

流砂運動の素過程と流砂量に及ぼす粒子形状・粒度分布の影響

Effects of particle shapes and sizes on fundamental movement process of particles and sediment transport rate in streams

田所弾 (東京建設コンサルタント), 福田朝生 (中央大学研究開発機構), 福岡捷二 (中央大学研究開発機構)

TADOKORO Hazumu, FUKUDA Tomoo and FUKUOKA Shoji

Abstract Gravel-bed rivers are composed of a large variety of particle sizes and shapes. Large particles at the bed resist against flood flows, but are picked up and move intermittently. These particle motions are different from those in sandy rivers where most of particles move continuously. To estimate sediment transport rate in gravel-bed rivers, fundamental movement processes of particles with different sizes and shapes have to be examined. In this paper, three-dimensional numerical movable-bed simulations were conducted, and sediment transport rate and fundamental movement processes of particles were measured under three conditions of spheres, gravel particles and mixed particles. We found that the assessments of direct effects of particle shapes and sizes on fundamental processes are important for more accurate estimations of transport rate of mixed sediments.

Keywords: particle shape, particle size, sediment transport rate, fundamental movement process, solid-liquid multiphase flow

1. 序論

石礫河川は様々な大きさ・形状の粒子から構成されており、大きな粒子は容易には動かさず、間欠的な運動をとり、多くの粒径が移動する砂礫河川とは異なる。石礫河川の流砂量を説明するためには、流砂運動の素過程に及ぼす粒子形状や粒径の効果を明らかにする必要がある。砂礫河川の素過程に基づく流砂量式として式 (1)[1] がある。

$$q_{Bij} = f(d_{ij}) \cdot (A_3 d_{ij}^3 / A_2 d_{ij}^2) \cdot \Lambda_{ij} \cdot P_{sij} \quad (1)$$

ここに i : 粒径, j : 粒子形状, P_s : 離脱確率(Pick-up rate), A : 移動距離(Step length), $A_3 d^3$: 粒子体積, $A_2 d^2$: 上からの粒子投影面積, $f(d_{ij})$: 面積占有率である。

福田ら[2]は、流れと土砂の三次元運動を解析できる数値移動床実験水路を開発した (Fig. 1, 2)。本研究では、この数値水路を用いて、各々3種類の斜面崩落数値実験・移動床数値実験を行い、摩擦角や流砂量、その素過程である Pick-up rate (粒子の離脱確率) と $A_2 d^2$ (離脱粒子の河床停止時の上から見た際の露出投影面積), Step length (粒子が離脱してから堆積するまでの移動距離) に対し、粒子形状

や粒径がどのように効いているか検討する。

2. 数値移動床水路の概要

Fig. 3 に示す5種類の形状を用いて Fig. 4 に示す粒度分布 (40mm 青色, 50mm 赤色, 70mm 水色, 90mm 緑色, 120mm 黄色) となるように各形状を均等な数に設定し、数値実験を行った。石礫粒子4形状の粒子径は同一体積の球の直径として定義している。斜面崩落数値実験は粒子群間の摩擦角 Φ を求めるもので、水路の端から 2m の範囲に壁を立て、その間に高さ 2m となるように粒子群を敷き詰め、水深 3m の条件の下、瞬時に壁を取り除き粒子群を崩落させ、安定な斜面を形成させる。移動床数値実験では、水路に粒子群を敷き詰め、水路長 15m の水路の上流端で 0.5 m³/s の一定流量を与える。給砂は下流端を通過した粒子を同時刻に上流 $x=1-2m$ の範囲にランダムに投下させる。本研究の数値解法は、粒子は形状を維持しながら移動する剛体として Lagrange 的に解析し、流れは、粒子を密度の異なる液体として全体を非圧縮性流れとして Euler 的に解析する。粒子の運動解析は、粒子の接触を個別要素法 (DEM) で計算し、流れ場の解析から粒子に作用する流体力を直接評価し、剛体の並進と回転の運動方程式により個々の粒子の運動を解き、流れの解析の固相の位置と流速を修正する。

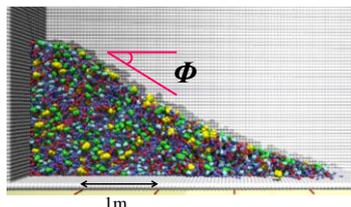


Fig.1 Numerical slope failure experiment.

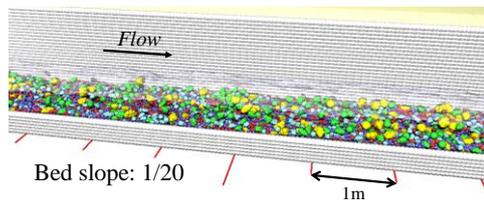


Fig.2 Numerical movable-bed experiment.

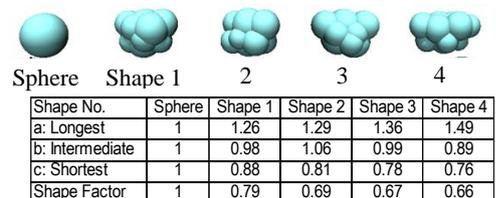


Fig.3 Particle shape.

Slope failure exp.	Condition	$\tan\Phi$
Case1-1	Spheres	0.40
Case1-2	Gravel particles	0.63
Case1-3	Mixed particles	0.60

Movable-bed exp.	Condition	Sediment transport rate (five particle sizes) [m ³ /s]
Case2-1	Spheres	2.7E-03
Case2-2	Gravel particles	1.5E-03
Case2-3	Mixed particles	2.0E-03

Table 1 Experiment cases and results.

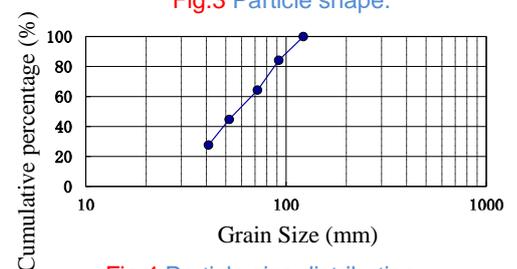


Fig.4 Particle size distribution.

詳細は文献[2]を参照されたい。

3. 斜面崩落実験の $\tan\Phi$ と移動床実験の流砂量の比較

崩落実験では、崩落後の最急勾配を計測し $\tan\Phi$ を評価した。同一粒子群の実験は、水路底面を移動床・固定床、さらに崩落粒子群の敷き詰め高さを変えても、 $\tan\Phi$ の値がほとんど変化しない。実験結果を Table 1 に示す。球粒子が多く含まれているほど $\tan\Phi$ の値が小さくなることが確認できる。次に移動床数値実験では 2m 間隔・60s 間計測した同粒径同形状の流砂量の時空間平均の値を Table 1 に示す。球粒子が多いほど総流砂量が大きくなっていることがわかる。Fig. 5 に示す $\tan\Phi$ と総流砂量を比較すると、同様の粒度分布を用いても、球形粒子群が多いほど、粒子群間での接触点数が減少することで、粒子間のかみ合わせ効果が減少し、斜面崩落実験では $\tan\Phi$ が小さく、移動床実験では総流砂量が大きくなると考えられる。Fig. 5 を粒径ごとに見てみると、球とは異なる形状が多く含まれている実験ほど、各粒径流砂量が小さくなる傾向を示すが、その変化の仕方は粒径ごとに異なる。このように詳細な流砂量を推定していくため、流砂運動の素過程を検討していく。

4. 流砂運動の素過程に及ぼす粒子形状の影響

Case2-1,3 を用いて各粒径毎の粒子形状が A_2d^2 , P_s , A に対し、どのように作用しているかを検討する。Fig. 6 は離脱粒子が河床表層から抜け出す際の水路上から見た粒子投影面積 (A_2d^2) の同粒径の球に対する投影面積 ($\pi d^2/4$) の割合 ($A_2d^2/(\pi d^2/4)$) を示す。球から異なる形状の粒子ほど平らな面 (短径) を上に向け重心を低くして停止するため、面積割合 ($A_2d^2/(\pi d^2/4)$) が大きくなる。さらに大きい粒子ほど粒子形状による A_2d^2 の差が顕著に出ている。これは大きい粒子は小さい粒子に比べて相対的に周りの粒子配置の影響を受けにくく、安定な向きをとりやすいためである。

河床表面に停止して存在する各粒径・形状毎の粒子について、上から見た占有する面積の中で、単位時間当りに始動した各粒径・形状粒子の上から見た面積の比で、Pick-up rate (P_s) を評価した。Fig. 7 に P_s の計測結果を示す。小さい粒子では A_2d^2 が大きい粒子ほど P_s が小さくなる傾向を示すが、大きい粒子の P_s はほとんど一律の値をとる。

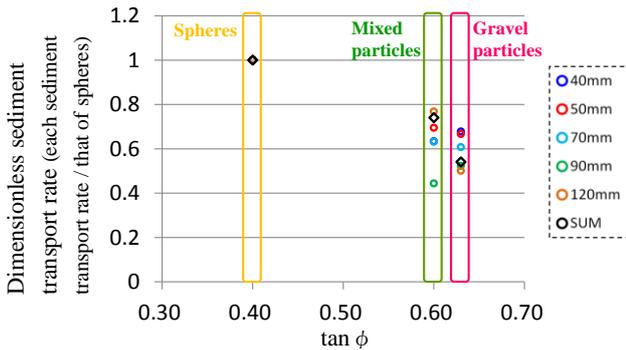


Fig.5 Comparison between sediment transport rate and $\tan\Phi$.

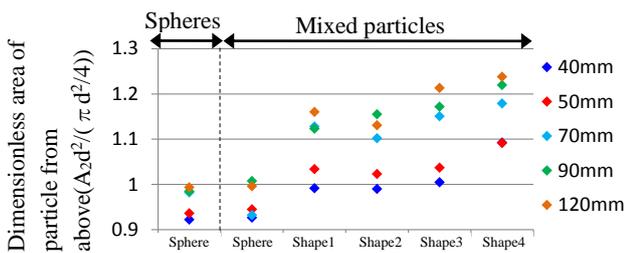


Fig.6 Comparison between A_2d^2 (projected area from above at the time of before pick-up) and particle shape.

$Step\ length(A)$ は粒子が動き出してから停止するまでの x 方向移動距離と定義され、大きい粒子の A は大きいため、十分長い数値移動床水路でないとい計測出来ない。ここでは十分な標本数を計測することができる小さい粒子 ($d=40,50\text{mm}$) の A を各粒径で無次元化し、Fig. 8 に示す。球から異なる形状の粒子ほど、 A は大きくなるように見えるが、形状 3, 4 はこの傾向を示さない。したがって粒子の無次元 A は、粒子形状によって、それほど変わらないとも読むことができる。この結果については更に検討が必要である。

これまで計測した流砂運動の素過程を用い、式 (1) から算定した流砂量と、数値移動床水路で直接計測した粒径・形状別流砂量の比較を Fig. 9 に示す。十分な数の粒子が計測できた 40, 50mm 粒子に関しては、両者は概ね近い値を示す。最後に、流砂量とその素過程を構成する P_s と A_2d^2 , A の関係について考察する。大きい粒子も小さい粒子も、球とは異なる形状ほど A_2d^2 は大きくなり、 P_s はそれに比べると大きくは変化しない。よって単位面積単位時間当たりの離脱粒子数 P_s/A_2d^2 は、球とは異なる形状ほど少なくなる。一方、 A は粒子形状毎にそれほど異なる値をとらない。離脱粒子数 P_s/A_2d^2 と A の積では、離脱粒子数に粒子形状の効果が大きく表れるため、流砂量は球とは異なる形状ほど小さくなる傾向を示した。

5. 結論

斜面崩落実験での $\tan\Phi$ と流砂運動の素過程が流砂量に及ぼす影響を明らかにした。 $\tan\Phi$ と流砂量の関係から、粒子形状が流砂量に及ぼす影響をおおよそ推定できる。より適切な推定のためには、流砂運動の素過程に及ぼす粒子形状の影響を取り込んでいく必要性を示した。

参考文献

- [1] 辻本哲郎ほか, 土木学会論文集, pp.37-46 (1992).
- [2] 福田朝生ほか, 土木学会論文B1, pp.I_937-I_942 (2012)

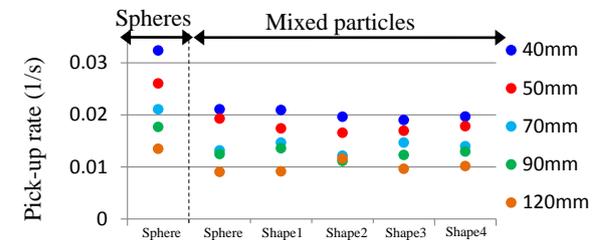


Fig.7 Pick-up rate with respect to particle shape.

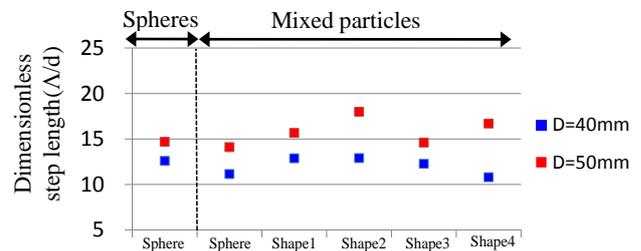


Fig.8 Step length with respect to particle shape.

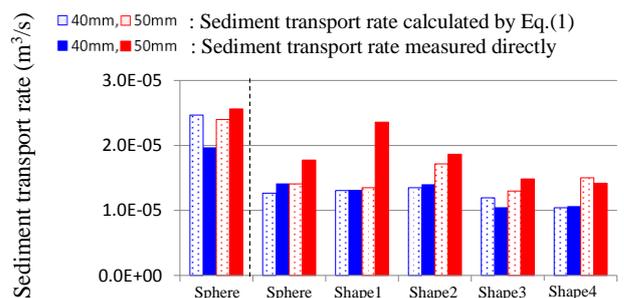


Fig.9 Comparison between Eq.(1) and sediment transport rate.