

学位請求論文要旨

数値移動床水路における石礫の運動と河床構造の変化過程 MOVEMENT OF GRAVEL AND PROCESSES OF CHANGE IN BED STRUCTURES IN A NUMERICAL MOVABLE BED CHANNEL.

都市人間環境学専攻 熱海 孝寿

Civil, Human and Environmental Science and Engineering, Takatoshi Atsumi

研究背景と目的

洪水流と共に生じる土砂移動は、河川における流路・河床変動、水利用、生物の生息、生育、繁殖環境など、河川で生じるあらゆる現象に深く関わる研究テーマである。河床との接触を頻繁に行いながら流送される土砂は、掃流砂と呼ばれ、転動、滑動、saltation (跳躍運動) の移動形態に分類される。流れの底面せん断力と流砂量に関係づける研究が古くから行なわれ、決定論的や確率論的なアプローチによる多数の流砂量式が提案されている。その中でも、Einstein の掃流砂関数、M-P-M 式、芦田・道上式などが代表的な流砂量式であり、現在でも広く適用されている (水理公式集 2018)。また、河川内の土砂は、大小様々な粒径から構成される混合粒径である場合がほとんどであり、掃流力や上流からの土砂供給条件によって、河床表層で細粒化や粗粒化が生じることが知られる。河床構造 (河床表層の粒度分布、粒子配置、空隙率、凹凸など) と流砂機構および流れ場は、密接に関係しており、これらの相互作用は、水理条件や河床材料特性によって複雑に変化するため、掃流砂量の定量的な評価を難しくさせている。この為、掃流砂量式の予測精度は、流れの算定精度と比べ低く、精々 1 オーダー程度の精度しか有していないことが指摘 (Ancy 2020, Frey ら 2009) され、現時点でも、土砂輸送の予測技術には課題が残されている。

本研究が対象とする石礫河川のように、河床材料が、2~3 オーダー程度の幅の広い粒度分布・多様な形状を有する場合は、多くの場合河床が粗粒化し凹凸が大きく、河床構造の影響が重要になる。代表的な石礫河川である常願寺川の洪水敷に掘削された大型礫床水路を用いて、現地スケールの水理実験が実施 (福岡 2008) され、洪水時に河床洗掘が生じると、露出した大粒径粒子が周囲の小粒径粒子群の流出を抑制する遮蔽効果が支配的になることが明らかにされている。さらに、石礫河川に修正 Egiazorff 式などの従来の砂礫河川で有用とされた河床変動計算を適用すると、細粒分の限界掃流力を過小に評価することや空隙率の変化を考慮できないことが課題として指摘されている。また、石礫河川では、覆瓦構造やクラスター等の粒子配列が河床表層に形成され、体積の大きい非球形の石礫同士が噛み合うため、粒子形状の効果も重要になると考えられる。

粗粒化に関する従来の実験的検討では、表層の粒度分布や流砂量などの積分された量に限定されていたが、近年の画像解析技術を用いた実験的研究では、掃流層内の粒子速度や固相割合、大礫の間隙に存在する砂礫に作用する掃流力や粒子配置など、河床近傍の粒子群の運動に関する鉛直方向の力学的な情報が集められつつある (Frey ら 2020, 関根ら 2018, Ferdowsi ら 2017 など)。また、解析技術や計算機性能の向上を背景に、個別要素法 (DEM) と流体解析のカップリングモデル (CFD-DEM モデル) による計算力学的なアプローチが適用され、掃流砂の移動機構の理解が深められている (福田 2013, Frey ら 2017 など)。解析結果から、掃流砂層内での粒子間接触が鉛直分級や表層の大礫集団の形成に重要であることが明らかにされている。これらの研究では計測や計算の実行を容易にするため、河床材料は 2 粒径や 3 粒径程度に代表させた検討がほとんどあり、連続的な広い分布を持つ河床材料を用いた検討は見られない。また、掃流砂に及ぼす粒子形状の影響については、それほど支配的

とならない結果を示唆するものが見られる (Gomez 1994, 高嶽ら 2021) が、流砂の素過程に及ぼす粒子形状の効果は、与えられる水理条件によって変化する。流砂に及ぼす粒子形状の影響を検討した既往の事例は少なく、どのような条件下で重要となるのか更なる検討が必要である。

従来型の河床変動解析法の改良も試みられており、河床の鉛直構造の表現や限界掃流力、離脱量・堆積量において鉛直方向の変化を取り入れる試みが行なわれている。(例えば、長田ら 2012, 太田ら 2019)。しかしながら、実河川での洪水時の流砂の計測が容易でないこと、加えて求められる精度がそこまで高くないこともあり、粒子運動の素過程を含めた検証は十分行えていないなどの課題を有するが、複雑な力学現象の力学的なモデル化の進展が見られている。石礫河川の流砂の予測技術の進展には、計算力学的な手段でしか得られない河床や掃流層内部の力学的な情報(流体力、接触力など)が必要となるが、CFD-DEM モデルなどは、計算負荷が非常に高いため、実河川での河床変動解析法に直接取って代わることは当面の間難しく、応用に向けた解析結果の整理や簡略化も重要であると考えられる。

本研究では、特に従来の河床変動解析法では十分取り扱うことが出来ない、石礫河川の河床構造の変化過程、粒子運動、掃流層内の流れ場に及ぼす混合粒径や粒子形状の影響に明らかにすることを目的とし、粒子レベルや流れ場の詳細な現象把握に有用なツールである解像モデル (resolved CFD-DEM, 流れの解析に粒子よりも細かい空間解像度を用い、流体力や粒子周りの流れ場を直接評価可能なモデル) を用いて、実際の石礫河川の河床材料に出来るだけ近づけた解析条件で種々の数値移動床実験を実施した。

本論文の内容と成果

本論文は6章で構成され、各章の内容と成果の概要は以下の通りである。

第1章の「序論」では、研究背景、既往研究の整理、研究目的、本論文の構成を示している。

第2章の「数値解析法の概要」では、各種数値解析法の特徴を述べ、石礫河川の掃流砂解析における解像モデルの必要性および解像モデルの一種である Fukuoka らの数値解析法の概要を示している。

第3章「同一体積・非球形粒子群による掃流砂運動に及ぼす粒子形状の効果」では、石礫河川の河床材料特性の中でも、粒子形状の効果に焦点を当て検討を行っている。混合粒径の河床材料は、形と体積の両方が異なるため、形の影響のみを定量的に明らかにすることが難しい。そこで、著者らは、同一体積で異なる形状の粒子群を用いた数値移動床実験を行い、非球形粒子が流れの中で覆瓦構造の河床を形成し、河床の安定に寄与する機構を示し、特に移動開始時の運動に形の影響が現れやすいことを明らかにしている。また、掃流力条件によって、粒子形状の影響が変化することが示唆されており、特に高掃流力条件では、移動粒子群が大量に存在するため、覆瓦構造などの表層の粒子配列の影響が卓越するかは不明である。

本章では、同一体積で異なる形状の粒子群を用いた数値移動床実験を2種類行った。1つ目は、流砂運動の基本に関係する粒子の移動開始時の検討であり、名目直径 70 mm の3種の粒子形状(扁平、棒状、球粒子)を用いた。給砂を行わずに、掃流力の変化(無次元掃流力 $\tau_* = u_*^2 / sgd \cong 0.03 \sim 0.09$)に対する粒子の pick up rate の変化量を調べた。数値実験水路は、長さ 10 m, 幅 1 m, 水路勾配は 1/20 である。粒子を水路にパッキングした後、非球形粒子については 20 秒間通水を行い表層の粒子を自然の状態にセットした後に、いずれも上流からの給砂なしで通水を行った。計算格子幅は、各粒径 d を7分割する値に設定した。2つ目は、同様の3種の粒子形状(扁平・棒状・球形状)、粒径 $d=6, 20, 60$ mm の粒子群を用いて、無次元掃流力 $\tau_* = 0.11, 0.18, 0.30$ と粒子が活発に移

動する数値実験条件で、数値移動床実験を行った。数値実験水路は、長さ $100d$ 、幅 $25d$ で各粒径に応じて与え、水路勾配は $1/100$ である。境界条件は、縦横断方向に周期境界条件を課した。格子幅は、各粒径 d を 4 分割する値に設定した。また、いずれも相対水深は、8.5 以上である。

1 つ目の粒子の移動開始時の検討から、球粒子は、非球形粒子と比較して、限界掃流力が低い値を取ること、また、非球形の扁平、棒状粒子群を比較すると、無次元掃流力が $\tau_* = 0.07$ 程度の場合は pick up rate の値に違いが見られた。扁平粒子で離脱が生じなかった粒子は、複数の粒子集団がかみ合って形成されるクラスターを構成する粒子が含まれており、表層粒子の姿勢や配置の違いによる粒子間のかみ合わせの程度が異なるためである。2 つ目の掃流力が大きい場合の数値移動床実験結果から、 $\tau_* = 0.18, 0.30$ 程度の場合は、名目直径を用いて表される無次元の流砂量、流砂体積、粒子速度に与える粒子形状および体積の違いによる差異は小さいことが明らかとなった。掃流力が高くなると、移動粒子は、不規則な粒子間接触による運動量交換なども活発に行われ始めるため、粒子形状の差異が現れにくいと考えられる。また、掃流層内部の力学的な考察を行い、特に、 $\tau_* = 0.30$ 程度の高掃流力の場合は、移動粒子群の存在が流れ場に及ぼす影響に加え、移動粒子間接触の作用が、平均粒子速度に影響を及ぼしたと考えられる。本章での検討により、掃流砂に及ぼす石礫粒子形状の影響は、限界掃流力付近の移動開始時の過程を扱う時に重要となることを明らかにした。

第4章「混合粒径・球形状による鉛直分級機構に関する検討」では、石礫河川の河床材料の特徴である幅の広い粒径分布の効果について検討を行った。Fukuoka ら (2014) などの既往の検討では、解析に用いられた最小粒径と最大粒径の比が 3 程度と狭かったため、混合粒径の効果は比較的小さかった。このため、粒径分布を出来るだけ広くとり 1 オーダーの幅を有する粒径集団を用いて数値移動床実験を実施し、鉛直分級の形成と河床構造の変化に関する粒子の離脱・堆積過程の運動について明らかにする。

数値移動床実験水路の諸元は、水路長 4.01 m 、幅 1.02 m の直線水路である。数値解析に使用した粒径分布は、Talbot型の粒径分布を参考に、粒径 $d=1.5\sim 20\text{ cm}$ の 1 オーダー程度の広がりのある連続した粒径分布を設定した。粒子形状は球形状を用いた。本解析では、粒子間接触の効率化のために、直交格子に粒子を格納するリンクリスト構造を用いており、粒径の大きい粒子については、複数の球を連結し単一の球形状を模擬することで解析上の粒径比を小さくし、計算時間の短縮を行った。初期水位を 2.0 m として与え、境界条件は、いずれも縦横断境界に周期境界条件を適用した。数値実験は、合計 4 ケースを行い、Case1 は、粒子の重心位置に乱数を与えて投入位置を決定し、初期河床を形成した。Case2 は、河床表層を細粒化する目的で、Case1 の通水 20 s 付近に最小粒径 $d=1.5\text{ cm}$ の粒子群を 5 万個追加で投入した。Case3 は、初期河床を平坦にとするため、Case1 より粒子群を多めに投入した後、Case1 の初期の平均河床高以上の粒子を取り除き、平坦な初期河床を作成した。Case4 は、Case3 と同様の初期河床を用いた。Case1～Case3 は、水路勾配 $1/30$ で、最大粒径に対する無次元掃流力 $\tau_* \approx 0.17$ と全粒径が活発に移動する掃流力条件であり、Case4 は、水路勾配 $1/80$ で、最大粒径に対する無次元掃流力 $\tau_* \approx 0.06$ と掃流力の低い条件である。格子幅は、最小粒径 $d=1.5\text{ cm}$ を 4 分割する値に設定した。

すべての実験ケースにおいて、 100 秒程度で kinetic sieving による鉛直分級が形成され、初期河床の作成法の違いが鉛直分級に与える影響は小さいことを確認した。大粒径粒子が、表層で露出し離脱することで、鉛直上方に遷移し、一方、小粒径粒子群は、大粒径や中粒径間の離脱した空隙を埋め鉛直下方に移動する。中粒径粒子群は、初期に埋没していた粒子が離脱し上方に遷移していくこと、また初期に高い位置に配置していた粒子が鉛直下方に遷移することで鉛直分級が形成された。

また、鉛直分級の発達過程での河床の粒子数密度および離脱・堆積粒子数密度の鉛直分布を調べた。通水初期の段階では、各高さで粒子の離脱・堆積粒子数密度の相違が生じ、平衡状態に至ると離脱・堆積粒子数密度の鉛直分布はいずれの粒径も正規分布に近いことが得られた。さらに、粒子の pickup rate および deposition rate の鉛直

分布の計測を試み、それぞれ指数分布および正規分布形に近いことが得られた。これにより、河床の鉛直構造の変化過程と粒子運動の素過程との関係を整理した。

第5章「石礫河川の掃流層内の流れ構造と粒子運動」では、第4章で実施した掃流力の異なる実験ケース(Case3, Case4)について、鉛直分級が発達した動的平衡状態の掃流層内の流れ構造と粒子運動との関係を調べた。

掃流力が高く流砂量が大きくなると掃流層内の流速勾配が減少すること、掃流層上端から水面変動の影響が小さい $(z - z_b)/h = 0.70$ までは、両ケースの流速勾配は概ね一致しており、移動粒子群による流速勾配の変化は掃流層内部に限られていることが分かった。粒子群の平均流速分布から小粒径と中粒径粒子群の流速分布は、流れの流速分布とほぼ同様の速度で流れに追従している。一方、大粒径粒子群の速度は、平均流速と同様の分布形を有しながら $2u_*$ [m/s]程度遅く、粒子-流体間の運動量交換に、特に大粒径粒子が寄与していると考えられる。さらに、流砂量の増大に伴い、掃流層内のレイノルズ応力分布に変化が生じ、レイノルズ応力のピーク位置が鉛直上方に遷移すること、ピーク位置から掃流層上部までは、レイノルズ応力が増加することが明らかとなった。平均流および乱れ成分に及ぼす流体-粒子相互作用項の分析から、流体-粒子相互作用力項は、乱流成分よりも平均流により強く影響を及ぼし、平均河床高の近傍で重力加速度の流下方向成分と同等の大きさを有することが分かった。また、粒子運動が周囲の流体に及ぼす影響について明らかにするため、瞬時レイノルズ応力の空間分布の分析を行った。これにより、跳躍運動する粒子周りの瞬時レイノルズ応力は、粒子運動の影響を受けて、*ejection* ($u' < 0, w' > 0$), *inward interaction* ($u' < 0, w' < 0$), *sweep* ($u' > 0, w' < 0$) となることが確認できた。平均粒子速度が遅い大粒径粒子の周囲の流速は、 $u' < 0$ となる為、粒子の跳躍運動に合わせて *ejection*, *inward interaction* を取る。このため、掃流層上部で、掃流力の増大に伴いレイノルズ応力が増加傾向にあることは、大粒径粒子群の運動に伴う流体混合作用の中でも特に *ejection* の寄与が大きいと考えられる。本章の検討から、跳躍運動する石礫粒子群と掃流層内の平均流や乱れ構造の変化の関係など、基礎的な知見を明らかにすることが出来た。

第6章「結論」では、本論文で得られた成果を総括し、今後の課題を示している。

本研究では、石礫河川の掃流砂機構及び河床構造の変化過程の解明を目的に、Fukuokaらの数値解析法に基づき種々の数値移動床実験を行った。掃流砂に及ぼす粒子形状の影響、混合粒径で構成される河床構造の変化過程および掃流層内の流れ構造と粒子運動の相互作用について明らかにした。

以下に今後の課題を示す。

- ・第4章で実施した混合粒径数値移動床実験では、縦横断方向に周期境界条件を用いた平衡状態の検討に限られているが、実際の洪水時に生じる河床変動は、非定常・非平衡な場であり、本検討との相違がある。この点について、鉛直分級過程や跳躍運動などが、どのように変化するかを明らかにする必要がある。また、混合粒径の非球形粒子形状の検討を行い、各粒径階の粒子運動に及ぼす粒子形状と体積の効果を明らかにする必要がある。
- ・石礫河川の粒度分布は2~3オーダー程度であるのに対して、本検討では、1オーダー程度の粒度幅しか有していない。本検討で用いた解像モデルを用いて、さらに小さい粒径を扱うことは計算負荷が高く、コードや解法の改良による高速化のみでは対応できないと考えられる。そのため、解像モデルと非解像なモデルを組み合わせたハイブリッドモデルの開発・適用を図ることが現象把握のために必要である。