

学位請求論文要旨

十分発達した河口砂州の洪水流による拡幅機構と開口幅に関する研究

Study on the flushing mechanism of well-developed river mouth sandbar due to flood flows

都市環境学専攻 立山政樹

Civil and Environmental Engineering, Masaki Tateyama

【研究の背景と目的】

河口は河川と海の接続部である。河口周辺では、河川流・海浜流・淡水と塩水の密度流・波浪が重なり合い複雑な流れ場となる。河口砂州は、河川流による浸食作用と波浪や海浜流による漂砂の堆積作用から形成される。大きく発達した河口での砂州は河川幅を狭め、河道内への塩水遡上を抑制する。一方で、航路の縮小や開口部流速の増大を招き、河川利用上の支障となる。河川流量の少ない中・小河川では、発達した河口砂州が河口を完全に閉塞し、魚類の遡上・降河を阻害する場合もある。また、洪水時には、発達した河口砂州が河道内の水位を高め、堤防からの越水や、支川からの排水を困難にする等の深刻な問題を引き起こす恐れがある。このように、河口砂州の発達状況により、様々な問題が発生することから、洪水流による河口砂州の拡幅機構を定量的に明らかにし、河口砂州の維持管理技術に資することは重要な治水課題の一つである。

従来、洪水流による河口砂州の拡幅と開口幅については、平面二次元解析により検討されてきた。しかし、縦横断的に大きな斜面勾配を有する河口砂州上において、平面二次元解析では底面付近の流れを適切に解析できないことから、砂州の崩落過程をモデル化し、開口幅の拡大を計算することが一般的であった。これに対し本研究では、縦横断的に大きな斜面勾配を有する河口砂州底面付近の流れと流砂運動に注目し、斜面勾配の影響を適切に考慮、定式化し、さらに、砂州の拡幅過程の影響が現れている河道観測水面形の時間変化に一致するように、洪水流と河床変動を計算することにより、河口砂州の拡幅過程と最終的な開口幅を砂州の崩落過程をモデル化せずとも説明できるものと考えた。

対象とした阿賀野川は、基準点の馬下(34.6km)において計画高水流量 13,000m³/s とされる国内有数の大河川である。河口には、日本海の厳しい波浪や飛砂の影響を受け、両岸に細砂からなる河口砂州が大きく発達している。観測史上最大流量(馬下地点で約 10,000 m³/s)を記録した平成 23 年 7 月洪水時には、河口砂州が大きく拡幅し、開口幅が拡大した。この洪水時には、河口域において縦断的に密に水位計が設置されていたため、詳細な洪水水面形の時系列データが得られた。これに加えて、CCTV カメラによる洪水中の河口砂州変形の様子が撮影され、さらに洪水前後に実施された詳細な測量により河道及び河口砂州の地形変形が計測される等、貴重な基礎データが得られた。

本研究では、まず、十分発達した河口砂州周辺の流れの三次元性と縦横断的に大きな斜面勾配の効果を、砂州上の流れと流砂運動の解析に取り込むことで砂州の拡幅過程を定式化する。そして、細砂から構成される河口砂州の大規模な拡幅により開口幅が拡大した平成 23 年 7 月阿賀野川洪水を対象とし、洪水時の観測水面形の時間変化に基づいて、河口砂州の拡幅プロセスを明らかにするとともに、最終的な開口幅を算定し、現地観測結果を適切に説明できる河口砂州の拡幅モデルを構築することを目的としている。

【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、研究の背景、目的、本研究の構成を示す。

第2章「洪水流による河口砂州拡幅機構に関する既往研究」では、洪水流による河口砂州の拡幅に関する既往研究を概観し、本研究の位置付けを示す。

河口砂州に関する既往研究では、平面二次元洪水流・河床変動解析に砂州の崩落モデルを組み込んだ解析法により、砂州の拡幅過程が計算されている。しかし、縦横断的に大きな斜面勾配を有する河口砂州上において、平面二次解析では底面付近の流れと流砂運動を適切に考慮できないことから、砂州の崩落過程のモデル化なしには開口幅の拡大を説明出来ない点に課題があることを示し、河口砂州上の底面付近の流れと流砂運動を適切に計算する新たな解析法の必要性を述べている。

第3章「十分発達した河口砂州を有する阿賀野川河口域における平成23年7月阿賀野川洪水流と河口砂州の変形観測」では、まず、阿賀野川の概要及び十分発達した河口砂州形状の特徴とその経年変化を示す。次に、既往最大洪水である平成23年7月阿賀野川洪水における詳細な観測結果から、河口砂州がどのように拡幅し開口幅が拡大したかを明らかにし、最終開口幅を解析するために重要となる点を整理する。

阿賀野川の河口では、昭和40年頃から両岸に砂州が形成されるようになり、河口砂州上流河道の幅は約1,000mであるのに対し、河口では砂州により川幅が200m程度まで狭められている。濡筋部の河床高と河口砂州の比高差は10m以上あり、河口砂州の前縁部の斜面勾配は約1/5にもなる。近年、河口砂州形状が経年的に変化し、河口砂州は徐々に河川上流側に移動している。このため、河口砂州の変形移動に伴い波浪が直接河岸に衝突するようになり、河口域の護岸被災が生じるようになってきている。阿賀野川では、概ね $6,000\text{m}^3/\text{s}$ 以上の出水が生じると、河口砂州が大きく開口することが分かっているが、どのようなプロセスを経て最終開口幅が形成されるかは明らかでない。

本研究では、阿賀野川河口砂州の洪水時の拡幅プロセスを明らかにするため、国土交通省北陸地方整備局阿賀野川河川事務所と共同で大規模な観測体制を整備し洪水流観測を行った。洪水時の河口砂州の拡幅過程は、その上下流河道の水面形の時間変化に明確に現れることから、河口から3.4km付近までの区間に水位計を密な縦断間隔で設置し、洪水時の水面形時系列を詳細に観測できるようにした。洪水時の河口砂州の変形を把握するため、CCTVカメラによる洪水時の河口砂州拡幅の様子を撮影した。また、洪水中及び洪水前後で河口砂州の航空写真撮影が行われた。河口砂州周辺の地形や河床材料を解析に適切に取り込むため、河口周辺ではマルチビーム測量による3次元測量が行われ、河床材料も詳細に調査された。以上のような観測体制を整えた状況において、平成23年7月新潟県と福島県只見地方に被害をもたらした記録的な豪雨（平成23年7月新潟・福島豪雨）が生じた。

平成23年7月阿賀野川洪水では、横越地点のピーク流量は既往最大となる約 $11,000\text{m}^3/\text{s}$ に達した。洪水前後の横断測量結果から、河口砂州の開口幅は0.2km断面において約200mから約550mまで拡大した。CCTVカメラの映像分析から、大きな斜面勾配を有する河口砂州の上流側前縁部を洪水流が越流するとともに拡幅が生じ始め、洪水ピークまでの間に急激に開口幅が拡大すること、一方で洪水減水期における拡幅量は相対的に小さいことを明らかにした。このことから、河口砂州の前縁部を越流する流れと流砂運動を精度良く解析することが、砂州の拡幅過程を計算するために重要であることを明らかにした。

第4章「十分発達した河口砂州の洪水流による拡幅機構の解析モデルの構築」では、第3章の観測結果から、十分発達した河口砂州の洪水流による拡幅過程を説明するには、縦横断的に大きな斜面勾配を有する河口砂州前縁部を越流する流れと流砂運動を適切に計算することが重要であることが明らかになったため、これらを考慮した流れと流砂運動を定式化し解析モデルを構築する。

十分発達した河口砂州は、洪水流の通水断面積を狭め、河口砂州を挟む上下流で大きな水位差を引き起こすとともに、流線を大きく曲げるため、河口砂州周辺では三次元性の強い加速流れとなる。河口砂州を越流する流れは、流量の増大と共に砂州の洗掘範囲を縦横断方向に広げ河道の開口幅を拡大する。この点に着目し、河口砂州周辺の流れの三次元性と縦横断的に大きな斜面勾配が砂州上の流れと流砂運動に及ぼす効果を解析に取り込み、洪水流による河口砂州の拡幅過程を定式化し、モデル化した点に本研究の特徴がある。

本研究では、河口部周辺の三次元的な流れ構造は、水深スケールの渦運動に規定されること、河床変動解析に重要な底面流速が、水深積分した渦度の定義式により、水深平均渦度と水表面流速、水深平均鉛直方向流速から計算できることに着目し、解析モデルを構築した。具体的には、水深積分した渦度方程式と水表面における運動方程式を水深積分した連続式・運動方程式と連立して解析することで斜面上の底面付近の流速を適切に計算し、これを用いて底面せん断応力を評価する。これらにより、洪水時に三次元性の強い加速流が生じる阿賀野川河口砂州周辺において、砂州斜面上の底面付近の流れの適切な計算を可能にする。また、流砂運動の解析では、斜面上の流れから評価される底面せん断応力と斜面上の砂粒子に作用する重力の影響を考慮することで、斜面に沿った掃流砂量式、斜面勾配を考慮した流砂の連続式を導出した。阿賀野川河口砂州は、細砂で構成されることから河床変動解析には掃流砂の他に浮遊砂の三次元運動を考慮する必要がある。すなわち、河口砂州周辺流れの解析から得られた三次元流速場を用いて底面付近の浮遊砂濃度を精度良く求め、これと浮遊砂濃度の三次元移流拡散方程式より洪水流れと流砂運動を一体的に解析した。

第5章「平成23年7月阿賀野川洪水による河口砂州の拡幅機構と最終開口幅の検討」では、河口砂州の大規模な拡幅に伴い開口幅が拡大した平成23年7月阿賀野川洪水の観測水面形の時系列データに、第4章で構築した十分発達した河口砂州の洪水流による拡幅機構の解析法（以下、本解析法と呼ぶ）を適用し、本解析法が阿賀野川河口砂州の拡幅機構と最終開口幅の決定に有効であることを示す。

解析区間は、横越水位・流量観測所（13.5km）から河口沖2.5km地点までとし、平成23年7月洪水時に観測された水面形の時間変化を説明するように洪水流と河床変動を解析した。解析の初期地形については、河道内はマルチビーム測量による3次元測量データを用い、水面上の砂州の初期地形は定期横断測量結果から航空写真を参考に補間して作成した。解析メッシュは、河口砂州の形状を詳細に取り込むために10m四方の格子形状とした。河床材料粒度は、河道区間の平均粒径として粒径0.5mmを河床に与え、一方、河口砂州は波浪や漂砂で運ばれてきた細かい材料で形成されるため、T.P.-1.0m以上では粒径0.2mmの細砂を与えた。

まず、本解析法を用い、観測水面形の時間変化を説明するように洪水流と河床変動解析を行った結果から、阿賀野川河口砂州の拡幅過程を考察する。洪水流量が比較的小さく河口砂州を越流しない時間帯では、河道中央部に位置する河口砂州の開口部に流れが集中し、河道の河床低下が進行する。その後、河口砂州の上流側前縁部で砂州を越流する流れが生じると砂州の拡幅が始まる。さらに洪水流量ピークまでは、河口砂州が洗掘を受けて砂州の拡幅を急激に進行する。この拡幅過程は、第3章で示したCCTVカメラの映像分析による砂州の拡幅過程とほぼ一致することから、高い精度の解析結果が得られている。河口砂州の拡幅の進行に伴い、砂州上の土砂は河道中央に向かう底面付近の流れによって輸送され、洗掘を受けた河道中央部を埋め戻す。洪水後の本解析結果は、

河口砂州上の測量断面である 0.2km における洪水後に観測された砂州の拡幅量や河道の中央部の埋戻し量をほぼ説明出来ている。このことから、本解析法は、越流流れにより河口砂州の前縁部が洗掘され、その土砂が河道中央部に輸送され埋め戻されながら砂州が拡幅していく機構を説明出来ている。阿賀野川河口砂州は細砂で構成されることから、河口砂州を越流する流れにより細砂が大量に巻き上げられ、河口砂州の上流端 0.2km 付近から浮遊砂濃度が下流に向かって急激に増大する。このため、河口砂州の拡幅に対して、浮遊砂移動の影響が大きいことが分かる。河口砂州周辺で巻き上げられた浮遊砂の多くは、海域のテラス状の地形を有する-0.5km~-1.0km 付近に沈降・堆積し、砂州から流送された浮遊砂が河口テラスを成長させることが明らかとなった。

次に、本解析法と従来法である斜面勾配の効果を考慮しない方法の計算結果を比較した。洪水流が河口砂州を越流しない時間帯では、本解析法と従来法の河口砂州の拡幅状況に殆ど差が見られなかった。しかし、流量が増加し大きな斜面勾配を有する河口砂州の前縁部で越流が始まると、従来法に比べて本解析は河口砂州の前縁部の洗掘量、砂州前縁部の下流への移動量を増大させる結果となった。このことから、洪水流による河口砂州の拡幅過程を解析するためには、縦横断的に大きな斜面勾配の効果を砂州上の底面付近の流れと流砂運動の解析に適切に取り込むことが重要であることが明らかとなった。

以上より、本解析法を用いて、各時間の観測水面形と一致するように流れと河床変動を計算することで、砂州の崩落過程をモデル化しなくとも洪水ハイドログラフによる河口砂州の拡幅のプロセスと最終的な開口幅の決定機構を適切に説明できることを示した。

第 6 章「結論」では、本研究で得られた成果を総括し、今後の研究課題を示す。

本研究では、十分発達した河口砂州周辺の流れの三次元性と縦横断的に大きな斜面勾配の効果を砂州上の流れと流砂運動の解析に取り込み定式化することで、河口砂州の拡幅過程をモデル化した。この解析モデルを細砂からなる河口砂州の大規模な開口が生じた平成 23 年 7 月阿賀野川洪水に適用し、観測水面形の時間変化に基づいて、洪水流と河床変動を計算することにより、河岸浸食崩落モデルを導入せずとも河口砂州の拡幅過程を表現し、最大開口幅に達する機構を力学的に説明出来ることを示した。

今後は、河口砂州背後域への浮遊砂の輸送・堆積機構、河口砂州に対する河川水の浸透と洪水越流の複合した外力が河口砂州の拡幅機構に及ぼす影響、河口の州が礫から構成される場合と砂から構成される場合の拡幅機構の違い等の研究が残された課題である。