

## 論文の内容の要旨

論文題目：斜面災害防止のための早期警報システムの開発と運用

氏名：瀬古 一郎

### 1. 研究開発の動機と内容

土砂災害は激甚化しており、平成 24 年 7 月九州北部豪雨、平成 25 年 10 月伊豆大島・土砂災害、今年 8 月広島市豪雨災害など、毎年大規模な被害が発生している。土砂災害危険箇所は全国に約 21 万箇所あり整備率は 2 割程度である。数多くの危険斜面にハード対策をするには予算的にも時間的にも困難が伴うため、防災・減災のためのモニタリングを有効に進めていく必要がある。センサーや警報システムの開発にあたり次のような点に着目した。

- ・安価で簡便に設置・移動でき僻地でも維持管理を容易にでき、明確な監視基準をもつこと
- ・斜面毎に前兆現象に通じる斜面内部の変状を観測できること
- ・亀裂や滑落崖の有無に関わらず地質調査や法面の状況に応じて設置できること
- ・住民へリアルタイムに直接通報でき迅速な避難に資すること

土砂災害の実情、各種センサーを用いた既往研究、マイクロエレクトロニクス技術やインターネットを含む通信技術を活用し、①双方向通信による斜面観測・警報システムの開発、②斜面崩壊検知センサーの開発、③小型孔内傾斜計の開発を行った。また、それらが効果的に機能するように、④斜面災害リスクのリアルタイム評価手法の検討を行った。

### 2. 研究開発の内容

#### 2-1) 双方向無線通信による斜面観測・警報システムの開発

システムは、データロガー（親機）、斜面崩壊検知センサー（子機）、センサーノード（孫機）からなり、ホストサーバー～親機間は携帯モバイル網、親機～子機間は周波数 429.250～429.7375MHz 帯の特定省電力無線（伝送距離最大 600m）、子機～孫機間は 2.4GHz 帯短距離無線（同 50m）を用いてデータ伝送する。データは、時刻、センサーID、2 軸傾斜計状態信号（3 軸も可能）、水分計計測値、バッテリー電圧、センサーユニット温度である。ホストサーバーでデータを収集・分析・判定し、インターネットを通じて警報メールを出すことが

できる。管理者側からデータ転送タイミングなどの命令を親機を介して子機と孫機へ通知することが可能である。無線通信に関しては、最長通信転送可能距離試験、樹木等影響試験を行って動作を確認した。センサーノードについては現地に実際に設置し動作確認した。

## 2-2) 斜面崩壊感知センサーの開発

MEMS 傾斜センサーと土壌水分センサーの計測データを 10 分毎にデータロガーへ伝送し、内蔵バッテリーで 1 年間動作する。300 g という小型軽量で防水の筐体に入っており、杭を斜面へ打ち込んで簡単に取り付けることができる。2 軸傾斜センサーの場合、検知精度



斜面崩壊検知センサー



設置状況

0.0025 度、土壌水分計は精度  $0.002\text{m}^3/\text{m}^3$  である。試作品について -80~80 度の冷熱衝撃試験、消費電流試験を行い、神戸市六甲砂防斜面において長期動作確認試験を行った。

## 2-3) 小型孔内傾斜計の開発

斜面崩壊検知センサーのユニットを直径 25mm のステンレスパイプに仕込み、連続したパイプ全体を斜面地盤に打ち込んで地中に設置し、深度方向に傾斜変位を観測する。地磁気計を内蔵し斜面最大傾斜方向に対して傾斜角を補正できる。試作機について消費電力試験、傾斜試験を行い、神戸市六甲砂防斜面における 1 年 2 ヶ月間の実証試験で通信状態や傾斜変位の季節的変動を確認した。1 ユニット設置に要する時間は約 30 分ほどであった。

## 3. 実証実験

### 3-1) 中国・都江堰市における斜面崩壊実験による検証

2011 年 6 月に中国・四川省都江堰市・虹口・塔子坪知久の地すべり斜面において、2 日間にわたって人工降雨実験を行った。斜面崩壊検知センサー 3 個、小型孔内傾斜計 2 個 (0.5 m×2 段)、伸縮計 2 本、間隙水圧計、体積含水率計などを設置し、降雨と崩壊の関係、センサー間の比較を行った。降雨開始後、斜面下部の斜面崩壊検知センサー、小型孔内傾斜計に変化がみられ、それらを地表面変位に換算して伸縮計と比較すると概ね 1 : 1 に変位するこ

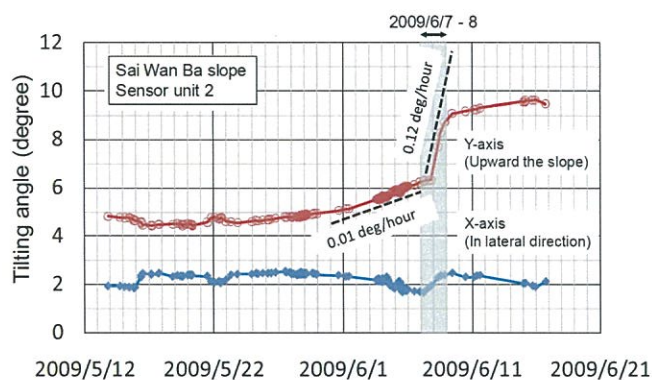
とを確認した。また、傾斜角速度変位 0.15~0.4 度/時が 1~5 時間継続した後に急激に崩壊することがわかった。

### 3-2) 中国・都江堰市における地すべりへの適用

2010 年、中国都江堰市・塔子坪地区の地すべり斜面の調査ボーリング孔跡（深さ 12m）に小型孔内傾斜計（1m×12 段）を設置して約 1ヶ月間にわたり観測した。その結果、斜面内部の長期的変状を観測できることを確認するとともに、傾斜角データの日変動（日温度変化）やノイズ、および、筐体の防水に課題があることがわかった。

### 3-3) 中国・三峡ダム湛水区域における地すべりへの適用

2008 年から約 2 年間にわたって中国・重慶市万州地区の三峡ダム湖岸の地すべりを観測した。2009 年 6 月の降雨時に土壌水分が上昇し、傾斜角変位速度が 0.01 から 0.12 度/時まで増加し、その後に傾斜変位は収まったが、この間に崩壊土塊が 10m 移動したことを確認した。すなわち、傾斜角変位速度で 0.01 度/時を越えると要注意であり、0.1 度/時を越えると危険な状態と判断されることがわかった。



地すべり体の傾斜角変化と経過時間の関係

### 3-4) 県道脇の斜面崩壊における二次災害防止への適用

2009 年 7 月、福岡県冷水峠で道路脇斜面が崩壊した。このため、斜面崩壊検知センサー 3 台を設置して斜面監視と復旧作業時の工事および道路交通の安全を確保した。10 月に入ると降雨によって浸食崩壊が発生しセンサーが横倒しとなったが、その直前の 1 時間に 0.16 度/時の傾斜変位を観測し、斜面の異常を検知することを確認できた。

### 3-5) 国道の斜面崩壊における二次災害防止への適用

2011 年 7 月の連続降雨で福岡県田川市の道路脇斜面が崩壊した。復旧工事の安全確保のため、斜面崩壊検知センサー、孔内傾斜計、伸縮計、Web カメラなどを設置して監視した。設置後、時間雨量 15mm 程度の降雨によって、斜面変状が傾斜角変位速度 0.006~0.079 度/時で 27~10 時間程度続くことを確認した。斜面変状が斜面末端部から徐々に上部へ伝達さ

れるような滑動メカニズムの場合、斜面崩壊検知センサーを末端部に設置すれば、亀裂などのある上端部に設置する伸縮計よりも一早く崩壊の予兆を察知できることがわかった。

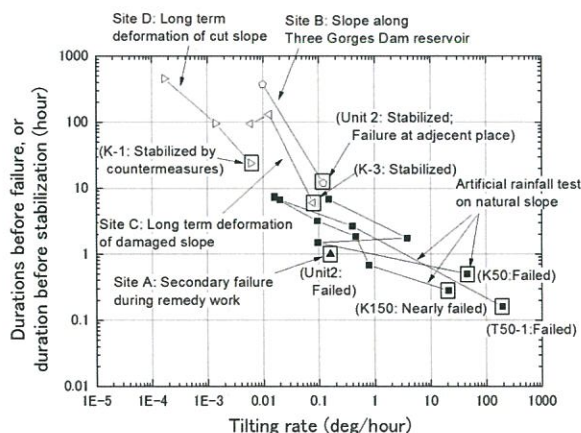
### 3-6) 切土工事における安全確保への適用

2010年10月、山形県内の高規格道路建設の切土掘削工事で3ヶ所ある斜面の最頂部に各1個の斜面崩壊検知センサーを設置し動態観測した。そのうち1つの斜面で計画高近くまで掘削した段階で、傾斜角変位が0.00017度/時で2週間以上続き、法肩にクラックが発生した。その後、変位が0.006度/時まで増加し押さえ盛土して変位が止まったことを確認した。現場の地質は斜面に斜行する流れ盤構造であり、地盤状態が不良や不明確な場合においても工事の安全確保のための斜面モニタリングが有用であることが認められた。

## 4. 斜面災害リスクのリアルタイム評価手法の検討

実証試験結果および既往文献に基づいて、傾斜角変位速度から斜面の危険度を判定するため、傾斜角変位速度と崩壊（安定）するまでの残余時間を整理した。その結果、傾斜角変位速度0.1度/時を超えると崩壊まで約10時間以内と見積もられた。以上を通じて傾斜変位に関し管理基準案を提示した。

センサーを設置する位置については斜面の地形状況に応じて、平面的には斜面崩壊検知センサーを密に設置し、深度的には小型孔内傾斜計を配置することが有効である。工事の場合は工事進捗に応じてセンサーを適切に移動することが必要となる。



傾斜角変位速度と崩壊（安定）までの残余時間

## 5. 結論と今後の課題

M E M S 傾斜センサー、土壤水分センサーを組み込み、安価（5万円以内）でかつ簡便に斜面に設置でき、斜面の平面的および深度方向の変位をリアルタイムに観測し、インターネットを介してホストサーバーから直接関係者や住民へ通報することができるシステムを開発した。斜面の変位と傾斜に関するデータの収集と解析、機器の改良などを行って、より精度よく、より安価に崩壊の予兆を把握できるシステム構築を目指すことが課題である。