

崩壊モデルに基づく土砂生産ポテンシャルの推定

国土技術政策総合研究所 砂防研究室 山越 隆雄 田中 健貴 吉田 拓海
株式会社オリエンタルコンサルタンツ ○秋山 怜子・矢渡 岳
井口 慧・石田 美津希

1. はじめに

近年、砂防計画の立案にも河床変動計算が用いられるようになり、河床からの土砂生産や堆積・侵食による土砂調節は、流出解析によって求めた河川流量とその時間変化によって把握されるようになった。一方、斜面崩壊による土砂生産も、崩壊モデルによって把握しようとする試みはこれまでも見られたものの、パラメータ設定とそれによる再現性の検証が難しいとされてきた。そのため、未だ崩壊生産土砂量は、打萩（1971）による崩壊面積率と降雨量の近似式から推定することが多かった。しかしながら、近年極端な豪雨の頻発により、土砂生産場に対する生産土砂量の規模の予測の重要性は高まっている。

本報告では、平成30年7月豪雨で崩壊が発生した広島市東部の府中大川(11.0 km²)、御衣尾川(5.5 km²)、畑賀川(11.6 km²)、矢口川(4.0 km²)の4流域を対象に、崩壊モデルを用いて小流域単位の生産土砂量の予測可能性を検討するとともに、降雨規模の変化による土砂生産特性について試行した結果を報告する。

2. 使用する計算モデル

崩壊発生の判定は、無限長斜面安定式により計算した。地下水位は、Rosso *et al* (2006) の地下水モデルをもとに、入力する降雨時間間隔で初期水深(h_0)を更新して計算した。計算に使用するパラメータは、既存の土質試験結果及び簡易貫入試験結果をもとに、平成30年7月豪雨について再現性が高いパラメータを標準ケースとして採用した。計算は航空LPに基づく10m正方形グリッドを1要素とした。

$$FS = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c + (\gamma_d D \cos \theta - \gamma_w h \cos \theta) \tan \phi}{\gamma_d D \sin \theta} \quad h = \frac{u}{\gamma_w \cos \theta}$$

τ_f : すべり抵抗力, τ : すべり応力, FS : 安全率, c : 土の粘着力, ϕ : 土の内部摩擦角,
 γ_d : 土層の単位体積重量, γ_w : 水の単位体積重量, D : 土層厚, θ : 斜面勾配, h : 地下水深,
 u : 土層中の間隙水圧

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

for $\frac{ap}{Tb \sin \theta} > 1$

h : 地下水位, a : 流域面積, b : 単位幅, e : 含水比, S_r : 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

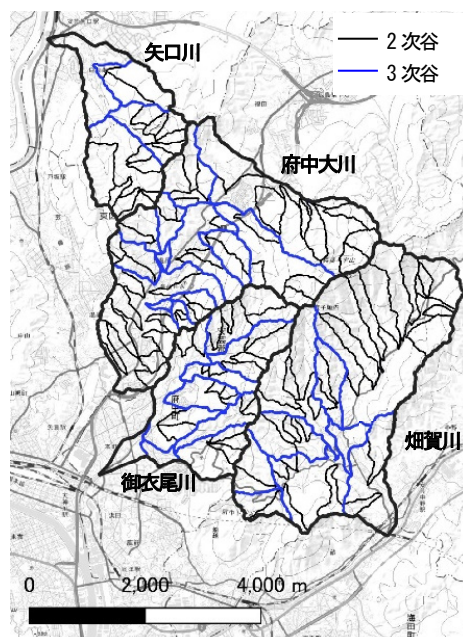


図1 調査対象溪流位置図

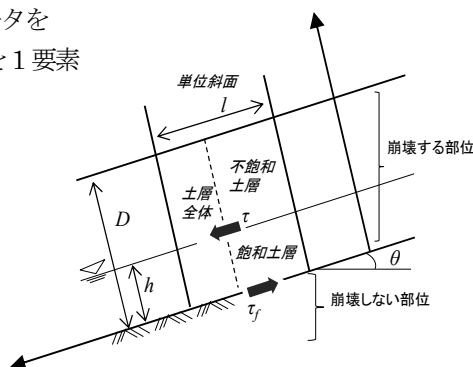


図2 表層崩壊概念図

3. 再現計算によるパラメータの設定と実績生産土砂量の比較

再現計算の対象降雨は平成30年7月豪雨とした。入力条件とする降雨はXバンド雨量データ(250mメッシュ; 10分間隔)の空間分布のある条件とした。この降雨により、対象4流域では230箇所の崩壊が発生し、各流域の実績崩壊面積率は0.1%~0.5%(全体0.26%)となった。なお、最寄りの地上雨量計である気象庁広島における24時間雨量は200年確率規模を大きく上回っていた。

最初に、既存の広島花崗岩地域で実施された土質試験結果から求めた物性値を設定した。土層厚、土の粘着力については、感度分析的に複数のケースを比較し、流域全体の崩壊面積率が合致するケースを標準ケースとして設定した。飽和透水係数については、オーダーの異なる3ケースを実施し、1990年以降の非発生降雨を含む長期間の計算を実施し、平成11年6月豪雨、平成26年8月豪雨を非発生降雨、平成30年7月豪雨を発生降雨として分離できる飽和透水係数(平均値の約100倍)を標準ケースとした。土層厚については、①全域を1mとして一律とした場合、②既存の文献等から勾配別に設定した場合、③対象4流域の崩壊実績より推定した場合の3ケースを比較し、崩壊面積率が最も近くなるケース②を採用した。場の条件のうち、空間分布があるのは土層厚及び地形量(斜面勾配・流域面積)のみとした。

表1 計算条件

	単位	条件	備考
初期飽和度		0.5	単位体積重量の空隙比
		0.82	平均から算出
土の粘着力	kN/m ²	4.2	試験平均
土の内部摩擦角	°	36.4	試験平均
土層厚	m	20°未満 2.0 m 20~30° 1.5 m 30~40° 1.0 m 40° ~ 0.5 m	既存文献等から設定
飽和透水係数	m/s	0.0003	試験結果の100倍

再現計算結果について、2次谷及び3次谷単位で分割した単元流域単位での生産土砂量（崩壊メッシュ数×100m²×土層厚）を実績崩壊生産土砂量と比較した（図3）。二次谷を単元流域とした場合、崩壊が発生した流域については、実績と比較してほぼ±1オーダーの生産土砂量が推定された。ただし、計算要素（メッシュ）単位での適合率（実際に発生かつ予測で発生／予測で発生）、再現率（実際に発生かつ予測で発生／実際に発生）は2%未満と低く、10mグリッド単位で位置を適合させることはできておらず、±1オーダー程度の土砂量を推定する可能性を示すにとどまった。

4. 土砂生産ポテンシャルの検討

4.1 現地計測に基づく表層土層厚分布による再現性：

対象流域内で実施した簡易貫入試験（府中大川 25 箇所、矢口川 25 箇所）をもとに作成した土層厚分布推定式（ $D[\text{cm}] = -0.2984 \theta [\text{degree}] + 122.78$ ）を用いたケースを実施した。この土層厚分布は斜面勾配 10° 以上の範囲では全て土層厚が 1.0m～1.2m の範囲に収まり、土層厚の分布範囲が基本ケースより狭く、1 オーダー大きくなる結果となった（図4）。

4.2 降雨規模の変化に応じた土砂生産特性：

計算上の生産土砂量の上限すなわち崩壊ポテンシャルを検討した。国土交通省の「気候変動を踏まえた水災害対策のあり方について」によると、気候変動により、気温が2°上昇すると降雨量は1.1倍になると推定されている。そこで、土層厚を再現計算と同じ文献値による分布とし、平成30年7月豪雨の各時刻の雨量を1.1倍に引き伸ばして算出した結果、場の条件（地形、土層厚、土質強度）と地下水深（ $0 \leq h \leq D$ ）の組み合わせから、安全率が1.0以下の解をもち計算上崩壊発生と予測される斜面は約1.4倍と推定された。さらに、生産土砂量が上限値に達するまで引き延ばし率を変えて計算した結果、流域により差があるものの、降雨量が平成30年7月豪雨の2倍程度となったところで上限値に達した。計算上、4流域合計の比生産土砂量は再現計算ケースの5,133 m³/km²（実績崩壊生産土砂量 4,439 m³/km²）に対し、32,350 m³/km² と約6倍となった（図5）。

5. まとめ

以上より、当該地域で一般的に使われることの多い土質定数や土層厚分布を想定し、過去の斜面崩壊発生・非発生の履歴を踏まえて流域斜面を代表する飽和透水係数を同定して生産土砂量を試算したところ、小流域単位での崩壊生産土砂量が概ね±1オーダー程度で再現できることが確認でき、100年確率降雨を超える平成30年7月豪雨時に実際に生じた崩壊生産土砂量に対して、約6倍の崩壊生産土砂量が上限値として推定された。従来、降雨量に対する生産土砂量は打荻（1971）の式が用いられ、崩壊有効雨量の2乗に比例して崩壊生産土砂量が見積られることにより過大に評価される問題があった。本検討では、その地域の一般的な定数を用いて簡易な斜面安定計算を用いることによって、流域単位で土砂量の±1オーダーレベルでの再現性は期待でき、また過大でない上限値を推定できる可能性があることが確認できた。従って、斜面安定解析を用いた崩壊生産土砂量の推定は、生産土砂量の絶対値の推定手法としては課題が多いものの、降雨量に応じた崩壊生産土砂量の引き伸ばし・引き締め手法としての活用が期待できるため、今後検証を進めていきたい。

本稿の作成にあたり広島西部山系砂防事務所及び広島県土木建築局にデータ提供、現地調査のご協力をいただきました。また、XRAIN 雨量データは、DIAS を通じて国土交通省より提供されたものを活用させていただきました。感謝申し上げます。【引用文献】打荻（1971）：新砂防，23（4），p21-34，Rosso. et al（2006）：Water Resource Research，42 p 1-16

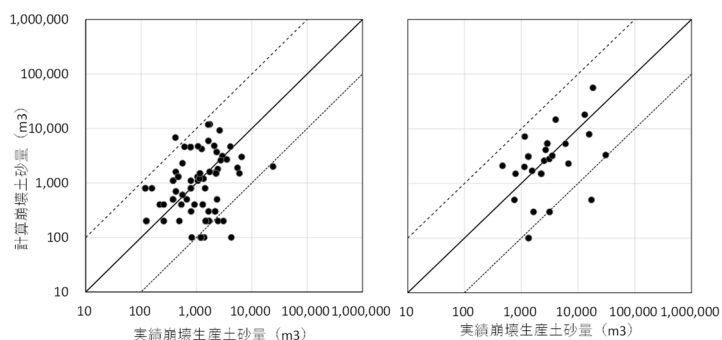


図3 基本ケース計算結果（左：2次谷区分、右3次谷区分）

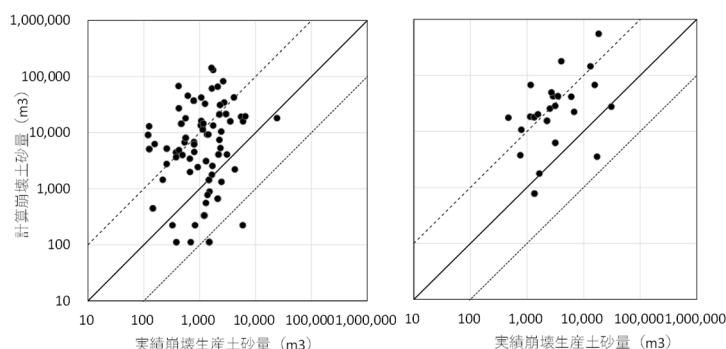


図4 現地の簡易貫入試験結果に基づく土層厚分布による計算結果（左：2次谷区分、右：3次谷区分）

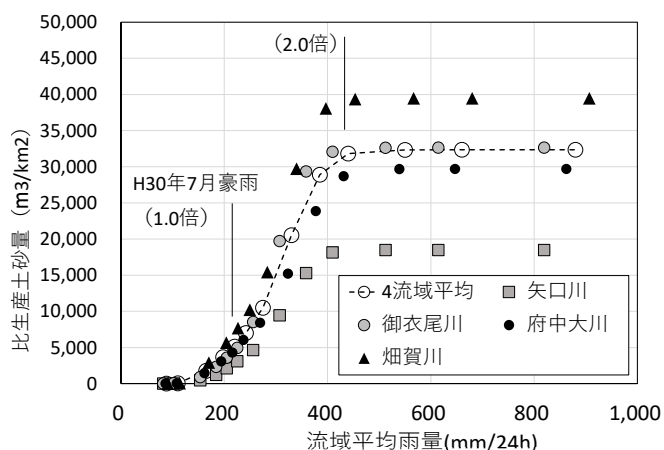


図5 降雨量が増大した場合の比生産土砂量の変化