

岩盤斜面崩壊・崩落モニタリング用 センサネットワークシステムの開発

西山 哲¹

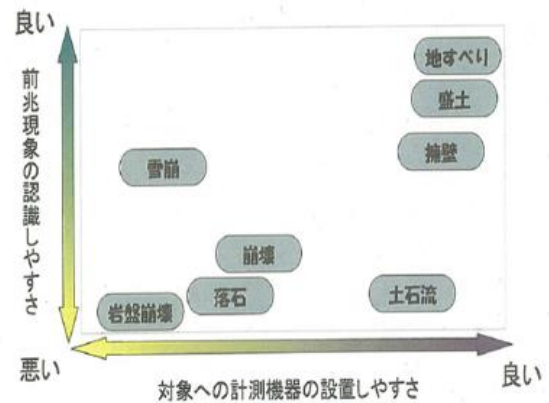
¹岡山大学大学院 環境生命科学研究科 教授 (〒700-8530 岡山市北区津島中3-1-1) .

本研究開発は岩盤斜面の挙動を高精度に計測し、さらに当計測データをリアルタイムに無線で配信するセンサを活用することで、効率的かつ効果的なモニタリング手法の実用化を試みたものである。開発したセンサは、面的に自由に配置できる、斜面の変状をベクトル的に捉えることができるなどの利点を有しており、いつでも、どこでもリアルタイムに斜面の傾斜挙動を観測できることを実証したモニタリング事例を紹介する。

キーワード MEMS, センサネットワーク, リアルタイムモニタリング, 岩盤斜面

1. はじめに

中国地方の地盤は大陸の東部を縁取る造山帯の一部であることから岩盤には亀裂や節理が発達しているうえに、地表から100m以上の深さまで“まさ土”からなる“深層風化帯”が広範囲に分布している。このため急傾斜地崩壊危険箇所は広島県だけでも5,960箇所、土石流危険渓流は4,930箇所と全国で一番多く存在する。宅地開発が進み危険箇所は増える一方で、近年はゲリラ豪雨などの局所的な豪雨が頻繁に発生しており、岩盤崩落・崩壊の危険性が非常に高い地域である。さらに道路防災総点検などで対策不要とした箇所や点検対象外の箇所においても、「崩壊の形態や規模が想定外」であったために表層および深層岩盤崩壊あるいは落石を含めた岩盤崩落は多発しており、岩盤斜面の防災対策が困難である実態がうかがえる。また図-1のように、旧道路保全技術センターによって報告されている「道路防災のための計測管理の手引き」においては、「対象への計測機器の設置しやすさ」と「前兆現象の認識のしやすさ」が最も困難であるのが「岩盤崩壊」「落石」であり、これらに対する計測技術の指針が明確に示されていないのが実情である。このような多数の危険な岩盤斜面の安定性を評価し、災害の予知・予測を行うための計測技術の整備を進めていく必要があることは理解できても、数千箇所という膨大な数の危険な岩盤斜面に対応した十分な計測網を普及させることは、現状の限られた予算と人員の中では困難な状況である。さらに技術的な側面からも岩盤崩落・崩壊災害は次のような特徴を有しているため、その観測体制の構築が困難であると考えられる。



道路保全センター
「道路防災のための計測管理の手引き」

図-1 岩盤崩壊モニタリングの特徴

- ・災害に至る前兆現象が微小なため、リアルタイムでの高精度の計測が要求される。
- ・どこが危険なのか特定できないため広範囲で高密度に計測を配置する必要があるが、計測器の設置や維持管理が困難な箇所が多いため、計測を実施する費用が高くなる。
- ・各地区ごとに崩壊形態が異なっているが、どのような崩壊形態であっても対応できる高密度の計測を実現する機器がない。
- ・計測システム自体が風雨や雷などの災害に対して頑強でなければならない

本研究はこのような背景を鑑み、表層・深層崩壊や落石を含めた斜面崩壊・崩落の危険性を判断する岩盤斜面モニタリングシステムを開発するものである。具体的には、岩盤の挙動を高精度に捉える小型のセンサを設置し、

そのセンサ信号を電波無線で収集することによりリアルタイムで危険を察知する計測システムであり、各種センサ類の中でもMEMS（Micro Electro Mechanical Systems）と称される各種センサと計測データを無線で配信する機能を一体化したセンサデバイスを活用した管理手法の構築を試みるものである。その特徴は、システムに有線の部分がないため設置個所の選定が自由であること、低コストであることから広範囲に数多くの計測網を完備することが可能であること、さらに設置後はメンテナンスフリーであることなど、従来の計測の欠点を克服するものである。このようにセンサテクノロジーと通信技術の最新技術を防災分野に導入することで、研究開発自体のコストダウンを図りながらも国民の期待にこたえる道路管理技術を効率的に進めていくことを狙うものである。ここで報告する防災技術の事例が、同様の課題をかかえる他の地域の管理手法への参考になれば幸いである。

2. センサネットワークの開発

本研究のモニタリングシステムは、計測対象物上の挙動を高精度に捉えるMEMSセンサと、そのセンサで計測した当対象物の挙動をリアルタイムに事務所に伝送する無線ネットワークにより構成される。図-2にMEMSセンサを収納したパッケージの外観を示す。約123×76mmのパッケージに傾斜センサと温度センサが組み込まれたMEMS基板、データを配信する無線モジュールと無線アンテナ、さらには電源であるリチウム乾電池2本が内蔵されている。このセンサによって計測された傾斜角度のデータは、温度値とともに無線によって遠隔に設置した基地局に伝送され、さらに当基地局から電子メールにて事務所に計測データが配信される。

図-3には、このセンサを用いたモニタリングシステムの実用例を示す。計測対象物にセンサを設置すると、そのセンサが対象物の挙動を検知し、さらに無線によって斜面の状態を事務所に配信する。センサは小型で有線部分がないことから、任意の箇所に多数個設置でき、また台風や地震時の断線によって計測が不能になる事態や落雷および誘雷による機器の損傷の心配も無い。このセンサからの計測データを収集して事務所に転送するのが基地局の役割であり、設置したセンサの計測データを1台の基地局にて収集して事務所に配信する。図-3ではセンサを治具を介して設置しているが、岩盤・落石に直接設置させることも可能であり、傾斜計は2軸以上の方向の挙動を検知するので、計測対象となる岩盤・落石の挙動をベクトルとしてパソコンに表示させることができる。基地局の電源は太陽電池であり、モニタリングシステム全体としても有線の部分がなく、またセンサを含め機器のコストも安価であることから設置機器の設計が自由に

できる。あらためてモニタリングシステム全体の特徴を挙げると、次のような利点のある計測システムであることが実証されている。

- 植生の繁茂している箇所でも稼働するように乾電池を組み込んだものとしている。植生の影響がなければ太陽電池駆動のセンサとすることはできるが、乾電池駆動の場合でも、センサの消費電力は小さいので、数分間隔での計測においても電池を交換する期間を長く設定することが可能で、また基地局は太陽電池で駆動するので、計測システム全体のメンテナンスの労力を軽減することができる。
- 0.05度以上の高分解能で2～3方向の傾斜角を計測できるので、微小な岩盤の挙動を3次元的に捉えることが可能であり、また遠隔地にてリアルタイムに斜面挙動を把握することができる。
- 基地局から半径300mの遠隔の場所にセンサを自由に設置することができ、広範囲の斜面全体の挙動を面的に捉える機器配置の設計を容易にできる。

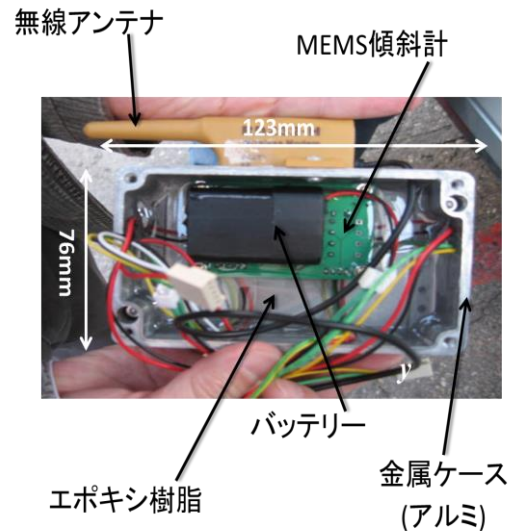


図-2 ナノセンサデバイスの概念



図-3 センサネットワークシステム概念

このように岩盤斜面を対象とした従来の計測手法の課題であった「高精度の計測機器を多数設置することが出来ない」あるいは「機器の設置後のメンテナンスの労力が多大である」などの欠点を克服するモニタリング手法を実現させることが可能となった。

3. 岩盤モニタリング計測例

本章では、岩盤斜面に本計測システムを適用した事例を示す。MEMSセンサは内部でおもりをバネで支える構造となっており、センサが傾くとセンサにかかる重力の方向が変化し、おもりが同じ位置に留まろうとする慣性力でバネが伸縮する。このおもりの変位を静電容量の変化として検出することで傾斜角を物理量として計測する。対象斜面は砂岩・頁岩を含む膨潤性泥岩層から成り、25年以上前に本斜面に擁壁が施工されてから10回以上、台風や豪雨などの影響で崩壊しており、ボーリング調査などの結果から深さ20mから30mの深さにすべり面が認められ、斜面上部から下部まで約600m、幅約210mにわたる範囲で深層崩壊を起こす危険性が認められている。

図-4に現場の地形および地質状況を示す。センサは対象斜面に3箇所設置し、擁壁の下端に2箇所、擁壁が施工されていない斜面上部の1箇所に設置した。図-5にセンサの設置状況を示す。本センサは、図に示す鉛直軸に対して、ピッチとロールの回転に対する角度変化を計測する。図-5に示す設置位置に対して基地局はセンサから見通せない擁壁の上部に設置しているが、周波数の低い電波は物体の背後に回り込む特性が大きいことを利用して、MHz帯の周波数の通信を使用することで基地局から300m以内の箇所であればデータ通信が可能となるシステムとしている²⁾。またセンサ内にエポキシ樹脂を注入し、雨露がセンサ内に侵入するのを防ぐ構造である。このセンサの傾斜角の計測結果の一例を図-6に示す。計測値とセンサ内の温度計の計測値はどれも24時間の周期をもっており、気温変化の影響を受けている。これは温度



図-5 センサおよび基地局の設置状況

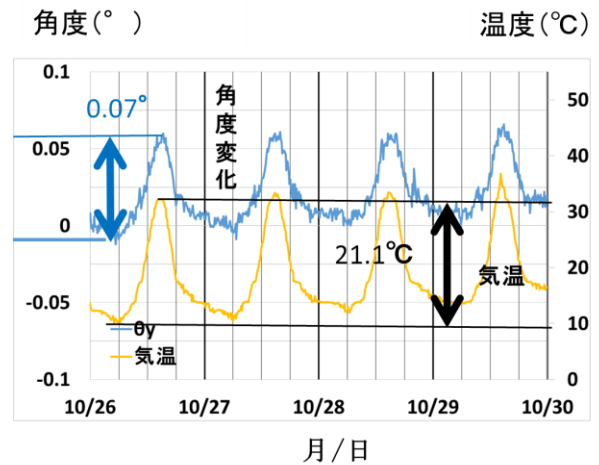


図-6 気温変化による計測値の変動

変化による各種部品の熱膨張の影響が出現した結果であると考えられるが、計測値の変動は約0.03°~0.04°であり、気温変化の影響を大幅に低減できた高精度の計測が可能であることが示されている。計測は10分間隔で行い、基地局で収集した計測データはInternetを介してサーバーに自動転送しweb上にて閲覧することで、いつでも、どこでもパソコン画面にて計測対象の挙動を観測する可能なシステムとした。

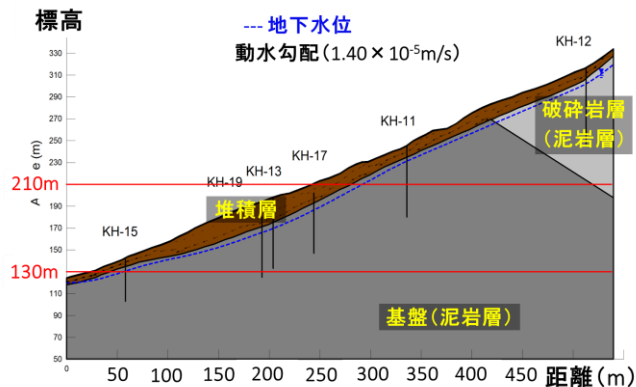


図-4 地形および地質概況

4. 計測結果

計測結果の一例を図-7および図-8に示す。なお参考のために各図には気温の計測値も示しているが、角度の計測値には気温変化の影響が現れていないと考えられる。斜面上部の擁壁部ではない箇所に設置したセンサの計測値において、ロール方向とピッチ方向の角度に0.30°および0.10°の変化が観測され、斜面上部が沈下する動きを示した。一方、擁壁部に設置したセンサの計測値の変化はそれぞれ0.08°と0.04°であり、もう一つの擁壁部に設置したセンサの計測値も同様な傾向を示しており、擁壁部にはアンカー工を施工したので、その効果により安定したと考えられる。図-9は計測期間中の降雨量と計測値の関係を示したもので、4月および6月の降雨時に計測値に大きな変動がみられており、対象斜面はもろく粘土化しやすい第三紀の泥質堆積岩類を含んでいるため、降雨の影響を受けて沈下する挙動が発生したものと考える。このように面的なセンサの配置によって、広範囲の斜面においても、変状が出現する箇所を詳細に観測することができ、また擁壁の対策工の効果を容易に確認することができる。なお本現場においては、さらにセンサを多数配置させて、斜面全体の回転や沈下といった挙動の詳細分析を行う計画を立案することになり、まずはスクリーニング的な挙動把握を行った後に詳細な観測計画を考察していくという、自由なセンサ配置の設計ができる利点を活用したモニタリングの実施が可能であることを実証した。

5. 結論

本研究において、MEMSセンサを活用した計測システムを開発し、その実用性を実現現場にて検証した。その結果、計測システムは低コストの機器で構成されるため、高密度の計測網を構築することができ、さらに計測システムは設置の設計度の自由度が高く、計測対象の挙動を面的かつベクトル的に捉えることができるという利点を発揮したセンサネットワークシステムが構築できることを実証した。今後は、管理手法の効率化に結び付くモニタリング技術として本成果の普及を図っていく予定である。

参考文献

- 1) 秦野佑也, 西山哲, 南方菜緒, 壺阪知広, 岩崎佳介: MEMSを用いた擁壁と深層崩壊のモニタリング, 第59回地盤工学シンポジウム平成26年度論文集, pp.57-62, 2014.
- 2) 秦野佑也, 西山哲, 岩崎圭介, 龍明治: MEMSセンサ・ネットワークを用いた地盤挙動モニタリングの研究, 第50回地盤工学研究発表会平成27年度論文集, C-07, 2015.

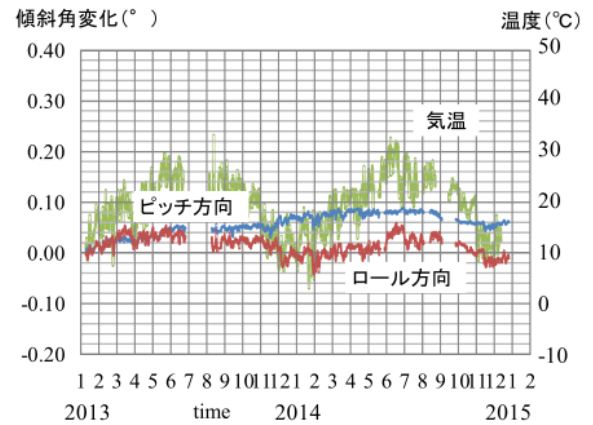


図-7 擁壁部の計測結果

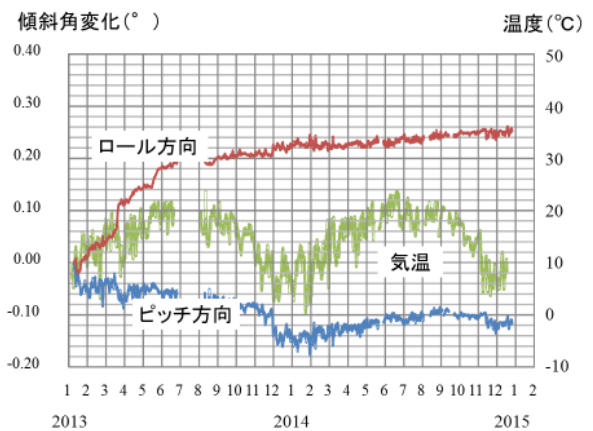


図-8 斜面上部の計測結果

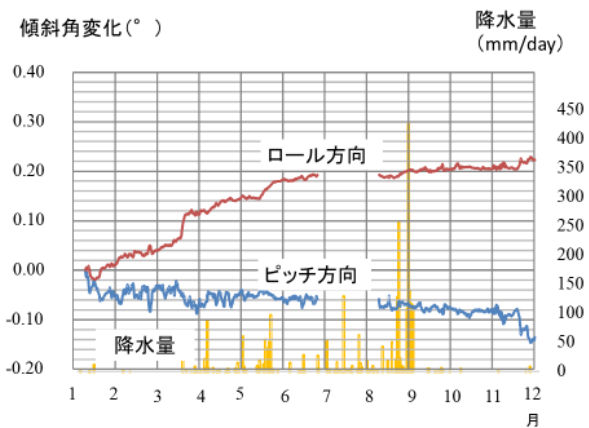


図-9 降雨と計測値の関係