

簡易斜面安定解析を用いた山地源頭部における崩壊発生箇所の検証

台湾 国立台湾大学森林学系 梁 偉立

1. 研究背景と目的

山地流域の源頭部は、0 次谷として崩壊や地すべりが発生しやすい部位と認識されている。崩壊危険度の高い源頭部であっても、事前に崩壊箇所を予測して観測を行ったとしても、必ずしも崩壊が発生するとは限らない。降雨による表層崩壊の発生は水文、地形、土壌、地質、および植生などの要因と密接に関連している。その中でも地形と水文的な特性が最も重要な要素であると考えられる。これらの特徴を把握できたとしても、事前に崩壊発生を予測できるかどうかは、依然として重要な課題である。2024 年の砂防学会研究発表会では、台湾の山地源頭部流域における表層崩壊動態および水文と地形的な特徴を報告した。本研究は続報として、崩壊まで蓄積したデータを用いて、事前に崩壊発生箇所と時間を予測できるかどうかを考察した。

2. 観測地・崩壊地概要

台湾宜蘭県における粗坑溪の支溪にある天然林小流域源頭部に観測地を設置した(24°45'42"N, 121°35'45"E)。2012 年から 2016 年 9 月まで、地形量と斜面水文応答を観測した。源頭部面積は 0.16 ha であり、基岩は頁岩と粘板岩から構成されている。観測地は急斜面であり、地表面の勾配は 4~75°, 平均 41°であった。年雨量は約 4125 mm であり、明瞭な乾季・雨季の区分はなく、台湾の代表的な多雨地域である。

地形測量については、レーザー距離計を用いて地表面地形を計測し、貫入試験によって土層厚を計測することで基岩面地形を推定した。水文観測については、降雨、流出そして基岩面における圧力水頭を 10 分間隔で連続的に記録した。

2016 年 9 月の台風 MEGI (平成 28 年台風 17 号) による豪雨で、観測地の下部がほぼ崩壊し (図 1), 上部にも表面変位が観測された。破壊面は岩盤内に達していなかったため、源頭部の表層崩壊に分類される。崩壊イベントは 9 日間にわたり、初期には断続的な降雨で、後期には強い降雨を特徴とした。崩壊までの積算雨量は 271.4 mm, 最大降雨強度は 8.4 mm/10 min と 38.4 mm/h に達した。9 月 27 日 13:20 に降雨のピーク前に流出が急激に減少した。量水堰が土砂により破壊されたと推測され、この時点が崩壊発生時刻と推定した。

3. 簡易斜面安定解析 (H-SLIDER 法)

崩壊まで観測地で調査してきたデータを活用し、H-SLIDER 法 (表層崩壊に起因する土石流の発生危険度評価手法) (内田ら 2009) により、簡易斜面安定解析を行った。このモデル (式 1) は定常状態を仮定し、ダルシー法則と無限長斜面解析に基づき、安全率 1 となる最小定常崩壊発生降雨強度 (R_c) を算出する。

$$R_c = \frac{K_s \tan I \cos I [c - \gamma_{uns} h \cos I (\sin I - \cos I \tan \phi)]}{A [\gamma_w \cos I \tan \phi + (\gamma_{sat} - \gamma_{uns}) (\sin I - \cos I \tan \phi)]} \quad \dots\dots\dots (1)$$

A は単位幅あたりの集水面積, h は土壌厚, I は基岩面の勾配, K_s は飽和透水係数, γ_{sat} と γ_{uns} は飽和と不飽和土層の単位体積重量, γ_w は水の単位体積重量, c は粘着力, ϕ は内部摩擦角である。 R_c が小さくなるほど、崩壊危険度が高いことを示す。

計算領域である基岩面を 2 m×2 m 単位のメッシュに分割した (計 472 個)。基岩面地形の空間分布を考慮し、現地調査による地形量をメッシュに与えた。他パラメータは空間的なばらつ

きを考慮せず、均一に設定した。 c と ϕ は観測地と9 km離れた4地点の公開データの平均値を採用したが、 γ_{sat} と γ_{uns} は観測地における159地点の不攪乱土壌サンプルから測定した。 K_s については、崩壊イベントに観測された流出と圧力水頭のデータから求めた等価飽和透水係数を適用した。

4. 結果と考察

現地観測記録では、38.4 mm/hと60.4 mm/hはそれぞれ崩壊イベント中と観測期間中の最大降雨強度であった。図1はH-SLIDER法で評価された R_c の空間分布を示しており、崩壊領域内のメッシュ数が162であった。結果として、観測された降雨強度範囲内で R_c を上回るメッシュがごく限られたうえに、崩壊領域に入ったメッシュが5のみであった。さらに、 R_c が60.4 mm/h以上のメッシュをほぼ四等分にし、相対的に安全な箇所と危険な箇所を区別した。この場合、最も危険な箇所(～185 mm/h)のメッシュ数が126であり、崩壊領域に入ったメッシュ数は75であった。つまり、最も危険箇所の約六割が崩壊領域に該当した。ただし、このような条件では、サイト全体の基岩面はほぼ飽和状態となり、観測期間中に記録されなかった非常に高い圧力水頭が計算された。

以上の結果より、崩壊危険度の高い箇所が観測地の下部斜面に位置しており、実際の崩壊範囲と高い一致性を示している。このことから、崩壊前に計測した地形情報を用いて簡易な斜面安定解析を行うことにより、事前に崩壊可能性の高い部位を特定できることが明らかとなった。しかし、崩壊発生時刻については効果的な予測が困難である。この理由としては、モデルの基本的な仮定が定常状態に基づくため、実際の地下水や基岩面飽和帯の空間分布を正確に反映していない点が挙げられる。また、実際に崩壊を引き起こした降雨量も降雨強度も観測期間中の最大値ではなかった。そのため、降雨強度のみで評価すると、崩壊範囲を過小評価し、崩壊発生時刻の予測も遅延することが示唆される。表層崩壊の発生時刻の予測精度を向上させるためには、観測地の水文応答を詳細に考慮する必要がある。特に山地源頭部においては、基岩面飽和帯の形成は降雨の鉛直浸透だけでなく、地下水の寄与も大きい。異なる水分供給源を同時に考慮することが重要である。

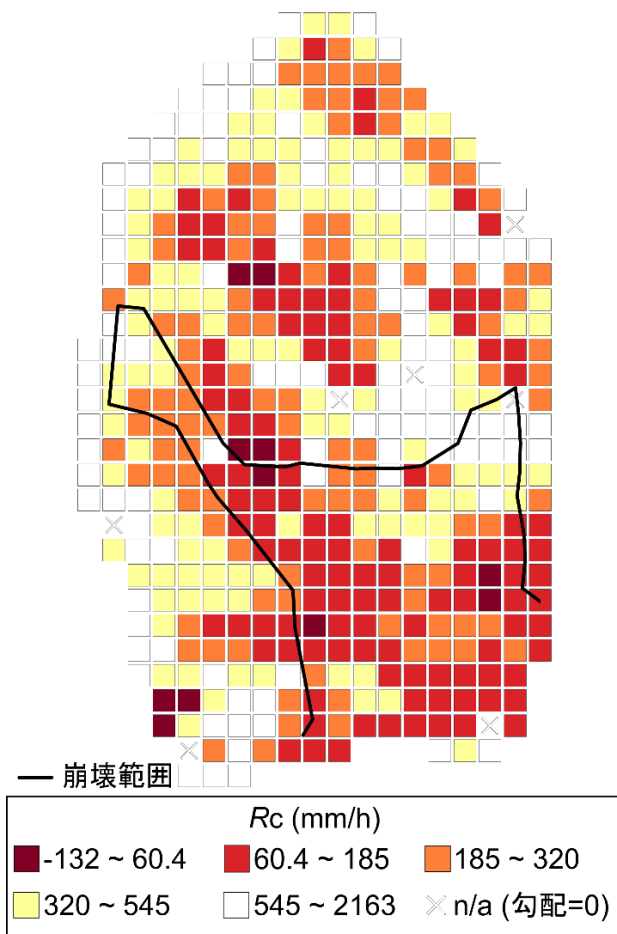


図1. 最小定常崩壊発生降雨強度(R_c)の空間分布。

引用文献：

内田太郎, 盛伸行, 田村圭司, 寺田秀樹, 瀧口茂隆, 亀江幸二. (2009). 場の条件の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, 62(1), 23-31.