

【建設工学研究所論文報告集第 61 号〔報告〕2019 年 11 月】

## 表層崩壊リアルタイムハザードシステム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 ～

### Some Problems and Measures appeared during the Construction of the Real-time Hazard System for Slope Disasters at a Heavy Rainfall (10)

沖村 孝 鳥居宣之 中川 渉 原口勝則 鏡原聖史  
Takashi Okimura Nobuyuki Torii Wataru Nakagawa Katsunori Haraguchi Satoshi Kagamihara

安藤 伸 伊藤正美 根本信行 植田允教 孝子繪図 笠原拓造  
Shin Ando Masami Ito Nobuyuki Nemoto Mitsunori Ueda Rinto Koshi Takuzo Kasahara

#### 1. はじめに

平成 30 年は、7 月豪雨、北海道胆振東部地震、台風 24 号などにより 3,459 件の土砂災害が発生し、昭和 57 年の統計開始以来の最大値を記録した。これは統計開始以降の平均発生件数（1,015 件）の約 3.4 倍にあたり、その被害は死者・行方不明者 161 名、負傷者 117 名、人家被害 1,505 戸に上っている<sup>1)</sup>。

中でも、7 月豪雨では、6 月 28 日から 7 月 8 日までの間に前線や台風第 7 号の影響によって、日本付近に暖かく非常に湿った空気が供給され続けることで、西日本を中心に広範囲かつ長時間の記録的な大雨となった。このときの降水量は、多いところで 7 月の平年値の 2~4 倍、九州北部、四国、中国、近畿、東海、北海道地方の多くの観測地点で 24・48・72 時間降水量の値が観測史上第 1 位を更新している。また、この大雨で、岐阜県、京都府、兵庫県、岡山県、鳥取県、広島県、愛媛県、高知県、福岡県、佐賀県、長崎県の 1 府 10 県に特別警報が発表されている<sup>2)</sup>。この 7 月豪雨による土砂災害は、崩壊や土石流による被害の中心となった広島県で 1,242 件、愛媛県で 413 件、その他の周辺県を含めて 2,581 件に上っている。また、TEC-FORCE による調査によると災害の形態が平成 29 年 7 月の九州北部豪雨に類似しているとされている。<sup>1)</sup>

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<sup>3)</sup>。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<sup>4)5)</sup>。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<sup>6)7)8)9)10)</sup>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」<sup>11)</sup>や留意事項<sup>12)</sup>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<sup>13)</sup>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<sup>14)</sup>、土石流の発生機構を考慮した新たな判定方法<sup>15)</sup>を考案し、その有効性について報告を重ねてきた。

本報告では、平成30年7月豪雨において本システムでは評価し難い小規模な崩壊や人工斜面の崩壊などが多数発生し、警戒避難における実用面の課題が確認されたため、その対策について検討した結果を報告する。

## 2. これまでの報告の概要

### 2. 1 2010年報告<sup>6)</sup>

2010年報告<sup>6)</sup>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<sup>7)</sup>

2011年報告<sup>7)</sup>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<sup>8)</sup>

2012年報告<sup>8)</sup>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<sup>9)</sup>

2013 年報告<sup>9)</sup>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、超塙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<sup>10)</sup>

2014 年報告<sup>10)</sup>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帶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<sup>12)</sup>

2015 年報告<sup>12)</sup>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) 積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<sup>13)</sup>における内容

2016 年報告<sup>13)</sup>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<sup>14)</sup>における内容

2017 年報告<sup>14)</sup>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、安全率については 5m メッシュごと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<sup>15)</sup>における内容

2018 年報告<sup>15)</sup>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。

### 3. 平成30年7月豪雨の検証

#### 3.1 降雨状況

平成30年7月豪雨の天気図を図3.1に示す。梅雨前線の影響で6月29日頃より西日本を中心に降り出した雨は、台風第7号の接近に伴い強さを増した。台風は7月4日に温帯低気圧に変わったが、その後も低気圧に暖かく湿った空気が供給され続け前線が発達し、7月7日には西日本を中心に全国的に広い範囲で記録的な大雨となった。

兵庫県においても史上最大の雨量を記録し、最も降雨が集中した7月5日から7日にかけて各地で土砂災害が発生した。表3.1に兵庫県における観測史上最大を記録したアメダス観測局を示す。最大48時間雨量や最大72時間雨量といった長期的な指標で史上最大を記録した観測局が多く、最大1時間雨量や最大3時間雨量の短期的な指標は、近年の豪雨と比較してそれほど大きくないことが特徴である。

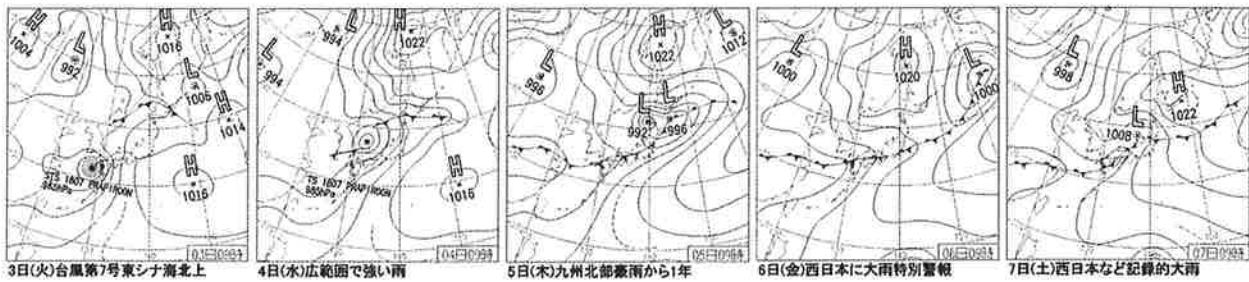


図3.1 平成30年7月豪雨の天気図（2018.7.3～7.7）【気象庁HP、日々の天気図より】

表3.1 兵庫県で観測史上最大を記録したアメダス観測局（6月28日0時～7月8日24時）

アメダス 観測局	市町	最大1時間 降水量	最大3時間 降水量	最大6時間 降水量	最大12時間 降水量	最大24時間 降水量	最大48時間 降水量	最大72時間 降水量
温泉	新温泉町	29.0	73.5	121.5	160.0	166.5	1位 323.5	1位 335.0
豊岡	豊岡市	36.0	61.5	104.0	156.5	1位 218.5	345.0	357.5
兎和野高原	香美町	27.0	58.5	106.0	155.0	215.0	1位 358.0	1位 375.5
大屋	養父市	36.5	71.5	130.0	1位 202.0	284.5	1位 433.5	473.0
八鹿	養父市	38.5	68.0	118.0	1位 181.5	1位 247.0	1位 408.0	1位 432.5
和田山	朝来市	63.0	83.5	125.5	166.5	1位 267.0	1位 388.0	1位 408.5
柏原	丹波市	24.5	52.5	66.0	132.0	196.5	1位 305.5	343.0
一宮	宍粟市	39.5	64.0	88.0	143.5	234.5	1位 364.5	391.5
西脇	西脇市	30.0	45.0	60.0	89.5	155.5	1位 279.0	1位 331.5
後川	篠山市	41.5	80.0	98.5	144.5	226.0	1位 400.5	1位 506.0
三田	三田市	26.0	49.5	77.0	125.5	188.0	1位 302.0	1位 384.0
三木	三木市	37.0	56.5	70.0	112.0	168.0	300.0	1位 399.5
西宮	西宮市	26.0	64.5	102.0	144.5	244.0	1位 394.5	1位 449.0
神戸空港	神戸市	27.5	52.0	76.0	106.5	178.0	292.0	1位 340.5
神戸	神戸市	25.5	57.0	94.5	129.0	220.5	1位 373.5	1位 434.5
上記観測局の集計	平均値	33.8	62.5	95.8	143.2	214.0	351.2	397.4
	最大値	63.0	83.5	130.0	202.0	284.5	433.5	506.0

※気象庁観測史上最大値のアメダス観測地点<sup>16)</sup>を参考に毎正時における時間雨量より求めた

図3.2に最大12・24・48・72時間雨量で史上最大を記録したアメダス八鹿を図3.3に平成30年7月豪雨で最も総降雨量が大きかった六甲山系に位置する保護センターのハイエイトグラフを示す。どちらも最大時間雨量は40mm程度であり、丹波市や神戸市等で土砂災害が発生した平成26年8月豪雨の時間雨量80mm以上の約半分程度である。降雨波形をみると、連続雨量100～150mm程度の雨が複数回にわたって連続して襲來したことにより、総降雨量が非常に大きくなっている。

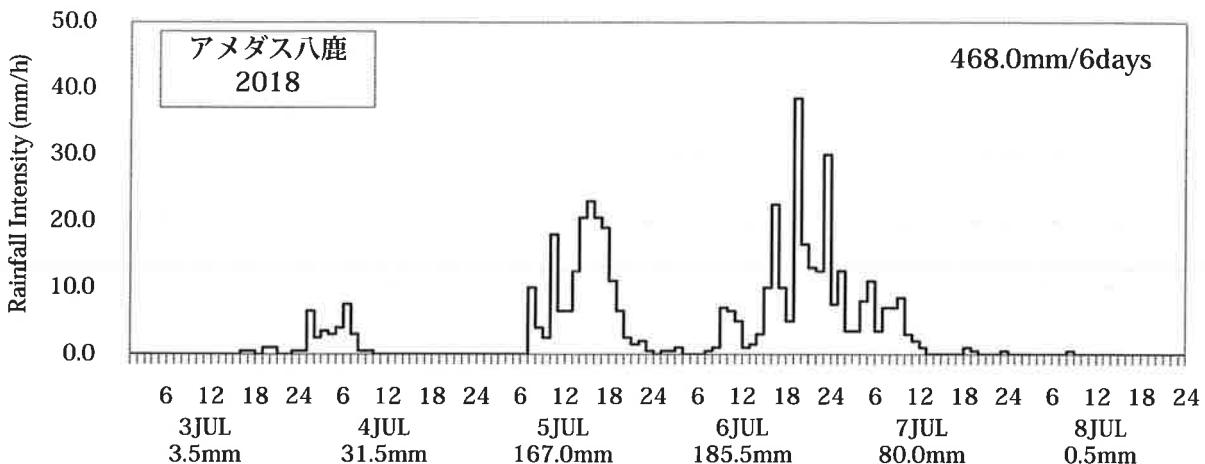


図 3.2 平成 30 年 7 月豪雨ハイエイト（アメダス八鹿）

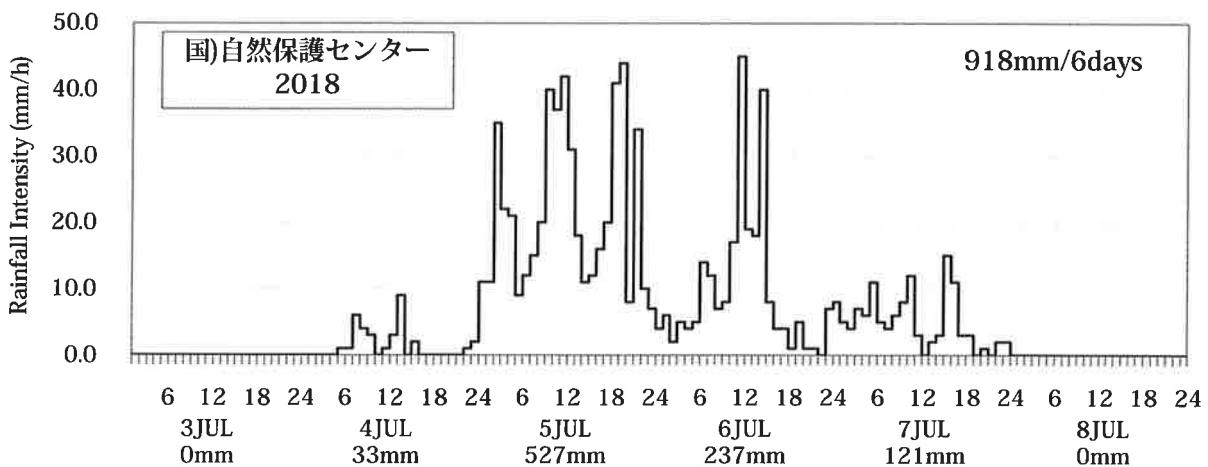


図 3.3 平成 30 年 7 月豪雨ハイエイト（国土交通省所管、自然保護センター局）

〔自然保護センター、神戸市灘区六甲山町北六甲、標高 800m〕

### 3. 2 土砂災害の発生状況

平成 30 年 7 月豪雨に伴い発生した土砂災害は、図 3.4 の 73 件が報告されている（兵庫県砂防課調べ）。宍粟市一宮町では、がけ崩れにより死者 1 名という甚大な被害が発生した。本システムが整備されている市町においては 73 件の内 39 件の土砂災害が発生し、家屋や道路等が被災した。土砂災害の多くは神戸市等の市街地周辺の斜面で発生した。

この 39 件の災害については私有地等で立ち入りが制限される箇所を除き現地概査を行った。その結果、擁壁や盛土の崩壊等の人工構造物の災害、宅地・道路からの排水の影響や斜面の排水不良等の人為作用の影響による災害、地すべりや渓岸の侵食等のシステムの解析メカニズム以外の災害が含まれることがわかった。システムで対象とする土砂移動現象は、表土層内の地下水位シミュレーションと無限長斜面安定解析を組合せた力学的モデルの特性やベースの数値地形情報の特性等から、下記 A) ~C) を想定している。

- A) 表層崩壊・土石流(崩壊起因型)を対象（地すべりは対象外）
- B) 自然現象を対象（人工的な地形改変地や宅地・道路等の排水の影響によるものは対象外）
- C) 大きさが 10m × 10m 以上の崩壊を対象（解析セルの最小単位が 10m × 10m のため）

この条件を適用すると、今回の39件中2件（いずれも土石流災害）が対象災害となり、大部分の災害は、対象外に分類される。土砂災害の形態や原因等による分類結果を図3.5に、対象外となった代表的な災害事例を写真3.1に示す。

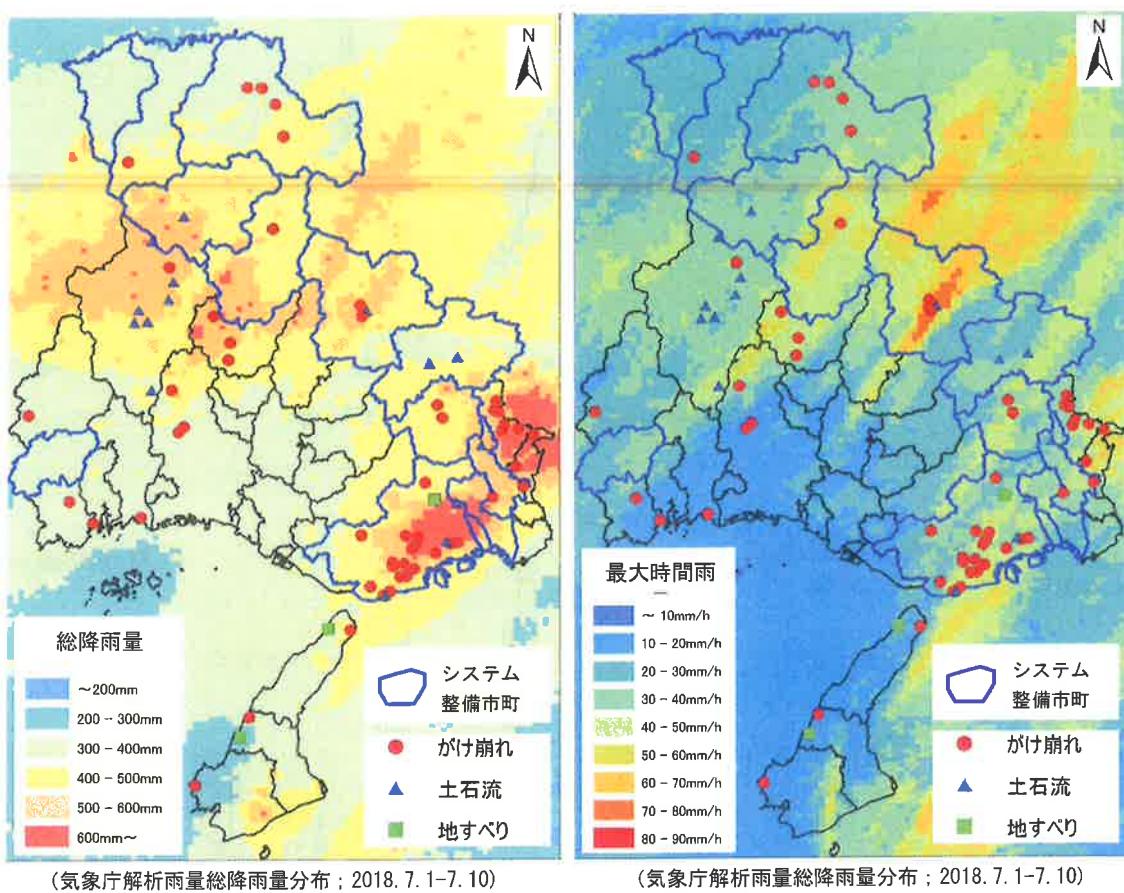


図3.4 土砂災害発生位置図（土砂災害の種別は砂防課調べによる）

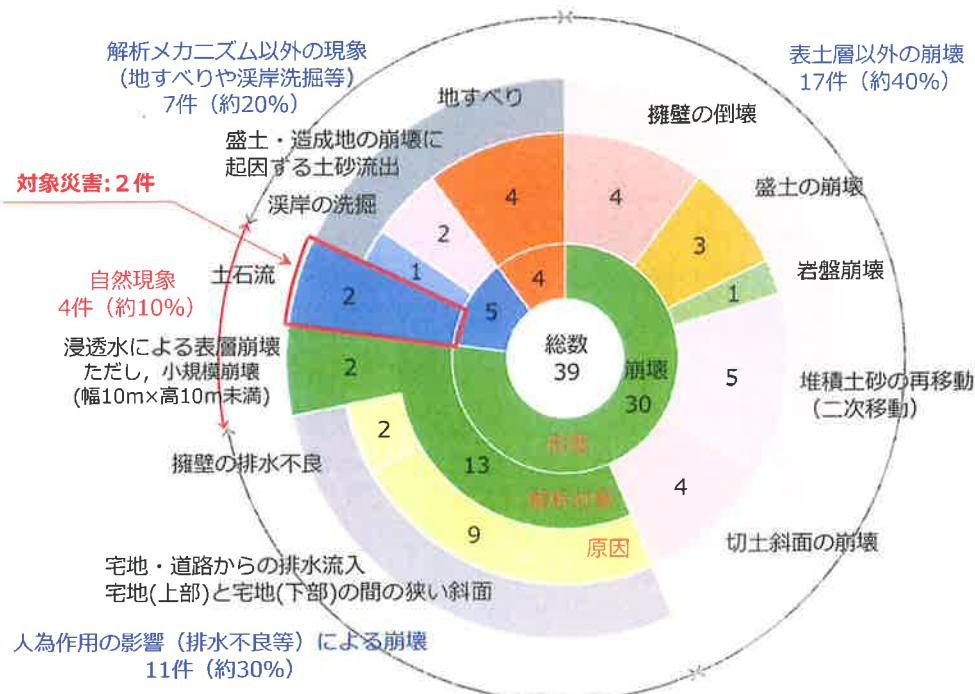


図3.5 平成30年7月豪雨による土砂災害の形態や原因等による分類と対象災害（現地確認結果による）



写真 3.1 平成 30 年 7 月豪雨の土砂災害状況（システムの判定対象外災害）

今回の豪雨で、システムの対象外の災害が多く発生した要因については、史上最大を記録した長雨の特性（短時間の雨量強度は比較的小さいが、降り止むことなく長時間降り続き、総降雨量が非常に大きい）による影響が大きいと推察される。これは、先行降雨により山腹斜面の表土層が飽和状態となった後も、連続して第2波、第3波の降雨ピークが襲来することにより、飽和状態が長時間にわたり継続することで、以下のa～eのような事象が引き起こされたものと考えられる。特にdやeの事象は、都市周辺の山麓の開発が進んだ地域で多く見られた。

- a. 山腹斜面の表土層が長時間にわたり地下水にさらされることで斜面の安定性が低下
- b. 山腹斜面からの多量の湧水により、山躑等の崖錐堆積物等が流出（二次移動）
- c. 風化花崗岩内のコアストーンの間の細粒成分が地下水や湧水により流出
- d. 斜面からの湧水が道路や宅地の排水路へ集中し、水路を溢水した水が斜面へ供給されることにより斜面が不安定化
- e. 檻壁裏に排水能力を上回る地下水が供給され、背後斜面の地下水位が上昇し不安定化等

また、今回報告のあった73件以外にも、六甲山系等を中心に数多くの崩壊が発生している。田中ほか<sup>17)</sup>によると、六甲山系においては、平成26年の豪雨と比較した場合、今回の豪雨の方が崩壊箇所数は多いが、崩壊規模でみると小規模なもの比率が高いことが報告されている（最大の崩壊地は面積約1,500m<sup>2</sup>、崩壊面積400m<sup>2</sup>以下の崩壊地が累積頻度約90%を占める／平成26年は最大面積約2,000m<sup>2</sup>以上、崩壊面積800m<sup>2</sup>以下の崩壊地が累積頻度約90%である）。

これは、長雨により斜面の安定性が低下したが強度の大きい降雨インパクトがなく、樹木根系の斜面崩壊抑止効果等により大規模な崩壊の発生に至らなかったのではないかと推測され、今回の長雨による土砂移動の特徴の一つと考えられる。

### 3. 3 システムの判定状況

#### （1）災害の捕捉状況

市町別の災害発生数と捕捉状況を表3.2に示す。表中の捕捉率は下記の要領で算定した。この結果、システムは対象災害2件（土石流）の内1件を捕捉し、捕捉率は50%であった。捕捉した養父市の土石流災害（奥山谷川）の事例については、本報告集の別報<sup>18)</sup>で紹介しているので参照されたい。見逃した丹波市の土石流災害（氷上町横田）については、本稿の第4章にて詳述する。

参考に対象外の災害を含めた全災害では、災害39件の内11件を捕捉し、全体の捕捉率は28%であった。

- a. 災害箇所が土砂災害警戒区域内の場合（システムの土砂災害警戒区域の判定を適用）

$$\text{捕捉率(%)} = \frac{\text{崩壊・土石流の発生した土砂災害警戒区域の内、危険判定のあった区域数}}{\text{崩壊・土石流の発生した土砂災害警戒区域数（総数）}} \times 100$$

- b. 災害箇所が土砂災害警戒区域以外の場合（システムの10mセルの判定を適用）

$$\text{捕捉率(%)} = \frac{\text{崩壊の発生した箇所の内、10mセルで危険判定のあった箇所数}}{\text{崩壊箇所数（総数）}} \times 100$$

表 3.2 災害の捕捉状況(平成 30 年 7 月豪雨)

システム名			豊岡	新温泉	朝来	養父	丹波	篠山	三田	西宮 芦屋 宝塚	神戸	上郡	合計
対象災害	災害件数	土石流	a			1	1						2
	システム危険判定数	土石流	b			1	0						1
	捕捉率(%)	c=b/a				100	0						50
全災害 (参考)	災害件数	がけ崩れ	a	4	1		2	1	2	1	19		30
		土石流	b			1	1	1			2		5
		地すべり	c								4		4
		合計	d	4	1	1	3	2	2	1	25		39
	システム危険判定数	がけ崩れ	e	0	0		2	1	0	1	3		7
		土石流	f			1	0	0	0		2		3
		地すべり	g								1		1
		合計	h	0	0	1	2	1	0	1	6		11
	捕捉率(%)	がけ崩れ	i=e/a	0	0		100	100	0	100	16		23
		土石流	j=f/b			100	0	0			100		60
		地すべり	k=g/c								25		25
		合計	l=h/d	0	0	100	67	50	0	100	24		28

## (2) 空振り判定の状況

市町別に空振り判定の状況を整理した。空振り率は、システムで危険と判定したが実際には災害が発生しなかった土砂災害警戒区域を災害非発生区域とし、市町の土砂災害警戒区域の総数に対する割合として以下の要領で算定した。算定結果を表 3.3 に示す。

$$\text{空振り率(%)} = \frac{\text{危険と判定した土砂災害警戒区域の内、災害の発生しなかった区域数}}{\text{土砂災害警戒区域（市町内の総数）}} \times 100$$

空振り判定は、急傾斜が合計 6,571 区域中 888 の非発生区域があり、空振り率は約 14%、土石流は合計 3,663 区域中 120 の非発生区域があり空振り率は約 3% であった。

表 3.3 空振り判定の状況(平成 30 年 7 月豪雨)

システム名			豊岡	新温泉	朝来	養父	丹波	篠山	三田	西宮 芦屋 宝塚	神戸	上郡	合計
土砂災害警戒区域 (総数)	急傾斜	a	1,021	577	423	491	837	761	197	294	1,741	229	6,571
	土石流	b	743	188	336	385	627	502	184	106	476	116	3,663
システムで危険と判定した 土砂災害警戒区域	急傾斜	災害発生区域	c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		災害非発生区域	d	30	13	110	161	255	102	0	9	195	13
	土石流	災害発生区域	e	0	0	0	1	1	0	0	0	0	2
		災害非発生区域	f	0	0	19	45	48	0	0	1	7	0
空振り率(%)	急傾斜	g=d/a	3	2	26	33	30	13	0	3	11	6	14
	土石流	h=f/b	0	0	6	12	8	0	0	1	1	0	3

参考として地域別土砂災害危険度の空振り率を表 3.4 に示す。比較のため地域別土砂災害危険度の 1km メッシュ（標準地域メッシュ第 3 次メッシュ）の判定をそのメッシュ内にある土砂災害警戒区域の判定と読みかえ、土砂災害警戒区域の数として整理した。空振り判定は、急傾斜が合計 6,571 区域中 4,913 の非発生区域、土石流は合計 3,663 区域中 2,762 の非発生区域があり、どちらも空振り率は約 75% であった。

表 3.4 空振り判定の状況〔参考、地域別土砂災害危険度〕(平成 30 年 7 月豪雨)

集計単位とした市町			豊岡	新温泉	朝来	養父	丹波	篠山	三田	西宮 芦屋 宝塚	神戸	上郡	合計	
土砂災害警戒区域 (総数)	急傾斜		a	1,021	577	423	491	837	761	197	294	1,741	229	6,571
	土石流		b	743	188	336	385	627	502	184	106	476	116	3,663
地域別土砂災害 危険度で危険判定 となった 土砂災害警戒区域※	急傾斜	災害発生区域	c	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
		災害非発生区域	d	845	0	423	491	556	518	67	294	1,716	3	4,913
	土石流	災害発生区域	e	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	2
		災害非発生区域	f	626	0	336	384	413	344	77	106	476	0	2,762
空振り率(%)	急傾斜		g=d/a	83	0	100	100	66	68	34	100	99	1	75
	土石流		h=f/b	84	0	100	100	66	69	42	100	100	0	75

※土砂災害警戒情報の発表基準(CL)を超過した1kmメッシュに含まれる土砂災害警戒区域

なお、地域別土砂災害危険度は、対象災害 2 件に対し見逃しなく災害捕捉率 100% であった。しかし、図 3.6 の様に市域全域が危険判定となり、今回の豪雨では危険箇所を空間的に絞り込む用途に対しては機能しなかった。

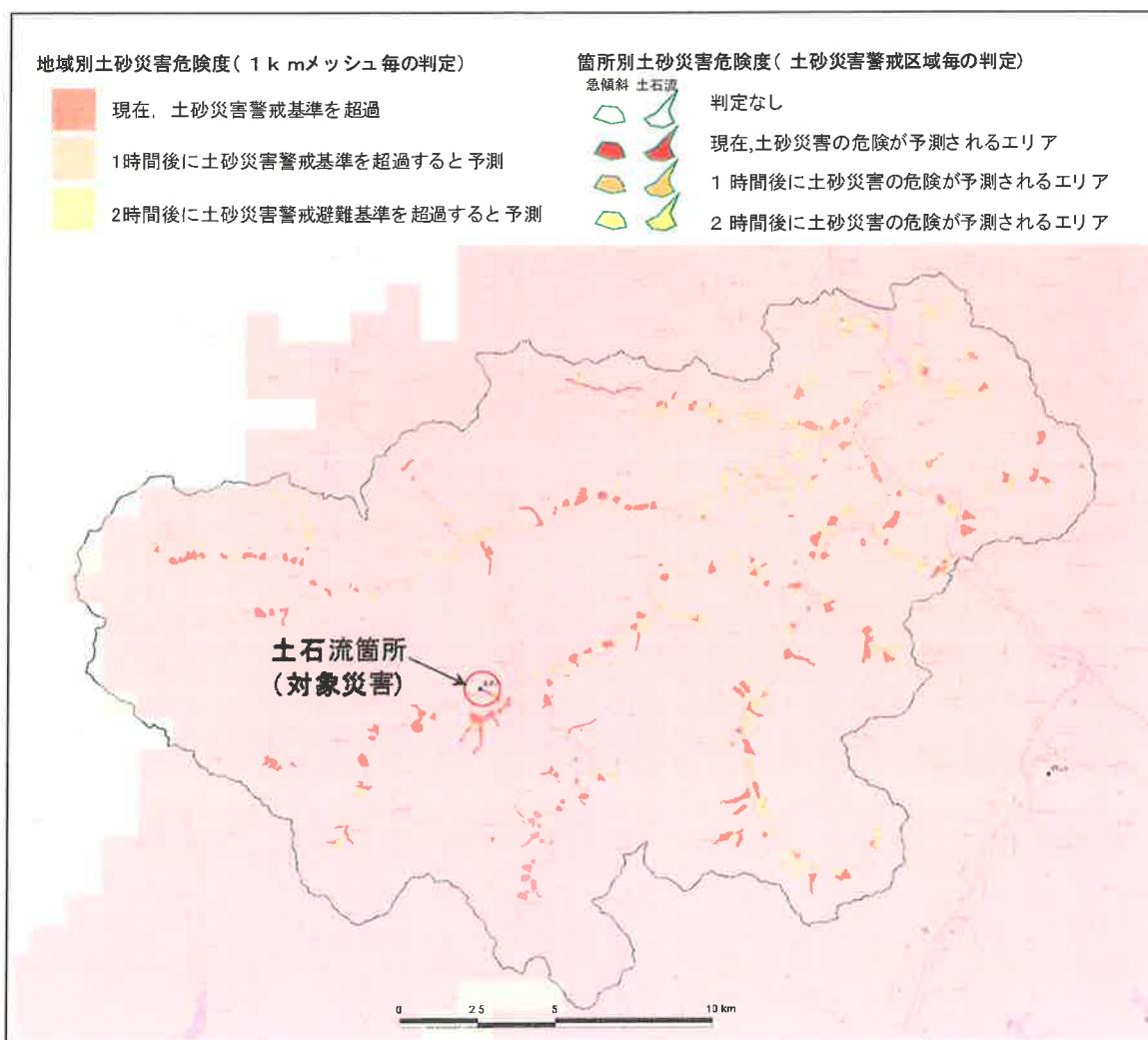


図 3.6 地域別土砂災害危険度と箇所別土砂災害危険度の判定状況例 (平成 30 年 7 月豪雨 ; 養父市)

### (3) 判定タイミングの適正について

発生時刻の判明している災害について、降雨とシステムの判定のタイミングを整理した。図3.7は養父市で発生した土石流の事例である。災害の発生時刻とシステムの判定時刻（実況で危険）は合致している。システムは気象庁降水短時間予報により1時間先、2時間先の計算を行っており、この事例では災害発生の1.5時間前に危険が予測されている。

図3.8は神戸市灘区の事例で、戦前の造成地の盛土が崩壊し、土石流が発生した事例である。

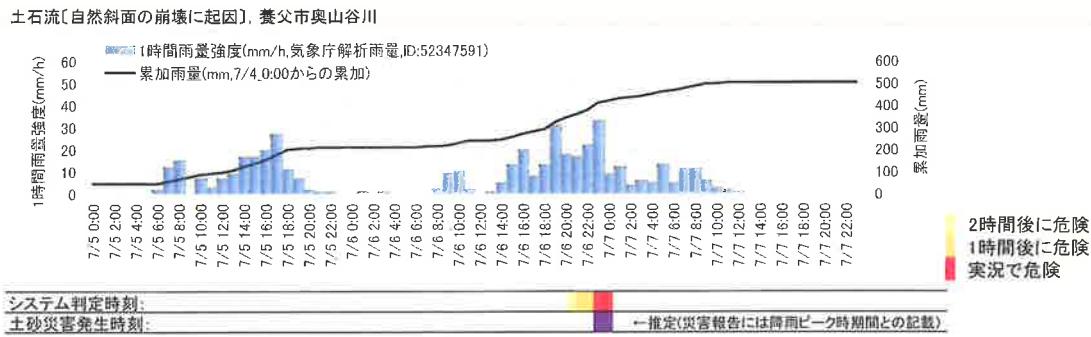


図3.7 災害発生時刻と判定のタイミングの事例（捕捉事例：養父市奥山谷川）

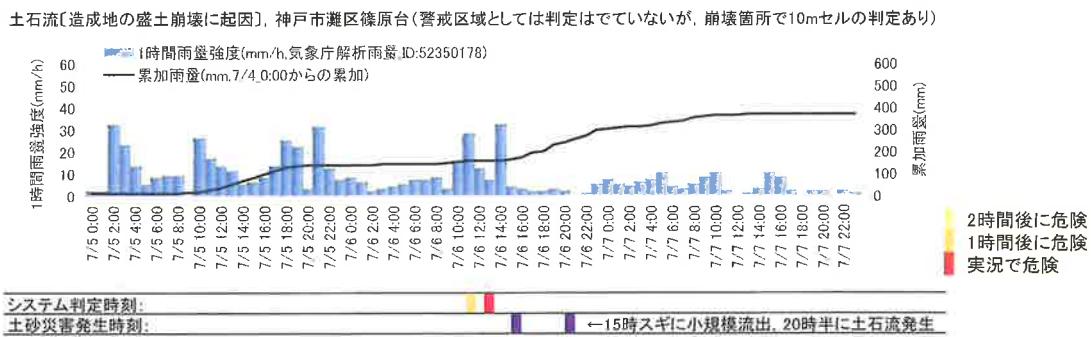


図3.8 災害発生時刻と判定のタイミングの事例（捕捉事例：神戸市灘区篠原台）

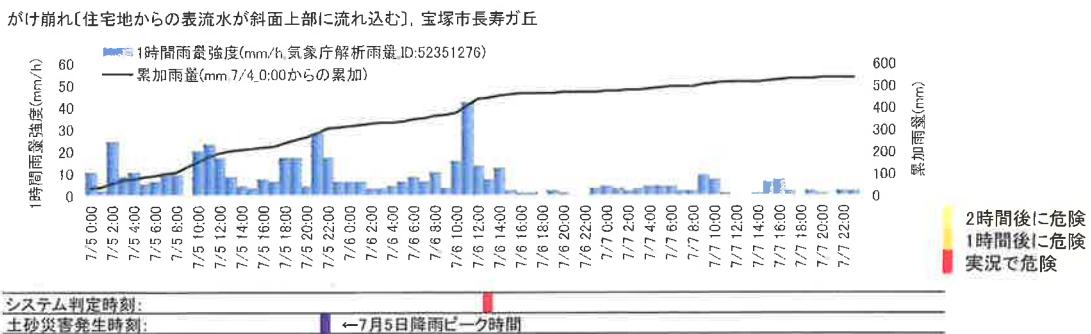


図3.9 灾害発生時刻と判定のタイミングの事例（見逃し事例：宝塚市長寿ガ丘）

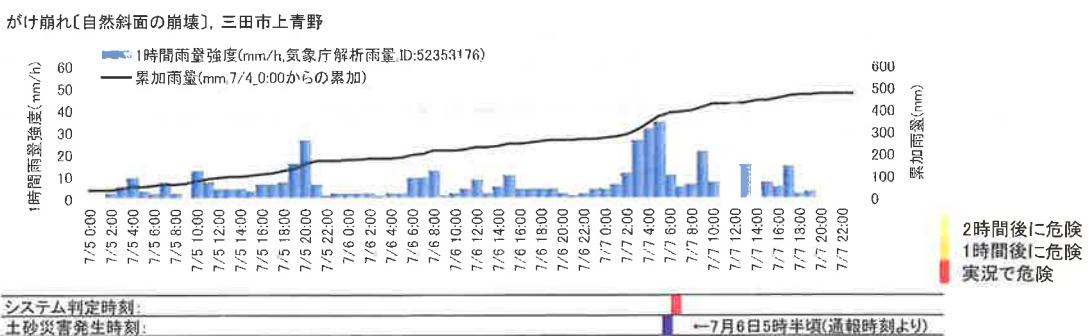


図3.10 災害発生時刻と判定のタイミングの事例（見逃し事例：三田市上青野）

土砂流出は2回あり、1回目は小規模な流出、2回目に規模の大きな土砂流出が発生した。1回目の流出は時間雨量約30mmの降雨ピークの直後であるが、2回目は雨が小康状態の時に発生している。造成地の背後斜面は風化花崗岩の自然斜面であり、地下に多量に浸透した雨水が降雨ピークから遅れて崩壊箇所付近に集中したのではないかと推測される。システムの判定は、崩壊地点の10mセルで1回目の流出の2.5時間前に危険を予測していた。

図3.9は宝塚市で段丘崖が崩壊した事例である。段丘面は宅地化が進み、排水路から溢水した雨水が道路を流れて斜面上部へ流れ込んだのが崩壊の原因と考えられる。システムの判定は7月6日12時であったが、崩壊はそれよりも約15時間前の降雨ピークで発生しており事前の予測はできなかった。

図3.10は三田市のがけ崩れの事例である。自然斜面での発生であるが、小規模ということから3.2では対象外の災害に分類していた。システムの判定は崩壊発生時刻から30分遅れて危険判定となった。

事例は少ないが、長雨型の豪雨に対するシステムの判定タイミングの適正を整理すると下記の様である。

- ・自然斜面の土砂流出（比較的規模の大きな土砂移動現象）の場合、判定タイミングは概ね適正であった（図3.7、図3.11の事例、本報告集の別報<sup>18)</sup>参照）
- ・人工改変地の土砂流出（比較的規模の大きな土砂移動現象／背後斜面が自然斜面）の場合、判定タイミングは概ね適正であった（図3.8、図3.12の事例）
- ・自然斜面のがけ崩れ（斜面の集水域外からの雨水流入などの人為的な影響のあるもの）の判定時刻の予測は難しい（15時間以上遅れる場合があった、図3.9、図3.13の事例、崩壊発生時刻は系外から斜面への流入量により変化すると考えられる）
- ・自然斜面のがけ崩れ（今回発生したほとんどは小規模な事例であった）の場合、判定タイミングは、発生時刻に対してやや遅れる（30分）傾向がみられた（図3.10、図3.14の事例、この原因としては、表土層が長時間にわたり地下水にさらされることで斜面の安定性が低下したためと考えられる）



図3.11 崩壊位置図（養父市奥山谷川）



図3.12 崩壊位置図（神戸市灘区篠原台）



図3.13 崩壊位置図（宝塚市長寿ガ丘）



図3.14 崩壊位置図（三田市上青野）

#### (4) 実用面における課題

これまでの整理で、養父市の土石流事例など比較的規模の大きな自然現象に対しては、空間的にも時間的にも精度が確保できていることが確認できた。しかし、その一方で今回の長雨型の豪雨では、小規模な現象や人為的な影響に伴う現象、地すべり等の発生メカニズムが解析モデルと異なる現象等、本システムでは評価し難い現象が多発することが確認された。

本システムは、土砂災害警戒区域毎に、避難を判断するためのアラート情報を自治体や住民に提供することを第一義に研究・開発が進められている。今回の豪雨においては39件の内、23件（約6割）が土砂災害警戒区域で発生していた。土砂災害警戒区域で発生した災害は、例えば道路側溝が溢れて路肩斜面が崩落した事例等、斜面崩壊とは直接関係のない災害であっても、住民にとっては「土砂による災害」と受け止められることがある。このため、システムを運用する行政側より、土砂災害警戒区域で発生した23件に関して何らかの危険判定を行う方法はないものか、対応が求められた。

表3.5に土砂災害警戒区域で発生した23件の内訳を整理する。この内、現行システムの斜面安定解析手法で解析の困難な現象以外について、次章において崩壊メカニズムを考察し、どのような対応があるのか検討を行うこととした。

表3.5 土砂災害警戒区域で発生した災害（23件）の内訳

土砂災害警戒区域（種別）	崩壊斜面の状態	背後斜面の状態	現 象	対象災害か否	件数	判定内訳(災害捕捉数)		対応	
						空間	時間		
急傾斜	自然斜面	自然斜面	がけ崩れ(小規模) 空間的には捕捉しているが、判定タイミングがやや遅れる	対象外	1	1	0	調査③	
			湧水による崖錐堆積物の二次移動	対象外	2	1	0	難	
			風化岩の崩落	対象外	1	0	0	難	
			地すべり性の崩壊(表土層が厚い崩壊)	対象外	1	0	0	調査④	
	人工斜面 (切土、盛土、擁壁等)	自然斜面	平坦地・緩傾斜面 (宅地・道路)	宅地や道路等の雨水流入に起因する崩壊(表層崩壊)	対象外	5	2	調査②	
			排水能力を上回る地下水の供給に起因する崩壊 (人工斜面部の崩壊や擁壁上部の自然斜面の崩壊)	対象外	5	1	0	調査①	
		平坦地・緩傾斜面 (宅地・建物・道路)	宅地や道路等の斜面外からの雨水流入に起因する崩壊	対象外	1	1	0	難	
			地すべり滑動	対象外	1	0	0	難	
土石流	自然斜面	自然斜面	既往崩壊地の拡大崩壊に伴う土砂流出	対象災害	1	1	1	対応済	
			地すべり性の崩壊(すべり面が深い)に伴う土砂流出 流域面積が小さい渓流(崩壊地と保全対象が近い)	対象災害	1	0	0	調査④ 調査⑤	
			流水による渓岸洗掘に伴う土砂流出(小規模)	対象外	1	0	0	難	
	造成地の盛土	自然斜面	地下水集中による盛土崩壊に伴う土砂流出	対象外	1	0	0	調査①	
		造成地	地下水集中による盛土崩壊に伴う土砂流出	対象外	1	1	1	難	
土石流として計上されているが、土石流警戒区域内にある斜面崩壊(斜面部分は別途土砂災害警戒区域(急傾斜)に指定されており、急傾斜としては危険判定となっている)				対象外	1	—	—		
合計					23	8	2		

##### ・現行システムで用いている斜面安定解析手法で解析の困難な現象

解析モデルの対象外の現象：表流水による表土層の侵食や崖錐の二次移動、岩塊の崩落、地すべり滑動等

人工的な影響によるもの：地下水の供給から崩壊の発生場所まですべて人工改変地であるもの

次章で検討を行う事項は、次の5つであり、23件中、14件（約6割）に対応する。

- 調査①：自然斜面と人工改変地が混在する警戒区域で、自然斜面部分の予測精度向上の対応検討（6件）
- 調査②：道路等による表流水の集中に伴う崩壊（自然斜面）のモデルの適応性の確認（5件）
- 調査③：崩壊（自然斜面）の判定タイミングの遅れへの対応検討（1件）
- 調査④：崩壊深度の大きい崩壊（自然斜面）に対するモデルの適応性の確認（2件）
- 調査⑤：流域面積の小さい渓流の予測精度向上への対応検討（崩壊面積率の閾値設定）（1件）

#### 4. 崩壊メカニズムの考察

##### 4. 1 現地調査の概要

3.3(4)で整理した調査①～⑤に対する土砂災害警戒区域より、現地調査を行う代表箇所を選定した。表4.1に現地調査箇所一覧を図4.1に位置図を示す。選定にあたっては、私有地や工事中の箇所、地域への配慮等を考慮した。このため、2の表六甲ドライブウェイと3の六甲山自然保護センターについては、平成30年7月豪雨で崩壊の発生した斜面のうち、土砂災害警戒区域ではない事例より選定している。

表4.1 現地調査箇所一覧表

調査箇所		土砂災害警戒区域 の有無	調査目的	
1	神戸市須磨区 高尾台	土砂災害警戒区域 (急傾斜)	調査①	自然斜面と人工改変地が混在する警戒区域で、自然斜面部分の予測精度向上の対応検討
2	神戸市灘区 表六甲ドライブウェイ	警戒区域外 道路のり面		道路等による表流水の集中に伴う崩壊（自然斜面）のモデルの適応性の確認
3	神戸市灘区 六甲山自然保護センター	警戒区域外 自然斜面	調査③	崩壊（自然斜面）の判定タイミングの遅れへの対応検討
4	三田市上青野	土砂災害警戒区域 (急傾斜)	調査④	表土層の深い崩壊（自然斜面）に対するモデルの適応性の確認
5	丹波市氷上町横田	土砂災害警戒区域 (土石流)	調査⑤	流域面積の小さい渓流の予測精度向上への対応検討（崩壊面積率の閾値設定）
		土砂災害警戒区域 (土石流)		

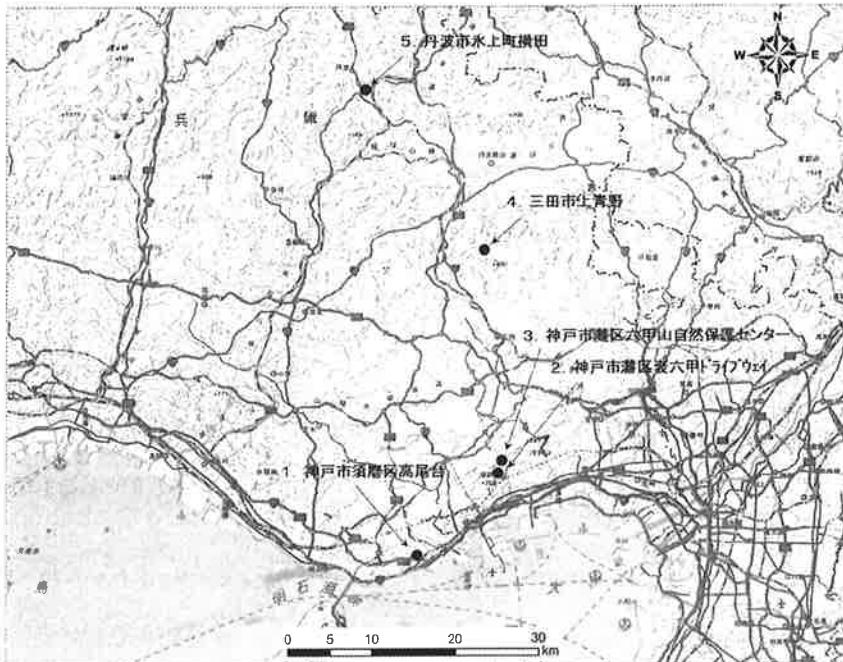


図4.1 現地調査箇所位置図

#### 4. 2 神戸市須磨区高尾台（土砂災害警戒区域）

今回の豪雨で多くみられた斜面の一部が切土や擁壁等の人工改変地となっている市街地内の崩壊事例より、神戸市須磨区高尾台（図 4.2）で発生した崩壊について紹介する。

### (1) 崩壞地狀況

現地状況を写真 4.1 に、周辺の地質状況を図 4.3 に示す。崩壊の原因是、誘因として豪雨に伴い、マサ化した部分に施工されていた石張り工の背面の水位が上がり、不安定化したものと考えられる。一方素因として、のり面に出現する地質が不均質で、崩壊箇所にはマサ化した花崗岩が分布していた。また、南北方向に走向を持つ亀裂が階段状に分布しており、潜在的な開口亀裂が岩盤に発達していたこと、ここに水圧が作用し、バックプレッシャーにより、崩壊を引き起こしたと想定される。崩壊前の写真では、石積み工がわずかにはらんでいるように見受けられる。さらに、尾根近くの段差から斜面クリープが以前より継続していたことが想定される。ボーリング調査結果および孔内傾斜計観測結果に基づき、平面図および地質断面を作成し図 4.4, 4.5 に示す。



図4.2 崩壊発生位置図（神戸市須磨区高尾台）

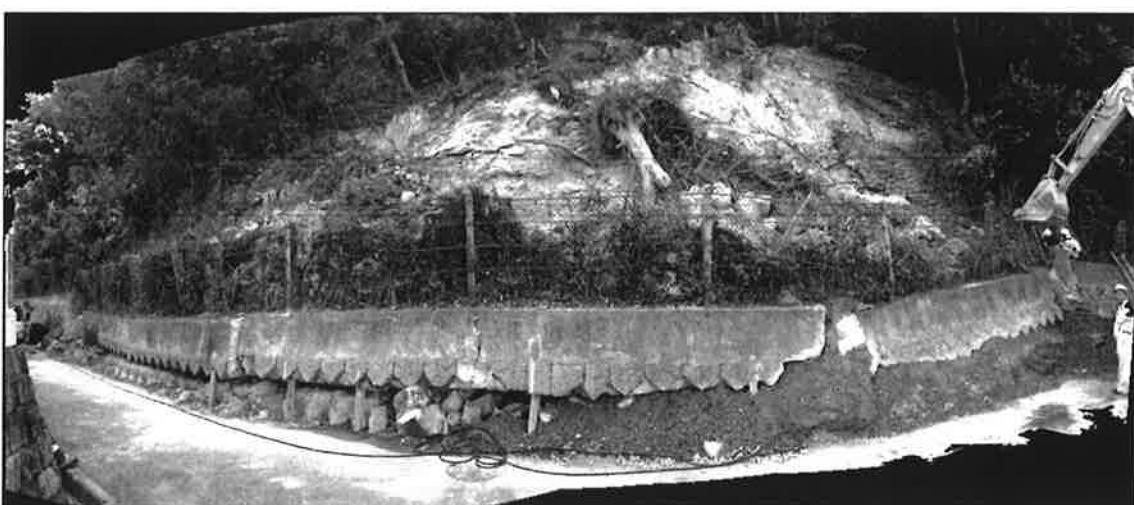


写真 4.1 崩壊状況の全景写真（神戸市須磨区高尾台）

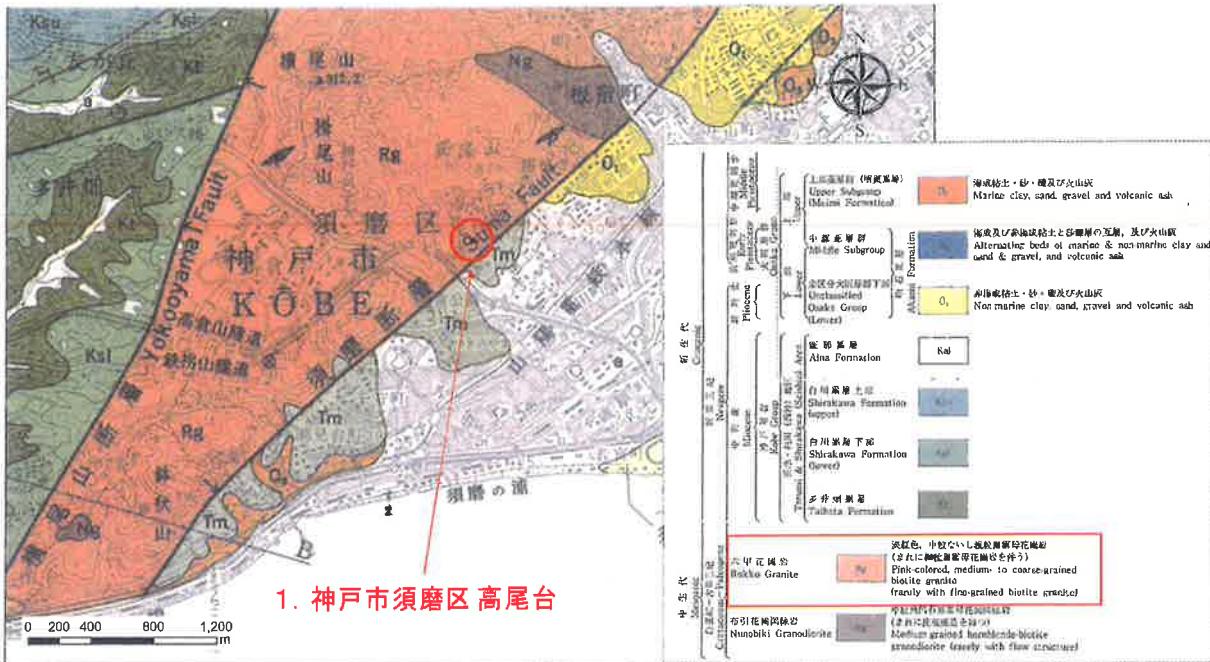


図 4.3 調査地周辺の地質状況 (5万分の1地質図福「須磨」より引用)

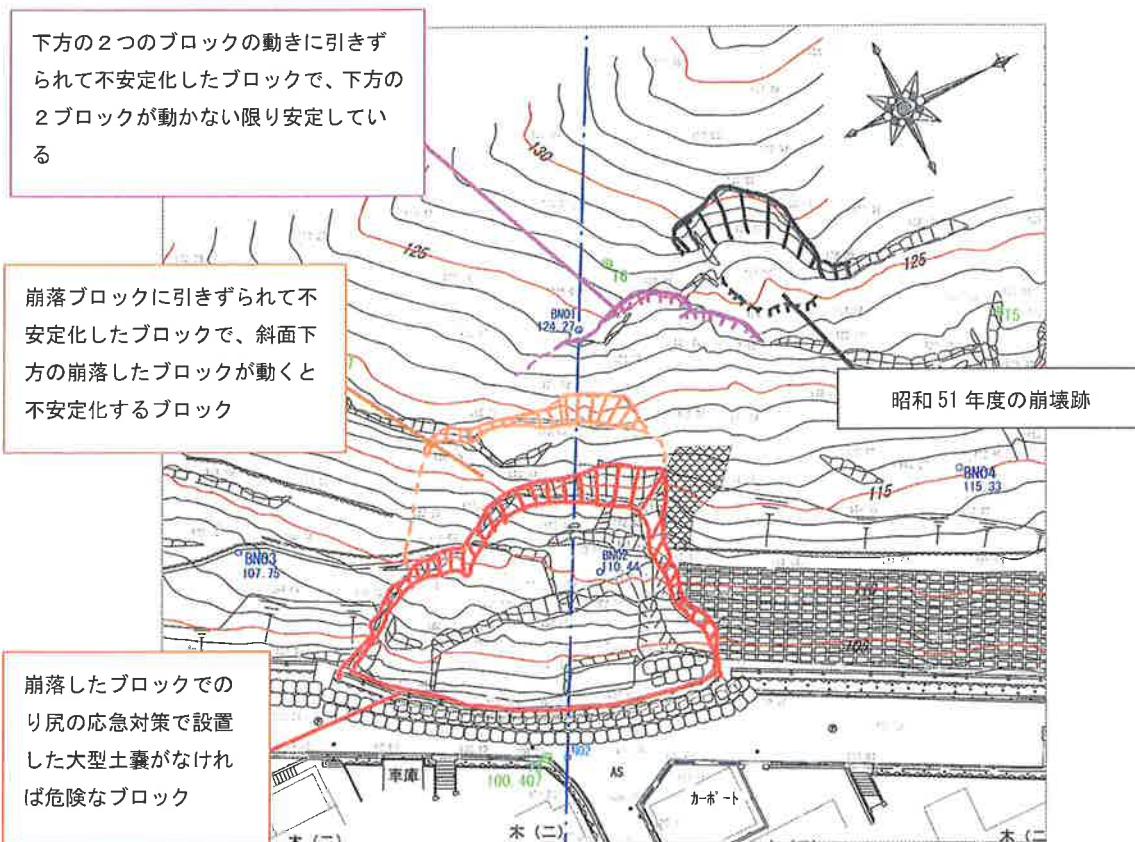


図 4.4 変状状況概要図

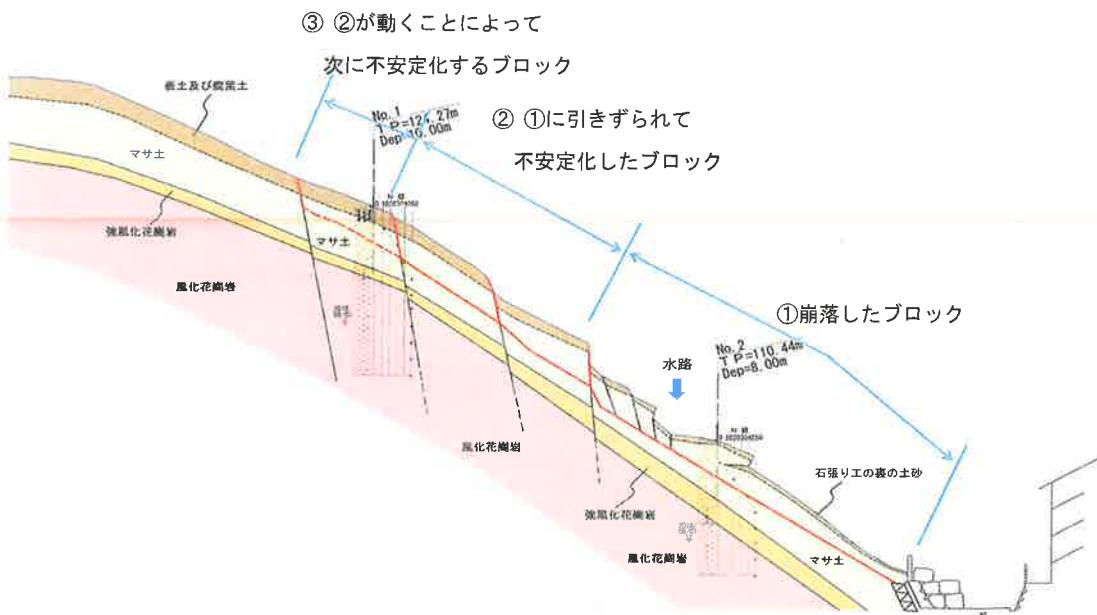


図 4.5 地質断面図

崩壊地に位置するメッシュの位置図及びモデル条件を図 4.6 に、システムの判定状況を図 4.7 に示す。崩壊地に位置するメッシュでは、集水面積が小さく、最大でも 0.4m 程度しか地下水位が上昇せず、崩壊判定に至っていない。崩壊要因は石張り施工による排水不良が発生し、システム上よりも地下水位が高くなり、崩壊に至ったと考えられる。



図 4.6 崩壊地に位置するメッシュ位置とモデル条件(高尾台)

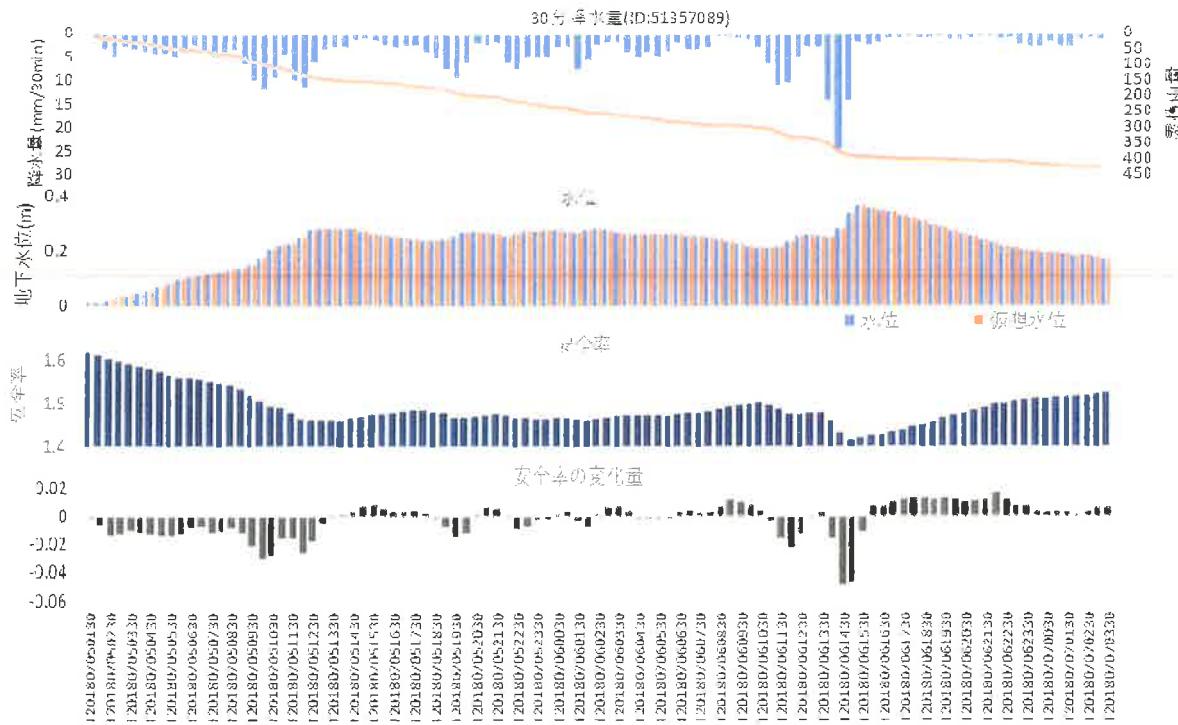


図 4.7 崩壊地に位置するメッシュの安全率、水位および安全率の変化量(高尾台)

## (2) 解析セルの細分化による試算

原因となった石張り工等は高さが数 m 程度であり、システムで用いている 10m セルよりもスケールの小さい地形改変である。このため、10m セルの精度では現地の地形状況を反映できていない可能性があることから、解析セルを 5m として危険度の再計算を行った。レーザー測量成果による 1mDEM から 5mDEM を作成し、5m セルの地表面の傾斜を測定し、新たに表土層厚と基盤勾配を設定した。水位については、現行の 10m セルで求めた水位を適用した。10mDEM と 5mDEM の地表面の傾斜区分を図 4.8 に、危険度の計算結果を図 4.9 に示す。現行の 10m セルでは崩壊判定とならなかつたが、5m に細分化したモデルでは、崩壊地周辺で崩壊判定となっている。

解析セルを細分化することで、より人工改変地と自然斜面の境界部の傾斜変化を再現することが可能となり、実地形を反映した解析になると考えられるが、今回の崩壊は、石張り工背面の水位上昇に伴う上部斜面の不安定化が原因であり、崩壊の発生メカニズムが異なる。現システムでは、斜面ごとに排水能力を評価し、擁壁背面の地下水位の変化を再現することはできない。このため、解析セルの細分化は、これまでと同様に自然斜面の表層崩壊において、より細かい地形情報を反映することで精度向上がはかれるが、今回対象の災害では現象を再現している訳ではないので、土砂災害警戒区域における見逃し判定の低減のための代替的な手法の一つと考える。また、空振り判定も多くなることが予想されることから、解析パラメータ等の設定にあたっては、現場の災害特性を考慮し、再現計算等を行うなど十分に吟味する必要がある。

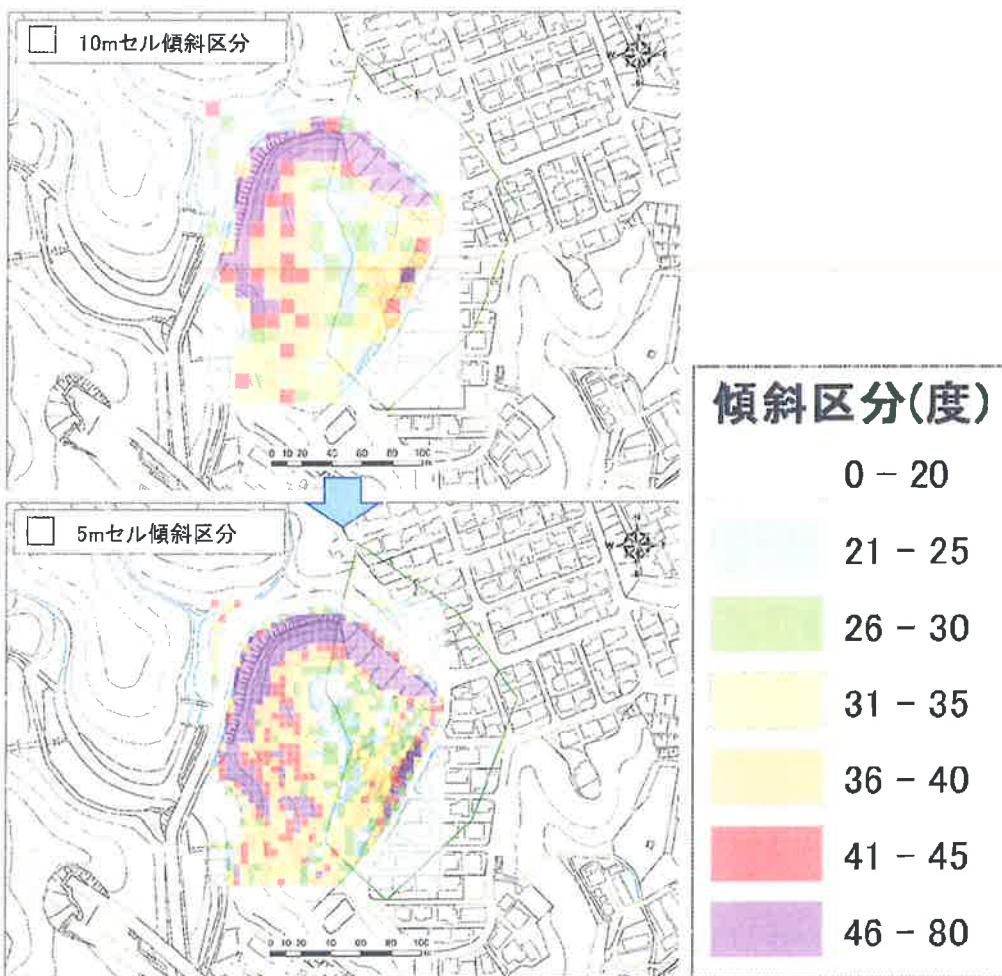


図 4.8 解析セルの大きさによる地形傾斜の違い(高尾台)

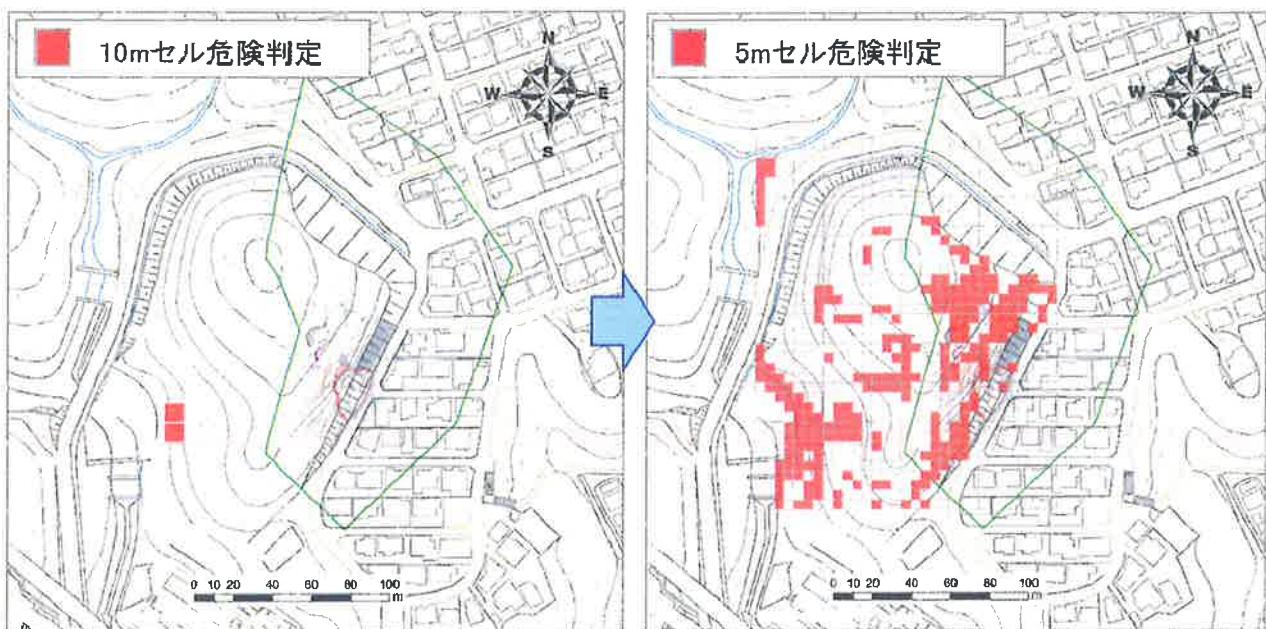


図 4.9 解析セルの大きさによる危険度判定の違い(高尾台)

#### 4. 3 神戸市灘区表六甲ドライブウェイ（道路法面、切土斜面）

4.2で検討した解析セルの細分化について、神戸市灘区表六甲ドライブウェイの切土斜面の崩壊（図4.10）で検証した事例を紹介する。

##### （1）崩壊地状況

崩壊は、写真4.2に示すように道路上側と下側の2か所で発生した。



図4.10 崩壊発生位置図（神戸市灘区表六甲ドライブウェイ）

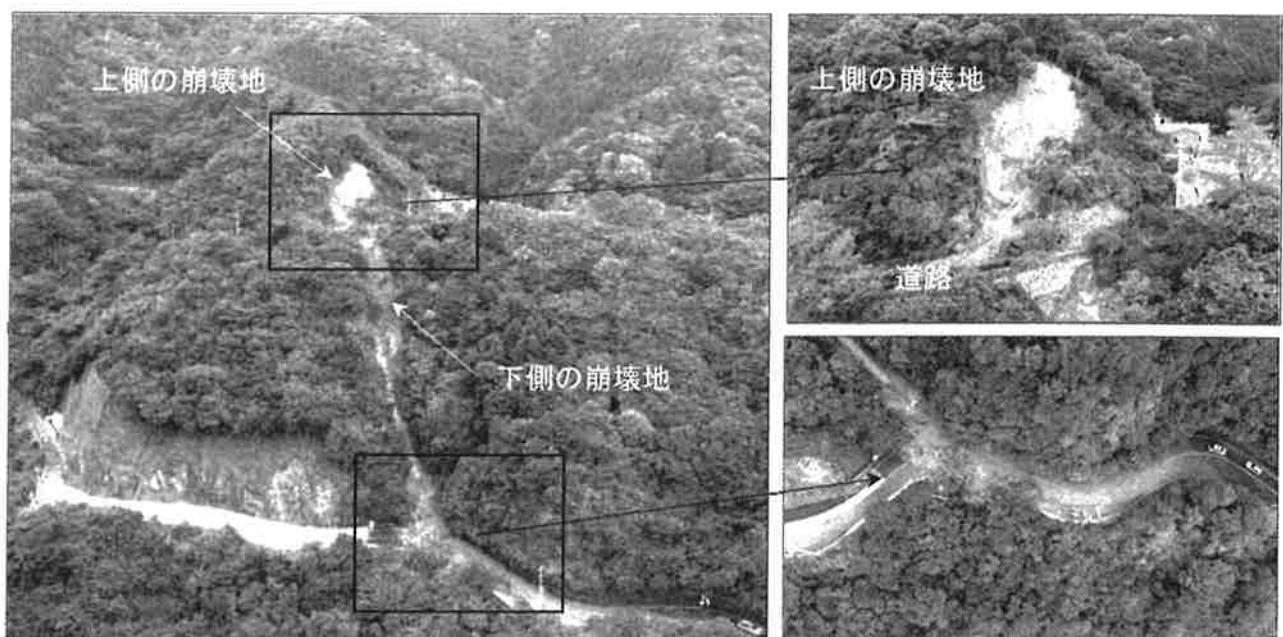


写真4.2 崩壊発生状況（神戸市灘区表六甲ドライブウェイ）

（国土交通省近畿地方整備局六甲砂防事務所平成30年7月5日～【平成30年7月豪雨】の概要・対応状況《第一報 7月17日 16時時点》より）

該当斜面には、六甲花崗岩が分布し、斜面足元にはひん岩の貫入が認められる。規模の大きな断層の通過は確認されていない（図 4.11）。

道路上側の崩壊は、左半分の亀裂に富んだ岩盤がひん岩、右半分の風化しやや軟質な岩盤が花崗岩で、崩壊は貫入境界に沿って発生した可能性がある（写真 4.3）。道路下側の崩壊は、周辺に比較すると斜面のやや緩斜面の表層に堆積した表土および崖錐堆積物中で発生している（写真 4.4）。風化状況から基盤は花崗岩であると想定される。過去の空中写真判読より、当該箇所ではガリ状の崩壊地が確認でき（1949 年撮影空中写真）、道路上側斜面は切土のり面であることがわかった（1961 年撮影空中写真）。

崩壊形態として、道路上側は、切土のり面崩壊で、貫入岩と花崗岩の地層境界に沿って風化花崗岩が崩落したものである。一方、道路下側の斜面崩壊は、旧崩壊跡に沿ってやや周囲より緩傾斜の斜面表層に堆積した表土および崖錐堆積物が崩落したものである。

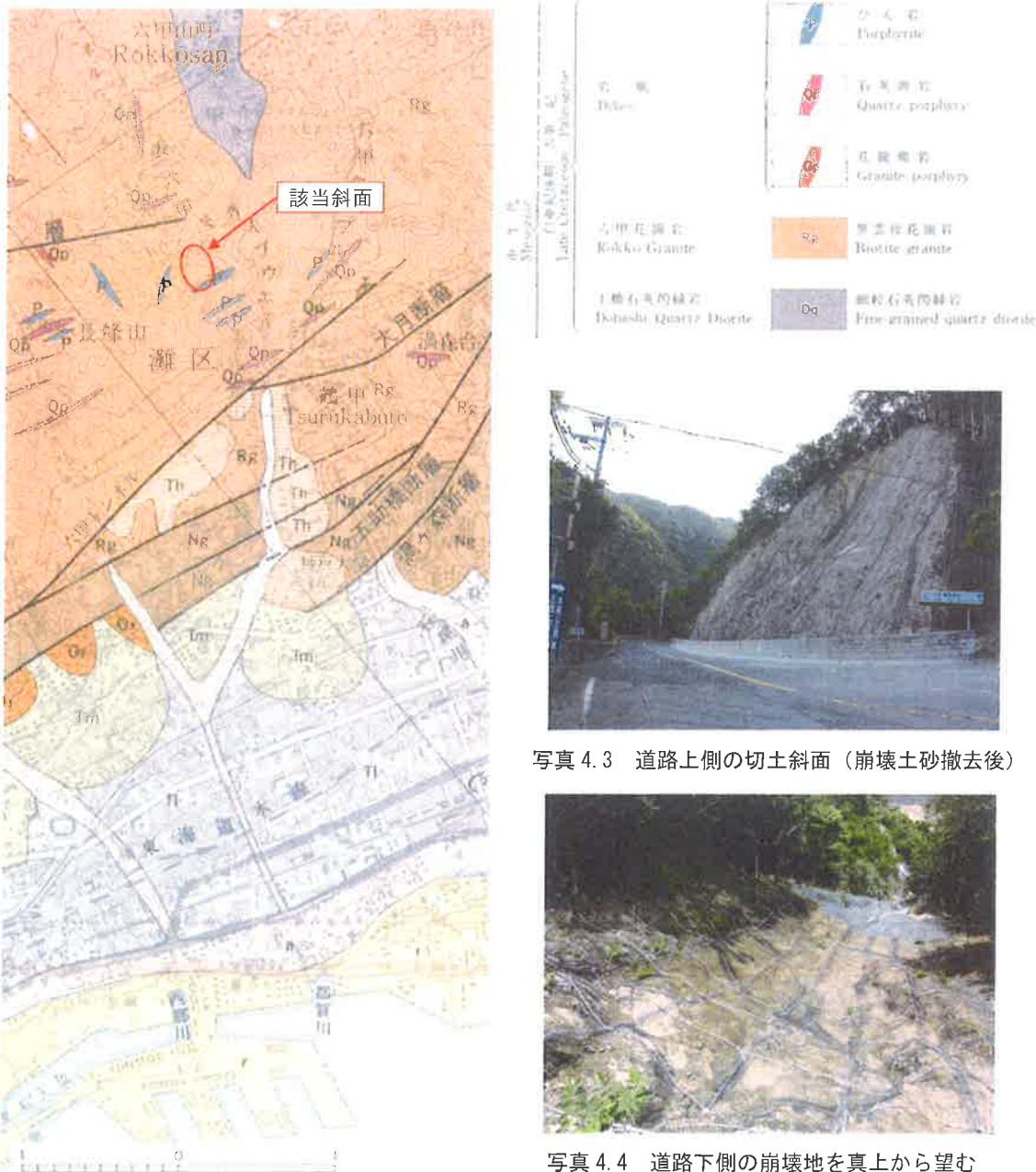


写真 4.3 道路上側の切土斜面（崩壊土砂撤去後）



写真 4.4 道路下側の崩壊地を真上から望む

図 4.11 調査地周辺の地質図（5万分の1地質図福「神戸」より引用）

崩壊地に位置するメッシュの位置図及びモデル条件を図 4.12 に、システムの判定状況を図 4.13, 4.14 に示す。道路上部の崩壊地に位置するメッシュでは、集水面積が小さいので、地下水位が上昇せず、崩壊判定に至っていない。崩壊要因は切土施工に起因すると考えられる。道路下側の崩壊地に位置するメッシュでは、降雨イベント前期の 2 回目の降雨ピーク時に満水状態となり、判定が出た。斜面中腹部に位置し、集水面積が大きかった。道路下側の崩壊はシステムで捕捉されている。

表六甲 道路上側崩壊箇所 現行システムの判定状況 図の□メッシュ	表六甲 道路下側崩壊箇所 現行システムの判定状況 図の□メッシュ
崩壊実績:あり 崩壊判定:なし	崩壊実績:あり 崩壊判定:あり
微地形区分 谷壁斜面	微地形区分 谷壁斜面
SLOPE 53.684	SLOPE 43.146
層厚 0.62	層厚 0.778
単位体積重量 17	単位体積重量 17
飽和単位体積重量 19	飽和単位体積重量 19
有効粘着力 5	有効粘着力 5
有効内部摩擦角 31	有効内部摩擦角 31
有効空隙率 0.35	有効空隙率 0.35
透水係数 0.056	透水係数 0.056
最大水位 0.381	最大水位 0.778
最小安全率 1.223	最小安全率 0.989

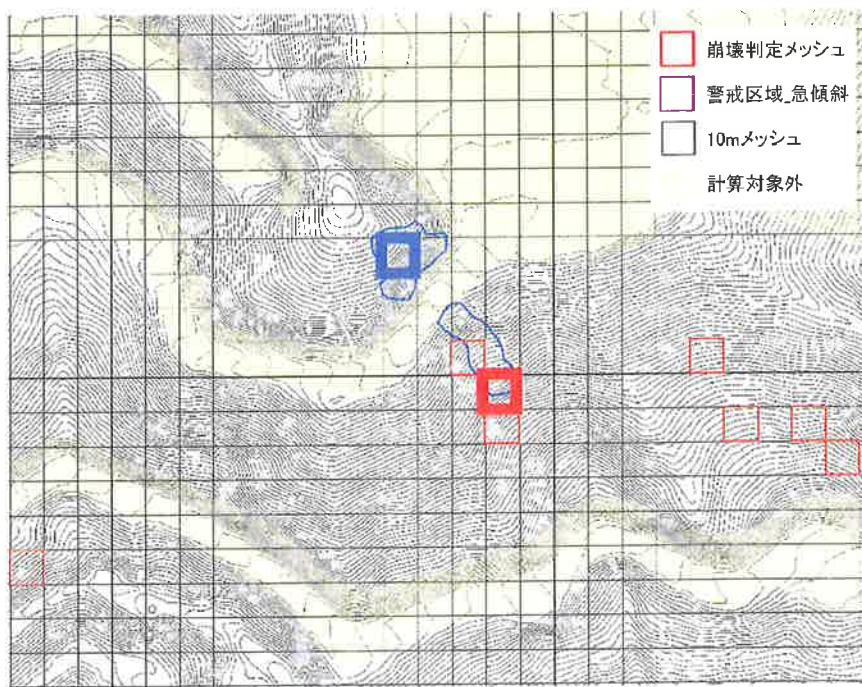


図 4.12 道路上側および下側の崩壊地に位置するメッシュ位置とモデル条件

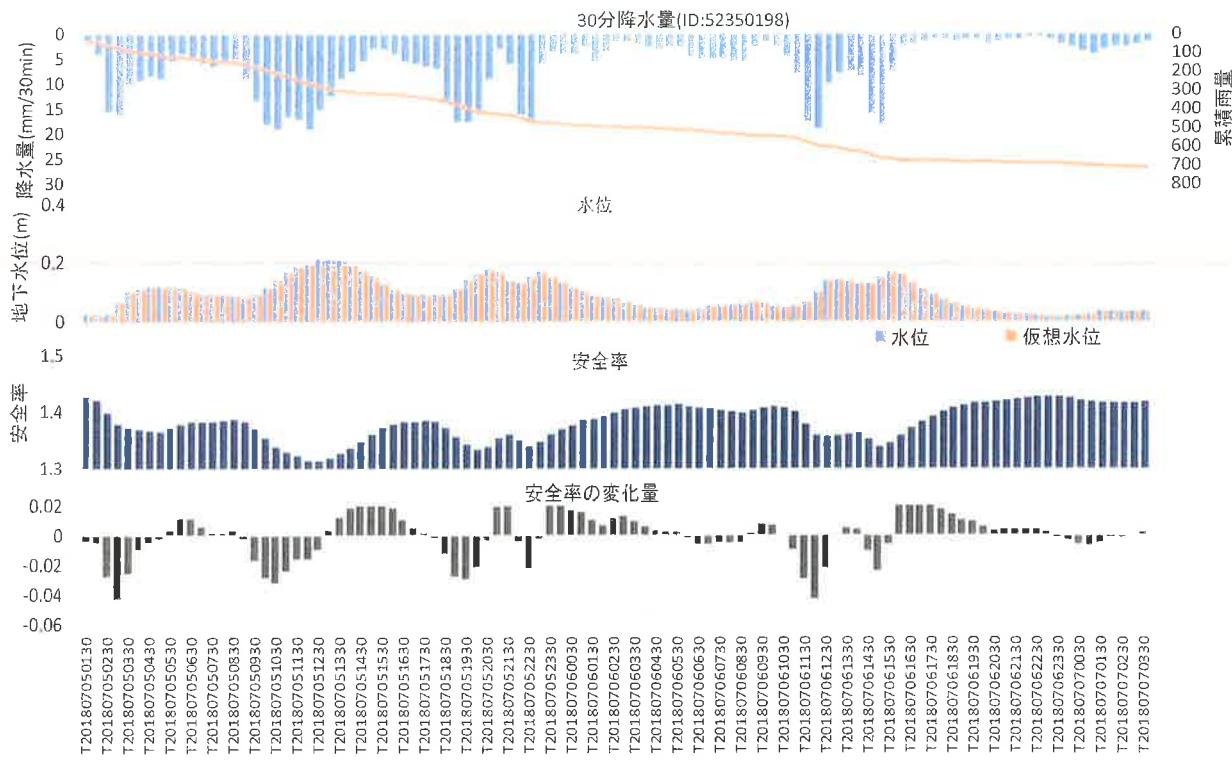


図 4.13 道路上側崩壊地に位置するメッシュの安全率、水位および安全率の変化量(表六甲 ドライブウェイ)

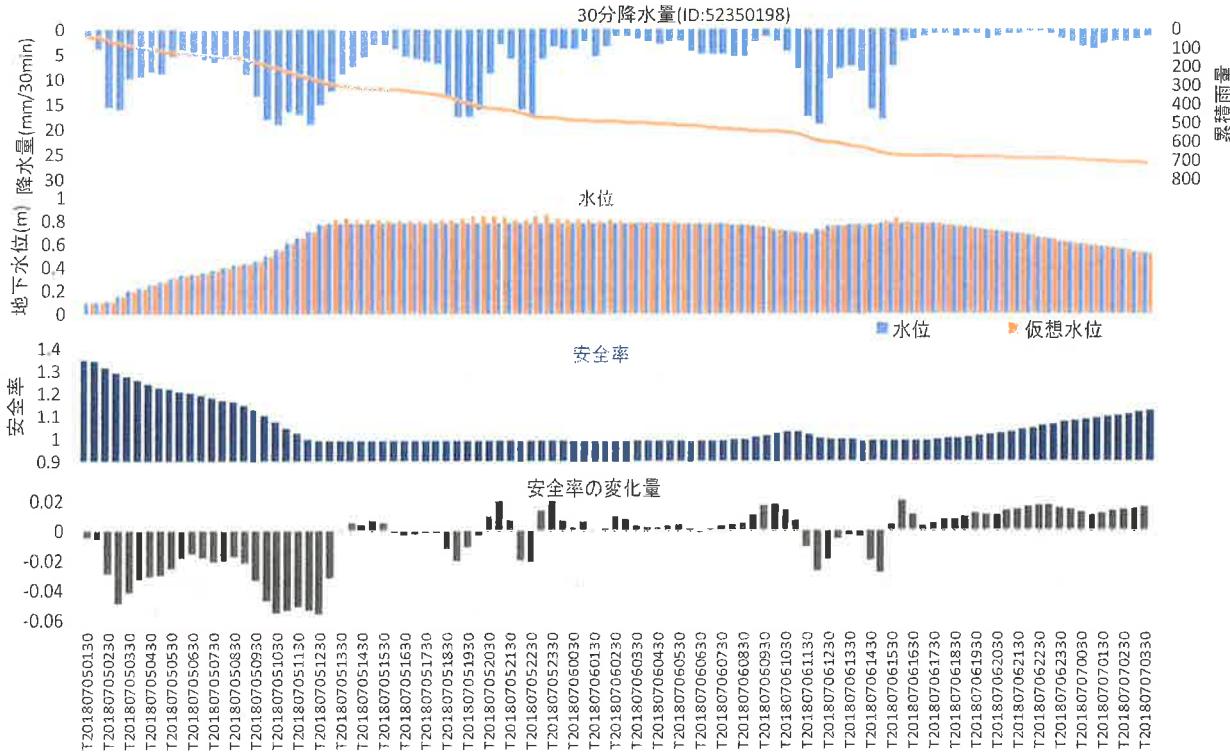


図 4.14 道路下側崩壊地に位置するメッシュの安全率、水位および安全率の変化量(表六甲 ドライブウェイ)

## (2) 解析セルの細分化による試算

崩壊判定とならなかった道路上側の斜面（切土のり面）について、4.2 と同様に土砂災害警戒区域における見逃し判定の低減のための代替的な手法として、5m セルで再現計算を実施した。10mDEM と 5mDEM の地表面の傾斜区分を図 4.15 に、危険度の計算結果を図 4.16 に示す。切土のり面の傾斜区分をみると、10m セルでは頂部斜面の緩傾斜地や斜面下部の道路の平坦面が反映され、斜面の上部と下部で 26~35 度の傾斜区分となっているが、5m セルでは斜面のほぼ全面が 46 度以上の急斜面となっている。危険度の試算では、10m セルでは崩壊判定とならなかったが、5m に細分化したモデルでは、切土のり面で 2 セルが崩壊判定となった。

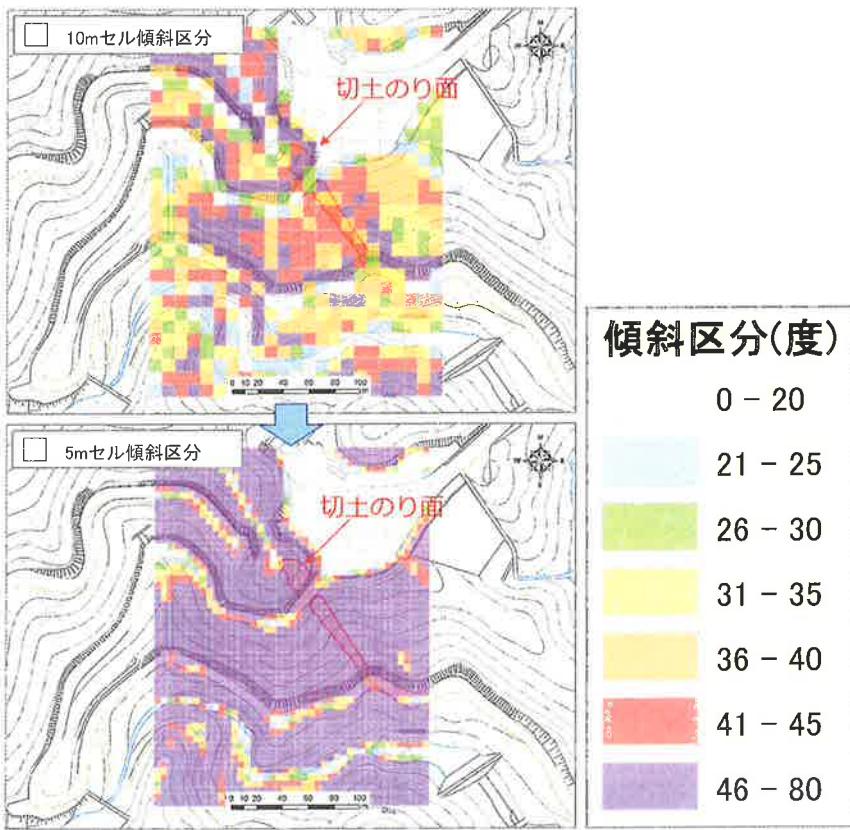


図 4.15 解析セルの大きさによる地形傾斜の違い(表六甲 ドライブウェイ)

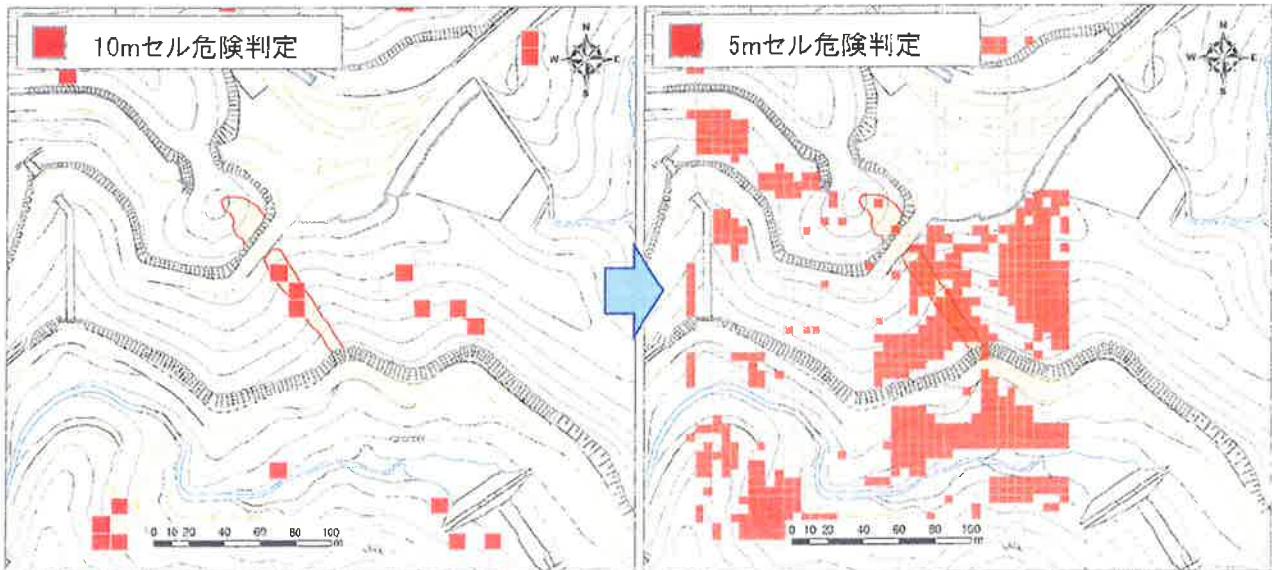


図 4.16 解析セルの大きさによる危険度判定の違い(表六甲 ドライブウェイ)

#### 4. 4 道路近傍での崩壊事例（六甲記念碑台）

##### (1) 検討概要

本報文では、平成 30 年 7 月豪雨によって発生した、六甲山自然保護センターの南側に位置する自然斜面を対象に検討を行った（図 4.17）。対象地付近では、平成 30 年 7 月豪雨のみならず、平成 26 年 8 月豪雨においても斜面崩壊が発生している。箇所別土砂災害危険度予測システム（以下、本システム）では、両災害の降雨期間中に発生した斜面崩壊を危険判定（捕捉）として予測できている斜面が多いが、検討対象地内において平成 30 年 7 月豪雨期間中に発生した斜面崩壊を危険判定できていない（見逃し）斜面崩壊が存在した。本報文では、危険度判定できていない崩壊地の発生原因を現地調査により明らかにし、本システムにより発生原因を検証した結果について報告する。

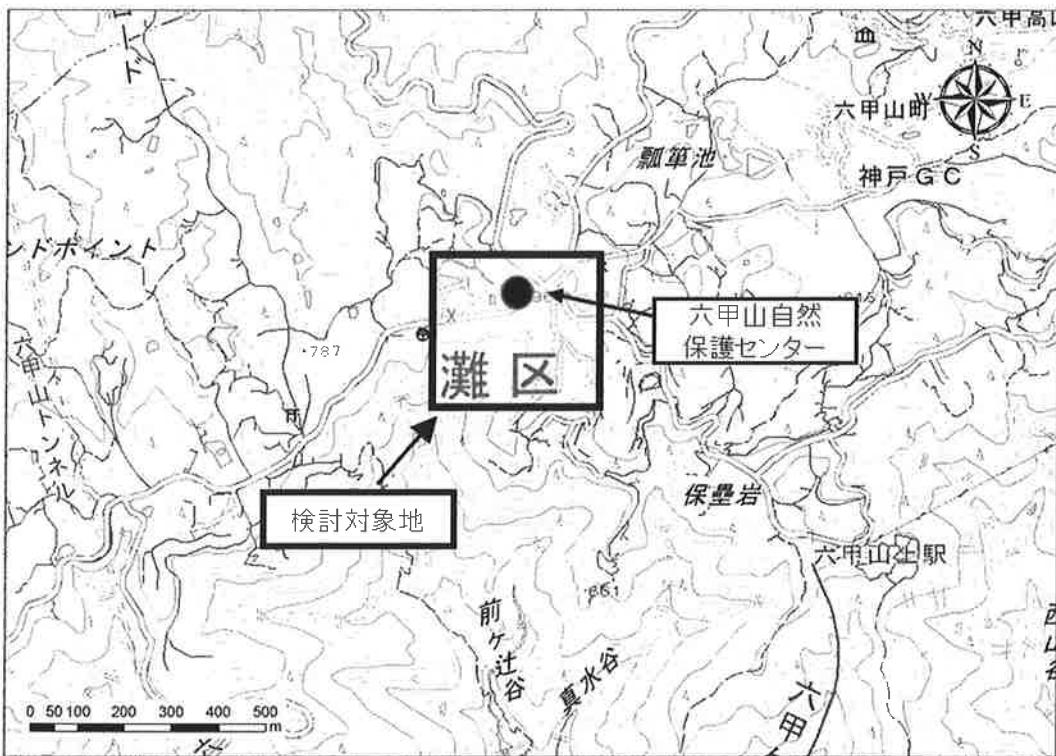


図 4.17 六甲山山頂における検討対象地

六甲山自然保護センター雨量観測所における平成 30(2019)年 7 月 4 日 1:00 から 7 月 8 日 5:00 の降雨状況を図 4.18 に示す。降雨期間中の最大時間雨量は、7 月 6 日 12:00 の 45mm であり、4 日間の累積雨量は 918mm を記録した。

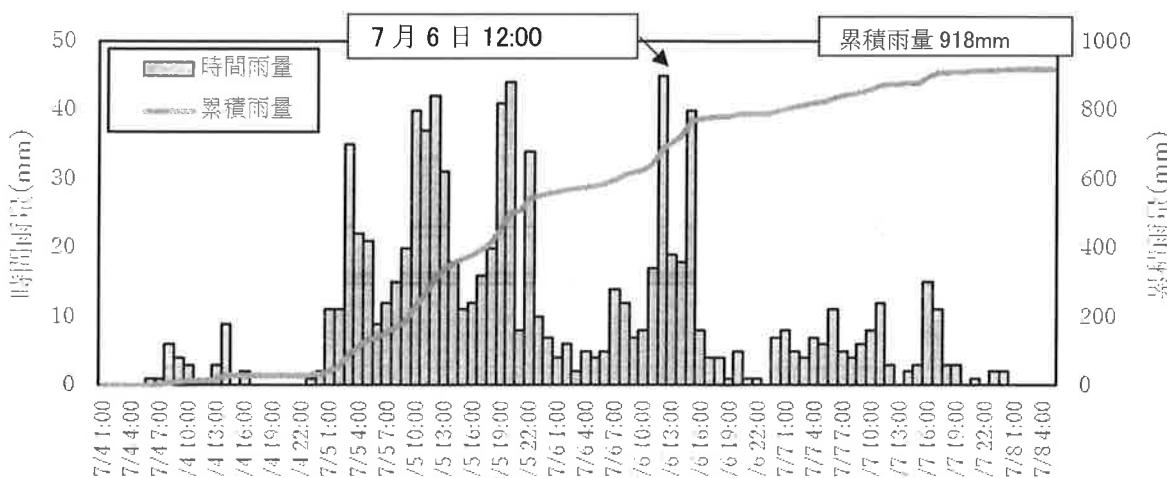


図 4.18 六甲山自然保護センター雨量観測所(国土交通省水文水質データベース)の  
平成 30 年 7 月豪雨期間中の時間雨量時系列変化

## (2) 崩壊地の概要

神戸市市域で運用中の箇所別土砂災害危険度予測システムにおける解析モデル（傾斜角および層厚）と平成 30 年 7 月豪雨期間中の最大水位および最小安全率の値を図 4.19 に示す。運用中の本システムの危険度判定は、安全率絶対値および安全率絶対値の変化率を用いた 2 軸判定により斜面の危険度を判定している。本システムでは安全率絶対値が 1 未満とならないセルは危険度判定とならないため、ここでは安全率絶対値に着目して検討をすすめることとした。

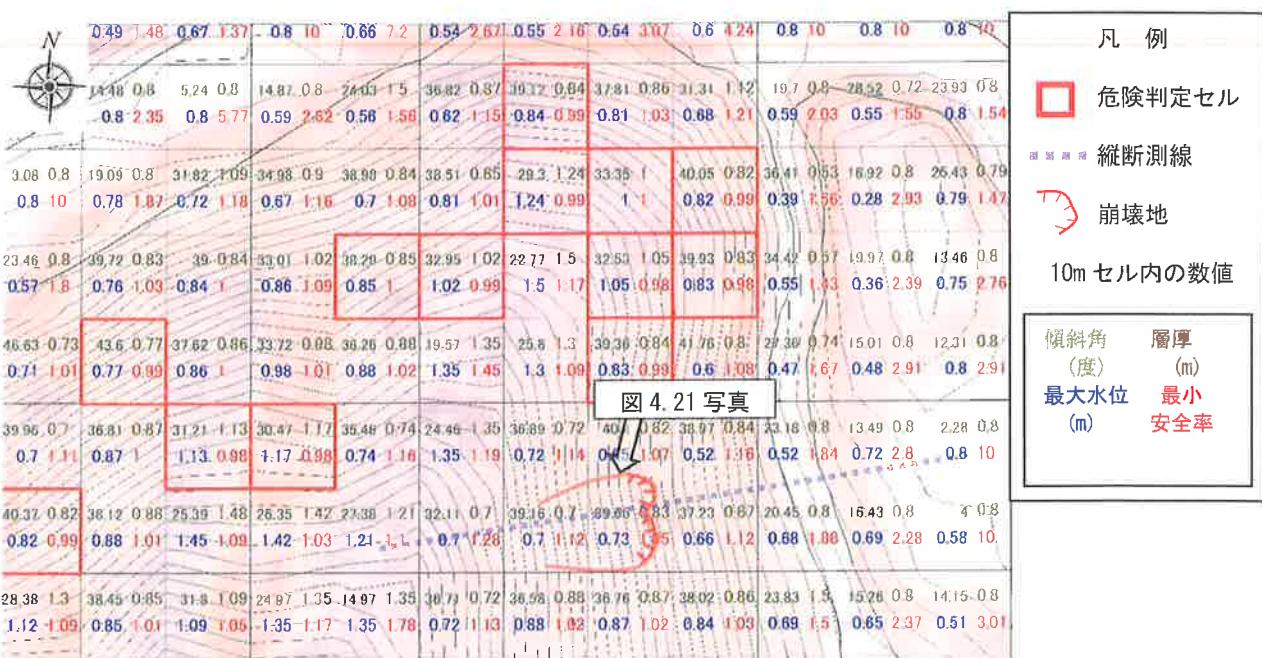


図 4.19 対象崩壊地付近の解析モデル条件と対象崩壊地位置図

崩壊地該当セルの地下水位と安全率の時系列変化（図 4.20）をみると、降雨の継続に伴い徐々に安全率が低下し、最大地下水位 0.73m（最大地下水位/層厚=0.88）時に最小安全率 1.06 となっている。崩壊地セルは、10mDEM から作成した等高線から分かるように、解析モデルでは平衡斜面で、集水性の高いセルではない。そのため、今回のような豪雨でも安全率は 1.0 未満とならず、危険判定条件に至らず見逃し判定となった。

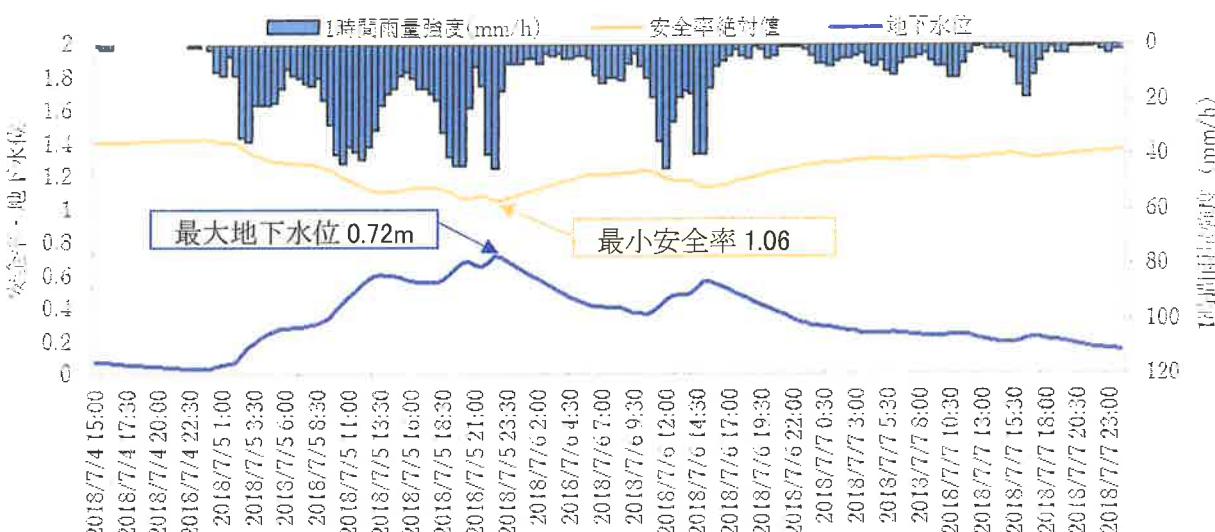


図 4.20 崩壊地滑落崖該当セルの安全率・地下水位・1 時間雨量強度の時系列変化

### (3) 崩壊発生メカニズム

対象崩壊地の現地調査を実施したところ、図4.21左写真に示すように崩壊地滑落崖付近の層厚は崩壊地側面の地表面から推定すると約0.8mであった。モデルでは、層厚0.83mとほぼ整合していた。図4.21右縦断図に示すようにモデルの地表面傾斜角は、斜面上部が37.23度、中腹は39.16度、下部は32.11度で、現地で崩壊後計測した傾斜は、斜面上部が36度、中腹は40度、下部は32度モデルとほぼ整合していた。

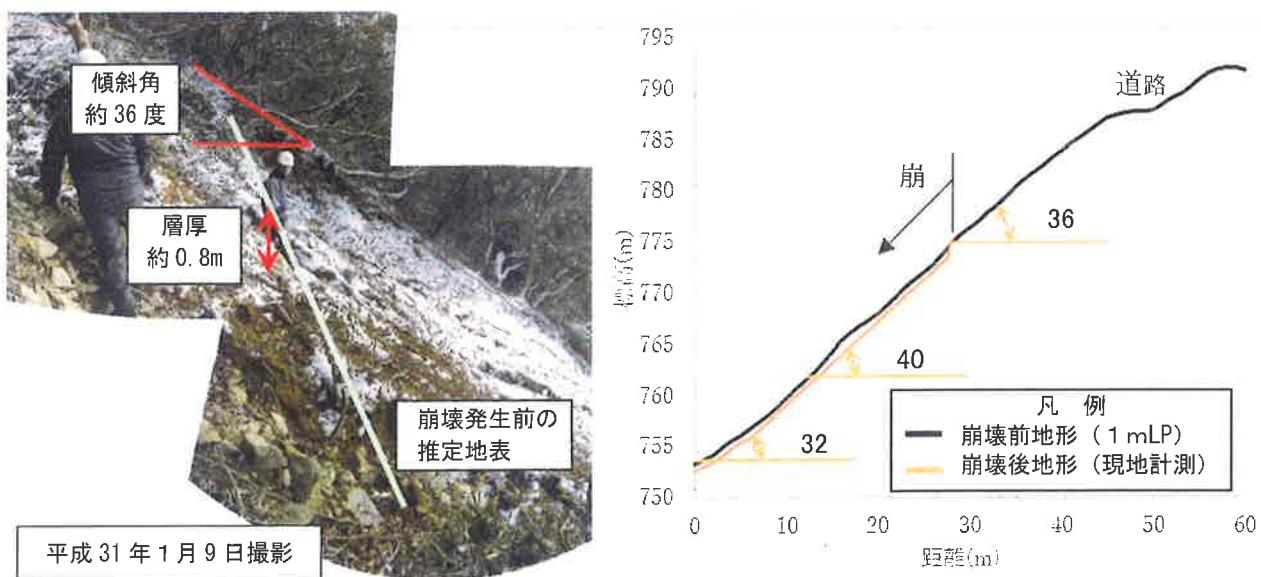


図4.21 現地調査による崩壊地の計測結果とモデルの比較

崩壊地付近の現地の地形とモデルはほぼ整合していることが判明したが、現地調査により滑落崖上部に地表水の流下痕跡が確認できた。この流下痕跡は、斜面の上部にある道路に続いていた（写真4.5）。



写真4.5 崩壊地滑落崖の状況（平成31年1月9日撮影）（撮影位置 図4.22写真①）

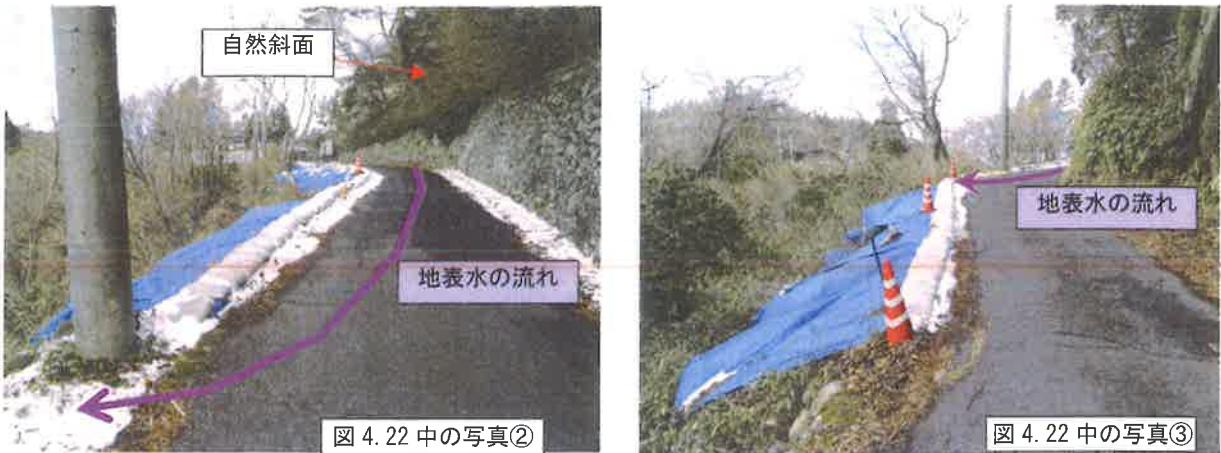


写真 4.6 崩壊上部に存在するアスファルト道路の現地写真（平成 31 年 1 月 9 日撮影）

崩壊発生斜面の上部に存在する道路には、平成 26（2014）年 8 月豪雨後に道路からの路面排水が斜面に流出することを防ぐためブルーシートおよび土のうが設置されていた。この土のうは一部、未設置箇所が存在しており、その部分から、崩壊地斜面へ路面排水が集中して排水された可能性が推察された。

崩壊地に流入する地表水の流下方向を推定するため 1mDEM により最急降下勾配方向の落水線を作成した（図 4.22）。この図は、集水面積が大きくなるほど落水線の太さを変えたものである。この図から土のうがない場合は、集水面積  $60\text{m}^2$  以上の落水線が 2 つあり、斜面地に流下すると考えられるが、土のうが設置されることで、図に示すような地表水の流れで、崩壊地斜面の集水域で示した範囲の雨水が集まつたものと推察された。

以上のことから、当該箇所の崩壊の主原因が、道路からの排水であると仮定し、その発生メカニズムについて本システムを用いて検証した。

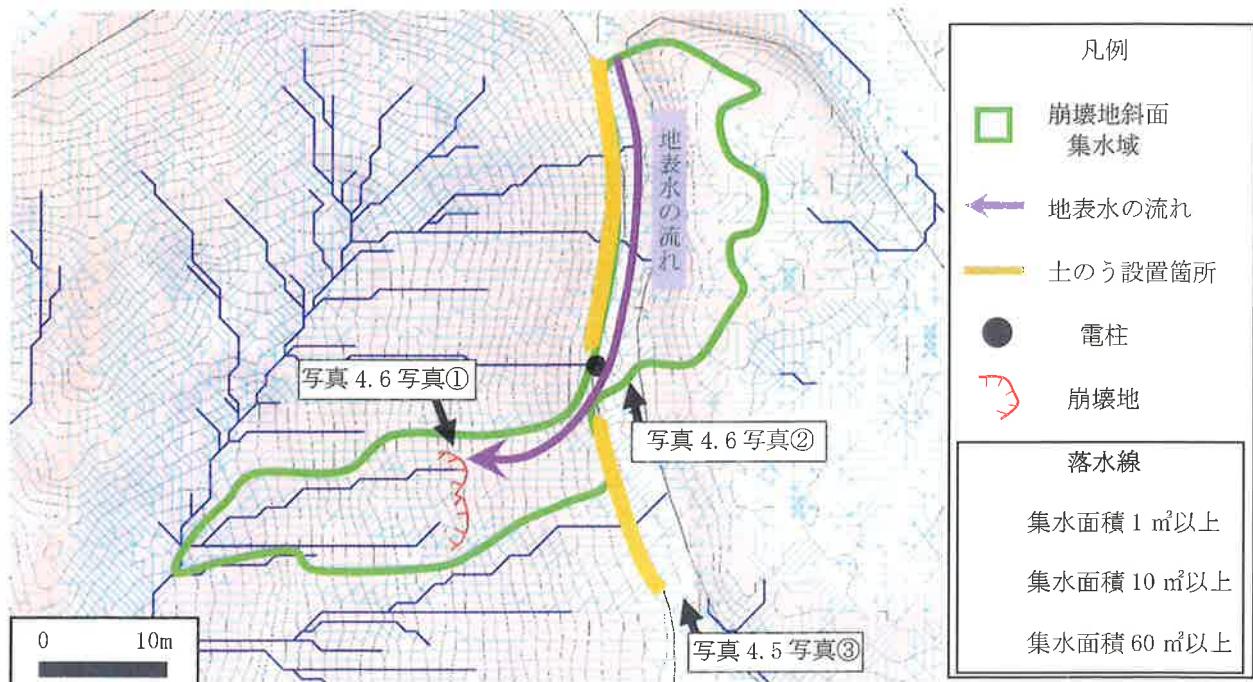


図 4.22 崩壊地斜面へ流入する地表水の流れ

#### (4) システムによる計算結果とモデル修正による計算結果の比較

現地調査の結果から道路から斜面へ排出された集水面積は、図 4.23 に示す面積 150 m<sup>2</sup>であると考えられる。そのため、集水されたと考えられるアスファルト部（A）が含まれる解析モデルの 10m×10m のセル（B）はアスファルトで地下浸透が遮断されていると考え、降雨の浸透を 0 とした。つぎに、道路を流下して排水される地点のセル（C）に、道路上の集水面積に降った雨を流入させることとした。なお、自然斜面セル（D）は通常の解析モデルとしている。

ここで、道路上の集水面積に降った雨が地表流となり道路上を流下する流速は、以下に示すマニングの平均流速式から約 0.7(m/s)と推定した。

$$\text{平均流速 } v = 1/n \times R^{2/3} \times I^{1/2} = 0.7[\text{m/s}]$$

n : 粗度係数 (粗いコンクリート 0.015)

R : 径深 (道路幅 3m、水深 0.01m と仮定し 0.01)

I : 動水勾配 (道路勾配 0.05)

崩壊斜面へ排出される降雨の効果範囲における道路中央部の降水が排水地点に到達する時間を平均到達時間と仮定すると、流下距離 17m、平均流速 0.7m/s であることから、道路上に降った雨が道路上を流下して斜面へ排水されるまでの時間は 24 秒後となる。この到達時間は本システムにおける計算ステップ 30 分と比較して十分に短い時間であることから、本検討では道路上の降水が地表に到達後すぐに流下し、斜面へ流出されると仮定した。

以上の仮定をもとに本システムによる平成 30 年 7 月豪雨期間中の降雨を入力して、計算を実行した。システムへの入力として、道路の集水面積 (約 150 m<sup>2</sup>) に降った 1 時間雨量強度値を 0 とし、排水地点該当セル（C）に道路の集水面積に降った 1 時間雨量強度値を加算することとした。

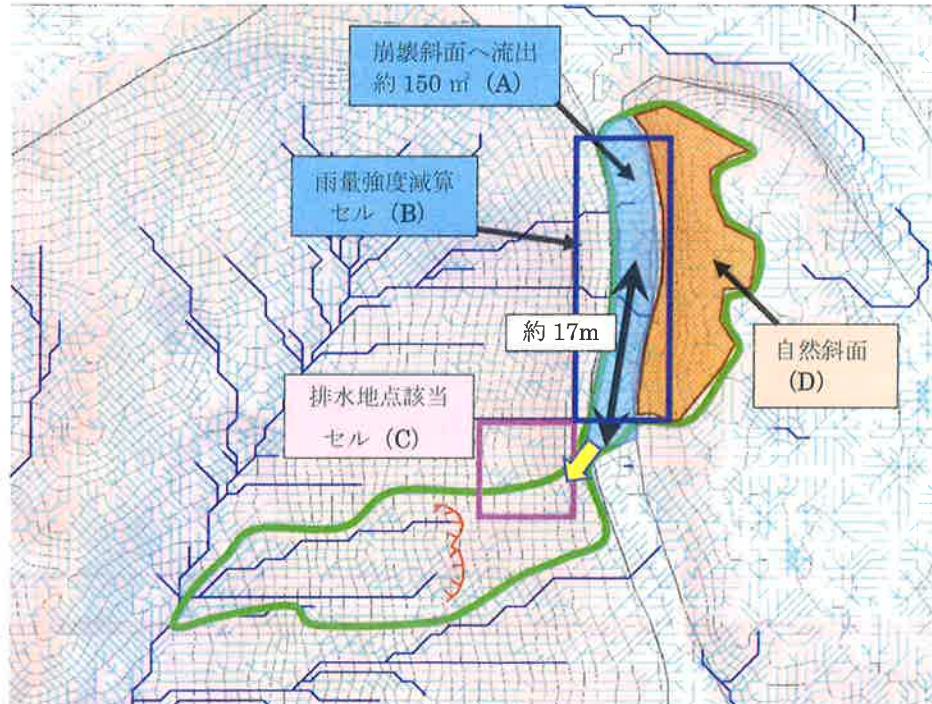


図 4.23 崩壊斜面に排水される降雨の降るアスファルト道路部分

道路排水を考慮した平成 30 年 7 月豪雨の再現計算結果の最小安全率および地下水位の分布図を図 4.24 に、崩壊地該当セルの時系列変化を図 4.25 に示す。この結果から、崩壊地したセルの安全率は 1 をわずかに下回り、危険判定となつた。図 4.25 の時系列変化から、道路排水による流入量の増加とともに地下水位も上昇、満水状態となり、安全率が 1

未満の状態が複数回発生している。一方、この検討によって、図 4.24 中の青で示したセルでは、安全率の値が上昇し、結果として空振り判定セルが消失した。

以上、多くの仮定を含むが、土のうによって、道路に降った降雨が斜面へ排出されたことによって、斜面が崩壊した可能性が示唆される結果となった。

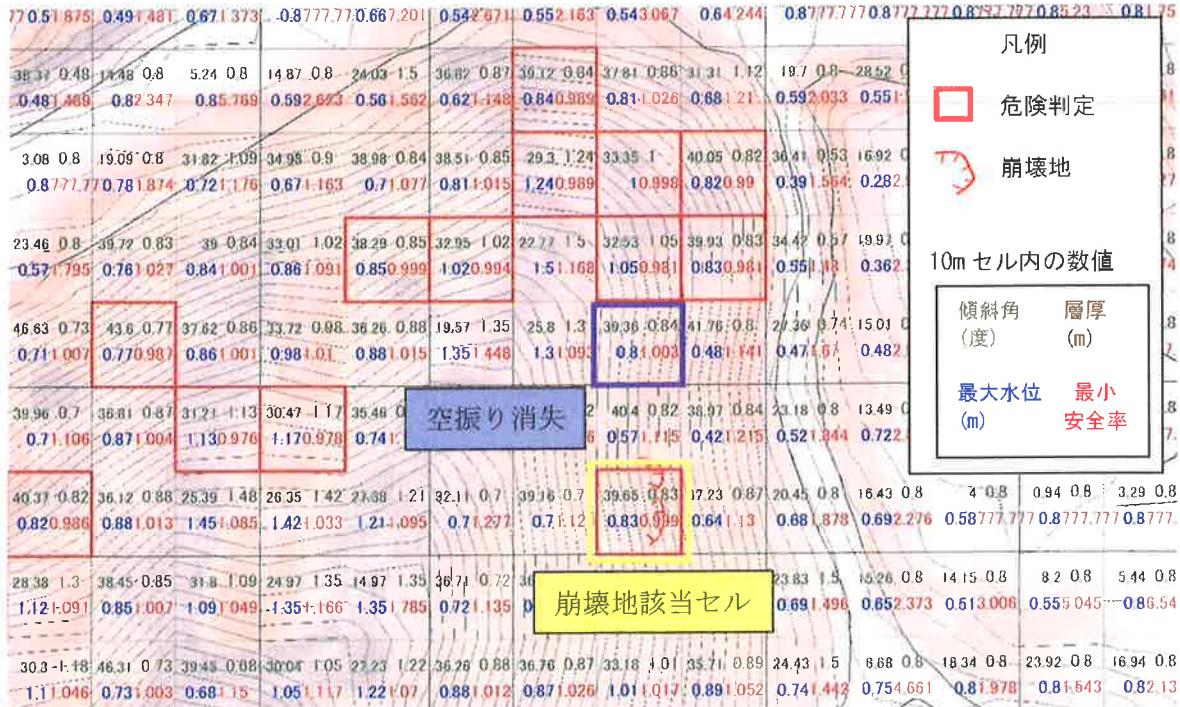


図 4.24 道路排水を考慮した再現計算結果の分布図

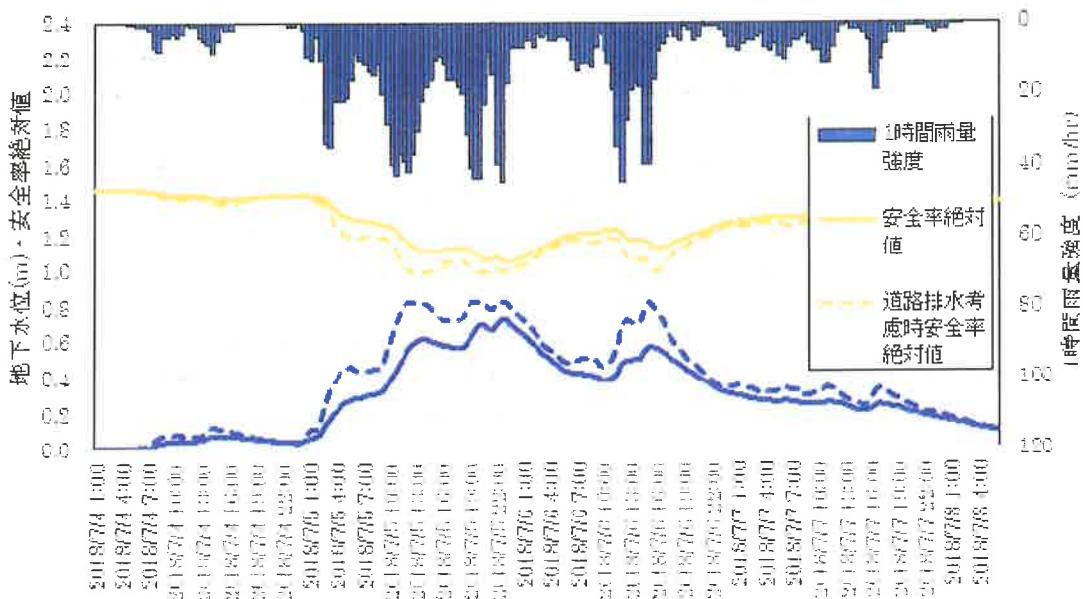


図 4.25 道路排水を考慮した再現計算結果における崩壊地該当セルの時系列変化

### (5) システム改良に関して

運用中のシステムにおいて、平成30年7月豪雨中に発生した崩壊地が見逃しとなっていたが、一連の検討によって、道路からの排水が崩壊発生の主な原因である可能性が示唆される結果を得た。

平成30年7月豪雨では、人工改変地からの地表水が自然斜面に集中して排水されたことが原因と考えられる斜面崩壊が多く報告<sup>19)</sup>されている。本検討のように、排水箇所と排水量を考慮することで、本システムで斜面崩壊の危険度を予測できる可能性がある。

しかしながら、本システムは地形および地質に基づき自然斜面の表層崩壊のモデルを広域で構築し、危険度を予測するものであり、個々、時事変化のある広域の道路や宅地等の影響によって崩壊する可能性のある箇所を予め抽出して、本システムに反映させることは、困難であると言える。ただ、範囲を絞って、道路施設に関するデータベースや1mLPデータ、宅地の排水情報などの情報を活用することで、危険な箇所を抽出することは可能である。さらに効率的に抽出する手法の検討を今後も継続して行いたい。

## 4. 5 三田市上青野（土砂災害警戒区域）

### (1) 検討概要

自然斜面で発生した崩壊事例として、三田市上青野の崩壊事例を紹介する。図4.26に位置図を、図4.27に地質図を示す。当初、既往資料（災害報告等）より崩壊規模が10m×10mより小さい崩壊としてシステムの対象外の災害に分類していたが、現地確認の結果、崩壊地は幅約10～15m、深さ1～2m程（写真4.7）の表層崩壊であることがわかり、対象災害に分類すべきと判断した。崩壊地の地質は風化の進んだ火山礫凝灰岩であり、その上位には流紋岩がキャップロックとして上載する。崩壊面にはガリ侵食がみられ、多量の地下水が関与したことがうかがえる。また、今回の崩壊地の上方にも過去の崩壊跡がみられることから、この斜面では繰り返し崩壊が発生しているものと推測される。システムの判定は、崩壊発生後に危険判定となっており、崩壊の発生場所は予測できたが、判定のタイミングは遅れた見逃しであった。

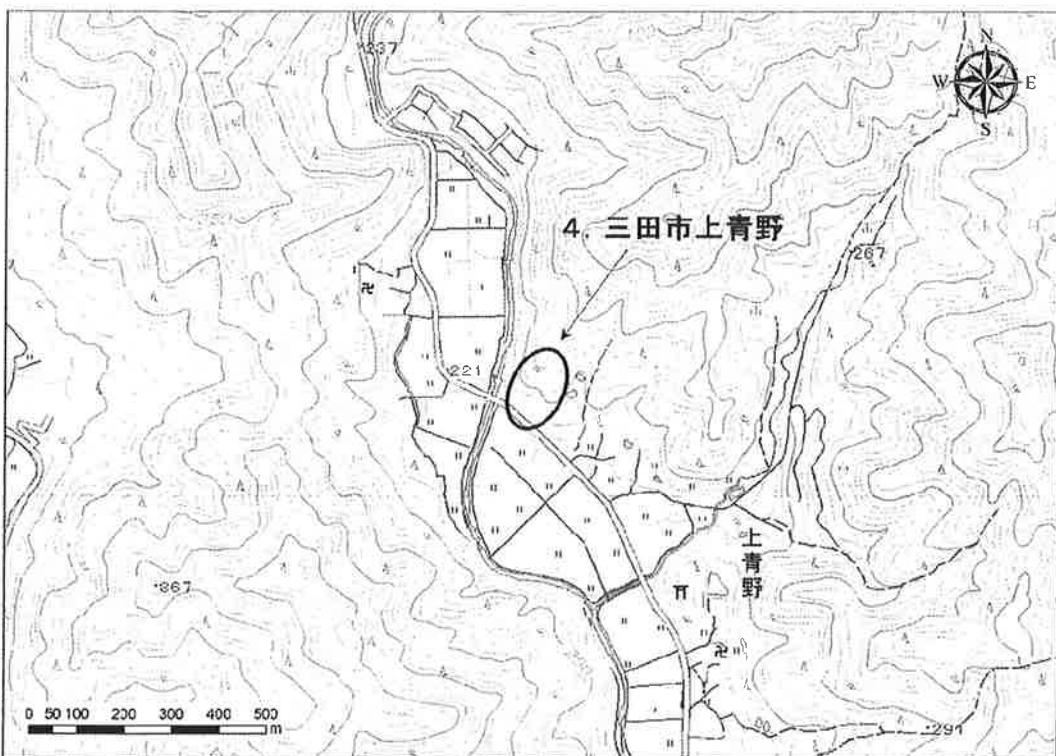


図4.26 現地調査位置図

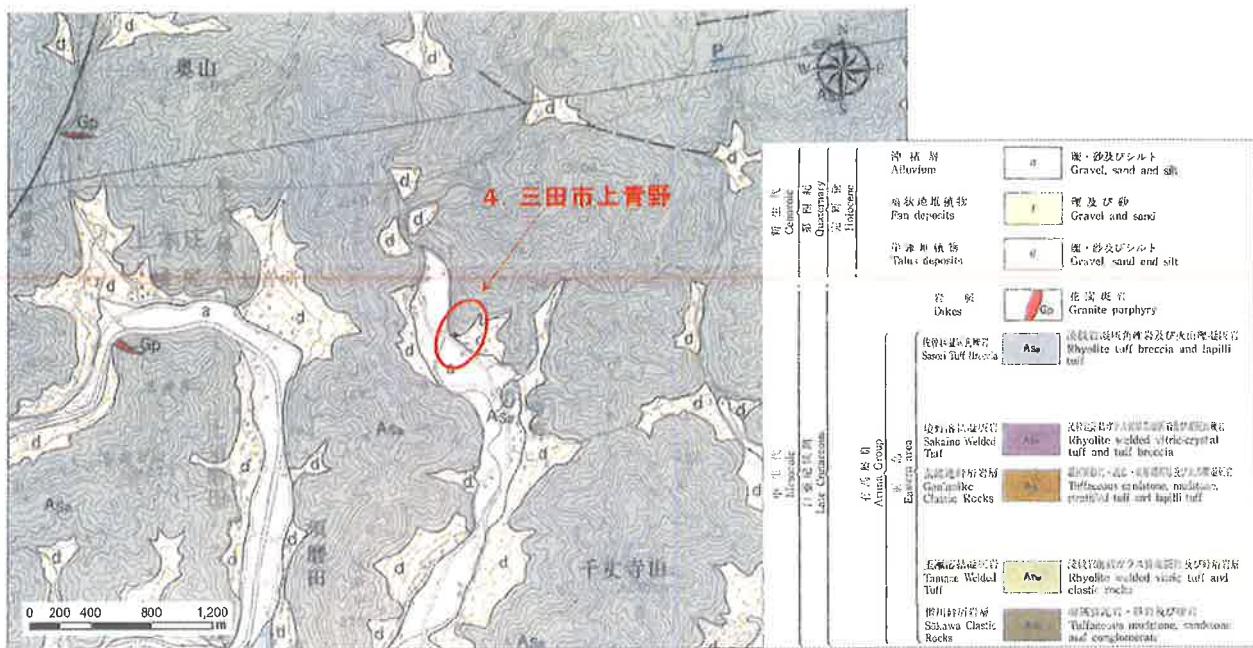


図 4.27 調査地周辺の地質図（5万分の1地質図福「三田」より引用）



写真4.7 崩壊地の写真

崩壊判定セルの位置を図 4.28 に、降雨と安全率、完全率の変化率の推移を図 4.29 に示す。降雨は、7月5日から7日の21時頃まで降り止むことなく強弱を繰り返し降り続き、総降雨量は500mm近くまで達した。一方、短時間の雨量強度は比較的小さく、7月5日20時頃と7月6時頃の2回の大きな降雨ピークでは、それぞれ時間雨量25mmと34mm程度であった。崩壊の発生時刻は、最も大きな7月7日6時の降雨ピークより少し前の5:30頃ということが、住民からの通報時刻からわかっている。

縦軸に安全率を横軸に安全率の変化率を指標とした二軸の関係図に、危険判定の基準線（赤色実線）と各時刻のプロットを結んだスネーク曲線を重ねたものを図 4.30 に示す。スネーク曲線は、7月7日 5:30 の崩壊発生時点では判定基準線より上方にあり、崩壊発生は予測できなかった。判定基準線を超えたのは崩壊発生後の 7 日 6:00 であった。

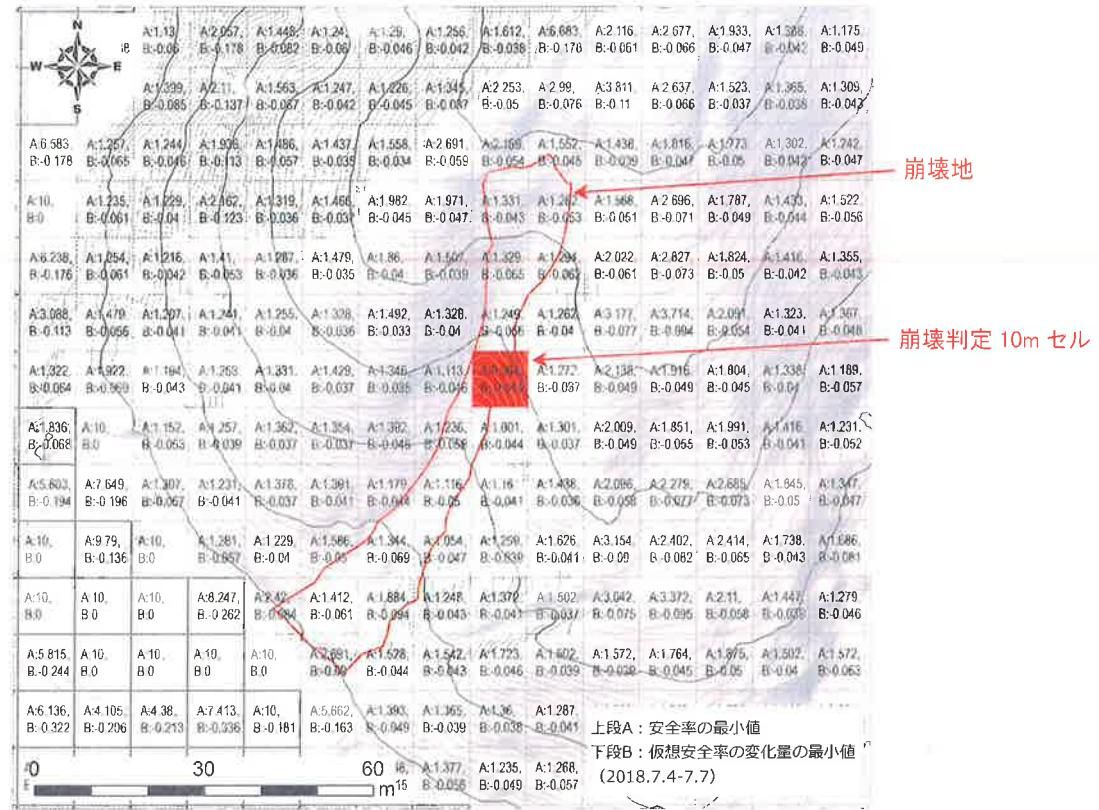


図 4.28 崩壊判定セルの位置図（平成 30 年 7 月豪雨）

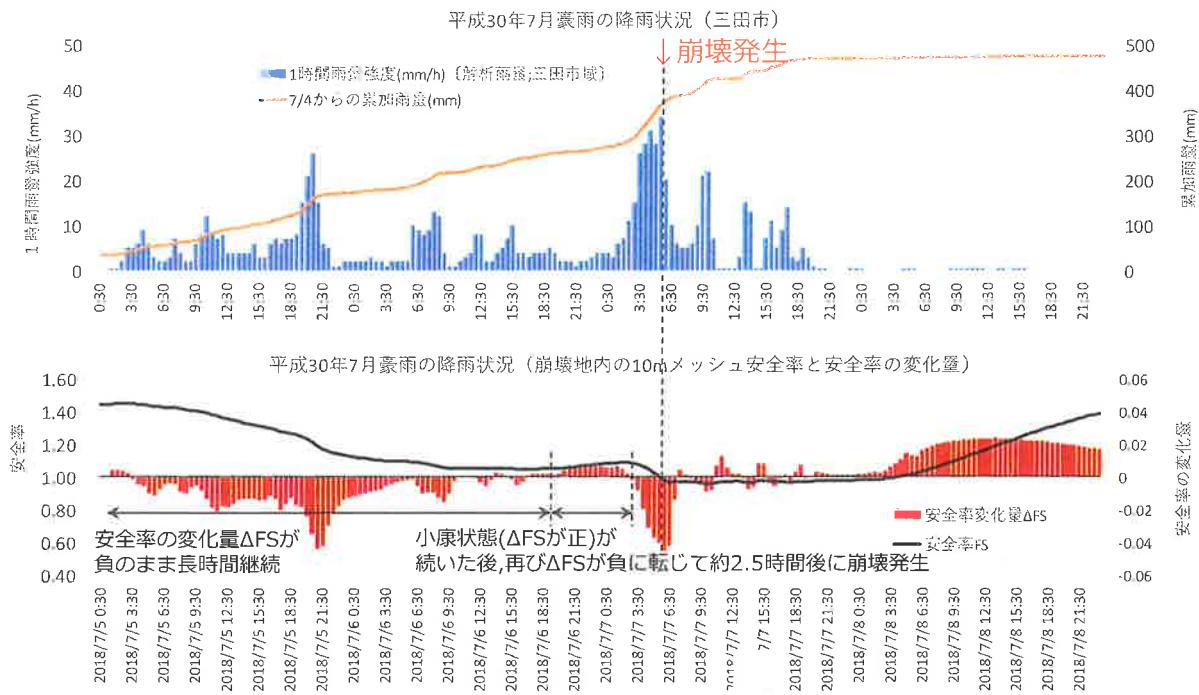


図 4.29 崩壊判定セルの降雨と安全率、安全率の変化率の推移

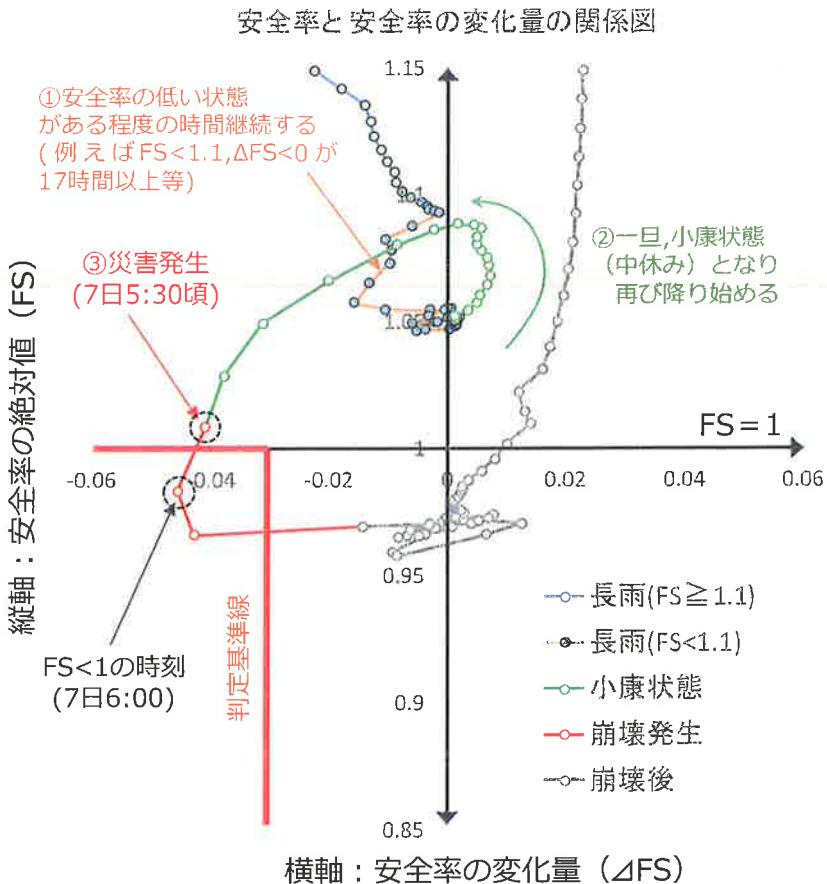


図 4.30 現行二軸判定基準( $FS < 1, \Delta FS < -0.03$ )とスネーク曲線(崩壊判定 10m セル)

## (2) 長雨に対する二軸判定基準

今回のケースでは、判定基準を超過する前（安全率  $FS < 1$  となる前）に崩壊が発生している。これは、地下水位が高く、表土層が地下水にさらされる時間が長時間継続することで土の強度が低下した可能性が考えられる。すなわち、長雨では、想定した判定基準線に達する前に崩壊が発生する恐れがあるので、安全率  $FS$  が 1 以上であっても早めに危険と判定する必要がある。

今回の事例をもとに今後の対応を考えると、長雨用の判定基準線を別途作成（図 4.31）し、通常期と長雨時で基準線を切り替えながら運用する以下のような方法が有効と考えられる。異なる降雨パターンにおけるスネーク曲線の挙動や判定基準線の設定については、本報告集の別報<sup>20)</sup>で紹介しているので参照されたい。

- 1)通常の雨：図 4.30 の判定基準線を適用
- 2)長雨の判断：例えば、安全率  $FS < 1.1$  の状態が一定時間（今回の事例では 17 時間）以上継続する場合
- 3)長雨用の判定基準への切り替え：図 4.31 の判定基準を適用
- 4)長雨用の判定基準の解除：例えば、安全率の変化率がプラスの領域（地下水位が低下傾向）の状態が一定時間（今回の事例では 16 時間）以上継続した場合、通常の雨の判定基準へ切り替える。

なお、上記 2)や 4)の判定基準線を切り替える条件は、降雨パターンの異なる数々の事例との比較から導かれるもので多大な労力が必要なことや、判定基準線を安全率 1 以上に設定すると、現状よりも空振り判定の増加が懸念されることから、別途、空振り判定を抑える対応が必要となる場合があることに留意する必要がある。

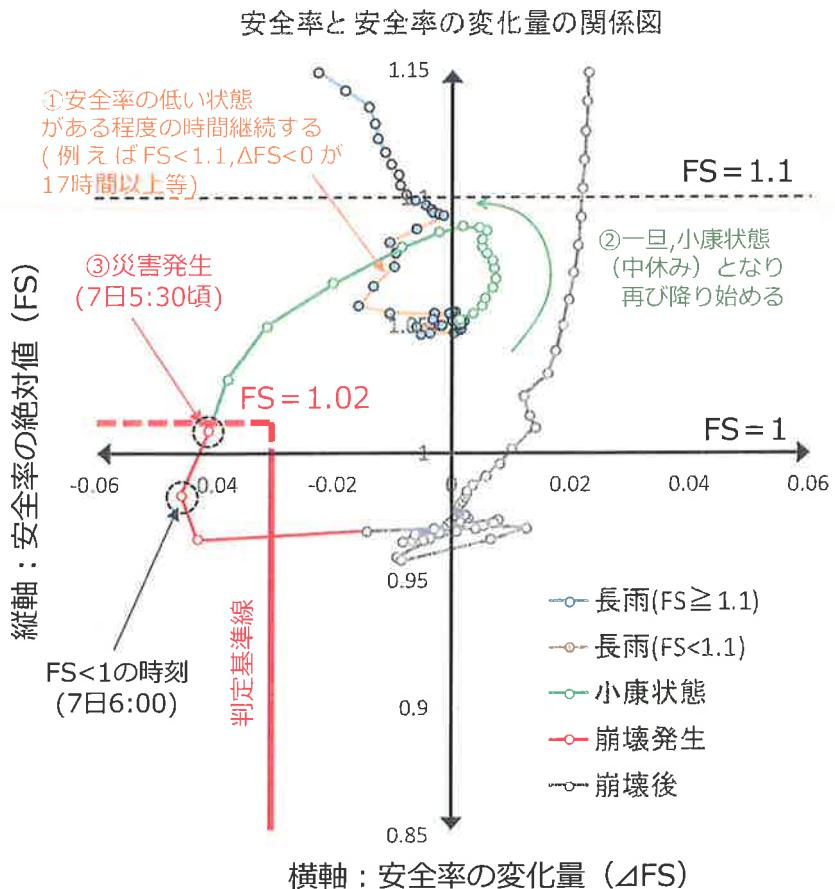


図 4.31 長雨用の二軸判定基準( $FS < 1.02, \Delta FS < -0.03$ )案とスネーク曲線(崩壊判定 10m セル)

#### 4. 6 丹波市氷上町横田（土砂災害警戒区域）

##### (1) 検討概要

自然斜面で発生した土石流事例として、丹波市氷上町横田の土石流事例を紹介する。図 4.32 に位置図を、図 4.33 に地質図を示す。既往資料（災害報告等）から、土砂災害警戒区域（土石流）における土砂流出の事例であったため、システムで対象とする災害に分類していた。しかし、現地確認の結果、土砂流出の原因となった崩壊は、幅約 7m、長さ約 10m、深さ約 5m 程度（写真 4.8）と深度の大きい崩壊であった。現行システムの表土層厚は、最大 1.3m（丹波層群、頁岩）で設定しており、このような崩壊深の大きい崩壊を予測することは難しいと考えられる。

システムは、図 4.34 に示す 10 セルを危険と予測したが、崩壊地と重なるものはなかった。また、10 セルでは、土石流判定で用いている崩壊面積率のしきい値には達しておらず、崩壊と土石流のどちらも見逃しであった。

今回の豪雨では、この事例以外にも、土砂災害警戒区域（急傾斜）において深さが 4~5m 程ある崩壊や地すべり等、崩壊深度の大きい土砂移動現象が数箇所で発生している。



図 4.32 現地調査位置図

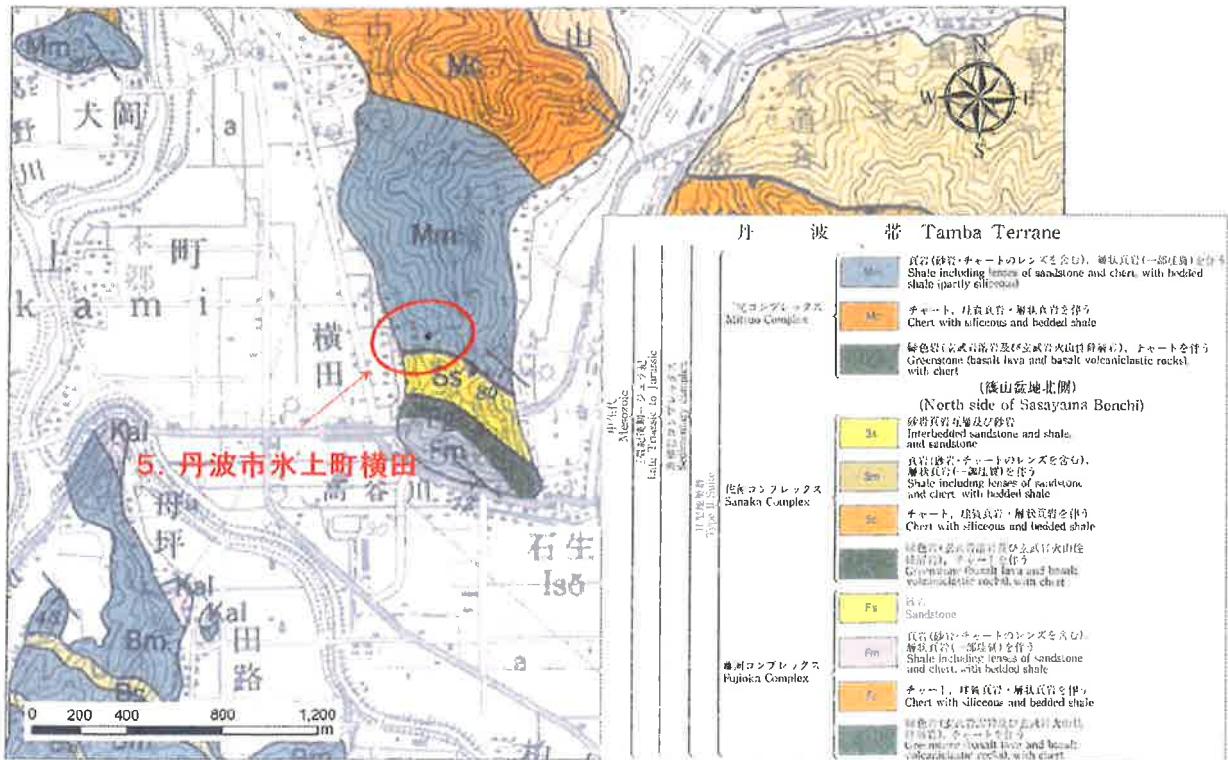


図 4.33 調査地周辺の地質図 (5万分の1地質図福「篠山」より引用)

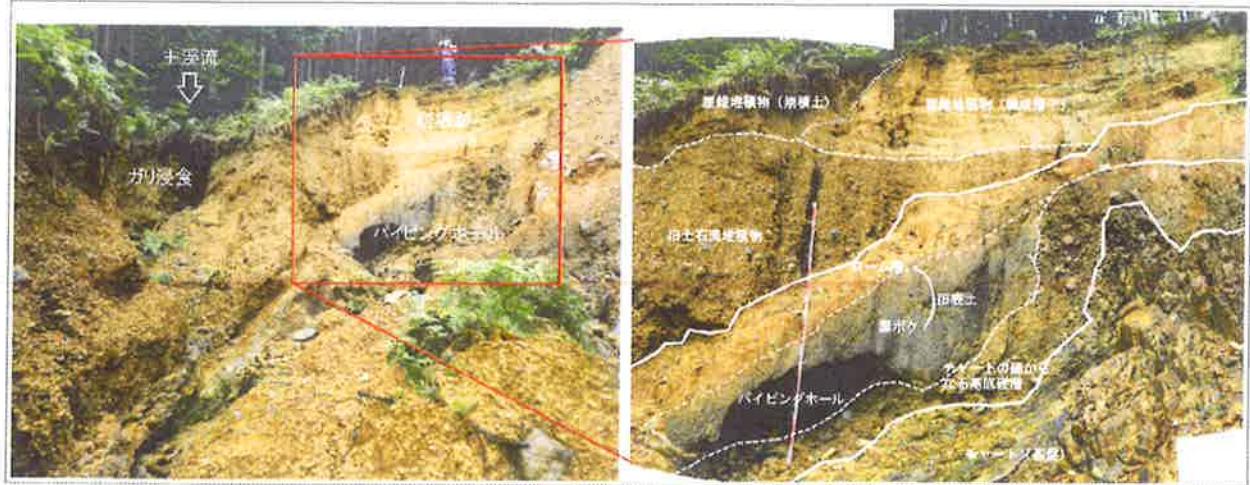


写真 4.8 崩壊地の状況

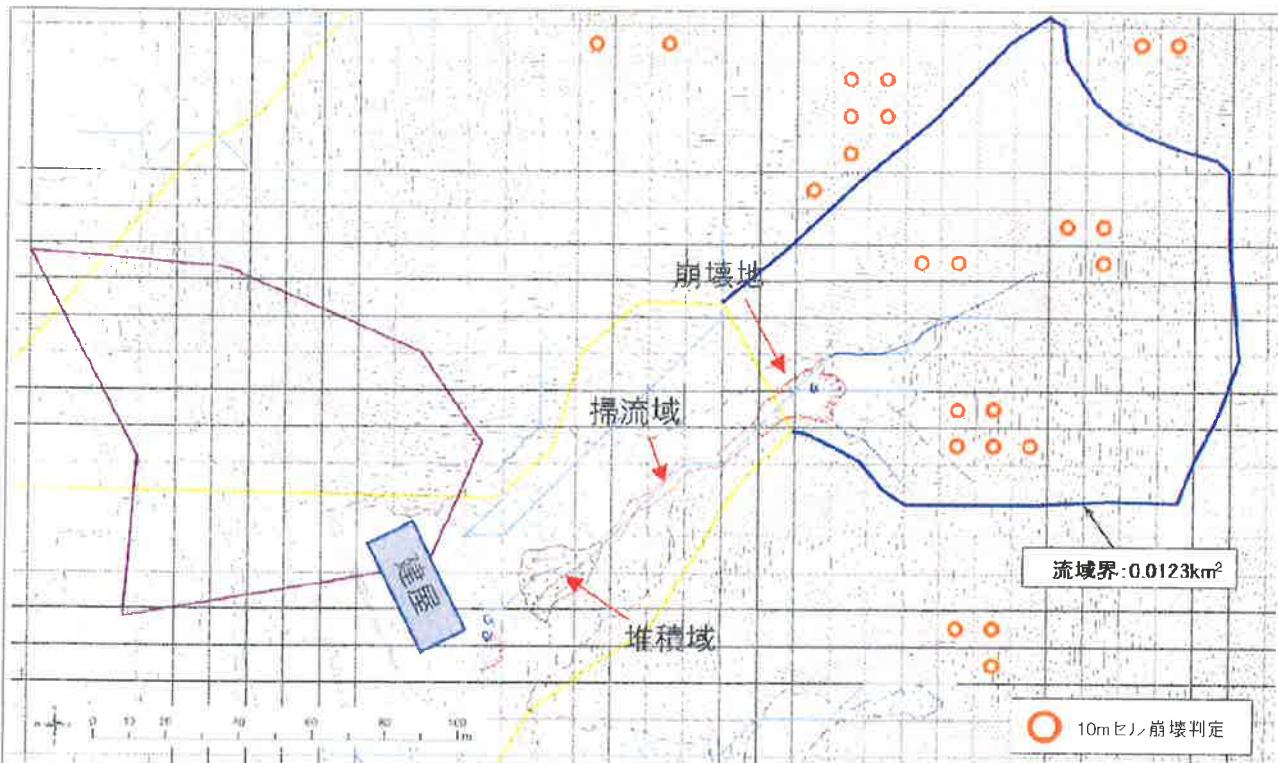


図 4.34 崩壊地の状況

崩壊は沖積錐の頭部付近で発生している。谷頭凹地の下端、遷急線付近に位置し、遷急線の一部を巻き込み発生している。丹波帶の貞岩、チャートを被覆して、黒ボクとローム層からなる旧表土、旧土石流堆積物、崖錐堆積物が厚さ約5mで堆積しており、谷には旧土石流堆積物、崖錐堆積物からなる沖積錐が形成されている。崩壊地内の露頭では、基盤と旧表土の境界にパイピングホールが形成されている。

基盤岩のチャートは不透水～難透水で有るのに対して、上の基底礫層は透水性が良い。また、黒ボクは腐食物を含み難透水性である。豪雨により地中に浸透した水が基盤岩で遮水され、透水性の良い基底礫層に高い水圧がかかり、大きなパイピングホールが形成されたと考えられる。

崩壊地の左側の主渓流合流箇所において、ガリーが形成されていることから推察すると、豪雨でガリーが形成され、基盤岩の上部の土層厚が薄くなったことと、基底礫部で水圧が高くなつたことから、斜面が不安定化して崩壊が発生したと考えられる。

土石流は、谷頭凹地の崖錐堆積物中発生した崩壊を起源として、崩壊地直下の渓床堆積物を巻き込んで堆積を増し、建屋（お寺本堂）山側の斜地に大部分が堆積した。

## （2）表土層を厚く設定した場合の危険度の試算

システムで設定している表土層厚（今回の崩壊箇所で 0.8m）に対し、実際の表土層厚は最大 5m であった（崩壊深度を表土層厚とした場合）。この表土層厚をシステムに反映した場合、崩壊を予測できたかどうかについて試算を行った。表土層厚は、崖錐堆積物の分布範囲を地形状況より推定し、その範囲内にある 10m セルを対象に現システムで設定している表土層厚の 3 倍の厚さに設定した。再現計算の結果を図 4.35 に示す。今回の試算では、崩壊地にかかる 10m セルでは崩壊判定とならなかった。この結果について考察すると以下のようである。

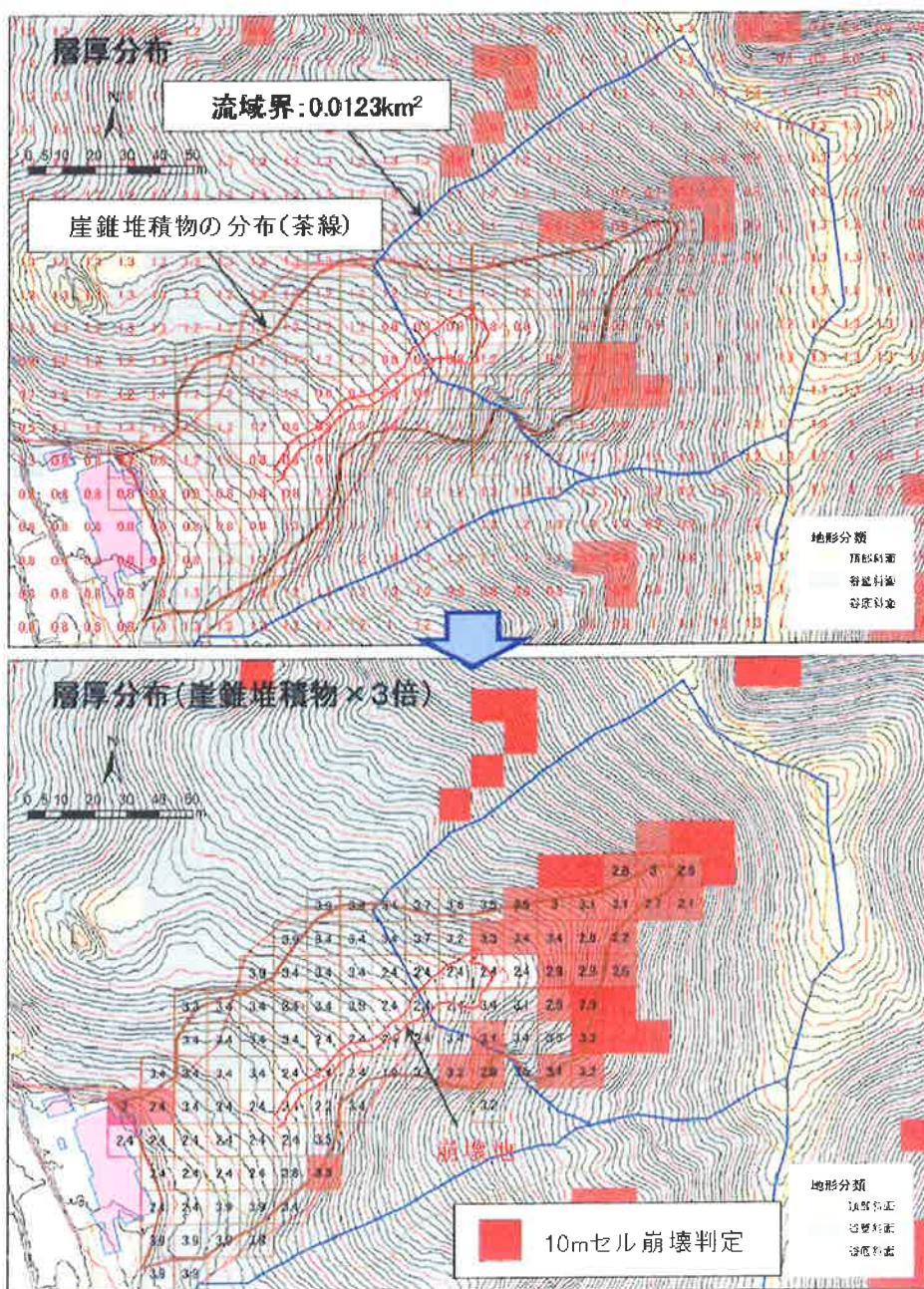


図 4.35 表土層を厚く設定（現設定の 3 倍）した場合の試算結果

- ・表土層厚の設定方法について

崩壊地にかかる 10m セルの表土層厚が 2.4m（現設定の 3 倍）では薄い（3m 以上）。表土層厚は、図 4.36 示す地形分類（谷底斜面、頂部斜面、谷壁斜面）別の関係式より推定している。崩壊地は谷底斜面に分類されており、谷壁斜面や頂部斜面より相対的に薄い設定となっている。現地状況に沿った表土層厚を設定するには、厚い崖錐堆積物用の層厚式を別途検討する必要がある。

- ・厚い表土層厚の分布エリアの抽出について

今回、崖錐堆積物の範囲として、現地状況と地形状況より推定したが、広範囲で推定する場合、DEM 等を用いた地形解析により抽出する方法を検討する必要がある。

- ・地盤定数の設定について

谷出口の緩傾斜地で崩壊が発生していることや表土層と基岩の透水性の違いにより斜面が不安定化したことなど、崩壊の発生形態やメカニズム等を考慮した地盤定数を別途検討する必要がある。

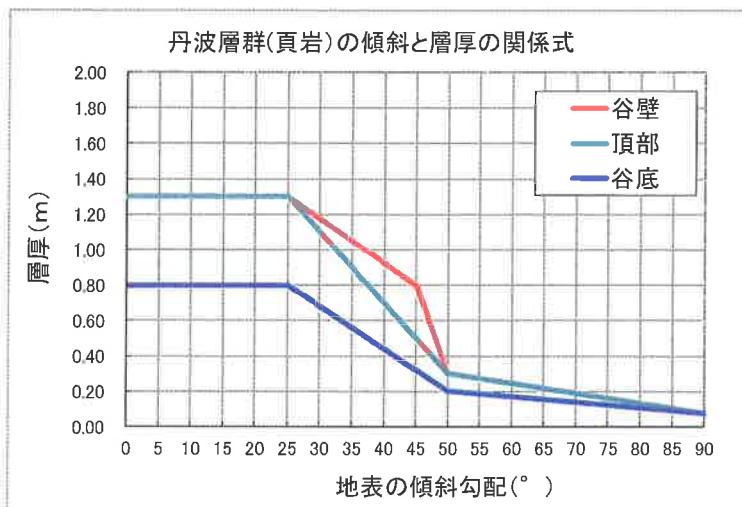


図 4.36 地表の傾斜勾配と表土層厚の関係式（丹波層群、頁岩）

### （3）土石流判定の崩壊面積のしきい値の設定

今回の土石流事例について、崩壊面積率を算定すると 4.9% であった。図 4.37 に対象渓流の土砂災害警戒区域と流域界、崩壊判定セルの分布状況を示す。対象渓流の流域面積は 1.23ha（10m セルで 123 セル）、崩壊地の面積は図 4.34 より 60m<sup>2</sup>（6 セル）とした。

$$\text{崩壊面積率 (\%)} = \frac{\text{崩壊地面積 (6 セル)}}{\text{流域面積 (123 セル)}} \times 100 = 4.9\%$$

図 4.38 に現行システムで用いている土石流判定基準線を示す。今回の渓流のしきい値を土石流判定基準線より求めると崩壊面積率 33.8%（42 セル）となり、実際の崩壊の面積率 4.9% と比較するとかけ離れた値となっている。この結果について考察すると以下のようである。

- ・現行の土石流判定基準線について

現行の基準線は、六甲山系における昭和 42 年災害時の土石流発生渓流と非発生渓流を比較的良好に分離する境界線として設定されたものである。しかし、この図で基準線の根拠としている土石流実績（著しい侵食）のプロットの範囲を見ると、流域面積の最小値は約 0.05km<sup>2</sup>（5ha）であり、設定当時には今回の渓流（流域面積 1.23ha）のような小さい流域の土石流発生実績はなかったことがうかがえる。

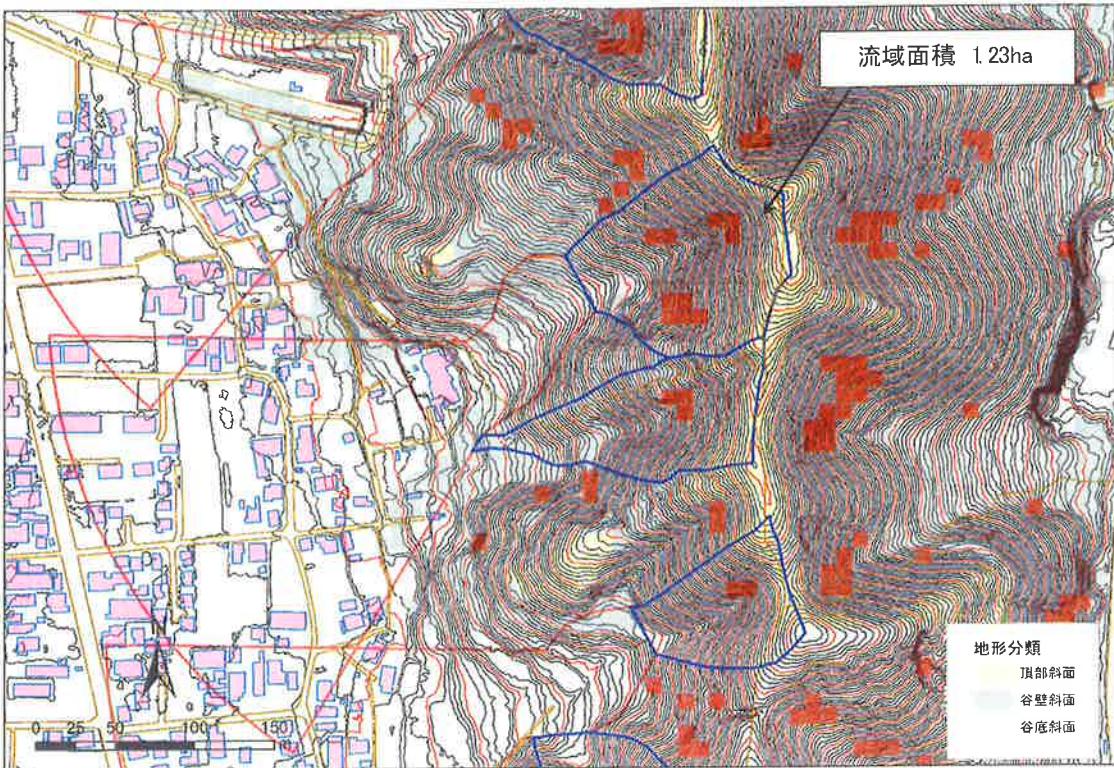


図 4.37 土砂災害警戒区域（土石流）と流域界、崩壊判定セルの状況

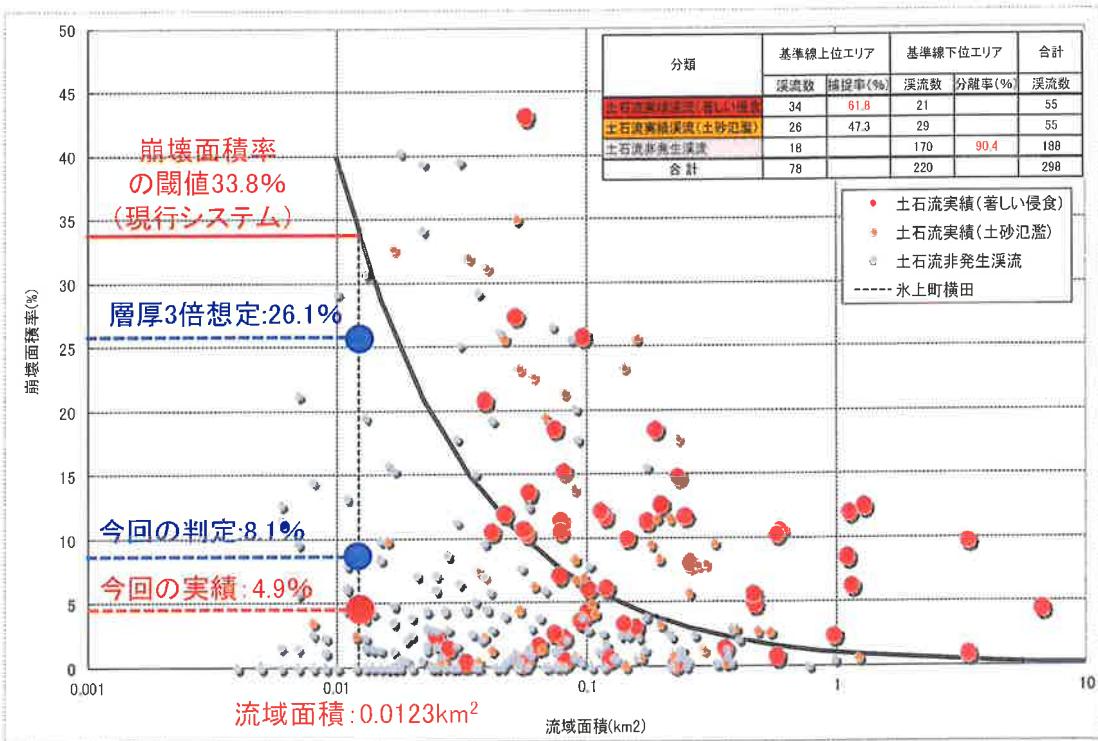


図 4.38 土石流判定基準線（土石流危険渓流の流域面積と昭和 42 年災害（表六甲）における崩壊面積率

また、流域面積  $0.1\text{km}^2$  (10ha) より小さい領域では、基準線より下位に土石流発生プロットが多く存在していることから、流域面積  $0.1\text{km}^2$  (10ha) 以上の領域と比較すると予測精度は落ちる。これらから、流域面積  $0.05\text{km}^2$  あるいは  $0.1\text{km}^2$  より小さい流域面積の渓流については、近年の土石流実績により見直す必要がある。

- ・崩壊面積率の算定に用いる 10m セルについて

現行システムでは厚い表土層の設定は行われていないため、崩壊地の位置や規模の予測は難しい。しかし、土砂災害警戒区域の判定の見逃しを低減するため、再現している現象は異なるが、山腹斜面で崩壊判定となった 10m セルを用いて代替的な運用を行う。図 4.38 に現行システムによる崩壊判定セル（10 セル）より求めた崩壊面積率と参考として表土層厚を 3 倍に設定した場合（崩壊判定セル、32 セル）の崩壊面積率を示す。崩壊面積率は現行システムが 8.1%、表土層厚を 3 倍に設定した場合が 26.1% となる。

また、この崩壊面積率の値は実績の崩壊面積率より大きく、土石流の判定基準として現実的ではないと考えると、例えば、土石流の発生条件を流域内で発生する最大の崩壊地の大きさで定義し、隣接関係にある崩壊判定セルの塊を崩壊地の大きさとして判定する方法などが考えられる。図 4.37 の場合、隣接関係にある崩壊判定セルの塊の最大のものは 5 セルであり、実際の崩壊地の 6 セルと比較するとほぼ近い値となっている。

- ・流域面積の小さい土砂災害警戒区域の精度向上について

今回の土石流事例では、土砂流出の原因となった崩壊地と保全対象の距離が近い関係にある。このような流域面積の小さい土砂災害警戒区域では、崩壊現象が直接保全対象へ影響することから、崩壊の精度向上が土石流の精度向上につながる。特に市街地周辺において、流域内に人工改変と自然斜面が混在するような渓流では、4.2 の急傾斜の事例と同様に解析セルの細分が精度向上に有効と考えられる。

## 5. 今後の課題と対策

平成 30 年 7 月豪雨の検証結果とその対策についての検討結果を以下に整理する。

### 【平成 30 年 7 月豪雨の検証結果】

- ・平成 30 年 7 月豪雨は、最大 48 時間雨量や最大 72 時間雨量といった長期的な指標で史上最大を記録する豪雨であった。連続雨量 100~150mm 程度の雨が降り止むことなく連続して複数回にわたって襲来したことにより、総降雨量は非常に大きくなつたが、1 時間最大雨量は 30~40mm 程度であり、近年、多発している土砂災害の 1 時間雨量 80mm 以上と比較すると短時間の雨量強度は小さかったことが特徴といえる。
- ・システム整備済の市町では 39 件の災害が発生した。スクリーニングの結果、対象災害は 2 件（土石流）であった。今回のような長雨型の豪雨では、小規模な現象や人為的な影響に伴う現象、地すべり等の発生メカニズムが解析モデルと異なる現象等、本システムでは評価し難い現象が多発することが確認された。
- ・養父市の土石流事例など比較的規模の大きな自然現象に対しては、空間的にも時間的にも精度が確保できていることが確認できた。（災害捕捉率は 50%（ただし、見逃し判定の土石流事例は、現地確認の結果、システムで想定していない崩壊深度の大きい崩壊に起因する土砂流出であった）、空振り率は急傾斜が約 14%、土石流が約 3% であった）
- ・自然斜面のがけ崩れの事例で、発生時刻に対して判定が遅れる(30 分)事例があった。対象外の災害事例の内、集水域外からの雨水流入などの人為的な影響のある事例では、システムの判定時刻より早く崩壊が発生する傾向がみられた。
- ・実用面の課題として、今回の豪雨で発生した 39 件の災害の内、23 件（約 6 割）が土砂災害警戒区域で発生していたことから、長雨による災害特性を踏まえたうえで、土砂災害警戒区域の判定に対する改良の検討が求められた。

### 【今回の長雨による災害特性を踏まえたシステム改良の検討結果】

#### 1) 自然斜面と人工改変地が混在する土砂災害警戒区域への対応

解析セルを細分化（5m セル）することは、人工改変地と自然斜面の境界部の傾斜変化の再現性が向上し、土砂災害警戒区域における見逃し判定の低減のための代替的な手法の一つとして有効であることが確認できた。（神戸市須磨区高尾台、神戸市灘区六甲ドライブウェイにおける検討）

#### 2) 道路等からの表流水の集中に伴う崩壊（自然斜面）への対応

道路からの排水が崩壊発生の主原因である可能性の高いことが示唆された今回の検証事例より、人工改変地から

の地表水の影響による崩壊に対し、流入箇所（排水箇所）と流入量（排水量）を考慮することで、危険度を予測できる可能性があることが確認できた。（神戸市灘区六甲山自然保護センターの事例）

### 3)崩壊（自然斜面）の判定タイミングの遅れへの対応

長雨による崩壊特性として、地下水位が高く表土層が地下水にさらされる状態が継続する場合（安全率の低い状態が長時間継続する場合）、想定した基準（安全率1未満）に達する前であっても崩壊する可能性があることが示唆された。これに対し、長雨用の判定基準を別途作成し、通常期と長雨時で基準を切り替える案を提案した。（三田市上青野の事例）

### 4)崩壊深度の大きい崩壊（自然斜面）への対応

表土層を厚く設定した試算結果より、崖錐堆積物等が厚く堆積するエリアの表土層厚の推定方法として、現行の地形分類（谷底斜面、頂部斜面、谷壁斜面）別の推定式とは別に、新たな推定方法を検討する必要があることが示唆された。（丹波市氷上町横田の事例）

### 5)流域面積の小さい土砂災害警戒区域への対応

今回見逃し判定となった渓流の崩壊面積率は4.9%であった。現行システムの土石流判定基準（流域面積1.23haの場合、崩壊面積率33.8%）との乖離がみられたことから、小さい渓流（概ね流域面積0.05km<sup>2</sup>以下）については、近年の土石流実績により崩壊面積率の基準を見直すことや、例えば、土石流の発生条件を流域内で発生する最大の崩壊地の大きさで評価する等、判定方法の見直しが必要であることが示唆された。（丹波市氷上町横田の事例）

#### 【今回の課題】

- ・解析セルの細分化について、空振り判定も多くなることが予想されることから、解析パラメータ等の設定にあたっては、現場の災害特性を考慮し、再現計算等を行うなど十分に吟味する必要がある。
- ・人工改変地からの地表水の影響による崩壊の危険度予測について、広域の道路や宅地等の影響により崩壊する可能性のある箇所を予め抽出し、個々で時事変化のある地表水の流入箇所や流入量をシステムに反映させることは、困難であると言える。ただ、範囲を絞って、道路施設に関するデータベースや1mLPデータ、宅地の排水情報などの情報を活用することで、モデル化は可能であると考えられることから、今後も継続して、効率的にモデルを作成する手法の検討を進める必要がある。
- ・長雨用の判定基準の作成については、降雨パターンの異なる数々の事例の比較検証等、多大な作業を伴うことが予想されることから、効率的に作業を進める方法の検討が必要である。
- ・崩壊深度の深い崩壊の危険度予測について、広範囲からDEM等を用いた地形解析により該当箇所を効率的に抽出する方法の検討が必要である。また、谷出口の緩傾斜地で崩壊が発生していることや表土層と基岩の透水性の違いによる斜面の不安定化等、崩壊の発生形態やメカニズムを考慮した地盤定数を検討する必要がある。
- ・流域面積の小さい土砂災害警戒区域について、土砂流出の原因となる崩壊地と保全対象の距離が近く、崩壊現象が直接保全対象へ影響することから、崩壊の予測精度向上が土石流の精度向上につながる。急傾斜と同様に、特に市街地周辺において、流域内に人工改変と自然斜面が混在するような渓流においては、解析セルの細分化について検討する必要がある。

## 6. おわりに

本報では、平成30年7月豪雨において本システムでは評価し難い小規模な崩壊や人工斜面の崩壊などが多数発生し、警戒避難における実用面の課題が確認されたため、その対策について検討した結果を報告した。これまで対象外としてきた人工改変の影響による小規模な崩壊や崩壊深度の大きい崩壊に関して、今回の長雨型豪雨による影響等を考察たうえ、これらの崩壊に伴う土砂災害警戒区域の見逃し判定を低減させる方法について報告した。

しかしながら、今回検討した解析セルの細分化や人工改変地からの地表水の流入量や流入地点の予測、表土層の厚いエリアの特定や表土層厚の設定など、本システムへ反映させるためには、広範で高い精度のデータ作成や多大な解析、検証作業を伴うことが予想される。予測精度向上のため、今後も引き続き事例の検証を重ねるとともに、DEM等を用

いた地形解析や道路施設に関するデータベース等の利用など、効率的にモデルを作成する手法についての検討を進めていきたい。

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。また、現地調査にあたり、神戸県民センター六甲治山事務所、神戸市北建設事務所、神戸市西建設事務所へ住民や工事業者との調整をお願いした。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：報道発表資料、平成30年の土砂災害についてとりまとめました～過去最大の土砂災害発生年を記録と記憶に残すため～、平成31年4月24日
- 2) 気象庁：災害時気象報告（平成30年7月豪雨及び5月20日から7月10日までの梅雨前線等による大雨等）、災害時自然現象報告書 2019年第2号、平成31年3月5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) 気象庁：平成30年7月豪雨（前線及び台風第7号による大雨等）、観測史上1位を更新した地点（6月28日0時～7月8日24時）、平成30年10月23日.
- 17) 田中ほか：平成30年7月豪雨による六甲山系の崩壊特性、第68回2019年度砂防学会研究発表会概要集、P072、2019.

- 18) 植田允教ほか：平成 30 年 7 月豪雨における養父市域の崩壊箇所と表層崩壊リアルタイムハザードシステムの判定について、建設工学研究所論文報告集、61、105-120、2019.
- 19) 山田裕司ほか：六甲山上部における豪雨による平成 26 年 8 月災害と平成 30 年 7 月災害での崩壊地の特徴、第 68 回 2019 年度砂防学会研究発表会概要集,P096,2019.
- 20) 沖村ほか：表層崩壊リアルタイムハザードシステム結果を活用した表層崩壊発生時刻について—豪雨中の崩壊発生予測のために—、建設工学研究所論文報告集、61、85-104、2019.

### 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
安藤 伸	応用地質株式会社、理学修士、地質学
伊藤 正美	応用地質株式会社、技術士(建設部門)、森林水文学
根本 信行	株式会社ダイヤコンサルタント、空間情報学
植田 允教	RAPIDE 合同会社、空間情報学
孝子 縠岡	国際航業株式会社、砂防工学
笠原 拓造	国際航業株式会社、砂防工学