

梯形河道护岸糙率及水流紊动特性实验研究

李仟¹, 曾玉红¹, 晏成明²

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉, 430072, E-mail: liqianslsd@whu.edu.cn;

2. 广东水利电力职业技术学院水利工程系, 广州, 510635)

摘要: 河道护岸兼具安全性、景观性、生态性等多种功能, 不同护岸型式会对河道阻力及水流结构产生影响。本研究采用仿真草皮和三棱柱砖块来模拟生态护岸, 通过室内非对称式梯形水槽, 设置了变流量和变底坡工况, 对不同护岸型式下的梯形河道的糙率、流速分布、紊动强度进行了研究。结果表明: 糙率系数值不受流量的影响, 随底坡的增大而增大; 从主河道向边坡方向, 流速垂向分布均符合对数分布规律, 横向分布呈现逐渐减小的特征, 流速的横向梯度受河道底坡和护岸型式影响较大; 在主槽区, 紊动强度沿垂向呈线性递减趋势, 而边坡部分则先增大后减小; 横向上, 紊动能先增加后减小, 在边坡与主槽交界处附近达到最大值, 可见交界处的紊动交换最为强烈。

关键词: 梯形河道; 生态护岸; 糙率系数; 流速分布; 紊动能

1 引言

梯形河道中水流受主槽和护岸的共同影响, 护岸作为水陆交错的过渡地带, 是河流生态系统的重要组成部分。不同的护岸型式, 会改变河道阻力和水流结构, 进而对河道中泥沙输移、水质净化、生物栖息等产生重要影响, 因此, 有必要对河道护岸的水动力特性进行系统的研究。很多研究关注了复式河道的水力特性问题^[1-3], 其中主要针对流速分布和水流紊动特性, 槐文信等^[4]研究了有植被的复式断面河道中的流速分布问题; 杨克君等^[5]分析了复式河槽中植被对水流紊动的影响; 王雯等^[6]针对多级复式断面河道中流速及紊动能分布进行了实验研究。还有不少学者针对河道生态护岸进行了大量的理论研究和探索, 刘丰阳等^[7]进行了不同植被生态护坡现场试验, 论证了护坡植被的减缓水流、抗冲固坡的作用; 蔡婧等^[8]以植草、柴笼、灌丛垫护坡为研究对象, 通过实验研究了 3 种生态护坡对地表径流的延滞拦截作用。本研究将通过实验来研究梯形河道中不同类型护岸的糙率、流速分布及紊动特性, 为生态护岸河道的水流结构、行洪能力、生态修复等研究提供理论依据。

2 实验概况

实验在长 20m，宽 1.2m，深 0.7m 的矩形变坡循环水槽中进行，在水槽进水口段布设稳流装置，确保入流的平稳均匀，在出口段设有栅栏式尾门来控制水深。通过阀门和电磁流量计实现对流量的控制，保证实验过程中流量恒定。在水槽中段选取 12m 作为实验段，布置梯形有机玻璃断面，在梯形边坡上布置仿真草皮和三棱柱砖块来模拟生态护岸，梯形河道横断面结构如图 1(a)所示。实验选取底面为直角三角形的直三棱柱砖块来模拟护岸上的挑流消能结构，该砖的材料为有机玻璃，实验选取两种不同尺寸的砖块粘贴在草皮上，两种砖块的迎水面与护岸面夹角分别为 15° 和 45° ，分别代表护岸 A 和护岸 B，布置形式如图 1(b)所示。在实验段每隔 2 m 设置水位测量断面，通过调节尾门控制水位，当各个断面水深差不超过 1 mm，即可认为水流为均匀流。采用三维超声波多普勒流速仪 (ADV) 对水流的三维流速进行测量，流速测量断面位于实验段 8m 处，此处水流已经得到充分发展达到了稳定状态。测量断面沿横向布置有 9~11 根垂向测线，测线布置形式如下：主槽部分从距边壁 20 cm 处开始，每隔 10 cm 布置一条测线；边坡部分则每隔 5cm 布置一条测线；根据水深不同，每条测线布置 8~11 个测点。针对护岸 A 和 B，设置了多组流量和底坡工况，首先固定底坡为 0.00025，依次选取 3 个流量分别为 45 L/s、60 L/s 和 75 L/s，然后保持恒定流量为 75 L/s，改变底坡分别为 0.00025、0.00050、0.00075、0.0021、0.0024 和 0.007，8 组实验工况分别表示为 A1-A8 和 B1-B8。为了进行对比，针对草皮护岸进行了 3 组实验工况，底坡为 0.00025，流量分别为 45 L/s、60 L/s 和 75 L/s，分别表示为草 1、草 2 和草 3。

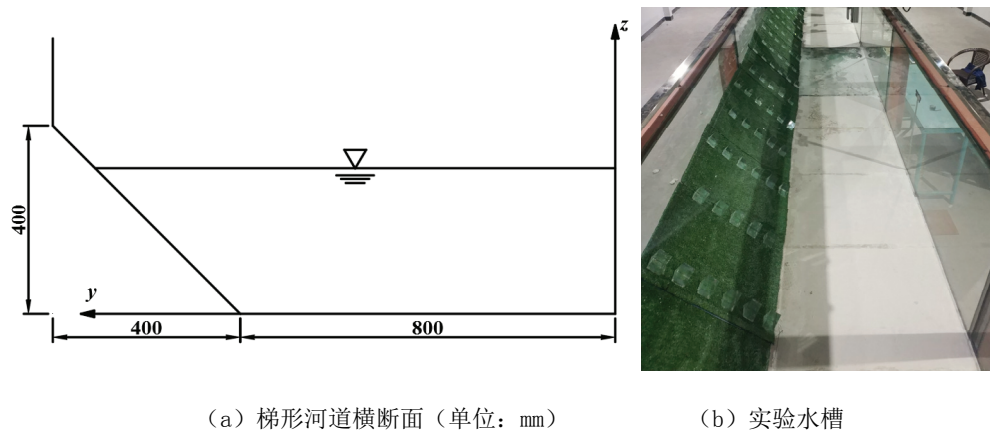


图 1 实验布置

3 结果分析

3.1 糙率系数

糙率系数 n 可由均匀流中 Chezy-Manning 公式得到:

$$n = \frac{1}{U} R^{2/3} i^{1/2} \quad (1)$$

式中, n 为糙率系数; U 为断面平均流速; R 为水力半径; i 为底坡。

当河道底坡固定 (0.00025) 时, 不同护岸情况的糙率与流量的关系如图 2 所示。草皮护岸、护岸 A 和护岸 B 的糙率系数平均值分别为 0.0162、0.0190 和 0.0269, 护岸 A 糙率大于护岸 B, 而仅有草皮的护岸糙率值最小; 同种护岸情况下, 糙率系数几乎不随流量的改变而变化。因此, 可认为河道底坡相同时, 糙率值不受流量的影响。

当流量不变 (75L/s) 时, 护岸 A 和护岸 B 的糙率系数与底坡的关系如图 3 所示。随着底坡的增大, 糙率系数 n 值逐渐增大, 护岸 B 的糙率变化幅度大于护岸 A。实验中各工况的弗汝德数的变化范围在 0.148~0.518, 说明水流均为缓流, 由于实验条件所限, 本文未进行急流工况下的研究。

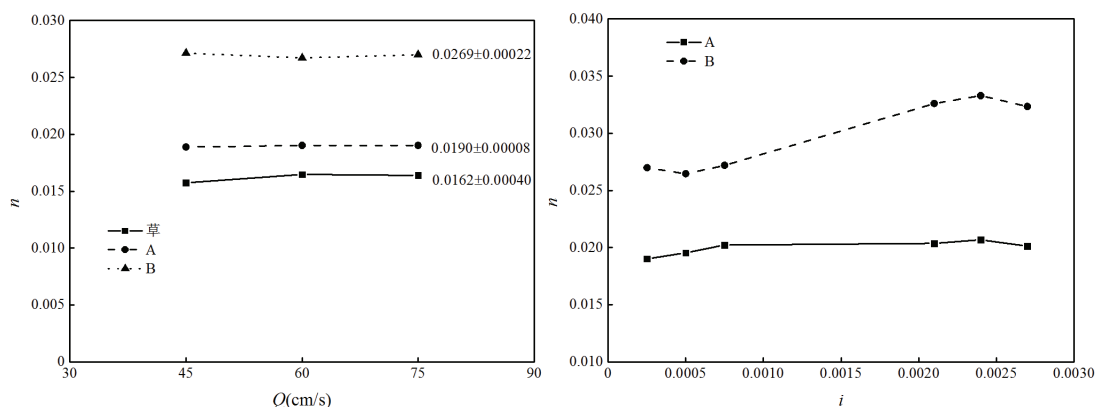


图 2 糙率与流量的关系图 3 糙率与底坡的关系

3.2 流速分布

图 4 给出了草 3、A3 和 B3 三种工况的纵向流速的垂向分布情况, 图 4 中 Hr 为相对高度, $Hr = z_p / H(y)$, z_p 为测点到床面的距离, $H(y)$ 为 y 位置处的水深, u/U 为无量纲流速, u 为纵向流速, U 为断面平均流速, y_1 , y_2 , y_3 为三条典型测线, 分别为主槽中心测线 ($y=40\text{cm}$), 主槽与边坡交界线 ($y=80\text{cm}$) 和边坡内最接近河岸的测线, 分别用来代表主槽区、主槽与边坡交界区和边坡区的流速分布情况。从图 4 中可以看出, 尽管护岸型式和河道糙率不同, 但流速的垂向变化是相似的, 均符合明渠水流典型的对数分布规律。另

外，由主槽向边坡的方向，流速明显呈现出逐渐减小的趋势。

图 5 给出了不同护岸的纵向流速的横向分布情况，图中无量纲流速为各个测线的深度平均流速与断面平均流速的比值。结果表明：由于护岸的阻水减速作用，由主槽向边坡的方向，流速分布呈现出逐渐减小的特征。由 A1 与 A3、B1 与 B3 的对比可以看出，在底坡不变的情况下，改变流量对流速的横向梯度影响不大。通过比较 A3、A5 和 A8 以及 B3、B5 和 B8 发现，流量不变的情况下，随着底坡的增大，流速分布的横向梯度明显增大，即河道底坡较大时，纵向流速的横向不均匀性加强，流速由主槽向边坡减小得更快。由于护岸 B 的糙率系数更大，阻水效果更强，使得在相同底坡和流量情况下，护岸 B 的横向流速梯度明显大于护岸 A，说明梯形河道横向流速分布受护岸型式及其阻水特性影响较大。

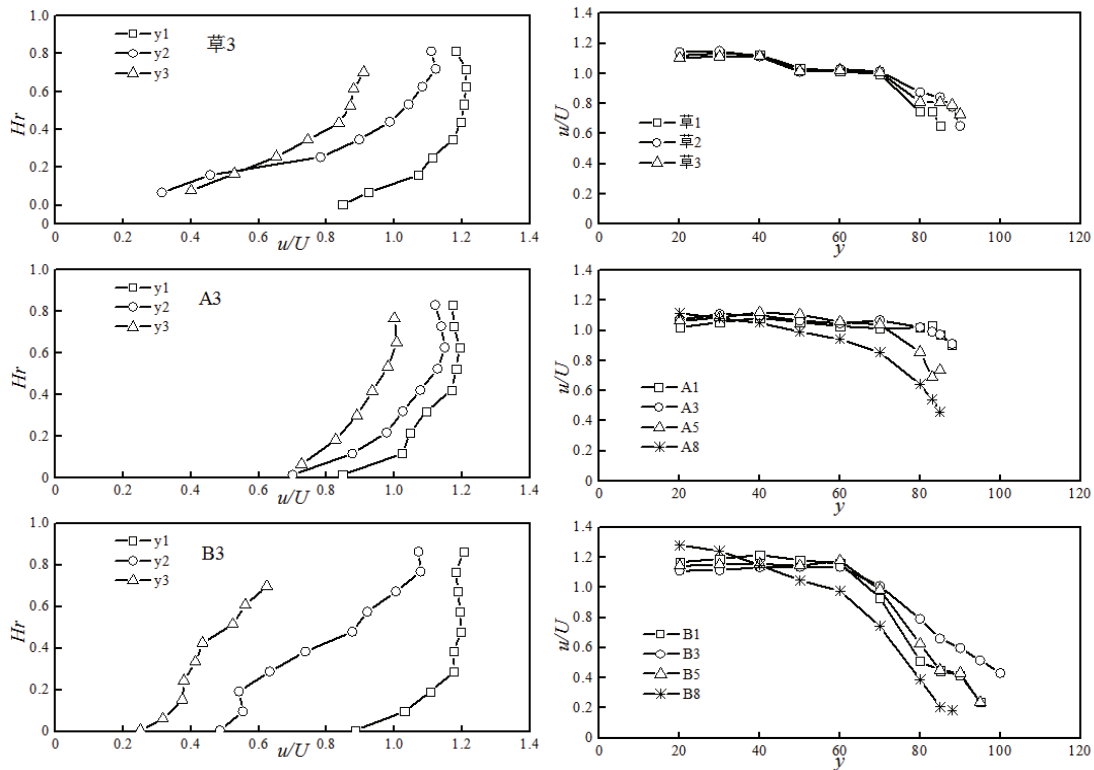


图 4 不同护岸的流速垂向分布

图 5 流速横向分布

3.3 紊动特性

采用相对紊动强度来分析水流的紊动特性：

$$\sigma_i = \sqrt{u_i'^2} / U \quad (2)$$

图 6 为主槽部分 (y1)、主槽与边坡交界处 (y2)、边坡部分 (y3) 的纵向相对紊动强度的垂向分布情况。从图 6 可以看出，在主槽区域，紊动强度沿垂向呈线性递减趋势，而

在边坡部分及主槽与边坡交界处，紊动强度沿垂向先增大后减小，近似为“>”形分布，不再遵循线性分布。另外可以发现，边坡部分紊动强度值大于主槽部分，而在两者交界处紊动强度值最大，说明交界处紊动交换最为强烈。

综合考虑水体三维脉动特性，用紊动能 T 来表征水流紊动的强弱：

$$T = 0.5(\overline{u_x'^2} + \overline{u_y'^2} + \overline{u_z'^2}) \quad (3)$$

紊动能横向分布情况如图 7 所示。图 7 中采用 U^2 对各个测线的深度平均紊动能进行无量纲化处理。可以看出，从主槽向边坡方向，紊动能先增加后减小，在边坡与主槽交界处附近达到最大值，可见交界处的紊动交换最为强烈。另外，不同护岸型式对紊动能横向变化的影响不同，护岸 B 紊动能明显大于护岸 A，说明了护岸 B 的阻水减速效果更强。

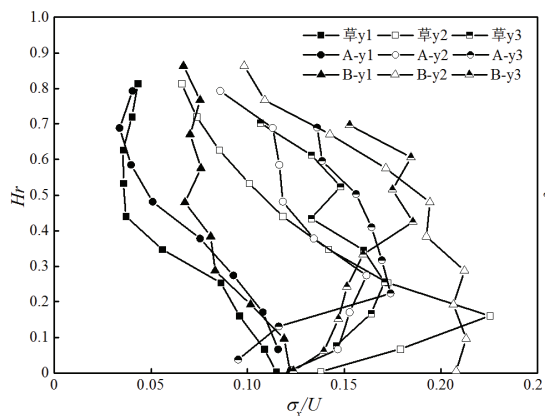


图 6 相对紊动强度

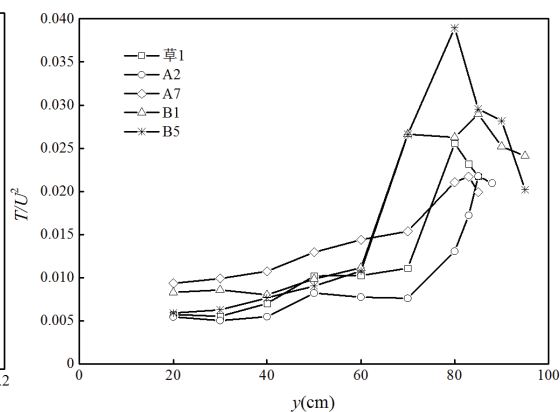


图 7 紊动能横向分布

4 结论

本研究在实验室水槽中模拟 3 种型式的生态护岸，并对其糙率、流速分布和紊动特性进行了研究。结果表明：同种护岸情况下，糙率系数值不受流量的影响，但在缓流情况下，糙率系数值会随底坡的增大而增大。不同型式护岸的流速垂向分布均符合对数分布规律；由主槽向边坡的方向，流速分布呈现出逐渐减小的趋势；流速的横向梯度受流量影响较小，但受河道底坡和护岸型式及其阻水特性影响较大。在主槽区域，紊动强度沿垂向呈线性递减趋势，而在边坡部分及主槽与边坡交界处，紊动强度沿垂向先增大后减小；从主槽向边坡方向，紊动能先增加后减小，在边坡与主槽交界处附近达到最大值，可见交界处的紊动交换最为强烈。

参 考 文 献

- 1 Huai W, Xu Z, Yang Z, et al. Two dimensional analytical solution for a partially vegetated compound channel flow [J]. Applied Mathematics and Mechanics(English Edition), 2008, 29(8): 1077.
- 2 Koziol A P. Three-dimensional turbulence intensity in a compound channel [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2013, 139(8): 852-864.
- 3 Liu C, Luo X, Liu X, et al. Modeling depth-averaged velocity and bed shear stress in compound channels with emergent and submerged vegetation [J]. Advances in Water Resources, 2013, 60: 148-159.
- 4 槐文信,秦明初,徐治钢,等.滩地植被化的复式断面明渠均匀流的流速比[J].华中科技大学学报(自然科学版),2008(07):67-69.
- 5 杨克君,刘兴年,曹叔尤,等.植被作用下的复式河槽漫滩水流紊动特性[J].水利学报,2005(10):1263-1268.
- 6 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.
- 7 刘丰阳,刘林双,王家生,等.荆江河段不同植被生态护坡的水流试验及应用[J].水运工程,2018(09):9-14+37.
- 8 蔡婧,李小平,陈小华.河道生态护坡对地表径流的污染控制[J].环境科学学报,2008,28(7):1326-1334.

Experimental study on roughness coefficient and turbulence structure of open channel flow with trapezoidal revetment

LI Qian¹, ZENG Yu-hong^{1,2}, YAN Cheng-ming²

- (1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan University, Wuhan, 430072. E-mail: liqianslsd@whu.edu.cn; 2. Department of Hydraulic Engineering, Guangdong Polytechnic of Water Resources and Electric Engineering, Guangzhou, 510635.)

Abstract: Ecological revetment has been widely applied because of it is safe, environmental and ecological friendly, diverse type river revetment can make different channel resistance and flow structure. In this study, the artificial turf and triangular prism brick were adopted to imitate ecological revetment, the experiments were conducted in an asymmetric trapezoidal flume with different flow rate and bed slope, the roughness coefficient, velocity distribution and turbulence structure of open channel flow with different trapezoidal revetment through laboratory experiments were investigated. The results showed that, the roughness coefficient increases with

bed slope while unaffected by flow rate; the vertical distribution of streamwise velocity conforms to the logarithmic profile, the streamwise velocity decreases from the main channel to the side slope, and the different bed slope and revetment type exert an obvious impact on the lateral distribution gradient of velocity; In the main channel, the turbulence intensity monotonically decreases from the channel bed in the vertical direction, while in the side slope increases first then decreases; In the lateral direction, the turbulent kinetic energy first increases with coordinate y , reaches a maximum value at the junction of the side slope and the main channel, then decreases with coordinate y , indicates that the turbulent exchange is strongest at the junction area.

Key words: Trapezoidal channel; Ecological revetment; Roughness coefficient; Velocity distribution; Turbulent kinetic energy.