

◆ 21 世紀の新技术特集 ◆

土砂災害発生予測と情報伝達のためのシステムの構築

反町雄二*

1. はじめに

1997 年 5 月の秋田県鹿角市八幡平での地すべり災害、1999 年 6 月の広島での集中豪雨、2000 年 3 月の岐阜県古城郡上宝村での大規模な雪崩災害、2000 年 9 月の愛知・岐阜・長野県での秋雨前線豪雨による土石流、がけ崩れ災害など、依然として悲惨な土砂災害は跡を絶たず、毎年全国のどこかで発生している。

近年の土砂災害の特徴として局所的な集中豪雨等により複数種類の土砂災害が同一区域において発生したり、土砂災害が同時多発化している傾向が認められる。因果関係は明瞭でないが、地球温暖化による環境変化などによって土砂災害の誘因となる降雨条件が変化しつつあるといわれており、このような傾向が今後とも続くことが土砂災害を防止していく上で懸念される。

また、1999 年の広島災害に見られるように新興住宅区域での土砂災害が顕在化している。谷の出口付近にまで住宅区域が拡大し、土地利用の面から見ても災害のポテンシャルは大幅に増大している。このような事態に対応するため、国土交通省は危険区域での土地開発の抑制などを目的とした「土砂災害警戒区域等における土砂災害防止対策の推進に関する法律」を本年 4 月から全国的に施行することとしている。

21 世紀においても土砂災害対策を徹底するために砂防施設等の建設といったハード対策を進めていく必要があることは論を待たないが、近年の土地開発に伴う土砂災害危険箇所の急増、建設サイト等の不足、工事実施にあたっての生態系や景観への配慮、財政状況の悪化など、防災事業をとりまく環境は厳しい。従って今後は益々、土砂災害の発生予測、危険度評価等のソフト対策が重要になるとと思われる。

砂防に関する研究では、土砂災害防止を図るた

めの施設の構造や機能評価に関する研究を促進する一方で、より効果的な警戒避難体制の整備に必要なソフト対策における技術の高度化のために、土砂移動現象の発生予測、発生した土砂移動現象の検知、信頼性の高い情報伝達システムの構築に関して重点的に研究を進めることがこれからも必要である。

以下に、これらに関する近年の研究課題である土石流発生予測の空振りを低減するための短時間降雨、超短時間降雨予測手法、光ファイバセンサを用いた地すべり監視システム、崩壊予測のための AE センサーによる斜面監視システム、表層雪崩の発生予測について最近の土木研究所砂防部の研究動向を紹介し、新世紀における課題を明らかにする。

2. 短時間降雨、超短時間降雨予測技術の導入

土石流災害を防止するためのソフト対策の一つとして、降雨状況から土石流の発生・非発生を評価し、警戒避難に役立たせるための手法が「土砂災害に関する警報の発令と避難の指示のための降雨量設定指針(案)」(建設省砂防課 昭和 59 年 6 月)として提案され、全国的に運用されている。

ただし、この手法に基づく基準雨量設定手法では、危険度の判断がリアルタイムの降雨データ及び既往最大降雨データによってなされており、警報の発令が安全側となり空振り率が高くなるという問題がある。この点を改良するためには、短時間・超短時間降雨予測技術の適用性を明らかにし、その適切な導入手法を明らかにする必要がある。

そこで、過去の主要な土石流災害事例から、典型的な梅雨末期の集中豪雨によるものとして広島災害(平成 11 年度)、佐渡島での災害(平成 10 年度)を選定した。降雨量データと気象庁降水短時間予報値とを比較し、その精度ならびにスネークラインに短時間降雨予報値、超短時間予報値を導入した場合の有効性を検討した。なお、スネークラインとは、前期降雨の影響を考慮した雨量(実

How can We Develop a Highly Precise Warning and Evacuation Systems for the Sediment-related Disaster Prevention in the Twenty-first Century?

効雨量) と 1 時間雨量強度の関係図においてリアルタイムで観測される両者の値を時間ごとにプロットしそれらを結んだ直線をいう。

2.1 短時間降雨予報値の予測精度

図-1 にアメダスデータを用いた場合の予測時間別に見た短時間降雨予報値と観測値の相関係数の事例を示す。予測時間の延長とともに予測精度は急激に落ちている。標準誤差 (予測値と観測値の差分の自乗を合計した値の平方根) を用いて 1 時間、2 時間、3 時間の予報時間ごとに精度評価を行った結果、1~3 時間予報とも、予測誤差を±標準誤差、予測誤差を $\pm 2 \times$ 標準誤差、予測誤差を $\pm 3 \times$ 標準誤差、とすれば的中率は各々、約 8 割、約 9 割、約 9 割 5 分となる (表-1)。

2.3 短時間・超短時間降雨予報値によるスネークライン作成事例

図-2 に災害発生 120 分前、60 分前までの超短時間予測値をもとにスネークラインを作成し、実降雨で作成したそれと比較した事例を示す。短時間降雨・超短時間降雨による予報とも 60 分後の降雨予報値は実測値とほぼ同様の傾向を示しているが、超短時間降雨予報については 120 分後の降雨予報値は過小となった。

超短時間予報値は短時間予報値と比較して情報の更新頻度が密であるため急激な気象の変化に対する追随性は短時間予報と比較して良いが、その

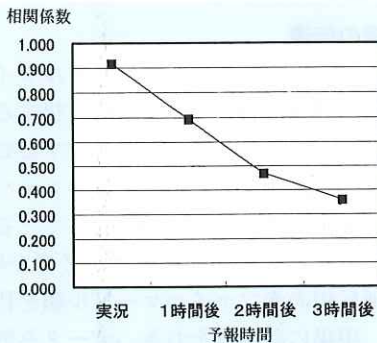


図-1 短時間降雨予報値と観測値の相関係数

表-1 標準誤差 (RMSE) による短時間降雨予報値の精度
(広島県内: 1994~1999 年)

	実測値が予測値の $\pm 1RMSE$ 以内だったもの	実測値が予測値の $\pm 2RMSE$ 以内だったもの	実測値が予測値の $\pm 3RMSE$ 以内だったもの
1時間後予測	77.2%	90.5%	94.9%
2時間後予測	80.1%	92.2%	96.1%
3時間後予測	79.3%	92.3%	96.3%

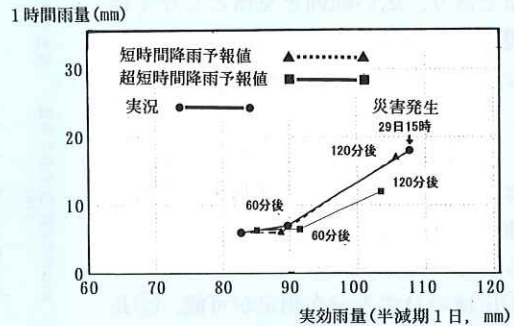


図-2 短時間降雨予報値によるスネークラインの作成事例
(1999 年広島災害)

追随性もレーダー情報の観測値更新頻度によるところが多い。例えば、レーダーの観測時間間隔よりも短い短時間で発達・衰弱するような集中豪雨に対しては予測精度が低下すると考えられる。

ただし、超短時間降雨予測手法を使えば降雨予測の精度は確実に向上する。さらに IT 化により将来このような濃密な情報の受・送信は容易となる。今後は、様々な時空間スケールを呈した降雨パターンを対象としてより詳細に降雨の時空間変動のスケールと予測精度との関係を明らかにし、短時間降雨予測、超短時間降雨予測手法を活用した精度の高いスネークラインの作成手法を構築し、土石流警戒避難基準雨量の空振り防止を計っていく必要がある。

3. 光ファイバセンサを用いた地すべり監視システム

3.1 地すべり監視への光ファイバの応用

地すべりの動きは崩壊や土石流に較べて緩慢である場合が多いため、移動の兆候が現れてから避難などの対策を講じることができる。また、降雨との関係も崩壊や土石流の発生と較べると明瞭ではない。そのため、地すべりについては地すべりの発生予知よりも地すべり土塊の移動状況の監視に重点がおかれている。現在発生する地すべりは、過去の地すべりの再活動であることが多く、過去に地すべりが発生した痕跡である地すべり地形を手がかりに地すべりが発生しそうな個所はかなり特定できる。このことも監視を行う上で好都合である。

ところで、地すべりの監視はほとんどの場合伸縮計、傾斜計によって行っているが、これらの計器で得られるデータは局所的な

値であり、広い範囲を見落としなく監視するためには、多数の計器を設置しなければならず、広い範囲の監視は難しかった。

この問題点に対して、光ファイバをセンサとしてひずみを計測する技術を地すべりの監視に応用することが試みられている。光ファイバセンサには、①広域のひずみ分布測定が可能、②長期測定が可能、③取り扱いが容易、④雷などの電氣的障害に強い、などのメリットがある。このことから、広い範囲を効率的、経済的に監視する手法として期待されている。

3.2 光ファイバによる地すべり計測の例

光ファイバによるひずみ計測技術として、現在盛んに研究されているのは、ブリルアン散乱光の周波数変化を利用した方法 (B-OTDR) とブラッグ格子による反射光の周波数変化を利用した方法 (FBG) である。B-OTDR は、光ファイバの一端からパルス光を入射し、後方散乱光の周波数変化と応答時間から、光ファイバに生じているひずみの大きさと位置を連続的に計測する手法である。この方式を利用して、地すべり地に光ファイバを張り巡らせて詳細な変動状況を計測すること、道路などの長い重要施設に沿って光ファイバを張って地すべり斜面の監視をすること、地すべりの移動方向に光ファイバを張って頭部から末端まで連続的に地すべりの移動量を計測することなどが考えられている (図-3)。

光ファイバセンサの地すべり監視への適用性を検討するために、土木研究所内で実験を行った結果の例を図-4 に示す。この実験では、長さ

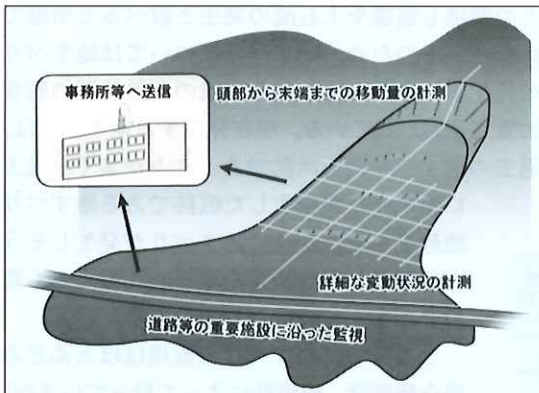


図-3 光ファイバによる地すべり移動量の計測

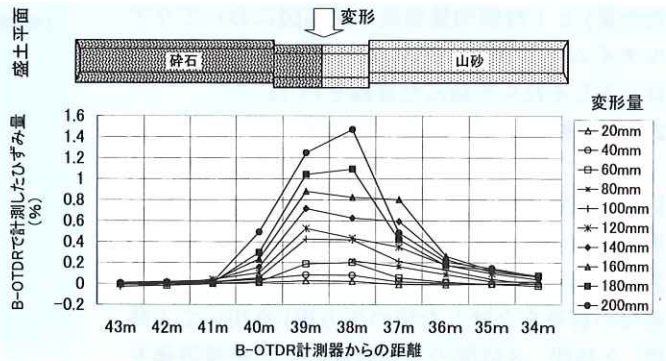


図-4 光ファイバによる地すべり監視の適用実験の結果

約 10m、幅約 2m、の盛土に光ファイバセンサを埋設し、その盛土の一部を強制的に変形させた。その結果、変形の生じた位置、大きさを検出できることが確認できた。このことから、実際の地すべり地においてもこの実験結果と同様に、地すべりの変動状況を捉えることができると考えられる。

一方、FBG は、屈折率を周期的に変化させたファイバで、ブラッグ回折によって特定の波長 (ブラッグ波長) の光のみを反射する。ファイバに生じたひずみによって屈折率の変化周期が変化し、反射光の周波数が変化することによって、ひずみを計測できる。観測用のボーリング孔に FBG を用いたひずみ計を設置して、すべり面付近の移動状況を観測することや、FBG を用いた水圧計を作成して地下水位の観測を行うことが考えられている。

3.3 情報の伝達

光ファイバセンサを用いればリアルタイムで地すべり地の計測が行えるが、常時監視するためには、計測データを事務所等まで送信する必要がある。センサと計測器の距離は、光ファイバセンサの計測可能距離である 10~20km までとることができるが、これ以上の伝送距離が必要な場合や、伝送に通信用の光ファイバケーブル網を利用する場合は、現場に計測器をおき、データを処理してから伝送する必要がある。

4. 崩壊予知のための AE センサーによる斜面監視システムの構築

がけ崩れは、崩壊発生時の土砂移動速度が速く、崩壊が始まってからの避難では間に合わないことから、斜面の異常現象をできるだけ早期に捉えて避難を行うことが重要である。

ところで、固体材料に力が与えられて変形が生じると、その外力による仕事はひずみエネルギーとして蓄積されるが、このひずみエネルギーが限界まで蓄えられると塑性変形が生じ、エネルギーの一部が AE(acoustic emission) となって放出される。斜面崩壊が生じるときにもこの AE が生じており、地表面に崩壊現象が生じる前に AE を的確に捉えることができれば早期に斜面の異常を察知避難を行うことができる。

以下に、官民共同で実施した AE センサーによる斜面監視システムに関する研究成果の一部を示す¹⁾。

4.1 システムの概要

図-5 にシステムの概念図を示す。斜面の地表あるいは地中に斜面内部で発生する AE を捉えるためのセンサーを設置して、AE の発生状況(発生数、波形等)を計測する。

AE センサーは通常、受波面積を大きくするためウエーブガイドを用いて設置される。現地からデータ送信を行えば管理事務所において監視することができる。また、崩壊予知の手法が確立されれば警報機と連動したシステムとすることも可能である。その場合、システムの構築における主な課題は、① AE センサーの設置方法の確立、② 計測データを解析・評価し崩壊予知を行う手法の確立である。以下に現地での試験計測等による検討結果を示す。

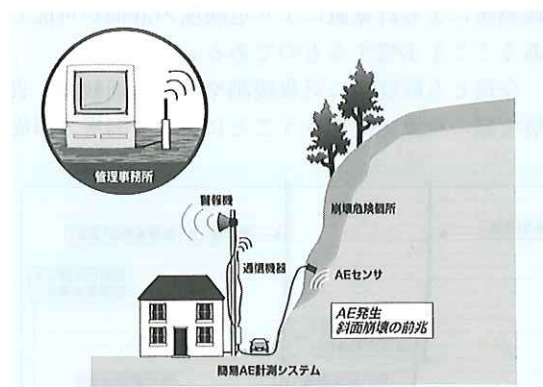


図-5 AE センサーによる斜面監視システムの概念

4.2 AE 計測の事例

図-6 はしらす斜面において斜面下部の掘削及び斜面への注水により人工的に斜面崩壊を発生させたときの AE 波形の計測事例である。(a) は斜面が不安定になり始めた状態での波形であり、単

発的で振幅が小さく、継続時間も短い。一方、(b) は崩壊 5 分前の波形であり、振幅が大きく、継続時間も長くなるという特徴を有する。これは膨大な数の斜面内部の破壊により無数の AE が重なり合った崩壊の最終段階と判断される。また、図-7 は崩壊前 30 分間の AE ヒットレイト(しきい値を超える AE 信号の単位時間あたりの発生回数)及び AE カウントレイト(AE 波形がしきい値を通過した単位時間あたりの回数)の変化事例である。本事例では崩壊約 5 分前にカウントレイトが急増しており、これらを計測することにより崩壊の直前予知が可能と考えられる。

その他の実験、現地計測等も含め、これまでの研究により明らかになった主な事項を以下に示す。

- ① AE の発生状況(AE 波形、カウントレイト等)を計測することは崩壊の直前予知に有効であると考えられる。
- ② 土砂斜面では、不動土塊と移動土塊の境界を横切るようにウエーブガイドを設置して計測することが望ましい。また、垂直に近い土砂斜面の場合、AE センサーは応力の集中する斜面下部にウエーブガイドを用いて設置することが望ましい。
- ③ 岩盤斜面においては、崩壊に影響を与えると考えられる不連続面近傍に AE センサー設置する

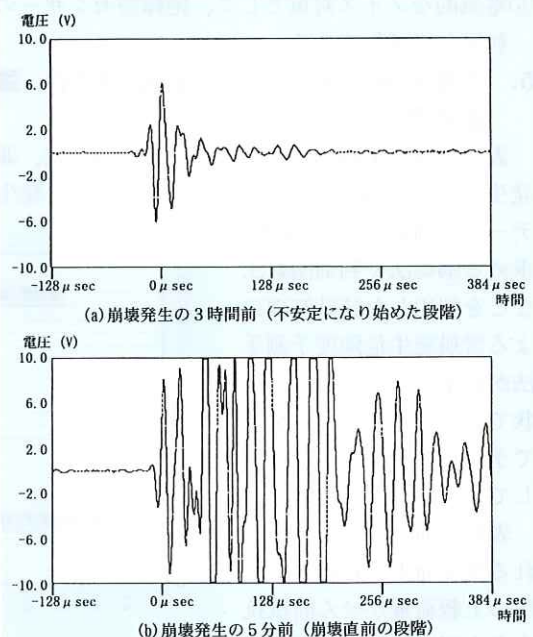


図-6 崩壊前の AE 波形(しらす斜面での事例)

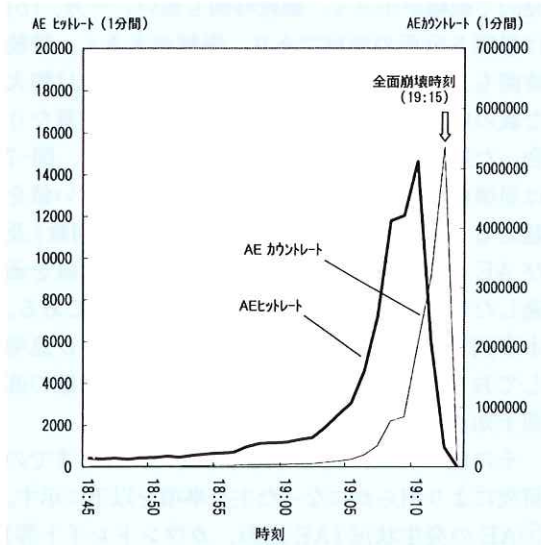


図-7 崩壊前の AE ヒットレート及び AE カウントレートの変化 (しらす斜面での人工崩壊の事例)

必要がある。また、ボーリング孔内に設置した場合には外部の気象条件の影響をほとんど受けないが、表面あるいは表面削孔による設置では気象条件の影響が大きい。

- ④降雨時には雨滴等に起因するノイズが多数発生する。土砂斜面の崩壊は降雨が直接原因となる場合がほとんどであるため、降雨ノイズをいかに除去するかが実用化への課題である。
- ⑤電氣的なノイズ対策として、絶縁型センサーの利用が不可欠である。

5. 表層雪崩の誘因となる弱層の形成条件、強度推定

表層雪崩の予測手法としては、雪崩の発生、非発生事例と気象データを基に、気象要因と発生データの関係を幾何学的に求める隅切法や判別関数法などを利用した統計処理による雪崩発生危険度予測手法が提示されているが、現状では実用に耐えうる精度で予測可能なレベルには達していない。

表層雪崩は、弱層と呼ばれる境界面上に存在する積雪の上載荷重がせん断抵抗力を上回った場合に発生する。そこで、積雪層内の弱

層の形成、強度変化といった物理的観点から雪崩発生機構を調べ、それに基づく危険度予測手法について検討している。

5.1 弱層強度を加味した雪崩発生危険度評価手法

平成9年度より新潟県新井市西方の大毛無山(標高1,429m)において気象観測、積雪層の構成や各種物性値、弱層強度等を把握するための積雪断面観測を行っている。これらの観測値を用いて弱層の強度を試算し、雪崩発生危険度(SI)を検討した。

SIは弱層のせん断強度(せん断抵抗力)を上載荷重の斜面分力(せん断応力)で除することにより求めることができる。また、弱層のせん断強度、上載荷重の実測値はそれぞれシアフレームテスト(現地せん断試験)、密度計測を現地で行うことにより求めることができるが、表層雪崩発生地点において実測を行うことは現実的に困難である。このため、気象観測値から求められる弱層のせん断強度および気温・時間の積雪深差から推定可能な積雪の上載荷重算出法を用いて算出したSIと、スキー場のある大毛無山で行った実測結果により算出した危険度値を比較することにより、その精度を検証した。

図-8にこれら実測値および計算値により求めたSIの比較を示す。計算値による危険度は弱層タイプ別に積雪表面への流入熱量により変化しており、また、実測値は計算値よりもやや危険側にあるものの概ね近似している。このことは、気象観測値による計算値により危険度の評価が可能であることを示唆するものである。

今後とも継続的に気象観測や積雪断面観測、表層雪崩の現象把握を行うことにより、弱層の形成

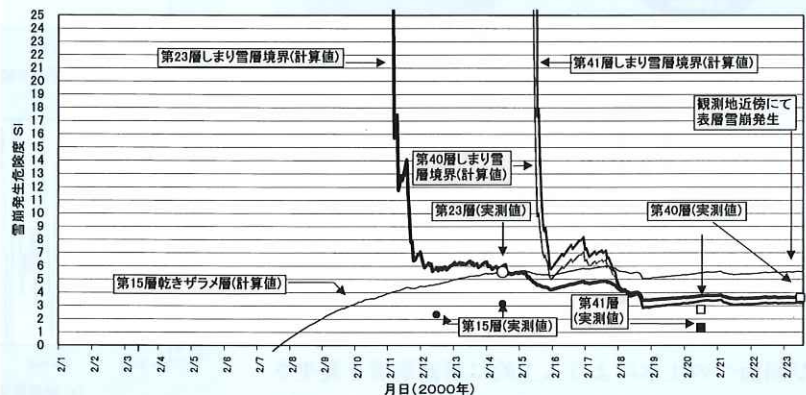


図-8 雪崩発生危険度(SI)の計算値と実測値の比較

条件の解明、強度推定手法のさらなる精度向上を計ることが必要である。

6. おわりに

土砂災害発生予測と情報伝達のためのシステム構築という観点から、土石流、地すべり、がけ崩れ、雪崩の発生予測、監視手法について現在の研究概要と今後の課題を述べた。

現時点では、個別の土砂移動現象に対してある程度の精度で発生予測、監視が可能なレベルまで達していると考えられる。今後とも研究を継続し、より一層の精度向上を計り、的確な警戒避難対策に結びつけていく必要がある。

一方、様々な土砂移動現象が同一区域で幅輻して発生する場合の総合的な警戒避難システムの構築手法については、個々の技術の寄せ集めのみでは十分な対応は困難と考えられる。個々の現象に対する予測・情報伝達技術と GIS との組み合わせによって総合的な土砂災害防止のための情報収集、解析、危険度評価、情報伝達、避難を一元的に扱うことのできるシステムを開発する必要がある。

21 世紀初頭には、情報関連技術及び関連する公共設備等が一層進展し、老若男女を問わずインターネットを活用し、携帯電話も国民一人一人が所有することとなろう。土砂災害に関するソフト対策は当然これを前提として進めなければならない。これまで記述した様にそれぞれの対策技術には課題が残されているが、情報関連技術のハード化が進む昨今、それを支援するソフトの土砂災害対策の整備を急ぎたい。

また、20 世紀では十分に把握できなかった土の中・雲の中・雪の中等を広範囲に精度良く把握する技術の向上も今世紀の大きな課題である。21 世紀を迎え、これらの課題解消に向けて、砂防研究の一層の研究促進に努力したい。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所砂防部急傾斜地崩壊研究室ほか：AE による斜面動態計測システムに関する共同研究報告書，共同研究報告書第 228 号，建設省土木研究所，1999。

反町雄二*



建設省土木研究所砂防部長
Yuji SORIMACHI