

山地河川における豪雨時の 土砂流出特性を考慮した河床変動計算

丹羽 諭・内田太郎・蒲原潤一

1. はじめに

河床変動計算は、過去の土砂災害に関する考察や、将来の災害の被害推定などに頻繁に用いられるようになった¹⁾。しかし、山地河川における大規模土砂流出時に関しては、現象の発生頻度が小さいこと、観測が難しいことから、斜面から河道への土砂供給や、河床変動の時間的な変化など、実態そのものの把握が困難といえる。そのため、計算結果の十分な検証が行われてきたとは言い難い。

本報告は、山地河川における豪雨時を対象とした河床変動計算手法の高度化を目的とする。そこで、豪雨時の土砂動態の特徴及び解析手法についてレビューし、土砂動態に関する詳細なデータが取得されている富士川水系春木川を対象とした解析結果から、計算手法の条件設定について検討し、計算結果への影響を明らかにしたので報告する。

2. 山地河川の大規模土砂流出の特徴と既往研究

大規模土砂流出時の山地河川は、中小洪水時や下流河道とは異なる水及び土砂移動に関する下記に示す特徴を有すると考えられる²⁾。

(1) 土石流～掃流砂までの様々な土砂移動形態

山地河川では、土石流として流下する急勾配な領域から、掃流砂・浮遊砂の形態で流下する緩勾配な領域が連続・混在している(図-1)。従って、評価手法においても、複数の土砂移動現象を対象とし、それらの現象を連続的に評価する必要がある。

土石流、掃流状集合流動、掃流砂の3種類の土砂移動形態に対して、勾配の違いによる土砂移動形態の違いを考慮し、土砂濃度、流速、水深を算出する手法^{1),3)}が提案されており、これらの解析手法を用いた事例は多い。

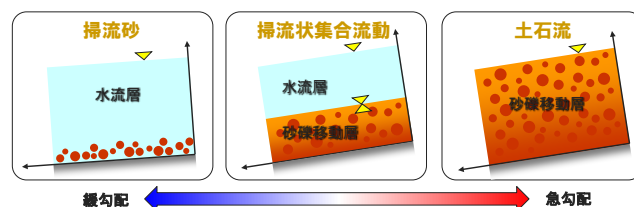


図-1 勾配に応じた土砂移動形態イメージ

(2) 大規模な土砂移動による流砂の非平衡性^{*}

急勾配な山地河川の領域では、緩勾配な領域と比較して、断面形の変化や時間的な水理量の変化が大きい。また、大規模降雨時には比較的大きい粒径まで掃流砂よりも非平衡性が強いと考えられる浮遊砂として流下しうる。このような山地河川の条件や大規模降雨時の条件により、流砂量は上流側の水理条件や流砂量に影響を受ける非平衡状態となっている可能性が考えられる。

緩勾配領域では、非平衡の度合いが小さいとして、平衡流砂量を仮定した解析が多く用いられているが、山地河川を対象とした非平衡計算モデル^{1),3)}を用いた解析事例は数多く報告されている。

(3) 崩壊地から生産される細粒土砂の伝搬

大規模な降雨となると、山腹崩壊が数多く発生し、通常時に河床に堆積している土砂に比べて細かい土砂が河道に大量に供給される。

急勾配な山地流域の細粒土砂の挙動については不明な点が多いが、急勾配領域を対象に細粒土砂を取り扱う事例⁴⁾はいくつか報告されている。その結果、細粒土砂が間隙流体と一緒に挙動するという条件設定が、大規模な土砂移動現象を表現することに重要であることが示されている。しかしながら、土石流や掃流状集合流動の領域において、間隙流体に取り込まれる細粒土砂量については、定量的な議論に至っておらず課題が残されている。

(4) 間欠的にもたらされる河道への土砂供給

河道への土砂供給プロセスとしては、斜面等からの崩壊や土石流による土砂供給が主たるものであると考えられ、一般的に総雨量又は降雨強度が大きい時間帯に集中する。また、河床に大量の不安定土砂が堆積している急勾配な溪流であっても、

Riverbed Variation Calculation that Have Considered the Sediment Discharge Characteristics During Heavy Rain in the Mountain Rivers

^{*}土木用語解説：流砂の平衡状態と非平衡状態

斜面直下の河道における土石流は短期降雨強度がある閾値を超えたときに発生⁵⁾し、斜面直下の河道内で停止・再移動する。この事実から、下流の河道には、出水中は常に土砂供給されるのではなく、間欠的に土砂が供給されると推定される。

しかし、既存の計算事例では、計算区間の上流端において洪水期間中は常に平衡給砂するなど、単純な仮定が用いられる事例が多い。一方、柘木⁶⁾は平成7年の姫川の大規模土砂流出に対して、住民からの聞き取り調査を実施し、土砂供給タイミングを考慮した河床変動計算を実施し、洪水後の河床変動高を良好に再現できたことを報告した。

(5) 河床侵食に対する土砂移動限界

中小洪水では河床が変形しなかったにもかかわらず、大規模出水時に河床の堆積土砂が急激に流出することがある。このような現象は、流水が河床に与える外力がある限界値を上回り侵食が開始するものと推定される。掃流砂の領域については移動限界が検討された事例は多いが、土石流や掃流状集合流動の領域を対象とした検討は少ない。

掃流砂に対しては掃流力と限界掃流力の比較により、河床侵食の有無を評価する河床変動計算事例が多い。一方、高橋⁷⁾は、河床内部のせん断力とせん断強度を用いて、土石流領域の侵食の有無を評価する手法を提案しているが、河床変動計算において考慮されていない場合が多い。

(6) 土砂堆積による大断面領域の流れ幅

大規模な土砂生産が発生すると、河道に大量に土砂が堆積し、平水時や中小洪水時の流水の流下幅を大きく上回る堆積域が生じることがある。また、山地河道においては、大規模な洪水であっても流水の流下幅は限定的であり、流れが左右に変動することにより、広大な堆積域が生じることが確認されている。

既存の計算においては、流れ幅を空中写真から読み取った川幅や災害実績の土砂移動幅の一定値で扱う事例が多いが、流れ幅を逐次レジーム則に従って変化させる計算⁸⁾も行われてきた。

(7) 合流点における複雑な土砂動態

大規模土砂生産時の急勾配溪流と本川河道の合流点近傍では、河道閉塞等の複雑な土砂移動現象が発生することが報告されている⁹⁾。また、合流点の本川水位が支川末端水位より高い場合には、本川に流入しようとした土砂が支川末端から堆積

遡上することもある。そのため、合流点付近の土砂洪水氾濫被害の詳細を推定するにあつては、合流点周辺の複雑な土砂動態を考慮した解析を行うことが重要であると考えられ、2次元平面での解析、本川河道と支川を接続するネットワークモデルによる1次元解析など様々な方法が用いられてきている。

3. 計算条件

3.1 計算対象

計算対象は、2011年の台風6号、台風12号、台風15号、2012年の台風4号による大規模な土砂流出が生じた富士川水系早川の春木川流域とした(図-2)。春木川は、集水面積が20.9km²、河床勾配は、早川合流点で約2°、大春木沢末端で約10°、本川における大春木沢との合流点で約4°である。大春木沢の源頭部には七面山崩れが存在する。

この期間の大春木沢から春木川本川への流出土砂量は約110万m³、春木川流域から早川への流出土砂量は約65万m³であった。流域内の砂防堰堤には水位計やCCTVが設置され、大春木沢と本川の合流点近傍には、時系列の河床変動高を測定するための砂面計が設置されている。

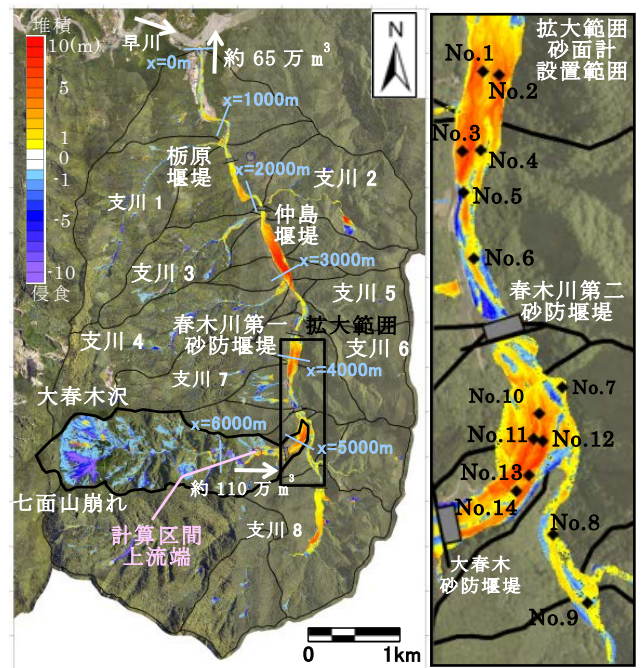


図-2 春木川における出水前後の航空レーザー測量データの差分解析

3.2 解析手法

検討には、2章で整理した山地河川の大規模土

砂流出の特徴 ((3)、(7)は除く) を考慮した解析手法を用いた。まず、特徴(1)、(2)を考慮し、土石流、掃流状集合流動、掃流砂を対象として、土砂移動形態に応じた平衡濃度と河床せん断力について連続的に評価する手法¹⁰⁾を適用した。

特徴(4)については、土砂投入時間を変化させることとした。特徴(5)の侵食条件については、河床表層と河床から1粒径分の深度において、せん断力 τ 、せん断強度 τ_c を算出⁷⁾し、両深度の τ が τ_c を上回った場合に侵食が生じるものとした。特徴(6)の流れ幅の評価については、レジーム則を適用し、最大値を河床変動幅とした。また、流動層から堆積させる土砂量は、最大流れ幅(河床変動幅)に均等に堆積させるものとした。

3.3 計算ケース

ここでは、十分なデータが取得されることが少なく、既往研究で解析結果へ及ぼす影響の検討事例が少ない土砂供給条件(特徴(4))、侵食条件(特徴(5))、流れ幅の取り扱い(特徴(6))を変更したケースを実施した(表-1)。全ケースで供給土砂量の総量は航空レーザー測量データから求めた実績値とした。その上で、CCTV画像等から土砂生産の発生が考えられた時間帯に限定して土砂供給したケース(間欠的な供給)、洪水中全時間帯で土砂を供給したケース(全時間供給)を対象とした。なお、「全時間供給」のケースでは、計算区間上流端から供給した土砂濃度は既往の土石流理論に基づく平衡濃度にほぼ等しくなった。

表-1 計算条件

ケース	土砂供給方法	侵食条件	流れ幅
A	間欠的な供給	高橋(1977)	レジーム則
B	全時間供給	高橋(1977)	レジーム則
C	間欠的な供給	なし	レジーム則
D	間欠的な供給	高橋(1977)	土砂変動幅で一定

4. 計算結果

図-3 に 2011 年台風 15 号後の河床変動高と 2012 年台風 4 号後の早川への流出土砂量、図-4 に砂面計 No.10 設置箇所の河床変動高を示す。基本ケースとしたケース A は、図-3 より河床変動高は実績と解析で良い一致を示した。一方、流出土砂量は解析でやや過小評価(実績値の 82%)となったが、特徴(3)を考慮することにより、再現性が向上する可能性も考えられる。また、図-4

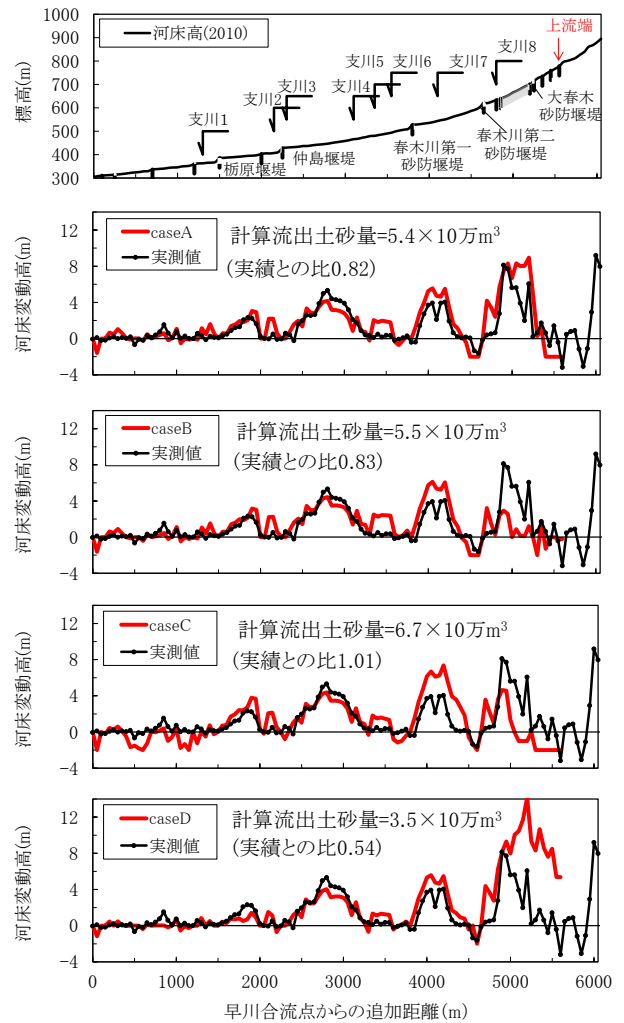


図-3 河床高及び流出土砂量の計算結果

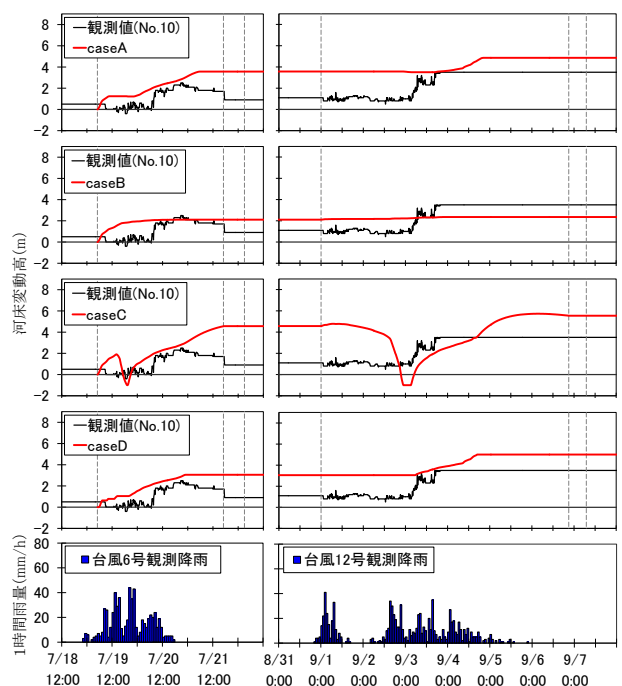


図-4 出水中における河床高の観測値と計算値の比較

より砂面計により観測された河床変動の特徴である出水前半の河床変動の小さな時間帯、急激な堆積、出水後半の河床変動が小さい時間帯が解析結果にも現れ、傾向は観測結果と解析結果で一致した。

土砂供給のタイミングを考慮しなかったケースBでは、図-3より春木川第二堰堤堆砂域の河床変動高が過小評価され、流出土砂量はケースAと同程度であった。図-4より河床変動の時間変化は、台風6号による降雨前半に変化した後、台風6号降雨後半から台風12号では変化が小さく、実績との乖離が大きくなった。

河床の侵食条件を考慮したケースCでは、図-3より流出土砂量は実績値と定量的に一致したが、河床変動量は春木川第二堰堤で過小評価、春木川第一堰堤で過大評価、下流域で過大侵食となった。また、図-4より土砂が供給されない時間帯には過大な侵食が発生し、河床高の時間変化が表現されなかった。

流れ幅を河床変動幅の一定値で扱ったケースDは、図-3より春木川第二堰堤で過大堆積となり、その影響で、流出土砂量が実績の半分程度となった。図-4より河床変動の時間変化はケースAと同じく、観測値の特徴が表現された。

5. まとめ

本報文では、春木川の大規模土砂流出に関して行った再現計算の結果から、河床変動計算に山地河川における豪雨時の土砂動態の特徴を考慮することで、精度の高い評価が可能なが示された。また、土砂供給のタイミング、河床の侵食条件、流れ幅については、各々の計算結果に影響が大きいことが示された。これらの結果は、流砂水文観測や砂面計による土砂動態の観測結果をもとに、

河床変動計算の条件やパラメータを設定することで、個別の流域に対して精度の高い解析が可能になることを示している。今後も、特徴(3)の崩壊地から生産される細粒土砂の伝搬を考慮するなど、山地流域における豪雨時の土砂動態の解析に適した手法について検討を進めていきたい。

参考文献

- 1) 例えば、中川一、高橋保、里深好文、川池健司：1999年ベネズエラのカムリグランデ流域で発生した土砂災害について、京都大学防災研究所年報、第44号 B-2、pp.207~228、2001
- 2) 水山高久：わかりやすい砂防技術(1)山地河川(溪流)の特徴、砂防と治水、Vol.35、No.6、pp.52~53、2003
- 3) 宮本邦明、伊藤隆郭：支配方程式に侵食速度式を導入した場合の土石流の数値シミュレーション手法、新砂防、Vol.55、No.2、pp.24~35、2002
- 4) 例えば、江頭進治、佐藤隆宏、宮本邦明：姫川支川蒲原沢土石流のシミュレーション、水工学論文集、Vol.42、pp.919~924、1998
- 5) 例えば、今泉文寿、土屋智、逢坂興宏：荒廃溪流源頭部の砂礫堆積地における土石流の発生と流動過程の観測、砂防学会誌、Vol.55、No.3、pp.50~55、2002
- 6) 朽木敏仁、水山高久、佐藤一幸、村上正人：土砂生産のタイミングを考慮した土砂生産・流出に関する研究、砂防学会誌、Vol.59、No.5、pp.15~22、2007
- 7) 高橋保：土石流の発生と流動に関する研究、京都大学防災研究所年報、第20号 B-2、pp.405~435、1977
- 8) 例えば、福田克之、松本清則、谷口和哉、椿下康之、清水幹輝、水山高久：出水中におけるスリット砂防堰堤の土砂流出調節に関する研究、砂防学会誌、Vol.54、No.6、pp.25~34、2002
- 9) 水山高久、井良沢道也、小林幹男、酒谷幸彦：山地河川における河床変動の実態、砂防学会誌、Vol.43、No.4、pp.27~32、1990
- 10) 鈴木拓郎、内田太郎、岡本敦：土砂移動シミュレーション手法における輸送形態の遷移に伴う不連続性の解消に関する研究、砂防学会誌、Vol.66、No.2、pp.21~30、2013

丹羽 諭



国土防災技術(株)(前国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室 部外研究員)
Satoshi NIWA

内田太郎



国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室 主任研究員
Taro UCHIDA

蒲原潤一



長野県建設部砂防課(前国土交通省国土技術政策総合研究所土砂災害研究部砂防研究室長)
Jun'ichi KANBARA