

山地河川における豪雨時の水と土砂の流出解析

九州大学大学院工学研究院 正 員 ○朴 埼 瑠
九州大学大学院工学研究院 正 員 橋本 晴行
鹿島建設（株） 荒渡 光貴

1. はじめに

洪水時における流出解析は流水のみを対象にした解析が通常行われるが、我が国の河川では強い降雨時には上流域で土石流や土砂流などが発生し、著しい河道変動が生じていることが多く、このような場合には流水と流砂を連立方程式の同時解として求める解析が必要となる。また、このことは山地流域からの土砂流出の評価に際しても同様なことが言える。山地河道には掃流砂を初めとして土石流、掃流状集合流動、高濃度浮流砂流など様々な流砂形態が現れる。このような流砂形態については従来より流砂量や抵抗則の評価式が開発されてきた^{1), 2)}。本研究は、それらの成果を裸地斜面をもつ山地河川に適用し、雨水流モデルを用いた土砂・水の流出量の評価法について考察を行ったものである。

2. 土砂と水の流出解析

モデル流域を斜面部と河道部とに分け（図-1）、斜面部では斜面を斜面長 L_s 、勾配 θ_s の様な矩形斜面として取り扱い、kinematic wave法を用いて雨水の流出計算を行う。河道部ではdynamic wave法を用いて斜面からの側方流入 q_{in} を伴う場合の1次元河床変動計算を行う。斜面から河道への土砂流入は裸地斜面の場合は考慮し、林地の場合は無視することにする。基礎式は以下のとおりである。

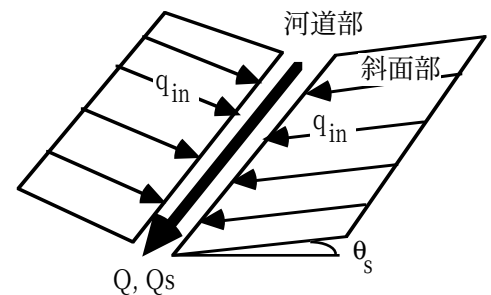


図-1 斜面部と河道部から構成される河川流域

(1) 斜面部

連続式は、水深を h 、水と土砂を合わせた全流量を q_m 、有効雨量強度を $r(t)$ として

$$\frac{\partial(h + z \cos \theta_s)}{\partial t} + \frac{\partial q_m}{\partial x} \cos \theta_s = r(t) \cos \theta_s \quad (1)$$

となる。ここに、 x 軸は上流端から水平に測った距離である。運動方程式は擬等流として取り扱い

$$q_m = \frac{1}{n_s} \sqrt{\sin \theta_s} h^{5/3} \quad (2)$$

とする。ここに n_s はマンニングの粗度係数である。初期条件は、計算結果に影響を与えないような微小値を選び流量 $Q = 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$ を一様に与えた。境界条件は上流端で流量 $Q = 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$ とした。斜面における河床変動は以下のように取り扱った。

1) 林地斜面の場合は斜面から河道への土砂流入は無視して $\partial z / \partial t = 0$ とおく。

2) 裸地斜面の場合は、 $\theta \geq 6^\circ$ の急勾配斜面では斜面から河道への土砂流出を考慮し $\frac{\partial z}{\partial t} = \delta v \frac{(C_\infty - C_{in})}{C_\infty}$ とおき^{3), 4)}、 $\theta < 6^\circ$ の緩勾配斜面では斜面からの土砂流出を無視して $\partial z / \partial t = 0$ とする。ここに δ は0.00002、 v は断面平均流速、 C_∞ は斜面における平衡濃度で、ここでは簡単のため $C_\infty = 0.5$ 、 C_{in} は0.1とする。

(2) 河道部

運動方程式、全相連続式、固相連続式はそれぞれ以下の通りである。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial v Q}{\partial x} \cos \theta = g B h \cos \theta \left[- \frac{\partial(h \cos \theta + z)}{\partial x} \right] - (B + 2h) \frac{v^2}{\phi^2} \quad (3)$$

$$B \frac{\partial(h + z \cos \theta)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \cos \theta = q_m \quad (4)$$

$$B \frac{\partial(C_\infty z \cos \theta)}{\partial t} + \frac{\partial(B q_s)}{\partial x} \cos \theta = C_{in} q_m \quad (5)$$

ここに x 軸は上流端から水平に取った距離、 z は基準水平面から垂直上向きに測った河床高さである。また、堆積層厚 $D = 2\text{m}$ とし、斜面部から土砂流入が無い場合は $C_{in} = 0$ とする。初期条件は、河道部では水が流れてい

キーワード：土砂流出、流砂、Kinematic Wave法、雲仙水無川

連絡先 〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1 TEL 092-642-3289 Fax 092-642-3322

ない状態を想定した。また、閾値を0.1mmとし、閾値より小さい水深を0と置いた。境界条件は、斜面からの土砂流入を考慮しない場合は、上流端においてそれに接する斜面からの流出流量を計算するとともに、後述の流砂量式(7)を用いて上流端の流砂量を計算する。そして、それらの和を全流量として上流端に与えるものとする。一方、斜面からの土砂流入を考慮する場合は、上流端に接する斜面から土砂濃度 C_m で流砂量を与える。また、上流端の水深 h は等流水深とし、河床勾配は初期河床勾配を一定として与える。計算の際に必要な河道幅は実測値のある場合は実測値を用い、実測値の無い場所には、笠井⁵⁾により提案された経験式を用いる。

$$B = 5.36 \times A^{0.37} \quad (6)$$

ここに、 B は河道幅(m)、 A は流域面積(km²)である。

流砂量式としては、急勾配河道において広範囲の勾配に適用可能な流砂量式を用いる。

$$\frac{q_s}{\sqrt{sgd^3}} = \frac{u_* \tau_*^{3/2}}{u_*} \left(1 - \frac{\tau_{*c}}{\tau_*}\right) \frac{1}{(\alpha - I_f) \cos \theta_0} G\left(I_f, \frac{h}{d}, \frac{w_0}{u_*}\right) \quad (7)$$

ここに掃流砂に浮流砂を考慮する場合は次式により $G(I_f, h/d, w_0/u_*)$ を計算する。

$$G\left(I_f, \frac{h}{d}, \frac{w_0}{u_*}\right) = 1 + 0.1 \left(\ln\left(\frac{h}{d}\right)\right)^2 (I_f)^{0.8} \exp\left\{-2.5\left(\frac{w_0}{u_*}\right)^{0.5}\right\} \quad (8)$$

3. 雲仙水無川における大規模土石流への適用

(1) 計算区間

計算対象の土石流は1992年8月8日発生の大規模土石流である。雲仙水無川流域は流域面積は15.7km²、河道は河口付近で河床勾配 θ は1.4°～3.1°であり、中間区間は2.8°～5.0°、上流側では5.0°～20°となっている。1/25000の地図から読み取った雲仙水無川流域を図-2に示す。

(2) 計算条件

斜面部においてマンニングの粗度係数 $n_s=0.6$ (m・sec単位)とおいた。計算は、斜面からの土砂の流入を考慮し、流砂形態としては掃流砂に浮流砂を考慮したケースを行った。河床材料の粒径は5mmとおいた。計算の際に用いた1992年8月8日1時から12時までの雨量データを図-3に示す。

(3) 計算結果

図-4に水無川橋での流量と流砂量の計算値を示す。降雨のピークが8時40分頃発生し、水無川橋でのピークの到達時間は9時であった。流出土砂量の実測値は22万m³であり、計算結果の27万m³と概ね一致した(表-1)。

4. おわりに

以上、豪雨時の山地河川における水と土砂の流出解析法を提案し、その適用性について調べた。その結果、斜面の被覆状態が裸地の場合の流域について流出解析を行い、その流出特性を明らかにすることができた。しかしながら、河床の粒度分布を考慮していないことや、堆積層厚の評価の問題など課題が残されている。

参考文献

1) 橋本・平野：掃流状集合流動の抵抗則と流砂量，土木学会論文集No.545/II-36，1996. 2) 平野・橋本・多川：急勾配水路における浮流砂を伴う流砂量，水工学論文集，第42巻，1998. 3) 高橋・中川：豪雨時に発生する石礫型土石流の予測，新砂防，Vol44，No3，1991. 4) 中川：土石流による地形変動とその解析，地形変動論，土木学会水理委員会基礎水理部会研究分科報告，1998. 5) 笠井：嘉瀬川ダムに流入する河川およびダムへの流入土砂について，平成9～11年度建設省・土木学会共同研究報告書（代表 九大 橋本晴行），2000.

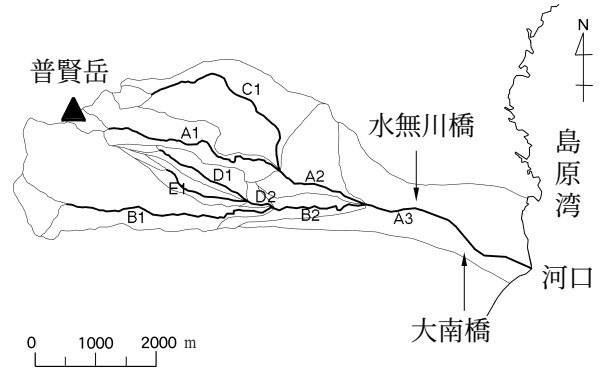


図-2 水無川流域

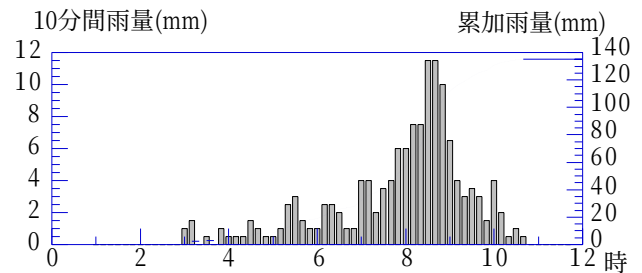


図-3 1992年8月8日の雲仙水無川でのハイトグラフ

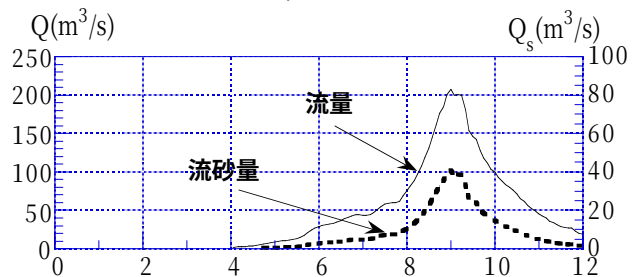


図-4 水無川橋での流量・流砂量の計算結果

表-1 水無川橋での計算結果

ピーク流量(m³/s)	207
総流量(万m³)	198
ピーク流砂量(m³/s)	41
総流砂量(万m³)	27
ピーク土砂濃度	0.20
平均土砂濃度	0.060