

文章编号: 1673-9469 (2017) 01-0057-04

doi:10.3969/j.issn.1673-9469.2017.01.013

## 刚性双层植物河道水流垂向流速分布试验研究

郝文龙<sup>1</sup>, 朱长军<sup>2</sup>, 郝振纯<sup>1</sup>

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210000; 2. 河北工程大学能源与环境工程学院, 河北邯郸 056038)

**摘要:** 天然河道中植物高低不等, 为了研究在淹没条件下含刚性双层植物河道的水流流速垂向分布规律, 试验在矩形平底水槽中, 采用PVC圆柱棒对刚性植物进行模拟, 用三维多普勒超声测速仪(ADV)对流速进行测量, 分析在两种不同高度植物存在的情况下流速的变化规律。试验结果表明: (1) 高棒之后区域的流速分布曲线存在4个拐点, 分布曲线分为5个部分, 各部分水流特性各不相同。(2) 短棒之后的区域的流速分布曲线存在3个拐点, 分布曲线分为4个部分。这两个区域的流速分布曲线的形状在短棒之上、高棒之下的部分有所不同, 其他部分大体相似。(3) 短棒之下的水流速度大小不尽相同, 但在高棒之上的水流流速分布逐渐收敛于一条对数曲线上, 高棒之上的水流流速分布符合无植物水流水面附近的流速分布情况。

**关键词:** 矩形水槽; 刚性双层植物; 流速分布

**中图分类号:** TV8

**文献标识码:** A

## Experimental Study on Vertical Distribution of Flow Velocity in Vegetated Channel

HAO Wenlong<sup>1</sup>, ZHU Changjun<sup>2</sup>, HAO Zhenchun<sup>1</sup>

(1.State Key Laboratory of Hydrology Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Jiangsu Nanjing, 210000, China; 2. College of Energy and Environmental Engineering, Hebei University of Engineering, Hebei Handan, 056038)

**Abstract:** In the experimental study on vertical distribution of flow velocity in double layer vegetated channel, PVC cylindrical rods are simulated as a rigid vegetation. Three-dimensional ultrasonic Doppler speedometer ADV is used to measure velocities in different locations of the rectangular flume. The results show that: (1) the velocity profile behind tall rods exists four inflection points that divide the velocity profile curve into five parts. And the flow characteristics of each part are not identical. (2) the velocity profile behind short rods exists three inflection points that divide the velocity profile curve into four parts. The shapes of velocity profile between the height of tall rods and short rods are different and other parts are generally similar. (3) the velocities under the height of short rods are different, but velocity profile at all locations above the tall rods can appear to converge onto a single logarithmic profile with a slip velocity, which is consistent with the velocity distribution near the water surface of the non-vegetated layer.

**Key words:** rectangular flume; double layer rigid vegetation; distribution of flow velocity

研究水流通过植物的复杂现象可以更好地理解其中所涉及到的物理现象, 植物的存在可以提高河岸的稳定性, 减少河岸侵蚀的现象发生, 对污染物浓度的降低和减少洪水灾害的发生都有重要意义。目前, 很多科学工作者都在进行这方面的研究, 工

作主要集中在以下几个方面: 在不同植物布置情况下, 通过计算拖曳系数来量化流体阻力, 并建立有关于植物密度和雷诺应力的函数<sup>[1-3]</sup>; 通过试验分析流速和紊动强度的变化规律来加深理解这种物理过程<sup>[4-6]</sup>; 还有很多研究人员在均匀排列的植物条件下

收稿日期: 2016-11-11

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0402704)

作者简介: 郝文龙(1988-), 男, 河北邯郸人, 博士, 研究方向为水文物理规律模拟及水文预报。

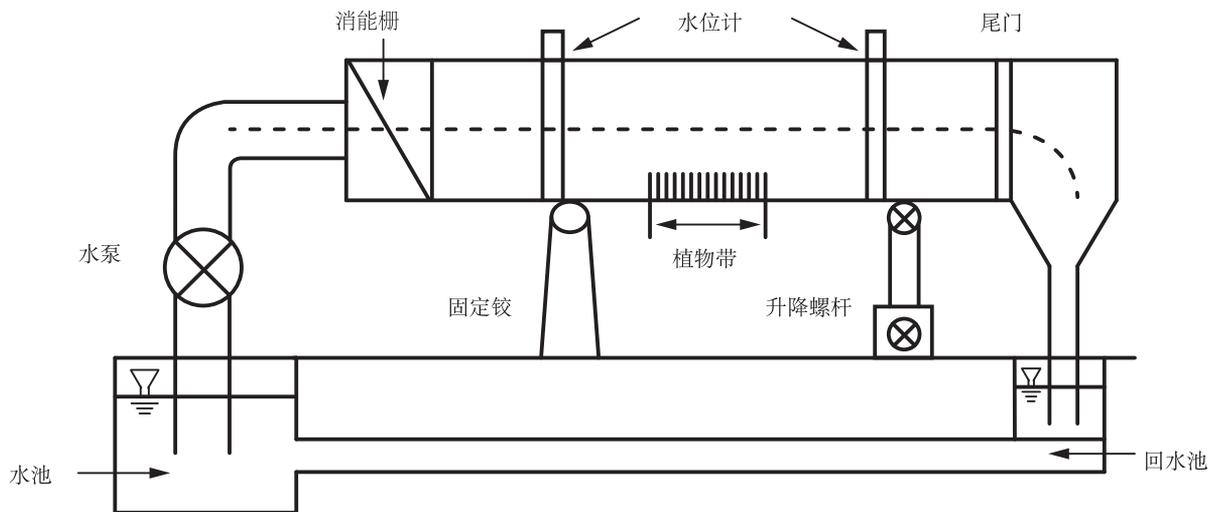


图1 试验循环矩形水槽布置图

Fig.1 Experimental re-circulating open-channel rectangle flume

建立了预测平均流速和紊流结构的数学模型<sup>[7-9]</sup>；Liu等<sup>[10]</sup>采用两种高度不同的丙烯酸树脂材料的圆棒模拟刚性植物，对双层植物的流速分布、紊动强度分布和输水阻力特性进行了研究，并给出了其分布规律；王雯、槐文信<sup>[11]</sup>对刚性淹没双层植被明渠水流特性进行研究，给出了双平均条件下的明渠流速、雷诺应力及紊动能分布，并对紊动能平衡方程中的各项进行了分析。但是，这些研究都主要集中在淹没或非淹没状态下的单一类型植物的研究。由于植物的类型和水流的流动条件不同，实际河岸环境中不同植物的淹没度也不尽相同。正是因为实际环境中这些复杂因素的存在增加了河流环境的不稳定性，所以本文采用了两种不同高度的圆棒模拟刚性植物进行了水槽实验并分析了流速的变化规律。

## 1 试验概况

为了更加全面地考虑实际河道中植物对水流的影响，本次研究在水槽中用两种高低不同的圆棒模拟了刚性植物对河道水流影响的试验。

模拟试验是在河北工程大学水利馆中进行的，用变坡水槽对天然河道进行模拟，水槽长7 m，宽0.5 m，高0.5 m，水槽两侧为玻璃壁面，底面铺满了大小不一的小石子，水槽下方设置着升降螺杆，可以对水槽的坡度进行调节。水槽进水部位设置了进水阀门和消能栅，消能栅对水流有一定的缓冲作用，水流稳定后进入水槽。水槽尾部设置闸门，调节闸门的开度可以对水槽的水位进行控制。为了对水位进一步严格地控制，在水槽水流方向上设置了两个水位计。变坡水槽布置如图1所示。

天然植物形态各异，特性复杂，而且难以在水槽中进行固定。因此，试验采用PVC圆棒对天然刚性植物进行模拟，圆棒有两种规格，一种是直径 $D=1$  cm，高 $h_1=8$  cm，另一种是直径 $D=1$  cm，高 $h_2=4$  cm。

为了减小水流的扰动，底坡坡度为0.001，水流的 $F_r$ 比较小。试验采取的布置方式如图2所示。种树带长3 m，流速的测量采用三维多普勒超声测速仪(ADV)从槽底部1 cm开始测量至水面，测量垂

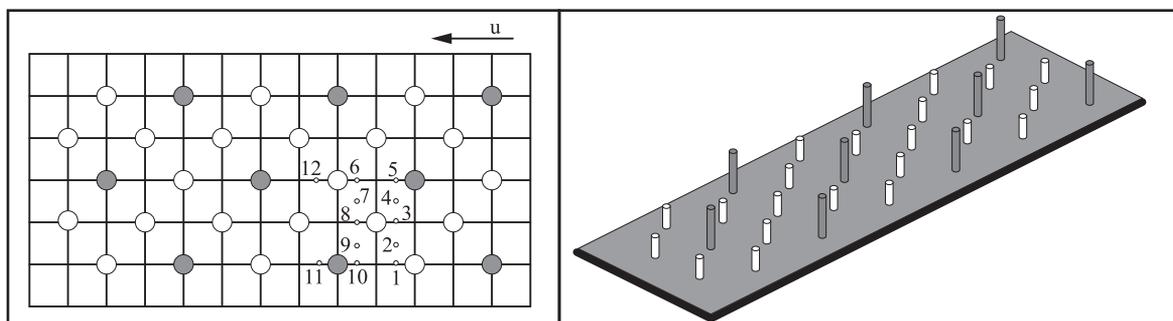


图2 圆棒布置示意图

Fig.2 Sketch map of cylindrical rods

表 1 试验水力学特征参数及植物特征参数

Tab.1 Parameters of the hydraulic characteristics and plant characteristics

| 植物密度<br>$\rho/(株 \cdot m^{-2})$ | $qv/(L \cdot s^{-1})$ | 断面平均流速<br>$U/(m \cdot s^{-1})$ | 水深 $h/cm$ | 底坡    | $R_e$  | $F_r$   |
|---------------------------------|-----------------------|--------------------------------|-----------|-------|--------|---------|
| 15.24+35.57                     | 13.09                 | 0.17                           | 14        | 0.001 | 20 340 | 0.139 2 |

线的位置如图 2 所示。

布置方式水力学参数及植物特征参数见表 1 所示。表中：

$$R_{e_h} = \frac{Uh}{\nu} \quad F_r = \frac{U}{\sqrt{gh}}$$

式中  $U$  为水流平均流速； $h$  为平均水深； $\nu$  为水流运动粘性系数。

## 2 试验结果与分析

图 3 所示是双层植物在明渠水流中各测量垂线的流速分布图， $z$  是从水槽底部到测量点的高度，由图可以看出，在短棒高度之下的流速分布中，水流相对比较自由的区域（测量垂线 2、4、7、9）速度是最大的，而最小的水流速度出现在圆棒的下游区域（测量垂线 1、5、8、11、12），在圆棒的上

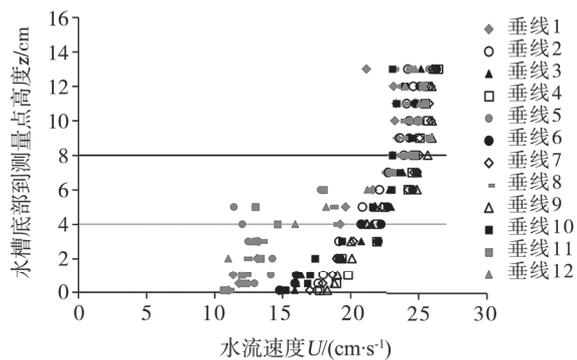


图 3 双层植物各垂线流速分布图

Fig.3 Velocity profiles of double layer vegetation downstream

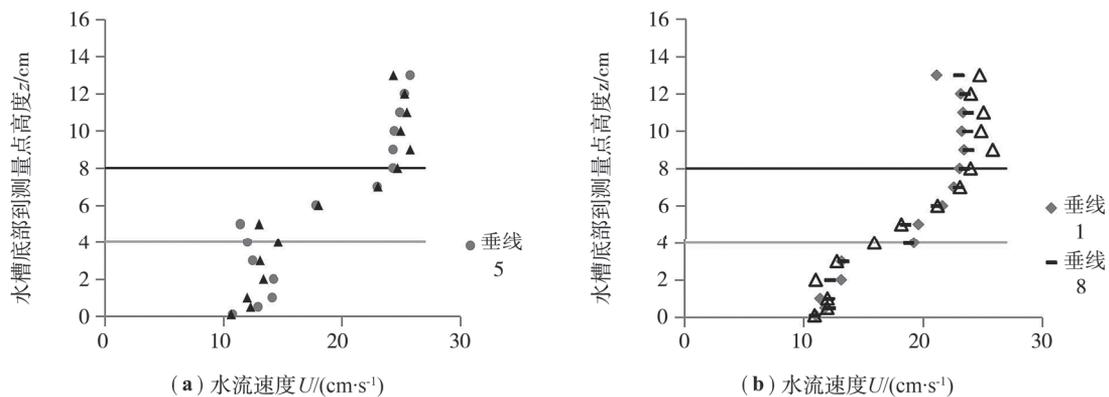


图 4 圆棒下游垂线流速分布图

Fig.4 Velocity profiles of cylindrical bar downstream

游区域（测速垂线 3、6、10），水流的速度接近最大流速和最小流速的中间值。

短棒高度之上的流速增长要比短棒高度之下的流速增长速度要快，这是因为高棒的布置比较稀疏，短棒的布置密度比较大，短棒高度之上的区域水流阻力较小，水流的流动更加自由。由图 3 可以看出，虽然每条测量垂线有不同的初始速度，但在高棒之上的水流区域流速分布逐渐收敛于一条对数曲线上，高棒之上的水流流速分布符合半对数分布。

图 4 (a) 和 (b) 分别是高棒下游区域（测速垂线 5、11）和短棒下游区域（测速垂线 1、8、12）试验所得的数据点分布图，而图 5 是其速度分布的一个典型线分布图。从图 5 曲线 (a) 可以看出，曲线存在 4 个拐点，流速分布大体可以分为 5 个区域，接近水槽底部的拐点发生在点 A，点 A 之下的区域为粘性底层区域，在短棒之下附近处有一个流速的拐点 B，AB 段流速随着高度的增加基本保持不变，说明在此区域内切应力和重力的作用相互平衡。在短棒之上的流速分布存在一个极小值点 C，BC 段流速随着高度的增加而减小，这是因为在高棒之后的附近区域有高棒的阻挡，对水流的流速有一定的阻碍作用，再往上到 CD 段之后，阻挡作用减小，流速随着高度的增加开始变大，直到高棒顶端。D 点以上，流速随着高度的增加以较稳定的斜率增加，高棒之上的水流流速分布符合无植物水流水面附近的流速分布情况。

短棒下游区域的流速分布如图 4 (b) 所示，此

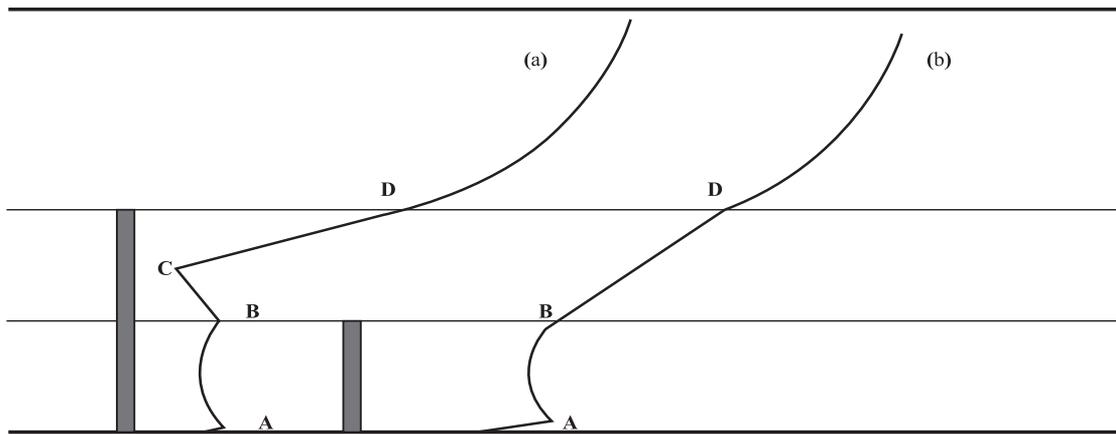


图5 植物区域典型流速分布图

Fig.5 Typical velocity profiles of vegetation area

区域短棒之下的流速分布和(a)的略有不同,这和高棒和短棒的长度比和圆棒的密度有关系。从图5曲线(b)可以看出,曲线存在3个拐点,流速分布大体可分为4个区域,接近水槽底部的拐点发生在点A,点A之下的区域为粘性底层区域,在短棒之下附近处有一个流速的拐点B,AB段流速随着高度的增加基本保持不变,这和图5曲线(a)是相似的。在图5中BD段,曲线(b)没有曲线(a)的C点,流速随着高度的增加一直增加到高棒顶端,这是由于,(a)中由于高棒的阻挡,流速有一个减小的过程,而(b)中高棒对此区域的影响已经可以忽略不计,流速的增加是持续的。D点以上,流速随着高度的增加以较稳定的斜率增加,这和曲线(a)中D点之上的分布也是相似的,水流流速分布符合无植物水流水面附近的流速分布情况。

### 3 结论

高棒之后的流速分布曲线分为五个部分,矮棒之后的流速分布曲线分为四个部分,各部分的流速特性不同。整体上看,高棒和矮棒之后的区域都存在一个粘性区域层,再往上,随着高度的升高,流速变化不是很明显。在矮棒顶端到高棒顶端这个高度范围内,两者的分布曲线不同,高棒之后的分布曲线存在一个拐点,随着高度的增加,流速先变小,在达到一个极小值点后,流速开始变大,而矮棒之后的分布曲线不存在拐点,随着高度的升高,流速变大。在高棒高度以上,两者的流速分布曲线相似,流速随高度的增加以较稳定的斜率增加,高棒之上的水流流速分布符合无植物水流水面附近的情况。

### 参考文献:

- [1]NEPF H M.Drag,Turbulence,and diffusion in flow through emergent vegetation[J].Water Resources Research, 1999, 35(2): 479-489.
- [2]GARCIA M H, Lopez F, Dunn C, et al.Flow, turbulence, and resistance in a flume with simulated vegetation[J].Water Science and Application, 2004 (8): 11-27.
- [3]TANINO Y, NEPF H M.Laboratory investigation of mean drag in a random array of rigid, emergent cylinders[J].J. Hydraul. Eng., 2008, 134(1): 34-41.
- [4]郝文龙, 吴文强, 朱长军, 等.含植物河道的水流垂向流速分布试验研究[J].水电能源科学, 2015, 33(2): 85-88.
- [5]IKEDA S, KANAZAWA M.Three-dimensional organized vortices above flexible water plants[J].J. Hydraul. Eng., 1996, 122(11): 634-640.
- [6]NEPF H M, VIVONI E R.Flow structure in depth-limited, vegetated flow[J].J. Geophys. Res., 2000, 105(C12): 547-557.
- [7]IKEDA S, YAMADA T, TODA Y.Numerical study on turbulent flow and honami in and above flexible plant canopy[J].Int. J. Heat Fluid Flow, 2001, 22(3): 252-258.
- [8]NEARY V S.Numerical solution of fully developed flow with vegetative resistance[J].J. Eng. Mech., 2003, 129(5): 558-563.
- [9]郝文龙, 朱长军, 常向萍.淹没刚性植物水流纵向流速垂向分布研究[J].河北工程大学学报:自然科学版, 2014, 31(3): 64-67.
- [10]LIU D, DIPLAS P, HODGES C C, et al.Hydrodynamics of flow through double layer rigid vegetation[J].Geomorphology, 2010, 116(3): 286-296.
- [11]王雯, 槐文信.刚性淹没双层植被明渠水流紊流特性研究[J].四川大学学报:工程科学版, 2014, 46(1): 61-67.

(责任编辑 王利君)