

不同布置形态下刚性淹没植被对水流特性的影响

杨琰青, 王雯, 顾中明, 董嘉锐, 周凯波, 李佳佳

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 自然河道中植被呈现多种多样的分布状态,为探究不同布置形态下刚性淹没植被对水流特性的影响,利用室内水槽模拟含刚性淹没植被的明渠进行试验研究。结果表明:刚性淹没植被的布置形态对明渠流水流特性影响显著。在本文研究的植被布置形态下的水深、植被阻力系数与植被粗糙系数均增大,表现为交错型布置 > 斑块型布置 > 线性布置;流速与雷诺数均减小,表现为线性布置 > 斑块型布置 > 交错型布置;糙率 n 随着平均流速与水力半径之积 VR 的增大而减小。

关键词: 植被水流; 植被布置形态; 植被密度; 水流特性; 阻力系数

中图分类号:TV133

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2018)05-0164-05

Influence of rigid submerged vegetation on flow characteristics under different vegetation layouts

YANG Yanqing, WANG Wen, GU Zhongming, DONG Jiarui, ZHOU Kaibo, LI Jiajia

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048 China)

Abstract: There are various distribution patterns of vegetation in natural rivers. In order to investigate the influence of rigid submerged vegetation on the flow characteristics under different layout patterns, the experiment was carried out using the glass sink in the laboratory to simulate the open channel with rigid submerged vegetation. The results show that the arrangement of rigid submerged vegetation has a significant effect on the flow characteristics of open channels. The water depth, vegetation resistance coefficient and vegetation roughness coefficient under vegetation layout all increase, and the specific staggered arrangement > patch type arrangement > long strip arrangement. Both the flow velocity and the Reynolds number decrease, showing a long strip arrangement > a patch type arrangement > a staggered arrangement. The roughness n decreases as the average flow velocity and the hydraulic radius VR increases.

Key words: vegetation flow; vegetation layout; vegetation density; water flow characteristics; resistance coefficient

1 研究背景

水生植被是河流生态系统的重要组成部分,广泛分布于自然和人工的水生系统,植被存在对此类生态系统水流形态的影响是当前水力学研究的热点之一^[1-3]。在自然环境中,植物对河道水流运动及水利工程建设均有较大影响。一方面,河道中植物的存在增大了河床糙率及河床阻力,降低了河道过流能力,对航运、防汛工程等产生负面影响;另一

方面,植物根系固结表土层,能够减轻河床侵蚀,可保滩护岸,对于治理水土流失,改善水环境,恢复水生态意义重大。探讨植被对水流运动的影响,对水土资源的可持续利用,河流及湖泊的生态修复、河道整治和管理等都具有重要意义^[4]。自然河道中植被呈现多种多样的分布状态,植被布置形态对于含植被水流的水力学特性影响重大。

20世纪50年代初,有学者开始研究淹没植被对河道水流特性的影响。Chow^[5]主要研究渠道中

收稿日期:2018-08-01; 修回日期:2018-09-07

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0504700);国家自然科学基金项目(51609198);国家自然科学基金重点项目(41731289);陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JQ5063)

作者简介:杨琰青(1991-),女,甘肃永靖人,硕士研究生,主要从事水力学数值模拟及植被水流方面的研究。

通讯作者:王雯(1986-),男,陕西凤翔人,博士,讲师,硕士生导师,研究方向为环境水力学。

植被对水流阻力特性的影响,他将曼宁粗糙系数作为特征值,总结分析了曼宁粗糙系数的影响因素,并绘制出 $n \sim VR$ 曲线。Hsieh^[6] 和 Li 等^[7] 通过研究矩形水槽中圆柱模拟植被产生的波的形态及紊动特性,检验淹没植被水流阻力特性。结果表明,植被密度会对水流流速产生影响,随着植被密度的增加,水流阻力增大,平均流速与水力半径之积 VR 和糙率 n 具有一定的函数关系。Huai 等^[8] 根据掺混长度理论,将含有淹没植被的明渠水流沿垂向分为无植被层、植被层和植被底层 3 个层次,并建立了流速垂向分布 3 层模型。Guo 等^[9] 基于 NSF 方程,用 Jacobi 椭圆方程函数精确描述植被层内的层流流速分布。

国内关于淹没植被水流特性的相关研究主要采用水槽模拟的方法。槐文信等^[10] 使用矩形玻璃水槽模拟自然河道进行淹没刚性植被试验,采取粒子图像流速技术(PIV)测量定单一流量下植被水流的纵向流速垂向分布,发现其分布呈“S”型曲线。王雯等^[11] 等在均匀流条件下对多级复式断面河道中边滩上无植被及有植被情况下的水流特性进行了试验研究,结果表明植被促使河道内主流速加速回归河道主槽,对应紊动能的最大值在一级阶地靠近主河道的位置出现。刘诚等^[12] 采用三维湍流模型研究水流中植被对水沙运动的影响。惠二青等^[13] 在实验室中通过对含有不同植被群落分布的渠道进行模拟试验,分析研究植被群落之间水流流速垂向分布。Morri 等^[14] 等通过探讨不同解析模式对含淹没植被水流垂向流速的预测能力选择合适的模型,并进行验证。当前随着计算机技术的高速发展,数值模拟技术得到了不断地改进和完善,国内外学者不断地尝试将数值模拟理论推广到含有植物河道的研究之中。

综上所述,关于淹没植被对河道水流结构和特性的影响,国内外学者多采用实验室模拟与实际观测相结合的方法进行研究,得出河道水流与植被之间的关系。但是关于不同植被布置形态对于植被水流特性的分析讨论相对较少。

2 试验设计

2.1 试验布置

本次试验在英国 Armfield 公司生产的大型室内实验水槽系统中进行,该系统由水箱、轴流泵、玻璃水槽及实验控制平台 4 部分组成。其中水槽长 7.5 m,宽 0.3 m,高 0.5 m,3 面采用钢化玻璃搭建,可以有效减少边壁阻力效应,减少试验干扰;离心泵循环

造流系统能够有效控制流量,水位通过尾门进行控制,可获得较为理想的均匀流实验条件。该实验控制平台具有自动流量控制、造波、变坡及数字化显示功能,可造流流量范围为 0 ~ 30 L/s。

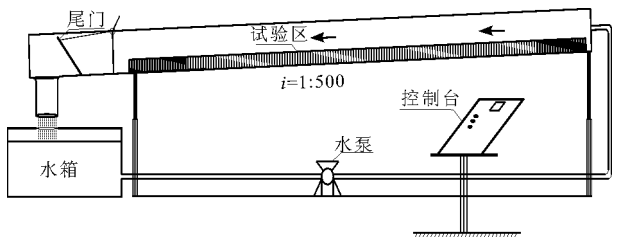


图 1 试验装置示意图

刚性植被采用高度 h_v 为 15 mm,直径 D 为 8 mm 的中空有机玻璃棒进行模拟,将有机玻璃棒固定于 6 块尺寸为 1.2 m × 0.3 m 的长条状有机玻璃板上,有机玻璃棒刚度较大,不因水流冲击而产生变形和位移。模拟植被布置横向间距为 20 mm,通过调整纵向间距调整单株植被密度,形成长 7.2 m 的植被带,试验水槽底坡设置为 2‰。

根据试验目的,本次试验共设置了 3 种布置形态,每种形态分别进行 3 种植被密度布置,如图 2 所示。取无模拟植被铺设的空白试验为对照组,一共进行 10 组不同工况的试验,如表 1。每组工况研究 6 组不同流量 Q (9、12、15、18、21、24 L/s) 下水深、断面平均流速、植被阻力系数、雷诺数、植被河床粗糙系数的发展趋势。其中,植被密度由公式(1)计算所得^[15]。

$$c_v = N_a \frac{\pi D^2}{4}$$

(1)

式中: c_v 为植被密度,%; N_a 为单位面积植被数, m^{-2} ; D 为植被直径,m。

表 1 试验设计方案

工况	植被密度/%	植被数量	布置形态
工况 a ₁	6.70	2880	线性
工况 a ₂	6.70	2880	斑块型
工况 a ₃	6.70	2880	交错性
工况 b ₁	3.35	1440	线性
工况 b ₂	3.35	1440	斑块型
工况 b ₃	3.35	1440	交错性
工况 c ₁	1.79	768	线性
工况 c ₂	1.79	768	斑块型
工况 c ₃	1.79	768	交错性
工况 d	无植被布置		

2.2 水力要素测定

本次试验采用探针法(精度为 0.1 mm)进行水深测量,即通过探针分别测得水面及水槽底板高程,相减可得水深。为减少水槽进出口影响,所有测量均在水槽中间段进行。

为减小误差,保证试验准确性,分别在水槽上游 2.0、4.0 和 6.0 m 处布置 3 个测量横断面,并沿每个横断面布设 3 个测量点,分别在距水槽边壁 0.06、0.15 和 0.24 m 处,以减小边壁对水流的影响。每种工况测量 9 组水深数据,并进行平均计算,得出相应工况下的水深。

3 结果与分析

3.1 水深与流速的变化特征

本文分析在不同植被分布条件下的平均水深及断面平均流速随流量变化特征。由平均水深与流量变化关系(图 3)可以看出,相同流量条件下,无植被布置的空白对照组水深最低,表明植被的存在增大

过流阻力,具有明显的雍高水位作用。与对照组相比,有植被覆盖使得平均水深雍高 2.7~4.7 倍。对比相同流量条件、相同铺设密度下的 3 种不同布置形态,可知交错型植被布置壅水高度最高,斑块型布置其次,而线性布置壅水高度最低。而对比相同布置形态、相同来流条件下不同铺设密度时的水深,可以得出植被布置密度较大则壅水高度较高。

由断面平均流速与流量变化关系(图 4)可以看出,相同流量条件下,无植被布置的空白对照组断面平均流速明显大于具有植被覆盖组,说明植被可以有效减缓流速,具有良好的阻水作用。与对照组相比,有植被覆盖使得断面平均流速延缓 20%~40%。对比相同密度下的 3 种不同布置形态,可知交错型植被布置流速延缓幅度最大,斑块型布置其次,而线性布置流速延缓幅度最小,阻水效果较弱。而对比相同布置形态、相同来流条件下不同铺设密度时的断面平均流速,可以得出植被布置密度较大则断面平均流速较小。

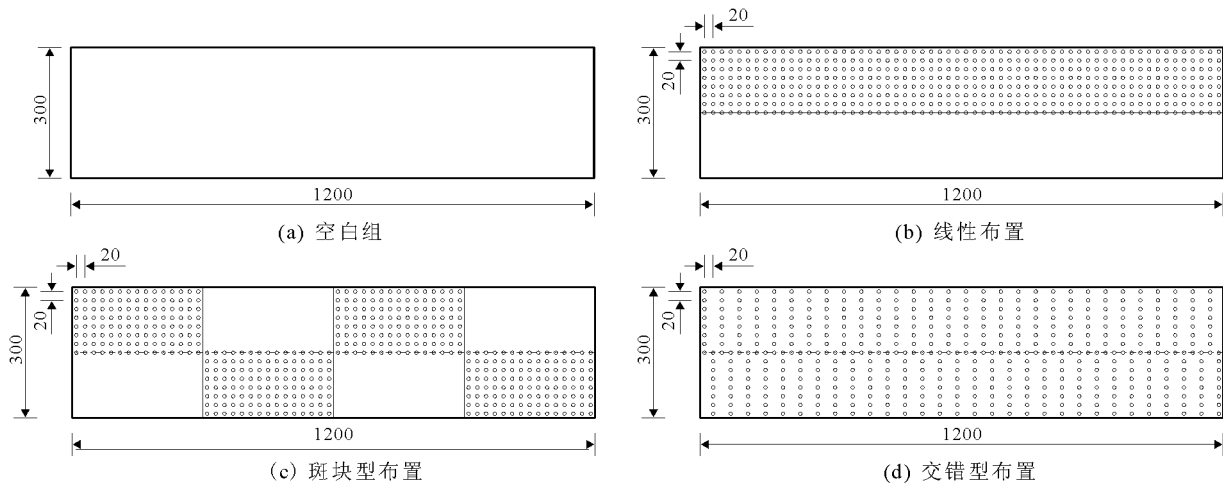


图 2 植被布置形态示意图(取 1/6 试验段为例,单位:mm)

3.2 阻力系数的变化特征

植被对水流的阻力大小与植被的高度、种植密度、布置形态等有密切的关系,植被的阻力系数因植被的具体特性及其具体布置形态不同而产生变化。由植被阻力系数与流量变化关系(图 5)可以看出,对比相同布置密度、相同来流条件下不同布置形态的植被阻力系数,可得交错型布置时植被阻力系数最大,斑块型布置次之,线性布置时植被阻力系数最小。而对比相同布置形态、相同来流条件下不同铺设密度的植被阻力系数,可以得出植被布置密度较大则植被阻力系数相对较小。

植被阻力系数由公式(2)计算可得^[15]。

$$C_d = \frac{2F_d}{\rho N A_v |V_v| \vec{V}_v} \quad (2)$$

式中: C_d 为植被阻力系数; F_d 为植被阻力, N; A_v 为单株植被投影面积, m^2 ; N 为植被带中植被个数; V_v 为植被区水流流速, m/s , 由公式(3) 计算可得。

$$V_v = \eta_v V \left(\frac{h_v}{h} \right)^{1/2} \quad (3)$$

式中: V 为断面平均流速, m/s ; h_v 为植被高度, m ; h 为平均水深, m ; η_v 为系数, 通常取为 1.0。

3.3 河床粗糙系数的变化特征

含植被河道的水流阻力不仅来源于河道边壁,更主要来源于河道植被,传统的曼宁公式不能直接被用来计算含植被河道的糙率。前人提出了等效综合曼宁

粗糙系数 n_v 的概念,并通过理论分析提出了计算公式。

植被河床粗糙系数可由公式(4)计算^[15]。

$$n_v = \sqrt{n^2 + \frac{1}{2g(1-c_v)} C_d N_a A_v \eta_v^2 \frac{h_v}{h} R_s^{1/3}} \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度, m/s^2 ; c_v 为植被密度; C_d 为植被阻力系数; N_a 为单位面积植被数, m^{-2} ; A_v 为单

株植被投影面积, m^2 ; h_v 为植被高度, m ; h 为平均水深, m ; R_s 为植被水力半径, m ; η_v 通常取为 1.0。其中植被水力半径 R_s 由公式(5) 计算:

$$R_s = \frac{h_v l_n}{2h_v + l_n} + h - h_v \quad (5)$$

式中: l_n 为植被横向间距, m 。

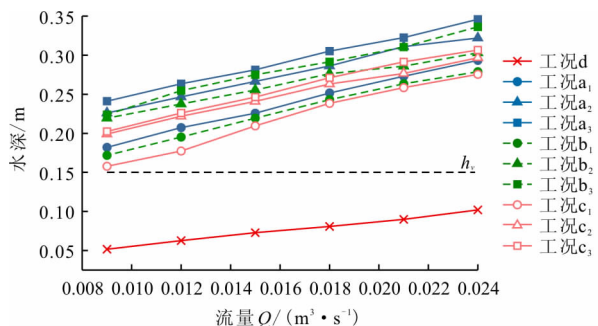


图3 平均水深与流量变化关系

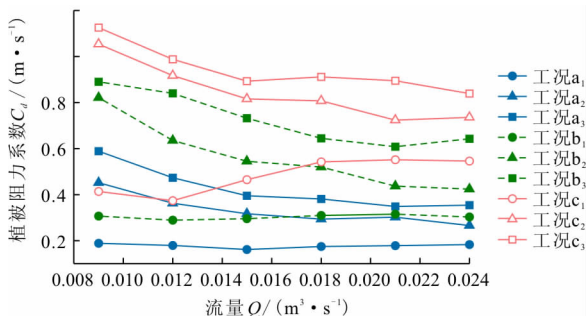


图5 植被阻力系数与流量变化关系

由植被粗糙系数与流量变化关系(图6)显示,对比相同布置密度、相同来流条件下,不同布置形态的植被粗糙系数,可以得出交错型布置时植被粗糙系数最大,斑块型布置次之,线性布置时植被粗糙系数最小。而对比相同布置形态、相同来流条件下不同铺设密度的植被粗糙系数,可以得出植被布置密度较大则植被阻力系数相对较大。

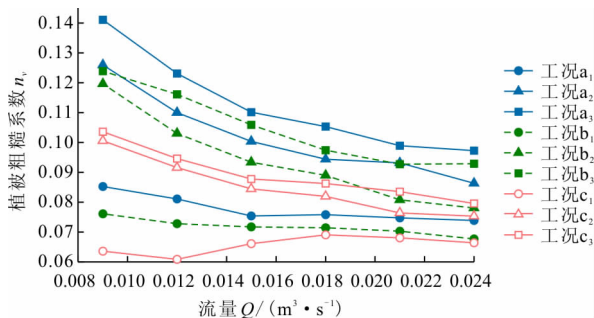


图6 植被粗糙系数与流量变化关系

3.4 雷诺数的变化特征

由植被雷诺数与流量变化关系(图7)可以看

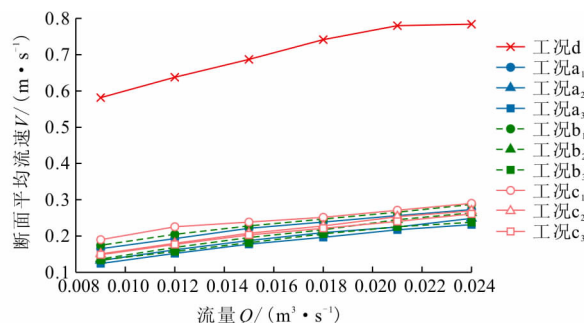


图4 断面平均流速与流量变化关系

出,有植被布置组较空白对照组雷诺数减小 37% ~ 47%。对比相同布置密度、相同来流条件下不同布置形态的植被雷诺数,可以得出线性布置时植被雷诺数最大,斑块型布置次之,交错型布置时植被雷诺数最小。

而对比相同布置形态、相同来流条件下不同铺设密度的植被粗糙系数,可以得出植被布置密度较大则植被雷诺数相对较小。

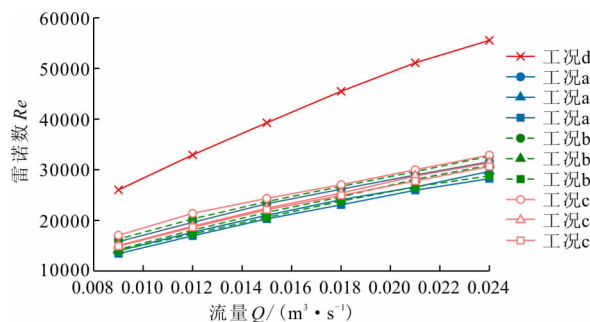


图7 植被雷诺数与流量变化关系

植被阻力系数与雷诺数变化关系(图8)则显示,相同植被密度与雷诺数下,植被阻力系数大小与植被布置形式呈现出较强相关性,其中交错型布置时阻力系数最大,斑块型次之,线性最小。不同布置形态下,布置密度为 1.79% 和 3.35% 时的植被阻力系数近似,而 6.70% 密度下的植被阻力系数较前两者明显较小。

由 n 与 VR 变化关系图(图9)可以看出, n 随着 VR 的增大而减小。 $n - VR$ 曲线符合 Chow^[5] 绘制的植被处于淹没状态时的 $n - VR$ 关系曲线。

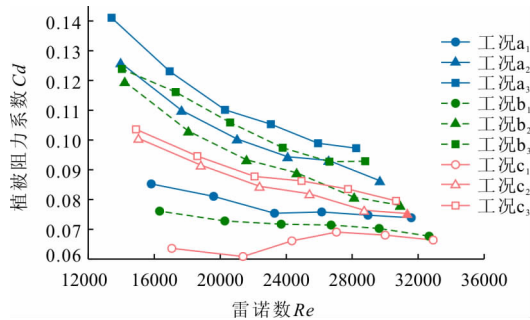
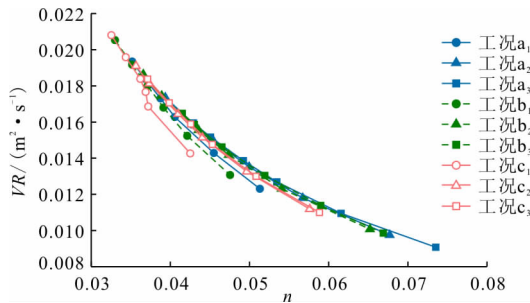


图8 植被阻力系数与雷诺数变化关系

图9 n 与 VR 变化关系

4 结 论

本文采用实验室水槽模拟试验,在均匀流的试验条件下,研究了不同植被布置形态对水流力学特性的影响,试验结果表明:

(1) 植被具有雍高水位、降低流速的作用,在本文研究的植被布置形态下,交错型植被布置壅水高度最高,斑块型布置其次,线性布置壅水高度最低。交错型植被布置流速延缓幅度最大,斑块型布置其次,而线性布置流速延缓幅度最小,阻水效果较差。

(2) 在本文研究的植被布置形态下的植被阻力系数与植被粗糙系数均表现为交错型布置 > 斑块型布置 > 线性布置。

(3) 有植被布置时雷诺数减小,不同植被布置形态下雷诺数表现为线性布置 > 斑块型布置 > 交错型布置。 $n - VR$ 曲线符合 Chow^[5] 绘制的植被处于淹没状态时的 $n - VR$ 关系曲线。

参考文献:

[1] HEIDI M. NEPF. Hydrodynamics of vegetated channels[J].

Journal of Hydraulic Research, 2012,50(3):262-279.

- [2] NIKORA V, WOOD P J, RICE S P, et al. Hydrodynamics of aquatic ecosystems: an interface between ecology, biomechanics and environmental fluid mechanics [J]. River Research & Applications, 2010,26(4):367-84.
- [3] SUKHODOLOV A N. Field-based research in fluvial hydraulics: potential, paradigms and challenges [J]. Journal of Hydraulic Research, 2015,53(1):1-19.
- [4] 江春波, 侯迪, 惠二青. 河道植被对水流运动影响研究之现状 [J]. 水力发电, 2009,35(7):11-3.
- [5] CHOW T V. Open-channel hydraulics [M]. New York: McGraw-Hill Book Company, INC, 1959:182-192.
- [6] HSIEH T. Resistance of cylindrical piers in open-channel flow [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1964,90(1):161-173.
- [7] LI R M, SHEN H W. Effect of tall vegetations on flow and sediment [J]. Journal of the Hydraulics Division, 1973, 99:793-814.
- [8] HUAI W X, ZENG Y H, XU Z G, et al. Three-layer model for vertical velocity distribution in open channel flow with submerged rigid vegetation [J]. Advances in Water Resources, 2009,32(4):487-492.
- [9] GUO Junke, ZHANG Jianmin. Velocity distributions in laminar and turbulent vegetated flows [J]. Journal of Hydraulic Research, 2016,54(2):1-14.
- [10] 槐文信, 赵磊, 李丹, 等. 有植被明渠纵向流速垂向分布特性的 PIV 试验分析 [J]. 实验流体力学, 2009, 23(1):26-30.
- [11] 王雯, 槐文信, 曾玉红. 多级复式断面河道植被水流特性试验研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013,41(10):128-132.
- [12] 刘诚, 沈永明. 水生植物对水沙运动影响的三维湍流模型 [J]. 水科学进展, 2008,19(6):851-856.
- [13] 惠二青, 江春波. 植被群落之间水流流速垂向分布计算方法 [J]. 水力发电学报, 2011,30(1):84-88.
- [14] MORRI M, SOUALMIA A, BELLEUDY P. Analytical Models Evaluation for Predicting Vertical Velocity Flows through Submerged Vegetation [J]. International Journal of Engineering Research, 2015,4(1):9-12.
- [15] WU W. Computational river dynamics [M]. CRC Press, Taylor & Francis, 2007.