

水生植物对水沙运动影响的三维湍流模型

刘 诚^{1,2}, 沈永明²

(1. 珠江水利科学研究院河口海岸动力学研究室, 广东 广州 510611; 2. 大连理工大学海岸和近海工程国家重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 水生植物的存在改变了明渠内水流的流动结构, 也影响着泥沙的输运。建立三维湍流模型, 在水流控制方程中加入植被阻力项和植被密度项来考虑刚性植物对水动力特性和泥沙输运特性的影响。应用该三维数值模型计算了矩形水槽内淹没植被对水流水平平均流速垂向分布的影响、复式明渠边滩栽种挺水植被对水流深度、平均流速分布以及植被岛周围泥沙床面的冲淤变形的影响。数值计算结果与实测结果吻合良好, 表明本模型可以有效地描述刚性水生植物对水流泥沙运动的影响。

关键词: 三维湍流模型; 水生植物; 水流结构; 泥沙输运; 悬沙; 床面变形

中图分类号: TV142 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-6791(2008)06-0851-06

在工程领域, 植被、水流和泥沙之间的关系正在被辩证地看待。一方面, 水中植被增大了河流的阻力, 减缓了河流流速, 导致河道水位攀升, 降低了河道的泄洪能力; 另一方面, 水中植被减少了河流挟沙能力, 促进泥沙淤积, 防止岸滩被洪水冲蚀。为了解、控制和预测水生植物对水流和泥沙运动的影响, 国内外已进行了一些研究。关于水生植物对水流结构的影响的研究方面, Dunn等^[1]、Pasche和Rouve^[2]、Nepf和Vivoni^[3]、Velasco等^[4]、Huang等^[5]、拾兵等^[6]、时钟和李艳红^[7]以及杨克君等^[8]采用试验手段进行了研究。采用数学模型研究流经植物的水动力特性也在发展和完善之中。如早期 Shimizu和 Tsujimoto^[9]建立的考虑植被影响的 k - ϵ 湍流模型, Darby^[10]建立了一个垂向一维模型来计算均匀流条件下柔性和刚性植物的存在对水流的影响。最近 Erduran和 Kutija^[11]等采用 COMSOL 模型数值研究了淹没与非淹没条件下柔性和刚性植物对水流流速垂向分布的影响, 宿晓辉和李志伟等^[12]应用 3D k - ϵ LES 模型研究了刚性淹没植物存在时的河道水流运动, Kang和 Choi^[13]采用雷诺应力模型模拟了水流中存在刚性植物时的流动结构, Naot等^[14]在 Naot和 Rodi^[15]的工作的基础上开发出三维代数应力模型研究河道内刚性植物对水流的动力响应, Wang等^[16]采用深度平均的二维模型研究了水生植物对湖泊内水流流动的影响。

水生植物影响泥沙运动特性的试验研究较少, Tsujimoto等^[17]在实验室水槽内研究了植被岛周围的床面变形情况。Tominaga等^[18]则通过在弯道内布置植被研究植物对水流泥沙运动的影响。采用数学模型研究水生植物对泥沙运动特性影响的工作也不多, Tsujimoto等^[17]在只考虑植被区域空间平均的流动结构的基础上提出一个考虑水生植物对泥沙冲淤特性影响的二维水深平均数学模型。Kitamura等^[19]在 Shimizu等^[9]所做工作的基础上建立三维模型研究植被覆盖区域的推移质输运能力。Wu等^[20,21]在二维深度平均的水流控制方程中加入植物密度项, 将 Tsujimoto等^[17]的模型拓展到可以考虑植物密度很大的情形。因为深度平均的二维模型不能直接给出植被对水动力特性垂线分布的影响, 也不能直接计算悬移质浓度沿水深的不同, 本文将 Wu等^[20,21]的模型扩展到三维的情况, 详细讨论植被对水流结构、泥沙运动以及河床冲淤变形的影响。

1 模型介绍

1.1 模型控制方程

Wu等^[20,21]主要在 Tsujimoto等^[17]与 Shimizu等^[19]提出的考虑了植物拖曳力的湍流模型的基础上建立了二维

收稿日期: 2007-09-15

基金项目: 国家自然科学基金重点资助项目 (50839001); 国家重点基础研究发展计划 (973) 资助项目 (2005CB724202)

作者简介: 刘 诚 (1976-), 男, 湖北潜江人, 博士研究生, 主要从事环境水力学方面的研究。

E-mail: jacklc2008@gmail.com

其中 $q_{bx} = b_x q_b$ $q_{by} = b_y q_b$ $b_x = \frac{u_{bx}}{\sqrt{u_{bx}^2 + u_{by}^2}}$ $b_y = \frac{u_{by}}{\sqrt{u_{bx}^2 + u_{by}^2}}$

式中 u_{bx} 与 u_{by} 为推移质运动速度。模型中的几个参数由 van Rijn^[26,27] 推荐的经验公式确定。

$$c_{b_s} = 0.015 d_{50} T^{1.5} z_a^{-1} D_*^{-0.3} \quad q_{b_s} = 0.053 [(S_p - 1) g]^{0.5} d_{50}^{1.5} T^{2.1} D_*^{-0.3} \quad T = \frac{(u_*')^2 - (u_{*cr}')^2}{u_{*cr}'^2}$$

$$L_s = 3 d_{50} D_*^{0.6} T^{0.9} \quad D_* = d_{50} [(S_p - 1) g]^{1/3} \quad S_p = s'$$

1.3 数值计算方法

对控制方程在直角坐标系内采用矩形网格条件下的有限体积法离散,利用 SIMPLEC 算法求解控制方程。对于没有地形冲淤变化的算例,首先计算流场控制方程(1)到(4),流场收敛后计算浓度场控制方程(5)。对于存在地形冲淤变化的算例,在一个时间步长内要先计算流场直到收敛,随后计算浓度场直到收敛,然后计算地形变化控制方程(11),之后根据地形变化调整垂向网格分布,再进行下一个时间步长的计算。

2 模型验证

2.1 水生植被对水流纵向流速垂向分布的影响

水流流经植被覆盖的水道时,植被的存在改变了水流所受到的阻力,水流为克服植被阻力而损失了部分动量。这种动量损失在水流水平流速的垂向分布上表现得很突出。Dunn 等^[2]1996 年在变坡水槽内研究有水生植被存在时恒定流流速的垂线分布特性,试验水槽长 19.5 m、宽 0.91 m、深 0.61 m,水流流速由声学 Doppler 流速仪测量得到。

选取 Dunn 试验中的工况 1 和工况 6 来验证模型对水生植被作用下的水平流速垂线分布特性的数值计算效果。工况 1 和工况 6 的试验条件如表 1 所示。Dunn 等在文献中定义植物在 x 、 y 方向的株距为 x 、 y ,植物密度 $a = D/(x \cdot y)$,工况 1 中 $x = y = 0.0762$ m,工况 6 中 $x = y = 0.1524$ m。

表 1 Dunn 等^[1]试验中工况 1 与工况 6 的具体布置情况表

Table 1 Experimental conditions in Dunn s experiments^[1]

工况数	植物直径 D/m	植被密度 a/m^{-1}	坡度 S_o	流量 $Q/(m^3 \cdot s^{-1})$	水深 h/m	植被高度 h_v/m
工况 1	0.0064	1.09	0.003 6	0.179	0.335	0.12
工况 6	0.0064	0.27	0.003 6	0.178	0.267	0.12

从图 1 和图 2 中的试验结果可以发现,水生植被的存在减小了植被所在深度范围内的水平流速,改变了水平流速垂向分布规律。数值计算结果和试验测量结果吻合较好,说明本模型控制方程中增加的植被阻力项准确描述了植被的影响。

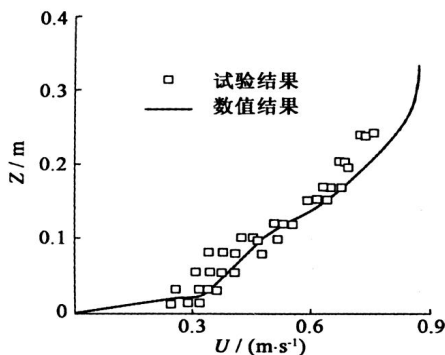


图 1 Dunn 试验工况 1 条件下水平流速垂向分布

Fig.1 Vertical profiles of horizontal velocities in Dunn s experiment 1

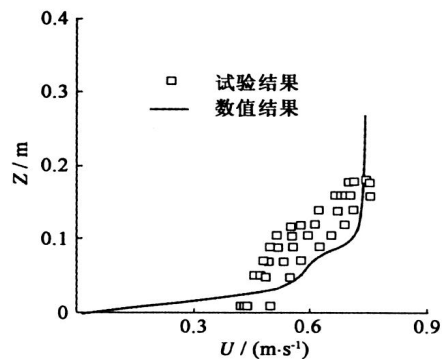


图 2 Dunn 试验工况 6 条件下水平流速垂向分布

Fig.2 Vertical profiles of horizontal velocities in Dunn s experiment 6

2.2 水生植被对水流纵向深度平均流速分布的影响

水深平均流速是重要的明渠水动力特征参数。在众多复式明渠中,由于滩地水深随季节变化,给较大型的

植被生长创造了条件。Pasche 和 Rouve^[21]于 1985 年在定床水槽内研究了复式明渠浅滩上栽种挺水植物之后的水平流速分布。水槽长 25.5 m、宽 1 m，其中的复式明渠主槽深 0.2 m、宽 0.314 m，浅滩宽 0.5 m、深 0.076 m，主槽和浅滩之间过渡段坡度为 1:1.5。滩地挺水植被采用直径为 0.012 m 的圆木制成，植物间距有多种布置情况，在此选取植物横向间距为 0.07 m，纵向间距分别是 0.07 m 和 0.14 m 两种情况，对应的植被密度为 1.26% 和 2.53%。数值计算结果如图 3 和图 4 所示。

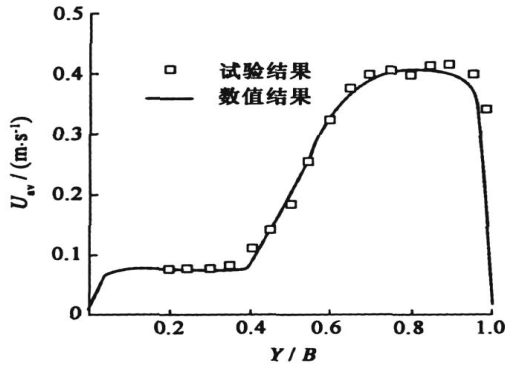


图 3 Pasche 试验中 $C = 1.26\%$ 时的水深平均流速横向分布
Fig. 3 Transverse profiles of depth-averaged primary velocities for $C = 1.26\%$

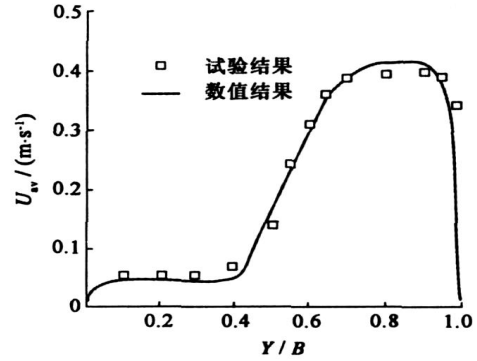


图 4 Pasche 试验中 $C = 2.53\%$ 时的水深平均流速横向分布
Fig. 4 Transverse profiles of depth-averaged primary velocities for $C = 2.53\%$

Pasche 试验表明，浅滩上的植被阻力显著地降低了该处的水深平均流速，同时增大了主槽的水深平均流速。图 3 和图 4 中的数值计算结果和试验结果吻合良好，进一步说明模型在模拟植被的水动力特性方面有较高的精度。

2.3 水生植被对泥沙运动的影响

Tsujimoto 等^[17]考察了日本 Tedomi 河中一扇形岛上的植物分布、地形演变和床沙组成等情况后，认为在中等强度的洪水期，泥沙会在植被内部和周围沉积，床沙则在植被区域的上游沉积。泥沙运动导致扇形岛向前以及向后扩张。Tsujimoto 等还在试验室水槽内进一步研究了植被岛周围泥沙运动。Tsujimoto 试验在 12 m 长，0.4 m 宽的倾斜水槽 ($i_b = 1/100$) 内进行，水槽底部铺满中值粒径 $d_{50} = 0.16$ cm 的细沙，水槽中部放置一块由缠绕的塑料纤维丝做成模型植被岛，如图 5 所示。植被密度参数 $\rho = 0.1 \text{ cm}^{-1}$ ，植被阻力系数 $C_d = 3.0$ ，试验中流量为 $3000 \text{ cm}^3/\text{s}$ ，初始时刻床面平整，主要观测水流运动 30 min 后植被岛附近细沙床面的变形，观测结果如图 6 所示。从图 6 可知，植被岛上下游两端出现泥沙淤积，两侧出现冲刷。Wu 等^[20]曾经建立水深平均的数学模型计算 Tsujimoto 试验。采用本模型对 Tsujimoto 试验进行计算，植被岛周围的床面变形如图 7 所示。比较图 6 和图 7，可以发现，本模型数值和试验观测结果基本吻合。从图 6、图 7 和 Wu 等^[20]的计算结果可以看出，本模型计算结果比深度平均数学模型的计算结果更接近试验结果。

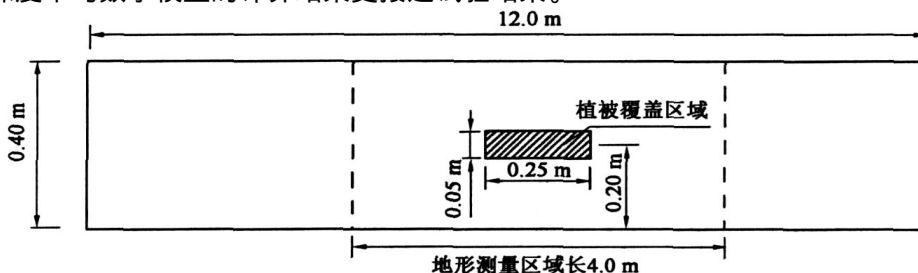


图 5 Tsujimoto 试验布置图

Fig. 5 Experimental layout in Tsujimoto's experiments

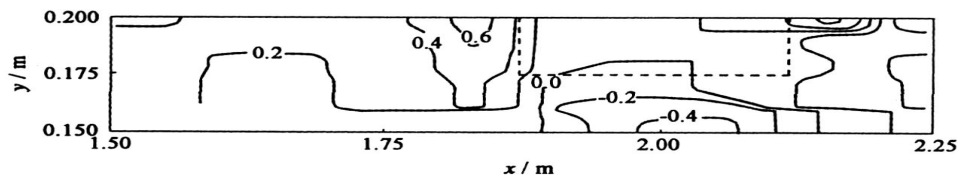


图6 Tsujimoto 试验中 30 min 后的床面变化分布图(单位: cm)

Fig.6 Measured bed changes after 30 minutes in Tsujimoto s experiments

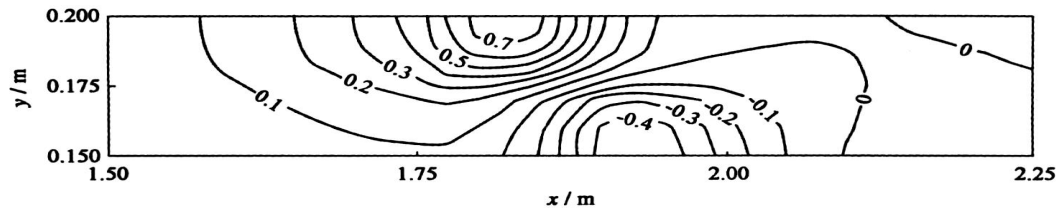


图7 本文三维模型计算 Tsujimoto 试验得到的 30 min 后的床面变化分布图(单位: cm)

Fig.7 Calculated bed changes after 30 minutes in Tsujimoto s experiments by 3D model

3 结 论

本文在 Wu 等^[20,21]、Tsujimoto 等^[17]、Shimizu 等^[9]和 Kitamura 等^[19]所做工作的基础上,建立了可以研究水生植物对水流结构和泥沙运动特性影响的三维数学模型。模型忽略了单个植物周围的小尺度流动结构,取而代之的是植被区域空间平均的流动结构,植被的作用依靠模型控制方程中增加的植被阻力项和密度项来考虑。模型可以计算研究区域的水动力特征、悬沙运动、床沙运动以及河床变形。采用该三维数学模型对 Dunn 等^[1]在试验水槽内布置高度低于水深的植物后的流场以及 Pasche 和 Rouve^[2]在水槽内复式明渠浅滩上栽种挺水植被之后的流场,数值计算结果与流速测量结果吻合良好,表明模型能够有效地模拟植被对水动力特性的影响。随后通过计算 Tsujimoto 等^[17]试验水槽内植被岛周围泥沙床面的冲淤变形,验证了模型对悬沙运动、床沙运动以及河床变形模拟的可靠性。

参考文献:

- [1] DUNN C, LOPEZ F, GARCIA M. Mean flow and turbulence structure induced by vegetation: Experiments[J]. Hydraulic Engineering Series, 1996, 51.
- [2] PASCHE E, ROUVE G. Overbank flow with vegetatively roughened flood plains[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1985, 111(9): 1262 - 1278.
- [3] NEPF H M, VIVONI E R. Flow structure in depth-limited, vegetated flow[J]. Journal of Geophysical Research, 2000, 105 (C12): 28547 - 28557.
- [4] VELASCO D, BATEMAN A, REDONDO J M, *et al.* An open channel flow experimental and theoretical study of resistance and turbulent characterization over flexible vegetated linings[J]. Flow, Turbulence and Combustion, 2003, 70(1 - 4): 69 - 88.
- [5] HUANG B S, LAI G W, QIU J, *et al.* Hydraulics of compound channel with vegetated flood-plains[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. B), 2002, 14 (1): 23 - 28.
- [6] 拾 兵, 郭怀民, 史宏达. 植物带前壅水高度计算的迭代方法[J]. 水动力学研究与进展 (A 辑), 2005, 20(1): 79 - 83. (SHI Bing, GUO Huai-min, SHI Hong-da. An iterative method of backwater height calculation for vegetation domain[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. A), 2005, 20(1): 79 - 83. (in Chinese))
- [7] 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): 1263 - 1268. (SHI Zhong, LI Yan-hong. Experimental studies of mean velocity profiles in vegetated river flow[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(8): 1263 - 1268. (in Chinese))
- [8] 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. (YANG Ke-jun, LIU

- Xing-nian, CAO Shu-you, *et al.* Velocity distribution in compound channels with vegetated floodplains[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2006, 38(2) : 246 - 250. (in Chinese)
- [9] SHIMIZU Y, TSUJIMOTO T. Numerical analysis of turbulent open channel flow over a vegetation layer using a $k-\epsilon$ turbulence model[J]. Journal of Hydroscience & Hydraulic Engineering, JSCE, 1994, 11(2) :57 - 67.
- [10] DARBY S E. Effect of riparian vegetation on flow resistance and flood potential[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 125(55) : 443 - 454.
- [11] ERDURAN K S, KUTIJA V. Quasi-three-dimensional numerical model for flow through flexible, rigid, submerged and non-submerged vegetation[J]. Journal of Hydroinformatics, 2003, 5(3) :189 - 202.
- [12] SU X H, LI C W, CHEN B H. Three-dimensional large eddy simulation of free surface turbulent flow in open channel within submerged vegetation domain[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. B), 2003, 15(3) : 35 - 43.
- [13] KANG H, CHOI S U. 3D numerical simulation of compound open channel flows with vegetated floodplains by Reynolds stress model[M]. Proceedings of the 2004 World Water and Environmental Resources Congress: Critical Transitions in Water and Environmental Resources Management [C]. Salt Lake City, Utah, USA, 2004, 1408 - 1417.
- [14] NAOT D, NEZU I, NAKGAWA H. Hydrodynamic behavior of partly vegetated open channels[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1996, 122(11) :625 - 663.
- [15] NAOT D, RODI W. Calculation of secondary currents in channel flow[J]. Journal of Hydraulic Division, 1982, 108(8) : 948 - 968.
- [16] WANG C, ZHU P, WANG P F. Effects of aquatic vegetation on flow in the Nansi Lake and its flow velocity modeling[J]. Journal of Hydrodynamics (Ser. B), 2006, 18(6) :640 - 648.
- [17] TSUJIMOTO T, KITAMURA T, TSUJIKURA H. Development of sand island with vegetation by repetition of flood and low-stage water[M]. Berlin: Water Resource Engineering '98. ASCE, Germany, 1998.
- [18] TOMINAGA A, NAGAO M, NEZU I. Effects of vegetation on flow structures and bed profiles in curved open channels[M]. Environmental Hydraulics Rotterdam:A. A. Balkema Publishers, 1998. 329 - 334.
- [19] KITAMURA T, JIA Y F, TSUJIMOTO T, *et al.* Sediment transport capacity in channels with vegetation zone[M]. Berlin: Water Resource Engineering '98, ASCE, Germany, 1998.
- [20] WU W M, WANG S S Y. A depth-averaged two-dimensional numerical model of flow and sediment transport in open channels with vegetation [M]. Washington D C: Riparian Vegetation and Fluvial Geomorphology. AGU, 2004. 253 - 265.
- [21] WU W M, SHIELDS F D J, BENNETT S J, *et al.* A depth-averaged two-dimensional model for flow, sediment transport, and bed topography in curved channels with riparian vegetation[J]. Water Resources Research, 2005, 41(3) :W03015, doi : 10.1029/2004WR003730.

3D turbulence model for the flow and sediment transport with aquatic vegetation^{*}

LIU Cheng^{1,2}, SHEN Yong-ming²

(1. Coastal and Estuary Dynamics Section, Pearl River Hydraulic Research Institute, Guangzhou 510611, China;

2. State Key Laboratory of Coastal and Offshore Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract : Aquatic vegetation plays an important role in the flow structure in open channels and thus changes the fate and transport of sediment. This paper proposes a 3D turbulence model, introducing vegetation density and drag force to the control equations of water flow with vegetation. The impacts of submerged vegetation on the vertical profiles of horizontal flow velocities, the changes of the depth-averaged flow velocities in a compound channel with emergent vegetation in the floodplain, and the bed surface topography changes around and in a vegetation island are calculated by the model. The calculated results show a good agreement with experimental results.

Key words : 3D turbulence model; aquatic vegetation; flow structure; sediment transport; suspended sediment; bed surface topography change

* The study is financially supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 50839001) and the National Basic Research Program of China (No. 2005CB724202).