

無線センサネットワークによる多点型土砂災害 予測システムの開発

小泉 圭吾¹・藤田 行茂²・平田 研二³・小田 和広¹

¹大阪大学大学院 工学研究科 地球総合工学専攻 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

²地球観測株式会社 モニタリング事業室 (〒564-0051 大阪府吹田市豊津1-10-206)

³長岡技術科学大学 工学部 機械系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町1603-1)

本研究の目的は、豪雨時の各のり面の危険性を段階的に把握することで、災害を未然に防ぐとともに、道路保全の維持管理に役立つシステムを開発することである。ここでは、降雨の浸透挙動を把握し、変形が進んだ際ののり面の挙動を模型実験から推定することで、崩壊までのプロセスを段階的に評価できる監視システムの開発をおこなった。具体的には、無線センサネットワーク技術を用いることで、のり面を多点で観測できるハードウェア、降雨の浸透挙動、表層土の変形挙動が「正常」、「注意」、「警告」、「災害」の4段階で確認できるソフトウェアを開発した、また、本システムの更なる改良を目的に、電池の長寿命化に関するアルゴリズムの検討、不飽和浸透-変形連成解析プログラムの開発も合わせて行った。

キーワード 土砂災害、センサネットワーク、不飽和土、崩壊予測

1. はじめに

(1) 概要

地震、集中豪雨による土砂災害が毎年各地で報告されている。ここでは土木構造物の中でも、緊急時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。高速道路で発生する土工関連の災害としては、のり面表層崩壊、地すべり、落石、土石流、地震時の盛土崩壊、豪雨時の切盛境界の崩壊などがあるが、近年の異常気象を考慮すると、これらに対する監視体制の強化がより一層重要になってきていることがわかる。特に、局地的かつ短時間に大量の雨を降らす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。

ここでは、地盤災害の中でも発生頻度の高い表層崩壊を対象とし、豪雨時の各のり面の危険性を段階的に把握することで、災害を未然に防ぐとともに、道路の維持管理に役立つ監視システムの開発を目的とした。

(2) 表層崩壊監視のプロセス

降雨による表層崩壊のメカニズムは、素因および誘因の違いにより、崩壊までの浸透挙動あるいは力学的挙動が異なり、一義的に定義することは難しい。一方、のり面における表層崩壊のメカニズムを概略的に捉えると、図-1のような崩壊プロセスを示すと予想される。降雨により地盤に水が浸透すると、間隙が水で満たされ飽和

度が上昇する。降雨が続いた場合、斜面下方向への浸透流により、のり尻の飽和度が上昇、地盤中の細粒分が流出することで有効応力が減少し、のり尻付近に微小変位が生じる。その後、表層にすべり面が発生し、大変位(表層崩壊)が生じる。素因、誘因の条件により、飽和、微小変位、大変位などの各プロセスの時間的スケールは異なるものの、過去の崩壊事例を評価すると概ね上述した傾向が見られるものと仮定できる。そこで本システムでは、地盤中の飽和度が上昇し、ピークに達した地点を「注意」、その後のり尻付近に微小変位が生じた時点「警告」、大変位が生じた時点「崩壊」とした監視システムを構築する。

(3) システム開発のコンセプト

開発コンセプトを下記に示す。

a) 斜面に対し、無線式センサノードを面的に配置することにより、従来の一点集中型監視に比べ、監視精度を向上させると同時に、従来型の課題であった誤報を大幅に削減する。

b) センサノードには、土壤水分センサ(水分ポテンシャルセンサ)、高分解能傾斜センサを搭載する。これらは従来の計測装置と異なり、いずれも小型でローコストなものとする。また、小型である長所を生かし、これらのセンサを1ユニットに組込むことで、設置における時間とコストを削減する。更に、専用のアルゴリズムを作成し、崩壊までの地盤の状況を段階的にモニタリングできるシステムを開発する。

- c) メッシュ型の無線センサネットワークを用いることにより、電源を入れるだけで、自立的にネットワークを構築し、データが受信局を経由し、管理事務所へ配信される。設置にかかる時間、費用を削減する。
- d) センサノードの電源は小型バッテリーで3年間メンテナンスフリーとする。

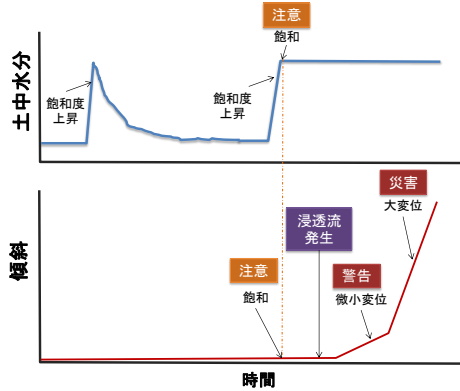


図-1 降雨時の崩壊までの監視プロセス

2. 降雨規制, 規制解除の閾値設定手法の検討¹⁾

(1) センサの埋設方法と安全率の関係

本研究では、雨水浸透によって飽和した風化層と不飽和状態の風化層の境界面にすべり線が発生すると仮定して直線すべりの安全率の式を適応した。概念図を図-2に示す。図-2(a)に示すように風化層を飽和層(A層)と不飽和層(B層)に分け、図-2(b)のようにすべり面上部A層が飽和状態であるようにモデル化した。この時の安全率は式(1)のように表せる。

$$F_s = \frac{T}{S} = \frac{\gamma' \tan \phi'}{\gamma_{sat} \tan \alpha} + \frac{2c'}{\gamma_{sat} H \sin 2\alpha} \quad (1)$$

ここに、T：浸透流がある場合のDC面のせん断強さ(kN/m²)、S：DC面に作用するせん断応力(kN/m²)、 γ' ：土の単位体積重量(kN/m³)、 γ_{sat} ：土の飽和単位体積重量(kN/m³)、 α ：のり面傾斜角(°)、H：すべり面の深さ(m)、 c' ：粘着力(kN/m²)、 ϕ' ：内部摩擦角(°)。この式の安全率を1とした時のH、つまり限界高さ H_c を算出することで想定するすべり面を定義する。その結果に安全率を考慮してセンサ設置位置を決定する。

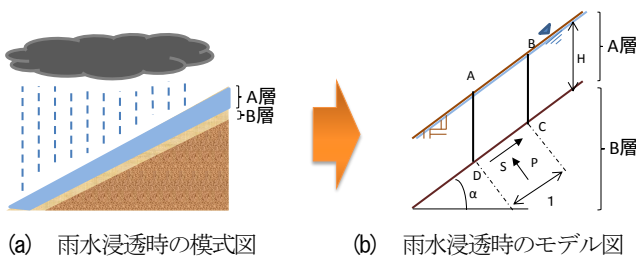


図-2 現場のり面への雨水浸透概念図

(2) 保水性試験による閾値設定手法の提案

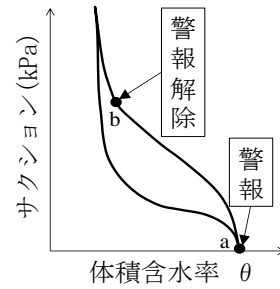


図-3 水分特性曲線概略図

図-3に水分特性曲線の概略図を示す。図のa点は有効応力が低下する点を示している。この点を規制のための警告を発する点として定義する。一方、天候が回復し、のり面の有効応力が回復する点をb点とする。本研究では対象のり面から試料を採集し、現地で使用するセンサを用いた保水性試験を行うことで、現地地盤の水分特性を把握することとした。①円柱アクリルパイプに現場土(現場の間隙比)を充填する。②現場土を充填すると同時に土壌水分センサと水分ポテンシャルセンサを埋設する。③供試体に加水する。④供試体が飽和に達した時点で加水をやめる。⑤4日間恒温槽で乾燥させる。⑥同条件下で複数回実験を行う。サンプリング間隔を1分とし、飽和時の体積含水率、排水過程の水分特性曲線を求める。

3. のり面表層崩壊模型実験

(1) 概要

豪雨による表層崩壊を再現するために、図-4のような模型斜面を製作した。本実験では、表層の風化度が大きく変化する層を不透水層と仮定し、その不透水層よりも上部で斜面下方向への浸透流を発生させることで、図-1に述べた崩壊プロセスの再現を試みる。その際の傾斜センサの変化を捉えることで、崩壊を未然に予測するための手法を検討する。基盤は現場土を締め固めて製作し、その上部に不透水層として、厚さ1.5cmの粘性土を挟み、その上に表層土として厚さ4cmの現場土を一定の締め固め度となるように打設した。ここでは、表層土の締め固め度を変えて複数回行った内の一例を示す。降雨を一定とし、図中①、②に示す土壌水分センサにより、浸透流発生に伴う土中の体積含水率の経時変化を把握する。計測は60秒ごととする。表層土の初期含水比は26.84%、体積含水率の初期値は、①が0.238、②が0.280である。また、変状を捉えるために、青、黄、赤の木製の串を傾斜センサに見立てて、図に示すように各4点、計12点設置した。実験装置のほぼ真横に定点カメラを設置し、画像解析により、10秒ごとの画像から傾斜変化を算出した。

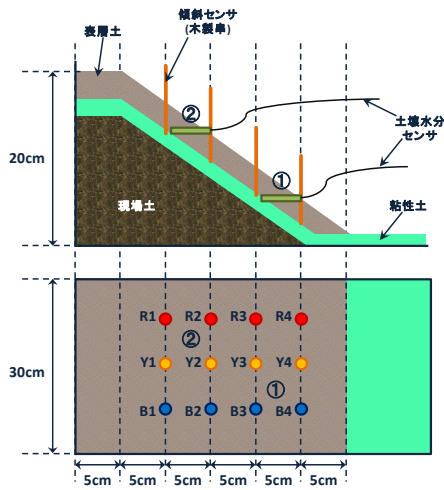


図-4 模型斜面概要

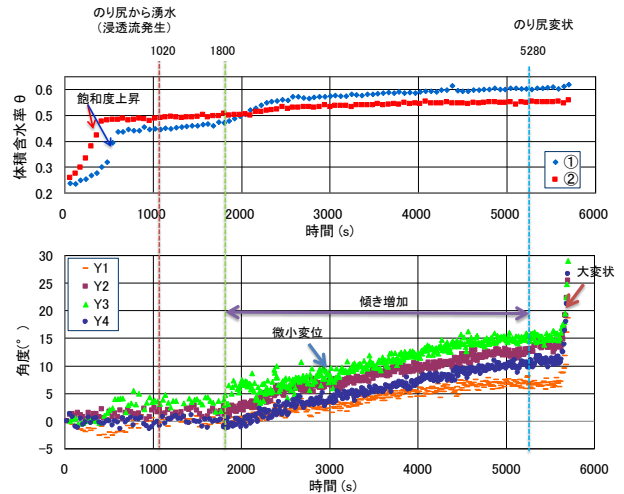


図-5 土壌水分センサおよび傾斜センサの時系列変化

(2) 結果

降雨開始から5630秒程度で表層崩壊が発生した。青、黄、赤の3列でほぼ同様な挙動を示したため、中心の列に設置したY1, Y2, Y3, Y4の4点に対する結果を示す。図-5は体積含水率及び傾斜センサ(Y1~Y4)の崩壊までのプロセスを示している。降雨開始から1200秒後にのり尻付近で湧水が確認された(図-6(a))。この時点ですべり面には斜面下方向への浸透流が発生しているものと考えられる。その後、①と②の体積含水率が再び緩やかに上昇し始めた。1800秒には①の体積含水率の上昇とほぼ同時に、Y1~Y4の傾斜センサに微小変位が確認された。その後、Y1~Y4の傾斜センサの傾きが増大し、5280秒でのり尻での変位が発生(図-6(b))、5610秒時点でのり肩付近(遷急線)にき裂が発生し、大変状へと到った。

(3) 考察

図-5に示す様に、のり尻が飽和し、斜面下方向に浸透流が発生、のり尻部に変位が現れたことで斜面全体に微小変位が生じた。今回の模型実験で観測された微小変位は、時間やスケールの差はあるが実現象においても同様の現象が発生するものと推測される。今回の実験では傾斜センサの変化量が約 10° 程度で大変状が発生していることがわかる。一方、雨水の浸透挙動に着目すると、降雨開始後、体積含水率が急激に上昇した後、しばらく経ってから再び緩やかに上昇し、それとほぼ同時刻から微小変位が進行し始めた。この現象は、水の浸透による空隙の減少に加え、土中の細粒分の流出が寄与していることが予想される。すなわち、浸透流の発生に伴い表層土中の細粒分が流出し、細粒分が水分に置換されていく過程を土壌水分センサが検知したものと推測される。このことから、細粒分が流出し、間隙が増加することにより、粒子配合の変化による土の強度低下が生じ、変形が発生したのと考えられる。これらの現象を早い時点で捉える事ができれば、崩壊を未然に予測することが可能となる。

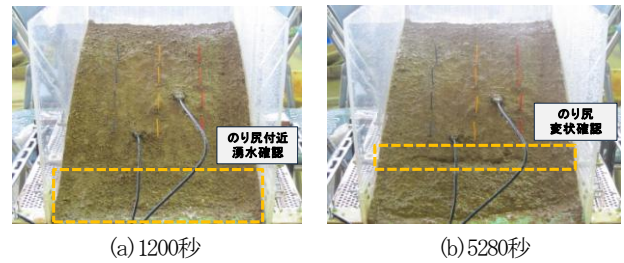


図-6 降水による模型斜面の変状の様子

4. 土砂災害予測システムの開発

(1) 無線センサネットワーク

崩壊予測に加え、豪雨時の地盤の性状を精度よく観測するためには、対象範囲内を面的に、かつリアルタイムに監視する必要がある。また、高速道路の通行規制および規制解除を目的とする場合は、崩壊の危険性の高い複数ののり面に本システムを設置する必要がある。そのため、設置に際しては、時間を要さず、ローコストでシステムを構築できることが望まれる。そこで本研究では、無線センサネットワーク技術の1つであるメッシュネットワークシステムによる土砂災害予測システムの構築を検討した^{2),3),4)}。

図-7は高速道路沿いのり面監視システムの実証実験の様子を示している。この図に示すように、本システムは基地局とセンサノードから構成される。センサノードは全て電池式で、互いにデータを送受信することができ、任意のセンサノードと自律的に通信が行えることから、必要な箇所に自由に配置できる。仮にノード間の距離が遠く、通信が出来ない場合でも、その間に新たなセンサノードを設置することでネットワークの構築が可能となる。また、あるセンサノードが故障した場合でも、それ以外のセンサノードは別の通信経路を自動的に再構築し、データを基地局に送ることができる。基地局に収集されたデータは管理者が常時観測できるシステムとした。

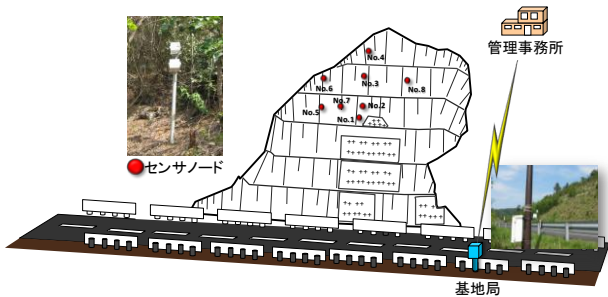


図-7 実証実験の概要

(2) メッシュネットワーク・トポロジー

図-8にメッシュネットワークによるセンサノード間の通信状況の一例を示す。複数のノードを中継しながら、データが基地局へ送信される状況が確認できる。

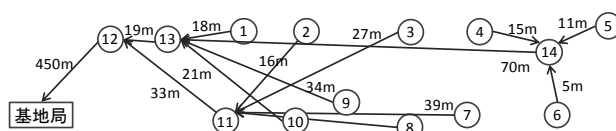


図-8 ネットワーク・トポロジーの一例

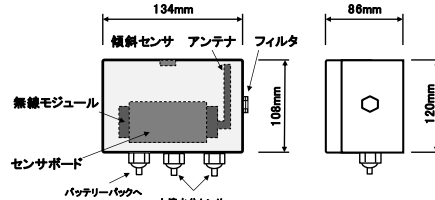


図-9 センサノード

(3) ハードウェア

図-9に開発したセンサノードの概要を示す。本体には無線モジュールと傾斜センサを内蔵し、外部センサとして土壌水分センサ（水分ポテンシャルセンサ）が2台接続される。また、電源として、10分間隔の計測で3年間の使用が可能な小型バッテリーパックを開発した。

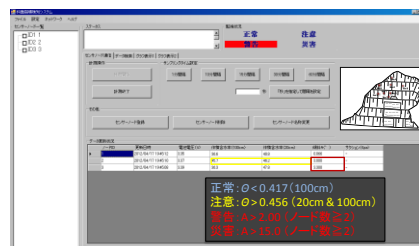


図-10 4段階（「正常」、「注意」、「警告」、「災害」）の土砂災害予測システム

(4) ソフトウェア

図-10に開発したソフトウェアの概要を示す。画面上では、設置しているセンサノードID、バッテリー電圧、土壌水分センサ（サクシオンセンサ）、傾斜センサの出力値が確認できる。また別画面において、時系列グラフの表示も可能である。豪雨による地盤の水分挙動およびの変形挙動に応じて、4段階（「正常」、「注意」、「警告」、「災害」）の表示機能を持たせた。各段階の閾値は別画面で任意に設定することが可能であり、2章、3章で述べた実験による評価手法および現場計測データを基に決定する。

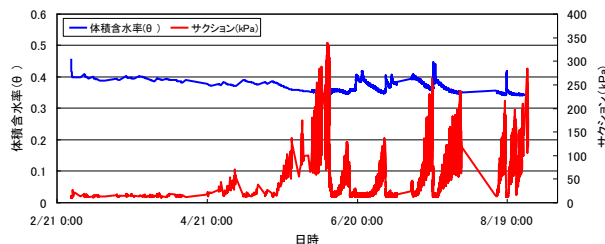


図-11 計測データの一例（深度20cm）

(5) 現場計測結果の一例

図-11に現場計測結果の一例を示す。このグラフは図-7に示したNo.1地点の深度20cmで計測した体積含水率およびサクシオンの時系列変化を示している。2月から3月にかけては降雪による影響がみられる。また、6月以降は降雨による浸透、晴天に伴う蒸発の影響による体積含水率、サクシオンの変動が確認できる。

(6) 監視システムのフローチャート

図-12に本システムのフローチャートを示す。豪雨時にのり面のセンサノードの体積含水率（サクシオン）が閾値を越えた場合に「注意」を発令する。この閾値は地盤中の間隙が水分で満たされた状態とし、現行の降雨による通行規制の判断基準に相当する。その後、天候が回復し、体積含水率（サクシオン）が規制値内に回復した場合、「正常」を発令する。この閾値は間隙中の水分の

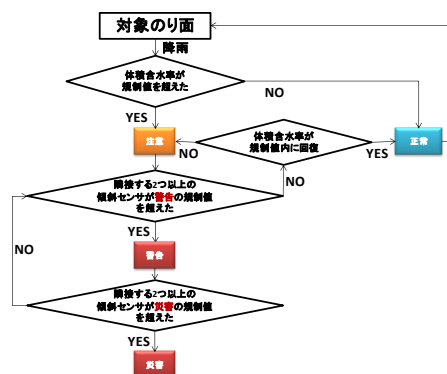


図-12 多点型土砂災害予測システムのフローチャート

減少（サクシオンの回復）に伴う有効応力の回復が見られた時点とし、現行の降雨による通行止め解除の判断基準に相当する。一方、降雨が継続し、センサノードの傾斜角度が微小変位の閾値を越えた場合は「警告」、大変位の閾値を越えた場合は「災害」を発令する。その際、

誤報を無くすために、2台以上のセンサノードが閾値を越えた場合にアラートを発令することとした。また、「警告」の閾値を越えた後に、体積含水率（サクシオン）が規制値内に回復すれば、点検の後に「正常」を発令する。

5. まとめと今後の課題

本研究助成では、高速道路のり面の表層崩壊を対象とし、豪雨による災害発生までの地盤中の降雨浸透挙動および変形挙動を段階的に観測するシステムを開発した。特に無線センサネットワーク技術の1つであるメッシュネットワークを用いた多点型監視システムのハード、ソフトの開発に重点をおき、実用化に向けたプロトタイプを完成させた。監視手法については、現地試料を用いた室内実験による閾値の設定法を提案したが、これらの妥当性を検証するためには、更なる実験・解析が必要となる。また、屋外での監視システムの長期運用化を図るためには、自然エネルギー等の利用のみならず、センサノードの常時と緊急時の稼働時間を制御することで、バッテリーの省エネ化を図る技術開発が必要となる。そこで、本研究では、システムの更なる改善を視野に入れ、今後の課題として次の2課題についても研究を進めた。

(1) バッテリーの長寿命化

表層崩壊の危険度が高まっている場合、全てのセンシング機能を起動させ、詳細な観測データを取得する必要がある。一方、晴天時など、危険度が低い場合は、センシング機能を停止させることにより、ネットワーク全体の稼働期間の長寿命化を図ることができる。この考えに基づき、センサノード自身による観測データと、このセンサノードと通信可能な近傍センサノードからもたらされる観測データを利用し、次の時刻でのセンシング機能の起動確率を指定する方策を提案している⁹⁾。

提案する起動確率指定方策の有効性を数値実験により検証した一例を図-13に示す。図-13(a)は、表層崩壊危険度をあらゆる仮想的に与えられた関数の形状である。図-13(b)の各点は、この時刻でセンシング機能を起動させたセンサノードを示している。表層崩壊の危険度が低い位置に設置されているセンサノードは、センシング機能を停止させ省電力化を図っていることが確認できる。

提案する起動確率指定方策を実装した実験によっても、その有効性を確認することができている。2章で設定する閾値などを利用した実装を行うと共に、観測対象のり面における実証実験の実施が、今後の課題である。

(2) 不飽和浸透-変形連成解析

不飽和土中の水理現象の支配方程式としてリチャーズの方程式、水分特性曲線のモデルとしてvan Genuchtenモデルおよび有効応力に基づく釣合い式を有限要素法に

よって離散化することにより、飽和・不飽和浸透流挙動と土の変形挙動を連成させる解析プログラムを開発した(図-12)。今後は、豪雨時の地盤中の水分挙動および変形挙動の時系列変化を解析により推定し、現地計測結果にフィードバックすることで、降雨規制、規制解除および崩壊予測の精度を高めていく必要がある。

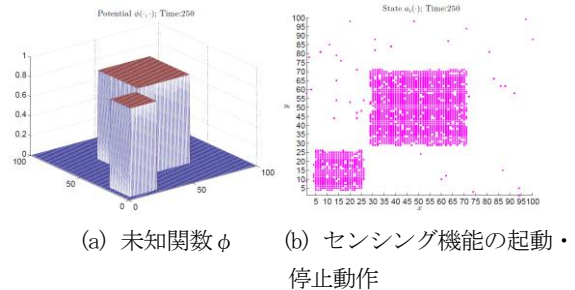


図-13 未知関数 ϕ とセンサノードの起動・停止動作の一例

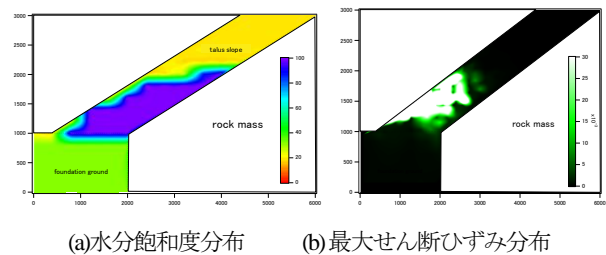


図-14 解析結果の一例

謝辞：本研究における高速道路沿いの実証実験に際して、西日本高速道路エンジニアリング(株)の上出氏、小西氏および西日本高速道路(株)関西支社福知山高速道路事務所の田中氏に多大なるご協力を賜りました。また、現場計測および実験・解析には大阪大学大学院の浅野君、村上君、長岡技術科学大学の吉武君に補助頂きました。なお、本研究は建設技術研究助成金（H23実用化研究開発公募）によるものであります。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 村上一馬, 小泉圭吾, 小田和広, 上出定幸: 豪雨時の斜面災害監視手法の検討, 平成 24 年度土木学会関西支部年次学術講演会, III-7, 2012.
- 2) K.Koizumi, K.Hirata, K.Oda, Y.Fujita, S.Kamide and T.Watanabe: Slope Disaster Detection System using Sensor Networks and Its Field Experiment Evaluations, The Society of Instrument and Control Engineering, Vol.5, No.1, pp.41-47, 2012.
- 3) K.Koizumi, H.Hirata, Y.Fujita and S. Kamide: Slope Disaster Monitoring System Using Wireless Mesh-Type Network, International Workshop on ICT in Geo-Engineering, pp.107-115, 2012.
- 4) K.Koizumi, K.Hirata, K.Oda, Y.Fujita and S.Kamide: Slope Disaster Monitoring System using Battery-operated Wireless Sensor Network, The 2nd World Landslide Forum, Rome, Italy, WLF-0263, 2011.
- 5) H.Hirata, M.Yoshitake and K.Koizumi: Probabilistic Sensor Management Strategy for Slope Disaster Detections, International Workshop on ICT in Geo-Engineering, pp.99-106, 2012.