

京都大学	博士 (工学)	氏名	于合理 (YU HELI)
論文題目	3D Numerical Simulation of River Flow and Sediment Transport around Spur Dikes (水制周辺の河川流と土砂輸送の三次元数値シミュレーション)		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、蛇行水路における水制周辺の河床変動と側岸侵食に関して、精緻な 3 次元数値解析モデルにより実験現象を再現し、将来の洪水イベントによる地形変動を予測することを目的としている。とくに河床変動・側岸侵食対策としての水制の効果について、その最適な位置および設置間隔について詳細に検討を行っており、実河川の場合にも適用したものであって、6 章からなっている。</p> <p>第 1 章は序論であり、側岸侵食対策としての水制の機能と種類 (透過 / 不透過、水没 / 非水没、上流向き / 下流向き、I 型 / T 型 / L 型など) について説明し、水制周辺の水と土砂の一般的な流れ構造を概説している。また、水制周辺の河床変動に関する水理実験と数値解析を用いた既往研究についてレビューし、課題を整理することで本論文の位置づけを明確にしている。最後に、3 次元数値解析モデルを用いた水制による河床変動と側岸侵食への影響に着目した本研究の目的と論文の構成について述べている。</p> <p>第 2 章では、直線水路に適用してきた Ota et al. (2017)、Ota and Sato (2020)、奥平 (2021) の河床変動モデルを蛇行水路に適用できるように改良した。モデルは浸透流の解析にポーラスメディア法、自由水面の解析に VOF 法、乱流解析に $k-\omega$ SST SAS 法を適用し、浮遊砂の解析にはオイラー的手法を、掃流砂の解析にはラグランジュ的手法を、河床変動解析には Exner 式を用いた。解析格子は、水平方向には非構造三角形メッシュを用い、鉛直方向には水面と河床面を含む範囲に対して構造格子を用いた。つぎに、上記モデルを U 字型水路実験ならびに蛇行水路での河床変動実験に適用し、解析結果を実験結果と比較することで、モデルの適用性を検証した。その結果、前者の実験では水位の縦断分布、流速の鉛直分布をいくつかの断面において比較していずれも精度良く再現できていることを、後者の実験では河床位の平面分布を比較してその変動幅や位置が実験結果と良好に一致していることを確認した。以上の結果から、本研究で開発したモデルが蛇行水路の河床変動を適切に再現することが可能であることを確認し、水制周辺の河床変動解析にも適用できると結論づけた。</p> <p>第 3 章では、第 2 章で構築したモデルを適用して、蛇行水路における水制周辺の流れと土砂移動を解析した。まず、蛇行水路の外岸側に 1 基の水制を設置する場合、その設置位置と蛇行度に応じて水制周辺の局所洗堀深や流れの再付着距離等の特性が変化することを確認した。設置位置が下流にいくほど流れの再付着距離は短くなり、蛇行度が大きい水路ほど流れの再付着距離が長くなることがわかった。また設置位置が下流にいくほど局所洗堀深は大きくなり、l_c/L が 0.5 となる地点で最も大きくなることがわかった。つぎに複数の水制を蛇行水路の外岸側に設置した場合、最上流の水制周</p>			

京都大学	博士（工学）	氏名	于合理（YU HELI）
------	--------	----	--------------

辺の洗堀深が最大となる直線水路の場合と異なり、最上流の水制周辺のみならず蛇行が最大に振れた箇所周辺が最も洗堀深が大きくなることがわかった。水制の効果を総合的に評価するため、側岸の保護、安定性、設置費用、生態環境への影響の4つの指標を定量化する手法を提案し、蛇行度によって結果は変わるものの、おおむね水制長の2～4倍が最適な間隔になることがわかった。

第4章では、第2章で構築したモデルに側岸土砂の崩壊要素を組み入れることで側岸侵食の解析ができるように上記モデルを改良した。側岸土砂の崩壊要素では、各河床セルの局所的な傾斜角を限界傾斜角と比較して、そのセルの安定性を判定し、不安定なセルの崩壊土砂量を計算する手法である。この手法では、側岸位置を探索する必要がなく効率的に計算を進めることができる。このモデルを既往研究における直線水路、水制のない蛇行水路、水制のある蛇行水路の3種類の実験に適用して解析結果を比較したところ、河道断面形とその時間変化、侵食崖線の平面的な形状とその時間変化のいずれも良好な一致が見られた。したがって、本モデルは水制の側岸侵食対策効果を評価し、蛇行水路の平面形状の時間変化を解析することに適用可能であると結論づけている。

第5章では、前章のモデルを実河川である宇治川の一部の区間に適用し、水制を設置した場合の解析を行った。まず2016年の洪水の再現を試みたところ、水位について観測値と解析結果は良好に一致した。河床変動と側岸侵食については、実際の侵食とは異なる傾向も一部で見られたものの、おおむね良好な結果が得られた。河床近傍の流速や底面せん断応力の分布をみると、流量や水位の増加に伴って主要な流れやせん断応力の大きい部分が外岸側から低水路中央に移動している様子がわかり、このことから、低水時期に側岸底部が侵食され、洪水ピークならびにピーク後の強度が減少したときに崩壊が生じるというこの区間の側岸侵食過程が推測された。つぎに、水制長の2倍と4倍の間隔で水制を設置した解析を行ったところ、水制が外岸側の流向を効果的に変えており、側岸底部の流速を低減する様子がみられた。

第6章は結論であり、本論文で得られた成果について要約するとともに、今後の課題についてまとめている。

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、蛇行水路における水制周辺の河床変動と側岸侵食に関して、精緻な 3次元数値解析モデルにより実験現象を再現し、将来の洪水イベントによる地形変動を予測することを目的としている。とくに河床変動・側岸侵食対策としての水制の効果について、その最適な位置および設置間隔について詳細に検討を行っており、実河川の場合にも適用したものであり、得られた主な成果は次のとおりである。

1. 直線水路に適用してきた既往の河床変動モデルを蛇行水路に適用できるように改良し、蛇行水路における既往研究での実験結果と比較することで、モデルの適用性を検証した。その結果、水位、流速、河床変動位のいずれも実験結果を良好に再現することができた。以上の結果から、本研究で開発したモデルが蛇行水路の河床変動を適切に再現することが可能であることを確認し、水制周辺の河床変動解析にも適用できると結論づけた。

2. 蛇行水路の外岸側に 1 基の水制を設置する場合、その設置位置と蛇行度に応じて洗堀深等の特性が変化することを確認した。設置位置が下流にいくほど洗堀深は大きくなり、 l_c/L が 0.5 となる地点で最も大きくなることがわかった。複数の水制を設置した場合、最上流の水制周辺ならびに蛇行が最大に振れた箇所周辺の洗堀深が大きくなることがわかった。水制の設置間隔による影響は蛇行度によって異なり、水制長の 2~4 倍が侵食防止にとって最適な間隔になることがわかった。

3. 側岸侵食の解析ができるように上記モデルを改良し、既往研究での実験結果と比較したところ、河道断面形とその時間変化、侵食崖線のいずれも良好な一致が見られた。このモデルを実河川である宇治川の一部の区間に適用し、水制を設置した場合の解析を行ったところ、実際の侵食とは異なる傾向も一部で見られたものの、おおむね良好な結果が得られた。

以上、本論文は、蛇行水路における水制周辺の河床変動と側岸侵食を精度よく再現しうる 3次元数値解析モデルを構築したこと、それを用いて水制の設置位置や設置間隔等を考察して実河川にも適用したことなどが高く評価でき、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士(工学)の学位論文として価値あるものと認める。また、令和 6 年 2 月 13 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。