

○筑波大学大学院生命環境科学研究科(現 (株)東京建設コンサルタント) 関根敬
 筑波大学生命環境系(現 (独)土木研究所) 水野秀明
 筑波大学大学院生命環境科学研究科 江藤稚佳子

1. はじめに

近年では、斜面崩壊がダム湖や洪水時の河川に突入することによって発生した段波により被害が発生した。例えば、平成 23 年 7 月の高知県東部を流れる奈半利川の吊橋が被災した事例や平成 23 年 9 月に十津川の長殿発電所が被災した事例がある。そのため、段波に対して安全な避難路と避難場所を示し、一般に周知する必要がある。斜面崩壊による土砂が河川に急激に流れ込むと、その土塊が水を押しのけることによって段波が生じる。河川の地形条件や水理量の条件によっては、その段波は下流だけでなく上流側にも伝播し、被害を発生させる恐れがある。

崩壊や地すべりの発生に伴う段波の遡上を予め推定し、安全な避難路と避難場所を検討する手段の一つとして数値計算は非常に有効である。数値計算を行うためには現象をモデル化した数理モデルが必要である。段波が上流に伝播する現象については、河川を遡上する津波の現象に対する水理モデルの研究がなされた(安田、2008)。しかし、土石流の突入に伴う段波の形成と遡上のメカニズムが十分に明らかになっていないため、土石流の突入に伴う段波の現象に対する数理モデルは現時点で確立しているとはいえない。本研究で対象としている現象は主に山地流域で発生するため、数値計算は急峻な地形やウェットベッド問題とドライベッド問題の混在といった条件下でも良好な精度を有するべきである。さらに、数値計算は溪流や溪谷のように流路の湾曲や合流点といった箇所において生じる局所的な衝撃波を考慮したものでなければならない。また、湛水池内の流れのように穏やかな流れまで適用できることが求められるが、そのような数値計算の手法は十分に確立されていない。関根(2014)は有限体積法を基本とし、局所的に保存則を満たし、局所的な衝撃波や希薄波を考慮した手法でフラックスを計算する方法を用いてあまり複雑でない地形条件下で C プロパティ(BERMUDEZ and VAZQUEZ, 1994)を満足する計算を行った。

そこで、本研究では著者らがこれまでに開発してきた手法(関根、2014)を改良し、平成 23 年 7 月に平鍋地区で発生した段波の事例に着目して、数値計算を用いて段波の形成・遡上過程のメカニズムを明らかにすることを目的とする。

2. 2次元浅水流方程式を用いた数値計算プログラムの開発

基礎方程式は 2 次元浅水流方程式である。この 2 次元浅水流方程式を平面 XY 上で曲線 C で囲まれた計算要素 S 内で積分すると、式(1)となる。

$$\iint_S \frac{\partial \vec{q}}{\partial t} dS + \int_C \mathbf{A} \vec{n} dC = \iint_S \vec{S} dS \cdots (1)$$

ここで、 $\vec{q}$ は変数ベクトル、 $\mathbf{A}$ は X、Y 方向フラックスのテンソル、 $\vec{n}$ は曲線 C に対して垂直な方向の単位ベクトル、 $\vec{S}$ は湧き出し項で、以下のようになる。

$$\vec{q} = \begin{bmatrix} h \\ Uh \\ Vh \\ Ch \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} Uh & Vh \\ U^2h + \frac{1}{2}gh^2 & UVh \\ UVh & V^2h + \frac{1}{2}gh^2 \\ CUh & CVh \end{bmatrix}, \vec{S} = \begin{bmatrix} i \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial x} + \tau_{bx} \\ -gh \frac{\partial z_b}{\partial y} + \tau_{by} \\ iC_* \end{bmatrix} \cdots (2)$$

ここで、 h は水深、 U 、 V は速度の X、Y 方向成分、 C は土砂容積濃度、 g は重力加速度(9.81m/s²)、 z_b は水路床の標高、 i は侵食・堆積速度(m/s)、 C_* は、河床の堆積層における土砂容積濃度、 τ_{bx} 、 τ_{by} は底面摩擦力の X、Y 方向成分で本研究ではマニング型の式を適用した。侵食・堆積速度は高橋(2004)の式を適用した。局所的に発生する衝撃波等を考慮するため、移流項と湧き出し項を分けて計算するフラクショナルタイムステップ法(Toro, 2001)を用いた。

関根(2014)は C プロパティを満たすために、計算要素内で過渡が生じないと仮定して、速度ベクトルが零ベクトルの場合に水面勾配を水平、そうでない場合には水面勾配を堆砂面の勾配と同じとした。しかし、本研究では、計算要素の水深の平面の勾配を静水圧の総和ベクトルと一致するような条件(式(3))を加えた。

$$\nabla \bar{h} = \frac{1}{gV} \int_C \left(\frac{1}{2} gh^2 \right) \vec{n} dC \cdots (3)$$

ここで、 $\nabla \bar{h}$ は水深の勾配である。また、本研究では計算要素を三角形としたが、その各辺上において水深が変化する。そこで、辺をウェットベッド状態である区間とドライベッドである区間に分けて、それぞれの区間の始点、終点及びその中間点においてフラックスを算出し、それらの値からシンプソンの公式により辺を通過するフラックスの総量を近似した。

3. 湛水池に突入する土石流の再現計算

地形モデルは、平鍋ダムが満砂状態の場合と土砂による堆砂が無い場合の 2 種類を想定した。満砂状態の地形モデルは、水野ら(2012)の地形モデルを使用した。堆砂が無い場合の地形モデルは、国土地理院の基盤地図情報数値標高モデルの 3 次元座標データを基本とし、水域については平鍋ダムの直下流の

河床高から貯水池の直上流の河床高を一定勾配として河床高を作成し、それらの3次元座標データ節点に対してデローニ三角形分割を行い、三角形要素を作成したものである。

作成した地形モデルに対し、数値計算を行った。境界条件は水野ら(2012)と同様とし、平鍋ダム地点の境界要素は透過壁とし、奈半利川の最上流部の三角形要素から $1,700\text{m}^3/\text{s}$ の割合で水を供給し、計算開始時刻から 10 分後に崩壊地内に位置する三角形要素から $170,000\text{m}^3$ の土砂と水を 1 秒間で供給した。その際、土砂の代表粒径は 1m とし、崩壊体積の 60% を土砂、40% を水とした。ただし、地形モデルの各三角形要素の粗度係数は 0.02 とし、固定床とした。

土石流により発生した段波の形成及び遡上メカニズムについて明らかにするため、表-1 に示す計算ケースで計算を行った。いずれのケースにおいても崩壊土砂は約 30 秒後に奈半利川に突入した。突入直前から 20 秒ピッチで谷出口から平鍋吊橋の区間において水位縦断面図を整理した。

土石流突入前の合流点付近のフルード数は Case1 の場合、3.3 で、流れは射流状態であった。平鍋吊橋の水位は、計算開始 710 秒後に最大値 157.4m となった。Case2、Case3 の場合、それぞれ 0.8、0.7 であり、流れは常流状態であった。図-1~3 より、いずれのケースにおいても発生した水位上昇は上流側へ伝播した。Case3 の場合、平鍋吊橋の水位は、計算開始 730 秒後に最大値 156.6m となった。Case4 の場合、平鍋吊橋の水位は、計算開始 690 秒後に最大値 153.8m となり(図-4 参照)、その差は 2.6m であった。Case5 の場合、平鍋吊橋の水位は、計算開始 710 秒後に最大値 157.1m となり(図-5 参照)、Case1 との差は 0.3m であった。

表-1 計算ケース

Case	堆砂状態	河道内の粗度係数	崩壊土砂
1	満砂	0.00	土砂と水
2	満砂	0.01	土砂と水
3	満砂	0.02	土砂と水
4	堆砂なし	0.02	土砂と水
5	満砂	0.00	水のみ

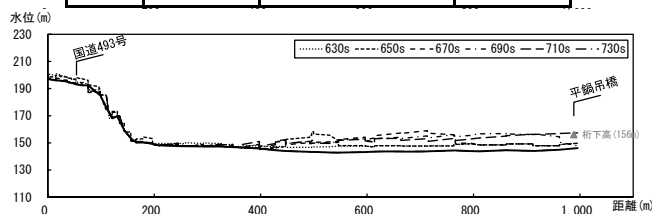


図-1 水位縦断面図 (Case1)

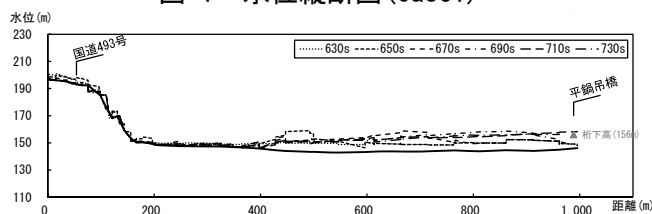


図-2 水位縦断面図 (Case2)

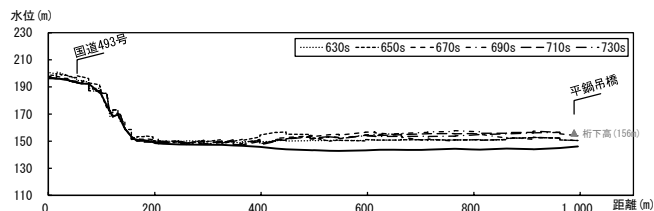


図-3 水位縦断面図 (Case3)

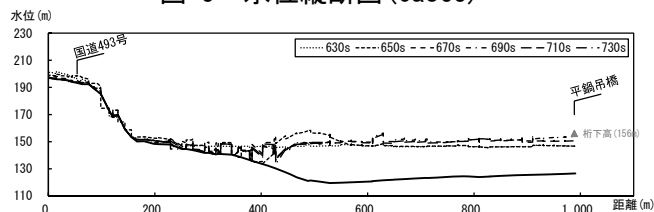


図-4 水位縦断面図 (Case4)

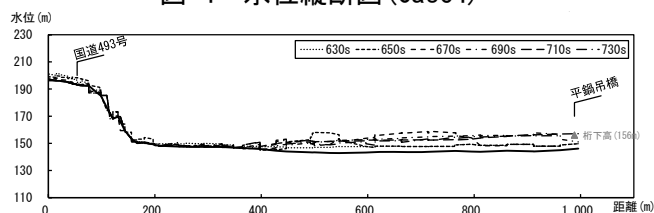


図-5 水位縦断面図 (Case5)

4. おわりに

崩壊土砂の突入時において奈半利川での流れが常流状態だけでなく射流状態であっても段波が形成し、遡上することがわかった。射流状態であった場合、合流点において土石流が堆砂することにより、段波はより高い水位を示し、より上流にまで遡上することがわかった。奈半利川が常流状態の場合において平鍋ダムが満砂した場合の地形と堆砂の無い地形の計算結果から、奈半利川の流れの水深が浅いほど、段波の水位が高くなることがわかった。今後、新しく開発した数値計算手法がどの程度湾曲部の水の流れを再現できるか検証する必要がある。また、土石流等の土砂移動現象が湛水池に流れ込んだ際の侵食・堆積過程を明らかにする必要がある。

引用文献

BERMUDEZ,A. and M.VAZQUEZ (1994) : UPWIND METHODS FOR HYPERBOLIC CONSERVATION LAWS WITH SOURCE TERMS, Computers Fluids Vol.23, No.8, p.1049-1071

水野秀明・梶昭仁・石塚忠範(2012) : 大規模な崩壊による急速な河道断面の減少と水位上昇に関する考察, 平成 24 年度砂防学会研究発表会概要集, p.590-591

関根敬・水野秀明・安海高明(2014) : 水の急激な流入による湛水池の水位変化の再現計算, 平成 26 年度砂防学会研究発表会概要集 A, p.202-203

高橋保(2004) : 土石流の機構と対策, 近未来社, 432pp
Toro,E.F.(2001) : Shock-Capturing Methods for Free-Surface Shallow Flows. WILEY, 309 pp.

安田浩保(2008) : 不等流を遡上する波状性段波に関する水理実験とその数値計算, 寒地土木研究所月報, No.658, p.29 -37