

堤防の破堤確率を考慮した洪水被害額の 算定方法に関する基礎的考察

A BASIC STUDY ON ESTIMATION METHOD OF FLOOD DISASTER LOSS WITH THE PROBABILITY OF DIKE BREAK

森寛典¹・高木朗義²

Hironori MORI, Akiyoshi TAKAGI

¹岐阜大学大学院 工学研究科博士前期課程社会基盤工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²正会員 博(工) 岐阜大学教授 工学部社会基盤工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

We proposed the estimation method of flood disaster loss with the probability of dike break. This method is able to estimate the flood disaster loss according to a form and a material of embankment. In other words, the flood loss with the characteristics of embankment and with the probability of dike break based on the resistance against the dike break, is able to be estimated by this model. Therefore, a more efficient flood control planning is expected by using this model.

Key Words : flood disaster loss, probability of dike break, loss estimation, flood control plan

1. はじめに

わが国では現在、治水経済調査マニュアル(案)¹⁾に沿って治水事業の経済評価が行われている。このマニュアルに沿った方法(以下、「現行方式」と呼ぶ)では、河川水位が計画高水位に達すると、すべての破堤地点で破堤するという仮定で計算が行われている。しかし、実現現象として河川水位が計画高水位に達したからといって100%破堤する訳ではない。すなわち、計画高水位に達しても破堤しない場合や、計画高水位に達しなくても破堤する場合も発生し得る。したがって、堤防の破堤は確率事象として捉えることが理想的である。実際に国土交通省は、計画高水位より低い危険水位を「氾濫の恐れが生じる水位」²⁾と位置づけている。一方、治水事業の便益は最大となる被害の防止という考えから、すべての破堤地点で破堤するとされている。しかし、同一河川において左右岸や上下流で同時に破堤する確率は、単一地点で破堤する確率と比較して低下すると考えられる。

そこで本研究では、まず、河川水位に応じた力学的な破堤確率(力学的破堤確率)と、複数の破堤地点で同時に破堤する確率(同時破堤確率)の二種類の確率を考慮した洪水被害額の算定方法(以下、「新方式」と呼ぶ)を考案する。次に、現行方式との比較検討を通して考案した洪水被害額の算定方法を確認することを目的とする。

しかしながら、既往研究において堤防の破堤確率を明示的に取り扱ったものは少ない。その理由として、堤防は歴史的産物であるため堤体構造に関する資料が乏しいことや、破堤のメカニズムについて未だ明らかにされていないことなどが考えられる。そこで本研究では、既往研究の宇野ら³⁾により構築された被災事例に基づくロジットモデル(以下、「被災確率モデル」と呼ぶ)を採用して試行してみることとする。この被災確率モデルは堤防の形状および質の評価に必要な要因を選択できるうえ、破堤確率を定量的に表すことができる。現在、国土交通省は国が管理する河川の安全性についての調査を進めており²⁾、この流れを汲んで今後、堤防の安全性に関する議論が進むと考えられる。また、堤防の質や形状に即した洪水リスクを示すことで住民への説明責任を果たすことも可能になり、より効率的な治水計画が策定されることが期待される。

2. 洪水被害額算定方法

(1) 堤防の破堤確率の捉え方

治水経済調査マニュアル(案)¹⁾では、洪水被害額を算定する際の洪水氾濫計算の仮定条件として、対象氾濫原を複数の氾濫ブロックに分割し、氾濫ブロックごとに破堤地点を設定している。このような条件下、現行方式

では計画高水位に達した氾濫ブロックにおける被害額をすべて足し合わせたものを対象氾濫原の被害額として算定している。したがって、この洪水被害額算定式は(1)式で表される。

$$D = \sum_i \phi_i \sum_j d_j \quad (1)$$

ここで、添字 i : 流量規模, ϕ : 流量生起確率, 添字 j : 氾濫ブロック, d : 氾濫ブロック当たり被害額。

この算定方法では、計画高水位以上に達する流量が生起するとすべての破堤地点において必ず破堤するという仮定下で洪水被害額が算定される。しかし、堤防の破堤は確率事象であり、また必ずしも複数の破堤地点で同時に破堤する訳ではない。本研究では、このような状況を捉えるために河川水位に対する堤防の力学的破堤確率（力学的破堤確率）と、複数の堤防が同時に破堤する確率（同時破堤確率）の二種類の破堤確率を捉えた洪水被害額算定方法を考案する。

(2) 力学的破堤確率（流量に応じた破堤確率）

現行方式では河川水位が計画高水位未満では破堤せず（破堤確率：0）、計画高水位以上になると必ず破堤する（破堤確率：1）という仮定が設定されている。したがって、現行方式における破堤確率は図-1に示した点線として表される。しかし、実際には河川水位が計画高水位に達していなくても破堤する可能性はあり、また、計画高水位以上で必ず破堤するとは限らない。したがって、力学的破堤確率は、河川水位が計画高水位未満の場合に(2)式、河川水位が計画高水位以上の場合に(3)式のように表される。

$$P(h) \leq P_d(h) \quad (2)$$

$$P(h) \geq P_d(h) \quad (3)$$

ここで、 $P(h)$: 治水経済調査マニュアルで仮定されている破堤確率, $P_d(h)$: 力学的破堤確率。

なお、力学的破堤確率は水位の上昇に従って増加すると考えられるため、図-1に示した実線のようにになると考えられる。

(3) 同時破堤確率（破堤時の流量低減）

現行方式では、河川水位が計画高水位に達したすべての破堤地点で、同時に破堤すると仮定している。しかしながら、実現象として複数の破堤地点が同時に最大規模で破堤するということは考えにくい。実際には、図-2に示すようにある地点で堤防が破堤した場合、それより下流では河道流量が減少するため、その破堤箇所より下流に位置する破堤地点の破堤確率は低下する。本研究で提案する新方式では、上流から順に破堤するかどうかを考え、破堤する場合は流量低減し、破堤しない場合は流量低減しない、という条件を仮定する。これにより複数の破堤

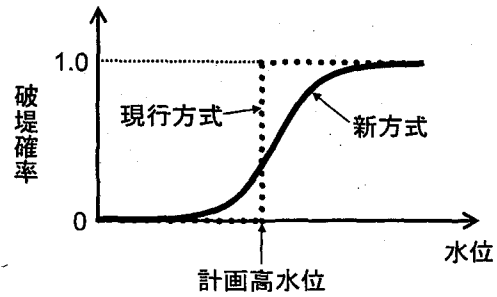


図-1 現行方式と新方式の破堤確率の概念

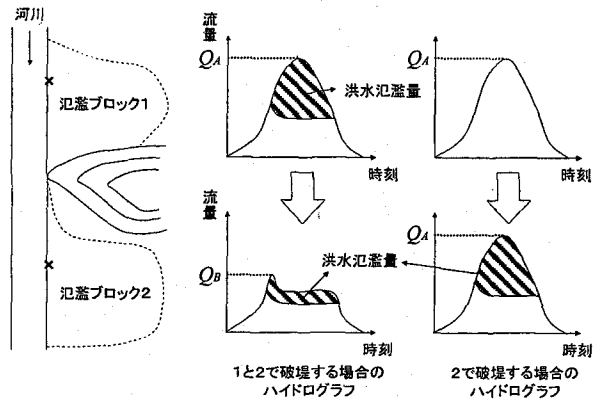


図-2 流量低減のイメージ

地点において同時に破堤する確率を表現する。また、この場合の破堤確率は破堤地点での流量に依存すると考えられる。

ここで、同時破堤確率の考え方の例として、図2の中央列に示すように氾濫ブロック1で破堤し、かつ、氾濫ブロック2でも破堤する場合を想定すると確率は(4)式のように表される。このケースでは氾濫ブロック1で破堤するため、氾濫ブロック1の下流にあたる氾濫ブロック2での流量が減少することとなる。

$$P_s = P_d(Q_A) \times P_d(Q_B) \quad (4)$$

ここで、 P_s : 同時破堤確率, $P_d(Q)$: 河道流量に応じた破堤確率（力学的破堤確率）。

また、図-2の右列に示すように、氾濫ブロック1では破堤せずに、氾濫ブロック2のみで破堤する確率は(5)式のように表される。このケースでは、氾濫ブロック1で破堤しないため、氾濫ブロック2の流量は低減しないこととなる。

$$P = (1 - p(Q_A)) \times p(Q_A) \quad (5)$$

本研究では、このように力学的破堤確率と破堤後の流量低減を考慮することによって同時破堤確率を捉える。

以上のような二種類の破堤確率を考慮すると洪水被害額算定式は次式のように表される。

$$D = \sum_i \phi_i \sum_j P_d(Q_j) \prod_k (1 - P_d(Q_k)) d_j \quad (6)$$

ここで、添字 k : 対象破堤地点より上流の破堤地点。

3. 被災確率モデルによる破堤確率の試算

新方式によって洪水被害額を試算するために、宇野ら³⁾によって構築された被災確率モデルを採用して力学的破堤確率を算出する。この被災確率モデルは、当時全国を対象にアンケート調査で収集した中小河川堤防の被災事例（破堤、表法決壊、裏法崩壊、軽無被害に区分）のデータに基づいて推定されたモデルであり、(7)、(8)式に示す二項ロジットモデルで表現されている。

$$P_d = \frac{1}{1 + \exp(-V)} \quad (7)$$

$$V = \theta_0 + \theta_1 X_1 + \dots + \theta_{12} X_{12} \quad (8)$$

ここで、 V ：堤防の被災ポテンシャル、 X ：特性要因（堤防規格や河道状況など）、 θ ：パラメータ。

このモデルによって破堤確率を算出するには堤防規格や河道状況などの情報が必要となる。ここでは、試算に必要な堤防規格や河川水位などのパラメータを、I河川堤防やその基準地点における水位などを参考にして仮定した。これを表-1、表-2に示す。本研究では宇野らによって構築された被災確率モデルにこれらの値を入力して破堤確率を算出する。このように被災確率モデルを用いることによって、堤防規格や河道流量、堤防の材質といった様々な要因を考慮した破堤確率を算出することが可能になる。現行方式では河川水位が計画高水位に達すると破堤するという仮定が設けられているが、この被災確率モデルでは表-3に示した様々な要因を含めた破堤確率の算出が可能となるため、堤防ごとの破堤確率に違いが生じることとなる。すなわち、氾濫ブロック毎の洪水リスクが評価可能となるといえる。また、この被災確率モデルはサンプルの違いによって4種類構築されており、Model 1とModel 2は越流が生じる場合のモデルであり、Model 3とModel 4は越流が生じない場合のモデルである。なお、Model 1は全事例のデータに基づいて推定されたモデルであり、Model 2、Model 3は破堤、表法欠壊、裏法崩壊を生じた事例に基づいて推定されたモデルであり、Model 4は大河川堤防のデータに基づいて推定されたモデルである。

ここでは、Q6（越流）、Q5（堤防高水位）、Q4（計画高水位）、Q3（危険水位）という4通りの流量を想定し、被災確率モデルを用いて、流量に応じた力学的破堤確率を算出した。破堤確率の算出において、越流が生じる場合はModel 2を、越流が生じない場合はModel 3を採用して破堤確率を算出した。ここでは堤防高を7.5mと仮定したため、河川水位が7.5mに達するまではModel 3を用い、それを超える水位においてはModel 2を用いて破堤確率を算出した。Model 2とModel 3によって算出される破堤確率は堤体土質が影響するため、それぞれのモデルにおいて堤体土質を「土砂」「砂」「粘土分多し」「砂レ

表-1 堤防規格の設定

堤防規格	I河川堤防	想定した堤防
天端幅(m)	4.9	5.0
裏法高(m)	5.7	6.0
法勾配	—	1/3.0
堤体断面積(m ²)	131.7	138.0

表-2 河川水位の設定

河川水位	I河川堤防	想定した堤防
堤防高水位(m)	—	7.5
計画高水位(m)	6.3	6.5
危険水位(m)	5.8	5.5

表-3 特性要因のパラメータ推定結果³⁾

	特性要因	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
θ_0	選択肢ダミー変数	2.156	4.538	1.962	-3.502
θ_1	天端幅	-0.439	-0.628	—	—
θ_2	裏法高	—	—	-0.839	0.742
θ_3	堤体断面積	—	—	0.037	-0.014
θ_4	堤体土質	-1.919	-3.094	-2.195	—
θ_6	流下能力/被災時流量	—	—	-1.201	—
θ_7	表法構造【透水性構造】	—	—	—	—
θ_8	天端舗装【透水性構造】	—	—	—	—
θ_9	漏水あり	1.590	—	—	1.443
θ_{10}	河道状況【蛇行凹岸部】	—	—	—	—
θ_{11}	河道状況【蛇行凸岸部】	0.981	2.429	—	—
θ_{12}	河道状況【橋梁・横工】	—	—	—	—

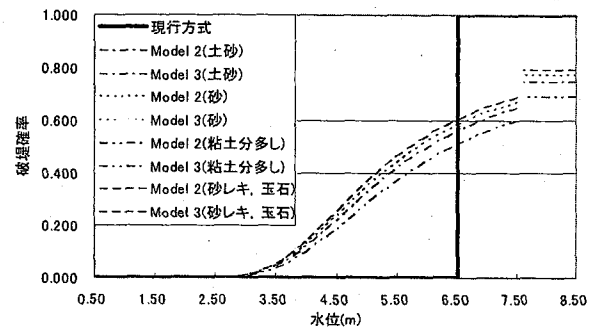


図-3 Model 2とModel 3によって算出された破堤確率

表-4 想定した堤防における条件

流量	Q6	Q5	Q4	Q3
生起確率	1/200	1/100	1/80	1/50
水位	越流	堤防高水位	計画高水位	危険水位
	—	7.5m	6.5m	5.5m
破堤確率	0.752	0.653	0.565	0.425

キ、玉石」という4通り想定して破堤確率を算出した。結果を図-3に示す。図-3を見ると、河川水位が3.0m以下では破堤確率が0であることがわかる。また、越流が生じる水位で破堤確率が不連続となっており、越流後は水位によらず破堤確率は一定となる。

4. 仮想氾濫原における現行方式と新方式の比較

(1) 試算のための仮定条件

現行方式と新方式によって算出される洪水被害額を比較するために仮想氾濫原を想定する。次に、前述したQ6、Q5、Q4、Q3という4通りの流量（水位）が生起すると仮定する。各流量に対して仮定した生起確率や河川水位、被災確率モデルによって算出された破堤確率を表-4に示

- 300 -

以上より、各河道流量に対して破堤する氾濫ブロックの位置を表す破堤パターンと、その生起確率が算出される。また、破堤時の河道流量および浸水によって被害を受ける氾濫ブロックは破堤パターンによって明らかとなる。そのため、ある破堤パターンで浸水する氾濫ブロックにおける破堤時の河道流量に応じた被害額を足し合わせることによって、その破堤パターンでの洪水被害額が算出される。このように算出された洪水被害額にその破堤パターンとなる確率を乗じたものを期待被害額として算出した。例として、流量Q6が生じた場合における破堤パターンと期待被害額を表-6に示す。ここで、「××××」は流量Q6で破堤、「×」は流量Q3で破堤を表している。また、その他の流量についても同様に期待被害額を算出した。

以上のように算出された期待被害額を横軸に、生起流量を縦軸にとって描かれた曲線をイベントカーブという。例として、堤体土質が「土砂」の場合のイベントカーブを図-6に示す。新方式では河川水位が計画高水位未満で破堤することも考慮されているため、計画高水流量に満たない流量が生起しても洪水被害が発生し得る。一方、現行方式では計画高水流量未満で洪水被害が発生することはない。

年平均被害額は現行方式で1,874 (百万円/年)、新方式で542 (百万円/年)と算定された。新方式によって算定された年平均被害額は、現行方式の30%程度となることからわかる。また、その他の堤体土質において算定された年平均被害額を図-7に示す。ここで仮定した条件では、堤体土質の違いによらず、新方式による洪水被害額算定結果は現行方式の30%程度の値となった。氾濫ブロックが1箇所の場合と比較すると、堤体土質の違いによる洪水被害額の差はわずかしきみられなかった。

5. 堤防形状を考慮した洪水被害額の算定

(1) 試算のための仮定条件

ここでは、堤防形状の違いによる洪水被害額算定への影響を分析する。現行方式では、堤防断面積が不足している場合、計画堤防が現況堤防に内包されるまで下方に平行移動させ、その高さから余裕高を引いた高さで破堤するという仮定が置かれている。これをスライドダウンという(図-8)。これは堤防形状に対して最も安全側を仮定したものである。そこで本研究では、堤防形状を考慮した破堤確率を算出する。

スライドダウンは浸透に対する安全性確保のために考慮する手法という点に着目し、漏水が破堤の特性要因となっているModel 1とModel 4を用いることとした。Model 1とModel 4における漏水の変数を流量に応じて変化させることによって、河道流量に伴う漏水の危険性を考慮した破堤確率を算出した。また、堤体断面積につい

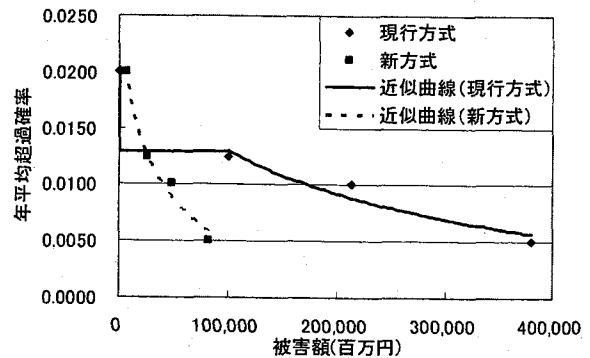


図-6 堤体土質が土砂の場合のイベントカーブ

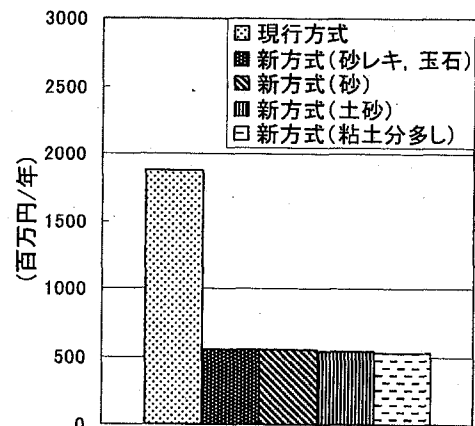


図-7 5氾濫ブロックの場合の洪水被害額の比較

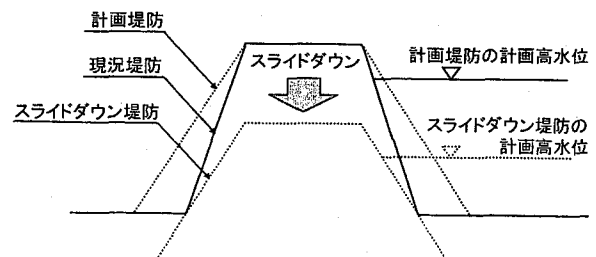


図-8 スライドダウンの概念

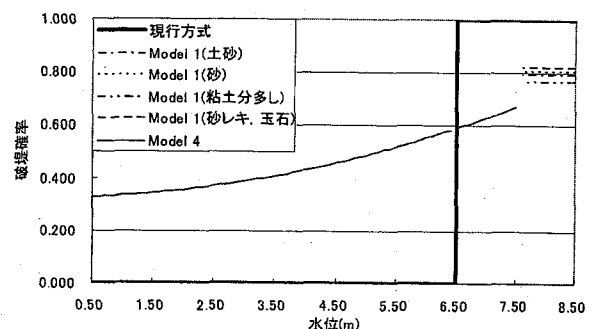


図-9 Model 1とModel 4によって算出された破堤確率

ても計画堤防より小さい値を仮定した。結果を図-9に示す。ここで、Model 4は流量や堤体土質によって破堤確率が影響していないが、これはModel 4が一事例の洪水をサンプルとしていることが原因であると考えられる。また、

ここでは4章で想定した堤防を計画堤防として、それから1mスライドダウンさせて河道流量に対する河川水位を表-7のように仮定し直した。この結果、現行方式において流量Q3の場合でも破堤することになる。

(2) 1 氾濫ブロックの場合の洪水被害額

氾濫ブロックが1箇所存在する仮想氾濫原において、現行方式と新方式によって洪水被害額を算定した。結果を図-10に示す。スライドダウンを考慮したため現行方式では破堤する水位が低下し、洪水被害額が大きくなった。一方、新方式は4章の結果とほぼ同じであるため、新方式と現行方式の差は拡大した。また、新方式による洪水被害額は、堤体土質による影響がごくわずかである。これは破堤確率として、堤体土質による影響がないModel 4を用いたためと考えられる。

(3) 5 氾濫ブロックの場合の洪水被害額

4. (3)と同様に各流量における期待被害額を算出してイベントカーブを作成した。例として、堤体土質が土砂の場合のイベントカーブを図-11に示す。図-6と大きく異なる点は、現行方式において流量Q3で破堤すると想定するため、洪水被害額が大きく算定されることである。図-12に示した年平均被害額の比較を見ると、現行方式と新方式による洪水被害額の差が、より顕著に現れている。一方、堤体土質が異なっても洪水被害額がほとんど変わらないという結果が得られた。これも、Model 4が堤体土質による影響を受けないためであると考えられる。しかし、わずかではあるが、堤防形状に基づく破堤確率を考慮した洪水被害額が算定することが可能となった。

6. おわりに

本研究では、破堤確率を考慮して洪水被害額を算定する方法を提案した。これにより、堤防の質や形状の違いを反映した洪水被害額の算定が可能となった。この算定方法を用いることによって堤体土質などの要因を含めた洪水被害額の算定が可能となるほか、堤防の破堤に対する抵抗力に基づく破堤確率に即した洪水被害額が算定可能となる。したがって、堤防や河川などの状態を含めた洪水リスクがわかり、より住民の感覚に適合した洪水被害額の算定が可能になると考えられる。

参考文献

- 建設省河川局：治水経済調査マニュアル（案），2000。
- 国土交通省ホームページ（<http://www.mlit.go.jp/>）
- 宇野尚雄，森杉壽芳，杉井俊夫：堤防安定性評価のためのロジットモデル，地盤工学におけるリスク評価手法に関するシンポジウム発表論文集，I-3，pp15-20，1987。

表-7 断面積が不足している堤防における条件

流量	Q6	Q5	Q4	Q3
生起確率	1/200	1/100	1/80	1/50
水位	越流	越流	堤防高水位	計画高水位
破堤確率	0.798	0.671	0.593	0.521

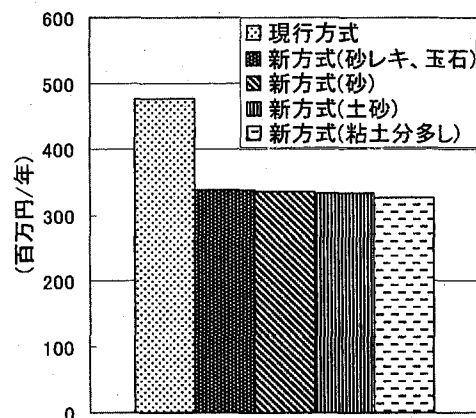


図-10 堤防形状を考慮した1氾濫ブロックの場合の洪水被害額の比較

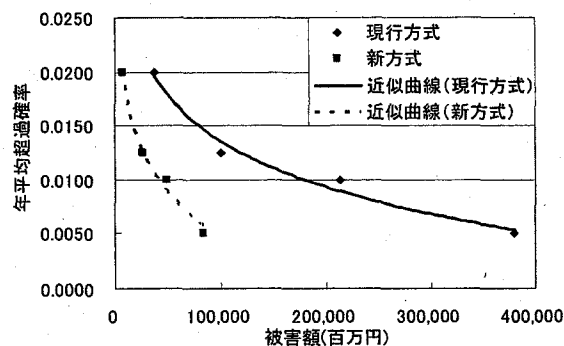


図-11 堤防形状を考慮した堤体土質が土砂の場合のイベントカーブ

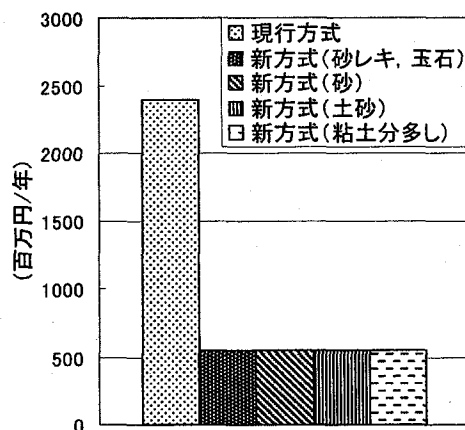


図-12 堤防形状を考慮した5氾濫ブロックの場合の洪水被害額の比較

(2007.4.5受付)