

令和 5 年 5 月 15 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K05057

研究課題名（和文）振動エネルギーを指標とした斜面災害リスク評価と可視化

研究課題名（英文）Slope disaster risk assessment and visualization using vibration energy as an index

研究代表者

篠田 昌弘（Shinoda, Masahiro）

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・教授

研究者番号：30462930

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）：本研究では地震による振動エネルギーに着目して、地震の発生頻度と発生規模を考慮した盛土斜面災害リスク評価法の提案と盛土斜面災害リスクマップによる可視化を目的とする。盛土斜面災害リスク評価法を提案するため、振動エネルギーに応じた地盤材料の変形強度特性を把握した。次に、現実に即した斜面模型を用いて、振動エネルギーを考慮した長時間加振実験を実施して、斜面崩壊メカニズムの検討を実施した。さらに、加振実験結果より、斜面の地震時変位量算定モデルを構築した。最後に、地震の発生頻度と発生規模を考慮した盛土斜面の損傷頻度評価を確率論的手法により実施して、盛土斜面災害リスクマップを作成した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、地震の発生頻度と発生規模を考慮した斜面災害リスク評価法の提案と斜面災害リスクマップによる可視化を目的とする。斜面の損傷頻度評価を実施する際には、地震のハザード評価、斜面の脆弱性評価、両者を掛け合わせた損傷頻度評価を実施する必要がある。本研究の最終成果物は地震の発生頻度や斜面の崩壊量を考慮した斜面災害リスクマップであり、この斜面災害リスクマップを可視化することで、容易に斜面災害リスクを把握することが可能であり、斜面災害リスク低減に大きく貢献できる。本研究では、地方自治体で示されている斜面傾斜による土砂災害ハザードマップではなく、地震時の斜面災害リスクに着目した点に特徴がある。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to propose an slope risk assessment method focusing on vibration energy caused by earthquakes, taking into account the frequency and scale of earthquake occurrence, and to visualize the method using an slope risk map. In order to propose an evaluation method of slope disaster risk, the deformation strength characteristics of geomaterials in response to vibration energy were identified. Next, long-time shaking table tests were conducted using a realistic slope model to investigate the mechanism of slope failure in consideration of vibration energy. Furthermore, a model for calculating seismic displacement of the slope was developed based on the results of the shaking tests. Finally, a probabilistic method was used to evaluate the frequency of damage to slopes considering the frequency and magnitude of earthquakes, and a risk map of slope failures was developed.

研究分野：地盤工学

キーワード：斜面 ハザード評価 脆弱性評価 リスク評価 地震 地震時残留変位量 振動台実験

1. 研究開始当初の背景

近年、地震発生リスクやそれに伴う盛土や斜面災害リスクが増加している。政府の地震調査研究推進本部が公表している全国地震動予測地図によれば、今後30年以内に震度6弱以上の揺れが起きる確率が、北海道南東部、首都圏、東海から四国の太平洋岸で高くなっている。一方、現在の科学技術力では、自然外力の発生を高精度に予測することは不可能であり、自然外力の発生予測には大きな不確実性が伴う。そのため、地震等の自然外力を決定論的ではなく、確率論的に議論することが合理的である。すなわち、決定論的に定めた設計外力を超える外力が発生する可能性が常にあり、その可能性を考慮して災害リスクを低減することが重要となる。我が国の地方自治体では、盛土や斜面崩壊に関する危険度を土砂災害ハザードマップで示しているものの、盛土や斜面勾配を主要なパラメータとしており、地震等の特定の作用を誘因とした広域的な斜面災害リスクは公表されていない。盛土や斜面災害リスクを低減するためには、崩壊のメカニズムを明らかにするとともに、崩壊の発生・崩壊量と関連の高い物理量を把握した後、斜面の変形量評価モデルを構築することが重要である。さらに、災害外力の確率論的評価、高まる災害外力を考慮した耐力評価、外力の発生頻度（ハザード）と外力に応じた斜面の耐力（フラジリティ）を考慮した損傷頻度評価が重要となる。

2. 研究の目的

本研究では、地震の発生頻度と発生規模を考慮した斜面災害リスク評価法の提案と斜面災害リスクマップによる可視化を目的とする。斜面の損傷頻度評価を実施する際には、地震のハザード評価、斜面のフラジリティ評価、両者を掛け合わせた損傷頻度評価を実施する必要がある。これまでの地震解析では、設計に直接関係する加速度や速度が検討対象であり、振動エネルギーに関する統計的解析は実施されていない。また、振動エネルギーに対する斜面の損傷確率をフラジリティで示した研究成果は見当たらない。当然のことながら、上記ハザード評価とフラジリティ評価結果を用いた斜面の損傷頻度を評価した事例は皆無である。また、本研究の最終成果物は地震の発生頻度や斜面の崩壊量を考慮した斜面災害リスクマップであり、この斜面災害リスクマップを可視化することで、容易に斜面災害リスクを把握することが可能であり、斜面災害リスク低減に大きく貢献できる。本研究では、地方自治体で示されている斜面傾斜による土砂災害ハザードマップではなく、地震時の斜面災害リスクに着目した点に特徴がある。

3. 研究の方法

(1) 地盤材料の変形強度特性

本研究における斜面模型振動台実験に用いる地盤材料は、不飽和状態の人工配合試料（珪砂+ベントナイト）と北海道胆振東部地震における斜面崩壊地から採取した地盤試料である。前者は容易に実験室で配合可能であり、同一の強度と剛性を保有した地盤材料を高い再現性で作成できる。後者は斜面崩壊地と同等の地盤試料であり、地盤試料の量は限られているものの、斜面崩壊地における地盤材料をそのまま用いることに意義がある。両者の変形強度特性は、三軸圧縮試験と三軸圧縮繰返し試験で求めた。

(2) 斜面の振動台実験

図1、図2に斜面模型を示す。斜面模型は基盤層、弱層、表層の3層で構成されている。基盤層は安定した地山を想定しているため、セメント安定処理した粒度調整碎石を十分に締め固めることで作成した。弱層には、珪砂・水・ベントナイトを重量比100:10:1で混合した人工配合試料及び北海道胆振東部地震の斜面崩壊の大部分を占めていた滑り層である樽前d層の2種類の材料を使用した。この樽前d層は、2021年4月に崩壊地から近い土取り場から採取した。表層には起動力を確保するため磁砂鉄・早強ポルトランドセメント:ベントナイト・水を重量比21:9:2:8で混合した材料を用いた。

本振動台実験では、永久磁石を用いた電気式の二次元（水平・鉛直方向）振動台を用いた。振動台実験の入力波は、5Hzの正弦波180波として、水平方向、水平鉛直同時加振（同位相）、水平鉛直同時加振（逆位相）の3種類の加振波を用いて、慣性力の向きを変化させて加振し

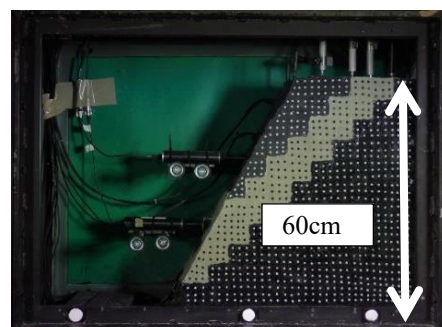


図1 振動台実験で使用した模型
(人工配合試料)

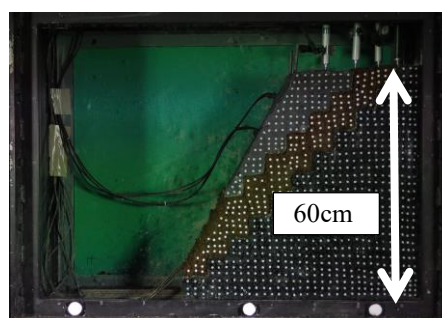


図2 振動台実験で使用した模型
(斜面崩壊地採取試料)

た。加振方法については 100Gal から 100Gal ずつ段階的に増加させ、模型が大崩壊に至った段階で実験を終了した。

(3) 地震時の斜面変位量の評価

篠田 (2013) によって提案された Spencer 法に基づいた地震時残留変位量算定法を用いて、地震時の斜面変位量の評価を実施する。算定条件として、振動台実験により得られた斜面崩壊時のすべり線と、表層または振動台の加速度時刻歴を入力波として用いる。この解析結果と実際の振動台実験結果の整合性が高ければ、この解析方法が妥当であると言える。篠田 (2013) によって提案された Spencer 法に基づいた地震時残留変位量の算定法で、加振中の地震時残留変位量を算定して、振動台実験結果と解析結果の整合性を確認した。

(4) 斜面の地震リスク評価と可視化

地震時確率論的リスク評価 (以下、地震時 PRA と呼ぶ) は、地震ハザード評価と対象構造物のフラジリティ評価を実施して、対象構造物の地震による被害を確率論により定量的に表現するものである。地震のハザード評価では、小地震から大地震まで地震動の大きさに応じた超過確率を連続的に評価する。対象構造物のフラジリティ評価では、ある特定の地震動が発生したと仮定して、その地震動の大きさ (確定値) を用いて構造物の限界状態超過確率を算定する。リスク評価では、ハザード評価結果とフラジリティ評価結果を用いて対象構造物の地震リスクを算定する。なお、本研究では、リスク算定にコストや地震による影響は含めておらず、本研究で扱う地震リスクは、被災確率と同義である。

地震時 PRA を道路や鉄道分野に普及させるためには、地点毎のハザード評価と、斜面のフラジリティ評価が必須となる。(国研) 防災科学技術研究所 (以下、防災科研と呼ぶ) では、地震ハザードの共通情報基盤として、2005 年に地震ハザードステーション J-SHIS の運用を開始して、地震動予測地図の一般公開を始めた。2009 年には、全国地震動予測地図として新たに整備された 250m メッシュの全国版「確率論的地震動予測地図」、主要断層帯で発生する地震に対する詳細な強震動予測に基づく「震源断層を特定した地震動予測地図」、それら計算に用いた全国版表層・深部地盤モデル等を公表した。斜面のフラジリティ評価を実施するためには、地震規模を設定して、信頼性解析により事前に設定された限界状態を超過する確率 (限界状態超過確率) を解析的に求める必要がある。本研究では、篠田ら(2022) が提案した簡易なフラジリティ曲線推定式 (式(1)) を用いた。式(1)の SI は、地震動強さの指標であり、地表面最大加速度、地表面最大速度、Arias intensity のいずれかである。 μ は第一母数、 σ は第二母数、 P_f は限界状態超過確率である。第一母数 μ と第二母数 σ は式(2)と式(3)から求められる。式(2)の ϕ_{ave} は地盤材料の内部摩擦角、 c_{ave} は地盤材料の粘着力であり、 A 、 B 、 C 、 D 、 E は地震動強さの指標ごとに定められたパラメータである。このフラジリティ曲線推定式を用いることで、容易に鉄道盛土のフラジリティを推定することが可能である。フラジリティ曲線で得られる限界状態超過確率 $P_f(x)$ とすると、地震リスクの確率密度は、特定の地震動レベルを有する地震が発生する確率 $f(x)$ に、特定の地震動レベルにおける限界状態超過確率 $P_f(x)$ を乗じることで求められる (式(4))。上記で得られた地震ハザード評価結果と斜面のフラジリティ評価結果を用いて、斜面の地震リスク評価を実施した。多様な地盤材料に対応させるため、地盤材料の平均内部摩擦角を 30 度から 50 度まで、平均補強材破断強度を 0kN/m から 120kN/m まで変化させて検討を実施した。

4. 研究成果

(1) 地盤材料の変形強度特性

図 4 と図 5 に、人工配合試料と斜面崩壊地採取試料の三軸圧縮試験による応力-ひずみ関係を示す。図 4 から、人工配合試料はピーク状態と残留状態を示す地盤材料であることが分かる。一方、図 5 から、斜面崩壊地採取試料はピークを示さず、载荷に伴い偏差応力が増加した。この三軸圧縮試験結果より、人工配合試料はピーク時と残留時の強度定数、斜面崩壊地採取試料はピーク時 (= 残留時) の強度定数を求めた。人工配合試料・樽前 d 層の物性値を表 1 に示す。

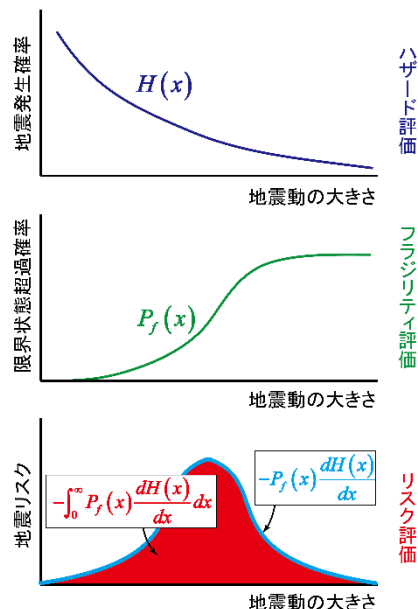


図 3 地震時確率論的リスク評価

$$P_f = \Phi\left(\frac{\ln SI - \mu}{\sigma}\right) \quad (1)$$

$$\mu = \frac{A \cdot \gamma_{ave} \cdot H}{c_{ave}} + B + C \quad (2)$$

$$\sigma = \frac{D}{\tan \phi_{ave}} + E \quad (3)$$

$$R = \int_0^{\infty} P_f(x) f(x) dx \quad (4)$$

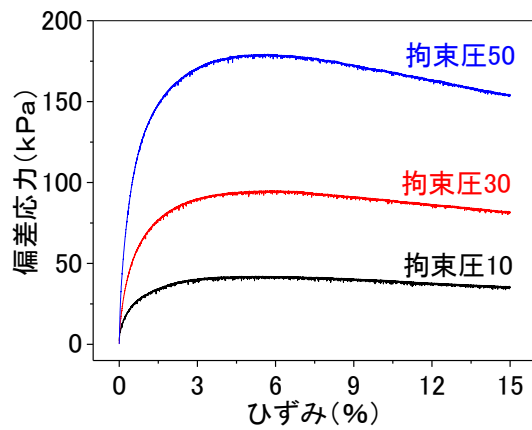


図4 人工配合試料の応力-ひずみ関係

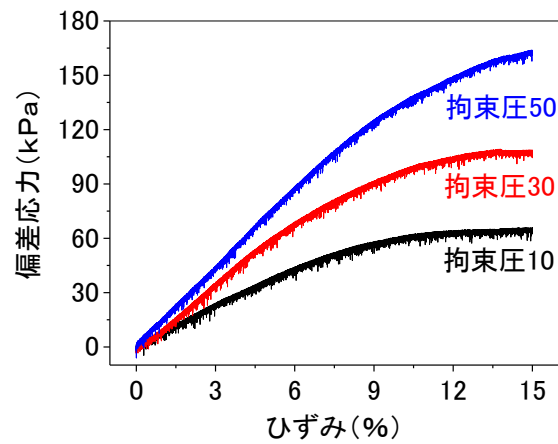


図5 斜面崩壊地採取試料の応力-ひずみ関係

表1 人工配合試料と斜面崩壊地採取試料の物性値

	単位体積重量 (kN/m ³)	内部摩擦角 (度)	粘着力 (kN/m ³)
人工配合試料	16.7	36.47	0.0
斜面崩壊地採取試料	12.5	33.31	9.0

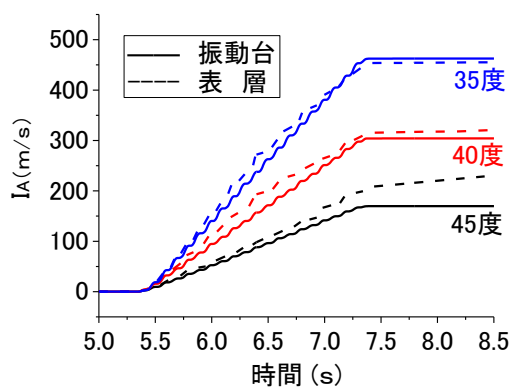


図6 Arias Intensity と時間の関係

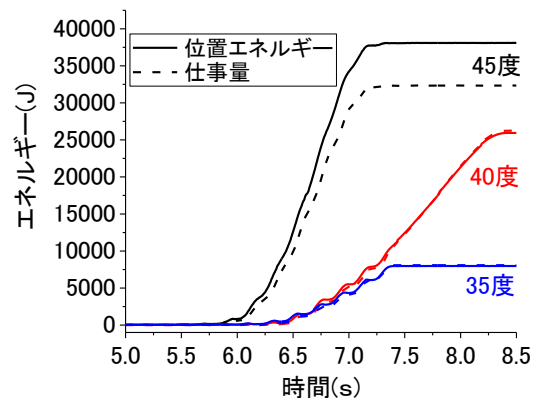


図7 斜面土塊の位置エネルギーと仕事量

(2) 斜面の振動台実験

振動台上の水平加速度から求めた Arias Intensity は、式(1)を用いて算定する。ここで、 I_{A1} は振動台上の Arias Intensity、 T_d は加振時間、 \dot{X} は振動台上の水平加速度である。なお、本検討で用いた振動台実験結果は、全て水平加振であるため、振動台の鉛直加速度はゼロである。上記と同様に、斜面土塊の水平・鉛直成分から求めた Arias Intensity は、式(2)を用いて算定する。ここで、 I_{A2} は斜面土塊の Arias Intensity、 \dot{x} は斜面土塊の水平加速度、 \dot{y} は斜面土塊の鉛直加速度である。図6に振動台上の加速度と、斜面土塊の水平・鉛直成分から求めた Arias Intensity を示す。図6から45度の加振後半を除き、全てのケースで振動台と斜面土塊の Arias Intensity が等しいことが分かる。

$$I_{A1} = \frac{\pi}{2g} \int_0^{T_d} \dot{X}^2 dt \quad (5)$$

$$I_{A2} = \frac{\pi}{2g} \left(\int_0^{T_d} \dot{x}^2 dt + \int_0^{T_d} \dot{y}^2 dt \right) \quad (6)$$

$$\Delta E_1 = mg\Delta h \quad (7)$$

$$R = (mg \cos \alpha + m\ddot{x} \sin \alpha + m\ddot{y} \cos \alpha) \tan \phi \quad (8)$$

$$E_2 = R\sqrt{x^2 + y^2} \quad (9)$$

斜面土塊の位置エネルギー増分は、式(7)を用いて算定する。ここで、 ΔE_1 は斜面土塊の位置エネルギー増分、 m が斜面土塊の質量、 Δh が斜面土塊の鉛直変位量である。斜面土塊の仕事量は、斜面土塊底面に発生する摩擦力に斜面の変位量を乗じたものと定義する。ここで、斜面土塊底面に発生する摩擦力は、式(8)を用いて算定する。ここで、 R は斜面土塊底面に発生する摩擦力、 α は斜面勾配、 ϕ は斜面地盤のピーク時の内部摩擦角である。なお、式(8)で示す摩擦力は地盤の粘着力の影響は小さいと仮定して無視している。斜面土塊の仕事量は、式(9)を用いて算定する。ここで、 E_2 は斜面土塊の仕事量、 $\sqrt{x^2 + y^2}$ は斜面土塊の変位量である。図7に斜面土塊の位置エネ

ルギー増分と仕事量の関係を示す。図7から45度の加振後半を除き、全てのケースで斜面土塊の位置エネルギー増分と仕事量が等しいことが分かる。

(3) 地震時の斜面変位量の評価

図8と図9に人工配合試料斜面と斜面崩壊地採取試料斜面の地震時残留変位量の比較結果を示す。縦軸が解析結果、横軸が実験結果であり、グラフの中央を対角に貫く直線が1:1を表している。この直線に重なれば、解析結果と実験結果が一致する。解析結果は、実験結果と比較して全て安全側であることが確認できた。斜面崩壊地採取試料斜面における実験結果と解析結果の差が大きいが、これは地盤材料の粘着力を無視した結果であると推察した。

(4) 斜面の地震リスク評価と可視化

図10に全国の斜面盛土の地震リスクマップを示す。斜面盛土は、盛土高9m、平均内部摩擦角40度、平均補強材破断強度60kN/mである。図10から北海道南東部や仙台平野の一部、首都圏、東海～四国地域の太平洋側及び糸魚川-静岡構造線断層帯の周辺地域などの地震リスクが高いことが分かった。なお、図10に示した地震リスクマップは、防災科研が公開している確率論的地震動予測地図と同じ傾向であることが確認できた。

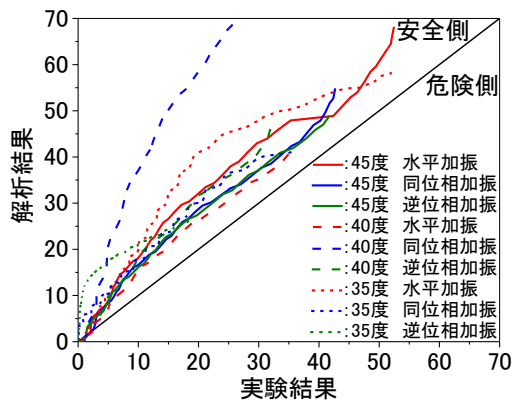


図8 実験結果と解析結果の地震時残留変位量の比較 (人工配合試料斜面)

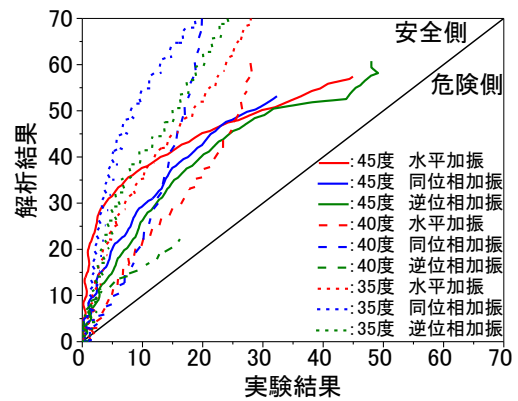


図9 実験結果と解析結果の地震時残留変位量の比較 (斜面崩壊地採取試料斜面)

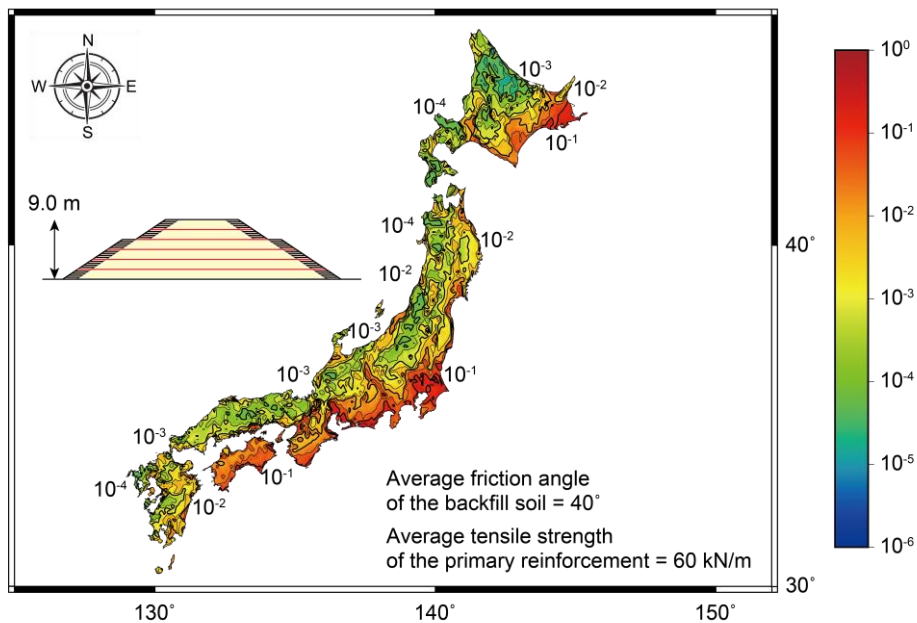


図10 盛土斜面の全国地震リスクマップ (盛土高: 9m、平均内部摩擦角: 40度、平均補強材破断強度: 60 kN/m)

<引用文献>

- ①篠田 昌弘、Spencer 法に基づいた斜面の地震時残留変位量の算定法、土木学会論文集C (地圏工学)、第69巻、2013、491-503
- ②Shinoda, M., Nakajima, S., Watanabe, K., Nakamura, S., Yoshida, I. and Miyata, Y., Practical seismic fragility estimation of Japanese railway embankments using three seismic intensity measures, Soils and Foundations, Vol. 62, 2022, 1-23

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 篠田昌弘、宮田喜壽	4. 巻 36
2. 論文標題 最近の地震履歴を用いた鉄道盛土の全国地震リスクマップ	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 ジオシンセティックス論文集	6. 最初と最後の頁 1-8
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 篠田昌弘、宮田喜壽	4. 巻 77
2. 論文標題 修正適応型粒子群最適化法を用いた斜面の非円弧すべり安定解析	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 土木学会論文集C（地圏工学）	6. 最初と最後の頁 258-270
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2208/jscejge.77.3_258	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 篠田昌弘、中島進、渡邊健治、中村晋、吉田郁政	4. 巻 28
2. 論文標題 Practical seismic fragility estimation of unreinforced and reinforced embankments in Japan	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Geosynthetics International	6. 最初と最後の頁 48-64
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1680/jgein.20.00026	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 篠田昌弘、高倉太希、宮田喜壽	4. 巻 35
2. 論文標題 高レジリエンス性能を有する補強土擁壁の長時間加振実験	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 ジオシンセティックスシンポジウム論文集	6. 最初と最後の頁 15-22
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12件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 篠田昌弘
2. 発表標題 SEISMIC FRAGILITY ESTIMATION OF GEOSYNTHETIC-REINFORCED EMBANKMENT
3. 学会等名 第17回世界地震工学会議（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 篠田昌弘
2. 発表標題 Regional landslide susceptibility following the 2016 Kumamoto earthquake using back-calculated geomaterial strength parameters
3. 学会等名 第5回斜面防災世界フォーラム（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高倉太希
2. 発表標題 振動台実験による自然斜面模型崩壊挙動の把握
3. 学会等名 第18回地盤工学会関東支部
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高倉太希
2. 発表標題 模型振動台実験による斜面崩壊前後の変形局所化挙動
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 高倉太希
2. 発表標題 複数の斜面模型振動台実験結果を用いたArias Intensityとエネルギー量の考察
3. 学会等名 第76回土木学会年次学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高倉太希
2. 発表標題 北海道胆振東部地震の崩壊斜面地盤材料を用いた斜面の振動台実験
3. 学会等名 日本地震工学会第16回年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 丸尾光平
2. 発表標題 崩壊斜面地盤材料を用いた斜面の振動台実験による地震時崩壊速度の検討
3. 学会等名 第49回関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鍛本聡大
2. 発表標題 鉄道盛土の地震時確率論的リスク評価
3. 学会等名 第49回関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高倉太希
2. 発表標題 複数の振動台実験における計測エネルギー量の観点から見た斜面勾配と地盤強度定数の関係
3. 学会等名 第49回関東支部技術研究発表会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 佐々木星
2. 発表標題 補強土擁壁の長時間加振実験による補強メカニズムの解明
3. 学会等名 第48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 大山将和
2. 発表標題 斜面模型振動台実験結果による崩壊挙動の評価
3. 学会等名 第48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 高倉太希
2. 発表標題 斜面模型振動台実験結果を用いたエネルギー量の考察
3. 学会等名 第48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
研究 分担者	宮田 喜壽 (Miyata Yoshihisa) (20532790)	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・教授 (82723)	
研究 分担者	野々山 栄人 (Nonoyama Hideto) (00624842)	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・准教授 (82723)	
研究 分担者	吉田 郁政 (Yoshida Ikumasa) (60409373)	東京都市大学・理工学部・教授 (32678)	

	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 協力者	橋本 和佳 (Hashimoto Kazuyoshi)		

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