

応答曲面法による豪雨時のため池破堤に関するリスク評価

中国四国農政局 非会員 水間啓慈

岡山大学環境生命科学研究科 正会員 ○西村伸一・柴田俊文・珠玖隆行

1. はじめに

本研究では応答曲面法¹⁾を用いて、豪雨時のため池堤体（アースダム）の破堤に伴う損失を算定する方法を提案する²⁾。さらに、この結果に基づいて豪雨の確率特性³⁾を考慮し、下流域のリスクと期待総コストを計算する。ため池は、数が多いため、個々の堤体を厳密に解析することは不可能に近い。提案法によると無数にあるため池群のリスク評価を一度に簡便に行うことができるため、改修の優先順位付けなどに利用できると期待される。

2. 解析地域の概要

3つのため池サイトが、損失コストの応答曲面を作成するために選択された。サイトの概要を表-1に示す。図-1に洪水シミュレーションによる最大水深を示している。サイトAおよびサイトCは最大および最小のため池であるが、ここでは代表としてサイトAの結果を示している。下流域の損失コストを洪水シミュレーション結果により、浸水域内の施設の損傷に基づいて算定することができる。計算された損失コストが表-2に示されている。

3. 解析対象地域の応答曲面

感度解析に基づいて損傷コストに支配的に影響する要因が選択される。ここでは下記の5つの要因が選択されている。a)ため池の有効貯水量、c)主たる氾濫流路の勾配の中央値、e)利用可能区域1km²当たりの世帯数、f)利用可能区域1km²当たりの従業者数である。i:洪水域における家屋や作業所の標高の中央値である。なお、要因iについては説明を図-2に与えている。応答曲面（Response Surface: RS）を決定するために21ケースの洪水解析結果を用意しており、表-3にこれらの各要因の値と洪水解析の結果を与える。これらのサンプルケースは基本的にサイトA、B、Cの地形特性を基本とし、要因の値を変化させた仮想サイトとして作成したものである。この結果に基づいて、損失コストを表現するRSが式(1)の様に決定されている。

$$C_{RS} = 15,880 \times a - 3.959 \times 10^8 \times c + 7,951 \times e + 1,492 \times f + 5.183 \times 10^6 \times i \quad (1)$$

21ケースの損失コストについて、洪水解析による厳密な結果とRSによる結果を比較したものを図-3に示す。結果によると式(1)は、決定係数が $r^2=0.79$ と、比較的適合度が高い結果となっている。さらに、決定されたRSを他のサイトであるDおよびEにも適用して精度の検証を行っている。表-4には、サイトの特性を与えている。また、表-2にはこのサイトD、Eの損傷コストも示されている。図3は、これらのサイトの解析結果も示されているが、RSは、損失コストを適切に評価している。

4. リスクおよび期待総コスト評価

リスクは、越流破堤の確率とそれによる

表-1 応答曲面決定のための解析対象サイトの概要

	Site A	Site B	Site C
Outline of farm ponds	Number of dams	2	1
	Amount of effective reserved water (1,000 m ³)	Upstream 216 Downstream 212	Upstream 84 Downstream 96
	Height of earth-fill (m)	Upstream 11.8 Downstream 11.6	Upstream 9.0 Downstream 9.0
	Longitudinal length of earth-fill (m)	Upstream 99 Downstream 111	Upstream 129 Downstream 202
	Beneficial area (ha)	Upstream 12 Downstream 12	Upstream 12 Downstream 18
			5
Outline of downstream area	Population /km ²	915	946
	Houses /km ²	334	324
	Working persons /km ²	862	124
	Business facilities /km ²	42	25
	Area of farm (ha/km ²)	31.2	56.3
	Restoration cost of agricultural facilities (million JPY)	-	76

*Sites A and B have two sequential earth-fill dams of the upstream and downstream

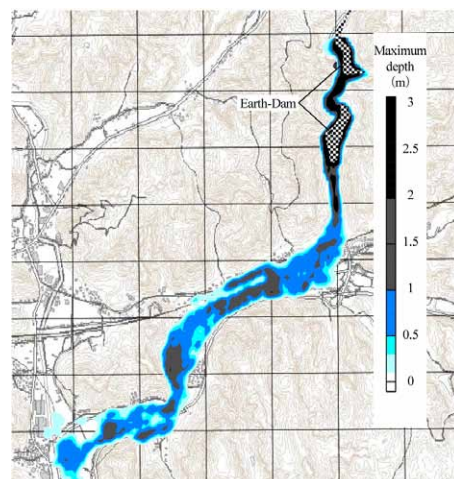


図-1 解析対象サイトAの洪水解析の結果（最大浸水深）

表-2 洪水解析による損失コスト

Site	A	B	C	D	E
Damage cost (1,000 JPY)	4,672,561	2,969,700	186,734	3,279,482	3,314,806

キーワード：信頼性設計、越流確率、ため池、洪水リスク、破堤、応答曲面
連絡先（〒700-8530 岡山区津島中3-1-1 岡山大学環境理工学部・TEL：086-251-8162）

損失コストから評価される．ここでは，改修前のため池堤体と，改修後の2つの状態について，式(2)を用いて期待総コストを評価するものとする．

$$C_T = C_0 + C_f \cdot E[n] \quad (2)$$

$$E[n] = \begin{cases} \sum_{k=1}^{t_i} [P_o(1-P_o)^{k-1} \{1+(t_i-k)P_i\}] & \text{(Original)} \\ t_i \cdot P_i & \text{(Improved)} \end{cases} \quad (3)$$

ここで， C_T は，期待総コスト， n は供用期間 t_i 年における越流破堤の回数を表している． C_0 は，堤体の改修コスト， C_f は，越流破堤による損傷コストを意味する． P_o および P_i は，それぞれ，改修前後の越流確率を表している．ここでは，ため池堤体は，ため池への流入量が流出量を上回ったときに発生するものとし²⁾，越流が生じると堤体は破堤するものと仮定している．また，ため池堤体の改修とは，堤体盛土の補強と，取水管，洪水吐きの改良を指すものとする．この中で，越流破堤の低減に貢献するのは，洪水吐きの改良である．今回は，供用期間として， $t_i=50$ 年を考えている．5つのサイトの結果が表-5に示されている．ここで，堤体の改修効果は，改修前後の期待総コストの差A-Bによって評価される．表では，厳密な方法とRSを用いた場合の結果が比較されている．2つの方法で，期待総費用の値には乖離が見られるが，改修効果による優先順位の結果は同じとなった．

5. まとめ

5つのため池堤体の，改修前後の期待総コストを求めた．厳密な洪水解析を行い，損失コストを求める場合と，応答曲面を用いる場合を比較した．応答曲面を用いても，計算された改修効果に基づく優先順位は同じになり，提案法が，実設計でも適用可能であることが実証された．

引用文献 1) 山田 秀：実験計画法—方法編—，日科技連出版社(2004)，2) 水間啓慈・西村伸一・柴田俊文・珠玖隆行：応答曲面法によるため池破堤リスクの簡易評価，農業農村工学会論文集，Vol.84(1)，pp. 1_47-1_55 (2016)，3) 西村伸一・珠玖隆行・柴田俊文・藤澤和謙：豪雨時の越流破堤に対するため池堤体の信頼性設計，地盤工学会誌，Vol.63，No.5 (2015)

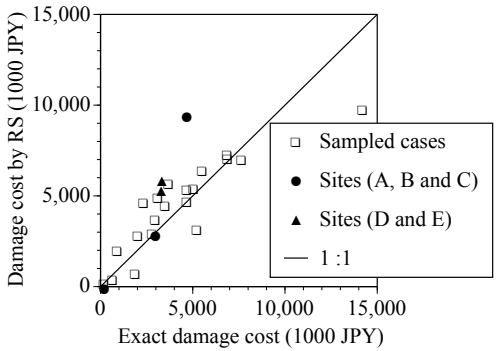


図-3 洪水解析とRSによる損失コストの比較

表-3 応答曲面を決定するための解析ケース

No.	Site	a	c	e	f	i	Damage cost (million JPY)
1	C	10.000	0.607	73.000	62.000	0.17	49
2	B	219.000	0.820	158.800	237.861	0.50	3,507
3	B	114.500	1.032	244.600	413.709	0.50	2,793
4	A	323.500	0.678	330.400	589.570	0.25	6,873
5	C	62.250	0.891	416.200	765.430	0.17	2,026
6	B	271.250	1.103	90.160	941.291	0.50	4,673
7	B	166.750	0.749	175.960	1,117.139	0.50	4,688
8	B	375.750	0.961	261.760	87.125	0.50	7,641
9	A	36.125	1.174	347.560	262.985	0.25	643
10	C	245.125	0.631	433.360	438.834	0.17	5,517
11	A	140.625	0.843	107.320	614.694	0.25	898
12	A	349.625	1.056	193.120	790.555	0.25	5,045
13	B	88.375	0.702	278.920	966.403	0.50	3,104
14	A	297.375	0.914	364.720	1,142.264	0.25	6,880
15	A	192.875	1.127	450.520	112.249	0.25	2,960
16	C	401.875	0.772	124.480	288.098	0.17	3,680
17	A	23.063	0.985	210.280	463.958	0.25	180
18	C	232.063	1.198	296.080	639.819	0.17	5,224
19	C	127.563	0.654	381.880	815.667	0.17	2,332
20	B	336.563	0.867	467.680	991.528	0.50	14,199
21	C	75.313	1.080	141.640	1,167.389	0.17	1,869

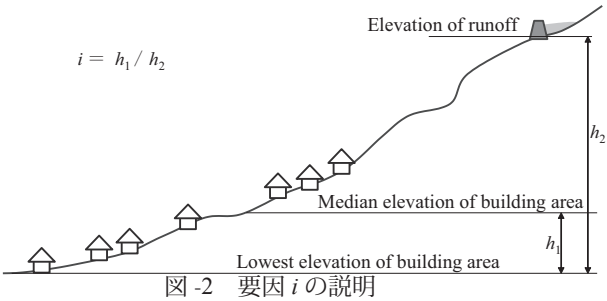


図-2 要因iの説明

表-4 精度検証のための解析対象サイトの概要

	Factor	Site D	Site E
Outline of farm ponds	Number of Ponds	1	1
	Amount of effective reserved water (1,000 m3)	105	200
	Height of earth-fill (m)	15.7	12.1
	Longitudinal length of earth-fill (m)	93.5	118
	Beneficial area (ha)	23	30
Downstream area	Median inclination on main route of flood (%)	c	0.406
	Population /km²	1,145	1,269
	Houses /km²	e	407
	Working persons /km²	f	528
	Business facilities /km²	67	37
	Area of farm (ha/km²)	27.2	39.3
	Median elevation of housing and business area in flood area	i	0.23
		0.14	

表-5 供用期間50年における越流破堤の期待総コスト

Sites		A	B	C	D	E	
Probability of overflow	Original (Priority)	0.02262 (1)	0.00516 (5)	0.00895 (3)	0.02239 (2)	0.00664 (4)	
	Improved	0	0	0	0	0	
Improvement cost (1000JPY)		B	387,009	469,940	55,287	129,003	285,650
Exact approach	Damage cost (1,000 JPY)	4,672,561	2,969,700	186,734	3,279,482	3,314,806	
	Expected total cost (1000JPY) A	3,184,135	676,856	67,609	2,222,453	939,106	
	Effect of improvement work A-B (Priority)	2,797,126 (1)	206,916 (4)	12,322 (5)	2,093,450 (2)	653,456 (3)	
Response surface method	Damage cost (1,000JPY)	7,997,972	3,094,007	199,743	4,343,181	4,632,453	
	Expected total cost (1,000 JPY) A	5,450,249	705,188	72,319	2,943,305	1,312,404	
	Effect of improvement work A-B (Priority)	5,063,240 (1)	235,248 (4)	17,032 (5)	2,814,302 (2)	1,026,754 (3)	