

令和 2 年 6 月 12 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03342

研究課題名（和文）杭位置の違いを考慮した群杭の非線形杭周水平地盤パネの実用的算定式の提案

研究課題名（英文）Evaluation of nonlinear lateral soil resistance of pile groups considering each pile location

研究代表者

宮本 裕司（Miyamoto, Yuji）

大阪大学・工学研究科・教授

研究者番号：50416856

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 12,800,000円

研究成果の概要（和文）：杭基礎構造物の耐震設計では、上部構造については大地震に対する2次設計が行われているが、現在、ほとんどの杭基礎は1次設計のみである。近年、杭基礎の地震被害が原因で上部構造の機能が喪失する建物が多く発生している。このような背景により、上部構造モデルと同等な杭基礎の地震応答解析モデルの構築が必要である。杭基礎の地震応答解析モデルを作成するためには、杭と地盤との非線形動的相互作用を杭周地盤パネとしてモデル化する必要がある。本研究では、各種のパラメータを考慮した3次元FEMによる解析検討及び羽根付き鋼管杭の現地水平載荷実験を行い、杭周地盤パネの実用的な算定法を検討している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

大地震時の杭支持構造物の耐震性能評価をより正確に行うためには、杭基礎と地盤の非線形相互作用を考慮した杭基礎－上部構造連成系の応答解析モデルが必要となる。本研究では、地震時の杭基礎建物の挙動を正確に評価するための杭周辺地盤の非線形性を取り入れた杭周地盤パネの算定法について検討した。杭周地盤パネの評価では、地盤の種別として砂地盤、粘土地盤を対象として、杭基礎のパラメータは杭本数、杭配置、羽根の有無、杭頭部地盤の改良効果などを考慮して、非線形特性、履歴特性を分析した。これらの成果は、上部構造ならびに杭基礎の耐震設計を高度化するための設計モデルの構築に大いに役に立つものである。

研究成果の概要（英文）：In the seismic design of structures supported on pile foundation, the upper structures are designed for large earthquakes, but most pile foundations are designed only for small earthquakes. In recent years, many buildings have lost their functions due to earthquake damage of pile foundations. From this background, it is necessary to construct a seismic response analysis model for pile foundations that is equivalent to that of superstructures. To create a seismic response analysis model for pile foundations, nonlinear dynamic interaction between piles and the ground should be modeled as lateral soil spring of piles. In this study, we analyze the three-dimensional FEM considering various parameters and conduct lateral loading tests of steel pipe pile with wings to investigate a practical calculation method of the lateral soil spring around pile.

研究分野：耐震工学、地震工学、杭基礎、杭周地盤抵抗

キーワード：杭支持建物の耐震設計 杭-地盤連成系の地震応答解析モデル 杭周地盤パネの算定 群杭基礎 非線形特性 履歴特性 3次元非線形FEM解析

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

## 1. 研究開始当初の背景

杭の設計応答解析モデルに用いる杭周地盤バネは、現状では標準貫入試験の  $N$  値を用いた実験式あるいは簡易モデルを用いた解析解の式から得たバネ剛性に、非線形特性を与えている。しかし、これらの水平地盤バネはある条件下で算定されたもので、実状に適合していない。そのため上部構造の精緻な耐震解析モデルに比べ、杭基礎のモデル化の精度は格段に劣っており、杭周地盤バネの合理的な簡易算定法について検討する必要がある。

## 2. 研究の目的

本研究では、三次元非線形有限要素法と杭の水平載荷実験から杭周地盤バネを算出して、初期剛性や非線形特性（骨格曲線と履歴特性）を分析・評価する。また、各種パラメータを考慮した実用的な杭周地盤バネの算定法について検討する。

## 3. 研究の方法

杭周辺地盤の非線形性を取り入れた杭周地盤バネについて、三次元有限要素法を用いた解析および杭先端に羽根を取り付けた鋼管杭の水平載荷実験から杭周地盤バネを評価し、地盤の土質の違い、杭本数、杭配置、羽根の有無による影響を把握した。また、杭頭部地盤の改良効果が杭周地盤バネに与える影響を評価し、杭周地盤の水平抵抗と非線形特性を分析した。さらに、砂地盤と粘土質地盤における杭周地盤バネを算定するための提案式を検討した。

## 4. 研究成果

大地震時の杭支持構造物の耐震性能評価をより正確に行うためには、杭基礎と地盤の非線形相互作用を考慮した杭周地盤バネを算定して、杭基礎 - 上部構造連成系の応答解析を行うことが必要となる。以下に示す本研究で得られた成果は、杭周地盤バネを高度化した杭基礎と上部構造を連成した設計モデルの構築に大いに役立つものである。

### 4.1. 土質による降伏条件の違いが杭周地盤抵抗に与える影響

三次元有限要素法による静的解析を行い、土質による降伏条件の違いが単杭および群杭の杭周水平地盤抵抗に与える影響を検討した。得られた成果は以下の通りである。

- ① 地盤の材料非線形モデルとして Mohr-Coulomb 規準を用いた場合、杭前方地盤の応力状態の違いにより、前面杭の杭周地盤反力は浅い位置では三軸圧縮時の地盤強度から決まり、深い位置では三軸引張時の地盤強度から決まる。
- ② 群杭の地盤反力は、強度が拘束圧に依存する砂質土では前面杭に集中するのに対し、拘束圧に依存しない粘性土においては前面杭だけでなく側面杭や内部杭でも大きくなる。杭頭のせん断力もこの影響を受けて、杭位置による違いは杭周地盤抵抗に比べ小さくなるものの、両地盤で各杭への応力の分配に違いが見られる。

- ③ 前面杭及び側面杭への地盤反力の集中率を算出した。砂質土の場合、杭変位が大きくなると前面杭への集中率は杭変位の増大と共に大きくなるが、側面杭への集中率は逆に小さくなる。一方、粘性土の場合、前面杭への集中率は杭変位によらず概ね一定になるが、側面杭への集中率は杭変位の増大と共に小さくなる。
- ④ 砂質土、粘性土ともに、前面杭及び側面杭への地盤反力の集中率は、地表付近で小さくなるものの、ある程度の深さに達すると概ね一定値となる。内部摩擦角が大きくなると地表付近で前面杭への集中率は増大するのに対し、粘着力は前面杭、側面杭のいずれの集中率に対してもあまり影響を及ぼさない。

#### 4.2. 土質と杭配置が群杭の杭周地盤ばねの履歴特性に及ぼす影響

土質と杭配置が群杭の杭周地盤ばねの非線形と履歴特性に及ぼす影響を、三次元有限要素解析によって検討した。得られた成果は以下の通りである。

- ① 単杭の杭周地盤ばねは、砂地盤では履歴面積の大きい安定した履歴を描くのに対し、粘土地盤では杭-地盤間の剥離の影響によりスリップ型の履歴を描く。
- ② 砂地盤中の直列・正方配置群杭において、後方杭の最大杭周地盤反力は前方杭のそれに比べ小さい。これを反映して、前後端の杭の杭周地盤ばねは、杭を変位させる向きによって最大杭周地盤反力が異なる非対称な三角形型の履歴を描き、中杭のそれは、最大杭周地盤反力の小さい対称な四角形型の履歴を描く。
- ③ 粘土地盤中に密に配置された直列・正方配置群杭では、隣接杭の影響により地盤との間の剥離が緩和され、杭周地盤ばねのスリップが緩和される杭がある。一方で、杭間隔が広い場合には隣接杭の影響は小さくなり、杭周地盤ばねのスリップが単杭と同様に現れる。
- ④ 群杭 1 本あたりの平均杭周地盤反力-杭変位関係より、等価剛性および等価減衰定数を評価した。地盤材料によらず、群杭 1 本あたりの等価剛性は単杭のそれに比べ小さくなる。また、粘土地盤中の正方配置群杭を除く各群杭の等価減衰定数は、単杭のそれとは異なる性状を示す。これらの傾向は、杭が密に配置されているほど顕著である。
- ⑤ 群杭の杭周地盤ばねの履歴特性は、砂と粘土の材料特性に依存する非線形性や、隣接杭との位置関係の影響を受けて変化する。杭基礎の応答解析モデルを精緻化するためには、杭周地盤ばねが持つこのような特性を反映することが重要となる。

#### 4.3. 杭周地盤ばねの非線形特性と群杭係数の算定式

三次元非線形有限要素法により求めた単杭と群杭の杭周地盤ばねの解析結果をもとに、砂地盤および粘土地盤における単杭の杭周地盤ばねの初期剛性と非線形特性を算定する式を提案した。得られた成果は以下の通りである。

- ① 砂質地盤のせん断波速度、内部摩擦角と杭径等をパラメータとして単杭の杭周地盤ばねの算定式を示した。また、集約杭周地盤ばねの群杭係数を算定する式を、杭本数、杭間隔杭径比をパラメータとして示した。

- ② 提案した杭周地盤ばねの非線形特性の算定式は、杭の各パラメータに対して三次元有限要素法の解析結果によく対応するものであり、2層地盤にも適用できることを示した。また、提案した集約杭周地盤ばねの群杭係数の算定式についても三次元有限要素法の解析結果とよく対応した。
- ③ 粘性土地盤での単杭と群杭の杭周地盤ばねの解析結果をもとに、粘性土中の単杭の杭周地盤ばねの初期剛性と非線形特性を算定する式を、地盤のせん断波速度、粘着力と杭径等をパラメータとして示した。また、群杭係数および各杭の地盤反力分担率の算定式を、杭本数、パラメータとして示した。
- ④ 提案した杭周地盤ばねと群杭係数は、群杭を杭集約モデルでモデル化して地震応答解析を行う際には、杭の初期剛性と非線形特性を求め、多折れ線モデル等に近似することで設計解析用モデルに取り込むことが可能となる。なお、本研究で提案する杭周地盤ばねの算定式は、限られた解析条件と地盤条件で得られたものである。今後の課題として群杭のパラメータを拡張した杭位置の違いによる杭周地盤ばねの算定式を検討する必要がある。

#### 4.4. 羽根付き鋼管杭の水平載荷実験と杭周地盤ばね特性

羽根付き鋼管杭の杭周地盤ばねの諸特性を明らかにするため、粘土質地盤に製作した実大羽根付き鋼管杭（杭直径 267.4mm、鋼管厚さ 9.3mm）の正負交番繰返し水平載荷実験と解析的検討を行った。得られた成果は以下の通りである。

- ① 羽根付き鋼管単杭について、羽根の有無、羽根径比（杭直径に対する羽根の等価円直径の比  $\approx 2.3$  と  $3.0$ ）、約 1 年経過した施工後の経時変化を実験パラメータとして水平載荷実験を行い、杭頭での水平抵抗特性と杭周の水平地盤抵抗の変位依存性について分析した。その結果、羽根付き鋼管杭の水平抵抗は羽根なし鋼管杭に比べ小さくなり、杭周地盤の緩みが大きく影響することを示した。杭周地盤の履歴曲線は載荷初期からスリップ型の特性を示し、羽根なし鋼管杭に比べ割線剛性が大幅に低下し、地盤深さと土質の影響を受けることを明らかにした。また、羽根付き鋼管杭の水平抵抗に及ぼす羽根径比と経時変化の影響は小さいことを示した。
- ② 羽根付き鋼管群杭の杭頭を半固定条件とした単杭および群杭（2本直列配置、杭間距離は杭直径の 3.7 倍）の水平載荷実験を行い、群杭効果と羽根の影響領域について検討した。その結果、羽根付き鋼管群杭の水平抵抗特性は、羽根なし鋼管杭に比べ群杭効果が緩和することを示した。また、大変形時において地表面に出現する地盤のひび割れは、概ね羽根の通過領域内に留まり、羽根付き鋼管群杭の水平抵抗は羽根の通過による杭周地盤の緩み領域の反力が支配的であることを明らかにした。
- ③ 羽根付き鋼管単杭の杭頭周辺地盤を早強コンクリートで置換改良した単杭の水平載荷実験を行い、改良範囲と改良深さが水平抵抗に及ぼす影響を検討した。その結果、改良範囲を羽根の最大回転直径より大きくし、かつ改良深さを少なくとも杭直径程度とすることで、杭頭の水平抵抗は大変位振幅域においても羽根なし鋼管杭と同等かそれ以上にまで増大し、杭

頭周辺地盤の改良が有効であることを明らかにした。

- ④ 三次元非線形有限要素法を用いて杭周地盤の緩みを検討するとともに、杭頭改良体の抵抗機構について分析した。その結果、杭周地盤のモデル化として羽根の最大直径をもつ円柱地盤の剛性と強度を、深さと土質に応じて低減させることで、羽根付き鋼管杭の水平抵抗特性を良好にシミュレートすることを示した。また、杭頭の改良体をモデル化した解析では、改良体とその周辺地盤の接触条件として底面に密着条件、側面に剥離・滑りを許容することで改良効果を良好にシミュレートすることを示し、杭頭を改良した羽根付き鋼管杭の水平抵抗機構に改良体前面の受働抵抗と改良体底面での支圧抵抗が大きく影響していることを明らかにした。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 7件）

1. 著者名 馬承遠、中野尊治、宮本裕司	4. 巻 第736号
2. 論文標題 土質による降伏条件の違いが群杭の杭周水平地盤抵抗に与える影響	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 pp.813-821
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="http://doi.org/10.3130/aijs.82.813">http://doi.org/10.3130/aijs.82.813</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 廣瀬榛名、宮本裕司	4. 巻 第739号
2. 論文標題 3次元非線形FEM解析による杭集約モデルの杭周水平地盤ばねの算定式	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 pp.1361-1370
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="http://doi.org/10.3130/aijs.82.1361">http://doi.org/10.3130/aijs.82.1361</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 柏 尚稔、小林俊夫、宮本裕司	4. 巻 第56号
2. 論文標題 繰返し水平載荷実験における羽根付き鋼管杭の水平抵抗評価	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 pp.99-104
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 小林俊夫、中野.84.639尊治、柏尚稔、宮本裕司	4. 巻 第759号
2. 論文標題 羽根付き鋼管杭の水平載荷実験による杭周水平地盤抵抗に関する研究	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 日本建築学会構造系論文集	6. 最初と最後の頁 pp.639-647
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） <a href="http://doi.org/10.3130/aijs.84.639">http://doi.org/10.3130/aijs.84.639</a>	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 小林俊夫, 中野尊治, 柏尚稔, 宮本裕司	4. 巻 第62号
2. 論文標題 羽根付き鋼管杭の2本群杭の原位置水平載荷実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 pp.85-90
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 中野尊治, 宮本裕司	4. 巻 Vol.66B
2. 論文標題 砂および粘土地盤における三次元有限要素法による群杭の杭周地盤ばねの履歴特性	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 構造工学論文集	6. 最初と最後の頁 pp.237-244
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 小林俊夫, 宮本裕司, 中野尊治, 柏尚稔	4. 巻 第64号
2. 論文標題 杭頭周辺の地盤を改良した羽根付き鋼管杭の水平抵抗	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会技術報告集	6. 最初と最後の頁 未定
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている(また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計19件(うち招待講演 1件/うち国際学会 8件)

1. 発表者名 Yuji Miyamoto
2. 発表標題 Development of new geo-material to reduce the earthquake response of soil-foundation-structure system
3. 学会等名 International Conference on Civil, Architecture and Marine Engineering, Osaka, Japan (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakano, T. and Miyamoto, Y.
2. 発表標題 Hysteresis characteristics of lateral soil resistance of pile group based on 3D FEM
3. 学会等名 International Conference on Civil, Architecture and Marine Engineering, Osaka, Japan (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Kobayashi, T. and Miyamoto, Y.
2. 発表標題 Cyclic lateral loading test and simulation of lateral soil resistance for steel pipe pile with wings
3. 学会等名 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Rome, Italy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nakano, T. and Miyamoto, Y.
2. 発表標題 Nonlinear horizontal resistance of pile groups with soil properties that differ from surrounding soil
3. 学会等名 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Rome, Italy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Nishida, M., Miyamoto, Y., Shimamura, A. and Kobayashi, T.
2. 発表標題 Simulation analysis of static loading test for steel pipe pile strengthened by the new composite geo-material
3. 学会等名 7th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Rome, Italy (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Nakano, Y. Miyamoto
2. 発表標題 Dynamic Nonlinear Horizontal Resistance of Pile Group Considering Soil Types and Pile-Soil Contact Conditions
3. 学会等名 Sustainability Issues for the Deep Foundations、GeoMEast 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kobayashi, Y. Miyamoto
2. 発表標題 Lateral Resistance of Steel Pipe Pile with Wings by Static Cyclic Loading Tests
3. 学会等名 Dynamic Soil-Structure Interaction for Sustainable Infrastructures、GeoMEast 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 A. Shimamura, Y. Miyamoto, T. Kobayashi
2. 発表標題 Experimental Study on Lateral Resistance of Steel Pipe Pile with Wings Using the New Composite Geo-material with Magnesium Acrylate
3. 学会等名 Dynamic Soil-Structure Interaction for Sustainable Infrastructures、GeoMEast 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 廣瀬榛名, 藤森健史, 宮本裕司
2. 発表標題 単杭の実大水平載荷試験を用いた杭周地盤ばねの簡易評価法の検証
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林俊夫, 宮本裕司, 中野尊治, 引山遼太
2. 発表標題 羽根付き群杭鋼管杭の原位置水平載荷実験と解析 その1 実験概要と杭頭水平抵抗
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中野尊治, 小林俊夫, 宮本裕司, 引山遼太
2. 発表標題 羽根付き群杭鋼管杭の原位置水平載荷実験と解析 その2 杭周地盤の水平抵抗
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 引山遼太, 中野尊治, 宮本裕司, 小林俊夫
2. 発表標題 羽根付き群杭鋼管杭の原位置水平載荷実験と解析 その3 三次元有限要素法による解析
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 廣瀬榛名, 宮本裕司, 藤森健史
2. 発表標題 3次元非線形FEM解析による粘性土地盤の杭周水平地盤ばねの算定式
3. 学会等名 第15回日本地震工学シンポジウム,
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Liao Yixin, 中野尊治, 宮本裕司, 廣瀬榛名
2. 発表標題 粘土地盤中の群杭の非線形杭周地盤ばねの算定式
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林俊夫, 宮本裕司, 佐々木亮太, 中野尊治, 島村 淳, 後藤彰宏
2. 発表標題 水平載荷実験による羽根付き鋼管杭の水平抵抗と杭頭改良効果に関する研究 (その 1) 原位置水平載荷実験の概要と杭頭荷重 - 杭頭変位関係
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 佐々木亮太, 中野尊治, 宮本裕司, 小林俊夫
2. 発表標題 水平載荷実験による羽根付き鋼管杭の水平抵抗と杭頭改良効果に関する研究 (その 2) 杭周地盤の抵抗性状および杭頭での割線剛性と履歴減衰
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Liao Yixin, 馬承遠, 中野尊治, 宮本裕司
2. 発表標題 地盤の接触条件と降伏関数の違いが杭周の水平地盤抵抗に及ぼす影響 その1: 接触条件の違いによる影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 馬承遠, Liao Yixin, 中野尊治, 宮本裕司
2. 発表標題 地盤の接触と降伏関数の違いが杭周の水平地盤抵抗に及ぼす影響 その2: 降伏関数の違いによる影響
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 廣瀬榛名, 宮本裕司
2. 発表標題 3D-FEMに基づく群杭の非線形杭周地盤ばねの簡易算定式の提案
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	川辺 秀憲 (Hidenori Kawabe) (00346066)	大阪大学・工学研究科 ・准教授  (14401)	
研究分担者	柏 尚稔 (Hisatoshi Kashiwa) (40550132)	国土技術政策総合研究所・建築研究部・主任研究官  (82115)	
研究分担者	島村 淳 (Atsushi Shimamura) (10535967)	ケミカルグラウト株式会社(技術本部技術開発部)・技術本部技術開発部・その他  (92623)	