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(13)

Some Problems and Measures appeared during the Construction of the Real-time Hazard System for Slope Disasters at a Heavy Rainfall (13)

沖村 孝	鳥 居 宣 之	中川 渉
Takashi Okimura	Nobuyuki Torii	Wataru Nakagawa
鏡原聖史	笠原拓造	窪田 安打
Satoshi Kagamihara	Takuzo Kasahara	Yasu'uchi Kubota
葛 巻 怜 香	関 英理香	伊藤正美
Reika Kuzumaki	Erika Seki	Masami Ito

1. はじめに

令和3年は、42の都道府県で972件の土砂災害が発生しており、特に8月には448件の土砂災害が発生し、最近10年の同月における平均発生件数(177件)を大幅に上回った。この7月および8月に発生した土砂災害が年間発生件数の約8割に達している¹⁾。

中でも、8月豪雨では、8月11日以降、日本付近に停滞している前線に向かって、暖かく湿った空気が流れ込み、前線の活動が活発となった影響により、西日本から東日本の広い範囲で大雨となった。特に九州北部地方で線状降水帯が発生し、日降水量が多いところで400mmを超える大雨となった。14日には、気象庁は長崎県、福岡県、広島県を対象とした大雨特別警報を発表した。また、16日から18日は、西日本から東日本の太平洋側を中心に広い範囲で雨となり、日降水量が近畿地方の多いところで200mmを超える大雨となった。これにより、8月には448件の土砂災害が発生し、最近10年(平成23年~令和2年)の同月における平均発生件数(177件)を大幅に上回り、平成26年の636件に次ぐ2位となった¹⁾。気象庁は、8月7日から8月23日にかけての台風及び停滞前線による暴風及び大雨等について、気象状況および災害状況を詳細に報告している²⁾。

このように、近年では、観測史上最大の降雨量や降雨強度が報告されることが毎年のように生じている。従来、土砂 災害の発生時刻に関する危険度指標は、過去の被災経験から総降雨量あるいは土壌雨量指数や降雨強度のパラメータが 用いられ、これらが過去に観測された値とその時の崩壊発生の有無から、崩壊発生の危険度が経験的に求められ、土砂 災害警戒区域に対する土砂災害警戒情報として使われている。しかし、近年のような過去に経験したことのない大きな 降雨量に対しては、経験的に求められた指標や基準だけでは、十分な対応に結び付かない可能性がある。すなわち、過 去に崩壊記録のない斜面で崩壊が発生したり、総降雨量によらず大きな降雨強度の出現時刻に崩壊が発生したりする可 能性がある。これを解消するためには経験的なデータから危険度を判断するのではなく、降雨を入力した力学的な斜面 安定解析から安全率を求め、この安全率から危険度を判定することが必要になる。また、空間や時系列に関して、より きめ細かな予測情報を提供することが、警戒や避難情報の適切な発令に資するものであると考えられる。

筆者の一人は、かつて表土層崩壊を対象として地形を10m 格子間隔で数値モデル化し、格子点(もしくはセルの中心 点)に表土層厚を設定し、降雨を入力し、飽和横流れ浸透解析によりセルの浸透水位を計算し、無限長斜面安定解析式 を用いて、各セルで時間ごとに安全率を計算する手法を提案した³⁰。近年、技術の開発により高精度の地形データや降 雨データを入手できる状況になってきたこともあり、このモデルを用いてリアルタイムでハザード情報を計算できるよ うになってきた。このような環境条件下で、兵庫県のご協力を得て平成19年度より3ヵ年で「六甲山系土砂災害危険 度予測システム」プロジェクトでかつて提案したモデルを実用化する機会に恵まれた⁴⁵⁵。このモデルの構築、実用化に 際して新たに出現した問題点などは、すでにこれまでの報告⁶⁰⁷⁸⁹⁹¹⁰⁰で詳しく紹介した。また、問題点への対策を組み込 んだ「土砂災害のためのリアルタイムハザードシステムの作成手順」¹¹⁰や留意事項¹²⁰をとりまとめた。その後、バージ ョンアップとも言える新たな取り組みとして、安全率の変化量を加えた判定方法¹³⁰や、市街地内の小規模斜面にも対応 する 5m メッシュ併用型の解析方法¹⁴⁰、土石流の発生機構を考慮した新たな判定方法¹⁵⁰、長雨時に多発する小規模崩壊 への対応方法など^{160 170 180}を考案しその適用性について報告を重ねてきた。

本報告では、リアルタイムハザードシステム(以下、システム)について、前年度に神戸市灘区のモデルエリアを対象に対応を検討した結果と他地域へ適用する場合の課題や留意事項に引き続いて、令和3年(2021)8月豪雨を降雨条件として、少雨における空振り判定の見直しを実施した。対象は、令和3年度にシステムを構築した猪名川町域、及び既往の11システム(豊岡、上郡、三田、丹波、丹波篠山、西宮・芦屋・宝塚(一部)、神戸、朝来、養父、新温泉、香美)である。なお、各システムにおいて過去の豪雨事例での比較検証を行い、改良の効果を確認するとともに導入にあたっての課題を整理した。

2. これまでの報告の概要

2. 1 2010 年報告

2010 年報告⁶⁾では、モデルの概要説明を行った後、システム化に際して生じた課題について説明し、その対策手法の 紹介を行った。その内容の主なものは、次のとおりである。

- 1) 地形のスムージング化
- 2) 地形分類と表土層厚
- 3)人工改変地の扱い
- 4) 地盤条件の設定
- 5) 推定表土層厚の再検討
- 6) 植生条件の考察
- 7) 異なる地質条件への対応
- 8) 微地形条件(水面、沖積地等) への対応
- 9) 用いる雨量データの検討
- 10) 演算処理高速化の検討
- 11) アウトプットデータの表示方法の検討
- 12) 土砂災害警戒区域(急傾斜)への反映方法の検討
- 13) 土砂災害警戒区域(土石流)への反映方法の検討

2. 2 2011 年報告

2011 年報告 ⁷においては、2010 年度の試験運用中に出現した様々な課題を、個別に検討した。その内容は以下のとおりである。

- 昭和42年崩壊地の表土層の推定
- 2) 谷壁斜面に存在する浅い谷(0次谷)の表土層厚の推定
- 3) 谷壁斜面と谷底斜面境界部での表土層厚の不連続対策
- 4) 小起伏斜面における表土層厚の推定
- 5) シミュレーション降雨による異常セル推定表土層厚の補正
- 6) 土砂災害警戒情報解除のためのタイミング情報対策

2. 3 2012 年報告

2012 年報告⁸においては、その後の運用中に出現した課題について対策を検討した。その内容は以下のとおりである。

- 1) 0 次谷および急傾斜地における層厚の調整
- 2) 表土層満水時の判定における不具合対策

3) シミュレーション降雨による局所的な不具合対策

2. 4 2013 年報告

2013 年報告⁹においては、豊岡市を対象としてこれまで適用していない地質条件である北但層群や矢田川層群、照来 層群、超塩基性岩などに適用した際に判明した課題と対策について述べた。その内容は以下のとおりである。

- 1) 難透水層の影響による崩壊への対応
- 2) 人家裏切土斜面の崩壊特性の把握と対応

2. 5 2014 年報告

2014 年報告 ¹⁰においては、上郡町を対象としてこれまでに適用していない地質条件である相生層群や超丹波帯など に適用した際に判明した課題と対策について述べた。その内容は以下のとおりである。

- 1) 頂部小起伏面の周縁部に多発する崩壊への対応
- 2) 頂部小起伏面の自動抽出手法

2. 6 2015 年報告

2015 年報告¹²においては、表六甲山系や豊岡市、上郡町と類似の地形・地質を有する三田市への適用において、表 土層の設定などについて新たな留意点が得られたのでこれを報告した。その内容は以下のとおりである。

- 1) 有馬層群(丹波層群を含む)固有の層厚式の設定
- 2) 裸地、草地、とくしゃ地における粘着力の調整
- 3) 礫密度を考慮した土質パラメータ間の整合性の確認

2. 7 2016 年報告

2016年報告¹³においては、2014年8月豪雨による丹波市の土砂災害を対象にシステムの検証を行う中で、崩壊の判定タイミングが実際の崩壊等が集中的に発生した時刻よりも数時間遅れる傾向にあることや、降雨が終了しても判定が長時間継続するという課題が確認されたため、安全率の絶対量に加えてその「変化量」を判定の指標とすることで、判定タイミングが改善されたのでこれについて報告した。また、朝来市のモデル構築を行うため、基礎資料の整理ならびに崩壊地の特徴について検討を加えた。結果、斜面崩壊密度と見かけ上の流量に相関関係があることが示唆された¹⁴。

2. 8 2017 年報告

2017 年報告¹⁵)においては、神戸市の市街地内に「小規模斜面」が土砂災害警戒区域として数多く分布しており、このような小規模斜面はその平面幅が狭いため 10mDEM によって傾斜が的確に表現できない場合があるほか、人工改変の影響もあるためこれまで対象外としていた。しかしながら、神戸市からの要望によりその対応を検討する必要が生じた。このため、土砂災害警戒区域内を「5mメッシュ」にて安全率を計算する方法について比較検討し、リアルタイム演算のスピードやシステム改修費用などを勘案して、地下水位については 10m メッシュで演算した結果を適用し、5mメッシュの表土層厚、および市街地内の小規模斜面固有の地盤物性値等の条件により安全率を検討する方法を採用することとした。また、朝来市のモデルについて、谷底斜面と谷壁斜面の境界付近で崩壊判定が出やすい傾向が認められたことから、現地調査を行い谷底斜面と谷壁斜面の境界付近の透水係数を現地の材料特性に合わせることで、谷底斜面と谷

2. 9 2018 年報告

2018 年報告¹⁷においては、近年の豪雨の激化に伴い短時間に地中に浸透しきれない雨水が地表面流となって一気に 渓流に流出することで「渓床堆積土砂流動型の土石流」が発生しやすいことが確認された。しかしながら、現行の土石 流予測モデルではこのような土石流の発生機構を十分に考慮できていないことが空振りの一因と想定された。このため、 平成 26 年に丹波市で発生した土石流事例をもとに現行の手法による危険度判定の課題を整理し、崩壊起因型、渓床堆 積土砂流動型、複合型の土石流に対し、それぞれの発生機構を反映した判定手法を検討した。検討の結果、新たな土石 流判定手法の適用によって「空振率が半減」し、さらに「捕捉率についても向上」することが確認できた。しかしなが ら、改善された空振率は未だ高い数値であること(約 35%)や、他地域への適用に際しては検証事例が丹波市の事例に 限られているなどの課題が残っているため、引き続き「他の地域を含めて検証を続ける」こととした。

2. 10 2019 年報告

2019年報告¹⁸においては、平成 30年7月豪雨において「長雨特有」の崩壊発生形態として、「小規模な崩壊」や「人 工斜面の崩壊」などが多数確認された。これらは、本システムでは対象外としている崩壊形態であり、システム稼働中 にこれらの発生を予測することはできなかった。しかしながら、情報を利用するユーザーからは小規模な崩壊等であっ ても本システムにおいて予測できるよう改良の要望があり、どのような対応が可能か検討を行った。検討の結果、「解析 セルの細分化による小規模崩壊の予測」や、道路上を流れる流水を考慮した「人工斜面の崩壊予測」などの対応方法に ついて検討し「適用できる可能性を示した」。しかしながら、今回検討した方法を広範囲に展開するにはモデル構築にお ける膨大な作業が発生するほか、サーバ等のハードウェアの増設などの課題もあり、「実用化のためにはさらに効率的な 方法の検討が必要」と考えられた。また、養父市のモデル構築を行うため、基礎資料の整理ならびに崩壊地の特徴につ いて検討を加えた。検証計算において崩壊の捕捉率が低い北但層群では、地質区分を細分化し材料特性を考慮した地盤 定数を設定することで捕捉率を向上することができた。そのモデルを用いて平成 30 年7 月豪雨時の崩壊箇所と判定結 果を対比した結果、自然斜面の崩壊や土石流は捕捉できたものの、人家裏の人工改変地で発生した小規模な崩壊は見逃 しており、同箇所の予測の課題が残った¹⁹。

2. 1 1 2020 年報告

2020 年報告²⁰においては、2018 年に丹波市を対象に検討した土石流の発生機構を考慮した新たな判定手法¹⁷⁾ につ いて、「地質の異なる香美町を対象にその適用性を検証」し、その結果について報告した。検討の結果、地質の異なる香 美町においても新たな土石流判定手法を「適用できることが確認」できた。また、さらに「空振率」を改善する方法と して「河道幅を仮想的に与える方法を提案」し、崩壊予測モデルによる空振率と遜色のないレベルで運用できる見通し となった。しかしながら、検証事例が丹波市と香美町に限られているため、全県への適用に向けては、提案した「谷出 口流量」や「渓床堆積土砂流出率」からなる閾値設定方法の効率化等について、引き続き事例検証を重ねることが必要 と考えられた。

2. 1 2 2021 年報告

2021 年報告²¹⁾においては、2020 年 7 月豪雨において、少ない雨量で生じる多くの空振りが確認されたため、神戸市 灘区のモデルエリアを対象に対応を検討した。検討の結果、空振りの要因として、表土層厚の層厚式の設定や、浅い谷 沿いの表土層厚の減厚区間より上流側において地下水位の挙動が適切に再現できていない可能性が挙げられた。このた め、詳細地形図を用いた谷沿いの水系網の設定や、透水係数の見直しにより、空振りを減少させる効果があることを確 認した。検証事例が神戸市に限られているため、今後の全県への適用に向けては、引き続き事例検証を重ねることが必 要と考えられた。

3. 山腹斜面(谷壁斜面)に出現する赤判定の対策

3.1 検証降雨とシステムの判定状況

令和3年(2021)8月豪雨では兵庫県においても雨が多く、特に県中部の宍粟市〜丹波市にかけて累加雨量が300mm を超える降雨となった(図3.1)。図3.2に気象庁の解析雨量による時間雨量と累加雨量の時系列グラフを示す。県北部 (香美町)における8月13日~15日の降雨は、最大1時間雨量10~20mmのピークが複数回で発生した長雨型であ った。また、県中南部(神戸市)における8月17日~19日の降雨は、最大1時間雨量10~20mmのピークが複数回で 発生した長雨型であった。このうち、西宮市、神戸市、朝来市、養父市、香美町にて土砂災害警戒情報が発表されてお り、この際に気象庁が発表した大雨警報(土砂災害)の危険度分布を図3.3に示す。

本システムは、10m セル単位の崩壊予測(安全率と安全率の変化量の二軸の閾値による判定⁷⁾、以下「判定(二軸)」 と略す)を基本に、土砂災害警戒区域(急傾斜地の崩壊、土石流)毎の危険度を予測している。危険度の予測は、気象 庁の解析雨量と降水短時間予報を用いて、実況と1、2、3時間先を予測しているが、本論は実況の10m セル単位の判 定結果を対象に整理した。令和3年8月豪雨における各市町のシステムの判定(二軸)状況を表3.1に示す。1時刻(30 分単位)の10m セルの判定(二軸)数は、丹波市の440 セルが最大であった。この降雨による土砂災害の発生(道路 や人家の擁壁の崩壊等を除く)は3箇所で報告されているがいずれも本システムでは見逃しとなった。この3箇所は、 宅地からの排水流入による崩壊(神戸市須磨区),谷沿いに堆積した土砂の流出(朝来市和田山町),施工中の法面の崩 壊(香美町村岡区)であり、人工的な要因によるものや渓流の洗掘に起因するものであることから、本システムでは判 定が困難な事象であることが判った。



図 3.1 令和 3 年 (2021) 8 月 11 日~15 日の累加雨量分布図 (気象庁解析雨量 1km メッシュ)



図3.2 令和3年(2021)8月のハイエトグラフ(気象庁解析雨量による時間雨量と累加雨量)



8/11-15 に最も危険度が高まった時の 土砂キキクル(危険度分布)図 8/17 に最も危険度が高まった時の

土砂キキクル(危険度分布)図



8/19 に最も危険度が高まった時の 土砂キキクル(危険度分布)図

図3.3 土砂災害警戒情報発表降雨における大雨警報(土砂災害)の危険度分布(神戸地方気象台)

市町	気象情報	1時刻(30分単位) の10mセルの判定 (二軸)数
神戸市	土砂災害警戒情報	87
西宮・芦屋・宝 塚の一部	土砂災害警戒情報	6
三田市	大雨警報	5
上郡町	大雨警報	3
豊岡市	大雨警報	1
新温泉町	大雨注意報	77
香美町	土砂災害警戒情報	30
朝来市	土砂災害警戒情報	151
養父市	土砂災害警戒情報	261
丹波篠山市	大雨警報	9
丹波市	大雨警報	440

表 3.1 令和 3年(2021)8月豪雨のシステム判定(二軸)状況(2021年8月1日~8月21日)



図3.4 丹波市における令和3年(2021)8月のハイエトグラフ(気象庁アメダス柏原)と判定(二軸)セル数の関係

降雨とシステムの判定(二軸)結果の関係について、丹波市の事例を図 3.4 に示す。8月11日から降雨が始まり、8 月15日までに累加雨量は237.5mmに達した。この間、最大時間雨量は8月11日21時の23mmであり、この他は時 間雨量15mm以下であった。判定セルは8月13日13時~20時半、8月14日4時~12時半の間に発生しており、ピ ークは8月14日10時半の440セルであった。この判定セル数がピークに達した時点では大雨警報が出されている状 況であるが、累加雨量は129.5mmであった。なお、この降雨に対して土砂災害警戒情報は発報されておらず、災害の 発生は無かった。以上のように、少雨時に空振りの判定(二軸)が生じる点は、他市町でも同様に認められたことから、 各市町のシステムに共通する課題であると考えられた。

3. 2 少ない雨量で生じる空振り判定の要因分析

(1) 少ない雨量で生じる空振り判定の特徴

少雨時に発生する空振りの判定を改善するために、まず要因分析として判定の特徴を検討した。これ以降の検討では、 崩壊・非崩壊箇所と判定セルの比較を行う必要があるため、10m セル単位の崩壊予測(安全率による判定、以下「判定」 と略す)に基づいて検討することとした。

令和3年8月豪雨において累加雨量が150mmに達するまでに判定されたセル数について各市町の状況を表3.2に示 す。また、判定位置の地形的位置について、図3.5および図3.6に示す。空振りの判定数は、整備済みの11システムの うち、新温泉町、香美町、丹波市、朝来市、養父市が多く、豊岡市、丹波篠山市がやや多く、神戸市、西宮・宝塚市、 上郡町、三田市は少ない。これは日本海側と瀬戸内海側において、判定数の傾向が異なることを示しており、主に日本 海側に広く分布する粘性土主体の地質と、瀬戸内海側の砂質土主体の地質の違いによるものと推定される。

また、図 3.5 および図 3.6 に示すように、空振りセルは、主に谷地形の上流付近に分布している。この傾向は、2021 年報告²¹⁾と同様であり、空振りとなったセルは、減厚区間と減厚区間より上流の谷頭部付近に位置することや、谷の横 断形状の特徴も同じ傾向で特異な点は見られなかった。空振り判定の要因として、2021 年報告²¹⁾は水系網の位置や長 さが現地地形を適切に反映できていないこと、谷沿いの透水係数の設定が現地の地盤状況に対応できていないこととし て報告している。各市町において、少雨時の空振り判定の殆どは水系網沿いであり、2021 年報告²¹⁾と同様であることから、 同じ要因が推定される。すなわち、既往検討により、水系網沿いは層厚を減じることで崩壊が発生しにくい設定となっているが、 この設定区間より上流側において少雨で安全率が1を下回るセルが生じている。この原因として、地下水が集まることで、水位が 上昇しやすい条件となるため、空振り判定が発生しやすいことが挙げられる。このため、水系網の長さや透水性を見直すことで、 少雨での判定数を抑える必要があると考えられる。

市町	期間	累加雨量(mm)	累加雨量150mmま での空振りセル数	空振り判定の位置
神戸市	2021/8/17-8/20	177.5	111	主に谷地形の上流付近に分布
西宮市	2021/8/12-8/15	153.0	35	主に谷地形の上流付近に分布
三田市	2021/8/12-8/15	143.5	118	主に谷地形の上流付近に分布
上郡町	2021/8/12-8/15	151.0	3	主に谷地形の上流付近に分布
豊岡市	2021/8/12-8/15	282.5	267	主に谷地形の上流付近に分布
新温泉町	2021/8/7-8/10	265.5	1140	主に谷地形の上流付近に分布
香美町	2021/8/12-8/21	268.5	1619	主に谷地形の上流付近に分布
朝来市	2021/8/12-8/15	284.0	857	主に谷地形の上流付近に分布
養父市	2021/8/12-8/15	269.5	1266	主に谷地形の上流付近に分布
丹波篠山市	2021/8/12-8/15	244.5	157	主に谷地形の上流付近に分布
丹波市	2021/8/12-8/15	237.5	2765	主に谷地形の上流付近に分布

表3.2 少ない雨量で生じる空振りの市町別の発生状況(令和3年8月豪雨)



図 3.5 降り始めからの累加雨量が 150mm 未満の判定セルの分布(丹波市, 令和3年8月豪雨) 水系網は 10mDEM より作成(上端の集水面積は2,000m²[丹波層群]の設定]



図 3.6 降り始めからの累加雨量が 150mm 未満の判定セルの分布(新温泉町, 令和3年8月豪雨) 水系網は10mDEM より作成(上端の集水面積は2,500m²[照来層群]の設定]

3.3 少ない雨量で生じる空振り判定の対応

(1)検討の流れ

前節に示したように、空振りの要因として、粘性土主体の地域の地盤定数の設定の問題、谷地形沿いの透水性の設定の問題 が挙げられた。このため、空振りが多い課題に対するモデル見直しとして、検討フローを以下の通り整理した。本論では1次およ び2次検討を詳細に示す。3次検討については、下記枠内に示すように既往研究²¹⁾により、水系網を1セル上流まで延ばすこと や、複数の谷が集まる谷頭凹地状の集水地形において透水係数を見直すこと等により空振り判定を解消する方針を示して いるので、詳細な記載は本論では省略する。

1次検討

2次検討

水系網沿いの透水係数を見直すことにより、災害非発生降雨(令和3年8月)における累加雨量150mmまでの判定 セル(空振りセル)を減少させる。(過去の検証災害の再現精度を維持した上での見直しである必要があるため、透水係 数の見直しは検証災害の再現計算と合わせて行う)

3 次検討



2次検討後にも判定が残るセルについて以下の条件を確認して、各セル個別の地盤定数や透水係数を見直す。

■神戸市灘区エリアにて整理された個別調整²¹⁾

谷壁斜面の事例

水系網を1セル延長すると解消(水系網を生成する際の集水面積を1000 mより小さくする等) ②複数の谷が集まる谷頭凹地状の集水地形の事例

透水係数を2倍から5倍とすることで解消(合流地点は流量が多く、現地の表土層は粗粒である) ③大阪層群・神戸層群の事例(層厚を減厚することで解消:個別に要検討)

(2)1次検討(地盤定数(c、φ)の見直し)

兵庫県では、北部の日本海側と中南部の瀬戸内海側において、分布する地質に明瞭な違いがあるため、地盤の地質が風化 して生じている表土層の土質が明瞭に異なっている。図3.7に示すように、瀬戸内海側では、花崗岩類や古第三紀〜白亜紀酸 性火山岩類の地質が広く分布しており、風化により形成される表土層は主に砂質土からなる。これに対して、日本海側は、火山 噴出物起源の堆積岩である、新第三紀中新世堆積岩(北但層群)および第三紀鮮新世〜第四紀火山(照来層群他)が広く分布 しており、風化により形成される表土層は主に粘性土からなる。更に中間地域は、中・古生代岩類および堆積岩(丹波層群)が分 布するが、砂質岩または泥質岩が混在しており、これら岩相に応じて表土層は砂質土および粘性土からなる傾向をもつ。

このように地質によって、表土層の土質に明瞭な違いがあることから、システムの表土層の地盤定数は、地質の違いを考慮して 適切に設定する必要がある。これまでの設定は、神戸市域の花崗岩分布域における砂質土主体の表土層の粘着力、内部摩擦 角の設定を基本として、他地質を設定していたことから、特に粘性土が多い日本海側を中心に見直しを行うこととした。

この見直し方針を立てる目的で、まず現地踏査により表土層の状況を調査した。ここでは新温泉町の調査結果を示す。図 3.8 に示すように、新温泉町において、令和 3 年 8 月豪雨の累加雨量 150mm までの少雨時に発生した空振りセルの位置は、第四 紀火山岩類および第三紀鮮新世~第四紀火山(主に照来層群)の分布域に偏っている。これらの殆どの空振り判定セルは、谷 地形の上流付近に分布する特徴を持つ。図 3.9 に示すように、現地状況は第四紀火山岩類の分布する山腹斜面において、表 土層は主に玄武岩溶岩が風化して土砂化した砂礫混じり粘性土からなることを確認した。このため、表土層の粘着力は砂質土主 体の表土層よりも高いことが判った。また、谷地形沿いは、玄武岩の風化残礫が集積した状態であり、細粒分は流出している。こ のため、谷地形沿いの透水性は高い状態であると判った。更に、照来層群の分布する山腹斜面では、表土層は泥岩、シルト岩 と溶岩の互層となっており、表層崩壊は泥岩シルト岩の風化した砂礫混じり粘性土が分布する傾向があることを確認した。このた

96



め、表土層の粘着力は砂質土主体の表土層よりも高いことが判った。また、谷地形は溶岩の風化残礫が集積した状態で、細粒 分は流出していることから、谷地形沿いの透水性は高い状態であると判った。

図3.7 兵庫県の代表的な地質分布(兵庫県砂防課²²⁾に追記)

以上の現地踏査の結果に基づき、表土層の地盤定数を適切な値へ試算により見直した。ここでは、新温泉町の照来層群について、検証災害である平成2年豪雨(災害発生)および令和3年7月豪雨(災害非発生)の判定結果を利用した検討結果を図3.10に示す。新温泉町の照来層群は、粘性土の表土層であることから、当初設定のc=5.0kN/m² ϕ =33°よりも高い粘着力cが想定されたため、捕捉セル数(A)を維持しつつ、空振りセル数(C)を減少する組み合わせとして、粘着力cを0.5kN/m²ずつ上昇させながら、対応する内部摩擦角 ϕ を検討した。その結果、c=6.5kN/m² ϕ =25°の組み合わせが最も適切と判断された。なお、兵庫県砂防課 ²²)は、第三紀鮮新世~第四紀火山(照来層群他)について、急傾斜地おける土石等の堆積時の内部摩擦角を ϕ =25°に設定していることからも妥当な設定値であると考えられる。



図 3.8 降り始めからの累加雨量が 150mm 未満の判定セルの分布 (新温泉町エリア, 令和3年8月豪雨) 水系網は 10mDEM より作成 (上端の集水面積は 2,000m² 〔第四紀火山岩類〕, 2,500m² 〔照来層群〕の設定〕



古い表層崩壊地の状況

シルト岩の風化状況

谷地形の状況

図3.9 現地踏査による地質状況(上:第四紀火山岩類(図3.8のC地点)、下:照来層群(図3.8のD地点))



災害非発生降雨では、空振りを抑えるために更に土質強度を上げることも考えられるが、 災害発生降雨による試算の結果,崩壊をある 程度捕捉できる強度とする必要がある。兵庫県の土砂災害防止法基礎調査マニュアル(案)ではめ=25°とされていることから、 が適切である。 $C = 6.5 KN/m^2 \phi = 25^{\circ}$



以上のような流れにより各市町で検討した結果、既往の地盤定数(c、 ¢)を表 3.3 に示すとおり見直した。粘性土からなる表土 層が分布する新第三紀中新世堆積岩(北但層群)、第三紀鮮新世〜第四紀火山(照来層群他)、および中・古生代堆積岩(丹波 帯)は、当初設定よりも高い粘着力 c と、これに対応した内部摩擦角 ¢ に見直された。見直し後の内部摩擦角 ¢ は兵庫県砂防 課²²⁾の土砂災害防止法基礎調査マニュアル(案)に掲載されている地質毎の堆積時の内部摩擦角(表 3.3)に近い値であ る。図 3.11 に見直し後の粘着力 c と内部摩擦角 ¢ の関係図を示す。瀬戸内海側の砂質土主体の表土層に対して、日本海側の 表土層は相対的に粘着力 c が大きく、内部摩擦角 ¢ が小さい側にプロットされる。更に、中間地域の表土層は砂質土および粘 性土の両側に分散する傾向を示す。以上の地盤定数(c、 ¢)の関係は、今後の他市町への適用時の目安になると考えられる。

	土砂灰吉防止法基碇調宜マニュアル	(条)			白	忉	見旦	し伎	
番号	地質区分	土質区分	堆積時の 内部摩擦 角(°)		C' (KN/m ²)	φ(°)	C' (KN/m²)	\$\$\phi\$	備考
1	第三紀鮮新世〜第四紀更新世の 段丘堆積物および大阪層群他	砂質土	30		5	31	5	31	
				Ĩ	6	25	6	25	豊岡(崩壊集中域)
					5	32-33	6	27	豊岡(崩壊集中外)、新温泉、香美
2	第三紀中新世堆積岩(北但層群)	粘性土	25		5	32-33	6.5	25	香美(北但層群村岡累層)
					6	25	6	27	朝来、養父(村岡累層以外)
					5	33	6	27	養父(村岡累層)
3	第三紀中新世堆積岩 古第三紀堆積岩(神戸層群他)	粘性土	25		5	30	5	30	
					6	24	6	24	豊岡(第四紀火山)
					6	24	6.5	23	新温泉, 香美(第四紀火山)
4	第二紀鮮新世〜第四紀火山岩(鉢伏・神鍋火山岩、照来層群他)	粘性土	25		5	33	6.5	25	新温泉,香美(照来層群)
					5	32	6	27	豊岡(照来層群)
					6	24	6.5	23	朝来(第四紀火山)、養父(鮮新世火山)
					5	32	5	31	朝来(生野最下部累層)
_	古第三紀~白亜紀酸性火山岩類	礫質土	35		5	32	5	32	三田,上郡,神戸,宝塚西宮,香美(北部),豊岡,丹波篠山,朝来,養父
5	(矢田川、生野、相生、有馬層群他)	(砂質土)	(30)		5	32	5	33	丹波,香美(南部),新温泉
					5	32	3	35	神戸(遷急線沿い)
c	古王妇讲建出 (加自民联)	74.55	20						
6	日亜紀堆積石(和泉唐群)	砂賀工	30		_		_	_	
					4	36	4	36	丹波、丹波篠山(丹波層群砂岩)
					4	36	4	37	丹波(丹波層群チャート)
	中·古生代堆積岩(丹波帯、超丹波帯	砂質土	30		4	36	5	31	丹波(超丹波蒂),西宮芦屋
7	他)				5	31	5	31	養父(丹波帯)
	変成岩類 (三波川変成岩他)				5	31	5.5	31	朝来(超丹波蒂)
		粘性土	-		5	31	6	25	丹波、丹波篠山(丹波層群頁岩)、朝来(丹波帯)
	市 十开作出题 (左方服 每韓世代)			İ	5	28	5	32	上郡
0	中・古生代右親(夜八野、舞鶴帝他)	礫質土	35		5	31	5	31	朝来(夜久野岩類)、養父(舞鶴帯、夜久野岩類)
ŏ	^旭	(砂質土)	(30)		5	28	5	28	養父(超塩基性岩)
	1世)				5	31	5.5	31	朝来(舞鶴帯)
				İ	5	31	5	31	神戸,三田,上郡,西宮芦屋,香美,新温泉,豊岡,養父
-	-+- U2 U2 42	74.66.1			5	30	5	30	香美(崩壊多い地域)
9	化岡石規	砂賀土	30		5	28	5	28	上郡(崩壊多い地域)
					5	31	5	32	朝来

表 3.3 地盤定数(c、φ)設定値の見直し結果(赤字:見直し箇所)



図 3.11 見直し後の地盤定数(c、 φ)の関係図

(3) 2次検討(少雨における空振りの減少)

少雨における空振りセルは、水系網沿いに集中して分布しているため、水系網の位置や透水係数を見直す必要がある。 この検討に用いる少雨は、兵庫県内の広範囲に観測された最近の実降雨である災害非発生降雨(令和3年8月)におけ る累加雨量 150mm までの降雨を用いて、空振りセルを減少させることを目標に検討を行った。

1)水系網の設定(詳細地形情報(1mDEM)を用いた水系網の設定)

当初設定していた10mDEMによる渓流の上流端付近は、0次谷の微地形を十分に示していないため、より詳細な水系線を追加設定する必要がある。図3.12に示すように、追加した水系網は、周囲のメッシュより表土層を薄く設定した0次谷に接続する谷地形とし、詳細地形情報(1mDEM)を用いて抽出した(既往研究²¹⁾により、水系網の集水面積を1000 m²で作図)。また、周囲のメッシュより表土層を薄く設定した0次谷のメッシュに隣接する谷壁斜面の1メッシュを渓流側壁斜面として設定した。以上の流れを図3.13に示す。



図 3.12 詳細地形情報(1mDEM)を用いた水系網の作成



図 3.13 渓流および水系網の設定の流れ

渓流および水系網の設定の詳細は以下の通りである。

①10mDEM を用いた渓流の作成

(集水面積:大阪層群・神戸層群は 2,000 m²、その他の地質は 2,500 m²で作図するが、後検討により見直す。また、豊岡市域は幅広い谷地形のため 5mDEM による渓流を作成している。)

1) 渓流 Line から半径 10m バッファを発生させ、それと重なる谷壁斜面セルまたは谷底斜面セルを渓流(0次谷) セルとする。 2) 渓流(0次谷) セルの内、谷壁斜面セルを対象に-15cm の減厚処理を行う。

②1mDEM を用いた水系網の作成

1) 1mDEM を用いた水系網 Line の設定(集水面積:1000 m²)

2)水系網 Line から 10m バッファを発生させ、それと重なるセルを水系網セルとする。(既に渓流(0次谷)セルとして重複する セルはそのまま渓流とする)

③渓流側壁斜面の設定

渓流(0次谷)セルと谷壁斜面あるいは谷底斜面が隣接する場合、渓流(0次谷)セルの外側の1セルを渓流側壁斜面として抽 出する。

以上の渓流及び水系網の設定は、図 3.14 に示すように、田村²³⁾による微地形区分に対して、10mDEMによる渓流(以下 「渓流」と略す)は下部谷壁斜面内の非恒常的水路であり、1mDEMによる水系網(以下「水系網」と略す)は谷頭凹地 内の非恒常的水路として対比される。ここでは、前者を下部谷壁水路、後者を上部谷壁水路として新たに定義した。



※水路(非恒常的):表流水が降雨時のみ発生する水路を示す

図 3.14 微地形区分の模式図(田村²³⁾に赤字追記)

2) 渓流及び水系網の透水係数の設定

渓流及び水系網の透水係数は、地形、地質等の影響も受けると考えられる。このため設定にあたっては、図 3.15 に示すように、 まず代表的な5つの地質(花崗岩は既往研究 ²¹⁾にて検討済みのため除外)について、ミニモデル(2km 四方の計算モデル)の 試算を行うことで、少雨(累加雨量 150mm 程度)で発生する空振り判定が解消できる地質毎の透水係数の設定値の目安を得る こととした。

そのうえで、各市町における地質毎の詳細な検討を行う方針とした。検討に際しては、まず検証災害の降雨条件にて、ミニモ デルで得られた透水係数の目安を中心に地質毎に透水係数を設定して再現計算を行い、当初の捕捉率を維持しつつ、空振り 率を最も低減できる透水係数の最適な値を感度分析により求めた。この最適値の設定において、少雨(累加雨量 150mm 程度) で発生する空振り判定が解消されるかを計算して確認した。



図 3.15 代表的な地質ごとの透水係数の検討箇所(兵庫県砂防課²²⁾に追記)

a) ミニモデルを用いた検討

ここでは、代表的な地質の一つである丹波市の有馬層群の検討結果について示す。まずミニモデルを用いた試算は、 有馬層群の分布範囲の2km四方の狭い範囲にて実施した。ここでは令和2年度までに構築したモデルについて、少雨 で空振り判定が生じるセルに対して個別に地盤定数を調整した設定を取り除いたもの(プレーンモデル)を用いて試算 した。設定定数は表3.4に示すとおりである。降雨条件は令和3年8月豪雨において累加雨量が150mm未満の少雨を 用いた。図3.16に示すように①プレーンモデルに対して、②透水係数変更後は、安全率1未満の判定セルは殆ど消えて いる。これは、少雨で判定セルが生じる箇所の殆どが渓流及び水系網沿いに分布するため、渓流及び水系網沿いの透水 係数を高めることで水位が低下し、安全率が高まったものと考えられる。なお、③透水係数変更後(全降雨)は累加雨 量 300mmを超える試算であるが、判定セルは水系網の上端付近の適切な位置に分布することを確認した。このように、 渓流及び水系網沿いの透水係数を高める設定は、少雨時には地下水位を低下させる効果により判定セルを減少させるが、 多雨時には地下水位が徐々に高まることで適切に判定が生じる見直しができることを確認した。

表 3.4	ミニモデルの計算条件	(丹波市域の有馬層群)

	①プレーンモデル	②プレーンモデル 透水係数変更後	③プレーンモデル 透水係数変更後(全降雨)
入力した雨量の期間	2021/8/11 0:00 ~ 2021/8/15 23:30	同左	2021/8/1 0:30 ~ 2021/8/23 16:00
地質区分	有馬層群	同左	同左
土の単位体積重量 kN/m ³	16.0	同左	同左
土の飽和単位堆積重量 kN/m ³	19.0	同左	同左
土の有効粘着力 kN/m ²	5.0	同左	同左
土の有効内部摩擦角 deg	32.0	同左	同左
有効空隙率1	0.35	同左	同左
透水係数 cm/sec	0.056	渓流(10mDEM を用いた渓流 Line から 10m)の範囲: 0.280(現行の5倍) 水系網(1mDEM を用いた渓流 Line から 10m)の範囲: 0.112(現行の2倍) 渓流側壁斜面: 0.112(現行の2倍)	同左
累加雨量 150mm 到達時刻	一律 2021/8/14 3:00	同左	同左



以上のミニモデルによる試算を行い、表 3.5 に示すようにミニモデルから考えられる代表的な地質に対する透水係数の目安を 整理した。なお、各市町の地質毎の設定にあたっては、検証災害の捕捉率等を低下させない程度に透水係数を設定する必要 があるため、以降の各市町の地質毎の詳細な透水係数の検討に際しては、この目安は概ね最大値と考えて検討する必要がある。

代表的地質	下部谷壁水路 (10mDEM渓流)	上部谷壁水路 (1mDEM水系網)	渓流側壁斜面					
有馬層群	0.280(5K)	0.112(2K)	0.112(2K)					
丹波層群	0.224(4K)	0.084(1.5K)	0.084(1.5K)					
神戸層群	0.280(5K)	0.112(2K)	0.112(2K)					
北但層群	0.280(5K)	0.112(2K)	0.112(2K)					

表 3.5 ミニモデルにより得られた代表的な地質の透水係数

b)渓流の長さ・幅

10mDEMによる渓流は、0 次谷において豪雨時のみ表流水が発生するような谷の下流側として定義している。この渓流の 上端付近は、常時は表流水は認められないが、湧水による洗掘跡やガリ地形が認められ、谷沿いの表層は間欠的に発生する 表流水により表土層は薄くなり、細粒分が流出して粗粒で透水性が高い特徴を持っている。これに対して、表層崩壊が発生す る斜面は渓流より上流側の自然斜面であり、両者は近接するが重複しない位置関係である。このため、渓流は、過去の崩壊地 に対して、近接する程度の長さとすることが適切であるため、各地質において、集水面積ごとの渓流の上流端と崩壊地に近接 するような位置関係となる渓流を検討した。図 3.17 に、丹波市域の丹波層群・有馬層群、豊岡市域の北但層群で検討を行っ た事例を示す。検討の結果、適切な渓流の長さは、集水面積 4000m²の渓流が最も適切であると判断された。また、渓流の幅 は、上記の渓流の詳細な設定に示すとおりである。



図 3.17 渓流の長さの設定検討(丹波市、有馬層群の事例)

c) 透水係数の検討

前節の a)による渓流、水系網、および渓流側壁斜面沿いの透水係数の目安を基準に、各市町の地質毎の渓流、水系網、 および渓流側壁斜面の透水係数の検討を行った。検討に際しては、当初モデルの検証災害時の捕捉率を一定程度維持しつ つ、空振りセルを減少させることができる組み合わせの試算を繰り返した。その結果の事例として、図 3.18 に丹波市の有馬層 群および丹波層群の検討結果を示す。図に示すように、モデル改良後は、一部で崩壊地について見逃しが生じるものの、一 定程度の捕捉率を維持しつつ、空振りセルが大幅に減少することを確認した。



図 3.18 検証災害時のモデル改良効果(丹波市 平成 16 年 10 月豪雨) (左図:改良前、右図:改良後)透水係数 K=0.056cm/s

上記の検討により、過去の検証災害の再現性を維持した上で地質毎の最適な透水係数の組み合わせを用いて、少雨での判定効果について、令和3年10月豪雨の累加雨量150mmまでの条件にて検証した。その結果として、丹波市の有馬層群、および丹波層群の事例を図3.19に示す。当初モデルの空振りセルは、改良後では大幅に減少したことから、モデルの改良効果を確認することができた。



図 3.19 少雨時のモデル改良効果(累加雨量 150mm まで(令和3年8月豪雨)) (左図:改良前、右図:改良後)透水係数 K=0.056cm/s

なお、各市町の地質毎の渓流、水系網、および渓流側壁斜面の透水係数の検討の結果、最終的な設定値を表 3.6 に示す。1 0mDEMによる渓流は豊岡市や新温泉町の一部地質を除いて、0.280cm/s(5×0.056)の透水係数が最適値として求められた。 1mDEMによる水系網は、0.112cm/s(2×0.056)~0.056cm/sが求められた。瀬戸内海側の砂質土主体の地質において透水係 数が高くなる傾向があり、日本海側および中間地域において、透水係数が低い傾向がある。ただし、地形条件や地質毎の谷沿 いの表土層の条件により、最適な透水係数は微小に変化している。また、渓流側壁斜面は、瀬戸内海側の砂質土主体の地質に において 0.112cm/s(2×0.056)~0.084cm/s(1.5×0.056)が求められたが、その他の地域では改良前の当初モデルと同値であ る 0.056cm/s、つまり微地形区分として設定の必要性は無いと整理された。以上の設定に対しては、次項の現地調査にて妥当性 を確認した。

				透力	透水係数 (K=0.056cm/sec)			
	市町	改良モデル	地質区分	下部谷壁水路 (10mDEM渓流)	上部谷壁水路 (1mDEM水系網)	渓流側壁斜面		
		改良前の	当初モデル	к	К	К		
1	神戸市	Case021.1	全地質	5K	2K	2K		
2	西宮・芦屋・宝 塚の一部	Case017.1	全地質	5K	2K	2K		
3	三田市	case023.1	全地質	5K	К	К		
	ᄽᆇᄼᄔᄪ	0 00	花崗岩	5K	2K	2K		
4	宿名川町	Case36	その他	5k	К	1.5K		
5	上郡町	Case033.1	全地質	5K	2K	2K		
6	豊岡市	Case038.10	全地質	2K	К	К		
	新温泉町	Case007.11	照来層群	5K	К	К		
7			第四紀火山岩	5K	2K	К		
			その他	2K	К	К		
8	香美町	Case019.9	照来層群、北但層群村岡累層、 第四紀火山・鮮新世火山とその他 (岩脈等)	5K	2К	К		
			その他	5K	К	К		
0	却女士	0 101	花崗岩、生野層群	5K	1.5K	К		
9	别木巾	Case 101	その他	5K	К	К		
10	養父市	Case58	全地質	5K	К	К		
11	丹波篠山市	Case013.4	全地質	5K	К	К		
10	5 ***	0 0 10 10	有馬層群、生野層群	5K	1.3K	К		
12	17波印	CaseU12.18	丹波層群、その他	5K	К	К		

表3.6 渓流、水系網および渓流側壁斜面の透水係数一覧表

108

d) 現地調査による妥当性確認

前項(c)の改良時の設定条件について、現地にて妥当性の確認を行った。確認場所は、より正確な判定が求められる土砂 災害警戒区域(急傾斜地)の代表箇所とした。表 3.7 および図 3.20 に丹波市における現地確認結果の事例を示す。確認の結 果、前述した改良モデルの渓流及び水系網の設定(水路の長さ、幅、透水性)について、現地で概ね同様の傾向があることを 確認した。なお、渓流側壁斜面として区分できるような地形は現地に認められなかったが、改良モデルにおいても設定してい ないため、この点も整合しており、改良モデルの設定条件が妥当であることを確認した。

微地形区分	比較	水路延長および水路幅	透水性	改良モデルの設				
M 8/8 E /3			, <u> </u>	定条件の妥当性				
下部谷壁水路 (10mDEM渓流)	モデル	谷底~高さ60m付近の区間、幅20.0m 0.280cm/sec(0.056×5)						
		公宮 京さ60に明瞭なよ	表層は礫質土であり、周辺斜面よりも	合している				
	現地扒沉	谷底~高さ60mに明瞭な水路沈掘が分布する。幅17.0m	透水性は高い。					
上部公時水路	モデル	高さ60~110m付近の区間、幅20.0m	0.0728cm/sec(0.056×1.3)	モデル設定と慗				
<u>エ記日 主/小</u> 館 (1mDEM水 豕綱)	TELLUL	<u> 京 ナ 60 112</u>	表層は礫質土~礫混じり土砂であり、	合している				
(IIIIDEIVI/水响)	現地仏沅	高さ60~113m1小型に凹地状の疲い洗掘地形が分布する。幅21.8m	周辺斜面よりも透水性は高い。	ロレている。				
	モデル	 デル 下部谷壁水路は設定しない。 状況 下部谷壁水路の両岸は露岩気味であり、現地に明瞭な渓流側壁斜面は認められない。 						
渓流側壁斜面	現地状況							

表 3.7 渓流および水系網の現地確認結果表(丹波市;124030021_森皿)



図 3.20 渓流及び水系網の現地確認結果(丹波市;124030021_森皿)上図:改良モデルの設定条件による渓流及び水 系網の分布図に現地確認結果を追記。下図:現地確認による水路横断図

(4) 改良による効果

上記のモデル改良について、各市町の検証災害降雨に対する再現計算の結果を表 3.8 に示した。モデル改良の結果、捕捉率は 75%程度を維持しつつ、空振率を大幅に低減させることができた。この改良効果は、図 3.21 にも示すように空振りセル数 (C)を概ね半減させている。

	市町	検証	計算モデル	改			セル数				適中	率等	
		災害		良	Α	В	С	D	合 計	適中率	捕捉率	空振率	見逃率
1	抽古古	C12	Case021 24)	前	14,717	3,633	115,376	5,653,458	5,787,184	97.9%	80.2%	2.0%	19.8%
T	「「「「」」、 「」」、 「」」、	342	Case021.1	後	14,298	4,052	44,886	5,723,948	5,787,184	99.2%	77.9%	0.8%	22.1%
0	西宮・芦	C12	Case017 25)	前	1,129	215	18,743	549,908	569,995	96.7%	84.0%	3.3%	16.0%
۷	産 玉塚 の一部	342	Case017.1	後	1,043	301	12,408	556,243	569,995	97.8%	77.6%	2.2%	22.4%
a	三田市	\$40	case023 26)	前	800	171	14,297	1,490,286	1,505,554	99.0%	82.4%	1.0%	17.6%
5		040	case023.1	後	779	192	12,430	1,492,153	1,505,554	99.2%	80.2%	0.8%	19.8%
Д	猪名川	НЗО	Case14 27)	前	148	24	18,864	823,399	842,435	97.8%	86.0%	2.2%	14.0%
4	⁴ ⊞⊤	1130	Case36	後	138	34	12,638	829,625	842,435	98.5%	80.2%	1.5%	19.8%
5		S10	Case033 28)	前	1,037	194	54,925	1,348,421	1,404,577	96.1%	84.2%	3.9%	15.8%
5	2 工印间	0+5	Case033.1	後	888	343	51,885	1,351,461	1,404,577	96.3%	72.1%	3.7%	27.9%
6	6 豊岡市	Н16	Case038 29)	前	7,748	1,433	95,487	5,653,682	5,758,350	98.3%	84.4%	1.7%	15.6%
0		1110	Case038.10	後	6,468	1,872	60,844	5,689,166	5,758,350	98.9%	77.6%	1.1%	22.4%
7	7 新温泉 町	Н2	Case007 30)	前	906	165	59,766	2,085,953	2,146,790	97.2%	84.6%	2.8%	15.4%
7			Case007.11	後	608	226	27,377	2,118,579	2,146,790	98.7%	72.9%	1.3%	27.1%
8	8 香美町	Н2	Case019 31)	前	887	214	111,372	3,203,501	3,315,974	96.6%	80.6%	3.4%	19.4%
0		112	Case019.9	後	698	213	46,412	3,268,651	3,315,974	98.6%	76.6%	1.4%	23.4%
9	胡來古	H16	Case41 32)	前	81	25	75,228	3,369,938	3,445,272	97.8%	76.4%	2.2%	23.6%
5		1110	Case101	後	75	31	28,396	3,416,770	3,445,272	99.2%	70.8%	0.8%	29.2%
10	春父市	H16	Case41 32)	前	118	19	60,925	3,723,553	3,784,615	98.4%	86.1%	1.6%	13.9%
10	及八中	1110	Case58	後	104	33	24,462	3,760,016	3,784,615	99.4%	75.9%	0.6%	24.1%
11	丹波篠	H16	Case012 33)	前	352	82	47,800	2,863,867	2,912,101	98.4%	81.1%	1.6%	18.9%
	山市	1110	Case013.4	後	286	72	30,882	2,880,861	2,912,101	98.9%	79.9%	1.1%	20.1%
12	丹波市	H16	Case012 33)	前	1,209	298	120,063	3,606,209	3,727,779	96.8%	80.2%	3.2%	19.8%
12	71/217	1110	Case012.18	後	908	317	39,415	3,687,139	3,727,779	98.9%	74.1%	1.1%	25.9%
【参考】指標の演算方法							実績	予測	発生予想	非発生	予想		
		捕	提率= A /(A +B)				崩壊発	生	А	В			
		空見					崩壞非务	き生	С	D			

表3.8 モデル改良前後の捕捉率、空振率の変化(検証災害降雨)



図 3.21 モデルの改良効果(検証災害の捕捉率,空振りセル数)

一方で、図 3.21 に示すように、改良後に捕捉率が数%程度の低下が生じている。この見逃しが生じている個所は、低い山地の遷急線付近からの表層崩壊や、10mDEM 渓流沿いの中流付近での崩壊などが挙げられる。これらの見逃し原因としては、低山地において風化が進行して厚い表土層が形成されることで崩壊に至るケースや、谷沿いの渓岸浸食に起因した斜面崩壊などが推定され、改良モデルにおいても対応できない崩壊メカニズムが含まれていることが捕捉率低下の原因と考えられる。なお、図 3.21 は改良後も空振り判定が半分程度残る結果となっている。この空振り箇所の殆どは、0 次谷の上流端付近であり、表層崩壊が発生しやすい位置である。この傾向は、豪雨時の再現計算としては、妥当な結果であると考えられる。

更に、上記の改良について、土砂災害警戒区域(急傾斜地)内において考察する。表 3.9、図 3.22の右図に示すように、土砂 災害警戒区域内で災害履歴がある豊岡市および丹波市において、崩壊が発生した区域のうち判定セルが生じた区域(崩壊を捕 捉した区域)数は、改良後も概ね維持している。よって、モデル改良後においても、豪雨時には適切に判定が出るモデルである ことを示している。また、改良の結果、警戒区域内の空振り判定セル数は最大でおよそ半減しており、これに伴い、空振りの警戒

							全降雨						
	*m	検証	76 - 6	0405	□ ++ 40 * 5	崩壊が発生 した警戒区 域数	捕捉した 警戒区域数	空振り	警戒区域内の空振りセル数				
	ןייי מי	降雨	WIX	CASE	区或総数			警戒区域数	空振り警戒区域 のセル総数(①)	空振り 判定セル数(②)	空振り判定セル面積率 (%)(②/①×100)		
2	二四士	\$40	前	23.0	109	0	-	30	4870	86	1.77		
5	0	340	後	23.1	190		-	29	5015	86	1.71		
6	曲回士	ш16	前	38.0	1067	16	16	453	81733	1583	1.94		
Ь	마미묘	пто	後	38.10	1007		14	351	52284	783	1.50		
7	站 百 四	Ц 2	前	7.0	595	0	-	216	42295	883	2.09		
1	利加水叫	ΗZ	後	7.11			-	155	32719	543	1.66		
0	禾羊町	Ц 2	前	19.0	417		-	210	45573	1530	3.36		
0	省夫叫	п∠	後	19.9	417	0	-	94	33442	651	1.95		
11	回油炼山士	1116	前	12.0	702	0	-	328	97250	1166	1.20		
11	亓 波條山巾	п10	後	13.4	195	0	-	271	83897	756	0.90		
10	回波士	ш16	前	12.0	960	4	3	326	91876	1639	1.78		
12	נוי צא דז	п10	後	12.18	000	4	2	220	66760	730	1.09		

表3.9 土砂災害警戒区域(急傾斜地)内の判定状況(検証災害,全降雨)



図 3.22 モデルの改良効果(左図:検証災害(全降雨)時の警戒区域における 判定区域数および判定セル数、右図:検証災害(全降雨)時の警戒区域における崩壊捕捉の状況)

区域数も減少している。なお、図 3.23 に示すように、空振りが生じている殆どの警戒区域では、区域面積に対する空振りの判定 セルが占める割合は5%以下であることから、警戒区域内における空振りは小規模なものであることを示している。更に、改良後 は空振りの判定セルが占める割合が高い区域ほど減少幅が大きいことから、警戒区域内の空振り判定に対する改良効果が確認 できる。



図 3.23 モデルの改良効果(空振りの警戒区域における、空振り判定セルの面積率ヒストグラム)

また、近年の実績降雨における改良効果の確認として、令和3年8月降雨の実績降雨を用いて再現計算を行った。この降雨 は長雨型の非災害発生降雨である。特に、累加雨量150mmの少雨では崩壊の発生は殆ど無いことから、累加雨量150mmまで に発生した判定セル数が減少しているかを改良効果の指標として判断した。この改良の結果を表3.10に示した。図3.24に示す ように、各市町のモデル改良後は、当初モデルに比べて判定セル数が概ね1割前後まで減少しており、改良効果を十分確認す ることができた。また、判定セルが発生した警戒区域は図3.25に示すように、各市町で2箇所以下程度に減少させており、改良 効果が確認できた。

		検証降雨	判定		改良前			改良後		少雨時判定数の	改良
	市町	連続雨量 150mm	方式	判定セル数	判定セルがあ る警戒区域数	著戒区域内の 判定セル数	判定セル数	判定セルがあ る書戒区域数 (自然斜面)	書戒区域内の 判定セル数 (自然斜面)	減少率 %	効果
1	神戸市	R3.8	1軸	1,524	16	20	79	1	1	94.8%	0
2	西宮・芦屋・ 宝塚の一部	R3.8	1軸	198	1	4	33	1	1	83.3%	0
3	三田市	R3.8	1軸	118	1	1	7	0	0	94.1%	0
4	猪名川町	R3.8	1軸	88	2	6	15	1	1	83.0%	0
5	上郡町	R3.8	1軸	13	0	0	2	0	0	84.6%	0
6	豊岡市	R3.8	1軸	267	6	6	25	0	0	90.6%	0
7	新温泉町	R3.8	1軸	1,140	0	0	108	1	1	90.5%	0
8	香美町	R3.8	1軸	1,619	5	7	66	0	0	95.9%	0
9	朝来市	R3.8	1軸	855	5	12	121	1	3	85.8%	0
10	養父市	R3.8	1軸	1,266	0	0	112	0	0	91.2%	0
11	丹波篠山市	R3.8	1軸	157	2	2	37	0	0	76.4%	0
12	丹波市	R3.8	1軸	2,765	5	8	100	1	1	96.4%	0

表 3.10 モデルの改良効果(少雨条件の判定セル数、判定セルが生じた警戒区域数)

※少雨時判定数の減少率(%)=((改良前の判定数)-(改良後の判定数))/(改良前の判定数) ×100



図 3.24 モデルの改良効果(令和3年8月累加雨量150mm までの判定セル数)



図 3.24 モデルの改良効果(単位面積当たりの判定セル数)



図 3.25 モデルの改良効果(少雨時(令和3年8月 累加雨量 150mm まで)の判定セルが生じた警戒区域数)

4. まとめと今後の課題

山腹斜面における危険度判定の精度向上を目的として、システムの整備済みである各市町において少ない雨量で生じ る空振り判定を減少させる検討を行った事項を列挙すると下記のとおりである。

- 1)少ない雨量で生じる空振り判定は、令和3年8月豪雨における各市町の事例から、減厚区間とそれ以外の谷壁斜面 内の浅い谷で発生していた。
- 2)上記の空振りは、谷壁斜面内の集水面積1,000m²以上となる地点から減厚区間の間の浅い谷で生じていた。地下水 位の推移状況から、モデルで想定している透水性が実際と乖離している(実際の透水性はもっと大きい)と推測され た。また、粘性土主体の地質からなる日本海側の市町において空振りが多い傾向があることから、地盤定数の設定を 見直す必要があった。
- 3)その改良方針として、1次検討;検証災害において、地盤特性に応じた地盤定数(c、ø)の見直しを行い、空振り 率を低減させる、2次検討;少雨における空振りの減少、水系網沿いの透水係数を見直すことにより、災害非発生降 雨における判定セル(空振りセル)を減少させる、3次検討;2次検討の少雨における検証で判定が残る各セルについ て個別のセルに対して設定条件を確認して、各セル個別の地盤定数や透水係数を見直す、とした検討フローを整理し

た。

4)以上のモデル改良により、各市町における検証災害の空振り判定の減少、および災害非発生降雨(少雨)における 空振り判定の大幅減少の改善が確認できた。

本検討で確認された事項を踏まえ、今後、以下の事項に留意して他の市町への展開に向けたい。

1) 警戒区域単位の判定精度の向上

本検討により、山腹斜面の空振りは大幅に減少して判定精度が向上した。これに対して、警戒区域内の判定は、区 域単位の避難判断につながるため、更に判定精度の向上を目指す必要がある。これまでも、区域内の防災施設効果を 考慮したモデルに改良するなどして、精度向上に努めてきたが、今後は、システム運用の中で、実降雨を検証しなが ら、課題点を抽出し、モデル改良を進めていく必要がある。また、5mDEMの地形情報を用いた微地形を考慮した判 定精度の向上の検討も進めていき、判定精度の高いモデルに改良する必要がある。

2) 判定のタイミングの最適化

これまでのモデル改良は、判定結果の精度を向上させることに主眼を置いてきたが、判定のタイミングは、避難開 始の判断に関わる重要な情報であるため、今後はこの点の精度向上も努めていく必要がある。気象庁の 10 分化デー タにあわせたシステム改良も行っており、今後の実降雨による検証にて改良を進める必要がある。

5. おわりに

本報告では、令和3年度にシステムを構築した猪名川町域、及び既往の11システム(豊岡、上郡、三田、丹波、丹波篠山、 西宮・芦屋・宝塚(一部)、神戸、朝来、養父、新温泉、香美)における令和3年8月豪雨のシステム判定結果を用いて、少な い降雨量で生じる空振り判定の要因を分析するとともにその対応について検討した。空振り判定を減少させる対応方針 は、主に日本海側に分布する地質を起源とする粘性土からなる表土層を適切な地盤定数に見直したこと、渓流及び水系 網の位置や透水係数の適切な設定により、大幅に改善された。今後、他地域への適用時には、本検討で整理したモデル 改良の流れを用いてシステムの精度向上をはかりたい。

本プロジェクトの推進に関しては、兵庫県土木部砂防課の全面的なご支援を受けた。このような機会を与えていただ いた関係各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 国土交通省砂防部: 令和三年の土砂災害、令和4年3月
- 2) 気象庁:災害時気象報告(台風及び停滞前線による令和3年8月7日から8月23日にかけての暴風及び大雨等)、 災害時自然現象報告書2022年第2号、令和4年2月25日
- 3) 沖村孝・市川龍平: 数値地形モデルを用いた表層崩壊危険度の予測法、土木学会論文集、1985.
- 4)沖村孝・鳥居宣之・尾崎幸忠・南部光広・原口勝則: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.
- 5) Takashi OKIMURA, Nobuyuki TORII, Masatoshi MATSUMOTO, Mitsuhiro NANBU and Katsunori HARAGUCHI: Construction of the real-time hazard forecasting system in order to support evacuation from surface slope failure disasters caused by heavy rainfalls, International Symposium on Earthquake Induced Landslides and Disaster Mitigation at the 3rd Anniversary of the Wenchuan Earthquake, Chengdu, China, 2011.
- 6)沖村孝・鳥居宣之・南部光広・原口勝則: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、 建設工学研究所論文報告集、52、119-137、2010.

- 7)沖村孝・鳥居宣之・南部光広・原口勝則: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
 (2)、建設工学研究所論文報告集、53、153-173、2011.
- 8)沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則: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
 (3)、建設工学研究所論文報告集、54、159-183、2012.
- 9)沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則: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
 (4)、建設工学研究所論文報告集、55、91-116、2013.
- 10)沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則 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(5)、建設工学研究所論文報告集、56、45-66、2014.
- 11) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則:土砂災害のためのリアルタイムハザードシステムの作成手順、建設工学研 究所論文報告集、56、67-83、2014.
- 12)沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則: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
 (6)、建設工学研究所論文報告集、57、17-36、2015.
- 13) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・鏡原聖史: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、43-58、2016.
- 14) 鏡原聖史・沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・根本信行・植田允教:表層崩壊リアルタイムハザードシステム 構築について ・朝来市域のモデル構築(その1)・、建設工学研究所論文報告集、58、59-72、2016.
- 15)沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・鏡原聖史: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(8)、建設工学研究所論文報告集、59、29-39、2017.
- 16)鏡原聖史・沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・根本信行・植田允教:表層崩壊リアルタイムハザードシステム 構築について ・朝来市域のモデル構築(その2)・、建設工学研究所論文報告集、59、41-47、2017.
- 17)沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原ロ勝則・鏡原聖史・笠原拓造・江川真史・孝子綸図: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.
- 18)沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・鏡原聖史・笠原拓造・江川真史・孝子綸図: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(10)~平成30年7月豪雨の検証と課題~、建設工学研究所論文報告集、61、23-66、2019.
- 19) 植田允教・沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・鏡原聖史・根本信行: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.
- 20)沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原ロ勝則・鏡原聖史・笠原拓造: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(11)、建設工学研究所論文報告集、62、45-66、2020.
- 21) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・原口勝則・鏡原聖史・笠原拓造: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(12)、建設工学研究所論文報告集、63、23-46、2021.
- 22) 兵庫県砂防課:土砂災害防止法基礎調査マニュアル (案)、2005.
- 23) 田村俊和:湿潤温帯丘陵地の地形と土壌、ペドロジスト、31、135-146、1987.
- 24) 兵庫県神戸土木事務所:情報基盤第8020-0-S01号 神戸市域箇所別土砂災害危険度予測システム検証業務報告書、 2017.
- 25) 兵庫県西宮土木事務所:情報基盤第 7001-0-S01 号 西宮土木管内箇所別土砂災害危険度予測システム検証業務 報告書、2016.
- 26) 兵庫県宝塚土木事務所: 情報基盤第 6004-0-S01 号 三田市域箇所別土砂災害危険度予測システム検証業務 報告書、 2015.
- 27) 兵庫県宝塚土木事務所:情報基盤第 3000-0-S01 号 猪名川町域箇所別土砂災害危険度予測システム構築業務報告 書、2022.
- 28) 兵庫県光都土木事務所:情報基盤第 6002-0-S01 号 土砂災害防止法 箇所別危険度予測システム検証業務 報告書、 2015.
- 29) 兵庫県豊岡土木事務所 : 情報基盤第 6003-0-S01 号 豊岡土木事務所管内箇所別土砂災害危険度予測システム検証業

務 報告書、2015.

- 30) 兵庫県新温泉土木事務所:情報基盤第 9001-0-S01 号 新温泉土木管内箇所別土砂災害危険度予測システム構築業務 (美方郡新温泉町) 報告書、2018.
- 31) 兵庫県新温泉土木事務所: 地渓流第 1002-1-S01 号 香美町域箇所別土砂災害危険度予測システム検証業務 報告書、 2020.
- 32) 沖村孝・鏡原聖史・濱本拓志・根本信行・笠原拓造: オルソフォトを用いた崩壊地分布図作成について、建設工学研究所論文報告集、64、2022.(掲載予定)
- 33) 兵庫県丹波土木事務所: 情報基盤第 7010-0-S01 号 丹波市域・篠山市域箇所別土砂災害危険度予測システム検証業務 報告書、2016.

著 者

- 沖村 孝 所員、理学博士、地盤工学
- 鳥居 宣之 所員(非常勤) 神戸市立工業高等専門学校教授、博士(工学)、山地防災工学
- 中川 涉 客員研究員 応用地質株式会社、博士(工学)、地盤工学
- 鏡原 聖史 客員研究員 株式会社ダイヤコンサルタント、博士(工学)、地盤工学
- 笠原 拓造 客員研究員 国際航業株式会社、砂防工学
- 窪田 安打 応用地質株式会社、博士(理学)、構造地質学
- 葛卷 怜香 応用地質株式会社、理学修士、応用地質学
- 関 英理香 応用地質株式会社、技術士(建設部門)、砂防工学
- 伊藤 正美 応用地質株式会社、技術士(建設部門)、森林水文学