

石礫群の流下挙動と流れ場に及ぼす粒子群形状分布の影響

中央大学大学院 学生会員 ○高 鋏 裕也
中央大学研究開発機構 フェロー会員 福岡 捷二

1. 序論

幅広い粒径、形状の河床材料からなる石礫河川の河床変動解析法が求められている¹⁾。一般に、河川における水流と土砂による固液混相流は、図-1に示すように、流れ場、粒子群、粒子単体に関する要素に支配される。しかし多くの流砂研究では、粒子形状を球と仮定している。石礫河川の土砂移動現象を適切に理解するためには、粒子形状を考慮する必要があると指摘されている²⁾。著者らは、流砂運動に及ぼす形状の影響に関する基礎的研究として、広島大学により行われた実際の石礫を用いた石礫流送実験の映像^{3),4)}の画像解析、実験を模擬した数値水路実験を行い、小さくかつ一様な凹凸場において高速で流下する石礫単体の移動速度は、石礫の形状と最大投影面積により規定されることを示した^{5),6)}。しかし実際の流砂運動は、石礫群として移動しており単体の運動だけで規定されるわけではない。

本研究では、形状分布の異なる石礫群を固定床粗面水路に流下させ、石礫群の運動と流れ場に及ぼす形状分布の影響を検討する。

2. 数値水路実験の概要と数値解析法²⁾

数値水路実験(図-2参照)での石礫群の移動速度、運動形態を調べる。石礫群は、表-2に示すように、球群、洋ナシ型群、円盤型群、混合形状の4ケース、それぞれ24個ずつ投入する。代表粒径は、同体積の球の直径と定義し、全て105mmである。上流端には、3.0m³/sの一定流量を与え、下流端は圧力ゼロとする。水路は全長21m、幅2.2m、水深は約0.4m、勾配1/100である。本稿の解析法は、福田ら²⁾の解析法を用い、流れはEuler的に、石礫の運動は、Lagrange的に解析する。流れ場の解析における混相流の密度 ρ は、流体計算セルに含まれる気相、液相、石礫、水路構成粒子の密度を体積平均して評価する。本稿では、水路との接触が重要となることから、流れ場の解析時には、水路構成粒子の密度を水と等価とすることにより、水路床近傍の密度増加が生じないようにした。

3. 石礫群の流下挙動に及ぼす形状分布の影響

観測は、先頭の石礫が水路上流端から8m地点を通過し、19m地点に到達するまでの時間とする。図-4に石礫群の平均移動速度を示す。上下のバーは石礫群中の個々の石礫の平均移動速度のバラツキを表す。石礫群の平均移動速度は、洋ナシ型群>円盤型群>混合形状>球群の順となった。球群と洋ナシ型の石礫群は、石礫単体の場合^{5),6)}と同様に最大投影面積が大きいほど移動速度が速い。これは洋ナシ型の石礫は跳躍するが、球は、底面凹凸が小さいこと、また自身の形状のため跳躍しないためである。一方、最大投影面積の大きい円盤型の石礫群の移動速度は、石礫単体の場合^{5),6)}と異なり、洋ナシ型の石礫群より遅い。これは石礫の運動形態と石礫同士の衝突によると思われる。円盤型の石礫は単体で移

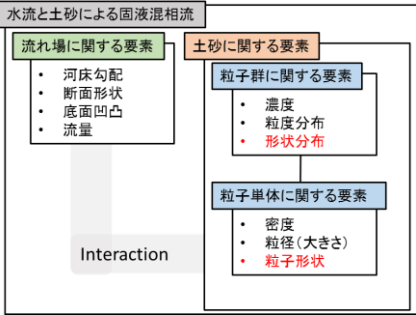


図-1 水流と土砂による固液混相流を支配する要素

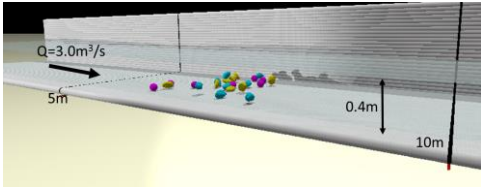


図-2 数値水路実験

表-1 石礫の形状

石礫モデル	球	洋ナシ型	円盤型
形状名	球	洋ナシ型	円盤型
無次元長径 (長径/同体積球の直径)	1.00	1.34	1.50
無次元中径 (中径/同体積球の直径)	1.00	0.90	1.00
無次元短径 (短径/同体積球の直径)	1.00	0.83	0.60
Shape Factor ($c/(ab)^{0.5}$)	1.00	0.76	0.49
無次元最大投影面積 (最大投影面積/ 同体積球の投影面積)	1.00	1.25	1.61

表-2 投入した石礫群

ケース	球	洋ナシ型	円盤型	合計
(a)	24(個)	0	0	24
(b)	0	24	0	24
(c)	0	0	24	24
(d)	8	8	8	24

動する際、水路底面近傍を浮上して移動する場合に速く、短軸を回転軸として転動・跳躍する場合に遅くなる^{5),6)}。図-5に石礫群の運動する様子を示す。図-5(a)に示すように、浮上して移動する石礫もあるが、他の石礫に衝突し、短軸を回転軸とした転動・跳躍により移動する運動形態に変化する傾向にあり、円盤型の石礫群の移動速度が低下したと考えられる。石礫群全体と個々の石礫に着目する。一様形状の場合、群の移動速度と個々の石礫の移動速度とのばらつきは小さい。一方、混合形状では、個々の石礫の移動速度が大きくばらつく。これは石礫群が異なる形状の石礫で構成されており、その移動速度および運動形態が異なるためである。混合形状の石礫群は流下と共に分散することが示された(図-5(d)参照)。石礫群の鉛直構造を検討する。図-6に石礫群の平均鉛直高(太線)、鉛直高の最高点(点線)の時系列変化を示す。平均的な鉛直高は、形状分布が球から外れるほど大きくなる。鉛直高の最高点は、形状分布の中で球からのズレの大きい石礫に依存して大きくなる。以上より、球群は2次元的な運動で、形状分布が球から外れるほど石礫群は3次元的に運動し流下する。次に、流れ場に及ぼす影響を検討する。石礫が無い場合における平均流速は、3.01m/sであり、石礫群を投入した場合は2.98~3.05m/sと、石礫群の投入による平均流速への影響は現れなかった。しかし図-7に示すように、黒線で表す石礫群が無い場合の流速分布と比べ、石礫群を投入すると、石礫が存在する水路底面付近で流速が減少し、水面付近で増加する。水表面流速には、石礫群形状分布の影響は現れないが、流速分布が変化する位置は、石礫群の平均鉛直高付近で生じている。石礫群の運動と流れ場との相互作用の詳細については今後の課題とする。

4. 結論

石礫群の形状分布により、その移動速度や運動形態が大きく異なることから、石礫単体の形状だけではなく、石礫群の形状分布を考慮する必要があることを示した。石礫群の移動速度は、その運動形態と鉛直高、流速分布に大きく影響するが、本稿では、石礫の跳躍に大きな影響を及ぼす底面凹凸が小さく実現象とは異なる条件で行った。今後は底面凹凸と石礫形状が石礫運動に及ぼす影響を検討する。

参考文献

1)福岡捷二:水工学に関する夏期研修会講義集 A,44,A-1,pp.1-25,2008. 2)福田朝生ら:土木学会論文集 B1(水工学),Vol.69,No.4,pp.I_1051-I_1056,2013. 3)重村一馬:広島大学大学院工学研究科修士論文,2004. 4)福岡捷二ら:河川技術論文集,第11巻,2005. 5)高鉦裕也ら:第70回年次学術講演会講演論文集,II-80,2015. 6)高鉦裕也ら:混相流シンポジウム講演論文集,A112,2015.

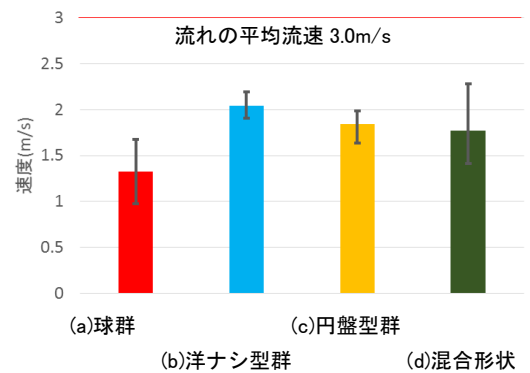


図-4 石礫群の平均移動速度

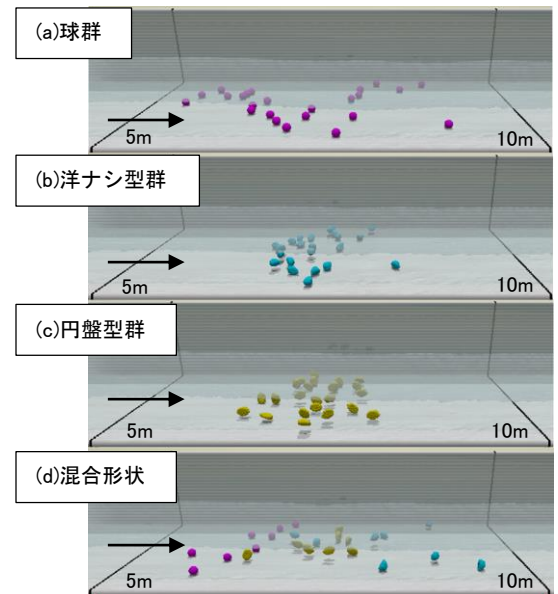


図-5 石礫群の運動する様子

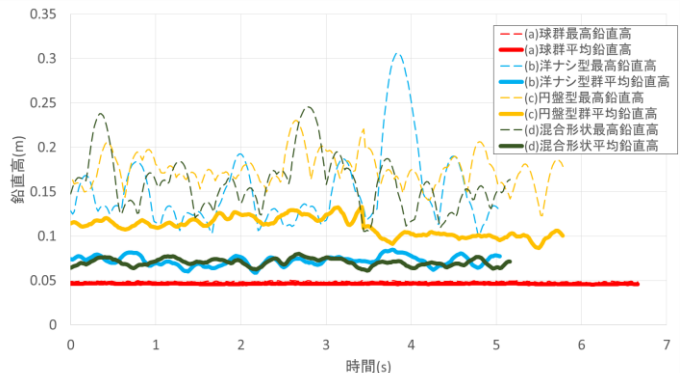


図-6 石礫群の鉛直高時系列変化

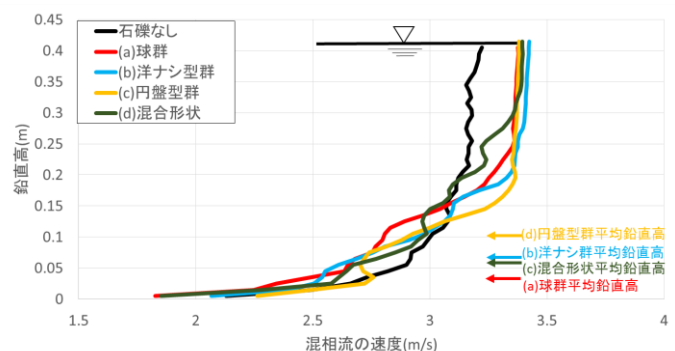


図-7 水流と石礫群による固液混相流の流速分布