

◆ 報 文 ◆

簡易かつ長期間計測を目標とした斜面崩壊検知センサーの開発

柳町年輝* 栗原淳一** 田村圭司***

1. はじめに

土砂災害に対する警戒避難の判断基準は、降雨量を指標として運用が進んでいるが、事前に避難が勧告された事例は少ないのが実態である。その理由の一つとして、洪水氾濫の危険につながる水位の上昇といった現象を実際にみる事ができる洪水とは異なり、土砂災害は突然発生し、災害発生直前まで切迫性を感じにくいといったことがあげられる¹⁾。

そこで、その地域周辺で土砂災害が発生し始めているといった危険情報を早く入手できれば、行政も住民も自らの危険として認識し、避難行動につながりやすいと考えられ、そのためには、地域内での土砂災害の発生状況を把握するシステムが必要となり、多くの観測器を設置する必要がある。

また、斜面における土石の運動様式は大まかに、落石、岩盤崩落、斜面崩壊（表層・深層崩壊）、地すべりに分類できるが、このうち最も発生件数が多い斜面崩壊の発生を検知することは、土砂災害に対する警戒避難に対し有効であると考えられる。

現在ある斜面変位に関する観測機器（伸縮計等）の多くは、斜面崩壊の初期の微少な変動を精度良く検知することを目的としているため、精密な計測が可能な構造となっている。そのため簡易に設置が出来ない、メンテナンスを頻繁に行う必要がある、耐用年数が短い（3～5年）、価格が高い（伸縮計1台約30万以上）等の問題点からごく限られた場所でしか使用されていない²⁾。

これに対し、単純にどの斜面がいつ崩壊したかのみの情報でも、例えばその情報が自治体に伝達されることで避難の判断に対する切迫性をもった有効な情報と成り得ると考えられる。例えば、自治体ごとに既崩壊地の周囲などの崩れやすい斜面をモデル的に幾つか選定し、センサーを設置することなどが想定される。

そこで本報では当チームが現在開発中のセンサーの機能を斜面崩壊の発生検知に限定した一方で、安価かつ長期間メンテナンスなしで、斜面に容易に設置可能な斜面崩壊検知センサーについて報告する。

なお、本研究は総合技術開発プロジェクト「社会資本の管理技術の開発」における「土砂災害の初期の変動を検知する技術の開発」として現在実施中である。今後、野外での検証を進めていく予定にしているが、本報告では、これまで実施した試作器の作成、室内実験による性能の検証に関する結果について速報的に報告するものである。

2. 斜面崩壊検知センサーの開発

2.1 開発の目標

センサー開発の意義を整理すると、表-1のようになる。

1) 安価なセンサー

多数の危険斜面を対象とする事から、1個数万円程度で製作できる安価なセンサーを開発する。

2) 単純な構造で壊れにくいセンサー

メンテナンスをできるだけ不要とするために、単純な構造とする。

3) 長期間利用可能なセンサー

長期間使用を目指すことから、できるだけ消費電力を抑える。また、バッテリー（乾電池、ボタン電池等）で稼働するような構造とする。

4) 容易に設置できるセンサー

従来機器より小型・軽量かつ短時間で人力のみで設置可能とする。

2.2 崩壊検知センサーの試作

表-1の開発目標に基づき表-2に示す検知センサーを3種類試作した。各センサーの特徴は、タイプIセンサーは、地上に設置したセンサー自体が斜面の崩壊に際して、大きく傾いた場合に崩壊を検知（転倒検知方式）し、一般用微弱無線を用

表-1 開発目標

① 検知機能	勾配が概ね30度以上の急斜面に設置し、崩壊の発生を時間遅れなく検知する
② 通信方式	無線通信（100m以上伝送可能）
③ 電 源	バッテリー駆動（電池寿命5年間以上）
④ 検知出力	デジタル出力
⑤ 目標価格	センサー1台数万円程度
⑥ 耐用年数	約10年間
⑦ 設置条件	容易かつ人力で設置可能
⑧ 耐環境性	気象条件（降雨・雪・落雷）や環境（立木・寒冷地）などにより機能障害が生じない

表-2 試作した崩壊検知センサー

試作タイプ	タイプⅠ	タイプⅡ	タイプⅢ
検知方式	転倒検知	傾斜検知	
設置方法	地上設置		地中埋設
外観			
概要	地上に設置したセンサーが崩壊により転倒する事により発生を検知	地上に設置したセンサーが崩壊により傾く事により発生を検知	地中に埋設したセンサーが崩壊により傾く事により発生を検知
特徴	安価・設置が容易	通信距離が長い	土砂に埋もれた場合でも通信が可能
通信方式	一般用微弱無線	特定小電力無線	地中通信用微弱無線
電源(寿命)	電池(5年以上)	電池(5年以上)	電池(5年以上)
価格	3万円程度	5万円程度	7万円程度
サイズ・重量	約φ60×H150mm, 200g程度	約D150×W150×H250mm, 400g程度	約φ46×H51mm, 185g程度

い検知信号を通信する方法である。

タイプⅡセンサーは、地上に設置したセンサー自体が斜面の崩壊に際して、設定角度以上に傾いた場合に崩壊を検知(傾斜検知方式)し、特定小電力無線を用い検知信号を通信する方法である。

タイプⅢセンサーは、地中に埋設したセンサー自体が斜面の崩壊に際して、設定角度以上に傾いた場合に崩壊を検知(傾斜検知方式)し、微弱無線を地中でも通信可能に改良した地中通信用微弱無線を用い検知信号を通信する方法である。

今回試作したセンサーは表-1に示した開発目標のうち、③バッテリー駆動(電池寿命5年以上)、④デジタル出力、⑤製作費が3～7万円程度、⑦設置が容易な小型および重量400g以下と軽量で容易に持ち運ぶことが可能である等の機能を有している。また、①検知機能、②通信方式に関しては室内検証実験において検証を行った(3章参照)。なお、⑥耐用年数、⑧耐環境性においては、今後、実際の現地において長期間の検証試験を行う予定である。

2.3 崩壊検知センサーの設計

2.3.1 検知方式について

検知方式は、転倒検知と傾斜検知の二つの方式で設計した。転倒検知方式のセンサーには、近接スイッチ式転倒センサーを用いた。このセンサーは、通常の状態では、転倒センサーと設置治具が一体となっており内部の近接スイッチがOFF状態にあるが、斜面の崩壊に際し転倒センサーが設置治具と離れる(転倒する)と近接スイッチがONとなり崩壊検知信号が発せられる仕組みとなっている(図-1(a))。

傾斜検知方式のセンサーには、金属球式傾斜セ

ンサーを用いた。このセンサーは、センサーが水平の状態では、金属球は台座窪みの位置にあり金属メッキ同士がつながらず、導通していない(スイッチOFF状態)。しかし、台座が一定の角度以上に傾くと金属球が転がり、側面と台座面の金属メッキ同士が金属球を介して導通しスイッチが入る仕組みとなっている。また、スイッチ感度は台座角度による。センサーの内部構造を図-1(b)に示す³⁾。

2.3.2 通信方式(無線通信)について

センサーから伝送のための有線ケーブルを引くことはコストや、設置の手間がかかり、切断のおそれも高いことから無線による伝送方式で検討を行った。センサーからの通信に利用可能で、免許が不要、通信費用がかからない無線方式には

表-3に示す様々な方式がある⁴⁾(比較例としてテレメータ無線も記載している)。

今回は崩壊検知センサーの設置場所が屋外の自然斜面であることから、これら無線方式の中でも草木や水などで電波が届きにくくなる等の影響を受けにくい低い周波数を用いている微弱無線方式と特定小電力無線方式について検討した⁵⁾。なお、両方式は通信速度が遅いのが欠点であるが、今回伝送する信号は、崩壊検知信号のみの少ない情報量なので両方式の通信速度でも伝送が可能である。

また、斜面の崩壊に際しセンサー自身が土砂に埋もれてしまう場合も考えられることから、微弱無線方式の中でも土砂に埋もれた場合でも通信が可能である地中無線通信を加えた検討を行った。以下に検討を行った各無線方式の特徴を示す。

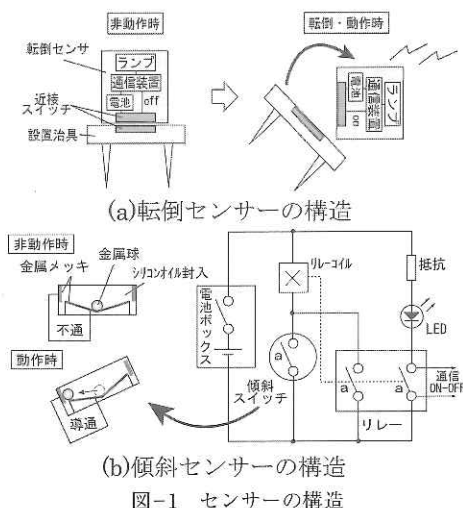


図-1 センサーの構造

1) 一般用微弱無線 (表-2のタイプⅠに使用)

送信機から3m離れた地点の電波の強さが電波法に規定された範囲内であれば、周波数、変調方式を問わず、機器の設計・開発が自由、利用方法についても、目的が合法的なものであればよく、自由に利用が可能な無線方式である。短所は、電波が弱いので通信可能な距離が短いことである。

一般的に使われている機器の周波数は主に超短波帯 (VHF) の300~322MHz帯が利用され、通信速度は2kbps程度である。一般的には通信距離は30m程度と言われているが、電波の伝搬条件の良い場所ではより遠くまで届く場合があり、今回のタイプⅠセンサーの屋外での予備的に行った実験では、最大で200m程度であった。

崩壊検知センサー向けの利点としては、自由に周波数・変調方式・送信間隔等が変更可能であるので、通信装置の設計を工夫することにより省電力化が図られ電源寿命を延ばせる可能性があることや、同一斜面に複数設置した場合の通信の混信を避ける工夫も可能であると考えられる。

2) 地中通信用微弱無線 (表-2のタイプⅢに使用)

微弱無線の規格の中で、通常使われている機器の周波数よりも、かなり低い周波数を使用する事により地中・水中 (海中)・空中を問わず通信可能とした無線方式である。一般の微弱無線よりもかなり低い周波数帯域である8~20kHzを使用する。通信速度は非常に遅く75bps程度で、通信距離は地中で最大100m程度である。

崩壊検知センサー向けの利点としては、崩壊土砂に埋もれた場合でも通信が可能で草木や水など

の影響も受けない事である。

3) 特定小電力無線 (表-2のタイプⅡに使用)

電波の送信出力が10mW以下で、指定された目的、周波数帯、電波形式で利用でき、呼出符号の自動送信、連続送信時間の限定などの一定の規定に従い利用が可能な方式である (使用機器は技術基準適合証明を取得する必要がある)。微弱無線より送信出力が大きく通信距離も長い。

周波数は、400MHz帯及び1200MHz帯が利用され、通信速度は300, 1.2k, 2.4k, 4.8kbps等である。通信距離は通常30~300m程度であるが、長距離タイプの場合1km程度届く実績もある。

崩壊検知センサー向けの利点としては、通信距離が長くとれる可能性がある事である。

2.3.3 電源方式について

通信と同様に有線ケーブルでは問題点が多いので、バッテリーで駆動する機器とし、中でも価格の面や斜面に設置する事から日射や草木に影響される太陽電池による方式は採用せず、一次電池での電源とした。また、長寿命化の方法として、常時には電力を消費せず、センサーが崩壊を検知したときにだけ電力が消費されるイベント起動方式とした。

3. 開発したセンサーの室内検証実験

3.1 検証実験内容

表-1の開発目標のうち、①検知機能の崩壊発生から時間遅れなく検知可能であるかについて検証するとともに、②通信方式の無線通信が通信可能であるかについて検証実験を行った。なお、本

表-3 免許不要・通信費用がかからない無線方式一覧

通信方式	微弱無線		特定小電力無線	無線LAN	ZigBee	Bluetooth	UWB	無線タグ	テレメータ無線
	一般用微弱無線	地中通信用微弱無線							
主な特徴	機械の設計が自由で、工夫次第で効率的・経済的な通信が可能	地中・水中 (海中)・空中を問わず無線通信が可能	免許・資格が不要な機器の中では通信距離が長い。機器には技術基準適合証明が必要	伝送速度は速いが消費電力は大きい	Bluetoothより通信速度は遅いが、低価格、低消費電力、設置が容易	高品質な動画通信までを含めずデータと音声と簡易動画の通信に特化	室内のみ利用可能で、高品質な近距離無線が可能	小型、低価格、電源が不要等の利点があるが通信距離が短い	通信距離が長い資格や免許が必要、価格も高い
規格	電波法施行規則第6条1項		電波法施行規則第6条4項	IEEE802.11a IEEE802.11b IEEE802.11g	IEEE802.15.4	IEEE802.15.1	IEEE802.15.3a IEEE802.15.4a	Gen2/ISO 1800-6 Type C	国電通仕第21号
周波数	300MHz帯	8kHz ~20kHz	400MHz帯 1200MHz帯	2.4GHz 5GHz	2.4GHz	2.4GHz	3.1GHz ~10.6GHz	~135kHz 13.56MHz 900MHz付近 2.45GHz	70MHz 400MHz
草木・水などの影響の受けにくさ	○	◎	○	×	×	×	×	○~×	○
通信速度	2kbps	75bps	300bps 1.2kbps 2.4kbps 4.8kbps等	11Mbps 54Mbps	250kbps	721kbps	数10k ~1.03Gbps	数kbps ~数十kbps	1200bps 又は200bps
通信距離	~30m	~100m	~300m	~300m 長距離タイプは数km	10~75m	10~100m	4~30m	密着~7m	数km~数十km
価格	数万	数十万	数万	数万	数万	数万	数万	数万	数万
免許・資格・通信費等	不要		不要	不要	不要	不要	不要	不要	免許・資格が必要
主な利用例	小規模な無線伝送、無線リモコン等	傾斜計、間隙水圧計、土圧計等のセンサーのデータ伝送	無線電話、リモコン、ワイヤレスマイク、テレメータ等	PCのローカルネットワーク等	家電製品の監視・コントロール	PC、携帯端末、PC周辺機器、AV機器等の無線接続	PC、携帯端末、PC周辺機器、AV機器等の無線接続	商品・物流管理、スライ、パスマ、ETC等	雨量計等センサーのデータ伝送

※参考文献4) をもとに作成した

研究では、表-1に示したとおり、最終的な開発目標として、100m程度伝送可能なセンサーの開発を目指しているが、ここでは、開発の第一段階として、無線通信が可能であるかどうかについてのみ検証を行うこととした。

検証には、室内に小型の人工斜面を製作し、人工降雨等で斜面崩壊を発生させる実験方式とした。今回の実験では、土砂収納容器内の土砂が崩壊開始から数十秒程度で傾斜台から落下する移動速度の早い崩壊を対象とした。

人工斜面は、傾斜角度が自由に調節可能な傾斜台の上に土砂収納容器を設置し、その容器内に土砂を堆積させたものである。土砂収納容器の大きさは、長さ179cm×高さ50cm×幅90.5cmで側面の壁は内部の土層の状態を観察できるようにアクリル板を用いた。また、実験準備中に斜面下部から土砂がすべり落ちるのを防止する為に下部に4cmの高さの土砂止めと土砂容器底面に滑り止めアングルを3箇所設置した。

実験には、粒径がほぼ一様の市販の佐原砂を用いた。粒度特性は砂分：96.9%、細粒分3.1%、最大粒径2mm、粒径D50:0.211mm、粒径D10:0.123mm、均等係数1.946である。この試料を10cm詰める毎にタンピングし突き固めを繰り返し、50cm厚まで堆積させ表面を水平に整形し土層表面に20cm間隔のマーキングを施し一晚放置した。その結果、乾燥密度は 1.34g/cm^3 、飽和透水係数は $1.18 \times 10^{-2}\text{cm/s}$ 程度であった。

その後、傾斜台の角度を 40° に傾斜させ、試作したセンサーを地表面または土中に設置し、人工降雨装置から霧状の降雨を降雨強度 100mm/h で降らすとともに、地下水位の上昇を促進し急激に崩壊を発生させるために降雨開始から約45分間後に収納容器背面から直接給水した(図-2参照)。

検証実験の記録のため、ビデオカメラを正面2台、上面1台、側面2台の計5台を設置し映像記録を行った。また土層の変位量については、正面と上面映像から地表面のマーキング線の変位量を計測し求めた。地表面の勾配角度の変位は、側面の映像から土砂収納容器の外枠(変位前の地表面勾配 40°)を 0° とし外枠と変位した地表面から角度を求めた(反時計周りの変位をプラス、時計周りをマイナス角度とした(図-2右参照))。また、②通信方式の無線通信が可能であるかのみ検証の為、室内の5m程度離れた地点に無線受信機とロガーを設置し実験を行った。

検証実験は、3タイプのセンサーに対しそれぞれ

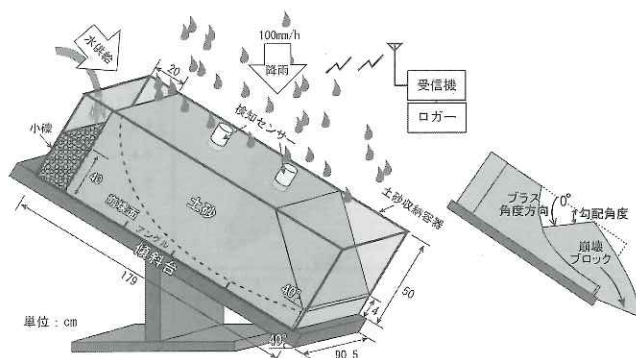


図-2 検証実験イメージと勾配角度の変位計測

1回(計3回)実験を行った。いずれの実験も降雨開始約50分後(背面給水約7分後)に土層全体が下方へ移動し始めた。本実験では土層全体が一体で崩壊するのではなく、図-3の崩壊ブロック図に示したように、3~5ブロック(A~E)に分かれ斜面下部のブロックから順次崩壊した(ここで言う崩壊とは、土塊の形状が壊れながら土砂収納容器の外に落下する一連の動きをさす)。また、はじめのブロックが崩壊してから最後のブロックが崩壊するまでは10~30秒程度であった。

3.2 検証結果

図-4にタイプIIセンサー検知時の崩壊状況を示した。なお図中に崩壊を検知したセンサー(写真では見にくいですが検知すると点灯する)を○印で囲み検知と示した。タイプI~IIIの実験時の崩壊ブロック図、崩壊時間と移動変位・勾配変位角度を図-3に示す。なお、それぞれのタイプのセンサーを崩壊ブロック図の①~④の位置に3個設置して検証実験を行った。

図-3、4からタイプIIセンサーの実験の状況について述べる。最初に斜面下方のブロックAが崩壊しその直後にセンサー①の検知が確認された。その後ブロックB~Dが下方に移動・崩壊し、最上部に設置していたセンサー④が検知した。その後、1秒前後の間にセンサー②およびセンサー③が相次いで検知をしている。いずれも、崩壊とはほぼ同時に検知をしていたことが確認された。

また、検知タイミングと勾配角度に関しては、タイプIセンサーは、地震等により誤作動を起こさないようにセンサー自体が転倒すると検知する構造となっており、他の要因ですぐに転倒しないように約 30° 傾くと転倒するよう製作した。検証実験では、設置したすべてのタイプIセンサーは地表面の勾配が約 20° に達した時にセンサーが転倒し検知した。

タイプIIセンサーは、任意の設定した角度まで

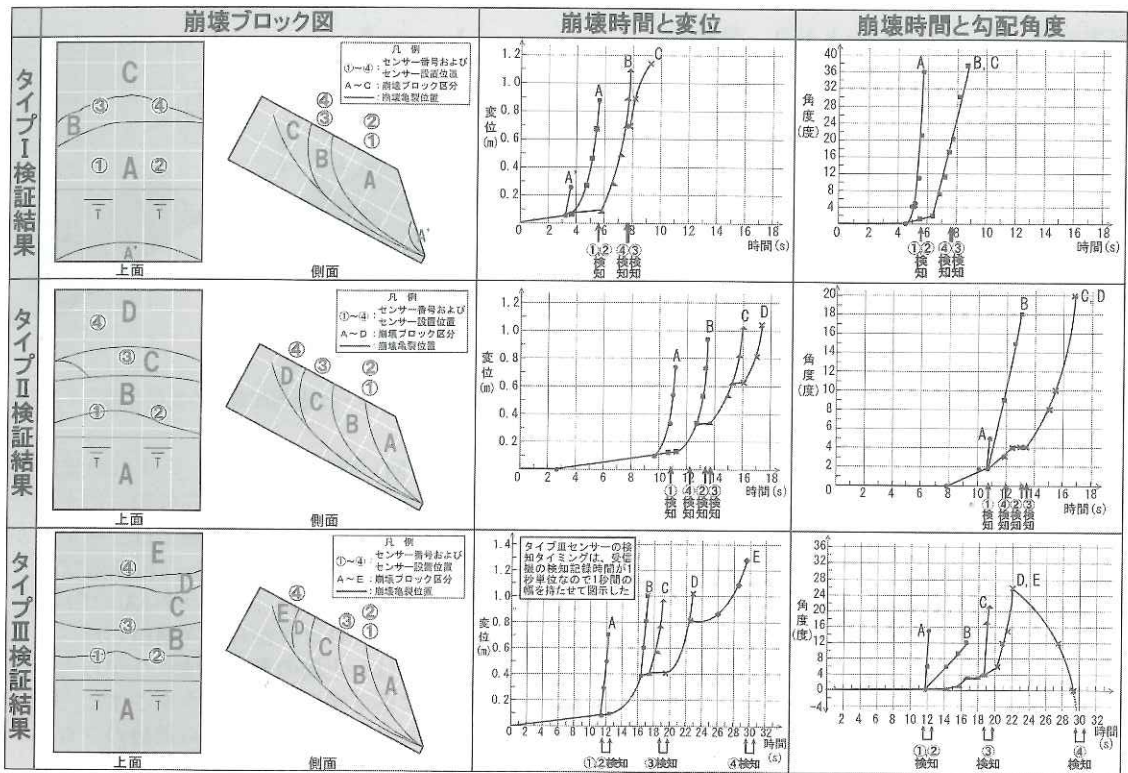


図-3 崩壊時間と変位・勾配角度

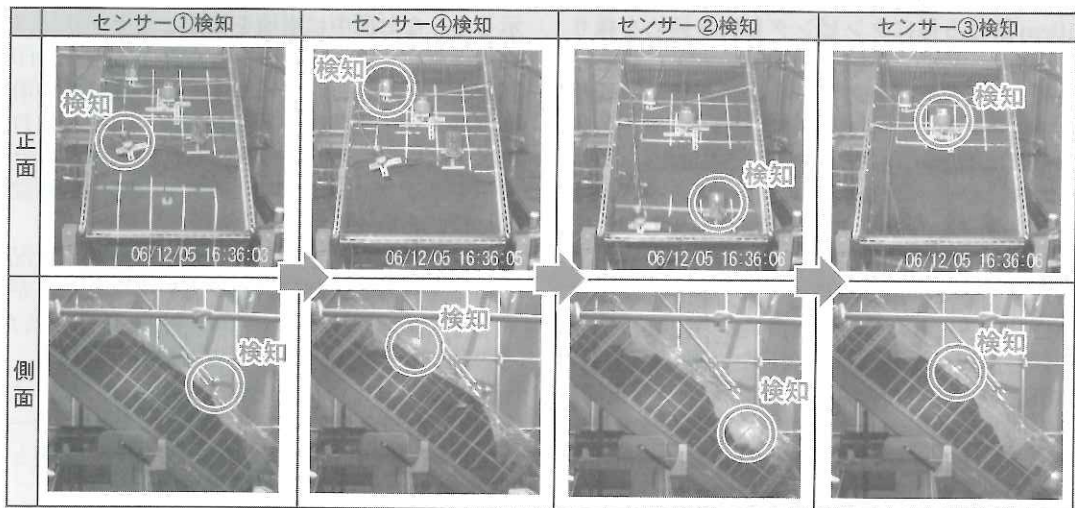


図-4 タイプⅡセンサーのセンサー検知時の崩壊状況

センサーが傾いた時点で検知する構造となっており、崩壊初期の角度変化を捉えることを目的にセンサーが約5度傾いた時に検知するよう製作した。検証実験では、設置したすべてのタイプⅡセンサーは地表面の勾配が初期状態より約2～4度変化した時にセンサーが検知した。

タイプⅢセンサーは、地震等により誤作動を起

こさないように約45度傾いた時に検知するよう製作した。検証実験では、タイプⅢセンサーの検知記録間隔が1秒単位であるため検知時点の詳細な角度は不明であるが、タイプⅢセンサー①～③の地表面の勾配が画像で判読可能な変位時間約0.3秒間で9～17度（1秒間に換算すると約30～57度）と急激に変化した時に検知した。センサー④

は地表面の勾配が、マイナス方向（手前に倒れる方向）に急激に変化した時（およそ1秒間に90度以上）に検知した。

また、タイプⅠ～Ⅲの多くのセンサーで検知した時点の地表面の勾配が設定角度未満で検知しているのは、急激に角度が変化するとセンサー周囲の地盤が崩れ、画像判読のブロック全体の勾配よりセンサー自身の角度の方が大きくなるなど、センサーの傾きの変化がブロック全体の勾配変化に比べて大きかったためである。

以上の結果より、今回の実験で行ったような斜面の変化開始から急激な斜面崩壊（約30秒間）に至る現象に対してはいずれのセンサーも、この30秒の間に検知しており、今回検証した12個すべてのセンサーは崩壊に対し時間遅れなく検知したことが確認された。

次に通信に関しては、タイプⅢセンサーの地中通信用微弱無線では、同じ崩壊ブロックに設置してあったセンサーが同時に検知・信号発信した場合があったがセンサーそれぞれに別の周波数を使用しているので混信せずセンサー4個すべて通信が行われた。さらに、土砂に埋没した状態においても通信が確保されていた。

一方、タイプⅠセンサーの一般用微弱無線では、崩壊と共に同時に検知・信号発信した他のセンサーが同一周波数を使用していたので通信が混信し、データ受信が不可能であったケースがあり、個々のセンサー毎に別の周波数を使用するか、識別受信する等改良の必要性が判明した。このことは、他の無線方式でも同様で同一周波数を使用した場合混信する可能性があり、対策の必要がある。

なお、特定小電力無線においては、今後検証実験を行う予定である。

4. まとめと今後の課題

斜面崩壊の発生検知を目的として、安価かつ長期間メンテナンスなしで容易に設置可能な小型・

軽量のセンサーを3タイプ試作した。室内で斜面模型実験を行い、開発目標の①検知機能の崩壊に時間遅れなく検知可能であるか、②通信方式の無線通信にて正しく通信可能であるかに対して適用性を確認した。

その結果、①検知機能に関してはいずれのセンサーも崩壊に際し時間遅れなく検知し適用性が確認された。②通信方式に関しては、通信距離は短い地中通信方式に関しては無線通信が正しく行われたが、一般用微弱無線に対しては個々のセンサー毎に別の周波数を使用するか、識別受信する等の改良の必要性が判明した。

本報告は斜面崩壊検知センサーの開発に関する第一段階の成果をまとめたものである。今後は、開発の第二段階として、実用化に向けて、屋外における無線通信の通信距離の計測および通信方式の改良、屋外での耐久性試験や実際の崩壊危険斜面における検証実験を行う予定である。

最後に、今回の試作器の作成に関して多大な協力を頂いた坂田電機(株)、(株)拓和、日本工営(株)にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 国土交通省砂防部ホームページ：土砂災害警戒避難ガイドライン検討委員会、第1回説明資料
(http://www.mlit.go.jp/river/sabo/link_dosya-guidelines.html)
- 2) (社)地すべり対策技術協会編集：地すべり観測便覧，pp.47-60, 1996
- 3) 白田昭司：電磁リレーの基礎と応用、新電気1月号，pp.59-64, 2007
- 4) 総務省ユビキタスセンサーネットワーク技術に関する調査研究会最終報告、参考資料4
(http://www.soumu.go.jp/s-news/2004/040806_4.html)
- 5) 総務省電波利用ホームページ：無線局開局の手続き・検査
(<http://www.tele.soumu.go.jp/j/proc/index.htm>)

柳町年輝*



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所土砂管理研究グループ
火山・土石流チーム交流研究員
Toshiki YANAGIMACHI

栗原淳一**



長野県砂防課（前 独立行政法人土木研究所つくば中央研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム）
Junichi KURIHARA

田村圭司***



独立行政法人土木研究所つくば
中央研究所土砂管理研究グループ
火山・土石流チーム
Keiji TAMURA