

令和 3 年 6 月 17 日現在

機関番号：12401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01517

研究課題名（和文）杭基礎系の降伏を許容したキャパシティデザインのための応答評価手法の高度化

研究課題名（英文）Highly accurate computational method for dynamic response of structure systems supported by pile foundations allowing yielding behavior in capacity design

研究代表者

齊藤 正人（Saitoh, Masato）

埼玉大学・理工学研究科・教授

研究者番号：40334156

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,600,000円

研究成果の概要（和文）：近年の大地震では、基礎構造物に甚大な被害が及ぶ事例が報告されている。地盤-基礎系に伝達される力の増加により、系は非弾性的な挙動を示し、波動現象と破壊現象が共存する複雑な状況を生み出す。本研究では、非弾性特性を代表する耐力や降伏挙動を対象に振動数依存性の有無と現象解明を模型実験と有限要素法による数値解析で評価した。さらに非弾性特性と振動数依存性が構造物に及ぼす影響の優位性とそのメカニズムを明らかにした。本研究では、両特性を考慮した応答評価手法を提案し、実験で得られた動特性を再現することに成功した。最後に、同手法の適用範囲を降伏程度に応じて使い分けることの可能性を提言するに至った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

建物を支える基礎と周辺地盤は、地震の際に壊れる場合があることが知られている。一方で、建物の動き方によって、それらは固くも柔らかくもなる特性がある。壊れる現象とそうした特性の関係は未解明である。これが解明されれば、地震が起きたときに建物がどのように動き、どのように壊れるのか、これまでよりも正確に予想できるようになる。この研究では、模型を使った実験と計算によって、それらの関係を明らかにした。

研究成果の概要（英文）：In recent years, there have been reported that several cases in which foundations were severely damaged during earthquake events. An increase in the amplitude of loading transmitting to soil-foundation systems is attributed to inelastic behavior of the system, thus leading to intricate combination of failure mechanisms and wave propagations. This research conducted experimental and numerical studies of single piles and pile groups for prevailing the relation between yielding procedures and frequency-dependent characteristics in the systems. This study proposed a new phenomenological model that can consider both the intensity and frequency dependencies of the systems. The model was verified by comparing the impedance functions and their convergence trends with the amplitude of loadings obtained from the experiments. This study finally proposed the applicability of the proposed model based on the yielding level.

研究分野：地震工学

キーワード：杭基礎 動的相互作用 非線形性 振動数依存性 模型実験 有限要素法解析 集約モデル

1. 研究開始当初の背景

地震時における構造物の動的挙動を精度よく予測するためには、地上部の構造物のみならずこれを支持する地盤と基礎を無視することはできない。地盤-基礎-構造物間の動的相互作用を適切に評価することで、高精度な応答予測は可能となる。動的相互作用の研究は、原子力発電所の耐震設計に端を発し、有限要素法や薄層要素法など複雑な波動現象を扱える高度な解析手法が開発された。過去の研究によって、地盤-基礎系の動的ばね特性が構造物に及ぼす影響が設計上無視できないものであること、また動的ばね特性は「振動数依存性」、つまり加振力の振動成分によって静的ばね特性から大きく変動した値を示すことが明らかとなった。

一方で、東日本大震災のように、近年の大地震では基礎構造物の著しい損傷が報告されている。つまり、地盤-基礎系の応答は非弾性領域となる。キャパシティデザインに基づく現代の耐震設計において、強震動によって増大するエネルギーの吸収を構造物のどこで行うか、という問題は極めて重要である。一般に、早期復旧の観点からは、地上に出ている構造物の一部を損傷させて、そこでエネルギー吸収をさせるという設計方針が採用される。しかし、複線化に適した壁式橋脚のように橋脚の耐力が高く、基礎の損傷が先行することが避けられない場合も多い。そのため、現在、地盤-基礎系を非弾性として扱う設計法が前提となっている。

それでは、前述した地盤と基礎の「振動数依存性」と「非弾性特性」を今後どのように扱うべきなのであろうか。今の設計法では、性能照査の観点から強度と靱性(粘り強さ)を定量的に評価することが求められている。そのため、降伏状態、最大耐力状態、終局状態などの段階的な非弾性特性が性能照査の際に使用されることから、「非弾性特性」に軍配が上がっている。このとき、「振動数依存性」は陰に動的解析に含まれることはあっても、非弾性特性との解析上の相性の悪さから近似的に扱われることや無視されることが一般的となっている。

これまで代表者は、平成23年度から5年間(基盤研究(C)(平成23年度~平成24年度、平成25年度~平成27年度))にわたり、地盤-杭系を対象にした非弾性領域における動的相互作用を研究してきた。結果、地盤-杭系は弾性時のみならず非弾性時においても強い「振動数依存性」を示すことが、模型杭を用いた振動実験から明らかになった。つまり、地盤に強い非弾性が現れた場合でも、基礎周辺の地盤では多様な振動現象が発生し、それを原因に振動数依存性は消滅せず、弾性時と同様に振動数依存性は現れ続けるのである。

このことは、現行の耐震設計法には未だ改善の余地があることを示唆している。しかし、どのような状況において、振動数依存性をどの程度、さらにどのように応答評価に組み込んだらよいのであろうか。代表者の5年間にわたる研究では、先人による過去の研究と同様に「ばね」としての地盤-基礎系の特性を評価してきた経緯がある。言い換えれば、地盤-基礎系における荷重と変位の関係のうち、その「傾き」の特性を主な研究対象としてきたのである。一方で、構造物-基礎間の力の伝達の観点からは、地盤-基礎系の「耐力」が重要な指標となる。これまでの研究では、耐力に関する評価は一切行っていない。地盤-基礎系が降伏した場合には、荷重-変位関係の「傾き」よりも、むしろ伝達荷重の限界を示す「耐力」に、構造物全体系の挙動が支配されている可能性が高いことが予想される。その場合、「ばね」の振動数依存性は副次的な効果となり、現行の設計法に示すような「非弾性特性」で十分ということもあり得る。その際、「耐力」そのものに振動数依存性があるかどうかについても慎重に評価しなければならない。

地盤-基礎系の非弾性状態における「耐力」の「振動数依存性」の解明とそれらの特性が構造物全体系に及ぼす影響とその範囲を明らかにすることが、本研究の核心をなす学術的な課題であり「問い」である。

2. 研究の目的

近年の甚大な地震被害では、損傷が基礎構造物に及ぶ事例が顕著である。本研究では地盤-杭系を対象とし、系の非弾性挙動と振動数依存性という“破壊現象”と“波動現象”が共存する複雑な状況下での動的相互作用について評価を行う。模型実験ならびに数値解析を用いた系の耐力に関する振動数依存性を明らかにすること、耐力と動的ばねの振動数依存性と非弾性特性の関係を解明し、構造物に及ぼす影響とその条件ならびに範囲を明らかにすること、さらには両特性を同時に考慮できる応答評価手法の確立を目的とする。

3. 研究の方法

地盤-杭基礎系の非弾性状態における「耐力」の「振動数依存性」の解明とそれらの特性が構造物全体系に及ぼす影響を、次の4つの研究により調べる。

地盤-杭基礎系の「耐力」を対象とした振動数依存性の評価

中型せん断土槽内に1/20スケールの地盤-群杭実験模型を1g場で製作し、杭頭位置における復元力特性(耐力)を静的載荷および動的載荷により評価する。

耐力を対象とした振動数依存性のメカニズムの解明

3次元非弾性有限要素法(FEM)による模型実験のフィールドを再現し、実験結果との比較によるValidationを行う。検証後、地盤と杭の波動伝播と振動特性を応力とひずみから耐力と振

動数依存性のメカニズムを精査し、現象の物理的解釈を見出す。

動的ばねと耐力の各振動数依存性が構造物に及ぼす影響特性の検討

模型実験及びFEMで得た動的ばねと耐力の特性をばね質点系モデルに組み込むことで、「振動数依存性」と「非弾性特性」が構造物の応答に及ぼすそれぞれの影響を検討する。

応答評価手法の開発と現行の耐震設計に向けた提案と提言

動的加振に対する両特性を反映した応答評価手法（時間領域解析手法）を開発するとともに、現行の耐震設計に向けた両特性の効果的な取り扱い方に関する提案と提言を行う。

4. 研究成果

（平成30年度の成果）

研究初年度の実験的研究では、本研究が目指す杭基礎の耐力特性を含めた大变位領域であることから、従来のアクリル部材から耐衝撃性の高いPOM杭部材を選定した。そのため群杭基礎を対象とした杭頭載荷試験に先立ち、単杭を対象に乾燥砂を用いた杭頭載荷試験を行い、群杭基礎への拡張範囲（本数など）に加えて、本研究が対象とする杭-地盤系の基本特性と実験システム構築を進めた(Fig.1, Fig. 2)。実施した実験は、1) 一方向載荷時における荷重 変位関係の速度依存性、2) 繰り返し載荷時における履歴特性の速度依存性、3) 大変形残留変位時からの速度依存性、4) 動的インピーダンス特性の振動数ならびに振幅依存性についてそれらの特性を把握した。また、本研究においては地表面近傍に生じる表層地盤の変形特性を捉えるため、載荷前、載荷途中、最大載荷時における空間3方向の土粒子運動を3次元画像処理技術（PIV）により開発した。後者の開発によって、杭周辺の詳細な土粒子変位量とその分布性状を把握することが可能となった。

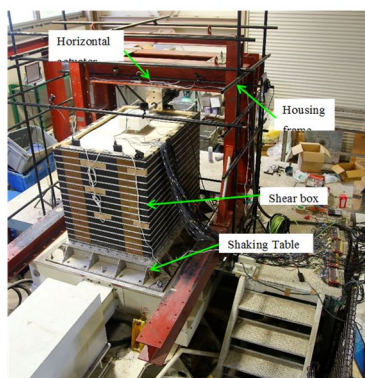


Fig. 1 shaking table unit and pile model

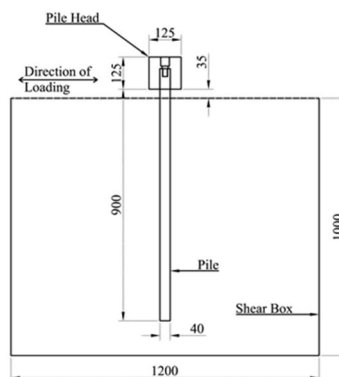


Fig. 2 schematic of single pile

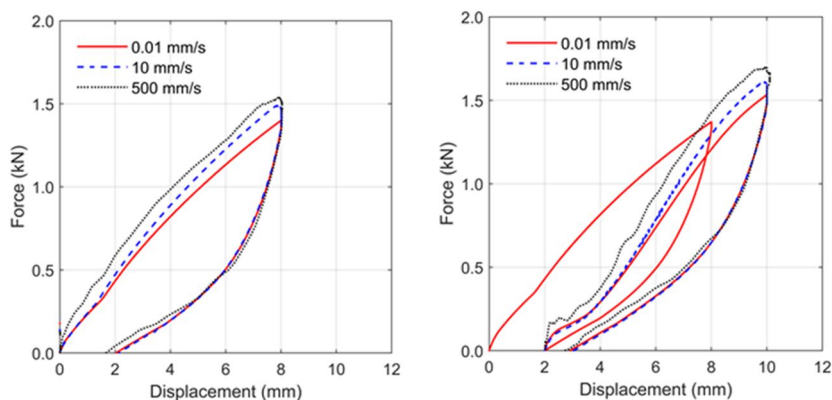


Fig. 3 force-displacement relationship for initial case (left) and b) residual case (right)

本実験では、杭頭における荷重 変位曲線に速度依存性のあることが明らかとなった(Fig. 3)。この実験では杭頭位置にアクチュエータを水平に取り付けた後、所定の3速度(0.01、10、500mm/s)で杭頭を一方向に載荷した。その結果、載荷速度の増加に伴い立ち上がりの初期剛性と耐力が増加する傾向が見られた。この特性は、繰り返し載荷の実験においても同様に確認されている。その際、杭頭の最大変位時における地表面土粒子の移動量は、杭頭速度が大きいくほど広範囲にまたその振幅も増加する傾向を示している(Fig.4に500mm/s 載荷のケースを一例として示す)。

動的インピーダンス関数に関しては、所有する実験装置で載荷可能な最大ストロークを与えての杭頭位置における調和載荷実験を行った。Fig.5に示すように、インピーダンス関数は低振幅加振から中振幅となる5.0m/s²において剛性項(実部)と減衰項(虚部)ともに振動数依存性を示している。一方、本システムで載荷可能な最大ストロークのケース(図中、Max-case)では、

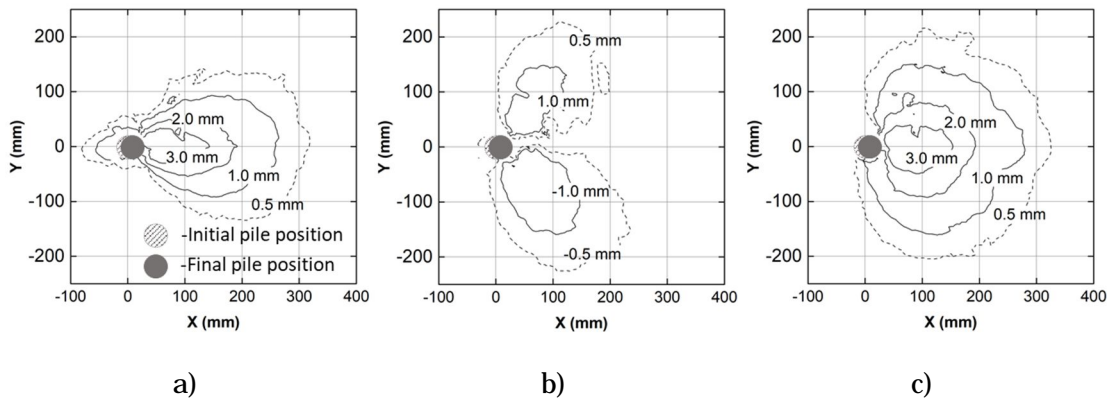


Fig. 4 displacement contours for the 500 mm/s initial loading cases at 8 mm pile head displacement in the a) loading direction, x, b) perpendicular direction, y, and c) heave, z

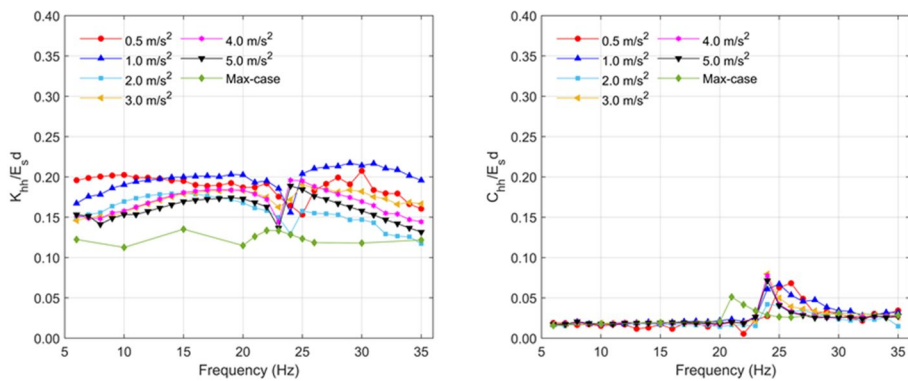


Fig. 5 horizontal impedance functions of single piles a) real part (left) and b) imaginary part (right)

振動数依存性が弱まりフラットな特性が現れる（剛性項）。減衰項は特定の減衰形状に収束する様子が現れる。

（令和元年度の成果）

令和元年度の研究では、前年度の単杭に続いて、2x2 正方配列の群杭基礎の杭頭載荷試験を実施した。具体的には、1) 一方向載荷時における荷重 変位関係の速度依存性、2) 繰り返し載荷時における履歴特性の速度依存性、3) 大変形残留変位時からの速度依存性、4) 大変形残留変位時からの振動数依存性と振幅依存性、5) 動的インピーダンス特性の振動数ならびに振幅依存性についてそれらの特性を把握した。群杭基礎の実験からは、単杭基礎で確認された載荷速度の依存性と振動数依存性の大幅減時における振動数依存性の低減が同様に確認された。

これら単杭試験と群杭の動的載荷試験に対して、動的インピーダンス関数の剛性項と静的載荷曲線の剛性（割線剛性）の関係について評価した（Fig.6 に単杭基礎のケースを示す）。

その結果、振動数依存性は応答振幅の増大に伴う地盤の非弾性状況下において低減し、静的な荷重 変位曲線（骨格曲線）から定まる割線剛性に収束する性質が現れることが明らかとなった。この特性は群杭基礎のインピーダンス特性にも同様に現れることも確認された。また、こうした実験的研究と並行してそれらの挙動のメカニズムの解明を進めた。本研究では、PLAXIS 3D を用いた 3 次元非弾性有限要素法（FEM）による模型実験のフィールドを再現し、実験結果との比較によるシミュレーション解析を行った（Fig.7）。本シミュレーション解析では、単杭と群杭双方の一方向載荷における速度依存性と動的載荷による振動数依存性と振幅依存性を対象に、地盤のひずみ振幅依存性、土の塑性変形、杭と周辺地盤の境界部における非線形性を考慮している。令和元年度は、土の強度特性と変形特性を把握するために低拘束圧下における 3 軸試験と一面せん断試験を実施した。それらの要素試験から得られた物性値を用いてシミュレーション解析

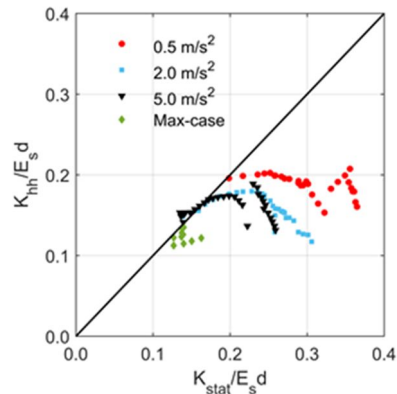


Fig. 6 comparison between dynamic stiffness (K_{hh}) and secant static stiffness (K_{stat}) obtained from the backbone curve for the corresponding displacement amplitude of dynamic stiffness for single pile

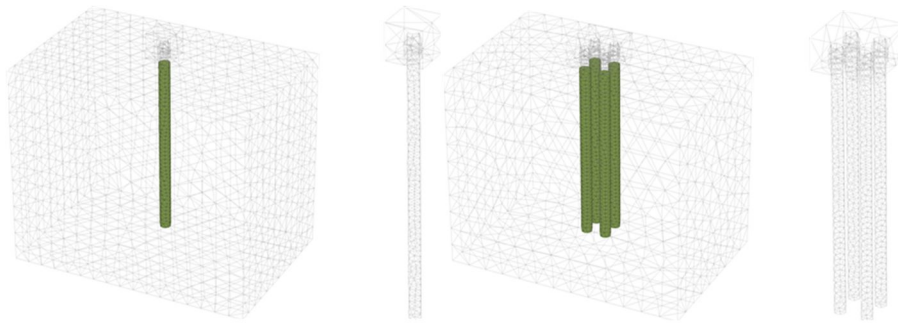


Fig. 7 model of single pile and pile group

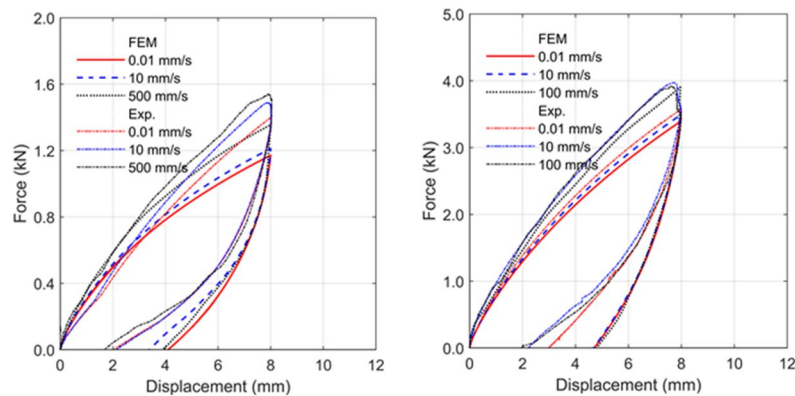


Fig. 8 Numerical force-displacement relationship in comparison with experimental values for single pile (left) and pile group (right)

を行った結果、実験で観測された速度依存性が定性的に表現できることが判明している (Fig.8)。(令和2年度の成果)

令和元年度までに実施した実験的研究では、単杭と群杭(正方配列4本杭)を対象に乾燥砂を用いた杭頭載荷試験を行い、動的インピーダンス特性の振動数ならびに振幅依存性について把握した。そこで令和2年度は、以下の2つの評価を実施し、本研究を結論付けた。

有限要素解析による地盤-群杭基礎系の振動数依存性に関する収束特性の評価

令和元年度に実施した単杭・群杭基礎の実験シミュレーション解析を深度化し、実験で観測された振動数依存性の静的剛性への収束特性についてその再現性を検証した (Fig.9)。その結果、シミュレーション解析においても、動的剛性項の大変形時における静的骨格曲線への収束特性が確認された。このことは、杭頭載荷試験で発見された同現象を裏付ける重要な知見であり、これまで未解明だった動的インピーダンス関数と振幅依存性の関係を明確に説明する重要な成果である。

振動数依存性と入力振幅依存性を同時に考慮した応答評価手法の開発と現行設計に向けた提案と提言

振動数依存性を有する動的ばねの収束特性を再現可能な解析モデルを提案し、単杭基礎の収束特性を再現するに至った。本研究の提案モデルは、振動数依存性を表現できる従来型の Gyro-Lumped Parameter Model (GLPM) を改良し、同モデルを作用荷重レベルに応じて逐次パラメータ変化させ、それと同時に GLPM と直列したパイリニア型の非弾性履歴ばねを組み合わせることで、実験で観測されたインピーダンス関数の作用荷重レベルに応じた変化や剛性項の収束特性を良好に再現するに至った。

設計への提言として、基礎の変形が降伏点近傍に及ぶ場合、本モデルの適用が望ましいと結論付けた。一方で、降伏後に更なる大変形が見込まれる場合、あるいは降伏点には到達しない小変形が見込まれる場合には、前者は単純な履歴モデル、後者は GLPM で代替できる可能性を本研究では結論付けている。

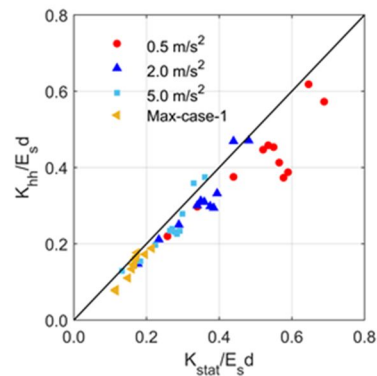


Fig.9 Comparison between dynamic stiffness (K_{hh}) and secant static stiffness (K_{stat}) obtained from the backbone curve for the corresponding displacement amplitude of dynamic stiffness for single pile

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計2件（うち査読付論文 2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 Shrestha Naba Raj, Saitoh Masato, Saha Alok Kumer, Goit Chandra Shekhar	4. 巻 61
2. 論文標題 Frequency- and intensity-dependent impedance functions of laterally loaded single piles in cohesionless soil	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 129 ~ 143
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sandf.2020.11.004	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 Shrestha Naba Raj, Saitoh Masato, Saha Alok Kumer, Goit Chandra Shekhar	4. 巻 4
2. 論文標題 Experimental and Numerical Analysis on the Rate-Dependent Cyclic Lateral Load on a Single Pile in Sand	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 International Journal of Civil Infrastructure	6. 最初と最後の頁 9 ~ 15
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4件（うち招待講演 1件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 齊藤正人、Shrestha Raj Naba, Saha Kumer Alok, Goit Shekhar Chandra
2. 発表標題 単杭基礎の水平動的ばねの大変形時における収束特性の実験的評価
3. 学会等名 土木学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Naba Raj Shrestha, Masato Saitoh, Alok Kumer Saha, Chandra Shekhar Goit
2. 発表標題 Rate-Dependent Cyclic Lateral Load Test on a Single Pile in Sand
3. 学会等名 5th International Conference on Civil, Structural and Transportation Engineering (ICCSTE'20)（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Masato Saitoh
2. 発表標題 Plenary Lecture: Frequency vs. Intensity Dependencies of Soil-Pile Systems
3. 学会等名 The 5th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE-2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Alok Kumer Saha, Masato Saitoh, Naba Raj Shrestha, Chandra Shekhar Goit
2. 発表標題 NUMERICAL MODELLING OF THE RATE-DEPENDENT CHARACTERISTICS OF LATERALLY LOADED SINGLE PILES IN DRY SAND
3. 学会等名 The 5th International Conference on Advances in Civil Engineering (ICACE-2020) (国際学会)
4. 発表年 2021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	Goit Chandra (Goit Chandra) (10782732)	埼玉大学・理工学研究科・助教 (12401)	

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
---------	---------