⁽³⁵⁾ MEMSおよび無線技術を用いた 計測手法の開発と地すべり斜面への適用

南方 菜緒1・西山 哲2・矢野 隆夫3・龍 明治4

¹学生会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2棟) E-mail:minakata.nao.34n@st.kyoto-u.ac.jp

²正会員 岡山大学大学院 環境生命科学研究科 (〒700-0082 岡山市北区津島中3-1-1)
 E-mail:nishiyama.satoshi@okayama-u.ac.jp
 ³正会員 京都大学大学院 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂 C1-2棟)

E-mail: yano.takao.7u@kyoto-u.ac.jp

⁴正会員 株式会社 アーステック東洋(〒601-1374 京都府京都市伏見区醍醐西大路町44-32) E-mail: ryu@earthtech-toyo.com

近年,土木構造物の新たなモニタリング手法の開発が急務である.背景には,高度経済成長期に建設された構造物の老朽化と自然災害,中でも地球温暖化の影響を受け,頻発する予測不可能な異常現象が挙げられる.この背景に鑑み,土木構造物や斜面の崩壊などを事前に防ぐために,Micro Electro Mechanical System (MEMS)と無線技術を活用した新たなモニタリング手法の開発を行った.MEMS技術の普及により小型で安価なセンサの製作が可能になり,さらに無線によるデータ転送技術と組み合わせた結果,任意の位置での高密度な計測が可能となった.本論文は本手法の開発を取り纏めたものであり,さらに本手法を実際の地すべり斜面へ応用した実例とその成果について報告する.

Key Words : MEMS, wireless communication, retaining wall, landslide and natural disaster reduction

1. はじめに

近年, 高度経済成長期に建設された構造物の老朽化と 地球温暖化の影響によるゲリラ豪雨などの異常気象の頻 発から、構造物の崩壊や予測が困難となる土砂災害によ る被害が危惧されている. これらの被害を事前に防ぐべ く、構造物の維持管理の重要性と、構造物の新たなモニ タリング手法の開発の必要性が高まっている¹. さらに, 土木構造物だけではなく、台風や豪雨などの自然災害に よって、土砂災害などが誘発される可能性の高い地域が 多数存在していることから、これらにも対応可能なモニ タリング手法を開発する必要がある.我が国においても, このような危険な斜面が全国で数万箇所において存在し ている. このような状況において, 限られた財源と管理 体制の中で効率的かつ効果的な防災管理を行っていく必 要があるが、道路沿いの斜面の大半は地形上あるいは経 済上の問題などにより、抜本的な対策工を早期に実施す ることが困難であることから、モニタリングによる斜面 監視が有効な手段として活用されている². しかし、こ れらに対して計測網が普及しているとはいえないのが現

状である^{3,4)}.

現在でも、構造物や斜面などに対して、傾斜計、伸縮 計およびTS (Total Station)を用いた計測による維持管理 は実施されている.しかし、従来の計測機器は、落雷に よる電磁ノイズに弱いことや、電源・通信ケーブルが必 要であると言った設置の自由度に制限がある.同時に敷 設工事や劣化に伴うメンテナンスなど初期投資費用およ び維持管理費用などの点において問題を抱えている⁵.

これらの問題点を解決すべく, MEMS (Micro Electro Mechanical System)[®]と無線技術に着目し新たな計測手法の 開発した. さらに今回は局所的豪雨が頻発している台湾 において, 深層崩壊が存在している斜面[®]に本手法を適 用し, 供用性の把握を行った.

2. 計測手法の概要

本研究ではMEMS技術と無線技術を導入し、計測手法 を開発した.計測手法の概要を図-1に示す.MEMSセン サを計測対象物に設置し、計測地付近の安定した場所に 基地局を設置する.基地局からWebを介して,遠隔地であっても観測結果を取得できる仕組みである.

(1) MEMSの概要

MEMSとは、シリコンの基板上に各種センサを一体化 させた小型デバイスであり、本研究では静電容量型加速 度センサを搭載したものを用いる.計測された加速度を 式(1)により換算することによって傾斜計として活用す る.ここでAccは加速度を表し、x、yは各軸の方向を示 す.

$$\theta_i = \operatorname{Arccos}\left(\frac{Acci}{\sqrt{Accx^2 + Accy^2}}\right) \quad i = x, y$$
(1)

図-2は開発したセンサの概観と計測原理を示す.本研 究では、静電容量型加速度センサに加え、温度センサと 充電式電池を搭載する.また温度特性を把握するために、 MEMSセンサを屋外に1週間静置したところ、静置して いたにも関わらず、角度変化が生じた.このことから、 MEMSセンサの計測角度は外気温の変動や太陽光の影響 を受けることがわかった.そこで、図-3に示すシリコン 樹脂を注入し、基盤を固定した結果、温度の影響を大幅 に低減することが可能となった.この結果を図-4に示す. 赤色と青色、緑色の実線はそれぞれ6,と6,とMEMSセン



サ内の温度の計測値であり、黒色の破線は計測値の1日 の移動平均で計算した値を示す.これより、1日の計測 角度の変動幅は温度変化を考慮したうえで、0.01°以下 であり、開発したセンサは計測対象物に対して0.01°の 挙動を計測できることがわかる.

(2) 無線技術

図-2に示したMEMSセンサの基板に無線通信機器を組 み込み,遠方に設置した基地局へ計測データを転送する. 無線電波は図-5に示すように,波と同様に回折の性質を もち,周波数の低い電波の方が物体の背後に回りこむ特 性が大きい.そこで,本研究では,低周波数帯(434MHz) の無線を導入し,植生等の障害物の影響を受けることの ない遠距離通信を実現させた.この成果から,中継器を 使う必要性がなくなり,計測システムの設計の自由度が 向上した.MEMSセンサで計測している傾斜角度(加速 度から変換したもの)と温度のデータを任意の間隔で基 地局に送信する.本研究では10分間隔でデータ送信を行 っている.以上に述べたようにスリープ状態を適用し, ダイレクト通信を行うことで,メンテナンスフリーを実 現した.本手法においては,現在約1年間は電池交換が 不要である.



図-3 樹脂を注入した MEMS センサ



3. 地すべり斜面への適用事例

計測を行った斜面は、活動型地すべりが存在する山岳 地帯に位置する県道沿いの斜面である.図-6に斜面の概 観を示す. この斜面の地質は膨潤性泥岩であるため、本 斜面は1980年に施工されてから10回以上、台風や豪雨な どの影響で崩壊していることもわかっている. これらの 斜面崩壊は図-7に示す深層崩壊を誘発しうる深さ20mか ら30mのすべり面に起因すると考えられる. 2009年の大 雨により実際に本斜面は崩壊している^{7,8}.この際に、 大規模な補修工事を行い2012年に擁壁を施工し、地すべ り対策を行っている.本計測手法をこの斜面に適用し, 約1年間の計測を行った.図-8に示すように開発したセ ンサを3つ(S11, S12, S13)と基地局を設置し,基地局か らInternetを介して、リアルタイムでモニタリングを行っ た. 図-9は各MEMSセンサと基地局の設置状況を示す. 設置したMEMSセンサのうち、S12とS13は擁壁の下端に 設置し、S11は擁壁が施工されていないすべり面の上部 に設置した.これらのセンサから得られた結果を図-10 に示す. 青色, 赤色の実線はそれぞれ図-8に示したθ_xと

θ、であり、黒色の破線は1日の移動平均の値を示す.ま たグラフの横軸には経過年月をとり、縦軸には計測値を とる. ただし、この計測値はMEMSセンサの設置角度に 依存するため、各々のセンサが異なる値を示す. そこで、 今回は変化量に着目することとした.また7月中旬より1 か月間、システムダウンによりデータ欠損が生じている. 計測結果より、上部に設置したS11の計測値のにおいて、 計測当初1月から10月の間に変動がみられる.一方で、 S11の計測値の、S12およびS13の計測値のとのでは、すべ て0.1°以下であったたため, S12, S13においては安定し ているといえる.以上の計測結果を斜面の動きに置き換 えて考えると、対策措置として施工された擁壁部分にお いては、地すべりの挙動が見られず、安定していた. つ まり、対策措置が地すべりの抑制に有効であったことが わかる.しかし、雨季において地すべりの先端部分が微 動ながら沈下していることから、図-7に示した深層崩壊 の危険性があるため、今後引続き観測する必要があると 考えられる、そこで、擁壁を施工していない部分に2つ のMEMSセンサ(図-8の緑色の部分)を追加し、地すべ りの挙動をより詳細に明らかにしていくこととする.





4. 結論

本研究は、計測対象物の挙動を0.01°で捉える高精度 な計測手法をMEMS技術と無線技術を活用し、開発した. 本手法を深層崩壊対策を施した現場に適用したところ、 擁壁施工部分には変状は見られず、安定していた ものの、雨季の間、崩壊地の上部が微小な変動が生じて いることを捉えた.すなわち、自由にセンサを配置でき る多点同時計測の有用性を実証することができた.将来 は、地球温暖化による気候変動から生じる災害モデルの 予測に繋げることを目指す.

参考文献

- Jiazeng, S., Henry, T. Y. Y., M. ASCE., Weixing, S., Daniel, B., and Paul, H., : Structural Damage Diagnosis Using Interstory Drift –Based Acceleration Feedback with Test Validation, ASCE Journal of Engineering Mechanics, 139(9), pp. 1185-1196, 2013.
- 2) 木村直樹:道路防災モニタリングネットワークシス テムの構築に関する研究,平成 21 年度近畿地方整備 局研究発表会,防災・保全部門 No.7, 2009.
- 3) 中川光雄,成田穰,里優:道路防災モニタリングネットワークシステムの構築に関する研究,土木学会第66回年次学術講演会,pp.27-28,2011
- 4) Uchihara T, Towhata I, Trnh T, L A, Fukuda J, Bautista B J C, Wang L, Seko I, Uchida T, Matsuoka A, Ito U, Onda Y, Iwagami S, Kim M, Sakai N, : Simple monitoring method for precaution of landslides watching tilting and water contents on slopes surface, *Journal of Landslides*, Vol. 7, 10, pp. 351-357, 2010.
- 木村直樹:国土交通省国土技術研究会報告書, pp.192-195, 2009.
- 6) 前田龍太郎,池原毅,小林健,単学伝:MEMS のは なし,日刊工業新聞社,2005.
- 千木良雅弘,松四雄騎,ツォウチンイン,平石成美, 松澤真,松浦純生:京都大学防災研究所年報,第55 号 A, pp.193-211, 2012.
- Justin Chun-te Lin, Ja-Jang Chen, Duu-Jong Lee, Wan-Mu Guo, : Treating high-turbidity storm water by coaquiationmembrance process, *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, Vol. 43, 3, pp. 291-294, 2012.