

降雨および堤体物性値の不確定性を考慮した洪水解析

岡山大学大学院環境学研究科 正会員 ○西村伸一・長尾遥奈・藤澤和謙・珠玖隆行

1. はじめに 本研究ではため池（アースダム）が破堤した際の洪水シミュレーションを行うことにより，被害確率の推定を行うことを目的とする．とくに今回は，降雨の確率特性および堤体の洗掘に関わるパラメータの不確定性をモデル化している．これらの要因を考慮し，その結果として得られる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，有限体積法にモンテカルロ法を適用することによって下流被害域の浸水深の不確定性を明らかにしている．

2. 疑似降雨の作成 本研究では，岡山市の場合を例に取り，45年間の降雨データを基に，乱数によって疑似降雨を生成し，越流および氾濫の解析に用いるものとする．豪雨のパターンを生成するのに，年最大の72時間連続降雨データの統計処理を行う．ただし，6時間以上の無降雨期間がある場合を一雨の区切りとする．具体的な疑似降雨波形の作成方法を図-1に示す．基本的には，実降雨データの波形を，時間雨量の自己相関性を考慮することによって忠実に再現している．更に72時間総降雨量の確率分布を実降雨データから求め，乱数を生成して，降雨波形を調整する．この操作によって，様々なパターン降雨波形が作成されることになる．作成された疑似降雨波形の例を図-2に示す．

3. 越流確率の算定方法 ここでは，ため池への流入量が増大し，洪水吐の設計越流水深を，洪水時のピーク越流水深が上回った場合に越流が生じるものと仮定する．洪水吐からの設計洪水流量と流域のピーク洪水流量は，それぞれ，式(1)，(2)で与えられる¹⁾．

$$Q_d = C_d \cdot B \cdot h_d^{3/2} \quad (1) \quad Q_p = \frac{1}{3.6} \cdot r_e \cdot A \quad (2)$$

ここで， Q_d ：設計洪水流量 (m^3/s)， Q_p ：洪水ピーク流量 (m^3/s)， C_d ：設計流量係数， B ：洪水吐における堰の有効幅 (m)， h_d ：洪水吐の設計越流水深 (m)， r_e ：有効降雨強度， A ：流域面積 (km^2) である．また，有効降雨強度は，降雨強度から式(3)を経由して得るものとする．

$r_e = f_p \cdot r$ (3) f_p ：ピーク流出係数 (0.7~0.8 の一様乱数で与える)
 Q_d と Q_p の収支を考慮して，連続降雨72時間中のピーク越流水深 h_p が求められる．さらに，乱数による降雨と f_p の不確定性を考慮して越流確率 $P_f = \text{Prob}[h_d < h_p]$ を求める．越流確率は， $h_d < h_p$ を満足する回数を総シミュレーション回数で割った値とする．さらに，確率が一定値になるまでシミュレーションを繰り返す．

3. 洪水解析 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．

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} + \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial y} = \mathbf{S} \quad (4) \quad \mathbf{U} = \begin{pmatrix} h \\ uh \\ vh \end{pmatrix}, \quad \mathbf{F} = \begin{pmatrix} uh \\ u^2h + gh^2/2 \\ uvh \end{pmatrix}, \quad \mathbf{G} = \begin{pmatrix} uh \\ uvh \\ v^2h + gh^2/2 \end{pmatrix} \quad (5) \quad \mathbf{S} = \mathbf{S}_0 + \mathbf{S}_f = \begin{pmatrix} 0 \\ ghS_{ox} \\ ghS_{oy} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -ghS_{fx} \\ -ghS_{fy} \end{pmatrix} \quad (6)$$

ここで， $\mathbf{U}$ ：保存量ベクトル， $\mathbf{F}$ ， $\mathbf{G}$ ： x ， y 方向の流束ベクトル， $\mathbf{S}$ ：ソース項 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

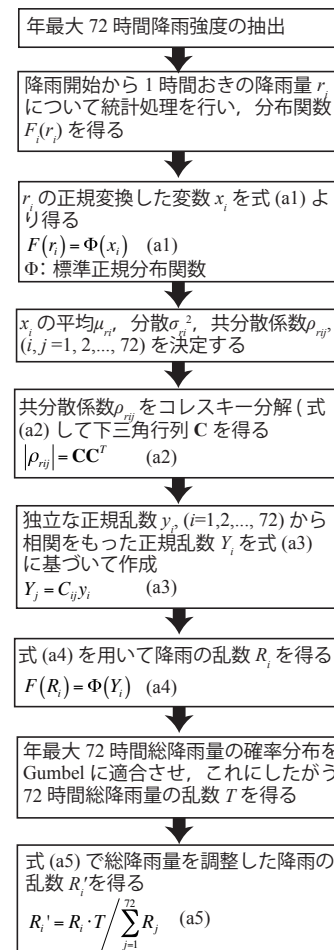


図-1 疑似降雨の作成アルゴリズム

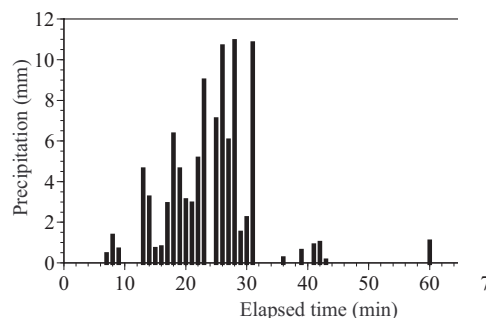


図-2 疑似降雨の例

HLL リーマン解法を用いた有限体積法²⁾により解析を行う。本研究では、図-3の断面形状を保つため池が破堤すると仮定し、破堤断面からの流出ハイドログラフを次式にしたがって求める。

$$Q_{out} = \sqrt{\frac{gA^3}{\partial A / \partial h}} \quad (7)$$

$$V = Q_{out} / A \quad (8)$$

$$\frac{dH}{dt} = \frac{-E}{(1-n)} \quad (9)$$

$$E = \alpha(\tau - \tau_c) \quad (10)$$

$$\tau = \rho C_f V^2 \quad (11)$$

$$C_f = \frac{\kappa^2}{\left\{ \log \frac{R \cdot \exp(\kappa \cdot A_r - 1)}{\kappa_s} \right\}} \quad (12)$$

ここで、 Q_{out} : 流出量 (m³/s), A : 破堤断面における流積 (m²), 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 : セン断応力 (Pa), τ_c : 限界せん断応力 (Pa), ρ : 水の密度 (Kg/m³), 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 本研究では、図-4に示す4つのため池群のシステム信頼性解析を行うものとする。A池とB池、C池とD池がそれぞれ上池と下池の関係にあり、下池は上池の破堤に影響され、破堤パターンは次の五つに絞られる。①B池のみ、②A B池、③C D池、④B C D池、⑤A B C D池。これらのパターンの任意年における越流確率 P_f は、①0.04%, ②0.29%, ③3.48%, ④0.001%, ⑤0.01%と計算される。次に、越流した場合の最大浸水深の確率分布を次の様に求める。土質定数である α , τ_c , κ_s と、破堤断面の角度である γ に乱数を適用して洪水モンテカルロシミュレーションを行う。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³⁾にしたがい、図-5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。乱数による平均流出ハイドログラフの例を図-6に示す。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ことができる。A B C D池全てが決壊した際の最大浸水深の浸水を図-7に示す。図の○はため池の位置を示し、ここから流出ハイドログラフに基づき越流水を流入させる。図中の△は、仮想観測点を表しており、図-8にはこの点における最大浸水深の分布を与えている。5つのパターンで、最大浸水深が10cmを超える確率 P_{sub} を求めると、それぞれ、①12.8%, ②20.0%, ③0.00%, ④12.9%, ⑤20.2%である。確率 P_f , P_{sub} から、任意年に最大水深が10cmを超える確率、

いわゆる損傷確率は次式で得られる。
$$P = \sum_{i=1}^5 P_{fi} \cdot P_{subi} = 0.065 (\%) \quad (13)$$

6. まとめ 年最大72時間連続雨量の統計量と、堤体の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、越流確率と最大浸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。

引用文献 1) 農業農村工学会 (2006): 土地改良事業設計指針「ため池整備」, 農業土木学会, 2) 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. 3) Macchione, F. (2008): Model for predicting floods due to earthen dam breaching I: Formulation and evaluation, *J. Hydraul. Eng.*, pp.1688-1696.

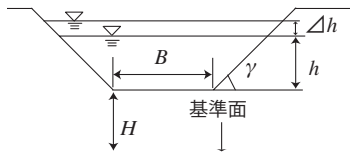


図-3 破堤断面の定義

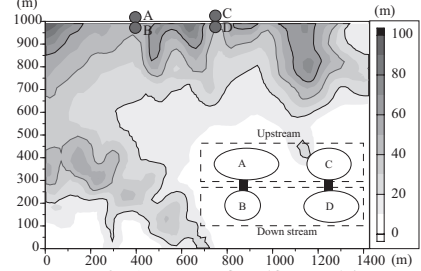


図-4 地形とため池の位置関係

表-1 土質定数の統計的性質

Parameters	Average	Standard deviation
τ_c (Pa)	25	5
k_s (m)	0.090	0.018
α (m/s/Pa)	5.5×10^{-3}	1.1×10^{-3}
γ (Deg)	54.2	17.8

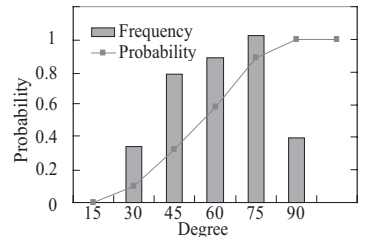


図-5 破堤断面の角度 γ の確率分布

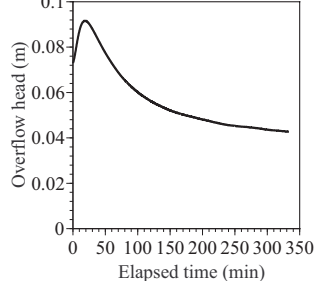


図-6 CD池が決壊した場合の平均越流水深

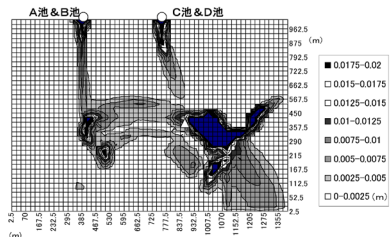


図-7 すべての池が決壊した場合の最大浸水深 (△: 観測点)

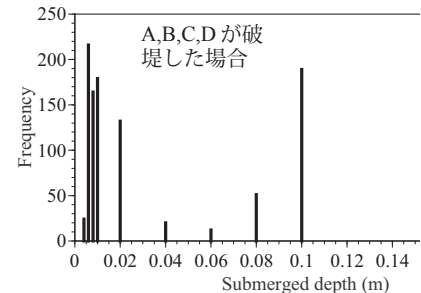


図-8 観測点における最大水深の分布