水流中の異なる形状の石礫群の堆積構造と流れ場に関する研究

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. はじめに

石礫河川の河床は幅の広い粒度分布，様々な形状を有する河床材料で構成されている．洪水時には露出した大粒径粒子が抵抗となり周囲の小粒径粒子の流出を抑制する．関根ら[1]は水理実験により幅の広い粒度分布が流砂機構に与える影響について検討し鉛直分級等に関する重要な知見を得ている．しかし，水理実験では規模の観点から扱える粒径や形状に限界がある．洪水後の河川に見られる覆瓦構造のように，複雑な形状を有する石礫が河床の構造や土砂の運動に与える影響は大きい．石礫河川の土砂移動現象を把握するため福田ら[2]は，任意の形状と大きさの粒子群運動と流れを同時に解析できる数値移動床水路を構築し，移動床水理の展開に新しい方向を示している．しかし，この解析は多様な形状・粒径からなる石礫群を用いた実験のため，粒度分布や形状の影響が複雑に作用し河床の安定に及ぼす形の効果を見ることが困難であった．本検討では，形状が異なる一様な粒径の石礫群を用いた数値移動床実験を 3 ケース行い，河床の堆積構造や流れ場を分析し石礫河川の河床変動に及ぼす粒子形状の影響の理解を深めることを目的としている．

2. 数値移動床実験の概要

数値実験水路は，長さ 15m，幅 1m，勾配 1/20 の一様な直線水路である．**図-1** は用いた粒子を異なる方向から示したもので，Case1 及び Case2 は一種類の異なる形状の粒子を用い，Case3 は Case1 と Case2 の粒子を混合して検討した．**表-1** に粒子形状特性を示す．Case1 に用いた粒子は凹凸がある不規則な平たい粒子形状で中径と長径の比が大きく短径と中径の比が小さい．一方，Case2 の粒子は凹凸の小さい滑らかな棒状で中径と長径の比が小さく短径と中径の比が大きい．粒径は同体積の球の直径と定義し d = 70 mm，密度は 2650 kg/m^3 である．水路に粒子をランダムに投下し初期河床を作る．3 ケースに投入した粒子群の総土砂量は等しく，Case3 では 2 種の粒子を同じ量投入した．**表-2** は初期河床の空隙率を示す．初期条件は水路床からの水深を 60 cm と与え，上流端では 5 秒間かけて流量を 0.0 m^3/s から 0.5 m^3/s まで上昇させその後一定流量とした．下流端の境界条件は圧力 0 Pa とした．給砂方法は下流端を通過した粒子を同時刻に上流 x = 1-3 m の範囲にランダムに投下させる．数値解析法は，福田ら[2]の解法を用い，流れは Euler 的に石礫の運動は剛体として Lagrange 的に解析する．

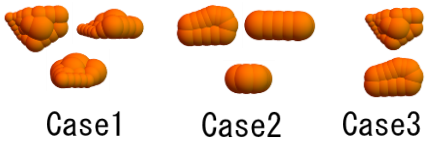


図-1　実験に用いた粒子形状

表-1 粒子形状特性

代表粒径:d，長径:a，中径:b，短径:c		
	Case1	Case2
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

表-2 初期河床の空隙率

Case1	0.40
Case2	0.36
Case3	0.38

3. 通過土砂量

図-2 は通水開始から 50 秒間に x = 11m の断面を通過した土砂量を示す．Case1 と Case2 の通過土砂量を比較すると，Case2 は Case1 の約 2.6 倍となり棒状の粒子は移動しやすい形状といえる．また，Case3（2 種類）の通過土砂量は Case1 と Case2 の通過土砂量の中間の量であるが，平たい粒子と棒状の粒子の通過土砂量にほとんど差がない．これは，Case3 では，平たい粒子と棒状の粒子が相互に影響を及ぼし，Case3 の平たい粒子は Case1 に比べ流れ易くなる．一方，Case3 の棒状の粒子は Case2 に比べ流れにくくなった．

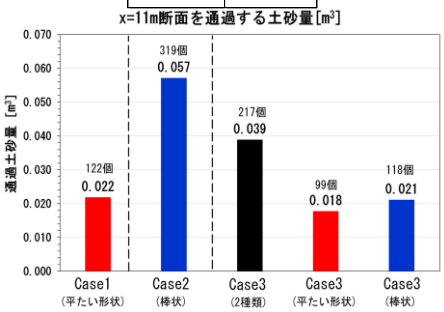


図-2 通過土砂量

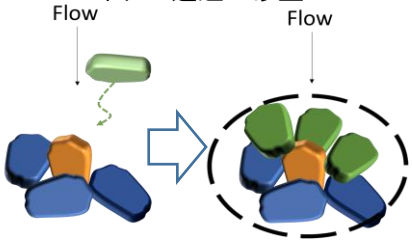


図-3 粒子集団の形成(Case2)

キーワード　石礫河川，粒子形状，堆積構造，数値移動床
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　ＴＥＬ03-3817-1615

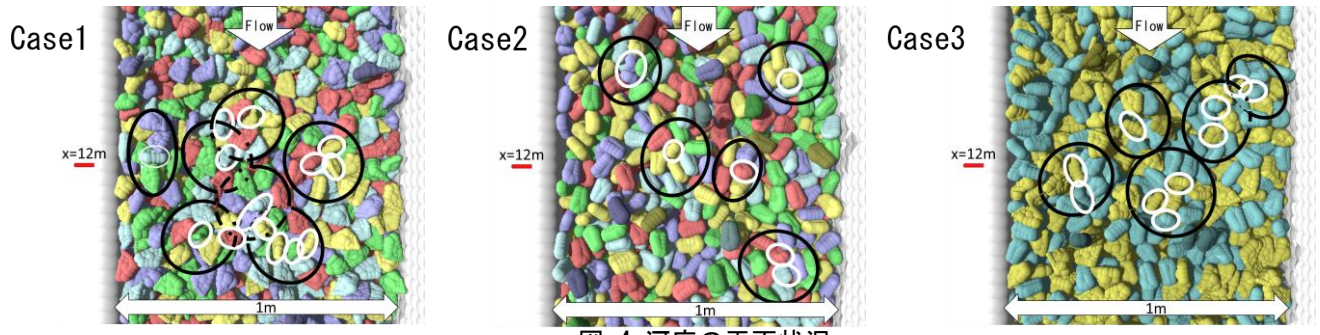


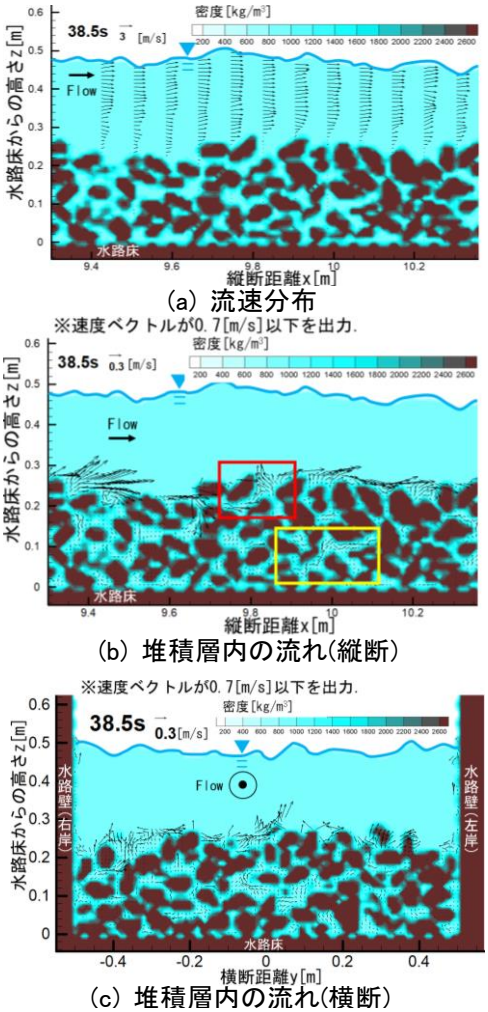
図-4 河床の平面状況

4．河床表層に見られる安定な粒子集団

図-3 は Case2 を例に河床表層に見られる安定な粒子集団の配置を示す．ここで述べる安定とは，粒子が離脱，滑動しにくい状況にある粒子とする．図-3 のオレンジ色の粒子は粒子が集団を形成するときの核になる粒子である．この粒子は長軸を鉛直方向に向け礫床にある程度埋没しており容易に抜け出せない．核となる粒子の周囲には同心円状に，7 個程度の粒子が堆積し集団を形成する．周囲に堆積する粒子は流下方向に長軸を向け，平らな面を上に向けた覆瓦構造を取っている．集団を構成する粒子の粒子間の距離が近いため，流体力や移動して来る粒子の衝突による大きな外力に対して粒子間で力を伝えることで集団を維持している．図-4 に Case1~Case3 の通水後の河床表面の状況を示す．白線で囲う粒子は核となる粒子で，黒線で囲う粒子が粒子集団を示す．Case1 では，核となる粒子が多数存在しており粒子集団間の距離が近い．そのため粒子集団が互いに影響しあい，他の実験ケースに比べより河床は安定している．Case2 では，粒子集団が Case1 より高い状態で構成され離れて存在している．Case3 では，黄色の平たい形状の粒子が核になり，その周囲に水色の棒状の粒子が堆積している．形状によって粒子の配置に特徴が見られる．粒子集団を形成せずに単体の粒子が姿勢を変えるだけでは流体力や衝突に対して耐えられず離脱しやすい．容易に離脱せず安定して堆積するには，粒子自身の姿勢だけでなく周囲の粒子との配置が重要である．

5．流れ場について

図-5は，Case1の流れの解析結果を示す．通水開始から38.5秒後の瞬間値である．密度コンター図に二次元の速度ベクトルをplotした．図-5(a)，(b)は水路中央断面(y=0)でのx-z面の流況を示している．(a)より流速は水面近くで約3.5 m/sである．(b)の赤色の枠に着目すると，石礫群の隙間から湧き出す流れが確認できその速度はおよそ0.3 m/sである．河床表層から3層目の粒子が存在する深さでの石礫間の流れは，河床表層の粒子の姿勢や河床近傍の流れの影響を受けるため変動が大きい．また，黄色の枠に示す水路床近傍でも間隙間の流れが確認でき速度はおよそ0.2 m/sである．水路床近くの流れは，河床表層の乱れの影響が小さく定常に近い．図-5(c) はx =10 m断面のy-z面の流況を示す．図から横断方向の流れも確認でき堆積層内では三次元性の強い複雑な流れ場であることが分かる．



(a) 流速分布
(b) 堆積層内の流れ(縦断)
(c) 堆積層内の流れ(横断)
図-5 流れ場(Case1 の瞬間値)

6．結論と今後の課題

形状の異なる石礫群を用いて数値移動床実験を行った結果，形状により堆積構造が異なることが分かった．安定な河床には粒子姿勢よりも集団としての配置が特に重要である．また，河床表面近傍と河床内部の流況について興味ある解析結果を示した．今後，堆積層内の粒子群と流れの相互作用を検討し安定な河床構造の知見を増やしたい．

参考文献 1)関根ら，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.74,No4,I_1069-I_1074,2018. 2)福田ら，土木学会論文集 B1(水工学) Vol.69,No4, pp.I_1051-I_1056, 2013.