

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前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、

- 1) 対象流域のDEMを高速フーリエ級数によりスムージングし、2次微分、3次微分することにより自動的に頂部斜面、谷壁斜面、谷底斜面に微地形分類する
- 2) 微地形区分ごとに、セルの傾斜 (θ) と表土層厚 (H) の関係式を設定し、セルの表土層厚 (H) を推定する
- 3) この表土層厚をセルに与え、表土層厚を持ったDEMを構築する
- 4) レーダアメダス解析雨量と1~3時間先の短時間降雨予報を入力する
- 5) 地下水モデル¹³⁾を使って、各セルで4段階の異なる時刻で浸透水位 (h) を30分ごとに計算する
- 6) セルの地形・水位条件 (θ , H , h) と地盤条件 (c , ϕ) を用いて、無限長斜面安定解析式より、30分ごとに4段階のセルの安全率を求める、ものである。

以上の仮定より、本手法は連続体である地形表面を10mで離散化していること、傾斜をもとに表土層厚を推定していること、地盤条件 (k , c , ϕ , γ 等) は一様であると仮定していること等、大きな仮定が入っている。

この「リアルタイム崩壊予測システム」に関しては、すでにいくつかの機会、構築プロセスを紹介¹²⁾し、実際に適用するに際して顕在化した課題と解決手法に関しては既報^{14)~16)}に紹介してきているため、本稿では詳細な説明を省略する。詳しくは参考文献を参照されたい。この手法を用いることにより、危険なセルの空間位置と危険になる時刻が算出できる。

3.2 「リアルタイム崩壊予測システム」を活用した道路通行規制の考え方

昭和43年8月、時間雨量100mmを超える集中豪雨により国道41号に立ち往生していたバス2台に土石流が直撃し、死者104名を出す大惨事が発生した。この時に亡くなった遺族側から国の道路管理の責任を求める訴訟が出され、第2審で土石流の危険性は予測不可能であったが、通行止めの措置を取らなかったとして国の責任が認められる判決が下された。この事故を受けて、国では5年ごとに道路防災点検の実施を制度化するとともに、雨量に基づく事前通行規制を行う仕組みを確立した。この仕組みを実施するためには、それぞれの道路で、危険な場所(通行規制区間:空間)をあらかじめ定め、さらに通行を規制する危険な雨量(規制雨量:時間)を決めておく必要がある。通行規制区間は過去のデータで崩壊が多発する場所が選定され、規制雨量は総降雨量で定義されることになり、この値も過去の経験からそれぞれの規制区間で設定された。総降雨量のリセットは2.2に述べたように時間雨量2mm以下が3時間継続した場合とされた。

規制区間は、図-1¹⁰⁾に示すように、昭和55年当時は全国で250区間近くあり、その後減少したが、昭和63年頃には一時増加した。しかし、防災対策が行われることにより減少し、平成16年では193区間になっている¹⁰⁾。規制雨量に関しては、その後、降雨観測精度が向上し、砂防(自然斜面)や鉄道、高速道路では総雨量に加えて、時間雨量も使われるようになっているが、道路関係では現在まで総降雨量のみが使われている。

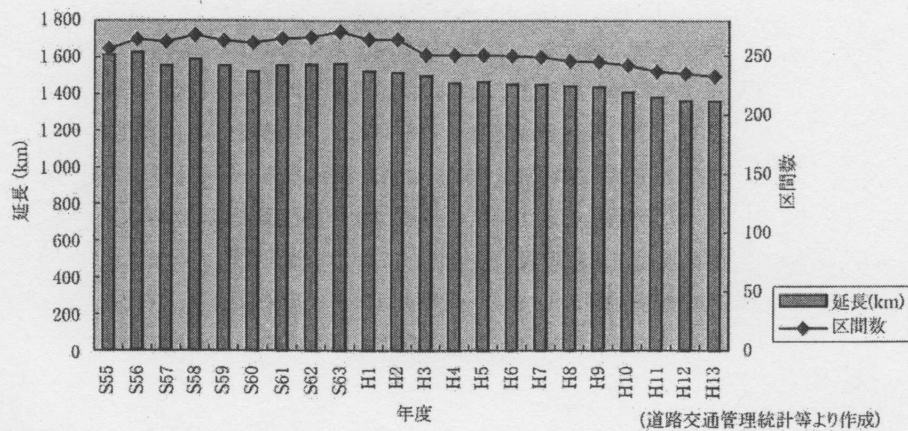


図-1 事前通行規制区間数、延長の推移¹⁰⁾

(国土交通省直轄の一般国道、昭和55~平成13(1980~2001)年度)

現状の課題としては、通行止めの時間を、1) 通行規制したにもかかわらず無災害であった時間、2) 規制区間内で災害があり通行止めした時間、3) 規制区間以外で災害があり通行止めした時間に区分すると、図-2¹⁰⁾に示すように、3) が一番大きく、次いで1)、2)の順となっていることである。3)の課題は通行規制区間(危険空間)の設定にかかわるものであり、1)の課題は規制雨量の設定(危険時間)にかかわるものである。このため、規制区間内の防災対策が行われるとともに、規制区間そのものの設定の見直しや規制雨量の検討が行われているが、近年、50mmを超える時間雨量の出現頻度が2.3で述べたように増大している¹¹⁾こともあり、大きな時間降雨量を経験してこなかった過去の被災データに基づいた規制手法では限界があることが明らかになってきている。



図-2 通行止め時間とその内訳¹⁰⁾

(国土交通省直轄の一般国道、平成2~16(1990~2004)年度)

現状では、規制区間内の斜面の安全を向上させる対策が積極的に行われ、規制区間の解除により道路の通行サービス性能の確保、安全の向上のための施策が目指されている。しかし、規制区間を解除するためには、1) 対策工の施工、2) 学識経験者による検討、3) さまざまな降雨によっても崩壊しない実証データの収集が必要であり、防災対策工事が実施されていても解除には時間を要する事態となっている。加えて、近年、道路の土砂災害は道路のり面からの災害のみならず、道路施設管理区域外である自然斜面の崩壊によるもらい災害も頻発している。このため、管理区間の解除はあまり進まず、道路通行サービス機能が、直ちに向上しない状況が生まれている。このため、通行規制雨量を大きくすることにより通行止め回数や時間を減少させ、通行サービス機能を向上させる手法が進められつつある。

これら危険区間や危険時間に関する課題を解決するためには、対策工の効果を評価するとともに、また、過去の経験に依存しない規制手法が必要であり、この条件を満足させるためには、時間とともに変化する降雨量を入力して、道路のり面の安定度を評価する物理モデルの導入が必要となる。これを満足する一手法が「リアルタイム崩壊予測システム」である。この手法は、上述したように降雨量を入力して、危険なセルの位置と危険な時刻を計算により求めることができる。このため、道路の通行規制の課題(規制雨量の妥当性)に対しては、次のプロセスにより検討できる。1) あらかじめ決められている通行規制区間を解析対象として、レーザプロファイラーにより、詳細なDEMをまず求める。2) この範囲は、もらい災害の可能性を評価するために規制区間の道路に沿った自然斜面の尾根部までを対象とする。3) さらに道路に沿った斜面対策工の位置も正確に記入する。対策工の評価は、大きな変状を来していない対策工は効果があるものとして大きな強度を与える。4) 切り取り法面は表土層厚を薄くする。5) 切り取り法面と自然斜面の境界は通常遷急線となり、自然斜面は切り取りにより下端部が解放されているため、崩壊しやすいことを考慮して遷急線を含むセルはせん断抵抗強度を小さくする(「リアルタイム崩壊予測システム」のセルでは下端解放による不安定化を表現できないため)等の検討が必要である。

一方、降雨は、当該通行規制区域に与えられている規制雨量は総降雨量であるため、この総降雨量を満たす降雨型、例えば前方集中型、中央集中型、後方集中型等の様々な想定降雨パターンを設定する。この時の想定降雨継続時間は、当該地方での最頻値を与える。

以上、境界条件の設定をした後、様々な想定降雨パターンの条件下で、崩壊が発生しなければこの規制雨量は妥当な値となろう。対策により効果が期待できる場合は、規制雨量を大きくし、どの値まで可能かを求めることにより、新たな規制雨量の候補値を求めることができる。但し、この考え方は規制値の設定に関するものであり、この規制値を超えると区間内では崩壊が発生することになる。しかしその時点では既に通行規制が行われており、崩壊があっても人命や車両に関する被災は防ぐことができる。

崩壊が出現せず、降雨が停止、もしくは少なくなった場合の規制解除は、現行では2mm/hが3時間継続したこと及び道路パトロールで崩壊がないことを確認した後に解除されることになっている。この解除時刻を、「リアルタイム崩壊予測システム」を活用して求める場合には、本来は安全率の絶対値が1.0以上になった場合が安全の確認になるが、六甲山系で過去の崩壊事例を解析したところ、降雨停止後、24~50時間程度まで赤のセルが継続することが明らかになっている。これは、斜面下方のセルでは上流からの浸透水が流入し続けるため、長時間にわたって安全率が1.0以下になる傾向があることが明らかになっている。

このため、安全率の絶対値が1.0以下であっても、安全率の変化がゼロかあるいは上昇に転じた場合に規制解除（赤色を黄色にする）とする基準で検討した。その結果を図-3に示す。この例では降雨終了後、改良前は55時間「警戒」（赤）判定が継続していたが、改良後は8時間継続となった。それでも長時間解除ができない状態になっている。この時間が長いと行政の警戒態勢が続くことになり、現在、より早期の警戒時間解消の方法について再検討中で、その成果の一部は次報で紹介する予定である。

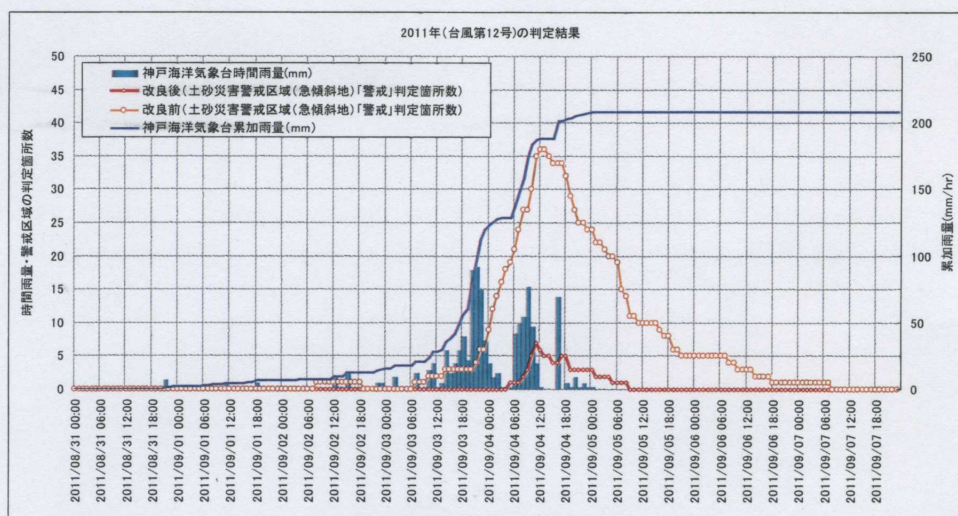


図-3 警戒セル数の時間変化

3.3 「リアルタイム崩壊予測システム」を活用した自然斜面崩壊からの避難手法の進め方

自然斜面の崩壊による防災対策は従来から崩壊した斜面の原形復旧対策が従来から主として行われていた。しかし、この手法では崩壊の発生により貴重な人命を失う機会があり、現に、本原稿を執筆している2013年の夏期においても7月28日の山口・島根豪雨災害では死者・行方不明4名が、8月9日の秋田・岩手豪雨災害では仙北市内の土石流により6名の尊い人命が失われる災害が発生している。このような尊い人命の損失を防ぐため、1999年の広島豪雨災害を契機として、「土砂災害警戒区域等における土砂災害の防止対策の推進に関する法律」が2.3で述べたように2001年4月に施行された。この法律は、従来の壊れてから直す手法ではなく、避難によって人命を守る初めての法律である。避難を行うためには避難を要する区域（土砂災害警戒区域）といつ避難を必要とするか（土砂災害警戒情報）の二つの情報が必要である。土砂災害警戒区域は、土砂災害の原因であるがけくずれ、地すべり、土石流毎に設定の方法が定められて

いる。がけくずれの場合は、2.3で述べたように高さ5m以上、傾斜30度以上の自然斜面は全て崩壊する可能性があると思なされ、この斜面の上部、下部で土砂災害警戒区域（イエロー）が設定され、この区域内に居住する住民は、豪雨時に市町村から出される避難勧告により避難することになっている。特に危険な区域は土砂災害特別警戒区域（レッド）が設定され、ここでは新たな開発行為が規制されるとともに、既存の家屋の補強や移転により命の安全を確保する仕組みがとられている。これらの区域指定は都道府県により設定される。土砂災害警戒区域は、がけくずれの場合、がけの高さの2倍もしくは50m以内となっている。一方土石流の場合は、傾斜が2度までは流下するものとして警戒区域が設定されている。これらの基準は、過去の実績を元に経験的に決められている。

一方、避難を要する時刻に関しては、市町村からの避難勧告や指示が住民に対して行われるが、土砂災害に関しては市町村では判断しがたい場合が多いため、都道府県が气象台と協同して土砂災害警戒情報を市町村や住民に発信することになっている。2.2で述べたように国道では規制雨量は総降雨量であったが、自然斜面を対象とした土砂災害警戒情報では、総降雨量に相当する長期雨量指標に加えて短時間雨量指標の二つのパラメータを当初使用していた。しかし、2008年から国土交通省と気象庁による連携手法が新たに提案された。そこでは長期（総）雨量指標としては観測された雨量ではなく、地面に浸透した雨量を擬似的に表す土壌雨量指数を連続雨量に変わるパラメータとして提案し、一方、短時間雨量指標としてはレーダアメダス解析雨量の60分間積算雨量を採用し、非発生降雨の発現頻度から安全領域を評価する手法（RBFN）が採用され、過去の降雨から得られる降雨の応答曲面上に崩壊、非崩壊を区分するCLが設定され、このCLから崩壊、非崩壊が判別されるようになってきた。更に、この応答曲面上に、気象庁から発表される1時間から3時間先の短時間降雨予報値を入力することにより、3時間先までの危険度を評価している。しかし、上述したようにここ30年間の降雨の特徴としては、時間雨量50mmという「滝のような雨」の出現頻度が多くなり、過去の降雨情報から設定されているCLでいいのかという疑問も生じてきている。加えて、既に述べたように、この土砂災害警戒情報は、短時間降雨予報の単位である5km×5kmの範囲で出されている。この予報単位が広域であるため、避難情報を発信する市町村では、どの警戒区域が本当に危険になっているかが不明なため、土砂災害警戒情報が都道府県から発信されても、この情報が直ちに避難勧告に結び付かない現状にある。

これらの課題を解決する手法として、3.1で紹介した「リアルタイム崩壊予測システム」の活用が考えられる。既に六甲山系では、兵庫県砂防課と建設工学研究所が一緒になって、2008年度より、「六甲山系箇所別予測システム」の構築を行ってきている¹²⁾。そこでは、六甲山系を対象として「リアルタイム崩壊予測システム」を活用し、レーダアメダス解析雨量と3時間先までの短時間降雨予報値を入力して、各セルごとに得られた安全率の結果を1.0以下は赤、1.0～1.05は黄色として表示するものであり、この結果を急傾斜、土石流の土砂災害警戒区域図にオーバーレイすることにより、土砂災害警戒区域ごとの結果として示すものである。具体的には、急傾斜の場合は土砂災害警戒区域内に1箇所でも黄色のセルが出現した場合や赤のセルが出現した場合、それぞれ土砂災害警戒区域を黄色もしくは赤にペイントする。一方土石流の場合は、昭和42年災害時の流域面積と崩壊面積率の関係を求め、土石流発生溪流と非発生溪流の限界曲線を予め求め、さらに土石流の土砂災害警戒区域の上流端の集水面積を求めておく。リアルタイムに降雨を入力し、流域面積内の黄色の崩壊面積率や赤セルの崩壊面積率を計算し、限界曲線から求められる限界面積率に達した場合、土石流土砂災害警戒区域を黄色もしくは赤色にペイントすることとした（図-4¹²⁾参照）。

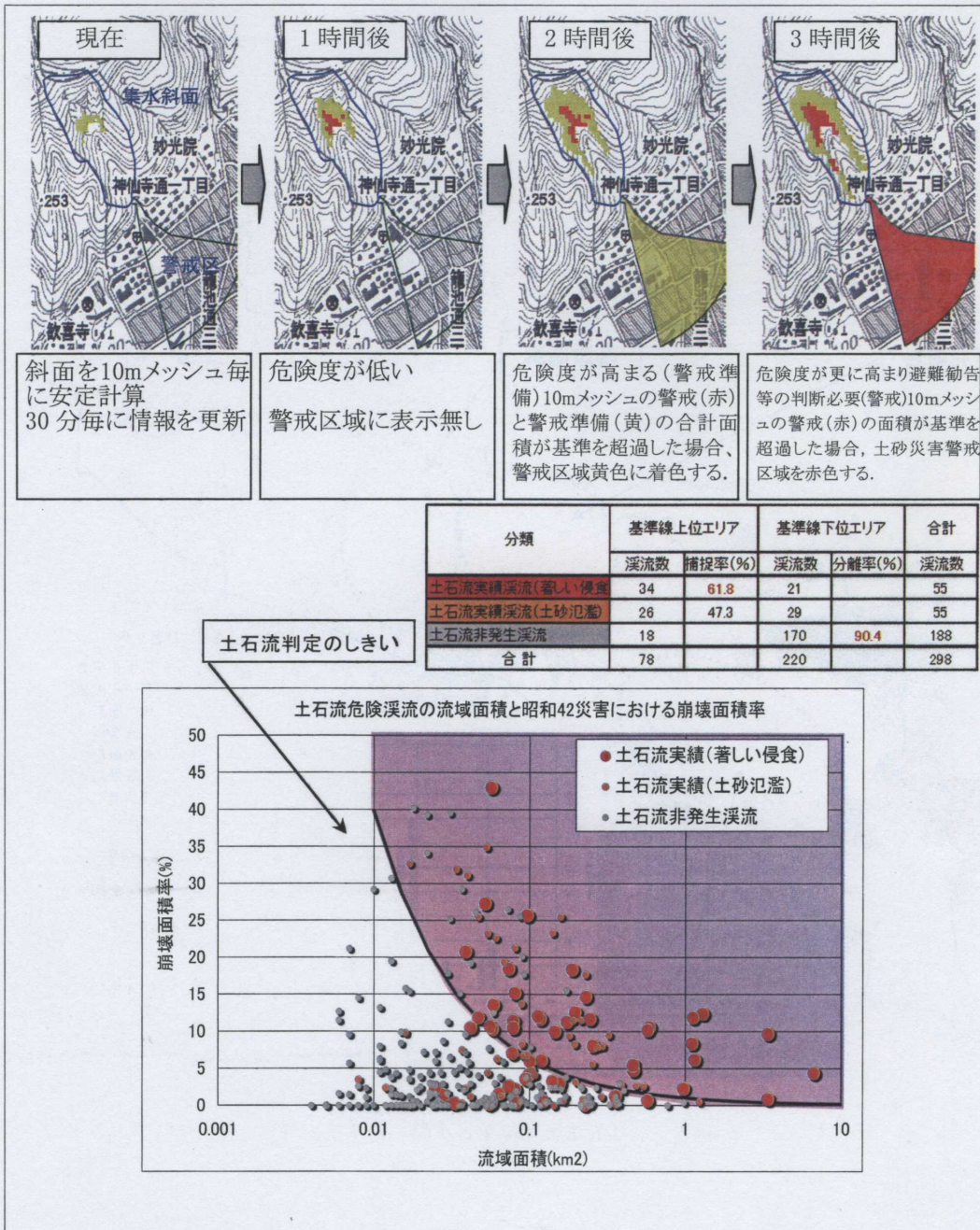


図-4 土石流による土砂災害警戒区域の警戒・危険判定の考え方¹²⁾

昭和42年豪雨の六甲山系内の降雨記録を元に、各時間の等雨量線図を作成し、この図より5km格子の降雨量を作成し、昭和42年豪雨のシミュレーションを行った。その結果を図-5¹²⁾に示す。この図には西六甲、中六甲、東六甲地域における崩壊出現セルの時間変化も示している。この時の雨域は、西から東へ移動していたが、崩壊出現セルの時間変化も西でまず出現し、ピークが東に行くに従って遅くなる傾向を示している。

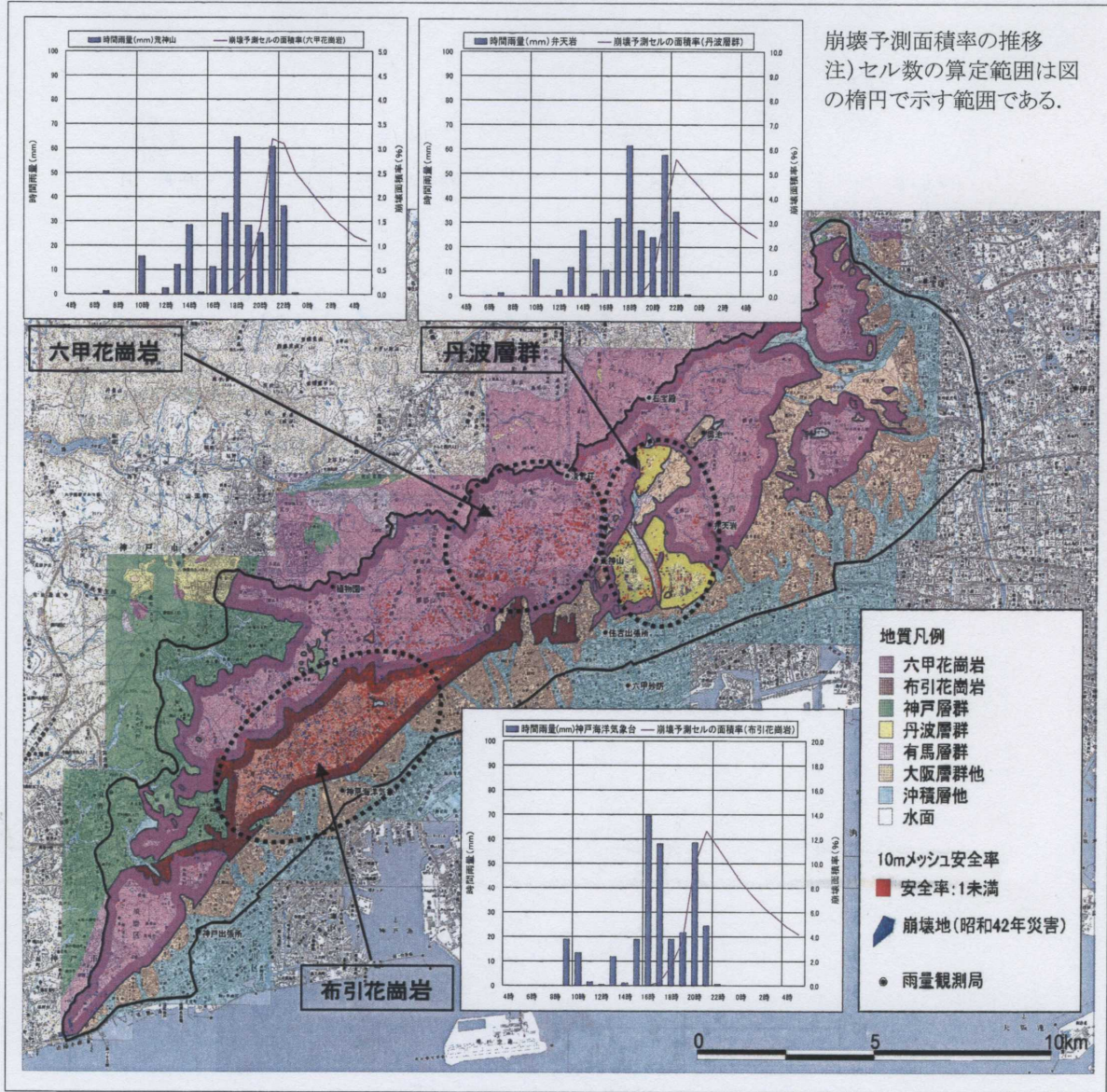


図-5 崩壊発生予測結果と実際の崩壊地の関係¹²⁾

表-1 は赤セルと昭和 42 年豪雨により発生した崩壊との空間位置関係を示したものである。崩壊が発生していないセルを非崩壊と予測する D の数が多かったため、崩壊・非崩壊を予測する「的中率」は 94.9%と大きな値を示しているが、崩壊したセルを予測できた「捕捉率」は 63.9%とそんなに大きくはなく、この逆の「見逃率」は 36.1%と大きくなった。この「見逃率」は崩壊予測を行う側にとっては重要で、できる限り少なくする必要がある。一方、崩壊を予測したにもかかわらず崩壊しなかった「空振率」は 4.1%と小さいが、これは D の数値が入っているためである。この「空振率」が大きいと、「オオカミ少年」的になるが、避難をしてもらうためには大きくなってしまったと思われる。

表-1 昭和42年災害の的中率等の精度評価指標（セル単位）

実績 \ 予測	発生予測		非発生予測		計
	A	B	C	D	
崩壊発生	12,190	6,890			19,080
崩壊非発生			35,021	775,004	810,025
計	47,211	781,894			829,105

評価指標	率 (%)	分子 (10mメッシュ数)	分母 (10mメッシュ数)
適中率 = (A+D)/(A+B+C+D)	94.9	787,194	829,105
捕捉率 = (A)/(A+B)	63.9	12,190	19,080
空振率 = (C)/(C+D)	4.1	35,021	845,046
見逃率 = (B)/(A+B)	36.1	6,890	19,080

表-2 は、もし昭和42年当時に土砂災害警戒区域が指定されていると仮定した場合の結果である。急傾斜地の土砂災害警戒区域は本来崩壊が発生しやすい斜面に設定された926区域であるが、そのうちDの値が大きく、「的中率」は80.1%となったが、表-1のセルを対象とした場合に比較すると小さくなっている。「捕捉率」は70%と大きくなり、その逆の「見逃率」は30%となって区域を対象とした方が、表-1より信頼度が増すことがわかった。このため、本手法ではセルに加えて、土砂災害警戒区域も予測単位として表すことにした。

これらの検討の結果、六甲山系におけるモデルは、昭和42年豪雨に土砂災害警戒区域が指定されているとすれば、当時発生した崩壊による被害の情報をある程度信頼をもって予測しうるものと判断した。このシステムによる結果は、地元の市に伝達され、時間と空間に関する効果的な避難情報として活用されることが望まれる。

表-2 昭和42年災害の的中率等の精度評価指標（警戒区域単位）

（土砂災害警戒区域（急傾斜）926箇所における適中率）

実績 \ 予測	発生予測 (箇所数)		非発生予測 (箇所数)		計
	A	B	C	D	
崩壊発生 (箇所数)	63	27			90
崩壊非発生 (箇所数)			157	679	836
計	220	706			926

評価指標	率 (%)	分子 (箇所数)	分母 (箇所数)
適中率 = (A+D)/(A+B+C+D)	80.1	742	926
捕捉率 = (A)/(A+B)	70	63	90
空振率 = (C)/(C+D)	15.8	157	993
見逃率 = (B)/(A+B)	30	27	90

3. 4 予測精度の向上のために

1) 表土層が乾燥状態にある場合

上述したように過去の崩壊事例を対象として本モデルの検証を行った場合、注意しなければならないことは解析対象とした過去の崩壊事例の一連の降雨の前に降った先行降雨の影響である。長期間降雨のない状態で急に大きな降雨強度で降雨があった場合は、降雨の一部は表土層の飽和に費やされるとともに、一部は表流水となり表土層内の水位上昇に

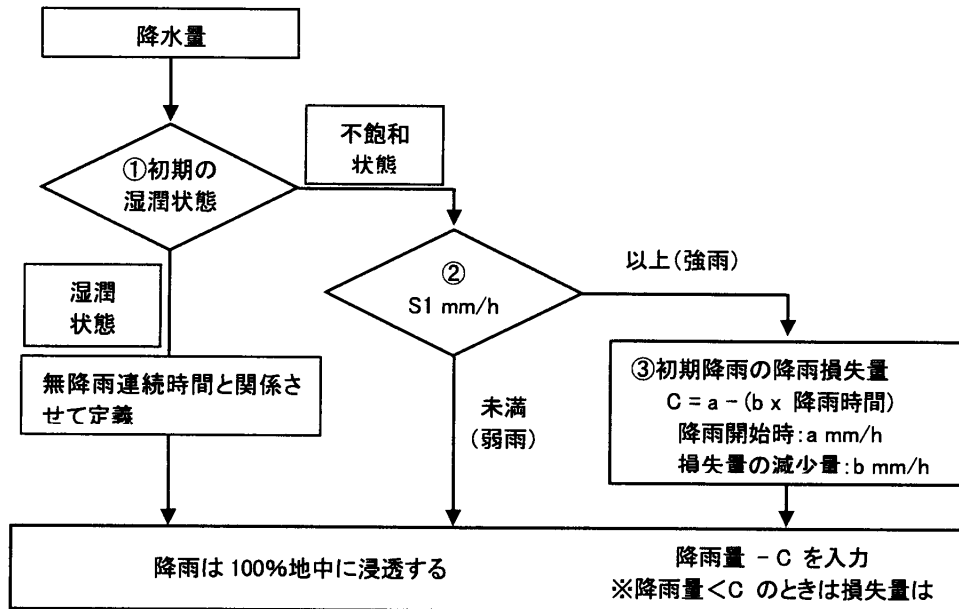


図-6 無降雨連続時間に応じた降雨損失量の算出フロー

としては「降雨損失」となり崩壊発生に寄与できず、本システムで仮定しているように、全ての降雨が表土層内の水位上昇に寄与するという仮定が成り立たないことになる。このため、無降雨連続時間に応じた降雨損失を評価しておく必要がある。六甲山系以外の本研究の一部の対象地区では、平成16年は総降雨量372mmで崩壊が発生し、平成23年には総降雨量483mmで崩壊が発生しない場合があることが見られた。この事例を参考に、後者で崩壊が発生しない損失雨量を無降雨連続時間と関係させて定義した。その考え方を図-6に示す。

近年、100mm/hを超える大きな降雨強度がしばしば観測されている。このように強い降雨があると現実には全ての降雨が浸透水位に寄与することはなく、表土層を飽和させたり一部は浸透せずに表流水となって地表面を流下する。ところが本リアルタイムモデルは、不飽和浸透を考慮せずに降雨すべてが土中の浸透水面に達するものと仮定している。このため、このように浸透水位の上昇に寄与しない降雨を、本リアルタイムモデルでは考慮する必要がある。浸透水位の上昇に寄与しない降雨をここでは降雨損失と称する（本来は流出に寄与しない浸透した雨水や蒸発した雨水等を降雨損失と称しているが、ここでは浸透水に着目しているので浸透水位の上昇に寄与しない雨水を降雨損失と称した）。一方、本リアルタイムモデルでは、表土層の地表面に浸透水位が達した場合は、地表面以上の浸透水は地表流になるものとして以後の計算では考慮していない。従って飽和しているセルに強い降雨があっても降雨損失は発生しないことになる。このため浸透水位が高い場合は、強い降雨であることを考慮する必要はないが、浸透水位がないか、もしくは浅い場合（無降雨が続いた場合もしくは弱い雨が数時間降った場合）は、本モデルではすべての降雨が斜面に入ることになるので、降雨損失が評価できず現実と合わなくなる。このためこのような場合、降雨損失（浸透水位の上昇に寄与しない雨水）を考慮する必要がある。図-6はこの考え方を示したものである。この図では、S1以下の降雨強度の場合は、今までの仮定通り、すべて表土層内に浸透するが、無降雨が続いて浸透水位がないか浅い場合にS1以上の強い降雨強度が出現した場合は降雨損失を考慮することとしている。この降雨損失量は地下水位が低い場合は大きく、高い場合は少なくなる。

しかし、この量は不明であるので、本研究対象地区では見られた、平成16年は総降雨量372mmで崩壊が発生し、平成

