

◆ 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

流砂系においては土砂や洪水の氾濫、ダム貯水池における堆砂、河床低下に伴う人工構造物の基礎部損傷、海岸侵食などの問題が発生しており、土砂の生産・流出過程の把握が必要となっている。このため、国土技術研究会指定課題「流砂系における土砂移動実態に関する研究（平成11年～15年度）」では、流域全域の土砂動態のモニタリング（現地計測）を実施し、流砂系一貫として土砂移動の実態を量・質・時間的に明らかにしてきた。しかし、山地流域における土砂生産量と山地河川流量の推定精度の向上が課題として残されている。

砂防基本計画では生産土砂量の算定が基本となるため、山地流域における土砂の生産量や、山地河川流量に依存している流出土砂量の推定手法の確立が必要である。計画では100年以上の確率降雨に伴う現象を対象として、過去の災害などの実績に基づいて土砂生産の量や発生時期を推定している。

しかし、通常そのような規模の実績データを得ることは困難であるため、基本生産土砂量の推定は既往データの統計処理による経験的な方法ではなく、土砂移動現象を物理的にシミュレートして生産土砂量を求める手法が望ましい。

以上のことから、本研究では平成16年度から18年度を研究期間として、まず地形、地質等の情報に基づいた物理的な土砂生産モデルにより、短期および中・長期の基本生産土砂量と土砂供給タイミングを客観的・合理的に推定する手法を提案する。そして、過去の災害事例が乏しい流域や調査が困難な流域においても適用可能な手法を開発することを目的としている。

2. 土砂生産予測調査の実施状況

2.1 研究方法

基本生産土砂量を推定するために、短期・中期・長期に分けて検討する。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。

本研究では、短期に相当する土砂移動現象として斜面崩壊、中期・長期では渓床・渓岸侵食を支配的なものと考え、それぞれを対象として研究を進めている。

生産土砂量推定の調査内容を図-1に示す。土砂移動現象を物理的に説明するために、現象が発生する場の地形、地質等に関する基礎的な調査を行うとともに、モデルによる土砂生産計算結果の検証に供するためのモニタリングを実施する。

2.2 モニタリング実施状況

2.2.1 短期の生産土砂量

短期の基本生産土砂量を推定する場合、計画規模の降雨時に流域内で発生する斜面崩壊を対象と

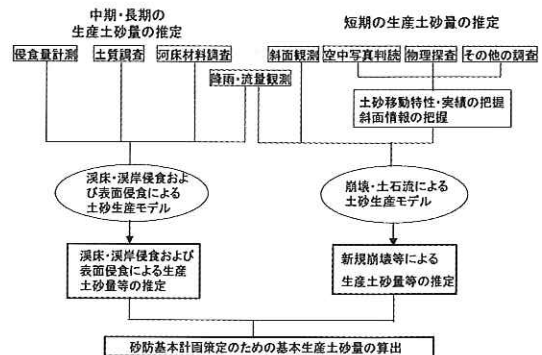


図-1 山地流域における土砂生産予測手法の調査内容

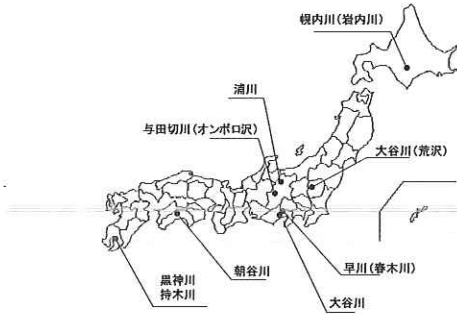


図-3 研究対象溪流位置図(中期・長期)

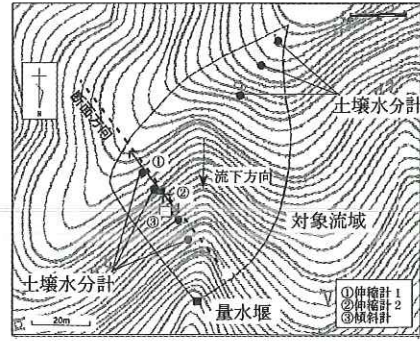


図-4 観測位置平面図

表-3 観測機器一覧

	観測機器	数量	備考
雨量観測	雨量計	2	
流量観測	流量堰	2	
斜面土壌水分観測	テンシオメータ	20	
	地下水位観測	1	
斜面変位観測	伸縮計	2	
	傾斜計	1	
調査、試験	簡易貫入試験	150	土層深分布
	土質試験	1式	せん断試験

<流量観測> 量水堰で得られた降雨と比流量との関係を図-5 (a) に示す。降雨波形のピークと流量のピークがほぼ一致し、降雨波形に対応して流量も敏感に増減する傾向がある。

<サクション計測> 図-5 (b) は、サクションの降雨に対する変化を時系列で表している。なお、降雨開始前4日間は無降雨であった。19日午前7時に時間雨量6mmの降雨を記録し、サクションが急に下がるのがわかる。大局的にみると、深度15cmのサクションは、19日7時の降雨に反応して下がった後、低いところで一定傾向を示す一方、深度50cmは20日0時から6時にかけて、深度100cmは、20日13時以降から、ほぼ飽和状態を示し、浅い順にサクションは小さくなる傾向を示している。一方、深度200cmでは反応が鈍く降雨による影響は小さい。今回のような降雨強度が小さい雨では、降雨浸透による飽和領域が緩やかに上部から下部へ伝わっていくことがわかる。

<変位観測> 伸縮計は、未崩壊の斜面に設置するため、微地形調査により崩壊範囲を推定し、尾根部付近より、①25mの地点と②その下方に8mの地点にインバー線を設置した。図-5 (a) で見られる降雨ピークは19日15:00付近にあるが、それほど鋭いピークではなく、その後も同程度の降雨が続いている。図-5 (d) では、降雨ピークから18時間後程度に、崩壊上部の伸縮計①は急激に引っ張りの方向に変位し、同時に伸縮計②でも

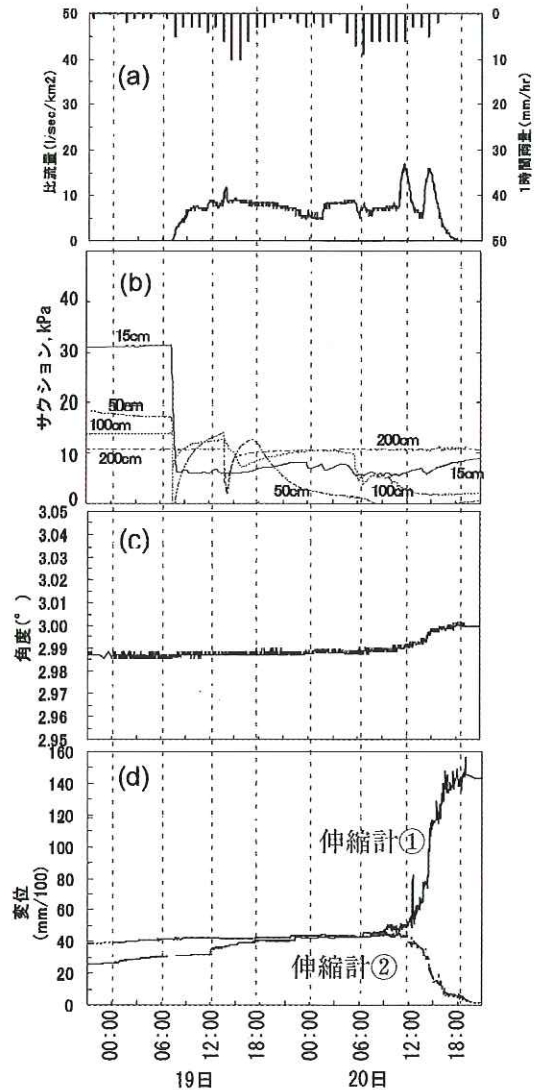


図-5 (a) 時間降雨と比流量との関係
(b) 時間降雨とサクションとの時系列変化
(c) 傾斜計と、(d) 伸縮計の時系列変化

変化がみられ、圧縮傾向を示している。また傾斜計でも、同時期に傾斜計が増加する変化が記録されている(図-5(c))。これらから20日10時より18時にかけて、斜面表層部が下方に変位したのが捉えられた。このように崩壊に至らない場合でも斜面は変形しており、その変形挙動(地表面の変位)をとらえることができれば、突発的に発生するといわれる斜面崩壊でも、その崩壊予測ができる可能性があると考えられる。

3.3 解析モデルと解析事例

＜斜面安定＞ 斜面の安定性の評価は、一般的に分割法を用いた極限平衡法による安全率で行われている。ここでは、斜面変位を考慮するために有限要素法(FEM)を用いた評価法を考える。この方法の利点は、破壊形態を予め決めることなく、複雑な地形形状、地質構造などに対しても実態に即した安定性の評価ができ、浸透流解析と連携すれば、不飽和土の力学特性¹⁾を考慮したFEMも可能となる。さらに降雨浸透などによる斜面の変形状態を追っていくことで、安定度の推移を追跡することも可能である

＜解析モデル＞ ここで用いる解析モデルは表層風化層を考慮した2層構造を考え、飽和不飽和浸透流解析と弾塑性解析を組み合わせた解析を行う。この計算では、表層を計算領域とし、基盤における変位境界と水理境界は、それぞれXY固定、非排水としている。ここでは、サクシオンを飽和度に換算し、“飽和度に応じた粘着力の増減”をモデルに組み込んでいる点が特長である。

＜解析結果＞ 観測の項で述べた荒谷川をモデルにした解析例を示す。ここでは、50mm/hを連続して降らした場合の飽和度分布の時間変化を示している。本解析では、表土層のみを解析対象としている。図-6に開始初期時点(点線)と降雨12時間後(実線)の変形図を重ねて示した。なお縦横変倍にして変形を見やすくしている。境界条件で基盤は固定としているが、飽和度が上がることによる重量増加と強度低下により、斜面全体として、下方に変位していくのがわかる。

次に図-7に飽和度分布図を示す。黒の部分に100%の飽和状態を示し、不飽和になるにつれて色が白くなっている。時間とともに飽和度の高まっていく様子がわかる。特に基盤形状と表層の厚さにより飽和度上昇の違いが見られ、表層の薄いところ、基盤の緩傾斜部での飽和度の上昇がみられる。この解析事例では、透水係数が大きいため、降雨が続くにつれて下方から飽和している。

以上のように本モデルの計算結果より、飽和度

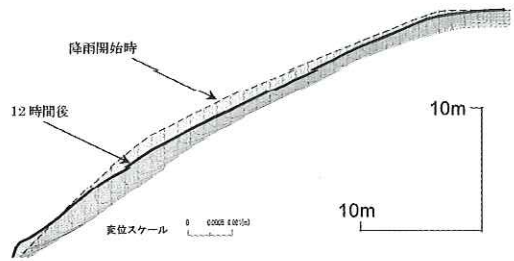


図-6 変形図(降雨開始時と12時間後)

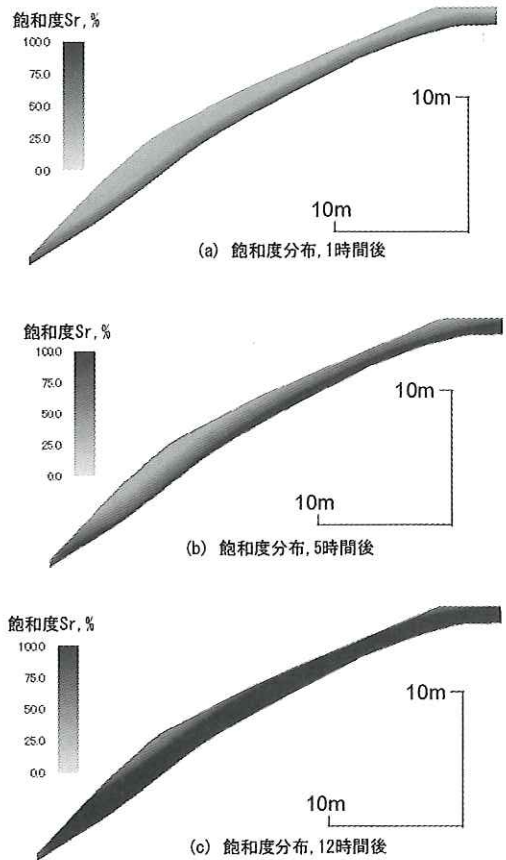


図-7 解析結果(飽和度分布の時系列変化)

の増加(図-7(c))と変形の関係(図-6(12時間後))が調和的であることがわかる。今後更にこのような解析を進め、斜面の危険度を変位量や局所安全率を用いて評価する方法を検討するとともに、現地データの蓄積を図っていく予定である。なお、現時点では、これらの解析は2次元であるが、今後3次元化に移行する予定で、これにより、土砂生産量の予測を検討することができる。

4. 中期・長期の生産土砂量の推定

4.1 中期・長期の生産土砂量推定手法に必要な調査・観測と方法

中期・長期の土砂移動現象のうち、今回は渓岸・渓床侵食の再現モデルと観測の概要について説明する。

モデルの考え方は、ある区間の渓床、渓岸においてある流量を想定して、水面形や掃流力等の水理計算から掃流砂量や浮遊砂量を求め、対象区間の上下流の断面を流入・流出する土砂量の差から河床変動量を決定する方法である。なお、渓岸侵食についてもこの収支に加えて評価を行う。

河床変動を表現するには、刻々と変化する流れの状態と流砂量を評価して、流砂量の変化を追跡する必要がある。このため、基本的に①流れの計算、②流砂量の計算、③河床変動量の計算という3つのモデルを必要とする。流れの基礎方程式は連続式と運動方程式、流砂量の評価には流砂量式(掃流砂・浮遊砂)を用いるが、渓岸侵食の計算や混合粒径を扱う場合は粒度分布の変化の計算も必要となる。

渓岸・渓床侵食モデルに必要となる調査・観測項目を図-8に示す。土砂生産量を計算するには、現地計測により渓岸、渓床の地形と河床材料の粒径分布を調査する必要があり、作成したモデルは渓岸、渓床侵食量の実測結果と照合して検証を行う。

4.2 調査観測の分析事例

4.2.1 航空レーザー測量による渓岸・渓床の計測

溪流の土砂動態は通常定期横断測量による平均断面法により土砂量を算出して検討されているが、測量結果は数百mの一定間隔しか得られないこと、上流部ほど作業効率が低下するなどの欠点がある。最近ではレーザーによる面的な地形計測が可能となっており、精度のよい土砂動態の把握手



図-8 中期・長期の基本生産土砂量推定手法研究のための調査・観測イメージ

法としての適用性について検討を行っている。

中部地方整備局天竜川上流河川事務所管内の天竜川水系と田切川は、木曾山脈の念丈岳を源流とし、急峻なV字谷をなして東流しながら伊那盆地で扇状地を開析する「田切地形」を形成して天竜川に合流する。与田切川左岸支流のオンボロ沢は、赤椰(あかなぎ)岳南東斜面の大規模な崩壊地である百間ナギを源流としている(図-9)。

当地では2001年12月より毎年出水期前後の2時期(6~7月、10~12月)において、航空レーザーによる河道地形測量を実施している。計測は1m²あたり6点の計測密度で行い、0.5m間隔の正方格子に正規化して各種の解析に供する。精度検証として、現地の17箇所における地上の横断測量結果と航空レーザー測量の結果について、高さを2000点で比較した。その結果、平均較差-2cm、最大較差1.4m、標準偏差23cmとなり、従来の定期横断測量に比較しても同等のデータが面的に入手でき、人の進入が困難な上流域でも下流域と同様の精度で面的な河道土砂動態の把握が可能であることが判明した。

4.2.2 与田切川(オンボロ沢)の河床変動・土砂動態

与田切川では2001年12月から2004年11月まで計7回の航空レーザー計測が行われている。土砂の変動量は2時期の計測値で作成したDTM(デジタル地表面モデル)を差分した標高変化量に格子面積を乗じて体積変化として計算できる。地上測量では区間断面積の変化量と区間長から体積変化量を求めるため、詳細な変化は不明だが、レーザー計測は格子の変化量を直接的に計算可能で、細部の変化が把握できるのが利点である。

しかし、計測タイミングは離散的であるため、計測した期間における土砂量の増減はわかるが、中間時の変化は捉えていないので期間中の土砂生

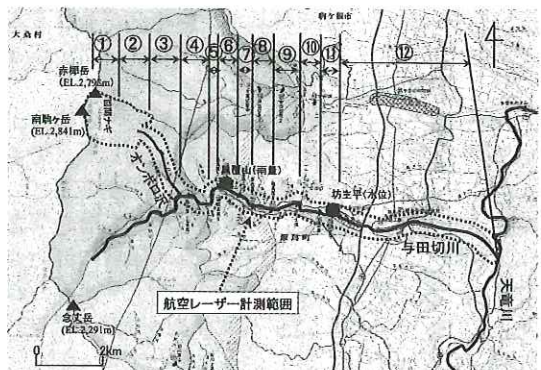


図-9 与田切川・オンボロ沢位置図

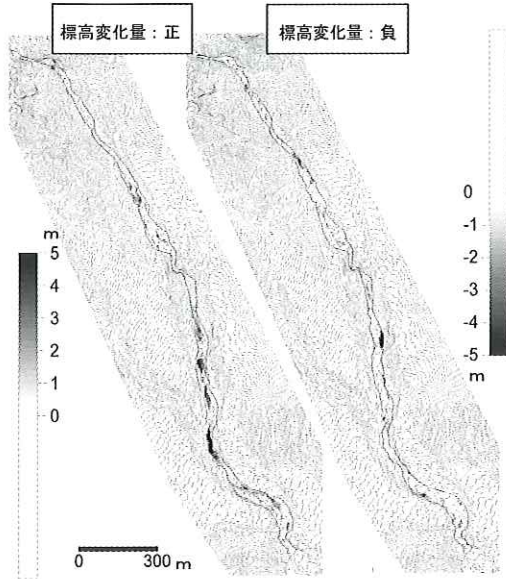


図-10 河床の標高変化 (オンボロ沢 2004年6～11月)

産、移動量の積算値ではないことに注意する必要がある。ここでは、2時期で地表面が上昇した場合を堆積、低下した場合を侵食と解釈し、そのときの体積変化量をそれぞれ堆積量、侵食量として土砂動態の傾向を把握した。

2004年は6月と11月に計測を行ったが、期間中に黒覆山雨量観測所で日雨量100mmを超える日が4日あり、中小規模の出水が発生した。この期間のオンボロ沢下流区間について解析した結果を段彩図として図-10に示す。レーザー計測では堆積、侵食の場が面的に細部まで表現でき、溪岸・斜面の変化も詳細に計測が可能で、この区間の土砂量の変化は侵食量20,700m³、堆積量46,600m³、変動量は+25,900m³で、平均変動高は+0.43mと求めることができた。このように、航空レーザー測量では見通しの可能な範囲であれば、面的に精度の高い計測ができるため、溪流の土砂動態の把握に活用が期待される。しかし、植生が密な場合には地表面を計測することは困難であり、また、当地ではオンボロ沢上流部の区間では、積雪が雪渓として残るため、出水期前の計測値は不正確となる。このような場合は、現地での補足調査や解析期間の検討が必要となる。

次に2001年12月の計測結果を基準に、6回の計測について12区間の河床変動量を平均変動高で図-11に示す。降水量は2001年12～2002年11月は1,326mm (最大日雨量88mm)で、以降2003年10月まで2,205mm (同120mm)、2004年11月までは2,701mm (同147mm)であった。崩壊地付

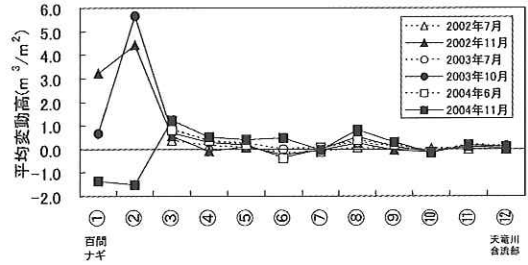


図-11 2001年1月～2004年11月の河床変動 (2001年12月を0とする)

近の①②で変動が大きいが、③以降の下流では大きな変動がみられない。2004年は①②の区間は侵食傾向で、③以降の区間は変動高が正で堆積傾向となっているが、天竜川本川との天竜川の合流部付近の⑪⑫はこの期間ではほとんど変化がなく、中期・長期の土砂動態を把握するには今後も観測を継続する必要がある。

5. まとめ

今回は短期のうち表層崩壊、中期・長期では溪岸・溪床侵食を例に現地における観測と解析事例を紹介した。今後は観測データの蓄積と解析により、崩壊予測を3次元に拡大して斜面の安定性を評価し、崩壊土砂量の推定や発生タイミングについて検討する予定である。また、溪岸・溪床侵食に関しては空中レーザー測量により均一で高密度の土砂動態計測が可能である。今後は溪岸侵食を考慮した河床変動推定手法を提案し、各地で計測された土砂動態の計測結果を適用することにより溪流の土砂移動を表現可能なモデルを検討する予定である。

本研究は平成16年度から平成18年度まで実施する計画で行っており、平成17年度には各試験地の整備が整い本格的なデータ収集が開始された。本研究が対象とする範囲は山地の源頭部が主体で、調査、観測には困難が伴うが、土砂生産・移動モデルの設定とそれを検証できる精度の良いデータを計測することにより、山地流域における土砂生産予測手法が確立できると期待される。

参考文献

- 1) 地盤工学会, 不飽和地盤の挙動と評価, pp85-142, 2004.

〈文責〉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 上席研究員 栗原淳一
同 主任研究員 秋山一弥
同 酒井直樹