

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：17301

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K13005

研究課題名(和文) 斜面崩壊危険性評価のための無線センサネットワークシステムによる多点計測手法の開発

研究課題名(英文) Development of multi-point measurement method by wireless sensor network system for risk evaluation of slope failure

研究代表者

杉本 知史 (SUGIMOTO, Satoshi)

長崎大学・工学研究科・准教授

研究者番号：60404240

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：豪雨災害に起因する斜面災害が多発する中、本研究では広域的な多点観測を目的として、無線センサネットワーク(WSN)を用いた斜面崩壊のモニタリングシステムの開発を行った。また、既存のセンサに対して1/10程度の精度を確保しつつ、1/10～1/100程度のコストの汎用センサを用いて低コストセンサを開発し、多数のセンサを用いた多点モニタリングと無線による遠隔モニタリングの手法を構築した。これらを用いて、実フィールドにおける屋外環境下での継続的かつ安定的なデータ収集とその分析により、降雨量と地下水位の関係や数値計算による崩壊危険度の定量的評価を行い、観測データに基づく斜面のモニタリング手法を提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

豪雨災害に起因する斜面災害が多発する中、本研究では広域的な多点観測を目的として、無線センサネットワーク(WSN)を用いた斜面崩壊のモニタリングシステムの開発とその収集データの適用に関する研究を行った。屋外環境下における安定的かつ継続的なデータの収集と、これらのデータに基づいた斜面の力学的安定性の評価に関する基礎的な成果を得た。現在行われている観測雨量やレーダー解析雨量と代表的な地質・地形に基づく災害危険度の評価に、本研究手法による個別の斜面の監視手法を加えることで、今後、より地域性を踏まえた防災・減災につなげるための一助となる見通しを示した。

研究成果の概要(英文)：Slope disasters caused by heavy rain disasters occur frequently in Japan. In this study, a slope failure monitoring system using a wireless sensor network (WSN) was developed for the purpose of wide-area multipoint observation. In addition, a low-cost sensor has been developed using a general-purpose sensor with a cost of about 1/10 to 1/100 while ensuring an accuracy of about 1/10 that of a conventional sensor. Multi-point monitoring using a large number of sensors and wireless remote monitoring methods have been constructed. Through continuous and stable data collection and analysis in the outdoor environment in the actual field, the relationship between rainfall and groundwater level and the numerical evaluation of the collapse risk were quantitatively evaluated. A slope monitoring method based on observation data was proposed.

研究分野：地盤工学

キーワード：斜面災害 多点観測 無線センサネットワーク 遠隔モニタリング 崩壊危険度評価

1. 研究開始当初の背景

地方行政の財政費逼迫により、地方のインフラ管理を無人化することが求められている。一方、インフラの整備が進む昨今でも各地で地震や豪雨による斜面崩壊や地すべり事故が多数発生している。このような斜面等災害対策としては、災害発生以前からの兆候を災害発生予測地域で常時モニタリングを行い、危険度の高い箇所から優先的に対策工事を行うなどの事前対策が有効と考えられる。しかし、使用されているモニタリングシステムは、有線による情報収集システムが主流であったため、斜面等の未開発地域への設置が困難な場合が多かった。また、センサも市販品で主流の高精度かつ高価なものが利用される場合が多く、システムのコストや設置の困難さにより計測点が制限されていた。さらに、装置を長期間に渡り稼働させるための電源確保が困難であることも、斜面等の未開発地域でモニタリングの大きな障害となっていた。結果的に、先に示した事前対策の優先度の判断に有効となるデータに対し、取得計測データ量の制限や計測個所の局所化が問題となっていた。

本研究に関連する研究事例として、インフラの維持管理や防災・減災を目的とした原位置でのモニタリングに関する研究は活発に取り組まれていたが、上記のような問題点に着目した研究の取り組みは行われていないのが現状であった。また、社会基盤施設の管理負担の軽減やリアルタイムのモニタリングの重要性が高まっていることも、本研究テーマの有意性の拠り所となった。

2. 研究の目的

豪雨災害に起因する斜面災害が多発する中、その予防的対策として原位置における観測が行われるが、現行システムは、有線利用が主流であり、かつセンサが比較的高価なものが利用される場合が多く、災害発生の予測や避難実施の判断に有効となるデータに対し、取得計測データ量の制限や計測個所の局所化が問題となる。本研究ではこれらを解決するため、無線センサネットワーク(WSN)を用いた斜面崩壊のモニタリングシステムの開発を行う。また、既存のセンサに対して 1/10 程度の精度を確保しつつ、1/10~1/100 程度のコストの汎用センサを用いて低コストセンサを開発し、多数のセンサを用いた多点モニタリングと無線による遠隔モニタリングの手法を構築する。さらに、従来にない多点計測により得られたデータに基づいた、崩壊の危険性の数値計算手法の確立にも取り組み、道路防災や砂防への展開につなげる。

3. 研究の方法

比較的規模の大きい斜面もしくは法面の崩壊を想定した、地盤変状や間隙圧、地下水位等の変動を多点計測するためのセンサ類の開発ならびにその精度評価を行った。また、これまでの研究で使用実績のあるデータ通信のための無線システム、電源供給システムとセンサ類を組み合わせた「多点計測用モジュール」を作製し、室内・屋外での計測の適用性評価を行った。併せて、計測システムの安定運用のためのエネルギーハーベスティングシステムの電力収支の検討や観測エリア内の無線ネットワークシステムの通信品質の評価も行った。これらの成果を踏まえ、実斜面でのデータ計測の実施に展開し運用安定性を確保しつつ、計測データに基づく斜面崩壊の危険性に関する数値計算手法について検討を行った。詳細については、4. 研究成果の項で述べる。

4. 研究成果

豪雨災害に起因する斜面災害が多発する中、本研究では広域的な多点観測を目的として、実フィールドにおける屋外環境下での継続的かつ安定的なデータ収集とその分析により、降雨量と地下水位の関係や数値計算による崩壊危険度の定量的評価を行い、観測データに基づく斜面のモニタリング手法を提案した。以下、項目ごとにその成果について述べる。

(1) 汎用センサを用いた多点計測用センサの開発ならびに精度評価

本研究で構築したモニタリングシステムでは、センサから得られる出力の通信の無線化、汎用性の高い安価なセンサ回路を利用することで、従来の課題を解決しようとした。そのため、それぞれのセンサの精度や仕様に応じたセンサ回路の開発を要した。さらに一部のセンサは出力値として非常に微小な電位差を扱うことから、精度の高いセンサ回路の開発を要した。間隙水圧計を例として説明する。図 1-1 に間隙水圧計を対象としたセンサ回路と遠隔モニタリングにより得たデータを示す。さらに、図 1-2 には間隙水圧計用センサ回路の動作確認実験の結果を示す。図 1-1 によると、各センサが降雨に対して出力を示し、地下水位が上昇していることが確認できる。さらにこのセンサ回路の出力電圧の線形性は、図 1-2 から確認できる。

(2) 多点計測用モジュールの作製と室内・屋外での計測の適用性評価

本研究では比較的安価な無線端末と安価なセンサを可能な限り多く広範囲に設置し、センサから得られる情報を、取得する端末数の規模により、センサの精度を補完するようなシステムの構築を目指した。その様子を図 2-1 示す。本システムの健全性の向上のためには、無線端末の配置の最適化が不可欠である。最適化において端末間無線通信の安定性をできる限り損わず、最適

化によって不要な通信を減らすことは、消費電力抑制に繋がる。システムの最適化は勿論、端末に搭載する無線通信用のアンテナについても同様であることから、実験により WSN に適したアンテナの検討、実環境下における影響についての実験結果について述べる。

無線端末として Zigbee 規格の商品である Xbee 端末を用いて実験を行った。その際に、Xbee 基板に装着されているチップアンテナと一般的なモノポールアンテナを用いて実験を行った。受信信号強度である RSSI(Received Signal Strength Indication)を測定し、放射指向性を確認した。Zigbee において、安定に通信するため RSSI<-85.0[dBm]となる必要がある。図 2-2 に用いたチップアンテナの放射指向性を示す。この図より、方位角方向に成分(垂直偏波)を主偏波として放射し、また成分(水平偏波)は低仰角において弱いことがわかる。

リモート側の無線端末である親機にチップアンテナ、ローカル側の無線端末である子機にモノポールアンテナを用い、実環境下でのデータの比較対象として校舎屋内を利用して設置環境の影響の確認を行った。斜面災害が発生する現場では、木々が乱立している場合が多いため、このような環境を想定した樹木が多く存在する敷地を利用して、設置環境の影響の確認を行った。リモート側の無線端末である親機にチップアンテナ、ローカル側の無線端末である子機にモノポールアンテナを用いて通信を行った。地面からの反射波の影響を考慮し、アンテナ端末を地面から 50cm の位置に設置した。通信回数は 100 回に設定した。親機のチップアンテナの xy 平面が地面と水平になるように設置し、子機のモノポールアンテナ xy 平面が地面に対して、水平に設置した場合と垂直に設置した場合の 2 つのパターンについて受信信号強度を測定した。図 2-3 に屋外実験で得た実験結果を示す。これより、樹木が障害となって一部条件において信号強度や通信確率が著しく低下するケースが確認された。本実験より、植え込みや木々が乱立するような環境下において、安定して通信を行うためには 1 つの端末間の通信距離を最大 16~43m 以内で通信を行う必要があることを確認した。また、このような環境下では通信が木々の影響を受け、設置や配置の簡易性に影響を与えてしまう。そのため、このようなシステムには、偏波面に捉われない垂直・水平の両偏波成分放射可能なアンテナの採用が望ましい。

(3) 観測エリア内の無線センサネットワークシステムの通信品質の評価

本項では、無線通信の安定性の向上について述べる。図 3-1 の観測対象斜面は、佐世保市内の産業廃棄物処理場で、奥行きが約 150m、幅約 120m、高さ約 40m である。地表面付近に遮水を目的とした覆土、その下は土砂主体の産業廃棄物、その下に崖錐堆積物、基礎岩で構成されている。数年前から斜面中段付近から最下段にかけて変状が確認され、その後小康状態を保った状態であったが、再度変状が発生することが懸念されたため、図 3-2 に示す本研究で開発した遠隔モニタリングシステムを現地に設置し、地表面からの雨水流入の有無、斜面内の地下水位の変動の観測を開始した。

設置当初は、地下水位観測のための感激水圧系を設置した下段までの通信が非常に不安定で、下段のエンドデバイスから得られるデータの取得率が低かった。さらに、最初に設置した端末の

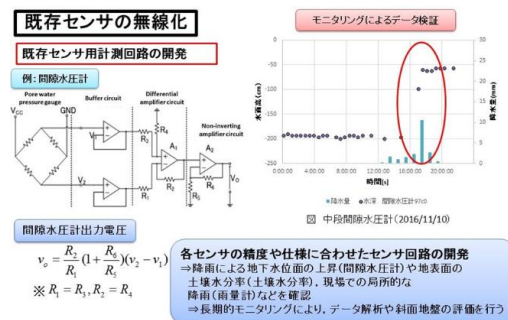


図 1-1 センサ回路と取得データ

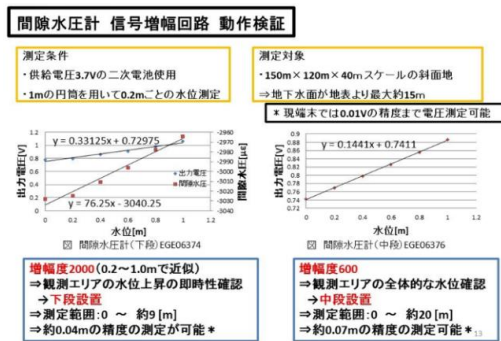


図 1-2 センサ回路の動作検証

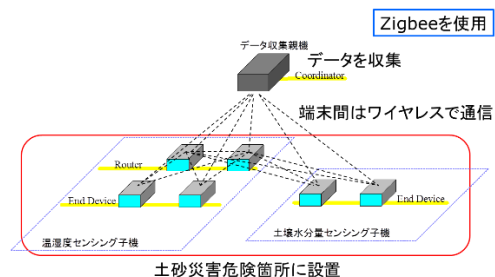


図 2-1 提案システムの構成

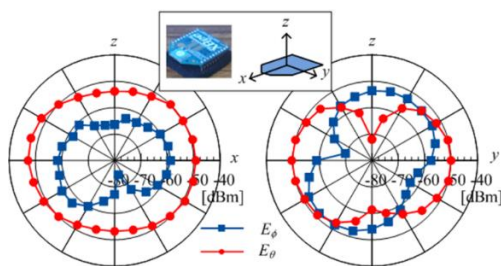


図 2-2 チップアンテナの放射指向性

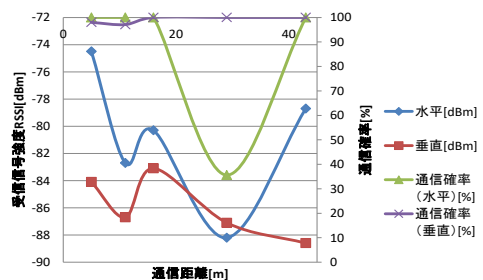


図 2-3 通信強度に関する屋外実験結果

位置では一部のルータに通信が集中し、そのルータが何らかの問題を抱え停止してしまうとエンドデバイスからデータを取得することができなくなった。そこで、図 2-2 の結果を踏まえ、これらの特徴を考慮し、アンテナの向きの調整を行った。調整後の端末配置図を図 3-3 に示す。これにより各エンドデバイスにおいて、複数の通信経路による通信を確認し、通信路の健全性や通信の堅牢性を確保できた。

(4) エネルギーハーベスティングシステムに関する電力収支の検討

本研究で提案するシステムは、エネルギーハーベスティングによる給電を無線端末とセンサのみではなく、ゲートウェイやインターネット回線接続機器にも用いることで、システムとして完全なワイヤレスを達成することで、設置施工のコストを下げ、自立的かつ長期的に稼働することができるシステムを目的としている。本項では、コーディネータの電源供給の安定性の向上について述べる。各段のエンドデバイスとコーディネータの電源システムに定格 50W のソーラーパネル 1 枚と容量 480Wh のバッテリーを用いて給電を行った。しかし、図 3-1 に示す観測エリア内の下段・中段のエンドデバイス群は稼働していたのに対し、上段のコーディネータは、負荷の消費電力量が発電量を上回り、結果的に、数日間でシステムが停止した。そこで各段の消費電力量と発電量を推定し、その差の推移を検証した。図 4-1 にシステム改善前後の発電量と消費電力量の差の推移を示す。これから上段に設置しているコーディネータの消費電力は約 5.7W であることが分かる。さらに、気象庁の気象データから、改善前の発電量を割り出し、改善前のバッテリー残量との差の推移を見てみると、安定してバッテリーに充電されていないことがわかる。原因として、現場環境や天候不良により、1 枚の 50W パネルでは十分な発電を行えていないことが挙げられる。以上の点を考慮し、ソーラーパネルを合計 3 枚に増設し、バッテリー容量を 672Wh に増量して上段のシステム運用を行った。図の改善後の推移を見てみると、コーディネータ電源システム改善後のバッテリーが、現場環境や天候に関わらず、約 1 か月間安定的に充電されていることを確認できる。これにより、自立的に稼働可能なシステムを構築したものと考える。

(5) 原位置でのデータ計測実施による運用安定性の高度化対策と長期的実装に向けた評価

本項では、(3) 項に示した観測エリアにおける、原位置でのシステムの運用安定性の検討結果例を示す。図 5-1 に各ノードにおける計測データ収容率を示す。横軸が日付で縦軸が日あたりのデータ収集率を示している。各ノードの通信は 10 分に 1 度の頻度で行われている。全ノードの平均データ収集率は 77% である。コーディネータに近接する上段からデータ収集率が高くなる結果となった。一方で、近接距離と収容率が逆転するケースも確認された。これは、中段センサ群の位置が上段-中段間の高傾斜角の斜面に通信を阻害されたものと考えられる。また、最下段に設置したノード (b9ff) のデータ収集率が 0 % となるケースも確認された。これは、設置ノードの回路モジュールが雨による浸水または、モジュールを

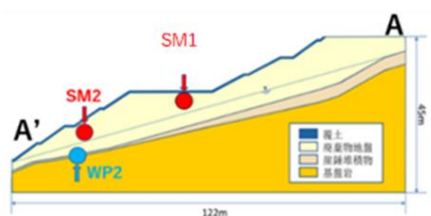


図 3-1 モニタリング対象斜面



図 3-2 遠隔モニタリングシステム

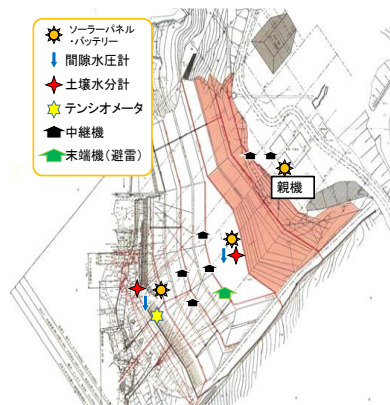


図 3-3 観測対象斜面での端末配置図

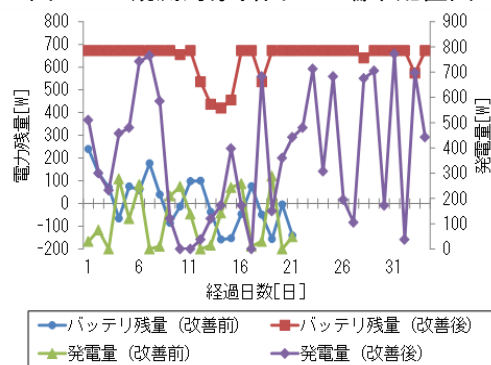


図 4-1 発電量と消費電力量の差の推移

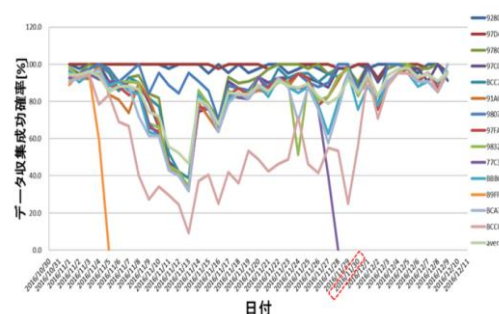


図 5-1 各ノードのデータ収容率

保護するカバー内部での結露が発生したことによるショートが考えられる。当該故障ノードは、エンドデバイスに付属するために必要な設置箇所であるため、運用安定性向上のため、ルータの近接化や斜面勾配に対する通信アンテナの配置方向の配慮が必要と考えられる。その後、観測エリアへの機器配置等の見直しを行った上で、2017年6月13日～2021年1月31日の約3年6か月の期間にわたり計測したデータに基づいた降雨量と地下水位との関係を検討した例について、図5-2、5-3にそれぞれ示す。図5-2は、2020年6月～8月の降雨量（橙色）と地下水位の変化（青色）の関係を示す。通信途絶に伴う一部地下水位データの欠損が見られるが、概ね連続的に計測していることが確認できる。降雨イベントごとに、地下水位が急上昇し、その後漸減して通常の水位に戻る様子が伺える。この反復の期間ごとに、降雨量と水位上昇量との関係を各年で色分けして示したものが、図5-3である。データ数に限りがあるため、傾向を伺うことは難しいが、今後長期的に運用することで、当該斜面の降雨に対する水位上昇の傾向が把握できれば、経年的に同程度の雨量でも水位上昇傾向が高くなれば、斜面安定性が低下する様子が把握できると考えられる。

(6) 数値計算による計測データに基づく斜面の安定性評価手法の確立

図3-1に示す当該斜面を対象として、遠隔モニタリングシステムから取得した計測データに基づいた斜面の安定性評価手法の検討を行った。本研究では、P. A. Cundallらが開発した陽解法を基本とした大変形有限差分法解析コードであるFLACを用いた。斜面の変状傾向や降雨、地下水位の条件に着目した弾塑性FDM解析を行うため、二次元斜面モデルを作成し、斜面の構成地質について異なる条件を与え、せん断強度低減法に基づいた斜面安定解析を実施した。シミュレーションの流れは、①斜面モデルの作成、物性値の設定、②地下水流の定常状態の再現、③降雨と地下水流の再現、④重力解析による斜面崩壊の有無の判定、の大きく4つに分けられる。奥行き140m、高さ61.7mに設定した解析モデル(図6-1)を作成した。解析に用いる物性値は表6-1のように設定した。また、原位置で観測された地下水位と降雨量の推移から、対象斜面での地下水位は、斜面下方において数十mmの降雨時に約1~3m上昇することが確認できた。また、地下水位の変動が降雨直後（おおよそ数時間程度）に生じており、敏感な反応も確認できた。これらの状況を再現するため、ケース①：物性値に基づいた解析、ケース②：基盤面上で局所的に地下水が流れやすくなったと仮定した解析、ケース③：ケース②に加え斜面末端部の透水性が悪くなったと仮定した解析の3通りの解析を行い、崖堆積物層の透水性が地下水位上昇及び安全率へ与える影響を検討した。

解析の手順として、それぞれ斜面高部側方から地下水の流れを与え、定常的な地下水面(地表面から約6.5m)を再現し、次に斜面表層から降雨強度15mm/h、総雨量150mmを与え、降雨を再現した。また、降雨に伴い、斜面高部側方からの地下水流入量も増加させた。ケース②、③において地下水位上昇量及び降雨直後の地下水位上昇が再現性を確認した。本研究では、せん断強度低減法による全体安全率の算定を実施した。また、斜面高部側方からの地下水流入量の増加が安全率に与える影響を確認した。図6-2から、斜面末端部の透水係数がわずかでも小さくなると、安全率が1.0を下回るのに必要な地下水流入量が大幅に減少し、斜面崩壊の危険性が高まることが考えられる。

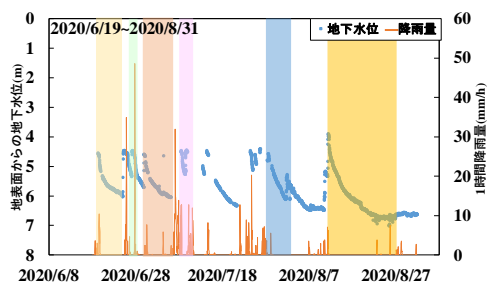


図5-2 地下水位と降雨量の関係

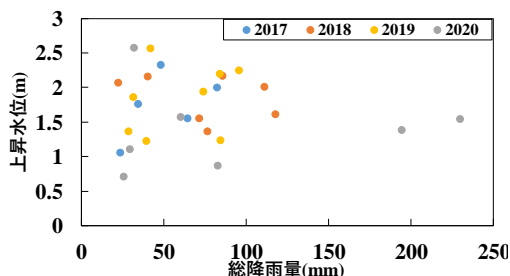


図5-3 降雨量と水位上昇の関係

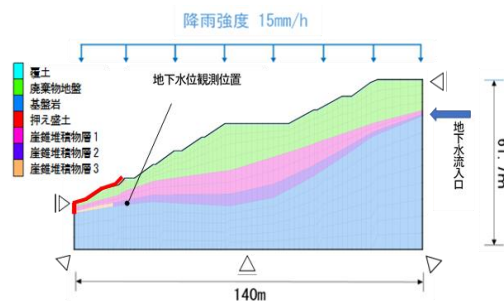


図6-1 解析モデルの断面図

表6-1 解析で用いた入力物性値

	乾体密度	せん断摩擦角	粘着力	ポアソン比	変形係数	透水係数	閉鎖率
	ρ_s (kg/m ³)	ϕ (°)	c (kN/m ²)	ν (%)	E (N/m ²)	k (m/s)	n (%)
基盤岩	2300	-	-	0.15	1000	5.0×10^{-7}	0.2
崖堆積物層1	1700	35	0	0.3	300	5.0×10^{-3}	0.3
崖堆積物層2	1700	35	0	0.3	300	2.5×10^{-2}	0.3
崖堆積物層3	1700	35	0	0.3	300	2.5×10^{-2}	0.3
廃棄物地盤	1400	37	8	0.3	200	3.0×10^{-3}	0.3
腐土	1400	15	10	0.3	200	5.0×10^{-7}	0.2
押え盛土	2300	-	-	0.15	300	3.0×10^{-5}	0.2

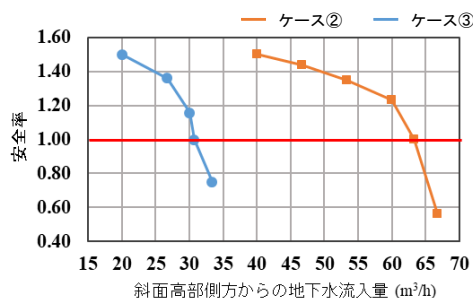


図6-2 地下水流入量と斜面安全率の関係

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 Sugimoto Satoshi	4. 巻 14
2. 論文標題 RESEARCH OF DAMAGED CONDITION BY THE 2016 KUMAMOTO EARTHQUAKE AND GROUND INVESTIGATION ON STONE WALLS AND ERATH STRUCTURES IN KUMAMOTO CASTLE	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of GEOMATE	6. 最初と最後の頁 66-72
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.21660/2018.45.7268	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9件（うち招待講演 0件/うち国際学会 4件）

1. 発表者名 中村智哉・杉本知史・蔣宇静・大嶺聖・石塚洋一・高江洲竜馬・岩崎昌平
2. 発表標題 斜面地盤の多点観測を目的としたモニタリングシステムの開発
3. 学会等名 令和元年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉本知史・張慧中・蔣宇静・大嶺聖
2. 発表標題 降雨および地下水流を伴う斜面地盤の安定性評価に 関する研究
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 Yuuya Katsuda, Satoshi Sugimoto, Yoichi Ishizuka, Shohei Iwasaki, Ryoma Takaesu, Koichiro Yamashita, Minoru Yamanaka
2. 発表標題 Development of the deformation monitoring system with wireless sensor network and evaluation of mechanical stability for damaged stonewalls by huge earthquake in Kumamoto Castle
3. 学会等名 8th International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Fujimoto, R. Yamaguchi, Y. Ishizuka, T. Fujishima, and S. Sugimoto
2. 発表標題 Circularly-polarized small microstrip antenna for ISM band
3. 学会等名 Progress In Electromagnetics Research Symposium (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takafumi Fujimoto, Satoshi Sugimoto, Toshihiro Okumatsu
2. 発表標題 Development of Simplified Lightning Protection Method of Electronic Device for Wireless Sensor Network at Outdoor
3. 学会等名 Proceedings of the 24th International Conference on Electrical Engineering (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 張慧中, 杉本知史, 石塚洋一, 岩崎昌平, 山下浩一郎
2. 発表標題 降雨浸透による斜面変状の現地モニタリングと力学的考察に関する研究
3. 学会等名 土木学会第73回年次学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 張慧中, 石田純平, 杉本知史, 蔣宇静, 大嶺聖, 石塚洋一, 笹村拓哉, 岩崎昌平
2. 発表標題 斜面のモニタリングのための無線センサリングネットワークの構築・活用に関する基礎的研究
3. 学会等名 土木学会第72回年次学術講演会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuki Nishikawa, Takuya Sasamura, Yoichi Ishizuka, Satoshi Sugimoto, Shohei Iwasaki, Hongyan Wang, Tomoyuki Fujishima, Takafumi Koichiro Yamashita, Takahisa Suzuki, Koji Kurihara
2. 発表標題 Design of Stable Wireless Sensor Network for Slope Monitoring
3. 学会等名 2018 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 堤拓摩, 張慧中, 杉本知史, 蔣宇静, 大嶺聖, 石塚洋一, 西川祐貴, 岩崎昌平, 山下浩一郎, 鈴木貴久
2. 発表標題 無線センサネットワークによる産業廃棄物堆積斜面の変状モニタリング
3. 学会等名 平成29年度土木学会西部支部研究発表会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

長崎大学 地盤環境研究室 http://www.cce.nagasaki-u.ac.jp/~jiban/Activity.html

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