

土石流危険渓流が集中する山地流域における土砂流による被災範囲推定手法の開発

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 23～平 26

担当チーム：土砂管理研究グループ（火山・土石流）

研究担当者：石塚忠範、水野秀明、山越隆雄、武澤永純、清水武志

【要旨】

2011年9月の和歌山県那智勝浦や2009年7月の山口県防府で発生した土砂災害等、複数の土石流危険渓流の源頭部において斜面崩壊に起因する土石流が発生し、土砂が河道へ流入し、緩勾配の地域において土砂流による被害が生じる例が後を絶たない。このような山地小河川における土砂流災害への警戒避難対策に資する手法の開発が求められている。2011年度は、過去の災害事例のデータの収集整理を行うとともに、同年度に数多く発生した土砂災害の現場で調査を行った。また、数値計算により土石流・土砂流の流下・氾濫形態を再現することを目的として非構造メッシュでのシミュレーションを実施し、その留意点を整理した。その結果、収集したデータについて土質特性に着目して崩土の流動化しやすさの検討を行った。その結果、粒度構成で細粒分の割合が多い場合、細粒分の割合が多いほど流動化しやすい傾向が認められた。また、本モデルを用いた計算では、60分間の計算に計算機が要した実時間は、構造メッシュで約30～45分間、非構造メッシュで60～120分間程度の計算時間であったが、非構造メッシュでは極端に小さいメッシュが生成され、計算時間が大幅に長くなることがあった。また、氾濫範囲を考慮して氾濫原の境界条件(透過・不透過)を設定する必要がある。これらの点に留意してデータ作成を行う必要があることが明らかになった。

キーワード：崩土流動化、粒度構成、非構造メッシュ、土石流氾濫シミュレーション

1. はじめに

1.1 背景

2011年9月の和歌山県那智勝浦や2009年7月の山口県防府で発生した土砂災害等、複数の土石流危険渓流の源頭部において斜面崩壊に起因する土石流が発生し、土砂が河道へ流入し、緩勾配の地域において土砂流による被害が生じる例が後を絶たない。このような山地小河川における土砂流災害への警戒避難対策に資する手法の開発が求められている。

そこで、本研究では、土石流危険渓流が集中する山地流域において発生する土砂流の非再販に調査・推定手法を開発するため、以下の項目について研究開発を進めるものである。

- ①崩壊起因土石流の流動化判定に関する調査・推定手法
- ②山地小河道への土砂流入量の推定手法
- ③微細な地形の効率的処理手法

2011年度は、過去の災害事例のデータの収集整理を行うとともに、同年度に数多く発生した土砂災害の現場で

調査を行い、崩土の流動化状況と崩土の粒度構成を調べた。また、数値計算により2009年に山口県防府市の山地流域で発生した土石流・土砂流の流下・氾濫形態を再現することを目的として非構造メッシュでのシミュレーションを実施し、その留意点を整理した。

2. 土石流へと発達した崩壊の土質特性

2.1 背景と本研究の目的

2011年は地震、豪雨、融雪を起因として大規模な斜面崩壊が多数発生した。9月の台風12号による豪雨では紀伊半島で多数の大規模な崩壊が発生した。様々な要因により、崩壊は流動化することで土石流となり、下流の広範囲に被害を及ぼす。一方で崩壊が流動化せずに斜面下部に留まり堆積することで河道閉塞し被害を発生させる場合もある。

崩壊の流動化について、水野ら¹⁾はシラス地帯である鹿児島県船石川で2007年7月と2010年7月に2回発生した深層崩壊に起因する土石流の流下実態より報告し

表1 検討対象地区の概要

地区	災害形態	発生要因	災害規模			備考
			幅(m)	斜面長(m)	流下長(m)	
新潟県津南町辰口	深層崩壊	2011年3月長野県北部地震	100	130	760	
長野県栄村北信	深層崩壊	2011年3月長野県北部地震	240	360	1,200	河道閉塞形成
山形県庄内町立谷沢	地すべり	融雪(2011年5月発生)	340	470	1,300	一時的に河道閉塞、上流湛水なし
高知県北川村平鍋	深層崩壊	2011年7月台風6号	120	290	1,500	土石流は平鍋ダム貯水湖に突入
奈良県五條市赤谷	深層崩壊	2011年9月台風12号	350	1,100	900	河道閉塞形成
奈良県十津川村長殿	深層崩壊	2011年9月台風12号	300	710	1,200	河道閉塞形成
奈良県十津川村栗平	深層崩壊	2011年9月台風12号	580	850	300	河道閉塞形成
奈良県野迫川村北股	深層崩壊	2011年9月台風12号	180	380	200	河道閉塞形成
和歌山県田辺市熊野	深層崩壊	2011年9月台風12号	390	660	1,500	河道閉塞形成
鹿児島県南大隅町船石川	深層崩壊	2010年10月豪雨	40	165	700	既往報告(水野ら、2011)

ている。報告では船石川で発生した土石流は流域面積が小さく水の量が少ない条件であるが、高い流動性を有したことが特徴であり、2010年の災害後に採取した土砂の土質試験結果と土石流の流下状況から、粒度の構成で細粒分の割合が高かったことが崩壊の流動特性に影響したと推測している。

また、山下ら²⁾は1990年7月に発生した熊本県一の宮災害を事例として調査を行い、土石流発生源の崩壊地の土質特性について、火山灰質粘性土の場合、未崩壊地の土に比べて崩壊地内の土の間隙比が大きい結果を得ており、間隙比が崩壊発生の一つの指標になり得ると報告している。笹原ら³⁾は1999年6月に広島市及び呉市で発生した表層崩壊の調査を行い、広島市の事例で間隙比が崩壊地内の土より崩壊地外の土の方が小さく、崩壊地内の土の方がゆるい状態であったが、呉市の事例ではこれらの関係は不明瞭であり、結果の一般性を検証するために同様の土の力学特性の検討を行う必要があると報告している。

本研究の研究目的は以下のとおりである。

①複数の崩壊地で土を採取し、その土質特性を整理、比較し、以下を検証する。

- ・粒度構成で細粒分の割合が多い場合、流動化しやすくなるかどうか
- ・空隙率が高い場合、水を多く含み流動化しやすくなるかどうか

②様々な要因のうち、土質特性(粒度構成、空隙率)から流動化しやすさの目安を検討する。

2.2 研究方法

2.2.1 調査対象地区

表1、図1に調査対象地区の一覧表を示す。本調査では2011年に発生した主な土石流災害を対象として9地区の土砂サンプルを採取した。新潟県津南町、長野県栄村、奈良県五條市、奈良県十津川村、奈良県野迫川村、和歌山県田辺市、高知県北川村の8地区のサンプルは深層崩



図1 検討対象地区位置図

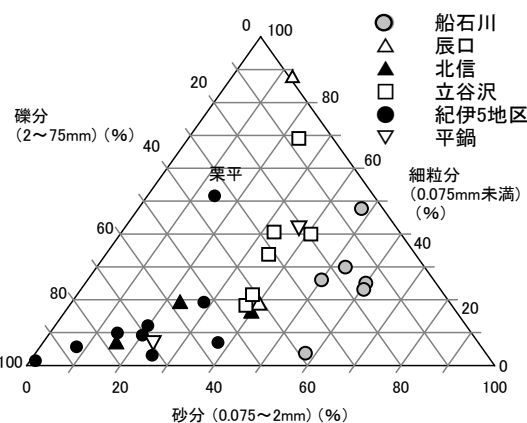


図2 検討対象地区の粒度構成

壊を起因とするもので、山形県庄内町のサンプルは地すべりを起因とする土石流である。なお、比較対象として、既往の研究データ¹⁾からシラス地帯の船石川の土砂サンプルを含めた。

2.2.2 調査方法

各地区で土のサンプルを採取した位置は崩壊地斜面内の地山、崩壊残土、下流の堆積土砂の3地点とした。また、採取サンプルの状態は攪乱状態と不攪乱状態の2種

類を採取した。攪乱状態のサンプルはスコップ等を用いて1~5kg程度を採取した。不攪乱状態のサンプルは採取場所の表土を5センチ程度剥いだ後、100mlステンレス円筒を用いて採取した。採取した攪乱、不攪乱状態のサンプルに土質試験を行い、攪乱サンプルからは粒度構成、不攪乱サンプルからは粒度構成、空隙率の2項目を計測した。

2.3 結果と考察

2.3.1 粒度構成

図2は粒度を細粒分(0.075mm未満)、砂分(0.075mm以上2mm未満)、礫分(2mm以上)で示したものである。舟石川の粒度構成の分布と比べて、立谷沢の粒度構成の分布は砂分が少なく、細粒分がやや多い範囲となった。河道閉塞を形成した北信、紀伊半島の5地区は栗平を除き、細粒分が20%より少なく、礫分の割合が多かった。栗平のサンプルは2次崩壊した崩壊地頂部の表層の崩落土を採取したため礫分が少なかったと推測する。既往研究1)より、粒度構成で細粒分の割合が多い場合、流動化しやすくなることが推測されており、今回のサンプルでも河道閉塞を形成せず、流動化した地区は細粒分、砂分が多く、河道閉塞を形成した地区は細粒分、砂分が少ない傾向であった。

また、採取位置(地山、崩壊残土、堆積土砂)の違いによる分布の傾向は特に見られなかった。

2.3.2 空隙率

空隙率は土に含まれる土砂、水、空気のうち、水と空気が占める体積の割合である。土によって異なった数値となり、砂の場合で0.30~0.45程度で山地流域の一般的な数値としては0.4とすることが多い⁴⁾。崩壊地における過去の研究事例では、シラス地帯で約0.6~0.71)、熊本県の火山灰質粘性土で約0.7~0.82)、広島県のまき土で約0.453)等の数値が報告されている。

本研究では、空隙率は採取した不攪乱サンプルの土質試験結果より乾燥試料質量と土粒子の密度を用いて100mlあたりの土粒子容積を算出し、空隙率を算定した。なお、土粒子の密度試験結果は約2.5~2.7の範囲であり、対象地点毎で特に傾向は見られなかった。

図3に採取した地山の不攪乱サンプルの空隙率を示す。辰口で0.45、立谷沢で0.47、河道閉塞が発生した奈良県の北股で0.60、平鍋で0.35の値となり、今回採取したサンプルの中では北股が高い数値となった。

図4に粒径加積曲線を示す。一般的に粒径が小さくなると空隙率が高くなるが、今回採取したサンプルでは平均粒径が0.1mm以下の辰口地区と約0.25mmの立谷沢

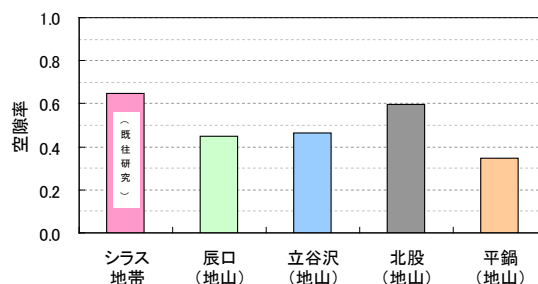


図3 検討対象地区の空隙率

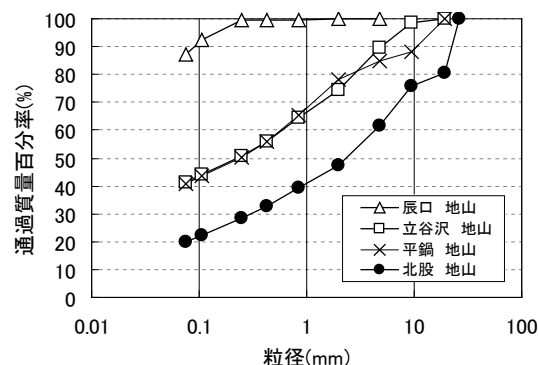


図4 検討対象地区の粒径加積曲線

で空隙率はほとんど変わらなかった。

紀伊半島で発生した河道閉塞5地区のうち、地山の不攪乱サンプルを今回採取したのは北股地区のみで他4地区の地山の空隙率が不明であること、北股の崩壊土量他4地区より小さかったことの2点から明確には言えないが、他4地区に比べると北股の河道閉塞部下流側法勾配が緩勾配だったこと(北股14°、赤谷19°、長殿22°、栗平34°、熊野22°:資料5)中の縦断図より計測)は、空隙率が高く、水を多く含みやすかったことで、河道閉塞は発生しているものの崩壊の多くの部分が流動化したと推測する。一方、辰口、立谷沢、平鍋は北股に比べて空隙率が小さく、空隙率だけをみると北股と比べて流動化しにくいと想定されるが、大規模な河道閉塞を形成しておらず、大部分が流動化している。このことから、流動化しやすさは空隙率だけでなく、地質や地形特性等の他の影響も及んでいると推測する。

2.3.3 土質特性と流動化しやすさの関係

表2は今回対象とした地区の空隙率、細粒分の割合の関係と地区の災害状況から流動化しやすさを整理したものである。空隙率は0.4、細粒分は20%を大小の区分の目安に、流動化しやすさは河道閉塞形成の有無とした。この結果、空隙率が高くとも細粒分の割合が少ない場合は河道閉塞が形成されており、流動化が抑制されること

があると推測する。また、空隙率が低くとも細粒分が多い場合は流動化しやすいことがあると推測する。

2.4 結果とまとめ

様々な要因のうち、土質特性に着目して流動化しやすさの検討を行った。その結果、粒度構成で細粒分の割合が多い場合、流動化しやすくなるかどうかについては、細粒分の割合が多い場合、流動化しやすい結果であった。空隙率が高い場合、水を多く含み流動化しやすくなるかどうかについては、北股地区、立谷沢地区、辰口地区のように空隙率が高くとも、細粒分の割合が少ない場合は流動化しにくい結果であった。逆に、平鍋地区のように、空隙率が低くとも、細粒分の割合が多い場合は流動化しやすい結果であった。

3. 土石流氾濫事例における数値計算

3.1 背景と本研究の目的

平成21年7月21日、活発な梅雨前線の影響で防府(気象庁観測所での日雨量が275mm、60分間雨量が72.5mmという観測史上最大の雨量を記録した。この豪雨により、防府市で死者17名、全壊家屋33戸、半壊家屋78戸という被害が発生した。山口市の13渓流と防府市の53渓流で土石流が発生しており、このうち、佐波川右支川の松ヶ谷川、阿部谷川、剣川では規模の大きなものが発生している。よって、大規模な土石流が発生した剣川を対象として、数値計算により土石流の流下・氾濫形態を再現することを目的として検討を実施した。

3.2 計算モデルの概要

数値解析の基礎式は、水野ら⁶⁾が開発したモデルに以下の連続式を加えたものである。

$$\frac{\partial(\text{Ch})}{\partial t} + \frac{\partial(\text{CUh})}{\partial t} + \frac{\partial(\text{CVh})}{\partial t} = C^*i$$

ここに、 C : 土砂容積濃度、 U : x 方向の流速、 V : y 方向の流速、 h : 水深、 C^* : 堆積層の土砂容積濃度、 i : 侵食速度である。

3.3 入力データの作成

計算は、図5に示す全領域で同一サイズの三角メッシュ(構造メッシュと呼ぶ)と、剣川沿いにランダムサイズの三角メッシュ(非構造メッシュ)を作成して行った。非構造メッシュは、任意に設定した2次元座標とその座標点での標高を10mDEMから読み取り、3次元座標を作成し節点とした。

その際、構造メッシュでは流域全体で50mの間隔、



図5 計算に用いた構造メッシュ(上)・非構造メッシュ(下)(上流側を部分的に表示)

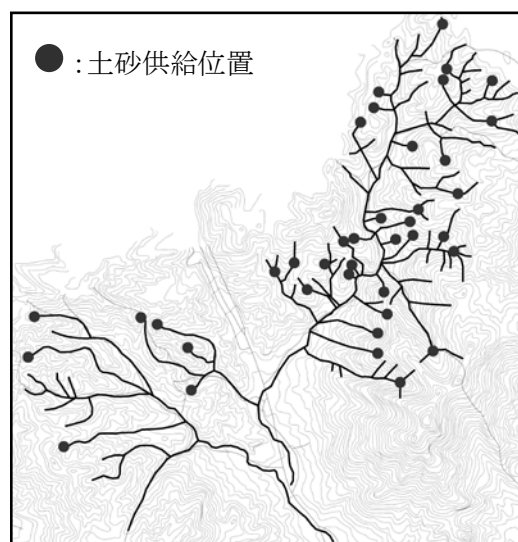


図6 土砂供給位置

非構造メッシュでは剣川沿いに50mの間隔でメッシュを作成した。それらの節点群に対してデローニ三角形分割を行って、三角形要素を作成した。三角要素を構成す

表 2 剣川の0次谷、1次溪流の移動可能土砂量

	堆積幅(m)	堆積深(m)
0次谷	3.0	0.8
1次溪流	15.0	2.0

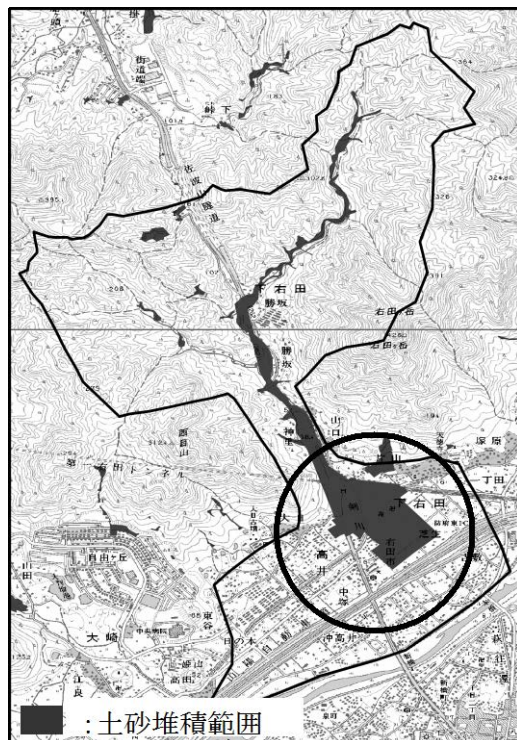


図 7 実績土石流堆積区間

る辺のうち 2 つの三角形に属していない辺を境界とし、それらのうち佐波川本川に沿ったものを透過壁、それ以外を不透過壁とした。なお、剣川の線形は数値地図 25000 空間基盤に登録されている河川区間に、1/25,000 の地形図から読み取った支川の線形を加えたものとした。計算に用いた粗度係数は 0.035 で、固定床とした。また、降雨は定常状態を仮定して 10~60mm/時の降雨を全メッシュで一様に 60 分間与えた。

土砂は、災害発生前後の LP 測量データを基に、侵食が発生した 0 次谷、1 次溪流の上流端に位置するメッシュ(図 6 参照)から供給されると仮定した。供給土砂量は、0 次谷、1 次溪流毎に、表 2 に示す溪床堆積土砂量の実測データと、1/25,000 の地形図から測定した溪流長から算定した。なお、土砂容積濃度は 0.6 とした。また、土砂は計算開始後 10 分~11 分の 1 分間で供給されると仮定し、単位時間当たりの供給土砂量を箇所毎に設定した。

3. 4 解析結果

図 7 に災害発生前後の LP データを基に作成した堆積区間を示す。また、図 8 に構造メッシュ、図 9 に非構造

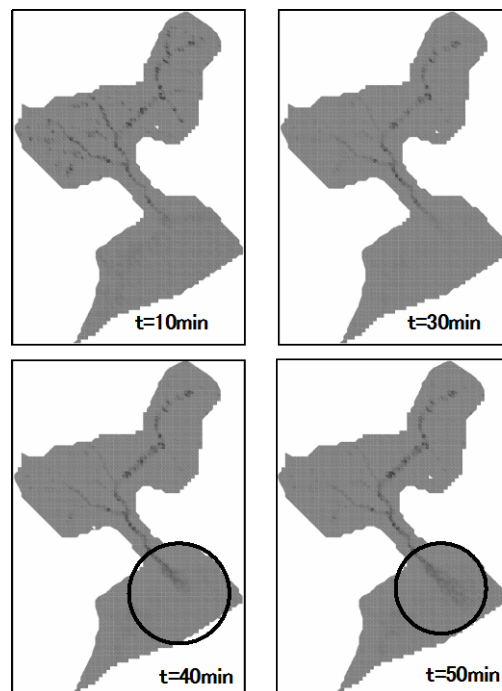


図 8 構造メッシュによる計算結果 (r=30mm)

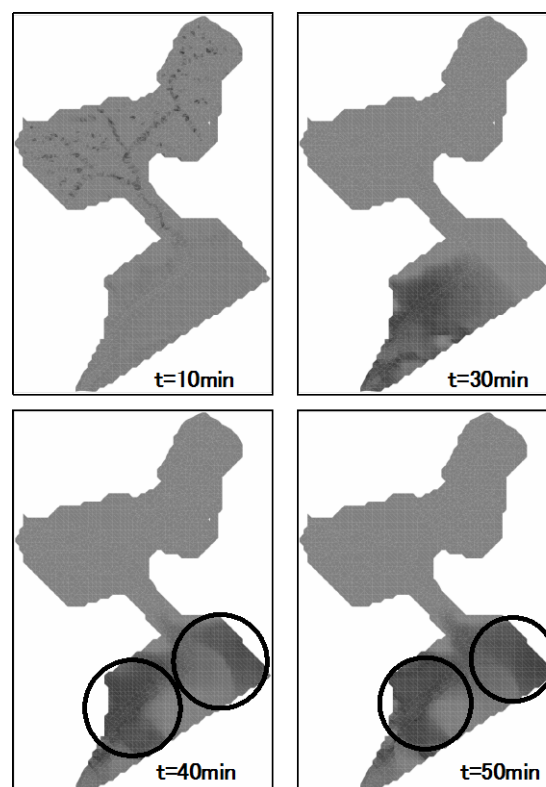


図 9 非構造メッシュによる計算結果 (r=30mm)

メッシュによる $r=30\text{mm/時}$ とした場合の計算開始 10 分後(土砂供給時間)と氾濫原に土砂が到達する 30~50 分後の計算結果を示す。図中の○で囲む部分に示すように、構造メッシュの場合では、土砂が河川に沿わずに直線的

に堆積したのに対して、非構造メッシュの場合は、土砂が河川に沿って堆積した。非構造メッシュの場合、40分後と50分後において土砂が流路から離れた箇所でも堆積したが、これは、その周辺にある境界を不透過壁としており、流れが淀んだことに起因すると考えられる。

実績の堆積範囲は、図7に示すように剣川の谷出口から両岸に広がっていた。よって、今回検討した条件下では、非構造メッシュの計算結果が実績に近いと言える。なお、図中の色が濃いメッシュは、各時刻で相対的に土砂流深が大きい箇所を示しており、絶対値ではない。

3.5 今後の課題

本モデルを用いた計算では、60分間の計算に計算機が要した実時間は、構造メッシュで約30～45分間、非構造メッシュで60～120分間程度の計算時間であったが、非構造メッシュでは極端に小さいメッシュが生成され、計算時間が大幅に長くなることがある。また、氾濫範囲を考慮して氾濫原の境界条件(透過・不透過)を設定する必要がある。これらの点に留意してデータ作成を行う必要がある。

5. まとめ

2011年度は、過去の災害事例に基づき、崩土の流動化状況に関する基礎的な調査を行うとともに、非構造メッシュでのシミュレーションを実施して、その留意点を整理した。

その結果、収集したデータについて土質特性に着目して崩土の流動化しやすさの検討を行った。その結果、粒度構成で細粒分の割合が多い場合、細粒分の割合が多いほど流動化しやすい傾向が認められた。また、本モデル

を用いた計算では、60分間の計算に計算機が要した実時間は、構造メッシュで約30～45分間、非構造メッシュで60～120分間程度の計算時間であったが、非構造メッシュでは極端に小さいメッシュが生成され、計算時間が大幅に長くなるがあった。また、氾濫範囲を考慮して氾濫原の境界条件(透過・不透過)を設定する必要がある。これらの点に留意してデータ作成を行う必要があることが明らかになった。

参考文献

- 1) 水野秀明、小山内信智：「2010年7月鹿児島県船石川土石流災害の流化実態」、土木技術資料、Vol.53、No7、2011
- 2) 山下祐一、石川芳治、草野慎一：「土石流発生源の崩壊地の土質特性」、新砂防、Vol.44-5、1992
- 3) 笹原克夫、南哲行：「6.29 広島県呉土砂災害における山腹崩壊発生に関する土質力学的検討」、土木技術資料、Vol.42、No6、2000
- 4) 土木用語解説：土木技術資料、Vol.53、No7、2011
- 5) 国土交通省近畿地方整備局：「土砂災害防止法に基づく土砂災害緊急情報について（第2号）（2011/9/12）」
- 6) 水野秀明、小山内信智：非構造メッシュを用いた合流点及び湾曲部の流れに関する数値解析、砂防学会誌、Vol64、No4、p.33-38、2011.

Development of the method to estimate the area affected by hyper-concentrated flow in the densely-populated mountainous watersheds

Budgeted : Grants for operating expenses

General account

Research Period : FY2011-2014

Research Team : Volcano and Debris Flow Research
Team

Authors : ISHIZUKA Tadanori

MIZUNO Hideaki

YAMAKOSHI Takao

TAKEZAWA Nagazumi

SHIMIZU Takeshi

Abstract : Recently, it often happens that landslide-induced debris flows don't stop just on the fan but merging into the main stream. In that case, it often results in flooding of the wider area in the lower reach of the stream. It is necessary to develop the method to estimate the area affected by hyper-concentrated flow in the densely-populated mountainous watersheds. In F.Y. 2011, the authors gathered the data of the previous disasters and conducted field surveys in sites where such disasters occurred. The authors also conducted numerical simulation of hyper-concentrated flow on non-structural topographic mesh and finds out some points to conduct this kind of simulation.

Key words : fluidized landslide, grain size distribution, non-structural topographic mesh. debris-flow flooding, debris flow inundation numerical simulation