

◆特集：国土交通省国土技術研究会◆

山地流域における土砂生産予測手法の研究

河川局砂防部砂防計画課
独立行政法人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
北海道開発局建設部河川計画課
各地方整備局河川部河川計画課
内閣府沖縄総合事務局開発建設部河川課

1. はじめに

本課題は、砂防基本計画に必要となる短期、中・長期の基本生産土砂量について、実際の土砂移動現象を踏まえた物理的な土砂生産予測手法により、基本生産土砂量と土砂供給のタイミングを客観的・合理的に予測する手法を提案することを目標として、平成16年度から18年度を研究期間として実施されている。

平成16年度は、対象とする現象を特定するとともに、各現象に対する調査・観測手法を明らかにした。続いて平成17年度は、各現象の調査・観測地点を選定し、観測を行い、データの収集を行った。平成18年度は、生産土砂量推定手法の提案を行い、各観測結果からこれらの手法の再現性の検証を行った。

2. 生産土砂量の予測手法

2.1 研究であつかう土砂移動現象

生産土砂量予測手法を検討するため、先ず土砂移動現象を、短期・中期・長期に分けて検討することとした。ここで短期とは計画規模の一連の降雨に対するもの、中期とは短期の降雨とともに発生する土砂量の影響期間（数年間程度）に対するもの、そして、長期とは短期・中期を除いた数十年間程度またはそれ以上の期間に該当する。その上で、短期に相当する土砂移動現象として、表層崩壊、中規模崩壊、大規模崩壊等の斜面崩壊（表-1）を、中長期では渓床・溪岸侵食を支配的な現象として、検討を進めた。

表-1 短期の土砂生産現象の分類
(模式図は、小橋より引用¹⁾)

	表層崩壊	中規模崩壊	大規模崩壊
概要	表層の風化土層と基岩との間の面を境界として表土層が崩壊するものである。個々の規模は小さく、崩壊の深さも数10cm～2m程度であるが、発生数は多い。花崗岩地帯に多く、長さ、幅とも小規模で、表層土層も比較的薄い斜面であることが多い。	過去の大規模な火砕流堆積物により形成された斜面や、基岩が認められないほど強度に風化が進行した斜面において発生する崩壊である。個々の規模は大きい。崩壊の深さも大きい。発生頻度は低い。たとえば火山噴出物地帯が挙げられ、長さ、幅とも大規模で、斜面表面から基岩までが深い急峻な斜面で発生することが多い。	基岩内部で崩壊が発生するものである。個々の規模は極めて大きく、崩壊の深さも大きい。発生頻度は低い。第三紀層、破碎帯等の地質に多く、長さ、幅の大きい斜面で発生することが多い。
模式図			
事例	2003年 福岡県太宰府市災害 御笠川支流	1993年 山形県湯沢の崩壊状況	1997年 鹿児島県出水市針原川

2.2 短期の生産土砂量推定手法

検討は、八幡川水系荒谷川、富士川水系早川（小春木川）、鬼怒川水系大谷川（荒沢）、最上川立谷沢で行った。その解析例を以下に示す。

2.2.1 表層崩壊による生産土砂量推定手法

表層崩壊による生産土砂量の推定は、三次元浸透流、安定解析を用いて検討した。検討対象地（図-1）は、広島市の荒谷川支流（流



図-1 荒谷川流域平面図

域面積 0.014km^2 の斜面である。この斜面では、1999年に広島豪雨災害により、2箇所で崩壊が発生している（図-1）。

三次元解析に先立ち、簡易貫入試験により、表層土厚の空間分布を把握し、計算メッシュを $5 \times 5\text{m}$ で作成した。次に、飽和・不飽和浸透流解析と安定解析を逐次行った。安定解析は、表層崩壊を仮定した無限斜面法²⁾を用いて行い、安全率 (F_s) が1以下となる範囲を求め、簡易貫入試験で求めた表層土厚を乗じて、生産土砂量を求めた。これらの解析には、土層厚、飽和透水係数、水分特性曲線、単位体積重量、粘着力 (C)、内部摩擦角 (ϕ) 等のパラメータが必要となる。これらのうち、降雨浸透による飽和度の変化により C が変化することから、2種類の C を用いて、 C の変化が生産土砂量の推定に与える影響を検討した。 C は、飽和度を変化させて一面せん断試験を行った結果から、(1) $C=7\text{kPa}$ 、(2) $C=3\text{kPa}$ と設定した。降雨波形は、対象地より北に 1.4km に位置する魚切ダムの1999年豪雨災害時の観測データを用いた。 F_s の計算結果を図-2に示す。図中に示す1999年の崩壊発生箇所と比較すると、実際の崩壊は、 $F_s < 1$ のセルで発生している。 $F_s < 1.0$ の全セルに土層厚を乗じ、生産土砂量は、(1) $5,892\text{m}^3$ 、(2) $11,308\text{m}^3$ という結果が得られた。これに対して、実際の崩壊土量は、2箇所の崩壊地を併せて 500m^3 程度であり、推定土量よりもかなり少ない。このように潜在的な崩壊危険性のある箇所が一度に崩壊するのではなく、大きな降雨毎に一部が崩壊すると考えられるが、降雨等の条件次第では、一度に危険性のある部分が崩壊する事も考えられる。さらに、この検討では、 C の値により、生産土砂量が異なる結果となり、パラメータを精度良く推定する重要性が確認された。

2.2.2 中・大規模崩壊による生産土砂量推定手法

中・大規模崩壊による生産土砂量についても、浸透流解析と三次元安定解析を用いた手法を適用する。安定解析では、一般的な修正 Hovland 法³⁾を用いた。

ここでは富士川水系早川の支川である春木川（流域面積 20.9km^2 ）における事例を示す（図-3）。春木川は、流域内を糸魚川-静岡構造線が通り、地質が脆弱であり、流域内には崩壊地が多数存在する。そのため、土砂生産が活発であり、崩壊地

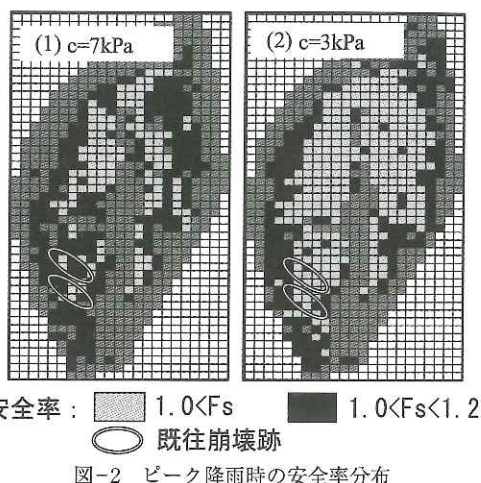


図-2 ピーク降雨時の安全率分布

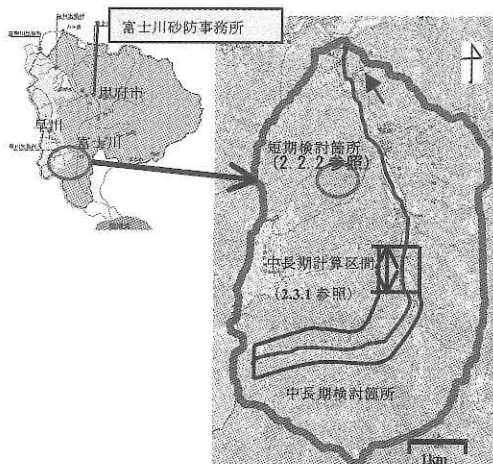


図-3 春木川位置図と検討箇所

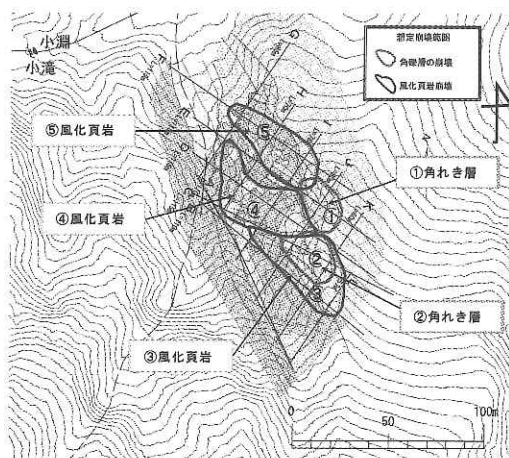


図-4 検討斜面の崩壊ブロック

から供給された土砂が河道に厚く堆積している。対象斜面は、流域の中でも特に崩壊地が多く、斜

面の変状が見られる箇所とした。この手法では、崩壊箇所、崩壊ブロックの抽出精度が生産土砂量に影響を与えるため、崩壊箇所、ブロックを正確に抽出することが重要である。そこで、物理探査と電気探査を行い、5つの崩壊ブロックを特定した(図-4)。対象斜面の地質は、斜面下部の頁岩に礫層が載る構造となっている。礫層部のブロックは①、②、頁岩部のブロックは③～⑤である。規模は①、②が斜面長25、30m、幅15m、深さ5m程度、③～⑤は、斜面長55m、幅20～25m、深さ10mである。また降雨波形は、現場で計画に用いられる降雨(図-5)を用いた。

図-5に降雨にともなうブロック⑤の安全率の変化を示す。計算の結果、降雨量の増加に伴い、安全率は徐々に低下し、30時間を越えた時点で $F_s=1.00$ を下回る。同様にブロック④も安全率が $F_s=1.00$ を下回り、④、⑤合わせて約25,000 m^3 の土砂が生産される結果となった。

以上の結果より、流域内の崩壊危険箇所とその崩壊面、計算に必要なパラメータが特定できると、本手法により、生産土砂量の推定ができる可能性がある。しかし、土砂生産のタイミングについては、特に崩壊深が深い場合、降雨ピークから遅れて発生することも考えられるため、実現象との整合について課題が残る。また、崩壊地と崩壊ブロックを精度良く抽出することが重要であることは先に述べたが、これについては、現在土木研究所で、中大規模崩壊の発生危険箇所を抽出する手法を検討中である。次にその概要を紹介する。

2.2.3 中大規模崩壊危険箇所抽出手法

これまで検討した「大規模崩壊のおそれのある溪流の抽出手法素案」は、既往の崩壊事例の地形・地質の特徴及び水理水文特性に着目し、崩壊発生に関連すると考えられる抽出指標を基に作成している⁴⁾。その概要を表-2に示す(なお、本手法は現在も継続して検討中である)。

抽出の手順は大きく2つに分かれている。第1段階は、崩壊の誘因となる地下水を多量に貯留する可能性のある区域という観点から、マクロな視点(縮尺1/20万程度の調査スケール)で危険区域を抽出するもので、机上調査により行う。第2段階は、上記の抽出された危険区域の中から、地下水の貯留・湧出や厚い土層厚の存在を示唆する地形や地質構造に着目し、より大縮尺(縮尺1/2.5

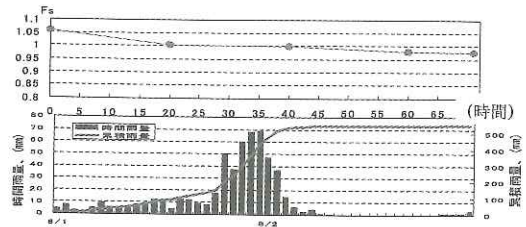


図-5 降雨波形及びブロック⑤の安全率変化の状況

万程度の調査スケール)のミクロな視点で危険溪流を抽出するもので、机上調査のほかに現地における地形・地質調査及び水文調査を行う。その地形指標の例を図-6に示す。

図-6の中央には、中大規模崩壊跡地が見られ、その上方および右方には山頂緩斜面が分布し、二重山稜が認められる。これらは、中大規模崩壊の

表-2 中大規模崩壊の抽出手法素案の概要

第1段階：マクロな危険区域の抽出

(調査スケール； $S=1/200,000$ 程度)

- ・地質：火山岩分布地域
- ・地質構造：明瞭なりニアメント、活断層、断層破砕帯、キャップブロック構造
- ・地形：中大規模崩壊跡地、災害履歴

第2段階：ミクロな危険区域の抽出

(調査スケール； $S=1/25,000$ 程度)

- 1) 第1段階抽出区域の大縮尺スケールでの見直し
- 2-1) [A群] 地形・地質：埋没谷、キャップブロック構造、明瞭なりニアメント、活断層、断層破砕帯、中大規模崩壊跡地、貫入岩
- 2-2) [B群] 水文：透水路と難透水路の境界、湧水の存在、溪流下流側への不連続な流量増加、常時認められる流水
- 2-3) [C群] 地質構造：崖錐等の厚い未固結堆積物、山頂や山腹の広い緩斜面、厚い風化帯
- 3) 現地詳細調査：水質測定、流量観測

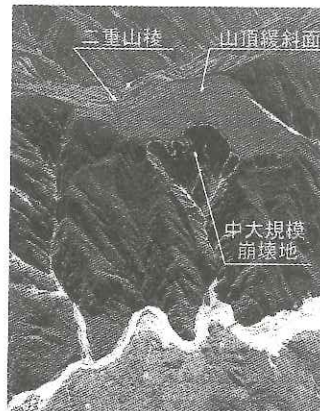


図-6 中大規模崩壊に関連する地形指標の例(鈴木⁵⁾の図を基に加筆)

兆候を示す指標と考えられる。このような地形地質に現れた指標に基づいて危険斜面の抽出作業を行う。

2.2.4 短期生産土砂量推定手法のまとめ

以上、短期の生産土砂量推定手法を示した。崩壊箇所と崩壊ブロック、また表層土厚や土質定数等のパラメータ等が推定できると、崩壊現象による短期の生産土砂量を物理的に予測できる可能性があると言える。但し、パラメータや崩壊ブロックの推定には、多大な労力を要することから、解析モデルだけではなく、これらの簡便な把握手法の開発も必要である。

2.3 中長期の生産土砂量予測手法

中長期の対象とする溪岸・溪床侵食による生産土砂量は、河床変動計算を用いて、対象区間内の堆積・侵食の土砂収支を計算することにより、予測が可能である。的確な土砂量を求めるためには、地形、粒度分布といった初期条件、計算区間の境界に与える流量や土砂量等の条件（境界条件）を的確に推定し、計算を行う必要がある。このうち、粒度分布や流量は、現地調査や観測により、直接、精度の高いデータ収集が可能であるが、境界条件として与える土砂量については、直接的な計測が困難である。また、地形条件についても、源頭部は、地形が急峻であり、地上からの縦横断測量が困難である。そのため、今回の検討では、高精度の地形データの収集が可能であることから、近年使用実績が増えている航空レーザー測量により、2時期の測量結果から求めた地表変動量により土砂移動量を求め、境界条件として与えることを検討した。以下にその結果を報告する。

2.3.1 検討対象地の状況

検討は、富士川水系早川支川春木川、天竜川水系与田切川、桜島で実施した。以下に、富士川水系早川支川春木川（図-3）の検討事例を示す。中長期の生産土砂量の検討は、春木川上流部の約4km区間を対象に行い、春木川第一～第二堰堤間の約1km（河床勾配1/13）では、上流部で行った航空レーザー測量から得られた変動土砂量を与えて、河床変動計算を行った（図-3）。

2.3.2 河床変動計算条件

河床変動計算は、一次元のモデルにより実施した。計算に用いる掃流砂量式は、芦田・高橋・水山式、浮遊砂量式は、芦田・道上式を適用する。

なお、流れ、流砂量、河床変動を表す各基礎方程式については、紙面の関係上、省略する。溪岸侵食については、本検討では、通常の流水による侵食を想定していることから、側岸の限界掃流力と流砂量式から侵食される土砂量を求めて拡幅量を求める芦田・江頭・加本のモデル⁶⁾を使用した。

$$q_{p*} = \frac{q_p}{u_* d} = F_0 \cdot \tau_*^{1/2} \left[1 - \frac{1}{\varepsilon^2} \cdot \frac{\tau_{*sc}}{\tau_*} \right]^3 \left[\frac{h}{d} \cdot \frac{1}{\sin \theta_1} \right] \quad \dots\dots (1)$$

ここに、 q_{p*} ：無次元側岸侵食量、 q_p ：単位河道長さ辺りの側岸侵食量、 u_* ：摩擦速度、 θ_1 ：側岸傾斜角、 τ_* ：河床の無次元掃流力、 h ：水深、 d ：河床材料の平均粒径である。また、 $F_0 = 2(\chi_3/\chi_2)\varepsilon^2 F_0$ であり、 F_0 は実験係数で $F_0 = 0.03 \sim 0.35$ 、 χ_2 、 χ_3 は砂粒子の形状係数で、 $\chi_2 = \pi/4$ 、 $\chi_3 = \pi/6$ である。

ε^2 は側岸の無次元掃流力 τ_{*s} と河床の無次元掃流力 τ_* の関係を示す係数で $\tau_{*s} = \varepsilon^2 \tau_*$ と置かれ、 $\varepsilon^2 = 0.5$ 程度の値をとる。よって、 $F_0 = 0.03$ とすれば、 $F_0 = 0.02$ となる。さらに、 τ_{*sc} は側岸斜面における砂粒子の無次元限界掃流力であり次式で表される。

$$\tau_{*sc} = \tau_{*c} \cos \theta_1 \sqrt{1 - \left[\frac{\tan \theta_1}{\mu} \right]^2} \quad \dots\dots (2)$$

ここに、 τ_{*c} ：河床の無次元限界掃流力、 μ ：砂粒子の内部摩擦係数である。

河道断面は、航空レーザー測量結果に基づき、50m間隔で矩形断面を設定した。また、河床材料は、計算区間に堰堤の堆砂域が含まれるため、河床材料調査により、堰堤堆砂区間とそれ以外の区間に分けて、設定した（図-7）。

土砂量は、二時期（2005年7、11月）の航空レーザー測量から得られた地形変動量から求めた21,431m³を、計算区間の上流端から流量に応じて与えた。ここで、計算区間内に、本支川の合流がある他流域での事例では、支川からの供給土砂量の配分を行わない場合、計算結果が観測結果と大きく異なる結果が得られた。的確な条件設定が必要であると言える。

流量については、再現期間である2005年7月から11月までの実績降雨量を用いて、キネマティックウェーブ法により流出解析を行い、ハイドログラフを作成した（図-8）。なお、流量が小さい期

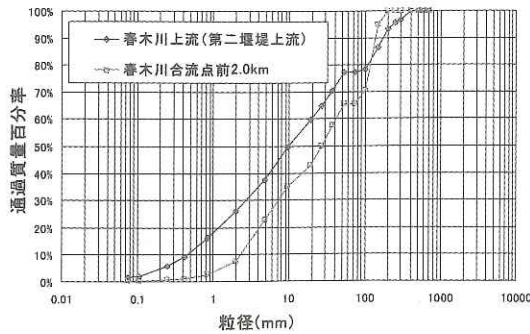


図-7 計算に用いた粒度分布

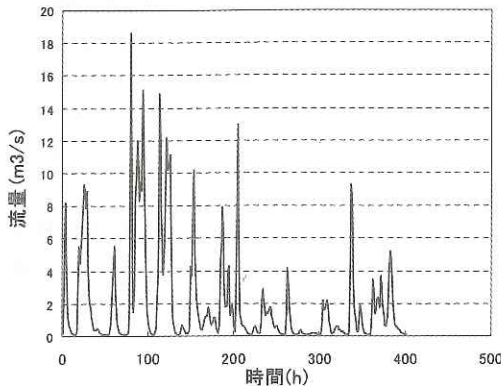


図-8 計算に用いたハイドログラフ

表-3 土砂収支計算結果 (単位: m³)

	計算区間上端に 与える土砂量	河道内 生産土砂量	春木川第一堰堤 からの流出土砂量
河床変動計算	21,431	7,289	28,720
航空レーザー測量	21,431	2,700	24,131

間は河床変動が生じないため計算を省略している。

2.3.3 検討結果

以上の条件から、2005年7月～11月の降雨を対象に、河床変動計算を実施した。この結果、計算区間の河道内では約7.3 km³の土砂が生産され、計算区間下流の春木川第一堰堤から、約2.9万 m³の土砂が流出する結果が得られた(表-3)。航空レーザー測量による変動量も、これに近い約2.4万 m³の結果が得られた。また、河床変動計算と航空レーザー測量結果を比較すると(図-9)、河床変動が生じた箇所、変動量も、両者は同様の傾向を示している。ただし、計算区間上下流端は、航空レーザー測量の結果とは逆の傾向を示している。これは、上流端は境界条件の影響、また下流端は、計算結果の方が生産土砂量が多いことから、下流端付近で堆積の傾向が実際より、強く現れた

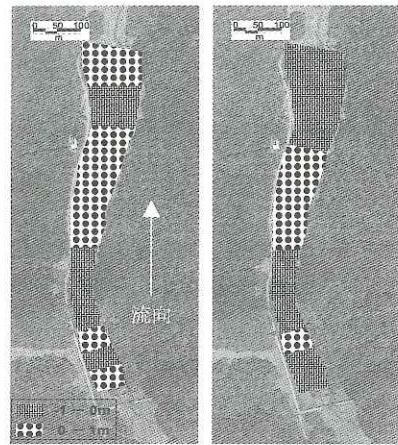
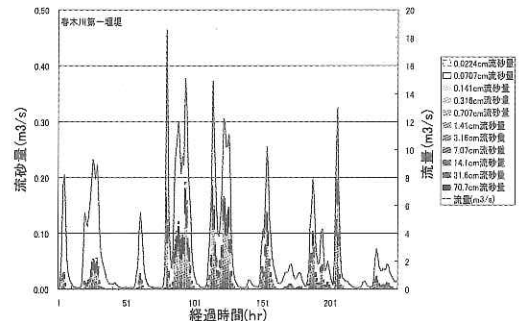

図-9 河床変動量の比較
(左; 計算 右; 航空レーザー測量)


図-10 水・土砂ハイドログラフ

ためと考えられる。

また、得られた粒径別の土砂ハイドログラフを見ると、生産された土砂の粒径は、特定の粒径に偏らず、細粒分から粗粒分まで均等に分布する傾向が得られた(図-10)。

2.3.4 中長期生産土砂量予測手法のまとめ

今回の検討により、計算条件として土砂量と流量を的確に与えることにより、一次元の河床変動計算を用いて中長期の生産土砂量が推測できること、航空レーザー測量による河床変動量の計算では、変動が生じた箇所と変動量の傾向が、河床変動計算結果と概ね一致すること、また、本手法により、流量・土砂ハイドログラフが得られることから、河道内の土砂生産のタイミングの推測も可能と思われる。以上より、河床が安定している時期、河床変動が起きた大きな出水後は、土砂生産源となる斜面、河道において航空レーザー測量を実施し、2時期の比較から、面的な土砂移動の動向を把握し、計算に与える土砂量等の条件を求めることが出来るようにしておくことが必要である。

表-4 検討結果のまとめ

対象現象		生産土砂量推定手法	H18までの到達点	課題
短期	表層崩壊	飽和・不飽和浸透流解析、三次元安定解析により、計算セル毎に斜面安全率を求め、安全率が1以下のセルに簡易貫入試験で求めた土層厚を乗じる。	不安定斜面で生産される潜在的な土砂量として推測が可能。	セル単位の危険度評価に基づく崩壊土量の推定であり、実際に発生する崩壊範囲との整合性が課題。また、土層厚や土質定数等のパラメータの精度が結果に影響を与えるため、簡便かつ適切にパラメータを推測する手法が必要。
	中・大規模	事前に崩壊ブロック（範囲と深さ）を推定し、飽和・不飽和浸透流解析と、三次元安定解析により、安全率を求め、1以下となった時点で崩壊発生のタイミングと崩壊土量を求める。	物理探査や電気探査等により、崩壊発生箇所と崩壊ブロックの範囲、崩壊深の推定が可能な場合、崩壊土量が推定できることを示した。	崩壊発生箇所を予測する手法が必要。また、物理探査等による土中構造の把握は高コストとなる可能性が高い。土砂生産のタイミングは、中・大規模崩壊の場合、降雨ピークから遅れる場合があり、 $F_s < 1$ で崩壊発生と見なすことについて、実現象との整合が課題。
中・長期		1次元河床変動計算により、土砂収支を計算する。計算に必要な供給土砂量は、航空レーザー測量により、計算区間上流側の地表の変動量から推定する。溪岸侵食量は芦田・江頭・加本の式を使用。	側岸侵食を考慮した1次元河床変動計算により、航空レーザー測量から求めた実際の値に近いと思われる生産土砂量を再現することができた。土砂生産のタイミングは、河床変動計算から、土砂ハイドログラフを作成することにより、推定が可能。土砂生産の推定に当たり、航空レーザー測量が適用できることを示した。	今回の検討は、1出水期を対象とした狭い範囲での検討であったため、より広範囲、長期間の土砂流出の事例を用いた検証が必要。また、計算条件に必要な流量を求めるため、精度の高い山地流域の流量データの蓄積が必要。

3. まとめと今後の課題

今年度は、調査・観測事例に基づき、短期、中長期の生産土砂量予測手法とその再現性について検討を行った。短期は、表層崩壊、中・大規模崩壊による生産土砂量の推定について、不飽和・飽和浸透流解析・安定解析の適用が可能か検討を行った。その結果、従来の安定解析を三次元的に扱う手法により、面的な把握がある程度可能であることを示した。そして、規模やタイミングを精度良く推定するための研究、特に、パラメータにより結果が大きく異なるため、浸透・安定解析に必要なパラメータを簡便かつ精度良く推測する手法を確立する必要があると言える。

中長期については、河床変動計算による推定手法を示し、計算条件のうち、計算区間上端に与える土砂量について航空レーザー測量の適用により推定できる可能性があることを示した。しかし、今回の検討は1出水期を挟む期間で、限定された区間で実施したことから、更に長期間、広範囲で検証を実施し、その適用性を確認する必要がある。また、河床変動計算に必要な流出解析を行うに当たり、定数の設定と結果の検証を行う必要があることから、山地流域における精度の高い流量観測が必要である。

表-4に本研究の結果を示す。3年の研究期間内に観測・調査箇所で大きな降雨が無かったこともあり、土砂生産域における土砂動態十分に解明できたとは言いがたい。しかし、必要な調査・観測手法や、具体的解析手法案を示すことができた。今後は、本研究で検討された調査・観測手法に基づき、短期における地下水挙動のモニタリング、中・長期における河床変動のモニタリングを実施し、データの蓄積と解析を行う必要がある。

参考文献

- 1) 小橋澄治、山地保全学、文永堂出版、pp.129-178, 1993
- 2) (社)地盤工学会：斜面安定解析入門、pp.42-45, 1989
- 3) H. J. Hovland : Three dimensional slope stability analysis method. Proc. ASCE., Vol. 103, GT9, pp.129-140, 1977
- 4) 酒井直樹、鈴木隆司、栗原淳一：地形・地質特性からみた深層崩壊発生溪流の抽出手法の提案、第3回土砂災害に関するシンポジウム論文集、土木学会西部支部、pp.53-58, 2006
- 5) 鈴木隆介：建設技術者のための地形図読図入門 3段丘・丘陵・山地、古今書院、pp.555-942
- 6) 芦田和男、江頭進治、加本 実：山地流域における侵食と流路変動に関する研究 (2)、京大防災研究所、年報第26号B-2, 1983

〈文責〉独立行政法人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 栗原淳一
同 総括主任研究員 桜井 亘
同 研究員 酒井直樹