

石礫粒子の形状が粒子運動に及ぼす影響

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

石礫河川は多様な粒子形状と大きさを有した河床材料で構成され、洪水中の土粒子の間欠的な運動や鉛直分級、覆瓦構造等特徴的な現象が見られる。石礫河川の流砂現象の解明の為に、福田ら²⁾は粒子の形と大きさを任意に取り込み、粒子群の運動と流れの相互作用を考慮した三次元数値移動床水路を構築した。数値実験結果は、石礫粒子の移動軌跡や運動等を適切に説明し、表層で粗粒化した大礫集団が河床に作用する流体力の多くを受け持ち、河床が安定になる機構を定量的に説明している。加えて、数値移動床水路で非球形の粒子群を用いた田所ら³⁾の実験では、球群のみの実験と比較して、反砂堆の発達速度および遡上速度に違いが現れるなど、粒度分布だけでなく粒子の形も、安定な河床構造の形成に影響を及ぼすことを明らかにした。しかしながら、これらの研究は、形や大きさが異なる石礫集団による数値移動床実験に基づくため、粒子の運動に及ぼす個々の粒子の形の影響を定量的に明らかにすることは困難であった。そこで、著者らは、異なる形状を持つ一様な大きさを有する石礫を用いた数値移動床実験を行い、河床表層の構造について分析し、覆瓦構造の形成が河床の安定に寄与していること等を力学的に明らかにしてきた³⁾。本研究では、粒子運動に着目した分析を行い、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、数値解析に使用した 2 種類の非球形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 $d = 70$ mm、密度は 2650 kg/m^3 である。表-1 は、数値移動床実験の条件を示している。

初期河床の作成の為に投入した粒子群の総土砂量は 4 ケースとも同量で、堆積層の厚さはいずれも、およそ 21cm である。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

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。球形状を用いた Case4 の土砂輸送量は他のケースと比較して極端に多く、非球形粒子と異なり球形状粒子は、点でしか接触が生じず、河床に堆積している際に生じる接触力が小さいためだと考えられる。また、図-2 より粒子形状の違いが、流砂量に大きな影響を与えることが確認された。Kalinske 型の流砂量式では、流砂量を流砂体積と粒子速度の積で表現する。流砂体積と粒子速度を分析する為、 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、他の粒子との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は、移動粒子として評価した。定義した移動粒子を $t=0 \sim 100\text{s}$ および $x = 10 \sim 11\text{m}$ で、0.1 秒間隔でサンプリングした。図-3 および図-4 は、それぞれ流砂体積と粒子速度の計測結果を示している。図-3,4 より

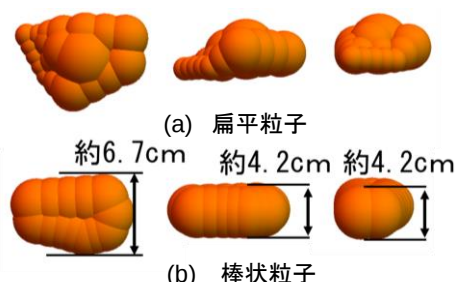


図-1 異なる視点から見た粒子形状

表-1 数値実験条件

	Case1	Case2	Case3	Case4
流量 $[\text{m}^3/\text{s}]$	0.5	0.5	0.5	0.5
水深 $[\text{m}]$	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形状 (扁平, 棒状)	球
名目直径 $[\text{mm}]$	70	70	70	70

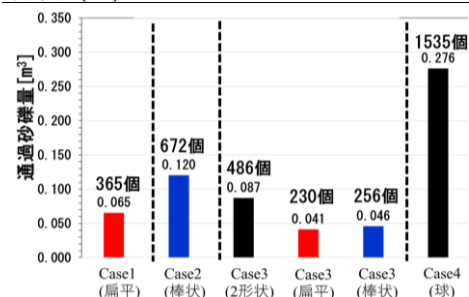


図-2 通過礫量

キーワード 石礫河川, 粒子形状, 粒子運動, 数値移動床

連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27-31214 中央大学研究開発機構 TEL 03-3817-1615

り、流砂体積には各ケースで差異が見られるのに対し、粒子速度は、各ケースで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。

4. 離脱に及ぼす粒子形状の影響

図-5 は、Case1～4 の $t=0\sim100s$, $x=10\sim11m$ 区間での河床からの離脱量を示している。各ケースの離脱量の比は、図-2 に示した通過礫量とほぼ同じであり、流砂体積の差異を生じさせた一因と考えられる。

扁平、棒状、球粒子群の掃流力と離脱割合(pick up rate)の関係を調べる目的で、新たに数値実験を行った。数値実験水路は、長さ10m、幅1m、水路勾配は1/20で、 $x=6\sim8m$ 区間を20cm程度の深さで敷き詰め移動床区間としている。水路の他の区間には、表層一層のみに移動粒子が敷き詰められている。流量を0.1～0.5 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。表-2 は、各ケースの摩擦速度を示している。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。移動床区間 $x=6\sim8m$, $y=-0.4\sim0.4m$ で表層に露出している粒子の内、鉛直方向に高い粒子をトレーサー粒子とした。各実験のトレーサー粒子の個数は67～105個の範囲であった。図-6は、計測したpick up rateを示している。摩擦速度は、いずれも $(gRI)^{0.5}$ から算出した。実線は、CaseA(扁平), CaseB(棒状), CaseC(球)の離脱割合であり、プロットは、移動床実験のCase1～4で計測した値を示している。

土屋⁵⁾は一様粒径および混合粒径土砂の限界掃流力時の土砂の移動状態をpick up rateの値が0.005 1/sとしており、これを本実験結果に適用して限界摩擦速度を求めると、CaseA(扁平), CaseB(棒状), CaseC(球)それぞれで、 $u_{*c}=0.266, 0.262, 0.230$ であった。球と比較して非球形粒子(扁平と棒状)の限界摩擦速度は15%程度大きい値を取った。また、CaseA(扁平), CaseB(棒状)を比較すると限界掃流力付近では、粒子形状の差異は、明確に現れておらず、これは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ているためであると考えられる。一方、高掃流力状態ではCaseA(扁平), CaseB(棒状)の離脱割合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、棒状粒子と比較して周囲の粒子に力を伝達し移動しにくいと考えられる。

5. 結論

同一体積で粒子形状が異なる数値移動床実験を行い、粒子形状の違いによって土砂の輸送量に有意な差が確認された。そして、粒子形状の影響は、特に離脱過程に明確に現れたことが原因と考えられる。非球形粒子の扁平と棒状粒子群の離脱割合を分析した結果、特に高掃流力時の離脱量に粒子形状の差異が顕著に現れた。離脱量の評価に向け、形や大きさの異なる粒子群について、限界掃流力や河床表層の構造と離脱運動の関係を今後詳細に検討し、石礫河道の土砂移動機構を明らかにする必要がある。

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) 田所ら：土木学会論文集 B1 (水工学), Vol.70, No.4, pp. I_961- I_966, 2014. 3) 熱海ら：河川技術論文集, 第25巻, pp.747-752, 2019. 4) 中川ら：土木学会論文報告集, 第244号, pp.71-80 1975. 5) 土屋義人；京大防災研究年報, Vol.6, pp.228-253, 1963.

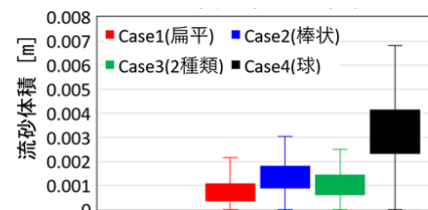


図-3 流砂体積($x=10\sim11m$)

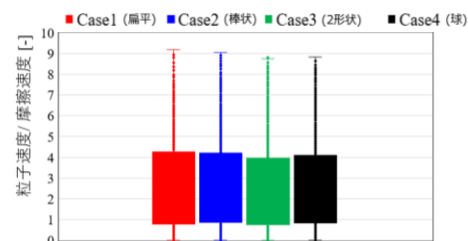


図-4 移動粒子の無次元速度 ($x=10\sim11m$)

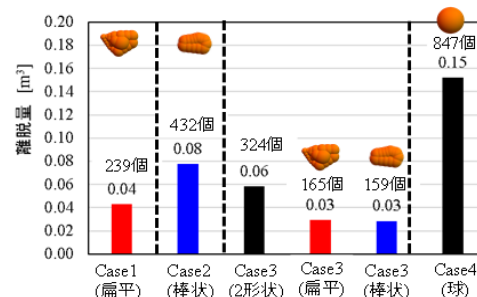


図-5 離脱量の比較

表-2 実験条件(摩擦速度 m/s)

流量 [m^3/s]	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
CaseA(扁平)	0.194	0.220	0.254	0.266	0.283
CaseB(棒状)	0.202	0.228	0.252	0.273	0.298
CaseC(球)	0.196	0.230	0.248	0.255	—

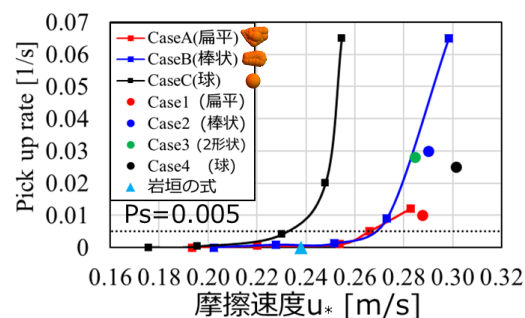


図-6 離脱割合の計測結果