

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)

Some Problems and Measures appeared during the Construction of the Real-time Hazard System for Slope Disasters at a Heavy Rainfall (12)

沖 村 孝

Takashi Okimura

鳥 居 宣 之

Nobuyuki Torii

中 川 渉

Wataru Nakagawa

原 口 勝 則

Katsunori Haraguchi

鏡 原 聖 史

Satoshi Kagamihara

笠 原 拓 造

Takuzo Kasahara

1. はじめに

令和 2 年は、7 月豪雨などにより、1,319 件の土砂災害が発生し、昭和 57 年の統計開始以降 13 番目に多い件数を記録した。これは統計開始以降の平均発生件数（1,105 件）の約 1.2 倍にあたり、その被害は死者・行方不明者 21 名、負傷者 8 名、人家被害 252 戸に上っている¹⁾。

中でも、7 月豪雨では、偏西風の蛇行の持続により本州付近に停滞した梅雨前線に沿って西から流れ込んだ水蒸気と日本の南から張り出した太平洋高気圧の縁辺を回る南からの水蒸気が大量に集まりやすい状態が継続し、かつ、気圧の谷の影響で上昇流が強化されたことにより、西日本から東日本にかけて広い範囲で記録的な大雨となった。7 月 3 日から 14 日までの総降水量が九州を中心に 7 月の月降水量平年値の 3 倍を超える地点や、年降水量平年値の半分以上となる地点が確認され、全国 964箇所のアメダス地点における 7 月上旬の降水量の総和は、これまで最多であった「平成 30 年 7 月豪雨」の記録を超え、最多（総和：208,308mm、1 地点あたり：216.1mm）を記録した。また、7 月上旬の 1 時間降水量 50mm 以上の非常に激しい雨の発生回数について、これまで最多であった「令和元年東日本台風」の記録を超え、最多回数（82 回）を記録した。この豪雨に伴う土砂災害は、記録の残る自然災害の中で、土砂災害の発生が確認された都道府県数（37 府県）は 1 番多く、発生件数（961 件）においても 3 番目となる過去最大クラスの広災害であった¹⁾。気象庁は、7 月 3 日から 7 月 31 日までの一連の大雨について、災害の経験や教訓を後世に伝承することなどを目的として「令和 2 年 7 月豪雨」と名付けた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壤雨量指数や降雨強度のパラメータが用いられ、これら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地下水位を計算し、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³⁾。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カ年で「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⁴⁾⁵⁾。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⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾¹⁰⁾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」¹¹⁾や留意事項¹²⁾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¹³⁾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¹⁴⁾、土石流の発生機構を考慮した新たな判定方法¹⁵⁾、長雨時に多発する小規模崩壊への対応方法など¹⁶⁾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、令和2年(2020)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結果と他地域へ適用する場合の課題や留意事項について報告する。

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（急傾斜）への反映方法の検討
- 13) 土砂災害警戒区（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。

- 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深い谷（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、とくしや地における粘着力の調整
- 3) 碳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。

2. 8 2017年報告

2017年報告¹⁴⁾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、安全率については5mメッシュ毎に表土層厚や地盤物性値は市街内の小規模斜面固有の条件を検討する方法を採用することとした。

2. 9 2018年報告

2018年報告¹⁵⁾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¹⁶⁾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。

2. 1.1 2020年報告

2020年報告¹⁷⁾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¹⁵⁾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。

3. 少ない降雨量で生じる空振りの課題と対応

3. 1 少ない降雨量で生じる空振りの発生状況

令和2年(2020)7月豪雨では兵庫県においても雨が多く、特に神戸市では1カ月の間に15日も雨の降る日があった(図3.1)。図3.2にアメダス神戸の時間雨量と累加雨量の時系列グラフを示す。降雨は24時間無降雨の中断期間で区切ると6回あり、各降雨の総降水量は約80~150mm、最大時間雨量は約20~50mm程度で、ひとつひとつの雨の規模は大きくなかったが、土砂災害警戒情報は3回発表された(図3.3)。

システムでは、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」と略す)を基本に、土砂災害警戒区(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、それぞれ実況と1、2、3時間先の3種類あるが、本報告では実況の10mセル単位の判定を対象に整理する。この7月豪雨における神戸市システムの判定状況を表3.1に示す。10mセルの判定は、6回の降雨で43セルから2,058セルであった。また、期間中に土砂災害の発生(道路や人家の擁壁の崩壊等を除く)はなかったため、これらの判定は全て空振りであった。

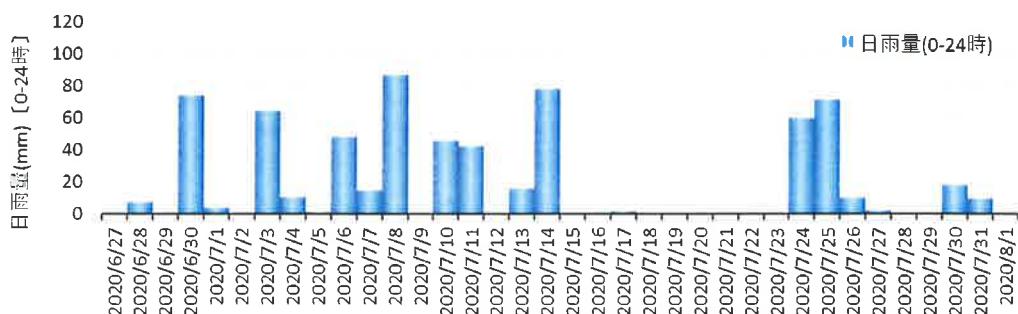


図3.1 令和2年(2020)7月の日雨量(気象庁アメダス神戸)

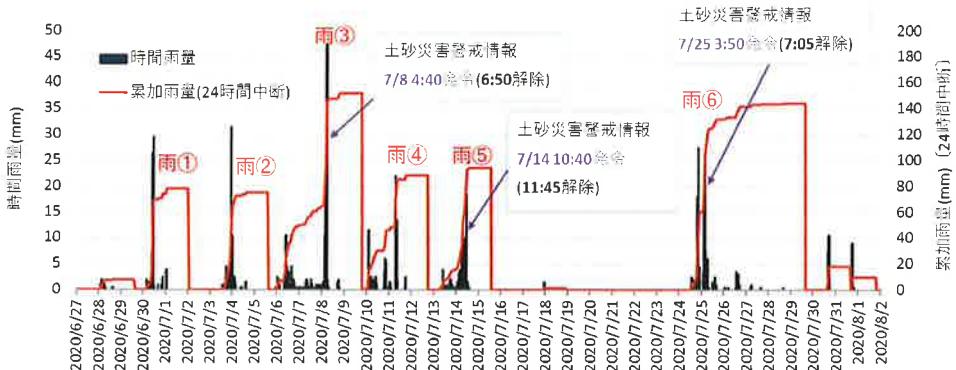


図 3.2 令和 2 年(2020)7 月の時間雨量と累加雨量(気象庁アメダス神戸)



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)

表 3.1 令和 2 年(2020)7 月豪雨のシステム判定状況(神戸市システム)

降雨番号 一連の降雨	降雨期間	降雨状況(アメダス神戸)		気象情報			システム判定 崩壊判定(実況) 10mセル数	備考
		総降水量 (mm)	最大時間雨量 (mm/h)	大雨 注意報	大雨 警報	土砂災害 警戒情報		
①	6/30-7/1	78.0	29.5	発表有	発表有		74	降雨ピーク1回
②	7/3-7/4	75.0	31.5	発表有			43	降雨ピーク1回
③	7/6-7/8	151.5	47.5	発表有	発表有	発表有	499	降雨ピーク2回(中休み40時間)
④	7/10-7/11	88.5	22.0	発表有	発表有		58	小ピーク複数回
⑤	7/13-7/15	94.0	18.5	発表有	発表有	発表有	414	後方集中型
⑥	7/24-7/25	144.0	27.5	発表有	発表有	発表有	2,058	降雨ピーク2回(中休み5時間)

7月豪雨の6回の降雨では毎回判定があったが、期間中に同じ10mセルが判定となった重複分を除くと正味の判定セルは2,238セルであった。その内、複数の降雨で判定となったセルは、2回が349セル、3回が160セル、4回が38セル、5回が25セル、6回が5セルであった。この2,238セルは神戸市全体からすると谷壁斜面にあたる1,834,218セル(約183km²)に対し0.12%、1km²あたり12セルと大きい数ではないが、今回の7月豪雨において数日おきに繰り返し判定されたことで少ない降雨量で生じる空振りとして顕在化した。これらの判定はシステム画面上で目立つことや雨のたびに同じセルが判定される等、システムの信頼性低下につながり、今後のシステムの普及促進への影響が懸念された。6回の降雨の内、土砂災害警戒情報の発表がなかった3降雨(6/30~7/1、7/3~7/4、7/10~7/11)において判定のあった130セルについて、どのような場所に位置しているのか確認した結果、以下のようなであった。

- ・130 セルはすべて谷壁斜面に位置する
- ・周囲の斜面に比べて表土層が薄い谷地形に位置する：82 セル（図 3.4）
- ・上記の谷地形以外に位置する：48 セル（図 3.5）

現行モデルでは、谷壁斜面内の浅い谷における空振りへの対策として、周囲の斜面に比べて表土層が薄い谷地形を抽出し、表土層厚を 0.15m 減厚する処理を行っている²³⁾（以下、減厚区間と呼ぶ）。減厚区間の抽出は、上端は集水面積で定義し、神戸市では神戸層群と大阪層群のエリアで 2,000m²、それ以外の地質のエリアでは 2,500m² としている。下端は谷壁斜面と谷底斜面の境界までとしている（図 3.6）。神戸市では 7 月豪雨において、この減厚区間で空振りとなつたセルが 83 セル確認された。また、減厚区間以外のエリア（これまで未対策のエリア）で空振りとなつたセルが 47 セル確認された。これらのセルも谷壁斜面内の浅い谷に位置するが、減厚区間よりも上流の谷頭部付近に位置する。減厚区間の横断形状が谷底の幅が狭い V 字型であるのに対し、谷幅は広く崖錐が堆積した U 字型の地形を呈する。

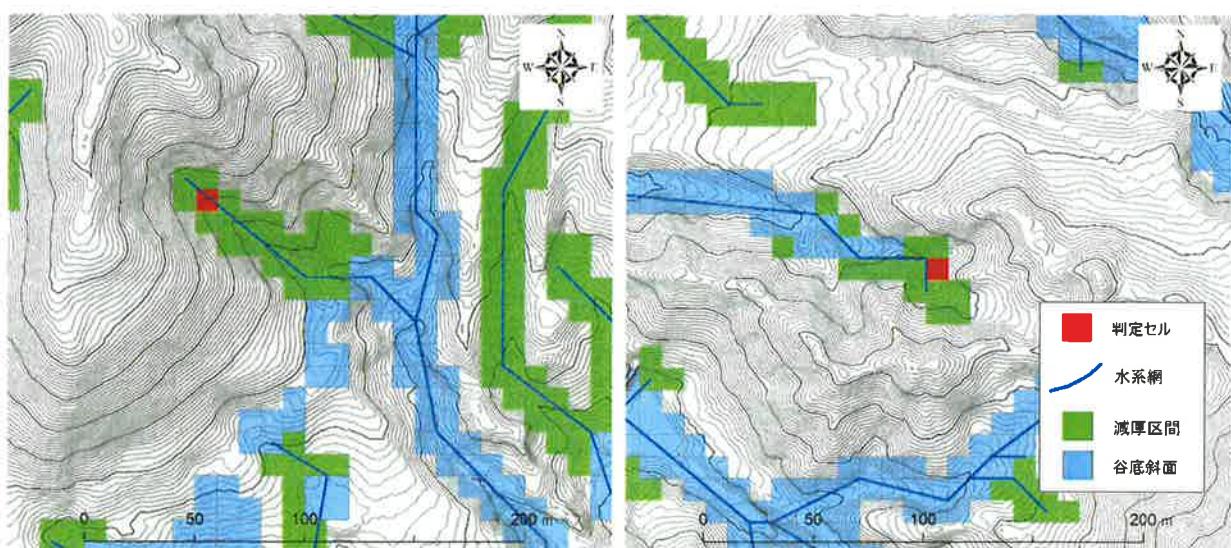


図 3.4 減厚区間で発生した空振り事例

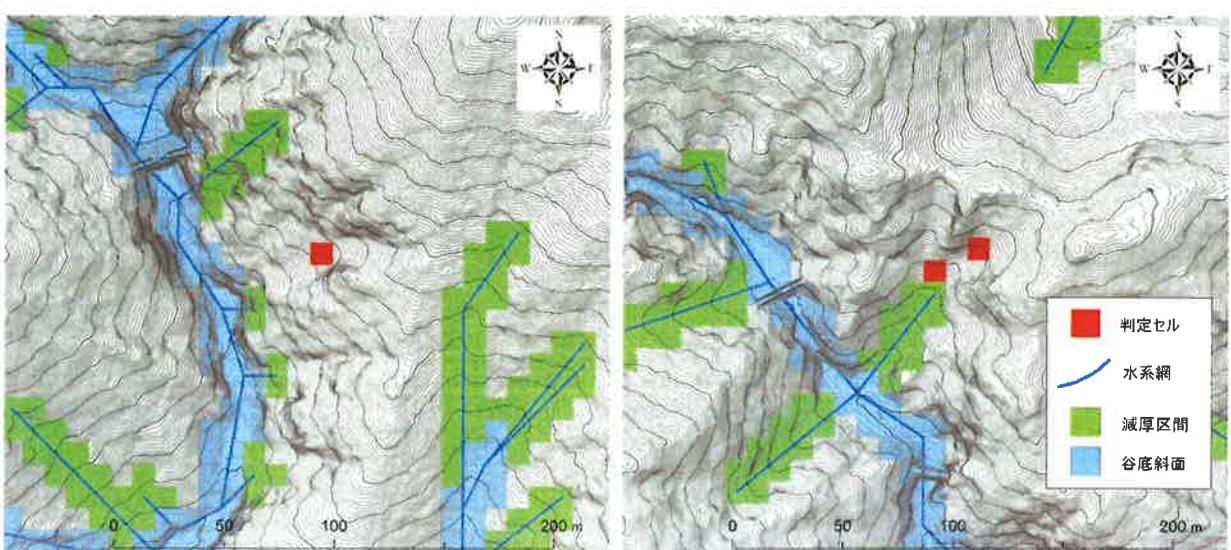


図 3.5 減厚区間以外で発生した空振り事例

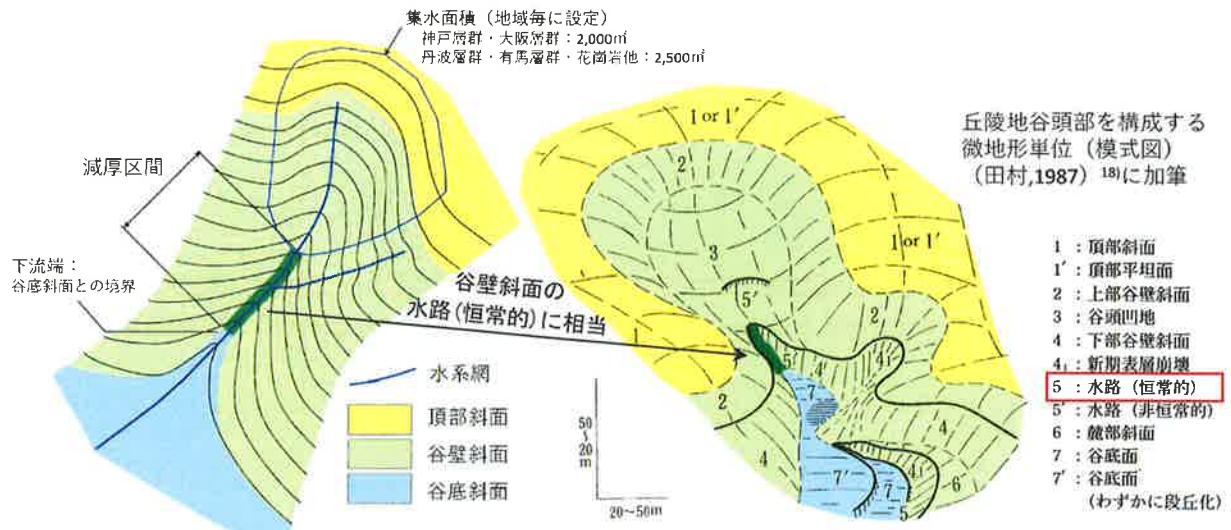


図 3.6 減厚区間の定義（模式図）

3. 2 少ない降雨量で生じる空振りの要因分析

(1) 対象降雨

少ない降雨量で生じる空振りについて、下記の理由から、平成 30 年（2018）7 月豪雨を対象に神戸市灘区の六甲山麓を検討対象地区として要因分析を行った（図 3.7）。

- ・令和 2 年の 6 回の降雨の波形と平成 30 年の降り始めから 1 回目の降雨ピークの波形が類似している（図 3.9）。また、令和 2 年と同様に平成 30 年でも少ない降雨量の段階で空振りが生じた（図 3.10）。
- ・令和 2 年では判定後に雨が降り止んでしまうが、平成 30 年では判定後に一旦小康状態となるもののその後再び降雨がある。少ない降雨量で生じる空振りへの対応（斜面安定解析における土の強度定数や表土層厚の調整、集水モデルにおける透水性の調整等）について検討を行ううえで、降雨が継続し地下水位や安全率の推移を把握できる平成 30 年の降雨を用いる方が望ましいと考えた（図 3.9）。
- ・令和 2 年の降雨は平成 30 年と比べて雨の規模が小さく局所的な降雨分布を示す。少ない降雨量で生じる空振りの原因抽出に際しては、異なる地形・地質条件が含まれるエリアで、雨の降り方（降雨波形や降雨量）にかたよりの少ない平成 30 年の降雨を用いる方が望ましいと考えた（図 3.8）。



図 3.7 検討対象地区（神戸市灘区エリア）

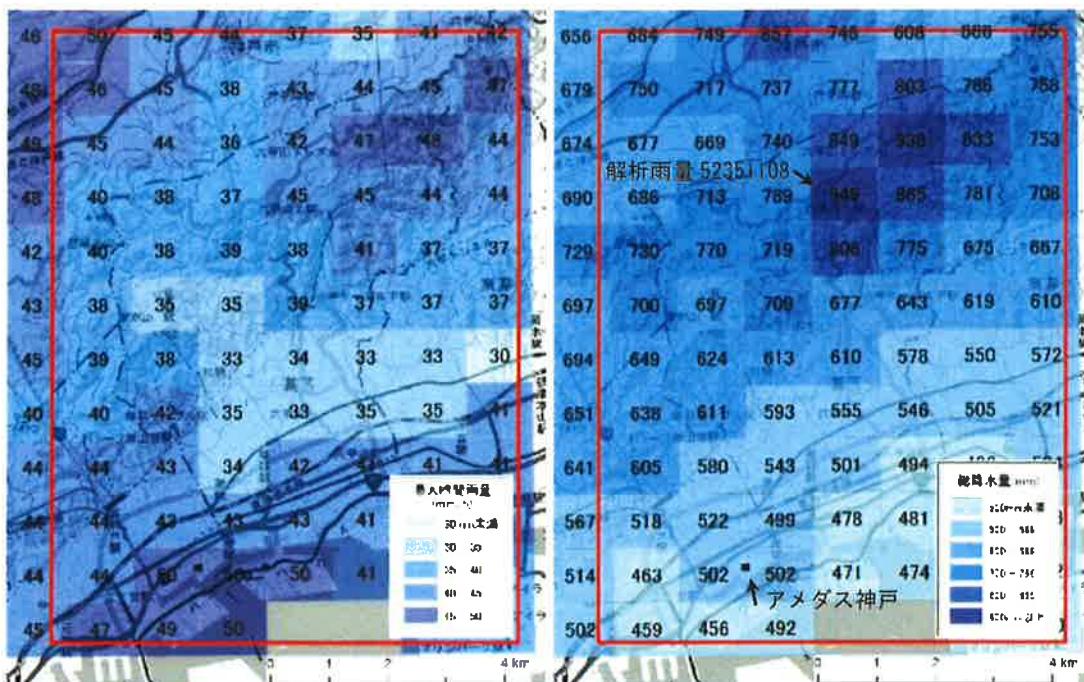


図 3.8 平成 30 年(2018)7 月豪雨の最大時間雨量(左)と総降水量(右)【気象庁 1km 解析雨量】

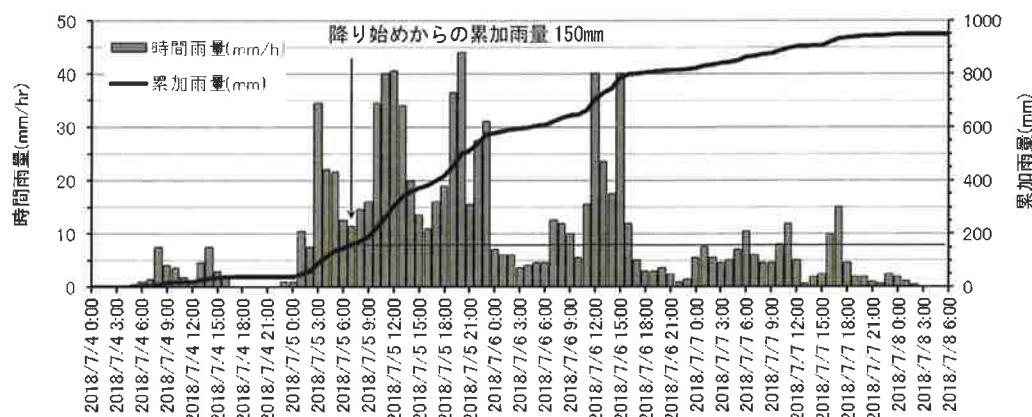


図 3.9 平成 30 年 7 月降雨のハイエトグラフ(気象庁解析雨量: 3 次メッシュコード: 52351108)

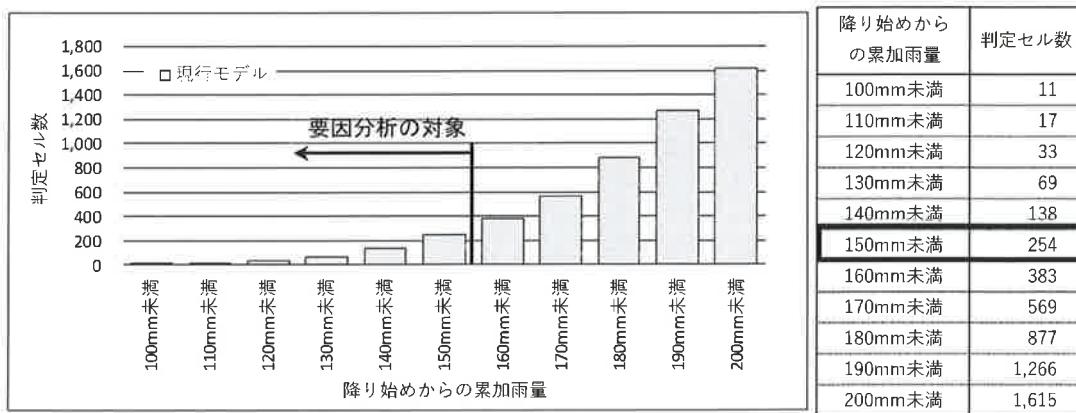


図 3.10 降雨始めからの累加雨量別の判定セル数(平成 30 年 7 月豪雨、神戸市灘区エリア)

要因分析は、令和 2 年 7 月豪雨のひと雨の総降雨量が 150mm 程度であったことから、降り始めからの累加雨量が 150mm となるまでに判定された 254 セルを対象とすることとした（図 3.10）。

図 3.10 は、平成 30 年 7 月豪雨における降り始めからの累加雨量別の判定セル数を整理したものであるが、判定セル数は降り始めからの累加雨量に応じて指數関数的に増加している。図 3.9 の降雨波形と比較すると、累加雨量 150mm の時点（5 日 7:00）は 1 つ目と 2 つ目のピークの谷間にあたり、1 つ目のピークから累加雨量が 200mm を超える 2 つ目のピークの間（5 日 3:00～9:00）は、雨は小康状態となっている。このことから、1 つ目のピークの降雨量が、その後の判定セル数の増加に影響しているものと推測される。

（2）少ない降雨量で生じる空振りの特徴

平成 30 年 7 月豪雨の降り始めからの累加雨量が 150mm となるまでに判定された 254 セルの対象エリアにおける分布状況を図 3.11、図 3.12 に示した。また表 3.2 に地質別の判定セル数を示す。前節の令和 2 年 7 月豪雨と同様に分布状況を整理すると下記のとおりである。

- a.254 セルはすべて谷壁斜面に位置する
- b.減厚区間に位置する：32 セル（内訳：神戸層群 16 セル・大阪層群 15 セル、花崗岩 1 セル）
- c.上記の減厚区間以外に位置する：222 セル

降り始めからの累加雨量が 150mm となるまでに判定されたセルの総数は、前節の令和 2 年 7 月豪雨の整理では 130 セル（神戸市全域）であったが、今回の平成 30 年 7 月豪雨では 254 セル（灘区エリア）と増加している。これは令和 2 年より平成 30 年の方が雨が大きく灘区エリア全体にまんべんなく雨が降ったためと考えられる。減厚区間に位置するセルは、令和 2 年の 82 セルに対し 32 セルと少なくなっているが、これは該当するほとんどのセルが神戸層群・大阪層群に位置し、灘区エリアにおける神戸層群・大阪層群の分布エリアが小さいためと考えられる（単位面積当たりのセル数は他の地質に比べて大きい）。減厚区間以外に位置するセルは、令和 2 年が 48 セル、平成 30 年が 222 セルであるが、これは総数と同様に灘区エリア全体にまんべんなく雨が降ったためと考えられる。これらを踏まえ、少ない降雨量で生じる空振りの分布特性は令和 2 年 7 月豪雨と平成 30 年 7 月豪雨とでは違いではなく同様の事象として扱えるものと判断した。

また、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。

表 3. 2 少ない降雨量で生じる空振りの地質別の分布状況

集計単位	地質区分	谷壁斜面		減厚区間		左記以外のエリア		合計	
		分布面積/分布割合 (km ²)	(%)	セル数 (個数)	分布割合 (個数/km ²)	セル数 (個数)	分布割合 (個数/km ²)	セル数 (個数)	分布割合 (個数/km ²)
令和2年7月降雨 〔神戸市全域〕	大阪層群	22.24	12	11	0.5	0	0.0	11	0.5
	神戸層群	46.88	26	49	1.0	1	0.0	50	1.1
	丹波層群	9.32	5	0	0.0	1	0.1	1	0.1
	有馬層群	48.04	26	21	0.4	5	0.1	26	0.5
	花崗岩	56.79	31	1	0.0	41	0.7	42	0.7
	合計	183.27	100	82	0.4	48	0.3	130	0.7
平成30年7月降雨 〔灘区エリア〕	大阪層群	0.80	2	16	20.0	2	2.5	18	22.5
	神戸層群	1.07	3	15	14.0	2	1.9	17	15.9
	丹波層群	1.65	5	0	0.0	4	2.4	4	2.4
	有馬層群	1.07	3	0	0.0	3	2.8	3	2.8
	花崗岩	30.22	87	1	0.0	211	7.0	212	7.0
	合計	34.81	100	32	0.9	222	6.4	254	7.3

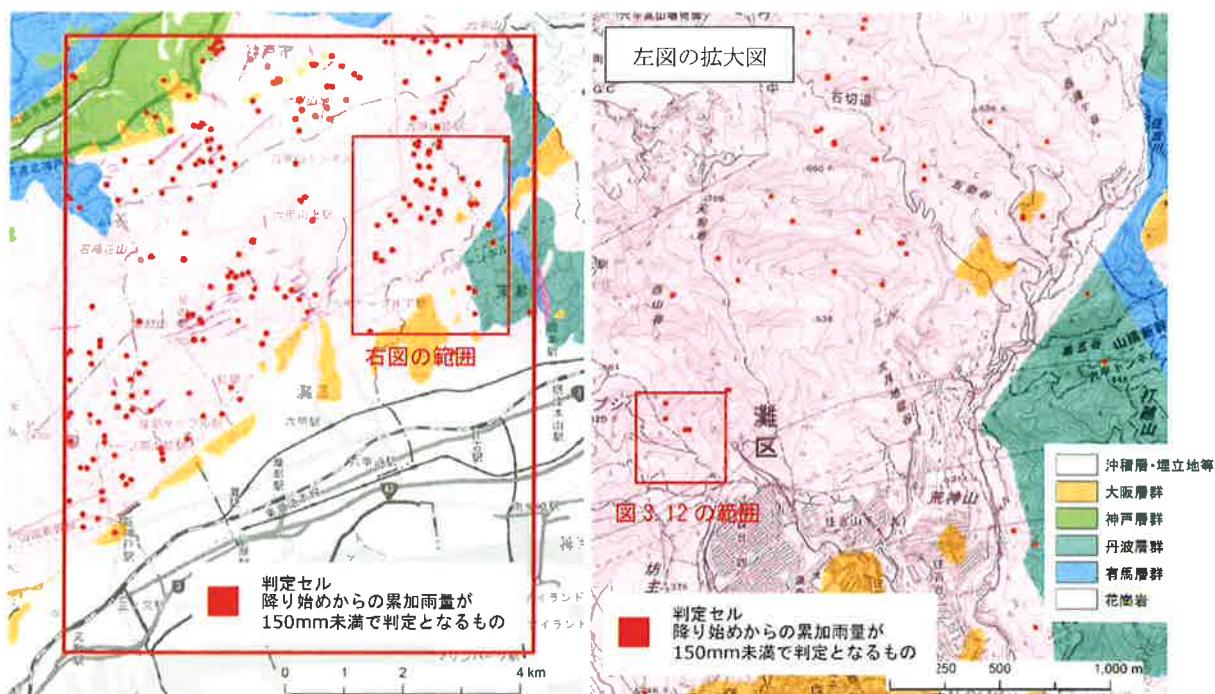


図 3.11 降り始めからの累加雨量が 150mm 未満の判定セルの分布（神戸市灘区エリア、平成 30 年 7 月豪雨）



図 3.12 降り始めからの累加雨量が 150mm 未満の判定セルの分布（神戸市灘区エリア、平成 30 年 7 月豪雨）

水系網は 10mDEM より作成（上端の集水面積は 2,500m² [花崗岩] の設定】／図中の横断測線は図 3.20 に後述

(3) 少ない降雨量で生じる空振りの要因

表土層厚の減厚処理の対策を行っているにもかかわらず空振りの生じた減厚区間とそれ以外のこれまで未対策であったエリアの2つに分けて空振りの要因を検討した。

1) 減厚区間の空振り

該当するセルは32セルあり、地質別の内訳をみると神戸層群が15セル、大阪層群が16セルであわせて31セル(97%)、花崗岩が1セル(3%)であった(表3.2)。このことから空振りの原因是神戸層群と大阪層群特有のものと考えられた。神戸層群・大阪層群では過去に層厚式の見直しが行われている¹⁹⁾。この見直しは昭和42年7月豪雨の再現計算における捕捉率の向上について検討されたもので、谷壁斜面の表土層厚を厚くするよう層厚式が変更された(図3.13左)。神戸層群・大阪層群の崩壊は、現地調査結果から図3.13右のように遷急線部崩壊型、背後凹地型、斜面中・下部崩壊型のタイプに分類され、風化の進行により表土層厚が厚くなり崩壊が発生する機構が想定された。ここで、崩壊発生場所に着目すると、いずれも風化層が厚く発達しやすい山腹斜面である。この層厚式の変更に伴い減厚区間の層厚も厚く変更されており、0.15mの減厚処理を行っても変更前の減厚していない層厚よりも厚い設定となっている(図3.14)。このことが少ない降雨量で空振りが生じやすくなっている原因と推定される。

この層厚式の変更は、本来、風化層が厚く発達しやすい山腹斜面に適用されるもので、減厚区間に適用するのは適切ではないと考えられる。

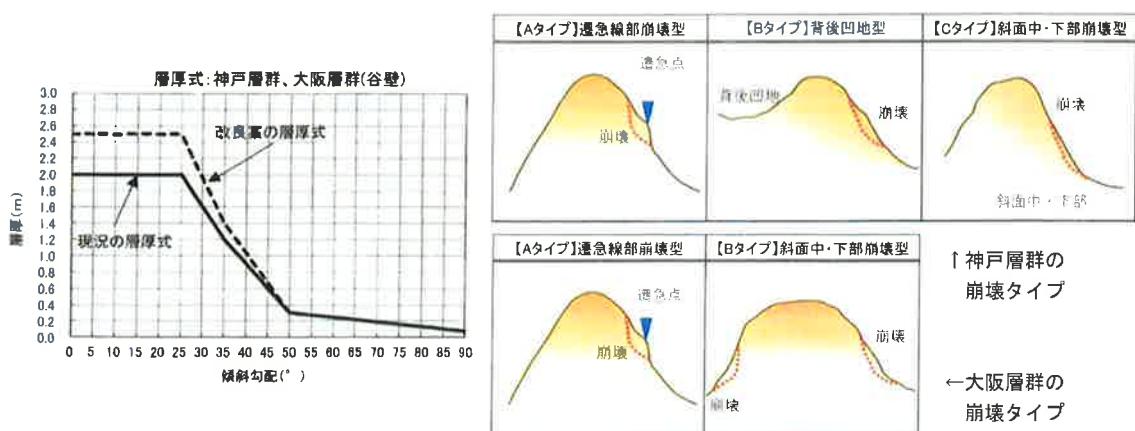


図3.13 神戸層群・大阪層群の層厚式の改良(左)と崩壊タイプ¹⁹⁾

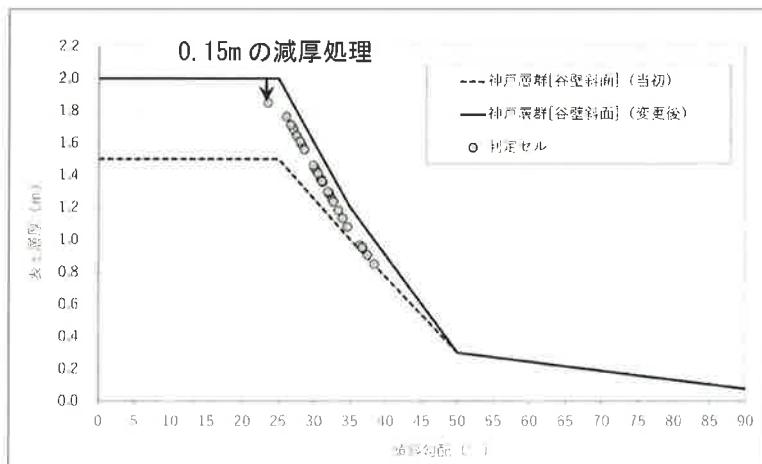


図3.14 神戸層群・大阪層群の改良前後の層厚式と累加雨量150mm未満で判定となるセルの傾斜と層厚の関係

2) 減厚区間以外の空振り

該当するセルは 222 セルある。これらのセルは谷壁斜面内の浅い谷に位置し、減厚区間よりも上流の谷頭部付近に位置している（図 3.15）。図 3.16 に 222 セルの集水面積別のセル数を整理した。1,000m²未満（最小値 700m²）のセルが 1 セルあるが、ほとんどのセルは 1,000m²から減厚区間の上端を定義している集水面積（神戸層群と大阪層群のエリアで 2,000m²、それ以外の地質のエリアでは 2,500m²）の間にあり、集水面積が大きくなるほどセル数は多いことがわかる。

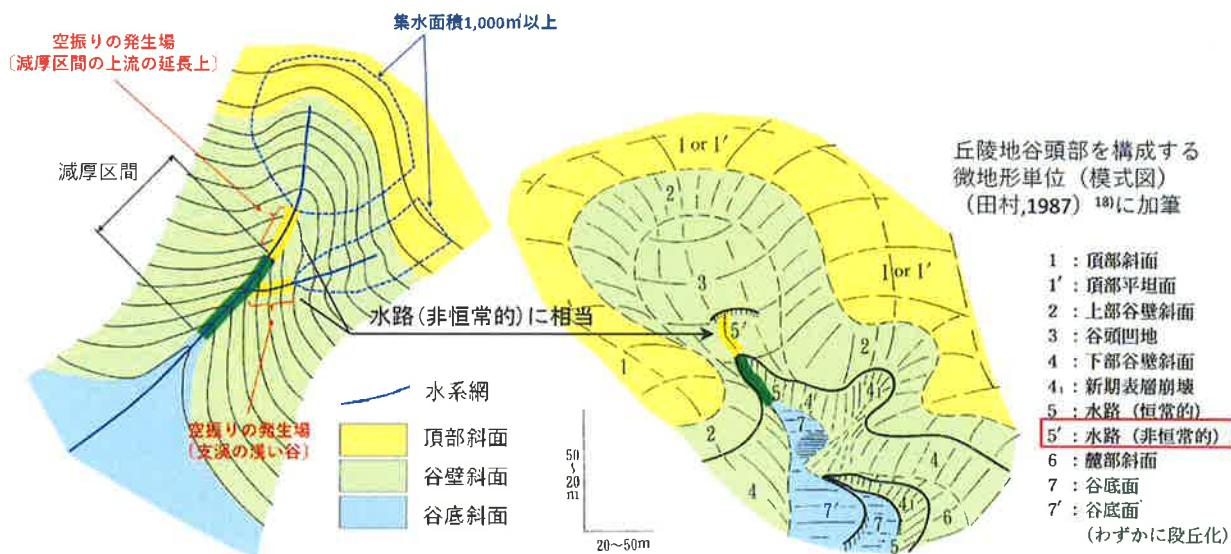


図 3.15 減厚区間以外の空振りの発生場（模式図）

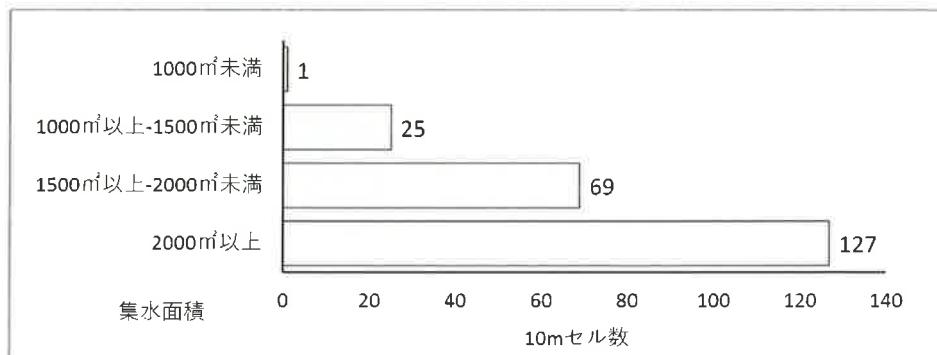


図 3.16 集水面積別のセル数
(降り始めからの累加雨量 150mm 未満の判定セル)

これまでに今回の様な谷壁斜面内の浅い谷で生じる空振りについて検討した事例は、減厚区間における表土層厚の減厚処理の他、谷壁斜面と谷底斜面境界部の表土層厚の不連続対策⁷⁾がある。これは谷底斜面と谷壁斜面の境界付近で判定セルが列状に発生する現象に対する検討で、原因として地形分類ごとに異なる推定式を用いて表土層厚を設定するため境界部で層厚の段差が生じ、局所的に地下水位がたまりやすくなったものと考えられた。この時は谷底斜面側の境界部の層厚を谷壁斜面との平均層厚となるように増厚する対策が検討されたが、既往崩壊地以外で判定されるセルが増加し空振率が増加すること、メッシュの大きさ 10m に対し表土層厚は 1m 前後であるため、現実的に不連続の影響は大き

くないと考えられたことから不採用となった。層厚の違いで生じる局所的な地下水変化については、このような層厚差を緩和する方法の他に透水性（透水係数や空隙率等）を変えて地下水位を調整する方法も考えられる。

図3.17に図3.12の図中に示す横断測線のセル地点における降雨と地下水位、安全率の推移を整理した。地下水位は、7月5日8:30に満水（表土層厚と同じ0.83m）となり同時刻に判定となった。この時の降り始めからの累加雨量は144mmであった。判定時刻の前の3:00から8:30の間、雨は一旦小康状態となるが、この間の地下水位は上昇し続けている。これは、上流側の周囲のセルから供給される地下水が下流側のセルへ流出する量よりも上回っているためである。

集水面積1,000~2,500m²の谷部の表土層が崖錐堆積物である場合は、一般的に空隙が大きく透水性は大きい。花崗岩等の基盤岩の風化部からなる場合でも、水が集まりやすく地下水の流れにさらされる頻度が高い場所であるため、細粒分が流出し、表土層中の空隙は周辺斜面に比べて大きいと推測される。今後、現地試験等の実証確認を要するが、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る）ことが、少ない降雨量で空振りが生じた要因となっているのかも知れない。

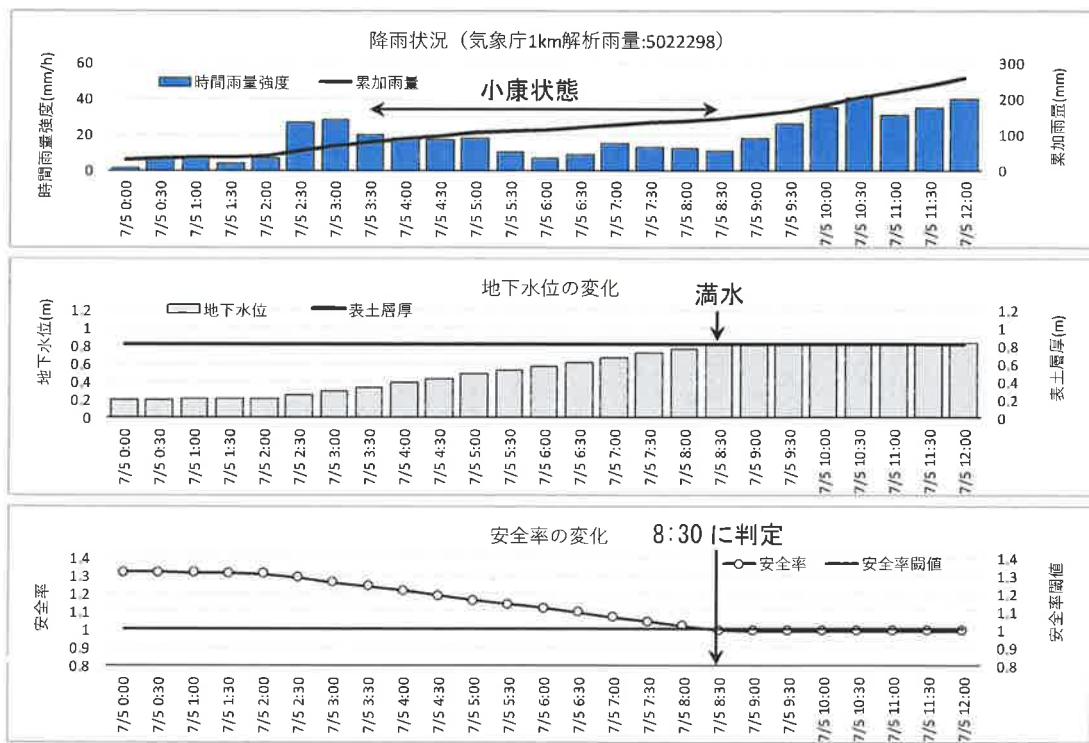


図3.17 降雨と地下水位、安全率の推移状況（図3.12の横断測線のセル）

3. 3 少ない降雨量で生じる空振りへの対応

(1) 減厚区間の空振り

神戸層群・大阪層群の層厚式の見直し時に、風化層が厚く発達しやすい山腹斜面の表土層厚を見直すという本来の目的からはずれる流水による侵食を想定している減厚区間まで、その見直しが適用されていたことが空振りの要因と考えられた。

このため、神戸層群・大阪層群の層厚については、減厚区間の層厚式を元の設定に戻すこととした（図3.18）。このようなモデル設定の見直しに伴う不具合は、他地域のシステムや今後の見直しにおいても想定されることから、設定見直しの際には十分な検証を行う必要がある。

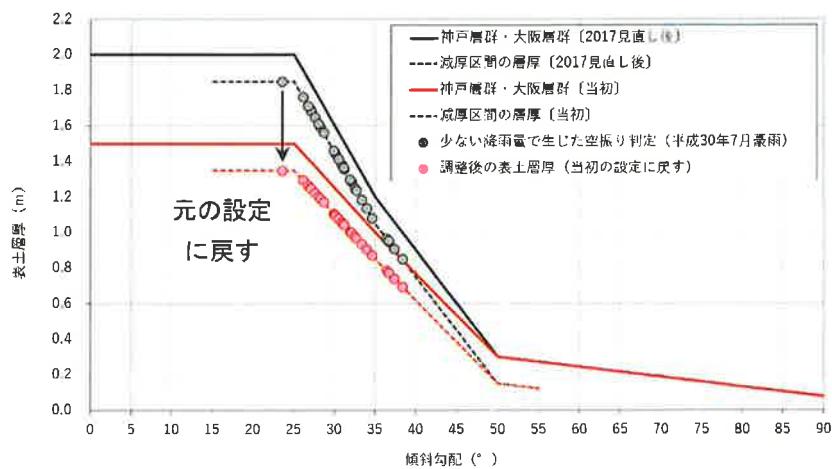


図3.18 神戸層群・大阪層群の谷壁斜面内の減厚区間の層厚の変更

(2) 減厚区間以外の空振り

これまでの検討経緯をふまえ、①表土層厚の減厚、②土の強度定数の引き上げ、③透水係数の調整（新たな調整方法の試み）について、少ない降雨量で生じる空振りへの対応を検討した。

1) 表土層厚の減厚による対応

該当する 222 セルは、表土層厚の減厚処理を行っている減厚区間より上流の集水面積 1,000～2,500m² の谷頭部付近に位置する。谷の横断形状は減厚区間のV字に対しU字で谷幅が広く崖錐が堆積した地形を呈する。このような場所は、周囲の斜面からの崖錐堆積物が一時的に堆積する場で土砂生産源となることが多く、土砂移動の活発な場所といえる。このため、表土層厚は周辺斜面よりも厚いことが想定され、これまでの空振りへの対応として検討していた表土層厚の減厚は、実態にそぐわないと考えられる。

また、モデルの表土層厚は、地表の傾斜と表土層厚との関係式で設定される（図3.19）。該当セルが位置する谷の横断形状をみると、セル幅（10m）の中に山腹斜面（急斜面）から谷底（平地）への地形変化点が含まれており、このような場合には、10mDEMで計測される傾斜は実際の山腹斜面の傾斜より緩く評価される（図3.20）。この傾斜にもとづいて表土層厚を設定すると、山腹斜面の傾斜で設定した場合の表土層厚よりも厚く設定されることになる。しかし、現地が堆積場ということを考えると、詳細な地形モデル等から山腹斜面の傾斜を読み直して表土層厚を再設定することは、層厚を減じる方向に働き危険側の設定となる懸念があるため、適切な方法ではないと考えられる。

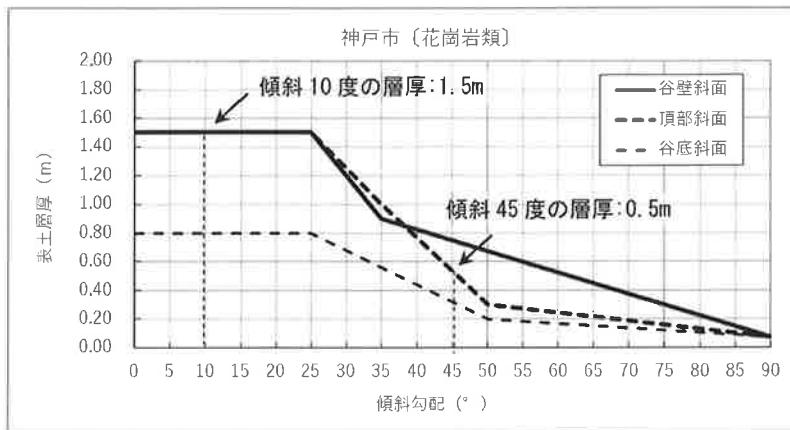


図 3.19 神戸市の地表傾斜勾配と表土層厚の関係〔花崗岩類〕

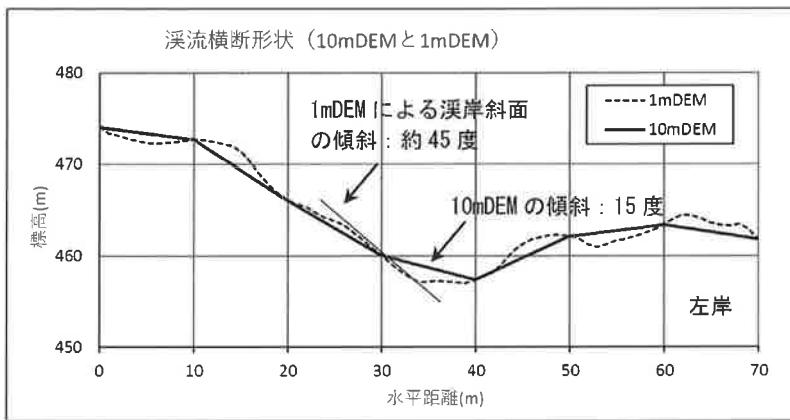


図 3.20 谷の横断形状 (横断測線位置は、図 3.12 に示す)

2) 土の強度定数（粘着力）の引き上げによる対応

土の強度定数を大きくすると、崩壊場であるにも関わらず安全率が 1 を下回らないセルが生じる。例えば、図 3.17 の事例では、7月5日8:30の判定時刻の地下水位は0.83mで、表土層厚の0.83mに対し満水状態であった。この地下水位で安全率が1を下回らないような土の粘着力等の強度定数を逆算で求めて設定しいたとすると、どんな地下水位の条件でも安全率が1を下回らなくなり、判定されないセルとなってしまう。このようなことから、土の強度定数を変更することは実態にそぐわないと考えられる。

3) 透水係数の調整による対応

透水係数が少ない降水量で生じる空振りセルへ及ぼす影響について調べた。透水係数は、現行モデルで0.15mの減厚処理を行っている谷壁斜面内の減厚区間のセルと、その上流側の水系網沿いのセル（上端の集水面積1,000m²とする）および谷底斜面の水系網沿いのセルを対象に、現在の設定値（0.056cm/sec）の2倍（0.112cm/s）にした場合と5倍（0.28cm/sec）にした場合について試算し、空振りセルの水位や安全率の変化を把握した。なお、減厚区間より上流の水系網は、10mDEMから作成したものと1mDEMから作成したものを比較したところ、10mDEMでは詳細な谷地形の形状が把握できていなかったため、1mDEMの水系網を用いた（図3.21）。

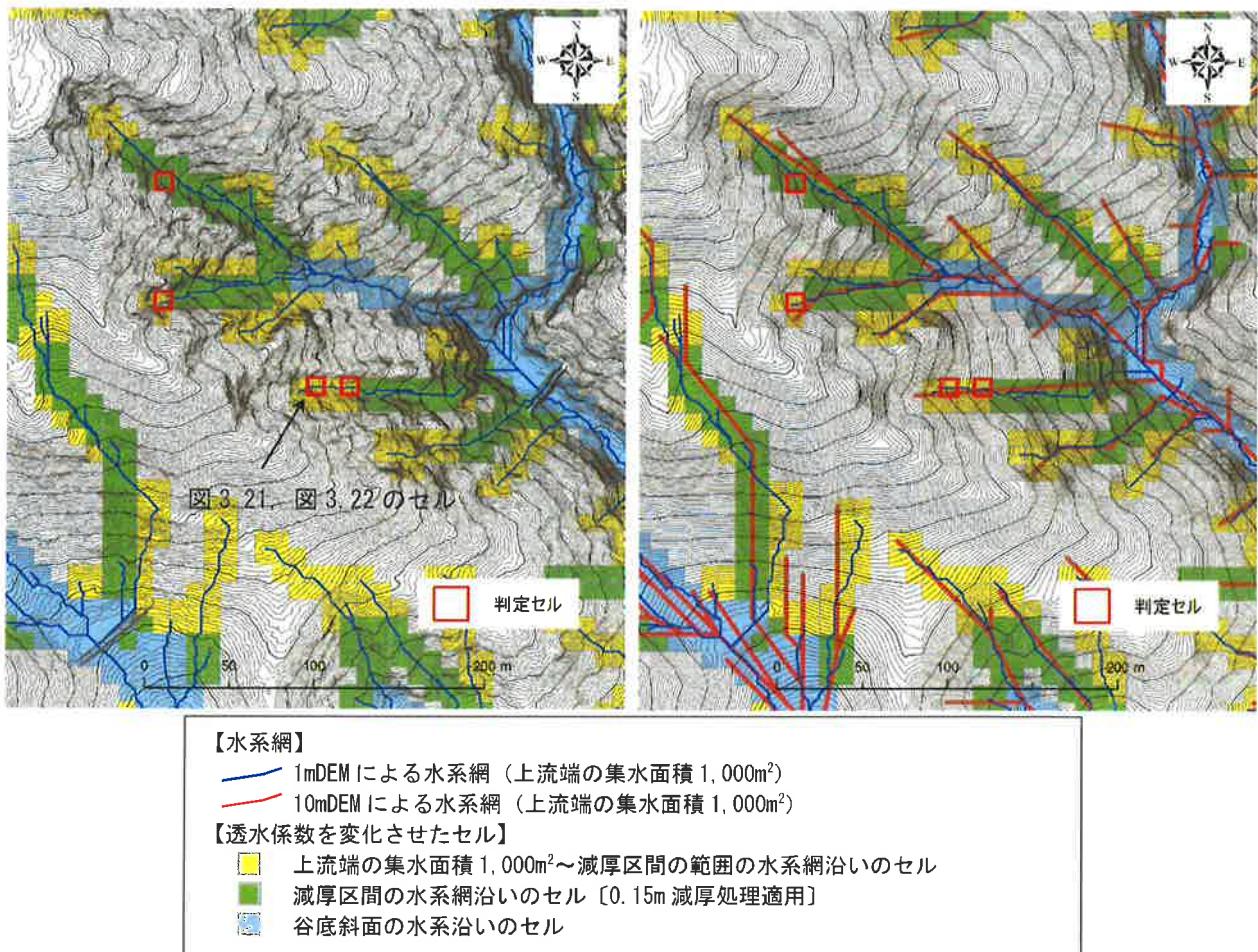


図 3. 21 透水係数を変化させたセルと 10mDEM と 1mDEM による水系網の違い(神戸市灘区エリア, 平成 30 年 7 月豪雨)
(左図 1mDEM の 1m 間隔の等高線図／右図 10mDEM の 1m 間隔の等高線図)

図 3.22 に 2 倍にした場合の地下水位と安全率の推移を示す。地下水位の満水時刻は変更前の 7 月 5 日 8:30 から 11:00 へ、安全率が 1 を下回る時刻も 8:30 から 11:00 へと 2.5 時間後ろに移動した。この時の累加雨量は、220mm であり、当初は 144mm で判定されていたものが透水係数を 2 倍とすることで 220mm まで判定がでなくなった。図 3.23 に 5 倍にした場合を示す。地下水位は満水とはならず、最も上昇した 13:00 の時点で、0.52m (満水時の 63%) であった。

これらより、透水係数の調整は、先の表土層厚の減厚による対応や土の強度定数（粘着力）の引き上げによる対応のように、どのような地下水条件でも判定されなくなるといった調整ではなく、地下水の移動量を調整することで判定の時間的なタイミングを調整できることがわかった。

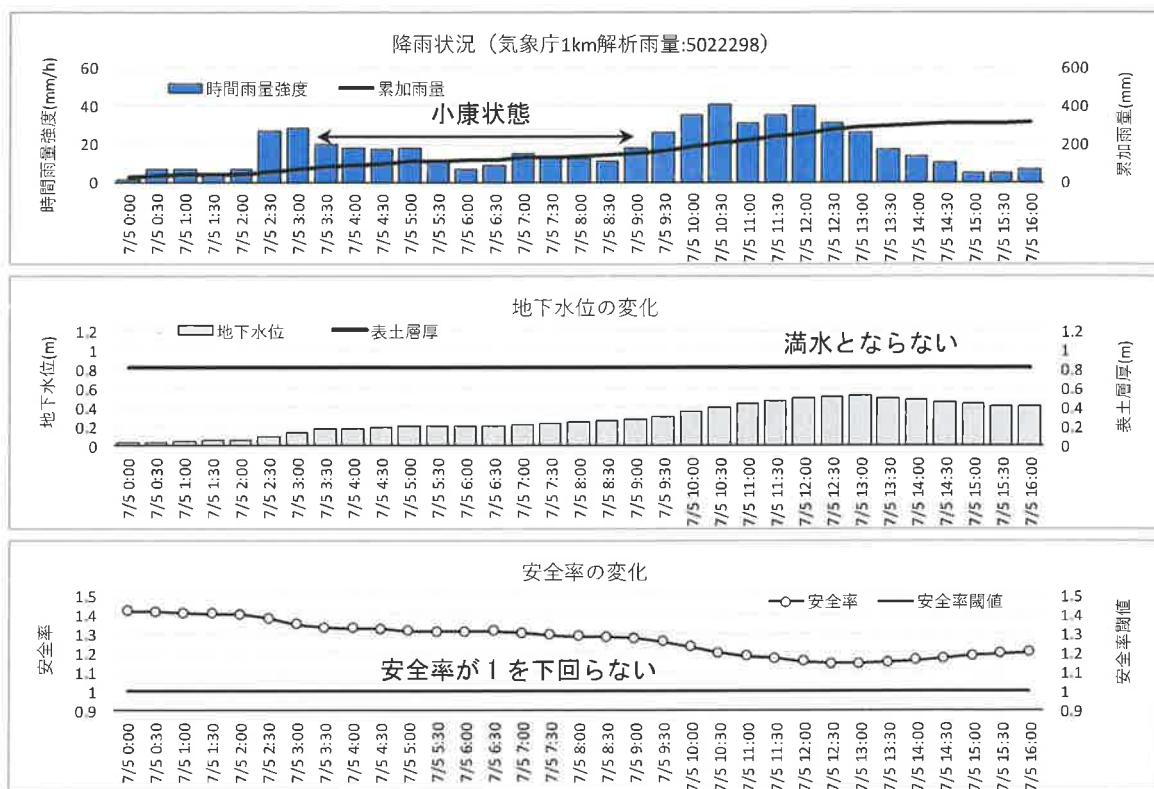
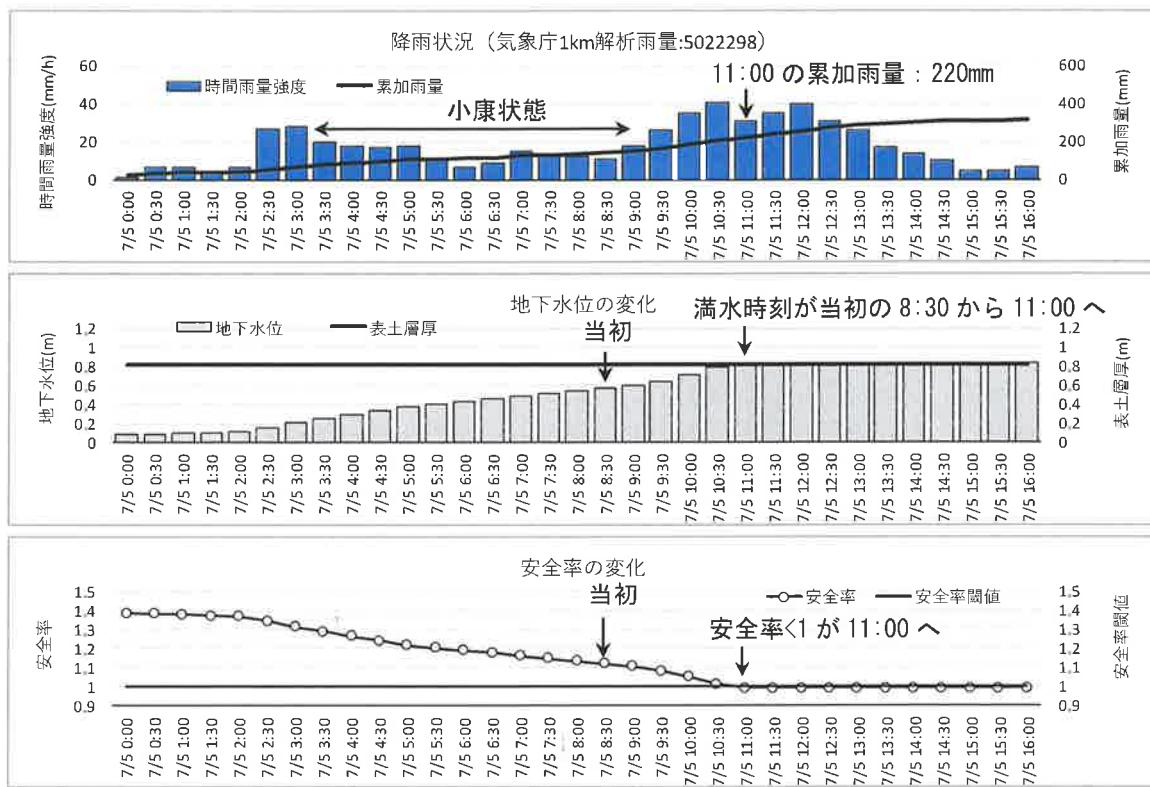


図3.24に、現行モデルと透水係数を2倍、5倍とした場合の降り始めからの累加雨量別の判定セル数を整理した。累加雨量150mm未満の判定数は、透水係数2倍が254セルから70セルへ、5倍が254セルから32セルへと減り、空振りの低減効果が確認できた。

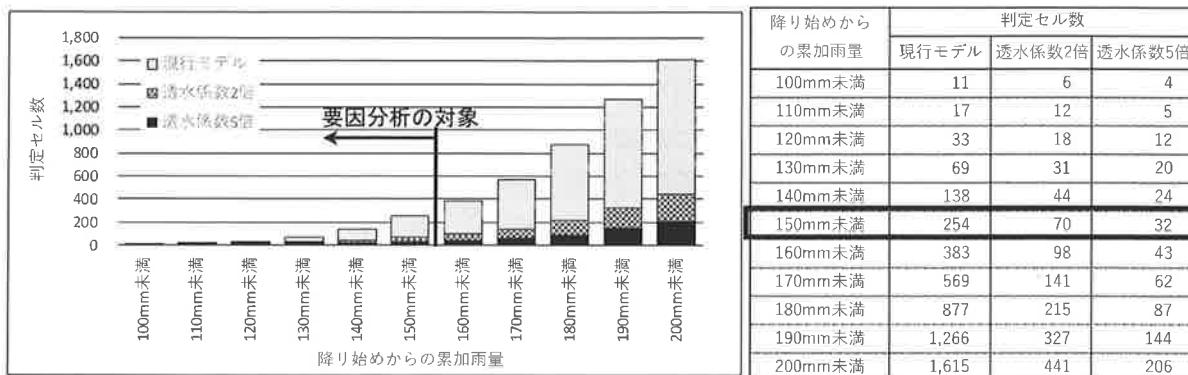


図3.24 透水係数の調整後の積算雨量別の崩壊判定10mセル数（平成30年7月豪雨、神戸市灘区エリア）

減厚区間以外の空振りについては、今回の試算より、①表土層厚の減厚、②土の強度定数の引き上げ、③透水性の調整のうち、透水係数の調整が適していることがわかった。

しかしながら、透水係数の適切な設定値に関しては、過大に引き上げた場合、今回の試算の5倍の場合のように地下水位が下がり過ぎて判定されなくなることもあり、危険側の設定となることも懸念される。透水係数の調整に関する懸念事項について、下記に整理する。

【透水係数の調整を適用する対象セルについて】

- ・今回の神戸市の事例では、少ない降水量で生じる空振りの分布状況から、集水面積1,000m²以上の水系網沿いのセルを対象に試算を行ったが、地形、地質条件等の異なる地域では、この集水面積の閾値が異なる可能性がある。
- ・これまで空振りへの対応として、表土層厚の減厚や土の強度定数の引き上げを適用してきたが、透水係数の調整も同様に空振りの低減を目的とした調整であるため、これらの適用条件を整理する必要がある。

【透水係数の設定値について】

- ・実際の現地の透水係数については、今後、原位置試験や表土層の粒度分布特性等から確かめる必要があるものと考えられるが、複雑な土質条件での現地データから適切な設定値をどのように得るのかが課題と考えられる。
- ・透水係数の調整では判定時刻のタイミングが変化することから、過去に行った災害検証において、崩壊発生時刻を捕捉できているかどうかの再検証が必要となる。
- ・透水係数の調整を行うことで全降雨期間を通しての判定セル数も減少する。これは空振りの低減に寄与する効果であるが、逆に見逃しが発生する可能性があるため、崩壊発生事例による再検証が必要となる。

透水係数の調整に関しては、今回、新たな取り組みとしてはじめたばかりであり、今後も引き続き検討を進めてゆきたい。

(3) 少ない降雨で生じる空振りの把握方法

少ない降雨量で生じる空振りに関する以上の検討を踏まえると、モデルの構築段階や調整時において何故、事前に把握できなかつたのかという疑問が生じる。そこで、モデルの構築段階や調整時の検証計算で用いている仮想降雨について今回の空振り事例と比較した。

図 3.25 に神戸市の土砂災害警戒情報の発表のための C.L. と平成 30 年 7 月豪雨と令和 2 年 7 月豪雨のスネーク曲線を示す。空振りは、時間雨量強度 30~40mm/hour の降雨ピークの後、約 4 時間以上経過した領域で生じていた。

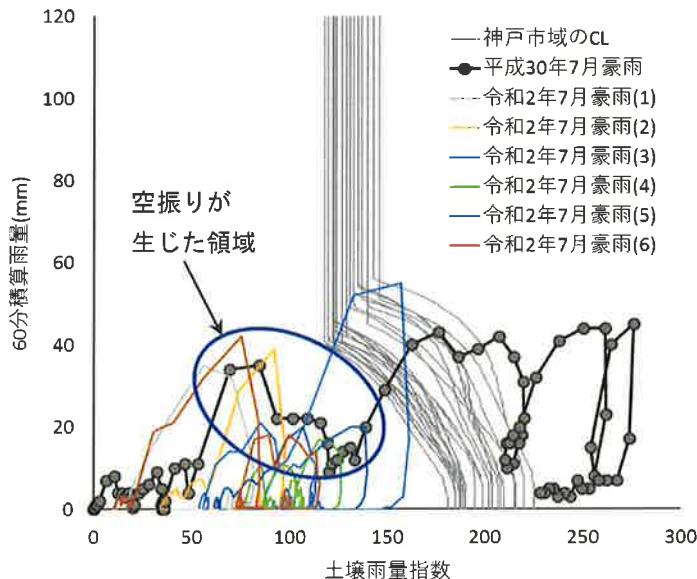


図 3.25 土砂災害警戒情報の C.L. 設定図と平成 30 年 7 月豪雨・令和 2 年 7 月豪雨のスネーク曲線

一方、モデルの構築段階や調整時の検証計算で用いている仮想降雨について、図 3.26 にハイエトグラフと土砂災害警戒情報の発表のための C.L. と仮想降雨のスネーク曲線を示す。仮想降雨は、初期降雨として時間雨量強度 5mm/hour の雨を 20 時間（累加雨量 100mm）降らせた後、最大時間雨量強度約 60mm/hour で 10 時間の累加雨量が 260mm となるような前方集中型と後方集中型の波形の雨と、初期降雨の後、時間雨量強度 10mm/hour の雨を 26 時間（累加雨量 260mm）一定で降らせる長雨型の 3 種類作成している。

これまでの仮想降雨による検証では、一連の仮想降雨を連続的にモデルへ入力し、主に下記に示す 4 つのタイミング（図 3.27）で判定されるセルを抽出し、モデルの調整対象としていた。なお、確認②の空振りの調整対象セルは、安全側を考慮し、該当する市町における土砂災害警戒情報の発表のための C.L. の中から最小の C.L.（最下限の C.L. に対する非発生降雨に着目）を用いている。

確認①：前期降雨の期間（弱雨（累加雨量 100mm）における空振りの把握）

確認②：最下限の C.L. を超過するひとつの計算時刻（非発生降雨の上限における空振りの把握）

確認③：降雨ピーク時（地形・地質条件等の違いによるモデルの挙動の確認や豪雨でも判定されにくい土砂災害警戒区域の把握等）

確認④：降雨ピーク後から降雨終了 24 時間後の期間（判定継続時間の確認）

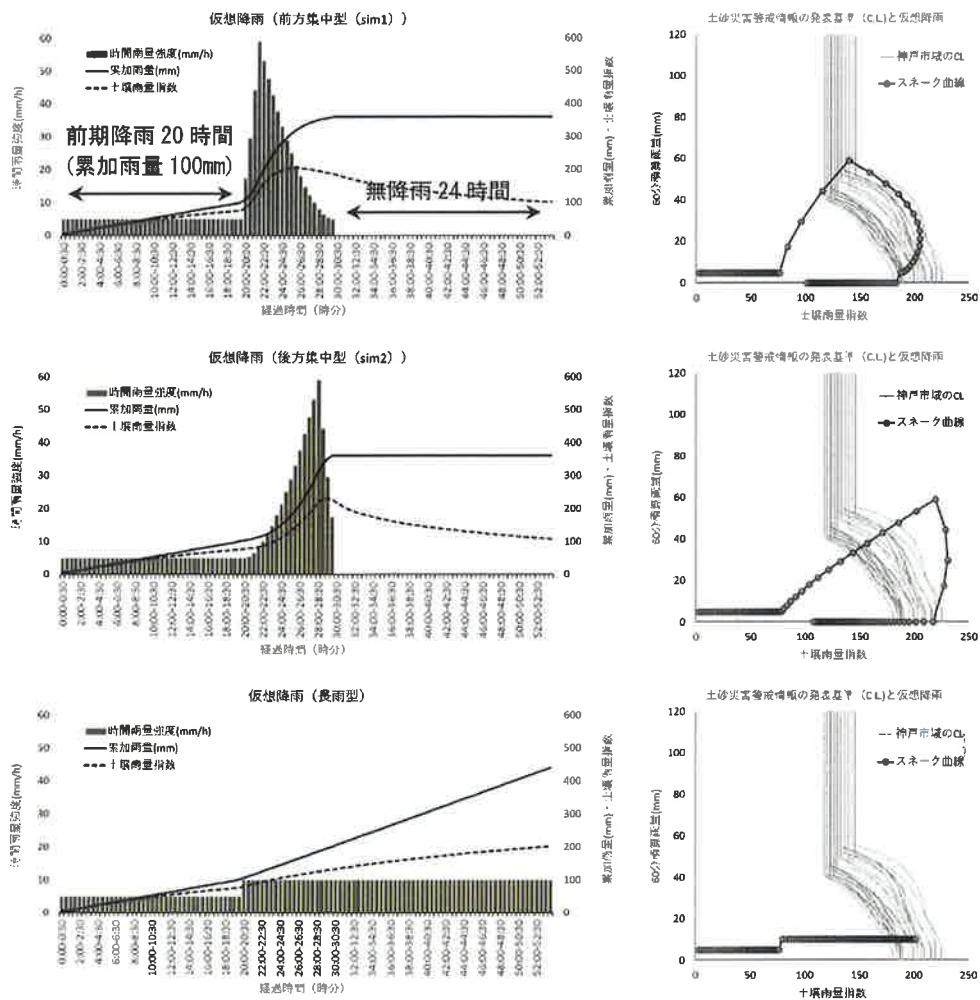


図 3.26 モデル検証用の仮想降雨 [3種類] (ハイエトグラフとスネーク曲線)

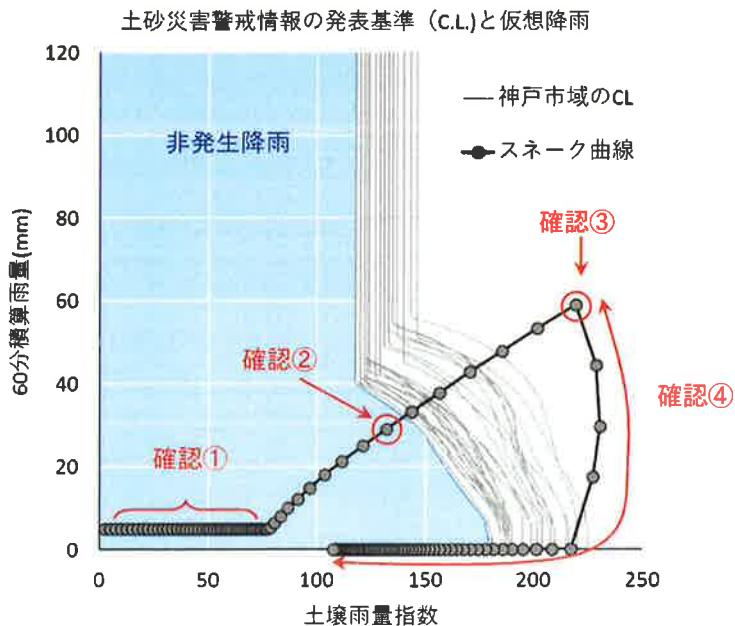


図 3.27 仮想降雨による検証方法例 [後方集中型] (これまでの方法)

少ない降雨で生じる空振りを見逃さない仮想降雨は、図 3.25 で丸印を付けた範囲を通過する必要がある。すなわち、ある程度の強い雨（図 3.25 では時間雨量強度 30~40mm/hour）の後、弱雨もしくは無降雨の降雨浸透期間を有することが仮想降雨の条件となる。図 3.27 では、確認②の時点で時間雨量強度が約 30mm となっているが、その後に弱雨もしくは無降雨の期間がないため CL を超過する。これは前方集中型の仮想降雨でも同様であり、長雨型の仮想降雨では時間雨量強度の条件が満たされていない。

「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」¹¹⁾においては、仮想降雨による計算について、降雨終了後に 24 時間程度の無降雨期間を含めて計算することになっており、降雨の浸透、地下水の集水期間の判定への影響を確認することの重要性が示されている。これを踏まえると、前方集中型と後方集中型の仮想降雨の計算においては、図 3.28 に示すように確認①②③の段階で降雨を一旦小康状態とし、24 時間の無降雨期間を設けた降雨波形を設定すべきであったと反省される。そうすることで、今回の問題となった少ない降雨で生じる空振りは、モデル構築段階やモデルの見直し段階で対処できていたと考えられる。

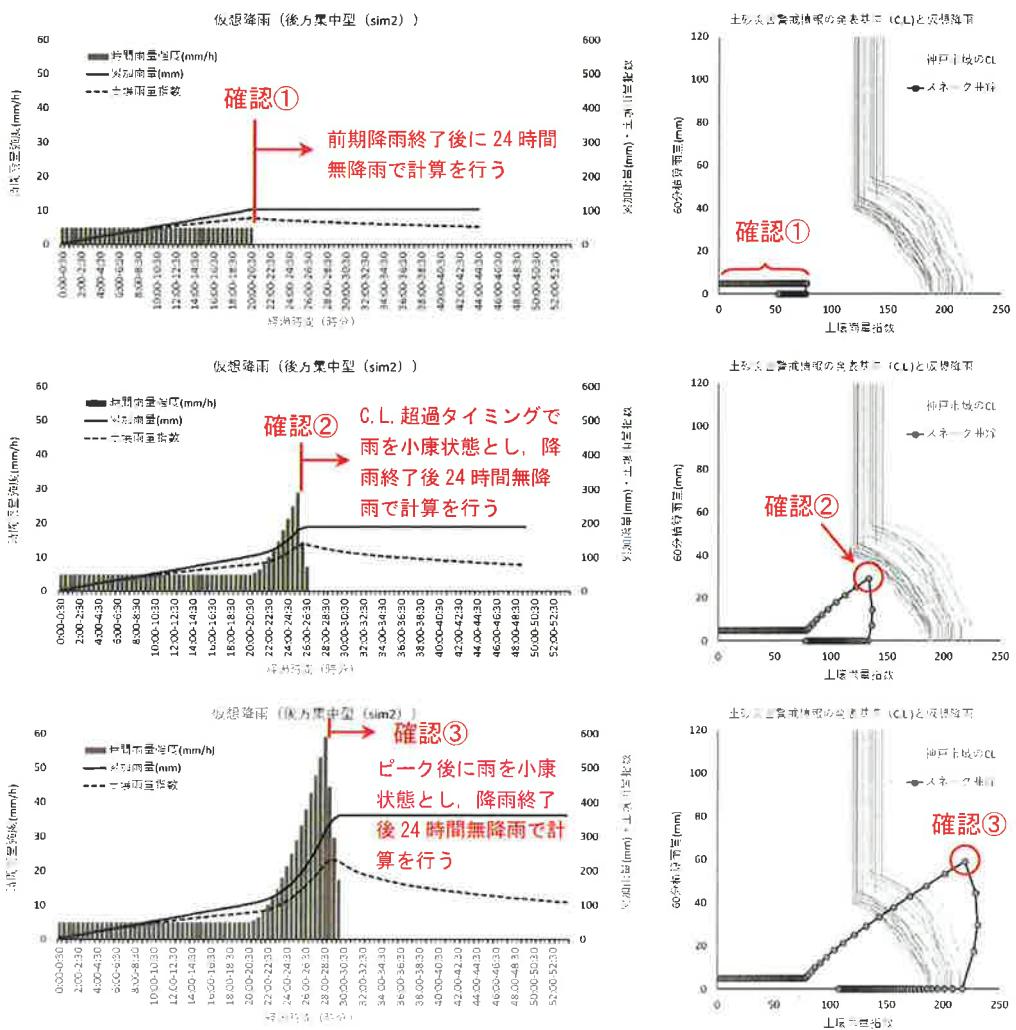


図 3.28 検証用の仮想降雨（案）[後方集中型の設定例]

また、空振りの調整対象を該当市町における最下限の C.L.に対する非発生降雨に着目していることに関して、これまで安全側の視点でモデルを作成していたといえる。今後、精度を追及してゆく場合は、C.L.本来の非発生降雨に着目し、図 3.29 に示すような C.L.設定単位である 5km メッシュでの検討が必要と考えられる。

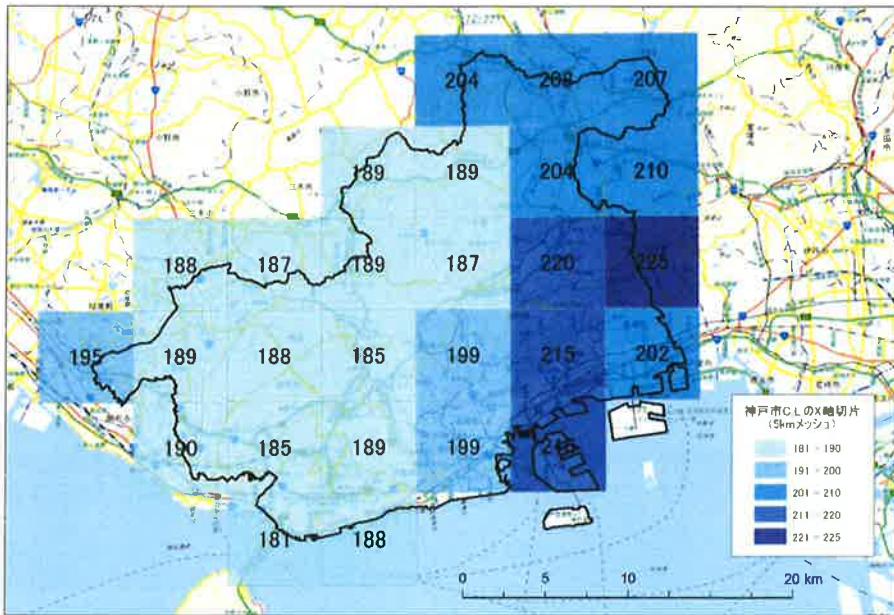


図 3.29 C.L. の設定単位 (5km メッシュ) と C.L. の X 軸切片の分布状況 (神戸市域)

4.まとめと今後の課題

少ない降水量で生じる空振りについて、神戸市における事例を対象に検討した事項を列挙すると下記のとおりである。

- 1) 少ない降水量で生じる空振りは、2020年7月豪雨と2018年7月豪雨における神戸市の事例から、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) 前者は、神戸層群と大阪層群の減厚区間で生じており、過去に層厚式の見直しをした箇所であった。見直しの目的は風化層が厚く発達しやすい山腹斜面の表土層の増厚であったが、減厚区間までその増厚処理が適用されていた。このため、減厚区間の表土層厚を見直し前の層厚に戻すこととした。
- 3) 上記以外の空振りは、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。
- 4) その対応について、これまでの①表土層厚の減厚と②土の強度定数の引き上げに加え、新たな調整方法の試みとして③透水性の調整を比較した結果、③の透水係数の調整が、今回のケースでは適していると考えた。
- 5) また、検討を進めてゆく中で、モデルの構築段階や調整時において対応できなかったのかという疑問が生じた。これについては、仮想降雨のハイエトグラフを複数設定することで改善できることがわかった。

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

1) 仮想降雨による検証の充実

少ない降水量で生じる空振りは、システム全体でみると大きな数ではないが、システム画面上で目立つことや雨のたびに同じセルが判定される等、システムの信頼性低下につながり、今後のシステムの普及促進への影響が懸念され

る。このため、これら空振りを極力生じさせないよう検証計算で用いる降雨パターンを充実させる。

また、空振りの調整対象については、これまで安全側をみて、該当市町の最下限の C.L.に着目していたが、今後、精度を追及してゆく場合においては、C.L.設定単位の 5km メッシュごとの検討が望ましいと考えられる。

2) 地形・地質条件や現象に応じたモデル調整手法の選択方法の検討

空振りの調整方法として、これまでの①表土層厚の減厚する手法、②土の強度定数の引き上げる手法に加え今回③透水係数を調整する手法を提案した。これらは、調整の効果に一長一短があり、地形・地質条件や現象に応じて適宜使い分けることが必要と考えられた。今後、他地域へ展開する場合、最適手法の選択方法、あるいは組合せ方法について統一的な方針を定めたマニュアル化が必要である。

3) 地形モデルの高度利用に関して

透水係数の調整検討にあたっては、集水面積 1,000m²程度の浅い谷地形を抽出する必要がある。水系網の作成にあたっては、1mDEM の詳細地形モデルを用いて設定することが望ましいと考えられる。

5. おわりに

本報告では、少ない降雨量で生じる空振りについて、2020 年 7 月豪雨と 2018 年 7 月豪雨における神戸市の事例を用いて、要因を分析するとともにその対応について検討した。空振りの要因としては、表土層厚の推定に用いる層厚式の見直を行った際に見直しの目的からすると変更すべきではないセルまで変更対象に含まれてしまっていたこと、谷壁斜面内の浅い谷でこれまでに表土層厚を減厚してきた区間よりも上流側で、地下水位の挙動がモデルで適切に再現できていないのではないかということの 2 つが推測された。また、本来これらを事前に把握するための仮想降雨による検証方法に、降雨パターンを充実させる必要があることがわかった。

層厚式の見直しに伴う課題と仮想降雨による検証方法の課題については、今回の検討結果に基づき対処する。減厚区間以外の空振りへの対応は、透水係数の調整方法について、引き続き調査、検証を重ね他地域への適用に臨みたい。

本プロジェクトの推進に関しては、兵庫県国土整備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い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：令和二年の土砂災害、令和 3 年 3 月
- 2) 気象庁：災害時気象報告（梅雨前線による令和 2 年 5 月 9 日から 7 月 31 日にかけての大河等）、災害時自然現象報告書 2021 年第 1 号、令和 3 年 3 月 12 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、Mitsuhiko 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・中川涉・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・中川涉・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・中川涉・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・中川涉・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・中川涉・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・中川涉・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) 沖村孝・鳥居宣之・中川涉・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.
- 15) 沖村孝・鳥居宣之・中川涉・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.
- 16) 沖村孝・鳥居宣之・中川涉・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.
- 17) 沖村孝・鳥居宣之・中川涉・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.
- 18) 松井健・武内和彦・田村俊和：丘陵地の自然環境—その特性と保全—、古今書院、48、1990.
- 19) 沖村孝・中川涉・中尾直美・伊藤正美・嵯峨根朋子：兵庫県内の新生代第三紀堆積岩類における地形・地質学的特徴とリアルタイム表層崩壊予測モデルへの適応と限界について、建設工学研究所論文報告集、59、49-71、2017.

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 渉	客員研究員 応用地質株式会社、博士(工学)、地盤工学
原口 勝則	客員研究員 国際航業株式会社、技術士(建設部門)、砂防工学
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	国際航業株式会社、砂防工学