

特集：時々刻々変化する土砂災害リスクを把む

現地取得が可能なパラメータを用いた 崩壊発生時刻予測手法の開発

秋山怜子・石塚忠範・内田太郎・高原晃宙

1. はじめに

崩壊発生時刻予測手法に関する研究は1980年以降活発に行われてきた。2007年より運用されている土砂災害警戒情報は、その中でも統計的な手法に基づく予測手法を用いている。近年は、土砂災害警戒情報から一歩踏み出し、さらに時間、場所の詳しい情報提供を目指した精緻な数値計算モデルに基づくリアルタイム崩壊予測などの試みもある¹⁾。しかしながら、複雑な力学モデルによってパラメータが多くなればなるほど、その設定が難しく、広範囲に対する崩壊予測には課題が多い。

(独)土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チームでは、2009年に「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)」(独立行政法人土木研究所, 2009)²⁾を公表した。このマニュアルでは、事業優先度、監視箇所、対策工設置箇所の決定のための溪流の相対的な危険度評価を目的として、表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価手法(H-SLIDER法)を示している。このH-SLIDER法は、入力条件を現地調査によって把握できるものみに絞った分布型力学的モデルである。実際の土層厚の空間分布を用いることにより、ある程度精度よく表層崩壊の相対的な危険度の評価が可能であることが示されており³⁾、簡易的かつ精度良く崩壊発生危険箇所を予測できる手法である。このH-SLIDER法と気象庁の降水短時間予報によって崩壊発生時刻を予測することが可能となれば、パラメータが煩雑化することなく、比較的簡易な調査のみで、現在土砂災害警戒情報に採用されている1kmメッシュよりもきめ細かな崩壊発生予測を行うことが期待できる。

そこで、表層崩壊マニュアルで用いられている手法(H-SLIDER法)に、降雨時の地下水位の上昇過程を取り入れ、崩壊発生時刻を予測する手

法を提案する。本稿では、提案する手法を過去の土砂災害発生事例に適用し、その再現性について評価した結果を報告する。

2. 崩壊発生モデルと予測手法

H-SLIDER法は、無限長斜面安定解析の地下水位を、その地点の集水域に降った降雨量と等しく、常に一定と仮定したモデルである。このように地下水位を一定と考える方法は、既往研究でもしばしば用いられる。それに対して、本研究では、Rosso *et al.*⁴⁾の提案する一定降雨強度条件下における地下水位と時間の関係をH-SLIDER法の無限長斜面安定式に取り入れ、崩壊発生限界降雨強度 $R(t)$ (以下、「限界降雨強度」)を時間 t の関数で示した(式(1))。

$$R(t) = \frac{K \sin I \{c(1+e) + (G_s + eS_r) \gamma_w h \cos I (\cos I \tan \phi - \sin I)\}}{A \gamma_w \left[1 - \exp\left(-\frac{1+e}{e-eS_r} \frac{K \sin I}{A} t\right)\right] \cos I \{(e - eS_r) \sin I + (1 + eS_r) \cos I \tan \phi\}} \quad \dots \text{式 (1)}$$

ここに、 $R(t)$ は限界降雨強度[m/s]、 K は飽和透水係数[m/s]、 I は斜面傾斜[°]、 c は土の粘着力[kN/m²]、 e は間隙比、 S_r は飽和度、 γ_w は水の単位体積重量[kN/m³]、 h は土層厚[m]、 ϕ は土の内部摩擦角[°]、 A は単位幅あたりの集水面積[m²/m]、 t は継続時間[s]を示す。

崩壊発生は、 t を降雨データと同じ間隔で0から十分に長い時間(本研究では48時間)まで変化させて、それぞれの t に対して判定する。判定する時刻 T から t 時間以内の降雨強度 $r(T, t)$ と、限界降雨強度 $R(t)$ を比較し、降雨強度 $r(T, t)$ が限界降雨強度 $R(t)$ を上回った時刻 T を、「崩壊発生」として判定する(図-1)。この時、降雨強度 $r(T, t)$ は次式で算出する(式(2))。

$$r(T, t) = \frac{1}{t} \sum_{i=0}^{t-1} r_{T-i} \quad \dots \text{式 (2)}$$

ここに、 T は崩壊発生を予測する時刻を示す。

A method of prediction for time and location of landslide occurrence using locally measurable parameters

実際の雨量データを用いて図-2で説明する。8:00時点を例とすると、雨量データから得られる8:00から前の1時間、2時間、3時間・・N時間降雨強度を、限界降雨強度と比較する。下段の図から、1時間～3時間は限界降雨強度を下回っているが、4時間以上では限界降雨強度を上回るため、崩壊発生と判定する。1～N時間降雨強度のすべてで一度も限界降雨強度を上回らなければ、崩壊は発生しないと判定する。

提案する手法では、このように式(1)から得られた限界降雨強度と継続時間の関係について、降雨継続時間を特定せずに評価している。H-SLIDER法と比較して提案する手法が最も異なる点は、地形量と土質定数から求める限界降雨強度と、実際の雨量データを直接比較できる点である。

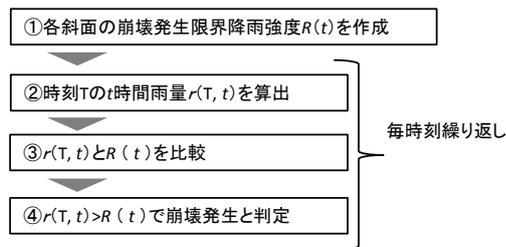


図-1 崩壊発生の予測手法

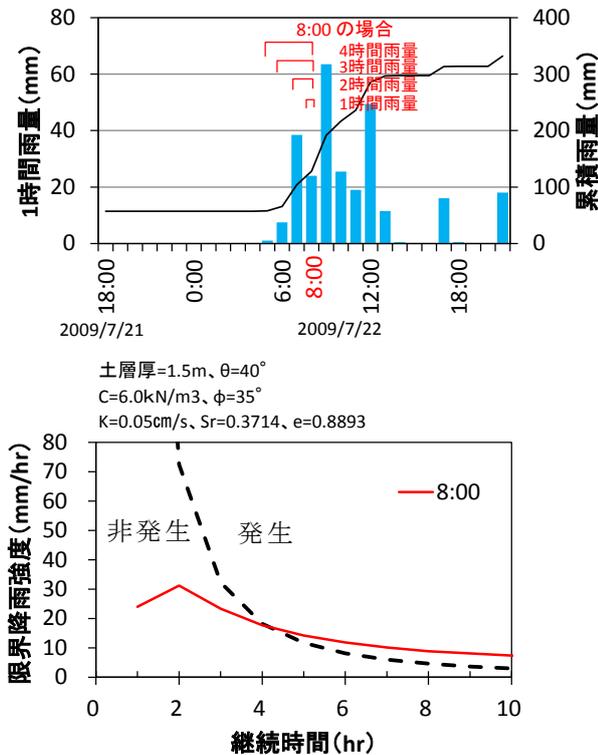


図-2 限界降雨強度と継続時間の関係の例：

上段：対象とする雨量データ、下段：限界降雨強度と継続時間の関係

H-SLIDER法における地下水位は、一定の状態を仮定しており、雨量の時間変化によらず一定である。すなわち、斜面ごとの相対評価にとどまり、雨量の時間変化と比較して崩壊発生時刻を予測することができない。それに対して、提案する手法は、降雨の継続時間の取り方を複数変えて継続時間ごとの限界降雨強度と比較していることから、短時間強雨の場合や、長期間少雨の場合もそれぞれ評価できることが期待できる。この方法を idH-SLIDER法 (revised H-SLIDER for assessing rainfall Intensity ·Duration thresholds.) と呼ぶ。ただし、飽和地表流の発生による降雨流出は考慮されていないため、限界降雨強度に相当する地下水深が土層厚を上回っている場合や、地下水深が土層厚を上回っている状態には適用できない。

3. 平成21年防府市で発生した斜面崩壊への適用

3.1 対象地域の概要と計算条件

本研究では、2009年（平成21年）7月21日に土石流災害が発生した山口県防府市の剣川流域の右支溪(流域面積0.064km²)を対象とした(図-3)。

対象流域では、概ね15m間隔で簡易貫入試験(140地点)が実施されており、土層厚はこの結果から推定した。その他のパラメータは表-1に示す値を用い、計算は5m間隔のグリッド(以下、「計算要素」とする)毎に実施した。パラメータのうち、土の粘着力Cのみ後述する適中率をもとにフィッティングしている。それ以外については土



国土地理院の数値地図 25000 (地図画像)『山口』に加筆

図-3 研究対象地

表-1 計算に使用した土質定数

等価透水係数 K	0.05 cm/s
土の粘着力 C	6.0 kN/m ²
土の内部摩擦角 ϕ	35.0°
土層の単位体積重量	
飽和単位体積重量 γ_{sat}	18.1 kN/m ³
湿潤単位体積重量 γ	15.2 kN/m ³
飽和度 Sr	0.3714
間隙比 e	0.8893
水の単位体積重量 γ_w	9.8 kN/m ³

質試験、既往調査結果をもとに設定した。

再現性の評価には、崩壊と判定された計算要素(以下、「崩壊要素」とする)のうち、実際に崩壊地に存在する要素の割合を示す適中率と、流域の崩壊箇所数のうち、崩壊発生が予測された要素を含む崩壊箇所の割合を示すカバー率を用いた。(1-適中率)は空振り率を示すため、適中率が低いことは空振りが多いことを示し、カバー率が低いと、実際の崩壊箇所の見逃しが多いことを示す(図-4)。

3.2 崩壊発生位置及び時刻の検証

再現計算による崩壊要素の平面分布を図-5に、適中率、カバー率及び崩壊要素数の時間変化を図-6に示す。崩壊要素の増加が最も多くかつ適中率・カバー率が高い時刻は12:10で適中率0.89(8要素/9要素)、カバー率0.75(6箇所/8箇所)であった。従って要素としても、崩壊箇所としても7~8割の精度で再現できているといえる。

崩壊発生が予測される時刻は、崩壊判定要素が急激に多くなる時刻が最も確からしいと考えた。図-6によると、11:20~12:10に崩壊判定要素の急激な増加がみられ、増加数が最も多いのは11:20~11:30であった。当該流域の正確な崩壊発生時刻はわからないが、NPO法人山口県防災・砂防ボランティア協会の報告⁵⁾によると、剣川流域については「8時10分頃、国道262号にきれいな水が流れていたが、流れが泥水になり小石が大石になった。」「11時ごろ、剣川から土石流が流れ出し、国道の路面より1.0mぐらいの高さで流れていた。」という証言がある。この記述から、11時以降の土石流発生と、計算結果による崩壊発生の多いタイミングがよく一致している。他流域等の記録も勘案すると、周辺一帯で11:00~12:00頃にかけて、斜面崩壊、土石流等に関する現象が確認されており、崩壊発生時刻についても概ね再現で

きていると考える。

次に、idH-SLIDER法による崩壊判定要素の限界降雨強度と継続時間について比較した(図-7)。

適中率:

予測結果が実際の崩壊地に含まれているか?

$$Pv = \frac{G_1}{G_1 + G_3} \quad \text{※空振り率} = 1 - Pv$$

カバー率:

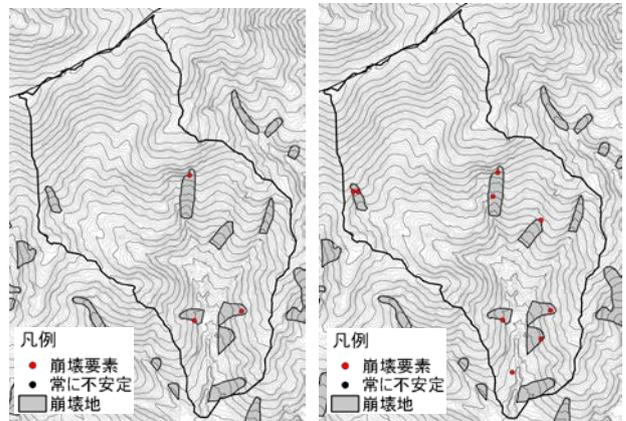
実際の崩壊地に予測結果が含まれているか?

$$Cv = \frac{PG_1}{PG_1 + PG_2}$$

		現地の状況	
		崩壊地	崩壊地でない
計算結果	崩壊発生と判定	G ₁	G ₃
	崩壊発生と判定されない	G ₂	G ₄

		現地の状況
		崩壊地
計算結果	崩壊発生と判定された要素を含む	PG ₁
	崩壊発生と判定された要素を含まない	PG ₂

図-4 評価の指標



(a) 11:20 (b) 12:10

図-5 id-HSLIDERによる崩壊分布

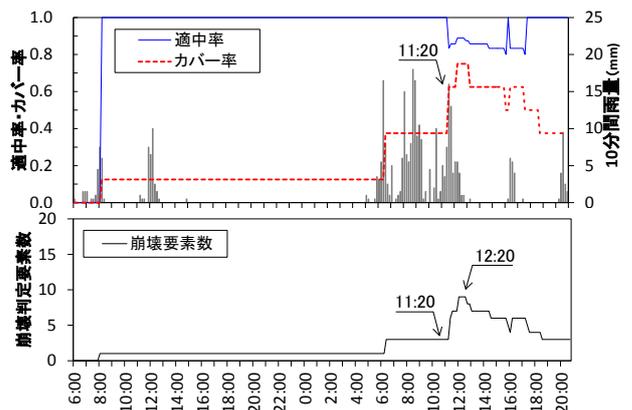


図-6 適中率、カバー率及び崩壊発生要素の時間変化

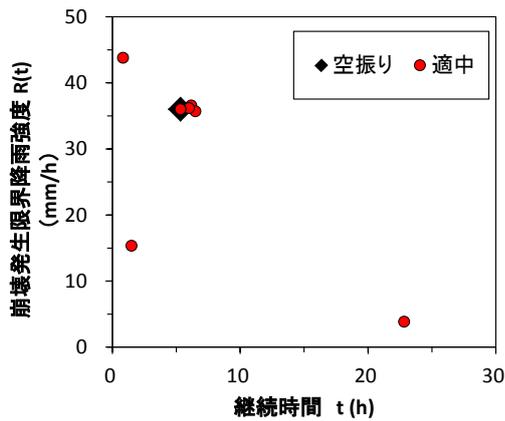


図-7 限界降雨強度と継続時間の関係

空振り要素と適中要素の間に差は見られない。崩壊要素9要素のうち6要素は、5～6時間以内35mm/h以上の降雨強度が限界降雨強度となっていた。

このようにidH-SLIDER法は、時間の経過に伴う地下水位の上昇過程を表現できるようになったことで、実際に観測された雨量や降水短時間予測による雨量と、斜面ごとに異なる崩壊条件(降雨強度、継続時間)によって崩壊発生を評価することが可能である。

4. まとめ

本研究では、H-SLIDER法と同じ少ないパラメータにより、崩壊発生位置とその時刻を予測できるidH-SLIDER法を示した。この現地調査によって設定可能なパラメータで崩壊発生時刻を予測する技術は、今後、土砂災害危険度の高いより詳しい場所と時刻を、地方自治体や住民に提供できることが期待できる。

今後、他の地域の災害や、非発生降雨についても検証し、予測精度と地形条件の関係、パラメータの不確実性分析等を把握したうえで、実際の運用に向けて本予測手法の適用性及び活用方法について検討する予定である。

謝 辞

本研究で使用した航空レーザ測量成果は、中国地方整備局山口河川国道事務所から貸与いただきました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 木下篤彦、神野忠広、岡本敦、一言正之、小野寺勝、桜庭雅明、杉山実：六甲山系におけるリアルタイムハザードマップシステムの構築、砂防学会誌、Vol.66、No.1、pp.15～22、2013
- 2) 独立行政法人土木研究所土砂管理研究グループ火山・土石流チーム：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)、土木研究所資料、第4129号、37p、2009
- 3) 内田太郎、盛伸行、田村圭司、寺田秀樹、瀧口茂隆、亀江幸二：場の条件設定手法が表層崩壊発生箇所の予測に及ぼす影響、砂防学会誌、Vol.62、No.19、pp.23～31、2009
- 4) Renzo Rosso, Maria Cristina Rulli and Giovanni Vannucchi : A physically based model for the hydrologic control on shallow landsliding, Water resource research, 42, pp1-16, 2006
- 5) NPO法人山口県防災・砂防ボランティア協会：平成21年7月21日土石流災害に伴う「土石流前兆現象・避難状況実態調査」及び「被災体験証言」報告書、p56、2011

秋山 怜子



(独)土木研究所つくば中央
研究所土砂管理研究グループ
火山・土石流チーム
交流研究員
Reiko Akiyama

石塚 忠範



(独)土木研究所つくば中央
研究所土砂管理研究グループ
火山・土石流チーム
上席研究員
Tadanori ISHIZUKA

内田 太郎



国土交通省国土政策技術総合
研究所土砂災害研究部砂
防研究室 主任研究官、
博(農)
Dr. Taro UCHIDA

高原 晃宙



(独)土木研究所つくば中央
研究所土砂管理研究グループ
火山・土石流チーム
研究員、博(農)
Dr. Teruyoshi TAKAHARA