

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：82723

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H03309

研究課題名（和文）危機耐性向上のための土構造物の破壊形態制御法と次世代性能設計法

研究課題名（英文）Damage control and next-generation performance based design of soil structures to improve the anti-catastrophe performance

研究代表者

宮田 喜壽（Miyata, Yoshihisa）

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：20532790

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,300,000円

研究成果の概要（和文）：土構造物は道路全長の約8割を支えるような重要性の高い構造種別である。この技術に関し、社会基盤の危機耐性を考慮した設計法の構築と構造物の設計に関する国際基準ISO2394への対応が課題になっていることを踏まえ、性能設計の枠組みについて検討した。盛土、重力式擁壁、補強土壁を対象に従来の設計作用を大きく超える条件で振動台実験を行い、地震動の強さ、継続時間、上下方向地震動が土構造物の破壊形態に及ぼす影響について明らかにした。ラグランジュベースの破壊解析法と冗長性・ロバスト性を考慮した信頼性解析法を構築し確定論・確率論的リスク評価法を確立した。以上より道路網の危機耐性向上に役立つ性能設計指針を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

土構造物は、道路全長の約8割を支えるような重要性の高い構造種別である。本研究では、その設計の高度化について研究を行った。研究の学術的意義としては、設計地震動よりはるかに厳しい作用条件に対する土構造物の挙動を実験的に明らかにしたこと、土構造物のリスクを確定論的・確率論的に定量化する数理力学モデルの実際問題への適用性を高めたことが挙げられる。社会的意義としては、災害時の事業継続性や早期復旧が可能になるための技術の高度化や、2015年に改訂された一般構造物の設計法に関する国際基準への対応をスムーズにするための基礎的成果が得られたことが挙げられる。

研究成果の概要（英文）：In this project, a new framework of the performance based design by considering is examined based on those backgrounds. Shaking table tests were performed for non-reinforced embankments, conventional gravity retaining walls, and reinforced soil walls under extreme conditions far exceeding conventional design criteria. In a series of the tests, the effects of seismic intensity, seismic motion duration, and vertical seismic motion on the failure mode of the soil structures were investigated. A Lagrangian based failure analysis method and a reliability analysis method were developed to consider structural redundancy and robustness in the design. They enable for designer to assess deterministic and probabilistic geotechnical risk. Those achievements will contribute for next generation performance based design of soil structures which consider anti-catastrophe performance.

研究分野：地盤工学

キーワード：性能設計 土構造物 危機耐性 冗長性 ロバスト性 地盤補強 リスク 数値解析

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

東日本大震災以降、想定を超えた事象への対応について関心が高まり、構造設計の分野では、通常設計では想定しない作用・事象に対しても、構造物単体あるいはそのシステムが破滅的な状況に陥らないような性質：危機耐性（土木学会，2013）を考慮する必要性が広く認識されるようになってきた。しかし、その概念をどのように実際の設計体系に組み込むかについては試行段階にある。一方、構造物の性能設計の基本概念を定めた国際基準 ISO2394 は 2015 年に改訂され、構造物の冗長性・ロバスト性が安全性・使用性に続く第 3 の性能として位置づけられ、リスクに基づく意思決定が定められた。ISO2394 第 2 版が 1998 年に出版された際は、その 4 年後に「土木・建築にかかる設計の基本」が国土交通省から示された。今回も同様な対応がなされると考えられる。

上記の背景において、申請者は道路網の危機耐性向上のため、土構造物を対象にした ISO2394 包括型の次世代性能設計指針確立のための研究を行うべきという考えに至った。道路網は様々な施設を支える最も重要度の高い社会基盤のひとつであり、危機耐性を向上させる必要性が最も高いということ、そして、道路設備のほとんどが土構造物であるが、性能設計の整備には課題が多いことが理由である。土構造物には盛土、重力式擁壁、補強土壁など様々な形式のものがある。現在、道路網整備にあたっては、設計条件を満足する代替案のなかで初期建設費が最も安価な構造形式が決定されている。危機耐性についての性能目標を定め、リスクの観点から最も有利な構造形式を選定し、詳細設計を行うための研究が必要であると考えた。

2. 研究の目的

現在の土構造物の設計において、危機耐性を考慮した性能設計法の構築と改訂された国際基準 ISO2394 (2015) への対応が課題になっていることから、新しい性能設計の枠組みについて検討する。まず、盛土、重力式擁壁、補強土壁を対象に従来の設計想定に依らない条件で振動台実験を行い、地震動の継続時間、強さ、上下方向地震動が土構造物の破壊形態に及ぼす影響を明らかにする。次に、ラグランジュベースの破壊解析法と冗長性・ロバスト性を考慮した信頼性解析法を構築し、確定論的および確率論的リスク評価法を提案することを目的として研究を実施した。

3. 研究の方法

本研究は土構造物の設計における危機耐性を考慮した性能設計法の構築を目指すものである。

（1）従来の設計作用以上の地震動に対する土構造物の破壊挙動の解明

盛土、重力式擁壁、補強土壁を対象に、従来の設計想定に依らない条件で振動台実験を精度良く実施するために次の点について検討を行った。

①材料試験・模型実験準備：振動台実験を開始する前に、使用する材料の物理・力学試験（三軸圧縮繰返し試験など）、盛土、重力式擁壁、補強土擁壁の模型の作製方法について検討した。

得られた知見をもとに、以下の 3 つの実験条件に対して実験を行った。

②長継続時間地震動に関する実験：長継続時間地震動条件下で実験を行い、地震動の継続時間が土構造物の崩壊挙動に及ぼす影響について検討した。

③幅広い地震動に関する実験：現行の設計地震動に関係なく、非常に厳しい地震動条件下で実験を実施した。段階的に加振を行い、損傷から破壊へと進展する過程の内部構造変化について検討した。

④上下地震動に関する実験：上下と水平方向の地震動の位相差によって、土構造物の地震時挙動は変化すると考えられる。そこで、最大加速度と位相差を変化させた実験で、上下地震動を設計で考慮する必要性について検討した。

（2）土構造物の破壊形態・破壊確率解析法の構築

①不連続・流動変形を考慮した破壊形態解析法：土構造物の破壊形態の予測法を提案するために、大変形解析に大きな利点を有する SPH 粒子法による流動変形解析法について検討した。

②冗長性・ロバスト性を考慮した信頼性解析：冗長性を考慮した補強土壁の信頼性解析法と斜面の非円弧すべり解析法をハイブリッド化して、振動台実験で観察された破壊形態を説明できる新しい解析法について検討した。

③補強土壁を対象に、補強材力モデル（作用）と引抜力モデル（抵抗）についてモデルバイアス特性を検討した。この試みはこれまで続けてきたものであるが、今回は、スチールグリッドや PET ストラップといった新しい補強土壁形式について検討した。

④補強土壁の内的安定性について、作用・抵抗のモデルバイアス特性を考慮した破壊確率の計算式をもとに、従来の安全率と破壊確率の関係、許容破壊確率から作用・抵抗係数を算定する方法について検討した。

（3）ISO2394 (2015) を包括した土構造物のリスク評価法の提案

①破壊形態による直接・間接損失を考慮したリスク解析：土構造物のライフサイクルコスト計算法と地震ハザード情報を活用した信頼性解析法について検討した。災害リスクは、破壊確率と災害復旧費の積で考慮した。災害復旧費には、解体撤去費、再構築費、道路損壊に伴う時間

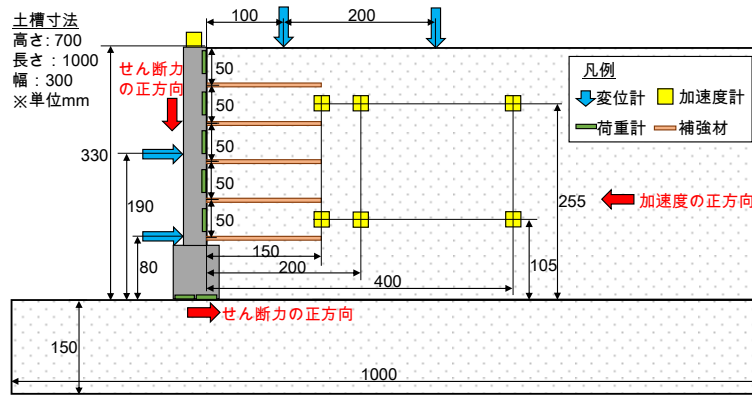


図-1 振動台実験の模型地盤の概要

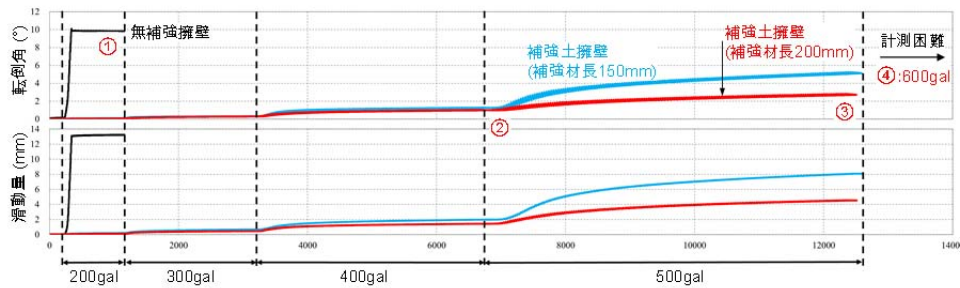
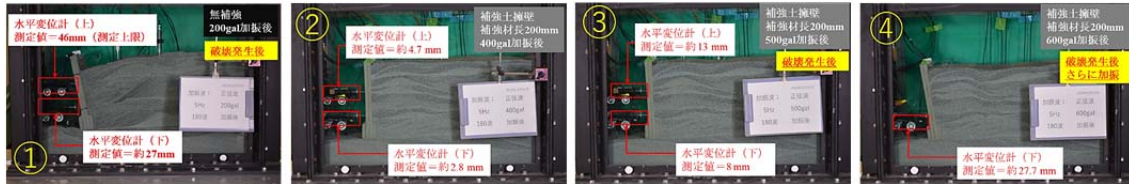


図-2 振動台実験の結果

損失費，復旧中に迂回路を走行することで生じる走行損失費，損壊に伴う人的損失費を考慮した．地震ハザード情報は，防災科学技術研究所が公開している強震観測網データを利用した．②振動台実験，冗長性・ロバスト性を考慮した信頼性解析，破壊形態による直接・間接損失を考慮したリスク解析に関する成果をとりまとめ，新しい設計指針について検討した．これにより，設計当初より「壊れたときのシナリオ」を考えた道路網の整備・運用計画が可能になり，通常的设计レベルで想定される以上の作用が生じて，土構造物に破壊が生じても事業継続性や早期復旧が可能になる．

4. 研究成果

(1) 従来の設計作用以上の地震動に対する土構造物の破壊挙動の解明

振動台実験を行う上での基礎的研究として，振動台に使用する土質材料の物理・力学試験を実施した．力学試験では，幅広いひずみ速度条件で三軸圧縮試験を実施し，その力学特性を把握した．模型準備については，盛土，重力式擁壁，L型擁壁，補強土壁の模型について，過去の土構造物の被災事例データベースに基づいて作製方法の検討を行った．地盤作製方法は，多重ふるい落下装置を用いることとして，多重ふるい落下装置の設計・製作を行った．振動台実験の準備として，実験装置の性能確認を行った．まず，振動台や土槽に加速度計を設置し，掃引加振を実施し，振動台や土槽自体の固有振動数等の応答特性を把握した．次に，振動台に土槽を設置し，正弦波や不規則波を入力した場合の振動台と土槽の応答特性を把握した．東北地方太平洋沖地震の築館と熊本地震の益城で観測された観測波を用いて振動台を加振した結果，振動台から再現性の高い加速度波形が得られることを確認した．さらに入力地震動の決定のための事前検討として，水平方向と鉛直方向の加速度波形を入力可能なニューマーク法により斜面の変形解析を実施した．解析に用いた加速度波形は，48箇所の地震観測所から得られた強震波形を32方位に分解した波形を用いた．その結果，水平方向と鉛直方向の慣性力の方向により，発生する地震時変位量が異なることが分かった．事前検討した加速度波形から，2011年東北地方太平洋沖地震の強震波形（浪江）を用いて，振動台実験を実施するものとした．

上記の検討結果を踏まえ，無補強擁壁と補強土擁壁の振動台実験を実施した(図-1)．本実験では水平方向のみで800galまでの設計作用以上の地震動を作用させたものと，上下地震動を模擬して水平方向と鉛直方向の位相差を変化させた正弦波(最大加速度800Gal, 5Hz, 20波)を作用させたものを行い，土構造物の破壊挙動を把握した．振動台実験の結果，補強土擁壁は，無補強擁壁が破壊に至ったときの約35倍のエネルギーを入力しても，転倒角の増分が約半分，

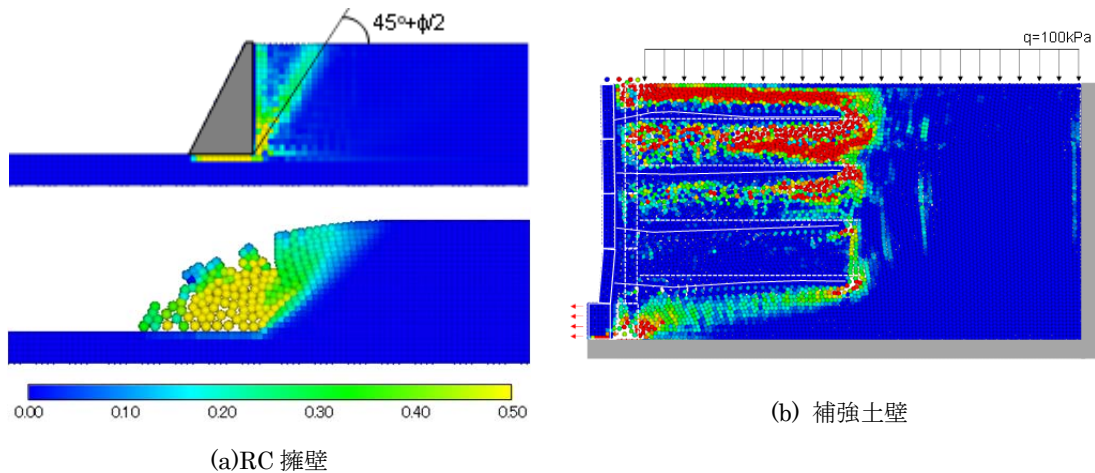


図-3 解析結果

滑動量の増分が約3分の2程度となっており、補強材を設置することにより、擁壁の耐震性を向上させることが可能であることが分かった。さらに、加振中の変形性については、補強土擁壁では無補強と比較して、滑動・転倒は緩やかに増加しており、変形に対して粘り強く対応していることが分かった。補強土擁壁の変位は、加速度を増加させた初期において増加するが、その後、一定の値を取るようになる。補強材を設置することにより、変位に占める滑動に關与する成分の割合が大きくなり、逆に転倒に關与する成分が小さくなる(図-2)。上下地震動を模擬した実験結果では、慣性力が盛土法面の垂線方向に作用すると変形量が大きくなることが分かった。

(2) 土構造物の破壊形態・破壊確率解析法の構築

破壊形態解析法として、不連続・流動変形を考慮した破壊形態解析法を開発した。大変形解析に大きな利点を有する粒子法(SPH法)を用いて、盛土と擁壁の大変形解析を実施した。その結果、常時から崩壊時の地盤の運動、そして崩壊土砂が静止するまでを解析できることを示した。次に、粒子法で補強材をモデル化する方法を新たに提案し、解析プログラムに組み込んだ。提案方法の妥当性の検証として、補強土擁壁の大規模載荷実験の施工過程および載荷過程の再現解析を行った。得られた解析結果は、実験結果と比較し、壁面パネルの水平変位および補強材力を再現することができた(図-3)。

破壊確率解析法として、帯鋼補強土壁、ジオシンセティックス補強土壁、格子状金属補強材を用いた補強土壁に対して、作用・抵抗モデルを新しく提案した(図-4,5)。この検討の結果、フレキシブルな引張強度特性を有するジオシンセティックス補強材から、剛な引張強度特性を有する帯鋼補強材までの幅広い条件に対して、破壊確率を精度良く計算できることになった。さらに、この成果をもとに、帯鋼補強土壁を対象に、許容破壊確率から部分安全係数を計算した。この一連の結果より、破壊確率を陽なかたちで考慮する設計と、それを部分係数で陰なかたちで設計の、2段階の設計が補強土壁に対して可能になった。

(3) IS02394(2015)を包括した土構造物のリスク評価法の確立

破壊形態による直接・間接損失を考慮したリスク解析法を開発した。本解析法では、破壊確率による構造物の安定性のみでなく、初期建設・維持管理・災害復旧を考慮したライフサイクルコスト(LCC)とライフサイクルCO₂(LCCO₂)を包含した解析手法の確立を行った。その結果より、破壊確率・ライフサイクルコスト(LCC)・ライフサイクルCO₂(LCCO₂)を最適化する許容設計条件の決定方法を検討した(図-6,7)。本手法は、設計条件や要求性能によって最適工法を合理的に選択する新しい設計の枠組みとなりえることを示した。

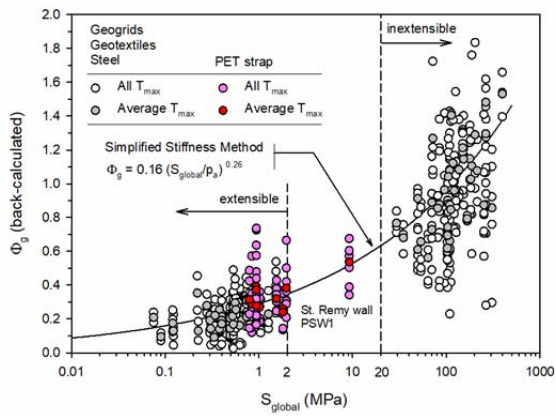


図-4 提案する作用モデルの修正係数

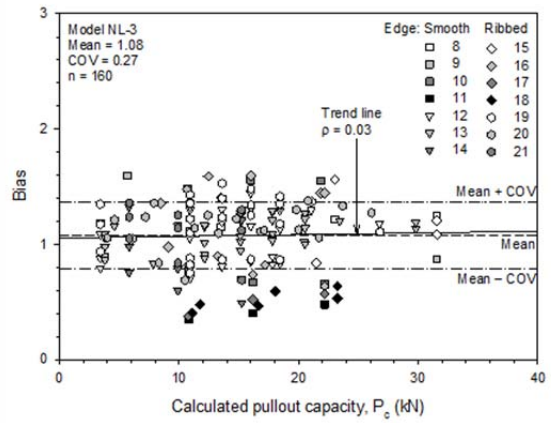


図-5 提案する抵抗モデルのバイアス依存性

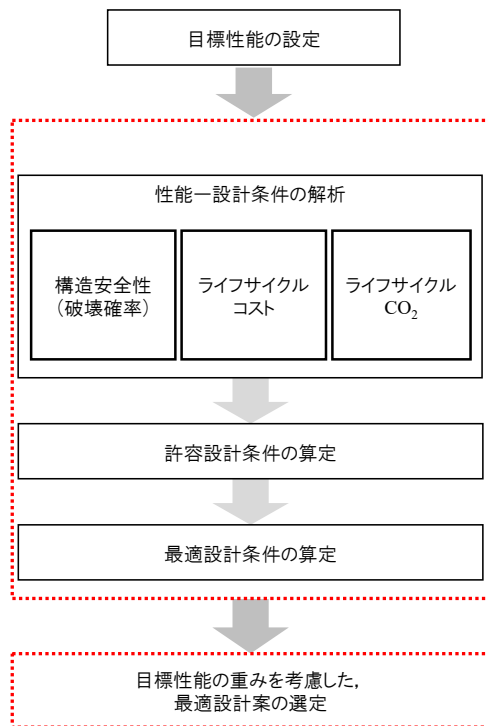


図-6 新しい設計法の枠組み

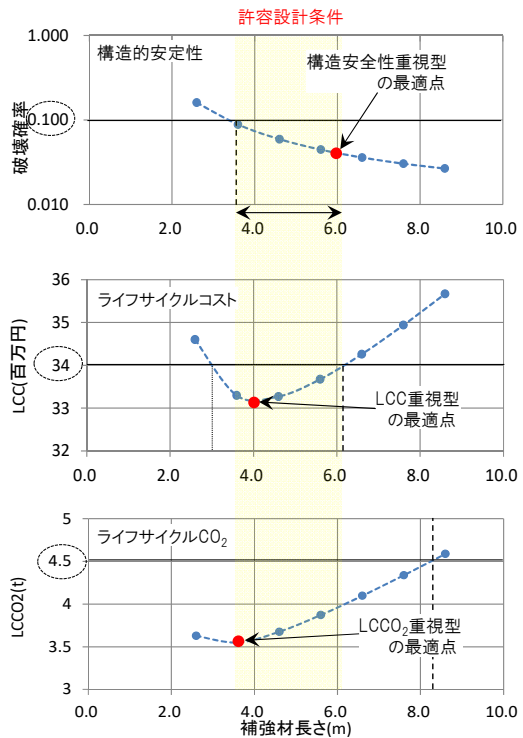


図-7 本設計法による補強材長さの決定例

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計9件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Bozorgzadeh,N., Bathurst,R.J., Allen,T.M. and Miyata,Y.	4. 巻 146(1)
2. 論文標題 Reliability-based analysis of internal limit states for MSE walls using steel strip reinforcement	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 ASCE's Journal of Geotechnical and Geoenvironmental 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 該当する

1. 著者名 Miyata,Y., Bathurst,R.J. and Allen,T.M.	4. 巻 26(4)
2. 論文標題 Calibration of PET strap pullout models using statistical approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Geosynthetics International	6. 最初と最後の頁 413-427
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1680/jgein.19.00026	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 該当する

1. 著者名 Shinoda,M. and Miyata,Y.	4. 巻 14(3)
2. 論文標題 PSO-based stability analysis of unreinforced and reinforced soil slopes using non-circular slip surface	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Acta-geotechnica	6. 最初と最後の頁 907-919
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 Bathurst,R.J., Allen,T.M., Miyata,Y., Javankhosdel,S. and Bozorgzadeh,N.	4. 巻 13(3)
2. 論文標題 Performance-based analysis and design for internal stability of MSE walls	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Georisk	6. 最初と最後の頁 214-225
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://doi.org/10.1080/17499518.2019.1602879	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 該当する

1. 著者名 Miyata, Y. and Bathurst, R. J.	4. 巻 14
2. 論文標題 Statistical assessment of load model accuracy for steel grid-reinforced soil walls	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta Geotechnica	6. 最初と最後の頁 57～70
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s11440-018-0638-5	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 該当する

1. 著者名 Miyata Y., Bathurst, R. J. and Allen, T. M.	4. 巻 25
2. 論文標題 Evaluation of tensile load model accuracy for PET strap MSE walls	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Geosynthetics International	6. 最初と最後の頁 656～671
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1680/jgein.18.00032	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 該当する

1. 著者名 野々山栄人, 宮田喜壽	4. 巻 66
2. 論文標題 粒子法による地盤解析に関する一考察	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 地盤工学会誌	6. 最初と最後の頁 8～9
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 -

1. 著者名 Miyata, Y. and Bathurst, R. J.	4. 巻 Online
2. 論文標題 Statistical assessment of load model accuracy for steel grid reinforced soil walls	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Acta-geotechnica	6. 最初と最後の頁 1-14
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s11440-018-0638-5	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 該当する

1. 著者名 篠田昌弘, 宮田喜壽	4. 巻 32
2. 論文標題 ジオシンセティックス補強斜面の非円弧安定解析法	5. 発行年 2017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 147-152
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 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 5件)

1. 発表者名 加藤哲志, 篠田昌弘, 宮田喜壽
2. 発表標題 想定外の地震に対する補強土擁壁を用いた土構造物の強靱化に関する研究
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 藤村伊吹, 宮本慎太郎, 宮田喜壽
2. 発表標題 損傷作用を受けたジオグリッドの土中クリープ特性に関する基礎的研究
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 Miyata, Y.
2. 発表標題 Reliability analysis of geogrid pullout capacity
3. 学会等名 IGS TC-Soil Reinforcement & TC-Barrier Systems Workshops (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Miyata, Y.
2. 発表標題 Japanese technical standards on geo-structures for road applications and technical manual on geosynthetic-reinforced walls
3. 学会等名 IGS TC-Soil Reinforcement & TC-Barrier Systems Workshops (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野々山栄人, 宮田喜壽, Bathurst Richard
2. 発表標題 補強土壁の損傷設計を見据えたSPHを用いた数値シミュレーション
3. 学会等名 第23回応用力学シンポジウム
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 篠田昌弘, 宮田喜壽
2. 発表標題 水平・鉛直同時加振によるL型擁壁の動的挙動
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, 宮田喜壽
2. 発表標題 土構造物の破壊形態推定と制御に関する解析的検討
3. 学会等名 第54回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 筒井健司, 篠田昌弘, 宮田喜壽
2. 発表標題 水平・鉛直二次元振動台を用いた盛土の加振実験
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 Miyata,Y., Watanabe,K. and Fujita,T.
2. 発表標題 Seismic design of reinforced soil walls in Japan: A case study on the 2016 Kumamoto earthquake
3. 学会等名 Proc. of 11th International Conference on Geosynthetics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Miyata,Y., Shinoda,M. and Hironaka,J.
2. 発表標題 Damage of geogrid reinforced soil wall caused by extreme load - Japanese case histories
3. 学会等名 Proc. of 11th International Conference on Geosynthetics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinoda,M. and Miyata,Y.
2. 発表標題 Life cycle cost of geosynthetic-reinforced soil slopes subjected to an earthquake
3. 学会等名 Proc. of 11th International Conference on Geosynthetics (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 篠田昌弘, 宮田喜壽
2. 発表標題 水平・鉛直二次元振動台の導入と盛土の加振実験
3. 学会等名 第15回関東支部発表会 (GeoKanto2018)
4. 発表年 2018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	篠田 昌弘 (Shinoda Masahiro) (30462930)	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	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・講師 (82723)	
研究分担者	宮本 慎太郎 (Miyamoto Shintaro) (60782711)	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・助教 (82723)	