

数値移動床水路における粒子群運動に及ぼす粒子形状、粒度分布の影響に関する研究

Study on the effect of particle shapes and particle size distributions on particle motions

in the numerical movable-bed channel

10D3104011L 河川工学研究室 田所 弾

Hazumu TADOKORO

1. 序論

石礫河川の河床は、粒子形状の異なる大粒径から小粒径までの広い粒度分布により構成されている。しかし、粒子形状の違いによる流送土砂量や河床変化については未だよくわかっていない。福田らは石礫粒子の形状を考慮した数値移動床水路（図-1 参照）を構築し、それを用いて石礫粒子群の粒子運動を解析している。しかし形の影響がどの程度であるのかを比較する基準となるものがない。そこで本研究では石礫粒子と等価な体積と粒度分布を持つ球粒子を用い、球群と石礫群の粒子運動に及ぼす粒子形状、粒度分布の影響を数値移動床水路での実験から評価する。

2. 数値移動床水路の概要

本研究の数値解法は、福田らと同様に流れを Euler 的に、粒子は Lagrange 的に解析する。粒子の接触力を個別要素法、流れ場の解析で粒子に働く流体力を評価し、剛体の並進と回転の運動方程式により粒子の運動を解き、次に流れの解析で固相の位置と流速を修正する。

3. 球と石礫の粒子運動の比較

数値移動床水路で福田らの石礫と同じ粒度分布（図-2, 5 粒径）を有する球群について、水流による粒子運動を調べる。水路諸元は水路長 15m, 水路幅 1m, 水路勾配 1/20 である。比重 2.65 の 5 粒径（40 mm 青色, 50 mm 赤色, 70 mm 水色, 90 mm 緑色, 120 mm 黄色）の材料を用い、石礫の粒子径は同一体積の球の直径として定義した。石礫は各粒径に対して図-3 の 1~4 で示す 4 種類の粒子形状が均等な数となるように設定している。ここでは 40-70 mm を小粒径粒子、

90-120 mm を大粒径粒子と定義する。上流端には流量 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ の一定流量を与え、下流端には圧力ゼロの境界条件を与えた。給砂方法は下流端を通過した粒子を同時刻に上流 $x = 1-2 \text{ m}$ の範囲にランダムに投下した。図-4 は河床が十分発達した時刻（球： $t = 200 \text{ s}$, 石礫： $t = 400 \text{ s}$ ）の河床高と表層粒子径の平面分布を示したものである。球と石礫どちらも河床の凸部は大粒径粒子の集団により形成されている。球群に比べ石礫群の方が河床の凹凸が大きいの。これは不規則な粒子形状が及ぼす粒子同士のかみ合わせ効果により、石礫群の凹凸は崩れにくく、凸部が維持されることで、流れが凹部に集中し、洗掘が生じたためである。図-5 は河床発達後（球： $t = 200 \text{ s}$, 石礫： $t = 360 \text{ s}$ ）の移動・停止時の粒子に着目し、小粒径粒子、大粒径粒子それぞれのアンサンブル平均をとった流体力、接触力、流速を示したものである。左軸は移動粒子の x 方向速度、右軸は水中重量の流下方向成分で無次元化した

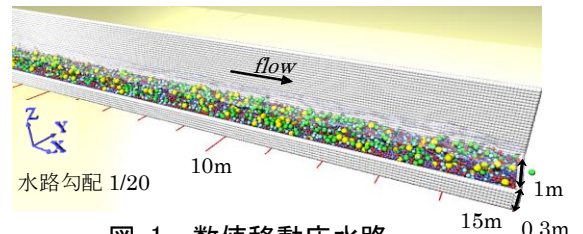


図-1 数値移動床水路

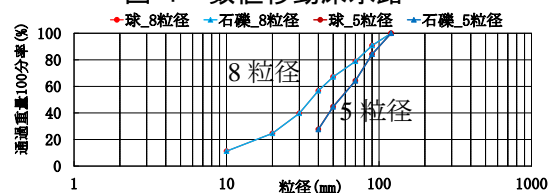


図-2 実験に用いた粒子の粒度

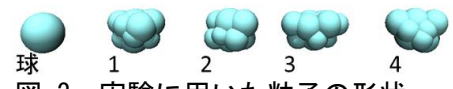


図-3 実験に用いた粒子の形状

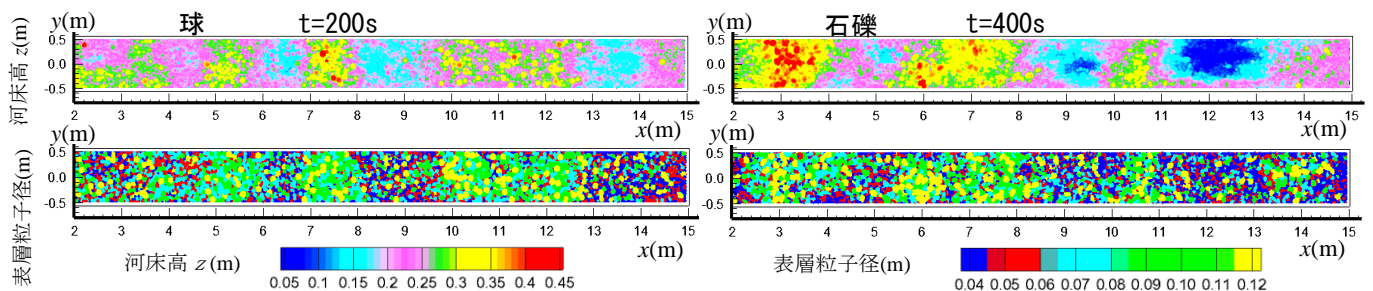


図-4 各時刻の河床高、表層粒子径の平面分布

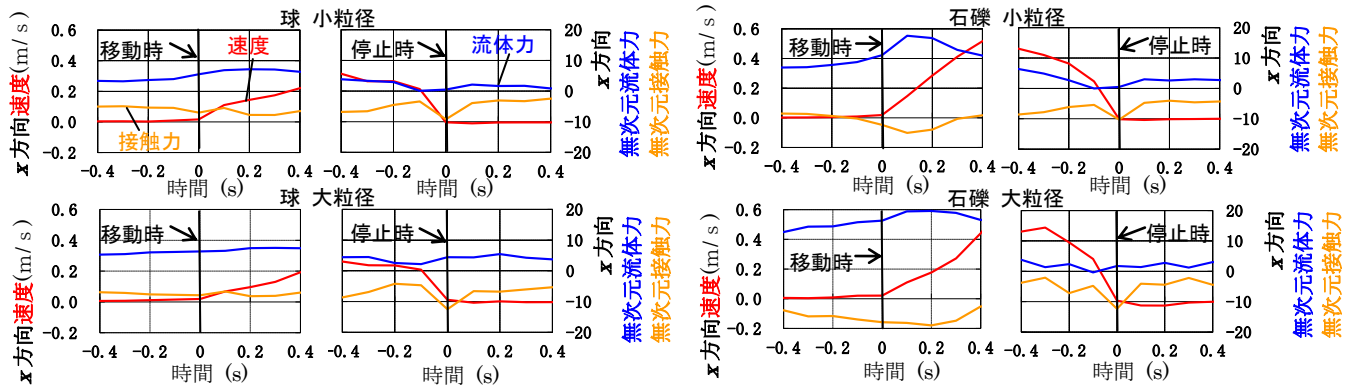


図-5 移動・停止時の粒子の速度・接触力・流体力の変化

x 方向の流体力および接触力を表している。移動開始時の石礫は、球に比べ大きな流体力が作用しないと動き出せないことがわかる。これは不規則な形状のかみ合わせ効果により、他の粒子に支持されやすく、大きな流体力にも抵抗することができるためと考えられる。また石礫は球に比べ急激に加速している。これは球に比べ表面積が大きく、動き出すと大きな流体力を受けやすいからである。移動停止時では球に比べ石礫の方が大きな流速から停止することができる。これも移動開始時と同じようにかみ合わせ効果により、石礫の方が他の粒子に支持されやすいためと考えられる。球と石礫のどちらの粒子も、移動開始時に比べ、移動停止時の方が作用する流体力が小さくなっている。これは移動開始時では、流体力が強く作用する発達した河床凸部の下流部付近から多くの粒子が離脱し、移動停止時では流体力が比較的弱い河床凸部の上流部付近で多くの粒子が停止するためである。

4. 球群と石礫群の水中安息角の比較

次にかみ合わせ効果を水中安息角の実験から検討する。数値移動床実験と同様の粒度分布 (図-2, 5 粒径), 粒子形状を用いて、球と石礫の水中安息角を計測した。水路の端から 1m の範囲に壁を立て、その間に高さ 0.7m の粒子群を敷き詰め、水深 1.5m の条件下、瞬時に壁を取り除き粒子群を崩落させた。図-6 に水中安息角の算定結果を示す。球の水中安息角 ϕ は 22° ($\tan\phi=0.4$), 石礫の水中安息角は 31° ($\tan\phi=0.6$) となった。形の効果により静水中を静止する石礫は、球に対して 1.5 倍 ($0.6/0.4$) も静止摩擦係数が大きくなる。図-6 の近景から、石礫は球とは異なり、他の粒子と平らな面を共有するように接触している。接触面を共有する石礫が移動する際は、必然的に 2 つの粒子が接触面を共有しながら一体的に回転する傾向を有することになる。この効果により、石礫は、河床内部

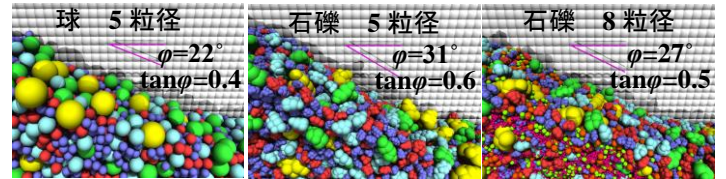


図-6 水中安息角 (水路中央断面図の近景)

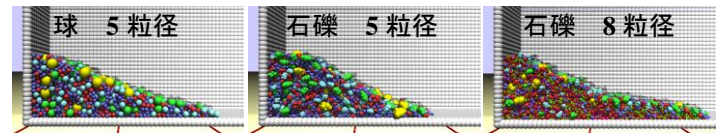


図-7 水中安息角 (水路中央断面図の遠景)

の粒子も一体的に表層の粒子の回転に抵抗する。逆に球は、隣接する粒子とは点接触となるため、お互いが回転を拘束する効果は石礫と比較して小さい。

次に細かい粒子を含んだ 8 粒径の球群、石礫群 (図-2) を用いて、粒度分布の違い、特に細かい粒子 (10 mm 紫色, 20 mm 黄緑色, 30 mm 橙色) の存在が他粒子集団に及ぼす効果を水中安息角の実験で検討する。計算条件は 5 粒径の水中安息角実験と同じである。この場合には、球の水中安息角 ϕ は 19° ($\tan\phi=0.35$), 石礫の水中安息角は 27° ($\tan\phi=0.50$) となった。図-6 の近景から、細かい粒子の存在によって、2 つの石礫粒子同士が平らな面を共有するように接触することが難しくなり、かみ合わせ効果が小さくなる。図-7 の遠景から、5 粒径の球、石礫に比べ 8 粒径の石礫の方が崩落した粒子群の移動距離が大きくなっている。これはかみ合わせ効果の減少、細かい粒子のころの働きにより、小粒径粒子、大粒径粒子が動きやすくなったためである。また静止形状では、5 粒径の球と石礫の勾配は概ね一直線であるのに対し、8 粒径の石礫は、先端粒子群の勾配が後続粒子群に比べ緩くなっている。これは細かい粒子の存在により、先端粒子群は静止しにくく、緩い勾配で比較的大きな層を成して静止し、その影響を受けて後続粒子群が静止するためである。