

山地流域の様々な土砂移動形態を連続的に計算する数値計算プログラムの作成

国土技術政策総合研究所 ○内田太郎・松本直樹・桜井 亘
 株)建設技術研究所 西口幸希・村上正人
 立命館大学 里深好文

1. はじめに

山地域の土砂に起因する災害・問題は、短期の土砂流出氾濫、中長期の土砂流出、土石流、流木、深層崩壊、天然ダムなど多岐にわたる。また、砂防堰堤の効果や機能は、型式や堰堤の設置位置にや対象とする土砂移動現象によって異なる。しかし、計画生産土砂量から砂防堰堤の効果量を差し引くなどして、計画を策定する現行の手法では、堰堤の設置位置、型式による砂防堰堤等の効果の違いを定量的に評価することが難しい。新設の砂防堰堤の適地が限られていく中、効果的・合理的に多岐にわたる土砂移動現象に対する対策を実施するためには、対象とする土砂移動現象を極力精度良く想定する必要があると考えられるが、現状、数値計算が土砂移動現象を精度良く想定することができる最も有効な手段と考えられる。

一方、山地河川は勾配が場所によって大きく変化すること、水深が時間とともに大きく変化すること、粒径が多岐にわたることなどにより山地河川の土砂移動現象は複雑である。このため、これまで数多くの数値計算手法が提案されてきているものの、急勾配領域から緩勾配領域まで多様な粒径を網羅的に対象とした数値計算手法は確立されているとは言い難いように思える。そこで、本研究では、豪雨時の山地流域の土砂動態を精度良く想定することを目的とし、様々な流砂形態を連続的に計算する数値計算プログラムの作成を試みた。

2. 対象現象と基本的考え方

本研究では、石礫型の土石流から、掃流状集合流動、掃流砂・浮遊砂に土砂移動形態が遷移する過程を対象とした(図1)。土石流形態の中には、乱流型土石流形態も存在するが、本研究では対象としなかった。

本研究では、時空間的な流砂の粒度分布の変化を表現できるよう、全領域、混合粒径で算出することとし、河床には交換層を設けた。また、流砂の移動形態は粒径によって異なると考えられる。そこで、本研究では層流状態で流下する粗粒土砂(図1の①~③)と乱流に取り込まれて流下する細粒土砂(図1の④~⑥)に2区分してモデル化した。その上で、計算が安定するように流砂形態の遷移にともない急激な侵食・堆積、水深の変動が生じないように留意した。

3. 方法

3.1 抵抗則

河床せん断力の算出には、流砂形態により異なる抵抗則を用いる高橋らの手法¹⁾を用いることとし、流砂形態の遷移による河床せん断力の不連続性を取り除いた鈴木らの手法²⁾を用いた。

3.2 粗粒土砂の取扱い

(1)平衡濃度

粗粒土砂(図1の①~③)の平衡濃度について

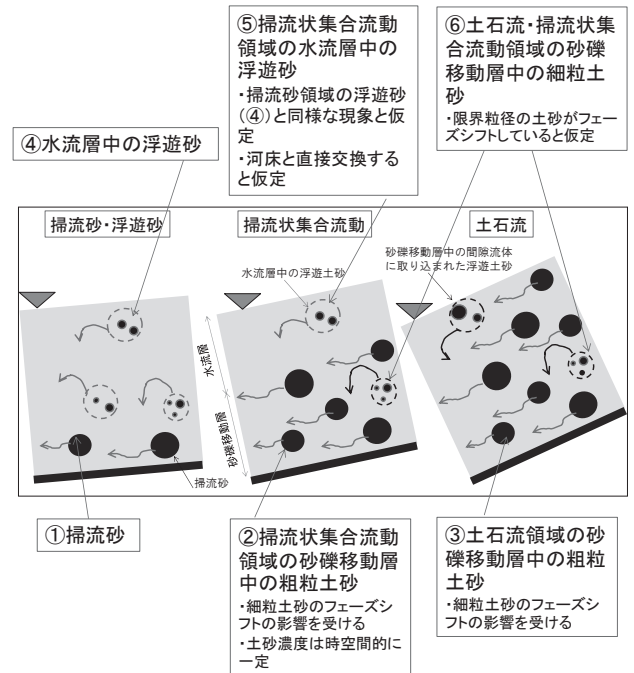


図1 計算プログラムのイメージ

は、流砂形態により異なる算出式を用いる高橋ら手法¹⁾を用いることとした。その上で、流砂形態の遷移による平衡濃度の不連続性を取り除いた鈴木らの手法²⁾を用いた。

また、3.3(2)に示す細粒土砂のフェーズシフトにより、土石流、掃流状集合流動領域の間隙流体の比重や粗粒土砂の平衡濃度に変化が生じる。この変化は西口らの手法³⁾に従い、評価した(図1の②および③)。

(2)砂礫移動層厚

砂礫移動層厚は、江頭らの手法⁴⁾に従い、砂礫移動層厚に依らず、一定とした。江頭ら(1990)は砂礫移動層中の濃度を河床の土砂濃度の半分としているが、鈴木らの手法²⁾を用いる場合、土石流から掃流状集合流動に遷移する際に不連続に水流層が出現することになる。一方、土石流から掃流状集合流動に遷移した時点で水流層が発生すると考えられることから、本研究では砂礫移動層中の土砂濃度は土石流から掃流状集合流動に遷移する時点の土砂濃度と等しいと仮定した。その上で、本来は流速の鉛直分布を考慮する必要がある⁴⁾が、本研究では、まずは簡便に流速は深さ方向に一定であると仮定し、砂礫移動層厚を算出した(図1の②)。

3.3 浮遊砂・細粒土砂の取扱い

(1)水流層中の浮遊砂

掃流領域の浮遊砂は、既往の浮遊砂の浮上・沈降を考慮した非平衡計算手法に従い、計算した。沈降速度はRubeyの式で算出した。また、基準面濃度は芦田・道上式を用い、濃度の鉛直分布は指

数分布と仮定した(図1の④)。

次に、掃流状集合流動領域の水面付近の水流層中にも、浮遊砂と同様な挙動をする流砂が存在すると考えられるが(図1の⑤)、計算手法については研究例が少ない。ここでは、掃流状集合流動領域の水流層の浮遊砂は掃流砂領域の浮遊砂と連続的な現象であると考えられるとした鈴木らの考え⁹⁾に従い、浮上・沈降を考慮した非平衡計算とし、水流層中の濃度分布および基準面濃度は掃流域の取扱いと同一とした。ただし、基準面濃度算出の際の水深については、現時点では十分な知見がないので、水流層のみの水深と流れ全体の水深と選べるようにした。

(2)砂礫移動層中の細粒土砂

土石流や掃流状集合流動の砂礫移動層中であっても、細粒土砂は間隙流体と一体として流下するいわゆるフェーズシフトした状態になる(図1の⑥)。本研究では、西口らの手法⁹⁾に従い、限界(上限)粒径以下の粒径の土砂については、全てフェーズシフトすると仮定した。ただし、内田ら⁶⁾と同様に砂礫移動層中の間隙流体の土砂濃度が上限値を超える場合は、限界粒径以下の土砂であっても、粗粒土砂として扱った。なお、間隙流体の土砂濃度は砂礫移動層中で深さ方向に一様とした。

限界粒径についてはほとんど研究例がないが、ここでは浮遊砂の浮遊限界に関する考えに従い、摩擦速度と沈降速度の関係から、フェーズシフトの限界粒径を算出した。一般に掃流領域の浮遊砂の場合は、摩擦速度の当該粒径の沈降速度に対する比が1を超えるときに当該粒径の土砂は浮遊しようと評価されるが、土石流の場合、掃流状態に比べて多くのエネルギーが礫の衝突等で失われると考えられるため、摩擦速度の当該粒径の沈降速度に対する比がある閾値を超えた場合にフェーズシフトすると評価することとした。閾値についても十分な知見はないが、閾値が3~21の場合、過去の大規模な土石流の到達範囲を概ね良好に表現できたという報告がある⁷⁾。そこで、本研究では閾値はこの値を参考にすることとし、時空間的に変動しない一定値とした。

3.4 河床と流砂の交換

(1)交換層

交換層は中谷の手法⁸⁾に従い1層で厚さが一定とし、粒度分布の変化は交換層内でのみ行われるものとした。すなわち、砂礫の侵食・堆積および浮遊砂の浮上・沈降によって河床面の高さが上下するにしたがって交換層も上下するとした。侵食が生じた場合、交換層下面では河床材料が交換層に供給され、粒度分布が変化する。一方、堆積が生じた場合、交換層下面では交換層の土砂が堆積層に移行するが、この過程は交換層の粒度分布に影響しないと仮定した。また、本来であれば交換層より下の堆積土砂の粒度分布は変化するはずであるがこの過程は評価していない。

(2)侵食・堆積速度式

土石流、掃流状集合流動領域においては、河床の平均粒径を用いて粗粒土砂の全体の侵食・堆積速度を高橋の侵食・堆積速度式⁹⁾により算出した。その上で、中川ら¹⁾と同様に、流砂形態に依らず粒径別の侵食速度は河床材料の粒径の存在割合に

従い、堆積速度は流砂の粒径の存在割合で全侵食または堆積速度を割り振った。

掃流砂領域では、粒径ごとに平衡濃度を求め、交換層内の当該粒径の存在割合を乗じた値と流砂の当該粒径の濃度を比較し、粒径ごとに侵食・堆積速度を高橋の侵食・堆積速度式⁹⁾により求めた。

(3)細粒土砂の取扱い

砂礫移動層中の細粒土砂の堆積過程は、堆積する直前には細粒土砂であっても、固体的な振り舞いをし、粗粒土砂とともに河床の骨格を構成するという過程と堆積する直前まで細粒土砂は間隙流体と一体となっており、粗粒土砂によって骨格が構成される河床の間隙に残るといった過程が考えられる⁹⁾。両過程が共存している可能性は高いが、本研究では、前者の過程に従いモデル化した。

また、砂礫移動層中のフェーズシフトした細粒土砂が浮遊砂に移行する場合が考えられるが本研究では砂礫移動層中のフェーズシフトした細粒土砂もいったん河床に堆積した後、河床から水流層中の浮遊砂に直接なると仮定した。

4. 計算の実施

ここでは、計算結果の例を簡単に示す。湯沢砂防事務所管内の登川における平成23年7月の新潟・福島豪雨時の土砂動態を対象に計算を実施した。供給土砂および河床材料の粒度分布は現地調査結果を用いた。流量波形はレーダー雨量を用いて合成合理式により小流域ごと遅れ時間を考慮して、算出した。また、同流域では災害前後のレーザプロファイラを用いた差分解析により各地点の通過土砂量が算出されている。

計算の1例を図2に示す。図に示すように、通過土砂量は概ね再現できている。また、上流域からでは粗粒土砂(図1の①~③)が卓越するのに対し、下流域では浮遊砂(図1の④、⑤)が卓越する結果となっており、この遷移過程がスムーズに計算されている。今後も検証を進めていく予定である。

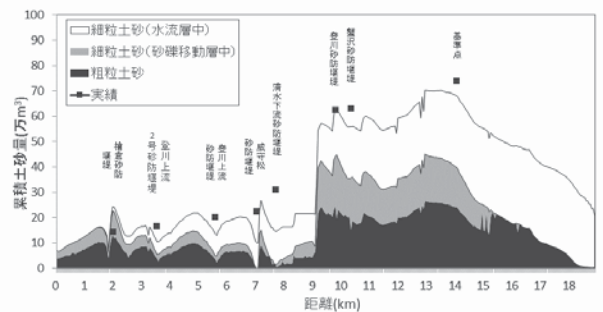


図2 計算結果の例

【参考文献】1) 中川一ら(2001) 京都大学防災研究所年報, 44(B2), 207-228/2) 鈴木拓郎ら(2013) 砂防学会誌, 66(2), 21-30/3) 西口幸希ら(2011) 砂防学会誌, 64(3), 11-20/4) 江頭進治ら(1990) 京都大学防災研究所年報, 33(B2), 293-306/5) 鈴木拓郎ら(2013b) 砂防学会研究発表会概要集 B, 114-115/6) 内田太郎ら(2014) 土木技術資料, 56(9), 22-25/7) 西口幸希(2014) 京都大学学位論文/8) 中谷加奈(2010) 京都大学学位論文/9) 高橋保・中川一(1991) 砂防学会誌, 44(3), 12-19