

基于原位试验的砂枕水下漂移规律研究^{*}

王茂枚¹, 侯 悅¹, 王宏伟², 张子鹏³, 朱 昊¹

(1. 江苏省水利科学研究院, 江苏南京 210017; 2. 江苏省水利信息中心, 江苏南京 210004;
3. 南京水务建设工程有限公司, 江苏徐州 210003)

摘要: 砂枕自水面抛投后, 受重力和水流的推移力作用, 在下沉的过程中, 会产生顺水流方向的落距。砂枕落入河底后还会具有一定的速度, 若这个速度大于砂枕的止动流速, 那么砂枕还会继续运动, 而砂枕自触碰床面后发生的移动距离为稳定移距(二次漂距)。根据砂枕在动水中的漂移规律进行试验, 结合垂线流速分布规律, 通过3种漂距计算方法得到砂枕水下漂移到着床稳定全过程的漂移距离计算公式, 并进行对比分析。结果表明, 当河流的垂线流速为指数型流速分布时, 使用惯性力法和综合系数法推导出的漂距公式适用性较好。

关键词: 河道治理; 垂线流速; 砂枕落距; 二次漂距

中图分类号: U614; TV85

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)11-0030-07

Underwater drift rule of sand pillow based on in-situ test

WANG Maomei¹, HOU Yue¹, WANG Hongwei², ZHANG Zipeng³, ZHU Hao¹

(1. Jiangsu Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China;
2. Information Center of Jiangsu Water Resources, Nanjing 210004, China;
3. Nanjing Water Construction Engineering Co., Ltd., Nanjing 210003, China)

Abstract: After the sand pillow is thrown from the water surface, it will have a drift distance in the direction of the water flow during the sinking process under the action of gravity and water flow. The sand pillow will still have a certain speed after falling into the river bottom, if the speed is greater than the stopping velocity of the sand pillow, the sand pillow will continue to move, and the movement distance after the sand pillow touching the bed surface is a stable displacement (secondary drift distance). According to the drift rule of sand pillow in dynamic water, combined with the vertical velocity distribution rule, the drift distance calculation formula of sand pillow in the whole process from underwater drift to landing stability is obtained through three drift distance calculation methods, and the comparative analysis is carried out. The results show that when the vertical velocity of the river is exponential velocity distribution, the drift distance formulas derived by using the inertial force method and the comprehensive coefficient method have good applicability.

Keywords: riverway regulation; vertical velocity; falling distance of sand pillow; secondary drift distance

长江中下游干流河道河岸抗冲性较差, 水流冲刷力强, 崩岸险情时有发生, 抛石护岸一直是长江中下游的主要护岸形式, 但近年来因块石资源短缺、开采难等原因, 砂枕应运而生。由于砂

枕在水下能形成抗冲实体, 且经济环保、施工方便, 成为一种新的受青睐的抛投施工工艺, 得到广泛应用^[1-2]。为降低砂枕抛投的损失量, 减少工程投资, 须在抛前预测砂枕的漂距, 进行精准抛

收稿日期: 2023-03-01

*基金项目: 江苏省水利科技项目(2020007、2021034、2021063)

作者简介: 王茂枚(1983—), 男, 博士, 正高级工程师, 从事河湖治理与保护方面的研究。

投。韩海骞等^[3]在钱塘江河口闻家堰段护底抛体研究中, 假设抛体在下落、漂移的过程保持匀速运动, 未考虑天然河道垂线流速分布对漂距的影响; 应强等^[4]通过水槽试验, 建立砂袋落距的微分方程, 同时结合和畅洲左汊砂袋的现场抛投试验结果以及实际施工中实测的资料, 采用垂线平均流速, 推导出砂袋落距的表达式, 但是未考虑到砂枕触碰到床面后还会继续向前移动。李寿千等^[5]在扬中河段开展抛石原位试验, 推导出涨潮、落潮下的抛体漂距公式, 但是也没有计算抛体的二次漂距。本文通过原位试验的方法, 结合天然河道水流的垂线流速分布状况, 考虑砂枕在水底第二阶段的位移, 推导出更具科学性和可靠性的砂枕漂距公式, 为实现砂枕抛投水下精准定位提供理论依据。

1 试验区概况

本文以长南京段八卦洲为研究区域, 八卦洲河段鹅头分汊型河道, 右汊为主流, 左汊为支汊。抛投试验区为深槽区(图 1), 施工区域高程为-41~ -5 m, 按照从上游向下游、从底部到顶部的顺序施工, 根据船舱尺寸将施工区域划分为边长为 30 m 的正方形区格, 准确定位, 定量抛投。



图 1 八卦洲抛投试验区

砂袋设计尺寸为直径 1.2 m、长 10 m, 充盈率基本满足设计要求的 70%。试验采用开体驳抛投工艺, 砂枕充填完成后, 缓缓打开舱体, 江水逐渐进入舱体内, 待舱体完全打开后, 砂枕全部落入水中, 记录抛投位置实时的水深、水位数据,

抛投前后使用多波束测深系统进行水下地形测量。

由于八卦洲水况复杂, 几种流向同时出现, 流态极为紊乱, 砂枕的落床位置变化较大, 故抛投前分别进行 3 组控制变量试验, 掌握砂枕的漂移规律。

2 砂枕漂移规律

通过 3 组控制变量试验分析漂距变化的规律:

- 1) 水深为 32 m, 流速为 1.00 m/s, 砂枕质量分别为 12.72、12.76、12.80、12.96 t;
 - 2) 流速为 1.00 m/s, 砂枕质量为 12.96 t, 水深分别为 30、33、35、40 m;
 - 3) 水深为 32 m, 砂枕质量为 12.96 t, 流速分别为 0.677、0.820、1.000、1.200 m/s。
- 砂枕漂距影响因素关系见图 2。

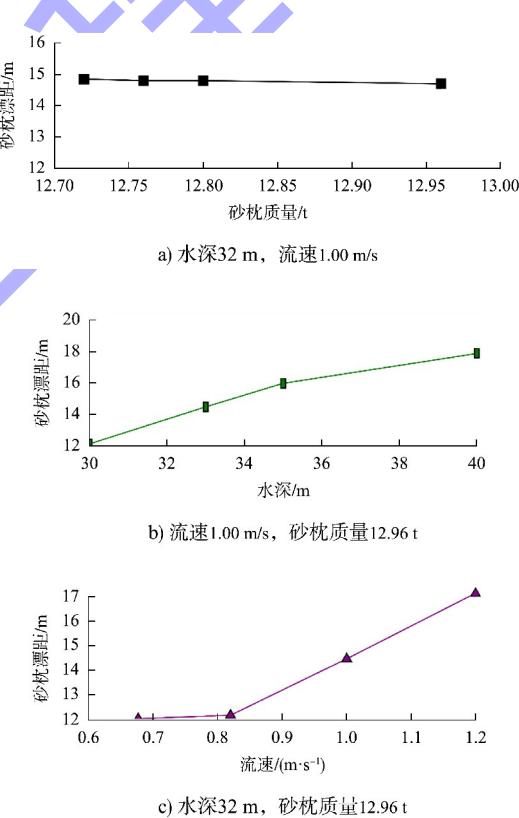


图 2 砂枕漂距与各影响因素关系曲线

由图 2a)可知, 砂枕质量对砂枕漂距的影响较小。当水深和流速相同时, 砂枕漂距大小与砂枕质量呈反比, 砂枕质量越大, 砂枕漂距越小。由图 2b)可知, 水深对砂枕漂距的影响较明显。当水流速度和砂枕质量相同时, 砂枕漂距大小与水深呈正比, 水深越大, 砂枕漂距越大。由图 2c)可知, 水流速度对砂枕漂距的影响明显。当水深和

砂枕质量相同时，砂枕漂距大小与水流速度呈正比，流速越大，砂枕漂距越大。

综上可知，水深、流速是影响砂枕漂距大小的主要因素，而砂枕质量对砂枕漂距的影响居于次要地位。

3 垂线流速分布

Coles^[6]提出表面区尾流函数，对对数分布进行修正；惠遇甲^[7]分析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^[8]提出新的指数型流速分布公式；刘春晶等^[9]认为含尾流函数的对数流速公式可以比全水深对数公式更精准地描述明渠均匀流的流速分布，但在工程中可采用全水深的对数公式；鞠俊等^[10]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。本文结合以往的研究成果，使用最小二乘法进行拟合，发现八卦洲试验区垂向流速呈指数型流速分布。根据实测的垂线流速数据，相对水深 y/h 为 0.05、0.20、0.40、0.60、0.80、0.99 处的流速 $u_{y/h}$ 与水面流速 u_m 的拟合关系式分别为 $u_{0.05} = 0.73u_m$ 、 $u_{0.2} = 0.832u_m$ 、 $u_{0.4} = 0.87u_m$ 、 $u_{0.6} = 0.90u_m$ 、 $u_{0.8} = 0.90u_m$ 、 $u_{0.99} = 0.986u_m$ ，故拟合出的垂线平均流速公式为：

$$v = \frac{\int_0^h u dy}{h} = 0.858u_m \quad (1)$$

式中： v 为垂线平均流速，m/s； h 为水深，m； y 为任一水深处到河底的距离，m； u 为各点瞬时流速，m/s； u_m 为水面流速，m/s。

4 砂枕的漂距公式研究

砂枕的漂距为移距和二次漂距之和。有试验表明，抛体在接近槽底前有急促下沉的情况，当抛体相对密度较大时，急促下沉的情况尤为明显，这在一定程度上说明砂枕的水平运动速度也是变化的，与垂线流速分布有关，故应考虑垂线流速分布对砂枕漂距的影响。结合梁润^[11]和詹义正等^[12-13]的抛体漂距公式研究成果，采用 3 种方法推导砂枕的漂距公式。

4.1 砂枕移距公式

通过原位试验，结合动力平衡方程，采用不同的角度，推导出 3 种砂枕漂距公式：1) 基本公式法是采用物体水平位移的基本公式，假定砂枕始终保持匀速下沉，因为砂枕的重力加速度较大，入水后能迅速达到均匀沉降，所以此方法可行；2) 惯性力法是根据砂枕在不同水深处受到的水平推移力是变化的，所以水平方向是一个变加速运动的过程，结合因变加速而产生的惯性力，考虑到虚质量力的影响，最终推导出砂枕在动水中的漂距公式；3) 综合系数法是结合水流速度垂向分布的实际情况，根据砂枕的物理特征，推出综合系数 k 和砂枕漂距公式。

4.1.1 基本公式法

在不受盐水影响的河口区，根据窦国仁^[14]的泥沙颗粒沉速计算公式：

$$\omega = \sqrt{\frac{4}{3} \frac{1}{c_f} \frac{\rho_s - \rho}{\rho} gd} \quad (2)$$

式中： c_f 为泥沙颗粒的阻力系数； d 为砂枕的粒径，m； ρ 为水密度，kg/m³； ρ_s 为砂枕密度，kg/m³。经计算可知，阻力系数接近常值，为简化计算，取 $c_f = 1.2$ 。故式(2)可简化为：

$$\omega = 1.054 \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho} gd} \quad (3)$$

假定砂枕在垂向始终保持为匀速下沉，则下落时间 $t = h/\omega$ ，砂枕水平方向的移距 $x_d = vt$ ，采用平均流速的方法推出砂枕的移距公式为：

$$x_d = 1.122vh/m^{1/6} \quad (4)$$

式中： m 为砂枕质量，kg。

4.1.2 惯性力法

由于砂枕的当量直径 d_s 较大，有效雷诺数较大，有效推力系数 C_D 受形状影响较明显，为提高精度，需要对待定参数 N_1 做出调整，公式为：

$$N_1 = 0.45 \left(\frac{S_m}{S_a} \right)^\alpha \left(\frac{c}{\sqrt{ab}} \right)^\beta = 0.45 \left(\frac{S_m}{S_a} \right)^\alpha \left(\frac{d_1}{\sqrt{L_1 d_2}} \right)^\beta \quad (5)$$

式中： α 、 β 为待定常数，由实测资料确定，根据潘庆燊等^[15]的长方体试验资料可取 $\alpha = 6$ 、 $\beta = -3/2$ ；

a 、 b 、 c 分别为抛体的长、中、短轴长, m ; S_m 为砂枕外接六面体的表面积, m^2 ; S_a 为同体积的球体表面积, m^2 ; d_1 、 d_2 分别为砂枕的高度(短轴)、宽度(长轴), m ; L_1 为砂枕的长度, m 。

考虑到砂枕入水后, 在水平方向受到水流的推移力, 坚直方向受到重力作用, 在运动过程中因变加速运动还会产生惯性力, 通过调整 N_1 , 将球状抛石的漂距公式应用于砂枕的漂距计算, 结合前面已求出沉速公式, 可推出砂枕在动水中的的移距方程为:

$$x_d = \frac{hv}{\omega} + \frac{1}{C_0} \ln \frac{1-A_0}{1-A_0 \exp(-B_0 \frac{h}{\omega})} \quad (6)$$

$$A_0 = \frac{C_0 u_m}{B_0 + C_0 u_m} \quad (7)$$

$$B_0 = \frac{M_1 \nu}{2 \left(\frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{2} \right) d_s L_1} \quad (8)$$

$$C_0 = \frac{N_1}{2 \left(\frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{2} \right) L_1} \quad (9)$$

式中: M_1 为待定参数, ν 为黏滞系数, d_s 为砂枕的当量直径。

4.1.3 综合系数法

有试验研究表明抛体在水中的下沉速度可看作等速下沉, 因此假定砂枕在动水中匀速下沉。砂枕下沉总历时 $T = h/\omega$, 则砂枕在动水中运动时间公式为:

$$t = (h-y)/\omega = T \left(1 - \frac{y}{h} \right) \quad (10)$$

根据砂枕在动水中的动力平衡方程, 结合初始条件 $t=0$ 、 $x=0$, 可求得:

$$x = \frac{hv}{\omega} \left[1 - \left(1 - \frac{t}{T} \right)^{m+1} \right] - \frac{1}{k} \ln [1+k(1+m)vt] \quad (11)$$

当 $t=T$ 时, 砂枕落到床面, 可求得砂枕移距公式为:

$$x_d = \frac{hv}{\omega} - \frac{1}{k} \ln \left[1 + k(1+m) \frac{hv}{\omega} \right] \quad (12)$$

式中: m 为流速指数, 取 0.109。

已知水流条件和砂枕的物理特征, 可推出相应的综合系数 k 的公式为:

$$k = C_0 \left[1 - B_0 T \ln \frac{1-A_0}{1-A_0 \exp(-B_0 t)} \right] \quad (13)$$

4.2 二次漂距及漂距公式

4.2.1 二次漂距公式

由于砂枕与床面碰撞后, 不仅会受到床面水流的推移作用, 还会受到前期运动的惯性作用影响, 具有一定的初速度, 继续向前运动, 此时须考虑砂枕的二次漂距。砂枕主要受水流的推移作用力、砂枕作变加速运动的惯性力和砂枕沿床面运动的摩擦力综合作用。

水流的推移作用力公式为:

$$F_1 = C_{Dd} k_1 \frac{\pi}{4} \rho d_1 d_2 \left(u_d - \frac{dx}{dt} \right)^2 / 2 \quad (14)$$

式中: C_{Dd} 为在床面上水流推移力系数; u_d 为水流对砂枕的作用流速, m/s ; k_1 为砂枕的折减系数。

砂枕做变加速运动的惯性力公式为:

$$F_2 = k_1 \frac{\pi}{4} \left(\frac{\rho_s}{\rho} + \frac{1}{2} \right) \rho d_1 d_2 L_1 \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (15)$$

砂枕沿床面运动的摩擦力公式为:

$$F_3 = \left[k_1 \frac{\pi}{4} (\rho_s - \rho) g d_1 d_2 L_1 - C_L \rho d_2 L_1 \left(u_d - \frac{dx}{dt} \right)^2 / 2 \right] f \quad (16)$$

式中: C_L 为床面上举力的阻力系数, 取 0.18; f 为砂枕在水下的摩擦系数, 取 0.94。由此可推出砂枕沿床面运动的平衡方程为:

$$\frac{du_R}{dt} = \frac{C_{Dd} k_1 \pi d_1 + 4 C_L f L_1}{k_1 \pi (2a_{rs} + 3) d_1 L_1} \left[\frac{2k_1 \pi f a_{rs} g d_1 L_1}{C_{Dd} k_1 \pi d_1 + 4 C_L f L_1} - u_R^2 \right] = p (q^2 - u_R^2) \quad (17)$$

$$u_R = u_d - \frac{dx}{dt} \quad (18)$$

$$a_{rs} = \frac{\rho_s - \rho}{\rho} \quad (19)$$

其中:

$$p = \frac{C_{Dd} k_1 \pi d_1 + 4 C_L f L_1}{k_1 \pi (2a_{rs} + 3) d_1 L_1} \quad (20)$$

$$q = \sqrt{\frac{2k_1 \pi f a_{rs} g d_1 L_1}{C_{Dd} k_1 \pi d_1 + 4 C_L f L_1}} \quad (21)$$

令 $D = \frac{q+u_d - u_{s,0}}{q-u_d + u_{s,0}}$ ($u_{s,0}$ 为砂枕在床面上的初始运动速度, m/s), 对式(17)进行积分, 代入初始条件 $t=0$ 、 $dx/dt=u_{s,0}$, 可得:

$$u_R = u_d - \frac{dx}{dt} = q \cdot \frac{D \exp(2pqt) - 1}{D \exp(2pqt) + 1} \quad (22)$$

砂枕从触碰床面到稳定所经历的总时间记作 T_c , 当 $t=T_c$ 时 $dx/dt=0$, 由式(22)可得出稳定历时公式为:

$$T_c = \frac{1}{2pq} \ln \frac{q+u_d}{D(q-u_d)} = \frac{1}{2pq} \ln \frac{1+u_d/(q-u_d)}{1-u_{s,0}/(q+u_d)} \quad (23)$$

式(23)成立的条件为 $u_d < q$, 考虑临界状态 $u_d = q$, 则床面上水流对砂枕的作用流速和砂枕的稳定流速分别为:

$$u_d = \sqrt{\frac{2k_1 \pi f a_{rs} g d_1 L_1}{C_{Dd} k_1 \pi d_1 + 4 C_L f L_1}} \quad (24)$$

$$u_c = \frac{2^m}{1+m} \left(\frac{h}{d_1}\right)^m \sqrt{\frac{2k_1 \pi f a_{rs} g d_1 L_1}{C_{Dd} k_1 \pi d_1 + 4 C_L f L_1}} \quad (25)$$

式(25)中的稳定流速为砂枕沉落至床面时止动的临界条件, 由于砂枕漂移是从运动到静止的过程, 故 u_c 是砂枕的止动流速, 由于砂枕抛投试验是使用开驳船进行抛投, 砂枕抛投后的初速度几乎为零, 因此起动流速等于止动流速。当 $u_d \geq u_c$ 时, 砂枕始终处于运动状态, 其稳定时间 $T_c \rightarrow +\infty$; 当 $u_d < u_c$ 时, 砂枕具有有限的稳定时间和二次漂距。由式(22)可得:

$$\frac{dx}{dt} = u_d - q \cdot \frac{D \exp(2pqt) - 1}{D \exp(2pqt) + 1} \quad (26)$$

对式(26)进行积分, 代入初始条件 $t=0$ 、 $x=0$, 可推出:

$$x = \left(u_d + \frac{q}{D}\right)t + \frac{1}{pD} \ln \frac{1+D}{1+D \exp(2pqt) + 1} \quad (27)$$

式(27)所描述的是砂枕触碰到床面后表现的一般运动规律, 当 $t=T_c$ 时 x 即为砂枕的二次漂距 x_c , 代入式(27), 可推出砂枕的二次漂距公式:

$$x_c = \left(u_d + \frac{q}{D}\right) T_c + \frac{1}{k_c p D} \ln \frac{1+D}{1+D \exp(2pqT_c) + 1} \quad (28)$$

$$u_d = u_m \left(\frac{d_1}{2h}\right)^m \quad (29)$$

式中: k_c 为修正系数, 根据试验数据拟合得出 $k_c = 2.5$ 。当 $t=T$ 时水流瞬时流速 $u=u_d$ 、砂枕接触床面时的运动速度 $u_{sd}=u_d - u_m/(1+ku_m T)$ 。

从式(28)、(29)可以看出, 在水深和水流流速不变的情况下, 砂枕的粒径越大, 则 u_d 也越大, 二次漂距 x_c 越大, 即床面上的砂枕越不稳定; 在砂枕的粒径和水流流速不变的情况下, 水深越大, 则 u_d 就越小, 二次漂距 x_c 越小。

4.2.2 砂枕漂距公式

结合砂枕的移距和二次漂距公式推导成果, 则砂枕在水平方向上的总移距公式为:

$$x_T = x_d + x_c \quad (30)$$

结合式(4)、(28)可得, 基本公式法推出的砂枕漂距公式为:

$$x_T = 1.122 \cdot \frac{vh}{m^{1/6}} + \left(u_d + \frac{q}{D}\right) T_c + \frac{1}{k_c p D} \ln \frac{1+D}{1+D \exp(2pqT_c) + 1} \quad (31)$$

结合式(6)、(28)可得, 惯性力法推出的砂枕漂距公式为:

$$x_T = \frac{hv}{\omega} + \frac{1}{C_0} \ln \frac{1-A_0}{1-A_0 \exp\left(-B_0 \frac{h}{\omega}\right)} + \left(u_d + \frac{q}{D}\right) T_c + \frac{1}{k_c p D} \ln \frac{1+D}{1+D \exp(2pqT_c) + 1} \quad (32)$$

结合式(12)、(28)可得, 综合系数法推出的砂枕漂距公式为:

$$x_T = \frac{hv}{\omega} - \frac{1}{k} \ln \left[1+k(1+m) \frac{hv}{\omega} \right] + \left(u_d + \frac{q}{D}\right) T_c + \frac{1}{k_c p D} \ln \frac{1+D}{1+D \exp(2pqT_c) + 1} \quad (33)$$

4.3 砂枕漂距公式的验证及分析

现结合指数型垂线流速分布公式, 进行砂枕漂距公式验证, 并分别设立 5%、10% 和 15% 共 3 个误差带(相对误差越小, 所在误差带颜色越深), 用来做相对误差分析。

4.3.1 基本公式法

由基本公式法推出砂枕漂距公式的计算误差

见图 3。可以看出, 计算漂距值与实测漂距值的相对误差均大于 10%, 而且大多在 15% 以上, 误差较大。因此, 由基本公式法推导出的漂距公式不适用于砂枕漂距计算。

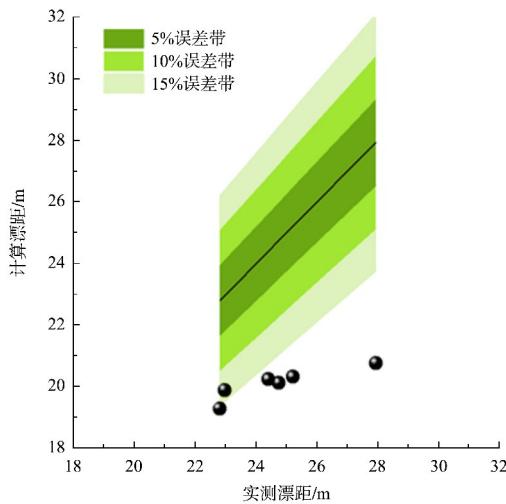


图 3 指数型垂线流速下基本公式法推出砂枕漂距公式计算的误差

4.3.2 惯性力法

由惯性力法推出砂枕漂距公式的计算误差见图 4。可以看出, 计算漂距值与实测漂距值拟合较好, 只有 1 组数据的相对误差超过 10% (但仍在 15% 以内), 其余组数据的相对误差均在 10% 以内。

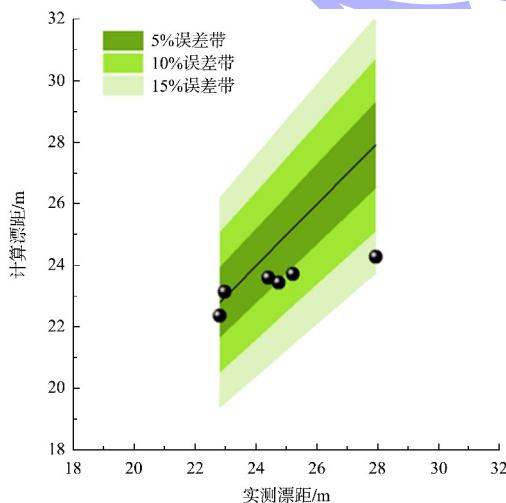


图 4 指数型垂线流速下惯性力法推出砂枕漂距公式计算的误差

4.3.3 综合系数法

由综合系数法推出砂枕漂距公式的计算误差见图 5。可以看出, 计算漂距值与实测漂距值拟合效果

较好, 相对误差均在 15% 以内, 且大多不超过 5%。

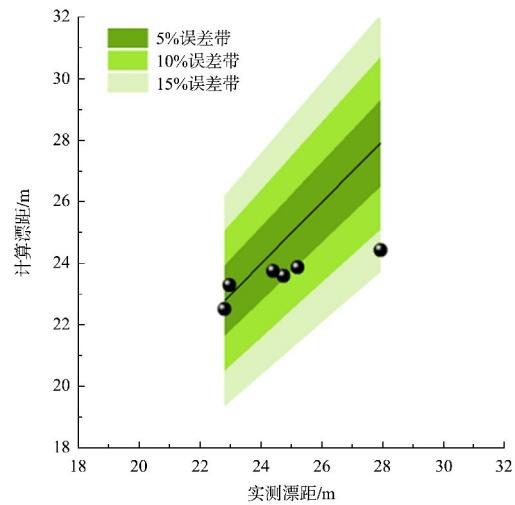


图 5 指数型垂线流速下综合系数法推出砂枕漂距公式计算的误差

3 种方法推出砂枕漂距公式计算结果对比见图 6。可以看出, 使用综合系数法和惯性力法推导出的砂枕漂距公式均符合砂枕在水下的运动规律, 且使用综合系数法计算的漂距值更准确; 使用基本公式法推导的砂枕漂距公式计算出的漂距值偏小。因此, 当河流的垂线流速为指数流速分布时, 可以使用惯性力法和综合系数法推出的漂距公式, 对砂枕进行水下精准定位。

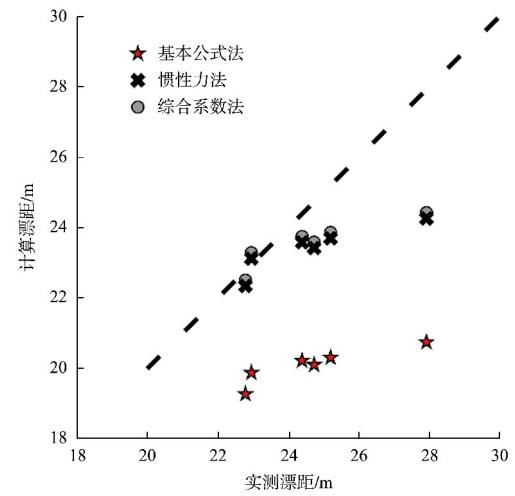


图 6 指数型垂线流速下 3 种方法推出砂枕漂距公式的计算结果对比

5 结论

1) 本文将砂枕在水中的漂距分为砂枕的移距和二次漂距, 推导出相应的垂向流速分布公式和

砂枕漂距公式，解决了长江下游砂枕抛投的水下落点难以精准定位的问题。

2) 惯性力法和综合系数法推导出的漂距公式，相对误差均在 15% 以内，已达到较好的精确度，可以应用于工程施工中。

3) 试验区域的水下地形相对平坦，且采用开体驳袋装砂枕抛投工艺，无需考虑砂枕的抛高、入水角度等，故在进行公式推导时没有考虑河道的纵坡比降及岸坡的坡角。

4) 砂枕的主要作用是减小水流对床面的冲刷，自身稳定性非常关键，因此未来还需要对已经落在床面的砂枕进行稳定性分析，判断砂枕后期在何种情况下会失稳。

参考文献：

- [1] ZHANG W B, TAN J H. Shape and mechanical behavior of geotextile tubes [J]. Journal of Donghua University, 2006, 23(2): 8-12.
- [2] SATTAR A M A, BONAKDARI H, GHARABAGHI B, et al. Hydraulic modeling and evaluation equations for the incipient motion of sandbags for levee breach closure operations[J]. Water, 2019, 11(2): 279.
- [3] 韩海骞, 杨永楚, 王卫标, 等. 钱塘江河口闻家堰段护底抛石研究[J]. 泥沙研究, 2002(2): 29-35.
- [4] 应强, 张幸农, 李伟. 沙袋在水流中的沉速、落距[J]. 泥沙研究, 2009(1): 15-19.
- [5] 李寿千, 牛文超, 刘菁, 等. 弱感潮河段抛石漂移距现场试验研究[J]. 水运工程, 2019(12): 1-6.
- [6] COLES D. The law of the wake in the turbulent boundary layer[J]. Journal of fluid mechanics, 1956, 1(2): 191-226.
- [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.
- [8] 周家渝, 陈立, 叶小云, 等. 泥沙影响流速分布规律的试验研究[J]. 水科学进展, 2005(4): 506-510.
- [9] 刘春晶, 李丹勋, 王兴奎. 明渠均匀流的摩阻流速及流速分布[J]. 水利学报, 2005(8): 950-955.
- [10] 鞠俊, 夏云峰, 闻云呈. 长江河口段流速沿垂线分布规律[J]. 人民长江, 2008(15): 46-48, 73.
- [11] 梁润. 河道截流的抛石抗冲稳定流速及稳定移距[J]. 武汉水利电力学院学报, 1978(1): 41-50.
- [12] 詹义正, 寇树萍. 球体的移距及稳定移距公式[J]. 武汉水利电力大学学报, 1996(2): 85-90.
- [13] 詹义正. 球体在动水中的移距公式及其应用[J]. 泥沙研究, 1992(4): 85-91.
- [14] 窦国仁. 河口海岸全沙模型相似理论[J]. 水利水运工程学报, 2001(1): 1-12.
- [15] 潘庆燊, 余文畴, 曾静贤. 抛石护岸工程的试验研究[J]. 泥沙研究, 1981(1): 75-84.

(本文编辑 王璁)

· 消息 ·

中交集团 2 个项目获 ENR2023 年全球优秀项目奖

近日，美国《工程新闻记录》杂志（ENR）2023 年全球最佳项目和优秀项目奖揭晓。中交集团作为唯一获奖中国企业，共有 2 个项目获奖，分别是：肯尼亚拉姆港 1~3 号泊位项目获机场港口类优秀项目奖，克罗地亚佩列莎茨跨海大桥及连接线项目获桥梁隧道类优秀项目奖。

根据公布结果，今年共有来自 23 个国家和地区的 31 个项目分别获得机场、公路、桥梁隧道等 16 个类别的全球最佳项目奖或优秀项目奖。该奖的评选不仅注重项目的安全性能、创新、挑战和设计施工质量，特别强调项目全球团队的多样性及他们之间的合作，同时考虑项目对当地社区及建筑行业的影响。

此次评选是 ENR 杂志组织的第 11 次全球评选，中交集团已连续 6 年荣获全球最佳项目及优秀项目奖项。

肯尼亚拉姆港 1~3 号泊位项目获机场港口类优秀项目奖；克罗地亚佩列莎茨跨海大桥及连接线项目获桥梁隧道类优秀项目奖。