

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 21 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420571

研究課題名(和文) 繰返し鉛直・水平荷重を受ける杭の支持力特性の評価と設計への反映

研究課題名(英文) Investigation on bearing capacity of piles subjected to cyclic vertical and lateral loading for seismic design

研究代表者

鈴木 比呂子 (Suzuki, Hiroko)

千葉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：60401527

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：杭の鉛直荷重試験結果より、杭、羽根の径が杭の先端支持力、周面摩擦力、羽根部抵抗力に与える影響を評価した。周面摩擦力は、周辺地盤の土圧が変化することで変動する。載荷が繰り返され、累積変位が降伏変位に達すると、土圧の変動も小さくなり、周面摩擦は著しく低下する。さらに、杭の水平荷重試験を実施し、群杭における前方杭と後方杭の水平および鉛直荷重の分担を明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Effects of diameters of pile and wing near a pile tip on bearing capacity and pull-out resistance are investigated through vertical loading tests. Shaft friction is induced due to earth pressure increment in soil around a pile. In cyclic loading, when the cumulative displacement reaches the yield displacement, the earth pressure increment becomes insignificant accompanying with a significant decrease in shaft friction. In addition, distributions of vertical and horizontal bearing load of piles within a pile group are investigated through horizontal loading tests.

研究分野：地盤工学

キーワード：杭 鉛直荷重 水平荷重 支持力 引抜き抵抗力

1. 研究開始当初の背景

東北地方太平洋沖地震では、津波の被害が甚大であった地域で一部の杭基礎が引抜けた状態で建物が転倒している例などが報告されている¹⁾。これらは、繰返しの荷重もしくは液状化により、杭に作用する周面摩擦力が低下したところに津波による浮力、波力が建物に作用し、転倒につながったと推察される。高層建築、塔状建築などであれば、転倒モーメントによって生じる鉛直荷重もより大きなものとなり、杭の周面摩擦力が低減すると、特に引抜き側で危険になる可能性が考えられる。しかし、建築基礎構造設計指針、道路橋示方書²⁾³⁾などでは、杭の引抜き抵抗に重要な影響を及ぼす周面摩擦力の繰返しによる低減に関する明確な規定はないことから、杭の鉛直支持力、引抜き抵抗力に対する繰返しが与える影響を明らかにする必要がある。

また、杭-構造物系の大型振動台実験結果について、杭の軸力に着目し、押し込み側、引き抜き側になる時の杭に作用する周面摩擦力を比較すると、杭の周面摩擦力は引き抜き時に押し込み時に比べて著しく小さくなる傾向が見られる。このことは、杭が繰返しの押し込み、引抜きの鉛直荷重を受けるだけでなく、水平荷重も同時に受けることで両者の違いが大きくなっている可能性を示唆している。

水平荷重に対する杭の地盤反力変位関係は従来から重要な研究課題として取り組まれている。また、鉛直支持力特性を検討するために、杭の単調載荷試験に基づく研究等も従来から多く行われている。しかし、水平と鉛直の繰返し荷重を受ける複雑な条件の下において、杭の鉛直支持力特性を評価した研究はほとんど見られないのが実状である。

<参考文献>

- 1) 日本建築学会：2011年東北地方太平洋沖地震災害調査速報，丸善，2011。
- 2) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針，丸善，2001。
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 I 共通編 IV 下部構造編，丸善，2004。

2. 研究の目的

構造物の転倒モーメントによって杭に作用する鉛直荷重は、引抜き側でより危険になると考えられる。特に、繰返し荷重を受ける際には、周面摩擦力が低下すると考えられるが、学会の指針などでは明確な規定がなく、重要ではあるものの見過ごされている課題と言える。そのため、杭の周面摩擦力の荷重変位関係は、単調載荷試験結果に基づく値を用いる場合が多く、繰返しの正負交番載荷の影響を考慮した資料の蓄積、杭、地盤の条件などが与える影響を明らかにすることが求められている。しかし、実大の杭の繰返し載

荷試験は、規模が大きくなることから多くは行われておらず、また、実地盤では地盤構成も複雑となり、各影響要因の寄与度を抽出することが難しい場合も考えられる。

また、実際の構造物を考えると、杭は鉛直荷重を受ける際に水平荷重も受ける。しかし、水平荷重と鉛直荷重を同時に受ける際の杭の支持力特性を検討した例はほとんどない。さらに、群杭では、前方杭となる際に押し込み荷重を受け、後方杭となる際に引抜き荷重を受ける。杭間隔が狭くなると、杭の相対変形によって生じる地盤内の応力の重ね合わせにより、後方杭より前方杭で水平地盤反力が大きくなることが知られており、このことから、両者を比較すると、押し込み、引抜きというだけでなく、荷重の条件が全く異なると考えられる。

本研究では、実大試験に比べて簡便にできる遠心場での縮尺模型実験を行い、データの蓄積を行う。様々な杭、地盤の条件のもとに、正負交番の鉛直載荷試験を実施し、繰返し荷重を受ける杭の周面摩擦力を検討し、基礎データを収集する。さらに、杭が水平荷重と鉛直荷重を同時に受ける際の杭の周面摩擦力を検討するため、杭-構造物系の水平載荷試験を行う。これは、構造物に水平載荷することで、杭に水平荷重を作用させるだけでなく、鉛直荷重も間接的に作用させるものである。また、群杭の杭間隔を変えて実験を行い、水平荷重の影響による押し込みと引抜き時の周面摩擦力の違いを検討し、設計のための有用な資料を構築する。

3. 研究の方法

研究は、既往の振動台実験結果に基づく分析、および、遠心載荷装置を用いた載荷試験を実施、その結果の分析により推進する。既往の振動台実験は、実大スケールの3次元振動台で実施したものである。実大スケールの実験では、実現に近いデータが得られるものの、規模が大きいことから時間、費用を莫大に要する。そこで、本研究では、新たに実施する実験は遠心載荷装置を用いて行う。遠心載荷装置は、作成した縮尺した地盤-杭模型に遠心力を作用させることで、実大と同様の応力状態を再現できる装置である。いずれの試験も30Gの遠心場で実施する。

遠心場における鉛直載荷試験結果、水平載荷試験結果をもとに、繰返し鉛直荷重を受ける際の杭の支持力、引抜き抵抗力、および、水平荷重を同時に受ける際の杭の支持力、引抜き抵抗力について考察を行うことで、設計に反映できる資料を構築する。以降(1)～(3)に各実験の概要を示す。

(1) 3次元振動台実験 (既往の実験)

図1に、実験模型の例を示す。実験は大型せん断土槽の中に地盤-杭-構造物模型(図1)

を作成して実施された¹⁾。杭は3×3の群杭で先端は土槽底面にピン接合，頭部は基礎に剛接合され，杭間隔を径の4倍として配置されている。実験は，上部構造物の固有周期と高さをパラメーターとして行われた。

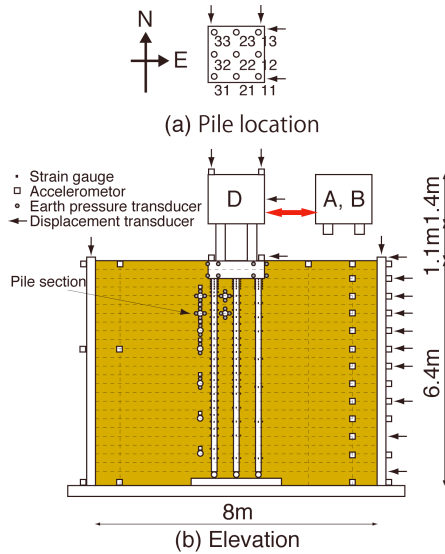


図1 3次元振動台実験

(2) 遠心場の鉛直載荷試験

図2に鉛直載荷試験の実験模型の例を示す。円形剛体土槽内に地盤を作成し，中央に単杭模型を設置した。地盤は，乾燥した砂を用い，密度をパラメーターとした。杭はステンレスパイプを用い，杭の形状（直杭，羽根付杭），杭径，羽根径，地盤密度をパラメーターとした。実験は，変位制御で行い，各杭に，単調押し込み，単調引抜き，正負交番載荷を実施した。正負交番載荷は4段階で載荷変位を大きくし，各ステップを3回繰り返した。

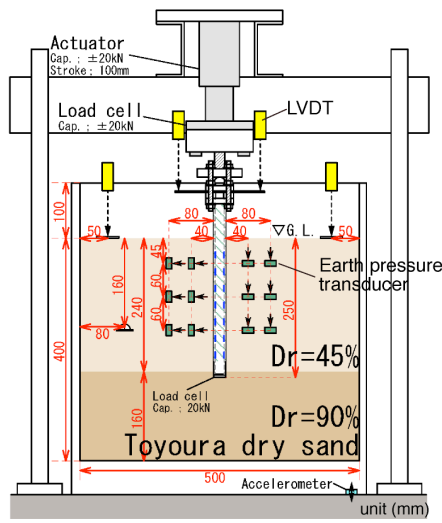


図2 鉛直載荷試験

(3) 遠心場の水平載荷試験

図3に，水平載荷試験の実験模型の例を示す。直方形の剛体土槽内に，乾燥砂を用いて地盤を作成し，2×2の群杭を設置した。杭はステンレスパイプを用い，先端は自由で，杭頭はフーチングに固定されている。杭間隔は杭の中心で杭径の3.5倍，もしくは，7倍とした。実験は，フーチングに設置した載荷板に，水平方向に載荷，除荷，再載荷を行った。構造物（載荷板）への水平載荷により，転倒モーメントを生じさせることで，杭には水平荷重と鉛直荷重を同時に作用させた。

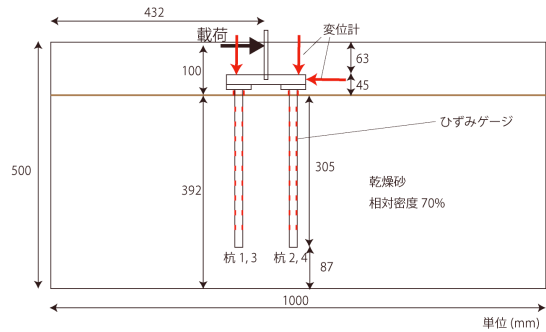


図3 水平載荷試験

<参考文献>

1) 田端，佐藤：E-ディフェンスによる大型土槽の地盤基礎実験，文部省大都市大震災被害軽減化プロジェクトII成果報告書-平成17年度-，489-554，2006。

4. 研究成果

(1) 3次元振動台実験

既往の3次元振動台実験結果に基づき，群杭の挙動に影響を与える要因を検討し，以下のことを示した。

- ① 構造物慣性力および地盤変位による水平力と，構造物慣性力によって生じる転倒モーメントの組み合わせが杭に生じる応力分布に大きな影響を与える。
- ② 転倒モーメントが大きくなると，群杭効果が顕著になり，群杭内における鉛直荷重，水平荷重の分担の差が大きくなる。

(2) 遠心場の鉛直載荷試験

遠心載荷装置を用いた杭の鉛直載荷試験より，以下のことを明らかにした。

- ① 押し込み試験，および，引抜き試験において，杭の表面に作用する周面摩擦力は，杭径が大きいほど極限となる変位（降伏変位）が大きくなる。降伏変位を過ぎると，周面摩擦力は低下する。一方，正負交番載荷試験では，累積変位が降伏変位に達することにより周面摩擦力が降伏する。
- ② 引抜き試験において，杭の周面摩擦力は，直杭より，羽根付杭で小さくなる。これは，羽根付杭では，羽根部により杭周辺地盤が

持ち上げられることで、杭周辺地盤のせん断変形が小さくなるためと考えられる。この傾向は羽根付杭が大きい杭ほど顕著である。

- ③ 鉛直交番載荷試験において、周面摩擦力が極限に達するまでの小さな変位では、引抜き荷重に対し、主に周面摩擦力で抵抗する。そのため、杭径が大きく、羽径比の小さい杭ほど引抜き抵抗力が大きくなる。
- ④ 鉛直交番載荷試験において、周面摩擦力が極限值に達した後は、引抜き荷重に対して主に羽根部で抵抗する。変位振幅の増大にともない、羽根径比の小さな杭では引抜き時における羽根応力の低下が著しく、羽根面積の大きな杭ほど羽根応力が大きくなる。そのため、羽根径比および羽根面積の大きな杭ほど羽根部抵抗力の低下が小さく、引抜き抵抗力の低減は緩やかである。
- ⑤ 杭の先端抵抗力の発現は周面地盤に影響を受け、地盤密度が低く周面摩擦が小さいほど、先端抵抗力が大きくなる。これは、密度が低い地盤では、鉛直荷重に対し、周面摩擦のみでは抵抗できず、杭の先端に大きな荷重が伝達されるためである。
- ⑥ 鉛直載荷により杭周辺地盤の土圧が変動することで、周面摩擦力が大きくなる。また、その変動は密度が高い地盤ほど大きくなる。これは、杭の変形にともない周辺地盤がせん断変形し、密度の高い地盤では、せん断により体積膨張するため、より大きな土圧変動が生じたと考えられる。杭の変形にともなう土圧変動は、杭から離れるに従って小さくなる。正負交番載荷時の土圧の変動は周面摩擦力の変動と概ね対応し、繰り返しにともない小さくなる。

(3) 遠心場の水平載荷試験

遠心載荷装置を用いた杭の水平載荷試験より、以下のことを示した。

- ① 杭間隔狭くなると、杭間隔が広い場合に比べて水平変位、鉛直変位がともに大きくなる。これは、杭間隔が狭くなると、群杭効果によって水平抵抗が小さくなるため、また、抵抗モーメントの回転半径が小さくなるためである。
- ② 杭の水平変形が大きくなる地表では、杭に生じる周面摩擦力が押し込み杭（前方杭）に比べ、引抜き杭（後方杭）で小さくなる。この傾向は杭間隔が狭くなると顕著となる。これは、周面摩擦力は面に作用する垂直応力に影響を受け、群杭内では、押し込み杭（前方杭）より引抜き杭（後方杭）で、水平からの拘束が小さくなるためと考えられる。また、引抜き杭においても、深部になると、周面摩擦力が大きくなる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕（計1件）

- ① Hiroko Suzuki, Kohji Tokimatsu and Kentaro Tabata, Factors affecting stress distribution of a 3x3 pile group in dry sand based on three-dimensional large table tests, Soils and Foundations, 査読有, Vol. 54, 2014, 699-712, 10.1016/j.sandf.2014.06.009

〔学会発表〕（計7件）

- ① 鈴木比呂子, 畠山康介, 梁瀬凌祐, 奥村豪悠, 本多剛, 水平載荷が杭の周面摩擦に与える影響の実験的検討, 第51回地盤工学研究発表会, 2016.9.13~2016.9.15, 岡山大学(岡山県岡山市) (発表確定)。

- ② Kohei Urabe, Kohji Tokimatsu, Hiroko Suzuki and Yoshiharu Asaka, Bearing capacity and pull-out mechanism of wing piles during cyclic vertical loading, 6th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, 2015.11.1~2015.11.4, クライストチャーチ (ニュージーランド)。

- ③ Hiroko Suzuki, Kohei Urabe, Kohji Tokimatsu and Yoshinaru Asaka, Experimental investigation on pull-out resistance of a pile with a wing plate in alternately cyclic loading, 10th U.S. National Conference on Earthquake Engineering, 2014.7.21~2014.7.25, アンカレッジ (アメリカ)。

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 比呂子 (SUZUKI, Hiroko)
千葉工業大学・工学部・准教授
研究者番号：60401527