

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：10103

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560659

研究課題名(和文) 中間層における杭の鉛直支持機構と評価法

研究課題名(英文) An evaluation method of bearing capacity of pile installed in layered sand deposits

研究代表者

土屋 勉 (TSUCHIYA, Tsutomu)

室蘭工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20163834

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：地盤構成を種々変化させた大型加圧土槽を用いて回転貫入杭の鉛直載荷実験を行い、載荷の進行に伴う杭先端面と羽根面の支持力発現状況を明らかにした。支持力発現状況の異なる杭先端面と羽根面のそれぞれについて、標準貫入試験で採用するN値の地盤範囲と支持力係数を誘導した。更に、杭の打ち止め深度の異なる原位置載荷試験を実施して、本研究で構築した新たな支持力算定式の適用性を検証した。

研究成果の概要(英文)：The author conducted vertical loading tests on a model screw pile in a calibration chamber where the different mechanism of toe resistance mobilizing at the closed end and helical screw was in focus. Layered sand deposits were prepared in two different densities concerning relative position of the pile toe and the thin layer around it. A new formula to evaluate the toe resistance of a screw pile is proposed based on the test results. The formula shows fairly good applicability to estimate the toe resistance of full-scale piles by taking different soil modulus at the closed end and helical screw.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：建築学，建築構造・材料

キーワード：杭 支持力係数 中間層 模型実験 可視化

### 1. 研究開始当初の背景

環境負荷の軽減と社会資本整備の効率化が社会的な課題となっており、建築基礎構造においても材料、掘削土量、コスト等の縮減が求められている。軟弱地盤地域に建設される建物では、地中深くに分布する砂礫層に杭支持させるのが一般的であったが、軟弱地盤に挟まれた密な砂層(中間層)を利用できる可能性もある。

現行の設計規準における杭の支持力計算は、杭先端部から下方へ杭径相当の深さまでの範囲における標準貫入試験のN値に基づいており、それ以深の地盤は考慮されない。コスト縮減を追及するあまり、この算定式を中間層に用いることは極めて危険である。中間層を正しく活用するためには、中間層の厚さや硬さ、更にそれ以深の地盤特性を考慮した新たな支持力評価法を構築することが急務と云える。

### 2. 研究の目的

これまで等閑視されてきた比較的密な中間層においては、最近急速に開発が進められている回転貫入杭が適していると著者は推察している。本研究では、大型の加圧土槽を利用して杭の施工から載荷に至る一連の過程(実現場に近い)における杭の挙動を実測して、回転貫入杭の杭先端部と羽根部の支持力機構を明らかにした後、中間層における杭の鉛直支持力評価法を構築することを目的とする。

### 3. 研究の方法

回転貫入杭の支持力機構を検討するためには、他の杭工法(圧入杭、埋込み杭)の支持力機構との相違を明らかにするため、以下のようなサブテーマを設定して研究を進めた。

#### (1) 杭近傍地盤の粒子挙動の可視化

杭種による支持力機構の相違を把握することを目的として、前面にガラス面を配した半円筒土槽を新たに製作し、種々の杭タイプの載荷中における周辺地盤の挙動をビデオ撮影した。その画像をPIV解析することで、土粒子の滑り線の進行を詳細に可視化した。

地盤は均一地盤の他に、ゆるい一般層に密な砂層が介在する中間層モデル地盤を作成した。通常円形断面の圧入杭と埋込み杭、更に杭先端面に拡底板を設けて回転貫入杭の形状を模擬したタイプの杭を対象とした。

#### (2) 押込み荷重を受ける回転貫入杭の支持力算定式の構築

当研究室に整備されている大型加圧土槽(直径2.0m、高さ2.5m)に中間層を有するモデル地盤を作成して、回転貫入杭の施工試験および載荷試験を実施した。支持層への根入れや中間層の厚さを変化させて、押込み載荷時における杭体各部(羽根、杭先端、杭周面)の抵抗力を計測した。これらの杭体各部の抵抗力と地盤構成の検討に基づいて実用的な

杭の支持力算定式を構築した。更に、実現場における回転貫入杭の載荷試験結果との比較することで、本算定式の適用性を検証した。(3) 引抜き荷重を受ける回転貫入杭の挙動の把握

押込み荷重が作用する回転貫入杭の支持力評価法の研究を引抜き荷重が作用する場合に展開することを目的として、当研究室に整備されている中型加圧土槽(直径1.0m、深さ1.2m)を利用して、回転貫入杭の施工実験と引抜き実験を実施した。施工実験では杭貫入に伴う諸数値(杭頭トルク、貫入率、施工終了時の杭体各部の残留応力)を測定し、載荷実験では杭体各部(羽根、杭先端、杭周面)の応力と周辺地盤の土圧の測定を行った。

### 4. 研究成果

#### (1) 杭近傍地盤の粒子挙動の可視化

##### 埋込み杭と圧入杭の押込み挙動

以下の4タイプの杭が押込み載荷される場合の杭近傍の粒子挙動を可視化した。

BS: 埋込み杭で杭周面が滑らか

BR: 埋込み杭で杭周面が粗(溶射加工)

PS: 圧入杭で杭周面が滑らか

PR: 圧入杭で杭周面が粗(溶射加工)

杭中心直下の粒子速度に着目すると、埋込み杭のBSとBRでは載荷初期には広範囲な粒子移動が観察されるが、載荷の進行に伴い粒子移動は杭先端近傍に限定され、高密度領域(コア)の形成が示唆された。圧入杭のPSでは施工時にコアの形成が完了しているため、載荷時の粒子移動は杭先端近傍地盤に限定される。載荷が進むにつれて埋込み杭と圧入杭の粒子速度分布は類似していることから、いずれの試験体も中間層がパンチング破壊した状況を示したと考えられる。

杭先端から上方に軸径分離した深度における杭側面から外側地盤の粒子速度分布に着目すると、埋込み杭のBSの粒子速度は杭側面の極近傍のみに生ずるが、BRでは杭側面から外側に徐々に粒子速度が減少している。溶射加工が杭周面の摩擦抵抗を増大させていることを反映したものと考えられる。圧入工法では、杭周面から外側にほぼ様な粒子速度を示している。

せん断ひずみ速度分布に着目すると、BSがBRよりも杭先端以深へのせん断力伝播が大きく、かつ集中する傾向がみられる。

##### 拡底平板付き杭の引抜き挙動

直杭の先端に軸径の2倍の拡底平板を取り付けた羽根付き杭の引抜き時の粒子挙動をPIV解析し、以下の知見を得た。

羽根付き杭の引抜き抵抗力は、最大値に達した後に急減する脆性的な荷重-変形曲線となる。この傾向は地盤の密度が高いほど顕著であるが、残留引抜き抵抗力は地盤の密度にさほど影響しない。

羽根付き杭の引抜きに伴って発生する滑り面は、羽根端部から外側上方および内側上方の2ヶ所で明確に観察され、前者は最大引

抜き荷重時、後者は残留引抜き荷重時のものと推察された。また、最大引抜き時の滑り面の角度は密度が高いほど大きいことが明らかにした。

なお、杭近傍の粒子挙動の可視化について研究報告した大学院生（研究代表者が指導）が、日本建築学会北海道支部（2012年度）および地盤工学会（2013年度）より優秀発表者賞を授与されている。

## (2) 押し込み荷重を受ける回転貫入杭の支持力算定式の構築

### 地盤のN値の評価方法

杭先端面と羽根面の支持力を分離して評価するために、採用する地盤のN値の深度をそれぞれ検討した。

杭先端面支持力に関して、平均N値の計算範囲を杭先端面から下方へ変化させて、杭先端面の支持力係数 $\alpha_b$ との相関性をみると杭先端面より杭の軸径（db）以内のN値とは全く相関が見られない。場所打ち杭では杭径程度で相関が良いとされているのに対して、回転貫入杭では施工終了時点で杭先端面直下に形成されるコアが影響したものと推察している。杭の軸径よりも深くなるにつれて相関係数が上昇して3db程度で最大となり、それ以深では徐々に相関係数が低下する結果を得た。

羽根面の支持力に関して、平均N値の計算範囲を羽根面から下方に変化させると、羽根径（dw）の2.5倍付近で高い相関となった。ただし、施工による羽根上面の締めりや載荷に伴って羽根下部の土が羽根上面に回り込む現象等も影響すると考えられる。そこで、平均N値の算定範囲を羽根面より下に2.5dwに固定して、羽根面上方へ変化させると平均N値の算定範囲が0.5dwを越えると相関性が低下した。なお、実務で通常用いられている杭先端面から上下に $\pm 1dw$ の相関係数があまり良くない結果となった。

以上の検討より、回転貫入杭の支持力算定式に用いる地盤のN値の深度として、支持力との相関性が優れている下記を提案した。

・杭先端面：杭先端面より下方へ杭軸径の3倍の範囲

・羽根面：羽根面より下方へ羽根径の2.5倍、羽根面より上方へ羽根径の0.5倍の範囲

### 誘導した支持力式

大型土槽実験で得られた回転貫入杭の極限支持力と上記で定めた平均N値の関係をプロットした。ここで、杭先端面および羽根面の支持力をそれぞれの面積で除した支持力度で表示している。杭先端面および羽根面のそれぞれについて、原点を通る最小二乗法の近似直線を求めた極限支持力の算定式を以下に示す。

・極限支持力(kN)算定式

$$R_{up} = \alpha_b \cdot N_b \cdot A_b + \alpha_w \cdot N_w \cdot A_w \quad (1)$$

ここで、 $\alpha_b = 216$ : 杭先端面の支持力係数、 $N_b$ : 杭先端面の平均N値、

$A_b$ : 杭先端面積(m<sup>2</sup>),

$N_w$ : 羽根面の平均N値、

$A_w$ : 羽根面積(m<sup>2</sup>)

杭先端面および羽根面の許容支持力の算定式は、(1)式に示す杭先端面の極限支持力 $R_{ub}$ と羽根面の極限支持力 $R_{uw}$ に、それぞれの支持力発揮率を乗じる新たな下記の方式を誘導した。

・長期許容支持力(kN)算定式

$$R_{Lp} = \alpha_{Lb} \cdot R_{ub} + \alpha_{Lw} \cdot R_{uw} \quad (2)$$

ここで、 $\alpha_{Lb} = 0.38$ ,  $\alpha_{Lw} = 0.29$

・短期許容支持力(kN)算定式

$$R_{Sp} = \alpha_{sb} \cdot R_{ub} + \alpha_{sw} \cdot R_{uw} \quad (3)$$

ここで、 $\alpha_{sb} = 0.67$ ,  $\alpha_{sw} = 0.65$

上記の支持力算定式(1)～(3)による計算結果と実験値の比は0.98～1.01、標準偏差=0.14であり、回帰精度は良好である。

### 原位置載荷試験による検証

杭の打止め深度の異なる2本の実杭（軸径：db = 114.3, 羽根径：dw = 228.6）の押し込み載荷試験結果と上記(1)～(3)による計算値を比較することで、本研究で構築した支持力算定式の適用性を検証した。

なお、研究代表者が指導した大学院生が、2013年3月にこれらの研究で博士（工学）の学位を授与されている。

## (3) 引抜き荷重を受ける回転貫入杭の挙動の把握

上載圧および根入れ深さの増大に伴って引抜き荷重は大きくなる傾向がみられた。杭の根入れの浅い試験体では、極めて小さな変位で極限抵抗力を示した後に減少する脆性的な引抜き挙動を示した。杭体各部の抵抗力には以下のような特徴が明らかになった。

羽根面の負担荷重は杭頭の80%程度である。ここで、施工開始時を原点とした羽根面荷重は羽根面の残留荷重が加わるため、杭頭荷重の90%程度となった。したがって、羽根部の断面設計に際して、残留荷重に配慮する必要がある。

杭先端面では引張り抵抗力となり、載荷初期の引抜き時にピークを示した後、一度減少してからわずかに上昇する傾向を示した。これらの抵抗力は上載圧および根入れ深さの増大に伴って大きくなる。先端部の引張り抵抗力は施工時の残留荷重（圧縮力）と絶対値が概ね等しい。したがって、引抜き時に測定される杭先端面の引張り抵抗の大部分は、施工時に生じる杭先端面の残留応力の解放に起因するもことを明らかにした。

杭施工時の打止めトルクと極限時における杭頭荷重および先端部荷重（羽根面+先端面）の關係に着目する。両者は共に概ね比例關係となることから、打止め時の杭体トルクから杭の引抜き抵抗力を推定できる可能性がある。また、スウェーデンサウンディング試験による換算N値と先端部荷重度の關係は概ね比例關係にあることから、杭先端部の支持力推定に際して、地盤のN値が利用でき

ることを示した。

なお、回転貫入杭の引抜き挙動について研究報告した大学院生(研究代表者が指導)が、日本建築学会北海道支部(2013年度)より優秀発表者賞を授与されている。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計14件)

大江隆寛, 土屋勉, 他4: 引抜き荷重を受ける杭周辺地盤のPIVによる可視化実験, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 査読無, No.86, 2013, 129-132

岡聖也, 土屋勉, 他6: 回転貫入杭の引抜き抵抗力に関する実験的研究(その2), 日本建築学会北海道支部研究報告集, 査読無, No.86, 2013, 73-76

池田篤則, 土屋勉, 永井宏: 杭先端面と羽根面の支持力機構に基づいた回転貫入杭の鉛直支持力算定式の構築, 日本建築学会技術報告集, 査読有, 18巻, 2012, 877-882

福田健, 土屋勉, 他4: 鉛直荷重を受ける杭周辺地盤のPIVによる可視化実験(その1 PIVの導入と適用例), 日本建築学会北海道支部研究報告集, 査読無, No.85, 2012, 125-128

土屋勉: 建築における杭の引抜き抵抗, 基礎工, 査読無, 39巻, 2011, 29-31

島田正夫, 土屋勉, 他3: 回転貫入杭の施工中における地中応力の検討, 日本建築学会北海道支部研究報告集, 査読無, No.84, 2011, 111-114

〔学会発表〕(計9件)

大江隆寛: 杭周辺地盤のPIVによる可視化実験(その2 引抜き荷重を受ける底板付き円筒模型杭), 地盤工学会, 2013年7月23日, 富山国際会議場(富山県)

米田大希: 回転貫入杭の引抜き抵抗力に関する模型実験, 地盤工学会, 2012年7月14日, 八戸工業大学(青森県)

大澤隆幸: 薄層地盤に施工された回転貫入杭の支持力と地中応力の検討, 地盤工学会, 2011年7月5日, 神戸国際会議場(兵庫県)

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

土屋 勉 (TSUCHIYA, Tsutomu)  
室蘭工業大学・工学研究科・教授  
研究者番号: 20163834