

粗糙透水床面明渠水流的垂线流速分布

陈兴伟^{1,2}, 林木生¹, 程年生³, 林炳青¹

(1. 福建师范大学地理科学学院, 福建 福州 350007; 2. 湿润亚热带山地生态国家重点实验室培育基地, 福建 福州 350007;
3. School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)

摘要: 为了进一步揭示粗糙透水床面明渠水流运动特性, 针对垂线流速分布研究存在的问题, 根据边界层理论, 推导了含有摩阻流速、理论床面流速和原点位移等3个参数的修正对数公式; 通过水槽试验, 运用激光多普勒测速仪, 分别对用直径1 cm玻璃珠构成的粗糙不透水和透水床面明渠水流的垂线流速分布进行了测量。结果表明: 推导的修正对数公式与实测符合很好; 相同水流条件下, 透水床面的摩阻流速要大于不透水床面, 各自的阻力系数保持基本不变; 理论床面流速是主流平均流速的0.35~0.45倍, 且床面相对流速随着雷诺数的增大而略有减小。

关键词: 垂线流速分布; 对数公式; 透水床面; 明渠水流

中图分类号: TV133.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2013)06-0849-06

冲积河流河床一般为泥沙组成, 当泥沙颗粒较粗, 尤其是砾石河床时, 一是表现为床面粗糙对明渠水流的影响; 二是河床渗透作用较大, 透水层渗流与明渠水流的相互作用, 导致明渠水流运动特性的变化。粗糙不透水床面明渠水流运动特性研究较多, 董曾南等^[1]认为垂线流速分布可用理论零点修正的对数公式。Wang等^[2]应用多普勒超声流速仪研究了砾石河床的紊流特征。对于粗糙透水床面明渠水流运动, Lovera和Kennedy^[3]通过分析河道及水槽观测资料, 认为冲积河流的阻力特性并不遵循粗糙不透水床面流动的规律; Zagni和Smith^[4]用铅粒、钢珠铺成的床面研究明渠流的运动, 结果表明这种透水床面的水流阻力比相同条件下的不透水床面要大, Zippe和Graf^[5]的风洞试验, 结果与此相似。另一方面, 也有试验研究卡门常数 κ 的变化问题, 如Nezu^[6]、Gupta和Paudyal^[7]的试验认为 κ 随着渗透能力的增强而减小, 但Zagni和Smith^[4]认为 κ 保持不变; Chen和Chiew^[8]、Cheng和Chiew^[9]在研究垂向渗流对明渠水流影响时, 也假定 κ 不变。关于流速分布的研究, Zagni和Smith^[4]、Zippe和Graf^[5]、Gupta和Paudyal^[7]沿用对数分布公式, 并和粗糙不透水床面一样, 考虑了理论零点的修正。Mendoza和Zhou^[10]应用摄动理论进行推导, 得到了修正后的对数流速公式。近年来, 由于数值模拟方法的发展和测量技术的改进, 又有一些新的研究成果, 如Stoesser^[11]等应用大涡方法(LES)进行的数值模拟, Pokrajac和Manes^[12]应用粒子影像流速仪对12 mm直径玻璃珠组成的透水床面流动特性进行测量, 但水深最大为42 mm, 也没有对透水床面垂线流速分布规律进行分析。李寿千等^[13]用自行设计的床面切应力直接测量装置, 对垂向渗流作用下床面切应力的变化进行了测量, 分析了垂向渗流对推移后输沙率的影响^[14]。

本文在对粗糙透水床面明渠水流的垂线流速分布进行理论分析的基础上, 通过水槽试验, 应用激光多普勒测速仪(LDA)及配套的高精度坐标架系统, 对垂线流速分布进行精细测量, 进而分析粗糙透水床面垂线流速分布规律。

1 粗糙透水床面垂线流速分布模式

粗糙不透水床面的垂线流速分布已有较多研究^[1], 主要是对对数公式进行理论零点修正, 可用下式表示:

收稿日期: 2012-12-17; 网络出版时间: 2013-08-14

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20130814.1037.015.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50979015)

作者简介: 陈兴伟(1963-), 男, 福建福鼎人, 教授, 博士, 主要从事河流水沙污染物过程及模拟研究。

E-mail: cxwchen215@163.com

$$\frac{u}{u_{*i}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y + y_i}{k_s} + B \quad (1)$$

式中 u 为距床面 y 处的流速; u_{*i} 为粗糙不透水床面的摩阻流速; κ 为卡门常数; k_s 为球体直径; y_i 为理论零点; B 为积分常数。

对于粗糙透水床面, Zagni 和 Smith^[4]、Zippe 和 Graf^[5]、Gupta 和 Paudyal^[7] 沿用式(1), 但对 y_i 和 B 的变化没有加以研究。Mendoza 和 Zhou^[10] 提出了如图 1 所示的分布模式, 认为 $y=0$ 时, 实际的床面流速为 u_s ; 应用摄动理论分析得到 $y=0$ 以上区域流速分布为

$$\frac{u - u_s}{u_{*p}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y + y_0}{y_0} \quad (2)$$

式中 y_0 为粗糙透水床面的理论零点; u_{*p} 为粗糙透水床面的摩阻流速。

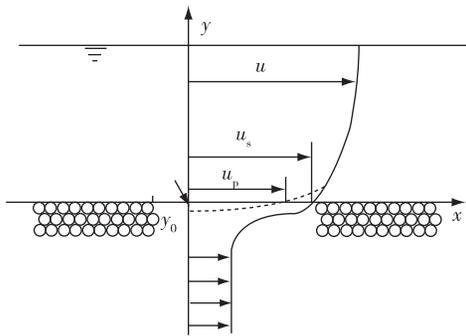


图 1 粗糙透水床面垂线流速分布示意
Fig. 1 Schematic diagram of velocity profile over permeable bed

Mendoza 和 Zhou^[10] 认为由于界面的影响, 粗糙透水层内的流速分布存在一过渡段, 然后是相对均匀的分布。同理, 界面也应对床面之上的流速分布产生影响, 也存在着—薄层, 流速分布与其之上的主流不一致。即是图 1 中的虚线及与之相连的实线部分, 构成粗糙透水床面流速分布模式, 也即理论零点为 y_0 , 理论床面流速为 u_p ; 尽管虚线部分实际并不存在, 也即实际测量并不存在 y_0 和 u_p , 且薄层的厚度也有待研究。根据这样的分布模式, 粗糙透水床面垂线流速分布的公式可推导如下。

对于水平床面的二维紊动边界层, 其 x 方向的方程为

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial \tau}{\partial y} \quad (3)$$

式中 v 为垂向流速; p 为压力; ρ 为水的密度; τ 为切应力。对于水槽试验的均匀流动, 与 u 和 τ 的垂向变化相比, u 和 p 的 x 方向变化很小, 可以忽略。而垂向流速也相对较小, 垂向变化不大, 可假定为不变, $v = v_p$ 。则式(3)就简化为

$$v_p \frac{du}{dy} = \frac{1}{\rho} \frac{d\tau}{dy} \quad (4)$$

应用积分条件: $y=0$ 与 $y=y$ 时, $u = u_p$ 与 $u = u$; 以及 $\tau = \tau_b$, $\tau = \tau$, 积分式(4)得

$$\tau = \tau_b + \rho u v_p - \rho u_p v_p \quad (5)$$

与文献[8]的处理相似, 由普朗特的混渗理论:

$$\tau = \rho \iota^2 \left(\frac{du}{dy} \right)^2 \quad (6)$$

式中 ι 为混渗长度, 并认为

$$\iota = \kappa y \quad (7)$$

和不透水床面相比, 透水床面的主流运动范围为 $y = -y_0$ 之上, 所以可修改式(7)为

$$\iota = \kappa(y + y_0) \quad (8)$$

式(6)相应变为

$$\frac{du}{dy} = \sqrt{\frac{\tau}{\rho}} \frac{1}{\kappa(y + y_0)} \quad (9)$$

由于 $\tau_b = \rho u_{*p}^2$, 将式(5)代入式(9), 并根据积分条件 $y=0$ 与 $y=y$ 时, $u = u_p$ 和 $u = u$ 进行积分:

$$\frac{u - u_p}{u_{*p}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y + y_0}{y_0} + \frac{v_p}{4u_{*p}} \left(\frac{1}{\kappa} \ln \frac{y + y_0}{y_0} \right)^2 \quad (10)$$

式(10)与文献[8]所研究的床面垂向渗流作用下的明渠流速垂线分布结果相类似。但与床面垂向渗流影响相比较, 粗糙透水床面更需要考虑水平方向渗流的影响, 即与 u_p 有关, 而垂向流速 v_p 很小可被忽略, 则式(10)变为

$$\frac{u - u_p}{u_{*p}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y + y_0}{y_0} \quad (11)$$

与式(2)相比, 两者形式相同, 但 $y = 0$ 时的流速定义不同。

2 试验装置和测量方法

试验水槽与床面布置如图 2 所示, 与文献[15]相同。水槽长 20 m, 宽 0.8 m, 深 0.6 m, 水槽水平放置, 可变坡底板为油漆过的钢板, 两侧壁为玻璃。距水槽进口 10 m 处, 是一个长 1.65 m、宽 0.7 m 的收缩段, 由 12 层直径 1 cm 的玻璃珠紧密有规则铺成, 以模拟粗糙透水床面。其上下游铺上 1 层相同玻璃珠形成粗糙度相同但不透水床面, 长度分别为 5.0 m 和 2.5 m。试验中, 用精度为 0.1 mm 的测针量测水面高程, 流量由安装在进水管路上的电磁流量计测量, 通过变频控制稳定流量。采用丹麦 DanTec 生产的二维 LDA 测量水槽中垂线上的流速分布, LDA 安装在同时进口的三维坐标架上, 位移精度为 6.25 μm 。

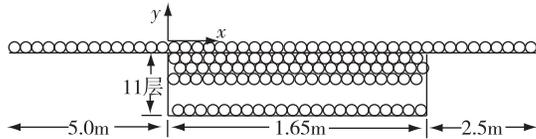


图 2 粗糙透水与不透水床面示意
Fig. 2 Schematic diagram of test section

6 组试验的水力参数见表 1。文献[15]报道了前 3 组的试验结果, 该 3 组试验虽然流量不同但水深基本不变, 每次都待系统运行稳定后再进行流速测量。分别在不透水

和透水床面测量了 2 条和 3 条垂线, 位于 $x = -19.35 \text{ cm}$ 、 -16.75 cm 、 89.65 cm 、 94.00 cm 和 99.25 cm 。每根垂线位于玻璃珠顶部, 都从距顶部 0.2 cm 处开始测量; 在 0.2 倍水深内测量了大于 50 点, 满足文献[16]提出的最小 50 点的要求。在此基础上, 补充了后 3 组试验。试验方法相同, 但只在透水床面区域的 $x = 89.65 \text{ cm}$ 和 94.00 cm 处测量了两条垂线。表 1 中水深为 $x = -19.35 \text{ cm}$ 处所测。本次试验应用一维模式, 只进行纵向流速测量。

3 结果分析

3.1 粗糙不透水床面垂线流速分布

文献[15]应用拟合方法, 得到了如下的粗糙不透水床面垂线流速分布:

$$\frac{u}{u_{*i}} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{y + 0.25k_s}{k_s} + 10.1 \quad (12)$$

对式(12)从 $y = 0$ 到 $y = H$ 进行积分, 得

$$u_{*i} = \frac{U}{2.5 \left[\left(1 + 0.25 \frac{k_s}{H} \right) \ln \left(\frac{H + 0.25k_s}{e} \right) - 0.25 \frac{k_s}{H} \ln \frac{0.25k_s}{e} + (4.04 - \ln k_s) \right]} \quad (13)$$

依式(13)计算得到的前 3 组 u_{*i} 见表 2, 与拟合所得相差很小, 在 3% 之内。所以 4 ~ 6 组试验的 u_{*i} 由式(13)算出并列于表 2。

表 1 试验水力参数

Table 1 Hydraulic parameters of experiments

试验 编号	水深 H/cm	宽深比 B/H	断面平均流速 U/(m·s ⁻¹)	雷诺数 Re	弗劳德数 Fr
1	17.5	4.6	0.443	76 700	0.34
2	17.5	4.6	0.504	87 200	0.38
3	17.5	4.6	0.543	94 100	0.41
4	20.0	4.0	0.475	94 100	0.34
5	20.0	4.0	0.513	101 500	0.37
6	20.0	4.0	0.550	108 900	0.39

表2 不透水与透水床面试验结果比较

Table 2 Comparison of results

试验编号	$u_{*i}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$		$u_{*p}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	y_0/cm	$u_p/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	$(u_{*i}/U)^2$	$(u_{*p}/U)^2$	u_p/U
	拟合	计算						
1	0.029 8	0.029 6	0.034 9	2.8	0.19	0.004 5	0.006 2	0.433
2	0.034 3	0.033 7	0.038 7	2.1	0.20	0.004 5	0.005 9	0.399
3	0.037 4	0.036 3	0.043 1	2.5	0.23	0.004 5	0.006 3	0.420
4		0.031 1	0.039 4	1.9	0.18	0.004 4	0.006 9	0.379
5		0.034 0	0.040 2	1.6	0.19	0.004 4	0.006 1	0.368
6		0.036 5	0.043 5	1.6	0.20	0.004 4	0.006 3	0.365

3.2 粗糙透水床面的垂线流速分布

图3为试验1和试验5两种水流条件下,粗糙透水床面的垂线流速分布测量结果。由图3可知,在相同试验条件下,垂线流速分布基本重合。说明在模拟粗糙透水床面的1.65 m试验段内,尽管该段的头尾部分水流条件受其上下游不透水床面的影响,但在 $x=89.65\sim 99.25\text{ cm}$ 之间或其前后一定范围内,流动条件比较一致,可以反映粗糙透水床面水流运动特性。

上文推导的粗糙透水床面垂线流速分布公式(11),假定 κ 不变,则有3个未知参数 u_{*p} 、 u_p 和 y_0 ,可以通过垂线流速分布实测数据的线性回归求得。首先假定一个 y_0 ,通过线性回归可以得到 u_{*p} 和 u_p ,并计算相应的 F 检验的 F 值^[17]。线性回归理论认为,回归结果越好, F 值越大。所以,变化 y_0 ,可得新的 F 值。通过比较,直到最大的 F 值出现,此时的 y_0 及相应的 u_{*p} 和 u_p 即为所求。如此求得的垂线流速分布拟合结果与实测比较如图4所示,相关系数 R^2 都在0.98以上。

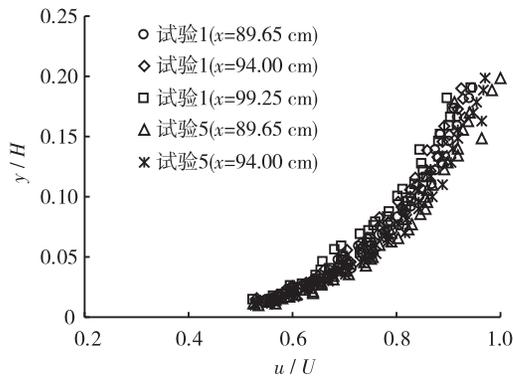


图3 粗糙透水床面流速分布测量

Fig. 3 Velocity profile measurements for permeable bed

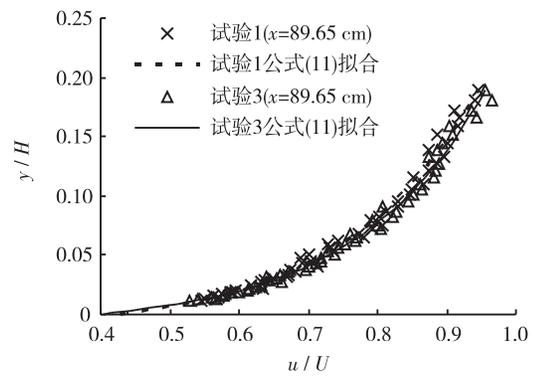


图4 粗糙透水床面流速分布拟合与实测比较

Fig. 4 Velocity profile for permeable bed

为进一步揭示透水床面的影响,将每组试验所测的2或3条垂线流速结果作为1组数据,应用式(11)进行回归,结果如图5所示。图5进一步表明:①在模拟粗糙透水床面的试验段内,有一定范围的流动条件比较稳定,可以代表粗糙透水床面的水流运动特性;②式(11)很好地描述了粗糙透水床面的流速垂线变化。

3.3 公式参数变化

通过前述的式(11)回归,所得到的每组试验3个参数分别列于表2。将理论床面流速量纲一化,以及定义摩阻流速与断面平均流速比值的平方为阻力系数,6组试验相应计算所得也列于表2,如图6、图7所示。表2和图6显示,由于床面透水,透水层存在水平方向的流速,所以床面流速较大,是主流平均流速的0.35~0.45倍;且相对床面流速随着雷诺数的增大而略有减小。图7表明,透水床面的阻力系数较不透水床面有较大增大,且在床面粗糙度和透水层孔隙率不变的条件下,阻力系数基本保持不变。图8说明理论零点随着雷诺数的增大而减小。

但由于目前试验仅考虑一种床面组成与结构, 无法揭示摩阻流速、理论床面流速和原点位移 3 个参数与床面渗透特性的关系, 尚待进一步试验与理论分析; 且由于试验水流难于满足均匀流条件, 对试验结果有一定影响。

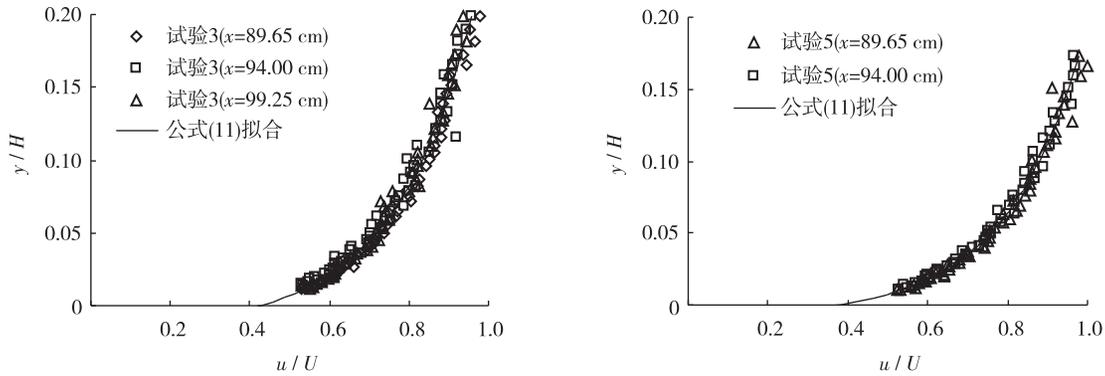


图 5 不同试验条件粗糙透水床面流速分布实测及其拟合

Fig. 5 Velocity profile measurements and modified log law fitting for permeable bed

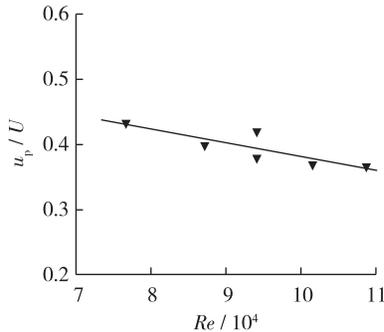


图 6 床面相对流速变化

Fig. 6 Variation of relative bed surface velocity

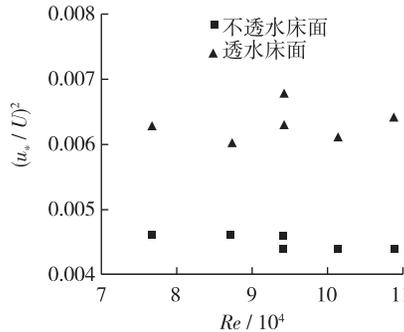


图 7 床面阻力系数变化比较

Fig. 7 Comparison of resistance coefficient

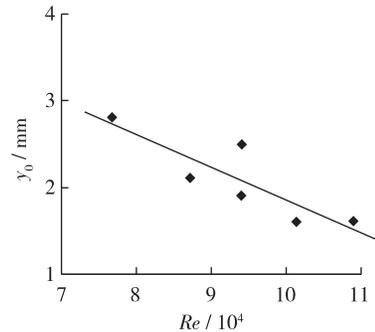


图 8 理论零点的变化

Fig. 8 Variation of origin displacement

4 结 论

(1) 理论推导所得的粗糙透水床面垂线流速分布修正对数公式, 其简化形式含有摩阻流速、理论床面流速和原点位移 3 个参数; 试验结果表明, 正对数公式与实测符合很好。

(2) 相同水流条件下, 透水床面的摩阻流速大于不透水床面, 各自的阻力系数基本不随雷诺数改变。

(3) 理论床面流速为主流平均流速的 0.35 ~ 0.45 倍, 且相对床面流速随着雷诺数的增大而略有减小。

参考文献:

[1] 董曾南, 陈长植, 李新宇. 明槽均匀紊流的水力特性[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 1994, 9(1): 8-22. (DONG Zengnan, CHEN Changzhi, LI Xinyu. State of the art of research of open-channel turbulence [J]. Journal of Hydrodynamics: Ser A, 1994, 9(1): 8-22. (in Chinese))

[2] WANG X Y, YANG Q Y, LU W Z, et al. Experimental study of near-wall turbulent characteristics in an open-channel with gravel bed using an acoustic Doppler velocimeter [J]. Experiments in Fluids, 2012, 52(1): 85-94.

[3] LOVERA F, KENNEDY J F. Friction factors for flat bed flows in sand channels [J]. Journal of Hydraulics Division, 1969, 95(4): 1227-1234.

[4] ZAGNI A F E, SMITH K V H. Channel flow over permeable beds of graded spheres [J]. Journal of Hydraulics Division, 1976, 102(2): 207-222.

[5] ZIPPE H J, GRAF W H. Turbulent boundary-layer flow over permeable and non-permeable rough surfaces [J]. Journal of Hydraulics Division, 1976, 102(2): 207-222.

- lic Research, 1983, 21(1): 51-65.
- [6] NEZU I. Turbulent structure in open channel flow [D]. Kyoto: Kyoto University, 1976.
- [7] GUPTA A D, PAUDYAL G N. Characteristics of free surface flow over gravel bed [J]. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 1985, 111(4): 299-319.
- [8] CHEN X W, CHIEW Y M. Velocity distribution of turbulent open-channel flow with bed suction [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, ASCE, 2004, 130(2): 140-148.
- [9] CHENG N S, CHIEW Y M. Modified logarithmic law for velocity distribution subjected to upward seepage [J]. *Hydraulic Engineering*, ASCE, 1998, 128(12): 1235-1241.
- [10] MENDOZA C, ZHOU D. Effects of porous bed on turbulent stream flow above bed [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 1992, 118(9): 1222-1240.
- [11] STOESESSER T, FROHLICH T, RODI W. Turbulent open-channel flow over a permeable bed [C]// *Proceedings of 32th IAHR Congress*. Venice: IAHR, 2007.
- [12] POKRAJAC D, MANES C. Velocity measurements of a free-surface turbulent flow penetrating a porous medium composed of uniform-size spheres [J]. *Transport in Porous Media*, 2009, 78(3): 367-383.
- [13] 李寿千, 陆彦, 陆永军. 渗流作用下床面切应力响应机理[J]. *水科学进展*, 2011, 22(4): 509-511. (LI Shouqian, LU Yan, LU Yongjun. On the response of bed shear stress to seepage [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(4): 509-511. (in Chinese))
- [14] 陆彦, 陆永军, 李寿千. 流域边界上推移质输沙率[J]. *水科学进展*, 2011, 22(2): 215-221. (LU Yan, LU Yongjun, LI Shouqian. Bed load transport with bed seepage [J]. *Advances in Water Science*, 2011, 22(2): 215-221. (in Chinese))
- [15] 陈兴伟, 林木生, 林炳青. 粗糙透水床面明渠水流的垂线流速分布的试验研究[J]. *亚热带资源环境学报*, 2012, 7(4): 16-19. (CHEN Xingwei, LIN Musheng, LIN Bingqing. Experimental measurements for the velocity distribution of turbulent open-channel flow over permeable rough bed [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2012, 7(4): 16-19. (in Chinese))
- [16] 陈兴伟, 林炳青, 林木生. 样本容量对明渠垂线流速分布对数公式拟合的影响[J]. *水利水电科学进展*, 2013, 33(5): 35-37. (CHEN Xingwei, LIN Bingqing, LIN Musheng. Influence of sample size on the analysis of velocity distribution in open-channel flow [J]. *Advances in Science and Technology Water Resources*, 2013, 33(5): 35-37. (in Chinese))
- [17] 盛骤, 谢式千, 潘承毅. 概率论与数理统计[M]. 北京: 高等教育出版社, 2008. (SHENG Zhou, XIE Shiqian, PAN Chengyi. *The theory of probability and the mathematical statistic* [M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese))

Velocity profile of turbulent open-channel flows over rough and permeable beds*

CHEN Xingwei^{1,2}, LIN Musheng¹, CHENG Niansheng³, LIN Bingqing¹

(1. *School of Geographic Science, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China;*

2. *State Key Laboratory Breeding Base of Humid Subtropical Mountain Ecology, Fuzhou 350007, China;*

3. *School of Civil and Environmental Engineering, Nanyang Technological University, Singapore 639798, Singapore)*

Abstract: The time-mean velocity profile of turbulent open-channel flows over rough and permeable beds is analyzed both experimentally and theoretically in this study. The velocity profile can be derived from a slip velocity at the bed surface and an origin displacement, a modified logarithmic law is thus obtained. The experiment is conducted in a glass-sided flume where the channel bed is prepared with uniform marbles 1 cm in diameter. The velocity is measured using a laser doppler velocimeter. The profile of the measured velocity is used to validate the theoretically derived profile. The result shows that the modified logarithmic law is able to well describe the measured velocity profile. Under the same flow condition, the shear velocity over the permeable bed would be greater than that over the impermeable bed. The value of the flow at the permeable interface is about 0.35 to 0.45 times that of the average stream flow.

Key words: velocity distribution; log law; rough and permeable bed; open-channel flow

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50979015).