

含淹没植被明渠水位及糙率变化试验研究

姬昌辉, 洪大林, 丁 瑞, 申 霞

(南京水利科学研究院 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏 南京 210029)

摘要: 采用概化水槽试验研究了在不同植物间距、水流条件下, 含淹没植被明渠水位、曼宁糙率系数的变化特征, 给出了含淹没植被明渠的糙率经验公式。试验结果表明: 相同的流量、水深条件下, 明渠的水位壅高值和水面比降均随植物间距的减小而逐渐增大, 当植物枝叶相互间贴近或交叉时, 植物对明渠水位、比降的影响程度相对较大; 水深基本相同、植物排列方式相同的情况下, 随着流量的增加, 水面比降基本呈线性增大趋势; 水深相同的条件下, 含淹没植被明渠糙率受水流流速的影响较小。

关 键 词: 明渠; 淹没植被; 水位; 比降; 曼宁糙率系数

中图分类号: TV133

文献标志码: A

文章编号: 1009-640X(2013)01-0060-06

水生植物在国内外河道护岸及生态修复工程中得到广泛应用, 因此相关研究也较多。虽然水生植物有利于净化水质、美化环境, 但水生植物也增加了河道水流阻力, 使水位升高、流速减小, 降低河道的行洪能力。国外关于水生植物对水流阻力及水流结构的研究较多, M. Righti 等^[1]研究了由灌木丛组成的完全淹没植物所引起的河道阻力, 提出了基于空间和时间基数的模型。M. Faith-Moghadam^[2]等研究了淹没植物的曼宁糙率系数的变化规律。N. S. Cheng 等^[3]通过类比管流和植被明渠流, 用与植被有关的水力半径重新定义了雷诺数, 提出了一个新的含有雷诺数的摩擦力函数。J. D. Shucksmith^[4]等利用两类植物在试验室玻璃水槽中研究了植物不同生长期对水流阻力的影响。国内倪汉根等^[5]用 PVC 模拟芦苇, 通过水槽试验研究了芦苇在非淹没流条件下的阻力特性。胡旭跃等^[6]采用棕榈毛作为模拟材料, 探讨了植物高度的非均匀性对水流阻力的影响。王忖等^[7]在玻璃水槽中种植天然沉水植物和挺水植物, 对紊流特性进行测量研究。吴福生^[8]用钢棒、PVC 模拟刚性及柔性植物, 从涡动力学观点出发研究了含植物明渠的能量耗散及紊动耗散特性。槐文信等^[9]用羽毛模拟柔性植物研究了柔性植被明渠的水力特性, 得到了淹没植被情况下的纵向流速和雷诺应力分布。但是目前国内对于含植物明渠的水流特性的研究尚处于起步阶段^[10]。其次, 平原河道大多为复式断面河道, 洪水过境时, 淹没滩地植被, 行洪水位抬高, 由淹没植被引起的河道水位、糙率变化等问题有待进一步研究。因此, 研究淹没植物明渠的水位及糙率变化特征对河道防洪有重要意义。并且河流物理模型试验中河道滩地常用塑料草进行加糙, 但塑料草排列方式对糙率影响的研究较少。本文通过概化水槽试验探索淹没植被对明渠水位及糙率的影响, 同时也可研究含植被滩地行洪以及物理模型试验中滩地糙率的模拟提供参考。

1 试验概况

1.1 水槽简介

试验中明渠采用梯形断面的平底顺直水槽, 长 30 m, 底宽 1 m, 深 0.3 m, 两侧边坡坡比 1:3, 水槽流量由量水堰控制, 水深由尾门控制, 沿程布置 6 个水位站(1#~6#), 水位由测针测量, 1#水位站距水槽进口 5 m, 各水位站间距 4 m(见图 1)。试验中的淹没植物采用塑料草代替, 塑料草高(h)2.5 cm, 9 瓣叶片, 每瓣叶

收稿日期: 2012-05-25

基金项目: 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室基本科研业务费重点项目(Y20809)

作者简介: 姬昌辉(1980-), 男, 山西平定人, 工程师, 主要从事河流动力学及工程泥沙研究。E-mail: chji@nhri.com

片长 4.2 cm, 叶片最宽约 0.7 cm, 铺设的塑料草所覆盖平面范围基本上为圆形, 平均直径(d)约 8 cm. 水槽中铺设塑料草时, 分别采用边长(即塑料草间距 L)为 5, 8, 10 和 16 cm 的正方形进行布置(图 1).

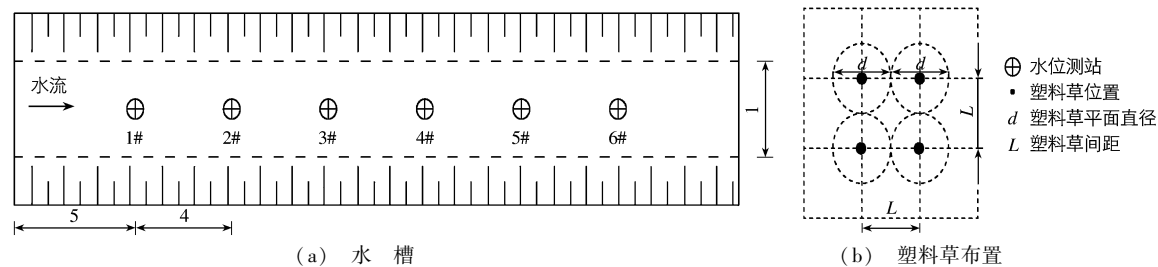


图 1 水槽示意图(单位: m)
Fig. 1 Sketch of a flume (unit: m)

1.2 试验条件

塑料草高度(h)一定的情况下, 试验的控制水深(H)分别采用 10, 15 和 20 cm(以 6# 水位站控制), 以研究不同的植物相对高度(h/H)对水位及糙率的影响. 在不同的水深下, 分别施放 3 级流量, 使没有铺设塑料草的水槽平均流速分别保持在 0.1, 0.2 和 0.3 m/s 左右, 以研究不同流速的影响. 在无塑料草及 4 种不同间距的布置形式下, 分别进行表 1 中所列 9 种工况的水槽试验.

表 1 试验水流条件
Tab. 1 Experimental conditions

控制水深/ cm	上游控制流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	无草水槽平均流速/ ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
10	0.013	0.10
	0.026	0.20
	0.039	0.30
15	0.022	0.10
	0.044	0.20
	0.066	0.30
20	0.032	0.10
	0.064	0.20
	0.096	0.30

2 淹没植被对水位的影响

植物分别以间距为 5, 8, 10 和 16 cm 的形式布置时, 可测量各水位站水位, 并与无植物时的水位进行比较, 计算得到各种工况下的水位壅高值(表 2)、水面比降(图 2). 可见: ①在相同的水流条件(流量及控制水深相同)下, 植物布置的密度越大, 水位壅高值越大. ②在控制水深相同、植物布置间距相同的情况下, 随着流量增大, 水位壅高值也相应增大. ③水流流速基本相同(分别为 0.1, 0.2 和 0.3 m/s)、植物排列间距相同的情况下, 随着水深的减小, 植物的相对高度(h/H)增大, 其水位壅高值也增大. ④相同的水流条件下, 水面比降随着植物间距的减小逐渐增大(图 2), 当间距为 8 cm, 与植物平面直径基本相同时, 水面比降增大的幅度有所增加, 说明植物相互间枝叶贴近或交叉后, 会更大程度减小水槽的行水能力. ⑤在控制水深相同的情况下, 随着流量的增加, 水面比降也增大, 基本呈线性增大趋势(图 3), 且水深越小, 即植物相对高度(h/H)越大, 水面比降增大的幅度越大. ⑥水流流速基本相同, 植物排列方式相同的情况下, 水面比降随着水深的减小而增大(图 3), 即随着植物相对高度(h/H)的增大, 水面比降基本呈线性增大趋势.

表 2 水位壅高值
Tab. 2 The values of backwater

间距/ cm	水位站	不同流量下水位壅高值/cm								
		$Q=0.013$	$Q=0.026$	$Q=0.039$	$Q=0.022$	$Q=0.044$	$Q=0.066$	$Q=0.032$	$Q=0.064$	$Q=0.096$
16	1#	0.17	0.54	1.07	0.10	0.36	0.79	0.06	0.31	0.68
	2#	0.15	0.53	0.98	0.10	0.34	0.71	0.05	0.25	0.63
	3#	0.14	0.45	0.84	0.09	0.29	0.56	0.07	0.22	0.50
	4#	0.09	0.33	0.74	0.07	0.21	0.42	0.05	0.15	0.38
	5#	0.06	0.14	0.44	0.04	0.10	0.23	0.03	0.09	0.21
	6#	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10	1#	0.35	1.14	2.14	0.20	0.78	1.73	0.13	0.63	1.40
	2#	0.29	1.04	1.94	0.17	0.69	1.51	0.09	0.49	1.23
	3#	0.22	0.86	1.67	0.15	0.56	1.23	0.10	0.44	1.00
	4#	0.14	0.59	1.34	0.08	0.39	0.89	0.05	0.31	0.74
	5#	0.10	0.34	0.77	0.04	0.22	0.52	0.02	0.16	0.45
	6#	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8	1#	0.41	1.41	2.56	0.23	0.98	2.03	0.19	0.73	1.73
	2#	0.35	1.27	2.36	0.20	0.88	1.82	0.18	0.64	1.52
	3#	0.29	1.04	2.04	0.18	0.74	1.54	0.17	0.54	1.25
	4#	0.18	0.77	1.67	0.11	0.56	1.16	0.10	0.38	0.95
	5#	0.10	0.45	1.03	0.08	0.32	0.68	0.07	0.20	0.56
	6#	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5	1#	0.71	2.06	3.47	0.35	1.33	2.72	0.22	1.09	2.13
	2#	0.63	1.87	3.24	0.30	1.20	2.44	0.18	0.94	1.90
	3#	0.54	1.57	2.83	0.25	0.98	2.02	0.18	0.77	1.54
	4#	0.39	1.17	2.41	0.15	0.74	1.58	0.12	0.58	1.16
	5#	0.25	0.69	1.54	0.08	0.39	0.90	0.04	0.33	0.65
	6#	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

注：流量单位为 m^3/s 。

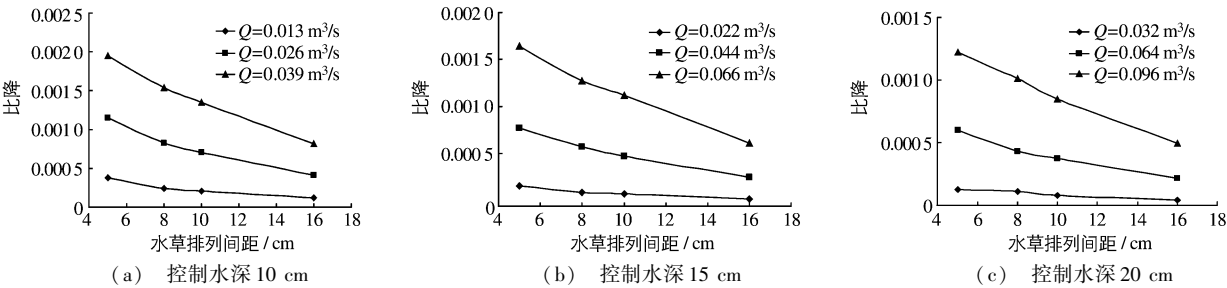


图 2 比降随植物排列间距变化
Fig. 2 Variation in gradient ratio with plant spacing

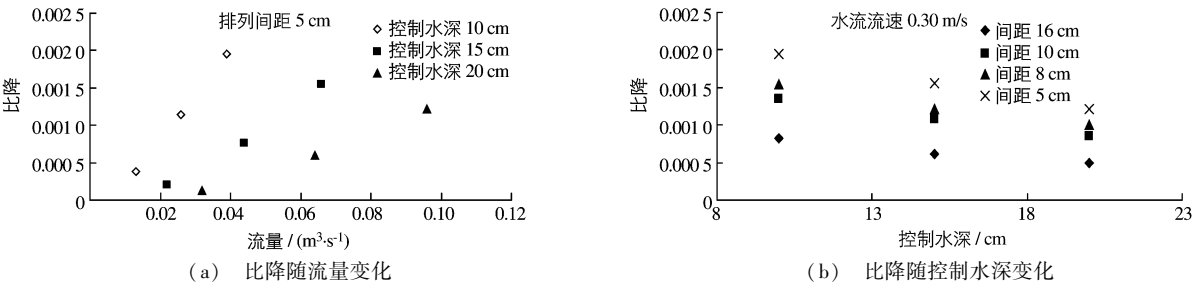


图 3 比降随流量和控制水深变化
Fig. 3 Variation in gradient ratio with discharge and water depth

3 淹没植被对糙率的影响

明渠布置植物后,植物成了水流阻力的关键影响因素之一. 曼宁糙率系数可以直观反映河渠的粗糙程度,因此本文选用曼宁糙率系数反映明渠的阻力情况,曼宁糙率由谢才公式及曼宁公式计算而得.

$$\text{谢才公式:} \quad Q = CA\sqrt{RJ} \quad (1)$$

$$\text{曼宁公式:} \quad C = \frac{1}{n}R^{1/6} \quad (2)$$

$$\text{水力坡降:} \quad J = \left(Z_1 - Z_2 + \frac{V_1^2}{2g} - \frac{V_6^2}{2g} \right) / 20 \quad (3)$$

式中: C 为谢才系数,由曼宁公式计算而得; A 为断面面积,取 $A = (A_1 + A_6)/2$; R 为水力半径,取 $R = (R_1 + R_6)/2$; J 为水力坡降,由伯努利方程计算而得; n 为曼宁糙率系数; Z_1 和 Z_6 分别为 1#和 6#水位站水位; V_1 和 V_6 分别为 1#和 6#水位站处的断面平均流速.

计算得出水槽试验中无植物和不同植物排列间距所对应的曼宁糙率系数见表 3.

表 3 曼宁糙率系数

Tab. 3 Manning roughness coefficients of the flume

流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)	无植物时的 n	有植物时的 n			
		间距 16 cm	间距 10 cm	间距 8 cm	间距 5 cm
0.013	0.011	0.021	0.028	0.030	0.039
0.026	0.011	0.020	0.028	0.031	0.038
0.039	0.011	0.020	0.028	0.031	0.038
0.022	0.010	0.020	0.026	0.027	0.033
0.044	0.012	0.020	0.027	0.030	0.035
0.066	0.011	0.020	0.028	0.031	0.036
0.032	0.011	0.018	0.024	0.029	0.031
0.064	0.011	0.021	0.027	0.029	0.035
0.096	0.011	0.021	0.028	0.031	0.035

3.1 糙率变化特征

从表 3 中可以看出,布置植物后,水槽的糙率系数明显增大,是无植物情况下的 1.71 ~ 3.56 倍. 流量、水深相同的情况下,随着植物排列间距的减小,糙率系数显著增大,当排列间距小于 8 cm 后,水槽的糙率变化幅度略有增大(图 4);在相同的控制水深、相同的植物排列方式下,随着流量增大,水槽内流速也相应增大,但水槽糙率的变化幅度较小(图 4),可见在水深一定的条件下,明渠糙率受水流流速的影响较小.

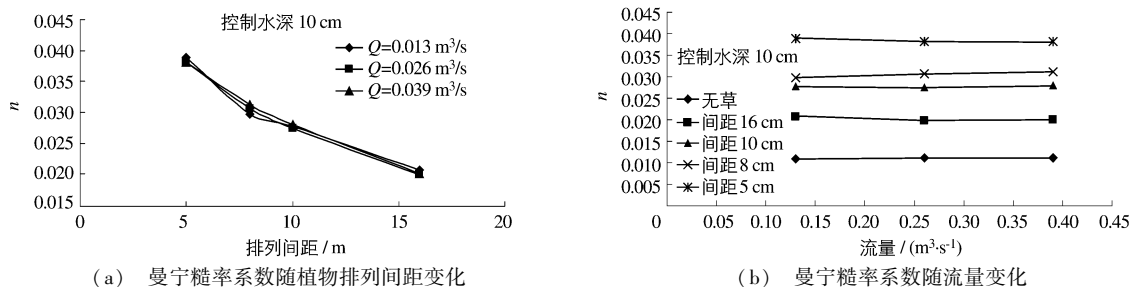


图 4 曼宁糙率系数随植物排列间距和流量的变化

Fig. 4 Variation in Manning coefficients with plant spacing and discharge

3.2 经验公式推导

水槽布置植物后,其糙率主要与水草的间距 L ,水草的平面直径 d ,水草的高度 h ,水深 H ,水流流速 V 等有关,由上述分析可知,糙率受水流流速变化的影响较小,因此,推导糙率公式时去掉流速因素,得出如下关系

$$n = f(L, d, H, h) \quad (4)$$

$$\text{无因次化后为} \quad n = f\left(d/L, \frac{H-h}{H}\right) = c_0 f_1(d/L) f_2\left(\frac{H-h}{H}\right) \quad (5)$$

$$\text{假设} \quad f_1(d/L) = c_1 (d/L)^{m_1} \quad (6)$$

$$f_2\left(\frac{H-h}{H}\right) = c_2 \left(\frac{H-h}{H}\right)^{m_2} \quad (7)$$

将式(6)、(7)代入式(5)后,根据试验资料计算分析得出各参数值,并得出如下方程:

$$n = 0.27 (d/L)^{0.499} \left(\frac{H-h}{H}\right)^{-0.401} \quad (8)$$

由于糙率受水流流速的影响较小,因此将本次试验水深条件相同、沉水植物排列间距相同情况下的糙率值(表3)平均,并与式(8)的糙率计算值进行比较,可得计算值的相对误差为 0.2% ~ 7.7%。

4 结 语

(1)水槽布置植物后,水流阻力加大,植物布置越密集,水槽水位壅高值越大.当植物排列间距小于植物平面直径,即植物相互间贴近或交叉后,水槽的水位壅高值及水面坡降的增大幅度相对较大.说明明渠中的植物在相互贴近或交叉的情况下,对水位的影响相对较大.水深相同的情况下,比降随着流量的增大呈线性增大趋势,并且植物相对高度越大,水面比降增大的幅度越大.水流流速相同的情况下,比降随着植物相对高度的增大而增大,两者呈线性关系.

(2)水流条件相同的情况下,随着植物排列间距的减小,糙率系数显著增大.植物排列间距相同、水深相同的情况下,糙率受水流流速影响较小.本文根据水槽试验资料推导得出含淹没植被明渠的糙率公式可以为估算淹没植被明渠的糙率,以及物理模型试验中滩地糙率的模拟提供参考.

参 考 文 献:

- [1] RIGHETTI M, ARMANINI A. Flow resistance in open channel flows with sparsely distributed bushes[J]. Journal of Hydrology, 2002, 269(1/2): 55-64.
- [2] FAITH-MAGHADAM M, KASHEFIPOUR M, EBRAHIMI N, et al. Physical and numerical modeling of submerged vegetation roughness in rivers and flood plants[J]. Journal of Hydrologic Engineering, 2011, 16(11): 858-864.
- [3] CHENG N S, NGUYEN H T. Hydraulic radius for evaluating resistance induced by simulated emergent vegetation in open-channel flows[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(9): 995-1004.
- [4] SHUCKSMITH J D, BOXALL J B, GUYMER I. Bulk flow resistance in vegetated channels: analysis of momentum balance approaches based on data obtained in aging live vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 137(12): 1624-1635.
- [5] 倪汉根, 顾峰峰. 湿地非淹没芦苇水流阻力的试验研究[J]. 水动力学研究与进展: A 辑, 2005, 20(2): 167-173. (NI Han-gen, GU Feng-feng. Roughness coefficient of non-submerged reed[J]. Journal of Hydrodynamics(Ser A), 2005, 20(2): 167-173. (in Chinese))
- [6] 胡旭跃, 李冬, 曾光明, 等. 植物高度非均匀性对明渠床面糙率影响的试验研究[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2008, 35(6): 67-71. (HU Xu-yue, LI Dong, ZENG Guang-ming, et al. Experimental study on the resistance characteristics of non-uniformity vegetation height in open channels[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2008, 35(6): 67-71. (in Chinese))

- [7] 王忬,王超. 含挺水植物和沉水植物水流紊动特性[J]. 水科学进展, 2010, 21(6): 816-822. (WANG Cun, WANG Chao. Turbulent characteristics in open-channel flow with emergent and submerged macrophytes[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(6): 816-822. (in Chinese))
- [8] 吴福生. 含植物明渠水动力特性研究[D]. 南京:南京水利科学研究院, 2009. (WU Fu-sheng. Dynamic characteristics of open channel flow with vegetation[D]. Nanjing: Nanjing Hydraulic Research Institute, 2009. (in Chinese))
- [9] 槐文信,韩杰,曾玉红,等. 淹没柔性植被明渠恒定水流水力特性的试验研究[J]. 水利学报, 2009, 40(7): 791-797. (HUI Wen-xin, HAN Jie, ZENG Yu-hong, et al. Experimental study on hydraulic behaviors of steady uniform flow in open channel with submerged flexible vegetation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(7): 791-797. (in Chinese))
- [10] 吴福生. 河道漫滩及湿地上淹没柔性植物水流的紊流特性[J]. 水利学报, 2007, 38(11): 1301-1305. (WU Fu-sheng. Turbulent characteristics of flow on floodplains and wetlands with flexible vegetations[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2007, 38(11): 1301-1305. (in Chinese))

Variation characteristics of water level and roughness of an open channel with submerged vegetation

JI Chang-hui, HONG Da-lin, DING Rui, SHEN Xia

(State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China)

Abstract: Variation characteristics of water level and Manning roughness coefficients of an open channel with submerged vegetation are studied with flume experiments under different plant spacing and different flow conditions. An empirical formula for the Manning roughness coefficient of the open channel with submerged vegetation is obtained. The results show that the backwater and surface slope of the open channel increase with the decrease of plant spacing under the conditions of the same discharge and water depth. Influence of the submerged vegetation on the water level and surface slope is relatively larger when plant leaves touch or cross each other. Under the conditions of the same water depth and plant spacing, surface slope presents linear increases with the increase of flow. The influence of flow velocity on roughness of the open channel with the submerged vegetation is little under the same water depth.

Key words: open channel; submerged vegetation; water level; surface slope; Manning roughness coefficient

热烈祝贺《南水北调与水利科技》创刊10周年

欣悉《南水北调与水利科技》创刊十周年,谨此表示热烈祝贺,祝贵刊越办越好!

《南水北调与水利科技》为全国中文核心期刊、中国科技核心期刊、中国科学引文数据库来源期刊,同时被国内外多家检索机构和数据库收录. 期刊主要栏目有:南水北调、水文水资源、生态与环境、数字水利、工程技术、水文地质与工程地质、水土保持、水科学发展论坛等.《南水北调与水利科技》十年耕耘,硕果累累,深受广大水利科技工作者和院校师生欢迎.

《水利水运工程学报》编辑部