

豪雨時の表層崩壊予測と減災 —通行規制、避難、事前対策に向けて—

Prediction and Disaster Mitigation for Shallow Slope Failure caused by Heavy Rainfall

沖 村 孝
Takashi Okimura

1. はじめに

2011 年は歴史に残る大災害が頻発した年であった。3 月 11 日には、1900 年以降世界で第 4 位にランクされるマグニチュード 9.0 の東北地方太平洋沖地震(東日本大震災)が発生した。観測された最大加速度は宮城県築館や塩竈では 2,000 ガルを超える震度 7 の大きな地震¹⁾で、地殻変動も宮城県沖で水平最大 24m 東に、鉛直方向には約 3m 上昇した²⁾。この影響を受けて三陸沿岸では地盤沈下が顕在化し、岩手県陸前高田では 84cm の沈下が出現³⁾し、港湾施設は水没のため使用不可能になった。また地震の継続時間は 4 分を超え、阪神・淡路大震災を引き起こした兵庫県南部地震の 20 数秒に比してはるかに長いものであった⁴⁾ため、関東地方では液状化現象が千葉県浦安市をはじめ各地で観測され、多くの家屋の基礎の被害が報告されている。加えて、この地震により 10m を超える大きな津波が発生し、20m を超える浸水深を各地で観測した。この地震や津波により死者 15,840 名(阪神・淡路大震災では 6,434 名以下同様)、行方不明 3,646 名(3 名)、全壊 121,691 戸(111,942 戸)、半壊 198,816 戸(144,370 戸)にも達する大災害となった⁵⁾。加えて、福島では原子力発電所の津波による被災で放射能被害が現在でも継続中である。

この災害から約 6 ヶ月後の 8 月 30 日から 9 月 6 日にかけて台風 12 号による豪雨が紀伊半島を襲い、奈良県上北山村では総降水量が 1,812mm(年間平均降水量は 2,713.8mm)、十津川村では 1,358mm(2,314.0mm)をはじめ、各地で 1,000mm を超える集中豪雨が発生した^{6),7)}。この豪雨により紀伊半島では 17 箇所で河道閉塞を伴う大規模崩壊が発生した。このうち、奈良県五條市大塔町赤谷、和歌山県田辺市熊野、奈良県十津川村長殿など 5 箇所では国土交通省による緊急調査が行われ、決壊による二次災害の対策が実施された。この豪雨では土砂災害に加えて洪水災害も発生し、9 月 5 日 22:00 に発表された内閣府の報告によれば、死者 34 名、行方不明 55 名、全壊 86 棟、半壊 19 棟、一部損壊 107 棟、床上浸水 2,126 棟、床下浸水 12,343 棟にも達する大きな被害となった⁸⁾。このように近年では頻発する自然災害により、多くの人命や財産の損失が毎年のように発生している。

かつて筆者は多発する自然災害のうち、特に斜面表層崩壊に着目し、これを予測する手法を概観し、現状の課題を指摘するとともに、課題の背景となった原因を探った報告を行った⁹⁾。本稿では、2 にその内容を改めて紹介するとともに、防災・減災の視点から課題を解決する一手法として予測手法を紹介し、その活用について述べる。

2. 斜面表層崩壊予測技術の従来課題⁹⁾

2.1 危険斜面の予測

災害を防ぐ、あるいは減少させるための対策としては、ハードウェアとしての防災対策工事がまず考えられる。この工事を効果的に行うためには、危険な場所の特定を行う必要がある。このため約 50~60 年前から危険斜面の予測に関する研究が精力的に進められてきているにもかかわらず、信頼度の高い予測手法は未だ確立されていない現状にあるといえる。自然斜面を対象とした場合、予測手法が確立されていない原因としては、1) 自然斜面で発生する斜面崩壊には、

表層崩壊、大規模崩壊、深層崩壊、落石・転石、トップリング崩壊、地すべり、土石流等、さまざまな種類があり、それぞれ崩壊メカニズムが異なる、2)このため、それぞれの崩壊現象・形態ごとに崩壊発生に影響すると思われる地質、地形、地盤、植生要因が求められ、点数法あるいは数量化法等によって崩壊、非崩壊の判別が行われているが、そこで用いられている目視で得られる地形情報や地質、植生情報のみでは予測が困難であること、3)すべり面は地中に出現するが、表土層厚の深さやその分布、地中の不連続面など地表面下の情報を広範囲にわたって得る手法が提案されていない、4)豪雨時の雨水の浸透、流下の機構や挙動を広範囲に把握、観測できる手法が確立されていないため、浸透水の挙動が不明であることに加えて、崩壊発生の原因となった雨の降り方は様々であるため、危険斜面予測に際しては一般に豪雨の要因が採用されていない、5)土や岩の強度定数を現地ですべて求める手法が確立されておらず、加えて、自然斜面ではそのばらつきが大きく、盛土に比して安定計算による安全率のばらつきも大きくなる、等が考えられることにより、危険斜面の位置をあらかじめ知ることは困難である。このため、自然斜面を対象としたハードウェアである構造物による防災は、保全対象物の重要度、あるいは保全対象である人家の戸数の多さにより決定されている。

一方、切土や盛土などの人工斜面では、道路では平成8年の一斉点検の手法を介して、危険斜面の抽出を行い、対策が必要とされる斜面、防災カルテを作成し対応する斜面、特に新たな対策を必要としない斜面に区分され、要対策斜面では積極的な防災対策工事が行われた。この一斉点検では、人工斜面のみならず、道路沿線に展開する自然斜面の点検も行われているが、人工斜面および自然斜面ともに上述した1)から5)の課題が残っている。一斉点検以外では重大事故が発生した場合、この原因を明らかにするための調査が実施され、調査を通して原因が特定された場合は、この原因を有する斜面を一斉に調査を行うことにより、危険斜面として抽出する手法も用いられている。しかし、この手法でも災害発生当時の豪雨（総降水量、最大降水強度や降雨パターン等）あるいは地震（最大加速度、周期特性、継続時間等）などの誘因が前提条件として設定される傾向が強く、異なる降雨に対する考察が少なく、このため得られる抽出結果も信頼度に欠けることが多々ある。

盛土や切土等の人工斜面の最大の特徴は維持管理を通して危険斜面の予測を行い、対策を講じる仕組みが構築されていることである。壊れてから復旧する場合に比して、事前に対策がとれば人命を守ることができるのみならず、経済的にも効率的である。人工斜面も含めた道路等の社会資本は今後の課題として、現存する社会資本の長寿命化を図っていく必要が指摘されており、今後、この維持管理はますます重視されていく必要がある。

維持管理を通して、危険斜面を予測する方法は、従来の日常点検や定期点検の手法に加えてより長期的な視野を持ち、点検結果の長期的なトレンドを見ていくことも必要である。長期間を視野に入れた危険度予測の手法としては、道路や鉄道等の人工斜面に対しては、従来型の一斉点検等による危険斜面の抽出の精度の向上を図るとともに、新たに、維持管理を通して得られた風化や劣化による危険斜面の抽出を試みることも考えられる。具体的には維持管理も従来型のシートにチェックする方式に加えて、キレツや沈下、湧水等の定量的な計測も追加し、これらのデータを蓄積することにより、将来的には横軸に時間、縦軸に斜面の安定度で表される斜面の安定性能曲線の作成を目指すべきであろう。すなわち、維持管理は、単に危険度の短期的な兆現象の把握のみならず、より中長期的な視点をも加え、長期的な安定性能曲線の作成をも目指すべきであると考えられる。維持管理を通して、もしこの曲線が得られるならば長期的な危険の逼迫度が把握出来るとともに、破壊する前に対策を行うことにより危険の回避ができるとともに、補強、修復対策により復旧対策よりコストの縮減を目指すことが期待される。このように中長期的の対策を意図した維持管理体制を早急に確立することは、社会資本の延命化、維持管理経費の縮減にも貢献できる。

2.2 危険時刻の予測

斜面崩壊を防ぐことができなかつた場合でも、被害を減少させるための対策として次に考えられた手法は、ソフトウェアによる減災対策である。具体的には、道路における異常気象時通行規制、鉄道では運転規制である。道路における通行規制は、昭和43年に発生した飛騨川バス転落事故を受けて導入された制度で、豪雨時に崩壊発生の危険性があると想定された区間を通行規制区間として定め、豪雨時に通行を規制することにより、崩壊が発生しても災害が出現しないような仕組みである。しかし、この通行規制区間の設定は経験的に決められた場合が多く、区間外で崩壊が発生することもあった¹⁰⁾。この区間での通行規制のタイミングとしては降雨データが使われ、規制区間近傍に設置されている雨量計

によるデータを用いて、「連続降雨量」が規制開始のパラメータとして使用された。この規制値は、それぞれの規制区間ごとに過去の崩壊発生時の記録等を活用して設定された。また、規制解除は、2mm/h が 3 時間継続した場合と定められた。いずれも経験値で、かつ安全側であったため、規制時間内に崩壊が発生せず、いわゆる空振りに終わったり、規制時間が長時間に及ぶこともあったが、災害を減少させる大きな役割を果たした¹⁰⁾。

一方、鉄道（国鉄）では、戦前から路線保守担当区ごとに升を設置し、その升に貯まった水深を計測して列車の運行を規制していたが、その後、雨量測定の大規模化が進み、運転規制の方法も各管理局ごとに標準化されていた¹⁰⁾。このため、昭和 43 年の飛騨川バス転落事故の際にも国道に平行に走る高山線では運転が規制されており、事故を未然に防ぐことができた。昭和 47 年には新たな基準が設けられ、1)雨量は路線に設置された雨量計によること、2)規制は警備、速度規制、運転中止の 3 段階とすること、3)雨量パラメータは「時間雨量」と「連続雨量」の二つを用いること、4)規制区間は駅間を単位とすること等が決められた。この規制により、年平均 9 件あった豪雨災害による列車脱線事故は、昭和 49 年から昭和 61 年までの 13 年間で、計 3 件と激減したことが報告されている¹⁰⁾。

これらの通行規制や運転規制に用いられている雨量は、上述したように道路近傍や駅に設置された雨量計により得られているが、近年は気象観測体制が拡充し、気象庁によるレーダアメダス解析雨量が、平成 18 年より 1km×1km の大きさで、30 分ごとに発表され、集中豪雨時には、短時間降雨予報が 1 時間から 6 時間先まで出されるようになってきている。加えて、国土交通省では X バンドマルチパラメータを活用したレーダ観測により、250m×250m の精度で観測降雨量が得られるようになってきている。このため今後の課題としては、管理者が設置している雨量計のみならず、これらの広域にわたる観測データを活用し、また規制雨量のみならず短時間降雨予報を活用して崩壊危険時刻を予め知ることに、より信頼度の高い通行規制が行われることが期待される。

2.3 自然斜面崩壊からの住民の避難行動に向けて

2.1 および 2.2 に述べた予測は、いずれも道路の管理機関及び鉄道会社により管理されている人工斜面あるいは人工構造物を対象としているが、わが国では管理が行われていない自然斜面の崩壊や土石流も頻発している。これらの現象による被害は、重要構造物のみならず住民の命や家屋にも被害が及んでいる。この被害を防ぐためには、土砂災害防止施設（ハードウェア）による対策が必要であるが、予算の制限もあり、十分な対策が行われているとは言い難い状況にある。このため、主として土石流危険渓流を対象として、土石流発生危険度を雨量を指標として求め、この情報を行政が発信することにより早期の警戒避難体制を図る仕組みが、昭和 50 年代後半から提案されてきた。そこでは、過去の降雨の履歴を表すことができるタンクモデルと過去の災害発生記録の関係を用いた手法が提案されたが、平成に入ると先行雨量の効果を減じさせる実効雨量の考え方が導入され、パラメータとしては総降雨量と時間雨量に相当する二つの実効雨量が用いられ、過去の災害記録より土砂災害発生基準線（以下、CL と称する）が設定され、これを基に行政の警戒避難体制の立ち上げに活用されてきた。

その後、この手法は土石流のみならず崩壊にも開発され、土石流危険渓流や急傾斜地崩壊危険区域を対象として崩壊危険度を行政が発信することにより、警戒避難のための情報を住民に提供してきている。しかし、この情報は斜面災害の原因となる崩壊発生場所に関する情報であり、いざ避難をしようとしてもどの地区が土砂災害に対して避難を要する場所なのか、この手法では不明であった。しかし、1999 年の広島豪雨災害を契機として、2001 年には避難を要する地域を、都道府県が土砂災害警戒避難区域として定める法律が制定され、がけ崩れ、土石流、地すべりごとに避難区域が設定される仕組みが構築された。この場合、がけ崩れや土石流が発生する可能性がある場所は、より広域に安全に避難が実行されることを目指して、がけ崩れの場合、傾斜 30°、高さ 5m 以上の斜面は全て崩壊する可能性があるものとされ、一方、土石流では流域面積 5km² 以下の流域面積の急勾配渓流では土石流が発生するものとされた。この条件を満たす斜面または渓流の下流で警戒区域が設定されることになるが、災害の原因となる斜面や渓流の数があまりにも多く、また安全側で避難してもらうために、大きめの警戒区域が設定されることになった。このため警戒区域内に避難所が出現する事態が出現したり、過去に実施された工事による効果も定量的に評価できず、避難すべき住民のリスク認知が得られない場合もある等の課題もある。

一方、これらの警戒区域で「いつ」避難するかという情報は、上述した「連続有効降雨量」と「時間有効降雨量」の二つのパラメータを活用したCL法や、あるいは気象庁が提案した「土壌雨量指数」を連続降雨量の代わりに用いて、降雨出現確率から危険時刻を予測する手法が、国土交通省と気象庁により土砂災害警戒情報として平成20年3月より運用されている。しかし、この警戒情報には次の二つの課題が存在している。一つ目は、危険時刻の判断が、当該地域の過去の災害経験や降雨の超過確率によって判断されていることである。近年、集中豪雨の出現回数が多くなっていることが、国土交通省によって指摘されている。それによれば、時間雨量50mm以上の集中豪雨の日本での出現頻度が30年前に比して、ここ10年では約1.4倍になっている¹¹⁾。ということは、過去の降雨データに起因する災害記録や統計データが現状では少し異なっている可能性があり、危険度判定の信頼度は少し劣るのではないかという課題が存在する。二つ目の課題は、この土砂災害警戒情報は、市町村の行政単位に発信されることである。面積の大きな行政区では、どこの土砂災害警戒区域が危険な区域となるかが不明となり、避難勧告等を発信すべき地区が不明なため、緊急の対応等が効果的に行い難いことである。

3. 「リアルタイム崩壊予測システム」の活用

ここまで現状の手法と課題について検討したが、最大の課題は、2.1で述べたように危険斜面の予測では地震や豪雨の大きさ（加速度や総降雨量等）や特性（降雨では降雨パターン、降雨強度等、地震では周期特性、継続時間等）が考えられておらず、危険時刻の予測では地形や地質など、場が示す条件が考えられていないことである。この課題の改善のための方法を別稿⁹⁾で指摘したが、それを再掲すると以下のとおりである。

- 素因は風化や劣化など過去からの傾向をも知り、誘因は地域の特徴を把握する必要がある
- 素因と誘因の重ねあわせでは多様な崩壊形態を予測できない
- 多様な崩壊形態から多発する（災害の原因となることが多い）崩壊形態の特定により信頼度の向上を図る
- 降雨を入力条件とした物理モデルの構築が必要である
- 崩壊規模の予測は困難である
- 崩壊の発生場所と被災の発生場所は同じではない
- 防災・減災はハードウェア、ソフトウェア、ヒューマンウェアで達成する必要がある

別稿⁹⁾ではこれらの課題とその背景について論じたが、本稿ではこれらの課題を解決する手法の一つとして、現在開発中の「リアルタイム崩壊予測システム」¹²⁾を活用した道路通行規制の考え方、自然斜面崩壊からの避難手法の進め方、および効果的な事前対策場所の選定手法に関して議論を進め、ハードウェア（効果的な事前対策場所）、ソフトウェア（道路通行規制）、ヒューマンウェア（自然斜面崩壊からの避難）で防災・減災を達成する考え方について議論を進める。

3.1 「リアルタイム崩壊予測システム」の概要¹²⁾

近年、レーダ技術の発展により、空中からもしくは地上でレーダ波を放射し、地物で反射してきた波をとらえることにより地物の形状を正確に測定する手法は大きく進歩してきた。特に山地においては、従来の空中写真では植生により地形の正確な把握が困難であったが、レーダ波は植生を透過することもあり、山地の正確な地形形状が把握できるようになってきた。このため数十センチメートルの格子間隔で数値地形モデル（DEM）の作成も可能になり、微地形をも含めたDEMが入手できるようになり、正しい地表面傾斜を求めることが可能になってきた。一方、降雨も2.2に述べたように、1km×1kmを単位としたレーダアメダス解析雨量が10分ごとに求められるとともに、1～6時間先までの時間雨量が短時間降雨予報として30分ごとに発表されるようになってきた。

沖村・市川¹³⁾はかつて10m格子間隔のDEMを用いて、格子点に表土層厚を入力したモデルを作成し、このモデルに降雨量を入力することにより、10m格子のセルごとに表土層内の水位を求め、この水位とセルの傾斜と表土層厚を用いて、無限長斜面安定解析によりセルの安全率を求めることにより、時々刻々変化する降雨条件下で出現する危険セルの位置を求める手法を提案した。この手法を活用して、六甲山系における危険となる土砂災害警戒区域を求め、住民の避難行動のための情報を提供する箇所別土砂災害危険情報システムを兵庫県と一緒に開発してきた^{14)～16)}。

モデルは、具体的には、

