

有植被河道的水力特性研究

徐惠芬 赵振兴 韩 璐

(河海大学环境科学与工程学院 江苏 南京 210098)

摘要 利用三维超声波多普勒流速仪(ADV)量测有植被时水槽不同测点位置的瞬时流场。分析了测点位置和水深与植被高度比对时均流速分布的影响。试验结果表明植被层上下水流结构复杂, 柔性植被的存在使垂线流速降低, 所测得的流速分布在植被层顶部附近呈现“ < ”形状, 在植被区域内部流速分布近似为“ 3 ”形。分析了植被区水流紊动强度和雷诺应力的垂线分布情况。水流紊动强度和雷诺应力在植被区域的上层相对较大, 说明在该处发生着剧烈的质量和动量交换以及很强的剪切作用。

关键词 有植被河道 河道水力特性 垂线流速分布 水流紊动强度

中图分类号 :O35 ;TV131.65 文献标识码 :A 文章编号 :1006-7647(2006)06-0024-04

Hydraulic characteristic of river channels covered with vegetation//XU Hui-fen , ZHAO Zhen-xing , HAN Lu(College of Environmental Science and Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : A 3D acoustic Doppler velocimeter (ADV) is used to measure the instantaneous flow fields at different measurement points in a flume covered with vegetation. The influences of locations of measurement points and the ratio of the water depth to the height of vegetation on the distribution of time average flow velocity are analyzed. Some conclusions are drawn : the flow structure is complicated in the layer of vegetation ; the existence of flexible vegetation decreases the flow velocity in vertical direction ; the flow velocity distribution calculated near the top of the vegetation layer shows a “ < ”-shape and it demonstrates a “ 3 ”-shape within the region of vegetation. Moreover , the distributions of turbulence intensity and Reynolds stress of water flow in the vertical direction in the region of vegetation are analyzed , and the result shows that they are relatively large in the upper layer of this region , demonstrating that fierce quality and momentum exchange and high shear stress occur at this region.

Key words : river channel covered with vegetation ; hydraulic characteristic of river channel ; flow velocity in vertical direction ; turbulence intensity of water flow

许多河流或多或少被植被所覆盖,因而在人们了解河道时植被是个关键因素,同时,在防洪和水资源利用上,植被也起着重要作用,所以了解河道中植被对水流的作用是很有必要的。过去,人们认为明渠中的植被对水流产生附加的阻力,从而增加河床的糙率,因此,生长在河岸或滩地上的植被,无论是淹没或是非淹没状态下的,通常都被认为是使水流产生巨大能量损失的直接原因。Cowan^[1]和 Chow^[2]首先提出了解决方法,对于由草、灌木丛或树木引起的附加形式的阻力,推荐了曼宁糙率系数的值。

生长在河道里或滩地上的植被对水流的水力特性有很大的影响,比如平均速度、雷诺应力分布、阻力系数及紊动强度等。明渠中的植被增强了紊流,从而增加了水流的能量损失并施加拖曳力阻碍水流运动。流经植被的水流,其水流特性很大程度上取决于植被的种类和密度,以及水流的速度和水深。

作为比较前沿的研究课题,王怵^[3]进行了有植被的河道水流试验研究,对流经柔性植被的水流水力特性进行了分析。本文在此基础上进一步研究流经柔性植被时水流的时均流速、紊动强度、雷诺应力的分布情况。

1 试验设备及水力条件

本试验在河海大学水力学及流体力学实验室完成。试验水槽长 7.8 m、宽 0.3 m,在水槽底部铺打了孔的 PVC 板,用来种植植被。植树带长 2.5 m,共分 11 排,排与排之间间隔 25 cm,每排又分 6 格,格与格之间间隔 5 cm。可以根据不同的排列方式来安插植被。试验材料采用仿真模型树,树高 15.6 cm,树冠的最大宽度为 10 cm,与实际尺寸近似为 1:1。模型树采用交错布置模式,图 1 给出了交错布置方式中的株距、行距及测点位置。试验水槽的底坡为

0.002,共选取 5 个测量断面,在测量断面上选择 3 根测速垂线,距左侧壁分别为 7.5 cm、15 cm、22.5 cm。本次试验采用的测量仪器为美国 Sontek 公司生产的 ADV(多普勒超声波测速仪),其测量精度较高。ADV 测速的条件如下:渠道底坡为 0.002,水深为 16.1 cm,流量为 0.012 622 m³/s,植被高度为 15.6 cm,植株直径为 5 mm,植株间距为 5 cm。

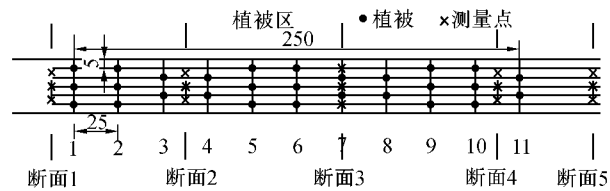


图 1 模型树布置方式(单位:cm)

2 试验结果分析

2.1 时均流速的垂线分布

在流经柔性植被的河道水流中,研究植被内部的垂线流速分布,可以了解植被对于垂直方向动量交换影响的情况。本文用三维 ADV 在矩形水槽中量测流经柔性植被的流速分布,了解不同水深和测点位置对流速剖面的影响。

植被的存在对水流结构的改变具体表现为时均流速沿垂线分布的变化。为方便起见,平均流速分布用无量纲形式表达,即用植被层高度 k 和摩阻流速 u_* 表达, $u_* = \sqrt{gRJ}$ (g 为重力加速度, R 为水

力半径, J 为水力坡度,近似于底坡 i)。本试验中 u_* 为 3.9 cm/s。

在有植被的情况下,用 ADV 测得的植被处于淹没情形下不同断面的时均流速分布来分析,如图 2 所示。图中 $u^* = u/u_*$, u 为测点流速, z 为测点距水槽底面的高度, y 为测点距水槽左侧壁面的距离, z/k 为相对高度。

试验结果揭示了植被层上下水流结构的复杂性。水流流经植被时,植被要素(茎、叶、干等)消耗了水流的运动能量,水流平均流速减小。由于植被的柔韧性,植被的弯曲流线化和波动十分明显。植被层顶部的叶子趋向平行于水流。叶片正面与反面类似于两个固体壁面,在接近叶面处,形成了两个“黏性底层”,使得流速分布在植被层顶部附近呈现“<”形状。流经植被区域内部的水流垂线流速分布呈“3”形,其分布规律主要与植被本身的结构有关。在相对高度 $z/k = 0.8$ 附近流速出现极小值,原因可能是此处为植被枝叶密集处,植被对水流的阻力较大,因而流速相对较小。

从图 2 中还可以看到,虽然试验所选的植被位置和测点位置沿水槽中心线对称分布,但是试验测得的流速分布差别较大(图 2(a)和(c)),可见柔性植被对水流的作用既不稳定又十分复杂。

2.2 紊动强度的垂线分布

紊动强度用脉动值的均方根除以摩阻流速使之

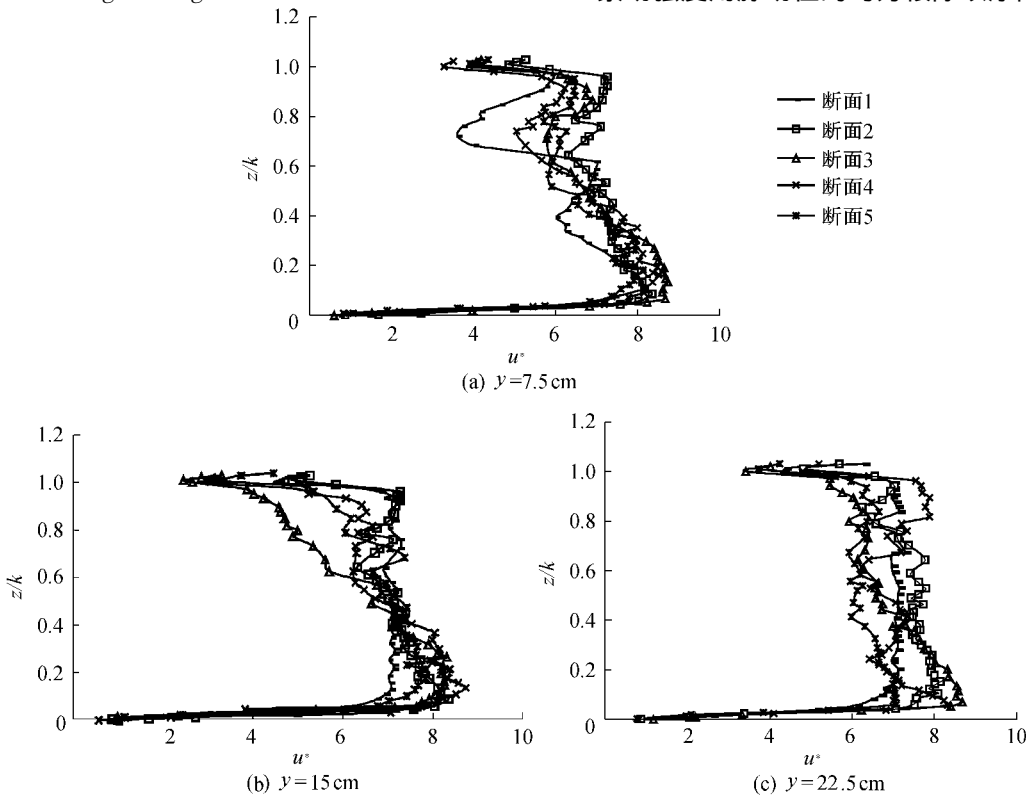


图 2 淹没情况下 ADV 测得的流速分布

无量纲化来表示。图 3 给出了在不同断面左边测点位置($y = 7.5\text{ cm}$)处的纵向(x)、横向(y)和垂向(z)的紊动强度沿水深的变化规律。图中 $T(x) = \sqrt{u_x'^2} / u_*$, $T(y) = \sqrt{u_y'^2} / u_*$, $T(z) = \sqrt{u_z'^2} / u_*$ 。 u_x' , u_y' , u_z' 分别为纵向、横向和垂向的脉动流速。

试验资料表明:在植被区域的顶部,纵向、横向、垂向 3 个方向上的紊动强度相对较大,说明在该处有着较强烈的质量和动量交换。在植被内部靠近固体壁面处,由于流体受壁面黏性力作用对脉动有抑制,紊动强度较小。在相对高度 $z/k = 0 \sim 0.1$ 之间,紊动强度有个极大值,这是由于时均流速 $\bar{u}$ 的减小和脉动绝对值的增加。而在相对高度 $z/k = 0.3$ 附近,紊动强度有个极小值,这可能是由于此处为植被最底层枝叶生长的根部位置,脉动受到植被阻力的限制。

从资料上还可以分析出,纵向紊动强度 T_x 与横向紊动强度 T_y 分布情况相似,而与垂向紊动强度 T_z 分布差别较大,并且垂向紊动强度小于纵向紊动强度和横向紊动强度。这是由于树冠作用导致紊流涡在垂向的统计尺度明显小于在水平方向尺度的缘故,说明紊动未达到各向同性。

另外,不同断面的紊动强度变化规律也不同。从图 3 看出,断面 2 的紊动强度变化幅度较大,这是由于水流刚进入植被区时,植被在水动力的作用下发生相应变形,水流的一部分紊动能转化为植被来回摆动所需的能量。

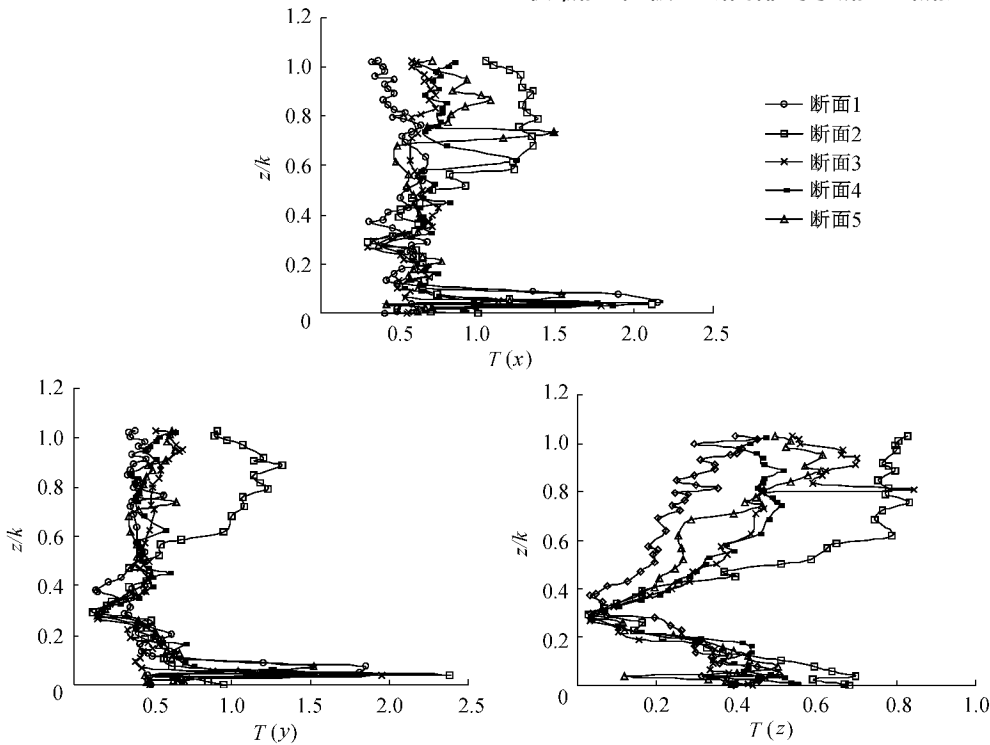


图 3 不同断面左边测点位置 $y = 7.5\text{ cm}$ 处的紊动强度垂线分布

2.3 雷诺应力的垂线分布

图 4 表示无量纲紊流切应力沿水深的变化规律。无量纲雷诺应力采用雷诺应力除以 u_*^2 表示。图中 $R(a) = -\overline{u_x' u_y'} / u_*^2$, $R(b) = -\overline{u_x' u_z'} / u_*^2$, $R(c) = -\overline{u_y' u_z'} / u_*^2$ 。

由图 4 可知,从底部到植被层顶部,纵向、横向和垂向的雷诺应力在各断面的变化规律有所差异。在植被上半部分,断面 2 的纵向雷诺应力绝对值相对较大,断面 5 的横向雷诺应力绝对值相对较大,断面 3 的垂向雷诺应力绝对值相对较大,这可能与植被本身的形状及断面前后的植被布置方式有关,从而使水流在各断面的流动形态各异。

从图中还可以分析出,由于植被层顶部和上部水体存在很强的剪切作用,雷诺应力在此处达到最大值。从冠层顶部向下雷诺应力减小,在相对高度 $z/k = 0.3$ 附近雷诺应力达到最小。植被层内(底部)水流切变速率(切应力 τ)的减小有利于黏性泥沙的沉积,这也是植被护岸作用的根源之一。

3 结 语

a. 本文用三维 ADV 测量了植被区不同位置的垂线流速分布情况,试验结果揭示了植被层上下水流结构的复杂性,表明柔性植被的波动和偏转使水流变得不稳定,导致水流垂线流速降低。植被的弯曲流线化和波动十分明显,植被层顶部的叶子有被水流放平的趋势。在植被层顶部附近,流速分布呈现“ $<$ ”形状,流经植被区域内部的水流垂线流速呈“3”形分布。

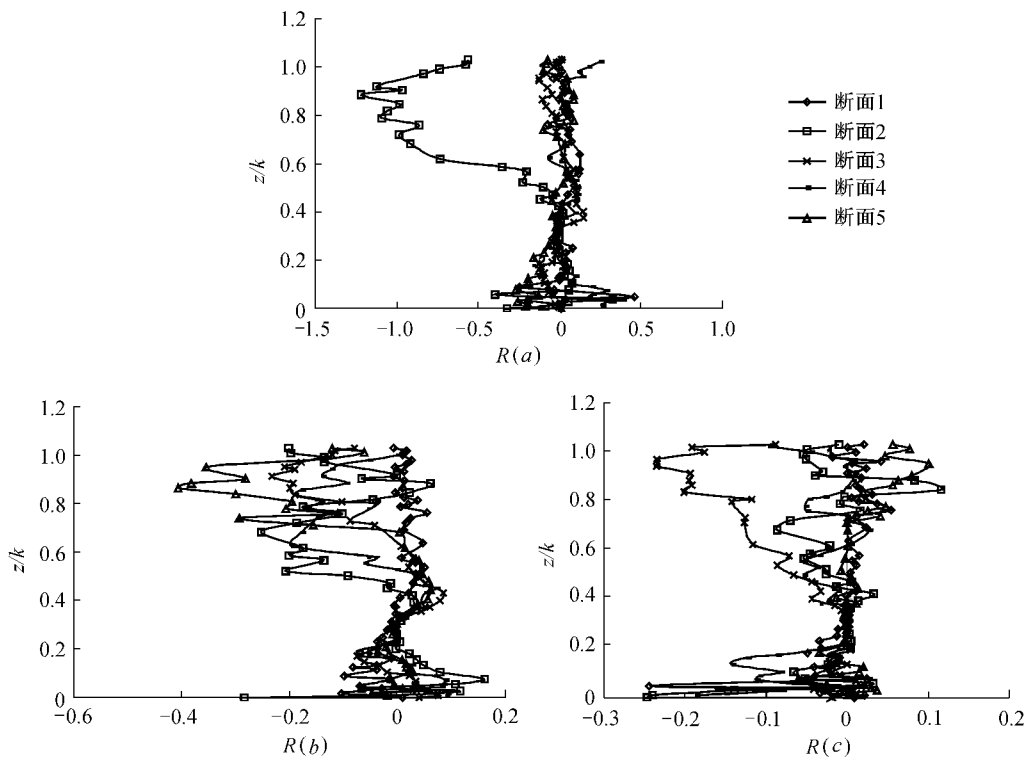


图4 $y = 7.5 \text{ cm}$ 处雷诺应力在不同断面位置的分布

水流分布规律主要与植被本身的结构有关。

b. 在植被区域的顶部有着较强烈的质量和动量交换,纵向、横向、垂向3个方向上的紊动强度相对较大。紊流涡在垂向的统计尺度明显小于在水平方向的尺度,紊动未达到各向同性。另外,不同断面紊动强度的变化规律也不同。

c. 由于植被本身的形状及断面前后植被布置方式的差别,纵向、横向和垂向的雷诺应力在各断面的变化规律不尽相同,流动形态也各异。植被层顶部和

上部水体存在很强的剪切作用,雷诺应力在此处达到最大值。

参考文献:

- [1] COWAN W L. Estimating hydraulic roughness coefficients[J]. Agricultural Engineering, 1956, 37(7): 473-475.
- [2] CHOW V T. Open channel hydraulics[M]. New York: McGraw-Hill, 1959.
- [3] 王付. 河岸植被对水流影响的研究现状[J]. 水资源保护, 2003, 19(6): 50-53.

(收稿日期 2005-05-17 编辑 高建群)

(上接第23页)

e. 如何根据最后计算出的状态概率分布求出所预测的降水量值(在某些情况下需为一个具体的数值),仍是一个有待解决的问题。加权马尔可夫链预测方法必须与其他方法结合起来,才能有效地解决这个问题。

f. 随着预报对象序列的逐年增加,资料的代表性也日益增强,自相关系数、状态转移概率矩阵、权重将会发生某些变化,这种变化是预报理论模式不断完善的过程,预报方案不是固定不变的。因此,应将每年预报对象的新的实测值加入到资料系列中去,实现动态调整预报对象的自相关系数、状态转移概率矩阵、权重,以期进一步提高预报精度。

总之,本文提出的加权马尔可夫链预测方法将序列的自相关分析、多步长一步转移概率分析等有机地结合起来,物理概念清晰,计算简便,为提高中短期降

水量预测的精度提供了一条值得探索的途径。关于马尔可夫链预测方法的优劣,笔者将另文讨论。

参考文献:

- [1] 夏乐天,朱永忠.工程随机过程[M].南京:河海大学出版社,2000:59-81.
- [2] 张汉雄.用马尔可夫链模型预测宁南山区旱情[J].自然灾害学报,1994(3):47-54.
- [3] SEN Ze-kai. Critical drought analysis by second order markov chain[J]. Journal of Hydrology, 1990, 120(1-4): 183-202.
- [4] 冯耀龙,韩文秀.权马尔可夫链在河流丰枯状况预测中的应用[J].系统工程理论与实践,1999(10):89-93.
- [5] 孙才志,张戈,林学钰.加权马尔可夫链在降水丰枯状况预测中的应用[J].系统工程理论与实践,2003(4):100-105.
- [6] 罗积玉,邢瑛.经济统计分析方法及预测[M].北京:清华大学出版社,1987:347-348.

(收稿日期 2005-08-25 编辑 高建群)