

学位請求論文要旨

河口区間および本・支川分流区間を含む河道の河床変動予測技術に関する研究 Study on Bed Variations in the Areas of the River Mouth and Branched Section during Floods

土木工学専攻 岡村誠司
Civil Engineering, Seiji Okamura

研究の目的と意義

河道計画、河道管理を適切に行うためには、洪水時の水位変化や河床変動を精度良く予測する必要がある。そのためには、実際に起こった洪水における洪水流と河床変動の実態を把握することが重要である。特に河口区間では、河床材料の粒径が小さく洪水時に河口と海の水位差が大きくなるため、大規模な河床洗掘が生じやすい。洪水流の水面形は潮位変動と河床変動の両方の影響を受けて変化するため、河口区間において洪水時の河床変動の実態を把握することは非常に重要である。また、本・支川分流区間では、洪水の分流量と河床変動が相互に影響を及ぼし合うため、分流量と河床を安定的に維持できる適切な河道設計及び管理を行う必要があり、このためには、洪水流と本・支川の河床変動の実態を適切に把握できるようにしなければならない。

しかし、このように洪水流と河床変動が相互に影響を及ぼし合う複雑な現象であることに加え、洪水時の河床高変化を縦横断的に測定することは観測技術や労力・費用の面から困難であり、洪水時に生じている河床変動について、実態を把握できていないのが実状である。

近年では、洪水流と河床変動の複雑な現象に対して数値解析を用いて洪水の再現・予測が行われるようになってきているが、洪水時の河床変動が観測できていないために、解析結果が洪水現象を適切に説明できているか検証できないことが多い。このような状況から、限られた観測データより洪水時の河床変動を適切に推定できる解析手法が求められている。

福岡らは洪水時の流量変化、河道抵抗および河床変動等が洪水時の水面形の時間変化に表れていると考え、観測水面形の時間変化を解として非定常洪水流解析を行うことにより、任意断面の流量ハイドログラフや河床抵抗を高精度で推算できることを示した。ただし、解析では洪水時の河床変動が小さいと仮定して検討されている。洪水時の河床変動が大きい場合、その影響も水面形の時間変化に表れると考えられるが、河床変動の大きい河道区間についてはこれまでの解析法では十分な説明を与えていないと考えられる。

本研究では、水面形観測データを用いて洪水時の河床変動を適切に説明する解析手法を確立することを目的とする。はじめに、実際に大きな河床変動が生じた石狩川昭和56年8月洪水を対象に、洪水時に観測された水面形の時間変化を解としながら洪水流の非定常解析と河床の変動解析を一体的に行うことで、洪水時の河床変動を含む洪水現象を説明できることを示す。次に、この解析方法を河道管理上の課題を抱える利根川河口区間および利根川・江戸川分流区間へ適用し、水面形観測を中心とした観測結果を上記の解析により補完することで、現象が複雑なためにこれまで把握することができなかったこれらの河道区間における洪水現象の実態を把握するとともに、河道計画・管理に有効な技術的手段を提供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5章で構成され、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「石狩川河口区間における昭和56年8月洪水時の河床変動解析」では、河口区間で大きな河床洗掘が生じた石狩川昭和56年8月洪水を対象に、水面形観測結果を用いて洪水流と河床変動を把握する解析方法を示した。

石狩川昭和56年8月洪水では、北海道開発局(当時)により水面形および河床変動の詳細観測を中心とした先駆的、大規模な観測が行われた。この洪水現象に関して、これまで北海道大学を中心に多くの精力的な研究が行われてきた。森らは三次元洪水流解析と河床変動解析を一定流量の条件下で行い、反転らせん流により洗掘位置が低水路中央に寄る複断面蛇行流路での河床変動の特徴を説明した。清水らは、鉛直分布を仮定した浮遊砂濃度の移流拡散方程式を用いて一次元河床変動計算を行い、石狩川河口区間の河床変動に対して浮遊砂が重要な役割を果たすことを示した。井上らは清水らの解析を発展させ、浮遊砂濃度および水平方向流速の鉛直分布を考慮した浮遊砂濃度フラックスの算定法を提案し、二次流による浮遊砂輸送が蛇行流路の河床変動に与える影響を示した。

しかし、これらの先駆的・精力的な研究にあっても、洪水流の特徴である水面形の時間変化を準定常の仮定で解析しているために、水面形とともに時間的に変化する河床変動を十分に説明する段階に至っていない。また、浮遊砂濃度の鉛直分布を仮定し、浮遊砂濃度フラックスを水深積分して平面二次元の枠組みで浮遊砂輸送を解析しているために、底面付近の流れによる高濃度の浮遊砂の輸送とそれに伴う河床変動を十分に表現できない。

本章では、観測水面形の時間変化を解としながら非定常洪水流解析と河床変動解析を一体的に行い、観測水面形の時間変化により洪水時の河床変動を検証しながら、洪水後の測量河床形状、および観測流量ハイドログラムも再現するように解析を行うことで、洪水現象全体を説明できる方法を提案し、これを実証した。

ここでは、断面形の縦断変化や蛇行の影響を受けた非平衡性の強い流れ場における浮遊砂輸送を適切に解析するため、準三次元流解析により底面付近の流速を精度良く解析するとともに、従来の解析法のように浮遊砂濃度の鉛直分布を仮定せずに、浮遊砂濃度の三次元移流拡散解析を行った。これにより、底面付近の高濃度の浮遊砂が底面付近の流れの方向に輸送される現象を表現でき、蛇行流路における洗掘位置の位相の不一致等これまで説明できなかった洪水時の河床変動の機構を明らかにした。

さらに、掃流砂が河口区間での河床変動に与える影響にも着目し、特徴の異なる複数の掃流砂量式(福岡の式、芦田・道上の式、佐藤・吉川・芦田の式)を用いた解析を行い、石狩川河口区間全体の河床変動に対しては浮遊砂の影響が支配的であるが、湾曲外岸での洗掘などの局所的な河床変動は掃流砂の影響を強く受けることを示した。このことから、浮遊砂量が大部分を占める河口区間においても掃流砂量を適切に算定することが河床変動の解明にとって重要であることを示した。

第3章「利根川河口区間における洪水時の河床変動と河床抵抗」では、流下能力不足の解消が求められている利根川河口区間を対象に、洪水流、河床変動および河床抵抗の特性を把握することを目的とし、洪水観測と横断測量データ、および第2章で示した観測水面形を解とする非定常洪水流-河床変動解析を用いて検討した。

はじめに、詳細な水面形の時間変化が観測された平成19年9月洪水の観測データより実態を調べた。洪水時に水位上昇が生じる箇所は、これまで考えられてきた導流堤に挟まれ河幅の狭い0.0km付近だけでなく、河口から5.0kmまでの区間で著しい水位上昇が生じていることを示した。河口付近の痕跡水位は潮位変動の影響を受けており、洪水の水面形を表していない。このため痕跡水位を用いたこれまでの洪水解析は不正確であり、水位計により詳細な水位縦断形の時間変化を観測することで初めて洪水の正確な水面形を把握できることを示した。

利根川河口域に観測水面形の時間変化を解とする非定常洪水流-河床変動解析法を適用することで、以下の3つの主要な点が明らかになった。

第1は、この洪水による利根川河口区間での河床変動量は小さいが、この要因の一つとして導流堤に挟まれ河幅の狭い1.0km~0.5km区間の河床に礫が分布しているために洪水時の河床低下を抑制していることが明らかとなった。さらに、平水時の河床形状測量結果より、利根川6.0km下流区間の広い範囲に河床波(砂堆)が確認され

た。河床波の発達区間が洪水時の水位上昇区間と一致することから、河床波による河床抵抗の増大が水位上昇の一因であると考えられた。河床波の発達が特に顕著な銚子大橋下流区間の河床波の形状特性について、銚子大橋の橋脚がきっかけとなって木下の研究で示されている並列らせん流（縦渦）が発生し、水深との関係でウロコ状河床波が発達しやすい水理条件になっていることが示された。

第2に、河床波の形成・発達過程について、定期横断測量が開始された昭和36年以降の河床形状変化を調べ、以下の実態を明らかにした。6.0km下流区間では、昭和30年代には既に広範囲で河床波が発達していた。昭和40年代に上流の20km～40km区間で大規模に行われた河床浚渫・低水路拡幅によって流下してきた土砂が6.0km下流区間にも堆積し、ほとんどの河床波が埋まり見かけ上消滅した。その後、昭和56年～58年の連続洪水を契機に河床低下とともに河床波が再び現れ、現在に至るまで河床波の分布範囲と波高は徐々に拡大し続けている。

河床波の状況が異なる各年代の主な洪水を対象に、観測水面形を解とする非定常洪水流—河床変動解析を行い、洪水中の河床変動過程を説明するとともに河床抵抗を算定した。さらに、小規模河床波の抵抗に関する岸・黒木の研究、林の研究、および石狩川昭和56年8月洪水中の河床抵抗と比較することで、利根川の河床波の抵抗特性について検討し、以下の結果を得た。元々河床波が発達していた昭和34年8月洪水では、石狩川昭和56年8月洪水で観測された砂堆と同程度の河床波抵抗であった。土砂堆積によりほとんどの河床波が消滅した後の昭和47年9月洪水では全ての区間で平坦河床に相当する小さい抵抗であった。河床波の発達し始めた昭和57年9月洪水の河床抵抗は平坦河床と比べて若干大きくなり、さらに河床波の発達した平成19年9月洪水では、既往研究で調査された他の現地河川と同程度の河床抵抗となっていることを示した。利根川河口区間における洪水中の有効せん断力の大きさは、石狩川や他の現地河川で河床形態が平坦河床へ遷移する値と比べて小さいことから、利根川河口区間では洪水中に平坦河床へ遷移する水理条件になり難いと考えられるが、さらなる検討が必要である。

第3に、利根川河口区間と石狩川河口区間における洪水中の河床変動特性の違いについて比較検討した。洪水ピーク時におけるエネルギー勾配が石狩川河口区間で約1/1,500であるのに対して、利根川河口区間は元々海であったことから約1/20,000と非常に緩やかである。それに加え、石狩川河口区間では河積が流下方向に減少するために無次元掃流力および流砂量が流下方向に増大し、区間全体で大きな河床低下が生じるのに対して、利根川河口区間では河積が縦断方向にほぼ一様であり、そのため無次元掃流力および流砂量の縦断方向の変化量が小さい。このため、利根川河口区間では洪水流による河床変動量が小さい。また、利根川河口区間においても石狩川河口区間と同様に浮遊砂が卓越しており、区間全体の河床変動に与える掃流砂の影響は限定的である。しかし、河口導流堤付近など河道形状が急変し掃流力が局所的に変化する場の河床変動は掃流砂の影響を強く受けており、浮遊砂だけでは利根川河口域の河床変動を説明できないことを示した。

本章で示した利根川河口区間の洪水流と河床変動および河床波抵抗の実態は、今後、河口域の河道改修によって河床波抵抗がどの様に変化するか十分理解して工事を進めていくことが極めて重要であることを指摘している。

第4章「利根川江戸川分流区間における洪水流と河床変動」では、適切な洪水分派と河道の維持管理が課題となっている利根川・江戸川分流区間を対象に、分流点付近の洪水流と河床変動の現象を把握することを目的とし、詳細な縦断水面形の時間変化が観測された平成19年9月洪水を対象に検討を行った。

はじめに、分流点上下流区間において詳細に測量された低水路の河床形状より、分流点付近には河道線形に応じた特徴的な固定砂州・交互砂州が形成されており、平成19年9月洪水前後でこれらの砂州が変形・移動している実態を示した。洪水による砂州の変形・移動は洪水前の河床形状に強く依存するため、河床変動解析においては初期の砂州形状を適切に与える必要がある。本研究では、500m間隔の定期横断測量と航空写真に基づいて砂州の前縁線を推定し、横断測線間は推定した砂州の前縁線に沿って測量結果を補間することで実態に近い砂州形状を与えた。解析を行った結果、洪水前後での分流点付近の砂州の変形や下流への移動を説明することができた。

砂州河道において洪水による河床変動を精度良く把握・予測するためには、本研究で行ったように初期の砂州形状を精度良く与えることが重要であることを明らかにした。

分流点の江戸川低水路には潜り流出構造の閘宿水門があり、洪水流の江戸川への流入を制御し、分流点付近の河床変動に影響を与える。そのため、洪水流－河床変動解析において閘宿水門の影響を適切に考慮することが、利根川・江戸川分流区間の洪水現象を把握する上で重要である。本章では、従来の水門を通過する流れの定式化の問題点を示し、新しい計算法を開発した。すなわち、水門を含む計算格子に運動量保存則を適用し、流れが水門から受ける静水圧と動圧を運動方程式中に考慮することで水門の存在を考慮し、さらに、水門上下流の観測水面形(水位差)の時間変化を用いて水門の影響を適切に考慮できていることを確認した。

このような洪水中の河床変動、水門の影響のほか、分流点の複雑な河道形状や高水敷上の樹木群や高茎草本の影響を受けて水面形や分流量が変化する複雑な洪水現象についても、詳細な観測水面形の時間変化、本・支川での観測流量ハイドログラフ、および洪水後の測量河床形状を再現できる非定常洪水流－河床変動解析法を示し、分流点を含む区間の洪水流と河床変動を概ね説明できることを示した。

さらに、解析結果より、平成19年9月洪水では江戸川へ流入する流れの大部分が利根川右岸高水敷上の浮遊砂濃度の薄い流れであり、さらに低水路では閘宿水門の直上流で土砂堆積が生じ、江戸川へ土砂が流入しにくい分流構造となっていることを明らかにした。

適切な洪水分派と維持管理にとって、河道改修に伴い洪水と土砂の分流量がどのように変化するか十分に理解することが必要であり、流量規模や洪水波形の異なる洪水における分流特性を把握していく必要がある。

第5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、水面形観測データを用いて洪水流と河床変動の実態を把握する解析方法を確立することを目的とし、石狩川、利根川という大河川の洪水を対象に検討を行った。河口区間で大きな河床洗掘の生じた石狩川昭和56年8月洪水を対象に観測水面形の時間変化を解とする非定常洪水流－河床変動解析を行うことで、洪水中の河床変動を含む洪水現象を説明できることを示した。洪水中の河床高変化を測定することが観測技術・費用・労力の面から困難であるのに対して、水位観測は高精度で時空間的に密なデータが比較的安価で容易に得られるため、本解析法は工学的に有用と考える。さらに、この解析方法を河道管理上の課題を抱える利根川河口区間および利根川・江戸川分流区間へ適用し、水面形観測を中心とした観測結果を上記の解析により補完することで、これまで把握できなかったこれらの河道区間における複雑な洪水現象の実態を把握できることを示した。それとともに、浮遊砂が卓越し洪水流の非平衡性が強い河道区間における河床変動を適切に説明できる浮遊砂輸送の解析方法を示し、掃流砂と浮遊砂それぞれが河床変動に果たす役割を明らかにした。本研究で示した方法は、今後、適切な河道管理方法を検討していくうえで、洪水現象の実態を把握するための有効な手段になると考える。

今後の課題を以下に示す。

- ・第2章では、広い範囲で生じる河床変動の影響が洪水の水面形変化に顕著に表れることが示された。一方で、局所的な河床変動量の変化に対する水面形の変化が小さい事も示された。今後、局所的な河床変動が問題となる場において、その変化を捉える水面形の観測方法や測定精度について検討していくことが必要である。
- ・第3章では、利根川河口区間に発達する河床波について、その形状特性、形成・発達過程、および抵抗特性を明らかにした。今後さらに、河床波形状が平水時にも維持される理由、河床波の発達する区間が6.0km下流に限定される理由、河床波の発生条件を解明していく必要がある。
- ・第4章では、平成19年9月洪水を対象に利根川・江戸川分流区間の洪水現象を説明できる非定常洪水流－河床変動解析法を示した。今後、流量規模や洪水波形の異なる洪水でも同様に洪水現象を説明することができるか、複数の洪水で検討を行い、分流特性を十分に理解していく必要がある。