応答曲面法によるため池破堤時の被害額の簡易推定

誌名	農業農村工学会論文集
ISSN	18822789
著者名	水間,啓慈 西村,伸一 柴田,俊文 珠玖,隆行
発行元	農業農村工学会
巻/号	83巻5号
掲載ページ	p. I_147-I_153
発行年月	2015年10月

農林水産省 農林水産技術会議事務局筑波産学連携支援センター
Tsukuba Business-Academia Cooperation Support Center, Agriculture, Forestry and Fisheries Research Council Secretariat

AgriKnowledge

農業農村工学会論文集 IDRE Journal No. 299 (83-5), pp. I_147-I_153 (2015.10) 〈研究論文〉

応答曲面法によるため池破堤時の被害額の簡易推定

水間啓慈* 西村伸一** 柴田俊文** 珠玖隆行**

* 国立研究開発法人農業・食品産業技術総合研究機構 農村工学研究所，〒305-8609 茨城県つくば市観音台 2-1-6
** 岡山大学大学院 環境生命科学研究科，〒700-8530 岡山県岡山市北区津島中 3-1-1

要 旨

我が国には江戸期以前に築造されたものも含め農業用ため池が数多く存在し，地震や豪雨のリスクに常に直面している．このため，遅滞なく効率的に改修等のハード対策や管理体制の強化等のソフト対策を講ずる必要があり，破堤時の想定被害額を考慮しながら優先順位を決定し計画的に対応を図ることが求められている．しかしながら，既定の氾濫解析に基づく被害額算定手法は複雑であり，優先度を検討する数多くのため池の被害額を一度に算定することは難しいことから，容易に被害額を推定できる簡略化された手法が必要となる．本研究では，このような課題に対応するため，応答曲面法を用いて被害額を簡易に推定する手法を提案する．応答曲面法とは，実験計画法に基づく回帰分析により，因子と応答との定量的な関係を表現する回帰式を作成する手法であり，得られた回帰式は応答曲面と呼ばれる．被害額算定に考慮すべき多くの因子について感度解析を行い，被害額の値に大きく寄与する 4 つの因子を抽出した．これらの因子を用いて作成した応答曲面の決定係数 R^2 は 0.84 と高く，行政機関等が行う被害額の簡易推定への実用の可能性が示唆される結果が得られた．

キーワード：ため池，被害額，感度解析，応答曲面，実験計画法

1. はじめに

平成 24 年 3 月に国が決定した土地改良長期計画では「機能の監視・診断等によるリスク管理を行いつつ，劣化の状況に応じた補修・更新等を計画的に行うことにより，施設の長寿命化とライフサイクルコストの低減を図る戦略的な保全管理を推進する」とされている．具体的には，施設の劣化が進行することによるリスクを評価し，その結果に基づき維持管理に係る意思決定を最適化すること等が求められている．しかしながら，ストックマネジメントの基本的な考え方（食料・農業・農村政策審議会農村振興分科会農業農村整備部会技術小委員会，2007）のなかでリスク評価は「リスクを評価しつつ財政支出と農家負担の年度間の平準化を図るといった高度なマネジメントを展望することは重要な課題」とされるにとどまり，「リスク評価を的確に行うための研究等に取り組んでいくことが必要」とされるなど未だ導入には至らない状況にある．

とりわけ，農業用ため池については東日本大震災におけるため池の決壊被害の発生や，記録的な集中豪雨の頻発等を背景として，遅滞ない対策が急務とされているものの，決壊した場合に下流域への影響が大きいとされる防災重点ため池のみでも，その数は約 9 千箇所にものぼり，さらなる対策の効率化が求められている．そのため，実際に充てられる費用や労力の限度を勘案しながら，リスクの大きなため池を効率的に抽出し，優先して対策を講ずる手法の確立が必要とされている．

ため池のリスク管理に係る既往の研究においては，地震や豪雨時の氾濫解析手法は簡易なツール（谷，2005）から精緻なモデル（堀ら，2010）まで数多くの提案がなされている．しかしながら，これらの手法を用いて実際に氾濫解析を行い，氾濫域の資産データを整理し適用する作業には多大な時間と労力を要する．そのため，この手法を用いてため池間の想定リスクを簡易に比較することは難しく，計画段階の意思決定の際などに適用できる実用的な手法は未だ確立されていない状況にある．

そこで筆者らは，リスク評価のプロセスのうち被害額算定の簡略化に着目し，容易に入手可能な資産データのみを用いて既定の手法（農林水産省農村振興局企画部土地改良企画課・事業計画課，2007）と大差なく被害額を算定する手法（水間ら，2015）を提案した．その提案法は，農地一筆ごと家屋一棟ごとといった詳細な調査等を要さずに被害額を概算できるものであるが，氾濫解析を行って最大浸水深を求めるプロセスは必要となる．実際の計画時の意思決定の効率化に資するためには，このプロセスに要する労力を軽減することが有効となる．

このような背景から，本研究では，被害額算定をさらに簡略化するため，実験計画法に基づき作成する応答曲面（回帰式）を用いて氾濫解析を行わずに被害額を簡易に推定する手法を提案する．この手法により応答曲面を作成すれば，適用条件を満たす多くの他地区の被害額推定に要する作業

この研究論文は，J-STAGEではカラーにて掲載しています．
http://www.jstage.jst.go.jp/browse/jsidre/-char/ja

の大幅な簡略化が可能となる．

ここで被害額の推定に用いる因子は貯水量や世帯密度等の候補から感度解析をもとに選定し，その因子と被害額との関係を示す応答曲面を重回帰分析によって作成する．因子の被害額に対する感度や応答曲面は，実在する複数のモデル地区のデータをもとに多くのため池データを作成し，氾濫解析や被害額算定を繰り返す数値実験により求める．この数値実験を効率化するため，ここでの被害額の算定には上に述べた筆者らが提案する簡易算定手法を用いる．最後に，提案する手法を，実際に機能保全対策の検討対象とするため池の選定に適用する手法として実用化する際に重要となる適用条件の設定等の課題について考察を加える．

2. 被害額算定手法と影響因子の候補

2.1 氾濫解析と被害額算定の手法

2.1.1 氾濫解析手法

本研究では，基礎方程式には，鉛直方向の等速度分布，非圧縮性流体，静水圧分布，底部傾斜を条件とする平面 2 次元浅水方程式を用い，近似 HLL リーマン解法を用いた有限体積法により氾濫解析（Toro, 1999；Yoon and Kang, 2004；西村ら，2009）を行う．氾濫解析は実在するため池地区と乖離しないように作成する多くのケースを対象に行う．ここでは，ため池が数多く存在する中国四国地域のある県から貯水量や下流域の住居，事業所，農地等の密度が異なる **Table 1** の 3 つのモデル地区を選択し，この地区のデータをもとに数値実験の対象とする多くのため池データを作成し氾濫解析を行う．

2.1.2 被害額算定手法

被害額は新たな土地改良の効果算定マニュアル（農林水産省農村振興局企画部土地改良企画課・事業計画課，2007）に準じて，氾濫解析結果から得られる最大浸水深をもとに算定する．資産データは無償で入手可能なデータのみを使用する．また，これらのデータや氾濫解析から得られる最大浸水深の値を用いた被害額の算定には，作業に要する時間や労力が小さく，5～8%の誤差で被害額を算定することが可能な方法（水間ら，2015）を適用する．**Table 2** に被害額算定に用いる主な資産データを示す．ここで表中の公表値とは，それぞれ総務省統計局が公表している統計調査結果（総務省統計局，2009，2010，2014）を指す．

Table 1　モデル地区の概要
Properties and downstream conditions of small earth fill dams treated in this study

		A 地区	B 地区	C 地区
ため池	配置形態	複数	複数	単独
	有効貯水量（千 m^3）	上池 216 下池 212	上池 84 下池 96	10
	堤高（m）	上池 11.8 下池 11.6	上池 9.0 下池 9.0	6.7
	堤長（m）	上池 99 下池 111	上池 129 下池 202	5.6
	受益面積（ha）	上池 12 下池 12	上池 12 下池 18	5
下流域	人口（人/km^2）	915	946	368
	世帯数（世帯/km^2）	334	324	121
	従業者数（人/km^2）	862	124	186
	事業所数（事業所/km^2）	42	25	24
	農地面積（ha/km^2）	31.2	56.3	57.0
	用水路等（再建設費 百万円）	−	76	−

Table 2　被害額算定に用いる主な資産データ
Asset data used for estimating the damage cost

項目	データの入手方法等
世帯数・全産業従業者数	政府統計の総合窓口 e-Stat の HP から 500m メッシュの世帯数，全産業従業者数のデータを無償でダウンロード
産業分類別従業者数	500m メッシュの全産業従事者数に市町村の産業分類別従業者数の割合（公表値から算出）を乗じて算出
農林漁家数	500m メッシュの世帯数に市町村の農林漁家の割合（公表値から算出）を乗じて算出
延床面積	モデル地区の存在する都道府県の家屋の平均延床面積（公表値から算出）に世帯数を乗じて算出
水田・畑面積	土地利用種別が「田」と「その他の農用地」のメッシュに 100m メッシュの面積 10,603 m^2 を水田・畑面積として与える
資産評価額，被害率等	「治水経済調査マニュアル（案）」で示している評価額，被害率等を参考にする
資産以外の被害額	省略する（都道府県や関係市町村の衛生部局等への個別の聴き取り等は行わない）

2.2 影響因子の候補の選定

2.2.1 因子選定の考え方

被害額は，2.1.1 に述べた氾濫解析をもとに①25m メッシュごとの最大浸水深を算定し，②その値に各メッシュの世帯数や事業所の従業者数，農地面積等の資産データを適用することによって算出する．ここでは，①と②のそれぞれのプロセスで算出結果に影響する可能性があると考えられる因子を感度解析の検討対象として挙げることとする．

2.2.2 検討対象とする因子

2.2.1 に述べた最大浸水深を算定する①のプロセスで影響すると考えられる因子としては，a)ため池の有効貯水量，b)氾濫解析エリアの面積に対する貯水池より標高が低い区域の面積の割合，c)主たる氾濫流路の勾配の中央値の 3 つを選ぶ．勾配の因子は，少数の極端な値が影響する平均勾配に比べて，値の頻度分布も考慮される点で氾濫流路全体の特性を表現する因子として有利である中央値を候補としている．b)は氾濫原となるため池よりも標高が低い面積の割合が大きい地区と小さい地区では被害の規模や態様が異なることが想定されるため，その特性の違いを表現する因子として候補に挙げたものである．

被害額を算定する②のプロセスで影響すると考えられる因子としては，d)氾濫解析エリア内の土地利用種別が「森林」以外の区域（本研究では，これを「利用可能区域」と呼ぶ）の面積の割合，e)利用可能区域 1km^2 当たりの世帯数，

Table 3　解析に用いた L16 直交表と被害額
L16 orthogonal table and damage costs

No.	a	b	c	d	e	f	g	h	被害額（百万円）
1	1	1	1	1	1	1	1	1	3,084[121]
2	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	679[57]
3	1	1	-1	-1	1	1	1	1	23,443[931]
4	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	3,029[457]
5	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	7,805[365]
6	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	1,494[565]
7	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	18,717[588]
8	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1	3,164[854]
9	1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1,063[17]
10	-1	1	1	-1	-1	1	-1	1	1,428[20]
11	-1	1	-1	1	1	-1	1	-1	2,676[33]
12	-1	1	-1	1	-1	1	-1	1	3,766[26]
13	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1,496[80]
14	-1	-1	1	1	-1	1	1	-1	826[69]
15	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	1	862[37]
16	-1	-1	-1	-1	-1	1	1	-1	499[42]
17	0	0	0	0	0	0	0	0	9,673[743]

注）被害額欄の[ ]内は農業被害額で内数
a(1,0,-1)=(428,126,10) 千 m^3
b(1,0,-1)=(77.5,48.6,30.3) %
c(1,0,-1)=(1.2,0.8,0.6) %
d(1,0,-1)=(71.3,47.0,27.5) %
e(1,0,-1)=(502,268,73) 世帯
f(1,0,-1)=(1293,390,73) 人
g(1,0,-1)=(61.0,55.8,43.3) ha
h(1,0,-1)=(68628,55765,43315) 円

f)利用可能区域 1km^2 当たりの従業者数，g)利用可能区域 1km^2 当たりの農地面積，h)利用可能区域内の農作物の平均価格の 5 つを選定した．これら以外に人口や事業所数も被害額に影響する因子であるが，それぞれ e)や f)との相関が非常に強いことが想定され，また e)や f)は被害額算定の際に直接用いられることから，これらを候補とすることとした．

なお，ここで氾濫解析エリアは，ため池及び下流の氾濫想定域が存在する約 500m 四方の 3 次メッシュ（「統計に用いる標準地域メッシュおよび標準地域メッシュ・コード」（昭和 48 年行政管理庁告示第 143 号））を単位としている．

3. 因子の感度解析と応答曲面の作成

3.1 実験計画法による因子の感度解析

3.1.1 実験計画法

本研究では実験計画法（山田，2004）に着目し，ため池の簡易な被害額算定手法を提案することを視野に，その最初のステップとして，直交表に従った実験結果の線形回帰により各因子の被害額に対する感度を求める．線形回帰には次式の重回帰モデルを用いる．

$$\mathbf{y}=\mathbf{X}\boldsymbol{\beta}+\boldsymbol{\varepsilon} \tag{1}$$

ここに，$\mathbf{y}$ は出力ベクトル，$\mathbf{X}$ はパラメータマトリックス，$\boldsymbol{\beta}$ は回帰係数，$\boldsymbol{\varepsilon}$ は誤差を表す．この回帰係数がパラメータの感度を表現し，係数が大きければ感度が高く，係数が小さければ感度があまりないことを意味する．

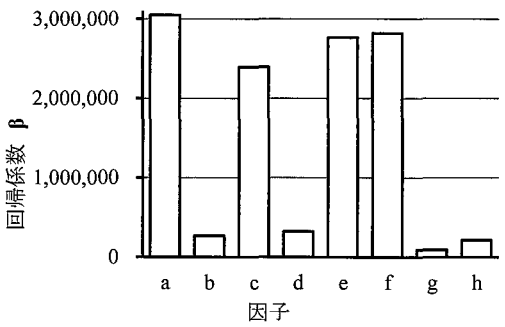

Fig. 1　各因子の被害額への感度
Sensitivity of each factor to the damage cost

$\mathbf{X}$ はパラメータ 1 つだけでなく，各パラメータの組み合わせの効果（交互作用）も考えることができる．回帰係数 $\boldsymbol{\beta}$ を求めるためには最小二乗法を用いる．

$$\boldsymbol{\beta}=\left(\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{X}\right)^{-1}\mathbf{X}^{\mathrm{T}}\mathbf{y} \tag{2}$$

ここで $\mathbf{T}$ は転置を表す．

解析結果の重回帰分析によりパラメータを求める場合，数値実験の計画が「直交」であれば，最も効率的な実験であるとされる（Santner et al., 2003）ことからこれを用いる．ここでは L16 直交表に，全水準の中心点を追加して適用した．これにより最大 15 個のパラメータの感度を 16 回の数値実験で調べることができる．

感度解析に用いる直交表と被害額の値を **Table 3** に示す．

表中の，1 は最大値，-1 は最小値，0 は中央値であり，たとえば No.1 のため池地区は全てが 1（最大値）であることから，a が 428 千 m^3，b が 77.5 %，c が 1.2%，d が 71.3%，e が 502 世帯，f が 1,293 人，g が 61.0ha，h が 68,628 円の地区であり，この地区で氾濫解析を行って算定した被害額が 3,084 百万円（うち農業被害額が 121 百万円）となる．

ここで氾濫解析や被害額の算定に用いる No.1～17 の各ため池データは，**Table 1** の 3 地区の地形データや土地利用種別，世帯数等を一部補正して作成する．たとえば，氾濫流路の勾配の中央値が **Table 3** の値となるよう最低標高との標高差に一定の倍率を乗じて全地点の標高を補正する．

3.1.2 感度解析結果

直交表に基づく実験の結果，得られた被害額をもとに，各因子の感度を計算した結果を **Fig. 1** に示す．この図から，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 1km^2 当たりの世帯数，f)利用可能区域 1km^2 当たりの従業者数の 4 つの因子が被害額に大きく寄与することがわかる．一方，b)貯水池より標高が低い区域の面積の割合や，d)利用可能区域の面積の割合等は被害額の値にほとんど影響しない結果となった．これらはモデル地区全体の地形や土地利用を反映する因子ではあるものの，氾濫域に特化したものでないことから，被害額への影響は限ら

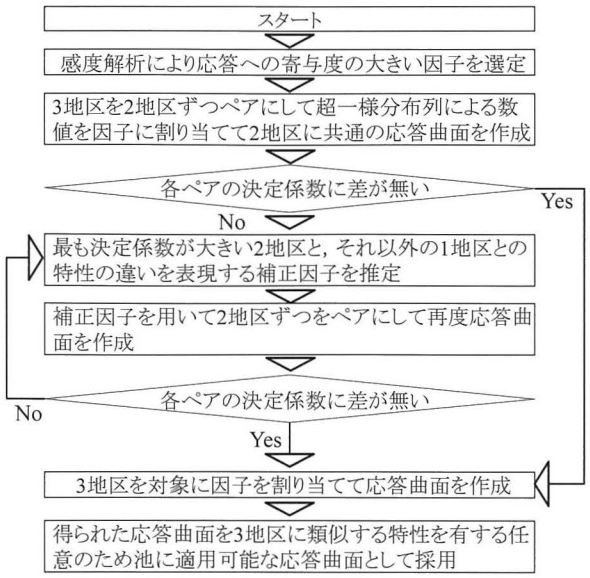

Fig. 2　応答曲面作成の手順

Flow chart for making a response surface

Table 4　因子と被害額の関係

Relationship between factors and damage costs

No.	地区	a	c	e	f	被害額 A	被害額 B
1	C	10.000	0.607	73.000	62.000	49	-2,038
2	B	219.000	0.820	158.800	237.861	3,507	2,782
3	B	114.500	1.032	244.600	413.709	2,793	1,829
4	A	323.500	0.678	330.400	589.570	6,873	7,110
5	C	62.250	0.891	416.200	765.430	2,026	3,268
6	B	271.250	1.103	90.160	941.291	4,673	4,487
7	B	166.750	0.749	175.960	1,117.139	4,688	3,993
8	B	375.750	0.961	261.760	87.125	7,641	6,119
9	A	36.125	1.174	347.560	262.985	643	833
10	C	245.125	0.631	433.360	438.834	5,517	6,268
11	A	140.625	0.843	107.320	614.694	898	1,712
12	A	349.625	1.056	193.120	790.555	5,045	6,533
13	B	88.375	0.702	278.920	966.403	3,104	3,151
14	A	297.375	0.914	364.720	1,142.264	6,880	7,973
15	A	192.875	1.127	450.520	112.249	2,960	4,323
16	C	401.875	0.772	124.480	288.098	3,680	6,002
17	A	23.063	0.985	210.280	463.958	180	-5
18	C	232.063	1.198	296.080	639.819	5,224	4,815
19	C	127.563	0.654	381.880	815.667	2,332	4,476
20	B	336.563	0.867	467.680	991.528	14,199	9,297
21	C	75.313	1.080	141.640	1,167.389	1,869	1,852

注) 被害額 A は既定の方法に準じた算出額であり，被害額 B は応答曲面による額(単位は百万円)

れることが一因と推察される．また，g)農地面積や h)農作物の平均価格の被害額への感度も極めて低い結果となった．これは **Table 3** に示すとおり各地区ともに被害額のうちの農業被害額が大きな割合を占めていないことによるものと思われる．

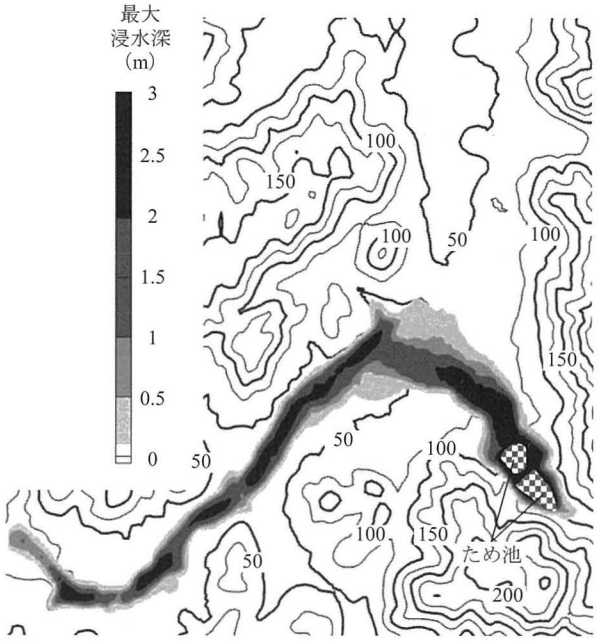

Fig. 3　氾濫解析による最大浸水深の一例

Example of distribution of maximum depth obtained using the flood analysis

3.2 応答曲面の作成方法と結果

3.2.1 応答曲面の作成方法

応答曲面作成のフロー図を **Fig. 2** に示す．感度解析において被害額への感度が高いとの結果が得られた 4 つの因子に実験計画法を用いて 21 パターンの数値を与える．ここでも，地形や世帯数のデータは **Table 1** の 3 地区のデータをもとに 3.1.1 で述べた方法で補正して数値に適合させているため，3 地区ごとの地形条件や世帯数等の分布特性等の影響を厳密には排除できないことが問題となる．そこで，まずは，このような特性の違いによる地区間の相関の差異の有無を確認することとし，2 地区ずつ 3 パターンの組み合わせで回帰分析を行い．その結果，3 パターンの決定係数に差が無く高い値が得られた場合は 3 地区をまとめて回帰分析を行って応答曲面を求める．

一方，2 地区ずつのペア間の決定係数の差が大きい場合には，最も高い相関が認められる 2 地区に共通し，それ以外の 1 地区では異なる特性が存在すると仮定し検討を進める．地区間の特性の違いを表現する補正因子を推定し，この因子を加えて，再度，2 地区ずつをペアにして回帰分析を行う．その結果，各ペアの決定係数に差が無く，ともに高い値が得られた場合は，推定が正しいものと判断する．最後に 3 地区をまとめて回帰分析を行い，得られた回帰式を 3 地区に類似する立地特性を有する任意のため池に適用可能な応答曲面として採用する．

3.2.2 応答曲面の作成結果

実験計画法を用いて 21 パターンの数値を因子に与え，これを乱数により任意に 3 地区に割り当てて被害額を求めた．因子と被害額の関係を **Table 4** に，氾濫解析から得られた最大浸水深の一例を **Fig. 3** にそれぞれ示す．これをもと

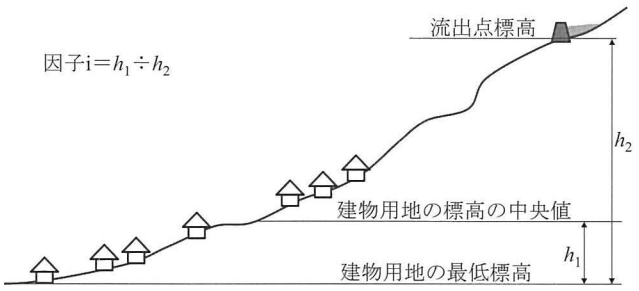

Fig. 4　因子 i の定義
Definition of factor i

Table 5　応答曲面作成に用いた因子と被害額
Factors and damage costs for making a response surface

No.	a	c	e	f	i	被害額 A	被害額 B
1	10.000	0.607	73.000	62.000	0.17	49	-2,622
2	219.000	0.820	158.800	237.861	0.50	3,507	4,048
3	114.500	1.032	244.600	413.709	0.50	2,793	3,251
4	323.500	0.678	330.400	589.570	0.25	6,873	6,664
5	62.250	0.891	416.200	765.430	0.17	2,026	2,696
6	271.250	1.103	90.160	941.291	0.50	4,673	5,299
7	166.750	0.749	175.960	1,117.139	0.50	4,688	5,098
8	375.750	0.961	261.760	87.125	0.50	7,641	7,266
9	36.125	1.174	347.560	262.985	0.25	643	850
10	245.125	0.631	433.360	438.834	0.17	5,517	5,591
11	140.625	0.843	107.320	614.694	0.25	898	1,257
12	349.625	1.056	193.120	790.555	0.25	5,045	5,735
13	88.375	0.702	278.920	966.403	0.50	3,104	4,557
14	297.375	0.914	364.720	1,142.264	0.25	6,880	7,374
15	192.875	1.127	450.520	112.249	0.25	2,960	4,265
16	401.875	0.772	124.480	288.098	0.17	3,680	4,740
17	23.063	0.985	210.280	463.958	0.25	180	-142
18	232.063	1.198	296.080	639.819	0.17	5,224	3,803
19	127.563	0.654	381.880	815.667	0.17	2,332	3,802
20	336.563	0.867	467.680	991.528	0.50	14,199	10,473
21	75.313	1.080	141.640	1,167.389	0.17	1,869	775

注) 被害額 A は既定の方法に準じた算出額であり，被害額 B は応答曲面による額(単位は百万円)

に 2 地区の組み合わせごとに 14 パターンずつ取り出して相関を調べた．その結果，決定係数 R^2 は 0.65 から 0.87 と大きな差が認められ，最も高い相関が得られたのは A 地区と C 地区の組み合わせとなった．

ここまでの結果から，A 地区と C 地区に類似し，B 地区には異なる特性が存在すると推定した．A 地区と C 地区は谷筋に，B 地区は台地上に，それぞれ建物用地が位置する傾向がある．そこで，この特性を表現する補正因子 i として，「氾濫域内の建物用地の標高の中央値の位置（**Fig. 4**）」を新たに与えることとした．ここで平均値ではなく中央値を採用した理由は，2.2.2 で勾配の因子に中央値を選んだ考え方と同様に，頻度分布を反映する因子であることによる．これを用いて，再度，2 地区ずつをペアにして回帰分析を行った結果，決定係数 R^2 の差は 0.80 から 0.92 と小さく，全て高い値が得られた．そこで，3 地区をまとめて 21 パターンで回帰分析を行った．その結果は **Table 5** と **Fig. 5** に示すとおりとなり，決定係数は R^2=0.84 と高い相関を有する回帰式（式(3)）が得られたことから，この式を被害額の算定に用いる応答曲面として採用した．

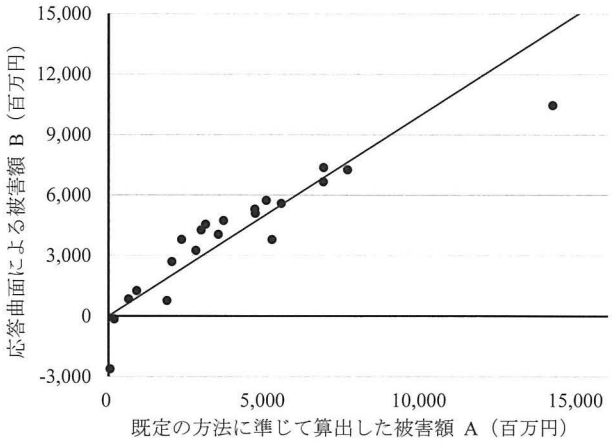

Fig. 5　応答曲面の適合度
Fitness of the proposed response surface

$$\text{被害額} = 16{,}830 \times a - 1.052 \times 10^8 \times c + 9{,}879 \times e + 1{,}916 \times f + 6.646 \times 10^6 \times i - 4.122 \times 10^6 \quad (3)$$

ここに，a：有効貯水量（千 m^3），c：主たる氾濫流路の勾配の中央値（%），e：利用可能区域内の世帯数の平均密度（世帯/km^2），f：利用可能区域内の従業者数の平均密度（人/km^2），i：氾濫域内の建物用地の標高の中央値の位置であり，被害額の単位は千円である．

4. 考察

4.1 応答曲面の適合度について

3.2.2 に示す結果は，被害額に対する感度が高い因子を用いることにより，ため池の破堤被害額の概略値を簡易に推定できる可能性を示唆するものである．しかしながら，**Table 5** や **Fig. 5** の個々の点に着目すると，既定の方法に準じて算出した被害額 A が最大と最小の 2 点で応答曲面による被害額 B との差が大きいことがわかる．この理由は，式(3)の因子 a と因子 e の係数が大きいことにより，これらの因子がともに最小，または，ともに最大の組み合わせとなる 2 点の適合度が低くなっているものと考えられる．特に，No.1 の地区は因子 a，因子 e，及び因子 f がともに最小値の組み合わせとなっており，式(3)の定数項のマイナス値が被害額 B の値に大きく影響する結果となっている．

本研究においては，リスクが大きなため池をスクリーニングする際に役立つものとなる応答曲面を作成することを目的としており，これら 2 点は応答曲面を用いずとも貯水量の規模や下流の世帯や従業者の密度等から，リスクの大小を容易に判定できることが想定される．本研究で作成し

た応答曲面は，その他の19点のように，たとえば，貯水量は大きいが世帯数が少ない地区と，貯水量は小さいが世帯数が多い地区を比較する場合など，因子の数値の序列をもとに想定される被害規模の大小を判断することが難しいため池地区の適合度が比較的良好であることから，実際の意思決定の場面において有効に活用されることが期待できるものと考えられる．

今後，3 つのモデル地区以外の実在するため池に応答曲面を適用し，既定の手法による被害額との差を確認し，本研究で提案する手法の適合度を検証していく必要がある．

4.2 応答曲面の適用条件について

応答曲面の作成手法からわかるとおり，本研究で作成した回帰式は，下流の地形や建物の分布特性等がモデル地区と乖離するため池に適用することは難しい．今後は，その乖離性を判定するしきい値について応答曲面の適用限界として具体的に数値化するプロセスを通じて，本研究で提案する手法を用いる際の条件を明確化することが課題となる，その際には，**Table 5** の因子に適用した数値の範囲を1つの目安として，適用条件を明らかにすることが重要となる．

5. まとめ

本研究では，実験計画法を用いて，貯水量や氾濫域の地形条件・世帯密度等のうち被害額の算定結果に対する感度が高い因子を抽出するとともに，その因子を用いて被害額を算定する応答曲面を作成する手法を提案し実際に適用を試みた．

その結果から得られた知見を以下に示す．

(1)　有効貯水量，主たる氾濫流路の勾配の中央値，利用可能区域 1km^2 当たりの世帯数及び従業者数の 4 つの因子が被害額の算定結果への感度が高い．

(2)　これらの因子に，氾濫域内の建物用地の標高の中央値の位置を表現する因子を加えた5つを用いて被害額を推定する応答曲面を作成したところ，既定の方法による被害額の算定値との高い相関が得られた．

なお，本研究で提案する手法で作成した応答曲面を適用できるため池は，5 つの因子が一定の範囲内であるほか，山池であること等の基礎的な特性が検討に用いたモデル地区と乖離しない地区であるといった制約が存在することに留意が必要である．

近年，記録的な集中豪雨が頻発するなかにあって，西日本の瀬戸内海沿岸を中心に存在する膨大な数のため池の保全管理を効率化するための 1 つの方策として，氾濫時に想定される被害額に応じて効果的に対策を講ずることが有効と考えられる．本研究で作成した応答曲面の適用条件を明確にし，ため池の貯水量や下流域の世帯密度等から求める被害額の推定値に，破堤確率の評価を組み合わせ簡易にリスクを評価する手法へと発展させることが今後の課題である．

謝辞：本研究の一部は科学研究費助成事業基盤研究(B)(課題番号25292143)及び岡山工学振興会学術研究助成の支援を受けています．ここに記して謝意を表します．

引用文献

堀　俊和，毛利栄征，松島健一，有吉　充(2010)：豪雨リスクを考慮したため池のライフサイクルコスト算定手法と最適な豪雨対策の選定手法，農業農村工学会論文集，**270**，57-67.

水間啓慈，西村伸一，柴田俊文，珠玖隆行(2015)：ため池破堤による想定被害額の簡易評価手法，農業農村工学会論文集，**295**，39-46.

西村伸一，森　俊輔，藤澤和謙，村上　章(2009)：豪雨時の越流破堤に対するため池堤体の信頼性設計，応用力学論文集，**12**，89-97.

農林水産省農村振興局企画部土地改良企画課・事業計画課(2007)：新たな土地改良の効果算定マニュアル，大成出版社，372-375.

Santner, T.J., Williams, B.J. and Notz, W.I. (2003) : *The design and analysis of computer experiment*, Springer.

総務省統計局(2009)：経済センサス－基礎調査.

総務省統計局(2010)：国勢調査 職業等基本集計.

総務省統計局(2014)：社会生活統計指標－都道府県の指標－.

食料・農業・農村政策審議会農村振興分科会農業農村整備部会技術小委員会(2007)：農業水利施設の機能保全の手引き.

谷　茂(2005)：中山間地域における総合防災システムについて，農土誌，**73**(8)，25-28.

Toro, E.F. (1999) : *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics -A Practical Introduction-*, 3rd Edition, Springer, 315-331.

山田　秀(2004)：実験計画法-方法編，日科技連出版社.

Yoon, T.H. and Kang, S.-K. (2004) : Finite volume model for two-dimensional shallow water flows on unstructured grids, *Jounal of Hydraulic Engineering*, **130**, 678-688.

農業農村工学会論文集 IDRE Journal No. 299(83-5), pp. I_147-I_153 (2015. 10)

Simplified Estimation of Damage Costs from Floods due to Earth Dam Breaches Using Response Surface Methods

MIZUMA Keiji*, NISHIMURA Shin-ichi**, SHIBATA Toshifumi** and SHUKU Takayuki**

* *National Institute for Rural Engineering, National Agriculture and Food Research Organization,*
2-1-6 Kannondai, Tsukuba, Ibaraki 305-8609, JAPAN
** *Graduate School of Environmental and Life Science, Okayama University,*
3-1-1 Tsushima-naka, Kita-ku, Okayama-shi 700-8530, JAPAN

Abstract

Most of small earth dams in Japan were constructed at least 100 years ago and need to be improved because Japan is constantly at risk of severe earthquakes and heavy rainstorms. When improvements of earth dams are planned, small earth dams that have a higher risk of dam breaches should be given priority for improvement. Although a risk is defined as the product of occurrence probability and damage costs, estimating the damage costs using existing methods is very difficult and complicated. Therefore, simplified methods are necessary to select earth dams that must be preferentially improved. In order to overcome the difficulties in estimating damage costs, this study proposed a simplified estimation method for damage costs of floods due to earth dam breaches using a response surface method (RSM). RSM is a methodology that produces regression equations, called response surface, that quantitatively express the relationships between responses (output) and factors (input) by regression analyses based on experimental designs. Although many factors need to be considered to estimate damage costs of floods due to dam breaches, this study focused on four factors that largely affect the damage costs as based on results from a sensitivity analysis. Then a response surface that can estimate damage costs of floods was created by using the four parameters and its applicability was examined. As a result, the determination coefficient of the response surface R^2 was 0.84 and the proposed response surface can be easily applied to estimate damage costs of floods due to dam breaches.

Key words : *Earth dam, Damage cost, Sensitivity analysis, Response surfaces, Experimental design*

〔2015. 4. 2. 受稿, 2015. 7. 19. 審査終了〕