

不连续宽级配河床垂线流速分布试验研究

魏丽^{1,2}, 卢金友³, 徐海涛³

(1. 中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 四川 成都 610041; 2. 中国科学院 水利部成都山地灾害与环境研究所, 四川 成都 610041; 3. 长江水利委员会长江科学院, 湖北 武汉 430010)

摘要: 不连续宽级配床沙在天然河道中广泛存在, 作为非均匀沙的特殊类型, 其床面水流特性与一般意义上的非均匀床面相比具有不同的特性. 以不连续宽级配床沙为例对其床面垂线流速结构进行了试验研究, 结果表明不连续宽级配近底床面垂线水流结构出现S型转折, S型位置与水流强度和床面形态有关. 并提出了基于近底S型的水流垂线流速分段表示的流速公式及垂线流速S型平均转折位置的计算公式.

关键词: 不连续宽级配床面; 垂线流速; S型流速

中图分类号: TV142.1

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2012)03-0026-06

天然河流中存在大量的不连续宽级配床沙, 不连续宽级配床沙与一般非均匀沙相比具有显著的特征, 其床沙粒径范围很宽, 泥沙最大最小粒径比值可以达到成百甚至上千, 床沙组成中某一粒径范围(约为1~10 mm)的泥沙含量很少或几乎缺失, 表现在级配曲线上呈现“板凳”状, 床沙粒径分布直方图具有明显的双峰分布特征. 不连续宽级配床沙在我国澜沧江、金沙江、永定河官厅水库下游的某些河段和葛洲坝下游、丹江口水库下游某些河段及国外一些河流如加拿大 Frase River^[1]均存在. 以往针对不连续宽级配床面水流流速结构研究较少, 本文进行了清水冲刷不连续宽级配床沙试验, 对其床面垂线流速结构进行了研究.

1 试验概况

试验在长江科学院沌口科研基地的全自动变坡玻璃水槽内进行, 水槽全长28 m, 试验段长25 m, 宽0.5 m, 高0.5 m, 水槽尾部设有集沙槽, 水槽可变坡比范围为0~5‰(见图1). 该水槽采用变频供水控制与计算机控制相结合技术, 实现了变坡、流量、水位的全过程自动控制, 降低了试验强度, 改善了控制精度, 流量测量精度为0.5%, 控制精度为2%; 水位测量精度为0.1 mm, 控制精度为0.5 mm. 沿程水深由水位测针量测得到, 流速采用三维声学多普勒流速仪(ADV)测量. 水槽进口铺3 m长的卵石过渡段, 卵石

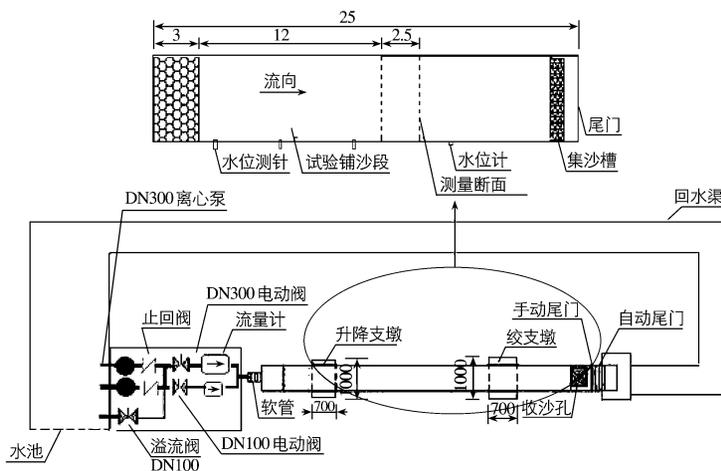


图1 水槽试验布置图(单位:m)

Fig. 1 Plane layout of experiment flume (unit: m)

收稿日期: 2011-10-23

基金项目: 国家自然科学基金(50879006); 中国科学院知识创新工程重要方向项目群(KZCX2-YW-JS305); 中国科学院成都山地灾害与环境研究所青年百人团队项目资助

作者简介: 魏丽(1987-), 女, 四川广元人, 硕士研究生, 主要从事泥沙基本理论的研究.

E-mail: 201_weili_201@163.com

直径 $d=20\text{ mm}$, 试验铺沙段长 21 m , 铺沙厚度为 6 cm , 试验测量断面长 2.5 m , 距离水槽进口 15 m , 保证均匀紊流充分发展.

水槽试验设计了3组(A,B,C)不连续宽级配床沙与一组用以对比的连续宽级配床沙(D), 试验床沙级配见图2. 试验沙采用天然黄沙与卵石石配比而成(加少量水充分搅拌呈半湿状后铺于水槽中), 试验床沙粒径范围约为 $0.1\sim 40\text{ mm}$, $d_{\max}/d_{\min}\approx 400$, 不连续宽级配床沙设计缺失粒径范围为 $1\sim 10\text{ mm}$. 其中A,B,C这3组床沙细沙与卵石所占比例不同, 其中细沙所占比例分别为 22% , 56% 和 40% . 水槽试验沙特征参数分别为: A组, $d_{50}=21\text{ mm}$, $d_{90}=30\text{ mm}$, $\sigma=2.03$, $B_* = 3.56$; B组, $d_{50}=0.85\text{ mm}$, $d_{90}=20\text{ mm}$, $\sigma=2.13$, $B_* = 3.21$; C组, $d_{50}=15\text{ mm}$, $d_{90}=26\text{ mm}$, $\sigma=2.28$, $B_* = 3.94$; D组, $d_{50}=7\text{ mm}$, $d_{90}=26\text{ mm}$, $\sigma=2.39$, $B_* = 2.35$. 其中沙样粒径分布的均方差 $\sigma = \ln\sqrt{d_{84.1}/d_{15.9}}$, B_* 为表征宽级配床沙非均匀性的床沙粒径峰度系数^[2], $B_* = D_c/D_f(P_c + P_f)$, D_c, D_f 为床沙粗细粒径百分数峰值所对应的粒径值, P_c, P_f 分别为 D_c, D_f 所占床沙百分数. 流速测量断面均布置10条垂线, 第1条垂线离水槽侧壁 2.5 cm (沿水流方向水槽右侧壁), 第1和第2条垂线间隔 2.5 cm , 其余垂线间隔 5 cm ; 每条垂线从床面底部处开始测量, 在水深 1 cm 之内测点间隔为 2 mm , 之后间隔为 1 cm . 测点布置见图3.

水槽铺沙后放极小流量的水流进水槽, 使床沙得到充分浸泡, 第2天再进行清水输沙试验, 直到床面粗化完成. 由于设计试验沙级配范围较宽, A,B,C三组床沙缺失粒径范围较大, 卵石最小粒径几乎为 10 mm . 当水流速度较小时仅能起动细沙, 无法观测到部分卵石的运动情况, 为了能同时观察到细沙与卵石的起动输移情况, 本次设计试验水流流速较大. 根据泥沙起动流速公式计算的相应粒径卵石起动流速, 结合试验实际情况设计试验流速范围为 $0.512\sim 1.050\text{ m/s}$. 本次试验共设计13组清水输沙试验, 水槽试验参数见表1.

表1 水槽试验参数

Tab. 1 Characteristic parameters of the flume experiment

组次	流量/ ($\text{L}\cdot\text{s}^{-1}$)	水深/ cm	平均流速/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	比降/ ‰	R/K_s	Fr	$\lg Re$	N	平均转捩 位置 $z_{\text{转}}/h$
A_1	30	12	0.512	2.50	3.12	0.47	4.62	6	0.29
A_2	80	20	0.80	2.17	4.27	0.57	4.95	3	0.17
A_3	90	17	1.05	3.64	3.89	0.81	5.03	6	0.20
B_1	36	12	0.60	3.97	8.11	0.55	4.69	6	0.20
B_2	60	15	0.80	2.45	9.38	0.66	4.88	6	0.16
B_3	90	17	1.05	3.54	10.12	0.81	5.03	3	0.14
B_4	72	16	0.90	2.77	9.76	0.72	4.94	4	0.15
C_1	36	12	0.60	3.87	4.77	0.55	4.69	4	0.29
C_2	60	15	0.80	3.70	5.51	0.66	4.88	6	0.16
C_3	90	17	1.05	4.59	5.95	0.81	5.03	3	0.14
D_1	36	12	0.60	3.00	5.41	0.55	4.69	4	0.29
D_2	60	15	0.80	1.85	6.25	0.66	4.88	5	0.23
D_3	90	17	1.05	3.87	6.75	0.81	5.03	4	0.20

注: 最后两列为断面流速出现S型分布的垂线条数及位置; K_s 为河床粗糙度.

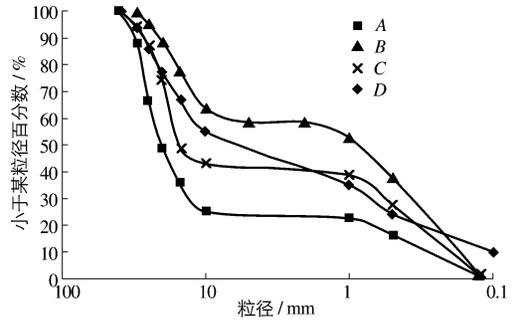


图2 水槽试验设计床沙级配

Fig. 2 Gradation curve of experiment sand

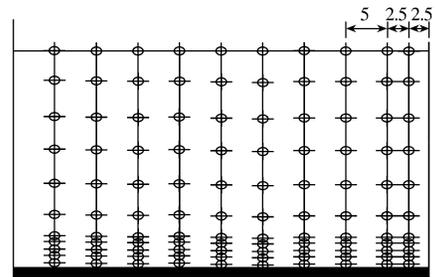


图3 水槽流速测点布置(单位:cm)

Fig. 3 Layout of flow velocity measuring point (unit:cm)

由表1可知,连续宽级配床面S型平均转捩位置随流速的变化幅度较不连续宽级配床面更小.由实测数据发现 A_3, B_3, C_3, D_3 四组试验出现S型流速分布的现象不如相同床面其他组次明显,且垂线流速的S型转捩程度不如其强烈,这主要因为 A_3, B_3, C_3, D_3 组的水深最大,相对床面粗糙度 R/K_s 值最大.

2 床面垂线流速分布

本次清水输沙试验各组床沙粒径相对较粗,随着清水冲刷,床面糙度不断增加,冲刷初期各床面实测垂线流速如图4(由于测次太多,故以个别组次所测的4条垂线为例,同时除特别说明之外,均取沿水流方向第2个测量断面的实测数据).

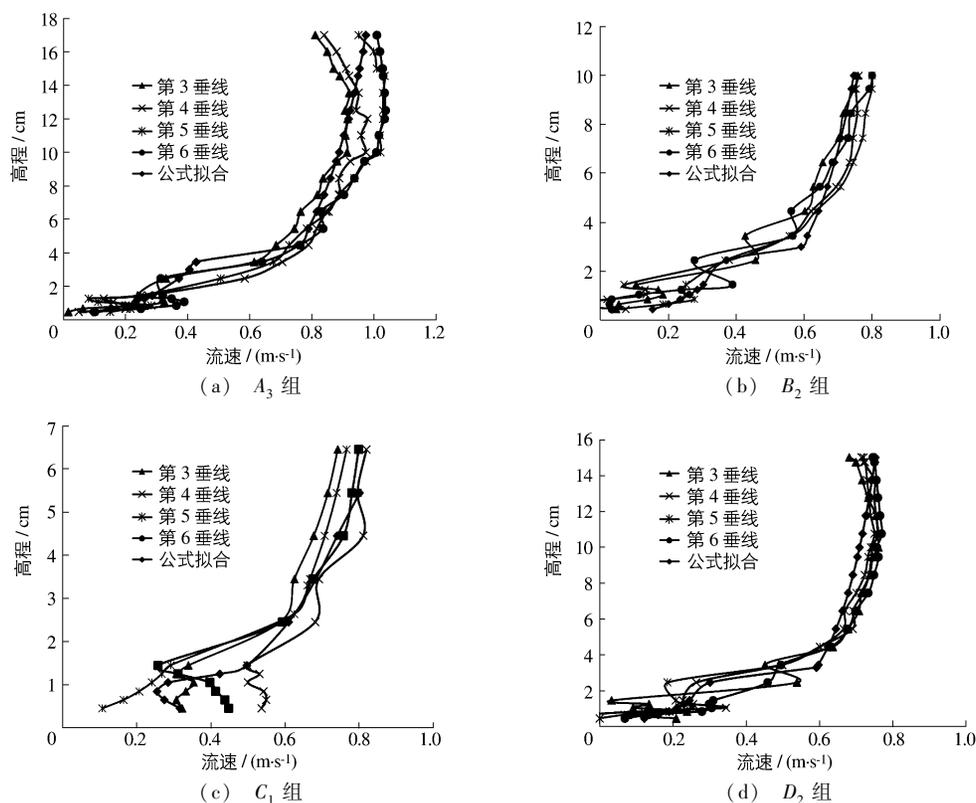


图4 实测垂线流速

Fig. 4 The measured vertical velocity profile

由图4可知,不连续宽级配床面 A, B, C 不同垂线流速分布沿横线分布较宽级配床面 D 更为分散.这是由于不连续宽级配床面具有中间某粒径范围泥沙的缺失,粗细颗粒之间的隐蔽、暴露、填充作用更为强烈,床面粗糙度较连续宽级配床面更为强烈.

由图4还可看出粗糙床面水流垂线最大流速出现在水面以下约 $0.6h$ 位置,床面附近每条垂线几乎均存在S型流速分布,S型出现的位置几乎相近,如 A_3 组出现S型分布的水深范围约为 $0.062h \sim 0.144h$, B_2 组约为 $0.057h \sim 0.16h$, C_1 组约为 $0.087h \sim 0.12h$, D_2 组约为 $0.07h \sim 0.23h$.水流垂线流速由床面先急剧增加,到一定水深(约为 1 cm)的位置开始突然减小,直到水深约为 2 cm 位置;然后流速继续增大,在 $0.6h$ 左右达到最大值;而后流速又开始减小直到水面.在本次开展的13组清水输沙试验中,几乎每组试验的实测垂线流速均出现S型流速分布.

Einstein 1950年提出了针对粗糙床面的对数流速分布公式如下^[3]:

$$u/u_* = 5.75 \lg(y/K_s) + 8.5 \quad (1)$$

式中: u 为距床面 y 处流速, u_* 为摩阻流速. R. López^[4] 提出大尺度粗糙床面平均流速公式为

$$\frac{U}{u_*} = 5.76 \log\left(\frac{12.14H}{K_s}\right) \quad (2)$$

式中: U 为断面平均流速; H 为断面平均水深. 河床粗糙度 K_s 是水流流速公式中非常重要的参数. Einstein 提出当床面为均匀沙时, $K_s = d$; 当床面为非均匀沙时, $K_s = d_{65}$. L. C. Van Rijn^[5] 总结了各家有代表性的 K_s 的表达式如下: Ackers-White: $K_s = 1.25d_{35}$; Hey: $K_s = 3.5d_{85}$; Engelund-Hansen: $K_s = 2d_{65}$; Kamphuis: $K_s = 2.5d_{90}$; Mahmood: $K_s = 5.1d_{84}$; Van Rijn: $K_s = 3d_{90}$. 可以看出, 床面粗糙度与床沙特征粒径成正比 $K_s = \alpha_i d_i$, 目前对于床面粗糙度的取值还没有统一的标准, 本文采用 Einstein 的 $K_s = d_{65}$.

本次输沙试验水槽床面为粗糙床面, 侧壁为光滑玻璃, 即床面与水槽侧壁糙度不同. 床面粗化的过程中, 床面剪切力相对水槽平均剪切力不断增加, 同时侧壁剪切力不断减小, 当床面达到一定糙度的时候, 水槽侧壁的剪切力对水槽平均剪切力的影响变得很小, 因此, 对于床面与侧壁糙度相差较大的情况需要对摩阻流速进行侧壁修正. 本文采用 V. A. Vanoni 等^[6] 提出的摩阻流速的修正方法, 摩阻流速修正前后对比如表 2. 由表 2 可知, 修正后摩阻流速比直接用水力半径计算得出的摩阻流速大 10% 左右.

表 2 摩阻流速修正前后对比

Tab. 2 Shear velocity comparison of the revised and original values

组次	摩阻流速			组次	摩阻流速		
	修正前	修正后	修正后/修正前		修正前	修正后	修正后/修正前
A_1	0.045	0.050	1.11	C_1	0.055	0.063	1.15
A_2	0.049	0.055	1.12	C_2	0.058	0.066	1.14
A_3	0.060	0.066	1.10	C_3	0.068	0.076	1.12
B_1	0.056	0.064	1.14	D_1	0.056	0.064	1.14
B_2	0.048	0.051	1.07	D_2	0.040	0.042	1.05
B_3	0.059	0.064	1.08	D_3	0.062	0.068	1.10
B_4	0.052	0.055	1.07				

如果忽略粗糙床面 S 型流速分布, 根据实测流速用公式 $u/u_* = 5.75 \lg(R/K_s) + M$ 对其拟合, 发现该公式可以较好地表示粗糙床面垂线流速分布, 但各组次 M 在同一垂线靠近床面处与床面之外取值不同, 公式拟合见图 4, M 值取值如表 3. 由表 3 可知粗糙床面垂线流速转换水深基本都在 0.22h 左右, 当水深 $z < 0.22h$ 时, $M_1 = 3 \sim 6.96$, 试验取值大多在 5 左右, 当水深 $z \geq 0.22h$ 时, $M_2 = 7 \sim 11.98$, 试验取值大多在 8.8 左右.

表 3 粗糙床面垂线流速公式 M 取值

Tab. 3 Values of M in the vertical velocity distribution formula of rough bed

组次	M_1	M_2									
A_1	4.98	9.62	B_1	3.87	6.74	C_1	6.96	8.49	D_1	4.18	8.40
A_2	4.50	9.19	B_2	3.00	8.54	C_2	4.41	6.99	D_2	5.88	11.98
A_3	5.81	10.16	B_3	4.68	7.54	C_3	5.00	8.50	D_3	4.22	8.87
			B_4	6.49	9.88						

3 垂线流速 S 型分布分析

V. Ferro^[7] 通过在粗糙床面黏附粗颗粒泥沙, 得到了主流区垂线流速分布 S 型曲线. 王协康等^[8] 在卵石粗化试验过程中也得到了 S 型流速分布, 在文献[9]中, 作者认为 S 型流速分布的出现与床面的粗糙度与水流条件有关系, 并给出了 S 型流速分布的初步判别条件 $2.0 \leq R/K_s \leq 5.9$ 及 $Fr \geq 0.41$, 文献还给出了 S 型曲线的转换位置 $z_{\text{转}}$ 的计算公式如下:

$$z_{\text{转}}/h = 0.008 2R/K_s + 0.183 6 \quad (3)$$

本次水槽试验中粗糙床面靠近床面的垂线流速分布均出现 S 形状. 由表 1 可知, 试验水流 $Fr=0.47 \sim 0.81$, $\lg Re=4.62 \sim 5.03$, 粗糙床面 $R/K_s=3.1 \sim 10.12$, 文献[8]中, 流速结构出现 S 型的试验水流 $Fr=0.34 \sim 0.79$, $\lg Re=4.94 \sim 5.07$, 粗糙床面 $R/K_s=2.1 \sim 11.3$. 可见本文与文献[8]试验水流参数相近, 但床面粗糙度相差较大, 可见试验水流 Fr, Re 与 S 型流速分布的出现有着密切的关系.

20 世纪 60 年代氢泡技术发明后, 有学者利用氢泡法拍摄水流紊动情况, 根据所拍摄的照片得到水流垂线流速分布. 钱宁^[10]认为在靠近水槽床面边壁区, 有可能产生 U 形环涡流, U 形环涡流在向下游运动变形的同时, 将离开边壁升向主流区. 涡流的旋度随曲率的加大而增强, 在 U 形环的尖端达到最大, 这里的纵向和垂向流速都很大. 当 U 形环发展到一定程度后, 在垂线纵向流速分布上将产生一个转折点, 使其具有类似板凳状的外形 (即本文中的 S 型). 沿着板凳面流速梯度和剪切力都很大, 最后涡流在那里崩退破碎, 形成大大小小的漩涡. Einstein 和李焕所发现的近壁层流层的成长和崩解过程见图 5^[10].

可见流速分布 S 型的产生与水流紊动有着十分密切的关系. 与王协康等^[9]以 Fr 作为判断参数不同, 本文认为水流雷诺数应该作为出现 S 型的主要判断参数, 但由于试验数据较少, 故不能给出具体的判别值. S 型位置与水流强度和床面形态有关, 根据水槽试验实测资料发现不连续宽级配粗糙床面垂线流速平均转捩位置可以拟合为式(4):

$$z_{\text{转}}/h = -0.01072R/K_s - 0.43884\lg Re + 0.2727Fr + 2.226909 \quad (R^2 = 0.78) \quad (4)$$

床面垂线流速平均转捩位置 $z_{\text{转}}/h$ 计算值与实测值对比见图 6. 由图可知式(4)可以较好地计算粗糙床面垂线流速平均转捩位置 $z_{\text{转}}$.

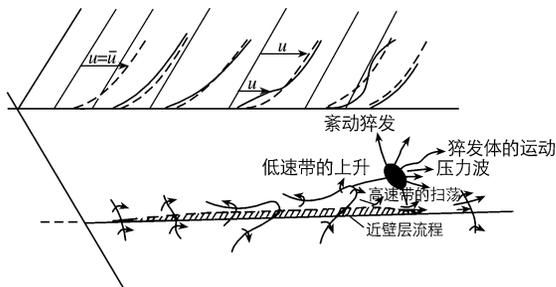


图 5 近壁层流层的成长和崩解过程

Fig. 5 Growing and disintegration process of viscous sublayer

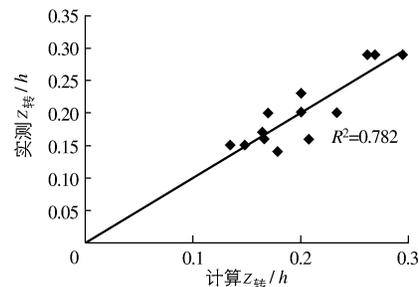


图 6 床面垂线流速平均转捩位置计算值与实测值对比

Fig. 6 Velocity transition position comparison of the measured and calculated values

4 结 语

本文以不连续宽级配床沙为例对其床面垂线流速结构进行了试验研究. 试验结果表明不连续宽级配床面不同垂线流速分布沿横线分布较宽级配床面更为分散. 连续宽级配与不连续宽级配近底床面水流结构均出现 S 型转折, 但连续宽级配床面 S 型平均转捩位置随流速的变化幅度较不连续宽级配床面更小. 由于近底床面水流结构 S 型的出现, 对不连续宽级配床面水流垂线流速采用分段拟合, 效果较好. 根据本次水槽试验参数, 认为水流雷诺数应该作为出现 S 型的主要判断参数, S 型出现位置与水流强度与床面形态有关, 并提出了宽级配粗糙床面垂线流速平均转捩位置计算公式, 拟合结果表明公式具有较好的精度. 天然河流中不连续宽级配及连续级配河床流速实测数据较少, 本文提出的公式与结论有待于收集更多的实测流速资料进行进一步探讨与验证.

参 考 文 献:

- [1] RADOANE M, RADOANE N, DUMITRIU D, et al. Downstream variation in bed sediment size along the East Carpathian rivers: evidence of the role of sediment sources[J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2007, 33(5): 674-694.
- [2] WILCOCK P R. The critical shear stress of natural sediments[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1993, 119(4): 491-505.
- [3] CHANG H H. *Fluvial process in river engineering*[M]. Florida: Krieger Publishing Company Krieger Driver, 1992.
- [4] L LÓPEZ R, BARRAGÁN J. Equivalent roughness of gravel-bed rivers [J]. *J Hydr Engrg, ASCE*, 2008, 134(6): 847-852.
- [5] VAN RIJN L C. Equivalent roughness of alluvial bed rivers[J]. *J Hydr Engrg, ASCE*, 1982, 108(10): 1215-1219.
- [6] VANONI V A, BROOKS N H. Laboratory studies of the roughness and suspended load of alluvial streams[J]. *Sediment Lab Rep*, 1957(68): 121.
- [7] FERRO V. Adv measurements of velocity distributions in a gravel-bed flume[J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2003 (28): 707-722.
- [8] 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. (WANG Xie-kang, YANG Qin-yuan, WANG Xian-ye, et al. Experimental study on interrelationship of how structure and stable bedform on clear-water scour in grave-bed flume[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2006, 38(3): 6-12. (in Chinese))
- [9] 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. (WANG Xie-kang, YANG Qin-yuan, WANG Xian-ye, et al. The velocity profile in gravel open channel flow[J]. *Journal of Sichuan University(Engineering Science Edition)*, 2007, 39(2): 14-19. (in Chinese))
- [10] 钱宁, 万兆惠. *泥沙运动力学*[M]. 北京: 科学出版社, 2003. (QIAN Ning, WAN Zhao-hui. *Sediment transport mechanics* [M]. Beijing: Science Press, 2003.

Experimental study on vertical velocity profile of river bed surface with discontinuous wide-grading sediment

WEI Li^{1,2}, LU Jin-you³, XU Hai-tao³

(1. *Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China*; 2. *Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Conservancy, Chengdu 610041, China*; 3. *Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China*)

Abstract: Discontinuous wide-grading sediment widely exists in natural rivers as a specific type of non-uniform sediment. It has different flow characteristics while comparing with traditional non-uniform sediment. The vertical velocity structures of the discontinuous wide-grading sediment bed are studied in a series of flume experiments. The experimental results show that S-type vertical velocity exists near the bed surface, and the S-shaped position is related to flow intensity and bed form. The vertical velocity formula expressed by section and based on the S-type is put forward and the S position of a vertical velocity profile is derived. The study provides a basis for the research of the flow structure of the discontinuous wide-grading sediment.

Key words: bed surface with discontinuous wide-grading sediment; vertical velocity profile; S-type vertical velocity