

DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2008.01.006

淹没状态下河道植物偏斜高度与糙率的关系

吴 航 拾 兵 陈志娟

(中国海洋大学工程学院, 山东 青岛 266100)

摘要 利用室内变坡水槽,模拟了复式河道滩地 3 种植物对漫滩水流的干扰作用,并借助声学多普勒测速仪(ADV)施测了不同垂线、不同测点的瞬时流速,计算了不同条件下的河道糙率。基于水动力及植物柔性变形分析,建立了淹没状态下的植物河道糙率计算的基本关系,反映出糙率值不仅与水流动力条件有关,还与植物类型、淹没高度、布置及其自身力学性能有关,同时,利用试验资料及理论分析成果,进一步获取了植物河道的附加糙率值,借此分析与评价河道植物对水流阻力的影响程度。

关键词 复式河道 淹没柔性植物 糙率

中图分类号:TV131.2+2 文献标识码:A 文章编号:1006-7647(2008)01-0020-03

Relationship between height of vegetation after deflection and roughness coefficient of vegetated channels in submerged state/WU Hang, SHI Bing, CHEN Zhi-juan(*Engineering College, Ocean University of China, Qingdao 266100, China*)

Abstract :The influences of 3 kinds of vegetation planted in floodplain of compound channels on the overbank flow were simulated in a laboratory slope-variable flume. The instantaneous flow velocity at different measurement points along different vertical lines were measured with ADV, and the roughness coefficient of the river channel was calculated under different conditions. Based on hydrodynamic analysis and flexible deformation analysis of submerged vegetation, a formula for calculating the roughness coefficient of vegetated channels in submerged state was deduced, and the additional roughness coefficient of vegetated channels was obtained by means of the test data and result of theoretical analysis. Thus, the influences of vegetation on water flow in river channels were analyzed and evaluated.

Key words :compound channel ;submerged flexible vegetation ;roughness coefficient

近年来,国内外对河道环境工程建设逐渐重视起来。河道已不仅仅是防洪、泄洪的通道,还要满足多方面的要求,尤其在小水期,不仅需要考虑河道的形态学和水力学特性,还要充分考虑河道(主要是滩地)的休闲、娱乐和观赏价值,尤其是在城镇地区。河滩和河岸自然生长或人工种植一些水生植物,是河道环境建设的需要,也是构成整个河流生态系统的重要组成部分。滩地和河岸植物不仅能有效保持水土,起到很好的固滩、消浪、护岸作用^[1-2],而且对于鱼类、无脊椎动物和一些鸟类来讲,滩地和河道植物也为它们提供了重要的栖息地和食物来源^[3]。然而,从水力学的观点来看,河道植物会对水流产生附加阻力,明显减弱河道的泄水流量,这种影响主要取决于植物的高度、密度、分布、硬度及其类型。由于植物的活性对水流摩阻作用的影响程度随繁殖季节来临而增加,随休眠枯萎季节来临而消减,所以如何

有效地确立植物河道的糙率系数,正确计算河道的泄洪能力,合理控制植物的分布及其生长密度,是亟待解决的问题。

本文基于柔性植物变形及室内模拟试验,探讨了植物河道糙率系数的计算关系。

1 试验设计

本试验在四川大学高速水力学国家重点实验室的矩形玻璃水槽中进行。水槽长 20 m、宽 0.3 m、高 0.4 m。槽首设有进水阀门,可对来水流量进行控制,尾部设一控制闸门用来调节水位。试验中流速的量测采用 ADV(多普勒声学测速仪)来实现。ADV 以声学多普勒效应原理为依据,通过内部信号处理软件的分析计算得出探头以下 5 cm 处水体的三维瞬时流速。试验分析表明,用 ADV 进行流场的测量具有较高的稳定性和精度,所得数据更为准确。试

验装置如图 1 所示。

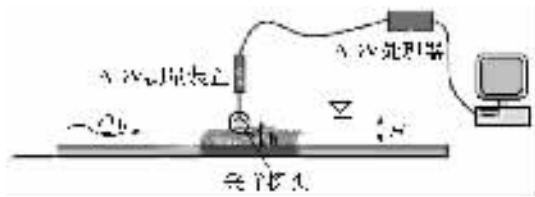


图 1 试验测量设备

试验中将复式河道断面概化为一对称的梯形断面,考虑了边壁的影响和水槽宽度,取整个断面的一半制作河道模型,其水动力坡度 S 分别取 0.01785% 和 0.125%,具体布置如图 2 所示。

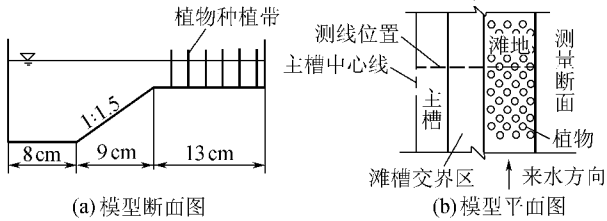


图 2 复式河道模型

2 试验方法

考虑到不同植物的形体特征,试验分 3 个方案:以塑料吸管模拟乔木,以粗壮羽毛模拟灌木,以绿色塑料草模拟实际的草丛。模型“乔木”和“灌木”均以固定的间距交错种植,且没有固定在河道模型上,可以方便地将其插上及拔下,以利于随时调整模型植物的种植密度和高度,塑料草则连接成排固定于“滩地”上。植物带模型种植长度为 4 m,种植方式及水流条件如表 1 所示。

表 1 滩地植物种植种类及对应水流条件

方案	$S/\%$	$\frac{Q}{2}/(L \cdot s^{-1})$	主槽水深/cm	滩地水深/cm	滩地植物类型	种植方式		
						行距/cm	株距/cm	高度/cm
N1	0.125	10.95	13.5	7.5	无			
N2	0.125	14.11	17.0	12.0	无			
N3	0.125	17.72	19.8	13.8	无			
V4	0.125	10.95	13.6	7.6	乔木	3	2	9.6
V5	0.125	14.11	17.2	11.2	乔木	3	2	9.6
V6	0.125	17.72	20.0	14.0	乔木	3	2	9.6
V7	0.125	22.21	23.8	17.8	乔木	3	2	9.6
V8	0.125	10.95	13.6	7.6	灌木	3	4	9.0
V9	0.125	14.11	17.2	11.2	灌木	3	4	9.0
V10	0.125	17.72	20.0	14.0	灌木	3	4	9.0
V11	0.125	22.21	23.8	17.8	灌木	3	4	9.0
V12	0.125	10.95	13.6	7.6	草	3	3	6.5~7
V13	0.125	14.11	17.2	11.2	草	3	3	6.5~7
V14	0.125	17.72	20.0	14.0	草	3	3	6.5~7

本试验研究了两种坡度、不同流量条件下的 3 种植物对水流结构的影响。当流量及滩地水深增加时,滩地植物经历了非淹没和淹没两种状态。水流流经植物带,造成一定程度的水面壅高,滩地植物带

内水面高于主槽水面,存在明显的横比降,归槽水流沿植物带纵向运行一段距离后,水面及横向流速分布趋于稳定。

3 糙率系数的理论分析

滩地植物改变了水流内部结构,加大了滩地的糙率,最直观的影响便是水流流速的变化。本文重点分析灌木的挡水作用及影响河道糙率的因素,灌木高度 h_f 在水中受水动力作用后的偏斜高度为 h_p 。

由明渠水流垂线平均流速公式 $v = C \sqrt{RS}$ 和曼宁公式 $C = \frac{1}{n} R^{1/6}$ 得到

$$n = \frac{H^{2/3} S^{1/2}}{v} \quad (R \approx H) \quad (1)$$

灌木在水流中单位面积上受到的动水压强:

$$p = \frac{1}{2} C_D \rho u^2 \quad (2)$$

式中: $u = u_m \left(\frac{z}{H} \right)^m$, $m = \frac{1}{6} \sim \frac{1}{10}$; C_D 为阻尼系数。

灌木结构示意图如图 3 所示。

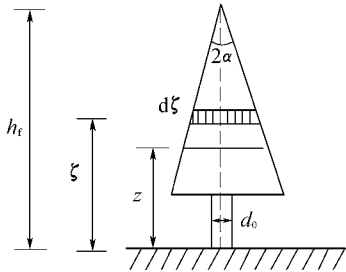


图 3 灌木结构示意图

灌木受到水流的动力矩:

$$M(z) = \int_z^{h_f} p(\zeta) \chi(h_f - \zeta) \tan \alpha (\zeta - z) d\zeta \quad (3)$$

由力学关系[4]

$$\frac{d^2 v}{dz^2} = \frac{M(z)}{EI} \quad (4)$$

对方程两边两次积分,得到挠度 v :

$$v = \frac{10 \beta C_D \rho \tan \alpha u_m^2}{EI_0 H^{2m}} \left[\frac{h_f^{2m+3} z^2}{4(m+1)} + \frac{h_f^{2m+2} z^3}{12(m+1)} - \frac{h_f z^{2m+4}}{4(m+1)(m+2)(2m+3)} - \frac{z^{2m+5}}{4(m+1)(m+2)(2m+5)} - \frac{h_f^{2m+2} z^3}{6(2m+1)} + \frac{h_f z^{2m+4}}{(m+2)(2m+1)(2m+3)} - \frac{h_f^{2m+3} z^2}{(2m+3)} + \frac{z^{2m+5}}{(2m+3)(2m+4)(2m+5)} \right] \quad (5)$$

当 $z = h_f$ 时,灌木顶端的挠度为

$$v = \frac{10 \beta C_D \rho \tan \alpha u_m^2}{EI_0 H^{2m}} h_f^{2m+5} .$$

$$\left[\frac{4m^2 + 14m + 15}{\alpha(m+2)(2m+1)(2m+3)(2m+5)} \right] \quad (6)$$

式中 $m = \frac{1}{6} \sim \frac{1}{10}$, 一般取 $m = \frac{1}{6}$, 则

$$\nu = 0.0566 h_f^{16/3} \frac{10 \beta C_D \rho \tan \alpha u_m^2}{EI_0 H^{1/3}} \quad (7)$$

$\nu \leq \sqrt{h_f^2 - h_p^2}$, 引入调整系数 a , 则

$$\nu = \frac{\sqrt{h_f^2 - h_p^2}}{\sqrt{1 + ah_p^{2/3}}} \quad (8)$$

得到

$$n = \frac{0.3204 h_f^{32/3} (1 + ah_p^{2/3}) \sqrt{S} \beta^2 C_D^2 \rho^2 \tan^2 \alpha u_m^4}{(h_f^2 - h_p^2) E^2 I_0^2 \nu} \quad (9)$$

式中 $u_m = (1 + m) \nu$, $I_0 = \frac{\pi}{64} d_0^4$; h_p 为灌木的偏斜高度。

令

$$h_p = kh_f$$

$$n = \frac{2.4 \left(\frac{\beta C_D \rho v^2}{2} \right)^2 \tan^2 \alpha}{\left(\frac{\pi}{64} \right)^2 (1 - k^2) k^{2/3} E^2 v \left(\frac{d_0}{h_f} \right)^8 \sqrt{S} h_p^{2/3} (ah_p^{2/3} + 1)} \quad (10)$$

令 $R_f = \frac{\beta C_D \rho v^2}{2}$ 代表植物单位面积受到的平均动水压力 ; $C_f = \frac{2.4}{\left(\frac{\pi}{64} \right)^2 (1 - k^2) k^{2/3}}$, 则

$$n = \frac{C_f R_f^2 \tan^2 \alpha \sqrt{S}}{E^2 v \left(\frac{d_0}{h_f} \right)^8} h_p^{2/3} (ah_p^{2/3} + 1) \quad (11)$$

式 (11) 反映出植物河道糙率 (n) 与水流动力坡度 (S)、流速 (v)、植物特性、植物偏斜高度 (h_p)、植物弹性模量 (E) 及冠部扩散角 (α) 的关系。

4 实验数据分析

滩地区流场特性是本文研究的重点 , 取实验数据的第 7、第 8、第 9、第 10 条垂线作为研究对象 (图 4), 每条垂线对应 2 个坡度 , 每个坡度对应 3 个流量 , 即 3 种流速 , 整理后得到 24 组水深与流速的关系数据。

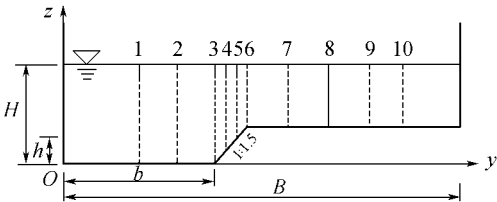


图 4 非对称复式河槽断面形态

图 5 给出了河道滩地有植物条件下垂线流速分布曲线。河道种植植物后 , 垂线流速分布呈 S 形^[5,6]。水流自床面向上至冠部的下边界 , 水质点纵向流速随水深的增加而增大 , 进入植物冠层后 , 水流因受枝叶的阻滞作用 , 流速减小较快 , 在阻挡面积最大处 , 流速出现最小值 , 此位置向下至冠部下边界间存在负流速梯度 , 此位置向上为正流速梯度 , 在植物顶面 , 流速开始接近指数或对数分布。在植物河道内 , 其流速分布存在明显的‘复杂边界’影响作用。

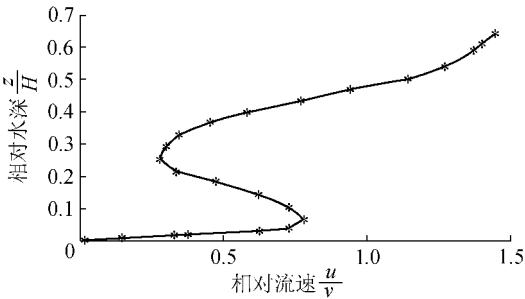


图 5 第 8 条垂线流速分布曲线 ($S = 0.125\%$, $H = 14.0$ cm)

垂线平均流速 v 可从图 5 中得出 , 本文对相对水深在 0.7~1.0 冠层以上区域 (A) 处的流速采用无植物时的指数分布 , 即 $u = u_m \left(\frac{z}{H} \right)^{1/6}$ 进行延伸。对垂线流速曲线进行积分 , 即得到垂线平均流速 v 。从图 5 可以看出滩地灌木的种植引起水质点垂向流速呈多层分布 , 从水底向上陡增 , 再递减至一定值 , 然后按指数分布增大至水面。其糙率 n 可由式 (1) 得到。

灌木偏斜高度 h_p 由图 5 中的速度最小值对应的高度分析得出。笔者将实验数据整理后得出 20 个垂线流速分布图 , 得到坡度分别为 $S = 0.125\%$ 和 $S = 0.01785\%$ 时的糙率 n 和偏斜高度 h_p , 如表 2 所示。

表 2 糙率与偏斜高度

$S = 0.125\%$		$S = 0.01785\%$	
n	h_p /cm	n	h_p /cm
0.0264	2.2	0.0260	2.7
0.0279	3.5	0.0277	3.0
0.0283	3.8	0.0290	3.8
0.0291	4.0	0.0295	4.1
0.0297	4.2	0.0307	4.2
0.0305	4.4	0.0315	4.8
0.0311	4.82	0.0321	5.0
0.0319	5.3	0.0337	5.5
0.0321	6.0	0.0350	7.0
		0.0365	7.3
		0.0369	7.8

点绘 n 与 $h_p^{2/3}$ 对应点 , 绘于图 6 中。从图 6 中可见 , 河道糙率随植物偏斜高度的增大而增大 , 当 $h_p = 0$ 时 , 无植物河道糙率为 0.019。

对数据点进行二次拟合 , 则有下列形式 :

$$n = p(h_p^{2/3})^2 + qh_p^{2/3} + n_0 \quad (12)$$

(下转第 27 页)

dimension to advance stream ecology[J]. Journal of the North American Benthological Society ,1997 ,16(2) :439-447.

[11] 龙笛 ,潘巍 .河流保护与生态修复[J]. 水利水电科技进展 2006 26(2) 21-25.

[12] 财团法人 河道整治中心 .多自然河流建设的施工方法及要点[M].周怀东 杜霞 李怡庭 ,等 ,译 .北京 :中国水利水电出版社 2003.

[13] 董哲仁 .国外河流健康评估技术[J]. 水利水电技术 , 2005 36(11) :15-19.

[14] 吴阿娜 杨凯 车越 ,等 .河流健康状况的表征及其评价[J]. 水科学进展 2005 ,16(4) 602-608.

[15] SIMPSON J ,NORRIS R ,BARMUTA L ,et al. AUSRIVAS- National River health program ,user manual[R]. Canberra : University of Canberra ,1996.

[16] PETERSEN R C. The RCE : a riparian , channel , and environmental inventory for small streams in the agriculture landscape[J]. Freshwater Biology ,1992 27(2) 295-306.

[17] LADSON A R ,WHITE L J. An index of stream condition : reference manual[R]. Victoria : Waterways Unit , Department

of Natural Resources and Environment ,1999.

[18] The Department of Water Affairs and Forestry . River health indicators and indices[EB/OL].[2006-07-12]. http ://www . csir . co . za /rhp /indices . html .

[19] 赵彦伟 杨志峰 ,姚长青 .黄河健康评价与修复基本框架[J]. 水土保持学报 2005 ,19(10) :131-134.

[20] 殷会娟 冯耀龙 .河流生态环境健康评价方法研究[J]. 中国农村水利水电 2006(4) 55-57.

[21] 耿雷华 刘恒 钟华平 ,等 .健康河流的评价指标和评价标准[J]. 水利学报 2006 37(3) 254-258.

[22] 黄恢柏 王建国 唐振华 ,等 .两种指数对庐山水体环境质量状况的评价[J]. 中国环境科学 2002 ,22(5) :416-420.

[23] 朱迪 常剑波 .长江中游浅水湖泊生物完整性时空变化[J]. 生态学报 2004 24(12) 2762-2763.

[24] DANIEL T C ,BOSTER R S. Measuring landscape esthetics : the scenic beauty estimation method[R]. Washington ,D . C . : USDA Forest Service Research Paper RM-167 ,1976.

(收稿日期 2007-05-24 编辑 :方宇彤)

(上接第 22 页)

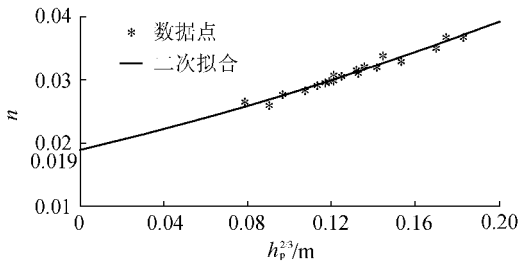


图 6 数据点绘

对于本实验 式中 $p = 0.12$, $q = 0.077$, $n_0 = 0.019$, 求出式(11)中的调整系数 $a = 1.56$, 得到植物河道附加糙率值 :

$$\Delta n = n - n_0 = \frac{C_f R_f^2 \tan^2 \alpha \sqrt{S}}{E^2 v \left(\frac{d_0}{h_f} \right)^8} h_p^{2/3} (1.56 h_p^{2/3} + 1) \quad (13)$$

5 结 论

- a. 利用明渠动水压力及植物柔性变形 ,建立了植物河道在淹没条件下的糙率计算的基本关系 ,反映出糙率值不仅与水流动力条件有关 ,还与植物类型、淹没高度、布置及其自身力学性能有关。
- b. 河道植物的生长 ,加大了水流的阻力 ,S 形流速分布呈现出“ 复杂边界 ”影响的特征。由垂线平均流速、河道水力坡度和植物淹没高度 ,得到了植物河道附加糙率值的计算关系式 ,由此可方便地估计植物河道对阻力的影响程度。

参考文献 :

[1] HUANG Ben-sheng ,LAI Guan-wen ,QIU Jing ,et al. Hydraulics of compound with vegetated floodplains[J]. Journal of Hydrodynamics 2002 ,14(1) 23-28.

[2] SHI Bing ,CAO Shu-you . Effect of floodplain vegetation on flow structure in compound channel [C]//SHANG Hong-qi . Proceedings of the 2nd international Yellow River forum on keeping healthy life of the river . Zhengzhou : Yellow River Conservancy Press 2005 :120-127.

[3] 白峰青 ,郑丙辉 ,田自强 .水生植物在水污染控制中的生态效应[J]. 环境科学与技术 2004 27(4) 99-110.

[4] 刘鸿文 .材料力学[M].北京 :高等教育出版社 ,1989.

[5] 杨克君 ,刘兴年 曹叔尤 ,等 .植被作用下的复式河槽流速分布特性[J]. 力学学报 2006 38(2) 246-250.

[6] 焦志洋 拾兵 荆晓冬 .复式河槽滩地植物对水流紊动结构影响的试验研究[J]. 海洋湖沼通报 2006(1) 28-36.

(收稿日期 2007-03-22 编辑 :方宇彤)

