

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

Experimental study of process and outflow rate when landslide dams outburst

小田 晃^{*1}

Akira ODA

森 俊 勇^{*3}

Toshio MORI

水山高久^{*2}

Takahisa MIZUYAMA

川田 孝 信^{*3}

Koushin KAWADA

長谷川 祐 治^{*1}

Yuji HASEGAWA

Abstract

The processes of outbursts of a landslide dam, consisting of sand, and a mixture of sand and bentonite were observed through flume experiments. The discharge rate of the outflow overflowing the top of the dam was measured. As a result, it was observed that there were a number of peaks appearing in the flow discharge hydrograph during the outbursts. The maximum discharge rate was observed at its first peak when the vertical erosion rate was most intensive. The value was then in a range from a few to a few tens times the inflow rate. These peak flow discharge rates were evaluated through the equation of Tabata et al. The second and the following peaks were caused by horizontal erosion in the eroded channel. Further, we also found that the temporal variations of the outbursts on the landslide dam were affected greatly by the adhesive qualities of the landslide dam earth.

Key Words : landslide dam, outburst, outflow rate, experiment

1. はじめに

2004年10月の新潟県中越地震による芋川流域のように、地すべりや大規模崩壊により河川が土砂で塞ぎ止められ天然ダムが形成されることがある。天然ダムが急激に決壊すると土石流や洪水となり、下流域で氾濫等の災害を引き起こす危険性がある。天然ダムがどのように決壊し、どの程度の流量になるのかを推定する必要がある。

天然ダムの決壊に関しては、水山ら(1987,1989)、高橋ら(1988,1993)、Costa(1988)、石川ら(1991,1992)、田畑ら(2001a,2001b)の研究がある。また、現象が類似している堤防決壊についての研究も山本(1978)、須賀ら(1981)、藤田ら(1984)、加藤ら(1985)、藤田ら(1988)等により行われており、天然ダムによる堤体の決壊過程、パイピングと越流による決壊のメカニズム、堤体決壊の対策工、決壊時の流量の推定等についての検討が行われている。

天然ダムの資料を取りまとめた水山ら(1987,1989)の研究では、実際に発生する天然ダムの決壊原因は天端からの越流によるものがほとんどであることが報告されている。また、Costa(1988)は世界各地で発生した人工の

ダム、氷河湖、天然ダムの決壊事例を整理して、ダムファクターと呼ばれる湛水量とダム高の積を用いてピーク流量を整理した。石川ら(1991,1992)も天然ダムの決壊シミュレーション結果に基づいて、ダムファクターを用いてピーク流量の推定を行っている。これに対し、田畑ら(2001b)はダムファクターを用いることは疑問であるとして、石川ら(1991)の計算データを、現場で容易に計測可能な天然ダムの高さや河床勾配、湛水域への流入流量からなる無次元量によって整理し、決壊時のピーク流量の推定式を提案している。

このように、従来の研究から、天然ダム決壊の主たる原因と、決壊時の流量の推定については成果が得られている。しかし、天然ダムの決壊過程とそのときの流量変化についてはまだ不明な点が多い。また、従来の研究では水山ら(1987,1989)の研究を除き、天然ダムの構成材料を考慮した研究は少ない。土砂の粘着性等の物性値の違いが、侵食速度に大きな影響を及ぼすことを考えると、天然ダムを構成する材料の違いは、決壊時のピーク流量と流出量ハイドログラフに影響を及ぼすと考えられる。

*1 財団法人建設技術研究所,筑波試験所 Civil Engineering Research Laboratory *2 京都大学大学院農学研究科 Graduate School of Agriculture, Kyoto University *3 財団法人砂防フロンティア整備推進機構 Sabo Frontier Foundation

そこで、本研究では、天然ダムの決壊過程として着目した侵食過程の状況と決壊時の流出量について、天然ダムの材料の違いと形状の違いによる検討を行った。材料としては、砂、および砂にベントナイトを混合させた材料を使用し、含水比を変化させる。天然ダムの形状としては下流法面勾配を変化させた。

2. 実験概要

天然ダムは、底面幅 30cm、側壁勾配 1:0.7、水路勾配 11.3 度の木製粗度無しの台形断面水路内に、図-1、表-1 に示す形状で作成する。なお、ベントナイトを混合させた材料は粘着力の違いによる変化も調べるため、粘着力との相関が高い含水比を変化させた。また、天然ダムは砂・ベントナイト・水を所定の量、ミキサーで5分間練り混ぜた後、3層（1層の厚さ約 10cm）に分けて十分に転圧しながら作成した。天端中央には幅 2.0cm、深さ 2.0cm の四角形の切欠きを作り越流水を誘導する。

実験に使用した材料は、砂（平均粒径 0.25mm）のみ、およびベントナイト（立花マテリアル社 TB-200）と砂を混ぜて作成した材料とする。砂の粒度分布を図-2 に示す。砂とベントナイトの粒径はほぼ均一である。なお、予備実験の結果より、ベントナイトの混合率が 5% 以上の場合、越流水による侵食で天然ダム下流法面が垂直もしくはオーバーハングとなっても崩壊が見られなかった。そのため、越流による侵食を確実に発生させるため、今

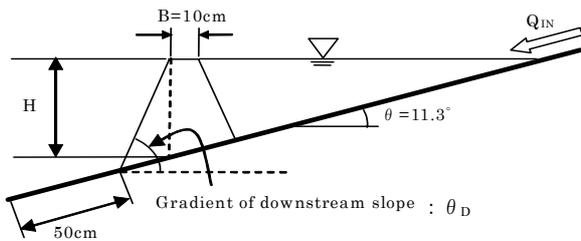


図-1 天然ダム設置状況

Fig. 1 Situation of installing the landslide dam in a trapezoidal channel

表-1 実験ケース一覧表

Table 1 List of experimental cases of materials and dimensions of land slide dams

No.	Ratio of weight		Water content	θ_D	Discharge rate Q_{IN}
	Sand	Bentonite			
1	97.5%	2.5%	15%	50°	200 cm ³ /s
2	97.5%	2.5%	10%		
3	97.5%	2.5%	5%		
4	100%	0%	15%		
5	97.5%	2.5%	10%	35°	

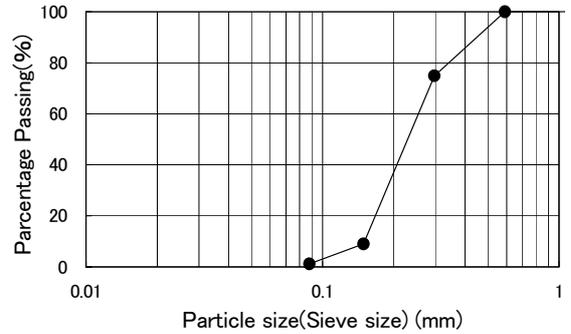


図-2 実験砂粒度分布図

Fig. 2 Particle size distribution of the mixed sand used in the experiment

回の実験では構成材料のベントナイトの含有率は 2.5% とした。

越流流量は湛水量の時間変化を基に計算した値を使用した。また、水路下流端からも直接土砂と水を採取している（実測値）。湛水量の時間変化を基にした越流流量の求め方を以下に記す。

- ①湛水域となる天然ダム上流法面断面の水路中央に設置した波高計（東京計測社製）から得られる電圧から、事前に波高計のキャリブレーションを行い求めておいた電圧と水深の関係より湛水域の水深を求める。
- ②水深から式(1)により湛水量を求める。
- ③サンプリングタイム毎に求めた水深データから計算された湛水量の差をサンプリングタイムで除して越流流量を計算する（計算値であり水のみ流量）。

なお、水深データのサンプリングタイムは実験 No.1~3 が 100ms、実験 No.4,6 が 200ms とした。また、計算は図-3 に示すように天然ダム上流側法面が鉛直であると仮定し、水深から計算した湛水量は湛水域の波の影響等を考慮して 5 秒間の時間平均値とした。

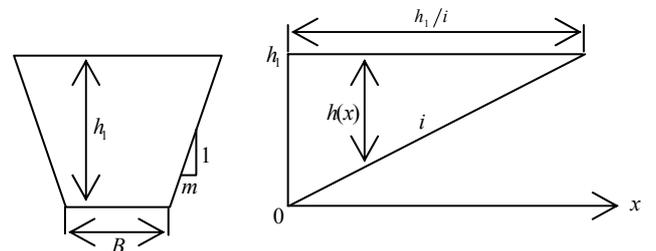


図-3 式(1)の記号の定義図

Fig. 3 Definitions of signs of equation(1)

$$A(x) = \frac{h(x)}{2} \{2B + 2mh(x)\}$$

$$h(x) = h_1 - ix$$

$$V = \int_0^{h_1/i} A(x)dx = \frac{m}{3i} h_1^3 + \frac{B}{2i} h_1^2 \quad (1)$$

ここに、 $A(x)$ は断面積、 B は台形断面の底面幅、 $h(x)$ は水深、 h_1 は湛水域となる天然ダム上流法尻断面($x=0$)の水深、 i は水路底面の勾配、 m は水路側面勾配、 V は湛水域の堆積(=湛水量)、 x は天然ダム上流側法面が鉛直であると仮定したときの断面からの水平距離である。

3. 越流流量の時間変化

波高計で計測した湛水量の時間変化を基とした越流流量の計算値と、水路下流端での水と土砂の合計流量(実測値)を図-4~8に示す。横軸の時間 0sec は波高計で計測した湛水域の水位が最高となった時間であり、越流開始時刻とほぼ一致する。なお、これらの図から越流流量の計算値と実測値はほぼ一致しており、今回採用した越流流量の計算方法の妥当性が確認された。

最大流量は、どのケースも越流流量の最初のピークである。その値はベントナイトを混ぜた材料で作られた天然ダムより、砂のみで作られた天然ダムの方が実測値・湛水量からの計算値とも3~7割程度大きくなる(図-7)。

また、その発生時間は砂のみで作られた天然ダムの方が5~10秒早くなる(図-7)。その結果、天然ダムの形状が同じでも(図-4~7)、砂のみで構成された場合の最大越流流量付近の波形は、ベントナイトを混ぜた材料で構成された場合よりも尖ることが確認された。このことから、粘着性の極端に低い砂のみの天然ダムでは、越流による堤体侵食が急激に進むことが推察され、天然ダムの越流流量波形の形状は天然ダムを構成する材料の粘着性に支配されると考えられる。なお、含水比の違いによる越流流量の時間変化は今回の実験からは明確に示されなかった。今回の実験範囲における含水比の違いでは、越流流量の極端な変化が現れるほどの粘着力の差とはならなかったものと考えられる。

また、これらの図から、どのケースも越流流量のピークが複数回発生していることが分かる。実験観察による

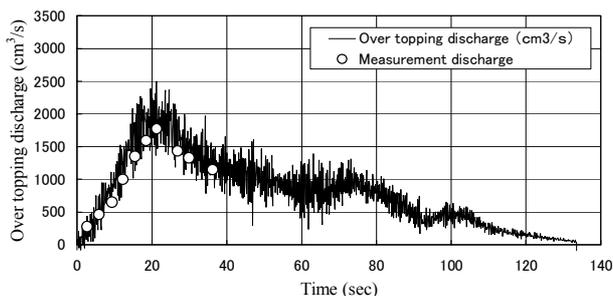


図-4 越流流量の時間変化 (No. 1)

Fig. 4 The temporal variation of the over topping discharge rate (No.1)

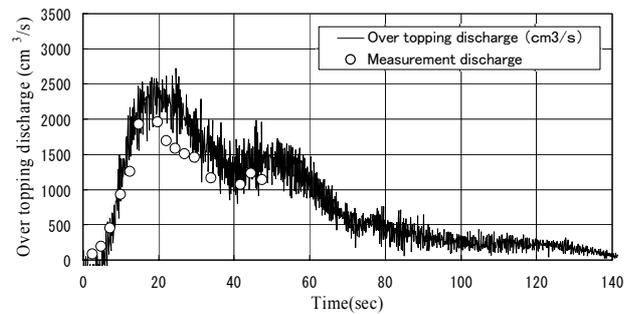


図-5 越流流量の時間変化 (No. 2)

Fig. 5 The temporal variation of the over topping discharge rate (No.2)

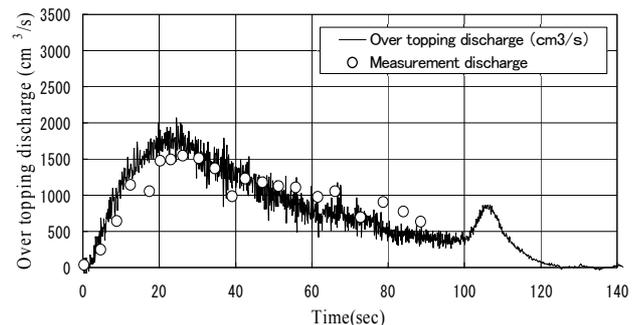


図-6 越流流量の時間変化 (No. 3)

Fig. 6 The temporal variation of the over topping discharge rate (No.3)

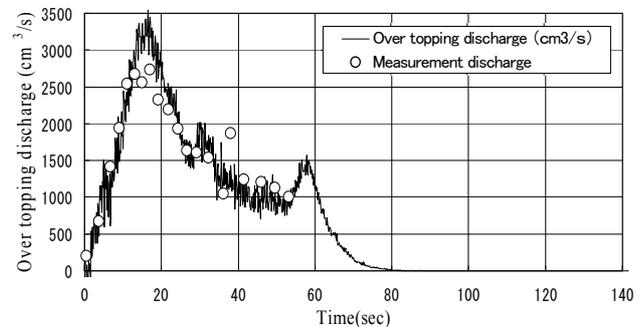


図-7 越流流量の時間変化 (No. 4)

Fig. 7 The temporal variation of the over topping discharge rate (No.4)

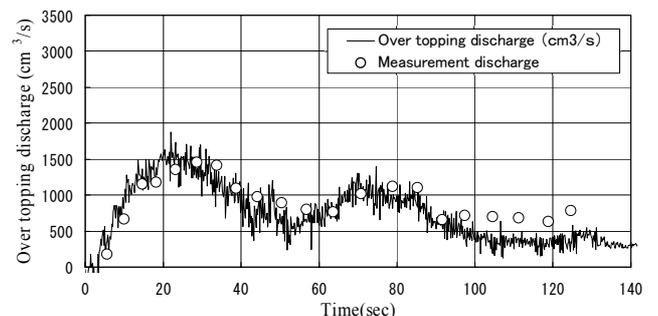


図-8 越流流量の時間変化 (No. 5)

Fig. 8 The temporal variation of the over topping discharge rate (No.5)

と、最初の越流流量のピーク（最大越流流量発生時）までに天然ダムの侵食流路は縦方向に急激に進行しているように見受けられる（図-11、侵食流路幅の変化については第6章参照）。そのときの流量は、最大で流入流量（ $200\text{cm}^3/\text{s}$ ）の約13倍になっている。その後、侵食流路は横方向に拡大し、側面の崩壊が発生する。2番目以降の越流流量のピークは側面崩壊が発生して急激に湛水域の水が流出したときと考えられる。

今回の実験における越流流量のピーク発生時の天然ダムの決壊状況は、大きくこれらのパターンに分けられ、2番目以降の越流流量のピーク発生原因が推定できた。

次に、同一の材料で天然ダムの形状の違いによる越流流量の時間変化を、湛水量を基とした計算値から比較した（図-5,8）。その結果、天然ダムの下流法面勾配が35度の図-8の最大越流流量（最初のピーク）は、下流法面勾配が50度の図-5よりも6~7割小さくなる。2番目の越流流量のピークも7割程度小さくなる。下流法面勾配35度の場合、下流法面に形成される侵食流路の勾配が緩く掃流力が50度の場合よりも小さいため、天然ダムの侵食速度が遅くなるものと考えられる。したがって、50度の場合と比べて侵食が急激には発生しないことから、最大越流流量が小さくなると推察される。

また、今回の実験において設定した最大計測時間である140秒では、下流法面勾配35度の場合には越流流量が $300\text{cm}^3/\text{s}$ 程度であるのに対して下流法面勾配50度の場合にはほぼ0となっている。越流開始後140秒の時点では、下流法面勾配35度のケースは決壊により侵食・崩壊した土砂が水路全幅にわたって残っており、それらの侵食により湛水域の水位が低下しているためと考えられる。この結果より、同一の材料で天然ダムの下流法面勾配が緩くなると、越流による水と土砂の流出継続時間は長くなるものと考えられる。

4. 越流流量のピーク発生時間と最大流量

図-9に最大ピーク流量発生時間と最大流量の関係を示す。なお、最大ピーク流量の発生時間とは越流開始から最大越流流量が発生するまでの時間である。

この図から、砂のみの場合（No.4）は、ベントナイトを混ぜた場合よりも越流流量のピーク発生時間が早く、かつ、最大流量が大きいことが分かる。砂のみの場合（No.4）はベントナイトを混ぜた場合よりも粘着力が小さく、流路の侵食速度が速くなったことが理由と考えられる。

また、今回の条件下では、天然ダムの下流法面勾配が緩い場合（No.5）、含水比が低い場合（No.3）で越流流量の最

大ピーク流量が少なくなり、その発生時間が遅くなる傾向が見られた。しかし、その差はわずかであり、実験範囲を拡大しての検討が必要であると考えられる。

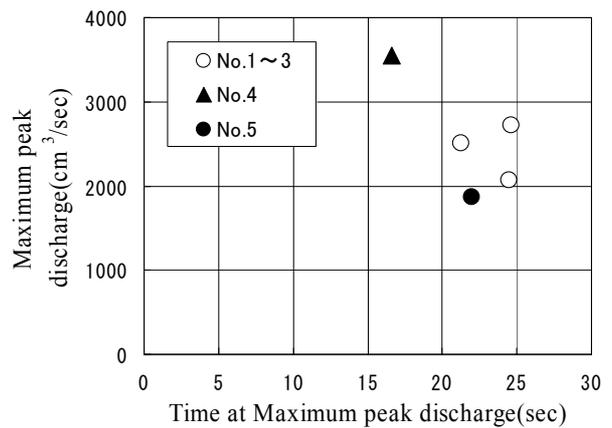


図-9 越流流量のピーク発生時間と最大越流流量の関係

Fig. 9 Relationship between the time of the occurrence of the peak discharge rate and the maximum discharge rate

5. 土砂濃度の時間変化とピーク流量の推定

天然ダムから越流する土砂を含む流れの土砂濃度の時間変化を図-10に示す。これらより、越流初期（0~10sec）はどのケースも土砂濃度が高く21~26%となっている。しかし、越流流量の最初のピークである15~25secにかけて土砂濃度は急激に低下し、5~10%となる。

このような土砂濃度の変化の理由として侵食流路の勾配変化が考えられる。越流初期は侵食流路の縦方向の侵食がまだ進んでいないため、流水は堤体下流法面勾配と同程度の急勾配である。そのため、土砂を含む流れの土砂濃度は高い。しかし、時間の経過とともに天端から侵食流路の勾配が緩くなる。このため越流してくる流れの

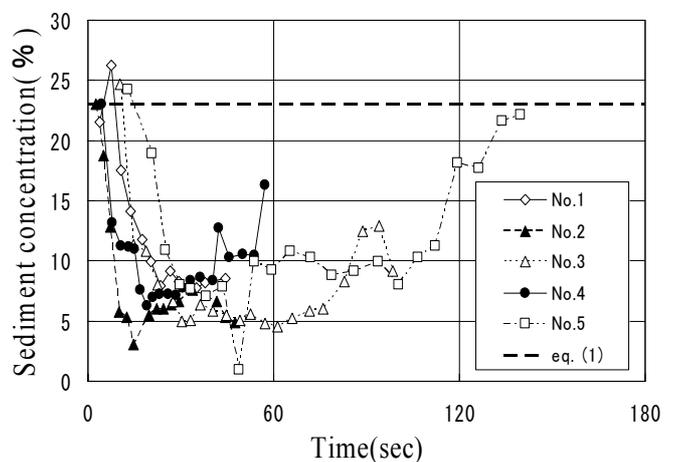


図-10 土砂濃度の時間変化

Fig. 10 The temporal variation of sand concentration

土砂濃度が低くなると考えられる。なお、今回の条件では天然ダムの構成材料の違いによる土砂濃度の変化は見られなかった。今回のベントナイトの比率では砂に近い条件であったためと考えられる。

ここで、天然ダム下流の水路斜面上 ($\theta = 11.3$ 度) で土石流状態であると仮定して土石流濃度を計算した。水路底面が固定床ではあるものの、土石流濃度 C_d を式(2)に示す高橋の式から計算すると 23% となる。実験による越流初期の土砂濃度とほぼ一致する。ここに、水の密度 $\rho = 1.0 \text{ t/m}^3$ 、天然ダム構成材料の密度 $\sigma = 2.65 \text{ t/m}^3$ 、材料の内部摩擦角 $\phi = 36$ 度とした。

$$C_d = \frac{\rho \tan \theta}{(\sigma - \rho)(\tan \phi - \tan \theta)} \quad (2)$$

天然ダム越流時のピーク流量の簡易予測式として、田畑ら(2001)が提案した式(3)がある。この式は土石流状態を想定して導かれている。したがって、今回の水路下流端でのピーク流量との単純な比較は出来ないが、参考値として示す。なお、越流流量ピーク時の流路幅は実験観察から 5.0cm~10cm を使用した。実験値と計算値を表-2に示す。計算値は実験値に近い値となっている。

$$\frac{q}{q_{in}} = 0.542 \left\{ \frac{(gh^3)^{0.5}}{\tan \theta \cdot q_{in}} \right\}^{0.565} \quad (3)$$

ここに、 g は重力加速度、 h は天然ダムの高さ、 q は単位幅当たりの越流時のピーク流量、 q_{in} は単位幅当たりの流入流量、 θ は河床勾配である。

表-2 最大ピーク流量の実験値と計算値の比較

Table 2 Comparison between the measured maximum peak discharge rate and the calculated maximum peak discharge rate

No.	Measured maximum peak discharge rate at the end of channel when using both sand and water (cm^3/s)	Calculated maximum peak discharge rate by eq.(3) (cm^3/s)
1	1772.5	1137~2275
2	1958.3	
3	1546.9	
4	2735.0	
5	1451.9	

6. 天然ダムの天端における侵食流路幅の変化

No.5 のケースについて、写真より天然ダムの天端における侵食流路幅(写真-1)が判読できる時間内での侵食流路幅の変化とそのときの越流流量を図-11に示す。な

お、越流流量は水位より計算した値である。

越流開始時を除き越流流量が最初のピーク(最大流量)を迎える 8sec から 27sec (図-8) までは侵食流路の横方向の変化が少ない。しかし、この時間は越流流量が $860 \text{ cm}^3/\text{s}$ から $1684 \text{ cm}^3/\text{s}$ とほぼ2倍に増加している。ここで、実験観察からこの時間における天然ダム下流法面での崩壊・亀裂は見られていないことから、越流流量の増加は縦方向の侵食が急激に進行したためと考えられる。

天然ダムの天端における侵食流路の横方向の広がりには最初のピーク直後に急激に早くなる。侵食流路を下流から観察したところ、ピーク直後からの横方向の急激な広がりにより、天然ダム内部の侵食流路側面がひさし状になり、それが落下する。この状態は、溪岸侵食に関する研究で福岡ら(1999)により報告されている状態と同様である。

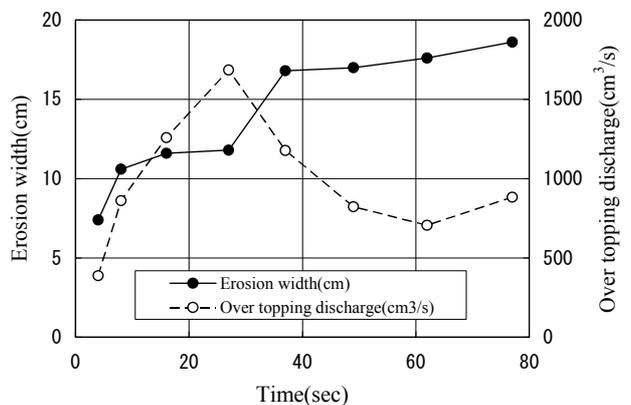


図-11 侵食流路幅の時間変化

Fig. 11 The temporal variation of the erosion width and the overtopping discharge rate



写真-1 ピーク流量時の侵食状況と侵食幅 (No.5, 越流開始から 27 秒後)

Photo 1 Situation and width of erosion at the maximum peak discharge rate (No.5, after 27 seconds from beginning of dam outbursts)

7. おわりに

天然ダムの決壊過程と決壊時の流出量について、天然ダムの材料の違いと天然ダムの形状の違いによる検討を行った。以下に結果を記す。

- ①粘着性の低い砂のみで作られた天然ダムは、越流による侵食が急激に進行し、最大越流流量はベントナイトを混ぜた材料で作られた天然ダムの場合より 3~7 割程度大きくなる。
- ②最大越流流量が発生する時間は砂のみで作られた天然ダムの方が 5~10 秒早くなる。
- ③砂のみで作られた天然ダム決壊時の最大越流流量付近の波形形状は尖ることが確認された。
- ④同一の材料で天然ダム下流法面勾配が緩い場合、侵食が急激には発生しないことから最大越流流量が小さくなり、その発生時間は遅くなる傾向が見られた。
- ⑤下流法面勾配が緩くなると、下流法面上での侵食流路の勾配が緩く掃流力が低下することから、越流による水と土砂の流出継続時間は長くなるものと考えられる。
- ⑥どのケースにおいても天然ダムの決壊時当初は天端付近の急激な縦侵食が進行しているものと考えられ、横方向の侵食が急激に進行する直前に最初のピークが発生するようである。
- ⑦最大越流流量は⑥の時であり、今回の実験範囲において、その値は流入流量 (200cm³/s) の約 7 倍から 13 倍であった。その後、侵食流路内の横方向の侵食により、ピークが複数発生することが分かった。

今後の課題として、決壊時の縦侵食・横侵食の状況を定量的に把握し、最大越流流量が流入流量、湛水量、天然ダムを構成する材料の違い、並びに下流法面勾配の違いにより、どのように変化するかについて、より詳細に検討する必要がある。

引用文献

- 石川芳治・井良沢道也・小泉豊 (1991) : 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.
- 石川芳治・井良沢道也・匡尚富 (1992) : 天然ダム決壊による洪水流下の予測と対策, 砂防学会誌 (新砂防), Vol.45, No.1, p.14-21.
- 加藤善明・橋本宏・藤田光一 (1985) : 堤防の耐越水化に

- 関する実験的研究, 第 29 回水理講演会論文集, pp.627-632.
- 川邊洋・権田豊・丸井英明・渡部直喜・土屋智・北原曜・小山内信智・笹原克夫・中村良光・井上公夫・小川紀一朗・小野田敏 (2005) : 2004 年新潟県中越地震による土砂災害 (速報), 砂防学会誌 (新砂防), Vol.57, No.5, p.39-46.
- 須賀堯三・石川忠晴・葛西敏彦 (1981) : 越流水による堤防の破壊特性 その 3, 第 25 回水理講演会論文集, pp.355-360.
- 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, 第 31 号, B-2, pp.601-615.
- 高橋保・中川一 (1993) : 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 巻, pp.699-704.
- 田畑茂清・池島剛・井上公夫・水山高久 (2001) : 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.
- 田畑茂清・井上公夫・早川智也・佐野史織 (2001) : 降雨により群発した天然ダムの形成と決壊に関する事例研究—十津川災害(1889)と有田川災害(1953)—, 砂防学会誌, Vol.53, No.6, pp.66-76.
- 福岡捷二・渡邊明英・片山敏男・板屋英治・柏木幸則・山縣聡・林基樹 (1999) : 粘性土 (シルト) 河岸の流水による侵食拡大機構, 水工学論文集, 第 43 巻, pp.695-700.
- 藤田光一・橋本宏・加藤善明 (1984) : 越流水による堤防の破壊特性 (その 4), 第 39 回土木学会年次講演会, 第 II 部門, pp.523-524.
- 藤田裕一郎・村本嘉雄・八尋裕 (1988) : パイピングによる堤体の決壊過程, 京都大学防災研究所年報, 第 31 号, B-2, pp.525-546.
- 水山高久・石川芳治・福本晃久 (1987) : 天然ダムの浸透破壊, 土木研究所資料, 第 2744 号.
- 水山高久・石川芳治・福本晃久 (1989) : 天然ダムの破壊と対策, 土木技術資料, 第 31-11 号, pp.50-56.
- 山本祐二・吉野丈雄 (1978) : 越流水による堤体法面の侵食特性, 第 33 回土木学会年次講演会, 第 II 部門, pp.529-530.
- J.Costa (1988) : Floods From Dam Failure, Floods Geomorphology,p.436-439.