

## 学位請求論文要旨

### 複雑な河道システムにおける洪水流・河床変動と堤防の破堤確率評価法に関する研究

Study on computation method of flood flows and bed variations in a complex river system  
and evaluation method for probability of levee failures during large scale floods

土木工学専攻 田端幸輔

Civil Engineering, Kosuke Tabata

#### 【研究の背景と目的】

近年、洪水外力の増大による甚大な水災害が、全国で毎年のように発生している状況にあり、流域が抱えるリスクを踏まえた有効な減災適応策が強く求められている。このためには、第一に、大規模洪水時の洪水流下・河床変動特性を説明できる水理解析モデル、第二に、破堤個所の推定技術の構築という2つの課題解決が求められている。平成23年7月に計画規模に相当する大規模洪水が発生し、様々な治水上の問題が顕在化した信濃川下流は、これら一連の検討を行うための我が国のモデル流域として位置付けられている。低平地を流れる信濃川下流は、洪水時に上流端の洗堰が全閉され、信濃川上流域からの流入流量はゼロとなり、主要支川である五十嵐川、刈谷田川が実質本川となる。また、中ノロ川の信濃川からの分派や合流、多地点からのポンプ排水、無堤部の存在等、他の河川には見られない複雑な河道システムを有している。

このため、第一の課題については、洪水外力に対する河道システム全体の様々な応答と相互作用を表現可能な洪水流・河床変動解析手法の構築が必要となる。これまで福岡は、平面形や横断形、河床変動や河川構造物等の影響は洪水時の水面形に現れると考え、観測水面形の時間変化を解として非定常洪水流解析と河床変動の一体解析を行うことにより、洪水流と河床変動を説明できる実用的な方法を提案している。また、内田・福岡は、浅水流方程式に、水深平均渦度方程式、水表面の運動方程式、二重水深積分した連続式、水深積分した鉛直方向運動方程式を導入することで、水平方向流速の鉛直分布や底面圧力、底面流速場を適切に評価することが可能な底面流速解析法を開発している。これまで、福岡らは、実河川の洪水流を対象に、底面流速解析法を適用し、観測水面形の時間変化に基づいた洪水流と河床変動の一体解析を行っており、潮位の影響を強く受ける河口部や、河川分派点周辺部等の洪水流伝播と河床変動特性を精度良く説明できることを示している。しかし、対象範囲は短い区間に限定されており、信濃川下流のように、低平地で分合流点や溢水氾濫箇所、湾曲部等の特徴的な区間で生じる流れが、河道システム全体の洪水流下や河床変動に影響を及ぼすような河道を対象とした検討はなされていない。また、これまでは河道の蛇行に伴う遠心力二次流による河床洗掘の再現が重要であったことから、静水圧の仮定により鉛直方向流速と底面圧力を無視した検討が多く見られるが、計画規模の大流量が信濃川に直角合流した五十嵐川合流点では、激しい水衝部、河岸侵食を生じさせるほど強い三次元流れを説明する鉛直方向流速と底面圧力を考慮した解析法が必要であり、また、実績洪水の再現計算が主体であったこれまでの解析法を、治水対策の実施が河道全体の洪水伝播に及ぼす影響評価にまで拡張することが必要とされている。

第二の課題について、これまで我が国では、洪水時の河道水位がH.W.L.を超えると破堤するものとして、堤防の破壊危険箇所が実務上評価されてきた。しかし、整備途上にある河川では、大洪水時に、堤防天端とH.W.L.の間の堤防余裕高部分を流れることを数多く経験しており、H.W.L.を超える水位に対し、堤防の破壊危険性を評価することは重要である。一般に、堤防がどのような土質でつくられているか不明なため、堤体浸透及び裏法滑りによる破壊の予測は困難であり、破堤危険箇所の推定技術を確立すること大きな意味を持つ。オランダ、イギリス、アメリカ等では、洪水時の破堤現象を確率的に捉えた信頼性解析を用いることで、破堤リスクを評価する手法が採用されているが、主に、想定する洪水継続時間が日本とは大きく異なることから、我が国の河川に諸外

国の推定手法を用いるのは適切でない。一方、国内においても、信頼性解析により堤防破壊確率を検討した研究が行われているが、得られた土質データ数に限りがあったことから、堤防の破壊危険確率を縦断的に捉えた検討がなされてこなかった。また、信頼性解析で用いる土質定数や設計法、得られる結果の解釈について、更なる検討が必要であることが指摘されている。このように、堤防の破壊確率を精度良く推定するには、多くの課題があるが、近年、堤防ボーリングデータが数多く集められて来たことから、筆者は、超過洪水による水害の危機管理対策を講じていく上で、これらの測定された堤防土質データを十分活用し、余裕高部分を流れる超過洪水時における長大堤防の浸透・裏法滑りによる破壊確率を堤防毎に縦断的に検討することが、極めて重要であると考え。

以上の2つの課題を踏まえ、本研究では、複雑な河道システムの洪水流・河床変動を説明できる数値解析モデルの構築と、大規模洪水時における堤防破壊確率を評価する手法を確立することを目的とする。はじめに、信濃川下流の平成23年7月洪水を対象とし、観測水面形の時間変化を用いた洪水流・河床変動解析手法により、複雑な河道システムを有する信濃川下流全体の洪水流及び河床変動を説明する。そして、ポンプ排水規制や無堤部の堤防建設等の治水対策が、信濃川下流域全体の洪水流伝播に及ぼす影響を評価し、今後の治水対策に向けた留意点、課題を明らかにする。次に、洪水流・河床変動解析で得られた堤防前面の水位ハイドログラフと、堤体ボーリング調査結果に基づいて設定した土質定数を用いた信頼性解析により、土堤防の堤体浸透、裏法滑りによる破壊確率縦断分布の算出方法を提示する。これを、信濃川下流平成23年7月洪水と、H.W.L.を超過する規模となった梯川平成25年7月洪水に適用し、大規模洪水時における長大堤防の破壊危険確率の推算を行い、堤体材料や堤体形状が異なる個所での破壊確率特性を検討する。そして、信濃川下流域を例とし、推算した破壊確率に基づいた水害リスク分布を検討するとともに、破壊確率を用いた水害リスク評価における今後の課題を示す。

## 【本論文の内容と成果】

本論文は6章で構成される。各章の内容と成果の概要は以下の通りである。

第1章「序論」では、研究の目的、既往研究の課題、および本研究の特徴を述べた。

第2章「複雑な河道システムを有する低平地河川の洪水流・河床変動解析」では、信濃川下流における平成23年7月洪水を対象に、河道システムの各構成部分が相互に影響しあうこと、それを表現するために各構成部分に支配的な流れスケールに着目した水理解析手法を用いて、観測水面形の時間変化に基づいた洪水流と河床変動の一体解析を行うことにより、複雑な河道システムにおける洪水流伝播と河床変動を説明できることを示した。

複雑な河道システムを有する信濃川下流では、縦断水面形や洪水流伝播を決定づける主流方向流速等の大規模な流れから、横断流速分布、湾曲部の二次流等の中規模の流れ、圧力鉛直分布に伴う小規模の水理現象が混在し、相互に影響を及ぼし合っている。このため、河口から上流端の洗堰までの長い区間で生じるさまざまなスケールの水理現象を説明できる数値解析モデルが必要となる。よって本研究では、水平方向流速の鉛直分布や底面流速場を評価できる、内田・福岡の底面流速解析法を用いるものとした。また、信濃川下流では、水位が密に観測されているため、観測水面形の時間変化を詳細に把握可能であり、洪水流下特性を検討する上で有益な情報が得られている。このため、河口から洗堰までの信濃川下流全体を対象とし、観測水面形に基づいた洪水流・河床変動の一体解析を行った。河床変動解析には、混合粒径の掃流砂量と浮遊砂について非定常性・非平衡性を考慮した。信濃川下流区間の洪水流量を決定づける複数支川からの流入量ハイドログラフは、本川で観測された水面形の時間変化を再現できるように与えた。また、信濃川と中ノ口川、信濃川と関屋分水路の各分派点における水門設置箇所では、流体が水門から受ける抗力を運動方程式に考慮し、水門の上下流の水面形を再現することで、相互に影響を及ぼし合う洪水伝播を表現した。こうして構築したモデルにより、平成23年7月洪水における観測流量ハイドログラフと、洪水後に観測された平均河床高縦断分布等を、工学的に十分な精度で説明できることを示した。

また、信濃川にほぼ直角に合流している右側支川の五十嵐川では、平成23年7月洪水時に計画規模を超える二

山波形の洪水が発生し、信濃川の左岸河岸水衝部において、大規模な河岸浸食を伴う局所洗掘・堆積が生じた。本研究では、信濃川・五十嵐川合流点において、静水圧の仮定を用いない底面流速解析法を適用し、鉛直流速と底面圧力を考慮することで、河川合流部で発達する三次元流れと河床変動の解析を行った。信濃川・五十嵐川合流部周辺では、刈谷田川合流点や、中ノロ川の分派点、溢水氾濫が生じる無堤部が近接しており、相互の流れ場に影響を及ぼし合う。これらの影響を考慮するため、信濃川と五十嵐川の流入境界条件には、信濃川下流全体を対象とした洪水流河床変動解析で得られた流量ハイドログラフを与えるものとした。また、合流部の局所的な三次元流れを解くため、解析メッシュは、信濃川下流全体を対象とした計算メッシュに比べて十分細かく設定した。解析の結果、信濃川に比べて五十嵐川の流量規模が卓越する第一波形において、信濃川の左岸河岸付近が水衝部となり、高水敷に乗り上げた流れが低水路へ落ち込む箇所では河岸が侵食されることを示した。一方、信濃川の流量規模が増大する第二波形目では、合流点下流部の低水路内の流速は、横断方向に概ね一様となって流れ、合流点直下の剥離域外縁に堆積していた土砂が若干であるが下流側に広がることとなった。以上より、静水圧の仮定を用いない底面流速解析法により、大流量の支川が、本川にほぼ直角に合流する箇所が生じる三次元流れと、これに起因する局所洗掘・堆積の発生機構をかなりの程度説明できることを示した。

第3章「信濃川下流部の治水機能評価と今後の治水対策の方向性」では、超過洪水時におけるポンプ排水機場からの内水排水量の規制や、無堤区間における大規模な溢水氾濫が、信濃川下流全体の洪水伝播に及ぼす影響について分析し、信濃川下流の今後の治水対策に向けた留意点、課題を示した。

信濃川下流域の治水安全度を向上させるための合理的な河川整備の方向性を示していくためには、ポンプ場からの内水排水や無堤区間の溢水氾濫が、洪水流下に及ぼす影響を分析し、信濃川下流域の有する治水のポテンシャルを評価していく必要がある。本章では、信濃川下流区間全体を対象に構築した洪水流・河床変動解析モデルを用い、ポンプ排水規制、無堤部の堤防建設等の治水対策が、信濃川下流全体の洪水伝播に及ぼす影響について詳細に解析した。中ノロ川におけるポンプ運転調整が実施されなかった場合を想定した解析の結果、中ノロ川下流部における流下能力ネック部の水位が、ほぼ堤防天端に達し、場所によっては越流することを示した。また、平成23年7月洪水では、無堤区間である西野地区での氾濫による大規模貯留が、下流側の水位・流量ピークの発生を大幅に遅らせていたことを明らかにした。以上より、中ノロ川の水位は、多地点からのポンプ排水による影響を強く受けており、緊急時のポンプ運転調整は、河道水位を低下させることに有効であることを示した。また、今後、ネック部の流下能力を確保していくためには、河道掘削に加えて、無堤区間の溢水氾濫による大規模な貯留機能の有効活用策を検討していくことが重要であることを明らかにし、信濃川下流部の効率的な改修のための方向性を考察、提示した。

第4章「長大な土堤防の浸透・裏法滑りによる破壊危険確率の算定法」では、洪水流・河床変動解析で得られる土堤防前面の水位ハイドログラフと、堤体ボーリング調査結果に基づいて設定した土質定数を用いる信頼性解析により、土堤防の破壊確率縦断分布を算出する方法を提示した。

本章では、水理解析により算出した堤防前面の水位ハイドログラフの縦断分布を入力条件とし、土質定数をパラメータとした信頼性解析によって、堤防の浸透と裏法滑りによる破壊確率を算出する方法を提示する。堤体内の非定常浸透流の自由水面は、不透水地盤上に設置された盛土内の非定常水平浸透流の近似解であり、洪水継続時間と河道水位の時間変化を考慮することができる内田の式により解析する。堤体内の浸潤線が、裏法面のいずれかの地点に達した場合に「浸透破壊」とし、浸潤線の上昇により円弧滑りの安全率が1を下回った場合に「裏法滑り破壊」と判定した。本研究では、堤体内の土質定数（透水係数、粘着力、内部摩擦角）を代表値で扱い、各定数は平均値の周りをばらついているものと仮定し、モンテカルロ法によって抽出した定数を、内田の式と円弧滑り安全率の式に入力する。この操作を十分な回数実施し、破壊判定となった回数を総試行回数で除すること

で、破壊確率を算出する。

第5章「大規模洪水時における実堤防の浸透・裏法滑りによる破壊危険確率の推算と水害リスクの検討」では、4章で提示した手法を、信濃川下流平成23年7月洪水と、H.W.L.を超過する規模となった梯川平成25年7月洪水に適用し、堤防の破壊危険確率の推算を行い、堤体材料や堤体形状が異なる個所での破堤確率特性を検討した。また、推算した破堤確率を用いて、信濃川下流域における水害リスクの検討を行った。

堤体前面の水位ハイドログラフには、洪水流と河床変動の一体解析による解析値を与えた。堤体の透水係数の平均値は、全国の一級河川の堤防ボーリング調査結果の公表値（国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室HP）から、堤体部分に相当するデータから設定した。しかし、粘着力 $c$ と内部摩擦角 $\phi$ の公表値は、縦断方向のばらつきが大きく、土質特性に応じた値になっていなかったことから、これを用いず、石原らの堤体内の土質区分と $N$ 値に応じた $c$ と $\phi$ の組み合わせを用いた。また、各定数のばらつきは、全国の一級河川の堤防ボーリング調査結果から集計した変動係数（標準偏差／平均値）をそれぞれ与えた。

信濃川下流と梯川の堤防破壊確率の縦断分布を算出した結果、縦断的に透水係数が大きい箇所において、浸透破壊確率が相対的に大きく算出されることが明らかとなった。また、浸透が生じやすい箇所では、裏法滑りの発生確率も大きくなる傾向が見られ、本手法により、浸潤線の上昇が滑り破壊に対しても危険になることが表現できることを示した。更に、流量規模を実績洪水の1.2倍、1.5倍にまで増大させ、余裕高内を洪水が流れる場合、破壊確率は全体的に高くなり、特に、堤体に砂分を多く含む区間では、細粒分を多く含む区間に比べて増加率が大きくなることを示した。また、浸潤線が裏法に到達した時には、既に法先部分が飽和状態になり、浸出面が生じていると考え、裏法面における浸出点出現頻度を鉛直下向きに積分することで、破壊確率の鉛直分布を表現した。この結果、破壊確率の鉛直分布は、法先部分で最も大きくなる結果となることから、本検討手法は、浸透流による法先部分の崩壊をきっかけとする進行性破壊の特徴を表現できることを示した。

次に、堤防前面の水深及び洪水継続時間の無次元量に対する破堤確率の変化特性を算出した。これにより、堤体材料や堤体形状が異なる個所での破堤確率特性の比較が可能となり、堤体土質特性及び堤防幅によって、破堤確率特性に顕著な差が現れることを示した。更に、信濃川下流域を対象に、流量規模を変化させて推算した堤防破壊確率、流量生起確率、氾濫ブロック毎の被災者数（ここでは氾濫ブロック内人口）に基づいて、水害リスクを検討した。これにより、堤防破壊危険箇所と周辺人口を踏まえた、流域全体の水害リスク分布の特徴を示すとともに、破堤確率を用いた水害リスク評価のために今後検討すべき課題を示した。

第6章「結論」では、本研究で得られた成果を総括し、今後の課題について述べた。

本研究では、信濃川下流域全体を対象に、複雑な河道システムの各部分が相互に作用する影響と、それを表現するために必要な流れスケールに着目した水理解析手法を用いて、観測水面形の時間変化に基づいた洪水流・河床変動解析モデルを構築した。そして、無堤部の溢水氾濫と内水ポンプ排水の影響を詳細に検討し、これらの信濃川下流域の治水に果たす重要性を明らかにした。更に、水理解析モデルと堤体ボーリング調査結果に基づいた信頼性解析により、堤防の破壊確率縦断分布を算出する方法を提示した。本手法を、近年大出水を経験した信濃川下流と梯川に適用し、大規模洪水時の堤防破壊確率を推算した。また、信濃川下流域において、推算した破堤確率に基づいた水害リスクの検討を行うとともに、今後の減災適応策検討に向けた課題を示した。

今後は、無堤部の溢水氾濫や河道内貯留を活かし、且つ、堤防破壊確率を軽減させられる合理的な河道線形・縦横断面形と、大規模洪水時の危機管理としての内水ポンプ、水門操作のあり方について検討していく。また、本研究で提示した堤防破壊確率算定法を多くの河川に適用し、検討事例を増やし、河道特性や堤体形状、堤体材料と破壊確率の関係を調べることで、破壊確率の値が持つ工学的意味を明らかにし、更に、流域の自然、社会・経済特性を考慮した水害リスクの評価に、破壊確率を用いる方法を検討する。