

# 降雨の確率特性と地盤物性の不確定性を考慮したため池堤体の破堤と洪水解析 Flood Simulation considering Probability of Heavy Rains and Uncertain of Soil Properties of Earth-fill Dams

○長尾遥奈 西村伸一 高木拓人 藤澤和謙 珠玖隆行  
NAGAO Haruna, NISHIMURA Shin-ichi, TAKAGI Takuto,  
FUJISAWA Kazunori and SHUKU Takayuki

**1. はじめに** 現在全国に決壊の危険性があり改修を要するため池が約2万箇所存在し、ため池決壊の主な原因は越流現象である。本研究では豪雨時の越流破堤リスクを評価することを目的としている。まず実降雨パターンに近い降雨波形を再現した擬似降雨を用いてため池堤体の越流確率及び越流水深を算定する。さらに決壊時の洪水解析を堤体物性値の不確定性を考慮して行い、特定地点の浸水深の確率分布の算定及び被害域を決定する。

**2. 擬似降雨** 降雨の統計モデルを決定するために、岡山气象台で収集された45年分の年最大72時間連続降雨の観測値を抽出し、実降雨データから時間雨量の連続性を有する擬似降雨を作成する。さらに豪雨波形が固定化され、越流が起こるパターンが固定されることを防ぐため、擬似降雨の総雨量が年最大72時間連続降雨総雨量のGumbel型極値分布に従うように1時間ごとの降雨量を再配分した<sup>1)</sup>。

**3. 越流確率** 越流確率の算出は貯留効果を考慮して洪水吐水深 $h$ の計算に水の流出入変化を用いる。まず洪水吐からの貯留量、流入量及び放流量を(3.1)(3.2)より計算する。

$$V=A_w h \quad (3.1) \quad Q_{in}=f_p r A / 3.6, \quad Q_{out}=C B h^{2/3} \quad (3.2)$$

$V$ :貯留量( $m^3$ ),  $A_w$ :貯留面積( $m^2$ ),  $h$ :水深(越流総水頭)( $m$ ),  $Q_{in}$ :流入量( $m^3/s$ ),  $f_p$ :流出係数,  $r$ :降雨強度( $mm/h$ ),  $A$ :流域面積( $km^2$ ),  $Q_{out}$ :放流量( $m^3/s$ ),  $C$ :越流係数,  $B$ :堰の有効幅( $m$ )  
降雨強度 $r$ には作成した擬似降雨を使用する。流出係数については0.7~0.8の範囲で一様乱数を用いた<sup>2)</sup>。貯留効果を考慮した流出入量の変化から、1時間毎の洪水吐水位として(3.3)の両辺の誤差が最小となる $h$ を決定し、72時間内の最高水位を越流総水頭 $h_p$ とする。

$$dV/dt=Q_{in}-Q_{out} \quad (3.3)$$

$h_p$ が洪水吐の設計限界水深 $h_d$ を上回る場合を越流と定義すると、越流確率 $P_f$ は条件式(3.4)で与えられ、モンテカルロ法を用いて決定する。

$$P_f=\text{Prob}[h_d < h_p] \quad (3.4)$$

越流確率及び越流が確認された際の $h_p$ の平均をため池決壊時の初期越流水深として算定結果を表1に示す。

表1 越流確率と初期越流水深

	Probability of Overflow and initial overflow head			
	満水面積 $A_w(m^2)$	貯流量 $V(m^3)$	越流確率 $P_f(\%)$	初期越流水深 $h_p(m)$
A	7700	18900	0.2935	0.07284
B	3100	5000	0.3334	0.08051
C	3400	10800	3.4728	0.06468
D	3400	15700	2.7582	0.07278

**4. 洪水解析** ため池の破堤を想定した被害想定シミュレーションは基礎式として、2次元浅水方程式を用い、近似HLLリーマン解法を用いた有限体積法により解析を行う。決壊断面からの放流量による流出ハイドログラフを(4.1)~(4.6)の算定式を用いて作成する。

$$Q_{out}=\sqrt{gA^3/(\partial A/\partial h)} \quad (4.1) \quad U=Q_{out}/A \quad (4.2) \quad dH/dt=-E/(1-n) \quad (4.3)$$

$$E=\alpha(\tau-\tau_c) \quad (4.4) \quad \tau=\rho C_f U^2 \quad (4.5) \quad C_f=\kappa^2/[\log\{R\exp(\kappa A_r-1)\}/\kappa_s] \quad (4.6)$$

$Q_{out}$ :流出量( $m^3/s$ ),  $A$ :破堤断面における流積( $m^2$ ),  $U$ :流速( $m/s$ )

$H$ : 基準面から破堤断面の底までの高さ(m),  $E$ : 盛土材料の侵食速度(m/s)

$n$ : 堤体の間隙率(%),  $\alpha$ : 侵食速度係数(m/s/Pa),  $\tau$ : せん断応力(Pa),  $\tau_c$ : 限界せん断応力(Pa)  
 $\rho$ : 水の密度(Kg/m<sup>3</sup>),  $\kappa$ : カルマン係数,  $R$ : 径深(m)

$A_r$ : 定数(=8.5),  $\kappa_s$ : 粗度高さ(m)

このときため池物性値の不確定性を考慮するため,  $\tau_c$ ,  $\kappa_s$ ,  $\alpha$ には正規乱数を適用する. また越流によって堤体が洗掘される角度 $\gamma$ については, 実験による統計量が求められており<sup>3)</sup>, これも確率変数として取り扱う. 各パラメータの平均値 $\mu$ と標準偏差値 $\sigma$ を表2に示す. 作成した流出ハイドログラフを解析の流入条件として用い, ため池が存在する破堤セルの水深, 流速及び下流域の各セルの水深, 流速を求める. 本研究で用いるため池(A, B, C, D)は, 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, ため池の決壊する組み合わせは, ABCD池, BCD池, AB池, CD池, B池の場合がある. 図1中の●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. ABCD池全てが決壊した際の最大浸水深のコンタ図を図2に, 地点△における最大浸水深のヒストグラムを図3に示す.

**5. 被害確率** 決壊するため池の各組み合わせについて越流確率 $P_1$ 及び△地点の浸水深が10cm以上になる確率 $P_2$ を算定した結果を表3に示す. (5.1)によって任意の一年間で△地点が10cm以上の浸水被害に遭う確率 $P_3$ を得ると被害確率は0.065%であった.

$$P_3 = \sum_{i=1}^5 (P_1 \cdot P_2) \quad (5.1)$$

**6. 結論** 本研究では, 実際の降雨の確率特性を有する擬似降雨を用いて越流確率の算定, 越流によりため池が決壊した場合の下流域における洪水解析を地盤物性値の不確定性を考慮して行った. 求めた越流確率及び被害面積, 最大浸水深を用いて下流域の特定の地域における被害確率が求められた. 算定した被害確率はため池の越流破堤のリスク評価に生かすことができる.

参考文献 1)長尾遥奈, 西村伸一, 藤澤和謙: 降雨統計モデルに基づいたため池の越流確率の算定と信頼性設計, 農業農村工学会全国大会講演要旨集, pp.200-201, 2011  
 2)農林水産省農村振興局(2006): 土地改良事業計画設計基準及び運用・解説 計画「排水」基準, 基準の運用, 基準及び運用の解説, 技術書, 農業土木学会, 205-206  
 3)Francesco Macchione(2008):Model for Predicting due to Earthen Dam Breaching I: Formulation and Evaluation Journal of hydraulic engineering, ASCE/DECEMBER, pp.1688-1969

表2 各パラメータの平均,標準偏差

Average and Standard deviation of parameters

	$\tau_c$ (Pa)	$\kappa_s$ (m)	$\alpha$ (m/s/Pa)	$\gamma$ (rad)
$\mu$	25	0.09	5.50E-05	54.226
$\sigma$	5	0.018	1.10E-05	17.775

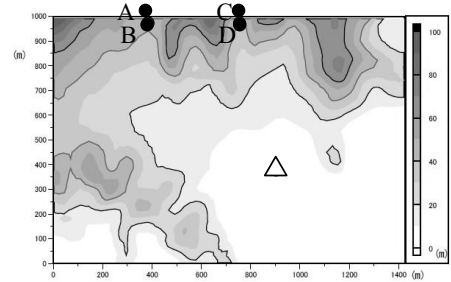


図1 ため池下流域の位置及び等高線図

Locations of earth-fill dams

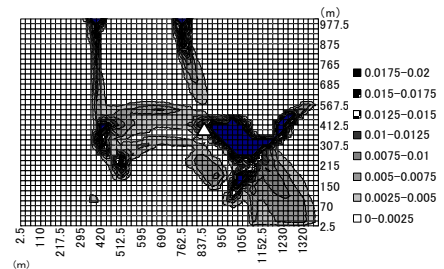


図2 ABCD池破堤時の浸水被害域

The example of submerged area

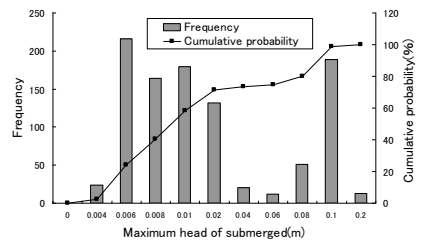


図3 最大浸水深のヒストグラム (ABCD池破堤時)

Histogram of maximum head of submergence

表3 越流確率及び浸水被害確率

Probability of overflow and submerge

	B	AB	CD	BCD	ABCD
$P_1$ (%)	0.04	0.29	3.47	0.001	0.01
$P_2$ (%)	12.8	20.0	0.0	12.9	20.2

$P_1$ : 越流確率

$P_2$ : 浸水被害確率(最大浸水深 >10cm)