

流砂運動に及ぼす石礫粒子形状の影響

中央大学大学院 学生会員 ○熱海 孝寿
 中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 序論

石礫河川は、様々な形状と大きさの河床材料を有しており、河床表層には、クラスター・覆瓦構造・鉛直分級などの構造が見られる。石礫粒子の形状と粒径は河床構造と流砂量に大きな影響を与えていると考えられているが、特に粒子形状の影響は十分に解明されていない。洪水時の石礫の観測は難しく、水理実験では、扱える粒径に制限があるため、実験から得られる成果は限定的である。福田ら¹⁾は、任意粒子形状と大きさを有する粒子群について、粒子運動と流れの相互作用を考慮した数値移動床水路を開発し、球粒子と石礫粒子で数値移動床実験を実施し、大粒径と小粒径間の運動形態の違いや、石礫粒子形状が土砂移動量に及ぼす影響を明らかにしている。しかし、粒径および粒子形状が異なる粒子群を用いた実験のため、結果に及ぼす粒子形状の影響が明確で無かった。本研究では、同一体積の異なる形状の粒子を用いて数値移動床実験を4ケース行う。そして、流砂運動の素過程を定量的に分析し、流砂運動に及ぼす粒子形状の効果を明確にする。

2. 数値移動床実験の概要と実験条件

数値実験水路の諸元は、水路長 15m, 幅 1m, 勾配 1/20 の直線水路である。図-1 は、数値実験に用いた 2 種類の異なる形状の粒子を異なる方向から示している。2 種類の粒子は、同一の体積を有するようにつくられており、名目直径は $d = 70 \text{ mm}$, 密度は 2650 kg/m^3 である。表-1 は、数値移動床実験の実験条件を示している。

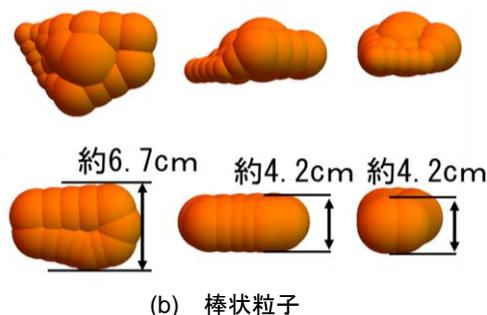


図-1 異なる視点から見た粒子形状

表-1 数値実験条件

	Case1	Case2	Case3	Case4
流量	[m ³ /s] 0.5	0.5	0.5	0.5
水深	[m] 0.24	0.23	0.24	0.25
フルード数($t=100\text{s}$)	- 1.27	1.35	1.31	1.25
粒子形状	扁平	棒状	2種類 (扁平, 棒状)	球
名目直径	[mm] 70	70	70	70
堆積層厚さ	[m] 0.23	0.21	0.22	0.22

初期河床の作成の為に投入した粒子群の総土砂量は 4 ケースとも等しい。上流端で一定流量 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ を与え、下流端は圧力を 0 としている。給砂は下流端を通過した粒子を同時刻に上流 $x = 1 \sim 3 \text{ m}$ の範囲にランダムに投下させている。数値解析法は、福田ら¹⁾の解法を用い、流れは Euler 的に、粒子運動は剛体として Lagrange 的に解析する。

3. 通過礫量の比較

図-2 は $x = 11 \text{ m}$ の断面を通過した粒子の体積量を示す。河床が平坦を維持していた $t = 0 \sim 100 \text{ s}$ で計測を行った。Case4 の土砂輸送量は他のケースと比較して極端に多い。非球形粒子と異なり球形状粒子は、点接触しか生じない。そのため、球は、一般的に最も移動しやすい形状と考えられる。粒子形状の違いが、流砂量に大きな影響を与えることが確認された。通過礫量に生じた差異の原因を明らかにするため、以下では、流砂の素過程について分析を行う。

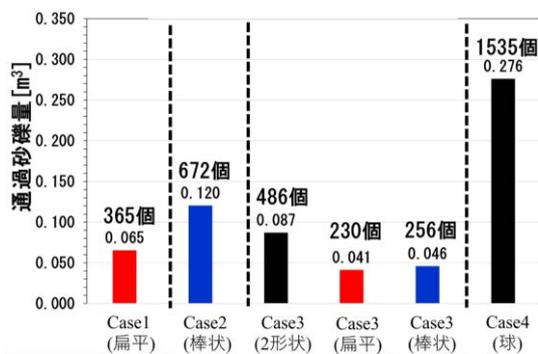


図-2 通過礫量

4. 粒子の移動速度と流下中の投影面積

跳躍運動中の粒子を分析する為、 x 方向の速度が 0.05 m/s 以上の粒子を移動粒子と定義した。また、衝突により一時的に速度が 0.05 m/s 未満の値を取る粒子であっても更に移動を続ける場合についても、移動粒子とし

て評価した。 $t=0\sim 100s$ および $x= 10\sim 11m$ で、移動粒子を 0.1 秒間隔でサンプリングし、移動速度と x 方向の射影面積を分析した。 図-3 は、Case1~4 の摩擦速度で除した粒子速度を示している。 各実験ケースで、粒子の移動速度の平均値及びバラツキがほぼ同じ値を示していることが分かる。

図-4 は、Case1(扁平), Case2(棒状)の移動粒子の x 方向投影面積の頻度分布を示している。 x 方向の投影面積の算出には、他の移動粒子の遮蔽は考慮していない。 図-4 より、Case1(扁平), Case2(棒状)どちらも、平均値付近でピークを示しており、概対照的な分布している。 Case1(扁平), Case2(棒状)のいずれも、平均値は、名目直径である $d=0.07m$ の球の投影面積とほぼ等しい。 跳躍運動は、不規則な回転運動をするため、平均的にみれば、流下方向の投影面積は、体積に規定されていると考えられる。

5. 離脱量および離脱割合

図-5 は、Case1~4 の $t=0\sim 100s, x=10\sim 11m$ 区間での離脱量を示している。 各ケースの離脱量の比は、図-5 に示した通過礫量とほぼ同じであり、粒子形状の効果は離脱過程や河床構造に顕著に現れる。 非球形粒子群の通水後の河床には、覆瓦構造の形成²⁾、クラスターの形成³⁾ が確認され、安定な河床の形成に粒子形状の影響が重要である。

扁平、棒状粒子群の離脱過程を詳細に調べる目的で、追加に数値実験を実施した。 数値実験の水路は、10m、幅 1m、水路勾配は 1/20 で、 $x=6\sim 8m$ 移動粒子を 20cm 程度の深さで敷き詰めている。 水路の他の区間には、表層一層に移動粒子が敷き詰められている。 流量を $0.1\sim 0.5[m^3/s]$ の範囲で $0.1[m^3/s]$ ずつ変更し、pick up rate を計測した。 pick up rate の計測方法は、中川ら⁴⁾と同様に、トレーサー粒子の残留率を調べ算出した。 図-6 は、pick up rate の計測結果を示す。 CaseA(扁平), CaseB(棒状)を比較すると、限界掃流力付近の低い掃流力では、粒子の形の効果は明確に現れていない。 どちらの実験でも、一定数離脱しやすい姿勢や配置の不安定な粒子が存在したためであると考えられ、一方、高掃流力状態では、CaseA(扁平), CaseB(棒状)の離脱割合に明確に差異が生じている。 これは、扁平な粒子形状は、平らな面積が大きく不規則な形状の為、クラスターを形成しやすく、棒状粒子と比較して周囲の粒子に力を伝達しやすいためと考えられる。

4. 結論

石礫粒子の運動に及ぼす粒子形状の影響を分析した。 その結果、粒子形状の影響は、粒子速度に明確に現れず、高掃流力下での離脱割合に顕著に現れた。 今後は、クラスターの存在割合などを明らかにし、離脱割合とクラスターの関係性を明らかにしていく。

参考文献

1) 福田ら：土木学会論文集 B1 (水工学), Vol. 69, No. 4, pp. I_1051-I_1056, 2013. 2) 熱海ら：土木学会関東支部論文報告集, 第 46 号, II-63, 2018. 3) 熱海ら土木学会論文集 B1(水工学), Vol.74, No.5, pp.I_919-I_924, 2018. 4) 中川ら：土木学会論文報告集, 第 244 号, p.71-80.

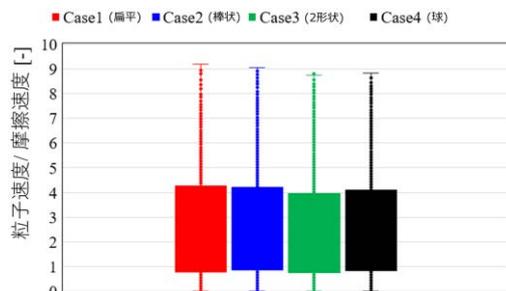


図-3 移動粒子の無次元速度

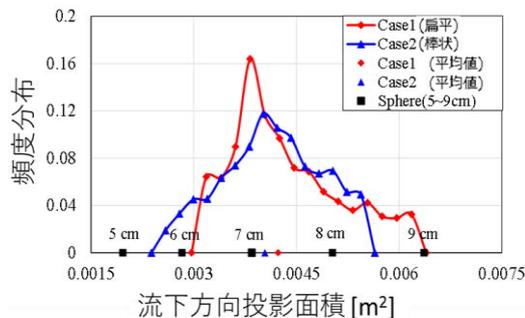


図-4 移動粒子の投影面積

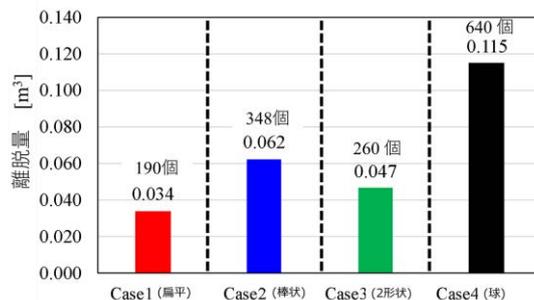


図-5 離脱量の比較

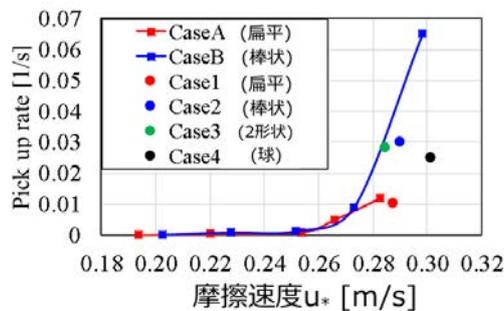


図-6 離脱割合