

含柔性沉水植物明渠水流运动特性试验研究

陈界仁, 朱晓丹

(河海大学水利水电工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 采用激光多普勒流速仪(LDV) 试验研究含柔性沉水植物的水流运动。试验结果表明 : 流速沿垂线分布呈 S 形 , 分为 3 个区域 , 即植物内部区、过渡区和上部区。植物密度对过渡区内流速影响显著 , 在该区内 , 植物密度越大则流速梯度越大。含植物水流的紊动强度和雷诺应力都明显增大 , 它们在垂线分布上有相似之处 , 都是在植物顶层的位置上达到最大值 , 说明在此区域内存在较强的能量交换和剪切作用 ; 二者在植物顶层上部区域随着水深的增加而减小 , 在植物内部区随着水深的增加而增大。

关键词 明渠水流 ; 柔性沉水植物 ; LDV ; 流速分布 ; 水流紊动强度 ; 雷诺应力

中图分类号 : TV143 **文献标识码** : A **文章编号** : 1006-7647(2008) 03-0016-04

Experimental study on flow characteristics of open channels with submerged flexible vegetation // CHEN Jie-ren, ZHU Xiao-dan(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract : Laboratory experiments using LDV were performed to investigate the characteristics of water flow in open channels with submerged flexible vegetation. Test results reveal that the measured velocity distribution, which is S-shaped, can be divided into 3 areas : the internal area, the transition area and the upper area of vegetation. The flow velocity in the transition area is evidently affected by vegetation density, and the velocity gradient tends to increase with the vegetation density. It is also concluded that the turbulence intensity and Reynolds stress greatly increase in water flow with vegetation, and the two parameters increase with flow depth in the internal area and decrease with flow depth at the top layer of vegetation. The maximum values of these two parameters occur near the top of the vegetation, showing that copious energy exchange and powerful shear action exist in this area.

Key words : water flow in open channels ; submerged flexible vegetation ; LDV ; flow velocity distribution ; turbulence intensity ; Reynolds stress

水流运动中存在着植物介质的现象比较普遍。如在水库近岸区域与河道河漫滩都会不同程度地生长植物。水流中有植物区域流速减小, 会滞留水中的污染物质、泥沙等, 同时增大水流阻力, 减小过流和行洪能力, 影响水流的流速垂线分布、水流紊动特性等。事实证明 : 在洪水期由于水中植物的存在抬高了河道的水位, 减小了河道的平均流速, 并且使部分河道水流能量转换, 在植物附近产生紊流脉动流速, 消耗水流动能, 降低了河道的泄洪能力。明渠中含植物的阻水机理及水流运动特性非常复杂, 与植物种类、韧性、密度及形状等特性有关。植物种类繁多, 有树木、灌木、水草, 水生植物有挺水植物和沉水植物等, 使得含植物渠道中水流的运动特性研究更加复杂。

早在 20 世纪 30 年代人们就开始关注含植物水流的运动特性。Kouwen^[1]重点对柔性沉水植物的水

流阻力进行了试验研究, 将水流运动分为 3 个区域 : 植物内部区、过渡区及上部区。随着量测设备和量测技术的进步, 人们对含植物水流的垂线流速分布与紊流特性进行了精细测量, 取得了一定成果^[2-4]。本文结合科技部 863 项目“ 镇江内江水环境专项 ”, 针对镇江内江的典型水生植物黑藻, 选用与原型植物相似的模型植物, 利用现代量测技术进行含沉水植物的水流垂线流速分布、水流紊动、雷诺应力的试验研究。

1 试验设计和布置

1.1 试验设计

本试验在河海大学水环境试验大厅的可变坡水槽内进行, 该水槽长 12 m、宽 0.42 m、高 0.7 m, 两侧为玻璃壁面, 底部为大理石。为布设水生植物, 在大理石底板上铺设灰色塑料板, 板面上均匀钻孔。

试验所选用于模拟黑藻原型植物的模型植物如图 1 所示,其形状与镇江水环境工程项目现场种植的植物基本相似。模型植物高度约为 10 cm,茎杆上每间隔 2 cm 均匀地生有 4~5 层细齿状叶子,冠层宽度为 3 cm 左右,其韧性较弱,会随水流的流动而摆动,属于典型的柔性植物。



图 1 模拟植物

水槽底部灰色塑料板铺设段距水槽进口 2~10 m,共铺设 8 m 长,考虑水流结构稳定要求,植物布设段为距水槽进口 3~9 m,共布置 6 m 长。测量断面在水槽中部距进口 5.7 m 位置上,距植物带上游 2.7 m 距植物带下游 3.3 m。水流运动基本达到稳定后进行量测,因此在此处测出的结果具有较好的代表性。

在测量断面中轴线左右 5 cm 处分别取 2 条测量垂线,每条垂线上间隔 5 mm 取测量点,测得各点的瞬时流速及平均流速。试验所用流量测量仪器为超声波流量计,流速测量仪器为激光多普勒流速仪(LDV)。为了保证试验中 LDV 采样点的有效性和准确性,采用二维相关采集,设置采样时间为 30 s,每个测量点取 2000 个有效瞬时测量值。

1.2 水力参数

a. 雷诺数 Re 。雷诺数的计算公式为

$$Re = \frac{vH}{\nu}$$

式中: v 为断面平均流速; H 为断面平均水深; ν 为水流运动黏性系数。

b. 水流佛劳德数 Fr 。佛劳德数的计算式为

$$Fr^2 = \frac{\alpha v^2}{gH}$$

式中: α 为动能修正系数,本文取 $\alpha = 1$ 。 Fr 可以作为流态判别的标准, $Fr < 1$ 为缓流, $Fr > 1$ 为急流, $Fr = 1$ 为临界流。

1.3 试验布置

试验所用玻璃水槽为可变底坡水槽,水流流态均调整为缓流均匀流。试验前对无植物、不同流量、不同水深下的均匀流条件进行了大量的预备工作,以确定在不同流量下满足均匀流的水深和控制水位。在保持相同流量的前提下,对有柔性沉水植物时所得到的不同水深和流速进行测量对比,实测相同流量情况下不同植物密度和排列方式流速分布等的结果。

试验考虑了柔性沉水植物两种不同的排列方式,其植物密度分别为 167 株/ m^2 和 96 株/ m^2 ,相对应于没有植物的情况,共有 5 组不同的流量。试验工况见表 1,其中 Q 为进水流量, H 为断面平均水深, v 为断面平均流速。

由表 1 可见,本试验中 Re 取值范围为 25 469~39 046, Fr 的值在 0.120~0.138 之间,均小于 1,说明本次试验中的水流属于缓流。

2 试验结果分析

2.1 有植物的水流流速沿垂线分布

本试验分别测量了 2 种不同植物密度相应于 5 组不同流量的流速分布。相对于无植物明渠水流的对数流速分布,含柔性沉水植物的明渠水流流速分布要复杂很多,流速垂线分布不服从对数分布,其分布呈 S 形,见图 2。

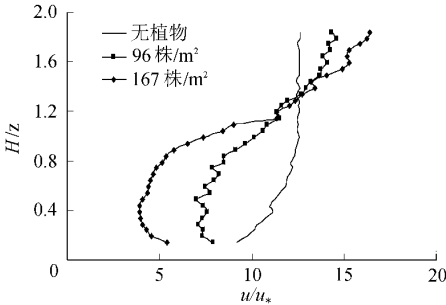


图 2 有、无植物的水流流速沿垂线分布($H = 0.2$ m)

流速沿垂线分为 3 个区域:即植物内部区、过渡区和上部区。各区流速分布特性如下:

表 1 柔性沉水植物试验结果

组次	$Q/$ ($m^3 \cdot s^{-1}$)	H/m		$v/(m \cdot s^{-1})$		Re		Fr	
		96 株· m^{-2}	167 株· m^{-2}	96 株· m^{-2}	167 株· m^{-2}	96 株· m^{-2}	167 株· m^{-2}	96 株· m^{-2}	167 株· m^{-2}
1	0.011	0.152	0.153	0.169	0.168	25 556	25 469	0.138	0.137
2	0.014	0.181	0.182	0.181	0.180	29 209	28 924	0.135	0.135
3	0.016	0.201	0.202	0.189	0.188	31 639	31 529	0.134	0.134
4	0.022	0.251	0.252	0.207	0.206	37 228	37 080	0.132	0.131
5	0.026	0.301	0.301	0.206	0.206	39 046	39 046	0.120	0.120

a. 在植物内部区,即 $H/z < 1$ (z 为植物高度) 以下的区域内,流速分布呈 C 形。在本区内植物的中上部枝叶密集,吸收了大量水流的动能,使得水流流速迅速减小,而植物的下部以茎秆为主,几乎没有枝叶,植物阻水作用减小,流速有一个增大的趋势;在最接近水槽底面的位置,由于受黏滞性的影响,流速再次减小。本区内的流速分布受植物密度的影响,密度大时,相对流速小。

b. 过渡区即 $H/z = 1$ 附近,包括植物层顶部与顶部之上的区域。该区流速梯度较大。由于模型植物具有一定的柔韧性,植物层顶部与上层水体之间相互作用。在植被层内部由于植被层对水流量的吸收,表现为一种指数衰减剖面,在紧靠植物层上方反映出很强的剪切作用,流速剖面在植物层内部出现逆转梯度现象,在植物层顶部附近流速梯度最大,这是由于植物层顶部茂密的枝叶与水面的接触消耗了大量的动能,使流速急剧减小,而植物的密度更是影响这一逆转梯度的直接原因,密度越大,逆转梯度越大。

c. 上部区即 $H/z > 1$ 附近,在植物层以上的区域,水流流速垂向分布与无植物的分布规律相似,符合经典的半对数分布规律。此结果与前人所做的试验结果^[1]较吻合。时钟等^[5]、Carollo 等^[6]以淹没状态下的大米草为研究对象,得出冠层以上的流速分布呈 J 形,而随着植物高度的减小,此分布更加明显的结论。

2.2 紊动强度沿垂线分布对比

图 3 为有、无植物的无量纲紊动强度沿垂线分布对比,紊动强度用脉动值的均方根除以摩阻流速使之无量纲化($\sqrt{u'^2_x}/u_*$)。从图 3 看出植物的存在使得水流紊动强度大幅度增加,在不同植物密度下水流紊动强度的增加也相差甚多,植株越密集则水流紊动强度增加越明显。从图 3 中还可以看出,植物密度为 167 株/ m^2 时的水流紊动强度比密度为 96 株/ m^2 时的增加较多,在水深较小时的情况更为明显。而由于本试验的雷诺数变化范围不大,所以

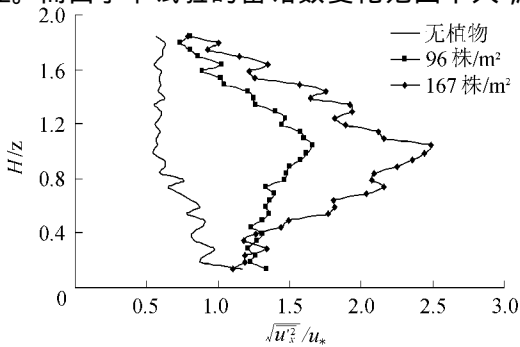


图 3 有、无植物的水流紊动强度沿垂线分布($H = 0.2\text{ m}$)

雷诺数对于紊动强度的影响并不明显。

根据图 3,与无植物的光滑平缓的分布情况相比,有植物后水流紊动强度不但在数值上增加明显,而且在分布形式上也截然不同。紊动强度的最大值都是出现在 $H/z = 1$ 附近的区域(即植物的顶部附近),说明在植物冠层部位有着强烈的动能交换;而从植物顶层部位开始向上部水面和下部水槽底,虽然比无植物时的紊动强度仍有明显增加,但就总体趋势而言紊动强度都在减小,说明植物层上部和植物层内部的动能交换都没有植物层顶部区域剧烈。

不同植物密度和水流条件下,水流紊动强度最大值的变化规律见图 4。由图 4 可见,植物种植密度大则水流紊动强度最大值也大,断面平均流速增加则水流紊动强度增大。

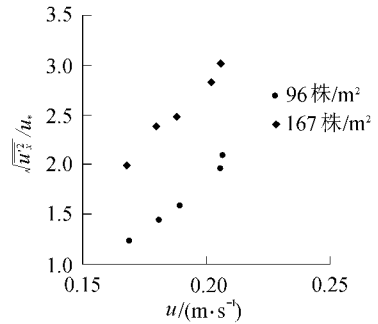


图 4 水流紊动强度最大值与流速、植物密度的关系

对于 y 方向(垂向),紊动强度的变化规律虽然与水流方向相一致,但是紊动强度最大值有一定的差别,垂向的紊动强度明显减小,这是由于植物冠层的作用,紊流涡在垂直方向的尺度要小于水平方向的缘故,说明紊流并不是各向同性的。

2.3 雷诺应力沿垂线分布变化

图 5 是有植物前后无量纲化的雷诺应力沿垂线分布对比,雷诺应力除以摩阻流速 u_*^2 使之无量纲化($-\overline{u'_x u'_y}/u_*^2$)。含植物后水流雷诺应力大幅度增加,说明植物的存在增加了水流内部的剪切应力,而植物的密度是水流雷诺应力增加的主要因素,由本试验的两种种植密度可以看出,在种植密度增加不到 1 倍的情况下雷诺应力的最大值增加了 1 倍。

同紊动强度的情况相类似,雷诺应力的最大值

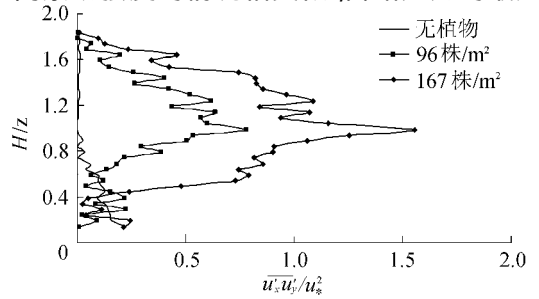


图 5 有、无植物的水流紊动切力分布($H = 0.2\text{ m}$)

也出现在 $H/z = 1$ 附近区域,说明在植物顶层附近水流内部的剪切力达到了最大值,植物顶层和上部水体之间存在强烈的剪切。雷诺应力从植物顶层区域开始向水槽底部逐渐减小,在 $H/z = 0.5$ 处雷诺应力已经很小,再往下的一段区域内雷诺应力变化较小。植物层从顶部开始向内部雷诺应力的迅速减小说明从顶部开始向下水流切变流速减小,这一改变极大地有利于泥沙细颗粒的沉积,是植物治沙力学的根本理论依据所在。

3 结 语

a. 本文采用现代量测技术,选用与原型植物形态相似的模型植物,试验研究了柔性沉水植物的明渠水流运动特性。结果表明:含植物水流流速沿垂线分布呈 S 形,分为 3 个区域:即植物内部区、过渡区和上部区。植物密度对过渡区内流速影响显著,在该区内植物密度越大则流速梯度也越大。水流的紊动强度和雷诺应力的垂线分布规律有相似之处,二者在植物顶层的位置达到最大值,说明在此区域内存在剧烈的能量交换和剪切作用,两种作用的剧烈程度都是在植物顶层上部区域随着水深的增加而递减,在植物内部区随着水深的增加而递增。植物的种植密度是影响水流紊动强度和雷诺应力的主要因素,其决定了水流紊动强度和雷诺应力的增加幅

度及其在植物区内部的分布形态。

b. 有植物区域水流的运动特性十分复杂,本文通过试验进行了水流流速分布、紊动强度和紊动切力的初步研究,其影响机理还有待积累更多精细测量资料进行深入的分析研究。

参考文献:

[1] KOUWEN N, UNNY T E, HILL H M. Flow retardance in vegetated channels[J]. Irrigation Drainage Division, ASCE, 1969, 95(2): 329-342.

[2] TEMPLE D M. Velocity distribution coefficients for grass lined channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, ASCE, 1986, 112(3): 193-205.

[3] GOURLAY M R. Discussion of 'flow resistance in vegetated channels' by KOUWEN N, EUNNY T, HILL M [J]. Irrig Drain Div Am Soc Civ Eng, 1970, 96(3): 351-357.

[4] WU Feng-cheng, SHEN Hue-wen, CHOU Yong-jian. Variation of roughness coefficients for unsubmerged and submerged vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(9): 934-942.

[5] 时钟, 李艳红. 含植物河流平均流速分布的实验研究[J]. 上海交通大学学报, 2003, 37(8): 1254-1260.

[6] CAROLLO F G, FERRO V, TERMINI D. Flow velocity measurements in vegetated channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2002, 128(7): 664-673.

(收稿日期 2007-05-08 编辑 高建群)

(上接第 11 页)逐渐增大,水流进入嘶马弯道后泥沙不会淤积,河床处于微冲状态;入流口以上,随着淮河入流的增加,水流的挟沙能力逐渐减弱。水流进入落成洲上段时,泥沙会淤积,特别是淮河入流口上游三益桥附近,在洪水年淮河入流时流速减小幅度较大,泥沙大量落淤,影响航道畅通。这就是洪水年三益桥附近泥沙淤积严重的一个重要原因。

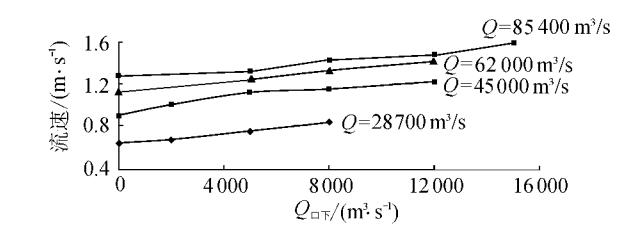


图 8 淮河入流口下 5 号断面平均流速与入流量的关系

4 结 语

a. 淮河入流引起河道水位升高,入流量越大水位抬高越大。当长江发生百年一遇洪水且遭遇淮河最大设计流量 $15000 \text{ m}^3/\text{s}$ 时,嘶马水位抬高 0.78 m 。

b. 淮河入流对长江流场有影响,当长江流量在造床流量以下、遭遇淮河较大来水时,淮河入流对长

江流场的影响最为严重。

c. 淮河入流减缓了三益桥边滩的流速,长江发生大洪水时会加剧泥沙的落淤,对航道的畅通不利。

d. 当长江发生大洪水时,淮河的泄洪直接增大了嘶马弯道的过流量,近岸流速会增大,这对长江护岸工程不利。

e. 当长江流量较小、淮河泄洪较大时,太平洲右汊的分流会增加,和太平洲左汊相比而言,淮河入流对太平洲右汊的影响较小。

参考文献:

[1] 李昌华,金德春. 河工模型试验[M]. 北京:人民交通出版社,1981.

[2] 华东水利学院. 水力学[M]. 北京:科学出版社,1979.

[3] 洪大林,谢瑞. 扬中河段整治开发物理模型试验研究[R]. 南京:南京水利科学研究院,2006.

[4] 张幸农. 长江下游口岸直水道航道整治工程定床物理模型试验研究[R]. 南京:南京水利科学研究院,2006.

[5] 钱宁,万兆惠. 泥沙运动力学[M]. 北京:科学出版社,1983.

(收稿日期 2007-05-21 编辑 骆超)