

戦-24 深層崩壊に起因する天然ダム等異常土砂災害対策に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 23

担当チーム：火山・土石流チーム

研究担当者：田村圭司、内田太郎

武澤永純、清水武志

【要旨】

2008年岩手・宮城内陸地震により形成した天然ダムに対して、レーザープロファイラにより計測された詳細な地形データを用いて、越流による侵食・堆積実態について整理した。ついで、実際の事例に適用され再現性が確認されているシミュレーションモデルを用いて、現象の再現を行った。レーザーにより計測されたデータを用いることで、計算条件を詳細に設定することが可能となり、その結果、ピーク流量や侵食・堆積といった土砂移動状況をよく再現できていた。

キーワード：岩手・宮城内陸地震、天然ダム、越流侵食、レーザープロファイラ、数値シミュレーション

1. はじめに

天然ダムの決壊は下流に甚大な被害を及ぼすことがある（例えば、Costa and Schuster、1988；田畑ら、2002）。天然ダムによる下流への被害を予測するためには、越流にともなう天然ダムの侵食・下流への土砂流出を予測することが必要である。そこで、1980年代以降、天然ダムの越流侵食現象に関する数値シミュレーション手法が提案されてきた（例えば、高橋・匡、1988；高橋・中川、1993）、さらに、近年は実際の天然ダム決壊事例を対象に計算が実施され、数値シミュレーション方法の検証・改良が進められている（里深ら、2007a；2007c；千葉ら、2007）。

一方、近年になるまで天然ダムの越流による侵食に関する研究は、数値計算を除くと、模型実験によるものが大半であった（例えば、高橋・八木、1983；水山ら、1989；小田ら、2006；2007）。これに対して、2004年の中越地震以降、中越地震も含めて、2005年の台風14号及び2008年岩手宮城内陸地震で比較的規模の大きい天然ダムが生じ、実際の天然ダムの越流による侵食に関する新しいデータ・情報が報告されてきている（加藤ら、2005；小山内ら、2007；千葉ら、2007；内田ら、2009）。しかし、越流による侵食時のピーク流量を予測する上で影響の大きい越流による侵食幅、侵食による天然ダムの縦断勾配の変化、流出土砂の天然ダム下流における堆積状況に関する詳細なデータは非常に限られている。

一方、近年、レーザープロファイラによる測量技術が格段に進歩し、天然ダムのようにアクセスが悪い場

合においても精度の高い地形情報の取得が可能となってきている。例えば、小山内ら（2007）は中越地震により形成された芋川流域においてレーザープロファイラを用いて、天然ダムの地形変化の実態について報告した。

平成20年岩手・宮城内陸地震では、一迫川、三迫川流域などで15の天然ダムが形成された（井良沢ら、2008）。その中の沼倉裏沢地区、川原小屋地区の天然ダムでは、下流側での避難、既設えん堤の除石などは行われたものの、天然ダム本体に対しては掘削等の対策はとられなかった。一方、沼倉裏沢地区や川原小屋地区の下流におけるダムにおける流入流量の観測データからは、両地区の天然ダムの越流による侵食が原因と見られる急激な増水が見られた。内田ら（2009）は、沼倉裏沢地区における越流侵食直後の現地調査の結果を報告した。しかし、越流侵食直後の現地調査の範囲は限られており、地形変化の状況が十分に把握できたとはいえない面があった。特に、天然ダムより下流の土砂の侵食堆積状況を把握することができなかった。そこで、本研究では、沼倉裏沢地区、川原小屋地区の2地区において、レーザープロファイラにより取得されたデータを用いて、越流前後の天然ダムの形状および天然ダムより下流の侵食堆積状況の検討を行った。さらに本研究では、沼倉裏沢地区で形成した天然ダムを対象に、従来提案されてきた天然ダムの越流侵食に関する数値シミュレーション方法であるLADOFモデル（里深ら、2007a；2007c）を適用し、手法の適用性について検証した。

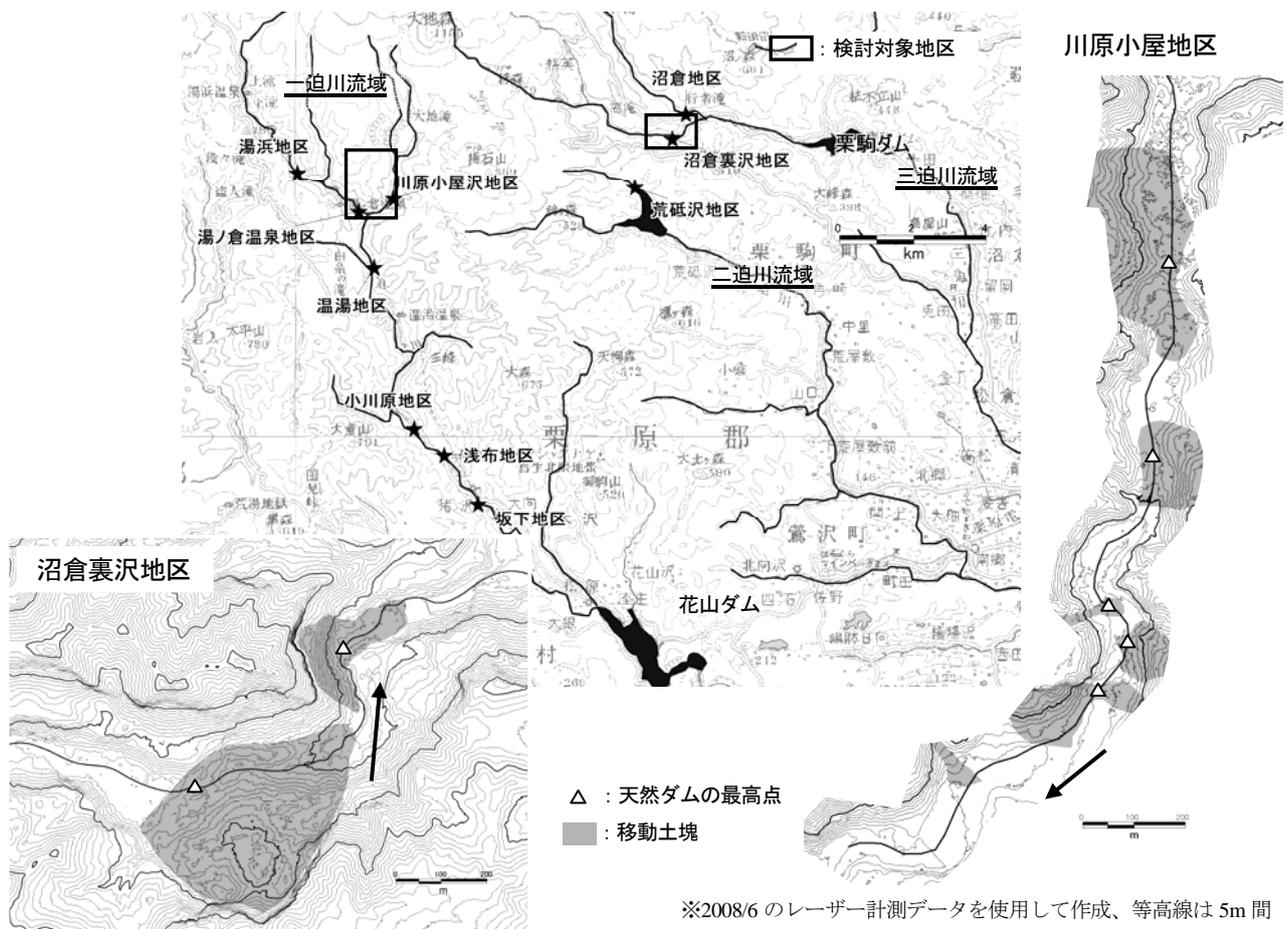


図-1 天然ダムの位置図

2. 研究方法

2.1 研究対象

本研究では、2008年6月14日岩手宮城内陸地震で発生した天然ダムのうち、図-1に示す沼倉裏沢地区、川原小屋地区を対象とした。沼倉裏沢地区の天然ダムは、三迫川流域の栗駒ダムより上流5kmの地点に位置し、右岸斜面で大規模な崩壊が発生し、河道を閉塞した(図-1の左下図)。天然ダム形成箇所より上流の集水面積は約18km²であった。内田ら(2009)の調査によると崩壊した斜面の勾配は約35°、崩壊地の幅は約400~600m、高さは約90mである。その後、形成した天然ダムは6月21日にかけて越流侵食され、湛水域は大幅に縮小した。なお、2008年6月20~21日の同地域では大きな余震もなく降水もなかった(内田ら、2009)。また、三迫川本川の沼倉地区においても天然ダムが生じ、越流侵食による土砂流出が生じた(井良沢ら、2008)。そこで本研究では、沼倉地区の天然ダムからの土砂流出の影響がない沼倉裏沢地区の天然ダムから三迫川との合流点までを検討対象とした。

一方、川原小屋地区の天然ダムは、迫川上流域の左支川川原小屋沢に位置しており、本川との合流点から上流2kmまでに両岸から崩壊が複数発生し河道を閉塞した。(図-1の右図)。その中でも本川合流点から1、600mと1、200m付近に形成した天然ダムは比較的規模が大きく、前者では右岸側が崩壊し、崩壊した斜面の勾配は約33°、崩壊地の幅は約400~500m、高さは約70m、また後者では左岸側が崩壊し、崩壊した斜面の勾配は約30°、崩壊地の幅は約100~200m、高さは約90mである(GISによる簡易計測)。天然ダム形成箇所より上流の集水面積は約15km²であった。

2008年7月12日未明に花山ダムにおける流入流量の急増は生じた。また、2008年7月12日の午前中にヘリコプターからの観察により、川原小屋地区の天然ダムにおける湛水域がほぼ消滅していたことから、花山ダムにおける流入流量の急増は川原小屋地区の越流侵食によると考えられた。なお、2008年7月10~12日の降水量は、連続雨量28.5mm(10日午後10時~12日午前4時)、最大時間雨量12mm(12日午前3時)であった。

2.2 使用したデータ

本研究では、3 時期（2008 年 6 月 16 日（地震発生から 2 日後）、9 月 8～9 日、11 月 12～13 日）のレーザープロファイラにより計測された地形データ（以下 LP データと呼ぶ）を用いた。なお、使用した LP データの諸元は表-1 のとおりである。また、同期間の降水量（6/17～10/22 は栗駒深山、10/23～11/30 は駒ノ湯雨量観測所）を図-2 に示した。期間内の最大日雨量 128.5mm（10/24）、日最大時間雨量は 35mm（9/7 16:00）であった。

すなわち、2008 年 6 月 16 日の LP データは天然ダム形成直後の越流侵食前のデータ、9 月 8～9 日は越流侵食後のデータ、11 月 12～13 日のデータは日雨量 120mm の降雨の後と位置づけられる。

表-1 用いた LP データ

名称	2008/6	2008/9	2008/11
計測日	6/16	9/8, 9	11/12, 13
メッシュサイズ	1m		
備考	地震直後	天然ダム越流侵食後	

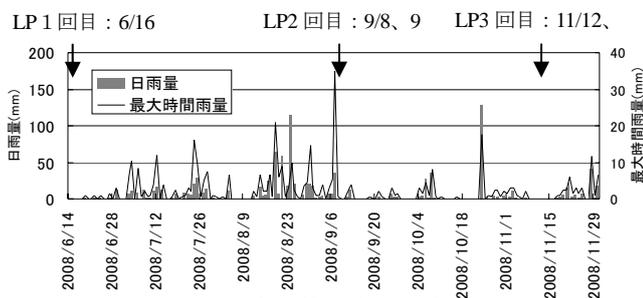


図-2 降雨状況(アメダス)

2.3 地形及び地形変化の把握

(1) 地形計測

本研究では、地震直後(6月)の地形に基づき、図-3 のように河道の範囲を設定した。なお、次のような箇所を河道と斜面との境界とし、越流侵食前後で河道の範囲は変更しないものとした。

○ 崩壊土砂の影響がない範囲

空中写真及びオルソ画像より、河道と斜面の境界(図-3で示す実線の範囲)を判読。

○ 崩壊土砂の影響がある範囲

空中写真及びオルソ画像を確認して、地山または露岩箇所が明らかでない場合は、横断面を確認し、横断勾配の変化点となる地点(図-3で示す点線の範囲)を判読。

その上で、LP データより天然ダム形成地点及びそ

の下流の河道の中心に沿って測線(図-3で示す二重線)を引き河道の縦断形を求めた。また、20m 間隔で縦断測線に直交する横断測線を設定し、天然ダム及び河道の横断形を把握した。

(2) 侵食状況の把握

(1)で作成した横断面図を用いて、天然ダム形成箇所の河道幅(図-4の B1) および天然ダムの越流侵食により生じた溝の上幅(B1)、下幅(B3) および深さ(H)を計測した。さらに、(1)で作成した横断面図とオルソ画像を用い、20m ピッチで通水面の標高を算出し、各断面での上流 100m の縦断勾配を算出した。

(3) 土砂変動量および変動高の算出

土砂変動量、変動高を 2 時期の LP データの差分をとることにより算出した。その際、土砂変動量は、(1)で設定した河道範囲を対象に算出した。

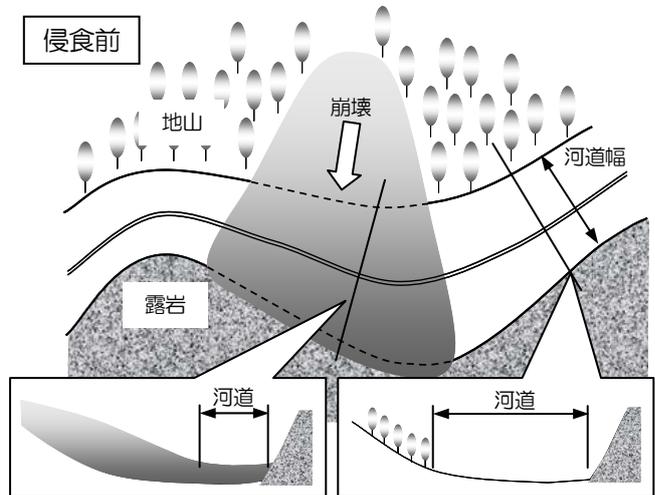


図-3 河道幅の設定手法に関する模式図

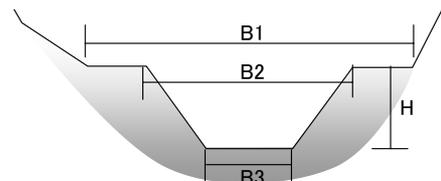


図-4 越流侵食により生じた天然ダムの水みちの模式図 (B1 は河道幅、B2、B3、H はそれぞれ水みちの上幅、下幅および深さ)

3. 結果

3.1 越流侵食前の天然ダムの形状

(1) 沼倉裏沢地区

上流側の天然ダムは、堰き止め長さ 550m、閉塞箇所の推定元河床高と河道閉塞箇所の最高点の比高は約 26m、閉塞箇所の下流端と河道閉塞箇所の最高点の比高は約 42m、水平距離は 400m、下流のり勾配は 6° であった。なお、図-5の天然ダム上流側の水平面は湛水の影響であると考えられる。

また、この天然ダムの下流端から約 200m 下流（三迫川合流点から 400m～500m 上流）では、堰き止め長さ 300m、閉塞箇所の上流端と河道閉塞箇所の最高点の比高は約 8m、閉塞箇所の下流端と河道閉塞箇所の最高点の比高は約 17m、水平距離は 250m、下流のり勾配は 3.9° である（図-5）。

(2) 川原小屋地区

川原小屋地区では空中写真及びレーザープロファイラデータより 3つの天然ダムが確認できた（図-6）。1番上流川の天然ダム（以下 A ダムと呼ぶ）は堰き止め長さ 300m、図-6 より、元河床高と河道閉塞箇所の最高点の比高は約 24m、閉塞箇所の下流端と河道閉塞箇所の最高点の比高は約 29m、水平距離は 200m、下流のり勾配は 8.3° である、一方、Aダムの下流の天然ダム（以下 B ダムと呼ぶ）は、堰き止め長さ 200m、閉塞箇所の上流端と河道閉塞箇所の最高点の比高は約 14m、閉塞箇所の下流端と河道閉塞箇所の最高点の比高は約 20m、水平距離は 150m、下流のり勾配は 7.6° である。また、沼倉裏沢地区同様、天然ダム上流側の水平面は湛水の影響であると考えられる。さらに、Bダムの下流にはさらに小規模な天然ダム（以下 C ダムと呼ぶ）が形成していた。

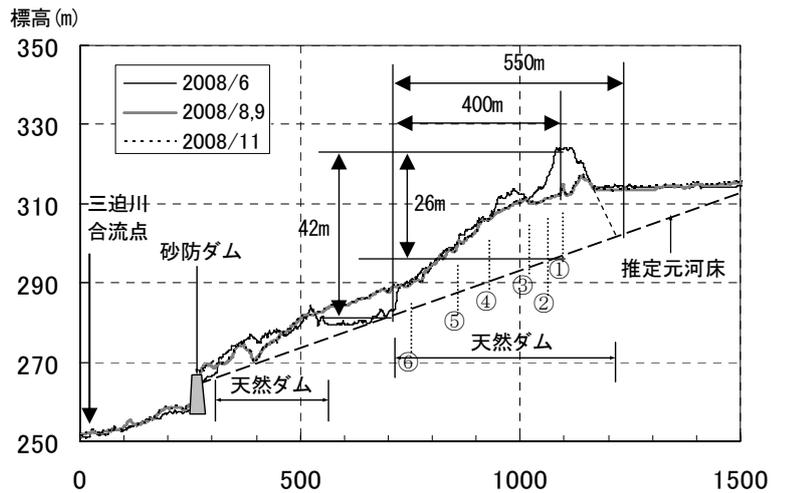
3. 2 越流侵食による天然ダムの形状変化

3.2.1 縦断形状および勾配の変化

越流侵食前後の天然ダム周辺の縦断勾配の変化状況を図-7に示す。図中の推定元河床勾配は天然ダムの上下流の縦断勾配を示した。

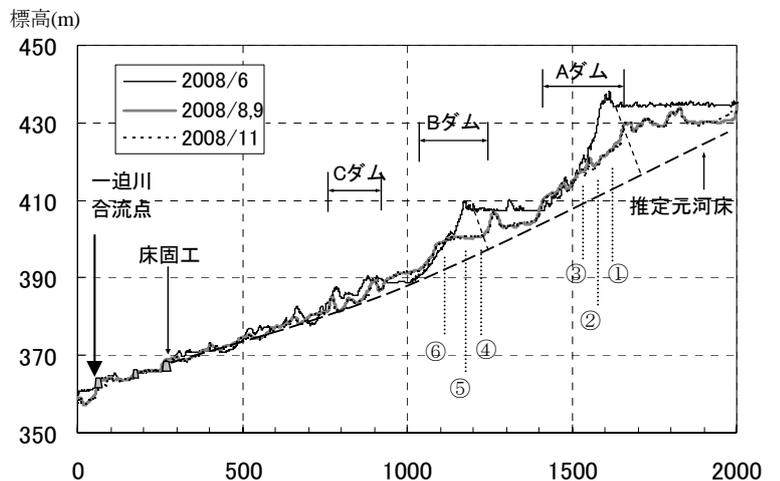
(1) 沼倉裏沢地区

沼倉裏沢地区では、9月は6月に比べて天然ダム天端付近（1、100m 付近）が天然ダムの形成により約 26m 上昇した河床が、約 12m 侵食により河床が低下（図-5）し、縦断勾配は約 10° から約 2° に低下した（図-7）。これに対して天然ダム下流端から上流 200m の範囲（700m～900m）付近では、河床の低下量は最大でも 2.5m 程度であり（図-5）、縦断勾配は侵食前後でほとんどかわらず約 6° であった（図-7）。天然ダム上流側には、9月の時点においても水平面が見られるが、越流侵食後においても河道閉塞が完全に解消されず湛水面が残っていたためである。また、9月と6月の湛水位はほぼ同じであったが、6月のデータは越流侵食が生じる5日前の湛水位上昇中のデータであり、たまたま越流侵食前のデータ取得時の湛水位が越流侵食後の水位と一致したと考えられる。



※図中の推定元河床は、LP データによる天然ダムの上下流の縦断勾配から推定した。

図-5 沼倉裏沢地区における河床縦断形状の変化



※図中の推定元河床は、LP データによる天然ダムの上下流の縦断勾配から推定した。

図-6 川原小屋地区における河床縦断形状の変化

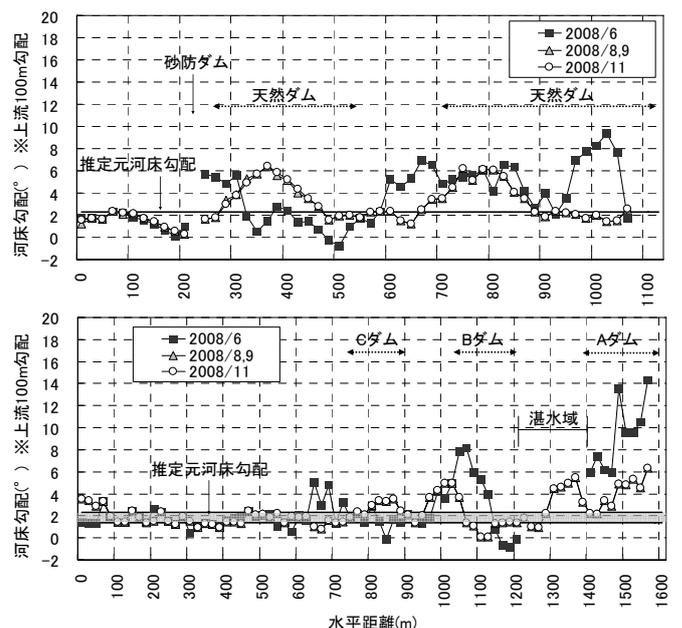


図-7 縦断勾配の変化(上：沼倉裏沢、下：川原小屋)

一方、下流側の小規模な天然ダム地点では、天端の勾配の緩やかな部分（図-5の300m～500m付近）が侵食され平均約2.5m河床が低下した。また、9月と11月を比較すると、天然ダム形成箇所の縦断形にはほとんど違いが見られなかった。

(2) 川原小屋地区

川原小屋地区では、9月は6月に比べてAダム天端付近（1,600m付近）が天然ダムの形成により約24m上昇した河床が、約16m侵食により低下（図-6）し、縦断勾配は約14°から約4°に低下した（図-7）。またBダム天端付近（1,200m付近）が約10m侵食により河床が低下（図-6）し、縦断勾配は約8°から約1°に低下した（図-7）。Cダム付近の河床勾配は侵食および堆積により次第に元勾配に近づいた（図-7）。

沼倉裏沢地区と同様、2008/9と2008/11を比較すると、天然ダム形成箇所の縦断形にはほとんど違いが見られなかった。

3.2.2 越流侵食に伴う天然ダムの水みちの形成

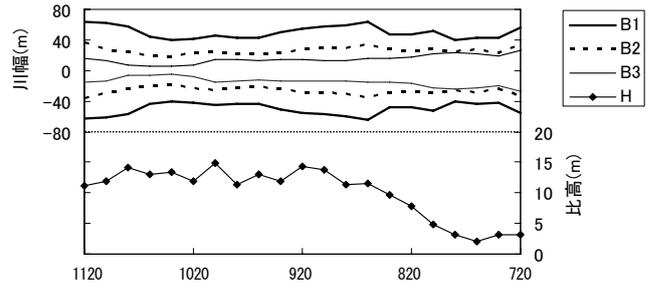
(1) 沼倉裏沢地区

図-8で示すとおり、侵食前の天端（最高点）位置（侵食前の最高点は上流端から40m）に近い天然ダム上流端から40m～100m付近で溝の下幅（図-4のB3）が15m程度と最も狭く、下流に行くにしたがって徐々に40～50mまで広がっている。また、溝の上幅（図-4のB2）も下幅とほぼ同じ傾向が見られ、下流へ行くほど幅が広がった。溝の比高（図-4のH）も侵食前の天端で最も大きく、約13mであったのに対し、下流では約2.5mまで小さくなった。横断形状を図-10に示す。

(2) 川原小屋地区

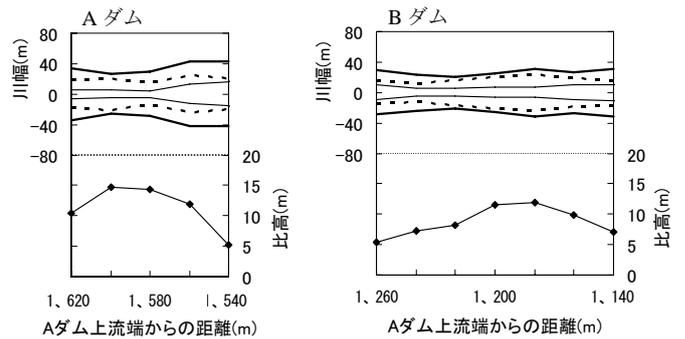
図-9で示すとおり、Aダム上流端から20m付近（侵食前の最高点は上流端から20～40m）で溝の下幅が13m程度と最も狭く、下流に行くにしたがって徐々に約30mまで広がっている。また、溝の上幅も下幅とほぼ同じ傾向が見られ、下流へ行くほど幅が広がった。比高は上流端から20m付近で約15mと最も大きかったのに対し、下流では約5mまで小さくなった。

また、BダムはAダム上流端から380m～400m付近で溝の下幅が10m程度と最も狭く、下流に行くにしたがって徐々に約20mまで広がっている。また、溝の上幅も下幅とほぼ同じ傾向が見られ、下流へ行くほど幅が広がった。一方、比高は溝の下幅が最も狭い位置よりやや下流の420m～440m付近で最も



天然ダム上流端からの距離(m)
※図-5で示す720m～1,120mの区間

図-8 沼倉裏沢地区の水みちの幅および深さ



Aダム上流端からの距離(m) Bダム上流端からの距離(m)
※図-6で示す1,540～1,620mの区間(Aダム)および、1,140m～1,260mの区間(Bダム)

図-9 川原小屋地区の水みちの幅および深さ

大きく、約12mであったのに対し、下流では約7mまで小さくなった。なお、Bダムの侵食前の最高点は上流端から20～40mであった。横断形状を図-11に示す。

3.3 越流侵食に伴う土砂流出による下流河道の河床変動

3.3.1 天然ダム下流河道の地形変化

(1) 沼倉裏沢地区

9月のLPデータでは、6月に比べて上流側の天然ダムの直下から下流側の小規模な天然ダムの上流側（500～700mの区間）では、最大約4.2mの土砂が堆積した（図-12の上図）。この区間の9月の河床勾配は概ね元河床勾配（2.3°）に近い値となっていた。下流側の小規模な天然ダムの直下には砂防えん堤が存在し、砂防えん堤下流での土砂変動は最大で約1.0mと上流区間に比べてわずかであった。また、いずれの区間においても、9月と11月の間には、縦断形に顕著な差は見られなかった。

(2) 川原小屋地区

9月のLPデータでは、6月に比べてAダムの直下からBダムの上流側（1,400m付近）では、最大約1.4mの土砂が堆積した（図-13の上図）。この区間の9月の河床勾配は概ね元河床勾配（2.3°）に近い値とな

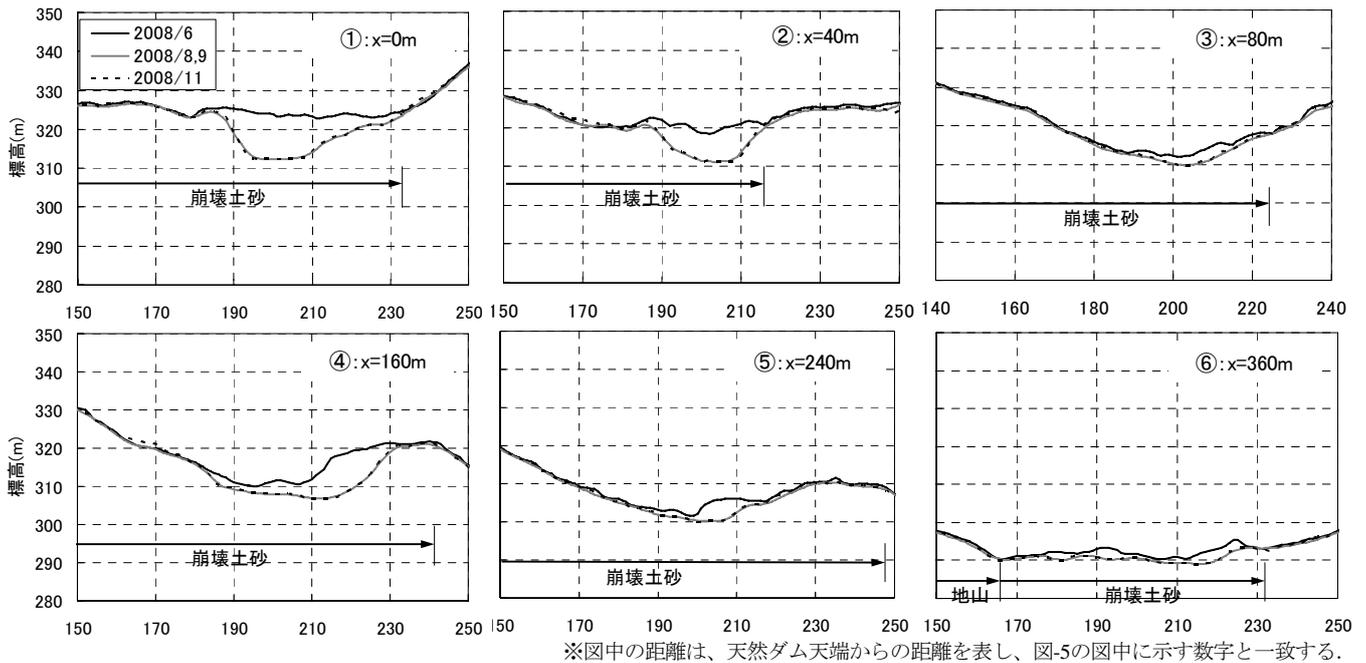


図-10 沼倉裏沢天然ダムの横断形状の変化

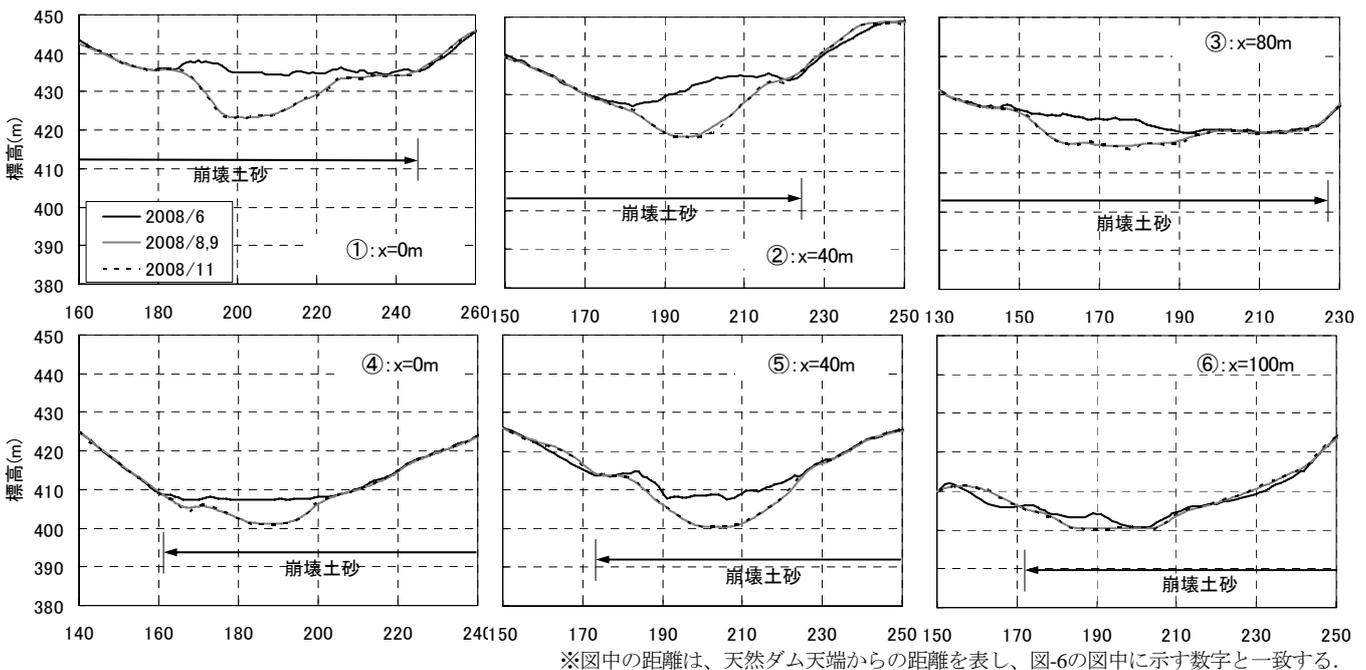


図 11 川原小屋地区天然ダムの横断形状の変化

っていた。一方、Bダムの直下からCダムの上流側（900m～1、100mの区間）では、最大約2.4mの土砂が堆積した。また、いずれの区間においても、9月と11月の間には、縦断形に顕著な差は見られなかった。

3.3.2 越流侵食に伴う土砂変動量

次に、2時期のLPデータの差分をとることにより算出した20mピッチの土砂変動量および区間内平均、最大、最小の変動高をそれぞれ図-12下図、図-13

下図に示す。なお、図の縦軸は、プラスが堆積、マイナスが侵食を表す。

(1) 沼倉裏沢

6月～9月の間に上流側の天然ダムで約5.3万 m^3 （700m～1、120mの区間）の土砂が侵食され、天然ダム下流端から下流の小規模な天然ダムとの間に全体の約1/3である1.8万 m^3 （500m～700mの区間）の土砂が堆積していた。また、この下流側の規模が小さい天然ダムの侵食量は約1.5万 m^3 であった。さ

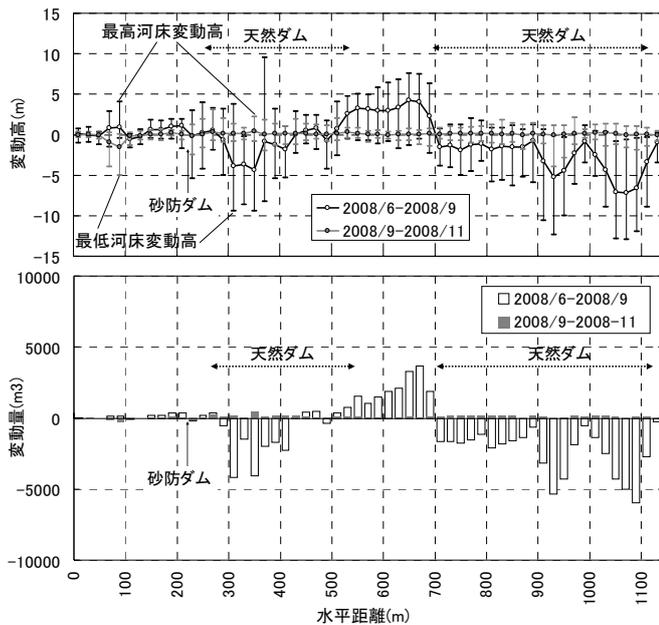


図-12 沼倉裏沢における越流侵食による土砂変動量

らに、この小さい天然ダムから合流点までの約300mの区間に0.2万 m^3 の土砂が堆積していた。この結果、2つの天然ダムの侵食により生じた土砂のうち、約70% (4.8万 m^3) が下流へ流出したと考えられる。

(2) 川原小屋地区

6月～9月の間にAダムで約3.9万 m^3 (1,480m～1,600mの区間)の土砂が侵食され、Bダムとの間に全体の約1/6.5である約0.6万 m^3 (Bダム湛水域を含まない1,380m～1,480mの区間)の土砂が堆積していた。ただしA、Bの両天然ダムは6月の計測時点で比較的大きな湛水域を有しており、6月における湛水域区間の堆積量はLPによる差分では算出できない。そのため、Bダム湛水域に堆積したと考えられる土砂を推定した。ここでは、Bダムの上流側法面を縦断面図から推定し、元河床との交点の0mとして上流側湛水域160mの範囲の9月の河床高と推定元河床高の差分を算出した。これによると湛水域の9月時点の堆積量は約3.6万 m^3 であった。ただし、Aダムを形成した崩壊地は、下流側にも広範囲に広がっている。そのため、この値は、側壁斜面から直接供給された土砂量も含まれ、必ずしも全てが上流から供給されたわけではないと考えられる。

一方、Bダムでは約1.8万 m^3 (1,100m～1,200mの区間)の土砂が侵食され、Cダムとの間に約0.5万 m^3 (900m～1,100mの区間)の土砂が堆積しており、この区間での堆積の量は沼倉裏沢と同様、上流から下流に向かって徐々に減少した。また、Cダムでは約1.1万 m^3 (700m～900mの区間)の土砂が侵食さ

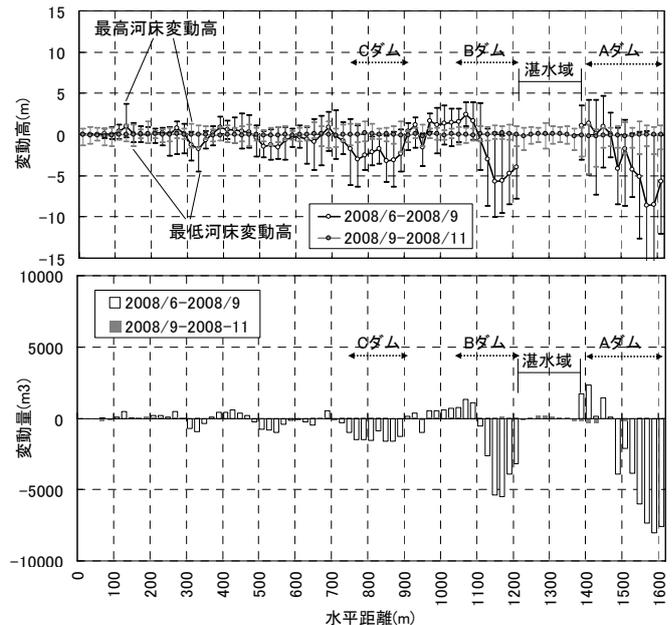


図-13 越流侵食後の土砂変動状況(川原小屋)

れ、さらにCダム下流から合流点までで0.2万 m^3 侵食されており、B、Cの2つの天然ダムの侵食により生じた土砂のうち、約84% (2.6万 m^3)が下流へ流出したと考えられる。

4. 考察

4.1 結果のまとめと既往実験・計算との比較

沼倉裏沢地区は無降雨時に越流侵食が生じたのに対し、川原小屋地区では降雨時に越流侵食が生じたなど流入流量に差があったと考えられる。しかし、結果で示したように、侵食形態において、以下のような多くの共通点が見られた。

- ① 天然ダムにより約26m、24m上昇した河床が、それぞれ約12m、16m侵食により低下したが、越流による侵食後もそれぞれ約14m、8m河床は上昇したままであった。
 - ② 侵食により大きく河床が下がった部位の縦断勾配は元河床の勾配に近かった。
 - ③ 侵食により生じた水みちの形状を詳しく見ると、侵食前の天然ダムの最高点付近で最も深くかつ狭かったのに対し、下流に行くに従い、浅くなり、侵食幅は大きくなった。
 - ④ さらに、いったん越流による侵食があったのちは、総雨量約120mmの降雨があったが、天然ダムの形状に大きな変化は見られなかった。
- また、天然ダムより下流の土砂流出・堆積状況において、以下のような共通点が見られた。

- ⑤ 天然ダムより流出した土砂の一部が直下に堆積していた。また、いずれの箇所も、大きな天然ダムのすぐ下流に小規模な天然ダムが形成されていたが、天然ダム下流において生じた堆積のうち、大半は下流の小規模な天然ダムとの間で生じていた。
- ⑥ 下流の小規模な天然ダムより下流では、縦断勾配は天然ダムの下流ののり勾配より緩かったが顕著な堆積は生じていなかった。
- ⑦ 堆積域の縦断勾配はほぼ元河床の縦断勾配と等しく、天然ダムの下流ののり勾配と比べると緩かった。

①～⑦の結果について、既往の実験（高橋ら、1988、1993；水山ら、1989；小田ら、2007）及びシミュレーション（高橋ら、1988；里深ら、2007a、2007b）と比較し、表-2に整理する。シミュレーションのうち、高橋ら（1988）は実験と比較し侵食・堆積形状の再現性を確認した。さらに里深ら（2007a）は実際の高磯山に見られる事例に関して再現計算を実施し、ピーク流量が再現できることを示している。ただし、実験・シミュレーションの多くはほぼ均一粒径（小田ら（2007）を除く）を対象（あるいは代表粒径を用いた計算）に実施したものである。

結果、実験・シミュレーションとも、条件や検討対象が様々であるため、一概に現地との比較はできないが、③の侵食により生じた水みちが下流に行くほど浅く、幅が広がる結果は既往の実験やシミュレーションと同様の結果となっていた（表-2）。

表-2の①で示したように、天然ダムの侵食が途中で止まる（天然ダムの全てが侵食されない）とした、実験やシミュレーション（高橋ら、1988、1993；里深ら、2007a、b）では、侵食により大きく河床が下がった部位の天然ダムの縦断勾配は元河床の勾配より急であった（表-2の②参照）。これらの実験やシミュレーションでは、侵食された土砂が天然ダム直下に堆積する勾配と天然ダムの侵食後の縦断勾配が等しく、元河床勾配よりも急であった。その結果、侵食後の天端から堆積末端まで縦断勾配の変化はほとんど無く、直線的な縦断形状となり、侵食が停止している（高橋ら、1988；1993；里深ら、2007a、b）。しかし、沼倉裏沢、川原小屋地区では、侵食後の天端付近の縦断勾配及び流出土砂の堆積勾配は元河床勾配に近いものの、侵食が途中で停止しており、既往の実験・シミュレーションとは異なる結果となっていた（図-14）。

4.2 侵食後の天然ダムの縦断形状

4.1で示したように、今回検討した2箇所の天然ダムは越流による侵食後も約14mまたは8m河床は上昇したままであった。言い換えれば、侵食が途中で停止していた。しかし、停止後の河床の縦断形状は4.1でも述べたように従来の実験・シミュレーションとは異なるものもあった。また、今回の検討から、侵食後の総雨量120mmの降雨では、更なる侵食はほとんど生じなかったことを示した。このように、どのような状態である程度の天然ダムは安定状態に達し、その後、侵食が生じにくくなるかは、被

表-2 結果の比較

※ 条件や検討対象が異なるためのものも含む。

	天然ダムの侵食状況		天然ダム下流の土砂流出・堆積状況	
	実験	シミュレーション	実験	シミュレーション
同様の結果	○高橋ら(1988,1993) 天然ダムの一部(約2/3)が侵食	○高橋ら(1993)・里深ら(2007a,b) 天然ダムの一部(約2/3～1/2)が侵食	⑤ (連続した天然ダムにおける検討はされていない)	(連続した天然ダムにおける検討はされていない)
異なった結果※	○水山ら(1989) 天然ダムのほぼすべてが侵食	-		
同様の結果	○水山ら(1989) 侵食により大きく河床が下がった部位の天然ダムの縦断勾配は元河床の勾配に近い。	-	⑥ ○水山ら(1989) 侵食された土砂のほとんどが下流に流出している。	(小規模な天然ダムについての検討はされていない。)
異なった結果※	○高橋ら(1988,1993) 侵食により大きく河床が下がった部位の天然ダムの縦断勾配は元河床の勾配より急	○高橋ら(1993)・里深ら(2007a,b) 侵食により大きく河床が下がった部位の天然ダムの縦断勾配は元河床の勾配より急		
同様の結果	○高橋ら(1993)・小田ら(2007) 下流法面の下流側の方が比高が小さく、川幅が大きくなっている。	○高橋ら(1993)・里深ら(2007b) 侵食により生じた水みちは下流ほど浅く、広い	⑦ ○水山ら(1989) 堆積域の縦断勾配はほぼ元河床の縦断勾配と等しい。	-
異なった結果※	-	-		
同様の結果	④ (越流侵食後のイベントによる形状変化の検討はされていない)	(越流侵食後のイベントによる形状変化の検討はされていない)		
異なった結果※				

害の推定及び対策の実施上重要である。ここで、侵食が途中で停止した機構について考察する。

検討したいずれの箇所においても、天然ダム直下で顕著な堆積が見られた。これまで、天然ダム直下で生じる堆積により、侵食が途中で停止する可能性が実験や数値計算により指摘されてきた（例えば小田ら、2007；里深ら、2007a、図-14 参照）。しかし、図-5、図-6に示したように、いずれの天然ダムにおいても、天然ダム直下の堆積により上昇した河床位は侵食後の天然ダム天端の位置に比べて 15～25m 低く、天然ダム直下の堆積により侵食が途中で停止したとは考えにくい。

一方、川原小屋地区の天然ダム越流侵食後のオルソ画像を確認すると、湛水域はほぼ消滅していたが、図-6に示したように、A ダムより上流側の河床は侵食後であっても元河床より高い位置にあったと考えられる。B ダムについても同様に、A ダムの越流による侵食量と、A ダム～B ダムの区間に堆積した土砂量はほぼ等しい。このことから、天然ダム湛水域に水と同時に上流域から多量の土砂が流入したため、越流による水位低下が河床位に到達し、それ以上の侵食が生じなかった可能性も考えられる。すなわち、侵食が途中で停止したのは、従来の実験では考慮されていない湛水域の堆砂の進行による可能性が考えられる。

一方で、沼倉裏沢地区では、越流による侵食後も上流側に湛水域が確認された。このことは、川原小屋地区とは異なり、越流による水位低下が河床位に到達したため侵食が停止した可能性は考えにくい。一般に、侵食が停止する理由として、①水量の不足、②侵食可能な土砂の不足、のいずれかもしくは両方であると考えられる。内田ら（2009）の 6 月 21 日～22 日の栗駒ダム流入流量を見ると、沼倉裏沢地区の天然ダム決壊による流量上昇が確認できるが、流入流量は約 60 分で急激に上昇し、約 $100\text{m}^3/\text{s}$ をピークにして約 60 分で急激に減衰している。つまり、天然ダムの越流侵食現象は、流量増加の継続時間である約 120 分という短いタイムスケールで発生した

ものと考えられ、急激な流量増減後は、天然ダム堤体を侵食するのに十分な流量が上流から供給されなかった可能性が考えられる。一方で、内田ら（2009）で示したように、侵食後河床は顕著なアーマールコート化が見られた。このことは、従来の実験では十分に考慮（再現）されてない、河床のアーマールコート化による侵食可能な土砂の減少・消滅が侵食の停止に寄与した可能性も考えられる。すなわち、これらのことから、侵食が停止した理由として、①の水量の不足に加えて、②の侵食可能な土砂の不足の両方が寄与した可能性が考えられる。

なお、川原小屋地区においては、越流侵食直後の現地調査は実施されておらず、アーマールコート化の実態については把握できていない。

また、その他、小田ら(2006)により天然ダムを構成する土の粘着力が侵食速度に影響を与えることが指摘されており、実験・シミュレーションでは十分に考慮されていない、土の粘着力が影響した可能性も考えられる。

以上のように、天然ダムの越流侵食による被害推定の精度向上のためには、上流側からの土砂・清水の流入およびアーマールコート化を評価する必要があると考えられる。ただし、いずれの影響も下流の被害を小さくする方向に働くと考えられ、防災上、安全側を見ると考えた場合、従来の手法も妥当であると考えられる。

4.3 天然ダム下流の土砂堆積状況

流出土砂の堆積範囲、到達範囲は、下流域の短期的な河床上昇や構造物への影響等の推定に重要となる。4.1 の⑤で示したように、越流侵食による土砂の堆積は、ほぼ当該天然ダムと下流の天然ダムの間に限られていることが示された。さらに、この区間の堆積勾配は 4.1 の⑦で示したように、元河床勾配とほぼ等しかった。これに対して、4.1 の⑥で示したように、下流の小規模な天然ダムより下流では、縦断勾配は天然ダムの下流のり勾配より緩かったが顕著な堆積は生じていなかった。なお、ほぼ同様な天然ダムの越流侵食による河床縦断形状の変化は、中越地震により芋川支川塩谷川に形成した天然ダムでも見られていた（小山内ら、2007）。

沼倉裏沢、川原小屋地区の侵食堆積の実態を見る限り天端付近で越流侵食された土砂の考えられる堆積過程は、堆積のみが生じた場合と一旦堆積したのちに侵食した場合の 2 つに大別できる。すなわち、①下流の小規模な天然ダムとの間に元河床勾配に平

(a) 既往の実験やシミュレーション (b) 沼倉裏沢、河原小屋地区

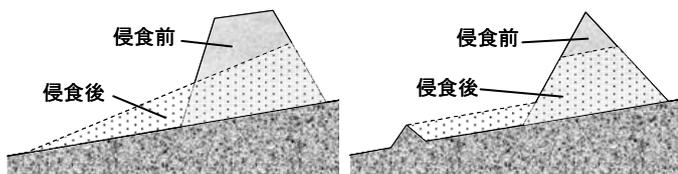


図-14 越流侵食前後の天然ダムの形状

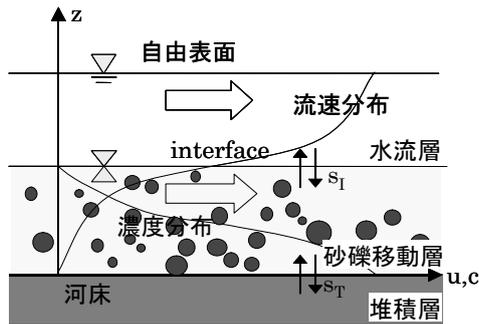


図-16 二層流モデルの模式図

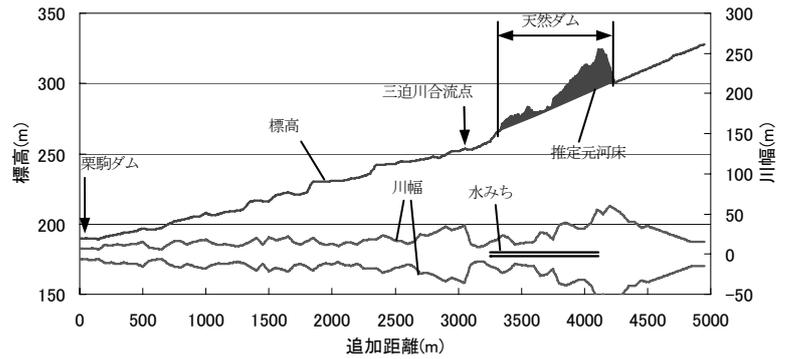


図-15 計算河道

行して徐々に堆積していき、河床位が下流の天然ダムの天端を越えた後はそれ以上堆積することなく下流に流出する、といった比較的長いタイムスケールで主として堆積のみが生じたケース、あるいは、②既往の実験・シミュレーションで示されたように、越流直後には図-14の左図で示すように直線的に堆積したが、天然ダム部でアーモアコートが進むなどにより、天然ダム部の侵食が停止したのち、上流からの土砂濃度の低い流水により、天然ダム下流の小規模な天然ダムとの間の土砂（細粒分）が下流に流出し、元河床勾配程度で侵食がおさまる、といった堆積したのち侵食が生じたケース、の2つの過程に分類されると考えられる。

5. 天然ダム越流侵食状況の数値シミュレーション

5.1 計算に使用するモデル

本研究では(2007b; 2007c)が示したモデル(LADOFモデル)を用いて検討を行った。同モデルは土石流から掃流状集合流動への遷移過程を解析するために、水のみが流れる水流層と、水と砂礫の混合物が流れる砂礫移動層とに分解し、各層の支配方程式に基づいて解析する二層流モデルを基本としている。高濱ら(2000)は図-15で示すように二層流モデルではinterfaceを通じて質量と体積のフラックスが介在するので、水流層がinterfaceを通して単位時間・単位面積あたりに獲得する体積量を s_1 とした支配方程式を用いている。これにより、土石流から掃流状集合流動まで統一的に扱うことができる。

また、里深ら(2007b; 2007c)は縦方向の侵食と同時に横方向の侵食（側岸侵食）が生じて流路は次第に拡大するといった側岸侵食のモデルを組み込んだ。里深らは、側岸侵食速度は流速と水深に比例するという高岡(2006)の考え方に基づいた上で、側岸侵

食速度が側岸で高さ方向に一様であると仮定した側岸侵食速度式を用いた。

5.2 計算の実施

5.2.1 計算条件

(1) 天然ダム及び河道の形状

本研究では、内田ら(2009)及び吉野ら(2010)により示された2008年6月のLPにより計測されたデータ(1mメッシュ)を用いて、天然ダム形状を設定した。計算に用いた初期河床（越流による侵食前）の縦断形状を図-16に示す。

縦断測線は、先述した方法を用い、LPにより計測されたデータより天然ダム形成地点及びその下流の河道の中心に沿って測線を引き河道の縦断形を求めた。ただし、天然ダムの天端標高は天然ダムの満水位に大きな影響を与えるため、天端については天端の横断測線の最低標高を用いた。

また、川幅については全区間矩形断面とし、天然ダム形成地点及び下流の河道では、20m間隔で縦断測線に直交する横断測線を設定し横断形を把握したが、天然ダム上流(湛水範囲)については、最大湛水面積となる標高、すなわち天然ダム天端の最低点の標高の湛水幅を計算における川幅として設定した。ここで、計算河道は全区間矩形断面としているため、上記の理由により実際よりも湛水量が多く見積もられる。

(2) 流入流量

本研究で対象とする沼倉裏沢の天然ダムは無降雨時に越流侵食した。このことから、降雨等の影響による天然ダム地点における流入流量の変化はないものと仮定し、流入流量は一定とした。実際、栗駒ダムの流入流量は天然ダムの越流侵食によると考えられる流量の増減以外には、流量の増減はみられない。そこで、沼倉裏沢地点（集水面積約18km²）の流入

比流量を、栗駒ダム（集水面積約 45km²）の流入比流量と等しいと仮定し、2.6m³/s(ピーク終了後の2:00～5:00 までの栗駒ダム平均流入量 6.4 m³/s に対する沼倉裏沢地点の流入流量)とした。さらに、天然ダムに流入する水は、ある程度濁り成分は含まれているとは考えられるものの、決壊は無降雨時に発生したということから土砂濃度は低いと考え、上流からは真水（土砂濃度 0 の水）を供給した。

(3) 越流開始幅と側岸侵食の係数

里深ら(2007b)の側岸侵食速度式において、侵食速度は流速の $1/\alpha$ 倍となり、計算を実行するにあたり係数 α を決める必要がある。里深ら(2007c)は、2005年9月の台風14号の際に宮崎県耳川流域で発生した天然ダムの決壊計算において $\alpha=1,000$ で実現象を良く再現できているという結果を得ている。そのため本検討でも側岸侵食速度式の係数 α は 1,000 で実施した。

また、本検討では、天然ダム下流のり面の5箇所の横断面に対して、(掃流力)>(限界掃流力)となる水深を算出し、その時の流量に応じた水面幅を水みちの幅として設定した。その上で、平均の水みち幅を求め、初期の水みち幅とした

(4) 土質及び流れに関するパラメータ

表-3 に示す物性値については、基本的には里深ら(2007c)で用いられている一般値を用いた。内部摩擦角については、内田ら(2009)による調査結果である天然ダム地点の斜面勾配 35° を代用した。また粒径については、内田ら(2009)が示した天然ダムを構成する土砂の粗粒分の 60%粒径である 10cm とした。

表-3 計算に使用する物性値

	値	説明	設定根拠
σ	2.65 g/cm ³	砂礫の密度	一般値
ρ	1.0 g/cm ³	水の密度	一般値
ϕ	35 °	内部摩擦角	斜面勾配
d	0.1 m	平均粒径	粒径調査結果
c*	0.6	堆積層濃度	一般値
n	0.04	粗度係数	一般値

5.2.2 計算の実施

計算の開始は天然ダム満水時点とし、天然ダム湛水域の上流端から定常流量(2.6m³/s)を供給し、徐々に水位を上昇させることにより越流侵食させた。また、計算は天然ダム本体の侵食が十分に収まる4時間とした。計算における刻み時間と刻み幅は、 Δ

$t=0.01s$ 、 $\Delta x=10m$ とし、リープフロッグスキームで行った。

5.3 計算結果

5.3.1 河床高の変化

河床高の変化計算結果を図-7 に示す。2008年6月と9月のレーザープロファイラデータから求めた実績の侵食後の河床高(図-5)を併せて示した。

計算の結果、3,950m～4,200m 地点の天然ダム部に形成している2箇所は山は侵食され、天端付近では実績で12m程度河床低下しているのに対して、計算では約8m程度低下している。また、侵食された土砂は3,600m～3,750m 地点で多く堆積が見られ、実績で最大8m程度堆積しているのに対して、計算では最大約6m堆積している。このように、若干侵食の傾向が小さいものの、最終堆積形状は概ね実績に近い値となり、特に天然ダム堤体が侵食され、その直下流に堆積すると言った傾向は非常によく表現できていた。

5.3.2 水みち幅の変化

天然ダムの水みち幅の変化の計算値と、実績値(天然ダム越流侵食により生じた溝の上幅(詳細は図-8参照))を図-17 に示す。川幅に対して水みち幅は、天然ダム部に形成した越流時の通水幅であり、越流侵食が進行すると、流量とともに側岸侵食速度が大きくなり次第に拡幅する。

計算の結果、上流から下流に向かって水みち幅が広がっているが、4,000m付近で水みち幅の広がりが抑制されている。これは、今回用いたモデルが側岸で高さ方向に一律に発生すると仮定しているため、水みちが深くなり、側岸の比高が大きくなるに従い、側岸侵食速度が低下するためである。このような相違はあるものの、下流に向かって広がるといった最終的な水みち幅の広がりを概ね再現できているようである。

5.3.3 栗駒ダムの流入流量

栗駒ダムの流入流量には、沼倉裏沢地点以外の流入比流量である3.8m³/sを一律加えて算出した。計算された流量の時間的変化を図-178 に示し、栗駒ダムの実績流入流量(内田ら、2009)との比較を行った。なお、図-18図-17は栗駒ダム流入量の計算値と実績値とをピーク流量発生時間で合わせている。

計算の結果、栗駒ダム流入ピーク流量は、実績では約100m³/sであるのに対して、計算では約90m³/sであり、概ね実績を表現できていると考えられる。また、洪水継続時間は両者との約1.5時間であり概

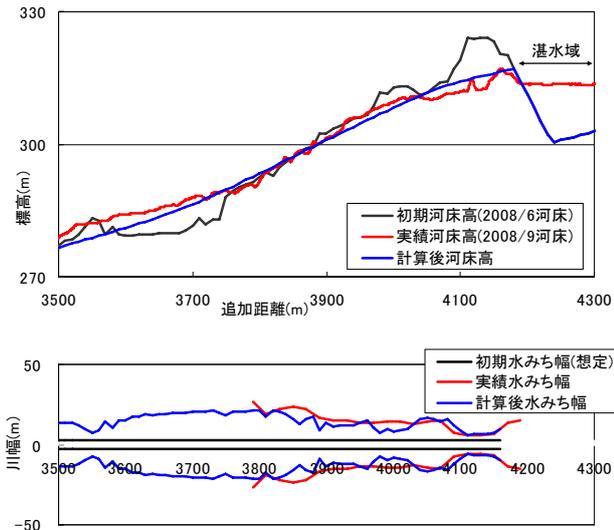


図-17 天然ダムの縦断形状と水みち幅の変化(詳細)

ね一致した。ただし、洪水波形をみると、計算では約5分で流量が立ち上がるのに対して、実績ではピーク到達までに約1時間かかっている。反対にピークの減衰については、計算値は1時間以上かけて減衰しているのに対して、実績では約20分で急激にピークが減衰しているという差異が見られた。

6. まとめ

本研究では、LP データを用いて天然ダム部及びその下流の土砂移動の経時変化を比較的詳細な視点から把握することを目的として行った。

LP 解析結果は4章で示したとおりであり、ここであげられた結果と課題を踏まえ、今後は以下の点について着目して整理し、水路実験等による検証を行う必要がある。

- i) 天然ダム直下の堆積過程および堆積に及ぼす下流の縦断形状(小規模な天然ダムの有無など)の影響を把握する。
- ii) 天然ダム越流侵食によるピーク流量発生後の水みちのアーマーコート化及びその影響を検証する。
- iii) 天然ダムの湛水域への土砂流出による越流侵食への影響を把握する。

また、天然ダム越流侵食に関する計算では、実績と比較した結果、計算後の河床高は、特に侵食された土砂がその直下に堆積している傾向について非常によく表現できていた。川幅についても同様で、下流に向かって川幅が広がっている状況が実績を良く表現できていた。

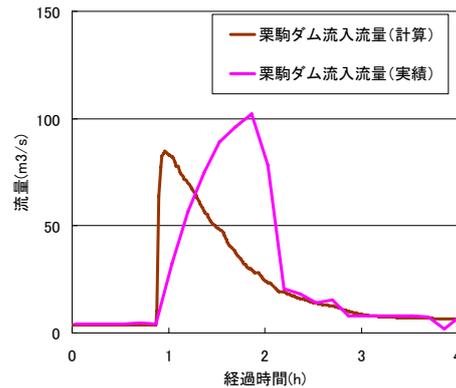


図-178 栗駒ダム流入流量

また、天然ダム下流の栗駒ダム流入流量は、ピーク値は若干計算値の方が小さいものの概ね実績を表現できていた。また、洪水の継続時間もほぼ再現できた。今後は、緊急時の天然ダムに関するデータの取得方法を検討し、天然ダム形成後に迅速に被害推定を行うことにより、天然ダム越流侵食による洪水被害の軽減に役立てていきたい。

参考文献

- 千葉 幹・森 俊勇・内川龍男・水山高久・里深好文 (2007) : 「平成18年台風14号により宮崎県耳川で発生した天然ダムの決壊過程と天然ダムに対する警戒避難のあり方に関する提案」、砂防学会誌、Vol. 60、No.1、p. 43-47
- Costa, J.E. and Schuster, R.L. (1988) : “The formation and failure of natural dams”, Geological Society of America Bulletin, Vol. 100, p. 1054-1068
- 井良沢道也・牛山素行・川邊 洋・藤田正治・里深好文・檜垣大助・内田太郎・池田暁彦 (2008) : 「平成20年(2008年)岩手・宮城内陸地震により発生した土砂災害について」、砂防学会誌、Vol.61、No.3、p. 37-46
- 加藤幸男・宮野 貴・水山高久 (2005) : 「芋川流域における小規模な河道閉塞(天然ダム)の決壊[速報]」、砂防学会誌、Vol. 57、No.6、p. 47-50
- 水山高久・石川芳治・福本晃久 (1989) : 「天然ダムの破壊と対策に関する研究報告書」、土木研究所資料第2774号
- 小田 晃・水山高久・長谷川祐治・森 俊勇・川田孝信 (2006) : 「天然ダムの決壊過程と決壊時の流出量に関する実験的研究」、砂防学会誌、Vol. 59、No. 1、p. 29-34
- 小田 晃・水山高久・長谷川祐治 (2007) : 「天然ダム決壊の模型実験」、砂防学会誌、Vol. 60、No. 2、p. 33-38
- 小山内信智・内田太郎・伊藤英之 (2007) : 「レーザープロ

- ファイラーを用いた地震時形成天然ダムの即時抽出手法」、土木技術資料、Vol. 49、 No. 9、 p. 42-47
- 里深好文・吉野弘祐・小川紀一郎・森 俊勇・水山高久・高濱淳一郎 (2007a) : 「高磯山天然ダム決壊時に発生した洪水の再現」、砂防学会誌、 Vol. 59、 No. 6、 p. 32-37
- 里深好文・吉野弘祐・小川紀一郎・水山高久 (2007b) : 「天然ダムの決壊時のピーク流量推定に関する一考察」、砂防学会誌、 Vol. 59、 No.6、 p. 55-59
- 里深好文・吉野弘祐・水山高久・小川紀一郎・内川龍男・森 俊勇 (2007c) : 「天然ダムの決壊に伴う洪水流出の予測手法に関する研究」、水工学論文集、 Vol. 51、 p. 901-906
- 田畑茂清・水山高久・井上公夫 (2002) : 「天然ダムと災害」、古今書院、205pp.
- 高濱淳一郎・藤田裕一郎・近藤康弘(2000) : 「土石流から掃流状集合流動へ遷移する流れの解析法に関する研究」、水工学論文集、第 44 巻、p.683-686
- 高橋 保・匡 尚富 (1988) : 「天然ダムの決壊による土石流の規模に関する研究」、京都大学防災研究所年報、 Vol. 31、 No.B2、 p.601-615
- 高橋 保・中川 一 (1993) : 「天然ダム越流決壊によって形成される洪水・土石流のハイドログラフ」、水工学論文集 Vol. 41、 p.699-704
- 高橋 保・八木秀樹 (1983) : 「土石流の流量予測」、京都大学防災研究所年報 Vol.26、 No. B2、 p. 329-351
- 高岡広樹(2006) : 「高濃度流れによる河道侵食と土砂流出に関する研究」、九州大学学位論文、p7-23、2006
- 内田太郎・松岡暁・松本直樹・松田如水・秋山浩一・田村圭司・一戸欣也 (2009) : 「天然ダム越流侵食の実態：宮城県三迫川沼倉裏沢地区の事例」、砂防学会誌、 Vol.62、 No. 3、 p. 23-29
- 吉野弘祐・内田太郎・田村圭司・小竹利明 (2010) : 「天然ダム越流による侵食と土砂流出の実態：レーザープロファイラを用いた解析」、砂防学会誌、Vol.62、 No.5、 p.27-35

RESEARCH ON METHOD OF EXTRAODINARY LANDSLIDE DISASTER SUCH AS LANDSLIDE DAM INDUCED BY A DEEP-SEATED LANDSLIDE

Budged: Grants for operating expenses, General account

Research Period: FY2009-2012

Research Team: Volcano and Debris Flow Team

Author: Keiji TAMURA, Taro UCHIDA,
Nagazumi TAKEZAWA, Takeshi SHIMIZU

Abstract: Landslide dams induce catastrophic outburst floods or debris flows mostly by overtopping. However, adequate information about sediment transport of landslide dam and changes of grain size distribution due to overtopping are still lacking. The 2008 Iwate and Miyagi inland earthquake triggered 15 landslide dams. Here we showed new data about the sediment transport of two landslide dams occurred by The 2008 Iwate and Miyagi inland earthquake due to overtopping erosion by the LiDAR data. We measured at 3 times, before overtopping erosion (just after the earthquake), after the overtopping erosion, around 4 months after the overtopping erosion. We found that about only 1/2~2/3 was eroded by the overtopping among the height of a landslide dam, and the water channel is formed in overtopping erosion; it had indicated that the water channel is wide in the downstream more than upstream. One side a part of the sediment from a landslide dam has deposited between landslide dam and small-scale landslide dam in the downstream, and the longitudinal riverbed gradient approaches to initial gradient. In addition, after overtopping erosion once, the substantial change was not seen in the shape of a landslide dam though there was a rainfall of the total about 120mm. We also calculated geomorphic change and discharge rate using numerical simulation model. Here we showed that the model can be reproduced geomorphic change and peak discharge rate very well.

Keywords: Iwate and Miyagi inland earthquake, landslide dam, overtopping erosion, sediment transport