

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)

Some Problems and Measures appeared during the Construction of the Real-time Hazard System for Slope Disasters at a Heavy Rainfall (15)

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	葛巻 怜香
Takuzo Kasahara	Satoshi Kagamihara	Reika Kuzumaki
関 英理香	根本 信行	濱本 拓志
Erika Seki	Nobuyuki Nemoto	Takuji Hamamoto

1. はじめに

令和 5 年（2023 年）は、43 の都道府県で延べ 1471 件の土砂災害が発生しており、その被害は死者・行方不明者 8 名、負傷者 19 名、人家被害 262 戸に上った。特に 6 月から 7 月の期間における発生件数は 781 件であり、その件数は令和 5 年に発生した土砂災害の約半数を占めている¹⁾。

中でも、6 月 2 日の台風 2 号による大雨と、6 月 29 日から 7 月 13 日の前線による大雨による被害が大きかった。6 月 2 日の台風 2 号による大雨は、梅雨前線が 1 日から 3 日午前中にかけて本州付近に停滞した。前線に向かって台風周辺の非常に暖かく湿った空気が流れ込んだため、2 日には前線の活動が活発になった。西日本から東日本の太平洋側を中心に大雨となり、高知県、和歌山県、奈良県、三重県、愛知県、静岡県では線状降水帯が発生した。1 時間に 80 ミリ以上の猛烈な雨が降り、1 時間降水量が観測史上 1 位の値を更新した地点があった。また、降り始めからの雨量は東海地方で 500 ミリを超えたほか、四国地方、近畿地方、関東地方でも 400 ミリを超え、平年の 6 月の月降水量の 2 倍を超えた地点があった²⁾。この大雨の影響により、19 都府県にて、土石流、地すべり、がけ崩れなどの土砂災害が 328 件発生し、死者 1 名、負傷者 1 名、人家被害 70 戸の被害が発生した¹⁾。

6 月 29 日から 7 月 13 日の前線による大雨は、6 月 28 日以降、梅雨前線が日本付近に停滞し、前線に向かって暖かく湿った空気が流れ込んだ影響で前線の活動が活発となり、各地で大雨となった。6 月 28 日から 7 月 16 日までの総降水量は大分県、佐賀県、福岡県で 1,200 ミリを超えたほか、北海道地方、東北地方、山陰及び九州北部地方（山口県を含む）で 7 月の平年の月降水量の 2 倍を超えた地点があった。またこの期間は大気の状態が不安定となり、北日本から西日本の所々で、発達した積乱雲による突風の被害が発生した日があった³⁾。梅雨前線の活発な影響により、山口県、鹿児島県、熊本県、島根県、福岡県、佐賀県、富山県など 9 県で線状降水帯が発生する等、広範囲で大雨となった。この大雨の影響により全国 22 県で土石流、地すべり、がけ崩れなどの土砂災害が 397 件発生し、死者 7 名、負傷者 14 名、人家被害 93 戸の被害が発生した¹⁾。

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。検討ケースは平成 26 年 8 月の神戸市豪雨にともなう斜面災害を用いて、断層沿いのモデル改良方針を検討してまとめたものである。

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性が生じた。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。

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。

3. 平成 26 年（2022 年）8 月豪雨状況とシステムの判定

3. 1 既往災害のシステム判定検証による問題点

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、土砂災害警戒区域内におけるシステム判定状況は図 3.1.1 に示すとおりであり、モデル改良後も概ね表層崩壊を捕捉している状況である。しかし、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生じる問題点が生じており、これを全て捕捉する課題が生じている。モデル改良後の表層崩壊の見逃し箇所の一覧表を表 3.1.1 に示す。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厚よりも厚い表土が分布することを確認した。当地区は、図 3.1.2～3.1.5 に示すように豊岡市但東町に位置しており、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。またここでは既往文献により、活断層（山田断層）が分布することが示されており、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見逃した原因は、モデルの表土層厚の設定が薄いことが主な原因と推定されるが、現地の表土層厚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る。また、丹波市の区域番号 124010066（区域名：石戸(1)Ⅲ）は、平成 16 年災害の際に自然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厚よりも厚い表土が分布することを確認した。図 3.1.6 に示すように、当地区は丹波市柏原町石戸に位置しており、平地から高さ 100m 程度で勾配 35° 前後の南向きの自然斜面である。ここでは、既往文献により、この自然斜面全体に地すべり地形が分布することが示されている。現地調査では、粗粒な砂礫が斜面を覆っており、この一部が崩壊していることを確認している。モデル改良後のシステムが見逃した原因は、モデルの表土層厚の設定が薄いことが主な原因と推定されるが、現地の表土層厚が一般的な山腹斜面よりも厚い原因としては、地すべりの影響により、崩落した粗粒な土石が周辺よりも厚く分布するためと考えられ、一部に崖錐性の表層崩壊が生じたものと推定される。

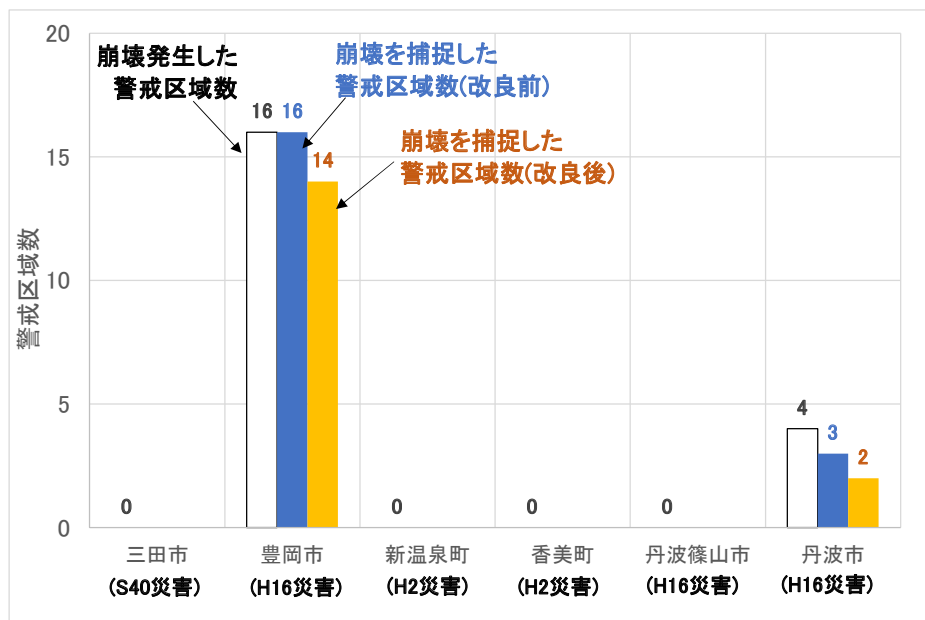


図 3.1.1 R3 年度モデルの改良効果（検証災害（全降雨）時の土砂災害警戒区域における崩壊捕捉の状況）²³⁾

表 3. 1. 1 土砂災害警戒区域における見逃し箇所（R3 モデル改良後）

※黄色着色部は断層、崖錐地形に関係する箇所

市町	区域番号	区域名	崩壊状況	現地踏査	見逃し原因の考察	モデル改良方針
豊岡市	110010125	香住第二	H16災害、民家裏の小規模な崩壊。	災害記録写真から判断	山側からの表流水の流入による崩壊のため、モデルでは表現できない事象。	モデルの適用が困難
	110060184	坂野(3)Ⅱ	H16災害、民家裏の斜面の表層崩壊。	崩壊範囲は20x20mである。表層には、花崗岩起源の表土層が分布する。表土層厚は1.3～1.6mである。	斜面勾配はモデルと現地の相違は殆ど無いが、表土層厚はモデルよりも現地は厚い。これは、 地盤は断層が直下に分布しており、地山が破碎質のため、風化した表土層が一般的な斜面よりも厚く分布していた可能性がある。 このため、見逃しが生じたと考えられる。	断層周辺の斜面について、表土層厚の傾向を調査することで、モデル改良する必要がある。
丹波市	124010066	石戸(1)Ⅲ	H16災害、自然斜面の表層崩壊。	崩壊範囲は15x15mである。表層には、有馬層群流紋岩質凝灰岩起源の表土層が分布する。表土層厚は1.0～1.2mである。	斜面勾配はモデルと現地の相違は殆ど無いが、表土層厚はモデルよりも現地はやや厚い。これは、当該箇所が崖錐地形(防災科学技術研究所 地すべり地形分布図より)であり、崩壊地周辺では 過去の斜面変動によって生じた土砂(移動体)が、やや厚く分布していた可能性がある。 このため、見逃しが生じたと考えられる。	地すべり地形分布図に記載された移動体の分布域については、モデルの表土層厚をやや厚くする対応が必要と考えられる。
	124060092	上牧牧北(1)Ⅱ	H16災害、自然斜面の表層崩壊。	崩壊範囲は10x10mである。丹波層群砂岩起源の表土層が分布する。表土層厚は1.1～1.5mである。	斜面勾配はモデルと現地の相違は殆ど無いが、遷急線付近に位置しており、表土層厚はモデルよりも現地は厚い。このため、見逃しが生じたと考えられる。	表土層厚が厚い傾向であるのは、局所的なものか、この地域に一般的なものかは現地調査で確認する必要がある。



図 3. 1. 2 豊岡市における見逃し箇所の航空写真(区域番号 110060184 (区域名：坂野(3)Ⅱ))

(国土地理院 2005 年撮影 H16 災害後)

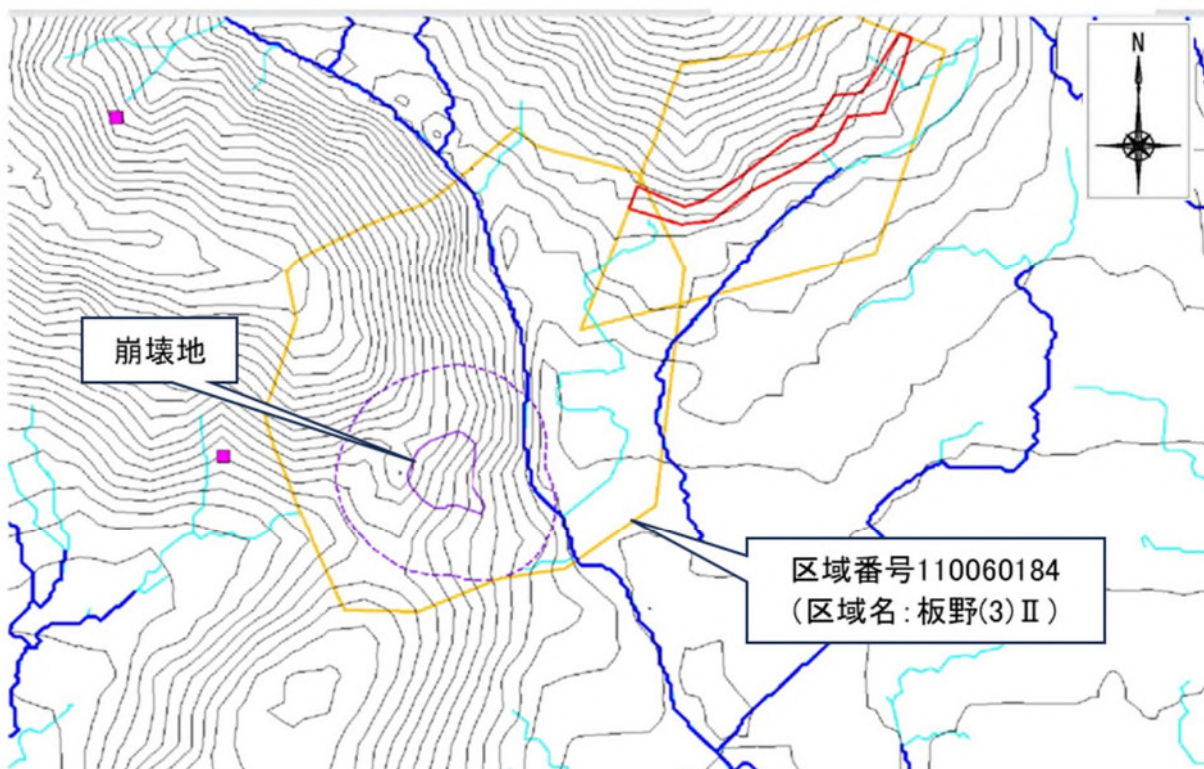


図 3.1.3 豊岡市における見逃し箇所的位置図(区域番号 110060184 (区域名：板野(3)Ⅱ))
崩壊地とシステム判定状況（安全率 1 未満は赤四角）

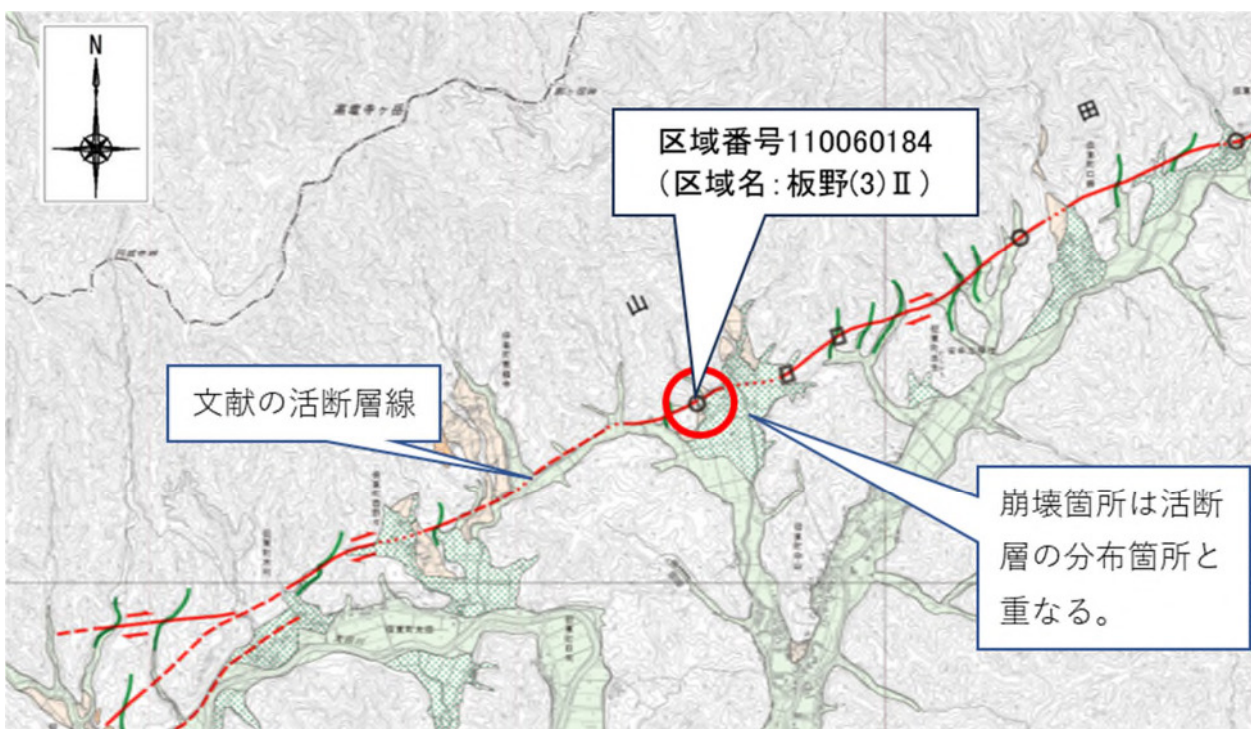


図 3.1.4 見逃し箇所と断層の位置関係（区域番号 110060184（区域名：板野(3)Ⅱ））
既往文献²⁵⁾を引用

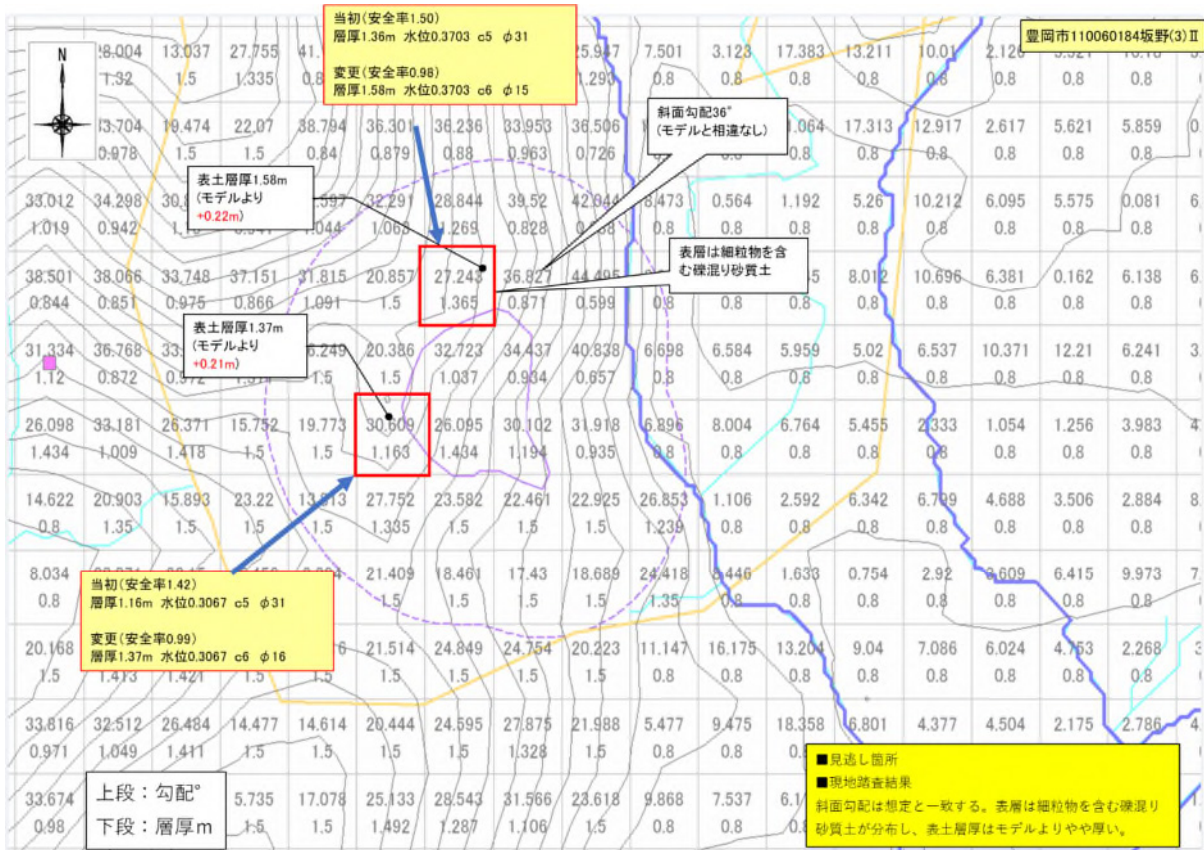


図 3.1.5 見逃し箇所の現地調査結果（区域番号 110060184（区域名：板野(3)Ⅱ））

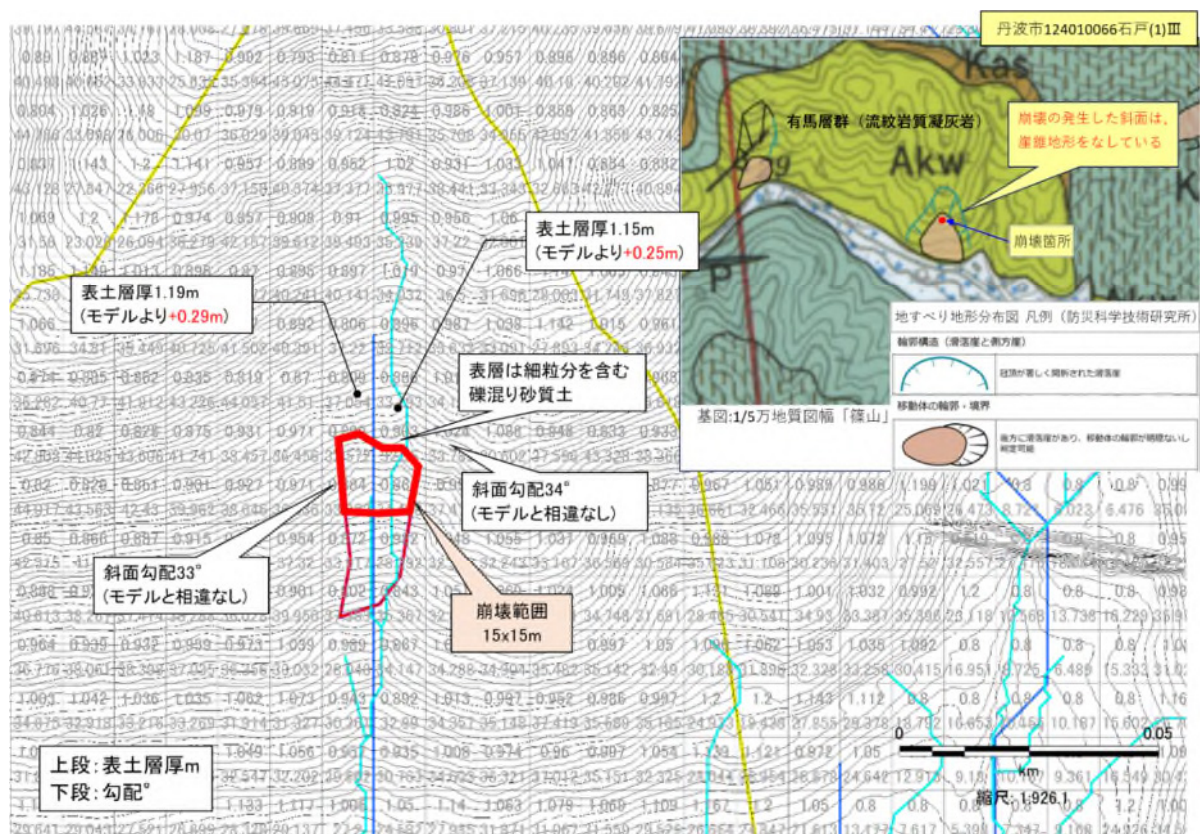


図 3.1.6 丹波市における見逃し箇所の現地調査結果（区域番号 124010066（区域名：石戸(1)Ⅲ））

以上に示したように、断層や崖錐地形では 2022 年報告の改良後の現行のモデルと異なる地盤状況のため、崩壊を適切に再現できていないことが判った。図 3.1.7 に示すように、断層や崖錐地形（一部の地すべり地形）は土砂災害警戒区域と重なるケースが各市町で認められることから、土砂災害警戒区域における予測精度の向上として、検討の必要性が高いと考えられた。具体的な検討方針は、以下のとおり整理された。

a) 断層

断層沿いは基盤岩が破碎されているため周辺斜面よりも細粒化しており風化しやすいことから、表土層厚が厚いと想定される。また、表土層の細粒分が多いことは、地盤強度が低下することや、透水性が低くなり地下水位が上昇しやすくなることも推定される。これらを踏まえ現地調査により、地盤条件を反映したモデルを検討する必要がある。

b) 崖錐地形

崖錐性崩壊の生じる可能性がある斜面は、ここでは地すべり地形の斜面の一部において破碎された移動土塊や堆積物が分布しており、周辺よりも表土層厚が厚い箇所を対象としている。ここでの表土層は比較的粗粒分が多いと推定される。これらを踏まえ現地調査により、地盤条件を反映したモデルを検討する必要がある。

以上から、土砂災害警戒区域内やその近傍に断層や崖錐地形が分布する箇所における地盤状況を把握して、モデル改良を行い、判定精度の向上を図ることとした。

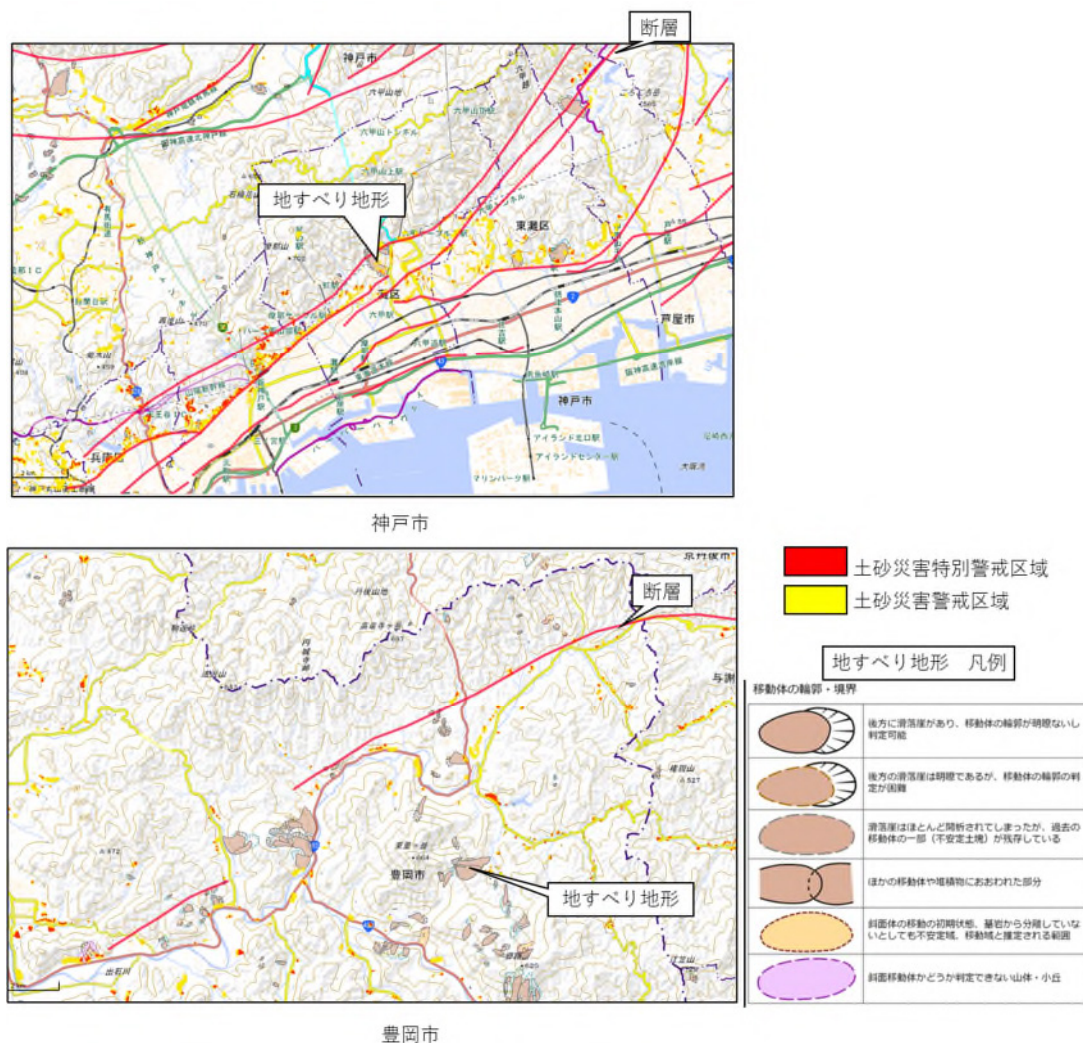


図 3.1.7 土砂災害警戒区域と断層、崖錐地形（一部の地すべり地形）の位置関係（産業技術総合研究所 HP より）

3. 2 現地調査によるモデル改良方針

断層・崖錐地形と表層崩壊の関係を検討するため、同地形が密集する地域において斜面災害の実績があるケースをモデル改良の検討ケースとした。断層については、近年の豪雨による斜面崩壊の実績がある神戸市を対象に検討することとした。ここでは、神戸市の平成 26 年 8 月豪雨では、神戸市の北東側において雨域が集中して斜面崩壊が多発した実績があり、また同地区は断層が密集する地域であるため、検討ケースとして適すると判断した。

(1) 降雨状況

平成 26 年(2014)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 3.2.1)。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。

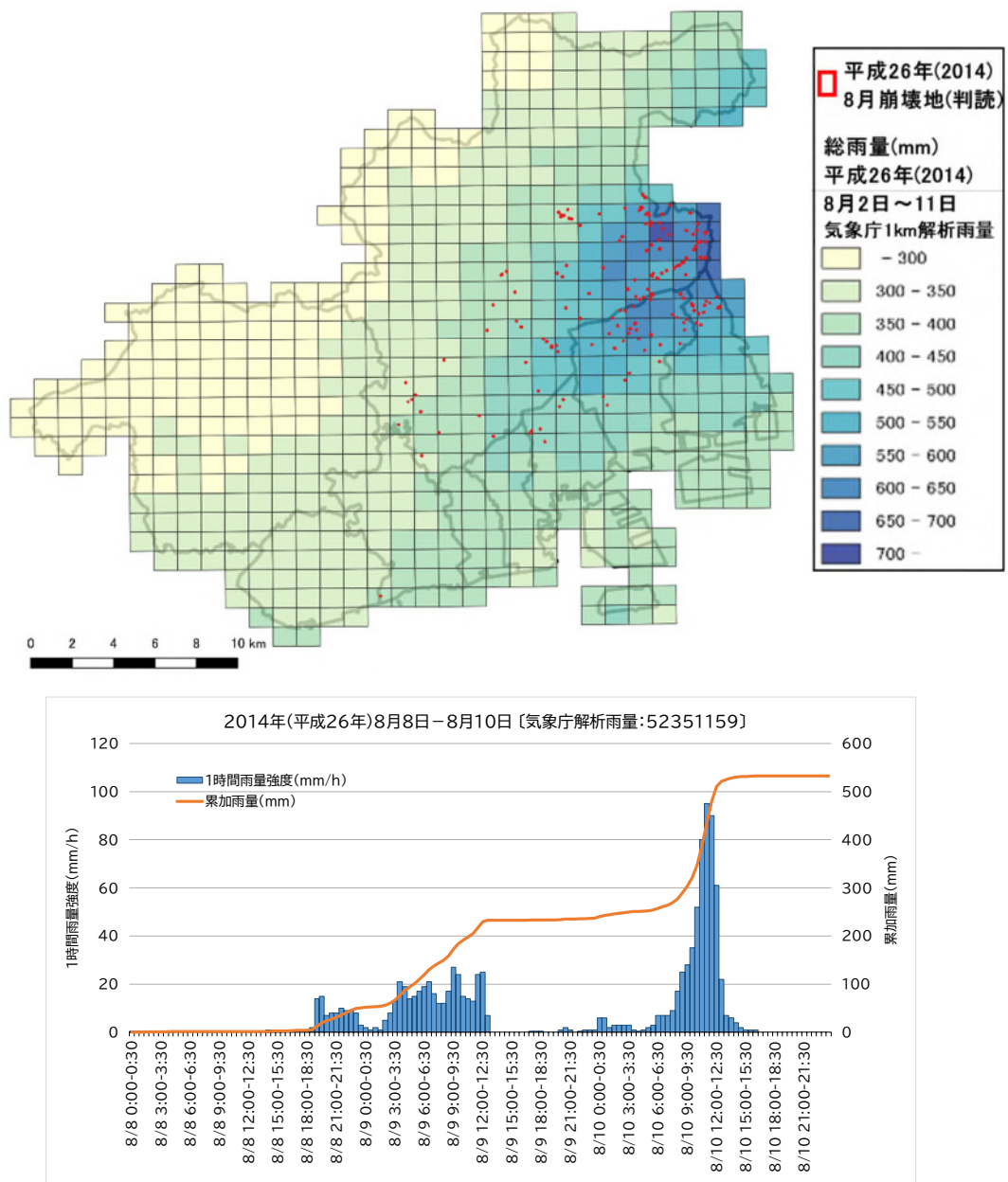


図 3.2.1 平成 26 年 8 月の神戸市豪雨（上図：総雨量と崩壊位置、下図：ハイトグラフ(平成 26 年 8 月 8-10 日)）

(2) 表層崩壊の捕捉状況

平成 26 年 8 月豪雨時に発生した表層崩壊に対する運用モデルの捕捉状況を図 3.2.2 に示す。崩壊地は総雨量が大きな神戸市東部に集中しており、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有することから、地質構造に影響を受けている可能性が示唆された。そこで、文献の断層線や地すべり地形を重ねた結果、断層に掛かる崩壊地が多いことが確認された。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ていることが確認された（表 3.2.1）。以上から、断層や崖錐崩壊を生じるような一部の地すべり地形沿いでは表層崩壊が生じやすいことが示された。運用モデルはこの特徴を評価していないため捕捉率低下の原因となっていると考えられた。なお、地すべり地形にかかる崩壊地の検証数が少ないことから、今回の検討では、断層に掛かる崩壊地のみを検討対象とすることとした。

表 3.2.1 崩壊地の判定結果（平成 26 年 8 月豪雨）

計算モデル	自然斜面の崩壊地数	捕捉	見逃	捕捉率%	山腹斜面の崩壊地		断層に掛かる崩壊地		地すべりに掛かる崩壊地	
					捕捉	見逃	捕捉	見逃	捕捉	見逃
運用モデル	97	57	40	58.8	45	27	12	12	0	1

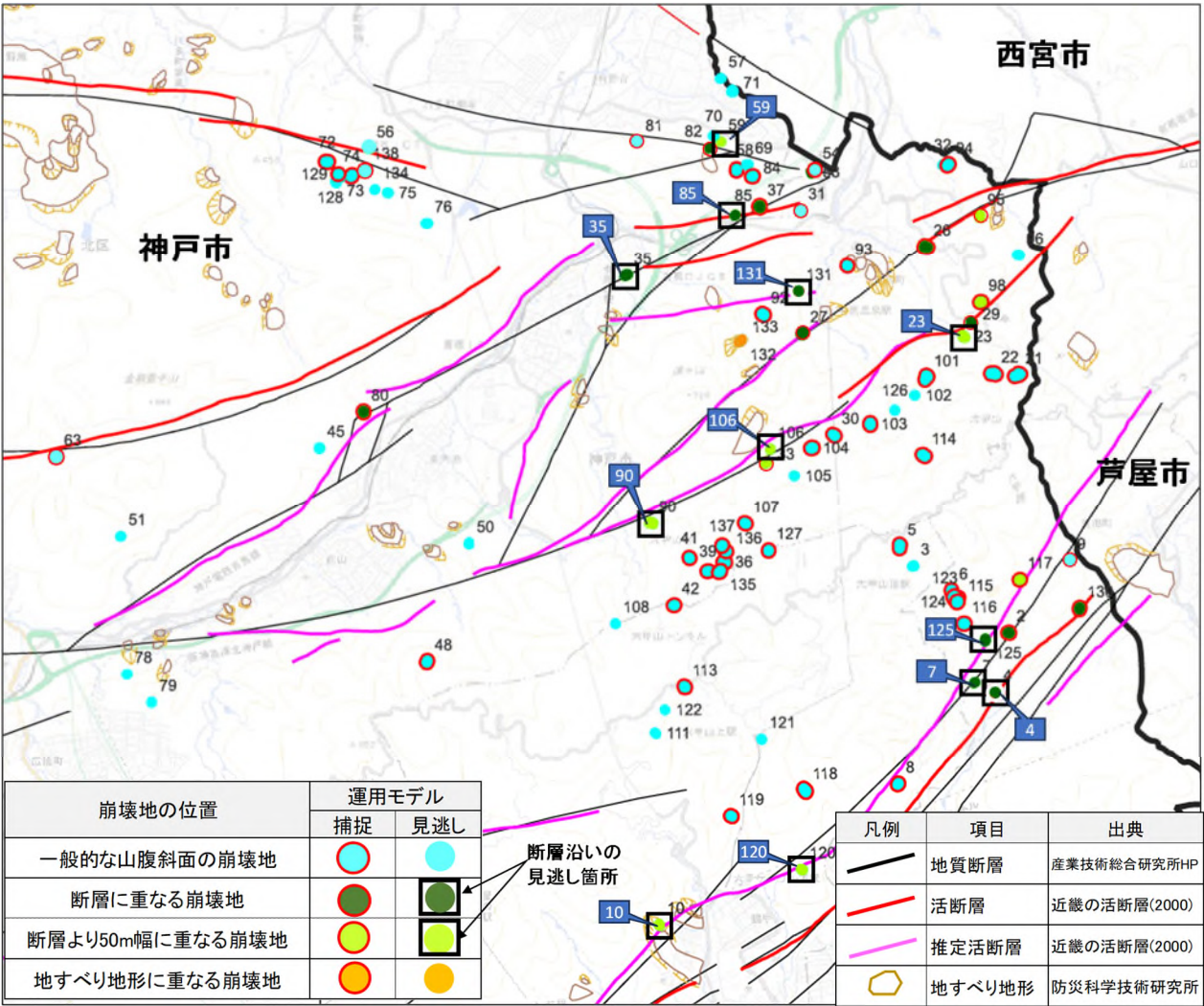


図 3.2.2 平成 26 年 8 月豪雨 判定状況（神戸市東部）

(3) 断層沿いの表土層のモデル化

断層沿いの地盤条件を現地調査に基づいてモデル化することで、表層崩壊の再現性を高める検討を行った。まず、断層分布については、以下の既往の文献資料を参考とした。このうち、文献に記載された断層・崖錐地形に位置する斜面に対して、表土層厚や地盤物性を現地調査により把握した。特に検証災害による崩壊地のうち見逃し箇所を優先的に調査した。

【断層】

- ・「近畿の活断層 東京大学出版会 2000 年」(活断層、推定活断層)
- ・「産業技術総合研究所 地質図 NAVI <https://gbank.gsj.jp/geonavi/>」(地質断層)

(上記文献にて記載されている断層線は地形図精度の影響により、DEM 詳細地形図と比較するとズレが生じている。このため、文献の断層線をトレースする際は、DEM 詳細地形図の断層地形(鞍部地形や直線谷等)を参考にトレース位置を微修正して図化した))

【崖錐地形】

- ・防災科学技術研究所 地すべり地形図(地すべり地形の一部が崖錐性地形と推定されるため、参考に図化した)

1) 現地調査

平成 26 年 8 月の神戸市豪雨時の崩壊地のうち、断層および崖錐地形と崩壊地が重なる箇所の一覧表を表 3.2.2 に示す。これらのうち、断層と地すべりの位置関係にもとづいて分類した。このうち断層沿いは古い表層崩壊跡の分布密度が高いことから表層崩壊が発生しやすい傾向があることが確認できる(図 3.2.3)。崩壊地と断層の位置関係から数パターンに分類して代表箇所を現地調査した(表 3.2.2 の着色部)。現地では、崩壊地の有無、崩壊深、崩壊幅・長さ、斜面勾配、表土の構成物の粒度等を観察した。更に崩壊原因についても推定した。

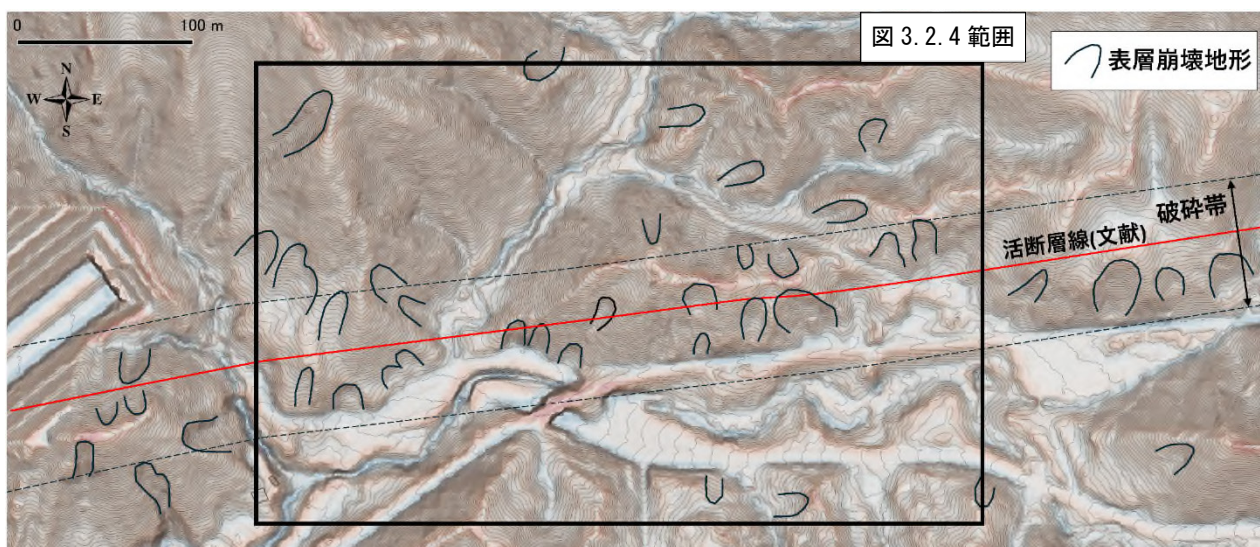


図 3.2.3 断層周辺の表層崩壊地形(地形図は兵庫県 LP_1mDEM より作図)

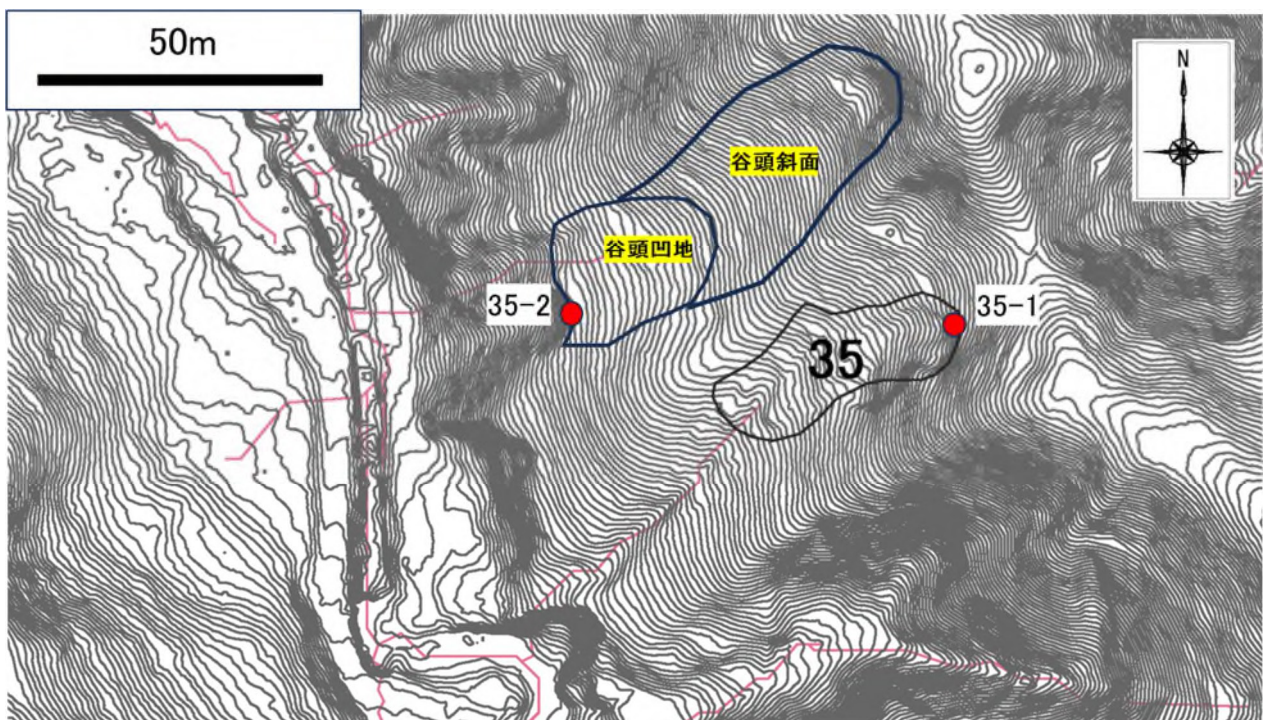
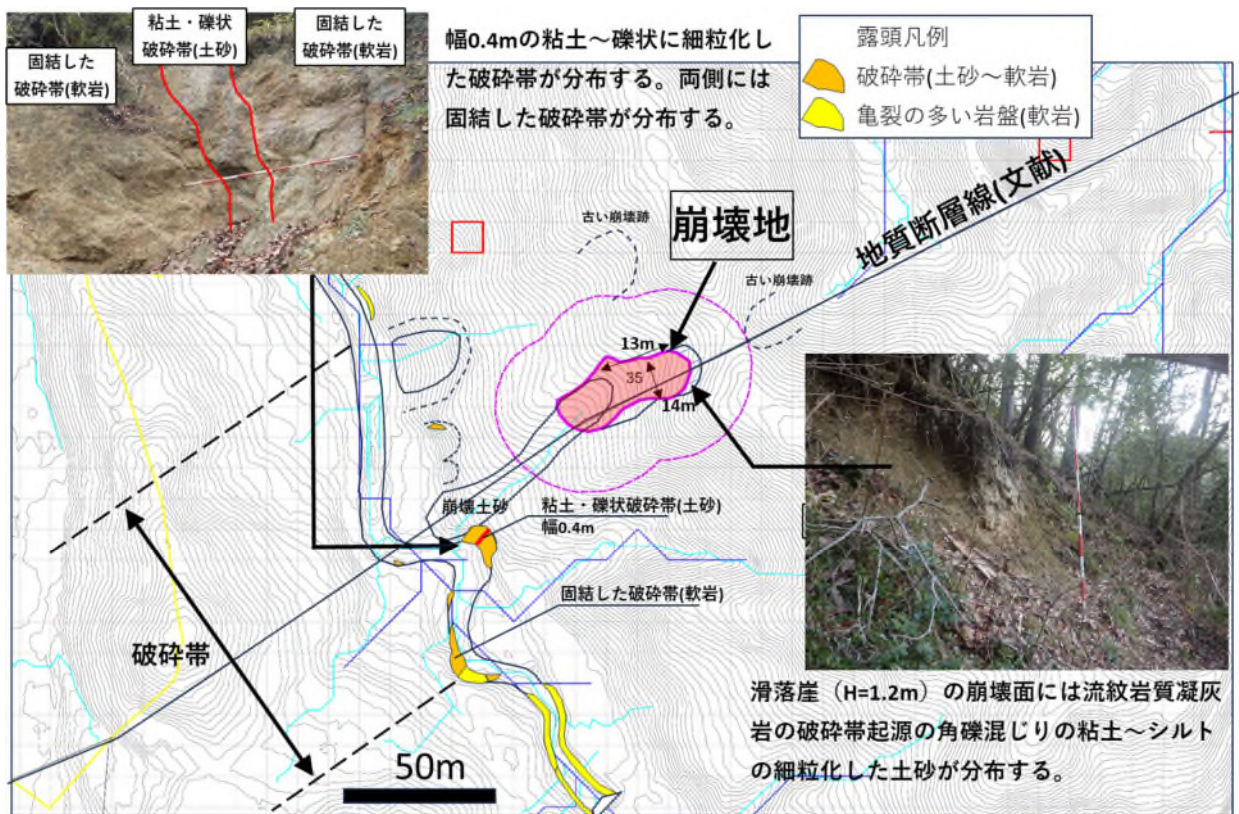
現地踏査の結果を図 3.2.4～3.2.9 に示すように、基盤の断層破碎帯の範囲に含まれる 0 次谷で表層崩壊が発生していることを確認した。この断層破碎帯の幅については、露頭の破碎状況から把握しており、崩壊地 4 (約 110m) 崩壊地 35 (約 100m) 崩壊地 85 (約 70m) の結果から、幅 70-110m と整理される。崩壊地では、表土層深がモデルの設定よりも数 10cm 程度厚い。表土層は、露頭観察から、主に砂質土からなるが、谷頭斜面と谷頭凹地に細粒砂～シルトからなる細粒層が分布することを確認した。

表 3.2.2 平成 26 年 8 月神戸市豪雨により発生した断層地形に関連する見逃し崩壊地の一覧表

		崩壊地と断層との位置関係				⑤崖錐 地形	現地調査 ※()内はモデルの設定値					本システ ムの捕捉 対象の崩 壊地
崩 壊 地 No	崩壊地の地形	①断層 が真上 を通る 谷にお ける崩 壊地	②断層 に平行 する谷 におけ る崩壊 地	③断層 が崩壊 斜面の 脚部を 通過す る(直交	④断層 が崩壊 斜面の 脚部を 通過す る(斜交		現 地 調 査	地質	斜面勾配°	表土層深 m	表土層の土層	
4	断層が斜面脚部を通 過。尾根から崩壊			○		○	花崗岩 (破砕帯)	32~35° (30~46)	2.0m (1.02m)	粘土混じり砂質土(砂質土)	モデルよりも表土層厚が厚く、表土層は細粒である。	○
7	断層が近接して通過する。断層方向の凹地地形	○										○
10	断層が斜面脚部を通 過。緩い凹地形が崩 壊			○		○	花崗岩 (崩壊土砂)	44° (42~46°)	1.4m (1.03m)	礫質土(砂質土)	モデルよりも表土層厚が厚い。	○
23	尾根沿いが崩壊				○							○
29	断層が斜面脚部を通 過。谷側壁部が崩壊				○							○
35	断層沿いの谷の崩 壊、斜面勾配が緩い	○				○	有馬層群 (破砕帯)	33° (28~34)	1.2m (1.1m)	角礫混じりの粘土～シルト(砂質土)	モデルよりも表土層厚が厚く、表土層は細粒である。	○
56	緩い尾根沿いの崩 壊。神戸層群				○						神戸層群は破砕帯を形成しておらず断層とは別原因とかがえられるため、除外	—
70	緩い尾根沿いの崩 壊。神戸層群				○							—
85	断層が斜面脚部を通 過。遷急線から崩壊				○	○	有馬層群 (破砕帯)	32° (28~35)	1.8m (1.1m)	礫混じり細粒砂～シルト(砂質土)	モデルよりも表土層厚が厚く、表土層は細粒である。	○
90	風化残積土の崩壊の可能性			○								○
106	断層が斜面上部を通 過。谷の側壁崩壊	○										○
120	断層が斜面脚部を通 過。表土層が厚い可能性			○								○
125	断層沿いの谷の崩壊				○							○
131	断層沿いの谷の崩壊				○							○

 現地調査により、断層の影響が確認された箇所

12箇所



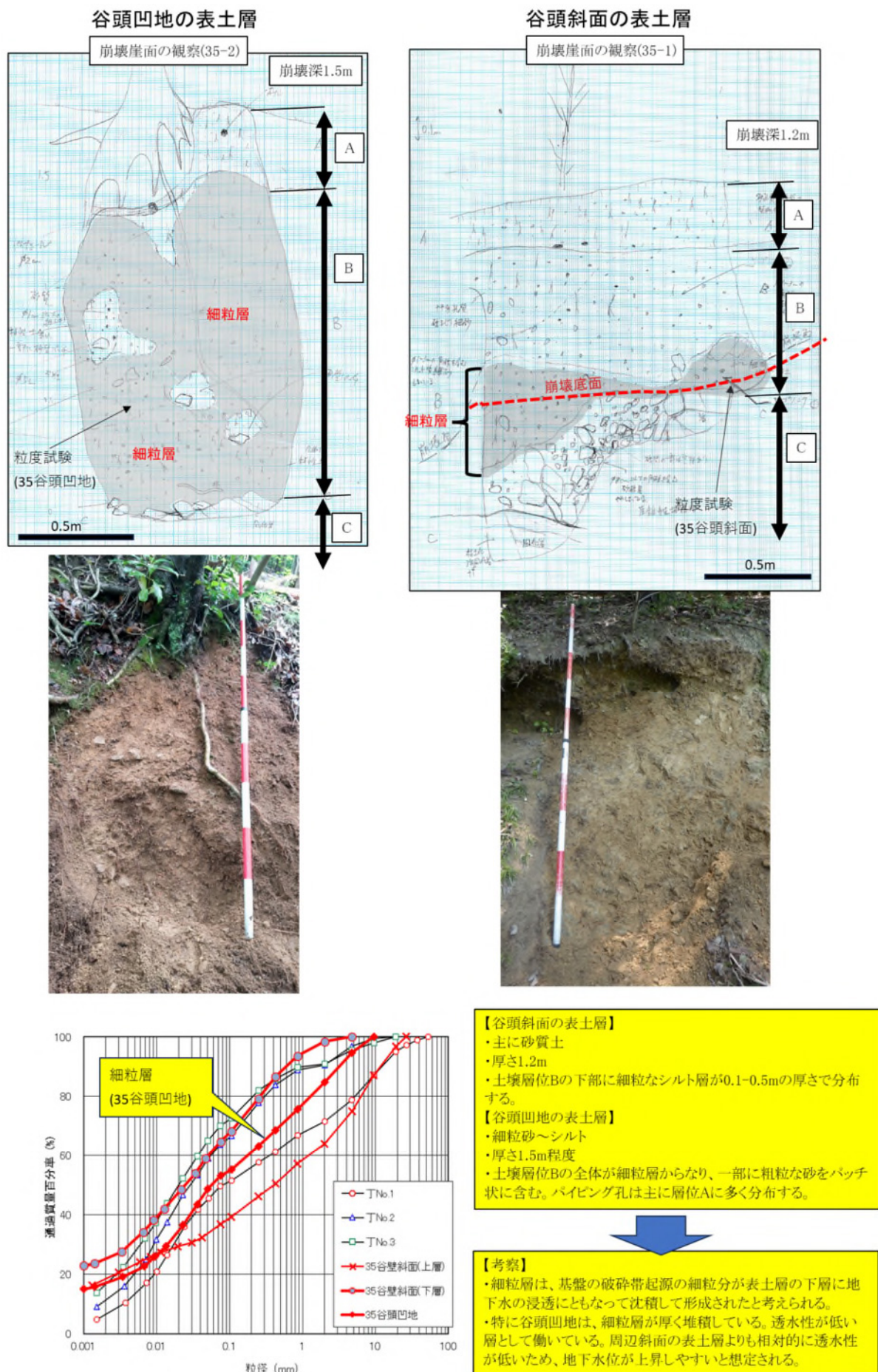


図 3.2.6 表土層の観察結果 (No. 35) (土壌層位 A~C は既往文献²⁶⁾による)

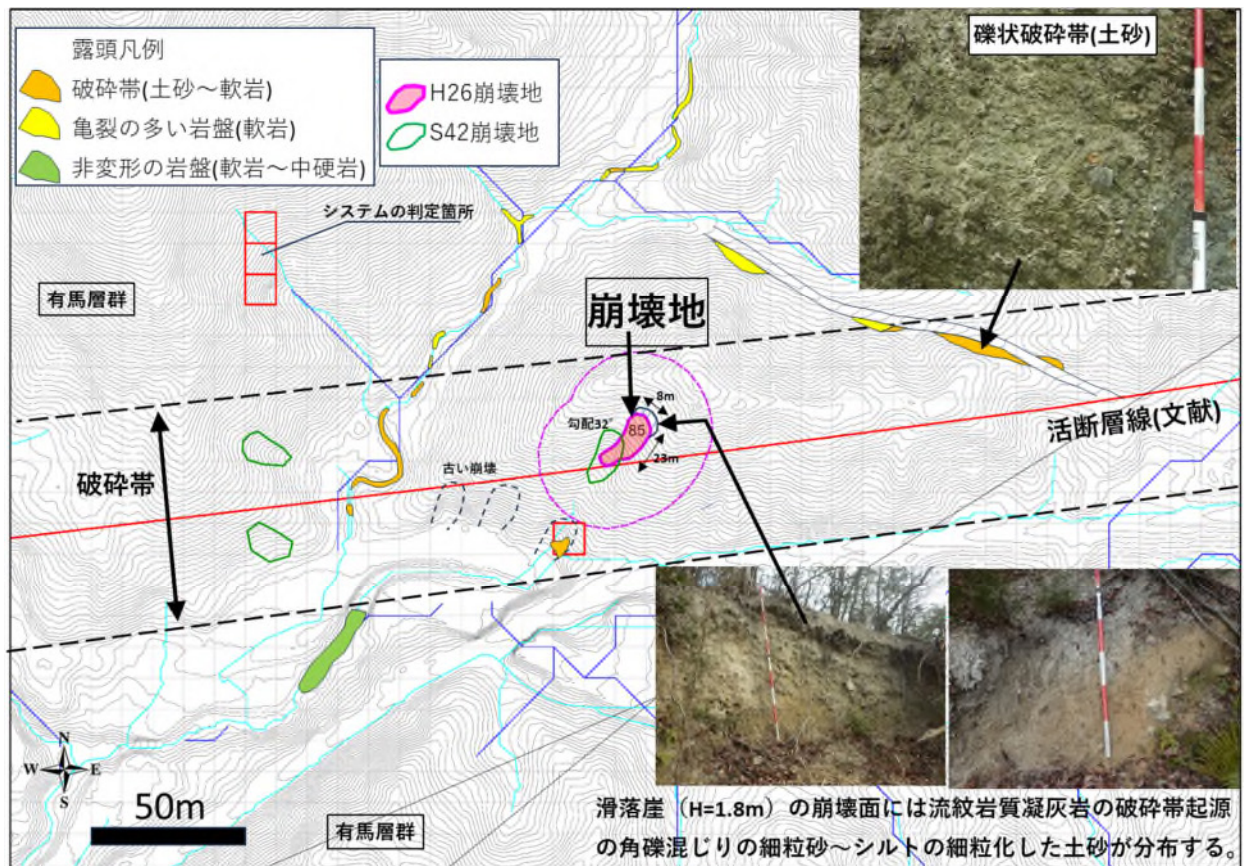


図 3.2.7 崩壊地の現地調査結果 (No. 85)

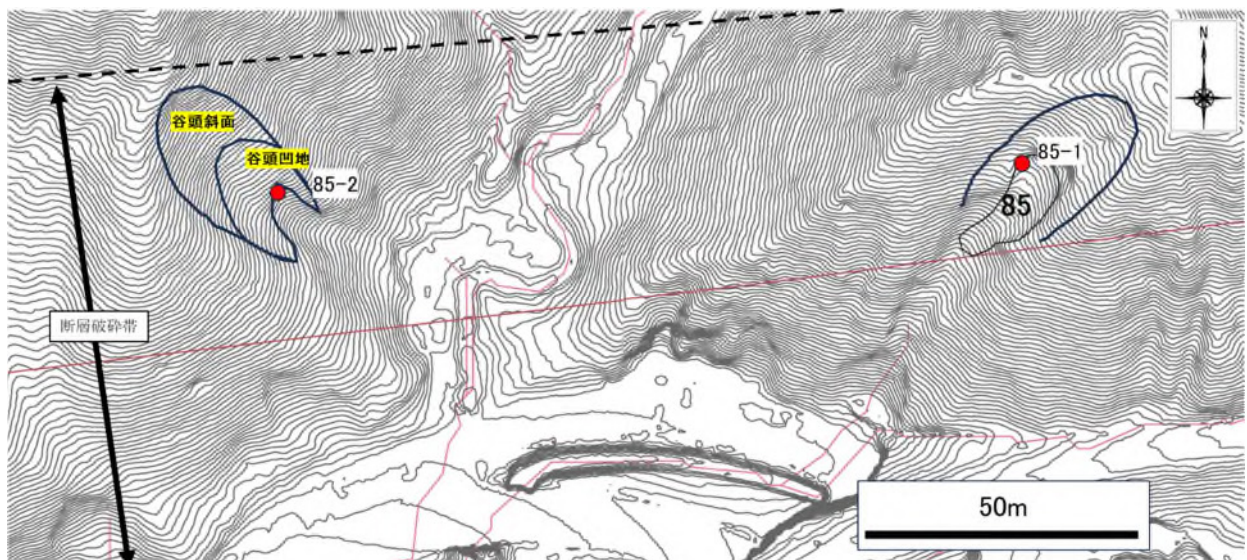
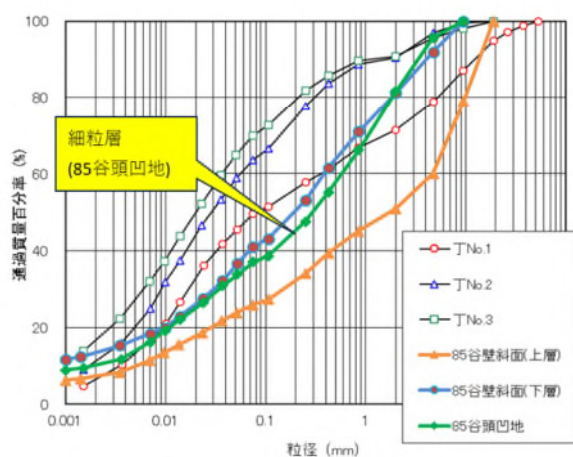


図 3.2.8 表土層の観察位置図 (No. 85)



【谷頭斜面】

- ・主に砂質土
- ・厚さ1.5m
- ・土壌層位Bの下部に細粒なシルト層が0.1-0.2mの厚さで分布する。

【谷頭凹地】

- ・細粒砂～シルト
- ・厚さ1.2m程度
- ・土壌層位Bの全体が細粒層からなり、一部に粗粒な砂をパッチ状に含む。パイピング孔は主に層位Aに多く分布する。

【考察】

- ・細粒層は、基盤の破砕帯起源の細粒分が表土層の下層に地下水の浸透にもなつて沈積して形成されたと考えられる。
- ・特に谷頭凹地は、細粒層が厚く堆積している。透水性が低い層として働いている。周辺斜面の表土層よりも相対的に透水性が低いため、地下水位が上昇しやすいと想定される。

図 3.2.9 表土層の観察結果 (No. 85) (土壌層位 A~C は既往文献²⁶⁾による)

この細粒層は、基盤の破碎帯起源の細粒分が表土層の下層に地下水の浸透にともなって沈積して形成されたと考えられる。特に谷頭凹地では、細粒層が厚く堆積しており、細粒層は透水性が低い層として働いている。すなわち、周辺斜面の表土層よりも相対的に透水性が低いため、地下水位が上昇しやすいと想定される。

2) 断層沿いにおける表層崩壊メカニズムの考察

断層沿いでは、基盤が破碎されており風化しやすいことから、表土層が周辺の山腹斜面よりも厚いと推定される。このうち、0次谷沿いは、周辺から水が集まる場所であるため、地下水位が上昇しやすい地形である。更に、0次谷沿いでは、基盤の破碎帯起源の細粒分が、地下水の浸透にともなって沈積していると考えられる。特に集水地形の端部である谷頭凹地では、細粒分が集積して厚く堆積している。このため、谷頭凹地では透水性が相対的に低い影響により、降雨時に地下水位が上昇しやすく、斜面が不安定化・崩壊すると推定される（図 3.2.10）。

なお、この崩壊メカニズムは神戸市域では花崗岩および有馬層群において考察されるものである。その他の神戸層群や大阪層群では断層が影響したと考えられる崩壊は認められなかった。これは、神戸層群や大阪層群などの堆積軟岩では、数 10m 以上の断層破碎帯が形成され難いことが原因していると考えられる。

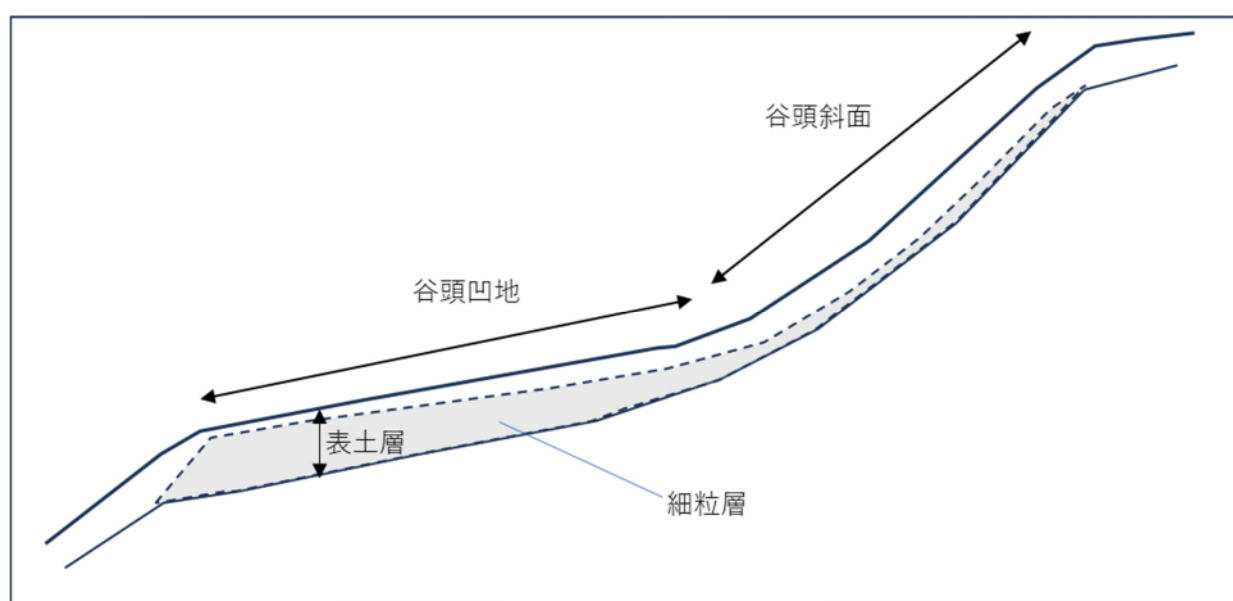


図 3.2.10 断層沿いにおける表層崩壊のメカニズムの概念図

なお、断層と 0 次谷（崩壊地）の位置関係により分類したケースごとに、表層崩壊のメカニズムを図 3.2.11 に示した。各分類においても、崩壊のメカニズムは上記と同様であると推定される。

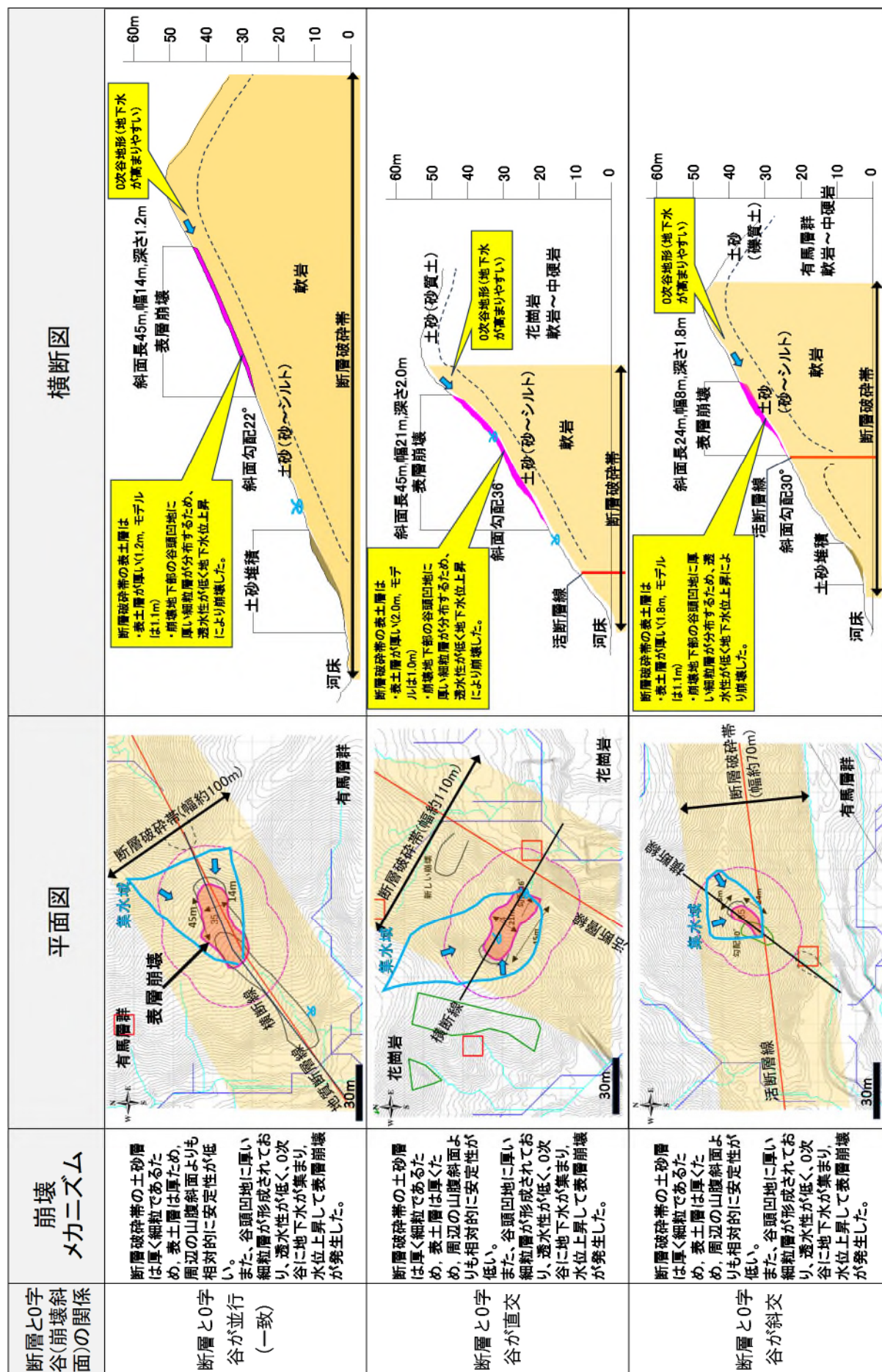


図 3.2.11 断層沿いにおける表層崩壊のメカニズム

3. 3 モデルの改良方針

前述した断層沿いの崩壊メカニズムの考察に基づいて、地盤の表土層厚および透水係数についてモデルの改良方針を検討した。

(1) 表土層厚

現地調査により、崩壊地の崩壊深さを計測した結果を図 3.3.1 に示す。ここでは、断層沿いの崩壊として判断される花崗岩、有馬層群における表土層厚—斜面勾配の関係式にプロットした。その結果、花崗岩は斜面勾配 $35^{\circ} \sim 45^{\circ}$ において神戸市域の谷壁斜面よりも $0.3 \sim 1.0\text{m}$ 程度厚い傾向が確認された。また、有馬層群においては、神戸市域の谷壁斜面よりも $0.1 \sim 0.7\text{m}$ 程度厚い傾向が確認された。既往論文における断層沿いの谷壁斜面についても同様に表土層厚が厚くなる傾向が確認されており、今回の調査結果と整合している。以上の結果から、花崗岩および有馬層群分布域において、断層沿いの斜面における表土層厚式を、プロットデータの中央値付近で検討した結果、図 3.3.1 に示す黒線を提案した。

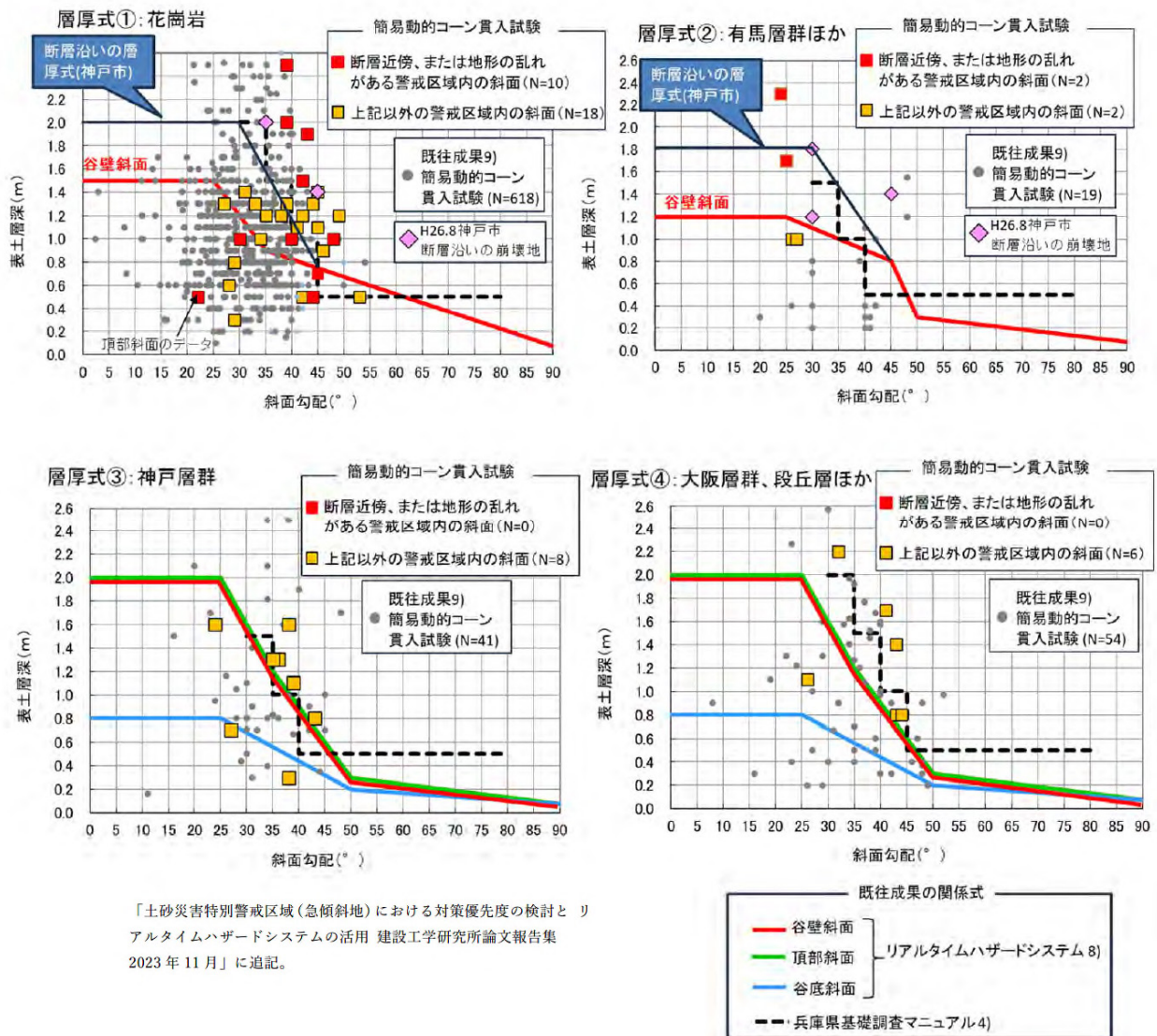


図 3.3.1 神戸市域における一般的な山腹斜面と断層沿いの斜面における表土層厚式

既往文献²⁴⁾に追記

(2) 透水係数

崩壊メカニズムの検討により、断層沿いの0次谷上流の谷頭凹地と谷頭斜面が分布する地形において表層崩壊が発生しており、特に谷頭凹地にて透水係数が低いことが表層崩壊の原因と考察している。このため、断層沿いの0次谷上流の谷頭凹地と谷頭斜面が明瞭である地形を抽出することが必要となる。谷頭凹地と谷頭斜面は、図3.3.2に示すような典型的な横断形状であるとされている。ここでは、この地形について各崩壊地の斜面にて横断形状を図3.3.3に示す箇所の地形を机上整理した。その結果は表3.3.1に示したとおり、谷頭斜面の勾配は一部を除いてほとんどが45°未満となる。また、谷頭斜面と谷頭凹地の勾配差は6~25°であり、両斜面間には明瞭な遷急線が分布することを示している。

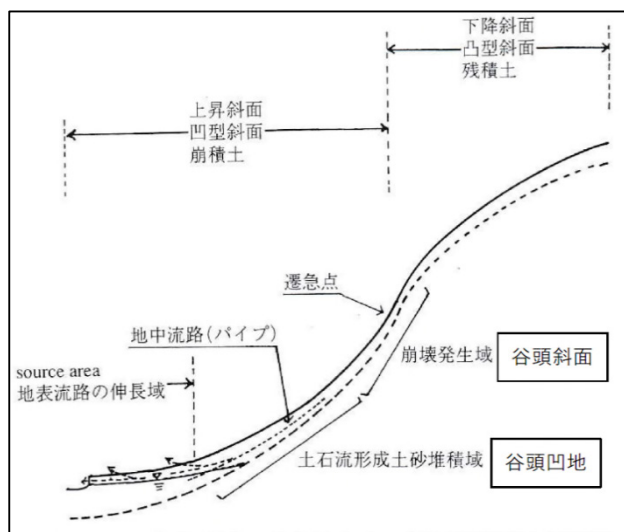


図 3.3.2 0次谷流域の谷頭斜面と谷頭凹地の横断形状

既往文献²⁷⁾に追記

表 3.3.1 崩壊地における横断地形の整理

崩壊地番号	谷頭斜面勾配°	勾配差°	長さm
4	44	23	44.7
33	31	7	54.2
35	26	6	48.4
37	36	25	15.4
70	37	13	41.6
85	38	15	25.3
95	36	10	34.2
98	39	16	26.1
117	43	9	48.2
120	45	9	43.7
130	40	15	34.1
131	56	24	35.6
45° 未満		6° ~25°	15~55m

①

②

③

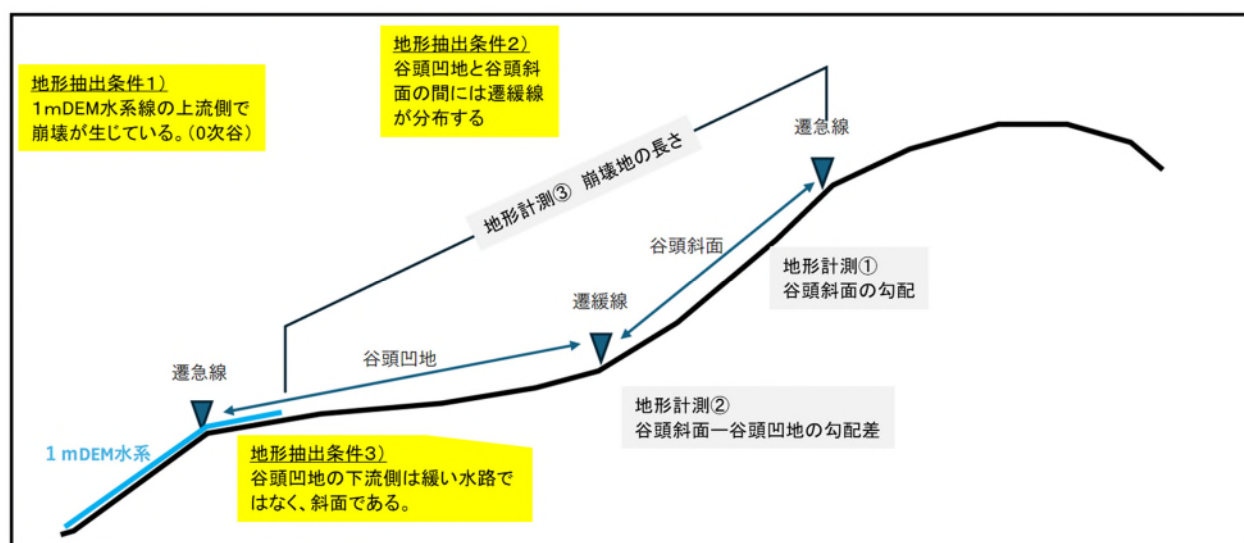


図 3.3.3 0次谷流域の横断地形の地形計測と地形抽出条件

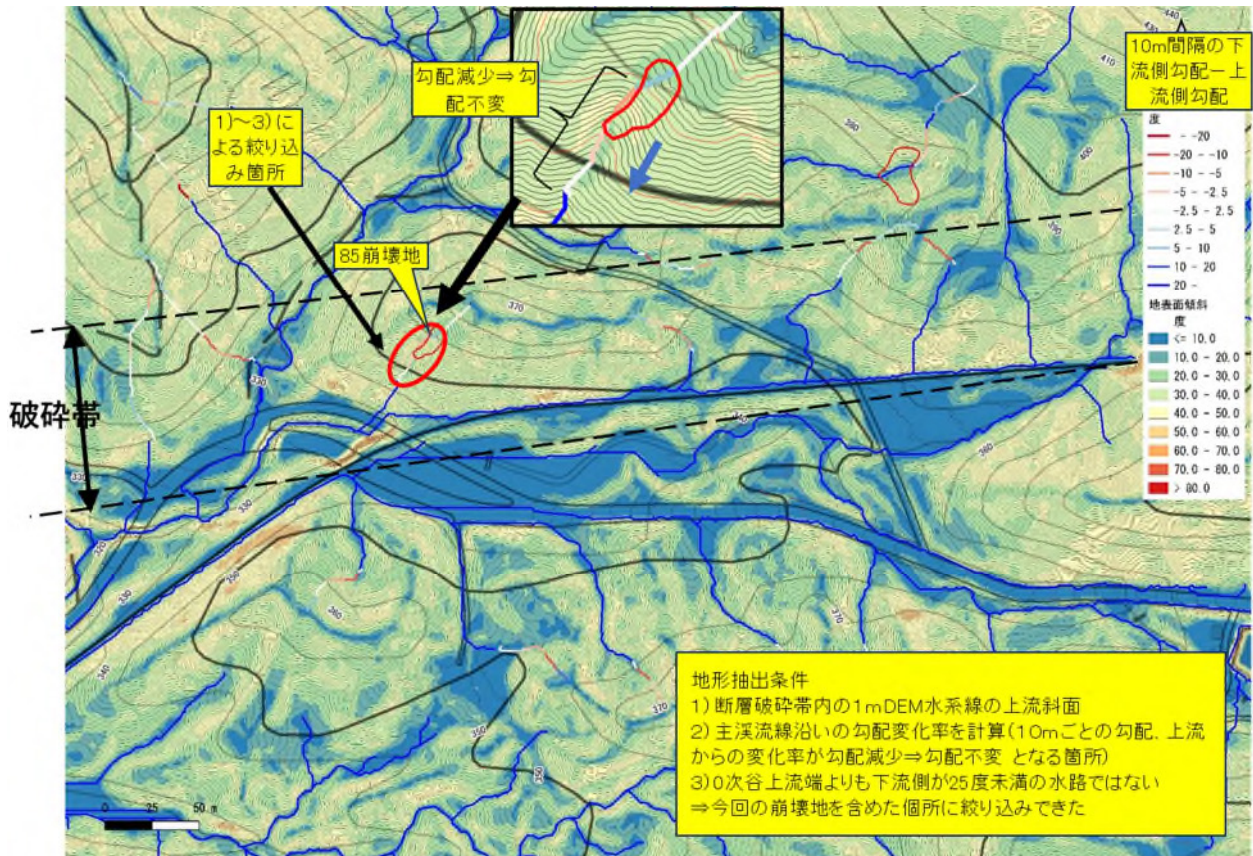


図 3.3.4 地形抽出結果（崩壊地 No. 85 周辺）

これらの特徴を踏まえて、図 3.3.3 に示すように、地形抽出条件 1) ～ 3) とした。

まず、前提条件として、地質は花崗岩または有馬層群が分布すること、及び谷壁斜面の地形区分であることとする。更に以下の条件で抽出を行った。

- 1) 1 mDEM 水系線の上流側で崩壊が生じている（0 次谷）。
⇒断層破碎帯内の 1 mDEM 水系線の上流斜面が断層破碎帯の幅（110m）の中に収まるものを抽出
- 2) 谷頭凹地と谷頭斜面の間には遷緩線が分布する。
⇒主溪流線沿いの勾配変化率を計算（10 m 毎の勾配、上流からの変化率が勾配減少⇒勾配不変となる箇所）
- 3) 谷頭凹地の下流側は緩い水路ではなく、斜面である。
⇒0 次谷上流端から下流側が勾配 25 度未満の水路ではない

上記の条件により地形区分を抽出した結果、図 3.3.4 に示すように、不安定化すると想定される地形のみを抽出することができた。今後、抽出された地形において、透水係数を低下させる設定により平成 26 年 8 月豪雨の試算を行い、再現性が高い透水係数を求めることとする。

4. 検証結果の全県への展開方針(案)の検討

3 章で検討した改良方法について、既往整備市町の本運用モデル全体及び未整備市町の試行モデルに対する今後の展開方針を検討した。主な検討流れとしては、1) 神戸市にて断層・崖錐地形による崩壊地の地形的・物性的な特徴を整理する。2) 代表的な市町にて断層・崖錐地形による崩壊地の地形的・物性的な特徴を整理する。そのうえで整備

済み市町のモデル改良を行うものである。

また、断層・崖錐地形による影響で崩壊しやすい斜面を予測モデルへの適用する際の留意点は以下の通り整理される。

- 1) 土砂災害警戒区域や道路等の保全対象が位置するエリアを中心とした近隣範囲までを設定範囲とする。(保全対象から距離のある、警戒避難に関係のない山地内などは、設定対象外とする。)
- 2) 本検討にて整理された、断層・崖錐地形による影響で崩壊しやすい斜面条件の箇所を、人が文献による断層・崖錐地形の位置を考慮しながら地形判読を行い抽出、設定する。
- 3) 各市町において、地質毎に、断層・崖錐地形の影響で崩壊しやすい斜面を整理し、表土層厚や地盤定数を設定する。

なお、3) は各市町では地形地質が異なるため、断層・崖錐地形の影響のある斜面の位置や物性的な特徴も異なるほか、断層・崖錐地形の密度及び分布の違いによって、検討の有効性が異なると考えられる。このため、表 4.1 に示すように各市町の特徴から、検討方法以下の2つに分類した。また、図 4.1 に調査予定箇所の位置図を示す。

検討方法 A・・・机上整理・現地踏査により断層・崖錐地形の影響で崩壊しやすい斜面を整理し、地盤定数の設定を行う。そのうえで、崩壊の恐れのある斜面を設定する。

B・・・机上整理により断層・崖錐地形と崩壊地の関係を整理する。影響があると判断される場合は、近隣の市町を参考に設定する。

表 4.1 の検討方法について、断層または崖錐地形の密度のどちらかが「特に多」かつ崩壊地が「多」の場合は検討方法 A、それ以外は検討方法 B とする。また、同地質にて、A,B を複数挙げている場合は、既往成果を精査して1箇所に絞り込むこととする。次年度以降は、この数量案に従って検討することが適当と考えられる。

表 4.1 断層・崖錐地形の影響のある斜面の検討方法案

	市町	断層の密度	崖錐地形の密度	検証降雨	崩壊地数	主要な地質分布による調査候補地	検討方法
1	神戸市	特に多	中	H26	多	花崗岩類、古第三紀～白亜紀酸性火山岩類	検討済
2	豊岡市	少	特に多	H16	多	第三紀中新世堆積岩	A
3	香美町	少	特に多	H2	多	第三紀鮮新世～第四紀火山	A
4	新温泉町	少	特に多	H2	多	第三紀鮮新世～第四紀火山	A
5	上郡町	中	少	S49	中		B
6	三田市	少	少	S40	少		B
7	丹波市	中	多	H16,26	多	中生代堆積岩	A
8	丹波篠山市	中	中	H16	中	中生代堆積岩	B
9	西宮・芦屋・宝塚市	特に多	中	S42	中		B
10	朝来市	少	中	H16	中	中・古生代岩類	B
11	養父市	中	多	H16	多	中・古生代岩類	A
12	猪名川町	少	少	H30	少		B

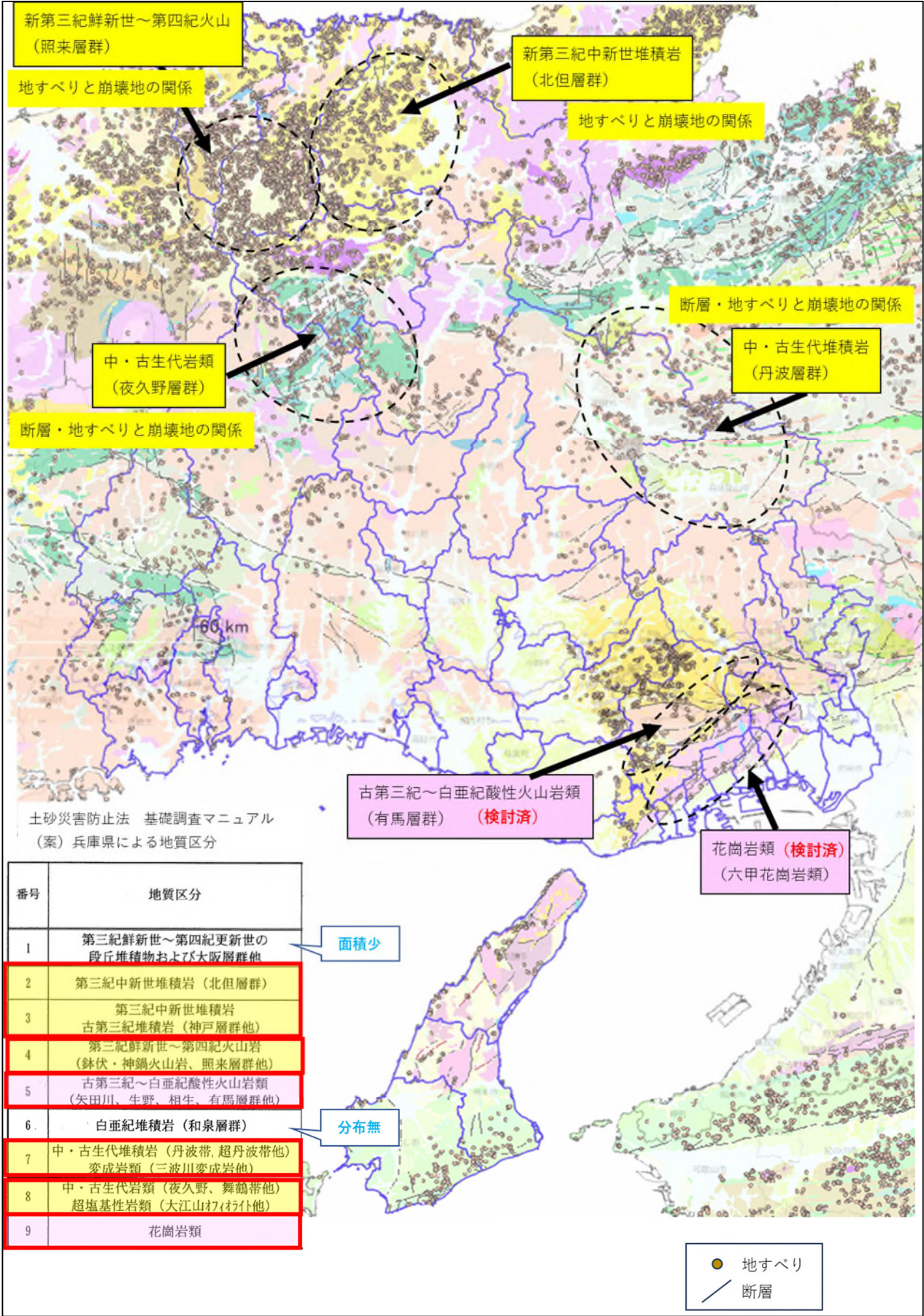


図 4.1 断層・崖錐地形 (一部の地すべり) と崩壊地の関係の調査予定箇所 (背景図は産業技術総合研究所 HP より)

5. まとめと今後の課題

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。この豪雨における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ため、このモデル改良の検討を行った。その結果、断層沿いの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することができた。今後、再現計算による検証を行い、モデル改良を行う方針である。また、崖錐性崩壊については、事例の多い市町にて検証を行い、モデルの改良方針を検討したうえで、断層沿いの崩壊とともにシステム改良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 5 年の土砂災害、令和 6 年 3 月
- 2) 気象庁：梅雨前線及び台風第 2 号による大雨（令和 5 年 6 月 1 日～6 月 3 日）、災害をもたらした気象事例、令和 5 年 6 月 23 日
- 3) 気象庁：梅雨前線による大雨（令和 5 年 6 月 28 日～7 月 16 日）、災害をもたらした気象事例、令和 5 年 8 月 8 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) 岡田真介・石山達也・岡田篤正・宮内崇裕、1:25,000 活断層図「大江山」、国土地理院、2018.
- 26) 只木良也：森林環境科学、朝倉書店、1996.
- 27) 塚本良則：森林・水・土の保全－湿潤変動帯の水文地形学－、朝倉書店、1998.

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
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

根本 信行	大日本ダイヤコンサルタント株式会社、技術士（建設部門）、砂防工学
濱本 拓志	大日本ダイヤコンサルタント株式会社、博士（理学）、応用地質学