

流砂量と流砂運動の素過程に及ぼす粒子形状・粒度分布の影響

株式会社東京建設コンサルタント 正会員 ○田所 弾
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径と形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。

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

ここに i : 粒径, j : 粒子形状, p_s : 離脱確率(Pick-up rate), Λ : 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。この水路は、土石流等の流動を適切に評価できるモデルであることが示されている³⁾。本研究では、数値移動床実験を行い、球形単独と、球形と石礫の混合の2つの条件下で流砂量と流砂運動の素過程を計測し、石礫河川の流砂量に及ぼす、粒子形状・粒度分布の効果について検討する。

2. 数値移動床水路の概要

図-2に示す粒度分布(40mm 青色, 50mm 赤色, 70mm 水色, 90mm 緑色, 120mm 黄色)となるように図-3に示す5種類の粒子形状を均等な数に設定し、流路に敷き詰め、数値実験を行った。粒子形状を概略

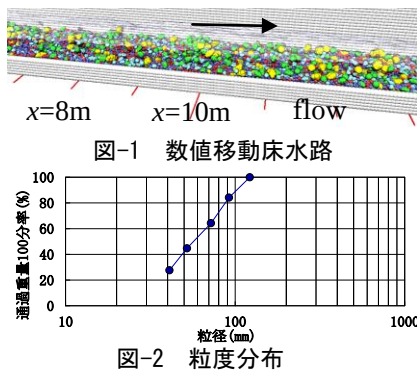


図-2 粒度分布

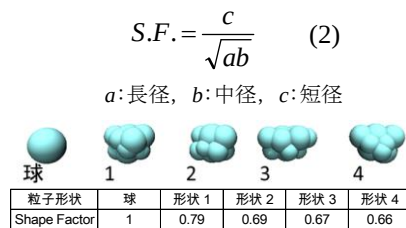


図-3 粒子形状

評価する方法は幾つかあるが、本文では式(2)で示される粒子の三軸(短径・中径・長径)によるShape Factorを用いる。このS.F.は、値が1に近いほど球形に近い。5形状のS.F.の値は、図-3のようになり、形状1が球形に一番近く、その他は似かよったS.F.の値を持つ。石礫粒子の粒子径は同一体積の球の直径として定義されている。水路上流端で0.5 m³/sの一定流量を与えた。水路長は15mである。給砂は下流端を通過した粒子を同時刻に上流 $x = 1-2$ mの範囲にランダムに投下させる。数値解法は福田ら²⁾の解析法を用い、流れはEuler的に、粒子は剛体としてLagrange的に解析する。計算法の詳細は文献²⁾を参照されたい。

3. 流砂量に及ぼす粒子形状の影響

数値移動床実験で2m間隔・60s間計測された各粒径・形状の流砂量の時空間平均の値を図-4に示す。5粒径の粒子群を用いた混合実験の流砂量を基準にして流砂量を比較するため、球単独実験の流砂量を1/5倍して示している。いずれの実験においても、大きい粒子・球形に近い粒子形状ほど流砂量が大きくなる。混合実験では球形単独実験に比べ球形の流砂量が減少している。これは球とは異なる石礫粒子のかみ合わせ効果により、球粒子が動きにくくなったためである。

4. 流砂運動の素過程に及ぼす粒子形状の影響

数値移動床実験の結果を用いて、離脱確率等、式(1)に示す各素過程に及ぼす粒子形状・粒度分布の影響を

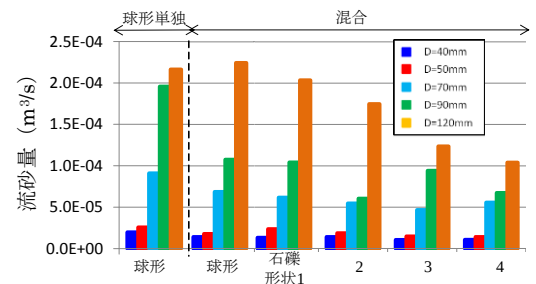


図-4 各粒径・形状別流砂量

キーワード 数値移動床水路, 粒子形状, 粒度分布, 流砂運動の素過程, 流砂量

連絡先 〒530-0042 大阪市北区天満橋 1-8-63 東京建設コンサルタント 関西本社 TEL 06-7636-1152

検討し、最後に各素過程と流砂量の関係について検討する。

図-5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と考えられる。

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、単位時間当たり開始した各粒径・形状粒子の上から見た面積の比で、 $p_s(1/s)$ を評価した。図-6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 はほとんど一様の値をとる。

Λ 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 Λ は長いため、数値移動床水路が十分長くないと計測出来ない。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 Λ を各粒径で無次元化し、図-7に示す。球から異なる形状の粒子ほど、 Λ は大きくなるように見えるが、形状3、4についてはこの傾向を示さない。したがって粒子の無次元 Step length 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図-8に示す。十分な数の粒子について素過程が計測できた40, 50mm粒子に関しては、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 Pick-up rate と A_2d^2 , Step length 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、 Λ 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 Λ 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

粒径・形状ごとに流砂運動の素過程は異なるので、石礫河川での流砂量を推定するためには、各形状粒径が流砂運動の素過程に及ぼす影響を評価することが重要である。

参考文献

- 1) 辻本哲郎, 後藤仁志, 中川博次: 時間軸上に展開された非平衡流砂過程のモデル化, 土木学会論文集, 1992.
- 2) 福田朝生, 福岡捷二, 内田龍彦: 移動床数値実験水路を流下する石礫粒子群の三次元運動, 土木学会論文集 B1, 2013.
- 3) 福田朝生, 福岡捷二: 土石流水路実験結果を用いた数値移動床水路による高濃度粒子群と水流の力学的相互作用の検討, 土木学会論文集 B1, 2016.

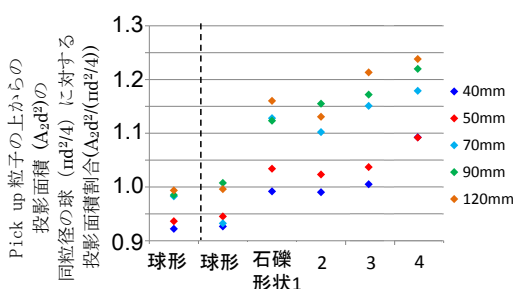


図-5 Pick-up する粒子の A_2d^2 と粒子形状

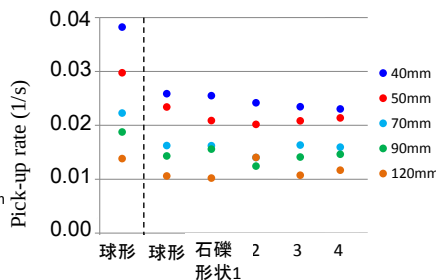


図-6 Pick-up rate (p_s)

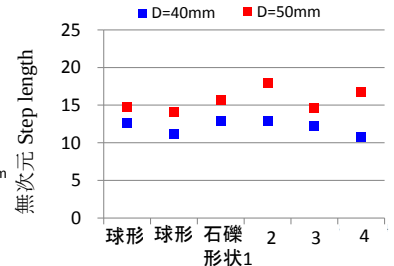


図-7 無次元 Step length (Λ/d)

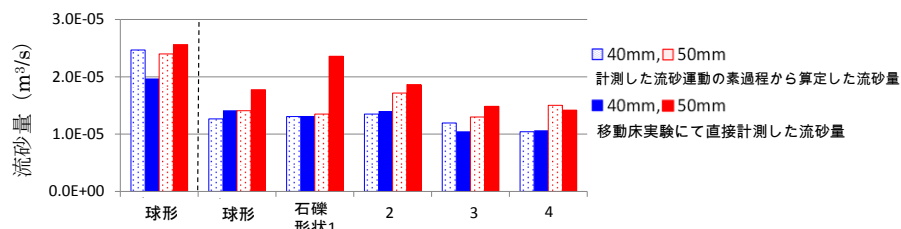


図-8 流砂運動の素過程から算定した流砂量と数値移動床水路で計測した流砂量の比較