破堤確率および上下流の関係を考慮したリスク評価に基づく流域治水計画策定方法の開発

岐阜大学大学院　学生会員　○大野峻
岐阜大学　正会員　杉浦聡志
岐阜大学　正会員　高木朗義

1. はじめに

近年，局所的な集中豪雨の発生頻度の増加に伴い，洪水被害が多発しており，治水施設の整備が急務である．しかし，我が国の河川延長および財政状況を鑑みると，すべての河川に対して計画断面堤防を整備することは時間的，予算的に難しい．限られた時間や予算のもとで，洪水被害を最小限に抑えるため，整備に対する投資効果が重要視されている．現在，河川堤防に対する投資効果は洪水被害軽減額として治水経済調査マニュアル（案）[1)] によって算定されている．治水経済調査マニュアル（案）では，地形などによって区分されるひとまとまりの氾濫区域（以下，氾濫ブロックとする）の被害額を氾濫シミュレーションにより算定しているが，破堤に伴う流下量の低減など上下流の関係は考慮されていない．ただし，洪水に対する破堤の有無は不確実性を伴うため，上下流の関係を表現するためには破堤を確率事象として扱う必要がある． 本研究では，破堤を確率事象として捉え，上下流の関係を考慮したリスク評価手法を開発することで，流域全体の洪水リスクを最小にする治水計画策定方法の構築を目指す．

2. 整備優先順位の決定方法

2.1. 優先順位決定手順

本研究では破堤を確率事象として捉え，被害額と破堤確率の積を洪水リスクとし，整備によるリスク軽減額の大きさにより整備優先順位を決定する． 優先順位決定手順を**図-1** に示す．決定手順は大きく 5 つの手順で構成される．各手順の概要を以下に示す．

I. 氾濫原の想定

対象とする流域の条件を整理する．対象流域における氾濫ブロックの数，氾濫ブロックごとの資産額，堤防形状などの洪水被害と整備効果を評価するための地理的な条件を設定する．

II. 外力条件の想定

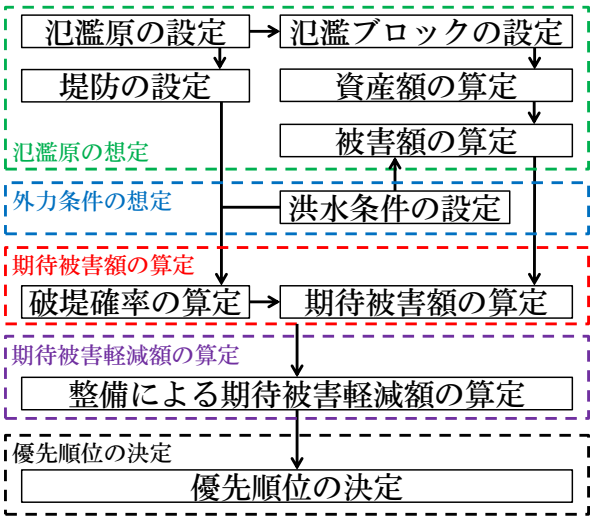

図-1 河川堤防整備の優先順位決定手順

対象流域内の実河川での計測結果を参考に，発生する洪水の流量および継続時間，頻度を設定する．

III. 洪水リスクの算定

設定した氾濫原と外力条件より氾濫ブロック別，流量別の破堤確率および被害額を算定する．破堤確率と被害額を乗じることで期待被害額を算定する．

IV. リスク軽減量の算定

整備対象氾濫ブロックの堤防条件を整備後の堤防を想定したパラメータとしたときのリスクを算定し，整備前のリスクとの差により，整備によるリスク軽減量を算定する．このとき，整備対象ブロックの氾濫可能性を低下させるだけでなく，破堤による流下量の低減などの整備対象ブロックより下流域に与える影響も整備効果として現れることに留意する．

V. 優先順位の決定

各氾濫ブロックを整備したときの流域全体のリスク軽減量を比較し，リスク軽減量が最大になる氾濫ブロックから整備を実施する．この整備を所与の条件として，整備便益が得られなくなるまで手順を繰り返すことで，堤防整備の優先順位を決定する．

本稿では，洪水リスクを算定するための破堤確率および被害額の算定方法，詳細な優先順位の決定手

順について説明する．

2.2. 応答曲面法による破堤確率の算定

堤防の破壊現象を確率的にとらえている研究は多く，たとえば大竹 [2] や田端 [3] がある．本研究では，破堤確率の算定に応答曲面法（Response Surface method，以下 RSM とする）を用いる．詳細は大竹に詳しいが，概説すると RSM は信頼性解析により堤防の安全性を評価する手法である．以下に RSM の手順および作業概要を示す．

a) 不確実性解析

堤体土質の調査より，土質定数の確率分布および基本統計量を算定することで堤体を構成する材料の不均質性を確率的に表現する．

b) 地盤解析

堤体の土質定数を入力値として，浸透流解析および斜面安定解析により，安全率を出力する．入出力値それぞれを回帰分析することで近似的な関数関係（以下，応答曲面とする）を得る．

c) 信頼性解析

応答曲面と堤体土質の確率分布からモンテカルロシミュレーションにより破堤確率を求める．これより，堤防材料の不均質性および被災時流量を考慮した破堤確率の算定が可能である．

2.3. 洪水被害額の算定

一般的な堤防整備効果の計測における被害額算定では，氾濫シミュレーションを用いて氾濫量を算定する．しかしながら，n箇所の氾濫ブロックでm通りの被災形態が生起することを想定すると各氾濫ブロックで生起する被災形態の組み合わせ（以下，破堤シナリオとする）はm^n通り生じる．流域全体の洪水リスクを評価するためにはそのすべてにおいて被害額算出が必要となる．そのため，被害額算出のためにシミュレーション計算を適用すると計算回数が膨大になり，計算負荷が大きい．そのため，簡易的に洪水被害額を求められる手法を導入する．

2.4. 破堤シナリオによる流域全体のリスク評価

整備による対象流域全体のリスク軽減量を評価するため，破堤シナリオを整理する．5 つの氾濫ブロックを有する地域において，各氾濫ブロックで越流，破堤，無害の 3 通りの被災形態を想定すると，被災シナリオは計3^5通り存在し，**図-2** に示すように整理できる．各破堤シナリオの生起確率と被害額は流量に応じた各氾濫ブロックにおける被災形態が生起する確率の積と，各氾濫ブロックの被災形態と流量に応じた被害額の和である．これらを乗じた各破堤シナリオの洪水リスクの合計が対象地域全体の洪水リスクとなる．

シナリオ No.	氾濫ブロックNo. 1	2	3	4	5	生起確率	期待被害額（百万円）
1	無害	無害	破堤	無害	無害	0.141	12,964
2	無害	無害	無害	破堤	無害	0.123	12,633
3	無害	破堤	無害	無害	無害	0.102	7,879
4	無害	無害	無害	無害	無害	0.068	0
⋮							
240	無害	無害	越流	破堤	破堤	0.000	5
241	無害	無害	越流	破堤	越流	0.000	3
242	無害	越流	越流	無害	越流	0.000	0
243	無害	越流	無害	越流	越流	0.000	0

図-2 破堤シナリオ

2.5. 優先順位の決定方法

整備による流域全体の洪水リスク軽減量より優先順位を決定する．決定手順を以下に示す．

(1) 各氾濫ブロックの堤防を整備後堤防としたときの破堤確率を RSM により算定する．
(2) 氾濫ブロックの堤防を整備したときの流域全体の洪水リスクを算定し，整備前と比較する．
(3) 手順(2)をすべての氾濫ブロックで試算する．
(4) 試算結果より，流域全体の洪水リスクを最小にする氾濫ブロックを一つ抽出し，整備対象とする．
(5) 整備対象氾濫ブロックの堤防を整備後堤防に更新して，洪水リスクの低減がなくなるまで手順(1)，(2)，(3)，(4)を繰り返すことで堤防整備の優先順位を決定する．

3. おわりに

本稿では，破堤が下流域に与える影響を考慮した流域全体の洪水リスクの考え方と整備優先順位の決定方針を示した．今後は簡易的に洪水被害額の算定する手法を構築する．また，仮想氾濫原を対象に開発モデルの挙動を確認し，流域別治水計画を示す．

【参考文献】

1) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル（案），2005.
2) 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.
3) 田端幸輔，福岡捷二，瀬崎智之：超過洪水時における堤防破堤確率評価手法に関する研究，土木学会論文集 B1（水工学），Vol.71, No.4, I_1273-I_1278, 2015.