

【建設工学研究所論文報告集第 61 号〔報告〕2019 年 11 月】

表層崩壊リアルタイムハザードシステム結果を活用した 表層崩壊発生時刻について —豪雨中の崩壊発生予測のために—

Some Relationships between the Slope Failures appearing during Heavy Rainfall and the Safety Factors calculated by the Real-Time Hazard System —for the purpose to estimate the slope failure appearing time under the condition of various kind of rainfall patterns—

沖 村 孝 笠 原 拓 造
Takashi Okimura Takuzo Kasahara

1. はじめに

わが国では、豪雨中に山腹斜面が崩壊することにより、多くの人命や財産の損失を被ってきている。この損失を招かないためには、1) 防災構造物の施工による安全の確保、2) 現状での危険場所の周知と避難計画の訓練、3) 都市計画や地域防災計画により危険場所での開発計画の抑制等々が考えられる。しかし、1) の手法では大きな予算措置や建設に長時間を要することもあり、毎年発生する集中豪雨に対しては対応ができない。また、3) では将来の計画であり、現状での対応は困難である。このため、現状においては 2) の手法が効果的であると思われるが、危険場所の判定には様々な自然条件に対応する必要があり、現状の「土砂災害警戒区域」の手法では、境界条件の複雑性に加えて、近年では、様々な降雨特性（降雨強度や継続時間などさまざまな雨の降り方）の豪雨が出現することにより、過去の豪雨時の経験が役に立たず、避難を要する情報の発信方法も様々な試行が試みられている現状にある。

これに対して、筆者らは兵庫県砂防課と共同して 10mメッシュのDEMをベースにした「リアルタイムハザードシステム」の構築を進め、過去の崩壊発生場所の再現が 80%になることを目指した活動を進めている¹⁾。しかし、10m以下の斜面が多く出現する市街地内や、山岳道路沿いでは、10m以下の小規模な崩壊に対しては、対応が困難であることが顕在化した事例もあり、これらに対しては、5mメッシュでの検討を進めている。加えて、上述した人工斜面では、豪雨に由来する雨水の排水が地形の勾配に左右されず、人工的な排水路に沿った排水のために崩壊が発生するなど、雨水の浸透以外のメカニズム面でも更なる検討が要求されている²⁾。

このような地形に由来する境界条件に加えて、近年では、短時間に、局所的に大きな降雨強度の出現に由来する崩壊や、2018 年 7 月に発生した 3 日間降雨量が最大となるような長雨の降雨による崩壊も出現しているなど、誘因である降雨の多様性に由来する災害も出現している。このような変化に対応するためには、本来なら浸透メカニズムから考察していく必要があるが、本手法のように広域を対象とした場合には激しく変化する誘因に対応することが困難であり、危険時刻の予報ができず、モデルの信頼性が不安となる現状にある。このため、本報ではメカニズムそのものは従来の飽和浸透型を用いて、得られた結果（安全率）から様々な降雨特性を反映させる手法を提案し、危険予想時刻の信頼度の向上を目指した。

2. 様々な降雨特性と山腹斜面崩壊

ここでは様々な雨の降り方と崩壊発生との関係を過去のデータから考察する。

(1) 総降雨量と崩壊発生

六甲山系では、従来の経験から総降雨量がおよそ 300~450 ミリ（昭和 13 年豪雨は 460 ミリ、昭和 36 年豪雨では 440

ミリ、昭和 42 年では 370 ミリ) になると崩壊が発生してきている。また国道など道路分野では、異常気象時に通行規制を行うために、「総降雨量」のパラメータを使用しているが、現状では、200 ミリ程度が使われており、自然斜面で発生する山腹崩壊に比して、安全側に設定されていることが特徴である。近年では、次項で説明する「降雨強度」と併用する案も提案されている。

(2) 降雨強度と崩壊発生

次のパラメータとして、短時間当たりの降雨量、例えば時間降雨量(時間降雨強度)がよく使われる。六甲山では降雨強度が約 45 ミリを超えると崩壊が発生し始めている(昭和 13 年豪雨では 47.6 ミリ、昭和 36 年豪雨では 44.7 ミリ、昭和 42 年豪雨では 69.4 ミリ)。しかし、強い降雨が一連の降雨の降り始めに現れた場合(例えば夏の夕立など)には、大きな降雨強度であっても崩壊は発生しない。ある程度降雨があった後に、換言すれば表土層内に雨水による浸透水面が出現した後に大きな降雨強度があれば、崩壊は発生しやすい。降雨強度は降った結果、解析雨量として判明し、事前には短時間降水予報が気象庁から発表されているため、この値を活用して、降雨強度を崩壊発生時刻の予報に使うことが望まれる。

(3) 土壌雨量指数と降雨強度の関係(CL曲線)と崩壊発生

上述したように、崩壊の発生には大きな降雨強度に先行する降雨の量が必要になってくる。このため、先行降雨量と降雨強度をパラメータとする場合、両者の出現時刻の関係が重要になる。すなわち、大きな降雨強度が、降り始めに出現する前方集中型の降雨か、降り終りに出現する後方集中型の降雨かという降雨特性(雨の降り方)が重要になってくる。しかし、(1)~(3)の考え方には、崩壊の発生に有無を判断する限界値が、事例が少ないため、定義できない。「およそ」と「約」の表現である。このため(3)の考え方では横軸に総降雨量(先行雨量)を半減期 72 時間の実効雨量を、縦軸に半減期 1.5 時間の実効雨量を設定し、過去に崩壊が発生した事例と、発生しなかった事例を集めて、この境界となる曲線(CL)を設定し、これから崩壊の発生の有無が判定される方法が提案された³⁾。その後、降雨だけのデータでなく、雨水は土中に浸透して崩壊の原因となるため、地表で観測される先行降雨量ではなく、土中の水分量を類推するアナロジーモデルとして、タンクモデルを使った「土壌雨量指数」が提案⁴⁾され、この土壌雨量指数を横軸に、縦軸には任意の時刻の雨量強度として「60 分間積算雨量」を使った CL が提案され、「土砂災害警戒情報」の発信に活用されている⁵⁾。この情報は 1 km メッシュで 30 分ごとに発表されており、地域を対象とした警戒情報に大きく貢献しているが、気象情報のみから発信されるものであり、地域に特有な地形情報が評価されていない。

(4) 降雨強度の大きな強雨と崩壊発生

筆者の一人は、従来見られなかった降雨強度が 70 ミリ以上の豪雨が、2010 年以降では、頻発していることを指摘した²⁾。降雨強度 70 ミリは、気象庁の表現では「非常に激しい雨」、「滝のように降る」、「傘は全く役に立たなくなる」、「水しぶきで一面が白っぽくなり、視界が悪くなる」と表現されている。このタイプの豪雨は、1) 降雨強度が 70 ミリ以上の豪雨が、2) 空間的には局所的に、3) 時間的には 3~5 時間継続して降る特徴があり、結果として発生する土砂災害としては、山頂近くの遷急点から崩壊が始まる土石流が多発していることを指摘した²⁾。以下に紹介するいくつかの事例は、いずれも土石流が発生した事例である。この事例としては、2010 年の奄美大島の住用の事例で、総降雨量 694 ミリ、継続時間は 23 時間、最大降雨強度 131 ミリ、降雨強度 70 ミリ以上の継続時間は 5 時間であった。2012 年の九州北部豪雨の阿蘇乙姫での事例は、総降雨量 501.5 ミリ、継続時間 20 時間、最大降雨強度 106 ミリ、降雨強度 70 ミリ以上の継続時間は 4 時間であった。2013 年の山口・島根豪雨の須佐での事例は、総降雨量 351 ミリ、継続時間 13 時間、最大降雨強度 137 ミリ、降雨強度 70 ミリ以上の継続時間は 2 時間であった。同じく 2013 年の伊豆大島豪雨の大島では、総降雨量 824 ミリ、継続時間 22 時間、最大降雨強度 118.5 ミリ、降雨強度 70 ミリ以上の継続時間は 5 時間であった。2014 年の北六甲豪雨の有馬川で観測された事例は、総降雨量 296 ミリ、継続時間 20 時間、最大降雨強度 88 ミリ、降雨強度 70 ミリ以上の継続時間は 2 時間であった。同じ年で、丹波豪雨の北岡本での事例は、総降雨量 422 ミリ、継続時間 20 時間、最大降雨強度 91 ミリ、降雨強度 70 ミリ以上の継続時間は 1 時間であった。また、同じ年の広島災害を起こした豪雨の三入で観測された事例は、総降雨量 257 ミリ、継続時間 13 時間、最大降雨強度 101 ミリ、降雨強度 70 ミリ以上の継続時間は 2 時間であった。2017 年福岡県朝倉市などで災害を起こした九州北部豪雨の朝倉では、総降雨量 543 ミリ、継続時間 24 時間、最大降雨強度 106 ミリ、降雨強度 70 ミリ以上の継続時間は 4 時間であった。本報では、上述した特徴を持ったこれらの雨を「強雨型」と称する。強雨型の降雨では雨水は浸透し、表土層中にある地下

水面に達するという仮定が満たされるかどうか不明であること、この仮定が満たされたとしても、強雨出現前の先行降雨によっては、安全率が1を切る前に崩壊が出現した事例が考えられることがあるため、強雨型の降雨があった場合は、新たな基準を設ける必要がある。この原因としては、強雨がすべて表土層内に浸透することなく、表流水として地表を流下するか、あるいは溪流（0次谷）の浸透水が集中し、大きな浸透水位の上昇が出現することにより、大きな水頭上昇が崩壊の発生原因と考えられることなどが想定されるが、本モデルではこのような崩壊メカニズムを仮定していないため、新たな崩壊発生の閾値を設けることにした。

(5) 途中で中休みがあった降雨と崩壊発生

しかし、以上の降雨特性は一つのピークを持った一連の降雨であり、近年の豪雨では「息をする」という用語が使われるように、いくつかのピークを持った一連の降雨、換言すれば中休みを持った降雨も出現するようになってきた。本報ではこの特徴を持った降雨特性を「中休み型」と称する。2019年7月豪雨では、過去にはあまり観測されなかった中休みを伴ったいくつかのピークを持った降雨が出現し、崩壊が発生した。土砂災害警戒情報を担当される行政の職員の方々は、この中休みが次の降雨に対してどのような効果があるかは、気になるところである。このような中休みを持った降雨時の崩壊事例は、過去にあまり例はないが、六甲山では、昭和36年豪雨、最初のピークの総降雨量が195.2ミリ、その後中休みが15時間あった後に、最初のピークにはほぼ匹敵する総降雨量177.3ミリがあった。両方の総降雨量を加えると372.5ミリと昭和13年災害時の降雨量に匹敵する降雨であったが中休みがあったため、昭和36年豪雨では、造成中の斜面や段丘崖が少数崩壊した（山崩れは287カ所⁶⁾、昭和42年は3,755カ所⁷⁾）だけであった。これは降雨停止により、表土層内では水位が低下し、不飽和型の浸透が起きると思われるが、現地での確認が困難である。前述したように、国道では、例えば降り始めから総降雨量180ミリや200ミリで規制区間を通行止めにしたたり、時間雨量2ミリが3時間継続すれば通行止めを解除し、総降雨量はリセットする規制が行われている。このため中休みの影響は大きいと思われるが、検証が困難であるため、対策工の効果評価が困難である課題を抱えている。

そこで本モデルでも、不飽和型のメカニズムを導入していないため検証は困難であるが、フタ山目の降雨開始時の表土層内水位と、ヒト山目の水位との関係を求めて、ヒト山目の影響を考えることにより安全度を評価することにした。換言すれば、従来の方は雨量の有無を基準としていたが、本報では、安全率を求めているため、安全率を使って中休みの有無を判定する可能性を検討することとした。

(6) 総降雨量は大きい、最大降雨強度が小さい長時間継続する降雨と崩壊発生

2019年7月豪雨は、広島、愛媛、岡山県等に大きな被害をもたらしたが、兵庫県では3日間降雨量が、過去の記録の最大値を更新する総降雨量435ミリの降雨があった。しかし、その間の最大降雨強度は25ミリと小さかった。全国的に見ても、この時の豪雨に対しては、11府県に対して降雨特別警報が発令されるなど、広域の降雨に加えて、全国のアメダス観測地点の約10%に相当する139地点で、72時間降水量の記録を更新した⁸⁾が、最大降雨強度は広島で44ミリ、呉で50.5ミリなど、(4)の強雨型に比して小さな値であった。最大降雨強度が小さいにもかかわらず、広島や愛媛県では数多くの土砂災害が発生した⁹⁾。本報ではこのような降雨を「長雨型」と称する。この降雨特性での災害は、六甲山系においては大きな斜面崩壊の発生は免れたが、総降雨量が大きいため、擁壁など人工構造物の影響を受けた小規模の山腹崩壊や市街地内の人工斜面において小規模の崩壊や、道路や宅地の排水不良に起因する崩壊が見られた。長雨型の降雨特性では、有効応力の減少に起因する崩壊危険度の予知では、表土層内の地下水位が上昇しないため、有効応力の減少に起因する崩壊判定は出来ない。長雨の状況として考えられることは、表土層内では、基岩近傍では飽和流が常に長時間存在し、表面付近では不飽和層が分布していると考えられる。しかし、このような状況が長時間継続すると、飽和流により細粒分が流亡し、あるいは目詰りを起こすことが考えられる。河川工学の分野では、2018年の岡山倉敷での堤防決壊の原因として、堤防が長時間飽和状態にあると、堤体の安全率が低下することも考えられるとの発表があった¹⁰⁾。堤体は人工工作物であるためこのような理由が考えられるかもしれないが、自然斜面でも強度が低下することは考えられる。上述したような細粒分の移動が考えられる。また、表層崩壊のすべり面付近が長時間飽和状態にあると、第三紀層の粘性土の場合、膨潤が考えられ、安全率が1より大きくても崩壊が発生する可能性を無視することは出来ないと思われる。このように、2018年7月西日本豪雨のように、72時間降雨量の記録更新が観測された場合には、このような従来考えられなかったメカニズムを新たに設定する必要があるかもしれない。

以上のように、様々な降雨特性の下では、表土層内の水位上昇による有効応力の低下のメカニズムのみではない、別

の崩壊メカニズムも想定する必要がある。

3. 降雨特性の違いを「表層崩壊リアルタイムハザードシステム」に反映するために

本研究所では、兵庫県県土整備部砂防課のご支援を得て、土砂災害警戒区域を対象とした土砂災害警戒情報の発信モデルを「表層崩壊リアルタイムハザードシステム」として構築中であり、一部は運用している¹¹⁾。しかし、危険時刻の発信と解除に関しては、運用中の自治体から、早目に赤になること、赤が消えても降雨によってはすぐ赤が再点灯するため、運用上、困ることなどのご指摘を受けている。前者の、早く赤になることに関しては、「見逃し」となることよりも、「空振り」の方を優先しているためであり、既に、できる限り絞り込みを行っている。後者の、赤の点灯の点滅に関しては、閾値にバッファを持たせていないためであることと、本報で上述してきた降雨特性が短時間で大きく変化する事情によるものと考えている。本システムは、住民のリスク認知の向上と、避難行動への移行を速やかに実行できることを意図しているものであり、時間的な見逃しを避けるためには、システムから得られたアウトプットを最大限活用することである。すなわち、安全率の値と、その変化率を活用することであると思われ、既に、危険度の判定は、安全率の値のみに加えて、安全率の時間変化を活用する二軸方法を既に提案している¹²⁾。本報では、2. で述べた降雨特性の変化が、二軸方式ではどのように表れるかを求め、図示することにより、多様な降雨特性に対して、新たな危険度判定の指標を求めようとするものである。

二軸方式とは、安全率の絶対値のみで危険度を判定するのではなく、近年の急激に大きな強度が出現する降雨状況に対応するため、安全率の時間変化を取り入れ、縦軸に安全率、横軸に安全率の変化率を取り、この二つのパラメータで危険度を判定しようとするものである。この概念を図-1に示す。ここでは危険度を判定するために、6本の閾値を設定したものを示した。ライン1、ライン2は安全率が1以上であっても、急激に安全率が低下する場合には、危険と判定できるようにするもので、「強雨」時を想定している。一方、ライン4とライン5は安全率が1以下になっていても、変化率が小さいか、あるいは変化しない場合は崩壊しないものとみなすため、「長雨」時を想定している。これらの閾値は過去のデータから求めることとしている。これは当然、地域によって地質や土質が異なるため、地域ごとに設定することとしている。強雨や長雨の経験がない地域では、ライン1、2やライン4、5の組み合わせは設定しない場合もある。以上の仮定の下に、上述した様々な降雨特性に対して二軸方式を用いた結果を示す。

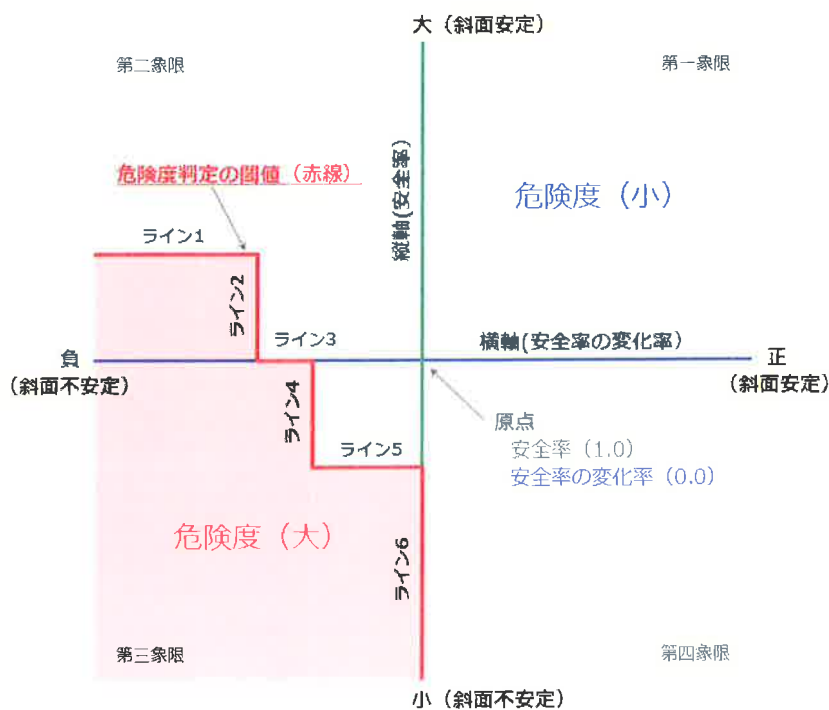


図-1 二軸方式の概念図¹²⁾ (一部改変)

1) 六甲山で発生した昭和42年の豪雨（後方集中型）による土砂災害事例：安全率の絶対値による崩壊発生予測

図-2は昭和42年に六甲山系で出現した豪雨のハイトグラフを示す。7月7日から降り出した雨は、翌々日の15:00まで100.5ミリ降っていたが、16:00頃から急に大きな降雨強度が出現し、その後8時間で270.7ミリの降雨に見舞われた。この降雨パターンは、大きな土砂災害が発生しやすい降雨末期にピークを持った降雨が降る典型的な「後方集中型」であった。このため、六甲山系では多くの崩壊が発生した。この降雨を用いてリアルタイムハザードシステムで安全率を求め、その時間変化率を計算した結果を二軸で示した。計算を行った地点を図-3に、結果を図-4に示す。

この計算は、図-3に示したように、この豪雨により当時崩壊が発生した場所内のセルでのものである。計算は7月9日0時を本格的降雨の「降り始め」として開始した。16時から18時に至る最初のピークでは安全率は1.10であり崩壊発生には至っていない。その後、20ミリ/時前後の降雨があり、安全率は低下を続け、1.00近傍に落ちたが、その後21時に58.5ミリ/時の強い降雨に見舞われ、安全率は1.0以下を示し、崩壊の多発に至ったものと思われる。これより、17時から18時、19時の降雨では、安全率のみでは崩壊に至っていないが、後述する強雨の定義である70ミリ/時付近であるため、19時前後でも崩壊が起きた可能性がある。しかし、安全率の絶対値は1.10より大きいため、判定基準線は図-4に示した安全率1.0の赤線で妥当と思われる。



図-3 昭和42年豪雨時の解析位置図（神戸市灘区）

昭和42年豪雨の降雨状況（神戸海洋気象台）

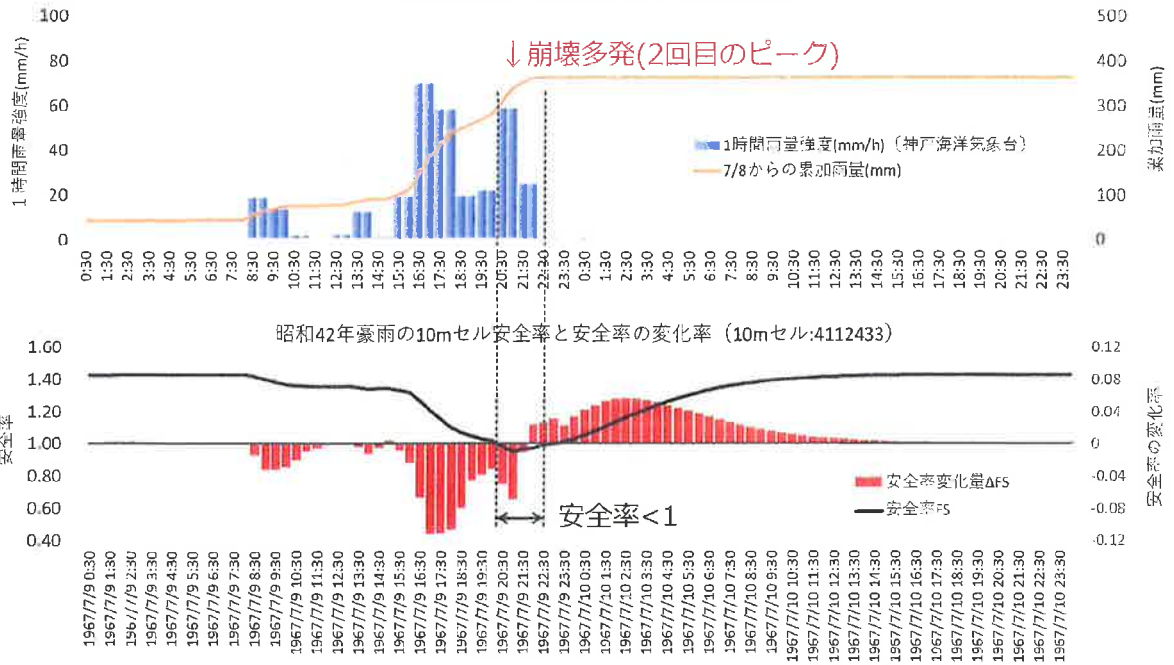


図-2 昭和42年豪雨のハイトグラフ、安全率とその変化率

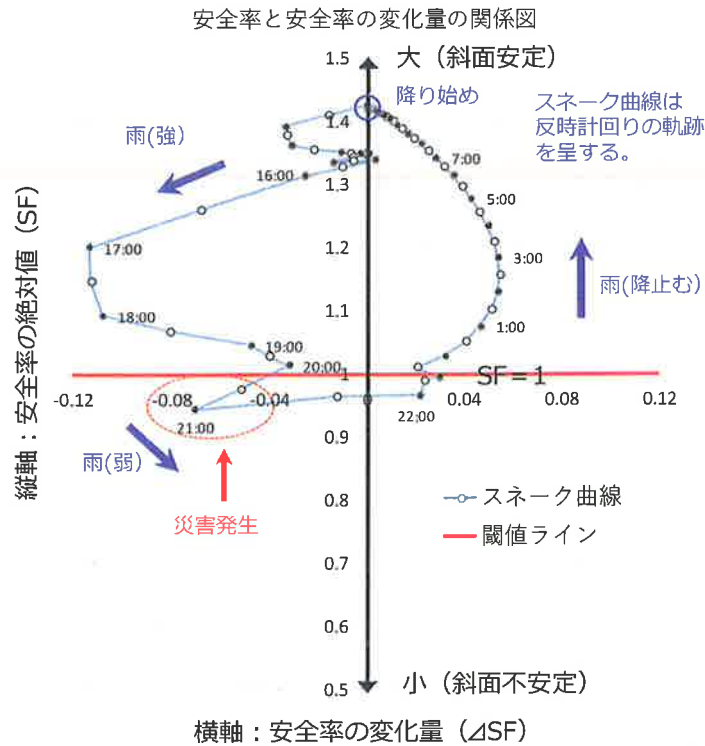


図-4 二軸図 (昭和 42 年豪雨、神戸市灘区)

2) 強雨型による土砂災害事例：2014 年丹波豪雨による土砂災害事例：新しい閾値を用いた崩壊発生の設定

2014 年の 8 月には各地 (北六甲、丹波、広島) で 90 ミリ/時以上の強雨が降り、これによりそれぞれの場所で、土石流災害が発生した。図-5 は丹波市「北岡本」で観測されたハイトグラフを示す。8 月 16 日 16 時までには大きな降雨は見られず、16 時から翌朝 8 月 17 日 6 時まで、15 時間の継続を持った降雨が出現した。その中で 17 日 3 時の降雨強度は 91 ミリにも達する大きな強度を持った降雨であった。この強雨により、丹波市市島町徳尾地区では、数多くの土石流が出現した。



図-6 2014 年丹波豪雨の解析位置図 (丹波市市島町)

図-6 に二軸のための計算を行った地点を示す。この時の安全率とその変化率を二軸に示した結果を図-7 に示す。この図には、土石流が多発した時刻付近を赤丸で示した。これによると、安全率の絶対値は土石流が発生したにもかかわらず1.0を切っていないことがわかる。しかし、変化率は-0.09~-0.06と、図-4に比して大きな値を示している。これは、90ミリを超える大きな降雨強度であったために、安全率は大きく低減を示したものと思われる。この土石流の発生を危険とするために、強雨時では図-7に示したように、第2象限に、安全率の絶対値では1.0以上であっても、危険となる新たな閾値を設ける必要があることが判明した。このため、本研究では、新たな閾値として、強雨時の場合は図-7に示す判定基準線を設定することとした。

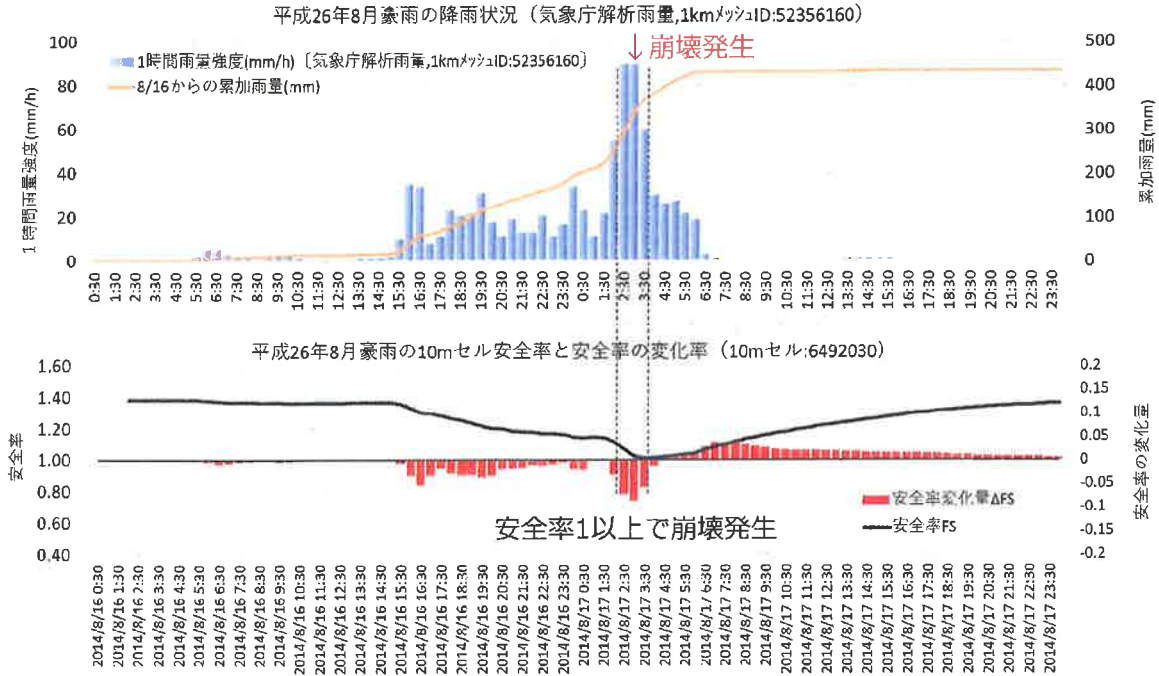


図-5 2014 丹波豪雨ハイトグラフ、安全率とその変化率

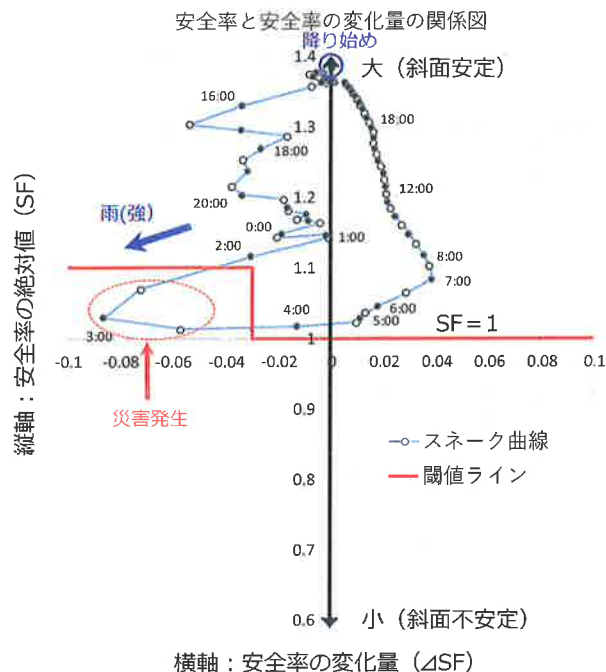


図-7 二軸図 (2014年丹波市)

このように、強雨の場合に、新たな閾値を必要とする理由としては、以下のメカニズムに起因する可能性があると考えられている。

強雨の場合、計算上ではこの強雨がすべて表土層内に浸透し、有効応力が減少するものとしているが、現実には、強雨がすべて表土層内に浸透し、一部は飽和浸透するが、それ以上の雨水は表流水となって地表を流下することが考えられる。飽和浸透した雨水により、表土層内の不飽和領域では不飽和の原因である空気を圧縮すると仮定すると、この圧力により有効応力が急減し、崩壊に至る可能性が考えられる。一方、地表を流下する雨水を考えると、この流水により溪流の河床の土砂を洗掘する可能性が考えられる。この浸食作用は、自然斜面では一様流ではなく、段波 (roll wave) になりやすく、大きな浸食力となることが考えられ、これにより土石流が出現する可能性があると考えられる。

このような現象が発生すると、静力学的に考えている土質力学に基づく安定解析では、強雨によるメカニズムが、入っていないため、安全率が 1.0 以上でも崩壊する場合が考えられる。ここでは、第 2 象限に新たな閾値を導入することにした。

3) 途中で中休みがあった土砂災害事例：昭和 36 年の六甲山系の崩壊事例

中休み型降雨の事例として、ここでは昭和 36 年の六甲山系の事例を取り上げる。昭和 36 年豪雨のハイエトグラフを図-8 に示す。最初のピークの総降雨量が 195.2 ミリ、その後中休みが 15 時間あった後に、最初のピークにほぼ匹敵する 177.3 ミリ総降雨量があった。前述したように、両方の総降雨量を加えると 372.5 ミリとなり、昭和 13 年災害時の降雨量に匹敵する降雨であったが、中休みがあったため、昭和 36 年豪雨では、287 カ所の崩壊と少なかった⁶⁾。これらの崩壊は、山腹斜面の崩壊に加えて、高度成長政策の影響を受けて、保全対象物が多い造成中の斜面や段丘崖も崩壊した。しかし、崩壊数は、昭和 13 年や、後に発生した昭和 42 年災害に比して 1/10 にも満たなかった。この原因として、長時間の降雨中休みがあったため、表土層内の雨水は下流に流下し、先行降雨としての影響が少なかったものと考えられていた。



図-9 昭和 36 年豪雨の解析位置図 (神戸市灘区)

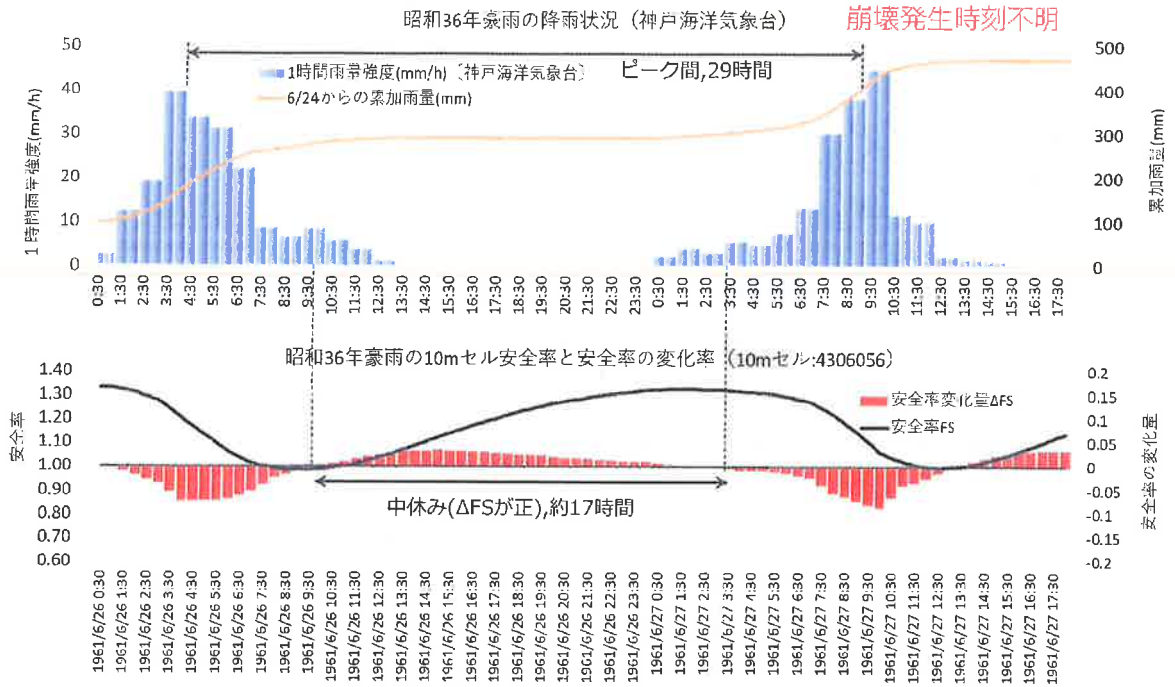


図-8 昭和36年ハイトグラフ、安全率とその変化率

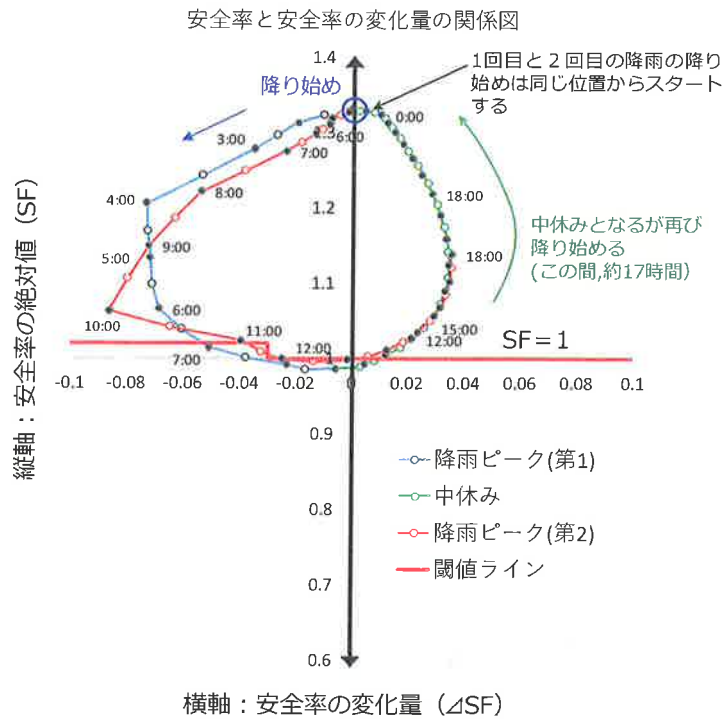


図-10 二軸図 (神戸市灘区)

本研究では、リアルタイムハザードシステムを用いて、安全率で崩壊発生の有無を考察しているため、この中休みがどれくらい継続すれば、先行降雨の影響が除去できるかを二軸モデルで検討した。検討した地点を図-9に、その結果を図-10に示す。この図-10によれば、最初の降雨では、降雨継続時間の末期に安全率が1.0を1.5~2.0時間切っており、崩壊が発生した可能性がある。しかし、降雨の停止に伴って安全率は回復し、徐々に大きくなり、約12時間後の2番目の降雨の降り始めまでには、最初の計算開始時点付近まで、安全率が回復していたことがわかり、先人が想定していた表土層内の雨水が流下していたことを計算上でも確認できたことになる。この結果を信じると、六甲山の場合、約12時間無降雨に近い状況が継続すれば、最初の降雨の影響をリセットできるようなのである。約12時間以内に降雨が再開すれば、図-10では安全率が低下を開始するため、わずかの降雨量であっても、崩壊が発生する状況になることが推定される。また、再開後の降雨強度の大きさによっては、第1象限から第2象限に移行し、それが強雨であった場合は新たな判定基準線で崩壊の発生が想定できる。

降雨のリセットに関しては、前述したように早期に通行止めを解消したい国道においては、降雨強度が2ミリ以下になって、この状態が3時間継続すれば、総降雨量の積算開始時刻をリセットするという規則がある。国道の場合は、この基準に達したら即解除ではなく、道路パトロールによって、安全性を確認した後に解除されるようであり、更に2~3時間の弱雨、もしくは無降雨状態を経ているようである。このリセットは、先行降雨の影響を評価するものであり、避難解除の時間ではないことに注意する必要がある。本研究では、連続解析を実施しているため、先行降雨の影響はすべて安全率で評価しているため、従って中休みの時間を検討・評価する必要はない。

4) 長雨型の降雨による災害事例：2018年の7月豪雨による三田の事例：最大降雨強度30ミリでも崩壊が発生する事例

2018年に西日本で多発した7月豪雨は、全国のアメダス観測地点の約10%に相当する139地点で、72時間降雨量が記録更新となる降雨が出現した²⁾。この降雨により、広島県や愛媛県では土砂災害が多発した。これらの県でも、総降雨量（最大時間雨量）は、広島県「呉」で約400ミリ（51.5ミリ/時）、「広島」で約420ミリ（44ミリ/時）、愛媛県「大洲」で約320ミリ（32ミリ/時）、「獅子越峠」で約420ミリ（33ミリ/時）、「宇和島」で約340ミリ（49ミリ/時）であった。これらの降雨の特徴は、総降雨量は大きい、最大降雨強度は小さいという長雨型の降雨であった。この一例を図-11に示す。この図からは、大局的には、後方集中型の降雨であったが、後方の集中部分ではピークが二つに分かれて出現していること、そのピークの大きさは50ミリ/時と強雨には該当しない²⁾大きさであったこと、降雨継続時間は7月5日の9:00~7月7日の8:00まで約49時間と丸2日間継続していたことがわかる。この降雨特性は、かつて提案した²⁾強雨ではなく、30ミリ/時~70ミリ/時の弱雨型であることがわかる。この降雨により、多くの土砂災害が出現したが、その様子の一部の概要は、本報告集の別報¹³⁾で紹介しているので参照されたい。

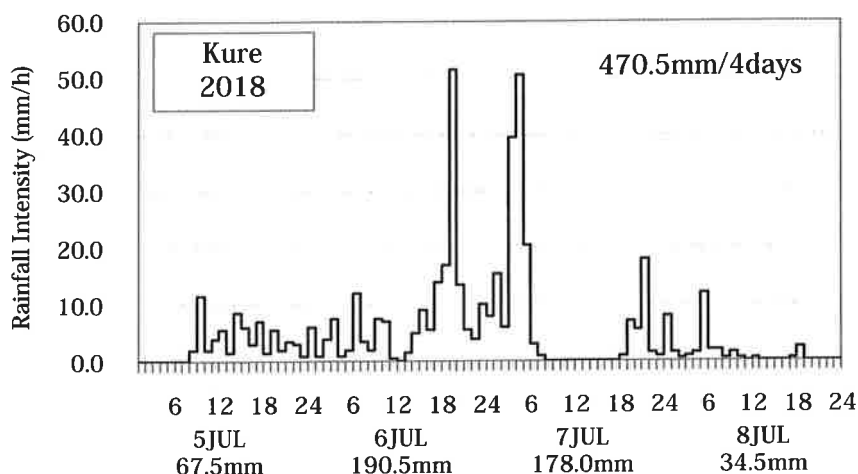


図-11 呉ハイエトグラフ（気象庁アメダス）

この豪雨により、兵庫県においても大きな災害には至っていないが、山腹斜面の崩壊事例が出現した。この事例のハイエトグラフを図-12に示す。この図では、解析雨量を用いているため30分間ごとの雨量を用いて、図示はこの値を2倍した1時間雨量で表示している。この図より、「三田」においては7月5日深夜から7月7日22時頃まで降り続けていることがわかる。主なピークは二つあり、最初のピークは7月5日19~20時頃に最大降雨強度23.5ミリ/時で、二番目のピークは7月7日の3:30~6:00頃までで、最大降雨強度は21ミリ/時と小さかった。現地の住民からの報告では崩壊は2番目のピーク中の5時30分頃であった。

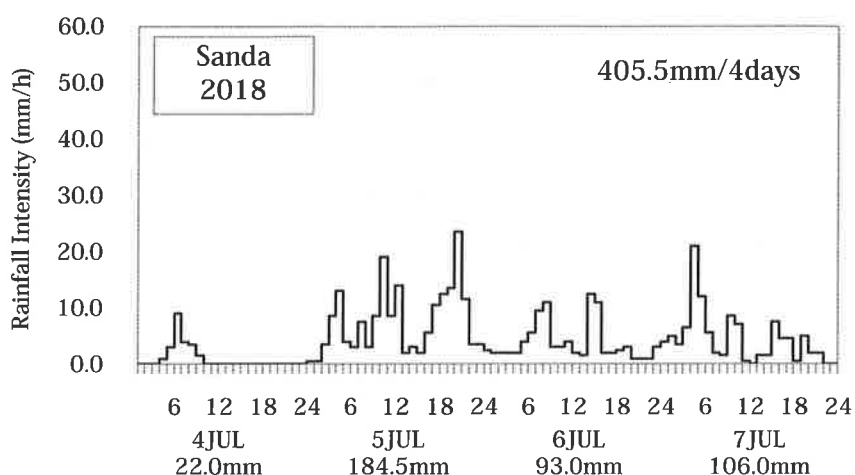


図-12 三田ハイエトグラフ（気象庁アメダス）

検討した地点の位置図を図-13に示す。この図に示したように、この地点はこの時に崩壊が発生した場所で、地質は有馬層群である。この時の解析雨量に基づくハイエトグラフを図-14に、二軸モデルの結果を図-15に示す。継続時間が長いので、第二ピーク付近の状況が不明である。このため、この付近に状況を図-15に右に拡大して示した。



図-13 2018年7月豪雨の解析位置図（三田市上青野）

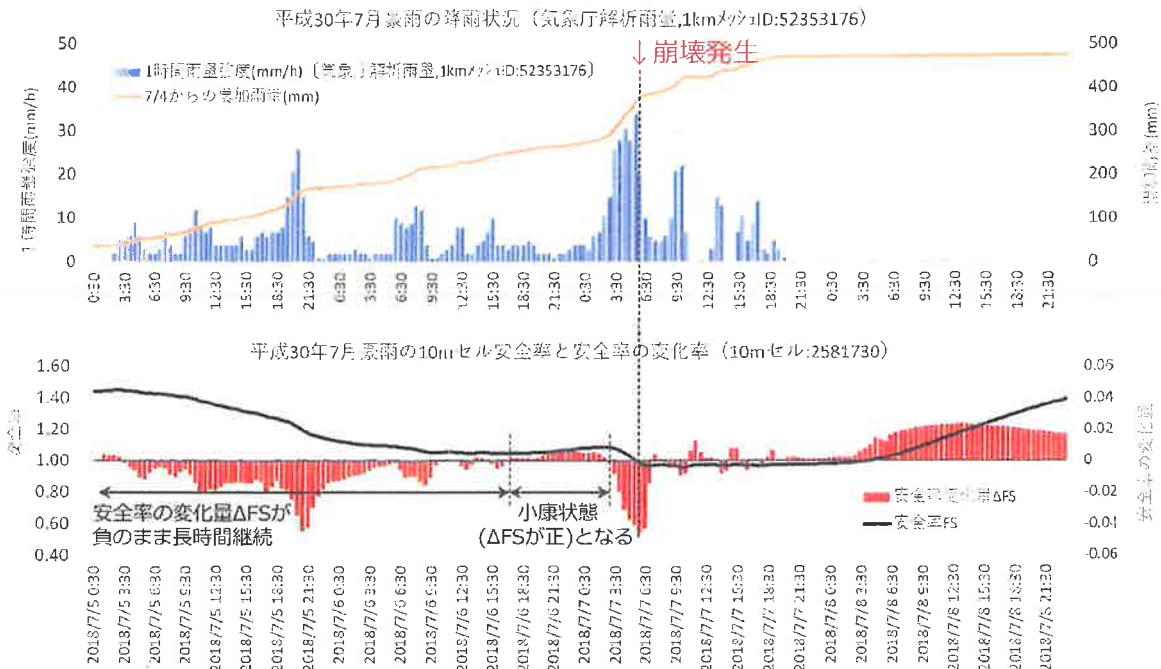


図-14 2018年7月豪雨のハイトグラフ、安全率とその変化率

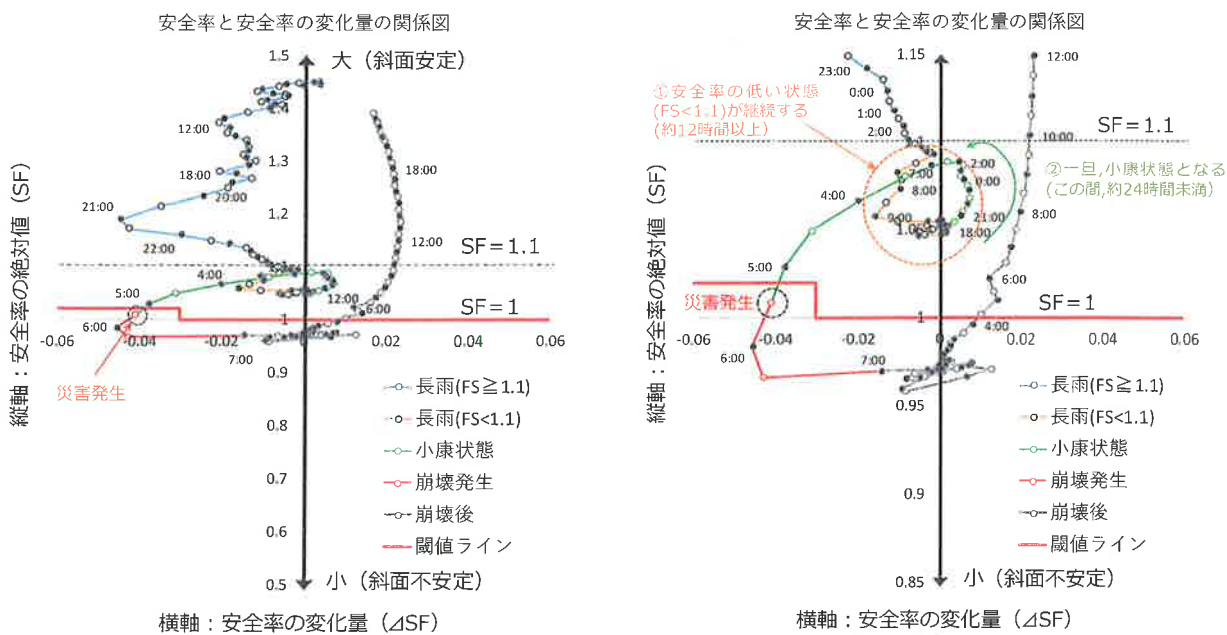


図-15 二軸図(三田市上青野、右図は左図の一部を拡大したもの)

降り始めのころは、安全率は1.40以上と大きな値を示していたが、第一のピークにより安全率は低下をはじめ、第一の降雨ピークの終わりころには安全率は1.1くらいになっている。これ以降を示している図-15を参照すると、三つほどの小さなピークにより安全率は1.05くらいまで低下し、その後の少雨により安全率は再び増加し、第1象限で1.08くらいまで回復したが、その後、第二のピークとなる降雨が降りはじめると、再び第2象限に移行し、急激に第3象限に移行した。本来はこの第3象限移行時が崩壊の発生となるが、本事例は第2象限で現地では崩壊が発生した。この間、安全率が1.1以下のゾーンに滞留しており、本事例では滞留時間は17時間であった。この地点では神戸層群であった

ため、長い滞留時間により土の強度が低下している可能性が考えられる。このため、本事例では、滞留時間が 12 時間以上であると膨潤により強度が低下するとして、安全率が 1.0 以上であっても崩壊するものとして、図-14 に示すように、新たな閾値を設定した。これにより、崩壊発生が判定できるものとした。

以上のように、水工学が堤防の安定で考慮している崩壊メカニズムは、粘性土の斜面においても、同様なメカニズムで発生する可能性があることを示すことができた。

5) 長雨型の降雨による災害事例：2018 年の 7 月豪雨による養父の事例・検討地点の違いによる二軸判定図の違いの例

7 月豪雨による養父市内の崩壊については、別報¹⁴⁾で詳しく報告しているため、ここではその概要について報告し、本報では二軸の計算結果について詳しく述べる。

当該地におけるハイトグラフを図-18 に示す。解析対象地点の位置図を図-16 に示す。この位置の詳細な地形図を図-17 に示す。この場所ではまず図-17 詳細地形図で示すメッシュ番号 3713972 を対象とした。この地点は、谷壁斜面に相当している。ここでは、総降雨量は 481.3 ミリ、最大降雨強度は 38 ミリ/時であった。7 月 4 日の 0:00 から 7 月 7 日の 14:00 頃まで 4 日間 86 時間の継続時間であった。降雨特性は 7 月 5 日の 7:00～23:00 頃までの第一ピークと、7 月 6 日 9:00 頃から 7 月 7 日の 10:00 頃までの第二ピークが見られる。崩壊は第二ピークにより発生した。

二軸モデルの結果を図-19 に示す。二軸方式の検討開始は図-18 の第一ピークの途中からであるため、第 2 象限からスタートしているが降雨のピーク時では安全率は 1.1 以下になり、その後、第 2 ピークの降雨まで、約 12 時間安全率 1.1～1.03 に滞留しており、長雨の定義を満足しているため、図-15 に示した長雨の閾値を設定したが、本事例ではこの閾値とは関係なく、安全率 1.0 を切り、第 3 象限に移行した。移行後 1 時間後に崩壊が発生したと推定されており、ハザードシステムは崩壊発生を正しく予測できたと思われる。



図-16 平成 30 年 7 月豪雨の解析位置図（養父市大杉谷）

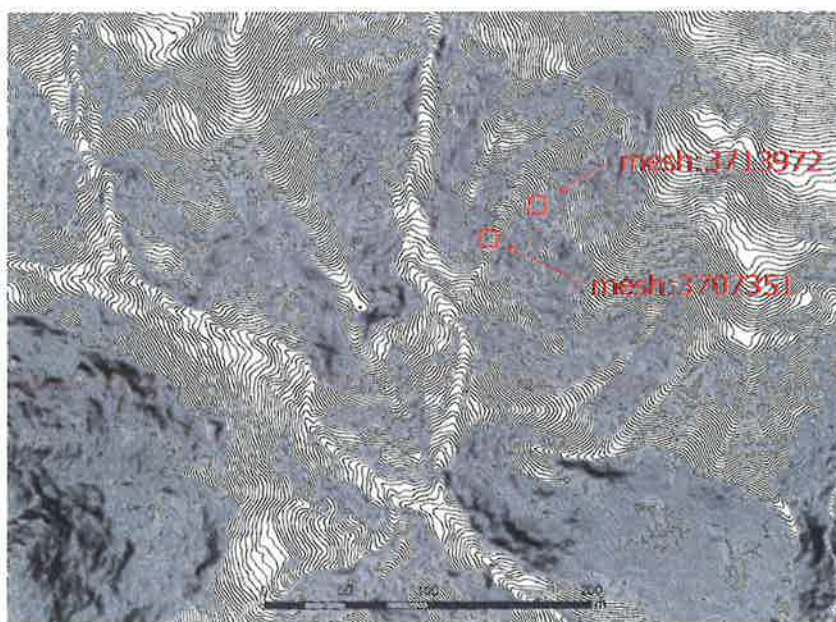


図-17 詳細地形図（図-16 の対象地点を拡大した図）

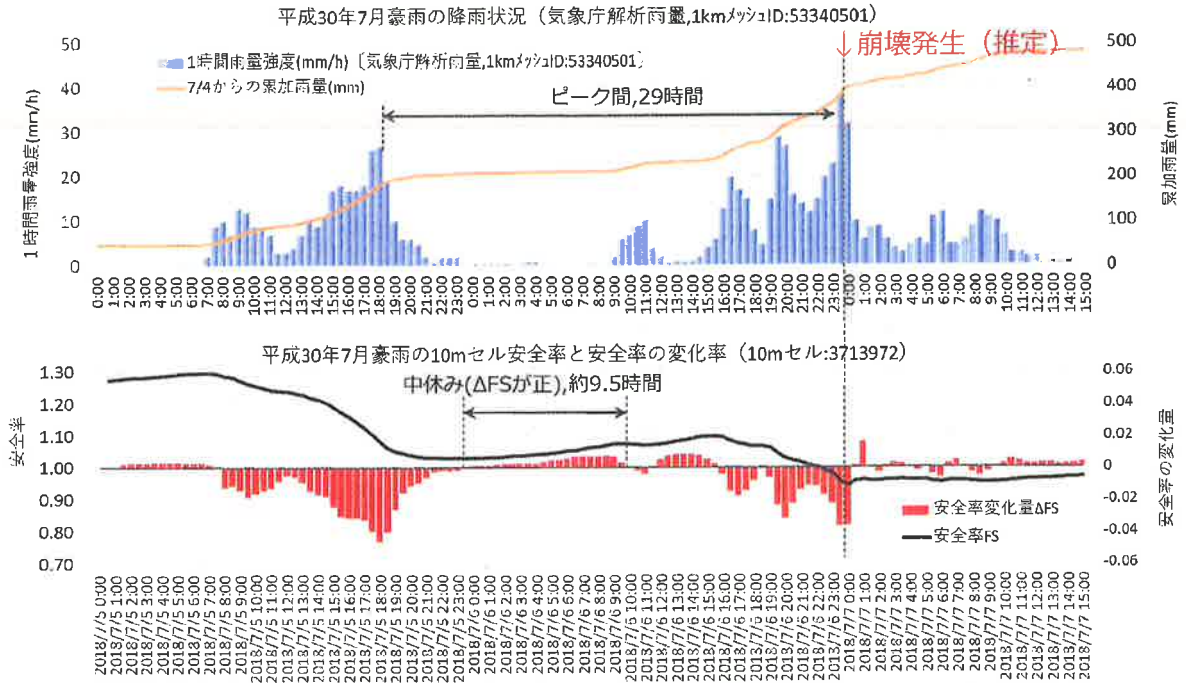


図-18 7月豪雨のハイトグラフ (養父市大杉谷 ; 3713972)、安全率とその変化率

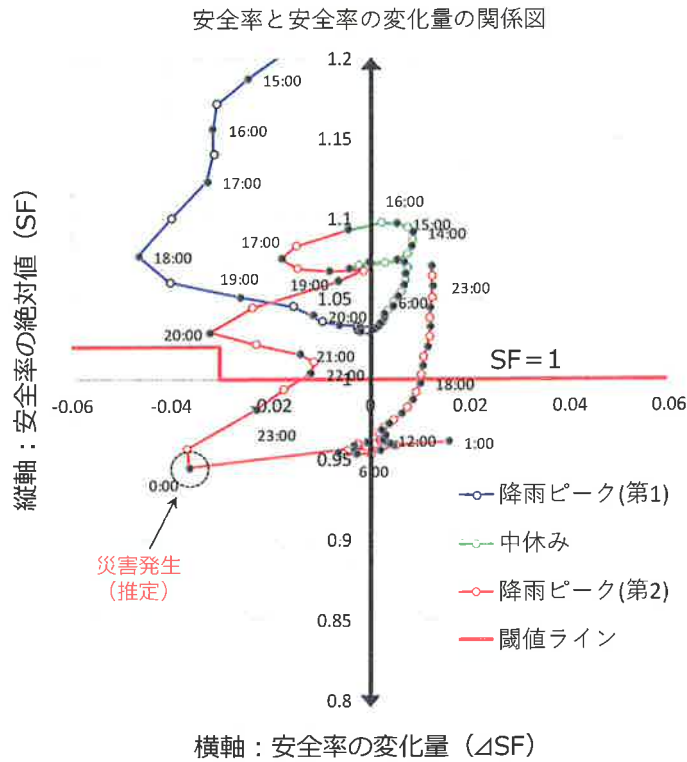


図-19 二軸図 (養父市, 大杉谷 ; 3713972)

本崩壊は、広い崩壊地であるため、崩壊地内に多くのセルが設定され、結果として多くのセルで赤判定となる結果となった。これにより本地区では、急傾斜型ではなく土石流型の崩壊と判定した。このため、同じ赤判定でも、セルの場所が違えば二軸の計算結果がどのように異なってくるかを知るために、同じ崩壊地内下流の溪床のセル(メッシュ番号: 3707351)を対象として、二軸の検討を行って見た。ハイレートグラフを図-20に示す。同じ地域であるため、ハイレートグラフは図-18と同様であるが、検討した場所が異なるため、安全率とその変化率は異なっている。これらを用いて、二軸図を作成した。その結果を、図-21に示す。その結果、この地点では、第1ピーク時で、崩壊が発生する可能性を示していた。このことは、同じ崩壊地内でも、谷壁斜面と溪床では危険度の出現時間が異なり、溪床の方が谷壁斜面より早く出現することを示している。この理由としては、溪床では傾斜が緩であるため表土層は厚く、表流水の集水により水位が大きくなって危険になると思われるが、山麓で実際に確認された崩壊出現時刻は第2ピークであった。この確認は谷壁斜面の崩壊が出現し、その規模が大きかったため、崩土が山麓まで流下したものと推定された。溪流では、常時に浸食作用が発生する可能性があるため、大きな流域面積の場合には溪床の表土層厚を薄く仮定している。しかし、2,000~2,500m²以下の集水面積ではこの仮定に該当しないため、第一ピークで赤になったものと思われるが、リアルタイムハザードシステムは崩壊規模を想定するものではないためこのような結果になったものと思われる。しかし、このように二軸方式では場所の違いによって、危険度の出現が異なることが明らかになった。このことは、土砂災害警戒区域という広い範囲を対象とした危険度の予測では、毎時降雨によって危険場所は異なる可能性があるが、土砂災害警戒区域内の最少の安全率を対象とした二軸方式の導入を今後考える必要があることを暗示している。

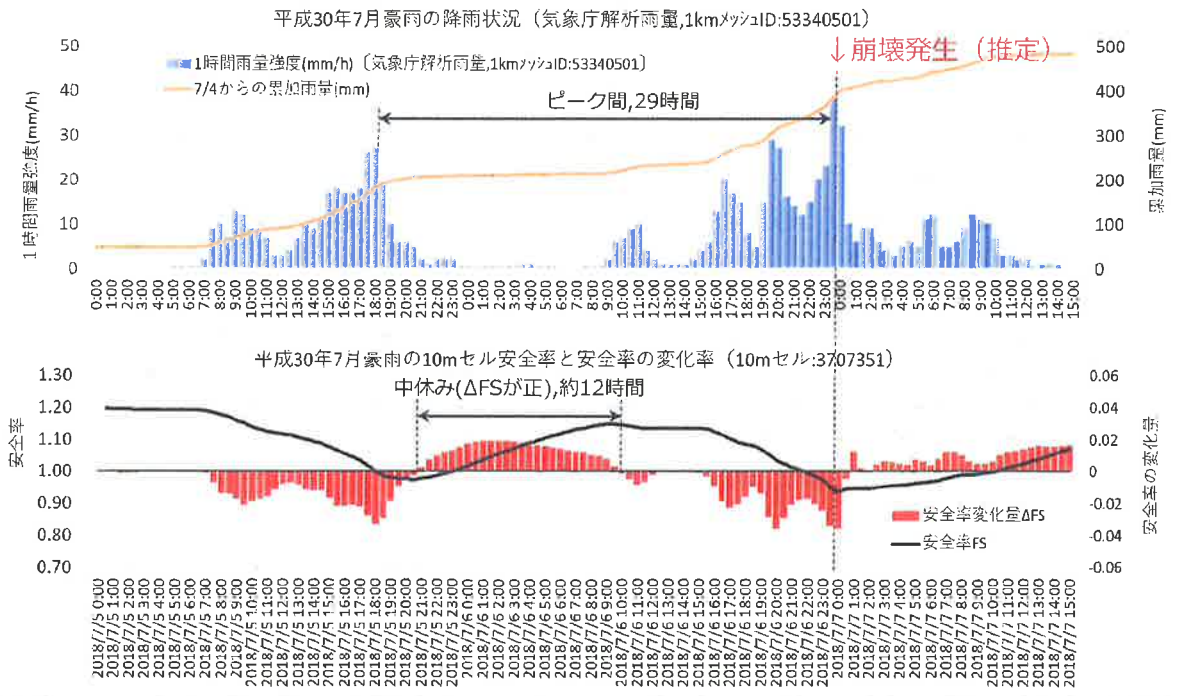


図-20 7月豪雨のハイレートグラフ(養父市大杉谷; 3707351)、安全率とその変化率

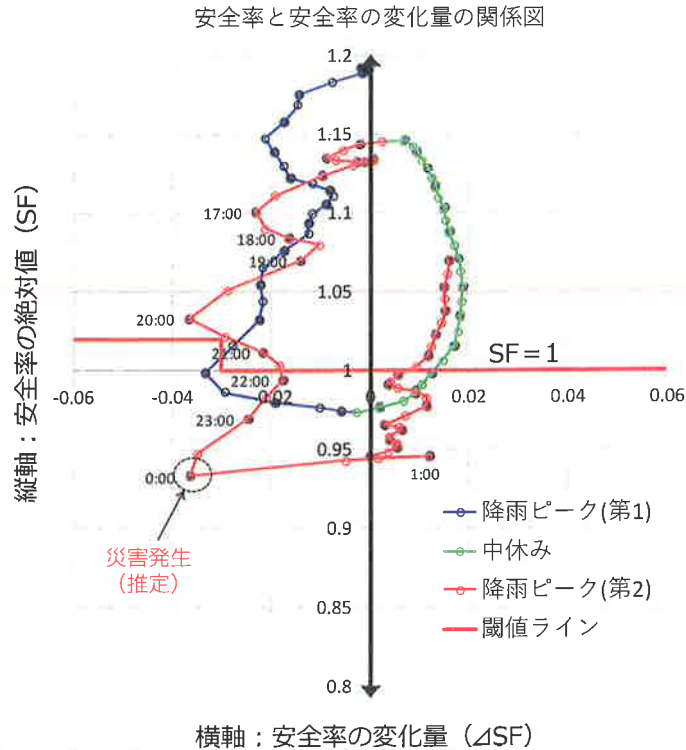


図-21 二軸図（養父市，大杉谷；3707351）

6) 長雨型の降雨による非災害事例：2018年の7月豪雨による神戸市の事例

2018年7月の長雨型に見舞われた神戸市域では、崩壊面積が100m²以下の小規模崩壊が市街地内の人工斜面や小規模自然斜面で崩壊が発生したが、六甲山の山腹では発生しなかった。この非発生事例が、リアルタイムハザードシステムでも確認できるか否かを求めるために、非発生地点を対象にして二軸の解析を行った。

図-23に、当該地域のハイトグラフを示す。ここでは、総降雨量は592.6ミリ、最大降雨強度は35ミリ/時であった。7月5日の0:00から7月7日の15:00頃まで3日間63時間の継続時間であった。降雨特性は7月5日

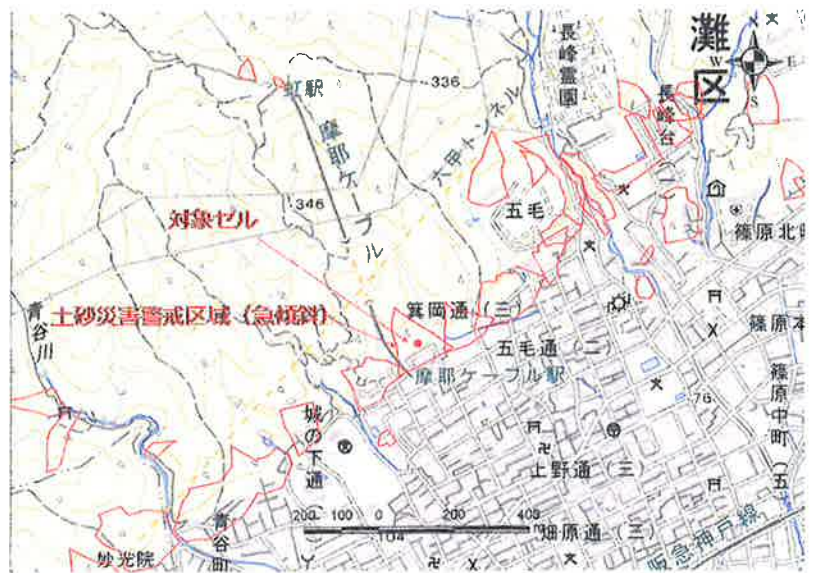


図-22 平成30年7月豪雨の解析位置図（神戸市灘区）

の10:30頃の第一ピークと、7月6日12:00、7月6日14:30頃に時間雨量30ミリ

/時を超える顕著なピークが見られた。第一ピークの降雨で、安全率は19時頃に1.1以下になり、13時間1.1以下が継続する長雨の条件になっていた。このため、二軸図には図-15に示した長雨の閾値を設定した。検討した地点を図-22に示し、その結果を図-24に二軸図として示した。当該地域の土砂災害警戒区域ではこの豪雨では赤にならなかったが、図-24に示すように、二軸図でも、危険領域には入ることなく、崩壊発生の危険性がなかったことが、二軸解析からも示された。このため、本報では、長雨の定義を先に示した1.1~1.0での安全率が12時間以上滞留した降雨とすることは妥当であったと思われる。

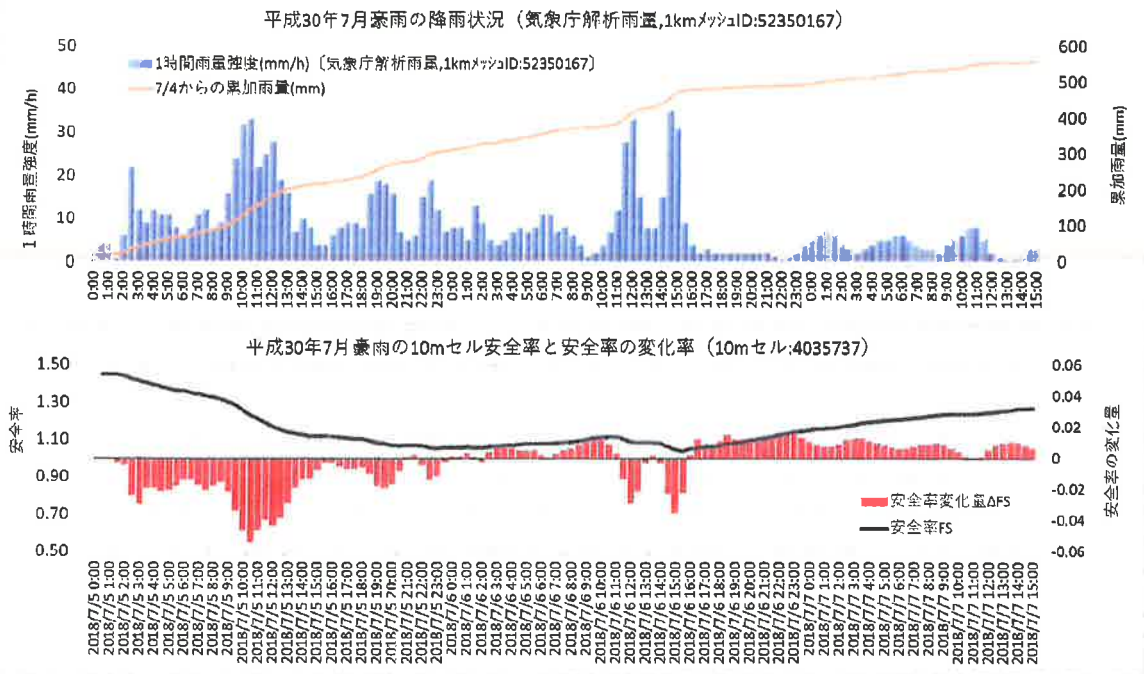


図-23 平成30年7月豪雨のハイトグラフ(神戸市灘区)、安全率とその変化率

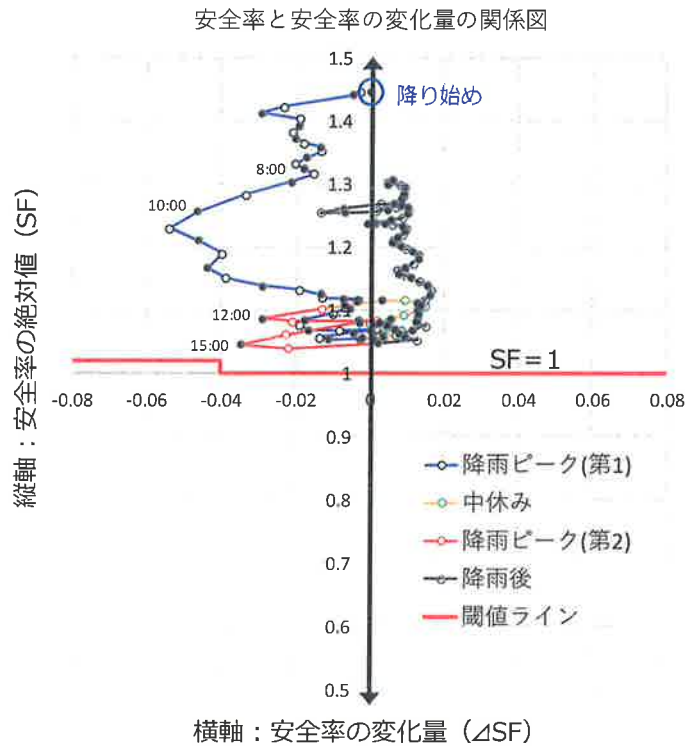


図-24 二軸図(神戸市灘区)

4. おわりに

近年発生する様々な降雨特性とそれに伴って発生する土砂災害との関連について、筆者らが提案しているリアルタイムハザードシステムから得られる情報を基に検討を進めた。得られた成果は、以下のとおりである。

1) 強雨の扱いについて

近年特に頻発している降雨強度の大きな豪雨については、本報では、仮に 70~80 ミリ/時以上の降雨が出現した場合を、「強雨型」と定義し、安全率と安全率の時間変化量を用いた二軸方式によって検討した。その結果、強雨型の降雨の場合には、安全率が 1.0 以上であっても崩壊が出現していることが明らかになった。この理由は、様々な原因が考えられるが、本報では危険度を示すことが目的であるため、強雨型の降雨があった場合には、本システムでは降雨の表土層内水位への浸透、表土層内の水位の上昇、有効応力の減少というメカニズムで危険度評価しているため、安全率の時間変化量が大きく減少する特徴を閾値として導入すること、及びこの閾値を超えた場合には安全率が 1.0 よりも大きくても危険とすることとし、変化量が -0.04 以上を閾値とし、この値を越えれば安全率は 1.1 を閾値とする手法を提案した。この強雨型の判定条件（赤線）の解除は、プロット場所が第 1 象限に戻って 24 時間以上経過した場合と仮に提案する。この解除はあくまでも閾値の解除であり、警戒情報の解除ではないことに注意を要する。

2) 降雨の中休みについて

降雨の継続中に、降雨が停止する中休みがあり、その後再び降雨があった場合、最初の降雨を評価する必要性は、危険度の判定を、「総降雨量」で行う場合には、先行降雨とするか、降雨をリセットするかが特に重要になる。この中休みが特に顕著であった事例を対象に、二軸方式で検討した。事例としては昭和 36 年豪雨を対象にした。その結果、六甲山では約 12 時間の中休みがあると、それまでの降雨はリセットできることが明らかになった。しかし、道路の場合は通行できることが重要であり、この事例のように広域を対象とした結果では安全側になりすぎるため、例えば「異常気象時通行規制区間」を対象として、このリアルタイムハザードシステムを導入すれば、中休みが評価できるため、解除の目安を得る目的としては、今後、活用出来よう。

3) 「長雨型」の扱いについて

強雨型とは反対に、降雨強度はそれ程大きくないが、降雨継続時間が長い場合にも崩壊が出現する事例が、平成 30 年 7 月豪雨により出現した。このような降雨をリアルタイムハザードシステムで解析すると、安全率が 1.0 に達しておらず、危険度の判定がこのままでは困難であることが判明した。このため、7 月豪雨で崩壊が出現した三田市と養父市の事例を基に、二軸方式で検討を進めた。その結果、長雨の特徴を降雨特性ではなく、安全率 1.0 をわずかに上回る継続時間で表現し、河川工学で提案されている地盤強度の低下の考え方を導入した。具体的には二軸方式で、安全率が 1.1~1.0 の範囲に 12 時間以上滞留した場合を長雨型の条件とし、この条件下では強度が低下する現象として、安全率 1.02 を閾値とし、安全率変化量が -0.03 以上になれば危険と判定する方法を提案した。この長雨型の条件の閾値の解除については以下に述べる。

4) 赤判定の点滅について

平成 30 年 7 月豪雨の際に、ある自治体から危険信号である赤いセルが点滅したため、避難指示の発令の判断に迷ったというお話を伺った。本リアルタイムハザードシステムは、解析雨量を使って求められた安全率により判定しているが、それと同時に短時間降水予報を用いて、3 時間先の状況まで示している。この値を活用していただければ、将来の変化が想定できると考えていたが、緊急時で判断を要請することも大きな負担となると思われたため、この二軸方式の結果を使って、安全側の解除の仕組みを考えた。この課題は赤を点灯する課題ではなく、点灯した赤の継続及び解除にかかわる課題であろう。二軸方式では第 1 象限に入れば安定と判断できるが、バッファを入れるとすると、継続や解除の場合は、長雨で考察したように、長時間安全率 1.0 以下のゾーンに滞留していることが想定されるため、また解除の際には慎重であるべきと考えられるため、長雨に用いた閾値安全率 1.02 を解除の閾値とするか、もしくは第 1 象限に

戻ってきてから2~3時間経過後にパトロールを経て、解除することも考えられる。この詳細な考察については、今後、検討を重ねていく必要がある。

5) 二軸方式を検討する地点について

3.5) で考察したように、同じ溪流内でもセルの場所が異なれば、二軸の結果が異なってくる。3. では過去に発生した場所でセルを選定して、その場所における危険度の時間的変遷について考察した。しかし、本リアルタイムハザードシステムは、これから起きる危険度をリアルタイムで予測しようとするものであり、崩壊発生場所は不明であるため、計算地点をあらかじめ固定することができない。ところが、本研究ではメッシュではなく、土砂災害警戒区域を対象として、その危険度を知ることが課題であり、警戒区域の危険度は、その区域内のセルの危険度から判定するものである。このため、警戒区域内の最も危険なセルの安全率を知ることが重要になる。しかし、それは事前には不明であるため、ここでは二軸による判定を行うために、降雨開始から対象とする土砂災害警戒区域内で最少の危険度を知るプログラムを作成しておき、警戒区域内で最少の安全率が1.1を切った時点から安全率と安全率変化量のプロットを開始する。この作業は、特定の一つのセルだけではなく、降雨の経過によって最小値を示すセルが変わってくる可能性があるが、土砂災害警戒区域としては最小値として評価できる。このようにすれば、本報で示した様々な降雨特性を持った降雨に対しても、危険な時刻を知ることができよう。今後も、いくつかのデータを積み重ねて、信頼度の高い方法を提案していくつもりである。

以上述べた成果は、現在考慮中であり、今後検討を進めていく予定である。ここでは、解析雨量による方法のみを示したが、短時間降水予報を活用することも、是非必要であり、今後の課題として2~3時間先のデータを活用した危険度判定の手法を考えていきたいと思っている。本報告を作成するに際しては、リアルタイムハザードシステムを一緒に作成している神戸市立神戸工業高等専門学校 鳥居宜之教授、国際航業株式会社、応用地質株式会社、株式会社ダイヤコンサルタントの皆様の御協力を得ることができた。ここに記して感謝の意を表します。

参 考 文 献

1) 例えば

- 1) 沖村孝ほか：豪雨による土砂災害を対象としたリアルタイムハザードシステムの構築、新砂防、63 (6)、4-12、2011
Nobuyuki Torii et al.: Development of the pinpoint and real-time risk prediction system for rainfall-induced sediment disasters in Hyogo Prefecture、国際シンポジウム INTERPRAEVENT2018 ポスター、2018.
- 2) 沖村孝・植田允教・鏡原聖史・笠原拓造・根本信行：土砂災害の原因となった近年の降雨特性と強雨による崩壊・土石流発生メカニズムについて、建設工学研究所論文報告集、60、61-91、2018
- 3) 瀬尾克美ほか：土砂災害警戒避難基準雨量の課題と改良について、新砂防、53 (6)、37-44、2001)
- 4) 岡田憲治：土壌雨量指数、測候時報、69 (5)、67-100、2002.
- 5) 国土交通省河川局砂防部・気象庁予報部：国土交通省河川局砂防部と気象庁予報部の連携による土砂災害警戒避難基準雨量の設定方法、23、2005. 6.
- 6) 六甲砂防工事事務所：六甲60年史、近畿建設協会、702、2001.
- 7) 沖村孝：水系網分布と崩壊発生の研究—崩壊地形立地解析 I—、建設工学研究所論文報告、21、87-97、1979.
- 8) 気象庁：「平成30年7月豪雨」の大雨の特徴とその要因について、報道発表、平成30年7月13日
- 9) 海堀正博ほか：平成30年7月豪雨により広島県で発生した土砂災害、新砂防、71 (4)、49-60、2018.
- 10) 前田健一：平成30年西日本豪雨を踏まえた地盤工学会の課題と提言—堤防WG—、地盤工学会会長特別委員会最終報告会、東京、2019
- 11) 沖村孝ほか：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策 (9)、建設工学研究所

論文報告集、60、29-43、2018

12) 沖村孝ほか：表層崩壊リアルタイムハザードシステムの構築に際して生じた課題と対策（7）、建設工学研究所論文報告集、58、43-70、2016

13) 沖村孝：西日本豪雨による広島での災害現地踏査報告、建設工学研究所論文報告集、61、67-83、2019

14) 植田允教ほか：平成30年7月豪雨における養父市域の崩壊箇所と表層崩壊リアルタイムハザードシステムの判定について、建設工学研究所論文報告集、61、105-120、2019

著 者

沖村 孝 所員，理学博士，地盤工学
笠原 拓造 国際航業株式会社，砂防工学