

「山口・防府豪雨災害に関する報告会」
平成21年11月2日, 土木会館 講堂

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

九州大学大学院工学研究院
八千代エンジニアリング(株)
九州大学大学院工学府

九州大学工学部

橋本晴行
永野博之*
池松伸也
宮崎 遼
黒田佳祥
三好朋宏

(*九州大学大学院社会人ドクター)

現地調査

7月31日	予備調査
8月10, 11日	真尾地区の土石流流下河道調査
9月4日~7日	石原地区の土石流流下河道調査
10月14日	石原地区の土石流流下河道調査

土砂水理学

ピーク流量の推定, 再現シミュレーション

土石流の(流動・堆積過程の)実態解明



被災した真尾地区の老人ホーム

石原地区の土石流



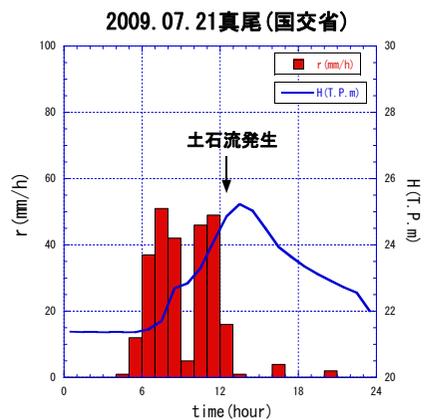
(2009.07.22アジア航測(株)撮影)



(C) 国際航業株式会社・株式会社バスコ

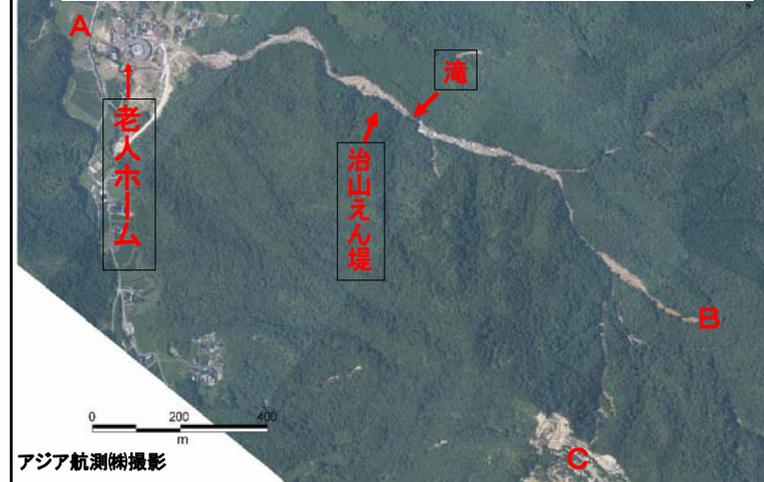
(2009.07.22国際航業(株)・(株)バスコ撮影)

国土交通省真尾観測点での時間雨量と佐波川水位



「土石流発生前には洪水流が発生していた」

真尾地区の老人ホームを直撃した土石流の流下河道



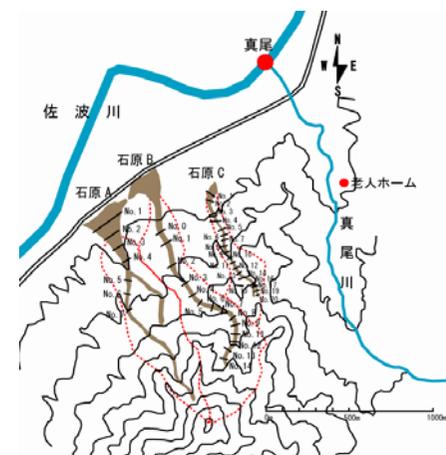
「土石流は崩壊により引き起こされたものである」

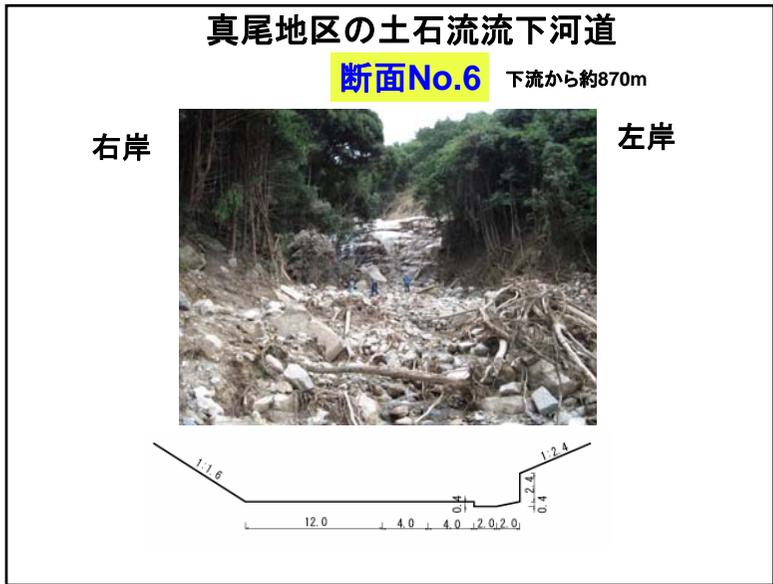
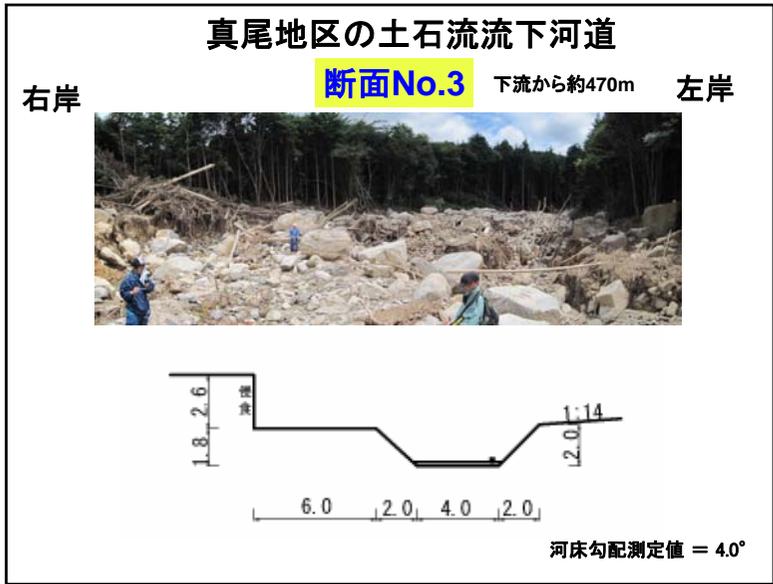
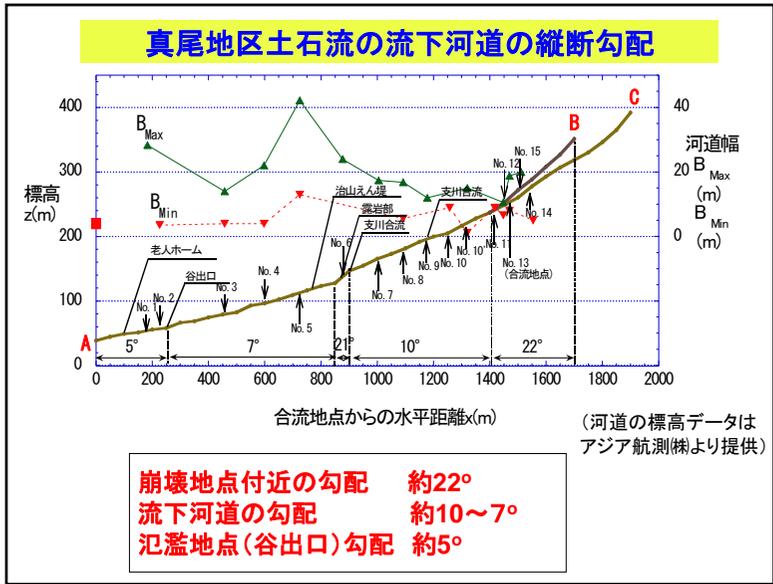
真尾地区の土石流流下河道



流域面積: 約1km², 河道区間距離(A-B): 約1,700m

石原地区の土石流流下河道





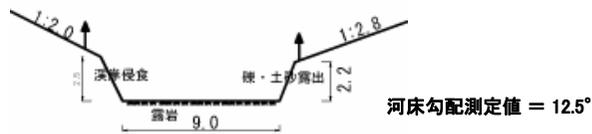
真尾地区の土石流流下河道

断面No.11 下流から約1420m

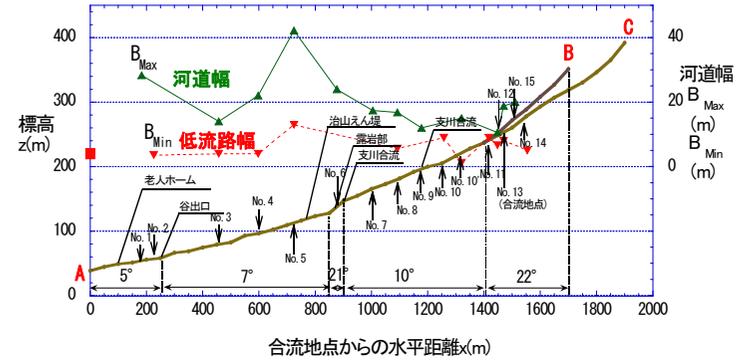
右岸



左岸



真尾地区土石流の流下河道の河道幅



溪流の河道幅は、土石流流下後、約15~40mと拡大した。

土石流の流況を支配する無次元パラメータの導入

橋本・平野(1995), Hashimoto and Hirano(1997), 橋本(2001)

土石流の運動方程式

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_t} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho_t} \left(\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} \right)$$

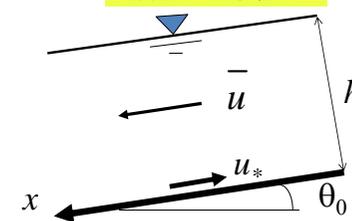
$$\tau_{zx} = K_{zx} \sigma d^2 F(C) \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right)^2 \quad \text{: 粒子間応力}$$

length scale=L, velocity scale=Uとおくと

$$\frac{\text{慣性項}}{\text{粒子間応力項}} = \frac{U^2/L}{(\sigma/\rho_t)d^2 F(C)U^2/L^3} = \left(\frac{L}{d} \right)^2 \frac{\rho_t}{\sigma F(C)}$$

$$\text{無次元パラメータ: } N_L \equiv \frac{L}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}}$$

断面平均流速

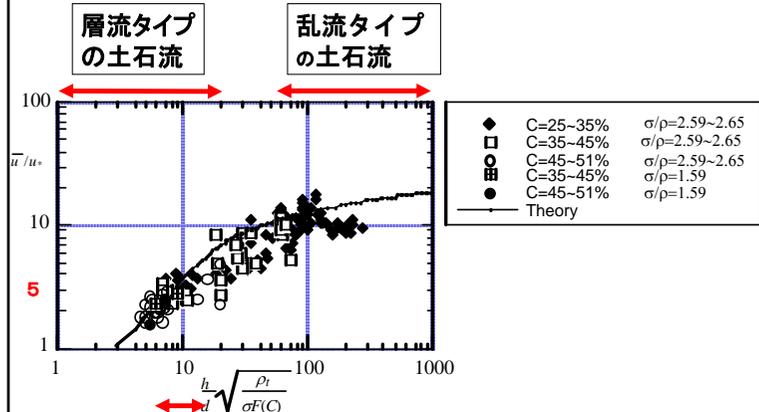


Length scale $L = h$

Non-dimensional parameter $N_h = \frac{h}{d} \sqrt{\frac{\rho_t}{\sigma F(C)}}$

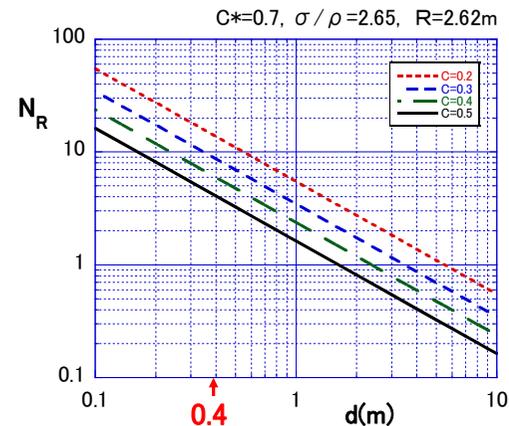
断面平均流速 $\frac{\bar{u}}{u_*} = f(N_h)$

流速係数と無次元パラメータとの関係



「 $N_h=10$ 前後であり(後述), 土石流は層流タイプ(石礫型)であった」

無次元パラメータと土砂粒径との関係



代表粒径 $d=0.4m$ と仮定すると, $N_R \approx 10$ 前後となる.

(R =径深であり, 広い長方形断面河道の場合には, $R \approx h$ (水深)と近似できる. 従って $N_R \approx N_h$)

痕跡水位を用いたピーク流量の推定

高岡ら(2004, 2006)

流速係数 $\varphi = 5$

流量 $Q = A\varphi\sqrt{gR\sin\theta}$

・真尾地区 河道断面No. 10, 11

河床勾配 $\theta = 10^\circ, 15^\circ$

断面平均流速 $v=9\sim10m/s$

流量 $Q=250\sim240m^3/s$

・石原地区A 河道断面No. 6

$\theta = 10^\circ$

$v=10.9m/s, Q=642m^3/s$

・石原地区B 河道断面No. 4

$\theta = 8.7^\circ$

$v=10.4m/s, Q=648m^3/s$

・石原地区C 河道断面No. 9

$\theta = 11^\circ$

$v=8.8m/s, Q=245m^3/s$

「石原地区溪流A, Bの流量規模は真尾地区より大きかった」

真尾地区土石流の1次元河床変動 シミュレーションに基づく評価

高岡(2004), Takaoka et al. (2007)

計算条件 Case 1

崩壊流出土量=5,000m³, 崩壊継続時間=60秒
 流出土砂濃度=0.4, 流速係数=5
 河道の代表粒径=0.4m 崩壊流出流量=145m³/s

計算結果

・真尾地区河道断面No. 10

$v=10.1\text{m/s}$, $Q=225\text{m}^3/\text{s}$, $h=3.5\text{m}$, $C=0.46$

・谷の出口

$v=5.83\text{m/s}$, $Q=104\text{m}^3/\text{s}$, $h=2.7\text{m}$, $C=0.23$

計算条件 Case 2

崩壊流出土量=5,000m³, 崩壊継続時間=30秒
 流出土砂濃度=0.5, 流速係数=5
 河道の代表粒径=0.4m 崩壊流出流量=230m³/s

計算結果

・真尾地区河道断面No. 10

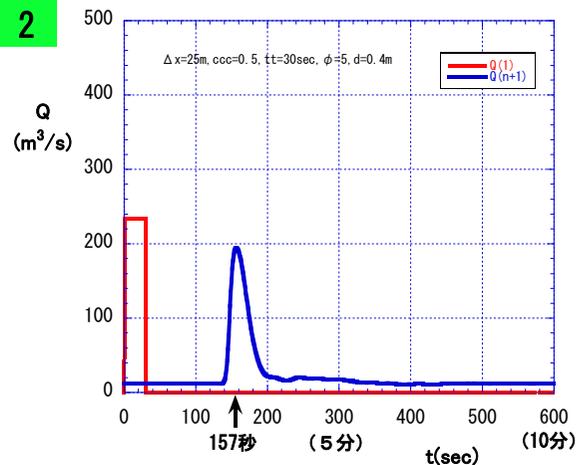
$v=10.1\text{m/s}$, $Q=376\text{m}^3/\text{s}$, $h=7.9\text{m}$, $C=0.59$

・谷の出口

$v=7.23\text{m/s}$, $Q=195\text{m}^3/\text{s}$, $h=4.2\text{m}$, $C=0.33$

谷出口における土石流の流出ハイドログラフ

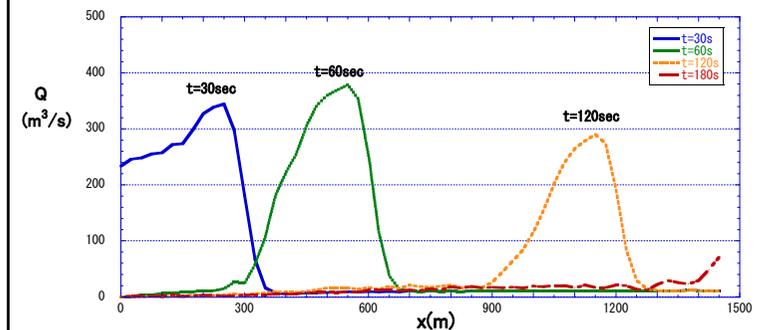
Case 2



「真尾地区土石流の到達時間は157秒」

土石流の流量波形

Case 2



「流下に伴い始めに成長し、その後減衰した土石流の流量」

土砂収支

Case 2

崩壊流出土量 = 5,000m³
側岸侵食量 = 4,600m³
河床堆砂量 = 3,700m³
流出土砂量 = 4,900m³

上記の結果は計算条件 (Case 2) の仮定のもとでの評価であり、
詳細はさらに修正していく必要がある。

強烈な土石流の破壊力



土石流の破壊力の評価

橋本ら(1997), 橋本(2001)

$$D_{99} = \bar{D} + \sigma_i Z_{99} = \bar{D}(1 + C_v Z_{99})$$

$$\bar{D} = \frac{\rho_t v^2 A C_D}{2}, \bar{D}_w = \frac{\rho_w v^2 A C_{Dw}}{2}$$

$$\frac{\bar{D}}{D_w} = \frac{\rho_t}{\rho_w} \frac{C_D}{C_{Dw}}, \frac{C_D}{C_{Dw}} = f(N_o)$$

$$\frac{D_{99}}{D_w} = \frac{\rho_t}{\rho_w} \frac{C_D}{C_{Dw}} (1 + C_v Z_{99})$$

$$\frac{D_{99}}{D_w} = 1.54 \times 3 \times (1 + 0.3 \times 2.33) = 7.8$$

「土石流の破壊力は水流の流体力の少なくとも約8倍であった」

前のスライドにおける記号の説明

D_{99}	変動量(流体力)の非超過確率99%を満たす流体力(破壊力)
\bar{D}	土石流の流体力(破壊力)の平均値
\bar{D}_w	水流の流体力の平均値
ρ_t, ρ_w	土石流の密度, 水の密度
A	流体が作用する物体の遮蔽面積
C_D, C_{Dw}	土石流の抗力係数, 水流の抗力係数
σ_i, C_v	土石流の流体力の標準偏差, 変動係数
Z_i	標準偏差により正規化された流体力の変動成分
Z_{99}	変動量(流体力)の非超過確率99%となる Z_i の値
N_o	長さスケールとして対象物体のスケールを選らんだ場合の無次元パラメータ

結 論

1. 土石流発生時には先行的に洪水流が発生していたものと推測される。
2. 真尾地区の土石流は崩壊が引き金となり発生し、途中、河床、溪岸を侵食しながら発達したが、同時にかなりの土砂を河道に堆積させた。その結果、土石流の流出規模は比較的減少した。
3. ピーク流量は、真尾地区の上流で $225\text{m}^3/\text{s}$ 、谷の出口で $104\text{m}^3/\text{s}$ 。流動深はそれぞれ3.5m、2.7mと推測された。石原地区は、それ以上の流出規模であったと推測される。
4. 土石流の到達時間は2分30秒程度で、発生してからでは逃げる時間的余裕はない。事前避難をいかに実現するかが最重要課題である。
5. 土石流の破壊力は水流の流体力の少なくとも約8倍である。

謝 辞

国土交通省山口河川国道事務所には水位、雨量データの提供を受けた。
また、アジア航測㈱の小川紀一朗氏には航空測量結果について貴重な情報提供を受けた。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,
<http://www.aiiko.co.jp/bousai2/hofu/hofu2.htm>, 2009.
- 2) 国際航業㈱:【速報】平成21年7月 山口県豪雨災害,
http://www.kkc.co.jp/social/disaster/200907_yamaguchi/index.html, 2009.7.
- 3) 橋本晴行・平野宗夫:泥流の抵抗則に関する研究, 水工学論文集, 第39巻, pp. 495~500, 1995.
- 4) H. Hashimoto and M. Hirano: A FLOW MODEL OF HYPERCONCENTRATED SAND-WATER MIXTURES, Debris-Flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment, ASCE, pp. 464~473, 1997.
- 5) 橋本晴行, 村上浩史, 平野宗夫, 鳥野 清:土石流・乾燥粒子流の流体力に関する研究, 土木学会論文集, No.565/I-39, pp. 85-98, 1997.
- 6) 橋本晴行:土石流の流動機構について, 第20回混相流シンポジウム講演論文集(招待講演), pp. 61~68, 2001.
- 7) 橋本晴行, 朴埼環, 池松伸也, 田崎信忠:急勾配移動床水路における種々の流砂形態に対する統合的流砂置式, 水工学論文集, 第47巻, 2003年2月.
- 8) 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.
- 9) 高岡広樹, 橋本晴行, 朴埼環, 池松伸也, 城戸正一郎, 疋田誠:2003年7月水俣市集川で発生した土石流のピーク流量の推定, 第2回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp. 103-108, 2004年8月.

- 10) 高岡広樹, 橋本晴行, 田菴卓也, 古閑美津久, 山崎一彦:2005年9月宮崎県霧塚山で発生した土石流の現地調査と流出規模の推定, 第3回土砂災害に関するシンポジウム論文集, pp. 157-162, 2006年8月.
- 11) 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, pp. 353~363, 2007.