

学位論文題名

急勾配水路における流れと河床変動の数値解析に関する研究

学位論文内容の要旨

本論文は、流れの遷移がある場での流れと河床変動の数値解析、及び、掃流砂が卓越する場での2次元河床変動計算法と現地への適用についての研究である。

河川の整備に関する検討においては、流れや河床変化の適切な予測が不可欠である。治水の観点からは、流下能力の確保や堤防等の河川管理施設の洪水流に対する安全性確保の検討のために、少なくとも洪水時の水位、流速の適切な予測が必要である。さらに、河道掘削後や取水堰等の横断工作物の改築後には、河床高変化や砂州移動などのように、河川の維持管理に影響を及ぼす現象が懸念されるため、事前の河床変動予測が重要となる。河川環境の観点から、河道掘削後に瀬と淵などの多様な河床形状が再形成されるかどうか、再形成にどれくらいの期間を要するかといった河床変動予測も必要である。

流下能力の評価には一般に1次元の不等流計算が用いられ、通常、常流を前提として下流から上流に計算が進められる。途中、落差工のように射流の生じる箇所があると、その直下流における跳水の発生のため微分可能を前提とする水位追跡はできなくなる。このため、落差工地点の水深を限界水深で置き換え、上流側への水面勾配に制限を加えて再び上流へ計算を進める。このような便法は、急勾配河川の洪水時のように、流れの遷移が随所に現れる場合には無意味である。このため流れの遷移も対象とした適切な水位予測が必要であるが、実用的な予測法はいまだに確立されていない状況にある。

この水位予測には、航空工学の分野で用いられている衝撃波捕獲法が有用である。その一つの MacCormack 法(予測子・修正子法)は既に開水路流れに応用されているが、擾乱の伝播特性を正しく表していないため、理論的に明快で、河床変動解析への発展も期待できる衝撃波捕獲法を応用することによって、実用的な水位予測法を確立する必要がある。

また、河道掘削や堰等の改築による河床への影響は、長区間かつ長期間に及ぶことから、その予測には一般に擬似定常を仮定した1次元河床変動計算が用いられる。しかし、この計算は、流れの遷移が随所に現れる場合には適用できない。適切な水位計算が困難であるだけでなく、流砂の連続式に対する風上差分に問題が生じるためである。流れの遷移が随所に現れる場合の河床変化の予測では、擬似定常の仮定を取り払って河床擾乱の伝播機構を適切に評価し、その伝播機構を反映できる河床変動計算法が必要であるが、現段階ではそのような計算法はない。

一方、長区間の縦断的な河床変動予測だけではなく、弯曲部や砂州前縁線の局所洗掘、瀬と淵の再形成のように局所的かつ平面的な河床変動予測も維持管理や河川環境の面で重要である。これまでに、2次元浅水流モデルや3次元流れのモデルによる主に掃流砂を対象とした河床変動計算について研究がなされてきているが、2次元浅水流モデルによる河床変動計算は実用的で、実河川の河床変動を容易に予測できる手法として期待される。さらに、急勾配の河川では、平均年最大流量程度の流量規模でも局所的に砂州頂部が水面から露出することがあるた

め、水深方向に格子網のない浅水流モデルによる計算が有利である。

ただし、浅水流モデルによる計算では、本来3次元的な現象を水深方向に積分したモデルに取り込むことから、河床底面近傍の流速を適切に算定する必要がある。蛇行流路ではらせん流の適切な評価が必要となるが、その評価法が確立されていない。また、急勾配で掃流砂が卓越する実河川にどの程度適用できるのかが明らかでない。

以上のように、急勾配の河川においてより良い河川整備を検討して提案するためには、洪水時の水理特性や河床変動特性を評価するための技術がまだまだ不足している状況にある。このような状況に鑑み、本研究を行っている。

第1編では、流れの遷移のある場における流れと河床変動の数値解析法を理論的に明らかにするとともにその実用化を図るため、衝撃波捕獲法の一つで風上スキームのFDS法を流れと河床変動の数値解析に適用した。開水路流れの解析については、解析法の詳細や境界条件の設定法を理論的に明らかにした上で、ダム破壊流れ、常射流混在流の計算を行った結果、本計算モデルにより段波や遷移する流れが適切に表されることが分った。

河床変動解析については、流れが河床変化に影響を及ぼすと同時に河床変化も流れに影響を及ぼすという相互干渉を組込んだ解析法を構築した。この解析では、流砂があると常に下流と上流それぞれの方向に伝播する特性波があるため $Fr=1$ という特異点は取り除かれて、問題なく限界流や流れの遷移を扱えることが分った。そして、河床変動計算を行った結果、限界流や流れの遷移がある場合にも本解析は有効であることが分った。さらに、本解析では3次方程式を解く必要があるので、計算効率を上げるため、本理論に基づき準定常解析（流れの基礎方程式に流砂の連続式を単純に加えた解析）を合理的に利用する河床変動計算法を提案した。これらの成果は、今までになかった新しい計算法を提示するものである。

第2編では、掃流砂が卓越する急勾配の河川における平面的な河床変動予測の実用化を図るため、浅水流モデルを用いた2次元河床変動計算法について検討を行った。まず、流砂量算定に大きく関係するらせん流の評価法が確立されていないことを踏まえ、蛇行流路を対象として洗掘深、洗掘位置および全体的な河床形状の予測精度の向上を図るため、らせん流の評価に着目して検討を行った。らせん流による河床近傍の流速として曲率に比例する式形を採用し、この算定に流路の曲率や流線の曲率を用いた場合の再現計算精度を考察した結果、らせん流強度式に流線の曲率を用いると、洗掘深、洗掘位置、波高ささらには全体的な河床形状の再現性が良くなることが分った。その要因は、洗掘部における主流線の曲率を流路曲率よりも大きく評価していることと、主流線の曲率のピーク位置が蛇行水路形状に対して位相差をもつことにある。

次に、急流河川の一形態である網状河川を対象とする河床変動計算の再現性について検討された例がないことを踏まえ、2次元河床変動計算の実河川への適用性を調べるため、今もなお河床上昇傾向にあり網状流路が形成されている安倍川を対象として検討を行った。既往大出水について河床変動の再現計算を行い、洗掘と堆積の平面分布および横断形状の再現性を検討した。その結果、平均河床高や最深河床高の縦断分布および大局的な洗掘・堆積の平面分布の特徴を再現できることが分った。また、高水敷造成および河床掘削による周辺河床への影響について予測計算を行った結果、この河道改修が下流部の河床変動に大きな影響を与えることが予想された。以上の検討によって、本計算モデルの実河川への適用が可能であることが示された。

これらの知見は、急勾配の河川において河川整備を検討するにあたり、有用となるものである。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 板 倉 忠 興
副 査 教 授 佐 伯 浩
副 査 教 授 藤 田 睦 博
副 査 助 教 授 黒 木 幹 男

学位論文題名

急勾配水路における流れと河床変動の数値解析に関する研究

本論文は、急勾配の河川における治水と河川環境が調和した河川整備検討を容易にすることを目的として、流れの遷移がある場での流れと河床変動の数値解析、および2次元河床変動計算法の実用化に関する研究を行ったものである。

第1編は、流れの遷移がある場での流れと河床変動の数値解析に関する研究である。

急勾配河川では洪水時に流れの遷移が随所に現れるが、これを対象とする実用的な水位計算法は確立されていない。この理由は、従来の水位計算モデルが水理量の伝播特性を適切に表していないことにあるが、伝播特性を適切に表す計算モデルを構築することは容易ではない。さらに、一般に用いられる擬似定常を仮定した河床変動計算法は、流れの遷移が随所に現れる場合に適用できない。これは、水位計算が困難であるだけでなく、流砂の連続式に対する風上差分に問題が生じるからである。このため擬似定常の仮定を取り払い、河床擾乱の伝播機構を適切に反映する新たな計算法が必要である。

これら2つの問題点を解決するため、本編では衝撃波捕獲法の一つで特性帯の理論に基づくFDS法を開水路流れに適用している。そして、開水路における理論を明らかにし、1次元計算モデルを構築している。

流れの計算については、特性速度の方向に応じて流束差を配分する解析法の詳細や境界条件の設定法を理論的に明らかにし、実験水路におけるダム破壊流れや常射流混在流の計算を行い、モデルの適合性を検証している。河床変動計算については、流れと河床変化の同時的な相互干渉をモデルに組込むことによって、フルード数 $Fr=1$ の特異点を取り除かれ、問題なく流れの遷移を扱えることを明らかにしている。とくに、河床変動計算モデルでは今までになかった新しい計算法を提示している。

第2編は、浅水流モデルを用いた2次元河床変動計算法の実用化に関する研究である。

弯曲部や砂州前縁線の局所洗掘、瀬と淵の再形成のように局所的かつ平面的な河床変動予測も維持管理や河川環境の面で重要である。浅水流モデルを用いた2次元河床変動計算は実用的で、実河川の河床変動を容易に予測できる手法として期待される。急勾配の河川では、平均年最大流量程度でも局所的に砂州頂部が水面から露出することがあるため、水深方向に格子網のない浅水流モデルによる計算が有利である。しかし、この計算では流砂量算定に関係する河床近傍流速を適

切に算定する必要があり、その算定法が確立されていないため精度の高い河床変動予測が困難である。また、2次元河床変動計算を実河川にどの程度適用できるかが明らかでない。

本編では、まず計算精度の向上を図るため蛇行水路を対象とし、らせん流の評価に着目した検討を行っている。その結果、らせん流による河床近傍流速として流線の曲率に比例する式形を用いると、局所的な洗掘、堆積や全体的な河床形状の再現精度が向上することを示している。この要因として、洗掘部における主流線の曲率が流路曲率よりも大きくなることと、そのピーク位置が蛇行水路形状に対して位相差をもつことを明らかにしている。

さらに、本計算モデルの実河川への適用性を調べるため、今もなお河床が上昇傾向にあり網状流路が形成されている安倍川を対象として検討を行っている。既往大出水についての再現計算を行い、洗掘と堆積の平面分布および横断形状の再現性を検討した結果、平均河床高や最深河床高の縦断分布および大局的な洗掘・堆積の平面分布の特徴を再現できることを示している。また、高水敷造成および河床掘削が周辺河床に与える影響について予測計算を行った結果、これらの改修が下流部の河床変化に大きな影響を与えることを示している。これらの検討によって、本計算モデルの実河川への適用が可能であることを明らかにしている。

本研究の成果により、従来困難であった流れの遷移がある場での水位と河床変動の予測が可能となり、さらに、精度の高い2次元河床変動予測の実河川への適用が可能となった。これらの知見は、急勾配の河川において河川整備を検討するにあたり極めて有用である。

よって著者は、北海道大学博士（工学）の学位を授与される資格あるものと認める。