

生态型河道水流特性研究现状

朱红钧, 赵振兴

(河海大学环境科学与工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要 针对生态型河道中植被用于水质改善和美化景观时破坏了原来河道中水体结构的问题, 回顾了国内外有植被河道水流特性的研究进程, 从试验模拟和数值模拟两方面总结分析已取得的研究成果, 认为水中植被的存在改变了原来水流的运动特性, 并对影响水流特性的各种相关因素进行分析探讨, 指出目前研究方法存在的局限性。鉴于生态型河道水流问题的复杂性, 指出实际工程中应综合考虑多方面影响, 合理种植植被, 并对今后的研究进行展望。

关键词 生态型河道 水流特性 植被

中图分类号 TV143

文献标识码 A

文章编号 1006-7647(2006)S1-0156-04

1 问题的提出

河道中植被种类多、范围广, 通常以沉水湿生的叶片草、浮游植物、挺水植物和树木为主, 合适的植物可起到净化污水的作用。如何使植被在生态型河道中净化水质的同时对水利和航运的影响最小, 这是人们面临的主要问题, 也正是生产实际中出现的新问题。

早在 1948 年, Ree^[1] 在美国农业工程冬季会议上就提出河道中水草的覆盖会对行洪产生影响。日本名古屋大学环境工程实验室^[2] 认为水生植被是河道的重要组成部分, 在保证行洪安全的同时还要考虑环境方面的影响, 以求水资源的最有效利用。Velasco 等^[3] 指出在河道修复工程设计中必须充分认识到水流问题的复杂性, 其影响因素不仅来自水流本身, 还要考虑生态环境方面的要求, 对有植被的河道进行水流动力学研究尤其重要。Tsihrintzis 等^[4] 提出湿地的修复也需要考虑水力特性方面的设计, 如水流阻力系数的确定和阻力方程的采用。

水中植被的存在改变了原先水流的运动特性, 影响了水体结构, 降低了时均流速, 抬高了水位等, 这虽然已经引起了人们的注意, 但有植被的河道水流特殊而复杂, 颇多的影响因素(如河道形状、底坡、植被种类、种植排列方式、种植密度、淹没状态等)给研究带来了困难。20 世纪 80 年代后期开始, 陆续有学者根据实际需要针对具体情况开展研究工作,

从而使人们对有植被的河道水流问题及其水流特性有了深入的了解。但由于问题的复杂性, 对有植被河道的水流问题研究还是粗浅的, 有待于更深入的研究。

2 有植被河道水流的研究现状

2.1 对有植被河道的模型试验研究

流经植被的水流, 其水流特性很大程度上取决于植被的类型、密度、淹没状态以及水流流速和水深等。Bakny 等^[5] 关于有植被渠道水流阻力特性的研究、Wilson 等^[6] 对有无枝叶植被过流现象的对比以及针对不同形式淹没植被对明渠水流影响的研究、邱秀云等^[7] 关于植物‘柔性坝’的布置方式和种植密度对河渠水流的影响研究都很好地证实了该点。

根据植被枝干的坚硬程度, 可将其分为刚性和柔性两类。因刚性植被随水流摆动很小, 不需考虑植被的弯曲, 人们对刚性植被进行了大量研究, 柔性植被的研究相比少些。不过, 对淹没的草^[8-12] 和柔性窄条^[13] 及树冠^[14] 的试验研究还是取得了一定的进展。柔性植被受到大流速水流冲击会发生弯曲变形, 并且在不同的流速和水位下会呈现不同的波动现象。Ree 等^[9] 指出当植被倒伏后, 看上去就像用梳子梳理过一样整齐, 因此流经柔性植被的渠道水流问题实质上是一个动边界的问题。当植被弯曲时, 边界糙率会降低很多, 植被的抗弯曲程度取决于植被的柔韧度和密度。然而, 先前的很多研究往往

忽略了植被的韧性。Kouwen 等^[15-16]根据水位的高低将有柔性植被的河道划分为 3 个水流区域:①植被不弯曲而且稳定的区域;②植被受到波动的区域;③植被完全弯曲的区域。Palmer^[17]根据水深和植被高度的相对关系划分了 3 种水流条件:①低水流,即水流流过时枝干和叶子没有弯曲,处于非淹没状态;②中等水流,即植被处于完全淹没状态,水流阻力随流量急剧变化,植被开始弯曲和摆动;③高水流,即使植被弯曲,枝干和叶子摆动,但这种影响可忽略。Syunswke 等^[18]用 LDV 量测明渠水流流经柔性植被时的垂向流速分布,他们观察到平均流速分布在植被层顶部存在一偏转,还发现紊动强度和雷诺应力在此位置也达到最大值。Fathi 等^[14]指出,如果把河岸植被单单看作是刚性的,将导致流速和阻力关系产生重大的错误。

国内,王付^[19]对玻璃水槽中柔性模型植被的水流影响做了详细的研究。试验证实柔性植被的存在使垂线流速降低,且在植被层顶部有一流速反梯度。研究表明,由于植被强烈的波动和偏转使水流变得很不稳定,植被弯曲高度所对应的水深是紊动强度最大的地方,通过比较紊动强度分布和流速垂线分布后发现偏转点对应的相对水深也就是紊动强度最大的地方,这和 Syunswke 等^[18]的结论是一致的。试验还指出最大的紊动强度和雷诺应力都出现在植被区域的上层,说明该处发生着剧烈的质量和动量交换以及很强的剪切作用。但研究没有明确定量究竟植被存在造成了多大的紊动强度,雷诺应力的变化也还是未知的,而这才是实际工程中需要密切关注的问题,这样的物理模型试验研究对进一步理解柔性植被的物理特性及其对水流的影响是很重要的。

另外,河道自身形状也是影响水流特性的主要因素。不同形状河道的水体结构不同,横断面流场也分布不均。Pasch 等^[20]对河滩种有植被的梯形复式断面渠道进行了研究,他们将河道断面分割成 4 个部分,然后对各部分流速沿横断面的分布采用不同公式进行计算,得出流速分布后,衔接得到整个断面的流速分布。可见,横断面为非矩形时,流场分布比较复杂,不同的河道断面分割直接导致不同的流速分布。

国内黄本胜等^[21-22]结合珠江流域复式断面河槽的特征和种树的实际情况,建立了 9 组不同滩高和不同滩槽宽度比的物理模型,对不同水深、不同模拟材料以及树径与种树间距之比进行了种树前、种树后 150 多组次的试验研究。王付^[19]对复式断面河道滩地种树,通过改变多种种树密度和排列方式进行试验,他们发现种树带宽度、漫滩水深、种树密

度和排列方式是影响河道水流特性的主要因素,在滩槽交界附近,垂线流速有演变到‘S’形状的趋势,呈现三维流动,其流速分布大大偏离了对数分布的规律。河道自身的非规则形状已经使得水流运动变得复杂,再加上植被的引入,此时的河道水流就变得更杂乱无章。

河道中的植被增大了河床的水流阻力,这正是水流能量损失的主要因素。当前人们主要是通过建立能量守恒方程来研究不同模型植被在不同排列方式下的水流特性,从而给出相应问题的阻力公式或糙率表达式等。Lan 等^[23]将种有部分植被的明渠分为岸滩、沉水区、岸边区,分别得出相应的连续方程、动量方程、紊动能及混合长度表达式。Chen^[10]研究了有草皮宽浅渠道的水流阻力效应,通过河床底面坡度的两种关系式推出了阻力系数的表达式。Darrel^[24]进行了有草皮渠道的流速分布的研究,给出了能量和动量系数,利用植被顶部切应力、混合长度及糙率公式推出了流速分布的具体表达式。Fathi 等^[14]用松树幼苗模拟岸滩植被,运用达西公式、曼宁公式,从边界平均切应力和动量平衡的角度推导出等效糙率公式。Angenila^[25]对河床出现植被影响水流输运进行了试验研究,给出了物形阻力系数的相关公式。Temple^[26]研究了淹没草的水流阻水效应,给出了植被的折合糙率。这些研究都是从阻力入手,利用相关方程推导得出植被造成的阻水效应。

国内,韩璐等^[27]在自循环水槽中对模型草的水流影响进行了试验研究,将水流阻力系数转化为曼宁系数,从而得出了与前人试验成果相吻合的结果。试验发现在植被密集处水流的扰动较为明显,特别是植被层顶部,同时,在植草带后一定范围内有尾迹流存在的现象。

将水利与生态相结合的一次尝试是拉尼亚^[28]的半淹没植被的水流特性研究,他选取了生态型河道常采用的水生植物菖蒲进行水槽试验模拟研究,证实了水深和流量的关系与植被密度、布置形式关系非常密切。植被密度的增加导致过水断面的减小和阻力的增大。流速在垂向有明显的分层,在菖蒲的茎秆层流速朝河床方向逐渐减小,而在冠叶层流速朝水面方向逐渐减小。水流的紊动强度分布在植被内部具各向异性。尽管与前人的研究成果吻合较好,但还是没有发现水流紊动强度的具体规律,而且研究物种单一,且只是处于半淹没状态,淹没状态没有涉及,这些都有待进一步试验研究。

2.2 对植被影响河道水流的数值模拟研究

在试验研究的同时,许多学者尝试求解水流运动微分方程,从数值模拟的角度来研究植被的影响

程度。

Stephen^[29]对岸滩植被的水流阻力效应和行洪影响作了数值模拟,得出了流量和水位以及种植密度与5年一遇洪水流量下水位的关系图,为岸滩合理种植植被提供了较好的参考价值。Kouwen等^[15]提出用植株长度和硬度作参数,推导曼宁系数与流速和水力半径乘积之间的关系。虽然有其局限性,但这种方法为数值模拟运算提供了新的思路。

紊动的水团在水体内以不同大小的涡旋存在,能量传递在大小涡旋内不断进行,Nadaoka等^[30]就应用大涡模拟技术提出了一种沿水深积分平均的二维浅水方程,Yang^[31]运用前人建立的大涡模型,模拟了具有单侧和双侧桩群的宽浅矩形明渠的水流问题,宿晓辉等^[32]针对浅水问题研究了有植被河道的水流紊流,建立了浅水问题的大涡模拟运动 κ - l (LES)模型。通过模拟计算发现,植物存在使区域内水流流速大幅降低,在靠近植物边界处产生较大的速度梯度,并提出在有植物的规则河道中,植物对水流的阻力是紊流能量产生的主要来源。LES模型不仅在计算结果上好于水深平均的大涡模拟模型,还可以模拟水流运动沿水深方向的变化,为进一步研究紊流运动机理,特别是紊流大尺度涡旋的发展提供了一种研究方法。

拾兵等^[33-34]基于前人研究的理论推导进行了一定的简化处理,结合部分水槽试验资料的回归分析,建立了明渠植树后床面相对切应力、糙率与树木因子之间的计算关系。与他人不同的是,他将每棵植株作为单一个体考虑,计算单株树木的体积、占河床面积及阻水面积,从而推导出相应的公式。虽然这些公式还需作进一步理论论证和试验验证,但提供了研究树群水流问题的一个新思路。

程莉^[35]从水动力学基本理论出发,模拟宽浅河道岸滩种植植被的水流数学模型,推求了沿水深积分平均的二维流动方程,并在空间域上采用伽辽金有限元法对所得方程进行离散,最后运用牛顿-拉斐逊迭代法对方程求解。Fischer等^[36]对淹没植被的明渠进行了三维数值模型的研究。他们将渠道分解成很多子区域,联立连续方程、动量方程和紊动能方程,提出植被相关系数,并推导出植被阻力的表达式,得出淹没植被不仅可以起到保护生态的作用而且可以营造蓄洪空间的结论。

从连续方程、动量方程和紊动能方程入手,运用不同的离散方法迭代求解是数值模拟的主要思路。在实际工程建设中,可能更多的要采用数值模拟方法进行方案认证,所以建立更贴切的数值模型是急需的。

3 展 望

前人已经做了较多关于有植被河道水流特性的研究,随着人们对生态环境的重视,今后需要考虑的问题有:

a. 人为、随意地选择用来净化水质和美化环境的植被是不科学的,缺乏考虑就引入物种只会增加生态型河道的隐患。因此,通过模型试验研究相关物种对水流的影响是急需的。

b. 原先考虑的植被局限于草皮、矮树丛和树木,这些都是天然存在于河道中的物种,没有考虑其他物种,对于可能应用于生态型河道中的物种更需要及时研究其对水流的具体影响。

c. 以往的研究均是在一特定环境下做出的相应结论,有一定的局限性。由于野外实地测量的局限性,目前尚未见到对整个天然河道进行实地量测的研究。并且,由于先前量测仪器的精度有限,早期的研究基本上集中于评估平均流速、阻力规律和糙率系数,植被区域水流没有得到详尽的描述、分析和理解,且这些水动力特性在防洪、泥沙运动中的意义研究尚不充分。另外,迄今为止,对有植被河道的研究,不论是单式断面还是复式断面渠道,都局限于顺直河道,没有考虑断面形状对水流的影响,因此,对有植被的弯道水流进行研究也是必要的。

d. 实际工程建设中可能更多的依靠数值模拟进行方案的认证,所以建立更贴切的数值模型是急需的。

可见,生态型河道水流问题是一门多学科交叉课题,它涉及到水流、泥沙、植被、地貌、河道演变及环境生态等诸多领域,需要人们考虑到各个方面的影响,进行综合研究,以便得出比较全面的结论,为河道整治工程以及生态修复工程提供参考。

参考文献:

- [1] REE W O. Hydraulic characteristics of vegetation for vegetated waterways[C]//The winter meeting of American Society of Agricultural Engineers at Chicago. Washington D C :Tech Bull, 1948.
- [2] TSUJIMOTO T. Fluvial processes in streams with vegetation [J]. Journal of Hydraulic Research, 1999, 37(6) 23-27.
- [3] VELASCO D, BATEMAN A, REDONDO J. An open channel flow experimental and theoretical study of resistance and turbulent characterization over flexible vegetated lings [J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2003(70) 769-88.
- [4] TSHIRTINTZIS A, MADIEDO E. Hydraulic resistance determination in marsh wetlands [J]. Water Resources Management, 2000(14) 285-309.

- [5] BAKNY M F, GATES T A. Field-measured hydraulic resistance characteristic in vegetation-infested channels[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1992, 118(2) :713-743.
- [6] WILSON C, STOESSER T, BATES P D. Open channel flow through different forms of submerged flexible vegetation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(11) :847-853.
- [7] 邱秀云, 阿不都外力, 程艳, 等. 植物‘柔性坝’对水流影响的试验研究[J]. 水利水电技术, 2003, 34(9) :62-65.
- [8] 时钟. 海岸盐沼植物单向恒定水流流速剖面[J]. 泥沙研究, 1997(3) :82-88.
- [9] REE W O, PALMER V J. Flow of water in channels protected by vegetative lining [C] // U S Dept of Agriculture Soil Conservation Service. Washington D C :Tech Bull, 1949.
- [10] CHEN Cheng-lun. Flow resistance in broad grassed channels [J]. J Hydraul Div Am Soc Civ Eng, 1976, 102(HY3) :307-322.
- [11] EASTGATE W I. Vegetated stabilization of grassed waterways and dam by washes [C] // Water Research Foundation of Australia. Queensland :University of Queensland, 1969.
- [12] GOURLAY M R. Discussion of “Flow resistance in vegetated channels” by N. Kouwen, T Eunny, H M Hill [J]. J Irrig Drain Div Am Soc Civ Eng, 1970, 96(3) :351-357.
- [13] KOUWEN N, UNNY T E. Flexible roughness in open channels [J]. J Hydraul Div Am Soc Civ Eng, 1973, 99(5) :1085-1103.
- [14] FATHI M M, KOUWEN N. Nonrigid nonsubmerged vegetative roughness on floodplains [J]. J Hydr Engrg, ASCE, 1997, 123(1) :51-57.
- [15] KOUWEN N, LI R M, SIMONS D B. Flow resistance in vegetated waterways [J]. Trans, ASCE, 1981, 24(3) :684-698.
- [16] KOUWEN N. Modern approach to design of grassed channels [J]. J Irrig Drain Eng, 1992, 118(5) :713-743.
- [17] PALMER V J. A method for designing vegetated waterways [J]. Agricultural Engineering, 1945, 26 :516-520.
- [18] SYUNSWKE I, KANAZAWA M. Three-dimensional organized vortices above flexible water plants [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(11) :634-640.
- [19] 王付. 有植被的河道水流试验研究 [D]. 南京 :河海大学, 2003.
- [20] PASCH E, ROUVE G. Overbank flow with vegetatively roughened floodplains [J]. J Hydr Engrg, ASCE, 1985, 119(9) :1262-1278.
- [21] 黄本胜, 赖冠文, 邱静, 等. 河滩种树对行洪影响试验研究[J]. 水动力学研究与进展, 1999, 14(4) :468-474.
- [22] 黄本胜, 蔡金德. 漫滩水流问题及其研究进展 [C] // 1994 全国水动力研讨会文集. 北京 :海洋出版社, 1994.
- [23] LAN N, IEHISA N, NAKAGAWA H. Hydrodynamic behavior of partly vegetated open channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(11) :625-633.
- [24] DARREL M T. Velocity distribution coefficients for grass-lined channels [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1986, 112 :193-205.
- [25] ANGENILA A, JORDANOVA, JAMES C M. Experimental study of bed load transport through emergent vegetation [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 129(6) :474-478.
- [26] TEMPLE D M. Flow retardance of submerged grass channel linings [J]. The Soil and Water Division of ASAE, 1982, 26(7) :1300-1303.
- [27] 韩璐, 赵振兴. 流经柔性植被的水流特性试验研究 [J]. 河海大学学报 :自然科学版, 2005(增刊) :11-13.
- [28] 拉尼亚. 非淹没植被水流特性研究 [D]. 南京 :河海大学, 2005.
- [29] STEPHEN E D. Effect of riparian vegetation on flow resistance and flood potential [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 25(5) :443-454.
- [30] NADAOKA K, YAGI H. Shallow water turbulence modeling and horizontal large eddy computation of river flow [J]. J Hydraulic Eng, 1998, 124(5) :493-500.
- [31] YANG Chen-feng. Turbulent shear flow in shallow open channel with Training Structures [D]. 东京 :东京技术学院, 1996.
- [32] 宿晓辉, 张建新, 李志伟, 等. 带有植物的河道水流浅水紊流运动大涡模拟 [J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(2) :223-229.
- [33] 拾兵, 付强, 曹叔尤. 植物对明渠水流的影响 [J]. 西南民族学院院报 :自然科学版, 1998, 24(4) :354-357.
- [34] 拾兵. 植物治沙力学机理及河宽动力调整研究 [D]. 成都 :四川大学, 1998.
- [35] 程莉. 植树护岸条件下河道水流水流的数值模拟 [D]. 南京 :河海大学, 2002.
- [36] FISCHER A T, STOESSER T, BATES P. 3D numerical modeling of open-channel flow with submerged vegetation [J]. Journal of Hydraulic Research, 2001, 39 :303-310.

(收稿日期 2006-05-09 编辑 骆超)

