

短時間溪流閉塞における堆積形状と決壊時のピーク流量, ハイドログラフについて

EXPERIMENTAL STUDY ON THE SHAPE OF SMALL LANDSLIDE DAMS DURING TORRENTS AND THE DISCHARGE HYDROGRAPH DURING AN OUTBURST

小田 晃¹・水山高久²・宮本邦明³

Akira ODA, Takahisa MIZUYAMA and Kuniaki MIYAMOTO

¹ 正会員 博士 (工) 日本大学准教授 生産工学部土木工学科 (〒275-8575 千葉県習志野市泉町 1-2-1)

² 正会員 農博 京都大学教授 大学院農学研究科森林科学専攻 (〒606-8502 京都府京都市左京区北白川追分町)

³ 正会員 工博 筑波大学教授 大学院生命環境科学研究科 (〒305-8572 茨城県つくば市天王台 1-1-1)

Flashfloods are one cause of river accidents. During a flashflood, the water level rises suddenly. A flashflood can result when a small dam, formed by a landslide or debris flow, bursts during a torrent. When such a dam blocks a river, the flood that follows its collapse can cause a disaster downstream. The time until collapse is short. To prevent damage from the natural collapse of small landslide dams, it is important to understand the characteristics of dam shape and the discharge hydrograph. We studied landslide dams that were smaller than the dams examined in previous studies. We experimented with small landslide dam outbursts in a rectangular flume. The results are summarized as follows; 1) when a small landslide dam forms, the discharge decreases immediately; 2) when there is discharge in the flume, the length of the bottom of the landslide dam is increased; and 3) the erosion width of the crowns of the landslide dams followed regime theory.

Key Words : landslide dam, hydraulic model experiment, shape of dam, peak discharge, hydrograph

1. はじめに

災害をもたらす鉄砲水の発生原因のひとつとして、一時的に溪流が土砂や礫、流木により閉塞され、決壊する現象が着目されている¹⁾。そのような現象は、現地調査などから山間部の河道幅の狭い溪流で多く発生しているようである。また、それが原因のひとつとなって災害となった事例も報告されている²⁾。溪流の地形的な変化、山腹や溪岸の崩壊による土砂流出で、一時的な溪流の閉塞が発生することが考えられる。

河道閉塞 (以下、天然ダム) に関する研究事例は多くの報告がある。その中で、天然ダムの決壊原因の多くは越流決壊によることが水山ら³⁾、田畑ら⁴⁾により報告されている。また、高橋ら^{5), 6)} は天然ダムの決壊過程を分類し、天然ダム決壊時に下流側で発生する土石流についてのモデルを提案して実験値との比較から流路勾配と湛水量がハイドログラフに影響することを報告している。天然ダム決壊時のピーク流量の推定に関する研究は Costa⁷⁾、石川ら^{8), 9)}、田畑ら¹⁰⁾ により行われている。Costa

は実際に決壊した天然ダムの事例を整理して、ダムのタイプ別に高さで決壊時の湛水量 (以下、湛水量) の積のべき乗を用いたダムファクターを提案している。石川らは高橋らのモデルに基づいた河床変動計算から、単位幅当たりの湛水量とダムの高さの積を用いた決壊時のピーク流量の簡易予測式を提案している。田畑らはこれらの提案式で使用されているパラメータの次元が流量の次元とは異なる点に着目し、天然ダムの湛水域に流入してくる流量を用いて決壊時のピーク流量の簡易予測式を提案している。

このように今までの研究では河道を完全に閉塞し、決壊までに湛水域が完全に形成されるような土砂量を対象としていた。そのため、天然ダム形状は、決壊時のピーク流量に影響するもの⁷⁾、天然ダムが形成される河川の流量にはほとんど無関係であった。ここで、土砂の堆積から越流するまでの時間が数十秒程度であるような天然ダムの形状は、土砂量が少ないため河川の流量により堆積時の形状が変化すると思われる。したがって、今回対象とする小規模な天然ダムの決壊では、流量によって変化すると考えられる天然ダム形状が決壊時のピーク流量

に影響すると予想される。

本研究で対象としている数十秒程度の短時間で決壊する小規模な天然ダムについての研究はほとんど見られず、その特性については明らかにされていないのが現状である。しかし、近年の鉄砲水の現地調査²⁾によれば、小規模な天然ダムであっても、下流域での短時間の急激な水位上昇の原因と推定できるとされている。

そこで、本研究では鉄砲水の原因の一つと考えられる小規模な天然ダムの決壊について実験的に検討する。検討項目は、溪岸崩壊を想定した滑落土砂により形成される天然ダムの堆積形状、決壊時のピーク流量、並びに形成から決壊までのハイドログラフであり、流れが存在する溪流を対象として、それらの特性を明らかにする。

2. 実験概要

実験条件は、前述の鉄砲水の現地調査²⁾の事例を基に設定した。これによれば、形成された天然ダムの高さは1.5~2.5m、決壊時の推定流量は最大で25m³/s、計算に使用された溪流幅は4.0m、天然ダムが形成されていた河道勾配は1/5.7~1/3.7であった。これらの諸元を想定縮尺1/30で縮尺し、使用する水路の諸元を考慮して設定した。

実験水路は長さ9.0mの矩形断面直線水路であり幅は15cmとした。水路勾配は1/5, 1/4, 1/3である。また、水路底面は粗度付(1.0mm-2.0mmの砂を貼り付けた)の固定床とした。崩壊土砂は溪流側岸からの崩壊土砂による溪流の閉塞状況を再現するため、通水している水路の側面から土砂を滑落させた。土砂を滑落させる斜路は幅20cm、勾配45°として水路側壁に接続した(図-1)。

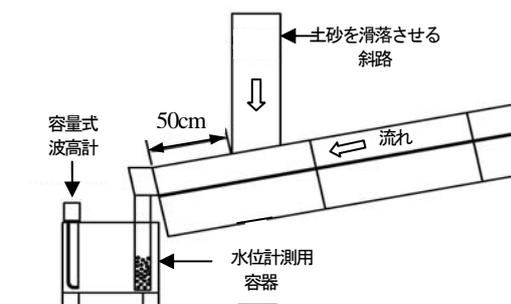


図-1 実験水路略図

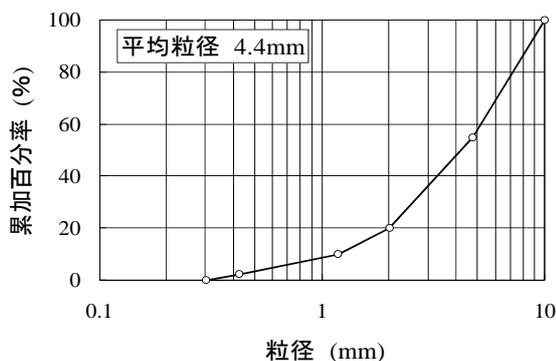


図-2 実験砂の粒度分布図

使用した砂は、現地の資料がないため図-2の粒度分布で示される平均粒径4.4mmの混合砂を使用した。実験で滑落させた土砂量は事例における堆積高となるように土砂量を予備実験から設定し、空隙込みの量で1,000cm³と2,000cm³の2種類とした。なお、実験砂は表乾状態の砂の重量の10%の水を混ぜた湿潤状態とした。

決壊時のピーク流量は、事例を基に設定するとフルードの相似則から約5,000cm³/sとなる。よって、決壊前の溪流ではこれ以下の流量が流れていたと考えられる。予備実験により、確実に天然ダム形状が写真から読み取れる水路の流量を確認したところ3,000cm³/s以下であれば、天然ダム形状の写真読み取りが可能であることが分かった。したがって、ここでは水路の流量をQ=250, 500, 1,000, 2,000cm³/sとした(以下、流入流量)。なお、天然ダム形状は水路左岸側の側面から約1/3秒間隔で撮影した写真から判読した。水路下流端には容器(直径32cm、高さ57cm)を設置してその水位上昇量を容量式波高計で記録して流量を算出した。

3. 実験結果と考察

(1) 天然ダムの高さ と 底面長の関係

土砂が溪流に落下した時、土砂は流水により下流へ流され、天然ダム形状が変化することが実験観察から分かった。そこで、ここでは崩壊土砂が流水中に滑落・堆積した場合の形状(高さ と 底面長)を調べた。高さ と 底面長の定義を図-3に示す。図中のL_uは土砂が滑落する斜路の上流端から越流直前の堆積土砂上流端までの距離(以下、上流側堆積長)、L_dは斜路の下流端から越流直前の堆積土砂下流端までの距離(以下、下流側堆積長)である。なお、堆積土砂の天端は水路横断方向にはほぼ水平となる状態を対象とした。

図-4に水路勾配1/5のときの越流直前の天然ダムの高さHと底面長Lの関係を示す。図中の「●」と「▲」は流入流量が無い場合の実験値である。また、高橋らの提案した堆積形状に関する式⁵⁾による、流入流量が無い場合の高さ と 底面長の計算値も「+」と「*」で示した。この図から、流れが存在する溪流に崩壊土砂が滑落・堆積すると同程度の堆積高の場合には底面長が長くなることが示された。

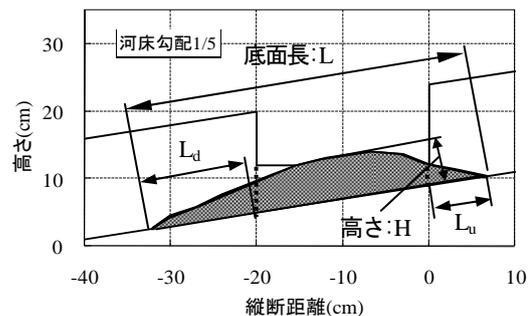


図-3 天然ダムの底面長Lと高さHの略図

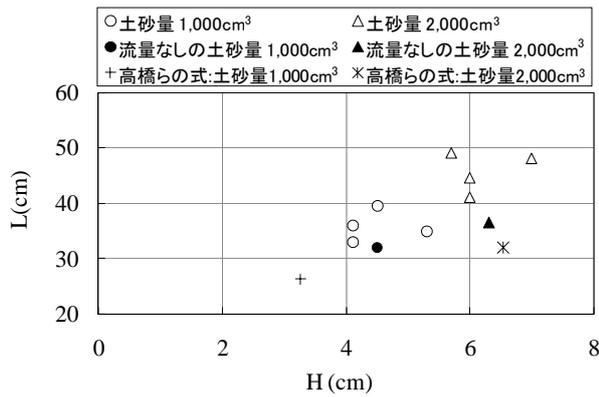


図4 天然ダムの高さHと底面長Lの関係

このことから、溪流の流れは滑落土砂を全体的に移動させるのではなく、底面長を長くさせる方向に作用していると考えられる。流水の一部は天然ダムが形成される数秒の間に土砂へ浸透する。浸透の程度は今のところ不明であるが、土砂滑落時の空隙に流水が浸透することで、滑落前の状態よりも多く水を含むこととなる。このような状態で堆積した土砂の下流側斜面は一時的に下流へ崩れ易くなるため、底面長が長くなったと考えられる。なお、高さについては流れの有無による影響は見られなかった。堆積土砂の下流側斜面の崩れが局所的であったためと考えられる。

(2) 流入流量と天然ダムの高さ、底面長の関係

前項で得られた下流側斜面の崩れについて検討するため、水路勾配 1/5 のときの流入流量と越流直前の天然ダムの高さHと底面長Lの関係を調べた。図-5に結果を示す。土砂量の増加により高さは約2cm 高くなるものの、流入流量の違いによる高さの変化はほとんど見られない。一方、底面長は土砂量の違いによる変化とともに流入流量の増加による変化が示された。土砂が水路に落下した際の、堆積土砂への流水の浸透により崩れが発生したと考えられる。この点を確認するため、流入流量の変化による堆積形状の比較を行った。

図-6に流入流量Qと上流側堆積長 L_u 、下流側堆積長 L_d の関係を示す。この図から流入流量の有無により水路上下流の堆積長が変化することが示された。流入流量が

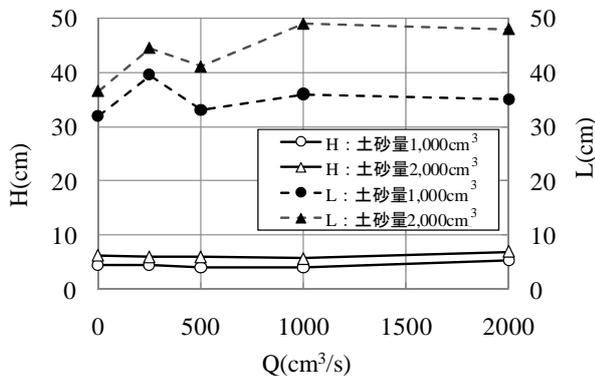


図5 流入流量Qと高さH、底面長Lの関係

0の場合と比較すると、流入流量の増加に従い下流側堆積長が5~10cm 増加し、上流側堆積長が0~3cm 減少している。図-5で示された、流入流量ありの場合の底面長の増加は、下流側斜面が崩れたことが原因であることが分かった。また、その理由として天然ダムが完全に形成されるまでの短時間に、堆積土砂に流水が浸透したものと考えられるが、この点についてはさらなる検討が必要と思われる。

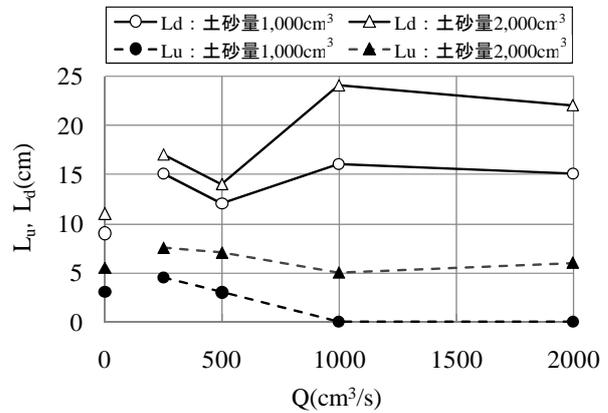


図6 流入流量Qと L_u 、 L_d の関係

(3) 流入流量と天然ダム決壊時のピーク流量の関係

流入流量Qと決壊時のピーク流量 Q_p の関係を図-7に示す。図中の×印は土砂量1,000 cm^3 、それ以外は土砂量2,000 cm^3 である。決壊時のピーク流量は水路下流端(崩壊土砂投入水路下流端から50cm 下流)で計測した水位を基に算出した。

この図から、流入流量が1,000 cm^3/s までは、流入流量の増加とともにピーク流量が増加している。しかし、さらに流入流量が増加するとピーク流量は流入流量に近づく傾向が示された。これは、流入流量の増加で斜路から

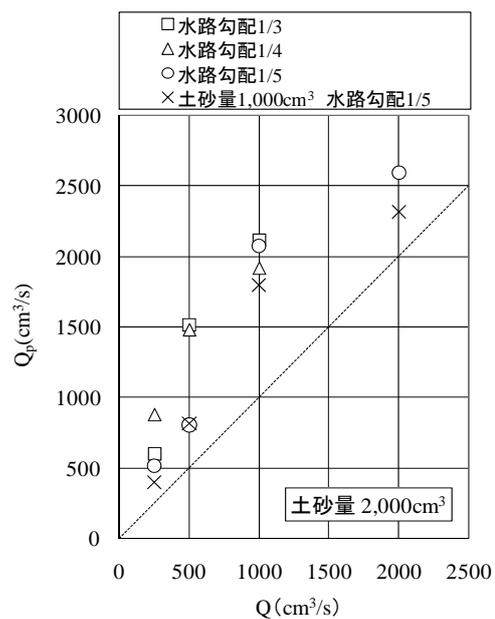


図7 流入流量Qとピーク流量 Q_p の関係

滑落してきた土砂が一気に流される状態となるためである。すなわち、流入流量の増加にしたがって天然ダムが形成されにくくなることを示している。また、今回の条件では、流入流量とピーク流量の関係に及ぼす水路勾配の影響は明確でない。なお、土砂量が $1,000\text{cm}^3$ の場合、 $2,000\text{cm}^3$ と比べてピーク流量が少なくなる傾向が見られる。天然ダムの形成による一時的な湛水量の違いによるものと考えられる。

(4) 湛水量と天然ダム決壊時のピーク流量の関係

水路勾配 1/5 の場合における越流直前の水面形状を、水路側面から撮影した写真により判読し（例えば写真-1）、その形状から推定した湛水量 V_w と決壊時のピーク流量 Q_p の関係を図-8 に示す。なお、流入流量 $Q=2,000\text{cm}^3/\text{s}$ のケースと、 $Q=1,000\text{cm}^3/\text{s}$ 、土砂量 $1,000\text{cm}^3$ のケースは、湛水域の上流端で発生する跳水により水面形が著しく乱れ、湛水域の判読が困難であったため除いた。

その結果、今回の条件範囲では湛水量の違いによるピーク流量の変化は見られない。天然ダムの規模が小さく湛水量が少ないためと考えられる。よって、前項で記した、土砂量の増加によるピーク流量の増加は湛水量によるものでないことが分かった。

土砂量の増加によるピーク流量の増加の原因について以下のように考察する。堆積土砂量が多いほど空隙量が増加する。一方、流入流量の増加で底面長が長くなる現象は、堆積土砂の空隙へ流水が浸透しているものと推察した。これらから、空隙に含まれる水量は、土砂量の増加（空隙量の増加）に伴い多くなると思われる。天然ダム決壊時には、天然ダムに含まれる水も同時に流下する。したがって、天然ダム決壊時のピーク流量は、土砂量の

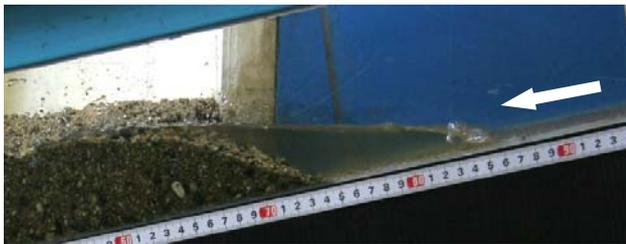


写真-1 越流直前の湛水状況（水路側面から撮影）

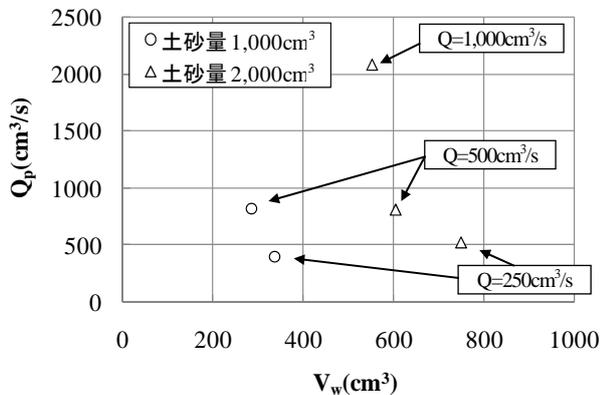


図-8 湛水量 V_w とピーク流量 Q_p の関係

増加により増えることになるものと考えられる。この点については、堆積土砂内の間隙水の量を計測することで確認できると思われる。今後の検討課題である。

なお、今まで検討されてきた天然ダムの決壊時のピーク流量の推定は、湛水量が重要な因子として着目されていた。しかし、今回対象とするような小規模な天然ダムの決壊の場合、湛水量は有効な因子とはならないことが示された。天然ダム決壊時のピーク流量の推定は、どの程度の規模の天然ダムであれば湛水量が有効な因子となるのかを把握した上で行うことが重要であろう。

(5) 天然ダム決壊時の水路下流端でのヒドログラフ

溪岸崩壊による天然ダムは天端形状が必ずしも水平であるとは限らない。そこで、ここでは天然ダムの天端が水路横断方向に水平の場合と傾斜している場合について、それぞれの天然ダム決壊時のヒドログラフを比較した。

水路勾配 1/5、 $Q=250\text{cm}^3/\text{s}$ で土砂量 $1,000\text{cm}^3$ と $2,000\text{cm}^3$ の場合の崩壊土砂の堆積（天然ダムの形成）から侵食・決壊、流出までのヒドログラフを図-9、10 に示す。なお、図中の太線は滑落させる土砂塊の下流端を斜路下流端（水路側面）から 30cm とし、天然ダムの天端が水路横断方向に水平となった場合であり、細線は 20cm とし、天然ダムの天端が傾斜した場合である（写真-2）。

両方の条件とも天然ダムにより水路の流れがせき止められたため水路下流端での流量は一時減少する。その後、越流決壊に至るが、天端の横断形状が水平の場合は流量の減少量が大きいことが示されている（図-9、10）。天端の横断形状が傾斜している場合、低い側（今回の実験では左岸側）から越流侵食が始まり、流水が完全にせき止められなかったことが理由と考えられる。

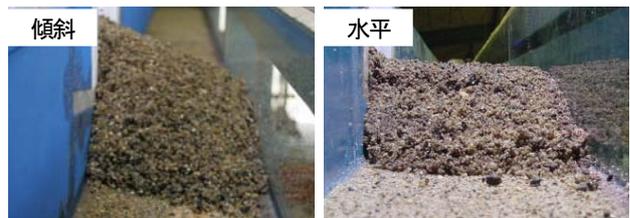


写真-2 天然ダムの天端横断方向（水路下流側から撮影）

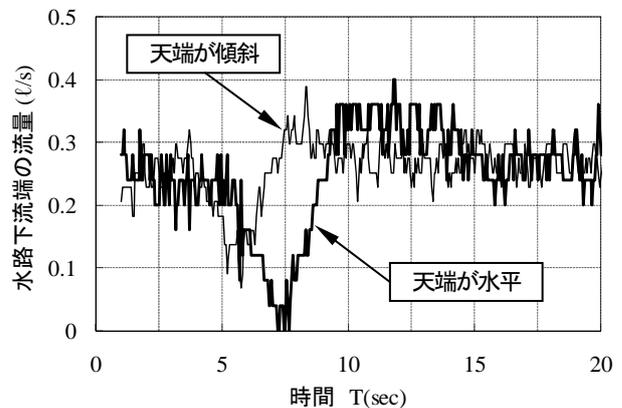


図-9 決壊時のヒドログラフ（土砂量 $1,000\text{cm}^3$ 、 $Q=250\text{cm}^3/\text{s}$ ）

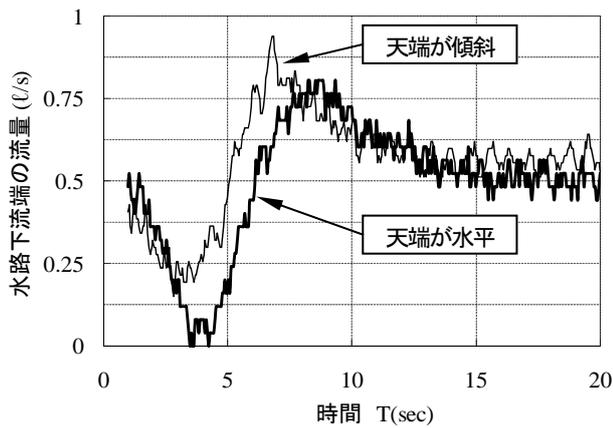


図-10 決壊時のハイドログラフ (土砂量 2,000cm³, Q=500cm³/s)

次に、天然ダムの急激な侵食により、水路を流れていた流入流量よりも多い流量が発生する。堆積土砂の空隙に蓄えられていた水も含めて流下したためと考えられる。このような一時的な流量増加は、地形状況にもよるが鉄砲水、もしくはフラッシュフラッドと呼ばれている急激な水位上昇による災害につながる可能性が高い。なお、今回の条件下では、決壊時のピーク流量に天然ダムの天端の横断形状の違いによる変化は見られなかった。天端の横断形状よりも土砂量の方が、決壊時のピーク流量に対して、より支配的であると考えられる。

(6)天然ダム決壊時の侵食幅

天然ダム決壊時の流量は天然ダムの侵食が進むと同時に増加する。そこで、ここでは侵食幅と流量がどのような関係にあるのか、また、どの侵食幅でピーク流量が発生するのかについて、天然ダムの天端が水路横断方向に水平の場合の実験結果をもとに検討した。

侵食幅は水路上から撮影したビデオ映像から読み取った越流水面の幅とした。侵食幅の計測断面は土砂を滑落させる斜路の下流端断面とし、その横断面上の侵食路底面に堆積土砂がおおよそなくなるまで計測した。計測時間間隔は1.0秒である。なお、越流流量は水路下流端の流量であり、越流開始時は水路下流端の流量が0である時とした。

図-11に水路勾配 1/5, Q=250cm³/s, 土砂量 1,000cm³と Q=500cm³/s, 2,000cm³の時間 t と侵食幅 B の関係を、図-12に流入流量 Q と侵食幅 B の関係を示す。図-12の各点は1秒毎の流量と侵食幅の点であり、各点を結ぶ線は時間の進行方向を示している。

図-11より侵食幅は時間とともに増加し、土砂量 1,000cm³のケースでは3秒以降、土砂量 2,000cm³のケースでは6秒以降でほぼ一定となっている。このときの侵食幅を式(1)で表わされる、流量と河道幅の関係¹¹⁾である Regime 理論による計算値と比較した。

$$B = \alpha Q^{1/2} \quad (1)$$

ここに、Bは侵食幅、Qは流入流量、 α は係数である。

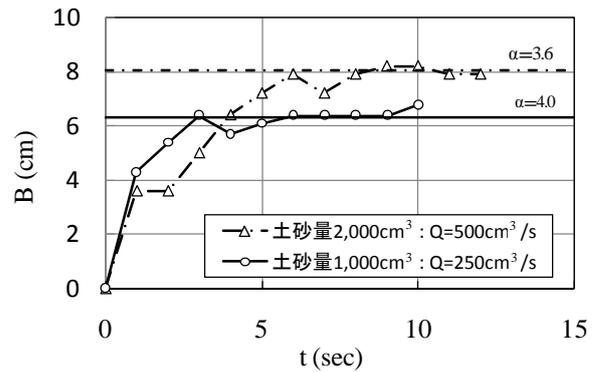


図-11 時間 t と侵食幅 B の関係

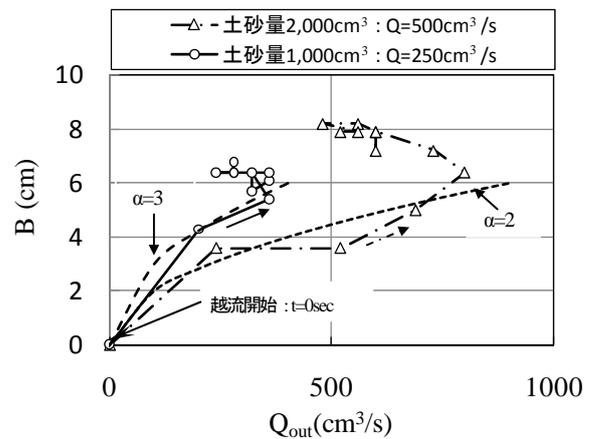


図-12 水路下流端流量 Q_{out} と侵食幅 B の関係

侵食幅がほぼ一定となったときの α を求めると土砂量 1,000cm³のケースは $\alpha=4.0$ 、土砂量 2,000cm³のケースは $\alpha=3.6$ であった。 α の値としては、既往の土砂流・土石流の計算等¹²⁾で用いられている値に近い結果が得られた。今回のような急勾配における侵食流路であっても、決壊後の侵食幅がほぼ一定となった状態における侵食幅は式(1)で表わされることが確認できた。

ここで、侵食幅がほぼ一定となる時間は、図-12から流量がほぼ一定となる時間と一致していることが示されている。したがって、流量がほぼ一定となるときの侵食幅は式(1)の関係で表わされると考えられる。

次に、水路下流端での流量と侵食幅の関係を示した図-12を基に、流量変化時の侵食幅について考察を行う。水路下流端の流量が増加している状況では、侵食幅も増加している。さらに、ピーク流量後から、流量がほぼ一定となるまでの流量低下時も侵食幅は増加している。流量が一定ではないものの、先の Regime 理論の関係を用いて流量と侵食幅の関係を式(2)で表わし、実験値と比較した。

$$B = \alpha' Q_{out}^{1/2} \quad (2)$$

ここに、Bは侵食幅、 Q_{out} は水路下流端の流量、 α' は係数である。図-12中に $\alpha'=2.0$ 、 $\alpha'=3.0$ としたときの線を描いた。今回の実験条件であれば、ピーク流量までは

式(2)により侵食幅が推定可能であることが示唆された。しかし、将来、数値計算による決壊時の状況をシミュレートする場合、係数 α' の設定方法と、ピーク流量後の流量減少期における侵食幅の推定が課題として残されている。

4. おわりに

短時間で決壊する小規模な天然ダムについて水路実験を実施した。以下に主な結果をまとめる。

- (1)流れが存在する溪流に崩壊土砂が堆積すると同程度の堆積高の場合、底面長が長くなる。これは、下流側斜面が崩れたことが原因であることが分かった。また、その理由として、天然ダムが完全に形成されるまでの短時間に堆積土砂に流水が浸透したものと考えられるが、この点についてはさらなる検討が必要と思われる。
- (2)天然ダム湛水域への流入流量が大きくなると、決壊時のピーク流量は天然ダム形成前の溪流の流量に近づく。流入流量の増加により天然ダムが形成されにくくなっていることが確認された。
- (3)崩壊土砂が堆積すると一時的に水路の流量が減少、もしくは0になる。この流量の減少量は堆積形状によっても変化する。
- (4)今回の条件のような、急勾配で短時間で決壊する小規模な天然ダムについても、侵食幅がほぼ一定となる状態（ここでは流量もほぼ一定となっていた）における侵食流路幅の推定はレジーム理論である式(1)の形式で可能であることが示唆された。

本研究では限られた実験条件における、小規模な天然ダムの決壊についての結果を報告した。小規模な天然ダムの決壊の特性をより普遍的に把握するためには条件範囲の拡大による検討が必要である。具体的には、粒度分布の違い、滑落する土砂の幅の違い、流入流量範囲の拡大等である。また、今回の実験では検討できなかった侵食深、堆積部の勾配の関係、流下時の土砂濃度等が課題として残されている。これらを明らかにすることで、小規模な天然ダムのピーク流量がどのような状態で発生するのかより明確になるものと考えられる。

謝辞：本実験は（財）建設技術研究所筑波試験所の自主研究費で実施した。また、実験とデータ整理は（株）パシコン筑波リサーチにお手伝いしていただいた。ここに謝意を表します。

参考文献

- 1) 長谷川祐治, 杉浦信男, 小田 晃, 水山高久, 宮本邦明: 流木を含む土石流の流れに関する研究(2), 平成19年度砂防学会研究発表会概要集, pp.416-417, 2007.
- 2) 栗原淳一, 桜井 亘, 武澤永純, 田方 智, 鈴木隆司, 盛 伸行: 2006年に発生した鉄砲水災害の発生原因について—佐賀県伊万里市, 山形県富並川の事例—, 砂防学会誌, Vol.60, No.2, pp.39-44, 2007.
- 3) 水山高久, 石川芳治, 福本晃久: 天然ダムの破壊と対策, 土木技術資料, 31-11, pp.50-56, 1989.
- 4) 田畑茂清, 水山高久, 井上公夫: 天然ダムと害, 古今書院, p.52-53, 2002.
- 5) 高橋 保, 匡 尚富: 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, 第31号, B-2, pp.601-615, 1988.
- 6) 高橋 保, 中川 一: 天然ダムの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, 第37号, pp.699-704, 1993.
- 7) John E. Costa: Floods from dam failures, FLOOD GEOMORPHOLOGY, 26, p.439-463, 1988.
- 8) 石川芳治, 井良沢道也, 小泉 豊: 天然ダム決壊による洪水流下の予測に関する研究報告書, 土木研究所資料, 第3013号, pp.57, 1991.
- 9) 石川芳治, 井良沢道也, 匡 尚富: 天然ダム決壊による洪水流下の予測と対策, 砂防学会誌, Vol.45, No.1, pp.14-21, 1992.
- 10) 田畑茂清, 池島 剛, 井上公夫, 水山高久: 天然ダム決壊による洪水のピーク流量の簡易予測に関する研究, 砂防学会誌, Vol.54, No.4, pp.73-76, 2001.
- 11) 土木学会編: 水理公式集, 平成11年版, 丸善, p.181, 2007.
- 12) 福田克之, 松本清則, 谷口和哉, 椿下康之, 清水幹輝, 水山高久: 出水中におけるスリット砂防堰堤の土砂流出調節に関する研究—黒部川流域祖母谷支川を対象として—, 砂防学会誌, Vol.54, No.6, pp.25-34, 2002.

(2008.9.30 受付)