

2009年7月防府市真尾・石原地区において発生した土石流の流動特性

黒田佳祥¹・橋本晴行²・永野博之³・池松伸也¹・宮崎 遼¹・三好朋宏⁴

¹九州大学大学院工学部・²九州大学大学院工学研究院・³八千代エンジニアリング(株)・⁴九州大学工学部

1. まえがき

2009年7月21日、山口県内において活発な梅雨前線の影響で大量の雨が降り、防府市を中心に土石流が多発した。中でも真尾地区では老人ホームに土石流が直撃し、多くの入居者が亡くなられた。土石流が発生した地域は花崗岩地帯であり、従来から土砂災害の多い地域でもある。今後の土砂災害による被害を軽減するためにも今回起きた土石流の流動特性を把握することは重要である。

本研究は、真尾・石原地区を対象として、河道調査をもとに土石流の1次元流動シミュレーションを行い、土石流の流動特性を明らかにしたものである。

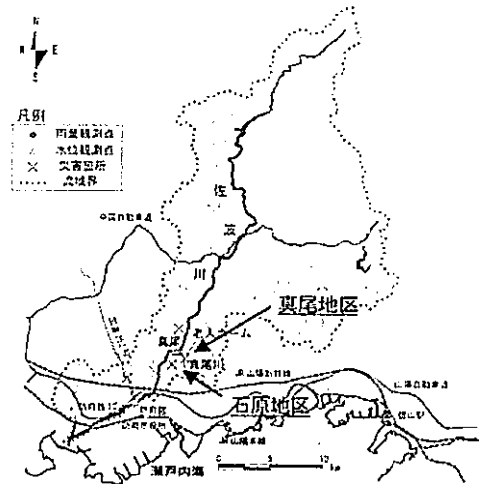


図-1 佐波川流域図

2. 災害の概要

図-1に防府市の佐波川流域を示す。今回特に被害の大きかった地区を×で示している。

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非常に活発化した。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、防府市を中心に土砂災害が多発した。図-2に、被災地に近い地点での観測降雨・水位の時間変化の1例を示している。土砂災害が多発した防府市や真尾地区の降雨は、7～9時、11～12時の2回降雨ピークが確認され、21日の総雨量は266～275mmに達した。今回の降雨は6時～12時の6時間に降雨が集中した短時間降雨であった。土砂災害は2回目のピークである12時前後に多発した。

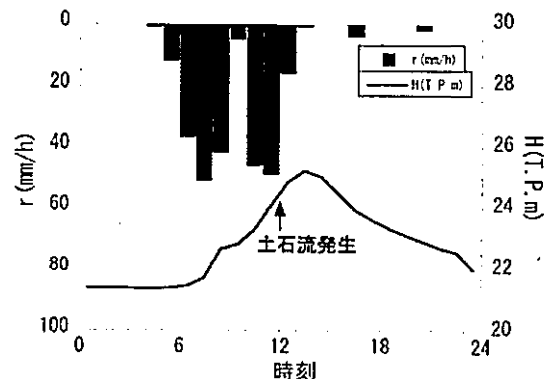


図-2 真尾観測点での降雨・水位の時間変化

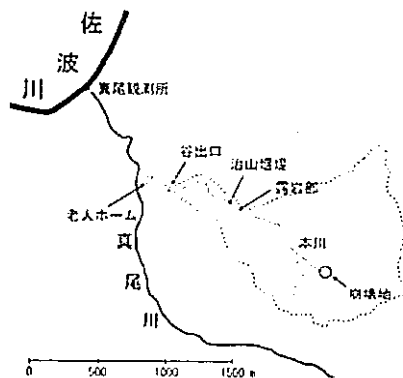


図-3 真尾地区

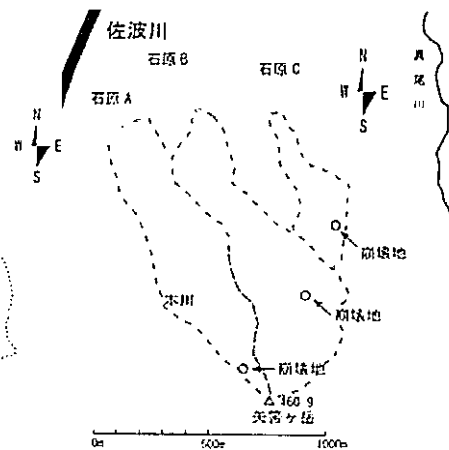


図-4 石原地区

図-3に真尾地区の土石流流下河道（上田南川）を、図-4に石原地区の土石流流下河道をそれぞれ示す。真尾地区では、4箇所崩壊地から発生・流下した土石流が下流の老人ホームを直撃した。石原地区では、3本の溪流から多量の巨石や土砂が下流の集落に流出し、広範囲にわたって氾濫していた。両地区での死者数は9名にものぼった。

3. 土石流の1次元流動シミュレーション

3.1 基礎式^{1), 2)}

土石流を1次元の非定常流として取り扱くと、基礎式は以下のようになる。

- ・運動方程式：
$$\frac{\partial(\rho_i Q)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_i v Q)}{\partial x} = -\frac{1}{2} g \cos \theta \frac{\partial(\rho_i B h^2)}{\partial x} + \rho_i g B h \sin \theta - \rho_i (B + 2h) \frac{v^2}{\phi^2}$$
- ・全相の連続式：
$$\frac{\partial(Bh)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = h i_s + B i_b + q_{in}$$
- ・固相の連続式：
$$\frac{\partial(CBh)}{\partial t} + \frac{\partial(CQ)}{\partial x} = C_s h i_s + C_s B i_b$$
- ・河床侵食速度式：
$$i_b = -\frac{\partial z}{\partial t}$$
 ・側岸侵食速度式：
$$i_s = \frac{\partial B}{\partial t}$$

ここに、 Q ：全流量、 h ：水深、 z ：基準水平面から垂直上向きに測った河床高、 B ：流路幅、 θ ：河床勾配、 C ：流砂濃度、 C_s ：最密充填濃度、 ρ_i ：流れの密度、 v ：断面平均流速である。濃度分布は一様と仮定しているため、断面平均濃度は流砂濃度に等しい。また、 q_{in} は雨水による側方からの流入流量であり、合理式より求めた。ここに流入土砂は無視した。

河床、側岸の侵食速度 i_b 、 i_s は高岡により以下のように与えられる。

- ・河床侵食速度： $C_{T_{eq}} > C_T$ のとき $i_b = k_b (C_{T_{eq}} - C_T)^p \cdot v$ (侵食)
- $C_{T_{eq}} < C_T$ のとき $i_b = -k_b (C_T - C_{T_{eq}})^p \cdot v$ (堆積)
- ・側岸侵食速度： $i_s = k_s \cdot v$ ただし、 $k_b = 0.01$ 、 $p = 0.7$ 、 $k_s = 0.01$

ここに、河床の変動は広範な流砂形態に適用可能な流砂量式³⁾より求められた平衡流砂濃度 $C_{T_{eq}}$ から決定されるものとする。また、側岸は直立を保ったまま水平方向に侵食され、侵食土砂は即座に流れに取り込まれるとする。

3.2 計算条件

計算における諸値を表-1に示す。粒径は均一と仮定し、現地調査の結果から平均粒径 0.3m と仮定する。また、流速係数の評価は、実測の断面から、橋本の提案する高濃度流の挙動を規定する無次元量を求め、水路実験における無次元量と流速係数との関係図から流速係数として $\phi=5$ を得る。次に境界条件として、上流端において流量、流砂濃度、水深を与える。ただし、水深は等流水深として与える。今回の土石流は全て崩壊型土石流であるため、入力として静止状態の土量を与え、崩壊流出土砂濃度と崩壊継続時間の条件から土石流に変換し、上流端において流量を与える。表-2に計算対象区間と崩壊土量の入力条件を示す。

表-1 計算に用いる諸値

初期河床高	25000分の1の地形図
初期流路幅	笠井の式 $B = 5.36 \times A^{0.37}$
時間刻み幅	$\Delta t = 0.25$ 秒
空間刻み幅	$\Delta x = 25$ m
最密充填濃度	$C_s = 0.7$
平均粒径	$d = 0.3$ m
流速係数	$\phi = 5$
河床堆積層厚	2m

表-2 計算対象区間と崩壊土量の入力条件

	計算対象区間延長	崩壊土量 ^(4), 5)	崩壊流出土砂濃度	崩壊継続時間
真尾	本川1450m	本川1500m ³	0.4	60秒
石原A	本川1175m	本川1500m ³	0.4	60秒
石原B	本川1300m	本川1500m ³	0.4	60秒
石原C	本川750m	本川500m ³	0.4	60秒

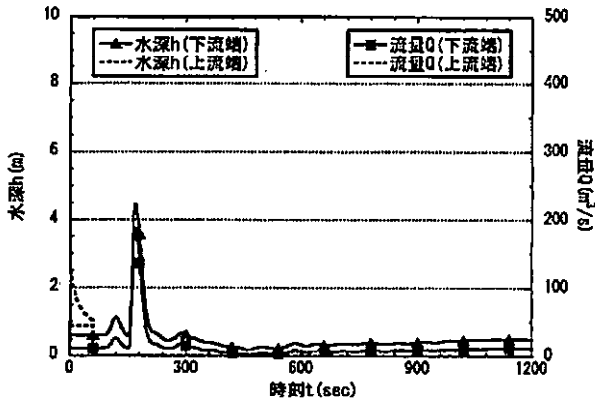


図-4(a) 下流端における水深と流量の時間変化 (真尾)

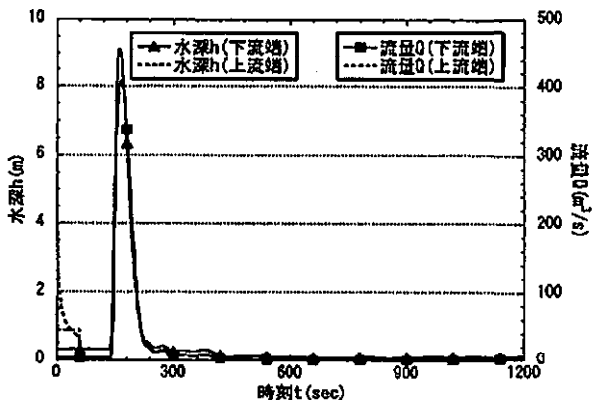


図-5(a) 下流端における水深と流量の時間変化 (石原B)

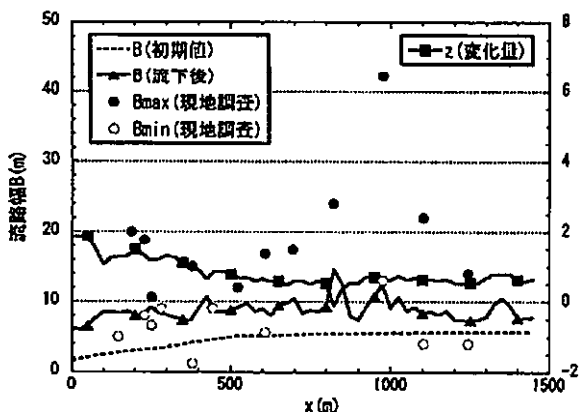


図-4(b) 土石流流下後の流路幅と河床高の縦断方向変化 (真尾)

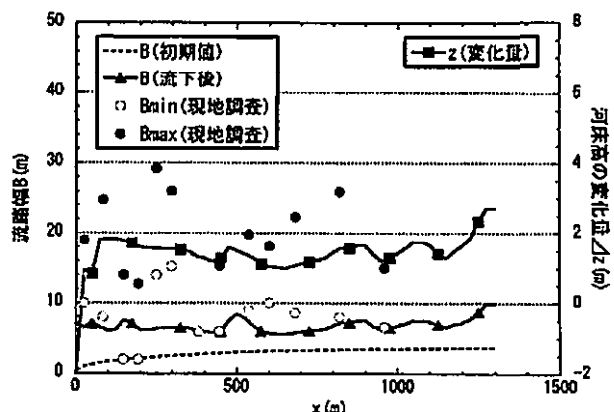


図-5(b) 土石流流下後の流路幅と河床高の縦断方向変化 (石原B)

3.3 計算結果と考察

(a) 真尾地区

下流端における水深と流量の時間変化を図-4(a)に示す。下流端でのピーク流量は186m³/sであり、その時の流速は6.5m/s、流砂濃度は0.22であった。また、現地調査の結果から求められるピーク流量がx=380m地点で249m³/sであるのに対して、計算ではx=375m地点で110m³/sであった。また、砂防学会⁵⁾による調査結果からx=450m地点でのピーク流量が213m³/s~288m³/sであるのに対し、計算では同地点で131m³/sであった。本計算によると、土石流の流量は流下していくにつれ拡大していき、最大で235m³/sになった。これより土石流が河道を侵食しながら大きな規模に拡大していった様子が分かる。次に、土石流流下後の流路幅と河床高の縦断方向変化を図-4(b)に示す。河床は全体的に堆積傾向で、一部局所的な侵食が見られる。流路幅の広がり方は概ね現地調査の結果と一致している。また、河床の堆積量が少ない地点ほど流路幅の広がりが大きくなる事が分かる。

(b) 石原地区

図-5(a), (b)には石原Bについての計算結果を示す。下流端における水深と流量の時間変化を図-5(a)に示す。下流端でのピーク流量は $400\text{m}^3/\text{s}$ であり、その時の流速は 8.1m/s 、流砂濃度は 0.36 であった。このことから、高濃度の土石流が一気に下流まで到達したことが分かる。また、土石流流下後の流路幅と河床高の縦断方向変化を図-5(b)に示す。これより、河床は全体的に堆積傾向で特に下流端での堆積が非常に多いことが分かる。ここで興味深いのは先ほどの真尾の計算結果とは違い、河床の堆積量の変化と流路幅の広がり方が同じ傾向を示していることである。この傾向は石原A、石原Cの計算結果からも確認できる。

(c) 土砂収支

表-3に各土石流での土砂収支を示す。ただし、河床は全て堆積であるので数値に一が付いている。砂防学会⁵⁾の調査結果と比較すると、真尾地区においては流出土量を少なく評価しているのに対し、石原Bでの流出土量は比較的近い値が得られていることが確認できる。石原地区と真尾地区を比較すると、石原地区では入力した崩壊土量に対して大きな流出土量を得られていることが分かる。この違いは初期条件として与えている流域面積の違いによるものと考えられる。真尾の流域面積が 1.0km^2 であるのに対し、石原地区ではA,B,Cの流域面積がそれぞれ $0.30, 0.37, 0.1\text{km}^2$ とかなり小さい。本計算では流域面積が流路幅や雨水の横流入量に直接関係していることから、その違いによって土砂収支に違いが出ているのではないかと考えられる。

表-3 各土石流での土砂収支

	崩壊土量(m^3)	側岸侵食土量(m^3)	河床侵食土量(m^3)	流出土量(m^3)
真尾	1500	8200	-7400	2900
石原A	1500	27000	-11000	17000
石原B	1500	20000	-9900	11100
石原C	500	3700	-2100	1900

4. あとがき

本研究では、真尾・石原地区で発生した土石流に関する1次元流動シミュレーションを行った。その結果、真尾地区の土石流は石原地区のそれに比べて流路幅、河床高の縦断変化や流出土量の面において異なることが確認された。今後は初期条件や崩壊地での崩壊の入力条件について妥当性を検討していく必要がある。

謝辞：本研究に際して、国土交通省山口河川国道事務所より水位、雨量データを提供いただいた。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。流動シミュレーションについては、名古屋大学の高岡広樹氏に助力を受けた。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) T. Takaoka, H. Hashimoto and M. Hikida: Simulation of landslide-induced debris flow- The Atsumari debris flow disaster in Minamata City, Japan, Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, Proceedings of Fourth International Conference, September 10-13, pp.353~363, 2007. 2) 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. 3) 橋本晴行, 朴埼瑛, 池松伸也, 田崎信忠: 急勾配移動床水路における様々の流砂形態に対する統合的流砂量式, 水工学論文集, 第47巻, 2003. 4) アジア航測(株): 平成21年7月中国・九州北部豪雨災害, 2009. 5) 古川浩平他9名: 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.