

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 8 月 23 日現在

機関番号：15501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2020

課題番号：16H03152

研究課題名（和文）想定外の豪雨地盤災害を対象としたメッシュ型無線センサー監視システムの開発

研究課題名（英文）Development of mesh-based wireless sensor monitoring for unexpected heavy rainfall ground disasters

研究代表者

中田 幸男（NAKATA, YUKIO）

山口大学・大学院創成科学研究科・教授

研究者番号：90274183

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,200,000円

研究成果の概要（和文）：局所的集中豪雨の激化が想定外の災害をもたらす、安心・安全を脅かしている。未経験な自然環境下において発生する災害を予測できる新しい監視技術の開発が急務になっている。この課題に対して、想定外の災害に有効となるメッシュ型無線センサー網による地盤災害の監視システムの検討を行った。その結果、メッシュ型無線センサー網の機器基盤を構築し、数年間の監視を実施できることや、実際の斜面変状を現地計測可能であることを示した。また、現場計測や模型実験から得られる斜面変状や崩壊発生時のデータを活用し、異常箇所抽出するための警告基準および時間予測モデルを検討し、監視システムの概念を構築した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本提案は、従来の監視システム概念と異なり、多数の観測点を設け地盤災害を面的に観測し抽出しようとする点が独創的といえる。また、高精度のセンサーを数点設置するという従来の観測システムの考えから脱し、安価で単純なセンサーを多数散在させ、センサー群からなるメッシュ型観測体制を構築し、信頼性の高い情報を収集しようとするものである。本システムのようなローコスト多数型の監視システムを構築できれば広域な災害監視が可能となる。また、災害後の救出・復旧活動時における兆候観測にも適用でき、建設構造物全般に利用できる。

研究成果の概要（英文）：Recently, torrential rains have caused unexpected collapses, threatening safe and secure social life. There is an urgent need to develop new monitoring technology that can predict disasters that occur in such an inexperienced natural environment. So, we developed firstly, the unique monitoring system consisting of mesh-type wireless sensors, carried out monitoring for several years, and measured on-site actual slope deformation. In addition, by utilizing the data on slope deformation and collapse obtained from on-site measurement and model experiments, we examined the concept for warning alert extracting the abnormal area and proposed the basic technology of the monitoring system.

研究分野：地盤工学、防災工学

キーワード：地盤災害 センサー 監視

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

近年、局所的集中豪雨の頻度が増加し、長時間にわたる高強度な豪雨が想定外の崩壊をもたらす、安心・安全な社会生活を脅かしている。未経験な自然環境下において発生する想定外の災害を予知できる新しい監視技術の開発が急務になっている。ここでは、想定外の豪雨地盤災害の監視という課題に対して、現場計測および模型実験から得られる斜面変状や崩壊発生メカニズムの知見を活用し、災害に対する危険度の定量的評価を含む監視システムの開発を行う。

2. 研究の目的

本研究では、想定外の災害を監視する上で有効となるメッシュ型無線センサー網による地盤災害の監視システムの構築を目標に、得られる地盤変状のデータ分析に基づく災害に対する危険度の定量的評価の可能性について検討を行う。まず、センサー網を構築するために、センサーやデータ集積装置のハードウェアを開発する。その上で、現地に開発した無線センサー網を設置し、地盤の観測データの取得を行う。得られたデータ分析に基づいて、災害源となる危険箇所を抽出できるシステムを構想する。加えて、模型土層に作成した土構造物で観測される崩壊に対するデータを体系的に収集し、崩壊直前までの挙動を検討する。

3. 研究の方法

具体的な研究の方法は以下のようになる。1) センサーの多数化し、メッシュ型配置を可能にするために、センサーや集積装置のハードウェア開発を行う。2) 開発した機器を現場に設置し、観測データの取得を行う。3) 土構造物に対する崩壊を模型実験において再現し、崩壊挙動の予兆を体系的に検討する。4) データの分析に基づいて、地盤災害源となる危険箇所を抽出する警告基準を検討する。5) 警告基準を超過する時間を予測するモデルを検討し、異常箇所抽出システムの概念を構想する。

4. 研究成果

以下では、3. で示した研究方法のうち、2) 3) 4) の主要な結果の概要を述べる。

[1] 切土斜面での観測

調査は山口県美祢市の切土法面を対象とした。40年以上前の建設において、25度から30度程度の角度で斜面が切り取られた。法面材料は、地層のボーリング試験により、山頂の風化安山岩、中層の軟岩、数種類の砂利で構成していることが確認された。最上層の標準貫入試験値(N)は10未満だが、中間層の値は50まで増加した。下部層のN値は50以上で、比較的硬い地層を表している。

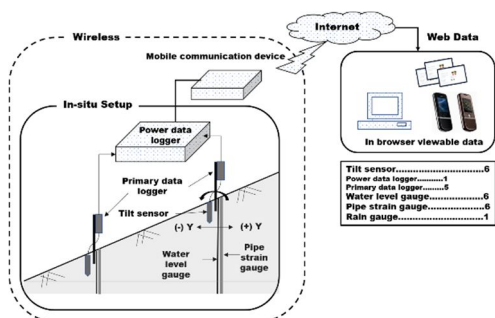


Fig.1 斜面のモニタリングと観測システムの概略図

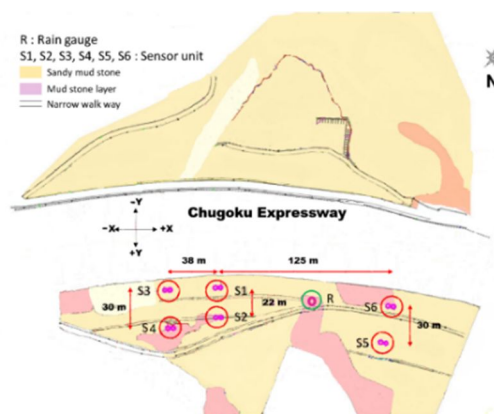


Fig.2 切土法面に設置されたセンサーユニットの配置

Fig.1に、この調査で採用した包括的なモニタリングおよび早期警告システムの概略図を示す。このシステムは、単純な表面傾斜センサー（解像度 1/1000 度）と、パイプひずみ計、水位計、雨量計で構成されている。合計 6 台のセンサーユニットが、24 時間ごとの斜面の不安定性を評価する手段として傾斜の程度を測定する切土斜面に設置されている。パイプひずみ計は、傾斜角に対応して発生した水平変位を確認し、斜面移動の傾斜速度に基づく警告基準を確立するためにのみシステムに追加された。さらに、地下水面と降雨状態をモニタリングするために、水位計と雨量計が設置された。このシステムは、自動的に無線接続されるよう設計されている。センサーユニットはソーラーパネルから電力を供給され、現場で正常に機能したが、インターネット通信のエラーのために一部のデータが誤って失われた期間もあった。傾斜センサーは 10 分間隔で傾斜状態を記録したが、パイプひずみと水位データは 60 分間隔で記録した。記録されたデータは、同じく斜面の近くにあるデータロガーユニットに転送された。最後に、ゲートウェイユニットはすべてのセンサーユニットからデータを収集し、携帯電話ネットワークを介してサーバーステーションに読み取り値を送信した。Fig.2 は、斜面挙動の原因を把握するための、モニタリ

ング現場におけるセンサーユニットの位置と配置を示している。

Fig.3,4 and 5 は、2018年4月から7月までのモニタリング期間における、降雨量と地下水位、パイプひずみ、累積傾斜角の記録の収集データの時間履歴を示している。本研究では、Fig.3b に示すように、時間の経過に伴う累積降雨量（1011.5 mm）が地下水位の漸進的な上昇の主な原因であると判断した。地下水位は地表から測定され、6月30日から7月8日までの継続的な大雨によってピークに達した。地下水位計の測定値は、7月6日の午前10時にピークに達し、G3、G4、およびG6の地表からそれぞれ-0.06 m、5.64 m、および3.22mとなった。特にS4からのモニタリング結果では、Y軸(Fig.5b)に大きな傾きの変動が見られる。S4付近で大きな動きが見られ、7月6日には傾斜角が-2度に達した。一方、降雨日のY軸方向の傾斜角のわずかな変化は、他のすべてのセンサーにも記録された。6月30日から大雨時のパイプひずみの激しい動きもセンサーユニットS4にあるパイプひずみ計P4で検出された(Fig.4)。

パイプひずみ計の変位は、対応する降雨量と地下水位がそれぞれ平均45mm/dayと5.64mとなった7月6日において、深さ1.5m地点で98mmであった。この時、物理的な変形が確認された。Fig. 6より、約5~6メートルの長さにわたって約200~300mmの下向きの変位が発生したことが確認できる。記録されたデータは、激しい降雨により地下水位が上昇し、斜面が不安定となったことが設置されたセンサーユニットによって効果的に検出されたことを示している。

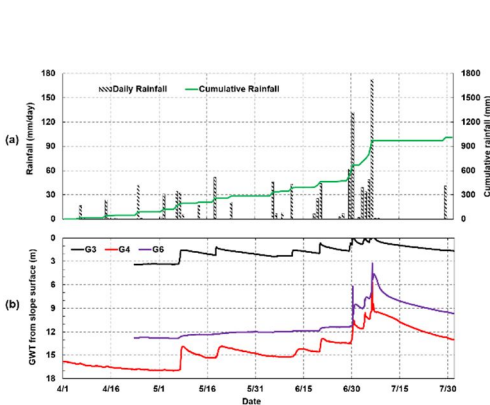


Fig.3 (a) 降雨量,(b) 地下水位 (GWT) の時間履歴を示すデータの概要

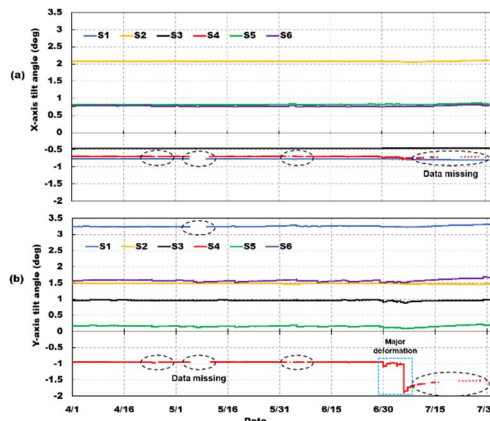


Fig.5 (a) X軸,(b) Y軸の累積傾斜角の時間履歴を示すデータの概要

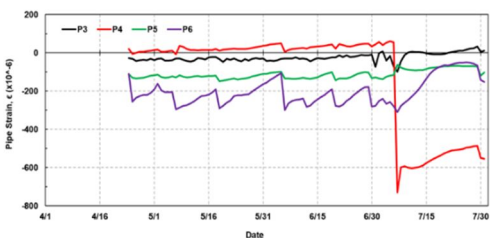


Fig.4 斜面から1mの深さにおけるパイプひずみの時間履歴を示すデータの概要



Fig.6 S4ユニット付近で観測された物理的変形

[2] 警告基準と傾斜角速度による時間予測モデル

降雨による斜面崩壊のモニタリング結果と現地観測に基づいて、警告基準が提案される。警告レベルの管理ポイントの概要を Table 1 に示す。

傾斜角を使用した時間予測は、適切な斜面不安定性モニタリング機器として認識されている傾斜センサーによって得られる効率的なデータに依存している。崩壊発生前の変形モニタリング出力は、連続的な加速段階を与える。Fig. 7 に示すように、崩壊寸前の目標傾斜速度(t_c)を考えた時、現在の傾斜速度(c)から目標ステージに到達するまでの時間は、次の式を使用して予測できる

$$T_p = (t_c - c) / K \dots \dots \dots (1)$$

ここで、 T_p は予測時間を表し、 K は現在時刻の直前の傾斜速度の変化率を表す。この予測モデルは、加速段階での傾斜速度と時間の間に線形関係があることを前提としている。

Table 1 警告基準の概要

Tilt rate (deg/hour)	Disp. rate (mm/hour)	GWLC rate (m/hour)	Warning level
0.01	0.5	0.5	Precaution
>0.1	>5	>1.0	Evacuation

[3] 時間予測モデルの室内模型試験への適用

本研究では、模型斜面崩壊試験を、さまざまな降雨強度と細粒分含有率もつ土質条件で実施した。Fig. 8は、斜面崩壊の変形過程における傾斜角変化の時間履歴を示している。T1を除いて、模型斜面は加速度計A1とA2の間がすべり、崩壊した。また、T1の場合、加速度計A2の下部の侵食によって崩壊が引き起こされた。T2とT3の傾斜角は負の進行を示しているが、他の3つのテスト傾斜センサーは正の傾斜方向に変状した。これは、T2およびT3の場合の傾斜センサーが移動中に後方に傾斜したためである。Fig. 8に示すように、すべてのテストのケースで加速度計によって記録された傾斜動作は、模型斜面の崩壊が発生し、最終崩壊の2~3分前に加速段階が開始されたことを示している。この図は、傾斜角の増加率が線形ではなく、崩壊前の段階で急激に増加しており、崩壊パターンが個々で異なることも示している。

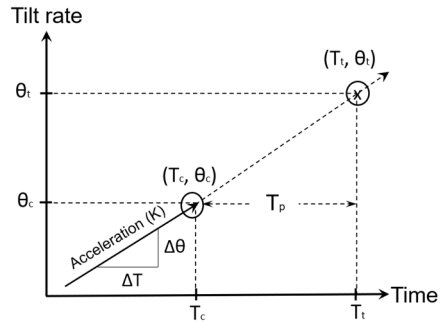


Fig.7 時間予測モデルの基本図

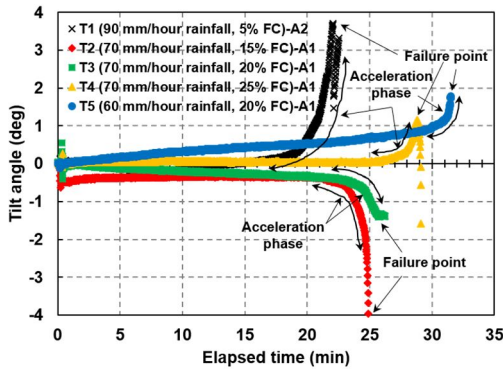


Fig.8 崩壊過程における傾斜角の時間履歴

最終崩壊までの加速段階における傾斜速度の履歴を Fig.9a に示す。示されているように、傾斜速度は 0.2deg/min まで徐々に増加し、その後、崩壊直前に傾斜速度の急激な上昇が発生した。K の値も変形の進行とともに増加しており (Fig.9b)、この値は、傾斜速度の差 (現在の傾斜速度-1 分前の傾斜速度) を時間間隔 (1 min) で除すことで求められる。K 値が最大となるときの目標傾斜速度を Eq.1 の θ_t とし、時間予測は Fig.9c のように求められる。現在の時刻より -3 ~ -2 分までの傾斜速度 (K 値) の変化率をとると、計算された予測斜面崩壊時間は 2 分未満であり、これは、Fig. 9a にも示されているように、実際の斜面崩壊時間が現在時刻から -2 分までの 2 分間であることと著しく類似している。テスト T1 については、予測時間が過大評価となったが、他のすべてのケースの予測は実際の崩壊時間と一致している。時間予測モデルは、最後の 1 分間の予測に対してより正確な結果も示しており、これは、モデルが斜面変形の連続加速フェーズでの時間予測に効率的であることを意味している。崩壊前の滑らかな増加以外に、変形加速度の性質が変化するため、時間予測値に多少の変動が生じる。

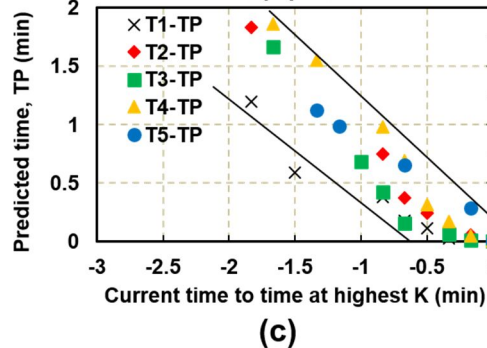
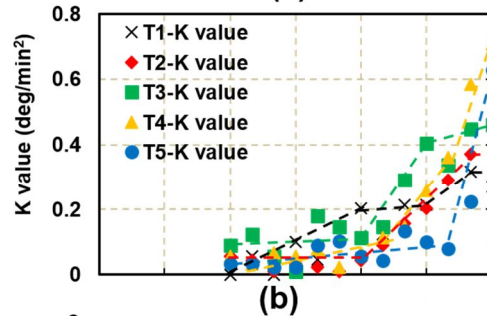
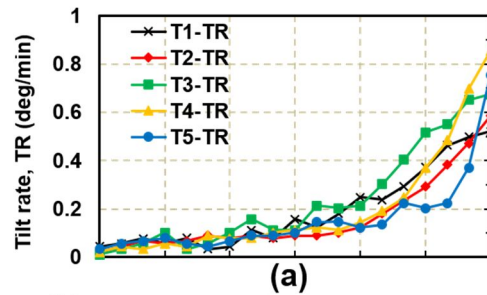


Fig.9 (a) 模型斜面試験の傾斜速度 (last 3 minutes) の時間履歴; (b) 時間の経過に伴う傾斜速度の変化率 (最後 2 分); (c) 崩壊時間を 0 としたときの最後 2 分間の時間予測

[4] 時間予測モデルの現場斜面変形への適用

切土斜面モニタリングの結果に対して、開発した時間予測モデルの適用性を検討した。

Fig.10 に示すように、6つのセンサーのうち、S4のみで大きな変形が記録されており、このセンサーの周囲の土塊が不安定になっていることがわかる。この変形は、30時間の平均降雨量が10mm/hourであったために発生した。この図は、30mm/hour以上の高強度の降雨で変形が始まったことを示している。この期間中に、Fig.10に示すような2つの変形イベントが発生した。斜面は降雨の進行とともに動いている。降雨が止まると動きも止まり、切土法面の変形は降雨パターンに完全に依存している。

これら2つのイベントの時間予測をFig. 11に示す。現在の時刻予測では、過去1時間の傾斜速度の履歴が考慮され、Kの値(deg/hour²)が算出される。変形イベント1では、最大傾斜速度が約0.143 deg/hourとなり、この傾斜速度を目標崩壊基準として予測時間が計算され、Fig. 11aに示されている。最終変形の1時間前の予測計算時間は42分であり、過大評価となっている。この現象は、この予測ポイントでの傾斜速度の増加率が、前方の傾斜速度の増加と比較して高いために発生した可能性がある。同様に、変形イベント2の場合に得られる最大傾斜速度は0.394 deg/hourとなった。この傾斜速度は、Fig. 11bの予測時間を計算するための目標崩壊基準として用いられる。最後の50分の加速段階では、傾斜速度の増加がほぼ直線的となった。この時点で、最大傾斜速度に達する予測時間は約59分と計算されるが、これは実際の時間からわずか9分の評価となった。したがって、時間予測の結果(Fig. 11)は、開発された時間予測モデルにより、斜面変形の連続加速段階における地すべりの動きをより正確に予測できることを示している。

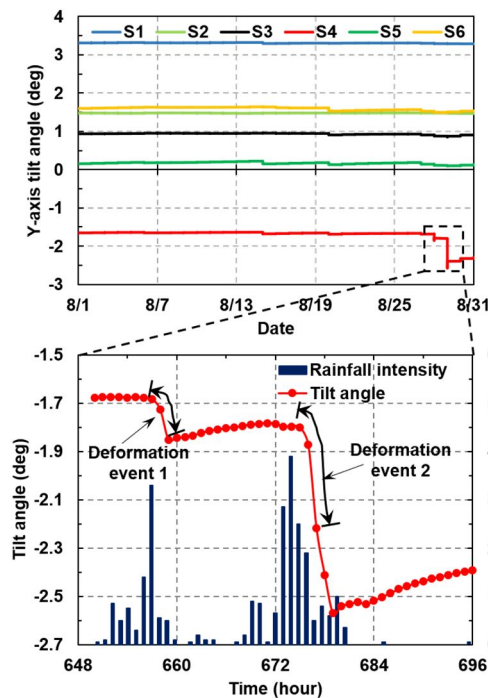


Fig.10 2019年8月の現場自然斜面モニタリングにおける傾斜角の時間履歴

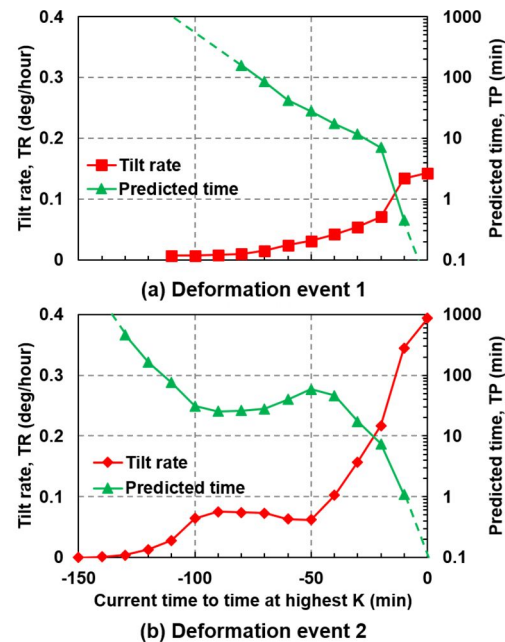


Fig.11 開発された時間予測モデルによる現場斜面変形の時間予測(崩壊時間を0とし、加速段階の傾斜速度の絶対値をプロット)

[5] 結論

- 1)切土斜面では3年間の計測を実施し、平成30年7月豪雨を経験し現地で明確に確認できる変状に関連するデータを取得した。自然斜面では、3年期の計測を42台のセンサーを設置し実施した。降雨強度の高い降雨を経験したが、目立った変状はなかった。河川堤防では、河川水位の上昇を伴う豪雨を経験し、4年間の計測を実施した。
- 2)小型模型実験装置を用いて、降雨斜面崩壊実験を実施した。得られた地表面の傾斜データについては(3)の分析に利用した。また、河川堤防の浸透による崩壊に対する堤防崩壊実験を実施した。
- 3)得られた地表面の傾斜データを分析して、危険個所を抽出するための警告基準を検討した。ここでは、傾斜角速度が抽出するためのパラメーターとして有効であること、傾斜角速度に対して閾値を設定することが有効であること、直近の地下水位変化との相関性が非常に高いことが見いだされた。本内容については学術論文として取りまとめた。
- 4)得られた知見をもとに、異常個所として判断される箇所と時間を予測できる時間予測モデルを検討した。これにより、室内小型模型実験についても、異常な変状の時刻を推定できることや、切土法面での2度の異常な変状する時刻を予測できることを確認した。

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 0件）

1. 著者名 疋田彩華・杉田哲哉・倉田大輔・森啓年・下川大介	4. 巻 25
2. 論文標題 河川堤防のパイピング発生時の水位上昇速度と基礎地盤表層の変形に関する模型実験	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 河川技術論文集	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14件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 5件）

1. 発表者名 Md Rasef SHEIKH, Yukio NAKATA, Munehiko SHITANO and Masahiro KANEKO
2. 発表標題 Unstable slope monitoring and early warning by multi-point tilting sensor and pipe strain gauge
3. 学会等名 International Conference on Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development (GEOTEC HANOI) 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yohei Inomata and Yukio Nakata
2. 発表標題 Topographical characteristics and model test behaviour for occurrence region of debris flow at Hiroshima in August 2014
3. 学会等名 16th Asian regional conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 栗栖直之, 森啓年, 倉田大輔, 中田幸男, 安藤竜馬
2. 発表標題 ワイヤレス傾斜計による河川堤防の変形モニタリング手法の開発～西日本豪雨時のモニタリング結果～
3. 学会等名 第6回河川堤防技術シンポジウム
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 知花大夢、中田幸男、松方健治
2. 発表標題 飽和度状態の変化による道路盛土材の非排水せん断強度特性への影響
3. 学会等名 第70回（平成30年度）土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yukio Nakata, Tetsuya Tashita, Hiromu Chibana ,Kenji Matsukata
2. 発表標題 Effect of drainage and saturation on undrained shear strength for compacted sandy soils
3. 学会等名 Effect of drainage and saturation on undrained shear strength for compacted sandy soils, 7th international symposium on deformation characteristics of geomaterials (IS- Glasgow19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 知花大夢、中田幸男、松方健治
2. 発表標題 非排水せん断条件における道路盛土材の強度特性
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 Md RaseI SHEIKH, Yukio NAKATA, Munehiko SHITANO ,Masahiro KANEKO
2. 発表標題 Real Time Unstable Slope Monitoring Using Multi-Point Tilting Sensor and Pipe Strain Gauge
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 Yohei Inomata, Yukio Nakata
2. 発表標題 Topographical characteristics and model test behaviour for occurrence region of debris flow at Hiroshima in August 2014
3. 学会等名 16th Asian regional conference on soil mechanics and geotechnical engineering (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Md Rasef SHEIKH, Yukio NAKATA, Munehiko SHITANO ,Masahiro KANEKO
2. 発表標題 Unstable slope monitoring and early warning by multi-point tilting sensor and pipe strain gauge The 4th Int.Conf.
3. 学会等名 GEOTEC HANOI 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 鈴木素之, 太田岳洋, 大和田正明, 河内義文, 楮原京子, 片岡 知, 西山健太, 西川智樹
2. 発表標題 平成30年7月豪雨による山口県南東部の地盤被害の状況
3. 学会等名 第61回地盤工学シンポジウム, 地盤工学会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 猪俣洋平・中田幸男
2. 発表標題 降雨による模型斜面の崩壊挙動に与える斜面形状の影響
3. 学会等名 第53回地盤工学研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 栗栖直之・森啓年・今村能之・中田幸男
2. 発表標題 ワイヤレス傾斜計による河川堤防の変形モニタリング手法開発
3. 学会等名 平成30年度土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 猪俣陽平・中田幸男
2. 発表標題 模型斜面崩壊実験に用いる降雨装置の検討
3. 学会等名 69回（平成29年度）土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 西原尚輝・中田幸男
2. 発表標題 PIV 解析による破碎材料のせん断挙動の把握
3. 学会等名 69回（平成29年度）土木学会中国支部研究発表会
4. 発表年 2017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	鈴木 素之 (SUZUKI MOTOYUKI) (00304494)	山口大学・大学院創成科学研究科・教授 (15501)	

6. 研究組織（つづき）

	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	吉本 憲正 (YOSHIMOTO NORIMASA) (00325242)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授 (15501)	
研究分担者	森 啓年 (MORI HIROTOSHI) (20355803)	山口大学・大学院創成科学研究科・准教授 (15501)	
研究分担者	梶山 慎太郎 (KAJIYAMA SHINTAROU) (50803532)	山口大学・大学院創成科学研究科・助教 (15501)	

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