

石礫河川の表層粒子の安定な姿勢—覆瓦構造

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. 本研究のねらい

石礫河川の河床材料は、幅の広い粒度分布を有し、球とは大きく異なる形状である。洪水後の河床の石礫の並び方は、覆瓦構造に見られるように、粒子形状の影響が大きい。石礫河川の流砂現象を明らかにするため、福田ら¹⁾は、任意粒子形状と大きさを有する粒子群について、粒子運動と流れの相互作用を考慮した数値移動床水路を開発した。解析に用いられる粒子の粒径は、粒子と同体積の球の直径に換算した等価直径である。等価直径の定義には、粒子の体積しか考慮されていない。著者らは、複雑な形状の等価直径の大きさは移動床上を運動する粒子群の流砂現象と結びつけて定義することが望ましいと考えている。その為に先ず、移動床の礫床形状と粒子形状の関係を調べる必要がある。石礫河川では、覆瓦構造のように表層の粒子の姿勢や配置が安定な河床構造に重要で、球形状の粒子には姿勢の変化は生じない。そこで、本研究では、同一体積の異なる形状の粒子を用いて数値移動床実験を行い、表層粒子の安定な姿勢について定量的に明らかにする。そして、石礫河川の粒子の安定な姿勢と粒子形状の関係を分析し、覆瓦構造が最も安定な姿勢であることを示す。

2. 数値移動床実験の概要と実験条件

数値実験水路は、水路長 15m、幅 1m、勾配 1/20 の広矩形の様な直線水路である。通水前に粒子をランダムに投下し初期河床を作る。座標軸は、流下方向、水路に平行な横方向および水路に垂直な上向きをそれぞれ x 軸、 y 軸、 z 軸にとる。図-1 は、数値実験に用いた二種類の異なる形状の粒子を異なる方向から示したものである。表-1 に粒子形状特性を示す。Case1 に用いた扁平な粒子は、不規則な凹凸を有しており一方、Case2 の棒状粒子は、凹凸の小さい滑らかな形状である。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、等価直径は $d = 70 \text{ mm}$ 、密度は 2650 kg/m^3 である。

初期河床の作成の為に投入した粒子群の総土砂量は 2 ケースとも等しい。上流端で一定流量 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ を与え、自由落水脈内はほぼ大気圧となることから、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. 表層粒子の姿勢の変化

先ず分析方法について説明する。表層粒子は、流下方向速度が 0.05 m/s 以下で鉛直上方から水路を見たときに露出している粒子とした。水路の全区間を検討区間にしており、サンプル総数は 2 ケース共に、いずれの時間も 4000 個程度であった。図-2 は河床表層粒子の長軸、中軸、短軸を示す。各軸はいずれも他の二軸と直交する。本検討では、粒子の長軸の向きと座標軸との間の角度から粒子の姿勢の変化を分析した。長軸の向きを示すベクトルは、流下方向成分が正負の二つを考慮することができるが、流下方向成分が正となる方向とした。

キーワード 石礫河川, 数値移動床水路, 粒子形状

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

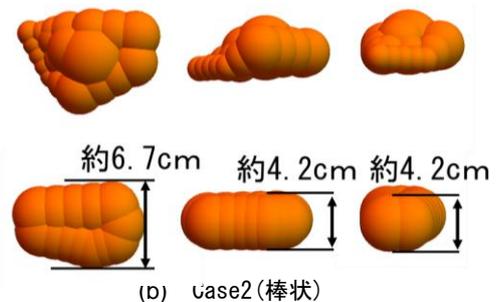


図-1 異なる視点から見た粒子形状
表-1 粒子形状特性

粒径:d, 長径:a, 中径:b, 短径:c	扁平	棒状
無次元長径:a/d	1.57	1.44
無次元中径:b/d	1.16	0.97
無次元短径:c/d	0.72	0.68
中径と長径の比:b/a	0.74	0.67
短径と中径の比:c/b	0.62	0.70
S. F.	0.53	0.58

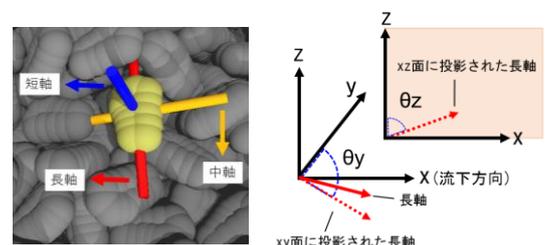


図-2 粒子の三軸 図-3 長軸と座標軸との角度

また、長軸と各座標軸の間の角度を、図-3に示すようにxz面に投影された長軸とz軸との間の角度を θ_z 、同様にxy面に投影された長軸とy軸との間の角度を θ_y と定義した。

図-4に棒状粒子を例に河床表層粒子の姿勢の時間変化を示す。横軸は θ_z で、縦軸は粒子の個数割合を示している。通水前の $t=0s$ と $t=50s$ を比較すると $\theta_z=20\sim99^\circ$ の長軸を鉛直上向きに傾けた姿勢と水路床に平行な姿勢の粒子が増加し、一方で $\theta_z=100\sim180^\circ$ の長軸を鉛直下向きに傾けていた姿勢の粒子は減少している。さらに、 $t=0s$ には、長軸を水路床に平行に向けている $\theta_z=80\sim99^\circ$ にあったピークが $t=50,100s$ には $\theta_z=60\sim79^\circ$ にある。長軸を鉛直下向きに向ける姿勢は、流体力などの外力を容易に回転運動に変えて運動してしまう。一方、 $\theta_z=80\sim99^\circ$ の水路床に水平な姿勢は、流下方向からみた粒子の投影面積を小さくし、流体力の受けづらい姿勢である。また、 $\theta_z=20\sim80^\circ$ の長軸を鉛直上向きに傾けた姿勢は、流体力を流下方向の背後の石礫に伝えやすく、姿勢を留めて居られる安定な姿勢と考えられる。

図-5でCase1(扁平)とCase2(棒状)の表層粒子の姿勢を比較する。図-5(a),(b)はそれぞれ θ_z, θ_y の頻度分布を示している。図-5(b)から、どちらの形状も $\theta_y=60\sim120^\circ$ の長軸を流下方向に向けている粒子が多く、ピークは流下方向にほぼ平行な $\theta_y=80\sim99^\circ$ にある。横断方向は対称的な分布を示している。図-5(a),(b)から θ_y, θ_z のそれぞれの頻度分布は、どちらの形状も共によく似た分布形している。図-6に $t=100s$ 秒後のCase2(棒状)の河床表層粒子の堆積状況を示す。図から、長軸と座標軸との間の角度の個数割合が大きい $\theta_z=40\sim99^\circ, \theta_y=60\sim120^\circ$ の姿勢の粒子が、覆瓦構造を形成していることが確認できる。また、 θ_y, θ_z 共に扁平な粒子の方が棒状粒子よりもピーク値が小さくなっている。扁平な粒子は、棒状粒子と比較して平らな面積が大きく、さらに不規則な凹凸を有しており、周囲の粒子とのかみあわせ効果大きい。そのため、扁平な粒子の方が、安定な姿勢に変化した粒子数が少なかったと考えられる。

4. 結論

河床表層の粒子は、長軸の向きを流下方向、鉛直上向きに向けることによって安定な姿勢をとり、覆瓦構造を形成することが明らかとなった。また、粒子の3軸径が表層粒子の安定な姿勢を決める上で重要であることが考えられる。今後は、粒子の姿勢や配置が粒子運動や流れ場にどのような影響があるか明らかにし、球から大きく異なる形状粒子群の代表粒径について考察していきたい。

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.

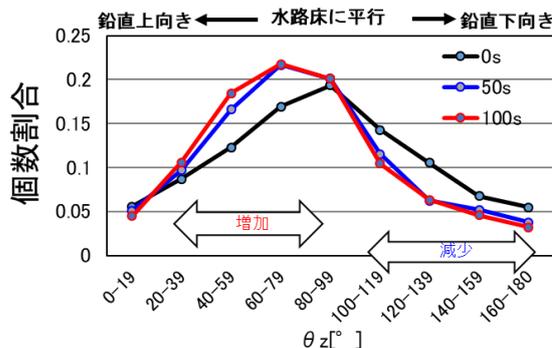
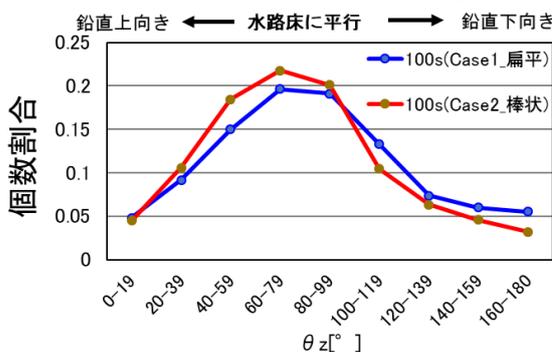
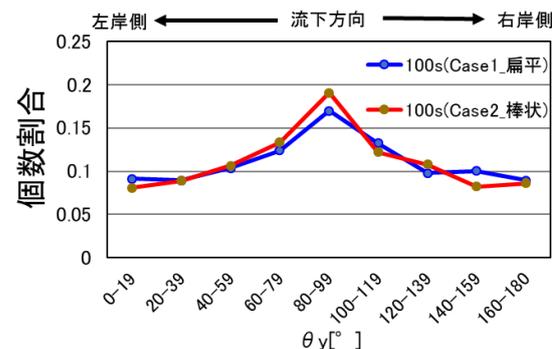


図-4 表層粒子の姿勢の時間変化 (Case2_棒状粒子)



(a) 長軸とz軸の間の角度： θ_z



(b) 長軸とy軸の間の角度： θ_y

図-5 粒子形状による姿勢の違い

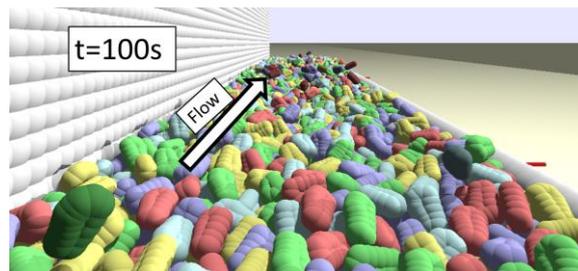


図-6 河床表層粒子の堆積状況 (Case2_棒状)

そのため、扁平な粒子の方が、安定な姿勢に変化した粒子数が少なかったと考えられる。