

doi:10.3969/j.issn.1674-8530.2011.01.010

有植被突扩明渠水流特性试验

王 泽, 张 静

(河海大学 力学与材料学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 通过水槽试验分别研究在沉水植物水蕨和挺水植物富贵竹两种植物作用下的突扩式明渠水流特性, 采用声学多普勒测速仪, 测量突扩前后不同垂线、不同测点的瞬时流速, 计算得出时均流速分布, 分析其变化特征, 探讨突扩明渠中植物对水流内部结构的影响。试验发现: 在种植植被前, 中垂线上突扩前后流速均呈半对数分布, 而种植植被后, 水流受两种不同植物的影响而产生不同的变化趋势, 有沉水植物的情况流速分布可分为3层, 即植被冠层内、植被层之上和过渡层, 且过渡层有流速逐渐增大的趋势, 有挺水植物情况由于植物不同部位阻水效应的差异, 使得流速呈现“3”型分布。位于扩散段回流区内的左垂线流速分布更加复杂, 不服从半对数关系。种植植被后, 同一垂线不同流量下水流的流速分布有很大变化, 并且流速分布的变化率随流量的增大而增大。

关键词: 明渠水流; 突扩; 植被; 声学多普勒测速仪; 流速分布

中图分类号: S277.9; TV131.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-8530(2011)01-0045-05

Experiment on hydraulic characteristics of sudden-expansion channel with vegetation

Wang Ze, Zhang Jing

(College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China)

Abstract: Vegetated sudden-expansion open channel flow with the submerged plant of floating fern or emerging plant of lucky bamboo beds was studied in a laboratory flume. An acoustic doppler velocimeter was employed to measure the instantaneous flow velocity at different measure points of different vertical lines before and after the sudden expansion. The distribution of the mean flow velocity was calculated in order to analyze its characteristic and discuss the influence of plants in open channel on the internal structure of water flow. The experiment revealed that before vegetating, the middle current curve before and after sudden-expansion was semi-logarithmically distributed; after vegetating, because of the influence of two different plants, the distribution of flow velocity under submerged plant condition was classified into three levels; the canopy, the vegetable layer, and the intermediate bed. The intermediate bed was increasingly enlarged. Due to the different water-blocking effects on the different positions of emerging plant, the flow velocity assumes “3” style distribution. The velocity distribution of left vertical line located at the return flow region was more complex and was not semi-logarithmically distributed. After vegetating, the velocity distribution of the identical vertical line under different discharge has a great change. And the variance ratio of velocity distribution was increased along with the discharge increased.

Key words: open channel flow; sudden expansion; vegetation; acoustic doppler velocimeter; velocity distribution;

收稿日期: 2010-01-14

基金项目: 国家973计划项目(2008CB418203)

作者简介: 王 泽(1956—), 女, 辽宁沈阳人, 教授, 博士生导师(daoshiwz@126.com), 主要从事流体力学研究。

张 静(1985—), 女, 河南三门峡人, 硕士研究生(215xiaojing@163.com), 主要从事流体力学研究。

河道中生长的植被是其水动力系统的一项基本要素。探讨植被与水流的相互影响,深入理解植被与水流之间的作用机理及生长有植被的河流的水力环境,在水资源可持续利用、河流及湖泊的生态修复、管理和河道整治等方面有重要的科学和实践意义^[1]。但由于影响因素比较多,例如河流入湖时过流断面的突然增大、选择植被的种类、种植排列方式、密度、淹没状态等,增加了研究有植被河道水流问题的难度,对于这一类问题的研究仍有待于更加深入地探讨。

数值模拟^[2-3]和模型试验是流体力学的主要研究方法,而在植物对水流的作用及含植物水流的紊流机理研究中,水槽试验是国内外学者经常采用的研究手段,Wilson等^[4]利用水槽试验研究明渠水流通过不同形式淹没状态下的柔性植被时的水流特性。Sylvester Petryk等^[3]选取了小麦和高粱两种植物的模型进行了水流通过植被的模拟试验,指出植被的密度是影响流阻的一个重要因素。吴福生等^[6]在室内矩形水槽试验中系统地对比刚性植物与柔性植物的阻力特性、垂线流速分布及紊流特性进行全面研究。王海胜等^[7]通过水槽试验分析了不同类型植物对复式河槽流速分布的影响。然而迄今为止,对有植被明渠水流的试验研究,无论是单式断面渠道还是复式断面渠道,都很少考虑断面形状突变对水流的影响^[8],因此,笔者在前人基础上研究植被对突扩明渠水流的影响,为进一步认识天然河道中植被对水流的影响提供依据。

1 试验方案

1.1 试验装置

该水槽采用自循环系统,水流由供水系统供出,通过流量调节阀,进入消能池,水流稳定后进入水槽,水槽试验段总长1.64 m,高0.25 m,突扩前段长0.80 m、宽0.12 m,突扩段长0.84 m、宽0.21 m,展宽比1.64。水槽两侧边壁及底面均为有机玻璃板,槽尾设有挡水闸门,调节闸门开启度来控制水槽水位并测量流量。本试验采用美国 SonTek 公司的三维超声波多普勒测速仪对水流速度进行测量。

1.2 试验材料及方案

测量前先将底泥平铺入突扩水槽底部,再将植物交叉排列固定于底泥中,分别采用沉水植物水蕨和挺水植物富贵竹两种水生植被进行试验。植被带布置在水槽中部,长为1 m。

本试验中瞬时流场的测量分别在3种不同的水力条件下进行,即:无植物、有沉水植物和有挺水植物,并在每种水力条件下设 Q_{\max} , $1/2Q_{\max}$ 和 $4/5Q_{\max}$ 3个工况。试验中沉水植物为淹没状态,挺水植物为非淹没状态,水深均为15.3 cm。

试验在植被带上游、下游、植被带内部选取6个横断面作为测量断面,测量垂线布置在各断面的中垂线上,另在断面4靠近边壁处布置一条左垂线,以对比研究扩散段回流区的水流特性。具体布置方式如图1所示。

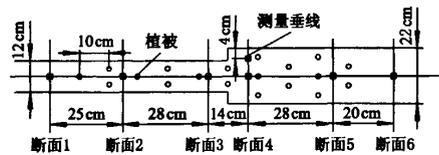


图1 测量布置平面图
Fig. 1 Measuring layout

2 试验结果及分析

2.1 无植物条件下时均流速分布

在 Q_{\max} 工况下,分别对断面2-5的中垂线进行了测量。图2反映了各垂线时均流速 u_x 与相对水深 y 的关系,发现突扩前与突扩后纵向流速的垂向分布均呈现“J”型,符合半对数关系,即 Von Karman - Prandtl 关系式;突扩后断面5的流速有大幅度衰减,接近水面的流速有轻微波动。可见,过流断面的突然扩大没有改变时均流速在断面中垂线上的分布,而使突扩后的流速水平大大降低,水流表面由于波动起伏流速变得不稳定。

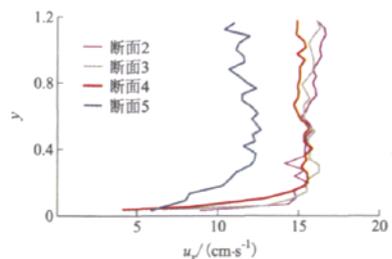


图2 无植物条件下各断面中垂线流速分布
Fig. 2 Velocity distribution of different cross-section under condition without plant

在 $4/5Q_{\max}$ 工况下对比断面4中垂线与左垂线的流速分布(见图3),可以看出左垂线流速从渠底向上有单调递增趋势,已不服从半对数关系,并较中

垂线流速有大幅削减.这主要是由于左垂线位于扩散段的回流区内,该区域内不断有漩涡产生,消耗大量动能,造成流速减小且波动大.

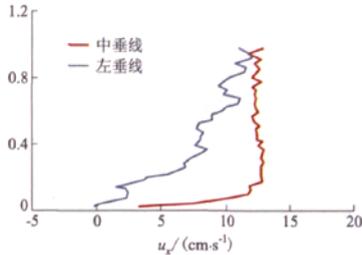


图3 无植物条件下断面4左垂线与中垂线流速分布对比
Fig.3 Comparison of velocity distribution between left and middle vertical line on cross-section 4 without plant

比较不同工况下突扩后断面4中垂线的流速分布(见图4)可以看出,无植物条件下,不同的工况下流量的改变只影响流速的大小,对流速分布的改变很小.

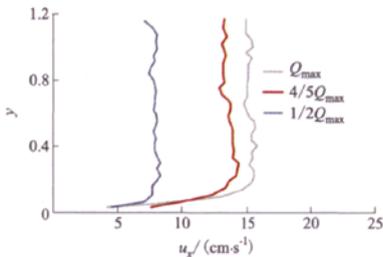


图4 无植物条件下不同流量断面4中垂线流速分布
Fig.4 Velocity distribution of section 4 under different discharge without plant

2.2 有沉水植物条件下时均流速分布

栽种沉水植物水蕨后,在相同的水力条件下,不同断面时均流速分布表现出不同的特征,见图5.

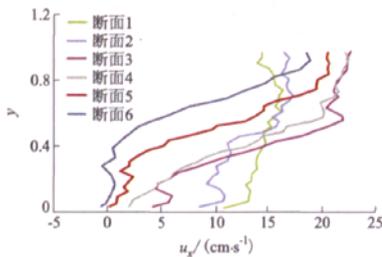


图5 有沉水植物条件下各断面中垂线流速分布
Fig.5 Velocity distribution of different cross-section under condition with submerged plant

观察图5发现,水流未进入植被区之前断面1时均流速沿垂线分布与无植被时的趋势基本一致,

随着水流进入植被区,时均流速不再符合半对数分布,并且这种变化一直延伸到植被带下游.

在图5中可以观察到沉水植物作用下水流流速分布的三层结构,这与前人研究结果一致^[9-10].

(1)在植被冠层内呈“S”型分布,植被冠层内的流速随流减小,由于植物随水流倾覆后,其高度相对于水深偏小,加上植物不同的排列与位置对植物冠层内水流的影响,使得“S”型分布不是十分明显,并且各断面流速曲线形态各异,但仍可发现在突扩前断面2,3在植被冠层内相对水深 $y=0.1$ 处有一个次级流速最大值出现,突扩后断面5则出现在 $y=0.2$ 处,这是由于突扩后流速的衰减使植被的倾斜度减小,其相对高度就比突扩前高一些,因此流速分布中,次级流速最大值出现在较高的水深位置上.

(2)在植被层之上的水体均表现出“J”型流速分布,也即冠层之上的水流结构符合湍流边界层理论,但其分布区域的大小各断面都有所不同.

(3)过渡层从植被冠层顶部开始到流速基本恢复稳定结束,植被冠层顶部的扰动吸收了大量的水流运动能量,欲使流速降低,而当上部水体随惯性向前运动时,对过渡层水流产生了拖拽力,使流速保持单调递增的趋势,可以近似为线性变化.可以看到断面2的过渡层最小,说明刚进入植被带植被对水流的扰动小,随着水流向下游发展过渡层增大,也就是植被对水流的扰动作用在增强.

图6显示了种植沉水植物前后断面4左垂线在 $4/5Q_{max}$ 工况下的流速分布情况,可以看出种植沉水植物前后左垂线在植被层之上的流速水平相当,在植物冠层顶部及冠层以内流速比无植被时小,这是后排植被阻挡作用引起的.

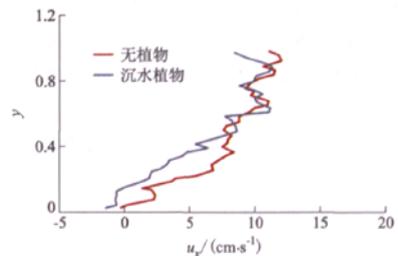


图6 有无沉水植物断面4左垂线流速分布对比
Fig.6 Comparison of velocity distribution with or without submerged plant on left vertical line cross-section 4

突扩后断面4在不同工况下的流速分布如图7所示.随着平均流速增大,冠层内流速的变化并不大,而在植物层之上各工况流速大小差异明显,从而

使过渡层内流速梯度随流量的增大而增大。

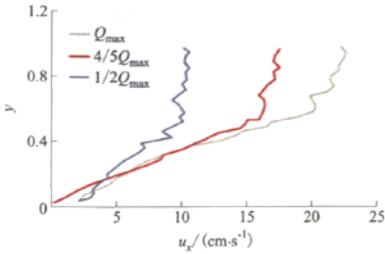


图7 有沉水植物条件下不同流量断面4中垂线流速分布
Fig.7 Velocity distribution of section 4 under different discharge with submerged plant

2.3 有挺水植物条件下时均流速分布

在有挺水植物富贵竹的突扩式水槽中,对沿程各个断面的中垂线进行了测量,图8反映的是工况 Q_{max} 下的测量结果。

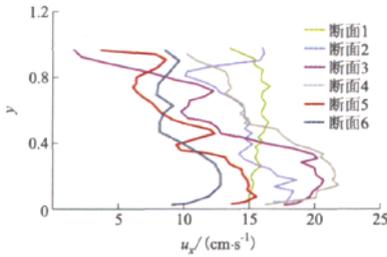


图8 有挺水植物条件下各断面中垂线流速分布
Fig.8 Velocity distribution of different cross-section under condition with emergent plant

断面1处水流未进入植被带,流速分布仍呈“J”型,符合半对数变化规律。随着水流进入植被带,各断面流速均发生了巨大的变化。本试验中富贵竹处于非淹没状态,也即水流始终穿梭在植物的间隙中,植被要素(茎、叶、干等)吸收了水流的运动能量,然而植物不同的部位消耗的能量有多有少,在接近渠底的部分为茎秆,向上发展植物的叶片越来越稠密,阻水能力也越来越强,因此出现了下部流速大、上部流速小的现象,呈现“3”型分布。由于实际植物的生长结构不同,对水流的影响很大,因而各断面的流速分布呈现出各异性。突扩前从断面1到断面3植被枝叶部分水体流速相继减小,茎秆部相继增大,突扩后断面4由于距离植被稍远,并处于植被间隙的后方,流速比断面3有少许增大,断面5的流速则比突扩前有很大程度的衰减,这是突扩后流速水平整体下降的结果,植被带后的断面6仍然没有摆脱植被对它的影响,延续了断面5的流速分布趋势,随着断面平均流速持续在扩散段递减,植被茎秆

部水流流速继续衰减,而枝叶部水流流速在摆脱植被后有所回升。

图9为种挺水植物前后工况 $4/5Q_{max}$ 下断面4左垂线的流速分布比较。可以看到挺水植物的阻挡使左垂线的流速分布相当复杂,由于渠底阻力相对较小,流速的最大值出现在此处,在后排植物的阻挡下垂线的中部形成了很强的回流,虽然在靠近水面流速有所提升,但始终比无植物时的流速小很多。

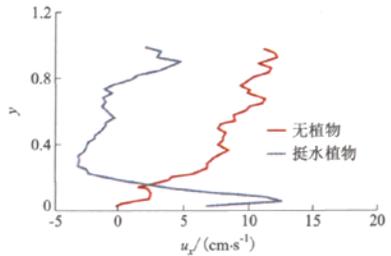


图9 有无挺水植物断面4左垂线流速分布对比
Fig.9 Comparison of velocity distribution with or without emergent plant on left vertical line cross-section 4

图10反映的是植被带内不同工况下相同垂线的流速分布比较。可以看到靠近水面流速分布相对集中,此位置处植物叶片稠密,对水流的阻挡作用很大,虽然平均流速有很大变化,此处的流速差距却很小。然而流速分布曲线的下半部分,也就是植物的茎秆作为主要的阻力因素,不同工况的流速差距很大,流速分布在整个水深上的变化率随平均流速的减小而减小,也即当平均流速较小时流速的垂线分布更均匀。

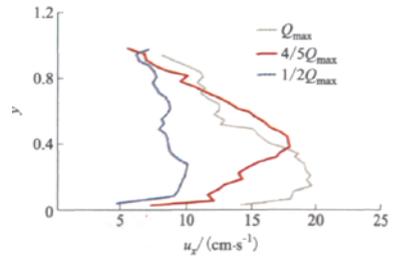


图10 有挺水植物条件下不同流量断面4中垂线流速分布
Fig.10 Velocity distribution of section 4 under different discharge with emergent plant

3 结论

分别对3种不同水力条件下,突然扩大明渠水流的时均流速分布做出比较分析发现:

(1) 在无植物条件下比较各断面中垂线的流速

分布,发现突扩前与突扩后纵向流速的垂向分布相似均呈现“J”型,突扩后流速有大幅度衰减。位于扩散段的回流区内断面4左垂线的流速分布从渠底向上单调递增,已不服从半对数关系。

(2)栽种植物后,在相同的水力条件下,不同断面中垂线流速分布表现出不同的特征。总体上,植被带上游水流受植被影响较小,流速分布与无植被时的趋势基本一致,而植被带内及下游水流受到很大影响,时均流速分布不再符合半对数分布。试验发现沉水植物水蕨作用下的水流流速分布可分为3层结构,即:植被冠层内、植被层之上和过渡层,随着水流向下游发展过渡层在逐渐增大,说明植被对水流的扰动作用在沿流增强。在挺水植物富贵竹作用下,植被要素(茎、叶、干等)吸收了水流的运动能量,然而植物不同的部位所消耗的能量多少不同,从而出现了下部流速大、上部流速小的现象,呈现“3”型分布。

(3)种植植物后断面4左垂线的流速分布发生变化。有沉水植物条件下,受后排植被阻挡植物冠层顶部及冠层以内的水流速度比无植被时小;有挺水植物条件下,左垂线的流速分布更加复杂,流速的最大值出现在渠底,在后排植物的阻挡下垂线的中部还有逆向流速出现。

(4)在无植物的条件下,流量只改变流速大小,而不改变流速分布。栽种植物后流量的改变,对水蕨冠层以上和富贵竹茎部的水体影响较大,流速分布在整个水深上的变化率随流量的增大而增大。

参考文献 (References)

- [1] 李冬,刘斌. 植被对水流结构影响研究进展[J]. 科技信息, 2007(13): 217-218.
Li Dong, Liu Bin. Progress of researching the influence of vegetation on flow structure [J]. *Science Information*, 2007(13): 217-218. (in Chinese)
- [2] Belmiloud M, 陈善群. 分叉管流动的数值模拟[J]. 排灌机械, 2005, 23(2): 39-48.
Belmiloud M, Chen Shanqun. Numerical computation of bifurcation pipe flows [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2005, 23(2): 39-48. (in Chinese)
- [3] 陈善群, 王泽. 旋涡发生器三维流场的数值模拟[J]. 排灌机械, 2008, 26(1): 65-68.
Chen Shanqun, Wang Ze. Numerical simulation of 3D flow field in a pair of vortex generators [J]. *Drainage and Irrigation Machinery*, 2008, 26(1): 65-68. (in Chinese)
- [4] Wilson C A M E, Stoesser T, Bates P D, et al. Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2003, 129(11): 847-853.
- [5] Sylvester Petryk, ASCE A M, George Bosmajian III. A analysis of flow through vegetation [J]. *Journal of the Hydraulics Division*, 1975, 101(7): 871-884.
- [6] 吴福生, 姜树海. 柔性植物与刚性植物紊流特性研究[J]. 水动力学研究与进展, 2008, 23(2): 159-164.
Wu Fusheng, Jiang Shuhai. Turbulent characteristics in open channel with flexible and rigid vegetation [J]. *Chinese Journal of Hydrodynamic*, 2008, 23(3): 159-164. (in Chinese)
- [7] 王海胜, 杨克君, 刘兴年, 等. 滩地植被下复式河槽水流特性试验研究[J]. 人民黄河, 2009, 36(6): 26-27.
Wang Haisheng, Yang Kejun, Liu Xingnian, et al. Experimental study of flow characteristics in compound channels with beach vegetation [J]. *Yellow River*, 2009, 36(6): 26-27. (in Chinese)
- [8] 王付, 赵振兴. 河岸植被对水流影响的研究现状[J]. 水资源保护, 2003(6): 50-52.
Wang Cun, Zhao Zhenxing. The progress of researching the impact of riparian vegetation on water [J]. *Water Resources Protection*, 2003(6): 50-52. (in Chinese)
- [9] 王付. 有植被的河道水流试验研究[D]. 南京: 河海大学环境科学与工程学院, 2003.
- [10] 时钟. 海岸盐沼冠层水流时均流速分布的试验研究[J]. 海洋工程学报, 2001, 8(3): 11-17.
Shi Zhong. A flume study on mean velocity profiles of flow in a coastal saltmarsh canopy [J]. *Ocean Engineering*, 2001, 8(3): 11-17. (in Chinese)

(责任编辑 徐云峰)