

山地流域における豪雨時の水と土砂の流出解析

RUNOFF ANALYSIS OF SEDIMENT AND WATER DUE TO HEAVY RAIN FROM A MOUNTAIN RIVER DRAINAGE

橋本晴行¹・朴琦璵²・高岡広樹³・荒渡光貴⁴

Haruyuki HASHIMOTO, Kichan PARK, Hiroki TAKAOKA and Mitsuyoshi ARAWATARI

¹ 正会員	工博	九州大学大学院助教授	工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
² 正会員	工修	九州大学大学院助手	工学研究院 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
³ 学生会員	工修	九州大学大学院	工学府 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)
⁴ 正会員	工修	鹿島建設(株) 東北支店	(〒980-0802 仙台市青葉区二日町1-27)

A simulation method is developed to predict runoff of sediment and water from a mountain river drainage. The river drainage is divided into slope areas and river reaches. A kinematic wave method is employed in the runoff prediction from the slopes and a dynamic wave model for the runoff of sediment and water in the river reaches. Runoff of sediment and water from the slopes is considered at the slopes steeper than 6° , while runoff of water at the slopes milder than 6° . The result of the computation with the total-load transport equation agrees with the field measurements of sediment discharge in the Mizunashigawa River.

Key Words : Sediment runoff, sediment transport, kinematic wave method, Mizunashigawa River

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を対象にした流出解析には高橋・沢田・里深¹⁾、高橋・中川・里深^{2), 3)}、⁴⁾などの研究があるが、斜面からの土砂流出は考慮しておらず、火山地域などの裸地斜面流域への適用性には課題が残る。また流砂形態としては掃流砂、土石流、掃流状集合流動の3つを取り扱い、高濃度浮流砂流は考慮していないなどの問題も残っている。

著者らは急勾配河道について従来より流砂量や抵抗則の評価式を開発してきたが^{5), 6)}、本研究は、それらの成果を裸地斜面をもつ山地流域に適用し、斜面部では斜面侵食を考慮し、雨水

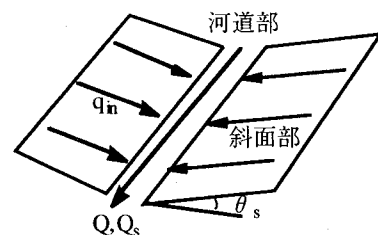


図-1 斜面部と河道部から構成されるモデル流域

流モデルを用いた土砂・水の流出量を評価する。河道部ではDynamic wave法を用いて土砂・水の流出解析を行った。流砂形態としては上述の4つの形態を考慮し流砂量を評価する。

2. 水と土砂の流出解析

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 をもつ一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。その際、斜面から河道への土砂流出については、流出土砂濃度 C_m を、 $C_m=0.1$ もしくは 0.2 と一定値を仮定することにする。しかしながら、全ての斜面からの土砂流出を考慮

すると過大評価の可能性が生じるので、土砂流出は、 $\theta_s \geq 6^\circ$ の急勾配の裸地斜面の場合は考慮し、それ以下の勾配では無視することにする。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。

基礎式、初期・境界条件は、斜面部、河道部それぞれについて以下のとおりである。

(1) 斜面部

斜面部では、kinematic wave法を用い、土砂と水を合わせた全相について、非定常の連続式と等流の運動方程式を連立して解く。河床変動は侵食速度式を水路実験により求め評価する。

a) 基礎式

全相の連続式は、水深を h 、水と土砂を合わせた全流量を q_n 、有効雨量強度を $r(t)$ 、斜面勾配を θ_s として

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

となる。ここに、 x 軸は斜面上流端から水平に測った距離、 z は基準水平面から垂直上向きに測った斜面の地盤高、 h は水深であり、斜面に対して垂直に測ったものである。

運動方程式は流れを等流として取り扱い

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

とする。ここに、河床変動による勾配の変化は無視している。また、マンニングの粗度係数は $n_s = 0.6$ (m-sec単位)とした。

b) 河床変動

斜面における河床変動は、土砂の連続式を使わず、以下のような侵食速度式のみを用いて解析した。

① $\theta \geq 6^\circ$ の急勾配裸地斜面では河道への土砂流出を考慮して

$$\frac{\partial z}{\partial t} = k_c \cdot C_{in}^2 \cdot v \quad (3)$$

とおく。ここに、 k_c は補正係数、断面平均流速 $v = q_n/h$ 、 C_{in} は斜面からの流出土砂濃度であり、斜面全体に一樣に与える。侵食速度については3章において考察される。

② $\theta < 6^\circ$ の緩勾配斜面では土砂流出を無視して

$$\frac{\partial z}{\partial t} = 0 \quad (3')$$

とする。

c) 初期条件と境界条件

初期条件は、計算に影響を及ぼさない程度の微

少流量 $Q = 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$ と水深 $h = 0.1\text{mm}$ を斜面全体に一樣に与えた。

境界条件は、斜面上流端において $Q = 10^{-5}(\text{m}^3/\text{s})$ 、 $h = 0.1\text{mm}$ を一定値として与えた。

(2) 河道部

a) 基礎式

河道部においては、流量、断面平均流速、水深、河道勾配、河道幅をそれぞれ Q 、 v 、 h 、 θ 、 B とすると、運動方程式、全相連続式、固相連続式はそれぞれ以下ようになる。

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial v Q}{\partial x} \cos \theta = g B h \cos \theta \left[-\frac{\partial(h \cos \theta + z)}{\partial x} \right] - (B + 2h) \frac{v^2}{\phi^2} \quad (4)$$

$$B \frac{\partial(h + z \cos \theta)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} \cos \theta = q_{in} \quad (5)$$

$$B \frac{\partial(C_s + z \cos \theta)}{\partial t} + \frac{\partial(B q_s)}{\partial x} \cos \theta = C_{in} q_n \quad (6)$$

ここに x 軸は河道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、 h は水深で、河床に対して垂直に定義されている。また、 ϕ は流速係数、 C_s は堆積土砂の最密充填濃度、 q_s は流砂量、 q_{in} は斜面部から河道部への横流入流量である。

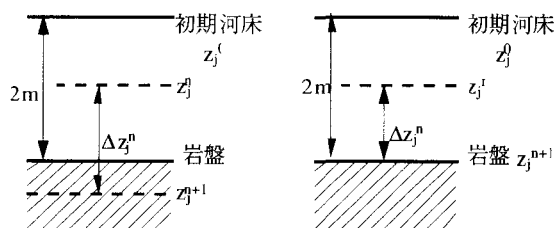


図-2 岩盤露出時の流砂量計算の模式図

b) 流砂量の評価

河床堆積土砂層の厚さの評価は困難であるので、従来の研究⁴⁾を参考にして、一樣に2mと仮定し、その下には岩盤が存在するものとする。流砂量 q_s の計算時に、堆積層が存在し岩盤が露出していない場合と、岩盤が露出した場合とでは計算法が異なる。

まず、堆積層が存在する場合には平衡流砂量式を用いて評価する。

平衡流砂量の評価式としては、等流で、広範囲の急勾配河道に対して提案されている流砂量式⁵⁾を不定流に拡張して用いる。これは、掃流砂、掃流状集合流動、掃流砂に浮流砂を伴う流砂形態、

高濃度浮流砂流など広範な流砂形態を対象にした式である。すなわち

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

ここに、 $G(I_f, h/d, w_0/u_*)$ は $I_f, h/d, w_0/u_*$ の関数である。また、 $\alpha = 0.875$ ，無次元限界掃流力 $\tau_{*c} = 0.05$ ，エネルギー勾配 $I_f = u_*^2/(gh)$ ， $\bar{u}_s/u_* = 4.7$ ，摩擦速度 $u_* = v/\phi$ ，無次元掃流力 $\tau_* = u_*^2/(sgd)$ ， w_0 は粒子の沈降速度で Rubey の式より評価される。

流砂量式(7a)における $G(I_f, h/d, w_0/u_*)$ は、流砂形態として、掃流砂や掃流状集合流動のみの場合には

$$G\left(I_f, \frac{h}{d}, \frac{w_0}{u_*}\right) = 1 \quad (7b)$$

となり、それらに浮流砂を伴う場合には、次式となる。

$$G\left(I_f, \frac{h}{d}, \frac{w_0}{u_*}\right) \doteq 1 + 0.1 (\ln(h/d))^2 (I_f)^{0.8} \exp\left\{-2.5 \left(\frac{w_0}{u_*}\right)^{0.5}\right\} \quad (7c)$$

次に、堆積層が流失し、岩盤が露出した場合には式(6)の固相連続式を変形した次式により流砂量 q_s を計算する。

$$q_{sj}^n = \frac{B_{j-1}}{B_j} q_{sj-1}^n - C_* \Delta z_j^n \frac{\Delta x}{\Delta t} + \frac{C_{in} q_{in}^n \Delta x}{B_j} \quad (8)$$

ここに、 $n+1$ 時間 step の河床高 z_j^{n+1} の計算値が初期河床より 2m 以上掘れた場合 (図-2(a))， z_j^{n+1} は、岩盤表層の高さに修正する (図-2(b))。すでに岩盤が露出している地点では、河床がそれ以上低下することなく $\partial z/\partial t \geq 0$ とならなければならないので、式(6)において左辺第二項は $\partial(Bq_s)/\partial x \leq 0$ となる必要がある。

c) 川幅Bの評価

計算で必要となる川幅Bについては、流量Qとの関係を示したレジーム則や、流域面積との関係を表わした笠井⁷⁾の式がある。ここでは後者の式を用いることにする。

$$B = 5.36 \times A^{0.37} \quad (9)$$

ここに、川幅Bの単位はm、流域面積Aの単位は km^2 である。

図-3は、笠井が行った調査結果とともに、筆者らの現地調査結果を合わせて示したものである。

d) 初期条件と境界条件

河道部の初期条件は水が流れていない状態を想

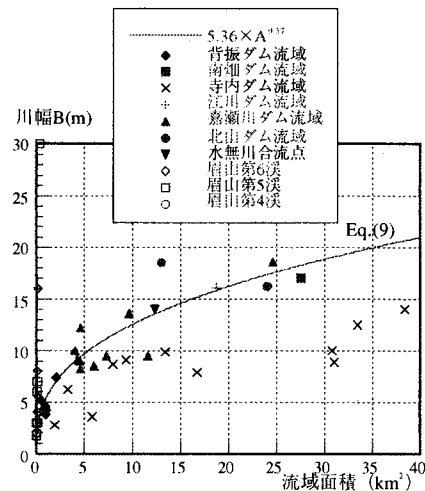


図-3 流域面積と川幅の関係

定した。

河道部上流端の境界条件は、上流端に接する斜面からの流出流量を計算し、上流端の水深hを等流水深として、次式で与える。

$$h = \left(\frac{Q}{B\phi\sqrt{g} \partial z/\partial x} \right)^{2/3} \quad (10)$$

ここに、河床勾配 $\partial z/\partial x$ は初期勾配を一定として与える。

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \text{一定} \quad (11)$$

3. 斜面における侵食速度に関する実験

侵食速度評価式は水路実験により実験的に決定される。

(1) 実験方法

実験は、全長700cm、幅30cmの可変勾配水路において長さ L_b 、幅 B_b 、深さ D_b の移動床長方形断面流路を設けて行った。実験条件を表-1に示す。

水路勾配 $\theta_0 = 6^\circ, 10^\circ, 14^\circ, 18^\circ$ ，移動床部の長さは $L_b = 570cm$ とした。流路は、それぞれの勾配に対し初期断面の異なるCaseA, B, Cの3種類とした。

まず、CaseAでは、水路左岸壁にそって長方形断面流路を設け、片側侵食を伴う実験を行った。

CaseBでは、水路中央に長方形断面流路を設け、両岸侵食を伴う実験を行った。

CaseCでは、水路を塩化ビニール板で仕切り、側岸侵食のない状態で実験を行った。

河床材料には平均粒径 $d = 0.17mm$ ，比重 $\sigma/\rho = 2.61$ の細砂を用いた。上流からの供給流量 $Q_{w0} \doteq 400cm^3/s$ とした。実験は所定の時間通水した後、

表-1 実験条件

	CaseA	CaseB	CaseC
流路の長さ L_b (cm)	570	570	570
流路の幅 B_0 (cm)	5	5	5,10
流路の深さ D_0 (cm)	2.5,5,7.5	2.5,5	-
流砂濃度 C_T	0.21~0.31	0.21~0.34	0.17~0.35
h/d	64.39~96.58	-	37.95~81.39
側岸侵食の有無	片岸侵食	両岸侵食	側岸侵食なし

停止し、ポイントゲージにより河床高、流路幅、断面形を測定した。また、下流端においては流れを採取し、側方よりビデオカメラを用い、水位、河床高の時間変化を測定した。

(2) 実験結果

図-4は実験で得られた河床侵食速度の無次元量と流路からの流出土砂濃度 C_T の関係を示す。ここに v は断面平均流速である。

図中には、2種類のデータをプロットしている。ひとつは通水停止後の河床縦断面形から得られた空間平均の侵食速度であり、あとひとつは、移動床上流端から $x=325\text{cm}$ の位置で測定された局所的な侵食速度である。大略、実験式として次式を得ることができる。

$$\frac{\partial z}{\partial t} = k_c \cdot C_T^2 \cdot v \quad (12)$$

ここに、 C_T は下流端からの流出土砂濃度であり、補正係数 k_c は本実験の範囲では0.01である。この式は上述の式(3)で用いられている。

4. 雲仙水無川流域への適用

2, 3章において考察した流出解析法を裸地斜面をもつ雲仙水無川流域に適用した。対象とした土石流は1992年6月7日の小規模土石流と、同年8月8日発生の大規模土石流である⁸⁾。

(1) 計算区間

計算対象の水無川流域を図-5に示す。計算は、河道部をA,B,C,D,Eの5つに分け、各斜面からの流出流量を計算した後、河道部の河床変動計算を行った。ここに赤松谷から河口までのE河道を本川とする。

図-6に示すように、A河道はB河道に、C河道はD河道にそれぞれ合流し、BとD河道はE河道に合流する。合流する支川河道の流出流量と流砂量は本川河道に横流入として与えられるものとする。

計算区間の全流域面積は15.7 km^2 である。A～E河道の流域面積はそれぞれ0.6 km^2 , 0.7 km^2 , 1.8 km^2 ,

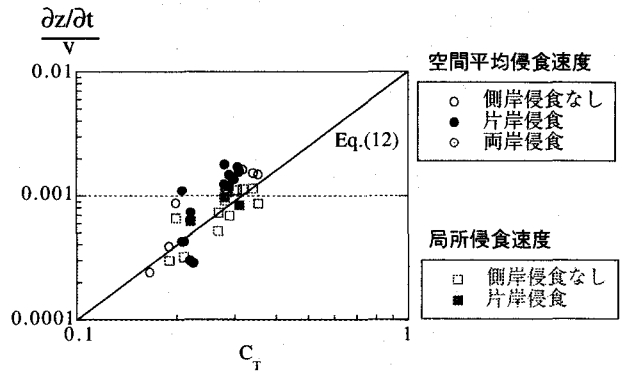


図-4 河床侵食速度の無次元量と流出土砂濃度との関係

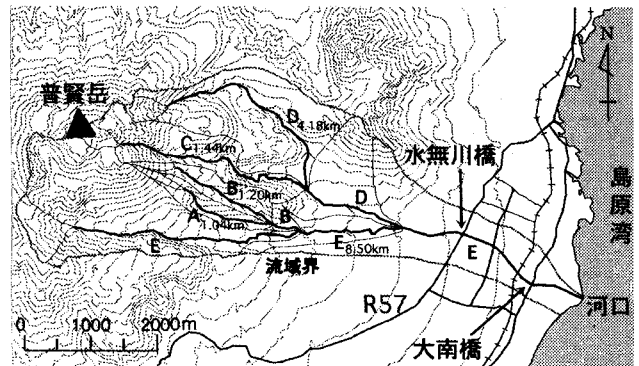


図-5 水無川流域

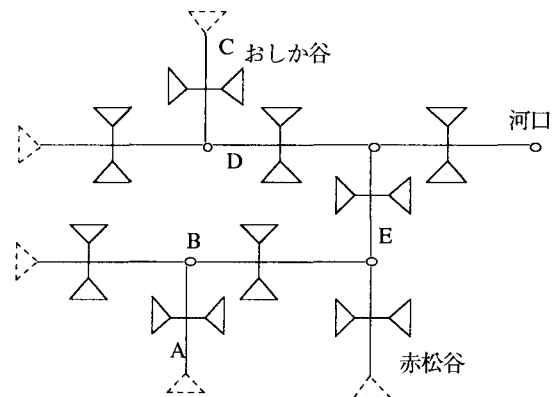
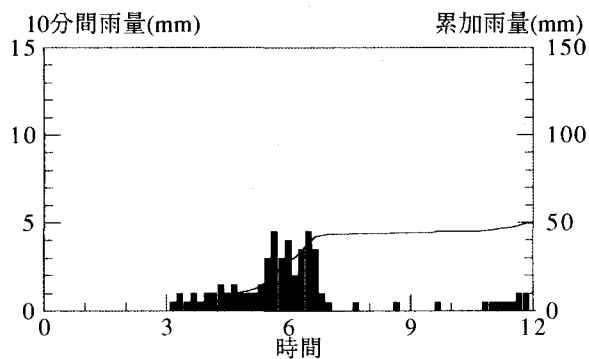


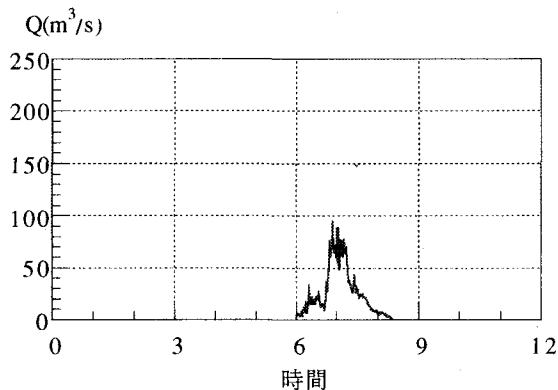
図-6 水無川流域の計算モデル

表-2 計算条件

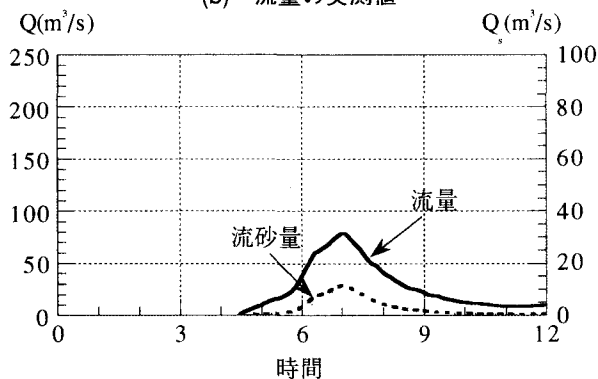
斜面侵食の補正係数 k_c	0.00114
斜面からの流出土砂濃度 C_{in}	0.1(小規模), 0.2(大規模)
斜面のマニング係数 n_s	0.6
流速係数 ϕ	7
堆積土砂の平均粒径 d	0.005m
堆積土砂の最密充填濃度 C^*	0.7
堆積土砂層厚	2m
時間格子間隔 Δt	0.05sec~0.2sec
空間格子間隔 Δx	10m(斜面部), 20m(河道部)



(a) 1992年6月7日の雲仙水無川での
ハイエトグラフ



(b) 流量の実測値



(b') 流量と流砂量の計算値

図-7 1992年6月7日発生の小規模土石流を対象
にした大南橋における観測値と計算値の比較

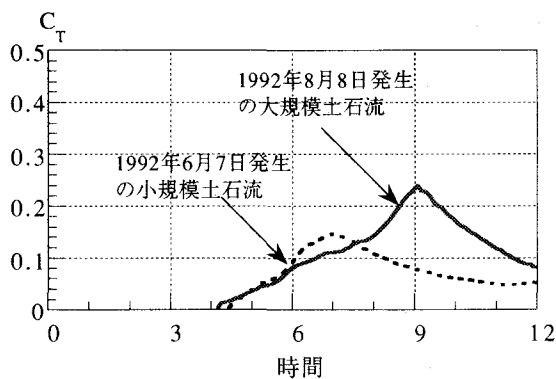
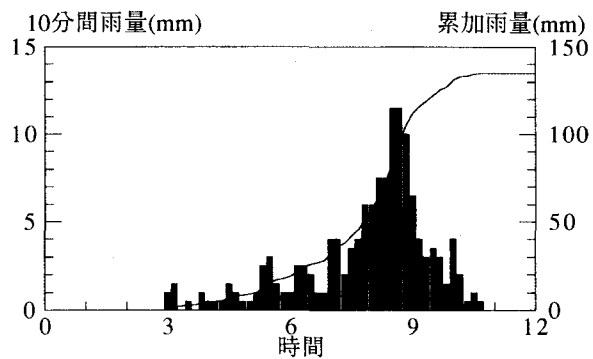
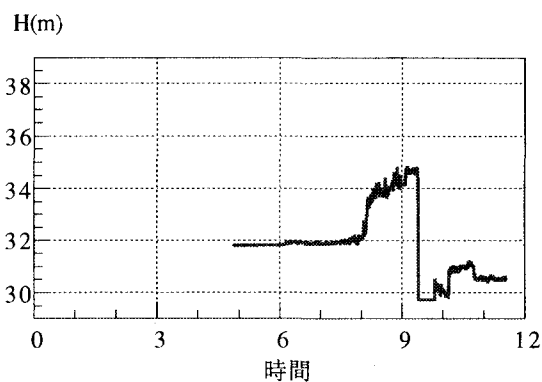


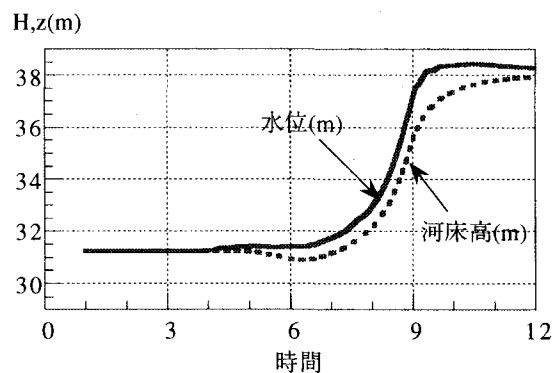
図-9 流砂濃度の計算値



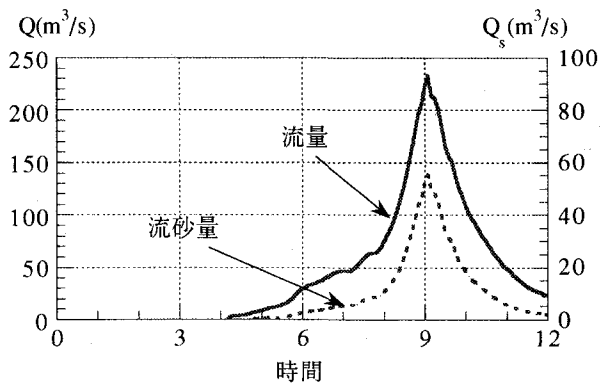
(a) 1992年8月8日の雲仙水無川での
ハイエトグラフ



(b) 水位の実測値



(b') 水位と河床高の計算値



(c) 流量と流砂量の計算値

図-8 1992年8月8日発生の大規模土石流を対象
にした大南橋における観測値と計算値の比較

4.5km², 8.1km²である。A～E河道の河道長はそれぞれ1040m, 1200m, 1440m, 4180m, 8500mである。河道の勾配は0.3°～20°であり、20°以上の勾配の河道は斜面として取り扱った。

(2) 計算条件

差分法としてはマコーマック法を用いた。この差分法では境界での計算ができないため、下流端の境界条件はBOX型差分を用いて流量Q、水深h、河床高zを求めた。また、閾値を0.1mmとし、閾値より小さい水深を0mと置いた。

計算条件は表-2に示す。河道幅Bは、E河道の河口から3100m上流までは実測値を用い、その他の河道では川幅Bとして式(9)を用いた。また、斜面侵食の補正係数 k_c については、本解析が斜面全体を流路とみなしているため、流路侵食実験より得られた値より小さく設定し、 $k_c=0.00114$ とおいた。

5. 計算結果と考察

(1) 1992年6月7日発生の小規模土石流

降雨データは、1992年6月7日0時から24時間の10分間降雨(図-7(a))を用いた。斜面からの流出土砂濃度 C_{in} は0.1を用いた。

図-7(b), (b')は河口から1080m上流にある大南橋の実測流量と計算流量・流砂量を示す。

ピークの流量と到達時刻の計算結果は、それぞれ78.8m³/s, 7時05分である。

一方、ピーク流量と到達時刻の実測値は、それぞれ、94.7m³/s, 6時55分であり計算結果と概ね一致している。

(2) 1992年8月8日発生の大規模土石流

用いた降雨データは、1992年8月8日0時から12時間の10分間降雨(図-8(a))である。斜面からの流出土砂濃度 C_{in} は0.2を用いた。

図-8(b), (b')に大南橋での水位Hの実測値と計算値を示す。また、図-8(c)は流量と流砂量の計算値を示す。

図-8(b)は超音波水位計で測定した実測値である。水位計は6時10分頃から顕著な反応を示し始め、8時7分頃に急激に水位が増加し、9時24分頃にはセンサーが浸水破損した。同図中の不規則な信号はその結果である。ピーク付近では越流氾濫が発生した。雨量のピークに対応して大規模な土石流が流下し、急激な河床上昇に伴い水位を急増させたと推定される⁸⁾。図-8(b')の水位と河床高の計算値は、越流を考慮していないため、実測値より過大な結果になったが、当時の土石流の様子をよく示している。

ピークの流量と到達時刻の計算結果は、それぞれ232.6m³/s, 9時05分であった。

図-9は流砂濃度の計算値を示す。1992年6月7日発生の小規模土石流では平均濃度は0.06であり、ピーク時の濃度は0.15である。流砂濃度の実測値は $C_T=0.06\sim0.13$ であり、概ね一致している。

1992年8月8日発生の大規模土石流での計算濃度は、平均濃度は0.06、ピーク時の濃度は0.20である。流出土砂量の実績値は22万m³であり、計算値27万m³と概ね一致した。

6. おわりに

以上、裸地斜面をもつ山地流域について、土砂と水の流出解析について考察した。

斜面部については河床変動も考慮し、土砂と水の混相流が河道部に流入するものとした。その河床変動については、水路実験を行い侵食速度評価式を実験的に求めて評価した。河道部については、dynamic wave法を用い、流砂量の評価式としては広範な流砂形態をカバーする平野・橋本・多川の式を用いることにより、比較的簡単な方程式系を用いて流出解析を行った。その結果、本研究の流出解析法は、平野ら⁸⁾による現地観測結果を良好に説明できることが分かった。

参考文献

- 1) 高橋保・沢田豊明・里深好文：山地河川における土砂流出の数値計算，京都大学防災研究所年報，第38号B-2，1995。
- 2) 中川一：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会報告，1998。
- 3) 高橋保・中川一・里深好文・鈴木信昭：豪雨時における水系一貫の土砂流出予測に関する研究，河川技術に関する論文集，第5巻，1999。
- 4) 高橋保・井上素行・中川一・里深好文：山岳流域における土砂流出の予測，水工学論文集，第44巻，2000。
- 5) 橋本晴行・平野宗夫：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。
- 6) 平野宗夫・橋本晴行・多川博章：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。
- 7) 笠井美青：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：橋本晴行），2000。
- 8) 平野宗夫・橋本晴行・Kichan PARK・河野通斎・恩田邦彦：雲仙水無川・中尾川における土石流の現地観測と河床変動計算，土木学会論文集，No.635/II-49，1999。

(2002. 9. 30受付)