

2009年7月防府市において発生した土石流の流出土砂量の評価に関する研究

山口大学大学院理工学研究科 正会員 ○永野 博之
 九州大学大学院工学研究院 正会員 橋本 晴行
 中国電力株式会社 正会員 黒田 佳祥
 九州大学大学院工学府 正会員 池松 伸也

1. 目的

2009年7月21日、山口県では早朝から各地で激しい豪雨となり、山口市や防府市を中心に水害、土石流災害が発生した。特に防府市では、多くの山腹斜面で発生した崩壊が土石流化し、大量の土砂が流出した。この災害による山口県内の死者17名のうち14名は防府市に集中しており、土石流災害の甚大さを物語っている。今後の土砂災害対策にあたり、土石流による流出土砂量を評価することが重要となる。本研究は、防府市内の土石流発生溪流を対象とし、現地調査、航空測量データの解析、1次元流動シミュレーションを用いて、発生した流出土砂量を評価するものである。

2. 内容

2009年7月31日～10月14日にかけて真尾・石原地区の土石流発生溪流において現地調査を行い、痕跡水位からピーク流量を推定した。また、現地調査と航空測量データを基に、1次元の流動シミュレーションを行い、流出土砂量を評価した。

2-1. 発生した土石流の概要

図-1に佐波川の流域図を示す。防府市は山口県のほぼ中央部の佐波川の下流域に位置し、土石流は佐波川の支川流域で発生した。図-1に特に被害の大きかった真尾・石原・八幡谷・剣川地区を×印で示す。

7月19日から26日にかけて、暖かく湿った空気が梅雨前線に流れ込み、前線の活動が西日本で活発化した。これに伴い、梅雨前線に近い山口県では21日の明け方から昼過ぎにかけて、非常に激しい豪雨となり、防府市を中心に土石流が多発した。図-2に7月21日の真尾・防府観測点で観測された1時間雨量・総雨量を示す。真尾観測点は土石流が発生した溪流近傍の観測点であり、防府観測点は防府市中心地の観測点である。降雨のピークは7～9時、11～12時の2回あり、21日の総雨量は真尾観測所で266mm、防府観測所で256mmに達した。土石流は2回目のピークである12時前後に



図-1 佐波川流域と被災地区

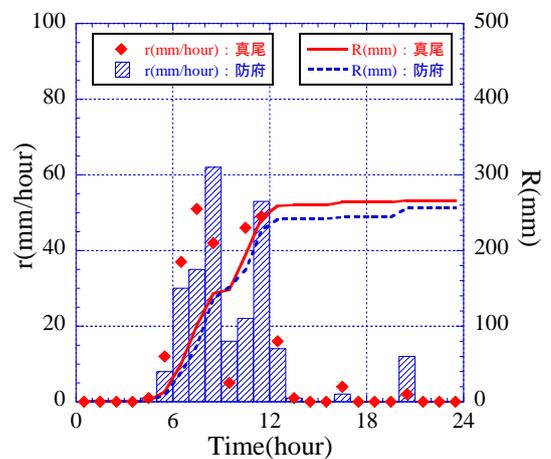


図-2 時間雨量と総雨量の時間変化

多発した。

2-2. 現地調査とピーク流量の推定

表-1に真尾・石原・八幡谷・剣川溪流の概要を示す。石原地区では3溪流において土石流が発生した。ただし、崩壊土砂量の評価は崩壊が土石流化し、下流端まで流下した崩壊部のみを対象とした。

表-1 真尾・石原・八幡谷・剣川溪流の概要

溪流名	真尾	石原A	石原B	石原C	八幡谷	剣川
流域面積	1.1km ²	0.3km ²	0.4km ²	0.1km ²	1.4km ²	2.0km ²
溪流延長	1,900m	1,100m	1,600m	800m	2,300m	2,600m
崩壊土砂量	2,300m ³	2,500m ³	1,600m ³	1,300m ³	5,000m ³	40,200m ³
平均勾配	11°	11°	11°	10°	7.5°	5.5°
堰堤の有無	治山堰堤 1基※破損	無	無	無	透過型砂防 堰堤2基	不透過型砂 防堰堤2基

表-2 痕跡水位から推定されるピーク流量と流速

溪流名	真尾	石原B
断面積 (m ²)	20	42
水深 (m)	2.2	3.4
勾配 (°)	13	8.0
流量 (m ³ /s)	171	365
流速 (m/s)	8.6	8.6

(1) 土石流発生溪流における断面調査

真尾地区における土石流流下河道の縦断図¹⁾と流下幅を図-3に示す。真尾地区では真尾川の支川の上田南川で土石流が発生した。x_d:真尾川の合流点からの距離, x: 計算上流端からの距離である。流域内に砂防施設はなく、治山堰堤が1基整備されていた。規模の大きい崩壊は崩壊B、Cである。崩壊B、Cで発生した土石流はNo.3で合流しており、合流部付近の河床は侵食されて露岩していた。No.3~No.8までは露岩箇所が多く、侵食傾向にあった。No.8~No.14までは侵食後に堆積が起きていることが確認された。No.11~No.12に整備されていた治山堰堤は、袖部を残して破壊されていた。No.11より下流では20mを超える幅で土石流が流下した形跡が確認された。また、No.12では侵食された右岸付近に巨礫や流木が集中的に堆積していた。

(2) 痕跡水位からのピーク流量の推定

表-2に痕跡水位から推定したピーク流量と流速を示す。真尾・石原地区におけるピーク時の痕跡水位と平均粒径の調査結果から流速係数をφ=4と推定し、調査断面において等流条件を仮定して、ピーク流量と流速を算出した。古川ら²⁾は真尾地区において流量が212.9~287.6m³/s、石原地区において14~15m/sと報告しており、今回の推定値と概ね一致していた。

2-3. 土石流の1次元流動シミュレーション

(1) 基礎式

表-3に基礎式の一覧を示す。流れを長方形断面の1次元漸変流とし、開水路非定常流の基礎式を用いた。

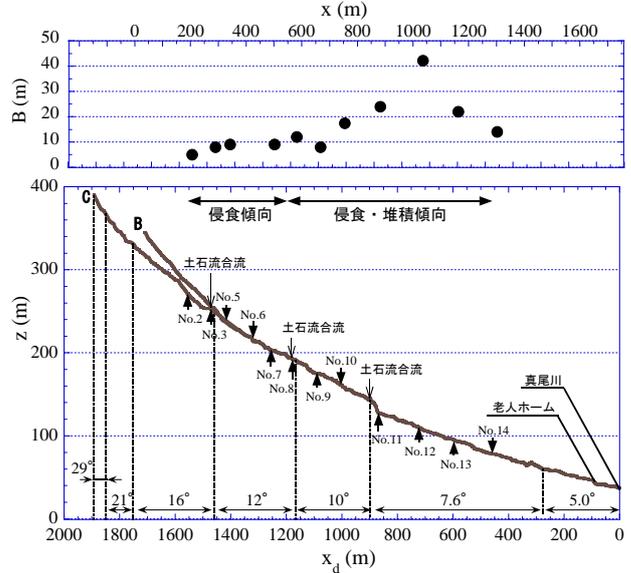


図-3 土石流流下河道の縦断図¹⁾と流下幅（真尾）

表-3 基礎式の一覧

<ul style="list-style-type: none"> 運動方程式 	t : 時間
$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(vQ)}{\partial x} = -gBh \frac{\partial H}{\partial x} - (B+2h) \frac{v^2}{\phi^2}$	Q : 流量
<ul style="list-style-type: none"> 全相の連続式 	v : 断面平均流速
$\frac{\partial(Bh)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = hi_s + Bi_b + q_{tin}$	θ : 河床勾配
<ul style="list-style-type: none"> 固相の連続式 	g : 重力加速度
$\frac{\partial(CBh)}{\partial t} + \frac{\partial(C_T Q)}{\partial x} = C_s hi_s + C_s Bi_b + q_{sin}$	B : 流路幅
<ul style="list-style-type: none"> 河床の変動式 	h : 水深
$\frac{\partial(z \cos \theta)}{\partial t} + i_b = 0$	H : 水位
<ul style="list-style-type: none"> 側岸の変動式 	φ : 流速係数
$\frac{\partial B}{\partial t} - i_s = 0$	i_s : 側岸侵食速度
<ul style="list-style-type: none"> 河床の侵食速度 	i_b : 河床侵食速度
$C_T < C_{T\infty} : i_b = k_b (C_{T\infty} - C_T)^p \cdot v \text{ (侵食)}$	q _{tin} : 側方流入流量
$C_T \geq C_{T\infty} : i_b = -k_b (C_T - C_{T\infty})^p \cdot v \text{ (堆積)}$	C : 断面平均濃度
<ul style="list-style-type: none"> 側岸の侵食速度 	C _T : 流砂濃度
$i_s = k_s \cdot v$	C* : 最密充填濃度
<ul style="list-style-type: none"> 平衡流砂濃度 	q _{sin} : 側方流入土砂量
$C_{T\infty} \approx \frac{Bq_{s\infty}}{Q}$	z : 河床高
	C _{T∞} : 平衡流砂濃度
	q _{s∞} : 単位幅当たり平衡流砂量

表-4 各溪流における計算区間と崩壊条件

溪流名	真尾	石原A	石原B	石原C	八幡谷
計算区間	本川: 1,450m 支川: 100m	本川: 750m 支川: 425m	1,000m	700m	本川 : 1,100m 支川1: 450m 支川2: 175m
崩壊土砂量 V_s	本川: 1,000m ³ 支川: 1,300m ³	本川: 1,850m ³ 支川: 600m ³	1,650m ³	1,300m ³	本川 : 3,150m ³ 支川1: 400m ³ 支川2: 1,400m ³
崩壊流出土砂濃度 C_0	0.2, 0.4				
崩壊継続時間 T	30sec, 60sec				

ただし、濃度分布は一様と仮定し、 $C=C_T$ とした。侵食・堆積速度は、高岡³⁾の提案する侵食・堆積速度式を用いた。河床の侵食・堆積の判定は平衡流砂量式から求められる平衡流砂濃度と流砂濃度の大小により決定し、 $k_b=0.01$, $k_s=0.01$, $p=0.7$ とした。

(2) 崩壊条件

表-4 に対象溪流の計算区間と崩壊条件を示す。上流端では崩壊を考慮した境界条件（流量・流砂濃度・水深）を与え、崩壊モデルは崩壊土砂量 V_s が、崩壊継続時間 T 中に、崩壊流出土砂濃度 C_0 で土石流化するとした。崩壊土砂量 V_s は航空写真から算定した。崩壊継続時間 T や崩壊流出土砂濃度 C_0 の評価は困難なため、各溪流において4パターンの崩壊条件を設定した。

(3) 計算条件

表-5 に計算条件を示す。初期河床高はLPデータより作成した。初期の流路幅は笠井⁴⁾の提案する式を現地河道に適合するように修正したものを用いた。平均粒径・流速係数は現地調査より得た値を用いた。河道への横流入量は合理式より算定した。

(4) 計算結果

図-4 に真尾・石原Bにおける上流端・下流端の流量ハイドログラフを示す。ただし、真尾・石原Bともに $C_0=0.2$, $T=30\text{sec}$ のケースである。土石流の流量はどの溪流においても上流域では漸次増加したが、下流域では崩壊条件次第で減少する溪流もあった。現地調査で推定した地点での計算のピーク流量と流速は、真尾で流量 $188\text{m}^3/\text{s}$, 流速 8.2m/s , 石原Bで流量 $270\text{m}^3/\text{s}$, 流速 7.1m/s であり、現地調査結果と概ね一致した。

図-5 に真尾における土石流流下後の流路幅と河床高の縦断方向変化を示す。現地調査の結果、 $x<580\text{m}$ では侵食傾向、 $x>580\text{m}$ では侵食後に堆積が生じていた。計算結果では、上流域での侵食は過小評価となったものの下流域での堆積は現地状況が再現された。流路幅については、 $x<900\text{m}$ では計算値が現地調査結果と概ね一

表-5 計算条件

初期流路幅	$B=8.04 \times A^{0.37}$
時間刻み幅	$\Delta t=0.1\text{sec}$
空間刻み幅	$\Delta x=25\text{m}$
最密充填濃度	$C^*=0.65$
平均粒径	$d=0.3\text{m}$
流速係数	$\phi=4$
河床堆積層厚	2m

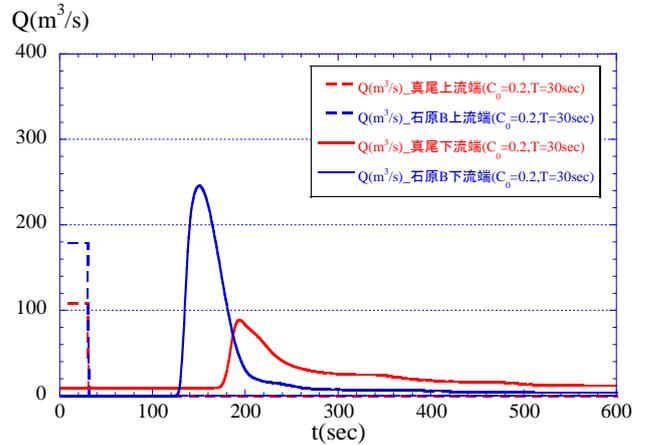


図-4 真尾・石原B溪流の流量ハイドログラフ

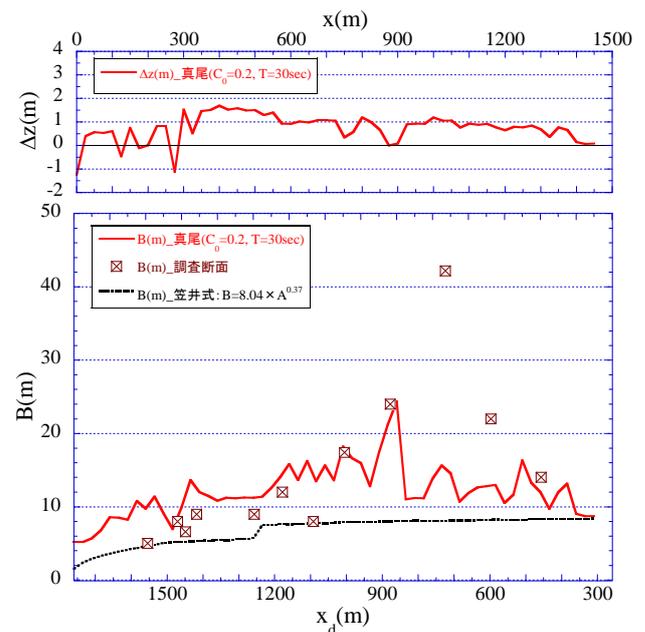


図-5 真尾における土石流流下後の縦断方向変化

表-6 各溪流における土砂収支

溪流名 崩壊条件	真尾 ($C_0=0.2, T=30\text{sec}$)	石原A ($C_0=0.2, T=30\text{sec}$)	石原B ($C_0=0.2, T=30\text{sec}$)	石原C ($C_0=0.2, T=60\text{sec}$)	八幡谷 ($C_0=0.2, T=60\text{sec}$)
崩壊土砂量 (m^3)	2,300	2,450	1,650	1,300	4,950
側岸侵食土砂量 (m^3)	13,300	16,450	16,200	8,900	23,000
河床侵食土砂量 (m^3)	-11,200	-6,850	-9,050	-4,650	-19,950
流出土砂量 (m^3)	4,100	11,400	9,050	5,500	6,800

致した。表-6 に各溪流における土砂収支を示す。ただし、4 パターンの崩壊条件のうち、現地の河道状況と比較し、最も適当と考えられるものを採用した。表-6 において、河床侵食土砂量は全溪流において負値となり、堆積が卓越する結果となった。また側岸侵食により生産される土砂量が崩壊土砂量より大きく、流出土砂量の結果に大きな影響を及ぼすことがわかった。

2-4. 土石流の比流砂量とダムの比堆砂量との比較

図-6 は、前項により得た土石流の比流砂量と山口県・九州北部に位置するダムの比堆砂量を比較したものである。ただし、剣川については、アジア航測㈱が航空測量データより算定した流出土砂量を用いた。ダムの比堆砂量 $q_{sd}(\text{m}^3/\text{km}^2/\text{year})$ は、ダム内に流送されてきた土砂量を年平均化し流域面積 $A(\text{km}^2)$ で除したものであり、比流砂量 $q_{sf}(\text{m}^3/\text{km}^2/\text{event})$ は 1 回の土石流により流出した土砂量を流域面積 $A(\text{km}^2)$ で除したものである。計算により得た土石流の比流砂量は、ダムの比堆砂量に比べて大きく、単位流域面積で見ると、年間のダム堆砂量を上回る土砂が 1 度の土石流により流出したことがわかる。また、時間スケールを 1 時間に揃え、土石流発生溪流相当の流域面積で比較すると、計算結果との差は概ね $10^3 \sim 10^4$ となる。比堆砂量は、掃流砂、浮遊砂、ウォッシュロードの移動形態で土砂が貯水池に流入した結果であり、計算結果との差は、土砂移動形態の違いを表すと推測される。また、芦田ら⁵⁾によれば、ダムの比堆砂量は $q_{sd} \propto A^{-0.7}$ の関係にあり、図-6 から、今回発生した土石流の比流砂量についても同様の関係が成り立つと推測される。

3. 結論

本研究では、2009 年 7 月 21 日に防府市で発生した土石流を対象に流出土砂量を評価した。計算から得た流出土砂量をダムの堆砂量と単位流域面積当たりで比較した結果、1 度の土石流の流出土砂量の方が大きくなる結果を得た。また、土石流の比流砂量が流域面積の関数で表されることが示唆された。

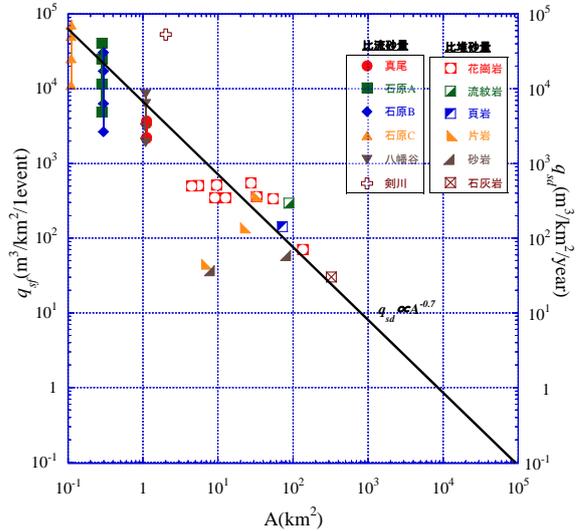


図-6 比流砂量と比堆砂量の比較

謝辞：本研究に際して、山口県河川課、国土交通省山口河川国道事務所より資料をいただいた。また、アジア航測㈱の小川紀一郎氏には航空測量結果について貴重な資料をいただいた。シミュレーションは、名古屋大学高岡広樹氏の助力を受けた。また本研究は、一部、科学研究費(代表、山口大学 羽田野袈裟義教授)の補助のもとに実施した。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) アジア航測㈱：平成 21 年 7 月中国・九州北部豪雨災害，2009。
- 2) 古川浩平，海堀正博，久保田哲也，地頭園隆，権田豊，杉原成満，林真一郎，池田暁彦，荒木義則，柏原佳明：2009 年 7 月 21 日山口県防府市での土砂災害緊急調査報告，砂防学会誌，Vol. 62, No. 3, p. 62～73, 2009。
- 3) 高岡広樹：高濃度流れによる河道侵食と土砂流出に関する研究，九州大学博士論文，2004。
- 4) 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，九州大学 橋本晴行)。
- 5) 芦田和男，奥村武信：ダム堆砂に関する研究，京都大学防災研究所年報，第 17 号 B, 1974。