

表層崩壊予測モデルを用いたリアルタイム危険度予測の試行

株式会社オリエンタルコンサルタンツ ○秋山 怜子・高橋大地・高山遼太
国土交通省 近畿地方整備局 大規模土砂災害対策技術センター
竹下 航・岸本 優輝・小林 正直・高原 晃宙

1. はじめに

2011年9月台風第12号により、和歌山県南部の那智川流域では多数の表層崩壊に起因した土石流が発生し、甚大な被害が発生した。その後、那智川流域に特徴的な地形条件、地質条件に着目した調査が継続的に実施されてきた。その結果、無限長斜面安定解析を基本とする危険度評価手法により、面的な危険度分布の把握が試行された（松澤ら、2021）。一方、これまでも表層崩壊モデルを用いたリアルタイム予測の試みがあるものの、現地調査に基づく場の条件設定と水文計算の計算負荷により、実際に運用されている例は限定的である。

そこで、本検討ではこれまでの那智川流域における調査結果に基づく場の条件と簡易な水文モデルを組み合わせて、リアルタイムの土砂災害危険度評価に向けた予測システムの試験サイトを構築し、2024年8月～10月の2か月間試行した結果として、システム構築時の課題を報告する。

2. 使用する計算モデル

崩壊発生モデルは、那智川流域で過去に検討されたC-SLIDER法（土木研究所、2009）による危険度マップ作成（松澤ら、2011）において使用されたパラメータを使用できる無限長斜面安定式を採用する。場の条件として、土層厚分布は地質別に設定された斜面勾配による回帰式（図1、表1）、土質強度やその他物性値は、複数地点で採取された土質試験結果をもとに設定されたものである。一方、地下水位は、那智川流域ではコアストーンや地質境界の影響による不均一な地下水流出プロセスの存在が予想されたことから、モデルによる正確な表現は困難と考えたため、少ないパラメータで簡易的に地下水位を予測するRosso.et al（2006）の地下水位モデル（式1）を採用した。このモデルは、計算要素間の流出計算を伴わないため、計算要素ごとに独立して計算できるのが特徴である。ただし、降雨時間刻みで初期水深を更新して逐次計算する手法（以下、「CASE-1」）と、同様のモデルによる複数の限界降雨強度で評価するIDH-slider法（秋山ら、2015：以下、「CASE-2」）の2ケースを比較した。

$$h = \frac{apD}{Tb \sin \theta} \left[1 - \exp \left(-\frac{1+e}{e-eSr} \frac{Tb \sin \theta}{aD} t \right) \right] + h_0 \exp \left(-\frac{1+e}{e-eSr} \frac{Tb \sin \theta}{aD} t \right)$$

$$\text{for } \frac{ap}{Tb \sin \theta} > 1 \quad \dots \text{式1}$$

h : 地下水位, a : 流域面積, b : 単位幅 e : 含水比, Sr : 初期飽和度, D : 土層厚, $T = K \cdot D$,
 K : 飽和透水係数, h_0 : 初期水深, p : 降雨強度

3. 検討手法

最初に、那智川流域で近年唯一の崩壊発生事例である2011年台風第12号の降雨状況について、降雨の空間分布が考慮できる解析雨量を用いて再現計算を実施し、場の条件設定の再現性を評価した。次に、計測に基づく条件設定の妥当性を確認するため、計算結果について現地調査を実施し、主に土層厚設定や、崩壊発生・非発生要因を確認した。また、入力条件による計算結果を比較するため、2012年以降の非発生降雨のうち比較的降雨規模の大きい降雨について、1kmメッシュ解析雨量と250mメッシュXバンド雨量による計算結果を比較した。これらについて、各予測手法（CASE-1、CASE-2）の予測結果の特徴を比較したうえで、CASE-1のモデルについて、試験サイトを構築し、運用の実現性及び運用段階での課題を確認した。

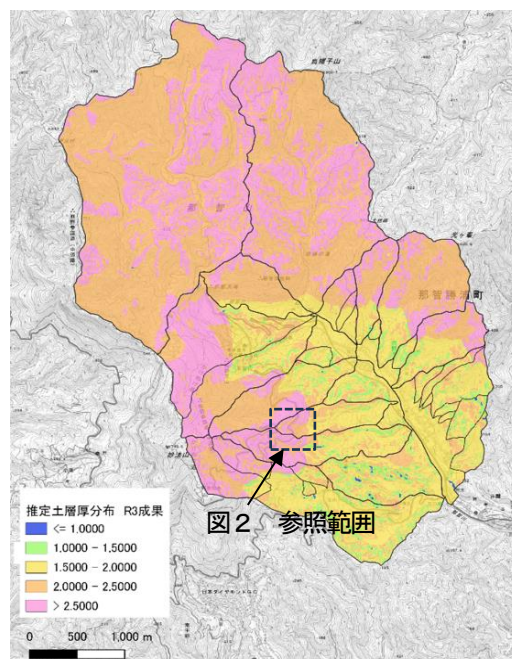


図1 既往の調査結果に基づく土層厚分布

表1 既往の調査結果に基づく土層厚分布式

花崗斑岩 (熊野酸性岩類)	山頂緩斜面	$\theta \leq 35^\circ$	$35^\circ < \theta$
		2.77	$-0.097 \cdot \theta + 6.16$
	開析斜面上部	$\theta \leq 25^\circ$	$25^\circ < \theta$
		2.77	$-0.017 \cdot \theta + 3.19$
	開析斜面下部	一律	
		2.2	
泥岩 (熊野層群)	山頂緩斜面	$\theta \leq 10^\circ$	$35^\circ < \theta$
		2.42	$-0.020 \cdot \theta + 2.08$
	開析斜面上部	$\theta \leq 15^\circ$	$15^\circ < \theta$
		2.39	$-0.039 \cdot \theta + 2.97$
	開析斜面下部	一律	
		1.68	

表2 既往の調査結果に基づく土質条件

			花崗斑岩	泥岩
飽和時單位堆積重量	γ_{sat}	kN/m ³	17.42	16.95
不飽和時單位堆積重量	γ	kN/m ³	15.13	14.95
土粒子密度	GS		2.65	2.65
間隙比	e		1.13	1.27
初期飽和度	Sr		0.56	0.64
飽和透水係数	Ks	m/s	0.01	0.00
土の粘着力	C	kN/m ²	7.00	10.25
土の内部摩擦角	Φ	°	28.33	15.50

4. 計算による再現性の確認

崩壊の再現性について CASE1、CASE2 で確認した（表3）。ここで、計算要素は10m グリッドであるのに対し、実際の崩壊地は数 10m³ 以上と複数の計算要素を包含するため、計算要素単位での評価に加え、同一崩壊地の内部に1つでも崩壊発生と予測された計算要素がある場合は、崩壊地内部の計算要素すべてを崩壊発生とみなす「みなし要素」を考慮した評価を加えた。その結果、適合率（適中率）は低いが、崩壊地単位の再現率（捕捉率）は70%程度得られることが確認された。そのため、斜面や小流域などまとまった範囲での評価方法が必要である。

CASE1、CASE2 は、基本とする水文モデル、斜面モデルが同じため、再現率・適合率に大きな差は認められなかった。ただし、実際の崩壊地と計算結果を比較すると、土層厚が相対的に薄く設定された泥岩範囲では広範囲の斜面が崩壊と予測されたのに対し、厚く設定された花崗斑岩範囲では、崩壊と予測された範囲は狭い。計算初期から安全率が1.0を下回る範囲が広く、崩壊発生の予測可能範囲が限られているためである（図2）。土層の空間分布設定には依然課題が多いが、調査結果から推定する手法の課題として確認することができた。一方、崩壊発生と予測される計算要素数を時系列で比較すると、CASE-1は降雨ピークへの対応が大きく減衰が早い、CASE-2は降雨ピークへの対応は小さいが、減衰が遅い結果となった（図3）。これは、両者で初期水深の考え方が異なることに起因している。

5. システムへの実装と試験サイトの構築

計算モデルを実装するシステムは、クラウド環境であるAWS - EC2を使用した。試験サイトの構築に先立ち、2017年以降の解析雨量及びXバンド雨量のアーカイブデータを用い、比較的規模の大きい8降雨について、降雨データの単位時間（解析雨量：1kmメッシュ30分間隔、Xバンド雨量：250mメッシュ10分間隔）あたりの計算時間を比較した。その結果、解析雨量の場合、1単位時間あたり1.4秒、Xバンドの場合、1単位時間あたり14秒であった。現在、Xバンド雨量の最短更新時間は5分間隔であるが、本業務の対象範囲（10m×10m；約18万要素）であれば十分対応できる計算時間あることを確認した。ただし、10分間隔での頻繁に更新される危険度情報は、現時点では運用上現実的でないと考え、解析雨量及び予測雨量を入力条件とし、CASE-1のモデルにより24時間先までの流域別の崩壊要素数及び崩壊要素の面的分布の表示する試験サイトを構築し、試験運用中の2024年8月28日の非発生降雨の例では、予測時点では多数の要素で崩壊発生と予測されたものの、時間の経過とともに予測降雨の規模が小さくなり、実績雨量による予測結果と予測雨量による予測結果の差は4倍に及んだ。以上から、試行結果として、①表層崩壊予測の精度向上に関する課題、②予測結果の評価の課題、③降雨予測に基づく予測結果の活用の課題が確認された。技術的にリアルタイムシステムの構築が可能だとしても、これらの課題について丁寧に解決していくことが重要である。特に、可視化と同時に適切な基準値設定や将来予測結果に対する行動計画など、情報システムの活用方法を明確にしたうえで、単純に計算結果を表示するだけではなく、複数の土砂移動現象やそれに起因する様々な被害全体を軽減するための運用面からも検討されることが望ましい。【引用文献】秋山ら（2015）：簡易な水文モデルを用いた崩壊発生時刻予測手法、土木研究所（2009）：表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価マニュアル(案)、松澤ら（2021）：那智川流域の地形・地質特性を反映した表層崩壊危険度マップの作成、Rosso. *et al*（2006）：A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding.

表3 再現計算結果

再現計算結果		CASE1		CASE2 (idH-slider)	
		要素	みなし要素	要素	みなし要素
実際に発生・予測発生	TP	164	397	143	392
実際に発生・予測で非発生	FN	332	99	353	104
実際に非発生・予測発生	FP	27,190	27,190	23,959	23,959
実際に非発生・予測非発生	TN	64,825	64,825	68,056	68,056
合計		92,511	92,511	92,511	92,511
再現率 (TP / (TP + FN))		33.1%	80.0%	28.8%	79.0%
適合率 (TP / (TP + FP))		0.6%	1.4%	0.6%	1.6%

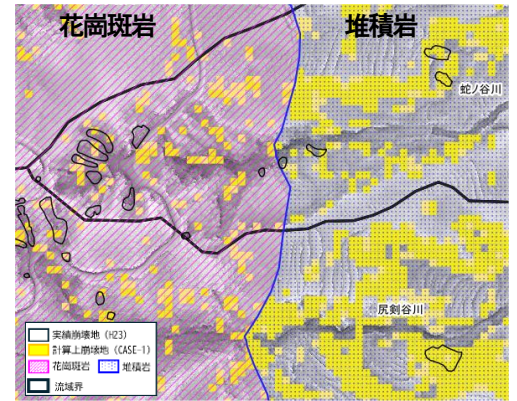


図2 再現計算結果 (CASE-1) 拡大図

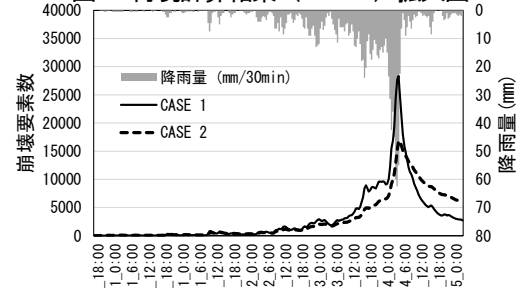


図3 モデルによる計算結果の比較

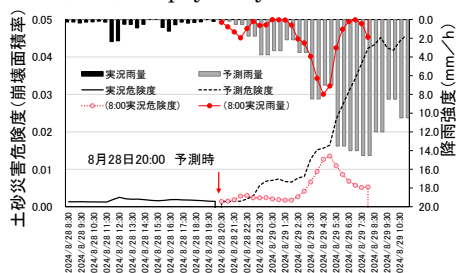


図4 予測雨量に基づく予測結果と実績値の比較計算

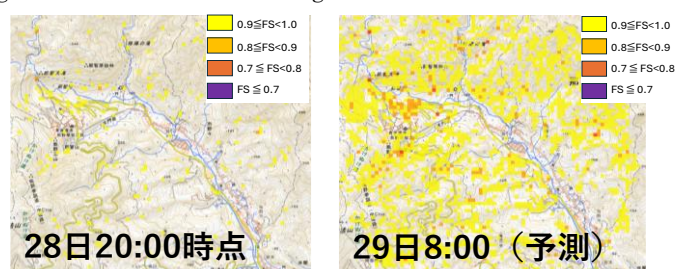


図5 予測雨量に基づく予想結果