

平成 21 年 6 月 5 日現在

研究種目：若手研究(A)  
 研究期間：2007～2008  
 課題番号：19686031  
 研究課題名（和文） 土壌水分量と傾斜変位に着目した低コストで簡便な豪雨時の  
 斜面監視システムの開発  
 研究課題名（英文） Development of simple and low-cost early warning system for  
 landslides due to heavy rainfall based on sensing water contents and tilting  
 研究代表者  
 内村 太郎 (TARO UCHIMURA)  
 東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
 研究者番号：60292885

## 研究成果の概要：

豪雨による斜面災害の予兆を捉えて早期警報を発するために、計測項目を斜面の土壌水分量と傾斜変位に絞って、安価で簡便なモニタリング装置を開発した。電源供給や配線のコストと手間を省くために、完全にワイヤレス化し、データ通信は無線で行い、消費電力も削減を重ねて乾電池で1～3年間動作するものとし、かつ600mの通信距離をもつセンサーユニットを開発した。大型模型実験や実斜面での検証実験を行い、信頼線、耐久性を確認した。

## 交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	5,200,000	1,560,000	6,760,000
2008年度	6,300,000	1,890,000	6,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	11,500,000	3,450,000	14,950,000

## 研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・地盤工学

キーワード：斜面

## 1. 研究開始当初の背景

本研究では、小規模な斜面崩壊の大部分を占める表層崩壊を対象を絞り、安価で簡便な警報システムを開発した(図1)。斜面監視のコストを下げるにより、将来は、危険箇所周辺の住民が、自発的に費用を負担し、行政と協力して設置・運用できるようになることを念頭に置いた。

我が国では、都市への人口集中に伴って、都市域では急斜面上やその近辺が開発される一方で、多くの急傾斜地域の住居や施設が

取り残されてきた。加えて、近年は、都市部の集中豪雨や強大な台風も増加し、豪雨による斜面災害が毎年発生している。我が国で発生する斜面災害の大多数は、小規模かつ多発的な表層すべりである。このような小規模斜面全てに、擁壁やアンカーなどのハード対策を行うことは、費用対効果の点から困難である。より安価に防災効果を得る方法として、斜面をモニタリングして崩壊の予兆をとらえ、適切に警報を発することが考えられるが、既存の斜面監視・警報システムは高価で複雑である。現在使われている、斜面の変位や土

壤水分などを計測しデータを電送する装置は、1計測点あたり50万円前後かかる上、斜面防災や現地計測の専門家が設置し運用しなければ使えない。

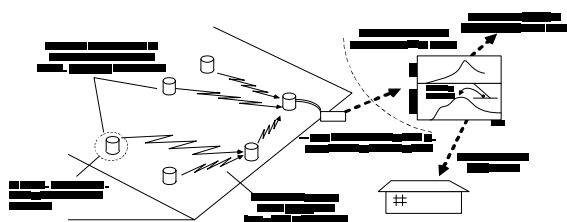


図1 複数のセンサーユニットを用いた遠隔地からの斜面監視システム

## 2. 研究の目的

本研究で開発する、斜面を監視するセンサーユニットは、従来より1桁近く安い5万円/1計測点(部品原価ベース)を目標にした。このセンサーユニットは、内蔵電池で長期間(1年~数年)駆動し、計測データは無線で送信するため、配線作業は一切必要なく、30分ほどの作業で斜面に差し込むだけで設置が完了する。また、このセンサーユニットのセンサーの種類を変えることで、斜面防災以外の様々な用途の野外計測にも、安価で手軽な汎用性の高い計測・データ収集システムを構築する手段を提供できる。このような安価な計測手段が実用化されれば、経済条件の厳しい発展途上国においても、防災やその他の環境計測などに有用なツールとなる。

既往の研究によると、表層滑りの直前には、特に法尻部の変位と飽和度の上昇(80%~90%)がみられる。そこで、装置を簡単にするために、計測項目は土壤水分量と傾斜変位に絞り、斜面法尻部を中心に設置する。変位の計測には、離れた不動点を基準にインバー線をひいて絶対変位を測る伸張計がよく使われるが、設置場所の確保やインバー線の保護など、作業に手間とコストがかかる。これに対して、傾斜変位はセンサーユニットを埋め込む1点に設置すれば測れるので、作業を大幅に簡略化できる。土壤水分については、斜面安定に力学的に寄与するのはサクションであり、セラミックカップと間隙水圧形を用いた計測がよく使われるが、カップの中を常に飽和させるなど、長期の計測には手間がかかるので、安価で扱いやすい土壤の誘電率を用いて体積含水比を測るタイプの土壤水分計を用いた。

## 3. 研究の方法

### (1) 計測ユニットの高機能化・実用版の試作

代表研究者らは、平成18年度までに、土壤水分計と傾斜計を用いて斜面の状態を計測し、無線でデータを回収する装置を試作し、大型模型実験で検証を行っていた。しかし、この試作品は、消費電力が大きいため電池で長期間駆動できず、無線の通信距離も数10mと、実斜面での適用には不十分な仕様だった。

本研究では、まず、装置に用いる部品や電子回路、制御プログラムを全面的に見直し、消費電力を徹底的に削減するとともに、通信距離600m(公称値)の無線モジュールや、安価、小型、低消費電力で精度の高いMEMS技術を用いた傾斜計(図2)、安価で取扱いの容易な土壤水分計(図3)を採用して、センサーユニットの高機能化を図った。

さらに、試作回路図からプリント基板を起こし、野外設置用のケース、治具なども設計して、工場で大規模生産が可能な実用版のセンサーユニットを完成させた。



図2 MEMS 2軸傾斜計(VTI社)



図3 土壤水分計(Decagon社)

### (2) 実現場での検証

(独)土木研究所、中国科学院、中央開発株式会社などの協力を得ながら、以下の実現場の現場で、検証実験を行った。

- ・神戸市六甲山系の砂防斜面  
千丈谷：以前に地すべりのあった住宅地付近の斜面で、現在も、砂防管理の対象になっている。
- ・芋川谷：1995年阪神淡路地震で崩壊した山腹の斜面で、現在、砂防工事が行われている。
- ・荒砥沢ダム崩壊斜面：  
2008年岩手・宮城内陸地震で大規模崩壊した、荒砥沢ダム周辺

地山の動態監視計測を行った。

- ・ 三峡ダム地すべり斜面：  
中国科学院の協力により、三峡ダムの湛水に伴い発生したと見られる周辺斜面の動態観測のために装置を設置した。

### (3)大型模型実験による検証

本研究で開発した装置は、コストと手間を省くために、計測項目を斜面の地表面での傾斜（回転変位）と土壌水分量に絞った。そのため、この2つの項目から斜面のどのような状態が把握できて、斜面崩壊の前兆としてどのようなシグナルが見られるのか、理解しておく必要がある。

すでに18年にも同様の試験を行っていたが、本研究においても、(独)土木研究所の協力を得て、より大型の模型を用いた検証実験を行った。

## 4. 研究成果

### (1) 計測ユニットの高機能化・実用版の試作

センサーユニットの設計に工夫を重ねた結果、10分に1回の頻度でデータを取得・送信し、平均消費電流100 $\mu$ A(単3アルカリ電池4本で3年程度駆動)を実現した(図4)。

また、電源供給のオプションとして、小型の太陽電池を使う方法について検討した。センサーの設置場所が、陽の当たらない森林の中であることが多いことから、森林内の照度レベルの測定や、太陽電池の低照度での発電特性について、詳細なデータを集めた。その結果、森林内の照度は、日なたの1/100程度しかないが、センサーユニットが低消費電力であるため、100cm<sup>2</sup>程度の太陽電池パネルでも、継続的に駆動できることが分かった。



図4 センサーユニット(左)と太陽電池による電源供給(右)

### (2) 実現場での検証 ・ 神戸市六甲山系の砂防斜面

千丈谷、苧川谷の2つの急斜面(傾斜角40~50度)にセンサーユニットを設置した(図5)。現地入りしてから、現地の状況を把握し、設置箇所を決定するには半日程度かかるが、設置作業そのものは、斜面に杭を立ててユニットをネジ止めするだけで約30分で終了し、機器がワイヤレス化したことのリットが確認できた(図6)。

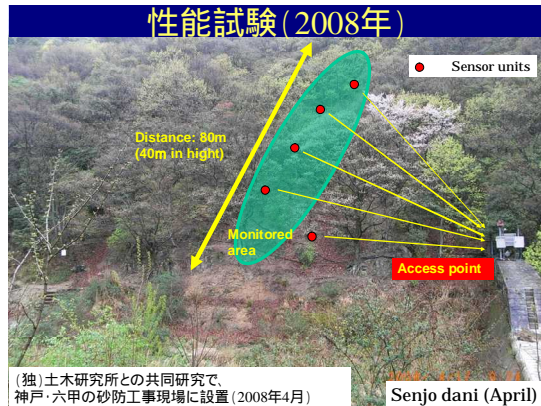


図5 六甲・千丈谷斜面のセンサー設置位置



図6 センサーユニットの取り付け作業

図7は、設置した機器からインターネット回線を介して回収した傾斜変位と土壌水分量の推移である。傾斜変位は、途中でセンサーのメンテナンスのために値が変動しているのを除いて、異常な挙動は見られないが、常時、最大15mm/m程度の範囲で変動が見られる。一方、土壌水分量のデータは、計測場所によって常時の水分量に差異があり、一律にある水分量を超えたら災害のリスクがある、と規定することは困難である。しかし、降雨のイベントに対しては敏感に反応しており、現地の降水状況を把握して、リスクの判断基準の一つにすることは可能である。

図8(a)(b)は、比較のために現地に設置した気温と従来型1軸傾斜計で、2008年5月1日からの一週間に観測されたデータの経時

図を示す。従来型傾斜計は一週間の間におよそ 0.06 度の変動が生じた。傾斜計値の変化は、気温変化曲線と一致しており、気温変化による影響だと考えられる。図 9 (c)(d)は、今回開発した崩壊検知センサーに組込んだ MEMS 傾斜計の X 軸と Y 軸の観測結果の経時図を示す。X 軸と Y 軸値は一週間の間におよそ 0.25 度の変動幅があった。これは図 9 (a)(e)に示すように気温・風速の変化などの外部力による影響だと思われる。

このように傾斜計のデータには温度などの影響によるノイズが含まれており、この原因を追及してより精度の高い計測を実現することが、今後の課題の一つと考えている。

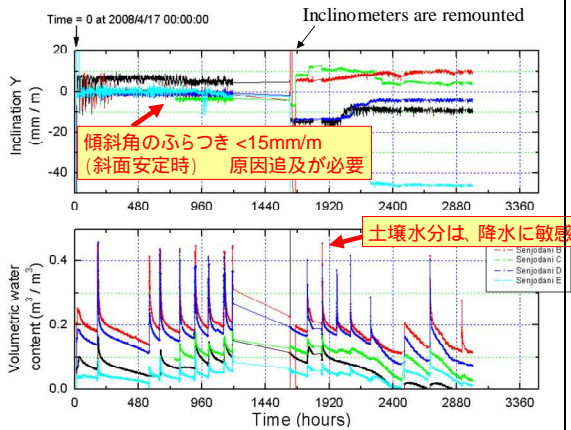


図 7 千丈谷の傾斜変位(上)と土壌水分(下)

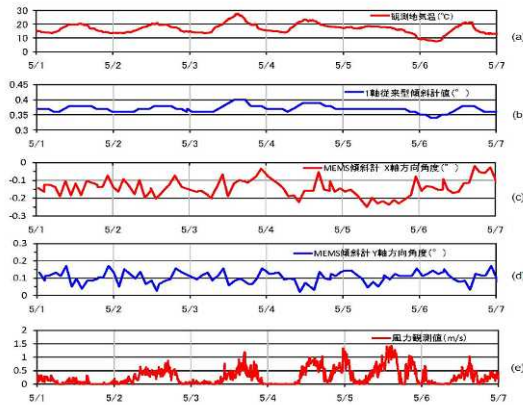


図 8 1 週間の計測データの詳細

・荒砥沢ダム崩壊斜面：

2008 年秋に、崩壊斜面の中で特に監視が必要と思われた 4 箇所に、センサーユニットを設置した(図 9)。

本現場では、監視箇所と、データを電話回線でインターネットに送れるダム管理事務所との間が直線距離で約 1.3km 離れており、無線ユニットの通信距離(公称値 600m)を超えていたため、ダム周辺道路に沿って 3 箇所

のデータ転送のためのユニットを開発して設置することで、データをリレーした。しかし一方で、センサーユニットからの無線データが、1.3km 離れた受信機に直接届いていることも判明した。これは、センサーユニットが比較的高度の高い位置に設置され、また震災のためにダムの水位が下げられていたために、管理事務所の受信機までの間に電波を妨げるものがなく、無線通信に極めて適した条件になっていたためと思われる。

設置後は、データを回収できたが、その後冬期には積雪に閉ざされ、20 年度中はデータを回収していない。

また、センサーユニットの応用として、斜面にハンドオーガーで穴を掘り、複数の傾斜計と土壌水分計を埋めた多段式傾斜計を構成して、斜面内部の変位を測る方法も試みた(図 10)。

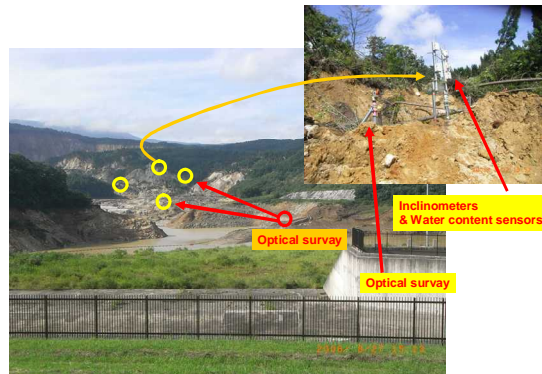


図 9 荒砥沢ダム周辺斜面の機器設置状況

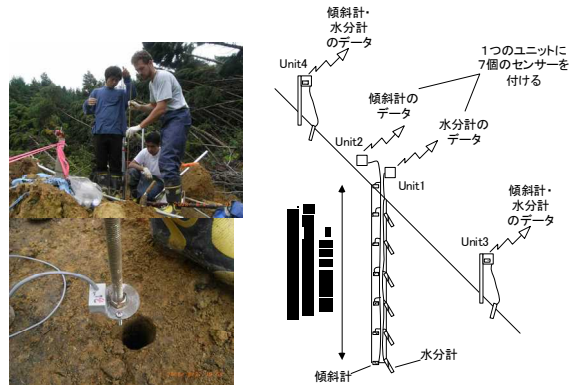


図 10 多段式傾斜計の構成、設置状況

・三峡ダム地すべり斜面：

海外の試験運用は初めてであり、四川省成都にある中国科学院の山地災害と環境研究所の協力を得て、センサーユニットを設置した。海外かつ山奥のため、日本の携帯電話機器もインターネット回線も使えず、また PC など高価な機器を現地においておくのも盗難の危険があるとのことで、現在はセンサー

ユニットから届いたデータを、受信機のメモリに保存して、定期的に現地研究者が回収する方式にしている。

今回、同研究所との協力体制を構築できたので、今後は、本研究成果の海外展開を図りたい。

### (3) 大型模型実験による検証

堤防模型（山砂、締りめ度 79.9%、初期含水比  $w = 19.1\%$ ）の人工降雨実験で、法面の4箇所に計測ユニットを設置した(図11)。豪雨時の河川堤防を模擬するため、先に背面側に湛水してから、毎時 15mm/h の均一な雨を降らせたところ、降雨開始から約1時間後、先に法尻付近で、続いて斜面上部で、進行的に崩壊した。この間の傾斜計の計測データ（傾斜角にユニットの埋め込み深さ 100mm を乗じて、地表面とユニット下端との水平相対変位量として表示）を図12に示す。法尻付近の崩壊の30分以上前から、最も法尻に近いユニット1の値が変化した。またユニット2,4でも周囲の崩壊とともに変化した。これらは、伸縮計などで変位の絶対値を測らなくても、斜面上の傾斜変位を監視することで、斜面崩壊前の変位の兆候を捉えられる可能性を示している。

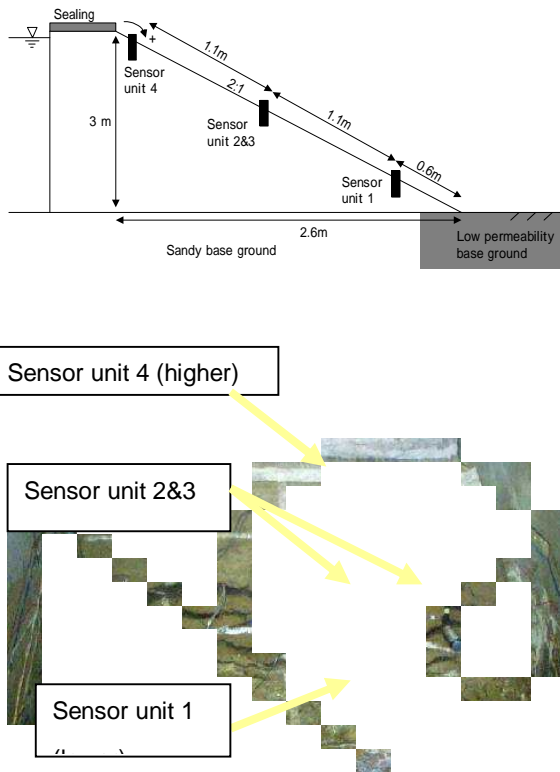


図11 大型斜面模型実験の概要

一方、ユニット3では周囲の兆候を捉えることなく突然転倒した。これは、より低い部分が先に崩壊して不安定になっていたためと考えられ、周囲の崩壊の仕方によっては、前兆の傾斜変位を生じずに崩壊する可能性があることを示している。そのため、1つの斜面に対し複数箇所にユニットを設置することが望ましい。

土壌水分量は、降水開始から崩壊までの間に上昇したが、途中で値が急激に下がり、崩壊時の飽和度を正確に測れなかった(図13)。これはユニットの周囲にクラックが生じ、水分計と周囲の土の間に空隙ができたためだろう。その後に飽和度が見かけ上 100%を超えるのは、その隙間に水が入ったためだろう。

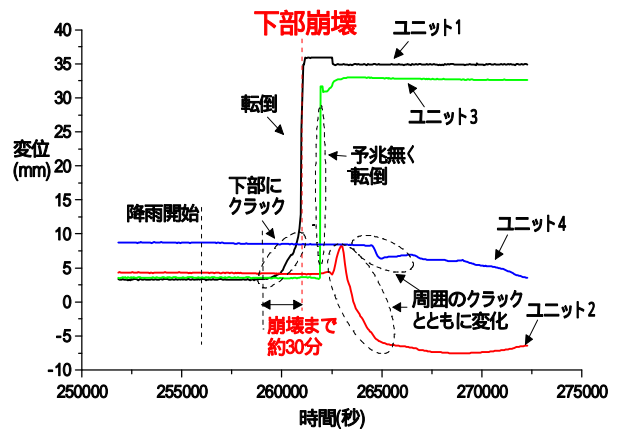


図12 模型斜面の傾斜変位

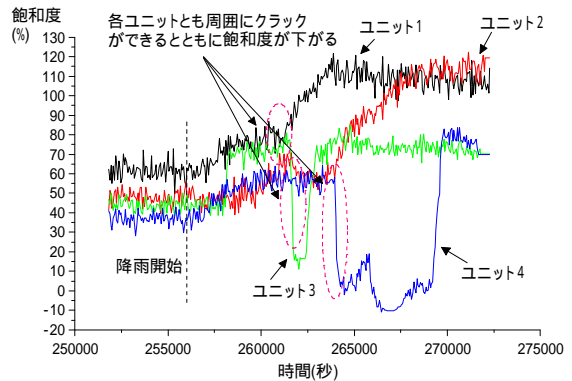


図13 模型斜面の土壌水分量

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 0件)

[学会発表](計 6件)

Uchimura, T., Towhata, I., Wang., L. and Seko, I. (2009): Development of Low-cost Early Warning System of Slope Instability for Civilian Use, Proc. of ISSMGE, Alexandria (to appear).(2009.10.05 アレキサンドリア)

Uchimura, T., Towhata, I., Wang., L. and Seko, I. (2008): Simple and Low-Cost Wireless Monitoring Units for Slope Failure, Proc. of the First World Landslide Forum, International Consortium on Landslides (ICL), Tokyo, pp. 611-614. (2008.11.19 東京)

Carlos Jose Bacca Bautista, Taro Uchimura, Jou Fukuda and Wang Lin (2008): Influence of Rainfall in the Behavior of Residual Soils, Proc. of the First World Landslide Forum, International Consortium on Landslides (ICL), Tokyo, Poster Session, pp. 13-16. (2008.11.19 東京)

Uchimura, T., Towhata, I., Wang., L. and Seko, I. (2008): Simple and Low-Cost Early Warning System for Slope Failure due to Rainfall and Erosion, Proc. of the 4th International Conference on Scour and Erosion (ISCE-4), pp.661-664 (CD-ROM e\_7.pdf). (2008.10.05 東京)

Uchimura, T., Towhata, I., Wang., L. and Seko, I. (2008): Simple and Low-Cost Wireless Monitoring Units for Slope Failure, Japan-Egypt Joint Symposium "New Horizons in Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Geotechnical Engineering Research Laboratory, pp.135-140. (2008.9.15 タンタ)

瀬古一郎、王 林、内村太郎、東畑郁生、福田穰(2007): 斜面崩壊を対象とした監視ネットワークの構築とその危険予測について、斜面災害における予知と対策技術の最前線に関するシンポジウム, pp.251-256. (2007.12.18 福岡)

[産業財産権]  
出願状況(計 2件)

名称: 斜面監視装置および斜面監視システム  
発明者: 王林、瀬古一郎、内村太郎  
権利者: 中央開発株式会社  
種類: 特許  
番号: 特願 2008-096039  
出願年月日: 平成 20 年 4 月 2 日  
国内外の別: 国内

名称: 斜面の監視システム  
発明者: 王林、瀬古一郎、西江俊作、内村太郎  
権利者: 中央開発株式会社  
種類: 特許  
番号: 特願 2009-041040  
出願年月日: 平成 21 年 2 月 24 日  
国内外の別: 国内

取得状況(計 0件)

6. 研究組織  
(1)研究代表者

内村 太郎 (TARO UCHIMURA)  
東京大学・大学院工学系研究科・准教授  
研究者番号: 60292885

(2)研究分担者

なし

(3)連携研究者

なし

(4)研究協力者

東畑 郁生 (IKUO TOWHATA)  
東京大学・大学院工学系研究科・教授  
研究者番号: 20155500

山田 卓 (SUGURU YAMADA)  
東京大学・大学院工学系研究科・助教  
研究者番号: 70451789

王 林 (WANG LIN)  
中央開発株式会社・課長  
研究者番号: なし

瀬古 一郎 (ICHIRO SEKO)  
中央開発株式会社・代表取締役  
研究者番号: なし