

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：14401
研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2012～2014
課題番号：24310139
研究課題名(和文) ユビキタスネットワークによる多点式多段階型土砂災害監視システムの開発

研究課題名(英文) Development of multistep slope disaster warning system by ubiquitous network technology

研究代表者
小泉 圭吾 (Koizumi, Keigo)
大阪大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：10362667

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,500,000円

研究成果の概要(和文)：ユビキタス技術を応用し、国内交通の大動脈である高速道路沿の予防保全を目的としたのり面健全度監視システムを開発した。この特長は、高速道路のり面を管理する上で必要となる斜面崩壊・地すべりの危険性、アンカー工・盛土の健全度をリアルタイムに監視できる点である。また、のり面に設置される観測機器は小型電池で自律的にネットワークを構築し、データをWebサーバーへ送信する機能を有する。

研究成果の概要(英文)：Slope structure health monitoring system for preventive maintenance of expressway which has the significant role as transportation infrastructure was developed. This system has three features for maintaining safety of slope structures along expressways. One is the feature to monitor shallow and deep landslide risks real-timely. Another is the feature to evaluate structure health conditions of a slope by a ground anchor method. The other is the feature to evaluate an effect of drainage on an embankment. The monitoring device that is set up on a slope has function for building wireless communication network automatically by small battery and the data are sent to a Web server through 3G wireless module.

研究分野：地盤工学

キーワード：土砂災害 リアルタイム監視 センサネットワーク ユビキタス 体積含水率 表層崩壊 地すべり
擬似飽和

1. 研究開始当初の背景

近年の集中豪雨による土砂災害は、管理者の想定外の場所で発生しているケースも少なくなく、従来の点検や地形・地質図による素因分析のみでは把握しきれない現状が指摘されている。2011年の土砂災害発生件数は1,422件、死者72名に及んでおり、2010年においてもその数は1,000件を上回っている。

この背景の下、災害時の物資輸送や復旧作業のライフラインとして重要な役割を果たす高速道路に着目すると、緊急時には交通規制区間、規制期間を出来るだけ短くすることが求められる。一方、それに伴う二次災害を防ぐためには、通行規制を安全かつ出来るだけ早急に解除する判断基準も重要となる。現在は、降雨量と時間経過を基に、通行規制、解除の判断がなされているが、道路管理者は解除後の土砂災害を危惧しており、頻発する局地豪雨を考慮すると解除のための局地的かつ定量的な判断基準を設定、利用可能とすることは喫緊の課題である。

2. 研究の目的

申請者は高速道路のり面を対象に、2010年より豪雨による表層崩壊予測システムの開発に取り組んできた。小型電池で長期運用が可能なメッシュ型無線センサネットワーク技術を用い、2011年度には表層崩壊監視を目的とした監視システムのプロトタイプを開発した。一方、これを実用化するためには表層崩壊のみならず、地すべり、アンカー工、盛土の健全度評価など、高速道路のり面で必要となる監視項目を網羅したシステムへと改良する必要がある。また、表層崩壊予測の方策についても、2011年度の研究成果を基に、予測手法の改善および実務に使えるシステムへの改善が必要である。そこで本研究ではこれらの課題を解決するために、以下の項目を研究目的とした。

1) 表層崩壊の崩壊過程を明らかにすることで、崩壊を未然に防ぐ方策を検討し、通行止め、通行止め解除基準の新たな指標の提案を行う。

2) 高速道路のり面を監視する上で必要となる地すべり、アンカー工、盛土の健全度評価などの計測項目を網羅した、ユビキタスネットワークによる多点式多段階型リアルタイム監視システムを開発する。

3. 研究の方法

1) 降雨時の表層崩壊に至るまでの過程を明らかにし、通行止め、通行止め解除基準の新たな指標の提案することを目的に、以下の実験、解析および現場計測を行った。

① 模型斜面における表層崩壊に至るまでの水分浸透挙動の把握

申請者らの模型斜面を用いた事前実験により、斜面に散水を行った際に、ある時点で体

積含水率の上昇率が変化し、その後、変形、崩壊に至ることが確認された。そこで、上昇率が変化する地点を擬似飽和 (θ_{fs}) と定義し、この現象を確認するために、同一条件で複数回の実験を行い、体積含水率の挙動に再現性があるかどうかの検証を行った。

② 模型斜面における表層崩壊に至るまでの変形挙動の把握

模型斜面実験により、擬似飽和から体積含水率の上昇率が変化する要因を明らかにするために、高精度変位検出装置を用いて、土粒子の深度ごとの変位特性を評価した。

③ のり面監視のための傾斜センサの適用性の評価

降雨の変形挙動を検出する手法として、傾斜センサを用いた計測手法の適用性に関する室内および屋外実験を行った。

④ 現地計測データと室内試験結果を用いた現地斜面のモデル化に関する基礎的研究

高速道路のり面で観測している体積含水率のデータを用いて、対象地盤のモデル化が可能かどうかの基礎的研究を行った。

2) 2011年度までの研究成果である、無線センサネットワークによる表層崩壊監視システム(以下、Ver. 2010とする)のプロトタイプを改良するために、以下の開発を行った。

① 無線通信機能の改良

Ver. 2010での無線通信機能の課題として、データ欠損率、通信距離が挙げられた。そこで本研究では、出力の改善による通信距離の向上、リトライ数の変更によるデータ欠損率の減少を目指して改良を行った。

② センシング機能の改良

Ver. 2010では近年の異常気象に伴う表層崩壊のみを監視対象にセンサの設定を行ったが、高速道路沿い斜面の維持管理を目的とした場合、豪雨時に短時間で発生する表層崩壊のみを対象とするのではなく、動きの遅い地すべりや、常時の構造物劣化に伴う変形などの監視が必要となる。また、これら供用後の維持管理を行うにあたって、建設当時の履歴は貴重な判断材料となることから、施工時に監視が必要な現場においても変状等を同一のシステムで監視できることが好ましい。そこで本研究では上述の点を考慮し、子機の改良を行った。

③ 監視ツールの改良

緊急時あるいは豪雨時等に、現場に行かなくてもリアルタイム監視が可能なシステムを構築することを目的に、Ver. 2010では研究用の監視ツールを開発した。各子機に電池を投入することで自動的にネットワークが構築され、データは基地局PCに取り込まれる。ここでは

3G 回線を利用し、遠隔から基地局 PC にリモートアクセスすることで、システムの設定変更およびデータの閲覧、解析が行えるツールを開発した。一方、本研究では、実務者用（道路管理者用）に、複数の現場あるいは施工管理や維持管理など、観測目的の異なる現場の情報を、いつでもどこからでも閲覧、監視ができる監視システムを開発した。

4. 研究成果

1) 模型斜面における表層崩壊に至るまでの水分浸透挙動の把握

図 1 は模型斜面（長さ×幅×高さ：70cm×30cm×45cm）に 100mm/h の散水を行った際の体積含水率の時系列変化を示した図である。センサは斜面下部（No. 1, No. 2）、中部（No. 3, No. 4）、上部（No. 5, No. 6）にそれぞれ 2 箇所ずつ設置した。ここでは紙面の都合上、センサごとの結果に対する考察は割愛し、いずれのセンサも概ね同じ変化をしているものとして考察を行うこととする。

この図より、体積含水率 0.34 付近で上昇率の変化が発生し、その後、斜面内部の飽和帯が形成され崩壊に至ることが確認された。この上昇率が変化する 0.34 付近を擬似飽和 (θ_{fs}) と定義し、同一条件で複数回の実験を行った。

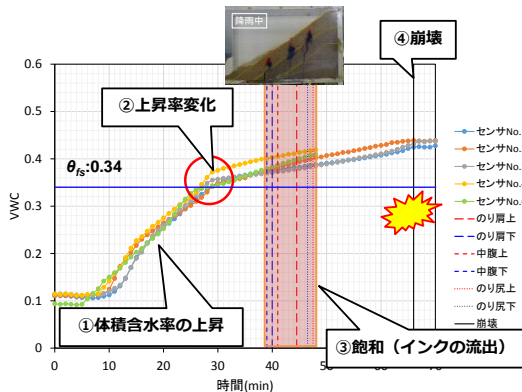


図 1 模型斜面における散水時の体積含水率の時系列変化（実験 1）

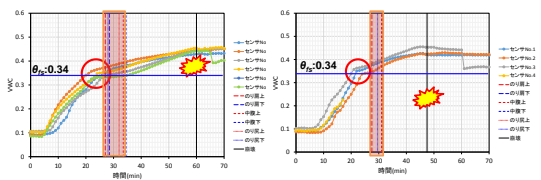


図 2 模型斜面における散水時の体積含水率の時系列変化（実験 2 および実験 3）

その結果、図 2 に示すように飽和帯の形成時刻、崩壊時刻に若干の違いはあるが、体積含水率の上昇、上昇率変化、飽和という過程で崩壊に至ること、また擬似飽和時の体積含水率がほぼ同じ 0.34 付近であることから、本実験に再現性があることが確認された。

2) 模型斜面における表層崩壊に至るまでの変形挙動の把握

図 3 は変位計測装置を用いて、散水時の体積含水率の時系列変化に対する、土の鉛直変位の時系列変化を計測した結果である。図中上部中央の模型斜面の赤枠を拡大した範囲が変位の計測範囲であり、ここでは No. 0, No. 5, No. 10, No. 15 の結果を示している。また体積含水率については図中上部左の赤枠に示した 3 地点の計測結果を示している。

この結果より、擬似飽和が発現した後に変位が進行していること、表層から順に変位が進展していること、表層から順に変位が伸展していることが確認された。またこの結果より、変位よりも疑似飽和を指標とした体積含水率の方が崩壊の予兆をより早く検出できることがわかった。

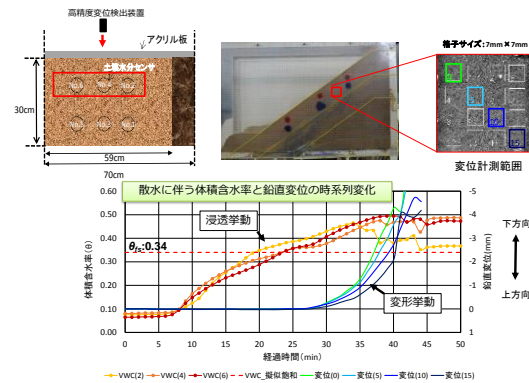


図 3 模型斜面における散水時の体積含水率と鉛直変位の時系列変化

図 4 は変位計測を行った全 15 地点の散水開始から崩壊までの変位ベクトルを示している。この図より地点ごとに変位ベクトルが異なることが分かる。これは土が剛体で変形していないことを示しており、土の骨格構造の変化に伴う間隙の拡大が、擬似飽和からの体積含水率の上昇に寄与している可能性が示唆された。

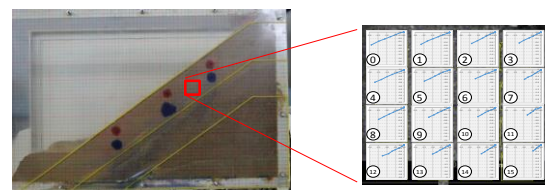


図 4 模型斜面における散水監視から崩壊までの各地点の変位ベクトル

以上の結果より、本研究で定義した擬似飽和体積含水率を通行止めの基準値とすることで、降雨により斜面に変位が発生する前に崩壊の危険性を予測できる可能性がある。また、通行止めの解除基準においても、擬似飽和体積含水率を指標とし、これを下回れば斜面が変位する危険性が低下するものと考えられる。一方、これらの結果はあくまで模型斜面の実験結果によるものであることから、実斜面へ

この基準値の設定に対する妥当性の検証については今後の課題である。

3) のり面監視のための傾斜センサの適用性の評価

ここでは、MEMS による傾斜センサののり面監視への適用性に関する評価を行った。その結果、以下のことが確認された。

①選定した傾斜センサにおいて温度によるドリフト現象が確認されたが、内蔵温度計を用いた補正を行うことでその影響を大幅に低減できることを確認した。

②設置が容易で安価な単管を用いた設置方法を検討した結果、地表面から 20cm, 70cm のいずれの高さにおいてもデータのばらつきに違いが見られなかった。また、無線通信においては設置高さの違いに関係なく、データ回収率は 100%であることが確認された。このことから、今回の実験においては、何れの設置方法でも風雨によるデータのばらつき、地形による無線通信障害の影響を受けないことがわかった。一方、今後は台風など強風や大雨の影響を受ける観測時期のデータを収集することで、最適な子機の設置方法を検討する必要がある。

③基準機を用いた室内試験とのり面での計測結果から、選定した傾斜センサの実用上の判別可能な傾斜角度は $\pm 0.1^\circ$ 程度であるものと判断できる。

④伸縮計によるのり面の管理基準値を基に傾斜センサの管理基準値を算出し、傾斜センサの判別可能な傾斜角度と合わせて評価した結果、「対策の検討」、「警戒、応急対策」、「嚴重警戒、通行止め」のいずれの基準値にも対応した判定を行えることが確認された。

4) 現地計測データと室内試験結果を用いた現地斜面のモデル化に関する基礎的研究

本研究では、自然斜面の土質が不均質である場合に、体積含水率の現地観測データと室内試験結果を用いて簡便に地盤のモデル化を行う手法について検討した。得られた知見と課題を以下に記す。

①たとえ同一斜面に土壌水分センサを設置しても、観測地点が異なれば体積含水率の経時変化の特徴が異なる場合がある。徳田らによって異なる道路沿いのり面でも同様の結果が得られていることから、自然斜面ではこのような傾向がみられることを認識する必要がある。一方で、排水過程における体積含水率の減少傾向は、降雨の特徴に影響されず、センサ設置位置ごとに同一の傾向を示した。ただし、ここでは対象斜面と気象データ観測地点が異なることから雨の止んだ時刻を正確に求めることができず、排水過程の始まりの体積含水率の値を予測してデータの分析を行った。従って、排水開始直後の体積含水率の減少傾向を評価するためには、現地に雨量計を設置する必要がある。

②対象斜面の土質の不均質性を評価するため

に、現地観測データを用いて室内試験結果の補完を行った。その結果、すべての観測地点の 1 次元のモデル地盤を作成することが出来た。

③モデル地盤を作成する際には、たとえ各深度の体積含水率の変化の傾向が同一であっても、観測地点ごとに不飽和浸透特性パラメータを推定する必要があると考えられる。

④推定した不飽和浸透パラメータを用いて作成した 1 次元のモデル地盤を用いて解析した体積含水率の経時変化と現地観測との比較を行った。図 5 は解析結果の一例を示している。この結果より、体積含水率上昇開始時刻や、体積含水率の最大値に多少の差異があるものの、モデル地盤は実地盤を再現していると考えられる。

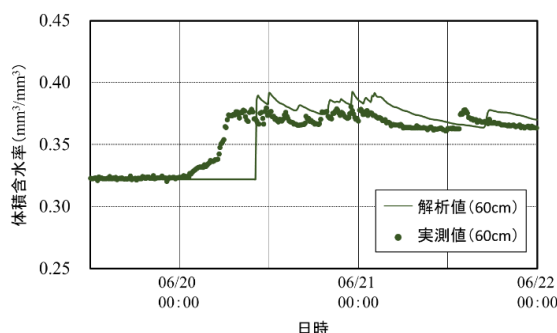


図 5 降雨における解析値と実測値の比較

5) 無線通信機能の改良

表 1 無線モジュールの仕様改善

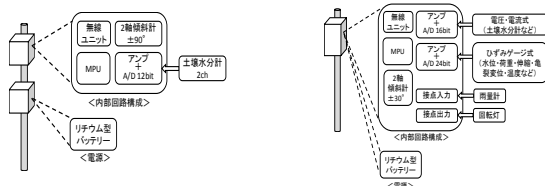
	Ver.2010	Ver.2013
周波数	2.4GHz	2.4GHz
出力	1mW	63mW
通信距離	約100m	約420m
(見通し)	※実測値	※実測値
リトライ数	-	10回

Ver.2010 からの出力の改善による通信距離の向上、リトライ数の変更によるデータ欠損率の減少を目的に、表 1 の仕様改善を行った。その結果、今回開発を行った改良版（以下、Ver.2013 とする）の無線データ受信率は、見通しがある、無しに関わらず、また通信距離が 400m 程度であっても、10 分間隔でほぼ欠損なくデータ収集できることが確認された。一方、本改良に伴い、電池の寿命が 1/3 程度に低下したことが確認された。

6) センシング機能の改良

図 6 は Ver. 2010 から Ver. 2013 へと改良した子機のセンシング機能の違いを示した図である。Ver. 2010 では 2 軸傾斜計と 2 台の土壌水分計の接続を可能とする子機を開発したが、

Ver. 2013 では電圧・電流式、ひずみゲージ式のセンサ（水位、荷重、伸縮、亀裂変位、温度など）の取り込みと、接点入出力機能を実装することで、雨量計および回転灯の接続が可能でセンサ基板を開発した。これにより、豪雨時の土砂災害監視に加え、長期メンテナンスを視野に入れた、アンカー工の軸力測定や、盛土の排水機能の監視に利用可能なシステムへと改良した。図7はアンカー工の健全度評価に対するVer. 2013の適用事例である。Aのり面にて、アンカーの軸力荷重と水位、降雨の関係を観測した結果を示している。この結果より、6月25日に発生した集中豪雨において、水位の変動は見られるものの、アンカーの軸力に変化が見られなかったことから、アンカー工が健全に機能していることが確認された。



Ver. 2010 Ver. 2013
図6 子機のセンシング機能の拡張

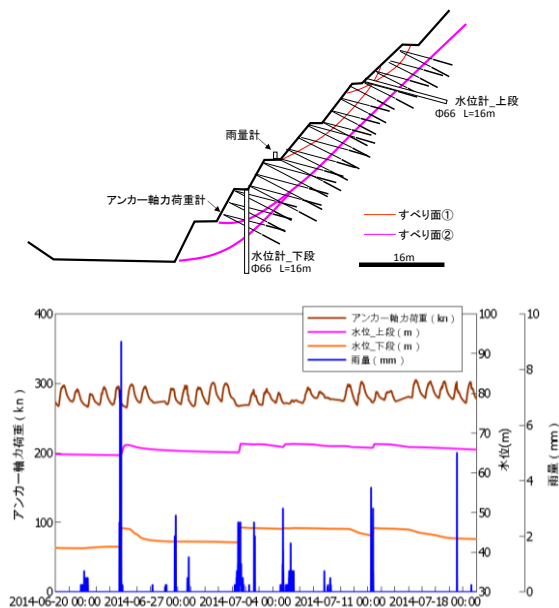


図7 Ver.2013を用いたAのり面における雨量、水位、アンカー軸力荷重の時系列変化

7) 監視ツールの改良

図8は本研究で新たに開発した、3G回線を利用してサーバに取り込まれたデータを、ユーザーがWEB画面上で閲覧、監視するためのツールである。このシステムでは、ユーザーが地図（航空写真）上で各現場の観測地点を確認でき、各現場での観測状況はグラフやメールなどで確認できる仕様とした。また、観測現場を新設する場合、センサの種類、設置位置、台数などの簡単な情報を登録することにより、その現場の監視画面がWEB上に自動

生成される仕組みを構築した。

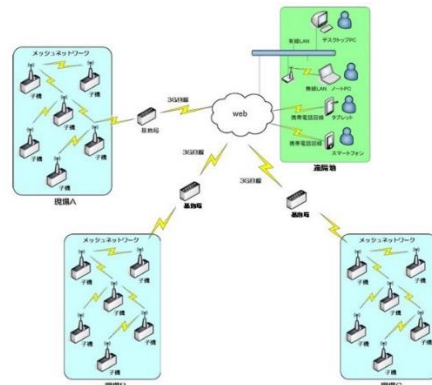


図8 道路管理者用監視ツール

<引用文献>

1) http://www.mlit.go.jp/river/sabo/jirei/h23do_sha/h23doshasaigai_gaiyo.pdf

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計19件)

- 1) 小泉圭吾, 小西貴士, 竹本将, 藤原優, 藤田行茂, 小田和広, 平田研二, 上出定幸: ユビキタスネットワークによる土砂災害監視システムの改良, Proceeding of the KansaiGeo-Symposium 2014, pp.141-144, 2014. 11. 21
- 2) 徳田早映, 小泉圭吾, 小田和広, 臼木陽平, 小西貴士, 竹本将, 藤原優: 現地観測データと室内試験結果を用いた現地斜面のモデル化に関する基礎的研究, Proceeding of the KansaiGeo-Symposium 2014, pp. 201-206, 2014. 11. 21
- 3) 大西貴之, 小泉圭吾, 小田和広, Tohari Adrin: 小型模型斜面における表層崩壊に至るまでの水分浸透挙動の把握, Proceeding of the KansaiGeo-Symposium 2014, pp. 213-216, 2014. 11. 21.
- 4) 小橋俊也, 小泉圭吾, 小田和広, 竹本将, 藤原優, 上出定幸: のり面監視のための傾斜センサの適用性に関する研究, Proceeding of the KansaiGeo-Symposium 2014, pp. 227-230, 2014. 11. 21.
- 5) 小泉圭吾, 村上一馬, 小田和広, 上出定幸, 小西貴士, 竹本将, 藤原優: 豪雨による高速道路のり面の表層崩壊監視を目的とした現場計測結果の評価, Proceeding of the KansaiGeo-Symposium2013, pp.155-160, 2013. 11.
- 6) 村上一馬, 小泉圭吾, 小田和広, 大西貴之, 松本修司, 上出定幸: 降雨浸透に伴う斜面の細粒分流出による土の強度特性の変化に関する研究, Proceeding of the KansaiGeo-Symposium2013, pp. 165-170, 2013. 11.

- 7) 大西貴之, 小泉圭吾, 小田和広, 上出定幸: のり面における比抵抗トモグラフィの解釈に関する研究, Proceeding of the KansaiGeo-Symposium2013, pp.171-174, 2013. 11.
- 8) Kenji HIRATA, Keigo KOIZUMI and Msahiro YOSHITAKE: Probabilistic Management of Slope Disaster Detection Systems for Reduced Energy Consumption, 2013 American Control Conference, 5048/5055, Washington, DC, 2013. 6.
- 9) K. Murakami, K. Koizumi, K. Oda, S. Kamide: Decision Criteria of Slope Hazards by Multi-step Monitoring using a WSN., Proceeding of the 2013 Geo-Congress ASCE, pp. 1536-1545, 2013. 3.
- 10) 小泉 圭吾, 藤田行茂, 平田研二, 小田和広, 上出定幸: 土砂災害監視のための無線センサネットワークの実用化に向けた実験的研究, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol. 69, No. 1, pp. 46-57, 2013. 2.
- 11) 村上一馬, 小泉圭吾, 藤田行茂, 小田和広, 上出定幸, 田中崇生: 無線センサーネットワークによる多点型土砂災害監視システムの開発一豪雨時の現行規制基準改善のための浸透挙動に関する研究一, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2012 論文集, pp. 67-74, 2012. 11.
- 12) 浅野祐也, 小泉圭吾, 藤田行茂, 小田和広, 上出定幸: 無線センサーネットワークによる多点型土砂災害監視システムの開発一模型斜面を用いた豪雨時の表層崩壊メカニズムに関する研究一, 地盤の環境・計測技術に関するシンポジウム 2012 論文集, pp. 75-80, 2012. 11.

[学会発表] (計 18 件)

- 1) 小泉圭吾, 藤田行茂, 竹本将, 藤原優, 森下泰, 上出定幸: 無線センサネットワークによる土砂災害監視システムの開発, 2015 電子情報通信学会総合大会, A1-2-1, 2015. 3
- 2) 森澤僚一, 平田研二, 小泉圭吾: 確率的起動・停止制御方策による斜面災害監視用センサーネットワークの運用ー通信経路の構築方策と検証実験ー, 第 2 回制御部門マルチシンポジウム講演集, 2015. 3. 5
- 3) Adrin Tohari, Keigo Koizumi, Arifan Jaya Syahbana and Oda Kazuhiro: Understanding of Causative Factors of Landslide Movement in Bumi Waluya Railway Station, West Java, Indonesia, 地盤工学シンポジウム論文集, pp. 135-140. 2014. 11. 28.
- 4) 小泉圭吾: ユビキタスネットワークによる高速道路のり面災害監視システムの開発, OSV 研究会特別講演会, 神戸大学 瀧川記念学術交流館, 2014. 4. 18.

- 5) Kenji HIRATA, Keigo KOIZUMI and Joao P. HESPANHA: Probabilistic Management of Slope Disaster Detection Systems for Reduced Energy Consumption and its Convergence Property, The 4th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems, Koblenz, Germany, 253/260, 2013. 9. 30
- 6) 大西貴之, 小泉圭吾, 小田和広, 上出定幸: 斜面における比抵抗分布の解釈に関する基礎的研究, 第 48 回地盤工学研究発表会, pp. 277-228, 2013. 7. 23.

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

- 1) 土砂崩れ予測精度向上, 日本経済新聞 (夕刊) 2014/11/13
- 2) 土砂崩壊含水率で予測, 読売新聞 (夕刊) 2014/9/6
- 3) 高速のり面異常早期検知, 読売新聞 (朝刊) 2013/11/5
- 4) 資材費が従来の 1 割の変位計で道路法面を常時監視, 日経コンストラクション, 2013/11/25
- 5) 土砂災害予測 低コストでピタリ, 読売新聞 (朝刊), 2011/8/6

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小泉 圭吾 (Koizumi Keigo)
大阪大学・工学研究科・助教
研究者番号: 10362667

(2) 研究分担者

小田 和広 (Oda Kazuhiro)
大阪大学・工学研究科・准教授
研究者番号: 00185597

(3) 研究分担者

平田 研二 (Hirata Kenji)
長岡技術科学大学・工学部・准教授
研究者番号: 40314364

(4) 研究協力者

藤田 行茂 (Fujita Yukisihige)
地球観測株・モニタリング事業室・代表取締役

(5) 研究協力者

Adrin Tohari
Indonesia Institute of Science,
Research Center for Geotechnology,
Senior Researcher