

长江南京八卦洲河段流速垂向分布特性研究

姜 果¹, 娄 丹², 赵 钢¹, 朱 昊¹, 周亚娟³

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 2. 南京国环科技股份有限公司, 江苏 南京 210000;
3. 南京齐源建设工程有限公司, 江苏 南京 211302)

摘要:根据长江南京八卦洲洲头右缘 ADCP 实测水流流速数据,对河段流速垂向分布特征进行研究,结果表明:八卦洲洲头右缘附近流速垂线分布符合指数型分布规律,指数取值范围为 $1/12 \sim 1/6$ 。通过不同水深处实测数据与计算结果的拟合效果对比可知,水深越大,流速的垂向分布与指数型分布的拟合程度越好。研究结果可为八卦洲洲头附近的演变趋势及工程整治研究提供参考。

关键词:八卦洲河段; 流速垂向分布; 指数型分布

中图分类号:TV122 文献标识码:B 文章编号:1007-7839(2021)S2-0019-04

Study on the characteristics of vertical distribution of flow velocity in the Baguazhou reach of the Yangtze River in Nanjing

JIANG Guo¹, LOU Dan², ZHAO Gang¹, ZHU Hao¹, ZHOU Yajuan³

(1. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China;
2. Nanjing Guohuan Technology Co., Ltd., Nanjing 210000, China;
3. Nanjing Qiyuan Construction Engineering Co., Ltd., Nanjing 211302, China)

Abstract: Based on the ADCP data of flow velocity measured at the right edge of the head of Baguazhou of the Yangtze River in Nanjing, the characteristics of vertical distribution of flow velocity are studied. The results show that the vertical distribution of flow velocity near the right edge of Baguazhou head of the Yangtze River accords with the exponential distribution, and the index value ranges from $1/12$ to $1/6$. By comparing the fitting effect of measured data and calculated results in different water depths, it can be seen that the greater the depth of water, the better the fitting degree of vertical distribution and exponential distribution of flow velocity. The results can be used as references for the study of the evolution trend and the engineering renovation of the head of Baguazhou.

Key words: Baguazhou reach; vertical distribution of flow velocity; exponential distribution

长江南京八卦洲河段上起下关,下至西坝,全长 18.8 km,为鹅头型分叉河道,其中右汊为主汊,左汊为支汊。

八卦洲左汊由于水流流程长、阻力大,河道淤积严重,分流比减小,严重影响左汊两岸沿江企业

及港口设施的正常运行。八卦洲右汊内有 4 个深槽近岸段,分别是洲头右缘、燕子矶、天河口、新生圩,受深槽逼岸影响,岸线容易发生崩退,威胁防洪安全。因此八卦洲河段的演变趋势及治理问题一直备受关注。侯卫国等^[1]根据多年水文地形资料,

收稿日期:2021-09-11

基金项目:江苏省水利科技项目(2018005,2019001);江苏省科技厅创新能力建设计划-省属公益类科研院所自主科研经费项目(BM2018028)

作者简介:姜果(1990—),女,工程师,硕士,主要从事河湖治理方面研究工作。E-mail:1842183814@qq.com

分析了河段近期演变特点及演变趋势,并采用数学模型对不同治理方案的效果进行了模拟。燕京等^[2]结合汉道水沙特性,根据数值模拟结果,论述了实施洲头鱼嘴向上游延伸整治工程的必要性。陈陆平等^[3]同样采用数值模拟的方法,研究了八卦洲右汉潜坝对改善左汉分流比的效果。李铭华等^[4]对八卦洲洲头右缘深槽岸坡治理中的沙袋防护设计与施工进行了研究,总结了复杂流态下沙袋抛投的施工工艺。由于目前八卦洲汉道河势总体演变特征为八卦洲头崩退,左汉河型趋弯、淤积,右汉深槽发育,因此八卦洲河段将长期面临工程治理的问题。对于长江中下游江心洲分汊河道,为保证汊道进口有很好的水流条件和河床平面形态,控制其不同水位下具有较稳定的分流比,必须对江心洲洲头进行防护,洲头护岸成为河势控制工程的组成部分。因此洲头水流条件对进行洲头治理研究是不可或缺的。而对于天然河道,不同位置阻力特性及水流紊动特性不同,因此流速分布特性也不相同^[4]。流速分布是研究河道泥沙运动及河床演变的基础,无论对数值模型建立或是沙袋、块石等抛投施工而言,都是非常重要的参数。因此本文利用 ADCP(声学多普勒流速剖面仪)对八卦洲洲头右缘不同测点的流速剖面进行测量,分析八卦洲洲头右缘的流速垂向分布特征,结果可供借鉴。

1 现场流速测量

2019 年 9 月 11 日采用 ADCP 流速剖面仪对洪水期八卦洲洲头右缘不同位置处的流速垂线分布进行了现场监测,测验时间为 13:00 ~ 14:00,同期南京下关潮位 4.70 ~ 4.78 m。本次测量采用的 ADCP 流速剖面仪,测量深度范围为 0.2 ~ 80 m,最小水深分层厚度为 0.001 m,流速分辨率为 0.001 m/s,配置有多频率换能器,可自动转换测量单元大小、工作频率、采样频率和工作模式,以最优化的系统配置和最佳分辨率精确完成从浅水到深水的断面流速测量。为获取各测点时均流速的垂线分布,采用船载式测流方式,将船体锚定测流。

流速断面图如图 1 所示,可以反映具有不同水深的每个单元的深度和水平速度,还可以反映河床底部的波动以及上、下盲区的位置,图中上、下空白区为上下盲区。

2 数据分析方法

在 ADCP 测流过程中,由于外界环境的干扰,测

量结果可能会出现较大误差,因此需要先进行预处理,再进行系统误差修正和数据处理,保证测量精度^[5]。ADCP 单次获取的垂线流速为瞬时的紊动流速。测量时船载 ADCP 流速仪每秒记录 1 次各水深处的瞬时流速,为了获得时均速度分布,需要对测量时间内获取的多组瞬时速度进行算数平均。不同水深处的时均流速值计算式为

$$\bar{u}_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n u_{i,j} \quad (1)$$

式中: \bar{u}_i 为水深分层为第 i 层的水流时均流速; n 为测量时间内瞬时流速的测次; $u_{i,j}$ 为第 i 层水深处第 j 测次的瞬时流速。

瞬时流速标准差 σ_i 计算式为

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (\bar{u}_i - u_{i,j})^2} \quad (2)$$

每个监测点监测时间为 3 min,每秒获取 1 次监测点不同水深处的流速数据。以水深为 35 m 处的测点为例,水深分层厚度设置为 2 m,共分成 18 个单元,但由于在水面及近河床区域存在一定的测量盲区,因此实际有效水深单元为 15 个,该测点不同水深单元处的瞬时流速见表 1。根据式(1)、式(2)计算得出的不同水深处的时均流速和标准差见表 2,标准差均在 5% 以内。可见采用各水深处的时均流速进行水流流速垂向分布特征分析是可行的。

3 流速垂向分布规律理论分析

天然河道紊流时均流速主要有对数型、抛物线型、二次抛物线型等多种型式的流速分布计算公式,其中对数型和指数型分布公式应用相对较多。对数流速分布公式最先由 Prandtl 根据动量传递理论得到,但仅适用于均匀流。随后,Kedegan 在明渠水流运动中引入了平板边界层的理论研究,提出了明渠流动中的断面流速的对数分布^[6]。随着对流速公式中的系数 k 、 B 取值范围的研究,对数流速分布公式更为完整,能够更好地符合实测数据。对数型流速分布公式为

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left(\frac{yu_*}{\nu} \right) + B \quad (3)$$

式中: y 为到河底的距离; u 为 y 处的流速; u_* 为水流摩阻流速; ν 为运动黏滞系数; k 为卡门常数。

指数分布的一般形式为

$$\frac{u}{u_{\max}} = \left(\frac{y}{h} \right)^m \quad (4)$$

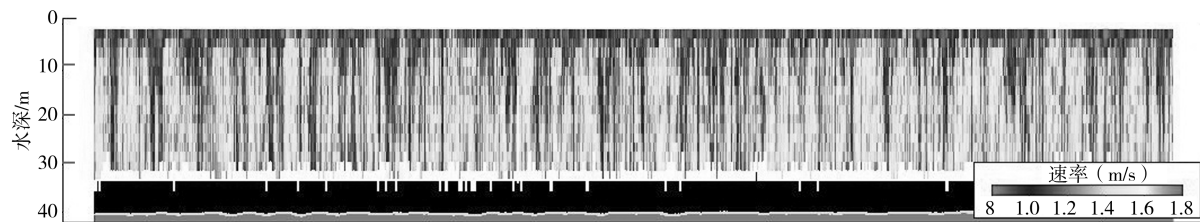


图 1 固定测点流速测量

表 1 测点各层水深瞬时流速 (单位:m/s)

水深单元 采样	1	2	3	.....	13	14	15
1	1.446	1.448	1.433	.....	1.432	1.396	1.208
2	1.468	1.459	1.406	.....	1.383	1.252	1.28
3	1.454	1.467	1.335	.....	1.308	1.351	1.327
4	1.437	1.453	1.296	.....	1.397	1.383	1.243
5	1.392	1.438	1.371	.....	1.427	1.407	1.299
.....
178	1.347	1.430	1.535	.....	1.342	1.261	1.216
179	1.456	1.413	1.486	.....	1.285	1.239	1.198
180	1.503	1.382	1.434	.....	1.337	1.311	1.225

表 2 各水深单元流速均值与标准差

水深单元	均值 / (m · s ⁻¹)	标准差/%
1	1.45	3.4
2	1.44	2.9
3	1.43	3.5
4	1.42	4.0
5	1.41	3.7
6	1.41	2.6
7	1.39	3.3
8	1.40	3.8
9	1.39	3.6
10	1.39	3.3
11	1.38	3.4
12	1.35	4.2
13	1.33	4.5
14	1.32	4.4
15	1.20	4.6

式中: u 为距床面高度为 y 处的流速, h 为水深, u_{\max} 为 $y=h$ 处的最大流速, m 为指数。

将流速 u 沿垂线积分,可得垂线平均流速 \bar{u} 为

$$\bar{u} = \frac{u_{\max}}{h} \int_0^h \left(\frac{y}{h} \right)^m dy = \frac{u_{\max}}{1+m} \tag{5}$$

$$u_{\max} = (1+m)\bar{u} \tag{6}$$

若已知垂线各点实测流速值,则相应 y 处的 m 值的计算式为

$$m = \frac{\ln \frac{u}{u_{\max}}}{\ln \frac{y}{h}} \tag{7}$$

4 测点垂线流速分布特征

将 8 个固定测点流速实测数据与指数型和对数型公式计算结果进行对比,2 种分布形式计算结果的均方差、纳什效率系数见表 3。结果表明,指数型分布均方差最小,纳什效率系数最接近 1。表明八卦洲洲头右缘附近的水流流速垂线分布与指数分布拟合度较好,更接近指数分布形式。

表 3 不同流速分布规律比较

测点	指数		对数	
	均方差	纳什效率系数	均方差	纳什效率系数
1	0.039	0.82	0.06	0.50
2	0.042	0.73	0.15	0.36
3	0.046	0.69	0.09	0.46
4	0.033	0.8	0.08	0.47
5	0.026	0.91	0.11	0.4
6	0.035	0.82	0.08	0.46
7	0.045	0.68	0.15	0.36
8	0.036	0.81	0.12	0.39

八卦洲洲头右缘水流流速垂向分布呈指数型分布,经计算指数 m 的取值范围为 $1/12 \sim 1/6$ 。根据不同水深处的流速分布对比可知,水深越大,流速垂向分布拟合程度相对越好。根据惠遇甲等^[7]相关研究,长江水流流速分布指数取值范围为 $1/12 \sim 1/6$,本次试验结果与经验值接近。

5 结 语

本文通过现场流速测量的方法,对八卦洲洲头右缘流速的垂线分布特征进行研究,发现长江八卦洲洲头右缘不同水深测点的垂向流速分布实测数

据与指数型流速分布公式的计算结果误差较小,纳什效率系数均接近于 1,总体拟合度较好,表明洲头右缘附近的流速服从指数分布。各测点流速垂向分布对应的指数 m 取值不同,经计算 m 的取值范围为 $1/12 \sim 1/6$ 。根据不同水深处的流速分布对比可知,水深越大,流速垂向分布拟合程度相对越好。

参考文献:

- [1] 侯卫国,胡春燕,谢作涛. 长江南京八卦洲河段演变分析及治理对策探讨[J]. 人民长江, 2011, 42(7): 39-42.
- [2] 燕京,徐锡荣,蔡文娟. 长江八卦洲汉道水沙特性与治理[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2010, 38(3):313-316.
- [3] 李铭华,严彬,朱相丞,等. 复杂流态下长江深槽岸坡沙袋防护设计与施工[J]. 水运工程, 2020(10): 198-202.
- [4] 卢金友,詹义正,赵根生,等. 河道中受侧壁影响的断面流速分布规律研究[J]. 水利学报, 2012, 43(6):645-652.
- [5] 周丽. ADCP 中剖面流速数据处理及误差控制[D]. 南京:东南大学, 2015.
- [6] 付辉,杨开林,王涛,等. 对数型流速分布公式的参数敏感性取值[J]. 水利学报, 2013, 44(4):489-494.
- [7] 惠遇甲. 长江黄河垂线流速和含沙量分布规律[J]. 水利学报, 1996(2):11-17.

(上接第 3 页)

5 结 语

2021 年是中国共产党成立 100 周年,站在“两个一百年”奋斗目标的历史交汇点上,我们要继续牢记“在改革创新、推动高质量发展上争当表率,在

服务全国构建新发展格局上争做示范,在率先实现社会主义现代化上走在前列”的重大使命,全面推进长江治理高质量发展,为谱写“强富美高”新江苏建设现代化篇章做出新的贡献。