断破壊面に作用する土圧の大きさや土圧分布形状についての検討を行う。

2. 引抜き試験

2.1 試験装置概要

試験要領は既報³⁾と同様に、(A)加圧装置を備えた直径1200mm×高さ1200mmの砂地盤タンク(6号珪砂、相対密度84%)、(B)杭頭に回転力及び鉛直荷重を付与できる施工・載荷試験装置、(C)二重管式の模型杭、(D)リアルタイムにトルク、軸力を表示できる計測装置を用いて、それぞれ設定した深度まで杭の回転圧入施工試験を行い、その後続けて載荷試験(引抜き試験)を実施した。

2.2 試験パラメータ

先端引抜き抵抗力と先端深度の関係を検討するために、杭先端深度を100mm～800mmで変化させた。また同一杭径における羽根径比Rdの影響を調べるために、杭径(Dp)40mmで1.5倍径～3.0倍径の試験体を準備した。さらに同一羽根径における羽根径比の影響を調べるために、羽根径(Dw)100mmで杭径を40mm、50mm、60mmとした試験体を準備した。試験パラメータをまとめると表1のようになる。なお、土層の拘束圧は上載圧を300kPa、側圧を150kPaで共通とした。また、貫入施工時の杭頭上載荷重(貫入時に作用させる杭頭軸力)は1kNで共通とした。

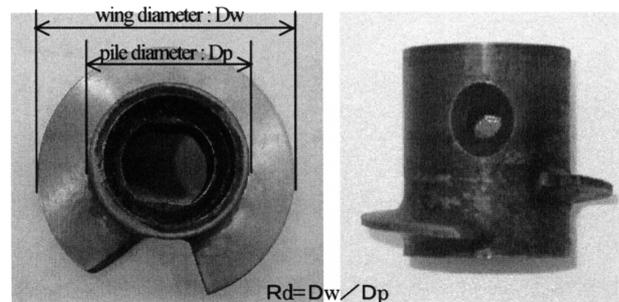


図1 先端羽根部
Pile toe

^{*(1)} 建築事業部 建築鋼構造部 マネジャー

^{*(2)} 鉄鋼研究所 鋼構造研究開発センター 主任研究員

表 1 試験パラメータ
Test parameter

Test case No.	Test name	Dp (mm)	Rd	Dw (mm)	Pile toe depth (mm)	Confining pressure		Pile top load (kN)
						Axial (kPa)	Lateral (kPa)	
1	4D15W3P10L3S10H	40	1.5	60	100	300	150	1
2	4D15W3P10L3S30H	40	1.5	60	300	300	150	1
3	4D15W3P10L3S60H	40	1.5	60	600	300	150	1
4	4D15W3P10L3S80H	40	1.5	60	800	300	150	1
5	4D175W3P10L3S10H	40	1.75	70	100	300	150	1
6	4D175W3P10L3S30H	40	1.75	70	300	300	150	1
7	4D175W3P10L3S60H	40	1.75	70	600	300	150	1
8	4D175W3P10L3S80H	40	1.75	70	800	300	150	1
9	4D20W3P10L3S10H	40	2.0	80	100	300	150	1
10	4D20W3P10L3S30H	40	2.0	80	300	300	150	1
11	4D20W3P10L3S60H	40	2.0	80	600	300	150	1
12	4D20W3P10L3S80H	40	2.0	80	800	300	150	1
13	4D25W3P10L3S10H	40	2.5	100	100	300	150	1
14	4D25W3P10L3S30H	40	2.5	100	300	300	150	1
15	4D25W3P10L3S60H	40	2.5	100	600	300	150	1
16	4D25W3P10L3S80H	40	2.5	100	800	300	150	1
17	4D30W3P10L3S10H	40	3.0	120	100	300	150	1
18	4D30W3P10L3S30H	40	3.0	120	300	300	150	1
19	4D30W3P10L3S60H	40	3.0	120	600	300	150	1
20	4D30W3P10L3S80H	40	3.0	120	800	300	150	1
21	5D20W3P10L3S60H	50	2.0	100	600	300	150	1
22	6D167W3P10L3S60H	60	1.67	100	600	300	150	1

3. 引抜き試験結果

3.1 試験結果概要

試験結果の代表例を図2に示す。これは試験ケースNo.11(杭径40mm, 羽根径80mm, 先端深度600mm)の例である。ここで, 杭頭軸力: 載荷軸力, 先端抵抗力: 二重管直下で計測した軸力値, 周面抵抗力: 二重管上端で計測した値である。また変位量は杭頭で計測している。

これより, 先端抵抗力は変位量が14mm(0.35Dp)程度で最大値を示し, その後減少して約65%程度の残留抵抗力を保持していることが分かる。周面抵抗力については変位量6mm程度が最大値となり, その後減少して75%程度の残留抵抗力を保持している。この傾向は全ての試験結果にほぼ共通するものであった。

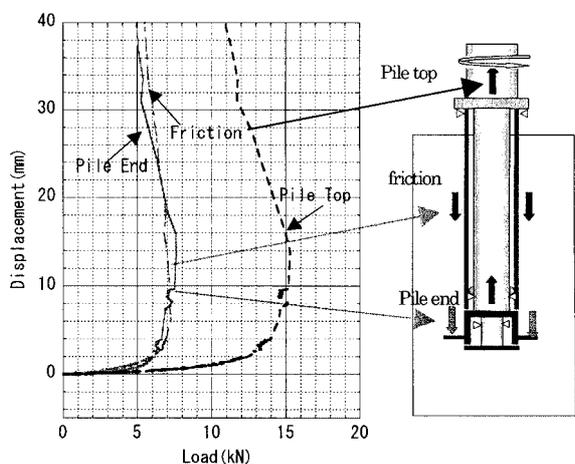


図2 引抜き試験の荷重 - 変位関係
Relationships between load and displacement

3.2 引抜き抵抗力についての分析

図3に先端深度と先端引抜き抵抗力の関係を示す。全ての羽根径で, 貫入深度がある程度以上に深くなると, 先端引抜き抵抗力は一定値に収束する傾向がある。これは先端羽根のアンカー効果による砂地盤側の破壊面が, ある程度以上上がらないことを表していると考えられる。

次に図4に羽根径比と先端引抜き抵抗力の関係を示す。先端引抜き抵抗力は全ての先端深度において, 羽根径比にほぼ一次比例する傾向になっている。図3の結果と併せると, せん断破壊面は円筒に近い形状となっており, 根入れが深い場合には円筒の高さはある値に収束しているものと考えられる。

図5には先端抵抗力を羽根面積で割った「羽根応力」と羽根径比の関係を示す。羽根径比の小さい方が羽根応力は大きくなっており, 羽根径比の小さいものほどアンカー効果が有効に働いていることが

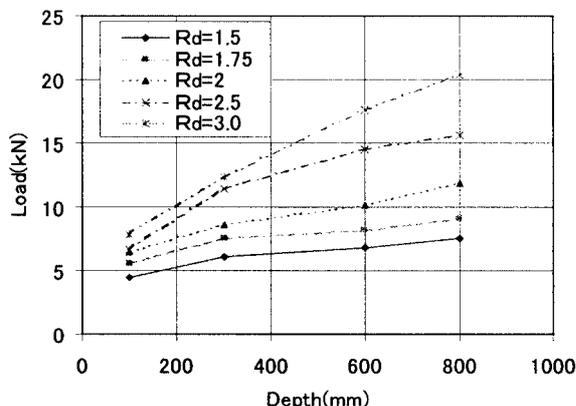


図3 深度と引抜き抵抗の関係
Relationships between depth and uplift resistance

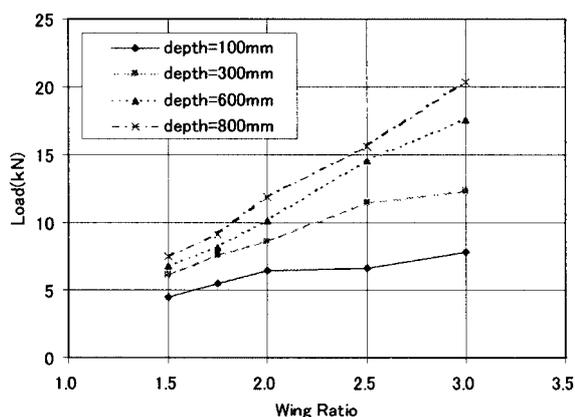


図4 羽根径比と引抜き抵抗の関係
Relationships between Rd and uplift resistance

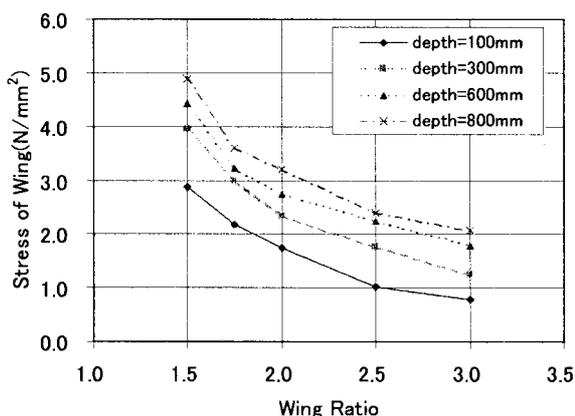


図5 羽根径比と羽根応力の関係
Relationships between Rd and stress of wing

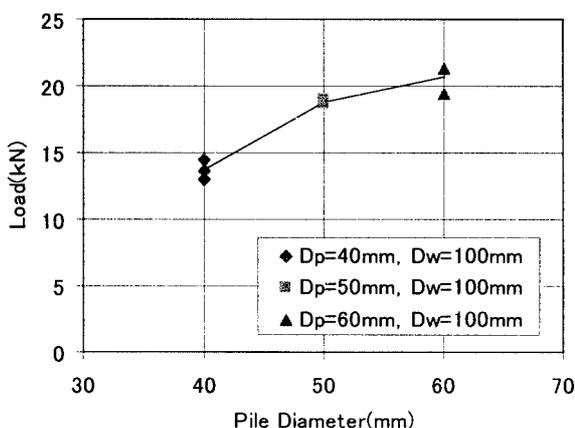


図6 杭径と引抜き抵抗の関係(同一羽根径)
Relationships between Dp and uplift resistance

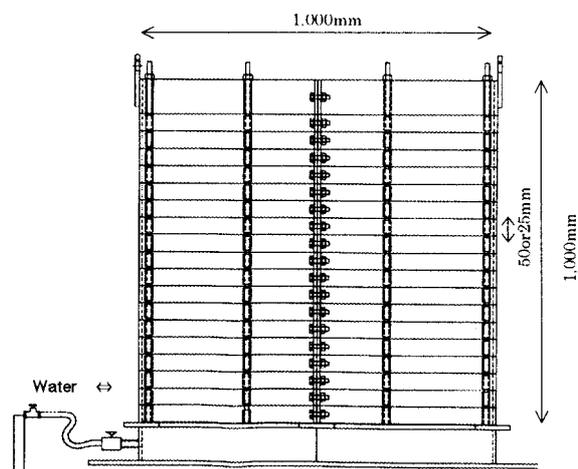


図7 可視化土層
Visible test tank

50mm間隔(一部25mm間隔)に分割できるようになっており、模型地盤作成時に層状に分割した砂層を形成できるようになっている。また縦方向には2分割できるようになっており、土槽を半割することで施工・載荷時の影響を目視できるようにした。模型砂地盤の作成における砂の投入は空中落下法で行い、土層の相対密度は約80%とした。

4.2 試験要領

試験に用いる杭種は杭径 $D_p = 40\text{mm}$ の2倍径($D_w = 80\text{mm}$)とし、施工・載荷種別は回転貫入のみ、埋込載荷(杭を先行して設置した状態で地盤を作成した杭)、回転貫入+載荷の3ケースとした。模型砂地盤に対する拘束圧は、拘束圧を作用させない場合と、上載圧のみ300kPa作用させる場合の2ケースとした。

模型砂地盤は乾燥砂の状態で作成し、土層分割毎に色砂を用いて砂の動きを観察できるようにした。施工あるいは施工+載荷を実施した後にタンク中へ給水し、十分に水を含ませてから排水を行った後、土層を縦方向に2分割して砂の動きを観察した。観察状態を写真1に示す。

4.3 可視化試験結果

試験結果を写真2~5に示す。拘束圧無しの場合(写真2,3)は先端変位1Dwまで載荷できたが、拘束圧有り(写真4,5)では先端抵抗が大きく、先端変位0.1Dw程度で試験機能力の限界により、



写真1 可視化状況
Visible condition

分かる。また図6には羽根径一定($D_w = 100\text{mm}$)で杭径が異なる場合の先端引抜き抵抗を示すが、やはり羽根径比の小さな方が先端引抜き抵抗は大きくなっている。これらより、上述した円筒破断面は外側に広がりを持つものではなく、逆に羽根の外径程度から杭径までの間の直径に収束しているのではないかと推測される。

4. 可視化試験によるせん断破壊面の検証

4.1 試験装置概要

試験装置は図7に示す通りで、直径1000mm、高さ1000mmの円筒形をしており、下端部に給排水装置を備えている。鉛直方向には

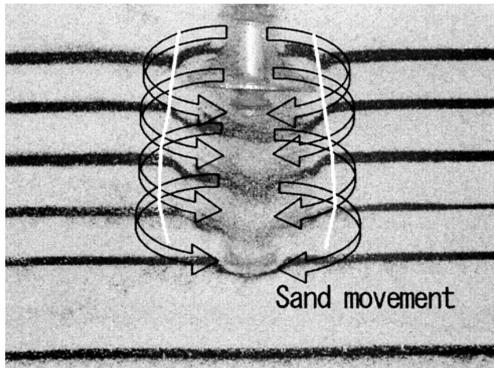


写真2 回転貫入 + 荷重試験時(拘束圧無し)
Screw-piling + uplift test (non confining presser)

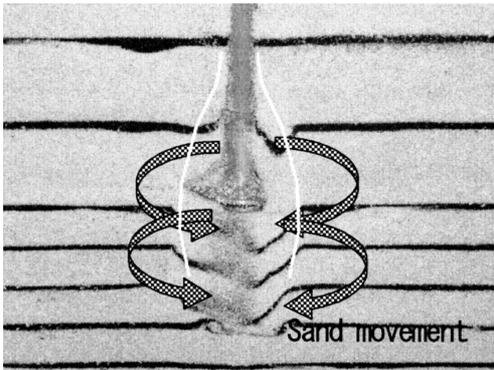


写真3 埋込荷重(拘束圧無し)
Bore + uplift test (non confining presser)

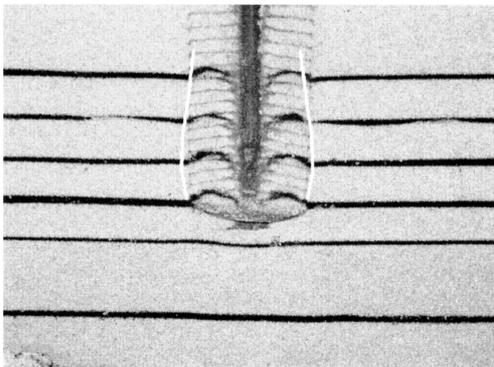


写真4 回転貫入 + 荷重試験時(拘束圧有り)
Screw-piling + uplift test (under confining presser)

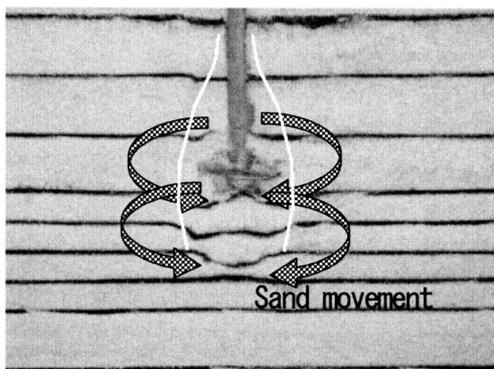


写真5 埋込荷重(拘束圧有り)
Bore + uplift test (under confining presser)

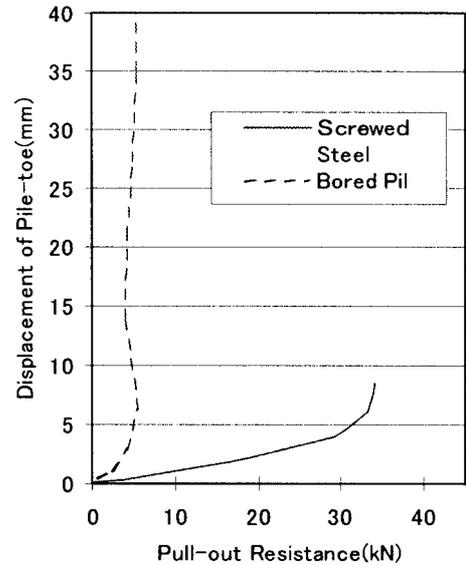


図8 引抜き抵抗比較
Uplift resistance

最大耐力は確認できなかった。写真より羽根上面に砂が変色している部分が観察されるが、この領域に先端引抜き抵抗時に主動くさびとして圧縮領域が形成された結果と考えられる。圧縮領域の形状は逆放物線状であり、羽根の付け根部分に近いほど大きな圧縮力を受けている事を表している。羽根上部地盤の破壊面としては、放物線状の地盤の移動は見られず、予想に近いほぼ円筒状に発生しているようである。

また埋込杭と回転貫入杭の引抜き抵抗比較を図8に示す。回転貫入によって引抜き抵抗が5倍程度上昇しており、羽根の推進力によって周辺地盤の締め固め効果が発揮されていると考えられる。写真からも施工時に羽根通過後の砂が1回転当たりの貫入量と同程度上方へ移動しており、羽根上面地盤を押圧することで羽根部の推進力を得ており、施工後の地盤の乱れは小さいことが観察される。

5. 土圧測定試験

5.1 測定方法と試験ケース

可視化試験で見られた施工時の羽根推進力に起因する地盤の押し上げ効果による羽根上部地盤への影響を把握し、荷重試験時にすべり破壊面に作用する土圧の分布形状及び土圧の大きさを確認するため、施工 / 荷重試験時における土圧測定を実施した。

試験は、引抜き試験と同じ加圧タンク地盤を用いて、羽根貫入位置から約20mmの位置に30mm径の土圧計を設置(図9参照)し、水平方向の土圧計測を行なった。地盤の拘束圧は上載圧を300kPa、側圧を150kPaとした。

試験ケースは、杭径一定($D_p = 40\text{mm}$)で羽根径比を1.5, 1.75, 2.0, 2.5, 3.0に変化させた場合と、羽根径一定($D_w = 100\text{mm}$)で杭径を $D_p = 40\text{mm}$, 50mm, 60mmに変化させた場合の2ケースとした。

5.2 試験結果

図9は回転貫入施工時に、杭先端が縦軸に示した位置に達した時の各土圧計の測定値を示したものである。土圧の性状としては、施工時の杭先端下方地盤の土圧は一旦減少した後、徐々に増加し、羽根が土圧計の位置を通過し少し深い位置まで貫入したときに受動土圧程度の最大値となり、その後再度低下している。最初の土圧低下

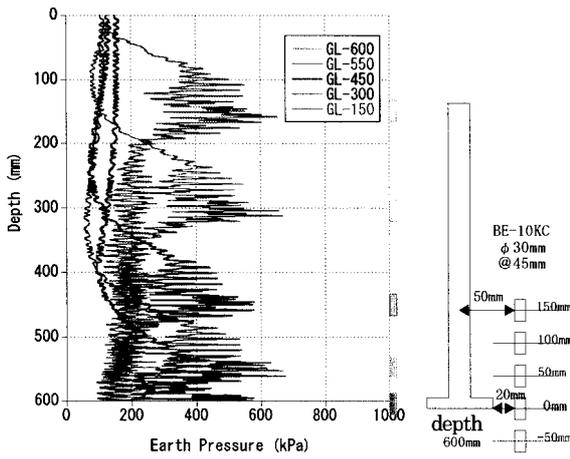


図9 施工時土圧
Earth pressure under construction

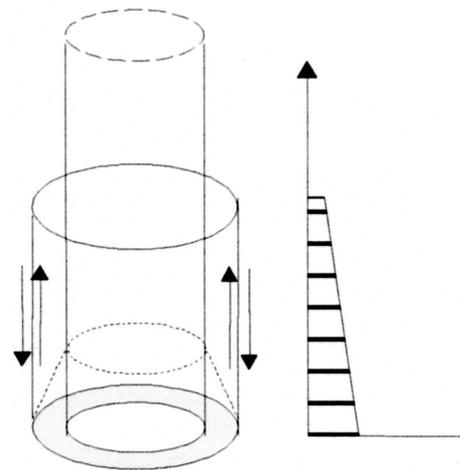


図12 先端抵抗性状
Uplift resistance mechanism

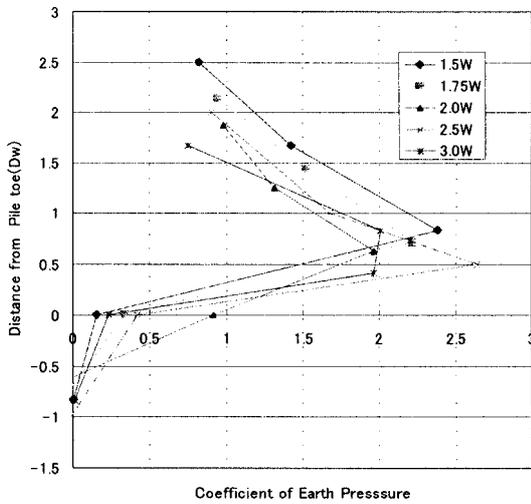


図10 土圧分布(杭径一定)
Distribution of earth pressure (Dp: constant)

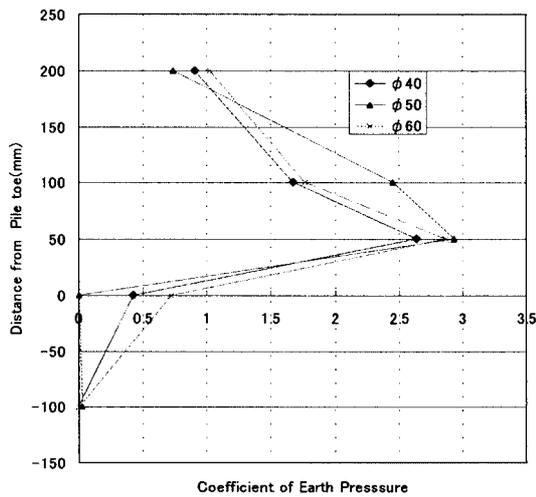


図11 土圧分布(羽根径一定)
Distribution of earth pressure (Dw: constant)

は、貫入時の羽根推進力によって上載圧が低下する効果であると考えられる。載荷試験においては、羽根下面の土圧は載荷変位に伴い急激に低下するが、羽根上面の土圧は増加傾向を示した。載荷荷重の最大時には図10, 11に示すように、全試験ケースで羽根部近傍で受働土圧程度まで増加するが、羽根上 2 Dw程度でほぼ静止土圧まで低下する台形分布の土圧が観察された。

以上の結果から、先端羽根付き杭の先端抵抗は、図12に示すようなせん断破壊面と、その面に作用するほぼ台形状の土圧によって発揮しているものと考えられる。

6. おわりに

模型杭の引抜き試験および、可視化試験、土圧測定試験を通じて、回転杭の先端引抜き抵抗力の特徴を検討し、せん断破壊面の形状についての推定を行った。その結果、せん断破壊面の形状と破壊面に作用する拘束圧の大きさと作用範囲についての推定ができた。今後はこれらの結果を実大杭の載荷試験結果に反映し、回転杭の先端引抜き抵抗力の推定、定式化を行いたい。

参考文献

- 1) 佐伯, 平田, 大杉: 羽根を有する回転圧入鋼管杭の引抜き試験 第35回地盤工学研究発表会論文概要集 2000.6 p.1803-1804
- 2) 永田, 和田, 原田, 宮本: 羽根付き鋼管杭の杭先端ひずみ測定を行った引抜き試験 (その2 試験結果). 日本建築学会大会学術講演梗概集(北陸) 2002.8 p.513-514
- 3) 佐伯, 永田, 平田, 和田: 回転圧入鋼管杭模型試験機の製作 第36回地盤工学研究発表会論文概要集 2001.7 p.1623-1624