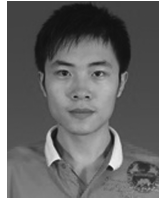


· 施 工 ·



袋装沙枕水下抛投漂移距现场试验研究^{*}

朱 昊¹, 王茂枚¹, 娄 丹², 罗 青¹, 刘晓兵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 210004;
3. 如皋市新濠水利市政工程有限公司, 江苏 如皋 226500)

摘要:近年来, 长江水沙变化导致堤岸冲刷加剧, 水下抛投护岸成为整治工程的重要环节, 新型防护材料袋装沙枕应运而生, 其抛投漂移预测的准确性直接影响工程的质量与效率。以长江中下游南京八卦洲河段整治工程为例, 分析水深、流速、沙枕质量等对漂移距的作用机理, 基于动力学进行漂移距计算公式理论推导, 通过在不同流速、水深条件下开展的现场抛投试验确定公式系数。结果表明, 采用推导的经验公式计算值与试验值较为吻合, 相对误差在 20% 以内。

关键词: 现场试验; 漂移距离; 抛距预测; 长江下游

中图分类号: TV 871; U 656.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)02-0191-06

Study on field test of drift distance of bagged sand pillow underwater throwing

ZHU Hao¹, WANG Mao-mei¹, LOU Dan², LUO Qing¹, LIU Xiao-bing¹

(1. Jiangsu Provincial Hydraulic Research Institute, Nanjing 210017, China;

2. Nanjing Guohuan Science and Technology Co., Ltd., Nanjing 210004, China;

3. Rugao Xinying Water Conservancy Municipal Engineering Co., Ltd., Rugao 226500, China)

Abstract: In recent years, the change of water and sediment in the Yangtze River has led to the intensification of bank erosion, and the underwater throwing revetment has become an important part of the renovation project. The new protective material bagged sand pillow comes into being, and the accuracy of its throwing drift distance prediction directly affects the quality and efficiency of the project. We take the regulation project of Baguazhou reach in Nanjing in the middle and lower reaches of the Yangtze River as an example, analyze the mechanism of water depth, flow velocity and sand pillow mass on drift distance, theoretically deduce the calculation formula of drift distance based on dynamics, and determine the formula coefficient by the field throwing tests under different flow velocities and water depths. The results show that the calculated values derived by the empirical formula in this paper are in good agreement with the experimental values, and the relative error is within 20%.

Keywords: field test; drift distance; throw distance prediction; the lower Yangtze River

人类活动、自然变迁和强厄尔尼诺现象的综合作用, 导致长江水沙条件的变化, 江水对堤岸冲刷加剧, 甚至造成江堤崩塌险情^[1]。近年来长江下游实施了多项大型综合整治工程, 水下抛投护岸无一例外都是这些工程的重要环节^[2-3]。

在整个抛投施工过程中, 将块石抛投到指定的位置, 确保抛落的石块下落至指定范围是影响抛投施工质量与效率的关键。采用经验公式进行抛投漂距的计算是目前较为常用的手段, 较多学者提出各自的理论公式^[4-6]。由于以往缺乏先进的

收稿日期: 2021-04-29

^{*}基金项目: 江苏省水利科技项目(2020007、2019001、2018005)

作者简介: 朱昊(1989—), 男, 博士, 工程师, 从事河流海岸动力学及工程泥沙研究。

通讯作者: 王茂枚(1983—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事河湖治理与保护方面的研究。E-mail: 1059122866@qq.com

监测方法和技术,通过现场原位试验确定抛投测定漂距技术难度较大^[7-8],广泛应用的抛投漂距经验公式大多是由室内水槽试验推导得出的。然而,现场测定结果显示实际测量值与理论计算值的误差较大^[9]。此外,随着环境保护等诸多因素,亟需探寻新的抛投材料以及防护工艺^[10],袋装沙枕工艺便应运而生^[11]。

因此,本文针对新型抛投材料通过漂移距理论公式推导以及现场抛投试验相结合的方法探求更加科学及可靠的漂移距公式,所得成果可为节约块石资源、解决天然河流抛投距离相关理论提供依据。

1 抛投现场试验概况

1.1 材料准备

采用黄家洲边滩采沙区为袋装沙枕的充填沙源。对指定的采沙区河床进行取样,测定筛分析、含泥量、泥块含量、堆积密度、表观密度。袋装沙土枕土工布等效孔径 $O_{95} \leq 0.5d_{85}$ (d_{85} 为袋装沙土枕充填料的特征粒径)。

现场设备有:1艘抛枕船、1艘定位船、1艘吸沙船、2艘运输船、1艘交通船、1艘警戒船、3套充沙设备、2台定位仪、2套南方自由行软件、1台测深仪、1台流速仪等。

1.2 抛投施工流程

首先在试验区进行区域网格划分,把整个试验区划分成每个小区域,进行定位船精准定位,然后把沙枕平铺在抛投船上,对沙枕充沙,而后沙枕抛投。在一次抛投结束后,移动定位船并重新定位,再次对沙枕充沙,最后在抛投前、结束抛投后进行多波束水下地形测量。

1.3 试验场地选取

施工原则按照从上游向下游、从远岸向近岸、从深泓到浅滩、从底部到顶部的顺序进行,抛枕施工时必须划分小区,准确定位、定量抛投。先对深槽坑坎处理是便于后期施工陡坡的关键。深槽坑坎抛填是沙枕抛填的基础,试验数据更具有适用性和代表性,更具有指导施工的意义。

工程所在区域八卦洲洲头水流情况复杂多变,漂距的大小与流速、流向等因素有关,确定的水流流场、调整定位方向可将漂距误差最大限度降低,保证沙枕抛填准确性。经综合考虑以沙枕抛填分部工程一单元(高程-16~-15 m)作为本次抛投试验区。试验段符合施工规范要求的抛投顺序从上游到下游、从底部到顶部的施工原则。

1.4 多波束水下测量

多波束测深系统是用于测量水下地形、地貌的大型测绘设备组合。它使用水下传感器,发射扇波束并接收从海底反射回来的回波信号。本试验采用 Sonic2024 型超高分辨率多波束测深系统、美国天宝公司 R7GPS、OCTANS 光纤罗经和运动传感器、Atlas 双频测深仪、全站仪、miniSVP 声速剖面仪等。

在吸收和借鉴国内外先进的多波束软件设计思想和开发技术的基础上,本文将多波束测深数据按以下顺序处理:1)将多波束系统设置并安装好,在抛投前、后进行现场地形地貌的测量,读取初始地形数据;2)将原始数据导入 caris 软件中进行定位编辑,存储数据;3)建立声速文件,进行数据修正;4)导入潮位数据并进行修正;5)进行线检查等其他数据检查,然后准备成图。

整个数据处理过程是以提供海洋环境可视化产品为最终目的,多波束系统采集的所有地形数据进行后处理,建立较为完善的原始数据与结果数据接口,实现水深数据的映射。

2 沙枕漂移距影响因素分析

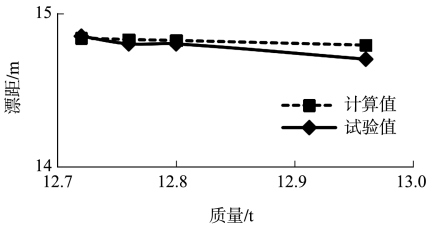
沙枕漂移距离(简称漂距)是指沙枕从入水至着床的过程中,在水流作用下所产生的水平距离,其受水流速度及流态、河水深度等因子影响,既有一定的规律性,又呈现出一定的随机性。

水流的冲击作用是抛投产生水平漂移的主要原因^[12],冲击力大小与水流流速有关,分析沙枕漂移影响因子本身属性特征,研究水流速度、河水深度、沙枕质量、水流流速垂向分布对抛投漂移的作用效果和作用机理是解决天然河流环境特

定条件下抛投落点准确性的关键。

2.1 水深、流速、沙枕质量的影响

为了考察沙枕落点距离与水深、流速、质量的影响, 分别进行 4 组控制变量试验。水深为 32 m, 保证水深和沙枕本身质量不变, 流速分别为 0.677、0.820、1.000、1.200 m/s 的漂距计算值与试验值比较见图 1a); 流速为 1.000 m/s, 保证流速和沙枕本身质量不变, 水深分别为 30、33、35、40 m 的漂距计算值与试验值比较见图 1b); 水深为 32 m, 流速为 1.000 m/s, 保证水深和流速不变, 沙枕质量分别为 12.72、12.76、12.80、12.96 t 下的漂距计算值与试验值比较见图 1c)。可以看出, 袋装沙枕漂距随水深的增加而增大, 反之则减小; 随流速的增加而增大, 反之则减小; 随沙枕本身质量的增加而减小, 反之随沙枕本身质量的减小而增大。不同水深、流速的漂距均值和均方差非常接近, 远大于沙枕质量。可见水深、流速是主要因素, 而沙枕质量对漂距影响居次要地位。

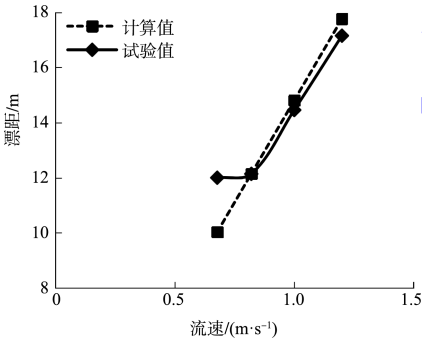


c) 沙枕质量与漂距关系

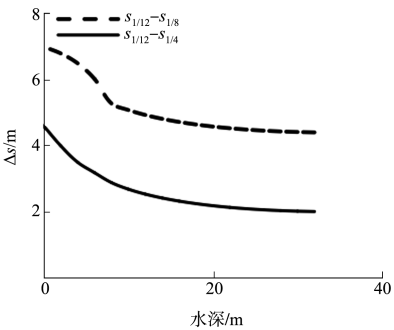
图 1 控制变量下漂距计算值与试验值比较

2.2 垂线流速分布对漂距的影响

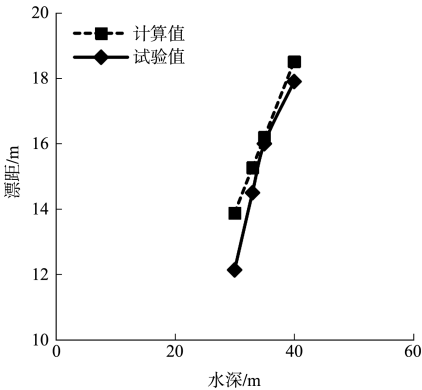
根据水流速度数据的垂直分布试验结果^[13], 在沙枕下沉过程中, 水流流速垂向呈指数型分布, 对沙枕漂距的影响主要取决于最大流速(水面流速)。为了考察流速垂线分布对沙枕漂距的影响, 分别取流速分布指数 n 为 1/12、1/8、1/4 进行计算分析, $s_{1/12}-s_{1/8}$ 和 $s_{1/12}-s_{1/4}$ 为不同垂线流速分布指数时块石漂距的差值。由图 2 可看出, 各差值随水深的增大而减小, 随水深的减小而增大, 随水面流速的增大而增大。因此, 在大水深或大流速的情况下, 应该多考虑水流实际流速在垂线方向上分布的影响。



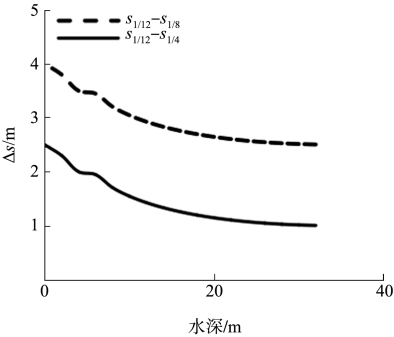
a) 流速与漂距关系



a) 水深 $H=32$ m, 最大流速 $v_{\max}=1.0$ m/s



b) 水深与漂距关系



b) 水深 $H=32$ m, 最大流速 $v_{\max}=0.8$ m/s

图 2 不同流速垂线分布时的块石漂距差值

2.3 沙枕充填时间与充填度之间的关系

本次沙枕的充填度不小于 70%，研究施工时如何能在最短的时间内充填达到设计要求是沙枕充填试验的目的，试验步骤为：

1)单位时间充填完成的沙袋称质量(m)，并进行编号记录。

2)对已称质量的沙袋测定含水率，并进行现场试验。

- ①称量干燥容器的质量(m_1)。
- ②取沙袋上、中、下 3 层各约 500 g 的样品，充分混合。样品以已知质量放入干燥容器中，记

录每个样品和容器的总质量(m_2)。

③容器和样品置于鼓风炉中，干燥温度在 105 ℃ 左右，烘干至质量恒定。

④将烘干后的样品与容器称质量，并记录总质量(m_3)。

⑤按下式计算含水率：

$$w = (m_2 - m_3) / (m_3 - m_1) \tag{1}$$

填充时间 8 min 时的充盈率试验数据见表 1，可见不同质量不同含水率的沙枕充盈率基本满足设计要求的 70%。

表 1 充盈率试验数据

试样编号	沙袋质量/t	含水率/%	干沙质量/t	堆积密度/(t·m ⁻³)	充沙量/m ³	设计充沙量/m ³	充盈率/%
1 [#]	13.50	10	12.150	1.54	7.890	11.304	70
3 [#]	13.31	12	11.713	1.54	7.606	11.304	67
5 [#]	13.51	9	12.294	1.54	7.983	11.304	71
7 [#]	13.87	14	11.928	1.54	7.746	11.304	69
9 [#]	14.54	15	12.359	1.54	8.025	11.304	71

3 抛体漂距公式的推导

沙枕下沉时的有效重力：

$$W = k_1(\rho_s - \rho)g \cdot \frac{\pi d_1 d_2}{4} l_1 \tag{2}$$

式中： ρ_s 为袋装沙枕的密度，它与袋装沙枕的充填物质、充填压实程度等因素有关； ρ 为长江中清水的密度； d_1 、 d_2 分别为沙枕的宽度、高度； k_1 为折算系数，计算整个袋装沙枕为椭圆形的折减系数。假设袋装沙枕的长度为 l_1 ，横截面积的长轴为 d_1 、短轴为 d_2 椭圆。

实际试验区长江水流流速较高，雷诺数较大，袋装沙枕在沉降过程中能够引起四周水体的扰动，属于紊动沉降状态，根据泥沙沉速的研究成果，沙枕在水流中受到的绕流阻力可表示为：

$$F = C_D \rho A \frac{\omega^2}{2} \tag{3}$$

式中： C_D 为袋装沙枕沉降过程中受到的绕流阻力系数； A 为袋装沙枕下沉过程中形成的绕流阻力面积，其值为 $d_1 l_1$ ； ω 为袋装沙枕在水体中下降的沉速。

考虑袋装沙枕长江水体运动时受到垂直向上的力和其在水中的运动情况，根据牛顿第二定律得：

$$W - F = m'a \tag{4}$$

式中： m' 为袋装沙枕本身的质量； a 为袋装沙枕在长江中下沉中的加速度。将式(2)(3)、 m' 及 a 代入式(4)可得：

$$k_1(\rho_s - \rho)g \cdot \frac{\pi d_1 d_2}{4} l_1 - C_D \rho d_1 l_1 \cdot \frac{\omega^2}{2} = k_1 \rho_s \cdot \frac{\pi d_1 d_2}{4} l_1 \frac{d\omega}{dt} \tag{5}$$

解式(5)可得：

$$\ln \left(\frac{p_1 + p_2 \omega}{p_1 - p_2 \omega} \right) = 2 p_1 p_2 t + c \tag{6}$$

其中：
$$p_1 = \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho}} g \tag{7}$$

$$p_2 = \sqrt{\frac{2 C_D \rho}{\pi k_1 d_2 \rho_s}} \tag{8}$$

式中： t 为沙枕落水时间； p_1 为反映与长江水流与袋装沙枕的物理特性有关的因子； p_2 为反映与袋装沙枕的尺寸、形状、充填物等有关的影响因子； c 为常数，在水面的初始条件下，将 $t = 0$ ， $\omega = 0$ 代入式(6)，可得出 $c = 0$ ，则式(6)可以写为：

$$\frac{p_1 - p_2 \omega}{p_1 + p_2 \omega} = e^{-2 p_1 p_2 t} \tag{9}$$

由式(9)可知，当 $t \rightarrow +\infty$ 时，由 $e^{-2 p_1 p_2 t} = 0$ 可得出 $p_1 - p_2 \omega = 0$ ，即 $\omega = \frac{p_1}{p_2}$ ，此为均匀沉降时的沉速，

记为 ω_0 , 有:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\pi k_1 \rho_s}{2 C_{D2} \rho}} \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s}} g d_2 = K \sqrt{\frac{\rho_s - \rho}{\rho_s}} g d_2 \quad (10)$$

式中: K 为系数, 与水体中水流流速垂向绕流阻力系数、袋装沙枕在水中下沉状态等有关。

将式(9)结合式(10), 可得:

$$\frac{\omega}{\omega_0} = \frac{2}{1 + e^{-2p_1 p_2 t}} \quad (11)$$

在已知袋装沙枕在水中的下沉速度时, 可以推算出袋装沙枕沉降到不同水流深度所需要时间, 即:

$$y = \int \omega_0 dt + c_1 \quad (12)$$

式中: y 为沙枕距离水面的垂直距离; c_1 为常数, 根据式(11)和初始状态的 $t=0$ 、 $y=0$ 代入式(12)可得:

$$c_1 = -\frac{\ln 2}{p_1 p_2} \omega_0 \quad (13)$$

将式(13)代入式(12)可得:

$$y = \omega_0 \left[\frac{1}{p_1 p_2} \ln(1 + e^{-2p_1 p_2 t}) \right] \quad (14)$$

当 $y=H$ 时, 由式(14)可得:

$$H = \omega_0 \left[t - \frac{1}{p_1 p_2} \ln \frac{2}{1 + e^{-2p_1 p_2 t}} \right] = \omega_0 (t - \Delta t) \quad (15)$$

沙枕水平作用力只有水流对沙枕的力, 根据牛顿第二定律得:

$$C_{D2} \rho \cdot \frac{\pi d_1 d_2}{4} \cdot \frac{(u-v)^2}{2} = \alpha_1 \rho_s \cdot \frac{\pi d_1 d_2}{4} l_1 \frac{dv}{dt} \quad (16)$$

式中: C_{D2} 为沙枕受到的水平绕流阻力系数; u 为袋装沙枕抛投出的水流运动速度; v 为沙枕在水中下落过程中的水平方向的运动速度; l_1 为沙枕长轴顺水流方向摆放的在水中的投影; α_1 为修正系数, 考虑到对长江天然河道水流流速垂向分布式(14), 并由初始条件 $t=0$ 、 $v=0$ 确定常数后, 可得沙枕水平运动速度:

$$v = \frac{\frac{C_{D2} \rho}{2 k_1 \rho_s l_1} u' t}{1 + \frac{C_{D2} \rho}{2 k_1 \rho_s l_1} u' t} u' = K_t u' \quad (17)$$

式中: u' 为沙枕在水中的速度; K_t 为沉降时间 t 的函数, 当 $t \rightarrow 0$ 时 $K_t \rightarrow 0$ 有 $v \rightarrow 0$, 当 $t \rightarrow +\infty$ 时 $K_t \rightarrow 1$

有 $v \rightarrow u'$ 。

沙枕水平漂距 $s = \int_0^{t_0} v dt$, t_0 为沉降时间, 将式(17)代入积分, 并由初始条件 $t=0$ 、 $s=0$ 确定积分常数为 0, 最后可得:

$$s = u' t - \frac{1}{\frac{C_{D2} \rho}{2 \alpha_1 \rho_s l_1}} \ln \left(1 + \frac{C_{D2} \rho}{2 \alpha_1 \rho_s l_1} u' t \right) = u' t - \frac{l_1}{\alpha_2} \ln \left(1 + \frac{\alpha_2}{l_1} u' t \right) \quad (18)$$

式中: α_2 为与沙枕形状、大小、密度等有关的综合系数。对于给定位置的河水深度, 可以由式(14)求得沙枕在下沉过程中的沉降时间 t_0 (即 $t - \Delta t$), 再将 t_0 代入式(18), 即可得到沙枕漂距的计算公式。

4 漂距公式现场验证

4.1 抛投试验方法

由于沙枕落水后至河床的漂距受多重因素相互影响, 难以用经验公式进行准确计算。因此, 沙枕的漂距主要还是依靠现场实际情况确定, 施工时采用多波束实时测量沙枕落地位置, 通过落地位置与目标位置之间的关系, 调整定位船位置, 同时修正漂距公式中的 K 值, 最终通过不断调整, 达到能通过漂距公式准确算出漂距, 为大规模施工提供数据支持。试抛沙枕漂距的测定方法如图 3 所示。

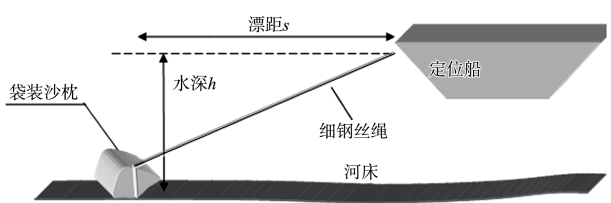


图 3 沙枕漂距测定

表 2 沙枕漂距抛投试验工况

水深 H/m	流速 $/(m \cdot s^{-1})$	抛枕质量 $/t$	水流流向
41.45	1.35	12.96	72°E
41.69	1.31	12.72	72°E
41.58	1.28	12.88	72°E
41.20	1.31	12.80	72°E
41.19	1.26	12.96	73°E
41.02	1.21	12.76	73°E

4.2 现场抛投试验结果

验证资料采用长江中下游南京八卦洲试验河

段沙枕抛投的资料,根据袋装沙枕的设计尺寸 $l_1=8.5\text{ m}$ 、 $d_1=1.6\text{ m}$ 、 $d_2=0.5\text{ m}$ 计算出沙枕沉速随 K 值变化曲线,由图 4 可看出,当时间 $t\leq 1\text{ s}$ 时, ω/ω_0 随 K 值的减小而增大;当 t 为 1.0、1.5、2.0、2.5 s 时, ω/ω_0 随 K 值的变化见表 3,当 $t=2.0\text{ s}$ 时,5 条曲线趋于稳定;当 $K=0.8$ 时, ω/ω_0 已达到 0.999,可以认为基本达到匀速沉降。

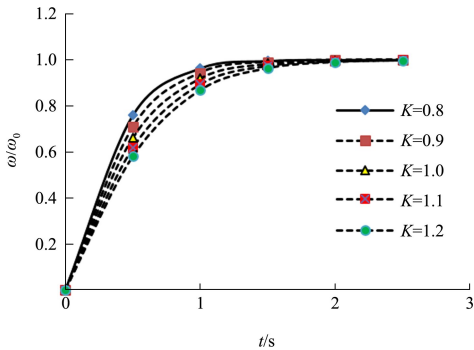


图 4 不同 K 值情况下沙枕沉速与时间关系

根据长江中下游南京八卦洲试验河段实测水深、流速等资料,采用以上动力学方法计算沙枕漂距,试验数据与计算数据及相对误差见表 3。可以看出,上述推导出的袋装沙枕漂移距计算公式与实际抛投试验值误差在 20% 以内,表明本文所述方法能够较好地计算漂距。

表 3 抛距试验值与计算值对比

抛距/m		相对误差/%
试验值	计算值	
6.72	7.60	11.5
14.71	12.80	14.9
14.14	12.50	13.1
5.46	6.00	9.0
9.09	10.69	15.0
17.16	15.00	14.4

5 结语

1) 袋装沙枕漂距随水深的增加而增大,随流速的增加而增大,随沙枕本身质量的增加而减小。水深、流速是主要因素,在大水深或大流速的情况下,应多考虑水流流速在垂线上分布的影响。

2) 本文基于水力学推导的漂距公式,在通过现场试验获得参数后可较好地预测袋装沙枕的漂移距离,可以运用到长江其他河段的抛投施工中,为长江河道整治工程的顺利实施提供参考依据。

3) 现有抛距计算公式是将水流流速沿水深方向的分布假定为指数分布,当工程区靠近河口受潮汐影响时,在流向转变时刻表层流速与底层流速可能出现反转,须针对转流时刻流速分布规律对抛距公式进行改良,以减少误差。

参考文献:

[1] 吕庆标,岳红艳,朱勇辉,等.水位变化速率对河道崩岸的影响研究[J].长江科学院院报,2021,38(5):11-16.

[2] 李金瑞,丁兵.安徽省长江崩岸应急治理工程效果分析及建议[J].人民长江,2020,51(8):1-7.

[3] 王爱春.长江下游和畅洲水道航道整治工程护岸专项研究[J].人民长江,2018,49(S1):1-5.

[4] 罗青,赵钢,王茂枚,等.基于 GIS 空间分析的抛石护岸工程水下抛石效果评价[J].水运工程,2021(2):182-187,198.

[5] KREYENSCHULTE M, SCHÜTTRUMPF H. Tensile bending stresses in mortar-grouted riprap revetments due to wave loading[J]. Journal of marine science and engineering, 2020, 8(11): 913.

[6] HAWS N W, ERICKSON J N. Revisiting riprap sizing relationships for overtopping flow conditions[J]. Journal of hydraulic engineering, 2020, 146(11): 16-21.

[7] 嵇文远,杨杰,田栋,等.起重船上精确抛石施工技术探索[J].中国水运,2021(2):143-145.

[8] MCCORMICK M K, WHIGHAM D F, STAPP J R, et al. Shoreline modification affects recruitment of invasive Phragmites australis[J]. Wetlands ecology and management, 2020, 28(6): 909-919.

[9] 李小超,常留红,宋俊强,等.复杂水流条件下抛石漂移距离的试验研究[J].水运工程,2017(6):1-8.

[10] 杨崇斌,罗建刚,许豫坤,等.金沙江地区运用钢丝网兜抛石施工工艺[J].施工技术,2020,49(S1):1583-1586.

[11] 王茂枚,姜果,赵钢,等.两种新型抛石护岸工艺在深水区应用效果对比[J].水运工程,2020(10):172-177.

[12] 齐梅兰,周马生,汤改春.群桩冲刷及抛石级配与厚度对防护效果的影响[J].水利学报,2021,52(6):723-730.

[13] 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.

(本文编辑 王璁)