

学 位 論 文 の 要 旨

E-MPS・DEMを用いた床止めの破壊限界評価のための
流体・土砂・剛体連成解析モデルの開発
(Development of fluid/sand/rigid body coupled analysis model
to evaluate destruction limit of ground sill using E-MPS and DEM)

氏 名 樋口 敬芳 印

近年、全国の多くの河川で上流からの土砂供給の減少等により河床低下が進行している。床止め下流で河床低下が進行すると、建設時に想定していた水叩き・護床工区間での流水の減勢が起きなくなり、護床工上の流速増大による護床工の劣化・損傷や護床工下流の河床低下が進行する。そのような状態で洪水が流下すると、護床工下流で段落ち流れが発生して局所洗掘が生じ、護床工が一気に流出するなどの急激な破壊が危惧される。床止めなどの河川横断構造物の破壊により堤防の損傷が決壊まで拡大すると、堤内地に大きな被害を及ぼす懸念がある。そのため、床止めの破壊限界の評価および適切な維持管理は非常に重要である。しかしながら、現状、床止めの維持管理は状態把握のみのものとなり、床止めが被災して初めて対策されるなど事後の対策となることが少なくない。予防保全的に維持管理していくためには床止めの破壊限界の評価手法の開発が求められている。本研究は床止めの破壊現象のうち最も破局的であると考えられる、床止め下流の河床低下が進行し、上下流水位差が大きくなる状況下で発生する下流側からの護床工の急な破壊（護床ブロックの流出）に着目する。本研究は、そのような破壊現象の破壊限界を評価できる鉛直二次元の流体・土砂・剛体連成解析モデルの構築を目的とし、さらに、構築したモデルを用いた護床工の破壊限界の評価手法を提案した。

床止めの護床ブロックの流出現象は、流体、土砂、さらに護床ブロックが動的に相互作用する複雑な移動境界問題を有する現象である。数値解析モデルは、格子を必要とせず、移動境界問題の取り扱いにより適した Lagrange 的な手法である粒子法に着目して構築した。流体の数値解析モデルは粒子法の一つである E-MPS (Explicit Moving Particle Simulation) 法を用いた。剛体である護床ブロックは PMS (Passively Moving Solid) モデルを用いることとし、護床ブロックの流出現象を考えるために護床ブロックの底面摩擦力を考慮できるモデルに拡張した。固体である土砂は Lagrange 的な手法である DEM (Distinct Element Method) を用いた。本モデルは、流体と固体の相互作用について、次の方法で構築した。河床を構成する固体粒子は河床から離脱するまで壁粒子として取り扱うこととした。ただし、E-MPS 法の壁粒子と固体粒子の壁粒子の接続部において圧力が不連続となる問題が生じるため、粒子数密度の算定式を補正した。また、河床を構成する固体粒子を壁粒子としてみなすため、E-MPS 法による流体の計算において河床内の流れ場を評価しないものとなる。これにより、河床表面付近の固体粒

子に対する流体の平均流速が過大に評価されてしまう問題が生じる。そのため、固体粒子に対する流体の平均流速の算定式を補正した。

段落ち部の流況特性である波状跳水および潜り噴流を対象とした **E-MPS** 法を用いた数値流体解析の適用性はこれまでに確認されていない。また、構築した流体・土砂・剛体連成解析モデルの護床ブロックの流出現象、床止め下流の洗掘現象、護床工下流の洗掘に伴う護床ブロックの流出現象への適用性を検証する必要がある。本モデルの、それぞれの現象に対する適用性を確認するため、対応する固定床および移動床の水理模型実験を行った。また、水理模型実験では護床ブロックの流出メカニズムの把握を行った。

それぞれの現象について、本モデルを用いた鉛直二次元の数値解析を行い、対応する実験結果と比較することで再現性を検証した。その結果、**E-MPS** 法により、波状跳水および潜り噴流の流況を再現することができた。また、本モデルにより、実験結果と同様、護床ブロックが護床工下流の洗掘孔の発達に伴い次々と流出していく現象を再現することができた。

最後に、床止め下流の河床低下に起因する床止めの破壊現象について、本モデルを用いた破壊限界の評価手法を提案した。単位幅流量 q と護床工下流の河床低下量 ΔH を指標とし、本モデルを用いた数値解析を実施することで破壊限界を評価する方法である。本研究では床止めの破壊限界評価手法として、固定床条件の流体・剛体連成解析モデルを用いて評価する方法と、移動床条件の流体・土砂・剛体連成解析モデルを用いて評価する方法の2つを提案した。固定床条件の流体・剛体連成モデルを用いた評価手法では、実験等により洗掘形状を設定し、単位幅流量 q と河床低下量 ΔH を組み合わせた解析ケースを実施することにより、護床工の破壊限界について一定の評価が可能であることを示した。移動床条件の流体・土砂・剛体連成モデルを用いた評価手法では、単位幅流量 q と河床低下量 ΔH を組み合わせた解析ケースを実施することにより、護床工の破壊限界について評価が可能であることを示した。

学 位 論 文 の 要 旨

E-MPS・DEMを用いた床止めの破壊限界評価のための
流体・土砂・剛体連成解析モデルの開発
(Development of fluid/sand/rigid body coupled analysis model
to evaluate destruction limit of groundsill using E-MPS and DEM)

氏 名 樋口 敬芳 印

Riverbed degradation has become common in many rivers because of a decrease in sediment supply from upstream. When riverbed degradation occurs downstream from a groundsill, the decrease in flow momentum on the apron and the bed protection that were assumed at the time of construction are no longer applicable. As a result, the degradation of the bed protection and the riverbed downstream is enhanced by the increased flow velocity. If a large flood occurs in such a situation, a step-down flow will occur downstream from the bed protection, causing local scour, and bed-protection blocks may be washed away. Furthermore, if the destruction of a structure that crosses a river, such as a groundsill, expands to cause embankments to collapse, it may cause great damage to areas behind the embankments. Therefore, it is important to evaluate the destruction limit and corresponding maintenance of groundsills.

At present, however, the maintenance of groundsills is limited to evaluating their state, and countermeasures are taken after the fact, such as when a groundsill is damaged. Development of an evaluation method for the destruction limit of groundsills is thus required for preventive maintenance. The most catastrophic phenomenon of groundsill destruction is sudden destruction by outflow of bed-protection blocks from the downstream end. This phenomenon results from the increased difference between the upstream and downstream water levels when riverbed degradation occurs downstream. Hence, this study focuses on this destruction phenomenon. The purpose of the study is to develop a vertical two-dimensional fluid/sand/rigid body coupled analysis model that can evaluate the destruction limit of this phenomenon. Furthermore, methods are proposed for evaluating the destruction limit of groundsills with the developed model.

The outflow phenomenon of bed-protection blocks entails complex moving-boundary problems in which the flow conditions, riverbed, and blocks interact dynamically. The numerical analysis model was developed by focusing on particle methods, which are Lagrangian methods that do not require a grid and are suitable for moving-boundary problems. A specific particle method, the E-MPS (Explicit Moving Particle Simulation) method, was used for the fluid phase. For bed-protection blocks, which are rigid bodies, the PMS (Passively Moving Solid) model was used; furthermore, it

was expanded to a model that can address the bottom friction force of the blocks in order to consider their outflow phenomenon. For the solid (sand) phase, another Lagrangian method, the DEM (Distinct Element Method), was used.

The model in this study was developed with the following approach for the fluid/solid interaction. The solid particles composing the riverbed are treated as a wall surface until separation from the riverbed. A problem arises, however, because the pressure becomes discontinuous at the interface between the wall particles in the E-MPS method and those of the solid particles; accordingly, the formula for calculating the particle number density was corrected. In addition, as the solid particles composing the riverbed are treated as wall particles, the flow in the riverbed is not evaluated in the fluid calculation using the E-MPS method. This causes a problem because the local average velocity of the fluid phase for a solid particle near the riverbed surface becomes excessive. Therefore, the formula for calculating this local average velocity was also corrected.

To date, the applicability of numerical simulation using the E-MPS method has not been investigated for the wave jump and the submerged jet, which are the characteristic flow conditions over a backward-facing step. The applicability of the developed fluid/sand/rigid body coupled analysis model must also be verified for the general outflow phenomenon of bed-protection blocks, the scour phenomenon downstream, and the resulting block outflow phenomenon due to the scour. To confirm the model's applicability for each phenomenon, hydraulic model experiments were conducted under the corresponding fixed-bed and movable-bed conditions. Through these experiments, the outflow mechanism of the bed-protection blocks was characterized. Then, for each phenomenon, a vertical two-dimensional numerical simulation was performed with the developed model, and the reproducibility was verified by comparison with the corresponding experimental results. The results showed that the E-MPS method could reproduce the wave jump and submerged jet flow conditions. In addition, the model could reproduce the phenomenon in which bed-protection blocks flow out one after another with the expansion of the scour downstream.

Finally, methods were proposed to use the developed model to evaluate the destruction limit for the ground sill destruction phenomenon due to riverbed degradation downstream. The method evaluates the destruction limit by using the unit-width flow rate q and the riverbed reduction amount ΔH downstream from the bed protection as indicators. In this study, two methods were developed for evaluating the ground sill destruction limit: a method using a fluid/rigid body coupled analysis model under fixed-bed conditions, and a method using the fluid/sand/rigid body coupled analysis model under movable-bed conditions. In the fixed-bed method, the scour shape is specified from experimental results. Numerical simulations of cases in which q and ΔH were combined showed that a certain evaluation is possible for the destruction limit of the bed protection. In addition, for the movable-bed method, numerical simulations of those cases in which q and ΔH were combined showed that the destruction limit can be evaluated.