

令和 4 年 5 月 5 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2021

課題番号：19K15138

研究課題名(和文) 極大地震時の軟弱な粘土地盤に建つ杭支持構造物の耐震性能評価法の開発

研究課題名(英文) Evaluation of Seismic Response of Structure Supported by Piles in Soft Cohesive Soil Subjected to Large Earthquake

研究代表者

中野 尊治 (Nakano, Takaharu)

大阪大学・工学研究科・助教

研究者番号：00805806

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：粘土地盤に建つ杭支持構造物の地震応答と杭周地盤ばねの非線形特性を、実験と解析から明らかにした。砂および粘土地盤中の杭支持構造物の模型振動台実験を行い、各種地盤の非線形化が上部構造応答と杭応力に影響を及ぼすことを示した。また、砂地盤での模型振動台実験と粘土地盤での原位置載荷実験に対するシミュレーションを三次元有限要素法によって行い、杭応力評価に有効なモデルを構築した。さらに、群杭の杭周地盤ばねの非線形特性を三次元有限要素解析によって評価し、砂地盤と粘土地盤における杭周地盤ばねの履歴特性の違いを明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

粘土地盤中の杭支持構造物を対象とした振動台実験の例は少なく、本研究課題で行った実験によって貴重なデータが得られた。三次元有限要素法による杭応力評価モデルの構築については、砂および粘土地盤のそれぞれで進展が見られ、今後の解析的研究の足掛かりとなると考えられる。また、代表的な杭配置をもつ群杭と単杭について杭周地盤ばねの履歴特性をまとめたことで、粘土地盤中の杭周地盤ばねをモデル化するための基礎的な知見を得ることができた。本研究課題の成果は、大地震に対する杭の応答評価法の高度化するための資料となることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：Experimental and analytical studies were conducted to investigate seismic response and nonlinear characteristics of pile-soil springs for structures supported by piles in cohesive soil. The results of a shaking table test demonstrated that nonlinear behavior of soil influenced seismic response of a superstructure and of piles. Three-dimensional finite element (3D FE) models for evaluating pile stress were constructed by comparing analytical results and data of a shaking table test in granular soil and an in-situ loading test in cohesive soil. According to an analytical study using 3D FE models, it is found that pile-soil springs of cohesive soil had different characteristics from those of granular soil.

研究分野：建築構造

キーワード：地盤 - 構造物の非線形相互作用 杭基礎 粘土地盤 群杭効果 杭周地盤ばね 模型振動台実験 有限要素法

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、研究者個人に帰属します。

### 1. 研究開始当初の背景

南海トラフ沿いの巨大地震や大都市直下地震の発生が逼迫する昨今、大地震に対する杭基礎の耐震性能の評価が必要とされ、建築基礎構造設計指針が改定されようとしている（※2019年11月に改定された）。杭支持構造物の地震応答を考える上で、地盤-構造物系の非線形相互作用の影響は無視できない。大地震時の杭基礎の損傷を精度よく予測するためには、杭基礎と上部構造を連成させた全体系を考え、杭-地盤間の力のやり取りを精緻な杭周地盤ばねとしてモデル化する必要がある。

杭周地盤ばねの非線形特性は、地盤の材料としての力学的性質を踏まえて土質条件に応じたものを用いるべきである。砂地盤の液状化については、杭支持構造物模型を用いた振動台実験が多く行われ、その成果は、地盤の間隙水圧の変化に連動した杭周地盤ばねの開発等を通じて杭基礎の応答評価法に反映されつつある。一方、軟弱な粘土地盤を対象とした実験は、粘土地盤を実験室で再現することの難しさや、粘土地盤特有の性質による取り扱いの難しさから、ほとんど行われていない。

2003年十勝沖地震と2016年熊本地震の被害を顧みると、軟弱な粘土地盤での地震動の増幅や杭近傍地盤の強非線形挙動が、杭基礎の被害に大きく影響を及ぼしたことが指摘されている。また、粘土地盤で実施された杭の原位置載荷実験では、杭-地盤間の剥離や杭近傍地盤の亀裂といった粘土地盤特有の非線形現象が確認されている。これらの現象が杭基礎の地震応答に及ぼす影響を実験的に把握し、精緻かつ耐震設計で使いやすい実用的な杭周地盤ばねにモデル化することは、杭基礎の耐震性能評価法の高度化に向けた喫緊の課題である。

### 2. 研究の目的

粘土地盤に建つ杭支持構造物の地震応答と杭周地盤ばねの非線形特性を、模型振動台実験と三次元有限要素解析から明らかにする。具体的には、

- 1) 模型振動台実験を行い、粘土地盤中の杭支持構造物の地震応答を明らかにする。
- 2) 粘土地盤中の杭の水平抵抗をシミュレートできる三次元有限要素モデルを構築する。比較対象となる砂地盤中の杭に対しても、三次元有限要素モデルの有効性を検討する。
- 3) 粘土地盤中の杭における杭周地盤ばねの非線形特性を三次元有限要素解析により評価し、その留意すべき性質を明らかにする。

### 3. 研究の方法

#### (1) 模型振動台実験

大阪大学所有の小型振動台を用いて、杭支持構造物の模型振動台実験を1g重力場で行った。試験体の断面図を図1に示す。杭基礎は、杭中心間隔が杭径の4倍となる9本群杭とした。杭の支持層は、加振方向もしくは加振直交方向に傾斜させた。表層地盤はカオリン粘土で製作し、密閉容器とコンプレッサーからなる図2の装置を用いて空気圧によって圧密した。地震動入力の一連の繰り返しによる影響を検討するため、振幅を漸増させていく一連の加振を2回行った。また、比較対象として、表層地盤を乾燥砂地盤とした実験も行った。

砂地盤の実験については、三次元有限要素法によるシミュレーションを行った。粘土地盤の実験についても同様のシミュレーションを試みたが、低拘束圧条件下の極めて軟弱な粘土地盤のモデル化が難しく、本研究では断念した。そこで、後述する原位置載荷実験のシミュレーションによって、粘土地盤中の杭における解析の有効性を検討することにした。

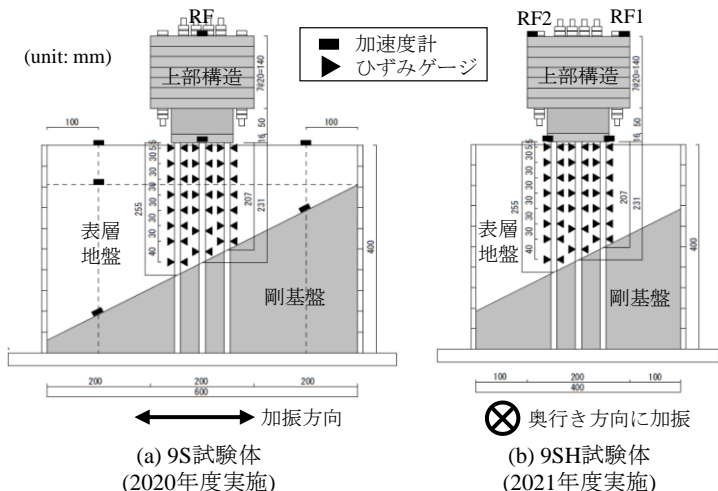


図1 試験体の断面図



図2 圧密装置

(2) 原位置載荷実験のシミュレーション

茨城県小美玉市の粘土地盤で実施された実大鋼管杭（杭径 267.4mm、杭長 5m）の原位置載荷実験に対して、三次元有限要素法によるシミュレーションを行った。地盤材料の非線形特性は、実験敷地で採取された地盤材料の室内試験結果などをもとに決定した。実験では杭-地盤間に剥離が発生したため、解析でも剥離を考慮した。

(3) 三次元有限要素法に基づく杭周地盤ばねの評価

三次元有限要素法を用いて、砂および粘土地盤中の群杭の杭周地盤ばねを評価した。検討対象とした群杭の例を図3に示す。杭本数と杭中心間距離をパラメータとし、杭一本ごとの杭周地盤反力-杭変位関係の履歴特性と、群杭全体としての杭周地盤ばねの動的変形特性を整理した。

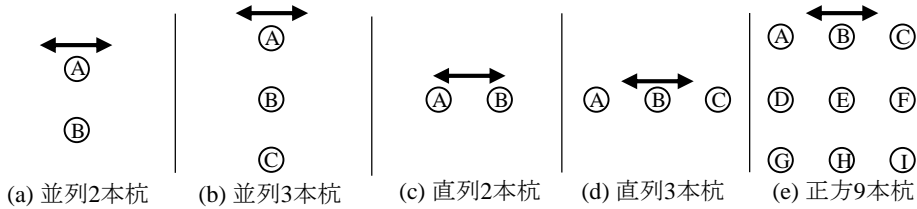


図3 解析対象とした群杭の例

4. 研究成果

(1) 模型振動台実験

a) 実験結果

支持層を加振方向に傾斜させ、表層地盤を粘土地盤とした実験で得られた杭の最大曲げモーメント分布を図4に示す。大加振を経験していない1回目の小加振では、杭長が異なってもほぼ同じ曲げモーメント応答を示している。これに対して、杭周地盤の非線形化が進む大加振では、杭周地盤剛性の低下により直線的な曲げモーメント分布になるとともに、先端の固定端の影響が現れ、短い杭の曲げモーメントが先端部で大きくなっている。さらに、大加振経験後となる2回目の小加振では、大加振と同様の曲げモーメント分布となっており、大加振によって緩んだ杭周地盤が回復していないことがわかる。これらの現象は、支持層を加振直交方向に傾斜させた試験体でも見られた。

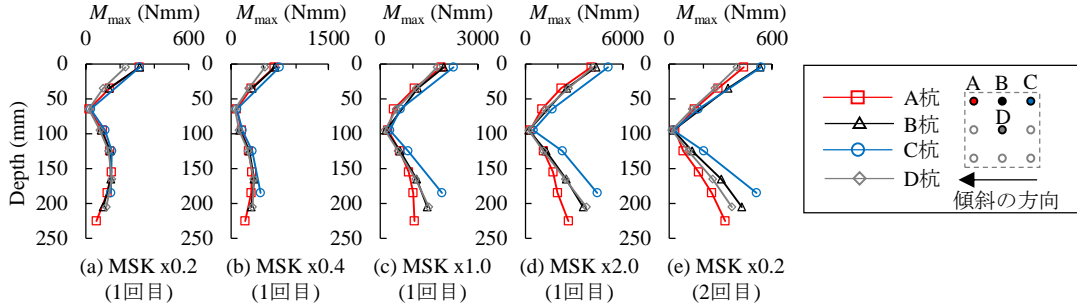


図4 杭の最大曲げモーメント分布（粘土地盤・実験）

b) 三次元有限要素法に基づくシミュレーション結果

支持層を加振方向に傾斜させ、表層地盤を砂地盤とした実験における杭の最大曲げモーメント分布を、実験と解析で比較して図5に示す。解析結果は実験結果と対応している。特に、大加振になるにつれ長い杭と短い杭の応答の違いが大きくなる現象を、解析はよく捉えている。同様に、支持層を加振直交方向に傾斜させた試験体の地震応答についても、三次元有限要素解析でシミュレートできた。したがって、支持層が傾斜した条件下においても、砂地盤中の群杭に対する三次元有限要素モデルの有効性が示された。

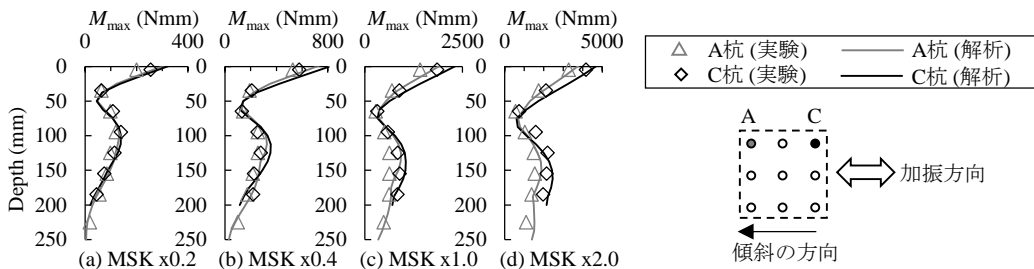


図5 杭の最大曲げモーメント分布（砂地盤・実験と解析の比較）

(2) 原位置載荷実験のシミュレーション

杭頭荷重－杭頭部変位関係を実験と解析で比較して図6に示す。ここで、解析結果は、杭－地盤間の剥離を考慮した「剥離」モデルと、考慮しない「密着」モデルで比較して示す。剥離モデル解析結果は、実験結果と対応している。一方、密着モデルの解析結果は、実験結果とは乖離している。杭頭部変位が±10mm および±60mm に初めて達した時点での曲げモーメント分布を、実験と解析で比較して図7に示す。剥離モデル解析結果は、杭頭が負側に60mm変位した場合の最大曲げモーメントを大きく与えるものの、密着モデルに比べると実験結果と対応している。このことから、粘土地盤中の杭を対象とした本実験に対して、地盤の材料非線形と杭－地盤間の剥離を考慮した三次元有限要素モデルの有効性が示された。

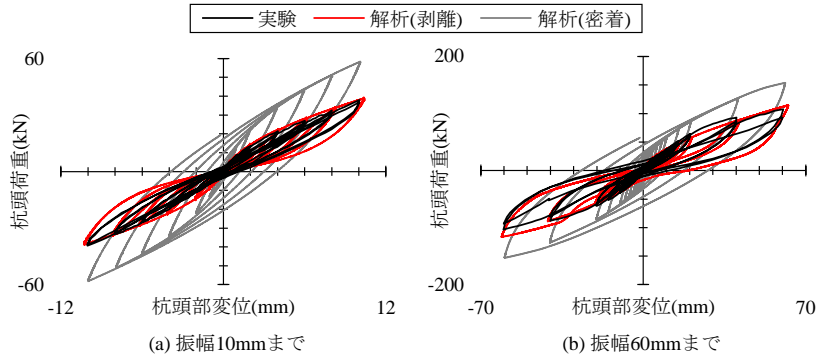


図6 杭頭荷重－杭頭部変位関係

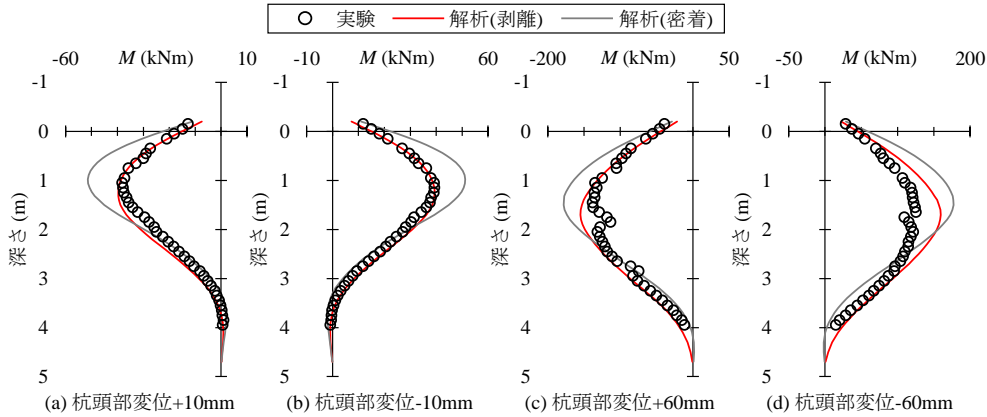


図7 杭の曲げモーメント分布

(3) 三次元有限要素法に基づく杭周地盤ばねの評価

単杭の杭周地盤反力－杭変位関係を、砂地盤と粘土地盤で比較して図8に示す。砂地盤における杭周地盤反力－杭変位関係は、若干のくびれを有するものの紡錘形に近い履歴を描く。これに対して、粘土地盤における杭周地盤反力－杭変位関係は、杭－地盤間の剥離によりスリップ型の履歴を描く。次に、粘土地盤において、直列3本群杭の端杭と中杭における杭周地盤反力－杭変位関係を図9に示す。左右いずれの方向の加力においても後方杭となる中杭では、隣接杭が杭間地盤を押し出すことで剥離による隙間が埋まり、スリップ性状が弱まっている。一方、加力方向に応じて前方杭にも後方杭にもなる端杭では、スリップの現れ方が加力方向によって異なり、複雑な履歴特性を有する。これらの履歴特性は、杭周地盤ばねの等価減衰定数にも影響を及ぼす。以上のことから、粘土地盤中の杭で杭周地盤ばねをモデル化する際には、杭－地盤間の剥離によるスリップ挙動の考慮が重要であることが明らかになった。

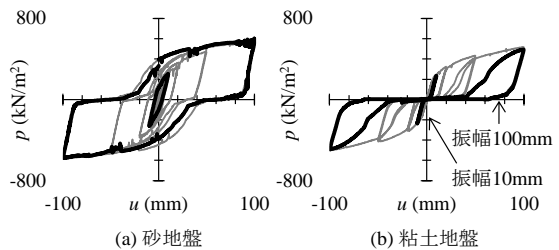


図8 単杭の杭周地盤ばね

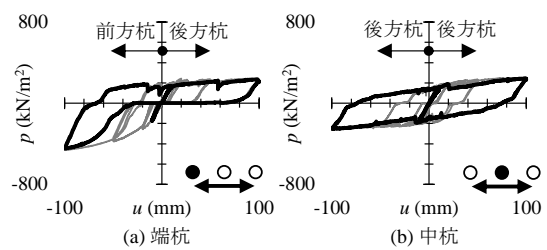


図9 粘土地盤中の3本群杭の杭周地盤ばね

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 中野尊治, 宮本裕司	4. 巻 87(795)
2. 論文標題 傾斜基盤上の砂地盤に建つ群杭支持建物の地震応答と非線形杭周地盤ばね	5. 発行年 2022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 424-434
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.87.424	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 宮本裕司, 中野尊治	4. 巻 構造11
2. 論文標題 傾斜基盤上に建つ群杭支持構造物の地震応答, その1 表層地盤を粘性土とした場合	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 831-832
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中野尊治, 宮本裕司	4. 巻 構造11
2. 論文標題 傾斜基盤上の砂地盤に建つ群杭支持構造物の地震応答, その2 表層地盤が砂の場合	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 833-834
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中野尊治, 宮本裕司	4. 巻 構造系(61)
2. 論文標題 傾斜基盤上の砂および粘性土地盤に建つ群杭支持構造物の模型振動台実験	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 日本建築学会近畿支部研究報告集	6. 最初と最後の頁 289-292
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中野尊治, 宮本裕司, 廣瀬榛名	4. 巻 85(777)
2. 論文標題 斜め方向入力を受ける砂地盤中の群杭の地震応答	5. 発行年 2020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 1419-1429
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3130/aijs.85.1419	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 符顯楠, 中野尊治, 宮本裕司, 廣瀬榛名	4. 巻 構造11
2. 論文標題 模型振動台実験に基づく斜め方向の入力を受ける砂地盤中の群杭支持構造物の地震応答	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会大会学術講演梗概集	6. 最初と最後の頁 275-276
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 符顯楠, 中野尊治, 宮本裕司, 廣瀬榛名	4. 巻 構造系(60)
2. 論文標題 斜め方向の入力を受ける砂地盤中の群杭支持構造物の地震応答(その1) 模型振動台実験による検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会近畿支部研究報告集	6. 最初と最後の頁 45-48
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中野尊治, 宮本裕司, 廣瀬榛名, 符顯楠	4. 巻 構造系(60)
2. 論文標題 斜め方向の入力を受ける砂地盤中の群杭支持構造物の地盤応答(その2) 三次元有限要素法による解析的検討	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 日本建築学会近畿支部研究報告集	6. 最初と最後の頁 49-52
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 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 中野尊治, 宮本裕司	4. 巻 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 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 オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 宮本裕司, 中野尊治
2. 発表標題 傾斜基盤上に建つ群杭支持構造物の地震応答, その1 表層地盤を粘性土とした場合
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野尊治, 宮本裕司
2. 発表標題 傾斜基盤上の砂地盤に建つ群杭支持構造物の地震応答, その2 表層地盤が砂の場合
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 中野尊治, 宮本裕司
2. 発表標題 傾斜基盤上の砂および粘性土地盤に建つ群杭支持構造物の模型振動台実験
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 Nakano, T. and Miyamoto, Y.
2. 発表標題 Nonlinear Soil Resistance of Pile Group Foundation Subjected to Harmonic Excitation Based on 3D FEM
3. 学会等名 17th World Conference on Earthquake Engineering (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 符顯楠, 中野尊治, 宮本裕司, 廣瀬榛名
2. 発表標題 模型振動台実験に基づく斜め方向の入力を受ける砂地盤中の群杭支持構造物の地震応答
3. 学会等名 日本建築学会大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 符顯楠, 中野尊治, 宮本裕司, 廣瀬榛名
2. 発表標題 斜め方向の入力を受ける砂地盤中の群杭支持構造物の地震応答 (その1) 模型振動台実験による検討
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中野尊治, 宮本裕司, 廣瀬榛名, 符顯楠
2. 発表標題 斜め方向の入力を受ける砂地盤中の群杭支持構造物の地盤応答 (その2) 三次元有限要素法による解析的検討
3. 学会等名 日本建築学会近畿支部研究発表会
4. 発表年 2020年



1. 発表者名 中野尊治, 宮本裕司
2. 発表標題 砂地盤と粘土地盤における群杭の杭周地盤ばねの履歴特性
3. 学会等名 日本地震工学会・大会-2019
4. 発表年 2019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
研究協力者	宮本 裕司  (MIYAMOTO Yuji)		

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------