

土砂災害の2次被害を防止するための 安価で迅速に設置できる監視装置の開発

内村 太郎¹・山田 卓¹

¹東京大学 大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷7-3-1)

斜面災害時に、低コストかつ迅速に監視体制を敷き、2次災害を防止することで早期の復旧とサービス再開に寄与するシステムの一環として、直径25mmのパイプに機器を組み込んで、迅速な設置を可能にした小型孔内傾斜計を開発し、国内外の実斜面で実証した。また、中国四川省の地すべり斜面で、人工降雨による斜面崩壊実験を行い、斜面崩壊の前に得られる計測データを観察した。その他の現場での斜面崩壊前の計測データも併せて、データの異常値の検出基準を考察した。また、これまでに開発してきた中長距離無線を用いたセンサーネットワークに接続し、低コストで多数のセンサーを密に配置できる短距離無線を用いたセンサーノードを試作した。

キーワード 斜面防災、2次災害、センサーネットワーク、モニタリング、早期警報

1. 研究の概要

斜面や崖、法面が、豪雨・地震などにより崩壊した場合、その復旧作業では、2次災害を防ぎ安全を確保しなければならない。また、応急的な復旧工事によって、周辺の道路などのインフラサービスを仮再開した場合でも、同じ箇所が再び崩壊して被害を拡大した事例もあり、山岳道路などでは地域間の交通を担う重要な道路が長期にわたって通行止めとなることもある。また、地盤は不均質でどこから破壊が始まるかわからないので、多点計測が重要である。そのために、安価なセンサーを開発し、現場に面的に配置することも必要である。

本研究では、低コストかつ迅速に設置できる、災害現場のモニタリングシステムを開発した。異常を監視し、リアルタイムでリスク情報を発信することで、2次災害を抑止し、早期の復旧、インフラサービスの再開に寄与する。

本研究グループでは、2005年から、斜面災害の予兆をリアルタイムで監視するための、安価で簡便なモニタリングシステムの開発に取り組み、既に実用版の設計と試作を終えて、国内外の斜面災害地域で試験運用を行ってきた¹⁾²⁾。図1のように、斜面に、センサーを備えた子機を配置し、無線通信を使って親機へデータを集めて記録し、異常を検知する。目的に応じて、親機から携帯電話でデータを送信し、インターネットを介して遠隔地から現地を監視することもできる。

図2は、標準的な子機の構成を模式化したものである。

斜面に、鋼杭を深さ50cm～1m程度挿入、または安定な基盤層が浅い場合は鋼杭の下端をそこに固定して、地表面の変位を傾斜角として検知する。

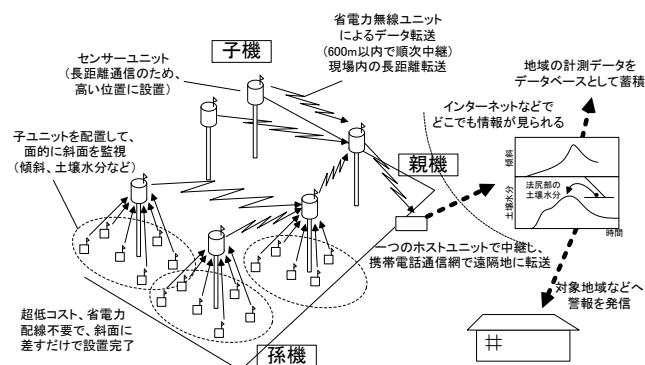
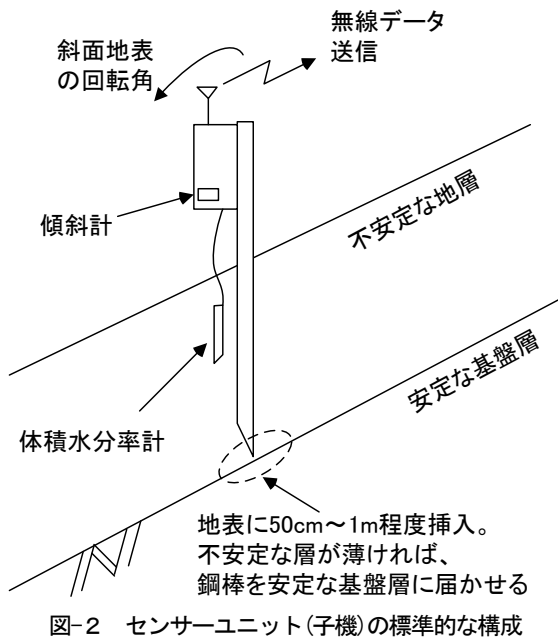


図-1 斜面の無線モニタリング（左下：子機、右下：親機）

最近では小型、省電力、高精度(分解能0.003度)のMEMS技術を使った傾斜センサーが流通し、装置の小型化と長期間の電池駆動を実現している。省電力のための回路と制御ソフトの工夫を重ね、10分に1回の計測とデータ送信を乾電池で1年以上(最大3年程度)続けられるようになった。また、体積水分率計は、土の誘電率を測定する安価なものを採用し、深さ20~30cm程度に埋設する。これに対して、本研究課題では、

- ① 直径25mmのパイプに機器を組み込んで、迅速な設置を可能にした小型孔内傾斜計、
- ② 短距離無線を用いた、安価、小型のセンサーノード(図1の「孫機」)

をこれまでのシステムに組み込める形で新たに開発した。



2. 小型孔内傾斜計

今回開発した小型孔内傾斜計は、直径25mmのパイプの内部にセンサーユニットを仕込み、パイプごと斜面地盤に打ち込んで設置できるものである(図3)。センサーユニットには、小型の傾斜計が組み込まれており、これを斜面地盤内に鉛直方向に等間隔で配置することで、2次災害の前兆となる斜面内部の微少な変位挙動を検知する。パイプの直径は、簡易動的コーン貫入試験で用いられるコーンの直径と同じなので、あらかじめセンサーが組み込まれたパイプを人力で打ち込むだけで、1~2名の作業員で短時間で設置が完了する(図4)。

各センサーユニットは、それぞれが独立したマイコン機器であり、上下に隣接するユニットと1本のケーブル

で数珠つなぎになっている。各ユニットが、下位のユニットの計測データを、上位ユニットに順次転送することで、地表の子機にデータが回収され、429MHzの特定小電力無線(通信可能距離が最大600m)で親機へ送信する。この仕組みにより、観測孔が深くユニットが多数つながっていても、パイプ内のケーブルは1本ですむため、設置の作業がたやすくなる。また、ユニットが何段つながっているかも自動的に認識するので、現地ですぐ打ち込めた深さに応じて、ユニットを適宜継ぎ足していけばよい。

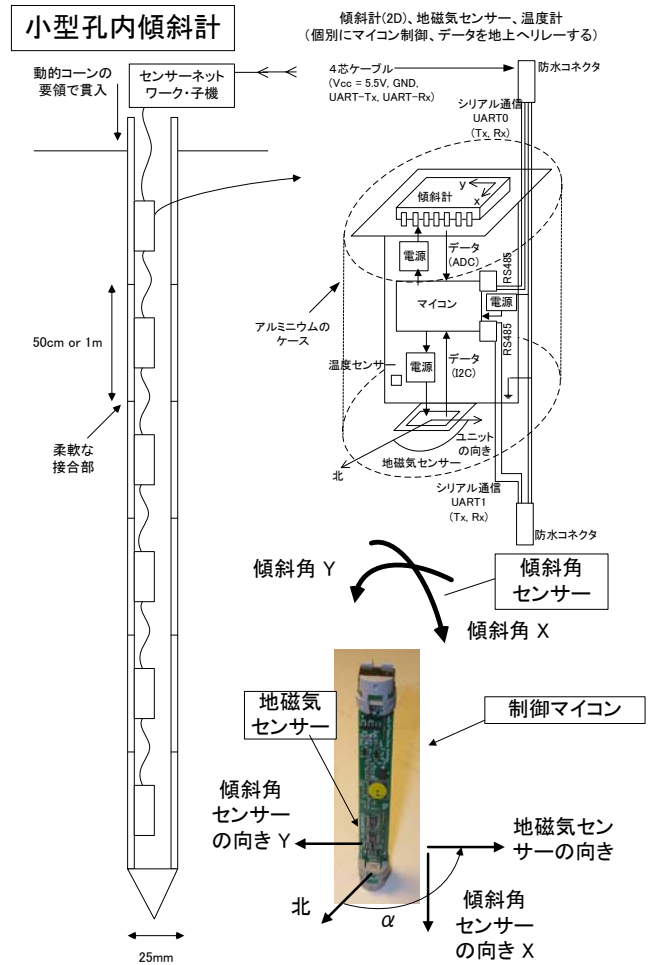


図-4 機器の設置作業

丸いパイプを打ち込む際に、パイプが回転することがある。内蔵された傾斜計が斜面に対してどの角度を向いているか分からなければ、正しい傾斜角が得られない。パイプの方向を正確に測定するため、センサーユニットには地磁気センサーも組み込んである(図3)。これにより、ユニットの向きを検知して傾斜計のデータを補正する。地磁気センサーが、地中や金属ロッドの中でも正しく方位を測れることを確認するため、センサーをPVC、アルミ、スチール、ステンレスのパイプに組み込んで、ローム層の平地で地下1mに埋めて、地磁気のN極方向に対して360度回転しながら、地磁気センサーの出力値と比較した(図5)。センサーを使用する前に、センサーの個体差を測定するキャリブレーションが必要だが、その後は、地中で、PVC、アルミ、ステンレスの中であっても、誤差3度以内で正しい方位角が検知できた。ただし、強磁性体の鋼鉄のパイプの中では、パイプの持つ磁気の影響を強く受ける。地中に埋設管や矢板などの鋼鉄が埋まっていたり、地盤が砂鉄を多く含んだりする場合は、正しく測れない可能性がある。今回は、貫入時に必要な強度と、防さびなどの耐久性も考えて、ステンレスのロッドを用いることにした。

図3に示すように、地磁気センサーの向きを北から反時計回りに α とすると、傾斜角センサーは、X方向に $\alpha - \pi/2$ 、Y方向に $\alpha + \pi$ となる。それぞれの方向の傾斜角センサーの出力をX、Yとし、斜面の方向を北から反時計回りに β とすると、斜面方向の傾斜角 ζ は、次式で計算できる。

$$\zeta = X \sin(\alpha - \beta) - Y \cos(\alpha - \beta) \quad (1)$$

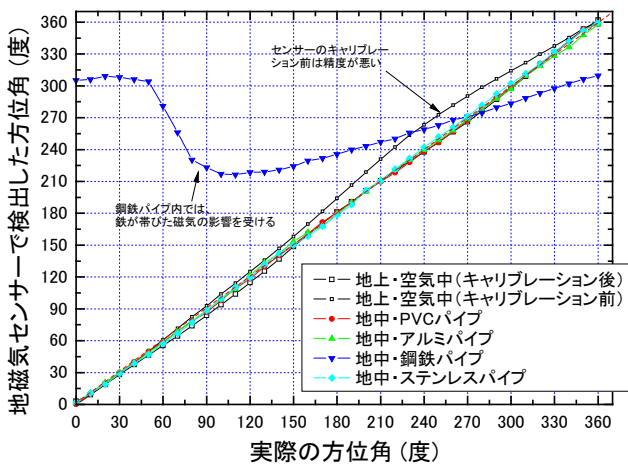


図-5 地磁気センサーの地中性能試験

今回開発した小型孔内傾斜計の試作機を、中国四川省都江堰市の塔子坪地区の地すべり斜面(図6)に設置し、観測を試みた。この斜面は、2008年に四川省で発生したブン川地震で損傷した後、大雨が降るたびに少しずつ変位するようになった。表層は深さ30m程度まで風化

した安山岩で、傾斜が約30度、斜面の高さが約250mである。図6に見えるように、斜面の下には集落が広がっており、災害の危険を抱えているため、継続的な監視が求められていた。

現地管理者が地盤調査を行ったボーリング孔が放置されていたので、小型孔内傾斜計を地面に打ち込むのではなく、この穴の中に挿入して埋め戻すことにした。そのため、通常の打ち込む方法では3~5m程度の深さにしか設置できないのに対して、この現場ではボーリング孔が閉塞していた深さ12m(ロッド1m×12段)まで設置することができた。各ロッドの接続は、図7のように、高圧ホースの短片を用いて、地盤の変位に追従してこの部分が折れ曲がるようにした。12段分のロッドの重量は30kgを超えるが、高圧ホースの引張強度は、この荷重を十分支えられる。設置後、ボーリング孔とロッドの間の隙間を砂で埋めて、地盤の変位がロッドに伝わる状態にした。

各センサーユニットをつなぐケーブルは、設置作業時に現地で順次接続し、防水テープで密封した。これらの一連の作業で、12段の小型孔内傾斜計を設置するのに、1時間半程度かかった。最後に、無線機能を備えた子機ユニットを立てて接続して設置を完了した(図8)。

計測は、30分に1回の頻度で行った。各センサーユニットの地磁気センサーによる方位角を元に、傾斜計のX、Y方向の傾斜角データを補正し、斜面方向の傾斜角を求めると、図9のようになった。ただし、センサーユニットの番号は、上位のロッド(長さ1m)から順に1~12となっている。



図-6 四川省都江堰市塔子坪の地すべり斜面



図-7 ロッド同士の接続

データには、1日周期の変動や、不規則なノイズが含まれている。不規則なノイズの大きさは、傾斜角の分解能(0.005度程度)の2~3倍であり、センサーの性能は十分引き出せている。また、12段あるユニットのうち、1, 2, 3, 8, 10段目は、正常なデータがとれなかった。これは、機器の防水の問題と思われる。このように、いくつかの課題があるが、長期的な傾斜変位のトレンドは読み取ることができる。



図-8 小型孔内傾斜計の設置状況

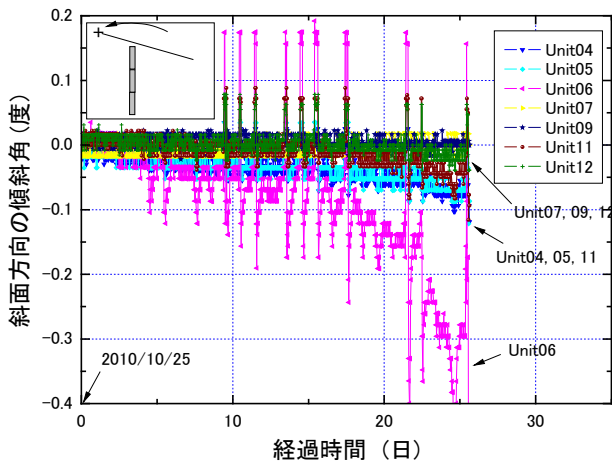


図-9 斜面方向の傾斜角

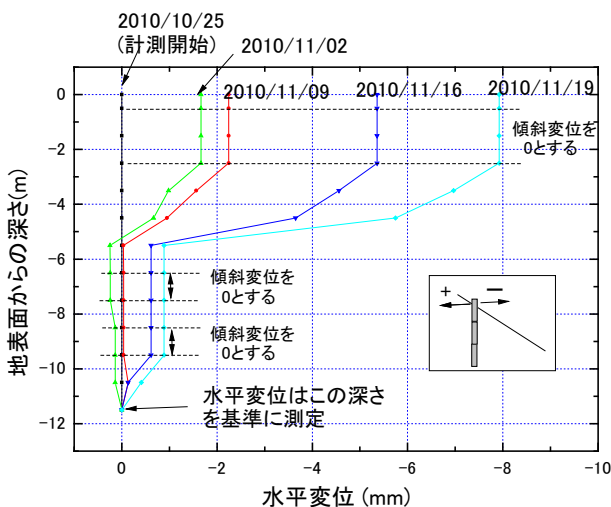


図-10 斜面方向の地盤内水平変位

傾斜角を、最下位のユニット12(深さ12m)を基準として順次積分することで、地盤内の斜面方向の水平変位を、日数の経過とともに表示すると、図10のようになる。正常なデータのとれなかったユニットは、傾斜角を0としたので、変位を過小評価している可能性があるが、計測開始から25日で8mm程度の変位が観測されている。

3. 短距離無線を用いたセンサーノード

本研究課題では、第2の目標として、短距離無線を用いた、安価、小型のセンサーノード(図1の「孫機」に相当)を、これまで開発してきた斜面監視システムに組み込める形で新たに開発した。現場で重点的に監視したい場所に、多数のセンサーノード「孫機」を設置する。孫機および子機に、IEEE802規格(2.4GHz帯、ZigBeeなどに類する規格)の短距離無線モジュールを搭載する。子機と親機は、本研究グループがこれまでに開発してきたモニタリング機器であり、429MHzの特定省電力無線を用いて、現場地域に1箇所設置する親機にすべてのデータを集め、SDメモリに記録し、必要に応じて携帯電話回線を使ってインターネットを介してサーバーへ送信する。これまで開発してきた親機、子機は、比較的長距離の通信が可能のため、広域にわたる対象斜面をカバーすることができるが、無線モジュールのコストがかかる。一方、短距離無線モジュールは安価であるが、通信距離が短く、野外計測で、離れた箇所に点在する対象斜面をカバーするには適さない。上記の構成によって、両者の利点を組み合わせることで、効率的な斜面監視を実現しようとするものである。

孫機の短距離無線モジュールは、最大50m程度の通信距離を持つが、孫機には中継機能があり、IEEE805の規格に従って自動的に周辺のモジュールを探査し、データの伝送経路を構築する。従って、子機から50m以上離れた範囲にも孫機を設置することができ、監視システムを構築した跡からでも、必要に応じて任意に新しい孫機を追加することもできる。

本研究課題では、この孫機と、子機に組み込まれる短距離無線モジュールを開発し、動作の確認を行った。製作した無線モジュールは、佐鳥電機(株)製のIEEE802モジュールを採用し、使用目的に適したネットワーク管理、データ転送のソフトウェアを開発した。また無線モジュールを介してデータを送受信し、センサーからのデータ取得、電源管理などを行う孫機のマイコン基板、およびそのための制御プログラムを開発した(図11)。

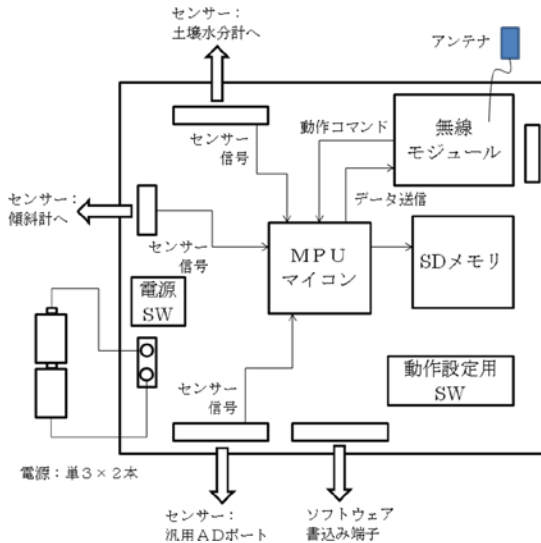
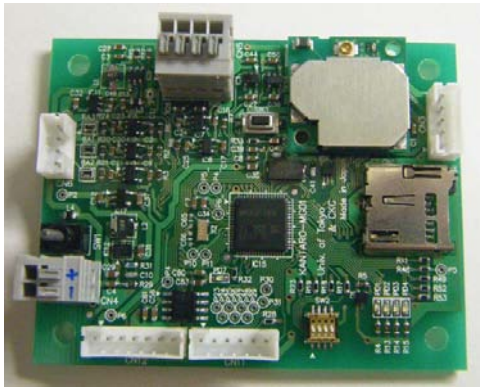


図-1 1 製作した孫機の基板とシステム構成 (写真右上の灰色の板が無線モジュール)

4. 斜面の人工崩壊実験と計測データの検討

2011年6月29日および30日の2日間にわたり、中国四川省都江堰市の虹口・塔子坪地区の地すべり斜面（上記の試験計測斜面の下部）で、人工降雨による斜面の崩壊実験を行った（図1 2）。小型孔内傾斜計を含む各種のセンサーを設置してその挙動を計測し、性能を確認するとともに、斜面崩壊前のデータを取得した。

実験箇所は、周囲より局所的に、幅3 m、高さ1.5 m程度高く盛り上がった尾根部分で、傾斜角は約18度である。風化安山岩斜面の崩落土が緩く堆積した場所で、細粒分を含む砂礫土である。ただし、崩壊の過程で、内部には最大50 cm程度の巨礫が含まれることが分かった。斜面上の幅1.5 m、長さ4 mの範囲に、人工降雨装置を設置し、200~300mm/hの強雨を断続的に与えた（図1 3）。また、降雨範囲の下端部を、深さ1.4 m傾斜角約40度で掘削して、斜面の不安定化を図った。

小型孔内傾斜計は、斜面の下端から50 cm (K50)、150 cm (K150)の位置に設置した。0.5 m x 2 段の構成とし、さらに最下端に20 cmのダミーロッドを接続して、これを不動点と仮定して深さ0.5 mおよび地表の水平変位を測定する構成にした。ロッド間の接続方法は、互いのロッドの内側に薄肉アルミ管を入れてリベットで固定することで、薄肉アルミ管を介して上下がつながる構成とした（図1 4）。薄肉アルミ管は、ある程度の曲げ力を加えると変形するので、ここがヒンジとなり、ロッドは剛体として回転する。また、薄肉アルミ管がロッドの内側にあるため、ハンマーで直接打ち込むことが可能である。

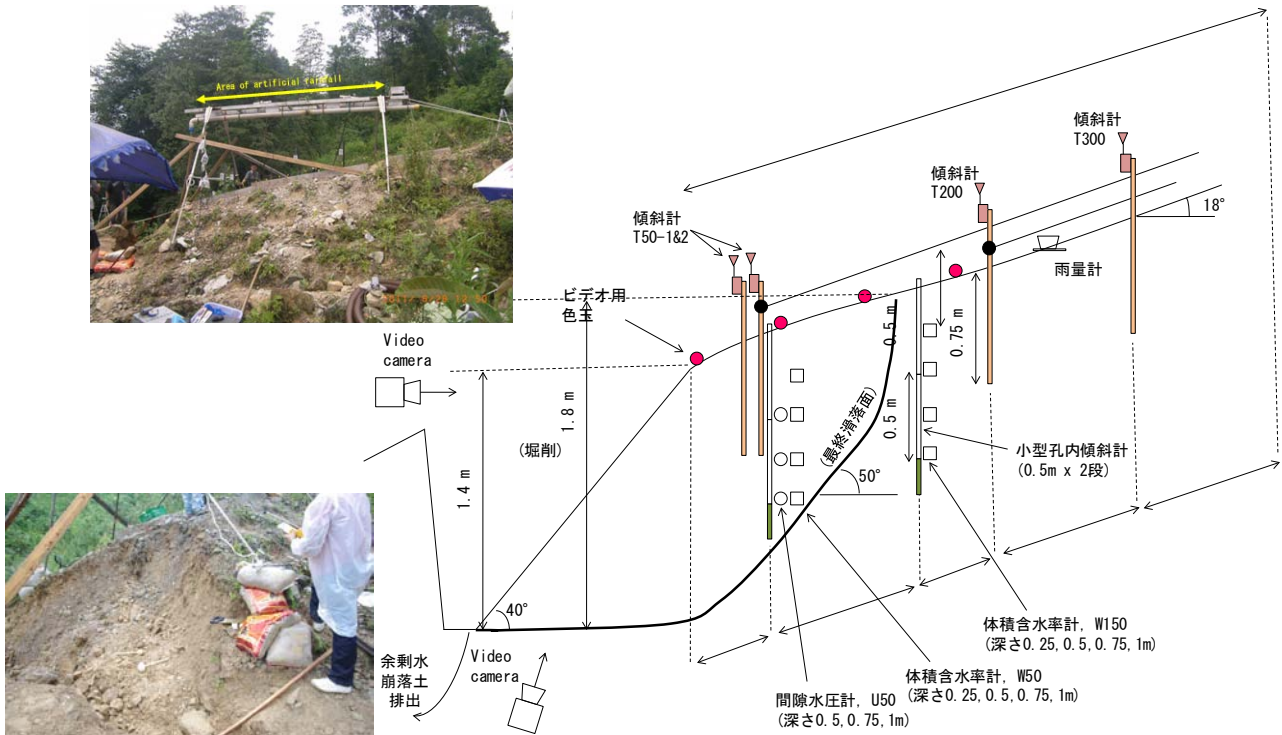


図-1 2 斜面の人工崩壊実験の構成 (写真：左上は降雨前、左下は崩壊後)

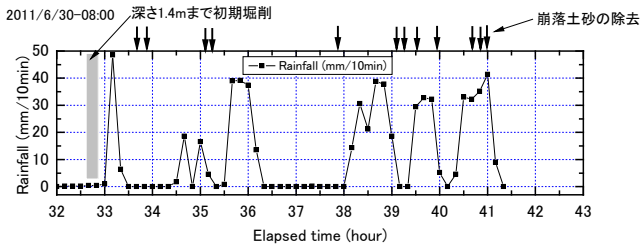


図-1 3 崩壊実験の降水量の推移

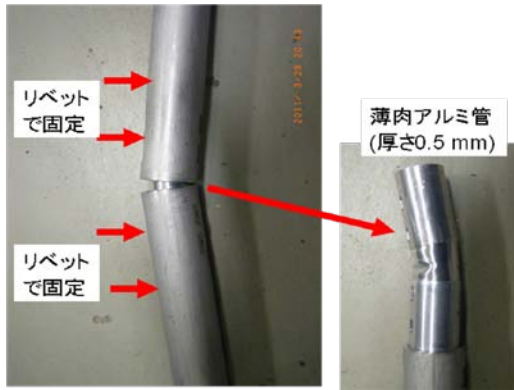


図-1 4 崩壊実験で用いた小型孔内傾斜計の接続部

また、斜面下端から 0.5 m の位置の両脇 2 箇所 (T50-1 と 2)、2 m (T200)、3 m (T300) の位置に傾斜計を設置した。傾斜計の鋼杭は、斜面に深さ 0.75m まで挿入した。

人工降雨により、斜面下端から掘削部分が崩落し、上方へ向かって進行的な崩壊が進んだ。図 1 3 には、実験終了時の最終の崩壊範囲と写真も示してある。崩落した土砂は、斜面下端の掘削範囲が V 字型で空間が狭く、堆積して崩落面を支えてしまうので、適宜取り除いた。その除去作業のタイミングも、図 1 3 に併記してある。

図 1 5 は、小型孔内傾斜計と傾斜計の傾斜変位の記録である。斜面下方から 50 cm に設置した小型孔内傾斜計 K50、傾斜計 T50-1 と T50-2、伸縮計 E50 は、水平方向の設置位置が異なるため、同時には変位していないが、早い時期から大きく変位し、崩落した様子がとらえられている。

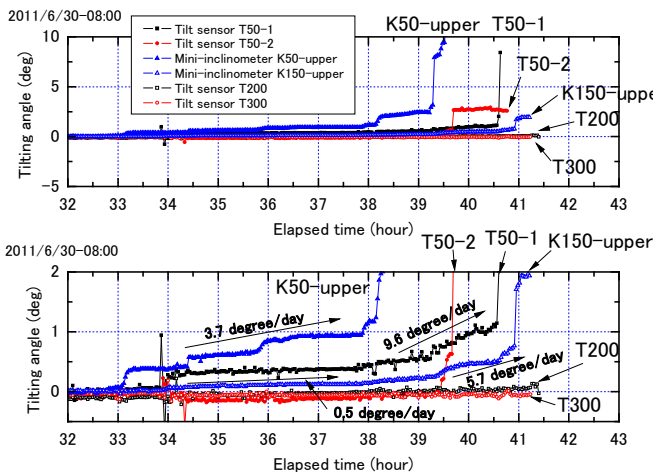


図-1 5 崩壊実験で用いた小型孔内傾斜計の接続部

また、それより上方にあるセンサーは、より遅く、より少ない量の変位を示している。今回用いた変位、傾斜を測定するセンサーのデータは、互いに整合して、斜面全体の挙動をとらえていると言える。また、斜面下端から 150cm の小型孔内傾斜計 K150 は、早い時期から継続的な変位をとらえていて、下端部での崩落などのイベントの影響が、斜面中央部まで及んだことを示している。

斜面崩壊は下端部から進行的に生じたが、その過程で数時間にわたって $0.15^\circ \sim 0.4^\circ / \text{時} = 3^\circ \sim 10^\circ / \text{日}$ 程度の傾斜変位速度が計測されている。

本研究では、斜面の人工崩壊実験の他に、国内の実斜面で傾斜計を用いた計測中に斜面が崩壊または亀裂が発見された事例で取得したデータも検討した。それらの傾斜変位速度は、崩壊した事例で $3^\circ / \text{日}$ 、亀裂の発見のみで応急措置で対処された事例では $0.12^\circ / \text{日}$ であった。

これらの事例を重ねてみると、 $0.01 \sim 0.1$ 度/日の継続的な傾斜速度が観測されれば、何らかの変位を疑う意義があり、これが $0.1 \sim 1$ 度/日のオーダーになれば、応急対応が求められる可能性がある、といえるだろう。

5. まとめ

斜面災害時に、低コストかつ迅速に構築できる監視システムの一環として、小型孔内傾斜計と、短距離無線を用いたセンサーノードを開発した。国内外の実斜面で実証、計測事例では、斜面崩壊の前に得られる計測データを分析し、センサーの傾斜変位速度を指標に、異常値の検出基準を考察した。簡便な傾斜センサーを用いた計測値は、斜面の属性や計測計画にも大きく依存すると考えられるが、斜面の異常をとらえる可能性を示している。

謝辞: 本研究は、地盤・防災コンサルティング会社の中央開発株式会社から、王林氏、西江俊作氏の 2 名の研究協力者が研究に参加した。また、本研究課題の実施に当たり、独立行政法人土木研究所、国交省六甲砂防事務所、中国科学院成都山地災害与環境研究所の協力を得た。

参考文献

- 1) 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 17th ISSMGE, Alexandria, Vol. 3, pp. 1897-1900.
- 2) Uchimura, T., Wang, L., Qiao, J.-P., and Towhata, I. (2011): Miniature ground inclinometer for slope monitoring, Proc. of The 14th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Hong Kong.
- 3) Taro Uchimura, Ikuo Towhata, Lin Wang, and Jianping Qiao (2011): Interpretation of monitored behavior of slopes for early warning of failure, (to appear).