

水工学シリーズ 15-A-8

リスクマネジメントにおける防災技術と展望
ー破堤確率と土地利用を考慮したリスク評価に基づく
河川堤防整備の優先順位決定方法ー

岐阜大学 教授

高木朗義

土木学会

水工学委員会・海岸工学委員会

2015 年 8 月

リスクマネジメントにおける防災技術と展望

一破堤確率と土地利用を考慮したリスク評価に基づく 河川堤防整備の優先順位決定方法一

Disaster mitigation technique and perspective in risk management

高 木 朗 義

Akiyosi TAKAGI

1. はじめに

わが国は、災害に対して脆弱な国土をもつ。洪水災害に着目すると、人口の約50%、資産の約75%が洪水氾濫区域に集中している。加えて、日本を流れる河川は規模が小さく、急峻なため、豪雨時には大きな流量が小さな断面に流下する特徴を持つ。また、わが国では梅雨前線の活動による雨季と、台風の通過による大雨など、降雨が集中する時期があり、近年ではゲリラ豪雨と呼ばれる短時間に集中した大雨が頻発するなど、降雨による災害が起こりやすい。以上の背景から、洪水被害を軽減させる河川整備は歴史的に見ても重要視されてきた。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。また、近年のひっ迫した財政事情により、社会資本整備に充当される予算は縮小してきた。そのため、すべての河川に対して整備を施すのは時間的、予算的に現実的でない。限られた時間や予算のもとで、効率的に整備による便益を具現化するためには優先順位を与える必要がある。現在の河川堤防整備の実務では、流域全体を概略点検し、概略点検で発見された局所的弱部を詳細点検することで堤防整備の実施を検討している。つまり、堤防の強度が小さい地域の堤防を改修することで洪水氾濫による被害の軽減を図っている。しかし、流域に視点を当てたとき、整備の下流域に与える影響を評価する方法が確立されていないため、洪水リスクを最小とするような整備には至っていないことが多い。そのため、現在の治水対策には、土地利用や堤防強度などの地域によって異なる上下流のリスクバランスを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、堤防の強度やその地域の土地利用によって異なる洪水リスクを定量的に評価し、上下流の関係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、堤防整備が流域に及ぼす影響を示し、流域全体の洪水リスクを最も小さくする治水計画策定方法の構築を目指す。

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

現在の堤防整備に関わる治水評価は治水経済調査マニュアル（案）¹⁾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破堤地点で「必ず破堤する」という仮定と、「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、実現象として河川水位が計画高水位に達したところで必ず破堤するわけではない。計画高水位に達しても破堤せずに越流する場合や達しなくとも破堤する場合が考えられる。さらに、ある地点での破堤を考えたとき、氾濫によって河道流量が減少するため、破堤地点より下流域では発生降雨に対して流量が小さくなる。すなわち、すべての破堤地点で発生降雨に対する最大被害が生じるとは考えにくい。つまり、現行の治水評価は実際の洪水被害に対して過大に評価するおそれがある。ま

た、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については明示されていない。したがって、従来の堤防整備は過去の被災経験をもとに下流より連続的に行われてきた。その理由として、上流から整備すると、整備した地点で被災する確率が減少するため、下流に大きな流量を流す確率が増大すること、下流域は歴史的に資産価値の高い土地利用をされていることが多く、被災時の被害が大きくなりやすいことがあげられる。しかし、近年になって都市開発が進み、下流域の土地利用も都市の開発地域によってさまざまとなってきた。加えて、我が国の経済状況は流域すべてを整備するだけの余裕はなく、下流域からの連続的な整備にも限界がある。そのため、地域によって異なる土地利用形態および流域における位置関係を考慮した流域全体でみた整備優先順位を与えることが現在の堤防整備に必要である。優先順位の決定には河川水位による堤防の壊れやすさを考慮したより合理的な判断基準に加えて上下流の関係を考慮した評価手法が必要である。

(2) 既往研究の整理と本研究の位置づけ

これまでも不確実な事象である災害を確率的に扱う研究は多く、リスク評価の判断材料である確率の算出方法が議論されてきた。宇野ら²⁾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。ここで、宇野らのロジットモデルは破堤確率の算出に天端幅や堤体断面積などの堤防形状にも含まれる被災要因を考慮したモデルであり、被災要因の特定ができる特徴を持つが、実務への適用を考えたとき、地域によって異なる被災要因のすべてを網羅することが困難である。また、要因の選択をする際に有力な要因が欠落する可能性もある。そこで、本研究では破堤を解析的にとらえた松尾ら³⁾や大竹ら⁴⁾の評価方法に着目する。松尾らや大竹らは斜面の安定解析を用いた方法で斜面崩壊に関する安全性を評価している。ただし、松尾らの評価方法は論文が投稿されてから幾何かの時を経ているため、現行の設計基準で考えられていない。加えて、モンテカルロシミュレーション（Monte-Carlo Simulation, 以下MCSとする）のような計算技術が不足していたため、多くの計算を必要とする解析手法を課題としていた。これに対し、大竹らは現行の設計基準のもと、飽和不飽和浸透流解析を基本とした解析手法を提案し、その有効性について示している。以上より、本研究においても大竹らの方法を用いることで破堤確率を算出する。

大竹らは堤防整備の優先順位の必要性も述べており、提案した解析手法を用いることで堤防の局所的な弱部を抽出し、局所的弱部から優先的に整備していくことを可能としている。また、瀧ら⁵⁾は破堤氾濫で想定される流出家屋数と発生頻度の積をリスクとしてとらえ、リスクの大きい箇所から優先的に整備することを評価した。しかし、河川整備の優先順位を考えると、整備による上下流への影響を考慮したものはない。そこで、本研究では以下の特徴を持つ堤防整備優先順位決定方法を提案する。1つは堤防の破堤を確率表現することにより、洪水リスクと整備によるリスク軽減量を定量的に評価する。2つは被災によって低減する河川流量を捉えることで、堤防整備が流域全体に与える影響を評価する点である。これにより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）の整備による流域全体の洪水リスクの変化を計測して、最も効率の良い整備順位を決定することを可能とする。

3. 優先順位の決定方法

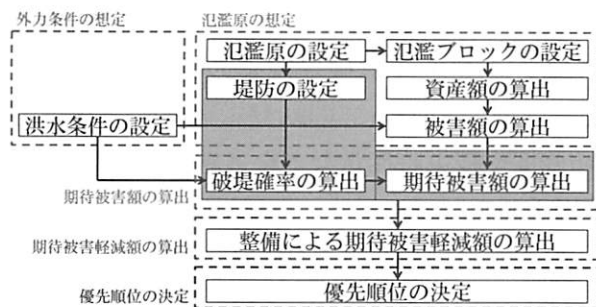


図-1 河川堤防整備の優先順位決定プロセス

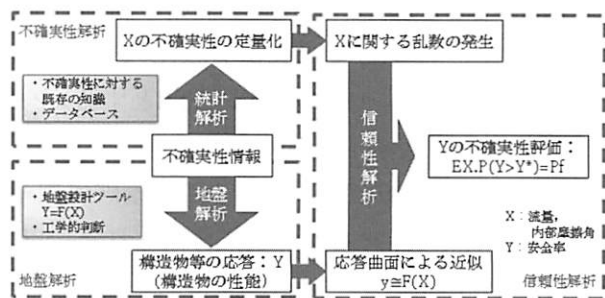


図-2 応答曲面法による破堤確率の算出手順

本章では、河川堤防整備の優先順位を決定する方法について説明する。優先順位の決定プロセスを図-1に示す。決定プロセスは大きく5つの手順で構成される。以下に各プロセスの概要を示す。

I. 氾濫原の想定

対象とする地域の条件を整理する。対象とする地域における氾濫ブロックの数や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

対象地域に発生する洪水の流量および継続時間を設定する。これらは実河川での計測結果を参考に設定することを想定する。設定した外力条件とI.で設定した氾濫原より、氾濫ブロックごとの被害額が想定される。

III. 期待被害額の算出

設定した氾濫原と外力条件から破堤確率を算出する。破堤確率を氾濫ブロックごとで想定する被害額に乘じることで期待被害額を算出する。この期待被害額が施策前における氾濫ブロックの洪水リスクである。

IV. 期待被害軽減額の算出

III.で用いた施策前の堤防から、整備による堤防条件を修正した堤防（以下、整備後堤防とする）を設定して、洪水リスクを算出する。このとき、対象とする氾濫ブロックが氾濫する危険性の低下だけでなく、破堤による流量低減などといった整備した氾濫ブロックより下流の流域に与える影響も堤防整備の効果として現れることに留意し、流域全体の洪水リスクを算出する。流域全体における整備前のリスクと整備後のリスクの差より、リスク軽減量を算出する。

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におけるリスク軽減量を比較・分析し、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。これを繰り返すことで、堤防整備の優先順位を決定する。

優先順位を決定するにあたり、洪水リスクの把握に必要な破堤確率の算出方法と優先順位を決定する分析手順（上記手順のIII.～V.）についてここで詳しく説明する。氾濫原、外力条件の設定方法については読者の理解を図るため、ケーススタディを用いて第4章で説明する。

(1) 破堤確率の算出方法

堤防の破堤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って生じるものだとされている⁶⁾。そのため、現在の堤防整備は、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の結果から堤体土質を堤体として望ましい土質に整備するなどといった質的な整備により、浸透の制御を図る工法が多く採用されている。増厚やかさ上げといった従来の工法も採用されているが

大した住宅地などによる土地や予算の制約の関係上、従来の工法では整備が難しい箇所が多くなってきていることも質的な改良が普及してきた要因である。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。詳細は大竹⁴⁾に詳しいが、概説すると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する手法である。RSMによる破堤確率の算出手順を図-2に示す。RSMは不確実性解析、地盤解析、信頼性解析の3つの手順に分けられる。以下、それぞれの役割と作業の概要を示す。

a) 不確実性解析

不確実性解析は破堤確率の算出根拠となる堤防強度に関する不確実性を表現するパラメータ（以下、不確実性情報とする）が従う確率分布および基本統計量を求め、不確実性情報を確率的に表現する作業である。この作業は信頼性解析における基礎資料となる。本研究では流量と堤体土質の内部摩擦角を不確実性情報として扱う。それぞれを不確実性情報として扱うことは自然条件である降雨のばらつき、堤防が歴史的構造物であることに起因する堤体内土質のばらつきを表現している。内部摩擦角は堤防強度に影響を与えるため、堤体内土質のばらつきを考慮することで堤防強度のばらつきを表現する。流量は対象河川の年最大流量から、内部摩擦角は同一氾濫ブロック内の複数地点から得られる土質試験結果から氾濫ブロックごとに求める。

b) 地盤解析

地盤解析は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実施する作業である。この作業は信頼性解析において応答曲面⁷⁾を導出するための基礎資料となる。ここで、応答曲面とは、地盤解析に入力した不確実性情報と対象構造物の応答（斜面崩壊の安全率等）を回帰分析することで得られる近似的な関数関係である。なお、本研究の地盤解析では不確実性情報にそれぞれの平均値、平均から標準偏差離れた値、平均から標準偏差の2倍離れた値の各5通りを入力し、計25通りの解析を実施した。

c) 信頼性解析

信頼性解析は地盤解析によって得られた結果（入力値：流量と内部摩擦角、応答値：安全率）から近似的に構築される応答曲面と不確実性解析によって得られた流量と内部摩擦角の確率分布からMCSにより構造物が限界状態に達する確率を求める作業である。

以上の手順で得られる応答曲面と不確実性情報のMCS結果の一例を図-3に示す。図-3は安全率を流量と内部摩擦角で近似した応答曲面上に流量と内部摩擦角の組み合わせをMCSによって分布させた結果を示したものである。図-3より、被災状態が安全率1の曲線と越流線で4つに区分されている。つまり、RSMは以下に示す4通りの被害形態を表現する。

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

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

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

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

ここで、 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、RSMを用いることで破堤メカニズムに

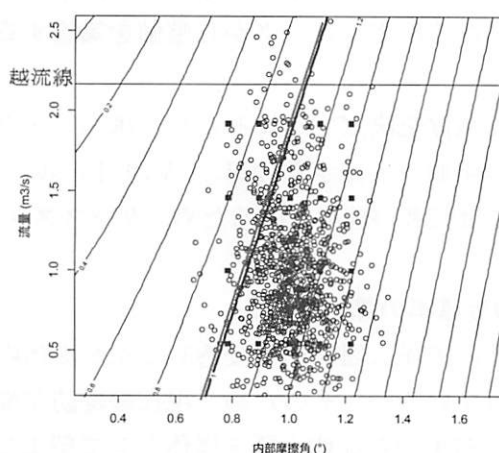


図-3 応答曲面と不確実性情報のMCS結果

則った破堤の確率表現が可能となる。また、破堤、越流の被害形態によって異なる氾濫量と河川を流下する量がそれぞれ求まるため、本研究が目指す堤防整備による流域全体のリスク評価が可能となる。

(2) 破堤パターンの作成

RSMで算出した破堤確率を各氾濫ブロックで想定する被害額に乗じることで各氾濫ブロックの洪水リスクが算出される。一方で、流域全体の洪水リスクの把握には、上流域で破堤すれば、以下の流域では流量低減が生じるため、これらを踏まえた評価をする必要がある。本稿では複数地点で破堤する確率を破堤パターンによって表現する。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流域全体でみた組み合わせのことである。氾濫ブロックの被害形態は4通り存在するため、氾濫ブロック数 n のとき、破堤パターンの総数は 4^n 通り存在する。このすべての破堤パターンにおける流域全体のリスクを算出する。そのため、対象地域を設定するときには、計算量軽減のため、氾濫ブロック数が多くならないよう留意する必要がある。

(3) 優先順位の決定方法

破堤パターンを用いて、堤防の整備が流域に与える影響を分析することで整備の優先順位を決定する。分析の手順を以下に示す。

1. 各氾濫ブロックの整備後堤防の破堤確率を RSM により算出する。
2. 氾濫ブロックの堤防を整備したときにおけるすべての破堤パターンの洪水リスクの総和を算出し、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. 試算結果から最も流域全体の洪水リスクを小さくする氾濫ブロックを抽出し、整備対象とする。
5. 整備対象となった氾濫ブロックの堤防を整備後堤防に更新して、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。

堤防整備の優先順位を堤防整備が氾濫ブロックに与える整備効果のみでなく、整備個所の下流域に与える整備効果も含めて判断することで流域における氾濫ブロックの位置関係や土地利用を考慮した整備優先順位が決定できる。ただし、この方法は洪水リスクを最も小さくする氾濫ブロックを探り、河川堤防整備の優先順位を決定する方法であるため、最終期に最も洪水リスクを小さくする整備でない場合が考えられる。この問題は動的計画法によって解決できるが本稿では動的計画法による整備優先順位の決定は考慮していない。

4. 優先順位の決定に必要な諸条件

前章で破堤確率の算出方法および堤防整備の優先順位決定方法の概略について示した。本章では、流域全体のリスクを考慮した堤防整備優先順位決定方法に必要な各種条件をケーススタディの設定と合わせて説明する。

(1) 仮想氾濫原の想定

a) 氾濫原の設定

本稿では氾濫ブロックの位置関係が整備の優先順位に与える影響を分析するため、5箇所の氾濫ブロックを有する仮想氾濫原を想定する。また、各氾濫ブロックの位置関係を明確にするため、各氾濫ブ

ロックを上流からナンバリングする（最上流が氾濫ブロック1となる）。ただし、1つの氾濫ブロックにおける破堤が予測される地点は1つとし、氾濫ブロック内における河川の流下能力は一定であると仮定する。なお、実務では治水経済調査マニュアル（案）をもとに分けられた氾濫ブロックに対し、氾濫シミュレーションを実施することで地形的関係より対象氾濫ブロックで氾濫した場合に氾濫した水が隣接した下流ブロックに流入することを考える必要があるが本研究では簡便のため、それぞれの氾濫ブロックは独立であると仮定する。

b) 堤防の設定

堤防強度が破堤確率に与える影響を分析するため、二種類の堤防を想定する。強度の大きい堤防として、堤防幅25m、堤防高5mの堤防を想定する。強度の小さい堤防は強度の大きい堤防を一回り小さくしたものを設定する。仮想堤防の横断図を図-4に示す。河道断面は簡便のため、河床が平坦であることを仮定し、河床幅は120mとした。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はマニング式を適用する。マニング式を(5)式に示す。径深は(6)式、流量は(7)式で算出される。

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

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

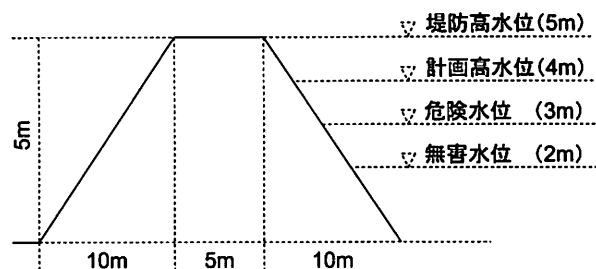
$$Q = Av = \frac{1}{n} R^{\frac{5}{3}} \left(\frac{1}{S} \right)^{\frac{1}{2}} i^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

ここで、 v ：流速、 n ：粗度係数、 R ：径深、 i ：河床勾配、 A ：通水断面積、 S ：潤辺、 Q ：流量。

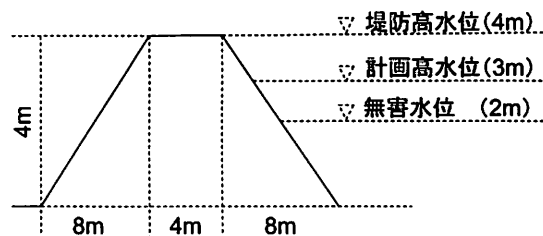
ここで、木曽川水系河川整備基本方針⁸⁾を参考に、粗

度係数を0.085、河床勾配を1/2540と設定する。算出された各水位流量を表-1に示す。

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ると、次の氾濫ブロックに流下する流量は破堤状況によって変化する氾濫量だけ低減した値になる。そのため、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が流下すると設定する。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支川等から50(m³/s)が流入すると仮定する。



a) 強度の大きい堤防



b) 強度の小さい堤防

図-4 仮想堤防

表-1 各高水位流量

a) 強度の大きい堤防の場合

堤防高水位流量(m ³ /s)	418
計画高水位流量(m ³ /s)	287
危険水位流量(m ³ /s)	177
無害水位流量(m ³ /s)	90

b) 強度の小さい堤防の場合

堤防高水位流量(m ³ /s)	287
計画高水位流量(m ³ /s)	177
無害水位流量(m ³ /s)	90

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、資産は一律に分布していると仮定する。また、土地利用による洪水リスクの違いを分析するため、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を設定する。現在の治水評価では治水経済調査マニュアル(案)に沿って資産額および被害額が算定されており、本研究で実施するケーススタディにおいても同様の算出方法を採用する。治水経済調査マニュアル(案)では資産が家屋や事業所償却資産、農漁家償却資産などに分類されており、資産ごとに算出方法が異なる。さらに、洪水氾濫による資産の直接的・間接的な被害は多岐に及び、計測方法が確立されていないものも多いため、すべてを計測することは困難である。そこで、本研究では簡単のため、直接被害の一部を被害額と定義して計上する。資産額は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分したものとする。また、資産額の算出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と設定する。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、土砂堆積による被害は考慮しないこととする。氾濫ブロックにおけるメッシュの浸水深は0.5mを1単位として、1.0m、1.5mのように表現する。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、浸水深の表現と整合性に設定する。ここで、最大浸水深を6mとした場合のメッシュの浸水深を表している。そのため、氾濫量・氾濫ブロックあたりの被害額も Σ (資産額×浸水深に
られる被害額と氾濫量の関係に着目すると、それぞれ

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					
浸水深	～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

[illegible]

図-5 最大浸水深を6mとした場合の浸水状況

表-5 流量と内部摩擦角の基本統計量

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

表-6 堤体土質の土質定数

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

表-7 応答曲面

堤防種類と整備状況	応答曲面Fs
5m堤防整備前	$0.50157+0.34263 \times D-0.21435 \times Q+0.60605 \times D^2-0.01638 \times Q^2$
5m堤防整備後	$0.77120+0.28376 \times D+0.03158 \times Q+0.50810 \times D^2-0.07279 \times Q^2$
4m堤防整備前	$0.7211+0.3027 \times D-0.4706 \times Q+0.5179 \times D^2$
4m堤防整備後	$0.50010+1.31477 \times D-0.52409 \times Q+0.11600 \times Q^2$

被害額算出の簡便のため、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。

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

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

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

ここで、 D_{house} ：住宅地被害額（百万円）、 D_{agri} ：農地被害額（百万円）、 $D_{h\&a}$ ：住宅地&農地の被害額（百万円）、 V ：氾濫量（ m^3 ）。

ただし、実務での実装においては氾濫シミュレーション^{たとえ9)}を適用し、被害額の算定精度を高めることが望まれる。

(2) 洪水条件の設定

洪水条件は三角ハイドログラフで表現する。実務においては実際のデータを参照する必要があるがここでは洪水は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。三角ハイドログラフと破堤後流量の関係から、氾濫ブロックの洪水氾濫量を求めることができる。これより、氾濫量に応じた被害額が算出される。

(3) 破堤確率の算出

a) 不確実性の定量化

本研究で扱う不確実性情報は流量と堤体内土質の内部摩擦角であるため、それぞれを年最大流量と河川堤防の土質試験結果から算出する。表-5に算出した不確実性情報を示す。流量は国土交通省水文水質データベース¹⁰⁾を参考に与え、内部摩擦角は木曽川上流河川事務所管轄内の河川での実調査を参考に与えた。

b) GUSLOPE¹¹⁾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は土質定数を与えた堤防に浸透流解析を行い、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は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。GUSLOPEに入力する堤体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¹²⁾に基づき、設定した。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とする）に使用される一般的な土質定数が示されていたため、今回のケーススタディ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-6、安定解析の結果（入力値：流量 Q 、内部摩擦角 D 、応答値：対象構造物の安全率 F_s ）を回帰分析することで得られる応答曲面を表-7に示す。表-7では強度の異なる二種類の堤防それぞれの整備前と整備後の応答曲面の4種類を示す。ただし、堤防の整備には第5章で後述するがドレーン整備を用いている。

c) モンテカルロシミュレーションによる信頼性解析

MCSにより、作成した応答曲面上に不確実性情報の組み合わせを分布させ、破堤確率を算出する。表-5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。

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

ここで、 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にした。以上より、本稿においても同様のモデル化誤差を採用し、0.1で与える。

5. 堤防強度を考慮した堤防整備の優先順位

前章で想定した氾濫原を対象に流域全体のリスクを考慮した堤防整備優先順位決定法のケーススタディを実施する。本章では、全ての氾濫ブロックの土地利用形態を住宅地で均一に設定し、流域内に異なる強度の堤防が混在する場合の流域評価を試みる。これにより、堤防の強度が優先順位に与える影響を分析する。また、各氾濫ブロックの堤防強度がそれぞれ小さい場合を想定することで堤防強度の小さい氾濫ブロックの流域における位置関係が堤防整備の優先順位に与える影響を分析する。

(1) 整備方法

堤防整備の優先順位を決定するため、整備後堤防の破堤確率をRSMによって算出する。本章ではドレーン工法¹⁴⁾で堤防を整備することとする。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-6に示すように、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、せん断強度を向上させることで、浸透に対する堤防の安全性を確保しようとするもので

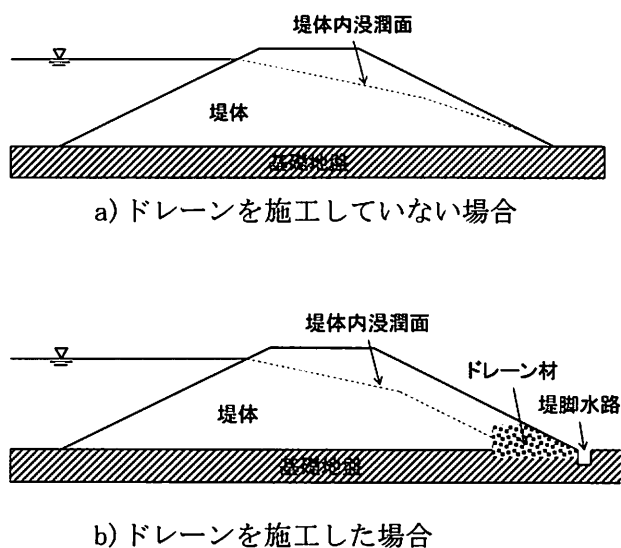


図-6 ドレーン工法の構造とその効果

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_v	0.1
単位体積重量 γ (kN/m ³)	20
粘着力 c (kPa)	0
内部摩擦角 ϕ (°)	42

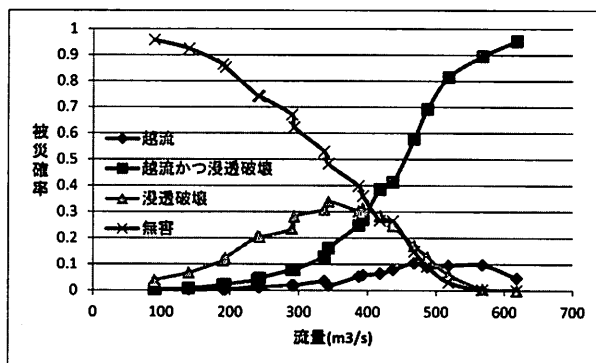


図-7 流量別破堤確率(5m堤防・整備前)

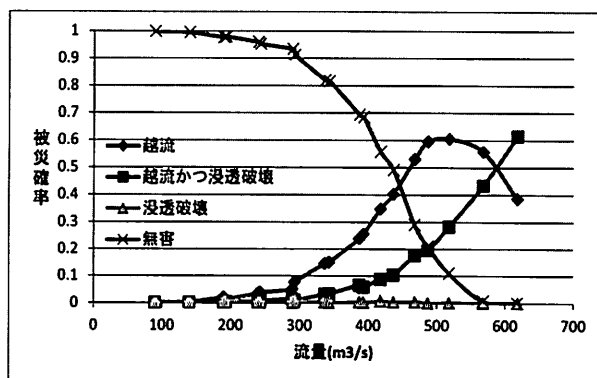


図-8 流量別破堤確率(5m堤防・整備後)

ある。ここで、RSMにおける斜面安定解析に必要なドレーン材の土質定数を表-8に示す。本章の堤防整備で用いるドレーン材は礫を参考に数値を与えた。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¹⁴⁾。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。以上の条件を満たす材料として、本研究ではドレーン材に礫を採用した。

(2) 破堤確率と洪水リスク

RSMにより、各堤防の整備前と整備後の破堤確率を算出した。それぞれを図-7、図-8、図-9、図-10に示す。なお、各流量における破堤確率はMCSで用いる流量の平均値を変化させることで算出している。いずれの場合においても流量の増加に伴い、無害の確率が減少し、被災する確率が増加している。図-7では、5m堤防の堤防高流量である400m³/s付近までは無害となる確率が最も生じやすいが、それ以上では越流かつ浸透破壊する確率が無害確率を上回っている。図-8は5m堤防にドレーン整備を施した結果である。図-7と比較すると、図-8は浸透破壊する確率および越流かつ浸透破壊する確率が小さくなっている。これより、ドレーン整備が堤防の強度を大きくすることがわかる。ただし、ドレーン整備は浸透破壊の確率を下げるため、相対的に越流する確率を上昇させる。また、破堤による流量低減も生じにくくなるため、流れてきた流量をそのまま下流に流すこととなり、下流域における洪水リスクの上昇につながる。図-9、図-10は4m堤防での算出結果であり、堤防高流量である287m³/s付近で無害確率と被災確率が逆転している。

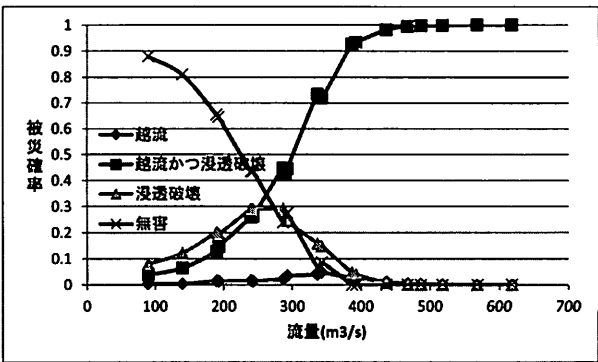


図-9 流量別破堤確率(4m堤防・整備前)

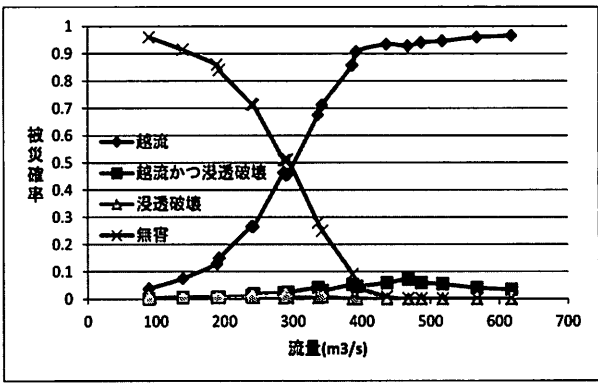


図-10 流量別破堤確率(4m堤防・整備後)

表-9 破堤パターン（各氾濫ブロックの堤防強度が等しく大きい場合）

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	0.141	12,964
無害	無害	無害	浸透破壊	無害	0.123	12,633
無害	浸透破壊	無害	無害	無害	0.102	7,879
無害	無害	無害	無害	無害	0.068	0
無害	無害	無害	無害	浸透破壊	0.059	6,982
無害	無害	無害	越流・浸透破壊	無害	0.058	11,270
無害	無害	無害	無害	越流・浸透破壊	0.051	9,926
浸透破壊	無害	無害	無害	無害	0.049	3,212

表-10 破堤パターン（氾濫ブロック1の堤防強度が小さい場合）

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	0.107	9,830
無害	無害	無害	浸透破壊	無害	0.093	9,578
無害	浸透破壊	無害	無害	無害	0.078	5,974
浸透破壊	無害	無害	無害	無害	0.077	4,235
越流・浸透破壊	無害	無害	無害	無害	0.058	7,708
無害	無害	無害	無害	無害	0.052	0
無害	無害	無害	無害	浸透破壊	0.045	5,279
無害	無害	無害	越流・浸透破壊	無害	0.044	8,545

表-11 破堤パターン（氾濫ブロック4の堤防強度が小さい場合）

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	無害	越流・浸透破壊	無害	0.260	36,236
無害	無害	浸透破壊	無害	無害	0.124	11,351
無害	浸透破壊	無害	無害	無害	0.078	5,973
無害	無害	無害	浸透破壊	無害	0.054	3,905
無害	無害	越流・浸透破壊	無害	無害	0.034	6,816
無害	浸透破壊	無害	浸透破壊	無害	0.030	3,893
浸透破壊	無害	無害	浸透破壊	無害	0.029	1,853
浸透破壊	無害	無害	浸透破壊	無害	0.026	3,302

算出した破堤確率を整理して破堤パターンを作成する。作成した破堤パターンを表-9、表-10、表-11に示す。表-9では各氾濫ブロックの堤防強度が等しく大きい場合、表-10では氾濫ブロック1の堤防強度が小さい場合、表-11では氾濫ブロック4の堤防強度が小さい場合の破堤パターンを示す。ただし、すべての破堤パターンの総数は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、 $4^5=1024$)あるため、一部抜粋し、生起確率が大きい順に示す。表-9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。第4章で設定した氾濫ブロックを一つ流下するたびに $50(\text{m}^3/\text{s})$ の流量増加により、上流域で破堤が生じなかった場合に氾濫ブロック3に流入する流量は $293(\text{m}^3/\text{s})$ であり、氾濫ブロック3に流入した時点では無害となる確率が最も高いことが図-7より確認できる。しかし、氾濫ブロック3で破堤すると氾濫ブロック3への浸水に伴う河川流量の低減が生じ、氾濫ブロック4、5で無害となる確率が大きくなるため、氾濫ブロック3で浸透破壊するパターンが最も生起しやすいという結果となった。表-10も氾濫ブロック3が浸透破壊するパターンが最も生起しやすい結果となった。しかし、表-9と比較すると、生起確率と洪水リスクが小さくなっていることが確認できる。これは、氾濫ブロック1で無害となる確率が小さくなったことに起因する。そのため、氾濫ブロック1で破堤するパターンが生起しやすくなっていることも確認できる。表-11では氾濫ブロック4で越流かつ浸透破壊するパターンが最も生起しやすいという結果となった。表-9と比較すると、最も生起しやすいパターンに変化が確認できる。このように、強度の異なる堤防を持つ氾濫ブロックの流域における位置関係によって破堤パターンおよび洪水リスクに変化が生じることが明らかになった。なお、氾濫ブロック2、3、5の堤防強度が小さい場合の破堤パターンも試算したが、紙面節約のため、省略する。それぞれの場合における破堤パターンの特徴を概説しておくと、いずれのケースにおいても堤防強度の小さい氾濫ブロックで破堤するパターンが最も生起しやすいことが確認できた。以上を整理すると、氾濫ブロック2、3、4、5の堤防強度が小さいケースでは堤防強度の小さい氾濫ブロックで破堤するパターンが最も生起しやすくなり、氾濫ブロック1の堤防強度が小さいケースでは堤防強度の大きい氾濫ブロックで破堤するパターンが最も生起しやすいという結果が得られた。これより、堤防強度の小さい氾濫ブロックが上流域に位置し、堤防強度の小さい氾濫ブロックで無害となる確率が大きいケースであれば、下流域に位置する堤防強度の大きい氾濫ブロックで破堤するパターンが生起しやすくなるといえる。

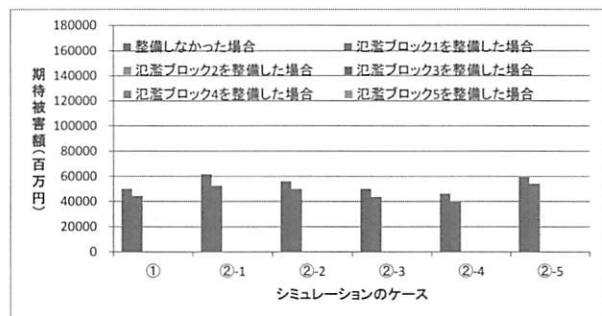


図-15 4期における堤防整備時の氾濫原全体の洪水リスク

表-12 各ケースにおける堤防整備の優先順位

ケース	整備の優先順位				
	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
①	5	4	3	2	1
②-1	5	4	3	2	1
②-2	5	4	3	2	1
②-3	5	4	2	3	1
②-4	5	4	3	1	2
②-5	5	4	3	2	1

表-13 土地利用の組み合わせ

土地利用の組み合わせ	氾濫ブロック				
	1	2	3	4	5
1	住宅地	住宅地	住宅地	住宅地	住宅地
2	農地	住宅地	住宅地	農地	住宅地
3	住宅地	農地	住宅地	住宅地	農地
4	農地	住宅地&農地	住宅地	農地	住宅地
5	農地	住宅地	住宅地&農地	農地	住宅地
6	農地	住宅地	住宅地	農地	住宅地&農地

表-14 破堤パターン（土地利用の組み合わせ2）

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	0.141	12,964
無害	無害	無害	浸透破壊	無害	0.123	15
無害	浸透破壊	無害	無害	無害	0.102	7,879
無害	無害	無害	無害	無害	0.068	0
無害	無害	無害	無害	浸透破壊	0.059	6,962
無害	無害	無害	越流	浸透破壊	0.058	14
無害	無害	無害	越流	越流・浸透破壊	0.051	9,926
浸透破壊	無害	無害	無害	無害	0.049	4

(3) 堤防整備の優先順位

各氾濫ブロックを整備した場合の破堤パターンを作成し、整備前の破堤パターンと比較することで堤防整備による流域全体の洪水リスクの変化を分析し、優先順位を決定する。ただし、堤防は巨大構造物であり、短期間ですべての区間を整備することは難しく、整備する区間をいくつかの工期に分けて整備することが一般的である。そこで、工期の進捗とともに変化する洪水リスクを図-11、図-12、図-13、図-14、図-15に示す。ここで、各図の横軸の①は各氾濫ブロックの堤防強度が等しく大きい場合、②は堤防強度の小さい氾濫ブロックが存在する場合を示している。なお、②の末尾の番号は堤防強度の低い氾濫ブロックNo.を示している。各図で示しているのは各氾濫ブロックを整備した場合の流域全体の洪水リスクであり、その期で最も洪水リスクが小さくなる氾濫ブロックを整備し、次の期に移る。これを繰り返すことで、整備の優先順位を決定する。整備の優先順位を表-12に示す。表-12より、下流より連続的に整備する方法が一般的であるのに対し、堤防強度が低い場所を下流より優先的に整備したほうがよい場合もあることが明らかとなった。その傾向として、堤防強度の低い氾濫ブロックが比較的下流域に存在している場合に整備の優先順位が変化することが推測される。これは、上流域で無害となる確率が高い、つまり、下流域に流れ込む流量が大きくなると、破堤した場合の洪水リスクも大きくなり、整備による期待被害軽減額が大きくなることが要因である。逆に、上流域に強度の低い堤防がある場合は破堤、もしくは越流等した場合においても流れ込む流量が下流域に比べて小さいため、整備の優先順位としては下流域からの整備のほうが上位となる結果となった。また、図-11の②-2、②-5で示すように整備を施すことで、整備前の洪水リスクを上回る場合もあることが確認できた。②-5では最下流に位置する氾濫ブロック5の堤防の強度が低いため、上流から整備を施すと氾濫ブロック5での被害を大きくすることが予想される。②-2は②-5と違い、強度の低い堤防の

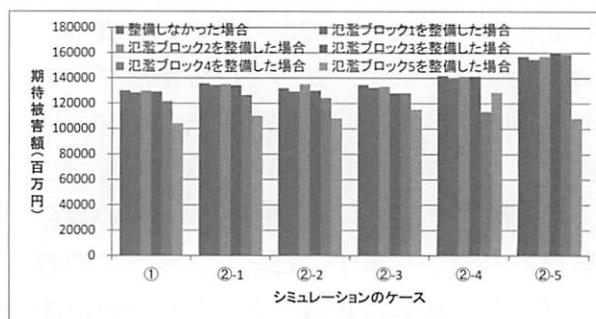


図-11 0期における堤防整備時の氾濫原全体の洪水リスク

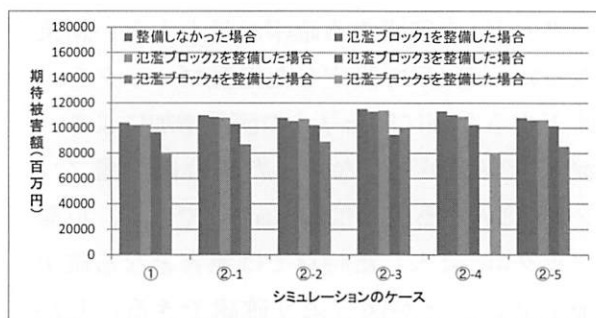


図-12 1期における堤防整備時の氾濫原全体の洪水リスク

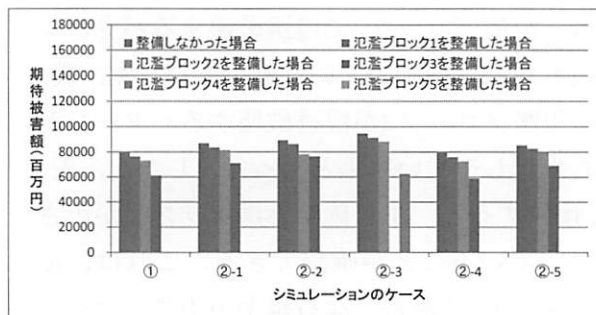


図-13 2期における堤防整備時の氾濫原全体の洪水リスク

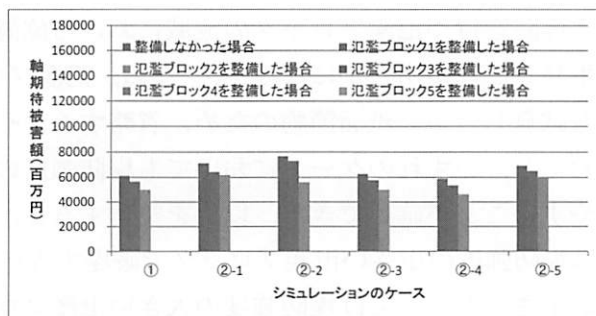


図-14 3期における堤防整備時の氾濫原全体の洪水リスク

位置が最下流の氾濫ブロックと異なるケースである。このとき、強度の低い堤防の整備を優先すると、流域全体で考えた場合、整備することでかえってリスクを増大させていることがわかる。これは、整備により下流への流量を増やし、洪水リスクを上昇させることに加えて、氾濫ブロック2の越流の確率も高いためであると考えられる。

6. 土地利用を考慮した堤防整備の優先順位

本章では第4章で設定した氾濫原を対象に流域全体のリスクを考慮した堤防整備優先順位決定法のケーススタディを実施する。ただし、本章は全ての氾濫ブロックの堤防を堤防強度の大きい堤防で均一に設定し、流域内に異なる土地利用形態の氾濫ブロックが混在することを想定する点が第5章と異なる。これにより、氾濫ブロックの土地利用形態が優先順位に与える影響を分析する。また、現行の下流から順に整備する方法と本稿で提案する流域全体の洪水リスクを考慮した堤防整備方法を比較することで、整備の順番が流域全体の洪水リスクに与える影響を分析する。なお、整備の方法は前章同様にドレーン工法によるものとする。

(1) 土地利用の組み合わせと洪水リスク

農地などの都市部と比較して資産額の小さい土地利用形態の氾濫ブロックの流域における位置関係が堤防整備の優先順位に与える影響を分析するため、本章のケーススタディでは6通りの土地利用の組み合わせを想定する。想定する土地利用の組み合わせを表-13に示す。ここで、氾濫ブロックの土地利用形態に変化が生じた場合の破堤パターンを示す。ただし、本章のケーススタディでは氾濫ブロックの土地利用による資産額の違いから洪水リスクに変化を確認できるが、堤防強度に差異はないため、破堤パターンの生起確率に変化はない。そのため、土地利用の組み合わせは6通り存在するがその中から1つを抽出した破堤パターンを示す。破堤パターンを表-14に示す。表-14は表-13で示す土地利用の組み合わせ2の場合の破堤パターンである。流域に存在する氾濫ブロックの土地利用形態が等しく住宅地であり、堤防強度も等しく大きい場合の破堤パターンを示した表-9と表-14を比較すると、表-14で示す破堤パター

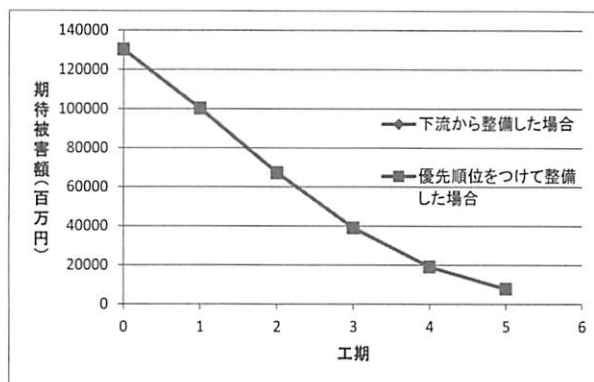


図-16 洪水リスクの推移
(土地利用の組み合わせ 1)

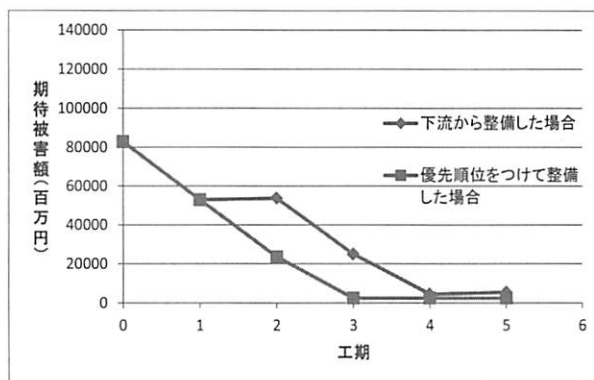


図-17 洪水リスクの推移
(土地利用の組み合わせ 2)

表-15 土地利用の組み合わせ別優先順位

土地利用の組み合わせ	優先順位				
	1	2	3	4	5
1	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地
2	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地		
3	氾濫ブロック4 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地	氾濫ブロック5 農地	
4	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地&農地		
5	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地&農地		
6	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック5 住宅地&農地	氾濫ブロック2 住宅地		

ンの洪水リスクが小さくなっていることが確認できる。

(2) 堤防整備の優先順位

設定した氾濫原において、6通りの土地利用の組み合わせが存在する場合の堤防整備の優先順位を決定する。堤防整備による工期ごとの流域全体の洪水リスクの推移を図-16と図-17、流域全体の洪水リスクを考慮した堤防整備方法によって決定した土地利用の組み合わせ別優先順位を表-15に示す。図-16、図-17は土地利用の組み合わせ1、2の場合に整備をしたときの工期ごとの洪水リスクの推移を示している。ただし、土地利用は6通りの組み合わせを想定しており、残りの5通りの組み合わせの場合に整備をしたときの推移は以下に示す土地利用の組み合わせ2の場合に整備したときと同様の特徴が確認できたため、省略する。

図-17より、流域全体の洪水リスクを考慮した整備方法は下流から順に整備する方法より効率的な整備であることが確認できる。ただし、流域全体の洪水リスクを考慮した整備方法は流域全体の洪水リスクが小さくなる順に整備する方法であるため、この結果は自明である。ここで、工期ごとの洪水リスクの差に着目する。工期2、3、4で下流から整備する方法よりも本稿で提案する優先順位をつけて整備する方法は洪水リスクが小さくなった。また、下流から順に整備する方法では工期4よりも工期5の方が洪水リスクが大きくなっている。すなわち、工期5の整備により、流域全体の洪水リスクが増加していることになる。これは、農地などの資産が住宅地と比較して小さい氾濫ブロックを整備することによる。工期5で整備した氾濫ブロック1で減少する洪水リスクと比べて、資産額の大きい住宅地で構成される下流域により大きな流量を流下させる確率が大きくなることで洪水リスクが大きくなったためである。これより、土地利用を考慮せずに下流から連続的に整備する方法は必ずしも流域全体の洪水リスクを減少させるとは限らない。ただし、図-16のように氾濫ブロックごとの土地利用に差がない場合、もしくは差をつけることができない場合においては本稿で提案する方法と下流から整備する方法に差は生じない。

表-16 土地利用の組み合わせ

土地利用の組み合わせ	氾濫ブロック				
	1	2	3	4	5
1	住宅地	住宅地	住宅地	住宅地	住宅地
2	農地	住宅地&農地	住宅地	住宅地	住宅地
3	農地	住宅地	住宅地	住宅地&農地	住宅地
4	住宅地	住宅地&農地	農地	住宅地	住宅地
5	住宅地	住宅地	住宅地	住宅地&農地	住宅地
6	住宅地	住宅地	住宅地	住宅地&農地	農地
7	住宅地	住宅地&農地	住宅地	住宅地	農地

表-17 氾濫ブロック1の堤防強度が小さい場合の土地利用の組み合わせ別堤防整備優先順位

土地利用の組み合わせ	優先順位				
	1	2	3	4	5
1	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地
2	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地&農地	
3	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地&農地	氾濫ブロック2 住宅地	
4	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地&農地	
5	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地&農地	
6	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地&農地	氾濫ブロック1 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地	氾濫ブロック5 農地
7	氾濫ブロック4 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地&農地	氾濫ブロック5 農地

表-18 氾濫ブロック3の堤防強度が小さい場合の土地利用の組み合わせ別堤防整備優先順位

土地利用の組み合わせ	優先順位				
	1	2	3	4	5
1	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地
2	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地&農地	
3	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地&農地	氾濫ブロック2 住宅地	
4	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地&農地	
5	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地&農地	
6	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地&農地	氾濫ブロック2 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地	氾濫ブロック5 農地
7	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地&農地	氾濫ブロック5 農地

表-19 氾濫ブロック5の堤防強度が小さい場合の土地利用の組み合わせ別堤防整備優先順位

土地利用の組み合わせ	優先順位				
	1	2	3	4	5
1	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地
2	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地&農地	
3	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地&農地	氾濫ブロック2 住宅地	
4	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地&農地	
5	氾濫ブロック5 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地&農地	氾濫ブロック1 住宅地	
6	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック4 住宅地&農地	氾濫ブロック2 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地	氾濫ブロック5 農地
7	氾濫ブロック4 住宅地	氾濫ブロック3 住宅地	氾濫ブロック1 住宅地	氾濫ブロック2 住宅地&農地	氾濫ブロック5 農地

表-15に示すように、流域全体の洪水リスクを考慮した整備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の氾濫ブロックは整備しない結果となった。堤防整備は、整備する氾濫ブロックだけを見れば洪水リスクを減少させる。その一方で、氾濫しなくなる確率を増大させるため、下流域に大きな流量を流下させる確率が大きくなる。以上の整理より、このような土地利用の分布の場合においては資産額の大きい氾濫ブロックを整備し、小さい地域は整備しないことで、流域全体の洪水リスクが最小となる。一方で、土地利用の組み合わせ6における整備優先順位に着目すると、資産額の小さい地域を大きい地域より優先的に整備することで流域全体の洪水リスクを小さくすることが確認できる。これは、資産額の大きい住宅地が比較的上流域に位置し、資産額が住宅地の半分である住宅地&農地が最下流に位置しているためである。これより、堤防整備は単純に土地利用による資産額の大小だけでなく、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。

7. 様々な条件下における堤防整備の優先順位

第5章で堤防強度の違い、第6章で土地利用の違いが河川堤防整備の優先順位に与える影響を分析した。本章では流域内に異なる土地利用形態を持つ氾濫ブロックが混在し、なおかつ、各氾濫ブロックの堤防強度が均一でない場合を想定したケーススタディを実施する。加えて、本章のケーススタディではドレーン整備以外の堤防整備方法も想定する。これにより、異なる土地利用形態や堤防強度をもつ氾濫ブロックの流域における位置関係および堤防整備に用いる工法が堤防整備の優先順位に与える影響を分析する。

(1) 整備方法

現在の堤防整備は現地の地形や予算などの多くの制約条件のもと、最も適した工法が採用されている。たとえば、拡大した住宅地によって堤防の拡幅が困難な場合には整備に必要な空間の少ないドレーン工法などが採用される。そこで、本章のケーススタディにおいても、堤防整備に用いる工法の違いが流域全体の洪水リスクに与える影響を分析し、実務において適切な工法を選択できるようにする必要がある。第5章、第6章では堤防整備に用いる工法を一律にドレーン整備としていたが、本章では堤防強度の小さい堤防の整備に堤防をかさ上げる工法と、堤防のかさ上げにドレーン整備を加える工法も代替案とする。したがって、堤防強度の小さい氾濫ブロックの整備はドレーン整備にかさ上げとかさ上げかつドレーン整備を加えた3通り存在することになる。本章ではドレーン整備を工法1、かさ上げを工法2、かさ上げにドレーン整備を加える工法を工法3として表記する。また、第6章では堤防をすべて5mで設定したが、本章では第5章のケーススタディと同様に4m堤防を堤防強度の小さい堤防として想定する。ただし、4m堤防をかさ上げたときは5m堤防になると設定する。そのため、かさ上げ後堤防の破堤確率は5m堤防をRSMによって算出した結果と同じである。試算においてはそれぞれのリスク軽減量を試算し、流域全体の洪水リスクを最も小さくする工法を採用し、そのうえで他の氾濫ブロックとの比較により堤防整備の優先順位を決定する。

(2) 試算のケース設定

本章でもケーススタディの対象は第3章で設定した氾濫原とする。5つの氾濫ブロックに土地利用、堤防強度を割り当てることで異なる土地利用形態や堤防強度を持つ氾濫ブロックの流域における位置

関係が堤防整備の優先順位に与える影響を分析する。本章で想定する流域の土地利用を表-16に示す。表-16では上流域、中流域、下流域のそれぞれに、都市部と比較して資産の小さい農地がある場合を想定した。また、それぞれの土地利用の組み合わせにくわえて、堤防強度の大小を考慮したケースを考える。本章では、①氾濫ブロック1の堤防強度が小さい場合、②氾濫ブロック3の堤防強度が小さい場合、③氾濫ブロック5の堤防強度が小さい場合の3ケースを試算する。つまり、本章で実施するケーススタディの総数は堤防強度が異なるケース（3通り）に土地利用の組み合わせ（7通り）を乗じた21通りである。

(3) 堤防整備の優先順位

設定した氾濫原におけるケーススタディの結果を表-17、表-18、表-19に示す。各表は氾濫ブロック1, 3, 5の堤防強度がそれぞれ小さい場合の土地利用の組み合わせ別堤防整備優先順位を示している。表-17を例に説明すると、土地利用の組み合わせ1の場合、整備優先順位は氾濫ブロック5, 4, 3, 1, 2の順に高くなっている。なお、土地利用の組み合わせ2, 3, 4, 5の場合は整備をしないほうがリスクを小さくするため、優先順位の第5位に整備する氾濫ブロックを示していない。表-17、表-18、表-19より、表-18の土地利用の組み合わせ3と7以外において堤防整備優先順位は、最下流に位置する住宅地が1位となった。これは、下流域に位置する氾濫ブロックは大きな流量が流入してくる確率が大きく、資産額の大きい住宅地で被災した場合に大きな被害となる確率が高いためである。ここで、表-18の土地利用の組み合わせ3のときの工法別洪水リスク

を図-18に示す。これより、整備後の流域の洪水リスクが工法によって異なることが確認できる。また、工法1のみに限定すれば、流域全体では、氾濫ブロック5の優先順位が最も高くなるが、工法3の代替案を含めれば氾濫ブロック3の優先順位が高くなる。一方で、表-17、表-18における土地利用の組み合わせ1の整備優先順位に着目すると、表-17では堤防強度の小さい氾濫ブロック1を整備したときの流域全体の洪水リスク減少量が下流に位置する氾濫ブロック2を整備したときより大きいことが確認できる。また、表-18では堤防強度の小さい氾濫ブロック3を整備したときの流域全体の洪水リスク減少分が下流に位置する氾濫ブロック4を整備したときより大きいことが確認できる。

表-18の土地利用の組み合わせ1における工法別洪水リスクを図-19に示す。図-19は最初の工期で氾濫ブロック5を整備した直後の工期の工法別洪水リスクを示している。工法別洪水リスクに着目すると、氾濫ブロック3に工法1もしくは工法3の整備をする場合は下流に位置する氾濫ブロック4の整備より流域全体のリスクを減少させることがわかる。しかし、工法1を施した場合の

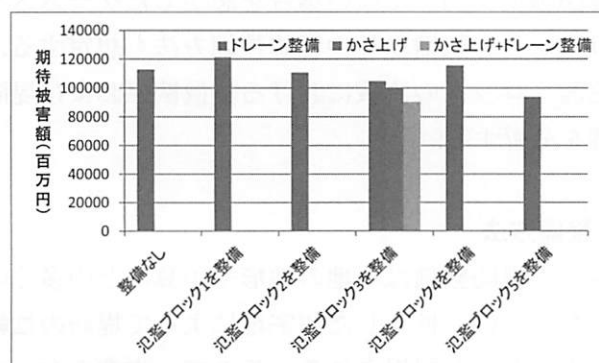


図-18 氾濫ブロック3の堤防強度が小さい場合における0期の工法別洪水リスク
(土地利用の組み合わせ3)

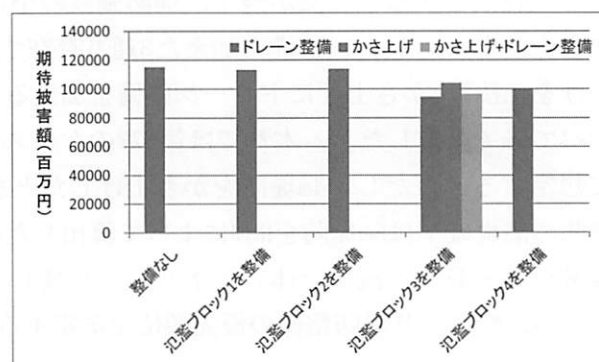


図-19 氾濫ブロック3の堤防強度が小さい場合における1期の工法別洪水リスク
(土地利用の組み合わせ1)

洪水リスクと工法3を施した場合の洪水リスクを比べると、工法1を施した場合の洪水リスクの方が小さい。これは、工法3の整備により氾濫ブロック3で氾濫しなくなる確率が増加し、下流域に大きな流量を流す確率が増加するため、下流域で発生する洪水リスクが大きくなるためである。このように、整備の対象地域にとっては洪水リスクを大きく下げる整備方法であっても流域全体でみると、必ずしも洪水リスクを最小にするとはいえない場合があることが明らかとなった。さらに、堤防強度の小さい氾濫ブロックに着目すると、表-17、表-18より、土地利用が農地の場合は整備しないほうが流域全体のリスクは小さくなる。ただし、表-19のように、最下流に位置する氾濫ブロック5の堤防強度が小さい場合は整備しても下流域の洪水リスクは増大しないため、土地利用が農地である場合も整備することで洪水リスクを減少させる。ここで、表-17に着目すると、土地利用の組み合わせが4, 5, 7の場合、下流域に位置する、堤防強度が大きく、資産の小さい氾濫ブロックより上流域に位置する、堤防強度が小さく、資産の大きい氾濫ブロック1を優先的に整備したほうが流域全体のリスクを減少させる。これは上流域に位置する氾濫ブロック1を整備した場合、下流域に大きな流量が流れることによるリスクの増大量が大きくなり、資産の大きい氾濫ブロック1を整備することによるリスクの減少量が大きいためである。これに対し、土地利用の組み合わせ6の場合の優先順位のように、堤防強度が小さく、資産が大きい氾濫ブロック1より、堤防強度が大きく、資産も氾濫ブロック1と比べて大きくない氾濫ブロック4を優先的に整備したほうが流域全体のリスクを減少させることが明らかとなった。これは、土地利用の組み合わせ6のとき、最下流に農地が位置し、氾濫ブロック4を整備したときの下流域の洪水リスク増大量が大きくなり、堤防強度の小さい氾濫ブロック1も最上流に位置し、氾濫ブロック1で被災する確率も小さいためである。また、表-18の土地利用の組み合わせ1, 2, 4, 5の場合は最下流に位置する氾濫ブロック5の整備優先順位が1位であるのに対し、土地利用の組み合わせ3, 6, 7の場合は氾濫ブロック5より上流に位置する氾濫ブロック3の整備優先順位が1位となっている。これは土地利用の組み合わせ3, 6, 7の場合、氾濫ブロック3より下流に資産の小さい氾濫ブロックが位置するため、氾濫ブロック3を整備したときに下流域の洪水リスクが大きく増加しなかったためである。以上より、河川堤防整備は地域によって異なる堤防強度や土地利用などの上下流のリスクバランスを考慮する必要がある。

8. おわりに

本研究では流域全体の洪水リスクを最も小さくする治水計画策定方法の構築を目指し、RSMを用いて、破堤確率と土地利用を考慮したリスク評価に基づく河川堤防整備の優先順位決定法を開発した。また、優先順位決定法をさまざまなケースで試算することで、土地利用や堤防整備工法などにより優先順位がどのように変化するかを考察することで、河川堤防整備において留意すべき点を明らかにした。本研究の成果を以下に示す。ケーススタディの結果、多くの場合において、下流域から整備することで流域のリスクを小さくすることが確認できた。しかし、流域の堤防強度や土地利用によっては下流域から整備するのではなく、堤防強度が小さい地域から優先的に整備したほうが洪水リスクを小さくする場合や資産が大きい地域から優先的に整備したほうが洪水リスクを小さくする場合もあることが確認できた。ただし、堤防強度の小さい地域が上流域に位置する場合や資産の大きい地域より下流に資産がある場合に堤防強度の小さい地域および資産の大きい地域から整備すると整備前より洪水リスクを増加させる可能性もある。また、堤防整備に用いる工法も整備優先順位に影響を与えることを明らかとした。整備の対象とする地域が中流域に位置し、下流域に資産が集中している場合、対象地域の

洪水リスクを最小にする工法であっても流域全体で考えると、最も洪水リスクを小さくする工法ではない場合もある。

今後は、開発した整備方法の実地域へ適用に向けて検討する。以下に課題点を整理する。本研究では、破堤した氾濫ブロックのみが被災しているとしている。しかし、上流域で破堤した場合、地形的関係により、氾濫した水が隣接した下流ブロックに流入することも考えられ、被害を過少に評価している場合がある。この課題については氾濫シミュレーション等を用いて被害地点を予測することで、被害額算出の精度向上が期待できる。また、本研究では、工期ごとに流域全体の洪水リスクを最も小さくさせる氾濫ブロックを探ることで河川堤防整備の優先順位を決定した。ただし、この方法では、最終的な堤防整備状況が最適でない可能性がある。最終期の流域における洪水リスクが最小となるように動的計画法を用いた求解法の構築が課題である。

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) 国土交通省河川局：治水経済調査マニュアル（案），2005.
- 2) 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.
- 3) 松尾稔，上野誠：破壊確率を用いた自然斜面の崩壊予知に関する研究，土木学会論文報告集，第 281 号，pp. 71，1979.
- 4) 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.
- 5) 瀧健太郎，北村祐二，中島智史，上坂昇治，山崎邦夫，松田哲裕，鶴飼絵美：破堤氾濫の危険度評価と減災対策に関する一考察，河川技術論文集，第 17 巻，2011.
- 6) 岡二三生，「土質力学」，2003-2008.
- 7) Box, G. E. P. and Draper, N. R.: *Empirical Model Building with Response Surface*, John Wiley, 1987.
- 8) 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.
- 9) 国土技術政策総合研究所水害研究室：NILIM2.0 都市域氾濫解析モデル (<http://www.nilim.go.jp/lab/rcg/newhp/seika.files/nilim/index.html>) (2015. 6. 30 アクセス)
- 10) 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/>) (2015. 6. 30 アクセス)
- 11) 株式会社シー・エス・ティー：(<http://www.jpccst.com/>) (2015. 6. 30 アクセス)
- 12) 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.
- 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.