

•水利与土木工程•

DOI:10.15961/j.jsuese.201600895

山区河流河床对漂石的突变响应及其近底水流结构特征

叶晨,王海周,郑媛予,董晓,王协康*

(四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室,四川成都610065)

摘要:山区河流受暴雨洪水、滑坡和泥石流等灾害的影响,漂石颗粒在河床不断集聚,从而改变局部区域的河床形态及其水流结构。作者基于对野外典型漂石河段的调查和室内概化水槽试验,指出了河床变形及水流运动对漂石的突变响应特征。试验床面分别预铺粒径为2.5和7.0 mm的均匀沙,并在其上放置粒径为15.7 cm的天然漂石,利用声学多普勒测速仪和全站仪测量漂石局部区域的水流结构及河床冲淤地形。试验分析表明:漂石河床局部调整受相对淹没度和床沙粒径的影响,随着相对淹没度的变化,冲坑深度及范围也随之调整,但淤积的最大高度值则趋于稳定;床沙粒径与冲坑深度、范围呈现出较好的线性正相关关系,但其对后者的影响要远大于前者。漂石河床的局部响应主要是因为漂石的存在促使其局部区域的水动力条件变化。在无床沙工况下,漂石局部近底流速分布随着相对淹没度的变化而变化,而在有床沙工况下,其对相对淹没度的变化却并不敏感,但它们都为符合对数分布。漂石局部的紊动强度及紊动耗散均在漂石下游的 $\Delta x \leq 1.5D$ 范围内出现陡增现象,且随着床沙粒径的增加,紊动强度陡增的幅度变小,其影响范围也随床沙粒径及相对淹没度的变化而变化。因此,山区河流河床漂石对水流运动及河床变形的作用主要表现在局部近底水流结构及紊动统计特征出现陡变特征,从而引起局部冲淤程度加剧,对河床的水沙运动及其稳定形态产生较大影响。

关键词:山区河流;漂石;河床突变响应;水流结构;紊动强度

中图分类号:TV853

文献标志码:A

文章编号:2096-3246(2017)03-0022-07

Influence of the Boulders on Bed Deformation and Bottom Flow Structure in Mountain Rivers

YE Chen, WANG Haizhou, ZHENG Yuanyu, DONG Xiao, WANG Xiekang*

(State Key Lab. of Hydraulics and Mountain River Eng., Sichuan Univ., Chengdu 610065, China)

Abstract: There is a higher frequency of rainstorm flood, landslide and debris flow occurring in mountainous area, causing the accumulation of boulders on river beds, changing locally the bed form and flow structure. The experiments were conducted in a moveable channel bed made of sorted sediments with $D_1=0.025$ m and $D_2=0.07$ m, respectively. A down-looking SonTek acoustic Doppler velocimeter (ADV) was equipped to record the rapidly responding flow movement so as to analyze the field turbulence and sediment transport. The bed topography was measured by total station. From the experimental results, it can be concluded that the relative submergence and sediment size exerts a strong control on channel morphology in the vicinity of the boulder, such as the depth, range of scour hole and the deposition height downstream, and there are good linear correlations among the sediment size, the depth, and range of scour hole. The analysis of the experimental data reveals that the velocity in the bottom portion of the flume (down to 0.2 of the relative flow depth (y/h)) preserves logarithmic law: in clear water, and the increase of the relative submergence leads to the reduction of the related parameters of velocity distribution; while the velocity in the bottom portion of the flume is insensitive to the relative submergence with grain underlying. Besides, the mixing process downstream of the boulder causes a considerable variation in the wall-wake zone, which exhibits a steep rise in turbulence intensity and turbulence dissipation at the range of the 1.5 times of the boulder distance downstream, and a gradual recovery with distance downstream of the boulder. The amplitude and region of influence of boulder on turbulence changes with the bed material grain size and the relative submergence. As a summary, the boulders result in dramatic increase of statistical characteristics of near-bottom flow structure and turbulence, which enhance the scouring and siltation, and have an important influence on the wa-

收稿日期:2016-09-01

基金项目:国家重点研发计划重点项目(2016YFC0402304-1);国家自然科学基金资助项目(51579163; 51639007)

作者简介:叶晨(1990—),女,博士生。研究方向:水力学及河流动力学。E-mail:993923137@qq.com

*通信联系人 E-mail:wangxiekang@scu.edu.cn

ter-sediment movement and its stable form.

Key words: mountain river;boulder;channel mutation response;flow structure;turbulent intensity

山区河流受山体滑坡、泥石流等自然灾害的影响,大量泥沙汇入河道,漂石颗粒在河床不断聚集(图1)。Keller等^[1]发现泥石流携带的大量漂石,约10%沉积于河床,并在较长时期内制约着河床的演变过程。大量漂石颗粒陡然进入的河道,会导致床沙级配分布变宽^[2-4],同时调整该河段的河床结构。刘怀湘等^[5]认为河床大粒径漂石和卵石,能够保护河床物质不受水流大量侵蚀,从而延缓河道下切,使该河段暂时保持稳定。王协康等^[6]基于对野外漂石河流的调查及相关试验,指出随着流量的增加,漂石局部区域的冲刷范围及最大冲深会显著加大。此外,岩性较强的漂石会使河道束窄,河床变陡,而这些会导致河流的洪水过流能力减弱,从而引起洪水位的暴涨和山洪灾害的发生^[7-8]。Ferguson^[9]认为粗颗粒的存在显著影响着漂石河道的水流结构。Sadeque等^[10]认为水流流经漂石河床会出现水流分区现象。Papanicolaou等^[11]表明处于完全淹没状态的漂石周围的流速分布常符合速度亏损律,并且在近尾流区出现近底逆流。Hajimirzaie等^[12]通过在水槽边壁上布置不同形状的壁挂体,分析了不同淹没程度下的水流结构变化。李文哲等^[13]认为在漂石群所构成的阶梯-深潭河床中,沿流向时均流速在阶梯上占主导,且垂线分布接近对数分布。王宪业等^[14]基于系列试验表明,在卵石

河道0.2倍水深附近易出现紊动能“尖钉”现象。王协康等^[6,15-17]通过清水冲刷试验,指出卵石与漂石颗粒对河床冲淤和推移质输移具有突出影响,并且针对六种不同粒径的典型流速分布进行了讨论。Yager等^[18]认为漂石阵列增加了水流形状的阻力,使泥沙输移的距离减小。Baki等^[19]利用天然漂石布置的鱼道对比讨论了漂石区域的水流紊动特性。Crowe等^[20]将漂石群视为卵石河床粗化层的一部分,通过改变床沙各粒径的含量来分析水流紊动特性,指出粗化层的泥沙含量是影响漂石聚集体局部流场和床面结构稳定性的主要因素。Hodge等^[21]认为对于河床为基岩的冲积性河流,沉积物斑块与水力条件以及水流携带的泥沙颗粒之间存在潜在的相互影响。总体来讲,山区性河流水文过程的季节性变化,常使河床的局部水流结构对漂石颗粒的突变响应急剧发生。作者基于岷江支流白沙河的野外调查与漂石河床概化试验,利用声速多普勒流速仪(ADV)精确测量了漂石在不同淹没条件下的水流运动参数,探讨了山区河流不同河床组成对大颗粒漂石的突变响应及漂石对近底流速分布、紊动强度、紊动耗散的影响,为揭示漂石河床局部调整的水动力学机理提供了理论基础,对深入研究漂石河床的水沙运动、河床变形及生态环境具有一定的理论意义与应用价值。

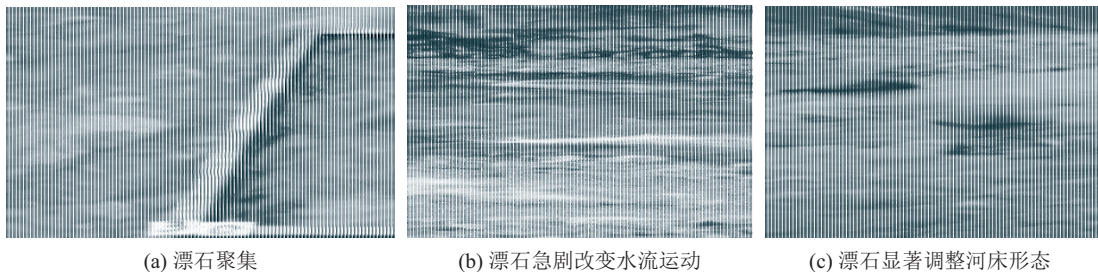


图1 白沙河漂石河床照片

Fig.1 Typical field photos of boulder channel in Baisha River

1 试验设置

试验在四川大学水力学与山区河流开发保护国家重点实验室中进行,试验水槽为长16 m、宽0.5 m、深0.4 m的平底水槽,底部为水泥抹面,坡降0.1%。试验段选在水槽中心,底床为水泥抹面,粒径为2.5和7.0 mm的均匀砂,铺沙长度为5 m、厚度为0.1 m,前后各铺设长1 m的三角形卵石,以平稳铺沙断面的水流。试验用的漂石样本取自岷江支流白沙河,有效直径 D 为15.7 cm,试验中原点布置其后侧的中心位置,并通过水槽末端的尾门控制水深,以形成不同的淹

没度。ADV架设在水槽上方,测速范围在0~2.5 m/s之间,频率为50 Hz,每个测点的测量时间为1 min,约测3 000点,并筛选出相关系数70%以上,噪声分贝15 dB以下,整体置信数据高于90%的数据点进行分析。试验中根据漂石的影响范围及尾迹带长度来布置测点,本次试验每种床面沿水流方向共布置3条测线,1条位于水槽中线,另2条距离中点左右各0.15 m, x 为距漂石的纵向距离, x/D 为无量纲距漂石纵向距离。每种床面测量5~19个断面,每个测试位置一般有5~15个测点,试验装置及测点布置见图2,试验工况见表1。

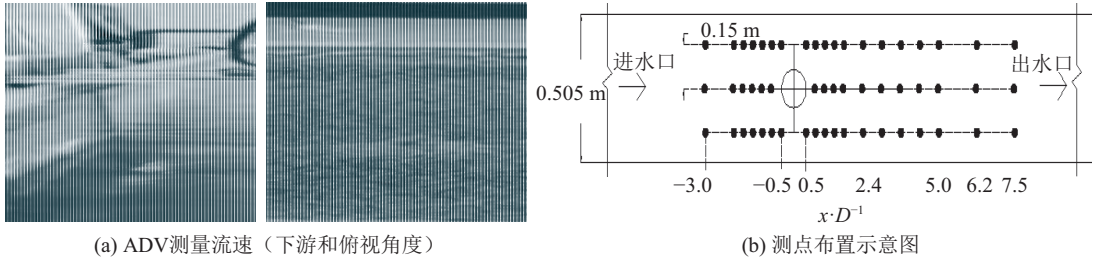


图 2 漂石试验及测点布置图

Fig.2 Photos of the boulder and the layout of measured position

表 1 试验工况及相关参数汇总

Tab.1 Summary of experimental parameters in all cases

工况	粒径/mm	相对淹没度 ($H \cdot D^{-1}$)	测量长度 ($x \cdot D^{-1}$)
无床沙	—	0.6、0.8、1.2、1.5	-3.05~7.51
有床沙	$d_1=2.5$	0.6、0.8、1.2、1.5	-2.09~8.30
	$d_2=7$	0.6、0.8、1.2、1.5	-3.05~3.05

2 试验结果分析

2.1 漂石河床局部突变响应特性

受漂石的阻水与绕流冲刷作用，漂石局部区域会形成显著的冲坑，此外，漂石上游形成溯源冲刷，而后方水流形成涡旋，造成局部冲刷，并在下游中心的位置形成淤积；漂石两侧则由于过水断面减小，流速加大，在下游两侧或一侧形成冲沟，如图3所示。

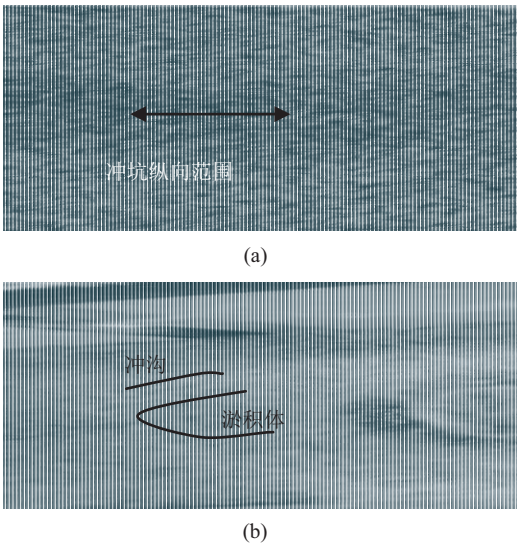
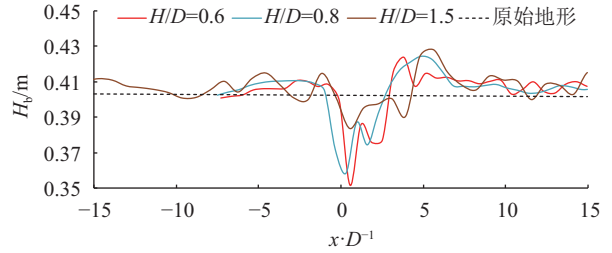


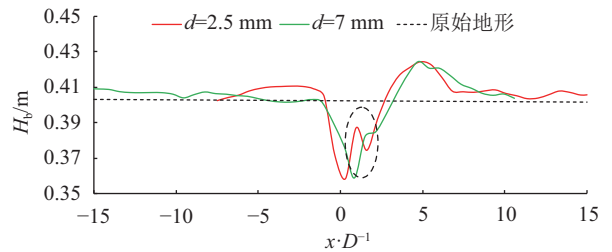
图 3 漂石局部冲淤变化

Fig.3 Photos of channel response around the boulder

为了深入分析河床变形特点，讨论了不同相对淹没度 H/D 及床沙粒径 d 对漂石局部冲淤特征的影响，沿着顺水流方向的最大冲深位置剖出不同工况下的地形纵剖面，如图4所示。



(a) $d=2.5$ mm



(b) 相对淹没度 $H/D=0.8$

图 4 不同床沙粒径条件下的河床中心纵剖面地形变化
Fig.4 Channel response around the boulder at the central section in different grain size mobile-bed

由图4可知，在同种床沙粒径下，相对淹没度 H/D 越大，最大冲坑深度 h_B 越小，而冲坑纵向范围 L 增加，淤积的最大高度值相近；在相同相对淹没度下，床沙粒径越大，冲坑纵向范围越大，而其对冲坑深度和淤积高度影响较小。综上，漂石局部河床的冲坑深度与冲坑范围不仅与水流条件相关，也与床沙粒径有关，而漂石下游最大淤积高度值对于相对淹没度及床沙粒径的变化并不敏感。为了进一步讨论床沙粒径 d 、冲坑深度 h_B 和冲坑纵向范围 L 三者关系，对数据进行了无量纲化，如图5所示。结果表明， d/H 、 h_B/H 及 L/H 呈现出较好的线性正相关关系，随着 d/H 的增加， h_B/H 及 L/H 也增加， L/H 与 h_B/H 为联动变化，但 h_B/H 增加的幅度要远小于 L/H ，故床沙粒径对冲坑范围的影响要远大于对冲坑深度的影响。究其原因，在相同水流条件下，床沙粒径越大，河床阻力越大，抗冲性越强，冲坑深度的增加幅度也就越小；由图4可知，在 $d=7$ mm 工况下，冲坑上游的坡度要小于 $d=2.5$ mm 工况，冲坑下游一侧的坡度两者接近平行，这表示冲坑

范围增加是由于漂石上游溯源冲刷造成的;同一粒径不同相对淹没度下,冲坑上游部分的坡度相同,说明冲坑上游部分的坡度等于泥沙休止角, Graf等^[22]在圆柱动床冲坑的试验中也发现这一点;相同条件下, $d=7\text{ mm}$ 的休止角要大于 $d=2.5\text{ mm}$ ^[23], 因此一旦形成溯源冲刷, $d=7\text{ mm}$ 的冲坑范围要大于 $d=2.5\text{ mm}$ 的冲坑范围。

其次, 相同相对淹没度时, 在 $d=2.5\text{ mm}$ 的冲坑内出现了最大冲坑深度 $h_{B, \max}$ 后又出现一个小的淤积

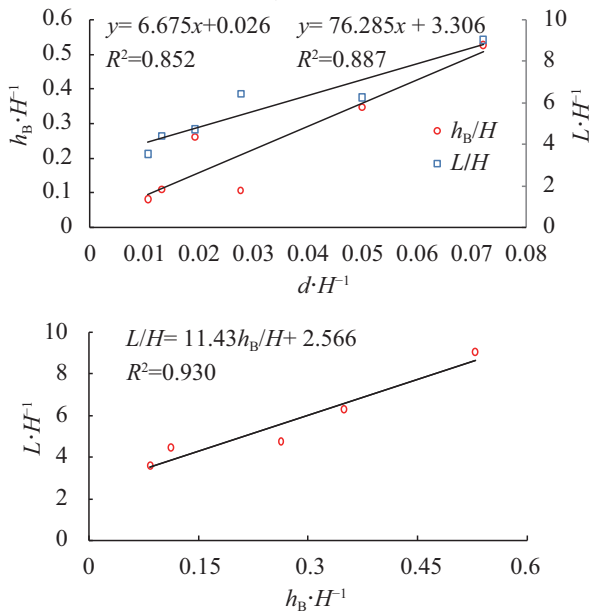


图5 相对床沙粒径 d/H 与相对冲坑深度 h_B/H , 相对冲坑范围 L/H 的关系

Fig.5 Relationship among different relative grain size, relative scour depth and scour width

锥体, 而在 $d=7\text{ mm}$ 冲坑内出现最大冲坑深度 $h_{B, \max}$ 后出现一个类似台阶的形状。这是因为漂石的局部水流流动形态类似于动床下圆柱体周围的冲坑水流流动形态, 根据Shen、Melville、Graf and Altinakar等研究^[24-26]可知, 水流程经漂石时会产生滞止压强, 它随着水深的增加而减小, 并在漂石前产生一个小的压力梯度和下沉水流, 并在漂石周围产生一个压力梯度, 使得流向漂石下游的水流横向转移; 又由于这种漂石前形成滞止压强, 引起水位增加, 从而形成弓形波; 当滞止压强增加到足够大时, 3维边界层会产生分离, 从而在漂石周围产生上浮作用力, 卷起漂石周围的泥沙, 促使泥沙输移; 此外, 在漂石下游会出现近底逆流^[11], 冲坑内携带泥沙的水流与近底逆流形成对撞抵消了一部分能量, 使得部分细颗粒在此落淤, 但随着床沙粒径的增加, 床面阻力也增加了, 即使紧沿漂石周围的水流挟沙能力有所减弱, 也不会出现淤积的小锥体, 因为其对漂石下游出现的近底

逆流的影响更大, 因此, 只会出现一个类似台阶状的平台。

2.2 漂石局部近底流速分布

漂石局部区域产生的冲淤变化是河床对漂石的突变响应, 为探究漂石河床局部响应机制, 本文从水动力学角度来分析水流结构的变化。对于卵石河床近底水流结构, Lacey等^[27]探讨了卵石堆淹没状态下的水流结构, Dey等^[28]基于卵石河床概化球体实验, 发现球体的存在使得下游尾流区的流速分布发生变化, 并产生流速逆转。一般情况下, 漂石对于上层水深的水流结构影响较小, 但对0.2倍水深以下区域的流速分布及泥沙输移影响较大, 当前漂石局部近底流速分布变化的研究较少, 从而难以深入揭示其对局部区域河床响应的作用机制。为此本文将对漂石前后的近底流速分布进行对比分析。以往研究者常利用流速和摩阻流速的比值来对流速无量纲化, 其形式为:

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{y}{h}\right) + b \quad (1)$$

式中, u 为测点处流速, κ 为卡门常数, y 为沿垂线水深, b 为常数, u_* 为摩阻流速。

由于粗糙河床的摩阻流速难以确定, 尤其是存在漂石的动床水流, 因此试验以漂石中心为原点, 以水流方向为正方向, 选择流速与平均流速的比值对流速进行无量纲化, 选取 $x/D=-0.8$ 及 $x/D=0.8$ (即距离漂石边缘5 cm)2个断面, 讨论漂石对于近底流区的影响。在 $0 < y/h \leq 0.2$ 时, 其形式为:

$$\frac{u}{U} = A \ln\left(\frac{y}{h}\right) + b \quad (2)$$

式中, A 为常数, U 为进口平均流速。

图6为漂石区域0.2倍水深以下的流速分布, 经拟合得到的近底流速参数, 如表2所示, 在各种工况下漂石前后的近底流速均符合对数分布, 试验结果与Nezu等^[29]提出的“漂石附近0.2倍的水深以下的流速分布严重偏离通常的对数分布曲线”并不一致, 也没有出现Dey等^[28]提出的流速逆转现象。无床沙工况下漂石前的流速略大于有床沙工况, 这是因为粗糙床面对水流有阻碍作用, 使得有床沙的近底流速偏小; 漂石后的流速分布存在较大差异, 在相同条件下 $H/D=0.8$ 的流速要大于 $H/D=1.2$; 在有床沙的试验中未出现流速分布随相对淹没度的不同而不同的现象, 由于床面泥沙的作用, 近底水流的紊动较强, 因此粗糙床面的近底流速分布对相对淹没度不敏感; 并且有床沙工况下漂石后流速分布的常数 A 值大于无床沙工况下漂石后流速分布常数 A 的值, 而常数 A 越大, 说明在 $0 < y/h \leq 0.2$ 时, 相对水深对于有床沙的近底流速分布的影响要大于无床沙工况。其次无床

沙漂石后的近底流速要大于漂石前的流速;而在有床沙时,情况则相反,尽管漂石的存在使过水断面减

小,近低流速增加,但泥沙的阻水作用使得近低流速增加不明显,甚至减小。

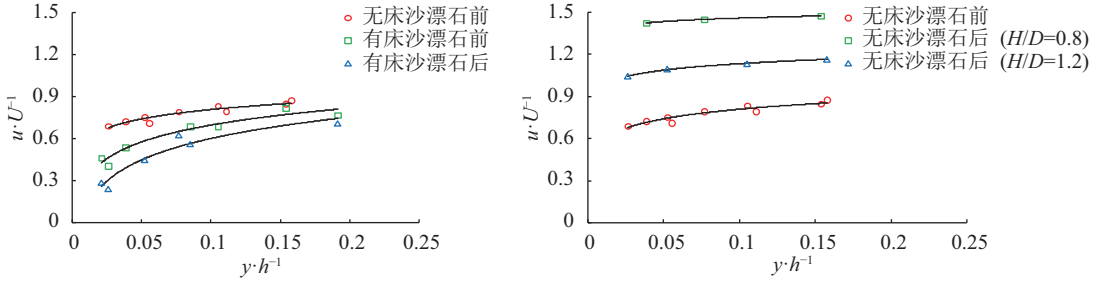


图 6 近底流速分布变化

Fig.6 Velocity profiles in inner-layer

表 2 近底流速分布相关参数

Tab.2 Summary of fitting function parameters of velocity profiles in inner-layer

		$H \cdot D^{-1}$	A	b	R^2
无床沙	漂石前	0.6、0.8、1.2	0.098	1.036	0.896
	漂石后	0.8	0.036	1.540	0.988
		1.2	0.067	1.288	0.995
有床沙	漂石前	0.8、1.2、1.5	0.175	1.098	0.935
	漂石后	0.8、1.2、1.5	0.222	1.113	0.923

2.2 漂石局部区域水流紊动强度

水流流经漂石,会产生较强的紊动,紊动强度反

应了流速瞬时值的变化大小,是衡量流体紊动强弱的主要参数之一,与水流掺混、尾涡分离及能量耗散关系密切,也是衡量漂石对局部水流结构影响强度的重要参数,公式形式如下:

$$\sigma = \frac{\sqrt{\frac{1}{3}(u'^2 + v'^2 + w'^2)}}{u_0} \quad (3)$$

式中: σ 为连续湍流下的紊动强度; u_0 为主流方向的时均流速; u' 、 v' 、 w' 表征3个方向速度脉动的强度,单位为m/s。不同试验工况条件下,漂石附近中心剖面紊动强度变化如图7所示。

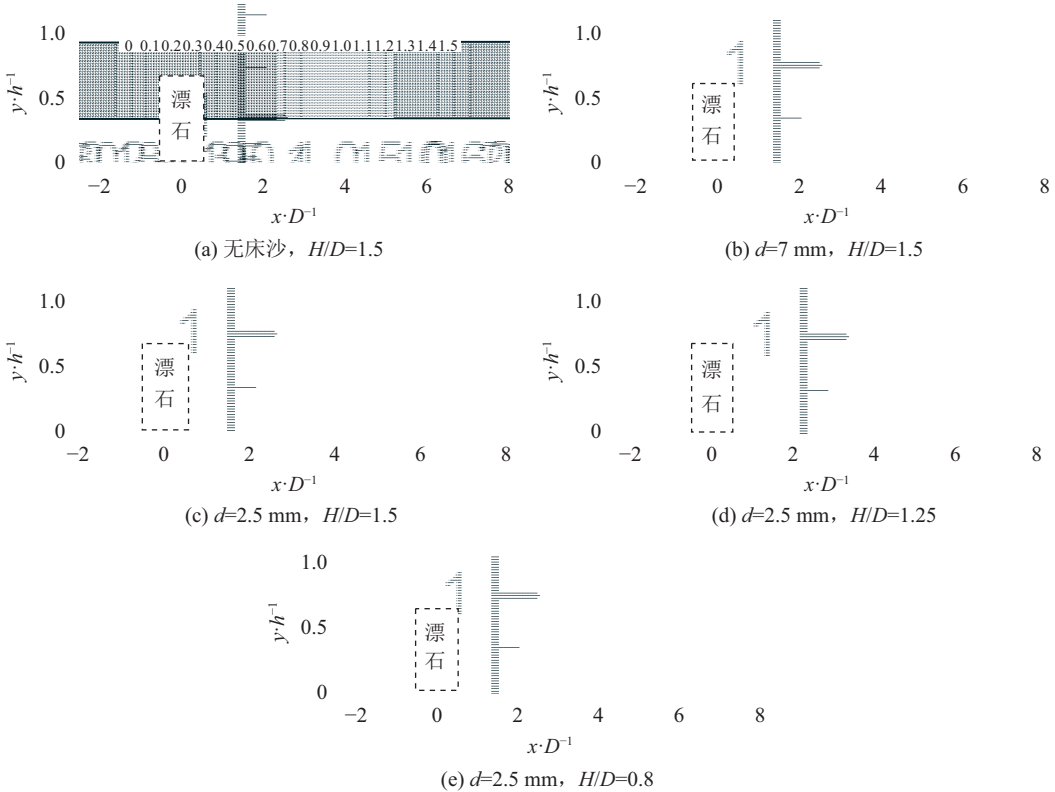


图 7 漂石中心剖面紊动强度变化

Fig.7 Turbulence intensities at the central section around the boulder

结果表明:漂石对紊动的影响集中在下游,紊动强度随着 y/h 的增加而减小,这可能是由于水流在漂石底部形成马蹄涡,而马蹄涡涡旋活跃,延展进入漂石下游尾流区,强度逐渐减小;其在漂石下游形成拖尾涡,并充满漂石下游的整个流深,因此增加了漂石局部河床的紊流强度,最终使得侵蚀和运输的沉积物增加^[22,26]。其次,紊动强度在漂石下游 $\Delta x \leq 1.5D$ 范围内出现陡增的现象,这是由于该区为漂石近部尾流区,存在近底逆流,其与滞止压强所形成的携沙水流在该区域相遇,从而使得紊动强度陡增;漂石对紊动强度中心剖面的影响范围为 $2D \leq \Delta x \leq 3.5D$,且随着相对淹没度(H/D)的增加而增加。同时,在相同条件下,无床沙时的紊动强度最大值从槽底偏离,在床沙粒径 $d=2.5\text{ mm}$ 及 $d=7\text{ mm}$ 的粗糙床面中的紊动强度最大值都在靠近槽底处,这与Papanicolaou等^[11]和Dey等^[28]对一个全淹没障碍物水流结构的研究结果大体一致;随着漂石粒径(D)与床沙中值粒径(d)差值的减小,紊动强度陡增的幅度也越小,这意味着床沙中值粒径越大,抵抗漂石所带来的水流紊动能力越强,抗冲刷能力也越大。

此外,从紊动能耗散率来看,紊动能与水流掺混、尾涡分离及能量耗散关系密切,是衡量漂石对局部水流结构影响强度的重要参数,由公式(4)得到:

$$\varepsilon = C_{\mu}^{3/4} \frac{K^{3/2}}{l} \quad (4)$$

式中: ε 为连续湍流下的平均紊动能耗散率; ε_0 为测量起点上游来流的平均紊动能耗散率初始值; K 为测量起点上游来流的平均紊动能; C_{μ} 通常取0.09; l 为紊流尺度,这里取 $l=0.07L^*$, L^* 为特征尺度,系数0.07是基于充分发展的湍流管流中的混合长度的最大值。

由图8可知,紊动能耗散率在漂石下游的 $\Delta x \leq 1.5D$ 范围内陡增,并随水流方向逐渐回落,图7的紊动强度变化也验证了这一点,这与Baki等^[30]在岩坡类型的鱼道试验中发现的能量耗散率的最大值出现在近部尾流区,并且能量耗散率沿下游水流流向递减的

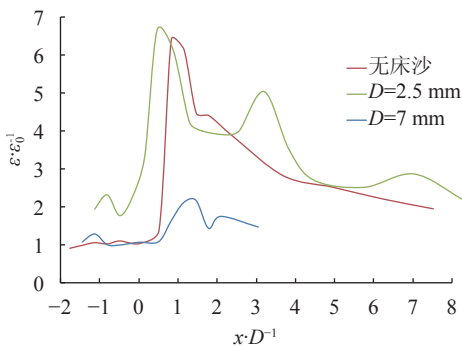


图8 $H/D=1.5$ 下的紊动能耗散率变化

Fig.8 Turbulence dissipation rate around the boulder in different relative submergence degree of $H/D=1.5$

结果一致。在无床沙与 $d=2.5\text{ mm}$ 情况下,紊动耗散率的变化趋势接近,但 $d=2.5\text{ mm}$ 与 $d=7\text{ mm}$ 两种情况的紊动耗散率的最大值相差较大,说明随着床沙粒径的增加,阻力增加,消耗能量增加,紊动耗散率变化趋缓,增加幅度较小。

3 结论

基于野外漂石河流的调查与概化试验,探讨了不同床沙组成条件下,河床对直接裸露的粗大漂石的突变响应及其水流结构变化特征,取得的主要成果如下:

1)随着相对淹没度的增加,漂石局部区域的冲坑深度变化不明显,但冲坑纵向范围增加;床沙粒径越大,冲坑深度及范围越大,但其对于前者的影响要远小于后者;漂石下游的最大淤积高度则较为稳定。

2)受漂石挤压水流的影响,局部区域的近底流速分布随距漂石位置、河床冲淤变形及漂石淹没程度的变化而存在差异。

3)漂石下游紊动强度随着 y/h 的增加而减小,漂石下游 $\Delta x \leq 1.5D$ 范围内紊动强度及紊动能耗散率出现陡增现象,无床沙时的紊动强度最大值从槽底偏离,粗糙床面时紊动强度的最大值在槽底附近,并且漂石对紊动强度中心剖面的影响范围为 $2D \leq \Delta x \leq 3.5D$,同时,其随着相对淹没度(H/D)的增加而增加。

参考文献:

- [1] Keller E A, Bean G, Best d. Fluvial geomorphology of a boulder-bed, debris-flow-dominated channel in an active tectonic environment[J]. *Geomorphology*, 2015(243): 14–26.
- [2] Chin A. Step pools in stream channels[J]. *Progress in Physical Geography*, 1989, 13(3): 391–407.
- [3] Montgomery D R, Buffington, J. Channel-reach morphology in mountain drainage basins[J]. *Geological Society of America Bulletin*, 1997, 109(5): 596–611.
- [4] Knighton D. Fluvial forms and processes: A new perspective [M]. New York: Oxford University Press Incorporated, 1998.
- [5] Liu Huaixiang, Wang Zhaoyin, Lu Yongjun, et al. Mechanism of morphological evolution in incised river and its relationship to streambed structures[J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(3): 367–372. [刘怀湘, 王兆印, 陆永军, 等. 山区下切河流地貌演变机理及其与河床结构的关系[J]. *水科学进展*, 2011, 22(3): 367–372.]
- [6] Wang Xiekang, Wang Bingjie, Wang Haizhou, et al. Experimental study on influences of boulder on channel responses and sediment supply with limited water depth in mountain river[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2016, 48(6): 46–50. [王协康, 王冰洁, 王海周, 等. 山区河流浅水条件下漂石对河床响应与泥沙补给影响的试验研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2016, 48(6): 46–50.]
- [7] Wohl E E. Gradient irregularity in the herbert gorge of

- northeastern Australia[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1992, 17(1): 69–84.
- [8] Brocard G Y. Influence of incision rate, rock strength, and bedload supply on bedrock river gradients and valley-flat widths: field-based evidence and calibrations from western Alpine rivers (southeast France)[J]. *Special Paper of the Geological Society of America*, 2006(398): 101–126.
- [9] Ferguson R. Flow resistance equations for gravel- and boulder-bed streams[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(5): W05427.
- [10] Sadeque M A. Shallow turbulent wakes behind bed-mounted cylinders in open channels[J]. *Journal of Hydraulic Researches*, 2009, 47(6): 727–743.
- [11] Papanicolaou AN, C. Effects of a fully submerged boulder within a boulder array on the mean and turbulent flow fields: Implications to bedload transport[J]. *Acta Geophysica*, 2012, 60(6): 1502–1546.
- [12] Hajimirzaie S M, Wojcik C J, Buchholz J H J. The role of shape and relative submergence on the structure of wakes of low-aspect-ratio wall-mounted bodies[J]. *Experiments in Fluids*, 2012, 53(6): 1943–1962.
- [13] Li Wenzhen, Wang Zhaoyin, Li Zhiwei, et al. Study on hydraulic characteristics of step-pool system[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(3): 374–382. [李文哲, 王兆印, 李志威, 等. 阶梯-深潭系统的水力特性[J]. *水科学进展*, 2014, 25(3): 374–382.]
- [14] Wang Xianye, Wang Xiekang, Liu Xingnian, et al. Calculation methods of shear velocity in open gravel channel[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2007, 27(5): 14–18. [王宪业, 王协康, 刘兴年, 等. 卵砾石河道摩阻流速计算方法探讨[J]. *水利水电科技进展*, 2007, 27(5): 14–18.]
- [15] Wang Xiekang, Yang Qingyuan, Wang Xianye, et al. Experimental study on interrelationship of sediment transport, flow structure and stable bedform on clear-water scour in gravel-bed flume[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2006, 38(3): 6–12. [王协康, 杨青远, 王宪业, 等. 卵石床面清水冲刷稳定形态及其水流结构试验研究[J]. *四川大学学报(工程科学版)*, 2006, 38(3): 6–12.]
- [16] Wang Xiekang, Yang Qingyuan, Wang Xianye, et al. The velocity profile in gravel open channel flow[J]. *Journal of Sichuan University (Engineering Science Edition)*, 2007, 39(2): 14–19. [王协康, 杨青远, 王宪业, 等. 卵砾石床面时均流速分布的试验研究[J]. *四川大学学报(工程科学*
- 版), 2007, 39(2): 14–19.]
- [17] Wang Xiekang, Ye Chen, Wang Bingjie, et al. Experimental study on velocity profiles with different roughness elements in a flume[J]. *Acta Geophysica*, 2015, 63(6): 1685–1705.
- [18] Yager E M, Kirchner J W. Calculating bed load transport in steep boulder bed channels[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(7): W07418.
- [19] Baki A B M, Zhu D Z, Rajaratnam N. Turbulence Characteristics in a Rock-Ramp Type Fishpass[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 141(2): 156–168.
- [20] Crowe J, Tan L, Tan L. Effect of Bed Sand Content on the Turbulent Flows Associated with Clusters on an Armored Gravel Bed Surface[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2014, 140(2): 137–148.
- [21] Hodge R, Hoey T, Maniatis G, et al. Formation and erosion of sediment cover in an experimental bedrock-alluvial channel[J]. *Earth Surface Processes & Landforms*, 2016, 41(10): 1409–1420.
- [22] Graf W H, Istiarto I. Flow pattern in the scour hole around a cylinder[J]. *Journal of Hydraulic Research*, 2002, 40(1): 13–20.
- [23] Simons D B, Senturk F. *Sediment transport technology* [M]. Colorado: Water Resources Publications, 1976.
- [24] Shen H W. *River Mechanics* [M]. Colorado: Fort Collins, 1971.
- [25] Melville B W. Local scour at bridge sites[R]. Report No. 117, University of Auckland, School of Engineering, New Zealand, 1975.
- [26] Graf W H, Altinakak M S. *Fluvial Hydraulics* [M]. Chichester: Wiley & Sons, Ltd., 1998.
- [27] Lacey R W J, Roy A G. Fine-scale characterization of the turbulent shear layer of an instream pebble cluster[J]. *Hydraulic Engineering*, 2008, 134(7): 925–936.
- [28] Dey S, Sarkar S, Bose S K, et al. Wall-wake flows downstream of a sphere placed on a plane rough-wall[J]. *Hydraulic Engineering, ASCE*, 2011, 137(10): 1173–1189.
- [29] Nezu I, Nakagawa H. *Turbulence in Open-Channel Flows* [M]. Rotterdam: Balkema, 1993.
- [30] Baki A B M, Zhu D Z, Rajaratnam N. Turbulence characteristics in a rock-ramp type fishpass[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2015, 141(2): 156–168.

(编辑 张琼)

引用格式: Ye Chen, Wang Haizhou, Zheng Yuanyu, et al. Influence of the boulders on bed deformation and bottom flow structure in mountain rivers[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2017, 49(3): 22–28. [叶晨, 王海周, 郑媛予, 等. 山区河流河床对漂石的突变响应及其近底水流结构特征[J]. *工程科学与技术*, 2017, 49(3): 22–28.]