



基于三维水动力模型的砂枕漂距预测研究*

侯悦^{1,2}, 马剑波³, 朱昊¹, 李士军⁴, 朱慧³

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏 南京 210017; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210024;
3. 江苏省秦淮河水利工程管理处, 江苏 南京 210022; 4. 泗洪县水利局, 江苏 宿迁 223999)

摘要: 砂枕是抛投护岸的新材料, 具有结构稳定、工程造价低等优点。以往仅采用传统的抛投经验公式, 每次抛前均需测量水深和流速, 较少使用模型模拟三维流场, 耗费人力物力。为提高施工效率, 通过垂线分层流速分析, 结合 Mike3 水动力模型和砂枕漂距公式, 分别采用六层法和十一层法进行砂枕漂距预测, 结果表明十一层法更精准。

关键词: 抛投护岸; 垂线分层流速; 水动力模型; 三维流场; 砂枕漂距

中图分类号: U65; TV8

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)12-0087-07

Prediction of drift distance of sand pillow based on three-dimensional hydrodynamic model

HOU Yue^{1,2}, MA Jianbo³, ZHU Hao¹, LI Shijun⁴, ZHU Hui³

(1. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China;
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210024, China;
3. Jiangsu Qinhuai River Water Conservancy Project Management Office, Nanjing 210022, China;
4. Sihong County Water Conservancy Bureau, Suqian 223999, China)

Abstract: Sand pillow is a new material for throwing to protect banks, which has the advantages of stable structure and low construction cost. Previously used traditional throwing empirical formula requires the measurement of the water depth and velocity data before each throwing, with few models used to simulate the three-dimensional flow field, which consumes manpower and material resources. In order to improve construction efficiency, this paper uses the six-layer method and the eleven-layer method to predict the drift distance of the sand pillow respectively in combination with the Mike3 hydrodynamic model and the drift distance formula of the sand pillow by analyzing the vertical stratified flow velocity, and the paper finds that the eleven-layer method is more precise.

Keywords: throwing for bank protection; vertical stratified flow velocity; hydrodynamic model; three-dimensional flow field; drift distance of sand pillow

砂枕主要由单层聚丙烯圆筒编织布扎制, 其内部充填砂浆, 具有良好的柔韧性。砂枕的漂距是指砂枕从入水到稳定落在河床的过程中因水流作用而产生的水平距离, 它与水流速度、水深、砂枕质量等因子有关。其中, 流速是砂枕产生水平运动的主要原因, 因此需考虑天然河道中水流

的垂线流速分布对砂枕漂距的影响, 提高预测结果的精准性。Mike 是专业水流模拟系统, 适用于湖泊、河口的水动力及其相关现象的三维仿真模拟, 以及复杂条件下的水流计算, 具有强大的分析功能^[1-3], 可计算水体交换的时间, 分析影响河口水体交换时间的因素^[4]; 研究水流运动较复杂

收稿日期: 2023-03-01

*基金项目: 江苏省水利科技项目 (2020007); 江苏省水利科技项目 (2021063); 江苏省水利科技项目 (2021074)

作者简介: 侯悦 (1996—), 女, 硕士, 从事水利工程研究工作。

的区域^[5]；较好地模拟研究区域水动力场变化过程^[6]。由于将 Mike 水动力模型应用于河流动力学，对水流模拟效果较好^[7-9]，因此选用 Mike3 计算垂线分层流速和水深，从而推求砂枕漂距。

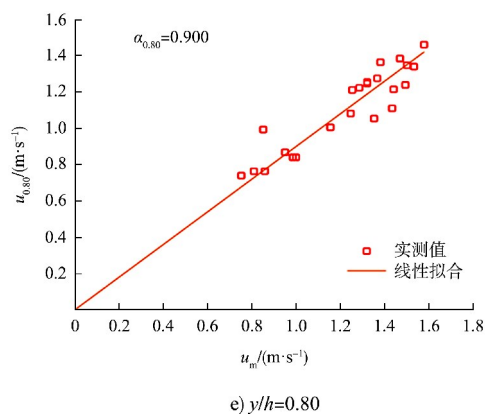
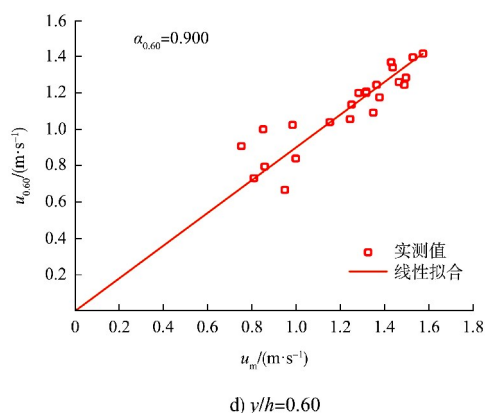
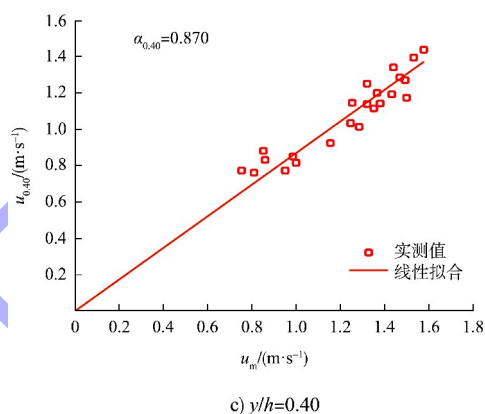
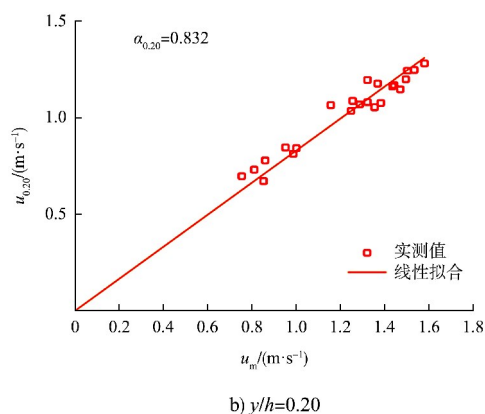
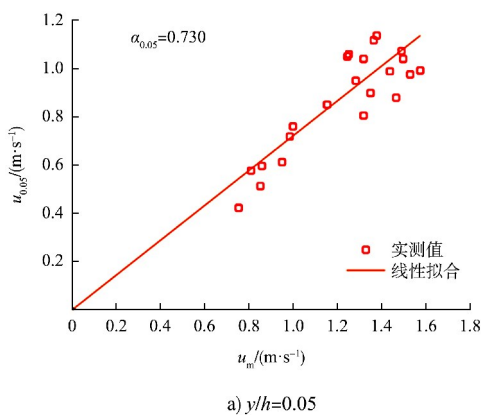
1 垂线分层流速

河道中流速沿垂线的分布规律是研究河床动力学问题的关键。惠遇甲^[10]指出垂线流速分布可以用指数流速分布公式和对数流速分布公式表示；周家俞等^[11]提出了新的指数型流速分布公式。长江口河段水流的垂线流速分布规律较复杂，鞠俊等^[12]认为动量交换强烈的区域，垂向流速接近 S 形分布，可按不同水深进行分层。

八卦洲右缘深槽地形复杂，河床呈两端深、中间浅的格局，中间浅部地区总体上存在较高的沉积倾向，洲头区域水深流急，主流转向频繁，水流流态复杂，流场空间分布多变，普通的简单曲线较难拟合，因此采用将垂线流速分层的方法，分别对垂向的 6 个点进行拟合，分析各层流速分布规律。通过线性内插法推求相对水深 y/h 分别为 0.05、0.20、0.40、0.60、0.80、0.99 处各点的垂线流速，并按 y/h 值的大小分组 (y 为河底到各点的距离)，建立 $u_h - u_m$ 关系。不同层水深处流速与水面流速的关系见图 1，从散点分布看，二者线性相关。采用最小二乘法按式 (1) 进行拟合如下：

$$u_h = \alpha_h u_m \quad (1)$$

式中： u_h 为不同层水深处流速； u_m 为水面流速； α_h 为拟合系数。



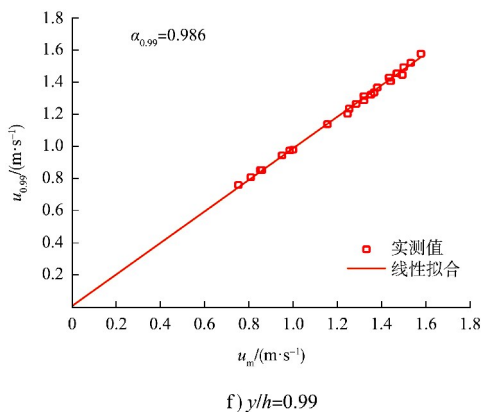


图 1 不同条件下各点流速与水面流速拟合关系

从天然河道水流的垂线流速分布着手, 将水流进行垂线分层, 根据各层拟合的流速与水面流速的关系, 可推出各层流速分布公式如下:

$$\begin{cases} u_{0.99} = 0.986u_m \\ u_{0.80} = 0.900u_m \\ u_{0.60} = 0.900u_m \\ u_{0.40} = 0.870u_m \\ u_{0.20} = 0.832u_m \\ u_{0.05} = 0.730u_m \end{cases} \quad (2)$$

已知任意一点水面流速的情况, 可根据式(2)求出 u_h , 计算各层的流速, 推求流速垂线分布, 但过于繁琐, 而 Mike3 水动力模型恰好能契合水流分层要求, 模拟三维流场, 在工程应用中极其方便。

2 模型建立与验证

三汊河—镇江站河段为模型的模拟河段, 模型计算范围总面积约 152.9 km², 主河道全长约 85.1 km。本次建立 Mike3 水动力模型, 采用六层法和十一层法进行流场模拟。

2.1 模型网格划分

数学模型采用 2018 年实测南京河段和镇扬河段 1:10 000 的地形资料, 平面坐标系采用北京 1954 投影坐标系。根据河道地形和水流特性, 水平方向对模型区域进行非结构化网格划分, 垂向采用 sigma 相对分层模式。陆地边界(包括岛屿)的网格控制边长均为 200 m; 研究区(砂枕抛投试验区域及附近岸线)网格控制边长为 100 m,

网格单元共 15 187 个, 网格节点总数为 8 541 个, 最大网格面积为 3.4 万 m²。试验区网格划分较细, 最大面积不超过 0.8 万 m², 与其他区域的网格过渡自然。试验区附近局部地形网格见图 2。

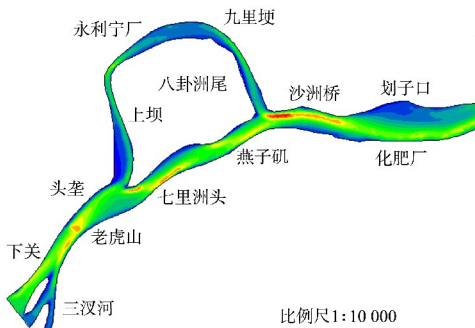


图 2 研究区域位置

2.2 模型验证

模型采用 2019-08-01—2019-09-14 共 45 d 的实测潮位和流速资料进行参数率定及验证, 验证时间大于 1 d, 满足精度要求。其中, 流速校正和验证分别使用垂线平均流速和垂线分层流速, 当使用垂线平均流速进行参数率定时, 需要根据五点法垂线平均流速公式将测出的分层流速转化为平均流速(声学多普勒流速剖面仪 ADCP 测出的是垂线分层流速)。Mike3 水动力模块主要参数见表 1。

表 1 Mike3 水动力模型主要参数

| 最小时间 步长/s | 最大时间 步长/s | 临界 CFL 值 | 干湿 水深/m | 涡黏 系数 | 糙率高度/ m |
|--------------|--------------|-------------|-----------------------|----------|------------|
| 0.01 | 864 | 0.8 | 0.005、0.050、 0.100 | 0.28 | 0.06 |

2.3 模拟结果分析

由于砂枕抛投时间是 2019-09-11—2019-09-14, 因此只需提取这 4 d 的数据用于漂距预测。模型采用二维输出和三维输出模块相结合的方法, 二维输出模块模拟水深、垂线平均流速, 三维模块模拟垂线分层流速。模拟八卦洲右缘深槽抛投试验区域各抛投位置见表 2, 相应的水深见图 3。

由图 3 可知, 这 4 d 的水深变化趋势大致相同; 同一时段, 各抛投点的水深略有不同。

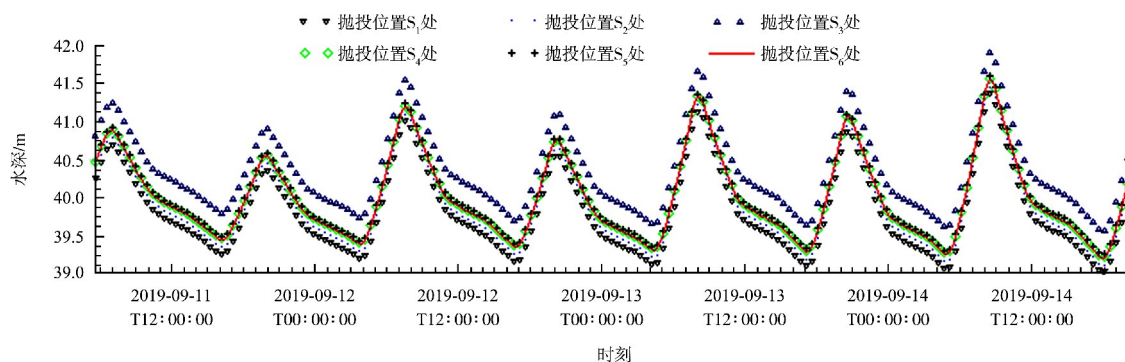


图3 试验期各个砂枕抛投点的水深模拟值

表2 砂枕抛投位置坐标

| 序号 | 抛投时间 | 抛枕质量/t | 起抛点坐标 | 砂袋落点坐标 |
|----------------|----------|--------|--------------------------------|--------------------------------|
| S ₁ | 07:53:00 | 12.960 | X=3 557 972.65 Y=384 825.23 | X=3 557 981.27 Y=384 851.81 |
| S ₂ | 08:37:00 | 12.720 | X=3 557 972.03 Y=384 823.93 | X=3 557 978.55 Y=384 848.29 |
| S ₃ | 09:14:00 | 12.880 | X=3 557 969.64 Y=384 824.47 | X=3 557 976.70 Y=384 848.19 |
| S ₄ | 09:50:00 | 12.800 | X=3 557 971.48 Y=384 824.69 | X=3 557 978.44 Y=384 848.08 |
| S ₅ | 10:29:00 | 12.960 | X=3 557 971.48 Y=384 825.99 | X=3 557 976.92 Y=384 848.30 |
| S ₆ | 10:52:00 | 12.760 | X=3 557 971.16 Y=384 820.23 | X=3 557 977.24 Y=384 842.20 |

由于 ADCP 测量垂向各层流速, 而 Mike3 水动力模型也计算垂向分层流速, 因此以 Mike3 计算的流速数据取代 ADCP 测量的流速数据可行。以下采用分层法计算流速, 精准推求砂枕漂距。

2.3.1 六层法

根据已拟合的垂线分层流速公式, 采用六层法, 使用模型将水流垂向从下往上进行分层, 厚度分别为 $0.05h$ 、 $0.15h$ 、 $0.2h$ 、 $0.2h$ 、 $0.2h$ 、 $0.2h$ 时, 每层顶部对应河流的相对水深 y/h 分别为 0.05 、 0.20 、 0.40 、 0.60 、 0.80 、 1.00 (相对水深近似为 0.99)。本次选用 1 个抛投位置作为模拟流速的代表点, 展示垂向第 3、4 层流速和平均流速的关系 (图 4)。

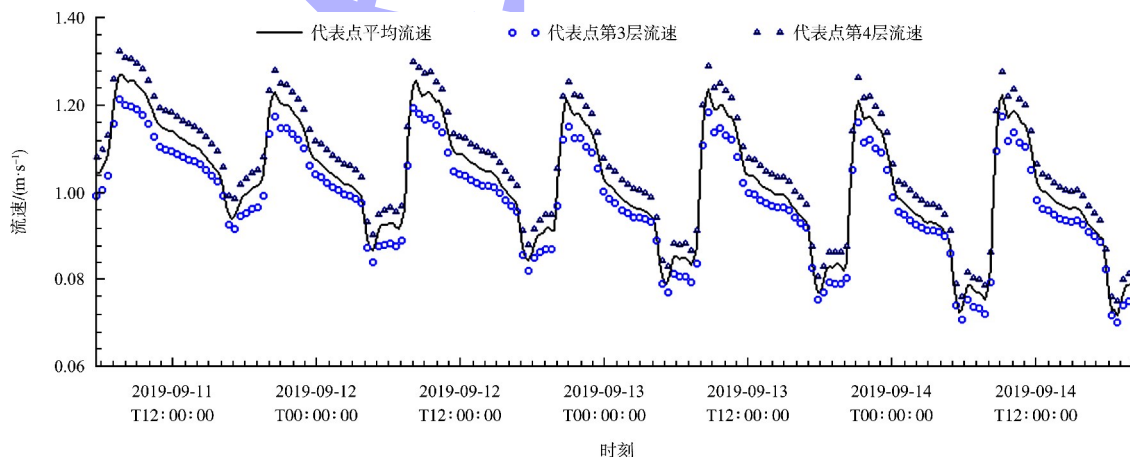


图4 代表点垂向第 3、4 层流速和平均流速拟合

由图 4 可知, 平均流速介于第 3、4 层流速之间, 通过一点法平均流速计算公式 $v = u_{0.6h}$ 分析可知, 平均流速应等于第 3、4 层流速的平均值 (图 5), 经验证, 通过代表点计算得到的垂向第 3、4 层流速的平均值与平均流速值非常接近, 因此可直接

将第 3、4 层流速的平均值视为垂线平均流速进行漂距预测。

通过建立三维水动力模型, 可以精准计算表层流速、底层流速和垂线平均流速, 推求抛投落距, 对砂枕的水下落点进行精准定位。

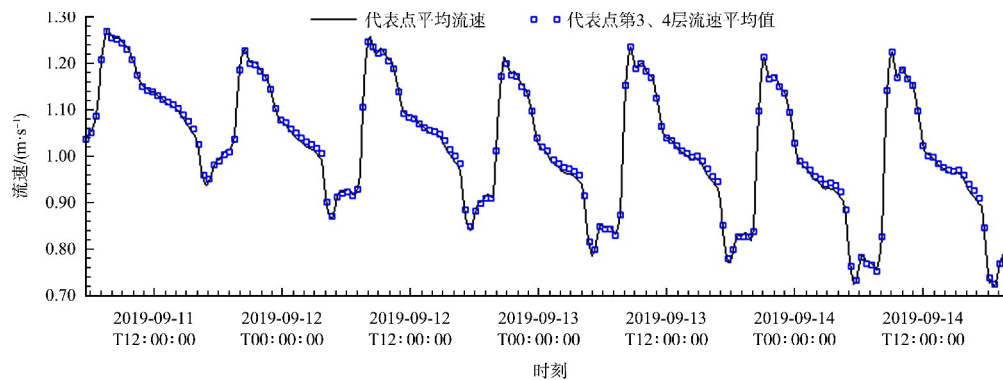


图 5 代表点垂向第 3、4 层流速平均值与平均流速拟合

2.3.2 十一层法

在垂向六层分法中,由于分层较粗糙,第 6 层厚度较大,因此表层流速可能略小于实际表面流速,直接将表层流速视作表面流速进行砂枕漂距预测,得出的结果较好,但略有偏差,为达到精准要求,现将水流垂向分为十一层。

十一层法是将模型垂向从下往上划分厚度分别为 $0.05h$ 、 $0.1h$ 、 $0.1h$ 、 $0.1h$ 、 $0.1h$ 、 $0.1h$ 、 $0.1h$ 、 $0.1h$ 、 $0.1h$ 、 $0.1h$ 、 $0.05h$,每层顶部对应

河流的相对水深 y/h 分别为 0.05 、 0.15 、 0.25 、 0.35 、 0.45 、 0.55 、 0.65 、 0.75 、 0.85 、 0.95 、 1.00 。根据一点法流速计算公式可知垂线平均流速应与第 5 层流速较接近(垂线第 5 层流速的范围是距水面 $0.55h \sim 0.65h$,距水面 $0.60h$ 的位置恰好在第 5 层流速中间)。此外,由于十一层法与六层法的水深和流向变化趋势几乎相同,因此只需分析代表点的垂向第 5 层流速和平均流速拟合(图 6)以及底层流速和表层流速对比(图 7)。

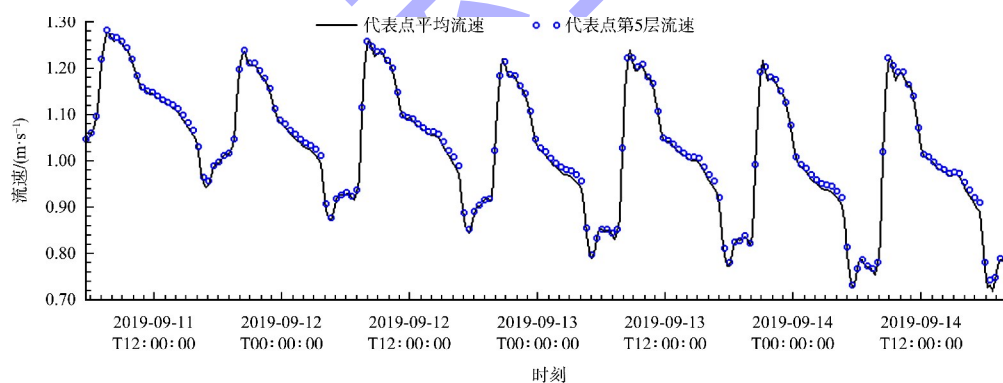


图 6 代表点垂向第 5 层流速和平均流速拟合

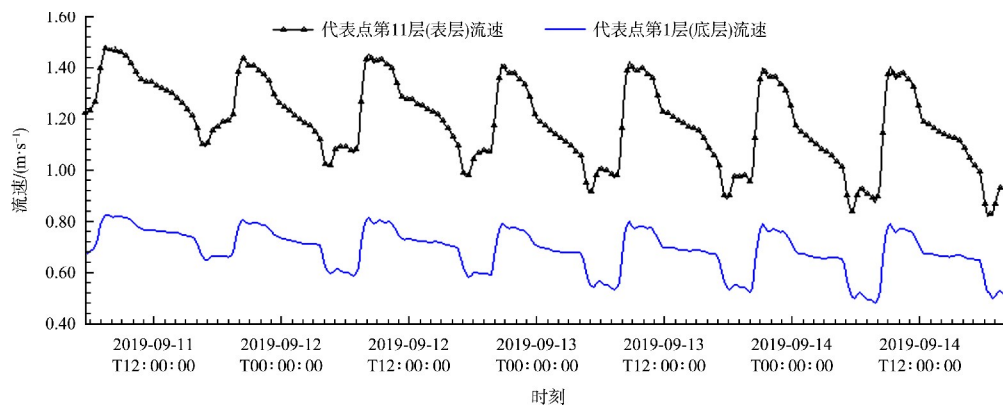


图 7 代表点表层流速和底层流速对比

经验证,在十一层分法中第5层流速值与平均流速值非常接近。由图7可知,底层流速与表层流速相差较大,而流速是砂枕漂移的主要驱动力,对砂枕漂距的影响尤为显著,因此在漂距计算中有必要使用垂线分层流速。

3 计算结果

为保证分层法模拟流场结果的可靠性,借助综合系数法漂距公式(3),对几个抛投点进行漂距计算及验证。分别绘出3个误差带,颜色由深至浅,代表的相对误差分别为5%、10%、15%。

$$X_T = \frac{hv}{\omega} - \frac{1}{k} \ln \left[1 + k(1+m) \frac{hv}{\omega} \right] + \left(u_d + \frac{q}{D} \right) T_c + \frac{1}{k_c p D} \ln \frac{1+D}{1+D \exp(2pqT_c) + 1} \quad (3)$$

$$p = \frac{C_{Dd} k_1 \pi d_1 + 4C_{Ll} f L_1}{k_1 \pi (2a_{rs} + 3) d_1 L_1} \quad (4)$$

$$\text{其中: } a_{rs} = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (5)$$

$$q = \sqrt{\frac{2k_1 \pi f a_{rs} g d_1 L_1}{C_{Dd} k_1 \pi d_1 + 4C_{Ll} f L_1}} \quad (6)$$

$$D = \frac{q + u_d - u_{s0}}{q - u_d + u_{s0}} \quad (7)$$

式中: X_T 为砂枕漂距; ω 为砂枕的下沉速度; v 为垂线平均流速; h 为水深; k 为综合系数; m 为流速指数; T_c 为稳定历时; C_{Dd} 为床面上水流推移力系数; d_1 、 d_2 分别为砂枕的高度(短轴)和宽度(长轴); L_1 为砂枕的长度; k_1 为将整个砂袋截面当成椭圆形面计算时的折减系数; C_{Ll} 为床面上举力的阻力系数; f 为砂枕在水下的摩擦系数; g 为重力加速度; k_c 为修正系数; T_c 为砂枕从触碰床面到稳定的总历时; u_d 为水流对砂枕的作用流速(临界状态 $u_d = q$); u_{s0} 为砂枕与床面碰撞后的运动速度; ρ_s 为砂枕的密度; ρ 为长江下游水体的密度。

3.1 六层法

分别使用第3、4层流速的平均值和垂线平均

流速,进行砂枕漂距预测,见图8。由图可知,当使用综合系数法漂距公式时,垂线平均流速和第3、4层流速的平均值,两种平均流速模拟方法得出的砂枕漂距预测结果均与实测结果较接近,相对误差在15%以内。

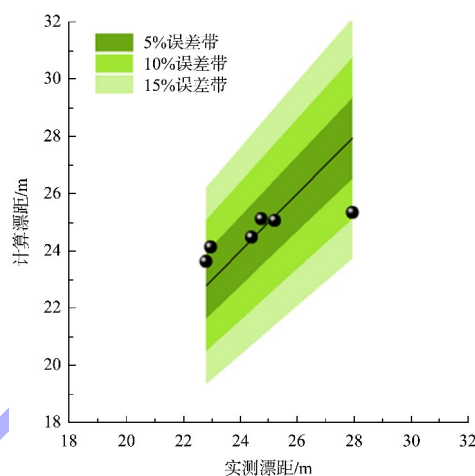


图8 第3、4层平均流速下砂枕漂距验证

3.2 十一层法

将垂向第5层流速视为垂线平均流速进行砂枕落距预测,见图9。由图可知,基于垂向平均流速或第5层流速的砂枕漂距预测方法所得出的结果均接近实测值,且相对误差均小于15%。

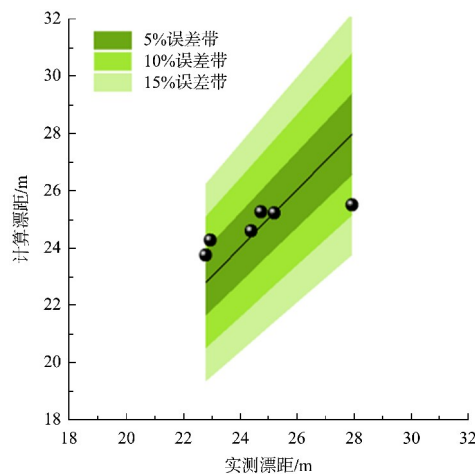


图9 第5层流速的砂枕漂距验证

由图10可知,在综合系数法漂距公式中,使用六层法和十一层法模拟的流场用于漂距预测结果相差不大。

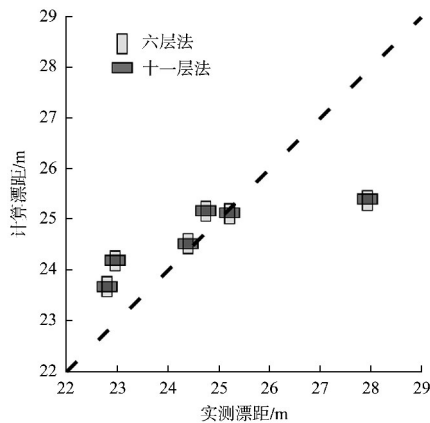


图 10 基于综合系数法漂距公式的计算结果对比

3.3 两种分层方法对比分析

为进一步分析六层法与十一层法的优劣,依据表 3 可知,使用综合系数法漂距公式时,六层法的相对误差为 0.40%~9.16%,十一层法的相对误差为 0.32%~9.06%,可见,十一层法的相对误差范围较六层法略小。综上,六层法分层简单,但是模拟的水面流速与水底流速不够精准;十一层法分层较为繁杂,但是模拟出的流速数据更精准。通过相对误差分析可知,十一层法更利于砂枕抛投水下精准定位。

表 3 基于综合系数法漂距公式的砂枕漂距计算结果误差

| 序号 | 实测值/ m | 六层法的漂距 计算值/m | 相对 误差/% | 十一层法的 漂距计算值/m | 相对 误差/% |
|----------------|-----------|-----------------|------------|------------------|------------|
| S ₁ | 27.94 | 25.38 | 9.16 | 25.41 | 9.06 |
| S ₂ | 25.22 | 25.12 | 0.40 | 25.14 | 0.32 |
| S ₃ | 24.75 | 25.17 | 1.70 | 25.18 | 1.74 |
| S ₄ | 24.40 | 24.53 | 0.53 | 24.53 | 0.53 |
| S ₅ | 22.96 | 24.19 | 5.36 | 24.20 | 5.40 |
| S ₆ | 22.80 | 23.68 | 3.86 | 23.68 | 3.86 |

4 结语

1) 流速是砂枕产生水平运动的主要原因,然而天然河道中水流的垂向流速分布又是不均匀的,借助 Mike3 水动力模型,可以模拟三维流场,计算抛投位置的垂向各层流速,不仅能够很好地克服 ADCP 测流时会有盲区的状况,还能减少使用测流工具的频率,减少人力物力的浪费。

2) 基于三维水动力模型,分析试验区的三维流场,模拟抛投点的水深、垂线平均流速、垂线分层流速数据,结合砂枕漂距公式,计算

砂枕漂距,经验证,该模型能够用于模拟抛投区域的水流运动规律,进行砂枕抛投的水下精准定位。

3) Mike3 水动力模型模拟的表层流速与表面流速较接近,可视为表面流速。相比于六层法,十一层法的垂向分层更为精细,表层流速与底层流速更接近实际流速值,且第 5 层流速可直接视为垂线平均流速,便于计算。因此,当使用水动力模型模拟三维流场时,可根据实际需要,调节表层、底层和其他层的厚度,厚度越小,流速值则越能够精准描述水下某一位置的水流状况。

参考文献:

- [1] 张晓雷,吴新宇,王恩. MIKE3 在小浪底坝区水沙运动模拟中的应用[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 73-78.
- [2] 于洋. 明渠弯道水流泥沙运动的三维数值模拟研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2018.
- [3] 师于杰. 基于 MIKE3 流场模型的河流上游明渠弯道水流三维数值模拟研究[J]. 水利科技与经济, 2021, 27(6): 83-86.
- [4] 黄少彬,李开明,姜国强,等. 基于 MIKE3 模型的珠江口水体交换研究[J]. 环境科学与管理, 2013, 38(8): 134-140.
- [5] 刘鑫,李春光,兰斌,等. 基于 MIKE3 的黄河宁夏四排口河段水动力模拟[J]. 人民珠江, 2020, 41(7): 33-38.
- [6] 刘江,胡云玲,姜亮亮,等. 利用 MIKE3 软件研究风场对赛里木湖水动力场的影响[J]. 新疆环境保护, 2015, 37(4): 29-33.
- [7] ZAMANI B, KOCH M. Comparison between two hydrodynamic models in simulating physical processes of a reservoir with complex morphology: Maroon reservoir[J]. Water, 2020, 12(3): 814.
- [8] KHOIRUNNISA H, WIBOWO M, GUMBIRA G, et al. Numerical modeling of the effects of reclamation and proposed infrastructures on thermal dispersion of power plant wastewater at PLTGU Muara Karang, Jakarta Bay[J]. IOP Conference Series (Earth and Environmental Science), 2021, 832(1): 12043.

(下转第 117 页)