

## 論文の内容の要旨

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、資産が集中する低平地河川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、複雑な河道システムを有する低平地河川における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。

本研究は、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している。以下に、各章で示された主な内容について述べる。

第1章では、研究の目的、既往研究の課題、および本研究の特徴が述べられている。

第2章では、複数支川の合流や、本川から分派・合流する中ノロ川、多点からのポンプ排水、無堤部における溢水氾濫等、複雑な河道システムを有する信濃川下流部における平成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、洪水流伝播と河床変動を説明できることを示している。

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。本研究では、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するため、水平方向流速の鉛直分布や底面流速場を評価できる、底面流速解析法を用いている。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モデルを構築している。これにより、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ている。

第3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応用し、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、課題を示している。

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を行った結果、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ている。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ている。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

している。また、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、提示している。

第4章では、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、土堤防の浸透・裏法滑りによる破壊確率縦断分布を算出する方法を提示している。

堤体内の非定常浸透流の自由水面は、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している。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」と判定している。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章では、第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ている。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ている。

近年、全国の一級河川の堤防ボーリング調査結果が公表されたことから（国土交通省国土技術政策総合研究所河川研究室 HP）、これを十分に活用し、信濃川下流と梯川における堤体内の土質及び透水係数の平均値を設定している。粘着力  $c$  と内部摩擦角  $\phi$  については、石原らが提案している、堤体内土質区分と  $N$  値に応じた  $c$  と  $\phi$  の組み合わせに基づいて設定している。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）をそれぞれ与えている。

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なり、このような箇所では、裏法滑りの発生確率も同様に大きくなることを示している。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ている。また、浸透による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り、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ている。これらの推算結果を踏まえ、堤体材料や堤体形状が異なる個所における余裕高部分の破壊確率が、河道水位変化や洪水継続時間によって変化することを示している。更に、信濃川下流域を対象に、流域水害リスク分布が検討され、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ている。

第6章では、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ている。

## 論文審査の結果の要旨

本論文の主要な成果は、複雑な河道システムを有する信濃川下流部の洪水伝播機構とそれに伴う河床変動を適切に説明できる数値解析モデルを構築し、これを応用して治水対策の効果を定量的に明らかにし、今後の治水の方向性を示したこと（2章、3章）、これまでは堤防の設計上、洪水流の水位が計画高水位（H.W.L.）を超えると破堤すると仮定されてきたことに伴う課題に対し、H.W.L.を超える大規模洪水時における堤防の信頼度を、「破壊確率」によって定量化し、これを堤防延長に亘って算定することで、長大な土堤防において破壊危険確率の高い箇所を、工学的に捉えることを可能にしたこと（4章、5章）である。ここでは、これら2つの成果を中心に審査結果を述べる。

### (1) 複雑な河道システムを有する信濃川下流区間の洪水流・河床変動解析

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合うこと、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新しい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、延長の大きい複雑な河道システム場における洪水伝播機構とそれに伴う河床変動を解明し、適切に説明している。更に、構築したモデルを応用し、H.W.L.を超える大規模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を定量的に評価し、実務に適用できる方式で示し、信濃川下流部の今後の治水対策に向けた留意点を示している。

### (2) 大規模洪水時の長大な土堤防の破壊危険確率算定法の提案と実堤防の破壊危険確率の推算

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、近年、数多く集められて来た堤体ボーリング調査データ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、これまで取り扱えなかった土堤防の浸透及び裏法滑りに対する破壊危険確率を縦断的に算出する方法を提示している。そして、この手法を、近年大規模出水を経験した信濃川下流と梯川に適用し、堤体材料や堤体形状が異なる個所における堤防余裕高部分（H.W.L.から堤防天端までの間）を洪水が流れるときの破壊確率が、河道水位変化や洪水継続時間によって著しく変化することを指摘し、解明している。更に、信濃川下流域を対象に、種々の規模の洪水に対する堤防の破壊危険確率から流域水害リスク分布を求め、その利用方法や今後の検討課題、方向性を示している。

以上、本論文では、複雑な河道システムを持つ信濃川下流部を流下する洪水流と河床変動の特性を新しい解析手法を用いて明らかにすると共に、今後の信濃川下流部の治水対策の方向性について重要な知見を得ている。更に、治水の懸案事項であった超過洪水時における土堤防の破壊危険確率の縦断分布の算定を可能にしている。これより、今後、河川における超過洪水による氾濫の危険性を予測し、また破堤氾濫した場合の水害に対する適応策を検討する上で、極めて意義のある予測手法を提案している。

これらの成果は学術上、河川工学上、重要な貢献を与えている。よって、本論文は、博士（工学）論文として価値があるものと認める。

/

（中央大学論文審査報告書）