

植物对明渠流速分布影响的试验研究

闫 静^{1,2,3}, 唐洪武^{1,2,3}, 田志军^{1,2}, 何 眇^{1,2}

(1. 水文水资源与水利工程国家重点实验室, 江苏南京 210098; 2. 河海大学 水电学院, 江苏南京 210098; 3. 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 江苏南京 210098)

摘要:采用圆柱铝棒模拟刚性植物进行水槽试验,利用激光流速仪 LDV 对含非淹没、淹没植物明渠流场进行了测量,对模拟植物淹没度、密度对流速分布的影响进行了研究。分析表明,植物非淹没条件下的平均流速可以表示为流量、渠宽、水深和植物密度的函数;植物淹没条件下,很难用统一的函数描述平均流速沿水深的分布,植物层上部和内部与顶部处的流速偏离有随淹没度、密度的增大而增大的规律,相同宽深比条件下,含淹没植物明渠和无植物明渠相比,最大流速位置前者高于后者,植物“抬高床面”或是减小了有效宽深比的作用。

关 键 词:植物; 明渠流速分布; 非淹没; 淹没

中图分类号: TV131 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2011)04-0138-05

水生植物是影响河流系统众多因子中最为重要的因子,是河流生态的重要特征,为其他水生生物提供了生活环境。正是因为水生植物对河流生态起着举足轻重的作用^[1],研究者试图从不同的角度研究水生植物。近年来陆续有学者从水力学的角度研究水生植物对河流垂向流速分布的影响。

对于流经非淹没植物的水流,有研究表明其纵向流速沿水深垂线分布近似为一常数(近床面除外)^[2]。对于流经淹没植物的水流,纵向流速沿水深分布存在两区和三区划分的观点,从床面至自由水面,不再遵循传统的明渠水流对数流速分布律^[3]。两区划分将流速分布分为植物层内及植物层以上区域,植物层以上区域,流速满足对数分布,在植物顶部以下区域,流速较小但不满足对数分布(可见,N. Kouwen, U. Stephan 和 F. López^[4-6])。三区划分的观点(如 M. R. Gourlay^[7], O. Ei-Hakim 等^[8], F. G. Carollo 等^[9], Nepf 研究团队^[10-12], T. A. Okamoto 等^[13]的观点)并未得到完全的统一,各区界限仍存在不同取值,且各区遵循的流速分布律也不尽相同。实际上,由于植物几何形状、刚度、排列方式、淹没度等因素均会对流场产生影响,很难得到统一的流速分布公式。本文基于水槽试验,采用圆柱铝棒模拟刚性植物,利用激光多普勒测速仪 LDV 对植物条件下的明渠水流流速进行了测量,分析了植物非淹没条件下的流速分布及植物淹没条件下密度和淹没度对流速分布的影响。

1 试验的建立和条件

试验在 12 m×0.42 m×0.70 m(长×宽×高)的矩形断面、可变坡循环水槽中进行,水槽边壁为普通透明玻璃。水槽底板为 4 块 2 m×0.42 m×0.01 m(长×宽×厚)的光滑灰塑料板,第 1 块板和最后一块板距上下游进、出水口均为 2 m,灰塑料板上钻有直径 6 mm 的圆孔,沿水流方向(x 方向)相邻两排孔的间距为 0.05 m,沿水槽横断面方向(z 方向)相邻两排孔的间距为 0.01 m。采用直径为 6 mm 的圆柱铝棒模拟刚性植物。1 台变频

收稿日期: 2011-08-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50879019); 教育部博士点基金资助项目(200802940001); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(2010B02214); 江苏省 333 科研项目(2017-B08038); 河海大学自然科学基金资助项目(2008426411)

作者简介: 闫 静(1980-),女,新疆石河子人,讲师,博士,主要从事明渠紊流力学和河流动力学方面研究。

E-mail: yanjing@hhu.edu.cn

泵安置在水槽下方的循环水管中驱动水流运动, 水流经过水池、变频泵、平水塔、过滤网、水流矫直机(平水格栅)、水槽、泄水池、回水廊道形成循环。试验循环水槽及模拟植物布置示意图见图 1。

流量由放置在水池中的变频泵控制, 采用康创 1010 系列时差式超声波流量计测量。水位由下游的尾水闸门控制, 采用水位测针测量。本试验采用 TSI 五光束单探头三维激光流速仪。

氩离子激光器提供高功率的绿色、蓝色和紫色 3 种波长的激光。在试验调试过程中, 发现紫光在水槽中心位置附近测量水流衰减很快, 采用三维相关采集无法采集到有效采样点, 而采用二维测量在整个水槽宽度内都可以达到理想的效果。为了保证实验中 LDV 采样点的有效性和准确性, 采用绿色、蓝色激光进行二维测量。LDV 激光信号经过信号处理器和配套的 Flowsizer 软件进行处理。本文主要讨论纵向流速的垂线分布规律。

为了避免和减轻水面波动, 试验水流的 Fr 值均较小, 具体的植物和水流条件见表 1。

表 1 植物条件下明渠水流试验条件

Tab. 1 Open channel flow conditions with vegetation

组 次	水 深 / cm	流 量 /(L·s ⁻¹)	底 坡 /(1/1 000)	断面平 均流速 /(m·s ⁻¹)	雷 诺 数 / 10 ⁴	弗 劳 德 数	间 距 / m	淹 没 度
B1	9	6.80	10.00	0.180	1.42	0.19	0.02	0.45
B2	12	9.17	11.00	0.182	1.91	0.17	0.02	0.60
B3	15	11.34	11.00	0.180	2.37	0.15	0.02	0.75
B4	18	13.70	12.00	0.181	2.86	0.14	0.02	0.90
C1	9	10.60	13.00	0.280	2.21	0.30	0.04	0.45
C2	12	15.12	15.00	0.300	3.16	0.28	0.04	0.60
C3	15	18.40	14.00	0.292	3.84	0.24	0.04	0.75
C4	18	22.68	15.00	0.300	4.73	0.23	0.04	0.90
D1	9	11.10	11.00	0.294	2.32	0.31	0.05	0.45
D2	12	15.12	11.00	0.300	3.16	0.28	0.05	0.60
D3	15	18.20	11.00	0.289	3.80	0.24	0.05	0.75
D4	18	21.92	11.00	0.290	4.58	0.22	0.05	0.90
E1	12	14.40	12.82	0.286	3.01	0.26	0.01	2.00
E2	18	23.22	4.80	0.307	4.85	0.23	0.01	3.00
E3	24	30.96	2.21	0.307	6.46	0.20	0.01	4.00
E4	30	37.80	1.21	0.300	7.89	0.18	0.01	5.00
F1	12	14.60	7.20	0.290	3.05	0.27	0.02	2.00
F2	18	22.68	3.05	0.300	4.73	0.23	0.02	3.00
F3	24	30.24	1.50	0.300	6.31	0.20	0.02	4.00
F4	30	36.80	1.11	0.292	7.68	0.17	0.02	5.00
G1	12	15.12	3.73	0.300	3.16	0.28	0.04	2.00
G2	18	22.68	2.60	0.300	4.73	0.23	0.04	3.00
G3	24	30.24	1.09	0.300	6.31	0.20	0.04	4.00
G4	30	36.80	0.65	0.292	7.68	0.17	0.04	5.00

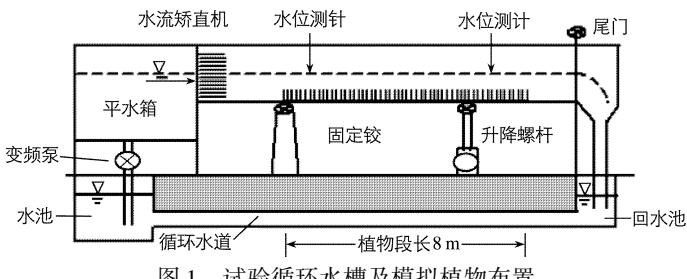


图 1 试验循环水槽及模拟植物布置

Fig. 1 Experimental recycling flume with simulated vegetation

表中断面平均流速 $U_m = Q / (BH)$, $Re = U_m R / \nu$, $Fr = U_m / (gH)^{0.5}$, 水温为 15℃。所有的试验组次中, 铝棒 x 方向的间距均为 $S_x = 0.05$ m。 λ 为模拟植物密度, 定义为 $B \times H \times L$ (水槽宽度×水深×植物带长度)水体范围内, 植物总的平均水平截面积占床面面积的百分比, 对于圆柱棒模拟的刚性植物有:

$$\lambda = N(\pi d_v^2/4)/(BL) \quad (1)$$

式中: N 为面积 $B \times L$ 的床面上植物数, 植物对齐排列时, 也可写作 $\lambda = \pi d_v^2/(4S_x S_z)$, S_z 为 z 方向相邻两铝棒的间隔距离, 本试验 $\lambda_4 > \lambda_3 > \lambda_2 > \lambda_1$.

试验中, 沿水流方向在相邻的两排圆柱棒之间测量了 3 个断面, 即选择距上游进水口(8.4-0.075) m, 8.4 m, (8.4+0.075) m 的 3 个断面作为测量断面. 每个断面上, 沿水槽横向, 在植物后部、空隙处测量了多条垂线. 将测量结果沿横向、流向进行空间平均, 得到流场空间平均流速分布.

2 非淹没植物条件下流速分布

图 2 为模拟植物非淹没条件下, 几组试验得到的平均流速垂线分布. 使用计算的断面表观平均流速 $U_m = Q/(BH)$ 对流速进行无量纲化.

可以看出, U/U_m 沿水深近似为 1.0. 实际上, 由于植物的存在, 过水断面的面积小于 BH , 实际的断面平均流速应大于计算值 U_m , 即 $\Delta U_m = (U_m)_{\text{实际}} - (U_m)_{\text{计算}} > 0$, 因此 U/U_m 略大于 1.0. 密度越大, U/U_m 越大, 这是由于密度越大, ΔU_m 也越大. 同时, 对于同种密度, 不同水深下 U/U_m 近似相同 (D2 和 D4 组次), 即淹没度(定义为水深与植物高度的比)对于非淹没水流影响不大.

对于含非淹没植物的均匀明渠流动, 根据平均流速分布特点和质量守恒, 普适的平均流速可以写为流量、过水断面及植物分布密度的函数:

$$U = \frac{Q}{BH(1 - \lambda)} \quad (2)$$

3 淹没植物条件下流速分布

3.1 流速分布规律

对于明渠流速分布, 一般采用摩阻流速 u_* 作为速度比尺、水深 H 或黏性长度尺度 v/u_* 作为长度比尺进行纵向流速沿垂线分布的无量纲化, 以便得到普适的分布规律, 如经典的对数-尾流分布律. 本研究也采用以上 3 个参数分别对流速和水深进行无量纲化, 其中摩阻流速记为 $u_{*\text{SR}}$, 考虑了植物的存在, 计算方法如下:

$$u_{*\text{SR}} = \sqrt{g \frac{\bar{A}}{P} S} \quad (3)$$

$$\bar{A} = BH \left(1 - \lambda \frac{h_v}{H}\right) \quad (4)$$

$$\bar{P} = 2H + B(1 - \lambda) \quad (5)$$

式中: \bar{A} 为平均过水断面面积; \bar{P} 为平均湿周; S 为均匀流坡度; h_v 为植物水下高度(植物糙元淹没时即植物高度 H_v).

图 3 为采用不同长度比尺得到的无量纲流速沿垂线的分布. 图 3 表明, 含淹没植物明渠纵向流速垂线分布的基本特点是存在拐点, 由拐点以下的凸线转变为拐点以上的凹线. 可以看出, 采用传统的摩阻流速 u_* 作为速度比尺、水深 H 或黏性长度尺度 v/u_* 作为长度比尺不能得到统一的流速分布公式.

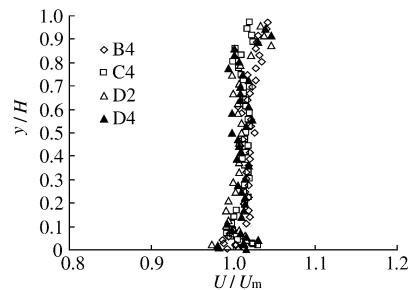


图 2 含非淹没植物明渠平均流速分布
Fig. 2 Velocity distribution of open channel flows with non-submerged vegetation

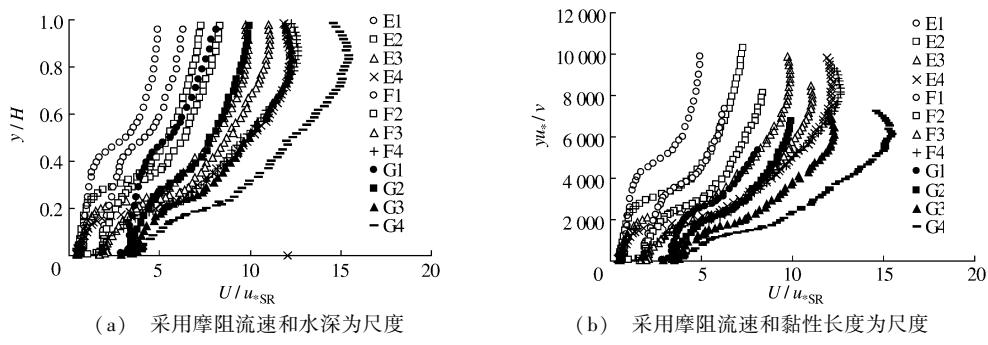


图3 无量纲流速沿垂线的分布

Fig. 3 Non-dimentional velocity distribution along vertical line

3.2 植物淹没度和密度影响

为了讨论淹没度的影响, 分别使用摩阻流速和植物高度作为速度和长度尺度, 得到无量纲流速沿垂线的分布见图4(a). 进一步使用植物顶部流速对平均流速的垂线分布进行无量纲化, 来分析植物层内部和上方水流相对植物顶点的偏离(见图4(b)). 从图4可以看出, 密度和淹没度对 U/U_v 都有影响: 相同淹没度下, 密度愈大, 植物上部和内部与顶部的流速偏离越大; 相同密度下, 淹没度越大, 植物上部和内部与顶部的流速偏离越大. 同时, 3种密度下, 密度越小, 4种淹没度之间流速分布越集中(见G系列).

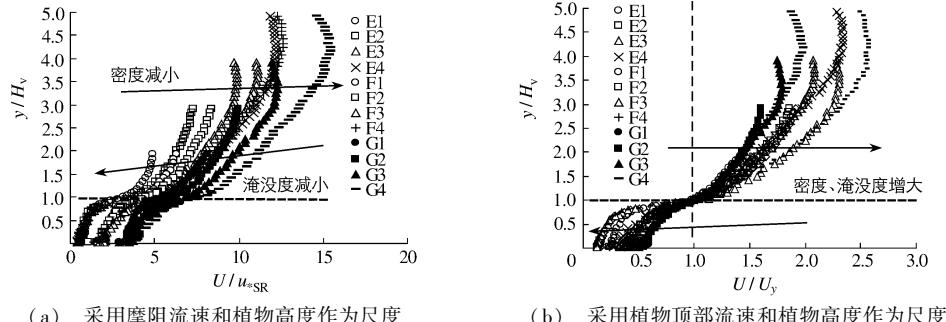


图4 无量纲流速的分布

Fig. 4 Non-dimentional velocity distribution

对水深为24和30 cm的3种密度, 出现了最大流速下移现象^[14], 但水深为12和18 cm($B/H=3.5, 2.33$, 均小于5.0)时, 近自由水面区域没有出现此现象, 说明植物有“抬高床面”的作用. 结合以上分析可以看出, 仅仅使用 U_v, H_v, u_{*SR}, H 或 u_v/v , 不能得到普适的含淹没植物明渠流速沿水深分布公式.

4 结语

(1) 植物非淹没条件下的纵向平均流速可以写为流量、渠宽、水深和植物密度的函数.

(2) 植物淹没条件下, 很难用统一函数描述纵向平均流速沿整个水深的分布. 纵向流速垂线分布的基本特点是存在拐点, 由拐点以下的凸线转变为拐点以上的凹线. 相同植物密度下, 淹没度越大植物上部和内部与顶部的流速偏离越大; 相同淹没度时, 密度愈大, 植物上部和内部与顶部的流速偏离越大, 密度越小, 不同淹没度间的流速分布越集中. 在水槽宽深比小于5.0时, 平均流速并未出现“最大流速下移”现象, 植物“抬高床面”或是减小了有效宽深比.

参考文献:

- [1] 唐洪武, 闫静, 吕升奇. 河流管理中含植物水流问题研究进展[J]. 水科学进展, 2007, 18(5): 785-792. (TANG Hong-

- wu, YAN Jing, LV Sheng-qi. Advances in research on flows with vegetation in river management [J]. Advances in Water Resources, 2007, 18(5) : 785-792. (in Chinese)
- [2] HUAI Wen-xin, CHEN Bing, HAN Jie. Mathematical model for the flow with submerged and emerged rigid vegetation [J]. Journal of Hydrodynamics, 2009, 21(5) : 722-729.
- [3] 闫静. 含植物明渠水流阻力及紊流特性的实验研究[D]. 南京: 河海大学, 2008. (YAN Jing. Experimental study on flow resistance and turbulence characteristics of open channel flows with vegetation[D]. Nanjing: Hohai University, 2008. (in Chinese))
- [4] KOUWEN N, UNNY T E, HILL H M. Flow retardance in vegetated channels [J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1969, 95(IR2) : 329-342.
- [5] STEPHAN U, GUTKNECHT D. Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation[J]. Journal of Hydrology, 2002, 269: 27-43.
- [6] LÓPEZ F, GARCÍA M H. Mean flow and turbulence structure of open-channel flow through non-emergent vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2001, 127(5) : 392-402.
- [7] COURLAY M R. Discussion of 'Flow resistance in vegetated channels' by Kouwen N[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Division, 1970, 96(IR3) : 351-357.
- [8] EI-HAKIM O, SALAMA M M. Velocity distribution inside and above branched flexible roughness[J]. Journal of the Irrigation and Drainage Engineering, 1992, 118(6) : 914-927.
- [9] CAROLLO F G, FERRO V, TERMINI D. Flow velocity measurements in vegetated channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(7) : 664-673.
- [10] GHISALBERTI M, NEPF H M. Mixing layers and coherent structures in vegetated aquatic flows[J]. Journal of Geophysical Research, 2002, 107(C2) : doi: 10.1029/2001JC000871.
- [11] GHISALBERTI M, NEPF H M. The limited growth of vegetated shear layers[J]. Water Resources Research, 2004, 40, doi: 10.1029/2003WR002776.
- [12] GHISALBERTI M, H NEPF. The structure of the shear layer over rigid and flexible canopies [J]. Environmental Fluid Mechanics, 2006, 6(3) : 277-301.
- [13] OKAMOTO T A, NEZU I. Turbulence structure and "Monami" phenomena in flexible vegetated open-channel flows [J]. Journal of Hydraulic Research, 2009, 47(6) : 798 - 810.
- [14] YAN Jing, TANG Hong-wu, XIAO Yang, et al. Experimental study on influence of boundary on location of maximum velocity in open channel flows[J]. Water Science and Engineering, 2011, 4(2) : 185-191.

Experimental study on the influence of vegetation on the velocity distribution of open channel flows

YAN Jing^{1,2,3}, TANG Hong-wu^{1,2,3}, TIAN Zhi-jun^{1,2}, HE Ye^{1,2}

- (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China;
 2. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety, Nanjing 210098, China)

Abstract: Vegetation is an important feature of natural rivers. Based on the flume experiments with aluminum cylinders simulating rigid vegetation and the laser Doppler velocimetry, the influences of vegetation submergence and density on the velocity distribution are investigated in this study. The analyses indicate that the mean streamwise velocity can be expressed by a function of flow discharge, channel width, water depth and vegetation density for non-submerged vegetated flows. For submerged cases, it is difficult to find a function to express the velocity distribution change with the whole water depth. The velocity deviation between both the upper layer and vegetation layer and the vegetation top become larger with the increment of vegetation submergence and density. The location of the maximum velocity of submerged vegetated flow is higher than that of non-vegetated flow with the same aspect ratio. The vegetation enhances the "bed level" or reduces the "effective aspect ratio" of channel.

Key words: vegetation; velocity distribution of open channel flow; non-submerged; submerged