

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出規模に関する研究

DEBRIS FLOW DISCHARGE IN HOFU CITY AREA IN JULY, 2009

黒田 佳祥¹・橋本 晴行²・永野 博之³・池松 伸也¹・宮崎 遼⁴・三好 朋宏¹

Yoshiaki KURODA, Haruyuki HASHIMOTO, Hiroyuki NAGANO, Shinnya IKEMATSU,

Ryo MIYAZAKI and Tomohiro MIYOSHI

¹九州大学大学院工学府 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: river35@civil.kyushu-u.ac.jp

²九州大学大学院工学研究院 (〒819-0395 福岡県福岡市西区元岡 744 番地)

E-mail: hasimoto@civil.kyushu-u.ac.jp

³八千代エンジニアリング株式会社 (〒460-0003 愛知県名古屋市中区錦 3-10-33 錦 SIS ビル)

⁴九州電力株式会社 (〒810-0004 福岡県福岡市中央区渡辺通 2 丁目 1-82)

Key Words: debris flow, debris flow simulation, Hofu city, debris flow disaster

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. 真尾地区では老人ホームに土石流が直撃し, 7名の入居者が亡くなられた. 石原地区では土石流が下流の集落において氾濫・堆積し, 2名の居住者が亡くなられた. また奈美地区や剣川流域でも, 土石流による被害が多発した. 今後の土砂災害対策を行っていくためには今回起きた土石流の流出規模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た土石流の流出規模の評価に関して, 発生した土石流の流動・流出特性を現地調査およびシミュレーションにより検討し, その結果をもとに崩壊型土石流における流出規模の評価手法について考察したものである.

2. 災害の概要

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-1に7月21日の真尾・防府観測所で観測された時間雨量・総雨量を示す. 真尾観測所は災害が発生した真尾・石原地区近傍の観測所であり, 防府観測所は防府市中心地の観測所である. 7~9時, 11~12時の2回に降雨のピークが確認され, 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. 土砂災害は2回目のピークである12時前後に多発した.

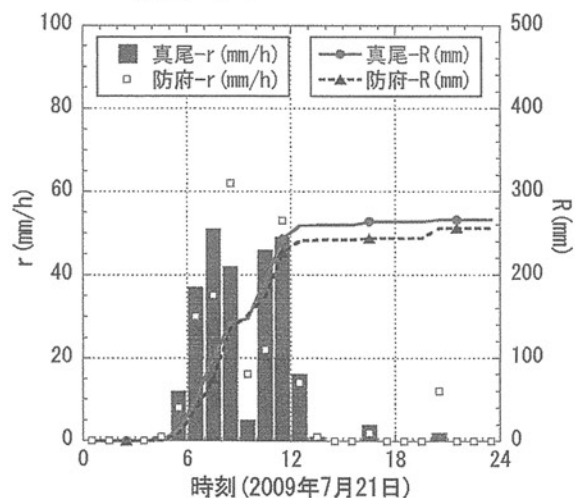


図-1 真尾・防府観測所での時間雨量・総雨量

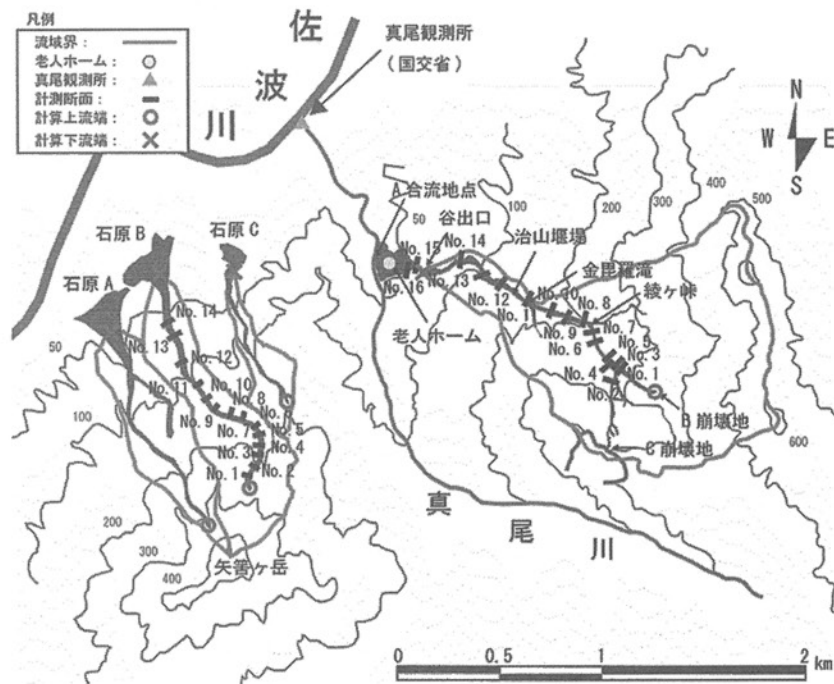


図-2 真尾・石原地区における土石流発生溪流の流域図

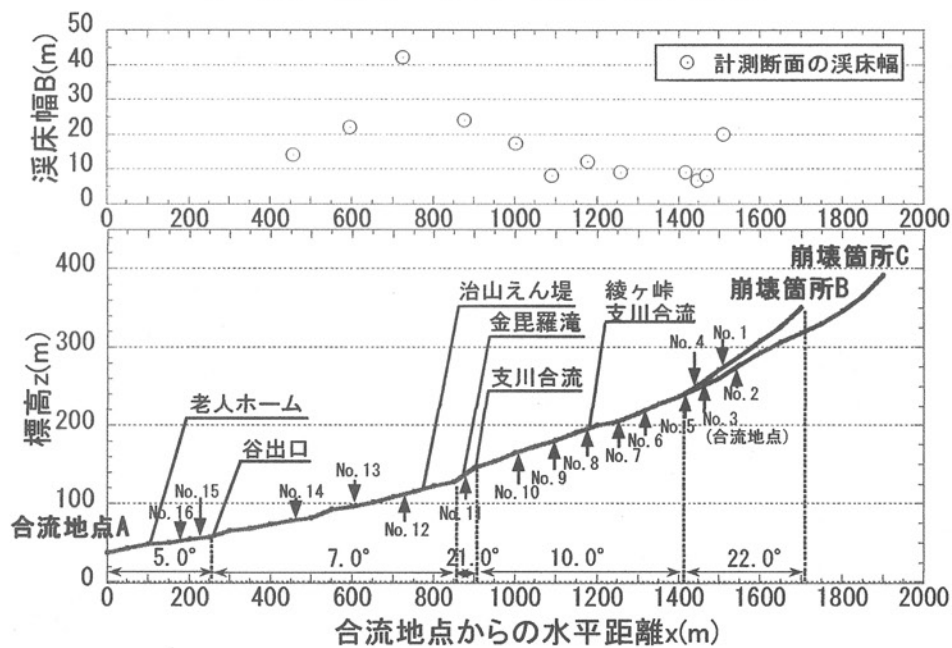


図-3 縦断面¹⁾と流路幅 (上田南川)

3. 現地調査

図-2に真尾・石原地区における土石流発生溪流の流域図を示す。真尾地区では真尾川の支川である上田南川で土石流が発生した。流域面積は約 1.0km^2 である。流域内には砂防施設はなく、治山堰堤が1基整備されていた。石原地区では3溪流で土石流が発生した。図-2に示すように西から石原A、石原B、石原Cとする。流域面積は石原A、石原Bで約 0.3km^2 、石原Cで約 0.1km^2 である。石原地区では3溪流の全てで流域内に

砂防施設および治山施設は整備されていなかった。

(1) 真尾地区

図-3に上田南川における縦断方向の河床高と溪床幅を示す。上流域の2つの崩壊(崩壊箇所B、C)と、中流域の左右支川上流における崩壊の計4箇所から発生した主な土石流が上田南川を流下し、下流の老人ホームを直撃した。写真-1は崩壊箇所B、Cで発生した土石流の合流部下流の様子である。写真右奥からCからの土石流が合流しており、河床は侵食されて露岩していた。またBからの土石流の流路が写真奥に確認でき、落差

7m の高所から合流しており、合流直前の流下幅は約 20m であった。合流部から綾ヶ峠付近までは露岩箇所が多く、概ね侵食の傾向が見られた。綾ヶ峠から金毘羅滝までは侵食後に堆積が起きていることが確認された。写真-2 に金毘羅滝の写真を示す。滝の直下には治山堰堤が存在していたが袖部を残して破壊されていた。金毘羅滝から谷出口までは 20m を超える幅で土石流が流下しており、計測断面 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、侵食部を含む溪床幅 42m の断面を流下した形跡が確認された。老人ホームの一階では高さ 1m まで土砂が堆積した形跡があり、多量の細粒土砂が老人ホーム内に流入したと考えられる。

(2) 石原地区

石原地区では 3 溪流から多量の巨礫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。石原地区では特に石原 B について述べる。石原 B で起きた土石流は源頭部から氾濫の開始地点まで断面を大きく侵食しながら流下した痕跡を確認できた。写真-3 は湾曲後の閉塞部状況(計測断面 No.7)であり、閉塞部より上流では多量の土砂が堆積していた。計測断面 No.8~No.10 の区間では露岩している箇所が多く見られた。写真-4 に露岩部の写真を示す。氾濫の開始地点では 30m 以上の流下幅となっており、これより下流では土石流が広範囲にわたって氾濫している様子が確認できた。土石流の流下方向上にあった民家では土石流の衝撃により車が家屋の壁に張り付いていた。民家付近では 2m 以上の巨礫も多く見られた。

(3) 痕跡水位からのピーク流量の推定

真尾・石原地区の土石流を層流タイプ(石礫型)と考え、流速係数 $\phi=5$ と仮定し、等流条件のもとでピーク流量を算出した。算出結果を表-1 に示す。算出に用いた計測断面はピーク時の断面と思われるものを採用し、土石流痕跡の有無、調査時の溪床状況および計測断面内に残存する立木の有無を考慮し、真尾は No.5、石原 B は No.9 の計測断面を用いた。表-1 より、真尾よりも石原 B の方がピーク流量の大きい土石流であったと推定される。真尾については、砂防学会²⁾の調査でも綾ヶ峠付近でピーク流量 213~288 m^3/s と推定されており、本調査結果と同程度の値となっている。

表-1 痕跡水位から推定されたピーク流量と流速

| 溪流 | 断面積 (m^2) | 水深 (m) | 勾配 ($^\circ$) | 流量 (m^3/s) | 流速 (m/s) |
|-----|------------------|-----------|--------------------|-------------------|-------------|
| 真尾 | 19.8 | 2.2 | 12.5 | 214 | 10.8 |
| 石原B | 42.3 | 3.4 | 8.7 | 382 | 9.0 |



写真-1 合流部下流の状況 (計測断面 No. 5 (真尾))



写真-2 金比羅滝 (計測断面 No. 11 (真尾))

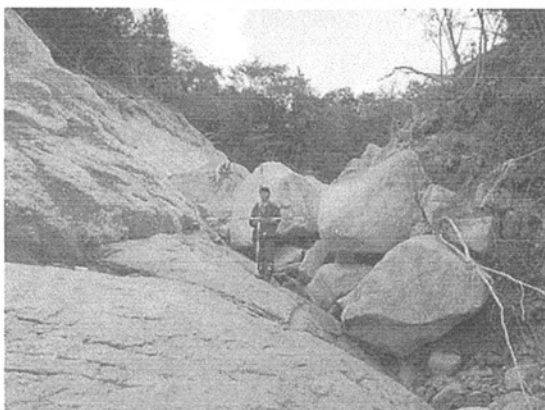


写真-3 湾曲部閉塞状況 (計測断面 No. 7 (石原 B))

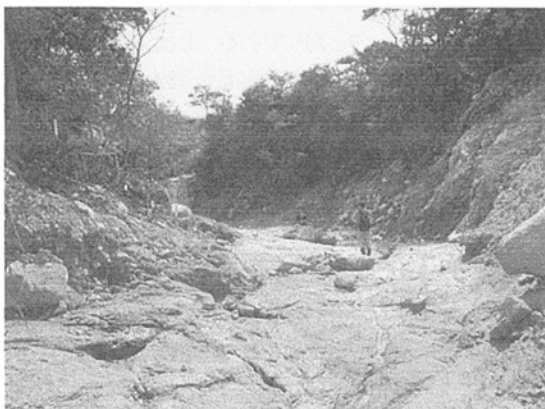


写真-4 露岩状況 (計測断面 No. 9 (石原 B))

4. 土石流の流動シミュレーション

現地調査結果および地形図から得られる標高と流域面積を用い、真尾・石原 B の土石流について 1 次元流動シミュレーションを行った。流路は長方形断面で近似した。側岸は直立を保ったまま水平方向に侵食され、侵食土砂は側方流入として即座に流れに取り込まれるとした。また、河床は流砂濃度と平衡流砂濃度の大小関係により侵食または堆積するものとした。

(1) 基礎式^{3), 4), 5)}

基礎式は非定常の運動方程式と全相・固相における連続式、河床・側岸の侵食速度式を用いた。侵食速度式は高岡により提案された式を用いた。河床の侵食または堆積の基準となる平衡流砂量は広範な流砂形態に適用可能な流砂量式により決定されるものとし、流砂濃度と断面平均濃度は等しい値をとるものと仮定した。

(2) 計算条件

計算に用いる諸値を表-2 に示す。粒径は均一とし、現地調査の結果から平均粒径を 0.3m とした。流速係数はピーク流量算出に用いた値と同様に $\phi=5$ とした。また雨水の河道への流入は合理式から求めた流量を横流入として考慮した。ただし、側方から流入する雨水は土砂を含まないとした。初期河道は、土石流発生前の流路形状を推定することが困難であるため、標高は 2 万 5000 分の 1 地形図より計測した値を用い、流路幅は流域面積から経験的に求められる笠井の式⁶⁾により決定した。

境界条件として上流端で流量、流砂濃度、水深を与えた。今回の土石流は全て崩壊型土石流であるため、上流端において静止状態の崩壊土砂量がある崩壊流出土砂濃度で崩壊継続時間の間に土石流に変換されると考えた。表-3 に計算対象区間と崩壊土砂量の入力条件を示す。表中の計算対象区間の上流端(○印)と下流端(×印)は図-2 のとおりである。上流端での流量、流砂濃度は崩壊により流入する流量と雨水により流入する流量を考慮して算出し、水深は等流水深として与えた。

(3) 計算結果と考察

a) ピーク流量

図-4 に下流端における流量の時間変化を、表-4 に下流端におけるピーク流量を示す。土石流が流下する過程で、雨水の横流入と側岸侵食により各地点の流量は瞬間的に増加する。本計算では側岸から取り込んだ土砂の多くが溪床に堆積するものの、上流端に与えた

表-2 計算に用いる諸値

| | | |
|--------|------------|-------------------------------|
| 初期流路幅 | B | 笠井の式 $B=5.36 \times A^{0.37}$ |
| 時間刻み幅 | Δt | 0.25 秒 |
| 空間刻み幅 | Δx | 25.0 m |
| 最密充填濃度 | C_* | 0.7 |
| 平均粒径 | d | 0.3 m |
| 流速係数 | ϕ | 5 |
| 河床堆積層厚 | | 2.0 m |

表-3 計算対象区間と崩壊土砂量の入力条件

| | 計算対象区間 | 崩壊土砂量 | 崩壊流出土砂濃度 | 崩壊継続時間 |
|-----|--------|---------------------|----------|--------|
| 真尾 | 1,450m | 1,500m ³ | 0.4 | 60秒 |
| 石原B | 1,300m | 1,500m ³ | 0.4 | 60秒 |

表-4 下流端におけるピーク流量の計算結果

| 溪流名 | ピーク流量 (m ³ /s) | 流速 (m/s) | 流砂濃度 |
|-----|---------------------------|----------|------|
| 真尾 | 186 | 6.5 | 0.22 |
| 石原B | 407 | 8.1 | 0.36 |

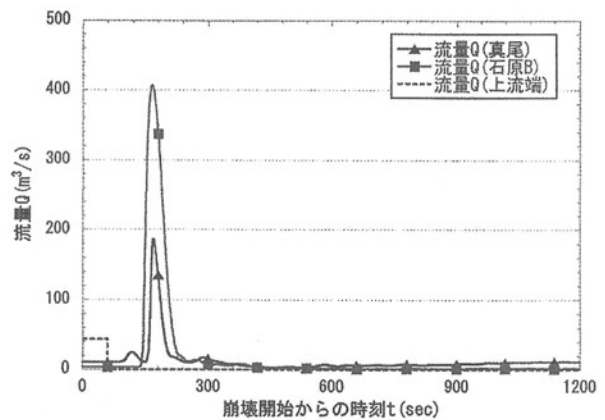


図-4 下流端における流量の時間変化

土石流流量は各断面区間での侵食によって漸次増加し、上流端の供給量に比べて大きな値となって下流端に流出する結果となった。表-4 に示すとおり、下流端のピーク流量は真尾より石原 B の方が大きい結果となった。また、表-1 に示した現地調査での推定地点の前後断面でのピーク流量の計算結果は、真尾では 87~90m³/s、石原 B では 185~196m³/s であり、現地調査による推定値よりも小さな値となった。各断面におけるピーク流量は、上流端の境界条件、側岸侵食により流れにとりこまれる量に依存するため、崩壊継続時間および側岸の侵食速度式における定数の適切な評価が今後の課題として考えられる。なお、真尾については崩壊箇所 B のみしか考慮していないことも影響していると考えられる。

b) 流路幅の変化と河床高の変化

図-5 に土石流流下後の流路幅と河床高の縦断方向変化を示す。流路幅の変化は、現地調査による溪床幅を土石流流下後の流路幅とみなして計算終了時流路幅と比較した。その結果、真尾では綾ヶ峠付近まで、石原 B では概ね全区間で現地調査結果に一致する結果となった。流路幅の計算結果は、初期河道の流路幅に大きく依存するため、土石流発生前の流路幅と本計算で設定した初期流路幅を比較し、計算結果の妥当性を検証することが今後必要であると考えられる。

河床高の変化は真尾・石原 B とともに河床全体で堆積傾向となった。また石原 B では特に下流端付近で堆積が 2m 以上にも達する結果となった。現地調査では、真尾・石原 B とともに侵食後堆積または侵食とみなされる区間が多く、計算結果の堆積傾向は過大であると考えられる。このため、河床の侵食速度式における定数の適切な評価が今後の課題であると考えられる。また、本計算では崩壊土砂量に比べて側岸侵食土砂量が多いため、側岸の侵食速度式についても同様に、定数の適切な評価が必要であると考えられる。

c) 土砂収支

表-5 に計算による土砂収支を示す。河床侵食土砂量は真尾・石原 B とともに堆積が卓越したため負号が付いている。表-5 から真尾・石原 B とともに側岸侵食土砂量が流出土砂量に大きく影響していることが分かる。砂防学会²⁾の調査結果では、真尾では谷出口での流出土砂量を 18,600m³、石原 B では堆積区間での堆積量を 28,000m³ と評価しており、本計算結果と比較すると、真尾では大きく異なるが、石原 B では比較的近い値となっている。本計算において真尾は崩壊箇所 B の土石流のみを考慮し、その他の崩壊から発生した土石流は考慮していないため、計算結果が過小となっていると考えられる。また、真尾より石原 B の方が同じ崩壊土砂量に対して大きな流出土砂量となったことから石原 B は真尾より大きな土石流に発達しやすい地形条件であると考えられる。

5. 土石流の氾濫・堆積シミュレーション

(1) 基礎式と計算条件

基礎式は運動方程式と全相・固相における連続式、河床の侵食速度式を用いた。時間刻み幅 0.1 秒、空間刻み幅 10m とし、その他の計算に用いる諸値は表-2 のとおりである。図-6 に境界条件を示す。計算メッシュへの流入幅は 40m⁷⁾とし、流動シミュレーションで得られた流量を単位幅流量に変換して与え、加えて水深と流砂濃度を与えた。

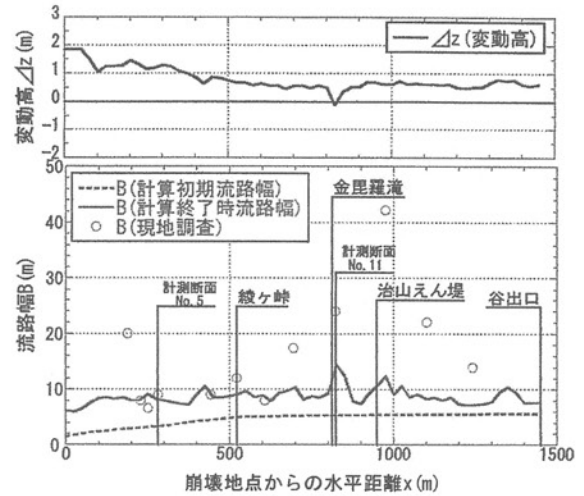


図-5(a) 土石流流下後の流路幅と河床高の縦断方向変化(真尾)

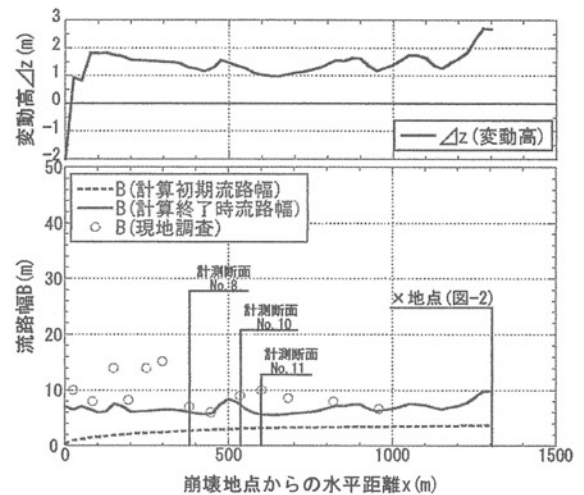


図-5(b) 土石流流下後の流路幅と河床高の縦断方向変化(石原 B)

表-5 計算結果による各土石流での土砂収支

| 溪流名 | 崩壊土砂量 | 側岸侵食土砂量 | 河床侵食土砂量 | 流出土砂量 |
|-----|---------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 真尾 | 1,500m ³ | 8,200m ³ | -7,400m ³ | 2,900m ³ |
| 石原B | 1,500m ³ | 20,000m ³ | -9,900m ³ | 11,100m ³ |

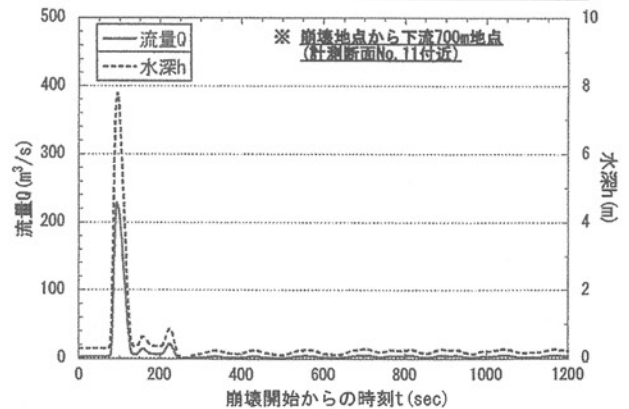


図-6 氾濫・堆積シミュレーションに用いる境界条件

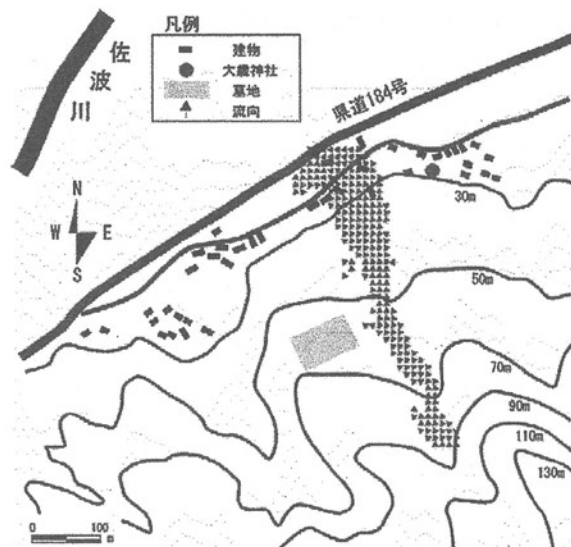
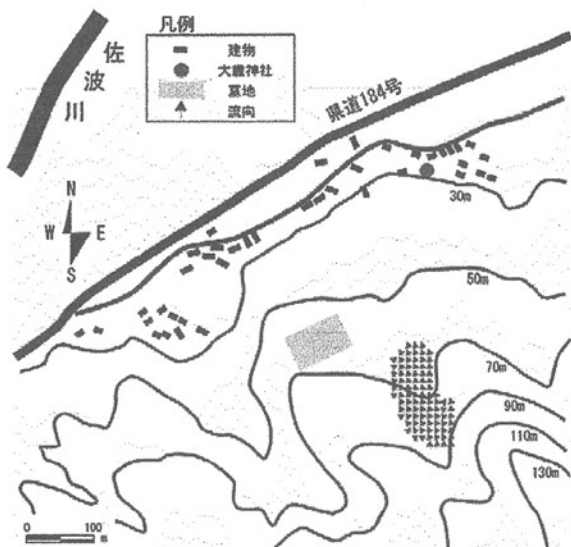


図-7 崩壊開始から100秒(左図), 180秒後(右図)における土石流の流向(石原B)

(2) 計算結果と考察

図-7に崩壊開始から100秒後, 180秒後における土石流の流向を示す。土石流は境界面から土砂を堆積させながら流下し, 下流の集落において0~55cm程度の堆積を生じていた。流下した土石流は民家を巻き込みながら西側に広がり, 航空写真⁷⁾から判読できる氾濫被害の様子が表現されている。今後は氾濫土砂量および氾濫面積について実績と比較し, 妥当性の検証を行う。

6. あとがき

本研究では, 真尾・石原地区を対象に現地調査およびシミュレーションにより流動・流出特性を検討し, その結果をもとに流出規模の評価手法について考察した。その結果, ピーク流量の計算結果は, 現地調査による推定値の半分程度となった。土石流流下後の流路幅は, 計算結果と現地調査結果は概ね一致したため, 初期河道の流路幅の検証による妥当性の確認が今後重要となる。河床高の変化は, 全区間で堆積が顕著となり, 現地調査結果と比較して過大な傾向となった。土砂収支は側岸侵食により生産される土砂量が崩壊土砂量を大きく上回る結果となった。また, 真尾と比べて石原Bは規模の大きな土石流へ発達しやすい地形条件にあることが明らかとなった。さらに, 石原地区について氾濫・堆積シミュレーションを行い, 土石流の流下・堆積過程を追跡し, 氾濫の広がりについて良好な結果を得た。

今後の課題として, 崩壊継続時間の適切な評価, 河床・側岸の侵食速度式における定数の適切な評価が挙げられる。

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, 地形データを提供いただいた。また, アジア航測(株)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) アジア航測(株):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, 池田曉彦, 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) 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.
- 4) 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.
- 5) 橋本晴行, 朴崎琢, 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 卷, 2003.
- 6) 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
- 7) 国際航業(株):【速報】平成 21 年 7 月 山口県豪雨災害.

(2010. 5. 14 受付)