

令和 5 年 5 月 19 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04678

研究課題名（和文）小径スパイラル杭活用による傾斜地の有効利用と斜面防災対策の同時実現技術の開発

研究課題名（英文）Development of slope disaster prevention technique by the small-diameter spiral pile for effective use of slopes

研究代表者

磯部 公一 (Koichi, Isebe)

北海道大学・工学研究院・准教授

研究者番号：70452084

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）：回転貫入の影響を考慮した小径スパイラル杭に対する正負交番鉛直載荷実験結果から、スパイラル杭のスパイラの巻き数増加による貫入抵抗の減少、ストレート杭とスパイラル杭との支持機構の差異とともに、不飽和地盤特有の繰返し荷重に対する支持力回復の遅れ現象の存在を明らかにし、実設計における注意すべき点を見出した。

斜面上構造物の支持と斜面安定工の複数機能を有する基礎構造が設置された斜面の安定計算手法を確立した。札幌市、岩手県内陸部、新潟県の地すべり地域を対象に、新たに年間雨量を素因情報に加えた深層学習による広域危険度評価手法を確立し、予測精度の向上と、危険ブロックの抽出を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

太陽光発電設備の建設急増は、発電事業の成立性確保のため、傾斜地上などの地盤や施工条件が悪い現場での施工事例を増加させ、結果として、豪雨を起因とした土砂流出による太陽光発電設備設置斜面の崩壊事例や強風被害が年々顕在化した。

本研究の成果である、小径スパイラル杭の複合荷重に対する支持力機構解明と、それに基づく斜面上構造物の支持と斜面安定工の複数機能を有する構造形式の開発、さらに深層学習による斜面災害の広域危険度評価手法の構築により、傾斜地により安全・安心な友好利用の可能性を見出し、豪雨災害の潜在的リスクを抱える斜面での施工を回避できる危険度評価手法の構築を実現した。

研究成果の概要（英文）：1) From the results of positive and negative alternating vertical loading experiments on a single small-diameter spiral pile considering the effect of rotational penetration, the penetration resistance decreased due to the increase in the number of turns of the spiral pile and the difference in the resistance mechanism between the straight pile and the spiral pile were found. The existence of the delay phenomenon of recovery of bearing capacity against repeated loads for the peculiar unsaturated ground were clarified, and points to be noted in the actual design were found.

2) A stability calculation method for a slope with a foundation structure that has multiple functions of supporting structures on the slope and slope stabilization work was established.

3) For landslide areas in Sapporo, Iwate and Niigata, a wide-area risk assessment method using deep learning while considering annual average precipitation was realized to improve prediction accuracy and extract dangerous blocks.

研究分野：地盤工学

キーワード：スパイラル杭 支持力 斜面 深層学習 危険度評価 対策工 安定解析

1. 研究開始当初の背景

再生可能エネルギーの需要増加に伴い、太陽光発電設備の建設が増加した時期には、発電事業の成立性を確保するために地盤条件が悪いながらも安価な土地で大規模に施工されたり、傾斜地上に建設されるなど、地盤条件、施工条件が悪い現場での施工事例が増加した。これに伴い、2014年の桐生市での土砂流出事例や、2015年の関東・東北豪雨による太陽光発電設備が設置された斜面の崩壊事例を皮切りに、太陽光発電設備の豪雨・強風被害は年々顕在化、甚大化している。

従来、太陽光発電設備の基礎形式はコンクリート直接基礎が主流であったが、上述のような地盤条件の悪い軟弱地盤での適用を念頭に、小径で短尺な鋼管杭やスパイラル杭、斜杭などを活用した基礎形式の開発が進んでいる。特に、スパイラル杭は鉛直方向の荷重(押し込み、引抜き)に対する抵抗が大きいため有用な杭形式ではあるが、曲げ剛性が小さいことで同径の鋼管杭と比べると水平抵抗が小さくなる問題がある。しかし、小径杭の場合、杭基礎の設計で一般的に使用される杭径に抵抗が支配される弾性地盤反力法では水平変位を過大に評価してしまい、杭径の1% (あるいは15mm) を許容変位とする従来の方法では過大設計となる可能性がある。また、スパイラル杭は回転圧入による周辺地盤との一体化効果により鉛直方向の荷重に対する抵抗が大きくなるが、実務設計においてはその効果を考慮しない安全側の設計となっている例が多い。そのため、小径杭の支持力特性を適切に評価し、より合理的に設計することができれば、適用範囲を拡大させることが可能である。

2. 研究の目的

以上の学術的背景に基づき、本研究ではスパイラル杭のような複雑形状を有する杭の複合荷重に対する支持力特性の解明を試み、その特性を活かした斜面防災対策工の開発へと発展させることを目標とする。

本研究では、上記の検討に基づいて、杭(斜杭も含む)とアンカー(あるいは鉄筋挿入工)の機能を組み合わせた斜面上構造物を支持する軽量な基礎形式を提案し、斜面の有効利用と降雨に対する斜面の安定化を同時に実現する構造形式の有用性を模型実験と数値解析により検証する。また、災害履歴と地形・地質情報に基づいた機械学習による広域斜面災害危険度評価を実施することで、当該構造物の設置適応箇所の抽出までを目的とする。具体的には、以下のとおりである。

- (1) 小径スパイラル杭の複合荷重に対する支持力機構の解明
- (2) 傾斜面安定工を有する斜面上構造物の安定性評価手法の構築
- (3) 斜面崩壊の広域危険度評価手法の構築

3. 研究の方法

- (1) 小径スパイラル杭の複合荷重に対する支持力機構の解明

既往の研究では、軟弱地盤に施工されたスパイラル杭に対する押し込み、引抜きおよび水平載荷試験に基づき回転圧入による周辺地盤との一体化効果を簡易的に考慮する方法を提案している。本提案手法に基づき FEM 解析におけるスパイラル杭基礎のモデル化を構築し、各種試験結果の再現解析を行い、不足している数値解析パラメータの同定を行うとともに、同定したパラメータを用いた同解析手法により、水平荷重(H)と鉛直荷重(V)の複合荷重に対するスパイラル杭の支持力特性を評価してきた。

本研究では、本手法の適用範囲をモーメント荷重(M)も含めた複合荷重に対するスパイラル杭の支持力評価へと拡大し、その支持力特性を数値解析により明らかにするとともに、数値解析解に基づき H - V - M 複合荷重に対する小径スパイラル杭の支持力評価式を提案し、その妥当性を検証する。

つづいて、不飽和砂地盤における小径スパイラル杭の貫入抵抗と、正負交番載荷に対する鉛直支持力、引抜き抵抗力特性に関する実験的検討を実施し、ストレート杭およびスパイラル杭に対する、不飽和砂地盤中における貫入実験、正負交番鉛直載荷実験(押し込み方向、引抜き方向)の結果を示し、乾燥砂地盤、飽和砂地盤に対する実験結果と比較した。

- (2) 傾斜面安定工を有する斜面上構造物の安定性評価手法の構築

高盛土などの土構造物の安定化には、排水の必要性とともに、耐震対策も重要な課題である。本研究では、新しく開発した非閉塞排水パイプの中にアンカー材または PC 鋼線を設置し、鉄筋コンクリート梁を用いてその両端を法面に固定し、排水機能とアンカー機能を持たせた盛土斜面安定化工法を提案している。本研究では、排水機能とアンカー機能のダブル機能による盛土斜面の安定性向上効果を数値解析的に検証することを目的に、地下水による盛土内の水分分布を浸透流解析により求め、その結果を用いた剛塑性有限要素解析により盛土斜面の安定性評価を行うハイブリッド解析を実施し、その妥当性および提案構造物の有用性を検証した。

(3) 斜面崩壊の広域危険度評価手法の構築

本研究では、札幌市南区、北海道厚真町、岩手内陸地域、新潟県を対象地域として、斜面災害の一つである地すべりに対するディープラーニングに基づく危険度評価モデルを構築し、精度を比較した。また、地すべりの規模の違いが危険度評価精度に与える影響を評価した。

4. 研究成果

(1) 小径スパイラル杭の複合荷重に対する支持力機構の解明

本研究では、実物大小径スパイラル杭に対する押込み、引抜き、水平の各種載荷試験の再現解析によりその妥当性と有用性を検証した三次元弾塑性有限要素解析手法を用いて、水平荷重、鉛直荷重、モーメント荷重の複合荷重に対する小径スパイラル杭の支持力特性を明らかにした。その結果、複合荷重載荷により支持力は低下し、各載荷方向単独で評価した場合の支持力を下回る危険側の評価になることを確認した。また、その成果に基づき、 H - V - M 複合荷重に対する小径スパイラル杭の支持力曲面(図-1)およびその推定式を提案し、推定精度を検証した結果、提案する推定式は概ね高い推定精度を保證していることを確認した。なお、本推定式は、杭軸および杭軸直角方向に対する支持力を載荷試験により求められれば、 H - V - M 複合荷重に対する支持力を推定できる特徴を有することから、その妥当性が実証されれば、本推定式の実用性は高いものとなる。

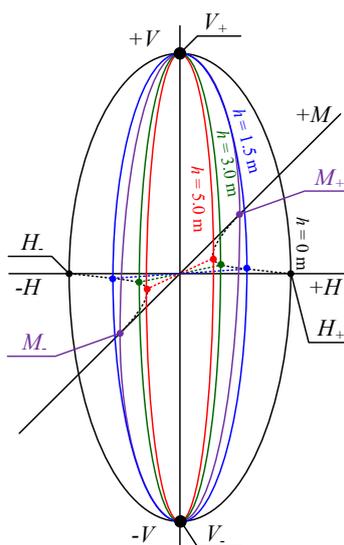


図-1 H - V - M 複合荷重に対する支持力曲面の概念図

また、サクシオン管理型の模型杭載荷試験装置(図-2,3)を用いて、回転貫入の影響を考慮した小径スパイラル杭の不飽和砂地盤(図-4)における正負交番鉛直荷重に対する支持力特性を把握した。その結果、乾燥砂、飽和砂地盤の結果と同様に、スパイラル杭のスパイラルの巻き数増加による貫入抵抗の減少、静的繰返し載荷時におけるストレート杭とスパイラル杭との支持機構の差異を確認するとともに、不飽和地盤特有の繰返し荷重に対する支持力回復の遅れ現象の存在を明らかにし、実設計における注意すべき点を見出した。

(2) 傾斜面安定工を有する斜面上構造物の安定性評価手法の構築

浸透流解析と剛塑性解析のハイブリッド解析により、排水とアンカーの両機能を有する排水パイプによる盛土斜面の安定性向上効果を適切に評価した結果、両機能による安定性向上効果が極めて大きく、土構造物の耐震対策にも有効な手段である可能性を示した(図-5)。

(3) 斜面崩壊の広域危険度評価手法の構築

札幌市南区、北海道厚真町、岩手内陸地域、新潟県の地すべり地域を対象に、新たに平年雨量を素因情報に加えた深層学習(DNN・CNN)による広域危険度評価手法を確立し、予測精度の向上と、危険ブロックの抽出を実現した。また、地すべりの規模の違いが危険度評価精度に与える影響を評価した結果、地すべり規模が大きいほど、地すべり発生箇所の検出速度が速くなる一方で、ノイズも多くなる課題も見出された(図-6)。

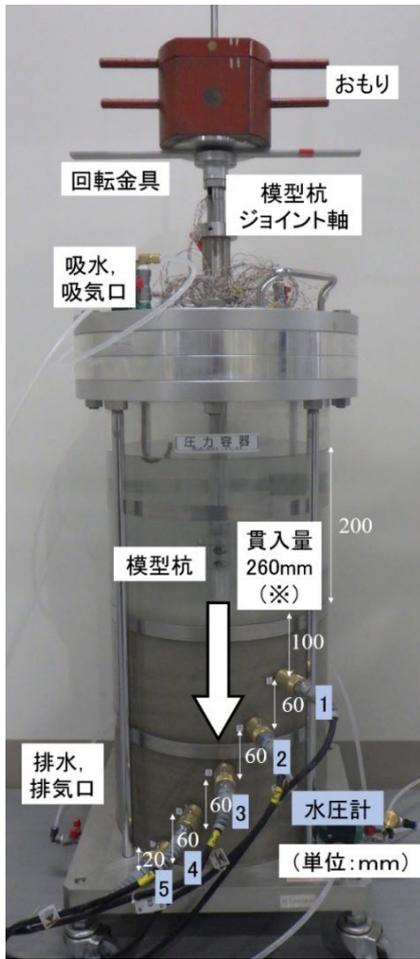


図-2 回転貫入装置

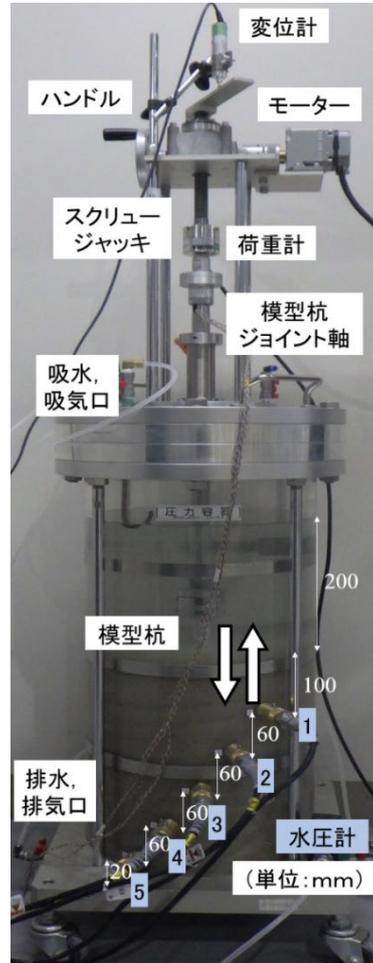


図-3 静的載荷装置



図-4 地盤作製状況

(左から、乾燥地盤作製時、注水開始時、注水後、排水時)

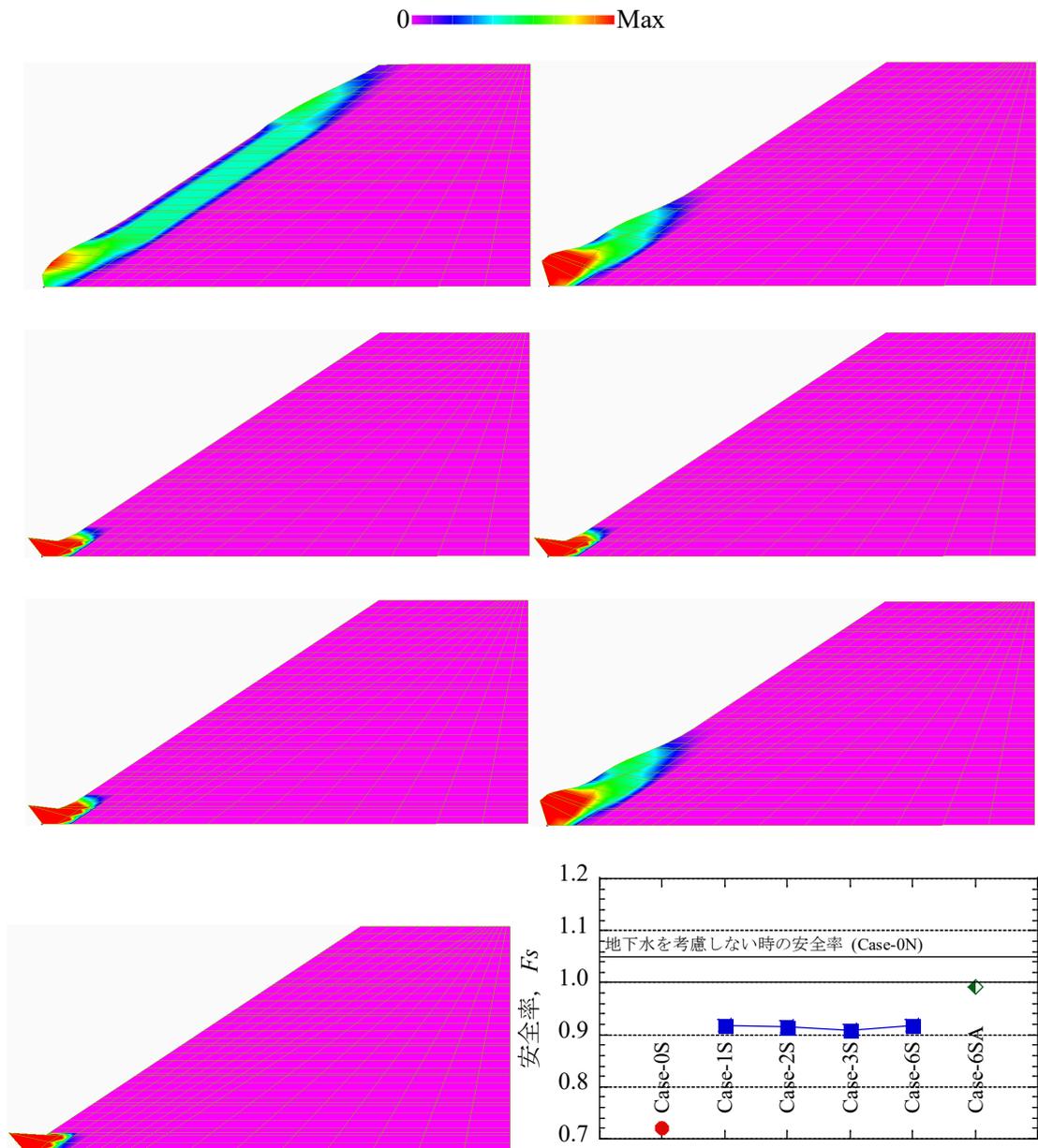


図-5 等価ひずみ速度分布と安全率の比較
(左上からCase-0N, 0S, 1S, 2S, 3S, 6S, 6SA)

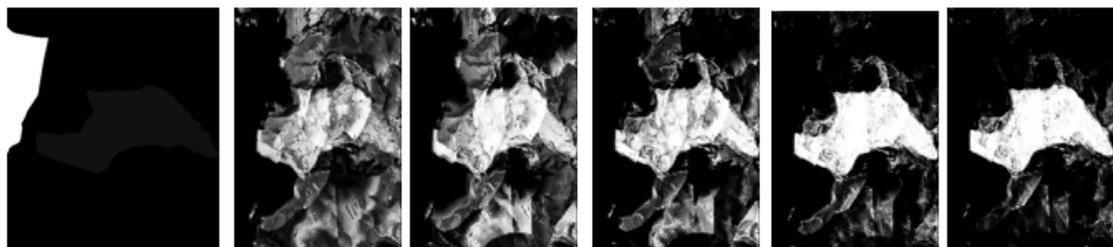


図-6 地域12地すべり地域危険度評価図
(左2番目からEpoch100~10000の結果, 最左図の灰色部は地すべり履歴箇所)

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Tamboura, H., H., Yamauchi, R. and Isobe, K.	4. 巻 62
2. 論文標題 Bearing capacity evaluation of small-diameter spiral piles in soft ground subjected to combined loads	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Soils and Foundations	6. 最初と最後の頁 101204
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.sandf.2022.101204	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6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 吉田憲司，本田康貴，磯部公一
2. 発表標題 浸透力相似模型実験による小径スパイラル杭の貫入抵抗と支持力評価
3. 学会等名 第62回地盤工学会北海道支部技術報告会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 吉田憲司，本田康貴，磯部公一
2. 発表標題 飽和砂地盤における小径スパイラル杭の貫入抵抗と鉛直支持力・引抜き抵抗力評価
3. 学会等名 第57回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 磯部公一、吉田憲司，本田康貴
2. 発表標題 飽和砂地盤における小径スパイラル杭の正負交番荷重に対する支持力評価
3. 学会等名 土木学会第77回年次学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 本田康貴，磯部公一，吉田憲司
2. 発表標題 小径スパイラル杭の鉛直支持力特性に対するスパイラルピッチの影響
3. 学会等名 第61回地盤工学会北海道支部技術報告会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 吉田憲司，本田康貴，磯部公一
2. 発表標題 貫入過程を考慮した小径スパイラル杭の押込み抵抗特性に関する実験的検討
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 櫻井康平，吉田憲司，浴達也，磯部公一
2. 発表標題 不飽和砂地盤における小径スパイラル杭の貫入抵抗と鉛直支持力評価
3. 学会等名 第63回地盤工学会北海道支部技術報告会
4. 発表年 2023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

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