

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(16)

Some Problems and Measures appeared during the Construction of the Real-time Hazard System for Slope Disasters at a Heavy Rainfall (16)

沖 村 孝	鳥 居 宣 之	窪 田 安 打
Takashi Okimura	Nobuyuki Torii	Yasu'uchi Kubota
笠 原 拓 造	鏡 原 聖 史	中 川 渉
Takuzo Kasahara	Satoshi Kagamihara	Wataru Nakagawa
葛 巻 怜 香	関 英 理 香	山 道 美 友
Reika Kuzumaki	Erika Seki	Miyu Yamaji

1. はじめに

令和 6 年(2024 年)は、45 の都道府県で延べ 1433 件の土砂災害が発生しており、その被害は死者 56 名、人家被害 705 戸に上った。統計開始以降(昭和 57 年～令和 5 年)の平均発生件数(1108 件)を上回り、直近 10 年(平成 26 年～令和 5 年)の平均発生件数(1499 件)と同程度であった¹⁾。

昨年の 1 月 1 日 16 時 10 分に石川県能登地方を震源にマグニチュード(M) 7.6、深さ 16km の地震が発生し、北陸 3 県で 456 件の土砂災害が発生し、死者 37 名、行方不明者 2 名、負傷者 3 名、人家被害 206 戸の被害が生じた¹⁾。石川県では、能登半島地震による土砂災害の全数の 9 割以上に当たる 424 件の土砂災害が発生した。これは、地震による土砂災害で、単一の県で発生した件数として歴代 1 位となった。また、能登半島地震では複数箇所にて河道閉塞が発生した。河道閉塞等が発生した箇所では、今後の降雨により二次災害が発生するおそれが高いため、国による緊急的な土砂災害対策等が実施されている¹⁾。

台風第 10 号は、8 月 26 日に強い勢力で日本の南の海上を北西へ進んで次第に動きが遅くなり、27 日は非常に強い勢力に発達して奄美地方に接近した。沖縄地方付近の熱帯低気圧、台風及び太平洋高気圧の縁を回る暖かく湿った空気の影響で、沖縄地方、四国地方及び東海地方では 多い所で日降水量が 100mm を超える大雨となったほか、栃木県で線状降水帯が発生した²⁾。これにより、全国で 157 件の土砂災害が発生し、死者 3 名、負傷者 3 名、人家被害 206 戸の被害が生じた¹⁾。

9 月 20 日から 22 日にかけて、日本海から本州付近に停滞した前線や前線上の低気圧に向かって暖かく湿った空気が流れ込んだ影響で、大気の状態が非常に不安定となり、西日本から東北地方にかけての広い範囲で雷を伴った大雨となった。秋田県では 20 日明け方に、石川県では 21 日昼前に線状降水帯が発生した。特に、石川県能登では、21 日午前中は猛烈な雨が降り続いて 1 時間降水量や 3 時間降水量で観測史上 1 位を更新した地点があったほか、20 日から 22 日にかけての総降水量が多い所では 500mm を超え、平年の 9 月の月降水量の 2 倍を上回るなど記録的な大雨となった³⁾。これにより、石川県では 273 件の土砂災害が発生した。

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）に表土層深を設定し、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⁴⁾。近年、技術の発展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 ヶ年で「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⁵⁾⁶⁾。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⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾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」¹²⁾や留意事項¹³⁾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¹⁴⁾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¹⁶⁾、土石流の発生機構を考慮した新たな判定方法¹⁸⁾、長雨時に多発する小規模崩壊への対応方法など¹⁹⁾²⁰⁾を考案しその適用性について報告を重ねてきた。令和 3 年時点で構築した市町は 14 市町となり、それらの市町が分布する兵庫県北部（日本海側）から南部（瀬戸内海側）の地域特性（表土層の粘性土～砂質土等の違い）を地盤定数や水系網沿いの透水係数の設定に反映することで、少ない降雨量（総降雨量 150mm 未満）で生じる空振り判定の改善につながることを報告した²²⁾²³⁾。

本報告は、リアルタイムハザードシステム（以下、システムと呼称する）について、既往災害のシステム判定を検証した結果、土砂災害警戒区域において、断層沿いや崖錐地形が原因と考えられる見逃し事例が確認されたため、モデル改良して見逃し解消を検討したものである。2024 年報告²⁵⁾の検討結果に引き続き、システムの改良を行い、モデルの改良を実施したものをまとめたものである。なお、本論では、システムが 10m メッシュのセル単位で計算した結果、安全率 1 未満となるセルを「判定セル」と呼称する。また、過去降雨の再現計算の際に、実際に発生した表層崩壊に対して、判定セルが崩壊地に重なる場合は「捕捉」、判定セルが崩壊地に 1 つも無い場合は「見逃し」、崩壊地が無い場所に判定セルが生じる場合は「空振り」として呼称する。また、崩壊地と判定セルの重なり方の定義は既往研究¹²⁾に従う。

2. これまでの報告の概要

2. 1 2010 年報告

2010 年報告⁷⁾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) 地形のスミング化
- 2) 地形分類と表土層深
- 3) 人工改変地の扱い

- 4) 地盤条件の設定
- 5) 推定表土層深の再検討
- 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⁸⁾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。

- 1) 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）の表土層深の推定
- 3) 谷壁斜面と谷底斜面境界部での表土層深の不連続対策
- 4) 小起伏斜面における表土層深の推定
- 5) シミュレーション降雨による異常セル推定表土層深の補正
- 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⁹⁾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¹⁰⁾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、超塩基性岩などへ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¹¹⁾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へ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¹³⁾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で、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¹⁴⁾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は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は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¹⁵⁾。

2. 8 2017 年報告

2017 年報告¹⁶⁾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 メッシュの表土層深、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、谷底斜面と谷壁斜面の境界付近で発生する空振りを低減することができたため、これを実装した¹⁷⁾。

2. 9 2018 年報告

2018 年報告¹⁸⁾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溪流に流出することで「溪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、溪床堆積土砂流動型、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¹⁹⁾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²⁰⁾。

2. 1.1 2020 年報告

2020 年報告²¹⁾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¹⁸⁾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「溪床堆積土砂流出率」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²²⁾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、表土層深の層厚式の設定や、浅い谷沿いの表土層深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。

2. 1.3 2022 年報告

2022 年報告²³⁾においては、前年度に引き続き、少ない降雨量（総降雨量 150mm 未満）で生じる空振り判定について、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）及び令和3年度（2021 年）に新たにシステムを構築した猪名川町域において、令和3年8月豪雨の空振り判定事例を用いて、その要因を分析するとともに対応を検討した。その結果、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の地盤定数を適切な値に見直すこと、これまで全域同じ値としていた表土層の透水係数を水系網及び水系網沿いの 10m メッシュでは地下水が早く抜けるよう大きな値に見直すことで空振り判定が大幅に改善されることがわかった。今回の検討で得られたノウハウは、山地斜面全体の精度向上に高い効果を発揮する一方、システム本来の目的である土砂災害警戒区域単位の危険度予測に着目する契機となり、土砂災害警戒区域単位の精度向上を目指す動機付けとなった。今後、土砂災害警戒区域に着目した実降雨や過去の豪雨の事例検証を重ね、精度向上の課題抽出及びその対応を検討することが必要と考えられた。

2. 1.4 2023 年報告

2023 年報告²⁴⁾においては、システムについて、表土層の地盤定数と水系網沿いの透水係数の見直しを適用した令和4年6月の改良後に発生した、令和4年7月豪雨におけるシステムの判定と現地状況との比較検証及びモデルの妥当性や今後の改良点等について検討した結果をまとめた。システムは表層崩壊を 80%以上（判定（一軸））で捕捉しており、システムの精度向上を確認することができた。一方で、一部に見逃しおよび空振りが確認され、現地踏査にもとづ

いてシステムの改良方針を整理した。

2. 15 2024 年報告

2024 年報告²⁵⁾においては、平成 26 年 8 月の豪雨に伴い、神戸市において土砂災害が発生した際のシステムの危険度判定の適合性を検証した結果、断層沿いの見逃し崩壊が認められた。このため、断層地形における崩壊メカニズムを整理したうえで、モデルの改良方針を整理した。

3. 断層地形沿いのモデル改良

3. 1 既往災害のシステム判定検証による問題点

(1) 神戸市のシステム判定状況

現モデルにおける近年の土砂災害時のシステム判定検証の結果、断層地形沿いの表層崩壊に見逃しが目立つことが確認されていた²³⁾。このため、2024 年報告²⁵⁾は断層地形沿いの表層崩壊の捕捉率向上を目的として、モデル改良方針を整理した。神戸市では、平成 26 年 8 月豪雨時に神戸市東部に土砂災害が集中して発生しており、主に地下水が集中する 0 次谷において表層崩壊が発生した。この崩壊地は列状に分布する傾向を示しており、文献断層沿いに崩壊地が多いことが確認された。運用モデルの判定はこれらの崩壊地の見逃しの割合が多いため、全体の捕捉率が低下した。神戸市は六甲山周辺に断層地形が広範に分布しており、今後も同様の崩壊が発生する可能性があると考えられた。この断層地形沿いには土砂災害警戒区域の位置も重なることから、モデル改良による斜面崩壊の捕捉率向上が必要と判断された。そこで、断層地形に掛かる崩壊地について、崩壊原因の他、表土層深や地盤物性を現地調査により把握して、運用モデルの改良方針を整理した。現地調査の結果、文献断層を中心に最大幅 110m 程度の破碎帯が分布しており、その範囲内にて表層崩壊が発生していた。その中でも谷頭斜面と谷頭凹地の地形が明瞭である箇所に崩壊が集中していることが確認された。また、破碎帯内は表土層深が周辺の山腹斜面よりも厚いこと、更に谷頭凹地の表土層は主にシルト～粘土混じり砂質土から構成される細粒層であることを確認した。このため、降雨時に地下水位が上昇しやすく、周辺の山腹斜面よりも崩れやすいことが判った。なお、幅広い破碎帯は花崗岩および古第三紀～白亜紀酸性火山岩類（有馬層群）のみで確認されたため、その他の地質分布域は検討対象外とした。以上の現地調査結果から、断層沿い（幅 110m の範囲）は表土層深が厚いことから、文献断層沿いの谷壁斜面の層厚を変更する方針とした。また、断層地形沿いの谷頭凹地は細粒分が厚く、透水性が低いと考えられることから、谷頭凹地の透水係数を低減する方針とした²⁵⁾。

(2) 豊岡市のシステム判定状況

豊岡市では、2022 年報告²³⁾によるモデル改良後の既往災害の再現計算の結果、空振り判定を減少させる効果が出た一方で、一部の表層崩壊に見逃しが発生する問題点が生じている。モデル改良後の表層崩壊の見逃し箇所は計 4 箇所であり、このうち豊岡市の区域番号 110060184（区域名：板野(3)Ⅱ）は、平成 16 年災害の際に民家裏斜面が表層崩壊した事例である。現地調査の結果、表層崩壊した斜面には、モデルに設定している表土層深よりも厚い表土が分布することを確認した。当地区は低山地の鞍部地形に隣接する斜面で、斜面勾配は比較的緩い。更に、2024 年報告²⁵⁾にて定義した文献断層が同地区に分布しており、上部斜面に分布する鞍部地形はこの断層に関連する地形として示されている。モデル改良後のシステムが表層崩壊を見逃した原因は、モデルの表土層深の設定が現地よりも薄いことが主な原因と推定されるが、現地の表土層深が一般的な山腹斜面よりも厚い原因としては、この断層が基盤に分布する影響が推定された。

3. 2 断層地形沿いの表土層のモデル化

上記に示した問題点に対して、現地調査に基づくモデル改良の方針を以下に示す。神戸市域のシステム判定については 2024 年報告 ²⁵⁾において断層地形沿いの現地調査およびモデル改良方針を報告しているため、本論ではモデル改良対象の地形抽出に関してのみ報告する。

(1) 神戸市における改良方針

2024 年報告 ²⁵⁾ は、花崗岩または有馬層群が分布する断層破砕帯は幅 110m の広がり有しており、現地調査に基づいて表 3.2.1 に示す通り表層崩壊が発生しやすい斜面の地形的特徴とモデル改良の方針を整理している。同報告は、現地調査により得られた崩壊深のデータから断層沿いの表土層深を地質ごとに整理している。花崗岩の分布する斜面では斜面勾配 35・45°の範囲において表土層深が山腹斜面のモデル設定値より厚い値に基づいて断層地形沿いの表土層深—斜面勾配の関係として整理されている。また、谷頭凹地の表土層はシルト～粘土混じり砂質土で構成される厚い細粒層が分布するため、周辺の山腹斜面よりも透水性が低いことが推定された。この谷頭凹地について、過去の豪雨災害の再現計算に基づいて捕捉率・空振率が改善する透水係数を検討した結果、山腹斜面の透水係数 0.056cm/s に対して 0.028cm/s が最適値であることが判った ²⁵⁾。

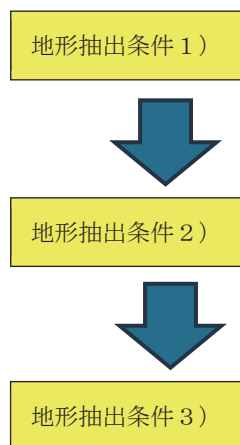
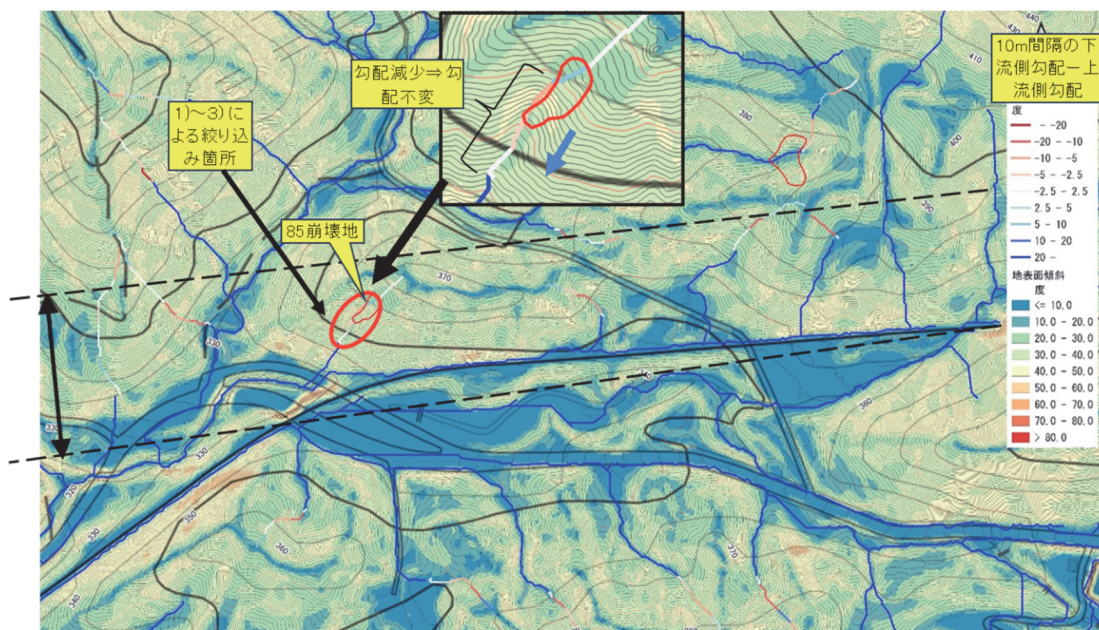
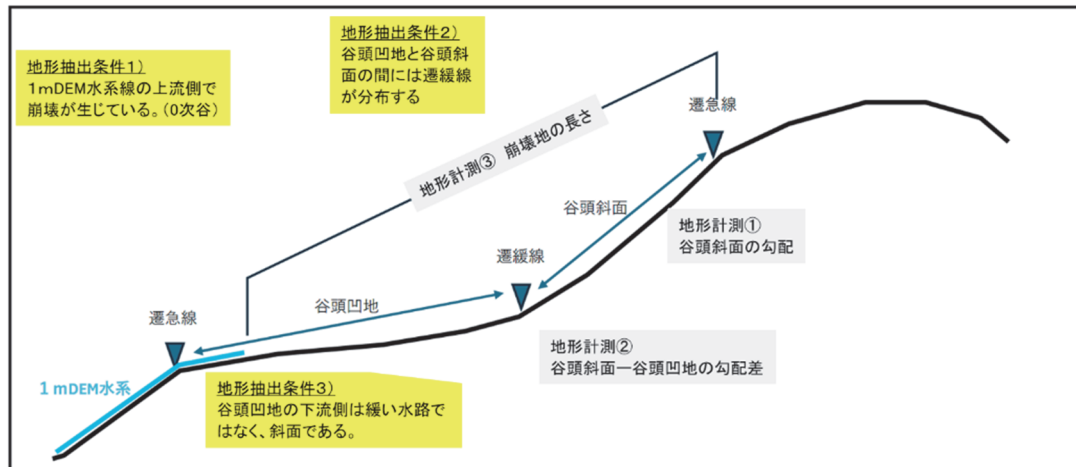
表 3. 2. 1 神戸市における断層地形沿いの地盤定数の設定 ²⁵⁾

改良方法		
	現モデルと現地の差異	地盤定数の設定
1	現モデルと比較して、現地は表土層深がやや厚い傾向がある。	断層破砕帯内の勾配 45° 以下の斜面について、表土層深を 0.6～0.5m 以下の範囲で増厚する。
2	表層崩壊が発生している谷頭凹地に細粒な土砂が厚く堆積している。	谷頭凹地の透水係数を山腹斜面よりも 1/2 に低減する。

現地調査で得られた表層崩壊が発生しやすい地形について、モデル全体で抽出する際の条件を図 3.2.1 に示すとおり条件 1)～3)として整理した。まず抽出においては、花崗岩または有馬層群の地質が分布する範囲であること、更に谷壁斜面の地形区分であることが条件となる。更に詳細な地形抽出の条件を以下に示す。

- 1) 1mDEM 水系線（0 次谷）の上流側で表層崩壊が発生している。
⇒断層破砕帯内の 1mDEM 水系線の上流斜面が断層破砕帯の中に収まる流域を抽出する。また、10mDEM 水系が掛からない地形に限定する。
- 2) 明瞭な谷頭斜面と谷頭凹地の地形（谷頭凹地と谷頭斜面の間に遷緩線が分布）において表層崩壊が発生している。
⇒水系線沿いの水平距離 10m 毎の地形勾配から勾配変化率を計算する。上流から下流へ向かって勾配変化率が減少傾向から勾配不変へ値が変化する形状の水系線に絞り込む。
- 3) 谷頭凹地の下流側に斜面が分布する。
⇒1mDEM 水系線（0 次谷）の上流端から下流側の斜面勾配が 25° 未満の水系は除外する。

上記の条件に基づいた地形分析により、図 3.2.2～3.2.3 に示す断層破砕帯沿いにおける表層崩壊が発生しやすい地形が抽出される。



1 mDEM 水系線 (0 次谷) の上流側で崩壊が生じている。

- ・ 1mDEM 水系から上流側の流域
- ・ 断層帯の中に流域が収まること
- ・ 10mDEM 水系が流域に掛からないこと

谷頭凹地と谷頭斜面の間には遷緩線が分布する

- ・ 1)で抽出した流域内の主溪流線沿いの勾配変化率が上流から下流へ負の変化) があること

谷頭凹地の下流側は緩い水路ではなく、斜面である。

- ・ 2) で抽出した流域のうち、流域の下流側が 25° 以上の斜面であること。

図 3.2.1 地形抽出条件

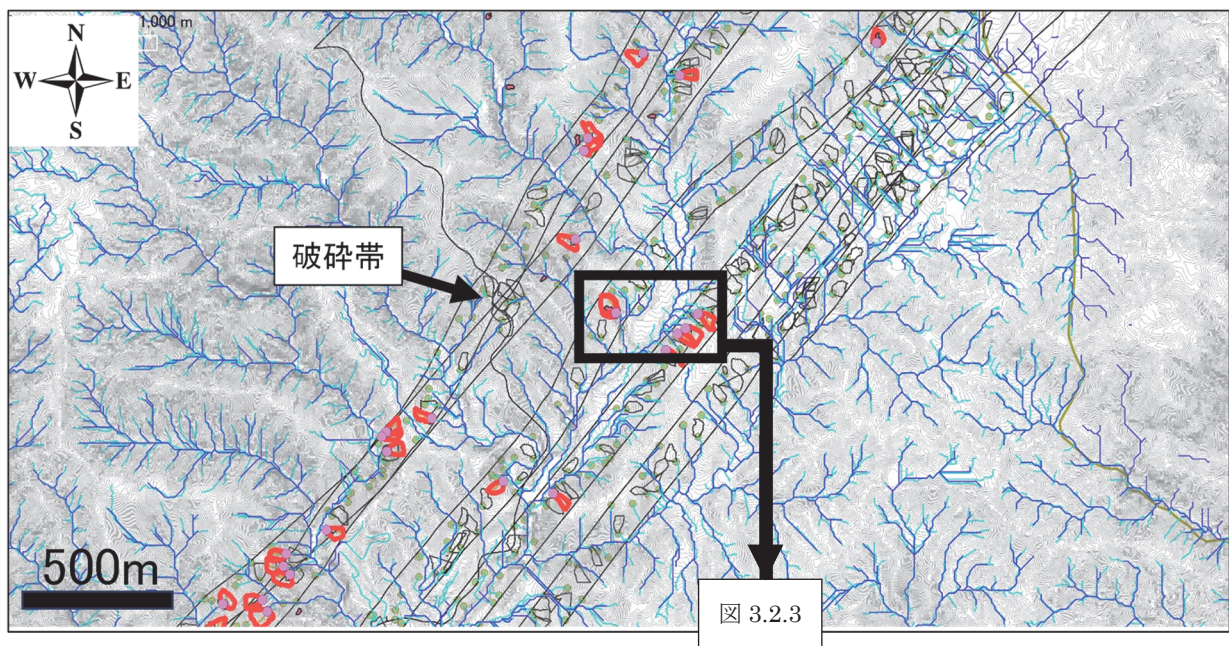
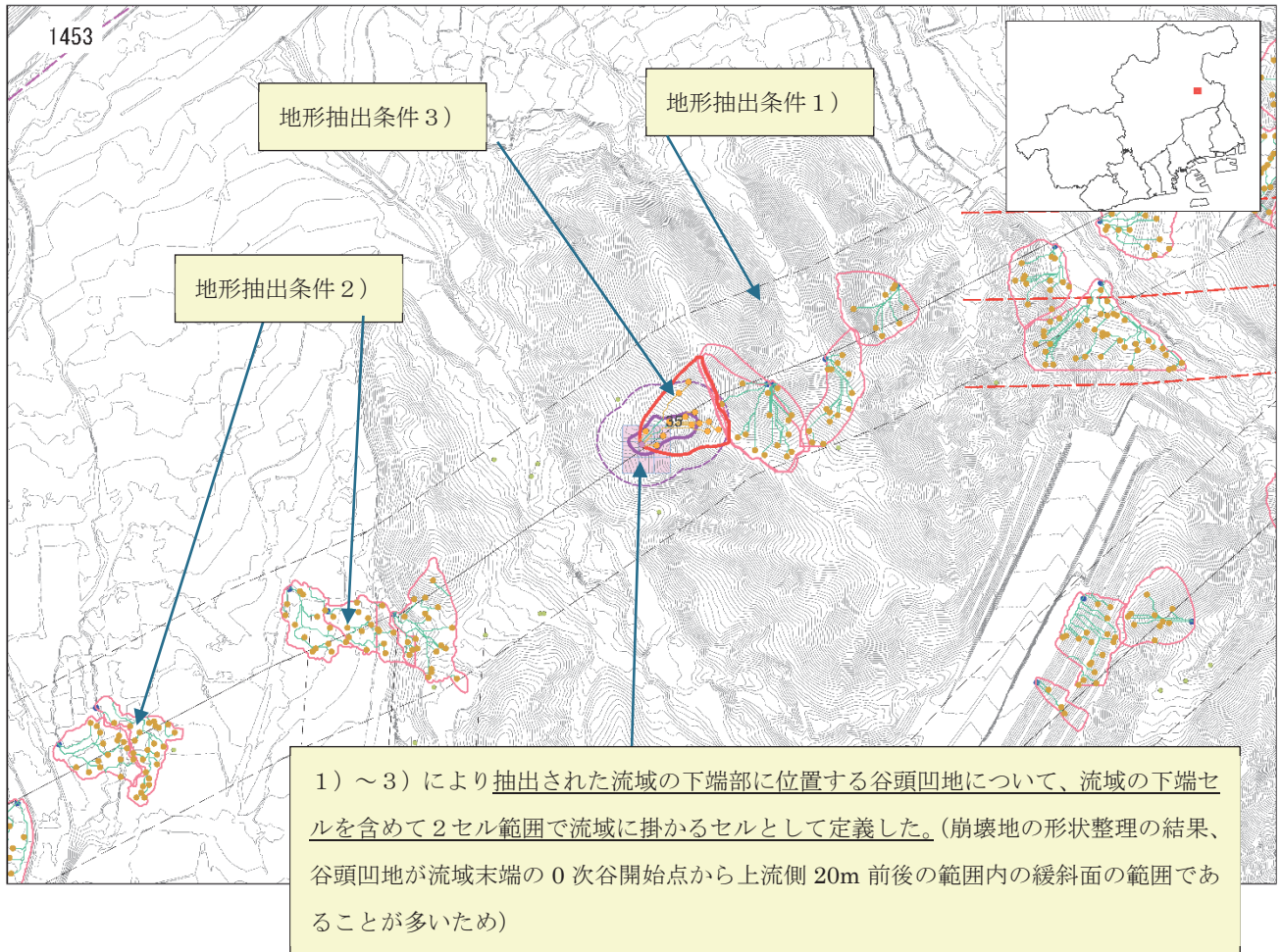


図 3.2.2 地形抽出結果 1

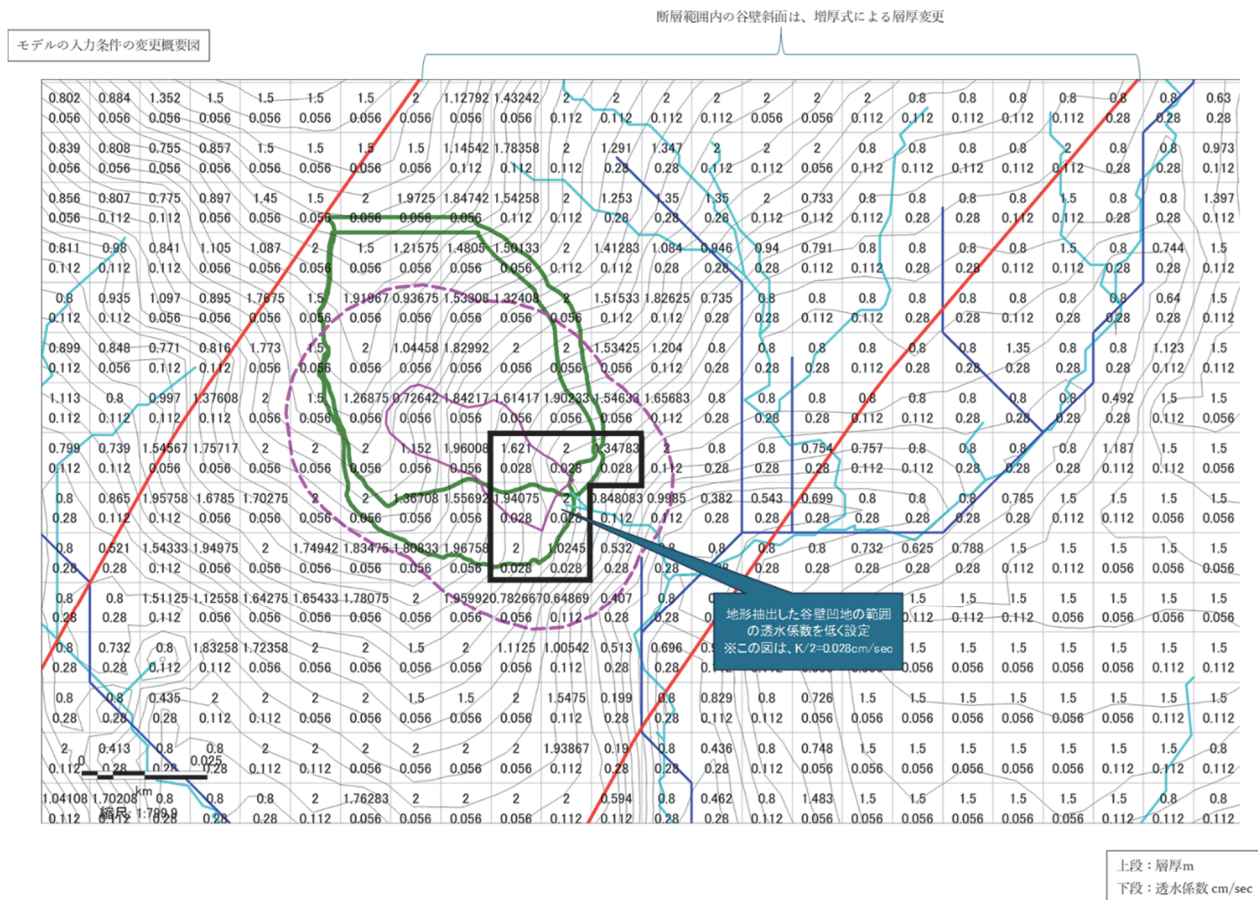
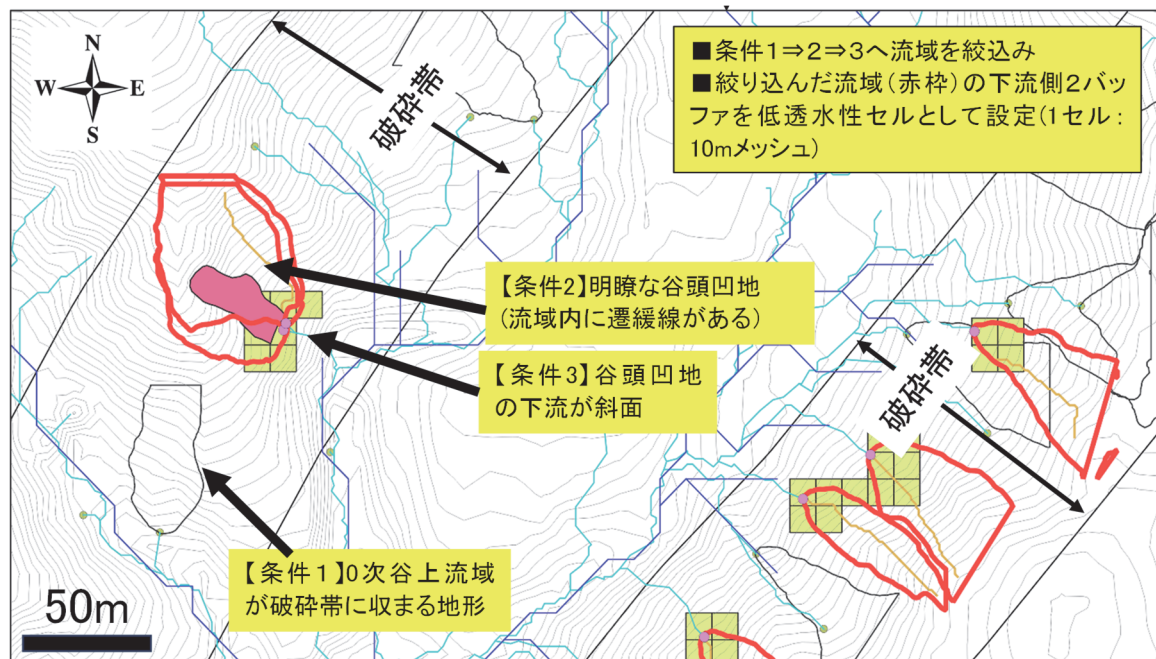


図 3.2.3 地形抽出結果 2

(2) 豊岡市における改良方針

1) 現地調査による断層地形沿いの表土層の特徴

豊岡市における現地調査の結果、図 3.2.4～3.2.8 に示すように基盤の断層破砕帯の範囲に含まれる 0 次谷で表層崩壊が発生していることを確認した。断層破砕帯の幅は露頭観察による破砕状況に基づいて評価した。その結果、①地区（文献断層から約 30m（全幅 60m））、②地区（文献断層から約 60m（全幅 120m））、③地区（文献断層から約 100m 以内）、④地区（文献断層から全幅 100m）の 4 地点において得られたデータから、断層破砕帯の平均幅は約 100m と整理される。また、図 3.2.5 に示すように崩壊地における表土層深はモデル設定値より約 0.2m 厚く、現地調査の計測値との乖離が認められた。山腹斜面は主として砂質土から構成されるが、谷頭斜面と谷頭凹地においては細粒砂～シルトからなる細粒層が分布することを確認した。なお、本論で言及する「文献断層」は 2024 年報告²⁵⁾ に記載された文献に基づくものである。

以上のとおり、花崗岩および白亜紀火山岩（矢田川層群）の分布域において、断層破砕帯（砂状）の範囲は文献断層を中心として概ね 100m 程度であると考えられる。これらの断層破砕帯は豊岡市全域の図 3.2.9 に示す文献断層（黒枠範囲）である。詳細な断層破砕帯の範囲は図 3.2.10 に示す。2024 年報告²⁵⁾は神戸市における断層破砕帯の幅が約 110m であると評価しており、本論で評価した値に近い結果である。これら断層破砕帯の範囲において表層崩壊が発生した斜面の地形地質的特徴は以下の通り整理される。

- ・ 0 次谷沿いに明瞭な遷急線が分布する地形からなる。
- ・ 狭い集水面積の流域にも関わらず、斜面の中腹～下部に湧水が認められ地下水が高い。
- ・ 斜面の裾部に細粒層が堆積している。表土層は主に砂質土から構成されており、細粒なシルト～粘土を含む。

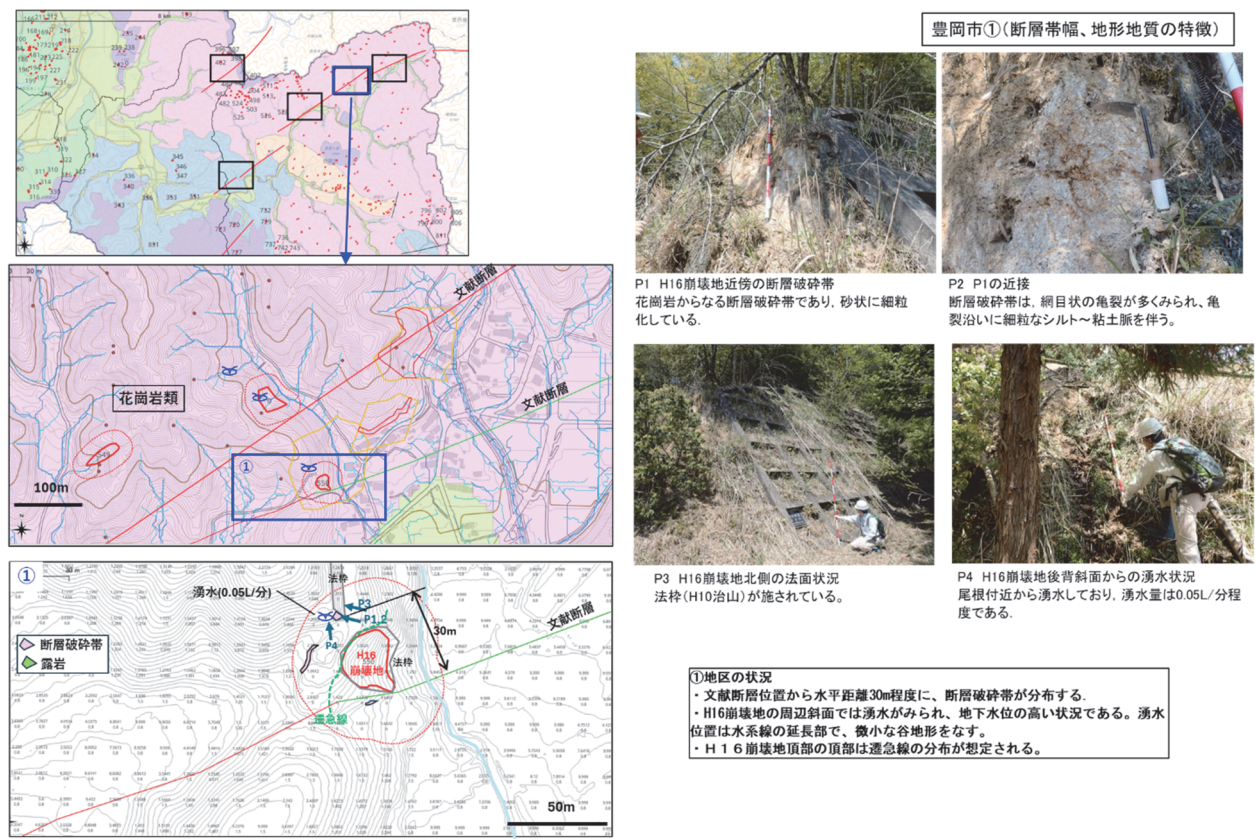


図 3.2.4 崩壊地の現地調査結果 (①地区)

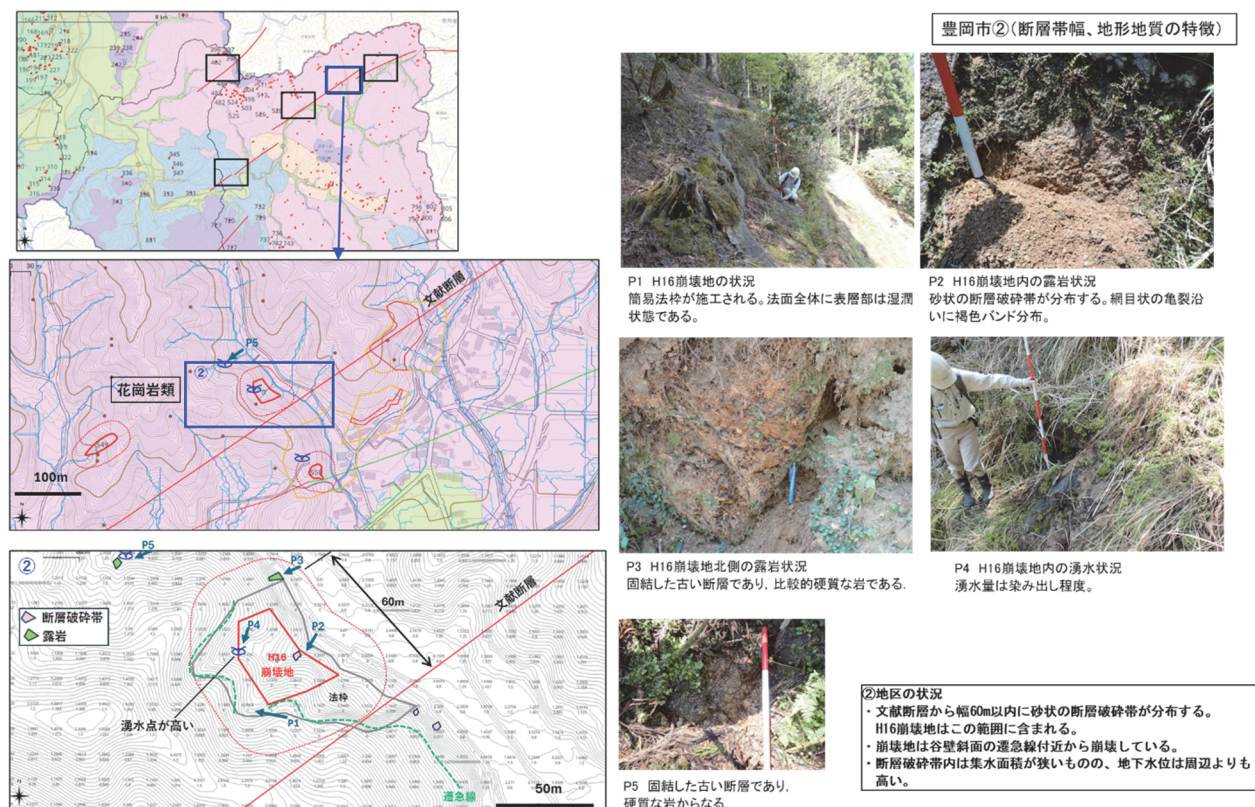


図 3.2.6 崩壊地の現地調査結果 (②地区)

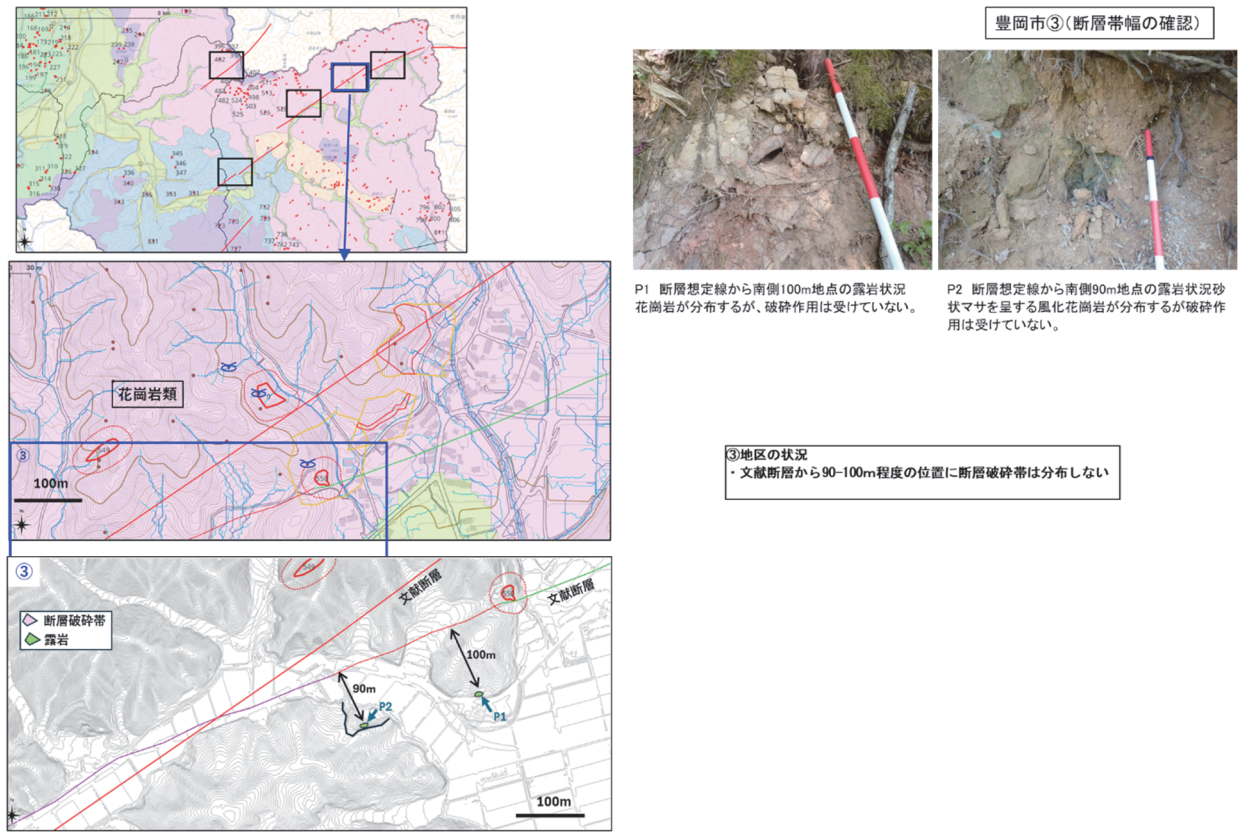


図 3.2.7 崩壊地の現地調査結果 (③地区)

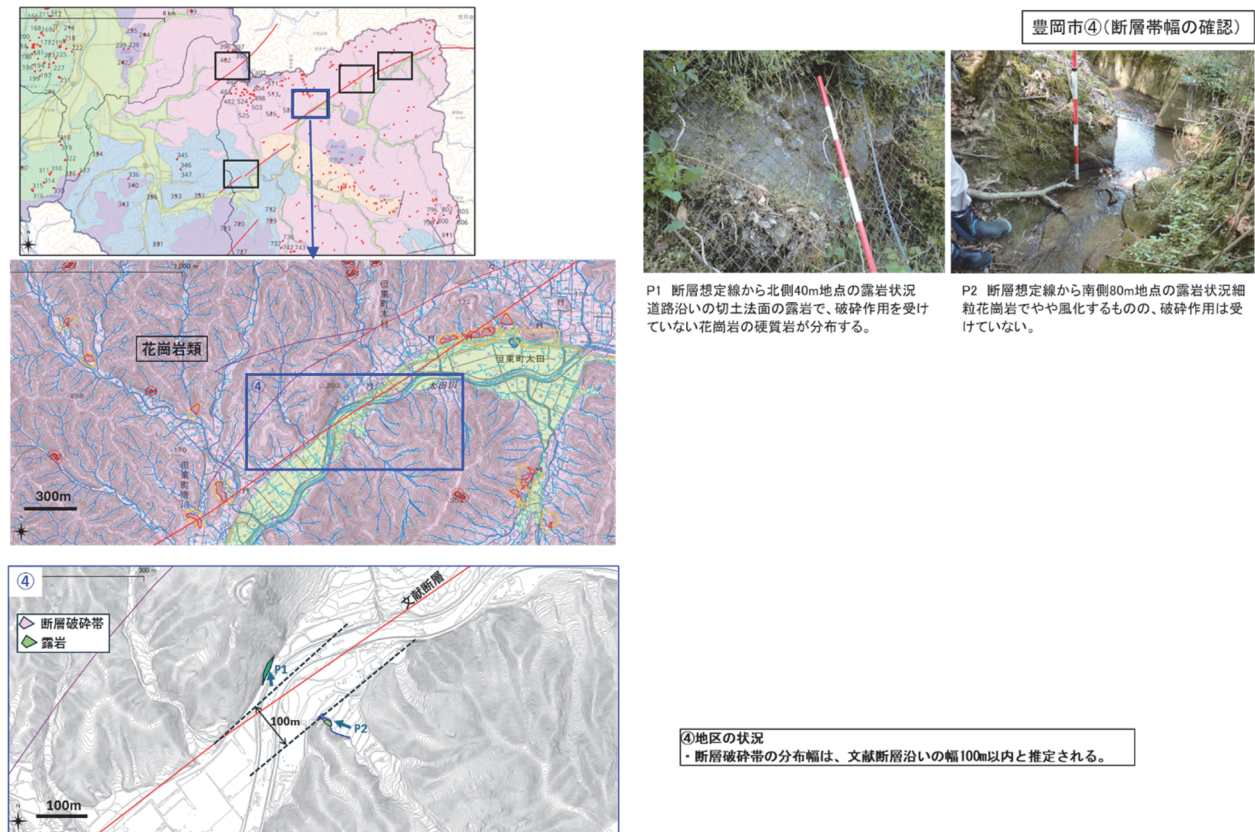


図 3.2.8 崩壊地の現地調査結果 (④地区)

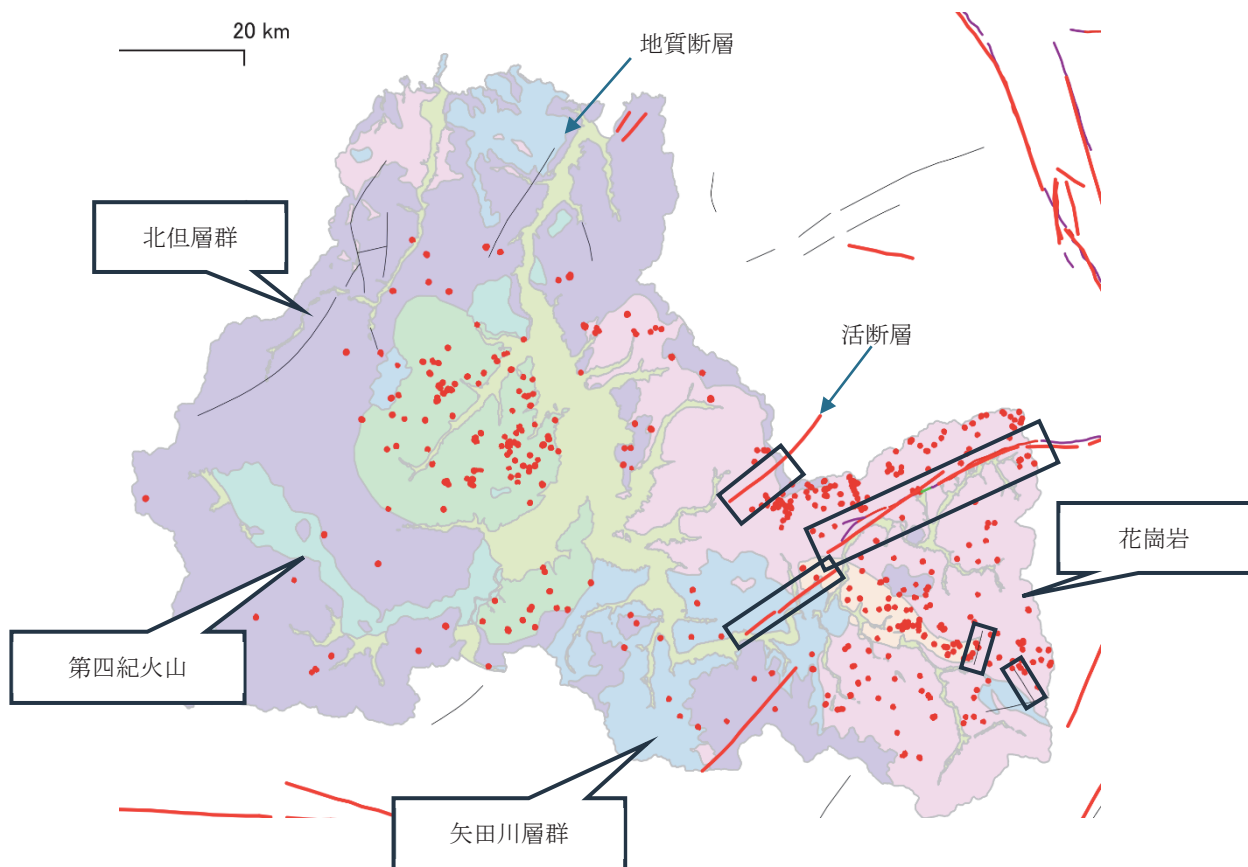


図 3.2.9 豊岡市の断層とH16 崩壊地（赤丸）の位置関係 ※四角枠内の断層がモデルの設定対象

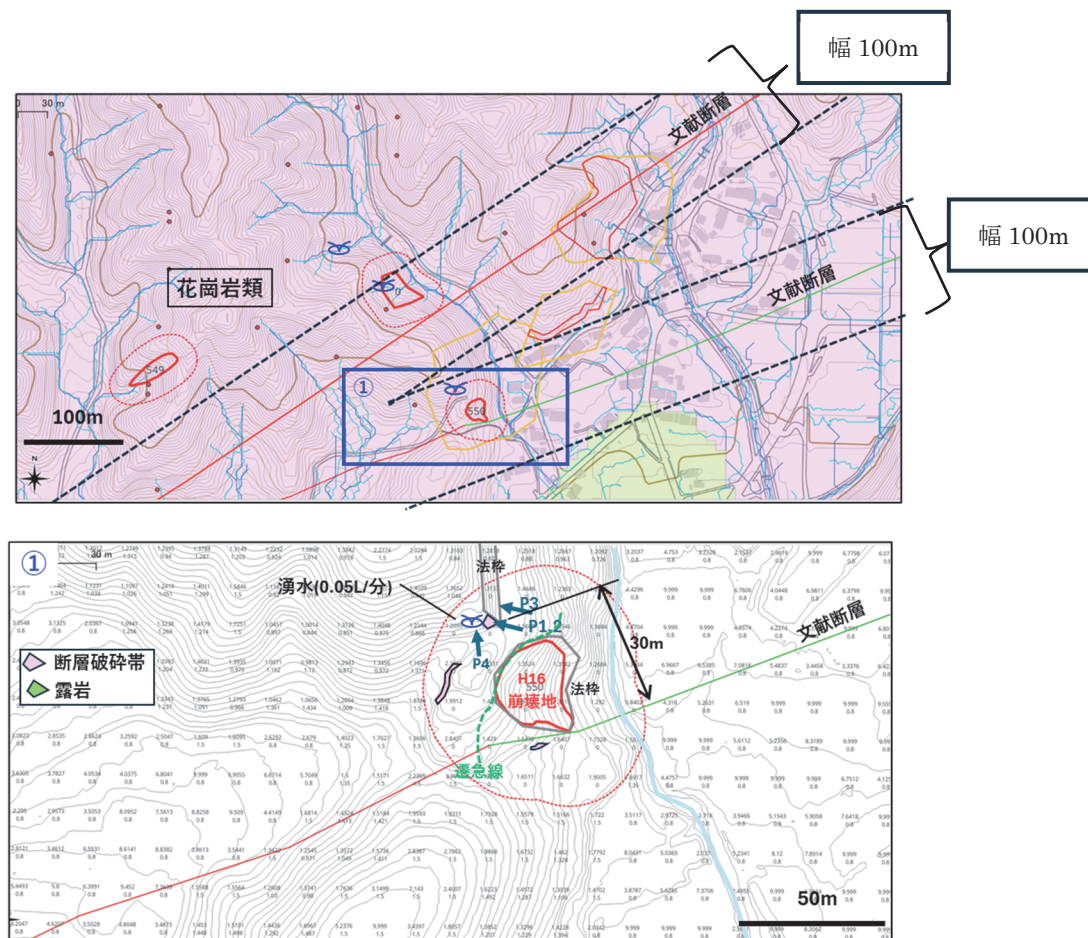


図 3.2.10 断層破砕帯の設定範囲

2) 断層地形沿いの表層崩壊のメカニズム

断層地形に掛かる表層崩壊箇所に関する地形的特徴は、現地調査に基づく0次谷沿いの斜面上の明瞭な遷急線から下側の比較的低い位置であると整理される。また、表層崩壊箇所の表土層はシルト～粘土混じり砂質土から構成される細粒層が分布するため周辺の山腹斜面よりも透水性が低いと考えられる。このため降雨時には、周辺の山腹斜面の0次谷と比較して、断層地形沿いの0次谷では斜面下部の地下水位が更に上昇して表層崩壊が発生しやすいと考えられる(図3.2.11)。なお、幅広い断層破砕帯は花崗岩および古第三紀～白亜紀酸性火山岩類(矢田川層群)のみで確認されることから、他地質の分布域に同様の表層崩壊の発生メカニズムは適用されないと考えられる。

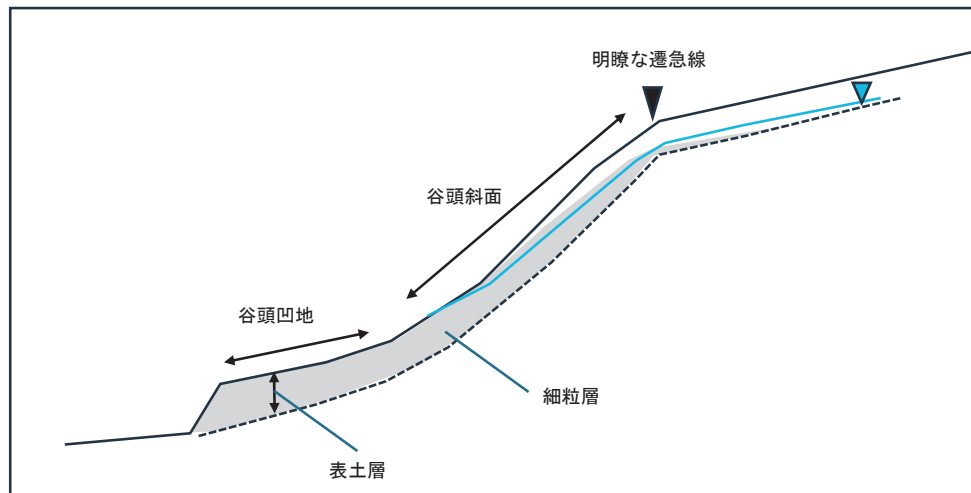


図3.2.11 断層沿いの表土層モデル

3) モデル改良対象の地形抽出

上記の地形的特徴に基づいて、モデル改良の対象となる地形の抽出条件を整理した。まず抽出範囲は、幅広い断層破砕帯が分布する花崗岩または有馬層群の分布域であること、及び谷壁斜面の地形区分であることが必要である。更に現地調査に基づいた地形条件として以下の通り整理される。

- 1) 現モデルと比較して、現地は表土層深がやや厚い傾向がある。

⇒断層破砕帯の幅(100m)の谷壁斜面を抽出する。

- 2) 集水面積が狭い範囲でも崩壊している。

⇒集水面積が狭い範囲においても表層崩壊が発生している点について、図3.2.12に示す崩壊実績のある斜面の集水面積の整理に基づいて、集水面積 500m² 以上の流域を表層崩壊が発生しやすい地形であると整理した。

- 3) 遷急線が明瞭な箇所にて表層崩壊が発生している。

⇒更に0次谷沿いに明瞭な遷急線が分布する地形において表層崩壊が発生していることから、崩壊実績のある斜面の山側と谷側の斜面勾配差が15°以上である地形を対象として整理した。

上記の地形抽出の条件に基づいて地形分析を行うことで、図3.2.13、3.2.14に示す通り断層地形沿いの表層崩壊が発生しやすい地形を抽出した。

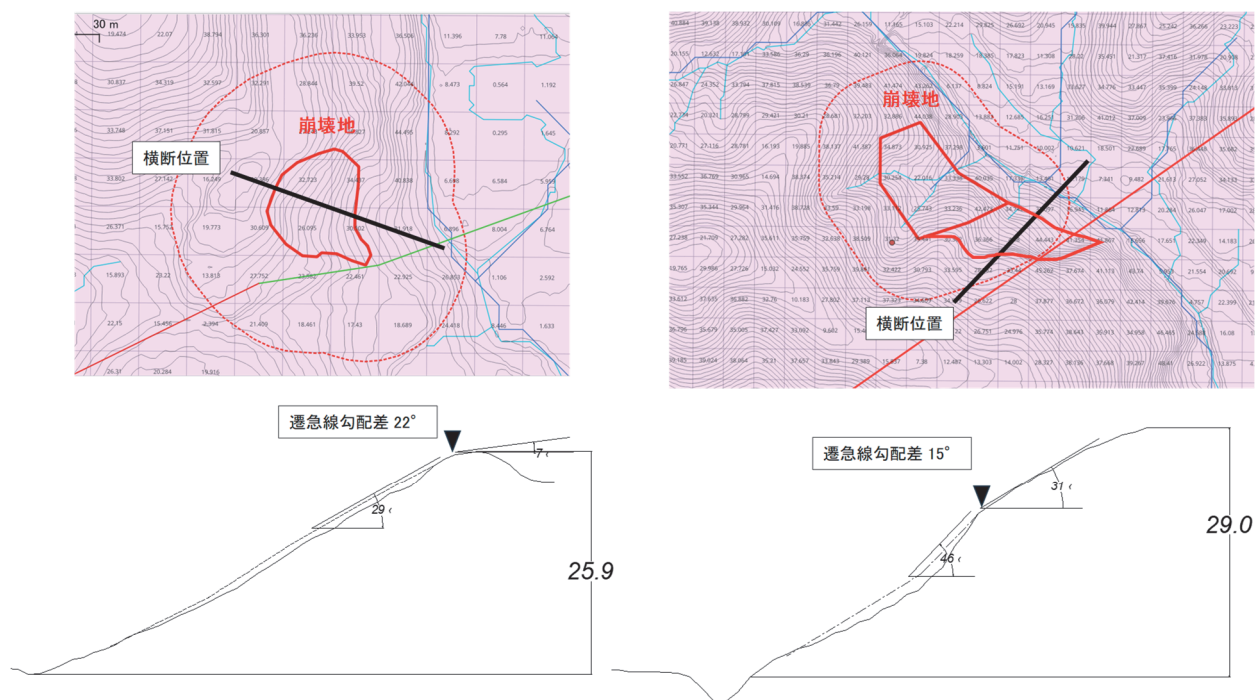


図 3.2.12 崩壊箇所の平面・横断面図

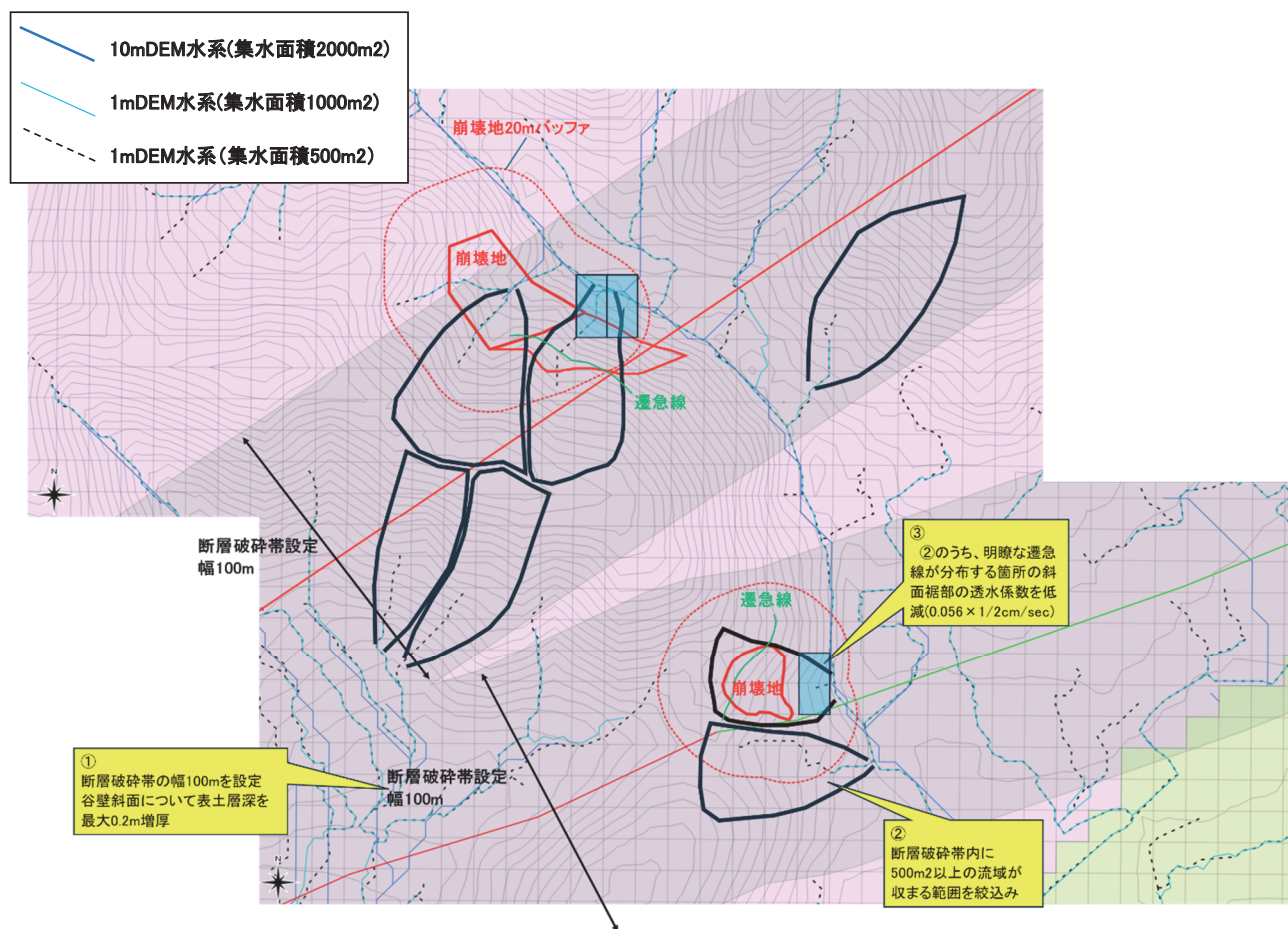


図 3.2.13 モデル改良方法

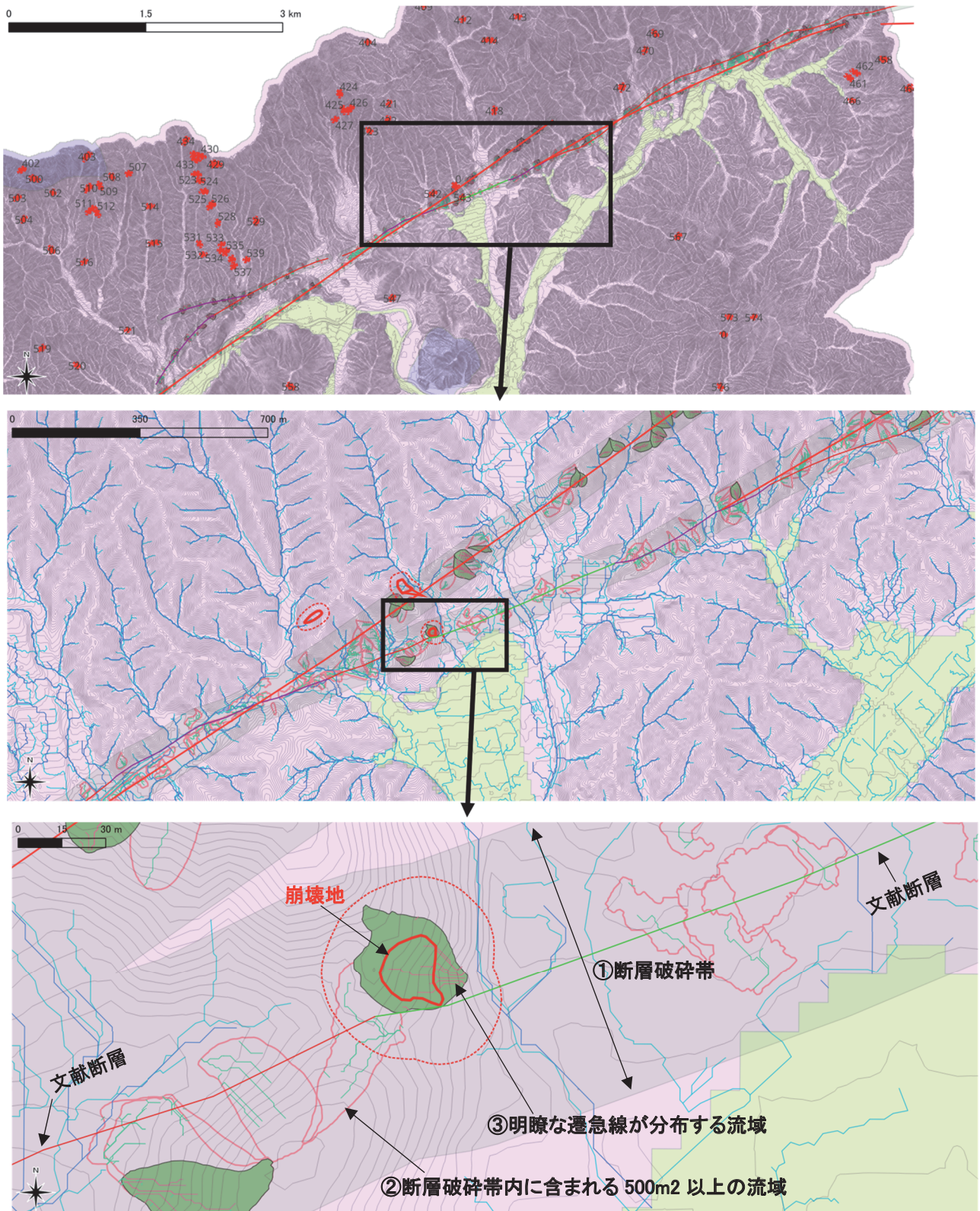


図 3.2.14 地形抽出結果

4) 表土層の地盤定数

上記の現地調査の結果に基づき、断層地形沿いの表層崩壊の特徴に対するモデルの改良方法は表 3.2.2 に示す通り整理される。現モデル設定よりも現地の表土層深がやや厚い点について、花崗岩および古第三紀～白亜紀酸性火山岩類（矢田川層群）の断層破碎帯における調査データに基づいて表土層深—斜面勾配の関係を図 3.2.15 に示す通り見直した。

また、表層崩壊した斜面の裾部に細粒層が堆積している点について、主に細粒なシルト～粘土を含む砂質土から構成されており、神戸市の花崗岩と同様の土質条件と考えられるため、神戸市の採用値である $0.056 \times 1/2 \text{cm/sec}$ にて試算する方針とした。

表 3.2.2 豊岡市における断層地形沿いの地盤定数の設定

改良方法		
	現モデルと現地の差異	地盤定数の設定
1	現モデルと比較して、現地は表土層深がやや厚い傾向がある。	断層破碎帯内の勾配 45° 以下の斜面について、表土層深を 0.2m 以下の範囲で増厚する。
2	裾部に細粒層が堆積している。	裾部の透水係数を山腹斜面よりも $1/2$ に低減する。

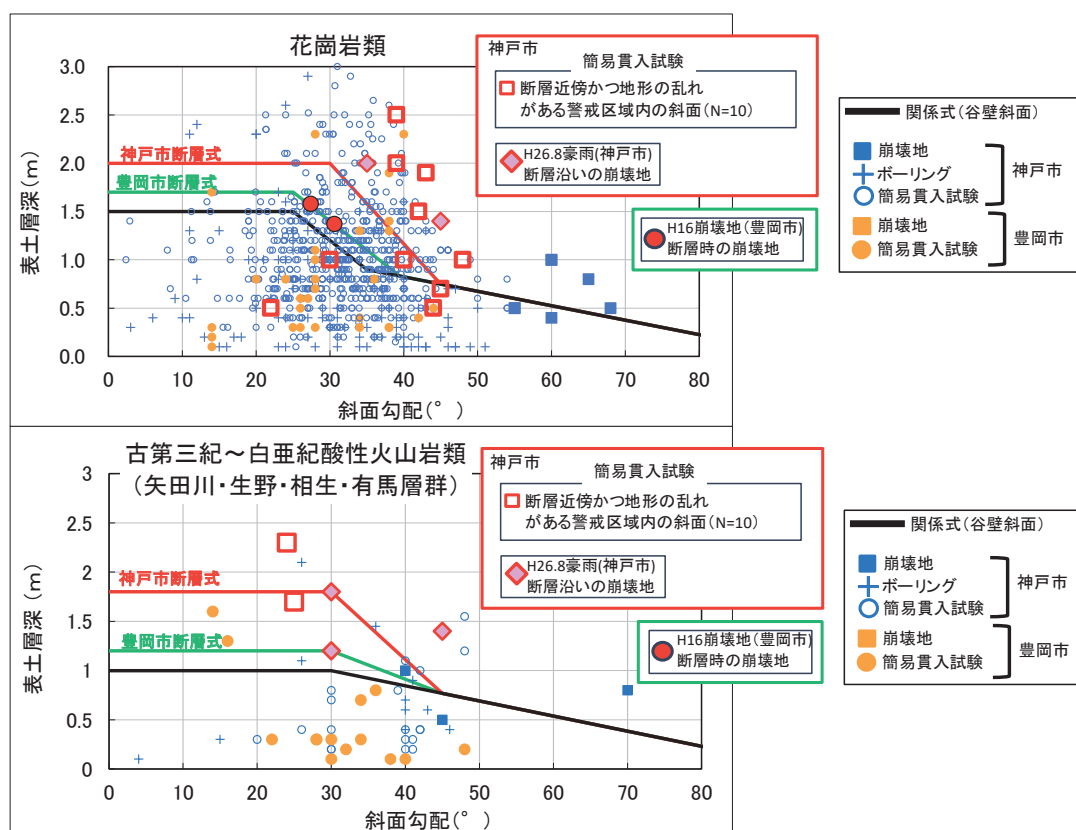


図 3.2.15 表土層深—斜面勾配の関係（豊岡市の断層沿いは緑線）

（表土層深—斜面勾配の関係はプロットデータの中央値付近で検討している²⁵⁾）

3. 3 システム判定結果の検証

モデル変更後のシステム判定結果について、既往降雨を用いてモデル改良の妥当性を検証した。各市の代表的な降雨として表 3.3.1 に示す検証降雨を用いることで、モデル改良前の 2022 年報告²³⁾による適中率等に対する改良効果を検討した。

表 3.3.1 検証降雨の一覧表

市町	検証降雨
神戸市	平成 26 年 8 月災害
	令和 3 年 8 月（連続雨量 150mm 無災害）
豊岡市	平成 16 年 10 月災害
	令和 3 年 8 月（連続雨量 150mm 無災害）

(1) 神戸市におけるシステム検証

1) 土砂災害が生じた豪雨における検証

平成 26 年 8 月に台風 11、12 号と前線に伴う暖気流の影響により西日本各地で豪雨が発生した。神戸市では、8 月 2 日～11 日に市の東部を中心に最大総雨量 700mm を超える豪雨となり、土砂災害警戒情報が発表された(図 3.3.1)。この豪雨の影響で家屋の浸水被害や山腹斜面の表層崩壊が発生した。

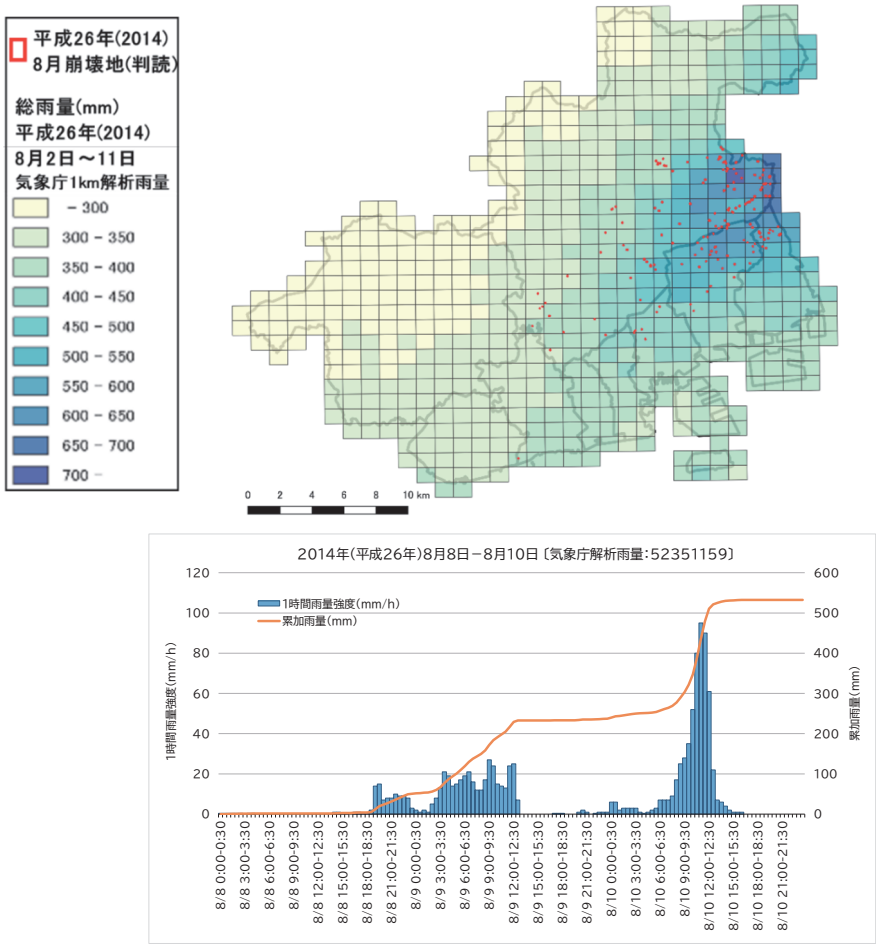


図 3.3.1 平成 26 年 8 月の神戸市豪雨
(上図：総雨量と崩壊位置、下図：ハイエトグラフ(平成 26 年 8 月 8-10 日))

上記の降雨条件において表 3.3.2 に示す計算ケースによる再現計算に基づく、Case26.6ver4 は断層沿いの崩壊地を捕捉した箇所数がモデル改良前の当初 12 箇所に対して、24 箇所へ増加する試算が得られた（表 3.3.3）。このため神戸市全域の崩壊地に対する捕捉率は 58.7%から 71.1%へ向上するため、モデル改良の効果が得られる。本論のモデル改良は断層破碎帯の範囲のうち崩壊しやすい地形に改良範囲を絞り込んでいるため、空振り判定の増加を一定程度抑制していることを図 3.3.2 は示している。

表 3.3.2 計算ケースごとの計算条件（神戸市）

計算ケース	断層沿いの層厚	1mDEM水系	10mDEM水系	谷頭凹地
当初モデル CASE26.3	当初式	2K	5K	K
CASE26.6ver4	増厚	2K	5K	1/2K
CASE26.7ver2	増厚	2K	5K	1/5K
CASE26.8ver2	増厚	2K	5K	1/10K

K=0.056cm/sec

表 3.3.3 計算ケースごとの計算結果（神戸市）

		CASE26.3	CASE26.6 ver4	CASE26.7 ver2	CASE26.8 ver2
全体	崩壊地数	97	97	97	97
	捕捉数	57	69	69	69
	捕捉率(%) ※箇所計算	58.76	71.13	71.13	71.13
断層沿い	崩壊地数	24	24	24	24
	捕捉数	12	24	24	24
	捕捉率(%) ※箇所計算	50.00	100.00	100.00	100.00

表 3.3.4 計算ケースごとの計算結果（神戸市）

	全セル	判定セル数	モデル	断層沿いの層厚	1mDEM水系	10mDEM水系	谷壁凹地
CASE26.3	5787184	17236	当初	当初式	2K	5K	K
CASE26.6ver4 (0.028)	5787184	23379	採用	増厚式	2K	5K	K/2

K=0.056cm/sec

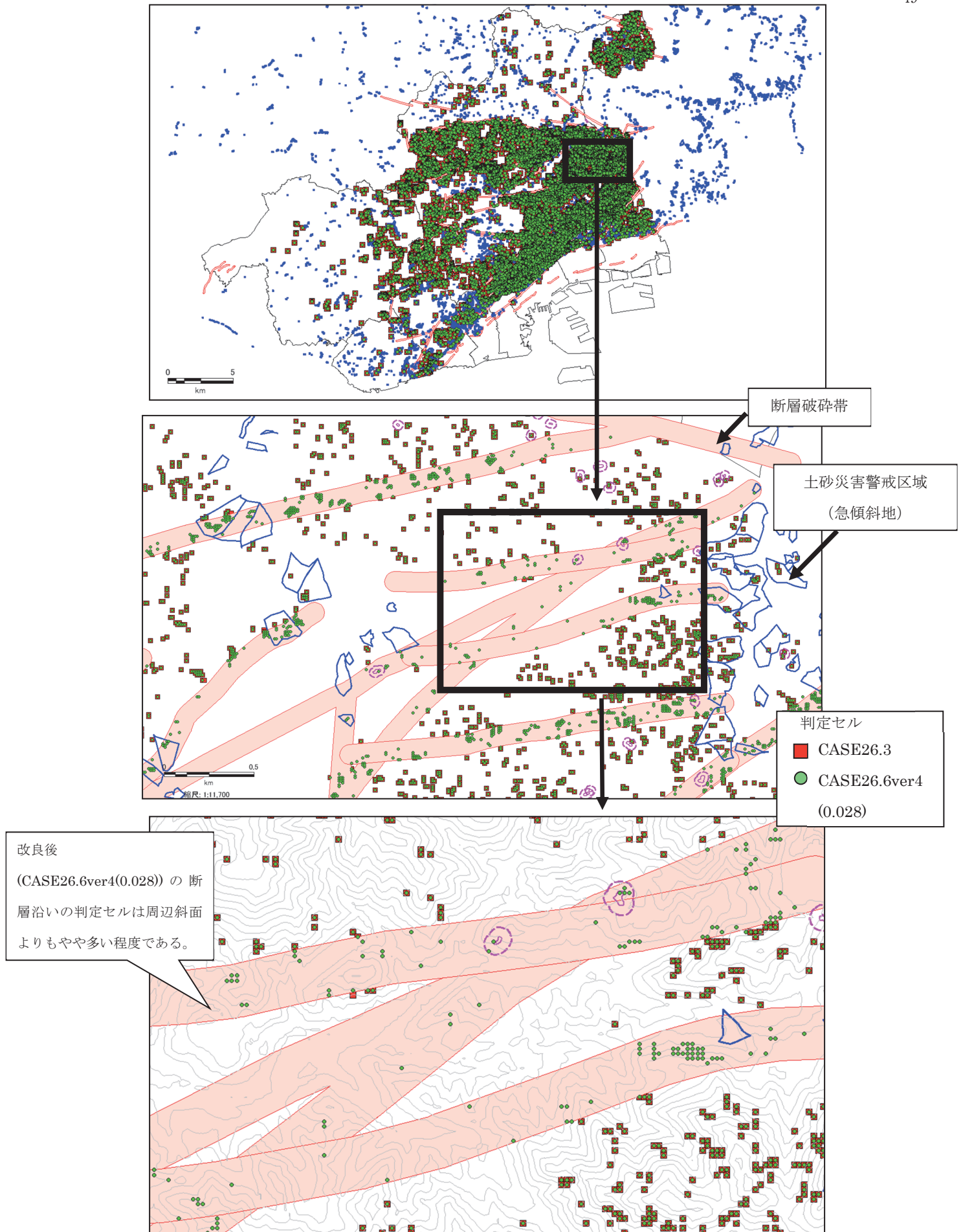


図 3.3.2 神戸市 平成 26 年 8 月災害 CASE26.6ver4 (0.028) の計算結果図

2) 少雨（無災害）における検証

少雨での空振り判定に対するシステムの判定精度を検証することを目的として、最近の無災害の降雨条件で再現計算と判定結果を検証した。令和 3 年 8 月豪雨では兵庫県全域において多雨となった。2022 年報告²³⁾では同降雨の連続雨量 150mm までの少雨により無災害時のシステムの判定精度を検証したことから、本論は同降雨にて検証することでモデル改良の影響を評価した。

連続雨量 150mm 以下の降雨条件における再現計算に基づくと、モデル改良前と比較して断層地形沿いのモデル改良範囲において僅かに判定箇所が増加するものの、断層地形の外の山腹斜面と比較して判定密度に顕著な変化は認められない（図 3.3.3～3.3.4）。また、土砂災害警戒区域単位の判定状況を表 3.3.5 に示すように、改良後に土砂災害警戒区域内に新たに判定セルが生じた区域数は 8 区域にとどまることから、警戒区域における少雨の空振り判定も抑制されていることが示される。以上から、本論で示したモデル改良後のシステム判定は土砂災害警戒情報が発報されるような災害発生の恐れがある豪雨時に判定が出る設定であることから、少雨におけるシステム判定精度は妥当であると判断される。

表 3.3.5 神戸市 令和 3 年 8 月（連続雨量 150mm 無災害）検証結果一覧表

計算ケース	検証降雨 (連続雨量 150mm)	警戒区域総数 (急傾斜Y区域)	計算結果		
			判定セル数	判定セルがある警戒区域数	警戒区域内の判定セル数
当初	R3.8	1838	79	1	1
改良後			481	9	14

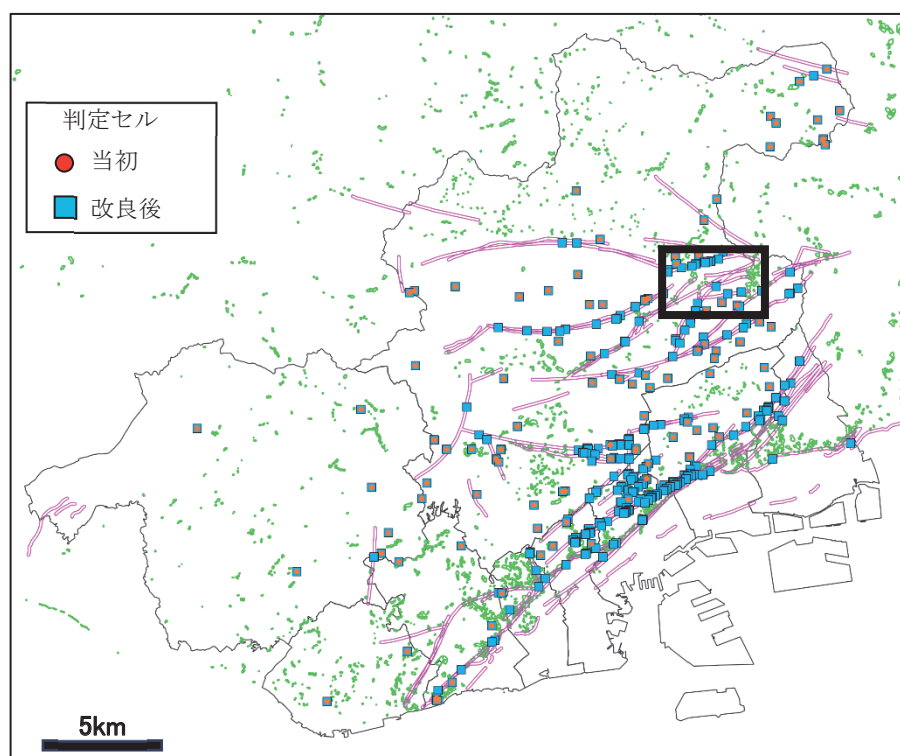


図 3.3.3 神戸市 令和 3 年 8 月（連続雨量 150mm 無災害）
計算結果図（広域図）黒枠は図 3.3.4 の上図範囲

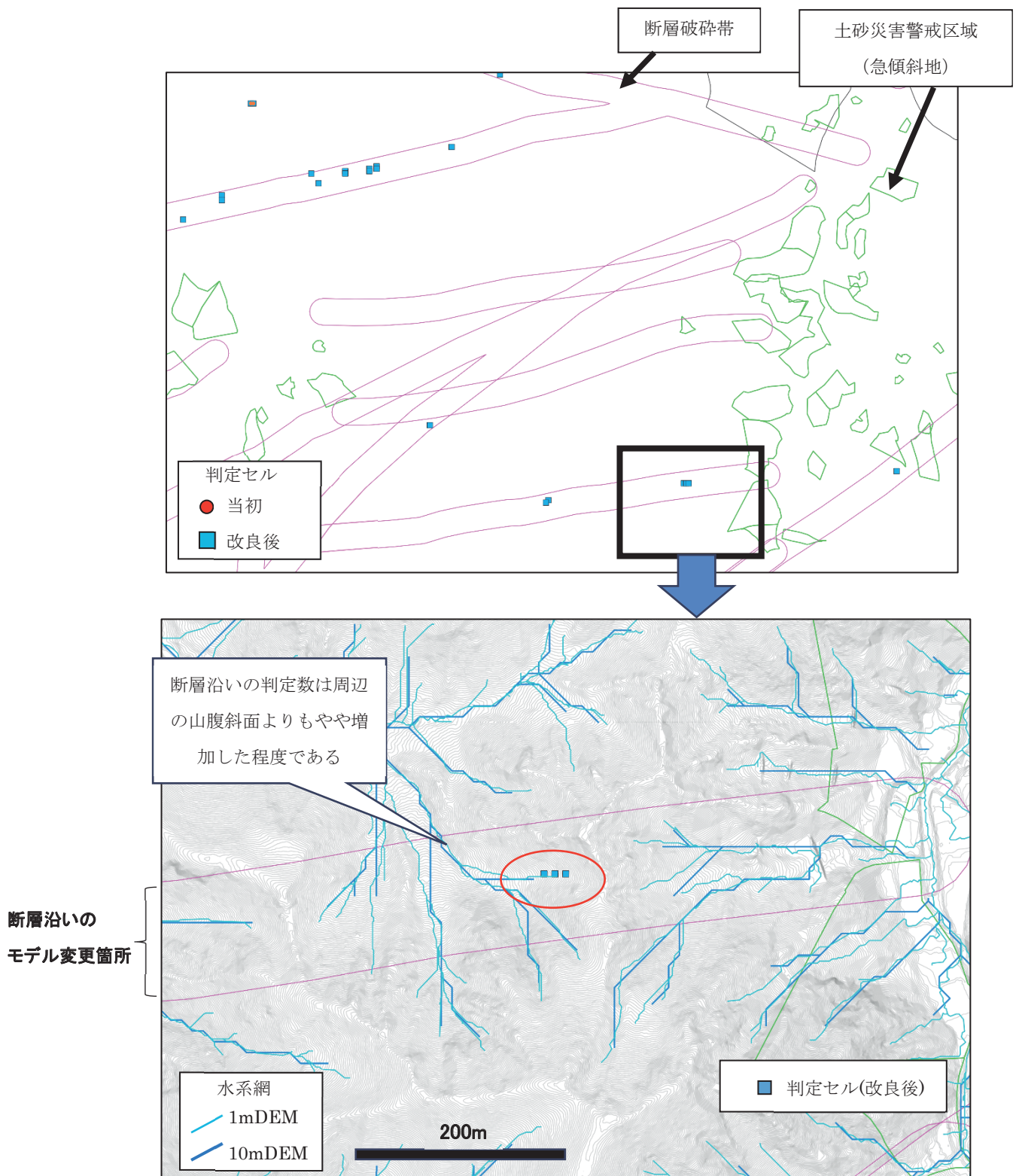


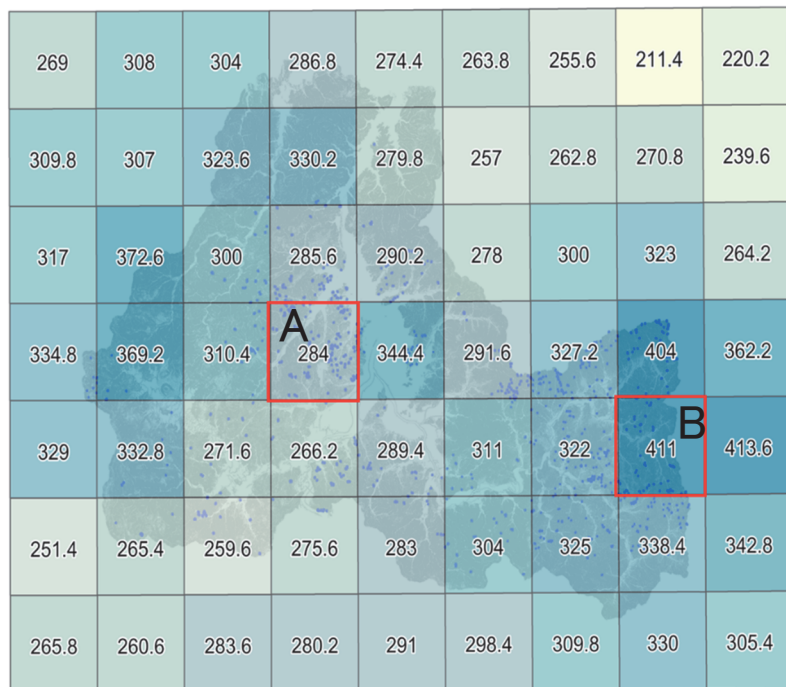
図 3.3.4 神戸市 令和 3 年 8 月（連続雨量 150mm 無災害）

計算結果図（上図：広域図、下図：拡大図）

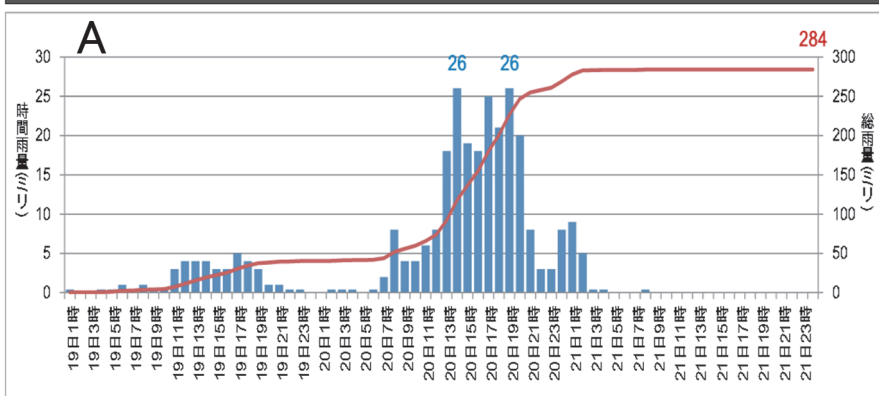
(2) 豊岡市におけるシステム検証

1) 土砂災害が生じた豪雨における検証

検証降雨は、豊岡市における土砂災害が発生した豪雨災害として平成 16 年 10 月豪雨とした。豊岡市では総降雨量 411mm を超える降雨であり、多数の斜面崩壊が発生した（図 3.3.5）。



総雨量が少ないが崩壊地が多く分布するエリアの時間別降雨データ



時間雨量が最も多いエリアの時間別降雨データ

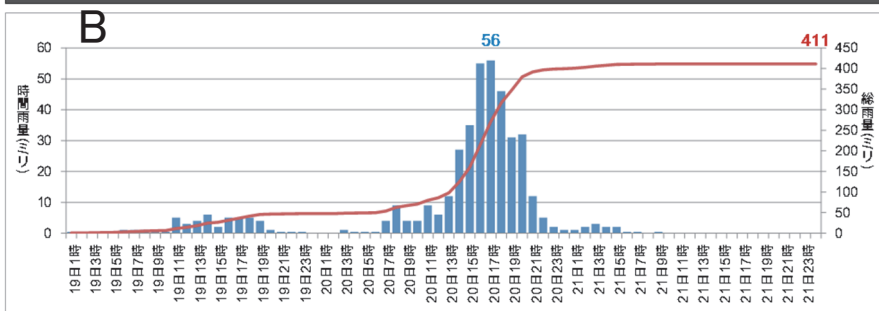


図 3.3.5 平成 16 年 10 月 19 日～21 日の累加雨量分布図（気象庁解析雨量 5km メッシュ）

(A: 崩壊地が集中するエリアのハイトグラフ、B: 最大時間雨量を記録したメッシュのハイトグラフ)

上記の降雨条件においてモデル改良後の計算ケースによる再現計算に基づくと、図 3.3.6～3.3.7 に示すように断層破砕帯沿いに新たに安全率 1 未満の判定が生じている。断層地形沿いの崩壊地を捕捉したセル単位の捕捉率はモデル改良前の当初 77.6%に対して、79.7%へ向上する試算結果が得られており（表 3.3.6）、モデル改良の効果が認められる。また、空振率（C/(C+D)）は当初 1.1%から増加は認められず抑制されている。更に、土砂災害警戒区域単位でみるとモデル改良後の警戒区域の捕捉数が 1 箇所増えたが、空振り数は 1 箇所増えるのみである（表 3.3.7）。本論のモデル改良は断層破砕帯の範囲のうち崩壊しやすい地形に改良範囲を絞り込んでいるため、空振り判定の増加を一定程度抑制していることを示している。

表 3.3.6 計算結果の比較（H16 災害 豊岡市）

計算ケース	セル数					適中率等				
	A	B	C	D	合計	適中率	捕捉率	空振率 C/(C+D)	空振率 C/(A+C)	見逃率
当初	6468	1872	60844	5689166	5758350	98.9%	77.6%	1.1%	90.4%	22.4%
改良後	6643	1697	62259	5687751	5758350	98.9%	79.7%	1.1%	90.4%	20.3%

【参考】指標の演算方法

適中率= (A +D) / (A +B +C +D)

捕捉率= A / (A +B)

空振率= C / (C +D)

見逃率= B / (A +B)

実績 \ 予測	予測	
	発生予想	非発生予想
崩壊発生	A	B
崩壊非発生	C	D

表 3.3.7 土砂災害警戒区域における計算結果の比較（H16 災害 豊岡市）

計算ケース	検証降雨	改良	区域総数	崩壊が発生した警戒区域数	捕捉した警戒区域数	空振り警戒区域数	警戒区域内の空振りセル数		
							空振り警戒区域のセル数	空振り判定セル数	空振り判定セル面積率%
当初	H16	前	1067	16	14	351	52284	783	1.5
改良後		後	1067	16	15	352	52334	792	1.5

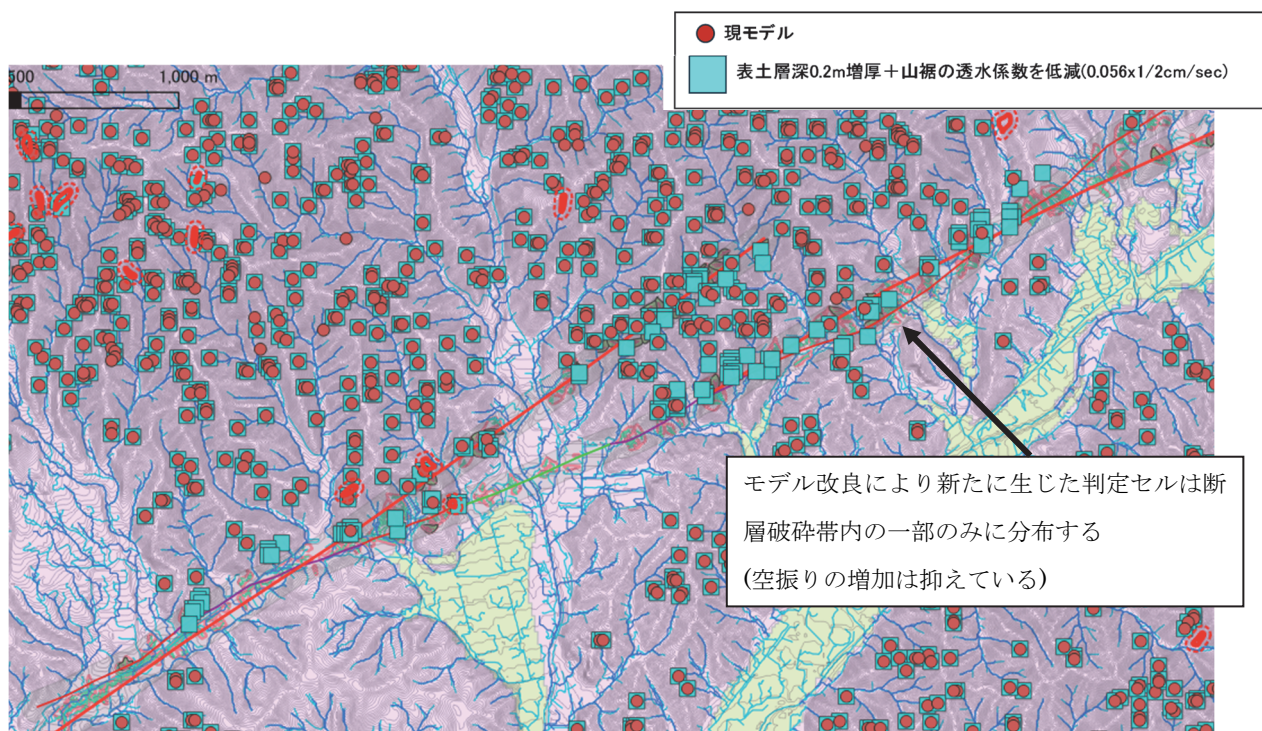


図 3.3.6 再現計算結果図 (安全率 1 未満)

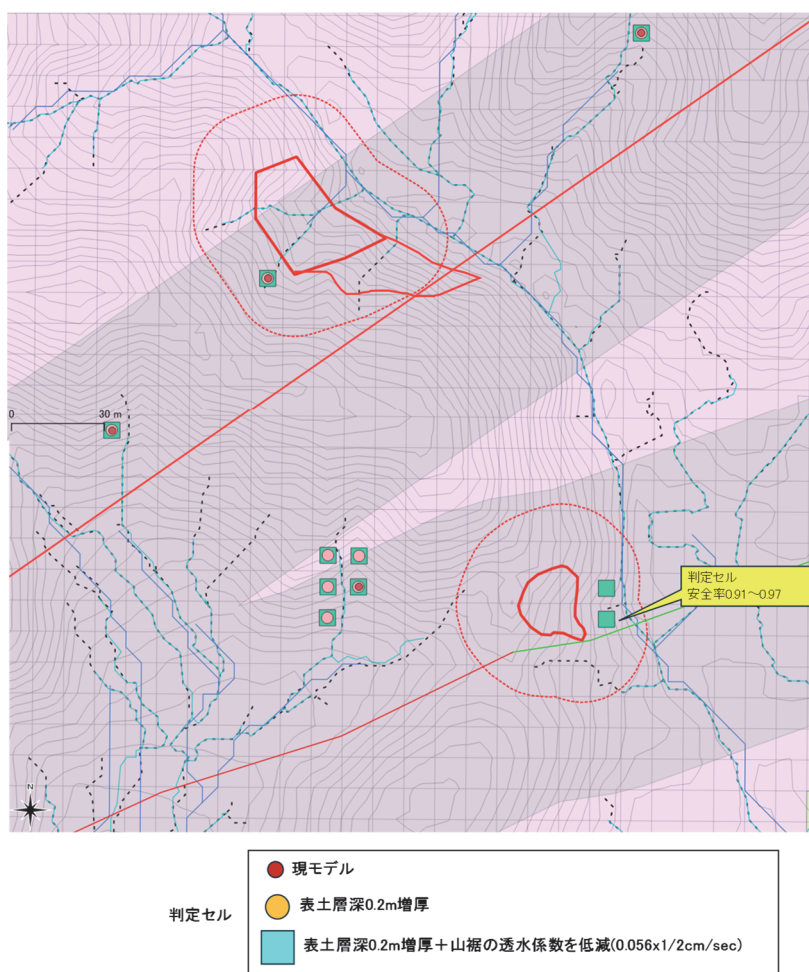


図 3.3.7 再現計算結果図 (安全率 1 未満)

2) 少雨（無災害）における検証

前述の神戸市と同様に少雨での空振り判定に対するシステムの判定精度を検証することを目的として、最近の無災害の降雨条件で再現計算と判定結果を検証した。令和3年8月豪雨では兵庫県全域において多雨となった。2022年報告²³⁾では同降雨の連続雨量150mmまでの少雨により無災害時のシステムの判定精度を検証したことから、本論は同降雨にて検証することでモデル改良の影響を評価した。

連続雨量150mm以下の降雨条件における再現計算に基づく、モデル改良前と比較して断層地形沿いのモデル改良範囲において僅かに判定箇所が増加するものの、断層地形の外の山腹斜面と比較して判定密度に顕著な変化は認められない（図3.3.8）。また、土砂災害警戒区域単位の判定状況を表3.3.8に示すように、改良後に土砂災害警戒区域内に新たに判定セルが生じた区域数は認められないことから、警戒区域における少雨の空振り判定も抑制されていることが示される。以上から、本論で示したモデル改良後のシステム判定は土砂災害警戒情報が発報されるような災害発生の恐れがある豪雨時に判定が出る設定であることから、少雨におけるシステム判定精度は妥当であると判断される。

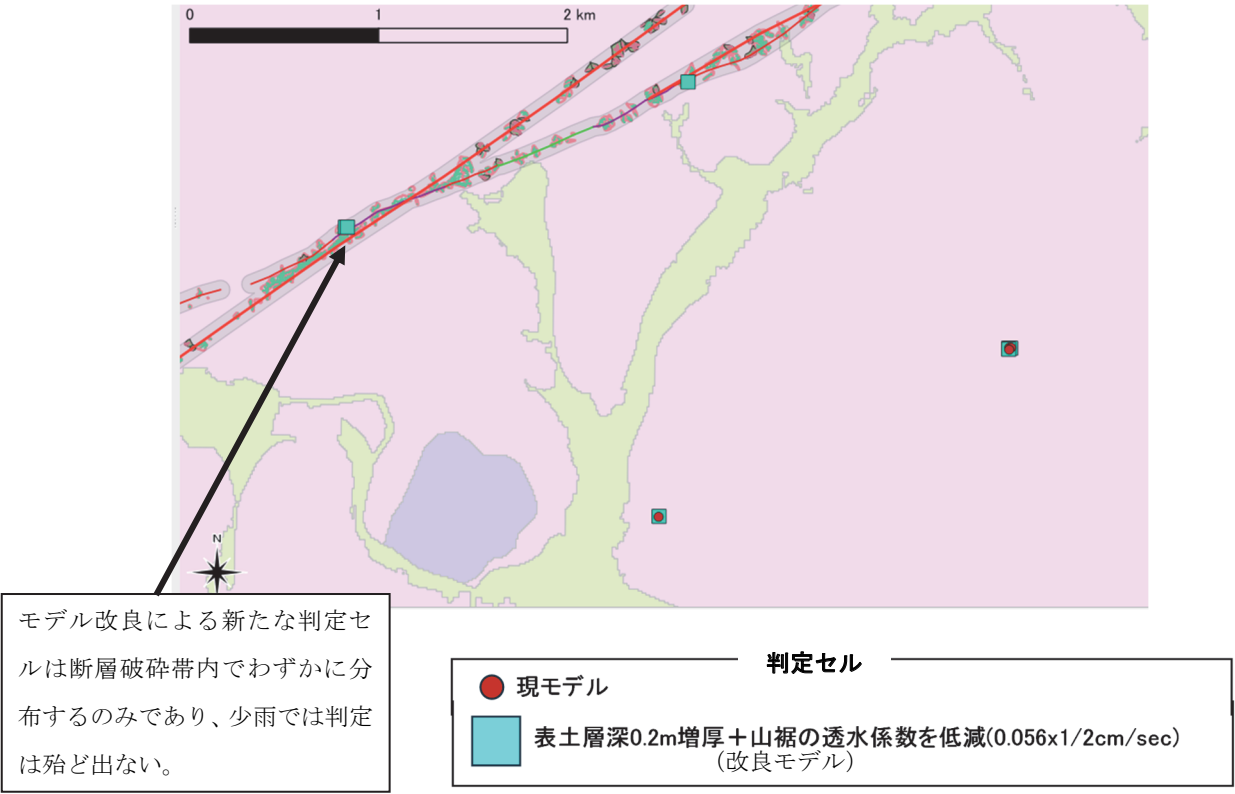


図 3.3.8 令和3年8月11日～15日の連続雨量150mmまでのシステム判定結果図
(モデル改良後)

表 3.3.8 豊岡市 令和3年8月（連続雨量150mm無災害）検証結果一覧表

計算ケース	検証降雨 (連続雨量 150mm)	区域総 数	計算結果		
			判定セ ル数	判定セ ルがある警戒 区域数	警戒区 域内の判定セ ル数
当初	R3.8	1075	25	0	0
改良後			168	0	0

4. 断層地形沿いのモデル改良に関する全県への展開方針

本論で示した断層地形沿いのモデル改良について、他市町への適用性は神戸市及び豊岡市において把握された地形地質条件を有するかにより判断される。2024 年報告²⁵⁾及び本論で示した、花崗岩及び古第三紀～白亜紀酸性火山岩類の地質が分布する範囲に断層が位置する箇所では、断層地形に影響を受けた崩壊が生じる可能性がある。これ以外の地質では、表層崩壊と断層地形の関連性が弱い。

以上から、花崗岩、古第三紀～白亜紀酸性火山岩類の地質と断層地形が重なる市町では同モデル改良方法を適用することでモデルの予測精度向上が期待できると考えられる。2024 年報告²⁵⁾は精度向上が期待できる市町を報告しているが、本論に示した適用できる地質と同地質が分布する範囲の断層の本数を見直すことで、システム整備済みの市町のうち上郡町および西宮・芦屋・宝塚市の2システムがモデル改良の対象として挙げられた（表 4.1）。モデルの改良方法は本論で示した手法を適用できる可能性はあるが、断層地形と崩壊地の関係や地盤定数の設定等は地域ごとに異なる可能性があるため、新たな市町への適用時は本論と同等の検討が必要と考えられる。

表 4.1 システム整備済み市町のうち、断層地形が表層崩壊に影響する可能性の整理

	市町	断層 本数	主要な地質構成	検証 降雨	崩壊地 数	断層の 影響
1	神戸市	特に多	花崗岩類 古第三紀～白亜紀酸性火山岩類	H26	多	◎
2	豊岡市	中	花崗岩類 古第三紀～白亜紀酸性火山岩類	H16	多	○
3	香美町	少	第三紀鮮新世～第四紀火山	H2	多	×
4	新温泉町	少	第三紀鮮新世～第四紀火山	H2	多	×
5	上郡町	中	古第三紀～白亜紀酸性火山岩類	S49	中	不明
6	三田市	少	古第三紀～白亜紀酸性火山岩類 古第三紀堆積岩	S40	少	×
7	丹波市	少	古第三紀～白亜紀酸性火山岩類 中生代堆積岩	H16、26	多	×
8	丹波篠山市	中	中生代堆積岩	H16	中	×
9	西宮・芦屋・ 宝塚市	多	花崗岩類 古第三紀～白亜紀酸性火山岩類	S42	中	不明
10	朝来市	少	中・古生代岩類	H16	中	×
11	養父市	中	中・古生代岩類	H16	多	×
12	猪名川町	少	古第三紀～白亜紀酸性火山岩類 中・古生代岩類	H30	少	×

また、図 4.1 に示すように、H16 豪雨災害時に丹波市内の土砂災害警戒区域内において表層崩壊が発生したが、本システムによる再現計算では見逃している。現地調査にもとづくと、表土層深がモデルの設定よりも現地の表土層が厚く、礫混じり土砂の崩積土から構成されることから崖錐地形の影響と考えられた。丹波市及び丹波篠山市には麓層面と呼ばれる特徴的な崖錐地形が分布することが報告されており²⁶⁾、広域的に分布する地形である可能性がある。この崖錐地形が分布する箇所において、モデル改良によるシステムの精度向上の可能性が考えられる。

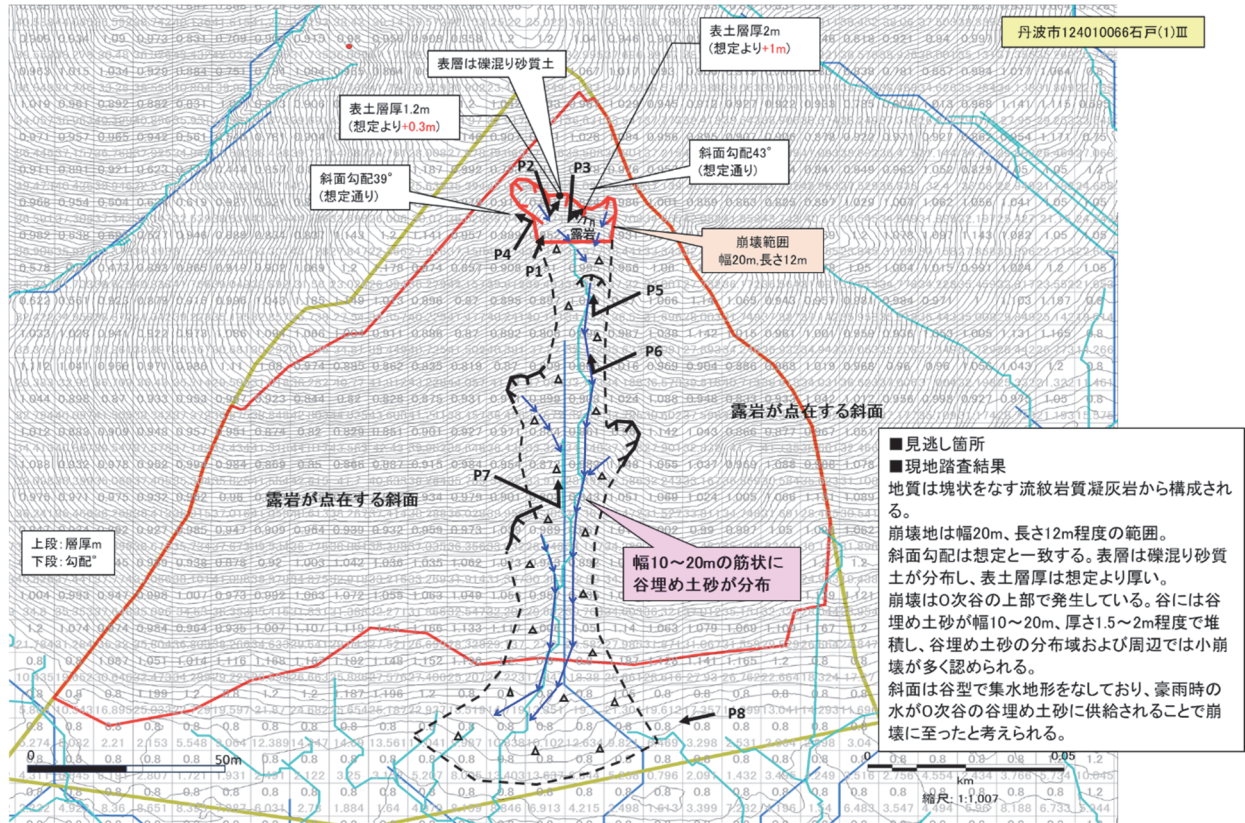


図 4.1 システムの見逃し崩壊事例 (124010066 石戸 (1) III)

5. まとめと今後の課題

神戸市及び豊岡市の断層地形沿いにおいて、現地調査によりモデルと現地の相違点を整理して地盤モデルを改良することで、システムの予測精度を向上させた。今後、システム整備済みの他市町への展開を行う予定である。

6. おわりに

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。この場をお借りして、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 6 年の土砂災害、令和 7 年 3 月
- 2) 気象庁：令和 6 年台風第 10 号による 8 月 26 日から 9 月 1 日にかけての大雨及び暴風等、災害時自然現象報告書 2025 年第 3 号、令和 7 年 5 月 23 日
- 3) 気象庁：低気圧と前線による令和 6 年 9 月 20 日から 9 月 22 日にかけての大雨等、災害時自然現象報告書 2025 年第 2 号、令和 7 年 3 月 13 日
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 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、建設工学研究所論文報告集、52、119-137、2010.
- 8) 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.
- 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 (3)、建設工学研究所論文報告集、54、159-183、2012.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 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.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) 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.
- 17) 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.
- 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 (9)、建設工学研究所論文報告集、60、29-43、2018.

- 19) 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.
- 20) 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.
- 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（11）、建設工学研究所論文報告集、62、45-66、2020.
- 22) 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.
- 23) 沖村孝・鳥居宣之・中川渉・鏡原聖史・笠原拓造・窪田安打・葛巻怜香・関英理香・伊藤正美：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）、建設工学研究所論文報告集、64、87-117、2022.
- 24) 沖村孝・鳥居宣之・鏡原聖史・窪田安打・笠原拓造・葛巻怜香・関英理香・根本信行・濱本拓志：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（14）、建設工学研究所論文報告集、65、55-83、2023.
- 25) 沖村孝・鳥居宣之・窪田安打・笠原拓造・鏡原聖史・葛巻怜香・関英理香・根本信行・濱本拓志：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（15）、建設工学研究所論文報告集、66、65-92、2024.
- 26) 田中眞吾・野村亮太郎・井上茂：兵庫県・多紀連山地域の麓屑面、地理学評論、59、261-275、1986.

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）、斜面工学
窪田 安打	客員研究員 応用地質株式会社、博士（理学）、応用地質学
笠原 拓造	客員研究員 国際航業株式会社、砂防工学
鏡原 聖史	客員研究員 大日本ダイヤコンサルタント株式会社、博士（工学）、地盤工学
中川 渉	応用地質株式会社、博士（工学）、地盤工学
葛巻 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
山道 美友	応用地質株式会社、応用地質学

