

令和元年6月17日現在

機関番号：13301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06489

研究課題名（和文）近接施工が複合基礎構造物の支持特性と耐震性能に与える影響評価

研究課題名（英文）Influences of adjacent works on bearing capacity of hybrid-type foundations

研究代表者

小林 俊一（Kobayashi, Shun-ichi）

金沢大学・地球社会基盤学系・准教授

研究者番号：10243065

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,600,000円

研究成果の概要（和文）：高度な都市機能が集積した都市圏で大規模な開削工事やトンネル・地下空間の掘削を行う場合、近接する既存の構造物基礎への影響を把握する必要がある。小型模型実験により、緩み発生後に変形を抑制できなければ基礎構造物の支持特性が悪化することを確認した。また地盤内部埋設の構造物挙動を3次元的に可視化する実験手法を改良した。さらに設計支援を念頭におき、剛塑性有限要素法と呼ばれる数値シミュレーション法を改良し、近接施工が基礎構造物の耐力に及ぼす影響を評価するツールを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

高度な都市機能が集積した都市圏では近接施工が避けられない。再開発事業は都市の新陳代謝を図るうえで重要であり、大規模な開削工事やトンネル・地下空間の掘削を伴う場合も少なくない。既存構造物の設計時には、大規模な近接施工は想定せず、また複合的な支持機構を期待し、経済性と安全性をバランスさせる。そのため、大規模な近接施工が既存構造物に与える影響には未解明な点が残されており、本研究は実現象を念頭に置いた模型実験観察結果と、設計への支援を志向した1つの数値評価ツールを提供するものである。

研究成果の概要（英文）：Social and economic functions are highly accumulated in urban areas and neighboring construction works are inevitable in such areas. A large-scaled open / underground excavation or tunneling may have large impact on its neighboring structures, especially foundations structures. In this study, the authors observed in small-scaled model tests that bearing capacity mechanism deteriorated much if a settlement of piles continues due to a trap door. The authors developed a three dimensional vitalization technique to observe inner behavior of a buried structure in a model ground using refractive index matching technique of transparent particle media and sucrose solution. In addition, as a design oriented numerical tool, the authors modified a rigid plastic finite element method based on limit analysis by reformulation as 2nd order cone optimization and implementing a ground-structure interaction model as the inequality constraints.

研究分野：地盤工学

キーワード：基礎構造物 支持力 剛塑性解析 可視化実験 近接施工

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

### 1. 研究開始当初の背景

(1) 過密する都市域では近接施工がごく一般的に行われる。このとき以下の理由により、既存の基礎構造物に近接施工がどのような影響を与えるのか、調査を行う必要がある。

(2) 基礎構造物は浅い基礎と深い基礎に分類される。浅い基礎では、支持力は地盤浅層で発現せざるを得ないが、深い基礎では地盤浅層よりも地盤深部の支持層で支持力が発現されることを期待する。また、パイルドラフトのような深い基礎と浅い基礎の両方の特性を兼ね備えた複合基礎構造物では、杭だけでなく地盤浅部にも相応の荷重分担をさせて経済性を実現している。ただし、水平方向の抵抗力は深い基礎であっても地盤浅層に依存せざるを得ず、フーチング埋込部分の水平抵抗や接地面のせん断力で水平抵抗を確保する必要がある。したがって、基礎構造物の近傍で近接施工が行われる場合、基礎構造物の水平抵抗に及ぼす影響を調べることは重要である。

(3) また、地盤深部での近接施工により緩み域が発生する場合、杭先端抵抗の低下によって杭の不同沈下や杭の荷重分担変化が生じ、基礎構造物の性能に悪影響を与える可能性がある。特に支持層での杭先端抵抗に代わって杭周面摩擦に期待する浮き基礎ではその影響は顕著に出現する可能性がある。

### 2. 研究の目的

(1) パイルドラフトのような深い基礎と浅い基礎の両方の特性を兼ね備えた複合基礎構造物では、地盤浅部にも相応の荷重分担をさせて経済性を実現している。したがって複合基礎構造物に近接して開削やトンネル建設等の近接施工が行われる場合、従来のフーチング基礎や杭基礎構造物とは異なるメカニズムで基礎の支持特性に影響を与える可能性がある。特に水平支持特性は耐震性能と深く関係するため、工学的に特に重要である。

(2)そこで、近接施工の影響を考慮し、経済性と耐震支持性能に優れた複合基礎構造物の設計に資する知見を得ることを目的として、複合基礎構造物と近接施工の相互作用を含む可視化小型模型実験の実施と終局限界状態を直接評価できる数値解析法の開発を行う。

### 3. 研究の方法

(1) 近接施工が既存複合基礎構造物の支持特性に与える影響を把握するため、近接施工による地盤の緩み域を発生させる機構、ならびに地中に埋設されている模型基礎構造物や周辺地盤の変位場計測に注意を払い、小型模型実験を実施する。

① 底面に落し戸を設置した土槽を利用し、2次元平面ひずみ状態で一定荷重を載荷した模型パイルドラフト基礎に落し戸の降下を作用させたときの、模型基礎の挙動把握及び周辺地盤の変位場計測。

② 地盤内部に埋設された構造物と周辺地盤の3次元的な相互作用を直接観察するため、透明模型地盤材料と間隙流体のインデックスマッチングを応用した、小型模型実験手法の開発とその適用性の確認。

(2) 浅い基礎構造物の支持力解析に用いられる剛塑性有限要素法を複合基礎構造物の支持力解析に応用するため、数値解析手法のそのものの改良と拡張を行う。

① 開発環境の効率化を図るため、混合型剛塑性有限要素法を汎用最適化ソルバーが利用できる2次元計画問題として再定式化し、数値解析コードを新たに開発。

② 修正カムクレイモデルの2次元表現や解析の3次元化による解析コードの改良。

③ 不等式制約による変形場の拘束条件を利用した地盤～地中埋設物の相互作用の剛塑性モデル化と解析コードへの実装。

### 4. 研究成果

(1) 複合基礎と近接施工の影響に関する模型実験：2次元落し戸模型土槽を利用し、2次元平面ひずみ条件下で落し戸降下量と模型パイルドラフト基礎の挙動および周辺地盤の変形場を計測した。模型パイルドラフト地盤は、剛なラフトに剛結された2つの柔な矢板で構成される。パイルドラフト基礎の鉛直荷重～沈下関係から降伏荷重を決め、複数の鉛直荷重下で実験を行った。変位場の観察および矢板の軸力計測結果を行い、落し戸の降下に伴う基礎構造物の支持力発現機構について検討した。その結果、「地盤深部での近接施工では、先端支持に影響を与える緩み領域の発生を抑える必要があり、支持力としての余裕度は地盤浅部で動員可能な周面抵抗と関連付けられることが分かった。また、幾何的影響のため沈下進行は載荷条件に不利であることが分かった。」

(2) 屈折率マッチングを利用した透明地盤材料による可視化模型実験法の提案：従来提案されている、石英粒子+ミネラルオイルの組み合わせによる実験法の代替手法として、石英粒子+スクロース水溶液を利用した実験法を提案した。粘性の高いスクロース水溶液を利用するため、模型地盤をいったん水で飽和させた後、上向き浸透流でスクロース水溶液に置換する液体置換法

を採用した。実験の安全性についてはミネラルオイルを利用した従来法も同様であるが、実験環境や廃棄物処理の面ではスクロース溶液が有利であることが特徴である。

(3) 3次元可視化実験手法の適用性検討：開発手法を応用し、地中埋設構造物と周辺地盤の相互作用に関する2つのモデル実験、「近傍に杭を圧入した時の埋設水平管路の挙動観察」、「展開式アンカーヘッドの引抜き挙動観察」を実施した。いずれのケースにおいても容器壁から深さ20cm程度までは十分に可視化可能であることを確認した。模型実験全般の難しさとして、ピーク強度が比較的小さい変形で出現するため、観察しやすい変形量が生じるときには残留状態に近い可能性があること、また構造物の変形は容易に計測できる反面、地盤材料自身は透明であるため変位場計測のため別途標点が必要となる。2つのモデル試験のうち、展開式アンカーヘッドの引抜き挙動観察は、今回開発した可視化実験に特に適している実験方法であることを確認した。

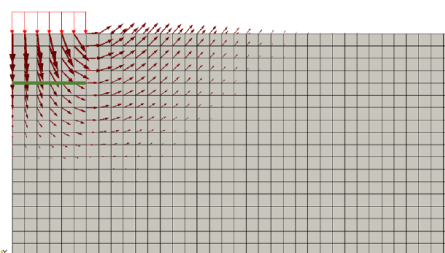


図：3次元可視化実験の例  
(展開式アンカーの引抜き)

(4) 剛塑性有限要素法の2次錘計画問題としての再定式化：従前より報告者が開発を行っていた混合型剛塑性有限要素法を新たに2次錘計画問題の形で再定式化を行った。この2次錘計画を汎用最適化ソルバーGUROBIによって解かせることによって、地盤材料の破壊条件のモデル化や地盤・構造物の相互作用のモデル化に傾注することが可能となった。また最適化ソルバーの利用で、最適化問題の記述プロセスや解法プロセスにかかる計算時間の分析が容易に行えるため、ソースコードの改善や数値解析の高速化・安定化にも有意義であることを確認した。

(5) 修正カムクレイモデルの剛塑性有限要素法への実装：近接施工による緩み域では地盤応力は主働状態となるため、ひずみ硬化による後続降伏曲面を無視できる短期安定問題で評価可能できると仮定し、剛塑性有限要素法に修正カムクレイモデルを組み込んだ数値解析法を開発した。修正カムクレイモデルは2次錘の形で表現できるため、汎用最適化ソルバーの利用が可能であること、また降伏曲面は滑らかで、 $f = 0$ となる実行可能な応力領域が有限領域となることから、最適化問題を解くうえでは望ましい性質を有すると考えられる。一要素挙動を模擬した簡単な数値実験を行い、いずれも安定的に解が得られることを確認した。

(6) 地盤～構造物の剛塑性モデル化と剛塑性有限要素法への実装：地盤と地中埋設物（例えば、アンカー、杭など）の相互作用を表現するため、物理的な寸法に基づいて有限要素メッシュを作成する方法がある。この方法は直接的でわかりやすいが、一方で地盤メッシュの寸法に対して、埋設物寸法が極端に小さい場合には、メッシュ形状がいびつでアスペクト比が大きくなるなど、数値解析に望ましくないメッシュを作成する危険性がある。これに対して、地中埋設物を地盤メッシュ内の点、線あるいは面で表現できると理想的に考え、それらの変形制約条件を考慮することで、地盤と地中埋設物の相互作用を表現するモデル化がある。従前の研究では、上界法に基づく剛塑性有限要素法に伸び縮みしない変形制約条件を組み込む研究が報告されている。これに対して我々は混合型の定式化により上界法と下界法の両方を考慮した検討を行い、混合型の定式化で不等制約条件が自然な形で導入可能で、伸びのみに抵抗、あるいは伸びと縮みで強度特性が異なる場合を剛塑性有限要素法に組み込む方法を提案した。



図：引張抵抗部材を埋設した地盤上の浅い基礎の支持力解析  
(剛塑性有限要素法)

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計2件)

① 山栗 祐樹, 小林 俊一, 西藤 潤, 松本 樹典: 2次錘計画に基づく $\phi$ 材料の数値塑性解析に関する考察, 土木学会論文集A2 (応用力学), 74(2), 2019年, I\_191-I\_202, 査読有  
[https://doi.org/10.2208/jscejam.74.I\\_191](https://doi.org/10.2208/jscejam.74.I_191)

② 山栗 祐樹, 小林 俊一, 西藤 潤, 松本 樹典: 修正カムクレイモデルを破壊規準に用いた剛塑性有限要素法について, 土木学会論文集A2 (応用力学), 73(2), 2018年, I\_333-I\_342, 査読

〔学会発表〕（計18件）

- ① 坂上 瑛梨佳：乾燥砂地盤におけるトンネル掘削を模擬した地盤変位が近接基礎構造物に及ぼす影響に関する二次元模型実験（その1：実験概要），第54回地盤工学研究発表会，2019.
- ② 山崎 健太郎：2次元混合型剛塑性FEMにおける高次要素の適用について，第54回地盤工学研究発表会，2019.
- ③ 小林 俊一：透明模型地盤材料を用いたフリップタイプアンカーの引抜き時挙動の観察，第54回地盤工学研究発表会，2019.
- ④ 山栗 祐樹：補強材の引張・圧縮強度特性を考慮した補強土地盤上の基礎の支持力解析，第22回土木学会応用力学シンポジウム，2019.
- ⑤ S. Kobayashi: Model tests with a transparent soil to observe behavior of buried structures due to neighboring constructions, 1st International conference on Press-in Engineering, 2018.
- ⑥ 山栗 祐樹：2次錐計画問題に基づく剛塑性有限要素法について，第52回地盤工学研究発表会，2017.
- ⑦ 山栗 祐樹：修正カムクレイモデルを破壊基準に用いた剛塑性有限要素法について，土木学会第20回応用力学シンポジウム，2017.

## 6. 研究組織

### (1) 研究分担者

研究分担者氏名：小林 俊一

ローマ字氏名：(Kobayashi, Shun-ichi)

所属研究機関名：金沢大学

部局名：理工研究域

職名：准教授

研究者番号（8桁）：10243065

研究分担者氏名：松本 樹典

ローマ字氏名：(Matsumoto, Tatsunori)

所属研究機関名：金沢大学

部局名：理工研究域

職名：教授

研究者番号（8桁）：10143877

研究分担者氏名：西藤 潤

ローマ字氏名：(Saito, Jun)

所属研究機関名：京都大学

部局名：大学院工学研究科

職名：准教授

研究者番号（8桁）：40456801

※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。