

# NUMERICAL MODEL FOR BEDFORM EVOLUTIONS OF NONUNIFORM SEDIMENT

(混合粒径河床における河床波の発生発達過程に関する数値解析)

## 学位論文内容の要旨

Under the erodible bed condition, hydrodynamic forces drive the motion of water and sediment and, thus, create a variety of interesting morphologies, including bedforms, meandering, braiding, alluvial fans and so on. This dissertation is a study of bedform evolutions of nonuniform sediment. Bedform is one of the interfacial instability due to the complex interactions between water flow and sediment transport. Thus, the prediction of bedforms, such as ripples and dunes, is still a challenging research topic for river engineers. Another difficulty when bedforms in the natural river are studied is that the river bed is commonly composed of various sizes of sediment (nonuniform sediment). Under the same flow conditions, coarse grain responds to the forces exerted by the water motion different from that of fine grain. Therefore, a selective transport of nonuniform sediment causes many morphological processes such as vertical sorting, armouring and downstream fining. Various formulas of nonuniform sediment transport model were proposed to explain the mechanisms and migration process of bedforms. Moreover, experimental studies were conducted in order to explain some important features inside bedforms such as vertical sorting at the lee face of dune which affected bedform dimension, bedform roughness and sediment transport.

Since the bed material is composed of many sizes of grain, the bedform geometry and their evolutions are rather complicated and time consuming for modeling. As a result, most of the models in the field of river engineering are simplified by considering only one grain size (a median size) of sediment to represent the non-uniformity of sediment. However, many studies have found that considering only one grain size cannot explain some important mechanisms of river morphology sufficiently such as the geometry of bedforms and their evolutions.

In this dissertation, the numerical modeling for nonuniform sediment was performed to simulate the characteristics of sand dunes and grain sorting inside sand dunes. The sediment transport model explicitly takes the turbulent flow model into account during the morphodynamic computation. The sediment transport model was composed of a nonuniform sediment transport model and a bed layer model. The concept of size fraction transport was employed for nonuniform sediment transport calculation. In addition, nonequilibrium bedload sediment transport of each sediment size fraction was treated using Eulerian stochastic formula proposed by Tsujimoto and Motohashi (1990) for the sediment pickup and deposition calculation. The bed layer model was employed to simulate the mechanisms of grain

sorting at various locations inside sand dunes. Moreover, the lee sorting model proposed by Blom and Kleinhans (2006) was incorporated with the computation codes during the morphologic computation for a realistic grain sorting simulations. The hydrodynamic model proposed by Giri and Shimizu (2006) was used for hydrodynamic simulations. In the turbulent model, the 2nd order non-linear k- $\epsilon$  turbulence closure is employed to reproduce turbulent features in shear flow with the separation zone. The time-dependent water surface change computation was used for a realistic reproduction of free surface flow over migration bedforms. The boundary condition at the bed was no slip. A logarithmic expression for near-bed region was adopted. The periodic boundary condition was employed in the computation domain of flow and sediment transport computations.

Comparing with the experimental results, the model provides the satisfactory agreement for grain sorting, bedform geometries and water depth. By means of the concepts of bed layer model and size fractional transport incorporating with the lee sorting model, the mechanism of grain sorting at various locations inside sand dunes can be investigated. The dune formation and their evolution process can be reproduced by the proposed model. In addition, the effects of nonuniform sediment on dune evolution were also examined. Under the same hydraulic conditions and mean grain size, the numerical simulations of the nonuniform sediment case are compared with that of the uniform sediment case. The simulated results are consistent with the experimental results which showed that the migration velocities of sand dunes in the nonuniform sediment case are faster than those of the uniform sediment case, and showed that the wave heights of sand dunes of the nonuniform sediment case are smaller than those of the uniform sediment case. The wave lengths of sand dunes of the nonuniform sediment case showed a slight difference with those of the uniform sediment case in the fully developed stage. Moreover, the temporal evolution of sand dune of the nonuniform case was found to be slower than the uniform case. With the use of the nonequilibrium sediment transport formula proposed by Tsujimoto and Motohashi (1990), one of the important parameter is the mean step length. Then, the numerical study was conducted in order to assess the influence of mean step length on sand dune dynamics. From the simulation results, it was found that the dune geometry significantly depends on the mean step length, and the appropriate value of mean step length for the simulation of non-uniform sediment is found to be 20-30 times sediment diameter.

It is necessary to mention that the present model of nonuniform sediment is conducted in order to simulate bedform evolutions under the subcritical flow condition, considering only bedload transport, with a constant discharge. Even the model results are in agreement with experiments as well as some commonly used prediction methods for geometric characteristics of sand dunes. Further this model needs to extend in varying flow field condition including with the suspended load transport mode in order to fulfill the model for natural river flow simulating.

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 清 水 康 行

副 査 教 授 泉 典 洋

副 査 准教授 木 村 一 郎

学 位 論 文 題 名

## NUMERICAL MODEL FOR BEDFORM EVOLUTIONS OF NONUNIFORM SEDIMENT

(混合粒径河床における河床波の発生発達過程に関する数値解析)

移動床河川においては流れと流砂の相互干渉およびこれによって形成される河川の蛇行や河床形態を含む様々な河道形態が形成される。本論文は広い粒度構成を有する流砂による河床波の形成機構に関するものである。河床波は複雑な水流と河床面の境界に発生する不安定現象である。リップルやデューンなどの小規模河床形態の発生・発達を予測する手法は未だに確立されておらず、河川工学上の重要な課題である。この問題を困難にしている1つの理由は、自然河川における河床材料および流砂はほぼ例外なく幅広い粒度構成を有する混合砂(非一様粒度分布)であるということに起因する。同じ流れの状態でも粗い粒径の粒子が水流から受ける流体力は細かい粒径が受けるものとは異なる。このため、混合粒径河床においては流砂の選択的な移動が生じ、アーミング現象に代表される鉛直分級や流下方向に向かった細粒分級が発生する。既往の研究においては様々な小規模河床形態の移動を説明するために幾つかの混合粒径流砂量式に関する理論的な研究が行われてきた。また、河床波の内部の分級機構や河床波背面、クレスト、崩落面などの砂粒子の動きを見るための詳細な実験的研究も行われて来た。

本研究では河床形態の形成のモデル化を目的とする。対象とする河床および流砂の成分は多くの粒径クラスから構成され、これによる河床形態の形成や発達、移動といった現象は非常に複雑であり、これをモデル化するのは非常に困難であるとともに、数値計算モデルを構築した場合も、その計算時間は多大なものとなる。従って、従来の研究は現象を単純化して均一粒径として扱って来た。しかしながら、これら均一粒径としての取り扱いによるモデル化は実際の混合粒径による現象に比べ、掲載される河床形態の形状や規模などの点で必ずしも正しい結果が得られないということが指摘されている。

本研究では混合粒径による小規模河床形態の発生、形成、移動などを再現出来る数値計算モデルの構築を行った。流砂モデルは流れの計算で使用している乱流モデルから生成される瞬間的な流れの強さを直接的に流砂の計算に使用した。流砂モデルは混合粒径の流砂移動モデルと、多層型の河床変動モデルを採用した。流砂の移動モデルは Tujimoto and Motohashi(199) による非平衡型の流砂モデルである、pickup and deposition 型のものを用いた。河床変動の多層モデルは任意の地点の任意の深さの粒度構成を表現可能なものとした。Blom and Kleinhans(2006) による、河床は背面の土砂崩壊に

よる粒径分布再配分モデルを採用した。流れの計算は Giri and Shimizu(2006) による非線形  $k-\varepsilon$  モデルを用いた。流れおよび水面形の計算は逐次変化する河床形状を境界条件としながら行った。河床の流速条件は nonslip とし、河床から微少距離離れた 1 番目の格子と河床の間の流速分布は対数則とした。上下流は周期境界条件とし、水理量および流砂、河床形状を上下流で等しく与えた。

実験結果との比較によれば、河床形態の地形的特徴および水面形の再現性は良好であった。このモデルにより、河床波内部の任意の地点の粒度構成の計算が可能となった。このモデルを用いて河床波形成における混合粒径の影響を検討した。全く同じ水理条件で、均一粒径による計算と、中央粒径がこの均一粒径と同じ混合粒径の計算を行った。この結果は過去の実験による傾向と同じように、混合粒径の場合は河床波の波高は低くなり、移動速度は速くなる。河床波の波長については実験結果と若干の違いが見られたが、これは数値計算領域の制約上によるものと考えられる。河床波波高の時間的発達速度は混合粒径のほうが均一粒径に比べて遅い傾向が見られた。Tsujimoto and Motohashi(1990) の流砂モデルにおいて最も重要なパラメーターが Mean Step Length と考えられたため、本研究ではこの値を様々に変化させて数値実験を行った。この結果、実験結果を最も合理的に再現する値は各粒径の 20~30 倍の長さであることが判明した。

本研究で示したモデルは常流、掃流砂、一定流量を対象としたものであり、これらについては今後の課題である。しかしながら、本研究で提案されたモデルでも実験結果や既往の経験的知識と一致した結果が得られ、河川工学的に貢献するところ大なるものがある。よって著者は、北海道大学(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。