

水流中における異なる形状の石礫粒子の移動機構に関する研究

中央大学理工学部 学生会員 ○高 鋏 裕也
 中央大学研究開発機構 正会員 福田 朝生
 中央大学研究開発機構 フェロー 福岡 捷二

1. 序論

石礫河川は洪水時の流れが激しく河床近傍の土砂移動を観測することが困難である。このため水流中を運動する土粒子の移動機構の理解は不十分である。土砂移動の解析では土粒子は球と仮定している。しかし、石礫河川の河床材料は様々な形状をもつため、水流中の石礫粒子の移動に対する形の影響を明らかにする必要がある。重村ら¹⁾、福岡ら²⁾は異なる粒径の着色した石礫粒子をコンクリート製大型水路に流下させ、水流中を流下する石礫粒子の貴重な映像を得た（以下、大型水路実験と呼ぶ）。また、福田ら³⁾は水流中の石礫粒子群の移動機構を理解するため、個々の石礫粒子群の三次元運動を評価する解析モデルを構築した。

本研究は、単一粒子を流下させた大型水路実験¹⁾の粒子運動の映像を解析する。しかし、大型水路実験の映像¹⁾では、鉛直方向の運動の評価が困難であることや不明瞭な映像があることから石礫粒子の特徴的な運動を把握できていない。そこで、福田らの数値解析法³⁾を用い、実大の石礫粒子を模擬して大型水路でシミュレーションをし、数値実験の結果を大型水路実験¹⁾で得られた粒子運動と比較する。大型水路実験および数値実験結果の比較から石礫粒子の水流中の移動に及ぼす形の影響を明らかにすることを目的とする。

2. 大型水路実験の概要と画像解析の方法

大型水路実験¹⁾では流下する石礫を、写真-1に示すようにデジタルビデオカメラを取り付けた台車で石礫を追跡し撮影した。図-1に実験で用いられた石礫とその形状の特徴を示す。石礫の形状は様々な角や平面形をもち球とは大きく異なる。図-2に実験の諸元と水路横断面図を示す。画像解析では、水路に記した目盛から画素数と実際の長さの関係を求め、これより台車の移動速度と石礫の座標を0.1秒ごとに算出し、石礫の運動を求めた。

3. 大型水路実験の画像解析の結果

図-3に大型水路実験における石礫の移動軌跡を示す。大型水路実験の映像から、どの石礫も鉛直方向だけでなく横断方向にも飛び跳ねる運動を示した。これは、複雑な形状をもつ石礫の移動機構の特徴と考えられる。楕円体型

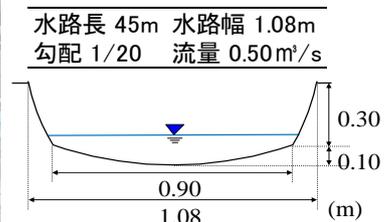


写真-1 大型水路実験の様子 図-2 実験の諸元と水路横断面図

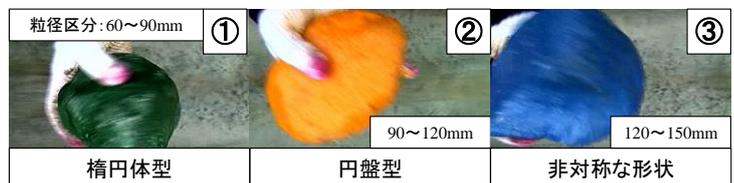


図-1 石礫および形状の特徴

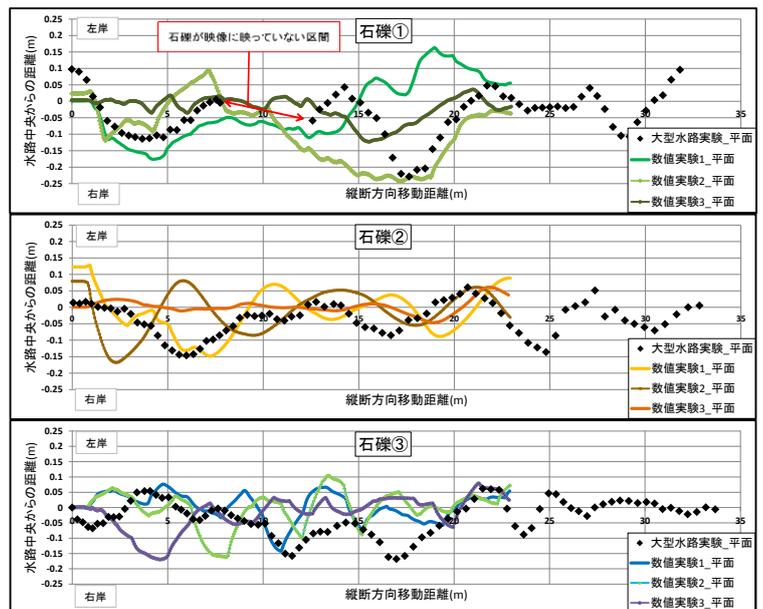


図-3 大型水路実験および数値実験における石礫の移動軌跡

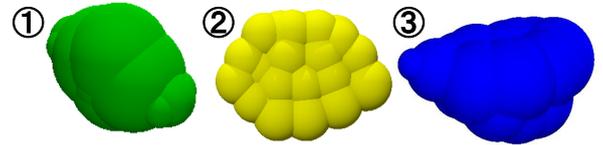
キーワード 石礫粒子の形状, 大型水路実験, 画像解析, 数値実験

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

の形状をもつ石礫①は、主に跳躍と長軸を回転軸とした回転により移動する。円盤型の形状をもつ石礫②は、映像の前半では回転するが、後半はあまり回転せず水路中央部を這うように移動する。これは、短軸回りの形状が円に近く短軸を回転軸とした回転をしやすいが、石礫が倒れると扁平な形状のため回転が生じづらい特徴を表している。非対称な形状をもつ石礫③は、頻繁に方向を変えながら移動する。石礫①と③を比べると、石礫①は回転軸が定まり運動が安定するが、石礫③は回転軸が定まらず運動が安定しないため、横断方向への移動距離は小さく頻繁に方向を変えながら移動したと考えられる。このように石礫の形状により石礫の移動機構は大きく異なることが明らかになった。

4. 数値実験の概要

数値実験で用いたモデル³⁾は、図-4に示す石礫形状を模した粒子を密度の異なる液体として全体を非圧縮流れとして解く。流れはEuler的に、粒子は形状を維持しながら移動する剛体としてLagrange的に解析する。数値解法の詳細は文献³⁾を参照されたい。モデル化した粒子の粒径は同一体積の球の直径と定義し、粒径区分の中央値で代表した。長径、中径、短径はそれぞれ代表粒径で無次元化した値である。水路長38mのうち、流れが発達した上流端より15m地点に石礫を投入した。石礫モデルごとに投入時の横断位置と向きを変化させ、3ケースずつ数値実験を行った。



	石礫①	石礫②	石礫③
代表粒径	75mm	105mm	135mm
長径	1.39	1.50	1.34
中径	1.01	1.00	0.90
短径	0.79	0.60	0.83
Shape Factor	0.68	0.49	0.75

図-4 数値実験で用いた石礫モデルとその諸元

表-1 大型水路実験と数値実験における平均粒子速度・平均振幅・平均跳躍距離の比較

	石礫①	石礫②	石礫③
平均粒子速度(m/s)	大型水路実験 3.59	3.94	3.68
数値実験	2.95	3.50	3.11
平均振幅(m)	大型水路実験 0.15	0.12	0.11
数値実験	0.13	0.15	0.11
平均跳躍距離(m)	大型水路実験 -	-	-
数値実験	1.31	0.99	1.00

5. 数値実験の結果

図-3に数値実験における石礫の移動軌跡、表-1に大型水路実験と数値実験における平均粒子速度、平均振幅、平均跳躍距離を示す。ただし、平均跳躍距離に関して、大型水路実験の平面映像からは平均跳躍距離を求めることが困難であるため、数値実験の値のみを示す。振幅は、石礫が1回の運動で横断方向に移動する距離と定義した。大型水路実験における平均粒子速度は、数値実験に対応する初期の23m区間の値である。数値実験の値は、それぞれ3回の試行の平均値である。数値実験における平均粒子速度は小さい傾向にあるが、平面軌跡を比べると概ね同一形状を模した石礫の大型水路実験の値と同様の傾向を示し、また平均振幅も近い値をとり、石礫粒子の形状の違いによる移動機構を良く表している。図-5に数値実験における石礫粒子の運動の様子を示す。それぞれの石礫粒子において鉛直方向の運動にはばらつきがあるが、大きな跳躍をするときや連続して跳躍するとき、横断方向に大きく移動するときは、石礫の角が水路床に衝突するときであることが明らかとなった(図-5の丸印)。

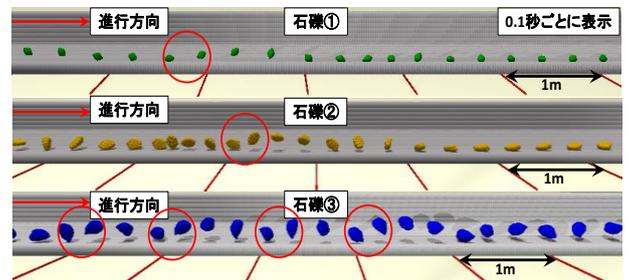


図-5 数値実験における石礫粒子の運動の様子

6. 結論

大型水路実験の映像および数値実験より、石礫粒子の形状に応じた移動形態が存在することが明らかとなった。また、大きな跳躍をするときや連続して跳躍するとき、横断方向に大きく移動するときには、石礫の角が水路床と衝突するときであることが分かった。これより、数値解析の結果は形状の異なる単一粒子の移動実験結果を適切に証明できることが明らかとなった。

参考文献

1)重村一馬：排砂水路を流下する礫群の運動と水路底面の磨耗進展機構，広島大学大学院工学研究科修士論文，2004。2)福岡捷二，渡邊明英，篠原康寛，山下翔，齊藤一正：高速で多量に流下する礫群の運動機構と床面磨耗量の推算，河川技術論文集，第11巻，2005。3)福田朝生，福岡捷二，内田龍彦：水流による石礫粒子群の移動機構とそのモデル化，土木学会論文集 B1 (水工学)，Vol.68, No.4, pp.I_937-I_942, 2012。