

高速流中を跳躍運動している非球形石礫の代表粒径に関する考察

中央大学研究開発機構 正会員 ○高 敏 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

石礫河川のように、粒径の大きな非球形粒子の運動を対象とする場合には粒子形状の効果を無視することは出来ず、また代表粒径をどのように決めるか不明である。著者ら¹⁾は、APM法²⁾を用いて、コンクリート製大型開水路流中の非球形石礫の跳躍運動³⁾を解析し、その移動形態と瞬時移動速度について重要な知見を得て来た。

本研究では上述の研究を受けて、粒径(等価体積球の直径 $d = 75, 105, 135 \text{ mm}$)と形状(図-1)の異なる12種類の石礫が高速流中を跳躍運動する際の姿勢、移動速度、加速度に及ぼす石礫形状の影響を明らかにし、これらに基づいて体積と形状を一体的に捉えた代表粒径の決め方の考え方を提案する。

2. 石礫跳躍運動解析の概要

図-1に石礫跳躍運動解析の概要を示す。勾配 $1/20$ の直線水路の上流端から定常流量 $0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ を供給し、 $x=2.5 \text{ m}$ 地点から石礫を静かに投入した。表-1に水路中央における水理量と水路底面凹凸特性を示す。解析の詳細は文献¹⁾を参照されたい。石礫に作用する流体力と石礫の投影面積は密接に関係することから、図-2に示すように、石礫周りの様々な視点から石礫の投影面積を算出し、投影面積の確率密度分布を調べた。表-2に、この時の最大・最小・平均投影面積(PA_{max}^* , PA_{min}^* , \overline{PA}^*)及び、石礫の投影面積が等価な体積を持つ球より大きいとき・小さいときのデータのみを用いた条件付き平均投影面積(\overline{PA}_L^* , \overline{PA}_S^*)を示す。いずれの値も等価な体積を有する球の投影面積で無次元化している。投影面積は石礫の形状や姿勢により大きく異なり、石礫の運動中の姿勢を把握することが重要である。本研究では、“A105”のように、石礫名称を形状と粒径により表す。また、初期条件の影響が小さくなるよう、石礫が $7.5 < x \leq 45 \text{ m}$ を移動する時のデータを用いて分析する。

3. 石礫の移動機構に及ぼす形状の効果

各石礫は、粒径に関わらず形状に応じた特徴的な形態¹⁾で移動した。図-3に、移動時の石礫の流れ方向の無次元投影面積 PA_{moving}^* の確率密度分布を示す。円盤型石礫が短軸を回転軸として転動・跳躍する場合を除き、非球形石礫は基本的に流れに対して投影面積の大きい姿勢で流下することが明らかになった。これは、水路底面に衝突して減速した石礫が流れに追従しようとして大きな流体力を受け加速するためと考えられる。このような姿勢で流下する石礫の瞬時移動速度の縦断方向成分 v_{px} の確率密度分布を比較する。

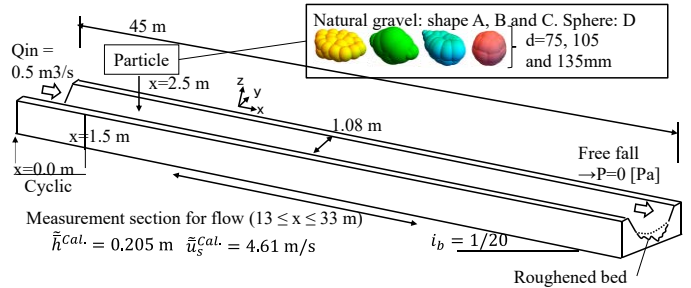


図-1 石礫跳躍運動解析の概要

表-1 水路中央における水理量と水路底面凹凸特性

相当粗度 k_s	0.023	m
水深	0.205	m
水深平均流速 U_c	3.88	m/s
水表面流速	4.61	m/s
摩擦速度	0.32	m/s
フルード数	2.73	-
シールズ数	0.051 ~ 0.092	-
相対粒径 d/k_s	3.26 ~ 5.87	-

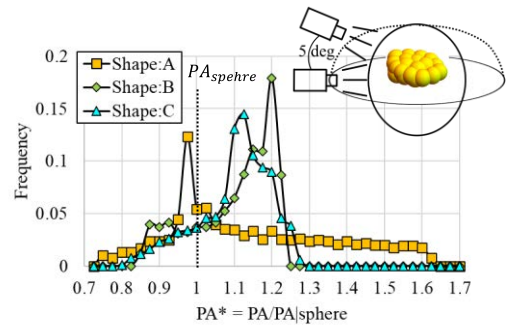


図-2 石礫の投影面積の確率密度分布

表-2 石礫の形状特性

	自然礫			人工
	形状: A	B	C	D: 球
長径a / 粒径d	1.50	1.39	1.34	1.01
中径b / 粒径d	1.00	1.01	0.90	0.99
短径c / 粒径d	0.60	0.79	0.83	0.99
Shape factor $=c/(a*b)^{0.5}$	0.49	0.67	0.76	0.99
Zinggの分類	円盤型	塊状 (対称的)	塊状 (非対称的)	塊状
PA_{max}^*	1.61	1.21	1.25	1.02
PA_L^*	1.26	1.14	1.12	1.01
\overline{PA}^*	1.14	1.09	1.09	1.01
\overline{PA}_L^*	0.92	0.92	0.92	-
PA_{min}^*	0.74	0.83	0.79	1.00
PA^* の変動係数	0.19	0.10	0.09	0.01

キーワード 非球形石礫, 跳躍運動, 加速度, 投影面積, 体積と形状を一体的に捉えた粒径
 連絡先 〒112-8551 東京都文京区春日 1-13-27 中央大学研究開発機構福岡ユニット Tel. 03-3817-1615

粒径 75 mm の場合、 v_{px} は水路中央の水深平均流速 U_c の 0.60 ~ 1.00 倍程度にばらつくものの、分布形状に及ぼす石礫形状の効果はほとんどなかった。一方、図-4 に示すように、粒径が大きくなると ($d=135$ mm), 瞬時移動速度 v_{px} の分布のピーク値と幅は石礫形状により異なる。球の移動速度が安定するのに対し、移動時の投影面積の確率密度分布のバラツキが大きいほど、分布の幅が大きくなる ($A135 > C135 > B135$)。河床面上では石礫の加速運動と減速運動が激しく生じていることから、粒径の大きな非球形石礫には運動中に大きな力が作用したと推察される。

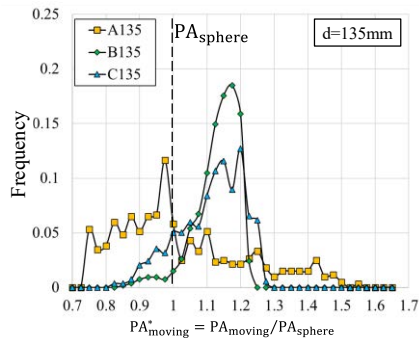


図-3 石礫の移動時の投影面積の確率密度分布

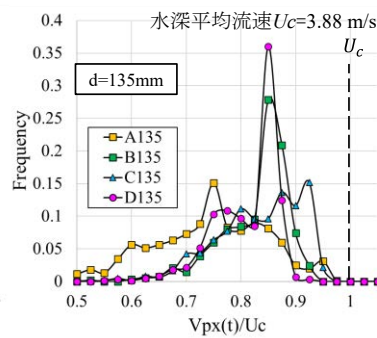


図-4 石礫の瞬時移動速度 v_{px} の確率密度分布

4. 石礫の体積と形状を一体的に捉えた代表粒径の考察

非球形粒子の運動特性は体積と投影面積で表される。この比は長さの諸元を持っており、体積が一定の場合、代表長さを表すときには代表的な面積が重要になる。非球形石礫の加速運動は流れに対する投影面積の大きい姿勢で起こることから(図-3)、移動時の投影面積が等価体積球よりも大きいときのデータを用いた無次元条件付き平均投影面積 $\overline{PA_{L,moving}^*}$ を算出し、これと加速度 dv_{px}/dt が正の時の無次元平均加速度 $\overline{dv_{px}/dt / g_x}$ の関係を示す(図-5)。ここに g_x は重力加速度の縦断方向成分である。両者に相関関係があることから、移動時の条件付き平均投影面積が大きくなるほど、流体力を介し、これが石礫の平均加速度に寄与することが分かる。このことから、移動時条件付き平均投影面積が、高速流中を跳躍運動する石礫の形状を特徴づける指標になると考えられる。

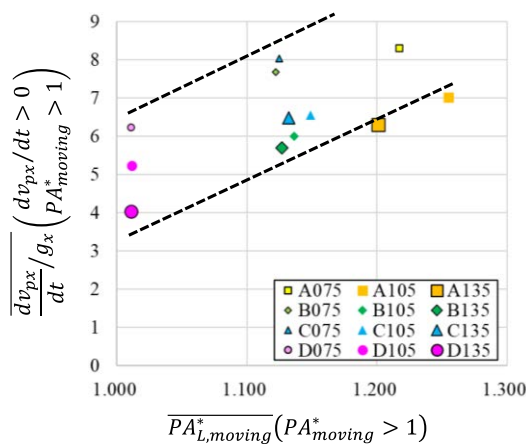


図-5 移動時の投影面積が球よりも大きいときのデータを用いた条件付き平均投影面積とこの時の平均加速度

粒径を、石礫の体積を移動時の条件付き平均投影面積で除した $d'_D = Vol./\overline{PA_{L,moving}}$ で定義する。図-6 に、等価体積球の直径 d 及び体積と形状を一体的に捉えた粒径 d'_D 、この時の条件付き平均加速度の関係を示す。体積と形状を一体的に捉えた粒径 d'_D を基準とすると、等価体積球の直径 d を基準とする場合と比べて、条件付き平均加速度は直線分布で近似出来、例えば条件付き平均投影面積の大きい非球形石礫の条件付き平均加速度は等価体積球の値よりも大きくなるなど、粒径 d'_D は石礫の加速運動に及ぼす石礫の体積と形状の効果を説明している。このことは、従来の球粒子を用いた跳躍運動解析では実現象を十分に説明できないことを表している。以上より、高速流中を跳躍運動する石礫の代表粒径として体積と形状を一体的に捉えた d'_D を提案する。なお、本研究で用いた 12 個の石礫においては、 $d'_D \approx 0.600 d$ (相関係数の 2 乗は $R^2 = 0.995$) であり、等価体積球の直径 d を用いて代表粒径 d'_D を見積もることも可能である。

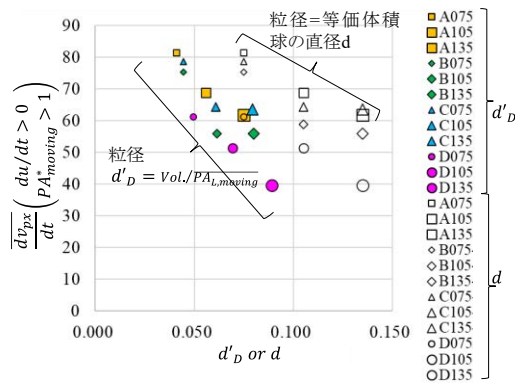


図-6 体積と形状を一体的に捉えた粒径 d'_D と条件付き平均加速度

今後、条件付き平均投影面積が等しく体積の異なる石礫を用いた検討や水理量が異なり石礫の運動も異なる条件においても検討を行い、上記の関係がどのように変化するかを明らかにする。

参考文献

- 1)高嶽, 福岡, 土木学会論文集 B1(水工学), Vol.77(2), pp.697-702, 2021.
- 2)Fukuoka et al., *Adv. in Water Res.*, Vol.77, pp.84-96, 2014.
- 3)重村, 広島大学大学院工学研究科修士論文, 2004.