

②-1 大規模土石流・深層崩壊・天然ダム等異常土砂災害の被害推定・対策に関する研究

研究予算 : 運営費交付金 (一般勘定)
研究期間 : 平 23～平 27
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、森田耕司、山越隆雄、
武澤永純、清水武志

【要旨】

大規模土石流・深層崩壊・天然ダム等異常土砂災害に対する施設整備や緊急時の危機管理体制を整える等着実な実施を進めるための研究・技術開発を目的として、本研究課題は、①深層崩壊発生危険箇所・発生規模予測手法の開発、②危機管理ガイドラインの作成、③ハード対策ガイドラインの作成、を達成目標として実施した。

本年度は、達成目標①の基礎検討として、地形特性が崩壊土砂の挙動に与える影響について検討するとともに、河道閉塞 (天然ダム) の堆積勾配について検討を行った。その結果、崩壊土砂の挙動は、河道の地形条件に対する崩壊地からの供給条件の大きさに、影響を受けているものと考えられた。また、既往の天然ダム事例から得られた計測結果では、天然ダムの形状は比高 1m～70m のすべての天然ダムにおいて、下流側堆積勾配は 23° 以下で、概ね全体の 75%程度が 10° 以下であることが示された。

キーワード：深層崩壊起因土石流、河道閉塞、天然ダム

1. はじめに

2008 年岩手・宮城内陸地震、2011 年東日本大震災に伴う土砂災害や、2011 年台風 12 号に伴う土砂災害等、近年、深層崩壊やそれに起因する大規模土石流、天然ダムの災害が発生し、甚大な被害が生じている。そのため、事前の施設整備や緊急時の危機管理体制の整備等を着実に進めるための研究・技術開発の進展が必要とされている。また、国の財政状況を鑑み、効率的・合理的に大規模土砂災害対策を実施するためには、深層崩壊等の発生危険箇所・発生規模予測手法が必要不可欠である。

そこで、本研究は、深層崩壊やそれに起因する大規模土石流、天然ダムの災害に対する事前の施設整備や緊急時の危機管理体制の整備に資するため、以下の達成目標を掲げて実施するものである。

- ① 深層崩壊発生危険箇所・発生規模予測手法の作成
- ② 異常土砂災害に対する危機管理ガイドラインの作成
- ③ 異常土砂災害に対するハード対策ガイドラインの作成

昨年度は、達成目標①の基礎検討として、深層崩壊発生斜面の特徴とされる岩盤クリープ斜面の表面形状把握手法の検討を実施した。また、達成目標②の基礎検討として、天然ダム堤体からの漏水が著し

い場合の天然ダムに起因する土砂災害の発生時期の予測手法の検討を実施した。

本年度は、達成目標①の基礎検討として、地形特性が崩壊土砂の挙動に与える影響について検討するとともに、河道閉塞 (天然ダム) の堆積勾配について検討を行った。

以下、本年度の検討項目について第 2 章、第 3 章で報告する。

2. 地形特性が崩壊土砂の挙動に与える影響

2. 1 背景

崩壊に起因して発生する土砂災害の形態は、崩壊土砂が崩壊地直下に堆積するか、または土石流化し下流へ流下するかによって異なる。例えば、前者では天然ダムの形成・決壊等による被害が想定され、後者では流下した土石流による直接的な被害が想定される。したがって、今後対策を講じていく上で崩壊土砂の挙動を想定することは重要である。

これまで、崩壊後の土石流化について、地形要因に着目した研究には石川¹⁾や山田ら²⁾がある。石川や山田らは、崩壊土砂の河道への流入角度や崩壊土砂流入部での河床勾配が、土石流化する崩壊地との関係が大きいことを明らかにした。また、林ら³⁾は、天然ダムの発生場の特徴について、崩壊規模と河道地形の曲率(河道の広狭)を整理し、これらが天然ダ

ムの発生場を特徴づけるとしている。

しかしながら、既往の研究で検討されている地形要因は、崩壊規模による影響を受けると考えられるが、それに関しては評価されていない。例えば、図1のように同様の河道地形においても、上図のように、河道における崩壊土砂を流下させる能力に対し崩壊土砂が大きいものは、崩壊土砂が崩壊地直下に堆積し、天然ダムを形成する「堆積型」になりやすく、逆に下図のように、崩壊土砂が小さいものは崩壊土砂が土石流となる「流下型」になりやすいと考えられる。そこで本検討では、崩壊地から河道への供給条件と崩壊規模を考慮した崩壊地直下の河道の地形条件に着目し、それらが崩壊土砂の挙動（堆積型・流下型）に与える影響について分析を行った。

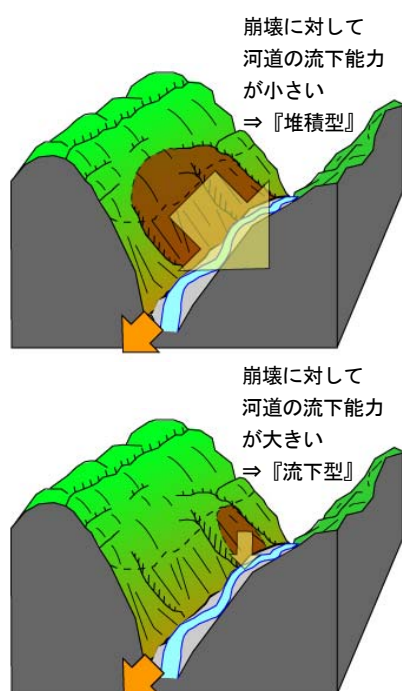


図1 崩壊規模と崩壊地直下の地形条件の概念図

2. 2 検討手法

本検討では、崩壊土砂の挙動は、河道の地形条件に対する崩壊地からの供給条件の大きさに、影響を受けているものと考えた。この時、崩壊地からの供給条件は、土木研究所(2012)におけるハイドログラフの設定手法⁴⁾を参考に算出したピーク流量をもって評価した。また、河道の地形条件は、最大崩壊深と同等の水深を想定した河道断面が流しうる流量を Manning 式より算出し評価した。

2. 3 対象事例

対象とした崩壊地は、平成23年8月の台風12号により奈良県五條市および十津川村で発生した崩壊地6箇所と、平成23年7月の台風6号により高知県北川村で発生した崩壊地3箇所の計9箇所である。

崩壊前後の航空レーザ計測データ（以下、LPと標記）およびオルソ画像を元に崩壊地ポリゴンを作成し、崩壊地と崩壊地直下の河道部において、各メッシュの差分量を計測した。このとき、差分量は崩壊後と崩壊前の標高差とメッシュの面積の積とした。このうち、差分量が0未満のメッシュの範囲を崩壊部とし、差分量の総和を崩壊量、0以上のメッシュの範囲を堆積部とし、差分量の総和を堆積量とした。算出した崩壊量と堆積量を用いて、崩壊量・堆積量比を算出した（表1）。

表1 対象崩壊地一覧

崩壊地名	発生箇所	災害名	崩壊量・堆積量比
辻堂	奈良県五條市	平成23年台風12号	44%
宇井	奈良県五條市	平成23年台風12号	58%
川原樋	奈良県五條市	平成23年台風12号	56%
赤谷	奈良県五條市	平成23年台風12号	81%
長殿	奈良県十津川村	平成23年台風12号	109%
テラ谷	奈良県十津川村	平成23年台風12号	14%
平鍋	高知県北川村	平成23年台風6号	1%
小島	高知県北川村	平成23年台風6号	0%
和田	高知県北川村	平成23年台風6号	47%

2. 4 崩壊地からの供給条件の算出

崩壊地からの供給条件は、上記で作成した崩壊地ポリゴンと崩壊前後のLPの差分量から崩壊規模を計測し算出した。崩壊土砂量は上記で算出した崩壊量とした。また、崩壊部において斜面最頂部を起点に斜面方向に崩壊中心線を作成し、崩壊中心線上の崩壊部の距離を崩壊長、崩壊中心線に直行する横断線のうち、崩壊幅が最大となる距離を崩壊幅とした（図2）。また、崩壊後のLPより崩壊部の斜面勾配を計測した。その他のパラメーターは、土木研究所に記載されている値⁴⁾を参照し、下式より崩壊地からの供給条件（ピーク流量）を算出した。

$$t_0 = \frac{d(D_c)(8L)^{5/2} B_{m0}^{3/2}}{2(10V_0)^{3/2} \sqrt{gI_{m0}} f(c)}$$

$$f(c) = \left[\frac{1}{a_i \sin \alpha} \left(C_{d0} + (1 - C_{d0}) \frac{\rho_0}{\rho_s} \right) \right]^{1/2} \left(\left(\frac{C_{d*}}{C_{d0}} \right)^{1/3} - 1 \right)$$

$$Q_p = \frac{2V_0}{t_0}$$

ここで、 Q_p ：ピーク流量 t_0 ：継続時間 L ：崩壊斜面長 V_0 ：崩壊土砂量（水込み） B_{m0} ：崩壊幅 Im_0 ：崩壊後の斜面勾配 $d(D_c)$ ：粗粒土砂の平均粒径 Cd^* ：土石の最密充填濃度（0.65） C_{do} ：崩壊土砂の粗粒土砂の容積濃度 ρ_0 ：間隙流体の密度 ρ_s ：土石の密度 ai ：係数（0.042） α ：17.8 度

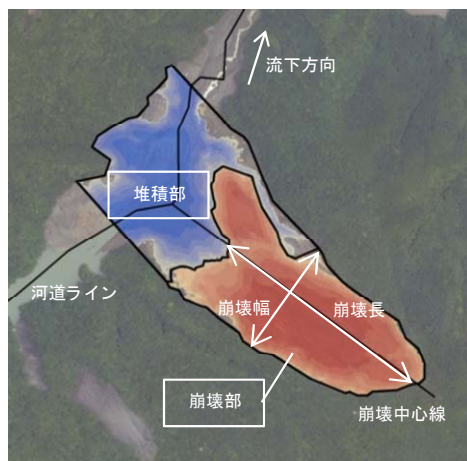


図2 崩壊規模計測の概念図(赤谷の事例)

2.5 崩壊地からの供給条件の算出

河道の地形条件は、崩壊前の LP を用いて作成した河道断面を用いて算出した。まず、崩壊前の LP より 5m コンターの等高線図を作成し、これを参考に河道ラインを設定した。次に、河道ラインに直行する横断面図を、河道ラインと崩壊中心線とが交わる点を基点に上流 100m、下流 300m の区間において 50m 間隔で作成した(図3)。作成した横断面図において、崩壊前後の LP の差分より求めた最大崩壊深と同等の水深を想定し、断面積と潤辺を計測した。また、各断面について上流 100m 区間における河床勾配を計測した。以上の計測結果を元に、マニング式より河道の地形条件を算出した。

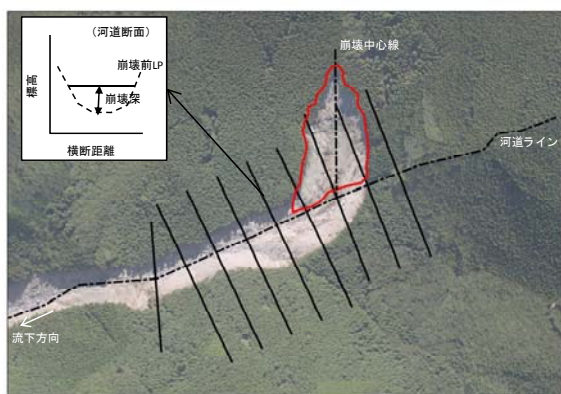


図3 河道断面計測の概念図(平鍋の事例)

2.6 検討結果

崩壊地からの供給条件と河道の地形条件を算出した結果の一例として、赤谷の事例を図4に、平鍋の事例を図5に示す。

赤谷での崩壊地からの入力条件は約 $2.0 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。それに対し、河道の地形条件は、崩壊地直下で比較的大きく約 $3.0 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ であるが、その上下流河道では $5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$ 程度であり、河道の地形条件に対し崩壊地からの供給条件は 40 倍程度であった。

一方、平鍋では崩壊地からの入力条件は約 $1.8 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$ であった。それに対する河道の地形条件は、最大で約 $1.5 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$ 、その上下流河道では約 $8 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ ～約 $1.3 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{s}$ であり、河道の地形条件に対し崩壊地からの供給条件は 2 倍弱であった。

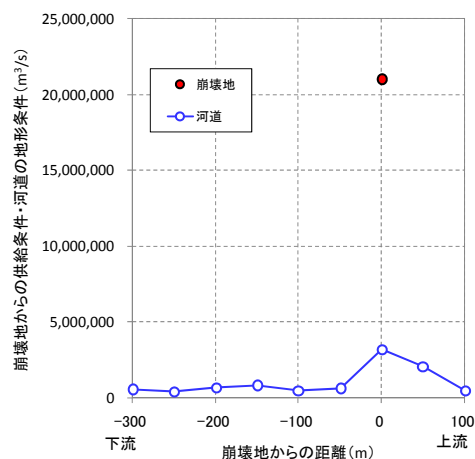


図4 供給条件と地形条件の算出結果(赤谷の事例)

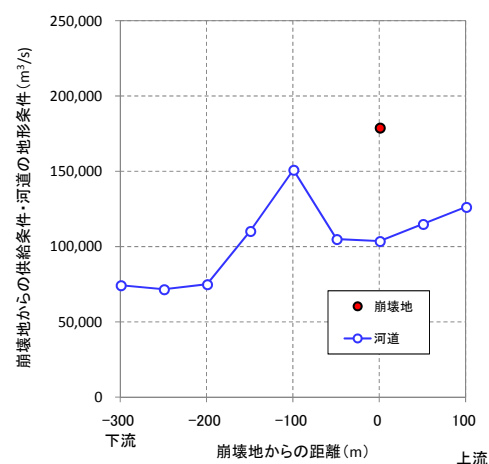


図5 供給条件と地形条件の算出結果(平鍋の事例)

図6に、対象事例での算出結果を示す。図中の実線は崩壊地からの供給条件と河道の地形条件の大きさが等しい関係を示す。本検討で対象とした崩壊地は、崩壊地からの供給条件と河道の地形条件で、比較的実線から離れた地点にプロットされるAグループと、実線に近い地点にプロットされるBグループの2つのグループに区分することができた。つまり、AグループはBグループに比べ、河道の地形条件に対する崩壊地からの供給条件が大きいことがわかった。また、Aグループは表-1に示した崩壊量と堆積量の比がすべての崩壊地で50%以上であり、崩壊地直下に堆積する崩壊土砂の割合が大きく、堆積型になりやすいと考えられる。

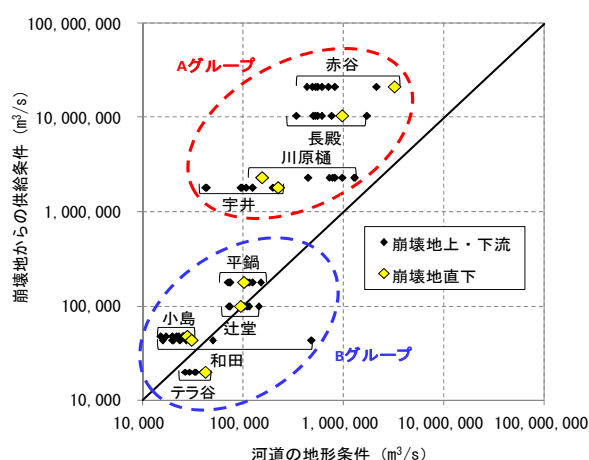


図6 供給条件と地形条件の比較

2. 7 まとめ

本検討では既往の崩壊地について、崩壊地から河道への供給条件と崩壊地直下の河道の地形条件に着目し、それらが崩壊土砂の挙動に与える影響を分析した。その結果、崩壊土砂の挙動は、河道の地形条件に対する崩壊地からの供給条件の大きさに影響を受けていると考えられた。しかしながら、本検討に用いた事例は9箇所と限られていることから、今後データを集集し、他の崩壊地においても同様な傾向が確認できるか、引き続き検討が必要である。

3. 天然ダム堆積形状

3. 1 天然ダム堆積勾配に関する既往の検討

深層崩壊などにより形成した大規模な天然ダムは、決壊時には下流の広い範囲へ甚大な土砂・洪水氾濫被害をもたらす恐れがある。その際、天然ダムの高さと共に天然ダム下流堆積勾配が決壊時のピーク流量と関連が大きいことが実験的にも示されている⁵⁾。そのため、数値計算により決壊時の被害範囲を把握する場合、堆積勾配を含む天然ダム縦断形状の推定が重要である。天然ダムの規模、形状に関する研究は、事例資料収集を中心にこれまでも広く実施されてきた^{6,7)}が、従来の天然ダムに関する事例資料は、天然ダムを形成する土塊量の把握を主眼としたものが多く、高さと幅、長さに着目して整理されており、天然ダムの縦断形状について整理されたものはほとんどない。今後の天然ダム検討の基礎資料とするため、計測方法が明らかにされた精度よい資料の蓄積が必要とされている。

3. 2 既存資料による天然ダム堆積勾配分布の推定

天然ダムの形状諸元が体系的に整理されている資料として、表2に示す2資料を用いた。これ以外に体系的に整理された資料として、中部地方建設局(1987)による天然ダム事例集⁸⁾、Casagli, N et al. (1999)によるイタリア国内の事例を中心とした資料⁹⁾がある。前者については、資料(A)で一部見直された結果が掲載されており、また資料(B)においてもほぼ網羅されている。後者については、収集事例の個別データが示された資料が見当たらないことから、参照することができなかった。

これらの資料では堰止め高、堰止め長が整理されているが、事例の多くは、当時の地形図、空中写真、住民ヒアリング等から推定したものであり、堰止め長に越流開始点から下流側の堆積範囲をどの程度含むかは事例により異なることが予想される。そのため、堰止め長に対する下流堆積範囲を図7に示すCASE1～CASE3で想定して、感度分析的に下流側堆積勾配を算出した。CASE1は、越流開始点が下流末端から堰止め長の3分の1の位置にあるとし、同様にCASE2は2分の1、CASE3は3分の2とした。

表 2 天然ダム諸元引用資料

	出典	掲載件数 (有効件数)
A	日本の天然ダムの対応策 (水山ほか, 2011)	168 件 (142 件)
B	Documented historical landslide dams from around the world (J.E.Costa, 1991)	463 件 (168 件) ※うち国内事例 78件 (60件)

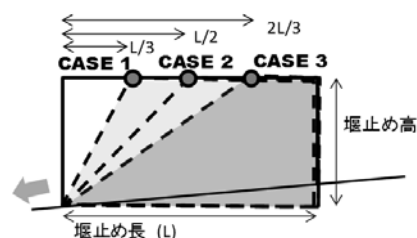


図 7 天然ダム堆積勾配想定ケース

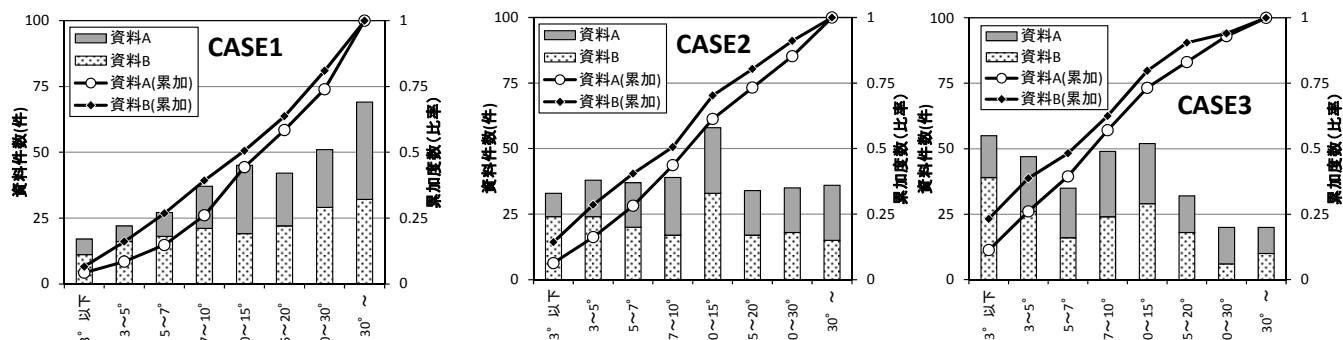


図 8 既往文献の堰止め高、堰止め長さから推定した下流側堆積勾配の分布

推定した結果を図 8 に示す。より急な状態での堆積を想定した CASE1 においても全体のほぼ 75%以上が 30° 以下となった。同様に CASE 2 では、20° 以下、CASE3 では 15° 以下であった。これまで、天然ダムの堆積勾配は、土砂の内部摩擦角（一般に 30~35° 程度）と考えられることもあったが¹⁰、既存の資料から再計算した結果では、それよりも緩い勾配で堆積することが推察された。

3. 3 航空レーザ計測データを用いた天然ダム堆積勾配分布

3.3.1 天然ダム堆積勾配の計測方法

続いて、近年精度向上が進んでいる LP を用いて、実際に天然ダムの堆積勾配を計測した。ここで、侵食過程にあり水筋が変化しやすい天然ダム堆積範囲では、側岸測線及び中心線は一意的な設定が難しい。そこで、1mDEMデータとそこから作成した 1m間隔の等高線図を用いて、天然ダム堆積勾配を示す中心線について次のように設定した（図 9）。最初に斜面勾配の変化点を参考に側岸を設定する（①）。次に、計曲線と側岸線の交点と、河道を挟んで同じ標高をもつ交点を結ぶ測線を設定する（②）。この測線の中点を縦断方向につないだ線を中心線とし、中心線に沿って横断測線を設定する（③、④）。この方法では、片岸に著しく土砂が堆積しているような区間では、②の測線が設定されず、区間上下流の交点から中点が設定されるため、土砂堆積により地形が不連続で

複雑な範囲についても、側岸の地形変化や水筋の影響を受けにくい。本検討の下流側堆積勾配は、越流開始点と下流側末端の 2 点間の標高差を比高とし、比高と 2 点の水平距離から下流側堆積勾配を求めた。

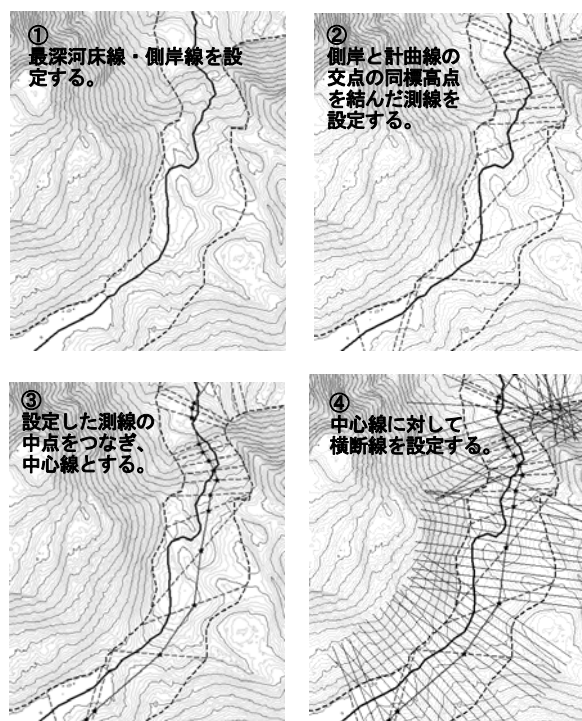


図 9 中心線及び横断線作成方法

3.3.2 堆積勾配の計測結果

上記の方法で求めた下流側堆積勾配について図10に整理した。なお、比高は等高線図の縦断方向の勾配点から下端と上端（越流開始点）を求めて差をとったものである。また、対象としたデータは、中越地震で形成された天然ダム51箇所、岩手宮城内陸地震で形成された18箇所、紀伊半島豪雨3箇所である。

その結果、比高 1m～70m 以上のすべての天然ダムにおいて、下流側堆積勾配は 23° 以下で、概ね全体の 75%程度が 10° 以下であった。また、紀伊半島で形成された大規模な天然ダム（栗平、赤谷、長殿）

についても形成直後、越流侵食後を通して 10° ～ 30° 程度であった。この結果を、既存資料から再計算した結果と比較すると、CASE 3 よりもさらに緩い傾向にあった。しかし、図11からわかるように、紀伊半島で形成されたような大規模な天然ダムでは、勾配変化点が複数あり、越流開始点と下流末端の勾配では実際の天然ダムの形状を示すには不十分であり、天然ダム形状を代表する堆積勾配としては別途検討が必要と考える。

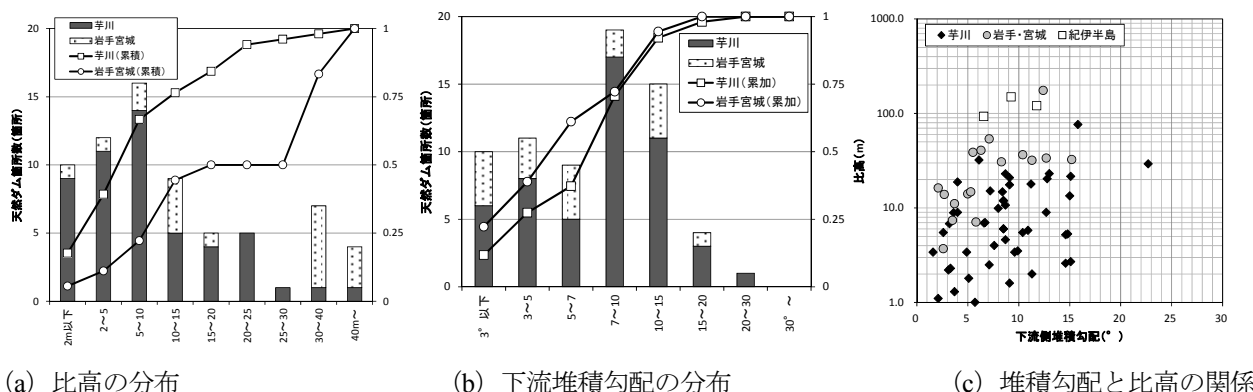


図10 対象とした天然ダムの形状の頻度分布

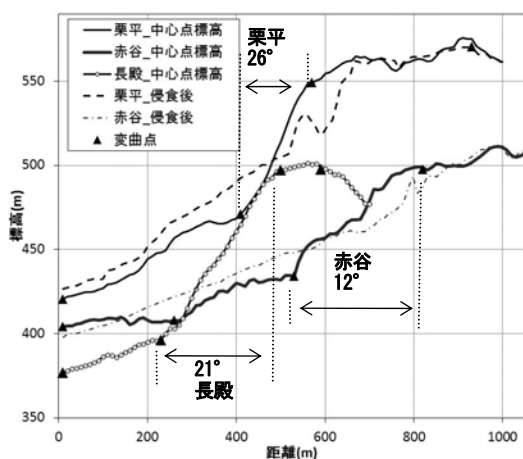


図11 縦断図及び最急勾配（紀伊半島）

3.4 まとめ

天然ダムの下流側堆積勾配は、越流決壊時のピーク流量との関連が大きいことが指摘されているものの、これまで体系的に整理された資料がなかった。既往文献やLPによる形状計測の結果、今回対象とした事例では下流側堆積勾配は 10° ～ 20° 未満の事例が多かった。

しかし、天然ダムの越流決壊時には、通常では考えられない洪水流量の発生により土砂・洪水氾濫による被害が発生する恐れがあり、世界的にみても多数の死者が発生している。前述のとおり、天然ダム下流堆積勾配が急な場合ほどピーク流量が大きくなる傾向にあることが知られている。そのため、住民に対する警戒避難情報の提供や被害予測を実施する場合等は、安易に過去の事例から平均的な堆積勾配を想定するのではなく、被害を最小限化することを念頭に、天然ダムの構成材料や周辺地形を勘案して天然ダム形状を想定する必要がある。

また、今後本研究では十分に検討できていない天然ダム上流末端から下流末端までの堆積形状の把握方法の検討と、天然ダム越流決壊時の侵食勾配についても検討したいと考える。

4. おわりに

平成24年度は、深層崩壊発生危険箇所・発生規模予測手法の作成の基礎検討として、地形特性が崩壊土砂の挙動に与える影響について検討と、河道閉塞（天然ダム）の堆積勾配についての検討を行った。

地形特性が崩壊土砂の挙動に与える影響について検討では、既往の崩壊地について、崩壊地から河道への供給条件と崩壊地直下の河道の地形条件に着目し、それらが崩壊土砂の挙動に与える影響を分析した。その結果、崩壊土砂の挙動は、河道の地形条件に対する崩壊地からの供給条件の大きさに、影響を受けているものと考えられた。しかしながら、本検討に用いた事例は9箇所のみであり、他の崩壊地においても同様な傾向が確認できるかについては、引き続き検討が必要である。

一方、河道閉塞（天然ダム）の堆積勾配についての検討では、既往の天然ダム事例から得られた計測結果では、天然ダムの形状は比高 1m～70m のすべての天然ダムにおいて、下流側堆積勾配は 23° 以下で、概ね全体の 75%程度が 10° 以下であることが示された。また、紀伊半島で形成された大規模な天然ダム（栗平、赤谷、長殿）についても形成直後、越流侵食後を通して 10～30° 程度であった。今後は本研究では十分に検討できていない天然ダム上流末端から下流末端までの堆積形状の把握方法の検討と、天然ダム越流決壊時の侵食勾配についても検討が必要と考える。

参考文献

- 1) 石川芳治：地震による土石流の発生に係わる地形、地質条件、砂防学会誌、Vol. 51、No. 5、pp. 35-42、1999.
- 2) 山田孝・南哲行・菊池英明・三浦郁人：複合型土石流の発生に關与する地形要因についての統計的解析、砂防学会誌、Vol. 53、No. 4、pp. 23-29、2000.
- 3) 林一成・田中頼博・阿部真郎・若井明彦：地震時における天然ダム発生場の特徴について、第 60 回平成 23 年度砂防学会研究発表会概要集、pp. 154-155、2011.
- 4) 土木研究所：深層崩壊に起因する土石流の流下・氾濫計算マニュアル(案)、土木研究所資料第 4240 号、2012.
- 5) 小田晃・水山高久・長谷川祐治、天然ダム決壊の模型実験、砂防学会誌、60(2)、p. 33-38、2007
- 6) 水山高久監修、「日本の天然ダムの対応策」、古今書院、p202. 2011
- 7) J. E. Costa・R. L. Schuster、Documented historical landslide dams from Around the World、U.S. Geological Survey、Open-File Report、91-239、486p.、1991
- 8) 中部地方建設局、「天然ダム調査事例集」、p356、1987
- 9) Casaglini N・Ermini. L、Transactions of the Japanese Geomorphological Union、20(3)、p. 219-249、1999
- 10) 高橋保・匡尚富、京大防災年報、第 31 号 B(2)、p. 601-615、1988

A STUDY ON DAMAGE ESTIMATION AND MEASURES FOR SEDIMENT-RELATED DISASTERS CAUSED BY DEEP CATASTROPHIC LANDSLIDES

Budgeted: Grants for operating expenses

General account

Research Period: FY2011-2015

Research Team: Erosion and Sediment

Control Research Group

(Volcano and Debris flow)

Authors: ISHIZUKA Tadanori,

MORITA Koji

YAMAKOSHI Takao

TAKEZAWA Nagazumi

SHIMIZU Takeshi

Abstract : Japan is posed to risks of sediment-related disasters caused by deep catastrophic landslides (DCL), so that it is necessary to develop the methods which enable us to design appropriate structural measures beforehand or to improve crisis management capabilities. At the same time, it is also necessary to study the methods to predict areas at risk of DCL in order to make mitigation measures more efficient under severe financial limitations. In F. Y. 2012, the authors conducted the studies about the relation between the geographical feature conditions of a channel and the action of debris of DCL, and about the form of a landslide dam. We have following results: 1) It is thought that the action of debris is affected by the scale of the DCL to the geographical feature conditions of a channel; 2) The slope by the side of the lower stream of all the landslide dam 1 to 70 m high is 23 degrees or less. And about 75% of them are 10 degrees or less.

Key Words : Debris flow, deep catastrophic landslides, landslide dam