

令和 2 年 6 月 17 日現在

機関番号：82723

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K14726

研究課題名（和文）杭-地盤系の三次元連続可視化と数値解析モデリング

研究課題名（英文）Three dimensional continuous visualization and numerical simulation for soil-pile system

研究代表者

野々山 栄人 (Nonoyama, Hideto)

防衛大学校（総合教育学群、人文社会科学群、応用科学群、電気情報学群及びシステム工学群）・システム工学群・講師

研究者番号：00624842

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：従来の実験技術では、杭基礎およびその周辺地盤の実際挙動を時間的連続的に可視化する術がなかった。本研究では、屈折率整合法と呼ばれる新しい実験技術の適用性の確認も含め種々の検討を行い、実験方法を整備した。得られた知見を踏まえて杭の載荷可視化実験を行い、杭と地盤の相互作用メカニズムの検討を行った。載荷中における地盤内の杭の実際挙動を観察し、単杭の水平載荷時に地盤に及ぼす影響範囲を可視化した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

従来の地盤工学における模型実験技術では、時々刻々と変化する地盤内部の変形現象を時間的連続的に捉えることが難しかった。一方、屈折率整合法では連続した情報を時間的に連続で得ることができる新しい実験技術である。

本研究の成果をさらに発展させることで、杭基礎と地盤の変形挙動が定量的に予測できる可能性があり、適切な杭基礎工法の選定、合理的な設計につなげることが可能となる。

研究成果の概要（英文）：In the conventional experimental technique of geotechnical engineering, there was no way to visualize the actual behavior of the pile foundation and the surrounding ground continuously in time. In this research, we conducted confirmation of the applicability of a new experimental technique called the refractive index matching method.

A pile loading visualization tests were conducted based on the obtained knowledge, and the interaction mechanism between the pile and the ground was examined. The actual behavior of pile in the ground during loading was observed, and the range of influence on the ground during loading was visualized.

研究分野：地盤工学

キーワード：杭基礎 可視化 模型実験 数値解析 画像解析

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

我が国は、世界的に見ても地震大国であり、これまでも甚大なる地震被害を経験してきた。兵庫県南部地震(1995)や東北地方太平洋沖地震(2011)では、構造物を支える杭基礎に多くの被害が生じた。耐震設計基準は、地震等の大災害を受けるたびに、被害発生の原因の解明と設計基準の改定が行われている。現行の杭基礎設計では、極端な単純化が行われ、具体的には杭は弾性梁、地盤はバネでモデル化されている。この方法で取り扱えるのは応力照査のみであり、杭やその周辺地盤の変形を考慮することはできない。設計の単純化に伴って、安全面ではその分の余裕を持たせているため、荷重条件によっては問題になることはないが、想定を超える巨大地震に対応できるかは不明である。また、近年ではコスト縮減などの要請もあり多様な杭形式が提案されていること、地盤と上・下部構造物の一体解析による耐震性能設計や都市全体を対象とした地震シミュレーションも行われていることを踏まえて、新しい杭基礎と地盤の相互作用モデルの構築が必要であると考えた。

### 2. 研究の目的

本研究では、地盤の変形挙動を観察するために、近年盛んに研究が進められている屈折率整合と呼ばれる実験技術を用いる。土を模擬した透明粒子(石英)と、その粒子と同じ屈折率を有する整合液を用いて透明模型地盤を作製し、杭基礎に外力を作用させたときの杭基礎およびその周辺地盤の変形挙動を時間的に連続可視化する方法を確立する。可視化によって得られた情報に基づいて杭基礎-地盤の相互作用モデルを構築する。

### 3. 研究の方法

本研究は杭-地盤系における三次元連続可視化を目指すものである。

#### (1) 平面ひずみ条件における地盤の変形挙動の可視化

杭基礎と地盤の3次元挙動を可視化するための準備として、平面ひずみ条件下で地盤条件を変えて帯基礎の支持力可視化実験を実施した(図-1, 2)。実験では、地盤内に配置したトレーサー粒子を、二次元PTV画像解析を用いて、2次元的な地盤の変形挙動を可視化する。なお、トレーサー粒子には、着色した石英を用い、土槽中央断面および土槽側面にそれぞれ配置した。



図-1 可視化実験の様子

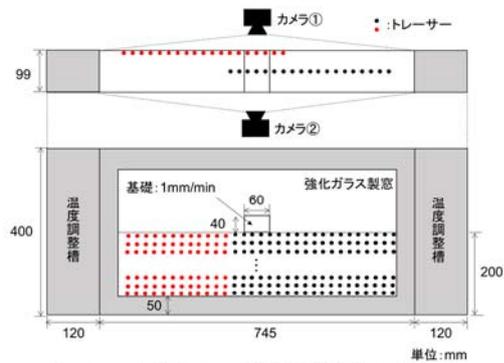


図-2 支持力可視化実験の概要

#### (2) 地盤の三次元変形挙動の可視化

地盤の三次元挙動を観察する方法を確立するために、二面の観察窓を有する三次元土槽を開発し、円形基礎の引揚可視化実験を実施した(図-3)。実験条件として、根入れ比D/Bと地盤の相対密度を変化させて、4ケースの実験を実施した。図-4に示すように、二方向から同期撮影した画像を用いて三次元PTV画像解析を行い、基礎引揚中の地盤の3次元的な変形挙動の時間連続可視化する方法を確立する。また、地盤と構造物の相互作用モデルの構築のための基礎的検討として、得られた可視化結果に基づいて、引揚抵抗力の評価式の提案および可視化実験で得られた変位場と引揚荷重の両方を数値解析(軸対称FEM)により再現を行った。

#### (3) 杭の水平載荷可視化実験

開発した三次元土槽と载荷装置を用いて、単杭の単調・繰返し水平載荷試験を実施した(図-5)。杭と杭周辺地盤の変形挙動の可視化を行うために、地盤内にトレーサー粒子を配置した。また、模型杭の挙動を可視化するために、2対のひずみゲージとトレーサー粒子をそれぞれ等間隔で取り付けた。従来の曲げひずみからたわみを計算する方法と、模型杭接着させたトレーサー粒子の挙動を画像解析によりたわみを求める方法で両者の比較を行った。

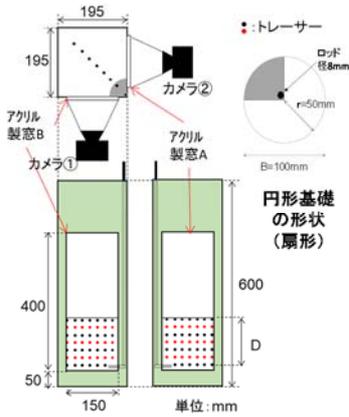


図-3 引揚実験の概要



図-4 作製した模型地盤

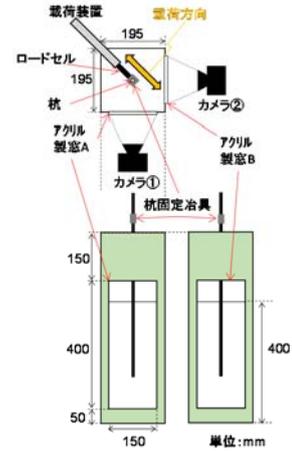


図-5 杭の水平載荷の概要

#### 4. 研究成果

##### (1) 平面ひずみ条件における地盤の変形挙動の可視化

地盤条件を変えた帯基礎の支持力可視化実験を実施した。密な地盤では、地表面で明確な隆起変形が確認された一方、緩い地盤では、鉛直方向の変形が深い位置まで広がる傾向が確認された。また、土槽側面と中央断面で同様な変形モードが得られた (図-6)。オイルを整合液とする透明土実験の場合、境界面での摩擦処理をする必要がないことを明らかにした。

##### (2) 地盤の三次元変形挙動の可視化

開発した試験装置を用いて、円形基礎の引揚可視化実験を実施した。画像解析により、地盤の三次元挙動を可視化することができ、その破壊モードは模型地盤の密度と基礎の深さに依存することを明らかにし、すべり面をモデル化した。得られたすべり線は、既往の研究で提案されている直線とその崩壊角度  $\theta$  が  $\phi/2$  ( $\phi$ : 内部摩擦角) と一致する結果が得られた (図-7)。また、本研究で提案した可視化結果に基づく引揚抵抗力モデルで、既往の現場実験の結果を再現することがわかった (図-8)。軸対称 FEM による再現解析では、土の構成モデルに下負荷面を考慮したモデルを用いることで、引揚荷重および可視化断面での変位場を概ね再現できることを確認した (図-9)。

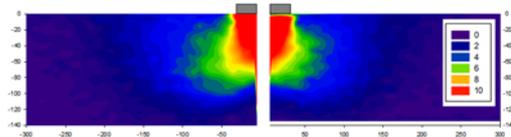


図-6 緩い地盤(左:土槽側面, 右:土槽中央断面)

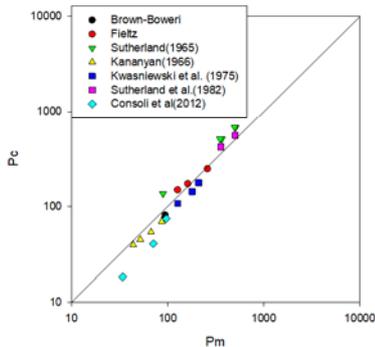


図-8 提案モデルと現場実験結果との比較(密な地盤)

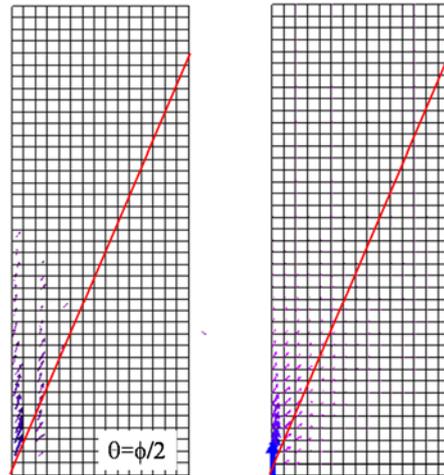


図-7 可視化実験で得られた図-9 FEMによる再現解析変位場とすべり線の結果 (D/B=4, 密な地盤)

##### (3) 杭の水平載荷可視化実験

透明土を用いて、地盤条件と模型杭の条件を変えて、単杭の単調・繰返し水平載荷可視化実験を実施した。肉厚の異なるアルミ製模型杭を用いて、杭先端を固定した条件で、模型杭が弾性変形で留まる変位まで単調載荷を行った。比較として、肉厚が薄い模型杭でも、同じ水平変位量まで載荷したところ、地盤内で模型杭が塑性変形した。両実験の杭のたわみをひずみゲージおよび画像解析を用いて求めた。肉厚が厚い模型杭は両者のたわみがほぼ一致したことから、透明土と

画像解析の組み合わせで、従来の実験方法と同じ結果が得られることがわかった。また、肉厚の薄い模型杭の塑性変形に対しても、画像解析でその挙動を把握でき、杭の実際挙動の連続可視化にも成功した。また、载荷中の地盤内に設置したトレーサー粒子の三次元的な動きについても連続的に追跡することに成功し、载荷による杭の変位によって地盤内の挙動が異なることが観察することができた。

摩擦杭を想定した可視化実験で、杭とトレーサー粒子の相対変位を求めたところ、緩い地盤では、深さ方向によらず同様の傾向が得られ、密な地盤では浅い位置ほど大きな相対変位が得られたことから、地盤の密度の違いによって地盤内の変形挙動が異なることが観察できた。また、杭の繰返し载荷によって、地盤内の密度分布が変化し、それに伴って粒子の移動が変化することも観察できた。

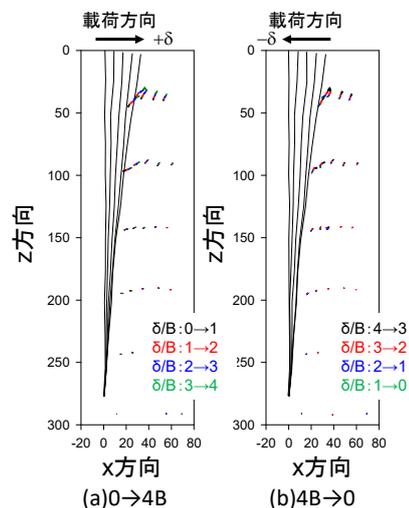


図-10 鉛直断面における杭と地盤の変位増分ベクトル

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 0件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 宮田喜壽, 高野大樹, 野々山栄人, Bathurst Richard	4. 巻 65
2. 論文標題 透明土を用いた地盤実験技術	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 26-27
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 -

〔学会発表〕 計10件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 渡辺武蔵, 野々山栄人, 宮田喜壽
2. 発表標題 透明土を用いた帯基礎の鉛直支持力可視化実験
3. 学会等名 第45回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野々山栄人, 宮田喜壽, 高野大樹
2. 発表標題 透明土を用いた模型実験方法に関する基礎的検討
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会講演集
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 野々山栄人, 宮田喜壽, 高野大樹
2. 発表標題 円形基礎の引揚抵抗力に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Nonoyama, H., Miyata, Y. and Takano, D.
2. 発表標題 Finite Element analysis of cement treated ground under micro failure and macro yield condition
3. 学会等名 Geo Mechanics from Micro to Macro in Research and Practice(IS-Atlanta2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 川野慎之介, 野々山栄人, 宮田喜壽
2. 発表標題 逆T型基礎の引揚支持力に関する可視化実験と数値解析
3. 学会等名 第46回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 松永祥承, 野々山栄人, 宮田喜壽
2. 発表標題 単杭の水平抵抗メカニズム解明のための可視化実験
3. 学会等名 第46回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野々山栄人, 宮田喜壽, 高野大樹
2. 発表標題 基礎の引揚可視化実験とその数値解析
3. 学会等名 土木学会第74回年次学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 野々山栄人
2. 発表標題 地盤の3次元連続可視化に向けた取り組み
3. 学会等名 土木学会応用力学委員会令和元年度東北地区応用力学フォーラム（招待講演）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 福本一真，井口陸，野々山栄人，宮田喜壽
2. 発表標題 透明土を用いた単杭の水平抵抗メカニズムの可視化実験
3. 学会等名 第47回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 井口陸，福本一真，野々山栄人，宮田喜壽
2. 発表標題 透明土を用いたジオグリッド補強基礎地盤の支持力メカニズムの可視化実験
3. 学会等名 第47回土木学会関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2020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
---------	---------------------------	-----------------------	----