

破堤確率を考慮した 河川堤防整備の優先順位決定法の開発

大野 峻¹・高木 朗義²・大竹 雄³・本城 勇介⁴

¹学生会員 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)

E-mail:t3121005@edu.gifu-u.ac.jp

²正会員 博士(工学) 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)

E-mail:a-takagi@edu.gifu-u.ac.jp

³正会員 博士(工学) 新潟大学准教授 工学部 建設学科 (〒950-2181 新潟市西区五十嵐2の町8050)

E-mail:y.ohtake@eng.niigata-u.ac.jp

⁴正会員 博士(工学) 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)

E-mail:honjo@edu.gifu-u.ac.jp

本研究では、効果的な治水計画策定への寄与を目的とし、破堤を確率事象として捉えることで、流域における上下流の関係や土地利用を考慮した堤防整備の優先順位決定法を開発した。開発にあたり、浸透流解析や斜面安定解析を用いた破堤確率の算出を行い、破堤確率を考慮した洪水被害額の試算を通して、上下流の関係や土地利用の違いについて分析した。そして、堤防整備の優先順位を整備による期待被害額変化から決定する方法を開発した。その結果、流域全体で考えると、被害ポテンシャルが大きい地域に対しては整備を行い、小さい地域は整備を行わず、遊水地としての活用が望ましいことが明らかとなった。さらに、堤防整備には被害ポテンシャルの大小に加え、整備に伴う下流域の洪水リスクの上昇について考慮する必要があることも明らかとなった。

Key Words : risk of a flood, response surface method, pattern of flood levee failure

1. はじめに

わが国は、災害に対して脆弱な国土である。人口の約50%、資産の約75%が洪水氾濫区域に集中している。さらに、日本を流れる河川は規模が小さく、急峻なため、豪雨時には一気に洪水となって流下する特徴を持っている。また、梅雨前線の活動や大型台風の通過による降雨が集中する時期、ゲリラ豪雨などと呼ばれる1時間に50mm、100mmを越す集中豪雨の増加が日本の気候の特色に挙げられる。以上のように、わが国が抱えている洪水リスクは非常に大きく、ひとたび洪水が発生すると甚大な被害を招く恐れがある。したがって、洪水被害を軽減するため、治水施設の整備が急務となっている。しかし、わが国の河川は一級河川だけでも総延長がおよそ8万8千kmと膨大であるため、そのすべてに対して整備を施すのは現実的でない。そのため、河川の堤防整備において、整備の優先順位を決めることが必要となってくる。

従来の治水計画は“流す治水”として下流より連続的に整備されてきた。一方で、霞堤や遊水地などといった

“溜める治水”として伝統的に整備されてきた歴史¹⁾も存在しており、霞堤や遊水地などの歴史的技術が見直されてきている。国土技術政策総合研究所²⁾によると、気候変動に適応する治水方策として遊水機能を有する土地の保全が挙げられていた。実際に、滋賀県の天野川流域に位置する岩脇・西円寺地区などでは遊水機能を持つ地域や越流堤が洪水被害軽減の役割を果たしている事例も報告されている。しかしながら、現在の治水整備において、このような歴史的技術が生かされている地域は多くなく、費用、便益の面からみて効果的な堤防整備が行えていないのが現状である。そのため、現在の治水対策には、地域ごとの整備箇所、堤防整備レベルなどについて考慮した評価手法が必要とされている。

本研究では、破堤を確率事象として捉えるとともに、流域における上下流の関係や土地利用を考慮した堤防整備の優先順位決定法を開発することで、堤防整備が及ぼす影響を示し、霞堤や遊水地などの歴史的技術の適用も視野に入れた治水計画策定に寄与することを目的とする。

2. 現状の治水評価と本研究の位置づけ

(1) 現状の治水評価と課題

現在の治水評価は治水経済調査マニュアル（案）³⁾に沿って行われている。治水経済調査マニュアル（案）では、河川水位が計画高水位に達したすべての氾濫ブロックで、「必ず破堤する」という仮定と、「すべての氾濫ブロックで発生降雨に対する最大被害が生じる」という仮定の下で洪水被害額が算定されている。しかし、実際には河川水位が計画高水位に達したからといって必ず破堤するわけではない。また、上流の氾濫ブロックで破堤すると河道流量が減少するため、下流の氾濫ブロックでは発生降雨に対して流量が小さくなる。すなわち、すべての氾濫ブロックで発生降雨に対する最大被害が発生するとは考えにくい。以上より、現行の治水評価では実際の洪水被害に対し、過大評価を行っているといえる。そのため、治水事業の有益性についても過大評価をしていることとなり、費用便益の面からみた事業実施の妥当性の信ぴょう性も失われている。さらに、治水経済調査マニュアル（案）は流域における治水事業実施の妥当性を判断するものであり、堤防整備の優先順位を決定する方法などについては明示されていない。そのため、現在の堤防整備は経験的に下流から整備しており、地域によって異なる土地利用形態や上下流の関係に対して考慮されていない点が課題としてあげられる。

(2) 既往研究の整理と本研究の位置づけ

日本は自然災害が多い国であるため、これまでも数多くの防災に関する議論が交わされてきた。宇野ら⁴⁾は過去の被災事例からロジットモデルを構築することで河川堤防の安全性を評価する方法を提案している。このロジットモデルによって被災要因の特定と被災の発生頻度の確率的表現を可能とした。一方で、松尾ら⁵⁾は斜面の安定解析を用いた手法で山の斜面崩壊に関する安全性を評価している。その評価方法は粘着力 c 、内部摩擦角 ϕ の母集団分布から正規乱数によって一組の c と ϕ の値を斜面の層にわりつけ、安定解析を行うというものであった。これを N 回繰り返すことで N 個の安全率を算出し、そこから安全率の母集団分布の推定を行うことで破堤確率を算出していた。ただし、このような地盤解析ツールを用いた直接的な信頼性解析ツールの結合は、一つの条件下で行う計算が膨大であること、地盤構造設計者に対して信頼性解析部分をブラックボックス化してしまうことが課題点であった。そこで、大竹ら⁶⁾は地盤解析と信頼性解析を基本的には分離して考える応答曲面⁷⁾を用いた手法を提案し、地盤解析と信頼性解析の有効な結合方法について示した。応答曲面を用いると、安定計算の結果は関係する変数の比較的簡易な関数として表現される。本

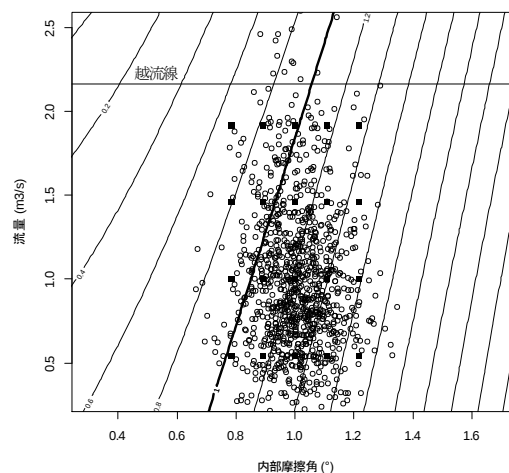


図-1 応答曲面と地盤パラメータの組み合わせ頻度分布

研究では応答曲面を用いた手法を応用することで土地利用や流域における位置関係によって異なる地域間の洪水リスクを考慮した堤防整備方法を提案し、堤防整備における留意点を示す。

3. 破堤の確率的表現

本研究では、破堤を確率事象として捉えることで洪水被害のリスク評価を行う。本章では、破堤を確率的に表現する方法について示す。現在、堤防の破堤メカニズムは堤体内に浸透した水が堤体内土塊の力の釣り合いを崩すことによるものとされている⁸⁾。そのため、堤防整備において、堤体への浸透流解析や堤体内土質に対する土質試験などを行うことで堤体の質的改良が図られている。本研究では破堤確率の算出に応答曲面法(Response Surface method, 以下RSMとする)を用いる。RSMとは浸透流解析や堤防斜面の安定解析を行うことで、堤防強度や被災時流量などを考慮した破堤確率の算出を可能とした手法である。破堤確率を算出する手順を以下に示す。まず、地盤解析ツールを用いて堤体への浸透流解析および堤防斜面の安定解析を行い、安全率を算出する。次に、流量や堤体の土質定数などの地盤パラメータと安全率を回帰分析することで安全率の関数である応答曲面を作成する。そして、リスク解析ツールを用いて、作成した応答曲面上に地盤パラメータを乱数分布させることで堤防の破堤確率を算出する。以上の手順で得られる応答曲面と地盤パラメータの組み合わせ頻度分布を図-1に示す。ただし、縦軸は流量、横軸は堤体土質の内部摩擦角を示し、それぞれ正規化している。これは、両軸にばらつきを持つデータを与えることで、降雨量に依存する発生洪水流量のばらつきと一連の堤防における堤防強度のばらつきを表現し、より現実的な破堤確率の算出を可能とした。さらに、図-1では安全率1の曲線と越流線で4つに区

分が別れている．つまり，応答曲面上で乱数分布を行うことは以下に示す4通りの被害形態を表現している．

$$P_o = \left(\frac{Q_o}{Q_a} \middle| F_s \geq 1 \right) \quad (1)$$

$$P_{os} = \left(\frac{Q_o}{Q_a} \middle| F_s < 1 \right) \quad (2)$$

$$P_s = \left(\frac{Q_{no}}{Q_a} \middle| F_s < 1 \right) \quad (3)$$

$$P_{ns} = \left(\frac{Q_{no}}{Q_a} \middle| F_s \geq 1 \right) \quad (4)$$

ただし， P_o ：越流確率， P_{os} ：越流かつ浸透破壊する確率， P_s ：浸透破壊確率， P_{ns} ：無害確率， Q_o ：堤防高流量以上の流量数， Q_{no} ：堤防高流量以下の流量数， Q_a ：全発生流量数， F_s ：安全率

このように，本研究では破堤の確率表現にRSMを用いることで破堤メカニズムに則ったリスク評価を可能としている．そのため，算出される洪水被害額は破堤の確率を考慮した被害額であり，治水経済調査マニュアル（案）によって算出される被害額に比べ，現実に応じた評価を可能としている．

4. 破堤確率を考慮した洪水被害額の試算

本章では，破堤確率を考慮する方法によって算定される洪水被害額の試算を行う．破堤確率を考慮することで堤防強度と流域における上下流の関係を反映した洪水被害額が算定されることが考えられる．そこで，試算のための仮想氾濫原や洪水条件などを想定し，破堤確率が洪水被害額に及ぼす影響について分析する．本章における洪水被害額の試算のための条件設定及び分析手順を図-2に示す．

(1) 仮想氾濫原の想定

a) 氾濫原の設定

土地利用の違いによる上下流の関係について検討するため，5箇所での氾濫ブロックを有する仮想氾濫原を試算の対象とする．ただし，氾濫ブロックは上流から順にサンバリングし，同堤防区間において河川の流下能力は一定であるとする．

b) 堤防の設定

本章では，一級河川である長良川の支川の一つである伊自良川を参考に設定を試みた．しかし，伊自良川堤防

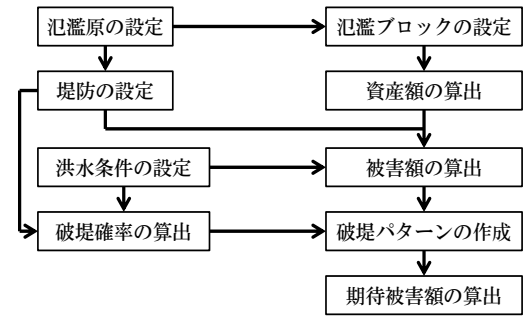


図-2 洪水被害額算出フロー

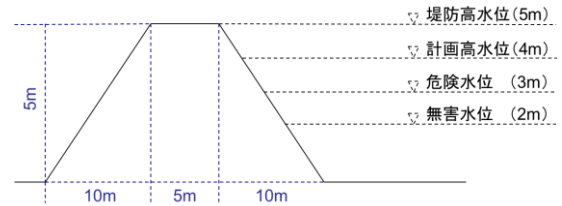


図-3 仮想堤防

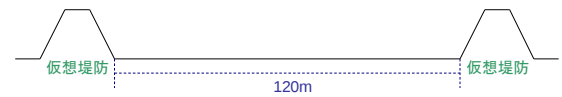


図-4 河道断面

はすでに整備が施されており，この堤防で破堤確率算出の試算を行った結果，堤防強度が非常に大きく，洪水被害がほぼ起こりえないものとなった．そのため，本章で用いる仮想堤防は伊自良川堤防から堤防高水位を2m引き下げ，堤防幅をおよそ半分に縮小した規格を設定した．本章で用いる仮想堤防を図-3に示す．河道断面も堤防同様に伊自良川を参考に設定する．横断測量成果⁹⁾より河道断面は図-4のように設定した．ただし，今回は計算を簡易に行うため，河床幅のみを参考とし，河床の凹凸については考慮せず，平坦な河床であることを仮定した．ここで，この河川における計画高水位流量を算出する．計画高水位流量の算出にマンニング式を適用する．マンニング式を(5)式に示す．

$$v = \frac{1}{n} R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

v ：流速， n ：粗度係数， R ：径深， i ：河床勾配
なお，径深は(6)式で算出される．

$$R = \frac{A}{S} \quad (6)$$

A ：通水断面積， S ：潤辺
(5)式によって算出される流速に通水断面積を乗じることによって流量が算出される．これを(7)式に示す．

$$Q = Av = \frac{1}{n} R^{\frac{5}{3}} \left(\frac{1}{S} \right)^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

Q : 流量

ただし、粗度係数を0.085、河床勾配を1/2540と設定する。これは伊自良川の整備方針が掲載されている木曽川水系河川整備基本方針¹⁰⁾に基づき、設定した。算出された各水位流量を表-1に示す。

c) 氾濫ブロックの設定

各氾濫ブロックは250mメッシュ（23個×12個＝276個）に分割されている矩形地域とし、資産は一様に分布していると仮定する。本試算において、対象とする氾濫ブロックの土地利用形態は住宅地、農地、住宅地と農地が混在している地域（以下、住宅地&農地とする）の3種類とする。

d) 資産額の設定と被害額の算出方法

氾濫ブロックに分布している資産額の設定と被害額算出方法の設定を行う。仮想氾濫原で試算するにあたり、土地利用に応じた資産額を治水経済調査マニュアル（案）に沿って算出する。なお、住宅地では家屋資産額と家庭用品資産額の和、農地では農作物（水稻）資産額、住宅地&農地では住宅地資産額と農地資産額の和を2分したものをそれぞれの資産額とする。また、計算に用いる床面積等はメッシュ面積とし、1メッシュあたりの世帯数は100と仮定する。被害額は資産額に浸水深及び浸水日数に応じた被害率を乗じることで算出される。本試算で用いる浸水深別被害率を表-2、表-3、表-4に示す。ただし、本試算において、土砂堆積による被害は考慮しないこととする。治水経済調査マニュアル（案）において、床下浸水は建築基準法との整合により浸水深0.45m以上を床上浸水とするとされているが、ここでは、浸水深0.51m以上を床上浸水と仮定する。これは、本研究で想定した氾濫ブロックにおけるメッシュごとの浸水深の変化を0.5mずつとしており、浸水深の最も浅いメッシュで床下浸水となるように配慮したためである。ここで、最大浸水深を6mとした場合の浸水状況を図-5に示す。なお、図-5の数字は該当メッシュの浸水深を表している。そのため、氾濫量はΣ（メッシュ面積×浸水深）によって算出され、氾濫ブロックあたりの被害額もΣ（資産額×浸水深別被害率）によって算出される。ここで、算出される被害額と氾濫量の関係に着目すると、それぞれは正の相関を持つことが明らかとなった。そこで、被害額算出の簡易化を図るため、本試算での被害額算出は以下に示す関係式を用いる。なお、氾濫量が0の場合は被害が発生しないため、切片は0とする。

表-1 各高水位流量

堤防高水位流量(m³/s)	418
計画高水位流量(m³/s)	287
危険水位流量(m³/s)	177
無害水位流量(m³/s)	90

表-2 住宅地における浸水深別被害率

浸水深	床下	床上				
	～0.5m	0.51～1.0m	1.01～1.5m	1.51～2.5m	2.51～3.5m	3.51m～
被害率	0.032	0.092	0.119	0.266	0.58	0.834

表-3 浸水深別家庭用品被害率

浸水深	床下	床上				
	～0.5m	0.51～1.0m	1.01～1.5m	1.51～2.5m	2.51～3.5m	3.51m～
被害率	0.021	0.145	0.326	0.508	0.928	0.991

表-4 農地における浸水深および浸水日数別被害率

事項	冠浸水					
	～0.5m	0.51～1.0m	1.01～1.5m	1.51～2.5m	2.51～3.5m	3.51m～
浸水日数	1～2	3～4	5～6	7以上		
被害率	0.21	0.24	0.37	0.54	0.64	0.74

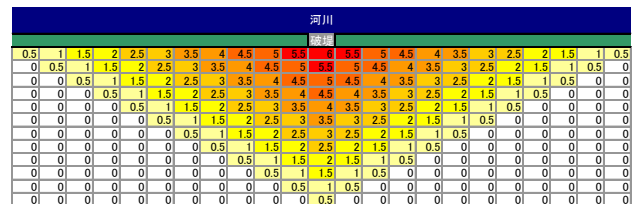


図-5 最大浸水深を6mとした場合の浸水状況

$$D_{\text{house}} = 0.0227V \quad (8)$$

$$D_{\text{agri}} = 0.0000277V \quad (9)$$

$$D_{\text{h\&a}} = 0.0114V \quad (10)$$

D_{house} : 住宅地被害額（百万円）， D_{agri} : 農地被害額（百万円）， $D_{\text{h\&a}}$: 住宅地&農地の被害額（百万円），

V : 氾濫量（m³）

(2) 破堤確率の算出

a) GUSLOPEによる堤防斜面の安定解析

RSMでは安全率の関数である応答曲面を作成するため、堤防斜面の安定解析を行う必要がある。本研究では、堤防斜面の安定解析にGUSLOPEを地盤解析ツールとして用いる。GUSLOPEとは土質定数を与えた堤防に対して浸透流解析を行い、浸透流解析の結果から安全率を出力させるプログラムである。なお、GUSLOPEでは斜面の安定解析に斜面の安定性評価の計算法の一つである極限平衡法（Limit Equilibrium Method, 以下LEMとする）を用いている。LEMは仮定した上部土塊の滑動力とすべ

り面上に発揮されうるせん断抵抗力の大小関係から安全率を評価するものである。そこで、今回の試算に用いる堤体の土質は斜面の安定性評価の手法を示したトンネル標準示方書¹¹⁾に基づき、設定を行う。トンネル標準示方書では二種類ある斜面の安定性評価の計算法のもう一方である有限要素法（Finite Element Method, 以下FEMと略）に使用される一般的な土質定数が示されていたため、今回の試算に用いる堤体土質はFEM解析に使用される土質定数データを代用する。堤体土質の土質定数を表-5に示す。また、安全率算出に用いる2つのばらつきデータの基本統計量を表-6に示す。内部摩擦角の基本統計量は庄内川土質試験の結果より算出した。本試算で用いる堤防、河道断面は伊自良川を参考としているため、内部摩擦角の基本統計量も伊自良川の土質試験結果から算出すべきであるが伊自良川の土質試験結果では堤体土質として参考にできる値が不十分であったため、庄内川土質試験の結果を代用した。流量については国土交通省水文水質データベース¹²⁾より公表されている伊自良川の年最大流量から求めた。

b) モンテカルロシミュレーションによる評価

本研究ではRSMのリスク解析ツールにモンテカルロシミュレーション（Monte-Carlo Simulation, 以下MCSと略）を用いた。なお、表-6より内部摩擦角は平均33.42、標準偏差3.61の正規分布、発生流量は平均193、標準偏差88.5のガンベル分布に従う。ガンベル分布は極値分布の一つであり、1000年に1回の割合で発生する大災害のような低頻度事象に対して分析しやすい特徴をもつ。ここで、モデル化誤差について考える。単純化、理想化した計算過程の安定解析では、計算した安全率に誤差が生じる。この問題を解決する手段の一つとしてMatsuo and Asaoka¹³⁾が提案した次式を用いる。

$$G_c = G + e \quad (11)$$

G_c : 真の安全率, G : 計算値の安全率,

e : モデル化誤差

Matsuo and Asaokaは過去の破壊事例から、その破壊事例における真の安全率と計算された安全率との誤差の分布を検討した。その結果、モデル化誤差は ± 0.1 に一樣分布することを明らかとした。以上より、本研究においても同様のモデル化誤差を考慮し、反映させている。

c) 仮想堤防における破堤確率

RSMより、仮想堤防の破堤確率は図-6のようになった。流量の増加に伴い、無害確率が減少し、浸透破壊する確率が増加している。また、流量400m³/s付近を境に越流かつ浸透破壊する確率が無害確率を上回っている。これは堤防高流量を超える流量が生起しているためである。なお、流量変化による破堤確率の変化はMCSで用いる流

表-5 堤体土質の土質定数

透水係数 k_v	0.005
透水係数 k_H	0.001
単位体積重量 γ (kN/m ³)	18
粘着力 c (kPa)	0

表-6 流量と内部摩擦角の基本統計量

	内部摩擦角(°)	流量(m ³)
平均	33.42	193
分散	13.03	7833
標準偏差	3.61	88.5

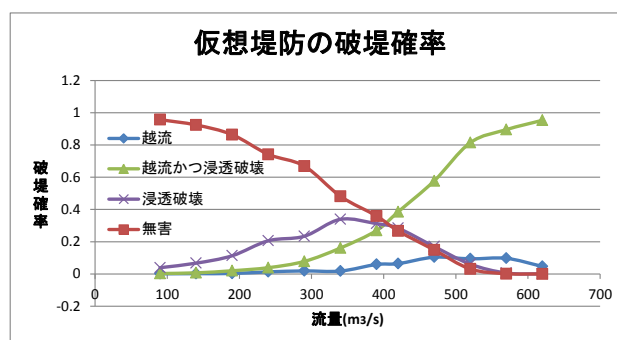


図-6 仮想堤防の破堤確率

量平均を変化させることで算出している。

(3) 破堤パターンの作成

対象とする仮想氾濫原では5つの氾濫ブロックが存在するため、破堤による流量低減などを考慮した複数地点における破堤確率を算出する必要がある。複数地点で破堤する確率を本節では破堤パターンを作成することで表現する。破堤パターンとは各氾濫ブロックで生起する被害形態の組み合わせを意味している。破堤パターンを作成するためには流量ごとの破堤確率と破堤後流量を設定する必要がある。そこで、仮想氾濫原の生起流量をハイドログラフによって設定し、そのピーク流量から破堤確率を算出する。さらに、破堤後流量を設定することによって、氾濫ブロックの洪水氾濫量をハイドログラフから求めることができる。なお、洪水被害額の試算では氾濫量に応じて被害額が算出される。

a) ハイドログラフの設定

今回は三角ハイドログラフを設定する。洪水は15時間続くものとし、ピーク流量はMCSによって分布した被害形態別流量を平均した被害形態別平均氾濫量とする。

b) 破堤後流量の設定

次に、破堤に伴う流量の低減について設定する。前章においてRSMでは越流、越流かつ浸透破壊、浸透破壊、無害の4種類の確率表現が可能であることを示した。各氾濫ブロックで破堤は一回のみ生起すると考え、破堤状

況に応じた流量が次の氾濫ブロックに流下すると設定した。越流した場合は堤防高流量，越流かつ浸透破壊および浸透破壊した場合は無害流量，無害であった場合は流入流量のままとした。各流量は表-1に示している。ただし，洪水時は多量の降雨が考えられるため，氾濫ブロックを一つ流下するたびに $50(\text{m}^3/\text{s})$ の流量増加を仮定する。

(4) 破堤確率を考慮した方法による試算

対象とする仮想氾濫原の土地利用が等しく住宅地であった場合における期待被害額を算出する。期待洪水被害額とは破堤パターンの生起確率とその破堤パターンでの被害額を掛け合わせたものである。試算結果を表-7に示す。表-7では破堤パターンの生起確率が大きい順に表示している。ただし，すべての破堤パターンを示そうとすると総数が1024パターン(5つの氾濫ブロックそれぞれで4通りの被災形態が考えられるため， $4^5=1024$)存在するため，一部抜粋している。今回の試算では，氾濫ブロック3で浸透破壊する確率が最も大きい結果となった。これは，氾濫ブロック3での破堤に伴う流量低減が氾濫ブロック4，5において無害となる確率を大きくしているためである。破堤パターンは各氾濫ブロックにおける被害形態の生起確率の組み合わせによって作成される。そのため，図-6のように下流に行くほど流量増加する場合においてもおよそ $400\text{m}^3/\text{s}$ までは無害となる確率が最も生じやすいが破堤に伴う流量低減によって破堤後の無害確率の増加がこのような結果を導出した。今回の試算では，氾濫ブロックごとの堤防強度を変化させていないため，破堤パターンの変化は見受けられなかったが言い換えれば，氾濫ブロックごとの仮想堤防を変更すれば破堤パターンの生起確率にも変化が生まれるということであり，堤防整備による期待被害額の変化を分析することができる。本試算では，破堤確率を考慮することによって，地域ごとの洪水リスクを表現した。これにより，事業の妥当性が明瞭になるとともに，より効率的且つ効果的な事業の推進に寄与することが期待される。

5. 地域特性を考慮した堤防整備の優先順位

本章では，破堤確率を考慮した洪水被害額算定方法を用いて，堤防整備の優先順位を決定する。現行の整備方法と破堤確率を考慮した場合の整備方法について示し，それぞれを比較，分析することで堤防整備における留意点を示す。

(1) 堤防整備の優先順位決定方法

仮想氾濫原において，以下の2通りの方法で堤防整備を行い，それぞれの整備効果の違いを分析した。

表-7 氾濫ブロックすべてが住宅地の場合における試算結果

破堤パターン					生起確率	期待被害額 (百万円)
氾濫ブロック1	氾濫ブロック2	氾濫ブロック3	氾濫ブロック4	氾濫ブロック5		
無害	無害	浸透破壊	無害	無害	0.141437	12.964
無害	無害	無害	浸透破壊	無害	0.122838	12.633
無害	浸透破壊	無害	無害	無害	0.102453	7.879
無害	無害	無害	無害	無害	0.068047	0
無害	無害	無害	無害	浸透破壊	0.058974	6.962
無害	無害	無害	越流+浸透破壊	無害	0.058339	11.270
無害	無害	無害	無害	越流+浸透破壊	0.050846	9.926
浸透破壊	無害	無害	無害	無害	0.048744	3.212
無害	無害	越流+浸透破壊	無害	無害	0.03926	7.785
無害	浸透破壊	無害	無害	浸透破壊	0.028444	4.487
無害	越流+浸透破壊	無害	無害	無害	0.023216	4.500
浸透破壊	無害	無害	浸透破壊	無害	0.018691	2.743
無害	無害	浸透破壊	無害	浸透破壊	0.018498	2.911
浸透破壊	無害	無害	無害	浸透破壊	0.017049	2.674
無害	浸透破壊	無害	浸透破壊	無害	0.016686	2.380

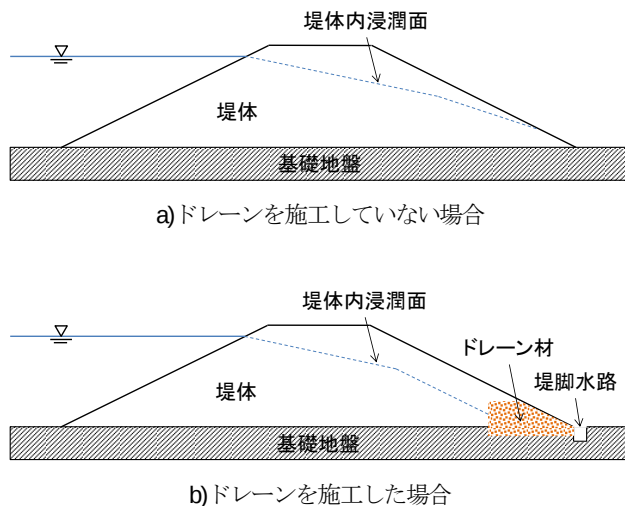


図-7 ドレーン工法の構造とその効果

表-8 ドレーン材の土質定数¹²⁾

透水係数 k_v	0.1
透水係数 k_H	0.1
単位体積重量 $\gamma(\text{kN}/\text{m}^3)$	20
粘着力 $c(\text{kPa})$	0
内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	42

a) 下流から順に整備する方法（現行方式）

現在，堤防整備の優先順位を決定する方法は明示されていないため，経験的に下流から順に整備されている。そこで，仮想氾濫原の下流から段階的に堤防整備を実施した場合における期待被害額を算出することで現在の治水方式を表現した。

b) 総便益が大きい順に整備する方法（新方式）

現行方式に対し，本研究では総便益が最も大きくなる氾濫ブロックから段階的に整備する方法を堤防整備の新方式として提案する。新方式では破堤確率を考慮することで，流域の上下流の関係や土地利用による被害ポテンシャルの差異を反映した優先順位の決定が可能になると考えられる。以下に新方式の手順を示す。まず，各氾濫ブロックを整備した場合の被害額をそれぞれ算定し，最

も洪水被害額が小さくなる氾濫ブロックを探る。次に、その氾濫ブロックの堤防を整備することによって破堤確率が低下すると設定する。そして、残りの破堤地点のうち堤防整備によって最も洪水被害額が小さくなる氾濫ブロックを探る。これを繰り返すことによって、堤防整備の優先順位を決定する。

(2) 堤防整備方法

本章では、堤防の整備をドレーン工法¹⁴⁾によるものとする。ドレーン工法とは洪水時に堤防に浸透した降雨ならびに河川水を裏のり尻のドレーン部に集水し、堤防外に速やかに自然排水する機能を有する浸透対策工法のことである。その効果は図-7に示す通りで、降雨あるいは河川水の浸透によって形成される堤体内浸潤面が裏のり面に浸出することを抑制し、堤体内浸潤面を低下させるとともに、堤体の一部をドレーン材に置き換えることによるせん断強度の向上とも相まって、浸透に対する堤防の安全性を確保しようとするものである。ここで、破堤確率の算出に必要なドレーン材の土質定数を表-8に示す。ドレーン材料は、堤体から、あるいは基礎地盤を通じての浸透水を少ない損失水頭で排水しうるものでなければならない。したがって、透水性の大きい材料とする必要があるが、その目安を透水係数でいえば、堤体の透水係数より100倍程度大きめにする必要がある。一方、堤防の安全性に関わるせん断強さについては、内部摩擦角（せん断抵抗角）がおおむね40°以上の材料とする必要があり、また施工時や施工後に劣化、すなわち細粒化を生じるような材料は避けなければならない。以上のことを考えると、ドレーン材料としては、細粒分含有量の少ない単粒度砕石や礫とすることが望ましいといえる。そのため、本章の堤防整備で用いるドレーン材は礫を採用する。以上の条件で算出された破堤確率を図-8に示す。ここで、図-6と図-8を比較すると、本研究で用いる仮想堤防に対し、ドレーン整備を行うことで破堤確率は図-6から図-8のように変化した。整備を施さなかった場合に対して、整備を施した場合の破堤確率では越流かつ浸透破壊する確率と浸透破壊する確率が流量に関わらず、0となった。そのため、ドレーン整備は堤防強度の増加に大きな影響を示しているといえる。しかし、ドレーン整備を施すと破堤による流量低減がなくなり、河川流量が増加するため、越流する確率が上昇することも図-8より明らかとなった。

(3) さまざまな土地利用パターンにおける優先順位

設定した仮想氾濫原において、6通りの土地利用パターンが存在する場合の堤防整備の優先順位を決定する。仮想氾濫原の土地利用パターンを表-9、堤防整備による土地利用パターン別期待被害額変化を図-9、総便益が大

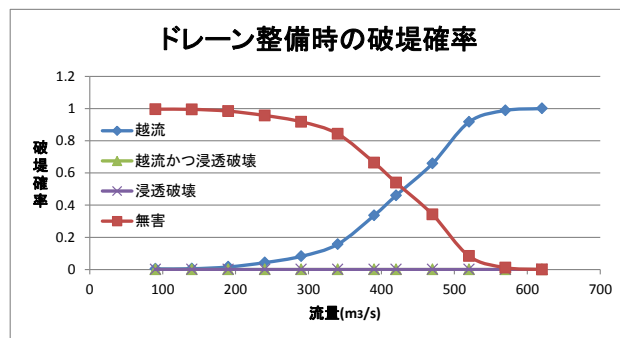


図-8 ドレーン整備時の破堤確率

表-9 土地利用パターン

土地利用パターン	氾濫ブロック1	氾濫ブロック2	氾濫ブロック3	氾濫ブロック4	氾濫ブロック5
i	住宅地	住宅地	住宅地	住宅地	住宅地
ii	農地	住宅地	住宅地	農地	住宅地
iii	住宅地	農地	住宅地	住宅地	農地
iv	農地	住宅地&農地	住宅地	農地	住宅地
v	農地	住宅地	住宅地&農地	農地	住宅地
vi	農地	住宅地	住宅地	農地	住宅地&農地

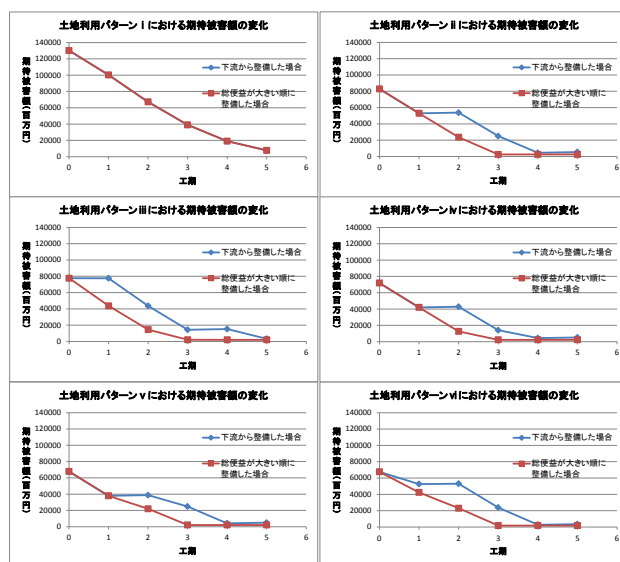


図-9 土地利用パターン別期待被害額変化

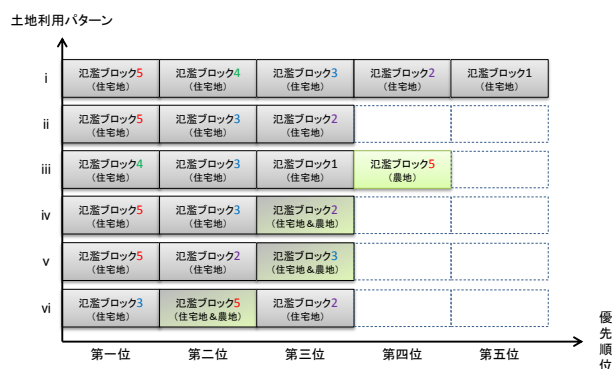


図-10 土地利用パターン別優先順位

きい順に整備した場合の土地利用パターン別優先順位を図-10に示す。

図-9より、土地利用パターンⅰを除いて、新方式で行う整備が現行方式より効率的であることがわかる。ここで、工期ごとの期待被害額の差は現行方式と破堤確率を考慮した場合の整備方法による便益の差を示している。つまり、現行方式では、より大きな洪水リスクを抱えたまま整備を行っていることがわかる。さらに、下流から順に整備する方法に着目すると、工期が進むことで期待被害額が増加している部分がある。これは、整備を行うことでかえって氾濫原全体の洪水リスクを増加させているため、便益の面からみて効果的でないことがわかる。また、不便な堤防整備による費用の損失が発生するため、下流から順に整備する現行方式では費用面からみても効果的でないことがいえる。

図-10では、総便益が大きい順に整備する方法で優先順位を決定すると、住宅地と住宅地&農地の氾濫ブロックは堤防整備を実施するが、農地は整備しないという結果が今回の土地利用パターンにおける検証で明らかとなった。堤防整備は該当氾濫ブロックの洪水リスクを低下させるものの、下流への流量を増加させるため、下流域の洪水リスク上昇が考えられる。そのため、流域全体で考えると、被害ポテンシャルが大きい地域には整備を行い、小さい地域は整備を行わず、遊水地として活用することが望ましいといえる。ただし、土地利用パターンⅲのような、氾濫原の最下流に位置する農地に対しては下流域への洪水リスク上昇がなく、パレート改善となるため、整備を行ったほうが流域全体の期待被害額減少につながるといえる。ここで、土地利用パターンⅳの検証結果に着目すると、被害ポテンシャルが低い地域のほうが被害ポテンシャルの大きい地域より優先順位が高くなった。これは、整備による下流域の洪水リスク上昇から得られた結果である。これより、堤防整備には単純に被害ポテンシャルの大小だけでなく、堤防整備による洪水リスクの上昇についても考慮する必要があるといえる。

6. おわりに

本研究では、RSMを用いることで破堤確率を考慮した、洪水被害額の算定と河川堤防整備の優先順位決定法の開発を行った。本研究で得られた成果を以下に示す。

① 洪水リスクの表現

地域の被害ポテンシャルしか考慮されていない現行方式では、破堤の確率が考慮されていないため、破堤を一つの線引きでしか表現できず、量的な堤防整備が主流であった。それに対し、本研究では、破堤をRSMによる破堤メカニズムに則った確率的な表現とすることで地域別の洪水リスクを表現し、質的な堤防整備が有効であることを示した。

② 流域特性を考慮した整備方法の有益性

仮想氾濫原を対象に、現行方式と開発した整備方法の2通りの整備によって得られる便益の違いを分析した。その結果、開発した整備方法が現行方式に比べ、土地利用を考慮しているため、短い工期で堤防整備を終えることができる、堤防整備を行わないことで氾濫原全体の被害額を小さくすることができるという2点において効率的、効果的に整備を行えることを示した。

今後は、開発した整備方法の実地域への適用を検討する。ただし、氾濫ブロックの数によっては膨大な計算が必要とされる破堤パターン作成の簡易化、被災時の氾濫ブロック間の相関性の考慮が課題である。

謝辞：本研究の一部は、平成26年度学術研究助成基金助成金（基盤研究(B)、課題番号：26289173、研究課題名：民産学連携による地域協働型インフラ管理システムの実装可能性と有効性検証、研究代表者：岐阜大学高木朗義教授）によるものである。

参考文献

- 1) 今後の治水対策のあり方に関する有識者会議：今後の治水対策のあり方について 中間とりまとめ、2010.
- 2) 国土交通省 国土技術政策総合研究所：国土技術政策総合研究所資料 気候変動適応策に関する研究（中間報告）、№749、ppⅡ-1-Ⅱ-30、2013.
- 3) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル（案）、2005.
- 4) 宇野尚雄，森杉壽芳，杉井俊夫，中野雄治：被災事例に基づく河川堤防の安定性評価，土木学会論文集，第400号，1988.
- 5) 松尾稔，上野誠：破壊確率を用いた自然斜面の崩壊予測に関する研究，土木学会論文報告集，第281号，pp.71，1979.
- 6) 大竹雄，本城勇介：応答曲面を用いた実用的な地盤構造物の信頼性設計法：液状化地盤上水路の耐震設計への適用，土木学会論文集 C（地圏工学），Vol.68，No.1，2012.
- 7) Box,G.E.P.and Draper,N.R.:*Empirical Model Building with Response Surface*,John Wiley,1987.
- 8) 岡二三生，「土質力学」，2003-2008.
- 9) 木曽川上流河川事務所：H22 横断測量成果（伊自良川 5.0kp），2010.
- 10) 国土交通省中部地方整備局，木曽川上流河川事務所，木曽川下流河川事務所：木曽川水系河川整備基本方針 現況河道特性の評価 【長良川編】，pp1-3，2009.
- 11) トンネル工学委員会：トンネル標準示方書 山岳工法・同解説，2006.
- 12) 国土交通省：国土交通省水門水質データベース（<http://www1.river.go.jp/>）（2014.8.1アクセス）
- 13) Minoru Matsuo，Akira Asaoka：A STATISTICAL STUDY ON A CONVENTIONAL “SAFETY FACTOR METHOD”，SOILS AND FOUNDATIONS，Vol.16，

No.1, pp. 79-80, 1976.

- 14) 国土開発技術センター：ドレーン工設計マニュアル,
1998.

(?)