

令和 5 年 6 月 10 日現在

機関番号：13701

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化(B)）

研究期間：2020～2022

課題番号：20KK0091

研究課題名（和文）アンカー補強された三峡ダム周辺大規模地すべり斜面の長期的安定性評価技術の熟成

研究課題名（英文）Enhancement of long-term stability evaluation technique for anchor-reinforced large-scale landslide slope in Three Gorges reservoir area

研究代表者

八嶋 厚（YASHIMA, Atsushi）

岐阜大学・工学部・特任教授

研究者番号：90144394

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 14,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、地すべり抑止工の機能を評価し、斜面の長期安定性を力学的に評価する手法を提案した。

1) アンカー付き地すべり抑止杭を施工した切土斜面について、常時微動計測を実施し、斜面の安定性評価手法を提案した。2) アンカー付き斜面において、振動法に基づく残存緊張力評価を実施した。特に、トンネル内や超過緊張アンカーなど、従来手法では評価できないアンカーについても緊張力評価ができることがわかった。3) 遠心載荷実験により、アンカー付き地すべり抑止杭の切土斜面地震時不安定化プロセスを明らかにした。4) アンカー付き地すべり抑止杭を施工した切土斜面の安定性について、信頼性解析の適用性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、地すべり抑止工による斜面の長期安定性評価手法を提案した。

1) アンカーと杭を施工した切土斜面について、常時の振動計測による斜面安定性評価手法を提案した。2) アンカー付き斜面において、振動法に基づく緊張力評価法を確立した。3) 遠心載荷実験により、アンカーと杭を施工した切土斜面の地震時不安定化プロセスを明らかにした。4) アンカーと杭を施工した切土斜面の安定性について、信頼性解析の適用性を確認した。

研究成果の概要（英文）：This study proposed a method for evaluating the long-term stability of slopes with landslide countermeasures.

1) Slope stability evaluation method based on microtremor measurement was proposed for piled anchor installed cut slope. 2) Tension evaluation method based on vibration method was established for anchored slope. 3) Centrifuge model test was conducted to clarify the destabilization process of anchor and pile installed cut slope during earthquake. 4) Application of reliability analysis was confirmed for stability of anchor and pile installed cut slope. The applicability of reliability analysis to the stability of anchored and piled cut slope was confirmed.

研究分野：地盤工学

キーワード：グラウンドアンカー 地すべり 現場計測 遠心載荷試験 動的数値解析 破壊確率 信頼性設計 振動法

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

地震、豪雨、さらには地形の大規模改変により出現したダム貯水池の水位変動、それら巨大外力により、山は崩れる。2008年四川大地震、2009年完成の三峡ダム、自然の猛威・人工改変の前に、地すべりは多くの生命と財産を奪った。多くの地すべり地において、地盤を縫付ける巨大な構造物を目にする。斜面を安定させるアンカー工が高頻度で採用される。

しかし、この構造物は永久ではない。技術者が丁寧に維持管理し、健全な状態を次世代に引継がなければならない。斜面が再活動しようとする場合には、アンカーの緊張力はアップし、地盤が緩む場合には、緊張力はダウンする。したがって、アンカー工の維持管理において、残存緊張力を正確に知ることこそが、私たちの安全安心を守ることに直結する。残存緊張力を計測するために、リフトオフ試験と呼ばれる大掛かりな試験やロードセルによる計測が行われる。しかし、高額な経費を要することから、高頻度、面的な評価は難しい。これにより、抑止工の機能に基づいた地すべり斜面全体の安全性評価は、対策工設計時以降はほとんど行われず、地盤変動の監視による安定性の判断がなされていることが多い。したがって、顕著なり面変状が見られた際の、対処療法的な対応が行われるのみである。

中国においては、四川大地震、三峡ダム貯水池の水位変動に起因する数多くの大規模地すべりにおいて、高密度動態観測が行われている。世界に類を見ない数多くの観測機器が収集した貴重なデータにより、地すべり再活動の危険性の有無が評価されている。しかしながら、高密度動態観測を継続するためには、観測計器の寿命、膨大な観測費用などの問題があり、定量的な長期安定性評価を困難とし始めている。

このような背景の下、本研究の学術的「問い」、およびそれらに対応して実務において期待される波及効果は以下の通りである。

学術的「問い」	実務における波及効果と意義
斜面の再活動と緩みを反映する、アンカーの残存緊張力を高頻度、多数評価できる技術は無いのか？	地すべり地におけるアンカーの緊張力を、高頻度で多数計測することができる。
地盤変動の監視やアンカー単体の性能評価ではなく、アンカー斜面全体の経時的安全性を評価できる技術は無いのか？	斜面全体の安全率の確率密度関数を用いた定量的・客観的評価手法の確立により、経時的な安全性評価が可能となる。

2 . 研究の目的

本研究の目的はアンカー（もしくはアンカー付き杭）で補強された地すべり斜面全体の長期的安定性評価を定量的・客観的に可能とする技術を開発することにある。これまで、斜面に変状が見られた際の対処療法的措置、もしくはアンカー単体の性能評価に終始していたアンカー斜面管理について、多くのアンカーについて、高頻度で残存緊張力の把握を可能とする、“弦”振動という物理現象に着目した、独創的で簡易な非破壊試験法を提案する、斜面全体の安全率の確率密度関数を導入することにより、破壊確率の経時変化を定量的・客観的に評価できる手法を提案する。これらにより、管理技術者自らが、定量的で効率的なアンカー斜面維持管理体制を実現することに寄与する。

3. 研究の方法

コロナ禍の制約のため、予定していた三峡ダム地すべり地における研究実施は、不可能となった。しかしながら、中国同済大学グループおよび国内共同研究者との間で綿密な意見交換を高頻度で行い、研究目的を達成するために、以下のような研究方法により研究を実施した。

アンカーおよび杭の地すべり抑止効果の解明（中国で実施）

地すべり抑止工法として多用されるアンカー工もしくはアンカー付き杭について、地震時について抑止メカニズムの詳細を明らかにする。このため、地震時のアンカー付き杭の抑止効果の詳細を把握するため、同済大学（上海）において遠心場動的載荷実験を実施する。

中国雲南省高速道路のアンカー付き地すべり抑止杭を施工した切土斜面について、常時微動を中心とした安定性評価のための計測を実施する。

アンカー残存緊張力の簡易的な非破壊試験法（振動法）の確立（日本国内で実施）

緊張力が作用するアンカー鋼材の自由長部を、両端が固定された“弦”と考え、弦の振動周波数から緊張力を求めるというシンプルなモデルを考える。したがって、線密度と長さが既知の鋼材において、弦の自由振動周波数を検出することができれば、簡単な式によって張力を求めることができる。この原理の妥当性については、科学研究（萌芽）（平成30年度～令和元年度）の成果により確認済み。日本国内の異なる種類のアンカーについて、振動法を用いた残存緊張力の推定を実施する。そして、「頭部キャップの取り外し」「シール材除去」「計測器設置」「計測」「シール材塗布」「頭部キャップ装着」といった作業工程の課題を整理し、効率的な作業工程を確立する。

破壊確率を用いた斜面の長期的安全性評価手法開発（日本国内で実施）

以下のSTEPで安全率確率密度関数を計算する。

STEP1：計測されたアンカー残存緊張力の平均値を用いて、円弧すべりの逆解析を行う。

STEP2：安全率（見掛け安全率）が1.0となるような地盤定数（ c , ϕ ）を推定する。

STEP3：緊張力のバラツキを考慮することで“破壊確率”と“真の安全率”を推定する。ここでは、「アンカー体の引き抜き」と「PC鋼線の破断」を破壊として定義する。

STEP4：「残存緊張力/設計値」の平均値、分散の関係と、これまでに追加対策が実施されたのり面の関係性を見出し、破壊確率に基づいた追加対策の閾値を選び出す。

4. 研究成果

アンカーおよび杭の地すべり抑止効果の解明（中国で実施）

- 1) 中国・同済大学で実施した遠心載荷実験に基づいて、アンカー付き地すべり抑止杭を施工した切土斜面の地震時不安定化プロセスの詳細を明らかにした。詳細な内容は英文ジャーナルで公表した。
- 2) アンカー付き地すべり抑止杭を施工した切土斜面の安定性について、地盤の不均一性に基づいた信頼性解析を実施した。詳細な結果は英文ジャーナルで公表した。
- 3) 中国雲南省高速道路のアンカー付き地すべり抑止杭を施工した切土斜面について、常時微動を中心とした安定性評価のための計測を実施した。現状、斜面は安定であるが、今後とも

計測を継続するとともに、安定性評価を高度化するために、新たに微動アレイ計測を実施する予定である。

アンカー残存緊張力の簡易的な非破壊試験法（振動法）の確立（日本国内で実施）

日本国内における数多くのアンカー付き斜面において、安定性評価のために、開発した振動法に基づく残存緊張力評価を実施した。評価したアンカーは、研究期間全体を通じて、100本を超えた。特に、トンネル内や超過緊張アンカーなど、従来のリフトオフ試験では評価できないアンカーについても緊張力を評価できることがわかった。これら試験果を国際会議等で基調講演および特別講演で発表した。

破壊確率を用いた斜面の長期的安全性評価手法開発（日本国内で実施）

NEXCO 各社のアンカー残存緊張力データを数多く収集した。そのデータを解析することにより、不安定化に向かうアンカー法面の判定方法を、破壊確率を用いて推定する方法を提案した。

なお、中国側共同研究者の協力により、中国・同济大学において国際ワークショップ、中国・上海交通大学において国際研究集会を実施し、中国国内の技術者および研究者に、研究成果を広く公表した。



中国・同济大学における国際ワークショップのポスター（2023年3月29日）



中国・上海交通大学における国際研究集会の様子（2023年3月30日）

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計13件（うち査読付論文 13件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 10件）

1. 著者名 SAITO Hideki, YAMAZAKI Mitsuru, YASHIMA Atsushi, NAWA Kazuki, AOIKE Kunio, SONE Yoshinori	4. 巻 77
2. 論文標題 ESTIMATION OF GROUND ANCHOR RESIDUAL TENSION BY VIBRATION METHOD	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. C (Geosphere Engineering)	6. 最初と最後の頁 213 ~ 232
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2208/jscejge.77.3_213	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 Xu Xi, Huang Yu	4. 巻 147
2. 論文標題 Parametric study of structural parameters affecting seismic stability in slopes reinforced by pile-anchor structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soil Dynamics and Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 106789 ~ 106789
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.soildyn.2021.106789	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 Huang Yu, Han Xu, Zhao Liuyuan	4. 巻 289
2. 論文標題 Recurrent neural networks for complicated seismic dynamic response prediction of a slope system	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Engineering Geology	6. 最初と最後の頁 106198 ~ 106198
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.enggeo.2021.106198	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 Bao Yangjuan, Huang Yu, Zhu Chongqiang	4. 巻 149
2. 論文標題 Effects of near-fault ground motions on dynamic response of slopes based on shaking table model tests	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soil Dynamics and Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 106869 ~ 106869
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.soildyn.2021.106869	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 Hu Hongqiang, Huang Yu, Xiong Min, Zhao Liuyuan	4. 巻 150
2. 論文標題 Investigation of seismic behavior of slope reinforced by anchored pile structures using shaking table tests	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soil Dynamics and Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 106900 ~ 106900
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.soildyn.2021.106900	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 Xu Xi, Aing Yuanchuang, Guo Zhen, Huang Yu	4. 巻 32
2. 論文標題 Stability analysis of rainfall-triggered toe-cut slopes and effectiveness evaluation of pile-anchor structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Earth Science	6. 最初と最後の頁 1104 ~ 1112
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 -

1. 著者名 Hu Hongqiang, Huang Yu, Zhao Liuyuan, Xiong Min	4. 巻 -
2. 論文標題 Shaking table tests on slope reinforced by anchored piles under random earthquake ground motions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Acta Geotechnica	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11440-022-01525-5	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 山崎 実・斎藤秀樹・八嶋 厚	4. 巻 65
2. 論文標題 振動によるグラウンドアンカー緊張力の測定方法の研究開発	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 高速道路と自動車	6. 最初と最後の頁 11-14
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 -

1. 著者名 Huang Yu, Xu Xi, Mao Wuwei	4. 巻 129
2. 論文標題 Numerical performance assessment of slope reinforcement using a pile-anchor structure under seismic loading	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soil Dynamics and Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 1-7
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 -

1. 著者名 H. Q. Hu, Y. Huang and L. Y. Zhao	4. 巻 21
2. 論文標題 Probabilistic Seismic-Stability Analysis of Slopes Considering the Coupling Effect of Random Ground Motions and Spatially-Variable Soil Properties	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Natural Hazards Review	6. 最初と最後の頁 -
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 -

1. 著者名 Y. Huang, X. Xu, J. Liu and W. Mao	4. 巻 131
2. 論文標題 Centrifuge modeling of seismic response and failure mode of a slope reinforced by a pile-anchor structure	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Soil Dynamics and Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 1-11
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 -

1. 著者名 K. Nawa, A. Yashima, Y. Murata, K. Kariya, H. Saito, K. Aoike, Y. Sone and M. Yamazaki	4. 巻 -
2. 論文標題 Evaluation of Ground Anchor Residual Tension by Vibration Method	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proc. 1st Int. Sympo. on Construction Resources for Environmentally Sustainable Technologies	6. 最初と最後の頁 -
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 -

1. 著者名 X. Xu and Y. Huang	4. 巻 掲載確定
2. 論文標題 Parametric study of structural parameters affecting seismic stability in slopes reinforced by pile-anchor structures	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Soil Dynamics and Earthquake Engineering	6. 最初と最後の頁 -
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15件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Yashima Atsushi, Murata Yoshinobu, Nakashima Kosuke
2. 発表標題 Challenge to Health Monitoring of Road Embankment Slope
3. 学会等名 3rd International Symposium on Risk Assessment and Sustainable Stability Design of Slopes (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hara Takashi, Tatta Naoki, Yashima Atsushi
2. 発表標題 Ground-anchored slope stability based on variation of tensile forces acting on ground-anchors
3. 学会等名 3rd International Symposium on Risk Assessment and Sustainable Stability Design of Slopes (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Fujuwara kakuta, Mallyar Enayat
2. 発表標題 Study on reinforcement insertion work with circular pile against slope failure
3. 学会等名 3rd International Symposium on Risk Assessment and Sustainable Stability Design of Slopes (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 He Zhengying, Chen Zhiyi, Li Chunxiang, Yashima Atsushi
2. 発表標題 Reliability-based optimization design of stabilizing piles in slope dynamic system under random seismic excitation
3. 学会等名 3rd International Symposium on Risk Assessment and Sustainable Stability Design of Slopes (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 斎藤秀樹・山崎 充・八嶋 厚・名波一輝・小島杏介・小河原敬徳
2. 発表標題 複数の鋼線を有するグラウンドアンカーの緊張力のノンリフト試験
3. 学会等名 物理探査学会第144回(2021年度春季)学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原寛太・Malliyar Enayat・干場奨太
2. 発表標題 斜面アンカー工の補助部材に関する 2 つの提案
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 斎藤秀樹・山崎 充・八嶋 厚・名波一輝・小島杏介・小河原敬徳
2. 発表標題 振動を用いたグラウンドアンカー緊張力の非破壊測定 - くさび定着 タイプアンカーへの適用 -
3. 学会等名 第56回地盤工学研究発表
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口 充・藤原覚太・小泉圭吾・笠間清伸・北爪貴史
2. 発表標題 斜面安定対策工に関する最新動向分析と今後の方向性について
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 斎藤秀樹・山崎 充・八嶋 厚・名波一輝・小島杏介・小河原敬徳
2. 発表標題 振動を用いたグラウンドアンカー緊張力測定方法のくさび定着タイプ アンカーへの適用
3. 学会等名 土木学会第76回年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 斎藤秀樹・山崎充・八嶋厚・名波一輝・小島杏介・小笠原敬徳
2. 発表標題 振動を用いたグラウンドアンカー緊張力測定方法のくさび定着タイプアンカーへの適用
3. 学会等名 地盤工学会中部支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 八嶋厚・名波一輝・小島杏介・斎藤秀樹・小笠原敬徳・山崎充
2. 発表標題 振動を用いたグラウンドアンカー残存緊張力の現場計測 トンネル内重交通および過緊張条件下における挑戦
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 八嶋 厚
2. 発表標題 不安定な斜面を守る - グラウンドアンカー残存緊張力を簡便に知る試み -
3. 学会等名 地盤工学会東北支部（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 斎藤秀樹・山崎充・八嶋厚・名波一輝・小島杏介・小笠原敬徳
2. 発表標題 複数鋼線を有するグラウンドアンカーの緊張力のノンリフト試験
3. 学会等名 物理探査学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 藤原覚太・Enayat Malliyar・干場奨太
2. 発表標題 斜面アンカー工の補助部材に関する 2 つの提案
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 山口 充・藤原覚太・小泉圭吾・笠間清伸・北爪貴史史
2. 発表標題 斜面安定対策工に関する開発動向と今後の方向性について
3. 学会等名 地盤工学会
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 Yashima Atsushi, Huang Yu	4. 発行年 2021年
2. 出版社 Springer	5. 総ページ数 141
3. 書名 Social Infrastructure Maintenance Notebook	

〔産業財産権〕

〔その他〕

ISRSS-SENDAI 2022 https://isrss-sendai.org/
--

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	藤原 寛太 (Fujiwara Kakuta) (40824925)	東海大学・工学部・助教 (32644)	
研究分担者	原 隆史 (Hara Takashi) (90544990)	富山大学・学術研究部都市デザイン学系・教授 (13201)	

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1件

国際研究集会 3rd International Symposium on Risk Assessment and Sustainable Stability Design of Slopes	開催年 2022年～2022年
--	--------------------

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