

博士論文の要旨及び審査結果の要旨	
氏名	石原 道秀
学位	博士 (工学)
学位記番号	新大院博 (工) 第 530 号
学位授与の日付	令和 4 年 3 月 23 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
博士論文名	On the Migrating Speed of Free Alternate Bars (交互砂州の移動速度)
論文審査委員	主査 准教授・安田 浩保 副査 教授・阿部 和久 副査 教授・早坂 圭司 副査 教授・村松 正吾 副査 准教授・中村 亮太
<p>博士論文の要旨</p> <p>扇状地から自然堤防帯に位置する河川においては、交互砂州と呼ばれる流下方向に堆積域と洗掘域を左右交互に入れ替える周期的な底面起伏が自発的に発生・発達する。この交互砂州は洪水時に移動する特性を有しており、その幾何学的な特徴と移動特性から波動現象の一種とみなされている。これまでに交互砂州の発生条件や発達機構に関する多くの知見が報告されているが、波動現象として重要な性質である移動に関する知見は未だ十分でない。本研究では、十分な実証に至っていない交互砂州の物理のうち、1) 移動速度の空間分布の有無と規模を定量化し、2) それに基づいて擬似固定床の仮定を実証したものである。</p> <p>本研究では、まず交互砂州が発生・発達し移動する水理条件において模型実験を実施し、交互砂州の発生・発達過程における底面位と水位を高頻度かつ高い空間分解能で測定した。次に、この測定値に基づいて交互砂州の移動速度の空間分布の有無について調べた。通水中に時々刻々と変化する底面と水面形状の測定結果から、交互砂州はその形状を変化させながら移動していることを確認した。この結果を波動論に基づいて考察した結果、交互砂州はその移動速度が空間分布をもち時間的に変化するという非線形波動の性質を有することを明らかにした。このことから、交互砂州の移動速度は空間分布を持つことを示唆した。</p> <p>次に、交互砂州の移動速度の空間分布の定量化を目的に、交互砂州が波動現象とみなせることを仮定し、底面位の移流拡散方程式を導出した。具体的には、一般的な河床変動解析に使用される支配方程式である、流れの連続式と運動方程式、流砂の連続式と流砂関数の 4 つの式に対し、数学的な変換を行うことで、同式を導出した。さらに、同式の移流項に付与される移流速度を定式化することで、交互砂州の移動速度の算定式を導出した。これにより移動速度の空間分布の定量化が可能となった。</p> <p>次に、上述の式の妥当性について、計測値と数値解析に基づいて、1) 測定された底面位の時間波形を再現できるのか、2) 区間全体において測定された河床変動量を再現できるのか、の 2 つの観点から検証を行なった。その結果から、流路内に交互砂州が卓越する場合において、同式は 1 分後の底面位を粒径と等倍以内の精度で予測できることを確認した。</p>	

次に、同式を用いて交互砂州の発生・発達過程における移動速度の空間分布の定量化を試みた。その結果、交互砂州の移動速度は空間分布を有し、交互砂州の発生から発達にかけてその分布が変化することが明らかとなった。移動速度と等流流速と比較した結果、移動速度は交互砂州の状態にかかわらず等流流速の 10^{-4} から 10^{-3} のオーダーであり、底面の変形速度は流水の変形速度と比べて十分に小さいことが明らかとなった。これにより、交互砂州における擬似固定床の仮定の成立を実証した。さらに、交互砂州の発生条件などの推定に使用される、安定性解析による卓越波数の移動速度と実現象の対応関係について、同結果から考察した結果、卓越波数の移動速度は交互砂州上の代表的な移動速度を推定していることを明らかにした。

最後に、規模や河床材料、水理条件などが全く異なる実河川において、交互砂州の移動速度の算定式の適用を試みた。対象河川は、令和元年の台風 19 号における出水時の千曲川である。同式から推定した移動速度と実河川において実際に移動した砂州の移動速度を比較した結果、実測値に対して算定値が半分程度と、両者が同じオーダーとなったことを確認した。

審査結果の要旨

本研究では、十分な実証に至っていない交互砂州の物理のうち、移動速度に焦点を絞り、特にその空間分布の有無と規模を明らかにしたものである。移動速度の空間分布とその規模を明らかにしたこと自体、先行研究では存在しなかった重要な成果である。さらに、この成果によって得られた重要な成果の一つは「移動速度は交互砂州の状態にかかわらず等流流速の 10^{-4} から 10^{-3} のオーダーであり、底面の変形速度は流水の変形速度と比べて十分に小さい」ことである。上記の成果により、移動床における全ての数理解析において暗黙の了解として適用されていた擬似固定床の仮定が適切なものであることが実証された。これは、本研究により移動床における数理解析の根底的な要素を保証したことを意味する。

次に得られた重要な成果は、安定性解析による卓越波数の移動速度と実現象の対応関係を明

確にしたことである。安定性解析は、微小擾乱が持つ波数ごとの増幅率を解析することで、交互砂州の発生条件や平衡波長、平衡波高を推定するものであり、卓越波数の移動速度も推定可能である。これまでこの卓越波数の移動速度について、実現象との対応関係が明確でなかった。その要因は、同解析では交互砂州上の移動速度を算定できなかったためである。本研究では、交互砂州を合成波として捉え、その移動速度を定量化している。このことにより、両者を比較することで、卓越波数の移動速度と実現象の対応関係の考察が可能となった。

最後の重要な成果は、実河川における交互砂州の移動速度を科学的に定量化できる可能性を

示した。本研究では、移動速度の算定式を導出し、その妥当性を模型実験に基づいて検証している。これに加えて、実河川における同式の適用性についても検討しており、同式の十分な適用性を確認している。

これらの成果から、本論文は博士(工学)の博士論文として十分であると認定した。