

非定常拡張 Hslider 法を用いた崩壊発生時刻予測手法

独立行政法人 土木研究所 ○秋山怜子・木下篤彦
 国土技術政策総合研究所 内田太郎
 独立行政法人 土木研究所 高原晃宙・石塚忠範

1. はじめに

表層崩壊危険度を評価する方法として、土層内の地下水位を定常で仮定した Hslider 法（独立行政法人土木研究所, 2009）や、降雨流出計算に基づく地下水位を反映した分布型の崩壊発生モデル（例えば、木下ら, 2013）がある。Hslider 法は、水位を定常と仮定したモデルであっても土層厚に実際の空間分布を用いればある程度精度よく表層崩壊危険度の評価が可能であることがすでに示されている（内田ほか, 2009）。しかし、この手法では地下水位が一定であることから、崩壊発生時刻や時々刻々と変化する危険度の空間分布の変化について示すことができない。そこで、本研究では Hslider 法へ、Rosso. *et al.*(2006)の定式化した一定降雨強度下における不飽和領域を考慮した非定常の地下水変化を取り入れた手法（内田ほか, 2012）を「非定常拡張 Hslider 法」として、ハイトグラフと降雨強度と継続時間で求められる崩壊発生限界雨量から崩壊発生時刻を予測する手法を提案し、2009 年に発生した山口県防府市剣川流域の斜面崩壊に適用し、再現性について検証した。

2. 崩壊発生時刻予測手法

Hslider 法の無限長斜面安定式へ Rosso *et al.* (2006) の提案する地下水位と時間の関係を適用し、計算開始時刻の初期水位を 0 と仮定すると、発生限界降雨強度は式 (1) のとおりとなる。

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

ここに、 c は土の粘着力[kN/m²]、 h は土層厚[m]、 l は斜面勾配、 ϕ は土の内部摩擦角、 A は単位幅あたりの集水面積[m²/m]、 r は降雨強度[m/s]、 K は飽和透水係数[m/s]、 e は間隙比、 S_r は飽和度、 t は時間[s]を示す。この式より、継続時間 t に対する崩壊発生限界降雨強度 r_t が得られる（図-1）。対象とする斜面が定常を仮定できる時間はその地点を含む上流域の地形や水文特性によって一定ではないと考え、崩壊発生時刻の推定は、 t を 0 から十分に長い時間(本研究では最大 48 時間)まで変化させ、崩壊発生を予測する時刻から t 時間以内の降雨強度と、発生限界降雨強度を比較し、降雨強度が発生限界降雨強度を上回った時刻を、「崩壊発生時刻」として判定する。本検討では、2009 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)を対象に、崩壊発生箇所について検証した。土層厚、集水面積、斜面勾配は、流域内 140 地点で実施した簡易貫入試験結果から算出し、その他の土質定数については表-1 に示す。

3. 再現性の検証

3.1 発生箇所の検証

再現計算による崩壊要素の平面分布を図-2 に、適中率、カバー率及び崩壊要素の時間変化を図-3 に示す。ここで適中率は、崩壊発生と判定された要素のうち実際の崩壊地に含まれている要素の割合を示し、カバー率は実際の崩壊箇所に対して、崩壊発生と判定された要素を含む崩壊箇所の割合を示す。適中率は降雨初期の段階で 1.0 になり、その後減少し、再び 0.7 付近まで増加する。一方、カバー率は、計算時間全体を通して増加傾向を示す。これは、適中率が適中した要素と空振りした要素との関係で決まっており、降雨後半になると少なからず空振りの崩壊要素が出てくることで、適中率が減少するためである。一方、カバー率については、崩壊要素の存在する崩壊箇所の数のみで決定するため、崩壊判定要素が減少しない限り増加傾向を示す。崩壊要素の増加が最も多かつ適中率・カバー率が高い時刻は 11:30 で適中率 0.80 (8 要素/10 要素)、カバー率 0.75(6 箇所/8 箇所)であった。従って斜面要素としても、崩壊箇所としても 7~8 割の高い精度で再現できていると考えられる。

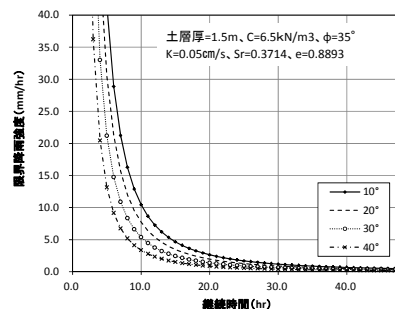


図-1 崩壊発生限界雨量の例
 表-1 計算に使用した土質定数

等価透水係数 K	0.05 cm/s
土の粘着力 C	6.50 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 S_r	0.3714
間隙比 e	0.8893
水の単位体積重量 γ_w	9.8 kN/m ³

3.2 発生時刻の検証

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予測時刻と考えた。図-3によると、11:20~12:20に急激な増加がみられ、崩壊要素の増加が最も多いのは11:20~11:30、11:50~12:00であった。当該斜面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(2011)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、発生時刻について概ね再現できていると考える。

3.3 従来のHslider法との比較

従来のHslider法は、定常状態を仮定しており、崩壊発生限界雨量は相対的な危険度として求められるため、必ずしも絶対的な時間雨量とは一致しない。ここでは従来のHslider法により全斜面要素の発生限界雨量を求め、最も適中率、カバー率が良い発生限界雨量(R_c)である $R_c=4.0\text{mm}$ を崩壊発生条件とした場合の適中率、カバー率を比較した(表2)。この結果、非定常拡張Hslider法はカバー率がやや低いものの適中率が高く、これまで指摘されているような、カバー率が上がると極端に空振り率が高くなるような現象は見られない。また、適中率、カバー率の両方を見比べてみても、従来のHslider法と比較して空振りが少なく、崩壊発生時刻の予測ができるだけでなく、位置の予測精度についても従来のHslider法より向上することが期待できる。

4. 崩壊発生時間及び限界雨量の関係

非定常拡張Hslider法による崩壊判定要素の崩壊発生雨量と崩壊決定時間について比較した(図-4)。空振り要素と適中要素の間に差は見られないものの、6時間以内 30mm/h 以上継続した強雨が条件となった要素と、20時間以上 $4\sim 10\text{mm/h}$ 程度継続した降雨を条件とした要素に大別された。従来のHslider法による限界雨量は 4.0mm/h であり後者に相当する。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、長時間の継続降雨だけでなく、短時間豪雨を条件とした崩壊発生も評価できるようになったためである。この特徴については、今後斜面勾配、集水面積等の地形条件との関係についても考察する予定である。

5. おわりに

本研究では、非定常拡張Hslider法は、Hslider法と同じ少ないパラメータにより実際のハイエトグラフと比較しながら、崩壊発生箇所とその時刻を予測できる可能性があることを示した。今後、パラメータの不確実性分析等により、本予測手法の適用性の検討とともに、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LPデータは山口河川国道事務所から借用しました。ここに感謝の意を表します。

引用文献：(独) 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)」；木下ら(2013)：砂防学会誌, vol66, No.1；内田ら(2009)：砂防学会誌, vol62, No.19；内田ら(2012)：平成24年度砂防学会研究発表会要旨集；Rosso et al(2006)：Water resource research, 42；NPO 法人山口県防災・砂防ボランティア協会(2011)：「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

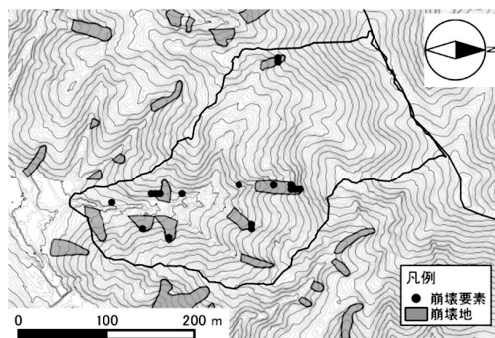


図-2 再現計算による崩壊分布

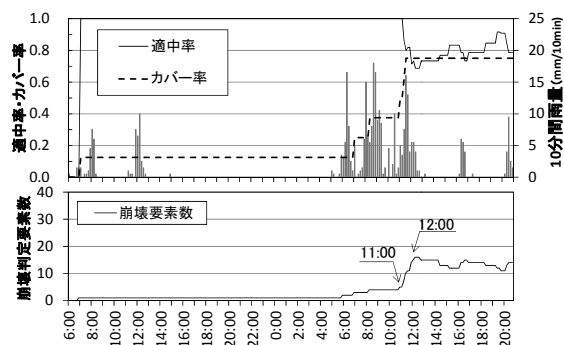


図-3 比較指標の時間変化

表-2 再現性を示す指標の比較

比較指標	非定常拡張 Hslider	従来のHslider
適中率	0.80 (8/10)	0.62 (34/55)
カバー率	0.75 (6/8)	0.88 (7/8)
発生時刻	11:30	—

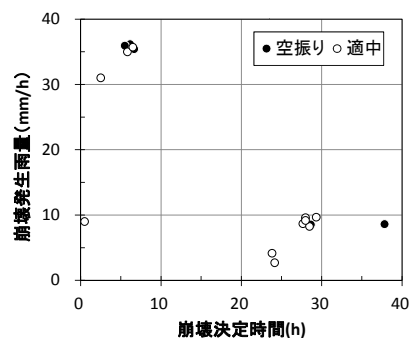


図-4 限界雨量と決定時間の関係