

小規模天然ダムの越流決壊を対象とした鋼製格子型砂防堰堤の土石流制御機能の検証

(財)砂防フロンティア整備推進機構 ○堀内成郎, 日本工営(株) 中央研究所 伊藤隆郭
京都大学大学院 水山高久

1. 結論: 大規模土砂災害に対する危機管理対策の 1 つとして、豪雨・地震に伴って形成される天然ダムとその決壊により発生する土石流対策がある。これに関しては、現地データや過去に発生した天然ダムデータの収集・整理^{1), 2)}、天然ダムの決壊に対する数値的な予測³⁾⁻⁵⁾等が行われてきている。また最近、天然ダムの越流決壊やダム破壊過程の再現を目的として、幾つかの数値モデルが再構築されている⁶⁾⁻⁸⁾。現地における天然ダムの越流決壊に伴う土石流ハイドログラフの予測が行われ、ある程度の予測解析が可能となってきているものの、解析モデルは研究者間で見解の一致が見られないところもあり、今後の研究課題として残されている。一方、天然ダムの決壊に伴う土石流形成に関する現地データや水理実験による越流侵食に伴う段波の形成と流下に関するデータもまだ十分には収集されていない。更に、透過型砂防堰堤を用いた土石流調節においては、ピーク流量の制御や土石流によって輸送される土砂の制御および粒径の調節などが対象となるが、鋼製格子型砂防堰堤を対象とした検討はこれまでなされていなかった。

ここでは、天然ダムの決壊により発生する土石流のピーク流量と輸送される土砂の鋼製格子型砂防堰堤による制御について、水理模型実験を通じて検証した。次いで、数値解析では、実験条件に相当する水理条件を与え、天然ダムの越流決壊に伴う土石流のハイドログラフを算定し、堰堤に到達するピーク流量の予測を行った。これらにより、小規模な天然ダムの決壊においても決壊流量が堰堤水通し部の設計流量よりも大きい土石流ピーク流量が発生する可能性があること、天然ダムの縦断形状の違いがピーク流量に及ぼす影響および鋼製格子型堰堤による天然ダムの越流決壊に伴う土石流の制御の可能性等についての検討を行ったので、これらを報告する。

2. 解析対象領域: 図-1 は、対象となる現地の河床位と川幅の縦断図である。図には、水理模型実験の対象区間を示した。対象とする溪流の堰堤計画断面における流域面積は 16.6 km²、水理模型実験で対象とする区間の平均勾配は、1/13.5 (= 4.2°) である⁹⁾。

3. 水理模型実験: 図-2 は、水理模型水路の全景である。流れの相似則には、フルード相似則を用いて諸元を設定した。実験に用いた土砂の特性を表-1 に示す。上流から定常的に給水 (60 m³/s: 95% 粒径に対する混合粒径の移動限界流量) を行い、天然ダムの越流決壊に限定した実験を行い、越流決壊に伴う十分に飽和した土石流を流下させた。模型の天然ダムは、図-1 および図-2 に示すような、高さ (16 m)・土砂量 (見かけ土砂量 16,250 m³) の 3 角形の形状の天然ダムを作成した¹⁰⁾。天然ダムの規模は、高さ土砂量の関係¹⁰⁾から見ると、比較的小規模である。天然ダムの作成においては、越流侵食が発生するように、土砂の透水性や含水比に留意した。具体的には含水比を 10% 程度にし、天然ダム形成時に作用する重量を想定して、3 層に分けて転厚し締固めた。

水路下流端では、砂防堰堤の有無の違いによる堰堤通過の流量、流砂量および粒度分布を計測した。天然ダム地点 (測線 No. 33+40m: x = 1,690 m) から堰堤 (測線 No. 29+5m: x = 1,455 m) の区間 (区間長 235 m) においては、通水後の河床位を計測した。天然ダム貯水池 (測線 No. 34+22.5m: x = 1,722.5 m: 天然ダムの上流法尻位置) と堰堤設置位置においては、サーボ式波高計で水位の時間変化を計測した。波高計および天然ダムの設置状況は、図-2 にも示している。天然ダムの決壊に伴う流況や越流幅の時間変化と堰堤周辺における流況は、ビデオカメラ等で撮影した。

4. 実験データの解析: 図-3 は、天然ダム湛水池と堰堤設置断面における水位の時間変化、図-4 は、河床縦断分布の通水前後における格子堰堤の有無による違い、図-5 は、堰堤設置断面測線におけるダム決壊に伴う土石流流量および土砂輸送濃度の時間変化、図-6 は、堰堤設置断面下流における土石流の平均粒径の時間変化である。図-4 で比較した通水後の河床縦断分布に示すように、天然ダム決壊後の下流域の河床における土砂堆積が顕著で、堰堤の有無による土砂堆積の違いは顕著には現れない。図-3, 5, 6 を総合してみると、フロント部の到達時 (0~120 sec.) には大きい粒径が格子堰堤に捕捉され、平均粒径は急激に小さくなるが、流量のピークが過ぎる (420~710 sec.) と、巨礫成分が堰堤まで到達し難くなり、堰堤および格子に捕捉された土砂 (特に、80% 粒径程度の巨礫成分

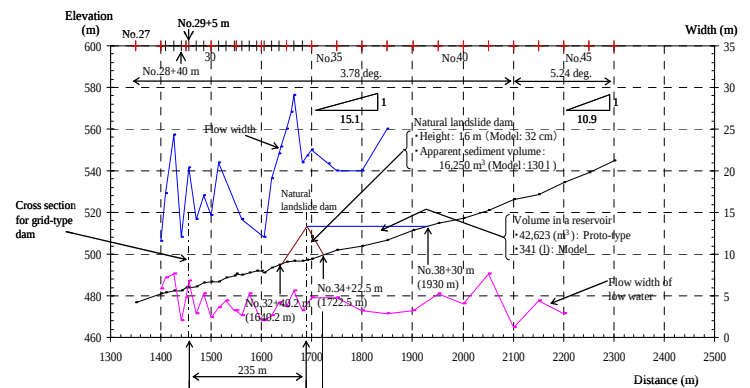


図-1 対象とする天然ダムの位置、河床縦断分布および河床の低水幅・谷幅の縦断分布

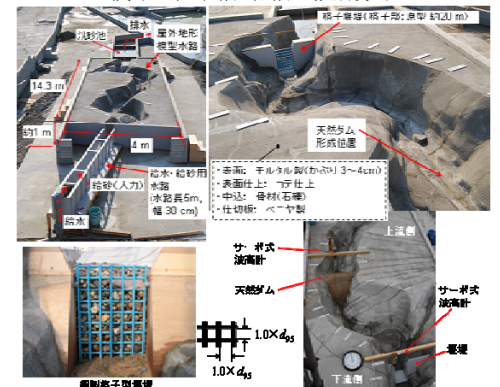


図-2 水理模型全景と堰堤設置位置

表-1 実験に用いた土砂の物理特性

	σ_p	c_s	d_m (mm)	d_{max} (mm)	d_{95} (mm)	d_{84} (mm)	d_{20} (mm)	d_{16} (mm)	d_{10} (mm)	k (cm/s)	ϕ (deg.)
Model	2.64	0.634	5.08	53	36	15	0.537	0.494	0.437	0.0922	38 to 40
Proto type	2.64	0.634	254	2,650	1,800	750	26.9	24.7	21.9	0.652	38 to 40

ここに、 σ_p : 土砂の比重、 c_s : 土砂の静止堆積濃度、 d_m : 平均粒径、 d_{max} : 土砂の最大粒径、粒径 d への下付添え字の数字は、粒度分布の質量百分率における割合 (%) である。 k : 土砂の透水係数、 ϕ : 土砂の内部摩擦角である。

分)が捕捉・通過を繰り返して、格子の閉塞は密ではなくなり、格子下流に流下している。実験を総括すると、鋼製格子型堰堤には土石流流量や土砂濃度ピーク値を低減する効果があることが分かる。

5. 数値解析： 水理模型実験で得られたデータのうち、格子堰堤を用いないものに対して、再現計算を行った。ここでは、一様砂に対する土石流河床変動の1層流モデル^{11), 12)}と貯水池における連続式を組み合わせたモデル

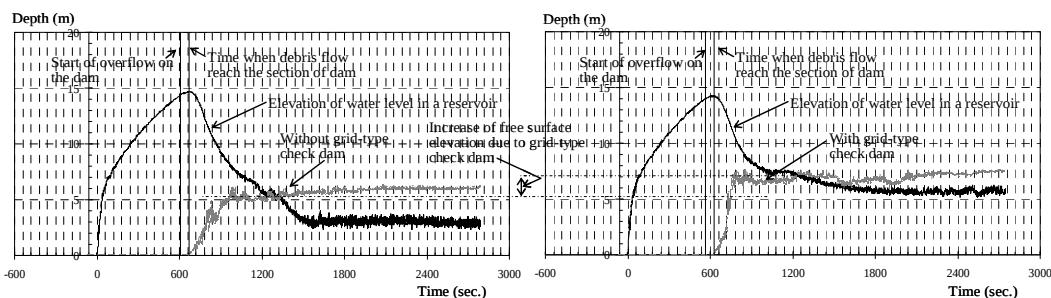
¹⁰⁾を用いた。なお、水理実験では、小規模の天然ダムの上流決壊が対象であり、川幅拡幅のハイドログラフに及ぼす影響は小さいと予想されるので、このモデル化は行っていない。計算では水理実験と同様の条件を与え、計算は有限差分により行い、leap-frog法を用いた。空間差分間隔 $\Delta x = 5\text{m}$ 、時間差分 $\Delta t = 0.00125 \sim 0.005\text{ sec.}$ の範囲の値を用いた。川幅は、**図-1**に示す平均流動幅の平均値である17mとした。堰堤断面における流量の時間変化と通水前後における河床縦断分布の計算データを、**図-4**および**図-5**に示した。これによると、越流侵食による流量・河床変動に関する実験と計算データの一致は良く、解析モデルの適用性が確認される。**図-5**によると、小規模な天然ダムの決壊においても、ピーク流量が格子堰堤の設計流量(水通し部)を上回る可能性があることが示されている。

天然ダムの越流決壊を想定して、越流決壊に伴うピーク流量に及ぼすダムの縦断形状に関する単純な感度分析を行った。**図-7**は、3角形状の天然ダムを対象として、越流ピーク流量に及ぼすダムの下流側の法勾配の影響である。下流法面の勾配が小さい程、天然ダム越流に伴う侵食率が小さくなるため土石流のピーク流量は小さくなる。この結果は、今後、ダム決壊に伴うピーク流量の観測を想定した際に、ピーク流量の縦断変化とダム形状の違いがピーク流量に及ぼす影響を考慮する必要があることを示す基礎的な情報である。

5. 結論： 3角形の形状の天然ダムの越流決壊を想定した水理模型実験と土石流の1次元計算を行った。天然ダム直下では、土砂濃度が大きい土石流が形成されるが、鋼製堰堤の格子によって土石流のピーク流量と輸送濃度を制御できることが分かった。今回の解析では、小規模の天然ダムを対象とし、ダム部の川幅拡幅過程は考慮していないが、今後は大規模な天然ダムの越流決壊に対して既往研究における側岸侵食の取り扱い等を導入して解析モデルの精度向上や天然ダムの縦断河床形状と越流部の流れを総合した土石流ピーク流量に関する普遍的なデータ整理を行っていく予定である。

謝辞： 本研究において、水理模型実験のデータの使用および解析結果の公表を快諾して頂いた国土交通省 富士川砂防事務所の諸兄に感謝致します。

参考文献： 1) Costa, J. E. et al. : Geological Society of American Bulletin, Vol. 100, 1054-1068, 1988, 2) 田畑茂清ら：天然ダムと災害，古今書院，2002, 3) Fread, D.: The NWS Dambrk Model: Theoretical background/ User documentation, National Weather Service, NOAA: Silver, Spring, Maryland, 1991, 4) 高橋 保ら：水工学論文集, 37, 699-704, 1993, 5) Awal, R., H. et al.: Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE, Vol. 52, 151-156, 2008, 6) 里深好文ら：砂防学会誌, Vol. 59, No. 6, 55-59, 2007, 7) 中川 一：2010年度(第46回)水工学に関する夏期研究会講義集, A コース, A-7-1-A-7-19, 2010, 8) 吉野ら：砂防学会誌, 63, 6, 52-58, 2011, 9) 堀内成郎ら：砂防学会誌, Vol. 62, No. 2, 37-44, 2009, 10) S. HORIUCHI et al.: Proc. of Int. Symp. in Pacific Rim, Interpraevent 2010, 26-30, 157-167, 2010, 11) 江頭進治ら：水工学論文集, 41 巻, 789-794, 1997, 12) 宮本邦明ら：砂防学会誌, 55, 2, 24-35, 2002,



格子堰堤なし
図-3 天然ダム貯水池と堰堤設置断面における水位の時間変化
格子堰堤あり

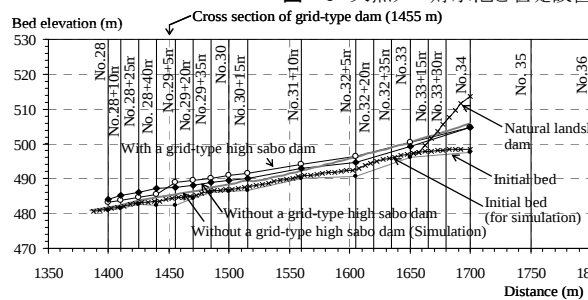


図-4 通水前後における河床縦断分布の比較

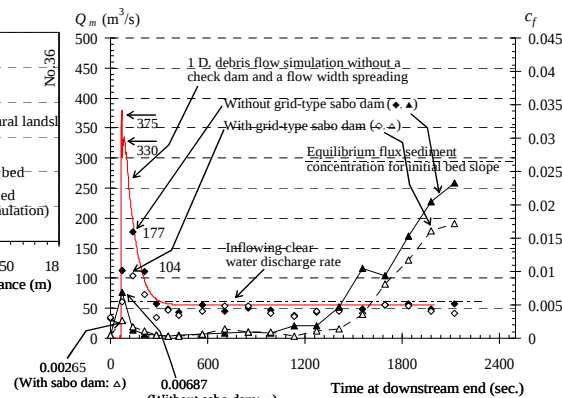


図-5 堰堤設置断面測線におけるダム決壊に伴う土石流流量および土砂輸送濃度の時間変化
(堰堤水通部の設計流量: $263\text{m}^3/\text{s}$)

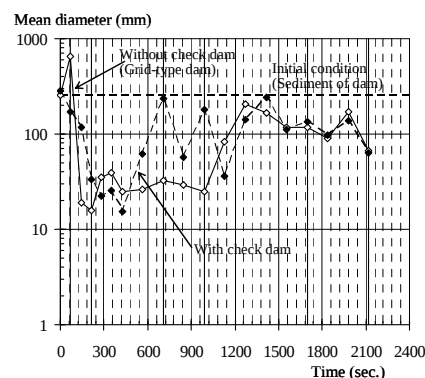


図-6 堰堤設置断面下流における土石流の平均粒径の時間変化

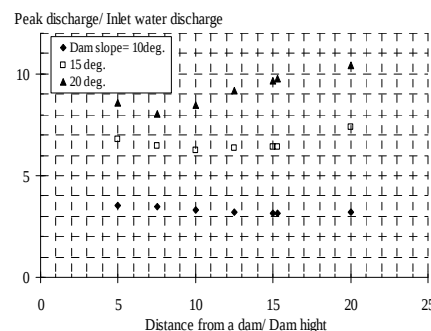


図-7 天然ダム越流決壊時のピーク流量の縦断分布に及ぼすダム下流法面勾配の影響
(縦軸: ダム流入流量に対するピーク流量, 横軸: ダム高さに対する縦断距離)