

堤体物性値の不確定性を考慮した洪水解析 Flood simulation considering uncertainty of earth-fill properties

○西村伸一 近藤祐介 藤澤和謙

NISHIMURA Shin-ichi, KONDOH Yusuke and FUJISWA Kazunori

1. はじめに

本研究ではため池が越流破堤した際の洪水シミュレーションを行うことにより、被害範囲の推定を行うことを目的とする。とくに今回は、越流に伴う堤体の洗掘に関わるパラメータの不確定性を考慮し、これらの統計モデルにモンテカルロ法を適用することによって、破堤断面からの流出ハイドログラフの不確定性を算定している。その結果に基づき、有限体積法による洪水解析を実施し、下流浸水域の洪水深の不確定性を明らかにしている。

2. 洪水シミュレーション

基礎式には、鉛直方向の等速度分布、非圧縮性流体、静水圧力分布、底部傾斜を条件とする平面2次元浅水方程式を用いる。

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (1) \quad \mathbf{U}: \text{保存量ベクトル}, \mathbf{F}, \mathbf{G}: x, y \text{ 方向の流束ベクトル}, \mathbf{S}: \text{ソース項}$$

$$\mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, \mathbf{F} = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + gh^2/2 \\ uvh \end{pmatrix}, \mathbf{G} = \begin{pmatrix} uh \\ uvh \\ v^2h + gh^2/2 \end{pmatrix} \quad (2) \quad \mathbf{S} = \mathbf{S}_o + \mathbf{S}_f = \begin{pmatrix} 0 \\ ghS_{ox} \\ ghS_{oy} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -ghS_{fx} \\ -ghS_{fy} \end{pmatrix} \quad (3)$$

ここで、 h : 水深、 u, v : x - y 直交座標 x, y 方向の流速、 g : 重力加速度、 S_{ox}, S_{oy} : x, y 方向の河床勾配、 S_{fx}, S_{fy} : x, y 方向の摩擦勾配である。さらに、基礎式に近似 HLL リーマン解法を用いた有限体積法¹⁾により解析を行う。次いで、図-1にため池が破堤した際の破堤断面と変数を定義し、破堤断面からの流出ハイドログラフの算定式を次式に示す。

$$Q_{out} = \sqrt{\frac{gA^3}{\partial A / \partial h}} \quad (4) \quad V = Q_{out} / A \quad (5) \quad \frac{dH}{dt} = \frac{-E}{(1-n)} \quad (6)$$

$$E = \alpha(\tau - \tau_c) \quad (7) \quad \tau = \rho C_f V^2 \quad (8) \quad C_f = \frac{\kappa^2}{\left\{ \log \frac{R \cdot \exp(\kappa \cdot A_r - 1)}{\kappa_s} \right\}} \quad (9)$$

ここで、 Q_{out} : 流出量 (m^3/s)、 A : 破堤断面における流積 (m^2)、 V : 破堤断面における流出流速 (m/s)、 H : 基準面から破堤断面水路床までの高さ (m)、 E : 侵食速度 (m/s)、 n : 堤体の間隙率、 α : 侵食速度係数 (m/s/Pa)、 τ : せん断応力 (Pa)、 τ_c : 限界せん断応力 (Pa)、 ρ : 水の密度 (Kg/m^3)、 κ : カルマン定数 ($=0.41$)、 R : 径深、 A_r : 定数 ($=8.5$)、 κ_s : 粗度高さ (m) である。

3. 信頼性解析法

ここでは、土質定数である α, τ_c, κ_s と、破堤断面の角度である γ モンテカルロ法を用いて洪水シミュレーションを行う。

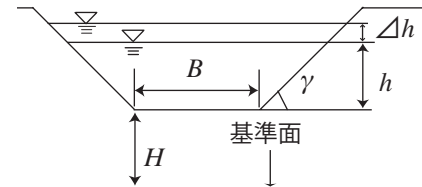


図-1 破堤断面の定義
Definition of broken section of an embankment

表-1 土質定数の統計的性質
Statistical properties of soil parameters

Parameters	Average	Standard deviation
τ_c (Pa)	25	5
k_s (m)	0.090	0.018
α (m/s/Pa)	5.5×10^{-5}	1.1×10^{-5}
γ (Deg)	54.2	17.8

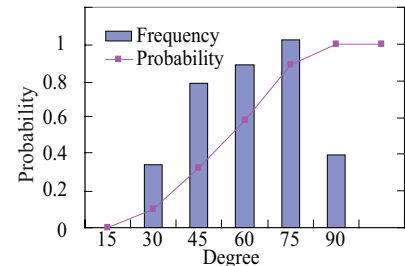
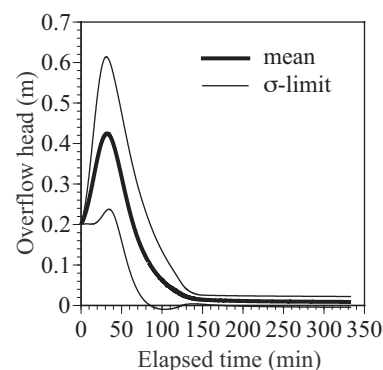


図-2 破堤断面の角度 γ の確率分布
Cumulative distribution of angle γ of broken section

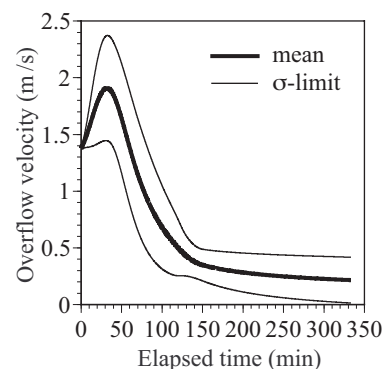
これらパラメータの平均値，標準偏差を表-1に示す．初めの3つのパラメータは，変動係数を0.2と設定しており，正規分布を仮定する．角度 γ の確率分布に関しては，公表されているデータ²⁾にしたがい，図-2のように分布を仮定している．各パラメータに乱数を適用することによって，破堤断面からの洪水流出ハイドログラフが乱数として得られる．これを洪水解析に適用することによって，最終的に，越流破堤による浸水範囲における最大浸水深の統計量を求める．

4. 解析条件および信頼性解析結果

今回は，池の貯留量として， $16,400 \text{ m}^3$ ，堤高として5 mを仮定している．初期の堤体の越流幅 B は，堤体の形状や堤体材料の粒径の影響によって決まるが，ここでは $B = 5.9 \text{ m}$ の確定値とした．また，間隙率も本来確率変数であるが，ハイドログラフへの影響が大きいとしないため $n = 0.30$ で確定値と仮定している．各パラメータの不確定性を考慮した場合の破堤断面におけるハイドログラフを，越流水深 h と流速 V について，図-3(a), (b)にそれぞれ示している．モンテカルロ法は100回繰り返し，図にはその平均値と， σ 限界値を示している．流速と越流水深ともに破堤開始後約30minで最大となり，しばらくもその時に最



(a) 越流水深



(b) 越流流速

図-3 破堤断面からの流出ハイドログラフ
Overflow hydrograph from broken section

大となっている．越流水深は，約150minで0になっており，破堤の過程が終了する．本研究では，図-4に示す仮想の地形を考え，図の左上のため池が破堤する場合を解析している．図には，そのときの最大水深の平均値を示している．地形は，ほぼ左右対称を仮定したが，図の左方面から水が流れるため下流域では，図の右寄りに浸水域が偏る結果となっている．洪水の確率特性を調べ得るために，点Aにおける最大水深の確率分布を求め，結果が図-5に示されている．今回の事例では，水深は非常に浅く，実際は問題ないと思われるが，定性的には，水深の大きい方に分布が集中しているのが特徴である．

5. まとめ

堤体の越流水深と侵食に関するパラメータを確率変数とし，洪水シミュレーションをとおして，最大水深の確率特性を評価した．この結果から，下流域の地区ごとの洪水リスク評価を正確に行うことができる可能性を示唆した．

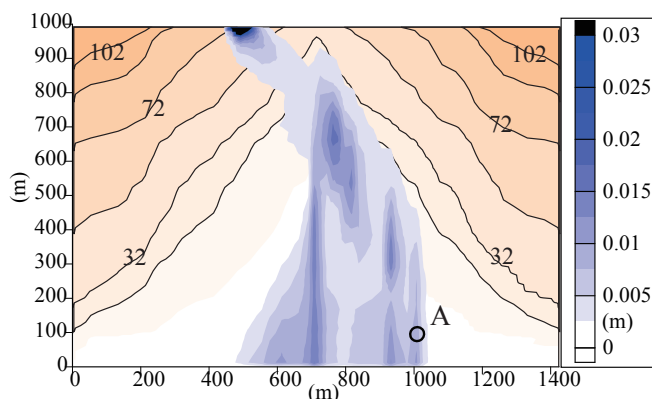


図-4 浸水域における最大水深
Maximum head of flooding discharge

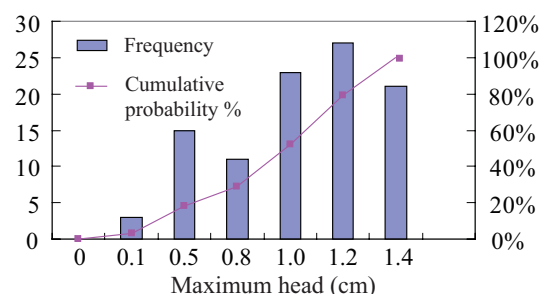


図-5 浸水域（点A）における最大水深の頻度分布
Cumulative probability of maximum head

引用文献 1)Yoon, T. H. and Kang, S-K (2004): Finite volume model for two-dimensional shallow water flows on unstructured grids, *J. Hydraul. Eng.*, pp.678-688. 2) Macchione, F. (2008): Model for predicting floods due to earthen dam breaching I: Formulation and evaluation, *J. Hydraul. Eng.*, pp.1688-1696.