

三井共同建設コンサルタント株式会社 正会員 ○原田紹臣
立命館大学 正会員 里深好文

1. はじめに

近年、地震や集中豪雨の影響によるため池決壊に伴う洪水流出およびその下流域で発生する甚大な洪水被害が報告されている^{1), 2)}。

そこで、本研究ではため池から流出する洪水流出過程に関して、実渓流において筆者らが実施した小規模な人工の土堤防決壊実験結果³⁾を対象に、二次元河床変動解析モデル⁴⁾を用いて再現計算し、モデルの適用性について検討した。そして、本モデルを用いて過去に発生した被害事例を参考に実規模での洪水流出について再現計算し、その適用性について検討した。また、実規模におけるため池からの流出過程に影響を与える要因に関して、条件を変化させて解析し、その結果に基づいて考察した。

2. 土堤防の越流侵食過程に関する数値計算

本研究では、筆者らが実施した小規模な土堤防の決壊実験結果³⁾を対象に、二次元河床変動解析モデル⁴⁾を用いて土堤防の侵食過程および洪水流出過程について再現計算し、実験結果との比較を通じてモデルを検証した。

(1) 既往実験の概要

実施した実験は、河床に堆積物がなく露岩している河道幅約 5m 程度の溪流において比較的均一な粒径の土砂を用いて土堤防模型を作製し、自然湛水させた後に決壊させた。

実験における堤防形状等の概要を図-1 に示す。

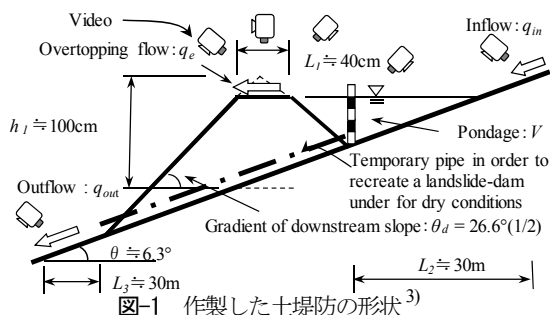


図-1 作製した土堤防の形状³⁾

(2) 支配方程式

二次元的な場での x 方向（流下方向）における流水の運動方程式、 y 方向（横断方向）における流水の運動方程式、流れの連続式、流砂の連続式および河床の連続式は、それぞれ次のように表される。

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} - \frac{\tau_x}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial u}{\partial y} \right) \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} - \frac{\tau_y}{\rho h} + 2 \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial v}{\partial y} \right) \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = i_b \quad (3)$$

$$\frac{\partial Ch}{\partial t} + \frac{\partial Chu}{\partial x} + \frac{\partial Chv}{\partial y} = i_b C_* \quad (4)$$

$$\frac{\partial z}{\partial t} + i_b = 0 \quad (5)$$

ここに、 x は流下方向の距離、 y は横断方向の距離、 u は x 方向の平均流速、 v は y 方向の平均流速、 t は時間、 ρ は流動層の密度、 p は圧力、 ε は渦動粘性係数、 τ_x 、 τ_y は x 、 y 方向の河床せん断力、 h は流動深、 g は重力加速度、 z は河床高、 C は流動層における土砂濃度、 C_* は河床の堆積濃度、 i_b は堆積物の侵食または堆積速度である。なお、河床せん断抵抗則はマニング則を用いて算出し、圧力に関しては静水圧近似を行っている。河床侵食速度については、土砂濃度を用いた従来のモデル⁵⁾をそのまま用いる。

(2) 解析条件

CASE 2-3 を対象に、実験とほぼ同じ条件を想定した解析条件として、土砂の粒径を 1.5 mm、内部摩擦角を 37 度、 $\Delta t = 0.001$ s、 $\Delta x = 0.1$ m、 $\Delta y = 0.1$ m、 $\rho = 1.1$ kg/m³、マニングの粗度係数を 0.05 m^{-1/3}s とし、越流侵食による土堤防の侵食過程および洪水流出過程について解析した。

(3) 解析結果と実験結果との比較

越流侵食による堤防の拡幅過程の解析結果を三次元的に表現したものを、図-2 に示す。縦侵食と拡幅侵食（側岸侵食）過程の様子が確認できる。なお、本解析モデルは、洪水流出過程を示すハイドログラフを堤防の侵食過程を含む二次元河床変動の解析に付随して求めることが可能である。

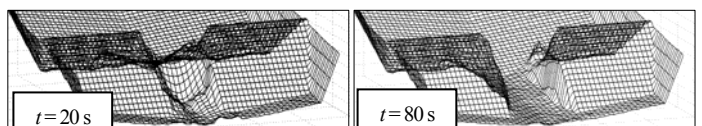


図-2 土堤防侵食過程の計算結果

流出ハイドログラフの実験結果と解析結果との比較を、図-3 に示す。全体的に、実験の傾向が再現できていることが確認される。

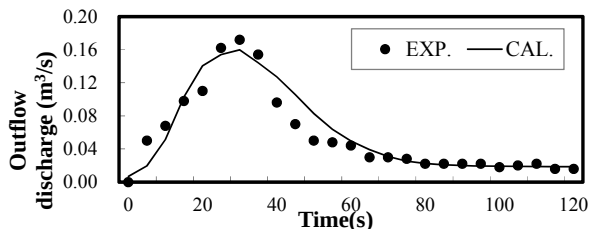


図-8 流出ハイドログラフの実験値と計算結果

3. 実規模における洪水流出に与える影響の検討

二次元河床変動解析モデル⁴⁾を用いて、実規模（スケール）への適用性について検討した。

(1) 解析モデルの実規模への適用性に関する検証

表-2に示す過去に発生した災害事例⁶⁾（CASE 1-1, 1-2）およびそれを基に仮定した条件（CASE 1-3, 1-4）を用いて解析した。なお、適用性について検証するため、従来から経験的に求められているピーク流出量とダムファクター（ダム高さ（m）とダム決壊時の上流貯水量（ 10^6 m^3 ）との積）との関係⁶⁾に本解析結果をプロットしたグラフを、図-3に示す。本解析結果は従来の経験則と似た傾向を示しており、実規模への適用に関して妥当性があることが分かった。

表-2 実規模への適用性に関する解析ケース

Type	Dam height (m)	Dam volume(m^3)
CASE 1-1	5.8	7,400
CASE 1-2	18.0	910,000
CASE 1-3	5.8	42,600
CASE 1-4	5.8	96,000

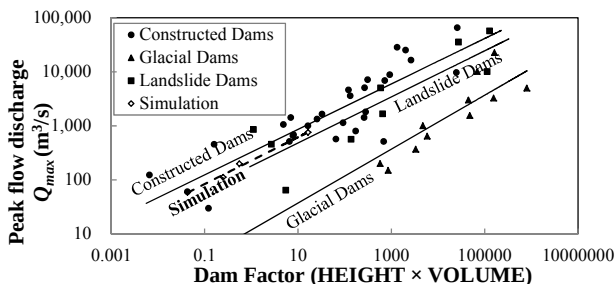


図-3 流出ピーク流出量とダムファクター⁶⁾に一部加筆の関係

(2) 洪水流出過程に影響を与える要因に関する検討

実規模におけるため池からの洪水流出過程に影響を及ぼす要因に関して、ダム湛水量、ダム高さおよび土堤防の上下流法勾配をそれぞれ変化させて検討した（表-3）。

ダム高さを一定とし、湛水量を変化させて解析した結果を図-4に示す。各ケースのピーク流出量の比と湛水量の比が、近似していることが分かる。これより、湛水量が洪水流出に強く影響を与えていることが分かる。

土堤防の上下流における法勾配をそれぞれ変化させて解析した結果を、図-5に示す。土堤防における上下流の勾配とも急になる程、ピーク流出量が大きい傾向を示している。

本研究において、洪水流出過程が従来から報告されている下流側の勾配だけでなく、上流側の勾配にも影響されていることが分かった。

表-3 洪水流出過程に影響を与える要因に関する解析ケース

Type	Dam height (m)	Dam volume(m^3)	Gradient of slope	
			Up(u)	Down(d)
CASE 2-1	6.0	2,600	1/2.5	1/2.5
CASE 2-2		5,200		
CASE 2-3		7,800		
CASE 2-4	2.0	2,600	1/2.0	1/2.0
CASE 2-5	4.0			
CASE 2-6	6.0			
CASE 2-7	6.0	7,800	1/2.0	1/2.0
CASE 2-8			1/2.5	1/2.5
CASE 2-9			1/3.0	1/3.0
CASE 2-10			1/2.5	1/2.0
CASE 2-11				1/3.0
CASE 2-12			1/2.0	1/2.5
CASE 2-13			1/3.0	

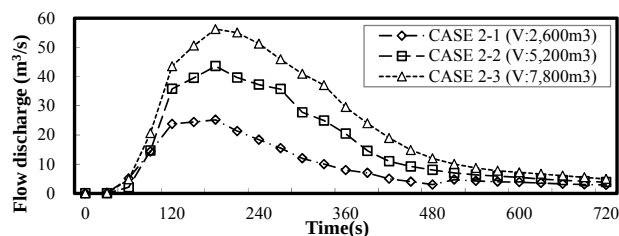


図-4 ダム湛水量(V)を変化させた洪水流出過程の相違

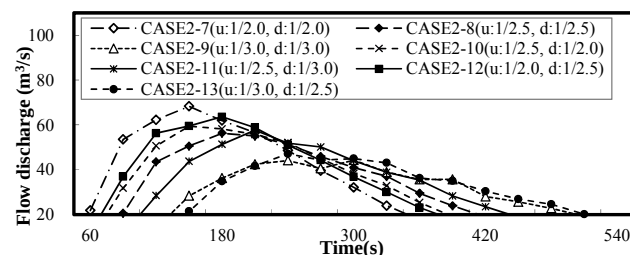


図-5 堤防の法勾配(up,down)を変化させた洪水流出過程の相違

参考文献

- 1) 平成16年台風23号による淡路ため池被害調査団；平成16年台風23号による淡路ため池被害調査報告書，農業土木学会京都支部，2005.
- 2) 堀 俊和・毛利栄征・上野和広；ため池の被害と耐震診断（特集 2011東日本大震災の教訓と復旧：国土保全），基礎工，40(8)，pp.65-67，2012.
- 3) 原田紹臣・里深好文；堆積部中の不飽和浸透過程を考慮した侵食に関する研究，河川技術論文集，vol.18，pp.287-292,2012.
- 4) 高橋 保・中川 一・里深好文；貯水池逆流システムによるフラッシング排砂，水工学論文集，vol.46，pp.785-790,2002.
- 5) 高橋 保・中川 一；豪雨時に発生する石礫型土石流の予測，砂防学会誌，Vol.44，No.3，pp.12-19，1991.
- 6) John E. Costa; Floods from dam failure, Flood geomorphology, pp.436-439, 1988.